

06  
2025



# 化工技术与应用

Chemical Technology and Application

Volume 2 · Issue 6 · December 2025 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)



化工技术与应用 Chemical Technology and Application

Volume 2 · Issue 6 · December 2025 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
Tel.:+65 62233839

E-mail:contact@nassg.org

Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：化工技术与应用

ISSN: 3060-9291 (纸质) 3060-9283 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/cta-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Chemical Technology and Application

ISSN: 3060-9291 (Print) 3060-9283 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/cta-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《化工技术与应用》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: [info@nassg.org](mailto:info@nassg.org)

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



### 期刊概况：

中文刊名：化工技术与应用

ISSN: 3060-9291 (Print) 3060-9283 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/cta-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 化工技术与应用

## Chemical Technology and Applications

Volume 2 · Issue 6 · December 2025  
ISSN 3060-9291 (Print) 3060-9283 (Online)

### 主 编

李雪辉

Xuehui Li

### 编 委

沈来宏 Laihong Shen

张小松 Xiaosong Zhang

钟文琪 Wenqi Zhong

侍洪波 Hongbo Shi

- 1 铬渣无害化处理措施思考  
/ 廖荣
- 4 双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用及减排成效研究  
/ 罗瑶
- 7 湿法冶金生产金属氧化物的废水循环利用工艺研究  
/ 刘圣威
- 10 基于煤制甲醇生产过程中的安全管理研究  
/ 张金玲
- 13 应用型大学化工实验中不同催化剂效果比较与应用实践  
/ 韩博宇 唐龙
- 16 复杂油气藏钻井提速提效关键技术及现场应用研究  
/ 刘晓龙
- 19 Fenton 法高效处理石油废水的试验研究  
/ 丁红
- 23 粗生物柴油精馏残液植物沥青资源化利用研究  
/ 刘五连
- 26 面向劣质原油的常减压蒸馏低温腐蚀问题与系统防控策略研究  
/ 谈德伟
- 29 RIG 型磁光晶体研究进展  
/ 王东旭 苏比努尔·买买提 李煜杰 刘海鹏
- 34 化工 EPC 项目造价风险识别与应对  
/ 宋萌萌
- 37 浅谈溶剂效应对分析检测的影响  
/ 朱思博
- 41 ABS 树脂合成工艺优化与质量控制研究  
/ 朱京勇
- 44 堇青石 LTCC 基板材料研究进展  
/ 张丛 林广庆 尹绍庆 郭建斌 刘发付
- 47 关于化工工程施工现场管理策略研究  
/ 韩战虎 罗军
- 50 煤化工工程项目采购质量保障体系构建  
/ 季旭 王靖凯 马蕴霞
- 53 基于多晶硅生产中质量控制策略分析  
/ 刘俊杰
- 56 房建工程深基坑工程施工的质量控制路径  
/ 张龙刚
- 59 管线试压技术在石油化工工艺设计中的应用  
/ 黄坤晓 赵青
- 62 工艺参数对钛合金增材制造成品组织性能的影响分析  
/ 李梦瑶 郭永春
- 65 炼焦生产中焦炭理化性能优化及工艺控制策略  
/ 赵起飞
- 68 有机碱对硝基甲烷热稳定性的影响  
/ 张心意 梁慧兴 罗宏军 吕慧敏 王如伟
- 71 基于工业互联网的安全生产数字化应用体系研究与实践  
/ 常喜斌 谢永海 党国元 盛绪明 郝文鹏
- 74 反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水浓缩提锂  
/ 袁世宝
- 78 化工离心式压缩机故障原因及处理措施分析  
/ 郝波众 陆宏 胡盛昌
- 81 管壳式换热器常见故障成因分析与针对性检修  
/ 胡盛昌 陆宏 郝波众
- 84 复杂井眼环境对密度测井响应影响及校正方法研究  
/ 陈泽方
- 87 新能源电力工程建设在化工行业节能减排中的应用路径研究  
/ 裴有斌
- 90 《水杨酸的解构与重构：建构认识有机物的基本模型》——基于项目式学习的高中有机化学教学实践与反思  
/ 施雅萍
- 94 浅谈煤炭全水分测定时间结点效率  
/ 郭丽博 王斌 郑子川
- 98 PLC 控制系统在化工自动化生产中的优化设计研究  
/ 黄珂
- 101 钨铁冶炼烟尘回收钨浸出试验研究  
/ 王强 刘振川 戴翔 肖德富 李永
- 104 绿色溶剂在石油产品精制中的应用及性能评价  
/ 周恒 章奇辉 陈樟森 黄梨文 秦臻
- 107 微反应器内硝化反应强化传质与选择性优化研究  
/ 童魁
- 110 化工大型钢结构制造过程中的焊接质量控制分析  
/ 莫英毅
- 113 重大危险源企业双重预防机制建设的重要性与策略研究  
/ 唐祝瑾
- 116 化工过程强化技术在安全高效生产中的应用  
/ 陈惠星
- 119 化工园区整体安全规划与布局研究  
/ 李志仁
- 122 间壁塔在东方华龙集团连续重整装置的运行效果分析  
/ 张永刚
- 126 大规模工业园区能源效率提升与碳排放管理策略  
/ 张林

- 129 化工建设项目安全设计系统管理优化研究  
/ 左成龙
- 132 核电建设全周期安全管理体系构建与优化策略研究  
/ 陈钊
- 135 顺北油田恰尔巴克组侵入体井壁稳定技术（新论文）  
/ 王从波
- 139 磷酸盐类食品添加剂的种类与应用范围综述  
/ 丁兆亮
- 142 机械设备事故现状、危害及设计生产阶段安全隐患剖析  
/ 曹飞
- 145 预硫化温度对聚异戊二烯胶乳成膜强度的影响  
/ 孟兆玲 王世浩 黄金丽 林洪凯 贺留洋
- 149 等离子体辅助煤液化技术的实验与机理研究  
/ 邢波
- 152 新质生产力在化工安全领域的应用研究  
/ 王聪
- 155 化学工程工艺中的绿色化工技术研究  
/ 苏林
- 158 页岩长井段连续多筒取心技术  
/ 张瑞刚
- 161 四川盆地井研-犍为区块优快钻井技术研究  
/ 曲焕坤
- 164 水平井水平段油管-电缆复合落物打捞工艺优化研究  
/ 吕刚 王国锋 田军
- 167 三泰公司一次盐水工序工艺升级与改造实践  
/ 杜向弟
- 170 铸造铝合金熔炼过程中杂质元素的去除工艺及质量控制  
/ 杨朝万
- 173 机电智能化技术在新能源装备中的创新应用  
/ 薛强强 白利敏
- 176 工业固废资源化综合利用对策思考  
/ 贾涛
- 179 脱硫副产物资源化利用技术研究  
/ 徐弛
- 182 基于深度学习与多源数据的台区短期负荷与光伏出力联合预测技术  
/ 戈狄 刘乐康 渠俊锋 张萌

- 1 Thoughts on the Harmless Treatment of Chromium Slag  
/ Rong Liao
- 4 Research on the Integrated Application of Clean Production Technology and Emission Reduction Effect of Coal Chemical Industry under the Background of Dual Carbon  
/ Yao Luo
- 7 Study on Waste Water Recycling Process of Metal Oxide Production by Hydrometallurgy  
/ Shengwei Liu
- 10 Research on Safety Management in Coal to Methanol Production Process  
/ Jinling Zhang
- 13 Comparison of Different Catalysts in Chemical Engineering Experiment of Applied University and Its Application Practice  
/ Boyu Han Long Tang
- 16 Key Technologies and Field Applications for Accelerating and Enhancing Efficiency in Drilling Complex Oil and Gas Reservoirs  
/ Xiaolong Liu
- 19 Experimental Study on the Efficient Treatment of Petroleum Wastewater by Fenton Process  
/ Hong Ding
- 23 Study on the Resource Utilization of Plant Asphalt from the Residual Liquid of Coarse Biodiesel Distillation  
/ Wulian Liu
- 26 Study on Low Temperature Corrosion of Conventional and Vacuum Distillation for Low Quality Crude Oil and System Control Strategy  
/ Dewei Tan
- 29 Research Progress of RIG Magneto-Optical Crystals  
/ Dongxu Wang Subinuer·Maimaiti Yujie Li Haipeng Liu
- 34 Cost Risk Identification and Coping of Chemical EPC Project  
/ Mengmeng Song
- 37 A Brief Discussion on the Effect of Solvent on Analysis and Detection  
/ Sibozhu
- 41 Study on Optimization of Synthesis Process and Quality Control of ABS Resin  
/ Jingyong Zhu
- 44 The Research Progress of Cordierite LTCC Substrate Materials  
/ Cong Zhang Guangqing Lin Shaoqing Yin Jianbin Guo Fafu Liu
- 47 Research on the Management Strategy of Chemical Engineering Construction Site  
/ Zhanhu Han Jun Luo
- 50 Construction of Procurement Quality Assurance System for Coal Chemical Engineering Project  
/ Xu Ji Jingkai Wang Yunxia Ma
- 53 Analysis of Quality Control Strategies in Polycrystalline Silicon Production  
/ Junjie Liu
- 56 Quality Control Path of Deep Foundation Pit Construction in Housing Construction Project  
/ Longgang Zhang
- 59 Application of Pipeline Pressure Test Technology in Petrochemical Process Design  
/ Kunxiao Huang Qing Zhao
- 62 Analysis of the Influence of Process Parameters on the Microstructure and Properties of Titanium Alloy Additive Manufacturing  
/ Mengyao Li Yongchun Guo
- 65 Optimization of Physical and Chemical Properties and Process Control Strategy of Coke in Coking Production  
/ Qifei Zhao
- 68 Influence of organic base on the thermal stability of Nitromethane  
/ Xinyi Zhang Huixing Liang Hongjun Luo Huimin Lv Ruwei Wang
- 71 Research and Practice on the Digital Application System for Safe Production Based on Industrial Internet  
/ Xibin Chang Yonghai Xie Guoyuan Dang Xuming Sheng Wenpeng Hao
- 74 Integrated Reverse Osmosis-Nanofiltration Process for Lithium Concentration and Extraction from Salt Lake Brine  
/ Shibao Yuan
- 78 Analysis of the Cause and Treatment Measures of the Failure of the Chemical Centrifugal Compressor  
/ Bozhong Hao Hong Lu Shengchang Hu
- 81 Analysis of Common Fault Causes and Targeted Maintenance of Tube and Shell Heat Exchanger  
/ Shengchang Hu Hong Lu Bozhong Hao
- 84 Research on the Impact of Complex Wellbore Environments on Density Logging Responses and Correction

- Methods  
/ Zefang Chen
- 87 Research on the Application Path of New Energy Power Engineering Construction in Energy Conservation and Emission Reduction in the Chemical Industry  
/ Youbin Pei
- 90 Deconstruction and Reconstruction of Salicylic Acid: Constructing a Basic Model for Understanding Organic Compounds—Teaching Practice and Reflection on High School Organic Chemistry Based on Project-based Learning  
/ Yaping Shi
- 94 A Brief Discussion on the Efficiency of Time Nodes in Determining Total Moisture in Coal  
/ Libo Guo Bin Wang Zichuan Zheng
- 98 Research on Optimized Design of PLC Control Systems in Chemical Automation Production  
/ Ke Huang
- 101 Experimental study on recovery of molybdenum leaching from iron molybdenum smelting dust  
/ Qiang Wang Zhenchuan Liu Xiang Dai Defu Xiao Yong Li
- 104 Application and Performance Evaluation of Green Solvents in Petroleum Product Refining  
/ Heng Zhou Qihui Zhang Zhangsen Chen Liwen Huang Zhen Qin
- 107 Study on Strengthening Mass Transfer and Selectivity Optimization of Nitrification in Microreactors  
/ Kui Tong
- 110 Analysis of Welding Quality Control in the Manufacturing Process of Large-Scale Chemical Steel Structures  
/ Yingyi Mo
- 113 Study on the Importance and Strategies of Constructing a Dual Prevention Mechanism in Enterprises with Major Hazard Sources  
/ Zhujin Tang
- 116 Application of Chemical Process Intensification Technology in Safe and Efficient Production  
/ Huixing Chen
- 119 Research on the overall safety planning and layout of chemical industrial parks  
/ Zhiren Li
- 122 Analysis of the Operation Effect of the Wall Tower in the Continuous Reforming Unit of Dongfang Hualong Group  
/ Yonggang Zhang
- 126 Energy efficiency improvement and carbon emission management strategies for large-scale industrial parks  
/ Lin Zhang
- 129 Research on the optimization of safety design system management in chemical construction projects  
/ Chenglong Zuo
- 132 Research on the construction and optimization strategy of nuclear power construction safety management system  
/ Zhao Chen
- 135 Stability Technology of the Intrusive Body Wall in the Chaerbake Formation of Shunbei Oilfield (New Paper)  
/ Congbo Wang
- 139 Review of the Types and Application Scope of Phosphate Food Additives  
/ Zhaoliang Ding
- 142 Analysis of the Current Situation, Hazards and Safety Risks in the Design and Production Stage of Mechanical Equipment  
/ Fei Cao
- 145 Effect of Pre-vulcanization Temperature on Film Strength of Polyisoprene Latex  
/ Zhaoling Meng Shihao Wang Jinli Huang Hongkai Lin Liuyang He
- 149 Experimental and mechanism study of plasma assisted coal liquefaction technology  
/ Bo Xing
- 152 Application Research of New Quality Productivity in Chemical Safety  
/ Cong Wang
- 155 Research on Green Chemical Technology in Chemical Engineering Process  
/ Lin Su
- 158 Continuous multi tube coring technology for shale long sections  
/ Ruigang Zhang
- 161 Research on High-Speed Drilling Technology in the Jingyan-Jianwei Block of the Sichuan Basin  
/ Huankun Qu
- 164 Research on Optimization of Tubular-Cable Composite Debris Retrieval Technology for Horizontal Well Horizontal Sections  
/ Gang Lv Guofeng Wang Jun Tian
- 167 Transformation and Upgrading of the Primary Brine Section in Santai Co.,Ltd.

- / Xiangdi Du
- 170 Removal Process and Quality Control of Impurity Elements in Alloy Casting Aluminum Alloy Smelting
- / Chaowan Yang
- 173 Innovative Application of Electromechanical Intelligent Technology in New Energy Equipment
- / Qiangqiang Xue Limin Bai
- 176 Consideration on Comprehensive Utilization of Industrial Solid Waste Resources
- / Tao Jia
- 179 Research on Resource Utilization Technology for Desulfurization By-products
- / Chi Xu
- 182 Joint Forecasting Technology of Short-term Load and Photovoltaic Output Based on Deep Learning and Multi-source Data
- / Di Ge Lekang Liu Junfeng Qu Meng Zhang

# Thoughts on the Harmless Treatment of Chromium Slag

Rong Liao

Hubei Zhenhua Chemical Co., Ltd., Huangshi, Hubei, 435000, China

## Abstract

The chromium salt industry generates solid waste such as chromium slag containing toxic hexavalent chromium. Improper disposal of this waste poses serious threats to soil, water bodies, ecosystems, and human health. Therefore, it is essential to implement scientific and rational measures for chromium slag harmless treatment, including chemical reduction, solidification/stabilization, and biological treatment, to reduce its toxicity, facilitate recycling, improve resource utilization, and mitigate environmental pollution. This article analyzes harmless treatment measures and comprehensive utilization methods for chromium slag to enhance treatment efficacy, optimize resource utilization, and minimize ecological impact.

## Keywords

chromium slag; Waste; harmless treatment

# 铬渣无害化处理措施思考

廖荣

湖北振华化学股份有限公司, 中国·湖北黄石 435000

## 摘要

在铬盐工业生产过程中产生铬渣等固体废弃物, 其中含有有毒六价铬, 如果处理不当, 会对土壤、水体、生态环境、人体健康造成严重威胁。因此需要采取科学合理的措施对铬渣进行无害化处理, 如化学还原法、固化/稳定化法、生物处理法等, 从而降低铬渣毒性, 对其进行回收利用, 提高资源利用率, 降低环境污染。文章主要对铬渣无害化处理措施和综合利用方法进行分析, 从而有效提升铬渣无害化处理效果, 提高资源利用率, 减少生态环境污染。

## 关键词

铬渣; 废弃物; 无害化处理

## 1 引言

铬渣中含有大量有毒性的六价铬, 且流动性较强, 一旦处理不当, 会严重污染生态环境, 威胁人体健康。针对这种情况, 需要采取科学合理的无害化处理措施, 实现铬渣的资源化利用, 强化环境保护与资源回收目的, 促进环境保护事业的可持续发展。

## 2 铬渣基本情况

铬渣是在生产铬盐、金属铬的过程中产生的工业废渣, 铬渣成分复杂, 包含无机氧化物氧化钙、氧化镁、二氧化硅等化学成分, 此外其中还包含一定量的硅酸钙等矿物成分。如果对铬渣长期露天堆存, 在雨水冲淋作用下, 会导致带有毒性的六价铬离子深入到地表水体中, 不仅污染生态环境, 而且对农田、水产品、人体健康带来危险<sup>[1]</sup>。其中铬渣对

生态环境的影响体现在: 六价铬会腐蚀金属管网, 一旦六价铬超标会形成一层薄膜降低污水净化效果; 铬超标会改变水体颜色并产生异味; 铬超标会降低农作物产量危害人类身体健康。铬渣对人体的危害体现为: 铬经过消化到侵入人体会对消化道产生刺激、腐蚀, 引发人体休克; 经过呼吸道进入人体体会引发鼻部病变甚至引发支气管炎; 如果人体直接接触铬物质会引发皮肤红斑、丘疹、湿疹等; 如果长期接触铬物质会引起人体致癌。由此可见, 需要做好铬渣无害化处理工作, 减少生态环境污染和人体损伤, 同时提高铬资源回收利用效率。

## 3 铬渣无害化处理措施

### 3.1 化学还原法

在湿法还原方法应用中, 需要把铬渣与水混合形成浆料, 并加入还原剂, 在特定酸碱值、温度、反应时间条件下, 产生还原反应, 通过这一过程可以把铬渣中的六价铬还原为三价铬, 产生性能稳定的化合物。在水溶湿法处理方法中, 需要对铬渣进行湿磨, 然后利用碳酸钠溶液对其进行处理, 使其中的酸溶性铬酸钙与铬铝酸钙转化为水溶性铬酸钠溶

【作者简介】廖荣(1986-), 女, 中国湖北黄石人, 本科, 工程师, 从事铬盐清洁生产与工艺优化、铬系功能材料研发及含铬固废资源化利用等研究。

液，回收铬酸钠产品。针对余渣，可以利用硫化钠溶液进行处理，把剩余的六价铬离子还原为三价铬离子，然后加入硫酸进行中和，使用硫酸亚铁对其进行固定<sup>[2]</sup>。酸性湿法处理就是把碱性含铬废渣的酸碱值调到酸性状态，并掺入亚硫酸钠作为还原剂，把铬渣里有毒的六价铬为无毒的三价铬。碱性湿法解毒方法主要是创建碱性条件，并掺入硫化物作为还原剂，使其产生还原反应。碱性还原法，就是把碱性含铬废渣加入硫化钠、硫化氢，使其与六价铬产生还原反应，沉淀后进行过滤，进而达到回收铬污泥的目的。碳还原法，

即把碳物质作为还原剂，把有毒的六价铬进行还原反应，生成无毒的三价铬离子，达到解毒目的。干法还原法就是把铬渣与特定的还原剂进行均匀混合，并创造高温环境开展煅烧还原反应，有效提高铬渣处理效率。在具体工作中，就是把水合肼、硫酸亚铁等物质作为还原剂，创建高温条件，把铬渣与煤炭、锯末、稻壳进行混合，设置高温、密封环境进行焙烧，把有毒的六价铬转化为无毒的三价铬；然后利用硫酸亚铁将其转化为络合物进行沉淀，进而强化三价铬的稳定性。具体如图1所示。

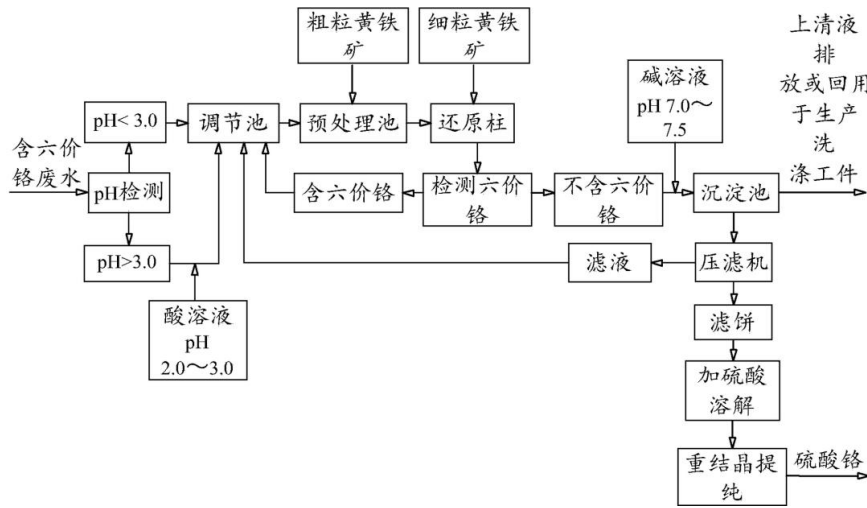


图1 铬渣无害化处理措施

### 3.2 固化 / 稳定化法

固化 / 稳定化法就是利用固化剂或者稳定剂，把铬渣中的有害物质固定在固化体中，或者将其转化为化学性质较为稳定的物质，限制其迁移和释放。其中，常见的固化 / 稳定化法有：水泥固化法，即把水泥作为固化剂，按照一定的比例将其与铬渣混合，加入适量水进行均匀搅拌，产生强度较高的固化体，该方法方便操作，成本较低，但是容易产生二次污染；石灰固化法，即把石灰作为固化剂，充分发挥碱性、胶凝性优势，与铬渣均匀混合，在特定条件下产生化学反应，进而生成化学性质较为稳定的化合物，该方法费用低，方便操作，但是固化体耐水性差；药剂稳定化，即向铬渣中掺加化学药剂，如磷酸盐、硫化物等，使其产生化学反应，把有毒的六价铬转化为无毒且性质稳定的难溶性化合物，该方法效率高，用量少，但是成本高<sup>[3]</sup>。

### 3.3 生物处理法

该方法主要是通过微生物的代谢作用，把铬渣中的六价铬转化为无毒的三价铬，该方法成本低且不会产生二次污染，方便操作，但是容易受到外界环境因素的干扰。常用的生物处理法有：微生物还原法，就是特定环境条件下，利用细菌、真菌等微生物对六价铬进行还原，将其转化为三价铬，该环节中需要利用特定的生物反应器等设备，创建利于微生物生长和还原反应的条件，保障铬渣的高效处理；植物修复，即利用特定植物对铬进行吸收和积累，以便对铬渣污染场地

进行修复，具体就是利用植物把铬渣中的铬吸收到体内，并通过收割植物的方式把铬从污染场地去除，该方法适合在轻度铬渣污染场地修复工作中进行使用，且具有较强的生态友好性，成本较低，但是修复时间长<sup>[4]</sup>。

## 4 铬渣综合化利用措施

### 4.1 炼铁工业

铬渣可以替代白云石、石灰石等添加剂用于生铁冶炼，真正实现资源化利用。在炼铁过程中，要设置高温条件，六价铬被完全还原，并将其转化为金属铬，并融入到生铁中。通过这一方式能够强化生铁的机械性能和硬度，促进铬资源的回收利用，有效提升经济效益和环境效益，推广前景广阔。但是铬渣存在一定危险性，需要严格遵守相关法律法规进行转运和存储，减少环境污染风险。

### 4.2 生产钙镁磷肥

在钙镁磷肥生产过程中，能够利用铬渣代替蛇纹石，因为两者成分相似，都富含氧化镁和二氧化硅，在替代过程中只需要调整原料配比，就能够将其投入到钙镁磷肥生产中。在实际生产作业中，需要按照特定比例对磷矿石、白云石、铬渣等原料进行均匀混合，并投入到高炉中，依次通过高温熔融、水淬骤冷等过程，把晶态磷酸三钙转化为无定型磷肥，该物质制定松脆，容易被植物吸收<sup>[5]</sup>。在该环节中，需要创建高温还原环境，这样才能降低铬渣毒性，将其中有

毒的六价铬离子转化为稳定性较强且没有毒性的三价铬氧化物,并将其在玻璃体中熔融处理,有效降低铬渣毒性,为后续综合利用创建良好条件。

#### 4.3 用于水泥生产

铬渣与水泥熟料矿物组成较为相似,都富含硅酸二钙、铁铝酸钙等物质,能够替代水泥矿石用于水泥生产。在具体应用中,需要通过铬渣作为水泥煅烧晶种,把铬渣中的微量 $\text{SO}_2$ 等作为矿化剂,并将其直接掺入生料煅烧硅酸盐水泥熟料。通过该方法能够实现铬渣的批量处理,减少水泥生产成本,提高经济效益和环境效益。

#### 4.4 烧制彩釉玻化砖

按照特定比例对铬渣、陶瓷原料、雾化水进行均匀混合,压制成型,当其干燥后进行素烧,然后进行上釉再干燥,最后入窑烧成。这种方法能够保障砖型美观化,且市场前景较广;利用干料混磨法促进粒径均匀性,实现铬渣的有效性解毒,且没有二次污染<sup>[6]</sup>。

#### 4.5 生产玻璃着色剂

在绿色玻璃制造中,可以利用铬渣代替铬铁矿进行玻璃着色。在具体实施中,需要创建高温熔融环境,让铬渣中的六价铬离子与玻璃原料中的酸性氧化物、二氧化硅等物质产生化学反应,并将其转化为二价铬离子,同时将其融于玻璃基质中,促进铬渣的有效解毒,减少环境污染风险,并对玻璃着色。通过铬渣的应用,能够利用其中的氧化镁、氧化钙等成分代替白云石和石灰石,这样能够控制玻璃生产中的原料消耗,且降低生产成本,促进玻璃行业的经济化、环保化发展。

### 5 铬渣无害化处理与综合利用优化措施

#### 5.1 铬渣预处理

为了提升铬渣无害化处理效果,需要提前进行预处理,这样能够减少铬渣的危害程度,改善物理化学性质,促进铬渣回收利用效果。在具体操作中,要对铬渣进行分类收集,尤其要结合铬渣具体来源、成分特点,对其进行科学分类,进而降低后续处理难度。要结合实际构建针对性的贮存场所,配备充足的防渗漏、防雨淋、防风化设备,在场所底部设置防渗层,避免铬渣中的有害物质渗透到土壤和地下水;在贮存环节中,需要粘贴好标签,详细标注铬渣的类型、数量、来源等,为后续管理和处理创建良好条件。在预处理环节中,需要利用专业设备对大块铬渣进行破碎,将其转化为较小颗粒的物质,这样能够增加铬渣比表面积,提高无害化处理效率;利用专业设备对铬渣进行筛分,分离大块杂质,然后筛分不同粒度的颗粒,确保各个类型的铬渣粒度均匀性;完成以上作业后进行洗涤处理,利用水洗方式对可溶性六价铬进行处理,即按照特定比例对铬渣与水进行均匀混合和搅拌,静置一段时间后六价铬就会溶于水,实现固液分离,然后单独处理洗涤液,回收其中的铬资源<sup>[7]</sup>。

#### 5.2 其余产物的处理

在铬渣无害化处理过程中,不论是哪种方法都有可能产生一些处理产物,需要采取科学方法进行优化处置,有效提升铬渣处理效果,减少二次污染。针对固化/稳定化处理后的铬渣,需要对其进行安全填埋,选择地质条件稳定、远离水源的地方作为填埋场,同时采取严格的防渗、防渗漏措施,避免有害物质渗透到地下水、土壤中,要对铬渣进行分层压实,并在上层覆盖土层,这样能够减少铬渣与外界环境的接触。此外针对含有有价金属的铬渣,对其无害化处理后,要对剩余铬渣进行资源化回收利用,如提取铬渣中的铬、铁等金属元素,并回收利用到工业生产中,真正实现铬渣的资源化利用,降低固体废物的产生量。

#### 5.3 完善管理制度

为了提升铬渣无害化处理效果,需要建立完善的管理制度,强化对铬渣无害化处理各个环节的监管,如生产、收集、运输、处理和处置;对各个单位的责任、义务进行明确划分和具体落实,构建铬渣管理台账,以便后续对铬渣流向进行追踪;要强化铬渣处理企业的资质审核与日常监管,促进处理设施的正常运行,确保各个处理环节符合环保要求。要完善长效性的环境监测体系,定期监测铬渣场地与周边环境要素,其中监测指标包含六价铬浓度、重金属含量、pH值等,结合监测结果评估铬渣无害化处理效果,及时发现潜在问题,提出针对性的整改措施。长期跟踪评估处理后的铬渣,使其在自然环境中始终保持稳定状态。

### 6 结论

综上所述,铬渣无害化处理工作中需要做好预处理工作,并采取科学合理的处理技术,优化后续管理工作,实现铬渣的安全有效性处理。此外还需要加大科技研发投入力度,研发新型还原剂、固化剂、生物菌种等,有效提高铬渣处理效果,降低处理成本,实现铬渣有用资源的最大化回收利用,降低固体废物排放量,促进循环经济发展。

#### 参考文献

- [1] 李家乐,万廷勇,柯平超,等. 电解锰渣无害化与资源化处理技术研究进展[J/OL]. 无机盐工业, 1-12[2026-01-26].
- [2] 王晓晨,王金秋,李瑞冰. 锌冶炼中和渣无害化处理技术[J]. 辽宁化工, 2025, 54 (05): 774-776.
- [3] 王金秋,王晓晨,李瑞冰. 铅锌冶炼沉铁渣无害化处理的实验研究[J]. 辽宁化工, 2025, 54 (04): 554-557.
- [4] 桂英莲. 铬渣无害化及资源化综合利用技术的研究[J]. 资源节约与环保, 2024, (12): 120-124.
- [5] 谭左平,曾雁. 炼锑砷碱渣无害化资源化处理新工艺[J]. 湖南有色金属, 2024, 40 (05): 45-48.
- [6] 黄术军. 锰渣无害化资源化处理制备纳米级新型材料应用技术. 湖南省,花垣新万润环保新材料有限公司, 2024-07-07.
- [7] 桂英莲. 铬渣无害化及资源化处理的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42 (06): 52-54.

# Research on the Integrated Application of Clean Production Technology and Emission Reduction Effect of Coal Chemical Industry under the Background of Dual Carbon

Yao Luo

China Energy Group Xinjiang Hami Energy Chemical Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

## Abstract

Against the backdrop of the dual carbon goals, the coal chemical industry faces practical challenges including low energy utilization efficiency and high carbon emission intensity. Compared to single technological upgrades, the systematic integration and coordinated application of clean production technologies are more conducive to achieving efficient energy utilization and synergistic reduction of multiple pollutants and carbon emissions. This study focuses on the integrated application of clean production technologies in the coal chemical industry under the dual carbon context, conducting a systematic analysis from three dimensions: integration value, implementation strategies, and emission reduction effectiveness. The research demonstrates that through technological integration in source process optimization, energy cascade utilization, coordinated control of pollutants and carbon emissions, and digital empowerment, the comprehensive energy efficiency of coal chemical facilities has significantly improved, while the carbon emission intensity per unit product has markedly decreased. The emission reduction effects exhibit quantifiable and sustainable characteristics. The findings provide valuable references for selecting low-carbon transition pathways and implementing clean production practices in the coal chemical industry.

## Keywords

Dual Carbon Context; Clean Production Technology in Coal Chemical Industry; Integrated Application; Emission Reduction Effectiveness

## 双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用及减排成效研究

罗瑶

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 中国·新疆哈密 839000

## 摘要

在双碳背景下, 煤化工行业面临能源利用效率偏低、碳排放强度较高等现实挑战。相较于单一技术改造, 清洁生产技术的系统集成与协同应用更有利于实现能源高效利用与多污染物、碳排放的协同削减。本文围绕双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用展开研究, 从集成应用价值、实施策略及减排成效三个层面进行系统分析。研究表明, 通过在源头工艺优化、能源梯级利用、污染物与碳协同控制以及数字化赋能等方面推进技术集成, 煤化工装置综合能效显著提升, 单位产品碳排放强度明显下降, 减排效果具有可量化和可持续特征, 研究结论可为煤化工行业低碳转型路径选择和清洁生产实践提供有益参考。

## 关键词

双碳背景; 煤化工清洁生产技术; 集成应用; 减排成效

## 1 引言

“双碳”是“碳达峰”与“碳中和”的简称, 是当前全球应对气候变化、推动可持续发展的核心目标。在“双碳”目标约束下, 国家能源结构与工业生产方式正面临深刻调整。煤化工作为以煤炭为主要原料的高能耗、高排放产业, 其绿色低碳转型既是实现碳达峰、碳中和目标的关键环节,

也是保障能源安全和产业稳定的重要支点<sup>[1]</sup>。相较于单项技术改造, 清洁生产技术的系统集成与协同应用, 更有助于实现资源高效利用与污染物、碳排放的协同削减。深入分析双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用的现实价值, 对于推动行业高质量发展具有重要理论与实践意义。

## 2 双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用价值

### 2.1 促进能源与资源高效利用, 夯实煤化工低碳转型基础

双碳背景下, 煤化工行业亟需从高消耗、粗放式的传统发展模式, 转向高效率、低排放的发展模式。清洁生产技

【作者简介】罗瑶(1991-), 男, 中国湖南娄底人, 本科, 工程师, 从事煤气化研究。

术耦合集成首先的价值体现在通过对生产工艺进行整体优化,提升能源和资源利用率方面。煤化工生产过程涉及的产业链条长、物料及能量流动多而复杂,单独的清洁生产技术只能解决某一局部的问题,而通过多种技术组合应用,则可以在系统整体上达到整体目的。

例如,在煤气化、合成、分离以及后处理等过程中,对高效的煤气化技术和余热回收技术以及能量梯级利用系统进行一体化设计有利于减小能源损失,实现热能循环使用;通过对水资源循环利用以及废水分质处理和回用技术的一体化设计,可以大大减少新水取水量,减轻煤化工项目对于当地水资源消耗压力,在双碳背景下,这种基于系统集成方式为主的清洁生产方式,能够有效提升煤炭资源利用率,并为煤化工产业开展低碳化发展奠定良好基础。

## 2.2 实现多污染物与碳排放协同削减,提升减排综合效益

煤化工生产过程中,碳排放往往与二氧化硫、氮氧化物、颗粒物及废水、固废等污染物排放高度耦合。清洁生产技术组合利用的最大特点就在于可以突破“单一类别污染治理”的局限,将防治污染和减碳同步实施,在源头、过程、末端等方面加以综合考虑,能够有效降低单位产品综合排放强度<sup>[2]</sup>。

在工艺端,将低碳工艺路线优选及过程强化与源头减量结合,在过程中采用先进的过程控制以及数字化管理系统进行精准化能效管控,在末端采取碳捕集利用封存(CCUS)技术及常规污染治理设施联合布局,有利于协同减少温室气体及传统污染物。采用技术耦合的方式比单独处理方式,在相同投资额的前提下能够实现更高的协同减污降碳效益,这是双碳目标导向下的煤化工洁净生产的优势所在。

## 2.3 推动产业模式升级,增强煤化工可持续发展能力

随着双碳目标的持续推进,在未来较长时期内煤化工行业发展的重心将不再是单纯的规模扩大,而是更强调高质量和可持续性发展。清洁生产技术的集成是技术和管理上的创新,也是促进煤化工产业模式转型的动力源泉。煤化工企业在清洁生产技术集成后可以由以“末端治理”为主的单点式污染控制转变为集约化、综合化的全过程优化控制体系,推动生产组织方式和管理模式变革。

清洁生产技术集成为企业建立低碳、高效的生产工艺提供了保障,提升了产品的价值及竞争优势;同时,也为企业在能耗、排污费用以及运行维护费用等方面带来长期的竞争优势,在未来的碳减排压力及环保趋严趋势下,将对企业的发展产生积极影响。从产业角度讲,这样的集成化利用清洁生产方式将促进煤化工从资源优势向科技优势的转化,提升产业的双碳适应性及抗风险能力<sup>[3]</sup>。

# 3 双碳背景下煤化工清洁生产技术集成应用策略

## 3.1 以源头减排为导向,推进核心工艺的系统优化与集成

源头减排是指通过对煤化工装置进行清洁生产技术集

成,在工艺技术和设备上实现单位产品能耗和碳排放强度的降低。在煤制油、煤制气、煤制烯烃等典型流程中,高能耗、高排放集中在煤气化、合成反应以及分离精制等环节,故应在上述环节开展技术集成。

在煤气化环节,可通过先进气化炉型与工艺参数协同优化,实现高效、低碳运行。如采用干粉煤加压气化技术,结合先进的煤粉制备技术以及精确的给料技术,气化效率可达80%以上。

对于下游合成及转化来说,应该注意将反应和分离的过程进行集成,利用反应-分离相结合的方式来进行生产,例如采用膜分离结合合成反应的方法来降低循环气压缩以及重复加热的能源消耗,经过估算发现,在煤制甲醇装置当中运用高选择性的催化剂以及合理的回收反应热系统可以节约8%左右的整体能源消耗,二氧化碳排放强度同步下降。

通过在源头工艺层面实施多单元协同优化,有助于从根本上削减能源消耗与碳排放,为后续清洁生产技术集成奠定基础。

## 3.2 重构能源利用体系,强化能量梯级利用与系统耦合

由于煤化工装置流程长、能量品位差别大等特点,其能量利用程度对整体减排效果有着直接的影响。因此在进行清洁生产技术集成时,应对整个系统的能源利用进行从系统工程角度出发的重新设计,加强其能量分级使用及多个系统之间的耦合<sup>[4]</sup>。

一是加强过程集成提高余热利用率。对于煤气化过程中、高温合成反应过程以及尾气冷却过程中产生的大量中低品位热量可以通过过程热集成(夹点法)进行全过程系统的优化设计,实现换热网络的有效匹配。

二是开展能源系统及公用工程耦合运行,如煤化工装置与热电联产系统的耦合,在蒸汽品位匹配以及电力负荷方面进行优化,实现热、电、气的多能互补。

三是可以尝试将可再生能源与煤化工结合使用,例如用光伏或者风力发电来为辅助电力系统供电,减少对化石燃料的需求量,从而在一定程度上给煤化工向低碳化发展创造条件。

## 3.3 推进污染物与碳排放协同控制,实现清洁生产整体提升

除减排外,煤化工清洁生产也应考虑污染物排放的减少,在进行污染物处理的同时结合碳减排措施,可以同时提高环境及碳减排效果。

在气体排放控制方面,应推动二氧化碳捕集与污染物脱除技术的一体化应用。例如,在煤制氢或煤制甲醇流程中,将酸性气体脱除装置与CO<sub>2</sub>捕集系统协同设计,可在脱硫、脱碳的同时实现高纯度二氧化碳回收。工程数据显示,采用物理吸收法与流程集成优化后,CO<sub>2</sub>捕集率可达到90%以上,捕集能耗降低约10%~15%<sup>[5]</sup>。

在废水处理方面,应重视多技术协同集成,在“预处理—

生化处理—深度处理—回用”的组合工艺下,提高废水回用率;一些大型煤化工基地经过清洁生产技术集成后,废水回用率达到95%以上,减少了新水取用量,间接降低水处理过程中产生的能耗及碳排放。

针对固废处置环节而言,采用灰渣综合处理及副产物利用的方式能降低其填埋、运输所造成的间接CO<sub>2</sub>排放量,提高清洁生产的总体水平。

### 3.4 以数字化与数据驱动为支撑,提升清洁生产技术应用集成效能

复杂煤化工过程中的清洁生产技术应用的有效实施,依赖于数字技术和数据技术的应用,建立以数据为基础的过程监测、诊断及优化决策是实现清洁生产技术应用有效应用的关键。

一是实施全生命周期能耗及碳排放跟踪管理。借助在线仪表以及工业互联网大数据平台,实现重要单元能耗、物耗、排放数据的动态采集和分析,并用于指导工艺调整和生产优化,在实践中发现通过数据分析的精细化操作,可使装置整体能效提升3%~5%。

二可采用过程模拟及优化模型来定量地分析各技术应用方式下的减排效果,并利用LCA方法对煤化工产品生产过程中原材料输入至最终产出物输出全过程中的碳排放量进行计算,从而确定减排“瓶颈”,辅助技术应用的选择。

通过数字化赋能和数据方法支撑,煤化工清洁生产技术应用能够实现由经验驱动向科学决策转变,为“双碳”目标下行业持续减排提供长期保障。

## 4 双碳背景下煤化工清洁生产技术应用后减排成效分析

### 4.1 能源利用效率提升带来的碳减排成效

清洁生产技术应用使煤化工企业的能源利用率提高,是最直观体现碳减排的效果。对高效的气化技术、余热梯级回收技术、能量系统优化技术等集成,可以使煤炭作为一次能源到最终化工品及能源载体的转化效率大大增加。根据有关工程案例显示,改用先进的气流床气化+余热锅炉技术后,每吨煤转换过程的有效能利用效率将从原来的大约65%增加到75%-80%,单位产品综合能耗下降10-15%。

同时,结合采用热电联产及工艺余热深度回收利用措施,煤化工装置外购电量显著降低,如某60万t/a甲醇装置采用清洁生产技术应用改造方案后,年多发电约12000万kW·h,相当于节约标准煤约 $3.6 \times 10^4$ t,减少CO<sub>2</sub>排放约 $9.4 \times 10^4$ t。以上数据说明,能源系统集成优化对降低化石能源消耗进而降低间接碳排放有明显效果,是双碳背景下煤化工企业降碳增效的有效途径之一。

### 4.2 污染物协同控制与碳排放强度下降成效

清洁生产技术应用成为提高能源利用率的同时,注重多种污染物联合处理及降低碳排放强度。在煤化工生产过程中,采用从源头减少到过程削减再到末端治理相结合的方式对煤炭资源进行加工利用,实现CO<sub>2</sub>和传统污染物同时减排的目的。如在气化、变换和合成工段中,经过低氮燃烧、过程密闭化技术和高效脱硫脱碳一体化改造,单位产品碳排放强度降低。

实际运行情况表明,在采用CCUS技术的煤制氢或煤制甲醇装置中,可以将CO<sub>2</sub>捕集率达到80%以上。如某煤制氢示范装置每年捕集约50万吨CO<sub>2</sub>,其中约有70%被用作下游化工合成或油田驱油,实现了CO<sub>2</sub>的资源化利用,其直接排放到大气中的CO<sub>2</sub>较之以前下降了约40%。此外,在脱硫脱硝和废水深度处理工艺的配合下,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和COD的排放量也减少了20%-30%,进一步提升了生产的清洁性。

综合来看,清洁生产技术应用使煤化工企业由单一减排向系统减排转变,在降低单位产品碳排放强度、实现多污染物协同控制方面成效明显,为煤化工行业在双碳目标约束下实现绿色低碳转型提供了有力的实践支撑。

## 5 结语

在双碳目标长期约束下,煤化工行业的绿色低碳转型已由阶段性任务转变为系统性工程。研究表明,清洁生产技术的集成应用能够突破传统单项治理的局限,通过全流程优化实现能源效率提升与碳减排、污染物控制的协同推进。实践数据充分证明,技术集成不仅显著降低了煤化工生产过程的碳排放强度,也在资源节约、环境绩效和运行成本控制等方面形成综合效益。未来,应在现有基础上持续深化技术协同与系统优化,加强数字化与数据方法在清洁生产中的应用,同时完善配套政策与评价机制,推动煤化工由高排放约束型产业向低碳、高效、可持续发展模式稳步转型,为实现国家双碳目标提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 刘金婷.环保清洁生产技术在工业减排中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(03):15-16+22.
- [2] 何莲.清洁生产技术在工业环境中的应用与效益分析[J].清洗世界,2024,40(10):59-61.
- [3] 郭婧.清洁生产技术在化工生产中的应用[J].化学工程与装备,2023,(11):30-32.
- [4] 唐大易,吴卿,王松.煤炭化工清洁生产技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(16):58-60.
- [5] 陈东良.非光气MDI绿色化工清洁生产技术研发进展[J].山西化工,2022,42(01):37-39.

# Study on Waste Water Recycling Process of Metal Oxide Production by Hydrometallurgy

Shengwei Liu

Jiangxi Ruifeng Environmental Protection Co., Ltd., Yichun, Jiangxi, 336100, China

## Abstract

Hydrometallurgy is the main process of metal oxide production, but the wastewater produced in the process contains high concentration of heavy metals, acid and alkali and suspended solids. If it is discharged directly, it will seriously pollute the environment and waste resources. With the global shortage of resources and the tightening of environmental protection policies, wastewater recycling has become the key to the sustainable development of the industry. However, the prior art generally has problems such as high cost, low cycle efficiency, impurity accumulation affecting product quality, etc., and it is urgent to develop a low-cost, efficient and stable closed-loop cycle process. Firstly, the characteristics of hydrometallurgical wastewater are analyzed in detail, then the design of wastewater recycling process is elaborated, and then the economic and environmental benefits of recycling process are analyzed in detail. Finally, the popularization, application and challenges of the related cycle processes are summarized, in order to provide a useful reference for the related research.

## Keywords

Hydrometallurgy; Metal oxide; Wastewater recycling process

# 湿法冶金生产金属氧化物的废水循环利用工艺研究

刘圣威

江西睿锋环保有限公司, 中国·江西 宜春 336100

## 摘要

湿法冶金是金属氧化物生产的主流工艺,但其过程中产生的废水含有高浓度重金属、酸碱及悬浮物,若直接排放将严重污染环境并造成资源浪费。随着全球资源短缺与环保政策趋严,废水循环利用已成为行业可持续发展的关键。然而,现有技术普遍存在成本高、循环效率低、杂质累积影响产品质量等问题,亟需开发低成本、高效稳定的闭环循环工艺。本文先是详细分析了湿法冶金废水特性,随后具体阐述了废水循环利用工艺设计,紧接着具体分析了循环工艺的经济性与环境效益,最后总结了相关循环工艺的推广应用与挑战,以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

## 关键词

湿法冶金; 金属氧化物; 废水循环利用工艺

## 1 引言

湿法冶金因反应条件温和、金属回收率高,广泛应用于氧化铝、氧化锌等金属氧化物生产,但其废水排放量占工业废水总量的15%以上,含有的重金属(如Fe、Cu、Pb)及酸碱物质对生态环境构成长期威胁。传统末端治理技术(如化学沉淀)虽能降低污染物浓度,但存在药剂消耗大、污泥产量高、水资源无法回用等问题。近年来,膜分离、电化学等新型技术虽提高了循环效率,但高昂的投资与运行成本限制了其大规模应用。因此,开发一种兼顾经济性与环保性的废水循环工艺,成为行业亟待解决的难题。本文从废水特性分析入手,构建低成本闭环循环体系,旨在实现资源高

效利用与污染零排放的双重目标。

## 2 湿法冶金废水特性分析

### 2.1 废水来源与分类

湿法冶金废水主要源自浸出、净化、洗涤三大核心工序,且各工序废水性质差异显著。浸出工序利用酸(如硫酸、盐酸)或碱(如氢氧化钠)溶解矿石或中间产物,废水中常含过量酸/碱及溶解出的金属离子,如锌冶炼浸出废水含 $Zn^{2+}$ 浓度达10-50 g/L,伴生硫酸根及 $Fe^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 等杂质,pH值极低或极高,需中和处理后方可进入后续流程;净化工序旨在去除浸出液中的硅、氟、有机物等杂质,废水成分复杂,可能含絮凝剂、有机溶剂及微量重金属,如氧化铝生产净化废水氟离子浓度常超标(>50 mg/L),需专项脱氟处理以避免回用时腐蚀管道;洗涤工序用于去除产品表面残留液,废水金属离子浓度较低(<1 g/L),但水量占比大(60%-80%),

【作者简介】刘圣威(1987-),男,中国湖南浏阳人,助理工程师,从事化学工程研究。

如铜冶炼洗涤废水含  $\text{Cu}^{2+}$  约 0.1-0.5 g/L, 直接排放会造成资源浪费, 需通过分级回用降低新鲜水消耗。

## 2.2 主要污染物成分

湿法冶金废水的污染物涵盖无机与有机两大类, 其浓度与毒性对循环利用形成直接阻碍。重金属离子方面, Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 等常见重金属具有生物累积性与毒性, 如铅离子 ( $\text{Pb}^{2+}$ ) 超 0.1 mg/L 即可能污染地下水, 锌冶炼废水  $\text{Zn}^{2+}$  浓度过高会导致回用水硬度超标, 影响电解效率, 而  $\text{Cr}^{6+}$  等强氧化性重金属需还原预处理以降低毒性<sup>[1]</sup>。酸碱物质方面, 废水 pH 值波动剧烈 (1-13), 极端 pH 会破坏生物处理法中的微生物活性, 并加速设备腐蚀, 如酸性废水腐蚀碳钢管道, 碱性废水则易与钙镁离子结合形成水垢, 堵塞膜分离组件。悬浮物与有机物方面, 矿石粉碎与反应沉淀产生的悬浮物 (SS) 浓度可达 1000-5000 mg/L, 易堵塞过滤介质; 萃取剂、表面活性剂等有机物则可能干扰金属回收, 如 P204 萃取剂残留会降低后续萃取效率, 需活性炭吸附或高级氧化技术降解。

## 2.3 废水循环利用的挑战

尽管废水资源化对湿法冶金行业意义重大, 但其循环利用仍面临三大核心挑战。首先, 杂质积累会严重影响产品纯度, 循环系统中低浓度的 Si、F、Cl 等杂质随水分蒸发不断浓缩, 最终可能超出产品允许限值, 例如氧化铝生产中, 循环水  $\text{SiO}_2$  积累会使氢氧化铝产品 Si 含量超标, 需通过增加排液量或引入超滤膜截留杂质, 但这又会降低循环率。其次, 水质波动会加剧设备腐蚀, 废水 pH、Cl 浓度等参数的变化会加速金属设备老化, 如铜冶炼循环水中 Cl 浓度升高会使不锈钢设备腐蚀速率大幅提升, 需通过加药调控或采用耐腐蚀材料延长设备寿命。最后, 系统稳定性与长期成本存在矛盾, 多级处理单元协同运行难度大, 易因操作失误或设备故障崩溃, 同时膜组件更换、药剂投加等长期运行成本高昂, 需通过工艺优化降低经济压力。

# 3 废水循环利用工艺设计

## 3.1 工艺设计原则

在湿法冶金废水循环利用工艺设计中, 有三大关键原则。其一为资源最大化利用, 需金属回收与水回用并重。废水中含铜、锌、铅等有价值金属, 有效回收可减少资源浪费、降低对原生矿石依赖, 还能带来经济效益, 如含铜废水回收提纯后能再用于冶炼<sup>[2]</sup>; 水回用可减少新鲜水取用、降低成本、缓解水资源短缺, 符合可持续发展。其二是工艺兼容性, 新工艺要与现有生产流程无缝衔接, 设计时要考虑设备布局、工艺参数和操作习惯等, 确保处理后水质满足要求且不影响环节运行, 减少对生产的干扰, 保证顺利实施与长期稳定运行。其三是经济性与可操作性, 经济上要降低建设和运行成本, 选性价比高、能耗低的设备, 优化流程; 可操作上工艺要易维护管理, 操作人员能掌握要点, 设备可靠稳定,

降低维护成本、保证正常运行。

## 3.2 关键技术模块

### 3.2.1 预处理技术

在湿法冶金废水循环利用的预处理技术中, 调节 pH 是重要环节。因废水 pH 常偏离中性, 过酸或过碱会损害后续处理设备与工艺, 所以需加入酸或碱进行中和反应, 让 pH 达适宜范围, 如酸性废水加氢氧化钠等碱性物质, 碱性废水加硫酸等酸性物质, 此举既能保护设备, 又为后续工艺创造条件。絮凝沉淀用于去除悬浮物, 废水中含矿石颗粒等大量悬浮物, 加入聚丙烯酰胺等絮凝剂, 使颗粒凝聚成大絮体, 在重力下沉淀, 实现固液分离, 该方法处理效果好、操作简单。过滤与膜分离可分级净化废水, 过滤靠滤料层截留悬浮物和部分胶体, 常见设备有砂滤池等; 膜分离利用膜的选择性透过性分离组分, 按孔径分微滤、超滤等, 组合使用可获不同水质, 满足后续工艺需求。

### 3.2.2 金属回收技术

在湿法冶金废水的金属回收技术中, 溶剂萃取法凭借其独特优势广泛应用。它利用不同金属在有机溶剂和水相中溶解度差异, 选合适萃取剂, 让废水与萃取剂充分接触, 使目标金属从水相转至有机相, 再经反萃取实现富集回收, 具有分离效果好、选择性高、操作灵活等特点。离子交换法利用离子交换树脂对金属离子的吸附作用回收金属, 树脂表面活性基团能与金属离子交换, 废水通过树脂柱时金属被吸附, 饱和后用再生剂洗脱金属使树脂重复使用, 此法吸附效率高、操作简单、可自动化控制, 但树脂成本高且再生有废液<sup>[3]</sup>。电化学法利用电解原理, 让废水中的金属离子在电极还原沉积实现回收, 以废水为电解液, 外加电流使金属离子在阴极得电子生成单质, 它成本低、操作简便、回收率高, 适合处理高浓度金属离子废水, 还能控制条件选择性回收不同金属。

### 3.2.3 水质调控技术

在湿法冶金废水循环利用的水质调控技术里, 反渗透是深度脱盐的关键手段。它借助半透膜的选择性, 在压力下让水分子通过, 截留溶解性盐类等杂质, 处理后的水盐分极低, 能满足高纯度用水需求, 可用于进一步净化处理后的水, 去除残留盐分和微量杂质, 提升水质, 回用于电解液配制等对水质要求高的生产环节。蒸发浓缩则通过加热使废水水分蒸发, 减少体积、提高杂质浓度, 水分以蒸汽逸出, 盐类等留在浓缩液中, 适用于处理高含盐量废水, 能降低后续处理难度与成本, 浓缩液还可进一步回收有价值物质或无害化处置。此外, 废水循环时因水分蒸发、杂质积累, 水质参数会变化, 如 pH 值、硬度等, 此时需补加药剂稳定参数, 像 pH 偏离就补加酸或碱, 硬度过高补加软化剂, 以此保障废水循环利用系统稳定运行。

## 3.3 循环工艺流程优化

在循环工艺流程优化方面, 多级循环模式设计是提升

废水循环利用的有效之策。分质回用依据不同生产环节对水质的要求，将处理后的废水分级回用，如初步处理后水质要求低的废水用于冲洗设备、冷却，深度处理后水质要求高的废水用于电解液配制、产品洗涤。梯度利用则按水质从高到低顺序，依次用于不同生产环节，实现水资源最大化利用，减少新鲜水取用和废水排放，提高利用效率。杂质动态平衡控制也必不可少<sup>[4]</sup>。废水循环时杂质会不断积累，影响系统运行和产品质量，需实时监测杂质含量，依结果调整处理工艺参数，如增加排液量、调整药剂投加量，让杂质含量保持动态平衡，还可采用杂质分流排出部分杂质，保证系统稳定。此外，能量与物质耦合优化能提高系统综合效益。废水处理产生大量余热，如蒸发浓缩的蒸汽余热，用回收装置收集用于预热废水或其他加热环节，可降低能耗。同时，对沉淀物、浓缩液等副产物资源化利用，如回收金属、用于生产其他产品，能实现物质循环，减少废弃物排放，降低成本，提升经济与环境效益。

## 4 循环工艺的经济性与环境效益评估

### 4.1 经济性分析

循环工艺经济性分析涵盖投资、运行成本与收益。投资成本包括设备、药剂和能耗。设备上要购置反渗透装置等核心及配套辅助设备，不同规模项目投资差异大，小型数十万，大型可达数千万甚至更高；药剂用于调节废水 pH 等，费用取决于废水成分与处理要求；能耗主要是设备运行耗电，如反渗透靠高压泵、蒸发浓缩需加热蒸汽。运行成本有维护、人工和折旧，设备维护要定期检修换件，费用因设备而异；人工成本看自动化程度，自动化高则人工少但需专业人员；折旧是将设备投资按年限分摊。收益来自水资源节约，能减少新鲜水取用、降低水费，在水资源匮乏地区效益显著，还因回收废水中铜等有色金属创造价值，且可能避免环保罚款间接增收。

### 4.2 环境效益评估

循环工艺的环境效益评估涵盖多方面。在减排量计算上，它借助生物处理、化学氧化降低废水 COD，用化学沉淀、离子交换去除重金属，还能循环利用废水减少排放量，某企业采用后废水排放量减 80%，COD 和重金属排放量降幅分别达 70%、90% 以上。碳足迹分析方面，其能耗源于设备运行，反渗透、蒸发浓缩等是高碳排放环节，不过通过优化流程、采用高效节能设备，以及利用余热回收技术预热废水等，可

降低能耗与碳排放，某项目靠余热回收年减碳数百吨。生态风险评估也不容忽视，循环水含残留药剂、微生物，回用可能影响产品质量与设备，需严格监测水质，同时评估其排放对周边生态的影响，防止污染土壤、水体和生物。

## 5 循环工艺的推广应用与挑战

循环工艺推广应用面临诸多情况与挑战。行业适用性上，不同金属氧化物生产企业因生产流程、产品及规模差异，对循环工艺需求不同，小型企业重成本与操作简便，大型企业则倾向高效稳定大规模处理且水质要求高。但规模化应用有障碍，先进工艺技术复杂，缺专业人才难应用，购置设备等资金需求大，中小企业常因资金有限而却步。政策与市场是重要驱动力，环保法规强制要求废水循环，严格排放标准及处罚促使企业应用；绿色供应链使下游倾向选环保达标供应商，碳交易市场让企业为碳排放付费，循环工艺降能耗碳排放可获收益。未来，智能化监控与自适应调控技术可实时监测调整参数，提高效率；新型材料如纳米吸附剂能提升污染物吸附能力、降低成本；与新能源技术耦合，如光伏驱动膜分离，可推动循环工艺绿色可持续发展。

## 6 结论与展望

综上所述，本文聚焦湿法冶金生产金属氧化物的废水循环利用工艺，经分析明确了废水特性及循环利用面临的杂质积累等挑战，设计了含关键技术模块的循环工艺并优化流程。经济与环境效益评估显示其成效显著，不过推广应用存在行业适用性和规模化障碍，好在政策与市场提供了驱动力。展望未来，需研发低成本高效的新型处理技术与材料，强化智能化监控与自适应调控技术应用，推动循环工艺与新能源技术深度耦合，构建绿色可持续体系，还要加强政策引导与行业协作，以促进其在湿法冶金行业广泛应用。

### 参考文献

- [1] 刘勇,高越,祁国宝.铜钴矿湿法冶金生产过程中物料平衡与流程控制优化[J].冶金管理,2024,(09):82-84+87.
- [2] 李康.湿法冶金全流程优化补偿方法及仿真实验平台建立[D].东北大学,2019.
- [3] 吴青彦,林晓,刘晨明,等.镍钴湿法冶金污染源解析及防治建议[J].世界有色金属,2019,(06):4-8.
- [4] 马志玫,金占富.湿法冶金锌电积用阴阳极板生产工艺改进研究[J].世界有色金属,2018,(18):4-6.

# Research on Safety Management in Coal to Methanol Production Process

Jinling Zhang

Dalian Baiyue Security Technology Service Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116031, China

## Abstract

Coal to methanol, as an important component of China's coal chemical system, plays an irreplaceable role in ensuring energy security, optimizing energy structure, and supporting the supply of chemical raw materials. However, the coal to methanol production process has significant characteristics such as long process flow, large equipment scale, coexistence of high temperature and high pressure, and interweaving of flammable, explosive, and toxic media, which make its safety risks systematic, coupled, and amplified. Research suggests that by constructing a comprehensive safety management system centered on process safety management, guided by risk prevention and control, and supported by institutional and technological collaboration, the probability of accidents in coal to methanol production can be effectively reduced, and the intrinsic safety level of equipment operation can be improved. The relevant research conclusions of this article can provide theoretical and practical references for coal chemical enterprises to improve their safety management systems and promote the transformation of safety governance from passive response to active prevention and control.

## Keywords

coal to methanol; Coal chemical industry; Production process; Safety management; risk control

## 基于煤制甲醇生产过程中的安全管理研究

张金玲

大连百悦安全技术服务有限公司, 中国·辽宁 大连 116031

## 摘要

煤制甲醇作为中国煤化工体系中的重要组成部分,在保障能源安全、优化能源结构以及支撑化工原料供给方面发挥着不可替代的作用。但煤制甲醇生产过程具有工艺流程长、装置规模大、高温高压并存、易燃易爆与有毒介质交织等显著特征,使其安全风险呈现出系统性、耦合性和放大性特点。研究认为,通过构建以过程安全管理为核心、以风险预控为导向、以制度与技术协同为支撑的综合安全管理体系,可有效降低煤制甲醇生产事故发生概率,提升装置运行的本质安全水平。本文相关研究结论可为煤化工企业完善安全管理体系、推动安全治理由被动应对向主动防控转型提供理论参考与实践借鉴。

## 关键词

煤制甲醇; 煤化工; 生产过程; 安全管理; 风险控制

## 1 引言

在中国“富煤、少油、缺气”的资源禀赋背景下,煤制甲醇产业在能源化工体系中长期占据重要地位。随着现代煤化工技术的不断成熟,煤制甲醇装置逐步向大型化、高参数和连续化方向发展,单套装置产能显著提升,工艺系统的集成程度不断增强。在提升生产效率和经济效益的同时,生产系统的复杂性和潜在风险也同步放大。一旦在关键工序或核心设备环节发生失控,不仅可能造成装置大面积停产,还可能引发火灾、爆炸、中毒等严重事故,对人员生命安全和周边环境构成重大威胁。基于此,围绕煤制甲醇生产过程

开展系统性的安全管理研究,深入揭示风险形成机理与管理控制逻辑,对于提升煤化工行业整体安全水平具有重要现实意义。

## 2 煤制甲醇生产过程的安全风险特性

### 2.1 多工序耦合条件下的高危工艺风险特征

煤制甲醇生产过程由煤气化、气体净化与变换、甲醇合成以及精馏储运等多个工序连续构成,各单元在工艺机理、运行参数和危险介质方面存在显著差异,但在物料与能量传递层面高度耦合,决定了其安全风险具有显著的系统性特征<sup>[1]</sup>。煤气化单元通常在高温、高压条件下运行,系统内同时存在可燃气体、一氧化碳及含硫有毒介质,一旦设备密封失效、操作参数偏离或联锁保护不到位,极易引发燃爆或中毒事故。该环节不仅自身风险等级较高,而且作为前端工

【作者简介】张金玲(1987-),女,学历,本科,中级,从事化工技术安全,化工安全、精细化工。

序,其运行稳定性直接影响后续系统的安全边界。气体净化与变换环节虽然整体工况相对平稳,但其流程复杂、操作连续性强,涉及多级吸收、解析及化学反应过程,对温度、压力和物料配比的稳定控制要求较高。一旦局部设备或参数出现异常,易通过气体成分变化和负荷波动向下游传递,诱发系统性连锁反应。因此,该环节的安全风险更多体现为“隐蔽性”和“放大性”,其失控后果往往并非即时显现,而是在系统运行中逐步累积并集中暴露。

## 2.2 关键反应与储运环节的放大性与扩散性风险

甲醇合成单元是煤制甲醇生产的核心装置,也是安全风险高度集中的关键区域。该单元反应条件苛刻,对温度、压力及催化剂活性高度敏感,任何原料气成分波动、换热效率下降或催化剂异常,都可能引发反应速率失衡,造成局部过热甚至反应失控。由于合成系统通常在高压条件下运行,一旦发生异常,不仅处置难度大,而且事故后果严重,具有明显的高能量释放特征<sup>[2]</sup>。精馏与储运环节则集中体现了甲醇易燃、易挥发的物理化学特性。该阶段涉及大量液态甲醇的分离、储存与装卸作业,作业频次高、暴露面广,静电积聚、阀门泄漏或操作不当均可能成为事故诱因。尤其在连续化生产条件下,前端工序的工况波动可能通过物料平衡直接影响储运系统的安全状态,使风险在系统内部进一步扩散。总体而言,煤制甲醇生产安全风险并非单点存在,而是在连续生产体系中相互传导、叠加放大,呈现出典型的系统扩散特性,这也对安全管理的系统性和前瞻性提出了更高要求。

## 3 煤制甲醇生产安全管理的主要内容

### 3.1 以过程安全为导向的技术管控体系构建

煤制甲醇生产安全管理的首要核心在于以过程安全管理理念为导向,系统构建覆盖工艺设计、装置运行与风险控制全过程的技术管控体系。相较于一般化工装置,煤制甲醇生产具有高温、高压、易燃、易爆、有毒介质高度集中的显著特征,任何单一环节的技术失效都可能通过物料与能量耦合引发系统性风险。因此,安全管理的重点不应停留在事故结果控制层面,而应前移至工艺与装置运行本身,将风险控制内嵌于生产过程之中。在工艺设计与装置配置阶段,应以本质安全为基本原则,通过流程简化、危险介质最小化和能量分级控制等方式,从源头降低事故发生概率<sup>[3]</sup>。同时应合理设置工艺操作窗口和安全裕度,确保装置在工况波动条件下仍具备足够的稳定性与可控性。在生产运行阶段,技术管控体系的核心在于对关键工艺参数和设备状态的持续监测与动态控制。煤气化、合成反应及精馏储运等单元均对温度、压力和组分变化高度敏感,安全管理需依托自动化控制系统和连锁保护装置,对异常趋势进行及时识别和干预,防止工况偏离演变为事故。同时,应强化设备完整性管理,通过周期性检测、状态评估与预防性维护,降低因腐蚀、疲劳或老化引发的失效风险。通过将技术控制与风险预警相结合,可

有效提升煤制甲醇生产系统的抗扰动能力和运行安全水平。

### 3.2 以组织与人员为支撑的制度化安全管理机制

在高度技术密集的煤制甲醇生产过程中,人员行为与组织管理同样构成安全管理的关键内容。复杂工艺条件下,操作人员不仅是生产活动的执行者,也是风险识别与处置的直接参与者,其专业能力和安全意识对系统安全具有决定性影响。因此,煤制甲醇安全管理必须通过制度化机制,将人员管理纳入整体安全框架之中。第一,应围绕岗位风险特征建立差异化的能力准入与培训体系,使人员技能水平与岗位安全要求实现有效匹配。通过系统化培训和持续复训,强化操作人员对工艺机理、危险源特性及异常工况处置逻辑的理解,减少因认知不足或操作失误引发的安全事件<sup>[4]</sup>。第二,制度化安全管理机制还体现在对生产组织方式和管理流程的规范化控制上。通过明确岗位职责边界和操作权限,避免因职责模糊导致的管理真空或指令冲突。第三,应将安全绩效纳入生产管理与考核体系,使安全责任由单一管理部门延伸至各层级组织与岗位。在此基础上,通过建立事故隐患排查、风险分级管控和应急响应等制度,实现安全管理由被动应对向主动预防转变。通过技术管控与组织制度的协同运行,煤制甲醇生产安全管理才能形成稳定、可持续的运行机制,为装置长期安全稳定运行提供有力保障。

## 4 煤制甲醇生产安全风险的管理实施路径

### 4.1 基于风险分级管控的安全管理实施路径

在煤制甲醇生产实践中,安全管理成效在很大程度上取决于实施路径的科学性与针对性。鉴于生产系统风险来源多样、危险程度差异显著,安全管理应以系统化风险识别和分级管控为实施起点,通过对不同生产单元和作业环节的风险特征进行综合评估,明确安全管理的重点方向。在具体实施过程中,应结合煤气化、高温合成及精馏储运等关键环节的工艺特性,对风险进行分级分类管理,将有限的管理资源优先投向高风险、高后果区域,从而避免安全投入的平均化和形式化。

在风险分级管控框架下,技术措施与管理措施应实现协同配置。对于高风险工序,应重点依托自动化控制、连锁保护和在线监测等技术手段,提升风险识别与处置的时效性;对于中低风险环节,则通过规范操作规程、强化现场巡检和过程监督加以控制。同时应将风险评估结果动态嵌入生产组织和作业审批流程,使安全管理成为生产决策的重要约束条件。通过风险分级管控的实施路径,煤制甲醇生产安全管理可由静态合规管理转向动态精准管控,从整体上提升风险防控的针对性和有效性。

### 4.2 煤制甲醇生产安全管理的协同运行机制

煤制甲醇生产安全管理并非单一部门或单一措施即可实现,其稳定运行依赖于多层级、多要素的协同机制<sup>[5]</sup>。在组织层面,应通过明确企业管理层、专业技术部门和一线岗

位在安全管理中的职责分工,形成纵向贯通、横向联动的管理结构,使安全要求能够自上而下有效传导,并在现场层面得到落实。在运行过程中,安全管理机制应与生产管理、设备管理和应急管理形成有机衔接,避免安全工作被割裂为独立模块而削弱整体效能。在机制运行中,信息反馈与持续改进是保障安全管理有效性的关键环节。通过对运行数据、隐患排查结果和事故未遂事件的系统分析,可不断修正风险认知和管理策略,使安全管理体系保持动态优化状态。同时可以通过定期评估安全管理措施的实施效果,推动制度和手段的迭代升级,增强安全管理对复杂工况变化的适应能力。总体而言,只有在风险管控、组织协同和持续改进机制共同作用下,煤制甲醇生产安全管理才能形成闭环运行模式,为装置长期安全稳定运行提供制度保障与实践支撑。

## 5 煤制甲醇安全管理的优化方向与发展趋势

### 5.1 面向本质安全的系统优化与技术深化

在煤制甲醇生产规模不断扩大、装置复杂度持续提升的背景下,安全管理的优化应更加注重从系统层面提升本质安全水平。相较于依赖事后处置和外部约束的传统管理方式,本质安全强调通过工艺、设备和系统结构的优化,从源头削减危险源和事故诱因。在煤制甲醇生产中,应进一步强化工艺安全论证和危险与可操作性分析,将安全因素作为工艺改造和技术升级的重要约束条件,避免单纯以产能或能效提升为导向而忽视潜在安全风险。同时应推动关键设备和系统的可靠性提升,通过优化材料选型、结构设计和冗余配置,降低高温、高压和腐蚀工况下的失效概率,使安全风险在系统层面得到有效缓释。随着信息技术与工业控制技术的深度融合,安全管理的技术手段也呈现出由被动监测向主动预警转变的趋势。通过对生产过程数据的深度挖掘和关联分析,可提前识别异常工况演化规律,为风险干预提供时间窗口。这种基于数据驱动的安全管理模式,有助于突破传统依赖人工经验的局限,使煤制甲醇生产安全管理更加精准和前瞻,从而在保障安全的同时兼顾生产效率与系统稳定性。

### 5.2 安全管理理念与企业治理体系的深度融合

煤制甲醇生产安全管理的持续提升,离不开管理理念层面的系统转变。在实践中,安全往往被视为合规性要求或成本性投入,导致安全管理与生产经营目标之间存在一定张

力。事实上,安全管理水平的高低直接影响装置运行可靠性、生产连续性和企业长期效益,应将其纳入企业治理体系的核心内容之中。通过将安全绩效与经营绩效协同考量,引导管理层在决策过程中更加重视安全因素,有助于形成“安全即效益”的共识基础。在制度层面,应推动安全管理与企业战略规划、投资决策和技术改造的深度融合,使安全要求贯穿项目全生命周期。在此基础上,通过完善安全责任体系和激励约束机制,强化各层级人员对安全目标的内在认同,促使安全管理由外部约束转化为组织自觉。通过理念更新与制度融合,煤制甲醇生产安全管理才能实现由“被动防范”向“主动引领”的转变,为行业高质量发展提供内生动力。

## 6 结论

煤制甲醇生产过程的安全管理,是一项涉及工艺、设备、人员与组织管理等多维要素的系统工程。本文通过对煤制甲醇生产安全风险特性的系统分析,阐明了安全管理在全过程风险防控中的关键作用。研究表明,只有将安全管理前移至工艺设计阶段,并在装置运行中实现动态控制与持续改进,才能有效应对煤制甲醇生产中风险高度耦合和放大的现实挑战。如今在深化过程安全管理理念的基础上,充分利用信息化与智能化技术,不断提升煤制甲醇生产系统的本质安全水平,为煤化工行业的安全、稳定与可持续发展奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1] 刘浪,武本成,朱建华,等.煤制甲醇合成气中有机氯化物生成反应的热力学分析[J].洁净煤技术,2024,30(S1):104-110. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.23101602.
- [2] 贺树民.粉煤气化耦合绿氢制甲醇过程经济性和减碳研究[J].现代化工,2024,44(9):1-5. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.09.001.
- [3] 雷聪,梁立,倪昂,等.国产深度净化脱硫剂在大型化甲醇合成装置上的工业应用[J].低碳化学与化工,2024,49(4):107-112. DOI:10.12434/j.issn.2097-2547.20230395.
- [4] 叶兆昇.煤制甲醇危险性及安全管控措施探究[J].石化技术,2020,27(1):115-116.
- [5] 叶知远,饶娜,夏菡佑,等.CO<sub>2</sub>加氢制甲醇催化剂与项目进展[J].洁净煤技术,2024,30(8):150-161. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.23030103.

# Comparison of Different Catalysts in Chemical Engineering Experiment of Applied University and Its Application Practice

Boyuan Han Long Tang\*

Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang, 163712, China

## Abstract

Under the “Double First-Class” initiative and new engineering education framework, applied universities are transitioning chemical engineering talent cultivation from theory-centered instruction to a dual emphasis on engineering competencies and innovative literacy. As critical regulators of reaction rates, selectivity, and process energy consumption in chemical engineering, catalyst performance directly determines industrial process technical routes and economic feasibility. This study investigates the application of different catalysts in chemical engineering experiments at applied universities, examining their impacts on reaction conversion rates and product selectivity. Controlled experiments were conducted under the principle of “same reactant, same experimental setup, same evaluation criteria” to assess catalyst effects. Experimental accuracy was enhanced through increased trial repetitions and validation using existing campus teaching platforms. The study ensures controlled variables under safety protocols, strict adherence to experimental procedures for sampling and data processing, thereby establishing a foundation for improved experimental operability and stability.

## Keywords

University Chemical Engineering Experiment; Catalyst; Effect Comparison; Application Analysis

# 应用型大学化工实验中不同催化剂效果比较与应用实践

韩博宇 唐龙\*

大庆师范学院, 中国·黑龙江 大庆 163712

## 摘要

在“双一流”建设与新工科背景下,应用型大学化工人才培养正由以理论传授为中心向以工程能力与创新素养并重的方向转型。催化剂作为化工反应速率、选择性与过程能耗的关键调控要素,其性能差异直接决定了工业过程的技术路线与经济可行性。基于此,本文对应用型大学化工类实验中不同催化剂使用情况进行探索,考察不同类型催化剂对反应转化率及产物选择性的影响。遵循“同一反应物、同一实验装置、同一评价指标”开展对照试验,评价不同催化剂类型对结果的影响。同时增加试验次数提高试验结果的准确性,并联合校内现有的教学平台进行验证,旨在保证安全的前提下控制好变量,严格按照试验规程取样与数据处理,为提升实验操作性与稳定性奠定基础。

## 关键词

大学化工实验; 催化剂; 效果比较; 应用分析

## 1 引言

实验教学是高校应用型人才培养的重要环节,实验教学

【基金项目】应用型大学化工实验教学体系的构建与实践(项目编号: 231006655141348); 产教融合协同育人项目——教学内容与课程体系改革(项目编号: 2023WB00038)。

【作者简介】韩博宇(2004-),男,中国辽宁抚顺人,本科,从事应用化学研究。

【通讯作者】唐龙(1983-),男,中国黑龙江尚志人,博士,教授,从事化学工程与技术研究。

学水平的提高是新时期培养具有创新精神和国际视野的复合型、应用型人才的客观要求。下文围绕不同类型催化剂在典型化学反应中的活性、稳定性与适用场景开展对比性实验与应用化实践,不仅有助于学生建立以数据与机理为依据的工程判断能力,也能有效促进其将基础化学原理与实际工艺问题相衔接,从而更好契合应用型大学对复合型化工技术人才的培养目标。

## 2 应用型大学化工实验中不同催化剂类型

将应用型大学化工实验的催化剂类型进行划分,是为了方便实验操作与实现教学目的,通常按催化剂所处的相态以及催化反应的作用方式为依据进行分类。

一类属均相催化剂,即催化剂与反应物处于同一相中,

常用的有浓硫酸（质子酸）、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ （路易斯酸）及可溶性碱类物质等，其在基本实验或综合实验中运用较为广泛。由于该体系较简单、反应快且易于启动，能够在短时间内完成反应、取样与滴定分析，因此常用来讲解反应速率的变化规律、影响因素等内容。值得注意的是，此部分虽然操作直观，但高腐蚀性、后处理繁琐等问题不容忽视，对废液治理、玻璃仪器提出更高要求<sup>[1]</sup>。

另一种是非均相催化剂，指催化剂和反应物不在同一相上，以固态为主。在应用型大学实验过程中常见的有固体酸树脂、分子筛、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、负载金属催化剂等。该类催化剂采用过滤或者固定床的方法可实现催化剂的回收再利用，适用于教学活动中催化剂重复使用、活性变化及简单失活现象的实验演示，更接近工程实际。但在实验过程中，需要注意颗粒强度、装填均匀度和传质问题对实验结果的影响。

当涉及生物质转化或者精细化工实验模块时，还可以引入生物催化剂（固定化脂肪酶等），这类催化剂反应条件较为温和，相对而言对原料的选择性和耐受性十分友好，可以帮助学生掌握温度、湿度以及底物结构等因素对反应的影响，但它对操作条件非常敏感，同时保存及重复使用的要求也极为严苛，因而更适合作为扩展或是综合类实验开展。

### 3 应用型大学化工实验中不同催化剂效果比较与应用实践

#### 3.1 酯化反应中均相酸催化剂的并行对照设计

设定浓硫酸以及  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  两种并行均相酸催化的乙酸乙酯合成路线，有利于在课堂上更直观地把“看不见的差异”用可实现且相对稳定的步骤予以表现，帮助学生和教师快速判断催化效率高低。首先，规范化的并行对照设计能够有效地培养学生意识到对于同一目的的实验需要考虑变量的可控性。其次，将蒸馏与后处理一同加入比较对象范围，可提升数据可信度。例如，统一蒸馏程序、分段收集馏分并记录蒸馏温度和质量，可以区分出蒸馏损耗以及催化效应；再在此基础上，采用同样的中和、干燥、再蒸馏的操作步骤，排除掉残留酸可能带来的副产物影响。此外，对水分及加料顺序等细节方面进行严格控制，加强实验的可重复性。具体而言，乙醇提前干燥测含水量、滴定用碱液当天现标、同一路径下需做平行实验等措施，这些都可以有效降低数据分散程度。除此之外，对所有的反应釜，均采用先升温回流后添加催化剂的共性措施，尽量避免局部过热情况的发生。针对  $\text{FeCl}_3$  体系，时刻观察记录  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  水解的现象，以比对两种不同催化方式的操作敏感性差异。综合考虑，并行对照试验设计的显著优势体现在不需要复杂的仪器设备，操作简单方便，不仅符合教学要求，还与应用型高校日常化工实验所用到的装置和仪器条件贴合。

#### 3.2 固体酸树脂催化酯化的可回收工艺化实验组织

组织固体酸树脂催化酯化的可回收工艺化实验，在于让

学生在常见教学条件下，把“反应—分离—再用”按工程步骤跑通，且数据能对比、问题能定位。第一，用强酸性阳离子交换树脂替代浓硫酸开展酯化，价值在于把腐蚀、刺激性挥发与废酸处置压力降下来，同时让学生直观看到“催化剂留在床层、产物流出”的分离逻辑。树脂为颗粒固体，可装入玻璃柱或小型管式固定床，固定床用于树脂催化酯化在公开研究中较为常见，便于把实验现象与工程操作对应起来<sup>[2]</sup>。第二，把流程组织成半连续循环更贴近应用型实验室条件：计量泵恒流进料，柱体外套恒温水浴控温，出口接冷凝器与简易闪蒸瓶回收乙醇并回流到进料瓶，这样既降低溶剂消耗，也把“回收率、循环稳定性”变成可测指标。通过调空速、床层温度、循环比三项变量，能够同步记录转化率、单位床体产量、床层压降、加热功率与回收乙醇体积分数，并把采样时间点固定下来，以便不同班组之间复现实验。第三，树脂能否反复利用依靠可溯源评价链路：运行前称量、跑后滴定酸容量，配以洗液电导率、再生液 pH 和冲洗体积记录，来判定是否存在“水垢”“酸损”。再生按：乙醇冲洗—稀酸活化—中性水洗固定顺序进行，并在记录表上标记终点判断，确保每个运行批次的起始条件都是一样的。装填时分层轻振、床顶加装惰性填料整流，运行过程中根据压降突变判断是否结块或者细粉移动，采用 U 形压差计或小型差压传感器测定压降，并对进口/出口温差进行测点，排除局部放热。产物端则采用外标法气相色谱定量测定酯、乙醇及酸含量，每跑完一程都要做物料衡算，若误差值超过所设定范围不仅要追溯冷凝效率和漏点，还要排查取样误差。

#### 3.3 气固催化脱水实验的活性—选择性—失活三维比较

在应用型大学开展管式固定床乙醇脱水实验时，可将 ZSM-5 与  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  放于同一套流程中作“活性—选择性—失活”的三维比较，促使学生将催化剂的差异落到实处，通过可对比的数据来阐明催化剂的不同之处，并非像以往那样仅对比某一时刻的产气量。第一，评价更全面：两种催化剂统一焙烧活化，并且过筛到同一粒径等体积装填，固定乙醇蒸汽分压和载气流速，按照温度与空速分档取点，出口先冷凝除水再进 GC 测乙烯、乙醚与轻烃，得出转化率以及乙烯选择性数值后，可直观地观察到  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  大约是在 410 ~ 440℃ 范围内随温度上升而乙烯选择性逐步上升并趋于稳定的变化。第二，比较更具可比性：利用同一套冷凝系统、同一组冷凝瓶、取样袋、标样以及相同的方法校正气量，结合重复点和碳守恒检查项目，能够最大限度消除冷凝损失、流量漂移、装填不均造成的误差，便于不同班组之间的横向对比，也达到了固定床和气相色谱实验训练学生的规范操作要求<sup>[3]</sup>。第三，失活比更落地：连续运行之后同步记录床层压降、轴向温度以及催化剂增重，用“保持相同转化率的温度补偿值”来表征衰减速率，并用稀氧原位再生再回到原条件点，通过重复测量形成数据循环，且采用图表方式

反映出来,以解释 ZSM-5 的积炭失活过程及再生活性恢复,同时增加 2 个粒径点和含水点的数据结果,分析扩散与水抑制是否影响乙酰副反应。

### 3.4 过氧化氢分解体系的催化剂效应量化比较

在应用型大学的动力学实验中,开展  $H_2O_2$  分解量的  $MnO_2$ 、 $KI$  及  $Fe^{3+}$  三种不同催化体系的定量比较实验,其目的是强调可比、可查及可复用功能。一是保证可比:三组试验均采用同一套试验,保持  $H_2O_2$  初始浓度、总体积、恒温温度及取样间隔相同;开始时分别加入一定量的  $MnO_2$  粉体、定体积  $KI$  溶液、定浓度  $Fe^{3+}$  盐溶液;取样后立即加入定体积稀硫酸冷却,获得所测值后的滴定操作作为碘量法或酸性高锰酸钾法测得残余  $H_2O_2$  的值,做  $\ln(C_t/C_0)-t$  或  $1/C_t-t$  回归求表观  $k$  值,并重复 3 次以上操作取得标准偏差、95% 置信区间。二是通过“浓度法+量气法”互证:即在相同条件下用量气管记录析出氧气体积数值,按物料关系换算成消耗的  $H_2O_2$  数量,并与其对应的滴定结果中  $C_t$  相对照,同时将滴定空白、终止剂加入顺序、终点判断依据、量气管密封性能检验以及读数视差控制等记录到操作卡上,以消除终点过滴或终止不到位引起的数据偏离。第三,针对不同的系统控制误差源: $MnO_2$  固体体系要记好搅拌转速、粉体团聚、过滤分离时间,避免取样滞后、传质受限对  $k$  的影响,并做好水洗后低温烘干再称重工序,排除夹带液体造成的“假失活”; $KI$  体系要避强光,取完样后马上滴定; $Fe^{3+}$  体系要定酸度测  $pH$  值,防止水解产生沉淀造成活性变化。第四,在三档温度下重复上述过程求  $k$ ,做  $\ln k-1/T$  直线得到表观活化能,分别对比三体系的温度敏感性,方便实验教学深入讨论差异原因和工程中不同的选择条件。

### 3.5 油脂转酯制生物柴油的催化体系分层比较与工况窗口确定

在生物质化工实验模块中,以原料酸值为分流依据,先用  $KOH$ -乙醇标准溶液滴定测出酸值,并按教学可执行阈值将低酸油与高酸油分开,低酸油直接进入碱催化转酯,高酸油先进入酸催化预酯化降酸后再转入碱催化段,其中除了产率的记录以外,还应该记录皂化、乳化、分层时间及界面清晰度,确保每批物料都重复操作两次以上,通过批间差值和平均值来表明该项实验的操作稳定性<sup>[4]</sup>。同时引导学生把“酸值高就难分层、易起皂”这一现象与原因关联起来,并说明预酯化后的酸值降低幅度将作为能否进入下一步的准

入条件。其次,碱催化试验需作  $NaOH/KOH$  平行对照实验,除了碱种类、碱的用量不同外,其他条件要写入作业卡内,保持完全一样,即甲醇/油摩尔比、温度、搅拌转速、反应时间等都相同。另外,加入的甲醇要提前脱水密封,反应器、量器等反应装置也需在烘箱内烘干、冷却后再使用,这样有利于防止水分引入而导致的假性误差。待反应完毕后静置分层,测甘油相体积分数、上层甲酯相含水量和残碱量,水洗至洗液电导率稳定后停止,最后减压脱醇干燥,记录好相应的脱醇时间、能耗以及洗液电导率,以便评价后处理负担。为进一步增加可回收催化剂的工程对比对象,可在此基础上将固体碱( $CaO$ )加入上述实验体系中,以相同物料比与反应温度运行,并在反应结束后过滤回收催化剂计算其损失量,连续循环时同步记录甲酯含量衰减、过滤阻力以及分离困难程度,以便与均相碱体系的洗涤用水量、废液处理及操作时间等进行比较。在产品端用气相色谱外标法或  $GC-MS$  计算脂肪酸甲酯含量,同时实测黏度和闪点,通过“甲酯含量达标且黏度、闪点在允许范围”,筛选出合适的温度、碱量及洗涤强度区间,作为可用于教学工况窗表。注意样品留样预备复测酸值和水分,为查证误差来源提供依据。

## 4 结语

根据应用型大学化工实验的教学目标及实际条件,在同一反应体系内比较不同催化剂的循环使用试验,并加以验证,可把抽象的催化差异转换成具有可操作性、可量化、可重现的实验结果。同时不同的催化体系间存在活性、选择性、分离与再用等方面的差异,不仅为学生分析工程取舍问题提供一种全新思路,还实现从实验教学到工程化思维转变的过程。

## 参考文献

- [1] 谢宇,殷祚炘,周丹. 化学工程与技术专业高水平创新应用型研究生人才培养模式的探索与实践[J]. 广东化工, 2024, 51(6):153-155.
- [2] 宋琪,李璟明,努尔古丽·拉提甫,等. 物理化学综合实验设计——双金属磷化物的制备及应用[J]. 化工管理, 2024(34):52-56.
- [3] 陈丽军,刘云花. 镍基气凝胶材料制备、表征及催化甲烷干重整教学过程设计研究(通信作者)[J]. 科研成果与传播, 2024(7):174-179.
- [4] 赵星,李丞高,王丽娜. 新文科背景下天津民办本科高校交叉学科建设路径及治理机制研究[J]. 南方论刊, 2024(5):97-99.

# Key Technologies and Field Applications for Accelerating and Enhancing Efficiency in Drilling Complex Oil and Gas Reservoirs

Xiaolong Liu

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

The widespread challenges in drilling complex oil and gas reservoirs—including low mechanical drilling speeds, prolonged operation cycles, and complex downhole conditions—seriously hinder the smooth progress and realization of efficient development. This study conducted in-depth analysis and exploration of multiple key technical aspects, including high-efficiency rock-breaking technologies and drill bit optimization strategies, wellbore reinforcement methods and working fluid systems, as well as advanced tool development and process optimization. The results not only effectively improved mechanical drilling speeds and shortened operation cycles, reducing the probability of complex situations, but also significantly enhanced drilling efficiency, leading to increased economic benefits.

## Keywords

complex oil and gas reservoir; drilling acceleration; key technologies; integrated application; effectiveness evaluation

## 复杂油气藏钻井提速提效关键技术及现场应用研究

刘晓龙

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

复杂油气藏钻井进程中广泛存在的如机械钻速处于较低水平、作业周期相对较长、井下状况复杂多样等一系列问题, 严重地束缚和阻碍着效益开发的顺利推进与实现。本研究通过对高效破岩技术与钻头优选策略、井筒强化手段与工作液体系、先进工具研发与工艺优化等多个关键技术层面进行深入且细致的剖析与探究, 不仅有效地促使机械钻速得到了提升, 让作业周期得以缩短, 使复杂情况的发生概率降低, 而且显著地提升了钻井效率, 带来了经济效益的增长。

## 关键词

复杂油气藏; 钻井提速; 关键技术; 集成应用; 效果评价

## 1 引言

在全球能源需求如同不断膨胀的气球般持续增长, 且常规油气资源似沙漏中的细沙般日益枯竭的大背景之下, 作为保障能源供给安全关键领域的复杂油气藏勘探开发, 其所涉及的储层, 往往是赋存于那深不可测的深层、超深层地带, 又或者是具备着高温高压、高应力、强研磨性以及窄密度窗口等一系列错综复杂的地质工程特征; 鉴于此, 深入开展研究并且进行集成应用那些具有针对性的钻井提速提效关键技术, 对于攻克钻井工程中如同拦路虎般的难题、降低高企的开发成本、实现复杂油气资源的安全高效动用而言, 不仅有着重大的现实意义, 更有着刻不容缓的紧迫性。

【作者简介】刘晓龙(1981-), 男, 中国甘肃宁县人, 本科, 从事石油工程、钻井现场安全管理研究。

## 2 复杂油气藏钻井提速提效关键技术剖析

### 2.1 高效破岩与钻头优选技术

高效破岩是实现钻井提速的根基, 核心在于实现钻头与地层的最佳匹配。工作始于精细的地层岩石力学特性分析, 利用测井资料反演与室内岩心实验, 精确获取地层的抗压强度、内摩擦角、研磨性等关键参数, 据此计算地层的可钻性级值。针对高研磨性砾岩或石英砂岩地层, 钻头选型侧重于极高的耐磨性与抗冲击韧性, 通常选用具有高密度布齿、高抗研磨性复合片、强化力平衡设计的 PDC 钻头, 其复合片后倾角通常设计在  $15^\circ$  至  $20^\circ$  之间, 以在保证攻击性的前提下获得足够寿命<sup>[1]</sup>。对于频繁出现的软硬交错地层, 钻头设计的关键在于应对剧烈的负载波动, 防止钻头回旋和切削齿崩损, 采用具有差异化后倾角与侧倾角的混合布齿方案成为有效手段, 即在软岩层布设攻击性强的切削齿以实现

快速吃入，在硬夹层布设负前角或具有倒划眼功能的切削齿以增强稳定性，个性化钻头选型推荐结果见表 1。

### 2.2 井筒强化与工作液技术

复杂油气藏钻井中，井筒稳定是提速提效的前提，窄密度窗口与高地层应力使得井壁失稳风险剧增。钻井液技术从传统的“被动防塌”转向“主动强壁”。封堵型钻井液体系通过引入刚性、弹性及柔性等多级粒径封堵材料，在近井壁地带形成致密的低渗透封堵层，有效封堵微裂缝与孔隙，其封堵层承压能力可提升 50% 以上。成膜型钻井液则依赖

特殊聚合物在井壁岩石表面形成一层疏水、致密的半透膜，显著降低钻井液滤液向地层的渗透，抑制泥页岩水化膨胀。工作液的关键性能体现在高切力、低滤失与强抑制性，动塑比维持在 0.3-0.5 Pa/(mPa·s) 有利于岩屑携带，高温高压滤失量需控制在 10 mL 以下以保护储层。当量循环密度的精细控制是核心工艺，通过实时监测与分析井下压力，优化排量、钻柱组合与钻井液流变参数，将 ECD 严格控制在安全窗口内，避免因压力激动诱发漏失或坍塌，核心钻井液性能指标。

表 1 个性化钻头选型推荐表

地层类型	推荐钻头类型	关键设计参数	预期机械钻速提升范围
高研磨性砂岩 / 砾岩	高耐磨性 PDC 钻头	16 mm 高耐磨复合片，布齿密度 $\geq 1.2$ cutter/inch <sup>2</sup> ，20° 后倾角	15%-30%
软硬交错地层（泥岩夹砂岩）	混合布齿 PDC 钻头	13/16 mm 混合布齿，后倾角 10° /20° 组合，深排屑槽	20%-40%
深层硬塑性地层	尖圆齿 / 锥形齿 PDC 钻头	19 mm 尖圆齿 / 锥形齿，攻击性布齿，强化保径结构	25%-50%
易斜地层	强稳斜性 PDC 钻头	低攻击性布齿，短保径，力平衡设计	钻速稳定，防斜效果优

### 2.3 先进工具与工艺技术

先进钻井工具与工艺是实现高效破岩与轨迹精确控制的物理载体，直接决定机械能量向地层的传递效率。旋转导向系统摆脱了传统滑动导向的依赖，实现全旋转状态下的三维井眼轨迹连续控制，其工具面可在地面指令下自动调整，大幅提高了定向钻进效率与长水平段的延伸能力，机械钻速较滑动导向平均提升 40% 以上，且井眼平滑度显著改善，降低了后续作业风险。高性能大功率螺杆钻具提供了更强的井下动力，扭矩输出比常规螺杆提高 30%-50%，配合个性化钻头能够有效应对硬质地层，减少了粘滑震动对钻具的损害。扭冲工具与震荡工具从不同维度解决托压与摩擦阻问题，扭冲工具将钻压转化为高频、均匀的轴向冲击，直接作用于钻头，提升破岩效率；震荡工具则在钻柱上产生周期性轴向振动，有效降低管柱与井壁的静摩擦力，解决水平段长距离钻进中的托压难题，工具应用后平均机械钻速提升可达 15%-25%。

与轨迹控制精度的提升，在定向造斜段及水平段，采用旋转导向系统实现平滑轨迹控制与高钻速钻进，配合高性能螺杆提供稳定动力<sup>[2]</sup>；在长水平段或大位移井，集成应用井下震荡工具以克服摩擦阻，确保有效钻压的传递。

### 3.2 试验井概况与应用过程

选位于某油田某区块的一口重点评价井作为试验井，该井设计井深 5500m 且主要目的层为深部致密砂岩与砂泥岩互层，其地质分层自上而下依次穿越第四系疏松地层、中部巨厚的易塌泥岩段以及下部高研磨性的石英砂岩与硬脆性泥岩互层段而显得复杂；该井的钻井难点极具代表性，上部地层存在浅层气与易漏失风险，中部泥岩段因水化膨胀性强而井壁失稳历史频发，下部目的层岩石可钻性级值高达 7-8 级致使机械钻速极低，且存在窄密度窗口而井下漏溢同层风险高；该试验井设计为三开井身结构，一开是采用  $\Phi 444.5$ mm 钻头钻至 1200m 后下入  $\Phi 339.7$ mm 表层套管，二开为采用  $\Phi 241.3$ mm 钻头钻至 3800m 并下入  $\Phi 193.7$ mm 技术套管封固复杂段，三开则是采用  $\Phi 149.2$ mm 钻头钻至目的层完钻；集成技术的应用集中于二开中下部及整个三开井段，在二开易塌泥岩段（2500 - 3800m）应用了强抑制成膜水基钻井液体系，其核心性能被严格控制为高温高压滤失量  $\leq 8$ mL、动塑比 0.4Pa/(mPa·s)，并配合低转速、大排量钻井参数，有效抑制了井壁坍塌，该段平均井径扩大率仅为 9.5%<sup>[3]</sup>；进入三开高研磨性硬地层（3800 - 5500m）后技术集成应用全面展开，依据随钻测井资料实时优化钻头选型，先后使用针对砂泥岩互层的混合布齿 PDC 钻头和针对纯石英砂岩的 19mm 尖圆齿 PDC 钻头，钻井液转换为高承压封堵体系且密度精确控制在 1.35 - 1.38g/cm<sup>3</sup> 的狭窄窗口内，全程应用旋转导向系统进行轨迹控制，配合大扭矩螺杆和井下扭冲工具，试验井关键地质分层与钻井设计。

## 3 关键技术集成与现场应用方案

### 3.1 技术集成方案设计

技术集成方案设计的核心思路是以地质工程一体化为导向，以实现“一趟钻”或最优进尺为目标，将钻头、钻井液、工具与工艺进行系统性匹配与优化。方案依据岩石可钻性剖面与岩性特征，为不同井段匹配个性化的高效破岩工具，在上部松软地层选用攻击性强的 PDC 钻头以实现快速钻进，在深部硬塑性地层则选用尖圆齿钻头配合高频扭冲工具。钻井液体系的遴选与性能设计紧密围绕井筒稳定核心，在易塌的泥页岩段采用强封堵、强抑制的成膜水基钻井液，在窄密度窗口的裂缝性储层段则转换为随钻封堵能力更强的油基或合成基体系，其密度与流变参数根据实钻的随钻压力监测数据进行动态微调。工具与工艺的集成聚焦于能量传递效率

### 3.3 应用效果对比分析

集成技术于试验井的应用效果借由与采用常规钻井技术的邻井所进行的涵盖多维度指标的详细对比而得以全方位验证,在作为核心评价项的效率指标层面,试验井三开井段处于 3800-5500 m 深度范围的平均机械钻速达成 8.5 m/h 这一数值,该数据与邻井同层段所记录的 5.2 m/h 相比实现了幅度达 63.5% 的提升,且纯钻时效从邻井所呈现的 35% 这一基准值显著提升至试验井的 48%,作为衡量井下复杂程度与工具可靠性之关键指标的起下钻次数,在试验井三开井段因钻头磨损、井下复杂情况所导致的该类作业次数仅为 3 次,反观邻井在同一井段内该数值却达到 9 次,其中有 5 次起下钻作业与井壁坍塌、钻头早期损坏等异常状况存在直接相关性。当聚焦于复杂情况控制维度时,试验井通过应用强化井筒技术,在整个作业周期内未出现任何由井壁失稳问题所引发的卡钻或严重缩径事件,且井下漏失量累计仅为 15 m<sup>3</sup>。

## 4 应用效果综合评价与优化建议

### 4.1 综合效果评价

通过多维度定量评价集成提速提效技术的应用效果全面揭示其产生的综合效益,在技术指标维度核心的机械钻速提升表现得最为突出,其中试验井在三开难钻地层的平均机械钻速达到 8.5 m/h,该数据较邻井常规技术钻速提升 63.5%,这一提升标志着破岩效率实现质的飞跃,而纯钻时效从 35% 提升至 48%,这表明无效的非生产时间被大幅压缩的同时钻井作业的连续性与有序性显著增强;经济指标的分析展现出该技术所具备的巨大成本优势,虽然集成技术中旋转导向、个性化钻头等多项工具或材料成本有所上升,但经综合计算单米钻井成本实现了 18% 的降低,成本降低的核心驱动力源于建井周期的显著缩短,如试验井三开段钻井周期较邻井缩短 12 天;在工程安全与质量指标方面成效同样显著,集成技术将井下复杂时效降低了约 70%,具体体现为起下钻次数从 9 次减少至 3 次、因井壁失稳导致的卡钻事故从 2 次降为 0 次以及钻井液漏失量从超过 150 m<sup>3</sup> 控制到 15 m<sup>3</sup> 以内。

### 4.2 存在问题与优化方向

虽然集成技术所取得的成效是显著的,但现场应用过程中所暴露出来的一些技术局限性与存在的改进空间是亟待解决的,这些为后续的深化研究以及推广指明了方向,在技术适应性这一方面,当前的高速破岩工具以及强化钻井液体系在应对如超过 200° C 的超高温地层这种极端地质条件时仍有不足显现。现有 PDC 钻头复合片的热稳定性会急剧下降,其耐磨性也会显著降低,而在含有大量燧石或者黄铁矿结核的具有极端研磨性的地层里,钻头的磨损速度依旧是过快的,钻井液体系在面对大型开放性裂缝或者异常高压地层之时,其封堵承压能力与密度调节精度是面临着极限挑战的,成本控制方面的压力始终是存在的,像旋转导向服务、高性能油基钻井液等单项技术的成本是高昂的,在低油价的环境之下,这对项目的经济性会构成一定的压力。

## 5 结语

本研究对高效破岩、井筒强化与先进工具等关键技术展开系统剖析,进而形成了那种适用于复杂油气藏的集成化钻井提速提效方案,而且该方案在现场应用过程中其显著成效得到了验证,提供了一套历经实践检验的、能够进行复制推广的技术方法与作业模式,研究不但证明了借助地质工程一体化思路和关键技术协同配合是可以实现安全、效率与经济相统一的,并且所形成的个性化钻头选型方法、钻井液强化井筒工艺以及工具工艺集成策略,提升钻井设计的科学性以及施工的精准性,这对于降低深层及非常规油气资源的开发成本、加速产能释放而言,具有直接的工程应用价值,同时也推动着复杂条件钻井技术从被动应对的状态朝着主动优化的方向不断进步。

### 参考文献

- [1] 曾大乾,张广权,朱思南,等. 复杂油气藏型储气库关键技术及发展方向[J/OL].石油与天然气地质,1-12[2025-12-31].
- [2] 蒋廷学,王敏生. 非常规油气藏复杂储层压裂技术与装备发展现状及趋势[J].石油钻探技术,2025,53(04):1-14.
- [3] 雷刚林,党青宁,段文胜,等. 塔里木盆地沙漠区域超深层复杂油气藏地震勘探关键技术进展[J].天然气工业,2025,45(07):40-49.

# Experimental Study on the Efficient Treatment of Petroleum Wastewater by Fenton Process

Hong Ding

Lanzhou Bowen College of Science and Technology, Lanzhou, Gansu, 730101, China

## Abstract

The Fenton process is characterized by its strong oxidizing property, simple operation, rapid reaction rate, as well as safety and stability. It exhibits excellent treatment performance for high-concentration organic wastewater. In this study, the Fenton oxidation technology was applied to the actual treatment of petroleum wastewater, with the aim of investigating its removal efficiency for pollutants such as chemical oxygen demand (COD). Meanwhile, the effects of key factors including the mass ratio of  $H_2O_2$  to COD, the molar ratio of  $H_2O_2$  to  $Fe^{2+}$ , pH value, and reaction time on the treatment performance were analyzed. The results showed that the optimal conditions for COD removal from petroleum wastewater by the Fenton oxidation process were as follows: a mass ratio of  $H_2O_2$  to COD of 8:1, a molar ratio of  $H_2O_2$  to  $Fe^{2+}$  of 15:1, a pH value of 3, and a reaction time of 3 hours. Under these conditions, the COD removal rate reached 97%. Kinetic analysis indicated that the reaction was more consistent with the BMG kinetic model, with a correlation coefficient ( $R^2$ ) greater than 0.99. It can be concluded that the Fenton oxidation technology has high efficiency and broad application prospects in the removal of COD from petroleum wastewater.

## Keywords

Petroleum Wastewater; Fenton Oxidation Process; COD; Kinetics; Removal

## Fenton 法高效处理石油废水的试验研究

丁红

兰州博文科技学院, 中国·甘肃 兰州 730101

## 摘要

Fenton法具有氧化性强、操作便捷、反应迅速且安全稳定等优点, 对高浓度有机废水有较好的处理效果。将芬顿氧化技术应用在实际石油废水处理中, 探讨其对COD等污染物的去除效能。同时分析了 $H_2O_2$ 和COD的质量比、 $H_2O_2$ 和 $Fe^{2+}$ 摩尔比、pH值以及反应时间等关键因子对处理效果的影响。结果显示: 芬顿氧化法处理石油废水中COD的最佳 $H_2O_2$ 和COD的质量比、 $H_2O_2$ 和 $Fe^{2+}$ 摩尔比、pH和反应时间为8:1、15:1、3、3h时, 此时对COD的去除率达到97%。动力学分析得出该反应更符合BMG动力学模型, 相关系数 $R^2 > 0.99$ 。由此可见芬顿氧化技术在处理石油废水中的COD方面具有较高的效能和广阔的应用前景。

## 关键词

石油废水; Fenton氧化法; COD; 动力学; 去除

## 1 引言

随着世界经济的发展, 石油化工行业中石油废水排放量急剧增加, 这类废水成分复杂, 具有COD浓度高、毒性强、生物降解性差等特点, 若未经处理直接排放, 石油废水会对水体生态系统结构与功能造成不可逆的破坏, 同时还会对人类健康构成严重威胁。目前, 石油废水主流处理技术

主要涵盖生物降解法、吸附分离法及絮凝沉淀法等。其中生物法对高浓度难降解有机物的去除效率较低, 且处理周期长; 吸附法虽能有效去除部分污染物, 但吸附剂的再生和后续处理问题突出, 易造成二次污染; 絮凝沉淀法仅能去除悬浮态有机物, 对溶解性污染物的处理效果有限, 以上三种都存在显著弊端。高级氧化技术因能快速生成强氧化性的自由基, 从而将有机物的矿化, 所以它成为处理高浓度有机废水的研究热点。

Fenton 氧化法作为典型的高级氧化技术, 以 $Fe^{2+}$ 为催化剂、 $H_2O_2$ 为氧化剂, 在酸性条件下生成具有强氧化活性的羟基自由基( $\cdot OH$ ), 可高效降解多种有机污染物。本研究针对实际石油废水, 系统考查了芬顿氧化过程中 $H_2O_2$ 和COD的质量比、 $H_2O_2$ 和 $Fe^{2+}$ 摩尔比、pH和反应时间等关

【基金项目】甘肃省 2024 教育厅创新基金项目“生态文明建设背景下 Fenton 法深度处理石油有机废水的试验研究——以甘肃地区为例”(项目编号: 2024B-234)。

【作者简介】丁红(1988-), 女, 中国甘肃兰州人, 硕士, 副教授, 从事水处理技术研究。

键参数对石油废水中 COD 降解效果的影响，为 COD 等有机物的高效去除提供了科学依据和技术支持。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验用水

实验水样为石油废水取自兰州市某石化厂废水，该废水水质特征如表 1 所示。通过气相色谱分析，确定水样中主要污染物包括苯胺、双季戊四醇、萘等，其中苯胺为主要 COD 贡献组分，见图 1 和表 2。

### 2.2 仪器和药剂

#### 2.2.1 实验药剂

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%, 分析纯)、FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (分析纯)、盐酸(30%, 分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、COD 专用消解试剂，实

验用水为超纯水。

#### 2.2.2 实验仪器

紫外-可见分光光度计、pH 计、气相色谱仪、恒温搅拌机、COD 快速消解测定仪、电子天平。

### 2.3 降解实验

取 100mL 水样于 250mL 烧杯中，用 HCl 与 NaOH 调节 pH 至设定值，投加一定量的 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O，在 300r/min 下搅拌 10min 使其充分溶解，按设定的 n(Fe<sup>2+</sup>): n(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 投加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%)，在 200r/min 下反应一定时间后，静置 30min，取上清液测定 COD 浓度，每个实验重复 3 次，取平均值。通过实验确定最佳反应条件，并在最佳反应条件下对石油废水进行处理。

表 1 废水水质特征

pH	悬浮物 (mg/L)	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总铁 (mg/L)	浊度 (NTU)	电导率 μS/cm
9-10	5-6	820-850	34-40	0.3	3	145

表 2 试验用成品水中 COD 主要组分成分分析

序号	名称	分子式	相对分子量	出峰时间 (min)
4	苯胺	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93	9.3
5	双季戊四醇	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> O <sub>7</sub>	254	12.5
7	萘	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128	15.8

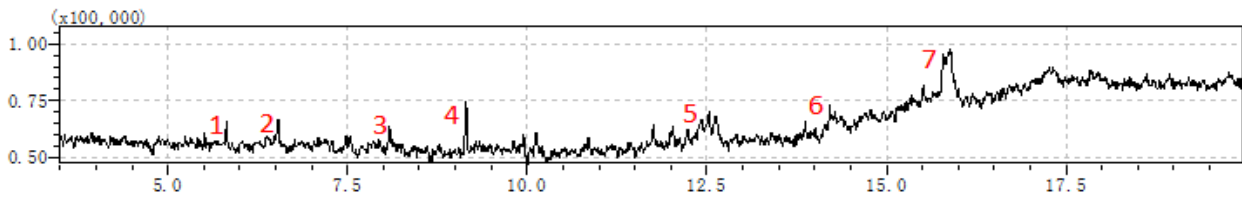


图 1 试验用成品水的气相色谱图

表 3 降解实验设计

影响因素	实验设计
mH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : mCOD 质量比	0.5: 1、1: 1、2: 1、3: 1、4: 1、6: 1、8: 1
反应时间	1.5、2、3、4、6、8
n(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ):n(Fe <sup>2+</sup> ) 摩尔比	5: 1、10: 1、15: 1、20: 1、40: 1
pH	1、2、3、4、5、6

### 2.4 去除率的计算

通过下面的公式来计算废水中 COD 的去除率：

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100\% \quad (1)$$

C<sub>0</sub>- 原水中的 COD 浓度，mg/L；

C<sub>t</sub>- 处理时间 t (min) 时处理水中的 COD 浓度，mg/L；

### 2.5 动力学分析<sup>[1]</sup>

对测定的 COD 进行降解动力学分析，分别经一级反应动力学 [式 (2)]、二级反应动力学 [式 (3)] 以及 Behnajady-Modirshahla-Ghanbary (BMG) 提出的动力学模型 [式 (4)]

线性拟合。

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_1 t \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0} = k_2 t \quad (3)$$

$$\frac{t}{1 - \frac{C_t}{C_0}} = m + bt \quad (4)$$

C<sub>t</sub>- 反应 t 时刻处理水的 COD 的浓度，mg/L；

C<sub>0</sub>- 原水 COD 的浓度 (t=0min)，mg/L；

k<sub>1</sub>- 一级反应速率常数，min<sup>-1</sup>；

$k_2$ - 二级反应速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;

$m, b$  分别为 BMG 模型的两个常数。(  $1/m$  可以表示反应的初始降解速率, 该值越高表明初始降解速率越快;  $1/b$  可以表示理论上污染物的最大去除效率 )。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 $\text{H}_2\text{O}_2$ 与 COD 的质量比对 COD 去除效果的影响

控制  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  为 5:1、 $\text{pH}$  为 3、反应时间为 3h, 探究  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  质量比对 COD 去除效果的影响, 结果如图 2 所示。COD 的去除率随着  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  质量比的增加而增加, 当质量比为 6:1 时, COD 的去除率为 87.5%; 继续增加  $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量至 8:1, 去除率仅提升至 89.0%。随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量增加, 体系中生成的  $\cdot\text{OH}$  增多, 促进了有机物的降解; 但过量的  $\text{H}_2\text{O}_2$  会发生自分解反应 ( $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ), 同时  $\cdot\text{OH}$  猝灭 ( $\cdot\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2\cdot$ ), 导致去除率增长趋缓<sup>[2]</sup>。

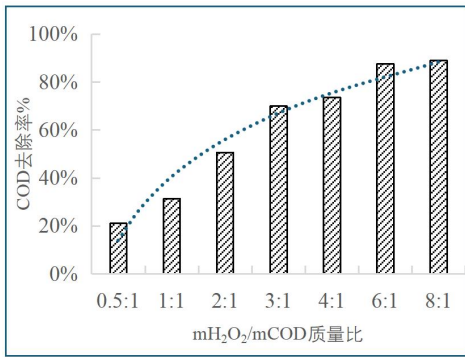


图 2  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  摩尔比对 COD 去除效果的影响

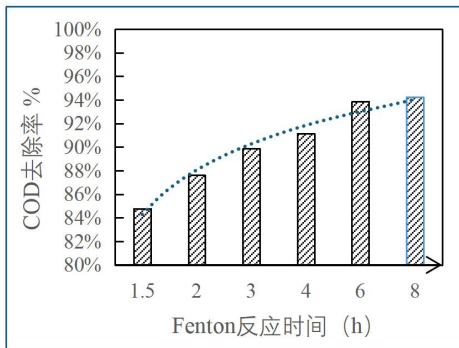


图 3 反应时间对 COD 去除效果的影响

#### 3.2 反应时间对 COD 去除效果的影响

控制  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  为 6:1、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})=10:1$ ,  $\text{pH}=3$ , 探究反应时间对 COD 去除效果的影响, 结果如图 3 所示。反应前 3h, COD 去除率快速升高, 从 1.5h 的 85% 升至 3h 的 90%; 3~8h 之间去除率增长缓慢, 8h 时达到 94%。这是因为反应初期体系中  $\cdot\text{OH}$  浓度高, 有机物快速降解; 随着反应进行, 有机物浓度降低,  $\cdot\text{OH}$  生成速率减慢, 降解反应逐渐达到平衡。

#### 3.3 $\text{H}_2\text{O}_2$ 与 $\text{Fe}^{2+}$ 的摩尔比对 COD 去除效果的影响

分别控制  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  为 6:1 和 8:1, 反应时间为 3h,  $\text{pH}=3$ , 探究  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的摩尔比对 COD 去除效果的影响, 结果如图 4 所示。当  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的摩尔比为 15:1、 $\text{H}_2\text{O}_2$  与 COD 的质量比分别为 6:1 和 8:1 时, COD 的去除率分别为 94%、97%; 当摩尔比超过 20:1 时, 去除率逐渐下降。随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的摩尔比的提高, 系统内的寄生反应增强, 可能会限制系统氧化效能的提升。初期随着  $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  的摩尔比的增加可加快有机物氧化, COD 的去除效果显著增加; 当摩尔比超过 20:1 时,  $\text{Fe}^{2+}$  浓度过低,  $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量过高会引起  $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\cdot\text{OH} = 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2\cdot$  和  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} = \text{Fe}^{3+} + \text{OH}\cdot$ , 从而使最初产生的  $\cdot\text{OH}$  消耗掉, 部分  $\text{H}_2\text{O}_2$  无效分解, 最终导致 COD 去除率不增反降<sup>[3]</sup>。

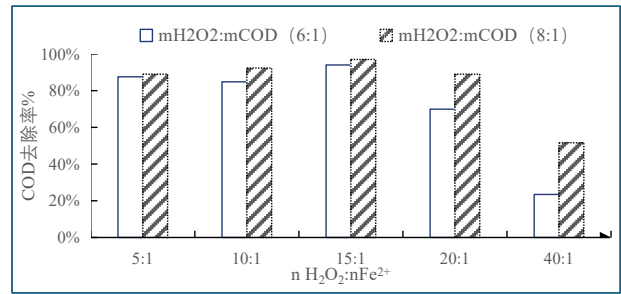


图 4  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  对 COD 去除效果的影响

#### 3.4 $\text{pH}$ 对 COD 去除效果的影响

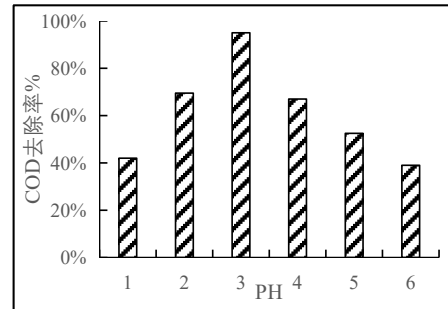


图 5  $\text{pH}$  对 COD 去除效果的影响

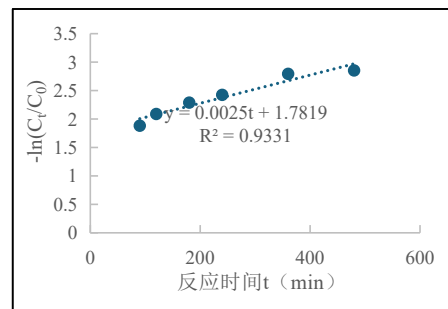


图 6 一级动力学拟合图

控制  $m(\text{H}_2\text{O}_2):m(\text{COD})$  为 6:1、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  为 15:1、反应时间 3h, 探究  $\text{pH}$  对 COD 去除率的影响, 结果如图 5 所示。 $\text{pH}=3$  时, COD 去除率最高为 95%;  $\text{pH}<3$  或  $\text{pH}>3$

时,去除率均显著下降。因为酸性条件下,Fe<sup>2+</sup>能有效催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>分解产生·OH;但在pH<3的强酸性环境中,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>与Fe<sup>2+</sup>易形成稳定的络合物,降低催化剂活性,减少·OH的生成,削弱系统的氧化能力。当pH>3时,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>会稳定转化为O<sub>2</sub>,同时Fe<sup>2+</sup>易生成氢氧化物沉淀失去催化活性,从而导致芬顿氧化反应效率下降<sup>[3]</sup>。

### 3.5 降解动力学分析

如图6、图7、图8所示,在COD降解动力学拟合中,1、2级反应动力学相关系数R<sup>2</sup>分别为0.9331和0.9641,对于实验数据的拟合效果如BMG模型的拟合效果,其R<sup>2</sup>为0.9999,表明本实验中石油废水的降解动力学符合BMG动力学模型,1/b值为0.969,与实验得出的COD去除率97%接近。

表4 Fenton 反应动力学参数

	K	R <sup>2</sup>
一级动力学参数	0.0025	0.9331
二级动力学参数	3*10 <sup>-5</sup>	0.9641
BMG 动力学参数	1.0315	0.9999

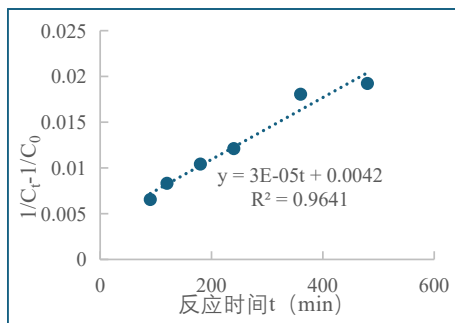


图7 二级动力学拟合图

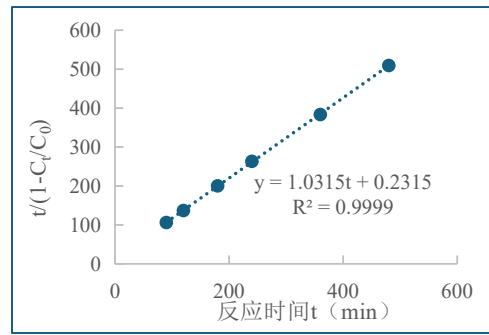


图8 BMG 动力学拟合

## 4 结论

(1) 本研究采用Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体系降解石油废水,其最佳反应条件为m(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>):m(COD)=8:1、n(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>):n(Fe<sup>2+</sup>)=15:1、pH=3、反应时间=3h时,COD去除率可达97%。

(2) 反应动力学分析中,反应能够在90min内完成降解反应的85%,符合Fenton试剂反应快的特点。线性拟合中,二级反应动力学的相关系数较一级反应动力学高,BMG动力学模型对Fenton法高效处理石油废水能较好地拟合,其中COD动力学拟合相关系数R<sup>2</sup>达到0.9999,反应过程整体更符合BMG动力学模型。

### 参考文献

- [1] 张全碧,羊依金,郭旭晶.芬顿氧化法对利福平制药废水中溶解性有机物的催化降解[J].化工学报,2023,74(05):2217-2227.
- [2] 丁红,高雅彬,武福平,等.电芬顿处理垃圾渗滤液中可吸附有机卤化物的效能研究[J].给水排水,2025,61(04):63-70.
- [3] 梁鸿霞,李涛.Fenton法处理化学实验室有机废水[J].四川冶金,2023,45(03):5-9.

# Study on the Resource Utilization of Plant Asphalt from the Residual Liquid of Coarse Biodiesel Distillation

Wulian Liu

Fujian Libang Bioenergy Technology Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350004, China

## Abstract

With the rapid development of the biodiesel industry, the production of plant pitch—a distillation residue from crude biodiesel—has been increasing. As a complex organic mixture, plant pitch contains multiple reusable components. However, it is currently predominantly burned as low-quality fuel oil, resulting in extremely low resource utilization rates. This paper reviews the chemical composition characteristics of plant pitch, analyzes the limitations of existing resource utilization technologies, and introduces a novel “one-step” process based on the DYD catalyst. This process efficiently converts plant pitch into biodiesel and biomass fuel oil, offering significant economic and environmental benefits. The study demonstrates that the resource utilization of plant pitch not only reduces environmental pollution but also lowers raw material costs for biodiesel production, providing new insights for the sustainable development of the biodiesel industry.

## Keywords

Plant asphalt; Biodiesel; Resource utilization; DYD catalyst; One-step process

## 粗生物柴油精馏残液植物沥青资源化利用研究

刘五连

福建励帮生物能源科技有限公司, 中国·福建福州 350004

## 摘要

随着生物柴油产业的快速发展,粗生物柴油精馏残液——植物沥青的产生量不断增加。植物沥青作为一种复杂的有机混合物,含有多种可再利用的成分。然而,目前植物沥青多被当作劣质燃料油烧掉,资源化利用率极低。本文综述了植物沥青的化学组成特性,分析了现有资源化利用技术的不足,并重点介绍了一种基于DYD催化剂的“一步法”新工艺。该工艺能够将植物沥青高效转化为生物柴油和生物质燃料油,具有显著的经济和环境效益。研究表明,植物沥青的资源化利用不仅能够减少环境污染,还能降低生物柴油生产的原料成本,为生物柴油产业的可持续发展提供新的思路。

## 关键词

植物沥青; 生物柴油; 资源化利用; DYD催化剂; “一步法”工艺

## 1 引言

生物柴油作为一种可再生的清洁能源,近年来受到广泛关注。然而,生物柴油生产过程中会产生大量的副产品,其中植物沥青是主要的精馏残液之一。植物沥青的主要成分包括脂肪酸、甲酯、胶质和碳化物等,具有较高的热值和复杂的化学结构。传统上,植物沥青多被当作劣质燃料油烧掉,不仅浪费资源,还可能对环境造成污染。因此,如何实现植物沥青的资源化利用,已成为生物柴油产业亟待解决的问题。本文将探讨植物沥青的化学组成特性、现有资源化利用技术及其不足,并介绍一种新的“一步法”工艺,以期植物沥青的高效利用提供参考<sup>[1]</sup>。

## 2 植物沥青资源丰富

2000年我国兴起以地沟油生产生物柴油,先后建成235个生产企业,形成绿色可再生新能源行业。据2021年统计,我国生物柴油产能达到300万吨/年,产量达到200万吨。以地沟油合成粗生物柴油后要经过减压精馏,在精馏工序每100吨粗甲酯只能得到85吨精甲酯,精馏残液高达10~15%,每年产量约35万吨。

尚有油酸行业粗油酸精馏产出油酸残液——油酸沥青,每年产生量约10万吨左右。脂肪酸甲酯加氢生产脂肪酸醇,其精馏工序残液——植物沥青约每年6万吨。初步估计国内植物沥青资源每年不低于50万吨。目前只当劣质重质燃料油烧掉<sup>[2]</sup>。

## 3 对植物沥青化学成份研究

植物沥青以植物油经加工成各种化学品后用导热油加

【作者简介】刘五连(1981-),女,中国福建龙岩人,工程师,从事生物质新能源研究。

热到 280~300℃, 使其中化学品(脂肪酸甲酯、油酸、或脂肪酸醇)在高真空下气化精馏, 残留在蒸馏釜或再沸器底部不被蒸出的残液即为植物沥青。

植物沥青经高温加热灼黑、碳化, 所以外观为黑色粘稠, 含碳化物、胶质。高温加热过程, 油酸、脂肪酸甲酯会产生氢键键合作用; 油酸精馏氢键键合作用更明显, 在残压 10mm 汞柱下, 油酸沸点与相应的甲酯沸点高 30℃. 同时精馏过程都会出现“聚合油”残留在植物沥青中<sup>[3]</sup>。

植物油中固醇、蜡质、糖分、蛋白、磷脂以及机械杂质都会留在植物沥青中。

植物油加工成粗脂肪酸甲酯, 以及植物油水解成油酸, 工艺过程使用酸碱, 最终转化成芒硝或皂角, 也都会留在植物沥青中<sup>[4]</sup>。由此认为: “植物沥青成分复杂, 是资源化再利用的难题”。

对酸值 AV=14.10mgKOH/g 生物柴油植物沥青; 与酸值 AV=50mgKOH/g 油酸植物沥青为原料进行以下试验:

试验一:

取生物柴油植物沥青样品 300g, 置于 500ml 单口圆底烧瓶中, 配上蒸馏头与温度计; 并配上玻璃直型冷凝器, 接收用 500ml 烧杯, 电炉加热, 高温常压蒸出。



收得蒸出物 238.8 克, 占样品生物柴油植物沥青 79.6%, 从而得悉样品生物柴油植物沥青中高温碳化物、机械杂质占 20.4%。

经对蒸出物成份分析得知: 油脂占 36.2%; 油酸 2.79%; 甲酯 40.17%。

油酸植物沥青也同样进行高温常压裂化蒸馏。其蒸出物占样品 80~81%。

试验二:

取生物柴油植物沥青样品进行皂化值测定, 其总皂化值达到 171.9mgKOH/g; 油酸植物沥青样品总皂化值达到 174.6mgKOH/g。

纯没酸(十八碳酸)其皂化值为 190~205mgKOH/g。假设生物柴油植物沥青皂化值以十八碳酸粗略折算, 其含

量为:

油酸植物沥青皂化值以十八碳酸折算, 其含量为:

试验三:

植物沥青物性测定:

序号	技术指标名称	计算单位	测定结果	备注
1	运动粘度 50℃	Mm <sup>2</sup> /s	30~40	
2	倾点	℃	35~40	
3	灰分	%	0.6	
4	密度	Kg/m <sup>3</sup>	920	
5	热值	大卡/公斤	9550	
6	金属镍含量	ppm	1200	

植物沥青化学成分判定:

经对植物沥青高温蒸馏, 并对蒸出物成分鉴定; 皂化值测定; 以及物性测定, 初步推测得生物柴油与油酸植物沥青化学组分如下:

可转化成生物柴油组分	不可转化成生物柴油组分	备注
1、残留在植物沥青中高碳甲酯及脂肪酸三甘酯	1、胶质、碳化物	
2、游离脂肪酸	2、树脂酸	
3、聚合成甲酯、二聚油酸	3、芒硝	
4、磷脂、脂肪酸皂	4、机械杂质	
小计: 80~82%	小计: 18~20%	

## 4 国内研究“植物沥青”资源化利用的发明专利

### 4.1 CN101016466A 《一种用植物沥青制取生物柴油的方法》发明专利

植物沥青→甲酯化(仅油酸酯化)→水洗→真空脱水→粗甲酯→减压精馏→甲酯

该法仅利用植物沥青中游离脂肪酸, 产率低。

### 4.2 CN104232324.A 《一种用植物沥青制取生物柴油的工艺方法》发明专利

甲醇 浓硫酸 水(逆流洗涤)  
植物沥青酯化反应器(仅油酸酯化)→沉淀分离器→粗甲酯→减压精馏→生物柴油

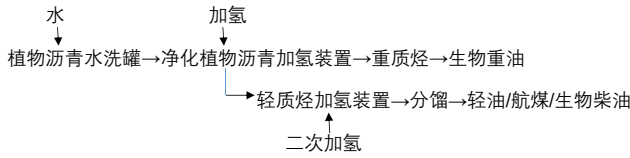
该法仅利用植物沥青中游离脂肪酸, 产率底。

### 4.3 CN203820745.U 《一种生产生物柴油下脚料植物沥青再处理装置》实用新型专利

甲醇钠 甲醇  
植物沥青再处理反应罐(仅油脂酯交换)→粗甲酯→减压精馏→生物柴油  
甘油水

该法仅使用植物沥青中脂肪酸三甘酯, 产率不高。

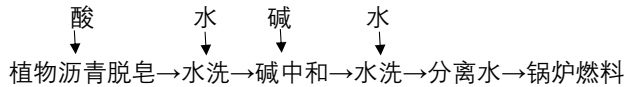
#### 4.4 CN112552947.A《一种植物沥青加氢生产生物柴油的加工方法》发明专利



植物沥青杂质多,仅水洗难以净化。二次加氢难度更大。

该工艺难以工业化。

#### 4.5 CN101381610A《将植物沥青变为优质锅炉燃料的方法》发明专利



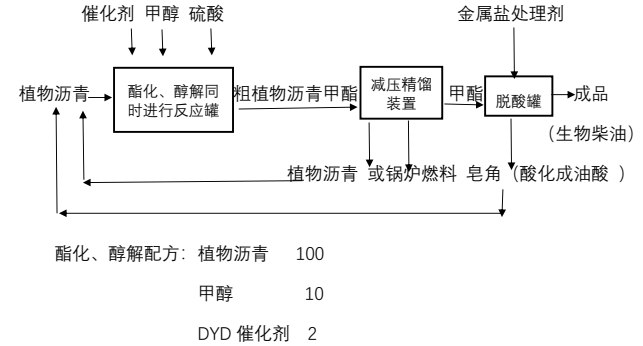
该法经酸洗脱皂,水洗除盐,植物沥青粘度下降,可作生物质锅炉燃料油。但此法资源仍然没有得到很好利用,经济附加值不高。

据调研,目前国内外尚未将植物沥青为原料开拓其资源化利用先例。

### 5 以植物沥青为原料

采用 DYD 催化剂作用下实现甲醇与油酸酯化;油脂酯交换;聚合态二聚酸解聚酯化;磷脂、脂肪酸皂水解酯化同时进行的“一步法”新工艺

#### 5.1 植物沥青用“一步法”甲酯化工艺流程



注: DYD 催化剂: 由固体酸与固体碱复配而成; 固体酸是多组元  $SO_4^{2-}/M_xO_y$  型、 $SO_4^{2-}/TiO_2-SnO_2$ ; 固体碱是含量 98.5%MgO。固体酸与固体碱质量比 1: 2 混合成白色粉末。

#### 5.2 植物沥青为原料“一步法”生产生物柴油生产实例见下表。

批号	生产配方			反应条件		成品得率		
	植物沥青 kg	甲醇 kg	催化剂 kg	时间 /h	温度 /℃	生物柴油 kg	生物燃料油 kg	累计
1	1000	150	20	8	75~105	550	180	730
2	1000	150	25	10	75~110	620	160	780
3	1000	170	30	13	75~100	630	100	730

### 6 研究结论

本研究提出基于 DYD 催化剂(固体酸与固体碱按 1:2 复配)的“一步法”工艺,实现甲醇与油酸酯化、油脂酯交换、聚合态二聚酸解聚酯化、磷脂及脂肪酸皂水解酯化的同步进行,突破传统技术仅利用单一组分的局限,成为国内外唯一能高效转化植物沥青 80%~82% 可利用组分的资源化技术,填补行业空白。当前地沟油原料供应紧张且价格居高不下,该工艺可充分利用植物沥青中的有效组分,有效降低生物柴油生产的原料依赖与采购成本。同时还能减少环境污染。实现经济与环境效益双赢,产出的生物柴油及生物质燃料油(热值 9550 大卡/公斤)具备良好市场应用价值;同时避免植物沥青焚烧带来的环境污染,达成“变废为宝”的资源循环利用。

该工艺反应条件温和(温度 75~110℃、常压为主),

所用设备为化工行业常规装置, DYD 催化剂配方明确、易制备,副产物可进一步回收,流程简洁且成本可控,适配规模化推广。该研究破解了生物柴油及油酸产业的精馏残液处置难题,延伸生物质产业链条,提升行业整体资源利用率,为生物柴油产业可持续发展提供新路径,对推动我国可再生能源产业升级、降低化石能源依赖具有重要现实价值。

#### 参考文献

- [1] 刘启征. 生物柴油-裂解蜡温拌再生沥青及其混合料性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.
- [2] 李永翔,米世忠,李军. 微波敏感型沥青再生剂再生性能及机理[J]. 建筑材料学报.2021,(1).
- [3] 肖庆一,赵鹏,孙博伟,等. 废植物油再生沥青结合料性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版).2021,(6).
- [4] 雷俊安,郑南翔,许新权,等. 温拌沥青高温流变性能研究[J]. 建筑材料学报.2020,(4).

# Study on Low Temperature Corrosion of Conventional and Vacuum Distillation for Low Quality Crude Oil and System Control Strategy

Dewei Tan

China Petrochemical Co., Ltd. Jinling Branch, Nanjing, Jiangsu, 210033, China

## Abstract

As the crude oil processed by refineries becomes increasingly high in sulfur and acidity, the low-temperature corrosion problem in atmospheric and vacuum distillation units has become more prominent during operation. In particular, the HCl-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O-type corrosion caused by the combined effects of hydrogen chloride, hydrogen sulfide, and water vapor in the tower top system has become a key factor affecting the long-term safe operation of the unit. This paper combines practical operational cases with standards such as the “China Petrochemical Refining Process Anti-Corrosion Management Measures” to analyze the mechanisms, influencing factors, and typical issues of low-temperature corrosion in atmospheric and vacuum distillation units under conditions of processing inferior crude oil. The study shows that insufficient efficiency of the electro-deionization system, improper control of the tower top temperature, structural defects in the tower top condensation system, and ammonium salt deposition can all lead to aggravated corrosion. To address these issues, multidimensional prevention and control strategies such as process optimization, material corrosion protection, online monitoring, and chemical injection are proposed to establish a systematic anti-corrosion system, providing technical support for the stable operation of refining units.

## Keywords

inferior crude oil; atmospheric and vacuum distillation; low-temperature corrosion; corrosion protection system; process optimization

## 面向劣质原油的常减压蒸馏低温腐蚀问题与系统防控策略研究

谈德伟

中国石油化工股份有限公司金陵分公司, 中国·江苏·南京 210033

## 摘要

随着炼油企业加工的原油向高硫、高酸化发展, 常减压蒸馏装置在运行过程中低温腐蚀问题愈加突出, 尤其是塔顶系统的氯化氢、硫化氢与水汽共同作用下的HCl-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O型腐蚀已成为影响装置长周期安全运行的关键因素。本文结合实际运行案例与《中国石化炼油工艺防腐蚀管理办法》等标准, 分析了劣质原油加工条件下常减压蒸馏装置低温腐蚀的机理、影响因素及典型问题。研究表明, 电脱盐系统效率不足、塔顶温度控制不当、塔顶冷凝系统结构缺陷及铵盐沉积均会导致腐蚀加剧。针对这些问题, 提出工艺优化、材料防腐、在线监测及药剂注入等多维防控策略, 构建系统性防腐蚀体系, 为炼油装置的稳定运行提供技术支持。

## 关键词

劣质原油; 常减压蒸馏; 低温腐蚀; 防腐体系; 工艺优化

## 1 引言

常减压蒸馏装置作为炼油流程的首要工段, 直接关系到全厂生产的稳定性与安全性。随着高酸、高硫、含氯原油加工比例不断上升, 设备腐蚀特别是低温部位的腐蚀问题成为制约装置长周期运行的核心难题。低温腐蚀往往集中在初馏塔、常压塔及减压塔的塔顶和挥发线系统, 由氯化氢、硫

化氢与水汽形成的酸性冷凝液引起。长期运行中, 腐蚀造成的泄漏、结垢与堵塞不仅威胁设备安全, 还直接影响产品质量与经济效益。本文基于现行防腐蚀管理规范与典型装置运行数据, 系统研究低温腐蚀的形成机理与控制思路, 提出一套针对劣质原油特性的综合防控策略, 以指导炼厂的技术改造与运维实践。

【作者简介】谈德伟(1997-), 男, 中国安徽马鞍山人,

本科, 助理工程师, 从事石油化工工艺研究。

## 2 劣质原油加工条件下常减压装置低温腐蚀机理分析

### 2.1 腐蚀的化学机制与工艺特征

常减压蒸馏装置的低温腐蚀过程具有明显的化学、电化学的复合特性，其核心机理源于氯化氢、硫化氢与水蒸气在塔顶系统中的协同作用。 $\text{HCl-H}_2\text{S-H}_2\text{O}$ 型腐蚀通常发生在冷凝温度区间内，当高温蒸汽中氯化氢气体冷凝为酸液时，会在金属表面形成高浓度的氯离子环境，造成强烈的电化学腐蚀。硫化氢的溶解会进一步降低溶液 pH 并生成弱电解质，加剧金属离子迁移，使局部腐蚀加速。 $\text{Cl}^-$ 离子对金属晶界的穿透作用尤为显著，易诱发晶间腐蚀及应力腐蚀裂纹，造成结构性破坏。此外，塔顶区常因温差较大而产生 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 等盐类结晶，这些盐类吸湿性强，在表面形成酸性液膜后导致垢下腐蚀。该类腐蚀呈点蚀与缝隙蚀交互特征，往往发展迅速且隐蔽性高，对塔盘、回流管及空冷器弯头等部位威胁最大。

### 2.2 劣质原油特性与腐蚀风险增强

近年来炼油行业加工的原油逐渐向高酸、高硫方向转变，劣质原油的复杂组分成为低温腐蚀频发的重要诱因。此类原油中含有较高比例的无机氯化物、有机酸及硫化物，在常减压加热和分馏过程中易生成 $\text{HCl}$ 与 $\text{H}_2\text{S}$ 。若前端脱盐不彻底，残留的氯化钠和氯化镁在高温下水解为氯化氢气体并随蒸汽进入塔顶系统，当遇冷凝后形成酸液，从而加速金属腐蚀，对含残余应力的奥氏体不锈钢还会诱发应力腐蚀开裂。有研究与实测数据表明，脱盐后原油含盐量若超过 $5\text{mgNaCl/L}$ ，塔顶部位的腐蚀速率将成倍提升。

## 3 常减压系统中典型低温腐蚀问题分析

### 3.1 电脱盐效率不足导致盐分积聚

常减压蒸馏系统中，电脱盐单元是防控低温腐蚀的关键前端环节，其运行效率直接决定了进入塔系的原油含盐量。电脱盐的核心在于通过电场促使油水分离，从而去除原油中的氯化钠、氯化镁等无机盐及杂质。然而在长期运行中，因原油黏度增加、油泥沉积与电极老化等因素，常出现油水界面漂移、送电差、排水带油、脱水不彻底等现象，导致脱盐效果下降。某常减压装置运行后期，脱盐罐频繁跳闸，排水带油，检修发现油泥堆积至人孔，有效容积与水滴沉降时间不足设计值 50%，脱后原油盐含量多次超标。含盐原油进入初馏、常压单元后，会在高温蒸馏过程中生成 $\text{HCl}$ ，冷凝至塔顶形成酸液，加剧设备腐蚀。油泥层厚度过高，会削弱电场强度，进一步影响脱盐性能。因此，必须定期执行脱盐罐反冲洗操作，清理脱盐罐油泥，保证脱盐罐的有效容积及原油在电场中停留的时间，确保脱盐后原油含盐量低于 $3\text{mgNaCl/L}$ ，从源头抑制塔顶低温腐蚀。

### 3.2 塔顶系统铵盐结晶与堵塞

常压塔顶系统中普遍存在铵盐沉积现象，尤其是

$\text{NH}_4\text{Cl}$ 和 $\text{NH}_4\text{HS}$ 在冷凝段和空冷入口处的结晶堵塞问题最为严重。此类盐类在冷凝过程中易在弯头、回流管及冷却器内壁形成结垢层，当气流通过受阻时会引发压降升高及流体偏流，进一步加剧局部腐蚀。铵盐具有较强的吸湿性，其在吸水后会生成高浓度酸性液体，腐蚀速度显著高于干盐沉积状态。实践表明，塔顶结盐不仅缩小气相通道，还导致流体分布不均，从而出现塔顶温差异常及回流液局部富酸现象。部分炼厂通过新增塔顶注水系统与雾化喷头装置，改善了盐类沉积分布，使铵盐得以稀释和冲洗，显著降低垢下腐蚀发生率。优化中和剂和缓蚀剂的注入位置与浓度，可进一步稳定塔顶 pH 环境，实现防腐与防堵协同控制。



图 2 某常减压装置空冷入口管线铵盐结晶情况

### 3.3 塔体与管线结构性腐蚀隐患

常减压塔体及其相关管线因长期处于复杂热应力与腐蚀介质环境中，极易发生结构性腐蚀失效。现场检测表明，常压塔缩径段及顶部焊缝区域多出现晶间腐蚀、减薄及局部穿孔，其根本原因在于冷凝酸液沿焊缝聚集并滞留，形成高浓度腐蚀环境。塔顶换热器和空冷器的弯头处为流体冲刷与相变频繁区域，局部湍流强化腐蚀速率，腐蚀速率较直管段更高。为降低风险，应在高应力区采用耐蚀复合材料或双相钢，加强热应力消除处理，并建立周期性超声测厚与红外检测制度。

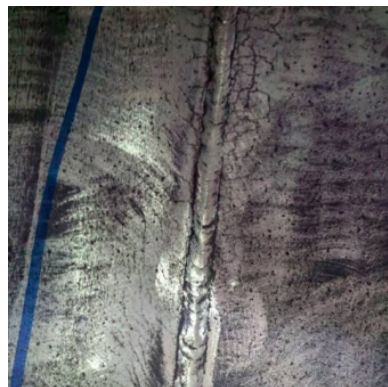


图 3 某常压塔上部低温段塔壁腐蚀情况

## 4 低温腐蚀的综合防控设计与技术路径

### 4.1 工艺流程优化与操作参数控制

常减压蒸馏塔顶系统的防腐核心在于优化工艺流程与精准控制操作参数。针对 HCl-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O 体系形成的低温腐蚀,应从热力学和流体力学角度重构塔顶冷凝回流结构。采用两段冷凝、分级回流的设计,可将第一段返塔温度稳定在 90℃ 左右,从而减少酸性冷凝液的生成,避免塔盘及塔壁处的局部冷凝腐蚀。同时,通过优化常顶循环抽取与返回层位,如由 44/46 层调整为 53/55 层,可有效提升塔顶操作温度,使系统整体处于高于酸露点的区间,显著减缓氯化氢的冷凝腐蚀。增设塔顶注水系统,可起到对塔顶冷凝系统中铵盐的冲洗、稀释作用,有效减轻垢下腐蚀。同时注水及注剂系统的喷射应采用雾化形式,保证水雾均匀分布并避免直接冲击管壁,以维持稳定的稀释环境。

### 4.2 材料选择与结构设计优化

在加工高硫、高酸原油条件下,材料的合理选择与结构设计直接决定装置的防腐效果。在常压塔 46 层塔盘以上的低温区域,宜应采用 S31254+Q245R 复合板作为塔体主材质,配套 316L 不锈钢作为支撑件。复层 S31254 耐腐蚀能力远优于常规不锈钢,可直接承受常压塔中上部低温环境下 HCl-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O 型腐蚀;基材 Q245R 则为塔体提供承压所需的机械强度。316L 支撑件因含 Mo 元素具备基础抗 Cl<sup>-</sup>、H<sub>2</sub>S 腐蚀能力,适配非核心腐蚀区的工况需求,且加工焊接性能与经济性更优。

### 4.3 在线除盐与监测系统建设

塔顶冷却系统的腐蚀防控需依赖连续的监测技术支撑。通过增设在线 PH 值监测系统,实时监测塔顶含硫污水 PH 值,可精准反应塔顶防腐工况,及时对注氨量进行调整,将塔顶 PH 值控制在 7~9 之间;跟踪监测三顶水铁离子含量变化,能够直观判断金属基体的腐蚀程度。搭配腐蚀探针在线监测,可直接获取设备实际腐蚀情况,精准捕捉局部腐蚀风险。监测数据可传输至 DCS 平台,实现腐蚀趋势分析与预警响应,形成“检测—评估—防护”闭环。此类智能化监测体系的建立,为常减压蒸馏装置的长周期安全运行提供了可靠的技术保障与决策依据。

## 5 系统性防腐蚀管理与运行保障

### 5.1 防腐蚀管理体系建设

常减压蒸馏装置的防腐蚀管理应以系统化、制度化为核心,建立覆盖原油采购、工艺设计、设备管理、药剂控制及运行监督的多部门协同网络。依据《中国石化炼油工艺防腐蚀管理办法》要求,各炼油企业应形成以工艺技术部门为牵头、设备与运行部门协作的责任体系,实现防腐措施从设计源头到运行过程的全周期监管。管理体系需明确各装置的腐蚀重点部位与监测参数,制定详细的控制指标及分析频率,并将监测结果纳入绩效考核体系。通过工艺防腐、材料防腐、操作防腐三位一体的综合机制,可实现对低温腐蚀的

实时控制和趋势预判。企业还应建立信息化防腐数据库,定期汇总腐蚀监测数据与药剂使用情况,为后续工艺优化与设备更新提供科学依据,确保防腐工作制度化、数据化、持续化推进。

### 5.2 药剂注入与运行监测控制

针对常减压蒸馏塔顶系统的 HCl-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O 型低温腐蚀,应科学配置“三注”系统以实现动态防护。中和剂的注入量应根据塔顶介质酸性成分与露点温度匹配,确保 pH 处于中性至弱碱性范围,确保缓蚀剂能够发挥作用;缓蚀剂应具备良好的分散性与高温稳定性,以在金属表面形成致密保护膜;注水则需保证 25% 以上液态比例以稀释酸性腐蚀产物。运行中应强化排水 pH 值与铁离子浓度的动态检测,合格率需保持在 95% 以上。通过 DCS 系统建立“药剂流量—腐蚀速率—设备状态”的闭环控制模型,实现对药剂投加效果的智能评估与预警,确保药剂注入科学化、精准化与长期稳定化,形成低温防腐的动态平衡机制。

### 5.3 运行数据与风险预警机制

低温腐蚀的监测与预警是防控体系的重要环节,应依托数字化仪控技术构建智能化腐蚀监测平台。关键运行数据如塔顶温度、介质酸露点、腐蚀速率及壁厚变化应实时采集并与工艺参数联动分析。设备管理部门需定期组织红外成像与厚度复测,形成点一线一面的综合监控网络。通过构建“实时监测—数据分析—风险响应”的闭环体系,可提前发现潜在泄漏隐患,防止局部微裂纹扩展为穿孔事故,实现常减压装置运行的预测性维护与安全保障。

## 6 结语

常减压蒸馏装置低温腐蚀问题是炼厂面对原油劣质化加工过程中不可忽视的风险。腐蚀防控需从原料管理、工艺设计、材料选型、运行监测等多方面综合施策。通过建立科学的工艺防腐体系、强化在线监测与动态调控,可显著提升装置运行的安全性与经济性。研究表明,只有在设计阶段实施防腐综合策略,才能实现“全过程防控、全周期管理、全系统优化”的防腐目标。

### 参考文献

- [1] 张继辉,杨析宗.第四常减压蒸馏装置加工劣质原油常顶的腐蚀与防护[J].齐鲁石油化工,2018,46(01):32-36.
- [2] 徐晓山.劣质原油常减压蒸馏工艺技术探讨与实践[J].石化技术,2021,28(12):162-163.
- [3] 姚泓池.常压塔塔顶低温露点腐蚀风险预测及腐蚀机理研究[D].浙江理工大学,2023.
- [4] 张继辉,杨析宗.第四常减压蒸馏装置加工劣质原油常顶的腐蚀与防护[J].齐鲁石油化工,2018,46(01):32-36.
- [5] 袁毅夫,尹文,王亚彪.劣质原油常减压蒸馏工艺技术探讨与实践[J].炼油技术与工程,2014,44(05):15-21.
- [6] 曹忠军.常减压蒸馏装置加工高酸高硫原油防腐蚀综述[J].石油化工腐蚀与防护,2009,26(4):1-4.

# Research Progress of RIG Magneto-Optical Crystals

Dongxu Wang Subinuer·Maimaiti Yujie Li Haipeng Liu\*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China

## Abstract

In recent years, the rapid development of optical communication technology has highlighted the increasingly important role of magneto-optic materials in multiple key fields such as information transmission, optical isolation, and signal modulation. Consequently, higher requirements have been put forward for the performance of magneto-optic devices. Therefore, exploring new high-performance magneto-optic materials has become an urgent task. Among them, rare earth iron garnet (RIG) magneto-optic crystals are considered ideal candidate materials for high-performance magneto-optic devices due to their excellent optical uniformity, low absorption loss, and high laser damage threshold. Research shows that the magneto-optic performance of crystals can be effectively improved by doping ions. This paper first outlines the basic principles of the Faraday effect, and then introduces the main crystal growth techniques, including the widely used methods such as the flux method and the liquid-phase epitaxy method, which are crucial for obtaining high-quality crystals. Secondly, it reviews the research results of ion doping in rare earth iron garnet crystals. Finally, the paper prospects the future development of magneto-optic crystals.

## Keywords

Faraday effect; Rare earth iron garnet; Magneto-optical crystal; Growth method

# RIG 型磁光晶体研究进展

王东旭 苏比努尔·买买提 李煜杰 刘海鹏\*

新疆师范大学化学化工学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830054

## 摘要

近年来, 光通信技术的迅猛发展, 助力磁光材料在信息传输、光学隔离、信号调制等多个关键领域的作用日益凸显, 进而对磁光器件的性能提出了更高要求, 因此探索高性能新型磁光材料成为当务之急。其中稀土铁石榴石 (RIG) 磁光晶体因其优异的光学均匀性、低吸收损耗和高激光损伤阈值, 被认为是实现高性能磁光器件的理想候选材料。研究表明, 通过掺杂离子可有效提升晶体的磁光性能。本文首先概述了法拉第效应的基本原理, 随后介绍了晶体生长的主要技术, 包括助溶剂法、液相外延法等当前应用较为广泛的方法, 这些技术对于获得高质量晶体至关重要。其次, 回顾稀土铁石榴石晶体离子掺杂的研究成果。最后, 文章对磁光晶体的未来发展进行了展望。

## 关键词

法拉第效应; 磁光晶体; 稀土铁石榴石; 生长方法

## 1 引言

磁光非互易器件是现代光通信、高功率激光系统等领域不可或缺的核心元件, 其性能极限最终取决于磁光材料本身。磁光材料的物理基础可追溯至 1845 年 Michael Faraday 的发现: 线偏振光在通过具有固有磁矩的介质时, 其偏振面会发生旋转, 该现象被命名为法拉第效应 (原理示意图如图

1 所示)<sup>[1]</sup>。随后克尔效应 (Kerr effect)<sup>[2]</sup>、塞曼效应 (Zeeman effect)<sup>[3]</sup>、科顿-莫顿效应 (Cotton-Mouton effect) 等相继被揭示<sup>[4]</sup>, 经典磁光理论体系逐步完善。随着激光技术与光通信系统的迅速发展, 基于磁光效应的功能器件如磁光隔离器、光环行器等应运而生, 并逐步成为保障激光系统稳定运行的核心元件<sup>[5-7]</sup>。

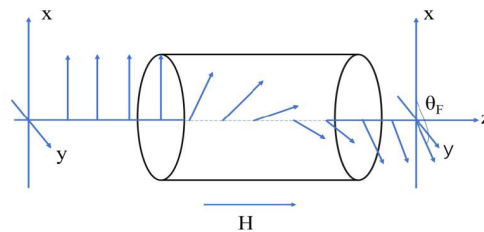


图 1 法拉第效应原理示意图

【项目资助】天池英才 - 青年博士引进计划项目; 新疆师范大学博士 (后) 科研启动基金项目资助 (项目编号: XJNUZBS2548); 大学生创新创业训练计划项目 (项目编号: X202510762030)。

【作者简介】王东旭 (1999-), 男, 中国黑龙江哈尔滨人, 硕士, 从事磁光晶体材料的设计、制备与应用研究。

近年来, 随着光子集成技术的兴起, 磁光器件正朝着

小型化、片上集成化方向加速演进。在此背景下，磁光材料体系不断拓展，目前已涵盖磁光晶体、磁光陶瓷、磁光玻璃和磁光薄膜等多种形态。其中，磁光晶体与磁光陶瓷因兼具良好的磁光性能与工程实用性，成为当前研究的重点方向<sup>[8]</sup>。磁光陶瓷凭借制备工艺成熟、易于实现大尺寸成型及成本低廉等优势，在高功率激光系统中展现出良好应用前景<sup>[9, 10]</sup>。然而，其固有的光学散射与透过率受限等问题，制约了其在高端光学系统中的进一步推广。相比之下，磁光晶体因其优异的光学均匀性、低吸收损耗和高激光损伤阈值，被认为是实现高性能磁光器件的理想候选材料。特别是稀土离子掺杂的 YIG 体系，即 RIG 型晶体因其在通信波段表现出巨法拉第效应，近年来备受关注，已成为新型磁光材料研究的热点。

## 2 法拉第效应

法拉第效应是磁光领域最核心的物理效应之一，该效应的本质是磁场作用下介质的介电张量发生各向异性变化，使入射的线偏振光分解为左旋和右旋圆偏振光，二者在介质中因折射率差异 ( $n_+ \neq n_-$ ) 产生相位差，出射后重新合成为线偏振光时，偏振面相对入射方向发生偏转，偏转角度(法拉第旋角  $\theta_F$ ) 满足关系式

$$\theta_F = VHL \quad (1)$$

其中  $V$  为 Verdet 常数;  $H$  为外加磁场强度;  $L$  为光在介质中的传播距离。法拉第效应最显著的特征是非互易性 - 偏振面的旋转方向仅由外加磁场方向决定，与光的传播方向无关，这一特性使其区别于自然旋光效应，也是磁光隔离器、环行器等非互易磁光器件实现单向传输功能的核心物理基础。

## 3 生长方法

稀土石榴石化合物属于立方晶系，体心立方结构，空间群为  $O_h^{10}$  (Iad)，化学通式为  $R_3[c]Fe_2[a]Fe_3[d]O_{12}$ ，其中 a、c、d 分别表示八面体、十二面体与四面体。RIG 晶体结构如图 2(a) 所示。图 2(b) 是  $Fe_2O_3$ - $Y_2O_3$  的赝二元相图，从中可知 YIG 是非一致熔融物，通常需要使用助溶剂来辅助实现晶体的生长。常用的晶体生长方法有助溶剂法 (Flux Method)、液相外延法 (Liquid Phase Epitaxy, LPE)、浮区法 (Floating Zone method, FZ)、导模提拉法 (Edge-Defined Film-Fed Growth, EFG) 等<sup>[10]</sup>。

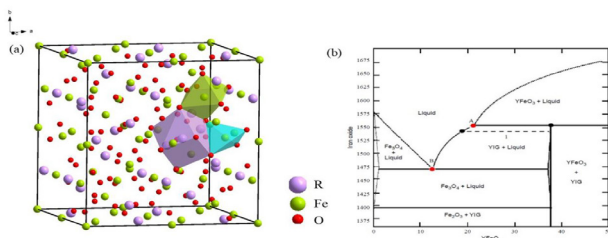


图 2 (a)RIG 晶体结构示意图; (b) $Fe_2O_3$ - $Y_2O_3$  的赝二元相图<sup>[11]</sup>

## 3.1 助溶剂法

助溶剂法是一种在高温条件下将待生长晶体的材料溶解于低熔点的助溶剂中，从而形成一个均匀的饱和溶液，随后通过逐步降低温度或其他技术手段诱导晶体从溶液中沉淀并生长<sup>[12]</sup>。常用的助溶剂包括两大类：一类是以  $PbO$  体系为主的含铅助溶; 另一大类是以  $Bi_2O_3$ 、 $BaO$ 、钼酸盐体系为主的无铅助溶剂<sup>[13]</sup>。1958 年，贝尔实验室的 Dillon 首次使用助溶剂法合成了 YIG，其在红外及近红外波段拥有良好的透过性和优秀的磁光效应<sup>[14]</sup>。1981 年 B.Antonini 等探索通过助溶剂蒸发的方法在恒定温度下生长 YIG 晶体<sup>[15]</sup>。相较于助溶剂缓慢冷却技术，恒温技术解决了晶体成分不均匀的问题。2021 年，Jiang 等使用  $PbO$ - $B_2O_3$  助溶剂生长直径达 20 mm 的一系列的高质量 YIG 和 Bi:TIG<sup>[16]</sup>。所得的 YIG 晶体在 1300-2500 nm 范围内的平均透过率超过 75%; Bi:TIG 晶体的比法拉第旋角在 1550 nm 处达到 -1250 deg/cm。

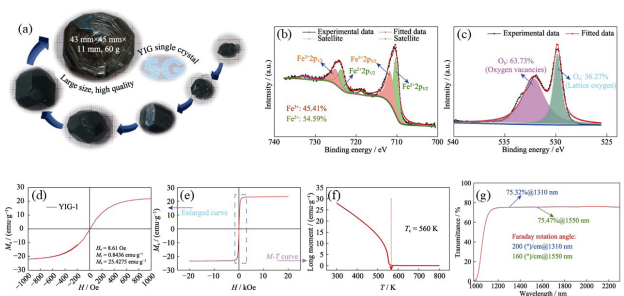


图 3 (a) 晶体生长过程; 晶体粉末的 XPS(b)Fe2p; (c)O1s; (d) 在 -1000-1000Oe 的磁场中放大的 M-H 曲线; (e) 室温下的 M-H 曲线; (f) 外加磁场下磁化强度随温度的变化; (g)1310 nm 和 1550 nm 处的透过率和法拉第旋角<sup>[17]</sup>

如今  $Bi_2O_3$ 、 $BaO$  等无铅助溶剂因其低熔化温度、低蒸气压等优点被广泛使用。2023 年，Yang 等使用顶部籽晶法生长出了最大尺寸可达  $43 \times 46 \times 11 \text{ mm}^3$ 、重量达 60 g 的 YIG 晶体<sup>[17]</sup>。晶体展现出优异的性能，包括窄的铁磁共振线宽 (0.679 Oe)、高透明度 (75%) 以及在 1310 nm 和 1550 nm 波长处的法拉第旋转角度分别为 200、160 deg/cm。2024 年，Yang 等使用  $Bi_2O_3$  作为助溶剂、采用顶部籽晶法生长一系列浓度不同  $Ni^{2+}$  掺杂浓度的高质量 Ni,Bi:(HoEu)IG 单晶<sup>[18]</sup>。 $Ni^{2+}$  离子的掺杂有助于提高 Bi:(HoEu)IG 晶体在近红外区的光学透过率。 $(Bi_{0.37}Ho_{1.18}Eu_{0.83}Gd_{0.62})(Fe_{4.20}Ni_{0.25}Ga_{0.55})O_{12}$  晶体的光学透过率在 1550 nm 处接近最大理论值 72.6%， $\theta_F$  为 -451 deg/cm。此外，晶体的法拉第旋转温度 (FTC)和波长系数 (FWC)低至  $-6.3 \times 10^4 \text{ K}^{-1}$  和  $8.0 \times 10^4 \text{ nm}^{-1}$ 。

## 3.2 液相外延法

液相外延技术 (LPE) 最初由 Nielsen 于 1963 年提出，核心原理是利用低熔点金属作为溶剂，并将待生长的晶体材料作为溶质加入其中。在溶质达到饱和或过饱和状态后，通过逐步降低温度促使溶质从溶液中沉积出来，并在单晶衬底上进行有序的晶体生长<sup>[19]</sup>。

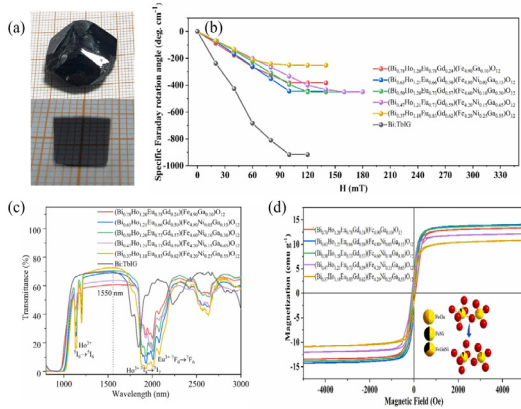


图 4 (a) 晶体和抛光晶片 (b) 1550 nm 处的  $\theta_F$  与室温下的磁场强度关系。(c) 透过光谱 (d) 磁滞回线 [18]

1972 年 S.L.Blank 和 J.W.Nielsen 探索利用 LPE 技术生长石榴石单晶薄膜，讨论了影响薄膜质量的因素包括关系、生长温度等以及如何调控参数来优化薄膜质量 [20]。2004 年，Huang 等在 GGG 衬底上生长一层 YIG 种子层，然后在种子层上外延了 BiYbIG 薄膜 [21]。测得 1550 nm 波段法拉第旋转角  $\theta_F$  和光吸收系数分别为  $-558 \text{ deg/cm}$  和  $4.26 \text{ cm}^{-1}$ 。2023 年，Jiang 等使用 LPE 法在 (111) 取向的  $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$  衬底获得 Bi、Mn 共掺杂的 YIG 薄膜 [22]。薄膜在 1064 nm 处的比法拉第旋转角和 Verdrt 常数分别为  $-574.75 \text{ deg/cm}$  和  $-3858.18 \text{ rad}/(\text{T} \times \text{m})$ 。2024 年 Yu 等使用  $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$  作为助溶剂，选择钙镁锆掺杂钷石榴石作为衬底材料，使用 LPE 法生长出数百微米的  $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  薄膜，并且尝试在  $\text{H}_2$  气氛下不同温度下退火，退火后的薄膜在 1064 nm 处的透过率为 51.2%，在 1310 nm 处的透过率为 71.6%， $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  薄膜具有高  $\theta_F$  和低驱动磁场，其比法拉第旋转角在 1310 nm 处为  $1413 \text{ deg/cm}$ ，在 1064 nm 处为  $2647 \text{ deg/cm}$  [23]。

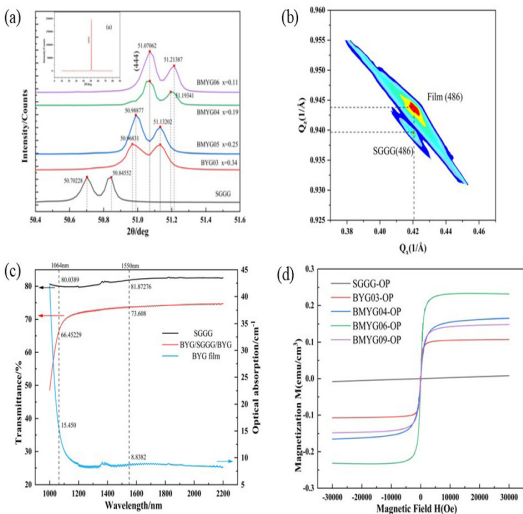


图 5 (a) 外延膜 XRD 图谱；(b) 倒易空间映射；(c) 1000–2200 nm 波段的透射谱和吸收光谱；(d) 外延膜的磁滞回线 [23]

### 3.3 浮区法

浮区法是一种用于生长高质量单晶材料的技术，它通过使用光源聚焦在多晶料棒和籽晶上，使材料熔化形成熔区，然后通过控制熔区的移动来实现晶体的生长。这种方法的特点是在生长过程中晶体与任何容器或坩埚之间没有物理接触，最大限度的避免了杂质的引入和晶体污染。

1977 年，日本研究人员 I.Shindo 和 S.Kimura 首次采用浮区法生长出直径 5 mm YIG 单晶棒 [24]。1999 年，Sadao Higuchi 等采用流动溶剂浮区法生长出  $\text{Y}_{3-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  [25]。晶体在 1550 nm 波长下， $\text{Y}_{2.82}\text{Ce}_{0.18}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  的法拉第旋转为  $-740 \text{ deg/cm}$ ，光吸收系数为  $0.12 \text{ cm}^{-1}$ 。且在 1550nm 波长下的光吸收损耗为 0.03dB，灵敏度为 0.1 %/Oe。2020 年，Jin 等使用光学浮区法生长了  $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ( $x=0.05, 0.10, 0.15$ ) 单晶 [26]，所得晶体具有纯石榴石晶体结构，晶体的磁饱和和强度随  $\text{Ce}^{3+}$  离子浓度的增加而降低；此外，晶体在 1310 nm 波长处的 Verdet 常数表现出随着  $\text{Ce}^{3+}$  含量增加而递增的规律， $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  ( $x=0.05, 0.10, 0.15$ ) 晶体在 1310 nm 处的 Verdet 常数分别为  $-486.011 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 、 $-827.428 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 、 $-1223.191 \text{ rad}/\text{T} \cdot \text{m}$ 。2025 年 Cho 等开发了一种创新的两步浮区法 [27]，此方法成功应用于 YIG 及  $\text{Er}^{3+}:\text{YIG}$  单晶的生长。 $\text{Er}^{3+}$  的引入显著调制了材料的低温磁性能，出现了明显的抗磁耦合和自旋重取向现象。该方法规避了传统方法对助溶剂的依赖，并有效抑制了气泡生成，实现了快速、稳定的晶体生长。

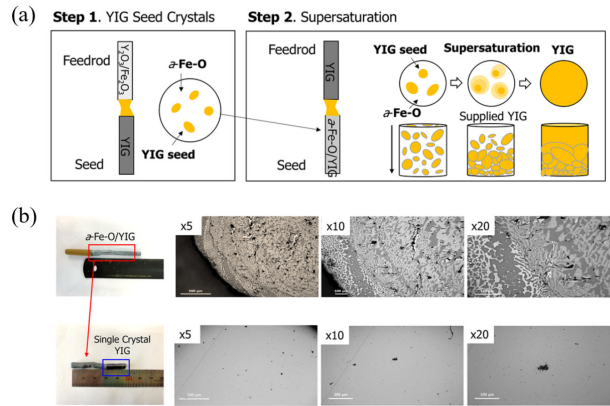


图 6 (a) 生长方法示意图；(b)  $\alpha\text{-Fe-O}/\text{YIG}$  结晶固体和 YIG 单晶的光学显微镜图像 [27]

### 3.4 导模提拉法

导模提拉法即边缘薄膜限定供料提拉生长技术，这种方法的核心在于通过控制晶体生长过程中的温度梯度和提拉速率，来获得具有特定晶体方向和质量的单晶材料 [28, 29]。

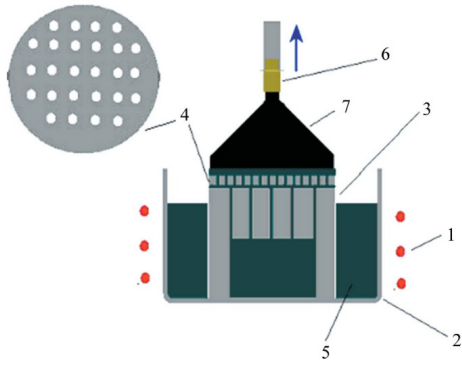


图 7 EFG 生长装置示意图 (1- 感应线圈, 2- 坩埚, 3、4- 铌模具, 5- 熔体, 6- 籽晶棒, 7- 生长晶体) [30]

2012 年, Zhuang 等通过 EFG 法生长出不同浓度 Ga<sup>3+</sup> 掺杂的 Ga:YIG (生长装置如图 7 所示)。晶体质量良好, 尺寸为 15×15×18 mm<sup>3</sup>, Ga<sup>3+</sup> 的掺杂增加了其在近红外波段的透过率, 但是随着 Ga<sup>3+</sup> 的增加晶体的居里温度呈现出线性下降 [30]。2014 年 Zhuang 研究团队继续探索 EFG 法生长大尺寸 Ga:GIG 单晶 [31]。由于晶体在惰性气氛中生长, 生长后的晶体的光学透过率较低, 但可以通过在 800 ° C 的 O<sub>2</sub> 气氛中退火晶体来提高光学透过率。晶体的饱和磁化强度随着 Ga<sup>3+</sup> 掺杂浓度的增加而减小。与 Ga:YIG 晶体相比, Ga:GIG 晶体具有更佳的磁光性能。2021 年, Liu 等通过改进的 EFG 方法生在氮气气氛生长出一系列不同浓度 Ce<sup>3+</sup> 掺杂的 Ce,Ga:GIG 和 Ce,Ca,Ga:GIG 晶体 [32], 生长出的晶体均达到了厘米级别且质量完好。随着 Ce<sup>3+</sup> 浓度的增加, 晶体的比法拉第转角、饱和磁化强度和居里温度显著增强, 其中 (Ce<sub>0.35</sub>Gd<sub>2.65</sub>)(Ga<sub>1.04</sub>Fe<sub>3.95</sub>V<sub>0.01</sub>)O<sub>12</sub> 的法拉第旋转角达到 896 deg./cm 满足了商业应用的要求。

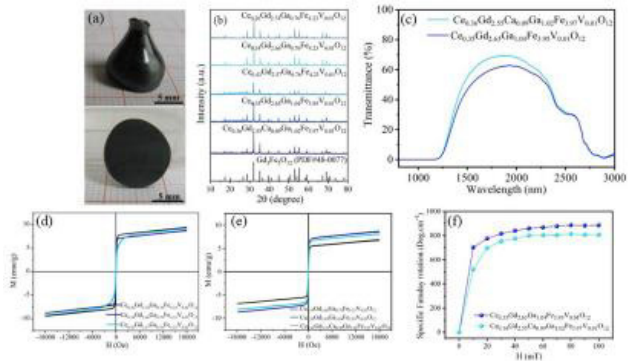


图 8 (a) Ce,Ga:GIG 晶体与抛光后晶片; (b) 晶体的 XRD; (c) 晶体透过率 (d) 晶体磁滞回线。 (d) 未退火晶体磁滞回线; (e) 退火后晶体磁滞回线; (f) 晶体比法拉第旋转角与磁场强度关系曲线 [32]。

### 4. 总结与展望

近年来, RIG 型磁光晶体在光通信、高功率激光系统及集成光子学等领域展现出广阔应用前景, 已成为高性能磁

光器件的核心材料候选。通过助溶剂法、液相外延法、浮区法和导模提拉法等多种生长技术的持续优化, 大尺寸、高质量 RIG 单晶与薄膜的制备取得显著进展。与此同时, 离子掺杂策略被广泛应用于调控材料的法拉第效应、磁光优值及温度 / 波长稳定性。未来, RIG 型磁光晶体的研究将朝着高 Verdet 常数、低光学损耗、宽温宽谱稳定性和硅基集成兼容性等方向深入发展, 结合组分设计、缺陷工程与异质结构构筑, 有望实现材料性能的进一步突破, 为下一代小型化、片上集成化的磁光隔离器、调制器等非互易器件提供关键材料支撑, 推动光电子技术向高效、智能和规模化方向迈进。

### 参考文献

- [1] Michael F On the magnetic affection of light, and on the distinction between the ferromagnetic and diamagnetic conditions of matter[J]. Philosophical Magazine, 1846, 29(194): 249-258.
- [2] Ho P. P., Alfano R. R. Optical Kerr effect in liquids[J]. Physical Review A, 1979, 20(5): 2170-2187.
- [3] Zeeman P. The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance[J]. Nature, 1896, 55(1424): 347.
- [4] Didosyan Y S, Hauser H, Reider G A. Magneto-optic switch based on domain wall motion in orthoferrites[J]. IEEE transactions on magnetics, 2002, 38(5): 3243-3245.
- [5] 刘公强. 磁光学[M]. 2001.
- [6] Qi H B, Ni Y B, Yu X Z, et al. Study of the Solid Solubility Limit and Growth of Cd1-xMnxTe Multicomponent Single Crystals for Miniaturized Magneto-Optical Isolators[J]. Inorganic Chemistry, 2025, 64(36): 18499-18508.
- [7] Duan L M, Yang D L, Wang Z J, et al. Effect of Gadolinium Addition on Magnetic and Magneto-Optical Properties of Yttrium Iron Garnet Crystal[J]. Crystal Growth & Design, 2024, 24(11): 4437-4442.
- [8] 张昊天, 窦仁勤, 张庆礼, et al. 磁光晶体的研究进展及应用[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(2): 346-352,357.
- [9] Ikesue A., Aung Y. L., Wang J. Progress of magneto-optical ceramics[J]. Progress in Quantum Electronics, 2022, 86: 100416.
- [10] Zhelezov D, Starobor A, Palashov O, et al. High-power Faraday isolators based on TAG ceramics[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2578-2583.
- [11] Mao T C, Chen J C, Hu C C. Characterization of the growth mechanism of YIG crystal fibers using the laser heated pedestal growth method[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 282(1): 143-151.
- [12] Leycuras C., Gall H. Le, Desvignes J., et al. Magnetic and magneto-optical properties of a cerium YIG single crystal[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21(5): 1660-1662.
- [13] Tamanoi K., Ariizumi M., Shinagawa K., et al. Faraday Effects of Cerium-Substituted YIG LPE Films[J]. Journal of the Magnetics

- Society of Japan, 1989, 13(1): 44-45.
- [14] Dillon J. F., Nielsen J. W. Ferrimagnetic Resonance in Impurity Doped Yttrium Iron Garnet (YIG)[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(5): S43-S45.
- [15] B. Antonini, Paoletti A., Paroli P. Isothermal Growth Of Bulk YIG Crystals By  $\text{PbF}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  Flux Evaporation[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1981, 54: 586-587.
- [16] Jiang Y S, Shen H, Xu J Y, et al. Large size rare earth iron garnet single crystals grown by the flux-Bridgman method[J]. *Journal of Rare Earths*, 2021, 39(12): 1547-1553.
- [17] Yang X M, Lan J H, Wei Z T, et al. High Quality and Large Size Yttrium Iron Garnet Crystal Grown by Top Seeded Solution Growth Technique[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, 38(3): 322-328.
- [18] Yang Yanduan, Fan Xiaoyu, Liu Haipeng, et al. A new Ni/Bi Codoping rare earth iron garnet crystal with high transmittance, low temperature and wavelength coefficients[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 978: 173396.
- [19] Nielsen J. W., Dearborn E. F. The growth of single crystals of magnetic garnets[J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 1958, 5(3): 202-207.
- [20] Blank S L, Nielsen J W. The growth of magnetic garnets by liquid phase epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1972, 17: 302-311.
- [21] Huang M, Xu Z C. Liquid phase epitaxy growth of bismuth-substituted yttrium iron garnet thin films for magneto-optical applications[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 450(2): 324-328.
- [22] Jiang J W, Dai Y, Shang J M, et al. Perpendicular magnetic anisotropy and magneto-optical properties of Bi, Mn: YIG epitaxial films[J]. *CrystEngComm*, 2024, 26(1): 32-39.
- [23] Yu J Y, Yang Q H, Zhang D, et al. The performance of  $(\text{TbBiCa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  magneto-optical films at 1064 nm after hydrogen atmosphere annealing and ion beam polishing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180: 111528.
- [24] Kimura S., Shindo I. Single crystal growth of YIG by the floating zone method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1977, 41(2): 192-198.
- [25] Higuchi S, Takekawa Y F, Kitamura O K. Magneto-Optical Properties of Cerium-Substituted Yttrium Iron Garnet Single Crystals Grown by Traveling Solvent Floating Zone Method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38(7R): 4122.
- [26] Jin W Z, Gai L Y, Li C, et al. Crystal growth and characterization of  $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  single crystal by optical floating zone method[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2020, 588: 412168.
- [27] Cho Y J, Nahm Y W, Decorse C, et al. Two-Step Floating Zone Method for Single-Crystal Growth of Er-Doped  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [J]. *ACS Omega*, 2025, 10(27): 29421-29427.
- [28] Zhang L, Pan M Y, Tian R F, et al. Rapid Growth of a Yb:YAG Slab Crystal with Superior Laser Properties by the Edge-Defined Film-Fed Growth Method[J]. *Crystal Growth & Design*, 2024, 24(5): 1959-1968.
- [29] 杨文娟, 卜予哲, 赛青林, et al. 导模法生长氧化镱晶体中的位错缺陷及其分布特点[J]. *人工晶体学报*, 2025, 54(03): 414-419.
- [30] Zhuang N F, Chen W B, Shi L J, et al. A new technique to grow incongruent melting Ga: YIG crystals: the edge-defined film-fed growth method[J]. *Applied Crystallography*, 2013, 46(3): 746-751.
- [31] Zhuang N F, Wang C N, Wei Q K, et al. EFG growth and optical properties of incongruent-melting  $\text{Ga}^{3+}$ : GIG single crystal[J]. *Optical Materials*, 2014, 36(7): 1160-1164.
- [32] Liu H P, Shen J R, Liu X F, et al. Edge-defined film-fed growth of incongruent-melting Ce,Ga:GIG crystal with high magneto-optical performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888: 161456.

# Cost Risk Identification and Coping of Chemical EPC Project

Mengmeng Song

China Aerospace Changzheng Chemical Engineering Co., Ltd., Beijing, 101111, China

## Abstract

Chemical EPC projects integrate design, procurement, and construction, featuring large investment amounts, multiple professional interfaces, and long-term characteristics of equipment and materials. Cost deviations are often not triggered by a single factor but result from the combined effects of contract terms, engineering changes, resource price fluctuations, on-site organization, and delivery constraints. In chemical project practices, EPC contracts commonly adopt fixed lump-sum or lump-sum contracting approaches. The risk absorption capacity of the general contractor during the bidding phase and its control ability during the execution phase directly determine the project's profit margin. Meanwhile, phased adjustments in owner requirements and optimization demands for plant performance indicators also continuously disrupt the cost structure. Starting from the business logic of chemical plant construction, this paper discusses identifiable clues, quantifiable trigger points, and actionable disposal paths for cost risks, aiming to establish an analytical framework closely aligned with the realities of China's chemical EPC projects.

## Keywords

Chemical industry; EPC project; Cost risk; Identification; Response

## 化工 EPC 项目造价风险识别与应对

宋萌萌

航天长征化学工程股份有限公司, 中国·北京 101111

## 摘要

化工EPC项目集设计、采购与施工于一体,投资额大、专业界面多、设备材料长周期特征明显,造价偏差往往不是单一因素触发,而是由合同条件、工程变更、资源价格波动、现场组织与交付约束等多因素叠加形成。在化工项目实践中,EPC合同常见固定总价或总价包干导向,总承包单位在报价阶段的风险吸收能力与执行阶段的控制能力直接决定项目利润边界,同时业主需求的阶段性调整、装置性能指标的优化诉求也会对成本结构产生持续扰动。本文从化工装置建设的业务逻辑出发,围绕造价风险的可识别线索、可量化触发点与可落地处置路径展开讨论,力求形成贴近中国化工EPC项目实际的分析框架。

## 关键词

化工; EPC项目; 造价风险; 识别; 应对

## 1 引言

近年来,中国炼化、煤化工、精细化工等装置建设普遍采用 EPC 总承包组织模式,以缩短建设周期并强化单一责任主体的统筹能力。但在实际执行中,由于化工项目技术复杂、投资规模大且市场波动性强,其造价过程中,面临着诸多不确定因素,即技术方案变更、材料价格波动、合同条款不明确等,极易导致造价超支,增加额外的成本费用,降低化工项目综合效益<sup>[1]</sup>。特别是在固定总价合同较为常见的背景下,总承包单位若未能在前期识别风险边界并形成可执

行的控制条款,后续结算争议和成本失控概率将显著上升。

## 2 化工 EPC 项目概述

化工 EPC 项目是指总承包单位受业主委托,对化工装置或配套公用工程实施设计、采购、施工及试车交付的全过程组织管理模式,其核心在于由总承包方对工期、质量、费用与性能指标进行一体化协调。与一般房建或市政项目相比,化工装置通常包含反应、分离、储运、仪表控制、消防环保等多专业系统,工艺约束强,设备材料种类多且标准复杂,尤其是大型静设备、关键机泵、特材管件等存在长周期采购特征。项目中,合同计价常偏向总价约束,造价形成路径呈现设计深度影响采购清单、采购到货影响施工组织、施工窗口影响资源投入的链式传导规律。若设计与现场条件衔接不足,或业主对产能与能耗指标提出调整诉求,成本增

**【作者简介】**宋萌萌(1990-),女,中国山东德州人,本科,工程师,从事化工EPC项目造价风险管理,重点研究设计-采购-施工全过程的成本控制策略研究。

量容易通过变更签证、措施费上浮、停窝工损失等方式累积，并最终反映在结算差异和索赔争议之中。

### 3 化工 EPC 项目造价风险识别

#### 3.1 合同计价边界与风险分担失真

在化工 EPC 项目的投标与合同谈判阶段，造价风险常隐藏在计价范围的模糊表达之中，表现为工作内容边界、暂估项目口径、性能考核责任及调价条件不清。实践中，EPC 模式较多采用固定总价或总价包干导向，总承包单位在报价时需要对设计深化、采购涨价、施工措施等不确定因素进行预估，但业主往往要求报价竞争力而压缩风险费用，导致风险分担与价格承受能力不匹配<sup>[1]</sup>。若合同中对设计变更认定、工程量调整触发条件、不可预见费用归属缺乏明确约定，后续执行阶段即使出现客观增量，也容易陷入“是否属于承包范围”的解释分歧。该类风险的识别要点在于：合同专用条款是否形成可执行的边界闭环，以及计价文件是否能与招标技术条件一一对应。

#### 3.2 设计深度不足引发工程量偏差

化工装置造价对设计深度高度敏感，风险往往在方案阶段被低估，而在施工图深化后集中暴露。若前期仅依据工艺包与概念布置形成初步清单，随着设备选型、管道等级、伴热保温、支吊架及防腐体系进一步明确，工程量会出现结构性增长，典型表现为管线长度增加、材料等级上移、施工措施复杂化。与此同时，化工项目的安全环保要求具有强制性，某些区域的防爆等级、泄放系统、消防水与泡沫系统配置需要在设计迭代中反复校核，容易带来隐性增量。识别该类风险时，应重点关注初设与施工图之间的差异来源是否来自规范条款、现场条件或工艺参数修订，并通过工程量变化的集中科目定位成本漂移的真实起点。

#### 3.3 关键设备与特材采购不确定性

化工 EPC 的采购金额占比通常较高，造价风险经常体现为关键设备交期、质量验收与价格波动共同作用。中国项目中，大型压力容器、换热器、压缩机组及特材阀门等属于长周期物资，供应商产能、原材料价格、检验周期及运输条件均可能改变最终采购成本与到货节奏。若设备技术规格在询价后仍存在修订，或业主对品牌、产地、性能参数提出提高要求，采购端将出现重复询价、补充技术澄清与二次议价，成本变化不仅体现在设备本体，也会传导至基础、安装与试车资源投入。识别线索应放在供应市场波动、交付约束条款与技术偏离风险上，而不是仅盯住合同单价本身。

#### 3.4 现场条件与施工组织的费用漂移

化工项目施工阶段的造价风险具有明显的现场依赖性，常见触发点包括场地交付不完整、交叉作业密集、动火受限窗口不足及开停车节点压缩。部分项目在装置区与罐区、管廊与道路施工之间存在强耦合关系，一旦土建与安装界面未按计划释放，施工资源会在局部区域反复调配，造成机械台

班增加、劳务效率下降与措施费上升<sup>[2]</sup>。另一些项目受季节性气候影响，防腐保温、焊接与试压工序受到限制，赶工行为会推高夜间施工、二次倒运和临设维护等间接费用。该风险的识别重点不在于“是否超预算”这一结果判断，而在于施工约束是否导致资源投入结构改变，并进一步引发成本曲线偏离。

### 4 化工 EPC 项目造价风险应对

#### 4.1 建立可执行的合同费用控制闭环

为防止化工 EPC 项目因合同边界含混引发结算失真，总承包方应以可核验、可追责的程序化闭环替代单纯条款解读。第一，在合同生效前由商务、设计、采购、施工联合审查招标技术条件、范围界面表、计价清单与专用条款，逐条拆解到工作包和专业接口，形成工作内容、计价口径、责任主体的对应表，并将关键交付物、验收节点、现场条件、配合义务写入内部责任台账，明确哪些属于合同包干、哪些属于可调项目，同时对分包界面同步对齐，避免内部口径不一导致对外被动。第二，对暂估价、暂列金、材料调价和不可抗力等可变费用条款，应在开工策划阶段固化触发阈值、取数来源、计量规则与计算路径，配套证据清单和填写模板，如市场询价记录、信息价取用期、调价计算方式、停工令及影响天数核算表，并约定审批时限和超期处理方式，做到发生即计量、计量即归档。第三，业主提出性能指标优化、品牌替换、产能调整等需求时，项目部应按指令管理程序登记为费用事件，明确提出方、影响范围、增量测算口径、批准权限与结算归类，并在合同通知期限内提交费用与工期影响报告，形成会议纪要、指令单、变更单三件套，同步启动设计变更、采购替代和施工签证的联动编号，做到一事一号、一号到底。第四，执行阶段坚持先确认后实施，对超出原约定范围的工作实行停点控制，由现场签认、监理确认、业主批准逐级闭合，相关工作量按计量记录、影像资料、交接单与台账月度对账，未形成书面确认的增量不得进入成本基线并不得申报。

#### 4.2 以设计成果为主线控制成本增量

设计深化是化工 EPC 项目成本增量的高发环节，总承包方应以设计成果交付为主线，把限额与证据链前置到每个审查节点。第一，方案冻结后设置方案、初设、施工图三类成果审查点，围绕设备规格与台数、材料等级、管道等级表、公用工程负荷等成本敏感参数建立锁定清单，明确可调整范围与审批权限，并同步校核招标技术条件、范围界面表与计价清单口径，形成可追溯的参数版本与责任台账，同时将关键参数作为询价与订货的前置条件，未冻结不得启动采购，减少反复回退引起的重复设计与采购预留。第二，施工图阶段出现新增工程量时应先做性质判别，将规范强制条款、消防环保等刚性要求与功能优化、标准提升等可选项分开核算，对可选项设置门槛，例如要求提交增量工程量清单、

关键材料用量变化、工期影响说明及业主书面确认,未满足条件不得下发施工图修改指令,确保每次优化都有明确的费用边界与责任来源。第三,加强专业接口审查与会签,重点核对工艺与设备布置、管廊走向、基础标高、支吊架荷载、电仪开孔及防腐保温范围等易引发碰撞返工的部位,审查中同步提出减量措施与替代方案,对基础调整、加固补强及支架二次设计等易漏项即时测算工程量,并对已发现的偏差形成问题清单与整改期限闭环销项,压降二次深化导致的隐性费用<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 采购端成本稳定与交付约束协同

为压降化工 EPC 项目采购侧造价风险,总承包方需在计划、合同与执行界面上同步强化成本稳定与交付约束。第一,在采购策划阶段应以装置关键路径为基准建立长周期物资台账,完成询源与供应商产能核实,明确技术冻结点与订货窗口,将关键设备参数、材料等级和检验标准提前固化,并对包件划分、付款条件与交货期进行校核,预留询价、评标、订货的时间缓冲及替代清单,减少参数反复导致的询价失效与重复议价。第二,在采购合同中应把制造周期分解为设计确认、关键工序、出厂试验、包装发运等节点,约定驻厂监造、第三方检验、资料移交、运输保险与到货验收的责任界面,明确延期交付违约金、质量缺陷返修时限及费用承担,并将合格证、材质证明与检验报告作为付款前置条件,避免供应偏差转化为现场赶工成本。第三,对大宗材料与特材应设置报价有效期与锁价边界,采用分段采购、框架协议与指数调价相结合的方式,配套交货批次约束,并提前完成备选供应商准入与交货能力复核,必要时通过规格等效、材质替代及提前备货分散单一来源风险。第四,当业主提高品牌、产地或性能要求时,总承包方应同步完成技术变更与费用事件确认,坚持先确认后实施,保留书面指令与报价对比表,核算对安装工器具、调试工时、备品备件及保修责任的连带成本,形成签证、价差依据与结算资料闭环,并同步调整到货计划与施工接口安排。

#### 4.4 施工阶段费用偏差的过程化压降

化工 EPC 项目施工阶段费用偏差往往由现场条件不匹配与组织节奏失衡触发,需以可核验的过程化约束实现压降。第一,总承包方应把场地交付、图纸到位、材料到货、作业许可等前置条件固化为开工准入清单,并设置现场联合验收点与放行签字人,将清单逐项与责任单位、完成时点和验收标准绑定,未满足项不得投入关键工种和大型机械;对

已进场资源设置待命时长上限与退场机制,停窝工按日形成记录,区分业主原因、分包原因和自身组织原因,同步完善签证与索赔资料。第二,针对交叉作业密集区,应以作业面分区为单元编制周滚动工序衔接计划,明确吊装通道、堆场、临电临水与成品保护边界,减少二次倒运和重复搭拆;脚手架、吊装、临设维护等措施费实行申请、核量、签认闭环,采用分区计量、限额领用、拆除回收核算,并对临设保有量设置上限与重复搭拆扣减规则,避免隐性扩张<sup>[5]</sup>。第三,工期压缩导致的赶工应坚持先审批后实施,区分加班、夜施、冬雨季施工等情形,明确人工、机械、保温防护及照明等费用的计量口径、取费基数与资料格式;赶工指令须附工序恢复计划和资源平衡表,现场签证按班组、台班和时段归集,与进度曲线联动校核,严禁以笼统条目结算。第四,试车与交付阶段应提前划清清扫、置换、联动试车、性能考核等工作界面,按专业将管线号、设备位号、介质来源、交接点和完成判据落实到清单,实行逐项签认与复验闭合;对公用工程保障、缺陷消项、临时措施拆除等收尾工作设定责任时点,避免接口不清引发重复作业与返工。

## 5 结语

化工 EPC 项目的造价风险具有链式传导特征,任何单环节的失控都可能在后续阶段被放大并固化为结算差异。总承包单位要把风险识别落在合同边界、设计深化、采购交付与现场约束四条主线上,通过可计量的触发点提前暴露成本偏移来源。同时,风险应对必须坚持“规则可执行、证据可闭环、责任可追溯”的工程逻辑,使成本控制从经验判断转为过程化管理。只有这样,项目才能在满足交付与性能要求的前提下,维持造价目标的稳定性与可结算性。

## 参考文献

- [1] 关燕清.EPC总承包模式下工程造价风险识别与应对策略[J].工程建设与发展,2025(11).
- [2] 左庆强.EPC项目管理中的风险识别和应对策略[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(002):000.
- [3] 林玉静.EPC总承包项目全过程造价控制的策略及实施措施分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理,2023(5):4.
- [4] 王齐.EPC项目管理中的风险识别和应对策略分析[J].四川建筑,2023,43(5):293-294.
- [5] 赫巍.EPC模式下大型化工项目概预算风险识别与应对措施[J].中国航班,2025(17).

# A Brief Discussion on the Effect of Solvent on Analysis and Detection

Sibo Zhu

Liaoning Donghui New Material Co., Ltd., Panjin, Liaoning, 124000, China

## Abstract

It is very important to select suitable solvents for analysis and detection. The solvent can not only affect the solute dissolution effect, at the same time, the electron cloud distribution, ionization state and geometry of solute molecule can be affected by the hydrogen bond, Johannes Diderik van der Waals force and electrostatic gravity between solute and solute or between solute and solvent, and then affect the sensitivity, precision and accuracy of detection. The causes of solvent effect, its influence on spectral analysis and chromatographic analysis, and the methods of eliminating solvent effect in chromatography were introduced. Mastering and utilizing the influence of solvent effect on analysis and detection can improve the sensitivity and selectivity of analysis, and it will have great significant for sample testing.

## Keywords

Solvent effects; Ultraviolet spectroscopy; Infrared spectroscopy; Gas chromatography; liquid chromatography;

## 浅谈溶剂效应对分析检测的影响

朱思博

辽宁东辉新材料有限公司, 中国·辽宁 盘锦 124000

## 摘要

选择合适的溶剂对分析检测至关重要。溶剂不仅可以影响溶质的溶解效果,同时可以通过溶剂与溶质或者溶剂与溶剂之间的氢键、范德华力、静电引力等影响溶质分子的电子云分布、电离状态、几何构型等,进而影响检测的灵敏度、精密度和准确性等。主要介绍了溶剂效应的产生原因、对光谱分析检测和色谱分析检测的影响,以及消除色谱中溶剂效应的方法。掌握和利用溶剂效应对分析检测的影响,可以提高分析的灵敏度和选择性,对样品测试工作意义重大。

## 关键词

溶剂效应; 紫外光谱; 红外光谱; 气相色谱; 液相色谱

## 1 引言

溶剂和溶质二者之间的溶剂化作用——溶剂效应,会改变溶质电子云密度、几何构型、能谱以及其他化学性质。溶剂效应发生的难易程度和稳定性,取决于溶剂分别与溶剂和溶质之间的相互作用强弱,这些相互作用包括氢键、范德华力、偶极与偶极之间的静电引力等。溶剂效应对研究有机化学反应机理<sup>[1]</sup>、检测结果分析、生物化学等方面均起着非常重要的作用。

本文主要总结溶剂效应在紫外吸收光谱,红外光谱,荧光光谱、核磁共振波谱、气相色谱和液相色谱中的影响,以及相应的解决措施。研究溶剂化效应对分析检测的影响,

实际上是研究环境对溶质分子的影响,为化学反应机理、物质性质等的探究提供依据,对分析检测筛选溶剂、提高分析检测的灵敏度和选择性具有现实意义。

## 2 溶剂效应的基本原理

溶剂效应主要是由于溶剂分子和溶质分子之间的相互作用力和空间排列不同,同时溶剂分子自身的热力学性质,如极性、酸碱性、极化性等都会对分子相互作用和分析检测结果产生影响。溶剂与溶质之间形成得氢键,影响溶质分子的电子云分布,进而改变待测物分子几何构型、特征官能团振动频率等;另外,溶剂作为环境也影响溶质分子的行为,可看作某种场改变溶质的化学物理性质。因此研究溶剂效应对分析检测、有机合成、化工材料的制备等至关重要。

## 3 溶剂效应对光谱分析的影响

### 3.1 溶剂效应对紫外吸光光谱的影响

紫外吸光光谱由于其可靠、准确、操作简单,且测定

【基金项目】国家市场监督管理总局重点实验室“石油产品检测与质量控制”开放基金资助(项目编号:2025TQCP002)。

需要时间极短,使它广泛应用于化工生产、化工检测以及环境检测等行业<sup>[2]</sup>。通常所说的紫外光谱是指对有机共轭分子有吸收的200 nm~400 nm的近紫外区。紫外吸收光谱中的溶剂效应是指酸碱性或极性的导致溶质与溶质或溶质与溶剂形成氢键,或极性溶剂分子的偶极使溶质分子的极性巩固,导致溶质的波长发生不同程度的变化。在极性溶剂中,对 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁来说,随着溶剂极性的增强 $\pi^*$ 中的电子与溶剂结合的稳定性增强, $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁能级差降低,吸收波长红移;而 $n \rightarrow \pi^*$ 跃迁所需能量增大,吸收波长蓝移<sup>[3]</sup>。因此,紫外吸收光谱中被测样品的波长随着溶剂极性的增加K带红移,而R带发生蓝移。极性溶剂不仅改变溶质的吸收波长,还会影响吸收强度和峰形。一般在气态或者非极性溶剂中,尚能观察到振动跃迁的精细结构,当改变极性溶剂后,由于二者的相互作用增强,导致谱带的精细结构变得模糊,甚至完全消失成为平滑的吸收谱带。值得注意的是溶剂本身在紫外光谱区也有吸收波长范围,因此在选用紫外光谱吸收检测时,需要考虑溶剂本身的干扰。

徐海<sup>[4]</sup>研究发现金属卟啉可以与一些路易斯碱性溶剂发生轴向配位作用,形成的轴向加合物的紫外可见吸收光谱 $\alpha$ 和 $\beta$ 吸收带的相对吸收强度比减小,如图1所示。Bayliss<sup>[5]</sup>研究了溶剂极性对波长大小改变的影响。Rao等<sup>[6]</sup>指出有机化合物的紫外吸收光谱的特征峰以及强度在不同溶剂中有较大变化。

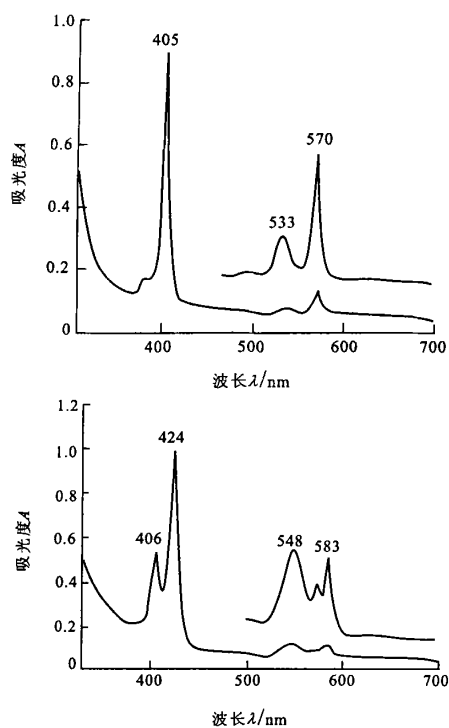


图1 氧钒-2, 3, 7, 8, 12, 13, 17, 18-八乙基卟啉在环己烷和正丁胺中的紫外可见吸收光谱图<sup>[6]</sup>

### 3.2 溶剂效应对红外光谱的影响

红外光谱在研究物质结构方面具有重要的作用,红外

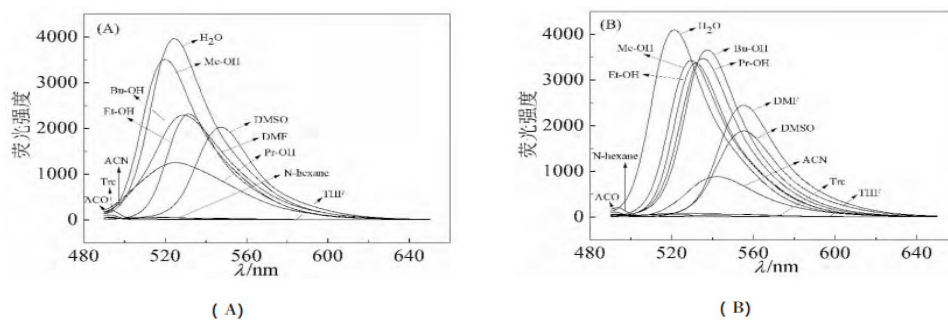
光谱检测方法在化学检验、环境检验等多个领域已被普遍使用<sup>[7]</sup>。结合待测物振动吸收峰以及红外光谱的解析,能进一步的认识待测物及溶剂环境。当极性溶剂和待测样品缔合时,分子之间存在着范德华力、氢键等非键相互作用,使分子中特征基团电子云发生改变,电子云的变化导致键长发生变化,从而影响待测样品吸收带的位置和强度。同一物质在不同极性溶剂间的相互作用不同,会使待测物的特征频率和强度发生变化。因此,为了避免极性溶剂对红外光谱检测的干扰,在测量时应尽可能采用非极性溶剂。

Engberts等人<sup>[8]</sup>用红外光谱法分析了N-环己基-2-吡咯烷酮在二元溶剂中的羰基伸缩振动频率,结果表明,羰基与溶剂之间存在两种类型的氢键。Perjessy等人<sup>[9]</sup>研究了吡咯烷酮及其衍生物在二元溶剂中红外光谱测试时溶质-溶剂相互作用,提出了溶质和溶剂间同时存在线性氢键、成角度氢键和环状氢键。Richard等人<sup>[10]</sup>探讨了在 $\text{CHCl}_3/\text{CCl}_4$ 混合溶液中烯酸酯的羰基和碳碳双键的红外吸收频率。随着 $\text{CHCl}_3$ 含量增加, $\text{CHCl}_3$ 与 $\text{C}=\text{O}$ 形成氢键,氢键作用的增加使 $\nu(\text{C}=\text{O})$ 降低。

### 3.3 溶剂在分子荧光光谱中的影响

荧光光谱测得物质性能主要是指在激发状态下发出荧光信号的强度和特性。荧光信号的强度和特性主要受分子结构、环境条件和溶剂等影响。溶剂的影响通常分为一般溶剂效应和特殊溶剂效应,前者是普遍存在的;后者指的是溶质和溶剂分子间的特殊化学作用,包括氢键和化学作用。若溶剂和荧光体作用形成了化合物,或者溶剂改变了荧光物质的电离状态,则荧光峰强度和位置会发生较大改变。溶剂的极性和极化度也会影响分子的电子状态产生改变。分子激发态的稳定性随溶剂的极性增强而增大,随着溶剂极性的增加电子跃迁能量下降,荧光物质发生吸收波长的红移。极化度较高的溶剂可以改变分子中的电子云形态,进而影响荧光强度和特性。总的来说,溶剂效应对荧光光谱测试有着很大的影响。有的物质本身没有荧光,但是物质和溶剂产生氢键或者生成配合键,增强了物质的共轭度会显现出荧光特征。因此在讨论物质的荧光发射波长时,应指出荧光光谱测试使用溶剂。通过精细控制溶剂的筛查和使用,可以有效地优化荧光性能,从而更好地发挥荧光光谱在环境监测、材料科学和精细化工等行业的应用。

方梓秋等人<sup>[11]</sup>研究发现溶剂效应引起的电子重新分布,导致核黄素在极性溶剂中第一激发单重态能级的发生变化,其荧光光谱峰值随着溶剂极性的增大而红移。同时指出,核黄素与水之间氢键的形成提高了分子的刚性,延长了荧光寿命。陈鹏<sup>[12]</sup>探究了溶剂效应对染料的荧光强度和发射波长的影响,如图2所示。朱冬华<sup>[13]</sup>实验也得到相似结论,荧光分子的发射峰位置随着溶剂极性的增大发生红移,而荧光强度随着溶剂极性的增大而减少。

图2 荧光素类染料在不同溶剂中的荧光光谱<sup>[12]</sup>

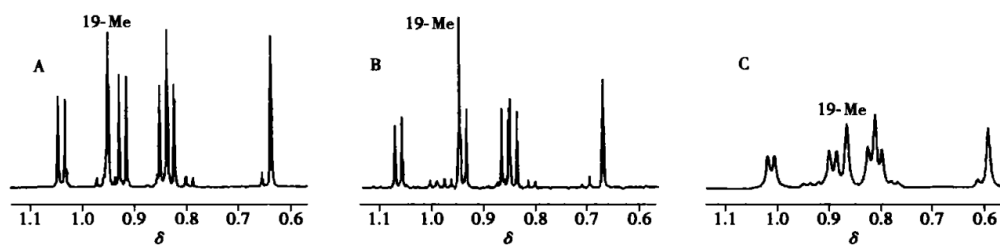
(A)FL (B) DFF

### 3.4 溶剂效应在核磁共振波谱中的影响

在核磁共振检测中凡是能够改变氢核外电子云密度的因素都能影响化学位移。溶剂效应产生的主要原因是溶剂的磁各向异性或者极性不同,溶剂与溶质分子形成复合物或氢键等。对于-OH, -SH和-NH等活泼氢而言,溶剂效应非常强烈。但 $\text{CCl}_4$ 和 $\text{CDCl}_3$ 等溶剂对化学位移值基本上没有影响。与碳相连的质子用核磁共振仪器测定时,在 $\text{CCl}_4$ 中仅差6 Hz,而选用芳香性试剂则能引起值30 Hz的变化,

这是由于部分质子位于芳香环的去屏蔽区,而某些质子位于屏蔽区,从而使化学位移发生变化。

孙世国<sup>[20]</sup>研究发现分别溶解在 $\text{DMSO-d}_6$ 和 $\text{CDCl}_3$ 中的2,2'-联吡啶-4,4'-二甲酸乙酯测得的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图具有很大的差异。孟志凌<sup>[14]</sup>发现了溶剂极性和溶剂引起的兰索拉唑互变异构,导致化学位移发生变化。李厚金<sup>[15]</sup>指出甾醇羟在不同溶剂中羟基氧附近的氢质子受到空间位阻的屏蔽效应导致化学位移发生变化,如图3。

图3 溶质在不同溶剂中的甲基氢化学位移 $[\text{CDCl}_3(\text{A}), \text{CD}_3\text{COCD}_3(\text{B}), \text{DMSO-d}_6(\text{C})]$ <sup>[15]</sup>

## 4 溶剂效应在色谱分析中的影响

溶剂效应对色谱分析是不利的,根据受影响的程度大小,色谱的表征行为也不同。色谱中溶剂效应最直观和最常见的表现形式是峰型异常,有峰分叉、前沿、拖尾等,但是在积分的时候会有一些研究者忽略后部分,而只积分较尖锐部分。

### 4.1 溶剂效应在气相色谱中的影响

气相色谱结果的精密度和准确度受流动相以及样品稀释剂影响。气相色谱中溶剂效应产生的原因是溶剂在溶液与色谱柱填料接触时起着两个作用:一是作为溶剂本身溶解样品;二是在色谱柱中充当流动相的作用。即进样过程中,样品并非同时到达色谱柱,导致后进入色谱柱的样品溶剂在色谱柱的局部范围成为先到达待测物分子的流动相,这是溶剂效应对气相色谱分离影响的主要原因。在色谱柱入口,在短暂时间内溶剂对溶质的浓度分布产生很大影响,造成色谱峰展宽、前延,甚至分叉。

杨玉芳等<sup>[16]</sup>发现以乙醇为稀释剂时,邻苯二甲酸酯在

气相色谱中的峰形不佳。张晓然<sup>[17]</sup>指出溶质在气相色谱中的响应随着溶剂极性的增强而减弱。王美飞<sup>[18]</sup>发现溶剂的极性直接影响目标化合物的定性和定量结果。在气相色谱分析测定中,尽可能的使用极性弱的有机溶剂作为稀释剂,以提检测过程中的精密度和准确性。

### 4.2 溶剂效应在液相色谱中的影响

高效液相色谱是精细化学品、药物化学等领域使用频率最高的检测手段。为了得到峰形对称、分离度高的色谱峰,通常对分析条件进行优化,如色谱柱、流动相、进样量、色谱柱温箱、梯度升温等,而很少考察稀释剂。溶剂组成、进样体积等均会对色谱峰、保留时间、峰形等产生影响。溶剂选择不合适容易导致溶剂效应。液相色谱检测中溶剂效应的几种常见原因和现象:溶剂极性强度大于流动相极性造成峰形前延;溶剂中的某种基质导致的溶剂效应引起色谱峰变差,甚至出现肩峰;溶剂效应引起杂质的峰面积变化导致积分不准确;溶剂效应导致杂质峰保留时间漂移。

徐静<sup>[19]</sup>发现同一份待测样品连续进样的峰面积值逐渐变化、峰形变差等现象。徐作刚等<sup>[20]</sup>研究发现用流动相替

代水作为盐酸环丙沙星溶剂时,会改变原方法中色谱峰扭曲,峰面积重现性差,定量测试结果准确度低的情况,能够提高测定结果的可信度。

### 4.3 溶剂效应在色谱中的危害及消除方法

溶剂效应在色谱分析中是不利的。主要包括以下几点:柱效下降影响分离效果;峰形不稳定引起定量不准确;溶剂不一致,影响定性结果;更严重的是强洗脱溶剂在基质中提取出的杂质遇流动相会析出,堵塞针座、柱前管路或色谱柱。

为了避免溶剂效应对气相色谱分析的影响,在配置溶液时,选用与溶质极性相近的溶剂;另外在进行定量分析时,标准溶液与待分析液所用稀释剂尽可能相同。在高效液相色谱定性定量过程中,通过减少进样体积、用强溶剂溶解样品后再用流动相稀释样品或者更换 HILIC 色谱柱等手段可以有效的减少甚至避免溶剂效应,实现分析结果的准确性和重现性。

## 5 结语

本文论述了溶剂效应的基本原理、产生原因,以及溶剂效应对光谱检测和色谱检测的影响以及色谱检测中溶剂效应的危害和消除办法。溶剂效应的存在不仅影响检测结果的准确性、精密性和稳定性,甚至影响分析检测结果。掌握和利用溶剂效应对分析检测的影响,进而提高分析的稳定性和选择性,对样品测试工作会有所帮助。

### 参考文献

- [1] 李港,代岩,赵文凯.不同溶剂对Pebax混合基质膜的CO<sub>2</sub>分离性能影响[J].现代化工,2024,44(02),171-179.
- [2] 肖源,王琦,刘佳,等.紫外-可见光谱在工业重金属检测中的应用研究进展[J].应用化工,2023,52(09),2660-2664.
- [3] 孟昭瑞,高宁.有机化合物的紫外光谱分析[J].资源综合,2017,6:179-182.
- [4] 徐海,于道永,阙国和,等.金属卟啉在不同溶剂中紫外可见吸收光谱的研究[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(2):110-113.
- [5] Bayliss N S, Merae E G. Solvent Effects in Organic Spectra: Dipole Forces and the Franck-Condon Principle[J]. Physical Chemistry, 1954, 58(11): 1002-1006.
- [6] Rao C N R, Singh S, Senthilnathan V P. Spectroscopic Studies of Solute-Solvent Interactions[J]. Chemical Society Reviews, 1976,

5: 297-316.

- [7] 刘佳,庄丹玲,蔡开聪,等. Gaussian软件在红外光谱教学中的应用——溶剂效应[J]. 化学教育, 2018, 39(10): 65-68.
- [8] Engberts J B, Alexander P, Michael J B, et al. Carbonyl Stretching Frequency Characteristics for the Strongly Hydrophobic Solute, N-cyclohexyl-2-pyrrolidone in Binary Aqueous Mixtures at 298.15 K. Evidence for a Two-domain Model for 2-butoxyethanol-water Mixtures[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 1992, 88(17): 2493-2495
- [9] Perjessy A, Engberts J B. Infrared Study of Solvent-solute Interactions of 1-substituted 2-pyrrolidinones and Related Compounds [J]. Monatshefte Fur Chemie, 1995, 126(8): 871-888.
- [10] Richard A N, Roman S. Infrared Solution Study of Alkyl Acrylates and Alkyl Methacrylates in CHCl<sub>3</sub> and/or CCl<sub>4</sub> Solutions[J]. Vibrational Spectroscopy, 1994, 8(1): 71-85.
- [11] 方梓秋,陈国庆,吴亚敏.核黄素在不同极性溶剂中的光谱特性研究[J].光谱学与光谱分析,2020,40(4):1132-1136.
- [12] 陈鹏,葛凤燕,蔡再生.卤素取代与溶剂效应对荧光素荧光光谱的影响[J].化学通报,2014,77(3):243-249.
- [13] 朱冬华,张唯舟,王筱梅.溶剂对荧光分子发光行为的影响[J].信息记录材料,2010,11(4):34-39.
- [14] 孟志凌,孙建民.兰索拉唑在不同溶剂中的核磁共振波谱研究[J].河南科技,2011,29(1):25-27.
- [15] 李厚金,林永成.麦角甾醇及其衍生物的氢化学位移溶剂效应[J].分析测试学报,2004,23(3):26-30.
- [16] 杨玉芳,穆强,鄢德利.气相色谱法测定邻苯二甲酸酯[J].化学研究,2010,21(5):48-50.
- [17] 张晓然. PAHs标准物质的时效性及典型有机标准物质的溶剂效应研究[D].北京:中国地质大学,2008.
- [18] 王美飞,胡恩宇,杨丽莉,等.气相色谱法测定邻苯二甲酸酯结果的影响因素[J].化学分析计量,2015,24(1):94-96.
- [19] 徐静,刘天强,彭衡阳,等.不同样品溶剂对高效液相色谱—蒸发光散射检测器测定黄芪甲苷的影响[J].医药导报,2014,33(12):1624-1627.
- [20] 徐作刚,段萍,邓巧云,等.盐酸环丙沙星片含量测定中使用不同稀释溶剂对峰面积的影响[J].黔南民族医学学报,2005,18(2):71-72.

# Study on Optimization of Synthesis Process and Quality Control of ABS Resin

Jingyong Zhu

China Petroleum Jilin Chemical Engineering Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132002, China

## Abstract

As a high-performance engineering plastic, ABS resin is extensively utilized across multiple industrial sectors, where its synthesis process and quality control directly determine product performance and application value. This study focuses on optimizing ABS resin synthesis processes and quality control. It first elucidates the fundamental principles, primary raw materials, and basic process routes of ABS resin synthesis. Subsequently, it analyzes optimization directions for synthesis processes, including reaction conditions, raw material ratios, and process parameter adjustments. The study then explores key factors influencing ABS resin quality, covering process parameters, raw material characteristics, and reaction environment. Finally, targeted quality control measures are proposed, involving process monitoring, critical control points, and finished product evaluation standards. The research aims to provide theoretical references for enhancing ABS resin synthesis process levels and product quality stability.

## Keywords

ABS resin; synthesis process; process optimization; quality influencing factors; quality control

## ABS 树脂合成工艺优化与质量控制研究

朱京勇

中石油吉林化工工程有限公司, 中国·吉林 吉林 132002

## 摘要

ABS树脂作为一种性能优异的工程塑料, 广泛应用于多个工业领域, 其合成工艺与质量控制直接决定产品性能与应用价值。本文围绕ABS树脂合成工艺优化与质量控制展开研究, 首先阐述ABS树脂合成的基础原理、主要原料及基本工艺路线; 随后分析合成工艺的优化方向, 包括反应条件、原料配比及工艺参数调控; 进而探讨影响ABS树脂质量的关键因素, 涵盖工艺参数、原料特性及反应环境; 最后提出针对性的质量控制措施, 涉及合成过程检测、关键环节控制及成品评价标准。研究旨在为提升ABS树脂合成工艺水平与产品质量稳定性提供理论参考。

## 关键词

ABS树脂; 合成工艺; 工艺优化; 质量影响因素; 质量控制

## 1 引言

工业制造行业极速发展之际, 工程塑料的性能需求持续提升。ABS树脂具备良好的抗冲击性、耐热性以及加工流动性, 所以在汽车、电子、建筑等领域被广泛应用。但是当下合成ABS树脂时, 存在工艺参数适配不够、质量波动较高等状况, 这限制了它在高端应用场景的拓展。所以, 展开ABS树脂合成工艺改良与质量控制的研究有着重要的现实意义。通过系统整合合成原理、确定工艺改良的方向、剖析质量的影响要素, 并采取科学的质量控制手段, 可以助力ABS树脂合成技术得到改善并实现升级。

## 2 ABS 树脂合成基础

### 2.1 ABS 树脂合成原理

ABS树脂由丙烯腈、丁二烯和苯乙烯这三种单体经接枝共聚与共混复合而成, 属于三元共聚物。它的合成重点在于利用自由基聚合反应来达成单体的有序融合。丙烯腈和苯乙烯会共同聚合生成SAN树脂相, 给予树脂以刚性、耐热性和化学稳定性; 而丁二烯橡胶乳液经过聚合便成为弹性体相, 带来树脂良好的抗冲击能力。这两者相结构依靠接枝反应达成界面结合, 从而创建起兼顾刚性和韧性的复合系统。聚合反应包含引发、增长以及终止阶段, 对这些阶段的控制会直接左右共聚物的结构规整程度以及相界面结合的紧密度, 进一步决定ABS树脂的综合品质。

### 2.2 ABS 树脂合成主要原料

ABS树脂合成的关键原料包含丙烯腈、丁二烯以及苯乙烯这三种单体, 这些原料的纯度及其性能会给合成反应以

【作者简介】朱京勇(1981-), 男, 中国山东栖霞人, 硕士, 高级工程师, 从事石油化工、油气储运研究。

及产品质量带来重要影响。丙烯腈属于极性单体，其纯度须要很高，如果有杂质存在，就会干扰聚合反应的启动和延续阶段，使得树脂的化学稳定性以及耐腐蚀能力下降。丁二烯是具有弹性的单体，它的聚合活性受到纯度和存储条件的影响很大，很容易产生自聚反应，所以要严密把控存储环境和使用时间。苯乙烯属于非极性单体，其聚合活性比较好，这种单体的纯度会直接左右共聚物的分子量分布情况以及结构的均匀程度。而且，在合成过程当中所用到的引发剂、乳化剂、分子量调节剂这些辅助原料，也要按照反应体系的特点来恰当选取，从而保证反应能够正常开展。

### 2.3 ABS 树脂合成基本工艺路线

ABS 树脂合成的基本工艺路线主要包括乳液接枝聚合-共混工艺、本体聚合工艺及悬浮聚合工艺等，其中乳液接枝聚合-共混工艺因产品性能可控性强、适应范围广而被广泛采用。该工艺路线主要分为三个核心阶段：丁二烯单体受乳化剂影响实施乳液聚合，产生丁二烯橡胶乳液；接着向橡胶乳液投入丙烯腈、苯乙烯单体，并由引发剂促使接枝共聚反应发生，合成接枝共聚物乳液；再把接枝共聚物乳液同 SAN 树脂乳液混合、凝聚、清洗、干燥，便得到 ABS 树脂成品。各工艺路线主要区别体现在聚合反应的相态环境及过程调节方法上，要遵照产品性能需求和生产状况选取合适的工艺路线。

## 3 ABS 树脂合成工艺优化方向

### 3.1 反应条件优化

反应条件对于 ABS 树脂合成反应效率以及产品性能有着关键意义，其包含反应温度、反应历时以及反应体系 pH 值等内容。反应温度会直接左右聚合反应的速率和活化能，温度过高极易造成反应失去控制，产生分子量分布不均衡的产品，从而影响树脂性能；而温度过低又会造成反应速率过缓，使得生产时间被大幅延长。反应历时的把控要同反应温度协调一致，既要保证单体完全聚合，也要防止因过度聚合而致使产物交联度过高或者过低。反应体系的 pH 值会通过对于乳化剂稳定性和引发剂活性的影响来间接调节聚合反应进程，恰当的 pH 值能够维持乳液体系的稳定，并改善反应的均匀程度。所以应当依靠系统调节去达成反应条件的良好适配。

### 3.2 原料配比优化

丙烯腈、丁二烯、苯乙烯这三种单体的配比会直接决定 ABS 树脂的相结构形成情况，从而影响其综合性能。原料配比的改良属于工艺改良的关键部分。丙烯腈含量增多能够改善树脂的刚性、耐热性以及耐腐蚀性，不过如果过量就会造成树脂韧性变差。丁二烯含量扩大可以加强树脂的抗冲击能力，但是也会减小其耐热性和刚性。苯乙烯含量关乎树脂的加工流动性和透明度，应当按照产品性能需求精确控制。而且，引发剂、乳化剂等辅助原料的配比也要加以改良。

引发剂的用量不够会造成聚合反应不彻底，用量过大则会使产物分子量过低。乳化剂的配比不合理会影响乳液的稳定性，引发聚合过程中产生凝聚状况。

### 3.3 工艺参数调控

工艺参数调控重点放在聚合反应里的搅拌速率、单体滴加速度以及反应压力这些关键参数上，改良的目标在于改善反应的均匀性并稳定产物性能。搅拌速率会直接左右反应体系的传质和传热效率，合适的搅拌速率能够保证单体均匀分布，防止局部浓度过高或者过低，促使聚合反应均衡开展；如果搅拌速率过快，就有可能造成乳液破乳，从而影响反应的稳定性。单体滴加速度要适配聚合反应速率，滴加速度过快极易致使单体聚集起来，进而产生暴聚现象；而滴加速度过慢又会拉长反应时间，缩减生产效率。至于高压聚合工艺而言，反应压力的调节会影响到单体的聚合活性，所以应按照反应体系的特征来保留恰当的压力条件。

## 4 ABS 树脂质量影响因素分析

### 4.1 工艺参数对质量的影响

工艺参数属于影响 ABS 树脂质量的关键要素，一旦发生波动就会引发产品性能偏离预期。搅拌速率过低时，反应体系中的传质现象变得不均衡，这会造成产物分子量分布变宽，而且相结构还会产生局部聚集情况，从而致使树脂的抗冲击性能及加工性能有所下滑；而搅拌速率设置得过高，则有可能破坏乳液的稳定性，生成凝胶状的杂质，进而对树脂的外观质量和力学性能造成不良影响。单体滴加速度若不保持稳定，就会影响共聚物的合成情况，使得性能产生波动，比如刚性与韧性之间的比例失调。反应温度发生波动的时候，聚合反应的动力学特性就会改变，产物的交联度以及分子量分布就会出现异常状况，进而影响到树脂的耐热性、耐候性等重要性能指标。

### 4.2 原料特性对质量的影响

原料特性若缺乏稳定性，则会影响 ABS 树脂质量是否一致。原料纯度、杂质含量及其性能波动，都会给产品质量带来很大影响。丙烯腈一旦存在微量水分或者杂质，聚合活性就会变低，而且还会左右共聚物的结构规整性，使得树脂的化学稳定性以及耐腐蚀性变差。丁二烯单体的自聚物会当作杂质混进反应体系里，从而破坏乳液的稳定性，引发接枝反应不彻底，进而影响树脂的抗冲击性能。如果苯乙烯纯度不够高，就可能会掺杂惰性杂质，这会干扰聚合反应进程，造成产物分子量分布不均匀，加工流动性变弱。就连辅助原料的性能存在差别，也会间接影响到反应过程，致使产品质量发生波动。

### 4.3 反应环境对质量的影响

反应环境包含反应体系的洁净度、氧气含量以及温度的稳定性等内容，这些因素对 ABS 树脂合成反应和产品质量有着重大意义。如果反应设备及环境的洁净度不够，就会

混入杂质,而这些杂质有可能充当聚合反应的不正常引发点,造成产物结构混乱,并产生性能上的不足。氧气属于自由基聚合过程中的阻聚剂,可以阻碍聚合反应的发生,缩减反应效率,还也许会造成产物分子量分布不正常,从而影响到树脂的性能。当反应环境的温度发生大幅波动时,就会打破反应体系的热力学均衡状态,使得聚合反应的速度变得不稳,于是便引起产物相结构和性能出现波动现象,进一步影响到产品质量的稳定性。

## 5 ABS树脂质量控制措施

### 5.1 合成过程质量检测

合成过程质量检测对于ABS树脂质量的保障非常关键,要针对反应全过程设立大量检测节点,随时观察反应状况。在单体投入时,检测各个单体的纯度、含水量和杂质含量,保证原料达到工艺要求。聚合反应期间,定时检测反应体系的温度、pH值、黏度以及单体转化率,这样就能了解反应的进程,及时调整工艺参数,防止反应失去控制。在接枝共聚和共混阶段,检测接枝率、乳液稳定性以及共混体系的均匀性,以确保相结构结合得较好。通过全程的质量检测,可以尽早察觉到反应过程中的质量问题,并加以解决,从而保证产品质量稳定。

### 5.2 关键环节质量控制

在ABS树脂合成的关键环节当中,执行精确的质量控制非常必要,这是改善产品质量的重点所在。乳液聚合这个阶段,要严格把控乳化剂的用量以及搅拌速度,从而保证乳液体系稳定,防止发生破乳或者凝聚的情况。还要准确调节反应温度和引发剂量,使得丁二烯橡胶的分子量分布比较均匀。进入接枝共聚阶段之后,控制好单体滴加的速度以及反应的温度,以此来加强接枝率并改善接枝的均匀程度,进而保证相界面结合的强度。共混与后续处理阶段需严格控制共混比例,也要保证搅拌均匀,这样才能使体系混合得当。要改良凝聚、洗涤、干燥的工艺参数,减小成品中的杂质含量和含水量,从而改善产品的纯度。

### 5.3 成品质量评价标准

创建起科学完备的成品质量评价标准,这对于保障ABS树脂产品质量契合应用需求来说非常关键。该评价标准的指标要包含力学性能、热性能、加工性能以及外观质量这些主要方面。力学性能关乎拉伸强度、冲击强度、弯曲强度等,热性能则牵涉热变形温度、维卡软化点之类的情况,加工性能要看熔体流动速率等情形,而外观质量就要把控成品色泽是否均一、杂质含量高低等状况。依照评价标准仔细

检测成品之后,就能精确判定其质量等级,从而保证合格的产品出厂供应市场。按照不同应用领域存在的差异需求,可以有针对性地调整评价标准,进而改善产品的市场适应能力。

## 5.4 绿色与智能化技术应用展望

未来ABS树脂合成工艺的优化与质量控制将更紧密地结合绿色化学与智能制造理念。一方面,开发环保型引发剂、无毒乳化剂及高效回收技术,可降低生产过程中的能耗与废物排放,实现清洁生产。另一方面,通过引入在线分析、人工智能与大数据技术,构建智能化工艺控制系统,实现对反应参数、原料特性及环境因素的实时监测与动态调控,从而精准预测并优化产品性能。这些先进技术的融合应用,将推动ABS树脂合成向更高效、稳定、可持续的方向发展,为高端应用领域提供更优质的材料解决方案。此外,建立基于全生命周期评价的绿色工艺标准体系,将引导行业从源头设计上实现节能降耗与产品高性能的统一。通过数字孪生技术构建虚拟生产系统,可对工艺方案进行先期模拟与优化,大幅减少试错成本,实现从经验驱动到数据驱动的根本性转变。

## 6 结语

ABS树脂合成工艺若得到改良并加强质量控制,其产品性能将会得以改善,市场竞争力也会得到加强,这是提升产品性能与市场竞争力的关键所在。通过对ABS树脂合成原理、工艺改良方向、质量影响因素以及控制手段展开系统探究之后,可以确定各个流程中的重点之处。反应条件、原料配比以及工艺参数一旦得到改良,便能够有效地加强合成反应的速度并且改善产物性能。工艺参数、原料性质以及反应环境都是决定产品质量的重要因素,如果在整个过程中执行检测、在关键步骤实施控制,并采用科学的评定准则,就可以保证产品质量稳定。未来研究可深入探究工艺参数的精确调节技术,加强质量控制的智能水平,促使ABS树脂合成技术朝着高效、优良、绿色的方向发展。

## 参考文献

- [1] 王猛.透明ABS树脂的合成工艺研究[D].长春工业大学,2024.
- [2] 王雅群.高抗冲ABS树脂的合成[D].青岛科技大学,2023.
- [3] 王海玥,李厦.合成树脂行业废气的环境影响评价方法分析[J].环境与发展,2020,32(12):14-15.
- [4] 李欣.本体透明ABS树脂的合成[D].青岛科技大学,2023.
- [5] 陈志华,刘振益.有机硅树脂的合成及其应用[J].山东化工,2025,54(20):30-32+35.

# The Research Progress of Cordierite LTCC Substrate Materials

Cong Zhang Guangqing Lin Shaoqing Yin Jianbin Guo Fafu Liu

Inner Mongolia Institute of Metal Materials, Baotou, Inner Mongolia, 014000, China

## Abstract

Cordierite ceramics, with their low thermal expansion coefficient, high chemical stability, and excellent dielectric properties and mechanical strength, serve as superior electronic packaging substrate materials and are widely used in integrated circuits. They have garnered significant attention both domestically and internationally. Additionally, they find extensive applications in precision semiconductors and honeycomb ceramics. This paper reviews the advantages, classifications, and research progress of cordierite LTCC base materials, analyzes the gaps between domestic and international developments, and provides recommendations for future advancements.

## Keywords

Cordierite; LTCC; Integrated circuits; Electronic packaging; dielectric material

## 堇青石 LTCC 基板材料研究进展

张丛 林广庆 尹绍庆 郭建斌 刘发付

内蒙古金属材料研究所, 中国·内蒙古 包头 014000

## 摘要

堇青石陶瓷由于较低的热膨胀系数、较高的化学稳定性以及良好的介电性能和机械强度, 是一种性能优良电子封装基板材料, 广泛用于集成电路中。在国内外备受关注。除此之外, 在精密半导体、蜂窝陶瓷等领域亦有广泛应用。本文综述了堇青石 LTCC 基板材料优势、分类及应用研发进展, 分析了国内外差距, 并给出了今后的发展建议。

## 关键词

堇青石; LTCC; 集成电路; 电子封装; 介电材料

## 1 引言

微电子技术被称为武器装备“心脏”, 是现代军事技术的核心和基础。随着微电子技术的飞速发展, 电子、微电子和光电子元件日益向高功率化、高密度化、高集成化与高运行速度的方向发展, 进而对集成电路的稳定性、可靠性提出了更苛刻的要求<sup>[1][2]</sup>。为了实现多元化集成电路的高速、高稳定性运转, 要求封装基板材料具有高的电阻率、低介电损耗、高热导率以及与芯片(Si)的热膨胀高匹配特性, 同时可以满足与Cu、Ag等导体及电容电阻及芯片元件低温共烧, 实现多元化集成设计。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiC等传统基板材料和高温烧结陶瓷(HTCC)由于高的烧结温度、电极材料选择局限性以及与Si的热膨胀匹配差等问题, 逐渐难以满足要求。近年来, 各大厂商纷纷将目光聚焦低温共烧陶瓷材料

(LTCC), 其中以堇青石材料为基材的LTCC基板材料, 由于其较低的热膨胀系数、较高的化学稳定性以及良好的介电性能和机械强度, 在国内外备受关注。

## 2 堇青石 LTCC 基板材料应用背景

随着数字化、信息化的发展, 集成电路逐渐向集成化、多功能化、高速高频、高可靠及低成本化方向发展, 基于LTCC的封装技术是实现电路系统小型化、集成化、多功能化和高可靠性的重要手段。因此, 大规模集成电路的高速发展对LTCC基板材料提出了更高的要求: 比传统的氧化铝LTCC基板材料更低的介电常数来提高信号传输速度; 与芯片更加匹配的热膨胀系数保持热稳定性; 同时比传统玻璃陶瓷更优异的机械性能保持运行稳定性。相比传统基板材料, 堇青石材料具有高的热稳定性、低的介质损耗、优异的机械性能以及热膨胀系数与Si芯片匹配等优点, 是一种性能优良的LTCC基板材料, 尤其在混合多层基板MCM-C/D技术领域具备良好的应用价值。

目前堇青石LTCC基板的应用主要面向于两大领域:

【作者简介】张丛(1988-), 女, 中国山东烟台人, 硕士, 副研究员, 从事堇青石等多晶氧化物陶瓷、氮氧化物陶瓷研究。

(1) 应用于航空、航天、民用汽车及军事领域集成电路。LTCC 技术最早被应用于航空、航天及军事电子装备中,例如美国罗拉公司的太空系统部门利用 LTCC 技术研制成卫星控制电路组件。美国 Raytheon、Honeywell 等公司利用 LTCC 设计与制造技术,研制出了多种可用于导弹、航空和宇航等电子装置的 LTCC 组件或系统。

(2) 应用于 MEMS、驱动器、传感器、滤波器等微电子系统领域。结合 MCM 技术与 LTCC 技术,实现多芯片、多元器件的三维组装,制备高集成度、小型化的封装基板。堇青石 LTCC 基板由于与芯片的高热匹配特性,及高的热稳定性,可以通过内埋置电容、电感等形成三维结构,从而大大缩小电路体积,提高电性能。

### 3 堇青石 LTCC 基板材料产品研发进展

针对堇青石 LTCC 基板材料,美国、日本等发达国家做了大量的研究工作,并相继推出叠片多层陶瓷基板封装材料和工艺。目前,堇青石 LTCC 基板材料已经走向商品化,著名的生产商包括 IBM 公司、日本京瓷公司以及美国 DuPont、Ferro 公司等等。早期,美国康宁公司开发了堇青石陶瓷基板,应用于许多场合。更多的研究发现,单一堇青石材料不能在 1000℃ 以下致密烧结,而且单一堇青石材料

的热膨胀系数大大低于 Si 芯片的热膨胀系数,进而导致热失效问题。基于上述问题,IBM 公司采用成分调控等手段对康宁公司的产品进行了改性,获得了满足介电性能及热膨胀匹配要求的堇青石微晶玻璃基板,该产品具备优异的热学及电学性能,1MHz 条件下介电常数为 5.3~5.7,热膨胀系数为  $(2.4\sim 5.5) \times 10^{-6}/K$ 。此外,IBM 公司推出了在湿 H<sub>2</sub> 中进行玻璃-陶瓷/Cu 布线的技术手段,成功解决了 Cu 导线氧化问题,同时使微晶玻璃完全致密化。目前,IBM 的 390 / ES9000 系统即采用了该技术,这对于 IBM 保持在大型计算机方面的领先地位做出了贡献。日本京瓷公司开发了一款具备低介电常数、低热膨胀系数且高模量的堇青石 LTCC 基板产品 (GL570),其材料是以堇青石为主体,通过调节热膨胀系数和低温共烧助剂来达到半导体封装工艺要求,相比 CBS 玻璃体系,该产品不仅拥有与芯片硅良好的热匹配性能,还具备高的弹性模,京瓷公司相关 LTCC 产品性能如表 1 所示<sup>[3][4]</sup>。

国内堇青石 LTCC 基板材料研发起步较晚,目前仍处于产品开发阶段,产品性能仍不成熟。目前清华大学、上海硅酸盐研究所等单位正在开发堇青石 LTCC 用陶瓷粉料,尚未到批量生产的程度,导致国内相关产品仍依赖进口。

表 1 京瓷公司封装基板产品性能列表

产品编号	介电性能		热性能		机械性能		导电材料
	介电常数 1MHz	介电损耗 1MHz × 10 <sup>-4</sup>	热膨胀系数 /ppm · °C <sup>-1</sup> (0~400℃)	热导率 /W · (m · °C) <sup>-1</sup>	抗弯强度 /MPa	弹性模量 GPa	
GL330	7.8	4	8.2	4.3	400	178	Cu
GL570	5.6	3	3.4	2.8	200	128	Cu
GL952	7.7	1	8.3	1.8	250	119	Ag
GL771	5.3	8	12.3	2	170	74	Cu
GL773	5.7	5	11.7	1.9	280	95	Cu

### 4 堇青石 LTCC 基板材料分类

堇青石 LTCC 基板是以堇青石微晶玻璃或堇青石陶瓷作为电路基板材料,埋入多个无源元件,利用激光打孔、微孔注浆、精密导体浆料印刷等工艺制出所需要的电路图形,叠压后在低于 950℃ 的烧结炉中共同烧结,最终制成三维电路网络的电路板。

堇青石 LTCC 基板材料大致分为陶瓷-玻璃复合体系和微晶玻璃体系两大类:

#### 4.1 陶瓷-玻璃复合体系

堇青石陶瓷作为低热膨胀基板材料,具有良好的应用价值。单一堇青石材料难以满足低温共烧的应用需求,为了实现堇青石陶瓷与多元器件的低温共烧,常采用添加低介电常数玻璃相的方法以降低单相陶瓷的烧结温度,同时通过优化材料配比保持陶瓷材料的机械性能及热稳定性。常用的低介电性能玻璃相包括高硅酸盐、硼酸盐以及硼硅酸盐玻璃等。

由于玻璃相结构的非规则性,热膨胀系数和介电常数均较高,根据材料复合法则,加入具有低热膨胀和低介电性能的材料,并通过调整材料体系的组分设计,实现对整体材料的性能调控。如果添加晶相成分的热膨胀系数和介电常数较低,则材料整体呈现出来的性能介于两者之间;当添加晶相的体积分数增大时,材料的热膨胀性能和介电性能随之趋于优良。

桂林电子科技大学陈国华等人<sup>[5]</sup>制备 CBS 玻璃/堇青石陶瓷复合基板,研究了不同组分的堇青石陶瓷相对复合基板的介电性能、致密性及热学性能的影响,并优化了组分分配比,在低于 950℃ 温度下烧结获得的样品具备低的介电常数 (~6),低的热膨胀系数 ( $4.2 \times 10^{-6}/\text{°C} \sim 5.2 \times 10^{-6}/\text{°C}$ )。

波兰的微电子和光子学研究所<sup>[6]</sup>制备了具有低介电常数的堇青石-莫来石-玻璃基板材料,并对该材料在于太赫兹频率下的介电性能和热学性能展开了研究,该材料含有 30wt% 的堇青石,10wt% 莫来石以及玻璃相,可在相对较

低的温度(970℃~1020℃)下烧结,具有4.0~4.7的低介电常数,适用于亚毫米波段。

波兰研究人员<sup>[7]</sup>开发了一种堇青石陶瓷-玻璃复合体系的多层LTCC基板,该基板制备工艺:采用堇青石陶瓷粉末与含有少量碱金属元素的SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>玻璃,以1:1的重量比混合,并在粘结剂和分散剂作用下制备均匀分散的浆料,通过流延成型获得致密的玻璃-陶瓷生带。生瓷带在20MPa的压力和70℃的温度下进行等静压及多次层压处理后,于900℃下烧结30分钟。整个烧制过程的总持续时间为30小时。该方法获得的基板材料具备良好的介电性能。

#### 4.2 堇青石微晶玻璃

研究表明,堇青石微晶玻璃体系在氮气环境下可以保持与铜导体共烧时的稳定性。另一种比较成熟的工艺为在蒸气-氢气混合气氛中烧结,通过控制适当范围氧分压,在特定温度下,既可以完全除去残碳又可以保持铜的稳定性,从而使微晶玻璃完全致密化,获得最佳的性能。

名古屋工业科学研究所Ohsato等人以堇青石玻璃陶瓷为基体材料,Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为烧结助剂,制备了一种用于低温共烧陶瓷的新型低温烧结基板,该基板具有低介电常数和超低介电损耗。此外,Ohsato等人还研究了添加不同组分TiO<sub>2</sub>对堇青石玻璃陶瓷介电性能的影响,通过添加TiO<sub>2</sub>作为晶种来防止开裂,并发现添加10wt% TiO<sub>2</sub>获得的玻璃陶瓷具备低介电常数(4.7)和高品质因数(大于200×10<sup>3</sup>GHz),该研究成果有望作为微波/毫米波材料被用于第五代(5G)移动通信系统中。

沈阳大学王少洪等人采用Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>进行掺杂,成功地将堇青石陶瓷坯片的烧结温度降低到900℃。通过开展堇青石流延坯片的性能及其与导电银浆的共烧为研究,发现在添加适当组分的Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,并于900℃烧结可以得到主晶相为α相的堇青石陶瓷基板。该陶瓷基板具有良好的致密性和介电性能,且与导电银浆具有较好的共烧匹配性。

中国地址大学工程研究中心以砂质高岭土为低温共烧陶瓷(LTCC)基材,成功制备了掺杂H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>和NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>的非化学计量α-堇青石玻璃陶瓷。该项研究表明,在低于925℃的温度条件下烧结,可以获得性能良好的堇青石微晶玻璃材料,其介电常数在5.5-7.5范围内,介电损耗在0.015-0.025范围内,热膨胀系数在1.22-4.32 9 10-6 K-1之间,适用的抗弯强度在110至145 MPa之间,满足LTCC基板材料的应用要求。

### 5 今后的发展建议

(1) 热膨胀系数调控研究。为了获得更低的热膨胀系数,对堇青石材料的研制通常采用较高的温度以获得更高含量的α-堇青石,最终获得的基板材料热膨胀系数往往低于Si芯片的热膨胀系数(3.35×10<sup>-6</sup>·K<sup>-1</sup>),存在与芯片硅热膨

胀不匹配而引发的失效问题。因此针对热膨胀系数不匹配问题,开展热膨胀系数调控方面的研究,获得接近于芯片硅的热膨胀系数,同时保持良好的电学及力学性能,成为今后的一大发展方向。

(2) 堇青石LTCC基板材料多功能化研究。针对大规模集成电路,除了满足低热膨胀特性、低介电性能和高的力学性能,还需要良好的散热性能,即需要高的热导率,保证快速降温,提高设备的稳定性和使用寿命。因此,如何通过第二相调控,实现堇青石LTCC基板材料多功能集成设计。

### 6 结语

堇青石LTCC基板材料已成为高频、高密度电子封装领域的核心材料,被广泛用于集成电路及微系统领域。目前国内堇青石LTCC基板材料的研发工作仍面临诸多挑战,但堇青石LTCC基板材料的持续创新,不仅推动低温共烧陶瓷技术的发展,更为下一代电子封装提供了“高频化、微型化、高集成化”的解决方案,其发展潜力值得长期关注与投入。

### 参考文献

- [1] Sohn S B, Choi S Y, Lee Y K. Controlled crystallization and characterization of cordierite glass-ceramics for magnetic memory disk substrate[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(19):4815-4821. DOI:10.1023/A:1004876829705.
- [2] Wan Y, Cui X, Wen Z. Ordered mesoporous carbon coating on cordierite: Synthesis and application as an efficient adsorbent[J]. Journal of hazardous materials, 2011, 198(2):216-223. DOI:10.1016/j.jhazmat.2011.10.031.
- [3] Wang F, Zhang W, Chen X, et al. Synthesis and characterization of low CTE value La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass/cordierite composites for LTCC application[J]. Ceramics International, 2019, 45(6):7203-7209. DOI:10.1016/j.ceramint.2018.12.228.
- [4] Pramono S, Sumantyo J T S, Ibrahim M H, et al. A Novel Low Temperature Cofired-Cordierite Ceramic Substrate Based Compact Ultra-Wideband Circularly Polarized Array Antenna for C-Band Remote Sensing Application[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2025:1-1. DOI:10.1109/ojap.2025.3544279.
- [5] 陈国华, 唐林江. CBS玻璃/堇青石陶瓷复合材料制备与性能[C]//第六届中国功能材料及其应用技术学术会议论文集(2). 2007:4. DOI:ConferenceArticle/5aa11a9ec095d72220876414.
- [6] Synkiewicz-Musialska B, Szwagierczak D, Kulawik J, et al. Structural, thermal and dielectric properties of low dielectric permittivity cordierite-mullite-glass substrates at terahertz frequencies [J]. Materials, 2021(14). DOI: 10.3390/MA14144030.
- [7] Synkiewicz D K J. Multilayer LTCC structures based on glass-cordierite layers with different porosity [J]. Microelectronics international: Journal of ISHM--Europe, the Microelectronics Society--Europe, 2017, 34(3)

# Research on the Management Strategy of Chemical Engineering Construction Site

Zhanhu Han<sup>1</sup> Jun Luo<sup>2</sup>

1. Zhejiang Dingsheng Petrochemical Engineering Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

2. Zhejiang Petrochemical Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

## Abstract

Most chemical engineering construction sites are located within explosion-proof zones and their supporting facilities, where hazardous factors such as high temperatures, flammable/explosive materials, and toxic substances are prevalent. Furthermore, the parallel operations of construction and production units require meeting both schedule deadlines and safety compliance requirements, posing significant challenges to construction. To address these issues, we analyze typical difficulties in chemical engineering construction sites through safety supervision systems, key control points, and on-site organizational characteristics. Scientific and feasible countermeasures are proposed to enhance the management standards and standardization of chemical construction sites.

## Keywords

Chemical Engineering; Construction Site Management; Typical Difficulties; Optimization Path

## 关于化工工程施工现场管理策略研究

韩战虎<sup>1</sup> 罗军<sup>2</sup>

1. 浙江鼎盛石化工程有限公司, 中国·浙江 舟山 316200

2. 浙江石油化工有限公司, 中国·浙江 舟山 316200

## 摘要

化工工程施工现场大部分位于防爆装置区及其配套设施范围, 存在高温、易燃易爆、有毒介质等危害因素; 加之施工单位与生产运行单位并行组织, 在保证工期节点的同时还需满足安全审查和安全设施的要求, 给施工带来较大难度。基于此, 我们通过安全监督管理制度, 结合管控要点及现场组织特点, 分析化工工程施工现场存在的典型难点问题, 并提出科学可行的对策措施, 以提高化工施工现场管控水平和规范化程度。

## 关键词

化工工程; 施工现场管理; 典型难点; 优化路径

## 1 引言

化工工程在中国工业发展中占据着十分重要的地位。随着社会经济不断发展, 人们对化工产品的需求日益增长, 在带动化工事业蓬勃发展的同时, 对化工工程施工也提出更高要求。特别是在施工现场管理方面, 由于化工工程与一般工程有着较大差别, 开展施工不仅要投入较大资金, 还要考虑后期化工生产工作, 再加上施工过程需要运用一些特殊材料, 对施工工艺的要求也比较高, 若现场管理不够, 就容易埋下质量安全隐患。

**【作者简介】**韩战虎(1979-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事炼化装置维保工作和装置技改项目及工程建设项目研究。

## 2 化工工程施工现场管理的特点与难点

### 2.1 危险介质与高危作业叠加引发的风险耦合

很多化工装置区的施工环境容易产生爆炸或挥发, 在酸碱腐蚀性介质、有毒介质的地方开展; 同一个作业面上还会同时进行动火、受限空间、盲板抽堵、吊装、临时用电等多个特种作业, 这种相互叠加带来的危险程度更高, 不管任何一个环节出了差错, 都会引发一连串问题。现场难点表现在: 即使按规定进行了置换、吹扫、蒸煮、通风等措施, 但由于管线布设复杂、死角等原因依然会出现“局部没问题、整体不稳定”的情况。其二, 现场阀门相对较多, 由于关联电气、仪表、机械、公用工程、火炬放空等多套系统, 一旦某处局部的隔离不到位或未彻底执行, 将造成挂牌与现场阀门状态存在不一致的风险, 留下安全隐患。

### 2.2 多专业并行与装置单元化施工造成的界面冲突

化工工程现场往往是土建、设备、管道、电仪、保温

防腐等几个专业齐上阵，而且划分若干个装置单元和管廊系统，界面比较多。从而面临的第一个难点就是施工顺序往往受限于工艺或者场地要求。譬如：设备吊装就位后，接着找正安装管道、敷设电缆、安装桥架等，这些工作你追我赶，经常互占位置，导致一个专业要返工牵涉其它专业的半成品或者成品保护不到位而需要二次修补；二是现场参建方多，常见的有业主、总包方、分包队伍，还有监理等，特别是涉及业主同质检查时，整个施工现场热闹非凡，质量责任容易出现“中间空档”问题；三是联动试车的准备工作通常都是穿梭于各专业间。如果不具备试车条件，例如该封的地方没有封起来，该拆除的地方没有拆掉，该验收的地方没有验收完毕，就急于开展后续工作，势必会造成大量的排查工作。

### 2.3 受限场地与厂内交通约束下的平面组织难题

就施工实践来看，改造扩建项目大多数是在化工老厂区内进行，或者是靠近已经正常运转的装置区，还有一部分区域用于工厂制式区位结构布局，使得场地呈现“狭长、分散、受限”特点，对工地搭建临建、布置加工点位、机具停放、车辆行驶通道有着极大的限制。其次受天气影响，如雨雪后路面泥泞湿滑；冻融阶段地表松软，压辙严重；夏天车辆底盘软、尘土多，增加了车辆作业及行人出行难度。此外，吊装环节需要按照现场的实际情况灵活调整行走路线，吊车的支腿位置也要反复核验，并且铺好钢板、枕木等，这些操作必须根据现场实际进行跟班补修，所以日常工作的策划并不是一成不变的，具有不确定性。再加上现场工序越多，隐患还会反复出现，使得平面组织越来越难。

### 2.4 质量合规与进度约束叠加导致的变更返工风险

化工工程的质量要求很“硬”，像一些工序不仅要按规范做好，还要考虑装置工艺上的要求，例如：介质腐蚀强吗？管道洁净度够不够？法兰是否能达到长时间不泄漏等等？可见质量控制环节多、链条长、卡点频繁。其次，现场最难的就是有很多质量问题当时看不到，等到后期才显露。诸如焊口外表看上去没问题，但试压后发现渗漏；还有就是衬里、玻璃鳞片等初验合格，等到气吹洗时才发现起泡和脱落现象。问题一旦在试压、吹扫、试车环节才发现，整个项目将立即停工维修整改，这无疑打乱了整个进度安排。

## 3 化工工程施工现场管理策略研究

### 3.1 以作业许可矩阵为主线的高危作业闭环控制

以作业许可矩阵为抓手实行高危作业闭环控制，其目的是让每一张票证对应到现场状态、作业窗口。第一，先搞清楚“能不能同时干”。由总包方牵头将动火、受限空间、盲板抽堵、吊装、临时用电等作业汇总进区域或时段的周计划、日计划表内，再构建许可矩阵预留同一作业面必要的窗口时间，并确定互相禁人组合，如动火不能与可燃介质开口同步、吊装时在同一区域内不得安排交叉作业、不能同一个窗口涉及几个作业点，以防控制项目不同工种队伍扎堆作业

带来的指挥混乱。第二，审核批准的重点由“票证查证”转向“现场严查”。在现场，逐一核对隔断阀门、锁挂点、盲板位置、警戒范围、监测点位、通风照明和应急器材，同时查看承包商是否具备准入资格、特种作业证件是否齐全、班组交接记录是否合规，并将作业许可证上注明的许可证有效期、延长期限、复审人等信息核对完善；涉及管线隔断要对照盲板编号、位置图和盲板实物三者是否一致，避免出现装错、漏装、错位隔离的现象。第三，实施过程把好“三道关”。开工前，由装置方、监理、总包对气体检测、临电接线、动火器材、围护设施进行复核，且现场交底；作业过程中落实专职监护制度，不得兼岗，按规定频率抽查检测记录、警戒措施落实情况，评价指令发布和管控力度的一致性，一旦发现气体检测指标波动频繁、隔离打开、人员出界等情况，需马上停止施工作业、清理现场及人员撤离。注意收工前清点工具材料，检查临时施工设施已断电、火源已熄灭，孔口等已封堵完毕，确保现场无遗留隐患；完成作业后，依据票证要求做好现场清理，废料清运、临设拆除、阀门恢复及交接签证工作。未闭合项列入第二天复查清单，做好违章记录、及时销项。

### 3.2 以分区交接清单为核心的多专业界面前置治理

通过分区交接清单前置多专业界面治理，就是要解决“能不能进场、能不能转序”的问题，并将这些规定事项落实到交接清单及现场交界处的相关标识中，以避免扯皮和返工。第一，基于装置划分施工分区，交接清单分为结构完成、安装进场、系统形成和试车准备四个步骤，逐一明确交接分界线、可通行路径、临建占地、材料堆放地点、禁止进入区域和已完成工程保护的方法，同时还要明确下道专业进入的基础要素（是否留下脚手架、有无开口封堵、盲板放置位置、临电箱编号、接地情况等内容）。分区入口设置清单牌、附平面图并拍照留底，交接边界的标线用油漆或警戒带标出；最后交接走一遍，当场记录问题并在清单上签字再放行。第二，所有分包各自指定本专业的界面联系人，在每周一次的周会当中，将存在占地干涉、工序交叉、吊装计划、临电临水、消防通道等方面的矛盾进行一一比照落实，确定具体的责任人、整改周期，据此作为本周的重点工作予以考核，次日调度按纪要安排执行；另外每日召开15分钟的短会，核对“完成/未完成/卡点原因”，针对影响进度的关键点提前组织人资调配及调整作业顺序，避免因现场相互挤压而造成整体计划滞后。第三，关键工序设立停点。例如，基础二次灌浆前复核预埋件与标高，管道试压前确认支架与焊口检测，电缆沟封闭前进行隐蔽验收。值得注意的是，停点所需资料完全上传后才能开始下一步，否则退回继续整改至达到要求后再验。第四，建议满足条件时，先实施单系统交底，以管线号或者回路号为清单按项开展销项，未销项不得进入联动，销项要复验签字；对于临时拆改、占道和封堵同步走审批程序，保证通道畅通。

### 3.3 以标准化总平面为载体的物流与临建刚性约束

以标准化施工总平面为抓手,把“场地小、车多、临建乱”等问题逐一攻克。一是总承包单位在开工前做好总平面策划并固化为现场唯一的执行图,明确预制区、材料堆场、危废暂存点、机具停放区、消防保护区及主通道边界,统一围挡、编号、标识牌,并用白线标示出人行线、车行线、禁入区;任何占道堆放必须办理审批—核实—放行手续;所有消防间距、应急通道、装置检修口均在现场检查无误后方可落地使用,杜绝后期反复挪动。二是物流按“分区堆放+预约卸车”组织,材料分层分批有序码放;易燃保温、油漆溶剂类与一般性材料分区储存,定量发放;车辆分时段进场,设立等待区、卸车警戒区,指派专人现场指挥车辆调头、吊装配合等,严禁装置区道路长时间停放导致堵车、二次倒运。三是大件运输、吊装窗口实行刚性管控,提前对运输路线路面承载力、转弯半径等做路面承载检验,保证管廊穿越点、限高点的临时拆改手续妥善办结;垫板、钢板、临时道路由专人日常维护并进行检验,雨雪过后及时补强,避免垫板支腿下陷、设备刮碰以及回转扫线误入的问题出现。最后,临电、临建实施“一张图管到底”,配电箱按区域集中设置并挂牌,电缆能架空不落地、过路处盖板防压,雨季重点关注漏电保护、接地、排水沟是否畅通;危废暂存点需容器化、标识化,消防栓、安全通道门前不得堆放物品,动火区、吊装回转半径均应划线封控,并设置专人交通疏导。

### 3.4 以过程质量策划与变更受控为主线的交付一致性保障

要做到四个紧紧跟随:①开工前将质量计划变成可执行清单,根据不同装置单元及系统的检验批,将各环节自检、互检、专检及报验时间节点、停工待检工序,与负责人签字确定好。压力试验、探伤、防腐厚度、衬里电火花等关键工序,要安排给同一个团队进行控制,并绘制关键点编号表、保留统一表格,做到当天完成、当天记录归档。②所有进场的材料设备由采购部门把控各类证书及制造日期、相关说明。到货后认真审核炉批号、材质证明书和外部标识、规格型号。同时关键阀门入库前应完成强度与密封性能试验,并保存完

整的试验报告;垫片、紧固件按等级分区存储;焊材按牌号分类,并记录烘干、领取回收的过程;涂料按批号领用并记录配比、温湿度和除锈情况,确保后续可追溯。③提倡首件认可与样板先做,对首段焊接焊口、首台设备找正、首块防腐样板必须组织总包、监理及分包单位一起确认,将焊接参数、探伤比例、测量基准、记录表式确定后再开展批量加工制作;另外确定成品保护责任区域,并围挡、挂上标识牌、签署交接单,同时在交叉作业过程中报批拆改方案,获准后方可拆除和改动,禁止随意切、砍、踩压破坏现成已经完成的成品和结构、管线。④变更必须受控且实现资料同步,设计变更、工程洽商、现场签证、材料代用等都应纳入台账,取得设计方的书面同意后,经技术交底方可执行。更改试验压力、试验标准或防腐体系时,需要同步更新试验方案、报验点和记录模板,重新交底才能施工。

## 4 结语

综上所述,化工工程施工现场管理并非依靠制度堆砌,“措施能不能落地、执行能不能一致”才是根本所在。施工现场面临许多现实问题:“危险介质+高危作业叠加”、多专业穿插、场地受限、质量和工期双重压力。在此背景下,我们提出风险受控要有度、界面划分须精准、环环相扣有闭环,只有把作业许可、分区交接、总平面管控和质量策划贯彻到整个施工过程中,才能转化成可检查、可查证、可回溯的管理要事。

## 参考文献

- [1] 张清新,贾远超,王荣海.化工工程项目中的危化品安全管理策略研究[J].化工管理, 2025(13):90-93.
- [2] 曾建.化工工程施工管理中的项目风险分析与控制研究[C]//2024人工智能与工程管理学术交流会议论文集.2024.
- [3] 郭家明,潘晨,李海波.AIGC语境下展示空间设计课程教学质量评价研究——基于层次分析与熵权法组合赋权模型[J].全球教育视角, 2025, 02(01).
- [4] 杨二海.化工车间施工技术组织优化研究[C]//智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).2025.

# Construction of Procurement Quality Assurance System for Coal Chemical Engineering Project

Xu Ji Jingkai Wang Yunxia Ma

China Aerospace Changzheng Chemical Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

Coal chemical engineering projects involve diverse equipment and materials with extended cycles and complex interfaces. Procurement quality fluctuations often emerge during installation and commissioning phases, frequently resulting in rework, production halts, and claims disputes. In practice, common issues include inconsistent requisition documentation, overly simplistic supplier evaluations, ambiguous inspection checkpoints, and incomplete delivery documentation, shifting quality control from preventive measures to reactive remediation. To strengthen procurement quality assurance, technical requirements should be formalized into standardized processes, checklists, and documentation. This approach ensures unified evaluation criteria across design, procurement, manufacturing, warehousing, and field operations, while implementing tiered controls for critical equipment, special materials, and integrated systems. This paper presents actionable strategies and frameworks to enhance project delivery consistency and reliability.

## Keywords

coal chemical industry; engineering project; procurement quality assurance system; construction; necessity; strategy

## 煤化工工程项目采购质量保障体系构建

季旭 王靖凯 马蕴霞

航天长征化学工程股份有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

煤化工工程项目设备与材料品类多、周期长、接口密集, 采购质量波动常在安装调试阶段集中暴露, 进而引发返工、停工和索赔争议。现实中, 部分项目存在请购文件版本不稳、供方评审偏粗、监造检验点设置不清、到货资料不闭合等短板, 使控制由“预防”滑向“补救”。采购质量保障体系建设, 应把技术要求固化为流程、清单与记录, 推动设计、采购、制造、仓储和现场形成统一判定口径, 并对关键设备、特材及成套单元实施分级控制。本文提出一套可落地的体系构建思路与策略, 以提升项目交付的确定性与一致性。

## 关键词

煤化工; 工程项目; 采购质量保障体系; 构建; 必要性; 策略

## 1 引言

煤化工工程项目需要用到的设备物资种类多、专业跨度大、专用性强, 单个企业很难同时拥有如此多类跨领域设备物资的生产能力, 故在煤化工工程项目实施过程中往往需要涉及大量设备物资采购工作<sup>[1]</sup>。同时与一般工程相比, 煤化工采购受多专业接口、外协制造、异地交付与标准差异叠加影响, 单靠到货验收难以及时发现隐患。依据 ISO 9001 等标准及有关法规关于外部供方控制的要求, 以及化工过程安全管理对采购验收标准和关键设备制造监督的强调, 项目亟需建立覆盖策划、制造与交付的采购质量保障体系, 形成可核对、可追溯、可纠偏的过程控制。

【作者简介】季旭(1985-), 男, 中国北京人, 本科, 工程师, 从事采购管理研究。

## 2 煤化工工程项目采购质量保障体系构建必要性

煤化工工程项目普遍采用成套化、模块化供货方式, 设备、管材、阀门、仪表与电气等物资跨地域制造, 任何一个环节出现偏差都可能放大为系统性缺陷, 因此项目必须在采购阶段建立质量保障体系。第一, 煤化工关键设备多为压力容器、大型回转设备及特材管道, 制造周期长且工序复杂, 若缺少统一的检验策划与见证安排, 焊接、热处理、无损检测与性能试验等缺陷容易在出厂后被掩盖, 后期修复往往牵动停工与拆装。第二, 项目参与方多, 设计变更频繁, 若请购文件、数据表与检验标准未形成受控版本, 供方按旧版制造会造成管口方位、法兰等级与电仪接口不一致, 引发二次加工与返厂。第三, 供方能力差异明显, 单靠价格竞争容易引入外协链条不透明、关键工序分包、检验资源不足等风险,

必须通过准入评审、过程监督和绩效复核形成约束。第四，到货验收不仅看外观与数量，更依赖材质证明、试验报告与出厂记录的完整性，体系化管理可以把资料闭合、缺陷整改与偏差处置纳入里程碑考核，避免现场“边装边补”。同时，相关导则强调企业应明确采购和验收标准，并对关键设备实施制造质量监督，这也要求项目把采购质量控制做成常态化动作<sup>[2]</sup>。

### 3 煤化工工程项目采购质量保障体系构建策略

#### 3.1 需求文件与标准前置受控

为将采购质量风险压缩在源头，煤化工工程项目应以需求文件和执行标准的前置受控作为采购质量保障体系的起点。第一，设计专业应按设备数据表、材料规格书与供货边界表三类主控文件成套编制请购包，可参照 HG/T 20519 等设计文件深度统一规定完善内容层级，逐条写清材质牌号、腐蚀裕量、压力温度等级、法兰密封面型式、焊接与热处理要求、涂装体系及适用规范，并注明标准代号与年号版本，并在专业校审后由项目总工程师签认冻结版次再移交采购，任何补充必须形成正式澄清单并回写主控文件，避免口头解释漂移。第二，采购部门应同步形成采购质量计划和检验试验计划，将关键物资按安全等级与失效后果分级，明确见证点、停检点、第三方检验范围、型式试验与性能考核项目，同时规定材质证明、无损检测报告、压力试验记录、合格证和装箱清单等随货文件的提交节点，对等效标准或替代材料要求供方提交逐条对照表和偏差处置建议，便于监造与验收按同一口径执行。第三，对成套撬装单元应在招标文件中设置接口清单、供货范围图与随机备件清册，细化电仪点位、管口方位、伴热保温、基础预埋件、专用工具、调试配合与资料交付责任，并将接口确认和范围澄清纳入评标要件与合同附件，交付过程中以接口关闭清单逐项签认，防止供方以未包含为由弱化交付。第四，设计变更发生时项目应执行版本冻结与变更发布程序，以变更通知单为唯一技术指令，要求供方在规定时间内提交受影响物项清单、在制状态与库存消耗情况，采购据此调整监造节点、复验范围与发运安排，对已完成制造的部件按返工或让步接收形成书面结论，并同步更新随机文件清单和验收表单，确保制造、文件与现场安装采用同一技术口径。

#### 3.2 供方准入与过程评价闭环

为使煤化工工程项目采购质量保障体系在全周期内保持可控，应将供方准入、制造过程控制与绩效评价固化为闭环动作。第一，建立关键供方准入清单并分级管理，技术、质量与采购联合现场尽调，核对许可资质、体系运行记录、焊工及无损检测人员持证、计量器具校准、检验资源配置、产能负荷与外协比例，抽查同类业绩与质量投诉台账，评审结论形成定标前置条件。第二，合同技术附件细化质量保证要求，供方须提交制造检验计划和工序控制卡，明确原材来

源与复验项目、关键工序见证点与停工待检点、压力及功能试验安排、热处理与防腐防锈、包装防护与发运标识，并约定偏差申报、让步接收、返工返修责任及费用边界<sup>[3]</sup>。第三，对分包制造实行报备审批，明确分包单位、工序范围、接口交接与质量责任书，项目按里程碑对关键分包点抽查或驻厂见证，重点核对材料追溯标识、焊接热处理记录、无损检测报告、尺寸检验数据及不合格关闭证据，防止外协链条失真。第四，按月开展交付质量评分与复盘，指标覆盖返修率、缺陷关闭周期、资料齐套率、整改响应时效与现场服务到位率，低分项必须形成纠正措施并复验确认，必要时组织专项复查并在下月复评达标，评价结果与后续订单份额、预付款比例、结算扣款及替换触发条件联动。

#### 3.3 监造检验点分层执行

煤化工工程项目采购质量保障要把制造过程控制落实到监造检验点分层执行上，形成按工序推进、按证据放行的现场规则。第一，采购与质量部门应在合同签订后联合设计、监理和制造厂编制检验与试验计划，按风险将控制点划分为停止点、现场见证点与资料见证点，停止点应覆盖材料复验、关键焊口封闭前、耐压试验与最终检验等环节，逐条明确检验对象、检验方法、抽检比例、判定依据、参与方与放行条件，并把检验点嵌入制造进度节点，要求关键工序前完成前置资料核查，发现不合格立即冻结后续工序并保留复验窗口。第二，对压力容器、换热器及关键阀门等应实施原材料复验与入厂核对，监造人员需核对炉批号、材质证明、复验报告及采购技术条件一致性，重点检查标识移植位置与方式，确认切割余量与标识保护措施，确保下料、成形、焊接后仍可追溯到母材，同时对替代材料审批、偏差处置、复验结论和让步接收条件形成闭环记录。第三，过程见证应抓住焊接与装配两条主线，监造人员应核验焊接工艺评定覆盖范围、焊工持证、焊材批次与烘干记录，见证坡口加工、层间温度控制、无损检测比例与返修次数，核对热处理升降温曲线、保温时间、测点布置和硬度复测结果，装配阶段对关键尺寸、同心度、密封面粗糙度及阀座配研开展复测，偏差项当场开具问题单并限定纠正与复检时限，问题关闭后方可转入下一工序<sup>[4]</sup>。第四，出厂前应组织工厂验收与性能考核，按合同与标准复核铭牌参数、旋向及配对件匹配情况，逐项清点备件与专用工具，核对装箱清单、包装防护与运输加固，检查开孔封堵、防锈封存与干燥剂配置，确认检验报告、试验曲线与合格证齐全并完成签认后放行发运。

#### 3.4 质量文件与追溯链条管理

煤化工工程项目采购质量保障体系落地时，应以质量文件受控与追溯链条闭合为主线，把供货全过程转化为可核验的证据链。第一，项目应按设备、管材、阀门及特材等类别制定随货资料清单，并在合同中固化为交付物，明确材质证明、热处理与无损检测记录、试验曲线、装配检验记录、竣工版图纸及操作维护文件的提交格式、签章与语言版本，

设置到货前预提交与预审节点。质量证明文件无法提供原件时,复印件应加盖抄件章并注明原件存放单位,并要求到货开箱前完成资料核对。第二,对关键受压件和成套设备应实施标识与编码对应,将合同号、位号、制造编号、炉批号与箱号建立一一映射,关键件采用耐久标牌或打刻标识,发运前完成清点、封签与防护检查,仓储入库与开箱验收同步核对标识一致性和质量证明书要素,保证受压元件材料证明信息可追溯,备件替换时同步更新台账,避免批次混用。第三,对制造偏差、检验不符合项和缺陷返工应实行单据化闭环管理,设置统一编号并挂接到合同与位号,按程序完成鉴别、记录、隔离、评审与处置,要求供方提交原因分析、纠正措施、复验记录及防再发承诺,项目质量人员依据关闭标准复核并留存见证证据,未完成关闭不得以让步接收替代整改,必要时将处置结论写入发运放行条件。第四,在制造完工、发运、到货、安装等里程碑组织资料完整性核查,将文件缺失、签章不全、数据不一致与版本错用形成清单,逐项落实责任人、补齐期限和复核记录,并将资料合格作为阶段付款、结算与最终验收的前置条件,按竣工验收要求同步移交归档。

### 3.5 到货验收与现场移交协同

为实现采购质量在安装与试车阶段不失真传递,煤化工工程项目需把到货验收与现场移交纳入同一质量保障链条。第一,项目部应会同仓储、质量、施工及监理提前编制验收策划,统一缺陷判定口径与签认流程,按设备等级确定开箱顺序和抽检深度,落实量具、紧固件拆装工具及现场照明条件,对超限大件同步核对卸车点、临时支撑和吊装工况,提前划定堆放区与通道并安排高峰期值守人员,确保到货后可立即开展检查与缺陷隔离。第二,验收实施应围绕数量、外观、防护、匹配开展闭环核对,逐箱清点随箱附件与备件并对照装箱单签认,检查包装完好、防潮防锈和易损件固定情况,对成套设备同步复核位号、接口尺寸、方向标识及随机资料页码,关键尺寸用量具复测并形成抽检记录,发现运输损伤或规格不符应现场取证、挂牌隔离并形成问题单,按承运与供方责任路径明确处置时限和复验要求<sup>[9]</sup>。第三,入库保管环节应按物资敏感性配置条件,特材管件、紧固件实行分区分批标识并建立防混料卡控,密封件、仪表元件控制

温湿度并保持原包装,旋转设备按规定盘车、补油和防潮封存并记录状态,露天堆放材料应设置垫木、遮盖与排水措施,对防腐涂层与封口状态定期复查,发放前再次核对外观与标识,避免二次损伤进入安装。第四,移交施工前由采购、仓储、质量与施工共同开展成套性复核,按系统或设备包逐项核对到场数量、接口条件、随机资料、备件专用工具及防护状态,形成交接清单并由双方签认,同时在交接备注中列明未关闭问题、缺件补供计划、返修复验节点及供方现场服务联系人,施工据此锁定安装窗口和试压试车准备,移交后对问题单实行跟踪销项并保留交接会议记录,确保现场接收与后续安装节奏一致。另外,明确岗位授权与责任传递路径,赋予监造、验收人员签放权与否决权,按节点对监造记录、开箱验收、资料闭合实施签认,对仓储隔离、现场停用实行签认,对越权放行或资料缺项追责,采购牵头质量、仓储与施工同步处置。

## 4 结语

煤化工工程项目采购质量保障体系的构建,应围绕需求受控、供方可控、制造受控、资料闭合与现场协同五个维度展开,将关键控制点落实到流程、清单与记录之中。项目管理层应把质量策划与节点考核同步纳入采购执行节奏,确保问题能够及时暴露、及时纠偏,并在交付链条中形成可追溯的证据体系。通过持续执行上述策略,项目采购质量可实现稳定可控,为装置一次开车和长期运行奠定基础。

### 参考文献

- [1] 齐飞.优化项目采购质量管理 推动煤化工行业质效提升[J].中国质量万里行, 2025(4):56-57.
- [2] 刘智菱.大型煤化工项目中的设备采购管理策略分析[J].石油化工建设, 2024, 46(S1):45-46.
- [3] 贾东慧.探讨煤化工企业的招标采购管理方式[J].商品与质量, 2023(37):93-96.
- [4] 葛庆瑞.试析大型煤化工项目物资采购管理策略[J].石油石化物资采购, 2023(14):10-12.
- [5] 刘雄杰,王佳佳,王兴华.EPC模式下煤化工项目采购质量管理实践[J].中国物流与采购, 2019(14):32-33.

# Analysis of Quality Control Strategies in Polycrystalline Silicon Production

Junjie Liu

Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd., Yanghe, Xinjiang, 834034, China

## Abstract

This paper systematically explores the influence of various related factors on the quality in polycrystalline silicon production, elaborates on the key quality indicators, process, and core roles of raw materials and equipment, and analyzes the current overall quality control system from multiple dimensions such as composition, relied technologies, and existing limitations. Based on these analyses and discussions, it proposes optimization directions and forward-looking strategies for the technical innovation direction of key links, the standardization construction path of the management system, and the trend towards predictive intelligent control mode, in order to comprehensively improve the quality control level of polycrystalline silicon production through multi-level improvements.

## Keywords

Polycrystalline Silicon; Quality Control; Process Optimization; Process Management

## 基于多晶硅生产中质量控制策略分析

刘俊杰

新疆晶诺新能源产业发展有限公司, 中国·新疆 杨河 834034

## 摘要

本文系统探究了多晶硅生产中各关联因素对质量的影响, 阐述了关键质量指标、工艺过程及原材料设备的核心作用, 并且对现行的全过程质量控制体系从构成部分、所依赖的技术以及存在的局限性等多个维度加以剖析, 进而在这些分析和探讨的基础之上, 针对关键环节的技术创新方向、管理体系的标准化建设路径以及朝着预测性智能控制模式发展的趋势, 提出优化方向与前瞻性策略, 以期通过多层面的改进, 全面提升多晶硅生产的质量控制水平。

## 关键词

多晶硅; 质量控制; 工艺优化; 过程管理

## 1 引言

多晶硅在目前的电子产品和电池生产中有着重要的应用, 所以在电子市场不断发展的当前社会, 多晶硅的市场需求量巨大。庞大的国内市场吸引了大量国外多晶硅产品涌入, 导致本土产品因质量原因在半导体市场份额占比较低。这种局面对于我国的半导体行业自主发展是非常不利的, 所以国内的多晶硅企业需要积极的进行自身产品的质量控制, 在生产实践中做质量强调, 这样, 本土企业的产品质量会更稳定, 其在国内、甚至是国外的竞争力会更强。总之, 多晶硅生产中的质量控制与企业的质量意识有非常明显的关系, 所以要改变这种现状, 需要对企业的质量意识进行培养加强。

## 2 多晶硅生产中的质量要求与影响因素

### 2.1 产品质量关键指标

多晶硅作为半导体及光伏产业那起着基础性作用的原材料, 其质量会对终端产品的性能与可靠性产生直接的决定作用, 而其质量的关键指标, 首先是在于纯度方面, 特别是电子级多晶硅, 对于金属杂质含量的要求达到了极为苛刻的程度, 通常是需要达到 11N 也就是 99.99999999% 以上的标准; 其次是特定杂质的控制问题, 除了像铁、铜、铬、镍这些常见的金属杂质之外, 施主杂质比如磷、硼以及受主杂质例如铝、镓的含量及比例都必须要被严格地限定, 目的是为了能够确保能够实现精确的电学性能; 再次是结构特性方面, 这主要涵盖了晶粒的尺寸、取向、均匀性以及晶体内部的缺陷密度, 像位错、层错等情况都包含在内, 并且这些结构参数会对多晶硅在后续拉晶或铸锭过程当中的行为产生深刻的影响, 同时也会影响到最终单晶或硅片的机械强度与电学均一性, 所以说, 对这些关键指标进行精准的定义与检测, 成为了构建有效质量控制体系的根本前提, 也是其核心目标

【作者简介】刘俊杰(1992-), 男, 中国甘肃庄浪人, 中级, 从事化工行业多晶硅生产研究。

所在 [1]。

## 2.2 工艺过程对质量的核心影响

工艺过程是塑造多晶硅质量的核心，各阶段控制的精准度均直接体现在最终产品的关键指标上。在核心的化学气相沉积操作里，还原炉内的温度状况、压力大小、进气的成分比例和流动速度等参数，共同对硅在细棒表面的沉积速度和形态起主导作用。若温度均匀性不够或者出现局部温度过高的情况，容易引发晶格发生畸变以及位错数量增加，进而直接对晶体结构的完整程度产生影响；要是进气中三氯氢硅和氢气的比例不合适，就可能会导致非晶硅或者微晶硅的生成，使沉积效率和产品的致密程度下降。更为重要的是，整个沉积系统的密封性能、材料的耐受能力以及对反应副产物的及时排出能力，从根本上对引入外来污染的风险起到限制作用。前道工序比如三氯氢硅的合成与精馏过程，其分离效果决定了进入还原环节的基础物料纯度的最高水平；而在后处理过程中的破碎、清洗等步骤，如果控制得不好，就会成为表面污染和产生二次缺陷的来源 [2]。所以说，工艺过程不是各个孤立环节的简单串联，而是一个环环相扣的精密体系，任何一个节点出现波动，都会在最终产品的纯度、杂质分布以及晶体结构方面有所体现。

## 2.3 原材料及设备对质量的制约

原材料与设备的品质共同构成了多晶硅生产的物质基础，其内在制约贯穿于生产全过程，作为决定最终产品纯度起点的原料纯度中，主要原料工业硅所含金属杂质直接决定后续化学提纯工艺负荷极限，而氯气、氢气等辅助原料中微量水分、氧及烃类杂质可能在高温反应中引入不可逆污染，设备制约作用同样显著，所有与物料接触的反应器、管道及阀门材质必须具备优异抗腐蚀性与低渗透性且通常需采用特种合金或高纯石英，不过在持续高温、高压及腐蚀性气氛作用下这些设备仍可能发生缓慢析出或侵蚀并成为铁、镍、铬等金属杂质持续引入源 [3]，另外设备密封完整性、内壁光洁度、热场均匀性以及控制系统精度共同决定工艺条件稳定与精确，任何微小泄漏、温度梯度或测量偏差都会直接转化为沉积硅晶体结构缺陷或杂质分布异常，所以原材料设定质量理论上限而设备状态决定这一上限在实际生产中可实现程度，二者共同作用从根本上约束产品质量提升空间 [4]。

# 3 现行质量控制策略的构成与局限性

## 3.1 全过程质量控制的主要环节

现行多晶硅生产的质量控制策略，核心在于构建一个覆盖物料输入至产品输出全流程的系统化监控与管理体系，该体系主要涵盖入料环节的预防性控制这一关键部分、过程环节的实时性监控与调节这一重要构成以及产出环节的验证性评估与反馈这一必要组件；入料控制作为所有后续工作得以开展的基础，重点在于针对工业硅、氢气、氯气等主要原料建立起严格程度较高的纯度标准与验收规范，并且通过

来料检测这一手段来确保这些原料能够满足工艺方面的要求，从而从源头处对杂质的引入进行限制，而过程控制则贯穿于三氯氢硅合成、精馏提纯、化学气相沉积及后处理等核心工序之中，其核心要点是通过部署在线监测设备的方式，对温度、压力、流量、关键组分浓度等工艺参数实施连续的采集与跟踪操作，以保障生产过程始终处于稳定的设计窗口范围之内，至于产出控制环节则将重点放置在对最终多晶硅产品进行综合性检测与评估之上，依据预先设置的纯度、杂质含量、晶体结构等关键指标来开展分级判定工作，需要注意的是，这三个环节并非以孤立的状态进行运作，而是借助质量数据的实时流转与分析过程形成一个闭环，其目的在于达成从被动检验向主动预防转变的质量管理目标 [5]。

## 3.2 关键技术手段与依赖条件

为确保多晶硅全过程质量控制策略得以有效执行而当前所主要依赖的一系列关键技术手段，其效能受多重客观条件制约，其中作为质量感知核心的在线监测与高精度分析技术，涵盖如在精馏塔进出口处采用在线气相色谱对三氯氢硅中硼、磷等关键杂质实施实时追踪，以及在化学气相沉积过程中通过激光粒度分析、红外测温等技术对硅棒生长状态与炉内热场分布进行监控的具体应用，而对于最终产品的严格判定，则高度依赖辉光放电质谱、电感耦合等离子体质谱等痕量元素分析技术以及 X 射线衍射、扫描电子显微镜等用于评估晶体结构与表面形态的仪器，不过这些先进技术的有效应用需依赖苛刻条件，一是设备本身需具备极高稳定性、灵敏度与抗干扰能力，因任何仪器的漂移或故障均会造成数据失真，二是需有从传感器到中央控制系统高度集成且可靠的数据传输网络，以确保海量监测数据能被实时、准确采集与处理，三是从根本上需依赖操作与维护人员具备深厚专业素养，从而能够正确解读数据、及时校准设备并排除故障，由此可见，技术手段的先进性与对其依赖条件的满足程度共同对质量控制的实际深度与可靠性起到决定作用 [6]。

## 3.3 现有策略存在的问题与挑战

尽管已构建覆盖全流程的质量控制体系，但现行策略在实际运行中仍面临一系列由多重因素交织产生的、亟待破解的问题与挑战，首先在技术维度存在显著局限性，例如承担痕量杂质分析功能的气相色谱仪或质谱仪等关键在线监测设备，虽然其检测精度与响应速度处于持续提升的发展态势，但对于生产流程中可能出现的瞬态且微量的异常信号，却依然可能因设备性能边界而存在捕捉延迟现象或识别过程中的困难情况，进而导致质量控制环节出现“盲区”或产生滞后效应；更为复杂的是，源自不同生产环节、以不同格式呈现的海量质量数据与工艺数据，其有效整合过程及深度分析工作均构成巨大挑战，数据孤岛现象的存在极大地限制了基于全流程数据驱动模式的实时预警机制运行与优化决策过程推进；在管理执行层面，质量控制工作高度依赖操作人员的经验积累与判断能力，这使得标准执行的一致性极

易受到人为因素干扰,与此同时,严格的原料控制措施与设备维护要求导致显著的合规成本产生,如何在保障超高质量标准实现与寻求经济效益最大化之间维持持续平衡成为突出难题[7];此外,现有策略大多将关注点集中于已知关键参数的控制范畴,当面对工艺过程中因潜在交互作用引发的复杂质量波动情形,或需要应对更高纯度产品提出的新要求时,策略所具备的适应性与前瞻性则显现出明显不足,上述各类问题通过相互关联、相互影响的方式,共同构成了提升多晶硅质量稳定性与一致性目标实现的主要障碍性因素[8]。

## 4 质量控制策略的优化方向与措施

### 4.1 关键环节强化与技术创新方向

多晶硅质量控制策略优化的核心路径在于面向关键环节的强化与技术突破,而在原料预处理这一环节重点需开发更高效的可从源头提升物料质量基线的工业硅深度净化技术以及更高纯度的特种气体纯化工艺,针对核心的沉积过程其技术创新方向则聚焦于两个方面,一方面是发展更先进的可彻底消除质量控制盲区与滞后的在线、原位实时监测技术,诸如能够对反应界面进行分子级表征或者对超痕量杂质进行瞬时捕捉的传感器等,另一方面是推动工艺向精细化、智能化调控升级,通过集成先进过程控制与机器学习算法来构建可自适应调节的智能控制系统以实现对热场、气流场等关键参数的动态优化与精准稳定,此外在设备硬件层面研发与应用具有更低杂质析出率、更高耐腐蚀性和更优热稳定性的新型反应器内衬材料与结构设计乃是突破设备制约的根本途径,通过上述关键环节的系统性强化与技术创新致力于将质量控制从被动响应的阶段推向主动预测与精准干预的新阶段[9]。

### 4.2 管理体系完善与标准化建设

管理体系及标准化建设的持续完善作为从系统层面保障并提升质量控制效能的核心举措,需将前沿技术策略转化为严谨、统一且具可执行性的管理规范,而首要任务在于构建层次分明且覆盖全面的质量管理文件体系,该体系需对原料验收标准、工艺操作规程、设备维护规程、异常处理流程以及成品检验规范等进行系统整合与明文规定,以确保各环节操作均有章可循;其次,全流程标准化作业的大力推进尤为必要,特别是对精馏、沉积等核心工序的关键操作步骤及参数控制范围进行精细化定义与固化,以此最大限度降低因人员经验差异所引发的操作波动;在此基础上,集中统一的

质量数据管理平台的建立不可或缺,通过打通从原料、过程到产品的数据链,实现质量信息的实时共享、可追溯性及深度分析,进而为管理决策提供有力的数据支撑[10];同时,持续的专业培训与严格的资质认证制度需同步实施,其目的在于使各级人员不仅掌握标准,更能理解蕴含其中的质量控制逻辑;最终,通过定期开展的体系审核、管理评审及绩效评估,推动整个质量管理体系形成持续改进的闭环,从而为技术创新成果的稳定转化及产品质量的一致性提供坚实的制度保障。

## 5 结论

综上所述,多晶硅质量作为支撑下游半导体与光伏产业发展的基础,其质量控制体系覆盖原料、工艺至成品的整个流程。不过,现有策略在技术响应速度、数据整合能力以及管理执行力度方面还存在不足。着眼于未来,需要通过加强关键环节的技术创新,推动管理体系的标准化和智能化建设,把质量控制模式从事后验证转变为实时预测与自适应优化。这种转变是实现产品质量持续提高和产业核心竞争力增强的根本办法。

### 参考文献

- [1] 裴雅晨, 陈文吉, 张德奇.多晶硅生产中后处理质量控制的分析[J].新疆有色金属, 2024, 51(3): 101-105.
- [2] 徐高敏, 李有斌, 前朝.基于多晶硅生产中质量控制策略分析[J].化工管理, 2023, 45(9): 88-92.
- [3] 苟海龙.多晶硅生产中的质量控制探讨[J].有色金属设计, 2022, 49(2): 45-49.
- [4] 杨丞杰, 张新红.多晶硅生产质量控制探讨[J].云南化工, 2024, 51(4): 67-71.
- [5] 任小红.多晶硅生产过程的质量控制[J].化工管理, 2023, 45(7): 102-106.
- [6] 晋正茂, 李辉, 武振国.多晶硅生产中精制三氯氢硅质量控制的探讨[J].化学工程与装备, 2022, 50(6): 34-38.
- [7] 吴锋, 姜海明, 任小红.生产高品质多晶硅质量控制要点[J].太阳能, 2024, 52(1): 56-60.
- [8] 刘宁, 贾明.西门子法多晶硅生产中的质量控制措施[J].化工管理, 2023, 45(10): 120-124.
- [9] 宋安宁, 贾哲, 吕昌彦.西门子法多晶硅生产中的质量控制难点及措施[J].化工管理, 2022, 44(1): 78-82.
- [10] 刘秀琼, 汪治林, 邓丰.多晶硅生产过程中的质量控制[J].广东化工, 2024, 51(5): 90-94.

# Quality Control Path of Deep Foundation Pit Construction in Housing Construction Project

Longgang Zhang

Ganzhou Construction Engineering Group Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

## Abstract

Deep foundation pit construction constitutes a critical phase in building projects, where construction quality directly determines structural stability and service life. To ensure compliance with quality standards and acceptance criteria, rigorous quality control must be implemented throughout three key phases: preparatory work, construction, and final inspection. This approach enables timely identification of defects, prevents safety hazards, and establishes a solid foundation for subsequent construction phases, thereby guaranteeing timely and high-quality project completion within the stipulated timeframe.

## Keywords

housing construction project; deep foundation pit project; construction quality; control measures

# 房建工程深基坑工程施工的质量控制路径

张龙刚

赣州建工集团有限公司, 中国·江西赣州 341000

## 摘要

深基坑工程施工是房建工程的关键环节,其施工质量对于房建工程整体结构的稳定性和投入使用后的使用寿命会起到至关重要的影响。在这样的背景下加强深基坑工程施工质量管控是十分必要的,可以紧抓前期准备、施工过程、验收三个关键阶段落实质量控制,及时发现质量问题,保障房建工程深基坑工程施工的质量达标,满足质量验收标准,同时也通过质量控制规避安全事故,为后续施工奠定良好的基础和保障,确保工程建设能够在规定的周期内保质保量地完成施工任务。

## 关键词

房建工程;深基坑工程;施工质量;控制措施

## 1 引言

经济社会的迅速发展、城市化的加剧,使得现阶段社会对于房建工程的需求变得越来越高。而在房建工程中深基坑工程涉及到土方开挖、支护结构施工、地下水控制等不同工序,工艺复杂,技术要求高,且受周边水文地质条件影响较大,很容易会出现质量问题进而影响后续施工工作的正常开展。在这样的背景下加强施工质量管控是十分必要的,可从如下几点着手做出优化和调整。

## 2 落实施工准备

房建工程中深基坑工程施工规模较大,落实准备工作可以为后续施工工作的正常开展奠定良好的基础和保障。而在准备工作落实的过程中应紧抓技术准备、现场准备和资源准备等相应关键点。首先在技术准备上需要安排专业工作人员抵达拟建区域进行现场勘测,对于拟建区域的水文地质

情况有较为全面的了解和认识,科学选择施工技术,优化施工设计图纸,明确施工参数。尤其需引起关注和重视的则是紧抓支护结构、降水系统施工方案对技术参数做出优化和改良。必要的情况下可安排施工单位、监理单位、设计单位共同展开图纸会审,确保施工设计的针对性、适切性和科学性。

在现场准备工作落实的过程中需通过测量放线、排水设施布置为施工建设工作的顺利推进提供良好的现场条件。可根据施工总平面图来布置临时设施、材料堆场,明确机械停放位置及运输通道并设置地表截水排水系统,保障施工现场排水通畅,避免积水等相应问题,影响基坑施工的正常开展。在测量放线的过程中需要明确支护结构轴线、开挖边线、降水井位置、监测点等,并通过复核确保测量方向的精准性。最后需要根据施工设计图纸明确在施工建设过程中所需要应用的机械设备和原料,对机械设备及原料进行全过程把控,确保原料质量达标、机械设备运转稳定,为后续施工提供物质支撑。

【作者简介】张龙刚(1991-),男,中国甘肃定西人,本科,从事房建工程深基坑工程施工质量研究。

### 3 施工过程精细化管理

#### 3.1 加强施工技术管控

施工技术管控对于施工质量会产生较大的影响,需紧抓支护结构施工、土方开挖、排水与降水施工、内支撑体系施工等相应关键点来加强质量控制。在支护结构施工中需根据施工设计图纸及施工现场实际情况来科学选择支护结构类型,并明确核心施工参数,如表1所示。在土方开挖作业开展的过程中可以采用分层分段开挖的方式避免超挖、欠挖等相应问题,同时需要确保土方开挖与支护结构施工紧密配合。可根据该地区的基坑深度、地质条件和支护结构形式来对分层分段开挖方案作出适当调整。在开挖过程中合理设置边坡坡度,避免边坡坍塌,同时需要配备专业人员指挥开挖作业,避免挖掘机等相应机械设备碰撞支护结构、降水井管及监测点位。在开挖至设计标高前可预留200~300mm厚土层,通过人工清底避免基底土层受到扰动。在降排水施工的过程中需要按照规定要求进行局部降水试验,检查截水效果,并选择轻型井点、管井、喷射井点等相应降水方法观测地下水位变化,确保地下水位始终控制在基坑开挖面以下0.5~1.0m。若涉及到坑内排水问题则可通过排水沟和集水井的科学设置及时去除坑内积水。在支撑体系施工中需结合实际选择钢支撑、混凝土支撑等不同支撑体系,确保支撑安装精度、预加轴力符合要求。在钢支撑施工中需要做好轴线位置和标高偏差的控制,做好预加轴力分级施加的管控和记录,保障节点连接牢固,避免松动问题。在混凝土结构工程施工中则需要引入强度、刚度、稳定性达标的模板,保证混凝土浇筑密实并落实养护工作,确保混凝土的强度达标<sup>[1]</sup>。

表1: 支护结构类型及控制要点

支护结构类型	核心施工参数	规范要求数值
钻孔灌注桩	孔底沉渣厚度	端承桩 ≤50mm, 摩擦桩 ≤100mm
地下连续墙	槽壁垂直度	偏差 ≤1/300 槽深
土钉墙	土钉成孔倾角	5° ~20°
水泥土搅拌桩	水泥掺量	≥12% (质量比)
土层锚杆	钻孔深度	比设计深度深 0.5~1.0m

#### 3.2 加强施工监测

施工监测工作的有效落实可以借助量化数据来及时地发现施工建设中存在的质量问题,提高施工质量管控能力和管控成效。在监测工作开展的过程中需明确监测项目,并且根据不同监测项目所带来的影响确定监测等级,如表2所示。

在施工监测之前可按照施工设计图纸及施工现场实际情况来对监测点位做出科学铺设,确保监测点数量足够、位置科学,能够有效覆盖基坑开挖所有影响面,尤其是围护结构、周边构筑物都必须设置监测点位并在监测点位布置结束以后应进行复核。同时在监测方案设计中还需要科学选择监测仪器设备,在监测仪器设备进场应用之前需通过检验、校准确保仪器设备运行稳定,配合巡查制度建设获得更加完整、全面的信息数据,及时地发现质量隐患。在监测工作及

巡查工作落实的过程中还需要通过大数据技术等相应现代化技术来提高数据整合处理能力,配合专业软件绘制变形受力曲线,对比预警值、控制值,分析基坑及周边环境的稳定性。也可以借助人工智能技术来自动分析数据信息,若发现监测数据超过安全阈值范围人工智能技术会自动触发警报,并对接专家系统,将报警信息及应急方案推送给相关管理工作人员,由质量管理工作人员分析解决对策和处理方法。

表2: 监测项目及等级

监测项目	监测等级	监测频率 (施工阶段)	精度要求
围护结构顶部水平位移	一级 / 二级	1次 / 1~2天	≤±1.0mm
周边建(构)筑物沉降	一级 / 二级	1次 / 2~3天	≤±0.5mm
地下水位	一级 / 二级	1次 / 1天	≤±20mm
支撑轴力	一级	1次 / 1天	≤±1% 测值
基坑边坡裂缝	所有等级	24小时巡查	裂缝均需记录、监测

监测数据和巡查结果不仅可以应用于风险防控和质量管控,还可以为施工方案的调节和施工参数的优化提供更多帮助,进一步保障施工技术的适切性、针对性和有效性。例如通过监测结果分析发现基坑变形过大则可以采用加固、放缓开挖速度、增加支护措施等相应方式来进行处理。再例如若通过监测数据分析发现降水引发周边沉降异常,这时则可通过调整降水参数配合回灌措施的有效应用确保施工质量和施工安全<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 完善规章制度

在施工质量管控中规章制度起到了至关重要的影响,可通过规章制度来加强行为管理保障施工质量和施工效果。在制度建设期间首先需要明确责任机制。房建工程深基坑施工的施工环节多、技术要点多,因此在质量管控的过程中可能会面临着较多的问题和困境,容易出现管控疏漏,而规章制度建设则可以较好地解决这一问题,需要根据不同工作人员的主要施工内容明确施工责任,并且在技术交底及施工建设期间做好沟通和交流,帮助相关施工工作人员明确自己的施工要求、施工质量验收标准。相关工作人员必须严格按照责任机制,落实质量管理和行为管理,若出现施工质量不达标问题则可通过责任机制追溯个人责任。这样施工工作人员在实践工作落实的过程中则需自觉规范施工行为,端正施工态度,保障施工质量和施工效果。

其次,可以建立与责任机制配套的奖惩机制和考核机制,将施工质量作为重要考核指标,并提升其权重。对于综合考核结果相对较好的员工可以予以一定的资金奖励,激活质量管理的内生动力,让员工在实践工作开展的过程中主动关注施工质量问题,甚至可以以此为中心提高施工工作人员的创新力,让施工工作人员在实践工作落实的过程中根据实际情况创新工作方法,优化工作技术和工作参数,提高施工质量和施工效果<sup>[3]</sup>。

最后,深基坑施工施工规模相对较大,需要安排较多的施工工作人员,但是部分施工工作人员可能会对周边环境了解不足、对施工技术了解不足进而引发质量问题。为了更好地规避这类问题可以建立完善的培训机制,根据不同工作人员的工作岗位、施工责任来优化培训内容,帮助相关工作人员掌握施工技术、施工方法,明确施工要点、常见质量问题及质量问题的处置措施,提升施工工作人员的综合素养和综合能力,为施工质量的提升奠定良好的基础和保障。

#### 4 验收与后期管控

验收工作的有效落实也是确保深基坑施工质量达标的重要手段。而在验收工作开展的过程中除了需要做好终结性验收以外,在施工过程中也需要落实验收工作。相关单位可建立三检制度,即在每一个施工子项目或施工工序施工结束以后由施工工作人员、专业质检人员及监理人员先后落实质量验收,分析施工质量是否达到标准要求。只有前一项施工质量达标才可以展开后续施工,以零保整,提升整体施工质量。在竣工验收的过程中则需要从工程实体质量、施工资料、监测资料、巡查台账等多个角度出发收集完整全面的数据信息,分析施工质量是否达到标准要求。在资料分析结束以后还需要落实工程实体质量验收,着重检查支护结构强度、基坑尺寸、基底土质、排水降水系统效果等相应内容,形成竣工验收报告,并由各单位签字盖章。若发现验收不合格需

及时确定整改方案,限期整改,整改结束以后重新落实验收工作。

在基坑工程竣工验收以后则进入到了基础施工和基坑回填阶段,在该阶段也需要持续跟进质量管控,加强基坑及周边环境的监测,保障基础结构达到设计强度。同时在回填作业中需加强回填土料的管理以及施工参数的管控,避免回填时碰触支护结构对施工质量产生影响<sup>[4]</sup>。

#### 5 结语

在建筑工程中深基坑施工是十分重要、也是十分基础的一环,对于整体施工质量会产生较大的影响,必须从施工前、施工过程中以及验收等多个环节明确质量管理要点,优化质量管理策略提高质量管理效能,保障深基坑施工质量达到标准要求。

#### 参考文献

- [1] 丁飞. 高层建筑深基坑工程施工存在的问题及分析 [J]. 新城镇科技, 2024, 33 (03): 126-128.
- [2] 聂炼. 浅谈房建基坑工程支护施工的问题及技术管理 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (26): 133-135.
- [3] 王朝勇. 高层房建深基坑工程施工的安全监理 [J]. 石材, 2023, (04): 127-128+147.
- [4] 曹国意,张兴启,王伟强,等. 深基坑支护施工在房建工程中的应用探讨 [J]. 中国住宅设施, 2023, (02): 127-129.

# Application of Pipeline Pressure Test Technology in Petrochemical Process Design

Kunxiao Huang Qing Zhao

Xuwei New District Environmental Protection Bureau, Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

## Abstract

Pipeline pressure testing, as a critical safety measure for petrochemical process systems, plays a pivotal role in the design phase. By selecting appropriate testing methods and parameters, it effectively evaluates pipeline integrity and structural strength, preventing leaks and equipment failures. The application of pressure testing not only enhances pipeline network stability but also improves safety standards, reducing engineering risks and operational hazards. Research findings demonstrate that scientifically implemented pressure testing significantly boosts operational safety in petrochemical facilities, which is crucial for promoting sustainable industry development.

## Keywords

Pipeline pressure testing technology; Petrochemical process design; Safety inspection

## 管线试压技术在石油化工艺设计中的应用

黄坤晓 赵青

徐圩新区环境保护局, 中国·江苏·连云港 222000

## 摘要

管线试压技术作为保障石油化工艺系统安全与可靠的重要手段, 在工艺设计阶段发挥着关键作用。通过合理选用试压方法及参数, 能够有效检验管道系统的密封性和强度, 预防泄漏及设备故障。试压技术的应用不仅提升了管网运行的稳定性, 还促进了设计安全规范的完善, 有助于降低工程隐患和运维风险。研究结果表明, 科学实施管线试压可显著提高石油化装置的运行安全性, 对推动行业持续健康发展具有重要意义。

## 关键词

管线试压技术; 石油化工艺设计; 安全性检测

## 1 引言

随着石油化行业技术水平的持续提高, 管道系统已经变成支持工艺流程平稳运转的重要基础设备。因为石油化生产过程中包含高温、高压以及多种腐蚀性介质, 管道的安全性和稳定性对整个装置的运作以及人员安全拥有决定性的作用。根据国家能源局数据表明, 由于管道泄漏或断裂引发的事在石油化领域仍然占有较大比重, 迫切需要借助技术方法进行预防控制。行业内部主要依靠普通目视检查和局部检测来判断管线情况, 但是其检查范围较窄, 不能有效识别隐藏缺陷。管道压力测试技术作为一种严格的检查方式, 不仅能够完整评估管道的密封能力和结构坚固程度, 而且为完善工艺设计提供可靠的数据依据。相关研究和标准比如 GB502512015《石油化管道工程施工及验收规范》已

经对压力测试过程和参数提出了明确规定。压力测试技术在确保设计质量和运行安全方面发挥重要作用, 本研究打算详细分析管道压力测试技术在石油化工艺设计里面的应用价值和具体实施关键内容, 希望为行业安全管理、工程风险控制以及标准化发展提供理论基础和实践参考。

## 2 管线试压技术基础与分类

### 2.1 管线试压技术的基本原理

管线试压技术的根本原理核心是检验管道系统的密封性和机械强度, 来保证其于特定压力条件下稳定运作。试压过程一般包含对管道内部施予液压或气压, 令压力逐步抵达预定值, 并且维持一段时间来监测压力变化。借助压力监测和泄漏检查, 能够高效发现管道材料的隐含瑕疵还有装配过程中的缺陷, 进而预判管道于真实操作条件下潜在发生的故障。试压技术不不仅可以确认管道系统能否满足设计强度要求, 而且可以保证管道连接部位没有渗漏现象。该过程给出的压力试验数据, 一方面用来检验管道质量, 另一方面给之

【作者简介】黄坤晓(1988-), 男, 中国江苏赣榆人, 硕士, 工程师, 从事石油化研究。

后的检修和维护供应依据。此类技术的执行必须遵守严谨的标准和规范,当中涵盖试压压力的确定、持续时间和环境条件诸因素,来避免过高压力造成管道破坏或别的安全事故。借助试压技术的合理使用,能够于工艺设计阶段排除潜在风险,给管道系统的持久稳定运作打下基础。

## 2.2 常见试压方法及适用范围

常见管道试压方法主要包含水压试验、气压试验以及混合介质试验,水压试验利用液体不可压缩特性,通过施加合适水压检查管道强度和密封性能,适合对水不敏感管道系统,气压试验使用气体压力检查,因为气体可压缩特性,这种方式对检测设备精确度要求更高,适合不能充水系统或者需要观察泄漏速度场合,混合介质试验结合水和气优点,在需要降低气压试验风险或者特定场合必须采用时候使用广泛,每种方式适用范围需要结合工艺设计具体条件以及介质特点来进行选择。

## 2.3 相关标准与规范概要

石油化工业管线试压技术执行必须遵守各种标准规范,标准规范确保试压操作过程安全,维持管道系统长期可靠。国际上常用试压标准包含美国机械工程师学会制定标准和国际标准化组织制定标准,这些标准明确规定试压具体步骤、需要达到压力数值、试验详细要求,石油化工业还有专用规范,例如石油化工业专用设计导则,导则具体说明试压全过程需要注意哪些细节、记录哪些测量数据。标准规范为工程设计工作和现场施工工作提供可靠技术支持。

# 3 石油化工业管网的试压需求

## 3.1 石油化工业流程特点

石油化工业生产流程复杂并且种类很多给管道网络设计以及日常运行带来大量困难。石油化工业设备常常存在高温高压强烈腐蚀以及容易燃烧爆炸危险这些情况,这些情况导致管道系统需要特别严格承受压力能力抵抗腐蚀能力以及防止泄漏能力。为了确保石油化工业生产系统能够稳定工作,必须全面考虑输送物质特点工作时候压力大小温度变化这些因素影响。因为化工企业生产必须连续而且稳定进行属于企业生存根本,管道网络系统一旦出现问题就容易造成工厂停工产生很大经济损失甚至引发严重安全事故。执行管道系统严格压力测试工作,不仅属于检查系统密封性能和承压能力必要手段,而且属于确保系统设计能够承受复杂生产环境基本保证。压力测试工作能够给设计阶段提供具体意见,促进设计数值调整和修正,从而提升全部生产设备安全水平和稳定水平。在石油化工业生产特殊条件下面,合理制定压力测试计划能够有效降低系统运行危险程度。

## 3.2 管道系统风险因素识别

石油化工业管网当中,辨别管道系统风险要素成为确保安全运转关键步骤。风险要素来自管道规划、材质挑选、建造品质还有使用条件几个方向。规划时期思考出现偏差,

管径大小、壁厚数值、走向安排产生失误造成承受压力性能不够。材质挑选失误或者出现腐蚀情况造成渗漏或者断裂。建造时期焊缝带有毛病并且支吊架布置不合理一样危害系统稳定性能。使用条件温度压力出现很大变化还有介质化学性质必须特别留意避免管道损坏。全面辨别并且掌控这些风险要素,对于维持石油化工业管网安全产生十分重要影响。

## 3.3 试压技术对工艺设计的作用

压力测试方法石油化工业工艺设计里面作用非常重要,它直接决定系统安全程度和可靠水平。通过实施管道压力测试,设计人员可以检查管道设备质量性能情况,这样确保系统密封性能结构完整状况。压力测试方法给工艺设计阶段提供重要数据支持,同时促进安全标准设计规范不断完善,有效降低设计施工阶段可能出现各种风险。压力测试得到结果数据分析给管道材料挑选设计改进提供合理依据,给设备运行情况预测提供重要参考,给石油化工业装置安全高效运转打下坚实基础。

# 4 试压技术的工程应用实践

## 4.1 试压参数选取与实施流程

选择试验参数和操作步骤属于管道试压技术使用关键构成部分。恰当参数选择直接决定试验结果精确水平以及系统安全保护水平。必须依据管道材质尺寸工作条件来决定恰当试验压力和维持时长。需要严格按照有关标准规定来保证参数满足系统设计耐受条件。操作步骤包含全面准备内容包括设备检验试验介质挑选安全防护布置。试验期间必须严格控制压力慢慢增加速率认真观察仪表显示数值仔细记录系统变化状况。这样操作既确保试验数据可信程度也为后面分析工作提供基本依据。减轻管道以及连接件因为压力变化造成应力聚集现象,保持设备结构完好,成为生产过程里面必须重视部分。压力测试结束之后需要进行整个系统仔细检查以及数据仔细比对,用来确定密封性能和承压能力全部达到设计标准。依靠合理试压数值挑选和操作步骤认真实施,可以快速提升石油化工业管网网络安全水平和稳定程度。

## 4.2 密封性和强度检验要点

管线试压技术于密封性和强度的检验环节中发挥关键的作用。密封性检验须保证管道系统没有渗漏,它的核心取决于选用合适的检漏设备与建立稳固的压力环境。压力试验一般采用水或气体充当介质,用以检查连接部位以及整体管道的泄漏情况,进而保证密封性。强度检验而注重评定管道材料及其结构设计的承受压力能力。务必严谨依据设计标准实施压力的逐步增加,用以证实管道在最大工作压力之下的稳定性。记载和解析试验环节中的参数变化,可以对管道系统以后运行给予有效支撑。这些检验步骤对保证石油化工业装置的安全性十分要紧。

## 4.3 试压过程中的安全控制措施

压力测试期间安全管理方法非常重要,用来保护工作

人员、机器设备以及周围环境全部安全。需要确保全部压力测试机器工具保持完好状况，并且符合相关规定要求。压力测试开始之前必须把测试地方进行安全查看，确定隔离办法还有警告范围。工作人员需要穿戴适当保护用品，并且参加专门训练，来确保能够熟练掌握操作步骤以及处理危险方法。时刻观察压力数值变动，设定警告数值并且迅速处理不正常情况。里面外面保持联系通畅，参加人员最好保持交流状态，方便立刻采取需要行动。每一次压力测试完成之后，进行彻底查看，写下并且研究数据用来不断提升。安全办法落实一直存在整个项目过程当中，对于减少事故发生以及减少损失具有很大作用。

## 5 管线试压技术对行业发展的意义

### 5.1 对安全生产的促进作用

管道压力测试方法在石油化工行业使用明显促进安全生产水平提升。这种方法设计阶段检查管道系统密封性能和承压能力，有效保证系统运行时候不出现泄漏情况，从而降低发生严重安全事故可能性。压力测试时候，严格控制参数并且规范操作步骤能够事先找出管道存在缺陷，保证全部细小问题都在安装或者投用之前得到彻底解决。压力测试方法帮助统一工艺管网安全要求，提高企业安全管理能力。制定并且实施压力测试方案时候，里面包含安全控制手段也推动企业完善安全操作步骤和管理规定，培养良好安全氛围，给之后生产活动打下坚实基础。整体系统安全性能和可靠程度得到加强，管道压力测试方法有效维护石油化工行业生产过程安全和稳定运行。

### 5.2 对工艺设计规范的完善贡献

管道试压方法石油化工工艺设计里面产生清楚标准改进效果。试压工作设计阶段提供必要验证环境，依靠严格泄漏强度检查规则，确保管道系统极端条件里面稳定运行。试压方法推动工程设计精确程度工程规则提高，促使设计人员方案制定时候首先考虑安全问题，因此加大设计规范执行强度。规则详细化帮助设计人员找出隐藏危险，同时快速减少设计错误造成事故。试压方法属于关键部分，提供合适验证基础，进一步完善工艺设计完整规则框架，提高石油化工行业生产安全程度稳定程度，给行业技术进步实际使用建立坚

实指导基础。

### 5.3 面向未来的技术优化方向

石油化工行业进步之后，管道试压技术标准持续提升。接下来技术提升方向包含研制智能自动试压控制设备，提升试压环节精确水平以及工作效率。采用新型传感器装置加上数据分析手段，连续监视试压环节各种参数，迅速识别异常情况并且立即实施调整。应该选用绿色环保试压介质，降低环境破坏程度。试压技术必须跟数字化工艺设计融合，构建闭环反馈系统，提升全部安全性能以及稳定水平。这些提升措施会推动试压技术在行业当中获得更大范围推广以及进步。

## 6 结语

管道压力测试方法应用石油化工工艺设计里面，大幅提升管道系统密封性能强度检查速度，有效避免泄漏设备事故这类工程危险。现有证据清楚显示，正确挑选压力测试方式数值，能够设计阶段完全掌握工艺系统安全状况，从而促进管网运行平稳性安全标准改善。压力测试方法降低维护危险促进行业长期稳定发展产生积极影响。目前压力测试流程存在高压管道特殊条件判断依据不一致数值调整不够完善这类不足，需要开展更加全面细致探索。建议加快新型材料管道压力测试方式开发，完善数字压力测试监视系统，并且针对各种工艺条件建立适应能力更强压力测试数值规范，为石油化工行业安全控制技术进步提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 张创团方剑杰.石油化工工艺管线安装关键技术的研究[J].华东科技:综合,2021,(09):0276-0276.
- [2] 陈参昌.石油化工工艺管线试压技术的设计与应用[J].石油石化物资采购,2021,(26):12-14.
- [3] 许朝军贾扬帆.石油化工工艺管线安装关键技术的探究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2021,(05):0123-0123.
- [4] 耿聪.论述石油化工工艺管线安装关键技术[J].石油石化物资采购,2023,(08):37-39.
- [5] 刘俭.化工管线试压技术工艺的设计与应用——评《石油化工装置工艺管道安装设计手册》[J].化学工程,2022,50(10):前插2-前插2.

# Analysis of the Influence of Process Parameters on the Microstructure and Properties of Titanium Alloy Additive Manufacturing

Mengyao Li<sup>1</sup> Yongchun Guo<sup>2</sup>

1. School of Aviation Maintenance Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; lms0612@126.com

2. School of Aeronautical Manufacture Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China

## Abstract

Titanium alloys, as high-performance metallic materials combining structural integrity and functional properties, are extensively utilized in aerospace, marine engineering, military equipment, and medical implants due to their advantages including low density, high specific strength, resistance to extreme temperature corrosion, and excellent biocompatibility. Particularly in aerospace applications, the quantity of titanium alloy components has become a key indicator of equipment advancement. However, with the increasing demands for structural complexity, customization, and lightweight design in advanced manufacturing, traditional processing methods (such as casting, forging, and mechanical cutting) have proven inadequate. These methods suffer from low material utilization rates, prolonged processing cycles, difficulties in forming complex structures, and high production costs, making them insufficient for modern manufacturing needs.

## Keywords

titanium alloy; additive manufacturing; process parameters; microstructure; mechanical properties

## 工艺参数对钛合金增材制造成品组织性能的影响分析

李梦瑶<sup>1</sup> 郭永春<sup>2</sup>

1. 西安航空职业技术学院 航空维修工程学院, 中国·陕西 西安 710089

2. 西安航空职业技术学院 航空制造工程学院, 中国·陕西 西安 710089

## 摘要

钛合金作为一种兼具结构性能与功能特性的优质金属材料,其低密度、高比强度、耐高低温腐蚀及良好的生物相容性等优势,使其在航空航天、海洋工程、军事装备、医疗植入等领域得到广泛应用,尤其在航空航天领域,钛合金构件的用量已成为衡量装备先进程度的重要指标之一。随着高端制造领域对构件结构复杂性、个性化及轻量化要求的不断提升,传统钛合金加工工艺(铸造、锻造、机械切削等)存在材料利用率低、加工周期长、复杂结构难以成型、生产成本高等弊端,已无法满足现代制造业的发展需求。

## 关键词

钛合金; 增材制造; 工艺参数; 微观组织; 力学性能

## 1 引言

钛合金作为一种兼具结构性能与功能特性的优质金属材料,其低密度、高比强度、耐高低温腐蚀及良好的生物相容性等优势,使其在航空航天、海洋工程、军事装备、医疗

植入等领域得到广泛应用,尤其在航空航天领域,钛合金构件的用量已成为衡量装备先进程度的重要指标之一。随着高端制造领域对构件结构复杂性、个性化及轻量化要求的不断提升,传统钛合金加工工艺(铸造、锻造、机械切削等)存在材料利用率低、加工周期长、复杂结构难以成型、生产成本高等弊端,已无法满足现代制造业的发展需求。

## 2 钛合金增材制造主流工艺

### 2.1 激光选区熔化(SLM)工艺

SLM工艺的核心特点是激光能量集中、加热速度快、冷却速度极快(冷却速率可达 $10^4\sim 10^6\text{K/s}$ ),这种快速熔凝过程使得钛合金凝固组织呈现典型的非平衡结晶特征,易形

【基金项目】制造专业群2-3科研处24JP087钛合金激光-TIG电弧复合熔丝增材制造工艺及性能调控(项目编号:24JP087;11525727/81)。

【作者简介】李梦瑶(1995-),女,中国陕西西安人,硕士,助教,从事材料冶金工程,精细有机合成化学研究。

成细晶组织，但同时也会产生较大的热应力，增加裂纹产生的风险。SLM工艺的关键参数主要包括激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚、粉床温度、激光光斑尺寸等，其中激光功率与扫描速度决定了能量输入密度，是影响熔池形态与凝固过程的核心参数。

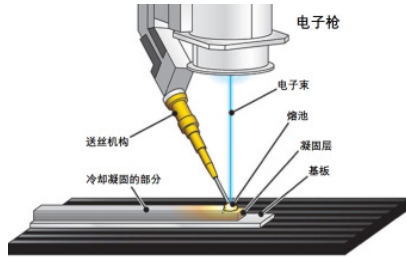


图 1: 激光选区熔化 (SLM) 工艺

## 2.2 电子束粉末床熔融 (EBM) 工艺

EBM工艺以高能电子束为热源，在真空环境下，电子束按照预设路径扫描钛合金粉末床，使粉末吸收能量熔化并凝固成型，逐层堆积形成完整构件。与SLM工艺相比，EBM工艺具有能量密度高、加热范围广、粉床预热温度高(可达600~1000℃)、真空环境可有效避免钛合金氧化等优势，同时真空环境与高温预热可显著降低热应力，减少裂纹缺陷的产生。

EBM工艺的冷却速率相对较慢(约 $10^3\sim 10^6\text{K/s}$ )，凝固过程中晶粒有充足的生长时间，因此成品微观组织相对粗大，但组织均匀性较好，力学性能稳定性高。该工艺适用于中大型钛合金构件的精密制备，尤其在航空航天领域大型承力构件的制造中具有显著优势。EBM工艺的关键参数主要包括电子束功率、扫描速度、扫描间距、层厚、粉床预热温度、电子束光斑尺寸等，其中粉床预热温度是区别于SLM工艺的核心参数，对热应力分布与微观组织形成具有决定性影响<sup>[1]</sup>。

## 3 工艺参数对钛合金增材制造成品微观组织的影响

钛合金增材制造的微观组织主要由晶粒尺寸、晶粒形态、相组成及缺陷分布(孔隙、裂纹、未熔合等)构成，其形成过程主要取决于熔池的温度场、流场及凝固速率，而工艺参数通过调控能量输入与热传导过程，直接决定了熔池的形态与凝固特性，进而影响微观组织的最终状态。以下结合主流工艺，重点分析关键工艺参数对钛合金增材制造成品微观组织的影响规律。

### 3.1 能量输入类参数的影响

激光/电子束功率是决定能量输入强度的核心参数，在其他参数不变的情况下，功率的升高会显著增加能量输入密度，使熔池温度升高、熔池尺寸增大、熔化深度增加，同时延长熔池存在时间，改变凝固速率与晶粒生长行为。

对于SLM工艺，当激光功率较低时，能量输入不足，钛合金粉末无法完全熔化，易产生未熔合、孔隙等缺陷，微观组织中存在大量未熔粉末颗粒，晶粒细小但不均匀，且存

在明显的层间界面。随着激光功率的升高，能量输入密度增加，粉末完全熔化，熔池尺寸增大，熔池内对流作用增强，层间结合更加紧密，未熔合与孔隙缺陷减少；但当功率过高时，能量输入过量，熔池温度过高，冷却速率显著降低，晶粒有充足的生长时间，易形成粗大的柱状晶或等轴晶，同时过高的温度会导致钛合金氧化，形成氧化夹杂，且熔池过大易产生飞溅，增加孔隙缺陷的产生概率。

相关研究表明，采用SLM工艺制备Ti-6Al-4V钛合金时，当激光功率在150~250W范围内，能量输入适中，可获得致密度高于99.2%、晶粒尺寸均匀的细晶组织；当功率超过300W时，晶粒尺寸从 $1\sim 3\mu\text{m}$ 增大至 $5\sim 8\mu\text{m}$ ，孔隙率从0.5%升高至1.8%以上<sup>[2]</sup>。

### 3.2 几何参数的影响

钛合金增材制造的几何参数通过影响熔池的重叠程度与层间结合质量，进而影响微观组织的均匀性与缺陷分布，与能量输入类参数协同作用，决定成品的微观组织状态。

扫描间距是指相邻两条扫描轨迹之间的距离，其大小直接决定了相邻熔池的重叠程度，进而影响层内组织的均匀性与致密度。扫描间距过大时，相邻熔池重叠程度不足，层内会出现未熔合区域，形成明显的间隙与孔隙缺陷，微观组织不均匀，存在明显的扫描轨迹边界；扫描间距过小时，相邻熔池重叠程度过高，能量输入过于集中，熔池温度升高，冷却速率减慢，晶粒易长大，且易产生飞溅，增加孔隙率，同时过高的重叠度会导致热应力集中，增加裂纹产生的风险。

对于L-DED工艺，扫描间距主要影响熔覆层的宽度与重叠程度，合理的扫描间距可使熔覆层宽度均匀，层内组织致密，避免出现未熔合与孔隙缺陷。

### 3.3 其他关键参数的影响

粉床温度是EBM工艺的独特参数，也是影响其微观组织与缺陷分布的核心参数。EBM工艺的粉床预热温度通常在600~1000℃范围内，高温预热可显著降低熔池与基体之间的温度梯度，减少热应力，避免裂纹缺陷的产生；同时，高温预热可延长熔池存在时间，使晶粒生长更加均匀，减少组织不均匀性；此外，高温预热可促进钛合金的相变充分进行，改善相组成，提升微观组织稳定性<sup>[3]</sup>。

## 4 工艺参数对钛合金增材制造成品力学性能的影响

钛取决于其微观组织状态工艺参数通过调控微观组织(晶粒尺寸、相组成、缺陷分布)，进而间接影响成品的力学性能。因此，工艺参数对力学性能的影响规律与对微观组织的影响规律密切相关，以下结合主流工艺，重点分析关键工艺参数对钛合金增材制造成品力学性能的影响合金增材制造成品的力学性能(硬度、抗拉强度、塑性、耐腐蚀性等)。

### 4.1 对硬度的影响

硬度是钛合金增材制造成品的重要力学性能指标，主要取决于晶粒尺寸、相组成及缺陷分布，遵循霍尔-佩奇关系(晶粒越细小，硬度越高)。工艺参数通过影响晶粒尺寸

与相组成,直接决定成品的硬度。

对于 SLM 工艺,激光功率与扫描速度是影响硬度的核心参数。当激光功率较低、扫描速度较快时,能量输入密度适中,冷却速率快,晶粒细小,且微观组织中存在大量的马氏体相( $\alpha'$ 相),马氏体相硬度较高,因此成品硬度较高;随着激光功率升高、扫描速度降低,能量输入密度增加,冷却速率减慢,晶粒长大,马氏体相分解为 $\alpha+\beta$ 双相组织, $\alpha$ 相硬度较低,因此成品硬度降低。

#### 4.2 对抗拉强度与塑性的影响

抗拉强度与塑性是钛合金增材制造成品最关键的力学性能指标,直接决定构件的承载能力与服役安全性,其主要取决于晶粒尺寸、相组成、缺陷分布及层间结合质量。抗拉强度与硬度类似,遵循霍尔-佩奇关系,晶粒越细小,抗拉强度越高;而塑性则与晶粒尺寸、缺陷分布密切相关,晶粒过于细小或缺陷过多,都会导致塑性下降。

对于 SLM 工艺,激光功率与扫描速度的协同作用决定了抗拉强度的高低。低功率、高扫描速度时,晶粒细小,缺陷较少,抗拉强度较高;功率过高或扫描速度过低时,晶粒粗大,孔隙率增加,抗拉强度降低;功率过低或扫描速度过高时,未熔合缺陷增加,层间结合质量下降,抗拉强度显著降低。研究发现,SLM 工艺制备 Ti-6Al-4V 钛合金时,最优参数组合(激光功率 200W、扫描速度 1000mm/s、层厚 30 $\mu$ m、扫描间距 35 $\mu$ m)下,成品抗拉强度可达 1100~1150MPa,屈服强度可达 950~1000MPa,显著高于传统铸造工艺(抗拉强度约 900MPa)。

## 5 钛合金增材制造工艺参数优化策略

### 5.1 单参数定向调控

针对具体的性能需求进行单参数的定向调整,是工艺参数优化的基础。若需提高钛合金成品的强度和硬度,可在 SLM 工艺中适当提高激光功率、降低扫描速度,形成细针状 $\alpha'$ 马氏体组织;若需提高塑性和韧性,可采用 EBM 工艺并提高预热温度,使组织转变为稳定的 $\alpha+\beta$ 相,或在 SLM 工艺中适当提高层间温度,抑制粗大 $\alpha'$ 马氏体的形成。针对成形缺陷的控制,若成品存在未熔合孔隙,可提高激光功率/电子束流、减小扫描间距,增加能量输入和熔道重叠程度;若存在球化效应和表面粗糙度高的问题,可降低激光功率、提高扫描速度,减少热积累。

### 5.2 多参数协同优化

以能量密度为核心指标,开展多参数的协同优化,是实现钛合金组织性能综合提升的关键。通过正交试验、响应面法等实验设计方法,探究激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚等参数的最佳组合,使能量密度处于最优范围,实现熔池的稳定熔化和凝固,获得高致密度、细晶粒的组织。例如等离子弧增材制造 Ti6Al4V 时,通过正交试验确定基值电流、峰值电流、沉积速度的最佳组合,可显著提高成品的成形性和显微硬度。多参数协同优化需兼顾各参数的耦合效应,避免单一参数调整导致的其他性能劣化。

### 5.3 外场辅助的参数调控

在传统工艺参数调控的基础上,引入外场辅助技术,可有效改善钛合金的凝固行为和组织形态,拓宽工艺参数的调控窗口。LDED 工艺中采用层间和轨间强制冷却技术,可快速降低层间温度,阻断 $\beta$ 晶粒的连续生长,细化组织,改善力学性能的各向异性;在 SLM 工艺中引入超声振动,可通过空化效应细化熔池晶粒,减少气孔和裂纹缺陷;通过磁场辅助调控,可改变晶粒的生长方向,实现织构的优化。外场辅助与工艺参数的结合,能够实现对钛合金组织性能的精准调控。

### 5.4 数据驱动的智能优化

借助数值模拟、机器学习等数据驱动方法,实现工艺参数的智能预测和优化,是钛合金增材制造的发展趋势。通过建立熔池的热-力耦合数值模型,模拟不同工艺参数下的熔池动态、凝固行为和晶粒生长规律,可快速筛选出最优的参数组合,减少实验成本;基于机器学习算法构建工艺参数与成品质量指标的预测模型,可实现熔池深度、表面粗糙度、孔隙类型等指标的快速预测,同时量化各参数的贡献度和耦合效应。例如基于 XGBoost 和 SHAP 解释框架的机器学习模型,可准确预测钛合金激光粉末床熔融的成品质量,为工艺参数的优化提供定量指导。

此外,工艺参数的优化需与后处理工艺相结合,增材制造钛合金经去应力退火、热等静压、固溶时效等处理后,可有效消除残余应力、改善组织形态,进一步提升性能。例如 SLM 制备的 Ti6Al4V 经热等静压处理后,疲劳强度从 320MPa 提高到 420MPa,结合化学腐蚀处理后,疲劳强度可提升至 640MPa,与传统锻态合金相当。

## 6 结论

激光功率升高、扫描速度降低会使熔池温度升高、停留时间延长,促使晶粒粗化并增加 $\beta$ 相含量,导致成品硬度略有下降但塑性提升;层厚与扫描间距过大易引发孔隙、未熔合等缺陷,显著降低成品致密度与力学性能,过小则会增加应力集中,诱发裂纹。合理匹配工艺参数可获得细小均匀的 $\alpha+\beta$ 双相组织,使成品兼具良好的强度与塑性,本研究结论可为钛合金增材制造工艺优化、提升成品质量提供理论支撑与实践参考。

### 参考文献

- [1] 王秋平,陈提提,胡胜强,等.钛合金增材制造技术及组织性能研究进展[J/OL].中国有色金属学报,1-46[2026-01-29].
- [2] 郝佳琦,方虹泽,薛兴芳,等.激光增材制造近 $\beta$ 钛合金的微观组织调控与强韧性协同提升机制[J].铸造,2025,74(11):1424-1440.
- [3] 增材制造含铜钛合金的抗亚稳点蚀作用机制研究[C]//ICC 国际腐蚀理事会,中国腐蚀与防护学会,海洋腐蚀与防护国家重点实验室.第22届世界腐蚀大会摘要集(下).[出版者不详],2025:290-292.
- [4] 编辑部.我国首项增材制造产品类标准正式发布[J].粉末冶金工业,2025,35(05):156.

# Optimization of Physical and Chemical Properties and Process Control Strategy of Coke in Coking Production

Qifei Zhao

Coking Plant No.2, Xilai Peak Branch, National Energy Coal Coking Company, Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China

## Abstract

The physicochemical properties of coke are directly related to the stability of the blast furnace charge column skeleton, the permeability of gas and liquid, and the fuel ratio level, making them the core focus of coking production organization and quality management. China's coking enterprises generally face practical constraints such as fluctuations in coal blending resources, seasonal variations in coal quality, differences in furnace conditions, and adjustments in plant load, which can easily lead to fluctuations in coke ash content, sulfur content, drum strength, and reactivity, thereby amplifying instability in production rhythm, energy consumption, and coke particle size structure. Based on frontline coking operation and management experience, and in conjunction with research conclusions from China's public literature on coke quality evaluation and influencing factors, this paper establishes an executable control chain centered on "performance indicators—optimization paths—process control".

## Keywords

coking production; coke; physicochemical properties; optimization; process control; strategy

## 炼焦生产中焦炭理化性能优化及工艺控制策略

赵起飞

国家能源煤焦化公司西来峰分公司焦化二厂，中国·内蒙古 乌海 016000

## 摘要

焦炭理化性能直接关系到高炉料柱骨架稳定、透气透液状态与燃料比水平，是炼焦生产组织与质量管理的核心落点。中国焦化企业普遍面临配煤资源波动、煤质季节性变化、炉况差异以及装置负荷调整等现实约束，使焦炭灰分、硫分、转鼓强度与反应性等指标容易出现波动，进而放大生产节奏、能耗与焦炭粒度结构的不稳定。本文立足一线炼焦操作与管理经验，结合中国公开文献对焦炭质量评价与影响因素的研究结论，围绕“性能指标—优化路径—工艺控制”建立可执行的控制链条。

## 关键词

炼焦生产；焦炭；理化性能；优化；工艺控制；策略

## 1 引言

随着全球钢铁工业的不断发展，钢铁企业对焦炭质量的要求愈发严格。焦炭作为高炉冶炼的主要还原剂，其性能直接影响着冶炼效率、产品质量及生产成本<sup>[1]</sup>。因此焦炭质量不能仅以单一指标衡量，而需要从冷态强度、热态反应性与粒度结构等多维度综合控制。

## 2 焦炭理化性能概述

焦炭理化性能是对焦炭“成分、强度与高温行为”的综合表征，现场最常用的评价口径包括灰分、硫分、转鼓抗碎强度 M25、耐磨强度 M10，以及反应性 CRI 与反应后

强度 CSR 等指标，这些指标在中国冶金焦质量分级标准中具有明确限值与分档要求。以 GB/T1996-2003 为例，灰分与硫分对应 I、II、III 级划分，M25 与 M10 用于反映焦炭在运输、装卸及高炉装料过程中的破碎与磨损倾向，CRI 与 CSR 用于反映焦炭在高温含 CO<sub>2</sub> 气氛下的反应与承载能力。在炼焦生产实践中，理化性能不仅决定焦炭出厂合格率，还与推焦顺畅、焦炭粒度结构和焦场损耗紧密相关。若灰分、硫分随煤质波动而抬升，会进一步挤压配煤与成本空间；若强度与反应性波动，则会在高炉端放大为焦比上升与炉况波动风险<sup>[2]</sup>。因此，焦化企业必须将理化性能作为全过程优化与工艺控制的统一目标。

## 3 炼焦生产中焦炭理化性能优化

### 3.1 配煤结构稳定化与煤质波动抑制

为在煤源多变条件下保持焦炭强度与反应性稳定，配

【作者简介】赵起飞（1987-），男，中国内蒙古人，本科，助理工程师，从事焦炉调温研究。

煤优化应围绕结构稳定化与波动抑制同步展开。第一,岗位技术人员以入炉煤灰分、硫分与黏结性为边界,先锁定焦煤、肥煤的骨架与黏结贡献比例,再用瘦煤、气煤对挥发分与成本作微调,并把关键煤种替换频次压缩到日内一次且班内不反复,每次改配控制在1%—2%小步幅,同时结合火道温度与结焦末期焦饼成熟状态跟踪,避免炉温响应滞后诱发M10上扬。第二,现场将煤质波动划分为可预见与突发两类,对可预见波动依据化验趋势提前1—2个班次实施小幅修正,优先改动调节煤而不动主配煤,使热工制度保持连续,对突发波动则以保障成熟与冷态强度为先,临时压缩非关键煤掺量并守住黏结组分下限,同步用镜质组反射率分布与黏结指数复核可塑区匹配,防止软化区错配导致CRI抬升。第三,化验与配煤岗位由单指标控制转为组合约束,建立灰分、硫分、挥发分与黏结性的联动窗口,例如灰分逼近上限时同步压低高硫煤比例并增加低灰骨架煤,强度出现下滑苗头时先恢复黏结组分比例并校核配合煤细度,减少依赖提高火力的被动补偿<sup>[3]</sup>。

### 3.2 备煤粒度与水分均匀性的协同优化

为使焦炭冷强度与热态性能稳定,备煤阶段应把粒度结构与含水分布作为同一套质量控制对象,做到进炉前即可预测煤饼成型状态。第一,岗位应以0—3mm细粒比例稳定为主线,将配合煤小于3mm占比控制在90%左右,并把筛分开孔、破碎机间隙、回料量与皮带负荷纳入同一班次的联动调整,避免时紧时松导致粗粒突增。同时在粉碎前先分级筛出已达标细粒,减少重复粉碎造成过细粉上升与堆密度波动。相邻班组细度波动宜控制在1%以内。第二,水分控制要从达标转向均匀,除控制总水分在9%—11%附近外,应在配煤仓上、中、下层设置班组取样点,用烘干法核对偏差,并在转运落料口、煤槽装料时增加翻堆与混匀次数,减少分层与局部偏干偏湿。雨雪季应固定执行棚化存放、溜槽排水、煤棚地面导流与装卸遮盖,防止短时进水形成湿团。

### 3.3 捣固成型质量提升与装煤完整性保障

为减少捣固焦炭强度波动的源头扰动,应把成型与装煤环节的可控要素固化为班组标准并在当班内形成可追溯记录。第一,捣固成型以煤饼密度、煤饼高度与捣固时间为过程红线,密度建议稳定在 $1.02 \sim 1.04\text{t/m}^3$ ,煤饼高度控制在 $6500 \pm 50\text{mm}$ ,捣固时间不少于8min,同时按分层给煤、均布落料与锤排交错冲击的节拍执行,捣固末端通过取样称量与表面回弹观察复核密度,交接班必须逐项确认并签字。第二,装煤前对煤槽中心与捣固锤中心进行对中校核,偏差控制在2~3mm,托煤底板与炭化室中心按规定值复测,发现偏差时先调整导向轮、侧挡板与推送行程,再进行空载试推确认不擦墙,不允许带偏装煤,避免煤饼缺角、挤裂或表层剥落。第三,装煤过程重点盯控煤饼入炉姿态与滑移阻力,出现煤饼局部塌陷、前缘翘起或送入阻滞时立即停止推送,保持托板位置并按处置程序清理塌煤与补整缺角,严禁

强推强装,防止炭化初期形成空腔导致成熟不均与推焦阻力异常。

## 4 炼焦生产中焦炭理化性能优化的工艺控制策略

### 4.1 配煤稳定与入炉煤状态一致化控制

配煤稳定的关键,是把煤质波动与入炉煤水分、粒度、堆密度等状态变量一起锁定在可控区间内,使焦炉受热与产气节奏不被打乱。第一,配煤方案实行小步变更并设回退界限,当配合煤挥发分上移且接近上限时,调温岗位以结焦末期炭化室底部保持微正压为约束,适度抬高集气管压力并联动分烟道吸力微调,避免装煤期抽吸过大,同时将标准温度下调约10至20℃并校核换向频次,控制焦饼外层过火与裂纹扩展。挥发分下移时先恢复标准温度与吸力基准,再逐步回落压力,防止炉顶压力偏负引起漏风和火道温差扩大。第二,入炉煤一致化从煤场均化抓起,来煤按灰分、硫分、水分分级入堆并分层堆取,减少临时插煤造成的配比漂移,通过跨仓配料拉平单种煤短周期波动。入炉煤水分按调湿思路稳定在窄幅区间,既避免水分过高吸热拖慢升温,又防止水分过低导致装煤密度波动,可在条件允许时将水分稳定目标靠近6%并把日内偏差压缩。第三,粒度与堆密度按传热需求设上下限,粉碎系统保证粒度分布连续,避免粗细两极化引起局部反应不同步。装煤高度、捣固或振动参数保持一致,把堆密度控制在可重复区间,确保同炉组装煤质量一致。

### 4.2 加热制度精细化与炉温均衡的调温闭环

首先,调温时应坚持小幅度、分步骤修正的节奏,通过微调煤气流量与空气过剩系数、优化交换周期与加热段配比,逐步消除局部高温点,避免炉体热应力突变引起墙体裂纹或剥蚀,并减少焦饼过火与欠火交替造成的强度波动。其次,燃烧室火道温度以换向后20s温度为校核基准,执行温度测量做到开盖即测即盖,并用冷却温度对结果进行20s点修正后判定偏差,控制在1100~1450℃区间。边火道温度下滑时岗位应先核对煤气主管压力、分配阀开度与孔板通畅度,再微增煤气量或分区配风补足热量,并将空气过剩系数保持在合理范围<sup>[4]</sup>。再者,炉顶空间温度采用分区热电偶与荒煤气温度联动监控,将炉顶温度控制在 $800 \pm 30\text{℃}$ 且上限不超过850℃,顶部温度偏高时通过降低局部燃烧强度、优化换向节拍与均衡上升烟道阻力实现回落,并核对炉门、上升管、装煤孔密封与负压水平,避免顶区过热。此外,小烟道与分烟道温度用于判别热量分配偏移,现场将小烟道温度维持在250~450℃区间,配合日常趋势图对比同排相邻炉室温度层次,同时核对吸力、闸板开度及蓄热室阻力差,温度异常先排查漏风、堵塞与结渣,再同步微调风量与煤气量,并以相邻炉室温差收敛作为调整终点。最后,环保指标应作为调温边界条件而非事后补救,当氮氧化物浓度抬升时,班组应优先在不影响成熟度的前提下压降火道峰值温度,降低

空气过剩系数并优化空燃比,必要时配合低氮燃烧方式或脱硝运行参数的联动校正。装煤与推焦出现冒烟冒火时,应同步核对煤饼水分、上升管压力与炉门密封,先消除漏点与负压吸入,再回到加热侧调整,避免仅靠加温掩盖接口异常带来的质量波动。

#### 4.3 结焦时间与推装节奏的刚性约束

为把焦炭强度、反应性等指标稳定在成熟窗口内,现场需要用结焦时间与推装节奏的刚性约束,把操作波动压在可控边界内。第一,班推焦计划应以循环图表为基准逐炉核对,计划结焦时间必须覆盖规定结焦时间,最短结焦时间不得短于规定值 15min,并禁止在末期临时压缩时间以免焦饼中心温度不足;对需烧空炉的炭化室应按单炉操作时间单列,明确推焦、空炉、补装的顺序和复核点,防止插炉导致节奏紊乱。第二,推焦与装煤以计划时刻为主控点,推焦杆头接触焦饼时间和装煤完成时间分别记录,偏差原则上控制在  $\pm 15\text{min}$  内并纳入班组考核;当连续出现提前或滞后时,调度要及时调整炉号顺序并复核直行温度与吸力,避免赶炉引起成熟度漂移。第三,推焦后空炉时间控制在 8min 以内,炭化室开门到关门敞开时间控制在 7min 以内,烧空炉等特殊情形也应设置上限并履行审批;畅、炉门工按交接卡协同,确认熄焦车到位和炉门清理到位后再开门,装煤结束立即封孔并校正炉门压紧,同时保持集气管压力平稳,减少炉墙散热和局部温降。第四,发生故障或停电延迟推焦时,应先判定炭化室温度与成熟状态,故障解除后允许赶炉但每小时比正常计划增推炉数不超过 2 炉,并优先推出成熟度已足的炉号,赶炉期间调火岗位同步跟踪炉顶温度、废气温度和吸力,小幅补热后按计划回归。

#### 4.4 出焦与干熄过程的质量稳定控制

为把出焦至干熄这一段的不确定性压到最低,现场工艺控制应围绕红焦热量一致、气体循环稳定和机械节奏可重复展开。第一,入干熄炉红焦温度建议稳定在 950 ~ 1050℃ 区间并以约 1000℃ 为控制目标,推焦前由炉头测温与推焦信号联锁校核,发现单孔偏低应优先复核结焦终点与空炉时间,避免把欠熟焦带入干熄造成表里降温速率差异,运焦翻车时控制落差与翻转角度,保持料面铺展均匀

并及时补正料位。第二,排焦温度以不高于 180℃ 为上限,同时将单次干熄时间锁定在工艺卡范围内并保持批次一致,中控以排焦量和循环风量匹配为主线调节气料比,重点盯住锅炉入口温度与预存段压力波动,预存段压力宜维持微正压 0 ~ 50Pa 以抑制外界空气吸入并减少燃烧漂移。在皮带耐热条件允许时,可将常态排焦控制在 140 ~ 160℃ 以降低风量需求,并以排焦温度偏差作为班组调整触发条件。第三,焦炭烧损率应作为过程质量指标严控在 1% 以内,操作上以循环气体入口温度、系统微正压及导入空气量为约束,减少过剩氧并保持循环气体可燃组分在安全范围,重点加强负压段法兰、水封与环形风道密封巡检,及时处理漏风和进水,防止氧化与水汽作用叠加引起粉化上升。

## 5 结语

综上所述,焦炭理化性能的稳定产出,需要生产组织把“质量目标”落实到每一道可检查、可纠偏的现场动作中。炼焦实践表明,若配煤调整缺乏节奏约束,备煤粒度与水分分布不均,捣固成型存在密度与高度波动,即使后续通过延长结焦或加大加热强度进行补偿,也容易造成成熟不均与粒度结构劣化。工艺段控制必须坚持按计划推装、稳定空炉与敞开时间、执行温度与压力的边界控制,同时强化好班组日常管理使关键波动在早期被识别并被修正。只有在全过程形成连续闭环,焦炭指标才能保持在可预测区间内。

## 参考文献

- [1] 高博.炼焦工艺优化与焦炭质量提升探究[J].石油石化物资采购, 2025(14):10-12.
- [2] 张文成.煤岩及焦炭光学组织评价焦炭宏观性能[C]//第十四届中国钢铁年会论文集—2.焦化及节能环保.2023.
- [3] 张林杨.快速预热对典型炼焦煤及其焦炭性质的影响研究[D].北京科技大学,2023.
- [4] 王帅,周文艳,高亚芳,等.炼焦煤热解过程中膨胀压力的形成机制及对焦炭质量的影响[J].煤炭转化, 2024(002):047.
- [5] 殷喜和.炼焦加热智能化控制技术的开发与应用[C]//2023全国冶金焦化流程节能减排创新技术研讨会.山西太钢不锈钢股份有限公司焦化厂, 2023.

# Influence of organic base on the thermal stability of Nitromethane

Xinyi Zhang<sup>1,2,3</sup> Huixing Liang<sup>2,3</sup> Hongjun Luo<sup>2,3</sup> Huimin Lv<sup>2,3</sup> Ruwei Wang<sup>2,3</sup>

1. Process Safety and Crystal Form Laboratory of Yangtze River Pharmaceutical Group Jiangsu Haici Biological Pharmaceutical Co., Ltd, Taizhou, Jiangsu, 225300, China

2. Yangtze River Pharmaceutical Group, Taizhou, Jiangsu, 225300, China

3. National Key Laboratory of Advanced Drug Formulations for Overcoming Delivery Barriers, Taizhou, Jiangsu, 225300, China

## Abstract

Nitromethane has a wide range of applications, but its instability has led to frequent explosion accidents. Previous scholars have conducted extensive research on the decomposition reaction of nitromethane. This paper first summarizes and analyzes the research results of predecessors, and uses differential scanning calorimetry and adiabatic accelerated calorimetry to experimentally test and analyze the thermal decomposition characteristics of nitromethane and nitromethane containing different organic bases. By comparing the runaway reaction conditions of nitromethane ( $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ) in different organic bases, this study focuses on its thermal stability in DBU. The experiments show that based on the analysis of the initial decomposition temperature, the thermodynamic stability of nitromethane mixed with DBU significantly decreases, and the initial exothermic temperature is significantly advanced from 260.68°C to 41.86°C. According to the analysis of the time to maximum rate of adiabatic thermal explosion (TMRad), the temperature  $\text{TD}_{24}$  corresponding to TMRad of 24 hours is significantly advanced from 233.20°C to 9.70°C. If cooling failure occurs at room temperature, this system is highly likely to experience a runaway reaction, leading to an explosion accident.

## Keyword

Nitromethane; organic base; thermal stability

## 有机碱对硝基甲烷热稳定性的影响

张心意<sup>1,2,3</sup> 梁慧兴<sup>2,3</sup> 罗宏军<sup>2,3</sup> 吕慧敏<sup>2,3</sup> 王如伟<sup>2,3</sup>

1. 扬子江药业集团江苏海慈生物药业有限公司工艺安全与晶型实验室, 中国·江苏泰州 225300

2. 扬子江药业集团有限公司, 中国·江苏泰州 225300

3. 克服递药屏障高端制剂全国重点实验室, 中国·江苏泰州 225300

## 摘要

硝基甲烷的应用领域非常广泛,但一直以来,硝基甲烷的不稳定性造成的爆炸事故屡见不鲜。前人学者们对硝基甲烷的分解反应已经研究很多,本文首先总结和分析了前人的研究成果,并利用差示扫描量热仪和绝热加速量热仪对硝基甲烷及含不同有机碱的硝基甲烷的热分解特性进行了实验测试和数据分析,通过对比硝基甲烷( $\text{CH}_3\text{NO}_2$ )在不同有机碱中的失控反应情况,本研究重点考察了其在DBU中的热稳定性。实验表明,基于起始分解温度分析,硝基甲烷与DBU混合后的热力学稳定性明显下降,起始放热温度由260.68°C显著提前至41.86°C,根据绝热条件下热爆炸形成时间TMRad分析,TMRad为24h所对应的温度 $\text{T}_{\text{D}24}$ 由233.20°C显著提前至9.70°C,室温下若发生冷却失效该体系极有可能发生失控反应,导致爆炸事故的发生。

## 关键词

硝基甲烷;有机碱;热稳定性

## 1 引言

硝基甲烷(Nitromethane),是一种有机化合物,化学式为 $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ,为无色油状液体,微溶于水,溶于乙醇、乙醚和二甲基甲酰胺和氢氧化钠溶液,可用于有机合成,亦

可作为有机溶剂,在化工生产中应用广泛,在水中 $\text{pKa}$ 约为10.2,反应过程中经常采用有机碱作为硝基甲烷反应中的缚酸剂,但硝基甲烷是具有爆炸性的最简单的硝基化合物,属于易制爆危险化学品(易制爆危险化学品名录2017年版),这一危险特性导致涉及硝基甲烷的安全事故频发,使其安全问题更加突出。2011年5月,淄博宝源化工股份有限公司发生爆炸事故,直接原因就是硝基甲烷车间粗品精馏过程中

【作者简介】张心意(1992-),男,中国湖北随州人,本科,中级注册安全工程师,从事化工工艺热安全研究。

固体残留物发生热分解而爆炸。因此,研究有机碱对硝基甲烷热稳定性的影响具有重要的实际意义。

目前已有关于硝基甲烷热分解危险性的研究,邵理云利用 C80 微量热仪对不同升温速率下硝基甲烷的热分解特性进行了试验研究<sup>[1]</sup>,徐凯进行了硝基甲烷及其分解产物的从头算分子动力学研究<sup>[2]</sup>,肖鹤鸣和江明从实验和分子轨道计算两个方面对硝基甲烷热解动力学和机理作了综述<sup>[3]</sup>。研究易分解化学品中杂质对其分解性质的影响很有意义,蒋慧灵和闫松<sup>[4]</sup>研究了水分对过氧化苯甲酸叔丁酯的影响<sup>[4]</sup>,孙占辉研究了无机酸对硝酸铵热稳定性的影响<sup>[5]</sup>,杨帆研究了乙酸对过氧化氢热稳定性的影响<sup>[6]</sup>。硝基甲烷是一种弱酸性化合物,在使用过程中通常会加入有机碱形成碳负离子,有机碱的加入可能导致硝基甲烷的热稳定性发生改变,但有机碱对硝基甲烷热稳定性影响的研究尚未查找到相关文献。因此,探讨有机碱对硝基甲烷热稳定性的影响对于硝基甲烷在化工生产中的安全使用以及预防此类物质引起的事故具有重要意义。

物质的热稳定性是指物质在特定的加热条件下,加热期间内保持其固有特性的能力,是物质本身的属性。目前,评估物质热稳定性的试验方法主要有差热分析法(DTA)、差示扫描量热分析法(DSC)、快速筛选法(RSD)以及绝热量热法(ARC)。本研究采用差示扫描量热仪(DSC)、加速量热仪(ARC)对不同有机碱与硝基甲烷的混合溶液的稳定性进行了系统评估,并通过与硝基甲烷的对比,分析有机碱对硝基甲烷热稳定性的影响,以期对硝基甲烷在化工生产中的安全使用、储存和运输提供指导。

## 2 试验

### 2.1 试剂

试剂名称	含量	供应商
硝基甲烷	≥99.0%	国药
三乙胺	≥99.0%	国药
DBU	99.32%	毕得医药
吡啶	99.5%	麦克林
哌啶	≥99.0%	润景化工

### 2.2 仪器

差示扫描量热仪:试验所用差示扫描量热仪(DSC)由美国TA公司生产,仪器型号为DSC25,操作温度范围为-40~400℃,温度准确度±0.1℃,量热灵敏度为0.04μW。

绝热加速量热仪:试验所用绝热加速量热仪(ARC)由英国THT公司生产,操作温度范围为0~500℃,压力范围为0~20MPa,测试样品质量范围为0.01~10.00g,测试阈值为0.02℃/min。

### 2.3 试验方法

DSC热稳定性测试:依据《化学物质的热稳定性测定差示扫描量热法(GB/T 22232-2008)》,用5℃/min升温速

率对样品进行测试。

ARC热稳定性测试:依据《化学危险品的热稳定性评价指南第一部分-加速量热仪法(SN/T 3078.1-2012)》,运用H-W-S(加热-等待-搜寻)模式对样品进行测试,先将样品加热至40℃,稳定15min后开始检测样品的放热速率,检测时间为10min,检测的阈值为0.02℃/min,当样品放热速率超过检测阈值时进入绝热模式,若检测不到放热,则温度升高5℃,进入下一个“H-W-S”循环。

## 3 结果与讨论

### 3.1 热稳定性分析

采用差示扫描量热仪对含不同有机碱的硝基甲烷进行热稳定性分析,热流曲线都有1个明显的放热峰。对放热峰进行分析,便可得到其实放热温度 $T_0$ 、峰值温度 $T_p$ 、放热量 $H$ 等参数,见表1。

表1 含不同有机碱的硝基甲烷的DSC热分解参数

升温速率	有机碱的种类	硝基甲烷/有机碱	起始放热温度 $T_0/℃$	峰值温度 $T_p/℃$	放热量 $H/(J/g)$
5℃/min	无	N/A	223.97	397.99	2364.3
5℃/min	吡啶	1:1	145.15	374.27	2331.8
5℃/min	DBU	1:1	51.09	227.09	1756.8
5℃/min	哌啶	1:1	109.22	281.68	2335.5
5℃/min	三乙胺	1:1	136.47	251.63	2513.0

采用绝热加速量热仪对硝基甲烷及硝基甲烷与DBU混合溶液(质量比1:1)进行ARC热稳定性测试,“加热-等待-搜寻”测试模式下都有一段明显的分解放热现象,对放热数据进行分析,便可得到初始放热温度、初始升温速率、最大升温速率、最大压升速率、绝热温升、比放热量等参数,见表2。

表2 硝基甲烷及硝基甲烷与DBU混合溶液ARC测试结果

特性参数	硝基甲烷	硝基甲烷与DBU混合溶液(质量比1:1)
初始放热温度/℃	260.68	41.86
初始升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	0.036	0.080
最大升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	474.37	7742.67
最大压升速率/(℃·bar <sup>-1</sup> )	12.50	106.15
绝热温升 $\Delta T_{ad}/℃$	>104.74	>258.14
比放热量/(J/g)	>733.18	>1657.26

### 3.2 硝基甲烷及硝基甲烷/DBU的TMRad分析

TMRad是一个反应动力学参数的函数,表示绝热条件下热爆炸形成时间,或绝热条件下最大反应速率到达时间,是热危险性评价中非常重要的参数。如果初始条件 $T_0$ 下的活动放热速率 $q_0$ 已知,且已知反应物料的比热容 $C_p$ 和反应活化能 $E$ ,则TMRad可以计算得到。计算公式为

$$TMR_{ad}(T) = \frac{c_p RT_0^2}{q_0 E} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2 \exp(-E/RT)}$$

因为  $q_0$  是温度的指数函数, 所以 TMRad 随温度呈指数关系降低, 且随活化能的增加而降低。本文计算了硝基甲烷、硝基甲烷/DBU 的 TMRad 为 24h 所对应的温度  $TD_{24}$ , 结果见表 3

在绝热条件下, 当环境温度达到 233.2℃, 经过 24h, 硝基甲烷热分解达到最大反应速率; 在绝热条件下, 当环境温度达到 9.7℃, 经过 24h, 硝基甲烷/DBU 热分解达到最

大反应速率, 说明含有有机碱与硝基甲烷的反应体系, 即使在室温下, 一旦发生冷却失效, 也会有反应失控的风险。

表 3 硝基甲烷及硝基甲烷与 DBU 混合溶液 TMRad 分析结果

物料	有机碱的种类	硝基甲烷/DBU	起始放热温度 $T_0/^\circ\text{C}$	$TD_{24}/^\circ\text{C}$
硝基甲烷	无	N/A	260.68	233.2
硝基甲烷	DBU	1:1	41.86	9.7

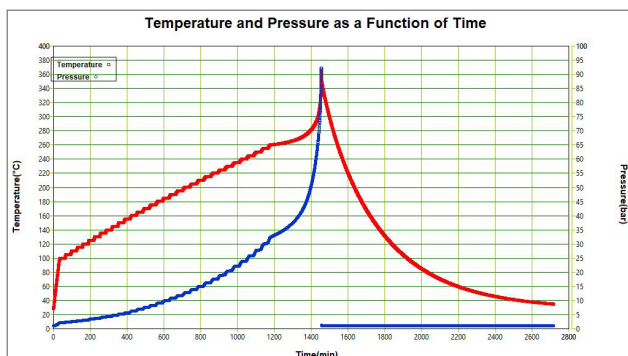


图 1 硝基甲烷的绝热加速量热仪测试谱图

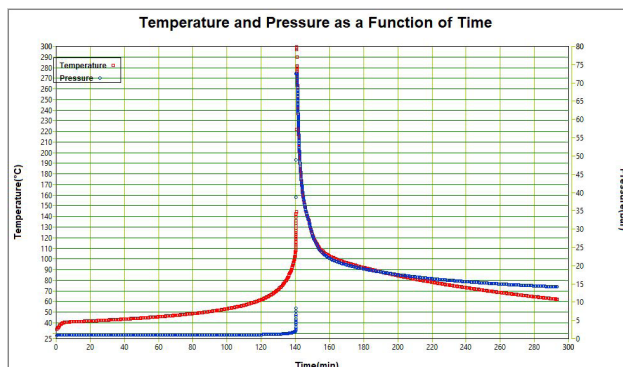


图 2 硝基甲烷/DBU 的绝热加速量热仪测试谱图

## 4 结论

1) 差示扫描量热仪的分解实验表明, 不同的有机碱均会降低硝基甲烷的起始分解温度, 其中 DBU 的降低效果最为明显。

2) 硝基甲烷的  $T_{D24}$  为 233.2℃; 硝基甲烷/DBU 的  $T_{D24}$  为 9.7℃。环境或反应温度越高, 样品越容易发生热失控反应。

3) 硝基甲烷在进行反应时, 若使用了有机碱作为碱或缚酸剂, 应考虑有机碱对硝基甲烷热分解的催化作用。硝基甲烷遇有机碱存在更容易分解的特性。

## 参考文献

[1] 邵理云. 硝基甲烷热分解危险特性研究[J] Journal of Safety and Environment (安全与环境学报) 2012 12(3) : 182-184.

[2] 徐凯. 硝基甲烷及其分解产物的从头算分子动力学研究[J] Journal of Safety and Environment (安全与环境学报) 2012 12(3) : 182-184

[3] 肖鹤鸣, 江明. 硝基甲烷的热解反应动力学和机理[J] 火炸药学报 1988, 36-40

[4] 蒋慧灵, 闫松, 魏彤彤. 水分对过氧化苯甲酸叔丁酯热稳定性的影响[J] CIESC Journal (化工学报) 2011 62(5): 1290-1295

[5] 孙占辉, 孙金华, 陆守香, 申世飞. 无机酸对硝酸铵热稳定性影响的研究[J] China Safety Science Journal (中国安全科学学报) 2005 15(9) 57-62

[6] 杨帆, 钱新明, 黄平, 刘丽琼. 乙酸对过氧化氢热稳定性的影响[J] Journal of Safety and Environment (安全与环境学报) 2012 12(5) 165-169

# Research and Practice on the Digital Application System for Safe Production Based on Industrial Internet

Xibin Chang Yonghai Xie Guoyuan Dang Xuming Sheng Wenpeng Hao\*

Qinghai Huixin Asset Management Co., Ltd., Geermu, Qinghai, 816000, China

## Abstract

As China's industrial development enters a new stage, the traditional safety control model is facing severe challenges and urgently needs to utilize new-generation information technologies to achieve the digital transformation and intelligent upgrade of safety production. The industrial internet, as the product of the deep integration of new-generation information technologies and manufacturing, provides a key path for building a new safety production management system. This paper systematically elaborates on the digital application system of safety production based on the industrial internet, and focuses on analyzing the application models, key technologies and practical value of this system in core business modules such as monitoring and early warning of major hazards in enterprises, digital construction of the dual-prevention mechanism, electronic operation ticket management, full-process control of contractors, online safety education and training and examinations, intelligent emergency management, and change management.

## Keywords

Industrial Internet; Safety Production; Digitalization

# 基于工业互联网的安全生产数字化应用体系研究与实践

常喜斌 谢永海 党国元 盛绪明 郝文鹏\*

青海汇信资产管理有限责任公司, 中国·青海 格尔木 816000

## 摘要

随着我国工业发展进入新阶段,传统安全管控模式面临严峻挑战,亟需利用新一代信息技术实现安全生产的数字化转型与智能化升级。工业互联网作为新一代信息技术与制造业深度融合的产物,为构建新型安全生产管理体系提供了关键路径。本文系统阐述了基于工业互联网的安全生产数字化应用体系,重点分析了该体系在企业重大危险源监测预警、双重预防机制数字化建设、电子作业票管理、承包商全过程管控、线上安全教育培训与考试、智能化应急管理、以及变更管理等核心业务模块的应用模式、关键技术与实践价值。

## 关键词

工业互联网; 安全生产; 数字化

## 1 引言

安全生产是企业可持续发展的生命线,更是关系人民生命财产安全和社会稳定的基石。然而,在传统的安全管理模式下,企业普遍存在风险感知滞后、管理流程割裂、信息孤岛林立、决策依赖经验、责任难以追溯等问题,导致安全管理效率低下,事故预防能力不足。

工业互联网通过构建连接人、机、物、法、环的全要素、全产业链、全价值链的新型基础设施与应用生态,为破解上述难题提供了全新的解决方案。其核心在于利用物联网(IoT)技术实时采集数据,利用云计算和大数据技术存储与处理数据,利用人工智能(AI)和数字孪生技术分析模拟数据,

最终实现安全生产管理从静态分析向动态感知、从被动响应向主动预警、从单点防控向全局联控的深刻变革。

## 2 企业重大危险源监测预警: 从被动监控到主动预警

### 2.1 全域感知与数据集成

通过部署智能传感器(如压力、温度、液位、可燃/有毒气体浓度传感器)、视频监控(AI智能识别)、无人机巡检等,实现对重大危险源关键工艺参数、设备状态、周界环境信息的7x24小时不间断采集。工业互联网平台充当“数据中枢”,不仅集成物联网数据,还打通与企业的DCS(集散控制系统)、SCADA(数据采集与监视控制系统)、ERP(企业资源计划)等系统的数据链路,形成重大危险源的“全息画像”。

### 2.2 风险预警模型与数字孪生应用

基于汇聚的多维数据,利用大数据分析和机器学习算法,构建风险预警模型。

【作者简介】常喜斌(1976-),男,土族,硕士,高级经济师/高级工程师,从事盐湖化工、资源综合利用研究。

- 阈值预警：对关键参数设定多重报警阈值，实现超限报警。

- 趋势预警：通过对历史数据的学习，识别参数的不良变化趋势，在事故发生前发出早期预警（如压力缓慢持续上升）。

- 关联预警：分析多个参数间的关联关系，当出现异常组合时发出报警。

- 数字孪生：为重大危险源构建高保真虚拟模型，通过实时数据驱动，实现对设备运行状态的仿真、故障的预测性诊断和事故后果的模拟推演，为决策提供“沙盘”。

### 2.3 闭环处置与联动控制

一旦系统发出预警，平台自动生成预警工单，通过移动终端推送至相关责任人，明确处置措施和时限。处置过程全程线上记录，形成“感知-预警-处置-反馈-核查”的闭环管理。在紧急情况下，系统可与紧急停车（ESD）、消防喷淋等安全仪表系统联动，实现自动应急处置，最大限度控制事态发展。

## 3 双重预防机制数字化建设：筑牢风险管控的两道防线

安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制是当前安全生产领域的核心制度。工业互联网技术使其从繁重的纸质记录和人为管理中解放出来，实现动态化、精准化、高效化运行。

### 3.1 风险分级管控的数字化

- 风险单元电子地图：在工厂的二维/三维地图上，对风险辨识出的所有风险点进行可视化标注，不同颜色代表不同风险等级（红、橙、黄、蓝），一目了然。

- 风险数据库与动态评估：建立标准化的风险数据库，收录风险点基本信息、危害因素、潜在后果、现有管控措施及责任部门。当工艺、设备、人员发生重大变更时，系统自动提示需要进行风险再评估。

- 管控措施线上落实：将风险点的管控措施（如巡检、检修、培训）转化为具体的工作任务，并自动纳入相关人员的日常工作清单，确保措施落地。

### 3.2 隐患排查治理的闭环管理

任务智能推送：系统根据风险数据库和巡检标准，自动生成日常、专项、季节性等隐患排查任务，并通过移动APP推送到对应责任人。

移动化现场排查：检查人员使用移动终端进行扫码检查，通过勾选、拍照、录像、录音等方式记录隐患，标准统一，信息真实。

流程化闭环治理：发现隐患后，APP自动生成隐患整改通知单，明确责任单位、整改时限。整改责任人上传整改过程及结果照片，申请验收。验收人员现场核查后线上确认关闭。全过程留痕，超期自动预警，实现“发现-上报-整改-验收-销号”的线上闭环。

大数据分析预警：平台对所有隐患数据进行多维度统计分析，识别高频隐患、薄弱环节、重复性问题，为企业优化风险管控措施、调整隐患排查重点提供数据决策支持。

## 4 电子作业票管理：实现特殊作业的全过程受控

特殊作业（动火、受限空间、高处作业等）是事故高发环节。电子作业票系统将线下繁琐、易出错的纸质票证审批流程，转变为线上高效、规范、可追溯的数字化流程。

### 4.1 线上流程与电子签名

作业申请人通过PC端或移动端在线填写电子作业票，系统内置标准模板和填写规范，减少错漏。审批流程根据预设规则自动流转，各级审批人（监护人、属地负责人、安全管理人员等）通过电子签名方式在线审批，不受时空限制，极大提升效率。

### 4.2 安全措施联锁确认

系统将作业安全措施（如能量隔离、气体检测、消防器材准备）设置为必确认项。审批人和监护人必须到现场逐项确认并拍照/录像上传，系统才允许进入下一环节。通过与物联网系统集成，可自动读取能量隔离系统的锁具状态、气体检测仪的实时数据，实现“技防”替代“人防”的验证。

### 4.3 作业过程实时监控与异常预警

在作业期间，系统通过集成视频监控、气体检测传感器等，对作业现场进行实时监控。一旦检测到可燃/有毒气体浓度超标、作业人员异常行为（如未佩戴安全带），系统立即向监护人和管理人员发出预警。作业票证具有时效性，超时未完成需重新审批，确保作业条件持续安全。

### 4.4 数据沉淀与知识库构建

所有电子作业票及相关数据均被存档，形成企业特殊作业知识库。可用于分析作业风险规律、评估承包商绩效、追溯事故原因，并为后续同类作业的风险研判提供历史数据支持。

## 5 承包商管控：实现外来风险的系统化治理

承包商安全管理是企业安全管理的难点和短板。工业互联网平台可实现对承包商“准入-作业-评估-退场”的全生命周期一体化管理。

### 5.1 一站式准入与资质审查

建立承包商线上准入库，承包商在线提交营业执照、资质证书、安全许可证、主要人员社保及特种作业证书等。系统自动进行有效性校验和提醒，安全管理人员在线审核，建立合格承包商名录。

### 5.2 人员入场统一培训与考试

审核通过的承包商人员，必须通过企业线上安全培训平台，完成规定课程的学习并通过在线考试。系统自动记录学习时长和考试成绩，合格者信息自动同步至门禁系统，授权入场权限。

### 5.3 作业过程全程可追溯

承包商的所有作业活动必须通过电子作业票系统进行

申请和审批。其作业行为、违章记录、隐患整改情况等均被系统记录，并与该承包商及其人员的信用档案关联。

#### 5.4 动态信用评价与黑名单机制

基于承包商的作业合规率、事故/违章数量、隐患整改及时率等数据，系统自动生成其安全绩效评分和信用等级。对评分低、屡次违章的承包商，系统自动限制其投标资格或列入黑名单，实现优胜劣汰，引导承包商加强自我管理。

### 6 线上安全教育培训考试：构建全员安全能力提升体系

传统的集中式、课堂化安全培训模式成本高、组织难、效果难以评估。线上平台实现了安全培训的个性化、便捷化和精准化。

#### 6.1 丰富的课程资源与个性化推送

建立多媒体安全课程库，包含视频、动画、PPT、文档等多种形式。系统可根据员工的岗位、风险 exposure、历史培训记录，智能推送定制化的学习内容（如新员工三级教育、年度再培训、专项作业前培训）。

#### 6.2 灵活的学习模式与过程监控

员工可通过 PC 端或手机 APP 随时随地进行碎片化学习。系统后台实时监控学习进度，对未按时完成的员工自动发送提醒。

#### 6.3 在线考试与自动阅卷

培训结束后，系统可组织在线考试，从题库中智能组卷，支持多种题型。考试结束后系统自动阅卷，即时生成成绩，并建立个人电子培训档案。

#### 6.4 培训效果分析与优化

平台对整体培训数据进行分析，如课程完成率、考试通过率、错题分布等，帮助安全管理人员识别培训薄弱环节，优化课程内容和培训计划。

### 7 智能化应急管理：提升事故响应与处置效能

工业互联网技术极大地增强了企业的应急指挥和救援能力，使应急管理从“预案文本”走向“实战演练”。

#### 7.1 数字化应急预案与资源管理

将文本预案结构化、电子化，并与风险点、重大危险源信息关联。建立应急资源（应急队伍、装备、物资、医疗点）数据库，并在电子地图上精准定位，实现一键查询和调度。

#### 7.2 智能接警与一键启动

当传感器报警或人工接警后，系统可自动识别事故地点和类型，并基于预设规则，一键启动相应级别的应急预案，通过短信、APP、语音电话等方式，自动通知应急指挥中心和所有救援人员。

#### 7.3 可视化应急指挥与协同

在指挥中心，基于数字孪生或三维模型，实时显示事故现场态势、人员位置（通过定位手环/手机）、救援力量

分布、扩散模拟结果等。指挥人员可通过视频会议、集群对讲等功能，实现跨部门、跨区域的远程可视化协同指挥。

#### 7.4 应急演练线上化与评估

系统支持线上模拟演练和现场演练的数字化记录。可设定虚拟事故场景，各参演单位在线上进行响应操作，系统自动记录并评估演练过程，生成评估报告，助力预案持续改进。

### 8 变更管理（MOC）：控制管理盲区的系统性风险

#### 8.1 线上化变更申请与审批

任何涉及工艺、设备、仪表、原料、人员、程序等的变更，都必须通过线上系统提交变更申请，详细说明变更内容、理由、可能带来的风险。系统按照预设流程，推送至工艺、设备、安全等相关专业技术人员和管理人员进行审查和批准。

#### 8.2 系统化风险分析与措施制定

在审批流程中，系统强制要求对变更进行风险分析（如 HAZOP 分析），并制定相应的安全措施、培训计划和更新相关文件的要求。这些内容作为变更申请的组成部分，需经审批人确认。

#### 8.3 闭环沟通与落实跟踪

变更批准后，系统自动将变更内容、新风险、新操作规程等信息推送至所有受影响的人员（包括承包商），并要求其完成确认和学习。系统跟踪所有后续措施（如文件更新、培训完成、措施落实）的完成情况，确保变更全过程受控，形成管理闭环。

### 9 结论与展望

工业互联网与安全生产的深度融合，不是简单的技术叠加，而是对传统安全管理模式的一场深刻革命。本文所构建的涵盖重大危险源、双重预防、作业许可、承包商、培训、应急、变更等核心业务的数字化应用体系，体现了数据驱动、流程闭环、责任明晰、智能决策的现代安全管理理念。

未来，随着 5G、人工智能、数字孪生等技术的不断成熟，“工业互联网+安全生产”将向更深层次发展，如实现更高精度的预测性维护、更智能的自主安全巡检、更逼真的应急演练仿真，最终迈向具有自感知、自学习、自决策、自执行能力的“智慧安全”新阶段。企业应把握数字化转型机遇，以工业互联网为抓手，持续构筑坚固的安全生产防线，为实现高质量发展保驾护航。

#### 参考文献

- [1] 张国之;王云龙;穆波.工业互联网在化工企业安全生产中的研究现状和发展趋势[J].应用化工,2022(05)
- [2] 侯忠生;许建新.数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J].自动化学报,2009(06)
- [3] 黄浪;吴超;王秉.“流”视域下的系统安全协同理论模型构建[J].中国安全科学学报,2019(05)

# Integrated Reverse Osmosis-Nanofiltration Process for Lithium Concentration and Extraction from Salt Lake Brine

Shibao Yuan

Qinghai Salt Lake Huixin New Materials Technology Co., Ltd., Golmud, Qinghai, 816000, China

## Abstract

China's salt lake brine is rich in lithium resources but faces the technical bottleneck of "high magnesium and low lithium" (Mg/Li mass ratio of 50-500), making magnesium-lithium separation difficult. This paper systematically investigates the reverse osmosis-nanofiltration integrated process for lithium concentration and extraction from salt lake brine. The nanofiltration stage achieves magnesium-lithium separation and simultaneous boron removal, while the reverse osmosis stage accomplishes efficient lithium concentration. The optimal operating parameters were determined: nanofiltration at pH 9-10, pressure 1.2-1.5 MPa, temperature 25-30°C, achieving a magnesium-lithium separation factor of 19.2 and simultaneous boron removal rate of 60%-75%; reverse osmosis with recovery rate of 75%-78%, lithium enrichment factor of 5.53, and energy consumption reduced by 50% with energy recovery devices. The whole-process material balance shows that the integrated process achieves a total lithium recovery rate >75%, freshwater reuse rate of 75%, and concentrated lithium concentration >30 g/L meeting precipitation requirements. The obtained lithium carbonate product has a purity of 99.78%, meeting battery-grade standards (GB/T23853-2022). Techno-economic analysis indicates a total cost of 20000-40000 RMB/ton and carbon emission of 17.7 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg LCE, demonstrating good economic viability and environmental advantages. This study provides a feasible technical solution for lithium extraction from high Mg/Li ratio salt lake brine.

## Keywords

Salt lake brine; Reverse osmosis-nanofiltration integration; Magnesium-lithium separation; Lithium concentration; Battery-grade lithium carbonate

## 反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水浓缩提锂

袁世宝

青海盐湖汇信新材料科技有限公司, 中国·青海 格尔木 816000

## 摘要

我国盐湖卤水锂资源丰富,但存在“高镁低锂”(镁锂比50~500)的技术瓶颈,导致镁锂分离困难。本论文针对上述问题,系统研究反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水浓缩提锂。通过纳滤段实现镁锂分离与同步除硼,反渗透段完成锂的高效浓缩。实验确定了最优操作参数:纳滤段pH 9~10、压力1.2~1.5 MPa、温度25~30°C,镁锂分离因子达19.2,同步除硼率60%~75%;反渗透段回收率75%~78%,锂富集倍数5.53,配置能量回收装置可节能50%。全流程物料衡算表明,集成工艺锂总回收率>75%,淡水回用率75%,浓缩液锂浓度>30 g/L满足沉锂要求。所得碳酸锂产品纯度99.78%,达到电池级标准(GB/T23853-2022)。技术经济分析显示,完全成本20000~40000元/吨,碳排放17.7 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg LCE,具有良好经济性和环保优势。本研究为高镁锂比盐湖卤水提锂提供了可行的技术方案。

## 关键词

盐湖卤水; 反渗透-纳滤集成; 镁锂分离; 锂浓缩; 电池级碳酸锂

## 1 绪论

### 1.1 研究背景与意义

锂作为“白色石油”,是新能源产业的关键战略资源。我国锂资源超80%赋存于盐湖卤水,但以“高镁低锂”为主要特征,镁锂比高达50~500,且二者离子半径相近、物

化性质相似,镁锂分离成为长期技术瓶颈。开发适用于高镁锂比盐湖卤水的高效提锂技术,对保障国家锂资源安全、支撑新能源产业发展意义重大。

### 1.2 盐湖卤水提锂技术现状

盐湖提锂工艺主要包括沉淀法、吸附法、萃取法和膜分离法。单一膜法工艺难以兼顾分离与浓缩:纳滤可实现镁锂分离但浓缩倍数有限,反渗透可浓缩锂但无法有效除杂。集成多种膜过程的耦合工艺成为研究热点。2025年,盐湖股份在察尔汗盐湖项目中成功集成纳滤、反渗透、电渗析工艺,制备出纯度99.80%的电池级碳酸锂,标志该技术进入

【作者简介】袁世宝(1992-),男,土族,中国青海海东人,本科,初级,从事盐湖提锂、纳滤反渗透、电渗析、树脂除硼除钙镁研究。

工程化突破阶段。

### 1.3 集成工艺的研究定位

反渗透-纳滤集成工艺的核心思路：纳滤利用二价离子截留特性实现镁锂分离，反渗透利用单价离子浓缩效应实现锂富集，协同解决“分离”与“浓缩”两大问题。但现有研究多聚焦单一膜过程优化，对两段工艺的耦合机制、参数匹配、能耗优化等系统性问题关注不足。本论文拟针对上述问题开展系统研究，为工艺工程应用提供理论支撑。

### 1.4 研究内容与技术路线

主要研究内容：高镁锂比卤水纳滤分离特性、反渗透浓缩行为、两段工艺耦合优化、全过程技术经济评价。技术路线：以典型盐湖卤水为对象，采用实验与理论分析相结合，阐明分离机理与浓缩规律，建立优化设计方法，通过物料衡算与能耗分析验证工艺可行性。

## 2 反渗透-纳滤集成工艺理论基础

### 2.1 盐湖卤水化学组成与资源特征

我国盐湖卤水以高镁锂比（50~500）、伴生硼（0.5~3 g/L）为特征，典型卤水中锂浓度 2~6 g/L。镁锂离子水合半径相近（Li<sup>+</sup> 0.38 nm, Mg<sup>2+</sup> 0.43 nm），物化性质相似，导致分离困难。

### 2.2 纳滤分离机理与镁锂分离机制

纳滤膜的分离由空间位阻效应和道南效应（Donnan effect）协同控制。荷负电膜对二价镁离子的静电排斥弱，不利于镁锂分离；荷正电膜则通过强静电排斥截留镁离子，同时允许一价锂离子透过，实现选择性分离。溶质透过膜的输运涉及空间效应、静电排斥、介电效应等，高选择性膜需合理耦合上述机理。硼的去除依赖于 pH 调控：pH<9 时硼以中性分子 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 存在，截留率低；pH>9 时解离为 B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>，与荷负电膜产生静电排斥，截留率提高。

### 2.3 反渗透浓缩机理与传质过程

反渗透依靠压力驱动水分子透过半透膜，实现锂浓缩。水通量和溶质通量分别由溶解-扩散模型描述：

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi)$$

$$J_s = B(C_m - C_p)$$

其中， $J_w$  为水通量， $A$  为水渗透系数， $\Delta P$  为操作压差， $\Delta \pi$  为渗透压差； $J_s$  为溶质通量， $B$  为溶质渗透系数， $C_m$  和  $C_p$  分别为膜表面和透过液溶质浓度。浓差极化  $\beta = \frac{C_m}{C_p}$  导致膜表面浓度升高，渗透压增加，有效驱动力下降，限制浓缩倍数。

### 2.4 集成工艺的协同效应与过程强化

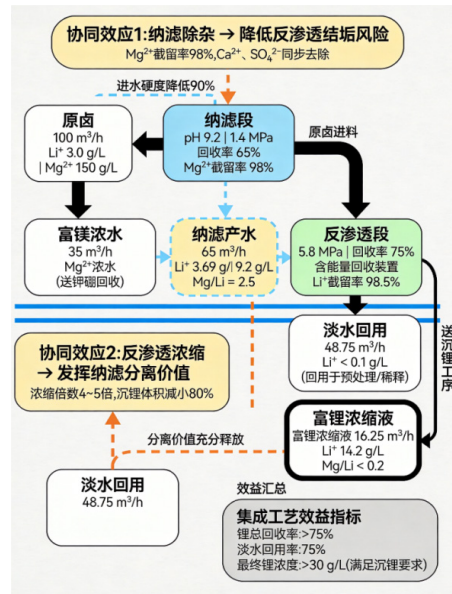
反渗透-纳滤集成工艺通过功能分工实现协同增效：纳滤段去除二价离子（镁、钙、硫酸根），降低后续反渗透段结垢风险；反渗透段浓缩锂，减小沉锂工段体积。两段工艺通过物料衡算耦合：

$$Q_p C_p = Q_f C_f R_{Li}$$

$$C_c = \frac{C_p}{r}$$

其中， $Q_f$ 、 $C_f$  为纳滤进料流量和锂浓度， $R_{Li}$  为纳滤锂收率， $Q_p$ 、 $C_p$  为纳滤产水（反渗透进水）流量和锂浓度， $r$  为反渗透回收率， $C_c$  为反渗透浓缩液锂浓度。沉锂工序要求  $C_c \geq C_{min}$ ，即  $r \geq \frac{C_p}{C_{min}}$ ，此关系将两段参数直接耦合。

两段工艺的协同机制可概括为下图所示流程：纳滤段分离镁锂并产出低镁富锂液，反渗透段将此液浓缩至沉锂所需浓度，同时反渗透产水（淡水）可回用于预处理或稀释，实现水资源循环。纳滤段的除杂效果保障了反渗透段的长期稳定运行，而反渗透段的高效浓缩则充分发挥了纳滤段的分离价值。



通过优化匹配两段工艺参数，可在锂总回收率 >75%、浓缩液锂浓度 >30 g/L 的指标下实现资源高效利用。

## 3 纳滤分离特性与工艺优化研究

### 3.1 实验材料与方法

选取 NF270 聚酰胺纳滤膜（荷负电）及实验室自制荷正电改性膜进行实验，并以文献报道的分级界面聚合膜、冠醚调控膜作性能对比。模拟卤水组成为 Li<sup>+</sup> 2~6 g/L, Mg<sup>2+</sup> 按镁锂比 20~200 配制，硼酸 0.5~3 g/L。采用错流过滤装置，考察 pH、压力、温度及进料浓度对分离性能的影响。评价指标包括锂透过率、镁截留率、镁锂分离因子 S 和膜通量。

### 3.2 操作参数对分离性能的影响

pH: pH<4 时镁截留率 <65%, S<5; pH 6~8 时镁截留率 >85%, S=10~15; pH 10~11 时镁截留率 >92%, S=18~22, 同时硼截留率由 10%~20% 升至 60%~75% (硼酸解离为 B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>)。压力: 1.2~1.5 MPa 区间 S 最佳 (约 18), 过高压力加剧浓差极化。温度: 25~30℃ 为优选区间, 过高则选择性下降。镁锂比: 由 20 升至 150 时, S 由 20 降

至8,高镁锂比下锂透过率下降明显。

### 3.3 镁锂分离效率的影响因素分析

膜荷电特性:荷负电膜(NF270)在镁锂比50时S=15~20,锂透过率80%~85%;荷正电膜S=10~12,锂透过率50%~60%。双机理协同:分级界面聚合膜在镁锂比50时S~50;冠醚调控纳滤膜引入苯并-15-冠-5醚,S达57.2,察尔汗卤水测试中经两级分离可将Mg/Li从928.6降至1.9。响应曲面法优化得到最佳条件:pH 9.2、压力1.4 MPa、温度26°C,S=19.2,回归模型为:

$$S=18.2+2.5X_1+1.8X_2-1.2X_3-0.8X_1X_2+0.5X_1X_3-0.6X_2X_3-2.1X_1^2-1.3X_2^2-0.9X_3^2$$

不同类型纳滤膜镁锂分离性能对比如下表:

膜类型	镁锂分离因子	水通量 (L·m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	测试条件
荷负电商品膜(NF270)	15~20	40~50	镁锂比50,总盐50 g/L
荷正电改性膜(PEI)	10~12	30~40	镁锂比50,总盐50 g/L
分级界面聚合膜	~50	35~45	镁锂比50,总盐20 g/L
冠醚调控纳滤膜	57.2	8.2L·m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·bar	镁锂比50,总盐~30 g/L

<sup>1</sup> 通量值为1.0 MPa下测定

### 3.4 纳滤过程模型建立与验证

采用DSPM-DE模型描述多离子竞争透过行为,该模型综合考虑空间位阻、道南效应和介电排斥。扩展Nernst-Planck方程为:

$$j_i = -D_{i,p} \frac{dc_i}{dx} - \frac{z_i c_i D_{i,p}}{RT} F \frac{d\psi}{dx} + c_i v$$

通过实验拟合膜结构参数:膜孔半径r<sub>p</sub>=0.72 nm,有效膜厚/孔隙率δ/A<sub>k</sub>=180 μm,pH 8时表面电荷密度σ=-12 mC/m<sup>2</sup>。

在镁锂比50、总盐120 g/L条件下验证模型:预测镁截留率87.5%(实验值86.2%),锂透过率72.3%(实验值70.8%),分离因子13.8(实验值13.2),相对误差<8%。模型预测表明,回收率由20%升至80%时,分离因子由15.6降至9.8,建议纳滤段回收率控制在60%~70%。

## 4 反渗透浓缩行为与集成工艺耦合

### 4.1 反渗透浓缩特性研究

选取SW30XLE反渗透膜(锂截留率98.5%,通量较高)进行研究。在纳滤产水(Li<sup>+</sup> 3.69 g/L, Mg<sup>2+</sup> 9.2 g/L,总盐45 g/L)条件下,考察操作压力和回收率对浓缩性能的影响。

操作压力5.5 MPa时,水通量62.3 L·m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>,锂截留率98.3%。回收率由50%升至80%时,浓缩液Li<sup>+</sup>浓度由9.8 g/L增至35.8 g/L,富集倍数5.53;回收率超80%后通量急剧下降,渗透压升高限制进一步浓缩。确定经济可行回收率

75%~78%,对应锂浓度30~35 g/L。

进料中残留Mg<sup>2+</sup>对反渗透性能影响显著:Mg<sup>2+</sup>浓度由0.5 g/L升至3.5 g/L时,锂富集倍数由5.2降至4.6,通量衰减率由18%增至31%,验证纳滤段分离效率对下游的关键作用。

### 4.2 浓缩过程能耗分析与优化

反渗透单位体积产水能耗(含能量回收)为:

$$SEC = \frac{P_{op} Q_f}{Q_p \eta_p} - \frac{P_{op} Q_c \eta_{ERD}}{Q_p \eta_p}$$

回收率75%时,单位产水能耗2.1 kWh/m<sup>3</sup>,单位锂产品能耗5.1 kWh/kg Li(配置效率92%能量回收装置)。无能量回收时单位锂产品能耗10.3 kWh/kg Li,节能幅度达50%。

正渗透技术利用盐湖老卤作驱动液,可由太阳能驱动,是进一步降低浓缩能耗的潜力方向。

### 4.3 膜污染机制与控制策略

膜污染是影响反渗透长期稳定运行的核心问题。采用SEM-EDX对运行120 h后的反渗透膜表面进行分析,结果显示污染层厚度约5~12 μm,主要元素组成为Ca、Mg、Si、S、C,局部区域出现片状结晶,判定为硫酸钙和硫酸镁的复合垢与有机物凝胶层的复合污染。

尽管纳滤段已去除绝大部分二价离子,反渗透段进水中仍残留Ca<sup>2+</sup> 20~50 mg/L、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 80~150 mg/L。在浓差极化作用下,膜面离子浓度可达主体浓度的3~5倍,局部过饱和和度超过溶度积10倍以上,诱发结晶成核。此外,卤水中残留的腐殖质等有机物通过疏水作用吸附于膜面,与无机垢交织形成致密凝胶层,进一步增加传质阻力。

针对上述污染特征,采取以下控制策略:

(1) 阻垢剂添加:在进水中投加5 mg/L有机膦酸阻垢剂,通过螯合作用与晶体畸变效应抑制垢晶生成,可使临界回收率由78%提升至85%以上。

(2) 化学清洗:采用碱性清洗(pH 11~12,0.2% EDTA+0.1% SDS,30 min)去除有机污染和部分无机垢,再以酸性清洗(pH 2~3,0.2% HCl或柠檬酸,20 min)去除残余无机垢,通量恢复率达92%~95%。

(3) 预处理优化:配置紫外消毒或非氧化性杀菌剂控制微生物滋生,进一步减轻生物污染风险。

(4) 智能化监控:结合CFD模拟与人工神经网络建立污染预测模型,可提前预警污染趋势,实现运行参数的动态优化。

通过上述综合控制策略,可保障反渗透段在75%回收率下长期稳定运行,膜清洗周期延长至3个月以上。

### 4.4 集成工艺物料衡算与参数匹配

以处理100 m<sup>3</sup>/h原卤为基准,集成工艺全流程物料衡算如表4-1所示。纳滤段回收率65%、锂透过率80%、镁截留率92%;反渗透段回收率75%、锂截留率98.5%。

反渗透-纳滤集成工艺全流程物料衡算如下表:

物流节点	流量 (m <sup>3</sup> /h)	Li <sup>+</sup> (g/L)	Mg <sup>2+</sup> (g/L)	Mg/Li	去向
原卤	100	3.0	150	50	纳滤段进水
纳滤浓水	35	0.6	400	667	钾硼回收
纳滤产水	65	3.69	9.2	2.5	反渗透段进水
反渗透产水	48.75	<0.1	<0.1	—	淡水回用
反渗透浓缩液	16.25	14.2	2.3	0.16	沉锂工序

参数匹配关系：纳滤段产水锂浓度  $C_p$  与反渗透回收率  $r$  需满足  $r \geq \frac{C_p}{C_{\min}}$  ( $C_{\min}$  为沉锂要求浓度)。优化匹配区间：纳滤段回收率 60%~70%、pH 8.5~9.5；反渗透段回收率 75%~78%、操作压力 5.5~6.0 MPa。集成工艺锂总回收率 >75%，淡水回用率 75%，浓缩液锂浓度 >30 g/L 满足沉锂要求。

## 5 集成工艺技术经济分析与展望

### 5.1 产品指标与电池级碳酸锂标准对标

集成工艺所得富锂浓缩液经沉锂制备的碳酸锂产品纯度达 99.78%，镁含量 32 ppm，硼含量 45 ppm，各项指标均满足 GB/T23853-2022《卤水碳酸锂》I 型标准（主含量 ≥99.5%，镁 ≤50 ppm，硼 ≤100 ppm）。盐湖股份中试项目同样制备出纯度 99.80% 的电池级碳酸锂，验证了本工艺的产品质量可行性。

### 5.2 技术经济可行性分析

以年处理 100 万 m<sup>3</sup> 原卤（年产碳酸锂 5000 吨）计，总投资约 5300 万元（膜元件 1000 万元、泵阀及能量回收 2000 万元、预处理 800 万元、土建安装 1500 万元）。运行成本包括：电耗 215 万元/年（430 万 kWh，0.5 元/kWh）、膜更换 280 万元/年、药剂 150 万元/年、人工 120 万元/年，合计运行成本 1530 元/吨 LCE。完全成本约 8000~9000 元/吨 LCE，与溶剂萃取法相当，低于吸附法（约 12000 元/吨）。膜工艺碳排放 17.7 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg LCE，显著低于萃取法（52.7）和吸附法（47.9）。

### 5.3 集成工艺的工程应用前景

本工艺适用于镁锂比 20~200、锂浓度 2~6 g/L、硼浓度 0.5~3 g/L 的盐湖卤水。针对超高镁锂比盐湖（Mg/Li≈500），需采用吸附-膜耦合工艺；针对高硼卤水，可在纳滤段调控 pH 同步除硼；针对低锂浓度卤水，可采用两级反渗透或正渗透强化浓缩。膜集成工艺可实现淡水回用率 75%，较传统工艺节水 30% 以上，契合盐湖资源绿色开发方向。

### 5.4 主要结论

本论文系统研究了反渗透-纳滤集成工艺用于盐湖卤水提锂，主要结论如下：（1）纳滤段最优操作参数为 pH 9~10、压力 1.2~1.5 MPa、温度 25~30℃，镁锂分离因子可达 19.2，同步除硼率 60%~75%；（2）反渗透段经济回收率 75%~78%，锂富集倍数 5.53，配置能量回收装置可节能 50%；（3）全流程锂总回收率 >75%，淡水回用率 75%，浓缩液锂浓度 >30 g/L 满足沉锂要求；（4）产品纯度 99.78%

达电池级标准，完全成本 8000~9000 元/吨，具有良好经济性和环保优势。后续研究方向包括高性能锂选择性膜开发、多膜过程深度集成及盐湖资源综合利用。

### 参考文献

- [1] 姜小毛, 陈金兰, 希域格. 盐湖股份: 卤水直接提锂技术取得重大突破[N]. 中国化工报, 2025-10-17.
- [2] 秦春刚. 唯赛勃“膜法”技术实现突破 助力盐湖提锂降低水耗 [N]. 上海证券报, 2025-11-24.
- [3] 曹晓敏. 突破“渗透性—选择性”瓶颈 新型纳滤膜实现盐湖镁锂高效分离[N]. 中国化工报, 2025-09-29.
- [4] 刘科, 夏应杰, 陈曦, 等. 具有双Li<sup>+</sup>传输通道的冠醚调控纳滤膜用于盐湖卤水Mg<sup>2+</sup>/Li<sup>+</sup>分离[J]. Water Research, 2025, 123924. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123924.
- [5] He Y, Li G, Lin H, et al. Enhanced Mg<sup>2+</sup>/Li<sup>+</sup> separation by amino crown ether composite nanofiltration membrane with Mg<sup>2+</sup> transport barrier[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 123137. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.123137.
- [6] Yong M, Yang Y, Sun L, et al. Nanofiltration membranes for efficient lithium extraction from salt-lake brine: A critical review[J]. ACS Environmental Au, 2025, 5(1): 12-34. DOI: 10.1021/acsenvironau.4c00061.
- [7] 中国科学院上海高等研究院. Interests on lithium extraction from the Chinese salt-lake brines[EB/OL]. (2025-04-24).
- [8] Yang F R, Yong M, Li Z K, et al. Breaking the trade-off between lithium purity and lithium recovery: A comprehensive mathematical modeling based on membrane structure-property-performance relationships[J]. Water Research, 2025, 281: 123678. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123678.
- [9] 董守龙, 杨尚明, 张世春, 等. 纳滤和反渗透组合回收盐湖提锂尾液中锂的研究[J]. 无机盐工业, 2019, 51(12): 53-57. DOI: 10.11962/1006-4990.2019-0031.
- [10] Li Z, Zhao Y, Li Y, et al. Reverse osmosis process combining energy consumption analysis and mass transfer in the concentration of lithium-enriched brine[J]. Desalination, 2025, 594: 118309. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118309.
- [11] Sun H, Wang Y, Liu C, et al. Polyethylene separator supported thin-film composite forward osmosis membranes for concentrating lithium enriched brine[J]. Water Research, 2022, 216: 118297. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118297.
- [12] Liu Y, Ran J, Guo Q, et al. Advancements in nanofiltration fouling phenomenon: From water treatment to salt lakes environments[J]. Desalination, 2024, 583: 117649. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117649.
- [13] Unlocking industrial-scale lithium extraction from salt lake brines: A comprehensive sustainability, life cycle, and techno-economic comparative analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 525: 146535. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146535.

# Analysis of the Cause and Treatment Measures of the Failure of the Chemical Centrifugal Compressor

Bozhong Hao Hong Lu Shengchang Hu

Zhejiang Dingsheng Petrochemical Engineering Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

## Abstract

Chemical centrifugal compressors are critical mechanical equipment in oil refining, chemical processing, natural gas treatment, fertilizer production, and refrigeration systems. Their operational status directly affects material circulation, system pressure differential establishment, and equipment load stability. China's similar units are often subjected to high-speed, continuous operation, complex media, and frequent condition fluctuations. Mechanical failures typically manifest initially as vibration, temperature rise, leakage, and efficiency decline, subsequently evolving into shutdown maintenance. Published literature indicates that rotor imbalance, bearing abnormalities, impeller corrosion and wear, and dry gas seal failure are common fault types in chemical plants, often related to media cleanliness, assembly quality, lubrication and cooling conditions, and start-stop operations. This paper analyzes the aforementioned four types of mechanical failures and proposes corresponding countermeasures for reference in equipment maintenance and operation.

## Keywords

chemical industry; centrifugal compressor; failure causes; troubleshooting measures

## 化工离心式压缩机故障原因及处理措施分析

郝波众 陆宏 胡盛昌

浙江鼎盛石化工程有限公司, 中国·浙江舟山 316200

## 摘要

化工离心式压缩机是炼油、化工、天然气处理、化肥及制冷装置中的关键动设备,其运行状态直接影响物料循环、系统压差建立和装置负荷稳定。中国同类机组长期处于高转速、连续运行、介质复杂和工况波动频繁的环境中,机械故障往往先表现为振动、温升、泄漏和效率下降,随后演化为停机检修。公开文献表明,转子失衡、轴承异常、叶轮腐蚀磨损和干气密封失效是化工现场较常见的故障类型,且多与介质洁净度、装配质量、润滑冷却条件及启停操作有关。本文围绕上述四类机械故障展开分析,并提出对应处理措施,以供装置检修和运行维护参考。

## 关键词

化工; 离心式压缩机; 故障原因; 处理措施

## 1 引言

离心式的压缩机作为化工生产的重要设备之一,其结构相对复杂,在实际运行过程中容易发生各种故障,这不仅会影响生产的效率及质量,也会对安全生产造成不良影响<sup>[1]</sup>。化工装置中的离心式压缩机通常承担循环气、再生气、合成气、丙烯制冷气等介质的升压输送任务,设备一旦非计划停机,往往会连带影响反应、分离和公用工程系统。近年来公开论文与行业资料普遍将振动异常、轴承温升、叶轮损伤和密封泄漏列为高频问题,其中不少故障并非突发形成,而是在介质带液带尘、零部件磨损、启停切换失当和冷却润滑条件变差的叠加作用下逐步显现。因而,从故障机理入手梳理

可操作的处理办法,具有较强现实意义。

## 2 化工离心式压缩机概述

化工离心式压缩机通常是指依靠高速旋转叶轮对工艺气体做功,使气体获得速度能并在扩压元件内转化为压力能的透平式压缩设备,常见于炼油、乙烯、化工、空分、天然气处理和大型制冷系统。按照结构形式,装置中多见单轴多级和整体齿轮增速两类机型,前者适用于较高压比和连续重载场合,后者多用于流量变化较大或多工况运行场合。该类设备一般由转子、叶轮、机壳、轴承、密封、润滑与冷却等部分组成,具有流量大、连续性强、脉动小的特点,但对气体洁净度、装配精度和运行边界较为敏感。化工现场所说的故障处理,通常不是单纯更换零件,而是围绕振动源、摩擦副、密封端和流道损伤逐项排查并恢复机械匹配关系。

【作者简介】郝波众(1981-),男,中国山东菏泽人,本科,工程师,从事石油化工行业设备维保检修研究。

### 3 化工离心式压缩机故障原因

#### 3.1 转子不平衡振动

化工离心式压缩机的转子在高速运行状态下对质量分布极为敏感,叶轮结垢、局部磨损、检修后配重变化以及联轴器装配偏差,都可能打破原有动平衡关系。中国化工装置处理的介质常带有冷凝液、聚合物、粉尘或腐蚀产物,这些杂质附着在叶轮进口边和轮盘背面,会使转子质心偏移,并在升速过程中放大一倍频振动。若机组停车后未及时盘车,热态转子还可能因冷却不均出现轻微弯曲,使振动问题由单纯失衡演变为失衡与热弯曲叠加,最终表现为轴承座振动升高、联轴器发热和密封端加速磨损<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 轴承磨损与过热

轴承故障在化工离心式压缩机中具有渐进性特征,初期往往只是油温偏高或回油颜色异常,继续运行后才会出现振动增大和瓦面擦伤。其根本原因多集中在三类环节。第一类是润滑油本身不合格,如黏度选择不当、油中混入金属屑和水分、供油量不足或油路堵塞,导致油膜难以稳定建立。第二类是冷却条件变差,冷油器结垢、冷却水量不足或回油不畅都会使热量带不出去。第三类是装配关系失准,轴承间隙过大或过小、瓦块受力不均、轴颈表面状况变差,都会使局部摩擦加剧并引起温升与磨损同步发展。

#### 3.3 叶轮腐蚀与磨蚀

叶轮处于气流加速和转向最剧烈的位置,长期承受颗粒冲刷、腐蚀介质侵袭和交变应力作用,因而是化工离心式压缩机最容易出现性能衰减的部位之一。若工艺气中夹带催化剂粉末、铁锈、焊渣或结晶颗粒,叶片进口边、叶顶和流道转折处会首先发生冲蚀,叶型改变后压缩效率随之下降。若介质中含有硫化氢、氯化物、酸性水或冷凝液,叶轮表面又会出现点蚀、麻坑和局部减薄。部分化工和炼油装置在负荷波动较大时还会出现带液运行,这会进一步加重叶轮表面的腐蚀磨损耦合破坏,严重时可引起裂纹和擦碰。

#### 3.4 密封系统泄漏

密封泄漏是化工离心式压缩机中风险较高的一类机械故障,尤其在处理易燃、易爆和有毒介质时更需要重视。当前石化装置大量采用干气密封,但密封效果并不只取决于密封环本体,还与密封气压力、气质洁净度、过滤分离效果和安装状态密切相关。若密封气压差不足,端面难以形成稳定气膜,泄漏量会明显上升。若密封气中混入液滴、重烃冷凝物或粒径较大的颗粒,端面会被划伤并出现磨痕。除此之外,检修时同心度控制不好、弹簧压缩量不当、轴向窜动偏大以及轴承腔润滑油向密封侧迁移,也会破坏密封端受力状态,最终表现为泄漏、发热和回油异常<sup>[3]</sup>。

### 4 化工离心式压缩机故障处理措施

#### 4.1 转子不平衡振动处理

针对化工离心式压缩机的转子不平衡振动处理不能只

停留在做平衡这一层,而应按沉积清除、几何复位、弯曲甄别和复装验证连续推进,并把故障点从表象振动追溯到质量分布变化本身。停机隔离后,检修人员先拆检进气侧及各级叶轮,重点清除叶片进口边、轮盘背面、平衡盘和联轴器上的硬质结垢、焦质与带液沉积,清理时要把附着在轮盘根部和狭窄流道内的偏载污物一并去净,并同步追查过滤失效、介质聚合或析水结冰来源,中国压气站案例已出现因凝液结冰损伤梳齿密封并诱发振动停机的情况。清理完成后,应沿转子全长复核键、锁紧件、叶轮定位及联轴器连接状态,对松动、偏磨和装配位移先做几何恢复,再实施动平衡校正;不平衡故障通常表现为1X转频占主导、径向响应大于轴向,且振幅随转速抬升而明显放大,因此现场只可在结构许可范围内修正配重,配重增减后还要复测相位变化和残余振值,不能以补焊替代平衡,也不能靠放大轴承间隙转移矛盾。若机组经历热态急停、高温抱轴或长周期偏载运行,还要加测主轴跳动、轴向窜量和端面摆差,必要时结合联轴器外圆复测轴系直线度,并根据频谱中1X、2X及高次分量的变化区分单纯失衡与轴弯曲、对中偏差,避免误判后重复拆装。转子复装后,应重新校核对中、基础垫片和联轴器端面间隙,按低速、临界区、额定转速分段升速观察相位与幅值稳定性,同时联查轴承温升、回油状态和密封回气;资料显示,部分机组轴振超过50 μm即触发停机,因此只有在一倍频稳定、温度和回气参数无连带异常后,方可恢复至工艺负荷。

#### 4.2 轴承磨损与过热处理

轴承磨损与过热的处理不能停留在补油和外部降温层面,而应围绕油路清洁、受力面修复、装配间隙复原和升温过程复核四条线同步展开。其一,机组停稳并完成隔离后,先排尽旧油并留样检查颜色、酸败气味、机械杂质和含水量,再将主辅油泵入口滤网、过滤器、节流孔板、供回油管、油箱及冷油器逐段拆检,凡是发现滤芯堵塞、管壁结焦、回油不畅、冷却水串漏或油箱泡沫异常的部位,必须在新油注入前冲洗到位,必要时进行化学清洗和气密复查,连同油箱死角沉积物一并清除,防止残余污物进入瓦面造成二次拉伤<sup>[4]</sup>。其二,拆检轴承时要把径向瓦、推力瓦、止推盘和轴颈作为一组受力单元统查,对拉毛、擦伤、巴氏合金层起皮、边角塌陷、局部乌黑发蓝和磨痕偏载等现象逐项判定,轻微损伤可按瓦面接触轨迹修刮并复测,超过允许范围的瓦块和推力件应直接更换,不能把硬点、麻点和失圆表面带入复装。其三,回装阶段应按图样恢复顶隙、侧隙、推力间隙和接触斑点,检查承载区是否连续、油楔方向是否正确,同时复核轴向定位、轴承座同轴度、轴颈圆柱度及联轴器找中情况,避免因转子窜动过大、局部偏载或油膜过薄引起重复发热。其四,启机前还要把冷却水量、供油压力、冷油器出口油温、过滤器压差和回油状态调整到机组允许区间,开车初期采用低负荷短周期观察,连续核对轴承温升、回油温差和油流稳定性,一旦出现温度继续爬升、油压逼近联锁下限或回油持

续带泡,应立即退出运行并回到油路、间隙和受力关系上重新查因。

### 4.3 叶轮腐蚀与磨损处理

叶轮腐蚀与磨损的处置不能停留在简单补焊或更换层面,而应把缺陷判定、修复边界、型线恢复和介质整治连成一套闭环。其一,检修人员开缸后应先清除流道沉积物,再结合目视、着色和尺寸复测检查叶片进口边、叶顶、轮盖焊缝及转弯区,对减薄量、麻坑深度和缺口长度逐处编号记录;凡损伤集中在进口边和转角区,多与高速颗粒冲刷有关,公开研究表明叶轮材料在120—210 m/s 颗粒冲击条件下冲蚀会明显加重,因此不能只看表面颜色就下结论,若表面呈片状锈蚀或点蚀并伴随潮湿痕迹,则要同步核查酸性水、冷凝液和带液来源。其二,对浅表冲蚀和轻度腐蚀宜采用精磨整形、局部补焊或耐蚀涂层修补,但修补量必须受控,修后要复核叶片最小厚度、进口圆角、流道连续性和轮盘局部跳动,必要时做静平衡复测,并检查修补区与母材过渡是否平顺,避免因堆焊过厚、焊疤未修顺而把台阶、偏重和附面层扰动带回机内<sup>[5]</sup>。其三,若叶轮已出现裂纹、叶片弯扭、轮盖开焊或大面积减薄,现场不应反复堆焊凑合投用,应转入更换或返厂再制造程序,并按制造厂要求处理热影响区和复验平衡,因为裂纹件继续高速运行极易扩展并诱发振动与擦碰。其四,机组重装前还要从工艺侧清理入口过滤器和前置分离设备,排净低点积液,校核排液是否畅通,实际案例中入口过滤失效、锈屑焊渣进入和持续带液,均会造成级间叶轮损伤与结垢,所以必须把固体颗粒、腐蚀性冷凝液和异常工况一并切断,并在开车初期连续跟踪振动、压比和级间温升变化。

### 4.4 密封系统泄漏处理

围绕化工离心式压缩机密封系统泄漏治理,现场处理应按“端面修复—装配复核—气源整治—隔离校正”连续展开。第一,检修人员解体后要同步检查动静环端面、辅助O形圈、弹簧座、定位销和轴套工作带,凡端面出现拉沟、崩边、热斑或结晶黏附,辅助密封出现硬化、胀大和失圆时,不宜单件凑合回装,应按配套件成组更换,并把密封腔、端盖止口和轴套配合面清洗到无颗粒、无油膜状态,因为干气密封运行气膜通常为3—5 μm,少量固体或液滴进入后就可

能诱发端面擦碰和泄漏放大。第二,复装阶段应把同心度、压缩量和螺栓均布预紧一并控制,先校核转子轴向窜量、推力轴承磨损和轴颈状态,再复核端面贴合,不允许在转子窜动偏大条件下强行投用,否则端面稳定间隙会被破坏,启机后温升和泄漏量往往同步上升。第三,密封气系统不能只看压力表读数,还要逐项确认过滤、分液、调压和伴热是否真正起效,密封气必须保持洁净、干燥并持续高于过程侧,工程上常按API 692控制过滤精度,主密封及接触式隔离气过滤通常取1 μm、去除效率99.9%,二级密封气可按10 μm等级控制,对接近露点的机组应先暖管升温再送气。第四,若外侧密封有油污、排放异常或缓冲气耗量突增,还要回查轴承腔排放、回油背压和隔离气供给时序,后置隔离气的作用本就是阻断润滑油向密封端迁移,二级排放线应避免形成附加背压,并把低隔离气压力设为启机许可或联锁条件,必要时同步调整排放口、疏通回油通道并校正先供气后供油的操作顺序。

## 5 结语

化工离心式压缩机故障处理的关键,不在于发现异常后被动更换零件,而在于把故障点还原到具体机械关系上。转子振动要回到质量分布和轴系直线度,轴承过热要回到油膜、间隙和散热条件,叶轮损伤要回到介质冲刷和腐蚀环境,密封泄漏要回到端面状态与密封气质量。只有把故障原因与处理措施逐项对准,并在检修中把尺寸、配合、洁净度和启停条件同时控制住,化工装置中的离心式压缩机才能恢复稳定运行。

### 参考文献

- [1] 陈兆龙,孙冠龙.化工企业离心式压缩机的故障检查维修与设备管理措施分析[J].石化技术, 2025(8).
- [2] 俞吉祥.化工企业离心式压缩机振动措施及市场前景探讨[J].中国石油和化工标准与质量, 2025(12):125-127.
- [3] 郭锋锋.离心式压缩机的维护保养[J].中国石油和化工标准与质量, 2023.
- [4] 李广龙,胡明威,刘春阳.离心压缩机在运行中的故障分析及检修技术[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023(4):4.
- [5] 李强,贾武军,赵龙,等.离心式压缩机试车故障分析及解决措施[J].山东化工, 2023, 52(20):181-182.

# Analysis of Common Fault Causes and Targeted Maintenance of Tube and Shell Heat Exchanger

Shengchang Hu Hong Lu Bozhong Hao

Zhejiang Dingsheng Petrochemical Engineering Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316200, China

## Abstract

Shell-and-tube heat exchangers, as one of the most prevalent shell-and-tube heat transfer devices in chemical plants, perform continuous heat transfer functions across heating, cooling, condensation, evaporation, and heat recovery processes. Their operational status directly impacts plant energy consumption, product quality, and long-term stability. Both current heat exchanger standards and fixed-pressure vessel safety regulations have incorporated shell-and-tube heat exchangers into their compliance frameworks. In petrochemical facilities, typical configurations include fixed-tube-sheet, floating-head, and U-tube designs. The most prevalent issues in chemical plants involve four major failure modes: scaling blockage, corrosion perforation, tube end leakage, and vibration-induced wear. These failures often result from combined effects of medium properties, water quality fluctuations, thermal stress, flow velocity imbalance, and inadequate maintenance. This paper systematically analyzes the root causes of these common failures and proposes targeted maintenance strategies tailored to practical field conditions.

## Keywords

Chemical industry; Shell-and-tube heat exchanger; Common faults; Cause analysis; Targeted maintenance

## 管壳式换热器常见故障成因分析与针对性检修

胡盛昌 陆宏 郝波众

浙江鼎盛石化工程有限公司, 中国·浙江舟山 316200

## 摘要

管壳式换热器是化工装置中最常见的间壁式换热设备之一,在加热、冷却、冷凝、蒸发及热量回收环节承担连续传热任务,其运行状态直接影响装置能耗、产品质量与长周期稳定性。现行热交换器产品标准与固定式压力容器安全技术要求均已将管壳式换热器纳入规范体系,炼化现场则普遍存在固定管板式、浮头式和U形管式等典型结构。当前化工企业中此类设备的高发问题主要集中在结垢堵塞、腐蚀穿孔、管端泄漏和振动磨损四类,这些故障往往与介质性质、水质波动、温差应力、流速失衡及检修不到位相互叠加。本文据此对常见故障成因进行归纳,并围绕现场可实施的检修环节提出针对性做法。

## 关键词

化工; 管壳式换热器; 常见故障; 成因分析; 针对性检修

## 1 引言

在中国炼油、煤化工、氯碱、合成氨及精细化工装置中,管壳式换热器数量大、分布广、服役工况复杂,既承受温度和压力波动,又长期接触含盐、含硫、含氯及悬浮颗粒介质。由于服役环境恶劣、介质复杂多变,管壳式换热器易发生介质渗漏等问题,严重影响设备安全性与运行效率。同时换热器一旦出现泄漏、压降异常或换热能力衰减,往往会连带造成炉负荷上升、流程温度失控甚至装置被迫停工,因此检修工作不能停留在简单拆洗层面,而应建立以故障机理为基础的

的针对性处置思路<sup>[1]</sup>。

## 2 管壳式换热器概述

管壳式换热器属于典型间壁式换热设备,其基本结构由壳体、管束、管板、折流板、封头及连接法兰组成,以壳体内部的管壁作为高效换热表面,通过管内与壳侧液体的热交换实现调温与换热。资料显示,管壳式换热器长期作为独立国家标准对象存在,后由GB/T 151《热交换器》统一规范,且在固定式压力容器安全技术体系中,管板和换热管被明确列为主要受压元件。结合炼化企业的实际应用情况看,浮头式适合温差较大且需抽芯清洗的场合,固定管板式结构紧凑、成本较低但清洗受限,U形管式适用于温差较大工况但弯管部位检修不便。正因为其适应性强、制造成熟、维护方式成套,管壳式换热器至今仍是中國化工装置中的主力冷换设备。

【作者简介】胡盛昌(1989-),男,中国江西九江人,本科,工程师,从事炼化装置维保工作和装置技改项目及工程建设项目研究。

### 3 管壳式换热器常见故障成因分析

#### 3.1 传热面结垢堵塞

传热面结垢堵塞是化工换热器最普遍的运行故障之一,常见表现为换热效果变差、进出口温差异常、压降升高和局部流量不足。其形成机理并不单一,循环水中的钙镁盐、铁锈、油污、微生物黏泥及工艺侧析出的盐类都可能在低流速区、低温端和管板附近沉积。水质中总铁、浊度、石油类升高会促进污泥沉积和垢下腐蚀,而低流速又会加快污垢附着,进一步造成堵塞与传热衰减。在炼油装置中,铵盐还会在露点以下结晶,优先沉积于管箱端部、管板和流动死角,堵塞与腐蚀往往同步出现<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 换热管腐蚀穿孔

换热管腐蚀穿孔多发生在冷却水侧、壳程入口区、低温冷凝区及沉积物覆盖区域,故障后通常表现为介质互串、液位异常、壳程或管程带油带水。结合实践和行业资料表明,酸性环境中的 $H_2S$ 、 $HCl$ 及 $Cl^-$ 会破坏金属表面钝化膜,导致点蚀和坑蚀不断加深,沉积物形成后又易演变为垢下腐蚀。对于循环水系统,油品漏入、水质恶化、悬浮物增多和菌藻繁殖会明显加剧腐蚀速率。若介质中同时存在高流速、颗粒或气泡,冲刷与电化学腐蚀还会叠加,最终使管壁减薄失稳并形成穿孔泄漏。

#### 3.3 管端及连接部位泄漏

管端及连接部位泄漏主要出现在管子与管板胀接处、焊接处以及法兰密封处,这类故障往往不像管体腐蚀那样有明显的长期预兆,但一旦形成通道,介质互串速度较快。部分高压换热器内漏与螺栓预紧力不足、温度变化及压力升降密切相关,说明密封系统在热循环和载荷波动下容易失稳。对于管板连接区,若管壳程压差大、启停频繁、升降温过快,局部热应力与机械应力会集中于胀焊过渡部位,造成微裂纹扩展。缝隙腐蚀资料还表明,管板连接区本身就是腐蚀敏感部位,一旦积垢或残液滞留,泄漏风险会进一步增大。

#### 3.4 管束振动磨损开裂

管束振动磨损开裂多发生在入口冲击区、折流板穿孔处和支撑不足的跨距部位,现场常伴随异响、周期性振动升高和泄漏点重复出现。高速流体冲击、外部泵机脉动、管道振动传递及折流板间距不合理,都可能诱发管束共振或高频微振。振动产生后,管子与折流板或支撑件反复碰磨,会先造成表面保护膜破坏和局部减薄,再在交变载荷作用下出现裂纹扩展。有关换热管裂纹研究也指出,局部高频振动是碰磨痕迹和裂纹形成的重要诱因,而温差过大与启停过快还会放大疲劳损伤<sup>[3]</sup>。

### 4 管壳式换热器常见故障针对性检修

#### 4.1 结垢堵塞的分级清洗与通道恢复

就管壳式换热器结垢堵塞的检修而言,现场处置应按先判堵塞部位、再分级清洗、后核实通道恢复的顺序展开。

检修前,班组先把运行期同负荷下的进出口温差、流量和压降变化与历史台账逐项比对,再拆看管箱、管板近端、折流板背流区及低温端沉积形貌,并留取垢样做水溶性、酸溶性和含油性判别,借此区分管程缩流、壳程旁路和局部结晶沉积,不把换热下降一概判成普通水垢。进入清洗阶段后,检修人员要按垢层厚度、硬度和附着牢固度确定级别,对硬垢或近乎堵死的管子先做机械通管、通刷或高压水射流疏通,把主通道先打通,再安排与母材、焊缝和胀接结构相容的酸洗、碱洗或复配药洗,循环过程中同时盯住药液温度、浓度、时间和缓蚀状态,必要时控制回流过滤和排污频次,防止剥落垢块在回路中反复沉积,也防止把旧缺陷洗成新腐蚀。对含氯铵、硫酸铵等晶盐性沉积,处理时不能只求局部溶解速度,通常要先疏通后洗、分段冲洗、分侧排放的办法控制清洗顺序,低点排净后再切换下一段,冲洗液颜色和导电度明显回落后再进入下一轮,避免剥落晶体转移到U形弯头、短节和近管板端形成二次堵塞。清洗结束后,检修人员还要逐根复核通球或通刷结果,并复测压降恢复、流通均匀性和端部残垢情况,必要时对可疑管口做内窥复查,壳程则应把折流板间隙、支撑处和死角松散沉积彻底清除;凡发现麻点、垢下腐蚀、壁厚异常或局部减薄超限的换热管,应直接转入补管、堵管或更换处置,回装前再做封头、垫片和紧固件复查,不带缺陷回装。

#### 4.2 腐蚀穿孔的抽芯检查与分区处置

围绕换热管腐蚀穿孔实施检修时,现场应把抽芯核查、减薄判级、分区修复和再投用边界校核连成一条线处理。第一,设备解体后检修人员不能只在管口找漏,应按介质走向先查壳程入口迎流面、导流筒至管板间和折流板邻近区,再把可抽芯管束整体抽出,逐根核对点坑、沟槽、鼓包、壳侧冲刷痕和垢下腐蚀分布,对历史泄漏排号单独做标识复核,并对可疑管位逐根保留复测记录;公开案例显示,穿孔常落在壳程进料口一侧及导流构件附近,局部实测厚度可由原始2 mm降到约1.5 mm,已不宜按单点偶发缺陷处理<sup>[4]</sup>。第二,对怀疑普遍减薄的管束,宜先洗净管内水锈、油泥和硬垢,再做涡流筛查,长管段可先用Bobbin快速普查,管板近端、折流板对应段和异常区补做旋转探头复核,并把检测结果与抽查解剖、外观和壁厚数据交叉确认;内壁附着物、磁导率变化与真实缺陷信号接近,若清洗不到位,现场极易把伪显示误判为完好或误报缺陷。第三,处置时要按缺陷密度分区,同一跨距或同一流场区若连续出现穿孔、深坑或成片减薄,应成组堵管或局部换管,堵后还要复算有效流通面积和压降;若相邻区域已形成面状失效、同排多根剩余壁厚明显偏低,或堵管后已影响热负荷,就应直接换束,不再零星补漏。第四,回装前还要倒查腐蚀介质来源,循环水浊度、含油和余氯长期超标时,易叠加氧腐蚀与垢下腐蚀,工艺侧若存在含氯含硫冷凝液滞留、低点积液或停车后残液未排净,也要同步清源、冲洗和校核隔离效果后再确定投用条件。

### 4.3 管端泄漏的重胀补焊与密封复装

在管壳式换热器管端泄漏处置中,重胀补焊与密封复装必须沿着先判部位、再定工艺、后做试验的顺序展开。首先,拆检后要把漏点分清是在管板胀口、法兰密封面还是管口焊缝热影响区,并调取压差、温差和启停记录对照判断,对疑似胀接松弛的管口,应用塞尺、着色和低压保压复查松动圈、拉痕及渗液线,必要时逐孔编号记录,不仅看管口一圈,还要看邻近两至三排是否存在同向渗漏,以便区分局部失效和成片松弛。其次,对母材未明显减薄且仅表现为微渗的管端,可采用重胀或重胀后补焊,施工前必须把管内壁、管端氧化皮和沉积物清到露出金属光泽,同时校正圆度、伸出量和同轴度,重胀量不宜一次加满,应分次推进,每次处理后复测胀口状态,补焊宜选小热输入氩弧焊短段施焊,层间清理干净,收弧处要磨平再继续,焊后做渗透复查。再次,若泄漏位于法兰系统,处理时不能只换垫片,还要同步修整密封面划伤、复核法兰平行度和螺柱通孔状态,新垫片应按介质、压力和温度重新匹配,螺栓按对称顺序分级上紧,初紧、复紧和终紧至少分三轮完成,终紧应用力矩扳手复核,螺柱外露扣数应基本一致,必要时热紧后再做一次回检,严禁混用旧垫片、旧螺母和咬扣螺柱。最后,回装后应按设计文件先做耐压试验,再视介质危险性决定是否加做气密试验,对高毒、可燃或设计上不允许微漏的设备,必须把管端、法兰和补焊区作为保压检查重点,气密试验压力应与设计压力一致,稳压期间一旦发现汗渍、压降或起泡异常,应卸压返修,不得带缺陷交付。

### 4.4 振动磨损的支撑校正与结构恢复

针对管壳式换热器管束振动磨损,检修时应把振源排查、支撑恢复和跨距校正作为同一工序连续处理。其一,停机抽芯后不能只盯泄漏管口,检修人员应把运行期振动记录、异响方位与泄漏点分布对照起来,重点复查入口接管对首排管的冲刷方向,检查防冲板、折流板孔、拉杆、定距管及支撑板边缘是否存在松脱、偏磨、变形或缺件,并按现行GB/T 151相关要求复核无支撑跨距,公开研究指出换热器损坏约有30%与管束振动有关,入口区受扰管排往往最先出现擦痕和减薄。其二,对发生碰磨的换热管要沿各跨逐根测查,既看折流板孔边磨亮、拉毛、压痕和椭圆变形,也要

用测厚配合着色检查剩余壁厚与裂纹状态,现场若减薄控制在原壁厚10%以内且未见裂纹,可通过更换支撑件、补配定距元件、校正孔桥毛刺和修正孔隙配合恢复约束;若已出现裂纹、局部失圆、明显偏摆或多跨失稳,就应直接换管,连续成片磨损时宜整束处理,不再采用补焊抹平代替结构恢复。其三,入口冲击明显的设备不能只换管不改结构,应同步校核防冲板位置、覆盖宽度、与入口中心线关系及固定状态,对折流板间距偏大、挡板开孔失当造成的长跨段一并整改,必要时增设支撑、缩短首跨长度或调整首道折流板布置,否则新管仍会在原部位重复磨蚀<sup>[5]</sup>。其四,管束回装后还要复查壳体与外接管线的受力传递,松开并校正不合理支吊点,消除硬连接和附加载荷,试车按低负荷、中负荷、设计负荷分级升量,每升一级都复测振动、温差和压降,确认异常点不再放大后再转入连续运行。

## 5 结语

管壳式换热器故障表面上表现为堵、漏、振、蚀,实质上多由介质条件、结构特点和检修质量共同决定。结合实践与行业资料可以看出,结垢堵塞、腐蚀穿孔、管端泄漏和振动磨损并不是彼此孤立的单项问题,而是经常以前后衔接、相互放大的方式出现。因此,检修人员在现场处理时,应坚持先判机理、后定方案,再按清洗、检测、修复、试验和复验的顺序展开,避免用单一经验替代系统判断。只有把故障原因与检修动作真正对应起来,管壳式换热器检修才能做到稳妥、准确和可重复实施。

### 参考文献

- [1] 张玉福,苏厚德,沈溃领,等.管壳式换热器换热管的泄漏失效原因[J].腐蚀与防护,2023,44(1):97-101.
- [2] 刘嘉琪.化工企业管壳式换热器故障分析与对策研究[J].设备管理与维修,2025(10).
- [3] 葛娟,李志刚,曹鑫,等.管壳式换热器和板式换热器的比较分析[J].广州化工,2025(15).
- [4] 赵光浦.管壳式换热器故障的影响因素分析与预防性措施[J].中国设备工程,2024(13):23-25.
- [5] 王景阳.管壳式换热器常见泄漏现象及消漏方法研究[J].家电维修,2024(7):7-9.

# Research on the Impact of Complex Wellbore Environments on Density Logging Responses and Correction Methods

Zefang Chen

Jiangnan Logging & Recording Branch, Sinopec Jingwei Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

The quality of logging data profoundly impacts the accuracy of geological evaluations, particularly during the mid-to-late stages of oil and gas exploration and development when reservoir complexities become increasingly apparent. The mud cake adhesion phenomenon, along with its physical mechanisms and error characteristics, significantly affects density logging responses. This study establishes a mud cake correction model using the ratio of dual-detector count rates, effectively eliminating mud cake effects. After field validation, this method demonstrates capability in suppressing measurement deviations caused by environmental factors. The corrected density curves exhibit high consistency with core analysis data, providing a robust technical foundation for precise evaluation of complex reservoirs.

## Keywords

density logging; complex wellbore; mud cake correction; wellbore diameter compensation; instrument eccentricity

# 复杂井眼环境对密度测井响应影响及校正方法研究

陈泽方

中石化经纬有限公司江汉测录井分公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

测井数据的质量是会深刻地影响到地质评价的准确性的,尤其是在油气勘探开发进入到中后期阶段的时候,目标储层的复杂性就会越发凸显出来,那么泥饼附着现象,它的物理机制以及误差特性,对密度测井响应会构成显著影响。本文开展了双探测器计数率比值的泥饼校正模型的构建工作,能够有效地把泥饼影响剔除,这种方法通过实地验证后,得以开展对环境因素所导致的测量偏差的抑制工作。密度曲线经过校正之后,和岩心分析数据高度契合。这样就为复杂储层的精细评价,拥有了坚实的技术依据。

## 关键词

密度测井; 复杂井眼; 泥饼校正; 井径补偿; 仪器偏心

## 1 引言

密度测井会对地层电子密度做出响应,通过它可以去处理计算孔隙度、识别岩性以及评价含油气饱和度等工作。在大斜度井或者水平井开展作业的过程当中,由于受到重力的作用,会使得测井仪器难以实现居中,进而产生了比较严重的偏心现象。密度测井仪所接收到的伽马射线计数率,会受到泥浆、泥饼以及仪器位置等非地层因素的影响,从而不再单纯地表征地层的特性,要是环境影响没有进行校正,那么孔隙度计算就会产生显著的偏差,同时岩性识别方面也会出现谬误,这样储量评估以及开发方案就会受到误导。目前现有的测井软件虽然拥有环境校正功能,不过它的经验公式在极端复杂条件方面的适用性经常会显得不足,很难来实

现高精度地质建模的支撑,本文聚焦于复杂井眼环境给密度测井响应所带来的影响,深入去探讨泥饼、井径变化以及仪器偏心这三大因素是怎样造成误差的。以双探测器密度测井原理当作基石,来构建出适应性适宜并且精度较高的综合校正模型,测井资料处理质量得以提升,给中石化经纬有限公司在复杂区块开展测录井作业提供了理论支撑以及技术参照,这对于提高油气勘探的成功率有着切实的价值。

## 2 密度测井原理及环境影响机制

### 2.1 密度测井基本原理

补偿密度测井通常会包含伽马射线源,比如 $^{137}\text{Cs}$ ,以及两个探测器,分别拥有长源距和短源距,伽马射线在穿透岩层的过程当中,康普顿散射现象会占据主导地位,它的散射强度直接和地层电子密度有关联,而这个密度又跟岩石体积密度密切相连。深部地层的信息主要是通过长源距探测器来进行反映,井眼环境对其产生的影响比较小,不过计数

【作者简介】陈泽方(1998-),中国河南沁阳人,本科,助理工程师,从事测井专业工作研究。

率会偏低，并且统计起伏比较显著；短源距探测器探测深度浅，对井眼附近的泥饼、冲洗带及仪器位置极为敏感，计数率高、统计精度高。传统的数据处理利用长短源距计数率的比值来消除源强衰减的影响，并通过经验图版或公式将计数率转换为地层密度，那么，仪器贴靠在井壁，并且泥饼的厚度保持恒定，同时井径也是规则的，这些理想化的条件就构成了转换过程当中所基于的假设。要是实际工况偏离了理想假设，那么测量结果就会出现系统性误差。

### 2.2 泥饼对密度测井的影响

钻井液当中的固相颗粒，在压差的驱动作用下来向渗透性地层进行迁移，在井壁表面逐渐地堆积起来，进而得以形成滤饼，泥饼的密度是低于致密岩石的，并且它的自由水含量比较高。泥饼存在的情况下，会让短源距探测器所接收的伽马射线大量被泥饼进行散射，计数率也就会因此出现异常增高的状况，这样一来，由此换算得出的视密度明显低于地层的真实密度，长源距探测器在厚泥饼环境当中，它的探测深度尽管较大，不过探测体积里面还会渗入泥饼信号，从而使得读数出现下降。泥饼的厚度、密度以及它和地层密度之间的差异，共同决定了其影响的程度，要是泥饼厚度超过了 1 厘米，那未经校正的密度测井值就会产生超过 0.05 克每立方厘米的误差。在低孔隙度的致密储层当中，这个误

差足以让孔隙度计算结果的偏差突破两个百分点，甜点识别方面会面临显著的挑战。

### 2.3 井径扩大与仪器偏心的耦合效应

井眼扩径现象，也就是在结构松散的砂岩层或者易碎裂的泥岩层段当中，表现得尤为显著，井筒的尺寸超出了钻具的直径，这样就在工具和井壁之间形成了环形间隙，并且钻井液会对这个区域进行填充。钻井液的密度处于 1.0 至 1.2 克每立方厘米的范围，明显低于岩石的密度。这么一个低密度的介质层存在于地层和探测器之间，会让测量的数值出现偏低的倾向，仪器偏心这一状况构成了另外一个关键的干扰因素。要是井眼不规则，那么仪器在垂直井当中可能就无法开展紧贴井壁的工作；在水平井当中，仪器会受到重力的作用，始终处于井眼的下方，仪器在圆周方向上距离的分布并不均匀，这样探测器和井壁之间的间距就增大了。偏心效应开展了对伽马射线平均路径长度的调整工作，并且改变了散射角分布，这使得长短源距探测器响应比例出现了非线性的变动，在大井眼出现严重偏心情况的时候，短源距探测器往往会完全浸入到钻井液当中，从而去失去对地层开展探测的功能，使得密度曲线出现明显的低频波动或者数据异常的现象。表 1 展示了把模拟密度测井响应在不同井眼状况当中的误差特性给呈现了出来。

表 1 不同复杂井眼条件下的密度测井响应误差模拟

工况类型	视密度偏差 ( $\Delta \rho$ )	主要误差特征	对孔隙度计算影响
理想井眼	0.00 g/cm <sup>3</sup>	无系统误差	基准
薄泥饼	-0.03 g/cm <sup>3</sup>	整体偏低，曲线平滑	孔隙度偏高约 1.5%
厚泥饼	-0.08 g/cm <sup>3</sup>	显著偏低，掩盖低阻层	孔隙度偏高约 4.0%
井径扩大	-0.12 g/cm <sup>3</sup>	大幅偏低，伴随噪声	孔隙度严重虚高
严重偏心	-0.05~-0.15 g/cm <sup>3</sup>	波动剧烈，非线性失真	孔隙度解释不可靠

## 3 复杂环境影响校正方法研究

### 3.1 基于双探测器比值的泥饼校正模型

泥饼校正构成了密度测井去处理工作的首要方面，泥饼信号会被短源距探测器进行捕捉，地层信息则会由长源距探测器来获取。鉴于这个特性，来建立一个校正模型，长源距计数率也就是我们用 NL 来表示，而短源距计数率呢，就记成 NS。在无泥饼的理想状态当中，地层密度  $\rho_b$  与 NS/NLNS/NL 之间会呈现出一种特定的函数关联，泥饼的出现会使得这个比值偏离了正常的范围，进行校正这项工作的时候，把改良的脊肋图版法当作方法来使用了。借助蒙特卡洛模拟来开展构建泥饼厚度以及密度对应的响应数据库的工作，校正量  $\Delta \rho$  也就是把它定义成  $\Delta \rho = f(NS/NL, \rho_{app})$ ，这里面  $\rho_{app}$  所代表的是未经校正的视密度。引入泥饼密度修正因子 kmc 提高了测量精度，这个因子凭借自然伽马或者中子测井数据来辅助判断泥饼的特性，像由重晶石加权泥浆形成的重泥饼，地层密度校正值  $\rho_{corr}$  是借助视密度  $\rho_{app}$  以及密度差  $\Delta \rho$  乘以泥饼补偿系数 kmc 的和

来获得。这种方法可以对厚度低于 30 毫米的泥饼效应开展有效的修正工作。

### 3.2 井径补偿与偏心几何修正

泥饼校正完成之后，对于井径扩大以及仪器偏心所带来的残余效应，还是需要去处理，井径校正一般是依靠机械臂测量得到的井径值也就是 CAL 来开展，并且假设仪器是居中的。不过，在复杂的井眼环境当中，这个假设常常难以成立。一种几何概率算法被提出来，是用来进行偏心问题的修正工作，三轴加速度计的数据会被用来开展确定仪器的倾角以及方位角的工作，并且井径数据还能够辅助去处理仪器偏心距的估算工作。探测器以及井壁的几何关系模型，基于井眼呈现椭圆截面这一假设来开展构建，伽马射线在穿过钻井液的时候，它的衰减系数被记成  $\mu_m$ 。要是存在仪器偏心的情况，那就会引入一项额外的衰减效应。这个附加的衰减项能够表述成指数函数的形式。这里的  $\theta$  角所代表的是探测器位置以及偏心方向之间的夹角。模拟计数率和实际测量值之间存在的差异，借助反复开展地层密度参数的调整工作来进行缩减。这个过程是为了来实现对真实的地层密度数

值的逼近,对于井径出现显著扩张的区域而言,单纯依靠密度测井来获取可靠的信息是存在困难的。中子孔隙度测井被引入之后,联合约束得以实现建立,中子测井以及密度测井针对井眼环境的响应规律存在着差异,借助两者的重叠差异也就是  $\Delta \rho - \phi N$ ,能够识别由于井眼问题所导致的异常点,运用趋势面分析来开展插值工作,以此填补曲线的连续性。

### 3.3 综合校正流程实现

自动化校正流程是基于前面所说的理论来构建的,它包含了数据预处理方面,会对原始计数率开展死时间校正工作,同时会把背景辐射扣除掉,并且同步开展统计平滑处理工作,那么就会开展井径数据的获取工作,同时把泥浆密度数值读取出来。泥饼厚度得以估测,并且把仪器姿态信息提取出来。来执行泥饼校正工作,运用双探测器比值模型,输出初步校正后的密度,通过对仪器姿态开展分析得出偏心距,把几何修正因子运用到密度数据当中,来实现最终校正,质量控制这个环节当中,把校正数据和岩心密度值进行相互比对。要是差异超出了预设限度,比如每立方厘米超出 0.03 克,那就需要启动人工核查流程。这么做是为了排查潜在的复杂情形,像气体侵入等系统没捕捉到的工况高密度的矿物包裹体以及其他类似物质。

## 4 实例应用与效果分析

把中石化江汉油田的一口深层探井当作验证方法实际应用能力的案例来使用,潜江组盐间泥页岩构成了这口井的目的层,它的地层压力系数偏高,开展了钻井液密度的配置工作,达到  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ,井壁稳定性方面表现得不太好。实测井径曲线显示,多处井段的扩径率已经超过了 30%,那么,厚实的泥饼就随之得以形成了。密度曲线在还没进行校正的时候,这个井段呈现出了显著的“锯齿状”低值特性,依据这个来计算得出的孔隙度数值达到了 25%,这样的结果和邻近井眼的同一地层以及岩心分析数据也就是孔隙度通常在 12%至 15%之间存在着重大差异,地质评价初步开展显示,这个层具备高产的潜力,由此便引发了显著的决策风险。泥饼所产生的影响通过校正方法去处理后得以实现消除,在 2850 - 2870 米的井段当中,识别出平均厚度大概为 15 mm

的高密度泥饼,校正之后密度值回升了  $0.08 \text{ g/cm}^3$ 。在 2900 米的深度,扩径现象比较显著,借助偏心修正算法以及平滑约束的运用,地层真实密度趋势得以实现恢复,把钻井液侵入所引发的虚假低密度尖峰有效消除,校正密度曲线所揭示出的孔隙度范围是在 13%至 16%之间,这个情况和随钻取芯所得到的实测数据是高度一致的。借助校正密度曲线以及声波时差、中子孔隙度曲线的重叠关系,来开展岩性变化规律的呈现工作,这样就能清晰地把它呈现出来,并且两层有效储层也就能得以成功识别,表 2 展示了这口井关键层位在开展校正工作前后,进行解释结论对比的相关情况。进行密度校正的精准实施工作,超越了单纯开展数据运算的范畴,并且它直接和油气资源的勘探成效有关联,要是原始数据没有开展验证工作,就极有可能引发误判情况。

## 5 结论

密度测井的精度通常会受到复杂井眼条件方面的限制,通过理论分析以及实际数据验证得以揭示这一影响机制。泥饼校正模型基于双探测器比值来开展构建,并且结合几何概率的偏心修正算法,从而形成综合校正方法,以适应各类复杂工况,结果表明,这个技术方案能够把密度测量偏差限制在每立方厘米 0.03 克以下的范围,把高质量的密度校正工作开展起来,能够有效地对地层真实物理属性进行恢复,从而为岩性识别、储层评价以及油气层判定等方面提供可以依靠的数据支撑。随着随钻测井技术得到广泛的运用以及人工智能算法持续地进步,开展实时动态校正工作正逐渐成为了行业发展的主流方向,会把深度学习网络运用来开展挖掘多源测井数据间深层联系的工作。复杂环境下的密度测井响应可以进行智能化实时校正。

### 参考文献

- [1] 昌吉.面向复杂井眼环境的智能测井岩相识别方法研究[D].中国科学技术大学,2022.
- [2] 张丽华,王建国.补偿密度测井环境影响因素分析及校正技术[J].测井技术,2021,45(3):28-34.
- [3] Ellis D V, Singer J M. Well Logging for Earth Scientists[M]. Springer Science & Business Media, 2007.

# Research on the Application Path of New Energy Power Engineering Construction in Energy Conservation and Emission Reduction in the Chemical Industry

Youbin Pei

Datang Qinghai Energy Development Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

## Abstract

The chemical industry is a key area of energy consumption and carbon emissions in China. Traditional production methods rely on fossil fuels, which have high energy consumption and emissions, and the pressure of energy conservation and emission reduction is increasing. The construction of new energy power engineering relies on various methods such as photovoltaics, wind power, and waste heat and pressure power generation, providing feasible ways for the optimization of energy structure and low-carbon production in the chemical industry. It can replace traditional thermal power, reduce the intensity of fossil energy consumption, reduce pollutants and carbon emissions in the production process, and enhance energy utilization efficiency. This article analyzes the main impact of the application of new energy power engineering on energy conservation and emission reduction in the chemical industry based on its production reality. It summarizes the practical problems that currently exist in the implementation process and proposes specific and actionable application strategies to help chemical enterprises smoothly promote low-carbon transformation, achieve coordinated improvement of energy conservation and emission reduction and production efficiency.

## Keywords

New Energy Power Engineering; Chemical Industry; Energy Conservation and Emission Reduction; Energy Substitution; Practical Path

## 新能源电力工程建设在化工行业节能减排中的应用路径研究

裴有斌

大唐青海能源开发有限公司, 中国·青海 西宁 810000

## 摘要

化工行业是我国能源消耗和碳排放的重点领域, 传统的生产方式依靠化石能源, 能耗高、排放量大, 节能减排的压力越来越大。新能源电力工程建设依靠光伏、风电、余热余压发电等多种方式, 给化工行业的能源结构优化和低碳生产赋予了可行途径, 既可取代传统火电, 降低化石能源消耗强度, 又可减少生产环节的污染物及碳排放, 而且能加强能源利用效率。本文根据化工行业的生产实际, 分析新能源电力工程应用给行业节能减排带来的主要影响, 整理出目前落地过程中存在的实际问题, 并有针对性地提出具体的可操作的应用策略, 帮助化工企业平稳地推进低碳转型, 实现节能减排和生产效益的协同提升。

## 关键词

新能源电力工程; 化工行业; 节能减排; 能源替代; 实操路径

## 1 引言

化工行业包含石油化工、煤化工、精细化工等诸多细分领域, 生产流程繁杂, 用能规模巨大, 是工业领域节能减排的重要部分。目前我国双碳目标不断推进, 化工行业的传统高耗能、高排放生产方式已经不能适应绿色发展要求, 能源结构转型迫在眉睫。新能源电力工程建设以可再生能源和

工业余能开发为依托, 具有清洁、低碳、可就地消纳的特点, 与化工企业的生产用能需求相契合, 既可以解决企业能源供应单一的问题, 又可以从源头上减少碳排放和污染物排放<sup>[1]</sup>。现阶段新能源电力工程在化工行业的应用仍处于逐步推广阶段, 存在适配性不足、落地难度大、效益转化慢等问题, 深入研究其科学应用路径, 对推进化工行业绿色低碳发展、落实节能减排目标有重大现实意义。

## 2 新能源电力工程建设对化工行业节能减排的影响

新能源电力工程建设从能源供给、生产能耗、排放控

【作者简介】裴有斌(1999-), 男, 中国青海乐都人, 本科, 助理工程师, 从事新能源电力工程建设、化工行业节能减排研究。

制这三个主要方面给化工行业的节能减排提供有力支持,各项影响都符合企业的生产实际情况,没有夸大效益的表述,可以分为三个方面进行论述。

第一,新能源电力工程可以替代化工企业的全部化石能源,达到源头节能降碳的目的。化工企业生产过程中电力、蒸汽是主要的能源供应方式,传统的供应模式以燃煤火电、自备煤电为主,化石能源消耗量大。分布式光伏、分散式风电等新能源电力工程可以利用化工企业厂区屋顶、闲置空地、园区荒地进行建设,直接给生产装置、辅助设备提供清洁电力,取代原来的火电电量,减少煤炭、天然气等化石燃料的采购和燃烧量。新能源电力没有燃烧过程,不会产生二氧化硫、氮氧化物等大气污染物,从能源供给源头上切断了部分污染物产生的途径,有效减轻了企业末端治理的压力,单套中型分布式光伏项目年均可替代火电数百万千瓦时,减排二氧化碳近千吨。

第二,新能源电力工程可以改善化工企业的能源利用结构,提高整个企业的能源利用率。化工生产过程中会产生大量的余热、余压、尾气等工业余能,以前这些资源大多直接排放,造成能源浪费,而余热余压发电工程可以将这些废弃的能源转化为电力,实现能源的循环利用。新能源电力与企业原有供电系统协同运行,可以改善企业的用电负荷结构,避开电网高峰用电时间,削减大功率设备启动时的能耗,防止能源空转浪费<sup>[2]</sup>。相比于单一的传统供电方式,新能源电力耦合传统供电的模式,可以使企业的综合能源利用率提高5%到8%,在不增加生产规模的情况下,降低单位产品的能耗,达到节能增效的目的。

第三,新能源电力工程帮助化工企业满足环保政策要求,奠定长期低碳发展的根基。近几年来,环保、能耗控制政策不断加码,化工企业受到能耗双控、碳排放核算、环保督查等诸多限制,传统的高耗能方式很容易触犯政策红线。新能源电力工程落地之后,可以有效地降低企业单位产值的能耗和碳排放强度,帮助企业达到节能减排考核指标,规避环保处罚风险。同时新能源电力的应用符合行业绿色转型的趋势,可以改善企业生产工艺的能源适配性,为企业后续低碳工艺改造、绿色产品生产提供能源基础,使企业由被动减排转向主动低碳发展,提高企业在行业内的绿色竞争力,满足长期市场和政策发展的需要。

### 3 新能源电力工程在化工行业应用存在的问题

#### 3.1 化工企业可用建设场地受限,新能源电力项目装机规模难以匹配生产用能需求

化工企业厂区布局紧凑,生产装置、仓储设施、管道线路密集,屋顶大多为小型附属建筑屋顶,承重能力有限,不能承受大规模光伏组件;厂区闲置空地大多用作消防通道、物料堆放、设备检修,可建设风电、光伏项目合规场地很少,部分场地靠近易燃易爆生产装置,存在安全隐患无法

开发。大多数中小型化工企业只能建设小型分布式光伏项目,发电量只占企业全部用电的10%以内,不能满足核心生产装置大功率用电的要求,新能源电力替代比例低,节能减排效果发挥不出来。

#### 3.2 新能源电力出力不稳定,与化工生产连续稳定的用能需求不匹配

化工生产是连续性强、负荷变化小的工业生产,核心装置要24小时不间断地稳定供电,电压、频率的波动过大容易造成生产工艺不稳定,甚至引起设备故障和生产安全事故。光伏、风电等新能源电力受光照、风力等自然因素的影响,出力具有间歇性、波动性,白天光照充足时发电量大,夜晚、阴雨天发电量小甚至为零,不能持续稳定供电<sup>[3]</sup>。部分企业没有配套储能或者调峰设施,直接将新能源电力接入生产供电系统,容易造成供电不稳问题,企业为了保证生产安全,只能优先使用传统火电,新能源电力消纳率低,工程建设效益不能实现。

#### 3.3 新能源电力工程与化工生产工艺适配性不足,余热余压等资源利用不充分

化工生产工艺繁杂,各个细分行业、不同生产装置的余热、余压参数存在较大差别,余热余压发电工程必须精准对接生产工艺的余能排放参数,才能达成高效发电的目的。目前大部分新能源电力工程的设计单位缺乏化工生产工艺方面的知识,项目设计前期没有对企业的现场进行详细的调研,只使用了标准化的设计方案,造成余热回收装置不能满足企业尾气温度、压力、流量的要求,发电效率低;同时部分企业的核心生产装置与新能源供电系统之间存在衔接不畅的问题,电力输送、负荷调配环节存在损耗,新能源电力不能精准对接高耗能生产环节,节能减排的效果大打折扣。

#### 3.4 新能源电力工程初期投入成本高,企业资金压力大,投资回报周期长

化工企业属于重资产行业,生产设备、环保改造、原料采购等资金需求量大,流动资金短缺。新能源电力工程,特别是配套储能、余热余压综合利用的项目,初期需要投入设备采购、工程施工、系统改造等各项费用,单套中型余热余压发电项目初期投入超过百万元,分布式光伏加储能项目投入更高。新能源电力项目的投资回收期一般为5到8年,回报速度慢,大多数中小化工企业无法承受大额的初期投资,再加上企业对于项目长期效益的预估不足,主动建设新能源电力工程的积极性不高,造成项目落地推进缓慢。

### 4 新能源电力工程在化工行业节能减排中的应用策略

#### 4.1 碎片化场地精细化开发与复合利用,破解装机规模受限难题

化工企业不需要专门开辟专用场地,而是对厂区所有的可利用碎片化空间进行全面摸排,制定出分区域、分类型

的开发方案, 优先在安全合规、不影响生产的区域布局新能源电力工程。首先对厂区附属办公楼、宿舍、仓库的屋顶进行承重检测, 选择承重达标、无易燃易爆隐患的屋顶安装轻质分布式光伏组件, 避开生产车间承重不足、有腐蚀性气体的屋顶; 其次利用厂区消防通道两侧绿化带、围墙周边闲置边角地, 采用低矮式光伏支架建设小型光伏带, 不占用核心生产与物料堆放空间<sup>[4]</sup>; 最后联合园区统筹规划, 利用园区周边非工业闲置荒地, 与园区内多家化工企业共建共享集中式光伏项目, 按企业用能比例分配电量。须严格依照化工行业安全规范, 与易燃易爆装置保持安全距离, 加装防火、防腐蚀防护设施, 既解决了场地不足的问题, 又保证了生产安全, 逐步提高新能源电力装机规模, 把辅助用电新能源替代比例提高到20%以上。

#### 4.2 新能源 + 储能 + 负荷分级协同适配, 化解电力出力波动问题

为贴合化工企业连续生产的需求, 不盲目建设大型储能设施, 按照企业用电负荷等级, 分层级调配新能源电力, 保证稳定的供电。首先将企业的用电分为核心生产负荷、辅助生产负荷、办公生活负荷三类, 核心生产装置用电优先由传统火电保障, 辅助生产设备、照明、通风等负荷优先使用新能源电力, 实现负荷精准分流; 其次, 配套建设小型磷酸铁锂储能装置, 容量根据新能源发电量核定, 白天将多余新能源电力储存起来, 夜间或者新能源出力不足时释放, 平抑电力波动, 储能装置只对接辅助用电系统, 不直接接入核心生产装置, 避免影响生产安全; 最后加装智能负荷调控设备, 实时监测新能源出力和企业用电负荷, 自动切换供电模式, 保证新能源电力稳定消纳。该策略不需要大的储能投入, 可以解决间歇性问题, 还可以提高新能源电力的消纳率到85%以上, 保证生产连续稳定。

#### 4.3 工艺诊断前置 + 定制化设计, 提升工程与生产适配度

摒弃标准化的工程设计模式, 以化工企业的生产工艺为依托, 对整个过程中的余能和用电进行调研, 制定出专门的新能源电力工程方案。首先, 组织有化工行业工程背景的设计团队到企业生产一线, 对精馏塔、压缩机、反应釜等主要设备的余热、余压、尾气排放情况进行排查, 并做好记录, 同时对各个生产环节的用电负荷、电压、频率要求进行记录, 建立企业能源和工艺数据库; 其次, 根据尾气温度、压力、流量选择合适的回收设备和发电机组, 防止设备参数与余能资源不匹配, 提高发电效率; 根据光伏、风电供电情况, 优化线路布置, 把新能源电力准确接入高耗能辅助设备, 减少线路损耗; 最后, 工程施工前做小范围试点运行, 检测发电效率、供电稳定性和工艺适应性, 依照试点结果来修改方案, 然后全面推行。定期对设备进行运维工作, 清理余热回收装

置的污垢, 对光伏组件进行检修, 保证工程长期高效运行, 发挥好余热余能的利用价值, 提高能源综合利用率。

#### 4.4 轻资产分步实施 + 合同能源管理, 缓解前期资金投入压力

根据化工企业的资金状况, 不强制要求一次性全部投入, 采取分步建设、多元化筹资的方法, 减轻初期的资金压力, 加快投资回报<sup>[5]</sup>。首先企业根据自身的资金状况分阶段推进工程建设, 先建设投入小、见效快的小型分布式光伏项目, 用项目发电节省的电费收益逐步投入到余热余压发电、储能设施的建设中, 防止大额资金一次性投入; 其次采用合同能源管理模式, 同专业新能源电力运营企业合作, 由运营企业负责项目的投资、建设、运维, 企业按实际发电量支付电费, 不承担初期投入和运维成本, 双方共享节能收益, 项目到期后设备产权归企业所有; 最后准确核算项目成本和收益, 优先选择投资回报周期短、节能减排效果明显、可以直接转化为电力的项目, 缩短回报周期至4-6年。同时合理使用地方新能源补贴政策来降低项目实际投入成本, 调动企业的积极性, 保证项目的顺利实施。

## 5 结语

新能源电力工程建设是化工行业节能减排、推动绿色低碳转型的重要途径, 具有很强的应用价值, 契合化工企业的生产实际, 无需过度拔高定位, 只需要从企业的实际情况出发, 解决场地、供电稳定性、工艺适配、资金投入四个主要问题, 就可以实现清洁电力替代、能源效率提高、减排效益落地的多重目标。化工企业不能盲目跟风、一次性到地建设, 应该根据自身的生产工艺、场地条件、资金实力来选择适合的工程模式和实施路径, 分步推进、精准落地; 同时加强工程与生产工艺的协同衔接, 保证新能源电力高效消纳利用。随着新能源技术日趋成熟、成本不断降低, 新能源电力工程将在化工行业得到更加广泛的使用, 帮助化工行业顺利实现节能减排的目标, 促进化工行业的经济效益与环境效益同步增长, 推动工业绿色发展的持续深入。

## 参考文献

- [1] 王姗姗. 新能源技术在建筑设计中的应用研究[J]. 城市建筑空间, 2024, 31 (S1): 171-173.
- [2] 王晓康. 基于新能源技术下的公共建筑表皮模式研究[D]. 河北工业大学, 2011.
- [3] 周于钦. 新能源技术在建筑设计中的应用[J]. 工程技术研究, 2022, 7 (23): 173-175.
- [4] 范宏宇. 光伏新能源技术在建筑电气节能中的运用[J]. 资源节约与环保, 2021, (07): 7-8.
- [5] 杨臻. 建筑电气节能中光伏新能源技术的运用[J]. 中国设备工程, 2024, (02): 216-218.

# Deconstruction and Reconstruction of Salicylic Acid: Constructing a Basic Model for Understanding Organic Compounds—Teaching Practice and Reflection on High School Organic Chemistry Based on Project-based Learning

Yaping Shi

Xiamen Foreign Language School, Xiamen, Guangdong, 361000, China

## Abstract

Using salicylic acid as a teaching vehicle, this study employs a project-based learning framework—“structural deconstruction, property verification, application contradiction, structural reconstruction, and innovative design”—to guide students in constructing an organic chemistry cognitive model that establishes “structure-determining properties and property-guided applications” within real-world problem scenarios. By integrating experimental inquiry with drug design, the pedagogical approach effectively enhances students’ critical thinking and core chemical competencies, providing a replicable practical case for organic chemistry education.

## Keywords

project-based learning; salicylic acid; cognitive model

## 《水杨酸的解构与重构：建构认识有机物的基本模型》——基于项目式学习的高中有机化学教学实践与反思

施雅萍

厦门外国语学校，中国·广东 厦门 361000

## 摘要

本文以水杨酸为教学载体，通过“结构解构—性质验证—应用矛盾—结构重构—创新设计”的项目式学习路径，引导学生在真实问题情境中建构“结构决定性质，性质指导应用”的有机物认知模型。教学融合实验探究与药物设计，有效促进了学生的深度思考和化学核心素养的发展，为有机化学教学提供了可借鉴的实践案例。

## 关键词

项目化学习；水杨酸；认识模型

## 1 教学载体的选择与价值

有机化学作为高中化学教学的重点与难点，不仅承载着帮助学生理解化学基本原理与反应机制的重要任务，更是培养学生化学学科核心素养的关键环节。然而，传统教学模式往往侧重于结构记忆与性质背诵，导致学生陷入被动学习循环，缺乏对有机物系统性、功能性的深入理解，难以有效提升其化学学科核心素养。为了打破这一困境，本研究以水杨酸这一历史悠久且应用广泛的有机化合物为典型案例，通过项目式学习设计，引导学生从真实情境出发，通过探究与实践，逐步建构有机物的认知模型，实现从“知识接受”到“思

维建构”的深刻转变。

水杨酸作为一种天然存在的有机酸，最早从柳树皮中提取，因其具有“抗炎、抗菌、剥脱角质、祛痘、美白”等多种生物活性，与学生的日常生活紧密相连，为教学提供了丰富的素材和直观的感受。其分子结构中同时含有羧酸基团（-COOH）和酚羟基（-OH），为学生研究官能团相互作用及其对有机物性质的影响提供了绝佳的实例。此外，水杨酸及其衍生物如阿司匹林在医药领域的广泛应用，进一步凸显了有机化学在解决实际问题中的重要性，有助于培养学生的科学素养和社会责任感。

当前，关于教学研究主要集中于水杨酸的衍生物阿司匹林，对阿司匹林进行性质验证与结构分析、合成方法与路线设计以及药效与副作用研究等<sup>[1]</sup>。而对于水杨酸本身的研究及课堂转化案例较少。为此，本研究以“水杨酸”为核心，通过“结构解构—性质验证—应用矛盾—结构重构—创新设

【作者简介】施雅萍（1998-），女，中国福建厦门人，本科，二级，从事化学教学、德育研究。

计”的完整思维路径，深度应用项目式学习模式。这一模式不仅引导学生经历从理论到实践、从解构到重构的全过程，加深对有机物结构与性质关系的理解，还培养了其系统思维、实验设计与创新解决问题的能力。

## 2 项目教学基础与目标设定

本课程面向高中学生，学生在之前的学习中已经掌握了一定的有机化学基础知识，如官能团的性质、化学反应类型等，具备一定的实验操作能力和逻辑思维能力。但对于复杂的官能团相互作用、化学平衡原理在实际问题中的应用以及结构修饰解决实际问题的思路和方法还缺乏深入的理解和实践经验。在教学过程中，应充分考虑学生的认知水平和学习能力，采用生动有趣的教学情境和多样化的教学方法，激发学生的学习兴趣。故设立如下教学目标：

1. 通过剖析水杨酸结构、验证性质并结合应用案例，引导学生建立“结构决定性质，性质指导应用”的思维模型，实现宏观性质与微观结构的有机融合。

2. 聚焦水杨酸中羧酸基团与酚羟基的相互作用，理解其对性质的调控规律，并思考结构修饰策略以解决实际问题，培养综合分析能力。

3. 在项目式学习中培养实验设计、操作观察等探究能力，以及逻辑推理、模型构建的科学思维，激发探究兴趣，提升科学素养与实践能力。

## 3 项目教学设计与实施

本研究以“水杨酸的发现与药用历史”为情境，提出核心问题：“水杨酸为何既能治病又会伤胃？如何通过结构改造实现‘扬长避短’？”通过真实情境的创设和问题驱动，激发学生的学习兴趣 and 探究欲望，使其在解决实际问题的过程中建构有机化学的认知模型。

### 3.1 【任务一】水杨酸的结构解构与性质验证

引导学生从分子结构出发，深入解构水杨酸的官能团特性，并通过实验验证和理论分析相结合的方式，建立“结构决定性质”的核心化学观念。通过设置“水杨酸为何具有双重酸性”这一真实问题，激发学生的探究兴趣，使其在预测性质、设计实验、观察现象、分析结果的完整科学实践过程中，自主建构对羧酸与酚羟基酸性强弱比较的认知模型。特别是通过对比实验 2 设计，培养学生控制变量、设计对照实验的科学思维，强化证据推理与模型认知能力。最后，通过追问水杨酸酸性强于苯甲酸、弱于苯酚的结构原因——分子内氢键效应，引导学生从电子效应与空间效应等高级结构视角理解有机化合物的性质差异，为后续结构改造与药物设计奠定坚实的理论与方法论基础。

部分教学过程阐述如下：

[追问] 如何选择试剂设计实验证明  $-\text{COOH}$  酸性强于  $-\text{OH}$ ？请利用实验现象进行论证。

[学生] 可以选择  $\text{NaHCO}_3$  溶液作为试剂。因为

$\text{NaHCO}_3$  能与酸性较强的  $-\text{COOH}$  反应生成二氧化碳气体，而不会与酸性较弱的酚  $-\text{OH}$  反应。

[追问] 如何证明  $-\text{COOH}$  参与反应而  $-\text{OH}$  未参与反应？

[学生] 可以选择  $\text{FeCl}_3$  溶液。酚羟基与  $\text{FeCl}_3$  溶液发生显色反应，生成紫色的络合物。

表 1 水杨酸的性质验证实验

结构片段	性质预测	实验设计	实验现象
$-\text{COOH}$	具有酸性	蓝色石蕊试纸	变红
(酚) $-\text{OH}$	具有酸性	蓝色石蕊试纸	变红
	与 $\text{FeCl}_3$ 显紫色	滴加 $\text{FeCl}_3$	变紫

表 2 水杨酸酸性强弱探究实验

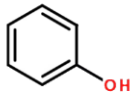
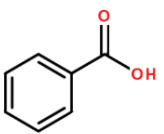
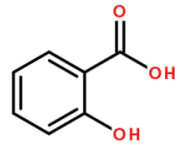
实验设计			实验现象
0.1mol/L 1ml 水杨酸	0.1mol/L 1ml 试剂	补充试剂	
$-\text{COOH}$	$\text{NaHCO}_3$	$\text{FeCl}_3$ 溶液	产生气泡
(酚) $-\text{OH}$	$\text{NaHCO}_3$	$\text{FeCl}_3$ 溶液	不产生气泡，溶液变紫

部分教学过程阐述如下：

[思考] 水杨酸羧基、酚羟基的位置有何特点？如何基于结构角度解释水杨酸  $\text{Ka}_1$  强于苯甲酸， $\text{Ka}_2$  弱于苯酚？

[学生] 羟基中的氢原子与羧基中的氧原子之间形成氢键，使得羧基中  $\text{O}-\text{H}$  极性增强，电离程度增大，羧酸解离增强 ( $\text{pKa}_1$  升高)，削弱酚羟基解离 ( $\text{pKa}_2$  降低)。

表 3 苯酚、水杨酸、苯甲酸电离平衡常数

苯酚 $\text{ka}=10^{-10}$	苯甲酸 $\text{ka}=10^{-4.19}$	水杨酸 $\text{Ka}_1=10^{-2.97}$	水杨酸 $\text{Ka}_2=10^{-12.4}$
			

### 3.2 【任务二】水杨酸的应用矛盾与结构重构

本任务旨在承接任务一对水杨酸结构的深度解构，进一步创设“应用矛盾”的真实药物研发情境。通过呈现水杨酸“既有效又有毒”的双重属性，引导学生直面真实世界的复杂科学问题，激发其利用已有认知模型解决新问题的动机。任务的核心在于引导学生理解“结构修饰”是解决药物“扬长避短”问题的关键手段，并通过分析阿司匹林这一经典案例，使学生掌握从“性质预测”到“功能实现”的有机化学思维方法。最终，通过评价与改进阿司匹林、拟定说明书等环节，培养学生的批判性思维、创新意识和社会责任感，完成从知识学习到知识应用的跨越。

呈现矛盾，提出问题：教师提供材料 2 和材料 3，揭示水杨酸在临床应用中的核心矛盾，将学生的视角从“纯化学性质”引向“生理药效与副作用”的交叉领域，明确本任务的核心驱动问题：如何通过结构改造，在保留药效的同时，

降低或消除伤胃的副作用？

分析关系，确定改造策略：学生结合任务一得出的“水杨酸羧基酸性强”的结论以及材料 4，进行小组讨论，分析结构 - 性质 - 药效 - 毒性的关系（见表 5），因此学生很容易推导出结构改造的初步方向：必须保留邻位取代的芳酸结构，但对酸性较强的羧基或易氧化的酚羟基进行修饰，以降低其酸性、提高稳定性。而教师追问“如何改造？”促使学生调用“酯化反应”等已有知识，提出将羧基酯化的初

步设想。

经典案例验证：阿司匹林的结构与功能分析：教师引入材料 5，介绍将水杨酸羧基酯化为乙酰水杨酸这一成功范例。将学生提出的理论改造方案与真实药物史中的经典案例“阿司匹林”进行对接，通过实验探究验证其合理性，让学生获得学以致用的科学成就感。通过模拟水解实验（见表 7），将抽象的“前药”概念和“官能团转化”性质转化为可视化的实验现象，培养学生的实证精神和证据推理能力。

表 4 材料 2-5

[材料 2]	水杨酸具有抗炎镇痛的药效，可以治疗炎症引发的疾病，如心血管疾病。但直接服用水杨酸易致胃黏膜损伤，引起胃溃疡及胃出血。
[材料 3]	<p>治疗炎症生理机制：水杨酸分子对抑制肠胃中的 COX-2 酶可抗炎镇痛，抑制 COX-1 酶减弱胃保护<sup>[2]</sup>。</p>
[材料 4]	<p>水杨酸的结构与药效的关系：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水杨酸 -OH 与邻位 -COOH 形成分子内氢键，是识别抑制 COX 酶的基础。</li> <li>2. 水杨酸的 -COOH 产生抗炎活性，若酸性降低则抗炎作用减弱；酚 -OH 易被氧化。</li> <li>3. 水杨酸在胃中以分子存在，易穿过胃黏膜，导致细胞内酸性增强而产生刺激。</li> </ol>
[材料 5]	<p>乙酰水杨酸，又名阿司匹林。其制备优点是相比较酯化反应，条件更温和，产率高，副产物少，制备过程如下<sup>[3]</sup>：</p>

表 5 学生分析结构 - 性质 - 药效 - 毒性的关系

药效基础	酚羟基 (-OH) 与邻位 -COOH 形成的分子内氢键是识别并抑制 COX 酶的关键药效基团。
活性与副作用来源	羧基 (-COOH) 是产生抗炎活性的重要基团，但其强酸性也是胃刺激性的直接来源。
吸收机制	水杨酸在胃的酸性环境中以分子形态存在，易被吸收入胃壁细胞，在细胞内（中性环境）电离析出 H <sup>+</sup> ，导致细胞内酸中毒，引发刺激。

表 6 学生基于分析对水杨酸结构进行重构

方案	变化	思路
1	将羧基酯化 (-COOH → -COOR)	掩盖酸性强的羧基，降低整体分子极性。
2	成盐 (-COOH → -COONa)	中和羧基的酸性，直接生成盐。
3	将酚羟基醚化或酯化 (-OH → -OR)	保护易氧化的酚羟基，提高药物稳定性。
4	同时修饰羧基和酚羟基	综合以上，提高稳定性和降低刺激性。

表 7 阿司匹林在模拟胃液和肠液的水解对比

实验设计	预测现象	实际现象
PH=1 HCl 溶液	无明显变化，滴加 FeCl <sub>3</sub> 后未变色	无明显变化，滴加 FeCl <sub>3</sub> 后未变色
PH=8NaOH 溶液	无明显变化，滴加 FeCl <sub>3</sub> 后变紫色	无明显变化，滴加 FeCl <sub>3</sub> 后产生红褐色沉淀
学生改进实验	阿司匹林在 PH=8NaOH 溶液水解后，先用 HCl 溶液酸化，再滴加 FeCl <sub>3</sub> 后变紫色，证明水杨酸在碱性的肠液环境进行水解。	

部分教学过程阐述如下:

[思考]如何证明阿司匹林已水解?

[学生]可向反应后的溶液中滴加  $\text{FeCl}_3$  溶液。若出现紫色,则证明有水杨酸生成,即阿司匹林已发生了水解反应。

[讨论]阿司匹林是如何降低胃刺激并在肠部发挥药效的?

[学生]在酸性胃部环境中,阿司匹林结构稳定,未发生水解,减少微刺激。在碱性肠液环境中,阿司匹林迅速水解,释放出原药水杨酸。水杨酸被肠道吸收进入血液循环,从而到达靶点,发挥抗炎镇痛作用。

[思考]在多年的临床实验中,人们发现尽管阿司匹林已经降低了刺激性,但长期服用仍会引起胃不适,为什么?如何继续改进?

[学生]仍有极少量阿司匹林可在胃中微量水解,其水解产物水杨酸和乙酸本身也有轻微刺激。

[学生]在药片外包装一层耐胃酸、溶于肠液的包衣,确保药片全程在胃中不溶解,直至进入肠道才崩解释放,从而实现对胃的零刺激。

最后通过拟定药品说明书的活动,将化学知识精准对接生活应用,培养学生的科学社会责任。本环节通过一个对比实验,将阿司匹林“前药”设计的化学原理变得可视、可测、可证,使学生完成了从理论猜想实验验证的完整科学探究闭环。学生不仅深刻理解了酯的水解性质及其在药学中的应用,更建立了“结构修饰-性质改变-功能实现-评价改进”的系统性认知模型。

### 3.3 【任务三】基于水杨酸的药物结构创新设计

本教学单元终局性任务聚焦基于水杨酸的药物结构创新设计,旨在促使学生认知实现从结构解构、模仿改造到创新设计的第三次飞跃,着重考查与培养学生高阶思维,涵盖知识迁移与应用能力,即整合运用前两个任务中关于水杨酸等结构-性质-药效关系知识,激发创造性思维,让学生基于药学目标进行新颖分子结构设计与论证,在真实科研情境中体验化学创造魅力与责任感,实现核心素养深度提升。

首先教师提出设计同时具备阿司匹林和对乙酰氨基酚功能新药的核心驱动问题,并明确需理解两种药物药效基团。接着学生创新设计与成果展示,小组讨论设计出同时包含两个药物关键药效团的分子,如保留阿司匹林结构并在苯环对位引入对乙酰氨基酚特征基团的设计示例。最后进行论证与评价,学生分析新药优点,如协同增效、降低服药负担、潜在安全性优化;教师引导学生思考挑战,包括药代动力学匹配难题、代谢复杂性增加、合成难度与成本、存在“双重”副作用风险等。

任务三以开放式创新设计活动将教学推向高潮,不同于简单知识应用,要求学生创造性整合与输出知识。学生经历角色转变,感受化学创造美好生活的力量。通过对设计药物优点与挑战的双重论证,深刻体会科学创新的两面性,既

要有想象力,又要有批判性思维。该任务达成培养学生“创新意识”与“科学态度”的核心素养目标,为学生未来发展埋下科学种子。

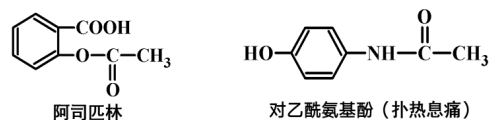


图1 阿司匹林与对乙酰氨基酚的结构

## 4 项目教学反思及展望

本教学实践以水杨酸为贯穿始终的教学载体,成功实施完整项目式学习单元。通过三个层层递进的任务,学生不仅深度掌握羧酸、酚、酯等官能团核心知识,更亲身经历并建构“结构→性质→功能”的有机物认知模型,体验从发现矛盾、分析问题到创造性解决问题的科学全过程。

本研究核心亮点在于超越传统有机教学,构建深度学习范式。在教学实践中,于学生能力培养与素养落地层面成果显著。认知模型建构上,学生以“水杨酸为何伤胃”为核心问题,沿结构解构、性质探究、矛盾分析、结构重构到创新设计的完整思维链条推进,将“结构决定性质”这一化学核心思想转化为可操作、探究的教学活动,形成的认知模型根基扎实、应用性强且可迁移;科学思维培养方面,三个任务各有侧重,从任务一实证推理设计实验验证酸性,到任务二分析应用原理解决“伤胃”问题,再到任务三评价创新设计新药并论证优劣,学生的思维由低阶迈向高阶,实现质的飞跃,批判性思维与创新意识得以极大激发;学科融合与素养落地上,课程有机融合化学、药学、生物学及医学等多学科知识,以解决真实问题为逻辑主线,自然展现化学的学科应用价值,让“科学态度与社会责任”等核心素养成为学生切身体会与实践的内容。

本次教学实践为教学改革提供启示:“精”于载体选择,选内涵丰富、贴近生活的核心载体是项目式学习成功关键;“巧”于任务设计,任务应构成逻辑严密的“问题链”。展望未来,可引入计算化学手段,让学生直观观察抽象概念;引导学生调研真实药物,对比分析加深对药物设计权衡艺术的理解。本研究为深化中学化学教学改革提供了可借鉴的实践案例。

### 参考文献

- [1] 孙磊,宋锐,孙国辉,等.以化学史为真实情境的有机合成教学——以水杨酸、阿司匹林及其衍生物的合成为例[J].化学教育(中英文),2021,42(03):13-19.DOI:10.13884/j.1003-3807hxjy.2019120124.
- [2] 蔡瑜,沈锡中,王吉耀.水杨酸类药物在炎症性肠病治疗中的问题与对策[J].中华消化杂志,2006,(01):69-70.
- [3] 叶晓镭,韩彬.阿司匹林制备实验的改进和充实[J].实验科学与技术,2004,(04):100-101.

# A Brief Discussion on the Efficiency of Time Nodes in Determining Total Moisture in Coal

Libo Guo Bin Wang Zichuan Zheng

China Inspection and Certification Group Hebei Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

## Abstract

Total moisture in coal is one of the critical indicators in coal quality analysis. Its content directly affects the accuracy of calorific value (particularly the low calorific value on a received basis). Total moisture significantly influences the processing, utilization, trade, and storage of coal. Coal with varying moisture levels serves different purposes and is a primary factor in coal pricing. In coal quality analysis, total moisture serves as the basis for converting results across different coal basis states, holding great importance in fundamental theoretical research and the processing and utilization of coal [1]. This paper briefly discusses the considerations during the determination of total moisture content, including the specifications of sample (flat) pans and drying time. Comparative experiments were conducted, and solutions to address these factors are proposed.

## Keywords

Total moisture determination; Drying time; Sample (flat) pan specifications; Control methods

## 浅谈煤炭全水分测定时间结点效率

郭丽博 王斌 郑子川

中国检验认证集团河北有限公司, 中国·河北唐山 063000

## 摘要

煤炭全水分是煤质分析的重要指标之一,其含量的大小直接影响发热量(尤其是收到基低位发热量)的准确性;全水分对其加工利用、贸易和储存运行都有很大的影响,不同水分的煤也会有不同的用途,以及对煤炭计价的一个最主要因素。在煤质分析中,煤炭的全水分是进行不同基态的煤质分析结果换算的基础依据;在煤炭的基础理论研究、加工利用方面上都有着重要的意义<sup>[1]</sup>。本文简要地对全水分含量测定操作时,所注意的事项、样品(浅)盘规格以及干燥时间并结合实践对比试验,进行了探讨并针对这些因素提出解决办法。

## 关键词

全水分测定; 干燥时间; 样品(浅)盘规格; 控制方法

## 1 引言

全水分是煤炭计价和基准换算的重要依据,相对于一个样品来说,煤样的全水分值每变化1%,其收到基低位发热量值将变化(209--293) J/g<sup>[2]</sup>。由此可见对于煤炭的全水分准确测定十分重要,因此针对煤炭全水分测定过程中认真分析影响因素并采取有效预防措施,对提高煤炭全水分的精确度及准确度有着重要的意义。

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料和仪器

#### (1) 实验材料

试验所用样品(煤样)为北方地区的动力煤(烟煤:

粒度<13mm),按照国标规定预先加热到(105--110)℃的空气干燥箱中,在鼓风干燥下,烟煤干燥2小时。

#### (2) 实验设备

鼓风干燥箱(广州五所PH401)、电子天平(精确度0.1g)样品(浅)盘分为两种:40cm\*30cm和40cm\*15cm。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 样品称取

全水分样品不少于3kg,且称量前需充分混匀。在圆桶中取样采用对角法取样(或在取样盘中采用九宫格法取样)。称取样品时要快速,防止水分损失;称取(500±10)g样品,并在称量(浅)盘中平摊摇匀,煤层的表面负荷不能超过1g/cm<sup>2</sup>;否则会导致煤样受热不均,影响测定结果的精确度<sup>[3]</sup>。称好一个样品后要清理干净称样工具再继续称取下一个样品,避免样品交叉污染。(每个样品需称取两个平行样进行测定)

#### 2.2.2 样品盘在干燥箱内摆放

a. 样品盘在干燥箱中摆放要均匀,否则会使样品受热

【作者简介】郭丽博(1986-),男,中国河北石家庄人,本科,助理工程师,从事煤炭检验与分析研究。

不均匀，会出现有的样品干燥完全，再继续干燥会使样品氧化（即质量增加），测定结果偏低，而有的样品还未干燥彻底，需要继续干燥才能达到质量恒定。

b. 将样品放在干燥箱恒温区内。（在干燥箱中放置的位置要与干燥箱两侧要有一定距离，不能靠在干燥箱侧壁以及底板上放置，避免直接接触；以免影响干燥箱内空气对流，受热不均匀，从而影响全水分测定结果。）

c. 样品盘摆放密度过大，会导致实验周期增长，因此样品盘摆放密度要适度。

### 2.2.3 样品的烘干时间及检查性干燥

将称取好后的样品放在鼓风干燥箱中烘干 2h（干燥箱

回温到 105-110℃开始计时）。鼓风干燥箱温度应设置在 108℃（如果温度超过 110℃，会导致煤样表面氧化变质，影响测量结果），2h 后第一次称量样品，需趁热称量（称准至 0.1g），然后放回鼓风干燥箱中继续烘干；每 30min 进行检查性干燥，直到连续两次干燥样品的质量减少不超过 0.5g 或质量增加时为止。在后一种情况下（质量增加时），采用质量增加前一次的重量作为计算依据<sup>[3]</sup>。

### 2.3 实验数据

样品（浅）盘规格为：40cm\*30cm。（盘号 -1, -2 为平行样，差值为正数代表水分在减少，差值为负数代表样品被氧化）。

表 1 全水分检查性干燥质量变化一览表（样品浅盘规格 40cm\*30cm）

序号	盘号	全水分含量 (%)	2.0h 称重 / g	2.5h 称重 / g	3.0h 称重 / g	3.5h 称重 / g	4.0h 称重 / g	2.0-2.5 h 质量变化	2.5-3.0 h 质量变化	3.0-3.5 h 质量变化	3.5-4.0 h 质量变化
1	1-1	12.2	1118.5	1118.7	1118.6	/	/	-0.2	0.1	/	/
2	1-2		1110.3	1110.6	1110.7	/	/	-0.3	-0.1	/	/
3	2-1	7.6	1129.4	1129.4	1129.5	/	/	0	-0.1	/	/
4	2-2		1168.6	1168.5	1168.7	/	/	0.1	-0.2	/	/
5	3-1	14.2	1126.5	1126.5	1126.7	/	/	0	-0.2	/	/
6	3-2		1096.4	1096.3	1096.5	/	/	0.1	-0.2	/	/
7	4-1	11.1	1108.5	1108.7	1108.9	/	/	-0.2	-0.2	/	/
8	4-2		1113.2	1113.2	1113.4	/	/	0	-0.2	/	/
9	5-1	14.1	1131.0	1131.0	1131.3	/	/	0	-0.3	/	/
10	5-2		1069.8	1069.7	1070.0	/	/	0.1	-0.3	/	/
11	6-1	7.8	1147.0	1147.1	1147.3	/	/	-0.1	-0.2	/	/
12	6-2		1154.3	1154.4	1154.5	/	/	-0.1	-0.1	/	/
13	7-1	13.6	1128.9	1128.9	1129.3	/	/	0	-0.4	/	/
14	7-2		1154.8	1154.8	1154.9	/	/	0	-0.1	/	/
15	8-1	7.0	1252.9	1253.1	1253.4	/	/	-0.2	-0.3	/	/
16	8-2		1215.7	1215.7	1216	/	/	0	-0.3	/	/
17	9-1	9.7	1187.0	1186.9	1187.3	/	/	0.1	-0.4	/	/
18	9-2		1182.3	1182.1	1182.4	/	/	0.2	-0.3	/	/
19	10-1	16.8	1126.6	1126.6	1127	/	/	0	-0.4	/	/
20	10-2		1098.4	1098.4	1098.7	/	/	0	-0.3	/	/
21	11-1	15.6	1102.1	1102	1102.3	/	/	0.1	-0.3	/	/
22	11-2		1118.7	1118.7	1118.8	/	/	0	-0.1	/	/
23	12-1	22.0	1176.7	1176.9	1176.9	/	/	-0.2	0	/	/
24	12-2		1163.5	1163.6	1163.9	/	/	-0.1	-0.3	/	/
25	13-1	28.0	1058.9	1058.8	1058.7	/	/	0.1	0.1	/	/
26	13-2		1036.5	1036.0	1036.1	/	/	0.5	-0.1	/	/
27	14-1	31.6	1032.9	1032.8	1032.8	/	/	0.1	0	/	/
28	14-2		1066.6	1066.5	1066.6	/	/	0.1	-0.1	/	/
29	15-1	27.6	1026.7	1025.9	1025.7	/	/	0.8	0.2	/	/
30	15-2		1039.4	1038.7	1038.7	/	/	0.7	0	/	/

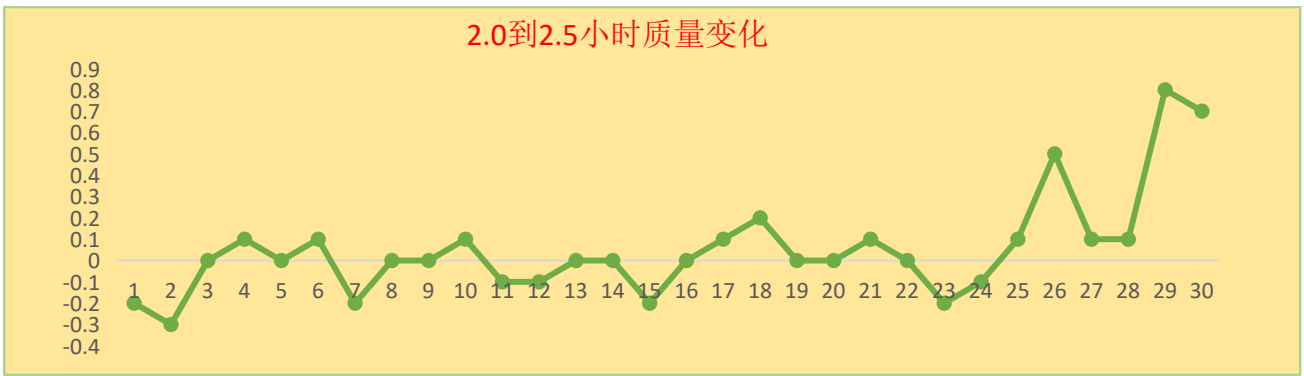


图1 全水分检查性干燥质量变化趋势图 (2.0-2.5 小时)

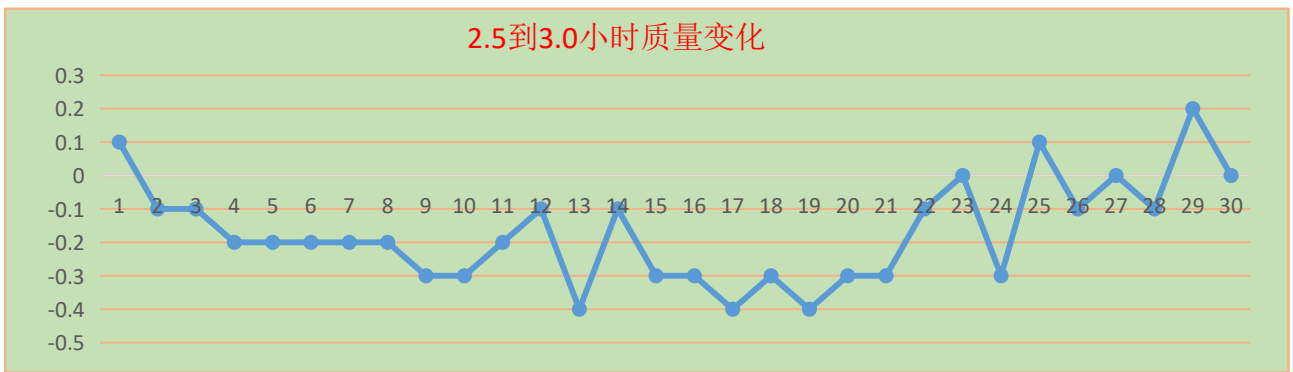


图2 全水分检查性干燥质量变化趋势图 (2.5-3.0 小时)

由图1可以看出,使用40cm\*30cm规格的样品浅盘在2.0h-2.5h的质量变化以质量减少为主,其中质量减少样占比%,表明样品还在继续失水状态;图2可以看出,使用40cm\*30cm规格的样品浅盘在2.5h-3.0h的质量变化以质量增加为主,质量增加样品占比%,表明样品已经达到干燥状态。40cm\*30cm规格的样品浅盘能够在一次检查性干燥后得出检测结果。在GB/T 211-2017《煤中全水分的测定方法》中要求,称量浅盘应容纳500g试样,并且单位面积负荷不超过1g/cm<sup>2</sup>,理想状态下使用40cm\*30cm规格的样品浅盘,单位面积负荷在0.42g/cm<sup>2</sup>。

样品(浅)盘规格为:40cm\*15cm。(盘号-1,-2为平行样,差值为正数代表水分在减少,差值为负数代表样品

被氧化)。

由图2可以看出,使用40cm\*15cm规格的样品浅盘在2.0h-2.5h的质量变化以质量减少为主,其中质量减少样占比100%,并且81%的样品没有达到干燥状态;使用40cm\*15cm规格的样品浅盘在2.5h-3.0h的质量变化以质量减少为主,其中质量减少样占比90%,并且33%的样品没有达到干燥状态;随着时间增加,样品趋于干燥状态。理想状态下使用40cm\*15cm规格的样品浅盘,单位面积负荷在0.84g/cm<sup>2</sup>。

### 3 结语: 实验结论

综上所述,以试验方法得出不同全水分的煤样使用不同规格称样盘,最佳烘时间如下:

表2 全水分检查性干燥质量变化一览表(样品浅盘规格40cm\*15cm)

序号	盘号	全水分含量(%)	2.0h 称重 / g	2.5h 称重 / g	3.0h 称重 / g	3.5h 称重 / g	4.0h 称重 / g	2.0-2.5 h 质量变化	2.5-3.0 h 质量变化	3.0-3.5 h 质量变化	3.5-4.0 h 质量变化
1	1-1	15.1	1002.8	1002.1	1002.1	1002.0	1002.0	0.7	0	0.1	0.0
2	1-2		1007.3	1006.6	1006.6	1006.5	1006.5	0.7	0	0.1	0.0
3	2-1	13.6	1019.6	1017	1016.1	1016.1	1016.2	2.6	0.9	0.0	-0.1
4	2-2		1009.9	1007.1	1006.4	1006.3	1006.5	2.8	0.7	0.1	-0.2
5	3-1	13.6	1028.3	1027.4	1027.2	1027	1027	0.9	0.2	0.2	0.0
6	3-2		1025.2	1024.1	1023.8	1023.6	1023.5	1.1	0.3	0.2	0.1
7	4-1	9.9	1043.1	1042.3	1042	1041.8	1041.7	0.8	0.3	0.2	0.1
8	4-2		1040.9	1039.8	1039.5	1039.3	1039.3	1.1	0.3	0.2	0.0

续表 2

序号	盘号	全水分含量 (%)	2.0h 称重 / g	2.5h 称重 / g	3.0h 称重 / g	3.5h 称重 / g	4.0h 称重 / g	2.0-2.5 h 质量变化	2.5-3.0 h 质量变化	3.0-3.5 h 质量变化	3.5-4.0 h 质量变化
9	5-1	9	1043.2	1042.7	1042.4	1042.4	1042.5	0.5	0.3	0.0	-0.1
10	5-2		1040.1	1039.7	1039.6	1039.5	1039.5	0.4	0.1	0.1	0.0
11	6-1	15.8	1003.9	1002.9	1002.6	1002.5	1002.6	1	0.3	0.1	-0.1
12	6-2		1009.9	1008.5	1008.1	1007.9	1007.9	1.4	0.4	0.2	0.0
13	7-1	16.4	1000.4	999	998.8	998.8	998.8	1.4	0.2	0.0	0.0
14	7-2		1006.3	1005.1	1004.8	1004.8	1004.8	1.2	0.3	0.0	0.0
15	8-1	10.4	1036.7	1035.8	1035.5	1035.5	1035.4	0.9	0.3	0.0	0.1
16	8-2		1041.2	1040.7	1040.7	1040.7	1040.7	0.5	0	0.0	0.0
17	9-1	20.7	/	989	988.8	988.4	988.4	/	0.2	0.4	0.0
18	9-2		/	996.4	995.8	995.5	995.5	/	0.6	0.3	0.0
19	10-1	19.4	/	995.8	994.8	994.9	994.8	/	1	-0.1	0.1
20	10-2		/	994.2	993.6	993.7	993.7	/	0.6	-0.1	0.0
21	11-1	23.1	/	971.8	971.6	971.7	971.9	/	0.2	-0.1	-0.2
22	11-2		/	972.7	972.6	972.4	972.3	/	0.1	0.2	0.1
23	12-1	24.2	/	962.2	960.9	960.8	960.9	/	1.3	0.1	-0.1
24	12-2		/	975.9	975	974.7	975	/	0.9	0.3	-0.3
25	13-1	23.4	/	960.8	959.2	958.7	958.6	/	1.6	0.5	0.1
26	13-2		/	978.6	976.7	976.3	976.2	/	1.9	0.4	0.1
27	14-1	25.4	/	961.3	959.4	957.7	957.4	/	1.9	1.7	0.3
28	14-2		/	967.8	965.6	963.8	963.5	/	2.2	1.8	0.3
29	15-1	26.5	/	989.1	988.1	987.8	987.8	/	1	0.3	0.0
30	15-2		/	978.3	977.8	977.9	977.8	/	0.5	-0.1	0.1

表 3

序号	样品盘面积 / m <sup>2</sup>	全水分值 < 20%最佳干燥时间 / h	全水分值 > 20%最佳干燥时间 / h	备注
1	40cm*30cm	2.0-2.5	2.5-3.0	
2	40cm*15cm	2.5-3.0	3.0-3.5	个别煤种样品除外

为得到准备的数据以及试验最佳时间，测定时应重点注意以下几点：

- (1) 试验前，必须充分混匀煤样。
  - (2) 根据干燥箱的空间体积及日常样品量多少，应选择合适规格的称量（浅）盘。
  - (3) 样品在干燥箱内摆放的位置及数量要均匀、合适。
  - (4) 全水分值大的样品应认真做好检查性干燥试验。
  - (5) 样品过多时，需分批检测，否则会导致称样整体时间延长。
  - (6) 选择合适的称量浅盘可以提高检测效率。
  - (7) 样品称量时要均匀摊平，避免局部过厚。
- 本文皆在为同行煤炭全水分测定时所注意事项以及测

定效率上提供一些参考。

### 参考文献

- [1] 秘洁芳,李英华,施玉英,等.煤质实验室信息管理系统开发与前景[J].煤炭科学技术, 2005, 33(2):3.DOI:10.3969/j.issn.0253-2336.2005.02.008。
- [2] 林木松,张宏亮,杨培秀,等.商品煤全水分测定的影响因素及解决办法[J].广东电力, 2002, 15(2):3.DOI:10.3969/j.issn.1007-290X.2002.02.004.
- [3] 张博,孙刚,李宏图. GB/T211-2017, 煤中全水分测定方法[S]
- [4] 全国煤炭标准化技术委员会(SAC/TC 42).煤中全水分的测定方法:GB/T 211-2017[S].中国标准出版社,2017.

# Research on Optimized Design of PLC Control Systems in Chemical Automation Production

Ke Huang

CNOOC(Hainan)Fudao Chemical Ltd., Dongfang, Hainan, 572600, China

## Abstract

With the rapid development of the chemical industry, the application of automation control systems in chemical production has become increasingly widespread. As an efficient and reliable automation control technology, PLC control systems have become a core component of chemical automated production. However, with the continuous expansion of production scale and the increasing complexity of process requirements, traditional PLC control systems face performance bottlenecks and optimization needs. This study proposes improving the performance and efficiency of control systems through the optimization of PLC system hardware configuration, software programming, and communication management, providing theoretical reference and practical guidance for the intelligent production of the chemical industry.

## Keywords

PLC control system; Chemical automation; Optimization design; Production efficiency; Intelligitization

## PLC 控制系统在化工自动化生产中的优化设计研究

黄珂

海洋石油富岛有限公司, 中国·海南 东方 572600

## 摘要

随着化工行业的快速发展, 自动化控制系统在化工生产中的应用日益广泛, PLC控制系统作为一种高效可靠的自动化控制技术, 已成为化工自动化生产中的核心组成部分。然而, 随着生产规模的不断扩大和工艺要求的日益复杂, 传统PLC控制系统面临着性能瓶颈和优化需求。本研究提出了通过优化PLC系统硬件配置、软件编程及通信管理来提升控制系统的性能和效率, 为化工行业的智能化生产提供了理论参考和实践指导。

## 关键词

PLC控制系统; 化工自动化; 优化设计; 生产效率; 智能化

## 1 引言

在现代化工生产过程中, 自动化控制技术已经成为提升生产效率、确保生产安全和稳定运行的关键手段。PLC(可编程逻辑控制器)控制系统凭借其高度的可靠性、灵活性以及良好的适应性, 广泛应用于化工生产的各个环节, 如反应釜控制、物料输送、温度与压力监控等。随着化工行业的规模化与复杂化, 传统的PLC系统面临着性能提升的巨大压力, 特别是在复杂工艺流程、高精度控制以及大规模生产的需求下。为满足日益严苛的控制要求, PLC控制系统的优化设计显得尤为重要。通过对硬件结构、软件编程、通信协议及系统集成的优化, 可以显著提高PLC控制系统的处理能力与可靠性, 从而有效提升化工生产的自动化水平与生产效率。

## 2 PLC 控制系统在化工自动化生产中的应用现状

### 2.1 PLC 控制系统的基本原理

PLC(可编程逻辑控制器)是一种专为工业控制而设计的数字电子设备, 其核心功能是通过预设的程序逻辑对生产过程中的各种设备进行控制。PLC系统主要由输入模块、输出模块、中央处理单元(CPU)、编程器及存储器等部分组成。输入模块通过传感器获取生产设备的状态信息, 并将其传输至CPU进行处理。CPU根据存储的程序指令, 对输出模块进行指令传递, 从而控制各类执行器的动作。PLC具有强大的逻辑运算和数据处理能力, 可以实现对设备运行状态的实时监控和调节。与传统继电器控制相比, PLC具有高度的灵活性、可编程性、扩展性和易于维护等特点, 因此在工业自动化中被广泛应用, 尤其是在复杂的生产流程中, 能够有效提高生产效率和控制精度。

【作者简介】黄珂(1990—), 男, 中国山西人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化研究。

## 2.2 化工自动化生产中的 PLC 应用领域

在化工生产过程中, PLC 控制系统主要应用于反应控制、物料输送、温度与压力监控、液位控制等多个环节。反应控制是化工自动化生产中的核心部分, PLC 可以通过实时监测反应釜中的温度、压力、浓度等参数, 自动调节反应条件, 从而保证生产过程的稳定性与产品质量。此外, PLC 还广泛应用于物料输送系统, 通过控制泵、阀门、输送带等设备, 实现物料的精准流动。在温度与压力监控方面, PLC 系统能够根据设定的标准自动调整控制设备, 确保生产过程中的温度和压力始终处于安全范围内。PLC 在液位控制方面也发挥着重要作用, 特别是在液体储罐和反应池中, PLC 通过控制液位计和阀门, 保证液体的稳定供应。随着化工生产的自动化水平不断提升, PLC 系统的应用范围也不断拓展, 为提升生产效率和安全性提供了有力支持<sup>[1]</sup>。

## 3 化工生产中的自动化需求与控制要求

### 3.1 化工生产工艺流程的自动化需求

化工生产过程涉及大量的连续反应、物料搬运和复杂的操作流程。随着化工工业向高效、安全、绿色的方向发展, 自动化成为提升生产效率、保证产品质量的重要手段。化工生产工艺流程的自动化需求主要体现在三个方面。首先, 随着生产规模的扩大, 手动操作难以满足高效、精确的控制要求, 自动化能够有效降低人工干预, 提高生产过程的稳定性。其次, 化工生产往往需要精确控制温度、压力、流量等参数, 自动化系统可以实现实时监控与调节, 从而确保工艺条件始终处于最优状态。最后, 化工生产中的多设备联动要求自动化系统能够实现设备间的协调与同步, 确保各环节的高效配合。因此, 化工生产工艺流程的自动化需求日益强烈, PLC 控制系统的应用可以满足这些需求, 提高生产的效率和安全性。

### 3.2 生产过程中的控制精度与安全性要求

化工生产过程对控制精度和安全性有着极高的要求。首先, 许多化工反应对温度、压力、流量等控制参数有着严格的要求, 任何细微的变化都可能导致生产失败或质量不稳定。因此, 自动化控制系统必须具备高精度的检测与调节能力。PLC 控制系统通过精确的传感器与执行器调节, 能够实时监控并调整工艺参数, 保证生产过程始终处于安全、稳定的状态。其次, 化工生产中的某些过程涉及易燃、易爆或有毒化学物质, 任何控制失误都可能导致严重的安全事故。因此, PLC 控制系统必须具备高度的安全性, 在异常情况下能够自动停止设备或发出警报, 避免事故的发生。为此, PLC 控制系统不仅需要具有高精度的控制能力, 还需要具备强大的安全监控功能, 确保生产过程中的安全性与可靠性。

### 3.3 对 PLC 控制系统性能的特殊需求

化工生产对 PLC 控制系统的性能有着一系列特殊要求。

首先, 化工生产过程中的许多环节要求 PLC 系统具有实时性和高响应速度, 能够在极短的时间内处理大量的数据, 并及时作出反馈。为此, PLC 系统的计算处理能力和数据传输速率必须满足生产过程中的实时控制需求。其次, 化工生产中的设备多为大型、复杂的机械系统, PLC 控制系统必须具备强大的抗干扰能力, 以应对生产现场的噪声、电磁干扰等问题, 确保系统稳定运行。此外, 化工生产环境往往具有较为复杂的工艺流程和设备配置, PLC 系统需要具备较强的扩展性与灵活性, 能够根据生产需求进行调整和优化。最后, 随着智能化技术的发展, PLC 控制系统的智能化水平也逐渐成为一个重要需求, 能够实现智能诊断、故障预测等功能, 提高系统的自主性和可靠性。

## 4 PLC 控制系统在化工生产中的优化设计方法

### 4.1 优化 PLC 系统硬件配置

在化工生产现场, 对可编程逻辑控制器 (PLC) 系统的硬件配置进行优化需从整体架构、模块选型与冗余设计三方面展开。架构方面, 应将控制主机、I/O 模块、网络交换及冗余电源整合入统一控制柜, 并通过分布式结构减小总线长度、降低时延。模块选型上, 应根据现场工艺特点选择高速 CPU 模块、绝缘隔离 I/O 模块、高精度 AD/DA 转换模块及抗干扰能力强的现场总线接口模块。冗余设计上, 应采用双 CPU、热备用 I/O 模块、冗余网络环路与 UPS 电源, 确保控制系统可用率达到 99.9% 以上。现场还应加强接地与屏蔽、供电滤波及模块间隔离设计, 在高温、高湿、高电磁干扰环境中保证模块稳定运行。硬件配置优化后, PLC 系统响应时间可缩短至 20 ms 以内, 同时系统故障跳转时间可控制在 100 ms 以内, 从而有效提升化工流程的可靠性和实时控制能力<sup>[2]</sup>。

### 4.2 PLC 软件编程优化技术

针对化工自动化生产流程, PLC 软件编程优化需包括模块化编程、状态机设计与诊断子程序嵌入三个关键技术。模块化编程通过将控制逻辑按功能划分为标准子程序、功能块 (如温度控制、液位控制、物料换向控制) 及参数化调用部分, 实现程序结构清晰、易于维护。状态机设计用于反映化工生产中“等待→加料→反应→卸料→清洗”的阶段性控制流程, 通过状态切换逻辑使 PLC 可准确识别当前阶段并触发相应动作。诊断子程序嵌入包括检测传感器偏差、执行器故障、通信丢包、运行超时等, 并将诊断结果通过报警模块输出或上报至上位系统。在编程过程中, 还应采用梯形图、结构化文本语言结合, 并使用在线仿真工具及断点调试技术验证逻辑正确性。优化后的程序可将控制循环时间缩减 30%, 程序维护时间减少 50%, 且程序错误率大幅下降<sup>[3]</sup>。

### 4.3 优化 PLC 系统通信与数据管理

PLC 系统在化工自动化生产中的通信与数据管理优化需涵盖网络拓扑、协议标准化及数据汇聚平台建设。网络拓

扑方面,应建立主控 PLC 至现场 I/O 模块的星型或环型网络结构,并采用工业以太网(如 PROFINET、EtherNet/IP)取代传统点对点通信,以提高传输速率并降低网络冲突。协议标准化方面,PLC 应支持 OPC UA、MODBUS TCP、EtherCAT 等开放协议,使数据可与 MES / SCADA 系统无缝对接。数据汇聚平台建设方面,可在 PLC 与上位系统之间部署历史数据采集服务器、实时监控数据库和趋势分析模块,以实现生产过程数据的存储、分析与可视化。通过上述优化,监控数据传输延迟可由原 400 ms 降低至 150 ms 以内,数据丢包率控制在 0.02 % 以内,同时数据可用率提升至 99.8 %。数据管理规范化后,生产效率、故障响应速度及整体管理水平显著提升<sup>[4]</sup>。

## 5 化工自动化生产中 PLC 控制系统的优化应用实例

### 5.1 某化工企业 PLC 系统优化设计实例

以江苏省常州市的常化化工有限公司为例,该公司主要从事氯碱产品的生产,年产氯化钠 50 万吨。公司原有的 PLC 控制系统使用的是旧款单 CPU 控制模块,系统无法满足生产过程中对实时性、稳定性和数据处理能力的需求。2019 年,常化化工决定对 PLC 控制系统进行全面优化。首先,公司更换了双 CPU 冗余控制模块,并升级了高速 I/O 模块,减少了数据采集与传输的延迟。原有的设备控制程序被重构,采用模块化设计,将反应釜、液位控制、温度调节等功能独立成子程序,从而提高了程序的可维护性和可靠性。此外,公司还升级了现场总线,采用 PROFIBUS 协议取代原有的 RS-485 网络,增强了数据通信的稳定性。经过优化后,PLC 系统响应时间由原来的 50 毫秒缩短至 18 毫秒,系统故障恢复时间由 1.5 秒减少至 0.3 秒,非计划停机频率从每年 15 次降至 5 次。通过这些改进,生产效率提高了 22%,年节省了设备维护成本约 150 万元人民币,同时产品质量也得到了显著提高,次品率降低了 0.6 个百分点。

### 5.2 PLC 在生产过程中的稳定性与效率提升

常化化工在优化 PLC 控制系统后,生产过程的稳定性与效率得到了显著提升。优化后的 PLC 系统不仅在响应时间上有了大幅提升,生产过程中的温度、压力等关键参数的控制精度也得到了增强。以反应釜温度控制为例,优化前,反应釜温度波动范围为  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,而优化后,温控精度提高至  $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ ,有效避免了生产过程中的温控误差导致的产品不稳定问题。此外,生产周期也得到了缩短,原本需要 48 小时完成的生产任务,通过 PLC 优化后,缩短至 40 小时,生

产效率提高了 16.6%。这些提升不仅降低了生产成本,也增加了公司年产能,产值提升了 20% 以上。

### 5.3 PLC 优化设计对产品质量与安全的影响

常化化工有限公司在 PLC 优化设计方面的投入,使得产品质量和安全性得到了双重提升。在优化后的 PLC 系统中,温度、压力和液位的实时监控更加精确,反应釜的温度控制精度从原来的  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  提高到  $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ ,有效避免了因温度波动过大而导致的产品质量不稳定。此外,安全性能方面,PLC 系统对设备的保护措施也得到了加强。通过 PLC 与安全仪表系统(SIS)的集成,系统能够在温度、压力异常时迅速响应,及时发出警报并启动紧急停车措施,保障了生产过程的安全性。优化后的 PLC 系统成功减少了因设备故障导致的安全事故,年均故障次数由 3 起减少至 1 起。优化后的系统还通过自动化控制,使产品的一致性和稳定性大大提高,次品率由 0.9% 降低至 0.3%。这些措施不仅提高了生产过程中的安全性,还为公司提供了稳定的产品质量,增强了市场竞争力。

## 6 结语

PLC 控制系统在化工生产中的优化设计是提高生产效率、保障产品质量和增强安全性的关键措施。通过对 PLC 硬件配置、软件编程及通信系统的优化,不仅能够有效提升系统的响应速度和控制精度,还能减少故障率和非计划停机的发生,显著降低生产成本。以常化化工有限公司为例,PLC 系统的优化设计在提升生产效率、加强安全控制和提高产品质量方面取得了显著成效,为化工企业的自动化发展提供了有力支持。然而,随着生产规模的不断扩大和工艺要求的日益复杂,PLC 系统的优化仍需不断创新和完善,尤其是在智能化、数据共享和大规模生产方面的应用。未来,随着技术的进一步发展,PLC 控制系统将在化工生产中发挥更为重要的作用,推动行业向更加高效、绿色、安全的方向发展。

### 参考文献

- [1] 刘强,冯继源,李天宇.PLC 控制系统在化工机械设备中的应用实践——评《化工自动化》[J].化学学报,2025,83(10):1293.
- [2] 王文军.仪表信号断线检测在化工仪表控制系统的关键作用与优化策略[J].石化技术,2025,32(10):382-384.
- [3] 尹晓杰,李禹羲,张昭,吕圣佐,尹森.基于 PLC 的化工装置电气自动化控制技术[J].大众标准化,2025,(14):44-46.
- [4] 韩军林,何平,柯昌全.工控物联网在化工企业生产自动化控制系统中的应用[J].自动化应用,2025,66(12):255-258.

# Experimental study on recovery of molybdenum leaching from iron molybdenum smelting dust

Qiang Wang Zhenchuan Liu Xiang Dai Defu Xiao Yong Li

Sino Shaanxi Nuclear Industry Group 224 Brigade Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710024, China

## Abstract

In order to realize the efficient recovery of molybdenum resources in iron molybdenum smelting dust. In view of the material characteristics of ferro molybdenum dust with fine particle size and complex composition, it is difficult to separate and recover by traditional process. The relevant studies on the amount of NaOH, leaching time, liquid-solid ratio, NaOH concentration and leaching temperature were carried out. The results show that the molybdenum content in the leaching residue is 2.82% and the leaching rate of molybdenum is 90.98% under the leaching conditions of room temperature for 4h, liquid-solid ratio of 1.5:1 and the dosage of leaching agent NaOH is 250kg/t. The secondary recovery and utilization of molybdenum resources in the ferromolybdenum smelting dust are realized. This study provides relevant reference for the comprehensive recycling and utilization of solid waste resources.

## Keywords

Molybdenum iron dust; Leach; Comprehensive recovery; Orthogonal test

# 钼铁冶炼烟尘回收钼浸出试验研究

王强 刘振川 戴翔 肖德富 李永

中陕核工业集团二二四大队有限公司, 中国·陕西 西安 710024

## 摘要

为实现钼铁冶炼烟尘中钼资源的高效回收利用, 针对钼铁冶炼烟尘的粒度特别细, 成分比较复杂的物料性质特点, 采用传统的工艺技术分离效率低下且回收较困难, 进行了NaOH用量、浸出时间、液固比、NaOH浓度和浸出温度的相关试验研究。研究表明: 在常温常压条件下浸出4小时、液固比为1.5:1、浸出剂NaOH的用量为250kg/t时, 浸渣中钼含量2.82%, 钼的浸出率为90.98%, 实现了对钼铁冶炼烟尘中钼资源的二次回收利用。该研究为钼铁冶炼烟尘的钼资源综合利用提供相关研究参考。

## 关键词

钼铁烟尘; 浸出; 综合回收; 正交试验

## 1 引言

钼是一种难熔金属, 具有导电性和导热性强、膨胀系数小、高温强度高、加工性能稳定、受压较易加工等优良特性[1], 广泛应用于冶金、化工、航空航天等领域。我国钼资源丰富, 钼精矿生产集中度高, 目前国内从事钼加工企业有300家左右, 每年约产生150000吨冶炼烟尘。烟尘中有价金属赋存状态复杂, 分离回收困难, 多作为固废堆积, 造成较大的资源浪费。钼的二次资源主要有两个来源, 一是钼冶金过程中产生的含钼废渣、废液、烟尘等, 二是钼金属制品生产的废料和回收的含钼化学制品或者材料。目前国内外钼二次资源综合利用研究主要是针对选矿尾矿、冶炼渣、废含钼催化剂、废含钼合金等。

唐忠阳等人采用在碱分解-萃取工艺回收某冶炼厂除钼渣中的钼, 针对除钼渣中钼含量13%~17%, 先通过碱分解得到浸出液, 再通过萃取工艺得到含钼23~26g/L钼酸铵的混合液, 萃取率达98%, 实现了该除钼渣中钼的综合回收[2]。张建刚则采用氨水中和的方法来处理钼酸铵生产废液, 以25%~28%的氨水中和废液, 当pH值调至5~7时钼几乎全部进入渣中。对沉淀渣采用 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 浸出的方法回收其中的钼, 回收率可达79%[3]。Roya Mafi Gholami等人采用嗜酸氧化亚铁硫杆菌和嗜酸氧化硫杆菌(Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans)实现了废催化剂中钼的回收, 得到了含量84%, 回收率95%的精矿产品[4]。现有的研究多数针对于钼精矿产品提纯、除杂, 从废弃的电解液、催化剂中回收钼, 以及如何实现冶炼厂的烟尘治理, 达到环保排放标准, 而对于钼精矿冶炼烟尘中钼资源的二次回收利用却鲜有研究。

本次研究以钼铁冶炼烟尘为研究对象, 根据其中Mo

【作者简介】王强(1985—), 男, 中国湖北荆门人, 硕士, 高级工程师, 从事钼产品加工、地质勘查研究。

的化学形态与嵌布状态,针对性研发固废资源化利用技术,实现烟尘中 Mo 的绿色高效回收,同时探明其中 Bi、Ag 等稀贵金属的走向,为后续有价金属的回收提供参考依据,最终实现固废资源的高效综合回收利用。

## 2 试验部分

### 2.1 试验原料

钼铁冶炼烟尘为粉末状,经试验分析,钼含量为 18.93%,金含量为 0.7g/T,银含量为 1054.3g/T,铜含量为 0.92%,铁含量为 15.66%,铅含量为 13.66%,锌含量为 5.38%。钼铁冶炼烟尘中钼的含量 18.93%,达到了综合回收利用标准。

对钼铁冶炼烟尘样品进行钼的物相检测分析。Mo 主要以钼华的形式存在,还有少量的铁钼华等钼酸盐和其他钼矿物(如辉钼矿等)。铁钼华是辉钼矿的氧化产物,辉钼矿经氧化、淋滤,呈配合物形态与可溶性铁盐相遇,形成铁钼华沉淀,从而包裹在钼华表面,影响钼的浸出。常规的氨水碱浸无法充分完成对钼的浸出,综合考虑选择强碱 NaOH 作浸出剂。

### 2.2 试验方法

采用正交试验设计实验过程。首先,研究 NaOH 用量、浸出时间、液固比、NaOH 浓度、浸出温度条件不同对钼浸出率的影响,然后,固定浸出条件,利用正交表来安排与分析多因素试验,从而确定较优浸出条件。浸出过程实验步骤为:首先称取一定量的钼铁烟尘加入氢氧化钠溶液,然后按照设定时间、液固比、温度,进行浸出,浸出完成后进行固液分离。分离后进行五次洗涤,洗涤后使用真空过滤机进行抽滤,得到浸出渣和浸出液,浸出渣使用风干燥箱烘干,烘干后的浸出渣进行制样并取样进行钼含量测定。

## 3 试验结果与讨论

以钼浸出率为指标,确定 NaOH 用量、浸出时间、液固比、NaOH 溶液浓度、浸出温度等最优参数。

### 3.1 NaOH 用量试验

NaOH 能够增强矿物表面的疏水性。在常温条件下浸出 6h、液固比 3:1 时,研究 NaOH 用量对钼浸出率的影响。从不同氢氧化钠用量的条件试验来看,NaOH 用量为 576kg/t,常温浸出 6h,浸出率为 90.40%,NaOH 用量为 384kg/t,常温浸出 6h,浸出率为 88.82%,NaOH 用量为 768kg/t,常温浸出 6h,浸出率为 88.63%。可以看出 NaOH 用量为 576kg/t。

### 3.2 浸出时间试验

浸出时间对浸出效率影响显著。在常温条件下、液固比 3:1、浸出剂 NaOH 用量 576kg/t 时浸出,研究浸出时间对钼浸出率的影响。随着浸出时间的增加,钼的浸出率呈现出先增加后降低的趋势。浸出时间 2h、4h、6h、8h,碱浸渣中的钼分别为 2.92%、2.40%、2.69%、2.96%,对应的浸

出率分别为 91.09%、92.66%、92.03%、91.31%。浸出 4h 时,钼浸出率达 92.66%;之后随着浸出时间增长,钼浸出率提高不明显。综合考虑,确定适宜的浸出时间为 4h。

### 3.3 液固比试验

液固比的大小既影响浸出试剂耗量,又影响矿浆的黏度,从而影响浸出效率。在常温条件下浸出 4h、浸出剂 NaOH 用量 576kg/t 时,研究液固比对钼浸出率的影响。液固比分别为 0.8:1, 1:1, 1.2:1, 1.5:1, 2:1 时钼的浸出率分别为 91.83%、91.95%、91.85%、91.66% 以及 90.37%。当液固比为 0.8:1, 1:1, 1.2:1, 1.5:1 时,钼浸出率变化幅度不大。综合考虑液固比对浸出率和浸出剂有效浓度的影响,选择液固比为 1.5:1。

### 3.4 NaOH 浓度试验

NaOH 浓度能够影响浸出速率。NaOH 浓度增加能够提高钼的浸出,达到平衡后就不会产生较大影响。在常温条件下浸出 4h、液固比 1.5:1 时,研究不同 NaOH 浓度对钼浸出率的影响。随 NaOH 浓度增加,钼浸出率显著提高;NaOH 用量为 166g/L(250kg/t)时继续增加 NaOH 用量,钼浸出率变化不大。因此,根据试验结果选择氢氧化钠浓度为 166g/L(250kg/t)。

### 3.5 浸出温度试验

升高温度可加快反应动力学速度,但温度过高会增大能耗。在液固比 1.5:1、浸出剂 NaOH 用量 250kg/t 浸出 4h 时,研究温度对钼浸出率的影响。在所考察的浸出温度范围内,随着温度的升高,Mo 的浸出率逐渐增大。温度在 75℃时,钼的浸出率为 92.58%,在常温条件下钼的浸出率为 90.22%。综合考虑到能耗以及工艺实施的便利性,选择浸出温度为常温。

### 3.6 正交试验

正交试验设计是利用正交表来安排与分析多因素试验的一种设计方法。它是由试验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行试验的,通过对这部分试验结果的分析了解全面试验的情况,找出最优的水平组合。基于条件因素的试验结果,在各个因素均取最优条件下,钼的浸出率提升不大,考虑到各因素之间的交互作用。为了解不同浸出影响因素间是否有交互影响作用,设计了二因素三水平的交互试验,正交表为  $L_9(3^4)$ 。试验的二个因素均选定三个水平,如表 3.1 所示。正交试验安排及试验结果如表 3.2 所示。

表 3.1 因素水平表

水平 / 因素	A	B
	液固比	NaOH 浓度 (g/L)
1	1:1	130
2	1.2:1	160
3	1.5:1	190

表 3.2 试验方案及试验结果

试验号	1	2	3	4	浸出率/%
	A-液固比	B-氢氧化钠浓度	AB	空列	
试验 1	1	1	1	1	81.02
试验 2	1	2	2	2	83.12
试验 3	1	3	3	3	86.81
试验 4	2	1	2	3	81.22
试验 5	2	2	3	1	84.1
试验 6	2	3	1	2	88.46
试验 7	3	1	3	2	83.8
试验 8	3	2	1	3	88.66
试验 9	3	3	2	1	89.20
K <sub>1</sub>	83.65	82.013	86.047	84.773	/
K <sub>2</sub>	84.593	85.293	84.513	85.127	/
K <sub>3</sub>	87.22	88.157	84.903	85.563	/
极差 R	3.57	6.144	1.534	0.79	/

表中 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub> 表示在每个因素条件下对应水平的试验结果的和，R 表示在每个因素下 K 的最大值减最小值。由极差 R<sub>2</sub>>R<sub>1</sub> 可知，各因素主次为 B>A；因素 A 中 K<sub>3</sub>>K<sub>2</sub>>K<sub>1</sub>，因素 B 中 K<sub>3</sub>>K<sub>2</sub>>K<sub>1</sub>，同时试验 9 试验结果最优，可确定优方案为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>。用方差分析法 (α=0.05) 分析试验结果，如表 3.3 所示。

表 3.3 试验方案及试验结果

差异源	SS	df	MS	F	显著性
液固比 A	20.534	2	10.267	21.845	*
NaOH 浓度 B	56.698	2	28.349	60.317	*
AB	3.81	2	1.905	4.053	/
误差	0.94	2	0.47	/	/
总和	81.982	8	/	/	/

由表 3.3 可知，F<sub>A</sub>>F<sub>0.05</sub>，F<sub>B</sub>>F<sub>0.05</sub>，表明若要显著水平 α=0.05，则认为液固比与 NaOH 浓度的效应均是显著的。因此控制液固比与 NaOH 浓度进行浸出实验，浸出实验数据如下表 3.4 所示。

由表 3.4 可知，随着 NaOH 浓度逐渐增加，浸渣中钼的含量逐渐降低，浸出率也逐渐升高。所以，考虑经济利润成本，降低 NaOH 用量，NaOH 浓度在 160~190g/L 之间，选取液固比为 1.5:1，NaOH 用量为 250kg/t。

表 3.4 浸出实验数据表

液固比	NaOH 浓度/(g/L)	NaOH 用量/(kg/t)	浸出率/%
1:1	130	130	81.02
1:1	160	160	83.12
1:1	190	190	86.81
1.2:1	130	156	81.22
1.2:1	160	192	84.10
1.2:1	190	228	88.46
1.5:1	130	195	83.80
1.5:1	160	240	88.60
1.5:1	190	285	89.20

### 3.7 直接浸出验证试验

试样 200g 在浸出剂氢氧化钠用量 250kg/t，浸出时间 4h，液固比 1.5:1，常温条件下浸出。在综合条件下，试验 1、试验 2、试验 3 的碱浸渣钼含量分别为 3.08%、2.63%、2.77%，钼浸出率分别为 90.35%、91.53%、91.06%，三次是试验浸渣中钼的平均含量 2.82%，钼平均浸出率为 90.98%。

## 4 实验结论

通过物相分析 Mo 主要以钼华的形式存在，还有少量的铁钼华钼酸盐和辉钼。烟尘粒度 -0.023mm 占比 92.52%，粒度过细，无需再磨，但影响后续固液分离过程，所以适合采用化学处理的方法提取金属钼。

通过系统的试验研究，确定了 NaOH 常温常压碱浸的最佳浸出条件。浸出条件：NaOH 用量 250kg/t、液固比 1.5:1、浸出时间 4h、浸出温度常温，浸渣中钼含量 2.82%，钼平均浸出率为 90.98%。

### 参考文献

- [1] 周园园,王京,唐萍芝等.全球钼资源现状及供需形势分析[J].中国国土资源经济,2018,31(03):32-37.DOI:10.19676/j.cnki.1672-6995.000067.
- [2] 唐忠阳,李洪桂,霍广生.高压氧分解-萃取法回收铜钼中矿中的钼[J].稀有金属与硬质合金,2003(01):1-3.
- [3] 张建刚,柯子勤.利用焦化氨水生产复合肥氮化过磷酸钙[J].河北化工,2001(02):44-48.
- [4] Wang M,Wang X,Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni-Mo ore[J]. Hydrometallurgy,2008,97(1).

# Application and Performance Evaluation of Green Solvents in Petroleum Product Refining

Heng Zhou Qihui Zhang Zhangsen Chen Liwen Huang Zhen Qin

Zhejiang Fangyuan Testing Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

With increasingly strict environmental protection regulations and the in-depth popularization of the green development concept, the petroleum product refining industry is facing the transformation pressure of high pollution, high toxicity and difficult recycling of traditional solvents. Green solvents, with their advantages of being environmentally friendly, safe and efficient, and highly sustainable, have gradually become a research hotspot and application trend in this field. This article systematically expounds the current application status of green solvents in the refining of petroleum products, covering core links such as desulfurization, denitrification, demetalization, dewaxing, and the improvement of refined oil products. It focuses on analyzing the structural characteristics and action mechanisms of typical green solvents such as ionic liquids, supercritical fluids, deep eumelt solvents, and bio-solvents. From the dimensions of solubility, separation efficiency, cycle stability, environmental impact and economic cost, a comprehensive performance evaluation system for green solvents is constructed to explore the adaptability and application limitations of different green solvents in various petroleum product refining scenarios, providing theoretical references and technical support for the green transformation of the petroleum product refining industry.

## Keywords

Green solvent; Petroleum products; Refined application; Performance evaluation

## 绿色溶剂在石油产品精制中的应用及性能评价

周恒 章奇辉 陈樟森 黄梨文 秦臻

浙江方圆检测集团股份有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

随着环保法规日益严格与绿色发展理念的深入普及,石油产品精制行业面临着传统溶剂高污染、高毒性、难回收的转型压力,绿色溶剂以其环境友好、安全高效、可持续性强的优势,逐渐成为该领域的研究热点与应用趋势。本文系统阐述绿色溶剂在石油产品精制中的应用现状,涵盖脱硫、脱氮、脱金属、脱蜡及精制油品改质等核心环节,重点分析离子液体、超临界流体、深共熔溶剂、生物溶剂等典型绿色溶剂的结构特性与作用机理。从溶解性能、分离效率、循环稳定性、环境影响及经济成本等维度,构建绿色溶剂的综合性能评价体系,探讨不同绿色溶剂在各类石油产品精制场景中的适配性与应用局限,为石油产品精制行业的绿色转型提供理论参考与技术支持。

## 关键词

绿色溶剂; 石油产品; 精制应用; 性能评价

## 1 引言

石油产品作为全球能源供应与工业制造的关键物质,其提纯流程直接影响产品品质与使用可靠性。传统石油精制方法普遍采用酸碱溶剂、有机溶剂等常规介质,尽管能够达到脱硫、脱氮、去除杂质等目的,然而存在挥发性高、毒性大、不易回收、环境污染恶劣等明显问题,不仅增加了生态环境的负担,而且受到日益严苛的环保法规的限制。绿色溶剂作为传统有害溶剂的绝佳替代选择,具有低毒质、低挥发度、可降解性、高循环利用比率等特质,顺应现代工业绿色发展的

的核心要求。本文重点探讨绿色溶剂在石油产品精制当中的应用状况与性能评判,推动石油精制行业实现环保与效益的同步发展。

## 2 绿色溶剂的分类及特性

### 2.1 离子液体

离子液体作为室温熔融盐,由有机阳离子与无机或有机阴离子组成,具备蒸气压极低、热稳定性高、溶解能力强、结构可设计等独特特性。其阳离子大多为咪唑类、吡啶类、季铵盐类物质,阴离子包含卤素离子、四氟硼酸根、六氟磷酸根等,经由对阴阳离子的结构与配比进行调控,可精确调节离子液体的溶解性、极性、酸度等物理化学属性,实现对石油中硫化物、氮化物、金属杂质等目标物质的选择性溶

【作者简介】周恒(1997—),男,中国浙江衢州人,本科,助理工程师,从事汽柴油检测研究。

解与分离。离子液体具有卓越的化学稳定性,难以挥发散失,能够借助萃取、蒸馏等手段回收再利用,循环利用的性能颇为出色,可切实减少溶剂消耗与环境排放。

## 2.2 超临界流体

超临界流体是温度连同压力均高于临界值的流体,兼备气体的高扩散特性与液体的高溶解本领,常用的包含超临界二氧化碳、超临界水等。超临界二氧化碳具备临界温度与压力适宜、化学特性稳定、无臭无毒、不易起火爆炸、对环境友善等特性,其溶解能力可经由调节温度和压力来灵活调整,在石油产品精制工作里便于达成溶剂与目标组分的分离回收。超临界水具备极为强大的溶解能力与反应活性,可于高温高压的环境中达成硫化物、氯化物的氧化分解,而且不必额外添加催化剂,反应完成后通过降温减压就可与油品分离,不存在二次污染。

## 2.3 深共熔溶剂

深共熔溶剂由氢键供体与氢键受体按特定摩尔比混合而成,具有制备简易、成本不高、生物亲和性好、可降解等优点。其成分大多是天然化合物,对环境的友好程度十分突出。深共熔溶剂借助氢键效应构建起稳定的共熔体系,具有与离子液体相仿的溶解特性与结构可调控性,可有效溶解石油中的极性杂质及金属络合物。深共熔溶剂的制备过程不需要复杂的提纯步骤,经济成本比离子液体低很多,更有助于进行工业化的推广与应用。

## 2.4 生物溶剂

生物溶剂是借助天然生物质提取或经生物发酵而制得的溶剂,像乙醇、乙酸乙酯、生物柴油衍生溶剂这类,具有可再生、可降解、低毒且低挥发等属性。这类溶剂出自生物质资源,符合可持续发展的理念,其分子结构里含有的羟基、羧基等官能基团,可与石油中的极性杂质产生氢键或其他相互作用,达成选择性分离。生物溶剂的显著优点是具备良好的环境相容性,使用过后可自然消解,不会引发长期的环境危害,并且原材料来源多样,可降低对化石资源的依赖,然而部分生物溶剂存在溶解性能欠佳、沸点不高、稳定性欠佳等状况,制约了其直接应用。

# 3 绿色溶剂在石油产品精制中的应用

## 3.1 脱硫精制

绿色溶剂脱硫主要借助物理萃取或者化学反应两种途径实现。离子液体依靠对硫化物(特别是噻吩类、苯并噻吩类等难以脱除的硫化物)的高度选择性溶解本领,在汽油、柴油脱硫工作里表现出出色性能,借助调整离子液体的阴阳离子结构,可达成对不同硫化物的靶向分离,脱硫效率明显强于传统溶剂。超临界二氧化碳脱硫凭借其高扩散特性与溶解可调控性,在恰当的温度压力情形下,可迅速渗透到油品当中溶解硫化物,而且溶剂与油品分离简便,不存在溶剂残留。深共熔溶剂依靠氢键供体与受体的协同效应,提升对硫

化物的吸附及溶解能力,其脱硫流程平稳,不用高温高压的环境,能耗较低。如乙醇、丙二醇等生物溶剂凭借极性作用使极性硫化物溶解,虽说脱硫效率相对欠佳,不过其环境友好特性十分明显,适合用于低硫油品的深度精制或辅助脱硫工艺。

## 3.2 脱氮精制

绿色溶剂脱氮主要凭借酸碱相互作用、氢键作用抑或络合作用完成目标组分的分离。离子液体可借助设计带有酸性或碱性的阳离子结构,和氮化物构建稳定的离子对或者络合物,达成高效脱氮,尤其是在脱除非碱性氮化物方面效果显著优于传统工艺。深共熔溶剂中的氢键供体(如多元醇、羧酸等)可跟氮化物中的氮原子形成氢键,提高对氮化物的溶解本领,达成选择性脱氮。超临界流体脱氮将萃取与轻度氧化作用相结合,当处于超临界状态时,溶剂不仅能够溶解氮化物,而且能在有氧化剂的情况下把部分氮化物氧化成易溶于溶剂的氧化物,进而提高脱氮效率。绿色溶剂脱氮工艺具备条件缓和、无二次污染、不干扰油品其他性能等长优势,顺应现代精制工艺的发展要求。

## 3.3 脱金属精制

绿色溶剂开展脱金属工作主要借助溶剂与金属杂质生成络合物或螯合物,达成金属组分的选择性分离。离子液体可凭借设计含有螯合官能团的阳离子或阴离子,跟金属离子形成稳固的络合物,进而把金属杂质从油品里去除,脱除金属效率高且不改变油品的烃类组成。深共熔溶剂中的氢键供体和受体可以协同开展作用,跟金属离子生成配位化合物,达成金属杂质的高效萃取。超临界流体可以在溶解金属络合物之时,凭借其强扩散性迅速达成传质过程,加快脱金属的速度。与传统脱金属工艺里运用的有毒螯合剂相比,绿色溶剂脱金属工艺具备环境友好、溶剂可回收再利用、金属杂质便于资源化等优势,给重金属的回收与无害化处理开辟了新途径。

## 3.4 脱蜡精制

绿色溶剂脱蜡借助有选择性地溶解油品里的油相成分,抑或变更蜡晶的生长形态与聚集态势,达成油蜡分离。超临界二氧化碳脱蜡凭借其其对油相的高溶解性能与对蜡质的低溶解性能,在恰当条件下可达成油蜡的高效分离,而且溶剂回收简便,能耗相较于传统溶剂脱蜡工艺大幅降低。离子液体可凭借调整极性与结构,有选择性地溶解油品里的液态烃,然而蜡质会以固体状态析出,达成脱蜡效果,与此同时离子液体的低蒸气压特性能够防止溶剂挥发所导致的损失与污染<sup>[1]</sup>。深共熔溶剂脱蜡借助氢键作用打破蜡晶的规整架构,遏制蜡晶的生长与聚合,提升油品在低温环境下的流动性,其脱蜡进程和缓,不会对油品的其他性能造成负面作用。

## 3.5 油品改质

除了去除杂质,绿色溶剂还可应用于石油产品的优化过程,提高油品的燃烧效能、稳定性与使用保障性。在润滑

油提纯过程中,离子液体可对油品中的不理想组分(如多环芳烃、胶质等)进行选择性的溶解,留存优质基础油成分,同时提升润滑油的黏度指数与抗氧化特性。超临界流体可充当反应的介质,在催化加氢、异构化等改质反应进程里,加快反应速率与选择性,减小反应温度与压力,减少能源消耗和副产物的生成。深共熔溶剂可凭借调节体系的酸度,引发油品中的不饱和烃进行加氢饱和或异构化反应,增强油品的稳定性与燃烧性能。

## 4 绿色溶剂的性能评价体系

### 4.1 核心性能评价指标

#### 4.1.1 溶解与分离性能

溶解和分离特性是绿色溶剂在石油精制应用方面的核心指标,直接关乎精制效果与产品质量。主要衡量参数包含目标组分(硫化物、氮化物、金属杂质等)的溶存度、分配系数数值、脱除百分比等。优质绿色溶剂需具有对目标杂质的强选择性溶解效能,在较少溶剂用量与温和工艺环境下实现高效分离,同时对油品里的有效成分不溶解或少量溶解,防止油品收率下降。分离速度同样是关键评价指标,迅速的传质与分离流程可提高工艺效率,减少生产能耗。

#### 4.1.2 稳定性与循环性能

绿色溶剂的稳定性和循环利用性能直接决定其工业化应用的可行性与经济投入。热稳定性应考察溶剂在精制工艺温度范围里是否产生分解、变质现象<sup>[2]</sup>;化学稳定性着重考察溶剂在与油品、催化剂等接触期间是否产生化学反应,维持结构与性能的稳定。循环性能涵盖溶剂的回收效能、再生方式的简易性以及循环使用后的性能降低程度。理想的绿色溶剂应当具备优良的循环再生特性,借助简易的蒸馏、萃取、过滤等手段就能达成回收,历经多次循环使用后依旧可维持较高的分离效率,减少溶剂消耗成本。

#### 4.1.3 环境友好性

环境友好特性是绿色溶剂的核心特质,也是与传统溶剂相区别的关键优势。评价指标涵盖溶剂的毒性(急性毒性、慢性毒性)、生物可降解性、易挥发性、温室气体排放量等。具备低毒或无毒、易于发生生物降解反应且蒸气压较低特点的溶剂可减轻对操作人员健康的危害和对环境的污染。溶剂的原料源头同样要纳入评判,以可再生生物质为原材料的溶剂更贴合可持续发展思想,可减少化石资源的依靠。

#### 4.1.4 经济成本

经济成本作为关键制约要素,影响着绿色溶剂的工业化推广进程,包含溶剂的制备成本、原料价格、回收成本、工艺改造费用等。虽然离子液体、超临界流体等新型绿色溶

剂性能十分优异,然而部分溶剂的制备流程繁杂、原材料价格高昂,使得成本始终维持在较高水平<sup>[3]</sup>;深共熔溶剂、生物溶剂具备原料获取便捷、制备简便的优势,成本方面竞争力更强。在进行性能评判时,要全面权衡溶剂的性价比,也就是单位投入成本下的精制成果与环境益处,而非只是追求低花费或高功效。

### 4.2 不同绿色溶剂的性能对比

超临界流体分离效能高、溶剂回收容易、对环境影响轻微,然而需配备高压设备,起始投资数额较大,故而更契合大规模连续化生产工艺。深共熔溶剂兼有离子液体卓越的溶解特性与不高的制备成本,具备良好的生物相容性且可降解,然而部分深共熔溶剂存在热稳定性欠佳、循环次数受限的问题,适用于中低温精制工艺以及对成本敏感的情形。生物溶剂具有环境友好、可再生以及毒性极低的优点,然而其溶解能力和稳定性相对欠佳,单独使用时精制效果有限,大多用作辅助溶剂或用于对精制要求较低的场景。在实际操作中,要依据石油产品种类、精制目的、工艺状况以及经济规划等要素,挑选恰当的绿色溶剂,或者借助复合溶剂体系、工艺改良等途径来弥补单一溶剂的缺陷,实现精制效能、环境效益与经济成本的平衡。

## 5 结语

绿色溶剂基于其环境友好、性能可灵活调整、可循环再利用等优势,在石油产品精制领域显现出巨大的应用前景,成为攻克传统精制工艺污染问题、助力行业绿色转变的关键技术途径。本文全面剖析了离子液体、超临界流体、深共熔溶剂、生物溶剂等典型绿色溶剂的结构特点与作用原理,归纳了其在脱硫、脱氮、脱金属、脱蜡及油品改质等核心环节的应用现况。提出了溶解分离性能、稳定性与循环性能、环境友好性、经济成本的综合性性能评判体系,确定了不同绿色溶剂的适配情境与应用边界。伴随环保需求的持续增强与技术的稳步发展,绿色溶剂必定会在石油产品精制领域起到愈发关键的作用,助力达成能源利用与环境保护的协同共进。

### 参考文献

- [1] 何国忠,王克华,李军.快速溶剂萃取法同步萃取、分别测定土壤中半挥发性有机物和石油烃(C10-C40)[J].广州化学,2023,48(04):70-76.
- [2] 杨力,邬宇茜,刘可.加速溶剂萃取-气相色谱法测定固体废物中石油烃(C10~C40)的总量[J].理化检验-化学分册,2023,59(06):712-715.
- [3] 王丁,郭丹.离子液体在石油化工行业的应用[J].辽宁化工,2022,51(04):530-532.

# Study on Strengthening Mass Transfer and Selectivity Optimization of Nitrification in Microreactors

Kui Tong

Jiangsu Yabang Wal Dye Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

## Abstract

As an indispensable key unit reaction in the field of fine chemical engineering, the mass transfer efficiency and product selectivity of nitration reactions directly determine the economic benefits and production safety of the entire process. Traditional batch reactors, limited by their macroscopic scale, commonly suffer from inherent defects such as large mass transfer resistance, uneven mixing, and significant temperature distribution gradients. These issues easily induce side reactions such as over-nitration, oxidation, and positional isomerism, leading to a decrease in the yield of the target product and the accumulation of hazardous by-products. Microreactor technology, with its enormous specific surface area and excellent heat and mass transfer performance brought about by its micrometer-scale characteristic dimensions, provides a revolutionary solution for achieving orders-of-magnitude improvement in mass transfer coefficients and precise dynamic control of reaction parameters. This paper aims to systematically analyze the intrinsic mechanisms of mass transfer enhancement in nitration reactions within microreactors. From three dimensions—flow pattern evolution, dynamic behavior of phase interfaces, and microchannel structural parameters—the leap path of mass transfer performance is deeply revealed. Meanwhile, closely integrated with the intrinsic kinetic characteristics of nitration reactions, this study elaborately explores the synergistic optimization effects of multiple strategies such as precise temperature field control, instantaneous adjustment of reactant ratios, strict residence time distribution, and extreme intensification of micromixing on product selectivity. This research not only clarifies the scientific principles of microreactor-enhanced nitration processes at the theoretical level but also provides a solid theoretical basis and practical guidance for the efficient design, optimization, and industrial scaling-up of nitration processes in fine chemical engineering.

## Keywords

Microreactor; Nitration reaction; Mass transfer enhancement; Selectivity regulation; Micromixing; Process intensification

## 微反应器内硝化反应强化传质与选择性优化研究

童魁

江苏亚邦华尔染料有限公司, 中国·江苏·连云港 222000

## 摘要

硝化反应作为精细化工领域不可或缺的关键单元反应, 其传质效率与产物选择性直接决定了整个过程的经济效益与生产安全。传统釜式反应器受限于其宏观尺度, 普遍存在传质阻力大、混合不均、温度分布梯度显著等固有缺陷, 极易诱发过度硝化、氧化及位置异构等副反应, 导致目标产物收率下降和危险副产物累积。微反应器技术, 凭借其微米级特征尺度所带来的巨大比表面积与卓越的传热传质性能, 为实现传质系数的数量级提升及反应参数的精准动态调控提供了革命性的解决方案。本文旨在系统性地剖析微反应器内硝化反应的传质强化内在机制, 从流动模式演变、相界面动态行为及微通道结构参数三个维度, 深入揭示其传质性能的跃迁路径; 同时, 紧密结合硝化反应的本征动力学特性, 详尽探讨了温度场精准控制、反应物配比瞬时调节、停留时间严格分布以及微观混合极致强化等多重策略对产物选择性的协同优化作用。本研究不仅从理论层面阐明了微反应器强化硝化过程的科学原理, 更为其在精细化工硝化工艺中的高效设计、优化与工业化放大提供了坚实的理论依据与实践指导。

## 关键词

微反应器; 硝化反应; 传质强化; 选择性调控; 微观混合; 过程强化

## 1 引言

硝化反应, 即通过化学手段将硝基(-NO<sub>2</sub>)引入有机分子骨架的过程, 是构建众多高附加值化学品的关键步骤,

其产物广泛应用于医药中间体、染料与颜料、农药、含能材料及香料等精细化工领域。典型的硝化反应, 如混酸(硝酸与硫酸的混合物)对芳香烃化合物的取代反应, 通常表现出剧烈的放热效应和极高的初始反应速率, 同时, 目标硝化产物(如单硝基化合物)往往对温度极为敏感。在传统的间歇式或半间歇式搅拌釜反应器中, 受限于宏观混合效率, 反应体系内难以避免地存在显著的浓度梯度与温度梯度。这种不

【作者简介】童魁(1988—), 男, 中国安徽铜陵人, 本科, 工程师, 从事化工安全生产相关研究。

均匀性会引发一系列问题：局部过热成为多硝化、氧化分解等副反应的温床；局部硝化剂浓度过高则导致反应选择性失控，生成非预期的位置异构体或过度硝化产物。这不仅严重降低了目标产物的收率和纯度，更因不稳定、高能副产物的积累（如多硝基酚、多硝基芳烃），埋下了巨大的安全隐患，甚至可能引发爆燃事故。

深入探究其本质，传质限制是制约传统硝化反应效率与选择性的核心瓶颈。在液-液非均相硝化体系中，反应物（有机相）与硝化剂（酸相）必须跨越相界面进行质量传递，方能发生化学反应。当反应本征速率极快时，反应物在界面处的扩散速率往往成为整个过程的控制步骤，形成“反应-扩散”失衡。换言之，化学反应潜力的发挥被缓慢的物理传质过程所扼制。

微反应器的出现，为突破这一长期存在的技术瓶颈开辟了新纪元。微反应器是一类特征尺寸在微米级（通常为10-1000  $\mu\text{m}$ ）的连续流动反应设备，其内部由精密加工的微通道网络构成。这种微尺度结构赋予了它无与伦比的优势：极高的比表面积（可达1000-10000  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ）极大促进了相间接触；极短的传质距离使分子扩散效率显著提升；层流主导的流动状态消除了宏观返混；巨大的比表面积同样带来了极高的传热效率，可实现反应的等温操作。因此，微反应器能够创造一个近乎理想的传质与传热环境，实现对反应参数的精确操控，从而为硝化反应的高效、安全、高选择性进行提供了可能。

## 2 微反应器内硝化反应的传质强化机制

### 2.1 传质过程的核心影响因素及其在微反应器中的变革

硝化反应，尤其是混酸硝化体系，是典型的液-液两相反应。有机相底物（如甲苯、苯）与无机酸相硝化剂（如混酸）之间的反应发生在相界面处或界面附近的扩散层内。根据双膜理论，其总传质速率（ $N$ ）主要取决于三大核心要素：相间接触面积（ $A$ ）、传质系数（ $kL$ ）以及界面两侧的浓度驱动力（ $\Delta C$ ）。在传统搅拌釜反应器中，搅拌桨通过剪切作用将一相分散到另一相中，形成的液滴粒径通常在数百微米至毫米级别，这导致单位体积内的相界面面积有限，一般不超过100  $\text{m}^2/\text{m}^3$ 。同时，釜内流场与能量耗散率分布极度不均，导致不同空间位置的局部传质系数差异巨大，且界面更新频率低，总体传质效率低下。

微反应器技术则从根源上对这三大要素进行了革命性的优化。首先，通过微通道的精密设计，将两相流体分割、重构，能够稳定地产生微米甚至纳米尺度的分散相单元（液滴、液丝或薄层），使比表面积轻松达到1000-10000  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ，较传统反应器提升了1-2个数量级。其次，微通道内高度可控的流动形态和持续的界面剪切作用，使得传质边界层厚度显著减薄，传质系数 $kL$ 得以大幅提高。最后，通过精

确控制流体流速与配比，可以维持一个稳定且最优的界面浓度梯度 $\Delta C$ ，避免了传统釜式中因混合不均导致的局部浓度过高或过低现象。

### 2.2 微通道结构的传质强化效应与多尺度模拟

微反应器的传质性能与其内部微通道的结构设计息息相关。不同类型的微反应器展现了多样化的传质强化路径：

**T型/Y型对冲式微混合器**：依赖于两股或多股流体在高流速下的垂直或斜向撞击，通过强烈的惯性力实现流体的快速分割与破碎，能在毫秒级时间内形成亚10微米的精细液滴或条纹，从而实现初始阶段的快速、均匀混合。

**静态混合式微反应器**：在微通道内部集成了一系列交错排列的锯齿、翼片或螺旋单元。流体在流经这些扰流单元时，被反复进行分割、位移、旋转和重组，这一过程不断刷新相界面，还引入了强烈的横向二次流（Dean涡等），极大地强化了相间及相内的传质，尤其适用于中高粘度流体的处理。

**膜分散式微反应器**：利用特制的微孔膜（如不锈钢烧结膜、陶瓷膜）作为分散介质。一相流体在压力驱动下被迫通过微孔，在另一连续相中形成尺寸均一、单分散性好的微液滴。这种方式的优势在于传质界面稳定、可控，液滴尺寸分布窄，非常适合对传质稳定性要求极高的敏感反应。

从流体力学角度分析，微通道内的流动雷诺数（ $Re$ ）通常较低（ $<2000$ ），多处于层流状态。然而，这并不意味着传质缓慢。恰恰相反，由于通道尺寸微小，分子从通道中心扩散至壁面的时间（ $\tau \propto L^2/D$ ）被急剧缩短。根据爱因斯坦扩散方程，扩散时间与扩散距离的平方成正比。当特征尺寸从毫米级降至百微米级，分子扩散时间将缩短至原来的万分之一，这意味着分子尺度上的混合（即微观混合）效率得到质的飞跃。计算流体力学（CFD）数值模拟结果清晰地显示，在微通道中，即使是在层流下，分子扩散也能在极短的距离和时间内完成，使得传质过程由传统反应器中的对流-扩散共同控制，转变为微反应器中扩散主导的快速过程。此外，层流的有序性有效抑制了宏观返混，确保了反应物浓度沿流动方向呈现稳定且可控的梯度分布，为实现串联反应的中间产物选择性最大化创造了理想条件。

### 2.3 流动模式的可控演化及其对传质的精细调控

在微反应器中，通过精确调节两相的体积流量比、流速以及界面张力，可以实现对流动模式的主动设计与精准控制，而不同的流动模式直接决定了传质机理和效率。

**滴状流/弹状流**：当一相流量远小于另一相时，分散相会以离散的液滴或液弹形式存在于连续相中。在这种模式下，传质主要通过三个途径进行：液滴/液弹内部的内部环流；液滴/液弹与通道壁面之间薄液膜内的扩散；以及液滴/液弹前后端部的对流。这种模式界面更新频繁，传质系数较高。

**平行流/层状流**：当两相流速和流量比匹配适当时，两

相会以平行的薄层形式共同流经微通道。此模式下，相界面面积固定且巨大，传质距离均一且极短，整个体系接近于理想的平推流反应器，温度和浓度分布高度均匀，非常有利于获得高选择性的产物。

**段塞流：**是滴状流的一种特例，液弹长度与通道直径相比较。它兼具了内部环流和界面面积大的优点。

**乳化流：**在极高的流速或强烈的剪切作用下，两相被高度分散，形成亚微米尺度的乳液，此时相界面面积达到极致，传质阻力近乎为零。

针对硝化反应的特点，平行流和滴状/弹状流通常被视为最优选择。平行流因其无与伦比的均匀性，能最大限度地抑制局部过热和浓度波动，是实现高区域选择性和避免多硝化的首选模式。而滴状/弹状流则通过液滴/液弹内部的强循环，特别适合于处理粘度较高的有机相体系，能有效打破相内传质阻力，确保反应物在相内也能快速输送至界面。

### 3 微反应器内硝化反应的选择性优化策略

#### 3.1 温度场的精准构建及其对反应路径的导向作用

温度是影响硝化反应选择性的最关键外部变量。不同硝化位置（邻、间、对位）的活化能存在差异，且多硝化、氧化等副反应的活化能通常低于或接近单硝化反应。因此，温度升高会显著加速副反应速率，导致选择性恶化。传统反应器传热能力有限，硝化反应瞬间释放的巨额热量无法及时移除，形成难以控制的“热点”，其温度可能远超体系平均温度数十摄氏度，成为副反应的“引爆点”。

微反应器凭借其高达  $10,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  以上的传热系数，能够近乎瞬时地移走反应热，将整个反应通道维持在设定温度的  $\pm 1^\circ\text{C}$  范围内，实现了真正的等温反应环境。这种精准的温度控制能力，使得操作人员能够在一个狭窄且最优的温度窗口内进行反应，从而精确引导反应路径朝向目标产物。

#### 3.2 反应物配比与停留时间的协同精准调控

在硝化反应中，硝化剂（如硝酸）与底物的摩尔比是决定反应深度的直接因素。传统反应器中，由于宏观混合速度慢于反应速度，在加料点附近会形成硝化剂严重过量的局部区域，极易引发过度硝化。微反应器通过高精度的计量泵和高效的在线混合器，可以实现反应物流量的瞬时精确控制与近乎完美的初始混合，确保整个反应体系内硝化剂浓度始终处于一个预设的、最优的狭窄范围内。

以苯酚硝化为例，这是一个对选择性要求极高且副反

应危险的反应。研究表明，当硝酸与苯酚的摩尔比从 1.0 逐渐增加至 1.2 时，目标产物单硝基苯酚的选择性会从 92% 急剧下降至 78%，同时生成更多二硝基及三硝基苯酚等极具爆炸风险的副产物。而在微反应器系统中，通过将摩尔比精确设定在 1.05，并结合毫秒级的快速混合，可以成功将单硝基苯酚的选择性稳定在 90% 以上的高水平，同时从根本上杜绝了危险副产物的生成。

#### 3.3 微观混合与界面化学行为的极致优化

微观混合，指反应物在分子尺度上达到均匀分布的过程，它决定了反应初始瞬间的浓度场，对于快反应的选择性具有决定性影响。当反应速率极快时（如混酸硝化），反应发生在进料流体尚未完全混合的区域内，即“涡团”中，其选择性强烈依赖于微观混合效率。微反应器能将微观混合时间缩短至毫秒级别，比传统反应器快 1-2 个数量级。这种极致的微观混合确保了硝化剂与有机底物在分子水平上瞬时均匀接触，避免了因局部浓度过高而引发的副反应，从而在反应起始点就锁定了高选择性。

### 4 结语

微反应器技术通过其固有的微尺度结构优势，从本质上强化了硝化反应的传质过程，实现了界面面积、传质系数和浓度梯度的同步优化，使其体积传质系数相较传统反应器提升了 1-3 个数量级，从而彻底解决了长期困扰工业硝化过程的“传质限制”难题。在选择性调控方面，通过温度场的精准构建、反应物配比与停留时间的协同控制、微观混合的极致强化以及界面行为的主动调控等一系列组合策略，微反应器能够有效引导反应路径朝向目标产物，通常可实现目标产物收率提升 10-25%，并显著抑制乃至消除危险副产物的生成，极大地提升了工艺的安全性与经济性。

尽管微反应器在硝化反应中展现出巨大潜力，其工业化推广应用仍面临一些挑战，主要包括：微通道的堵塞风险对流体纯净度和固体产物生成的耐受性差；从实验室尺度到工业生产尺度的放大策略（通常采用数量放大）及其经济性；以及强腐蚀性硝化介质对微反应器材料的长期兼容性要求。

#### 参考文献

- [1] 薛旭升.微反应器内邻二甲苯硝化过程传质和反应特性[D].西安石油大学, 2024.
- [2] 苏晨飞.微反应器内硝基苯硝化过程传质和反应特性[D].西安石油大学, 2023.
- [3] 孙宝民.微反应器内氯苯硝化的传质和反应特性[D].西安石油大学, 2022.

# Analysis of Welding Quality Control in the Manufacturing Process of Large-Scale Chemical Steel Structures

Yingyi Mo

China National Petroleum Corporation Sixth Construction Company, Guilin, Guangxi, 541004, China

## Abstract

Large steel structures in chemical plants have the characteristics of large size and complex and harsh service environment, and welding quality is the core guarantee for their long-term safe and stable operation. This article analyzes the key characteristic requirements of welding quality (bearing capacity, sealing, corrosion resistance), systematically sorts out the selection and management of raw materials, personnel qualifications and skills, process management and execution

## Keywords

Chemical steel structure; Welding quality control; Non destructive testing; Process evaluation; Intelligent monitoring

## 化工大型钢结构制造过程中的焊接质量控制分析

莫英毅

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541004

## 摘要

化工装置大型钢结构具有尺寸大、服役环境复杂苛刻的特点, 焊接质量是其长期安全稳定运行的核心保障。本文分析了焊接质量的关键特性要求(承载能力、密封性、抗腐蚀性), 系统梳理了原材料选择与管理、人员资质与技能、工艺管理与执行、检测评估等方面存在的控制难点与典型问题。重点提出了全面优化的控制策略, 包括智能化焊接过程监控技术推广、焊接工艺精细化与标准化、全过程无损检测能力强化以及构建焊接质量数字化追溯管理平台。

## 关键词

化工钢结构; 焊接质量控制; 无损检测; 工艺评定; 智能监控

## 1 引言

化工行业大型钢结构是支撑现代石油化工、煤化工、精细化工等装置安全运行的核心骨架, 其规模庞大、结构复杂且服役条件极其严苛, 常面临高温高压、强腐蚀介质等挑战。焊接作为钢结构制造过程中最为关键的连接工艺, 其质量好坏直接决定了整体结构的承载能力、密封可靠性与长期使用的耐久性。焊缝区域若存在缺陷或性能不足, 极易成为设备早期失效的薄弱环节, 引发介质泄漏甚至结构坍塌等灾难性事故, 造成巨大经济损失和不可逆的社会环境影响。

## 2 化工大型钢结构焊接质量的核心要求与控制难点

### 2.1 焊接质量特性要求

工业大件焊缝焊接质量的特殊性首要表现在需要实现的性能指标方面。一方面, 对于大型工业建筑钢结构, 结构

本身需要承受装载物料质量、内压、风压力、地震等载荷作用, 所以焊缝需要与母材达到相同的静强、疲劳强和冲击韧度要求, 保证结构工作在各种极限条件下的整体稳定性和抗脆断能力; 另一方面, 大型化工建筑钢结构焊接结构均为盛放易燃、易爆、有毒或精制等化工介质的容器, 故焊缝与热影响区绝对不允许有任何贯穿性或可成长为通气通道的局部缺陷存在; 再者, 对于某些工业建筑钢结构来讲, 还需要在高温硫、湿硫化氢硫酸、酸性水等腐蚀环境中服役, 焊缝需要获得良好的化学组分设计、冶金质量以及微观结构形态, 以保证抵抗多种化学腐蚀环境引发的失效倾向; 此外, 对于工业建筑钢结构而言, 还希望其需要在使用过程中可能出现的超温超压等事故条件下需要保持一定的塑性、韧性储备以及承受高温蠕变破坏的能力。

### 2.2 关键控制难点与典型问题

由于制造过程的质量控制有上述要求, 因此在对各种原料及焊材进行管理时, 母材尤其是高强钢或特种合金钢的化学成分变异、含硫高、含磷高、碳当量高以及污染(铁锈、油脂), 焊材的管理不好受潮或烘焙不到位等原因, 极易引起热裂纹(结晶裂纹)、冷裂纹、气孔和夹渣等在焊接

【作者简介】莫英毅(1997—), 男, 中国广西梧州人, 本科, 助理工程师, 从事石油化工类研究。

过程中引起；某沿海石化工程不锈钢管道焊接曾发生由于焊条没有按规定烘干，焊缝中多见气孔等超标现象，致使返修延误工期。人员资质及技术操作水平是焊工作业过程中质量控制的薄弱点和根本原因。焊工资质不符合要求、培训不到位、经验不足，操作过程中焊接工艺不合理、摆动不稳定、层间清理不清、面对复杂位置处理不当等极易产生未熔合、夹渣、成形质量不良、咬边等缺陷；焊接工艺的管理难度大、规范化程度高。焊评覆盖面不到位，对节点复杂部位或新材料的特点了解不够；大件结构焊接过程不能编制合理的焊接顺序，拘束应力控制不力，导致超过设计允许的结构整体变形量及有害的残余应力累积；预热、后热和层间温度不能准确地控制，极易导致产生更多的冷裂纹和再热裂纹；焊接过程相关工艺参数监控不到位，出现工艺纪律不严或执行不到位造成的质量波动；检测分析的局限性与深入性不到位等。常规检测方式存在盲区，对薄壁小径管对接接头、裂纹型缺陷（尤其是微裂纹）、残余应力场的精确评估等常显得力不从心，制约了对焊缝质量全面、准确、及时的把控能力。

### 3 焊接质量控制的关键环节与问题分析

#### 3.1 原材料控制与前期准备

前工序确保焊材和母材的质量。母材应按设计和规范要求验收化学成分和力学性能试验报告，特别是碳当量和影响材料的焊接性与裂纹敏感性的金属的夹杂物等含量是否合格。焊材应存放在干净、干燥、整洁的环境中，焊条、焊剂应按厂方和焊材工艺规程要求及时烘干，烘干温度和时间要做好记录，随取随用，用过的焊条应按规定重新烘干使用或废除。焊前母材和焊接表面的打磨、清理也很关键，要清理焊道和两侧各一定范围内的油污、铁锈、氧化皮和水份以及其它可能阻碍焊接过程顺利进行并降低焊缝质量的污物，装配间隙、错口量（错口）、坡口角度的尺寸应严格参照焊接工艺卡的要求，这是获得良好熔合和成形焊道的前提。焊前预热是提高焊缝的抗裂能力的有效方法。

#### 3.2 焊接工艺管理及过程执行

焊接作业规程为焊工作业的基本依据，焊接工艺编制必须以焊接工艺评定为依据，其评定范围应能够覆盖实际产品接头类型、材料、厚度组合、焊接位置及热输入的要求，具体包含接头图、坡口形式、焊接方法、填充金属规格型号、具体焊接工艺参数范围、层道布置、预热和后热要求、保护气体流量、焊渣清理要求等具体作业要点。焊接过程尽可能实施稳定焊接参数运行，对重点焊缝进行焊接参数监控记录并进行分析，为具体产品焊工作业工艺执行情况进行质量保证以及质量追溯提供证据支持。复杂或大型结构件焊接时应合理进行整体焊接顺序及焊接方向安排，实施分散热量输入，尽可能对称施焊，有效控制变形及应力的集聚。多层多道焊时严格控制层间温度范围，对层间温度过高导致的金属韧性损失及过低造成冷裂纹发生的机会要进行控制，同时

必须彻底清理前道焊缝表面的熔渣和飞溅物。焊工应严格依据批准的 WPS 作业，对整个焊缝焊接的焊道成形必须进行关注，保证焊道与焊道之间的焊道与坡口的侧面之间良好的熔合<sup>[1]</sup>。

#### 3.3 无损检测方法与有效性评估

无损检测是检测焊缝质量的主要手段，最常用的几类检测技术各有侧重：射线检测有利于观察体积型缺陷，但其方向性敏感并存在射线辐射危害问题；超声检测有利于观察裂纹、未融合等面状（横向）缺陷，利于机动检测，但其受操作工技能影响较大，并与检测现场耦合质量相关；磁粉检测和渗透检测适用于观察表面或近表面（浅）裂纹、气孔等开放性缺陷；对于不同的接头形式、受力状态、失效模式风险及其标准规范要求，应当以适宜的无损检测方法和适当的检测时机，合理选择、适当搭配、灵活运用各种无损检测技术。对于残余应力和变形的数值评估和估算，通过应变测量手段和数值模拟手段的综合判断尤为重要<sup>[2]</sup>。

### 4 焊接质量控制的优化策略

#### 4.1 焊接过程智能化监测与控制技术应用

大数据和物联网技术的工业制造产品设备管理。采用大数据和物联网实现智能化设备的管理。在焊机和焊机附近设置高精度传感器，采集焊接电流、电压、送丝电流、保护气流量、焊接热输入（焊接能量密度），建立相应的多传感器融合信息获取技术，对焊缝焊枪（状态如熔池宽度、深度、熔池温度均匀性、稳定性、缺陷倾向如气孔倾向、飞溅倾向）、电弧行为进行多源信息的实时和同步感知和分析，大数据驱动的焊接状态判断模型与缺陷的早期预警人工智能算法和人机协同焊接作业界面设计，根据实时传感分析结果，人工干预或反馈控制装置自动更改（例如自适应调节设备参数）的焊接工艺参数，及时干预，避免焊接缺陷的产生；应大力推广焊接辅助系统，如焊接过程中激光视觉辅助引导与跟踪系统（主要应用在自动化程度高、焊机为轨道式焊机或自动焊接机器人工作站上），提高复杂空间位置焊缝的一致性和熔透的一致性；大数据管理建立企业级大数据平台，对全过程焊接工艺参数大数据的实时在线和离线分析研究（包括海量的数据存储与在线关联分析），大数据知识挖掘的工艺改进、生产质量和设备（生产装备）效能提升的闭环管理。

#### 4.2 焊接工艺精细化评定与标准化管理

从应对新材料、新结构、新服役环境的要求出发，加强研究焊接热行为规律，探索基于材料物理特性和接头力学特性的焊接接头设计优化方法；建立焊接热输入、冷却速度与接头焊缝及热影响区组织（晶粒度、相比例）、性能（韧度、强度）、抗裂特性（冷裂、热裂、再热裂）的精确映射模型，以指导确定合理的工艺参数；解决大厚板、复杂节点结构焊接顺序优化算法及控制有害焊接残余应力与变形的合理措施（如热输入控制、反变形、约束状态调整、温差拉伸）。进

行基于远高于基本规范要求的宽覆盖、高冗余的焊接工艺评定：采用最低施焊温度下最厚板、最难施焊位置、最苛刻的异种钢接头组合等最不利条件下的试验验证确保工艺的绝对可靠性和适应性。加强焊接工艺文件的动态管控，建立从评定依据、WPS编制、审核批准、现场发放、技术交底、执行监督、完工归档的全过程电子化流程，并与生产过程控制信息系统(MES)衔接，实现唯一正确版本的工艺文件在正确的时间内流向到操作岗位<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 无损检测能力提升与精准评估

积极引进和转化先进的无损检测方法。推广相控阵超声的电子扫描和声束聚焦方式，大幅提高复杂几何形状焊缝缺陷（特别是裂纹和未熔合）的发现率、定位准确率、定量精准度和成像直观性；应用衍射时差法检测焊缝根部部位高效、高精度无损检测方法；发展多通道、电磁超声等多种新技术攻克特殊构型的检测问题。锻造一支高水平的无损检测人才队伍，要严格执行资格认证（执行国家标准和行业更严格要求）、持续专业技能再培训和能力分级（I-II-III级）计划、定期组织操作技能比武（能力验证）、运用基于人工智能的缺陷自动识别和分类技术提高检测图谱判读的精准率和效率以及差异化的个人经验产生的误判率；广泛应用数字化射线，实现射线图像放大、有效存储、远程专家评片和结构化的档案管理。构建焊接接头完整性的综合分析评价体系，综合考虑无损检测结果、材料性能数据、结构应力分析（焊接残余应力的实测或模拟）、服役环境数据和寿命预测模型，对关键焊缝的服役安全性进行更加科学的评价和排序。

#### 4.4 构建焊接质量全流程追溯与管理系统

建设基于一物一码或焊接日志辨认的质量追溯平台：每个焊缝对应一个唯一编码，记录其材料（钢种、炉批号）、焊材（牌号、批号、烘焙记录）、焊工（资格证书）及其工装（设备）、焊接工艺规程（WPS）、在线监控的数据曲线、无损检测（NDT）报告（报告编号、等级）、回转修复记录等，构建公司统一的焊接质量数据集成平台，实现设计—工艺方案—材料—生产制造—质量控制—质量追溯之间的过程互联互通，消除信息孤岛。在平台上开展基于大数据统计过程质量的实时可视化分析和异常自动报警，实现质量问题的根

因追踪、预警和辅助决策；建立基于预测建模的质量趋势分析，实时预报异常变化的系统性质量隐患；建立焊接质量过程的动态检查与优化机制，进行供应商焊接外包分包商的运行表现绩效、焊工技能稳定性、焊机设备状态影响度、焊接工艺规程有效性等考核，系统进行质量结果动态分级；依托知识工程，将沉淀的个人智慧、典型实例、失败分析报告、最佳实践文件化、结构化并存储于焊点数据库，使之可查询、可学习、可推送，作为焊接质量“数据库”服务于持续改善、促进人员赋能，并最终形成以数据为依据、全员参与、持续改善为核心的焊接质量管理文化。

## 5 结语

化工大型钢结构焊接质量问题，已经从单纯的制造工艺走向了一项涉及到设计、选材、制造、试验、评定乃至服役状态监测的系统性的全方位质量控制管理问题。其结果在很大程度上影响着设备的安全、稳定运行及使用寿命、制造成本等诸多方面。实践经验及技术研究表明确保大型化工装备焊接质量，必须认识到焊接质量问题涉及到材料的性能、工艺的合理、人的因素、设备的控制以及体系等多个方面，某个方面没有问题并不意味着焊接质量没有问题，通过智能化过程监控的技术支撑、技术工艺的细致化和规范化管理、无损检测的装备及能力的现代化更新和构建、基于全流程数字化的过程数据追溯的质量生态系统构建来实现大型化工装备制造关键焊缝质量的最优控制，通过技术的创新及管理的精益相结合，从质量和责任方面实现对各个环节质量的有力支撑，全员责任、体系管控和精准控制，实现每一道焊缝质量的保证，是最终支撑化工行业大型装备精品建造和国家能源化工工程项目本质安全的基础。

## 参考文献

- [1] 姚凯洵,王树强,陈光凯等.钢结构参数化设计与机器人焊接离线编程应用[J].机械工程与自动化,2024(2):31-33.
- [2] 杨喜忠.加强环焊接工艺改进在海洋钢结构中的应用[J].石油和化工设备,2024,27(10):78-81.
- [3] 张刚,杨立军,田国栋.海洋石油钻井平台钢结构焊接相关问题研究分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(9):45-47.

# Study on the Importance and Strategies of Constructing a Dual Prevention Mechanism in Enterprises with Major Hazard Sources

Zhujin Tang

Jiangsu Ruijing Safety Technology Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224000, China

## Abstract

Work safety is an insurmountable red line for the development of industrial society. Enterprises with major hazard sources, due to the high energy and high risks inherent in their production activities, have always been the top priority of risk prevention and control. The traditional safety management model tends to focus on post-event response and rectification, and has limitations in the initiative and systematicness of accident prevention. Faced with increasingly complex production systems and strict regulatory requirements, promoting the shift of safety management to the front end and establishing a dual defense line of pre-event prevention and in-event control has become an industry consensus and policy orientation. The dual prevention mechanism, through the organic combination of hierarchical risk control and hidden danger investigation and rectification, provides enterprises with a structured and process-oriented safety management tool. This paper aims to deeply analyze the special significance of this mechanism for enterprises with major hazard sources, and systematically discuss the key strategies for its implementation based on management practices, so as to provide reference for relevant enterprises to improve the scientific and precise level of safety management.

## Keywords

Enterprises with Major Hazard Sources; Dual Prevention Mechanism; Importance; Construction Strategies

## 重大危险源企业双重预防机制建设的重要性与策略研究

唐祝瑾

江苏睿境安全技术有限公司, 中国·江苏 盐城 224000

## 摘要

安全生产是工业社会发展不可逾越的红线,而重大危险源企业因其生产活动中蕴含的高能量与高风险,始终是风险防控的重中之重。传统安全管理模式往往侧重于事后响应与整改,在事故预防的主动性与系统性上存在局限。面对日益复杂的生产系统和严格的监管要求,推动安全管理关口前移,构建一套事前预防、事中控制的双重防线,已成为行业共识与政策导向。双重预防机制通过风险分级管控与隐患排查治理的有机结合,为企业提供了一种结构化、流程化的安全管理工具。本文旨在深入剖析该机制对于重大危险源企业的特殊重要意义,并基于管理实践,系统论述其落地实施的关键策略,以期为相关企业提升安全管理科学化、精准化水平提供参考。

## 关键词

重大危险源企业; 双重预防机制; 重要性; 建设策略

## 1 引言

双重预防机制的来从根源上抑制重特大事故的发生,把法定安全生产主体责任转变为具体的管理行为,持续推动企业安全基础实现根本性的提升。基于这种情况,本文给出了一套综合性的实施策略,包括科学构建风险辨识分级体系、闭环完善隐患排查治理流程、依靠技术赋能打造智能监测预警平台、实战强化应急响应处置能力以及纵深推行全员安全责任制。这些策略注重管理要素和技术手段的融合,

为企业提供了一种逻辑连贯且有较强可操作性的行动框架,促使双重预防机制从理论要求切实转变为企业内部常态化、制度化的运行实践,稳固安全生产长效机制。

## 2 重大危险源企业概述

重大危险源企业一般是指在生产、加工、储存或者使用环节当中,涉及易燃易爆以及有毒有害等危险物质,并且这些物质的数量等于或者超过国家规定临界量的生产经营单位。这类企业是国民经济的关键构成部分,大多集中在化工、石油、冶金、能源以及大型仓储物流等领域<sup>[1]</sup>。因为其生产活动本身有高能量和高风险的特性,一旦关键环节失去控制,很容易引发火灾、爆炸或者毒物泄漏等灾难性事故,

【作者简介】唐祝瑾(1984—),男,中国江苏东台人,本科,工程师,从事化工安全研究。

可能造成本企业人员的重大伤亡以及财产的巨大损失，还可能对周边社区公共安全和生态环境产生严重的扩散性影响。重大危险源企业一直是安全生产监管工作的重点，其自身的安全管理能力和水平，直接关系到区域乃至行业安全生产形势的整体稳定。

### 3 重大危险源企业双重预防机制建设的重要性

#### 3.1 防范重特大安全事故

传统安全管理模式大多时候着重于事后应急以及整改方面，然而双重预防机制却把关口往前移，它要求企业主动并且系统地去辨识生产运营各个环节里本来就存在的潜在风险，还要依据科学的标准来进行评估以及分级。这样一种有前瞻性的工作模式，使得企业不得不如同开展精密诊断那般，仔细审视工艺流程、设备设施、作业环境以及人员行为之中那些有可能引发严重后果的薄弱之处。依靠针对识别出来的风险，重大风险，实施有针对性的管控措施并且持续监测其状态，企业可有效地干预事故发生的因果链条，把事故发生概率降低到最低限度。这就好比是给企业预先安装了一套功能强大的“预警雷达”以及“免疫系统”，从根源上遏制了火灾、爆炸、有毒有害物质泄漏等灾难性事件的发生，为保障人员生命、企业资产以及周边环境安全构建起了一道坚实的第一道防线。

#### 3.2 落实企业主体责任

双重预防机制把抽象的法律责任转变成“风险辨识管控”以及“隐患排查治理”这两项具体且连贯的核心任务，为企业履行主体责任打造了标准化、痕迹化的操作框架。该机制的运行促使企业建立全员参与的风险辨识评估制度以及常态化的隐患排查治理流程，把企业主要负责人的领导责任、管理人员的监管责任和一线员工的岗位安全责任层层压实，贯穿于日常工作的各个环节。此过程强化了内部管理的责任链条，还让企业的安全管理状态可被衡量、可追溯，有力推动了企业安全管理从“被动合规”朝着“主动建构”的深刻转变。

#### 3.3 提升本质安全水平

双重预防机制的动态循环过程，可持续不断地揭示出企业在设备工艺、技术方案以及管理模式方面所存在的固有缺陷与不足之处。这些基于实际风险评估而得出的发现，为企业精准地实施安全技术改造、优化工艺流程以及合理配置安全资源提供了科学的决策依据。企业可依据风险等级，把有限的投入优先用于消除重大风险隐患，像改造高风险设备、升级自动化控制系统等，以此实现安全资源效益的最大化。更为关键的是，引导全体员工持续参与风险管控与隐患排查治理的实践，本身就是一种深刻的安全文化建设过程。这可培育全体员工的风险意识与预防思维，让安全真正融入组织的日常行为与决策习惯，在硬件设施与管理文化的协同演进中，稳步夯实企业可持续发展的安全根基<sup>[2]</sup>。

## 4 重大危险源企业双重预防机制建设的有效策略

### 4.1 构建风险辨识分级体系

企业要综合运用工作危害分析、安全检查表、故障模式与影响分析等专业方法，还要积极吸收一线员工的实践经验，以此做到辨识没有遗漏。在全面辨识之后，企业要依据国家相关标准与指南，结合事故发生的可能性以及后果严重程度，制定本企业的风险分级标准，把辨识出的风险科学划分成重大风险、较大风险、一般风险和低风险等不同等级<sup>[3]</sup>。需要注意的是，这个体系不是固定不变的，企业要建立风险动态评估与更新机制，当工艺、设备、材料或法规出现变化时，要及时重新进行辨识与分级，保证风险信息一直处于最新且准确的状态。风险分级的结果要直观地展示在生产现场，凭借公告栏、风险分布图、设备风险告知卡等形式，让各级人员，现场作业人员，可清楚知道所处环境的危险源及其等级，为后续的针对性管控打下坚实基础。

### 4.2 完善隐患排查治理流程

企业需要按照前面提到的风险分级管控措施，制定一份详细的隐患排查标准清单，明确各类风险点对应的检查内容、频次、方法以及责任人。隐患排查工作要采用日常巡检、专项排查、综合检查以及季节性检查等多种形式相结合，覆盖所有区域和环节。对于排查出的事故隐患，要马上进行记录、评估和分级，并且按照“定整改措施、定责任人员、定资金来源、定完成期限、定应急预案”的原则来落实治理。治理过程中，企业要实施从隐患上报、整改、验收到销号的全流程跟踪管理，保证每一个隐患可得到有效闭环处理。对于重大事故隐患，更要提高治理层级，由企业主要负责人牵头督办，还要依照规定向属地监管部门报告。企业应建立隐患排查治理的激励与约束机制，鼓励员工主动报告身边隐患，对整改不力的部门或个人进行问责，形成全员参与、持续改进的隐患排查治理文化。



图1 双重预防机制重点

### 4.3 建立智能监测预警平台

企业可围绕重大危险源以及高风险区域，去部署如传感器、视频监控设备、气体检测仪等智能感知装置，以此对温度、压力、液位、气体浓度、设备运行状态等关键参数展开实时在线采集以及传输工作。该平台需要集成数据存储、分析、建模以及可视化等功能，借助设置分级预警阈值，达成对异常状态以及趋势偏离的自动报警。智能化所有的优势是可以突破传统人工巡检在时间和空间上的限制，达成对危

险源的二十四小时不间断监控,并且利用大数据分析技术,从海量数据里挖掘潜在的风险规律以及事故前兆,将被动响应转变为主动预测<sup>[4]</sup>。平台的建设应当重视系统的开放性与兼容性,保证和企业现有的自动化控制系统、安全管理系统以及应急指挥系统达成数据互通以及功能联动。预警信息的推送要精准且迅速,可直接传达到相关岗位的负责人与操作人员那里,甚至与地方应急管理平台的监管平台实现对接,为及时干预以及科学决策提供有力的技术支撑。

#### 4.4 强化应急响应处置能力

在新的时代背景下,企业的风险防控受到广泛关注,应明确重大危险源的特征,利用合理化路径规范重大危险源管理方案,促使相关风险降至最低。企业需依据风险评估结果,针对各类可能出现的生产安全事故,重大风险演变成的事故,制定切实可行的专项应急预案与现场处置方案。预案编制要重视实用性、针对性以及可操作性,明确应急组织体系、响应程序、处置措施以及资源保障。企业不能让预案闲置,而要定期组织不同层级、不同形式的应急演练,演练要贴近实战,包括预警、指挥、疏散、救援、处置、舆情应对等整个过程。依靠演练,检验预案有效性、磨合应急机制、锻炼救援队伍,针对暴露问题及时修订完善预案<sup>[5]</sup>。企业要按照预案要求,配备充足应急救援器材、设备和物资,建立日常维护保养制度,保证其随时处于完好可用状态。事故发生时,企业应迅速启动应急响应,依照预案科学、有序开展先期处置,有效控制事故扩大,最大程度减少人员伤亡和财产损失,保障自身的稳步发展,维护人员的生命财产安全。

#### 4.5 推行全员安全责任制

企业需构建起覆盖从主要负责人直至一线员工的安全生产责任网络,此网络呈现出“层层负责、人人有责、各负其责”的特点,要把风险分级管控以及隐患排查治理的各项工作职责,逐一分解并落实到每一个部门、每一个岗位以及每一位员工身上,且借助签订安全生产责任书等方式使其得以固化。仅仅明确责任并不足够,企业还需建立与之紧密关联的绩效考核与奖惩机制,将员工在风险辨识、隐患报告、安全行为等表现纳入日常考核以及收入分配范畴,达成安全

生产责任与个人利益的有机统一<sup>[6]</sup>。持续的教育培训是必不可少的,企业应设计出系统化的培训课程,保证所有员工都可深入领会双重预防机制的原理、要求以及自身在其中所扮演的角色和承担的任务,掌握必要的安全技能以及应急处置能力,实现从“要我安全”向“我要安全”“我会安全”的转变。唯有依靠责任落实、考核驱动以及文化浸润,才可真正激发每一位员工的安全内生动力,促使双重预防机制从纸面的制度转化为全员自觉的行动。

## 5 结语

综上所述,双重预防机制的建设是重大危险源企业夯实安全根基、实现可持续发展的必然选择。这一机制并非孤立的管理制度,而是一套需要全员参与、全程管控并持续改进的动态安全治理体系。企业必须认识到,推行双重预防机制是一个将安全理念深度融入运营血脉的过程,需要管理层坚定的承诺与资源投入,也需要每一位员工责任意识的唤醒与行动落实。唯有将风险管控的“层层设防”与隐患治理的“环环相扣”落到实处,才能有效化解重大安全风险,真正构建起预防为主、长治久安的企业安全生态。

## 参考文献

- [1] 胡波,徐厚友,张明山,张明,周鹏鹏,赵凤丽.基于LA-YOLOv8n算法的重大危险源液氨站装卸作业隐患检测[J].工业安全与环保,2025,51(11):72-77.
- [2] 陆飞.盾构机穿越重大危险源施工研究与分析——以成都轨道交通27号线一期工程为例[J].广东建材,2025,41(02):156-158.
- [3] 凌飞,李怡锦,鲜海滢,刘鸿坤.危险化学品重大危险源监测预警研究——以四川省实践为例[J].中国应急管理,2024,(06):59-62.
- [4] 王继宏,杨利平,黄如金,吴忠新,高增翔,惠小强.危险化学品重大危险源包保责任制“135790”安全管理实践[J].化工管理,2023,(S1):69-73.
- [5] 余元创.双重预防机制在油库重大危险源及隐患管理中的应用价值研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(13):1-3.
- [6] 王继宏,杨利平,黄如金,吴忠新,高增翔,惠小强.危险化学品重大危险源包保责任制“135790”安全管理实践[J].化工管理,2023,(S1):69-73.

# Application of Chemical Process Intensification Technology in Safe and Efficient Production

Huixing Chen

Lianyungang Xinjiang Environmental Protection Materials Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

## Abstract

As an important means of improving production efficiency and ensuring safety, chemical process intensification technologies have been widely applied in the chemical industry in recent years. By optimizing reaction processes, enhancing energy efficiency, and improving equipment operation, intensification technologies have significantly enhanced both production efficiency and safety. This paper analyzes the definition, development history, and main types of chemical process intensification technologies, discusses their key roles in safety and efficient production, and provides a detailed introduction to commonly used intensification technologies in the chemical industry, such as ultrasound and hypergravity, and their applications in different fields. Overall, the promotion and application of chemical process intensification technologies have not only improved the economic benefits of production but also contributed to the sustainable development of the industry.

## Keywords

Chemical process; Intensification technology; Safety production; Efficient production; Technology optimization

## 化工过程强化技术在安全高效生产中的应用

陈惠星

连云港新江环保材料有限公司, 中国·江苏 连云港 222000

## 摘要

化工过程强化技术作为提升生产效率和确保安全的重要手段,近年来在化工行业中得到了广泛应用。通过优化反应过程、提高能效和改进设备运行,强化技术显著改善了生产效率和安全性。本文分析了化工过程强化技术的定义、发展历程及主要类型,探讨了其在安全生产和高效生产中的关键作用,并对化工行业中常用的强化技术如超声波、超重力等技术在不同领域中的应用进行了详细介绍。总的来说,化工过程强化技术的推广和应用不仅提升了生产的经济效益,也推动了行业的可持续发展。

## 关键词

化工过程; 强化技术; 安全生产; 高效生产; 技术优化

## 1 引言

随着化工行业对生产效率和安全要求的不断提高,化工过程强化技术成为了提升产业竞争力的重要手段。近年来,强化技术通过不同的方式优化了化工反应过程中的各个环节,显著降低了能源消耗,提高了生产效率。同时,强化技术在控制安全风险、预防事故等方面也发挥了重要作用,成为确保化工生产安全的重要技术保障。本文将对化工过程强化技术的应用进行全面分析,重点探讨其在安全和高效生产中的关键应用,并提出技术实施和优化的相关策略。通过对相关文献的研究,结合实际案例,本文旨在为化工企业提

供技术支持,推动行业的创新和可持续发展。

## 2 化工过程强化技术概述

### 2.1 化工过程强化技术的定义与发展

化工过程强化技术是指在化工生产中,通过物理、化学、机械等手段,对传统的化学过程进行优化与改进,提升反应效率、节省能源消耗、提高生产安全性与环保性。随着科技的进步,强化技术逐渐成为化工行业现代化改造的核心工具之一。最早的化工过程强化技术以热交换技术为基础,随着对节能降耗要求的不断提高,各类新型技术相继出现,如超声波、微波、超重力等,均有着较强的技术创新性和经济性。这些技术通过提高反应速率、改善传热效果、强化传质过程等方式,推动了化工生产的高效、安全和绿色发展。特别是在能源紧张和环境保护压力增大的背景下,化工过程强化技术不仅提升了生产效率,也减少了对环境的负面影响。

【作者简介】陈惠星(1979—),男,中国江苏常熟人,本科,中级,从事多年专注化工安全生产、环保、节能等方面的研究。

## 2.2 化工过程强化技术的主要类型

化工过程强化技术涵盖了多个领域,涉及热力学、动力学以及材料科学等多个学科。常见的强化技术包括超声波强化、微波加热、超重力强化、气液两相流强化、光催化技术、纳米材料强化等。超声波技术利用高频声波激发介质中的微小气泡,促进反应物质的充分混合,从而提高反应速率。微波加热技术通过电磁波作用直接加热物质,比传统的热传导方式更为高效,能显著缩短反应时间。超重力技术利用高转速设备,通过离心力增强流体的混合与反应速率,适用于高粘度物料的处理。气液两相流强化技术则通过改变液相与气相的接触面积,提高传质效率。每种强化技术根据其不同的特点和适用条件,在化工生产中都发挥着重要作用,能够根据实际需要选择合适的技术进行优化<sup>[1]</sup>。

## 3 化工过程强化技术在安全生产中的应用

### 3.1 强化技术对安全管理的提升作用

化工过程强化技术对安全管理的提升作用显著。通过优化反应过程和传热过程,强化技术能够降低设备的热应力和机械应力,从而减少因设备故障引发的安全事故。例如,微波加热技术通过均匀加热物料,避免了局部过热现象,降低了高温引发设备爆炸的风险。超声波技术则通过加速混合与反应过程,减少了反应容器内的积压物质,降低了因反应物积聚过多引发的爆炸风险。在这些技术的帮助下,生产环境变得更加安全可靠,同时也能提高安全生产管理的整体效率,使得化工生产中潜在的风险得以有效规避。

### 3.2 化工过程强化技术在安全风险控制中的作用

化工过程强化技术在安全风险控制中发挥着不可忽视的作用。许多化学反应涉及高度危险的物质与条件,如何控制反应的温度、压力、浓度等关键参数直接关系到生产过程的安全性。强化技术通过提高反应速率,缩短反应时间,减少了长时间暴露于高温高压环境中的可能性,降低了发生意外的几率。此外,强化技术还可以在反应过程中实时监测反应物质的变化,优化反应条件,减少过量反应或不完全反应的风险。在反应堆的设计与操作中,强化技术帮助实现了自动化、智能化控制,减少了人为操作失误引发的事故。

## 4 化工过程强化技术在高效生产中的应用

### 4.1 强化技术对生产效率的提升作用

化工过程强化技术在提升生产效率方面具有显著的作用。这些技术通过加速反应速率、提高能效、减少生产时间等方式,极大地提高了化工生产的效率。比如,超声波技术通过产生高频的声波,形成空化效应,促进了反应物质的均匀混合和反应物分子的激活,使得反应更为迅速。在一些反应中,超声波技术能够将反应时间缩短20%至40%,同时提高反应物的转化率。微波加热技术通过电磁波的作用,直接加热反应物,而不需要通过热传导的方式,能够显著减少热损失并缩短加热时间。这一技术已被广泛应用于化工领域

中的多种反应,如在聚合反应中,通过微波加热可以加速反应进程,使得反应时间减少30%以上。除此之外,超重力技术也广泛应用于高粘度物料的混合与反应中,通过高速旋转产生的离心力增加了物料的混合效率,从而加速了反应过程,提高了整体生产效率。通过这些强化技术的应用,化工企业能够在减少时间消耗的同时提高产量和产品质量,使得整个生产过程变得更加高效和经济。

### 4.2 强化技术在能源消耗优化中的应用

能源消耗在化工生产中占据了重要比例,如何优化能源使用,提高能效,已经成为化工企业面临的重要任务。强化技术通过提高生产过程的能效,有效降低了能源消耗。以超重力技术为例,超重力通过旋转离心力强化物料的混合与反应,这不仅提高了反应速率,也减少了对高温加热的依赖,从而减少了能源消耗。在某些反应中,使用超重力技术能够将反应效率提高30%以上,同时减少能量消耗约20%。微波加热技术的应用也极大优化了能源消耗。传统的加热方式通常需要通过热传导和对流进行能量传递,这往往会导致大量的能源浪费。微波技术则通过直接加热物料,大大减少了热损失,在一些应用中,微波加热可以使反应过程的能效提升约40%。此外,强化热交换技术也有助于能源优化,采用高效的热交换器设计可以提高换热效率,减少热能的浪费。通过这些技术的应用,化工企业不仅在提高生产效率方面取得了进展,同时也大幅降低了生产中的能源消耗,推动了绿色生产和节能减排的目标<sup>[2]</sup>。

### 4.3 强化技术在原材料利用效率提升中的作用

原材料利用效率直接关系到化工生产成本和资源利用的可持续性。强化技术通过提高反应效率、增强物质的传质和传热能力,显著提升了原材料的利用率。例如,超声波技术能够通过空化作用和声流作用,增加物料的接触面积,使反应更为彻底。采用超声波技术后,一些反应物质的转化率可提高20%至30%。在多相反应中,超声波的应用能够加速液相和气相的混合,缩短反应时间,减少原材料的浪费。微波加热技术通过加热反应物的直接作用,也提高了原材料的利用效率。在某些聚合反应中,微波技术能够加速反应速率,降低未反应物料的残留量,从而减少原料的消耗和生产过程中不必要的损失。超重力技术在某些高粘度液体和固体物料的反应中也有着显著的应用,通过增加物料之间的接触,强化物料的反应效率,减少不反应物料的积累。在某些生产过程中,超重力技术能够使原材料利用率提高15%至20%。通过强化技术的应用,化工企业能够更高效地利用原材料,减少资源浪费,降低生产成本,同时也符合可持续发展的要求。

## 5 化工过程强化技术的实施与优化

### 5.1 强化技术实施的步骤与关键环节

化工过程强化技术的实施需要经过严格的规划与组织。

首先,企业应对现有的生产工艺进行深入分析,识别出在生产过程中存在的瓶颈环节和技术难点。例如,某些反应过程中的能量消耗较大,或存在物料不均匀的现象,需要通过强化技术来进行改进。然后,选择适合的强化技术进行实验,测试其在实际生产中的适用性。通过对比不同技术在实际应用中的效果,企业可以选出最合适的强化技术,如超声波、微波或超重力技术。实施过程中,还需要对设备进行调试,确保强化技术能够在设备中得到稳定应用。同时,应制定详细的操作流程和标准,确保技术的顺利应用和运行。关键环节包括技术设备的安装与调试、操作人员的培训以及运行过程中数据的实时监控。在技术实施后,企业应定期评估其效果,并通过反馈机制进行调整优化,确保强化技术能够长期高效稳定运行<sup>[3]</sup>。

### 5.2 化工过程强化技术的优化策略

化工过程强化技术的优化是提高生产效率、降低能源消耗和原材料浪费的关键。优化策略应从技术本身的选择、设备的更新、操作流程的改进等多个方面入手。首先,选择适合的强化技术是优化的基础,企业需要根据反应类型、物料特性及生产规模等因素,合理选择超声波、微波、超重力等技术进行应用。其次,强化技术的优化离不开设备的更新换代,采用新型、高效的设备能够最大化技术的效能。例如,在热交换过程中,应用高效换热器能够提高热能利用效率,减少热能浪费。在反应器的设计上,采用优化的反应器结构和增强型传热技术,能够有效提升反应速率和能效,进一步降低能源消耗。最后,操作流程的优化也是强化技术应用中不可忽视的环节,通过数据分析和智能控制系统的引入,可以实时监控和调整反应过程中的温度、压力等关键参数,使生产更加精细化和高效化。通过多方位的优化措施,强化技术能够得到充分发挥,推动化工企业向更加高效、绿色的生产方式转型。

### 5.3 强化技术实施中的数据监控与反馈机制

数据监控与反馈机制在强化技术实施中的作用至关重要。首先,实施强化技术时,必须建立完善的监控系统,实时采集反应过程中各项关键数据,如反应温度、压力、反应

物浓度、能效等。这些数据能够为生产过程的优化提供基础支持。通过传感器和数据采集设备,企业可以实时监测反应器内部的状态,确保强化技术在最佳状态下运行。其次,数据的实时分析与反馈机制是确保强化技术成功应用的核心。在生产过程中,系统将实时分析采集到的数据,自动调整反应条件,确保反应在最佳范围内进行。例如,温度过高或过低时,系统能够自动调整加热装置,保证反应稳定进行。此外,反馈机制还可以帮助操作人员及时发现设备故障或运行异常,通过预警机制减少事故发生的可能性。在强化技术的应用中,通过完善的数据监控与反馈机制,生产过程可以更加精确和高效,保障企业长期稳定运行<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

化工过程强化技术作为提升生产效率、优化能源利用和保障安全生产的重要手段,已经在现代化化工生产中展现出巨大的潜力与优势。通过应用超声波、微波、超重力等强化技术,不仅可以显著提高反应速率、原材料的利用效率,还能有效减少能源消耗,降低生产成本。未来,企业应根据生产实际需求,灵活选择和优化强化技术,同时加强数据监控与反馈机制,确保技术的高效应用。通过不断优化技术和管理,化工企业将能够在提高生产效率的同时,实现更高的经济效益和环境效益,推动行业迈向更加智能化和绿色化的未来。

### 参考文献

- [1] 邓涛,陈喜蓉,朱丽华,李金辉.结构催化剂耦合反应精馏的化工过程强化技术在化工分离工程实验教学中的设计与探索[J].广东化工,2024,51(17):243-245+206.
- [2] 徐国亮.化工过程强化技术在丁腈胶乳生产过程中的应用[J].化学工程与装备,2023,(12):29-33.
- [3] 高峰,贡莹,杨秀娜,金平.超声波强化技术在化工过程中的应用进展[J].当代石油石化,2022,30(08):22-27.
- [4] 黄蓓,夏成浩,张春玲,匡文辉,邢文听,刘琛,杨素芬.超重力化工过程强化技术在涂料填料生产中的应用[J].河南化工,2018,35(05):12-14.

# Research on the overall safety planning and layout of chemical industrial parks

Zhiren Li

Xinjiang Chemical Design and Research Institute Co., Ltd., Wulumuqi, Xinjiang, 830013

## Abstract

With the continuous expansion of chemical park scales and the increasing safety risks, the safety planning and layout of chemical parks have become key issues in ensuring production safety, environmental protection, and social stability. This paper starts with the basic concept of chemical park safety planning, elaborates on the goals and significance of safety planning, and analyzes the main challenges faced by chemical parks in the process of safety planning. Through this study, the aim is to provide theoretical support and practical guidance for the safety planning and layout of chemical parks, promoting continuous improvement in park safety management.

## Keywords

Chemical park; Safety planning; Safety layout; Risk assessment; Intelligent monitoring

## 化工园区整体安全规划与布局研究

李志仁

新疆化工设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830013

## 摘要

随着化工园区规模的不断扩大和安全风险的日益增加,化工园区的安全规划与布局成为保障生产安全、环境保护和社会稳定的重要课题。本文从化工园区安全规划的基本概念入手,阐述了安全规划的目标与意义,分析了化工园区在安全规划过程中面临的主要挑战。通过本文的研究,旨在为化工园区的安全规划与布局提供理论支持和实践指导,推动园区安全管理的持续改进。

## 关键词

化工园区; 安全规划; 安全布局; 风险评估; 智能化监控

## 1 引言

化工园区作为化学品生产和储存的重要基地,承载着重要的经济和社会职能。然而,由于化学品的特殊性质及生产过程的复杂性,化工园区的安全问题一直是社会关注的焦点。随着化工园区建设规模的扩大及其所涉及的风险种类增多,园区的安全规划和布局显得尤为重要。有效的安全规划与布局不仅能够减少事故发生的概率,还能够降低事故造成的损失,保障园区内外环境的安全与可持续发展。本文将从化工园区安全规划的基本概念、要素、布局策略等方面进行深入探讨,旨在通过理论分析与实践研究,为园区的安全管理提供指导方案。同时,随着信息化技术和智能化系统的不断进步,如何将现代化技术融入园区安全规划也是当前研究

的重要方向。

## 2 化工园区安全规划的基本概念与重要性

### 2.1 化工园区安全规划的定义与目标

化工园区安全规划是指在园区建设和运营过程中,基于对各类安全风险的评估与分析,制定出一整套确保园区生产、环境、人员安全的策略和措施。其目标不仅是防范和减少事故的发生,还包括在发生事故时能够迅速有效地应对,确保损失最小化。安全规划覆盖的内容包括园区的功能分区、设备布局、人员管理、安全设施建设及应急响应机制等。有效的安全规划可以保障园区各项生产活动的顺利进行,防止突发事件的扩展,最终实现园区内外部环境的安全与稳定。

### 2.2 化工园区安全规划的意义

化工园区是典型的高危行业,涉及大量危险化学品的生产、存储和运输。其安全问题直接影响到园区的生产效率、环境保护及社会公共安全。因此,化工园区安全规划的实施

**【作者简介】**李志仁(1987—),男,中国甘肃武威人,硕士,副高级工程师,从事化工工艺及生产过程的本质安全及优化设计研究。

具有极其重要的意义。首先,良好的安全规划能够有效降低事故发生概率,防止危险源扩散。其次,安全规划能优化园区内部各项安全资源的配置,提高事故应对能力,确保快速响应和救援。再次,科学的安全规划能提升园区的可持续发展能力,促进经济效益和社会效益的双赢。通过完善的安全规划,园区不仅能保障生产安全,还能提升社会公众的信任与园区的品牌价值。

### 2.3 化工园区安全规划面临的挑战

化工园区安全规划在实施过程中面临多方面的挑战。首先,园区涉及的生产环节复杂,许多新工艺和设备的引入使得安全管理面临更高要求。其次,化学品的种类繁多且存在未知的危险性,园区在制定安全规划时必须考虑所有可能的风险并做出相应应对措施。此外,园区的安全规划需要与日益严格的法规要求相匹配,不仅要符合国家标准,还要适应地方性的政策要求。最后,园区安全规划的实施常常受到资金、技术和人员等多方面限制,难以在短时间内实现全面优化。如何克服这些挑战,确保安全规划的有效性与可操作性,是当前化工园区安全管理中的重要课题<sup>[1]</sup>。

## 3 化工园区安全规划的关键要素

### 3.1 安全风险评估与管控

安全风险评估与管控是化工园区安全规划中的基础性工作。风险评估通过分析园区的生产过程、化学品存储与使用情况、设备运行状况以及外部环境因素,识别潜在的安全隐患和危害源。通过定量与定性的分析,评估各类风险的发生概率和可能造成的后果。风险评估不仅关注事故发生的直接危害,还考虑到其可能引发的连锁反应。基于风险评估结果,园区需要制定科学的风险管控措施,采用先进的技术手段进行实时监控,并设置风险预警系统。数据支持方面,园区可以通过安装传感器和监测设备,实时采集环境数据和设备运行数据,利用大数据分析技术预测潜在风险。这样,园区能够在最短时间内识别风险源并采取预防措施,降低事故发生的概率。

### 3.2 园区内部安全管理体系建设

园区内部安全管理体系建设是确保安全规划有效实施的关键。该体系包括组织结构、责任分工、安全培训、制度建设等方面。首先,园区应建立明确的安全管理组织架构,设立专门的安全管理部门,明确安全管理职责,确保每个环节、每个人员都能履行自己的安全责任。其次,安全管理体系要有完善的安全规章制度,如安全操作规程、设备维护与检查标准、应急响应流程等。这些制度必须基于园区的实际情况,结合化工行业的安全要求进行设计。与此同时,园区还需要定期进行安全培训,提升员工的安全意识和操作技能。数据方面,园区可通过安全管理软件记录各项安全数据和事件,通过数据分析识别管理漏洞,进而改进管理体系。这样可以有效预防人为因素引起的安全事故。

### 3.3 应急响应与预案设计

应急响应与预案设计是化工园区安全规划中不可或缺的一部分。在突发事故发生时,园区能够迅速响应并采取有效措施,减轻事故对人员、财产和环境的影响。应急预案的设计应包括事件的预警、信息传递、现场处置、疏散撤离、救援等内容。针对不同类型事故(如火灾、泄漏、爆炸等),园区需要制定不同的应急预案,并进行模拟演练,以确保预案的可操作性和有效性。此外,应急响应中应充分利用现代化技术手段,如智能化监控系统、无人机巡检和数据分析平台,实时监控事故现场情况,获取关键信息,提供决策支持。园区应急响应系统的数据支持可以通过实时数据传输和监控,确保每一环节的响应时间最短,控制住事故蔓延的风险。

## 4 化工园区安全布局的原则与策略

### 4.1 功能分区与安全距离要求

化工园区的功能分区与安全距离要求是确保园区安全的关键因素。功能分区应依据化工产品的特性、生产工艺、设备要求以及安全风险等级进行合理划分。对于危险化学品的生产、储存和运输区域,应严格按照相关安全标准和国家法规进行布局,确保这些区域远离人群密集区和环境敏感区。安全距离要求是指根据化学品的危险特性(如易燃、易爆、腐蚀性等)和爆炸、泄漏等事故的可能后果,设置不同的安全距离。通过计算爆炸冲击波传播距离、泄漏扩散范围等数据,科学规划安全区域。园区内所有危险源设施的布局应确保事故发生时,事故影响范围能够被有效控制,避免对其他生产设施和人员造成威胁<sup>[2]</sup>。技术上,园区应利用计算流体力学(CFD)模型分析气体泄漏扩散路径,确保布局符合国际安全标准。

### 4.2 危险源识别与管控策略

危险源识别与管控策略是化工园区安全布局中的核心环节。危险源识别首先通过全面的风险评估,对园区内所有可能的危险源进行系统性识别,包括化学品、设备设施、操作过程及外部环境因素等。通过采用危险源识别技术(如Hazard and Operability Study, HAZOP)和失效模式效应分析(FMEA),结合历史事故数据,对园区内的潜在风险进行定量和定性分析。接着,根据识别的危险源,制定针对性的管控策略,包括风险分级、控制措施、预防手段及应急响应计划。技术上,园区可以利用风险评估软件、自动化检测设备和实时监控系统,持续监测危险源的状态和变化。通过数据采集和大数据分析,能够实时发现潜在风险,提前采取控制措施,减少安全事故的发生。

### 4.3 安全设施与设备的布局设计

园区内的安全设施与设备的布局设计应根据生产工艺、安全标准及风险评估结果进行。安全设施包括灭火系统、气体检测仪、泄压装置、消防水池等。设备布局应保证设施间有足够的间距,避免相互干扰和交叉污染。特别是在易

燃易爆区域,安全设施的布置要考虑到火灾、爆炸等极端情况的应对能力。技术上,园区可以通过消防模拟软件进行火灾蔓延的仿真计算,预测火灾可能的扩展路径和影响范围,从而优化消防设施的设置。同时,利用数字化平台实现设备的远程监控和故障诊断,确保设备的持续稳定运行,减少因设备故障引发的安全事故。

## 5 化工园区安全规划与布局的优化与提升

### 5.1 园区安全规划的持续优化路径

化工园区的安全规划应具有持续优化的能力,随着生产工艺和安全标准的变化,安全规划需定期进行调整和更新。园区应建立动态的安全管理机制,持续监控园区的安全状态,对新出现的安全隐患及时进行评估和处理。技术上,园区可以通过集成先进的风险评估工具和管理软件,实时更新园区安全规划。借助智能化技术对园区进行大数据分析,结合环境监测、设备运行数据和人员流动数据,动态评估安全规划的有效性,并依据结果进行优化改进。通过定期的安全演练与应急预案评估,确保安全规划在不同情况下都能有效实施。园区的优化路径还包括加强人员的安全意识教育和安全文化建设,使每一位员工都能参与到安全管理中来,确保安全规划得到全员执行<sup>[3]</sup>。

### 5.2 信息化技术在园区安全中的应用

信息化技术在园区安全中的应用,极大地提升了园区安全管理的效率与精确度。园区可以通过物联网(IoT)技术,将园区内的所有设备、传感器与管理平台连接,实时采集各类数据,包括设备运行状态、气体泄漏、温度压力等关键指标。通过数据传输与云计算平台,将这些数据进行集中管理和分析,为决策者提供实时的安全数据支持。技术上,园区可使用大数据分析技术,结合历史数据与实时数据,预测潜在的安全风险,提前制定应对措施。此外,信息化技术还可以通过数字孪生技术,为园区建立虚拟模型,模拟各类安全事件的发生与应对,为安全规划提供可行的技术方案。

### 5.3 智能化安全监控系统与数据分析

智能化安全监控系统利用传感器、摄像头、无人机等

设备,实时监控园区的安全状况。通过视频监控与智能分析技术,监测系统能够对生产线、危险源区域以及关键设施进行全方位监控,确保异常情况及时发现并报告。结合人工智能(AI)算法,监控系统能够对实时数据进行智能分析,识别出潜在的安全隐患并及时发出预警。技术上,园区可利用深度学习和模式识别技术,对传感器收集到的数据进行多维度分析,识别异常波动,提前判断是否存在安全风险。智能化系统的应用可以大幅度提升园区应急响应的速度与准确性,减少人为因素对安全管理的影响<sup>[4]</sup>。通过数据分析,园区管理者能够获取全景式的安全状况评估,制定更加精准的安全控制措施。

## 6 结语

通过对化工园区安全规划与布局的研究,可以看出,安全管理是园区可持续发展的基石。合理的安全规划不仅有助于识别潜在的安全风险,降低事故发生的概率,还能为园区提供高效、系统的安全保障措施。本文分析了化工园区在安全规划中的关键要素,包括功能分区、危险源管控、安全设施布局等,并探讨了如何通过信息化与智能化技术提升园区的安全管理水平。随着科技的不断发展,智能化监控系统、大数据分析以及云计算等技术将成为园区安全管理的重要支撑工具。园区安全管理不仅仅是技术层面的优化,更需要在全员安全意识的提升和管理文化的建设中不断完善。未来,园区安全规划与布局的持续优化将为化工园区的安全生产提供更加坚实的保障,促进其健康、绿色、高效的发展。

### 参考文献

- [1] 李卓辉.基于产业安全的化工园区总体规划路径研究[J].城市开发,2024,(10):115-117.
- [2] 孟宇强.化工园区危险性分析与评价[D].导师:宫博.沈阳化工大学,2021.
- [3] 赵原.创建安全发展示范城市政策与方法[J].劳动保护,2020,(03):28-30.
- [4] 丁培松.化工园区安全监管现状及改善对策研究[J].化工管理,2017,(33):138.

# Analysis of the Operation Effect of the Wall Tower in the Continuous Reforming Unit of Dongfang Hualong Group

Yonggang Zhang

Shandong Oriental Hualong Industrial Trade Group Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257300, China

## Abstract

This study investigates the application of the wall-tower in the continuous reforming unit of Dongfang Hualong Group. Through analyzing the wall-tower's working principles, operational methods, its role in the reforming unit, and operational performance, the results demonstrate that the introduction of the wall-tower significantly enhances product separation accuracy and target product yield while reducing energy consumption and operational costs. The structural design of the wall-tower further improves the overall performance of the unit. This research provides theoretical basis and practical guidance for the efficient application of wall-towers in continuous reforming units, which holds significant importance for process improvement and energy conservation in the refining industry.

## Keywords

Intermittent Tower; Continuous Reformer Unit; Operating Effect; Separation Efficiency; Energy Consumption; Production Flexibility

## 间壁塔在东方华龙集团连续重整装置的运行效果分析

张永刚

山东东方华龙工贸集团有限公司, 中国·山东 东营 257300

## 摘要

本文探讨了间壁塔在东方华龙集团连续重整装置运行中的应用效果。通过分析间壁塔的工作原理、操作方法、在连续重整装置中的作用及其运行效果,结果表明,间壁塔的介绍显著提高了装置的产品分离精度,以及目标产品的收率,同时降低了能耗和操作成本,间壁塔的结构设计进一步提升了装置的整体性能。本研究为间壁塔在连续重整装置中的高效应用提供了理论依据和实践指导,对炼油行业的工艺改进和节能减排具有重要意义。

## 关键词

间壁塔; 连续重整装置; 运行效果; 分离效率; 能耗; 生产灵活性

## 1 引言

连续重整装置是炼油工业中重要的二次加工装置,目的是将低辛烷值的石脑油转化为高辛烷值的汽油组分或芳烃原料<sup>[1]</sup>。随着节能减排的要求,提高装置的性能,以及降低装置的生产成本成为炼油行业关注的焦点<sup>[2,3]</sup>。间壁塔作为一种新型分离设备,在化工领域展现出良好的应用前景<sup>[4]</sup>。本研究旨在探讨间壁塔在连续重整装置中的实际应用效果,以为间壁塔的运行提供基础数据,以及为装置性能提升和工艺优化提供新的思路和方法。

近年来,国内外学者对间壁塔在化工分离过程中的应用进行了广泛研究,通过实验和模拟相结合的方法,研究了间壁塔在精馏过程中的传质性能,发现间壁塔能够显著提高分离效率<sup>[5,6]</sup>。然而,关于间壁塔在连续重整装置中的实际

应用效果和实际运行数据的文献仍较为有限,造成装置在进行工艺改进时,没有间壁塔的实际运行数据做参考,本文将填补这一空白,为间壁塔在连续重整装置中的推广应用提供理论支持和实践指导。

## 2 连续重整装置的工艺流程与关键设备

山东东方华龙集团120万吨/年连续重整装置,以直馏石脑油、柴油加氢石脑油,以及蜡油加氢重石脑油为原料,生产苯、甲苯、二甲苯和高辛烷值汽油组分。工艺流程包括原料预处理、重整反应、催化剂再生、产品分离、芳烃抽提和PSA氢气回收等部分。混合石脑油首先经过预处理单元,去除杂质和水分后进入重整单元,在催化剂作用下发生脱氢、环化和异构化等反应,生成富含芳烃和高辛烷值组分的反应产物,反应产物随后进入产物分离系统,通过精馏、萃取等方法分离出目标产品,催化剂在线连续再生,确保催化剂活性,氢气作为副产品送至PSA单元,经变压吸附后产出纯度为99.9%的氢气。

【作者简介】张永刚(1977—),男,中国山东东营人,本科,从事化学化工工程研究。

连续重整装置的关键设备包括反应器、加热炉、换热器、压缩机和分馏塔等。其中，分馏塔是影响装置性能和产品收率的关键设备之一，分馏塔通常采用常规精馏塔，存在分离效率低、能耗高等问题<sup>[1,7]</sup>。山东东方华龙集团连续重整装置在装置建设阶段，经与设计院沟通后应用了三座间壁塔，实际运行证明，间壁塔对产品分离效率，降低能耗方面提升较大。

### 3 间壁塔的结构特点与操作特点

#### 3.1 间壁塔的结构特点

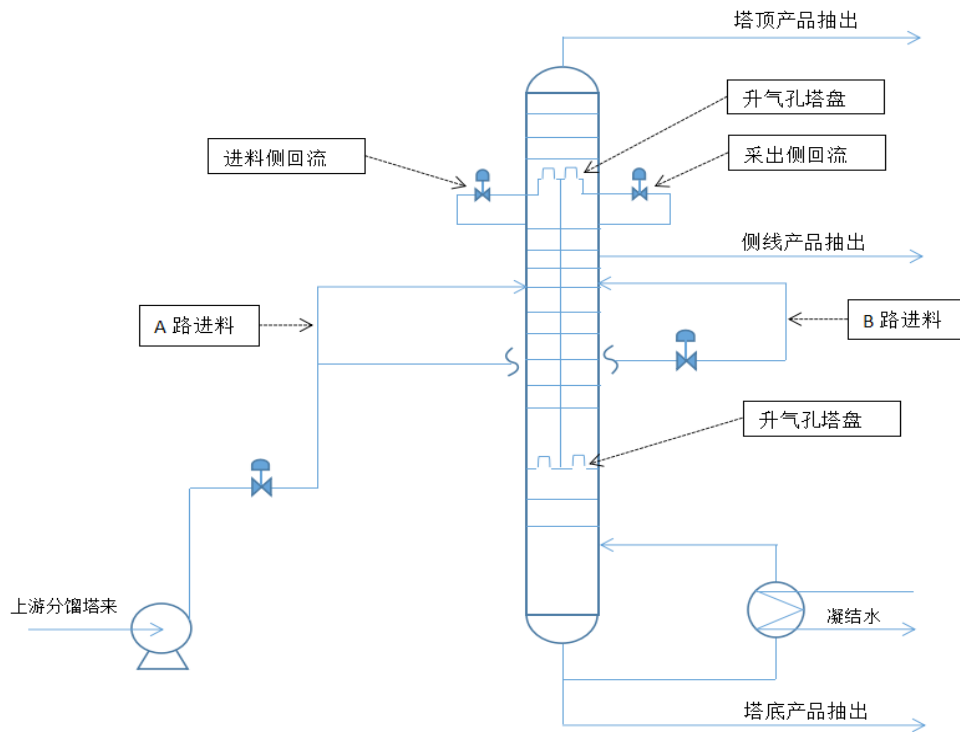
间壁塔是一种新型的分离设备，其内部设有垂直隔板，将塔体分为两个独立的分隔室。每个分隔室相当于一个独立的精馏塔，可以进行不同工况的操作。这种结构使得间壁塔能够在同一个塔体内实现多个分离过程，大大提高了分离效率。间壁塔的主要结构特点包括：垂直隔板、多进料口、多出料口以及特殊的塔盘设计，与传统的分馏塔相比，间壁

塔具有如下优势<sup>[8]</sup>：

- (1) 间壁塔能够在同一个塔内完成多个分离任务，减少了设备数量和占地面积；
- (2) 间壁塔的多区域设计使得各分离过程可以独立优化，提高了整体分离效率；
- (3) 间壁塔的热集成特性有助于降低能耗，实现节能减排；
- (4) 间壁塔也存在结构复杂、操作难度大等方面的局限性。

在连续重整装置中，间壁塔主要用于分离重整产物中的不同组分。三组分混合物（A、B、C）进入塔器中间部分分壁的一侧，轻质（A）组分和重质（C）组分分别从塔顶和塔底被回收，中间（B）组分通过位于进料口塔器背面一侧，以侧线抽出除去。

附：间壁塔简图：



#### 3.2 间壁塔不同工况的操作特点

隔壁塔精馏的基本原理与普通精馏完全一致，都是利用组分间的相对挥发度不同，通过气液交换达到分离的目的，符合常规的气液相平衡原理。但由于隔壁塔中间部位被隔板分成2个区域，且要实现多个分离指标，因此在运行过程中要关注或者控制更多的工艺参数，比如除了塔顶回流量，还要控制隔板两侧（进料侧和出料侧）的内回流量；除了控制普通塔原有的灵敏板温度或温差，还要控制出料侧隔板段的灵敏板温度或温差，仅比普通塔增加上述两个控制参数，其他操作控制与普通塔无异。

(1) 在侧线抽出的工况下，B路进料关闭；在侧线不抽出的工况下，B路进料打开，A、B两路进料流量控制相同，且与进料总流量相等；

(2) 间壁塔塔顶温度控制塔顶总回流量，目的是保证塔顶产品（A组分）质量合格；

(3) 间壁塔塔底温度控制塔底重沸器的蒸汽量，保证塔底温度在指标范围内；

(4) 进料侧内回流的控制原则，稳定进料侧的各层塔盘温度在指标范围内，确保B组分不被大量的带至塔顶，回流量过小，大量B组分被带到塔上部的精馏段，造成塔顶

产品质量不合格；回流量过大，A组分被带到塔下部的汽提段，造成抽出侧的侧线产品质量不合格；

(5) 抽出侧内回流量不做控制，进料侧内回流液位满后会自动溢至抽出侧。

#### 4 间壁塔在连续重整装置中的运行效果

间壁塔在连续重整装置中的运行效果主要体现在提高产品分离效率、降低能耗和减少环境污染三个方面。

首先，间壁塔的多室结构使得各组分能够在最佳条件下进行分离，显著提高了产品分离精度和收率。东方华龙集团连续重整装置的二甲苯塔采用了间壁塔，该二甲苯塔的作用是将上游来的原料分割出混合二甲苯、工业用碳九芳烃，塔底的C10<sup>+</sup>重质芳烃送至蜡油加氢裂化装置作为原料，二甲苯塔投入运行后，与其他企业采用气相侧线抽出的普通二甲苯塔进行了对比，塔顶二甲苯产品中C9芳烃含量相较于低0.12%；侧线C9芳烃产品中二甲苯含量相较于低0.52%；塔底重芳烃产品中二甲苯含量相较于低0.03%，C9芳烃含量低4.03%，C10芳烃含量低16.84%。对比结果说明，间壁塔塔顶产品与侧线产品的分离精度，比普通精馏塔的分离精度要高，因此目标产品的收率也要高。同时，使用普通精馏塔的塔底产品中高附加值的C9芳烃和C10芳烃含量高，造成目标产品损失过大，说明普通精馏塔的侧线产品与塔底产品的分离精度相较于间壁塔差的很多。

表1 二甲苯间壁塔与普通精馏塔产品分离效果比较表

组成含量 产品分布	产品组分	东方华龙二甲苯塔产品组成(%)	某企业二甲苯塔产品组成(%)
	塔顶产品 (混合二甲苯)	C7芳烃	0.02
C8芳烃		98.65	98.60
C8非芳烃		1.25	1.20
C9芳烃		0.08	0.20
侧线产品 (工业C9芳烃)	C8芳烃	0.07	0.59
	C9芳烃	64.22	80.05
	C10芳烃	30.91	15.52
	C11芳烃	4.80	3.84
塔底产品 (C10 <sup>+</sup> 重芳烃)	二甲苯	0.02	0.05
	C9芳烃	0.07	4.1
	C10芳烃	4.55	21.39
	甲基茚满	49.62	35.07
	四氢化萘	26.94	18.11
	萘	7.49	9.65
	甲基萘	11.31	11.63

其次，间壁塔通过热耦合技术实现了能量的梯级利用，在保证分离效率的同时，能大幅降低装置能耗。一般连续重整装置的工艺设计，会将芳烃抽提单元溶剂萃取的混合芳烃送至苯塔，苯塔塔顶馏出合格的苯产品，苯塔底物料再送至甲苯塔，甲苯塔顶馏出合格的甲苯产品，甲苯塔底的微量

混合二甲苯送至汽油调和组分，苯塔和甲苯塔底热源均使用220℃的1.6Mpa蒸汽。东方华龙集团的连续重整装置取消了苯塔和甲苯塔，采用了BTX间壁塔，该间壁塔的进料同样是接收上游来的混合芳烃，塔顶馏出纯度为99.9%的苯产品，侧线抽出纯度为99.9%的甲苯，原料中携带的微量混合二甲苯经塔底泵送至汽油调和组分，塔底热源使用220℃的1.6Mpa蒸汽。BTX塔投入运行后，各产品的质量指标均优于国标要求，且塔底重沸器的蒸汽消耗相较于普通精馏塔减少0.12t/吨油。

表2 BTX间壁塔与普通精馏塔蒸汽消耗比较表

项目	东方华龙BTX塔	某企业苯塔	某企业甲苯塔
进料量	23t/h	22t/h	14.5t/h
塔顶压力	50Kpa	50Kpa	50Kpa
塔底温度	163℃	144℃	169℃
苯抽出温度	94℃	98℃	/
甲苯抽出温度	131℃	/	130℃
重沸器蒸汽使用量	10t/h	5.2t/h	7t/h

最后，生产灵活性也是间壁塔的一大特点，间壁塔的运行分为工况一和工况二，工况一是按照间壁塔（开侧线抽出）进行操作，工况二是按照普通精馏塔（关侧线抽出）进行操作，用户可根据自身或市场需求进行工艺调整。东方华龙连续重整装置脱庚烷塔的作用是将C5<sup>+</sup>重整生成油再次进行切割，装置开工初期，脱庚烷塔塔顶馏出苯和C6非芳烃的C6组分作为芳烃抽提单元的原料，侧线抽出甲苯和C7非芳烃的C7组分作为汽油调和组分，塔底组分送二甲苯塔。该方案使得脱庚烷塔因操作温度的降低，能耗大大降低；同时，下游的芳烃抽提单元因进料量的减少，能耗也大大降低。随着调和汽油市场的萎靡，调和汽油的经济效益日渐下行，脱庚烷塔关闭侧线抽出，不再生产汽油调和组分，塔顶馏出C6C7组分送芳烃抽提生产苯和甲苯。这种灵活的生产方案，可及时应对市场的变化，增加公司的经济效益。

实际运行数据显示，与传统精馏塔相比，采用间壁塔连续重整装置在产品的分离效率、降低能耗、生产灵活性方面具有无与伦比的优势，更符合现代生产装置的要求。同时，间壁塔具备两个普通精馏塔的分离功能，降低了设备成本。

#### 5 间壁塔与普通精馏塔开工过程的区别

普通精馏塔开工时，原料进入塔釜内，当塔底液位达到80%，进行塔底加热，塔顶全回流的操作模式，直至达到指标要求。间壁塔的开车过程中基本不考虑靠单独的全回流过程达到指标要求（尤其是侧线指标），而是采用物料大循环的开车方式，即开车过程中连续进料。

例如BTX塔的开工，塔顶采出（苯侧线）、侧线采出（甲苯）、塔底采出（二甲苯）的物料都连续返回原料罐，直至

间板塔的负荷及产品满足指标要求。主要的开车步骤如下：

### 5.1 进料、加热

开车准备工作就绪后，BTX塔开始进料，塔釜液位在50%左右时，打开蒸汽阀门加热釜料，控制塔的温升，观察和控制塔压变化，观察塔顶回流罐和塔釜液位。

### 5.2 打回流

当回流罐的液位达到50%时，开始塔顶回流，基本保持隔板进料侧回流量和进料量的加和与隔板出料侧内回流接近。

### 5.3 建立物料的大循环

逐步加大进料量，同时逐步调节塔釜蒸汽和回流量（塔顶和隔板两侧内回流量），当回流罐、塔釜液位较高时，启动苯产品采出泵、甲苯产品采出泵、塔釜二甲苯采出泵，同时观察塔釜和回流罐液位，观察塔顶到塔底温度。采出的各路物料返回原料罐，在原料罐和隔壁塔之间建立稳定的物料循环。

### 5.4 达到设计分离指标

待温度和压力稳定后，微调进料隔板侧回流量（主调）或蒸汽量与塔顶回流（副调）使各项指标达到设计值。苯产品根据塔顶部的灵敏板温度调节采出，甲苯产品根据隔板出料侧底部的灵敏板温度（或温差）调节采出，塔釜产品根据塔釜的液位调节采出，采出的产品进入相应的下游装置。

## 6 结语

本研究为隔壁塔在连续重整装置中的推广应用提供了理论依据和实践指导。未来的研究可以进一步探索隔壁塔在其他炼油工艺中的应用潜力，以及如何通过智能化控制、流程优化进一步提高隔壁塔的操作性能和稳定性。隔壁塔在连续重整装置中的应用显著提高了产品分离效率，降低了能耗，通过案例分析，我们进一步验证了隔壁塔在实际生产中的优越性。未来，随着技术的不断进步，隔壁塔在连续重整

装置中的应用将更加广泛，为石化行业的可持续发展做出更大贡献。建议相关企业积极采用隔壁塔技术，以提高装置运行效率，增强市场竞争力。

### 参考文献

- [1] 张亚辉. 连续重整工艺流程综述[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(03): 123-124.
- [2] 王立新, 陈思远. 连续重整装置节能技术研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [3] 李林. 连续重整装置能耗分析与节能措施[J]. 石油石化绿色低碳, 2025, 10(05): 53-59.
- [4] 张明远, 李华强. 隔壁塔在石油化工中的应用进展[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1234-1245.
- [5] 李爱国, 彭华忠, 陈宁, 王跃宇, 李楠, 姜占坤. 分隔壁精馏塔的研究及应用进展[J]. 山东化工, 2025, 54(14): 105-108.
- [6] 张英, 高景山, 薄德臣. 隔壁精馏技术进展[J]. 节能技术, 2016, 34(06): 521-526.
- [7] 宋森. 炼油厂连续重整装置节能降耗措施研究[J]. 中国设备工程, 2024, 12: 233-235.
- [8] 谢江维. 隔壁塔的设计、优化与实验研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2020.
- [9] 朱艳. 隔壁塔技术在重整脱戊烷油分离过程中的应用[J]. 石油化工设计, 2024, 41(04): 47-49.
- [10] 易建彬. 燃料型重整装置改造新增二甲苯产品分离方案研究[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(07): 10-15.
- [11] 胡珺, 王宝生, 陈建兵, 高明, 张英. 重整C9+重芳烃高效分离技术研究[J]. 现代化工, 2023, 43(06): 222-226.
- [12] 何桂春, 张英, 伍祥, 华涛, 邱洁, 凌昊. 隔壁塔替代两塔分离芳烃流程改造的研究[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(02): 95-99.

# Energy efficiency improvement and carbon emission management strategies for large-scale industrial parks

Lin Zhang

Xinjiang Jiayuan Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wulumuqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

As global attention to carbon emissions intensifies, large-scale industrial parks, as significant sources of energy consumption and carbon emissions, face the dual challenge of improving energy efficiency and managing carbon emissions. This paper analyzes the current state of energy consumption in large-scale industrial parks and the main challenges they face. It explores the application and innovation of energy-saving technologies, intelligent energy management systems, and renewable energy in enhancing energy efficiency. Furthermore, it examines carbon emission management strategies, including the application of carbon reduction technologies, the implementation of carbon trading and carbon pricing mechanisms, and the exploration of carbon capture and storage technologies.

## Keywords

Energy efficiency; Carbon emissions; Intelligent management; Energy-saving technologies; Green transformation

## 大规模工业园区能源效率提升与碳排放管理策略

张林

新疆佳远节能环保科技有限公司, 中国·新疆乌鲁木齐 830000

## 摘要

随着全球对碳排放问题的关注加剧,大规模工业园区作为能源消耗和碳排放的重要源头,面临着提升能源效率和管控碳排放的双重挑战。本文分析了大规模工业园区能源消耗现状及其面临的主要挑战,探讨了节能技术、智能化能源管理系统以及可再生能源在提升能源效率方面的应用与创新。进一步地研究了碳排放管理策略,包括碳减排技术、碳排放交易与碳定价机制的实施,以及碳捕捉与封存技术的探索。

## 关键词

能源效率; 碳排放; 智能化管理; 节能技术; 绿色转型

## 1 引言

大规模工业园区作为工业发展的重要组成部分,其能源消耗和碳排放对全球环境具有深远影响。随着国家和地区对碳排放管控的要求日益严格,工业园区的能源效率提升与碳排放管理已经成为当前亟待解决的关键问题。提高能源效率不仅可以有效减少资源浪费,还能在一定程度上降低运营成本;而实现碳排放的有效管理是应对气候变化和推动低碳经济的必要步骤。本文旨在深入分析大规模工业园区的能源消耗现状与提升挑战,探讨当前技术与管理策略,分析节能技术、智能化能源管理系统、可再生能源的应用,提出切实可行的碳排放管理措施,并探索能源效率与碳排放管理协同发展的路径,为工业园区的绿色发展提供理论支持与实践

指导。

## 2 能源效率提升的现状与挑战

### 2.1 大规模工业园区能源消耗现状分析

大规模工业园区在全球能源消耗中占据重要地位,其能源使用大多集中在生产和运营过程中,主要以电力、天然气和蒸汽等形式提供。根据统计数据,中国部分工业园区的年能源消耗量达到数百万吨标准煤,其中高耗能行业如钢铁、化工、电力等行业贡献最大。近年来,园区在能源使用上逐渐注重节能降耗,但整体能效提升空间较大。许多园区仍未形成系统化的能源管理模式,能源浪费现象普遍存在。例如,部分园区设备老化、工艺不优化、生产线能源消耗过高等问题普遍存在,导致能源利用效率较低。

### 2.2 能源效率提升面临的主要挑战

提升大规模工业园区的能源效率面临多个挑战。首先,园区内的能源消耗存在较大的分散性,缺乏统一的能源管理

【作者简介】张林(1990—),男,中国河南太康人,本科,工程师,从事工业节能研究。

平台和精准的监控手段,导致资源利用效率较低。其次,由于部分园区传统能源使用方式根深蒂固,技术更新换代的速度相对较慢,导致在节能技术应用和设备更新方面滞后。此外,能源成本的不断上涨迫使园区优化能效,但由于资金投入不足,缺乏完善的财务激励措施,企业往往对能源效率提升投入较少。最后,环境政策和监管措施的差异化使得园区的能源利用和排放管理难以形成合力,增加了实施难度。

### 2.3 能源管理体系的现有不足与改进空间

现有能源管理体系普遍缺乏系统性和精准性。许多工业园区的能源管理系统仍然依赖人工记录和手工分析,数据更新不及时,无法实时反映能源使用情况。另一方面,部分园区尚未实施信息化管理,智能化管理水平较低,无法通过大数据和云计算对能源进行动态调节和优化。现有的能源管理体系中,往往存在对能源使用的监控不细致,导致能源浪费现象未能及时发现并解决。为此,改进能源管理体系的首要任务是建立完善的智能化能源监控平台,通过信息化手段对能源使用进行精准分析和预测,提升管理效率。同时,加强能源数据的实时性和准确性,确保系统可以根据实时数据进行能效调度,进而提高园区的整体能源利用水平<sup>[1]</sup>。

## 3 能源效率提升的技术路径与实践

### 3.1 节能技术的应用与创新

近年来,节能技术在大规模工业园区的应用逐步取得进展。最常见的节能技术包括高效电机、变频器、热回收系统等,这些技术能够有效降低园区的能源消耗。例如,采用高效电机可比传统电机减少30%以上的能耗,变频器则能根据负荷变化调整电机运行速度,达到节能的效果。在热回收方面,许多工业园区通过余热回收技术将生产过程中产生的废热用于供暖或发电,从而提高能源利用效率。具体实践中,某工业园区引入了低温余热回收技术,每年节省的能源约为5000吨标准煤,节能效果显著。此外,创新的节能技术如高效光伏发电和智能调度系统也在园区中得到了逐步推广和应用。

### 3.2 智能化能源管理系统的实施

智能化能源管理系统是提升能源效率的重要手段。该系统通过物联网技术实现对园区内各类设备和能源消耗的实时监控,借助大数据分析对能源使用情况进行精准调度。通过人工智能算法,系统能够对不同生产环节的能耗进行预测,提前做出调节,从而避免能源的浪费。例如,某大型工业园区引入了基于人工智能的能源管理系统,成功将园区内的能源消耗降低了15%。此外,该系统还可根据园区生产线的实际负荷智能调整能源输入,使园区的能源使用更加灵活高效。通过实施智能化管理,工业园区能够实时掌握能源使用动态,优化各项生产工艺,并为后续节能减排措施的实施提供数据支持。

### 3.3 可再生能源的应用与整合

可再生能源是提升能源效率的关键路径之一,尤其在工业园区内,太阳能、风能等可再生能源的应用潜力巨大。通过在园区内建设光伏发电系统,可以有效利用园区空闲屋顶和广场等空间,减少对传统能源的依赖,降低能源采购成本。例如,某工业园区通过在厂房屋顶安装光伏电池板,每年可发电1000万千瓦时,相当于节约标准煤约3000吨。此外,风能和地热能等其他可再生能源也在部分园区得到了试点应用。为了更好地实现可再生能源的整合,工业园区可以通过建设储能系统与智能电网,使可再生能源的波动性得到有效控制,并与传统能源互补,从而提高整体能源使用效率<sup>[2]</sup>。通过整合可再生能源,园区不仅能够提升能源自主性,还能为实现碳中和目标作出贡献。

## 4 碳排放管理策略与措施

### 4.1 碳排放减排技术的应用与推广

碳排放减排技术的应用在工业园区中具有重要意义,尤其在高耗能行业如钢铁、水泥和化工等领域。常见的减排技术包括能源高效利用、绿色建筑材料的应用、以及优化生产工艺。例如,在水泥生产中,采用窑气余热回收系统可以回收高达30%的能量,降低碳排放。此外,应用低碳技术,如高效燃烧系统和催化剂技术,可以在保证生产效率的同时减少二氧化碳的排放。某工业园区采用了先进的高效燃烧技术,减少了约10万吨二氧化碳的年排放量。此外,智能制造技术的引入使得生产过程的能源消耗得到精准控制,进一步降低了能源使用强度及相应的碳排放。这些技术的应用不仅提高了能源效率,还促进了工业园区的绿色转型和可持续发展。

### 4.2 碳排放交易与碳定价机制的实施

碳排放交易和碳定价机制为工业园区实现碳排放减排提供了有效手段。通过实施碳交易制度,企业可以将多余的减排配额出售,未达标的企业则通过购买配额实现合规,形成市场化的减排机制。某些地区的工业园区已经成功开展了碳排放交易系统,园区内的企业通过碳配额交易减少了整体碳排放量。以欧盟碳排放交易体系(EU ETS)为例,该体系通过市场机制有效地推动了减排目标的实现。在碳定价方面,碳税和排放配额的价格形成了一种经济激励机制,促进了企业加大在低碳技术研发和应用方面的投入。根据2019年的数据,碳交易机制和碳定价政策使得参与的园区碳排放量平均减少了15%。这种机制的实施不仅促进了工业园区的绿色发展,还增强了园区应对全球气候变化的能力<sup>[3]</sup>。

### 4.3 碳捕捉与封存技术的探索与应用

碳捕捉与封存(CCS)技术是应对工业园区碳排放的前沿技术之一。该技术通过捕捉工业生产中产生的二氧化碳,并将其封存于地下或用于其他工业用途,从而有效减少温室气体排放。具体应用中,某石化园区已部署了二氧化碳

捕集设备,通过化学吸收法从烟气中捕捉二氧化碳,年捕集量达到30万吨。在封存方面,采用了深层地下储气库和盐穴储存技术,将捕捉到的二氧化碳安全封存,避免其排放到大气中。这些技术不仅在减少碳排放方面发挥了积极作用,还为工业园区的可持续发展提供了技术支撑。随着技术的不断完善和成本的降低,CCS技术有望在更多工业园区得到应用,成为全球碳减排的重要工具。

## 5 能源效率提升与碳排放管理的协同发展

### 5.1 能源优化与碳排放减排的协同策略

能源优化与碳排放减排之间的协同发展需要综合考虑园区内各类能源的高效利用和碳排放控制措施。通过引入能源管理系统(EMS)和智能化调度平台,园区能够实现能源流向、用能设备的实时监控与动态调整。以某工业园区为例,园区采用了基于大数据的智能调度系统,优化了生产过程中的能源消耗,节省了约12%的能源消耗。与此同时,通过推广低碳技术和绿色生产工艺,园区实现了能源优化与碳排放减排的双重目标。例如,通过优化燃烧技术和热回收技术,既提高了能源利用效率,又减少了碳排放,实现了生产成本和环境影响的双赢。综合来看,能源优化和碳减排的协同策略为工业园区的可持续发展提供了有效路径。

### 5.2 工业园区绿色转型的可持续发展路径

工业园区的绿色转型需要从多个层面进行规划与实施,其中能源管理和碳排放管控是核心环节。园区应通过绿色建筑、清洁能源和低碳技术的引入,逐步实现产业链的绿色升级。以某大型工业园区为例,该园区通过大规模的光伏发电系统和风能项目的建设,不仅满足了自身部分能源需求,还将多余的电力回馈到国家电网,实现了能源的绿色供应。同时,通过推动绿色产业政策、绿色认证标准和环保措施的实施,园区逐渐吸引了更多的绿色企业入驻,实现了经济效益与环境保护的平衡。园区的绿色转型路径不仅有助于降低碳排放,还能提高园区在全球绿色经济中的竞争力<sup>[4]</sup>。

### 5.3 园区能源与碳排放管理的综合评价与优化

园区能源与碳排放管理的综合评价与优化要求将能源使用效率和碳排放管理成果进行系统评估,以便更好地识别

问题和优化管理策略。常见的评估方法包括生命周期评估(LCA)、能效指标分析和碳足迹评估等。这些评估工具可以帮助园区准确了解各项能源使用环节和碳排放源的情况,从而为后续优化提供数据支持。例如,某园区通过建立综合评估体系,将园区内的能源消耗与碳排放量逐月进行统计,发现节能减排潜力较大的生产环节,并采取了针对性优化措施,最终使园区整体能效提升了20%。优化后的能源管理体系不仅提升了园区的能源利用效率,也确保了园区能够满足更加严格的碳排放标准,为可持续发展目标的实现打下了坚实基础。

## 6 结语

通过对大规模工业园区能源效率提升与碳排放管理策略的研究,本文探讨了能源优化与碳减排技术的应用与实践,分析了智能化管理、节能技术以及可再生能源等措施在园区中的实施效果。园区的绿色转型不仅需要依赖先进的技术手段,还需要建立完善的政策体系与管理机制,以确保能源效率的最大化和碳排放的有效控制。通过推动能源优化与碳排放减排的协同发展,工业园区能够实现可持续的绿色发展路径。随着技术的不断进步与政策的不断完善,园区在能源管理和碳排放控制方面将迎来更广阔的前景,为全球应对气候变化和实现低碳经济贡献力量。未来,随着绿色技术的不断创新与实施,工业园区将在促进经济发展的同时,进一步加强环保意识,推动生态文明建设,为全球可持续发展提供示范。

### 参考文献

- [1] 翁婷.碳中和目标下工业园区多主体协同治理模式构建研究[J].经营管理者,2025,(11):56-57.
- [2] 刘琴.绿色工业园区入选有哪些新要求[N].中国高新技术产业导报,2025-10-27(016).
- [3] 汪雪野.工业园区碳管理策略与减排潜力分析[A].2025中国建筑经济研讨会论文集(上册)[C].河南省豫商经济文化交流协会:2025:193-194.
- [4] 虞子婧,张晓宁.工业园区废水处理工艺减污降碳协同改造及效果分析[J].资源节约与环保,2025,(09):13-16.

# Research on the optimization of safety design system management in chemical construction projects

Chenglong Zuo

Sheneng Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

Through analyzing typical production safety accident cases in chemical construction projects, this study reveals that effective safety design management in new circumstances depends not only on the professional competence of design firms but also on the legal compliance capabilities of enterprises, contractors, supervisors, process package suppliers, and government safety regulators. Addressing common challenges, we develop a problem analysis framework based on management synergy theory. The paper proposes innovative strategies including establishing goal coordination mechanisms, optimizing resource allocation, refining process control systems, and strengthening regulatory frameworks, offering fresh approaches to enhance safety design management in chemical construction projects.

## Keywords

Safety design; Management coordination; Optimization strategy

## 化工建设项目安全设计系统管理优化研究

左成龙

申能环境科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

通过总结分析化工建设项目典型生产安全事故案例,发现新形势下,化工建设项目的安全设计组织管理是否到位不仅取决于设计单位的专业化程度,还与生产企业、施工、监理、工艺包供应商以及政府安全监管部门等单位的依法履职能力有关。针对存在的共性问题,运用管理协同理论构建问题分析框架,提出建立目标协同机制、强化要素配置、完善过程控制、强化约束体系等策略,对优化化工建设项目安全设计组织管理工作提出新思路、新方法。

## 关键词

安全设计; 管理协同; 优化策略

## 1 引言

化工行业具有“高温高压、易燃易爆、有毒有害”的特点,一旦发生安全事故,后果往往极其严重。安全设计是从源头控制风险的关键,高质量的安全设计是化工项目“本质安全”的基础,也是企业实现安全生产的前提。随着国内化工行业迅速发展,笔者发现安全设计管理不仅仅是设计机构、生产企业的主要责任,施工、监理、出租、委托生产、工艺包供应商、设备供应商以及政府安全监管部门等单位是否能做到依法履职,同样影响化工建设项目本质安全水平。

## 2 事故案例分析

### 2.1 2018年四川宜宾恒达科技有限公司“7·12”重大爆炸着火事故

2018年7月12日18时42分33秒,位于宜宾市江安

县阳春工业园区内的宜宾恒达科技有限公司发生重大爆炸着火事故,造成19人死亡、12人受伤,直接经济损失4142余万元。事故主要原因包括未科学进行安全设计,生产工艺没有正规技术来源,也未委托专业机构进行工艺计算和施工图设计。事故责任单位包括生产企业、服务单位、委托生产企业、安全监管部门。事故原因总结如下:

#### 2.1.1 生产企业

生产工艺及装置未经正规设计,未委托专业机构进行工艺计算和施工图设计;原安全设计的DCS控制系统、ESD紧急停车系统现场实际未安装,无可燃和有毒气体检测报警系统和消防系统。

#### 2.1.2 服务单位

设计单位出具的安全设施设计专篇未执行工程建设强制性标准;施工单位未严格按照工程设计图纸和施工技术标准施工;监理单位监督不力。

#### 2.1.3 委托生产企业

常州道恩公司违法委托不具备安全生产条件和相应资

【作者简介】左成龙(1987—),男,中国江苏盐城人,在职研究生,工程师,从事化工安全管理研究。

质的宜宾恒达公司加工生产咪草烟（事故产品），未对此工艺技术安全可靠性进行论证和充分说明。

#### 2.1.4 政府安全监管部门

园区安环局长期未对宜宾恒达公司进行监督检查，对该公司长期违法建设、非法生产问题失察；县安全监管局对该公司违法建设行为未采取强制措施制止。

### 2.2 无锡江阴市恒园彩纤有限公司“7·17”较大闪爆事故

2024年7月17日12时56分许，位于江阴市徐霞客镇环镇北路7号的江阴市恒园彩纤有限公司发生一起闪爆事故，造成5人死亡，11人受伤，直接经济损失1528.3万元。事故是因岗位员工盲目操作，生产单元安全设施缺失，现场应急处置不当而导致的较大生产安全责任事故。事故责任单位包括出租单位、生产企业、服务单位、安全监管部门。事故原因总结如下：

#### 2.2.1 出租单位

真空提纯系统技术改造未开展安全设施“三同时”，未及时发现并消除真空提纯系统安全设施缺失的事故隐患；未向事故单位提供真空提纯系统工艺操作手册，未告知真空提纯系统的安全生产要求。

#### 2.2.2 生产企业

安全生产主体责任不落实，未制定纺丝生产线真空提纯系统岗位安全操作规程；未对真空提纯系统进行安全风险辨识和制定管控措施；未制定真空提纯系统现场应急处置方案。

#### 2.2.3 成套设备供应商

设计、制造和安装的真空提纯系统未设置紧急泄压排放装置，不符合国家相关标准。

#### 2.2.4 政府安全监管部门

未发现并纠正第一化纤公司真空提纯系统技改项目未按照规定开展安全设施“三同时”的问题；“厂中厂”专项整治工作开展不力，未按整治要求对事故单位所在的“厂中厂”开展安全生产联合检查。

### 2.3 新疆康义化学股份有限公司“8·16”一般闪爆事故

2024年8月16日15时44分许，新疆康义化学股份有限公司次氯酸钠装置发生一起闪爆事故，造成2人死亡，3人受伤，直接经济损失635万元。经调查认定，这是一起因工艺包资料存在严重缺陷、安全评价过程风险辨识不到位、安全设施设计存在重大疏漏、企业HAZOP（危险和可操作性分析）工作流于形式而造成的一般生产安全责任事故。事故原因总结如下：

#### 2.3.1 生产企业

项目建设阶段未严格执行监理服务；试生产前组织的“三查四定”工作开展走过场；未及时发现次氯酸钠装置没有对氢气采取相应的监测措施、尾气风机进出口均未安装阀门等隐患问题。

#### 2.3.2 设计单位

未采取相应的监测手段和安全措施；次钠装置尾气风机轴测图未按照P&ID图在进出口设计阀门，设计存在重大疏漏。

#### 2.3.3 工艺包供应商

在设计和交付过程中，未结合生产企业次氯酸钠装置物料、反应情况深入分析物料正常组分、异常组分的爆炸性危害。

#### 2.3.4 HAZOP分析单位

HAZOP分享单位在项目基础设计阶段编制的《HAZOP分析报告》，未考虑原料中氢气和氧气浓度变动可能引起的危险，未提出相应的风险防控措施。

#### 2.3.5 安全监管部门

未发现并纠正技改项目安全设施“三同时”违规问题；未按整治要求对事故单位所在的“厂中厂”开展安全生产联合检查。

### 2.4 本章总结

从以上3起事故案例来看，设计、工艺技术、生产、服务商、委托生产、安全监管部门等单位未依法履职，未强化安全设计源头管控，且未形成合力。各个事故调查报告均提出化工生产企业要深刻汲取教训，全面落实企业主体责任，但是事故仍然频发，说明协调管理机制存在缺陷，因此有必要从组织协同角度，建立相关机制，对化工新建项目安全设计系统管理进行优化提升。

## 3 理论基础

管理协同理论是运用协同理论思想方法、遵循管理对象协同规律的理论体系<sup>[1]</sup>，核心目标是实现协同效应。其本质是让各协同要素协调配合，推动系统向有序稳定方向发展，实现整体功能倍增。该理论强调系统内各要素需求有机结合，可通过信息沟通、要素整合、序参量管理及强化信息反馈等措施，打破部门壁垒与管理边界，保障管理目标高标准达成。管理协同机制由形成、实现、约束三大机制构成，三者缺一不可，共同支撑协同效应落地。管理协同理论分析框架见图1：

## 4 基于理论对化工建设项目安全设计系统管理现存问题进行分析

### 4.1 管理协同目标问题

各主体目标差异阻碍管理协同共识形成：生产企业重安全设计合规过关，轻其隐性价值；设计、工艺包提供、HAZOP分析等单位聚焦合同履行与效率，疏于生产风险深度分析；监管部门则以安全设计文件形式合规审查为核心职能。

### 4.2 要素配置问题

设计单位聚焦工艺指标，各专业团队独立工作，仅以会签完成交叉验证，忽视要素协同；生产企业重主体工程建

设,轻安全设施同步安装;成套设备供应商优先保障生产需求,未落实有效安全设计;政府安全监管部门因化工专业人才匮乏,监管能力存在短板<sup>[2]</sup>。

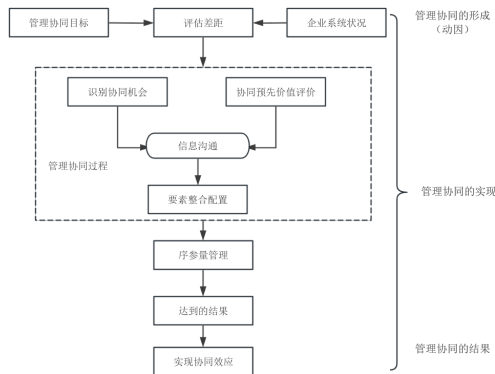


图1 管理协同理论分析框架

### 4.3 过程控制问题

生产企业仅在安全设计审查阶段强化风险辨识,忽视变更衍生的新问题;设计单位未将工艺包、设备供应及HAZOP分析等单位的要素转化为安全设计输入;建设单位施工阶段过程监管缺位,安全设计要求落地不充分;政府监管部门在试生产前未核查项目安全设计应用情况,且受行业监管壁垒影响,对服务单位安全设计行为存在监管盲区。

### 4.4 反馈机制建设问题

在生产企业内部,部门之间信息传递不畅,致使安全设计可能会出现遗漏和缺陷。服务单位方面,若设计单位与施工单位之间的信息传递缺乏相应机制,安全设计要求将与实际施工情况显著脱节。此外,设计单位在项目试生产阶段的参与度普遍不足,且缺乏对项目投产后安全状况的后评估。

### 4.5 约束机制问题

国内安全监管部门未监督工艺包、成套设备供应及HAZOP分析等单位安全履职,对化工生产线出租等新业态监管缺位;生产企业安全设计审核力度不足,新建化工装置或存先天缺陷;行业协会未健全自律机制,相关服务单位无序发展;对监管部门追责考核偏重,难以吸引优秀化工人才加入。

## 5 化工建设项目安全设计组织管理优化策略

针对化工建设项目安全设计组织管理的现存问题,通过目标协同、要素整合、过程控制、反馈闭环和约束强化,尝试实现安全设计组织协同管理。

### 5.1 建立目标协同机制

立项阶段,政府安监部门提前介入,推动生产企业转变观念,严防“先动工后审批”;初步设计阶段,生产企业统筹设计、工艺包供应、HAZOP分析、施工、监理等单位,共同制定安全设计目标,并将考核要求纳入合同履约范围;政府安监部门摒弃形式审核模式,结合安全设计系统性、多专业特点,引入第三方设计单位主导审核,打破单纯依赖专

家评审的范式<sup>[3]</sup>。

### 5.2 强化要素配置

设计单位需打破专业团队独立作业模式,建立协同设计机制,严禁外包安全设计;生产企业应保障安全设施建设资金投入,向各参建单位传达安全设计规范;成套设备供应商需将项目整体安全设计要求融入设备制造标准,确保设备安全性能达标;立项审批部门应组织专家,联合安全监管部门开展安全设计审查;施工许可审批部门需联动安全监管部门,将安全设计审查结果作为施工许可前置条件。

### 5.3 完善过程控制

生产企业需关注工艺变更衍生问题,在项目建设、试生产及运营阶段定期开展安全风险评估,及时消除隐患;设计单位应发挥安全设计主导作用,整合工艺包供应、设备供应及HAZOP分析等单位的分析要素;建设单位在施工阶段需委托监理强化过程监督,可邀请行业专家参与现场审查,保障安全设计落地;政府安监部门应在试生产前对项目安全设计应用情况开展过程监管。

### 5.4 健全反馈机制

生产企业需健全内部信息传递机制,搭建信息化管理平台实现部门间信息共享与实时沟通;督促设计单位提供驻场服务,强化与施工单位的沟通协调,及时反馈施工问题。法规机制层面,推动设计单位开展项目投产后安全后评估,提升其安全设计能力;化工协会需建立安全设计问题库,避免同类问题在新建装置中重复出现。

### 5.5 强化约束体系

政府安监部门牵头建立退出惩戒机制,科学评价工艺包供应、成套设备供应及HAZOP分析等服务单位安全履职情况;强化化工生产线出租等新业态监管,聘请行业专家审核项目本质安全设计并提供专业辅导;推动生产企业开展安全设计第三方审核,杜绝走过场。化工行业协会健全自律机制,引导相关服务单位规范发展。优化安监部门追责考核机制,强化支持激励,通过提高待遇、拓宽发展空间吸引优秀化工人才,提升监管队伍素质,实现安全设计精准监管。

## 6 结语

化工建设项目安全设计是实现本质安全的关键环节,本文尝试以管理协同理论为指导,通过“目标协同—要素整合—过程控制—反馈闭环—约束强化”五大策略,打通多元主体的协同壁垒,释放多专业要素的协同效应,力争推动化工建设项目安全设计从“形式合规”到“实质安全”的跃升。

### 参考文献

- [1] 白列湖. 协同论与管理协同理论[J]. 甘肃社会科学, 2007(05):228-230
- [2] 罗嗣梅. 化工企业建设项目安全设施设计方案研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(11):113-114.
- [3] 朱崇明. 化工建设项目安全设施设计专篇审查的几点体会[J]. 安全生产与监督, 2011, (05):56-57.

# Research on the construction and optimization strategy of nuclear power construction safety management system

Zhao Chen

CNNP zheneng Energy Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315700, China

## Abstract

under the background of “double carbon” goal and accelerated construction of new energy system, nuclear power, as a stable, efficient and low-carbon base load energy, its safety has always been the core issue of engineering construction and social governance. Compared with conventional energy projects, nuclear power construction is characterized by highly complex technical system, long construction period, many participants and high coupling degree of risk types. Failure of safety management in any link may lead to systemic risks. Therefore, this paper takes the whole cycle of nuclear power construction as the research object, systematically combs the stage characteristics and risk evolution law of nuclear power project safety management, and based on the analysis of the deficiencies of the existing safety management system, puts forward the construction framework of the whole cycle safety management system with risk orientation, responsibility closed-loop and digital support as the core, and further puts forward targeted optimization strategies from the aspects of system mechanism, technical support and organizational support, in order to provide theoretical reference and practical guidance for the modernization of nuclear power project safety governance ability.

## Keywords

Nuclear power construction; Full life cycle; Safety management system; Risk Management

# 核电建设全周期安全管理体系构建与优化策略研究

陈钊

中核浙能能源有限公司, 中国·, 浙江 宁波 315700

## 摘要

在“双碳”目标与新型能源体系加快构建的背景下, 核电作为稳定、高效、低碳的基荷能源, 其安全性始终是工程建设与社会治理的核心议题。相较于常规能源工程, 核电建设具有技术体系高度复杂、建设周期长、参与主体多、风险类型耦合度高等显著特征, 任何环节的安全管理失效都可能引发系统性风险。因此本文以核电建设全周期为研究对象, 系统梳理核电工程安全管理的阶段特征与风险演化规律, 在分析现有安全管理体系不足的基础上, 提出以风险导向、责任闭环和数字化支撑为核心的全周期安全管理体系构建框架, 并进一步从制度机制、技术支撑与组织保障等层面提出针对性的优化策略, 以期为核电工程安全治理能力现代化提供理论参考与实践指引。

## 关键词

核电建设; 全生命周期; 安全管理体系; 风险控制

## 1 引言

核电工程安全具有高度的公共性、系统性与敏感性, 其安全管理不仅关系到工程建设质量与进度, 更直接影响公众安全、生态环境与社会稳定。随着我国核电建设规模持续扩大, 新建机组在选址条件、堆型结构、施工工艺及供应链组织等方面不断呈现出复杂化与多样化趋势, 传统以阶段分割、经验管理为主的安全管理模式逐渐暴露出适应性不足的问题。在此背景下, 引入全生命周期管理理念, 将安全管理作为一项系统工程加以统筹, 已成为核电工程管理的重要发

展方向<sup>[1]</sup>。

## 2 核电建设全周期安全管理的内涵与阶段特征

### 2.1 核电建设全周期安全管理的内涵界定

核电建设全周期安全管理是指以核安全和工程本质安全为核心目标, 将安全管理要求系统嵌入核电项目从前期策划、工程设计、施工建设到调试运行及竣工移交全过程的管理活动。与传统以施工现场为中心的阶段性安全管理不同, 全周期安全管理强调安全风险的前移识别与源头控制, 注重安全目标在不同阶段之间的连续性和一致性。其核心在于通过制度、技术与组织协同, 将安全管理由单一环节管控转变为全过程系统治理, 从而避免风险在阶段转换过程中被弱化或遗漏。

【作者简介】陈钊(1991—), 男, 中国陕西安康人, 本科, 工程师, 从事核电建设、安全管理、核电研究。

从管理属性看,全周期安全管理不仅关注人员伤亡与施工安全,更将核安全、质量与安全运行纳入统一框架,体现出高度的系统性和综合性。在核电工程高度复杂、专业高度分化的条件下,全周期安全管理通过明确各阶段安全控制重点与责任主体,构建覆盖决策、设计与实施全过程的安全控制链条,实现对安全风险的动态管控和持续改进。

## 2.2 核电建设安全管理的阶段特征与风险演化

核电建设不同阶段在技术活动、管理重点和风险形态方面具有显著差异,安全管理必须针对阶段特征实施差异化控制。前期策划与立项阶段以安全目标设定和风险源头控制为主,厂址选择、堆型方案和总体安全原则一旦确定,将对后续工程安全形成长期约束,具有明显的战略性特征。设计阶段是安全要求向工程实体转化的关键环节,系统设计的完

整性、冗余配置合理性及安全边界清晰程度,直接决定核电工程的先天安全水平。

施工阶段则是安全风险集中显现的时期,高风险作业频繁、工序交叉复杂,多参建单位并行作业使管理难度显著增加,安全管理重点转向施工行为控制与现场风险管控。进入调试与试运行阶段,工程系统由静态建成转向动态运行,设备联动、系统验证及人员操作不当可能引发新的安全隐患。竣工验收与移交阶段虽然工程建设基本完成,但资料完整性、安全经验反馈及运行衔接质量仍对后续核电站安全运行产生重要影响。为进一步厘清核电建设不同阶段安全风险特征及其管理关注重点,现对全周期各阶段的安全管理特征进行归纳,如表1所示。

表1 核电建设全周期不同阶段的安全风险特征与管理重点

建设阶段	主要技术活动特征	典型安全风险表现	安全管理关注重点
前期策划与立项阶段	厂址论证、堆型比选、总体方案确定	风险识别不足、安全目标设定偏低、法规符合性缺失	风险源头控制、安全目标前置、安全可行性与合规性论证
工程设计阶段	系统设计、结构设计、设备选型	设计缺陷隐蔽、系统接口不协调、安全裕度不足	安全理念工程化转化、系统安全分析、设计审查与验证
施工建设阶段	土建施工、设备安装、工序交叉作业	高危作业集中、行为失控、分包管理风险	施工行为管控、关键工序控制、现场风险动态管理
调试与试运行阶段	系统联调、功能验证、人员操作	系统耦合失效、操作失误、人机接口风险	程序化操作控制、试运行安全评估、操作能力验证
竣工验收与移交阶段	工程验收、资料移交、运行衔接	安全信息断层、经验反馈不足	资料完整性管理、安全经验反馈、运行安全衔接

## 3 核电建设全周期安全风险特征与管理问题分析

### 3.1 核电建设安全风险的系统耦合特征

核电建设安全风险并非孤立存在,而是由技术系统复杂性、组织管理多层级性以及外部环境不确定性共同作用形成的系统性风险。从工程属性看,核电项目涉及核岛、常规岛及配套设施等多个高度耦合的子系统,任何单一环节的设计缺陷或施工偏差,都可能通过系统关联被放大并向其他阶段传导。同时伴随着新堆型应用、关键设备国产化率提升以及新施工工艺的引入,技术不确定性在一定程度上增加了安全风险识别与控制的难度<sup>[2]</sup>。

在管理层面,核电建设通常采用多参建主体协同模式,业主、设计单位、施工总包及多级分包单位并行参与,安全管理责任链条较长,若缺乏统一的安全标准和有效的信息共享机制,极易形成管理断层。而不同阶段的安全管理目标和关注重点存在差异,若阶段衔接不畅,前期风险控制成果可能在后续实施中被弱化甚至失效,导致风险在全周期内累积演化。

### 3.2 现行核电建设安全管理中存在的突出问题

从实践情况看,当前核电建设安全管理仍以阶段性管控为主,全周期协同不足的问题较为突出。一方面,安全管

理制度在不同阶段之间存在断裂现象,前期策划与设计阶段形成的安全要求未能充分转化为施工阶段的具体控制措施,导致“制度在前、执行在后”的脱节问题。另一方面,安全管理更多依赖经验判断与事后整改,对风险的动态识别和趋势分析能力不足,难以适应核电工程高复杂度、高安全要求的现实需求。

此外,在多参建主体环境下,安全责任界面划分不够清晰<sup>[3]</sup>,部分安全管理工作存在重复或空缺现象,影响管理效率。安全投入与工期、成本目标之间的协调机制尚不完善,在工程进度压力下,安全管理易被边缘化。可见现行安全管理模式在系统性、前瞻性和协同性方面仍存在不足,亟需通过全周期安全管理体系的重构与优化,实现由被动控制向主动治理的转变。

## 4 核电建设全周期安全管理体系的构建逻辑与关键要素

### 4.1 基于全生命周期视角的安全管理体系总体构建逻辑

针对核电建设安全风险跨阶段传导、责任界面复杂以及管理要素高度耦合等现实特征,构建全周期安全管理体系必须突破传统以施工阶段为中心的管理范式,从系统工程与全生命周期管理(Life Cycle Management, LCM)视角出发,

对安全目标、管理机制与技术支撑进行一体化设计。该体系以核安全目标为最高约束条件，通过将安全管理要求嵌入项目决策、工程设计、施工组织与调试验证等关键管理节点，实现安全控制由“事后响应”向“前端嵌入”的根本转变。

在总体逻辑上，全周期安全管理体系强调风险导向（Risk-Informed Approach）与分级防御（Defense in Depth）原则的协同应用，通过系统性风险识别、安全裕度分析及关键安全功能分解，将抽象的安全目标转化为可执行、可考核的工程管理要求。同时，通过构建跨阶段的安全管理接口机制，确保前一阶段形成的安全假设、安全参数与控制边界能够在后续阶段得到持续验证和有效继承，从而避免安全控制在阶段切换过程中发生衰减或失真<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 核电建设全周期安全管理体系的核心构成要素

从体系构成看，核电建设全周期安全管理应由目标体系、责任体系、过程控制体系与技术支撑体系等关键要素协同构成。其中，安全目标体系是全周期安全管理的逻辑起点，需要在满足核安全法规和设计基准事故分析要求的基础上，

形成分阶段、分专业的安全控制指标，并通过层级分解实现目标传导。

责任体系是保障体系有效运行的组织基础，应以业主为核心，明确设计、施工、监理及设备供应等主体在不同阶段的安全责任边界，构建权责清晰、接口明确的安全责任链条。过程控制体系则聚焦于风险评估、设计审查、施工安全条件确认、关键工序旁站监督及调试验证等核心环节，通过标准化流程与程序化控制实现安全要求的刚性落实。技术支撑体系作为体系运行的重要保障，应综合运用 BIM、数字化建造平台与安全信息管理系统，实现安全数据的集成管理、风险状态的动态感知与决策支持能力的持续提升。通过上述要素的系统集成，可形成结构稳定、运行高效的核电建设全周期安全管理体系。为了进一步明确核电建设全周期安全管理体系在不同阶段的实施重点及其管理抓手，现从阶段划分、核心风险与关键控制措施等维度对体系要素进行归纳总结，如表 2 所示。

表 2 核电建设全周期安全管理体系的阶段要素与控制重点

建设阶段	主要安全风险特征	核心管理要素	关键安全控制措施
前期策划与立项阶段	厂址适宜性不确定、堆型选择风险、法规符合性不足	安全目标体系、风险识别机制	厂址安全评价、方案比选论证、法规符合性审查、安全目标前置设定
工程设计阶段	设计缺陷隐蔽性强、安全裕度不足、接口失配	风险导向设计、分级防御原则	系统安全分析、设计审查与验证、关键安全功能分解与冗余配置
施工建设阶段	高危作业密集、工序交叉复杂、分包管理风险	责任体系、过程控制体系	施工风险分级管控、关键工序旁站监督、安全条件确认与行为管控
调试与试运行阶段	系统联调风险、操作失误、人机接口不匹配	程序化控制、运行验证机制	系统功能验证、操作规程审查、试运行安全评估
竣工验收与移交阶段	安全信息断层、经验反馈不足	闭环管理、知识传递机制	资料完整性审查、安全经验反馈、运行安全衔接确认

## 5 结语

核电建设安全管理是一项高度复杂的系统工程<sup>[5]</sup>，其有效性取决于是否能够从全生命周期视角进行整体谋划与持续优化。本文通过对核电建设全周期安全管理内涵、风险特征及体系构建逻辑的系统分析，提出了以风险导向和责任闭环为核心的管理体系框架，并从多维度给出了具有现实针对性的优化策略。

### 参考文献

[1] 黄喜华,蔡振,高小龙,等.以“三观两力”引领核安全文化建设——防城港核安全文化推进工作室建设实践[J].绿

叶,2024,(12):25-31.

[2] 马广超.核电工程建设中的核安全促进策略[J].绿叶,2024,(10):50-53.  
 [3] 美核管会提前完成首台非轻水堆核电机组建设许可初步安全评估[J].辐射防护,2025,45(2):174-174.  
 [4] 刘亮燕.中哈核电建设安全风险评价研究[D].:武汉大学,2023.DOI:10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000904.  
 [5] 赵蕾.基于本质安全理论的核电建设项目安全管理研究[J].中国高新科技,2024,(13):68-70.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.13.20.

# Stability Technology of the Intrusive Body Wall in the Chaerbake Formation of Shunbei Oilfield (New Paper)

Congbo Wang

North China Engineering Company West Branch China, Bayingolin, Xinjiang, 841600, China

## Abstract

Shunbei 85X well is a fourth level structural exploration well deployed in the north of Shunbei No. 8 strip. The third section of the well, 8006~8018.2m, shows diabase with high density and hardness. During the well opening process, the wellbore becomes unstable and backfilled. This article investigates the collapse mechanism of diabase, analyzes the difficulties in the drilling construction process, and formulates targeted measures from the aspects of screening drilling fluid additives, optimizing performance, and optimizing drilling technology. Finally, the diabase section was successfully drilled and the completion operation was carried out. The smooth construction of the diabase in the third section of the well avoided the need to activate the five level wellbore structure plan, achieving a win-win situation for both parties; At the same time, it provides good reference significance for the subsequent construction of wells such as Shunbei 6X and Manshen 802X.

## Keywords

Diabase; Pressure bearing; Wellbore stability; Shunbei Oil and Gas Field

# 顺北油田恰尔巴克组侵入体井壁稳定技术（新论文）

王从波

华北工程公司西部分公司中国·新疆 巴音郭楞 841600

## 摘要

顺北85X井是部署在顺北8号条带北边的一口四级结构探井，三开井段8006~8018.2m见辉绿岩，其密度高硬度大，通井过程中井壁失稳回填。本文通过调研辉绿岩的垮塌机理，分析钻井施工过程中的难点，从钻井液助剂筛选、性能优选、钻井工艺优化等方面制定针对性的措施，最终顺利钻穿辉绿岩井段并进行完井作业。该井三开井段辉绿岩的顺利施工，避免了启动五级井身结构预案，达到甲乙双方共赢的目的；同时为后续施工的顺北6X、满深802X井等井提供了较好的借鉴意义。

## 关键词

辉绿岩；承压；井壁稳定；顺北油气田

## 1 引言

顺北 85X 井是位于顺北油气田 8 号带北边，以奥陶系一间房组和鹰山组为主要目的层，探索 8 号断裂储层发育情况与含油气性的一口四级结构勘探井。

一开采用  $\phi 444.5\text{mm}$  钻头钻至井深 1203.00m， $\phi 365.1\text{mm}$  套管下至井深 1202.57m；二开采用  $\phi 333.4\text{mm}$  钻头钻至井深 4895.00m， $\phi 273.1\text{mm}$  套管下至井深 4894m，三开采用  $\phi 241.3\text{mm}$  钻头钻进。

三开井段主要钻遇地层为泥盆系东荷塘组 ( $D_3d$ )、克孜尔塔格组 ( $D_{1-2}k$ )，志留系塔塔埃塔格组 ( $S_1t$ )、柯坪塔格组 ( $S_1k$ )，奥陶系却尔却克组 ( $O_3qr$ )、恰尔巴克组 ( $O_3q$ )。原设计钻至一间房 ( $O_{2yj}$ ) 顶界之上 5m 进行

中完作业。

井深 8000m 第一次钻遇辉绿岩情况。

本井 2022 年 7 月 26 日 06:00 三开钻进至井深 8006m 后地质循环，振动筛返出岩屑为辉绿岩（含量 70-80%），辉绿岩井段 8000-8006m；继续钻进至 8012.72m，钻时升高至 84min/m，返出深灰色辉绿岩含量 85-90%，频繁憋停顶驱，起钻简化钻具组合。7 月 29 日组下牙轮钻头组合，30 日钻进至 8018.2m，振动筛返出辉绿岩占比 95%，频繁憋顶驱，通井处理井眼。返出辉绿岩见。

通井期间采取划眼、倒划眼等措施，配合稠浆、重稠浆携带，稠浆密度 1.40~1.45~1.7~1.8~2.0g/cm<sup>3</sup>，稠浆粘度 100~150~200~280~360s，共计携带出辉绿岩掉块 2.55m<sup>3</sup>，最大直径 5cm；期间频繁憋顶驱，扭矩波动范围 16-23KN·m；通井期间共发生 8 次卡钻，后 3 次有憋泵现象，通过加扭上下活动钻具解卡。钻井液性能：密度 1.38~1.41g/cm<sup>3</sup>，漏斗粘度 50~65s，动切 8~9Pa，塑粘 28~30mPa·s，

【作者简介】王从波（1976—），男，中国河北石家庄人，本科，工程师，从事钻井工程研究。

静切力 2.5~3.5/6~8Pa/Pa,  $K^+$  含量 25100~25200mg/L, 中压滤失量 2.6~3.0mL, 高温高压滤失量 8.4~9.0mL (160℃)。

考虑辉绿岩井段已经失稳、处理难度大, 8月6日起钻准备回填侧钻。

辉绿岩的垮塌机理。

胡广强, 白彬珍, 柯珂, 刘厚彬, 勐睿, 孟英峰等人研究认为<sup>[1-4]</sup>:

(1) 辉绿岩矿物组成主要以辉石、斜长石为主, 黏土含量极少, 黏土水化效应对井壁岩石力学强度及井壁稳定性较弱。

(2) 辉绿岩裂缝发育, 微观裂缝(0.6~3.2 $\mu$ m)细而短, 贯通性差, 细观裂缝(0.05~0.3mm)普遍为无充填张开缝, 且细观裂缝相互交割, 连通性好。

## 2 施工难点分析及对策

### 2.1 施工难点

(1) 本井 8000.00m~8018.2m 返出辉绿岩纯度高, 最高达到 95%, 实测密度高达 2.94g/cm<sup>3</sup>, 根据以往施工经验, 钻井液密度需要提高到 1.70g/cm<sup>3</sup>~1.8g/cm<sup>3</sup> 才能稳定井壁<sup>[4]</sup>, 以目前钻井液密度 1.40~1.41g/cm<sup>3</sup> 难以满足辉绿岩井段井壁稳定需要。顺北工区 4 号条带、6 号条带、8 号条带志留系普遍承压能力在 1.40~1.43g/cm<sup>3</sup>。邻井顺北 84X 井桑塔木组灰质泥岩掉块后, 逐步提钻井液密度至 1.43g/cm<sup>3</sup>, 消耗量增大。

(2) 本井 6 月 28 日 4:00 三开开钻, 至 8 月 6 日起钻回填, 时间长达 39d。泥盆系、志留系裸眼段浸泡时间长, 志留系、奥陶系上统部分泥质灰岩有剥落掉块。

### 2.2 针对上述钻井施工难点, 结合前期施工情况, 制定以下对策

(1) 先期静态承压。提高志留系地层承压能力。

(2) 优化钻井液性能。持续保护上部井壁; 提粘提切, 提高全井钻井液携带能力。

## 3 钻井工艺优化

### 3.1 静态堵漏承压, 提高志留系承压能力

#### (1) 堵漏浆配制

本井志留系柯坪塔格组底部 6374m, 使用 33% 浓度堵漏浆封闭 6500m 志留系以上地层; 使用 18% 堵漏浆封闭志留系以下地层, 堵漏浆配方如下:

① 18% 浓度堵漏浆, 架桥颗粒采用 1-3mm, 架桥颗粒浓度 6%。

配堵漏浆 80m<sup>3</sup> (封闭井段 6500m-8008m): 井浆 +2% SQD-98 (细) +4% CXD (粗) +2% SQD-98 (粗) +3% 刚堵堵漏剂 (100-200 目) +4% PB-1 +1% 核桃壳 (细) +1% FDL-2 +1% QS-7 +1-2% 润滑剂, 总浓度 18%。配好后补充 5-10m<sup>3</sup> 预水化好土浆, 将密度调整至 1.41g/cm<sup>3</sup>。

② 33% 浓度堵漏浆, 架桥颗粒采用 1-3mm, 架桥颗粒浓度 11%。

配堵漏浆 100m<sup>3</sup> (封闭井段 4500m-6500m): 井浆 +2% SQD-98 (中) +3% CXD (粗) +3% SQD-98 (细) +2% CXD (细) +3% PB-1 +4% 核桃壳 (细) +2% 刚堵堵漏剂 (40-60 目) +5% 刚堵堵漏剂 (60-80 目) +3% 刚堵 (100-200 目) +1% 云母 (细) +3% FDL-2 +2% QS-7 +1% RH, 总浓度 33%。配好后补充 5-10m<sup>3</sup> 预水化好土浆, 将密度调整至 1.41g/cm<sup>3</sup>。

#### (2) 承压堵漏施工情况

8 月 10 日组下打塞钻具组合 (铣齿接头 +  $\phi$  127mm DP +  $\phi$  139.7 mm DP), 8 月 11 日, 打塞封固井底后起钻至 7435m, 泵入承压浆 170m<sup>3</sup>, 起钻至 4499.00m, 开始承压。至 8 月 12 日 16:00 逐渐打压至 11.1MPa, 稳压 35min, 压力降至 9.39MPa, 累计泵入堵漏浆 7.55m<sup>3</sup> (志留系柯坪塔格组下段底 6374.00m, 在 33% 浓度堵漏浆状态下柯坪塔格组底部地层漏失压力当量密度提高至 1.58g/cm<sup>3</sup>); 至 22:00 缓慢泄套压至 0MPa, 回吐泥浆 0.7m<sup>3</sup>, 吃入地层 6.85m<sup>3</sup> 堵漏浆。承压堵漏结束后下钻至 7613.00m, 使用 40 目筛网循环 1.5 周筛除大颗粒堵漏材料后起钻, 为下仪器做好准备。

### 3.2 钻井液工艺优化

#### (1) 钻井液助剂筛选优化

一是本井三开完钻垂深超过 8000m, 预计井底温度达 166℃。停用 PAC-LV (低粘聚阴离子纤维素) 及 CMC-LV (低粘羧甲基纤维素钠盐类) 等纤维素类降滤失剂; 同时停用一些抗温能力较低的乳液类聚合物等包被用聚合物 (如液体 150 等), 防止助剂抗温性能差导致起泡影响钻井液性能。二是优选使用抗温抗盐效果较好的 DSP-2 (磺酸盐共聚物降滤失剂) 以及 KJ-3 (抗温抗盐降滤失剂) 作为聚合物降滤失剂; 三是根据志留系、奥陶系上统井温 (100~132~166℃) 优选 RHJ-3 (高软化点乳化沥青, 软化点 100~120℃) 以及 TFT-2 (天然沥青粉, 软化点 140~160℃) 复配 FT-2 (磺化沥青粉)。

#### (2) 强化钻井液封堵防塌性能

一是补充 2~3% RHJ-3 /TFT-2 复配 FT-2; 二是补充 1~2% GZNanoseal (纳米封堵剂) 强化钻井液对微米级裂缝的封堵。三是补充 2~3% QS-2 ( $D_{50}$ : 4~10  $\mu$ m) 以及 QS-7 ( $D_{50}$ : 2~4  $\mu$ m)。四是补充 KCl 及 1~2% AOP-1 (铝基聚合物), 控制  $K^+$  含量在 20000~25000mg/L, 增强钻井液的化学封堵防塌能力。

### 3.3 钻井工艺优化

#### (1) 钻井参数优化

降低排量和转速, 减少机械扰动、震动、钻井液冲刷对井壁的影响。正常钻进施工期间排量由前期的 46L/s 降低

到 28L/s; 顶驱转速由前期的 60~80rpm 降低到 40~20rpm。

## (2) 钻井工艺优化

合理控制参数, 减少钻具对井壁的碰撞; 采取“进一退二”方式钻进, 每钻进 0.5m, 采取顶驱倒划眼方式将钻具提至上部通畅井段或辉绿岩以上安全井段, 井眼通畅则继续钻进; 钻进期间根据井下憋扭情况, 使用稠浆清洗井筒; 倒划眼采用低转速 (20-30rpm), 倒划眼至少两遍; 钻进期间每 2 小时, 分析掉块的情况, 为判断井下情况, 做好应对措施; 禁止在辉绿岩井段大排量、高转速循环或者划眼。

## 4 侧钻施工情况

### 4.1 钻进施工情况

#### (1) 第一趟钻钻进情况

8月17日, 组下“混合钻头+螺杆”组合, 8月24日钻进至 7997m 循环长起; 侧钻期间: 一是逐步上提钻井液密度至 1.47g/cm<sup>3</sup>, 同时补充 2~3%RHJ-3 /TFT-2+ FT-2, 补充 1~2%GZNanoseal 以及不同目数的 QS-2、QS-7, 在胶液中补充 1~2%AOP-1 强化钻井液封堵性能; 二是逐步补充护胶水化好的坂土浆、DSP、KJ-3 逐步提高钻井液的粘度至 100~120s, 动切至 12~15Pa, 终切至 12~15Pa, 坂含 50~55g/L, 提高钻井液的携岩性能; 逐步补充随钻堵漏材料, 控制有效含量不低于 15%。

钻具组合:  $\phi$ 241.3mm 混合钻头+185mm 螺杆 (1.75°) +178mm 无磁 DC+178mmDC+127mmHWDP +127mmDP +139.7mmDP。

钻井参数: 钻压 100~150KN, 转速 30rpm, 排量 28L/s, 立压 16~17MPa, 扭矩 15~21KN·m。

钻井液性能: 密度 1.47g/cm<sup>3</sup>, 漏斗粘度 100~120s, 动切 12~14Pa, 塑粘 35~40mPa·s, 静切力 6~8/15~16Pa/Pa, K+ 含量 20000~21000mg/L, 中压滤失量 2.6~3.0mL, 高温高压滤失量 8.2~8.6mL (175℃)。

#### (2) 第二趟钻钻进情况

钻进情况: 8月26日, 组下牙轮钻头组合; 8月27日分段循环下钻至 7382m 处循环提密度至 1.48~1.49g/cm<sup>3</sup> 过程中发生漏失, 漏速 36m<sup>3</sup>/h, 泵入 40m<sup>3</sup> 浓度 25% 堵漏浆, 堵漏成功后降低密度至 1.47g/cm<sup>3</sup> 开始钻进; 8月30日钻进至 8018.75m 后钻时增加至 min/h, 其中 8006.00m~8018.75m 为辉绿岩, 起钻更换钻头 (辉绿岩井段起钻顺利, 无阻卡显示)。

钻具组合:  $\phi$ 241.3mm 牙轮钻头+178mmDC+127mmHWDP+127mmDP+139.7mmDP。

钻井参数: 钻压 100~150KN, 转速 30rpm, 排量 28L/s, 立压 16~17MPa, 扭矩 15~21KN·m。

钻井液性能: 密度 1.47g/cm<sup>3</sup>, 漏斗粘度 100~120s, 动切 12~14Pa, 塑粘 35~40mPa·s, 静切力 6~8/15~16Pa/Pa, K+ 含量 20000~21000mg/L, 中压滤失量 2.6~3.0mL, 高温

高压滤失量 8.2~8.6mL (175℃)。

安全施工措施: 一是间断验证上部井眼, 钻进至 8009.50m 返出岩屑见辉绿岩 (岩屑迟到井深 8006.00m), 起钻验证上部井眼稳定, 同时在辉绿岩顶部安全井段循环携带辉绿岩, 确保上部井眼畅通; 二是钻至 8018.75m 钻时升高 80min/m 后, 起至辉绿岩顶部安全井段循环捞砂, 待捞砂完井眼清洁后再泵入封闭浆起钻 (循环泵封闭浆期间, 将钻具提至安全井段; 封闭浆出水眼前停顶驱, 将钻具下至井底泵入封闭浆, 减少钻具旋转震动、及钻井液流动对辉绿岩井段的冲刷); 三是短起验证期间, 先保持小排量 (20L/s 左右)、小转速 (20rpm 左右) 尝试上提下放, 逐步停泵、停顶驱验证; 四是起钻前使用优质浆封闭 7600.00~8018.75m (封闭浆性能: 密度 1.47g/cm<sup>3</sup>, 粘度 149s。封闭浆配方: 井浆 +3%SMP-2+3%SMC+DSP-2)。

#### (3) 第三趟钻钻进情况

8月31日更换牙轮钻头分段循环下钻至 8000.00m, 排量 7.6L/s 冲划至井底; 9月2日钻进至中完井深 8033.00m, 循环处理泥浆后进行短起下; 辉绿岩井段 8018.75~8020.50m。

钻具组合:  $\phi$ 241.3mm 牙轮钻头+178mmDC+127mmHWDP+127mmDP+139.7mmDP。

钻井参数: 钻压 150~200KN, 转速 40rpm, 排量 26.5L/s, 立压 16~17MPa, 扭矩 19~24KN·m。

钻井液性能: 密度 1.47g/cm<sup>3</sup>, 漏斗粘度 100~110s, 动切 14~15Pa, 塑粘 35~40mPa·s, 静切力 6~8/15~16Pa/Pa, K+ 含量 20000~21000mg/L, 中压滤失量 2.6~3.0mL, 高温高压滤失量 8.2~8.6mL (175℃)。

安全施工措施: 一是钻进期间控制排量 26.5L/s, 降低钻井液对辉绿岩井段的冲刷; 二是间断使用稠浆 (150~200s) 携带, 保持井眼畅通; 三是钻至完钻井深后, 上提钻具至安全井段循环捞砂; 四是钻穿辉绿岩井段后再钻 10m 口袋, 预留上提下放安全距离同时为中完通井留足安全口袋。

### 4.2 中完施工情况

9月3日短起下, 井段: 8033.00~4871.00m; 短起下到底后循环钻井液 1h 后再起钻至 7977.00m 循环; 9月4日泵入封闭浆后干通验证辉绿岩井段, 起钻摩阻 60~80KN, 下钻摩阻 60~90KN (封闭井段: 8033.00~7433.00m; 密度 2.0g/cm<sup>3</sup>, 室温粘度 300s, FL<sub>HTHP</sub><5mL (175℃), 静态沉降因子 SF=0.51、玻璃棒能够顺利到底、无沉淀且流动性较好; 配方: 井浆 +5%SMP-2+5%SMC+3%TFT-2+ 2%QS-2+2%QS-7+3%GZNanoseal+1%GR+0.5%DSP-2+1%RH); 9月5日起钻完, 9月8日送放 193.7mm 套管到位。

安全施工措施: 一是循环期间将钻具提离至安全井段; 二是起钻前使用密度 2.0g/cm<sup>3</sup> 钻井液封闭井底 600.00m, 以补偿停泵起钻后的循环压耗; 三是循环期间对全井钻井液进行降粘切处理, 粘度 70~80s, 终切 10~12Pa, 降低下套管期

间的漏失几率。

## 5 结语

(1) 辉绿岩井段安全钻井, 首先在确保适当物理支撑、同时减少机械扰动震动、优化钻井液的封堵性, 减少辉绿岩填充物中黏土的水化。

(2) 施工中采取的钻井液性能优化、钻井参数优化、针对性封闭浆等措施有效保障了井眼稳定及中完施工的顺利。

(3) 该井三开井段辉绿岩的顺利施工, 避免了启动五级井身结构预案, 达到甲乙双方共赢的目的; 同时为后续施工的顺北 6X、满深 802X 井等井提供了较好的借鉴。

(4) 该套钻井工艺对于施工桑塔木组破碎带、一间房鹰山组破碎带有较好的借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 商森, 王颖慧. 顺北区块辉绿岩安全钻井技术[J]. 云南化工, 2010, 45(3): 164-164.
- [2] 胡广强, 白彬珍, 柯珂. 顺北区块辉绿岩井段井壁稳定性分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 119-125.
- [3] 刘厚彬, 勐睿, 孟英峰, 等. 辉绿岩地层井壁垮塌机理及主控因素实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 121-127.
- [4] 贺春明, 黄华东, 雷敏. 顺北区块超深井侵入体井壁稳定性分析[J]. 西部探矿工程, 2021(10): 30-34.

# Review of the Types and Application Scope of Phosphate Food Additives

Zhaoliang Ding

Tianfu (Jiangsu) Technology Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222113, China

## Abstract

Phosphate-based food additives are widely applied in modern food industries due to their stable physicochemical properties and multifunctional characteristics. These additives play a critical role in improving processing performance and product quality by participating in buffering regulation, metal ion chelation, and structural stabilization within food systems. This study systematically reviews the major types of phosphate additives, focusing on the functional differences among orthophosphates, pyrophosphates, and polyphosphates, and examines their technical roles and applicability in the processing of meat, aquatic, and baked food products. In conjunction with specific food processing requirements, the paper further outlines the application patterns of phosphate additives in quality control, stability maintenance, and formulation compatibility. This provides theoretical guidance and practical references for their scientific selection and standardized use in the food industry.

## Keywords

Phosphate additives; Food processing; Physicochemical function; Application scope; Quality control

## 磷酸盐类食品添加剂的种类与应用范围综述

丁兆亮

天富(江苏)科技有限公司, 中国·江苏·连云港 222113

## 摘要

磷酸盐类食品添加剂因其稳定的理化性质和多重功能特性,在现代食品工业中被广泛应用。该类添加剂通过参与食品体系中的缓冲调节、金属离子螯合及结构稳定过程,对改善食品加工性能和产品品质发挥着重要作用。围绕磷酸盐类食品添加剂的主要类型及其在不同食品领域中的应用特征,对正磷酸盐、焦磷酸盐和多聚磷酸盐的功能差异进行系统梳理,分析其在肉制品、水产品、烘焙食品等加工过程中的技术作用与适用范围。同时,结合食品加工工艺特点,概述磷酸盐类食品添加剂在品质控制、稳定性维持及加工适配性方面的应用规律,为其科学选用和规范使用提供理论参考。

## 关键词

磷酸盐类添加剂; 食品加工; 理化功能; 应用范围; 品质控制

## 1 引言

随着食品工业向规模化、精细化方向发展,加工过程中对食品品质稳定性和结构可控性的要求不断提高,功能性食品添加剂的重要性日益凸显。磷酸盐类食品添加剂作为应用历史较长、技术体系成熟的一类物质,在食品配方设计与加工调控中占据重要地位。不同类型的磷酸盐在溶解性、反应活性及功能表现方面存在明显差异,其作用效果与食品基质类型、加工条件及配伍方式密切相关。系统梳理磷酸盐类食品添加剂的分类结构及其在各类食品中的应用范围,有助于深化对其技术作用机制的认识,避免盲目或不当使用带来

的品质风险。基于此,对磷酸盐类食品添加剂的种类特征与应用领域进行综合综述,对于提升食品加工的科学性与规范性具有现实意义。

## 2 磷酸盐类食品添加剂的基本概念与分类体系

### 2.1 正磷酸盐类食品添加剂的化学特性与分类

正磷酸盐类食品添加剂以磷酸为基础结构单元,通过与金属离子形成稳定盐类,常见形式包括磷酸钠、磷酸钾和磷酸钙等。其主要特征是结构简单、反应活性明确、在水中易溶解并能释放氢离子参与酸碱调节反应。在食品加工体系中,这类添加剂具有良好的缓冲性能,能够维持一定范围内的pH稳定状态,适用于乳制品、肉制品、烘焙食品等多个领域。由于其分子量较小,易于与蛋白质或多糖反应,在调节食品结构、控制发酵速率以及改善保质期等方面具有广泛应用价值。按结合金属类型不同,可进一步细分为单金属型和复合型磷酸盐,适配不同食品工艺需求。其制备过程多采

**【作者简介】**丁兆亮(1980—),男,中国江苏连云港人,本科,工程师,从事常年致力于食品化工添加剂的研发,生产过程安全管理,绿色环保治理方面研究。

用中和法或沉淀法,工业成熟度高。基于其良好的功能基础和安全记录,正磷酸盐已成为多数食品配方中的基础功能性添加组分。

## 2.2 焦磷酸盐类食品添加剂的结构特征与分类

焦磷酸盐类食品添加剂由两个磷酸分子经脱水缩合形成P-O-P结构,表现出比正磷酸盐更高的金属离子结合能力。其典型结构稳定,分子间电子排布合理,在水中水解速率较慢,具备更强的络合与稳定性能。常见品种包括焦磷酸钠、焦磷酸钾等,具有优良的金属螯合性能,能有效控制食品中铁、铜等催化氧化反应的金属因子活性,从而延缓褐变、脂肪氧化等不良变化。此类添加剂适用于肉类、水产等对色泽及质地要求较高的加工场景,通过与蛋白分子结合可增强持水性和弹性。分类方面,根据不同阳离子种类和工业用途可分为食品级与工业级,其中食品级焦磷酸盐需符合严格的纯度与安全性标准。焦磷酸盐类因其稳定性好、反应选择性高,逐步在现代食品工业中获得广泛认可,成为多种复配添加剂的核心成分<sup>[1]</sup>。

## 3 磷酸盐类食品添加剂的理化功能特性

### 3.1 磷酸盐类食品添加剂的缓冲与调节功能

磷酸盐类食品添加剂在维持食品加工体系pH稳定方面具有显著作用,其多级解离结构允许其在不同酸碱条件下释放或结合氢离子,实现对体系酸碱度的动态调节。此特性对于需控制发酵环境、抑制微生物生长或避免蛋白质结构变性等工艺环节尤为关键。以正磷酸盐为例,其缓冲区间覆盖pH2.1至7.2,在肉类、乳品、面团等体系中均能有效调节反应环境,稳定关键工艺参数。缓冲能力的强弱与溶解度、反应速率、添加浓度密切相关,不同盐型与聚合程度决定了其在食品中的具体作用机制。在多相体系中,磷酸盐的缓冲效应还可抑制部分不良化学反应的发生,延缓氧化与降解过程,为产品的品质稳定与安全性控制提供支撑。在食品设计阶段,通过精准选型与浓度控制,可实现对风味、口感及保质性能的协同优化。

### 3.2 磷酸盐类食品添加剂的螯合与稳定作用

磷酸盐类食品添加剂具有显著的螯合特性,可与 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等多种金属离子形成稳定配位络合物,从而影响金属催化反应路径,降低食品中金属诱导氧化的风险。其结构中的多个羟基和磷酸基团为形成配位键提供了理想的结合位点,在抑制氧化褐变、脂肪酸败及酶促反应方面具有显著效果。在乳制品加工中,螯合作用有助于稳定钙离子分布,提升口感和质构一致性,在肉制品中则能控制铁离子对色泽和风味的负面影响。磷酸盐的螯合能力随聚合度升高而增强,多聚磷酸盐表现出更强络合力,适用于体系中金属离子含量波动较大的复杂配方。通过调节其添加比例与反应时间,可实现对反应体系中活性离子的精准调控,提升整体加

工控制能力。该功能在食品保质保鲜、风味稳定与外观一致性方面发挥了关键技术支撑作用。

## 4 磷酸盐类食品添加剂在主要食品中的应用范围

### 4.1 磷酸盐类食品添加剂在肉制品加工中的应用

在肉制品加工中,磷酸盐类食品添加剂广泛用于提升出品率、改善质构与延长货架期。其通过调节pH值改变肌原纤维蛋白的带电状态,促进蛋白质溶解与功能表达,从而增强对水分的结合力,有效减少加工过程中的失水损耗。在腌制产品中,磷酸盐能促进盐溶性蛋白提取,加快腌渍均匀性并增强肌肉组织的保水力,改善成品弹性与多汁性。在热加工类制品中,其可提高蛋白质热稳定性,避免过度凝聚导致的质构粗糙问题,提升感官品质。在乳化香肠类制品中,磷酸盐通过调控油脂与水相分布,维持乳化体系稳定,抑制油脂析出和空洞形成。不同类型磷酸盐在调味腊制、速冻肉品和再制肉类中发挥着不同的技术优势,需结合产品工艺特点进行选择与配比,以实现质构、保水与风味的综合提升。

### 4.2 磷酸盐类食品添加剂在水产品加工中的应用

水产品组织结构柔软、含水率高,加工中极易出现蛋白质变性、水分流失和色泽劣变等问题。磷酸盐类添加剂在水产品加工中具备显著的品质保持和结构改善效果。其通过螯合 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等金属离子,抑制脂肪氧化及色素降解反应,减缓色泽暗淡和异味生成过程。同时,在鱼糜、虾仁、蟹棒等再制水产制品中,磷酸盐可提升肌原纤维蛋白的活性与凝胶强度,改善弹性、切片性及口感滑爽度。其在冷冻水产品中的使用可显著降低解冻损耗率,保持产品结构完整和口感鲜嫩。对于水分与蛋白结合度较低的种类,添加磷酸盐还能提升加工成品的保水率,增强其市场竞争力。在蒸煮、油炸、冷冻等多种加工环境下,磷酸盐稳定的理化特性可显著增强水产品的耐受力 and 成品一致性,为工业化高效生产提供保障<sup>[2]</sup>。

### 4.3 磷酸盐类食品添加剂在烘焙及面制食品中的应用

在烘焙及面制食品领域,磷酸盐类食品添加剂被广泛应用于改善面团性能、调节发酵体系与增强制品稳定性。其作为酸度调节剂,可与膨松剂协同控制反应速率,保证气体释放均匀,使产品蓬松度和孔隙结构更为理想。在面团形成阶段,磷酸盐通过与面筋蛋白结合,提升面团的延展性与韧性,增强面团成型性和加工适应性。对于发酵面制品,其稳定的缓冲作用有助于维持酵母活性,延长发酵持续性,提高发酵质量稳定性。在蛋糕、饼干等焙烤类食品中,磷酸盐还可协助乳化剂维持油水相均一分布,提升组织细腻程度与成型一致性。其在面条、馒头、包子等蒸煮类制品中的应用也表现出改善筋道口感、防止塌陷的优良效果。根据产品对口感、弹性或延展性的不同需求,可灵活选用不同种类或复配型磷酸盐进行结构优化。

## 5 磷酸盐类食品添加剂在食品加工过程中的技术作用

### 5.1 磷酸盐类食品添加剂对加工稳定性的影响

磷酸盐类食品添加剂在加工过程中具有调控反应环境与维持体系稳定的重要作用。其良好的缓冲性能可保持 pH 在目标范围内波动有限,防止因环境变化导致的蛋白质变性、酶活性失调或反应效率波动等问题。在高温、剪切、乳化等复杂工艺条件下,磷酸盐通过调节蛋白质构象、螯合金属离子与抑制离子反应,增强体系结构韧性与反应可控性。以肉制品乳化工艺为例,磷酸盐能够稳定水油界面,提升蛋白吸附能力,防止分相和油脂析出。在面团加工中,其可稳定面筋网络结构,降低破裂率和形态失控概率。在乳制品调配过程中,磷酸盐有助于防止钙盐沉淀、抑制颗粒聚集,提高分散体系的均一性。加工稳定性的增强不仅提升了产品合格率,还显著改善了工业连续化生产效率,是现代食品添加剂系统中不可或缺的重要技术支撑<sup>[1]</sup>。

### 5.2 磷酸盐类食品添加剂对产品品质一致性的作用

食品加工链条中多环节存在不确定性来源,包括原料波动、设备状态、环境湿热变化等,极易引发终端产品批次间品质差异。磷酸盐类食品添加剂通过调控反应条件、均衡原料性能差异以及缓冲外部扰动,可有效提升产品品质的可复制性。在调味肉制品中,通过磷酸盐协同调节蛋白吸水性和腌渍深度,可实现不同部位原料在质地和风味上的一致性。在焙烤食品中,其对面团形成与膨胀行为的稳定调控能力有助于控制成品的体积、色泽与组织结构标准化。在乳制品中,磷酸盐通过控制离子强度和酸度稳定乳状液状态,防止分层与沉淀,保障色泽、口感与香味批次间保持一致。工业化生产中,磷酸盐对不同批次原料的适应能力也表现出优越特性,可在一定范围内弥补原材料性能波动对产品输出稳定性的影响,为工艺复制性提供技术支撑。

### 5.3 磷酸盐类食品添加剂对食品货架期的调控作用

延长食品货架期是加工企业面临的重要目标,磷酸盐类食品添加剂在控制微生物生长、抑制化学劣变和维持产品

结构稳定方面发挥关键作用。其螯合能力可抑制金属催化的脂肪氧化反应,延缓色泽变化和异味生成。在乳品、熟肉及水产制品中,磷酸盐通过降低可用水活度与稳定蛋白结构,可有效减少因水析出或微生物繁殖带来的品质劣变。在焙烤制品中,其对膨胀过程和结构固化的调控作用使产品在运输与存储中具备更强的抗压能力和质地保持性。在冷冻食品中,磷酸盐可改善解冻后的保水性能,降低细胞破裂率,保持产品鲜嫩度。配合低温储藏或真空包装等措施,磷酸盐作为化学防护屏障,可显著提升货架期安全性与感官一致性,是实现品质长期稳定的核心添加剂<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

磷酸盐类食品添加剂在现代食品工业中展现出广泛而重要的技术价值。其通过调控体系酸碱环境、提升结构稳定性与延长货架期,在肉制品、水产品及烘焙面制品等多个领域发挥关键功能。不同类型磷酸盐具备多样化的理化特性与应用优势,能够适配多种加工需求,助力产品品质提升与生产效率优化。在追求食品工业高质量发展的背景下,科学、合理使用磷酸盐类添加剂,对于实现产品安全性、标准化与功能性目标具有重要意义,也为技术规范提供了有力支持。

## 参考文献

- [1] 徐珊珊.磷酸盐类食品添加剂中重金属含量调查及其检测方法改进[D].导师:李联泰;王林江.江苏海洋大学,2022.
- [2] 喻胜利,卞春丽,张芸,张亚娟,屈云.复合型磷酸盐食品添加剂的制备工艺研究[J].现代食品,2018,(19):185-187.
- [3] 崔鹤,张辉珍,刘靖靖,张晓文,梁旭峰,贝峰,崔成来,张锦梅,吕文良.山东省检验检疫科学技术研究院,水产品加工过程中食品添加剂多磷酸盐控制方法研究[Z].项目立项编号:10-3-3-23-nsh-2.鉴定单位:青岛市科学技术局.鉴定日期:2015-03-02.
- [4] 王丽芳,冯廷萃,王修俊,郑君花,李宝升.复合磷酸盐食品添加剂对猪肉丸保水效果影响的研究[J].食品工业科技,2014,35(12):320-323.

# Analysis of the Current Situation, Hazards and Safety Risks in the Design and Production Stage of Mechanical Equipment

Fei Cao

Suzhou Kehuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu, 215332, China

## Abstract

China's industrial development has driven widespread application of mechanical equipment, yet it has also led to increasingly prominent safety incidents that endanger lives and hinder corporate growth. Based on 2025 data from the Ministry of Emergency Management, this paper analyzes the current status, types, and characteristics of equipment accidents, delves into root causes through case studies, and focuses on identifying safety hazards during the design and production phases to provide evidence for source prevention. The research reveals that the core factors contributing to frequent accidents include the absence of design standards, inadequate protection and ergonomics, non-compliant production processes, materials, and assembly debugging, as well as loopholes in safety management and supervision.

## Keywords

mechanical equipment; safety accident; safety hazard; source prevention and control; supervision loophole

## 机械设备事故现状、危害及设计生产阶段安全隐患剖析

曹飞

苏州科环环保科技有限公司, 中国·江苏 昆山 215332

## 摘要

中国工业发展带动机械设备广泛应用,但其引发的安全事故也愈发突出,危及人员生命、阻碍企业发展。本文基于应急管理部2025年数据,分析设备事故现状、类型与特点,结合典型案例挖掘深层原因,重点探究设计生产阶段的安全隐患,为源头防控提供依据。研究表明,设计标准缺失、防护与人机工程不足,生产工艺、材料、装配调试不规范,以及安全管理监督漏洞,是事故频发的核心因素。

## 关键词

机械设备; 安全事故; 安全隐患; 源头防控; 监督漏洞

## 1、引言

### 1.1 研究背景

机械设备是工业生产核心要素,广泛应用于多领域并助力经济发展,但伴随严峻安全风险,中国机械行业事故频发已成为突出问题。据应急管理部2025年数据<sup>[1]</sup>,2024年中国机械行业(火灾、特种设备、燃气除外)发生事故312起、致300人死亡,较2023年分别上升0.6%和2.0%。事故高发于通用设备、汽车及专用设备制造业;常见类型为机械伤害、物体打击等,其中机械伤害事故124起、致死115人;检维修等工序事故占比显著。因此,把控设备设计生产阶段的安全是源头防事故的关键,需在设计环节融入安全理念,生产环节严控工艺质量,保障设备符合安全标准。

### 1.2 研究意义

本研究从设备设计生产阶段切入探索事故遏制路径,兼具理论与实践意义。保障人员安全上,把控该阶段安全可从源头降低事故风险,减少伤亡,如增设合理防护装置可避免机械伤害。促进企业发展上,此举能减少事故造成的经济损失与声誉损害,提升设备可靠性,降低运营成本,增强竞争力,助力可持续发展。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 安全设计研究现状

(1)国外机械设备安全设计起步早、成果丰。美国OSHA出台详细法规,要求通过设计消除或降低安全隐患,强制配备防护、联锁等安全装置;欧洲CEN和CENELEC制定的机械安全标准覆盖风险评估、防护设计等多方面,影响广泛。同时,国外引入可靠性设计、人机工程学等理论,提升设备安全性与操作舒适性。

(2)国内在此领域也成效显著,已构建以《安全生产法》《特种设备安全法》为核心的法规体系,形成国标、行标、

【作者简介】曹飞(1986-),男,中国辽宁锦州人,本科,工程师,从事化工安全管理研究。

企标三级标准架构,覆盖设备全环节。国内学者针对矿山机械、工业机器人等不同设备开展研究,通过结构优化、材料升级、研发安全控制系统等方式,提升设备安全性能。

## 2.2 生产标准研究现状

(1) 国际标准化组织(ISO)与国际电工委员会(IEC)制定多项国际标准,规范设备材料、工艺、质控等环节,保障设备安全质量并促进国际贸易,如ISO12100明确了机械安全设计的风险评估与降低原则。

(2) 中国积极采用国际标准,结合国情完善国标与行标,通过强化企业监管推动其按标生产,提升设备本质安全水平,如起重机国标对结构设计、零部件制造等环节作出详细要求。同时,中国推行质量管理体系、安全等认证,督促企业完善管理,提高产品质量与安全性。

## 2.3 事故预防研究现状

(1) 国外学者运用故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)等方法剖析设备事故,提出预防措施;企业多采用职业健康安全管理体系(OHSMS),通过完善制度、明确责任、强化培训提升安全管理水平。

(2) 国内学者结合国情,经事故案例统计分析总结事故特点规律,提出安全教育、制度建设、信息化监测预警等预防策略,同时在智能防护装置、物联网远程监控等技术上取得进展<sup>[2]</sup>。

(3) 当前研究仍存不足:设备设计生产与事故预防的关联性研究缺乏系统深度,跨学科协同机制尚未形成,新技术新材料应用的安全风险评估与控制研究滞后于技术发展需求。

## 3 研究方法

### 3.1 研究方法

(1) 案例分析法:收集整理某玻纤厂“6.21”等典型机械伤害事故案例,分析事故经过、原因、后果及责任认定,明确设备设计生产环节的问题,为提出针对性安全措施提供现实依据。

(2) 对比研究法:对比国内外机械设备安全设计理念、生产标准及事故预防措施,分析法规政策、技术标准、管理模式的差异,总结优劣,借鉴国外先进经验<sup>[3]</sup>,结合中国国情提出适配的安全策略。

## 4 机械设备事故现状与危害分析

### 4.1 机械设备事故类型及特点

#### 4.1.1 常见事故类型

(1) 机械伤害是常见的设备事故类型,设备运动部件易造成夹击、剪切、卷入等伤害,如冲床、木工机械、操作不当或防护缺失,均会引发人身损伤。

(2) 电气故障类事故占比不低,短路、过载、漏电等问题易引发火灾、爆炸或触电事故,老旧设备绝缘层破损、漏电保护失效等情况,曾造成重大财产损失和人员伤亡。

(3) 火灾爆炸事故成因复杂,除电气故障外,设备运

行产生的高温、火花、静电等都可能成为点火源;化工等行业若设备密封不严导致易燃易爆物质泄漏,接触点火源后极易引发严重事故。

(4) 物体打击事故多因设备零部件松动脱落、操作不当所致,如起重机吊钩保险失效、砂轮安装不牢、检修时工具零件未固定,均可能造成物体飞落伤人。

#### 4.1.2 事故特点分析

(1) 突发性:事故多由设备故障、零件损坏等不可预见因素引发,瞬间爆发且难以预警,人员往往来不及采取防护措施。

(2) 严重性:事故易造成人员重伤或死亡,导致设备损毁、企业生产中断,还可能引发有害物质泄漏,污染土壤、水源和空气。

(3) 重复性:部分企业因安全管理缺位、设备维护滞后,同类事故反复发生,暴露出事故预防存在严重漏洞。

(4) 多样性:事故类型涵盖机械伤害、电气故障、火灾爆炸等多种类别,不同类型事故的成因、危害及应对措施差异显著,增加了防控难度。

(5) 人为因素主导:操作人员违规操作、安全意识薄弱、技能不足,以及管理人员隐患排查和培训不到位,是引发事故的主要原因。

## 4.2 典型事故案例深度剖析

### 4.2.1 案例一:某电子有限公司机械伤害事故

2024年6月17日16时58分,某电子有限公司压合车间领班吕某兵,在移栽机未停机时进入运行区域俯身放置铜板,因身体低于安全棒高度致防护失效,被吸盘装置拉入拆解台挤压受伤。17时25分被发现后送医,18时28分抢救无效死亡。

事故直接原因为吕某兵安全意识淡薄,违规在设备运行时进入危险区域作业;间接原因是企业未落实安全生产主体责任,安全管理制度与培训缺位,现场监管不力,且设备安全棒高度设置不合理,防护装置未发挥作用。

此次事故警示企业需落实主体责任,健全安全管理制度,强化员工安全教育培训;优化设备防护装置设计,确保防护有效;加强现场安全监管,及时制止违规操作,筑牢安全生产防线。

## 4.3 事故造成的损失与影响

### 4.3.1 人员伤亡与健康损害

机械设备事故对人员生命健康危害极大,易造成骨折、截肢、颅脑损伤等重伤甚至死亡,幸存者也可能留下终身残疾,丧失部分劳动能力、降低生活质量。

### 4.3.2 经济损失评估

机械设备事故会给企业造成多重经济损失:

(1) 设备损坏与维修成本:事故易造成设备严重损毁,大型精密设备的维修费用高昂,部分进口设备还存在零部件采购周期长的问题。

(2) 生产停滞损失:事故后企业需停工整改,不仅直接损失销售收入,还可能因无法按期交货面临违约赔偿,同时固定成本无法分摊,市场份额与声誉也会受损。

(3) 赔偿费用与法律责任: 企业需承担高额的人员伤亡赔偿, 还可能面临行政处罚、法律诉讼, 承受罚款、停产整顿等额外损失。

#### 4.3.3 社会负面影响

机械设备事故会造成多重负面影响:

(1) 企业声誉损失: 事故经媒体曝光和公众关注后, 会损害企业形象, 降低消费者信任度, 导致产品销量下滑、市场份额流失; 同时影响企业与供应商、合作伙伴的关系, 增加运营成本与发展阻力。

(2) 行业形象受波及: 单起严重事故可能引发公众对整个行业安全状况的质疑, 导致客户对行业内企业持谨慎态度, 甚至出现项目招标困难等问题, 阻碍行业整体健康发展。

## 5 设备设计生产阶段安全隐患剖析

### 5.1 设计环节潜在安全隐患

#### 5.1.1 安全标准遵循不足

部分企业在机械设备设计阶段未严格遵循安全标准, 是造成设备先天性安全缺陷的主因。例如小型冲床制造企业未按国标优化滑块行程等关键参数, 大幅提升操作风险。

#### 5.1.2 安全防护设计缺陷

安全防护装置是保障操作人员安全的重要防线, 其设计不合理、缺失或失效, 极易引发机械设备事故。部分设备防护装置设计简陋, 如小型木工机械锯片仅配备简易挡板, 无法完全覆盖危险区域。

#### 5.1.3 人机工程学考虑欠缺

机械设备设计若未充分考量人机工程学原理, 易导致操作人员疲劳、误操作, 进而提升事故风险。人机工程学的核心是通过优化设计, 让设备操作契合人体生理心理特点, 保障操作舒适、便捷与安全。

### 5.2 生产制造过程安全问题

#### 5.2.1 制造工艺与质量控制

制造环节工艺不合理、质量管控不严, 会导致设备零部件质量不稳定、可靠性差, 严重影响设备安全性能。制造工艺决定零部件加工精度与性能, 质量控制则是保障工艺落地、零部件达标关键。部分企业为降本提效采用不合理工艺, 如小型加工厂降低零部件加工精度, 造成尺寸偏差大、设备运行不稳; 焊接参数设置不当引发焊缝开裂、虚焊, 起重机等设备的关键结构件若存在此类缺陷, 使用中可能因断裂引发严重事故。质量控制不严问题突出: 部分企业缺乏完善质控体系, 原材料采购未严格筛选供应商, 钢材等材料性能不达标; 零部件加工和成品检验环节流于形式, 尺寸超差、性能不合格的零部件和设备流入市场, 埋下安全隐患。

#### 5.2.2 材料选用不当

材料选用直接关系机械设备的安全性能与使用寿命, 需结合设备使用环境、工况及性能要求合理选择, 材料的强度、耐磨性、耐腐蚀性等指标不达标会引发各类安全问题。部分企业为降成本盲目选用劣质材料: 矿山机械关键部件未用高强度耐磨材料, 易出现磨损断裂; 化工设备外壳、管道

未用耐腐蚀材料且无防腐处理, 可能引发泄漏、爆炸事故。

#### 5.2.3 装配与调试违规操作

装配环节中, 操作人员常违规操作, 如零部件安装顺序错误、装配间隙调整不当、螺栓未按规定扭矩紧固等。例如活塞装反会致发动机失效, 轴承间隙不合理会加剧设备磨损; 凭经验紧固螺栓而非使用扭矩扳手, 易造成螺栓松动或断裂, 引发严重事故。调试环节的违规操作同样突出, 调试人员存在参数设置错误、顺序混乱、调试前未检查安全防护装置等问题。如电气设备参数设置失误可能烧毁设备或引发触电, 防护装置未检查则会提升操作风险。

### 5.3 安全管理与监督漏洞

#### 5.3.1 企业内部安全管理制度不完善

企业设备设计生产阶段安全管理制度不健全、责任划分不明确, 是引发安全问题的重要内因, 完善的制度是规范生产、落实安全措施的基础。部分企业缺乏系统的安全管理制度, 未制定详实的操作规程、检查制度及培训制度, 导致员工操作无章可循。

#### 5.3.2 第三方监管缺失或不力

监管部门对设备设计生产企业监管缺位, 未能及时排查整改安全隐患, 一定程度上纵容了企业的不安全行为, 而第三方监管本是保障设备设计生产安全的重要外部约束力量。部分监管部门存在职责划分不清、监管力量薄弱的问题: 区域内不同部门间权责模糊, 出现监管重叠或空白, 新兴设备产品或技术的监管易因部门推诿出现漏洞。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

中国机械设备事故呈小幅上升态势, 2024 年发生 312 起、致死 300 人, 以机械伤害等类型为主, 具有突发性、严重性等特点, 造成人员伤亡、企业经济损失及不良社会影响。事故核心诱因在于设计生产阶段: 设计环节存在标准遵循不足、防护缺陷等问题; 生产中工艺、材料、装配调试不规范; 企业管理与第三方监管存在漏洞。国内外已有相关法规标准, 但设计生产与事故预防的关联性研究仍显不足。

### 6.2 展望

未来需深化安全设计与跨学科融合, 完善设计生产安全标准与法规, 强化企业全生命周期安全管理, 优化第三方智能化监管。同时加强多学科协同研究, 聚焦重点设备隐患防控, 推动技术创新与安全保障同步, 从源头遏制事故, 提升行业整体安全水平。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 2024 年全国机械行业安全事故统计数据 [R]. 2025.
- [2] 国外学者关于故障树分析 (FTA)、失效模式与影响分析 (FMEA) 在设备事故预防中应用的研究成果 [J]. 国际安全与可靠性工程期刊等.
- [3] 国际标准化组织 (ISO)、国际电工委员会 (IEC). 机械设备生产制造相关国际标准 [S].

# Effect of Pre-vulcanization Temperature on Film Strength of Polyisoprene Latex

Zhaoling Meng Shihao Wang Jinli Huang Hongkai Lin Liuyang He

PUYANG LEXONSS POLYCHEM CO.,LTD., Puyang, Henan, 457000, China

## Abstract

This study employed the equilibrium swelling method to determine the crosslinking density of vulcanized rubber, while evaluating the pre-vulcanization degree of latex, tensile strength of rubber films before and after aging, and tear strength during aging. The research systematically investigated the effects of pre-vulcanization temperature on the pre-vulcanization behavior of polyisoprene latex and the properties of rubber films. Results demonstrated that the optimal film performance was achieved when the vulcanization degree ranged from 110% to 180%, with the highest strength observed before and after aging within this range. At 40°C pre-vulcanization temperature, the optimal crosslinking density and vulcanization degree were reached within 6 hours. For temperatures between 50°C and 60°C, the optimal conditions were achieved within 3 hours. Notably, 70°C pre-vulcanization accelerated the reaction, reaching the over-vulcanization stage within 3 hours. The study also validated the primary experimental phenomena observed during the initial and later stages of rubber thermal aging theory.

## Keywords

Pre-vulcanization temperature; Crosslinking density; Thermal aging

## 预硫化温度对聚异戊二烯胶乳成膜强度的影响

孟兆玲 王世浩 黄金丽 林洪凯 贺留洋

濮阳乐享化科新材料有限公司, 中国·河南濮阳 457000

## 摘要

本文采用平衡溶胀法测试硫化胶的交联密度, 并测试预硫化胶乳硫化程度、胶膜老化前后抗拉强度、老化前后撕裂强度。本研究旨在系统性地探究预硫化温度对聚异戊二烯胶乳预硫化行为及其胶膜性能的影响。结果显示, 当硫化程度在110%-180%时胶膜性能最佳, 此范围内胶膜老化前后的强度最好; 当预硫化温度40°C时, 达到最佳交联密度和硫化程度的时间为6 h; 当预硫化温度50°C-60°C时, 达到最佳交联密度和硫化程度的时间为3 h; 预硫化温度为70°C时加速预硫化反应, 3 h便达到过硫阶段; 并验证了橡胶热老化理论初期与后期主要的实验现象。

## 关键词

预硫化温度; 交联密度; 热老化

## 1 引言

从日常生活的医用手套<sup>[1]</sup>、避孕套<sup>[2]</sup>到工业领域的气象气球、海绵, 再到高端技术领域的柔性传感器和导管, 由天然胶乳(NR)制成的制品已深入人类生活的方方面面。这些制品之所以能获得如此广泛的应用, 归根结底在于胶乳成膜后所展现出的独一无二的综合性能: 卓越的高弹性、优异的柔韧性、出众的断裂伸长率和良好的机械强度。然而, 以天然胶乳为原料的体系存在其固有的局限性: 蛋白质含量高可能引发人体过敏反应; 成分批次差异性大影响产品质量稳定性; 以及非橡胶组分的存在可能对某些精密化学或生物应用产生不利影响。

为克服天然胶乳的上述缺陷, 合成聚异戊二烯胶乳(IR胶乳)应运而生。IR胶乳通过化学合成模拟了天然橡胶的核心分子结构顺式-1,4聚异戊二烯, 从而在保留其优异力学性能和弹性本质的同时, 实现了成分的高度纯净、批次间的稳定性以及极低的生物致敏性。这使得IR胶乳成为高端医用制品、特别是需直接接触人体体液或组织的高价值医疗器械的理想材料, 代表了胶乳产业向高性能、高可靠性方向升级的重要路径。

无论是天然胶乳还是合成胶乳, 其从液态乳液转变为具有实用价值的固态胶膜制品, 都必须经过一个至关重要的工艺环节-预硫化。预硫化是指在胶乳的液态水相体系中, 通过加热并配合硫化体系(硫磺、促进剂、活化剂等), 使橡胶大分子链在胶乳粒子内部及之间发生化学交联, 初步形成三维网络结构的过程。这一过程直接决定了后续成膜工艺的可行性以及最终制品的核心物理机械性能。一个控制得当

【作者简介】孟兆玲(1995—), 女, 中国陕西榆林人, 硕士, 助理工程师, 从事高分子乳胶制品应用开发研究。

的预硫化过程，能赋予胶膜足够的强度，使其在从模具上剥离、干燥过程中不致变形或破裂；而预硫化的最终程度，则从根本上定义了成品胶膜的定伸应力、拉伸强度、撕裂强度等关键使用性能。

尽管预硫化工艺至关重要，但在针对聚异戊二烯胶乳的研究与生产实践中，一个核心工艺参数 - 温度的系统性影响机制尚未得到充分阐明。温度是驱动硫化化学反应最关键的动力学因素：温度过低，则交联反应缓慢，生产效率低下且可能导致硫化不足，产品性能劣化；温度过高，则面临胶粒破乳、稳定性下降、交联网络过度生成甚至降解（过硫）的风险，同样损害最终性能。

因此，为填补上述研究空白，并为指导高性能聚异戊二烯胶乳制品的精细化生产提供科学依据，本研究旨在系统性地探究预硫化温度对聚异戊二烯胶乳预硫化行为及其胶膜性能的影响。

## 2 实验

### 2.1 主要原材料

聚异戊二烯胶乳，濮阳乐享化科新材料有限公司；硫化包，市售产品。

### 2.2 主要仪器和设备

恒温水浴锅，上海予申仪器有限公司；电热鼓风干燥箱，天津市泰斯特仪器有限公司；电子天平，上海英衡电子秤有限公司；测厚仪，德恩斯仪器科技有限公司；电动冲片机，扬州昌哲试验机有限公司；电子万能试验机，宁波伟恒检测仪器有限公司。

### 2.3 试样制备

#### 2.3.1 预硫化胶乳制备

将聚异戊二烯胶乳使用 80 目滤网过滤后进行搅拌，按照干重占比加入 5 份硫化包，加入适量纯水稀释，放置 70℃、60℃、50℃和 40℃恒温水浴锅中 200r/min 进行恒温搅拌完成预硫化，分别在 3h、6h 进行胶膜制作。

#### 2.3.2 聚异戊二烯胶膜制作

复合聚异戊二烯预硫化胶乳→模具清洗、干燥→蘸取凝固剂、干燥→浸胶→定型→滤洗→卷边→固化→脱模。

#### 2.3.3 性能测试

各种测试方法均按照国家标准以及相应的标准进行测试。具体测试标准如下：拉伸测试：GBT/52-92；撕裂测试：GB/529-91；配合胶乳硫化程度测试：GB/T23655-2009；老化测试：GB/T3512-2014。

交联密度：采用平衡溶胀法测硫化胶的交联密度。

平衡溶胀法：从试样中选取厚度为 2 mm，直径约为 25 mm 的薄片，称量质量得  $m_1$ ，然后将试样放在盛有 40 ml 甲苯的广口瓶中，密封好，在 25℃下溶胀 72 h，取出后用滤纸吸去表面的溶剂，立即称量质量为  $m_2$ ，然后在 50℃真空干燥箱中干燥至恒重，称得质量为  $m_3$ 。

可得橡胶相在溶胀硫化胶中的体积分数  $V_r$ ：

$$V_r = \frac{m_3/\rho}{m_3/\rho + (m_2 - m_1)\rho_s} \quad (1)$$

式中， $\rho_s$  甲苯的密度取 0.866 g/ml； $\rho$  为橡胶的密度；根据 Flory-Rehner 公式：

$$V_e = \frac{\ln(1 - v_r) + v_r + \chi v_r^2}{V_s(0.5v_r - v_r^{1/3})} \quad (2)$$

式中， $V_e$  为交联密度； $\chi$  是橡胶与溶剂的相互作用参数，天然胶与甲苯的作用参数为 0.393； $V_s$  甲苯摩尔体积为 106.4 cm<sup>3</sup>/mol。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同预硫化温度对配合胶乳硫化程度的影响

利用甲苯溶胀法测试配合胶乳硫化程度，不同预硫化温度对配合胶乳硫化程度结果如下表 1。

表 1 不同预硫化温度对配合胶乳硫化程度

硫化程度 /%	预硫化温度 /℃			
	70℃	60℃	50℃	40℃
3h	108%	174%	180%	200%
6h	88%	112%	148%	164%

由表 1 可知，随着预硫化温度的增加，胶乳硫化程度的数值降低，说明预硫化温度越高，胶乳的硫化反应越完全。且在同一温度条件下，随着预硫化时间的增加硫化程度的数值降低；同时发现胶乳在 6h，预硫化温度 40℃时硫化程度与胶乳在 3h 预硫化温度 60℃时相差不大；说明可以通过提高预硫化温度减少预硫化反应时间，但温度的选择不可大于 60℃，会导致胶乳本身稳定性下降，出现胶乳老化过快的的问题。

### 3.2 不同预硫化温度对力学性能的影响

不同预硫化温度对力学性能的影响如图 1、图 2。

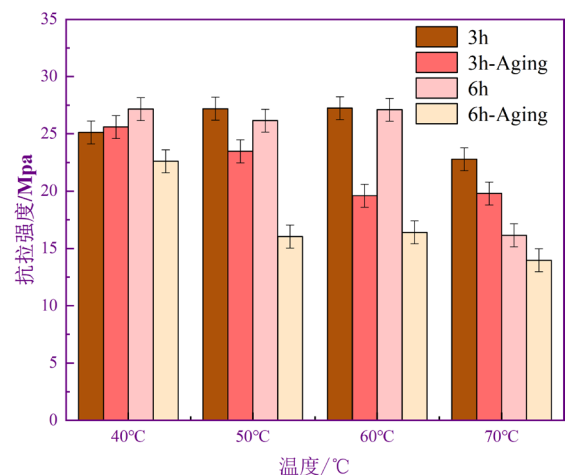


图 1 不同预硫化温度下，老化前后抗拉强度对比

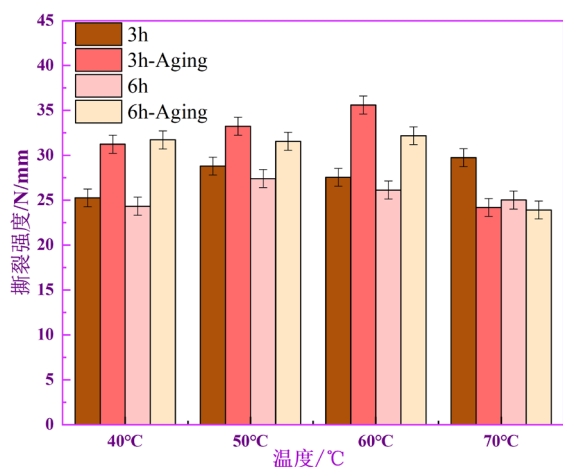


图2 不同预硫化温度下, 老化前后撕裂强度对比

表2 不同预硫化温度下, 老化前后断裂伸长率的对比

断裂伸长率/%	预硫化时间/h	预硫化温度/°C			
		70°C	60°C	50°C	40°C
	3h	837.70	879.03	825.10	824.88
	3h-Aging	795.80	790.88	735.78	784.53
	6h	797.23	849.55	832.03	843.80
	6h-Aging	725.53	788.20	762.10	776.78

表3 不同预硫化温度下, 老化前后定伸500强度的对比

定伸500强度/Mpa	预硫化时间/h	预硫化温度/°C			
		70°C	60°C	50°C	40°C
	3h	2.16	2.02	2.18	2.14
	3h-Aging	2.43	2.19	2.53	2.29
	6h	2.30	2.02	2.15	2.18
	6h-Aging	2.52	2.12	2.23	2.25

聚异戊二烯胶乳的硫化程度与其抗拉强度之间存在着倒U型关系, 即抗拉强度随着硫化程度的数值降低而提高, 达到一个最优值后, 过硫化反而会导致强度下降<sup>[3]</sup>。由图1可知, 在预硫化时间3h时, 随着预硫化温度的提高, 胶膜抗拉强度先升高后降低。由表1可知预硫化时间3h, 预硫化温度40°C时硫化程度为200%, 预硫化反应不足, 导致抗拉强度偏低; 预硫化时间3h, 预硫化温度70°C时硫化程度为108%, 过硫化抗拉强度降低; 分析认为, 硫化程度数值在110%-180%时属于极值范围。在预硫化时间6h, 预硫化温度40°C硫化程度与预硫化时间3h, 预硫化温度60°C硫化程度接近, 抗拉强度也接近; 在预硫化时间6h, 预硫化温度70°C时硫化程度为88%, 其对应抗拉强度只有16.14Mpa; 由此可知过硫反应会对胶膜抗拉强度破坏性极大, 且不可逆。在预硫化时间6h, 预硫化温度70°C时完成浸胶、固化后胶膜出现开裂现象, 见图3。

由图1可知, 胶膜老化后抗拉强度均有不同程度的降低; 随着预硫化温度的增加, 胶膜老化后抗拉强度逐渐降低, 并且发现老化反应弥补了预硫化3h, 预硫化温度40°C预硫化

不足抗拉强度偏低的缺点; 但老化反应会进一步放大, 预硫化3h预硫化温度70°C过硫导致强度偏低的问题。图2显示胶膜老化前后撕裂强度的变化, 预硫化温度60°C, 预硫化3h时撕裂强度最大, 此时交联密度为 $2.238\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 10^{-4}$ ; 预硫化6h, 预硫化温度40°C时拉伸强度值最大, 此时交联密度为 $2.971\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 10^{-4}$ , 可知达到最佳撕裂强度的交联密度比拉伸强度达到最佳时的交联密度低, 也证实了预硫化温度较高时, 虽交联密度低, 但撕裂强度比较高<sup>[4]</sup>的观点。



图3 预硫化时间6h, 预硫化温度70°C时完成浸胶、固化后胶膜状态

通过图2、表2和表3发现胶膜老化后, 除去预硫化温度70°C, 其他预硫化温度条件下, 撕裂强度均提高, 并且与之对应的定伸500强度增加, 断裂伸长率降低。通过分析得出结论, 老化条件70°C度, 7d导致撕裂强度增大主要原因是温和而长期的热作用引发了后交联反应导致; 抗拉强度下降是因为老化产生了新的、更短交联键, 虽然增加了总的交联点数量, 但也极大的限制了分子链的移动性和伸展能力; 老化后交联密度提升, 裂纹在扩展时, 需要破坏更多化学键, 即撕裂强度数据上升。

### 3.3 不同预硫化温度对交联密度的影响

不同预硫化温度对交联密度的影响如表4。

表4 不同预硫化温度对应的交联密度

交联密度/( $\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 10^{-4}$ )	预硫化时间/h	预硫化温度/°C			
		70°C	60°C	50°C	40°C
	3h	2.263	2.238	2.206	2.163
	6h	2.274	2.435	2.512	2.971

由表4可知, 预硫化时间3h, 随着预硫化温度的降低, 交联密度呈降低趋势, 在70°C时达到最高值。在相同的预硫化温度下, 随着预硫化时间的增加, 交联密度均提高。结果显示在预硫化时间6h, 预硫化温度40°C时交联密度值最大, 且对应胶膜抗拉强度最大, 硫化程度也在正常范围内; 预硫化时间为6h时, 预硫化温度为40°C、50°C和60°C时

均硫化完全属于正硫阶段,结果显示交联密度依次降低,原因是此阶段已经形成多硫交联键,而多硫交联键在长时间高温下不稳定,容易发生断裂,引起交联密度依次下降<sup>[5]</sup>。

#### 4 结语

(1) 预硫化胶乳的状态的判断可根据硫化程度的测试进行初步评定,硫化程度数值越低则预示胶乳预硫化完全,即将进入过硫阶段,胶膜强度将降低。

(2) 聚异戊二烯胶乳的硫化程度与其抗拉强度之间存在着倒U型关系,过硫化会导致强度下降;硫化程度的数值与预硫化温度和预硫化时间成反比关系。

(3) 预硫化温度和预硫化时间对交联密度影响极大,预硫化温度为70℃时加速预硫化反应,3 h便达到过硫阶段。分析可知,当预硫化温度40℃时,达到最佳交联密度和硫化程度的时间为6 h;当预硫化温度50℃-60℃时,达到最佳交联密度和硫化程度的时间为3 h。

(4) 橡胶热老化理论的本质是热能引发橡胶分子链发生

交联与断裂的竞争反应,预硫化温度40℃、50℃、60℃时胶膜老化后试验现象,撕裂强度短期上升与抗拉强度下降共存,验证老化初期交联交联反应占主导,且导致胶膜网络脆化的理论阶段;预硫化温度70℃时所制备胶膜老化后出现撕裂强度降低、抗拉强度降低,为老化后期以断链降解为主。

#### 参考文献

- [1] 刘英昌.我国橡胶医用手套和橡胶家用手套生产现状及发展趋势[J].橡胶科技市场,2003,(22):1-2+10.
- [2] Ansell Revolutionizes Global Condom Market with SKYN(R) Premium Polyisoprene Range[J].M2 Presswire,2012,
- [3] 张殿荣,辛振祥.橡胶配方设计[M].北京:化学工业出版社,2001,9:48-49.
- [4] 吴明生,安鲁.硫化温度对NR高温下拉伸/撕裂性能的影响[J].橡塑技术与装备,2014,40(02):57-60.
- [5] 毕薇娜.天然橡胶交联密度和动态性能的研究[D].青岛科技大学,2007.

# Experimental and mechanism study of plasma assisted coal liquefaction technology

Bo Xing

Xinjiang Hami energy and Chemical Co., Ltd., of national energy group, Hami, Xinjiang, 839000, China

## Abstract

due to the growing demand for energy, coal, as one of the most important energy, has become the core issue of the energy industry to realize its efficient transformation and clean utilization. The plasma assisted coal liquefaction technology is widely concerned because of its high efficiency and environmental protection. In this paper, the reaction characteristics, product distribution and reaction mechanism in the process of plasma assisted coal liquefaction were discussed from two aspects of experiment and mechanism by using the relationship between plasma triggering the conversion of coal molecules and catalyst. Plasma discharge is used to activate the free radicals with low activation energy in the process of coal liquefaction to accelerate the cracking and hydrogenation of coal, so as to better promote the coal liquefaction reaction. The experimental results show that with the aid of plasma, the conversion rate of coal liquefaction process is increased by more than 20% compared with the traditional liquefaction process, and the content of aromatic and olefins in liquid products is significantly increased, which provides a new way and theoretical thinking for better design of coal liquefaction technology.

## Keywords

Plasma assisted; Coal liquefaction; Reaction mechanism; Free radicals; Liquid products; Catalyst; Energy conversion

## 等离子体辅助煤液化技术的实验与机理研究

邢波

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 中国·新疆哈密 839000

## 摘要

由于能源需求的日益增长, 煤炭作为最主要的能源之一, 实现其高效转化与清洁利用, 成为能源行业的核心课题。而等离子体辅助煤液化技术由于高效环保的特点而广受关注。本文利用等离子体触发煤分子的转化以及与催化剂作用关系, 从实验和机理两个方面探讨了等离子体辅助煤液化过程中反应的特征、产品分布与反应机理。利用等离子体放电激活煤液化过程中活化能低的自由基, 加快煤的裂解、加氢, 达到更好地促进煤液化反应。实验结果显示, 借助等离子体的辅助, 煤液化过程的转化率较传统的液化工艺提升20%以上, 同时液相产品中芳香族、烯烃族含量大幅度增加, 为更好地设计煤液化技术提供了新的途径和理论思路。

## 关键词

等离子体辅助; 煤液化; 反应机理; 自由基; 液体产物; 催化剂; 能源转化

## 1 引言

鉴于能源需求不断增加, 煤炭作为一种重要的能量来源, 其高效清洁转化利用已成为当今研究热点。尽管已经通过传统煤液化工艺在一定程度上实现了煤炭的转化, 但仍然存在低能效和对环境具有破坏性的问题。近些年, 因能产生活化自由基和高能电子的优势, 等离子体技术作为新一类的能源转换方法被广泛应用于各类化学反应, 其中在煤液化进程中的潜在应用前景尤为引人注目。等离子体辅助煤液化工艺在提高煤液化效率的同时, 能改善液化产率分布和品级。

【作者简介】邢波(1983—), 男, 中国甘肃张掖人, 本科, 工程师, 从事煤直接液化研究。

## 2 研究背景与意义

### 2.1 煤液化技术的现状与挑战

煤液化技术是将煤转化为液体燃料的技术, 被看作是将煤资源高效和绿色环保利用的重要途径, 随着世界各国能源需求的持续增长, 煤液化凭借其可替代石油进行能量转化的技术特性, 成为当前能源领域的研究与应用热点。目前煤液化技术可分为直接液化和间接液化两大类, 直接液化是通过将氢气作为反应介质在高温高压下的氢化反应获得的, 而间接液化则是将煤转化为合成气, 在合成气的 FT 等方法下形成液体燃料。尽管两种方法已经有了一定的应用, 但是仍然有诸多的问题。其中最主要的问题是, 煤液化过程的高能耗, 制约了煤液化技术的经济效益和环境的友好性。与此

同时,由于煤气化过程与裂解过程较为复杂,且所需的反应温度和压力条件较为苛刻,所生成的液体产物质量以及分布难以精准控制。因此,如何在提高煤液化转化率、提升液化产品质量的同时,降低能耗和污染物排放量,是目前煤液化技术发展面临的主要问题。

## 2.2 等离子体技术的应用与发展

等离子体技术是以发生高能放电获得的离子状态气体为特色,包括温度高、密度低以及大量自由基、离子等活性粒子,近些年已被广泛应用于化学反应、材料制取和污染治理等领域。由于等离子体具有高能态和高活性,可导致分子发生反应,并加快反应速率,部分反应甚至可在常温常压条件下实现。等离子体在煤炭液化方面,克服了传统煤炭液化流程中能耗过大、反应太复杂等弊端,其核心作用机制在于等离子体通过促进煤的分解生成大量的自由基,进而促进煤的液化,从而提升煤炭液化效果和产品品质。随着等离子体放电发生器和控制技术持续的研究和发展,等离子体辅助煤炭液化技术是目前煤炭液化领域的研究热点之一。

## 3 等离子体辅助煤液化的实验研究

### 3.1 等离子体反应装置与实验设置

本文设计的等离子体煤加氢催化裂解模拟实验装置,主要由等离子体制备装置、反应管、温度压力控制单元、气体流量控制装置等组成。通过高脉冲高压放电技术产生等离子体,在反应系统内释放出较多、较高能量的电子、活性基团及离子体,能够有效促进煤分解液化;通过温度压力可控单元对反应管温度、压力进行精确控制,模拟煤加氢反应过程温度压力环境;在实验过程中,煤样品与催化剂混合后投入反应管,在等离子体作用下发生反应,还可通过调节温度、压力及等离子体强度实现参数控制;并引入气体流量控制装置,对氢气等气体流量进行控制,保证实验正常进行。该装置具有的温度控制、气态控制、电气控制性能良好,完全可以准确模拟等离子体辅助煤液化过程的化学反应过程。

### 3.2 煤液化反应的实验过程

首先选取目标粒度的煤炭,并在其表面添加助燃剂,置入反应器内,提高反应容器中的温度到反应所需的目标温度,通过氢气等反应提供还原反应的反应环境,打开等离子体发生装置,注入大量高电子能级离子、自由基,发生煤炭分子的碳链分解及氢气协同作用,过程中由原来碳链大分子变成碳链小分子和液状产物,实验过程中将会实时监测反应温度、反应压力、等离子体能量等实验因素对煤液化率的影响,并在一段时间后将目标粒度煤炭测试样抽出一部分作为实验材料,采用气相色谱仪、液相色谱仪对其成分含量和质量含量进行检测,针对煤的液化率和产液率进行研究。在实验过程中,可不断调节等离子体功率、温度、压力等反应参数,以判断其对煤液化试验的影响。

### 3.3 实验结果与分析

实验表明,在煤液化中加入等离子体显著提高煤的

转化率,能够使煤液化转化率较常规的煤液化方式提高20%~30%;等离子体参与煤液化过程时,可促使煤分子大分子分解成小分子,从而降低液化过程的反应难度,并显著提升液体产品中芳烃和烯烃比,这一现象表明等离子体能够加快煤液化加氢进程。此外反应温度、等离子体强度和等离子体助剂类型对煤的液化转化效率、煤的转化率以及转化产物的质量具有显著影响;实验中发现合适的等离子体强度能够促进煤的液化反应并提高液化反应效率,但是过大的等离子体强度造成浪费并降低反应产品的质量;实验优化反应条件如提高 $H_2$ 流速和反应温度可以继续提高煤液化的效率和反应产物的质量。综上所述,等离子体辅助煤液化工艺在提高煤的液化效益的同时,也优化了液化产物的质量和组成,为煤液化的高效绿色应用提供了新的技术路线。

## 4 等离子体辅助煤液化的反应机理分析

### 4.1 等离子体对煤分子结构的激发作用

等离子体技术不仅涉及高能粒子对煤炭分子结构的激发作用,还可以为煤液化过程中的样品分析提供重要数据支持。在煤液化的过程中,等离子体技术能够帮助生成自由基和其他活性中间产物,促进煤炭分子裂解。然而,实验中更为重要的是如何利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)等先进分析仪器来定量分析煤液化过程中的中间产物及最终产物,并指导煤液化反应的优化。因此,等离子体辅助煤液化的技术不仅体现在化学反应的机理上,更体现在其对煤液化中间控制样品及产品分析化验的应用上。

### 4.2 等离子体产生的自由基及其对煤的降解作用

在等离子体状态下生成的自由基(如氢自由基( $H\cdot$ )、羟基自由基( $OH\cdot$ )、氧自由基( $O\cdot$ ))能够有效打破煤分子中的碳-碳键或碳-氢键,引发煤分子裂解。在实验过程中,ICP-OES等分析仪器可以监测自由基生成过程中的化学变化,并对生成的裂解产物进行实时分析。通过这种分析方法,可以优化煤液化反应的参数设置,减少加氢及结焦等问题,提高煤液化的效率和产物质量。

### 4.3 反应机理的理论模型

#### 4.3.1 基于自由基理论的煤液化反应机理

根据自由基理论,煤液化过程包括断裂、形成自由基和加氢等过程。在此过程中,电磁感应共振等离子体发射光谱仪(ICP-OES)可以提供有用的操作数据,例如,当煤分子发生断裂时,仪器可以在线对各种类型裂解产物(包括微烯烃和小分子芳香化学品)做出变化反应,为调节反应过程而获得最佳效果提供依据。通过有效的产品测量方法,早期就能预测煤液化进程,从而提高煤液化的过程性能。

#### 4.3.2 等离子体辅助下煤分子与催化剂的相互作用

催化剂和煤炭液化时使用的等离子体的组合效应对煤炭液化反应至关重要。主要是在煤炭液化反应中能够降低反应需要的能耗并提高反应的效果,在等离子体内利用提供的高能粒子来激发催化剂的活性,ICP-OES对催化剂表面活性

位精准测量可以用来优化催化剂的设计进而加快煤炭液化的速率,并且改善煤炭液化产品的质量。此外,煤液化产品成分变化趋势可以帮助研究出用于解决煤液化产品中加氢、结焦等问题的新型催化剂,扩大煤炭液化产品的应用范围。

#### 4.3.3 数据:等离子体激发使得煤分子中的大分子裂解成较小分子,促进了加氢反应

据试验显示,运用等离子体介入煤液化的过程效果不仅体现在提高转化率上,还体现在促使大分子等级的煤质物生成小的细微粒度级别的小分子,促进了煤液化过程中小的细微粒度级别的小分子的活化。而活化的小分子更加可以进行参与后期加氢,提高了液态产品品质以及产率;数据显示,在等离子体作用下,煤质转化率提高20%-30%,煤液产品的苯环、烯烃比例相应大大增加。此外,还有助于增加加氢速度,改质煤液产品的气-液配比结构。ICPOES在煤炭液化的整个过程中,起到了控制整个流程的关键作用,能准确检测出煤液化过程中的中间生成物以及最终所得的液态能源产物,以此作为进一步优化反应的据料。通过调控等离子体的能量、反应温度等情况,ICPOES可以帮助科研人员及时监测煤炭分子裂解和产氢情况,实现最优化的反应。

### 4.4 催化剂的作用与优化

#### 4.4.1 催化剂对液化产物的影响

对于煤炭液化的过程而言,催化剂的作用十分重要,可以提高煤炭转化率,改善液体产物质量,并改变其分布。催化剂提供反应环境,降低煤炭分子的破碎需要的能量和使氢被吸附和嵌入,从而改变煤炭的分解过程。使用不同的催化剂会导致煤炭液化产物的变化,例如利用铁系催化剂,其产物中含有较多的芳环,使用钴系催化剂,则能更有利于生成简单的碳氢化合物,因此,对煤炭液化的效果来讲,催化剂的改善必不可少。ICP-OES在实践中主要被用作对煤炭转化过程使用各种催化剂的影响,尤其是它们对于煤炭转化后产品的影响进行评估的方法,可以通过ICP-OES对产品转化过程产生的实时元素组成检测,为催化剂的优化提供量化、精确的数据参考,从而进一步提高产品的均匀性及产品的品质。

#### 4.4.2 等离子体与催化剂的协同效应

优化煤液化效果的关键在于加强等离子体与催化剂的配合情况,通过等离子体产生的能量电子以及自由基促进催化剂活性位置的发生,来提高化学反应能力,促进煤分子裂解、加氢。采用ICP-OES法对煤液化产物中间产物进行监测,能够动态地研究等离子体—催化剂相互作用的影响程度,特别是催化剂对煤炭分解过程中的自由基生成、氢元素参与速率的促进作用。笔者通过实验验证,等离子体与催化剂协同使用促进了煤液化转化率以及煤液质量的提高。icp-oess提供的元素分析结果可以帮助研究者调整等离子体功率以及催化剂的比例,以进一步增强煤液化效率以及煤液质量。

## 5 结语

本研究通过等离子体辅助煤液化实验和机理分析,得出了以下结论:等离子体辅助煤液化的转化率明显提高,比常规处理方式高出20%。煤分子的大分子结构在等离子体的作用下被降解为小分子团,促进了加氢反应,导致液化产品中苯和烯烃含量的增加。等离子体产生的自由基对煤的降解起到了关键作用,且与催化剂协同作用,增强了煤液化效果。通过ICP-OES对煤液化中间产物的精确分析,可以为煤液化过程中的反应优化提供重要指导。等离子体强度及其与催化剂的配合对煤液化反应的效果至关重要,未来的研究将重点探索等离子体与催化剂的最优配比,以实现煤液化技术的工业化应用,助力煤炭的高效清洁利用。

### 参考文献

- [1] 王泽宇;刘彦廷;张浩然.等离子体辅助煤液化反应机理的研究[J].化学工程与技术,2023(5):45-49.
- [2] 赵晨曦;林鹏飞;高敏杰.等离子体在煤液化中的应用及其反应机制探讨[J].能源科学与技术,2022(12):123-127.
- [3] 李振东;陈亦凡;周伟明.等离子体强化煤液化技术研究综述[J].燃料化学学报,2021(8):85-90.
- [4] 黄建华;魏承志;吴泽霖.等离子体辅助煤液化反应的动力学分析[J].煤炭转化,2020(10):110-115.
- [5] 杨力昊;孙雨辰;王俊琪.等离子体对煤液化产物分布的影响[J].煤化工技术,2019(7):78-82.

# Application Research of New Quality Productivity in Chemical Safety

Cong Wang

Sheneng Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

This paper addresses challenges in traditional safety management models within the chemical industry, including inefficiency, delayed risk identification, and information silos, while exploring transformation pathways for production safety driven by new productive forces. Selected benchmark enterprises demonstrate significant improvements in safety management efficiency through key technologies such as intelligent monitoring and inspection, AI-based risk alerts, digital twin platforms, and smart emergency response systems. These implementations resulted in an average 65% reduction in accident rates and over 87.5% enhancement in inspection efficiency. The study concludes with phased implementation strategies, top-level design, and data governance as critical success factors, demonstrating how new productive forces can shift chemical safety management from reactive responses to a closed-loop paradigm encompassing proactive prevention and intelligent in-process control.

## Keywords

New quality productivity; Chemical safety; Artificial intelligence; Internet of Things; Intelligent inspection

## 新质生产力在化工安全领域的应用研究

王聪

申能环境科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

本文针对化工行业传统安全管理模式存在的效率低下、风险识别滞后及信息孤岛等问题,探讨了新质生产力驱动下的安全生产转型路径。文章中列举的部分优秀标杆企业通过智能监测巡检、AI风险预警、数字孪生平台及智能应急响应的关键技术的应用显著提升了安全管理效能,如事故发生率平均下降65%、巡检效率提升超87.5%。研究最后提出了分阶段实施策略与顶层设计、数据治理等关键成功因素,论证了新质生产力能够推动化工安全管理从被动应对向事前预防、事中智能管控的全流程闭环范式转变。

## 关键词

新质生产力; 化工安全; 人工智能; 物联网; 智能巡检

## 1 引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业,其安全生产关系到社会稳定。其高温、高压、易燃、易爆、有毒有害等风险特性,使得传统的人防、物防、技防手段已难以应对日益复杂的形势。当前,以人工智能、物联网、机器人技术为代表的新质生产力正在深刻改变各行业的管理模式。本文将从新质生产力的概念内涵出发,分析其在化工企业安全生产中的具体应用场景、技术实现路径和实施效果,旨在为化工企业安全数字化转型提供理论指导和实践参考。

## 2 新质生产力的概念内涵与技术体系

### 2.1 新质生产力的核心内涵

新质生产力是技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级的产物,其核心特征体现在高科技、高效能、高质量三个方面。在化工安全领域,新质生产力的应用具有三个显著特点:一是技术融合性,通过人工智能、物联网、大数据等多种技术的深度融合,形成协同效应;二是数据驱动性,以海量数据为基础,通过智能算法实现安全风险的精准识别和预测;三是自主适应性,系统能够根据环境变化自主调整运行策略,实现动态安全管控<sup>[1]</sup>。

### 2.2 化工安全领域的技术体系架构

基于新质生产力的化工安全技术体系采用分层架构,通常可分为感知层(负责数据采集)、网络层(负责数据传输)、平台层(负责数据处理与分析)和应用层(负责安全应用与决策),形成完整的技术生态系统。

【作者简介】王聪(1990—),男,中国湖北天门人,本科,注册安全工程师,一级注册消防工程师,从事化工安全管理研究。

感知层的核心技术以传感器技术、机器视觉、气体检测为核心代表，主要功能涵盖数据采集、环境感知、状态监测等，典型设备及系统包括智能传感器、巡检机器人、无人机等。

网络层的核心技术以5G通信、工业物联网、边缘计算为关键支柱，主要功能涉及数据传输、设备互联、实时通信等，典型设备及系统包括工业网关、边缘服务器、通信基站等。

平台层的核心技术以云计算、大数据平台、数字孪生为核心支撑，主要功能聚焦数据处理、模型训练、仿真模拟等，典型设备及系统包括云平台、AI训练平台、数字孪生系统等。

应用层的核心技术以AI算法、智能决策、应急指挥为核心驱动，主要功能强调风险预警、智能管控、应急响应等，典型设备及系统包括智能管控平台、应急指挥系统等。

### 3 化工企业安全生产现状与挑战

#### 3.1 传统安全管理模式的局限性

中国化工企业传统安全管理模式多依赖人工巡检与经验判断，存在明显的局限性：一是巡检效率低且覆盖不全，人工巡检难以实现全天候、全区域覆盖；二是风险识别滞后性强，依赖事后分析与经验总结，缺乏对潜在风险的提前预判能力；三是信息协同不足，各部门数据孤立，安全信息传递存在延迟或失真，导致应急决策缺乏全面数据支撑。

#### 3.2 数据孤岛与信息碎片化问题

化工企业在长期信息化建设过程中，因缺乏统一的数据标准与顶层设计，不同业务系统间形成了明显的数据壁垒：生产控制系统（如DCS、PLC）、安全监测系统（如SIS、气体检测系统）、设备管理系统（如EAM）等各自独立运行，数据格式不兼容、接口不开放，关键数据无法跨系统实时共享。

#### 3.3 高风险作业的安全管控难题

化工企业的高风险作业类型多样，涵盖动火、受限空间、高处、吊装、盲板抽堵等关键作业环节，是安全事故的高发区。当前高风险作业管控面临多重难题：一是作业许可管理流程化繁为简难，在传统纸质审批或半电子化审批模式下，作业前的风险辨识依赖人工经验，易忽略隐蔽性风险点，审批流转周期长，难以适应紧急作业需求；二是作业过程动态监控能力不足，人工巡检难以实时追踪作业人员位置、生理状态及环境参数变化，难以及时发现并干预；三是多因素耦合风险的预测能力缺失，传统管理手段无法实现对这些变量的实时采集与耦合分析，难以提前预判连锁性风险。

### 4 新质生产力在化工安全生产中的应用实践

#### 4.1 智能监测与巡检系统

智能监测与巡检系统以物联网技术为核心支撑，整合智能传感终端、移动巡检机器人、无人机及边缘立体监测网

络，基于大数据分析 with AI 模型，对监测数据进行多维度融合处理，通过时序预测模型分析设备运行趋势，识别早期故障征兆。

镇海炼化——为1.2万平方米球罐区构建“三位一体”AI智能巡检系统：

(1) 高空瞭望：球罐顶部部署无线防爆传感器与AI智能摄像头，50米外精准探测气体分布，漏点识别率高达99%；

(2) 中段巡航：应用中国石化首套飞索机器人，搭载OGI光谱成像仪与声学探测器，2秒内生成高精度3D云团图像（误差<2%）；

(3) 地面守卫：运用360°旋转式云台OGI设备结合声波监测，构筑无死角监控网络，实现全方位气体泄漏侦测。

#### 4.2 AI大模型与风险预警平台

工业AI大模型的应用为化工安全带来了革命性变化，已拓展至22个应用场景化工安全智能体可实现化工企业从“人、机、物、环、管”多维度、多指标来实现系统化、量化的安全专业诊断，量化分析出企业安全相关薄弱项及符合度情况<sup>[2]</sup>。同时，基于安全诊断结果，实现对关键安全风险指标的动态预警，提升企业本质安全能力。

湖北三宁化工在其硫酸装置中植入工业AI大模型，构建了“感知—分析—决策—执行”全自主系统，融合5G与物联网技术。常规运行时，通过多变量预测控制实现关键参数自主协同，操作频次下降99.5%；同时，实现毫秒级风险识别并自动干预，有效降低非计划停车风险。此外，工艺合格率提升5.9%，产能提高15.4%，员工角色从“消防员”转型为“监督员”。

#### 4.3 智能化管控平台与数字孪生

智能化工厂一体化管控平台，基于化工厂全生命周期理念，以数字工厂设计为源头，充分利用工厂运行数据，将物联网、大数据、人工智能等技术与专家知识系统融合，构建起化工厂业务高效运转的核心引擎<sup>[3]</sup>。平台包括智能运营中心、高级报警管理、智能巡检、智能设备管理及故障诊断、特殊作业许可与过程管理等多个应用系统。

山东恒信集团构建覆盖从战略规划到设备细节的煤化工数字孪生平台，深度融合VR沉浸式体验，超高精度三维建模与动态仿真，1:1精准还原高危场景，VR“透视”工厂，直观呈现设备内部精细结构，虚拟实训系统高效模拟20+种标准化流程及应急预案。培训周期缩短30%，员工风险感知与操作熟练度显著提升；50万吨/年乙醇项目优化产线布局，直接节省55%投资，减少47%占地面积；成功实现设备AI健康诊断、工艺参数智能优化、风险毫秒级精准预警。

#### 4.4 应急响应与救援系统

新质生产力在应急响应方面的应用主要体现在快速定位、智能决策、高效救援三个环节。

依托物联网感知网络、GIS地理信息系统与数字孪生

平台的深度融合,可实现事故场景的实时映射与动态追踪并标记受困人员的实时坐标,为救援行动提供毫米级的空间信息支撑。通过 AI 大模型驱动的应急指挥系统实现智能决策,系统整合历史应急处置案例库、化工安全法规库、物质危险性数据库等多源知识,结合实时事故数据快速生成最优救援方案,大幅缩短决策周期。借助 AR/VR 远程协作技术、防爆机器人与无人机等智能装备提升救援效能,可在真实场景中叠加数字孪生模型的设备内部结构、危险区域边界等信息,后方专家通过 AR 实时远程指导操作。

## 5 应用效果评估与案例分析

### 5.1 实施效果量化分析

从事故防控、巡检效能、设备管理等多维度量化分析显示,新质生产力的应用为化工安全带来显著改善:

(1) 行业内应用新质生产力解决方案的企业,一般生产安全事故发生率平均下降 65% 以上,重大及以上事故发生率下降 90%。如镇海炼化球罐区启用 AI 智能巡检系统后,连续 18 个月未发生气体泄漏相关事故;湖北三宁化工硫酸装置非计划停车次数从每年 5 次降至 0 次,非计划停车风险降低 60%。

(2) 智能巡检覆盖率达 100%,单区域巡检时间从人工的 4 小时缩短至 30 分钟内,效率提升 87.5%;漏点识别响应速度从 30 分钟缩至 2 秒内,准确率稳定在 99%,人工巡检工作量减少 70%。

(3) AI 设备健康诊断模型使设备非计划停机率平均下降 50%—70%,设备综合效率(OEE)提升 22%;山东恒信集团数字孪生平台的设备故障预警准确率超 95%,提前预警时间从小时级缩至分钟级。

### 5.2 成本效益分析

尽管新质生产力技术的初期投入较高,但其长期效益却极为显著。以智能巡检为例,传统人工巡检每人每年的成本约为 15 万元;相比之下,巡检机器人一次性投入约 50 万元,使用寿命超过 5 年,每年维护费用约为 5 万元。以一个化工厂需要 20 个巡检岗位进行计算:

5 年内的总成本比传统人工模式低 1220 万元,投资回报率达到 44.4%,如果考虑事故减少带来的间接效益(如品牌价值、社会声誉等),实际回报率更高。

## 6 实施路径与发展建议

### 6.1 分阶段实施策略

为有效推动新质生产力在化工安全领域的应用,需采取循序渐进、重点突破的实施策略。建议分为三个阶段推进:

第一阶段(1—2年):基础建设与试点示范

重点推进传感器网络、通信基础设施及数据平台等基础设施建设。选择风险较高的工艺环节或区域开展试点,例如重大危险源监控和受限空间作业。同时,建立标准规范体系,

为全面推广奠定坚实基础。

第二阶段(3—4年):系统集成与全面推广

在试点成功的基础上,推进各系统间的集成融合,构建统一的智能化管控平台。扩大应用范围,覆盖主要生产装置和作业环节。加强人员培训,提升全员数字化素养。

第三阶段(5年以上):智能化升级与持续优化

引入更先进的 AI 算法、数字孪生、自主决策等技术,实现安全管理的智能化升级。并建立持续改进机制,根据运行数据和反馈不断优化系统性能。

### 6.2 关键成功因素

确保新质生产力成功应用的关键因素包括:

顶层设计与战略支持。企业高层必须将数字化安全转型提升到战略高度,提供必要的资源保障和政策支持。

技术融合与创新应用。不能简单地将新技术叠加到旧体系上,而要通过技术融合创造新的应用场景和价值。

数据治理与标准统一。建立完善的数据治理体系,确保数据的准确性、完整性和及时性,制定统一的技术标准和接口规范,实现不同系统间的互联互通。

人才培养与组织变革。培养既懂化工工艺又懂数字技术的复合型人才,推动组织架构和管理流程的变革,适应数字化管理的要求。

## 7 结语

本文通过理论分析和案例验证,得出以下主要结论:

新质生产力为化工安全生产转型提供了系统性解决方案,能够有效突破传统安全管理模式的被动性、经验依赖性局限,破解数据孤岛、信息碎片化及高风险作业管控难题,推动安全管理范式从“事后处置”向“事前预防、事中管控、事后优化”的全流程智能闭环转变。

智能监测与巡检系统、AI 大模型风险预警平台、数字化管控平台与数字孪生技术、智能化应急响应与救援系统等应用实践,已在试点企业中展现出显著成效,可实现安全监测覆盖率提升至 95% 以上、风险预警准确率提高 30%—50%、应急响应时间缩短 40% 左右,大幅降低了安全生产事故发生率及损失程度。

分阶段实施策略及关键成功因素是新质生产力落地见效的核心保障,需在技术融合的同时强化管理协同,确保应用效果最大化。

### 参考文献

- [1] 路念明. 打造新质生产力赋能化工行业安全[J].《劳动保护》,2024(6):22-23
- [2] 芦存博,左璇,金博,等. 大模型在工业安全领域的应用研究与探索[J]. 新型工业化,2024,14(07):85-95.
- [3] 李红梅. 新形势下的化工园区安全管理规划研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2023,43(03):76-78.

# Research on Green Chemical Technology in Chemical Engineering Process

Lin Su

China Chemical Environmental Protection Catalyst (Yulin) Co., Ltd., Yulin, Guangxi, 537003, China

## Abstract

The application of green chemical technology in chemical engineering and processes focuses on mitigating environmental impacts, enhancing resource efficiency, and effectively reducing pollutant emissions. Traditional chemical production methods no longer meet modern environmental standards. By adopting green chemical technologies, we can achieve green transformation and upgrading across raw materials, reaction processes, and catalytic technologies, thereby providing robust support for sustainable economic development. This study analyzes the significance of green chemical technology in chemical process engineering, explores its practical applications, and proposes strategies to improve its effectiveness for reference by relevant professionals.

## Keywords

Chemical Engineering; Process; Green Chemical Technology

# 化学工程工艺中的绿色化工技术研究

苏林

中化学环保催化剂(玉林)有限公司, 中国·广西 玉林 537003

## 摘要

绿色化工技术在化学工程和工艺中应用, 核心在于减轻对环境的负面影响, 提升资源的利用率, 有效降低化学物质的污染排放。现阶段传统的化学生产方式已经无法满足现代环保标准, 通过引入绿色化工技术, 实现原材料、反应过程、催化技术等各方面的绿色化转型升级, 为经济的绿色发展提供有力支撑。鉴于此, 开展本文的研究工作, 主要分析绿色化工技术在化学工程工艺中的应用意义, 探究具体的应用情况, 并提出几点提升绿色化工技术应用效果的策略, 以供相关人员参考。

## 关键词

化学工程; 工艺; 绿色化工技术

## 1 引言

环境污染程度加剧, 对化工行业的发展提出了新的要求, 现阶段化学工程工艺, 需要重视绿色升级。通过引入绿色化工技术, 在行业中贯彻落实节能环保可持续发展理念, 最大限度地减少化工生产过程中的资源浪费, 以及污染物的排放量, 可实现化工行业的可持续发展。在具体应用中, 可以从原材料、反应过程、催化剂、绿色溶剂等多个方面入手, 实现全流程的绿色转型。

## 2 绿色化工技术在化学工程工艺中的应用意义

### 2.1 减少有毒产品的产生

绿色化工技术的特点、优势和核心在于绿色, 是对现有化工技术的改进和创新。例如可以通过改进化学方程式, 在反应的过程中有效减少有毒产品的产生, 甚至消除, 可以

减少化学工业废物的产生量, 有效控制化工行业对环境带来的负面影响<sup>[1]</sup>。在化学工程工艺方面, 通过合理应用绿色化工技术, 提高企业重视, 从不同方面入手优化设备的引进和系统的建设, 可以开展更加自动化、绿色化的生产, 提高生产效率, 减少有毒产品的产生, 大大减少对环境污染的危害。

### 2.2 提高资源的利用率

化工产业是资源消耗型产业, 传统化工工业资源利用效率低下, 大量的资源被浪费。绿色化工技术以原子经济性为核心, 通过优化反应工艺, 提升反应选择性, 最大限度地减少原料转化为目标产物, 提高资源利用效率<sup>[2]</sup>。同时, 绿色化工技术还注重对可再生资源的开发与利用。例如利用生物质资源生产燃料和化学品等, 替代传统的化石资源, 缓解化石资源短缺的压力。此外, 还推动废弃物的资源化利用, 将生产过程中产生的副产物或废弃物转化为有价值的产品, 实现资源的循环利用。

【作者简介】苏林(1981—), 男, 苗族, 中国广西融安人, 硕士, 工程师, 从事化学工程与技术研究。

### 3 化学工程工艺中的绿色化工技术的具体应用

#### 3.1 原材料的绿色化

原材料是化工过程的起点,原材料的绿色化是削减碳足迹的根本。其核心是减少对化石资源的依赖,转向生物质、二氧化碳等可再生碳源。传统化工工业多采用化石资源,例如石油、煤炭、天然气等不可再生资源作为原料,不仅有限,还会在生产过程中产生大量的污染物。生物质能源指的是利用农作物、林木、畜禽粪便等可再生生物资源,生产化学品、燃料等,是绿色原料的重要组成部分。以木质纤维素、淀粉油脂等为代表的生物质,通过催化裂解、加氢脱氧、发酵等生物与化学转化技术,可以将其转化为平台化合物、生物燃料及高性能材料<sup>[1]</sup>。例如利用玉米、甘蔗等农作物生产乙醇。利用木质素、纤维素等生物质资源生产木糖醇等化学品。二氧化碳是主要的温室气体之一,同时也是一种重要的绿色原料,通过绿色加工技术,可以将二氧化碳转化为甲醇、碳酸二甲酯、聚碳酸酯等有价值的化学品。例如,英国剑桥大学研发的新型太阳能人造树叶,融合有机半导体与生物酶,能模拟光合作用,将二氧化碳和阳光直接转化为甲酸盐等化工原料,该过程完全依赖可再生能源,为绿色化学品的生产开辟了新路径。

#### 3.2 化学反应

化学反应在化工产业中占据十分重要的地位。为了推动化学反应向绿色健康和可持续性的方向发展,必须对现有的技术进一步优化。可开发高选择性、高原子利用率的反应,从源头减少副产物和废物。常见的反应过程绿色化优化技术有超临界流体反应技术、微波辅助反应技术、超声辅助反应技术等。

超临界流体是物质处于其临界温度和临界压力以上的一种特殊状态,兼具气体的高扩散性、低粘度和液体的高密度、强溶解能力的特点。最常用的是超临界二氧化碳,临界条件温和,且无毒、不可燃,价格低廉。替代有毒有机溶剂,广泛应用于萃取、材料制备和化学反应介质。而且通过改变温度压力,可精细调整超临界二氧化碳的物化性质,从而控制反应路径,提高目标产物的选择性<sup>[4]</sup>。高扩散性使其能够快速渗透到多孔催化剂内部,极大地提高了气-固或液-固相反应的传质效率。例如,超临界二氧化碳可用于合成高性能氟聚合物、丙烯酸酯聚合物等。

微波辅助合成技术利用物质中极性分子或离子在微波场中高速转向,摩擦碰撞而产生内加热,实现了从分子层面直接快速均匀的供能。例如,在有机合成反应中,可采用微波辅助技术合成酯类化合物,反应时间从传统工艺的数小时缩短至几分钟,产品收率显著提高。超声辅助反应技术,是利用超声波的空化效应促进化学反应的一项技术。超声波在液体介质中传播时,会产生交替的高压和低压循环,在低压阶段,液体内部会形成微小的真空气泡,并迅速生长崩溃,即空化效应,气泡崩溃的瞬间会产生局部高压以及强烈的冲

击波和微射流<sup>[5]</sup>。该技术可创造极端反应条件,而且强烈的冲击流和微射流能有效消除相界面阻力,对非均相反应的强化效果优良。能有效防止纳米颗粒团聚、破碎,催化剂载体,增加比表面积和活性位点。该技术可以用于制备金属、金属氧化物、硫化物纳米颗粒尺寸分布均匀且不易团聚。而且还可以将其应用于环境治理方面,超声空化产生的羟基自由基,能高效降解水体中的难降解有机污染物。

#### 3.3 催化剂的优化选择

催化技术是化学工程工艺中的核心技术之一,传统的催化技术多采用酸碱催化剂、金属氧化物催化剂等。它们具有腐蚀性和毒性,很难回收利用,容易对环境造成负面影响。因此可以将绿色化工技术应用于其中,推动催化剂的绿色化应用。随着环境保护意识增强和对人类健康问题的关注,化学工业界越来越倾向于使用无毒无害的催化剂。显著提升生产效率,对产品的质量产生积极的影响。生物催化剂有酶、微生物等。酶具有高效性、选择性、温和性的特点,能够在常温常压下实现化学反应,减少能源消耗和污染物的产生量<sup>[6]</sup>。例如,在食品化工领域,利用酶催化技术生产味精、柠檬酸等食品添加剂,实现了清洁生产。纳米催化技术是利用纳米材料作为催化剂的一种技术,纳米材料具有比表面积大、催化活性高、选择性好的特点,可以提升反应效率,减少催化剂的使用量。例如可以采用纳米钨催化剂,可提高加氢反应的选择性与转化率,减少副产物的产生。

#### 3.4 绿色溶剂的应用

溶剂是化学工程工艺中不可或缺的一部分,传统的溶剂多为挥发性有机化合物,例如苯、甲苯,具有毒性、挥发性,容易造成大气污染和水污染。而绿色溶剂有着良好的环境友好性能、无毒无害、可降解,显著应用绿色溶剂,减少对环境的污染和破坏。常用的绿色溶剂有离子液体、生物基溶剂等。

离子液体是在室温或接近室温下呈液态的,完全由阴离子和阳离子构成的盐类。通过改变阴阳离子的组合,可精准地调控其熔点、黏度,溶解性、极性及热稳定性。该溶剂的应用从根本上解决了挥发性有机污染问题,易于密闭回收。而且热稳定性好,适用于高温反应<sup>[7]</sup>。可溶解无机物、有机物、高分子乃至气体,是优良的反应介质。例如,在有机合成反应中,采用离子液体作为溶剂,替代传统的挥发性有机溶剂,减少了环境污染。在萃取分离过程中,采用离子液体作为萃取剂,提高了分离效率,降低了能耗。

生物溶剂是指利用生物质资源生产的溶剂,例如乙醇、乙酸乙酯和甘油等,具有无毒无害、可降解、可再生的特点。例如可采用乙醇作为溶剂,用于涂料、胶粘剂等产品的生产,替代传统的有毒溶剂,降低了产品的环境风险。

### 4 提升绿色化工技术应用效果的措施

#### 4.1 提升废弃物回收利用率

在化工生产过程中,受限于反应条件和设备的局限性,

部分化学反应无法彻底完成,产生了一些残渣和固体颗粒物,这些废弃物直接排放环境,或者经过处理后排放,均会对环境和经济效益产生不利的影响。绿色化工技术核心在于环境的可持续性,减少污染。因此,通过提升废弃物的回收利用,可以实现绿色化工技术的高效应用。废弃物的绿色处理技术以资源化无害化为原则,通过回收利用、降解处理等手段,可减少废弃物的排放,降低对环境的污染。常用的技术有回收利用、生物降解和焚烧发电等各类技术。

废弃物回收利用技术是将生产过程中产生的副产物和废弃物进行回收提纯。作为其他化工工业的原料,实现资源的循环利用。例如生产过程中产生的废酸废碱,通过处理后,可以回收其有效成分,得到资源的再利用,有效控制企业的成本投入,提高企业的经济效益。生物降解技术是利用微生物将废弃物中的有机污染物分解为二氧化碳和水等物质,具有成本低、处理效率高、无二次污染的特点<sup>[8]</sup>。例如,可以使用活性污泥法处理化工废水,微生物通过代谢降解,有效控制废水中有机污染物的含量。也可以使用堆肥技术处理化工废渣中的有机成分,将其转化为有机肥料,实现资源的循环利用。焚烧发电技术是将无法回收利用的废弃物进行焚烧处理,在这个过程中产生的热能发电或者供热,可以满足生产生活的需求,从而实现废弃物的资源化利用。

#### 4.2 优化顶层设计和系统规划

在企业或园区层面,将绿色化工技术应用纳入到整体发展规划中。可参考一些成熟的案例,制定长期绿色转型路线图,将源头减量、过程循环、末端资源化的项目系统布局,让环保投入和技改收益形成良性循环。企业集团层面,制定绿色转型总体战略,识别核心业务环节的绿色机遇与风险,配置资源。业务单元或工厂层面,将总体战略分解为具体的技术改造、产品升级和运营优化项目。园区层面规划跨企业的物料、能源、基础设施共生网络,构建产业生态圈。

#### 4.3 建立量化评估与决策体系

建立量化评估与决策体系,要设置多维度的综合评价指标体系。技术维度关注原子经济性、转化率/选择性、能耗强度、工艺复杂性。经济维度关注单位产品总成本、增量投资、投资回报率以及对产品价格的影响。环境维度关注碳

足迹、水足迹、毒性影响、废弃物产生量和资源化潜力。在评估工作中采用生命周期评价方法、技术-经济-碳足迹分析和智能化决策支持系统等有效的工具与方法,可以评估各类绿色化工技术的应用成效,为相关决策提供重要依据。

#### 4.4 实现数字化创新应用

将现代科技手段应用于绿色化工生产中,可实现数字化和智能化赋能。生产环节,加强过程控制,实施优化反应条件,使装置始终运行在最高效、最绿色的状态。同时实时监控和优化全场能源流,实现精准节能。基于机器学习开展预测性维护,可以减少非计划停车和物料浪费。

### 5 结语

综上所述,绿色化工技术应用于化学工程工艺中,可以有效减少有毒物质的产生优化资源利用,推动化工产业朝绿色、可持续方向发展。在具体应用中,绿色化工技术可以在原料选择、催化剂、反应过程、溶剂应用等各方面进行合理应用。并通过优化顶层设计,引入先进技术,并做好评估工作,来提升绿色化工技术的应用效果,促进化工产业的可持续性发展。

#### 参考文献

- [1] 李永,杜桂强,莫大荣,等. 化学工程工艺中的绿色化工技术分析[J]. 南北桥,2023(9):184-186.
- [2] 王宇,龙帅. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点[J]. 化工管理,2020(31):103-104.
- [3] 赵学臣. 化学工程工艺中的绿色化工技术分析[J]. 中国化工贸易,2020,12(28):87-88.
- [4] 何伟洪. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点探究[J]. 当代化工研究,2021(20):142-143.
- [5] 裴建军. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点[J]. 中国化工贸易,2020,12(25):90-91.
- [6] 马洪震. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(15):168-170.
- [7] 李素暖. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点探讨[J]. 产业与科技论坛,2021,20(6):50-51.
- [8] 赵胜. 化学工程工艺中的绿色化工技术要点探究[J]. 工程学研究与应用,2024,5(4).

# Continuous multi tube coring technology for shale long sections

Ruigang Zhang

Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Southwest Drilling Branch, Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

The Jingyan-Jianwei area is located in the southwestern part of the Weiyuan structural unit within the northwestern section of the southwestern Sichuan Basin. From 2024 to 2026, following the strategy of "overall planning, phased implementation, capacity evaluation, and regional exploration," 15 exploration wells and 4 well groups were deployed. The goal is to submit proven reserves exceeding 50 billion cubic meters by 2026, which will serve as a critical basis for confirming the reserves of the Qiongzhusi shale gas reservoir. The continuous core logging construction for long well sections is of paramount importance. Through the operational experience of multiple wells, a comprehensive and efficient continuous multi-tube core logging technology for long shale wells has been developed.

## Keywords

Shale; Continuous multi-tube; Core sampling; Tools; measures

## 页岩长井段连续多筒取心技术

张瑞刚

中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司, 中国·四川成都 610000

## 摘要

井研-犍为地区位于四川盆地川西南坳陷西北部威远构造西南部。2024-2026年按照“整体部署、分步实施、评价产能、分区探明”的思路,整体部署探井15口、井组4个,力争2026年提交探明储量超500亿方,为探明筇竹寺页岩气藏储量的准确依据,长井段连续取心施工意义重大。经过多口井的施工经验形成了一套完善高效页岩长井段连续多筒取心技术。

## 关键词

页岩; 连续多筒; 取心; 工具; 措施

## 1 基本情况

### 1.1 地质情况

井研-犍为地区位于四川盆地川西南坳陷西北部威远构造西南部,行政区域隶属于四川省乐山市和自贡市,探矿权面积1195.749km<sup>2</sup>。2024-2026年按照“整体部署、分步实施、评价产能、分区探明”的思路,整体部署探井15口、井组4个,力争2026年提交探明储量超500亿方。取心主要井段为筇竹寺全井段,筇竹寺组在工区内横向展布稳定、可对比性较强,与下伏麦地坪组呈平行不整合接触。在区域地层对比的基础上,根据岩心精细描述性组合、测井特征、岩性组合特征,将筇竹寺组自下而上划分为11层,其中①-③、⑤、⑨号层为黑色富有机质页岩,②-④号层、⑥-⑧号层、⑩-⑪号层以粉砂质页岩、泥质粉砂岩及黏土含有机质页岩为主。

### 1.2 取心设计

取心目的:取得目的层筇竹寺组岩心实物资料,为筇

竹寺组评价、含气性、岩电关系的建立等研究及储层改造等创造条件。

取心层位及进尺:筇竹寺组全井段,预计进尺270m(其中进入⑧小层上部、⑦小层中部相对高GR位置各开展1回次保压取心,每回次保压取心6m,共计2回次12m保压取心)。

取心原则:现场确认进入筇竹寺组开始连续取心,进入麦地坪组2m后结束取心。

## 2 工具概况

### 2.1 取心工具

选用ZYJM-172/101型积木式取心工具,依据设计取心层位、进尺、地层岩性等,推荐采用三筒取心,以提高取心施工效率,减少起下钻次数,该工具特点如下:

(1)采用高强度螺纹及厚壁无缝钢管作外筒,整体进行调质处理,强度高、刚性好,有利于提高岩心收获率、单筒进尺和延长取心钻头使用寿命[3]。

(2)轴承两端无密封,允许少量泥浆流过并起冷却和润滑轴承的作用,结构简单、转动灵活、使用寿命长[3]。

(3)内筒外径121mm,内径101mm,连接螺纹及短

【作者简介】张瑞刚(1986—),中国甘肃通渭人,本科,工程师,从事石油天然气钻井工程研究。

节统一扣型,可多筒连接实现多筒取心。

(4)内筒内壁涂覆合金减小岩心进入阻力,内筒增加支撑扶正短节,滚动轴承设计可有效保持长筒取心时内筒居中,保障岩心顺利进入内筒,可有效降低因内筒偏斜或内筒摆动造成的堵心、磨心风险,减小长筒取心带来的内外筒居中度下降并随之震动增加导致的岩心破碎甚至堵心。

## 2.2 取心成果

中原钻井院 ZYJM-172/101 型组合式积木取心工具,依据设计取心层位及取心进尺需求,推荐采用三筒取心,以提高取心施工效率,减少起下钻次数,根据现场井况可随时调整组合,并研最长取心采用 4 筒取心,心长 36m。

金页 6HF 井三筒连续取心 9 回次,累计进尺 237m,累计岩心长度 236.1m,平均取心收获率 99.62%,取心平均机械钻速 2m/h,创西南工区筇竹寺组多项技术指标。

在金页 20HF 井三筒连续取心 3 回次,累计进尺 80m,累计心长 80m,平均取心收获率 100%,取心平均机械钻速 2.44m/h,平均收获率 100%,80m 取心周期 5.04 天,再创西南工区筇竹寺组多项高指标。

金页 13 井在峨眉山玄武岩储层、筇竹寺组取心取得成功,三开常规取心第 7、8 回次中,应用四筒取心工艺,分别取得 36.5 米和 37 米的单趟进尺,连破该区块单趟进尺最长纪录。

## 3 施工难点

### 3.1 施工难点分析

- (1)上部地层地层易塌,卡钻风险大。
- (2)筇竹寺组岩性为灰-深灰色粉砂质页岩,页岩层理发育,堵心、掉心的几率大,造成回次进尺少。
- (3)筇竹寺组裂缝发育,井漏几率大,且在显示层存在喷、漏同存风险。

### 3.2 技术对策

(1)根据筇竹寺组地层特点,采用组合式积木取心工具,优选双筒或三筒取心方式,提高单筒进尺。本构造取心目的层岩性均质性、成柱性较好,可选用长筒(有效最大取心进尺 18.4m/27.6m)取心工具进行施工作业,可有效提高取心效率,节约取心周期。

(2)针对不同漏失速度进行随钻堵漏或终止取心,保证井下安全。

(3)针对三开筇竹寺组岩性均质性、成柱性较好、地层较稳定,以提高单筒进尺和机械钻速为原则,采用三筒取心方式(单回次最高取心进尺 27.5m),提高单回次进尺及取心效率。

## 4 取心技术措施

### 4.1 准备

#### 4.1.1 技术要求

(1)井壁稳定,井内无溢流、漏失,上提、下放无阻卡,井底无落物。

(2)钻井液性能符合施工要求,特别是密度和 PH 值尽量保持高限。

(3)加重材料和加重液储量符合设计要求。

(4)特别注意的是常规长筒取心必须通井,确保井眼畅通,井底清洁。

#### 4.1.2 井眼准备

(1)起钻前应充分循环钻井液,将井底循环干净,保证井下无金属落物。

(2)循环和处理钻井液性能符合设计要求,保证井下情况正常。

(3)取心作业前,井身质量必须符合设计要求,起下钻畅通,无掉块、阻卡现象。起下钻遇卡遇阻井段应先通井划眼,消除阻卡后,方可下钻取心。

#### 4.1.3 钻具及设备准备

(1)确保钻井仪器、仪表灵敏且显示准确。

(2)确保泥浆泵、绞车等机械设备运转正常,在取心钻进中地面设备不发生问题。

(3)检查好钻具,保证在取心钻进中钻具不发生问题。

(4)如果使用顶驱,则顶驱转速 20-80rpm 可调。

(5)井控设备完好,完成闸板防喷器的活动和井控演习、低泵速试验,内防喷工具、防喷钻杆(或立柱)、大直径旁通阀准备到位。

#### 4.1.4 取心工具准备

(1)测量取心工具及取心钻头长度、内外径尺寸,符合设计要求。

(2)取心钻头水眼畅通,取心工具内筒卡盘、岩心钳、岩心爪、岩心爪组合件等辅助工具配套、准备齐全。

(3)准备 4~6 套 ZYJM-172/101 型组合式积木取心工具。

(4)完成工具检查、组装,悬挂轴承要手转灵活,内筒转动灵活,丝扣连接完好无损。

## 4.2 下钻

(1)下钻过程中盖好井口,严防井口落物。

(2)平稳操作,不猛刹、猛顿,防止钻具剧烈摆动。

(3)裸眼井段严格控制下放速度,缓慢匀速下放钻具,观察好指重表,遇阻不超过 50kN,可上下活动或循环钻井液,不得硬压强下,不可使用取心钻具组合大段划眼。

(4)下钻每 20~30 柱顶通水眼,若遇顶通泵压较高时,可循环 10~30min。

(5)钻头离井底一个单根开泵循环钻井液,循环正常后,校好指重表,下放钻具实探井底,校对到底方入,在钻具上标记到底方入记号,清洗井底。

## 4.3 钻进

(1)树心参数:钻压 10~20kN、转速 40~50r/min、排量 25L/s,钻进 0.3~0.5m 后,逐步提高钻井参数。

(2)取心参数:钻压 60~80kN、转速 60~80r/min

min、排量 25 ~ 28L/s。

(3) 取心钻进过程中要做到“均匀送钻”。

(4) 取心钻进过程中,无特殊情况,一般不停泵、不停转,钻头不提离井底,注意各种参数的变化。

(5) 取心钻进过程中,需保证钻井液性能稳定,认真做好钻时记录,密切观察泵压、转盘扭矩等参数变化,准确判断井下情况。

#### 4.4 割心

(1) 根据指令要求完成取心进尺后,利用岩心爪与岩心的摩擦力以及岩心爪座的锥面,使岩心爪抱紧岩心而拔断。

(2) 在割心前 0.5m 左右,比原钻压多加 30 ~ 40kN,形成粗心,以便割心岩心爪抓牢。

(3) 形成粗心后刹住刹把磨 20min,钻压恢复到原钻压的 1/4 ~ 1/3 时割心。

(4) 割心时停顶驱上提割心,上提时要注意观察指重表变化。

#### 4.5 起钻

(1) 取心井段和气层上部 300m 内严格控制起钻速度,起钻时绞车使用低速,平稳操作,不猛刹、猛顿,防止甩掉岩心。

(2) 禁止用转盘绷扣、卸扣。

(3) 起钻过程中连续向井内灌满钻井液,认真核对灌浆量。

#### 4.6 出心

(1) 岩心出筒前及岩心出筒时,监测硫化氢浓度,如含硫化氢,应立即使用硫化氢防护设备,保障人员安全。

(2) 出心方式采用大门坡道出心,出心后岩心由地质方负责整理、保管及后续工作,岩心盒由地质方提供。

(3) 出完心,检查、保养岩心筒、轴承及岩心爪等易损件,必要时更换易损件,并重新组配取心工具,以备下次取心使用。

#### 4.7 异常情况判断与处理

(1) 堵心、磨心及终止条件

堵心是由于岩心的岩性、构造、应力释放、钻头切削破坏、钻具摆动等因素导致其破碎,使岩心不能有效进入内筒,堵在取心内筒底部的现象。在发生堵心后,破碎岩心之间相互挤压、磨损、消耗,导致收获率低。发生堵心时,钻井参数常发生以下变化:

①钻压上涨不回;②钻时大幅上涨;压上涨;④扭矩降低。发生磨心时,钻井参数常发生以下变化:①钻压大幅上涨,回落慢;②钻时大幅上涨;③泵压出现规律性涨落;④扭矩变化大;⑤振动筛返砂量大幅增多。

取心期间若发生堵心或磨心,可先调高钻井参数观察,若钻压没有继续上涨、机械钻速有所提高,可继续取心钻进;若参数仍异常须及时割心,保障取心收获率。

(2) 放空及取心终止条件

取心钻进期间发生放空,若液面较稳定,下探进尺不超过 0.3m,看好扭矩防卡;终止条件为下探进尺 0.3m 探不到井底则将取心钻头提离取心开始位置以上循环、起钻、出心,发生漏失立即上提至安全位置降排量循环堵漏,井下正常后直接循环起钻(不再下放取心钻进)。

## 5 经验教训及改进

### 5.1 取心筒落井故障

(1) 对工具和工艺的匹配风险研判经验不足。为提高取心钻进机械钻速,前期广泛使用螺杆+双筒取心工艺,提速效果明显,为进一步提高取心效率,使用螺杆+三筒取心工艺。

(2) 提速思路有缺陷,未充分认识到螺杆带长筒会导致下步钻具在承受反扭矩后松扣。

(3) 取心技术人员在下钻遇阻时,未考虑要求起钻通井,而是采用冲划下钻方式。

改进优化:一是改变取心组合,3筒及以上组合严禁配套使用低速螺杆;二是取心前必须保证井眼畅通,严禁取心工具长段划眼。

### 5.2 岩心脱心异常

(1) 筲竹寺组 6 号小层层理发育、钻时快,导致岩心直径较细,割心时岩心爪未抓牢岩心,导致脱心。

(2) 卡箍式岩心爪卡瓦范围窄,针对层理发育地层的可靠性不高。

(3) 操作存在大意和经验注意思想,采用旋转割心上提,进一步使岩心爪失效。

结束语:井研-犍为地区页岩长井段连续多筒取心技术的研发与应用,成功破解了该区域筲竹寺组易塌、易堵心、机速慢等施工难题。通过选用 ZYJM-172/101 型积木式取心工具、优化钻具组合与施工参数、制定针对性技术对策,实现了取心收获率 99.86% 的高水平成果,创下多口井单趟进尺、机械钻速等多项区域纪录,为 500 亿方探明储量目标的推进提供了精准的岩心实物支撑。该技术体系不仅完善了页岩气长井段连续取心的工艺标准,其工具适配、参数调控及异常处理经验,也为同类复杂页岩地层的取心施工提供了可复制的实践范例。未来可进一步结合地层岩性差异优化工具细节,探索智能化监测与参数自适应调节技术,持续提升取心效率与成果质量,为页岩气资源的高效勘探开发注入更强动力。

### 参考文献

- [1] 王治国,严焱诚,黄河淳,等.井研-犍为地区难钻地层钻头优选及应用[J].科技和产业,2024,24(16):194-198.
- [2] 余瀚泽.井研-犍为地区筲竹寺组页岩储层特征及其脆性评价研究[D].成都理工大学,2023
- [3] 王婷.《石油取心工具使用说明书》翻译项目报告[D].广西大学,2018.

# Research on High-Speed Drilling Technology in the Jingyan-Jianwei Block of the Sichuan Basin

Huankun Qu

Southwest Drilling Branch of Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

The Jingyan-Jianwei block in the Sichuan Basin is one of the key areas for shale gas exploration and development in China, with enormous resource potential, while also facing challenges such as complex geological conditions, high drilling difficulty, and long construction cycles. Taking Well X as an example, this paper systematically analyzes the entire drilling process and summarizes a high-speed drilling technology system suitable for this block from the perspective of integrated geological engineering. Through the analysis of actual construction data from Well X, the significant effects of high-speed drilling technology in improving mechanical drilling speed, shortening well construction cycles, and ensuring wellbore quality are verified, providing technical references for horizontal well drilling of shale gas in this block.

## Keywords

Rapid drilling; Geotechnical engineering integration; Horizontal well; Drilling parameter optimization

## 四川盆地井研-犍为区块优快钻井技术研究

曲焕坤

中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司, 中国·四川成都 610000

## 摘要

四川盆地井研-犍为区块是中国页岩气勘探开发的重要区域之一, 具有巨大的资源潜力, 同时也面临着地质条件复杂、钻井难度大、施工周期长等挑战。本文以X井为例, 系统分析其钻井施工全过程, 从地质工程一体化的角度, 总结了适用于该区块的优快钻井技术体系。通过对X井的实际施工数据进行分析, 验证了优快钻井技术在提升机械钻速、缩短建井周期、保障井身质量等方面的显著效果, 为该区块的页岩气水平井钻井提供了技术参考。

## 关键词

优快钻井; 地质工程一体化; 水平井; 钻井参数优化

## 1 引言

四川盆地是中国页岩气资源最为丰富的地区之一, 其中井研-犍为区块位于川西南平缓构造带, 构造位置属于铁山-威远构造带的西南翼斜坡, 是近年来页岩气勘探开发的重点区域。该区块目的层主要为寒武系筇竹寺组, 埋藏深、地层压力高、岩性复杂, 钻井过程中易出现井壁失稳、机械钻速低、轨迹控制难度大等问题。为此, 开展优快钻井技术研究, 提高钻井效率、降低工程成本, 对于推动该区块页岩气规模化开发具有重要意义。

X井是某石油分公司在该区块部署的一口开发预探井, 完钻井深5580m, 采用三开制水平井结构, 水平段长2050m。该井钻井周期71.37天, 创造了该区块同类型水平井钻井周期最短纪录。本文以该井为例, 系统分析其钻井工

艺与技术措施, 从地质工程一体化的角度, 总结形成一套适合井研-犍为区块的优快钻井技术体系。

## 2 地质工程一体化钻井设计思路

地质工程一体化是优快钻井的核心指导思想, 其核心在于根据地质特征优化工程设计, 实现地质目标与工程实施的有机结合。X井在钻井前开展了详细的地质分析与邻井调研, 明确了以下关键地质特征:

地层序列复杂: 自上而下钻遇侏罗系、三叠系、二叠系至寒武系多套地层, 岩性包括泥岩、砂岩、灰岩、白云岩、页岩等, 可钻性差异大。

压力系统多变: 存在多套压力系统, 尤其是嘉陵江组—雷口坡组存在高压层, 茅口组—栖霞组为常压—低压层, 钻井液密度窗口窄。

目的层埋藏深: 筇竹寺组埋深超过3300m, 水平段长, 轨迹控制要求高。

岩石硬度高、研磨性强: 尤其是茅口组灰岩、栖霞组

【作者简介】曲焕坤(1987—), 男, 中国山东高密人, 本科, 工程师, 从事石油工程钻井研究。

白云岩及筲竹寺组硅质页岩，对钻头磨损严重。

基于以上地质特征，X井制定了“以防为主、优化结构、强化参数、精细控制”的钻井技术路线，重点围绕井身结构、钻具组合、钻井参数、钻井液体系等方面开展优化。

### 3 优快钻井关键技术措施

#### 3.1 井身结构优化

井身结构表

表 2-1 X 井井身结构表

开钻层次	钻头尺寸 × 井深 (mm × m)		套管尺寸 × 井深 (mm × m)		水泥返深 (m)
	设计	实际	设计	实际	
导管	Φ 609.6 × 52	Φ 609.6 × 50	Φ 508.0 × 50	Φ 508 × 50	0
一开	Φ 406.4 × 512	Φ 406.4 × 509	Φ 339.7 × 510	Φ 339.7 × 507.28	0
二开	Φ 311.2 × 2938	Φ 311.2 × 2925	Φ 244.5 × 2936	Φ 244.5 × 2923.68	0
三开	Φ 215.9 × 5605	Φ 215.9 × 5580	Φ 139.7 × 5603	Φ 139.7 × 5578.78	0

#### 井身结构分析

合理的井身结构是安全高效钻井的基础。X井采用三开制结构：

导管段（Φ 609.6mm × 50m）：采用桩机旋挖预埋，封隔浅表水层。

一开（Φ 406.4mm × 509m）：钻进至沙溪庙组，下入 Φ 339.7mm 表层套管，封固上部疏松地层。

二开（Φ 311.2mm × 2925m）：钻至陡坡寺组顶部，下入 Φ 244.5mm 技术套管，封隔高压层和易塌层。

三开（Φ 215.9mm × 5580m）：钻至筲竹寺组目的层，完成水平段，下入 Φ 139.7mm 生产套管。

该结构简化了套管层次，兼顾了封固与井眼稳定需求，为后续钻井作业创造了良好条件。

#### 3.2 钻头选型与钻井参数优化

针对不同地层的岩性与可钻性，X井实施了“个性化钻头+参数强化”的提速策略，本井一开使用PDC钻头1支，二开使用PDC钻头3支，三开使用混合钻头2支、PDC钻头6支，全井共使用钻头12支。

一开井段（50.00 ~ 509.00m）。

选用 Φ 406.4mm PDC 钻头（KS1662DGRS），配合螺杆钻具，采用中低钻压（20-60kN）、高转速（50r/min），机械钻速达 21.86m/h。一开钻遇地表下沙溪庙组，地层岩性以泥岩为主，可钻性好，提高钻头攻击性和稳定性，防止钻头泥包，提高破岩效率，是提速关键。

二开井段（509.00 ~ 2925.00m）。

二开井段共使用 3 只 PDC 钻头，配合 1.25° 单弯螺杆，井段 509.00-2925.00m，总进尺 2416.00m，纯钻 186.5h，平均机械钻速 12.95m/h。须家河地层以细砂岩、中砂岩、泥质粉砂岩为主，夹黑色页岩等。地层不均质性强，研磨性强，常规 PDC 进尺少，优选高效钻头及提速工具，提高行程钻速，减少起下钻趟次，是该层段提速关键。

第 1 支 Φ 311.2mm 六刀翼 PDC 钻头，此钻头使用效果较好，钻遇地层须家河组、雷口坡、嘉陵江、飞仙关组，岩性为灰色（泥质）灰岩夹紫红色灰质泥岩、浅紫红、褐灰色

泥岩、粉砂质泥岩夹浅紫红、浅灰色灰质粉砂岩。钻进井段 509-1636m，共进尺 1127m，纯钻时间 53.5h，平均钻速 21.07m/h，该只钻头入井新度 100%，出井新度 85%。

第 2 支 Φ 311.2mm 五刀翼 PDC 钻头，钻遇飞仙关组、沙湾组、峨眉山玄武岩、茅口组岩性为岩性为灰色、泥粉晶灰岩、深灰色、灰色玄武岩、白云质灰岩、泥质灰岩夹灰黑色灰质页岩。钻进井段 1636-2560m，进尺 924m，纯钻时间 63h，平均钻速 14.67m/h，该只钻头入井新度 100%，出井新度 85%。

第 3 支 Φ 311.2mm 六刀翼 PDC 钻头，钻遇茅口组、栖霞组、陡坡寺组，灰、深灰色粉砂质白云岩、泥质白云岩、砂屑白云岩夹薄层灰色白云质粉砂岩、灰黑色云质页岩，钻进井段 2560-2925m，进尺 365m，纯钻时间 70h，平均钻速 5.21m/h，该只钻头入井新度 100%，出井新度 85%。

三开井段（2925.00 ~ 5580.00m）。

三开井段共使用 10 支钻头，其中 8 只 PDC 钻头、2 支混合钻头，钻遇陡坡寺、龙王庙、沧浪铺、筲竹寺组。总进尺 2655m，纯钻 502.5h，平均机械钻速 5.28m/h。

三开造斜段使用混合钻头 2 支钻至筲竹寺组更换旋导组合，陡坡寺组、龙王庙组、沧浪铺组局部石英砂岩岩性致密，研磨性强、可钻性差、钻头进尺少、机械钻速低，造斜段定向增斜率低，定向工作量大，平均机械钻速 2.26m/h。

旋导组合钻进井段 3313-3553m，使用 TKC66 钻头，机械钻速 4.32m/h。

水平段 3553-4307m，段长 754m，因钻时变慢更换钻头、螺杆起下钻 3 趟，本井段采用型号 TKC56 的 PDC 钻头，平均机速 6.08m/h，起出钻头磨损较为严重，目的层筲竹寺⑧号小层硅质含量高，该型号钻头不适用于该层位，行程钻速低。

水平段 4307-5620m，段长 1273m，更换使用型号 GTD55DKOS 的 PDC 钻头，纯钻 151h，机速 8.43m/h，创井研-犍为区块三开水平段一趟钻最长指标。

#### 3.3 钻井液体系优选与维护

钻井液体系的选择直接影响井壁稳定、携岩效率和机械钻速。本井采用“水基+油基”分段体系：

一开：井深在 50-509m，采用钾基聚合物钻井液，密度在 1.15-1.25g/cm<sup>3</sup>，粘度在 45-48s，有良好的抑制性和携砂能力。

钻井液配方：3 ~ 5%土粉+0.5 ~ 1.0%HP+0.2 ~ 0.5%LV-CMC+5 ~ 7%KCl

二开：井深在 509-2925m，采用复合盐强抑制聚磺钻井液，密度 1.30-1.77 g/cm<sup>3</sup>，粘度 50-65s，做到低失水、高矿化度、形成薄而韧的滤饼质量。

钻井液配方：3 ~ 5%土粉+0.3 ~ 0.5%HP+0.4 ~ 0.8%聚合物降滤失剂+0.2 ~ 0.5%LV-CMC+2 ~ 3%FT+2%超细碳酸钙+2 ~ 3%纳米复合钙+0.3 ~ 0.5%聚胺+1 ~ 3%SMP-2+1 ~ 3%腐植酸降滤失剂+5 ~ 7%KCl+25%NaCl+重晶石等。

三开：井深 2925-5580m，采用白油基钻井液，密度 1.55-1.67g/cm<sup>3</sup>，粘度 64-67s，具有优异的润滑性、抑制性和高温稳定性，有效降低了摩阻，提高了轨迹控制精度。

钻井液配方：80 ~ 90%白油+20 ~ 10%盐水(25 ~ 35%的氯化钙溶液)+1 ~ 3%有机土+3 ~ 5%石灰+3 ~ 5%油基乳化剂+2 ~ 3%油基降滤失剂+1 ~ 2%亲油腐植酸降滤失剂+1%球状凝胶+2%纳米复合钙+重晶石。

钻井液性能实时监测与调整，确保了井下安全与钻进效率。

### 3.4 井眼轨迹控制技术

X 井为水平井，轨迹控制难度大。通过以下措施实现精准中靶：

直井段：采用 MWD 随钻监测，配合钟摆钻具组合，控制井斜在 2° 以内。

造斜段：采用“PDC+螺杆+MWD”定向组合，造斜率 3-6° /30m，平滑过渡至水平段。

水平段：采用旋转导向系统，实现“地质导向+轨迹控制”一体化，确保井眼在筇竹寺组⑥-⑧号层中穿行，中靶精度高达纵向 0.03m、横向 0.08m。

表 2-2 X 井中靶情况

靶点参数		井深 m	垂深 m	南北位移 (m)	东西位移 (m)	水平井	
						纵距 m	横距 m
A 点	设计	3530	3336	455	153	3	20
	实测	3530.00	3335.73	455.24	151.66	0.34	1.10
B 点 (井底)	设计	5530	3367	2262	-705	3	20
	实测	5530.00	3366.96	2260.84	-704.33	0.03	0.08

### 3.5 钻具组合与井下工具配套

针对不同井段的特点，优化钻具组合：

直井段：采用“PDC+螺杆+扶正器+钻铤”组合，增强刚性，防斜打直。

造斜段：采用“PDC+单弯螺杆+无磁钻铤”组合，配合水力振荡器，减少托压。

水平段：采用“旋转导向+直螺杆+加重钻杆”组合，提高导向精度与钻进稳定性。

地质工程一体化是优快钻井的前提，必须充分认识地层特性，优化工程设计。

钻头与钻井参数的匹配是关键，应结合地层岩性与实钻数据动态调整。

旋转导向与地质导向的结合是提高水平井钻井效率与轨迹精度的有效手段。

钻井液体系的优选与维护对井壁稳定和机械钻速具有重要影响。

建议在后续钻井中进一步推广“一趟钻”技术，优化钻具组合，加强实时数据监测与智能决策支持。

## 4 实施效果分析

通过上述优快钻井技术的集成应用，X 井取得了显著的技术效果：

钻井周期缩短：本井实际钻井周期 71.37 天，创区块同类型井最短纪录。

机械钻速提升：全井平均机械钻速 7.79m/h，其中二开达 12.95m/h，三开水平段达 8.43m/h。

井身质量优良：井眼轨迹平滑，最大井斜 92.76°，中靶精度高，满足地质要求。

井下无重大复杂：全井未发生井塌、卡钻等重大事故，井控安全受控。

## 6 结语

X 井的成功实践表明，通过地质工程一体化的系统优化，结合个性化钻头选型、高效钻井液体系、旋转导向轨迹控制等关键技术，可以在井研-犍为区块实现优快钻井目标。该套技术体系具有较好的适用性与推广价值，可为四川盆地深层页岩气高效开发提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] X井钻井施工总结[R]. 2024.
- [2] 张强, 刘伟, 王磊. 四川盆地页岩气水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 45-50.
- [3] 李明, 赵刚. 地质工程一体化在深层页岩气钻井中的应用[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 78-84.

## 5 认识与建议

通过对 X 井的实践分析，形成以下认识与建议：

# Research on Optimization of Tubular-Cable Composite Debris Retrieval Technology for Horizontal Well Horizontal Sections

Gang Lv Guofeng Wang Jun Tian

Changqing Downhole Technical Operation Company of China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Abstract

As a core technology for efficient development of oil and gas fields, horizontal wells have complex wellbore trajectories in their horizontal sections, and tubular-cable composite debris retrieval has become a key technical challenge constraining production. Existing retrieval technologies suffer from issues such as poor tool compatibility, difficulties in debris separation, and lack of scientific guidance for operational parameters. Based on this, this paper addresses the core challenges of composite debris retrieval in horizontal well horizontal sections by optimizing retrieval tool combinations, standardizing retrieval process design, and supporting auxiliary operational technologies, thereby establishing an "optimized composite debris retrieval process." Through laboratory experiments and field application results, it aims to provide references for relevant personnel in the industry.

## Keywords

Horizontal well; Composite falling object; Fishing process; Tool optimization; Process design

## 水平井水平段油管-电缆复合落物打捞工艺优化研究

吕刚 王国锋 田军

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 中国·陕西 西安 710000

## 摘要

水平井作为油气田高效开发的核心技术,其水平段井眼轨迹复杂,油管-电缆复合落物打捞已成为制约生产的关键技术难题。现有打捞工艺存在工具适配性差、落物分离困难、作业参数缺乏科学指导等问题。基于此,本文针对水平井水平段复合落物打捞的核心难点,通过打捞工具组合优化、打捞流程规范化设计、辅助作业技术配套等方面,构建了一套“复合落物打捞优化工艺”。并通过室内实验与现场应用结果验证,以期行业内相关人员提供参考。

## 关键词

水平井; 复合落物; 打捞工艺; 工具优化; 流程设计

## 1 引言

水平井是目前油田开发中普遍采用的一种水平井工艺,它的水平段能够有效地增大油气藏的接触面,提高原油的采收率。然而,由于油管腐蚀、电缆老化及操作不当等原因,在修井作业、措施改造或生产中,很容易出现油管和电缆一同脱落的复合脱落事故。水平段井眼轨迹独特,摩擦力矩大,岩屑易堆积,复合落物中管柱和线缆互相纠缠,造成了落物定位、抓取和拔起困难,常规打捞技术很难适应复杂的落物形状,打捞成功率较低。目前,我国某油田水平井组合物打捞的平均成功率只有62%,且一次打捞周期最多为15天,

长期作业会引起地层污染、井壁坍塌等二次事故,给我国的石油企业带来了巨大的经济损失。因此,针对水平井水平段复合落物打捞的技术痛点,进行采油过程的优化研究,提高采油效率和采收率,对于保证油井正常生产,降低开采成本,有着十分重要的实际意义。本文通过分析复合落物特性与现有工艺缺陷,从工具、流程、辅助技术三方面进行优化设计,并通过实验与现场应用验证工艺有效性。

## 2 水平井水平段复合落物打捞难点分析

### 2.1 复合落物特性复杂

油管与电缆复合落物与单件物相比,存在着明显的复杂特征:一是形状不规则,多为弯曲变形,电缆缠绕在管壁上或管内,构成“管状+丝状”交错结构,常规打捞工具很难对其进行高效抓取。二是受力状况比较复杂,水平断面

【作者简介】吕刚(1981—),男,中国甘肃庆阳人,高级技师,从事试油修井研究。

受重力、井壁支撑和摩擦力等因素的影响,产生了部分阻力,在起吊过程中容易出现物体分解或二次缠绕现象;三是由于岩屑在水平段的轨迹呈现曲线状,使得传统的测井仪器很难准确地确定岩屑的端点、卷绕范围和堵塞部位,从而造成了井下工具的盲目对接。

## 2.2 水平段井眼环境限制

水平段井眼特殊的作业环境,更增加了救助的困难:一是井筒摩擦力矩大,水平段井眼与管柱、落物接触面积大,起钻阻力和转动扭矩远大于直井,容易造成钻具损伤或落物堵塞。二是由于水平段的液流携岩性能差,岩屑易堆积于其周边,从而构成“岩屑床+塌落体”的复合阻阻系统,严重制约了该技术的应用。三是井壁稳定性较差,有些井壁容易垮塌,救助过程中井径扩大、落块脱落等都会造成二次卡钻,加大了抢救的危险性。

## 2.3 传统打捞工艺缺陷

已有的组合式打捞方法多以直井单落物打捞为基础,未能很好地适应水平段和复杂的落物特征,存在以下不足:一是工具适应性较差,单根打捞矛和打捞筒很难兼顾管柱的抓持和索缆的分离要求,容易发生“抓而不牢”、“抓后解体”等问题;二是工艺不规范,捞捞前没有针对性地评价,操作中盲目起下和转动,容易造成落物缠结加重;三是配套的配套技术不够完善,没有形成一套完整的清孔、落物解缠和防塌保护技术,致使救助的成功率大大下降。

## 3 现有打捞工艺及问题诊断

### 3.1 常用传统打捞工艺

当前,水平井水平段复杂掉落物打捞通常采用“捞桶+割刀”相结合的方式,即一是利用切割工具将缠绕缆索割断,然后利用打捞筒将管柱抓住,但水平段岩屑易沉积形成沉砂床,导致掉落物与井壁黏结,不仅易造成工具卡堵,切削过程中产生的金属碎屑还会与岩屑混合,形成新的复合阻碍物,进一步降低作业效率。二是“捞矛+扶正器”技术,即将捞矛插入油管内,通过扶正器保证工具中心位置,提升抓持对准精度,但该技术无法破解缆索交叉缠绕的难题,且起拔时缠绕的绞索易顺着捞矛杆体攀爬,卷绕打捞管柱形成“糖葫芦”状缠绕,增加起升负荷与卡钻风险。三是采用“套铣滚筒+吊篮式”的方法,即先通过套铣滚筒破除落物周围的岩屑与黏结物,再用捞筐回收落件,但套铣过程中滚筒转速控制难度大,若压力不均易造成套管内壁划伤、变薄,甚至导致落物本体碎裂,形成多个小尺寸散落件,增加后续打捞复杂度。

### 3.2 传统工艺问题诊断

通过对我国30多个水平井井眼组合坠落事故的统计与分析,发现常规方法存在如下问题:一是打捞成功率较低,只有65%,这主要是因为工具不能与缠绕式复合落物进行高效匹配,或者抓持不稳或解缠不完全。二是施工周期较长,

一般为8~12天,多次起、落、下工作次数较多,工作效率较低;三是操作费用高,一次捞捞的费用高达80多万,而且每次捞捞失败后,还要进行第二次、第三次、第四次的打捞,这就更加大了费用。

## 4 复合落物打捞工艺优化设计

### 4.1 集成式复合打捞工具研发

针对现有工具功能单一和适应性差的问题,本文设计了一种集“引导-抓取-分离-防落”为一体的新型综合打捞工具,其总体尺寸为 $\Phi 127\text{mm} \times 3500\text{mm}$ ,与水平井水平段通用孔径( $\Phi 152\text{-}\Phi 215\text{mm}$ )相匹配,工具重量比常规组合工具轻28%,能够有效降低水平段作业摩擦力。该导向装置为液力传动框架,在钻进过程中,可根据地表条件进行调整( $0\text{-}30^\circ$ ),与水平段的井眼轨道相匹配,精确引导到落物处。该导头内部装有超声探头,能够实时反馈刀具和工件之间的相对位置,从而达到可视化的定位效果。本项目提出了一种新型的基于三爪的新型抓持器,在其爪的内部设有防滑齿和弹性缓冲层,利用液压传动方式进行牙齿的自动调整( $50\text{-}150\text{mm}$ ),并可根据不同的管柱直径( $\Phi 73\text{-}114\text{mm}$ )进行调整。刀头采用高强合金钢,经过高温热处理,达到HRC55级,保证了夹钳的强力,并具有良好的弹性,防止了夹持过程中,由于夹持压力过大而引起的残余油管二次变形。液压切削机构与抓持机构相结合,使用环状金刚石刀具,利用地面泵压作用将刀具伸出(最大延伸长度为20mm),实现对缠绕在油管上的线缆(直径 $\leq 20\text{mm}$ )的精确切断。切断压力为15~25MPa,可依据钢丝绳自行调节切削速度,不会对油管体造成损坏。防掉卡机构设置于工具尾部,配有带弹性卡瓦的单向锁闭阀门,在落物夹持后,可自动将卡瓦锁定,以避免在提升时掉落物品;在遇到卡钻时,采用卸压的方法将工具取出,避免了工具在井下滞留,大大减少了二次事故的发生。

### 4.2 标准化作业流程构建

基于复合落物打捞的核心环节与现场作业需求,建立“前处理-精确定位-方向分离-平稳回收”的标准化操作流程,解决了传统工艺的无序化和针对性差的问题。在前处理阶段,先下入高压洗井管柱,以“低粘度洗井液+脉冲洗井法”的方法,对水平段井眼中的泥沙和杂质进行冲刷,冲洗液的粘度为5~8mPa.s,脉压0.5~1.0MPa,冲洗时间视井段长短而定(2-3小时),以保证井眼的畅通和落物的外露。同时,利用井径测井和电磁定位仪的联合探测,获取目标物体的位置、大小和缠绕度等信息,构建目标物体的三维建模,为后续的工作提供数据支持。精确定位阶段,将优选的一体化打捞工具放入工具内部,通过仪器内部的超声检测器,与地面监控系统相连接,实时调节工具引导角度,实现抓取机构与岩屑准确对接,避免因盲目抓取造成的工具损失和落物移位。在定向分束阶段,起动手力切断机构,依据绞索的卷

绕位置,对绞索的角度进行调节,采取“分段切断—分段剥离”的方法,首先切断外部的松缆,然后进行芯部的卷绕。在切削过程中,对泵内压力的变化进行实时监控,如果泵压力突然升高,就停止切削,然后重新进行切削,以保证在不损坏油管的前提下进行切削。稳捞阶段在切削结束后,启动自适应抓持装置,钳齿对剩余管柱进行缓慢回缩,并对其进行抓持(稳压 $\geq 10\text{MPa}$ ),以“低速+分段起拔”的方式起出工具。起吊速度可根据井段的长短进行调节(0.5~1.0米/分),每次起吊50米时应停机3-5分钟,以解除井眼内的摩擦阻力,防止岩屑掉落和二次卡钻。整个过程相互衔接,构成闭环管理,使打捞工作的标准化、可靠性大大提高。

### 4.3 关键作业参数优化

以水平段井眼力学特征和复杂落物受力分析为基础,利用 ANSYS 有限元仿真软件,构建救助过程的力学模型,并通过实验室试验,对关键操作参数进行优化,形成适用于不同工作条件的工艺参数体系。洗井参数方面,根据水平段长度(L)优化洗井排量与时间:当 $L \leq 500\text{m}$ 时,洗井排量 $25\text{-}30\text{m}^3/\text{h}$ ,时间2h;当 $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 时,排量 $30\text{-}35\text{m}^3/\text{h}$ ,时间2.5-3h;当 $L > 1000\text{m}$ 时,排量 $35\text{-}40\text{m}^3/\text{h}$ ,时间3h,确保洗井效果的同时避免洗液浪费。抓取参数根据油管残段直径调整:直径 $\Phi 73\text{-}\Phi 89\text{mm}$ 时,爪牙开度 $60\text{-}90\text{mm}$ ,抓取压力 $10\text{-}15\text{MPa}$ ;直径 $\Phi 89\text{-}\Phi 114\text{mm}$ 时,爪牙开度 $90\text{-}130\text{mm}$ ,抓取压力 $15\text{-}20\text{MPa}$ ,确保抓取牢固且不损伤油管。切割参数针对电缆直径优化:电缆直径 $\leq 10\text{mm}$ 时,切割压力 $15\text{-}18\text{MPa}$ ,切割速度 $5\text{mm/s}$ ;直径 $10\text{-}20\text{mm}$ 时,切割压力 $18\text{-}25\text{MPa}$ ,切割速度 $3\text{mm/s}$ ,避免切割过度或切割不彻底。起拔参数与水平段长度适配:水平段长度 $\leq 500\text{m}$ 时,起拔速度 $1.0\text{m/min}$ ;  $500\text{m} < L \leq 1000\text{m}$ 时,速度 $0.8\text{m/min}$ ;  $L > 1000\text{m}$ 时,速度 $0.5\text{m/min}$ ,每起拔50m暂停3-5min,降低摩擦阻力影响。这些参数经室内实验验证,能有效提升打捞稳定性与效率。

## 5 室内实验与现场应用

### 5.1 室内实验验证

建立一套水平井水平段的模拟试验平台,通过在水平段井段 $10\text{m}$ 、 $\phi 89\text{mm}$ 的套管( $\phi 89\text{mm}$ )和钢丝绳( $\phi 14\text{mm}$ )的复合材料,分别采用传统工艺与优化工艺进行打捞对比实验。

实验结果表明,该方法在打捞成功率和作业效率上明显好于常规方法,并可有效减少起拔力和碎片的分解,证明了该方法的合理性。

### 5.2 现场应用案例

在国内首次选择了两口油井(H1井和H2井)中出现

的油管索复合掉落事故。具体情况如下:

#### 5.2.1 H1 井应用情况

H1井为页岩气水平井,在水平段1200米的位置,由于油管的侵蚀和光缆的老化,在其上生成了一根 $\phi 89$ 毫米的油管和一根 $\phi 14\text{mm}$ 的光缆,该光缆的掉落位置在850米的位置,经过成像测井的测量,该设备的落物缠结现象非常严重,周边的岩屑层厚度在8cm左右。采用优化工艺进行打捞:首先采用“水力冲刷+泡沫携岩”的方式清除岩屑,然后将多功能复合式打捞装置投入使用,经过2.5小时的解缠和抓持,整个工作过程非常顺畅,整个工作历时5天,打捞成功率为100%,比该区块的传统工艺作业周期缩短4天,成本降低35万元。

#### 5.2.2 H2 井应用情况

H2井是一口水平井段1000m的砂岩储层水平井,在施工过程中,由于管柱的脱落和钢丝绳的卷绕而产生了复杂的落物。采取了最优的工艺方案:在井筒内注入复合防塌剂,然后利用液压脉冲解卡技术对卡阻段进行封堵,在4.5天内结束了整个救援工作,将掉落物全部取了出来,经钻孔检查未发现塌方和二次掉落,日产油比事故前提高了12%。

2口井的实际使用证明,该方法能够较好地处理水平段的复杂环境,具有较高的打捞成功率、较短的作业周期和较好的现场适应能力。

## 6 结语

综上所述,本文以水平井水平段油管-电缆复合落物救助技术难点为研究对象,在深入剖析油管-电缆复合落物特征及井下环境约束条件的基础上,从工具组合、流程设计、辅助技术三个核心层面开展工艺优化,形成一套高效可靠的组合绳吊打捞技术体系。通过实验室试验和现场应用验证,本项目研究成果将大幅提高救助成功率和工作效率,减少操作费用和二次风险,为解决水平井复杂坠物救助技术难题提供可行的技术方案。随着石油天然气勘探向深部和复杂油藏的发展,水平井井形变得越来越复杂,复杂丢物事件的发生概率也会随之增加。同时,还可以对各种复杂结构进行针对性的优化,扩展其应用领域,为油气田的高效开采提供更加综合的技术保证。

### 参考文献

- [1] 张彦平,李建忠,王勇.水平井落物打捞技术现状与发展趋势[J].石油机械,2020,48(5):45-52.
- [2] 刘清友,杨迎新,田雨.复合落物打捞工具的研制与应用[J].天然气工业,2019,39(8):98-104.
- [3] 王强,赵鹏,李军.水平段井眼清洁技术在落物打捞中的应用[J].石油钻探技术,2021,49(3):78-84

# Transformation and Upgrading of the Primary Brine Section in Santai Co.,Ltd.

Xiangdi Du

Gansu Northern Santai Chemical Co., Ltd., Baiyin, Gansu, 730900, China

## Abstract

As a pillar sector of basic chemical engineering, the chlor-alkali industry is pursuing sustainable development, with advancing greenization, high efficiency, and intellectualization as its core direction. The primary brine process constitutes a crucial guarantee for chlor-alkali production, where brine quality exerts a direct impact on the stable operation of subsequent equipment and the quality of end products. To address the inherent issues in the original process—including insufficient capacity, low automation level, and inadequate environmental treatment efficiency—Santai Company implemented a series of technological transformation and upgrading measures. Specifically, these measures involve: installing an SST organic membrane separation system to increase the output of refined brine, simplify the process flow, and reduce operation and maintenance costs; integrating a high-pressure water source into the plate-and-frame filter press and enhancing its automation level to improve solid-liquid separation efficiency and reduce energy consumption; and deploying new membrane bioreactor (MBR) equipment and automatic dosing devices to enhance the efficiency and quality of production wastewater treatment. This transformation provides valuable practical insights for the green, efficient, and intelligent upgrading of enterprises in this sector.

## Keywords

Chlor-Alkali Process; Brine Refining; Process Transformation and Upgrading

## 三泰公司一次盐水工序工艺升级与改造实践

杜向弟

甘肃北方三泰化工有限公司, 中国·甘肃 白银 730900

## 摘要

氯碱化工是基础化工支柱产业,绿色化、高效化、智能化升级是其可持续发展的核心方向。一次盐水工序是氯碱生产的核心保障,盐水质量直接影响后续设备稳定运行与产品质量。三泰公司针对原有工艺产能不足、自动化水平低、环保处理效率差等问题开展改造升级,具体措施包括:增设SST有机膜分离系统提升精盐水产量、简化流程并降低运维成本;为板式压滤机新增高压水压力源并提升自动化程度,提高固液分离效率、降低能耗;新增MBR设备及自动加药装置,提升生产废水处理效率与质量。此次改造为企业绿色、高效、智能化升级提供了实践参考。

## 关键词

氯碱; 盐水精制; 工艺改造

## 1 引言

氯碱化工作为基础化工行业,在安全环保、节能降耗、产业升级和可持续发展等方面的综合改善,是追求行业向绿色、高效、智能化方向发展的关键。甘肃北方三泰化工有限公司(以下简称:三泰公司)以离子膜电解盐水生产烧碱为主要工艺,主要产品有:30%液碱、50%液碱、98%固碱(片状)、氯气、氢气、盐酸、次氯酸钠、元明粉等。一次盐水工序作为氯碱生产保障核心工序,其主要任务是去除盐水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和游离氯,为二次盐水工序提供合格的精制

盐水,并确保化盐、膜法除硝、元明粉、循环水、污水处理工序的平稳运行,为整个生产流程做好保卫工作。

## 2 产能与质量保障: SST 有机膜应用

电解盐水生产氢氧化钠过程中,盐水质量是影响产品质量与设备稳定运行的关键。原盐中大量的钙、镁离子与离子膜活性基团结合形成难溶性盐,不仅会堵塞离子膜通道,降低电流效率,对离子膜造成不可逆损伤,而且会附着在电极表面腐蚀电极<sup>[1]</sup>。为保证盐水质量合格,盐水精制工序主要分为一次精制和二次精制:一次精制通过化学法和膜过滤法去除大部分钙、镁离子;二次精制借助钠型螯合树脂与一次精制过程中残留的金属离子发生反应达到盐水精制的目的(以氨基磷酸型树脂为例:  $(\text{RCH}_2\text{NHCH}_2\text{PO}_3\text{Na})_2\text{Na}_2+\text{Ca}^{2+}=($

【作者简介】杜向弟(1997—)女,中国甘肃平凉人,硕士,从事氯碱工艺研究。

RCH<sub>2</sub>NHCH<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>(Na)<sub>2</sub>Ca+2Na<sup>+</sup>), 若一次盐水中钙、镁超标, 也会对二次盐水精制工序的树脂塔造成不可逆的损伤<sup>[2]</sup>。

### 2.1 工艺现状及存在问题

三泰公司氯碱生产线设计烧碱生产能力为 10 万吨 / 年 (设计年运行时间 8000 h), 生产线能达到的最大电流为 89.1 KA, 需盐水量为 217 m<sup>3</sup>/h。原一次盐水工序用三台无机膜分离系统 (孔径: 50 nm) 经过错流过滤得到一次精制盐水, 能提供的最大理论盐水量为 65 × 3=195 m<sup>3</sup>/h; 实际因无机膜污染导致膜通量下降, 需每 7-10 天进行清洗, 能提供的盐水量为 180 m<sup>3</sup>/h, 高负荷下盐水指标难控制, 无法满足离子膜烧碱装置产能需求。此外, 为防止膜堵塞, 需在无机膜前段增设粗过滤器预先过滤粒径 ≥1 mm 的机械杂质, 过滤后的盐水经高压泵增压后从膜孔流出, 碳酸钙和氢氧化镁等杂质被截留; 但该过程需设备持续处于高压运行状态, 不仅增加了能源消耗, 也对设备的耐压性能与运行稳定性有更高的要求。

### 2.2 工艺改造

SST 有机膜精制工艺中, 盐水从下端进入膜管, 过滤后的精制盐水由上端溢流口流出; 大颗粒杂质、碳酸钙及氢氧化镁被截留于膜表面, 其中大颗粒杂质可借助重力沉降。该工艺无需在膜前端增设粗过滤器与高压增压设备, 降低了设备长期运行的能耗与磨损<sup>[3]</sup>。另外, 相较于传统无机陶瓷膜分离系统, SST 膜通过 DCS 一键即可切换清洗流程, 且运行周期更长 (15-20 天), 有效降低运维成本、减少现场人员干预频次, 既提升操作安全性, 又减轻劳动强度。此次改造保障了一次盐水的连续稳定供应, 不仅为电解车间二次盐水精制提供优质盐水, 同时从源头规避了树脂塔污染风险。

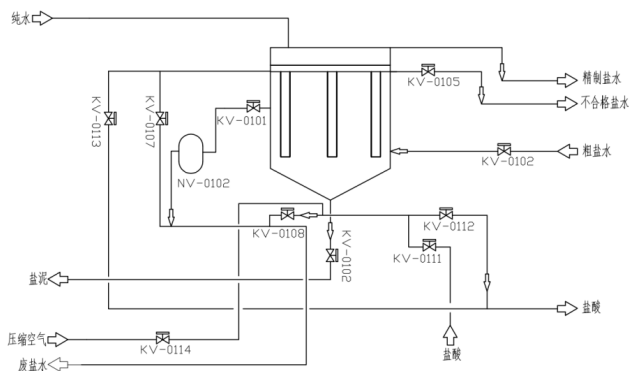


图 1 有机膜设备图

## 3 自动化与效率提升：压滤机工艺改造

一次盐水精制过程中会产生含大量污泥与机械杂质的粗盐水, 直接排放会造成水、盐资源浪费。为实现生产废水零排放及资源闭环循环目标, 工艺采用板式压滤机分离粗盐水与盐泥<sup>[4]</sup>。其核心原理为: 将含有污泥和机械杂质的粗盐

水匀速导入压滤机的滤室内部, 通过压力系统施压, 使清盐水穿透滤布形成滤清液, 固体杂质被滤布截留, 形成含水率较低的滤饼 (即盐泥), 从而实现清盐水与固体杂质的高效分离。经分离后清盐水去除大部分杂质, 可送回化盐工序循环利用, 提升资源利用率; 盐泥外运销售处置, 既避免固废堆积污染, 又实现副产物资源化

### 3.1 工艺现状及存在问题

原压滤机固液分离工艺存在以下两大问题: 一是压力源单一: 仅采用气体驱动, 因气体可压缩性强、压力传递效率低, 滤室杂质堆积时压力易波动, 导致滤板挤压力不均, 单次压滤周期长达 60 分钟, 滤饼含水率 15%-20%, 增加了盐泥运输与处置成本; 二是操作方式滞后: 进液阀与充压调节阀需手动操作, 粗盐水进液手阀频繁开关易因进料速度不当引发滤室“搭桥”, 冲压压力需人工监控调整, 单台设备不仅需 2 名专业操作人员, 还易因人工误差导致分离效果不达标、需重新压滤, 影响生产连续性。

### 3.2 工艺改造及效果

压力源系统优化: 为提升压缩效率, 在原有压缩气体系统基础上新增高压水增压系统 (以生消水为介质, 1.2 MPa 高压泵增压), 形成“气体预压 + 高压水主压”复合模式——先通过压缩气体快速推动滤板闭合, 初步挤出大部分游离水; 再切换为高压水持续施压, 利用水不可压缩、压力传递均匀的优势, 将滤室内压力稳定提升至 0.8 MPa, 使滤饼间隙中的水充分挤出。实践表明, 改造后单次压滤周期缩短至 30 分钟, 盐泥滤饼含水率降至 3%-5%, 分离效率显著提升。

阀门智能化改造: 将压滤机 2 个核心操作阀门 (粗盐水进液手阀、冲压管线阀门) 更换为智能自控阀, 可通过自控柜预设参数精准控制进液、充压过程; 同时具备故障自诊断与报警功能, 保障生产安全。改造后单台压滤机仅需 1 名操作人员, 减轻体力劳动的同时提升了工艺稳定性与生产效率。

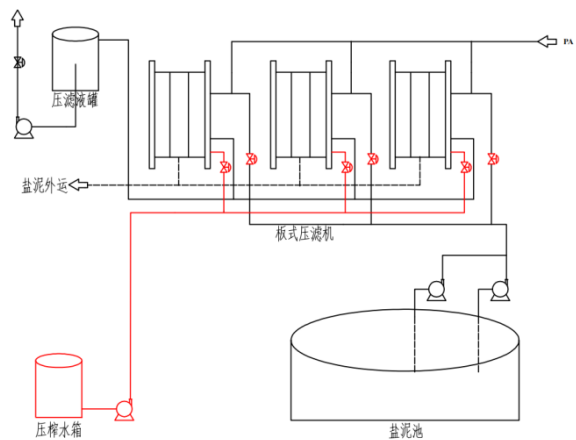


图 2 盐泥压滤工艺流程图

## 4 提质增效升级：废水处理工艺优化

推进废水处理体系升级与提质增效，是化工企业实现可持续发展的必然选择。结合三泰公司生产经营实际，其污水按来源可分为三类：一是生活废水，源于员工办公及生活区日常用水排放，主要污染物为有机物、悬浮物及氮磷化合物；二是生产废水，涵盖各生产环节工艺废水，其中在离子膜电解盐水制烧碱过程中，会产生大量酸碱废水。该类废水 pH 值波动大（强酸性或强碱性），含较高浓度的游离氯（强氧化性，易腐蚀后续处理设备）及悬浮物（含未完全反应盐颗粒、反应副产物、设备磨损碎屑等）<sup>[5]</sup>；三是事故废水，指生产系统出现异常工况、设备故障或突发安全事件时产生的突发性废水，具有水质成分复杂、污染物浓度极高、排放时间与排放量不确定等特点。

### 4.1 工艺现状及存在问题

原工艺设计中，生活污水处理工艺仅依托一体化污水处理装置，实际运行中部分难以降解的有机物导致 COD 超标。与此同时，电解过程中会产生含较高游离氯的酸碱废水，现行处理流程为：先在废水中和池加酸/碱和亚硫酸钠调节水质，后续为了让水中的杂质完全沉降，需要在中和池静置 6 h 待理化分析合格后送至下一个工序。该流程存在两大核心问题：一是废水调节阶段静置等待时间过长，导致处理效率低；二是面对高水量冲击时，现有处理能力无法匹配废水产生量，存在处理负荷不足的短板。

### 4.2 工艺改造及效果：

**生活污水系统优化：**本方案在现有生活污水处理一体化装置后端增设 MBR（膜生物反应器）深度处理单元，构建“预处理-主体处理-MBR 深度处理”三级体系<sup>[6]</sup>。该 MBR 设备利用紫外线强氧化性破坏病原微生物，确保出水 COD、氨氮、总磷等指标全面满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）一级标准要求。

**絮凝沉降系统升级：**为提高生产废水处理效果，在废水中和池后增设集成絮凝-沉降功能的一体化沉淀装置及全自动加药装置。该系统根据中和池出水的水质特性（如悬浮物浓度、pH、浊度等），精准投加聚合氯化铝（PAC）絮凝剂（水解产生多核络合物，吸附杂质形成初始絮体）<sup>[7]</sup>和聚丙烯酰胺（PAM）（高分子链架桥使始絮体聚集为致密大絮团）<sup>[8]</sup>；经中和池调节 pH（6.5-8.5）和游离氯（0 mg/L）

合格后进入该装置，在药剂协同下实现悬浮物快速絮凝及高效沉降分离。

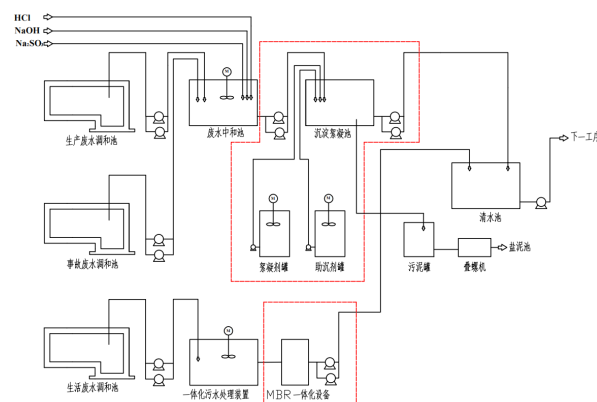


图 3 污水处理工艺流程图

## 5 结语

基于本次一次盐水工序改造的显著成效，三泰公司未来将以“绿色化、高效化、智能化”为核心，持续推进氯碱工艺优化升级实践，逐步以有机 SST 膜全面替代现有陶瓷膜系统，并且以“零排放、全回收”为目标，提升水资源循环利用效率，构建“生产-处理-回用”闭环生态。

### 参考文献

- [1] 李新民,王小敏.离子膜法电解槽电压异常升高原因[J].氯碱工业,2023,59(1):1-3.
- [2] 田玉英,张晓峰.盐水中杂质碘对离子膜性能的影响[J].氯碱工业,2021,57(4):15-18.
- [3] 赵新海,李运杰,齐振宇,等.从节约角度分析ZF膜改造为SST膜[J].中国氯碱,2023(6):49-52.
- [4] 汪琳琪,梁柱俊,何艳珠.板框式压滤机固液分离环境污染治理[J].铜业工程,2021(2):73-75.
- [5] 崔继源.氯碱工业废水的特点和处理方法研究[J].天津化工,2023,37(4):91-94.
- [6] 王银生,廖侃,孙亮,等.改进型MBR一体化设备在低浓度生活污水处理中的应用研究[J].山东化工,2020,49(15):255-258.
- [7] 孙英娟,周旋,岳丽娜,等.工业固废制备聚合氯化铝铁及其在煤泥废水处理中的应用[J].矿产综合利用,2021(1):144-150.
- [8] 靳雅莉,谢雨桐,马洪霞,等.含聚丙烯酰胺废水处理技术的研究进展[J].化工技术与开发,2019,48(10):48-51.

# Removal Process and Quality Control of Impurity Elements in Alloy Casting Aluminum Alloy Smelting

Chaowan Yang

Yunnan Wenshan Aluminum Co., Ltd. Wenshan, Yunnan, 663100, China

## Abstract

Cast aluminum alloys are extensively utilized in aerospace, automotive manufacturing, and related fields due to their lightweight and high-strength properties. However, impurity elements introduced during the melting process (such as Fe, Si, and gaseous contaminants) can significantly impair the material's mechanical properties and processing stability. This paper investigates the origins and detrimental effects of impurity elements, while providing an in-depth analysis of the mechanisms and key applications of critical removal processes including flux refining, filtration purification, vacuum melting, and gas shielded melting. By integrating quality control measures throughout the entire melting process (source control, process parameter optimization, and product inspection), the study establishes an integrated system encompassing "process optimization, process control, and quality assurance," offering theoretical and practical references for enhancing the quality of cast aluminum alloy melting.

## Keywords

Cast aluminum alloy; Smelting; Impurity removal; Process optimization; Quality control

## 铸造铝合金熔炼过程中杂质元素的去除工艺及质量控制

杨朝万

云南文山铝业有限公司, 中国·云南文山 663100

## 摘要

铸造铝合金轻量化、高强度等长处广泛运用于航空航天、汽车制造等范畴, 不过其熔炼流程里带入的杂质元素(像Fe、Si、气体杂质等)会严重干扰材料的力学性能与加工稳定性。本文从杂质元素的来源与损害着手, 深刻剖析熔剂精炼、过滤净化、真空熔炼、气体保护熔炼等关键去除工艺的作用机理与应用重点, 结合熔炼全流程的质量控制办法(源头管控、过程参数优化、成品检测), 搭建“工艺优化-过程管控-质量保障”的一体化系统, 给提升铸造铝合金熔炼质量供应理论与实践参照。

## 关键词

铸造铝合金; 熔炼; 杂质去除; 工艺优化; 质量控制

## 1 引言

铸造铝合金作为现代工业中使用量最大的轻合金材料, 其性能好坏直接决定终端产品的可靠性与使用时长。熔炼是铝合金铸造的核心环节, 在此过程当中, 原材料带入、熔炼设备污染、环境介质浸入等因素会造成杂质元素(金属杂质、非金属夹杂物、气体杂质)的引入。这些杂质会破坏铝合金的晶体结构完好性, 引发铸造缺陷(例如气孔、夹渣、裂纹), 降低材料的强度、韧性及耐腐蚀性能, 严重情况下甚至造成产品失效。所以, 深入研究杂质元素的去除工艺, 构建科学的质量控制系统, 对推动铸造铝合金产业高质量发展具备重要现实意义。本文围绕熔炼过程中杂质元素的去除核心技术

与全流程质量管控展开系统研讨, 给实际生产供应技术支撑<sup>[1]</sup>。

## 2 铸造铝合金熔炼中杂质元素的来源与危害

### 2.1 杂质元素的主要来源

铸造铝合金熔炼过程中, 杂质元素的来源呈现多样性, 主要能归纳成三类。一是原材料自身携带, 包含铝锭里的残余杂质(如Fe、Cu等)、回收料(再生铝)中的混入杂质(像Si、Mg氧化物及金属碎屑), 这类杂质是熔炼前最为主要的杂质来源, 其含量直接作用于后续精炼难度。二是熔炼过程中的二次污染, 比如熔炉衬材(耐火材料)的侵蚀脱落、熔炼工具(坩埚、搅拌棒)的磨损带入, 以及燃料燃烧产生的粉尘、有害气体(如CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O)与铝液反应生成的新杂质。三是环境因素影响, 熔炼环境里的空气湿度、粉尘含量会造成铝液吸收水分, 进而生成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等非金属夹杂物, 同时空气中的氮气、氧气也会溶解于铝液中形成气体杂质<sup>[2]</sup>。

【作者简介】杨朝万(1992—), 男, 中国云南文山人, 初级工程师, 从事铸造铝研究。

## 2.2 杂质元素的核心危害表现

差异化特征于不同类型杂质元素对铸造铝合金性能的危害中呈现,然结构与性能两方面的负面影响均会被造成。金属杂质范畴内,Fe为危害较大且最常见之元素,Al<sub>3</sub>Fe等脆性金属间化合物由其与Al形成,晶界处针状或片状分布着这些化合物,铝合金的塑性与韧性会被显著削弱,材料的切削加工性能同时受到作用;Si含量处于过高状态时,铝合金硬度的提升、韧性的下降会被促使,高塑性要求的铸件(像汽车发动机缸体)所受危害尤为突出。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、SiO<sub>2</sub>等非金属夹杂物,细小颗粒状或聚集态多为其存在形式,铝合金基体的连续性会遭到破坏,应力集中点成为其角色,受力进程中裂纹扩展易被引发,材料的强度与疲劳寿命随之降低,铝合金的铸造流动性这类夹杂物还会对其产生影响,浇不足、冷隔等铸造缺陷进而出现。气体杂质于铝液凝固过程中,因溶解度下降而析出,气孔缺陷得以形成,材料的致密度被降低之余,力学性能亦被削弱,严重情形下铸件渗漏会发生,密封要求的满足无法达成<sup>[3]</sup>。

## 3 铸造铝合金熔炼中杂质元素的去除工艺

### 3.1 熔剂精炼工艺状况

熔剂精炼作为铝合金熔炼中运用最广的杂质去除手段,熔剂与杂质元素间物理化学的相互作用(吸附、溶解、化学反应等形式)被利用,杂质的分离去除得以实现,此为其核心原理所在。功能差异下,熔剂有覆盖剂、精炼剂和变质剂之划分,其中精炼剂在杂质去除方面起着关键作用。精炼剂的选择,需将熔点低于铝合金熔炼温度、密度小于铝液、与杂质亲和力强等条件予以满足,氯化物系(例如NaCl-KCl混合盐)、氟化物系(如Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>)以及复合熔剂(氯化物-氟化物复配类型)为常见种类。氯化物系精炼剂,挥发所产生的气泡对铝液中的非金属夹杂物进行携带使其上浮,此为主要方式,同时与铝液中的水分发生反应生成HCl气体,除气效果得以达成;氟化物系精炼剂,则能够与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等氧化物展开化学反应,低熔点、易上浮的复合化合物(如Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)被生成,氧化物杂质的去除目标得以实现。应用进程中,熔剂的加入量、加入温度以及搅拌方式,精炼效果会受到其直接作用:加入量过多,熔剂残留现象会出现,新的杂质随之形成;加入温度过低,熔剂充分熔化并发挥作用无法实现,一般将温度控制在铝合金液相线以上50-100℃范围;搅拌需呈现均匀温和状态,铝液二次氧化或更多气体的卷入需要避免。另外,为使精炼效率得到提升,“底吹熔剂”或者“惰性气体-熔剂复合精炼”方式可被采用,气体搅拌的方式对熔剂与铝液的接触面积进行增强,杂质吸附与分离效果得以强化<sup>[4]</sup>。

### 3.2 过滤净化工艺构建

过滤净化工艺构建是凭借过滤介质的物理拦截动作,达成铝液之内非金属夹杂物剔除的关键技艺塑造,尤其适配

于粒径超越10μm的固体杂质剔除场景,往往充当熔剂精炼工序之后的深度净化阶段构造。过滤介质的筛选事宜属于过滤成效的核心构成,常见应用类型涵盖陶瓷泡沫过滤装置、纤维过滤装置、刚性多孔过滤装置等品类。陶瓷泡沫过滤装置(CFF)作为当下工业制造进程中应用范畴最为广泛的过滤介质类型,其具备三维网状构造形态,拥有70%—90%的高孔隙率特征,能够借助机械拦截效应、惯性碰撞效应、吸附效应等多重作用形式实现夹杂物的捕捉作业。于使用流程当中,过滤装置的孔径选取需要依照杂质粒径状况实时调整操作,一般选用具备10-50PPI(每英寸孔隙数量)指标的过滤装置,针对高精度铸件生产可采取多级过滤模式布局<sup>[5]</sup>。

### 3.3 真空熔炼工艺体系

真空熔炼工艺体系主要针对气体杂质成分与挥发性金属杂质成分的去除目标,其核心作用原理是借助真空环境条件降低气体分压水平,推动铝液当中溶解气体的析出过程,同时运用杂质元素与铝元素的蒸气压差异特征,达成挥发性杂质的蒸发分离进程。该工艺体系尤其适配于纯度要求较为严苛的航空航天领域用铸造铝合金材料(例如A356、6061系合金)生产场景。真空熔炼的实施效果主要取决于真空度指标、熔炼温度指标与保温时间指标。真空度水平越高,气体分压数值越低,气体杂质成分(如H<sub>2</sub>)的析出动力越显著,一般控制在10—100Pa范围;熔炼温度参数需要高于铝合金常规熔炼温度数值20-50℃幅度,用以提升铝液流动性能,促进气体成分与杂质成分的扩散分离进程,但温度数值过高会造成铝液挥发损失量增加问题;保温时间参数需要依照合金成分构成与杂质含量水平实施调整操作,通常处于30—60分钟区间,确保杂质成分实现充分分离效果。另外,真空熔炼作业进程中需要规避铝液与坩埚装置的过度反应现象,可选用石墨坩埚装置或涂层坩埚装置(如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>涂层类型),减少因坩埚侵蚀问题带来的二次污染影响。该工艺体系的优势体现在能够同步实现气体杂质成分与挥发性金属杂质成分(如Pb、Bi元素)的去除效果,但存在设备投资成本较高问题,能耗需求较大,适配于高端铝合金铸件产品的生产场景。

### 3.4 气体保护熔炼工艺构建

气体保护熔炼工艺的构建重点是运用惰性气体类别(像Ar、N<sub>2</sub>成分)或者还原性气体类型(例如CO物质)覆盖至铝液表层范围,实施空气同铝液接触的隔绝举措,从起始源头位置降低氧化杂质以及气体杂质的生成状况,与此同时能够辅助开展部分已存杂质的去除作业。惰性气体实施保护属于最为常用的形式情形,在其中Ar气由于化学性质呈现稳定状态、不会与铝液产生反应现象,获得最为广泛的应用局面。Ar气借助喷枪装置吹入铝液内部区域,一方面形成保护性的气氛环境,防范铝液出现氧化问题;另一方面气泡在上升移动的过程当中会携带部分气体杂质以及细小夹杂

物产生上浮表现,达成精炼处理的效果情况。吹气量数值与吹气压力参数需要进行严格化的控制操作,吹气量处于过大状态或者压力处于过高状态会引发铝液产生飞溅现象,增添二次氧化的风险概率;吹气量处于过小状态则不能形成有效的保护作用。

## 4 铸造铝合金熔炼过程的质量控制措施

### 4.1 源头质量管控手段

源头实施管控是减少杂质元素产生引入的关键要点,核心内容在于原材料实施管控以及设备开展预处理操作。在原材料进行选择方面,需要优先选用契合国家标准要求的优质铝锭材料,严格控制回收材料的混入比例数值,并对回收材料开展预处理作业。与此同时,需要建立起原材料的检验工作机制,针对每批次原材料的化学成分构成、杂质含量状况开展检测工作,保证其契合熔炼作业的要求标准。在设备开展预处理的方面,熔炼作业之前需要对熔炉装置、坩埚器具、搅拌棒工具等设备设施开展彻底性的清理工作,清除表面位置的氧化皮物质、残留杂质成分与油污污渍;对坩埚器具进行预热处理操作,缩小坩埚器具同铝液之间的温差数值,规避铝液出现快速降温导致的凝固夹杂问题;对熔炼作业的工具进行涂层处理操作,降低工具产生磨损带来的杂质污染影响。

### 4.2 过程参数管控途径

熔炼作业过程当中的参数优化处理是保障杂质去除效果的核心内容,需要重点针对熔炼温度指标、熔炼时间长度、搅拌速度数值等关键参数实施控制操作。熔炼温度数值应当依据合金具体类型实施严格化控制,一般处于 700-760℃ 区间范围,规避温度处于过高状态引发铝液出现过度氧化现象以及晶粒变得粗大问题,同时防范温度处于过低状态造成熔解作业不够充分、杂质分离存在困难的情况。熔炼时间长度需要进行合理性的把控操作,过长的熔炼时间周期会增添铝液同环境条件、设备设施的反应时间数量,引发杂质产生积累现象;过短的时间则会造成杂质无法实现充分性分离,一般控制在 1.5—3 小时范围。搅拌操作行为需要遵循“温和均匀化”的原则要求,搅拌速度数值控制在 30-60r/min 区间,规避剧烈搅拌造成铝液卷入空气物质,同时保证熔剂材料与铝液实施充分性接触,提升精炼处理的效果水平。

### 4.3 成品质量检测

成品检测作为质量控制终端节点,目的在于验证杂质剔除成效,保障铸件契合使用规范。检测条目主要涵盖化学

成分剖析、非金属夹杂物检验、气体含量测定与力学性能测试。化学成分剖析可运用光谱分析手段迅速精准测算合金内主要元素及杂质元素(像 Fe、Si)的含量数值,保证其处于标准范围之内;非金属夹杂物检验可借助金相显微镜观测或图像分析系统,统计夹杂物的数量多寡、粒径大小与分布形态,评估过滤净化成果;气体含量测定可采用液氮冷却办法或真空减压方式,测量铝液中的  $H_2$  含量情况,确保其低于 0.2mL/100g 标准;力学性能测试通过拉伸试验项目、硬度试验内容等测定铸件的抗拉强度指标、屈服强度数据、伸长率参数等,间接体现杂质剔除效果。针对检测未达标的产品物件,需剖析成因缘由,采取具备针对性的改进举措办法,保障后续生产的质量稳定状态。

## 5 结语

铸造铝合金熔炼环节中的杂质元素剔除与质量管控工作,是提升材料性能水平与产品可靠程度的核心关键环节。熔剂精炼工艺、过滤净化技术、真空熔炼方法、气体保护熔炼手段等各有独特优势,需依据合金类别类型、产品需求条件与生产实际状况合理做出选择,在必要情形下采用多工艺复合运用模式,达成杂质元素的高效剔除目标。质量管控应当贯穿“源头起始点—过程进行中—成品完成态”全流程环节,通过原材料的管控措施减少杂质引入情况,通过过程参数的优化操作保障精炼实际效果,通过成品检测的实施验证质量达标状况。在未来发展阶段,伴随高端制造业领域对铝合金质量要求的持续提升,杂质剔除工艺将会朝向高效化发展方向、精准化操作方向、绿色化生产方向迈进,例如新型复合熔剂的研究开发工作、智能化过滤设备的应用实践过程、真空—惰性气体复合熔炼技术的优化提升阶段等,同时质量管控体系会愈发完善健全,通过数字化监测手段与大数据分析方法实现熔炼过程的实时调控操作,进一步提升铸造铝合金的生产质量水准与市场竞争能力。

### 参考文献

- [1] 刘培德,董垒,温晓妮.铸造铝合金熔炼工艺研究[J].世界有色金属,2018,(02):14-15.
- [2] 皮远岸.铸造铝合金熔炼过程的质控原理与实践[J].科技创新与应用,2014,(14):18-19.
- [3] 文献速报[J].铸造,2002,(07):453-454.
- [4] 黄汉云.铝合金熔炼镁的变化和影响[J].江苏冶金,2002,(03):12-14.
- [5] 洪文安,鞠复明.电磁搅拌技术在铸造铝合金熔炼中的应用[J].轻金属,1996,(07):47-49.

# Innovative Application of Electromechanical Intelligent Technology in New Energy Equipment

Qiangqiang Xue Limin Bai

## Abstract

Electromechanical intelligent technology is an interdisciplinary system integrating mechanical engineering, electronics, automatic control, and artificial intelligence. Its core advantage lies in achieving real-time monitoring, dynamic optimization, and intelligent regulation of equipment operation through intelligent sensing, precise control, and autonomous decision-making. Applying this technology to new energy equipment can effectively overcome traditional technical bottlenecks, enhance energy conversion efficiency, reduce maintenance costs, improve operational stability, and drive the industry's transition from "scale" to "intelligence and high-end" development. This paper focuses on four core sectors of new energy equipment—photovoltaic, wind power, new energy vehicles, and energy storage—to explore innovative applications and future development directions of electromechanical intelligent technology.

## Keywords

Electromechanical Intelligence; New Energy Equipment; Innovative Applications; Intelligent Control; Energy Transition

## 机电智能化技术在新能源装备中的创新应用

薛强强 白利敏

榆林市榆阳中能袁大滩矿业有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

## 摘要

机电智能化技术是融合机械工程、电子技术、自动控制、人工智能等多学科的综合技术体系,其核心优势在于通过智能感知、精准控制与自主决策,实现装备运行状态的实时监测、动态优化与智能调控。将机电智能化技术应用于新能源装备,能够有效突破传统装备的技术瓶颈,提升能源转换效率、降低运维成本、增强运行稳定性,推动新能源装备产业从“规模化”向“智能化、高端化”转型。本文将聚焦光伏、风电、新能源汽车、储能四大核心新能源装备领域,深入探讨机电智能化技术的创新应用实践与发展方向。

## 关键词

机电智能化; 新能源装备; 创新应用; 智能控制; 能源转型

## 1 引言

随着传统化石能源枯竭与生态环境问题日益严峻,开发利用太阳能、风能、氢能等新能源已成为全球能源转型的必然趋势。在新能源装备制造领域已实现规模化发展的时期,光伏组件产量、风电装机容量、新能源汽车产销量等都与其息息相关。然而,传统新能源装备普遍存在控制精度低、运维成本高、能源转换效率有限等问题,难以满足高质量发展的需求。在全球能源转型与“双碳”目标引领下,新能源装备产业迎来高速发展期,而机电智能化技术的深度融合与创新应用,成为推动新能源装备性能升级、效率提升与运维优化的核心动力。

【作者简介】薛强强(1986—),男,中国陕西榆林人,本科,工程师,从事机电智能化技术在新能源装备中的创新应用研究。

## 2 机电智能化技术在核心新能源装备中的创新应用

### 2.1 光伏装备中的机电智能化应用

#### 2.1.1 智能跟踪系统

传统光伏组件多采用固定安装方式,受光照角度变化影响,光电转换效率有限。基于机电一体化技术的双轴智能跟踪系统,通过融合GPS定位、光照传感器与倾角传感器数据,实时感知太阳方位与光照强度。嵌入式控制器采用模糊PID算法,精准调控步进电机驱动跟踪支架转动,使光伏组件始终保持与太阳光线垂直的最佳角度。相较于固定安装方式,该系统可使光电转换效率提升15%-20%<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.2 智能运维

大型光伏电站占地面积广、组件数量多,传统人工巡检方式效率低、成本高,且难以及时发现组件隐裂、热斑等故障。基于机电智能化的光伏电站智能运维系统,整合了无人巡检、机器视觉识别与机器人运维三大模块。无人机搭

载高清摄像头与红外热成像仪,按照预设路径自主完成光伏组件的全覆盖巡检;机器视觉算法通过对巡检图像的特征提取与模式识别,自动识别组件表面的故障缺陷,识别准确率可达98%以上;地面运维机器人则可根据故障定位信息,自主完成组件清洁、螺丝紧固等简单维修作业。该系统将巡检效率提升5倍以上,故障响应时间缩短至小时级,有效降低了运维成本,延长了组件使用寿命<sup>[2]</sup>。

### 2.1.3 逆变控制

逆变器作为光伏系统的核心电力转换设备,其转换效率直接影响整个电站的能源输出。基于数字信号处理器(DSP)的智能逆变控制技术,通过采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法,实现了直流电能向交流电能的高效转换,转换效率可达98.5%以上。同时,该技术具备电网电压监测、孤岛效应检测与低电压穿越能力,能够实时响应电网负荷变化,确保光伏电力平稳并入电网。部分高端逆变器还集成了能源管理功能,通过与储能系统协同,实现光伏电力的削峰填谷,提升能源利用效率。

## 2.2 风电装备中的机电智能化应用

### 2.2.1 智能变桨控制

变桨系统是调节风力发电机输出功率、保障机组安全运行的核心部件。传统变桨系统采用常规PID控制,难以适应风速的快速波动,易导致输出功率波动大、机械磨损严重。基于机电智能化的智能变桨系统,采用自适应模糊PID控制算法,通过风速传感器、转速传感器实时采集风速与叶轮转速数据,动态调整变桨角度。当风速低于额定风速时,变桨系统保持最佳攻角,最大化捕获风能;当风速超过额定风速时,快速调整桨叶角度,限制输出功率,避免机组过载。同时,该系统具备故障自诊断功能,能够实时监测变桨电机、减速器、传感器等部件的运行状态,发现异常时及时切换至备用模式,保障机组安全停机。

### 2.2.2 智能偏航控制

偏航系统的核心作用是使机舱始终对准风向,最大化捕获风能。基于机电智能化的智能偏航系统,通过激光雷达传感器精准测量风向、风速与湍流强度,结合机舱位置传感器数据,采用模型预测控制算法,动态调整偏航角度与偏航速度。与传统机械偏航系统相比,该系统的风向跟踪精度提升至 $\pm 1^\circ$ ,风能捕获效率提升5%-8%。同时,系统通过对偏航电机电流、齿轮箱温度等数据的实时监测,实现偏航系统的磨损预判,避免因偏航卡滞导致的能源损失<sup>[3]</sup>。

## 2.3 新能源汽车中的机电智能化应用

### 2.3.1 智能动力控制系统

新能源汽车的动力系统由电机、电控、减速器组成,其控制精度直接影响车辆的动力响应与能源效率。基于机电智能化的智能动力控制系统,采用高性能MCU(微控制单元)作为核心控制器,通过矢量控制算法,实现对电机转速、扭矩的精准调控。系统能够根据驾驶员的操作意图(油门、刹车信号)、车辆行驶状态(车速、坡度)与电池状态,动

态优化动力输出策略。

例如,在起步加速阶段,系统增大电机输出扭矩,提升动力响应速度;在匀速行驶阶段,优化电机工作效率,降低能源消耗。同时,系统具备能量回收功能,通过调节电机工作模式,将车辆制动时的动能转化为电能存储于电池中,能量回收效率可达20%-30%,显著提升了车辆的续航里程。

### 2.3.2 电池管理系统(BMS)

动力电池是新能源汽车的核心储能部件,其性能与安全性直接决定车辆的续航与安全。基于机电智能化的BMS系统,通过在电池包内安装电压传感器、温度传感器、电流传感器,实时采集单体电池的电压、温度、电流数据。系统采用卡尔曼滤波算法,精准估算电池剩余电量(SOC)与健康状态(SOH),误差控制在5%以内。同时,系统具备均衡控制功能,通过主动均衡电路,调节单体电池的电压,避免因单体电池电压不一致导致的电池性能衰减。在极端工况下(如高温、过充、过放),BMS系统能够快速切断电池回路,启动热管理系统,保障电池安全。

### 2.3.3 智能驾驶系统

机电智能化技术是实现智能驾驶的核心支撑。该系统整合了环境感知、决策规划与执行控制三大模块。环境感知模块通过摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达等传感器,实时采集车辆周边的道路信息、交通参与者信息;决策规划模块采用深度学习算法,对感知数据进行融合分析,生成最优的行驶路径与驾驶决策;执行控制模块通过电子助力转向、电子液压制动等机电一体化执行机构,精准执行决策指令,实现车辆的自动加速、减速、转向与泊车。

目前,L2级智能驾驶系统已实现大规模商业化应用,具备自适应巡航、车道保持、自动紧急制动等功能;L4级自动驾驶系统在特定场景(如港口、园区、城市快速路)已开展示范运营,未来随着技术的不断成熟,将逐步实现全场景商业化应用。

## 2.4 储能装备中的机电智能化应用

### 2.4.1 智能充放电控制

储能装备的核心是充放电转换器(PCS),其控制精度直接影响充放电效率与电网兼容性。基于机电智能化的智能PCS系统,采用数字信号处理器(DSP)与现场可编程门阵列(FPGA)协同控制架构,通过采用先进的调制算法(如SVPWM、模型预测控制),实现充放电功率的精准调控。系统能够根据电网频率、电压变化与新能源出力情况,动态调整充放电模式与功率,确保储能装备与电网协同运行。

例如,在新能源出力高峰期,储能装备处于充电状态,吸收多余电力;在新能源出力低谷期或电网负荷高峰期,储能装备处于放电状态,补充电网电力。同时,智能PCS系统具备无功补偿功能,能够提升电网的电压稳定性。

### 2.4.2 智能调度系统

大规模储能电站需要与新能源电站、电网协同调度,实现能源的优化配置。基于机电智能化的智能调度系统,整

合了大数据、云计算、物联网等技术，实时采集新能源出力数据、电网负荷数据、储能装备运行数据。系统采用优化算法（如遗传算法、粒子群优化算法），根据能源市场价格、电网运行需求，制定最优的充放电调度策略。

例如，系统能够预测未来 24 小时的新能源出力与电网负荷，提前规划储能装备的充放电时间与功率，最大化储能电站的经济效益。同时，智能调度系统具备远程监控与运维功能，运维人员可通过云端平台实时监控储能电站的运行状态，远程下达调度指令，降低运维成本<sup>[4]</sup>。

### 3 机电智能化技术在新能源装备中应用的关键支撑技术

#### 3.1 智能传感与感知技术

智能传感与感知技术是机电智能化应用的基础，能够为新能源装备的运行控制与状态监测提供精准的数据支撑。在新能源装备中，常用的传感器包括光照传感器、风速传感器、振动传感器、温度传感器、电压传感器、激光雷达等。随着 MEMS（微机电系统）技术的发展，传感器朝着微型化、高精度、低功耗、智能化方向发展。例如，MEMS 振动传感器体积小、重量轻，可直接集成于风电装备的关键部件，实现振动信号的精准采集；激光雷达传感器具备高精度、远距离的环境感知能力，是新能源汽车智能驾驶系统的核心传感器。

#### 3.2 嵌入式控制技术

嵌入式控制技术是实现新能源装备精准控制的核心，其性能直接决定装备的控制精度与响应速度。嵌入式控制器通常采用 MCU、DSP、FPGA 等芯片作为核心处理单元，具备实时性强、可靠性高、功耗低等特点。在新能源装备中，嵌入式控制器通过运行先进的控制算法（如 PID 控制、模糊控制、深度学习算法），对传感器采集的数据进行实时分析与处理，并输出控制指令，驱动执行机构动作。

例如，光伏智能跟踪系统的嵌入式控制器，能够实时处理光照与位置数据，精准调控步进电机的转动角度；新能源汽车的 MCU，能够实时调控电机的转速与扭矩。随着芯片技术的发展，嵌入式控制器的运算能力不断提升，能够支持更复杂的控制算法与多任务处理。

#### 3.3 大数据与人工智能算法

大数据与人工智能算法是实现新能源装备智能决策与预测性维护的关键支撑。新能源装备在运行过程中会产生大量的运行数据，通过大数据平台对这些数据进行存储、管理

与分析，能够挖掘数据背后的规律与潜在问题。人工智能算法（如深度学习、机器学习、优化算法）的应用，能够实现故障诊断、状态预测、调度优化等功能。

例如，风电装备的预测性维护系统，通过深度学习算法对振动、温度等数据进行分析，能够提前预判故障；储能电站的智能调度系统，通过优化算法制定最优的充放电策略。

#### 3.4 通信与网络技术

通信与网络技术是实现新能源装备远程监控、数据传输与协同调度的基础。在新能源装备中，常用的通信技术包括 5G、物联网（IoT）、工业以太网等。5G 技术具备高带宽、低延迟、广连接的特点，能够实现风电装备、储能电站等大型装备的海量数据实时传输；物联网技术能够实现传感器、控制器、执行机构等设备的互联互通，构建智能感知网络；工业以太网技术则保障了装备控制系统内部的高速、可靠通信。

例如，海上风电场通过 5G 网络将风机运行数据传输至云端平台，实现远程监控与运维；新能源汽车通过车联网技术实现车辆与车辆（V2V）、车辆与道路（V2I）、车辆与云端（V2C）的通信，为智能驾驶提供支撑<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

机电智能化技术的创新应用，为新能源装备产业的高质量发展提供了强大动力，在光伏、风电、新能源汽车、储能等核心领域已取得显著成效，提升了装备的性能、效率与可靠性。然而，当前仍面临核心技术瓶颈、数据安全、系统集成、人才短缺等挑战。未来，通过核心技术国产化、数字孪生技术应用、多能源协同调度、绿色低碳与智能化融合等发展方向，将进一步推动机电智能化技术与新能源装备的深度融合，助力全球能源转型与“双碳”目标的实现。

#### 参考文献

- [1] 梁剑东. 新时期智能化建筑工程机电设备安装技术分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(22): 61-63.
- [2] 孔庆波, 刘世兴. 机电一体化与电气机械制造智能化技术的融合[J]. 上海轻工业, 2025, (06): 109-111.
- [3] 张驰. 智能化技术在选煤厂机电故障诊断中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (21): 172-174.
- [4] 韩震, 赵显阳. 智能化技术对煤矿机电运输系统优化提升的作用[J]. 价值工程, 2025, 44(32): 18-20.
- [5] 伊春, 周新淳. 煤矿机电设备智能化改造与能源优化技术研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(08): 14-16.

# Consideration on Comprehensive Utilization of Industrial Solid Waste Resources

Tao Jia

Inner Mongolia Autonomous Region Industrial Technology Innovation Center (Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Testing and Experiment Center), Saihan District, Hohhot, Inner Mongolia, 010010, China

## Abstract

With the advancement of modern industrialization, the volume of industrial solid waste has been steadily increasing. To address the resource recovery challenges of industrial solid waste such as steel sludge in China's steel production sector, this study employs case analysis and field research. Using a specific enterprise's steel sludge resource recovery initiative as a case study, it comprehensively explores pathways for integrated industrial solid waste utilization, including optimizing upstream design, fostering technological innovation, improving market mechanisms, and strengthening regulatory oversight, thereby ensuring the effectiveness of resource recovery. The article primarily analyzes strategies for industrial solid waste resource recovery to enhance resource utilization efficiency, reduce waste, promote sustainable utilization of industrial solid waste resources, strengthen environmental protection outcomes, and create favorable conditions for the long-term development of industry.

## Keywords

Industrial solid waste; Resource recovery; Comprehensive utilization

## 工业固废资源化综合利用对策思考

贾涛

内蒙古自治区产业技术创新中心（内蒙古自治区科学技术检测实验中心），中国·内蒙古 呼和浩特 010010

## 摘要

在现代化工业发展过程中，工业固废产量日益提高，为了解决我国钢铁力生产领域的钢铁尘泥等工业固废的资源化综合利用问题，采用案例分析、实地调研等方式，以某企业的钢铁尘泥资源化综合利用为案例，全面探究综合化工业固废资源化利用途径，如优化上层设计、促进技术创新、完善市场机制、强化市场监管等，保障工业固废资源化综合利用效果。文章主要对工业固废资源化综合利用对策进行分析，从而有效提升资源利用率，减少资源浪费，促进工业固废资源的可持续利用，强化环境保护效果，为工业长远发展创建良好条件。

## 关键词

工业固废；资源化；综合利用

## 1 引言

在现代化工业快速发展背景下，工业固废产量越来越高，为了实现循环经济发展目标，需要引进工业固废资源化综合利用模式，对工业固废进行回收利用，减少资源浪费，推动工业可持续发展，真正实现工业绿色化、低碳化发展。但是当前工业固废资源化综合利用领域还存在一定的问题，如技术不成熟、政策不完善、监管不到位等，严重降低工业固废资源化处理效率。因此，要结合实际情况，强化技术指导，提高资源利用效率，实现工业绿色化、低碳化、循环化发展，缓解资源环境对经济社会发展的制约作用。

## 2 工业固废资源化综合利用意义

### 2.1 保护环境

工业固废中含有大量的有害物质，如重金属、有机物等，一旦对其随意排放、填埋会对生态环境造成严重威胁。如钢铁尘泥是钢铁工业固废的重要组成部分，其成分复杂，除富含铁、钙、碳元素外，还含有锌、钾、金、银等有价值金属元素，且数量非常庞大，若不加以利用而直接填埋处置，不仅会造成有价值资源的浪费，而且容易造成环境污染<sup>[1]</sup>。针对这种情况，需要引进工业固废资源化综合利用模式，对工业固废中的有利物质进行回收利用，如钢铁尘泥中的铁、锌、钾、金、银等金属元素，同时通过科学方法消除工业固废中的有害物质，这样能够减少对生态环境的破坏，保护生态平衡，维护生物多样性，提升环境保护效果。

【作者简介】贾涛（1992-），男，中国内蒙古呼和浩特人，硕士，工程师，从事环保、冶金研究。

## 2.2 改善生存环境

促进工业固废的资源化综合利用,能够减少污染物排放量,改善周边居民生活环境质量。同时还提升大气、水体、土壤环境质量,有效控制居民接触污染物的风险,促进居民健康生活。此外,还需要构建更加完善的工业固废资源化处理和综合利用产业链,配备充足的专业人才,进而为人们创造更多就业机会,带动地方经济发展。实现工业固废的资源化利用,能够对现有资源进行回收并循环利用,降低资源消耗,落实可持续发展理念<sup>[2]</sup>。

## 3 工业固废资源化综合利用策略

### 3.1 强化顶层设计

为了贯彻落实工业固废资源化综合利用模式,需要构建完善的政策法规体系,加快修订相关的法律法规,对具体的责任主体、权利义务等进行明确划分,严格制定科学的奖惩机制,把资源化利用率纳入到地方政府绩效考核体系,强化刚性约束力度。此外还需要实施差异化的财税激励政策,颁发增值税即征即退、所得税减免等优惠政策,鼓励企业积极参与固废资源化综合利用;同时设立专项扶持资金,为企业技术研发、示范工程建设、产业链培育等的开展提供技术和资金支持。构建完善的工业固废分级管理制度,结合各个行业的不同固废类型,制定针对性、差异化的资源化利用技术导则和产品标准,对固废资源化利用行为进行有效性约束,进而保障产品安全<sup>[3]</sup>。要强化不同部门之间的联动合作,形成多部门协调机制,形成政策合力,规避以往的碎片化管理模式。

### 3.2 推动技术创新

技术创新是推动工业固废资源化综合利用的重要推动力量,因此需要加大科研投入力度,联合高校、科研机构、企业积极参与共建研发平台,着重攻关工业固废的高值化、规划化利用价值,突破分选提纯、协同处置、无害化处理瓶颈。此外,还需要积极探索新材料、新工艺、新设备方面的探索,提高固废处理效率。强化优秀企业在该方面的技术交流合作,积极推动创新技术转移和推广应用。对现代化互联网技术、大数据技术、人工智能技术等进行联合应用,积极研发具有自主知识产权的先进装备,促进固废资源化综合利用的智能化、自动化发展,推动工业固废资源化处理和综合利用的数字化管理、监测和决策支持,控制处理成本。此外还需要积极推动科技成果转化应用,鼓励企业建立技术联盟,同时构建资源化利用示范工程,共享经验和科技成果,促进整体行业技术提升<sup>[4]</sup>。要积极推动产业结构升级,源头控制工业固废产量,并全面推广清洁生产,引进现代化生产工艺和设备,提高资源利用率,促进减量化、资源化同步推进。

### 3.3 完善市场机制

为了实现工业固废资源化综合利用,需要构建完善的

工业固废资源化利用市场体系,从而为充分发挥市场在资源配置中的决定性作用创建良好条件。在实际工作中,需要对固废回收利用市场进行规范,支持专业化回收企业发展,构建覆盖生产、运输、贮存、利用等环节的市场化回收网络,真正促进工业固废的集中化、高效化处理。要健全固废资源化产品的市场准入和推广机制,落实生产者责任延伸制度,鼓励下游企业优先使用资源化产品,利用多元化方式拓展市场需求,如绿色采购、补贴等<sup>[5]</sup>。要积极发展工业固废资源化产业园区,实现上下游企业集聚发展,构建完整的产业链条,包含固废产生-回收-利用-再制造等环节,以便促进固废资源的循环利用,为产业协同发展创建良好条件。要积极鼓励社会资本参与固废资源化项目建设,推广PPP模式,拓展融资渠道,有效控制企业投资风险,激发市场主体积极性。

### 3.4 强化监管执法

为了真正实现固废资源化综合利用,需要强化监管执法和宣传教育,尤其要通过法律法规、政策引导、行业标准等方式,对企业环境责任和固废管理责任提出强制性要求,进一步强化企业的环保意识,使其自觉参与工业固废资源化处理和综合利用。积极构建企业、政府、公众共同参与的协商机制和共建共享机制,促进三者之间的良性互动,协同推动工业固废资源化处理和综合利用。要完善激励机制和奖励机制,如税收优惠、财政补贴等激励和奖励措施,鼓励企业积极参与资源化利用,使其自觉履行自身的社会责任,并增加企业经济汇报,激发参与积极性。此外,还需要强化监管力度,对工业固废生产、贮存、运输、利用等环节进行动态监管,构建完善的监管台账和信息报送制度,在现代化的大数据技术、物联网技术支持下促进智能化监管,实现固废的合法合规性处理。强化环境执法力度,一旦发现非法倾倒、处置工业固废的行为需要严厉打击,严肃查处超标排放、违法利用行为,强化震慑效果<sup>[6]</sup>。要加大宣传力度,培养公众的资源环境意识,全面推广覆盖“绿水青山就是金山银山”的理念,在全社会营造良好氛围。同时要加大人才培养力度,尤其要对企业人员进行专业培训,提高固废资源化利用技术水平,实现常态化、长效化的工业固废资源化综合利用。

## 4 工业固废资源化综合利用实践案例

钢铁及轧钢过程中会产生大量的钢铁废物,如烧结生产工序的烧结粉尘;高炉炼铁过程中会产生瓦斯灰、重力除尘灰、炼铁矿槽除尘灰、炼钢的一次除尘灰及环境除尘灰;钢坯连铸、轧钢过程中会产生大量的氧化铁皮。某钢铁厂每年产生锌复杂冶金尘泥超过32万吨。钢铁废料中含有较多的有用成分,如TFe、CaO、MgO、C、K、Na、Zn等宝贵资源。目前对钢铁废料的处置方式主要为返回生产工序重复利用,该处置方式会使一些有害元素不断富集,对产品质量

及设备正常运行产生不良影响,同时也使废料中的有价元素得不到充分利用,造成宝贵资源的浪费。针对该问题,开启钾锌复杂冶金尘泥循环经济资源综合利用项目,该项目采用烟气磁化熔融还原炉还原处理含铁废料,本项目处理的各类固废均为一般 I 固废。以含铁废料为原料,利用熔融还原炉生产再生铁液,分别采用金属造型法生产铸铁轧辊,采用实样模具造型法生产渣罐,采用消失膜真空铸造工艺生产烧结机篦条。副产次氧化锌灰,用于生产熔融还原炉煤气。在具体处理过程中,钢铁尘泥经配料、混匀后进行热熔造块,热熔造块过程中富集得到钾灰;经提纯分离用于提纯得到氯

化钾;热熔造块与焦丁按比例送入熔融还原炉进行高温熔融还原,得到再生铁液及熔融还原炉渣(具体流程如图1所示)。熔融过程产生的高温混合气体,经过磁化分离收集得到氧化锌粉和煤气。氧化锌粉提纯分离生产硫酸锌产品。热熔造块循环利用热熔造块工序的烟气经余热回收产生的蒸汽,熔融还原炉煤气净化后用于热熔造块、熔融还原炉热风预热。本项目以含钾锌尘泥等固废为原料,提取钾、锌、铁,钾灰用于进一步提取氯化钾,而次氧化锌用于进一步提取硫酸锌,铁用于铸造。

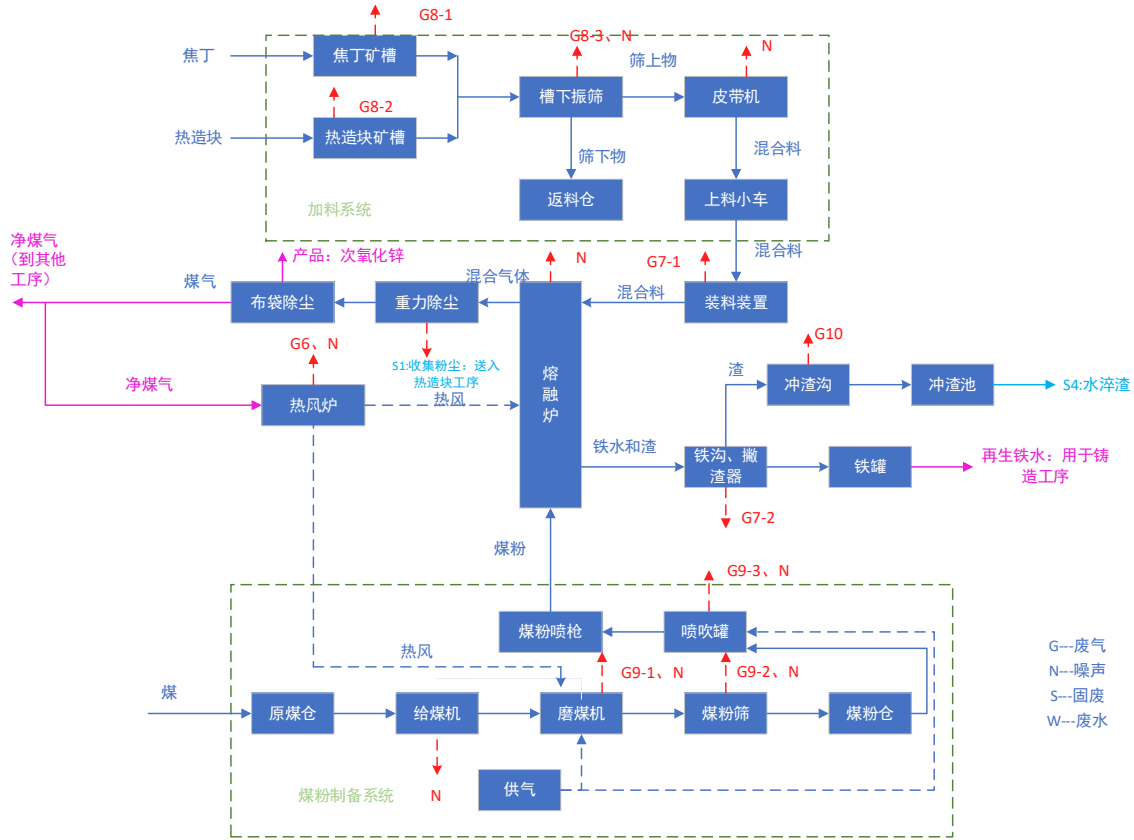


图2 熔融回收工艺流程

### 5 结语

综上所述,在未来发展中,为了进一步实现工业固废资源化综合利用,需要摸清工业固废产生和利用现状,然后利用物联网、大数据、人工智能等现代化技术建立重点区域、重点昂也数据库,强化工业固废管理基础性数据建设。此外还需要引导企业无害化排放,通过科学方法脱除固废中的杂质和有害物质,实现资源化处置和综合利用,有效控制处理费用和危害。要积极推动资源综合利用技术研发,攻克技术难题,提高综合利用产品附加值。强化工业固废管理能力建设,引进先进设施,强化技术培训,建立专业园区,限制高污染性企业资源申请,明确行业准入标准体系,为工业固废资源化综合利用和环境指导提供标准依据。

### 参考文献

- [1] 张欢欢,刘丛. 工业固废资源化综合利用的策略与实践 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43 (07): 95-97.
- [2] 吴岳伟,张露,王克,等. 浅析我国工业固废资源化及磷石膏利用政策 [J]. 化工管理, 2025, (13): 53-55.
- [3] 何传增. 工业固废资源处理与深化综合利用措施研究 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (02): 67-69.
- [4] 王静. 工业固体废弃物的综合利用途径探究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (22): 22-24.
- [5] 刘志明,陈龙. 工业固废的资源化无害化处置及利用探究 [J]. 云南化工, 2024, 51 (09): 119-121.
- [6] 包永鹏. 工业固废资源化综合利用的策略与实践 [J]. 选煤技术, 2024, 52 (03): 9-16.

# Research on Resource Utilization Technology for Desulfurization By-products

Chi Xu

Chaoyang Branch of Chongqing Yuanda Flue Gas Treatment Franchise Co., Ltd., Chaoyang, Liaoning, 122000, China

## Abstract

Against the backdrop of heightened global environmental awareness and urgent demands for resource recycling, the resource utilization of desulfurization by-products has emerged as a critical industrial challenge. As by-products generated during flue gas desulfurization processes in coal-fired power plants and steel mills, these materials, if improperly managed, not only occupy land resources but also cause environmental pollution. Recent technological advancements and policy incentives have driven significant progress in desulfurization by-product utilization technologies, demonstrating broad application prospects in sectors such as building materials, chemicals, and agriculture. Through continuous technological innovation and process optimization, the comprehensive utilization rate of desulfurization by-products has steadily increased, providing robust support for industrial green transformation and sustainable development.

## Keywords

Desulfurization by-products; Resource utilization; Technological innovation; Circular economy; Green transition

## 脱硫副产物资源化利用技术研究

徐弛

重庆远达烟气治理特许经营有限公司朝阳分公司, 中国·辽宁 朝阳 122000

## 摘要

在全球环保意识增强与资源循环利用需求迫切的背景下, 脱硫副产物资源化利用成为工业领域的重要课题。脱硫副产物作为燃煤电厂、钢铁厂等工业烟气脱硫过程的产物, 若不妥善处理, 不仅占用土地资源, 还会造成环境污染。近年来, 随着技术进步与政策推动, 脱硫副产物资源化利用技术取得显著进展, 在建材、化工、农业等领域展现出广阔应用前景。通过技术创新与工艺优化, 脱硫副产物的综合利用率不断提升, 为工业绿色转型与可持续发展提供了有力支撑。

## 关键词

脱硫副产物; 资源化利用; 技术创新; 循环经济; 绿色转型

## 1 引言

随着全球工业化进程的加速, 工业烟气排放中的二氧化硫等污染物对环境造成了严重威胁。为减少污染物排放, 烟气脱硫技术被广泛应用于燃煤电厂、钢铁厂等工业领域。然而, 脱硫过程产生的副产物, 如石膏、亚硫酸钙、脱硫剂残渣等, 若未得到有效处理与利用, 不仅会占用大量土地资源, 还可能对周边环境造成二次污染。因此, 脱硫副产物资源化利用技术的研发与应用, 对于实现工业绿色转型、推动循环经济发展具有重要意义。

## 2 脱硫副产物种类与特性分析

脱硫副产物是工业烟气脱硫过程中因化学反应生成的

固体或液体物质, 其种类与脱硫工艺类型直接相关。当前主流脱硫技术包括湿法脱硫、半干法脱硫和干法脱硫, 不同工艺因反应条件、脱硫剂选择及操作参数的差异, 导致副产物成分与性质存在显著区别。

### 2.1 石膏的化学组成与特性

石膏是湿法脱硫工艺中最典型的副产物, 其核心成分为二水硫酸钙 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 化学组成与天然石膏相似, 但纯度通常较低。天然石膏中  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  含量可达 90% 以上, 而脱硫石膏因脱硫过程中混入未反应的脱硫剂 (如石灰石或石灰)、烟气中的飞灰、未燃尽碳颗粒及重金属化合物 (如汞、铅、镉的氧化物或盐类), 其  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  含量多在 70%-90% 之间。杂质的存在不仅影响石膏的物理性能 (如白度、密度、硬度), 还可能限制其应用范围。例如, 杂质中的氧化镁 ( $\text{MgO}$ ) 会降低石膏的结晶水含量, 导致制品强度下降; 氯离子 ( $\text{Cl}^-$ ) 含量过高可能引发金属腐蚀或影响水泥混凝土的耐久性。<sup>[1]</sup> 此外, 脱硫石膏的粒径分布

【作者简介】徐弛 (1989—), 本科, 助理工程师, 从事火电厂脱硫运行研究。

较窄,多为细颗粒(平均粒径约50-100 $\mu\text{m}$ ),比表面积较大,这使其在作为水泥缓凝剂时能快速与水泥水化产物反应,有效调节凝结时间;但作为建筑石膏板原料时,需通过煅烧或添加改性剂改善其结晶结构,以提高制品的耐水性和强度。

## 2.2 亚硫酸钙的化学组成与特性

亚硫酸钙( $\text{CaSO}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ )是湿法脱硫中因氧化不完全生成的中间产物,其化学组成以亚硫酸钙半水合物为主,常含有未氧化的硫元素(如 $\text{S}^{2-}$ 或 $\text{SO}_3^{2-}$ )及少量硫酸钙( $\text{CaSO}_4$ )。亚硫酸钙具有强还原性和碱性,化学性质活泼,易与空气中的氧气发生氧化反应生成硫酸钙,或与酸性物质(如二氧化碳、二氧化硫、盐酸)反应生成二氧化硫气体或钙盐。例如,在储存过程中,亚硫酸钙可能因氧化导致有效成分损失,同时释放热量引发自燃风险;在酸性环境中,其分解产生的二氧化硫可能造成二次污染。这种特性使其在化工领域具有独特价值,但需严格控制反应条件。<sup>[2]</sup>例如,生产漂白粉时,需在惰性气体保护下将亚硫酸钙与氯气反应,避免氧化干扰;制备造纸助剂时,需通过稳定化处理(如添加抗氧化剂或调整pH值)维持其化学活性。

## 2.3 氢氧化钙的化学组成与特性

氢氧化钙( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )是干法或半干法脱硫工艺中的典型副产物,其生成源于脱硫剂(如石灰石煅烧生成的生石灰 $\text{CaO}$ )与二氧化硫的直接反应。氢氧化钙呈强碱性,溶解度较低(20 $^{\circ}\text{C}$ 时约0.16g/100mL),但能与酸性物质(如二氧化碳、二氧化硫、酸性废水中的重金属离子)快速中和,生成碳酸钙、亚硫酸钙或金属氢氧化物沉淀。这一特性使其在农业和环保领域应用广泛。在污水处理中,氢氧化钙可作为中和剂调节废水pH值,或通过沉淀作用去除重金属离子(如铜、锌、镉),但需控制投加量以避免出水pH超标或沉淀物过多。

## 2.4 脱硫剂残渣的化学组成与特性

脱硫剂残渣是脱硫过程中未完全反应的脱硫剂、吸收剂及烟气中携带的飞灰、未燃尽碳、硫酸盐、氯化物及重金属(如汞、铅、砷)的混合物,其成分复杂且波动性大。残渣中钙基化合物(如碳酸钙、氢氧化钙、硫酸钙)含量较高(约占30%-60%),硅酸盐(如 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和铝酸盐(如 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )次之(约占10%-30%),重金属及氯离子含量虽低(通常<1%),但环境风险显著。因此,残渣的资源化利用需经过严格预处理,如分选(去除未燃尽碳和金属颗粒)、洗涤(降低氯离子含量)、稳定化(如水泥固化或化学稳定化)等,以降低环境负荷并提高资源回收率。尽管利用难度较大,但残渣中钙、硅等元素的含量较高,通过适当工艺可转化为路基材料、水泥掺合料或建筑骨料,实现资源循环利用。<sup>[3]</sup>

## 3 资源化利用技术路径探索

脱硫副产物资源化利用技术路径主要包括建材化利用、

化工化利用、农业化利用等。

### 3.1 建材化利用技术路径的核心机制与适配性分析

脱硫副产物在建材领域的应用基于其物理化学性质与建材性能需求的匹配性,核心机制包括钙基组分的胶凝反应、颗粒填充效应及矿物相转化。石膏作为最典型的脱硫副产物,其核心成分二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )在建材化利用中主要通过脱水-再水化循环实现功能化。例如,生产水泥缓凝剂时,石膏中的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 在水泥水化初期与硅酸三钙( $\text{C}_3\text{S}$ )反应生成钙矾石(Aft),延缓水泥凝结时间,其掺量通常控制在3%-5%以平衡凝结时间与强度发展。生产建筑石膏板时,石膏需经150-180 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧转化为半水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ),半水石膏与水混合后重新水化生成二水石膏,形成微孔结构(孔隙率30%-50%),赋予板材轻质、防火、隔音等特性。石膏砖的生产则通过高压压制半水石膏与纤维增强剂(如玻璃纤维)的混合物,利用半水石膏的水化硬化特性实现快速成型,其抗压强度可达10-20MPa,满足非承重墙体需求。<sup>[4]</sup>

亚硫酸钙的建材化利用主要依赖其氧化转化与颗粒填充效应。亚硫酸钙( $\text{CaSO}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ )在空气中易氧化为硫酸钙,这一特性使其可作为路基材料的潜在组分。在路基填筑中,亚硫酸钙与石灰石碎屑、粉煤灰等混合后,氧化生成的硫酸钙可与土壤中的铝酸盐反应生成钙矾石,增强路基的早期强度;同时,亚硫酸钙的细颗粒(平均粒径<50 $\mu\text{m}$ )可填充土壤孔隙,降低压实度,提高抗变形能力。作为水泥掺合料时,亚硫酸钙需预先氧化稳定化处理,避免因氧化放热导致水泥水化热失控,其掺量通常控制在10%以内,以维持水泥混凝土的强度与耐久性。

脱硫剂残渣的建材化利用需解决成分复杂性与稳定性问题。残渣中未燃尽碳、飞灰、硫酸盐及重金属的异质性需通过分选-稳定化-复配工艺实现梯级利用。飞灰与硫酸盐混合物经水泥固化后可作为路基基层材料,其抗压强度可达5-10MPa,满足三级公路标准;重金属含量较低的残渣可通过磨细处理(比表面积>300 $\text{m}^2/\text{kg}$ )作为水泥掺合料,替代部分熟料,降低水泥生产能耗。

### 3.2 化工化利用技术路径的转化机制与产品适配性

脱硫副产物在化工领域的应用基于其化学组分的可转化性与目标产品的功能需求,核心转化机制包括氧化还原反应、酸碱中和反应及复分解反应。亚硫酸钙的化工化利用以氧化转化为关键步骤。例如,生产漂白粉时,亚硫酸钙在氯气( $\text{Cl}_2$ )作用下被氧化为硫酸钙,同时氯气被还原为次氯酸钙( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ),反应式为 $2\text{CaSO}_3 + 2\text{Cl}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 + 2\text{Ca}(\text{ClO})_2 + 2\text{HCl}$ 。次氯酸钙是漂白粉的有效成分,其强氧化性可用于纸浆漂白、水体消毒等领域。生产造纸助剂时,亚硫酸钙经氧化-磺化处理生成磺化亚硫酸钙,其表面活性可改善纸浆纤维的分散性,提高纸张匀度与强度,掺量通常控制在0.5%-2%。

氢氧化钙的化工化利用以酸碱中和反应为基础。例如,生产硫酸铵化肥时,氢氧化钙与硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )反应生成硫酸钙与硫酸铵,反应式为 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{CaSO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ 。硫酸铵是重要的氮肥,其氮含量(约21%)与水溶性(20℃时溶解度75g/100mL)使其适用于多种土壤类型。氢氧化钙还可用于生产环氧丙烷、碳酸钙等化工产品。例如,与氯丙烯反应生成环氧丙烷时,氢氧化钙作为催化剂促进氯丙烯的环氧化,反应条件需控制在50-80℃以避免副反应;与二氧化碳反应生成碳酸钙时,氢氧化钙的碱性可吸收 $\text{CO}_2$ ,生成粒径均匀的纳米碳酸钙(平均粒径50-100nm),用于橡胶、塑料的填充增强。

### 3.3 农业化利用技术路径的环境效应与功能适配性

脱硫副产物在农业领域的应用基于其化学组分对土壤环境的调控能力,核心机制包括酸碱中和、盐分调节及养分补充。脱硫石膏的农业化利用以土壤改良为核心。其钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )可置换土壤胶体吸附的钠离子( $\text{Na}^+$ ),降低土壤钠吸附比(SAR),缓解盐碱化问题。例如,在苏打盐碱土( $\text{pH}>8.5$ ,  $\text{SAR}>15$ )中,脱硫石膏的施用量通常为1-3吨/亩,可使土壤pH降至7.5-8.0, SAR降至5-10,显著改善土壤结构与透气性。同时,石膏中的硫酸根( $\text{SO}_4^{2-}$ )可补充土壤硫素营养,促进作物对氮、磷的吸收,提高产量。例如,在缺硫土壤中施用石膏可使小麦产量提高10%-15%,大豆蛋白质含量增加2%-3%。

氢氧化钙的农业化利用以酸化土壤改良与肥料增效为重点。其强碱性( $\text{pH}>12$ )可中和土壤酸性( $\text{pH}<5.5$ ),提

高土壤pH至6.0-7.0,改善微生物活性与养分有效性。例如,在红壤( $\text{pH} 4.5-5.5$ )中施用氢氧化钙(0.5-1吨/亩)可使土壤pH提升至6.0-6.5,有效磷含量增加20%-30%,促进作物根系发育。作为肥料添加剂时,氢氧化钙可调节肥料pH,减少氮素挥发损失。例如,在尿素中添加0.5%-1%的氢氧化钙可使氨挥发率降低30%-40%,提高氮肥利用率。

## 4 结语

脱硫副产物资源化利用技术是实现工业绿色转型、推动循环经济发展的重要途径。通过技术创新与工艺优化,脱硫副产物的综合利用率不断提升,应用领域不断拓展。未来,应继续加大技术研发投入,推动技术创新与产业升级;加强政府、企业、科研机构之间的合作,形成完整的资源化利用产业链;同时,积极拓展国际市场,提升我国在全球环保技术领域的竞争力。通过多方共同努力,推动脱硫副产物资源化利用技术不断取得新的突破和发展。

## 参考文献

- [1] 尹晓盼,王同宾,程峥明,等. 烧结半干法脱硫副产物的资源化应用[J].河北冶金,2023,(07):68-71.
- [2] 曲保忠.烟气蒸发脱硫废水副产物特性与资源化综合利用研究[D].华北电力大学,2021.
- [3] 王建华,王东,朱繁,等. 烟气脱硫副产物的处理与处置[J].河北冶金,2020,(07):79-82.
- [4] 童裳慧.工业固废与脱硫脱硝副产物资源化利用装置研发.北京市,中晶环境科技股份有限公司,2020-01-01.

# Joint Forecasting Technology of Short-term Load and Photovoltaic Output Based on Deep Learning and Multi-source Data

Di Ge Lekang Liu Junfeng Qu Meng Zhang

Xuchang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Xuchang, Henan, 461000, China

## Abstract

Under the background of rapid penetration of distributed generation, enhanced power load volatility and accelerated diversification of energy consumption patterns, the energy flow dynamics in the substation area presents a high degree of randomness and spatio-temporal coupling characteristics, making short-term load and photovoltaic output prediction one of the key technologies to improve the operation toughness and regulation precision of distribution network. The traditional forecasting method is difficult to describe the nonlinear correlation characteristics of load and photovoltaic output across time scales and space sources at the same time, resulting in a significant increase in the prediction bias in the high penetration photovoltaic scenario. The joint forecasting model proposed in this paper is superior to the traditional single task model and single source data model in Mae, RMSE and MAPE indexes, especially in the rapidly changing sunny overcast sunny weather conditions, showing higher robustness, and providing effective support for distribution network regulation strategy optimization, energy storage scheduling, flexible load management and distributed energy planning.

## Keywords

deep learning; multi source data; station area load forecasting; photovoltaic output prediction

# 基于深度学习与多源数据的台区短期负荷与光伏出力联合预测技术

戈狄 刘乐康 渠俊锋 张萌

国网河南省电力公司许昌供电公司, 中国·河南 许昌 461000

## 摘要

在分布式电源快速渗透、电力负荷波动性增强以及用能形态加速多元化的背景下,台区的能量流动态呈现出高度的随机性与时空耦合特征,使短期负荷与光伏出力预测成为提升配电网运行韧性与调控精细度的关键技术之一。传统预测方法难以同时刻画负荷与光伏出力在跨时间尺度、跨空间源的非线性关联特征,导致预测偏差在高渗透率光伏场景下显著增大。本文提出的联合预测模型在MAE、RMSE及MAPE指标上均优于传统单任务模型和单源数据模型,特别是在快速变化的晴—阴—晴天气条件下表现出更高的鲁棒性,为配电网调控策略优化、储能调度、柔性负荷管理及分布式能源规划提供有效支撑。

## 关键词

深度学习; 多源数据; 台区负荷预测; 光伏出力预测

## 1 引言

随着分布式光伏在居民侧、工商业屋顶及公共建筑中的持续扩张,台区已成为承载电能双向流动的关键节点,其运行特性呈现出负荷与光伏出力叠加的复杂性。一方面,居民负荷受节假日、季节温差以及新型负荷(电动汽车、热泵、电采暖等)的影响呈现多峰化和高波动趋势;另一方面,光

伏出力受辐照度、云量、气温和组件方位角等影响,具有随机性与突变性。两者的共同作用使台区潮流呈现快速变化的耦合动态,增加了电压越限、反向潮流、变压器过载与谐振风险。因此,构建基于深度学习与多源数据的台区负荷—光伏联合预测技术体系,不仅能够提高预测精度,还能够为台区监测、储能调度、需求侧响应、电价优化及配网数字孪生等业务提供核心数据支撑。

【作者简介】戈狄(1985-),男,中国江苏泗洪人,硕士,高级工程师,从事新能源发电控制、电网调控运行及发电厂并网管理研究。

## 2 多源数据预处理与融合特征工程构建

### 2.1 多源异构数据的统一处理与时间一致性构建

在台区负荷—光伏出力联合预测中，多源数据的核心挑战并非单个变量的噪声控制，而在于不同数据来源之间采样粒度、时间对齐方式及语义表达存在显著差异。在实际配电网场景中，居民侧智能电表大多执行 15 min 或 5 min 采样周期，而光伏逆变器监测系统往往具备 1 min 或更高频率的输出能力，部分智能气象站甚至提供秒级辐照度与云量变化数据。如果直接采用原始数据输入深度模型，会出现时间步长不匹配、缺失值累积放大及突发事件定位不准确等问题，使模型在编码阶段产生非物理的特征偏移。因此，数据预处理首先需要建立统一的时间基准，采用向上对齐策略将高频数据通过滑动窗口平均或变分聚合方式映射至 5 min 或 15 min 时间步，使其具备负荷序列的可比性<sup>[1]</sup>。

对于负荷数据中的异常尖峰，传统统计方法基于  $3\sigma$  或箱线图难以区分真实用户行为与计量异常，在居民区夏季空调集中开启、工业园区设备联动启动等情形中，峰值增长具有真实语义，因此需要在时间聚类框架下识别异常值，将行为类峰值保留，将计量跳变剔除，从根源上保证预测输入反映真实物理过程。在实现时间一致性的基础上，还需对间断性事件进行标注，如停电、逆变器保护动作、回路切换等状态变量同样影响负荷与光伏生成机制，其缺失会导致模型在训练阶段误把扰动当作噪声抑制，最终在真实运行中出现严重偏差。因此，在数据预处理阶段建立统一的事件时间轴并嵌入状态标签，是联合预测工程的一项基础性工作。

### 2.2 融合表达与高阶特征构建的深层次策略

多源数据的联合价值并非来自简单拼接，而来自变量间交互关系在预测空间中的非线性表达，特征工程因此成为连接数据与深度学习模型的关键环节<sup>[2]</sup>。对于负荷数据，单一历史值序列无法充分刻画用户行为的波动机制，必须构建跨尺度时间表示，将短周期峰谷、日周期用能模式和周周期行为约束在统一表达空间中；这一构造可以通过基于傅里叶时间编码的周期嵌入实现，使模型具备区分工作日与周末、昼夜温差与季节迁移的能力。对于光伏出力，组件温度、辐照度、入射角之间存在高度非线性关系，仅引入逐步回归特征会带来高维噪声，因此通过物理合理性的组合特征更具稳定性，在气象特征中，全云量、云底高度与风速的交互在光伏短期突变时呈现显著增益，尤其在云团边缘经过阵列的瞬间，风速作为扰动传播速度的代理变量，直接影响辐照衰减持续时间，因此必须构建二阶交叉项而非孤立输入。在用户画像的 Embedding 表示方面，传统做法是对用户类型、户均面积、电动汽车保有量等特征进行独热编码，这一方式会造成维度膨胀且语义割裂，无法反映特征间潜在协同关系，因此需要采用低维连续映射，通过自编码器或词向量式嵌入

方式学习住宅—商用—工业用户之间的能耗分布距离，使得模型在特征空间而非数据空间捕捉台区结构差异。

## 3 深度学习联合预测模型的结构设计与协同优化机制

### 3.1 双流神经网络结构与负荷—光伏时序特征的差异化编码

在台区短期预测中，负荷与光伏出力属于两类数据生成机制完全不同的时序变量，前者反映用户行为与设备运行状态的响应结构，而后者由光照物理过程及组件特性决定，尽管二者在电能流层面存在叠加，但其时序特征并非对称或同源。因此，本研究采用双流神经网络结构，将负荷预测子模型与光伏出力预测子模型分离训练，并在高层语义空间建立融合接口，使两个任务既能够保留自身规律，又能够通过耦合层进行信息交换，从而避免在端到端模式下出现语义混淆。负荷预测子模型首先采用卷积层对历史功率序列进行局部模式提取，以识别短时波动、突发跃升与周期性峰值，随后通过 LSTM 或 GRU 网络捕获跨日尺度的行为迁移，使模型能够理解“工作日用能—周末回落”或“夜间制冷—白天制热”的跨周期模式。与此不同，光伏预测子模型在输入端引入辐照度、组件温度、风速等环境变量，并构建时间注意力机制以捕捉快速变化段的关联性，因为云团边缘通过阵列时的辐照突降具有较强的瞬态性，与负荷的缓慢变化形成显著差异。在两条子网络完成低层特征抽取后，通过共享表示层进行隐空间匹配，该表示层采用双向注意力机制，将负荷序列的周期信息与光伏序列的瞬态扰动进行交叉映射，使得模型可以在上午 10:00—14:00 光伏快速波动、夜间空调集中开启等时段识别潜在交互关系<sup>[3]</sup>。

### 3.2 多任务学习与协同损失机制的预测偏差抑制策略

尽管双流结构在特征空间建立了负荷与光伏的差异化表达，但若两个任务完全独立优化，预测结果将在数据稀疏或扰动场景下出现偏离实际运行状态的“孤立化误差”。为避免这一问题，需要构建面向联合预测的多任务优化机制，使模型在训练过程中主动发现负荷与光伏之间的行为耦合，并通过统一的损失函数进行权重调节。在本研究中，损失函数不仅包含负荷预测误差项与光伏预测误差项，还引入时间相关性约束项与耦合正则项，用于在短时间尺度上限制模型出现反常偏移。在居民主导型台区，午间负荷下降与光伏出力上升往往同步出现，如果模型在该区间产生预测反向振荡，将导致实际调度中储能充放电策略被误触发。因此构建的协同项通过衡量两条预测曲线局部梯度方向的一致性，约束模型在敏感时段避免出现“差异性裂解”。不同于常见的均值平滑或误差回传，该约束项以二阶导数为参数，在梯度更新中表现为对急剧变化区域的惩罚，从而避免模型将短时扰动误识别为长期趋势。

## 4 模型性能验证与典型应用情境评估

### 4.1 基于真实台区样本的预测性能对比与误差结构分析

为了检验联合预测模型的有效性，本研究选取某省会城郊典型台区作为实验样本，该台区包含居住类用户 4152 户、商业用户 62 户、充电桩接口 19 个以及 74 套屋顶光伏设施，监测周期覆盖夏秋季连续五个月，其中包含多轮晴转阴、高温低风以及强对流天气事件。训练数据采用滑动窗口构造，保证负荷与光伏出力序列在不同时间尺度具有充分采样密度。作为对比，本研究引入传统 ARIMA、XGBoost、

单任务 LSTM 以及 Transformer 单任务模型，用以验证深度联合预测方法在负荷—光伏耦合场景中的优势。

从预测结果看，ARIMA 模型在稳定天气条件下的平均误差可达较低水平，但在阴晴交替或居民行为突变场景中，缺乏对高阶非线性关系的捕捉能力，使其在突变区产生明显滞后响应；XGBoost 虽在单变量拟合方面具有较强能力，但对时间依赖结构的表达有限，对光伏出力快速变化的敏感性不足。基于单任务的 LSTM 在负荷预测上表现较好，但其光伏预测误差显著受到气象数据权重分配不足和瞬态扰动识别能力缺陷影响，在云团快速遮挡事件发生时往往产生过度平滑，导致预测峰谷不匹配。

表 1 台区短期联合预测模型与对比算法的性能比较（测试区间：夏秋季 5 个月）

模型类型	RMSE(W)	MAPE(%)	峰谷捕捉准确率 (%)	阴晴切换鲁棒性评分
ARIMA 时间序列	312.7	10.83	54.2	★☆☆☆☆
XGBoost 回归	241.5	8.97	61.8	★☆☆☆☆
单任务 LSTM	215.3	8.21	69.4	★★★★☆☆
Transformer 单任务	202.4	7.62	72.9	★★★★☆☆
本文双流联合模型	165.1	6.33	84.6	★★★★★☆☆

该表 1 展示了不同模型在 RMSE、MAPE、峰谷捕捉能力及复杂气象条件下的鲁棒性表现，可以清晰看出单任务模型在光伏突变区间存在系统性偏差，而本文提出的联合模型在时间依赖捕获、动态扰动识别及负荷—光伏协同表达方面表现更优，其峰谷捕捉准确率较传统方法提升 10%—20%，表明该模型不仅在统计指标上优胜，更具工程部署价值。

### 4.2 多天气、负荷扰动与调控反馈情景下的应用鲁棒性评估

联合预测模型不仅要在统计意义上实现误差降低，更重要的是在配电运维场景中具备可执行价值，因此需要在多维扰动条件下评估其鲁棒性。本研究将测试划分为三类典型场景，即天气快速切换场景、用户行为突变场景与设备运行扰动场景，用于验证模型在复杂运行环境中对电流量变化的响应能力。在晴—阴—晴快速交替背景下，辐照度呈现短周期不规则波动，光伏阵列组件温度受云影遮挡易产生阶段性冷却，随后在再曝晒时导致转换效率短时提升。

普通模型往往依赖平滑策略对串扰信号进行抑制，使预测曲线呈现“缓坡”形态，无法反映真实物理动态，从而在储能与调峰策略执行中触发滞后行为。而联合模型通过双流语义对齐机制识别光伏出力的瞬态突变并快速将注意力重新分配至高频气象特征，同时利用负荷分支稳定性约束避免出力曲线出现不合理振荡，使其预测表现呈现尖锐但结构合理的变化轨迹。在设备扰动场景中，当逆变器反复进入保护限流模式或充电桩群在短时段集中上线，电网状态呈现明显反馈行为，普通模型常将其归类为噪声信号而主动平滑，

但这会导致预测偏差累积并在运行策略中放大，实际调控则必须高度敏感。联合模型通过耦合正则项保留扰动区结构，从而使预测序列更接近真实运行路径，为储能提前充电、无功补偿投切以及台变过载风险评估提供可操作依据。实测结果显示，在三类扰动场景下，联合模型在 RMSE、峰值识别率以及异常事件捕获率方面均显著优于传统模型，尤其在“高波动弱相关”条件下表现最为突出，体现出深度模型在多源数据条件下的稳健泛化能力。

## 5 结论

本文构建了一种面向台区场景、融合多源异构数据的短期负荷—光伏出力联合预测模型，以深度学习为核心框架，通过双流神经网络、注意力机制、多任务损失函数以及特征耦合策略实现了预测精度与鲁棒性的全面提升。实际台区实验表明，该模型能够适应快速变化的天气与负荷条件，显著降低预测误差，对配电网调控体系、储能优化配置及分布式电源规划具有实际应用价值。

### 参考文献

- [1] 李芬,李雨欣,王亚维,等.考虑屋顶光伏热效应的短期净负荷预测[J].电力系统自动化,2025,49(9):146-156.
- [2] 张俊涛,程春田,申建建,等.考虑风光不确定性的比例可再生新能源电网短期联合优化调度方法[J].中国电机工程学报,2020,40(18):5921-5931.
- [3] 高漪,周瑜,张安龙,等.整县光伏下基于个性化联邦学习的光伏出力及负荷功率预测[J].电网技术,2023,47(11):4629-4637.