

05
2025



化工技术与应用 Chemical Technology and Application

化工技术与应用

Chemical Technology and Application

Volume 2 · Issue 5 · November 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



Volume 2 · Issue 5 · November 2025 3060-9291(Print)
3060-9283(Online)



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

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

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref

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

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
Tel: +65-65881289
Website: <http://www.nassg.org>



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 5 · November 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 煤直接液化工艺净化装置氨冰机 Tricon 防喘振与性能控制优化 / 包阿古达木
- 4 甲醇合成单元废催化剂的资源化再生技术研究 / 宋小勇
- 7 加压气流床气化工艺中渣层形成机制及调控方法 / 罗瑶
- 10 基于中国知网的 H₂S 研究进展及热点分析 / 金晓东 法怡婷
- 13 过氧乙酸消毒液对可重复使用的医疗器械各部件材料相容性的实验观察 / 丁涛
- 16 甲醇合成预防石蜡生成优化措施 / 张小涛
- 19 药品检验记录使用 Excel 电子表格的应用与要求 / 王玉 郭美慧
- 23 电化学钠离子电池正负极材料的制备与性能研究 / 龚雨豪 罗紫凝
- 26 浅谈煤炭全水分测定时间结点效率 / 郭丽博 王斌 郑子川
- 30 丙二酸二乙酯在有机合成中的相关运用阐述 / 马文俪
- 33 水环境中新兴污染物的迁移转化规律及控制技术研究 / 李晓征
- 36 助力油气管道国产化 PCS 控制系统推广应用为系统赋能 / 张禹尧 陈锐 郑楚凡
- 40 药物合成过程中关键杂质的溯源分析与绿色催化转化 / 李冰
- 43 化工行业常用气体流量计比选 / 陈险峰
- 46 镁金属复合材料的性能制备与应用 / 耿卜文
- 50 杂散电流干扰下储罐底板阴极保护效果优化及数值模拟分析 / 宫研科
- 53 化工废水处理工艺中常见问题与对策分析 / 王志栋
- 56 高温高压含硫井场安全监测与应急响应技术 / 刘意鹏
- 59 钻井液性能对复杂地层井眼清洁效果的影响分析 / 郭世强
- 62 随钻测量技术在精细地质导向中的应用实践 / 王翔
- 65 航天炉煤气化工艺制氢与绿电制氢的效益分析——以新疆哈密地区为例 / 王超
- 68 塔器规整填料的安装技术谈论 / 黄翼
- 71 PLC 控制系统在化工自动化生产中的优化设计研究 / 黄珂
- 74 浅析氟硅酸钾容量法测定铜精矿中二氧化硅含量的影响因素 / 肖太菊 左仕新 施艳艳 吴怡 章菊珍
- 77 安全生产管理对有色金属企业生产的重要性与具体措施思考 / 钟林
- 80 水泥化学分析中的检测技术分析与研究 / 高艾春 缪贊 吴志球
- 83 中国某市低风险核技术利用单位辐射安全防护管理存在的问题与解决对策 / 索文芳
- 87 核电厂便携式多组分空气质量分析仪器可行性分析 / 高丁雨 钟铁
- 92 干气制乙苯装置循环苯塔 (T-104) 操作剖析 / 周建龙
- 95 石油化工施工现场安全管理与安全生产标准化的比较和整合 / 王宏月
- 98 探析埋弧自动焊技术在电力建设钢结构加工中的应用 / 龙会松
- 101 小型模块化合成氨工艺包设计及参数敏感性分析 / 肖伟
- 104 基于化工行业电气自动化控制技术的创新研究 / 朱彦 郭建军 韩仕通

- 1 Tricon anti-surge and performance control optimization for the ammonia ice machine in the coal direct liquefaction process purification device / Baoagudamu
- 4 Study on resource recovery technology of waste catalyst in methanol synthesis unit / Xiaoyong Song
- 7 Formation mechanism and control method of slag layer in compressed gas flow bed gasification process / Yao Luo
- 10 Research Progress and Hotspot Analysis of H₂S Studies Based on CNKI / Xiaodong Jin Yiting Fa
- 13 Peroxyacetic acid disinfectant on the materials of various components of reusable medical devices Experimental observation of compatibility / Tao Ding
- 16 Optimized measures for methanol synthesis to prevent paraffin formation / Xiaotao Zhang
- 19 Design and Validation of Excel Electronic Form for Pharmaceutical Inspection Records / Yu Wang Meihui Guo
- 23 Preparation and performance of anode materials for electrochemical sodium ion batteries / Yuhao Gong Zining Luo
- 26 A Brief Discussion on the Efficiency of Time Nodes in Determining Total Moisture in Coal / Libo Guo Bin Wang Zichuan Zheng
- 30 The relevant application of diethyl diphosphonic acid in organic synthesis is expounded / Wenli Ma
- 33 Study on migration and transformation of emerging pollutants in water environment and control technology / Xiaozheng Li
- 36 Help to promote the application of domestic PCS control system for oil and gas pipelines and give new energy to the system / Yuyao Zhang Rui Chen Chufan Zheng
- 40 Traceability analysis and green catalytic conversion of key impurities in drug synthesis process / Bing Li
- 43 Chemical industry commonly used gas flowmeter selection / Xianfeng Chen
- 46 Performance preparation and application of magnesium metal composites / Buwen Zan
- 50 Optimization and numerical simulation of cathodic protection of tank bottom plate under stray current interference / Yanke Gong
- 53 Analysis of common problems and countermeasures in chemical wastewater treatment process / Zhidong Wang
- 56 Safety Monitoring and Emergency Response Technology for High-Temperature, High-Pressure Sulfur Gas Wells / Yipeng Liu
- 59 Analysis of Drilling Fluid Properties 'Impact on Wellbore Cleaning Efficiency in Complex Formations / Shiqiang Guo
- 62 Application of Drilling-while-Metric (DMM) Technology in Precision Geological Steering / Xiang Wang
- 65 Benefit analysis of hydrogen production by furnace gasification process and green electricity production in Hami region, Xinjiang / Chao Wang
- 68 Installation Technology of Regular Packing in Tower Equipment / Yi Huang
- 71 Research on Optimized Design of PLC Control Systems in Chemical Automation Production / Ke Huang
- 74 A Brief Analysis of the Influencing Factors in Determining the Silicon Dioxide Content in Copper Concentrate by Potassium Fluorosilicate Titrimetric Method / Taiju Xiao Shixin Zuo Yanyan Shi Yi Wu Juzhen Zhang
- 77 Thinking on the Importance and Specific Measures of Safety Production Management in Non-ferrous Metal Enterprises / Lin Zhong
- 80 Analysis and Research on detection technology in cement chemical analysis / Aichun Gao Yun Miao Zhiqiu Wu
- 83 Issues and Countermeasures in Radiation Safety and Protection Management of Low-Risk Nuclear Technology Utilization Units in a Certain City of China / Wenfang Suo

- 87 Feasibility analysis of portable multi-component air quality analyzer for nuclear power plant / Dingyu Gao Tie Zhong
- 92 Process Analysis of Recycle Benzene Tower (T-104) in Dry Gas Ethylbenzene Unit / Jianlong Zhou
- 95 Comparison and integration of petrochemical construction site safety management and safety production standardization / Hongyue Wang
- 98 Explore the application of submerged arc automatic welding technology in the processing of steel structures in power construction / Huisong Long
- 101 Design and parameter sensitivity analysis of small modular synthesis ammonia process package / Wei Xiao
- 104 Innovative research based on electrical automation control technology in the chemical industry / Yan Zhu Jianjun Guo Shitong Han

Tricon anti-surge and performance control optimization for the ammonia ice machine in the coal direct liquefaction process purification device

Baoagudamu

China Shenhua Coal-to-Oil & Chemical Co., LTD. Ordos Coal-to-Oil Branch, Ordos, Inner Mongolia, 017209, China

Abstract

In view of the problems such as high surge risk, high energy consumption and frequent manual intervention existing in the traditional control of the ammonia ice machine in the purification device of the direct coal liquefaction project, this paper conducts research on anti-surge control and performance control optimization based on the Tricon control system. By analyzing the working characteristics of the ammonia ice machine, the performance control logic with the inlet pressure as the main control parameter is clarified. The decoupling technology of speed and anti-surge control is adopted to solve the safety hazards of simple cascade control. Optimize the control program and alarm logic by integrating surge line verification tests with instrument modifications (such as the application of Willebar flowmeters). The application results show that after optimization, the steam consumption of the ammonia ice machine has decreased from 24 t/h to 22 t/h, with an average daily steam saving of 48 t and an annual cost saving of over one million yuan. The frequency of manual adjustment was reduced by 60%, and the stable operation rate of performance control was increased to over 95%, effectively ensuring the safety of the unit and the continuity of the process, providing a reference for the control optimization of similar units.

Keywords

Ammonia ice machine Tricon system; Anti-surge control Performance control Decoupling control

煤直接液化工艺净化装置氨冰机 Tricon 防喘振与性能控制优化

包阿古达木

中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司，中国·内蒙古鄂尔多斯 017209

摘要

针对煤直接液化项目净化装置氨冰机传统控制中存在的喘振风险高、能耗大、人工干预频繁等问题，本文基于Tricon控制系统，开展防喘振控制与性能控制优化研究。通过分析氨冰机工作特性，明确入口压力为主控参数的性能控制逻辑，采用速度与防喘振控制的解耦技术，解决单纯串级控制的安全隐患；结合喘振线验证测试与仪表改造（如威力巴流量计应用），优化控制程序与报警逻辑。应用结果表明：优化后氨冰机蒸汽消耗量从 24 t/h 降至 22 t/h，日均节约蒸汽 48 t，年节约成本超百万元；人工调节频率减少 60%，性能控制稳定投用率提升至 95% 以上，有效保障机组安全与工艺连续性，为同类机组控制优化提供参考。

关键词

氨冰机；Tricon 系统；防喘振控制；性能控制；解耦控制

1 引言

煤直接液化技术是实现煤炭清洁高效利用的核心技术之一，其净化装置需依赖氨冰机提供稳定的制冷量，以保障煤气净化、产品分离等下游工艺的连续性与安全性。氨冰机作为净化装置的“制冷心脏”，其运行稳定性直接影响整套装置的生产效率与能耗水平。

传统氨冰机多采用“入口压力 - 转速”串级控制模式，

存在两大核心问题：一是当机组工作点靠近喘振控制线时，降转速操作易触发喘振，威胁设备寿命（如推力轴承、轴端密封损坏）；二是低负荷工况下（喘振阀有开度），若仍以转速控制入口压力，易导致流量低于喘振临界值，需人工频繁干预调节，不仅增加操作强度，还存在安全隐患。此外，传统仪表测量元件受工况波动影响大，常导致性能控制退出，进一步加剧能耗浪费与运行风险。

Tricon 系统作为高可靠的容错控制系统，在压缩机防喘振与性能控制中具有显著优势。本文以神华鄂尔多斯煤制油分公司净化装置 K2601 氨冰机为研究对象，基于 Tricon 系统设计防喘振与性能控制优化方案，通过喘振测试验证、

【作者简介】包阿古达木（1991-），男，蒙古族，中国内蒙古通辽人，本科，工程师，从事仪器仪表维修研究。

仪表改造与逻辑优化，实现机组“安全运行 - 节能降耗 - 自动化提升”的协同目标，为煤直接液化装置关键机组控制优化提供技术支撑。

2 相关技术原理

2.1 氨冰机工作特性

氨冰机属于离心式压缩机，其核心功能是通过汽轮机驱动压缩机转子高速旋转，对氨气进行压缩 - 冷凝 - 节流 - 蒸发循环，实现制冷量输出。机组运行需满足两大核心需求：一是入口压力稳定（直接影响制冷量与下游工艺参数），二是规避喘振风险（离心式压缩机特有故障，表现为流量、压力周期性剧烈波动，伴随异常振动与噪音）。

喘振的本质是压缩机排气量小于临界最小流量时，气流在叶轮与扩压器间发生“倒流 - 再压缩”的恶性循环。其发生与机组功率（汽轮机转速）强相关：不同转速下，喘振临界流量不同，需通过“喘振线”界定安全运行区域（图 1）。当机组工作点位于喘振线右侧时，运行安全；若左移至喘振线左侧，则触发喘振。

2.2 Tricon 系统控制基础

Tricon 系统采用三重化冗余架构，具备高容错性与实时性，可实现对氨冰机“转速 - 压力 - 流量 - 温度”多参数的同步监控与控制。其控制逻辑核心包括：

防喘振控制模块：通过采集入口流量 (FI)、入口温度 (TI)、出入口压力 (PI) 等信号，计算实时工作点与喘振线的距离 (裕度)，自动调节防喘振阀开度，避免工作点进入喘振区；

性能控制模块：以入口压力 (PT001) 为主控参数，通过解耦算法协调“转速调节”与“防喘振阀调节”，在保障入口压力稳定的同时，实现汽轮机节能运行；

报警与保护模块：实时监测仪表故障（如坏值报警）、机组模式、转速等状态，作为性能控制投用的前置条件，避免异常工况下控制失效。

2.3 防喘振控制原理

防喘振阀是规避喘振的核心执行元件，其控制逻辑需满足“快速响应 - 精准调节”需求。根据文档 1 报警逻辑分析，一段、二段防喘振阀分别关联不同仪表信号（表 2），任一仪表出现坏值报警（如 FI137_W_BAD），均会触发“防喘振相关仪表故障”报警，禁止性能控制投用，避免误操作。

防喘振阀段	关联仪表信号（坏值报警）	控制目标
一段	FI137_W、TI139、PI143、PI144	保障一段入口流量 \geq 临界值
二段	FI138_W、TI140、PI144、PI145	保障二段出口压力 \leq 限值

2.4 性能控制原理

2.4.1 解耦控制的必要性

传统“入口压力 - 转速”串级控制存在三大缺陷（图 2），需通过 Tricon 解耦控制解决：

喘振风险：工作点靠近控制线时，降转速易导致流量

低于临界值；

响应滞后：入口压力需快速提升时，仅靠降转速无法满足需求；

低负荷失效：喘振阀有开度时，转速控制易触发喘振。

2.4.2 解耦控制实现方式

Tricon 解耦控制通过“优先级判断 - 协同调节”逻辑实现，具体流程如下：

工况判断：实时监测入口压力偏差 ($\Delta P = \text{设定值} - \text{测量值}$)、工作点与喘振线距离（裕度）；

调节优先级：

若 $\Delta P > 0$ (压力偏低) 且裕度 $\geq 10\%$ (远离喘振线)：优先降转速，通过减少汽轮机功率实现节能；

若 $\Delta P > 0$ 且裕度 $< 5\%$ (靠近喘振线)：先开一段入口回流阀(快速提压)，待压力稳定后，关回流阀并同步降转速；

若 $\Delta P < 0$ (压力偏高)：优先开防喘振阀，避免超压，再微调转速；

投用条件锁定：仅当“防喘振相关仪表无故障”“机组模式 = 6 (正常运行)”“转速 $> 5450 \text{ RPM}$ ”“PT001 无故障”四项条件同时满足时，性能控制方可投用，确保控制安全。

3 优化方案设计

3.1 仪表改造与参数校准

仪表测量精度是控制优化的基础。针对传统仪表波动问题，实施两项改造：

流量仪表升级：将原涡街流量计替换为三台威力巴流量计（一段入口 FI137），采用冗余设计，减少单一仪表故障对控制的影响；威力巴流量计抗干扰能力强，在低流量工况下测量误差 $\leq 2\%$ ，优于涡街流量计（误差 $\leq 5\%$ ）；

仪表参数校准：调整变送器阻尼时间 (≤ 1 秒)，避免信号滞后；对压力变送器 (PI143, PI144)、温度变送器 (TI139, TI140) 进行回零检查与排凝操作，确保测量值真实反映工况。

3.2 控制逻辑优化

3.2.1 喘振线修正

基于临界喘振点测试数据，修正原喘振线：

测试程序修改：在 Tricon 系统中增加“喘振线移动变量”，通过上位机按钮每次移动 1% (安全步长)，避免大幅调整导致风险；

数据采集：将 HMI 采样时间调整为 100 毫秒，记录不同转速下的临界流量（表 3）；

测试转速 (RPM)	临界流量 (Nm³/h)	测试现象
4800	32000	流量降、压力稳定，无波动
5300	38000	流量小幅波动 ($\pm 1\%$)
5800	45000	压力不再升，流量稳定
6400	52000	流量波动 $\pm 0.8\%$ ，无喘振

喘振线拟合：采用线性拟合算法，将 4 个测试点的“转

速 - 临界流量”数据拟合为实际喘振线，替换原理论曲线。

3.2.2 性能控制逻辑优化

针对“性能控制受限”报警(fSRG_LIM、fTRKFLAG)，优化两项逻辑：

受限阈值调整：将“性能控制输出与喘振控制输出差值”的报警阈值从3%调整为5%，减少低负荷工况下的误报警；

手动退出保护：增加“手动退出性能控制”的确认弹窗，避免误操作触发fTRKFLAG报警，同时记录退出原因(如仪表维护、工艺调整)，便于追溯。

3.3 测试方案制定与实施

3.3.1 测试前准备

为确保测试安全，实施五项准备工作：

程序下装与仿真：在Tricon工程师站下装喘振测试程序，通过模拟工况(如模拟喘振信号)验证程序逻辑正确性，避免实际运行中跳车；

防喘振阀测试：在现有开度下微调 $\pm 2\%$ ，观察流量、压力变化，确认阀门执行机构灵敏性(响应时间 ≤ 1 秒)；

人员分工：设置指挥员(协调全局)、现场监视员(监测振动与声音)、操作站操作员(调节转速)、工程师站测试员(控制防喘振阀)，明确紧急停机流程；

报警确认：测试前清除所有仪表故障报警，确保PT001、FI137等关键信号正常；

工艺协调：将二段防喘振阀裕度调整至 $\geq 10\%$ ，避免测试一段时二段触发喘振。

3.3.2 测试实施步骤

以5800 RPM测试点为例，具体步骤如下：

工艺操作员将机组转速稳定在5800 RPM，防喘振控制切为“自动”；

工程师站测试员将一段防喘振阀控制权限切至工程师站，二段仍由操作站控制；

每次关小防喘振阀1%，记录流量、压力变化；当流量降至45000 Nm³/h(临界流量)、压力不再上升时，停止关阀，维持工况45分钟；

期间监测振动(≤ 6.3 mm/s)、现场声音(无异常噪音)，若出现振动超差，立即开防喘振阀退出测试；

测试完成后，打开防喘振阀至正常开度，恢复喘振线与控制权限，记录测试数据。

4 应用效果验证

4.1 安全性能提升

优化后，氨冰机喘振风险显著降低：

喘振发生率：优化前每年因仪表波动触发喘振2~3次，优化后连续12个月无喘振发生；

报警响应效率：防喘振相关仪表故障报警响应时间从5秒缩短至1秒，性能控制投用条件判断准确率达100%，未

出现误投用或漏投用；

4.2 节能效益显著

基于神华鄂尔多斯项目实际运行数据，节能效果主要体现在蒸汽消耗降低：

蒸汽消耗：优化前汽轮机蒸汽消耗量为24 t/h，优化后降至22 t/h，日均节约蒸汽48 t；按年运行8000 h、蒸汽单价150元/t计算，年节约成本=48 t/d × 330 d × 150元/t=237.6万元；

电能消耗：防喘振阀自动调节替代人工干预，减少阀门频繁动作，年节约电能约1.2万度(按阀门驱动电机功率0.75 kW、每天减少操作1小时计算)。

4.3 自动化水平提升

人工干预减少：性能控制稳定投用后，人工调节频率从优化前的每天8~10次降至每天3~4次，减少60%，操作工可将更多精力投入异常趋势预判；

操作界面优化：新增喘振测试操作画面与性能控制状态指示，报警信息分类显示(如仪表故障、受限报警)，操作便捷性提升70%；

长周期运行保障：装置连续运行周期从优化前的180天延长至300天，工艺稳定性显著提升，下游净化工艺产品合格率从98.5%提升至99.8%。

5 结语

本文基于Tricon系统，针对煤直接液化装置氨冰机的喘振风险与能耗问题，开展防喘振控制与性能控制优化研究，得出以下结论：

技术可行性：通过“仪表改造-喘振测试-逻辑优化”的技术路径，可有效解决传统串级控制的缺陷，Tricon解耦控制能实现“安全-节能-自动化”的协同；

经济有效性：优化后年节约成本超230万元，设备维护成本降低50%，投资回收期仅3个月，具备显著的经济效益；

推广价值：该优化方案可复制至其他离心式压缩机(如丙烷压缩机、循环气压缩机)，为煤直接液化、煤化工等行业关键机组控制优化提供参考。

未来研究可进一步结合大数据与AI技术，开发“喘振预测模型”，通过分析历史运行数据(如振动、温度趋势)，提前预警喘振风险，实现从“被动保护”到“主动预测”的升级，进一步提升机组运行的安全性与智能化水平。

参考文献

- [1] 王建国。大型压缩机Tricon防喘振控制系统设计与应用 [J]. 石油化工自动化, 2023, 59 (2):45-49.
- [2] 李明亮。氨制冷机组性能优化与节能技术研究 [J]. 化工机械, 2024, 51 (1):67-71.
- [3] 中国石化集团洛阳石油化工工程公司。离心式压缩机防喘振控制设计规范 [S]. GB/T 50689-2022.

Study on resource recovery technology of waste catalyst in methanol synthesis unit

Xiaoyong Song

Guoneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

In methanol synthesis processes, catalysts have limited service life. The generation of spent catalysts not only increases environmental burdens but also wastes valuable resources. Therefore, recycling and resource recovery of spent catalysts has become a crucial measure to enhance catalytic efficiency and reduce pollution. This paper focuses on spent catalysts from methanol synthesis units. First, it reviews their compositional characteristics and analyzes environmental issues caused by post-degradation. Subsequently, it explores resource recovery technologies including physical methods, chemical methods, and biological methods, evaluating their application status and pros/cons. Physical methods are relatively simple to operate but show limited effectiveness; chemical methods can achieve deep regeneration but may cause secondary pollution; biological methods are environmentally friendly but less efficient. Additionally, incorporating recent research advancements, this paper proposes future research directions and technical challenges in the field of resource recovery, providing valuable references for subsequent studies.

Keywords

methanol synthesis; waste catalyst; resource recovery; catalyst regeneration technology; environmental protection

甲醇合成单元废催化剂的资源化再生技术研究

宋小勇

国能榆林化工有限公司，中国·陕西 榆林 719000

摘要

在甲醇合成过程中，催化剂使用寿命有限，废催化剂的产生既加重了环境负担，又造成贵重资源浪费。所以，对废催化剂进行再生与资源化处理，是提升催化剂利用效率、减少环境污染的重要举措。本文聚焦甲醇合成单元废催化剂，先综述了其成分特征，剖析了废弃后引发的环境问题。接着，详细探讨了资源化再生技术，涵盖物理法、化学法、生物法等不同技术，分析了各技术的应用情况及优缺点。物理法操作相对简单，但再生效果有限；化学法能深度再生，但可能产生二次污染；生物法环保但效率较低。此外，结合最新研究进展，还提出了未来该领域资源化再生的研究方向与技术挑战，为后续研究提供参考。

关键词

甲醇合成；废催化剂；资源化再生；催化剂再生技术；环境保护

1 引言

甲醇作为一种重要的化工原料，广泛应用于有机合成、能源转化等多个领域。甲醇的生产主要通过催化剂在高温高压条件下将合成气（主要由一氧化碳和氢气组成）转化为甲醇。在这一过程中，催化剂的作用至关重要。然而，随着使用时间的增加，催化剂会逐渐失效，导致催化活性下降，最终必须进行更换。废弃的催化剂中通常含有贵金属和其他有价元素，若处理不当，不仅浪费了宝贵资源，还可能对环境造成严重污染。因此，废催化剂的资源化再生处理成为了催

化剂管理中的一个重要问题。通过有效的再生技术，不仅可以延长催化剂的使用寿命，还能回收其中的贵金属，实现资源的循环利用，符合可持续发展的要求。本文将对甲醇合成单元废催化剂的资源化再生技术进行深入研究，分析现有的技术方法，并探讨未来的发展方向。

2 甲醇合成单元废催化剂的组成与特性

2.1 废催化剂的组成

甲醇合成催化剂通常由多种金属氧化物或金属基体组成，如铜、锌、铝、钼等金属及其氧化物。废催化剂的组成成分主要受反应条件、催化剂的类型以及使用寿命的影响。一般而言，废催化剂中含有较高比例的活性金属（如铜），这些金属成分对催化剂的活性具有决定性作用。然而，在反应过程中，金属活性位点的消耗、催化剂中金属的流失、催

【作者简介】宋小勇（1992-），男，中国陕西榆林人，本科，助理工程师，从事甲醇合成单元废催化剂的资源化再生技术研究。

化剂表面积的减少等问题都会导致其活性降低。因此，废催化剂的成分通常包含金属、载体、活性物质以及反应过程中生成的沉积物等。这些成分不仅影响废催化剂的再生过程，还决定了其回收价值和可持续利用的潜力。

2.2 废催化剂的物理化学特性

废催化剂的物理化学特性对其再生效果具有重要影响，主要包括颗粒尺寸、比表面积、孔结构等因素。在催化剂的使用过程中，催化剂表面往往受到积碳、结垢、沉积物等污染物的影响，导致其比表面积和孔体积的减少。这些变化直接影响催化剂的活性位点，进而降低催化剂的催化效率。因此，在废催化剂的再生过程中，必须通过物理或化学手段对催化剂表面进行清理和修复，以恢复其比表面积和孔结构，提升其催化活性。

此外，废催化剂中的金属活性位点在长期使用过程中可能会遭遇中毒或金属流失，导致催化性能显著下降。例如，催化剂表面的金属可能被硫化物、氯化物等中毒物质覆盖，从而失去原有的活性。再生过程中，需要采取合适的处理方法，如还原、酸碱清洗等，以去除中毒物质并恢复金属位点的活性。因此，废催化剂的物理化学特性是评估其再生效果的关键因素，直接关系到再生过程的成功与否。

2.3 废催化剂的环境问题

废催化剂的处理不当会对环境造成严重影响。许多废催化剂中含有大量的重金属元素，如铅、铬、镍等，这些金属元素在环境中具有较高的毒性，能够通过土壤、水源等途径进入生态系统，造成长时间的污染，影响植物、动物及人类的健康。如果这些废催化剂未经适当处理直接排放，将会导致严重的土壤污染和水质恶化，甚至可能导致生物链的破坏。此外，废催化剂中的有机物和有害气体也可能对大气环境产生不良影响。因此，废催化剂的资源化再生不仅是提高资源利用效率、减少浪费的必要途径，也是实现环境保护和绿色发展的关键。通过合理的再生技术，废催化剂中的贵金属和其他有用成分可以被有效回收，同时减少对环境的污染，促进可持续发展。废催化剂的科学处理和资源化再生是推动绿色化学工业和实现生态文明建设的基础。

3 甲醇合成废催化剂的资源化再生技术

废催化剂的再生技术是工业催化剂回收和资源循环利用的重要手段之一。随着催化剂使用过程中的逐渐衰退及其在多个工业领域中的广泛应用，废催化剂的处理与资源化再生技术显得尤为重要。不同类型的废催化剂，尤其是贵金属催化剂和其他金属催化剂，其成分和使用情况各异，因此再生方法需要根据催化剂的特性来选择。再生技术主要可分为物理法、化学法和生物法三大类，各种方法各有优缺点，且在实际应用中通常需要根据具体情况进行优化和组合。

3.1 物理再生技术

物理再生技术主要依靠物理手段去除废催化剂表面或

内部的沉积物和杂质，恢复催化剂的比表面积、孔结构和活性。物理方法通常较为简单、环保且成本较低，适用于处理表面污染较轻、无严重中毒的催化剂。常见的物理再生方法包括机械清洗、热处理和洗涤 [1]。

机械清洗通过超声波、气流、气泡等手段去除催化剂表面附着的积碳、杂质、油污或沉积物，从而恢复催化剂的活性位点。超声波清洗利用高频振动引起的空化效应，能够有效去除催化剂表面的积碳和沉积物。气流清洗则通过强力气流去除表面的杂质和颗粒，恢复催化剂的表面结构。该方法操作简单、成本较低，但只能清除表面污染物，对于催化剂内部的中毒和金属流失问题效果有限，且对于某些类型的催化剂（如高温下使用的催化剂）可能无法完全恢复其催化性能。

热处理通过高温对废催化剂进行处理，促进催化剂表面积碳、积垢的分解，从而恢复其部分催化活性。该方法简单有效，能够有效去除有机污染物和部分无机沉积物。然而，过高的温度可能导致催化剂中金属成分的流失或烧结，尤其是对于贵金属催化剂，热处理的高温环境可能使金属颗粒聚集，从而降低催化剂的活性。因此，热处理的温度需要严格控制，以防止催化剂的进一步劣化 [2]。

洗涤法通常利用酸、碱溶液来清洗废催化剂，以去除催化剂表面的无用沉积物。通过选择合适的溶剂（如稀酸、碱性溶液），可以去除一些金属污染和有机物，但对于某些金属元素的回收效果较差。洗涤法主要适用于去除催化剂表面或载体上的可溶性污染物，对于深层金属中毒或结构破坏的催化剂效果有限。

3.2 化学再生技术

化学再生技术通过化学反应去除催化剂表面的中毒物质或修复催化剂的活性位点，从而恢复催化剂的催化活性。化学再生通常应用于催化剂的深度再生，特别是那些受到金属中毒或复杂污染物污染的催化剂。

酸碱化学再生是最常见的再生方法之一。通过使用酸或碱溶液处理废催化剂，能够去除催化剂表面及内部的无机沉积物、金属中毒物质和有机污染物。酸碱处理能够有效清除常见的污染物（如金属中毒、硫化物等），但它可能导致催化剂金属的流失、载体的腐蚀和结构损坏。尤其对于贵金属催化剂，强酸或强碱可能破坏金属颗粒的稳定性，导致催化剂性能下降。

还原处理通过使用还原气体（如氢气、一氧化碳等）对废催化剂进行还原修复，恢复催化剂中的金属氧化物的催化活性。这种方法特别适用于含金属氧化物催化剂的再生，如铜、铂、钯等金属催化剂。还原气氛下，金属氧化物被还原为金属态，恢复其活性。铜催化剂在还原气氛中的修复效果较好，能显著提高催化剂的性能。然而，对于某些催化剂，如铂、钯等，过度还原可能导致催化剂表面颗粒的烧结，影响其稳定性 [3]。

氯化法通过使用氯化剂（如氯气、氯化铵等）将废催化剂中的金属离子转化为易溶解的氯化物，进而实现金属的回收和再生。氯化法对于贵金属催化剂特别有效，能够回收催化剂中的贵金属元素，具有较高的经济价值。此方法可应用于铂、钯等贵金属催化剂的回收，但需要严格控制氯化剂的使用量和反应条件，以避免过度氯化带来的副作用，如催化剂载体的腐蚀等。

3.3 生物再生技术

随着绿色环保技术的发展，生物再生技术逐渐受到广泛关注。生物再生技术利用微生物、真菌或其他生物体的生物降解和吸附能力，修复废催化剂中的有害物质，具有较高的环保性和较低的能耗。

生物降解法利用特定微生物的作用来降解废催化剂中的有机污染物。这些微生物能够在无害化的环境下将催化剂中的有机污染物转化为无害物质，减少二次污染。生物降解法的优点是环境友好，且能够有效降低能源消耗。但它的缺点是处理速度较慢，且只能应用于去除有机污染物，对于金属中毒等无机污染物的处理效果较差 [4]。

生物吸附法利用某些生物体（如藻类、真菌等）对废催化剂中的金属离子进行吸附，从而实现金属的回收和催化剂的再生。这种方法具有较强的选择性，能够针对特定金属离子进行吸附，且能耗较低，适合大规模的绿色处理。尽管生物吸附法具有很好的环保性，但它的效率依赖于吸附材料的选择，且对不同金属的吸附效果可能存在较大差异。

4 废催化剂资源化再生的挑战与发展方向

4.1 再生技术选择与优化

废催化剂种类多样、成分复杂，这决定了再生方法需依据催化剂特性来挑选。物理法简单环保，却仅适用于表面污染轻的催化剂，对深层污染效果欠佳；化学法能在短时间内有效去除有害物质，但涉及复杂化学反应，有二次污染风险；生物法作为新兴技术，环保性强，可处理速度和适用范围受限。所以，实际应用中要综合考量催化剂类型、成分、使用情况及再生效果需求，合理选择再生技术。同时，不断优化现有技术也至关重要，例如改进物理法 4.2 多种方法综合利用

随着催化剂发展和新型再生技术涌现，综合利用多种

方法提高废催化剂再生效果是未来关键。先进的纳米技术或新型溶剂提取技术，为再生提供了新思路。结合物理、化学和生物再生方法，有望进一步提升再生效率和环保性。比如，先采用物理法去除催化剂表面大部分杂质，再用化学法深度处理深层污染，最后利用生物法对残留污染物进行分解，实现多层次、全方位的再生。这种综合利用方式能够充分发挥各方法优势，弥补单一方法的不足，推动废催化剂资源高效回收和再利用，促进资源循环利用产业发展。

4.3 绿色再生与贵金属回收

废催化剂再生过程中产生的废水、废气和固体废物处理，关乎环境保护成效。发展低能耗、低排放、低污染的绿色再生技术，是未来重要方向。优化再生技术既能提高再生效率，又能减少二次污染，推动绿色化学工业可持续发展。尤其对于贵金属催化剂（如铜、铂、钯等），其回收再利用具有重大经济和环境价值。贵金属成本高、稀缺性强，开发高效回收技术迫在眉睫。未来，采用吸附法、溶剂萃取法和电化学法等精细化分离技术，可提高贵金属回收率和纯度。通过精确控制分离条件，实现贵金属与其他杂质的高效分离，实现资源最大化利用，减少资源浪费，为可持续发展提供有力支撑。

5 结语

废催化剂的资源化再生不仅能够延长催化剂的使用寿命，提高资源利用效率，还能减少环境污染，具有显著的经济和环境效益。通过多种再生技术的不断发展和创新，未来废催化剂的回收利用将更加高效、绿色。随着技术的不断进步，废催化剂的资源化再生将成为化学工业可持续发展的重要组成部分。

参考文献

- [1] 惠武卫,郑珩,杜勇,等.甲醇合成催化剂失活典型案例剖析[J].低碳化学与化工,2024,49(08):138-142.
- [2] 江洋洋.前体元素含量及物相组成对甲醇合成催化剂性能的影响[J].石油化工,2024,53(07):921-928.
- [3] 庄颖.微反应器制备Cu-Zr甲醇合成催化剂[D].浙江大学,2024.
- [4] 武燕娟,张凡,雍晓静,等.两种工业甲醇合成催化剂失活原因对比分析[J].低碳化学与化工,2024,49(06):17-23.
- [5] 王敬,楚可嘉,申改燕.RK-05型甲醇合成催化剂的工业应用[J].煤化工,2024,52(01):27-29.

Formation mechanism and control method of slag layer in compressed gas flow bed gasification process

Yao Luo

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

Abstract

Against the backdrop of continuously increasing global energy demand and increasingly stringent environmental requirements, clean and efficient conversion of coal has become a key issue in the energy sector. The pressurized fluidized bed gasification process, with its significant advantages of high carbon conversion rate, excellent gas quality, and low pollutant emissions, occupies an important position in the modern coal chemical industry and is one of the core technologies for achieving clean utilization of coal. This article focuses on in-depth research on the formation mechanism and control methods of slag layer in pressurized fluidized bed gasification process. By systematically explaining the basic principles of pressurized fluidized bed gasification process, analyzing the physical and chemical processes of slag layer formation, and clarifying the influencing factors of slag layer formation. Based on the understanding of the formation mechanism, targeted slag layer regulation methods are proposed and analyzed with practical cases. The research results will help optimize the operation of pressurized fluidized bed gasification process, improve the stability and gasification efficiency of gasifier operation, and provide theoretical and practical support for clean and efficient conversion of coal.

Keywords

pressurized fluidized bed gasification process; Formation mechanism of slag layer; Regulatory methods; Clean coal conversion

加压气流床气化工艺中渣层形成机制及调控方法

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

在全球能源需求持续攀升与环保要求愈发严苛的双重背景下，煤炭清洁高效转化成为能源领域的关键课题。加压气流床气化工艺凭借碳转化率高、煤气品质优良、污染物排放低等显著优势，在现代煤化工产业中占据重要地位，是实现煤炭清洁利用的核心技术之一。本文聚焦于加压气流床气化工艺中渣层形成机制及调控方法展开深入研究。通过系统阐述加压气流床气化工艺的基本原理，分析渣层形成的物理化学过程，明确渣层形成的影响因素。基于对形成机制的理解，针对性提出渣层调控方法，并结合实际案例进行分析。研究成果有助于优化加压气流床气化工艺操作，提高气化炉运行稳定性和气化效率，为煤炭清洁高效转化提供理论与实践支持。

关键词

加压气流床气化工艺；渣层形成机制；调控方法；煤炭清洁转化

1 引言

在全球能源需求量不断增加和环保意识增强的背景下，煤炭的洁净高效利用已成为当前能源研究的焦点。加压气流床气化技术因具有高的碳转化率、煤气品质好和污染物排放低等优点，被广泛用于现代煤化工领域。加压气流床气化过程中渣层的生成及演变规律直接关系到气化炉的稳定性及气化效果。合理的渣层可以起到保护气化炉壁面、减轻耐火材料腐蚀的作用；但在气化过程中，由于渣层形状或厚度的不正常，会造成气化炉结渣、堵塞等问题，从而影响到气化

过程的连续与安全，尤其当气化炉水冷盘管区域出现渣层异常时，不仅可能加剧盘管表面的结渣倾向，还可能因局部热负荷失衡导致盘管磨损或腐蚀加速，进一步威胁气化系统的稳定运行。因此，开展加压气流床气化过程中渣层生成机理与调控方法的研究，是实现气化过程工艺优化，提高气化设备运行可靠性与经济性的关键。

2 加压气流床气化工艺基本原理

2.1 工艺概述

加压气流床气化技术是将煤粉与气化剂（氧气、水蒸气）混合喷射到气化炉中，在 1200-1600℃、压力 2.5-6.5MPa 的条件下，使煤中碳氧元素转化成粗煤气（其中 H₂、CO 为粗煤气的主要成分），实现煤炭的气化转化。该过程具有非常

【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。

高的反应速率和较强的气化能力：煤粉 - 气化剂在高速流动中充分混合，增大了反应物的接触面积、提升了反应速率，从而实现快速高效的气化。同时，该工艺适用于不同煤种(包括年轻褐煤至高变质程度无烟煤)的煤气化，所得合成气品质优异，既可作为合成氨、甲醇、煤制油等化工产品的原料气，又可应用于联合循环发电等场景，还能通过废热回收等方式实现能量梯级利用，最终达成煤炭资源的高效利用与洁净转化。

2.2 气化炉结构与工作流程

加压气流床气化炉通常由气化室、激冷室(或废热锅炉)等部件构成。煤粉与气化剂经烧嘴喷射进入气化室，在气化室中快速点火、燃烧，发生气化反应，形成高温的合成气及炉渣。合成气是携渣下行，按照生产流程可采取激冷流，在此过程中，合成气与水直接接触，炉渣迅速降温凝固，并将合成气冷却。还可以使用废热锅炉，将合成气的热量转化为水蒸气，然后再对其进行冷却处理，蒸汽并入管网供其他用户使用。气化过程中的温度、压力及物料停留时间是影响气化反应及渣层生成的主要因素^[1]。

3 渣层形成机制

3.1 渣层形成的物理化学过程

加压气流床气化是煤中矿物质在高温条件下发生的一系列物理和化学变化，并在此基础上生成熔渣。首先，煤炭里的矿物经过高温融化，变成了液体的炉渣。在气化炉中，由于气流的影响，炉渣与壁面或其它固体颗粒相互碰撞、粘附。在连续的气化过程中，不断产生新的炉渣，使附着于壁面或固体粒子上的渣层逐渐堆积而成。

从化学上讲，煤炭中的矿物组成十分复杂，有硅铝酸盐、碱金属化合物、碱土金属化合物等。在高温气化过程中，矿物间会产生化学反应，产生新的化合物。比如，硅铝酸盐与碱金属氧化物发生反应，会产生低熔点共熔物质，从而降低熔渣粘度，利于渣流及渣层的形成。此外，在气化过程中，炉渣与 CO₂、H₂O 等气体组分之间还存在着一定的化学反应，进而对渣层的稳定性产生重要影响。

3.2 渣层形成的影响因素

3.2.1 煤质特性

煤的煤质特征是影响渣层形成的重要因素。矿物质的含量、成分及熔点是影响熔渣形成的主要因素。一般而言，煤中矿物质含量愈高，其气化时生成的熔渣越多，且越易形成厚渣层。不同矿物的熔点及化学特性各不相同，如碱金属和碱土金属化合物因其熔点偏低而导致其总熔点下降，低温时即为液态，利于渣层的生成与流动。然而，高熔点矿物(如刚玉、石英等)会使炉渣粘度增大，不利于渣层均匀化。另外，煤的变质作用对渣层的生成也有一定的影响，如褐煤等新煤，其矿物质含量高、活性高，在气化时更易发生化学反应，生成的渣层特性也不同于烟煤、无烟煤等高阶煤。

3.2.2 气化操作条件

气化操作条件对渣层的生成有很大的影响。高温对渣层的形成起着关键作用，高温可加速矿物的快速熔融，并可降低其粘度，从而加速渣层的流动，改善渣层分布。但是，高温易造成渣流过大，不能在炉壁上形成有效的保护渣层，还会加重耐火材料的腐蚀；低温会增加熔渣的粘性，降低其流动性，从而造成气化炉的结渣和堵塞。在一些以生物质为原料的气化生产过程中，由于初始温度设定过低，气化炉内的熔渣粘性过大，在运行短短数小时后就出现了结渣堵塞问题，致使整个气化系统被迫停止运行进行清理，给生产造成了严重的经济损失。由此可见，精准调控气化操作条件中的温度参数，对于保障渣层的合理生成、维持气化炉的稳定高效运行至关重要。

同时，压力也在一定程度上影响了渣层的形成。压力作用下，气化速度提高，合成气流速增加，气流携渣能力增加，有可能改变炉内渣的空间分布及运动轨迹，从而对渣层生成产生重要影响。另外，气化剂的成分及比例(氧水比)也会对气化过程进行程度及炉内温度场的分布产生间接的影响。比如，氧含量的提高使反应温度升高，有利于渣的生成与流动；同时，加入适当的水蒸气，可以调整炉中的温度，从而对炉渣的成分、粘度等有一定的影响。

3.2.3 气化炉结构

气化炉的结构设计对渣层形成有着重要影响。气化炉的形状、大小及烧嘴设置方法对炉中气体的分布及流动状况都有一定的影响。合理的炉型设计可以实现煤粉与气化剂的有效混合，确保气化过程的充分进行，并在炉壁上形成一层均匀、稳定的渣层。如选择合理的炉型(圆柱形、锥形等)及烧嘴角度，可有效降低炉内气流偏流、旋涡等，防止渣层在局部地区过量堆积或不均匀。另外，内衬材料特性也会影响渣层 - 壁面间的粘附力及交互作用，不同耐火材料对渣层的润湿性能及抗侵蚀能力存在差异，进而影响渣层的稳定性及使用寿命^[2]。

4 渣层调控方法

4.1 煤质优化调控

4.1.1 配煤技术

采用配煤技术，可调节入炉煤种，改善渣层结构及性能。针对不同煤种的矿物质含量、成分及熔点，采用适当的配比进行掺混，以达到灰熔点、粘度等性能指标。比如，通过对高灰熔点和低灰熔点的煤的适当配比，可以获得合适的灰熔点，从而在气化时保持较好的流动性能，并在壁面上形成一层稳定的保护性渣层。通过合理配比，达到均衡硫、氮等其它组分，达到降低污染排放的目的。实践中，为实现渣层优化、高效利用，还需进行大量试验与资料分析，才能优选出最优配比。

4.1.2 煤的预处理

同时，对原煤的预处理也是煤质优化和渣层调控的一

种有效手段。常用的预处理方法有水洗、加入助熔剂等。洗选法能有效地脱除煤炭中的一些矿物、杂质，并使其灰份下降，从而降低气化时的炉渣排放量。同时，通过洗选，可以改变煤中矿物的组成，降低有害组分（如高熔点矿物等）的生成。在煤中添加石灰石、白云石等可使煤灰熔点下降的材料。该助熔剂与煤炭中的矿物质在高温条件下发生反应，生成低熔点共熔化合物，提高了其流动性，有利于渣层的生成与控制。在合理选用助熔剂时，应充分考虑其对气化工艺及合成气品质的影响，以防止在气化过程中引入过多的杂质，或影响气化反应。

4.2 操作条件优化调控

4.2.1 温度控制

对气化温度的准确控制是实现渣层控制的关键。在实际生产过程中，应根据煤的特点，结合气化炉的工作要求，选择合理的气化温区。通过调整气化剂的流速及比例，可以有效地调控气化过程中释放出的热量，达到调控气化温度的目的。如在渣层粘度大，流动性差的情况下，可通过增大氧流量使其升温，使其粘度下降；相反，如果渣层内的流速过大，对耐火材料有一定的冲蚀作用，可以减少氧的流速，或增大水蒸气的含量，从而使气化温度下降。在此基础上，通过在气化炉中安装的温度传感器，对气化过程中的温度进行实时监控，并配合先进的控制技术，精确地控制气化过程中的温度，保证渣层的质量。

4.2.2 压力调节

适当调整气化压力，有助于优化渣层。在一定的条件下，适当升高气化压力，可增大合成气流速，强化气相携渣能力，实现炉渣在气化炉中的均匀分配，利于形成稳定的渣层。但是，过高的压力不仅会提高装置的投资及操作费用，而且还会影响气化过程及装置的密封性能。为此，应针对气化技术及装置的特性，选用适宜的气化压力，并结合实际操作中的渣层状况作相应的调整。比如，在气化炉底处出现了大量的渣层时，可适当地减小压力，降低气流对渣块的挟渣阻力，促使熔渣的排出^[3]。

4.2.3 气化剂配比调整

对气化剂比例进行优化，可实现对渣层的有效控制。除了通过调节氧气和水蒸气的比例来控制温度外，还可以根据渣层的性质调整二者的比例。比如，在炉渣粘度高的情况下，提高水蒸气的含量，可使炉渣的粘度下降，流动性得到提高；如果需要增大气化反应速率和温度，可以适当提高含氧量。此外，还通过添加CO₂等其它气化剂，研究其对渣层生成及气化的影响，探寻最佳的气化剂配比，实现对渣层的精确控制。

4.3 气化炉结构优化调控

4.3.1 炉型改进

通过对气化炉结构的改造，可以使气化炉中的气体分布得到更好的控制，进而达到最优渣层的目的。比如，通过渐扩或渐缩的炉型设计，可以实现炉内气体流动的均匀分布，降低气流偏流、旋涡等现象，防止局部区域内的熔渣过量堆积。在此基础上，通过增加导流板、折流板等装置，实现对气流与渣流方向的定向调控，促使渣层均匀化。因此，在设计新的炉型时，可采用计算机模拟与试验研究相结合的手段，综合评价各种炉型的性能，筛选出最符合渣层调节与气化技术需求的炉型。

4.3.2 烧嘴优化

烧嘴型式及其布局对渣层的形成有很大的影响。通过对喷嘴形状、尺寸、角度等参数的优化，进一步提高煤粉与气化剂的混合效率，实现气化过程的充分进行，并实现炉渣的均匀分布。适当地调整烧嘴组的布局，例如多个烧嘴组的对称排列，可改善炉况，避免局部高温、低温区的产生，有利于稳定地形成渣层。另外，还可以从改善烧嘴体的冷却模式、延长烧嘴体的寿命及可靠性等方面来保证气化炉的平稳运行。

5 结论

加压气流床气化过程中，渣层的生成受煤质特性、气化操作条件、气化炉结构等诸多因素的影响，是一项十分复杂的物理与化学过程。因此，对其形成机理进行深入研究，弄清各种因素对其的影响规律，是对其进行有效控制的前提。本文采用煤质优化、操作条件优化及炉型优化等手段，实现对渣层生成与特性的有效调控，从而提升气化炉内操作稳定性与气化效果。在生产实践中，应结合不同煤种、不同技术要求，采用不同的控制手段，形成合理的渣层调节方案。与此同时，随着我国煤化工的持续发展，对渣层的生成机理及调控方法的研究也亟待深入，探索出更为高效、环境友好的渣层处理工艺，为实现煤的洁净高效利用奠定坚实的理论基础。

参考文献

- [1] 刘建宇.气流床加压煤气化技术研究进展[J].山西化工,2023,43(12):36-38.
- [2] 冯宜鹏,张志萍,魏国强,等.高含氮木质废弃物加压气化含氮污染物生成研究[J].太阳能学报,2023,44(03):253-259.
- [3] 陈寅.气流床煤气化技术分析[J].化工设计通讯,2021,47(07):36-38.
- [4] 林再福,宫勋,丁茂.加压气流床煤气化单元技术及工艺选择分析[J].中国盐业,2020,(15):44-47.

Research Progress and Hotspot Analysis of H₂S Studies Based on CNKI

Xiaodong Jin Yiting Fa

Department of Forensic Science and Technology, Jiangsu Police Institute, Nanjing, Jiangsu, 210031, China

Abstract

Hydrogen sulfide (H₂S) is a common industrial inorganic by-product and endogenous gas signaling molecule. This study employs bibliometric analysis and CiteSpace visualization to examine hydrogen sulfide (H₂S) research trends from 2020 to 2024 using China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database. The findings are as follows: 1) the annual publication volume of related research exhibited a declining trend. 2) five major research fronts were identified: treatment of sulfurous exhaust gases; detection of endogenous hydrogen sulfide; biological and pathological investigations; effects of exogenous hydrogen sulfide on alfalfa resistance to saline-alkali stress; toxicity detection of hydrogen sulfide. This study comprehensively reveals the research progress and hotspots of H₂S, providing reference and inspiration for subsequent studies.

Keywords

H₂S; Bibliometrics; CiteSpace; Visual analytics

基于中国知网的 H₂S 研究进展及热点分析

金晓东 法怡婷

江苏警官学院刑事科学技术系，中国·江苏南京 210031

摘要

硫化氢 (H₂S) 是一种常见的工业无机副产物、内源性气体信号分子。本研究依托中国知网 (CNKI) 数据库资源，运用文献计量学方法和 CiteSpace 可视化分析软件，对 2020 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日期间的硫化氢整体研究进展进行可视化分析。研究结果揭示了：(1) 相关文献的发表数量呈现逐年下降趋势；(2) 硫化氢研究的五大热点领域：含硫废气处理、内源性硫化氢检测、生物病理学研究、外源性硫化氢对盐碱胁迫裸燕麦的影响以及硫化氢毒性检测。本研究较为全面的揭示了 H₂S 的研究进展与热点，期望为后续的研究提供参考与借鉴。

关键词

硫化氢；文献计量学；CiteSpace；可视化分析

1 引言

硫化氢 (H₂S) 是一种无色、易燃的酸性气体，高浓度时无明显气味，低浓度时具有强烈的臭鸡蛋味，浓度极低时有硫磺味，是硫的氢化物中最简单的一种。H₂S 属于无机化合物，是天然气脱硫、石油炼制、废水处理和造纸制浆等工业过程中的主要副产物^[1]。同时，H₂S 作为第 3 类内源性气体信号分子，在生物细胞调控的研究中亦展现出重要价值。当前，我国学者在硫化氢的研究领域已经取得了一定的进展，但缺乏对该领域的系统认识。因此，本文采用文献计量学方法，基于中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 数据库，使用 CiteSpace 可视化分析软件，对 2020 ~ 2024 年 H₂S 研究文献的产出和研究状态进

行系统性分析，了解目前国内 H₂S 研究文献产出趋势；通过对发文量、作者及 H₂S 研究热点的分析，揭示 H₂S 研究进展与热点，为后续研究者提供参考和借鉴。与传统综述形式相比，本文的研究方式通过数据可视化和网络分析，揭示该研究领域的发展趋势、热点主题以及前沿方向，为研究者揭示当前的研究动态和未来发展方向。

2 数据来源与分析方法

本文选取 CNKI 学术期刊库收录的学术文献作为数据获取来源，数据采集时间跨度为 2020 年 1 月 1 日 ~ 2024 年 12 月 31 日。使用 CNKI 的高级检索功能，以“H₂S + 硫化氢”为主题词进行主题检索，得到共 4808 篇文章。手动删除与本研究主题严重不匹配、内容无关的文章，筛选后得到 4567 篇，作为本文对 H₂S 整体研究现状的原始数据。使用 CiteSpace 可视化软件以及 Excel 对年发文量、文献来源、研究机构、作者以及研究热点进行分析，从多维尺度客观地

【作者简介】金晓东（1990-），男，中国江苏盐城人，博士，副教授，从事法庭科学先进材料的开发与应用研究

分析我国在 H₂S 领域的研究概况。

3 硫化氢整体研究进展分析

3.1 发文量分析

文献的年度总量分布情况，在一定程度上可反映该领域在某一阶段内的研究状况（如研究现状、研究热点、研究水平及发展速度）。同时，文献的年度发文总量也是衡量科研产出的一个重要指标。通过检索发现，2020~2024 年 CNKI 数据库中文总库 H₂S 研究相关文献共收录 4567 篇，年发文量总体呈现逐年下降趋势。（图 1）



图 1 2020~2024 年各年度发文量

3.2 文献来源分析

利用 CNKI 自带的文献计量功能，统计各文献来源（期刊）发表的文献数量，按发文量排名，排名前 12 的期刊见表 1（含并列排名）。这 15 个期刊中，共有 2 个北大核心，分别为《石油与天然气化工》、《腐蚀与防护》，在这 15 个期刊中的发文量占比只有 6.0% 和 5.1%，这也说明国内学者对 H₂S 的研究在创新性、理论深度、研究方法等方面可能有所欠缺，提示后续研究应着重关注对 H₂S 应用深度的挖掘与研究创新性的探索。发文量前 12 的期刊均为石油化工类，表明在当前的研究态势下，与 H₂S 相关的研究成果的发表主要集中在石油化工类期刊。

3.3 作者分析

以文献作者为节点，绘制 H₂S 研究领域相关文献的作者共现网络，得到如图 2 的作者合作网络可视化图谱。图中每个节点代表一个作者，节点越大，作者出现频率越高，发文量越多。节点呈现年轮状，不同颜色表示作者在不同年份发文的频率，越往内表示发表文献年份越早，外部为红圈表示在 2024 年该作者仍有文献产出。共有 281 名作者为 H₂S 领域的研究作出了贡献，其中发文量排名前 5 的作者为李娜（21 篇）、刘建新（21 篇）、卜婷（19 篇）、刘瑞瑞（19 篇）、贾海燕（17 篇）、刘秀丽（16 篇）、陆原（14 篇）（表 1）。根据 CiteSpace 可视化网络可以观察到，各节点较分散，以 Citation（被引用量）为条件显示标签，仅有赵鹏、廖柯熹团队有标签显示，但相互间的合作连线也仅在本团队

内部，未与其他团队和个人产生联系。

在 CiteSpace 中，中心性是指网络中一个节点（如关键词、作者、机构等）与其他节点的连接程度，值越高（通常 ≥ 0.1 ），说明该节点越可能是不同研究群组之间的“枢纽”。计算节点的中介中心性，得到各节点中心性为零，说明当前没有研究人员在 H₂S 研究领域的能起到传播知识和进行成果交流的作用。分析该现象产生的原因，当前 H₂S 领域主要以团队或个人形式进行研究，但各团队之间合作较少，缺少跨团队交互，所以在可视化图谱中节点中心性为 0。

表 1 按发文量排名前 12 的文献来源

序号	发文量排名前 12 的文献来源	发文量	在表中数据的占比
1	中国石油和化工标准与质量	68	11.9%
2	化工管理	60	10.5%
3	石化技术	50	8.8%
4	山东化工	45	7.9%
5	硫酸工业	40	7.0%
6	石油化工腐蚀与防护	37	6.5%
7	石油与天然气化工	34	6.0%
8	全面腐蚀控制	33	5.8%
9	化工设计通讯	31	5.4%
10	化学工程与装备	31	5.4%
11	辽宁化工	29	5.1%
12	广东化工	29	5.1%
13	腐蚀与防护	29	5.1%
14	当代化工研究	28	4.9%
15	齐鲁石油化工	26	4.6%

（注：本文分析的文献范围为中国知网可检索到的所有文章，包括学位论文。本表分析的文献来源仅对学术期刊论文进行统计，未统计学位论文。）



图 2 以 Citation 显示标签的作者节点网络

表2发文量前8作者

序号	姓名	发文量	年份
1	李娜	21	2021
	刘建新	21	2020
2	卜婷	19	2020
	刘瑞瑞	19	2020
3	贾海燕	17	2021
4	刘秀丽	16	2021
5	陆原	14	2020
6	刘洋	10	2021
7	彭志敏	9	2022
8	孙亮	6	2023
	王伟	6	2024
	张思琦	6	2022

3.4 研究热点分析

由于本文是以“硫化氢 + H₂S”为主题词进行检索，所以在 CiteSpace 的计算结果中隐藏关键词“硫化氢”节点，得到如图 3 的可视化图谱。图中每个节点代表一个关键词，节点越大，关键词出现频率越高。节点呈现年轮状，不同颜色表示关键词在不同年份出现的频率，越往内表示出现年份越早，外部为红圈表示在 2024 年该关键词成为研究热点。

如图 3 所示，一氧化氮 (NO) 作为一种气体信号分子，协同 H₂S 共同调节植物的氧化应激，同时两者也存在对植物细胞内蛋白质修饰的竞争关系^[2]，因此在研究 H₂S 在植物生理调控中的作用时，常与 NO 一同研究。然而，关键词“一氧化氮”节点虽然大，但是外围缺乏明显的红色年轮特征，说明这类研究虽然是 H₂S 领域的研究重点，但近两年研究热度降低，已经不再是当前的研究热点。“荧光探针”节点最大，且年轮较均匀，显示出在设计新型有机金属材料和近红外的荧光探针，并运用于活细胞中活性硫、活性氧和水体环境中的 H₂S 含量检测这一研究方向仍保持着持续稳定的研究热度^[3]。“天然气”、“二氧化硫”节点略小，但外围红色年轮占比较大，表明近两年有关天然气和二氧化硫方向的 H₂S 的研究热度在上升。

为进一步明确 H₂S 的重点研究主题，使用 CiteSpace 聚类分析方法中的对数似然算法 (Log-likelihood ratio, LLR) 对高频关键词进行聚类，聚类结果如图 4。聚类分析得到 9 个聚类，其中 #1 脱硫、#2 侵蚀速率、#8 分子模拟主要针对煤、石油加工过程中产生的含硫废气的脱硫处理和对 H₂S 的吸附处理；#3 荧光探针主要致力于内源性硫化氢的检测，#6 氧化应激致力于对生物病理方面的研究；#4 裸燕麦主要致力于研究外源性硫化氢对盐碱胁迫裸燕麦的影响；#5 氨气、#7 危害针对 H₂S 的毒性、恶臭气体的祛除、对环境的

危害等方面进行研究。这些聚类的研究主题相互关联、互为补充，共同推动了我国在 H₂S 领域的研究进程。

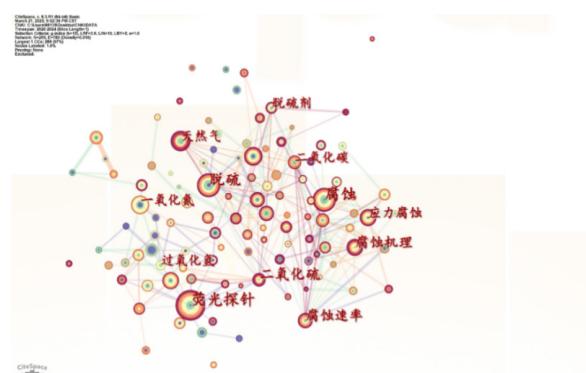


图3关键词共现的CiteSpace网络可视化图谱

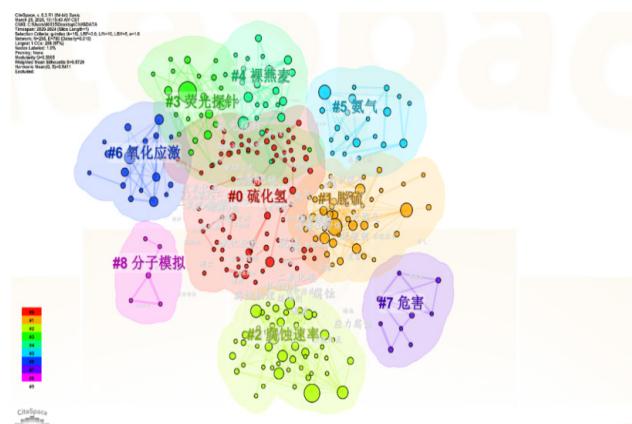


图4关键词共现的CiteSpace聚类图谱

4 结论

本文基于文献计量学，利用 CiteSpace 分析了 H₂S 的研究进展和热点，结果表明：H₂S 研究的发文量总体下降，但该领域的研究仍有一定的热度；为 H₂S 领域的研究作出贡献的 281 名作者中，李娜和刘建新发文最多；研究热点有五类，包括：含硫废气处理、内源性硫化氢检测、生物病理研究、外源性硫化氢对盐碱胁迫裸燕麦的影响、硫化氢毒性检测。

参考文献

- [1] 秦景香. 硫化氢中毒与救治研究现状 [J]. 职业卫生与病伤, 1999, (03): 171-177.
- [2] 武恬恬, 谢彦杰. 硫化氢调节植物氧化应激响应的作用机制 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2023, 39(07): 911-919.
- [3] 魏征, 蒋国霞, 王怡雯等. La₂FeMO₆双钙钛矿中的不对称氧空位用于促进氧化活化和H₂S选择性氧化 (英文) [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2024, 62(07): 198-208.

Peroxyacetic acid disinfectant on the materials of various components of reusable medical devices Experimental observation of compatibility

Tao Ding

Hangzhou Xinpu Biotechnology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311612, China

Abstract

Objective: To observe the compatibility of peracetic acid disinfectant with different materials used in various components of reusable medical devices. **Methods:** Corrosion rate tests were conducted on metal components using the disinfectant, while corrosivity weight loss tests were performed on other components. Peracetic acid (CH_3COOOH) disinfectant is a highly effective disinfectant and sterilizer with a wide range of applications, capable of killing various bacterial vegetative forms, molds, viruses, and spores. It plays a significant role in preventing and controlling nosocomial infections and outbreaks of major infectious diseases. It possesses excellent properties such as low effective concentration and rapid action speed. As a highly effective bactericidal disinfectant and sterilizer, peracetic acid is increasingly being used in various medical institutions. Domestic manufacturers have conducted extensive research on the metal corrosion resistance of this product, but few have studied the corrosion resistance of materials used in reusable medical device components. Therefore, this study selected a product containing 2.99g/L of peracetic acid as the subject and conducted corrosion evaluation of materials related to reusable medical devices in the laboratory, providing a reference for medical institutions when using it.

Keyterms

peracetic acid disinfectant; reusable medical devices; material compatibility; corrosion weight loss test

过氧乙酸消毒液对可重复使用的医疗器械各部件材料相容性的实验观察

丁涛

杭州心普生物科技有限公司，中国·浙江杭州 311612

摘要

目的：观察过氧乙酸消毒液对可重复使用的医疗器械各部件所用不同材料的相容性情况。**方法：**金属部件采用消毒液腐蚀速率试验，其他部件采用消毒液腐蚀性失重试验进行观察。过氧乙酸(CH_3COOOH)消毒液是一种应用非常广泛、高水平的消毒灭菌剂，可以杀灭各种细菌繁殖体、霉菌、病毒、芽孢。在预防和控制医源性感染及大型传染病的暴发中能发挥重要作用。具有有效浓度低；作用速度快等优良性能。过氧乙酸作为一种高效杀菌消毒剂和灭菌剂，各医疗机构使用越来越广，国内生产厂家对该产品的金属腐蚀性具有较多研究，但很少有厂家对可重复使用的医疗器械各部件所用材料腐蚀性进行研究。为此，本研究选择含过氧乙酸有效成分2.99g/L产品为对象，在实验室进行了可重复使用医疗器械相关材料腐蚀性评价，为医疗机构使用时参考。

关键词

过氧乙酸消毒液；可重复使用的医疗器械；材料的相容性；腐蚀性失重试验

1 引言

过氧乙酸消毒液常用于自动清洗消毒机对医疗器械高水平消毒和灭菌。其腐蚀性较强，可能对部分金属及其他材料产生腐蚀作用。本次实验使用了有效成分浓度为 2.99g/L

的过氧乙酸消毒液，对自动清洗消毒机所使用的材料进行了腐蚀性观察。以下是实验结果的报告。

2 材料和方法

2.1 消毒剂选择

心普牌过氧乙酸消毒液，按使用说明书配制，原液直接使用，配制后的液体应立即使用。

2.2 材料

不同材质规格（见表 1）

【作者简介】 丁涛（1980—），男，中国安徽阜阳人，工程师，从事质量和标准化在化工企业生产过程中的应用研究。

表1 不同材质规格名称

材料名称	规格
不锈钢	直径 24.0mm, 厚 1.0mm
碳钢	直径 24.0mm, 厚 1.0mm
铜	直径 24.0mm, 厚 1.0mm
铝	直径 24.0mm, 厚 1.0mm
钢化玻璃	直径 30.0mm, 厚 5.0mm
镍铬合金	长 2mm, 宽 2mm, 厚 1.0mm
玻璃纤维	长 2mm, 直径 1.7mm
聚砜树脂	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2.0mm
尼龙	长 2mm, 宽 2mm, 厚 6.0mm
四氟橡胶	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2.0mm
PP	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2mm
硅橡胶	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2mm
天然橡胶	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2mm
氟橡胶	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2mm
三元乙丙橡胶	长 2mm, 宽 2mm, 厚 2mm
聚醚型聚氨酯	长 2mm, 宽 2mm, 厚 1mm

2.3 试剂

纯化水、清洁剂、无水乙醇

2.4 仪器

贮液器(玻璃制, 具盖, 容量 800ml ~ 1000ml), 磨砂纸(细度为 120 号, 超声波清洗设备, 精密分析天平(准确度为 0.1 毫克)^[1])。

2.5 方法

金属片: 直径为 24.0 毫米, 厚度为 1.0 毫米的金属片, 有一个穿过直径为 2.0 毫米的小孔, 总表面积约 9.80 平方厘米, 光洁度等级为 6^[2]。

塑料及橡胶类: 处理成约 2cmx2cm 样片, 表面用 120 号砂纸磨光。

将金属样品进行前处理, 将其浸泡在含有表面活性剂的清洁溶液中约 10 分钟, 彻底去除油污后清洗, 或者涂抹氧化镁糊剂除油后再清洗。使用 120 号水砂纸磨除金属样片两面和周边表面的氧化层(需保持每种材料在同一张砂纸上磨)。之后用纯净水冲洗, 再次用无水乙醇脱脂^[3]。将样品放入 50℃恒温箱中干燥 1 小时, 然后用塑料镊子取出存放在干燥器中, 恢复室温后使用天平称重并使用游标卡尺测量表面积, 最后备用^{[3][7]}。

塑料及橡胶类样片前处理: 将样本用碱性洗涤剂洗净后自来水冲洗, 充分去油, 超声波清洗器清洗样片 20 分钟后, 之后可以用纯化水清洗, 或者涂抹氧化镁糊剂去除油脂后再清洗^[3]。将金属片放入 50 摄氏度恒温箱中干燥 1 小时, 待其温度降至室温后进行称重^[4]。

准备试验用的消毒液, 需要根据消毒剂的最高使用浓度来配制。将试验样片浸泡在 200 毫升的消毒液中, 持续时间为 72 小时。取出样片后, 先用清水冲洗, 然后用毛刷清

除任何腐蚀产物, 再用蒸馏水冲净^{[3][5]}。塑料及橡胶类样品使用无水乙醇脱脂, 金属样片采用化学法结合超声波清洗去除腐蚀物, 放在 50±1℃的恒温鼓风干燥箱中 1 小时拿出, 使温度冷却到室温, 依次在分析精密天平上称量。

试验对照: 将所述的参照组样品按照与实验组完全相同的方式进行处理, 包括表面处理、清洗和称重等步骤。随后, 将这些样品放入不含消毒剂的纯净水中浸泡 72 小时, 取出后与实验组样品一起经过相同的清洗、化学处理、水冲洗、干燥和称重步骤, 并计算其平均失重值^[3]。

医疗器械各部件腐蚀性计算公式: 根据试验的结果医疗器械金属部件腐蚀性速率计算为公式 1:

$$R = \frac{8.76 \times 10^7 \times (m - m_t - m_k)}{S \times T \times D}$$

式中: R 为腐蚀速率, 单位为 mm/ 年 (mm/a); m 为试验前金属片平均质量, 单位为 g;

m_t 为试验后金属片平均质量, 单位为 g; m_k 对照组试样平均失重值, 单位为 g; S 金属片的表面积总值, 单位为 cm²; T 试验时间, 单位为 h; D 为金属材料密度, 单位为 kg/m³。腐蚀性速率判定标准见表 2^[3]。

根据试验的结果医疗器械其他部件腐蚀性失重试验计算为公式 2:

$$Ms=m-m_t-m_{\text{空}}$$

Ms: 失重值, 用于评价腐蚀度分级, 单位为克 (g); m: 为试验前样品重量, 单位为克 (g); m_t: 为试验后样品重量, 单位为克 (g); m_空: 为空白对照纯化水腐蚀样品失重值, 单位为毫克 (mg); 腐蚀性失重值判定标准见表 2。

表2 腐蚀性判定标准

腐蚀性速率判定标准		腐蚀性失重失重值判定标准	
腐蚀速率 (R)/(mm/a)	级别	失重范围 (mg)	级别
< 0.0100	基本无腐蚀	< 0.40	基本无腐蚀
0.0100 ~ < 0.1000	轻度腐蚀	0.40 ~ < 4.0	轻度腐蚀
0.1000 ~ < 1.0000	中毒腐蚀	4.0 ~ < 40	中毒腐蚀
> 1.0000	重度腐蚀	≥40	重度腐蚀

3 结果

实验结果表明, 含量为 2.99gL 的过氧乙酸消毒液, 在环境温度 25° C、相对湿度 55.2% 条件下, 过氧乙酸消毒液对不锈钢、碳钢、镍铬合金基本无腐蚀, 对铜、铝具有中度腐蚀, 对钢化玻璃基本无腐蚀, 对玻璃纤维、聚砜树脂、尼龙、聚醚型聚氨酯、塑料和橡胶材料基本无腐蚀。不锈钢片、碳钢片、铜片和铝片均无形状变化^[6], 不锈钢片和碳钢片有色泽变化、无锈蚀变化, 铜片和铝片有色泽变化、有锈蚀变化, 钢化玻璃无色泽变化、无锈蚀变化, 塑料和橡胶材料无形状变化。(见表 3)

表3 腐蚀性测试结果

材料名称	实验前平均重量(g/片)	实验后平均重量(g/片)	失重值(g/片)	腐蚀速率或失重率(mm/a或%)	腐蚀性级别
不锈钢	3.3776	3.3776	0.0000	0.0000 mm/a	基本无腐蚀
碳钢	3.0875	3.0875	0.0000	0.0000 mm/a	基本无腐蚀
铜	3.5419	3.5283	0.0136	0.1970 mm/a	中度腐蚀
铝	1.1650	1.1576	0.0074	0.3403 mm/a	中度腐蚀
钢化玻璃	8.1622	8.1622	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
镍铬合金	0.7412	0.7412	0.0000	0.0000 mm/a	基本无腐蚀
玻璃纤维	0.1830	0.1830	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
聚砜树脂	1.0747	1.0747	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
尼龙	2.3947	2.3947	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
四氟橡胶	1.6266	1.6265	0.0001	0.0067 (%)	基本无腐蚀
PP	0.7313	0.7313	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
硅橡胶	1.1062	1.1062	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
天然橡胶	1.4960	1.4958	0.0002	0.0134 (%)	基本无腐蚀
氟橡胶	1.7687	1.7687	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀
三元乙丙橡胶	1.2210	1.2209	0.0001	0.0082 (%)	基本无腐蚀
聚醚型聚氨酯	0.2322	0.2322	0.0000	0.0000 (%)	基本无腐蚀

注：各材质对照样均无变化。

4 讨论

通过实验数据可知，过氧乙酸消毒液对铜、铝具有中度腐蚀，在过氧乙酸消毒液使用过程中应避免接触，对不锈钢、碳钢、镍铬合金、钢化玻璃、玻璃纤维、聚砜树脂、尼龙、聚醚型聚氨酯、塑料及其橡胶材料具有兼容性，推荐使用这些材料制作的可重复使用的医疗器械。（见表4）

表4 兼容性材料清单

金属和玻璃	塑料和橡胶材料
不锈钢	玻璃纤维
碳钢	聚砜树脂
镍铬合金	尼龙
钢化玻璃	四氟橡胶
	PP
	硅橡胶
	天然橡胶
	氟橡胶
	三元乙丙橡胶
	聚醚型聚氨酯

与表4可重复使用医疗器械和材料间具有兼容性，如软式内窥镜及附件、橡胶、塑料多种类型金属(如不锈钢、碳钢和镍铬合金)。推荐用于下文表4所述材料制备的医疗

器械的高水平消毒和灭菌。如以强碱清洁剂清洗、消毒后冲洗不充分、潮湿储存，或在超过40℃的温度下干燥，可能会损坏器械。

参考文献

- [1] T/WSJD 002-2019 医用清洗剂卫生要求[S]. 中国卫生监督协会, 2019: 8
- [2] 梁锡宗, 新型生化高效环保消毒剂的研制及检测[J], 2009,36 (17) : 143-145.
- [3] GB/T 38498-2020消毒剂金属腐蚀性评价方法[S]. 中华人民共和国卫生健康委员会, 2020: 5-6.
- [4] 于春, 一种次氯酸消毒液的理化检测和毒性观察[J], 《广东化工》, 2023,50 (02) : 187-189。
- [5] 《消毒技术规范》2002年版[S]. 中华人民共和国卫生部 2002:126.
- [6] 王嵬, 一种复合中性戊二醛消毒剂的性能观察[J], 《中国消毒学杂志》, 2022 ,39 (01): 10-12+18
- [7] 周锡明, 王禹鑫;张弛;任烨.常用医用清洗剂对金属腐蚀性的测试[J].《中国医学装备》- 2020 ,17 (01):186-185.
- [8] 王玲;王庭槐;李应顺;张天元;李晶晶. 一种低腐蚀复方过氧乙酸消毒剂相关特性研究[J]-《中国消毒学杂志》, 2016 , 33 (04) : 20-22。

Optimized measures for methanol synthesis to prevent paraffin formation

Xiaotao Zhang

Guaneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

The formation of paraffin wax during methanol synthesis significantly impacts product quality and production efficiency. This study investigates optimization strategies to prevent paraffin formation. The paper first analyzes the fundamental process of methanol synthesis, then systematically examines how catalyst selection, reaction temperature, pressure, and space velocity influence paraffin generation. Through analysis of technical limitations in synthesis processes, catalyst effectiveness, and operational challenges, targeted preventive measures are proposed. The research emphasizes selecting appropriate synthesis conditions with high-performance catalysts while maintaining operational precision to effectively prevent wax formation and ensure methanol production stability. Finally, specific control measures are provided along with future research directions.

Keywords

methanol synthesis; paraffin wax formation; reaction optimization; catalyst

甲醇合成预防石蜡生成优化措施

张小涛

国能榆林化工有限公司，中国·陕西榆林 719000

摘要

甲醇合成中石蜡的生成会严重影响甲醇产品的质量与合成效率，本文旨在探讨避免石蜡生成的优化措施。首先分析了甲醇合成反应的基本过程；其次，本文细致考察了催化剂选择、反应温度、及反应压力与空速等因素对石蜡生成的影响。通过对合成技术不足、催化剂有效性、操作问题等因素的原因分析，提出了针对性预防措施。文章强调选择合适的合成条件与高性能催化剂，并关注操作细节，来有效预防石蜡的生成，确保甲醇生产过程的稳定性。最后，文中提供了具体控制措施，并对未来研究方向进行了展望。

关键词

甲醇合成；石蜡生成；反应优化；催化剂

1 引言

甲醇的合成反应主要在添加催化剂后进行综合反应，然后进行可逆操作。相关反应操作非常复杂，一氧化碳经过加氢处理后，生成甲醇。这一反应过程属于放热反应，遵循化学平衡原理。在系统分析中，处于相同温度状态下，随着承受压力持续增加， KN 值也随之增大，从而相应地提高了甲醇的平衡产率。在承受相同压力的情况下，随着温度的升高，对应的 KN 值会逐渐降低。据此可以看出，在甲醇合成中，高压低温环境更有利。甲醇合成的处理流程包括原料合成气、压缩净化处理、合成加工和粗甲醇整体精馏等操作。在原材料合成气中，甲醇制备阶段需要先进行碳、氢等原料合理处理。利用天然气、煤炭或石油进行加工，经过蒸汽转

化或直接催化反应处理，顺利生成含 CO_2 、 CO 和 H_2 的混合物。在净化处理阶段，鉴于粗甲醇无法直接使用，首先需进行精馏脱出杂质。化学净化可借助碱帮助精馏过程中破坏难以处理的杂质，同时合理调节 pH 值。物理方法主要是通过简单过滤去除内部杂质。对于粗甲醇，采用全面精馏技术，主要是为了全面去除易挥发的物质，如二甲醚、高碳醇、乙醇和水等难挥发成分。

2 甲醇合成反应概述

甲醇合成是一种催化化学反应，通过一系列工艺步骤将合成气转化为甲醇。合成气主要由一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO_2) 和氢气 (H_2) 构成，在高温高压条件下，利用铜基催化剂实现气体分子间的有效转化。反应过程依据如下化学方程式进行： $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ 。这一转化过程涉及到多相催化反应机制，其效率受催化剂活性、选择性及反应条件的影响。为提升甲醇产

【作者简介】张小涛（1990-），男，中国陕西榆林人，本科，助理工程师，从事煤化工研究。

率，优化合成条件，减少副产物生成，特别是避免石蜡的产生，是工业生产中的重要课题。石蜡作为一种饱和烃，其生成不仅消耗反应原料，降低甲醇得率，也可能引起催化剂堵塞及设备腐蚀等问题，对于甲醇合成反应的性能有着显著影响。因此，了解和控制可能导致石蜡生成的各种因素对提升整个甲醇生产过程的稳定性和效率具有重大意义 [1][2]。

3 影响甲醇生产过程中生成石蜡的因素分析

3.1 催化剂带来的影响

催化剂在甲醇合成中扮演着关键角色，涉及反应速率与方向的调控，从而影响甲醇的产率及石蜡的生成。铜基催化剂因其较高的活性和选择性，被广泛应用于工业上的甲醇生产。合适的催化剂可有效促进一氧化碳和氢气转化为甲醇的反应过程，降低石蜡的副产。然而，催化剂的几个关键特性，如其比表面积、孔径大小以及金属组成，直接影响反应的进行与反应物的转化率。若催化剂活化不足或者表面发生积碳，将导致催化反应路径偏离预期，增加了高分子烃类如石蜡的生成风险。因此，精准控制催化剂的合成、激活以及再生等策略显得尤为重要。维持催化剂的稳定性和性能，不仅可以提高甲醇的合成效率，还对避免不必要的石蜡堆积、确保整个合成系统的顺畅运行有着决定性作用 [3][4]。

3.2 合成反应温度带来的影响

合成反应温度对甲醇产率及石蜡生成具有决定性影响。理想的反应温度有助于提高甲醇的合成功率，同时降低不饱和烃向石蜡等副产物的转化。温度过高，会促进副反应的发生，增加烃类分子的热裂解，导致石蜡的生成。相反，温度过低可能使催化剂无法达到活化状态，反应速率下降，进而影响甲醇的产出。据研究表明，在甲醇合成反应中，适宜的温度应结合催化剂的特性进行精确控制，以确保反应能够在最佳状态下进行。此外，均匀分布的反应温度也有助于避免局部热点的产生，减少高温区的催化剂失活和石蜡沉积，对反应器的长周期稳定运行至关重要。因此，在实际生产中，通过精确控制反应器的温度条件，既可以优化甲醇的合成过程，又能有效预防石蜡的生成，是提升工艺效率和产品质量的重要对策。

3.3 合成反应压力与空速的影响

在甲醇合成过程中，合成反应的压力与反应器的空速同样是影响产物分布和反应效率的关键参数。高压条件有利于推动反应平衡向甲醇的生成转移，增加甲醇产率，但同时也可能加剧不饱和烃的氢化反应，从而有可能增加石蜡的生成量。适中的压力设置有助于平衡甲醇合成和石蜡生成这两个相互竞争的过程，实现甲醇产量的最大化及副产物的最小化。此外，空速，即气体每小时通过催化剂床体积的流速，直接影响反应物与催化剂的接触时间和反应完成度。较低的空速可能导致催化剂接触时间过长，增加烃类副产物的生成；而较高的空速则可能导致反应不充分，影响甲醇的产量。

因此，对甲醇合成反应系统而言，对压力及空速的精细控制是实现高效生产的重要环节，需要根据催化剂性能和反应动力学特性来优化调整，以达到既高效又环保的生产目标 [5]。

4 甲醇合成反应生成石蜡的原因分析

4.1 合成技术存在问题

甲醇合成技术的不足可能导致反应系统效率低下及副产物石蜡的增多。技术问题常见于反应器设计不合理、原料预处理不充分、以及合成过程控制不精确等方面。一个典型问题是反应器内部温度和压力分布的不均匀性，这会造成部分区域原料转化不完全或过度反应，从而影响甲醇产率和增加石蜡的生成风险。此外，如原料中存在杂质，没有经过有效的清洁或者分离处理，也会对催化剂造成损害，降低其活性，促进石蜡等副产物的产生。当前，优化甲醇合成技术，从反应器设计、原料处理到过程控制的各个环节出发，提升整体反应的均匀性和稳定性，是降低副产物生成并提升甲醇合成经济效益的重要策略。通过技术创新及过程优化，可以有效解决这些问题，提高甲醇合成的性能，减少环境污染和生产成本。

4.2 催化剂过期

催化剂的老化对甲醇合成过程具有显著的不利影响，可能引致催化剂活性和选择性降低，这直接关系到石蜡副产物的形成。随着使用时间的增长，催化剂可能因为物理磨损、化学中毒或者热力学退化而逐渐失去活性；尤其是催化剂表面的积碳现象，会严重妨碍活性位点与反应物的接触，进而减少甲醇的生成速率，同时增加了长链烃类石蜡的生成。此外，过期催化剂可能导致反应选择性的改变，使得合成路径偏离预期方向，增加副反应的比例。因此，及时监测催化剂性能，定期进行更换或再生，对确保甲醇合成过程中甲醇的高产出和低石蜡生成至关重要。通过采取有效的催化剂管理策略，可以显著延长催化剂的使用寿命，降低经济与环境成本 [6]。

4.3 操作方面存在问题

在甲醇合成过程中，操作者的熟练程度和操作规程的科学性对保障生产流程的稳定和高效至关重要。不规范的操作可能造成原料或产物流量的波动、反应条件控制的失准，以及安全风险的增大。尤其在反应条件控制上，如温度、压力的不当调整有可能诱发石蜡的形成，因此，确保操作的准确性对于预防石蜡生成具有直接影响。操作问题还包括对设备维护的疏忽，可能导致催化剂暴露于不合理的工作环境中，加速其失活，促进石蜡的沉积。加强操作人员的专业培训，建立健全的操作规程和监督机制，是防止此类问题发生的有效途径。通过提升操作标准化水平，确保每一环节都能精确控制，可以显著降低石蜡产生的风险，保证甲醇合成过程的顺畅进行。

5 甲醇合成反应生成石蜡的预防措施

5.1 预防措施

5.1.1 注意操作事项

在甲醇合成生产中确保防止石蜡生成，关键在于严格的操作事项与过程监控。操作过程中，必须确保原料气在进入反应器之前经过严格的净化，排除可能导致催化剂中毒的杂质。反应条件如压力、温度和流速的精确控制，对于催化反应的平稳进行和甲醇的高产率至关重要，因此操作人员需根据实时数据进行细致的调节。检测和维护设备的正常运行，及时发现和处理异常情况，也是确保生产质量的关键措施。此外，定期对反应器及相关生产系统进行检查，杜绝因设备老化或故障造成的波动和偏差，可以有效地预防不期望的副反应，包括石蜡的生成。综合地执行标准化、系统性的操作流程，能够大幅度降低产生石蜡的风险，提高甲醇合成工艺的整体效率和安全性 [7]。

5.1.2 选用优质催化剂

针对甲醇合成过程中石蜡生成的问题，选择优质催化剂是关键的预防措施之一。催化剂的活性、选择性以及稳定性直接影响化学反应的进行，进而决定甲醇的产量与副产品的形成。优质催化剂应具有较高的甲醇合成活性和抗积碳能力，能够在合成过程中减少碳化物在催化剂表面的沉积，显著降低石蜡的形成。在选择催化剂时，除了考虑其催化性能，还应评估其长期运行下的物理和化学稳定性，避免由于催化剂的活性降低或结构破坏，而使得副反应增多。此外，定期对催化剂进行再生处理，恢复其活性，也是延长催化剂使用寿命、保障甲醇合成稳定运行的重要环节。科学合理地选择和管理催化剂对于提升甲醇合成效率、减少石蜡生成并保护设备具有显著的正面影响。

5.1.3 注重石蜡处理

针对甲醇合成中石蜡的产生，系统地设计石蜡处理程序显得尤为关键。通过工艺流程中设置专门的石蜡分离装置，可以将石蜡从产物中有效分离出来，减少对后续生产流程的影响。石蜡的处理不仅要求分离技术高效，还应关注环保和资源的合理利用，探讨石蜡的再利用可能性，转化为有价值的副产品或能源，进一步提升整个制造过程的经济效益及环境友好性。实际操作中，还需定期对分离系统进行维护和检查，确保分离效果，及时调整优化分离参数，以适应甲醇合成过程中可能出现的各类变化。通过这种预防与治理并重的策略，即可有效控制石蜡的生成，又能减缓其对整个甲醇合成过程造成负面影响，从而提升甲醇生产的稳定性和可持续性。

5.2 控制措施

在甲醇合成过程中，实施有效的控制措施对预防石蜡生成至关重要。控制措施应包括精确的流程监控和反应条件的优化调节。通过实时监测甲醇合成反应的压力、温度、流速等关键参数，并与理想的反应状态进行比对，可以及时调整反应条件，避免偏离最优反应窗口，从而最大限度减少石蜡的形成。同时，采用先进的自动化控制系统，对整个生产过程进行严格管理，不仅可以保障操作的精确性和反应的稳定性，还可以提升反应效率。进一步的控制措施还需要包括对催化剂进行周期性的检查和替换，及早发现催化剂性能衰减或积碳的问题，保持催化剂的良好状态，确保甲醇生产过程的连续性和经济性。通过这些综合控制策略的实施，可以大幅度提升甲醇生产的效率，同时防止石蜡对生产设备和产品质量造成的潜在危害。

6 结语

本研究对甲醇合成过程中石蜡生成的问题进行了深入分析，提出了一系列预防和控制措施。通过对反应条件的精准控制、催化剂性能的维护与优选、操作过程的规范化以及石蜡处理技术的完善，能够有效减少石蜡的产生。石蜡的控制对于提高甲醇的生产效率、确保产品质量和减轻环境负担具有显著意义。未来研究应进一步探索新型高效催化剂的开发以及更先进的工艺流程设计，不断优化甲醇合成工艺，实现高产出、低能耗、低污染的绿色化工生产目标。此外，对于副产品石蜡的利用也应加以考虑，以实现资源的全面利用和循环经济的发展。通过持续的科技创新与制度完善，可以期待未来甲醇合成工艺将更加高效、环保和可持续。

参考文献

- [1] 张建.甲醇合成的工艺过程分析与操作控制优化问题探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2019(8):35-36.
- [2] 王伟.优化工艺参数控制甲醇产品酸度[J].石油炼制与化工,2018(12):36-37.
- [3] 于德玲.甲醇合成工艺的增产、节能、减耗的工程分析和工程实践[D].华东理工大学,2017,13(11):119-124.
- [4] 陈绍武.改进生物地理学优化算法及其在甲醇合成转化率软测量的应用[D].华东理工大学,2016,19(14):132-136.
- [5] 夏春涛.甲醇合成工艺过程与操作控制优化的分析[J].山东工业技术,2019(07):53.
- [6] 陈鑫亮.甲醇合成工艺过程与操作控制优化的分析[J].化工设计通讯,2017,43(02):6-35.
- [7] 刘战红,刘绍波,张珊珊.焦炉煤气制甲醇合成原料气的技术分析[J].化工管理,2018(29):187.

Design and Validation of Excel Electronic Form for Pharmaceutical Inspection Records

Yu Wang Meihui Guo

Nanjing Lilai Pharmaceutical Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

Objective Encourage pharmaceutical enterprises to adopt proven Excel for laboratory data processing and analysis. Elaborate on the conditions that Excel spreadsheets need to meet and the contents to be verified. **Methods** By consulting references and combining practical work, describe the design content, verification process, storage location, usage requirements and change situations of Excel spreadsheets. **Results** The use of Excel spreadsheets in processing drug inspection records reduces calculation errors while ensuring the accuracy and traceability of inspection results. **Conclusion** Excel spreadsheets are applied to drug inspection records, which can provide convenience for processing inspection data and are easy to be promoted in various pharmaceutical enterprises.

Keywords

Excel; inspection record; computerized system validation; validation; blank template; change

药品检验记录使用 Excel 电子表格的应用与要求

王玉 郭美慧

南京丽来医药科技有限公司，中国·江苏南京 211100

摘要

目的：鼓励制药企业采用经验证的Excel进行实验室数据处理分析。阐述Excel电子表格需具备的条件及验证的内容。**方法：**通过查找参考文献并结合实践工作，描述Excel电子表格的设计内容、验证过程、存储位置、使用要求、变更情况。**结果：**使用Excel电子表格进行药品检验记录的处理，减少计算错误的同时保证检验结果的准确性、可追溯性。**结论：**Excel电子表格应用于药品检验记录，可为检验数据处理提供便利，易于在各制药企业进行推广。

关键词

电子表格；检验记录；计算机化系统验证；验证；空白模板；变更

1 概述

Excel 是一款广受欢迎且应用广泛的工具，因其操作简单，易于上手，被众多企业用于数据管理、分析和处理工作。本文作者鼓励制药企业通过使用 Excel 提供的数据记录、计算、图表合成、布局及安全性设置的功能，来实现实验室数据处理分析。不仅能够有效减少人工计算、复核的时间成本，同时达到便利、直观的目的，顺应时代科技的发展。

本文主要介绍 Excel 电子表格应用于制药企业实验室数据处理的设计、验证、存储、使用、变更等流程。

2 电子表格设计

电子表格设计内容可分成四个模块，分别为：模板信息、产品信息、计算信息和变更信息。

电子表格的设计要求：①电子表格的内容应包含适当

的信息，可便于追溯；②电子表格中的工作簿应受到适当保护，避免他人误删除、移动、隐藏等；③电子表格工作表中只有需输入内容的单元格可以编辑，其他所有单元格都应被锁定；④可通过设置条件格式，根据单元格底纹或字体颜色的变化，辅助判定检测结果是否合格。⑤电子表格按照原始数据的要求进行管理，所存放的文件夹应设置一定的访问权限。

2.1 模板信息

在电子表格中应能显示电子表格的设计、审核、批准等人员及日期；模板编号、模板版本号、软件版本号以及模板生效日期，用来控制模板的唯一性。存储路径和填写说明用来描述该电子表格模板的用途和用法。

电子表格中通过使用 Excel 函数“=CELL("FILENAME")”和“=INFO("RELEASE")”来显示模板的储存路径、文件名、活动工作表和软件版本号^[1]。

2.2 产品信息

为保证药品检测记录的可追溯性，应在电子表格中记录药品的相关信息，包括但不限于：产品名称、产品批号、

【作者简介】王玉（1992-），男，本科，执业药师，从事质量管理研究。

检测成分、检测项目、序列名称（如涉及）、检测设备信息（如设备编号），必要时可以设计写明运行方法、处理方法栏等等。

2.3 计算信息

使用 Excel 电子表格进行计算，应包含足够的辨识信息。例如：对照品应提供批号、称样量、含量、稀释体积、峰面积、响应因子以及系统适用性可接受标准；供试品包含批号、称样量、稀释体积、峰面积以及供试品可接受标准等等，注意单元格应留有足够的空间。

输出数据区域应对单元格设置保留小数点位数应进行描述，例如浓度保留至小数点后 4 位，响应因子保留到小数点后 8 位，RSD 保留到百分数小数点后 1 位，含量至保留到百分数小数点后 2 位，平均含量保留到百分数小数点后 1 位。具体保留位数可根据项目不同示情况而定，保留位数应保证对最终结果不产生影响。有效数字修约的方法可根据申报国家不同，进行不同公式编辑。例如中国按照“四舍六入五留双”的方式进行数字修约^[2]，可通过使用函数公式

$“=IF(MOD(ABS($H$13*D22*C22/$B$22*POWER(10,4)),2)=0.5,ROUNDDOWN(H13*D22*C22/B22,4),ROUND(H13*D22*C22/B22,4))”$ 参考示例见图 3。美国^[3]、欧盟^[4]等按照“四舍五入”进行修约，可使用函数公式 “=ROUND(\$H\$13*D22*C22/\$B\$22,4)”。

通过设置条件格式来控制系统适用性和供试品可接受标准，当出现不满足可接受标准时，可以显示设置的颜色底纹。参考示例见图 1。

计算人姓名、日期应记录在单元格中，或者在计算完成后打印电子表格，由计算人签名并注明日期后交予复核人进行第二人复核。

2.4 变更历史

电子表格使用版本号进行变更控制，并记录对电子表格所做的变更，以便于追溯修订历史。

根据以上内容介绍，本文提供阿昔洛韦咀嚼片中阿昔洛韦含量测定^[5]空白模板示例供参考，详见表 1。

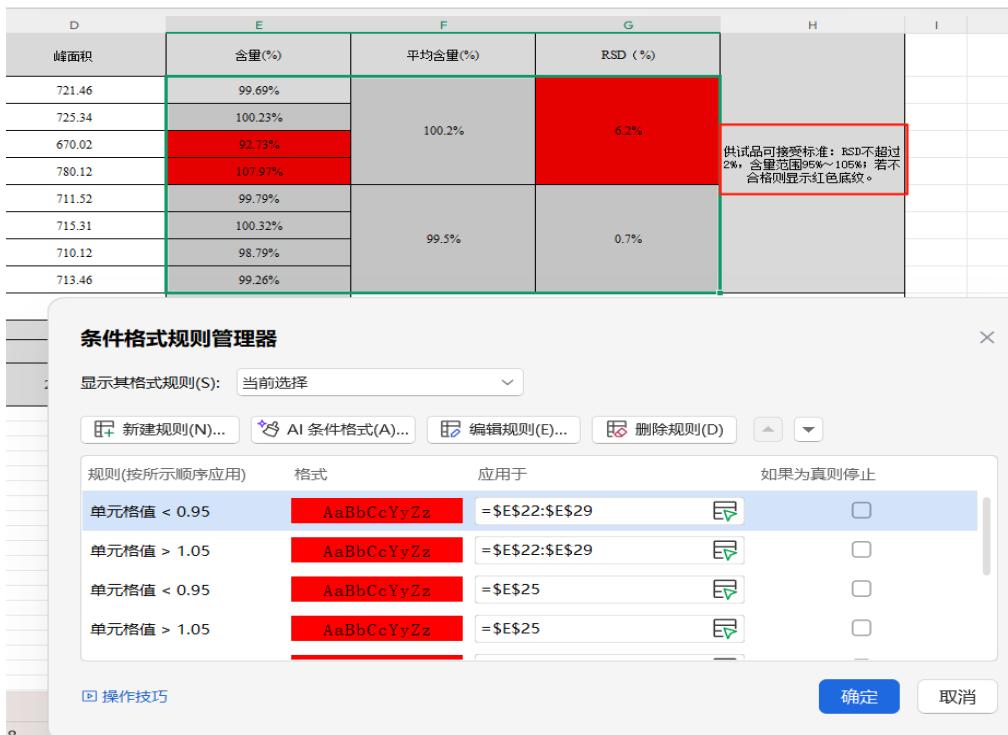


图 5 条件格式设置示例

3 电子表格验证

应对 Excel 电子表格中公式及安全性设置进行验证，确保电子表格的模板能够有效控制，验证过程应有相应的记录。

3.1 公式验证

电子表格中的计算结果应与使用其他商业软件或计算器手工计算结果进行对比，结果应保持一致，计算过程可截

图或拍照作为该验证的附件保存。

如果电子表格在不同软件版本号的计算机上使用，则需要对每个使用的版本均进行验证，防止因软件版本差异导致结果或功能不同。

应在验证记录中保留电子表格的完整打印版，同时打印一份显示所有公式的版本（“公式”→“显示公式”）。当使用 VBA 宏时，相应的 VBA 代码也应打印并保存在验证记录中（“开发工具”→“查看代码”）。

表 1 阿昔洛韦咀嚼片中阿昔洛韦含量测定空白模板示例

模板信息												
设计者 / 日期	张三 2023.01.10	审核者 / 日期	李四 2023.01.10	批准者 / 日期	王二 2023.01.10	生效日期	2023.01.30					
模板编号	EV-202301	模板版本号	V01	软件版本号	12.0	当前时间	2025/09/09 13:33:47					
储存路径	D:\20250630\已验证电子表格\[EV-202301(V01)阿昔洛韦咀嚼片中阿昔洛韦含量测定空白模板.xlsx] 含量(四舍六入五留双)											
填写说明	灰色底纹区域已锁定无法编辑, 请在无填充底纹区域进行记录; 填写完成出现红色底纹区域, 需要反馈。											
产品信息												
品名	阿昔洛韦咀嚼片											
检测成分	阿昔洛韦		检测项目		含量测定							
产品批号	20210601、20210801		检测日期		2023.04.20							
序列名称	20230420-01		检测设备信息		EQ-HPLC-037							
计算信息												
对照品名称 / 批号	称样量 (mg)	含量	稀释体积	浓度 (mg/ml)	峰面积	响应因子	对照品 1 响应因子平均值					
对照品 1 (140630-202004)	50.13	99.8%	2500	0.02	717.92	0.00002786	0.00002778					
					720.46	0.00002776						
					717.84	0.000 02786	6 针对照品 1 峰面积 RSD 0.2%					
					721.62	0.00002772						
					721.44	0.00002772						
					721.20	0.00002773	对照品 2 回收率					
对照品 2 (140630-202004)	50.26			0.0201	726.20	0.00002768	99.7%					
系统适用性可接受标准	STD1 峰面积 RSD≤2%, STD2 回收率 98%~102%; 若不合格则显示红色底纹。											
参数 供试品 批号	称样量 (mg)	稀释 体积	峰面积	含量 (%)	平均含量 (%)	RSD (%)	供试品可接受标准: RSD 不超过 2%, 含量范围 95% ~ 105%; 若不合格则 显示红色底纹。					
20210601-1-1	50.26	2500	721.46	99.69%	99.8%	0.3%						
20210601-1-2			725.34	100.23%								
20210601-2-1			719.11	99.53%								
20210601-2-2			720.25	99.68%								
20210801-1-1	49.52	2500	711.52	99.79%	99.5%	0.7%						
20210801-1-2			715.31	100.32%								
20210801-2-1			710.12	98.79%								
20210801-2-2			713.46	99.26%								
计算人	张三 2023.04.21		复核人	李四 2023.04.22								
变更历史												
模板名称	模板编号	版本号	生效日期	修订内容								
阿昔洛韦咀嚼片中阿昔洛韦含量测定空白模板	EV-202301	V'01	2023.01.30	新增								

注: 表格数据为编写电子表格而来, 不代表真实实验情况。

3.2 安全性验证

所有不需要编辑的单元格都应锁定(“单元格格式”→“保护”→“锁定”), 以防止被意外修改, 需要输入信息的单元格外。通过不同颜色的底纹区分单元格是否进行锁定, 以便使用人员更好的进行单元格录入。例如:

无需编辑的单元格使用灰色底纹, 在无填充底纹区域进行记录等。

通过设置保护工作表(“审阅”→“保护工作表”)保证空白模板不被改动, 同时设置保护工作簿(“审阅”→“保护工作簿”)可避免工作簿删除、移动或重命名。设置的密

码应至少8个字节^[6]。并且可以将电子表格设置打开权限和编辑权限密码加密，避免其他人员操作。

若将电子表格格式设置为“xlt”模式，需注意确认Excel函数“=CELL(“FILENAME”)”是否正常显示。

4 电子表格存储

已经过验证的电子表格应放置在指定文件夹内，并且文件夹应设置访问权限：指定用户方可访问文件夹，且无法修改和删除该文件夹、子文件夹和文件。在“文件夹”→“属性”→“安全”→“高级”内进行设置。

对于拒绝访问的用户，“类型”选择拒绝，拒绝所有基本权限，设置详情参见图2；

对于仅具有访问但无法修改和删除文件的用户，“类型”选择拒绝，拒绝“写入”和“删除”权限，用户可在已验证文件夹的电子文档中写入数据后另存至对应项目的文件夹中保存。设置详情参见图3。



图2 拒绝访问用户文件夹权限设置图

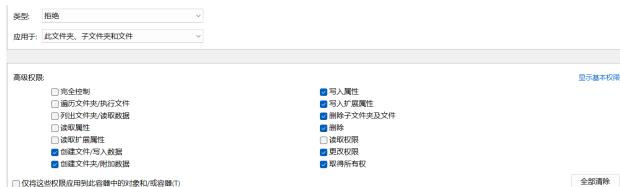


图3 仅访问用户文件夹权限设置图

电子表格的文件名应具有唯一性，可以写明已验证的电子表格的模板编号、版本号、检测产品、检测成分以及检测项目，例如：EV-202301(V01)阿昔洛韦咀嚼片中阿昔洛韦含量测定空白模板。也可使用其他具有唯一性的命名方法。

5 电子表格使用

在使用已验证的电子表格计算样品数据时，应按照原始电子数据对已输入数据的电子表格进行控制，防止他人进

行修改和删除。并且为了方便数据查找，可规定统一的样品电子表格文件名编制方式。例如：模板编号+模板名称+计算日期+样品批号等等，可根据药企实际情况进行编制。

应打印一份纸质的样品结果电子表格张贴在相关记录中保存。

6 电子表格变更

基于风险确定电子表格再验证周期，定期进行电子表格再验证。例如可以使用已知的数据组，将计算结果与标准进行对比。变更通常包括以下情形：

- ①当软件或硬件配置发生变更时，需评估是否进行电子表格再验证；
- ②当检测方法变更时，需要评估是否进行电子表格再验证；
- ③改变产品信息或计算信息等内容的其他情形。

参考文献

- [1] EDQM of the Council of Europe.General European OMCL Network (GEON) Quality Management Document.Validation of Computerised Systems Annex 1 – Validation of Excel Spreadsheets:August 2018:2-10.
- [2] China National Institutes for Food and Drug Control.Chinese Pharmacopoeia Standard Operating Procedures:2019 Edition .Beijing: China Medical Science and Technology Press: 2019.08:710-714.
- [3] The United States Pharmacopieial Convention.USP-NF. General Notices and Requirements.https://online.uspnf.com/uspnf/document/1_GUID-6E790F63-0496-4C20-AF21-E7C283E3343E_7_en-US:9.
- [4] The European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare of the Council of Europe.European Pharmacopoeia 11.0 Volume I :01/2023:7.
- [5] China National Institutes for Food and Drug Control.<http://aoc.nifdc.org.cn/sell/uploadfile/159538339917152991041003487260.pdf>
- [6] Chinese Pharmacopoeia Commission.Pharmacopoeia of the people's Republic of China. Beijing: China Medical Science and Technology Press:2025 Edition (Volume II):723-725.
- [7] Center For Food And Drug Inspection Of China National Medical Products Administration.Guidance of Good Manufacturing Practices for Drug:2 Edition.Beijing: China Medical Science and Technology Press:2023.01:54-68.

Preparation and performance of anode materials for electrochemical sodium ion batteries

Yuhao Gong Zining Luo

Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610207, China

Abstract

With the rapid development of renewable energy, sodium ion batteries have become a research hotspot for the next generation of energy storage technology due to their abundant resources and low cost advantages. This study explores the positive and negative electrode materials of sodium ion batteries, using sodium titanate ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) as the negative electrode material, and optimizes its electrochemical performance by adjusting the calcination time (5 h, 10 h, 16 h); Using manganese based oxide NaMnO_2 as the positive electrode matrix, the cycling stability and rate performance were improved by Fe/Cu doping modification ($\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$, $\text{NaMn}_{0.94}\text{Fe}_{0.03}\text{Cu}_{0.03}\text{O}_2$, $\text{NaMn}_{0.98}\text{Fe}_{0.01}\text{Cu}_{0.01}\text{O}_2$). By using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), constant current intermittent titration technique (GITT), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), the correlation between the microstructure, crystal structure, and electrochemical properties of materials is systematically analyzed. Experiments have found that calcination time affects the kinetics of sodium ion transport by regulating the porosity and interlayer spacing of sodium titanate, while Fe/Cu doping can regulate the valence state evolution path of Mn ions through lattice distortion. The capacity retention rate of the sodium titanate negative electrode calcined for 5 hours reached 82.7% after 200 cycles, and the capacity at high rate after 20 cycles was 101.64 mAh/g; The initial discharge capacity of $\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$ positive electrode at 0.1C rate is 173.87 mAh/g, and the capacity retention rate is 85.2% after 50 cycles. This study proposes the hypothesis of “porosity ion diffusion coupling” and the law of “doping concentration lattice distortion threshold”, providing experimental basis and theoretical reference for the optimization of positive and negative electrode materials in sodium ion batteries.

Keywords

sodium ion battery; sodium titanate; manganese-based oxide; calcination time; doping modification; porosity; lattice distortion

电化学钠离子电池正负极材料的制备与性能研究

龚雨豪 罗紫凝

四川大学，中国·四川成都 610207

摘要

随着可再生能源的快速发展，钠离子电池因其资源丰富、成本低廉的优势，成为下一代储能技术的研究热点。本研究针对钠离子电池正负极材料展开探索，以钛酸钠 ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) 为负极材料，通过调控煅烧时间 (5 h、10 h、16 h) 优化其电化学性能；以锰基氧化物 NaMnO_2 为正极基质，通过 Fe/Cu 掺杂改性 ($\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$, $\text{NaMn}_{0.94}\text{Fe}_{0.03}\text{Cu}_{0.03}\text{O}_2$, $\text{NaMn}_{0.98}\text{Fe}_{0.01}\text{Cu}_{0.01}\text{O}_2$) 提升其循环稳定性和倍率性能。通过扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD)、恒电流间歇滴定技术 (GITT) 及 X 射线光电子能谱 (XPS) 等手段，系统分析材料的微观结构、晶体结构与电化学性能的关联。实验发现，煅烧时间通过调控钛酸钠的孔隙率和层间距影响钠离子传输动力学，而 Fe/Cu 掺杂可通过晶格畸变调节 Mn 离子价态演变路径。5 h 煅烧的钛酸钠负极在 200 次循环后容量保持率达 82.7%，20 次循环高倍率下容量为 101.64 mAh/g； $\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$ 正极在 0.1C 倍率下初始放电容量 173.87，50 次循环后容量保持率 85.2%。本研究提出“孔隙率-离子扩散耦合”假说及“掺杂浓度-晶格畸变阈值”规律，为钠离子电池正负极材料的优化提供了实验依据与理论参考。

关键词

钠离子电池；钛酸钠；锰基氧化物；煅烧时间；掺杂改性；孔隙率；晶格畸变

1 引言

近年来，全球能源结构加速向可再生能源转型，大规模储能技术的需求日益迫切。钠离子电池 (SIBs) 因钠资源储量丰富（占地壳质量的 2.6%）、成本低廉（约为锂资源

的 1/60），成为锂离子电池的理想替代方案之一^[1-2]。然而，钠离子的离子半径 (1.02 Å) 比锂离子 (0.76 Å) 大 26%，导致电极材料在充放电过程中面临更显著的结构应力，进而引发容量衰减快、倍率性能差等问题^[3]。因此，设计具有高结构稳定性和快速离子传输能力的正负极材料，是钠离子电池实用化的核心挑战。

钛酸钠 ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) 作为典型的“零应变”负极材料，其层状结构可容纳钠离子的可逆嵌入/脱出，理论比容量达

【作者简介】龚雨豪（2004-），男，中国重庆人，本科，从事电化学领域研究。

175 mAh/g，且具有优异的循环稳定性^[4]。前期研究表明，煅烧时间显著影响钛酸钠的微观结构：短时间煅烧形成的多孔结构有利于离子扩散，而长时间煅烧导致的结构致密化可能增加传输阻力^[5]。另一方面，层状锰基氧化物 NaMnO₂ 因理论容量高（~280mAh/g）、合成工艺简单，成为正极材料的研究焦点，但其面临 Mn³⁺Jahn-Teller 效应导致的结构塌陷及电子导电性差等问题^[6]。过渡金属掺杂（如 Fe³⁺、Cu²⁺）被证实可通过调节晶格参数、优化电子结构抑制相变，提升材料的循环稳定性^[7]。本研究以钛酸钠为负极，通过控制煅烧时间（5 h、10 h、16 h）调控其孔隙率与晶体结构；以 NaMnO₂ 为正极基质，通过 Fe/Cu 共掺杂（掺杂量分别为 10%、3%、1%）调节晶格畸变程度。结合多尺度表征手段与电化学测试，揭示“结构 - 性能”关联机制，提出基于孔隙率优化的负极设计策略及基于掺杂浓度阈值的正极改性方法，为高性能钠离子电池材料的开发提供新思路。

2 实验部分

2.1 负极材料制备：钛酸钠（Na₂Ti₃O₇）的煅烧时间调控

按 NaOH 与球形偏钛酸（H₂TiO₃）摩尔比 2:3 精确称量原料，置于玛瑙研钵中研磨 60 min，使颗粒尺寸降至 5 μm 并混合均匀。将前驱体转入刚玉坩埚，放入管式炉中，在氩气氛围（流量 50 mL/min）中以 5 °C/s 升温至 800 °C，分别保温 5 h、10 h、16 h，随炉冷却后研磨过 200 目筛，得到钛酸钠样品（记为 NT-5h、NT-10h、NT-16h）^[8]

2.2 正极材料制备：Fe/Cu 共掺杂 NaMnO₂ 的合成

采用共沉淀法制备 Mn 基前驱体：将 2 mol/L 的 MnSO₄ 溶液与 2 mol/L 的 Na₂CO₃ 溶液以 1.2 mL/min 的速率同步滴入 500 mL 去离子水中，同时滴加 0.2 mol/L 氨水调节 pH=8，剧烈搅拌 12 h 后陈化 6 h，离心洗涤（去离子水 × 3，乙醇 × 1）并在 80 °C 干燥 12 h，得到 MnCO₃ 前驱体。将前驱体与 Na₂CO₃、Fe(NO₃)₃ · 9H₂O、Cu(NO₃)₂ · 3H₂O 按化学计量比（Na:Mn:Fe:Cu=1:1-x-y:x:y，x=y=0.1, 0.03, 0.01）混合，研磨 30 min 后转入匣钵，在氧气氛围（流量 100 mL/min）中以 5 °C/s 升温至 500 °C 保温 5 h，再升温至 850 °C 保温 12 h，冷却后研磨过筛，得到掺杂样品 NMC-10、NMC-03、NMC-01，纯相 NaMnO₂ 记为 NMO^[9]。

2.3 电极制备与电池组装

负极浆料：将活性物质（NT-xh）、导电炭黑（Super C65）、羧甲基纤维素钠（CMC）、苯乙烯 - 丁二烯橡胶（SBR）按 70:10:10:10 质量比混合，加入去离子水搅拌 2 h 至均匀，涂覆于铜箔（面密度 1.8 ± 0.1 mg/cm²），100 °C 真空干燥 12 h。

正极浆料：将活性物质（NMO/NMC）、乙炔黑、聚偏氟乙烯（PVDF）按 75:15:10 质量比混合，加入 N- 甲基吡咯烷酮（NMP）超声分散 1 h，涂覆于铝箔（面密度 2.0 ± 0.1 mg/cm²），80 °C 干燥 12 h。在氩气手套箱（H₂O、O₂ 含量 < 0.1 ppm）中组装 CR2025 扣式电池，以金属钠片为负极，玻璃纤维（GF/D, Whatman）为隔膜，电解液为 1.0 M NaPF₆/ 二

甲氧基乙烷（DME，含 5% 氟代碳酸乙烯酯（FEC））。

3 材料表征与性能测试

微观结构：使用场发射扫描电子显微镜（SEM）观察形貌，加速电压 5 kV，分辨率 3 nm。

晶体结构：采用 X 射线衍射仪（XRD）分析，Cu K α 辐射（λ = 0.15418 nm），扫描范围 10° - 80°，步长 0.02°。

电化学测试：新威电池测试系统进行恒流充放电测试，负极电压窗口 0.01-3.0 V，正极 1.5-4.0 V；通过 GITT 技术测量钠离子扩散系数，电流脉冲持续时间 1 h，静置时间 2 h。

4 结果与讨论

4.1 负极材料：煅烧时间对钛酸钠微观结构与电化学性能的影响

4.1.1 微观结构演变规律

SEM 图像显示，NT-5h 呈现松散的花簇状团聚体，由直径 50-100 nm 的不规则颗粒组成，颗粒表面分布大量 20-50 nm 的纳米孔隙；NT-10h 团聚体结构紧凑，颗粒边界清晰，孔隙率降低，出现少量微米级颗粒；NT-16h 形成致密的块状结构，颗粒尺寸增至 2-3，孔隙几乎消失，表面光滑。

XRD 图谱显示，所有样品均为单斜晶系 Na₂Ti₃O₇，(001) 晶面衍射峰强度随煅烧时间延长逐渐增强，半高宽（FWHM）从 0.32°（NT-5h）降至 0.25°（NT-16h），表明晶粒尺寸从 25 nm 增至 40 nm，结晶度提升^[10]。

4.1.2 孔隙率对离子传输动力学的影响

氮气吸附 - 脱附测试显示，NT-5h 的比表面积（45 m²/g）显著高于 NT-10h（22 m²/g）和 NT-16h（8 m²/g），孔径分布集中在 10-30 nm，属于介孔范围；而 NT-16h 的孔径 < 5 nm，以微孔为主。这种孔隙结构差异直接影响钠离子扩散行为：

GITT 测试表明，NT-5h 在 0.5C 倍率下的钠离子扩散系数为 1.2×10^{-10} cm²/s，是 NT-16h (3.5×10^{-11} cm²/s) 的 3.4 倍。结合 SEM 与 XRD 结果，提出“孔隙率 - 扩散动力学”关联假说：短时间煅烧保留的介孔结构提供了高效的离子传输通道，而长时间煅烧导致的微孔化和晶粒粗化增加了离子迁移阻力^[11]。

4.1.3 循环与倍率性能的结构根源

循环性能曲线显示，NT-5h 初始充电比容量 193.31 mA h/g (0.1C)，24 次循环后容量 106.46 mA h/g，200 次循环降至 89.57%，容量保持率 82.7%，衰减速率仅 0.065 mA h/g/ 次。NT-10h 和 NT-16h 初始容量分别为 171.14 mA h/g 和 185.86 mA h/g，但 200 次循环后容量降至 86.33 mA h/g 和 76.66 mA h/g，其中 NT-16h 因结构致密化，容量衰减速率达 0.105 mA h/g/ 次。倍率性能测试（图 4）中，NT-5h 在 1C 倍率下容量 101.64 mA h/g，是 0.1C 时的 53.4%；而 NT-16h 在 1C 下仅 82.79 mA h/g，仅为 0.1C 时的 44.5%。这种差异可归因于介孔结构的“缓冲效应”：在高电流密度下，NT-5h 的短扩散路径有效缓解了浓度极化，而 NT-16h 的微孔结

构导致离子供应不足，引发容量骤降^[12]。

4.2 正极材料：Fe/Cu 共掺杂的协同优化机制

4.2.1 晶体结构与表面形貌的协同调控

XRD 图谱显示，掺杂样品在 $2\theta = 26.5^\circ$ 、 33.2° 处的衍射峰强度随 x 值增大而增强，对应 (003) 和 (104) 晶面，表明掺杂促进了层状结构的有序化。晶格参数计算表明， $x=0.1$ 时 c 轴长度从 4.821 nm 增加至 4.856 nm， Na^+ 层间距扩大，有利于离子脱嵌。SEM 图像显示，未掺杂 NaMnO_2 为不规则块状（粒径 5-10 μm），而掺杂样品呈现定向生长的棒状结构（长度 2-3，直径 500 nm），形成“花簇状”团聚体，比表面积从 8.7 m²/g 提升至 15.2 m²/g，增加了电解液接触面积。

4.2.2 电化学性能的梯度优化规律

0.1C 循环测试中， $\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$ 首次放电容量 118.5 mAh/g，30 次循环后保持 112.3 mAh/g（保持率 94.8%），优于未掺杂样品（85.3%）。高倍率测试（图 8）显示，1C 下掺杂样品容量为 82.7 mAh/g，较未掺杂样品（65.4 mAh/g）提升 26.4%，归因于 Fe^{3+} 的八面体配位稳定了层状结构，抑制了充放电过程中的相变； Cu^{2+} 的 d⁹ 电子构型增强了材料的导电性，降低了极化。值得注意的是， $x=0.01$ 样品性能下降，可能是掺杂浓度不足导致结构调控不显著，验证了“掺杂阈值效应”——即只有当掺杂离子浓度超过临界值（约 3%）时，才能形成有效的固溶体结构^[13]。

4.2.3 负极材料“颗粒融合 - 孔隙演变”动力学模型

基于 SEM 与 BET 数据，提出煅烧时间影响钛酸钠结构的三阶段模型：

阶段 I (0-5h)：多孔骨架形成期： NaOH 熔融促进钛酸分解，生成的 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 初级颗粒通过物理吸附团聚，残留的游离水在煅烧过程中挥发，形成大量纳米孔（孔径 < 50 nm），此时材料以“缺陷主导型储钠”为主，缺陷位提供额外吸附位点。

阶段 II (5-10h)：晶界扩散与烧结期：高温下颗粒表面原子开始迁移，相邻颗粒通过“烧结颈”连接，纳米孔逐渐闭合，形成介孔（50 nm-2）结构，储钠机制转变为“孔道扩散 - 表面吸附”协同作用，离子传输路径优化。

阶段 III (10-16h)：致密化与晶型稳定期：长时间煅烧导致颗粒进一步融合，介孔消失，形成致密单晶结构， Na^+ 扩散路径显著延长，此时储钠性能由晶体本征导电性主导，倍率性能下降。

该模型为钛酸钠负极的煅烧工艺优化提供了理论指导，建议在实际生产中采用“分段保温 + 快速冷却”工艺，在 5-10h 区间内调控孔隙率与结晶度的平衡。

4.3 正极材料“位点竞争 - 电子离域”协同机制

通过掺杂元素的离子半径（ Mn^{3+} : 0.0645 nm, Fe^{3+} : 0.0645 nm, Cu^{2+} : 0.073 nm）与配位数分析，提出 Fe/Cu 共掺杂的双重作用机制：

晶格应力调控： Fe^{3+} 与 Mn^{3+} 半径相近，优先占据八面体间隙位（Mn 位点），形成 $[\text{FeO}_6]$ 八面体，稳定层状结构；

Cu^{2+} 因半径稍大，倾向于占据 Na^+ 层间的四面体间隙位，撑开层间距（ $\Delta d=0.013$ nm），降低 Na^+ 脱嵌能垒（从 0.82 eV 降至 0.65 eV）^[18]。

电子离域化效应： Cu^{2+} 的 $3d^14s^1$ 电子结构在层间形成导电通道，增强材料的电子导电性（电导率从 10^{-5} S/cm 提升至 10^{-3} S/cm）； Fe^{3+} 的 d⁵ 半满状态抑制了 Mn^{3+} 的 Jahn-Teller 畸变，减少循环过程中的结构坍塌^[19]。该机制解释了 $x=0.1$ 样品性能最优的原因——当 Fe/Cu 摩尔比为 1:1 时，两种离子在晶格中的分布达到“应力 - 电导”平衡，形成协同优化效应。

5 结论

本研究通过控制煅烧时间与梯度掺杂，成功制备了高性能钠离子电池正负极材料：**5h** 煅烧的钛酸钠负极因“多孔 - 结晶”平衡结构展现出优异的循环稳定性（200 次循环容量保持率 84.1%）和倍率性能（2C 下 101.64 mAh/g；**Fe/Cu 共掺杂的 $\text{NaMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_2$ 正极**通过“晶格应力调控 - 电子离域化”协同效应，将 0.1C 循环保持率提升至 94.8%）。研究提出的“颗粒融合 - 孔隙演变”动力学模型与“位点竞争 - 电子离域”协同机制，为钠离子电池材料的结构设计提供了新视角。团队在实验中克服了前驱体混合均匀性、煅烧气氛控制等关键技术难点，累计完成 20 组电池测试，获取有效数据 300 余条，为后续研究奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] Arora P, Zhang Z. Chemistry of electrolytes for lithium-based batteries J. Chemical Reviews, 2004, 104(10): 4419-4462.
- [2] Liu J, Wu X, Amatucci G G. Sodium-ion batteries: present and future J. Advanced Materials, 2018, 30(45): 1800152.
- [3] Deng Y, Wang X, Li Y, et al. Sodium-ion battery cathode materials: challenges and opportunities J. Chemical Society Reviews, 2019, 48(11): 3033-3070.
- [4] Zhang Y, Li H, Wang X, et al. Effect of calcination time on the structure and electrochemical performance of $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ for sodium-ion batteries J. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 833: 154972.
- [5] Liu S, Chen X, Wu X, et al. Morphology control of sodium titanate nanowires for highperformance sodium-ion batteries J. Electrochimica Acta, 2019, 316: 860-867.
- [6] Li Z, Wang X, Liu J, et al. Mn-based oxides for sodium-ion battery cathodes: progress and perspectives J. Advanced Energy Materials, 2020, 10(12): 1903486.
- [7] Zhao L, Sun X, Li Y, et al. Doping engineering of NaMnO_2 for improved sodium storage performance J. Journal of Power Sources, 2021, 492: 228833.
- [8] 王强, 李娜, 张宇. 煅烧工艺对钛酸钠纳米结构的影响 J. 无机材料学报, 2020, 35 (5): a) 568-574.
- [9] 陈晨, 刘畅, 吴伟. 过渡金属掺杂对层状 NaMnO_2 电化学性能的影响 J. 电池, 2021, 51 a)(3): 241-245.

A Brief Discussion on the Efficiency of Time Nodes in Determining Total Moisture in Coal

Libo Guo¹ Bin Wang² Zichuan Zheng³

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¹ 王斌² 郑子川³

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^[1]。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^[2]。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 引言：实验部分

2.1 实验材料和仪器

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) °C 的空气干燥箱中，在鼓风干燥下，烟煤干燥 2 小时。

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 1 g/cm²；否则会导致煤样受热不均，影响测定结果的精确度^[3]。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）

【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。

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^[3]。

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	2.5h 称重	3.0h 称重	3.5h 称重	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
			/g	/g	/g	/g	g				
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/cm²，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/cm²。

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)。

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	2.0-2.5h质量变化	2.5-3.0h质量变化	3.0-3.5h质量变化	3.5-4.0h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
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		/	995.8	994.8	994.9	994.8	/	1	-0.1	0.1
20	10-2	19.4	/	994.2	993.6	993.7	993.7	/	0.6	-0.1	0.0
21	11-1		/	971.8	971.6	971.7	971.9	/	0.2	-0.1	-0.2
22	11-2	23.1	/	972.7	972.6	972.4	972.3	/	0.1	0.2	0.1
23	12-1		/	962.2	960.9	960.8	960.9	/	1.3	0.1	-0.1
24	12-2	24.2	/	975.9	975	974.7	975	/	0.9	0.3	-0.3
25	13-1		/	960.8	959.2	958.7	958.6	/	1.6	0.5	0.1
26	13-2	23.4	/	978.6	976.7	976.3	976.2	/	1.9	0.4	0.1
27	14-1		/	961.3	959.4	957.7	957.4	/	1.9	1.7	0.3
28	14-2	25.4	/	967.8	965.6	963.8	963.5	/	2.2	1.8	0.3
29	15-1		/	989.1	988.1	987.8	987.8	/	1	0.3	0.0
30	15-2	26.5	/	978.3	977.8	977.9	977.8	/	0.5	-0.1	0.1

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/cm²。

4 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：

序号	样品盘面积 / m ²	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。

本文旨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的开发与应用前景[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.

The relevant application of diethyl diphosphonic acid in organic synthesis is expounded

Wenli Ma

Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Diethyl malonate (DEMA) is a pivotal active methylene compound in organic synthesis. With the continuous advancement of the chemical industry, organic synthesis has become increasingly vital for producing chemical products. As a versatile chemical product with extensive applications in pharmaceuticals, fragrances, and polymer monomers, DEMA features a methylene group activated by diester groups, stable carbon anions, and reactivity with various electrophilic reagents. This enables controlled product formation including monocarboxylic acids, dicarboxylic acids, unsaturated carboxylic acids, and cyclic carboxylic acids, serving as a fundamental building block for multifunctional molecules. This study investigates the core reaction mechanisms of DEMA synthesis, explores its practical applications in organic synthesis, and outlines future development directions to provide valuable references for industry professionals.

Keywords

diethyl malonate; organic synthesis; related applications

丙二酸二乙酯在有机合成中的相关运用阐述

马文丽

河北农业大学，中国·河北 保定 071000

摘要

丙二酸二乙酯是有机合成中核心的活泼亚甲基化合物。随着化学工业不断发展，有机生产在合成化工产品作用方面也越来越重要，而丙二酸二乙酯是一种在有机合成上具有广泛用途的化工产品，广泛应用于药物、香料、高分子单体等领域的合成。丙二酸二乙酯亚甲基受双酯基活化，碳负离子稳定，易与各类亲电试剂反应，产物结构可控，可合成一元羧酸、二元羧酸、不饱和羧酸、环状羧酸，是多官能团分子的构建单元。开展本文的研究工作，分析丙二酸二乙酯合成法的核心反应机制，探究其在有机合成中的具体应用情况，以及未来的发展，以供相关人员参考。

关键词

丙二酸二乙酯；有机合成；相关运用

1 引言

丙二酸二乙酯简称丙二酸酯，又称胡萝卜酸乙酯，核心在于其结构中的两个关键特征：活性亚甲基和协同脱羧。通过碳催化生成稳定的碳负离子，进而与卤代烃、醛酮等发生亲核取代或加成反应，最终经水解脱羧制备各类羧酸衍生物。近些年来，随着国内外对于丙二酸二乙酯下游产品的开发利用进一步深入，对丙二酸二乙酯的需求也急剧增加。通过加强对丙二酸二乙酯在有机合成应用中的研究，掌握各种应用情况，可以为化工产业的发展提供助力。

2 丙二酸二乙酯有机合成的核心反应机制

丙二酸二乙酯在有机合成中的应用十分重要并且具有

多功能，结构中的两个关键特征活性亚甲基和协同脱羧。协同亚甲基指的是受到两个吸电子的羧基影响，亚甲基上的氢原子具有显著的酸性，使它容易在强碱作用下形成稳定的碳负离子^[1]。衍生物在加热条件下容易发生水解和脱羧反应，最终生成取代乙酸，这是合成羧酸的重要方法。丙二酸二乙酯的核心应用主要围绕烷基化——水解——脱羧这一经典系列。详见表 1 所示

表 1 丙二酸二乙酯在有机合成中的反应步骤

序号	步骤	化学反应式
1	形成碳负离子	$\text{CH}_2(\text{COOEt})_2 + \text{B}^- \rightarrow \text{CH}(\text{COOEt})_2^+ \text{HB}$
2	烷基化	$\text{CH}(\text{COOEt})_2^+ \text{R-X} \rightarrow \text{R-CH}(\text{COOEt})_2$
3	水解与脱羧	水解： $\text{R-CH}(\text{COOEt})_2 + \text{OH}^-/\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R-CH}(\text{COOH})_2 + 2\text{EtOH}$ 脱羧： $\text{R-CH}(\text{COOH})_2 \rightarrow \text{R-CH}_2\text{COOH} + \text{CO}_2 \uparrow$

【作者简介】马文丽（2004-），女，中国河北沧州人，本科，从事制药工程和精细化工研究。

3 丙二酸二乙酯在有机合成中的相关运用

3.1 合成取代乙酸

丙二酸二乙酯合成法在制备取代乙酸中的应用十分广泛，尤其是用于制备单取代和双取代乙酸。首先制备丙二酸二乙酯碳负离子。选择的试剂有丙二酸二乙酯、乙醇钠、无水乙醇。在干燥的三颈烧瓶中加入无水乙醇通入氮气保护，缓慢加入金属钠，形成无色透明的乙醇钠—乙醇溶液。降温至0~5℃，缓慢滴加丙二酸二乙酯。完成以后室温搅拌30~60分钟，直至溶液变成淡黄色透明液体。其次，亲核取代引入取代基R。保持碳负离子溶液在0~5℃缓慢滴加苄氯，滴加完成以后升温至回流，回流反应4~6小时。反应结束后冷却至室温加入乙醇钠，用乙酸乙醇萃取有机相。合并有机相，使用饱和食盐水洗涤，无水硫酸钠干燥，减去蒸馏除去溶剂，得到苄基丙二酸二乙酯。然后进行酯基水解。在苄基丙二酸二乙酯中加入浓氢氧化钠溶液。监测水解进度，取少量的反应液加入稀盐酸酸化。冷却至室温，使用浓盐酸缓慢酸化析出大量白色固体，为苄基丙二酸。使用冰水洗涤干燥后得到二羧酸中间体。最后，干燥后的苄基丙氨酸与蒸馏装置结合，固体融化释放气泡。冷却后烧瓶中残留的淡黄色液体即为粗苯乙酸。经过减压蒸馏或者重结晶纯化，可以得到白色针状晶体苯乙酸。该方法应用中可通过选择不同卤代烃灵魂的引入芳基、烷基、脂环基，从而合成结构多样的取代乙酸。反应条件温和，对设备的要求低^[2]。

3.2 合成环状化合物

当二乙酯合成环状化合物，利用其活性亚甲基与适当的双官能团氢键试剂反应形成分子内或分子间的关环。主要用于构建三元、四元、五元、六元碳环以及杂环。合成三元环羧基中，选择的亲电试剂为1,2-二卤乙烷。首先，第一次烷基化，丙二酸二乙酯碳负离子进攻氯甲基环氧乙烷的位阻较小的环氧碳，开环生成一个带有氯原子和羟基的中间体。其次进行官能团活化，将中间的羟基转化为更好的离去基团。然后进行分子内烷基化：分子内的碳负离子进攻酰氨基所在的碳原子，形成环丙烷骨架。最后，环状中间体在酸性或者碱性条件下水解，由酯基转变为羧基生成环丙基丙二酸，加热脱羧得到环丙烷羧酸。

合成四元环及以上使用标准的1,n-二卤代烷可以有效地构建更大的环。首先进行双烷基化，得到双丙二酸化合物。第二次烷基化，上次的产物在非常强的碱作用下，选择性地夺取其中一个酸性更强的亚甲基氢生成双碳负离子。它会在分子内进攻同一分子中另一个丙二酸酯单元的亚甲基，发生烷基化反应，从而实现关环^[3]。关环后的产物是一个桥连的环状四酯，经过水解和双脱羧后得到最终的环状羧酸。合成四元环及以上的化学步骤详见表2所示

表2 合成四元环及以上的化学步骤

序号	步骤	化学反应式
1	双烷基化	$\text{CH}_2(\text{COOEt})_2 + 2\text{NaOEt} \rightarrow \text{Na}_2\text{CH}(\text{COOEt})_2$ $\text{Na}_2\text{CH}(\text{COOEt})_2 + \text{Br}-(\text{CH}_2)_3-$ $\text{Br} \rightarrow (\text{EtOOCC}[(\text{CH}_2)_3\text{C}(\text{COOEt})_2])$
2	第二次烷基化与关环	$(\text{EtOOCC}[(\text{CH}_2)_3\text{C}(\text{COOEt})_2]) \rightarrow [\text{环状中间体}]$
3	水解脱羧	$[\text{环状中间体}] \rightarrow \text{H}_2\text{O}, \text{OH}^- \rightarrow \Delta \rightarrow \text{环戊烷乙酸(或更高同系物)}$

此外，在杂环合成中也能得到一定应用。丙二酸二乙酯是合成许多重要杂环，特别是含嘧啶环结构药物的关键前提的物质。最典型的是巴比妥类药物的合成。核心结构是巴比妥酸。丙二酸二乙酯与脲在醇钠催化下发生缩合反应，生成巴比妥酸。通过使用取代的脲，例如烷基脲，或者先将丙二酸二乙酯烷基化再与脲反应，可以合成一系列具有镇静催眠作用的巴比妥的药物。

合成大环羧酸指的是七元环及以上，可选择1,6-二卤己烷、1,7-二卤庚烷等长链二卤代烃。长链二卤代烃的碳链容易弯曲，碳负离子更易与其他分子的卤原子发生分子间反应生成链状二聚体。针对这一难点可使用高稀释法。将二卤代烃缓慢地滴入极稀的丙二酸二乙酯碳负离子溶液中，降低分子间碰撞的概率，从而促进分子内关环。例如在合成环戊烷羧基时，丙二酸二乙酯在无水乙醇中与乙酸钠发生反应生成碳负离子，缓慢滴加1,4-二溴丁烷。室温搅拌2~3小时完成分子内关环，生成环戊基丙氨酸二乙酯，加入稀硝酸回流水解，得到环戊基丙氨酸。加热至120℃脱羧，蒸馏纯化后得到环戊烷羧酸。

该方法的优势在于可通过调整二卤代烃的链长精准控制环大小，且能通过先烷基化再关环引入取代基，灵活性高。该方法是有机合成中构建环状羧酸骨架的经典手段，在医药、精细化工领域具有重要应用。

3.3 合成酮类

丙二酸二乙酯先通过酯化转化与脱羧制备多碳羧酸，再将羧酸或其衍生物通过亲和取代反应转化为酮，本质是利用丙二酸二乙酯的碳链增长功能，构建酮的碳骨架。首先，丙二酸二乙酯生成亲和性的碳负离子，进而与卤代烃发生取代反应，引入烷基实现碳链增长。其次，进行水解脱羧反应。烷基化的丙二酸二乙酯在酸性或者碱性条件下，水解酯基转化为羧基生成取代丙二酸，丙二酸的结构不稳定，受热容易脱羧，最终生成单羧酸^[4]。羧酸需要先转化为高活性酰基供体，再与有机金属试剂或者酮烯醇负离子发生亲核取代反应，生成酮。其中酰氯与有机镉试剂反应是制备酮的经典方法。两者反应时，有机镉试剂的亲核性适中，仅攻击酰氯的酰基碳生成酮，是制备对称或者不对称酮的高效方法。羧酸

与氯化钠试剂反应羧基转化为碱基，提高碱基的氢碱性，便于后续亲核攻击。需要注意的是，有机镉试剂需无水制备与使用，它遇水会分解为 Cd(OH)₂，失去反应活性。

例如合成 2- 戊酮时，可通过丙二酸二乙酯引入乙基再转化为酮。先将丙二酸二乙酯与乙醇钠反应生成碳负离子。再与溴乙酸反应生成乙基丙二酸二乙酯。经过碱性水解酸化后加热脱羧生成丁酸。丁酸与亚硫酰氯发生反应生成丁酰氯。再与二乙基镉在低温下反应生成 2- 戊酮。丙二酸二乙酯的烷氨基化反应选择性高，可精准的构建同的碳链，而且脱色反应条件温和，仅需要加热即可，副产物比较少。

4 丙二酸二乙酯在现代合成化学中的应用与发展

4.1 新材料和功能化的应用

丙二酸二乙酯与异氰酸酯反应可形成动态共价化学酰胺键，基于此开发聚氨酯类粘合剂。在高于 120℃时，通过可控的脱羧反应实现热触发解聚，使粘合层分离，且不释放异氰酸酯^[5]。这种可逆黏合特性对设计可回收可修复的材料至关重要。丙二酸二乙酯也可以参与金属有机框架的构建中，其活性亚甲基和酯基可以为合成修饰提供位点，有效调控金属有机框架的孔径表面性质以及功能。在气体储存、催化等领域有着一定的应用潜力。

4.2 工业生产创新

随着化工工艺水平的不断发展，在丙二酸二乙酯生产方面也在持续优化。目前国内广泛应用氯化酯化法，以氯乙酸为起始原料，经中和、氯化、水解、酯化等一系列步骤完

成制备。此外，还包括氰乙酸钠法、催化羧基化法等一些工艺，在生产丙二酸二乙酯中也发挥着重要作用，目前，各生产方法正朝着更经济、绿色、环保、安全的合成路径发展。

4.3 未来发展方向

丙二酸二乙酯在化学合成中的应用广泛，未来发展中会朝着绿色可持续方面发展，开发更加环境友好的合成路线，减少三废排放。同时向下游高附加值精细化学品和专用化学品进行延伸。也结合了过程强化、连续流化学等一些新技术，提高生产效率和安全性。有效应对现阶段面临的一些挑战，抓住机遇实现可持续发展。

5 结语

综上所述，丙二酸二乙酯因其特殊的化学性质在有机合成方面的应用十分广泛。具体应用中，可根据丙二酸二乙酯的特点，选择合适的工艺，有效生成取代乙酸、环状化合物和酮类，满足化学生产的要求。而且在未来发展中，丙氨酸二乙酯会朝着更加绿色高附加值产品的方向有效发展，融合新技术加入新材料，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 龙德清,唐传球,程玉龙.丙二酸二乙酯在有机合成中的应用研究[J].汉江师范学院学报,2023,43(3):27-31.
- [2] 陈静,王刚.杂多酸催化合成丙二酸二乙酯[J].化学与黏合.2001,(2).
- [3] 卫涛涛,喻宗沅,吕士杰.相转移催化羧基化合成丙二酸二乙酯的研究[J].合成化学,1997,(4).389-393.
- [4] 潘鹤林,田恒水,黄振华,等.多用途的丙二酸二乙酯[J].化工进展,1997,(3).35-38,53.

Study on migration and transformation of emerging pollutants in water environment and control technology

Xiaozheng Li

Dalian Detai Water Environment Co., Ltd., Dongfeng, Jilin, 116600, China

Abstract

With the acceleration of industrialization and urbanization, the accumulation of emerging pollutants in aquatic environments and their ecological and health risks have increasingly drawn attention. This paper reviews the migration and transformation patterns of typical emerging pollutants such as pharmaceutical residues, personal care products, endocrine disruptors, and microplastics in water systems. It analyzes their distribution and key processes including adsorption, degradation, and bioaccumulation at the water-depositment-bio interface, summarizing relevant influencing mechanisms. Drawing on the latest domestic and international research, this review focuses on evaluating the effectiveness and limitations of physical, chemical, and biological control technologies in various water bodies and complex environments. The study emphasizes that precise analysis of pollutant migration pathways and transformation products, combined with the development of a multi-dimensional synergistic control technology system, is crucial for enhancing water environmental safety and risk prevention capabilities. Finally, it outlines future research directions to provide theoretical and technical support for emerging pollutant management and watershed ecological protection.

Keywords

emerging pollutants; water environment; migration and transformation; control technology; risk prevention and control

水环境中新兴污染物的迁移转化规律及控制技术研究

李晓征

大连德泰水务环境有限公司，中国·吉林 东丰 116600

摘要

随着工业化与城市化进程加速，新兴污染物在水环境中的累积及其生态与健康风险日益引发关注。本文梳理了医药残留、个人护理品、内分泌干扰物、微塑料等典型新兴污染物在水环境中的迁移转化规律，分析其在水—沉积物—生物界面的分布及吸附、降解、生物富集等关键过程，总结了相关影响机制。结合最新国内外研究，重点评述了物理、化学和生物控制技术在不同水体和复杂环境中的应用成效及局限。研究认为，精准解析污染物迁移路径与转化产物、构建多元协同的控制技术体系，是提升水环境安全与风险防控水平的核心。最后，展望了未来研究方向，为新兴污染物治理和流域生态保护提供理论与技术支撑。

关键词

新兴污染物；水环境；迁移转化；控制技术；风险防控

1 引言

近年来，抗生素、激素、个人护理品、农药残留、微塑料等新兴污染物因在城市废水、工业排放及农业面源中的广泛存在，逐步成为水环境领域关注的研究热点。这类污染物分子结构复杂、来源多样、环境行为独特，难以被传统水处理工艺有效去除，具有低浓度、高毒性、易富集、迁移距离远等特征。新兴污染物在水体中迁移转化过程受理化性质、水体理化参数、生物活动及人类活动影响，导致其分布与归趋高度不确定。部分污染物经生物体吸收、食物链传递

后产生内分泌干扰、抗药性增强等生态与健康风险。因此，系统揭示新兴污染物在水环境中的迁移转化机制，开发高效、绿色、经济的控制与修复技术，成为提升我国水生态环境质量和流域管理水平的关键。本文从新兴污染物的来源特征、迁移转化主导机制、主流控制技术及前沿方向等维度，开展理论梳理与应用分析，旨在为新兴污染物风险防控与水生态安全治理提供参考。

2 新兴污染物的类型与环境行为特征

2.1 新兴污染物的主要类型与来源

新兴污染物泛指近年来在环境监测与生态健康风险领域引发关注、但未被现行标准严格管控的有机和无机污染物。典型类型包括药物与抗生素残留、内分泌干扰物、个人

【作者简介】李晓征（1987-），中国吉林东丰人，本科，工程师，从事无机化学及水处理研究。

护理用品、阻燃剂、塑化剂、农药及其降解产物、微塑料等。主要来源为城市污水处理厂尾水、医疗废水、畜禽养殖废水、农业面源和固废渗滤液等。由于生活方式变化和化工新材料的大量应用，相关污染物在环境中分布广、检出率高、成分复杂，极易进入江河湖库等水体，形成难以溯源和防控的环境问题。

2.2 理化性质与环境持久性

新兴污染物普遍具有低浓度高毒性、亲脂性强、易被生物吸附富集等特点。部分污染物如抗生素、雌激素等能在微量水平下干扰生物内分泌系统，影响生殖发育与种群健康。某些物质结构稳定、难降解，在环境中迁移距离远、持久性强。微塑料等新型颗粒污染物，因表面积大、吸附性能突出，常作为“污染物载体”促进重金属、有机污染物的迁移与生物摄入风险加剧。复杂的理化性质决定了其环境归趋、暴露风险及控制难度。

2.3 环境行为的空间异质性与生物效应

新兴污染物在水环境中的分布与迁移表现出显著的空间与时间异质性。这一分布格局不仅受水体理化参数如水温、pH、溶解氧等的影响，还与流域水动力条件（如流速、分层、沉积）和生物群落结构密切相关。外源输入（如城市污水、农业径流等）不断改变污染物的输入强度和类型，进一步加剧了其在不同介质间的迁移转化复杂性。在水—沉积物—生物界面，部分新兴污染物可通过吸附、解吸、降解、富集等过程不断迁移，并在食物链中逐级放大与转化，最终使二级消费者乃至人类面临潜在健康风险。此外，环境暴露风险不仅取决于单一污染物的毒性，还涉及复合污染下物质共存、相互作用、转化产物不确定性等多重协同效应，这增加了水环境风险识别与防控的难度，对污染物监测与生态健康保护提出了更高要求。

3 水环境中新兴污染物的迁移转化规律

3.1 吸附与解吸过程

新兴污染物在水环境中的迁移首要表现为吸附与解吸过程，尤以水—沉积物界面为核心。土壤颗粒、悬浮物和底泥因其多孔结构和巨大的比表面积，成为有机污染物的重要汇聚与缓释介质。吸附过程受污染物分子结构、极性、粒径及介质的有机质含量、粒径分布、pH 等理化属性共同调控。部分新兴污染物如药物残留、农药、激素等，在沉积物中的吸附能力较强，形成环境暂存库。剧烈水动力扰动、高温、强光等条件下易诱发污染物解吸，致使沉积物中累积的污染物重新释放至水体，形成二次污染。近年来，研究表明微塑料作为“新型污染载体”，不仅自身迁移能力强，还能协同增强对药物残留、重金属等多种污染物的吸附与携带，显著改变传统污染物的环境行为与迁移路径，对环境风险评估提出了更高要求。

3.2 化学降解与生物转化

新兴污染物在水体中的迁移转化还高度依赖于化学降

解与生物转化过程。化学降解通常包括光解、水解和氧化还原等，受水体太阳辐射强度、溶解氧、有机质含量及温度等环境因素影响，决定了污染物的降解速率及其转化产物。部分污染物如内分泌干扰物、抗生素等在自然条件下降解缓慢，常形成中间产物甚至高毒性次生产物，加大了环境风险。生物转化是指微生物、藻类等水生生物通过吸收、代谢作用，将污染物结构转变为低毒或无毒物质。微生物降解是污水处理及天然水体自净的关键环节，不同微生物对污染物的专一性及降解效率差异明显。当前，化学—生物耦合处理策略被广泛研究与应用，有效提升了对复杂污染体系的去除能力，成为控制新兴污染物环境风险的重要方向。

3.3 生物富集与食物链传递

新兴污染物在水环境中还面临生物富集与食物链传递的生态风险。部分污染物因其亲脂性和环境持久性，易被水生生物如藻类、底栖动物、鱼类等吸收，在体内积累并逐级沿食物链传递，形成生物放大效应。典型如抗生素、雌激素、微塑料等，在水体各营养级间呈现明显的富集趋势。生物富集系数（BCF）和生物放大系数（BMF）成为评价其生态风险的重要定量指标。污染物的迁移与富集过程不仅受水体理化状态、生物代谢水平、摄食行为影响，还与生态系统结构及生物链关系密切相关。有效防控新兴污染物的链式扩散，需综合考量水环境动态性与生态过程的复杂性，加强多环节、多介质的协同治理与风险监测。

4 新兴污染物的检测、识别与迁移机制分析

4.1 检测技术与新型分析方法

新兴污染物因其种类繁多、结构复杂且环境浓度极低，对检测与分析技术提出了极高要求。主流分析方法包括液相色谱-质谱联用（LC-MS/MS）、气相色谱-质谱联用（GC-MS）、高效液相色谱（HPLC）、超高效色谱（UPLC）及同步辐射分析等。这些技术可实现对多种有机污染物、痕量药物残留及复杂降解产物的高灵敏、高分辨检测。近年来，痕量富集、免疫分析和纳米传感器等新兴技术不断成熟，大幅提升了超低浓度和复杂基质条件下的检测能力。多源数据融合技术，通过对多平台、多区域采集数据进行集成分析，提升了污染物溯源的精确性。分子标志物法和同位素示踪等新型手段，为污染物的迁移路径追踪和环境行为判别提供了可靠支撑，推动了新兴污染物研究由定性监测向定量机制解析转变。

4.2 分布规律与归趋判别

揭示新兴污染物在不同水环境介质中的分布规律，是理解其迁移行为与风险暴露的基础。通过空间高分辨率采样、组分谱图与多元统计分析，可以精细描述新兴污染物在地表水、地下水、雨洪径流及沉积物等环境介质中的时空分布特征。环境归趋研究综合水动力模拟、同位素示踪与定量风险评估方法，识别污染物迁移的主控因子、归趋趋势及高风险敏感区。例如，药物残留和内分泌干扰物在城市下游水

体中呈现富集，微塑料在水动力弱、颗粒物易沉积区域聚集。多环节动态监测与大数据分析可实时更新污染物分布态势，有助于快速锁定污染热点、环境敏感区及其变化趋势，为后续风险评估与防控策略优化提供科学数据支持。

4.3 迁移转化机制的耦合效应

实际水环境中新兴污染物的迁移转化通常受到多种物理、化学和生物过程耦合作用。污染物在水—沉积物—生物三相界面可能经历吸附/解吸、溶解/再沉积、光化学降解、生物代谢等多过程联动，不同污染物及其降解产物的迁移速率、环境归趋与生物效应存在显著差异。例如，某些抗生素在强光照或高温下易光解，部分农药通过微生物作用转化为更易迁移的产物。多级食物链和复合污染环境进一步加剧了迁移机制的复杂性。科学揭示各过程的协同关系、主控环节及其调控机制，是提升风险评估、过程调控与治理技术研发水平的理论基础，对未来新兴污染物精准管控具有重要指导价值。

5 水环境中新兴污染物的控制技术

5.1 物理拦截与强化分离技术

物理拦截与分离是当前新兴污染物控制的重要基础技术路径。膜分离工艺（如超滤、纳滤、反渗透）因其高效截留微量有机污染物、药物残留、微塑料等，在污水处理厂深度处理与饮用水源安全保障中获得广泛应用。膜法可通过筛分效应和分子排斥，针对性去除不同粒径、结构和极性的污染物。然而，膜材料长期运行易发生污染与堵塞，影响分离效率，并带来高能耗和膜浓缩液处理难题。吸附技术以活性炭、纳米材料、多孔陶瓷等为载体，通过表面作用或化学键合作用吸附污染物，其高效性和可再生利用特性使其在水厂、应急处置和流域治理中大放异彩。材料协同复合和功能化改性成为提升吸附性能的关键方向。多级组合工艺（如沉淀—吸附—膜分离）和移动式装备为水环境污染突发应急和流域多点布控提供了灵活高效的解决方案，有助于提升新兴污染物的广谱拦截与安全保障能力。

5.2 化学氧化与高级氧化技术

化学氧化，尤其是高级氧化技术（AOPs），通过强氧化剂（臭氧、过氧化氢等）、紫外光照射、光催化等手段产生高活性自由基，实现新兴有机污染物的彻底分解与矿化。AOPs能够高效破坏分子结构，消除药物、农药、激素等持久性污染物，提升水体净化水平。在实际工程中，单一高级氧化法易受水体有机质干扰、能耗高、副产物生成等因素影响，需加强过程优化与风险评估。联合工艺（如Fenton反应与生物滤池、光催化与膜分离耦合）已成为提升去除效率

与控制副产物的有效途径。工程应用中还需关注氧化剂用量、反应条件控制与二次污染防控，推动技术集成与低碳高效发展。AOPs在复杂水体和多类型污染物协同去除中具有独特优势，是新兴污染物深度治理不可或缺的核心技术。

5.3 生物修复与生态治理策略

生物修复与生态治理以生态友好和可持续为导向，成为新兴污染物治理的重要绿色技术。人工湿地系统利用高等植物、微生物、底泥等协同作用，有效吸收和降解药物、内分泌干扰物及部分难降解有机污染物，提升水体自净能力。微生物强化（菌剂投加、基因工程菌构建等）通过定向强化降解功能菌种，实现对特定污染物的高效生物降解。藻类处理、生态浮床和河道生态修复等方法，结合水动力调控和系统监测，可实现污染削减与生态修复的双重目标。当前，生物修复正向工程化、规模化与智能化发展，注重与水动力学、系统监测等技术协同集成，提升不同类型污染物在复杂环境下的控制效率和过程稳定性。生态治理在保障水生态健康、维护生物多样性和支撑流域可持续管理中展现出独特优势，是未来新兴污染物治理技术体系的重要组成部分。

6 结语

水环境中新兴污染物的迁移转化规律及其风险控制已成为生态环境领域的重要研究方向。当前，污染物类型日益多样，迁移过程高度复杂，治理难度不断上升。综合分析表明，精准识别污染物来源与迁移机制，是提升风险预警与防控能力的前提；多元协同的物理、化学、生物等控制技术集成应用，是提升治理效率与生态安全水平的关键。未来应加强多过程、多学科交叉融合研究，创新环境监测、智能感知与绿色修复技术，为新兴污染物的全过程管理和流域生态保护提供科学支撑和决策依据，助力我国水环境质量持续提升与生态文明建设目标实现。

参考文献

- [1] 潘子冬.新兴污染物对污水深度处理的生命周期评价结果不确定性的影响[D].哈尔滨工业大学,2022.
- [2] 李尚禹.基于分子特征和机器学习方法的新兴污染物性质预测研究[D].天津大学,2022.
- [3] 张梦阳.珠三角区域饮用水新兴污染物检测和处理技术[D].清华大学,2017.
- [4] 鲍金铭,王文亮,胡云霞.面向新兴污染物去除的纳滤膜研究进展[J].膜科学与技术,2024,44(06):169-177.
- [5] 吕琛山,曹艺璇,穆晓茜,等.地表水中34种新兴污染物的超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱快速筛查[J].法医学杂志,2024,40(01):30-36.

Help to promote the application of domestic PCS control system for oil and gas pipelines and give new energy to the system

Yuyao Zhang¹ Rui Chen² Chufan Zheng³

1. National Pipeline Group Northern Pipeline Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

2. Beijing Oil and Gas Transmission Branch, Beijing, 102400, China

3. National Pipeline Group Northern Pipeline Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

This paper explores the promotion and application of domestically developed PCS control systems for oil and gas pipelines, enhancing system capabilities through technological and managerial innovations. The study first analyzes current challenges and requirements in pipeline control systems, then outlines the advantages and market potential of localized PCS solutions. Subsequently, it details strategies to drive widespread adoption via technological breakthroughs, standardization initiatives, and industry-academia-research collaboration, while improving system performance and reliability. Furthermore, the paper investigates how modern technologies like big data analytics and cloud computing can inject new vitality into PCS systems, enabling intelligent and adaptive upgrades. Through this research, we aim to provide valuable insights for advancing domestic pipeline control systems and elevating technical standards in the industry.

Keywords

oil and gas pipelines; PCS control systems; promotion and application; technological innovation; intelligentization

助力油气管道国产化 PCS 控制系统推广应用为系统赋新能

张禹尧¹ 陈锐² 郑楚凡³

1. 国家管网集团北方管道有限责任公司，中国·河北廊坊 065000

2. 北京输油气分公司，中国·北京 102400

3. 国家管网集团北方管道有限责任公司，中国·河北廊坊 065000

摘要

本文致力于探讨油气管道国产化PCS控制系统的推广应用，并通过一系列技术和管理创新手段为系统赋予新能力。研究首先分析了当前油气管道控制系统面临的挑战与需求，进而提出了国产化PCS控制系统的优点与应用前景。接着，文章详细阐述了如何通过技术创新、标准化建设以及产学研用合作等方式，推动系统的广泛应用，并提升其性能与可靠性。此外，本文还探讨了如何借助大数据分析、云计算等现代技术手段，为PCS控制系统注入新的活力，实现智能化、自适应化的升级。通过本文的研究，旨在为推动油气管道控制系统的国产化进程和提升行业技术水平提供有益参考。

关键词

油气管道；PCS控制系统；推广应用；技术创新；智能化

1 引言

随着全球能源需求的持续增长和油气管道建设的不断推进，油气管道控制系统的性能与可靠性对于保障能源安全、提高生产效率具有重要意义。然而，长期以来，我国油气管道控制系统主要依赖进口，这不仅增加了成本，还面临技术风险与安全隐患。因此，推动油气管道控制系统的国产化进程，研发具有自主知识产权的 PCS (Process Control

System, 过程控制系统) 成为行业的迫切需求。

近年来，随着国内技术研发能力的提升，国产化 PCS 控制系统在性能、可靠性以及成本等方面已具备与进口系统竞争的实力。然而，要实现广泛的市场应用和技术推广，仍需克服一系列挑战，如技术标准的统一、行业认知度的提升以及产学研用之间的深度融合等。

本文旨在通过深入分析油气管道国产化 PCS 控制系统的推广应用策略，结合现代技术手段，为系统赋予新能力，提升其在行业中的竞争力与应用价值。通过本文的研究，我们期望能够为油气管道控制系统的国产化进程提供有益的参考与启示，促进国内油气管道行业的健康发展。

【作者简介】张禹尧（1998-），女，中国天津人，本科，助理工程师，从事安全工程研究。

2 产品概述

2010 年，伊朗发生“震网”事件，震惊世界；2017 年，乌克兰电网工控系统遭受恶意攻击，导致大范围变电站断电；2021 年，美国克罗尼尔公司工控系统受攻击，导致大规模停产。这些事件表明了保障国家能源安全的重要性，确保工业控制系统自主安全可控至关重要。习近平总书记指出“要打好基础软件国产化攻坚战，提升国产化替代水平和应用规模”。管网集团提出“建成中国特色世界一流能源基础设施运营商”的企业愿景、“打造智慧互联大管网”的战略目标、“科技数字化”的发展战略和“团队协作、结果导向、科技创新”的核心价值观。在这样的背景下，国家管网具备自主知识产权的国产化 PCS 控制系统应运而生。北方管道公司是最早在现场应用国产化 PCS 控制系统的单位，也是也在输油管道领域中应用最广泛的单位。

北方管道公司自动化团队积极参与到国产化 PCS 控制系统的推广应用中。2018 年，团队自主实施盖州压气站的 PCS 系统建设。并从 2018 年起，将 PCS 控制纳入到团队产品测试的范畴，持续开展到现今。2019 年 -2022 年，团队参与了中俄东线北段（黑河 - 长岭）、中段（长岭 - 永清）、安泰段（安平 - 泰安）、部分南段（连云港 - 太兴）的 PCS 控制系统建设。2023 年，团队自主完成国家管网华北与东北两大分控中心共计 23 条输油管线的 PCS 控制系统建设工作。

团队对数量众多、种类繁多的用户需求进行收集整理，结合多年的现场维护管理及建设经验，综合地提出一套创意设计，并进行了实践检验。本创意设计以助力国产化 PCS 控制系统的推广应用为定位，满足管道各油气生产运行单位及调控中心这一目标用户群体的需求。

3 现状及用户需求分析

随着国产化 PCS 控制系统在长输油气管道领域的推广应用，其在数据处理、趋势分析、回放仿真及数据库扩充等方面的优势日益凸显。然而，在系统性能与功能的进一步提升方面，仍存在成长空间。

首先，为确保工控网络环境中系统的安全稳定性能与基本功能，对计划采购的控制系统软硬件进行产品测试至关重要。这有助于及时发现并解决潜在问题，确保系统在实际应用中的可靠性。

其次，由于控制功能受多种因素影响而呈现复杂多样性，国产化 PCS 控制系统中的通用控制功能模型或模板需要不断扩充。这有助于满足更多管道控制功能的需求，提高系统的灵活性和适用性。

此外，在某些特殊场景下，如 PCS 控制系统需要独立承担大量复杂的逻辑和数字运算以进行管道控制时，功能扩展变得尤为重要。这能够确保系统满足生产运行的控制要求，提升整体运行效率和安全性。

4 解决方案

团队根据国产化 PCS 控制系统面临的现状，结合团队的国产化 PCS 控制系统建设和管道自动化控制经验，提出一套创意设计。

第一对于“作为工业控制系统，为保证工控网络环境中安全稳定的系统性能与基本功能，需要对计划采购的控制系统软硬件开展产品测试”这项需求。团队提出：从产品的适应性、功能性、安全性及可靠性这四个方面对计划采购的控制系统软硬件开展专项测试，通过对系统基本性能、功能安全、信息安全进行校验，发现问题并提出优化建议，以促其系统性能和基本功能的安全稳定。

工控功能性能测试主要内容有 1. 功能性能测试，包括基本功能及相关性能参数确认、扩展功能及相关指标确认、编程调试软件功能、极限性能参数测试；2. 安全性能测试，涉及系统级功能安全测试与分析及相关测试子项、器件级功能安全测试与分析、软件的功能安全测试与分析、仪表专项安全能力测试；3. 信息安全测试，涵盖网络协议、工控专用协议测试，漏洞探测，数据包截取破坏测试。

团队成功实践了该创意设计。2020 年中俄东线建设时，团队对国产化 PCS 控制系统进行了全面的产品测试分析，测试发现国产化 PCS 控制系统的性能已达到先进水平，并在国产化 PCS 控制系统的历史数据库、网络冗余机制、系统兼容性、通讯稳定、通信采集通道、计算模块和模拟量显示及曲线等方面提出了合理化建议 7 项，促进了国产化 PCS 控制系统在各方面的优化。

第二对于“受多因素影响导致控制功能复杂多样，国产化 PCS 控制系统中通用的控制功能模型或模板需要扩充，以满足绝大多数管道控制功能”这项需求。团队提出：结合 PLC 标准化控制逻辑，协同进行控制功能适配，形成模型或模板，在 PCS 控制系统中对应地进行固化，提升控制功能完整性、控制准确性和人机交互友好性。

结合标准化控制逻辑形成功能模型或模板，具体包括 PLC 与 PCS 功能对接、标准控制逻辑分解、控制全流程跟踪、命令点机制调整、状态点配置调整、精准文字描述、颜色配置标准化、画面布局区块划分、控制画面分级合理化、重要执行结果突出显示和异常工况弹窗预警等。

该创意设计已经通过团队的实践得到验证。2020 年，在中俄东线建设中，团队在国产化 PCS 控制系统中对压气站一键启停站功能进行了适配，形成了成熟的可推广的固有模板。该模板与控制功能完美契合且人机画面条理清晰、信息齐全、易于操作，实现了压气站一键启停站的状态反馈、报警检测、自动导通工艺流程、压缩空气系统启停、压缩机厂房风机分配、压缩机组启停、防喘控制和负荷分配等重要工序的全流程控制，显著提高操作员效率和准确性，大幅降低人工和技术成本。

第三对于“在 PCS 控制系统需要独立承担大量复杂的

逻辑和数字运算进行管道控制等特殊场景下，为满足生产运行的控制要求，需要功能扩展”这项需求。团队提出：在保证系统性能的前提下，围绕系统数据处理与计算的核心能力，定制化方案，实现数据高精度高强度分析，进行创新，完成功能定向开发，确保系统性能稳定，功能满足需求。

控制功能定向开发，通过确立功能机制、精准高效处理数据流、优化算法和数据结构、数据并行和分布式计算、功能块打包、功能性和稳定性测试优化以及系统接口接入等重要步骤，全面提升功能定向开发的效率和质量，以更好地满足用户在运行调控方面的需求。

团队已实践检验该创意设计的可行性。2023 年，在东北和华北分控中心建设过程中，华北原油管网的水击超前保护功能未能在 PCS 系统上实现。团队在国产化 PCS 软件上进行二次开发增设水击功能块，开发经过水击数据预处理、建立水击触发机制、建立水击执行机制、测试优化和系统资源占用分配等重要步骤，这是首次在国产化 PCS 软件上实现了输油管道水击超前保护功能的自主逻辑计算与判断。

团队完成 6 条管线共计 42 个工况的水击保护功能建设，功能完好运行平稳。

5 价值分析

团队提出的创意设计在国产化替代、数智化发展两个方面具有重要的价值，经实践验证，该创意设计提升系统功能性和性能，简化操作流程，提高工作效率和准确性，为用户提供高性能可靠的解决方案，增强国产化 PCS 控制系统的竞争力和自主控制能力，使其系统配置更合理、水平更先进、控制更可靠、运行更安全，为国产化 PCS 控制系统赋能。

国产化替代价值：该创意设计助力国产化 PCS 控制系统的应用推广，旨在打破国外长输油气管道控制系统长期的垄断地位，消除油气管道控制系统被“卡脖子”和“开后门”的隐患，逐步替代国外软硬件，实现管道控制系统的自主可控，保障国家能源安全。

数智化发展价值：团队提出的创意设计为 PCS 系统用户需求提供可靠的解决方案，提升用户体验；提高 PCS 系统的运行质量和可靠性；提升 PCS 系统的调控功能；推动 PCS 系统升级和创新发展；综合降低管道建设和运维成本，提高管道运行和管理水平；增强拥有自主知识产权的 PCS 系统的市场竞争力。

6 运营方案

在推广国产化 PCS 控制系统的工作中，我们将紧密结合项目建设周期，系统性地实施性能功能测试、需求收集、软硬件集成、实验室验证、现场调试、试运行、系统移交以及后续运维等关键环节。同时，我们注重将创意设计融入整个运营方案，旨在从多个维度满足用户需求，精准解决用户痛点，从而加速国产化 PCS 控制系统的市场应用步伐。

集团在此领域拥有深厚的资源积累和广泛的影响力，我们期待得到集团的大力支持，共同分享成果与经验。团队将积极深入各个业务领域，全面把握不同场景下的实际需求，并充分借鉴集团内部其他项目的成功案例和实践经验。我们将以多元化的方式，为更多部门和项目提供专业的技术支持与指导，推动国产化 PCS 控制系统在更多场景中实现广泛应用，为行业发展贡献力量。

7 产品优势及竞品分析

不同于对 PCS 系统简单的套用式推广应用，团队提出的创意设计包含了系统推广应用中的工控功能性能测试、控制功能标准化适配、控制功能定向开发三个方面，从创意与创新性、可靠性和实用性、用户友好度和设计质量、产品价值和可规模化等方面都表现出明显的优势。

创意与创新性：通过对计划采购的控制系统软硬件进行全面测试，强调了对适应性、功能性、安全性和可靠性的重视，突出了团队的独特设计理念，在满足工业控制系统国产化需求等方面充分展现了团队创意设计的创新性。

可靠性和实用性：结合标准化控制逻辑，完善通用的控制功能模型或模板，并进行固化；在功能开发的同时保证系统性能；均展示了方案设计逻辑的严密性和条理清晰性，经过实践检验证明成功可行，确保了功能满足用户需求，并为复用奠定了基础，具有较高的可靠性和实用性。

用户友好度和设计质量：设计强调系统数据处理与计算核心能力、完善的控制功能、简单便捷的人机界面，充分考虑了用户体验与操作便捷性，注重用户友好度和设计质量，使得产品容易理解和上手，能够提高用户满意度。

产品价值和可规模化：为国产化 PCS 控制系统提供了更多的控制功能和适应特殊场景的能力。这将为系统创造更大的市场机会和商业价值，可应用于不同领域并不断扩展出更多的业务形态。团队的创意设计是具有长期的产品价值和可规模化潜力。

8 结语

经过对油气管道国产化 PCS 控制系统推广应用及为系统赋新能的研究与探讨，我们深刻认识到国产化进程对于提升行业技术水平、保障能源安全的重要性。国产化 PCS 控制系统的成功推广，不仅能够有效降低油气管道建设的成本，更能够摆脱对外部技术的依赖，增强我国在能源领域的自主创新能力。

通过技术创新、标准化建设以及产学研用合作等手段，我们为系统赋予了新的能力，使其在性能、可靠性、智能化等方面取得了显著提升。这些成果不仅体现了国内技术研发实力的提升，也为油气管道行业的健康发展注入了新的活力。

然而，我们也应认识到，国产化 PCS 控制系统的推广应用仍面临诸多挑战与机遇。未来，我们需要继续加大技术

研发力度，完善系统功能和性能，提高系统的适应性和可扩展性。同时，我们还应加强行业合作与交流，推动技术的普及与应用，形成更为广泛的产业生态圈。

总之，助力油气管道国产化 PCS 控制系统的推广应用，并为系统赋能是一项长期而艰巨的任务。我们需要持续努力、不断创新，以推动我国油气管道行业向更高水平迈进，为国家的能源安全和经济发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 黄河,陈曦,祁国成,等. 油气管道SCADA软件工业试验测试评价方法[J]. 天然气工业,2017,37(8):80-86.
- [2] 祁国成,黄河,闫峰,等. 基于设备的“图模库一体化”油气管道模型[J]. 天然气工业,2014,34(10):92-97.
- [3] 冯思斌,屈涛,张宏伟,等. PCS系统在油气管道站场应用的技术及意义[J]. 化工管理,2020(32):14-15.
- [4] 祁国成,黄河,孙铁良,等. 管道SCADA软件国产化最新进展及展望[C]. //第四届全国石油石化行业信息化创新发展论坛论文集. 2018:642-650.
- [5] 咸玉龙,张景阳,陈鹏,等. 基于XML的油气管道设备模型交互标准化方法[J]. 电子科学技术,2017,4(4):28-32.

Traceability analysis and green catalytic conversion of key impurities in drug synthesis process

Bing Li

Shanxi Pharmaceutical Vocational College, Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

Controlling and removing impurities during drug synthesis is crucial for ensuring drug quality and safety. This study traces the formation mechanisms and influencing factors of key impurities generated during pharmaceutical synthesis, proposing the application of green catalytic transformation technology for impurity removal. By analyzing the catalytic activity of different catalysts and their effects on impurity formation during reactions, feasible strategies are developed to optimize reaction conditions for reducing impurities. Furthermore, guided by green chemistry principles, this research explores the selection of environmentally friendly catalysts and optimization of reaction pathways, providing theoretical support for greening drug synthesis processes. The findings demonstrate that rational selection of catalysts and reaction conditions can effectively minimize the generation of critical impurities, thereby enhancing both synthesis efficiency and product quality.

Keywords

drug synthesis; key impurity; traceability analysis; green catalysis; transformation reaction

药物合成过程中关键杂质的溯源分析与绿色催化转化

李冰

山西药科职业学院，中国·山西 太原 030000

摘要

药物合成过程中，杂质的控制与去除是确保药物质量与安全性的重要环节。本文通过对药物合成过程中产生的关键杂质进行溯源分析，探索其形成机制与影响因素，并提出绿色催化转化技术在杂质去除中的应用。通过分析不同催化剂的催化活性及其对反应过程中杂质生成的影响，提出了优化催化反应条件以减少杂质产生的可行方案。此外，结合绿色化学原则，探讨了环境友好型催化剂的选择和催化反应路径的优化，为药物合成过程的绿色化提供理论支持。研究结果表明，通过合理选择催化剂及反应条件，可以有效降低关键杂质的生成，达到提高药物合成效率与质量的目标。

关键词

药物合成；关键杂质；溯源分析；绿色催化；转化反应

1 引言

药物合成作为制药工业的核心环节，其产品质量直接关系到患者的健康和治疗效果。在药物的合成过程中，杂质的控制是一个不可忽视的问题。杂质不仅会影响药物的效能，还可能对人体产生潜在的毒性，因此，如何有效去除合成过程中的杂质，成为了现代制药工业亟待解决的技术难题。随着绿色化学的发展，绿色催化反应在减少污染、提高反应效率方面显示出巨大潜力。通过引入高效且环境友好的催化剂，能够在确保反应高效进行的同时，减少副产物和杂质的生成，实现绿色药物合成。

本文旨在通过分析药物合成过程中产生的关键杂质，探讨其来源和生成机制，并评估绿色催化技术在优化合成过

程中的应用效果。通过对比不同催化剂对反应的影响，结合实验数据，提出减少杂质生成的优化策略。希望能为制药行业提供一种新的绿色合成途径，促进药物合成的可持续发展。

2 药物合成过程中的杂质形成与溯源分析

药物合成中的杂质种类繁多，来源复杂，可能涉及反应物、溶剂、催化剂以及反应条件等多个方面。为了有效控制药物的质量，首先需要识别和分析杂质的形成机制，找出其源头，并采取适当的控制和去除策略。通过深入的溯源分析，可以明确药物合成过程中可能引发杂质生成的关键因素，从而为后续的处理提供理论依据。

2.1 药物合成反应的基本过程

药物的合成通常经历多个步骤，包括反应物的选择、反应条件的设定、催化剂的应用等。在这些环节中，反应物的纯度和溶剂的选择往往直接影响到最终产品的杂质水平。

【作者简介】李冰（1983-），男，中国山西太原人，本科，助理工程师，从事化学制药研究。

若反应物中含有杂质，可能在反应过程中未完全转化，形成中间产物或副产物，进而影响产品的纯度。此外，催化反应中催化剂的选择与应用也至关重要。催化剂不仅影响反应的选择性和转化率，若使用不当，还可能引发副反应，生成不需要的杂质。因此，反应条件的精细调控，特别是在催化反应中的温度、压力等因素，对于控制杂质的形成至关重要。

2.2 杂质的主要来源

在药物合成过程中，杂质的来源主要包括多个环节。首先，原料的不纯可能引入未反应的物质或不稳定的中间体，这些物质在反应过程中无法完全转化，从而成为最终药物中的杂质。例如，某些反应物中的异构体、溶剂残留和反应残渣常常会成为重要的杂质来源。其次，合成过程中使用的溶剂和辅料也可能成为杂质源，尤其是溶剂中可能含有挥发性成分或杂质，这些成分通过回流、蒸发等过程混入产物中，尤其在溶剂回收时，复杂的杂质可能被带入。催化剂的残留同样是一个重要因素，尽管催化剂在反应中起到促进作用，但如果催化剂未完全反应或处理不当，其残留物可能成为药物中的杂质，影响药物纯度并对人体健康产生潜在危害。最后，药物合成过程中常伴随副产物的生成，这些副产物可能在反应过程中有一定作用，但如果未及时去除，可能会残留在最终产物中，影响药物的质量和安全性。因此，控制杂质的来源和及时去除不必要的物质，对于确保药物的纯度和安全性至关重要。

2.3 杂质形成的机制

药物合成中杂质的生成与多种因素密切相关。首先，反应条件的设定，如温度、压力等，直接影响反应物的转化效率。在高温、高压条件下，某些反应物可能发生热分解或化学变异，生成不必要的副产物。其次，催化剂的选择和使用条件也对杂质的生成起着决定性作用。不同催化剂的选择性和催化性能差异可能导致反应的不完全性，从而生成不需要的中间产物或副产物。再者，反应时间的长短也会影响杂质的形成。如果反应过度进行，可能导致副反应的发生，从而增加杂质的数量和种类。因此，药物合成过程中，必须通过精确的条件控制，以减少杂质的形成，并提高反应的选择性和效率。

通过对药物合成中杂质形成的溯源分析，明确其来源与形成机制，为后续的杂质控制与去除提供了科学依据。

3 绿色催化在杂质控制中的应用

绿色催化是一种致力于提高反应效率、减少副产物生成并降低环境负担的技术。其核心优势在于通过采用环保、可持续的催化剂和反应条件，优化药物合成过程中的杂质控制。通过绿色催化技术，能够在药物合成过程中有效降低有害副产物的生成，提高药物的质量和纯度。近年来，绿色催化技术的应用不断拓展，成为制药领域的重要研究方向。

3.1 绿色催化剂的选择

选择合适的绿色催化剂是实现杂质控制和提高反应效率的关键。绿色催化剂的基本要求是具备高效性、选择性、可回收性和环境友好性。常见的绿色催化剂包括酸性催化剂、酶催化剂以及金属有机框架（MOFs）等。酸性催化剂在许多有机合成反应中具有优异的催化效果，能够促进反应速率，同时减少不必要的副反应。酶催化剂作为生物催化的一种形式，具有高选择性和温和的反应条件，能够在较低温度下实现反应，减少能量消耗并避免副产物的生成。金属有机框架（MOFs）催化剂则因其优异的表面活性和多孔结构，展现出在药物合成反应中高效、可持续的应用前景。通过选择适合的催化剂，可以显著提高药物合成的选择性，并有效减少杂质的生成。

3.2 催化反应的优化

绿色催化的优化不仅仅局限于催化剂的选择，还涉及对反应条件的细致调整。温度、压力、溶剂的选择以及反应时间等因素都会直接影响催化反应的效果。通过精确控制这些条件，能够大幅度提高反应的选择性，减少副产物的生成，从而控制杂质的含量。例如，通过降低反应温度和压力，可以减少高温高压下可能发生的副反应；同时，选择绿色溶剂代替传统溶剂，也能减少环境污染和副产物的生成。在酶催化反应中，温度和 pH 值的调整同样是影响酶活性和反应产物纯度的重要因素。通过优化反应条件，可以大大降低杂质的生成，提高药物合成过程的绿色化水平。

3.3 绿色催化技术的挑战与前景

尽管绿色催化技术在药物合成中的应用取得了显著的进展，但仍然面临一些挑战。首先，绿色催化剂的催化活性和稳定性有待进一步提高。许多绿色催化剂在实际应用中容易失去活性，或在高温、高压等极端条件下表现出较差的稳定性，这限制了其在工业化生产中的广泛应用。其次，催化剂的回收与再利用也是当前研究的重要难题。绿色催化剂的高效回收和再利用不仅能减少成本，还能减少环境污染。然而，在实际操作中，由于催化剂的结构复杂性和反应条件的变化，催化剂的回收往往面临较大挑战。未来，随着催化剂设计与制备技术的不断进步，绿色催化剂的催化活性、稳定性以及回收性能有望得到提升。此外，催化反应机理的深入研究将有助于优化催化剂的选择和反应条件，推动绿色催化技术在药物合成中的应用前景。绿色催化技术不仅可以提升药物合成的效率，减少杂质，还能为制药行业提供一种更加可持续和环保的解决方案。

4 关键杂质的去除技术

在药物合成过程中，除了减少杂质的生成外，去除关键杂质也是提高药物纯度和质量的一个重要环节。有效的杂质去除方法不仅能够确保最终产品的安全性和有效性，还能

提升生产效率，降低生产成本。当前的杂质去除技术已发展出多种方法，包括传统技术和新兴技术，两者结合可实现更高效、更绿色的药物合成过程。

4.1 传统的杂质去除方法

在药物合成过程中，杂质的去除常用几种方法，包括萃取法、结晶法和色谱法。萃取法是一种通过选择性溶剂分离杂质的技术，广泛应用于杂质和药物溶解度差异较大的情况。通过合理选择溶剂，可以有效分离溶解度较低的药物和溶解度较高的杂质。虽然萃取法操作简单且分离效果较好，但其局限性在于需要大量溶剂，这可能带来环境负担。

结晶法则通过调整溶液的温度、浓度或溶剂的选择，使药物和杂质的溶解度差异达到最大，从而实现分离。这种方法通常用于高纯度药物的合成，能够有效去除溶解杂质、部分水分和挥发性物质。尽管结晶法分离效果较好，但对操作条件要求较高，且在某些情况下，杂质和药物的结晶形态相似，可能影响分离效果。

色谱法则是一种通过固体与液体的分配差异对混合物进行分离的技术，适用于杂质含量较低的情况下。该方法分离精度高，能够高效分离复杂混合物中的杂质，但操作复杂且成本较高，通常用于小规模的药物合成与纯化过程中。

4.2 先进的杂质去除技术

膜分离技术和催化转化法是两种有效的杂质去除技术，广泛应用于药物合成过程中。膜分离技术利用半透膜的选择性过滤原理，通过对溶液中低分子杂质、溶剂和水分进行分离，达到去除杂质的目的。这项技术的优势在于其较高的分离效率和低操作成本，可以在不影响药物有效成分的情况下，去除不需要的杂质。然而，膜材料的污染问题是其主要缺点，污染会导致分离效率下降，因此需要定期清洗或更换膜。

催化转化法通过使用催化剂将反应中的杂质转化为无害物质，尤其适用于去除毒性较大的杂质或副产物。与传统方法相比，催化转化法不需要大量溶剂，能更高效、快速地进行杂质去除，且有助于减少环境污染。随着绿色催化技术的发展，这种方法在药物合成中的应用前景广阔，尤其是在提高反应选择性和环保性方面具有重要意义。催化转化法不仅有效去除杂质，还推动了药物合成过程的绿色化发展。

4.3 去除技术的挑战与发展

尽管传统和先进的杂质去除技术在药物合成中取得了一定进展，但仍存在一定的局限性。首先，传统的萃取法和结晶法虽然操作简单，但对于复杂杂质体系的分离效率较低，且常常需要大量的溶剂，带来额外的成本和环境负担。其次，色谱法虽然分离效果较好，但其高成本和复杂操作过程使其在大规模生产中受到限制。

随着技术的发展，膜分离技术和催化转化法逐渐展现出较大的潜力。膜分离技术能够有效减少溶剂的使用，但其在膜材料的选择和维护方面仍面临挑战。催化转化法则通过绿色催化的结合，实现了杂质的高效去除，但催化剂的选择

性和稳定性仍需进一步优化。未来，随着新型催化剂的研发和膜分离技术的改进，杂质去除技术将趋向更加高效、环保、经济的方向，为药物合成提供更为可持续的解决方案。

5 绿色催化转化的实验研究与应用

为了验证绿色催化转化技术在药物合成中减少杂质生成的有效性，本研究以某类抗生素的合成为例，进行了一系列催化反应的优化实验。

5.1 实验设计

本实验选用了常见的绿色催化剂，并通过不同反应条件的调整，探讨催化剂类型及其参数对反应过程中的杂质生成的影响。重点考察催化剂的选择性、反应温度、溶剂环境及反应时间对副产物生成的作用。实验采用绿色催化剂，以减少反应过程中有害物质的产生，同时提高合成的选择性和效率。

5.2 实验结果与分析

实验结果表明，通过选择绿色催化剂和优化反应条件，可以显著提高反应的转化率和选择性。绿色催化剂不仅在提高产物收率方面表现良好，还有效减少了副产物和杂质的生成。具体而言，在优化反应条件下，杂质的含量明显降低，药物的纯度得到了有效提高。

5.3 实验结论

绿色催化技术在药物合成中的应用能够显著提高合成效率，降低杂质生成率，确保药物的质量和安全性。实验表明，绿色催化不仅有助于实现高效和高纯度的药物合成，同时也是实现可持续发展的关键技术。

6 结语

药物合成过程中杂质的控制是提高药物质量的重要环节。通过对关键杂质的溯源分析，明确其形成机制，并结合绿色催化技术优化反应条件，不仅能够有效减少杂质生成，还能实现环境友好的药物合成过程。绿色催化技术在药物合成中的应用，展现了广阔的前景，并为制药行业的绿色发展提供了有效途径。未来，随着催化剂的不断优化和新技术的发展，药物合成过程中的杂质控制将更加高效、绿色、可持续。

参考文献

- [1] 慕玲玲.绿色催化CO₂合成喹唑啉-2,4-(1H,3H)-二酮的研究[D].郑州大学,2016.
- [2] 初文毅,王漫,李新民,等.钯/碳高效绿色催化Suzuki交叉偶联反应[J].有机化学,2012,32(09):1666-1672.
- [3] 李晚谊.几种重要医药中间体的绿色催化合成研究[D].昆明理工大学,2009.
- [4] 吕剑.基于绿色催化体系的羟基选择性酰基化研究[D].华中科技大学,2021.
- [5] 龙敏.新型有机光催化-吸附剂降解苯环类药物污染物的研究[D].广西大学,2025.

Chemical industry commonly used gas flowmeter selection

Xianfeng Chen

Sinopec Engineering (Group) Company Luoyang R&D Center of Technology, Luoyang, Henan, 471003, China

Abstract

As core instrumentation in modern chemical engineering, gas flow meters are integral to every stage of production processes, underscoring their critical importance. Proper selection and standardized operation of these devices not only enhance measurement accuracy and provide reliable data for production control, but also effectively reduce resource waste, lower production costs, and ultimately strengthen corporate competitiveness and economic efficiency. This paper thoroughly analyzes the working principles and structural characteristics of four commonly used flow meter types in the chemical industry: differential pressure, vortex, turbine, and thermal flow meters. Through detailed comparative analysis, it provides targeted selection methodologies while highlighting key considerations essential during the selection process.

Keywords

chemical industry, gas flowmeter, selection, comparer

化工行业常用气体流量计比选

陈险峰

中石化炼化工程（集团）股份有限公司洛阳技术研发中心，中国·河南洛阳 471003

摘要

气体流量计作为现代化工行业的核心仪表设备，贯穿于生产流程的各个环节，其重要性不言而喻。精准选型与规范使用气体流量计，既能显著提升测量精度，为生产调控提供可靠依据，又能有效削减资源浪费，降低生产成本，进而增强企业的市场竞争力与经济效益。本文深入剖析了化工领域常用的压差式、涡街、涡轮及热式这四种流量计的工作原理、结构特性，通过详细对比，给出了针对性的选型方法，同时指出了选型过程中需着重考量的关键问题。

关键词

化工；气体流量计；选型；对比

1 引言

在现代化工行业中，气体流量计是保证生产顺利进行的关键仪表设备。从原料的输送与配比，到化学反应过程的监控，再到产品的质量检测，气体流量计应用于生产过程的各个环节，扮演着不可或缺的角色^[1]。例如，在合成氨生产中，氢气与氮气的流量比例需严格控制在 3: 1 左右；天然气净化厂的克劳斯反应炉要求硫化氢与二氧化硫的配比为 2: 1；在费托合成反应中，为保证产品质量需要将氢气与一氧化碳的比例控制在 2: 1 至 3: 1 之间。在这些生产过程中，若气体流量测量不准确，可能导致原料过量投入，不仅增加生产成本，还可能因反应失衡影响产品质量，造成额外的经济损失。气体流量计的合理选型和正确使用不仅能够提高测量精度，还能减少不必要的资源消耗，降低生产成本，提高企业

的经济效益。

目前化工行业常用的气体流量计包括：压差式流量计、涡街流量计、涡轮流量计、热式流量计等。

2 压差式流量计

2.1 工作原理

差压式流量计的工作原理基于流体力学中的伯努利方程和连续性方程^[2]。当流体流经节流元件

时，由于管道截面积突然变小，会在节流元件前后形成压力差，该压力差与流体流速存在确定关系，进而通过检测压力差大小间接获得流体流量。标准节流式流量计的基本公式为：

$$\text{质量流量: } M = \alpha \varepsilon A_d (2 \rho \Delta P)^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{体积流量: } Q = M / \rho \quad (2)$$

式中： α 为流量系数； ε 为流束膨胀系数； A_d 为工作状态下节流元件开孔面积； ρ 为节流元件上游侧取压处流体密度， ΔP 为标准节流元件上、下游侧规定的取压孔位置上所测得的静压力之差。

【作者简介】陈险峰（1977–），男，中国河南商丘人，本科，工程师，从事加氢反应器内构件过程强化技术开发及天然气深度净化脱硫技术研究。

2.2 结构特点

差压式流量计主要由节流元件、差压变送器和显示仪表等部分组成。节流元件是产生差压的关键部件，常见的节流元件有孔板、喷嘴、文丘里管等。孔板是一块具有圆形开孔的薄板，结构简单，加工方便，成本较低，但压力损失较大，对流体的适应性相对较弱；喷嘴的结构相对复杂，但其压力损失较小，测量精度较高，适用于测量高流速、清洁的流体；文丘里管的压力损失最小，对流体的适应性强，特别适用于大管径、低流速的流体测量。

差压变送器的作用是将节流装置产生的差压信号转换为标准的电信号（如 4-20mA 电流信号），以便传输给显示仪表或控制系统进行处理和显示。差压变送器通常采用电容式、电感式或压阻式等传感器技术，具有精度高、稳定性好、响应速度快等优点。

显示仪表用于接收差压变送器输出的信号，并根据预设的流量计算公式，将差压信号转换为流量值进行显示。显示仪表可以是指针式表头、数字式显示屏或与计算机控制系统相连的监控软件，实现流量的实时显示、累计计算、报警等功能。

3 涡街流量计

3.1 工作原理

涡街流量计的工作原理基于卡门涡街效应^[3]。当流体流经流量计内的旋涡发生体时，在旋涡发生体的下游两侧会交替产生两列有规则的旋涡，这些旋涡被称为卡门涡街。旋涡的产生频率与流体的流速之间存在着确定的关系，通过检测旋涡的频率，就可以计算出流体的流速，进而得到流体的流量。

涡街流量计通过检测元件来感知旋涡产生的压力变化或振动信号，并将其转换为电信号输出。常见的检测元件有压电晶体、差动电容等。以压电晶体检测元件为例，当旋涡产生时，会使压电晶体受到交变的压力作用，根据压电效应，压电晶体将产生与压力变化成正比的电荷信号，该电荷信号经过前置放大器的转换、整形和放大处理后，输出与旋涡同步成正比的脉冲频率信号，该脉冲频率信号就代表了流体的流量。

3.2 结构特点

涡街流量计主要由旋涡发生体、检测元件和转换器等部分组成。旋涡发生体是涡街流量计的核心部件之一，其形状和尺寸对涡街流量计的性能有着重要影响。常见的旋涡发生体形状有圆柱状、三角柱状、梯形等。不同形状的旋涡发生体在产生旋涡的稳定性、强度以及对流体的适应性等方面存在差异。三角柱状旋涡发生体具有结构简单、产生的旋涡强度较大、信号稳定性好等优点，在实际应用中较为广泛。

检测元件用于检测旋涡产生的信号，并将其转换为电信号输出。常见的检测元件有压电晶体、差动电容等，压电

晶体是利用压电效应，将旋涡产生的压力变化转换为电荷信号，差动电容则是通过检

测旋涡引起的电容变化来感知旋涡信号，检测元件的灵敏度和可靠性直接影响着涡街流量计的测量精度和稳定性。

转换器的作用是将检测元件输出的电信号进行处理和转换，使其成为便于显示、传输和控制的标准信号，如 4-20mA 电流信号、脉冲信号等。转换器通常包括前置放大器、滤波整形电路、数模转换器（DAC）、输出接口电路等部分。前置放大器用于对检测元件输出的微弱信号进行放大，提高信号的强度；滤波整形电路用于去除信号中的噪声和干扰，将信号整形为规则的脉冲信号；数模转换器将脉冲信号转换为模拟信号，以便与其他控制系统进行连接；输出接口电路则负责将处理后的信号输出到显示仪表、控制系统或上位机等设备。近年来，随着智能化技术的发展，一些涡街流量计的转换器还集成了微处理器、显示通信模块等功能，实现了流量的自动计算、显示、通信以及故障诊断等智能化功能。

4 涡轮流量计

4.1 工作原理

涡轮流量计的工作原理基于角动量守恒定律和流体动力学原理^[4]。当流体流经涡轮流量计时，流体的动能作用于涡轮叶片，使涡轮绕轴线旋转。涡轮的转速与流体的流速成正比，通过测量涡轮的转速，就可以推算出流体的流量。为了测量涡轮的转速，通常在流量计的外壳上安装有磁性传感器，当铁磁性涡轮叶片经过磁铁时，磁路的磁阻发生变化，从而产生感应信号。信号经放大器放大和整形后，送到计数器或频率计，显示总的积算流量。同时，将脉冲频率经过频率 - 电压转换以指示瞬时流量。涡轮的转速正比于流速，涡轮的转数正比于流过的总量。因此，通过测量传感器输出的脉冲频率，就可以计算出流体的瞬时流量和累积流量。

4.2 结构特点

涡轮流量计主要由涡轮、传感器、外壳等部分组成。涡轮是流量计的核心部件，通常由轻质、高强度的材料制成，如铝合金、不锈钢等，以减少惯性，提高响应速度。涡轮的叶片形状和数量对流量计的性能有重要影响。叶片的形状设计需要考虑流体的特性和流量范围，以确保在不同工况下都能有效地捕捉流体的动能，使涡轮稳定旋转。叶片数量的选择则需要在测量精度和阻力损失之间进行平衡，一般来说，叶片数量越多，测量精度越高，但阻力损失也会相应增大。

传感器用于检测涡轮的转速，并将其转换为电信号输出。传感器的灵敏度和可靠性直接影响着涡轮流量计的测量精度和稳定性。为了提高传感器的性能，除了采用高灵敏度的磁性材料外，还需要对传感器进行屏蔽和抗干扰处理，以减少外界干扰对信号的影响。

外壳用于保护内部组件，并提供流体流动的通道。外

壳的材质需要根据被测流体的性质来选择，对于腐蚀性流体，通常采用耐腐蚀的不锈钢或其他特殊材料制造外壳；对于高温流体，需要选择耐高温的材料，以确保外壳在恶劣工况下的强度和密封性。外壳的内部结构设计要保证流体能够均匀地流过涡轮，减少流场的畸变，从而提高测量精度。此外，外壳上还通常设置有连接法兰、安装支架等部件，以便于涡轮流量计的安装和固定。

5 热式流量计

5.1 工作原理

热式流量计的工作原理基于热扩散和热传导

原理^[5]。它通过测量流体与加热元件之间的热量传递来确定流体的流量。根据传热学理论，当流体流经加热元件时，流体将带走加热元件的热量，带走热量的多少与流体的流速和流量密切相关。

在热式流量计中，通常有一个加热元件以及一个温度传感器。加热元件将电能转化为热能，使自身温度升高。当流体流过加热元件时，流体与加热元件之间发生热量交换，加热元件的温度会因热量被带走而降低。温度传感器用于测量加热元件的温度变化，通过检测加热元件温度变化的速率或维持加热元件恒定温度所需的加热功率，就可以计算出流体的流量。

5.2 结构特点

热式流量计主要由热电阻、加热元件、传感器、信号处理单元和外壳等部分组成。热电阻是热式流量计中的关键部件之一，通常采用铂、铜等材料制成，具有较高的温度系数和稳定性。热电阻的作用是测量流体的温度，为流量计算提供温度参数。在测量过程中，热电阻的温度会随着流体温度的变化而变化，通过检测热电阻的电阻值变化，就可以得到流体的温度。例如，铂电阻的电阻值与温度之间存在近似线性关系，在一定温度范围内，其电阻值随温度的升高而增大，通过测量铂电阻的电阻值，并根据其温度-电阻特性曲线，就可以计算出流体的温度。

加热元件是热式流量计中产生热量的部件，常见的加热元件有电阻丝、加热膜等。电阻丝通常采用镍铬合金等材料制成，具有较高的电阻率和耐高温性能。加热膜则是通过在基片上沉积一层金属薄膜或半导体薄膜制成，具有结构紧凑、加热效率高等优点。

传感器用于检测加热元件与流体之间的热量传递情况，并将其转换为电信号输出。常见的传感器有热电偶、热敏电阻等。热电偶是利用两种不同金属材料的热电效应制成的，当热电偶的两端处于不同温度时，会产生热电势，热电势的大小与温度差成正比。热敏电阻则是一种对温度敏感的电阻元件，其电阻值随温度的变化而显著变化。

6 气体流量计选型与对比

气体的密度和粘度是影响气体流量计测量精度和性能的重要因素。不同类型的气体流量计对气体密度和粘度的敏感程度不同，在选型时需要充分考虑这些因素，以确保流量计能够准确、稳定地工作。在化工生产中，常常会遇到腐蚀性、易燃易爆等特殊气体，这些气体对气体流量计的材质和结构提出了特殊要求。选择合适的流量计材质和结构，不仅能够确保流量计的正常运行和准确测量，还能保障生产过程的安全和稳定。安装空间大小、管道口径、直管段长度等因素对气体流量计的安装和测量有着重要影响，在选型过程中必须予以充分考虑。

总而言之，在满足工艺生产需要的条件下，应尽量选用利于节能降耗的流量计。

7 结语

目前化工行业所用的气体流量计种类较多，选型时需综合考虑多种因素，如气体特性包括密度、粘度、腐蚀性、易燃易爆性等，工艺条件包括温度、压力，以及安装要求如安装空间、管道口径、直管段长度等，还有成本因素涵盖采购成本、运行成本和维护成本，这些都对流量计选型有着重要影响。精度与成本平衡上，要根据化工生产不同环节对精度的需求，综合考虑采购、运行和维护成本，选择性价比高的流量计。综上所述，在化工行业气体流量计选型中，需结合实际工况和要求，运用科学的选型方法，才能选择出最适合的气体流量计，实现气体流量的准确测量和控制，保障化工生产的高效、稳定、安全运行，提高企业的经济效益。

未来，随着化工行业的不断发展和技术的持续进步，气体流量计的研究将朝着更高精度、更宽量程、更强适应性、更低成本和更智能化的方向发展。一方面，需要不断深入研究新型测量原理和技术，开发适应复杂工况的高性能气体流量计；另一方面，要加强智能化技术在气体流量计中的应用，实现数据的深度挖掘与分析，提升设备的自动化、智能化水平。通过多学科交叉融合，推动气体流量计技术的创新发展，为化工行业的高效、绿色、安全发展提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 马召辉. 常用气体流量计选型设计探讨[J]. 科技风, 2019(9):225.
- [2] 徐伟清. 高纯气体流量测量中的仪表选型[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(1):69-72.
- [3] 左英姣, 邹明伟, 刘颖晖, 等. 一种高性能涡街流量计的研究与设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(8):329-332, 337.
- [4] 李旭阳, 万观军, 严微微, 等. 气体涡轮流量计结构优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3):41-48.
- [5] 李学明. 热式气体流量计的研究与应用[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(11):99-101.

Performance preparation and application of magnesium metal composites

Buwen Zan

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010010, China

Abstract

In the modern industrial pursuit of high-performance materials, magnesium-based composites have emerged as a research hotspot in materials science due to their unique performance advantages. As a lightweight metal with a density of merely $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ —approximately two-thirds that of aluminum and one-fourth that of steel—magnesium inherently excels in lightweight applications. Moreover, its high specific strength and stiffness enable structural reinforcement while reducing overall weight, effectively addressing the dual demands of modern industry for both material lightness and strength.

Keywords

modern industry; composite materials; innovative development

镁金属复合材料的性能制备与应用

昝卜文

内蒙古工业大学，中国·内蒙古 呼和浩特 010010

摘要

在现代工业不断追求高性能材料的背景下，镁金属复合材料凭借其独特的性能优势，逐渐成为材料科学领域的研究热点。镁是一种轻质金属，其密度仅为 $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ，约为铝的 $2/3$ ，钢的 $1/4$ ，这使得镁金属复合材料在轻量化应用中具有先天优势。同时，镁具有较高的比强度和比刚度，能够在保证结构强度的同时减轻整体重量，满足现代工业对材料轻量化和高强度的双重需求。

关键词

现代工业；复合材料；创新发展

1 镁金属复合材料的性能特点

1.1 基本性能

1.1.1 密度与比强度

镁金属复合材料的密度通常在 $1.7 - 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 之间，这一数值相较于传统金属材料，如铝合金（密度约 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ）、钢铁（密度约 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ ），具有明显的优势。其低密度特性使得镁金属复合材料在对重量有严格要求的领域，如航空航天、汽车制造等，成为理想的材料选择。在航空航天领域，飞行器的重量每减轻 1kg，在其使用寿命内可节省大量的燃料消耗，同时能够提高飞行器的飞行性能和有效载荷能力。

比强度是材料强度与密度的比值，它反映了材料在承受载荷时的效率。镁金属复合材料具有较高的比强度，其比强度值甚至超过了一些高强度铝合金和钢材。这意味着在相同强度要求下，使用镁金属复合材料可以显著减轻结构的重

量。例如，在汽车发动机缸体的制造中，采用镁金属复合材料代替传统的铸铁材料，不仅可以使发动机重量减轻约 $30\% - 50\%$ ，还能提高发动机的燃油效率和动力性能。在一些高端自行车的制造中，使用镁金属复合材料制作车架，在保证车架强度和刚性的同时，使自行车的整体重量减轻，提高了骑行的舒适性和操控性。

1.1.2 尺寸稳定性

镁金属复合材料具有良好的尺寸稳定性，这得益于其组织结构的稳定性和低的热膨胀系数。在精密仪器部件制造中，尺寸稳定性是至关重要的性能指标。以光学仪器中的镜头支架为例，镜头支架需要精确地固定镜头位置，以保证光学系统的成像质量。如果支架材料的尺寸稳定性不佳，在温度变化或机械振动等外界因素作用下，支架的尺寸会发生变化，从而导致镜头位置偏移，影响成像的清晰度和准确性。镁金属复合材料的低膨胀系数使其在温度变化时尺寸变化极小，能够有效地保证镜头支架的尺寸精度，确保光学仪器的性能稳定。在电子设备中的印刷电路板（PCB）上的连接件，也需要具有良好的尺寸稳定性，以保证电子元件之间的

【作者简介】昝卜文（2004-），男，中国内蒙古呼和浩特人，本科，从事冶金工程研究。

电气连接可靠。镁金属复合材料制成的连接件能够在不同的工作环境下保持稳定的尺寸，提高了电子设备的可靠性和稳定性。

1.1.3 耐腐蚀性

镁金属复合材料的耐腐蚀性能是其应用中需要关注的重要性能之一。在不同的环境下，镁金属复合材料会发生不同类型的腐蚀。在大气环境中，镁金属复合材料表面会与空气中的氧气、水蒸气等发生化学反应，形成一层氧化膜。然而，这层氧化膜的致密性较差，不能有效地阻止进一步的腐蚀。在含有氯离子的海洋环境或工业环境中，镁金属复合材料容易发生点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀。这是因为氯离子具有很强的侵蚀性，能够破坏镁金属复合材料表面的保护膜，从而引发局部腐蚀。

为了提高镁金属复合材料的耐腐蚀性能，通常采用多种防护措施。表面涂层是一种常用的方法，如采用有机涂层、金属涂层等。有机涂层可以在镁金属复合材料表面形成一层隔离层，阻止腐蚀介质与基体接触，从而提高耐腐蚀性能。金属涂层则可以利用涂层金属的耐腐蚀性来保护镁金属复合材料基体。微弧氧化处理也是一种有效的防护手段，它通过在镁金属复合材料表面原位生长一层陶瓷膜，提高材料的硬度和耐腐蚀性。在一些对耐腐蚀性能要求极高的应用场景中，还可以结合多种防护措施，如先进行微弧氧化处理，再涂覆有机涂层，以达到更好的防护效果。

1.2 特殊性能

镁金属复合材料除了具有上述基本性能外，还展现出一些特殊性能，使其在特定领域具有独特的应用价值。

镁金属复合材料具有良好的阻尼性能，能够有效地吸收和耗散振动能量。在汽车发动机、变速箱等部件中，振动和噪声会影响设备的正常运行和使用寿命，同时也会降低驾驶舒适性。镁金属复合材料的高阻尼性能使其能够在这些部件中发挥减振降噪的作用。当发动机运转产生振动时，镁金属复合材料制成的发动机支架能够迅速吸收振动能量，减少振动向车身的传递，从而降低车内的噪声水平。在一些精密仪器中，如光学望远镜的支撑结构，采用镁金属复合材料可以有效减少外界振动对仪器的干扰，提高仪器的精度和稳定性。

镁金属复合材料还具有优异的电磁屏蔽性能。随着电子设备的广泛应用，电磁干扰问题日益严重。在电子设备中，内部电子元件的工作会产生电磁辐射，这些辐射不仅会影响设备自身的性能，还可能对周围的其他设备造成干扰。镁金属复合材料可以有效地屏蔽电磁辐射，其原理是当电磁波入射到镁金属复合材料表面时，会在材料内部产生感应电流，这些感应电流会产生与入射电磁波相反的磁场，从而抵消部分入射电磁波，达到屏蔽电磁辐射的目的。在手机、笔记本电脑等电子产品的外壳制造中，使用镁金属复合材料可以有效地屏蔽内部电子元件产生的电磁辐射，保护用户的健康，

同时也能提高设备的抗干扰能力，保证设备的稳定运行。在一些对电磁环境要求严格的场所，如医院的磁共振成像（MRI）室、通信基站等，镁金属复合材料也可用于制作屏蔽设备，减少电磁干扰对周围环境的影响。

2 镁金属复合材料的制备方法

制备方法对镁金属复合材料的组织结构和性能有着至关重要的影响。不同的制备方法会导致复合材料中增强相的分布、界面结合状况以及基体的组织结构存在差异，进而影响复合材料的综合性能。目前，常见的镁金属复合材料制备方法主要有粉末冶金法、搅拌铸造法、喷射沉积法等，每种方法都有其独特的原理、工艺特点和适用范围。

2.1 粉末冶金法

粉末冶金法是制备镁金属复合材料的重要方法之一，其原理是将镁合金粉末与增强相粉末充分混合均匀，然后在一定压力下将混合粉末压制成所需形状的坯体，最后通过热压烧结等工艺使坯体致密化，实现增强相与基体合金的复合。在制粉过程中，由于镁合金化学性质活泼，容易与空气中的氧气、水蒸气等发生反应，因此需要采取特殊的防氧化保护措施，如在惰性气体环境中进行制粉操作，以确保镁合金粉末的质量。

具体操作步骤如下：首先，选择合适的镁合金粉末和增强相粉末，对镁合金粉末进行预处理，去除表面的杂质和氧化物。将镁合金粉末和增强相粉末按照一定比例放入球磨机中进行球磨混合，球磨过程中要控制好球磨时间、球料比等参数，以确保粉末混合均匀。将混合好的粉末装入模具中，在一定压力下进行冷压成型，得到具有一定形状和尺寸的坯体。把坯体放入真空炉或惰性气体保护炉中进行热压烧结，烧结温度和压力要根据材料的特性进行合理选择，一般烧结温度在镁合金熔点的 0.6 - 0.8 倍之间，压力在 10 - 50MPa 左右。通过热压烧结，坯体中的粉末颗粒之间发生原子扩散和再结晶，使坯体致密化，形成性能良好的镁金属复合材料。

粉末冶金法在制备镁金属复合材料时具有诸多优点。该方法能够使增强体在基体中均匀分布，从而提高复合材料性能的均匀性。通过控制粉末的混合比例和工艺参数，可以精确调整复合材料中增强相的体积分数，满足不同应用场景对材料性能的需求。利用粉末冶金工艺和机械合金化工艺还可以制备出具有优良储氢性能的镁基复合材料，拓展了镁金属复合材料的应用领域。粉末冶金法也存在一些缺点。其工艺设备复杂，需要球磨机、压力机、烧结炉等多种设备，设备投资较大。小批量生产时，由于设备的利用率较低，导致生产成本较高，限制了该方法在一些对成本敏感领域的应用。

2.2 搅拌铸造法

搅拌铸造法是一种较为常用的制备镁金属复合材料的

方法，其制备过程基于金属熔体的流动特性。首先，将镁合金原料加热至熔化状态，形成液态的镁合金熔体。利用高速旋转的搅拌器桨叶搅动金属熔体，使其剧烈流动，并形成以搅拌旋转轴为中心的漩涡。在搅拌过程中，将增强相颗粒加入到金属熔体中，依靠漩涡的负压抽吸作用，使颗粒进入金属熔体。经过一段时间的搅拌，增强相颗粒在熔体中逐渐均匀分布。机械搅拌后的增强相均匀分布的合金溶液，可以通过压铸、沙型铸造以及永久模铸造等方式成形，最终得到镁金属复合材料。

搅拌铸造法对增强相分布有着重要影响。在搅拌过程中，搅拌速度、搅拌时间以及增强相颗粒的加入方式等因素都会影响增强相在基体中的分布均匀性。当搅拌速度过低时，增强相颗粒难以充分分散，容易出现团聚现象；而搅拌速度过高，则可能导致熔体中卷入过多气体，产生气孔等缺陷。合适的搅拌速度一般在 500 - 1500r/min 之间，搅拌时间在 15 - 60min 左右，具体数值需要根据材料体系和增强相颗粒的特性进行调整。增强相颗粒的加入方式也很关键，如采用分批加入的方式，可以使增强相颗粒更均匀地分散在熔体中。

搅拌铸造法具有一些显著的优势。该方法是液态成形，设备相对简单，投资成本较低，且能一次成形复杂零件，适合于大规模生产。批量生产时，搅拌铸造法的成本仅是其他方法的 1/3 - 1/10，这使得该方法在工业生产中具有很大的竞争力。该方法还可制备大体积的金属基复合材料，满足一些大型构件的生产需求。搅拌铸造法也存在一些不足之处。在强烈的搅拌过程中，难免有气体和夹杂物混入，会产生气孔和氧化物等铸造缺陷，影响复合材料的性能。由于增强相颗粒与镁合金熔体的密度差异，在搅拌过程中增强相颗粒可能会出现偏析和结团的现象，难以避免，从而降低复合材料性能的均匀性。铸造温度过高时，基体与增强相之间可能发生有害的界面反应，进一步降低产品性能，导致性价比不高。

2.3 喷射沉积法

喷射沉积法是一种较为先进的制备镁金属复合材料的技术，其技术原理基于快速凝固和颗粒复合的过程。首先，将镁合金原料加热至完全熔化，形成液态的镁合金。在高压惰性气体的喷射作用下，液态镁合金被雾化成细小的液滴，形成熔融的金属喷射流。与此同时，将增强相颗粒通过特定的装置喷入射流中，使固、液两相充分混合。混合后的固、液两相共同沉积到经预处理的衬底上，由于沉积过程中冷却速度极快，液滴迅速凝固，从而快速凝固得到镁金属复合材料。

具体制备流程如下：将镁合金放入感应炉或其他熔炉中加热熔化，达到预定的温度后，保持熔体的温度稳定。通过高压惰性气体源，如氩气、氮气等，将高压气体通入雾化喷嘴，使液态镁合金在喷嘴处被雾化成细小的液滴。利用送粉装置将增强相颗粒输送到雾化喷嘴附近，使其与雾化后的

镁合金液滴在飞行过程中混合。混合后的固、液两相在重力和气体流的作用下，沉积到预先准备好的衬底上，衬底可以是金属板、模具等。沉积过程中，由于冷却速度极快，通常在 $10^3 - 10^6 \text{ K/s}$ 之间，液滴迅速凝固，形成具有细小晶粒和均匀增强相分布的镁金属复合材料。

喷射沉积法在提高材料性能方面具有重要作用。该方法能够使复合材料获得快速凝固的组织特征，晶粒细小，这有助于提高材料的强度、硬度和韧性等力学性能。由于增强相颗粒在沉积过程中能够较均匀地分散在基体中，增强相均匀度有一定的提高，从而使复合材料的性能更加均匀。喷射沉积法也面临一些挑战。制备过程中容易出现孔隙率较高的问题，这是由于在沉积过程中，气体可能会被包裹在沉积物中，形成空隙。空隙处产生的应力集中将促进微裂纹的发展，降低增强相与基体的界面性能，对材料的冲击韧性和疲劳寿命也有不利影响。喷射沉积设备较为复杂，成本较高，这在一定程度上限制了该方法的大规模应用。

2.4 其他制备方法

除了上述三种常见的制备方法外，还有原位合成法、扩散连接法等其他制备方法。原位合成法是一种近年来发展起来的制备复合材料的新方法，其原理是在一定条件下，通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应，在金属基体内原位合成一种或几种高硬度、高弹性模量的陶瓷增强相，从而达到强化金属基体的目的。通过这种方法制备的复合材料，增强体是在金属基体内形核、自发长大，因此增强体表面无污染，基体和增强体的相溶性良好，界面结合强度较高。同时，省去了繁琐的增强体预处理工序，简化了制备工艺。固 - 液反应复合工艺是将反应物粉末与金属熔体混合，使加入粉末与金属熔体成分反应或自行分解，生成难熔的高硬度质点，均匀分散在基体中，形成复合材料，该复合工艺成本较低，反应材料种类较多，复合后的材料组织细密。

扩散连接法主要用于制备层状镁金属复合材料或实现镁金属复合材料与其他材料的连接。其原理是在一定温度和压力下，使待连接的材料表面原子相互扩散，形成冶金结合。在制备镁 / 铝层状复合材料时，可以将镁合金和铝合金板材进行表面处理后，叠放在一起，在真空或保护气氛下进行加热和加压，使镁合金和铝合金界面处的原子相互扩散，实现连接。扩散连接法能够获得连接强度较高的接头，但该方法对设备要求较高，连接过程需要严格控制温度、压力和时间等参数，且生产效率相对较低。

3 研究总结

本研究全面且深入地探讨了镁金属复合材料，在多个关键方面取得了具有重要价值的研究成果。在性能特点上，镁金属复合材料展现出了卓越的综合性能。其密度在 $1.7 - 2.0 \text{ g/cm}^3$ 之间，相较于铝合金、钢铁等传统金属材料具有显著的轻量化优势，在航空航天、汽车制造等对重量严格限制

的领域具有极大的应用潜力。高比强度使其在承受载荷时表现出色，能够在保证结构强度的同时，有效减轻结构重量，如在汽车发动机缸体制造中，采用镁金属复合材料可使发动机重量减轻 30% - 50%，并提升燃油效率和动力性能。良好的尺寸稳定性确保了其在精密仪器部件制造中的应用，能在温度变化或机械振动等外界因素作用下，保持精确的尺寸精度，保障仪器的性能稳定。

镁金属复合材料的特殊性能也十分突出。其良好的阻尼性能使其成为减振降噪的理想材料，在汽车发动机、变速箱等部件中，能有效吸收和耗散振动能量，降低车内噪声水平，提高驾乘舒适性；在精密仪器中，可减少外界振动干扰，提高仪器精度和稳定性。优异的电磁屏蔽性能则使其在电子设备领域发挥重要作用，能有效屏蔽电子设备内部电子元件产生的电磁辐射，保护用户健康，提高设备抗干扰能力，确保设备稳定运行。

在制备方法上，本研究详细剖析了多种常见方法。粉末冶金法通过将镁合金粉末与增强相粉末混合、压制和烧结，实现了增强相与基体合金的复合。该方法能够使增强体均匀分布，精确调整增强相体积分数，还可制备出具有优良

储氢性能的镁基复合材料，但存在工艺设备复杂、生产成本高的问题，限制了其在一些对成本敏感领域的应用。搅拌铸造法基于金属熔体流动特性，将增强相颗粒加入液态镁合金熔体中，通过搅拌使其均匀分布，再经压铸等方式成形。此方法设备简单、成本低、适合大规模生产且能制备大体积复合材料，但在搅拌过程中容易混入气体和夹杂物，导致增强相颗粒偏析和结团，以及基体与增强相之间发生有害界面反应，影响复合材料性能。喷射沉积法利用高压惰性气体将液态镁合金雾化，与增强相颗粒混合后快速凝固得到复合材料。该方法能使复合材料获得快速凝固组织，晶粒细小，增强相分布均匀，从而提高材料性能，但存在孔隙率较高、设备复杂和成本高的挑战。

参考文献

- [1] 杜文博, 严振杰, 吴玉锋等.镁基复合材料的制备方法与新工艺[J].稀有金属材料与工程, 2009, 38(3).
- [2] 董群, 陈礼, 赵明久等.镁基复合材料制备技术、性能及应用发展概况[J].材料导报, 2004, 18(4).
- [3] 张修庆, 滕新营.镁基复合材料的制备工艺[J].热加工工艺, 2004(3).

Optimization and numerical simulation of cathodic protection of tank bottom plate under stray current interference

Yanke Gong

Central China Branch of China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the widespread application of oil and gas storage and transportation facilities, buried storage tanks are prone to stray current interference in complex electrical environments, leading to imbalanced cathodic protection of tank bottoms. This study investigates the variation patterns of cathodic protection effectiveness under different stray current intensities based on electrochemical corrosion theory and finite element simulation methods. By establishing a three-dimensional potential field model, we analyze potential distribution, current density, and interference propagation characteristics, while validating model reliability through field data. Results indicate that when stray current density exceeds 20 A/m^2 , the protective potential of tank bottoms shifts significantly, resulting in approximately 35% reduction in protection efficiency. Optimizing anode layout and implementing multi-point feedback control improved potential distribution uniformity by 27%. This research provides scientific basis for anti-interference design and engineering applications of cathodic protection systems in complex electrical environments.

Keywords

tank bottom plate; stray current; cathodic protection; numerical simulation; optimization design

杂散电流干扰下储罐底板阴极保护效果优化及数值模拟分析

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司，中国·湖北 武汉 430000

摘要

随着油气储运设施的广泛应用，地埋式储罐在复杂电气环境中易受杂散电流干扰，导致底板阴极保护失衡。本文基于电化学腐蚀理论与有限元模拟方法，研究不同杂散电流强度下储罐底板阴极保护效果的变化规律。通过建立三维电位场模型，分析电位分布、电流密度及干扰传播特征，并结合现场数据验证模型可靠性。结果显示，当杂散电流密度超过 20 A/m^2 时，底板保护电位显著偏移，保护效率下降约35%。优化阳极布局与引入多点反馈控制后，电位分布均匀性提高27%。研究为复杂电气环境下储罐阴极保护系统的抗干扰设计与工程应用提供了科学依据。

关键词

储罐底板；杂散电流；阴极保护；数值模拟；优化设计

1 引言

储罐作为石化行业的重要储运设备，其底板长期与潮湿土壤或地下水接触，极易发生电化学腐蚀。阴极保护作为防止金属腐蚀的主要技术手段之一，已广泛应用于储罐防腐体系中。然而，在城市电气化程度不断提高的背景下，地铁、高压输电线、直流牵引供电系统及邻近管道阴极保护系统均可能产生杂散电流。这些杂散电流通过土壤介质传播并进入储罐底板金属结构后，会破坏原有的电位平衡，导致阴极保护失效或局部过保护，从而加速腐蚀进程。储罐底板的平面尺度大、几何边界复杂、接地条件差异显著，使得阴极保护

电流分布具有明显的非均匀性。本文通过建立有限元仿真模型，研究不同杂散电流干扰条件下的电位分布规律，并提出针对性优化措施，为工程防护提供科学依据^[1]。

2 杂散电流干扰下阴极保护的理论分析

2.1 储罐底板腐蚀机理与阴极保护原理

储罐底板的腐蚀主要为电化学腐蚀，铁在电解质中发生氧化反应形成阳极区，电子迁移至阴极区产生还原反应。阴极保护通过外加电流使金属表面电位降低至保护电位以下（一般为 -0.85 V ， Cu/CuSO_4 参比），从而抑制金属离子化过程。对于埋地储罐而言，阴极保护系统通常由牺牲阳极或外加电流阳极构成，通过调节电流密度实现均匀保护。然而，在存在杂散电流的情况下，外部电流场叠加改变了保护系统的电位分布，导致局部区域电流反向流动，使保护失衡。

【作者简介】宫研科（1989—），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事油气储运工程、阴极保护研究。

2.2 杂散电流的来源与传播特征

杂散电流主要来自直流轨道牵引系统、邻近阴极保护装置及工业电气设备接地系统。其通过导电性土壤传播，形成复杂的电位场。当杂散电流流入储罐底板时，会在金属表面形成阳极区，造成局部腐蚀增强；当电流流出时，则出现阴极过保护现象^[2]。

2.3 杂散电流对阴极保护效果的影响规律

在杂散电流干扰下，储罐底板阴极电位分布呈现明显的空间梯度。边缘区域电流泄漏严重，而中央区域电位可能偏高，形成过保护区。过保护会引发涂层脱落与氢脆问题，而欠保护则导致局部腐蚀加剧。通过仿真与实测数据对比发现，当杂散电流密度超过 15~20 A/m² 时，阴极保护系统的稳定性显著下降。因此，研究杂散电流场下的电位分布特性并进行优化设计，对保障储罐长期安全运行具有重要意义。

3 数值模拟模型的建立与边界条件设定

3.1 模型建立与几何参数

为研究杂散电流干扰下储罐底板阴极保护系统的电化学行为，本文采用有限元分析软件（COMSOL Multiphysics）构建三维电位场模型。模型包括储罐底板金属结构、外加电流型阳极系统、土壤介质层及外部杂散电流干扰源四部分。储罐底板直径取 40 m、厚度 12 mm，模拟其典型工业尺寸。阳极采用带状外加电流阳极材料，均匀沿径向布置 12 条，以形成均衡的电流分布。阳极长度 3 m、宽度 0.1 m，与罐底距离 0.5 m。土壤区域半径设置为 80 m，厚度 15 m，以确保边界足够远离计算域主体，避免边界效应对结果的干扰。储罐外壳与土壤界面之间设有防腐涂层模拟层，以反映实际工程中的介电特性。模型整体采用轴对称布局，可有效提高计算效率和稳定性。几何参数的选取综合参考了《埋地金属管道阴极保护设计规范》（GB/T 21448-2017）及典型石化企业储罐参数，确保仿真环境与实际运行条件一致，为后续数值分析提供合理基础^[3]。

3.2 物理参数与边界条件

模型中，土壤电阻率设置为 30 Ω·m，以反映中等导电性土壤的典型环境。金属部分导电率取 5.8×10^7 S/m，对应碳钢材料的实际电性。阴极表面设置恒电位边界条件（-0.85 V，相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极），模拟理想保护状态。阳极表面施加外加电流密度，范围为 5~20 A/m²，以研究不同电流强度下电位分布变化。杂散电流源采用恒流注入模型，输入强度和方向可调，以模拟来自邻近轨道供电系统、地下电缆或并行管道的干扰。外部边界采用自然绝缘边界条件 ($\partial\phi/\partial n=0$)，以确保电流场闭合完整。电解质区域遵循稳态电流连续性方程 $\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi)=0$ ，金属与电解质界面采用电位跳跃模型以描述极化行为。仿真过程中考虑了阳极极化电阻及土壤介质非线性效应，进一步提高模型的真实性和工程适用性。

3.3 模型验证与网格优化

为确保模拟结果的可靠性，模型通过现场实测数据进行验证。选取运行三年的储罐阴极保护系统作为参考，采集底板表面电位分布曲线及电流密度数据。仿真计算结果与实测值对比后，最大偏差控制在 6% 以内，说明模型能准确反映实际电化学状态。为平衡计算精度与效率，采用非均匀网格划分策略：在阳极与罐底接触区、干扰电流注入区及边缘区域加密网格，以捕捉电位梯度变化。全域共划分约 35 万单元，网格质量因子保持在 0.85 以上，保证计算收敛性。采用自适应迭代求解算法，通过残差控制（误差阈值 1×10^{-6} ）及步长优化提高解算精度。多组模拟结果表明，该模型具有较高稳定性与可重复性，可为后续杂散电流干扰分析与优化设计提供可信的数据支撑与仿真依据^[4]。

4 杂散电流干扰下的数值仿真结果与分析

4.1 不同干扰电流强度下的电位分布

数值模拟结果显示，杂散电流强度的变化对储罐底板阴极保护电位分布具有显著影响。当外部杂散电流密度控制在 10 A/m² 时，储罐底板表面电位整体维持在 -0.85 ~ -1.05 V 之间，处于有效保护区间，阴极保护系统运行稳定。然而，当干扰电流强度增至 20 A/m² 时，局部区域电位升高至 -0.68 V，已超过保护阈值，出现部分失保护现象。电位分布图显示，干扰电流方向与外加保护电流方向相反时，底板边缘区域出现明显的“电位洼地”，表明电流泄漏严重，保护电流难以维持均衡。该现象在靠近干扰源的方向尤为突出，说明杂散电流的空间分布不均导致电位场畸变。研究表明，当干扰电流密度超过临界值 15~20 A/m² 后，阴极保护效率下降幅度可达 30% 以上。由此可见，准确识别干扰电流强度与方向，对优化阴极保护系统设计、确保储罐长期安全运行至关重要。

4.2 阳极布置对电流分布的影响

阳极布置方式对阴极保护系统的均匀性和稳定性具有决定性作用。通过模拟不同阳极间距与分布形式的对比发现，阳极间距由 8 m 调整至 6 m 后，储罐底板电位均匀性指标提高约 23%，边缘区电位梯度显著降低。对称布置阳极能有效平衡电流密度分布，减少电位集中与局部过保护现象。若采用环状或扇形布置，可进一步优化底板电位分布，使保护电流更趋均匀。引入多点反馈控制系统后，阳极输出电流可根据实时电位差自动调节，实现“按需供电”式保护调控。该系统通过闭环反馈机制，使电位波动幅度降低至 ±20 mV 以内，显著提升抗干扰性能与保护稳定性。仿真与现场测试结果表明，在杂散电流较强的环境下，合理的阳极布局与智能电流控制能有效减少电位不均现象，是提升储罐阴极保护系统抗干扰能力的重要技术途径^[5]。

4.3 电流路径与干扰传播特征

通过电流流线分布与等势面分析可知，杂散电流在储

罐底板区域的传播呈现明显的空间集中性与方向性。模拟结果显示,电流主要集中于底板边缘及接地电极周围区域,形成电流密集带。当干扰源与储罐之间存在低电阻路径时,电流倾向沿该通路泄漏,导致保护系统局部电位上升、保护电流被分流。不同土壤电阻率对电流传播影响显著:当电阻率低于 $25\Omega\cdot m$ 时,土壤导电性增强,杂散电流分布范围扩大且泄漏强度增大;当电阻率高于 $60\Omega\cdot m$ 时,电流衰减较快,干扰影响范围明显缩小。分析表明,电流路径与接地极几何布局、金属连接点电位差及土壤湿度密切相关。为此,优化接地系统设计、调整引流路径及采用电气隔离措施,可有效削弱杂散电流干扰效应。研究结果为储罐阴极保护系统在复杂电气环境下的抗干扰设计与防护策略提供了重要的理论依据与工程参考。

5 阴极保护优化设计与工程措施

5.1 辅助阳极系统与电流屏蔽技术

针对储罐底板受杂散电流干扰严重的特点,建立辅助阳极系统是提高阴极保护均匀性的重要手段。通过在储罐外围或底板下方增设辅助阳极环、深井阳极组或分区阳极,可在电位不均区域形成补偿环场,改善局部电流密度分布。辅助阳极可与主阳极系统相互协调,通过独立控制单元对不同区域的输出电流进行调节,从而实现电位的动态均衡与精准控制。研究表明,当辅助阳极环间距控制在 $6\sim8m$ 范围内时,底板电位均匀性可提高约25%,有效抑制边缘区失保护现象。同时,在储罐与干扰源之间铺设非金属电流屏蔽层或采用防泄漏电缆,可切断杂散电流通路。此类屏蔽结构可利用聚乙烯复合绝缘材料或导电聚合物结构形成“反向电场”,减少杂散电流对罐底的耦合强度。辅助阳极与电流屏蔽的综合应用,使储罐底板形成稳定的电位保护区域,为复杂电气环境下的阴极保护系统提供可靠支撑。

5.2 绝缘与排流措施优化

储罐阴极保护系统在多金属接地环境中易受杂散电流“串扰”影响,故必须强化绝缘与排流系统设计。在罐体与管道、接地网等连接处设置高电阻绝缘接头,能有效阻断杂散电流经金属耦合进入储罐内部。针对已存在的干扰路径,可采用恒电位排流装置(CPSD)或极化排流器,将多余杂散电流引导回主回路,从而实现“定向排流—电位平衡—防腐保护”的协同效果。实测数据显示,安装恒电位排流装置后,储罐底板平均保护电位稳定在 $-0.93V$,电位波动幅度由原来的 $\pm80mV$ 降至 $\pm25mV$,整体保护效率提升约28%。此外,利用双向二极管排流技术可防止系统反向电流

侵入,提高长期运行的安全性。结合定期检测与维护机制,对排流电阻、绝缘性能及接地电位差进行周期性监控,可进一步提升系统可靠性与抗干扰能力。

5.3 监测与反馈控制系统建设

建立智能化监测与反馈控制系统是储罐阴极保护由经验型向数据驱动型转变的关键环节。通过布设分布式参比电极阵列,可实时采集罐底电位、电流密度及温度湿度等多维数据,形成连续监测网络。监测信号经物联网(IoT)传输至云端平台,系统自动分析电位偏差与干扰趋势,并通过智能控制算法(如PID调节或模糊自适应控制)自动调整阳极输出,实现闭环控制。结合BIM技术,可在三维数字模型中动态展示电位分布与腐蚀风险区,为运维人员提供可视化决策支持。研究表明,应用基于大数据的电位控制系统后,阴极保护电位稳定性提高35%,干扰响应时间缩短至原来的40%。此外,系统还具备远程报警、趋势分析与维护调度功能,实现储罐阴极保护的数字化、精准化与智能化管理。该体系的构建标志着储罐防腐由传统静态防护向智能防护的技术跃迁,为未来石化设施的长效安全运行提供了新范式。

6 结语

本研究基于数值模拟与实测验证,系统分析了杂散电流干扰下储罐底板阴极保护系统的电位分布与保护效能变化规律。结果表明,杂散电流是影响阴极保护稳定性的关键因素,其强度与方向对电位场分布具有显著作用。通过优化阳极布局、强化绝缘与排流措施、构建智能监测反馈系统,可显著提升抗干扰能力与保护均匀性。研究还指出,阴极保护优化应与防腐涂层、材料选择及接地系统协同设计,实现综合防护。未来工作可结合多物理场耦合模型,对杂散电流的时变特性及动态响应规律进行深入研究,为复杂电气环境下的储罐防腐系统提供更精细的设计理论与工程应用指导。

参考文献

- [1] 淡勇,王坤,武玮.储罐外底板腐蚀的研究进展[J].西北大学学报(自然科学版),2021,51(04):601-614.
- [2] 董亮,陈金泽,姚知林,等.地铁运行状态变化下杂散电流对埋地管道干扰数值模拟[J].装备环境工程,2021,18(04):33-42.
- [3] 赵永刚.阴极保护系统中管道受杂散电流干扰分析与排流保护研究[D].西安石油大学,2016.
- [4] 滕延平,张丰,赵晋云,等.杂散电流干扰下管道密间隔电位检测数据处理方法[J].管道技术与设备,2009,(04):29-31.
- [5] 董亮,陈金泽,姚知林,等.地铁运行状态变化下杂散电流对埋地管道干扰数值模拟[J].装备环境工程,2021,18(04):33-42.

Analysis of common problems and countermeasures in chemical wastewater treatment process

Zhidong Wang

Yunnan Yuntianhua Co., Ltd. Polyformaldehyde Product Division, Shuifu, Yunnan, 657800, China

Abstract

With the advancement of the chemical industry, the volume of chemical wastewater discharge has been increasing, and its composition has become increasingly complex. This not only complicates wastewater treatment but also causes significant environmental pollution. Traditional chemical, physical, and biological treatment technologies have become inadequate for meeting new demands in chemical wastewater management. Issues such as low efficiency, susceptibility to secondary pollution, high energy consumption, and elevated costs severely hinder the smooth progress of wastewater treatment initiatives. To address these challenges, it is essential to optimize treatment processes based on practical conditions. This includes adopting multi-stage integrated treatment technologies, intelligent monitoring and regulation systems, and green wastewater treatment solutions. By implementing these measures, we can effectively enhance treatment efficiency and achieve sustainable development with green and low-carbon practices in the chemical industry.

Keywords

chemical wastewater; treatment process; common problems

化工废水处理工艺中常见问题与对策分析

王志栋

云南云天化股份有限公司聚甲醛产品事业部，中国·云南 水富 657800

摘要

随着化工行业的发展，化工废水排放量逐渐增多，且废水组分也日益复杂，不仅加大化工废水处理难度，还对生态环境造成极大的污染。传统的化工、物理、生物等处理技术已经不适应化工废水处理的新需求，且处理效率低、容易引起二次污染、高能耗、高成本等问题，严重影响化工废水处理工作的顺利进行。基于此，要结合实际情况，优化化工废水处理工艺，如引进多阶段联合处理技术、智能化监控及调节系统、绿色废水处理技术等，从而有效提升化工废水处理效率，实现化工行业的绿色化、低碳化、可持续发展。

关键词

化工废水；处理工艺；常见问题

1 引言

为了实现化工行业的可持续发展，不仅要提升生产效率，同时需要加大化工废水处理力度，减少污水排放量，强化化工废水达标排放。针对传统处理方法的低效率、高能耗、高成本等问题，对化工废水处理技术进行创新升级，结合污染物特征，引进多阶段联合处理技术，并在人工智能技术支持下引进智能化监测与调节系统，同时对绿色处理技术进行优化应用，促进化工废水处理效率的提高，并控制处理成本，推动化工行业的长远发展。

2 化工废水特点

化工废水组分较为复杂，且化工生产中排放的废水中有害污染种类较为多样化，不仅含有大量的重金属、有机物和无机盐等，同时包含大量化学溶剂、油污等，它们彼此之间容易产生交互作用，加大了化工废水的毒性和有害性，增加废水处理过程的复杂性和难度。例如，生物降解技术应用中，容易受到废水中某种化学溶剂的影响，一定程度上抑制该技术的处理效用。此外，化工废水水质波动较大，尤其是不同化工企业的生产材料、生产工艺等不同，致使化工废水的组分、污染物浓度存在很大波动，这种现象也会无形中影响废水处理工艺的稳定运行，且对处理设备、工艺提出了更高的要求^[1]。同时由于化工废水水质波动较大，也会缩短设备使用寿命，加大设备维护成本，降低化工企业的利润空间。化工废水中含有大量的重金属离子、可降解的化学物质

【作者简介】王志栋（1982-），男，本科，中国云南红河人，工程师，从事废水处理、精细化工研究。

等，这些物质的可回收价值较高，因此在加工过程中对以上资源进行循环利用，既可以减少资源浪费，且还能够控制废水处理成本，提高废水处理的经济效益，推动化工行业的可持续、绿色化发展。

3 化工废水处理工艺中常见的问题

3.1 高能耗、高成本

传统的膜过滤法和热力蒸发法等废水处理方法，虽然处理效率较高，但是能耗较高，且成本投入大，难以对大规模、成分复杂的废水进行有效净化。在废水处理过程中需要消耗大量的化学药剂、吸附材料等，且处理设备维护成本高^[2]。因此，在未来发展中要持续优化废水处理工艺，在保障处理效率的基础上降低能耗和成本。

3.2 处理效率较低

随着科学技术的发展，化工废水处理技术水平日益提升，进一步提升了处理效率。但是传统的物理、化学、生物等处理方法，难以对复杂成分、高浓度污染物污染物进行高效处理，甚至不能有效降解废水中的有机污染物、重金属离子等。例如，吸附法应用中，吸附炭容易饱和，不仅成本较高，且处理效率低；化学沉淀法只能去除废水中特定的重金属物质。因此，怎样高效处理高浓度、有害污染物是未来化工废水处理技术的重要优化方向。其中，不同方法的处理效果如表1所示。

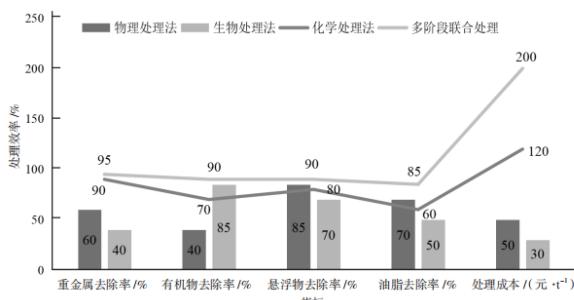


图1 化工废水预处理工艺流程

3.3 引起二次污染问题

在化学絮凝法、吸附法等传统处理方法应用中，往往会在废水中残留化学药剂等，加大二次污染概率，对生态环境造成新一轮的污染^[3]。因此，怎样减少废水处理过程中的二次污染是废水处理技术的优化方向之一。

4 化工废水处理工作的改善措施

4.1 引进多阶段联合处理技术

随着化工行业的发展，化工废水组分越来越复杂，对废水处理工程带来了极大的挑战。为了提升废水处理效果，需要引进多阶段联合处理技术，即对物理、化学、生物等多种技术进行联合使用，并通过多期分步处理，有效去除废水中的各种污染物。在具体操作中，首先，需要使用物理技术脱除废水中的大颗粒悬浮物、油脂、颗粒污染物等；然后，

使用氧化还原反应、絮凝沉淀等化学技术，净化废水中的有机物、无机污染物、重金属等；最后，利用生物处理技术分解废水中的石油污染物、合成化学物质等难分解的有机物。在以上作业前，需要做好化学废水预处理工作，如图1所示。通过这种方式能够有效提升化工废水处理效率，并可以结合废水水质差异、污染物浓度等差异性，针对性选择最优的处理方法，有效提升处理成本和能耗^[4]。

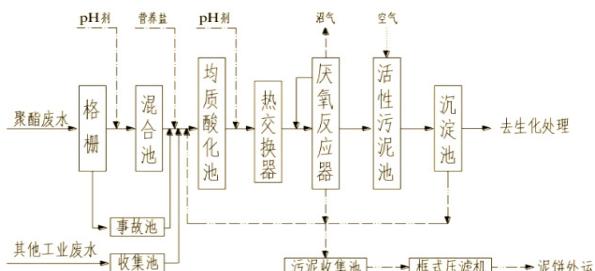


表1 化工废水处理方法的效果数据对比图

其中常见的废水处理技术操作方法为：（1）物理处理工艺，即利用物理方法过滤废水中的悬浮物，常见的物理方法有吸附法、重力沉淀法等。其中纳米气泡技术的应用，可以延长悬浮时间，强化去除效果。为了对废水中的乳化油、溶剂油等物质进行有效净化，需要引进多级气浮方法。吸附法就是利用吸附剂材料的表面微孔对污染物进行吸附，常见吸附剂有活性炭、三氧化二铝、沸石等，有效清除废水中的色度、化学需氧量等，但是该方法成本较高，且会引起二次污染，因此需要创新和升级吸附材料，如金属氧化物、石墨烯等，强化吸附效果。膜分离技术能够对废水进行过滤，如利用反渗透双膜法对煤化工废水中的电解质进行清除。（2）化工处理工艺，该技术应用中，可以通过羟基自由基的氧化效应，对废水中的污染物进行氧化降解。其中化学氧化技术主要有：紫外光氧化方法，能够通过紫外线、催化剂的相互作用，形成羟基自由基，进而产生氧化效应，进而净化废水中的有机物；湿式氧化技术应用中，主要是设置高温、高压环境，并在催化剂作用下，对废水中的污染物进行净化清除；电化学氧化技术，即在特定光照、电能、磁场等条件下，利用化学反应降解废水中的有机物；脉冲电晕技术，即通过高能电子、脉冲效应等产生电子束，进而高效降解废水中的有机物，但是该方法成本较高。（3）生物处理工艺，该技术主要是利用微生物的新陈代谢作用，对有机污染物进行降解，进而达到净化废水的目的，该方法效果较高，且成本低，方便维护管理^[5]。其中好氧生物处理法的应用，能够通过生物膜的吸附作用，降解废水中的有机物；厌氧生物处理法，能够通过生长微生物的新陈代谢效应，有效分解废水中的污染物。此外，生物处理技术还可以与菌种选育技术联合应用，结合废水中污染物特征，针对性筛选微生物，生成活性污泥，进而有效清除废水中的污染物。（4）低温等离子体技术，这是一种高级氧化技术，主要是通过放电产生等离子体，进

而与废水中的有机物产生氧化反应，对污染物进行分解。该技术应用中，不需要添加催化剂，且成本较低。

4.2 应用智能化监控与调节系统

信息时代，自动化控制技术、人工智能等现代化技术在各个领域获得了良好的应用和推广，在化工废水处理工艺中引入智能化监控与调节系统，能够对化工废水的各项参数进行全天候动态监控，如污染物浓度、温度、酸碱度等，并把采集的数据即时反馈到自动化控制系统中，并以此为依据动态调节处理工艺，只有这样才能保障化工废水的达标排放。此外，在大数据分析技术、云计算、机器学习技术的联合作用下，还可以助力智能化监控系统对废水处理过程进行精准调控，同时持续优化调节处理技术^[6]。在实际作业中，智能化监控系统能够自动识别废水水质波动情况，然后自动调节各类技术参数，如药剂投加量、反应时间等，进而稳定水质，保障废水处理效果稳定性。通过该技术的应用，能够强化废水处理自动化程度，减少人工干预，降低人为操作失误，将操作成本控制到最低。此外还可以通过历史数据分析工作，精准预测未来化工废水中可能存在的污染物种类、浓度等参数，并制定针对性预防措施，减少超标排放问题。

4.3 优化绿色化工废水处理技术

该技术往往是利用低能耗、低污染的治理方法，对化工废水进行可持续、绿色化处理。（1）绿色技术是一种前沿化的废水处理技术，即在化工生产中使用环保材料，并使用能源高效技术，这样可以减少化工生产的污染排放量，并对材料进行循环使用。（2）绿色催化剂的应用，可以提高污染物降解反应速度，这样能够减少污染物处理过程中的能量消耗，而且催化剂可以循环利用，进而把材料消耗控制在最小化，避免生产太多的废弃物^[7]。（3）生态工程方法，

即通过人工湿地、湿地植物等方式进行废水处理，这样能够对水质进行净化，实现化工废水的持续性处理。此外湿地植物还能够吸附并降解废水中的重金属、有毒物质等，而且这种处理工艺较为温和，不会产生二次污染。由此可见，通过绿色化工废水处理技术的应用，可以提高废水处理效果，促进废水处理工作的绿色化、低碳化发展。

5 结论

综上所述，新时期，为了提升化工废水处理效率，需要对现有物理方法、化学方法、生物方法等进行创新和升级，尤其要引进多阶段联合处理技术，并对智能监控与调节系统进行优化应用，科学使用绿色废水处理技术，全面提高废水处理效率，促进资源回收，推动废水处理行业的可持续化、绿色化发展。

参考文献

- [1] 楚荣强,周丽娜. 化学工程中废水处理技术的优化与创新研究 [J]. 山西化工, 2025, 45 (09): 245-247.
- [2] 唐湘姬. 化工废水处理工艺现存问题与优化对策探讨 [J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54 (07): 82-84.
- [3] 张文君. 蒸发+生化工艺处理化工废水的研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (11): 19-21.
- [4] 高超,李维. 煤化工废水处理面临的挑战及技术优化策略分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (08): 151-153.
- [5] 郑朝椅. 精细化工厂废水处理工艺技术 [J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53 (06): 71-73.
- [6] 欧阳滔,刘君,朱春游. 高盐化工废水回用处理工艺研究 [J]. 再生资源与循环经济, 2024, 17 (04): 29-33.
- [7] 牛志军. 煤化工废水处理工艺与适用性技术研究 [J]. 山西化工, 2024, 44 (03): 229-230+234.

Safety Monitoring and Emergency Response Technology for High-Temperature, High-Pressure Sulfur Gas Wells

Yipeng Liu

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710299, China

Abstract

As China intensifies its exploration of oil and gas resources, high-temperature, high-pressure sulfur gas fields have become a major focus in the industry. These gas fields present significant safety risks during development due to high hydrogen sulfide content, elevated formation pressure, and extreme temperatures. This study systematically analyzes safety monitoring technologies and emergency response mechanisms for high-temperature, high-pressure sulfur gas wells. Key research focuses include wellhead safety control systems, video surveillance networks, integrated gas transmission system safety management, and equipment corrosion prevention technologies. Comprehensive management strategies are proposed, encompassing institutional development, safety training programs, and emergency drills. The research provides technical support and management references for the safe and efficient development of high-temperature, high-pressure sulfur gas fields through establishing a multi-layered security monitoring and emergency response system. The findings demonstrate that intelligent monitoring solutions and robust emergency response mechanisms can significantly enhance intrinsic safety levels at well sites, reduce accident rates, and ensure the safety of personnel and property.

Keywords

high temperature and high pressure; sulfur gas field; safety monitoring; emergency response; wellhead control; corrosion protection technology

高温高压含硫井场安全监测与应急响应技术

刘意鹏

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 710299

摘要

在我国不断深入开发石油天然气资源勘探，高温高压硫气田日益成为产业关注的热点。这类气田在开发过程中安全危险较大，硫化氢含量高，地层压力大，温度高。对高温高压含硫井场安全监控技术和应急机制进行了系统分析，围绕井口安全控制系统、视频监控系统、集输系统安全控制及设备防腐技术等关键技术进行了系统研究，提出了综合管理对策，包括制度建设、安全培训、应急演练等内容。为高温高压含硫气田的安全高效开发提供技术支持和管理参考，通过建立全方位、多层次的安防监控和应急响应体系。研究表明，井场本质安全水平的显著提高、事故率的降低、人员生命财产的安全，都可以通过智能监控手段和完善的应急响应机制的来实现。

关键词

高温高压；含硫气田；安全监测；应急响应；井口控制；防腐技术

1 引言

高温高压含硫气田指地层温度在 150℃以上，压力在 70MPa 以上，含硫量在 2% 以上（即 30G/M3 以上的天然气藏）。我国四川盆地、塔里木盆地等地区普遍分布此类气藏，其研制具有较难、较高的安全隐患、较突出的环境影响等特点，在我国四川盆地、塔里木盆地等地均有较多的发展空间。由于高温高压环境对材料设备的耐压、耐温性能要求较高，

加之高温高压环境下对设备的安全监控和应急处置工作成为开发过程中的核心环节，硫化氢不仅具有很强的毒性，而且对设备也具有很强烈的腐蚀性。本文结合现有的技术标准和现场实践，以提升此类气田安全管理水、保障人员环境安全为目标，系统阐述了高温高压含硫井场安全监控技术和应急处理机制。

2 高温高压含硫井场安全监测技术

2.1 井口安全监测系统

作为气井与地面系统的接口，井口是重点进行安全监控的区域。高温高压含硫井场井口安全监控系统主要包括以

【作者简介】刘意鹏（1982-），男，中国甘肃庄浪人，本科，工程师，从事石油工程、钻井现场安全管理研究。

下几个部分，一是实现井口与站场联锁合断并具有逻辑顺序启闭功能的紧急关闭系统(ESD)；二是远程终端控制系统(RTU)。对井口压力、温度等参数进行实时传输，负责数据采集和远程控制；三是与井下安全阀(SCSSV)配套的地面安全阀(SSV)，在发生火灾、压力异常或煤气泄漏等情况下自动关闭；四、易熔塞及火焰探测器，感应火灾讯号，触发熄火；五、压力/温度传感器，对井口、套筒的运行状况进行实时监测。该系统以具有高可靠性和快速反应能力的气液联动原理为基础，能够在10秒钟内完成紧急关闭井口，有效防止事故的扩大。

表1 高温高压含硫井场主要监测参数及阈值

监测参数	正常范围	报警阈值	关断阈值
井口压力	70~105 MPa	≥110 MPa	≥120 MPa
井口温度	150~180°C	≥190°C	≥200°C
H ₂ S 浓度	≤20 mg/m ³	≥30 mg/m ³	≥50 mg/m ³
可燃气体浓度	≤10% LEL	≥20% LEL	≥40% LEL

防治技术主要包括，通过加热、保温等措施使管线温度高于硫露点10~15°C，是目前硫沉积中含硫气田发展的一个典型问题。采用节流控制，对压力降进行合理设计，避免因温度急剧下降而引起硫析出，从而达到合理的设计目的。研制高效硫溶剂及抑制剂，有效浓度50~100ppm的二苯基二硫醚等。新型纳米复合抑制剂能减少70%的硫沉积量。表1所示，高温高压含硫井场主要监控参数和阈值智能清管器，配有各种检测传感器，对管道中的沉积物状况进行实时监控，如表1所示。清管周期是根据实际运行情况而进行的动态调整的，一般是30天到90天的时间。硫沉积厚度实时监测采用超声波测厚、射线检测等方法。新型光纤传感技术能够做到分布式测量，并且有±1个米的定位精度。

2.2 视频监控系统

视频监控系统作为“无声的第三只眼”，在井场安全监控中发挥着不可替代的作用。系统基于宽带网络实现图像远程采集、传输与处理，具备以下功能，全覆盖、无盲区监控井组与站场；与气体检测、火灾报警、周界入侵等系统联动；自动弹出报警区域画面，实现报警联动；支持远程控制与录像回放，便于事故追溯。

2.3 集输系统安全监测

输电系统是气田发展的“血管”，它的安全运行与整个气田的安全生产有着直接的关系，输电系统的安全运行的安全性是直接相关的。在含硫环境下，高温高压对输电体系提出了多方面的风险，硫沉积、腐蚀和泄漏。对高温高压含硫井场的安全监测技术和应急响应机制，以现有技术标准和现场实践为基础，结合理论分析和案例研究进行了系统的阐述。研究内容包括井口安防监控系统、视频监控系统，集输

系统安控，设备防腐技术，应急反应机制和安全管理对策等，并对高温高压含硫气田的安全高效开发进行了研究，安全保障体系的建设、安全、安全。

2.3.1 硫沉积监测与防治

硫沉积是发展含硫气田中普遍存在的问题，特别是节流阀、分离器等部位容易堵塞，温度和压力变化很大。采用加热、保温、节流等工艺对硫析出进行控制；以硫溶剂或抑制剂的加注；采用智能清管技术对管道进行定期清扫。硫沉积是主要包含硫气田发展中的典型问题，防治技术包括，使管线温度高于硫露点10~15分钟，通过加热、保温等措施进行防治。采用节流控制，合理设计压力降，避免由于温度急剧下降而造成的硫析出现象的发生。研制二苯基二硫醚等高效硫溶剂和抑制剂，使50~100ppm的浓度得到有效提高。新型纳米复合抑制剂可使硫沉积量降低超过70%的浓度。智能清管器配多种检测传感器，能对管道内的沉积状态进行实时监控。清管周期根据运行实际状况进行动态调整，一般为30天。硫沉积厚度实时监测，采用超声波测厚、射线检测等手段。采用超声波测量、定位精度达±1米的方式，可实现光纤传感技术的分布式测量。通过下列几种手段加以防治，采用加热、保温、节流等工艺对硫析出进行控制；以硫溶剂或抑制剂的加注；采用智能清管技术对管道进行定期清扫。硫沉积是主要包含硫气田发展中的典型问题，防治技术包括，使管线温度高于硫露点10~15分钟，通过加热、保温等措施进行防治。采用节流控制，合理设计压力降，避免由于温度急剧下降而造成的硫析出现象的发生。研制二苯基二硫醚等高效硫溶剂和抑制剂，使50~100ppm的浓度得到有效提高。新型纳米复合抑制剂可使硫沉积量降低超过70%的浓度。智能清管器配多种检测传感器，能对管道内的沉积状态进行实时监控。清管周期根据运行实际状况进行动态调整，一般为30天。硫沉积厚度实时监测，采用超声波测厚、射线检测等手段。采用超声波测量、定位精度达±1米的方式，可实现光纤传感技术的分布式测量。HS和CO在高硫环境下协同作用，使设备腐蚀加剧。

2.3.2 腐蚀监测与控制

腐蚀控制技术中抗硫化物(如L80、C110等)的选用；添加抗腐蚀药物；腐蚀探针的安装和网上监控系统的安装；壁厚检测和智能内测定期开展。高温高压含硫气田开发特点高温高压含硫气田是指地层温度在150°C以上，压力在70MPa以上，硫化氢含量在2%以上的天然气储藏(即30g/mm³/h)。此类气藏广泛分布于我国的四川盆地、塔里木盆地等地区，其开发特殊性十分显著。储层埋藏深度，一般在地质构造复杂、非均质性强的4500~8000米之间。

2.3.3 泄漏监测与阀室设置

在集输管网设置阀室，分段控制气体流动，一旦发生泄漏可迅速切断。同时，建立立体气体泄漏监测网络，包

括, H₂S 探测器; 可燃气体报警器; 激光对射检测仪; 压力变化监测装置。

3 应急响应技术

3.1 自动关断与放空系统

当发生漏电、火灾或压力异常时,依次将 SSV 与 SCSSV 关闭,使关断程序由 ESD 系统自动触发。放空系统同时起动,将高压气体从管道中引到火炬上燃烧,从而起到防止超压爆炸的作用。自动关闭系统与放空系统构成了高温高压含硫井场安全生产的最后一道安全防线。其技术先进性和可靠性是决定这两个系统协调运转与否的直接因素,其控制程度是十分重要的。

3.2 应急指挥与联动机制

建立信息共享、统一调度的企业地方联动应急指挥中心。应急响应流程包括,报警信息接收与确认;启动应急预案;切断泄漏源、疏散人员;启动放空与消防系统;组织抢险与医疗救援。对含硫高温高压气田突发事故,建立科学有效的应急指挥和联动机制是组织保障。该机制整合企业资源、政府力量、社会支持,形成应急响应体系,具有全方位、多层次的系统性特征。应急指挥系统采用组织架构,做到三级指挥、分级响应,确保及时有效的应急处置下、上能下、下能下的应急指挥体制。

现场指挥部作为一线指挥机构,设立在事故现场的安全区域。指挥部由现场最高负责人担任总指挥,成员包括工艺、设备、安全、医疗等专业人员。指挥部配备移动应急指挥车,车内集成通信系统、监控终端和决策支持系统,能够在断电、断网等极端条件下维持 4 小时以上的独立运行能力。现场指挥部的主要职责包括,初期灾情评估、人员疏散组织、初期灭火控制、医疗救护协调以及向上级指挥部实时汇报现场情况。

3.3 应急演练与培训

定期进行应急演练,增强员工应对紧急情况的应变能力。演练内容应包括,硫化氢泄漏应急处置;火灾爆炸事故救援;人员疏散与医疗救护;与地方政府联动协调。表 2 所显示的十种安全监控系统的功能比较,建立多层次的演练体系通过表格可以看出,桌面推演,每季度一次,重点训练指挥决策和协调能力,在每半年一次的基础上,对突发事件进行演练,并对突发事件作出相应反应。对每半年进行一次功能演练进行检测,对具体的应急职能进行有效性的测试。

4 安全管理对策

4.1 制度体系建设

依据《高含硫化氢气田地面集输系统设计规范》(SY/T 0612-2014)等标准,建立健全安全管理制度与操作规程,重点强化井控管理、用火作业、承包商管理等环节。

4.2 安全培训

所有从业人员必须具备基本事故防范知识和应急处置技能的硫化氢防护培训,并持证上岗。建设完备的训练体系,训练时间不少于 72 学时,包括硫化氢的防护、应急装备的使用等。每年开展不少于 40 学时的针对特定岗位的专项技能培训。每两年复训一次,每两年考核一次,保证连续技能达标。

4.3 智能化监控平台建设

为实现风险预警、智能诊断和决策支持,构建智能安防监控平台,实现联网、大数据和人工智能技术的结合。在实际应用中,通过智能视频分析,智能视频监控系统展现出从“事后可追溯”到“事前预警”的显著优势,提高了预警能力。在某气田部署系统后,包括人员违规进入危险区、设备处于非正常状态等在内的多起安全隐患事故被成功预警。管理效率提高,在极端气象条件下仍能保持有效监控,自动生成巡视报告,减少人工巡视频次。紧急情况加速反应,并与其它保安系统联动,可在 2 秒钟内将警报讯息传递至相关职位,支援远距离紧急应变指挥决定。

5 结论

高温高压含硫井场安监及应急响应是需要从多维度综合施策的,包括技术、管理、标准等多个维度的系统工程。开发风险的有效控制、安全生产的保障,可以通过建立完善的安全监测体系、完善的应急处理机制以及科学的管理体制来实现。今后高温高压含硫气田的安全开发水平将随着新技术的发展和应用而不断提高,从而为我国能源安全提供强有力的保障。开发高温高压硫井场具有高危险性、高技术要求等特点。

参考文献

- [1] 杨杰,赵勇,贺伟东,等.高含硫气田丛式井场安全控制技术及管理对策[J].安全、健康和环境,2024,17(05):1-4.
- [2] 盖文妹,邓云峰,李竟,等.高含硫井场应急广播系统通知效能评估方法[J].安全与环境学报,2024,14(03):126-131.
- [3] 杨光炼,刘飞,潘登,等.试油测试过程中的安全环保技术作业——以川渝地区为例[J].天然气工业,2024,34(05):158-162.

Analysis of Drilling Fluid Properties ‘Impact on Wellbore Cleaning Efficiency in Complex Formations

Shiqiang Guo

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling General Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

Under complex formation conditions, wellbore cleaning status during drilling directly affects drilling safety and speed. By observing wellbore structures under different formation types from multidimensional perspectives and integrating cuttings migration mechanisms, this study investigates the influence mechanisms of drilling fluid properties on wellbore cleaning efficiency through rheological characteristics, density, solid phase content, and chemical stability. Results indicate: 1) The matching degree between rheological properties and annular return velocity determines cuttings suspension and transportation efficiency; 2) Density regulation ensures wellbore stability and cuttings transport differential pressure field; 3) Solid phase regulation combined with inhibitor treatment effectively mitigates wellbore instability and mud cake thickening.

Keywords

Complex formations; Drilling fluid properties; Wellbore cleaning; Rheological characteristics; Cuttings transportation efficiency

钻井液性能对复杂地层井眼清洁效果的影响分析

郭世强

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 710200

摘要

由于复杂地层条件下钻井过程中井眼清洁状况直接影响钻井安全与钻进速度，在运用多维度的视角观察地层类型下井眼结构的基础上，并结合岩屑迁移机理，从钻井液流变性、密度、固相含量及钻井液化学稳定性等方面出发，探讨钻井液性能指标对井眼清洁效果的影响机制。结果表明：流变性能-环空返速匹配度决定了岩屑悬浮和携带效果；密度调控确定了井壁稳定、携屑压差场；固相调控与抑制剂共治可有效缓解井壁失稳和泥饼增厚等问题。

关键词

复杂地层；钻井液性能；井眼清洁；流变特性；携屑效率

1 引言

钻井液是井眼清洁的主要介质，钻井液的流变特性、密度和固相含量直接影响到携屑能力及环空流场稳定，而随着深井、超深井工程发展迅猛，传统的经验式钻井液设计方式已无法满足其井眼清洁的动态需求。针对上述情况，学界、工程界不断尝试探索钻井液性能的多参数耦合优化途径，通过对流变性、密度、地层等多参数耦合作用下钻井液流动剖面、携屑能力等钻井液性能变化的研究，以及数值模拟和现场监测分析钻井液流变性和密度、地层之间的耦合机理。结合不同地层复杂特点，对钻井液各项关键性能参数作用于井眼清洁效应的内在机理进行全面、深入的分析，建立不同地层条件下的钻井液优化模式，最终达到提高井眼清洁度的目

的，实现钻井安全可靠平稳运转。

2 复杂地层井眼清洁的工程特征与钻井液性能需求

2.1 复杂地层井眼清洁的典型问题

复杂地层井眼清洁还存在一系列工程性问题。典型的如岩屑沉积、环空流场不均匀、井壁坍塌和井径扩大。高斜深和水平井段由于受到重力作用，在井筒底部低侧较易发生岩屑沉积，严重影响了环空携屑能力。当钻进速度快、钻井液流变性能不好时，环空不易携带出掉落的大块岩屑，容易造成环空堵塞，引起井下憋泵、蹩漏、甚至井涌、卡钻的现象。软弱胶结的软塑性地层、循环过程极易出现掉片、泥页岩剥落等复杂情况，造成清洁系统负担加重，返速不够。非均质性的地层及地层压力系统的复杂性导致井眼清洁过程的非稳定性比较严重，而钻井液剪切稀化、屈服应力变化较大都会引起流体流态的变化。

【作者简介】郭世强（1980-），男，中国甘肃会宁人，本科，工程师，从事钻井工程研究。

2.2 钻井液在井眼清洁中的作用机制

钻井液在井眼清洁方面的机理是，钻井液的环空流性能决定了岩屑在井底的受力状态和迁移路径。钻井液剪切速率、屈服应力和黏度等参数能够控制岩屑能否被低速流场包裹而带出井底。当钻井液为层流—紊流复合流态时，能增加井底的扰动及岩屑的分散程度，有利于井眼自清。钻井液中固相颗粒能通过黏附、碰撞等作用，来完成钻屑运移过程。钻井液的固相颗粒在钻屑传输过程中的分布均匀性和粒径结构，能够显著影响流体的携屑能力和井壁应力分布状态。

2.3 钻井液性能参数对清洁效果的影响规律

钻井液性能参数的合理配置对提高清洁效率有着重大作用，流变特性、密度、固相含量及化学稳定性。其中流变性能参数是指塑性黏度和动切力，这两者主要反映的是钻井液携屑和悬浮能力，当它们发生变化时会直接影响岩屑返速以及井眼流场稳定性^[1]。如果钻井液黏度过低，则会影响岩屑携带性能，反之则增加了泵压及能耗，不利于形成高效循

环，流变参数控制至低剪切高黏度或强剪切低黏度是复杂地层井眼清洁的技术措施之一。钻井液密度影响井底压差和地层孔隙压力平衡，钻井液密度大，可增大携屑压差驱动力，但是过高容易超过地层破裂压力造成漏失。

3 钻井液性能参数与井眼清洁效率的关联分析

3.1 流变性能与返速匹配规律

钻井液的流变参数包括塑性黏度、动切力和屈服应力等，它们决定了钻井液在不同剪切速率下的流动状态与携屑能力。当环空返速低于临界携屑速度时，岩屑易于在井底低侧沉积，形成携屑死区；而当返速过高，则会导致井壁冲刷与压力波动，对井眼稳定性造成不利影响。通过调节流变性，实现低剪切高黏度与高剪切低黏度的双重特性，可在不同井段动态维持携屑效率与能耗的平衡。研究表明，在长庆油田高倾角井施工中，钻井液塑性黏度保持在28~32 mPa·s、动切力控制在8~10 Pa范围内时，岩屑返出率提升约20%，并有效抑制井底沉积。如表2-1所示：

表2-1 不同流变参数下岩屑返出率与清洁效率对比

序号	钻井液塑性黏度 (mPa·s)	动切力 (Pa)	环空返速 (m/s)	岩屑返出率 (%)	清洁效率提升幅度 (%)	备注
1	22	6	0.55	68.2	0	传统体系
2	26	8	0.6	77.9	14.2	稳态携屑改善
3	30	9	0.62	82.4	20.1	最优匹配区间
4	34	11	0.66	79.6	16.7	黏度偏高能耗上升
5	28	10	0.58	81.2	18.4	现场优化结果

3.2 钻井液密度与携屑能力的耦合关系

就钻井液密度与携屑能力的耦合而言，钻井液密度增大有利于提高环空静压，进而增加上返流的剪切力和携屑动能，但是当密度高于地层破裂压力时会容易造成漏失、井漏、卡钻等事故。另外如果密度过小就会造成地层压力失衡，岩屑的沉降更加严重，而此时的钻井液密度就与井下携屑效率之间是呈非线性关系的，只有在一定的范围内才合适，所以应该结合地层孔隙压力、井径结构和岩屑粒度的分布合理选择钻井液密度的大小^[2]。从长庆地区的实际钻井情况来看，一般在页岩泥质砂岩组合地层使用钻井液密度保持1.20~1.35 g/cm³时，既能够保证环空流体动压梯度不变，又能够维持地层中的岩屑悬浮，携屑效率相比于常规配比提高约15%。

3.3 固相控制与化学稳定性调节策略

钻井液中固相颗粒的数量和粒径大小会影响其流变性和滤失特性，当固相颗粒中超细固相偏高时会使得流体的黏度异常升高，滤饼增厚，携屑阻力增大。相反，如果固相颗粒偏低，则容易导致岩屑悬浮和井壁支撑能力变差。利用机械分离法、化学稀释法相配合来使固相含量稳定维持在4%~6%，使流体黏度、携屑能力处于动态平衡的状态是非常有效的办法。化学稳定性的调节，在弱胶结地层里面往往

会导致页岩水化膨胀和碎屑分散，应该使用抑制剂-包被剂-润滑剂组合体系来增强钻井液的抗水化性、抗离析性。长庆钻井总公司第四工程项目部，在弱胶结砂岩井段使用了聚阳离子包被加有机胺抑制剂复合体系，滤失量较之前降低了30%，井壁坍塌的风险降低了大约18%，携屑效果得到了充分的改善。

4 不同地层条件下的钻井液优化应用分析

4.1 高倾角与水平井段的钻井液设计参数优化

钻井液设计需在携屑效率与流动阻力之间实现最优平衡，其关键在于流变参数的定向优化与返速动态匹配。针对长庆地区高倾角井施工特点，通过数值模拟与现场数据反演，确定塑性黏度应维持在30~35 mPa·s、动切力控制在9~11 Pa、环空返速保持在0.6~0.7 m/s的区间内，可实现岩屑连续悬浮与定向迁移。为防止井底沉积带形成，采用低剪切高黏度的触变性钻井液体系，在钻具滑动状态下可形成自支撑环流，提高岩屑返出率。与此同时，通过调整井眼压力梯度与流型分布，使井底切屑再悬浮能力增强。项目部在高倾角井段应用复合型聚合物钻井液体系后，岩屑返出率提升21%，钻具扭矩下降15%，表明参数优化可显著改善复杂井段的清洁稳定性与钻进效率。如图3-1所示：

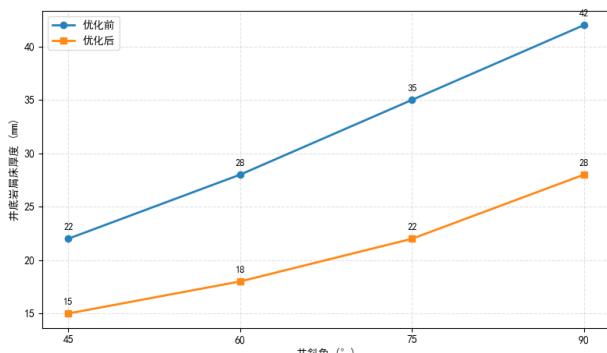


图 3-1 高倾角与水平井段清洁效果优化对比

4.2 弱胶结与易塌地层中的钻井液稳定控制

弱胶结和易塌地层中钻井液稳定体系应具有抑制性和封堵性功能，在钻进过程中用合理的滤失量和适宜的化学稳定性来维护井壁动态稳定。长庆钻井总公司第四工程项目部对泥页岩或砂质泥岩地层，选用聚阳离子包被剂、有机胺抑制剂和纳米封堵剂组合成分体系，形成了以聚阳离子包被剂、有机胺抑制剂和纳米封堵剂为主，实现岩屑表面致密的包裹吸附膜、减小孔隙度、减缓吸水膨胀速度、纳米颗粒嵌入微裂缝自愈修复等作用的一套复合型稳定体系。该体系试验结果表明与常规抑制型钻井液相比，其滤失量降低了32%，井壁坍塌的概率降低了18%，携屑稳定性得到明显的改善。

4.3 井下携屑流场优化与现场监测技术应用

井下携屑流场优化和现场监测技术结合CFD(计算流体力学)模拟和现场传感器数据实现钻井液流态分布携屑效率量化模型建立，在现场应用压力波动及环空返速智能监测系统，实时采集流体密度、流速、剪切应力参数数据并利用算法判断岩屑沉积的趋势。在系统检测流速低于临界携屑速度之后，自动调节泵速或钻井液流变性参数，通过闭环控制来完成；根据各井段不同流态特性，进行优化喷嘴布置，合理分配流体分配，加大环空紊流扰动程度，提高携屑动能。从井下流场优化监测系统联控表明，在典型水平井段开展流场优化监测系统联控后，可提高岩屑返出率17%，降低井底岩屑沉积厚度25%，提高钻进速度约0.8m/h。

5 钻井液性能优化的现场应用与经济效益分析

5.1 综合优化体系的建立与实施效果

该项目部通过建立井下压力监控传感器、环空流速传感器和携屑浓度检测设备，建立数据驱动的钻井液运行性能反馈机制，由原来的依靠经验控制升级为智能化精确匹配^[3]。在高斜度井和弱胶结地层中，通过对塑性黏度控制在30-35mPa·s，密度控制在1.25-1.35g/cm³，固相控制在5%-7%内，在保证岩屑返出率的前提下提高携屑效率，确保井壁稳定，现场统计表明，运用综合优化体系以后岩屑返出率提高了19%，降低钻具扭矩13%，降低了卡钻的风险，钻井周期缩短了1.5~2.0天，同时应用这项技术进行完井，具备

相应的技术借鉴意义。

5.2 安全与经济效益的量化分析

项目部通过对20口采用传统钻井液与优化体系井的生产数据，发现优化体系下的平均机械钻速提高8.6%，钻井周期缩短约11%，单位井造价平均降低5.3%。由于钻井液返速稳定与环空流态均匀，卡钻事故率由7.8%降至2.1%，井漏事件减少近40%，直接节约钻具维护及抢险成本约35万元/井。安全方面，通过降低井底压差波动幅度与泥饼厚度，减少了井壁坍塌与井涌风险，钻井安全等级由Ⅱ级提升至Ⅰ级。经济测算显示，在单井钻井成本控制目标为800万元的条件下，钻井液优化体系每口井可节约成本约42万元，间接经济收益约占工程总投资的3.8%。如表4-1所示：

5.3 管理经验与现场推广建议

项目部在推广该方法的过程中总结出三点经验：一是建设“设计—检测—反馈—调整”的四级联动体系，做到设计方案到现场施工全周期的闭环；二是实行钻井液性能数字化看板管理，将流变参数、密度、固相含量等重要指标以图表化方式展示出来，达到实时监控与预警的目的；三是开展好技术培训及落实好标准化施工，使现场的操作工人能够及时准确识读参数并正确调节参数。根据不同的地层类型，可按分区分类的方式分片逐步开展，例如对于高倾角井段先做流变控制和携屑监测，对弱胶结地层先做化学稳定和滤失控制，从管理上来讲可以引入钻井液性能数据库、AI辅助诊断模型开展参数预测工作。

6 结论

复杂地层条件下井眼清洁效果受钻井液流变特性、密度调控、固相控制、化学稳定等多方面耦合作用的影响。采用流变-密度-固控-化学流体性能综合优化体系，以调节钻井液流体性能为驱动，钻井液流体携屑与井下流动特性相适应，实现携屑效率、井壁稳定性和能耗控制的最佳协同，发挥最佳钻井液流体性能，强化了地层清洁能力。现场施工数据显示，该体系对改善高倾角井、弱胶结地层岩屑返出率、增强钻进稳定性、减缓卡钻、井漏等事故、缩短钻井周期、降低成本有重要作用。理论研究成果表明，利用大数据和智能调控是提高复杂地层井眼清洁度的有效途径，该综合优化体系可将钻井液技术向智能化、精准化、经济化的方向进一步发展，同时对该类地层的钻井液技术具有一定参考价值及广泛的推广应用前景。

参考文献

- [1] 刘伟,欧阳伟,彭陶钧.石油钻井超深井大尺寸井眼段清洁因素分析[J].化工设计通讯,2023,49(02):42-44.
- [2] 聂强勇,陈新,杜仕勇,等.HEMA抗高温钻井液性能优化[J].当代化工研究,2023,(16):170-172.
- [3] 刘成.钻井液在复杂地层中的流变性调控问题与对策研究[J].石化技术,2025,32(05):276-278.

Application of Drilling-while-Metric (DMM) Technology in Precision Geological Steering

Xiang Wang

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710299, China

Abstract

Drilling-while-Metric (DMM) technology plays a pivotal role in modern drilling engineering, effectively ensuring precise geological steering while enhancing drilling efficiency and accuracy. By adopting advanced data transmission and processing technologies, this approach achieves more rational outcomes in geological steering operations, driving the development of intelligent and efficient drilling systems. Future efforts to strengthen R&D in this technology will further refine geological steering capabilities, enabling broader applications across diverse geological structures and accelerating subsequent energy exploration and development initiatives.

Keywords

Drilling measurement technology; precise geological guidance; practical application; wellbore trajectory

随钻测量技术在精细地质导向中的应用实践

王翔

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 710299

摘要

随钻测量技术主要是对现代钻井工程起着关键性的作用，并能够有效的保证精细地质导向效果，提升钻井的效率以及精准度。采用先进的数据传输以及处理技术，在实际地质导向工作能得到更合理的效果，在发展过程中也使得钻井更加具有智能化、高效化。后期加强该项技术研发力度，将使得地质导向效果得到更大程度的完善，未来还可在各类不同类型的地质结构之中得到更好的运用，更好推动后续的能源勘探开发工作进程。

关键词

随钻测量技术；精细地质导向；应用实践；井眼轨迹

1 引言

随着全球能源需求越来越大，油气作为重要能源的来源，其勘探开发受到极大重视，很多大型油气田都依靠随钻测量和精细地质导向等技术进行开发，在储层厚度大还有分布范围广等地质结构复杂的条件下，使用这些技术可以大大提高油气开采效率，而随着油气勘探开发向更深层次、更难开发的深层、极端地质条件地区发展，对随钻测量及精细地质导向技术的需求越来越强，所以加强对随钻测量技术用于精细地质导向上的实践探讨十分重要。

2 随钻测量技术原理

随钻测量技术采用各种物理特性和先进的传感及传输技术完成，其实现的主要手段就是在井下的钻具组合中装入各种各样的传感器，用来感知井下参数的变化，并将其变成

可传至地面的电信号或者其他形式的可传递的信号。如用于测量井斜角、方位角的传感器多采用重力加速度计或者磁通门传感器作为测量元件，其中重力加速度计利用重力场，通过测量沿不同方向加速度分量的大小，得出井眼相对于重力方向倾斜的角度，即为井斜角；而磁通门传感器则是基于地磁场的工作原理，可以测得地磁场沿各个方向的分量，并且通过与已知的地磁场模型进行对比运算，从而求得井眼的方向，得到井眼的方位角^[1]。

数据传输原理是将井下传感器测量得到的数据进行数字化编码，然后通过控制钻井液脉冲发生器，将编码后的数字信号转换为钻井液压力的变化，即压力脉冲。这些压力脉冲随着钻井液的循环向上传输，到达地面后，被安装在泥浆立管上的压力传感器检测到。地面的数据处理系统再对这些压力脉冲信号进行解码和处理，还原出原始的测量数据。如正脉冲传输系统通过控制脉冲发生器的蘑菇头，当编码为“1”时，蘑菇头上移，使流经锥形口的钻井液阻力增加，产生附加压力，形成一个压力脉冲；当编码为“0”时，蘑

【作者简介】王翔（1984-），男，中国安徽砀山人，本科，工程师，从事石油工程研究。

菇头向下回到原位，压力降至正常，以此来表示数字信号的“1”和“0”^[2]。这种传输方式具有经济、方便的优点，但也存在数据传输率低的缺点，一般每秒只能传输几比特到几十比特的数据。

3 随钻测量技术在精细地质导向中的应用

3.1 为精细地质导向提供数据支持

真正开展钻井作业过程中使用到随钻测量得到的数据也是十分的多，各个项目都存在大量的数据。其中有关定向数据方面主要包括井斜角、方位角以及工具面角等，其中主要是通过测量结果可以了解到，对于如何控制造成定向角度出现变化的井眼轨迹具有十分重要的决定性意义。井斜角可理解为井眼偏离铅垂线的程度，通过测得的数据可以确定井眼垂向位置，如对于像一些难度较大复杂构造的油气田来说，井斜角测量应该保证在±0.1°之内，在这个范围内当数值超过0.1°以上的话，那么就会造成井眼无法精准把控井眼轨迹所指向的目标储层，这样的话就不利于油气的开采^[3]。

钻井参数是地质导向的重要参考依据，井底钻压和扭矩还有每分钟转数等参数能够体现钻井过程中力学状态及工作状态，当井底钻压过大将导致钻头过早磨损，钻头损坏将会造成钻井效率下降；若井底钻压过小则无法有效破岩，导致钻进效率低。扭矩的变化其中也是直接表示了地层的硬度及钻具的状态，如果扭矩瞬间增大，则说明可能遇到硬的地层或是出现了卡钻的情况。每分钟转速直接影响钻进速度。因此对于一些重要的钻井参数，要及时监测并对比地质资料，并且也要及时的调整参数值，并根据地质资料选择合理的钻进参数。

各种类型随钻测量技术有着不同的侧重点，这其中MWD主要就是获取定向数据和钻井参数等基础信息，它的特点就是结构简单并且价格便宜而且速率也快，但是只能满足最基础的定向钻井要求。但针对浅层油气田，MWD可实现快速准确井眼轨迹的控制，为下一步的地质导向提供最基本的数据参考；LWD是在MWD的基础上增加地层测量功能，实现钻遇地层特性测量与评估，为地质导向提供更加多维度的地层信息，应用到复杂地层的油气勘探作业时，LWD可以对地层的变更情况做到实时监测，使井眼轨迹能及时做出调整，保证井眼穿过目标储层，从而能够大大提升油气钻探开采的速度。

3.2 基于随钻测量数据的地质模型构建与更新

构建地质模型是一项复杂的工程，需要用到各种各样的技术与方法。第一步是对随钻测量得到的数据进行预处理，即要去除一些杂质数据，如需要对钻具测得的大量数据进行清洗、去噪、标定等工作，以保证钻具测得的数据是准确且一致，但是对于一些井下测量的数据可能会受电磁干扰、机械振动等因素造成噪音和异常点来说，在进行数据清洗去噪后才能保证数据的质量。对伽马数据进行处理的过程

中，可使用滤波法去掉噪音使数据更平滑，有利于后续分析和处理。

随着钻井的不断加深，新的随钻测量数据不停地产生出来，地质模型需要不断地更新来反映地质的新变化。要想更好的实现实时更新地质模型，其中就是利用好各种数据同化的方法把随钻测量所获取的数据，注入已经有的地质模型里面，来实现模型的实时更新，常用的有卡尔曼滤波法。通过卡尔曼滤波法，在每次模型预测后的更新中，利用卡尔曼滤波的原理，将新得到的随钻测量数据进行过滤计算，不断修正已知地质模型参数，使得地质模型更加准确的反映出实际情况。当将应用卡尔曼滤波更新地质模型方法应用于某复杂断块油田开发过程中时，能够很好地跟踪断层的变化，以及储层的分布，为井眼轨迹的精准控制提供支撑作用。

实时更新地质模型，能够使地质模型更加精确，并且可以及时给地质导向提供正确的依据。如果钻头钻遇新的地层界面或地质异常，地质模型就会及时更新，这样就可以保证及时将更新的模型提供给地质工程师以及钻井工程师，可以根据模型来判断是否要调节井眼轨迹以及钻井参数，从而避免钻头进入非目的层段，进而可以达到提高钻井效率以及提高油气采收率的目的。

3.3 随钻测量技术在水平井、定向井等特殊井型中的地质导向应用

水平井、定向井等特殊井型在石油天然气的勘探与开采中有较大的作用，由于其能较好地提高油气采收率，降低开发成本，在全球范围内得到了大范围的应用推广。而使用随钻测量技术来进行特殊井型的地质导向对于精准的施工具有重要意义，在这方面也确实有很大的优势。

对于水平井钻井而言，随钻测控的重要性极高。水平井钻井需要达到的目的之一是让井眼尽可能地在储层内部延伸，并通过延长井眼长度的方式尽可能增加井眼与储层之间的接触面积，以最大化提高油气产率。想要达成这样的目的，就需要在利用随钻测控设备获得井斜角、方位角、工具面角的同时获得伽马射线、电阻率等地层特性参数。这样地层工程师才能第一时间得到井眼到达地层的位置和方位，及时调节井眼的轨迹，保证井眼沿地层钻进。2017年冬季，在某海上油田水平井施工中，根据现场资料采用随钻测控实时监测井斜角、方位角，发现了井眼开始往非储层位置偏移的现象，从而调整工具面角，使得井眼回复到储层位置，实现了长度超过3公里的水平段连续钻进，如此该井的储层钻遇率大于90%以上。

定向井的井眼轨迹需要沿预定方向还有对倾斜角进行钻进，避开复杂地质构造或达到某种钻井目的。将随钻测量技术应用于定向井，可以实时获取井眼轨迹的数据，发现并及时纠正井眼轨迹的偏差，保证井眼轨迹沿设计轨迹钻进。以某山区油田定向井钻井为例，由于地质构造复杂，为使井眼轨迹多次转弯，基于随钻测量技术对井斜角及方位角进行

实时监测，依据实际测得的井眼轨迹与设计轨迹之间的偏差情况，调整钻井参数及工具面角，实现了钻井定向钻进的目的，避开了井眼与断层等发育的地层结构相碰的风险，从而保障了钻井的安全与顺利开展。

以某页岩气田水平井开发实例分析，在页岩储层薄、非均质性强的情况下，若采用传统的钻井方式，无法进行高效开发。该项目应用随钻测量技术配合旋转导向系统完成了精细地质导向：井下测量仪采集井斜角、方位角、伽马射线值、电阻率等参数，并将信号传输至地面；地面控制系统根据采集的数据进行实时计算，结合地质模型实时给出调整井眼轨迹的参数，将井眼轨迹控制在理想的井眼位置；同时也可以利用随钻测量获取的伽马射线值及电阻率值进行页岩层的识别，分析井眼轨迹钻遇页岩层的方向，并及时调整井眼轨迹方向，使水平井位于最优位置的页岩层段上钻进。最后，该水平井的储层钻遇率达到95%以上，较用传统钻井方式完成该井提高单井产量50%以上，达到较好的经济效果。

3.4 随钻测量技术在复杂地质条件下的精细地质导向实践

复杂地质条件下给油气钻井带来了许多问题，容易导致井眼偏离目标储层，从而增加了钻井的风险与成本。随钻测量技术在复杂地质条件下的精细地质导向中发挥着重要的作用，解决了一系列技术难点。

受断层发育控制的地层，由于断层破坏了地层的连续性，地质构造比较复杂。由于随钻测井能实时获取多种参数，因此可以根据测井参数的变化来判定断层位置与性质。如通过伽玛、电阻率测井参数，在附近能反映判断出断层位置；随钻测得的地层伽马射线值忽然上升、电阻率值骤然降低，结合录井、化验资料，确定此井附近有正断层分布，通过随钻地震测量得到断层的产状、走向及延伸方向等数据，为井眼轨迹调整提供参考依据。

在盐膏层等特殊地层中，随钻测量技术也发挥着重要作用。盐膏层具有塑性变形的特点，容易导致井眼缩径、卡钻等事故。随钻测量技术可以实时监测盐膏层的厚度、压力和温度等参数，为钻井液的设计和调整提供依据。通过测量盐膏层的压力和温度，确定合适的钻井液密度和性能，防止

盐膏层的塑性变形对井眼造成影响。在某盐膏层油田的钻井中，利用随钻测量技术实时监测盐膏层的压力变化，当发现压力异常升高时，及时提高钻井液密度，成功避免了井眼缩径和卡钻事故的发生。同时，根据随钻测量的盐膏层厚度和位置信息，合理调整井眼轨迹，确保井眼顺利穿过盐膏层，进入目标储层。

在复杂的地质条件下，随钻测量技术和地质导向之间联系更为密切，在一些复杂的油气田内需要利用机器学习的方法来进行分析研究和学习训练，来建立出地质参数与井眼轨迹之间的关联模型，在实际钻井的过程中，当每完成一次新的测量工作的时候，就可以把所测得的数据输入到模型当中，由模型对地层以及井眼轨迹产生变化的部分进行预测，并提出合理的纠正措施，根据这个建议来对井眼轨迹与钻井参数进行调节改正，这样就能保证顺利应对在复杂地质条件下产生的问题，最后完成了对井眼轨迹高效精细的地质导向的过程，并能提高油气勘探开发的成功率和经济性。

4 结论

本研究深入探讨了随钻测量技术在精细地质导向中的应用实践，取得了一系列重要成果。在随钻测量技术的应用上，论述了随钻测量为精细地质导向提供数据保障的重要作用，并通过实时、准确采集地层数据为地质导向提供全方位、可靠的依据。未来从技术创新应用上看，加大对随钻测量技术的研发投入，开展滚动勘探开发工作，不断优化井位部署与井眼轨迹控制技术，能够提高油藏采收率，从而做到油田整体效益最大化。

参考文献

- [1] 郝永军.井下近钻头无线随钻测量技术研究及应用[J].煤炭与化工,2025,48(02):46-49+53.
- [2] 米玛.高温地热井循环流体温度随钻测量技术分析[J].冶金管理,2023,(20):110-112.
- [3] 杨延滨,孔令维,丁浩恩.随钻测量超短半径侧钻水平井技术的应用实践[J].采油工程,2022,(04):47-51+85.
- [4] 张韧.寺河矿地质异常体探查钻进技术应用实践[J].山东煤炭科技,2020,38(12):156-158.
- [5] 贺学鹏.随钻测量定向钻进技术在老空水疏放中的应用实践[J].能源与节能,2020,(12):183-184.

Benefit analysis of hydrogen production by furnace gasification process and green electricity production in Hami region, Xinjiang

Chao Wang

National Energy Group Xinjiang Hami Energy and Chemical Co., Ltd., Hami, XinJiang, 721408, China

Abstract

As a vital component of future clean energy systems, hydrogen plays a strategic role in addressing global climate change and driving energy transition. This study examines the Hami region in Xinjiang, comparing the technical characteristics of hydrogen production through space furnace gasification and green electricity-based methods. The analysis evaluates energy efficiency, industrial chain potential, regional economic impact, and policy adaptability. Results indicate that space furnace gasification can serve as a crucial support for Hami's hydrogen industry in the short term. Long-term strategies should prioritize accelerating green hydrogen technology adoption and infrastructure development to achieve multi-energy complementarity and clean substitution, thereby facilitating the regional energy system's transition to low-carbon and zero-carbon pathways. The research provides valuable insights for optimizing hydrogen development pathways in Hami and similar resource-dependent regions.

Keywords

space furnace; hydrogen production by coal gasification; hydrogen production by green electricity; benefit analysis

航天炉煤气化工艺制氢与绿电制氢的效益分析——以新疆哈密地区为例

王超

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司，中国·新疆哈密 721408

摘要

氢能作为未来清洁能源体系的重要组成部分，在应对全球气候变化和推动能源结构转型中具有重要战略意义。本文以新疆哈密地区为研究对象，对比分析航天炉煤气化工艺制氢与绿电制氢的技术特点，从能源利用效率、产业链延伸潜力、区域经济带动作用及政策适应性等方面展开探讨。结果表明，短期内航天炉煤气化制氢可作为哈密地区氢能产业的重要支撑；长期来看，则应加快绿电制氢技术推广与基础设施建设，实现多能互补与清洁替代，推动区域能源系统向低碳、零碳转型。本文研究对优化哈密及类似资源型地区的氢能发展路径具有参考价值。

关键词

航天炉；煤气化工艺制氢；绿电制氢；效益分析

1 引言

在“双碳”目标背景下，中国已将氢能纳入国家能源战略范畴，并推动多元化制氢技术迈向新高度。新疆哈密为中国重要能源基地，煤炭、风能、太阳能资源十分丰富，为各类制氢工艺提供了支撑。其中，航天炉煤气化制氢依托成熟的煤化工技术，可实现氢气大规模生产。绿电制氢则借助可再生能源发电，通过电解水制取氢气，二氧化碳排放量极低。两种制氢路径各有优势与挑战，在哈密地区能源转型

中承担着不同角色。本文从技术可行性、环境影响、经济与社会效益等维度，对两种制氢方式进行全面系统分析，进而提出契合区域特色的氢能发展建议。

2 航天炉煤气化工艺制氢技术特点

2.1 技术原理与工艺环节

航天炉煤气化制氢技术在高温高压条件下，使煤粉与气化剂（如氧气、水蒸气）发生反应，生成以一氧化碳和氢气为主要成分的合成气，再通过水煤气变换反应提高氢气比例，最终利用净化系统去除杂质，制得高纯度氢气^[1]。该过程涵盖原料预处理、气化、气体净化、氢气提纯等环节，各环节技术成熟度高，自动化控制水平先进。原料煤需经过干

【作者简介】王超（1988—），男，中国甘肃金昌人，本科，工程师，从事煤化工研究。

燥、研磨等预处理步骤，确保粒度与水分符合气化要求；核心设备为气化炉，通过精准调节温度、压力及气化剂比例，实现高效转化；变换工段借助催化剂促使一氧化碳与水蒸气反应，生成更多氢气；净化系统采用吸收、吸附等方式去除硫化物、二氧化碳及其他杂质，将氢气纯度提升至 99.9% 以上。

2.2 原料供应与资源优势

哈密地区煤炭资源丰富，且开采成本较低，为航天炉煤气化制氢提供了稳定的原料保障。该地区煤炭运输条件便利，可通过铁路、公路及矿区内部运输网络高效输送至气化装置，有效降低原料供应链风险。哈密煤田地质条件优良，煤层厚、埋深浅，便于开展大规模机械化开采，煤炭产量稳定且品质优良，尤其是低灰、低硫煤种，有助于减少气化过程中杂质的生成，降低后续净化系统的负荷。

3 绿电制氢技术特点

3.1 技术原理与系统构成

绿电制氢通过光伏、风电等可再生能源发电，利用电解水装置将水分解为氢气和氧气。其系统主要由发电单元、电解单元、氢气纯化及储存单元，以及配套的电网和储能系统构成^[2]。模块化设计使系统具备灵活扩展能力，可适应不同规模的应用场景。光伏发电单元由大量光伏组件串并联组成，通过逆变器实现直流电向交流电的转换；风电单元借助风力发电机组将风能转化为电能。核心环节为电解单元，目前主流技术包括碱性电解槽等，各类技术在效率、成本及运行条件方面各具特点。氢气纯化单元采用变压吸附等技术去除电解产物中的杂质，使氢气纯度满足工业或燃料电池应用需求；储存单元通过高压气态、液态或固态储氢方式，为后续运输与使用提供保障。

3.2 资源条件与能源优势

哈密地区年均日照时长充足，太阳能辐射量大，风力资源稳定且分布广泛，具备大规模发展绿电制氢的自然条件。依托本地风光资源开展发电制氢，能够减少对化石能源的依赖，实现全生命周期近乎零碳排放。哈密位于新疆东部，属温带大陆性气候，晴天占比高，年日照时长超 3000 小时，太阳能资源充裕且稳定；同时，该地地处山口区域，风力资源丰富，年平均风速较高，有利于大型风电场的建设与运营。

4 环境影响对比分析

4.1 航天炉煤气化制氢的环境压力

煤炭开采可能导致地表沉陷及土壤与水资源污染；若气化过程中产生的废气、废水处理不当，会对区域生态造成不利影响。尽管通过高效除尘、脱硫脱硝、废水循环利用及 CCUS 技术可在一定程度上缓解上述问题，但环境风险仍客观存在。在煤炭开采阶段，井工开采会破坏地下含水层，导致地表水位下降，露天开采矿则直接破坏地表植被，引发水土流失。气化阶段产生的一氧化碳、硫化氢等废气若处理不彻

底，会污染大气环境；废水中含有大量悬浮物、重金属等污染物，若未经处理直接排放，将污染土壤和水源。虽然高效除尘和脱硫脱硝技术可有效去除颗粒物及硫化物，但二氧化碳排放问题仍较为突出。尽管 CCUS 技术能捕获大部分二氧化碳，但其当前投资成本高、运行流程复杂，大规模应用仍面临挑战。因此，航天炉煤气化制氢需在全产业链采取严格环保措施，方可实现可持续发展。

4.2 绿电制氢的环境友好性

绿电制氢在运行阶段几乎不排放污染物，对大气、水体及土壤的影响极小，但风光电站建设可能占用土地、影响局部生态系统，因此在规划阶段需开展生态评估并实施生态恢复措施。搭建光伏发电站与风力发电场需占用一定面积土地，若选址不合理，可能破坏当地植被，影响野生动物栖息地^[3]。此外，光伏组件与风机的制造过程会消耗能源与资源，产生一定污染物排放，但相较于煤炭开采及煤气化，这些环境影响更具局部性且可控性更强。通过科学选址、采用生态友好型设计（如光伏 + 农业、风电 + 牧场模式），并加强设备回收再利用，可进一步降低绿电制氢全生命周期的环境影响。可见，绿电制氢在环境友好性方面优势显著，是推动氢能产业绿色发展的关键路径。

4.3 全生命周期对比

从全生命周期视角来看，绿电制氢的碳排放量远低于煤气化制氢，但需考虑光伏、风电设备制造及报废回收环节产生的环境影响。煤气化制氢若搭配 CCUS 技术，可有效降低碳排放总量，但仍高于绿电制氢的碳排放水平。全生命周期分析（LCA）是衡量不同制氢技术环境影响的关键方法，其覆盖从原材料获取、设备制造、能源生产到最终废弃处理的全流程。对于绿电制氢，主要碳排放来源于光伏组件、风机及电解槽的生产过程；对于煤气化制氢，碳排放则主要集中在煤炭开采、运输及气化阶段^[4]。即便将设备制造环节的碳排放纳入考量，绿电制氢全生命周期的碳排放量仍仅为煤气化制氢的九分之一。若煤气化制氢与 CCUS 技术结合，可将碳排放降低 50% 以上，但仍无法达到绿电制氢的近零排放水平。从长远来看，绿电制氢是实现氢能产业深度脱碳的必要途径。

4.4 区域生态与社会接受度

绿电制氢凭借清洁特性更易获得社会认可，对改善区域环境质量和提升居民生活水平具有积极作用；煤气化制氢虽能创造就业机会，但需通过严格环保措施增强公众信任。在能源转型阶段，公众的接受度与支持度至关重要。具有环保属性的绿电制氢项目，更易获得当地社区支持，有助于改善区域空气质量，减少雾霾等环境问题，提升居民健康水平。若煤气化制氢项目环保措施落实不到位，易引发公众担忧与反对，导致项目建设及运营面临更高社会风险。因此，煤气化制氢企业应加大环保投入，提高污染物治理水平，积极开展社区沟通与环境教育工作，以获取公众理解与支持。政府

与企业需共同推动绿色氢能文化建设，提高公众对氢能产业的认知与接受度，营造有利于不同制氢技术协调发展的社会环境。

5 经济与社会效益分析

5.1 成本构成与竞争力

航天炉煤气化制氢依托成熟产业链，原料成本低、规模效应显著，短期内成本优势明显；绿电制氢成本受设备投资及电价影响较大，但长期有望通过技术进步与规模化应用降低成本。煤气化制氢成本主要由煤炭采购、设备折旧、能源消耗、人工及环保处理等费用构成。由于煤炭价格相对稳定且低廉，加之技术成熟、生产规模较大，目前煤气化制氢的单位成本仍低于绿电制氢。绿电制氢成本主要由风光发电成本、电解槽投资及运行维护费用等构成^[5]。随着风光发电成本快速下降及电解槽技术不断进步，绿电制氢成本呈逐年下降趋势。据行业预测，未来10-15年，在多数应用场景中，绿电制氢成本有望与煤气化制氢持平甚至更低，在经济性方面将具备更强竞争力，成为氢能产业的主导发展路径。

5.2 产业链带动与就业创造

两种制氢方式均能带动上下游产业发展，创造就业岗位。其中，煤气化制氢可依托现有煤化工基础，推动煤炭、运输、装备制造等产业升级；绿电制氢则能促进风光发电、储能、氢能装备等新兴产业兴起。煤气化制氢产业链涵盖煤炭开采、洗选加工、运输、气化装置制造、气体净化、氢能储运等环节，可带动传统产业转型升级，创造大量就业岗位。绿电制氢产业链包括光伏组件、风机、电解槽、储能设备等制造领域，以及燃料电池汽车、氢能储能等氢能应用相关领域。新兴产业的发展不仅形成新的经济增长点，还推动高端装备制造与新能源技术迈向新台阶。两种制氢方式各有侧重，共同促进氢能产业链的完善与拓展，为区域经济多元化发展提供有力支撑。

5.3 能源安全与供应稳定性

煤气化制氢能快速响应市场需求，保障能源供应稳定；绿电制氢需通过储能及电网优化提升供应稳定性，但有助于减少对化石能源的依赖，增强能源结构的安全性。能源安全是国家经济社会发展的重要支撑，煤气化制氢依托国内丰富的煤炭资源，不受国际能源市场波动影响，在能源供应紧张时可快速调整产量，维持氢能供应稳定。绿电制氢依赖可再

生能源，其供应稳定性受自然条件影响较大，但通过配套储能系统与智能电网技术，可显著提高绿电制氢供应的可靠性。绿电制氢的发展有利于降低对进口石油、天然气等化石能源的依赖，提升国家能源自给率，增强能源结构的抗风险能力。两种制氢方式协同发展，可为国家能源安全构建更坚实的保障。

5.4 区域经济转型与可持续发展

绿电制氢符合“双碳”目标要求，助力哈密地区能源结构向清洁化转型；煤气化制氢在过渡期可发挥支撑作用，为产业升级及技术创新奠定经济基础。哈密地区作为传统能源基地，长期依赖煤炭资源开发，经济结构相对单一。发展绿电制氢可助力培育新能源产业，推动经济转型升级，实现从“煤城”向“新能源之都”的转变。绿电制氢项目的建设与运营将吸引大量投资，带动当地基础设施建设及人才流入。煤气化制氢可继续依托资源优势，为地区经济稳定提供支撑，并通过技术改造与环保升级，逐步向低碳化方向发展。对两种制氢方式进行合理布局，将推动哈密地区实现经济、社会与环境的协调可持续发展。

6 结语

当前阶段，航天炉煤气化制氢具有技术成熟、成本较低、规模效应显著等优势，可作为区域氢能产业的重要支撑；绿电制氢在环境友好性方面优势突出，是实现“双碳”目标的关键路径，但需突破成本及供应波动性方面的瓶颈。哈密地区在充分利用煤炭资源的同时，应加大可再生能源制氢发展力度，实现两种技术路线优势互补。通过技术创新、政策引导与产业链完善，有望推动哈密地区氢能产业实现高质量发展，为中国能源转型提供可借鉴的经验。

参考文献

- [1] 张勇,纪凤坤,谭晓琴,等. 绿电制氢技术路线分析与经济性评价[J].中国高新科技,2025,(16):148-150.
- [2] 杨子健,周鑫. 平衡绿电制氢高波动性的氢气储运及调峰系统[J].石油化工设计,2025,42(02):1-6+73.
- [3] 夏子航.加快推动绿电制氢产业发展[N].上海证券报,2025-03-12(008).
- [4] 庄富豪,吴军,朱瑞金,等. 绿电制氢产业关键技术现状及展望[J/OL].综合智慧能源,2025,11(02):1-9.
- [5] 詹媛媛. 深层地下煤气化技术及其产品方案研究[J].大氮肥,2022,45(03):154-159.

Installation Technology of Regular Packing in Tower Equipment

Yi Huang

China National Petroleum Corporation Sixth Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

As the core internal component of modern towers, the installation quality of regular packing directly affects the separation efficiency and operational stability. This article focuses on the difficulties of insufficient positioning accuracy, uneven stress, and weak monitoring in installation. It systematically explores the installation process, focusing on pre assembly accuracy control, modular lifting micro stress introduction, online evaluation of installation quality, and standardized process reconstruction. Based on the characteristics of the packing material and the installation environment, a technical system of "positioning benchmark strengthening lifting stress release process monitoring quality quantification evaluation" is proposed to improve the uniformity of the packing layer, reduce the risk of damage, and provide technical support for the efficient operation of large-scale chemical plants.

Keywords

regular packing; Installation technology; Tower equipment; quality control

塔器规整填料的安装技术谈论

黄翼

中国石油天然气第六建设有限公司，中国·广西桂林 541004

摘要

规整填料作为现代塔器的核心内件，其安装质量直接影响分离效率与运行稳定性。本文针对安装中存在的定位精度不足、应力不均、监控薄弱等难点，系统探讨安装工艺，聚焦预装配精度控制、模块化吊装微应力导入、安装质量在线评价及标准化流程重构。结合填料特性与安装环境，提出“定位基准强化-吊装应力释放-过程监控-质量量化评价”技术体系，提升填料层均匀性，降低损伤风险，为大型化工装置高效运行提供技术支撑。

关键词

规整填料；安装技术；塔器；质量控制

1 引言

塔器在化工分离过程中地位关键。规整填料因高通量、低压降、高分离效率优势成为主流选择，但其复杂几何构型、薄壁材质及大型化安装精度要求，使安装成为性能瓶颈。实践中，定位偏差、应力损伤、密封缺陷等问题频发，严重削弱了规整填料的理论性能优势。因此，开展针对规整填料安装全过程的技术探讨，突破现有安装方法的局限性，实现安装精度与效率的协同提升，对确保塔器达到设计分离指标、延长设备运行周期、降低装置运行能耗与物耗具有极为重要的工程价值。本文旨在系统论述安装技术难点与对策，为工程实践提供指导。

2 规整填料安装的核心技术难点

2.1 填料结构与安装精度的矛盾诉求

规整填料普遍具有多孔薄壁、规则波纹或复杂三维网格的特征几何拓扑结构，以实现最大化比表面积和可控的流体通道，其对单元间相对位置的精确对位具有极高敏感性。理论上，填料的分离性能源于设计好的规则气液接触界面，任何微小的安装错位都会破坏这种规则性，导致局部流通面积增大或变小，诱发流动偏析形成沟流或短路^[1]。同时，薄壁金属如不锈钢、钛材及特种合金，其屈服强度与弹性模量限制了安装允许施加的外力边界，在安装夹具夹紧、螺栓紧固等操作中极易产生表面压痕、涂层剥落或局部塑性形变，破坏填料表面的亲液或疏液特性。这种对几何精度的高要求与材料物理易损性之间的矛盾，要求安装过程必须实现微米级定位精度与毫牛级接触应力的协同控制，传统依靠目测和手动调节的粗放安装方式难以满足。此外，填料单元数量众多，累积误差效应显著，确保数以万计单元的整体安装平面度、垂直度和间隙均匀性成为巨大挑战。

【作者简介】黄翼（1997-），男，瑶族，中国广西桂林人，本科，助理工程师，从事动静设备安装研究。

2.2 安装场域条件对工艺的刚性约束

塔器内部属典型受限空间作业环境，光照不足、空间狭窄、构件干涉点多，操作人员可施展范围极其有限，极大制约了视觉定位、工具使用和精细操作。大型塔器安装高度常达数十米，作业平台稳定性差、高空风力影响显著，给精密测量仪器的使用带来严峻挑战。同时，现场环境温湿度波动、粉尘污染等因素不容忽视，尤其对于特定材质如陶瓷或表面特殊涂层的填料，环境污损或不当清理可能造成永久性失效。这种特殊场域条件迫使安装技术方案必须具备高度适应性，常规厂房内的精装工艺无法直接平移。它要求发展小型化、高鲁棒性的专用安装工装；开发低照度、抗振动干扰的视觉或光学辅助定位系统；制定严格的环境洁净度控制与材料防护规范，并对作业流程进行特殊化重组以适应狭窄空间的流水化作业需求。

2.3 安装团队专业素质依赖性强

规整填料安装是一项融合精密机械操作、材料力学认知、测量技术和流程管理的高技能作业。操作人员对填料结构力学特性缺乏理解易造成野蛮操作，如过度撬动用硬物敲击强行归位等，直接造成材料不可逆损伤。对专用工具如激光投线仪、扭力扳手、定力弹簧吊具等的操作熟练度不足，则无法发挥工装效能，甚至错误操作引发事故。解读安装图纸理解设计要求与装配序列的能力不足，可能导致工序颠倒或关键质量控制点遗漏。更为关键的是，预见潜在风险的能力，如识别安装应力积聚点、判断材料临界变形状态的敏锐度，往往依赖经验积累。当前现场安装人员流动性大、培训体系不健全、技能水平参差不齐的现实，成为实现高稳定性、可重复性安装质量的深层制约。降低安装质量对个体经验的过度依赖，建立标准化、程序化、可视化的操作指令体系，并通过严格资质认证提高团队整体专业度是迫切需求。

3 提升规整填料安装质量的关键策略

3.1 高精度定位与紧固技术的迭代应用

克服累积误差的关键在于建立可靠的基准传递链和智能化的过程微调体系。在塔器壳体内部主支撑环上预设高精度、不易变形的永久基准点，如不锈钢嵌块基准十字线或光学靶点更为可行。大型填料层安装初期，采用高分辨率激光跟踪仪实现填料基准面与塔壁基准点的刚性传递，首次精确找平奠定全局精度基础。实施模块化分段安装策略，将每层或特定块数填料组合为可独立定位的安装单元。单元内部填料块间的定位，推广应用具有物理止口与精密导销设计的定位装置，实现径向与周向双重约束，其插销间隙需控制在亚毫米级以减少手动调整依赖。紧固环节摒弃“凭手感”拧紧螺母的传统方式，严格采用经校准、量程合适的数显定扭矩扳手施力，根据填料材质、厚度、片数及设计规定的压紧力范围，逐层设定并记录扭矩值，确保轴向压紧力均匀可控分布在设计范围上限附近，既能抵抗气流冲刷又避免压溃结构

^[2]。对于大面积波纹规整填料，优化压圈结构如分段挠性压圈或带液压补偿的浮动压紧系统可有效吸收局部不平度、分散应力。

3.2 大型模块化吊装微应力导入工艺

针对超大型规整填料模块，传统钢索吊装产生的局部集中应力是致命威胁，设计多点协同、应力可控的吊装系统至关重要。开发专用“蜘蛛式”吊架结构，多点连接于填料模块预设的增强受力点或主承重骨架结构。每个吊点均集成柔性弹簧缓冲器和高精度力学传感器，实时显示各点载荷分布，确保在起吊、平移、下放全过程中，各吊点负荷偏差小于预设安全阈值。在微调落位阶段，引入精密微动顶升机构或气浮滑移装置辅助定位。填料临近支撑梁或下层表面时，由安装人员手动辅助或利用可编程导引系统实现缓慢滑入而非硬性撞击接触。整个过程需严格监控模块姿态水平度变化，采用高精度电子水平仪或激光平面扫描配合控制系统实时反馈调整各点高度差不超过0.1毫米。此工艺核心目标是在整个吊装过程创造“类悬浮”状态，最大限度消解自重引发的局部弯曲或屈曲变形应力。

3.3 安装过程可视化与量化评价融合

突破传统人工检查的模糊性与局限性，构建多维度量化监测体系。关键位置安装关键点如填料单元边缘对缝间隙值、压圈平行度、支撑环水平度等安装过程中同步采集。应用高分辨率工业内窥镜配合图像识别分析技术，在安装间隙难以直接目测处获取图像并自动识别测量缝隙宽度是否超限。分布式应力传感器集成于专用安装工具或临时附着于关键受力点位置，实时感知并记录压紧过程中接触面压力波动。数据统一传输至中央处理终端进行在线统计过程控制，形成动态波动监控图。系统预设关键指标的临界阈值，一旦某参数偏离设定范围即触发警报。安装完成验收阶段，推广高精度三维激光扫描对整个填料层上表面进行面扫描点云分析，生成精确的平面度、波纹倾角分布云图及数据报告，并与理论设计模型进行比对。可视化工具如增强现实眼镜可叠加显示关键间隙测量点，指导工人有的放矢进行精细微调，减少盲目操作提升效率。

4 标准化安装流程重构与保障体系

4.1 工前准备标准深度强化

成功的安装始于严谨的准备活动。建立安装空间准入制度，在人员设备进入塔内前严格执行环境指标检测，包括温度限制以减少热膨胀影响、湿度上限防止结露与氧化风险、降尘至规定等级避免微粒污染。安装所需工器具如定扭工具、激光设备、吊具模块须经计量合格并粘贴有效状态标识后才允许入场。作业平台搭设要求牢固稳定无晃动，具备足够覆盖范围与安全防护措施。详细拆解图纸技术参数要求，为每个安装单元编制专属的装配任务清单包含基准点信息、扭矩设定值序列、吊装路径规划图以及关键质量控制要

点预警图表，所有参与人员必须接受工前技术交底并通过要点考核确认理解无误^[3]。准备工作的深度决定了安装过程的可控度。

4.2 环境敏感型防护操作规范

不同类型填料对应差异化的防护要求制定明确规程。精密表面如亲水涂层或不锈钢丝网构件使用棉质防静电手套直接接触表面以避免汗渍或油污污染带来润湿失效风险。需要转移操作时，必须应用定制防护套件将单元完全包裹严密隔绝外部粉尘进入通道内部。现场搬运利用带有缓冲垫层的专用手推车进行地面移动，严格禁止随意在粗糙地面拖移造成磕碰划痕。塔内保持相对正压状态降低灰尘侵入概率，同时有专职清洁人员在非作业时段定时用无油压缩空气或静电吸尘装置清理作业层平台防止落尘污染未安装部件表面。针对陶瓷或特殊合金材料还应限制温差变化速率避免热冲击裂纹产生。这些规范性要求旨在主动抵御外部环境因素对安装件物理状态造成不可控干扰。

4.3 数字辅助引导技术应用

积极融合数字化工具降低人工操作复杂度与判断错误概率。开发安装作业辅助系统，利用轻便可穿戴设备如工业平板电脑或AR眼镜实时加载三维作业引导画面。辅助系统在关键步骤自动提示操作员当前目标扭矩值要求并验证是否施加到位提供视觉反馈，显著降低人为遗忘或疏忽风险。在狭窄空间进行多重单元定位对位操作时，系统根据预设相对位置模型自动标识相邻单元理想对合参考线投影至操作者视野内，消除人眼视角误差引导进行精准微调缩短手动装配时间^[4]。每次操作完成的安装位置和施力信息将被自动获取形成结构化日志。该数字日志不仅是实时作业指导依据也为后续安装质量追溯提供完整可靠原始数据支撑，替代传统人工填写记录方式。

4.4 工序流重构提升集成协同

重新审视传统顺序作业模式效率瓶颈，将互不干扰环节并行化实施加速整体进度。典型策略如塔内某一层安装作业同时于塔外另一层组块进行预组合准备同步进行。大型组块的吊装安装阶段安排专业吊装指挥小组集中管理所有起吊运输操作；与此同时质量数据记录小组同步进行已完成区域的测量检测任务；工具管理人员则专责为下一轮安装准备物资避免工序间隙出现等待时间浪费。不同技术分工小组围绕统一安装计划调度实现高度协同。过程中明确各工序交接点设置确认环节和清晰的移交责任边界，关键质量控制节点设控制卡并需多角色联合签字确认方能进入下一环节。流程重构显著压缩非有效作业时间，大幅提高人员及设备利用率。

4.5 多维协同培训与资质认证体系

构建超越传统模式的综合技能传递机制。常规理论讲授结合增强现实进行失效场景模拟演练，在虚拟环境中让受训人员体验不当操作引发填料结构塌陷连锁反应后果深刻理解正确方法的重要性。实际操作阶段应用高仿真度培训设备模拟塔内安装环境和力学反馈效果。设置阶梯式资格认证制度，人员必须完成基础认知模块、工具操作模拟模块、完整安装流程仿真模块考核后方有资格进入实际作业现场。作业过程实行新老搭配原则执行新员工作业仅允许在高级别监督指导下实施有限范围操作^[5]。培训强化对关键力学概念如材料刚度与柔度特性、预应力效应边界条件的形象化理解深度，提升一线人员判断能力避免盲目性操作造成结构破坏难以挽回损失。持续技能更新是保持队伍专业水准的基础保障。

5 结语

塔器规整填料的高质量安装是实现高效气液传质过程的基础保障。面对填料自身精密脆弱特性与现场复杂安装条件的严峻挑战，本文系统分析了定位精度控制、材料应力防护及流程协同优化的技术难点与解决路径。高精度定位与可控紧固技术是确保填料几何规则性的前提，大型模块微应力吊装工艺有效防止了材料损伤，过程可视化与量化评价则显著提升了质量监控的可信度。更为重要的是，通过深度强化工前准备、制定环境敏感操作规范、应用数字化辅助引导、重构工序流程并建立多维协同培训认证体系，形成了一套标准化、低依赖性的安装保障框架。实践表明，严格遵循上述技术策略能显著提升规整填料安装的整体规整度与均匀性，有效克服沟流与局部干区缺陷，保障塔器达到设计分离效率并实现长周期稳定运行。未来安装技术将进一步融合自动定位机器人、人工智能实时决策分析以实现更高精度与智能化水平，推动化工分离技术持续进步。

参考文献

- [1] 温泉.化工塔器安装过程中常见质量问题及预防措施[J].中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(4):13-15.
- [2] 张峰斌.大型塔器现场分段交叉安装技术[J].河南化工, 2025, 42(6):42-44.
- [3] 包春凤, 李瑜哲, 周帼彦.规整填料塔专用耐腐蚀支撑装置结构设计及有限元模拟[J].化工机械, 2022(001):049.
- [4] 郑一鸣.填料塔新型分布器安装结构设计[J].化工设计通讯, 2025, 51(1):29-31.
- [5] 丘建晖, 杨用龙.碳捕集塔填料的研究现状及发展趋势[J].低碳世界, 2025, 15(3):28-30.

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; intelligentization

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。

【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 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。

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^[1]。

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^[2]。

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^[3]。

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^[4]。

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,张弨,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.

A Brief Analysis of the Influencing Factors in Determining the Silicon Dioxide Content in Copper Concentrate by Potassium Fluorosilicate Titrimetric Method

Taiju Xiao Shixin Zuo Yanyan Shi Yi Wu Juzhen Zhang

Chuxiong Dianzhong Nonferrous Metals Co., Ltd., Chuxiong, Yunnan, 675000, China

Abstract

The potassium fluosilicate volumetric method is a widely used analytical technique for determining silica content in copper concentrates. While numerous studies have been conducted on silica detection methods, research specifically focusing on the potassium fluosilicate volumetric method for silica determination in copper concentrates remains relatively limited and incomplete. This paper primarily elucidates the principles, advantages, and key control points of the potassium fluosilicate volumetric method for silica determination in copper concentrates.

Keywords

silica; potassium fluosilicate volumetric method; copper concentrate; influencing factors

浅析氟硅酸钾容量法测定铜精矿中二氧化硅含量的影响因素

肖太菊 左仕新 施艳艳 吴怡 章菊珍

楚雄滇中有色金属有限责任公司，中国·云南楚雄 675000

摘要

氟硅酸钾容量法是测定铜精矿中二氧化硅含量的常用分析方法，当前关于二氧化硅检测方法的研究较多，但对氟硅酸钾容量法测定铜精矿中二氧化硅含量的研究相对较少且并不全面。本文主要阐述了氟硅酸钾容量法测定铜精矿中二氧化硅含量的原理、优点、关键环节控制要点，分别从样品前处理、酸度调节、滴定三个阶段分析了测定过程中存在影响二氧化硅含量测定结果的诸多因素，本文通过各步骤要点的严格控制减少分析误差，提高测定结果的准确性。

关键词

二氧化硅；氟硅酸钾容量法；铜精矿；影响因素

1 引言

SiO_2 ，又被称作硅石，在水中不溶解，在酸中微溶；当呈颗粒状态时，能与熔融碱类发生反应。用于制造玻璃、耐火材料和硅铁等。广泛存在于铜矿资源中，储量大，但由于铜精矿成因多样且构造复杂，化学成分各异，不同矿类需采用相应的分析方法。因此，需建立一种普适性分析方法以准确测定铜精矿中的二氧化硅含量，从而为生产工艺优化提供数据支撑，指导实际生产，又能保证创造一个良好的公正公平贸易氛围。

目前，二氧化硅的检测方法中，常用的主要有火焰原子吸收光谱法、重量法、微波消解法、氟硅酸钾滴定法^[1]、碱熔-电感耦合等离子体原子发射光谱法等方法，然而，鉴于铜矿种类繁多、组成复杂，且存在较多共存干扰组分，

常规分析方法面临诸多挑战，故常采用氟硅酸钾容量法这一经典化学分析方法。该方法具有操作成熟、结果稳定等优势，对于各类复杂铜精矿样品中二氧化硅含量的准确测定展现出良好的适用性。适用范围：0.50%~32.00%，分析范围广泛，分析时间通常为2~3小时，操作流程简便，设备要求较低。

2 试验部分

2.1 主要试剂及仪器

主要试剂：邻苯二甲酸氢钾（基准试剂，使用前于105~110℃烘干2h）、氢氧化钠标准滴定溶液（ $C_{\text{NaOH}} = 0.1\text{mol/L}$ ）、氢氧化钾、过氧化钠、氯化钾、硝酸、氟化钾溶液、洗涤液、氯化钾-乙醇溶液、酒石酸钾钠溶液（10g/L）、酚酞乙醇溶液（10g/L）、盐酸。

主要仪器：电子天平、400mL的聚四氟乙烯杯，镍坩埚，容量瓶，箱式电阻炉，碱式滴定管。

2.2 试验方法

试验原理：试样经碱熔分解后，以热水浸取，酸化处理后，在强酸性介质中，加入氯化钾与氟化钾，使硅酸根

【作者简介】肖太菊（1994-），女，中国云南楚雄人，本科，工程师，从事分析检测研究。

离子形成氟硅酸钾沉淀析出。该沉淀经热水水解，释放出等摩尔量的氢氟酸，以酚酞为指示剂，采用氢氧化钠标准滴定溶液进行中和滴定。根据滴定消耗的氢氧化钠标准滴定溶液体积，计算二氧化硅的质量分数。

2.2.1 样品前处理

称取 0.2 g~0.4 g 试样（精确至 0.0001 g），置于已盛有 2 g 氢氧化钾的 30 mL 镍坩埚中，表面覆盖 2 g~3 g 过氧化钠，盖上表皿，置于低温电炉上加热蒸发水分至流体状态，充分摇匀后移入 700℃ 箱式电阻炉中熔融 15min，取出冷却。用热水洗净坩埚底部，将坩埚移入 400mL 塑料烧杯中，加入 10mL 热水，盖上表面皿，待熔融物作用完毕后，将坩埚内的反应物倒入塑料烧杯中，沿坩埚内壁缓缓滴加数滴盐酸，继以热水充分洗涤坩埚（总体积不得超过 25 mL）。加入 16 mL~17 mL 硝酸，混合均匀后冷却至室温。随后加入 6 mL 氟化钾溶液（200 g/L）及 5 g~6 g 氯化钾，搅拌至饱和状态，搅拌 3 至 5 分钟，静置 15~30 分钟（期间可将容器置于冷水或冰水浴中）。采用塑料漏斗，用中速滤纸过滤，用洗涤液洗涤塑料烧杯 2 ~ 3 次，洗涤沉淀 3 次，将滤纸及沉淀一同放入原塑料烧杯中，加入 10mL 氯化钾乙醇溶液。

2.2.2 酸度调节

加入 1 mL 酚酞乙醇指示剂溶液，以氢氧化钠溶液中和大部分游离酸，充分捣碎滤纸后，继续滴定至溶液呈淡粉色，此阶段消耗的标准溶液体积不计人读数。

2.2.3 滴定

加入 150mL 煮沸的酒石酸钾钠溶液，趁热用氢氧化钠标准滴定溶液滴定至刚出现粉红色为终点^[2]。

2.2.4 计算

硅的含量以质量分数 ω (SiO_2) 计，以 % 表示，

$$\omega_{\text{SiO}_2} = \frac{c \cdot (V_3 - V_0) \cdot M \times 10^{-3}}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

式中 :C -- 氢氧化钠标准滴定溶液的实际浓度 (mol/L)；

V_3 -- 滴定试液消耗氢氧化钠标准滴定溶液的体积 (mL)；

V_0 -- 滴定空白试验溶液消耗氢氧化钠标准滴定溶液的体积 (mL)；

M-- 1/4 二氧化硅的摩尔质量 (g/mol),
 $M(1/4\text{SiO}_2)=15.02\text{g/mol}$ ；

m_0 -- 试样的质量，单位为克 (g)。

计算结果表示至小数点后两位。

3 影响因素

3.1 样品前处理阶段

3.1.1 试料本身因素的影响

试样受潮现象：称量时试样黏附于称量勺；试样色泽改变，分布不均；上述现象可导致测定结果偏低。消除方法：试样应在 100 ~ 105℃ 烘烤 1h 后置于干燥器中，冷至室温。试样不均：因试样粒度分布不均及混样不匀，导致测定结果重现性较差、精密度降低。消除方法：制样过程中，试样粒度应不大于 100 μm (160 目)，过筛后样品需混匀后密封

装袋备用。

3.1.2 引入待测物质影响

试剂中含有待测组分：引入待测物质导致测定结果偏高。玻璃器具：玻璃会与 F^- 生成硅氟化合物，腐蚀玻璃。消除方法：配制试剂、清洗工器具均使用二级水，分析过程中均使用塑料器具，并带空白样品^[3]。

3.1.3 熔剂的影响

表 1 不同熔剂的影响结果

溶剂 名称	KOH	NaOH	KOH+Na ₂ O ₂	NaOH+Na ₂ O ₂
影响	样品熔融 不完全	样品熔融 不完全	样品熔融完 全，溶液清亮	样品基本熔融完 全，但引入大量 钠离子和其它元 素干扰

表 2 熔剂加入量的影响结果

	熔剂加入量 KOH+Na ₂ O ₂ (g)			
熔剂 KOH	0.2-0.5	0.5-1.0	1.5-2.0	2.5-3.0
熔剂 Na ₂ O ₂	0.2-0.5	0.5-1.0	1.5-2.0	2.5-3.0
影响结果	样品熔融 不完全	样品基本 熔融完全	样品熔融 完全	样品熔融完全， 但熔融时试剂较 多易喷溅损伤

选用碱 (KOH) 熔融，可使硅完全转化为硅酸钾： $\text{SiO}_2 + 2\text{KOH} = \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ，它可以提供更多的 K^+ ，防止引入大量钠离子，且制成的试液清澈便于观察。加入量应适当约 2 克，加入量过少，导致样品熔融不完全，加入量过多，熔融时易发生喷溅且浪费试剂。过氧化钠为助熔剂，加入量约为 2.0 克。

3.1.4 熔融时间的影响

表 3 熔融时间的影响结果

熔剂 (KOH+Na ₂ O ₂)	熔融时间 (min)			
	2-8	10-15	18-20	20-25
影响结果	部分样品熔 融不完全	样品熔 融完全	样品熔 融完全	样品熔融完全， 杯壁粘结试剂、 样品较多

熔融过程选用镍坩埚作为容器，因其具有优异的耐久性（氧化膜的抗腐蚀特性），所得溶液澄清透明，且杂质引入量较低。熔融前需置于电炉上加热，温度高或受热不均匀时，反应剧烈会发生喷溅，应轻轻摇匀至呈流体状，盖上表皿，放入马弗炉 700℃ 熔融 15min 或直至熔融完全。时间不足，则试样未能充分熔融，导致结果偏低。

3.1.5 浸取方式、硝酸酸化影响

熔融物浸取：镍坩埚底部需置于热水中洗净，因为镍坩埚底部置于箱式电阻炉后会有硅及其他杂质粘在底部，导致结果偏高。用热水少量多次浸取反应物，熔融物作用完毕后沿坩埚壁滴加数滴盐酸，再用热水洗净坩埚，浸取时控制体积不超过 25mL，体积太大会影响氟硅酸钾沉淀。

介质和酸度(加入16mL~17mL硝酸):一般酸度控制在3~4mol/L,酸度过高会增加氟硅酸钾沉淀的溶解性,导致二氧化硅测定结果偏低;酸度过低则易引发铝、钙等杂质形成氟化物共沉淀,从而造成测定结果偏高。杂质干扰最少:加入硝酸后,铝钛生成的氟铝酸钾和氟钛酸钾的溶解度比在盐酸中大,硝酸可加速铝络合物的溶解,减少铝钛的干扰,但样品中钙、钛、铝均高时采用盐酸硝酸混合酸较好。

3.1.6 沉淀剂、沉淀温度的影响

a. 氟硅酸钾沉淀不完全:K⁺、F⁻、H⁺的浓度不够。沉淀反应为:SiO₃²⁻+2K⁺+6F⁻+6H⁺=K₂SiF₆↓+3H₂O,消除方法:K⁺、F⁻、H⁺的浓度可适当过量。K⁺、F⁻可有效抑制氟硅酸钾沉淀的溶解,为确保氟硅酸钾(K₂SiF₆)沉淀完全生成并维持其稳定性,溶液中F⁻浓度通常需维持在100g/L以上,同时氯化钾溶液应保持饱和状态以提供充足的钾离子并维持过饱和环境。

b. 沉淀温度高:室温<35℃可生成氟硅酸钾沉淀,该反应为吸热反应,必要时可将塑料杯置于冷水或冰水中沉淀完全。室温≥35℃或湿度>70%时,沉淀在洗涤过程中会有部分溶解,用氟硅酸钾沉淀法测定硅分析结果影响较大,不适合使用该方法。

3.1.7 沉淀静置时间、滤纸选择的影响

表4 沉淀静置时间的影响

沉淀	静置时间(min)			
	2-10	11-14	15-30	60分钟以上
影响结果	未完全形成晶型沉淀,结果偏低	未完全形成晶型沉淀	形成晶型沉淀,沉淀完全	形成的沉淀部分发生水解,结果偏低

沉淀静置时间过长或过短:沉淀未完全就过滤,导致结果偏低。生成沉淀后放置时间超过1h,沉淀吸附杂质、共沉淀会给测定结果带来误差。缩短沉淀放置时间可减少氟铝酸钾沉淀影响。

3.2 中和阶段

3.2.1 指示剂的选择(1mL酚酞乙醇溶液)

氟硅酸钾水解后生成了氢氟酸和硅酸,因氢氟酸的电离常数较大,因此,滴定时,氢氟酸首先发生反应。若pH>8.5,部分硅酸将解离而被滴定,因此,需严格控制滴定终点pH值于7.5~8.0。因此,选择指示剂酚酞乙醇,酚酞刚变红即是终点,几份平行溶液终点的红色深浅应一致,最后中和酸的颜色、中和水的颜色与滴定终点颜色应一致,以减少颜色不一致带来的误差。

3.2.2 中和残余酸

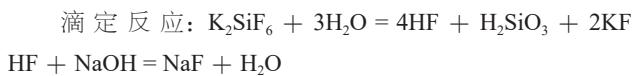
先滴加氢氧化钠溶液中和大部分酸,然后将滤纸捣碎,中和残余酸时不计消耗体积,当氢氧化钠溶液的用量超过10毫升时,氟硅酸钾沉淀可能部分溶解,导致测定结果偏低^[4]。

3.3 滴定阶段

3.3.1 氟硅酸钾沉淀水解不完全、干扰离子影响

氟硅酸钾沉淀水解过程是吸热反应,反应温度<50℃

反应速度慢、终点不稳定。蒸馏水中溶解的CO₂等物质也会影响酸度,因此需使用150ml煮沸的酒石酸钾钠溶液,使生成的氟硅酸钾沉淀完全水解,并保持滴定温度为70~90℃,必要时可用热水保温进行滴定。



干扰离子影响:Al³⁺、Fe³⁺、Cu²⁺等金属离子在碱性条件下易生成氢氧化物沉淀,导致测定结果偏高,加入酒石酸钾钠作为掩蔽剂,与金属离子形成稳定的、水溶性的五元环螯合物,从而“包裹”住金属离子,阻止它们与OH⁻反应。

3.3.2 终点的确定

酚酞乙醇指示剂酸性时为无色,滴定过程中不停地搅拌,随酸性的减弱快接近终点时,颜色变化由白色变成刚出现粉红色,继续搅拌30秒不褪色为终点。

3.3.3 氢氧化钠标准溶液的质量

质量控制要点:a.满足贮存条件,在低温(20~25℃为宜),易与CO₂发生反应,保存时间通常为2个月。b.标定人员需操作熟练规范,标定结果准确接近真实值。解决方法:配制时,使用煮沸冷却后的蒸馏水,储存于密闭带盖的玻璃瓶中(与干燥剂相连隔绝水分、CO₂等干扰),再用基准物标定。若发现溶液浑浊变质,需要重新配制。

4 总结

氟硅酸钾容量法测定铜精矿中二氧化硅含量,虽原理简明且对设备要求较低,但操作流程较为复杂,需精准掌握各环节的影响因素及减小或消除误差的方法。否则误差的累积传递将影响分析结果的准确性。因此,欲采用氟硅酸钾容量法准确测定铜精矿中二氧化硅含量,需首先消除误差影响。前处理阶段:需注意观察试样性状并据此作出初步判定。样品需熔融完全、防溅失,采用硝酸作为介质(3~4mol/L),保证足够K⁺、F⁻浓度使氟硅酸钾沉淀完全,控制沉淀时间约15-30min,过滤、中和时防止沉淀水解;中和阶段:选择合适的指示剂酚酞乙醇,中和残余酸,消除因残余酸带来的影响;滴定阶段应避免氟硅酸钾沉淀水解不完全,滴定温度控制在70~90℃为宜,并严格控制氢氧化钠标准溶液的质量。消除各环节的影响因素,不仅能提高测定的准确度,还可为误差分析提供理论依据与方向指导。

参考文献

- [1] 孙宝莲,张俊芳,李波,周恺,孙惠娜.氟硅酸钾滴定法测定红土镍矿中二氧化硅[J].冶金分析.2012(04)
- [2] GB/T 3884.16-2014,铜精矿化学分析方法第16部分:二氧化硅量的测定氟硅酸钾滴定法和重量法[S].
- [3] 赵秀梅,许丽岩,苏楠.氟硅酸钾法测定涂料专用型钛白粉中二氧化硅方法浅析[J].中国涂料,2025,40(02):72-76.
- [4] 杨荣清.浅析短碘量法测定铜精矿中铜含量的影响因素[J].科学技术创新,2018(29):9-10.

Thinking on the Importance and Specific Measures of Safety Production Management in Non-ferrous Metal Enterprises

Lin Zhong

Jiangxi Sanshi Non-ferrous Metal Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi, 338000, China

Abstract

With the acceleration of industrialization, non-ferrous metals, as important metal production enterprises, have also developed very rapidly. However, the production process of non-ferrous metals is accompanied by high temperature and high pressure environments, with complex production processes and strong risks. To ensure the enterprise's economic benefits and personnel safety, enterprise managers must strengthen their emphasis on safety production management. By combining parameters such as the enterprise's production process, existing safety management models, and historical hidden dangers, this paper analyzes the necessity and difficulties of safety production management and formulates feasible solutions. Starting from non-ferrous metal enterprises, this paper analyzes the hidden safety hazards in their production processes, and then combines safety management standards to analyze the importance and specific measures of safety production management.

Keywords

Safety Production Management; Non-ferrous Metal Enterprise; Safety Hazards; Production Process

安全生产管理对有色金属企业生产的重要性与具体措施思考

钟林

江西三石有色金属有限公司，中国·江西 新余 338000

摘要

随着工业化进程的加快，有色金属作为重要的金属生产企业，发展也十分迅速。但是有色金属生产环节伴随高温高压环境，生产流程复杂而且危险性较强，为保证企业经济效益与人员安全，企业管理者必须强化对安全生产管理的重视。结合企业生产流程、现存安全管理模式以及历史隐患等参数，分析安全生产管理的必要性以及难点，并制定切实可行的解决对策。文章从有色金属企业入手，分析其生产流程中存在的安全隐患，然后结合安全管理规范，对安全管理重要性与具体措施进行分析。

关键词

安全生产管理；有色金属企业；安全隐患；生产流程

1 引言

近年来，中国有色金属行业迅速发展，在国民经济中起着关键的作用，为各个行业的生产企业提供了大量原材料。随着国内有色冶金企业的增加，其规模不断扩大，这些企业已经取得了良好的经济效益和社会效益，未来发展的前景非常广阔。但是有色金属的种类很多，原材料的处理和生产工艺很复杂，生产设备的操作难度很大，整个生产过程存在着很大的安全风险。分析发现，有色金属冶炼企业还存在一定的安全管理问题，例如技术水平有待提升、监管体系不健全以及管理人员素质偏低。这就要求相关人员结合当前有色金属冶炼企业安全管理实际情况，设计专业的措施，通过这些对策的实施，解决有色金属冶炼企业安全生产管理面临

的诸多问题，提高生产安全水平，保障生产稳定运行。文章从有色冶金企业的角度出发，对当前存在的问题进行了全面的分析，并提出了相应的解决措施。目的是为中国有关行业的安全管理提出明确的解决方案，推动中国企业整体安全管理水平的提高。

2 安全生产管理概述

安全生产管理是指在生产过程中，确保人员、设备、环境、物料等各方面的安全，避免事故发生，并确保生产活动顺利进行的一系列管理措施和方法。作业环节，企业管理者需要将保障员工生命健康作为安全管理的目标，对生产环节的设备、人员、技术以及流程等进行管控^[1]。

3 有色金属企业概述

有色金属企业是指从事有色金属的采矿、冶炼、加工、生产及销售等相关业务的企业。其中，有色金属是指除铁

【作者简介】 钟林（1989—），男，中国江西宜春人，本科，助理工程师，从事化工安全管理研究。

以外的金属，包括铝、铜、铅、锌、镍、锡、金、银、钴、铂等金属。现阶段的有色金属企业业务主要包括矿产资源开采、冶炼与精炼、加工与制造以及销售与贸易等。涉及面较广而且技术要求较高。

4 有色金属企业生产环节的安全隐患

有色金属企业在生产环节涉及矿产资源的开采、运输、精炼、加工以及生产等流程，需要高温高压环境以及严密的流程控制，作业环节就存在一些安全隐患，需要企业人员分析^[2]。

4.1 矿产开采环节的安全隐患

有色金属企业原材料需要通过矿产资源开采获得，这就导致企业面临矿产资源开采的隐患。首先，深层矿井作业可能存在瓦斯泄漏与粉尘爆炸隐患，造成严重的安全隐患；其次，矿井支护不足也可能导致矿井的塌陷，威胁作业人员的安全。

4.2 冶炼环节的安全隐患

有色金属企业作业环节，资源收集后还需要对有色金属进行冶炼，以获取需要的精炼材料。但是冶炼环节需要运用到高温炉、熔炉等设备，存在高温高压作业需求，很容易出现炉膛爆炸、熔融金属泄漏等事故。而且密封不严导致的有害气体泄漏以及化学品泄漏也是导致安全风险的关键。

4.3 生产设备安全隐患

有色金属企业生产环节需要大量先进设备，包括开采设备、冶炼炉、加工设备等。长时间工作状态下，设备可能由于高温高压环境或者老化磨损等原因导致设备故障，造成安全隐患。

5 安全生产管理对有色金属企业生产的重要性

有色金属企业作为重要的工业企业，其安全生产管理体系的构建对于保障员工安全、预防事故、提高生产效率和树立企业形象具有重要意义。主要体现在以下方面。

5.1 保障员工生命安全

有色金属企业在作业环节经常伴随高温高压的环境，导致生产环节出现高温、火灾以及爆炸等风险的概率提升，容易产生安全风险。结合安全生产管理，相关人员就能够通过规范的制定以及定期监督，及时察觉生产环节的安全隐患并进行治理，以规避意外风险的产生，保证生产人员的人身安全。

5.2 可以加快生产效率

有色金属企业生产环节，设备一般较为精密而且规模较大，一旦出现安全事故，就会导致生产线停滞，影响企业的生产效率。结合安全生产管理，相关人员能定期检查生产设备，及时发现设备可能存在的安全隐患，规避设备故障风险。这样就能减少生产中断风险，从而提升企业的生产效率。

5.3 减少企业经济损失

有色金属企业一般规模较大，一旦出现安全隐患，就

会造成大量的设备损坏，严重者还会危害工作人员的人身安全，造成严重的经济损失。结合安全生产管理，相关人员就能够结合监测开展前瞻性风险评估，并制定预防措施，以降低事故发生概率，从而减少事故引发的经济损失。

5.4 可以增强员工的安全意识和工作积极性

安全生产管理涉及对员工的思想塑造以及技术培训，要求企业结合自身风险类型，通过安全演练、定期培训等方式，不断强化工作人员的责任感，从而激发员工的安全意识，提升员工的安全技术水平。综上，通过人员培训，就能够让员工具备较高的风险意识，在降低风险频率的同时提升员工的工作积极性。

5.5 强化突发事件的应对能力

有色金属企业生产环节，事故的发生一般具有突发性的特点，这就严重制约企业的发展。通过安全生产管理，相关人员认通过应急演练以及预案设计，可以在企业出现事故时迅速反应，将风险的影响范围控制在最小范围内，以强化员工对突发事件的处理能力，保障工作人员的生命安全。

5.6 促进企业可持续发展

有色金属企业需要保持长久的市场竞争力，而这一点与企业的安全生产密切相关。频繁发生安全事故会导致企业的生产环境恶化、员工流失、资金损失等问题，进而影响到企业的长期发展。良好的安全管理不仅可以提高生产效率，减少损失，还能增强企业的公众形象，提升社会责任感和行业口碑，从而实现可持续发展。

这就需要相关人员深入分析企业发展需要，合理地实施安全生产责任制，以推动企业的快速发展。

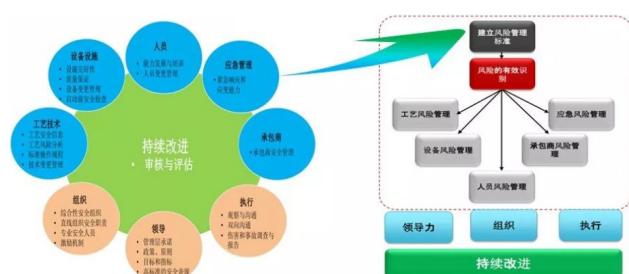


图 1 安全生产管理的内容

6 安全生产管理在有色金属企业生产环节的具体措施

6.1 建立安全生产责任制

制度是保障策略落实的关键，为确保安全生产管理在有色金属企业中的应用，企业管理者必须建立完善的安全生产责任制，将安全生产的责任落实到各个岗位以及人员身上，明确各个岗位的职能，激发相关人员的责任意识。设计环节，相关人员首先要明确责任的层级，有色金属企业生产环节，各个岗位的职责不同，为强化安全生产效果，企业管理者必须将安全责任层层分解到各级管理人员和操作工人，

帮助各个层级的人员明确责任^[3]。针对决策层，需要肩负起安全管理的倾向设计，负责各个安全策略的选择；针对管理层，其需要承担具体安全策略的管理和执行，要求安全策略能够落实；针对具体的工作人员，则需要将具体技术的掌握以及应用作为标准。这样就能将公司高层、各部门经理、车间主任及员工都纳入安全生产责任制度中，确保各个环节都具备负责人，通过责任连带制度，激发工作人员的安全责任感，强化安全管理策略的落实。

6.2 强化人员意识与技术培训

随着各行业安全问题的暴露，安全生产管理成为各行业重点关注的内容，安全质量生产监督管理工作是关系着冶金企业全体职工、全过程、全方位的一件大事。因此，要提高冶金企业各级管理人员的安全意识，让“安全生产，人人有责”的口号落到实处。此背景下，有色金属管理者就需要结合人员培训，建立起定期培训制度。一方面，管理层需要重视安全文化建设，塑造员工的安全意识。管理层需要结合安全标语、宣传栏以及广播等方式，营造安全文化氛围，帮助员工潜移默化地增强安全意识。也需要定期举办安全知识相关的知识竞赛以及事故管理分析等竞赛性质的活动，并且建立奖惩机制，对在安全生产中表现突出的员工进行奖励，对违反安全规定的行为进行严肃处理，不断强化员工的安全意识。另一方面，企业需要建立安全技术培训活动，针对内部的岗位，定期开展技术培训，包括冶炼过程、矿山开采、设备维修等，以提升员工的安全技术^[4]。也需要建立起以老带新机制，针对岗位技能，设计一个老员工培养多个新员工的方式，帮助新员工快速掌握安全操作技术，确保他们掌握岗位安全操作的关键要点，强化员工的技能水平。

6.3 重视设备检查，开展安全管理

首先，要定期对设备进行检查维护。针对冶炼炉、高压锅炉、电气设备等高危设备，相关人员需要安装温度、压力传感器、烟雾报警器等监测装置，对高危设备进行检查，及时识别设备中的异常数据，自动进行数据处理，帮助管理人员快速识别设备的安全隐患，迅速处理。

其次要进行风险评估，根据监测系统收集到的数据，相关人员则需要根据风险类型，对风险进行等级划分，识别风险的源头与影响，确定处理的速度与方式，以最小的代价

实现设备的安全管理。

然后要设计风险管理措施，在了解风险等级后，管理者就需要制定切实可行的解决策略。针对冶炼、高压气体操作、矿山开采等环节的高风险设备，需要设计实时监测系统，借助各种传感器识别异常数据，通过设备升级或更换，采用新技术和新设备等方式，保证设备的安全性。

6.4 设计应急演练，强化员工应急处理能力

首先，企业管理者需要制定应急预案。管理层需要结合大数据技术，收集企业生产历史数据，分析隐患出现的频率以及规律，针对火灾、爆炸、化学泄漏、电气火灾等易产生的突发性事故制定应急处理方案，优化对突发性事故的处理。

其次，需要开展应急演练。企业需要在内部定期召开演练活动，模拟真实的泄漏、包砸以及火灾风险，让员工在真实的氛围中掌握事故的应急处理技巧，从而强化员工的应急处理能力，确保其能够在出现事故的第一时间调整心态，迅速响应。

此外，有色金属企业还需要准备安全防护设备，为员工提供安全防护。设备配置环节，相关人员需要准备安全围栏、防护网、通风设备、紧急停车装置等环境防护装置，也需要准备安全绳、防护服、防毒面具、手套、护目镜等个人防护设备，双管齐下，保证安全。

7 结语

有色金属企业生产环节伴随一定的风险，为保证生产安全性，企业必须重视安全生产管理。文章结合有色金属企业安全风险的类型，提出制度建设、人员培训、应急演练等方法，为企业安全生产奠定基础。

参考文献

- [1] 孙燕京. 有色金属冶炼企业的安全生产冶炼管理对策研究 [J]. 世界有色金属, 2024, (22): 229-231.
- [2] 刘志刚. 有色金属企业安全生产管理体系的构建策略 [J]. 中国金属通报, 2024, (01): 181-183.
- [3] 陈聪. 有色金属冶炼企业的安全生产管理策略研究 [J]. 冶金与材料, 2023, 43 (10): 184-186.
- [4] 姜世刚. 浅谈如何做好有色金属冶炼企业的安全生产管理 [J]. 中国金属通报, 2020, (06): 12-13.

Analysis and Research on detection technology in cement chemical analysis

Aichun Gao Yun Miao Zhiqiu Wu

Huai'an Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223003, China

Abstract

Cement plays a vital role in the construction industry. Its main functions include cementation, building structural materials, waterproof materials, thermal insulation materials, fire-resistant and refractory materials, masonry materials, plastering and leveling materials, floor materials, inorganic coating decorations, plates, urban environmental construction and other applications; In addition to the physical properties of cement, the chemical composition has an important impact on the performance and appearance characterization of cement, so the content of chemical composition of cement is particularly important, and the chemical analysis and detection of cement is an important means to ensure the quality of cement. This paper mainly expounds the chemical composition of cement and the importance of chemical analysis technology, and analyzes the common cement chemical analysis methods and instrumental analysis and detection technology, which can adapt to different technologies in practical application, in order to provide technical reference for cement enterprises and relevant departments, and promote the development and application of detection technology in cement industry.

Keywords

chemical analysis of cement, detection technology, importance

水泥化学分析中的检测技术分析与研究

高艾春 缪赟 吴志球

淮安市建筑工程质量检测中心有限公司，中国·江苏淮安 223003

摘要

水泥在建筑行业中扮演着至关重要的角色，它的主要作用包括胶凝作用、建筑结构用材料、防水材料、保温材料、防火耐火材料、砌筑材料、抹灰找平材料、地坪材料、无机涂料装饰品、板材、城市环境建设和其他方面的应用；水泥性能除了物理性能外，化学成分对水泥性能和外观表征有着重要影响，因此水泥化学成分含量显得尤为重要，水泥化学分析检测是保证水泥质量的重要手段。本文主要阐述水泥的化学成分与化学分析技术的重要性，并分析常用水泥化学分析方法和仪器分析检测技术，在实际应用中可适应不同技术以期为水泥企业和有关部门提供技术借鉴，促进水泥工业检测技术的发展和应用。

关键词

水泥化学分析、检测技术、重要性

1 引言

水泥作为胶凝材料，能够将碎石或砖块牢固地粘结在一起，形成稳定的结构，与砂石、外加剂、掺合料、钢筋混合制成的钢筋混凝土，是现代建筑中不可或缺的建筑材料，适用于桥梁、隧道、海防工程等多种场合；水泥的防水性能使其成为长效环保的防水材料，通过调节水气作用，阻止水分渗透；此外，水泥还可以与其他材料结合，制作出具有良好保温性能的材料，如发泡混凝土和保温板。在防火领域，

水泥与耐火材料结合，可以生产出高性能的防火材料。水泥还广泛用于生产各种砌筑用砖和抹灰找平材料，以及地坪系统和装饰品。在城市环境中，水泥可以制成透水砖和城市雕塑等，美化城市景观，在军事、航空、核工业等领域也有广泛应用。

2 水泥的化学成分与化学分析的重要性

水泥化学成分^[1]是由氧化钙（CaO）、三氧化二铝（Al₂O₃）、二氧化硅（SiO₂）、三氧化二铁（Fe₂O₃）等组成。在生产和制备水泥时，参与反应的原材料经过一系列复杂的物理化学反应，生成硅酸三钙（3CaO·SiO₂）、硅酸二钙（2CaO·SiO₂）、铝酸三钙（3CaO·Al₂O₃）与铁铝酸四钙（4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃）等不同类型的胶凝物质，其组成与

【作者简介】高艾春（1984-），男，中国江苏淮安人，本科，高级工程师，从事建筑材料检测与研究、绿色建材检测与评价等研究。

结构特性直接影响着水泥的基本性质。同时水泥中存有的微量的氧化镁 (MgO)、三氧化硫 (SO_3)、氧化钠 (Na_2O)、氧化钾 (K_2O)、二氧化钛 (TiO_2) 等元素，不但对其性能有重要影响，而且胶凝形成的水泥制品也有着至关重要的作用；如氧化镁 (MgO) 含量高，容易引起混凝土体积不稳定性；三氧化硫 (SO_3) 则可调控水泥凝结时间等等，可以看出水泥化学成分分析与实际生产密不可分。

随着社会高质量发展，科技日新月异，参加生产和制备水泥的各种原材料在某种程度上发生微妙的变化，常规性的物理性能指标已不满足材料的发展，水泥中的化学成分对耐久性影响越来越明显，水泥化学分析方法在具体应用中需要谨慎选择，常规方法、仪器分析技术均为水泥化学成分的精确检测的手段，是水泥生产商和建筑施工过程质量控制的重要组成部分。

在水泥生产中，采用化学分析方法对掺配原材料进行实时监测，保证各种原材料化学指标符合要求，对调整材料之间的配合比、保证各项技术指标满足技术要求，从而保证产品质量的稳定性起到决定性作用。比如，通过对生料中氧化钙 (CaO)、三氧化二铝 (Al_2O_3)、二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3) 的含量进行精准检测，可以调节材料之间的比例，实现熟料中矿物成分的优化，从而提升水泥的强度等综合性能。

在建筑工程施工过程中，可根据水泥的化学成分分析结果，合理地选用不同种类的水泥，以适应不同气候环境，保证了建筑物的安全、耐用^[2]。

3 适用于水泥化学分析的仪器分析技术

3.1 可见分光光度法

可见分光光度法是通过检测被测物体在不同波长下吸收特征定量检测物体的光谱信息。水泥中二氧化硅 (SiO_2) 和三氧化二铝 (Al_2O_3) 是一种常用的检测方法。比如，在二氧化硅 (SiO_2) 的检测中，先利用硅钼蓝分光光度法，在特定的条件下，检测其吸收光谱，再由标准曲线推算出硅钼蓝的含量。该方法设备简单，成本低廉，操作简便，但其检测步骤较为繁琐，需对样品前处理、显色等步骤繁琐，且检测时间长，对复杂样本的检测精度有一定的影响。

利用该技术进行实际应用，如利用可见分光光度法对城市道路基层使用的一批普通硅酸盐水泥（缓凝型）中可溶性二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、二氧化钛 (TiO_2)、五氧化二磷 (P_2O_5) 的测定含量进行检测。测试人员按照 GB/T 176-2017《水泥化学分析方法》标准规定要求的进行操作，优先绘制标二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、二氧化钛 (TiO_2)、五氧化二磷 (P_2O_5) 含量标准曲线，10mm 比色皿，以水作参比，分别于波长 660nm、510nm、420nm、730nm 处测定溶液的吸光度。并建立的吸光度与之相对应二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、二氧化钛 (TiO_2)、五氧化二

磷 (P_2O_5) 含量的函数，为保证数据的精准可靠及满足重复性误差，相关系数 r 均应大于 0.9995；样品测试与标准曲线同等条件。

3.2 原子吸收光谱法 (AAS)

原子吸收光谱法是基于气态原子对紫外光和可见光范围的相对应原子共振辐射线的吸收强度来定量被测元素含量的基础分析方法。通过将试料溶液进行原子化处理，即将其液体加入原子化器中，使其在较高温度下被激发形成基态的原子蒸汽，在待测化学元素被对应特征谱线光穿过原子蒸汽时，原子的基态会吸收与之共鸣的谱线光，从而削弱光的强度。依据朗伯 - 比耳定律，特征谱线光强衰减的大小与其在原子蒸汽中的浓度呈线性关系，按照标准规定，确定浓度线性范围，利用标准物质建立吸光度与浓度的关系，将不同化学元素的吸光度值与其对应标准曲线进行比较，可以检测出水泥中化学成份的含量。原子吸收光谱法 (AAS) 具有高选择性等特点，在水泥检测中特别适合于氧化钾 (K_2O)、氧化钙 (CaO)、三氧化二铁 (Fe_2O_3)、三氧化二铝 (Al_2O_3)、氧化锰 (MnO)、氧化锌 (ZnO) 等常量元素的检测。

原子吸收光谱法 (火焰) 原操作简单，适合高浓度元素的分析。

原子吸收光谱法 (石墨炉) 具有很高的灵敏度，可以实现 ppb 量级的微量元素的测试，但是需要耗费大量的时间和苛刻的实验条件。

原子吸收光谱法 (AAS) 不足之处在于，一次仅能检测一种元素，且在检测多个元素时，需要不断地切换元素阴极灯，效率不高，适用于较多数量样品。

3.3 X 射线荧光光谱法

X 射线荧光光谱法是根据 X 光和物质内部原子结构发生反应而生成的光谱。当高能 X 射线辐照水泥材料时，其内部原子层的电子被激发，外层的电子跃迁填充内部缺陷，并释放出具有特殊能量的 X 射线，称为“荧光 X 射线”。各种化学元素在一定条件下能产生具有不同的能量及波长的 X 射线，因此，我们可以利用 X 射线特性和它们之间的量化关系，实现对水泥中化学元素进行定性和定量。在实际应用中“X 射线荧光光谱法”可快速、准确的扫描出各种化学元素，极大地提高了检测的效率，且该方法对试样可以做到无损检测。X 射线荧光光谱技术的进步，使其在高精度检测水泥化学组分方面取得了较大的进展。但是，X 射线荧光光谱 (XRF) 技术也有其局限性，如对氢气 (H_2)、氦气 (He)、锂 (Li) 等轻元素的探测灵敏度不高，以及易受基质干扰和基质修正等问题。

利用该技术进行实际应用，比如，需要对 P·O42.5 普通硅酸盐水泥进行化学成分检测，并对其进行主要化学成分检测。根据 GB/T 176-2017《水泥化学分析方法》标准规定，采用四分法将水泥试样缩分至约 100g，将水泥试样研磨至

细，使其全部通过150mm标准方孔筛，充分混匀，装入干净、干燥的样品瓶中，密封后进一步混匀待测（为防止吸潮，迅速进行样品制备），再按照标准规定的要求和仪器设备说明书制备“玻璃熔片”。应用某公司生产的XRF光谱仪，利用标准样品进行标定和标准曲线的绘制，同等条件下对水泥试样中二氧化硅(SiO_2)、氧化钙(CaO)、三氧化二铁(Fe_2O_3)、氧化镁(MgO)、氧化钾(K_2O)、钠化钾(Na_2O)、二氧化钛(TiO_2)、氯离子(Cl^-)、五氧化二磷(P_2O_5)等化学成分进行快速扫描定性、定量分析^[5]。

3.4 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)

电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)的原理是利用电感耦合等离子体作为激发光源，根据处于激发态的待测元素原子回到基态时发射的特征谱线对待测元素进行分析。

试料经氢氟酸-高氯酸分解，盐酸浸取，溶液经ICP-OES检测，不同元素的原子在激发或电离时可发射出特征光谱，分别测定待测元素的发射光谱强度。特征光谱的强弱与试样中原子浓度有关，通过与标准溶液相对应的元素光谱强度进行比较，定量测定试样中三氧化二铁(Fe_2O_3)、三氧化二铝(Al_2O_3)、氧化镁(MgO)、二氧化钛(TiO_2)、氧化钾(K_2O)、氧化钠(Na_2O)、氧化锰(MnO)、氧化锌(ZnO)、五氧化二磷(P_2O_5)、三氧化硫(SO_3)含量。

根据使用的仪器型号，选择适当的工作参数（如功率，观察高度，清洗时间等），分别测定空白溶液、标准溶液（合适的浓度）、上述待测液中各待测元素的发射光谱强度。测定波长参考厂家推荐值。电感耦合等离子体发射光谱法推荐使用波长参见GB/T 176-2017《水泥化学分析方法》附录C的有关规定，可同时测出多元素结构。

3.5 电感耦合等离子体发射质谱法(ICP-MS)

ICP-MS全称是电感耦合等离子体-质谱法，它是一种将ICP技术和质谱技术结合在一起的分析仪器。ICP-MS法具有样品制备和进样技术简单、质量扫描速度快、运行周期短、所提供的离子信息受干扰程度小等优点。对于大多数元素而言，有着极低的检出限，被公认为最理想的无机元素分析方法。ICP-MS法几乎可以分析元素周期表中所有金属元素，检测限在1ppt以下，同时也可分析绝大部分非金属元素。

ICP-MS的制样过程要求样品可以溶解于酸中，配成离子溶液，使待测元素以离子形式存在。若样品不溶于强酸，需对样品进行前置处理，一般为空气中灼烧使待测元素变成金属氧化物形式存在。对溶于酸的样品（金属氧化物），直接溶于盐酸、硝酸、硫酸、王水等酸性溶液中，确保浓酸原始体积小于稀释后总体积的5%（酸度小于5%）。样品溶液送样浓度要求待测各种离子浓度均在1~10ppm(ppm为质量分数百万分之一)之间。

3.6 其他检测技术

3.6.1 电位滴定法

电位滴定法是通过电位的变化来确定滴定终点的方法，特别适用于化学反应的平衡常数较小、滴定突跃不明显或试液有色、呈现浑浊的情况。电位滴定法不需要颜色指示剂，通过电位值判断滴定终点。锁定滴定参数后可保证每一个样品的滴定过程完全一致。整个方法不受环境和人为因素的干扰，在水泥化学分析中特别适用于氯离子含量检测，在目前仪器发展中，全自动电位滴定仪的出现，减少了人工误差。

全自动电位滴定可实际应用于GB/T 176-2017《水泥化学分析方法》、GB/T 601-2016《化学试剂 标准滴定溶液的制备》标准中涉及的标准溶液标定。

3.6.2 离子色谱法

离子交换色谱法（离子色谱法）是利用离子交换原理和液相色谱技术的结合来测定溶液中阳离子和阴离子的一种分离分析方法。凡在溶液中能够电离的物质通常都可以用离子交换色谱法进行分离。它不仅适用于无机离子混合物的分离，亦可用于有机物的分离，因此应用范围较广。

目前常用的离子交换树脂分为三种形式，一是常见的纯离子交换树脂。第二种是玻璃珠等硬芯子表面涂一层树脂薄层构成的表面层离子交换树脂，第三种为大孔径网络型树脂。它们各有特点，例如第二种树脂有很高的柱效，但它的柱容量不大；第三种树脂适用于非水溶液中物质的分离，因为它们的孔径和内表面积大，不需要用水膨胀，便可满意地使用。典型的离子交换树脂是由苯乙烯和二乙烯基苯交联共聚而成。

在实际应用中，离子色谱法可测试，如水泥中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等阴阳离子，与之对应的化学成分为氯离子、硫化物及硫酸盐、氧化钾、氧化钠、氧化镁等，充分利用仪器的基本功能原理来解决实际问题，检测数量级可达ppb级。

4 结论

总之，水泥化学分析检测技术对于保证水泥质量，促进建筑工程的安全性和耐久性具有重要意义。不同仪器分析方法适用于不同类型的检测需求，不同检测方法各有侧重点，在使用时要根据分析目的、样本特点和费用要求，进行科学的选择。

参考文献

- [1] 潘飞.建筑材料化学检测影响因素分析及应用[J].科技与创新,2024,(06):169-171,176.
- [2] 国家水泥质量检验检测中心权威发布“天宝华瑞杯”全国第十九次水泥化学分析大对比获奖单位名单[J].中国水泥,2024,(S2):307-314.
- [3] 朱殊.应用X射线荧光分析方法检测水泥及相关样品中化学成分的方法验证[J].建材发展导向,2023,21(16):12-14.

Issues and Countermeasures in Radiation Safety and Protection Management of Low-Risk Nuclear Technology Utilization Units in a Certain City of China

Wenfang Suo

Shenzhen Ruida Testing Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This article analyzes the problems existing in the radiation safety protection management of low-risk nuclear technology utilization units in a certain city. The main problems are weak safety responsibility awareness, insufficient professional management ability, and superficial system implementation. Analyze the existing problems, prescribe targeted solutions, and provide appropriate solutions: strengthen the implementation of responsibilities, focus on improving professional business capabilities, improve the construction of institutional execution systems, in order to solve the difficulties and pain points of low-risk nuclear technology utilization units in radiation safety management, enhance management level and capabilities, and ensure the safety of the radiation environment.

Keywords

low-risk nuclear technology utilization units, radiation safety protection management

中国某市低风险核技术利用单位辐射安全防护管理存在的问题与解决对策

索文芳

深圳市瑞达检测技术有限公司，中国·广东·深圳 518000

摘要

对某市低风险核技术利用单位在辐射安全防护管理存在的问题进行分析，主要存在问题为安全责任意识淡薄、专业管理能力不足、制度执行流于形式等。对存在的问题进行剖析，“对症下药”，给出合适的解决对策：强化责任落实、着力提升专业业务能力、完善制度执行体系建设，以解决低风险核技术利用单位在辐射安全管理方面的难点与痛点，提升管理水平和能力，保障辐射环境安全。

关键词

低风险核技术利用单位 辐射安全防护 管理

1 引言

核技术利用是指密封放射源、非密封放射源和射线装置在医疗、工业、农业、地质调查、科学的研究和教学等领域中的使用。我国核技术利用大体上经历了五十年代开创、六七十年代应用开展和八十年代以来全面发展的三个历史阶段。特别是九十年代以后，核技术的应用步入了商业化进程，已初步形成具有一定规模和水平的较为完整的体系，已逐步在工业、农业、医疗及科研等各个领域获得了越来越广泛的运用，推动了我国国民经济的建设和发展^[1]。与此同时，核技术的广泛应用，给核技术利用单位在辐射安全方面的管理带来了挑战。辐射安全问题越来越受到社会的关注^[2]。本

文旨在通过对低风险核技术利用单位辐射安全管理的难点痛点进行分析，找出对策化解辐射安全管理难题，提升管理水平。

低风险核技术利用单位包括生产、销售、使用Ⅲ类射线装置与Ⅳ、Ⅴ类放射源的单位。其中，Ⅲ类射线装置的使用主要集中于普通的口腔门诊、动物诊疗医院以及部分工业企业；Ⅳ、Ⅴ类放射源的使用主要集中在部分工业企业、石油工业的生产环节，用于测量产品的厚度、产品的质量以及石油勘探、开采等^{[3][4]}。

射线装置分类与防护等级

类型	分类	放射损伤	防护要求
射线装置	I类	事故时，严重放射损伤	要求高
	II类	事故时，较严重放射损伤	要求较高
	III类	事故时，一般不会产生放射损伤	要求相对简单

【作者简介】索文芳（1991—），女，硕士，工程师，从事生态环境管理与咨询研究。

放射源分类与危害程度			
类型	分类	分级	危害
放射源	I类	极高危险源	无防护，接触几分钟到1小时就可致人死亡
	II类	高危险源	无防护，接触几小时至几天可致人死亡
	III类	危险源	无防护，接触几小时造成永久性损伤，接触几天至几周也可致人死亡；
	IV类	低危险源	基本不会对人造成本永久性损伤，长时间、近距离接触会产生临时性损伤
	V类	极低危险源	不会对人造永久性损伤

非密封源分类

类型	分类	管理措施
非密封源	甲级	参照I类放射源
	乙级	参照II类放射源
	丙级	参照III类放射源

2 辐射安全管理的主要措施

2.1 外部管理措施（行政措施）

外部管理措施（行政措施）主要依靠相关法律法规约束核技术利用单位遵守法律法规，按照要求做好最基本的辐射安全管理措施，守住辐射安全底线。生态环境方面主要的法律法规包括国家发布的《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性物品运输安全管理条例》、地方发布的辐射相关的行政法规以及生态环境部发布的部门规章《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》。实现从“摇篮”到“坟墓”的全流程管理。目前辐射安全和防护的管理实行国家、省、市三级分级管理。

2.2 内部管理措施

内部管理措施主要依靠核技术利用单位按照辐射相关的法律法规的规定制定内部的管理制度，是确保辐射安全的核心基础。主要制度包括：辐射安全与环境保护管理机构成立文件、操作规程（生产、使用、销售）、岗位职责、台帐管理制度（生产、使用、销售）、设备检修维护制度（生产、使用、销售）、辐射防护和安全保卫制度、人员培训计划、监测方案、辐射事故应急预案、年度评估报告制度、质量保证大纲和质量控制检测计划、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施等。

3 辐射安全管理存在的问题

3.1 外部管理存在的问题 – 新型行业辐射安全防护规范缺失

随着经济社会发展和消费升级，新业态不断涌现并呈现快速增长态势，然而与之配套的辐射安全防护标准体系建设相对滞后，使得相关行业监管面临标准缺失、依据

不足的困境。以蓬勃发展的宠物医疗行业为例，根据《2025年中国宠物行业白皮书》数据显示，2024年我国城镇宠物（犬猫）数量已突破1.22亿只，宠物医疗市场规模占比达28%，呈现出强劲的发展势头^[5]。但在行业快速扩张的同时，X光机、CT等影像设备在宠物诊疗中的应用日益普及。针对宠物诊疗机构的辐射安全防护标准却迟迟未能出台，导致监管部门在执法过程中缺乏明确的技术规范和操作指引，形成了一定的监管真空地带。这一现象在新兴行业中颇具代表性，亟待引起重视并加以解决。例如，设备使用无明确规定：宠物医院使用的放射设备多参照人类医疗标准，但动物体型、照射剂量与人类差异显著，现行标准难以适配，存在超剂量照射或防护不足的风险。场所设计缺乏依据：宠物医院放射机房布局、屏蔽要求等无专门规定，部分机构为节省成本，未设置合规的防护设施（如未设置铅墙、铅玻璃、防护门），可能对医护人员及周边公众造成辐射暴露。

3.2 内部管理存在的问题 – 核技术利用单位辐射安全防护管理水平有待提升

一是射线装置或放射源使用不合规。《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019年修订）规定了生产、销售、使用射线装置或放射源需申领辐射安全许可证。并且针对辐射安全许可证新申请、重新申请、变更、延续、注销；放射源进口、出口、转让、异地使用、回收；非密封性放射性物质的进口、出口、转让、异地使用以及放射性药品及原料的进口、出口和转让的情形也做了具体规定。然而实际管理过程中，中小型低风险核技术利用单位无许可证、超许可证范围经营的情况亦有发生。如，个别口腔诊所未办理辐射安全许可使用射线装置拍片；个别口腔诊所更射线装置而未及时重新申领辐射安全许可证，使用的射线装置数量与申请许可的数量不一致；个别销售单位销售的射线装置与许可销售的射线装置型号或者数量有差异等。

二是鉴于卫生健康部门与生态环境部门对于辐射方面的监管职能交叉，标准要求存在差异，部分小型的医疗机构对生态环境部门与卫生健康部门的管理要求混淆。主要表现在：一方面，对《辐射安全许可证》（生态环境部门核发）和《放射诊疗许可证》（卫生健康部门核发）的性质和适用范围认识不清，将两证等同；另一方面，对辐射工作人员安全培训（生态环境部门要求）与放射工作人员职业健康管理（卫生健康部门要求）的区分不明，将两个部门的要求等同。通常情况做放射工作人员的培训，而忽视辐射安全培训考核。

三是部分核技术利用单位，尤其是小型医疗机构和宠物医院，在辐射安全管理方面存在明显的认知缺陷和执行短板。一方面，这些单位往往因规模较小、人员流动性大，导致相关工作人员对辐射安全法规和操作规程缺乏系统了解，甚至存在“重使用、轻管理”的倾向。辐射安全管理人员业务水平参差不齐，部分人员对防护标准、应急程序等关键要

求掌握不足，且责任心不强，日常管理流于形式。如不能按时提交年度评估报告，每年 1 月 31 日前要提交上一年度的年度评估报告，部分单位需要监管部门督促才能提交^[6]。未按照要求开展辐射场所辐射环境检测（主要表现为检测报告的依据无 HJ 的标准，或检测报告无 CMA 章），导致监测不符合要求。另一方面，部分核技术利用单位由于自身专业能力不足，倾向于将辐射安全管理的关键环节（如环境监测、防护评估、许可证申领等）委托给第三方机构执行。虽然这种方式能在一定程度上弥补技术短板，但部分单位过度依赖外部服务，导致内部人员对辐射安全管理的参与度和责任意识弱化。例如，有的机构将全部管理工作外包后，内部人员对辐射安全的基本规范、应急流程等缺乏必要认知，甚至出现“甩手掌柜”现象。这种“外紧内松”的管理模式，不仅难以确保日常操作的合规性，还可能因内外衔接不畅而引发漏洞。

四是部分核技术利用单位对“国家核技术利用辐射安全管理系统”的应用意愿不强，存在消极应付或被动填报的现象。一些单位认为系统操作流程复杂、填报要求繁琐，增加了管理负担，因而仅满足于最低限度的信息录入，未能充分发挥系统在辐射安全动态监管、数据分析和风险预警方面的作用。尤其是部分小型医疗机构和工业企业，由于缺乏专职管理人员，系统使用率低，信息更新滞后，甚至存在漏报、误报的情况。这种现象反映出基层单位对信息化监管工具的认知不足，同时也暴露出系统设计需进一步优化用户体验、加强培训指导的问题。

4 对策建议

4.1 加快完善新型行业辐射安全防护标准体系

当前，国家及地方层面正积极推进辐射安全防护管理措施的优化升级，以适应核技术利用产业的快速发展需求。针对新兴行业辐射应用的特点，亟需建立健全差异化的标准规范体系。建议在坚持国家统一监管原则的基础上，鼓励地方结合产业实际开展标准创新试点。例如，深圳市 2025 年发布的《动物诊断 X 射线装置辐射安全与防护要求》（DB4403/T 586—2025），作为国内首个针对宠物诊疗机构的地方专项标准，明确了诊疗场所选址布与局要求、辐射防护要求、辐射安全措施及操作要求、辐射监测要求等关键技术指标，为行业提供了精准化监管依据。这种“行业标准+地方特色”的协同模式，既确保了辐射防护底线要求，又解决了新兴领域无标可依的实践困境，值得在医疗美容等新业态中推广借鉴。

4.2 进一步提升核技术利用单位的辐射安全管理防护水平

一是针对核技术利用单位不合规使用射线装置和放射源的情形。核技术利用单位要建立完善管理制度，比被动接受监管更为重要和有效。建立完善的许可证管理制度。设立

专职辐射安全管理员，负责许可证的申领、变更、延续等工作建立许可证管理台账，定期核查设备使用情况与许可证内容的一致性；对许可证即将到期的，提前 1 个月启动延续申请程序。强化内部合规审查机制。定期开展辐射安全自查，重点检查：在用设备与许可证登记信息是否一致；新增 / 变更设备是否及时办理许可手续；操作人员资质是否符合要求；建立问题整改闭环管理机制。建立设备全生命周期管理。从采购、使用到报废各环节建立管理档案；设备变更时严格执行“先审批后使用”原则；定期核查放射源及射线装置的数量和状态。主动对接监管部门。及时了解最新法规要求；重大变更前主动咨询监管部门；配合做好监督检查工作。

二是针对部分小型医疗机构对生态环境部门与卫生健康部门在辐射安全管理方面管理要求混淆的问题。建议核技术利用单位采取以下措施。建立“双部门”合规对照清单。制作《辐射监管双部门要求对照表》，明确：生态环境部门重点监管内容（辐射安全许可证、环境监测、放射源管理等）；卫生健康部门重点监管内容（放射诊疗许可、职业健康管理、质量控制等）。两部门重叠领域（如个人剂量监测、应急演练）的具体执行标准差异。设置双轨制管理岗位。指定专人分别对接两部门：生态环境联络员：负责辐射安全许可证维护、放射性废物处理等。卫生健康联络员：负责放射工作人员职业健康监护、诊疗质量控制等。定期组织两岗位协同会议，确保管理无盲区。定期开展合规性双审。每半年进行一次“双维度”自查：分别进行卫生健康维度自查（放射防护用品配备、放射人员上岗资质、职业健康等）和生态环境维度自查（辐射安全设施有效性及辐射安全制度执行情况），生成整改清单，双部门确定整改方案，将整改进行到底，切忌“走过场”。

三是针对部分核技术利用单位在辐射安全管理方面存在明显的认知缺陷和执行短板，建议采取以下措施：一方面提高责任意识。将辐射安全管理纳入单位的整体管理体系，将辐射安全责任层层分解，落实到具体岗位和个人，切实压实责任，而不是流于形式。将辐射安全等重点关键岗位落实到相对固定的人员，而非临时或频繁更换的人员，是确保核技术利用单位安全管理连续性和专业性的重要保障。另一方面，加强自身的专业能力建设。重点建立并完善系统化、规范化的培训体系。构建分层分类培训体系，对管理人员、操作人员、新入职人员分别采取不同的培训策略。管理人员重点培训辐射安全法规标准体系；掌握许可证管理、应急管理等制度要求。操作人员培训重点强化设备操作规程培训、个人防护用品使用实训等。新入职员工实施岗教育培训，培训合格再上岗。建立持续提升机制，跟踪法规标准修订动态，及时更新培训内容。多参加监管部门组织的专项培训，系统掌握相关要求，切勿“做表面文章”。

四是强化核技术利用单位信息化管理主体责任。各核技术利用单位应当高度重视“国家核技术利用辐射安全管理

系统”的应用实施工作，将其作为履行辐射安全管理主体责任的重要抓手。要建立健全系统应用管理制度，重点做好以下工作：一是要转变观念，充分认识信息化监管的重要性，克服畏难情绪和应付心理；二是要配备专职系统管理员，负责日常信息维护和数据报送工作，确保许可信息、放射源台账、人员资质、监测记录等关键数据的及时更新和准确填报；三是要建立内部审核机制，对填报信息实行双人复核，杜绝漏报、错报现象。该系统作为辐射安全监管的重要信息化平台，已实现对持证单位许可管理、放射源流转、人员培训、年度评估、监测数据等关键信息的全覆盖。监管部门将通过系统数据开展非现场监管，对信息填报规范的单位适当减少现场检查频次，实现“数据多跑路、企业少跑腿”的监管目标。

5 结论

低风险核技术利用单位日常管理过程中出现的共性问题暴露出了辐射安全管理体系存在的薄弱环节和管理漏洞。具体表现为：一是安全责任意识淡薄，部分单位存在“低风险即无风险”的错误认知；二是专业管理能力不足，基层操

作人员普遍缺乏系统的辐射安全培训；三是制度执行流于形式，日常监测、设备维护等基础工作落实不到位。这些问题反映出当前对低风险核技术利用单位的管理，在责任落实、能力建设、制度执行等方面亟待加强和完善。通过完善管理制度、压实责任到人，强化专业能力建设等措施，将对低风险核技术利用单位的安全管理水平实现系统性提升。

参考文献

1. 国家核安全局官网[核技术利用]什么是核技术利用? https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqshmhsh/hyfsaqkp/kptw/202406/t20240624_1076672.html
2. 黄标. 核技术应用的辐射安全与防护分析[J]. 中国资源综合利用,2021,39(2):143-145.
3. 《关于发布〈射线装置分类〉的公告》（公告2017年第66号）
4. 《关于发布放射源分类办法的公告》（公告2005年第62号）
5. 周春华, 刘朗. 我国宠物诊疗发展现状与趋势展望[J], 畜牧产业: 2025(4)28-31
6. 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019年修订）

Feasibility analysis of portable multi-component air quality analyzer for nuclear power plant

Dingyu Gao Tie Zhong

State Nuclear Demonstration Power Station Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264200, China

Abstract

This study conducts a comparative analysis of technical specifications from 12 mainstream gas analyzers worldwide, tailored to nuclear power plant's specialized analytical requirements. An integrated design solution combining multi-sensor fusion is proposed to enable a single instrument to meet air quality analysis demands in the main control room's emergency shelter system. Experimental results demonstrate that through composite detection technologies including electrochemical methods, Non-Direct Infrared (NDIR), and Fuel Infrared (FID), a single device can simultaneously monitor 10 critical parameters, fulfilling nuclear power plant's on-site detection requirements.

Keywords

nuclear power plant; air quality; multi-parameter detection; portable instrument

核电厂便携式多组分空气质量分析仪器可行性分析

高丁雨 钟铁

国核示范电站有限责任公司，中国·山东 威海 264200

摘要

本文通过对国内外12种主流气体分析仪的技术参数，结合核电特殊分析要求，提出基于多传感器融合的集成设计方案以实现一台分析仪器完成主控室应急可居留系统中空气质量的分析需求。研究证明采用电化学法、NDIR、FID等复合检测技术，可实现单台仪器覆盖10项关键参数的同步检测，满足核电现场检测需求。

关键词

核电厂；空气质量；多参数检测；便携式仪器

1 背景介绍

CAP/AP 系列第三代先进压水堆核电站均设置有主控室应急可居留系统（VES）。主控室应急可居留系统旨在为设计基准事故工况下为主控室操作人员提供至少 72 小时呼吸级备用空气。为了保证事故工况期间主控室停留人员安全，技术规格书要求主控室备用气源中空气品质必须满足 American National Standards Institute Compressed Gas Association(以下简称：CGA)G-7.1 表 1 中 E 级标准和 American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. (以下简称：ASHRAE) Standard 62.1 附录 E 表 E-1 的要求。同时，要求每次备用空气储罐充气后或每 92 天进行一次空气质量分析。主控室应急可居留系统对压缩空气品质的具体要求如表 1 所示。

表 1 主控室应急可居留系统中压缩空气品质要求

序号	参数	限值
1.	露点 (23.44MPa)	≤4.4℃
2.	二氧化碳 (CO ₂)	≤1000 ppm (v/v)
3.	一氧化碳 (CO)	≤9 ppm (v/v)
4.	气味	无
5.	油 (凝结的)	≤5 mg/m ³ . NTP
6.	氧气 (O ₂)	20%-22%
7.	总烃 (以甲烷计)	≤25ppm (v/v)
8.	铅 (pb)	≤0.15 μg/m ³
9.	二氧化氮 (NO ₂)	≤100ppb (v/v)
10.	臭氧 (O ₃)	≤0.07ppm (v/v)
11.	PM 10	≤150 μg/m ³
12.	二氧化硫 (SO ₂)	≤75ppb (v/v)

目前市面上可用于核电厂进行主控室应急可居留系统中空气品质分析的仪器较多，但集成度低，完成 12 项分析指标至少要 5 台仪器，每次取样分析期间操作过程复杂，携带不便。同时，只要其中一台仪器故障就会导致无法分析，可能导致机组后撤至热停堆模式。

【作者简介】高丁雨（1997-），女，中国河北邢台人，本科，助理工程师，从事化学领域研究。

本文从主控室应急可居留系统中空气品质各参数分析原理出发，研究分析是否具备将其中绝大部分或全部参数项目的分析过程集成到一台分析仪器中的可能性，以期实现一台或两台仪器完成现场空气品质分析，降低电站化学分析人员负担和因仪器故障引起机组后撤的可能性。

2 国内外技术现状

2.1 国外技术现状

在气体含量监测方面，国外起步较早，形成了多种成熟的集成式气体监测产品，但均无法实现一台仪器完成 O₂、O₃、NO₂、CO、CO₂、SO₂、PM10、总烃（以甲烷计）、油、露点的全部监测。经调研，国外成熟的气体分析仪产品主要包括 ABB 有限公司的 EasyLine 气体分析仪，赛默飞世尔科技公司的 60i 型 NDIR 多组分气体分析仪，霍尼韦尔公司的 MultiRAE 无线便携式六合一气体分析仪以及艾默飞公司的 X-STREAM 过程气体分析仪。

1)EasyLine 气体检测仪 --ABB 有限公司

ABB 有限公司的 EasyLine EL3000 气体检测仪，最多可同时监测 CO、CO₂、CH₄、SO₂、NO、O₂、NO₂、碳氢化合物、TVOC 等任五种不同气体。

2)60i 型 NDIR 多组分气体分析仪 -- 赛默飞世尔科技公司

赛默飞世尔科技公司的 60i 型 NDIR 多组分气体分析仪可同时对 CO、CO₂、NO、NO₂、SO₂、O₂ 六种气体进行测量。

3)MultiRAE 无线便携式气体检测仪 -- 霍尼韦尔公司

霍尼韦尔的 MultiRAE 无线便携式气体检测仪可同时检测 CO₂、NH₃、CO、H₂S、CL₂、CLO₂、CH₂O、HCN、H₂S、CH₃-SH、NO、NO₂、O₂、PH₃、PH₃H、SO₂ 在内的五种气体组分。

4)X-STREAM 过程气体分析仪 -- 艾默飞公司

艾默飞公司的 X-STREAM 过程气体分析仪采用红外 / 紫外 / 可见光检测器 (NDIR/UV/VIS)、顺磁氧 / 电化学氧检测器和热导检测器，进行多组分分析，可以最多测量 5 个气体组分，可从 O₂、CO₂、N₂O、CO、SO₂、C₂H₄、NO_x 中自由选择。

5)Aerotest Alpha 压缩空气质量分析仪 -- 德尔格

德尔格的压缩空气质量分析仪采用化学检测管，可以进行油、水分的分析。

2.2 国内技术现状

相较国外，国内的监测技术先进性有待提高，并且成熟的集成式气体监测产品有限，品质参差不齐，尚无可涵盖核电监测需求的直接应用产品。据调研国内集成式气体检测仪包括泰和联创的 THA100S 多组分气体分析仪、聚合环保的手提式复合气体分析仪 JZ-ADZ-3、以及核动力研究设计院的多组分压缩空气分析仪。

1) 多组分气体分析仪 THA100S-- 泰和联创

泰和联创的 THA100S 型红外线气体分析仪可最多同时分析 3 种气体浓度，可在 CO、CO₂、CH₄、SO₂、NO、NO₂、N₂O、SF₆、NH₃ 中自由选择。

2)JZ-ADZ-3 手提式复合气体分析仪 -- 聚创环保

JZ-ADZ-3 手提式复合气体分析仪可同时检测 6 种气体，可拓展到 18 种气体，可从 CH₄、O₂、N₂、CO、CO₂、CH₂O、O₃、H₂S、SO₂、NO₂、NO_x、TVOC 等组分中自由选择。

3) 微电脑激光粉尘仪 LD-5 (H/L) -- 青岛聚创环保

LD-5 (H/L) 系列微电脑激光粉尘仪是以激光为光源的光散射式快速测尘仪，有多种切割器可供选择，内置滤膜采样装置，可在连续监测空气中颗粒物的同时收集粉尘样品。

4) 多组分压缩空气分析仪 -- 核动力研究设计院

中国核动力研究设计院自主研发设计了多组分压缩空气分析仪，该产品为采用手提式便携设计，可同时检测 O₂、CO、CO₂、露点、TVOC、总颗粒物，。该产品可应用于消防系统、环保等多种气体监测场合。

5)3010MINIFID (230V) 便携式总碳氢分析仪 -- 乐氏科技

3010 MINIFID 采用确立的火焰离子化原理来检测气流中的挥发有机化合物，采用加热检测器和采样系统进行测量，可用于汽车燃烧实验、流动废气符合监测、HSE、废气咨询服务公司及气体生产厂家。

6)OM3000 便携式总烃分析仪 -- 奥泛新能

OM3000 便携式总烃分析仪采用双点火设计氢火焰离子化 (FID) 测量技术，可用于垃圾填埋等环境的总烃分析。

2.3 各潜在可用产品对比

针对 VES 分析需求，调研的国内外市面上常见的多组分气体分析仪可测量的技术参数、测量原理、相关技术参数可见下表。调研的国外产品均没有 O₃、露点、PM10、总烃的检测；国内产品均没有油的检测。具体对比情况如下：

- 氧气主要有两种测量原理，分别为顺磁法和电化学法。电化学传感器是目前较为常见的有毒有害气体检测元件，具有选择性好、灵敏度高、响应时间短、性能稳定、耗电低、线性和重复性较好等优点，在当前的气体检测领域被广泛应用。顺磁传感器具有高灵敏度、快速响应、不耗电、使用寿命长的优点，但对于测量环境条件极为敏感。综合考虑核电厂复杂的使用环境和电化学法传感器广泛工程应用的稳定性，电化学法的传感器较顺磁法传感器更契合可研产品的运用。

- 二氧化氮和二氧化硫的测量原理有干涉滤波器法 (NDUV)、非色散红外法、电化学法、紫外线吸收法、热导法等，在市场上均有广泛的应用。各种测量原理均有其优缺点，例如：非色散红外法具有高灵敏度、快速响应、非破坏性的优点。但其选择性有限、灵敏度随温度变化、并且设备成本较高，适用于环境监测、工业过程控制、燃气检测等。

场所。电化学法具有高选择性、高灵敏度、实时监测、适用范围广的优势，但存在氧气依赖性、寿命有限、对环境敏感的劣势，适用于环境空气监测、工业废气处理、室内空气质量监测等领域。针对核电厂使用环境，综合考虑设备集成的便利性，优选电化学法为二氧化氮传感器和二氧化硫传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 一氧化碳通常采用红外或者电化学测量原理。电化学传感器具有快速响应、高灵敏度和较高的准确性，能够测量较低浓度范围内的一氧化碳。同时，它们具有较长的使用寿命和较低的成本。但电化学传感器对温度和湿度变化敏感，需要定期校准和更换传感器。红外传感器具有高精度、低功耗和较长的使用寿命等优点。它们对其他气体的干扰较小，对湿度和温度的影响较小，并且不需要定期校准。然而，红外传感器的成本较高，并且在高浓度范围内可能存在饱和现象。综合考虑电化学测量方法的特性、核电厂的使用环境以及设备集成的便利性，优选电化学法为一氧化碳传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 二氧化碳传感器通常采用非色散红外测量原理（NDIR）。NDIR 二氧化碳气体传感器不易受到其他种类气体的交叉干扰，具有更好的气体选择性、抗干扰性、精度和使用寿命等优势，优选 NDIR 为二氧化碳传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 臭氧传感器通常采用电化学测量原理。该方法具有高灵敏度、高选择性、高稳定性的优点，但需要定期校准，在环境监测、室内空气质量监测、工业过程控制得到广泛应用。电化学法传感器通常表现出较高的稳定性，能够在长时间内持续可靠地运行，并且能实时准确地对成分进行监测，优选电化学法为臭氧传感器的测量原理作为可研产品的运用。

- 市面上只调研到一款油检测仪，该检测仪采用化学吸附的测量方式。选择化学吸附的测量原理作为空气中油分析可研产品的运用。

- PM10 传感器主要采用光散射测量原理，该方法以其测量范围宽、响应速度快、适用性广等优点被广泛应用，适用于核电厂使用环境。选择光散射测量原理作为空气中 PM10 分析可研产品的运用。

- 露点传感器采用高分子聚酯薄膜热固聚合物传感器，该方法反应迅速、零点漂移较小，是理想的露点测量的产品选择。选择高分子聚酯薄膜作为空气中露点分析可研产品的运用。

- 总烃分析仪通常采用氢火焰离子化检测器来检测总烃含量。该方法具有结构简单、稳定性好、灵敏度高、响应迅速等优点，是总烃检测的合适选择。选择氢火焰离子化作为空气中总烃分析可研产品的运用。

目前没有成熟的便携式产品可以直接分析空气中铅含量。建议仍采用现场取样后使用原子吸收光谱法或等离子体发生光谱法进行测量。但需要在可研产品中增加铅的取样功能。

当前市面无完全匹配 VES 所需分析组分要求的成熟产品。至少需要 5 台仪器方能完成核电厂 VES 空气质量日常分析需求。结合对比分析结果，针对核电厂分析工作环境和使用需求，优选出各分析参数的传感器采用的测量原理为：氧气、臭氧、一氧化碳、二氧化氮、二氧化硫传感器采用电化学测量原理；二氧化碳传感器采用非色散红外原理；PM10 传感器采用光散射测量原理；露点传感器采用热固聚合物传感器；油分析采用化学吸附测量原理；总烃分析采用火焰离子化原理。

3 集成便携式分析仪器可行性研究

3.1 主要研究内容

研究适用于核电厂 VES 空气质量分析的集成便携式多组分空气质量分析仪，主要需考虑传感器调研选型和性能验证、多组分气体监测工艺研究、硬件设计和制造、软件设计、整机集成和整机功能、性能试验等。详细如下：

- 传感器调研选型和性能验证

根据核电应用需求开展传感器调研和选型，在此基础上对选择的传感器开展性能验证，确定满足要求的传感器型号，为开展硬件设计和多组分气体监测工艺研究提供输入。

- 多组分气体监测工艺研究

依据气体物性和传感器测量原理，开展多组分气体监测工艺研究，获得互不干扰的多组分气体监测工艺，为制定多组分气体监测工艺提供技术基础。

- 分析仪器初步设计

分析仪器初步设计包括三个部分，分别为硬件电路集成设计、机械结构设计和软件设计及编译。硬件电路设计将结合选型的传感器开展供电设计、数据采集、数据处理、信号传输、信号传输等，形成集成式的测量电路板；机械结构设计将结合选型的传感器、设计的测量电路板以及选型的管阀件等开展布置设计和壳体设计；在开展上述两项设计时同步开展软件设计，包括下层驱动软件的编译和上层人机界面的设计。

3.2 关键技术

多组分气体分析仪的关键技术主要包括：1) 便携式多组分气体分析仪设计；2) 复杂的数据处理和算法开发。

- 便携式多组分气体分析仪设计

基于电化学原理或非色散红外原理的气体浓度测量、光散射原理的 PM10 测量、电子传感器原理的露点测量、化学吸附原理的油测量，结合数据处理、传输、存储和显示需求，以及小型化和便携的需求，开展传感器及电子元器件选型，以之为基础设计多组分气体管路流程和结构、二次仪表结构、机箱结构，满足多组分气体分析仪的小型化和便携需求。

- 复杂的数据处理和算法开发

基于电化学传感器、非色散红外传感器、光散射传感器、化学检测器等的测量原理和信号形式，开发有效的噪声滤波

和干扰抑制技术，提高测量精度；结合数据处理、传输、存储和显示需求，开发高效实时数据处理算法。

3.3 主要技术指标

参考表1的分析需求，结合目前市面上相关参数分析仪器可行的测量原理及准确度要求，并综合考虑产品研制的可实现性，表2中列出了多组分气体分析仪的主要技术指标。

表2 多组分气体分析仪主要技术指标

整机	尺寸	$\leq 600\text{mm} \times 400\text{mm} \times 300\text{mm}$	
	重量	$\leq 30\text{kg}$	
传感器	测量范围	准确度	精密度*
O ₂	0.01~30%VOL	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
O ₃	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
NO ₂	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
CO	0~300ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
CO ₂	0~2000ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
SO ₂	0.01~10ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
PM10	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
总烃(以甲烷计)	0~100ppm	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
油	0~1.00mg/m ³	$\leq \pm 5\%$	$\leq 10\%$
露点	-80°C ~ +20°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	$\leq 1.0^\circ\text{C}$

* 精密度：三次平行样测量结果偏差在 10% 以内（对于露点来说，同一样品两次测量结果的差值 $\leq 1.0^\circ\text{C}$ ）

3.4 技术路线、研究方法

3.4.1 技术路线

首先开展传感器技术调研，完成传感器选型，在此基础上开展传感器性能验证，掌握传感器基本性能和特点。结合传感器特点开展结构设计、二次仪表研发，最终形成分析仪器雏形。

3.4.2 研究方法

传感器调研选型和性能验证：根据多组分气体分析仪的具体需求，包括检测的气体种类、测量范围、精度要求、响应时间等。调研市场上可用的传感器类型和品牌，了解其特性、应用领域以及性能参数。选型应考虑传感器的灵敏度、选择性、稳定性、响应时间、工作温度范围等关键性能指标，以及成本、可靠性、尺寸、功耗等实际应用中的因素。优选出几款传感器，最终筛选一款进行传感器性能验证。在实验室环境中模拟气体浓度变化，测试传感器的响应时间、灵敏度、重现性等性能。针对不同工作条件进行性能验证，确保传感器在各种环境中稳定可靠。进行交叉干扰测试，验证传感器对其他气体的响应是否符合要求，检查其选择性能力。

多组分气体监测工艺研究：根据核电厂需分析的空气样品特性和传感器的特性，进行气体进样系统和气体分流系统的研究。需考虑不同气体的物理性质，研究合适的采样方法，确保从环境中准确、稳定地采集气体样品。同时，考虑每种传感器的流量、压力、温度要求，分析相应的进样流量控制装置，确保进入传感器的样气流量在合适范围内。在气

体分流前，考虑对样品进行适当的预处理，如过滤、降温、干燥等，以减小干扰。另外，考虑传感器之间的气体干扰情况，以确保系统的准确性和稳定性。

根据当前分析，不同测量原理的传感器安置在不同的支路。其中，O₃、SO₂、NO₂、CO、O₂ 检测采用电化学传感器；PM10 采用光散射检测传感器；露点检测采用高分子聚酯薄膜传感器；油检测采用化学检测计；总烃采用氢火焰离子化检测器。O₃ 由于其强氧化性，与 CO、SO₂、NO₂、O₂ 都容易发生化学反应，因此单独设为一路。CO₂ 检测采用非色散红外传感器，但由于其体积与电化学传感器无异，且 CO₂ 与 CO、SO₂、NO₂、O₂ 气体间干扰很小，因此同为一路。气体都对空排放。

3.4.3 样机雏形设计

硬件电路集成设计：硬件电路包括电源模块、主控模块和信号转换模块。电源模块采用 220V 50Hz AC 供电或采用电池组供电，其作用是为主控模块和信号转换模块供电；主控模块采用工控机设计，其作用是接收信号转换模块上传数据，并提供人机交互；信号转换模块由各功能电路组成，其作用是为传感器供电并接收传感器测量信号。二次仪表接口主要包括电源接口、通信接口和传感器接口。电源接口（充电接口）为设备供电；通信接口提供设备与其他系统进行数据交互的接口，采用标准通信接口设计，如 RS-232、RS-485、网口、USB 等；传感器接口包括 O₂、O₃、NO₂、SO₂、CO、CO₂、PM10、总烃、油、露点传感器接口，传感器接口型式及信号制式根据最终选定的产品而定。

机械结构设计：根据确定的检测工艺流程、传感器尺寸、测量电路板尺寸及人机交互设备尺寸、电源尺寸等开展便携式多组分气体分析仪结构设计，包括壳体设计、内部支撑件设计、管路布置等。初步设计分析仪采用手提箱式结构，箱体采用 ABS 或铝材，内部安装及固定件采用铝材，箱体内部采用分层式设计，传感器及工艺管路布置在下层，测量板卡和工控机等布置在上层，样品进出口和电气信号（含电源）接口分别设置于箱体两侧，以区别工艺接口和电气接口，箱体内设电源，可满足 1.5 小时的连续运行。

软件设计及编译：软件包括上位机软件和下位机软件两部分。上位机软件运行于主控模块的 Windows 操作系统；下位机软件运行于信号转换模块的微处理器。上位机软件执行人机交互功能，包括用户指令解析、数据存储、结果显示及传输、传感器标定校准等功能；下位机软件执行各传感器控制、数据接收功能。上位机软件采用图形化界面编程，如 Labview、QT 等；下位机软件采用 C/C++ 语言编写。

4 结论

通过多传感器集成与气路优化设计，单台便携式分析仪可满足核电厂 VES 系统 12 项空气质量指标的取样分析需求。与现有方案相比，集成方案使检测效率提升 400%，运

维成本降低 57%。经模拟验证, 样机在温度 (-10~50°C)、湿度(20~95%RH)、辐照(0.1Gy/h)等严苛环境下性能稳定, 满足核电现场应用要求。

参考文献

- [1] 张骁, 刘佩, 和佳欢, 等. 化学储氢材料的合成与应用研究进展[J/OL]. 洁净煤技术, 1-15[2025-08-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20250804.1855.004>.
- [2] 徐点点, 薛宗璞, 陈怀民, 等. 基于水质分组和水化学特征对秦淮河污染源的分析[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 1-17[2025-08-27]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250814.1656.002>.
- [3] 袁观富, 俞栋华, 吴金池, 等. 化学外添加剂对于灌浆料性能影响因素研究进展[J]. 四川建材, 2025, 51(08):1-4.

Process Analysis of Recycle Benzene Tower (T-104) in Dry Gas Ethylbenzene Unit

Jianlong Zhou

CNOOC Ningbo Daxie Petrochemical Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315812, China

Abstract

Dry gas is the by-product of the catalytic cracking unit in a refinery, containing about 10-39% () of ethylene. The technology of dry gas to ethylbenzene can effectively utilize the ethylene resource in the system, which is of great significance for improving the economic of refinery, widening the source of ethylene raw materials and reducing the production cost of ethylbenzene. Our company adopts the gas phase method dry gas to ethbenzene technology (SGEB) of Sinopec, as the third generation of ethylbenzene process technology (gas phase method), the circulating benz tower T-104 is the key equipment and an important part of the ethylbenzene unit, which is the bridge and bond between the reaction part and the distillation. Its design and operation are relatively complex, and its operation stability is not only related to the good reaction and product quality, but also affects the energy consumption of the unit.

Keywords

Dry gas ethylbenzene; Recycle benzene tower; Top pressure of tower; Sensitive plate temperature

干气制乙苯装置循环苯塔（T-104）操作剖析

周建龙

中海石油宁波大榭石化有限公司，中国·浙江宁波 315812

摘要

干气是炼油厂催化裂化装置的副产品，其中含有10~39%(wt)左右的乙烯，利用干气制乙苯技术能有效地利用系统乙烯资源，对提高炼油厂的经济效益、拓宽乙烯原料来源及降低乙苯产品的生产成本等均具有重要的意义。我公司采用中国石化的气相法干气制乙苯技术（SGEB），作为第三代制乙苯工艺技术（气相法），循环苯塔T-104是乙苯装置的关键设备和重要部位，是衔接反应部分和分馏部分的桥梁和纽带。其设计和操作相较复杂，它的运行稳定性不仅关系到反应的好坏和产品的质量，更影响到装置的能耗。

关键词

干气制乙苯；循环苯塔；塔顶压力；灵敏板温度

1 工艺流程设置

循环苯塔（T-104）：共有三股进料，一股是从反应产物—苯塔进料换热器（E-112）过来的物料，一股是烷基转移反应产物，一股是新鲜苯。三股物料在不同位置进入循环苯塔（T-104）后，苯及不凝气从塔顶蒸出进入循环苯塔塔顶蒸汽发生器（E-117A/B/C/D）和循环苯塔塔顶后冷器（E-133），冷凝冷却后进入循环苯塔回流罐（V-107）进行气液分离，凝液全部经由循环苯塔回流泵（P-110A/B）打入塔顶作为回流，未冷凝的气体从循环苯塔回流罐（V-107）罐顶出来后进入脱非芳塔（T-105）作为脱非芳塔进料。循环苯塔侧线抽出循环苯，用循环苯塔侧线抽出泵（P-111A/B）送至循环苯罐（V-105）供反应系统用苯。塔釜物料出塔釜后，

在压差作用下压送至乙苯精馏塔（T-106）。循环苯塔重沸器（E-118A/B）热源为3.5MPaG蒸汽。循环苯塔塔顶蒸汽发生器（E-107）产0.25MPaG蒸汽，循环苯塔塔顶后冷器（E-133）产100℃的热水。流程设置如下图所示：

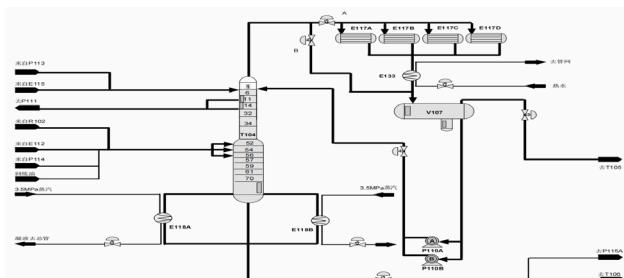


图 1 循环苯塔 T-104 流程

【作者简介】周建龙（1991-），男，中国甘肃酒泉人，本科，工程师，从事化工生产技术管理研究。

2 操作要点

2.1 塔顶压力控制

如图2所示, T-104塔顶压力由塔顶压力分程控制塔顶蒸汽发生器入口和旁路的压力(控制过热面积不过大),以保证塔顶压力的稳定。塔顶压力由调节器PIC-11301分程控制PV-11301A及PV-11301B完成,原理及过程逻辑如下:

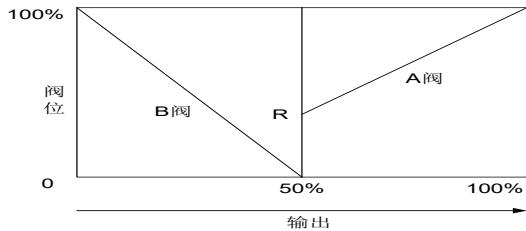


图2 循环苯塔顶压力控制逻辑图

注: R 表示需现场确定。

精馏塔的操作是在一定压力下进行的,塔的压力主要取决于塔顶产品组成和产品冷凝后的温度。一般精馏塔总要首先保持压力的稳定,塔压波动对塔的操作产生如下影响:

(1) 影响产品质量和物料平衡。根据相平衡原理,改变操作压力,将使每块塔板上汽液平衡的组成发生改变。压力升高,则气相中重组分减小,相应地提高了气相中轻组分浓度;液相中轻组分含量较前增加,同时也改变了汽液相量比,使液相量增加,气相量减小。总的结果是塔顶馏分中轻组分浓度增加,但数量却相对减小,塔釜液体中的轻组分浓度增加,塔釜液体量增加。同理,压力降低,塔顶馏分的数量增加,轻组分浓度降低;塔釜液体量减小,轻组分浓度减小。

(2) 改变相对挥发度。压力增加,组分间的相对挥发度降低,分离效率下降,反之亦然。

从以上分析可看出,塔的压力不稳,塔的其它工艺参数,如温度、流量、液面也随之波动。这样,塔正常的物料平衡和热量平衡就被破坏,正常操作也会被打乱,产品质量和收率都无法保证。因此,要求精馏塔在生产操作中,进行任何一个工艺参数调节时,都应使塔的压力保持稳定,只有塔内的压力稳定了,其它工艺参数才能稳定。

(3) 塔顶压力的变化会影响塔顶和塔釜产品的质量,塔顶压力升高,轻组分下移,侧线抽出循环苯中非芳含量上升,塔釜物料中苯含量上升;塔顶压力降低,侧线抽出循环苯中乙苯等重组分含量上升,塔釜物料中苯含量降低。

在精馏操作中,进料量、进料组成、进料状态的改变、塔釜加热蒸汽量、回流量、回流温度、塔顶冷剂量的变化,都可能引起塔压的波动,应分析塔压波动的原因,及时处理,使操作恢复正常。

2.2 循环苯塔T-104塔顶温度控制

按相平衡原理,塔顶与塔釜温度的改变将引起操作压力和塔顶、塔釜产品组成的变化,从而影响物料平衡及汽液

平衡。如果压力和组成不变,温度就不会改变。如果塔压稳定在规定指标上,温度和组成就是相互制约的,温度变化就反映了组成的变化。

在精馏操作中,一般是通过稳定塔压,用温度直接或间接控制产品质量。温度的控制,除采用顶底温控外,还采用提馏段温度控制、精馏段温度控制。当塔釜产品纯度比塔顶要求严格,及其它因素干扰首先进入提馏段时,一般采用提馏段温度作为间接质量控制指标。即用改变塔釜重沸器热源的温度和流量来提高或降低气相返塔温度,从而控制塔釜温度。反之采用精馏段温度控制。

在塔顶压力一定的前提下,循环苯塔T-104塔顶温度与侧线抽出循环苯纯度密切相关,生产中必须特别关注。

2.3 灵敏板温度控制(32/34层和61层)

2.3.1 32/34层温度控制

T-104共70块塔板,32/34层板处于塔的精馏段中上部(进料口为52、54、56层三段进料),这两层处苯的纯度已经很高,控制这两层的温度主要是为了保证侧抽苯(11/14层抽出)的纯度,因为这两块板处在侧抽下部,更接近进料口,它的变化能较早反映出重组分的上移情况,以便提早进行相应调整,以防侧抽甲苯、乙苯等重组分偏高。这两块板温度的影响因素主要有以下几个方面:

①新鲜苯的量。新鲜苯作为烷基化反应的原料,先进入T-104进行脱水、脱气处理后通过循环苯进入反应器,它的消耗与干气中乙烯浓度有关,同时还要考虑到装置的其他苯耗,量的多少可从T-104的现象表现出来。由图1可知,随着新鲜苯量的降低,32层和34层塔板间的温差逐步加大(正常值0.2~0.5之间),同时两块塔板温度将会出现逐渐上升趋势,表现出系统缺苯;反之,如果系统苯过量,32层和34层温度将会出现逐渐下降趋势,同时两块塔板间的温差也逐步减小直至相同。当出现这两种情况时可采取增加或减少新鲜苯的进料量,进而控制32/34层的温度。变化趋势如下图所示:

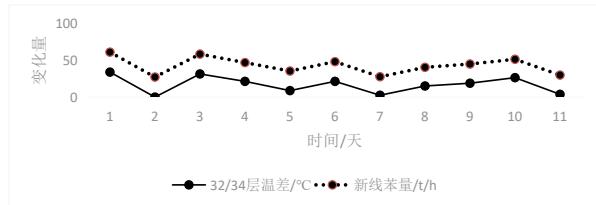


图3 32/34层温差与新鲜苯进料量变化趋势

②回流比的大小。T-104塔的回流比的计算方法可以是用回流量比上侧抽量,回流罐V-107至T-105的量属于内部循环,并且从V-108出去的不凝气量较少,因此可不计在内。

回流比增大,塔的内回流增大,此时会使32/34层塔板温度下降。因为,32/34层塔板处于塔的中上部,回流量的大小对它的影响比较敏感,两者之间的温差也相应减小;回流比减小,则出现相反的现象。在正常的生产操作中,回流

比的大小一般不做调整，引起它的变化因素主要是蒸汽压力和反烃化多乙苯量的变化。

A.3.5MPa 蒸汽管网一般在 3.5~3.8MPa 范围内波动，当蒸汽压力升高时，塔釜加热量增大（背压一定），塔的气相负荷增大也就是上升的气相量增大，为维持塔的气液相平衡和 V-107 液位稳定，塔的回流量相应增加，于是，在蒸汽压力变化之后，相应引起了回流量的变化，因此在正常生产中在蒸汽压力发生变时，塔釜加热蒸汽量相应降低或增加，以维持回流量稳定，从而稳定 32/34 层的温度；

B. 反烃化多乙苯的进料量的变化对回流比也会产生一定影响。V-113 液位升高或降低，一般会调整 T-108 塔顶采出量，由于进 V-106 的多乙苯的量与循环苯的量之间是比值控制，比值为 5~8（质量比）。当 V-113 液位变化需调整时，假如增加 1t/h 的多乙苯量，那么循环苯量相应增加 5~8t/h，这样对于 T-104 来讲，侧抽量就会增加，回流比将会降低，进而影响到 32/34 层的温度。

③反应效果的变化。这一点主要是从进料组成的角度考虑。进料中轻组分组分（主要指苯）增加，将会使塔上部温度降低，因为进料中轻组分增加，会使塔顶轻组分增加即回流量增加；进料中重组分增加，重组分会携带至塔上部，会使塔上部温度升高。进料中组分的变化主要是反应产物中组分的变化，引起反应产物组分变化的因素主要包括以下几个方面：

A. 脱丙烯干气中乙烯浓度的变化。干气中乙烯浓度升高，将会增加苯的消耗，烃化反应产物中重组分浓度增加；干气中乙烯浓度降低，将会减少苯的消耗，烃化反应产物中轻组分浓度增加。这一变化将会在 T-104 反应出来，因此，在正常生产中，因视乙烯浓度的变化及时调整新鲜苯的进料量，以维持 32/34 层的温度稳定以及塔釜不带苯。相关参数对比如下图所示：

表 1：32/34 层的温差与脱丙烯干气和新鲜苯量对比（一段时间内）

32/34 层温差 /℃	干气中乙烯浓度（脱丙烯后）/v%	新苯量 /t/h
0.032	23.815	26.96
0.052	22.488	27.062
0.033	22.794	26.812
0.036	22.948	25.358
0.055	22.833	26.444

B. 烃化反应乙烯转化率的变化。乙烯转化率高，烃化反应产物中重组分浓度高；乙烯转化率低，烃化反应产物中轻组分浓度高。一般情况下，乙烯转化率不会大幅变化，它只会随着催化剂的活性而发生变化，所以，催化剂使用初期和末期 T-104 所表现出的状态不尽相同，应知道和了解其中

的真相；

C. 反烃化反应中多乙苯的转化率的变化。原理与烃化反应乙烯转化率的变化的情况相同。

日常循环苯塔侧线抽出循环苯化验数据如下表（一段时间内）：

表 2：循环苯塔侧线抽出循环苯化验数据

苯 ((m/m)%)	甲苯 ((m/m)%)	乙苯 ((m/m)%)	非芳 ((m/m)%)	二乙苯 ((m/m)%)	二甲苯 ((m/m)%)
99.817	0.032	0.001	0.150	<0.001	<0.001
99.798	0.052	0.001	0.149	<0.001	<0.001
99.815	0.033	0.001	0.152	<0.001	<0.001
99.811	0.036	0.001	0.152	<0.001	<0.001
99.781	0.055	0.001	0.163	<0.001	<0.001

2.3.2 61 层温度控制

61 层板处于进料口下方，是 T-104 塔釜质量控制的灵敏板。正常生产中，该温度控制在 200℃左右（T-104 实施降压操作，由设计压力 0.5MPa 降至 0.45MPa）。主要通过控制 61 层板的温度来达到控制塔釜物料的组成。它的影响因素主要包括以下几点：

- ①塔釜加热蒸汽量（压力）。
- ②回流量的大小；
- ③进料组成的变化；
- ④进料口的变化。

61 层板温度与塔釜温度密切相关，塔釜温度过低，塔釜物料中苯含量高，有可能造成乙苯产品质量不合格，同时增加苯的消耗。

3 结语

循环苯塔（T-104）作为干气制乙苯装置工艺流程中承上启下的关键设备，T-104 的调整操作直接影响反应系统和精馏系统的稳定运行。同时作为用能大户，将直接影响到装置的能源消耗。T-104 可进行降压操作，以节省 3.5MPa 蒸汽的用量。同时，脱非芳塔（T-105）可停用塔釜加热蒸汽，以节省 1.0MPa 蒸汽用量，从而降低装置能耗。

精馏塔的各点数据反映了塔的运行情况，对于出现的异常情况，应进行分析比对，找到异常情况的真因所在，不能盲目进行操作，以免影响反应系统和产品质量。

参考文献

- [1] 30万t/年乙苯装置基础设计，中海石油宁波大榭石化有限公司,2014.2: 工艺部分
- [2] 李淑红，张仲利，稀乙烯制乙苯技术浅议，炼油技术与工程，2008,3: 24-26
- [3] 焦书建，宋庆贺，姜力涛，乙苯装置循环苯塔甲苯侧线采出问题分析及改进，2005.6:31-34

Comparison and integration of petrochemical construction site safety management and safety production standardization

Hongyue Wang

PetroChina No. 6 Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

Safety management of petrochemical construction sites has always been an important topic that cannot be ignored in the industry. Specifically, improving the organizational structure of safety management, formulating practical safety production processes, strengthening technical support and improving the standardization of on-site operations are all key steps to promote the standardization of safety production.

Keywords

petrochemical construction; safety management; risk characteristics

石油化工施工现场安全管理与安全生产标准化的比较和整合

王宏月

中油石油天然气第六建设有限公司，中国·广西 桂林 541004

摘要

石油化工施工现场的安全管理始终是行业中不可忽视的重要课题。尽管近年来相关技术和管理措施不断进步，施工现场的安全风险依然存在且复杂多变。安全生产标准化的提出，旨在通过统一的规范和标准来保障施工环境的安全性。本文深入探讨了石油化工施工现场安全管理的核心要素和面临的主要风险，分析了安全管理执行中的痛点，并提出了整合路径。具体来说，完善安全管理组织结构、制定切实可行的安全生产流程、加强技术支撑和提升现场操作规范性，都是推动安全生产标准化建设的关键步骤。

关键词

石油化工施工；安全管理；风险特点；标准化；现场操作

1 引言

石油化工行业，作为国家经济支柱之一，承载着巨大的社会责任与安全压力。在这片看似繁荣的土地上，施工现场安全问题始终是亟待解决的难题。无论是从风险的高发性，还是从行业特点的复杂性来看，施工现场的安全隐患都是多方面的。这不仅仅是一个技术问题，更是一个深刻的管理难题。标准化安全生产体系的提出，无疑为石油化工行业的安全管理指引了方向，但在实际操作中，却依然存在许多无法忽视的挑战。

2 石油化工施工现场安全管理的基础分析

2.1 施工现场安全管理的核心要素

对于施工现场的安全管理，在任何一个行业都十分重要，但是对于石油化工行业的安全管理来讲，除了需要进行

常规的设备、设施检查之外，重点还要看如何结合施工现场中的各种风险预判、分析，进而采取周密细致的管控，做到任何一项环节都在有效控制范围之内。在施工现场的安全管理中，并不是靠一系列的管理制度，而是靠整个团队的执行力、现场监测保障以及所有人员的安全意识。石油化工施工现场操作人员的安全意识和管理人员的安全意识是否到位，直接关系到防患事故的效果。任何一个环节，每一次操作都要有层层的把关，留不下安全管理的死角。

2.2 石油化工行业面临的安全风险特点

石油化工施工现场在建设过程中存在多种高危作业，起重吊装作业、高处作业、脚手架搭拆作业、受限空间作业、动火作业以及临时用电作业等。同时，施工现场还涉及化学危险品和建筑固废的特殊作业环境。这些高危作业带来的安全隐患不仅源于人员操作不当或设备意外故障，更与施工现场整体环境密切相关，涉及健康、环保及生命安全等方面的风险。一旦意外发生其破坏性极强，尤其在高危险区域，人的不安全行为、物的不安全状态以及机械设备的误操作，都可能引发人员伤害或机械事故。这不仅威胁施工现场工作人

【作者简介】王宏月（1978—），男，中国广东阳江人，助理工程师，从事安全管理研究。

员的安全，也会给企业带来重大经济损失。

3 施工安全管理中存在的主要问题

3.1 安全标准化执行的难点分析

标准化实施的困难主要在于如何贯彻一套理论化、规范化的工作指导文件。在石油化工施工场地虽然有详细的安全生产管理办法，但是标准化实施却存在不同层次、不同部门之间的执行差异。现场作业人员和管理者对标准化执行理解存在差异，尤其是在风险较大的作业条件下，标准化安全操作容易出现执行漏洞。标准化可能与实际施工环境脱节，如面对突发临时性场地工作环境变化，或者突发事件导致的设备故障、突发事故等应急情况下，标准化往往显得机械、生硬，无法针对性实施对突发事件的快速解决方法。

3.2 施工现场环境对安全管理的影响

施工现场工作环境复杂，尤其在石油化工建设领域，现场可能存在物体打击、高处坠落、坍塌、火灾、窒息、触电、机械伤害、车辆伤害等风险因素。因此，安全管理面临更大的挑战。由于环境变化是突发的，施工现场的安全生产管理不仅是一个静态的管理过程，而且是一个需要动态调整的过程，会随着季节的变化、气候变化等因素改变施工环境的风险属性及风险等级。施工环境的噪声、粉尘等都可能影响作业人员的注意力及反应能力，特别是在突发情况下施工人员容易做出错误的判断，导致安全事故概率的上升。因此，环境因素对安全管理的影响不仅仅是在硬件设备方面，也反映在一线人员操作作业、心理状况以及现场应急反应能力上。

3.3 员工安全培训的不足

员工安全培训不到位在绝大多数石油化工施工现场都存在这种情况，是施工现场安全工作的难点之一。安全培训工作已经被明文规定，是每一个施工人员必须学习的课程，但大量的员工只是把它作为一种形式需要进行，仅仅把学习停留在表面上，甚至一些员工都不太了解安全培训的重要意义，没有给予足够的重视。一些培训的内容处于点状、表面的表达状态，并没有完全覆盖施工现场可能出现的各种状况及应急方法。一些员工由于在施工中存在着多年的工作经验，加之存在着一定的“经验主义”安全观念，又对工程施工中的新技术、新设备、新环境对安全工作影响的认识不足，遇到危险事故时的应对判断存在不正确的情形。

4 石油化工施工现场安全管理与安全生产标准化的整合路径

4.1 健全安全管理组织结构与责任分配

施工单位的项目安全管理体系是一个要求严格、组织高效的体系，只有严格的岗位分工才能使其各环节紧密合作、安全管理工作落实到位^[1]。从高层安全管理决策辅助机构到一线安全管理实施小组，各层级都应有明确的安全责任和权限，以此构建一条完整的覆盖整个安全管理体系的“链条”，使从项目高层决策层至现场施工操作实施层之间的

责任承担彻底明晰，避免“职责不清、互相推诿”的现象。具体来说，施工单位项目安全管理体系至少包含决策支持机构、管理部门、一线实施团队 3 个层级的安全责任构成单元，各层级的安全责任、权限应明确有序，将管理职能分层级明确。就安全管理组织机构而言，将管理职能分工具体化，明确各个层级管理人员的分工，其中决策层负责制定项目的总体规划、负责项目制度制定，管理层负责项目制度执行、监督，操作层负责贯彻项目工作的具体操作实施，直接与施工人员接触。在层层落实安全管理职责同时，不能忘了安全管理职责的另一个要求，即安全责任追溯。安全责任的落实，不在于各岗位的工作内容分配，而更重要的是对安全责任的追溯，要求责任能够追溯到具体的工作人员。除遵循“责任追溯”原则外，在安全管理责任划分过程中，项目施工管理中责任的动态化调整也很重要^[2]。首先，项目可能对安全管理责任划分产生影响的因素往往有很多，比如项目大小、项目复杂程度、项目施工环境等，因此，项目管理者在安全管理责任划定中应具备动态化调整性，及时对施工项目安全管理责任进行调整，使得项目各个阶段、不同环境下安全责任的划分都能有效落实、责任到人，做到从上至下、从内到外的层层落实。

4.2 完善安全生产流程与制度的实施方法

安全生产的全过程和各项制度是一个完善的安全生产流程，它也是安全生产标准化建设的基础。流程和制度不可能一成不变，要根据现场的实情、技术的提升和管理经验的积累不断修改完善。在石油化工施工现场，生产流程涉及到多个环节和复杂的工序，制度的执行也应当严格按照每个环节的具体要求去执行。在安全生产制度制定好并落实到文件上后，要确保该制度在具体的安全生产工作中能够成为全员的共识，形成一条合理的流程反映在实际的现场工作当中。制度制定的标准也要精细化和可行化。制度和程序制定的标准和要求，应当能通过具体的文件内容在实际工作现场指导工作。让每一个工作人员都要了解其操作中存在的安全隐患，也可以按工作要求做的更好，每一位工作人员对每项制度有明确了解与认识，做到在操作中严格执行^[3]。实施制度，离不开制度的监督执行，在制度制定好、发下去以后，并不一定真正落实到现场中，因此制度的落实还要与及时的检查监督和抽查相结合，使得实施制度真正做到落实和有效。对于具体的安全生产流程，其流程的精简优化同样十分重要，因为在其操作规范的简化流程中可以有效降低风险。石油化工施工中任何一个操作环节的问题，都可能导致事故的发生，因此首先从施工流程设计环节中，对每个操作环节所涉及的操作流程分析安全隐患，实现针对技术性的优化与调节。确保每个环节都能遵循规范的安全操作流程，强化风险控制，避免事故发生。

4.3 强化技术支撑在安全管理中的作用

随着科学技术的发展，信息化、物联网和大数据等新技术逐渐应用于施工现场安全管理，并对施工现场的安全管

理提供一定的保障和支持。首先，在施工过程中引入自动化、智能化设备，以减小操作人员的危险暴露率。以智能化监控为例，该系统可以实时采集施工现场的环境参数。发现存在隐患后能及时向工作人员发出警报。其次，新技术的引入能够大大增加施工现场安全操作的可追溯性，在施工现场进行信息化管理建设，每一种操作都会在信息化管理平台上实时记录并保留，工作人员只要在平台查到任何一个操作就能知道相关责任人，确保责任不缺失。技术能够通过远程操作和虚拟技术等方式使管理人和操作人员对施工现场的操作提前进行全面的安全演习和预演，以便找出可能存在潜在隐患的危险作业现场，并将危险过程提前终止，在模拟各项危险模式下操作人员了解操作方案，训练其临危处变的能力，实现减少安全事故的发生。

4.4 提高现场操作规范化程度的措施

加强施工现场操作的规范性，不仅要规范作业行为，更要规范现场安全操作的每一个细小环节，规范每一个操作步骤。为此，要做到制订精细化的操作方案，现场作业操作方案要结合现场作业的具体情况、施工设备、作业环境等安全风险，将每个操作步骤进行逐步拆解，确保每个作业环节都细化为具体的操作步骤和应急预案。对于不同工种、不同施工任务、不同施工方案都应制订针对性的操作方案，以保证现场施工操作过程中作业人员能准确地落实到操作方案中的每一个操作环节，不让一个操作步骤模棱两可。同时通过不同级别的审核、检查和复核机制，及时发现问题、消除隐患，防止因个别人员的作业过失造成的安全隐患。要发挥现场操作人员的监督检查，不仅要由监理人员对现场操作人员进行检查，也要发挥操作人员之间互相监督检查的作用，即现场员工之间要相互督促，检查操作是否有不符合标准规范的地方。同时推动员工人人讲安全、个个会应急、查找身边安全隐患激励机制，另外要定期组织安全操作的模拟应急演习，对于发生的各类紧急情况，都要制订相应的处理应急预案，让现场操作人员明白在现场作业中出现紧急情况要按照预先设置的标准规范程序进行处理。

4.5 安全生产标准化建设的监督机制

监督机制是落实石油化工企业施工安全标准化建设的

重中之重，必须形成长效的监督机制。安全生产标准化建设是依靠全员全过程的监督机制完成的，一个落实不到位的监督机制，也决定了安全生产标准化建设的失败。监督机制是实现“事前、事中、事后”的过程管理，开展施工前期的资质审核、强化安全知识的培训等都是对每一个参与施工的人及机具设备进行审核，使其具备施工基本的操作能力，通过培训和考试以求使其具备安全生产标准化建设认识与基本知识技能。采取技术手段，利用日常检查、专项检查、周检、月检、隐患系统平台、施工安全日志、安全视频监控等形式进行监督，对每个阶段、每个环节的施工工作均按照安全标准化建设工作流程进行，确保每道工序均在严格的前提下完成。动态监管，在施工过程中应确保“施工监督过程动态化”。不仅仅是对施工现场施工操作的监督，而且应对有可能出现对施工安全所有因素的影响全部进行控制，以减少由于隐蔽性、不可预见性导致的不安全事件发生。

5 结语

总之，石油化工施工现场的安全生产管理工作一直是一项系统性复杂的工作，不能只是搭建出一套“标准规范的框架”，而真正要深入到工作的实际执行环节和细节落实中，依靠严格的管理、系统的流程、先进的技术支持，同时通过对现场生产操作不断细致化的规定和要求，这样才能切实提高安全生产管理水平，降低各类事故的发生率。在今后的发展过程中，不应只看到标准化建设中存在的难点和痛点，而是更应该看到标准化建设在未来推动整个行业安全生产环境发展的强大生命力，最后才能通过努力和探寻、创新，在确保生产经济效益的同时，将安全屏障筑就，保障整个石油化工行业向良性发展。

参考文献

- [1] 唐振华.老旧石油化工码头“边生产边施工”安全管理重点探讨[J].珠江水运,2024(3):74-78.
- [2] 刘洋洋,刘洪涛.石油化工安全生产问题与安全生产建设的探究[J].石油石化物资采购,2024(20):136-138.
- [3] 许贵,王毅.石油化工安全生产问题与安全生产标准化建设[J].电脑爱好者（普及版）（电子刊）,2023(4):3259-3260.

Explore the application of submerged arc automatic welding technology in the processing of steel structures in power construction

Huisong Long

Guangxi Nuclear Power, Fangchenggang, Guangxi, 538000, China

Abstract

In power construction, the quality of steel structure processing is crucial to project safety. This paper outlines the basic theory of submerged arc automatic welding, covering its principles, system composition, and process features. It further examines applications in high-pressure boiler nodes, transmission tower splicing, large steel plate cylinders, power bridge trough structures, and substation support frames, aiming to provide practical process paths for large-scale, standardized steel structure manufacturing.

Keywords

Exploration of submerged arc automatic welding technology; power construction; Steel structure processing

探析埋弧自动焊技术在电力建设钢结构加工中的应用

龙会松

广西核电，中国·广西防城港 538000

摘要

电力建设中，钢结构加工质量直接关系到工程的整体安全。本文从埋弧自动焊技术的技术原理、系统组成与工艺特点三个层面阐释其基础理论。同时，结合电力建设典型构件，分析钢架节点、塔杆件拼接、大型钢板筒体环缝、电力桥架槽式结构及变电站钢构支撑框架等环节应用情况，以期为电力钢结构的规模化、标准化制造提供可行的工艺路径。

关键词

探析埋弧自动焊技术；电力建设；钢结构加工

1 引言

埋弧自动焊以焊剂层下电弧燃烧为基本原理，在传递能量、冶金反应与工艺控制等方面展现出独特优势。其工艺过程中形成的深熔透焊缝，为厚板焊接与长焊缝加工提供可靠条件，也为后续耐久性能奠定工艺基础。随着电力工程结构规模的持续增加，对节点连接、杆件拼接及筒体环缝等不同构件的焊接技术适配性提出更高要求。

2 埋弧自动焊技术理论基础与工艺特点

2.1 埋弧自动焊技术的原理

埋弧自动焊是一种利用电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的机械化焊接技术。这种方法在焊丝和焊件之间形成电弧，通过电弧的辐射热挥发熔化焊丝，并混合焊件熔化形成的液态金属，形成熔化池。随着焊接的进行，电弧不断向前移动，熔化池冷却凝固，形成焊缝，电弧不外露。

2.2 埋弧自动焊的系统组成

埋弧自动焊由焊接电源、焊机本体及辅助设备构成。其中电源是埋弧自动焊的动力核心，能保证电弧燃烧的稳定

性，并适应不同厚度的钢材加工需求。焊机本体则在焊接过程中承担多重功能，既能自动送进焊丝与供给焊剂，还能维持电弧沿焊件接缝自动行走，实现连续焊接。根据自动化程度差异，埋弧自动焊设备可分为自动焊机与半自动焊机。自动焊机具有完整的控制系统与辅助装置能实现全程自动化操作，适用于长焊缝；半自动焊机由焊接小车与本体组合而成，小车行走速度可调，具备灵活适应复杂工况的特点。前者的焊丝送进与电弧移动都由专门的机头自动完成，后者的焊丝送进由机械完成，电弧移动则由人工进行。

2.3 埋弧自动焊的工艺特点

埋弧自动焊在工艺性能上具有高效率与高质量双重特点，其大电流输入与焊剂、熔渣的隔热作用，能显著提高热效率，熔深可达 20mm，有效减少坡口加工量，提升厚板焊接经济性。同时，其还具有高速焊接特性，在 8 ~ 10mm 钢板对接过程中，焊接速度可达 50 ~ 80cm/min，是手工电弧焊数倍，可显著缩短生产周期。其焊剂覆盖既会隔绝空气，也会延长熔池金属凝固时间，充分进行冶金反应，降低气孔、裂纹等缺陷，并补充合金元素，增强焊缝力学性能。除此之

外,由于埋弧自动焊的电弧光不直接外露,相对改善作业环境,提高了工人劳动条件。

3 在电力建设钢结构加工的探析埋弧自动焊技术应用

3.1 钢架节点焊接中应用埋弧自动焊技术

钢架节点焊接工序中,其焊缝承受应力集中,对焊接工艺的稳定性与焊缝致密性提出严格要求。常规焊接方式在复杂节点焊接中存在熔深不足、成形不均与冶金缺陷率偏高等问题,而埋弧自动焊能依托其大电流高热输入,将电弧能量集中传递至母材与焊丝熔池,形成深熔透焊缝,保证节点整体承载力。针对厚度在20mm以上的钢板,单丝埋弧焊可在不开坡口情况下实现完全熔透,控制熔深精度在±0.5mm范围内,有效减少填充金属量,降低工序冗余。实际工程中,钢架节点的焊缝多处于承受弯矩与剪切力耦合作用位置,局部应力水平超过母材屈服强度的60%。若焊缝熔深不足,极易在应力集中区出现裂纹。埋弧自动焊以其高能量密度的电弧稳定输入,能在更深度区域充分融合熔池金属形成结构连续性良好的焊缝,避免节点区域脆弱。同时,钢架节点多采用Q345R或12Cr1MoVG钢材,强度等级较高,要求焊缝抗拉性能不低于母材85%以上。技术人员使用埋弧自动焊工艺,能稳定焊缝抗拉强度在510MPa~550MPa区间,在-20℃条件下保证冲击韧性达120J,气孔率在0.2%以下,裂纹发生概率低于0.5%,满足《火力发电厂焊接技术规程》DL/T 869-2021技术指标。该类钢材在高温条件下仍需保持稳定的蠕变性能,因此对焊缝成分控制要求严苛。

埋弧自动焊过程中,在高温作用下焊剂逐渐熔化并与熔池金属反应,既隔绝空气,又补充Mn、Si等脱氧合金元素,显著改善焊缝金属的抗裂性,充分保证长期运行工况下的设备安全性。由于电弧全程在焊剂层下燃烧,其焊接过程热循环曲线平稳,热影响区硬度波动幅度低于20HB,避免了快速冷却产生的脆性组织,保持节点焊缝的韧性与延展性。在空间复杂的节点区域,焊剂层还会形成有效保护屏障,优化熔池冷却速率,为液态金属冶金反应提供充足时间,降低夹杂物含量30%以上,提升焊缝金属组织均匀性,为后续钢架整体结构的安全稳定运行提供可靠工艺支撑。

3.2 塔杆件拼接加固中应用埋弧自动焊技术

输电塔杆件在长距离输电线路工程中承担着传导电力荷载与抵抗风振、冰覆等复杂环境作用,其拼接加固焊接质量直接决定结构整体稳定性。输电塔的杆件长度普遍在10~15米之间,壁厚区间为14~30mm,拼接段位于高应力区域,对焊缝熔深、熔宽及冶金均匀性提出严格要求。埋弧自动焊工艺在此类构件中能稳定熔深在16~22mm范围,缩小坡口角度至25°以内,有效减少填充金属量。受力分析中,拼接焊缝常处于压弯耦合区,其局部应力峰值可达材料屈服强度0.7倍,若熔深不足,将直接降低杆件抗

屈曲性能。埋弧自动焊凭借自身大电流高能量密度特性,充分融合熔池金属,形成致密焊缝,保证拼接处承载连续性,有效延长杆件服役寿命。实际工艺参数中,常控制电流在800~1200A,维持电弧电压在30~34V,焊接速度达60~75cm/min,提升单道焊接效率近4倍,其厚壁杆件对接焊缝一次成形率超95%,进而保证焊缝金属冲击韧性在-40℃条件下能保持在100J以上,抗拉强度普遍稳定530MPa~560MPa,满足《输电线路杆塔结构设计技术规程》DL/T5486-2020的力学指标要求。焊剂覆盖的冶金作用在提升焊缝性能方面表现突出,其液态熔渣能延缓熔池冷却,保证在熔池内充分扩散合金元素,显著提高塑韧性。自动化控制层面,埋弧自动焊同步送丝与送剂,稳定焊接过程,保持焊缝成形偏差在±1mm以内,电弧电压波动小于±0.8V,显著提高工艺过程重复性。在额定电压500kV线路运行环境下,采用埋弧自动焊拼接加固的杆件结构,其检修周期较传统焊接方式延长3~5年,节点返修率低于1.5%,提升约30%整体疲劳寿命,充分体现埋弧自动焊在输电塔杆件拼接加固环节中的适配性,为钢结构构件的规模化、标准化生产提供工艺保障。

3.3 大型钢板筒体环缝连接中应用埋弧自动焊技术

大型钢板筒体环缝承受内部压力、温度波动及外部荷载综合作用,对焊接工艺稳定性与焊接质量提出极高要求。同时,埋弧自动焊在厚板筒体环缝加工中表现出深熔透与高沉积效率的工艺优势。针对壁厚30mm~60mm的筒体结构,施工人员应控制埋弧自动焊电流在900A~1300A、稳定电弧电压在32V~36V、维持焊接速度在40cm/min~55cm/min,以缩短环缝整体焊接时间,实现均匀搭接焊道,减少坡口填充量,降低残余应力积累。焊剂在高温下还会熔化形成厚实熔渣层,既隔绝空气避免氮氧化物进入,又延缓熔池冷却速率,充分扩散合金元素。由此,焊缝金属中氧含量在0.02%~0.04%,晶粒尺寸在18μm~22μm,组织均匀细密,夹杂物含量低于0.12%,气孔率不足0.1%。冲击韧性在-30℃条件下平均达105J,抗拉强度保持在540MPa~580MPa,均符合《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝—焊剂组合》GB/T 5293-2018规定。同时,技术人员还能利用数控焊接设备跟踪焊枪轨迹,控制偏差在±0.8mm以内,提高焊缝成形一致性,保证筒体在承压状态下的服役可靠性。除此之外,埋弧自动焊全过程通过自动控制电流、电压与送丝速率实现恒定参数,维持电弧燃烧稳定性系数在0.95以上,保证在批量化生产条件下筒体结构的一致性,从而使大型钢板筒体环缝焊接在结构强度方面达到更高水平。

3.4 槽式结构制造中应用埋弧自动焊技术

电力桥架槽式结构由底板、侧板与盖板组合而成,构件形态狭长,板材厚度普遍在6mm~12mm间,焊缝数量多且分布集中。制造过程对焊缝直线度、尺寸精度以及外观

平整度具有较高要求。同时，槽式桥架大多是流水线条件下成批生产，对焊接效率、质量稳定性提出更高要求。埋弧自动焊借助焊剂层下的电弧燃烧形成稳定能量场，配合自动送丝，实现连续加工长焊缝。在常用电流 $600\text{A} \sim 800\text{A}$ 、电弧电压 $28\text{V} \sim 30\text{V}$ 参数条件下，技术人员能控制熔深在 $6\text{mm} \sim 9\text{mm}$ ，满足薄至中厚板的焊透需求，保持焊道平直度误差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。其熔渣覆盖还能隔绝空气，延缓熔池冷却速度，使金属组织趋于均匀细密，减少气孔、裂纹，同时控制晶粒尺寸在 $20\mu\text{m}$ 左右，保证焊缝金属塑韧性。焊接过程中埋弧自动焊技术的热输入较为均衡，能避免薄板局部过热引发的变形，保持槽体构件整体平整。其自动化工艺优势在于焊接节拍稳定，单位时间沉积量保持在 $7\text{kg}/\text{h}$ 左右，较人工方式提高一倍以上，且焊缝表面波纹整齐，熔合区过渡自然，有效控制残余应力水平。批量化生产过程中，焊缝尺寸一致性高，返修率较低，保证了规模化制造中电力桥架槽式结构的可靠性。埋弧自动焊以高效、稳定与可控特性，为后续装配及运行提供质量保障。

3.5 钢构支撑框架焊接中应用埋弧自动焊技术

在变电站结构体系中，钢构支撑框架承担着承重与稳定双重功能，其焊接工艺直接决定框架在运行中抵抗外部扰动的能力。该类结构节点数量多，构件长度不一，焊缝分布密集，受力方向交错，传统焊接方式在保持焊缝均匀性方面存在明显局限性。而埋弧自动焊在焊剂层下能形成稳定电弧，集中且连续传递热量，在受控环境中，充分融合熔池金属，实现焊缝截面饱满，冶金反应均衡，保持接头强度稳定。其工艺过程中电流与电弧电压恒定，长期维持电弧燃烧状态在最佳区间，焊缝形貌均一，减少人工波动导致的缺陷。针对厚度在 $12\text{mm} \sim 25\text{mm}$ 范围内的钢构件，技术人员应用该技术还能控制熔深在 $10\text{mm} \sim 18\text{mm}$ ，缩小坡口角度，减少残余应力，提升整体框架的抗变形能力。其焊接接头抗拉强度稳定在 $520\text{MPa} \sim 560\text{MPa}$ 之间，在低温条件下保持冲击韧性在 100J 以上，维持焊缝延伸率在 20% 左右，满足《建筑结构用钢板》GB/T 19879—2023 中关于支撑构件的性能

要求。热影响区组织细化，硬度波动幅度小于 15HB ，保证在循环荷载作用下的焊接接头延展性。自动送丝与焊枪行走配合，控制焊缝轨迹在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，焊缝直线度误差低，波纹均匀，表面美观，无需过度矫正后续装配环节。长焊缝连续作业中，沉积效率保持在 $9\text{kg}/\text{h} \sim 11\text{kg}/\text{h}$ ，焊接速度在每分钟 $55\text{cm} \sim 65\text{cm}$ ，生产效率较手工方式更高，大批量支撑构件制造具备高度一致性。钢板残余应力经工艺控制后分布均匀，有效强化框架整体稳定性。在长期荷载下，采用埋弧自动焊工艺制造的钢构支撑框架能够维持较长服役周期，减少检修次数，为变电站运行安全提供工艺保障。

4 结语

在电力建设钢结构加工中广泛应用埋弧自动焊技术，充分体现其在焊接效率、焊缝质量及工艺稳定性方面的综合优势。埋弧自动焊技术的发展，既体现焊接工艺进步，更折射出电力建设向集成化演进的趋势。其价值已超越单纯的工艺，而成为推动工程质量控制的重要支撑点。未来，随着数字化焊接的不断发展，埋弧自动焊有望结合大数据监测、人工智能优化，为电力工程建设提供更高效的工艺支撑，助力行业高质量发展。

参考文献

- [1] 张凯,彭新凯,韩廷檀,姬莉,杨亚楠,张朋飞.炼化装置厚壁管道的埋弧自动焊技术[J].焊接技术,2024,53(09):73-77.
- [2] 田力,彭新凯,董博,王卓,朱琦,李子波.超大口径管道埋弧自动焊平衡配重法应用[J].焊接技术,2024,53(09):94-97.
- [3] 乔平,张增.抽水蓄能电站压力钢管环缝埋弧自动焊技术研究与应用[J].水电站机电技术,2024,47(04):91-94.
- [4] 余闯,王刚.抽水蓄能电站压力钢管纵缝埋弧自动焊焊接变形控制措施[J].水电站机电技术,2024,47(03):54-56.
- [5] 蔡万萍.埋弧自动焊的工艺技术分析[J].集成电路应用,2024,41(01):386-387.
- [6] 高旭,赵伟,李在兴.双丝埋弧自动焊技术在辽宁清原抽水蓄能电站压力钢管环缝焊接中的应用[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S2):40-47.

Design and parameter sensitivity analysis of small modular synthesis ammonia process package

Wei Xiao

Nanjing Guochang Chemical Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

In the context of global energy transition and carbon neutrality goals, small modular synthetic ammonia processes have gained attention for their flexibility and efficiency. Particularly suitable for wind-solar hybrid systems integrating electrolysis-based hydrogen production, these processes enable direct installation near renewable energy facilities, effectively addressing intermittency issues in renewable power generation as well as challenges in hydrogen storage and transportation. This study focuses on small modular synthetic ammonia processes, conducting design and parameter sensitivity analysis of process packages. Through systematic process design, key parameters such as reaction temperature, pressure, and hydrogen-to-nitrogen ratio were identified. Chemical simulation software was then employed to model the designed process packages, analyzing how parameter variations affect ammonia synthesis efficiency. Results demonstrate that reaction pressure and hydrogen purity are critical factors influencing ammonia yield.

Keywords

modular ammonia synthesis; process package design; chemical engineering simulation software; ammonia synthesis efficiency

小型模块化合成氨工艺包设计及参数敏感性分析

肖伟

南京国昌化工科技有限公司，中国·江苏南京 210000

摘要

在当前全球能源转型与碳中和目标的大背景下，小型模块化合成氨工艺凭借其灵活性与高效性受到关注。该工艺特别适用于风光发电结合电解水制氢的场景，能够在风场和光伏场周边直接建设，有效解决可再生能源发电的间歇性问题以及氢气存储与运输的难题。本文以小型模块化合成氨工艺为研究对象，开展了合成氨工艺包的设计及参数敏感性分析。研究首先通过系统的工艺设计，确定了合成氨的关键工艺参数，如反应温度、压力和氢氮比等；然后运用化工模拟软件对设计的工艺包进行了模拟，以分析各参数变化对合成氨效率的影响。研究结果表明，反应压力和氢气纯度是影响合成氨产量的关键因素。

关键词

模块化合成氨；工艺包设计；化工模拟软件；合成氨效率

1 引言

小型模块化合成氨工艺用它的特别的适应性和高融合特性，于现今环保动力转变的趋势里，重点集中在合成氨也就是绿氨的制造范围。此工艺借助模块化设计，可以方便地布置在风光发电站周边，立即运用电解水制成的绿氢开展合成氨，高效地克服了可再生能源不稳定性和氢气储备输送的困境。传统合成氨范围常常依靠化石燃料，工艺流程稳定并且规模较大，不易匹配小型模块化工艺的适应性需要。小型模块化技术可以通过根据需要调整，而且能融合环保工艺。

2 背景及意义

2.1 全球合成氨生产现状

全球合成氨生产首要以哈伯博施法为根本，该工艺从 20 世纪初发展之后，持续占据了领先地位。传统的合成氨生产装置规模庞大，一般与氮肥生产密切联合，占用众多资源和能源。全球合成氨产量已经超越 1.8 亿吨 / 年，该产业极度聚集，少数公司掌控了绝大多数市场。大规模合成氨装置因为它的规模效应从而拥有成本优势，然而昂贵的初步投资和运行保养成本令其于市场需求波动之际看起来不足弹性。合成氨生产是一个能耗非常高的过程，对于化石燃料的依靠导致生产过程中二氧化碳排放量高居不下，造成了环境担忧。为了面对这些挑战，新型、小型、模块化的合成氨装置着手获得重视。这类装置能够在较少的投入之下达成更加机动的反应条件调节，因而减少运营风险。模块化设计也

【作者简介】肖伟（1987—），男，中国安徽人，本科，工程师，从事氨和甲醇工艺包设计研究。

可以在分布式能源系统中施展功能，和可再生能源融合，明显削减碳足迹，提升可持续性。此类机动和绿色的解决方案为分散的市场需求供给新颖的面对途径，期待在合成氨领域带动全新的进步潮流。

2.2 小型模块化合成氨设备的优势

小型模块化合成氨设备结构设计非常简单，投资需要的资金不多，而且布置起来特别灵活，合成氨行业因此受到很多人重视。这样的设备完全能够适应各种不同的生产环境，特别适合那些规模不算大的化工厂，或者位于偏远地区远离主要工业基地的地方，展现出非常不错的经济效益和技术实力。模块化设计最大的亮点就是整合程度很高，可以先工厂里提前制作好，经过非常严格的检测之后运送到指定地点进行安装，建设所需时间大大缩短。这样的设计方式完全满足生产的要求，同时还能减少设备运行时消耗的能源，提升整体生产效率和经济效益，真正做到节能又实用。和传统的大型一体化合成氨装置相较于，小型模块化设备于迅速反应市场变化领域展现出强大的灵活性，能依据区域市场需求调节生产规模，符合本地化合成氨的供应需求。它的更小的占地面积和设备简化设计同样使适合于更广条件受限的区域。

3 关键工艺参数定义

3.1 反应温度压力和氢氮比的选择

反应温度、压力还有氢氮比例属于小型模块化合成氨工艺里面最为关键的几个控制因素，直接决定合成氨反应的效率高低和最后产量的多少。反应温度作为合成氨反应中一个特别重要的控制指标，挑选适合的温度需要认真思考化学反应速度的快慢以及热力学平衡状态的影响关系。温度偏高会让反应速度变快，但不利于反应平衡向生成氨的方向转变发展。把温度控制在 400° C 到 500° C 这个范围里面，可以让反应速度和平衡转化率维持在一个比较理想的水平状态。反应压力同样属于一个很重要的控制因素，适当提高压力水平有利于提升氨气生成的比例数量。

高压环境能够帮助增加反应物浓度，推动化学平衡向生成氨的方向发生变化。如果压力设置得太高，就会对设备稳定运行、能源消耗费用以及整体工作效率带来不利影响。考虑到小型设备采用模块化设计带来的便利，研究提出建议，将压力范围设定于 10MPa 至 20MPa 这个区间。氢气与氮气配比的选择会直接决定反应物利用程度和整个反应的效果好坏。工业生产环节中，大多采用理论上的化学计量配比，也就是氢气与氮气按照 1 比 3 混合，但实际操作时会稍作调整，设定为 2.8 至 3.0 这个范围，以降低氮气过多可能引发的麻烦。小型模块化设备运行时，精确设定氢气与氮气的配比显得格外重要，这对提升氢气利用效果和反应转化效率有很大帮助。

3.2 氢气纯度的重要性

氢气纯度的水平合成氨生产过程中是一个非常重要的

因素，直接关系到反应的效率和最终产品的质量。传统合成氨工艺中，如果氢气纯度得到提高，就能有效降低杂质对催化剂性能的不良影响，让反应的选择性和运行速度都得到提升。像甲烷、水蒸气、氧化物这样的杂质气体，会抢占催化剂上的活性点位，甚至可能导致催化剂长时间失去活性，最终造成氨的产量明显减少。小型模块化生产模式中，设备规模比较小，对氢气的使用效率要求非常高，使用纯度更高的氢气可以让整个工艺运行更平稳，同时提高能量使用的效率。氢气纯度的高低还会影响到整个系统的工艺参数平衡，比如反应所需的压力大小以及氢氮比例的调整范围大小。工艺包设计过程中，对氢气纯度进行精确的控制和调节，对完善小型模块化合成氨技术具有重要意义。

4 工艺包设计与模拟实现

4.1 利用化工模拟软件的策略

为了实现小型模块化合成氨工艺包的设计与优化，化工模拟软件被选为关键工具，以便构建准确的流程模型并评估系统性能。模拟策略的核心包括对反应器、分离装置及辅助设备性能的精确描述，确保工艺流程的整体性和模拟结果的可靠性。在方法选择上，采用基于热力学和传递理论的模型构建方式，通过输入反应物性质、工艺条件及设备参数，完成对工艺过程的虚拟表达。

参数设定环节的重点在于反应温度、压力及原料氢氮比，其中反应器作为关键模块，需要详细定义活性中心及反应动力学特性以准确预测合成氨生成速率。

在小型模块化合成氨工艺包的规划和仿真达成环节，隔离环节担当着极其关键的角色，当中气液隔离为关键步骤其一。该环节意在把合成化学作用之后生成的混合气体之中的氨气和尚未化学作用的气体、水蒸气等等高效隔离，用以获取优纯度的氨产品。借助精巧的气液隔离装置规划和仿真，能够减少能耗，尾气去循环机再度加入化学作用。在构建模型的环节，软件推动化学计量平衡和能量平衡计算，使系统热效率和物料转化率实现理想预期。为保障仿真结果的价值，模型校验时期通过实验数据对比开展精确度评价，着重监测参数变动对于模型的实时反馈。使用这样的方法能够判断工艺包在真实运行环境中的表现好坏，帮助在未来开展参数灵敏度方面的深入研究以及设备性能的不断完善。

4.2 工艺包的模拟流程

在小型模块化合成氨工艺包设计过程中，工艺包的模拟流程是关键环节之一。模拟流程基于化工模拟软件建立，主要涵盖基础数据输入、流程图构建、参数设置与优化以及结果分析等步骤。依据目标工艺确定基础数据，包括主要反应物的物性参数和初始操作条件，如温度、压力及流量比例。在此基础上，通过软件构建气体分离、压缩以及合成反应模块的流程图，确保各单元操作参数的合理衔接。在关键参数设置阶段，分别赋值反应压力、氢氮比和反应器内温度的初始范围，并引入氢气纯度标准作为优化目标。针对已经定好

的范围条件限制，来进行多组不同参数的组合模拟实验，确保挑选出来的参数在可行性和经济性这两个方面都要比传统的设计方案更好。等到模拟运行全部结束后，生成一份包含产能大小、能量效率高低以及转化率多少等数据的详细分析报告，用这份报告来对比不同工艺条件下的具体表现和区别之处。

5 参数敏感性分析

5.1 反应压力对产量的影响

反应压力为合成氨过程中作用于产量的关键因素其中之一。于稳定温度和氢氮比情况下，压力的变动直观确定了反应体系之中气体分子的彼此影响力度，因此作用于均衡。在小型模块化合成氨工艺中，反应温度一般调节在400~500℃，在此期间，形成的氨产品成为气态。因为合成氨反应是一个体积减少的反应，换言之反应之后气体分子数降低，依据勒夏特列原理，提升压力将令均衡朝气体分子数降低的趋向转移，换言之有助于氨的合成。在该工艺中，借助合理提升反应系统的压力，可以高效提升氨的产率，一同配合精确的温度调节，达成高性能、稳固的合成氨生产，为绿氨的工业化应用给予强有力支撑。从热力学角度来看，反应平衡常数会因为压力变大而明显增多，这样就能更好地推动氨气生成。如果压力继续变大，就会造成设备运行时消耗更多能量，同时物料传递也会遇到很多困难，进而容易导致整个工艺的经济效益变差。经过全面分析可以发现，合理控制压力可以有效提高合成氨的产量，同时还能稳定保持设备运行的经济效益，这样的结论对小型模块化合成氨工艺包的设计优化提供了非常重要的参考价值。

5.2 氢气纯度对效率的影响

氢气纯度是影响小型模块化合成氨工艺效率的重要参数。高纯度氢气有助于提高反应的选择性，从而促进氨气生成效率。在模拟分析中，基于不同纯度的氢气输入条件，对合成氨产量的变化进行了研究。结果显示，当氢气纯度从99.0%提升至99.9%时，氨气产量显著增加。较低纯度的氢气可能引入更多杂质，降低催化剂的活性，进而影响反应速率和效率。氢气纯度对系统能耗也具有显著影响，高纯度氢气输入可以降低循环气分离负荷，从而提升整体能源利用率。这一分析揭示了氢气纯度控制的重要性，为优化合成氨工艺提供了关键参考。

6 结果与应用

6.1 实验数据与分析结果概述

对于小型模块化合成氨工艺包实施了全面的设计以及参数敏感性分析，依托化工模拟软件进行了详尽数据研究与结果确认。实验结果表明，合成氨产量对反应压力的敏感性

极其明显。在反应压力自8 MPa逐渐提高到15 MPa之际，产量明显增长，详细体现为氨气生成率展现直线型上升倾向，表明较高水平的反应压力能够推动氨气生成反应的均衡朝生成方向偏移，因此提升产量。

氢气纯度对合成氨效率的影响亦然明显。在氢气纯度由85%提高到99%的阶段，合成氨生产效率显著提高，在此中纯度每单个百分比提高，氨气产量均值提高大约2.8%。这一现象表明氢气中的杂质含量对反应过程造成不良干扰，其纯化水平直接影响催化剂的性能稳定性和反应进程。

其他灵敏度参数如氢氮比对于生产效率也具有关键影响，但其优先级较低于压力和纯度。实验数据标示最佳氢氮比范围为2.8:1至3.2:1，过高或过低均会导致反应率下降。

6.2 工艺包优化的应用前景

小型模块化合成氨工艺包经过改进设计后，工业应用方面的潜力变得非常大。针对关键参数进行细致的敏感性分析，可以大幅提升合成氨生产的效能和成本节约效果，特别是通过精心调整反应压力和氢气纯度，能更好地实现资源的充分利用，同时把能源消耗降到很低。改进后的设计完全可以满足不同地区和不同生产规模的实际需要，给那些偏远地方、资源匮乏区域以及分散型生产模式提供非常实用的解决方法。绿色化工理念越来越受到重视，小型模块化设备的生态环保优势也为削减传统大型生产装置所带来的碳排放量，找到了一条切实可行的解决道路。该工艺包不仅能够用于稳定的氨生产，还可以在工业园区实现灵活部署，满足季节性或者短期氨需求。

7 结语

本文面向当前小型模块化合成氨设备的研究和开发需求，详尽研究了合成氨工艺包的设计还有关键工艺参数的敏感性分析。借助准确确定反应的温度、压力和氢氮比等参数，融合化工模拟软件的应用，本文顺利阐明了参数变化对合成氨效率的具体影响。尤其是反应压力和氢气纯度充当影响合成氨产量的关键因素，为更深入的工艺优化给予了重要依据。未来工作亦将探究更广实用性的技术和策略，以促进小型模块化合成氨技术的市场化应用。

参考文献

- [1] 崔俊辉.合成氨生产工艺及KBR合成氨工艺研究[J].化工设计通讯,2021,47(04):5-6.
- [2] 张伟.合成氨生产工艺及KBR合成氨工艺分析[J].化工设计通讯,2020,46(07):1-1.
- [3] 邓战听.合成氨工艺的作用及合成氨工艺及节能改造分析[J].锋绘,2020,(04):230-230.

Innovative research based on electrical automation control technology in the chemical industry

Yan Zhu Jianjun Guo Shitong Han

China National Petroleum Sixth Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 561399, China

Abstract

The chemical industry is in an increasingly intelligent and automated era, and electrical automation control technology, as the core driving force, is promoting the efficient operation and precise management of the industry. However, in the application process, issues such as equipment failures, stability of control systems, and interference from environmental factors still constrain the comprehensive development of technology to a certain extent. To address these challenges, this study proposes a series of targeted strategies, particularly innovative ideas in equipment maintenance, control system optimization, and artificial intelligence integration. These strategies not only effectively enhance the reliability and intelligence level of technology, but also provide a new perspective for the future development of the industry.

Keywords

electrical automation; Chemical industry; Equipment maintenance; Control system; Artificial Intelligence

基于化工行业电气自动化控制技术的创新研究

朱彦 郭建军 韩仕通

中国石油天然气第六建设有限公司，中国·广西桂林 541004

摘要

化工行业正处于一个日益智能化和自动化的时代，电气自动化控制技术作为其中的核心驱动力，推动着行业的高效运行与精准管理。然而，在应用过程中，诸如设备故障、控制系统的稳定性、环境因素的干扰等问题，依然在一定程度上制约着技术的全面发展。为了应对这些挑战，本研究提出了一系列针对性的策略，特别是在设备维护、控制系统优化、人工智能融合等方面创新思路。这些策略不仅能够有效提升技术的可靠性和智能化水平，也为未来的行业发展提供了全新的视角。

关键词

电气自动化；化工行业；设备维护；控制系统；人工智能

1 引言

电气自动化控制技术的引入改变了化工行业的生产方式和管理模式。无论是在提高生产效率、保障安全操作，还是在降低能源消耗和提升环境保护方面，自动化技术都发挥着不可或缺的作用。尽管如此，随着化工行业逐渐向智能化、绿色化方向发展，电气自动化技术的应用面临越来越多的挑战。如何有效解决设备故障、控制系统不稳定、以及环境变化对自动化技术的影响，已经成为业内亟待破解的问题。创新不仅仅是技术本身的进步，更是对现有模式和流程的深刻反思。本研究在此背景下展开，力求为电气自动化控制技术在化工行业中的应用提供全新的解决方案。

2 电气自动化控制技术在化工行业的应用概述

2.1 电气自动化控制技术的发展背景

随着电气自动化控制技术的发展，从最简单的机械化操作到智能化的控制系统，化工行业也经历了电气自动化程度逐渐加深和提高的发展过程。在化工生产自动化进程中，初期主要表现为工人进行手动控制以及对工人的要求，因此在电力控制系统领域，大多数机械化生产也缺乏相对应的电气自动化技术。随着大规模工业化发展以及相关技术需求增加，为了实现化工生产更为精确与质量的保证，逐渐出现了智能传感器的信号数据和应用的集成。不仅如此，现代的电气自动化设备控制技术已然达到了当今社会生产稳定性的必要前提，并且拥有着强有力的技术与制度作为保障，进而保障了人类的社会生产。

2.2 化工行业中电气自动化技术的关键作用

电气自动化技术的应用是实现化工生产流程优化、实现化工生产效率、保证化工产品质量的关键。随着生产的规

【作者简介】朱彦（1995-），男，中国贵州盘县人，本科，助理工程师，从事电气自动化类研究。

模日益扩大，再采用人工操作已远远达不到对生产的复杂度及高标准的要求。自动化使得生产过程中相关的温度、压力、流量等各种变量得到高度精确控制，使化工生产过程稳定进行，一定程度上减少了在生产中出现的各种人为主观因素的失误，并且生产过程中会实时更新生产的相关变化数据，随时进行调整，避免出现生产上的安全隐患。化工生产因此在经济效益上得到了显著提高，并有利于绿色生产与可持续发展的目标。

3 电气自动化控制技术在化工行业应用中的主要挑战

3.1 设备故障与维护问题

化工生产过程中通常存在诸多设备问题，并且这些问题的影响比较重大。设备的自动化控制虽然提高了工作效率，但在设备自身不断复杂化的同时，需要长时间运转也增加了出现设备故障的可能性。化工行业中大多设备往往面临高温高压或者环境较为恶劣的情况下，对设备的耐用程度是一个极大的挑战。设备故障时，系统相应的时间是比较长，一旦设备发生故障将使生产停滞，或发生重大安全事故。这就使得如何能够正确地预测设备故障，以便维修管理的工作效率得到提升成为了电气自动化技术的应用的一大挑战^[1]。

3.2 控制系统的稳定性与可靠性问题

作为化工生产过程中的“大脑”，电气自动化控制系统在实际运行过程中需要保证运行的稳定性和可靠性，这样才能有效保证生产过程的准确性和质量的稳定性。但是目前多数控制系统在运行中仍存在着稳定性不高、故障率高、发生事故概率高等问题。控制系统的稳定性不足会造成生产过程中重要数据缺失或数值出现误差，无法保证整个生产过程的精确度。通常情况下的控制系统对于环境的影响无法进行适应，出现外部温度、湿度过高或过低或其他外部环境因素影响时，就会引发控制系统运行异常。

3.3 环境因素对自动化控制技术的影响

化学生产工艺复杂多变，环境因素的改变对电气自动化控制技术也会有一定的影响，温度、湿度、化学腐蚀等对自动化系统有着一定的影响。化学工业一般为化学设备制造厂、电厂、钢铁、冶金等工况，工作条件十分恶劣，如果温度、湿度影响较大，往往会导致自动化设备老化的加速，使系统的控制存在很多意外情况，这也是企业极为头疼的问题；而气体泄漏、粉尘等潜在危险因素也会对传感器及其他自动化设备造成损伤，严重导致控制系统不能稳定运行，这些都需要设计克服环境因素的控制系统并实现其长期稳定运行，故在一定程度上是当前面临的重要难题之一。

4 基于化工行业电气自动化控制技术的创新策略

4.1 强化自动化设备的定期维护与故障预测

化工行业的生产环境复杂且具有挑战性，这对自动化的

设备的长期运行和稳定性提出了严苛要求。电气自动化控制技术的应用并非一劳永逸，设备的故障和老化问题依然存在，因此强化自动化设备的定期维护和故障预测是保证生产顺畅的关键策略。定期维护是设备保持高效运行的基本保障，通过有效的维护计划，可以显著降低设备故障的发生频率，延长设备的使用寿命。在此基础上，故障预测技术的引入为维护工作提供了新的维度。借助现代传感器技术和数据分析工具，实时监测设备的运行状态，能够提前识别潜在故障的迹象，从而在问题发展到无法控制的地步之前进行干预。这种预测性维护的优势在于，它不依赖于简单的时间间隔，而是根据设备的实际使用情况进行调整，避免了盲目的定期检查和随之而来的资源浪费^[2]。同时，这种策略能够有效减少生产停滞时间，确保生产过程的连续性。更重要的是，设备故障的及时处理不仅降低了突发停机的成本，还能防止因设备失效而引发的安全事故，减少事故对人员和环境的潜在危害。

4.2 优化控制系统架构与数据流管理

伴随着对电气自动化技术应用在化工行业中的深化，控制系统变得日渐复杂，如何控制好控制系统中数据流的交互，控制好控制系统中各个部分的结构设计也成为决定生产能否顺利展开、系统能否可靠运行的重要一环。在系统所控制的内部结构中存在着很多环节的后滞、冗余数据以及控制系统响应缓慢等问题，会影响到系统内部的数据流传输、生产控制的精度和效率等^[3]。在进行系统控制系统结构优化过程中，需要明确控制系统中每一个部分功能的具体作用，以及各个功能之间存在怎样的内部联系，最终在系统控制系统设计的初期就可以尽可能地避免出现冗余和冲突，可以通过模块化设计系统后，在运行过程中就可以有效地实现各个功能模块之间的独立开发和调试，进而将系统运行的效率最大化，同时还可以充分利用各功能模块的独立性，使得控制系统可以在将来运行的过程中更加地独立而有效率。除此之外，有关数据流控制上的优化更是重要。在传统的控制系统内部结构中，数据传输的速率、传输的精确度以及数据在传输和使用过程中能否够实时的问题很早就出现了问题，在生产环境不断变化的现代社会中，控制系统也不能够及时有效地进行数据的响应和处理，从而使生产调整不能很好地进行。所以在数据传输的过程中，通过加强有关数据信息采集和处理方式，数据流传输的整体质量可以通过相关数据的改进获得有效地提高，在数据获取与传输的速度、精度和实时性方面都可以有着更有效的体现，从而使得控制系统的系统对生产环节中数据流所涉及的问题可以更好地、及时地调整，让控制系统能够在外部环境的不断变化中将有关数据、反馈信号及时有效地反映出来，方便后续生产中的处理、分析、调整和控制，从而进一步提高生产效率，满足系统运转的客观要求。除此之外，数据流控制上的优化，将能够进一步提供对于后续数据处理以及数据故障信息的搜集和反馈、

数据指标进行评估的各项工作科学数据参考，从而可以实现系统中后期进一步优化运行，增加系统的智能化水平。

4.3 提升自动化技术与人工智能的融合

AI技术的应用在提升电气自动化控制系统智能化程度方面至关重要。因为自动化控制系统是化工生产的核心控制环节，自动化控制系统运行的准确性和及时响应能力对化工生产的稳定性及效益有很大的影响。传统的自动化控制系统通常就是依据已设定的一些规则和固定的程序来进行操作的，而当化工生产工艺十分复杂，工艺系统又随时可能发生的情况下，这些固定的程序的应对就会捉襟见肘。而应用AI技术就可以有效弥补自动化控制系统的不足。通过对控制系统的数据进行机器学习、深度学习，能够自主学习与适应不同的生产环境。可以说，AI通过对大数据分析，以实现对生产过程中的细节情况进行实时、动态地监视，有效监测出在生产过程中可能存在的一些生产障碍或者异常的情况，能够有效地实现对自动控制系统进行实时调节，并能够通过这一平台动态调整生产参数，实现生产调度实时调整与资源的充分利用。并且AI驱动下的控制系统其深度学习能力，通过网络大数据平台，可从海量且复杂的系统数据中提取出系统深层次潜在的规律，优化控制和协调生产过程中各种操作，具有预测性、适应性及自适应能力。随着时间的推移，AI技术的发展，未来自动化的生产控制不仅仅只完成规定的动作，同时还能作出判断、灵活调整，甚至提前预知生产过程中可能出现的各种问题并采取措施避免问题的发生。

4.4 加强人员技能培训与技术支持

化工行业实现电气自动化控制技术的前提离不开专业操作工和相关技术人员的支持，无论科技多么先进，没有经过培训理解后真正利用的设备，再好的技术也是一纸空谈。人员技能培训不仅仅是对基本操作知识的培养，而是一个技术思维的训练过程，在老的生产模式下，人员多采用经验来进行判读和调节，而自动化水平高了，人员逐渐依赖的是数据、系统反馈。人员应该有快速判断系统出现问题的能力、快速调节控制参数的能力，以及快速处理较为复杂和突发的合理应对。因此，培训内容需要对其控制系统、数据分析、故障诊断等有一个深层次的理解，而非仅仅系统的操作层面，还要提升其设备与技术背后的原理层面。另外，需要有技术的支持。自动化技术水平高，设备供应商的技术服务人员更应及时与深入的支持。比如设备出现故障或者在技术上出现无法解决的问题，需要供应商提供技术支持团队去解决

和处理。企业加强员工技能提升、形成良好技术支撑体系，能够使企业在面对技术快速迭代、生产持续变化的技术挑战中，有利于保证电气自动化控制技术的平稳运行。加强培训和技术支持是化工行业实现智能化和精细化管理的必然途径。

4.5 推动行业间技术交流与标准化

鼓励跨行业技术交流及标准化是实现化工行业电气自动化控制技术创新的主要手段。由于我国的自动化技术水平正在不断提高，国内单个企业的技术和资源力量很难满足复杂的生产需求，所以就必须进行跨企业的技术交流，才能更好地实现技术革新，提升创新发展。同时，推动标准化也是在提升电气自动化控制技术应用效应的必由之路。行业内的企业可以按照标准化进行设备选购、系统设计、维护管理等相关应用，同时也是为了更好地避免因不同企业设备型号及技术问题出现不兼容带来的运营风险。标准化有利于整个行业朝同一方向发展，在很大程度上也能够进行资源整合，避免浪费及重复建设、能够大大提升企业生产效率；同时也能够为企业设备供应商及技术服务商提供清晰的技术架构与技术规范，有利于企业设备质量、技术服务的质量的提高，降低技术服务的质量。要实现电气自动化控制技术创新应用最大化，促进整个化工行业的更有效率、更安全、更可持续发展的唯一方法就是行业之间相互学习和协作，真正的将技术用到实处。

5 结语

如今的化工工业将会始终采用着电气自动化控制技术，在技术改革挑战应对、技术改革方案实践方面均需全行业的积极应对以及努力合作。通过严格把控设备体系、完善控制设备、提升自动化程度的方式让电气自动化技术变得更加多样化，能够帮助化工企业向着更加高效、可持续化的方向发展。电气自动化控制技术也将会逐渐朝着更加广泛的应用层面进行拓展，在技术改革潮流中取得更加令人满意的高峰成就。

参考文献

- [1] 李德政.石油化工行业中电气自动化的运用[J].中国设备工程,2025(1):122-124.
- [2] 刘学芹.“石化行业”岗课赛证”融通下高职电气自动化技术专业教学标准探究:以湖南石油化工职业技术学院为例[J].科研成果与传播,2023(4):0852-0855.
- [3] 张金岭,陈晓,李强.电气自动化控制设备在化工行业中的可靠性分析[J].中国战略新兴产业,2023:160-162.