

01
2026



化工技术与应用

Chemical Technology and Application

Volume 3 · Issue 1 · January 2026 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)



化工技术与应用 Chemical Technology and Application

Volume 3 · Issue 1 · January 2026 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)

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

E-mail:contact@nassg.org
Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：化工技术与应用

ISSN: 3060-9291 (纸质) 3060-9283 (网络)

出版语言：华文

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

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Chemical Technology and Application

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

Language: Chinese

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

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《化工技术与应用》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref

版权声明/Copyright

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

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

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

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

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



期刊概况：

中文刊名：化工技术与应用

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

出版语言：华文刊

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

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

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

出刊及存档：

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

作者权益：

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

评审过程：

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

化工技术与应用

Chemical Technology and Applications

Volume 3 · Issue 1 · January 2026
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 工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真模拟与事故预防研究
/ 宋智星
- 4 电渗析技术在盐湖卤水锂镁分离中的应用
/ 袁世宝
- 9 焦炉煤气和转炉煤气化验分析在化工生产中的重要性
/ 贾霞
- 12 Techtiv-500 高选择性复合专有溶剂在东方华龙集团连续重整装置芳烃抽提单元运行效果评价
/ 张永刚
- 15 煤制氢化工尾气 CO₂ 绿色高效催化转化工艺研究
/ 李功龙 许丽琼
- 18 石油天然气化工装置关键设备的预防性维修策略探讨
/ 李庆麟
- 21 加油站员工安全培训的有效性评价及课程体系优化
/ 王建国
- 24 表面处理对双向拉伸聚丙烯薄膜性能的影响
/ 罗兰博
- 27 基于绿色制造的化工设备制造技术研究
/ 黄斌
- 30 钛管式换热器制造工艺研究
/ 叶又鑫
- 33 化工行业减污降碳协同路径研究
/ 谢朋 史晓
- 36 用于汽车车身地板的热熔阻尼垫的研制
/ 徐贝
- 40 天然气场站关键机械设备故障诊断与预警机制研究
/ 郭永涛 吕晓方 赵伯涛
- 44 浅谈生物技术在手性药物合成中的运用
/ 桑光明
- 47 冶金固废协同处置与高值化利用关键工艺及产业化路径探讨
/ 魏光泽
- 50 中国石油全国首套汽油柴油混油处理装置运行问题分析及技术攻关实践
/ 鲜小勤
- 53 石油化工关键过程装备失效机理分析与防控技术研究
/ 马强 李本 刘沅林 景晓
- 56 实验室分析数据质量控制与误差来源识别研究
/ 赵嫚
- 59 化工过程安全管理体系构建实践研究
/ 韩玉莲 姜能刚 王海鹏
- 63 加快推进高校废旧动力电池回收利用
/ 寻雅芝 包阳 廖熙妍
- 67 智能化升级背景下选煤厂生产管控模式研究
/ 丁晴晴
- 70 化工生产泄漏事故成因分析与应急处置方案研究
/ 杨丰 李玉娜 胡飞 池善格
- 73 低产低效油藏综合治理及增产措施研究
/ 李利君

- 1 Simulation and Accident Prevention of Industrial Pipeline
CO₂ Leakage
/ Zhixing Song
- 4 Application of Electrodialysis Technology in the Separation
of Lithium and Magnesium from Salt Lake Brine
/ Shibao Yuan
- 9 The Importance of Coke Oven Gas and Converter Gas
Analysis in Chemical Production
/ Xia Jia
- 12 Evaluation of the Operating Effect of Techtiv-500 High-Sele-
ctive Composite Proprietary Solvent in the Aromatic
Extraction Unit of the Continuous Reforming Plant of Ori-
ental Hualong Group
/ Yonggang Zhang
- 15 Research on Green and Efficient Catalytic Conversion Pro-
cess of CO₂ from Coal to Hydrogen Chemical Tail Gas
/ Gonglong Li Liqiong Xu
- 18 Discussion on Preventive Maintenance Strategy of Key
Equipment in Petroleum and Chemical Plant
/ Qinglin Li
- 21 Evaluation of the Effectiveness of Safety Training for Gas
Station Employees and Optimization of the Curriculum
System
/ Jianguo Wang
- 24 Effect of Surface Treatment on Properties of Biaxially Ten-
sile Polypropylene Film
/ Lanbo Luo
- 27 Research on Chemical Equipment Manufacturing Technol-
ogy Based on Green Manufacturing
/ Bin Huang
- 30 Research on Manufacturing Process of Titanium Tube Heat
Exchanger
/ Youxin Ye
- 33 Research on the Synergistic Path of Pollution Reduction
and Carbon Reduction in Chemical Industry
/ Peng Xie Xiaomei Shi
- 36 Development of Hot-melt Damping Pad for Automotive
Body Floor
/ Bei Xu
- 40 Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mecha-
nisms for Key Mechanical Equipment in Natural Gas Sta-
tions
/ Yongtao Guo Xiaofang Lv Botao Zhao
- 44 A Brief Discussion on the Application of Biotechnology in
Chiral Drug Synthesis
/ Guangming Sang
- 47 Key Processes and Industrialization Path of Co-disposal
and High-value Utilization of Metallurgical Solid Waste
/ Guangze Wei
- 50 Analysis of Operational Issues and Technical Breakthrough
Practices for China's First Nationwide Gasoline-Diesel
Blending Treatment Unit
/ Xiaoqin Xian
- 53 Research on Failure Mechanism Analysis and Prevention
Technology of Key Process Equipment in Petrochemical
Industry
/ Qiang Ma Ben Li Yuanlin Liu Xiao Jing
- 56 Research on Data Quality Control and Error Source Identifi-
cation in Laboratory Analysis Data
/ Man Zhao
- 59 Research on the Construction Practice of Chemical Process
Safety Management System
/ Yulian Han Nenggang Jiang Haipeng Wang
- 63 Accelerate the recycling and utilization of used power bat-
teries in universities
/ Yazhi Xun Yang Bao Xiyan Liao
- 67 Research on Production Control Model of Coal Preparation
Plant under Intelligent Upgrading Background
/ Qingqing Ding
- 70 Cause Analysis and Emergency Disposal Plan Research on
Chemical Production Leakage Accident
/ Feng Yang Yuna Li Fei Hu Shanghe Chi
- 73 Research on Comprehensive Management and Production
Enhancement Strategies for Low-Yield, Low-Efficiency
Reservoirs
/ Lijun Li

Simulation and Accident Prevention of Industrial Pipeline CO₂ Leakage

Zhixing Song

Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang, 163712, China

Abstract

Carbon dioxide is transported through pressure pipelines in scenarios such as chemical industry, refrigeration, food, and CCUS. Upon leakage, it can form high-concentration plumes near the ground, accompanied by hazards such as severe cooling, frost and ice formation, and asphyxiation exposure. Under certain conditions, it exhibits characteristics of dense-phase release and heavy gas diffusion, which conventional empirical methods struggle to account for peak deviations caused by low-lying retention, obstacle bypassing, and phase transformation. This paper focuses on source term calculations, near-field jet and downstream diffusion interface parameters, and proposes simulation key points that can be directly implemented in China's engineering safety assessment and design review. The study also provides a preventive checklist for layout isolation, connection reliability, and operational control, aimed at translating simulation outputs into on-site disposal boundaries.

Keywords

industrial pipeline; CO₂ leakage consequences; simulation; accident prevention; research

工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真模拟与事故预防研究

宋智星

大庆师范学院, 中国·黑龙江 大庆 163712

摘要

二氧化碳在化工、制冷、食品及CCUS等场景中经压力管道输送, 泄漏后可形成近地富集的高浓度气团, 并伴随强降温、结霜结冰与窒息暴露等危害。其在一定条件下呈现密相释放与重气扩散特征, 常规经验法难以覆盖低洼滞留、障碍绕流与相态转化带来的峰值偏差。本文围绕源项计算、近场射流与下游扩散的接口参数, 提出可在中国工程安评与设计复核中直接执行的仿真要点。本研究并给出面向布置隔离、连接可靠性与作业控制的预防清单, 用于将仿真输出转化为现场处置边界。

关键词

工业管道; CO₂泄漏后果; 仿真模拟; 事故预防; 研究

1 引言

中国 CCUS 产业与工业副产 CO₂ 综合利用规模上升, 推动了密相或高压 CO₂ 管道及厂内管廊系统的应用, 同时也把无火灾爆炸但可致群体窒息的风险类型推到前台。既有后果分析多借助商用软件完成, 但在介质杂质、相变与复杂地形等关键环节常出现参数取值随意、场景边界不清与输出难以用于疏散决策等问题。结合中国标准体系建设与工程实践需求, 本研究从后果仿真与事故预防两个维度展开, 强调可复核的输入口径、可校核的中间变量以及可用于现场处置的结果表达。

【基金项目】CO₂ 管道泄露后果仿真模拟研究 (项目编号: 2025WB120023)。

【作者简介】宋智星 (2003-) , 男, 中国黑龙江牡丹江人, 本科, 从事化学工程与工艺研究。

2 工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真模拟

2.1 源项与工况窗口的可追溯定义

为使工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真的源项输入可核验、可复算, 应先将工况窗口与边界条件以场景卡方式固化。其一, 按压力等级、介质温度与相态把运行区间分为气相、液相与密相三套窗口, 分别规定取值点位为站场出口、阀后或管段平均状态, 场景卡同时记录管壁温度、保冷完好性与环境温度, 并统一单位与基准压力, 对每次场景迭代保留版本号与修改记录, 便于审核回溯, 并把介质质量边界写入必填字段, 包括纯度、含水、氧含量及酸性杂质上限, 字段需绑定来源为化验单或在线分析仪, 注明校验周期与缺项替代规则, 确保物性与温降计算不被纯 CO₂ 默认值拉偏^[1]。其二, 孔口泄漏按针孔、裂缝与全断建立几何模板, 针孔用等效直径叠加收缩系数, 裂缝按长宽比给出附加阻力, 全断按破口角度确定有效面积, 计算先做临界流判别, 再用等熵膨胀并

引入真实气体状态方程修正质量流率、喷口温度与声速比,同时把阀门关闭时间、上游库存、并联支路回流与压缩机停机惯性写入操作条件,输出初期高流率与后期衰减的双阶段源项曲线。其三,针对密相喷放的低温效应,在源相端同步求解相包络穿越点、固相分率判别量与结霜增长速率的敏感区间,并将地表干冰沉积量与喷口局部堵塞系数作为近场边界,使扩散模型能够反映二次喷射偏转、落地堆积与暴露时程变化。其四,设置源项工程闭合校核流程,至少完成管径、粗糙度、摩阻系数、阀门等效阻力、保冷段换热假设与关键测点压力的闭合核算,并将计算书中的压降、温降与现场DCS趋势对照校核,最后用P&ID与竣工图逐项核对隔离阀位置、旁通与放空支路,确保源项可追溯到图纸与数据记录。

2.2 近场射流与重气扩散的分区耦合

为避免工业管道CO₂泄漏后果计算在近场与远场之间出现边界不一致,可采用射流区与重气扩散区的分区耦合流程。第一,0至50 m定义为动量主导区,按孔口类型确定喷流初始截面并执行临界流判别,取质量流率、喷口温度与速度作为输入,采用射流夹带与扩张角关系求中心线速度和浓度衰减,同时结合管道离地高度与地表粗糙度计算再附着距离与贴壁流长度,识别喷流抬升或俯冲并形成有效释放高度,对贴壁段按摩擦阻力修正动量耗散,最终输出有效释放高度、等效初速度与等效源半径并作为下游扩散的边界条件。第二,50 m以外按重气云团处理,依据密度比与理查森数选择重气模型或高斯修正模型,并将气象参数统一到10 m风速与1.5 m受体高度,稳定度、粗糙度与下垫面热通量按企业气象站记录和场景卡片固定口径,工程计算可选用SLAB等重气扩散算法,并遵循定量风险评估导则对重气与非重气扩散的选择要求。第三,存在厂房间隙、管廊挡风墙、围堰或沟渠时,采用局部CFD校核与工程模型主算组合,局部区域仅覆盖障碍物上下游与低洼滞留区,边界采用第一分区输出的等效源参数,计算提取回流区长度、滞留系数、绕流加速因子与近地湍流增强系数,再将这些量回填为工程模型修正项并保持同一源项与气象输入,避免全域CFD带来的网格依赖。第四,结果校核按可验证性组织输出,至少给出中心线浓度峰值随时间曲线、1.5 m高度等值线、低洼点超限持续时间与关键受体点浓度时程,并对峰值出现时刻、云团推进速度与稀释斜率进行自检,必要时与公开重气试验规律或同类模型对照其趋势一致性^[2]。

2.3 暴露判据与后果量化的本地化输出

为实现工业管道CO₂泄漏后果仿真结果的现场可用化,应将浓度时空分布转译为本地化暴露判据与可执行输出。第一,暴露阈值采用分层对照表管理,作业人员以GBZ 2.1的PC-TWA与PC-STEL为主,分别按8 h时间加权平均与15 min短时平均判读,仿真结果以1 min步长导出并同步计算15 min滑动平均,明确瞬时值与平均值两套口径,巡检

与抢险人员另设峰值控制并记录超限次数,危及生命档采用IDLH等急性阈值作为上限,所有ppm与mg/m³在泄漏漏压条件下统一换算,受体呼吸高度在站场取1.5 m,在低洼沟渠取1.0 m,在公众区取1.3 m。第二,后果量化以阈值首达时间与持续超限时间为核心指标,受体布设结合厂区门禁、换班集合点、固定岗、承包商作业点与巡检路线节点,逐点输出浓度时程并形成清单字段,至少包含首达时间、峰值、连续超限时长与可通行时间窗,同时在GIS上输出各阈值的危险区边界线,便于直接生成疏散优先级与封控半径。第三,气象输入按厂址多年统计与典型不利并行,统计集依风速风向与稳定度分箱选代表工况,不利工况优先取低风速稳定层结与清晨逆温,并对雨雾削弱湍流导致的近地累积、风向摆动造成的多次扫掠单独标注,确保扩散边界与预案条款可一一对应。第四,交付文件以可审计附录固化假设与参数来源,记录源项、地表粗糙度、障碍物修正与模型选型依据,对孔径、阀门关闭时间与杂质含量等开展一因素扰动得到危险距离区间,并按中国超临界或密相CO₂管道定量风险评估文件所述伤害准则与风险可接受基准给出危险距离建议值及适用条件。

3 工业管道CO₂泄漏事故预防研究

3.1 工程布置与隔离能力的前置约束

为把工业管道CO₂泄漏的窒息性危害在设计阶段就锁定在可隔离、可放散的边界内,应将工程布置与隔离能力作为前置约束。第一,总图与管廊方案比选应基于重气体滞留敏感区清单,结合厂址风向频率、地形高差与人员流线,硬性避开地下通道、下沉地坑、半封闭连廊和低洼绿化带等低位空间,对确需穿越部位通过抬高标高、布置通风挑檐、预留连续自然通风廊道减弱滞留条件,并在厂房夹缝与窄通道设置净空与禁堆控制,禁止临设围挡形成封闭死角^[3]。第二,切断阀与放散点按最小可隔离段成对布置,段两端设置可远程紧急切断阀并保留就地手动隔离,阀位以可达性、可视性、结冰防护与检修作业面校核为准,统一设置阀位指示、编号牌与安全站位线,放散口引至开阔安全区并避开疏散通道的下风向,放散管口配备防雨帽和导向筒以减少回落滞留,同时在操作卡中明确阀门动作顺序、盲板隔离位置、放散朝向和人员避让距离,使疑似泄漏点可在预案限定时间内完成上游截断、段内降压与受控放散。第三,法兰、阀组与软连接集中区应划定导排边界,排水沟、电缆沟与雨水口采取封堵或隔断并保持可复位,沟道穿越处设置可拆封堵板并纳入点检,必要时配置水封阻断气体窜入,对可能产生冷凝液或干冰颗粒的泄放区预留冲洗口、收集槽与可拆格栅检修位,并将地面防滑、防冻与防绊倒的结构细节写入维护标准。第四,施工与检修变更执行几何条件不劣化原则,凡围墙加高、围堰增设、检修棚封闭、挡风板安装或通风开口调整等改变气体流动路径的事项,必须同步复核人员通行宽度、应急车道

通畅性与检修车辆回转半径,并按变更后边界更新竣工资料与现场交底卡。

3.2 材料与连接部位的失效防控

在工业管道 CO₂ 泄漏事故预防中,为降低泄漏的突发性,材料与连接部位需按失效机理实施前置防控。第一,针对 CO₂ 夹带水分与酸性组分的内腐蚀,工艺文件应明确脱水控制值与取样复核频次,设计给出腐蚀裕度并对薄壁支管设定最小壁厚控制线,焊缝热影响区、螺纹连接与小口径支管纳入重点清单,施工落实坡口清洁、预热与层间温度控制、根部成形复核,并按比例进行射线或超声检测及必要的表面检测,缺陷返修后复验并归档材质与检验记录。第二,对节流、减压、放散等温降敏感点,必须校核最低金属温度并将泄放相变的温度骤降计入不利工况,材料选型以低温冲击韧性覆盖母材及焊缝金属和热影响区为准,连接优先对焊并避免温度频繁变化处采用不利法兰型式,现场严控冷弯半径与热处理偏差,保冷外护层破损及时修补并恢复排水,避免凝露积水诱发点蚀^[4]。第三,密封件与紧固件实行定型管理,垫片按介质相态及温压等级选型,装配前复核密封面缺陷,按扭矩分级对称紧固并记录首紧与复紧值,启停后在热循环稳定窗口复紧并复查预紧力,对快装接头、软管与临时跨接件设定使用次数与报废判据,开停工后执行肥皂水检漏。第四,在役检查分为日常与停检两层,日常关注结霜、白雾、异常噪声、阀杆渗出与支吊架松动,停检围绕测厚、保冷破损、法兰面与错口复核,必要时做泄漏试验,发现项纳入工作包闭合。

3.3 作业控制与应急处置的现场化机制

为使工业管道 CO₂ 泄漏防控落到班组动作,应把作业许可与应急处置做成可核查的现场机制。第一,按 GB30871 实施特殊作业票证联动,凡涉及 CO₂ 管线、阀组或放散点周边施工,先完成停输确认、上游截断、段内放空与置换,再做残压释放和盲板隔离,阀门上锁挂牌并复核隔离点,交底必须写清阀位顺序、盲板编号、放空持续时间与撤离方向,作业放行以压力归零和放空口朝向校核为条件,警戒区按下风向外扩并对沟渠、地坑等低洼点同步封控。第二,针对 CO₂ 单纯性窒息风险,进入可疑空间前按有限空

间要求检测氧含量,氧体积分数应在 19.5% 至 23.5% 范围内,超限则禁止进入,必须处置时由受训人员佩戴正压自给式空气呼吸器进入,外部监护保持持续联络、人员清点与出入口畅通,防护同步配置防寒手套与面屏以应对低温喷放,救护先转移至新鲜空气处并保持气道通畅,冻伤采用温水缓慢复温且不揉搓破皮。第三,演练按情景化脚本组织,覆盖夜间低风、雨雪低温和检修交叉作业等不利条件,按报警、切断、放空、封控、疏散、集合点清点、交通管制与外部救援接应的顺序逐项计时核对,同时检查集合点选址、通道封闭、现场联络和救护器材到位情况,演练结束当班修订班组处置卡和集合点路径^[5]。第四,事故与未遂事件实行同口径闭环,凡渗漏、误放散、阀位误操作或人员不适均形成原因分析和整改清单,明确接口改造、标识更新、规程条款补充与复训验证的期限,整改结果回填到作业票证条款和交接班要点,并在下一轮检修前对关键阀组、放空口和受限空间出入口复查签认。

4 结语

面向工业管道 CO₂ 泄漏的风险控制,应将源项、近场射流与下游扩散的接口参数固化为可复核口径,并在复杂厂区条件下采用分区耦合方法保持结果的可解释性与可追溯性。事故预防需从布置隔离、连接部位失效防控与作业应急三条线落实到可执行条款,并通过变更管理与经验反馈持续闭合薄弱环节,使设计、施工与运行阶段使用同一套风险边界表达。

参考文献

- [1] 谢飞,李佳航,王新强,等.天然气管道CO₂腐蚀机理及预测模型研究进展[J].天然气工业,2021,41(10):109-118.
- [2] 李萌,聂超飞,欧阳欣,等.超临界CO₂管道输送理论与仿真研究进展[J].油气储运,2025(5).
- [3] 闫振汉.工业规模CO₂管道泄漏过程热力学特性研究[D].吉林化工学院,2020.
- [4] 朱国承,曹琦,王萌,等.超临界CO₂管道泄漏扩散风险分析[J].安全与环境学报,2022(003):022.
- [5] 曹琦,何春宏,辛保泉,等.二氧化碳管道泄漏扩散风洞试验研究[J].安全与环境学报,2025(6).

Application of Electrodialysis Technology in the Separation of Lithium and Magnesium from Salt Lake Brine

Shibao Yuan

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

Abstract

Electrodialysis is an effective approach for lithium-magnesium separation from salt lake brines with high Mg/Li ratios. This paper systematically investigates the fundamental principles and engineering practices of electrodialysis technology in lithium extraction from salt lake brines. At the mechanism level, lithium-magnesium separation is governed by the dual mechanism of “Donnan thermodynamic exclusion + kinetic 差异 in dehydration energy barriers”, where Mg^{2+} migration is hindered due to its much higher dehydration energy barrier (-1922 kJ/mol) compared to Li^+ (-515 kJ/mol). At the material level, the evolution from positively charged layer modification, asymmetric structure design to COF membranes and biomimetic ion channel membranes is reviewed. PEI-DAIB asymmetric membranes achieve a selectivity of 72 and a Li^+ flux of 0.75 mol/(m²·h), COF membranes reach a selectivity of 321, and biomimetic carbon nitride membranes exhibit a selectivity ratio as high as 1708 under high magnesium background. At the process level, the feasibility of the “adsorption + electrodialysis + concentration” three-stage coupled process is demonstrated, where nanofiltration pre-concentration can shorten the process flow by 40%. Engineering practices show that in a Chinese salt lake 10,000-ton scale project, the electrodialysis system increases lithium concentration from 5-7 g/L to 20-25 g/L, with lithium recovery >99% and product purity reaching 99.80% battery-grade lithium carbonate. Electrodialysis technology has demonstrated scalability and can provide technical support for the efficient development of high Mg/Li ratio salt lake lithium resources in China.

Keywords

Electrodialysis; Salt lake brine; Lithium-magnesium separation; Monovalent cation selective membrane; Battery-grade lithium carbonate

电渗析技术在盐湖卤水锂镁分离中的应用

袁世宝

青海盐湖汇信新材料科技有限公司, 中国·青海 格尔木 816000

摘要

电渗析技术是实现高镁锂比盐湖卤水锂镁分离的有效途径。本文系统研究了电渗析技术在盐湖卤水提锂中的应用基础与工程实践。机理层面揭示, 锂镁分离的核心在于“Donnan热力学排斥+脱水能垒动力学差异”的双重机制, Mg^{2+} 因脱水能垒(-1922 kJ/mol)远高于 Li^+ (-515 kJ/mol)而迁移受阻。材料层面, 综述了从荷正电层修饰、非对称结构设计到COF膜、仿生离子通道膜的演进, PEI-DAIB非对称膜实现选择性72、通量0.75 mol/(m²·h), COF膜选择性达321, 仿生氮化碳膜在高镁背景下选择比高达1708。工艺层面, 论证了“吸附+电渗析+浓缩”三段式耦合工艺的可行性, 纳滤预浓缩可使工艺流程缩短40%。工程实践表明, 中国盐湖万吨级项目电渗析系统实现锂浓度从5-7g/L提升至20-25g/L, 锂回收率>99%, 产品纯度达99.80%电池级碳酸锂。电渗析技术已具备规模化应用能力, 可为我国高镁锂比盐湖锂资源高效开发提供技术支持

关键词

电渗析; 盐湖卤水; 锂镁分离; 一价阳离子选择性膜; 电池级碳酸锂

1 绪论

1.1 研究背景与意义

锂作为新能源时代的关键元素, 被誉为“白色石油”, 在电动汽车、储能电池等领域具有不可替代的战略地位。国际能源署预测, 全球锂需求将从2021年的10.1万吨增至

2030年的53.1万吨。我国锂资源超80%蕴藏于盐湖卤水, 但呈现高镁锂比(Mg/Li >20:1, 部分地区超2000:1)、低锂浓度的典型特征。镁锂离子因离子半径和水合半径相近, 分离极为困难。传统蒸发沉淀法生产周期长达18-24个月, 锂回收率低于30%。电渗析技术利用离子交换膜在电场作用下的选择性透过特性, 可实现锂镁高效分离, 具有连续操作、无需化学添加剂、环境友好等优势。

1.2 研究现状

盐湖卤水锂镁分离主流技术包括吸附法(选择性高但吸附剂溶损)、萃取法(分离系数高但有机相流失)、纳滤

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

膜法（操作简单但分离因子低）。单一技术难以满足高效分离和经济可行要求，多技术集成是发展方向。电渗析技术已从实验室研究迈向万吨级产业化：2025年中国盐湖“4+2”万吨锂盐项目实现锂浓度从5-7g/L提升至20-25g/L、锂回收率>99%；盐湖股份原卤直接提锂项目产品纯度达99.80%电池级碳酸锂。

1.3 研究目的与内容

本研究旨在系统解析电渗析技术在盐湖卤水锂镁分离中的应用基础与工程实践，包括机理、材料、工艺、应用、展望五个核心议题，为高镁锂比盐湖卤水提锂提供理论支撑与技术参考。研究遵循“机理→材料→工艺→应用→展望”的逻辑主线。

2 电渗析锂镁分离机理研究

2.1 电渗析基本原理

离子交换膜是电渗析的核心元件，其选择性源于膜内固定电荷基团。阳离子交换膜含有磺酸基等负电基团，根据Donnan平衡理论，膜相与溶液相接触时满足：

$$\frac{C_i^m}{C_i^s} = \exp\left(-\frac{z_i F \Delta \phi_D}{RT}\right)$$

其中 C_i^m 、 C_i^s 分别为离子 i 在膜相和溶液相的浓度， z_i 为离子价数， $\Delta \phi_D$ 为 Donnan 电位。该式表明离子价数越高，其在膜相的平衡浓度越低，这是电渗析锂镁分离的热力学基础。

在直流电场作用下，离子通量由能斯特-普朗克方程描述：

$$J_i = -D_i \left(\frac{dc_i}{dx} + \frac{z_i F C_i}{RT} \frac{d\phi}{dx} \right)$$

当电流密度超过极限电流 i_{lim} 时发生浓差极化：

$$i_{lim} = \frac{z_i F D_i c_i^b}{\delta(t_i^m - t_i^s)}$$

2.2 锂镁分离的物理化学基础

Li^+ 与 Mg^{2+} 虽离子半径相近（0.076 nm vs 0.072 nm），但水合半径（0.38 nm vs 0.43 nm）和水合能（-515 kJ/mol vs -1922 kJ/mol）差异显著。 Mg^{2+} 更高的脱水能垒是其透过膜的主要动力学障碍。

离子从溶液进入膜需经历三步（如下图）：(1) 从本体溶液扩散至膜面边界层；(2) 在膜/溶液界面脱离部分水合层；(3) 在膜相内迁移。 Mg^{2+} 因脱水能垒远高于 Li^+ ，在步骤(2)中受阻严重，而 Li^+ 较易脱水并进入膜相。

2.3 分离机理的理论模型

基于亲和作用的平衡模型认为分离系数由离子转移自由能差决定：

$$\alpha_{Li/Mg} = \frac{K_{Li}}{K_{Mg}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{Li} - \Delta G_{Mg}}{RT}\right)$$

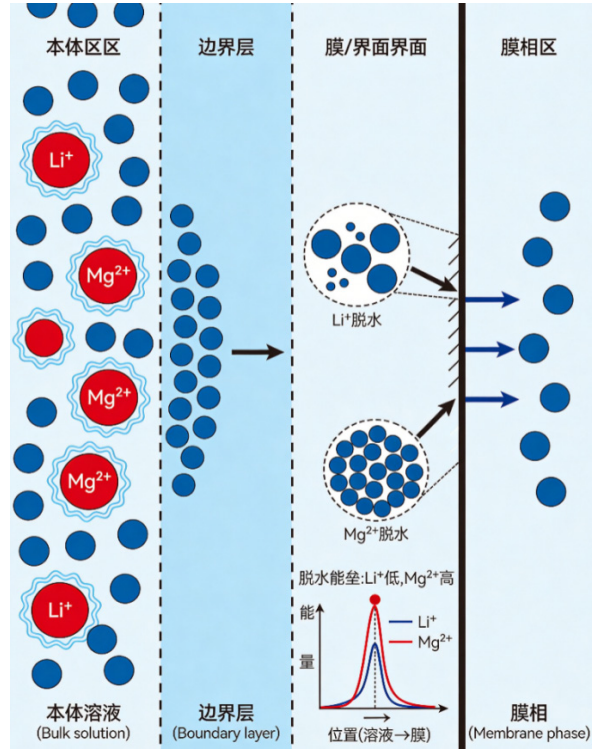
传统磺酸基膜对 Mg^{2+} 亲和力更强（ ΔG_{Mg} 更负），导

致 $\alpha < 1$ ；通过膜改性可改变亲和关系。

基于远离平衡的能垒模型强调动力学差异：

$$J_i = P_i c_i^s \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT}\right) \frac{z_i F \Delta \phi}{RT}$$

Mg^{2+} 的脱水能垒， Mg 远高于 Li^+ ，故其渗透系数极低。实际过程是热力学排斥与动力学差异的协同作用。



3 一价阳离子选择性膜材料研究进展

3.1 膜材料的性能要求与构效关系

3.1.1 理想膜性能指标

面向高镁锂比盐湖卤水提锂，理想的一价阳离子选择性膜应满足以下核心性能指标：

锂离子通量：> 0.1 mol/(m²·h)，决定单位膜面积的处理能力。

Li^+/Mg^{2+} 选择性：> 50，对于镁锂比 > 100 的卤水尤为重要。

面电阻：< 5 Ω·cm²，直接影响过程能耗。

长期稳定性：连续运行 1000 小时以上，通量衰减 < 10%，选择性衰减 < 15%。

近期研究已取得突破性进展，如表 1 所示。

3.1.2 膜结构与性能的构效关系

基膜材料（如磺化聚醚醚酮 SPEEK、聚苯乙烯-二乙烯苯）提供机械强度和基础离子传输通道。功能层的厚度、交联密度、电荷分布决定分离精度。研究表明，采用多孔聚醚醚酮（PES）作为支撑层，通过孔填充工艺制备的复合膜可在低 IEC 下实现增强的离子传输和尺寸稳定性。哈尔滨工

业大学邵路团队提出在基材与荷正电选择层间引入多孔中间层吸附咖啡酸分子，提升界面结合性，提高交联度并增加膜表面功能基团含量。此外，亚纳米孔道内的限域结构对离

子选择性传输具有决定性影响，膜表面静电效应可介导一价阳离子的脱水过程，低水合能离子更倾向于在高表面电荷影响下脱水。

表 1

膜材料类型	改性策略	Li ⁺ 通量 (mol/m ² · h)	Li ⁺ /Mg ²⁺ 选择性	面电阻 (Ω · cm ²)	稳定性测试	文献来源
QPAES 改性膜	荷正电层修饰	0.167	>1000	未报道	未报道	Zhang et al. 2026
PEI-DAIB 复合膜	非对称结构	0.75	72	<5	两段 ED 验证	Huo et al. 2026
电场辅助纳滤膜	电场协同	渗透率 150%	272.9	--	稳定	Zhang et al. 2025
COF 膜	反离子效应	0.53	321	--	长期稳定	邱明团队 2025
仿生氮化碳膜	仿生设计	--	1708*	--	稳定	刘健团队 2024
2D 蒙脱石膜	天然矿物	--	14.45**	--	优于商业膜	赵云良团队 2026

* 注：在高浓度镁背景下 (1.0 M Mg²⁺) 对低浓度锂 (0.002 M Li⁺) 的选择比；** 对西台吉乃尔盐湖卤水实测值。

3.2 表面改性策略与研究进展

3.2.1 荷正电层修饰

通过构建正电表面增强对 Mg²⁺ 的 Donnan 排斥。Zhang 等用季铵化聚芳醚砜 (QPAES) 改性，选择性 >1000，通量 0.167 mol/(m² · h)。纪志永团队二次界面聚合引入 PEI，选择性 15.90，打破 trade-off。

3.2.2 非对称结构改性层设计

构建孔径 / 电荷梯度协同提升性能。Huo 等开发 PEI-DAIB 非对称膜，松散 DAIB 亚层促 Li⁺ 快速传输，致密 PEI 上层阻 Mg²⁺，选择性 72、通量 0.75 mol/(m² · h)。邵路团队引入多孔中间层吸附咖啡酸，同步调控熵垒和焓垒。

3.2.3 电场辅助协同强化

外加电场促进 Li⁺ 脱水。Zhang 等将 P-ZIF-8 掺入聚酰胺，电场下分离因子 272.9，Li⁺ 渗透率 150%，Mg²⁺ 截留率 98.7%。电场可破坏 Li⁺ 水合结构，降低传输能垒。

3.3 新型膜材料前沿探索

3.3.1 共价有机框架 (COF) 膜

COF 材料因其亚纳米级规整孔道结构和可精确调控的孔道化学环境，成为研究前沿。浙江大学张庆华和华中师范大学邱明团队提出通过反离子效应构建带正电荷的 COF 膜，在 Å 级孔道内引入带正电荷侧链，利用反离子效应形成局部负电区域，显著提升锂离子传输速率和选择性。

DFT 计算和 AIMD 模拟揭示 Cl⁻ 受孔道内正电荷吸引先凝聚形成负电分布区，促进 Li⁺ 通过低能垒路径穿过孔道。该 COF 膜在电渗析实验中 Li⁺/Mg²⁺ 选择性达 321，通量 0.53 mol · m⁻² · h⁻¹，且长期稳定。

3.3.2 仿生离子通道膜

自然界生物离子通道 (如 KcsA 钾通道) 为人工膜设计提供启示。中科院青岛能源所刘健团队基于结晶和无定形同源氮化碳材料，构筑具有埃级尺寸通道的仿生氮化碳膜。聚三嗪酰胺经超声剥离、真空抽滤得到结晶氮化碳纳米片膜，再沉积无定形氮化碳得到晶体 / 聚合物复合膜。得益于均匀窄孔及丰富离子结合位点，该膜可从 1.0 M Mg²⁺ 中筛出 0.002 M Li⁺，选择比高达 1708。

4 电渗析工艺优化与工程应用

4.1 电渗析工艺参数的影响规律

电流密度存在最优区间——过低分离效率不足，过高易引发浓差极化和水解离。进料流速影响边界层厚度和传质系数，提高流速可减轻浓差极化，但会缩短物料停留时间。温度升高降低溶液粘度、提高离子迁移速率，但可能加剧膜溶胀，通常控制在 20-40°C。pH 影响离子形态和膜表面电荷，过高易导致氢氧化物沉淀。共存离子如 K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 会与 Li⁺ 竞争迁移，影响选择性。各参数影响规律汇见表 2：

表 2

参数	影响规律	优化区间	与选择性的关系	与通量的关系	注意事项
电流密度	存在最优区间	50-200 A/m ²	先升后降	正相关	过高引发浓差极化
进料流速	影响边界层厚度	2-10 cm/s	正相关	负相关	需平衡停留时间
温度	降低粘度、加速迁移	20-40°C	负相关	正相关	过高导致膜溶胀
pH	影响离子形态和膜电荷	5-7	复杂	复杂	避免氢氧化物沉淀
盐度	电荷屏蔽效应	<200 g/L	负相关	正相关	高盐度选择性下降

膜堆构型方面，板框式便于组装清洗，适用于高悬浮物体系；卷式装填密度高，适用于大规模连续生产。多级电渗析通过串联多个膜堆逐步提升锂浓度，两段式工艺采用

“一段粗分离 + 二段精分离”配置，实现过程优化。

4.2 集成工艺技术路线

单一技术难以同时满足高效分离和经济可行要求，多

技术集成是产业化发展的必然选择。

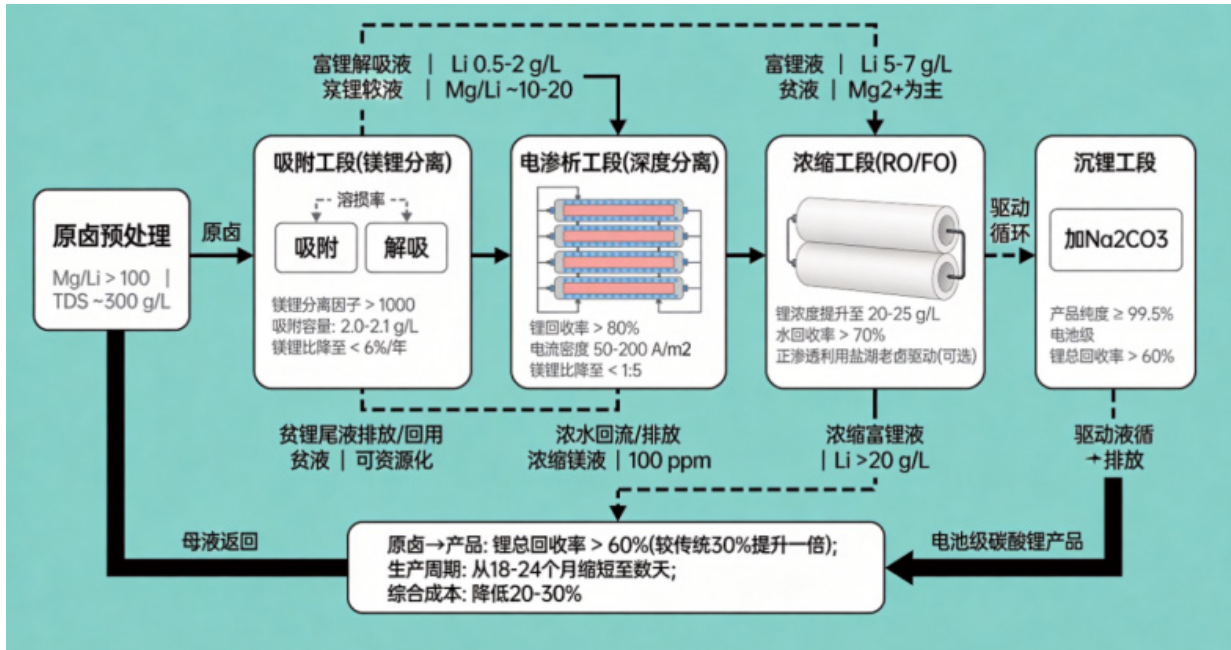
4.2.1 “吸附+电渗析+浓缩”耦合工艺

该工艺是目前高镁锂比盐湖卤水提锂的主流技术路线之一，各工段的分工逻辑如下图：

吸附段：利用对锂离子具有高选择性的吸附剂，从高镁锂比卤水中选择性吸附锂离子，实现镁锂初步分离。中蓝长化开发的 Li^+/LiX 吸附剂饱和和吸附容量 $\geq 4.5\text{g/L}$ ，工作吸附容量 $2.0 \sim 2.1\text{g/L}$ ，溶损率小于 $6\%/年$ 。

电渗析段：对吸附解吸得到的富锂液进行深度分离，进一步去除残留的镁离子。经过多级膜耦合分离浓缩后，卤水镁锂比可降低到 $1:5$ ，阶段锂收率大于 80% 。

浓缩段：将电渗析产出的低镁富锂液进一步浓缩，达到沉锂工序要求的锂浓度（通常需 $>20\text{g/L}$ ）。上海高等研究院提出采用正渗透技术，利用盐湖老卤作为驱动液，整体过程由太阳能驱动，可大幅减少浓缩阶段的碳排放和能耗。



4.2.2 “纳滤+电渗析”双膜工艺

纳滤膜利用电荷效应和筛分效应实现镁锂分离，但对高镁锂比卤水分离精度有限；电渗析选择性高但处理量相对较低。二者耦合可发挥协同效应：纳滤段进行预浓缩和镁截留，大幅降低后续电渗析的进料体积和镁负荷；电渗析段对纳滤产水进行深度分离，确保产品纯度。

杭州水处理研发的“低温界面聚合镁锂分离膜”具备高镁锂选择性，在同等处理规模下减少 50% 分离级数，工艺流程缩短 40% ，设备占地减少 35% 。在青海某盐湖提锂项目中，配合电渗析系统实现锂回收率提升 20% 以上。中蓝长化多级膜耦合分离浓缩技术可将解吸液锂浓度从 0.5g/L 提升至 7g/L （传统工艺仅 1.8g/L ），能耗降低 50% 以上，耦合电渗析后可进一步浓缩至 15g/L 。

4.3 工程应用案例分析

4.3.1 中国盐湖“4+2”万吨锂盐项目

2025年9月，中国盐湖“4+2”万吨锂盐项目在青海格尔木顺利投产。杭州蓝然提供自主创新的电渗析装备与离子交换膜技术，系统成功将卤水中锂离子浓度从 $5-7\text{g/L}$ 提升至 $20-25\text{g/L}$ ，锂回收率高达 99% ，同时实现高效除硼。项目工艺系统集成度高，管道布置简洁清晰，操作维护简便，

标志着电渗析技术在万吨级规模上已具备成熟的应用能力。

4.3.2 盐湖股份原卤直接提锂项目

盐湖股份原卤直接提锂技术采用“吸附+膜耦合”工艺路线，实现从原卤直接提锂的工程化应用。吸附段镁锂分离因子 >1000 ，纳滤段镁截留率 $>98\%$ ，最终产品纯度达到 99.80% 电池级碳酸锂，满足《电池级碳酸锂》标准。该技术将生产周期从 $18-24$ 个月缩短至数天，锂总收率从 30% 提升至 60% 以上，为我国低品位、高镁锂比盐湖锂资源开发提供了可行路径。

4.4 过程经济性与环境影响

电渗析提锂过程能耗约为 $3000-5000\text{kWh/t Li}_2\text{CO}_3$ 。成本构成中膜折旧占 $30-40\%$ ，电耗占 $20-30\%$ ，清洗维护占 $10-15\%$ ，人工占 10% ，其他占 $10-15\%$ 。相较于传统蒸发沉淀法，电渗析工艺综合成本降低 $20-30\%$ ，锂总收率提升一倍以上。

环境方面，电渗析过程无需大量化学试剂添加，化学试剂消耗降低 80% 以上；通过工艺优化和浓水回用，废液排放量减少 60% 以上；系统水回收率可达 70% 以上。正渗透技术利用盐湖老卤作为驱动液，可实现太阳能驱动的绿色浓缩过程。

5 挑战、对策与展望

5.1 当前面临的主要技术挑战

膜材料层面：选择性与渗透性的权衡关系尚未根本突破；长期运行稳定性不足，膜污染导致通量下降 30-50%；真实卤水中多离子竞争及高盐电荷屏蔽效应使性能大幅下降。工艺层面：频繁膜污染加速老化；高盐体系（TDS > 200g/L）静电排斥减弱；多离子竞争干扰锂选择性。工程放大方面，从小膜到工业级膜堆性能衰减明显，系统集成优化复杂。

5.2 发展方向与对策建议

膜材料方向：发展同源聚合物增强界面稳定性；开发仿生离子通道与智能响应材料。工艺创新：发展电场辅助协同强化；探索盐差能自驱动系统；引入人工智能辅助过程优化。工程化推进：推进膜组件标准化；开发模块化工艺包；建立全流程自动化控制。

5.3 产业化前景与战略价值

技术已从 TRL6-7 迈向 TRL8-9，未来 3-5 年将迎产业化爆发期。若全面推广，可使我国盐湖锂回收率从不足 30% 提升至 70% 以上，盘活资源超 800 万吨，对降低对外依存度（> 70%）、保障新能源产业链安全具有重大战略意义。技术成本较传统工艺降低 20-30%，具备绿色低碳优势。

参考文献

- [1] Foo Z H, Thomas J B, Heath S M, et al. Sustainable Lithium Recovery from Hypersaline Salt-Lakes by Selective Electrodialysis: Transport and Thermodynamics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(39): 14747-14756.
- [2] 刘铠瑞, 孙猛, 曲久辉, 等. Electrostatic-driven dehydration of ions in nanoporous membranes[J]. *Science Advances*, 2025.
- [3] 刘铠瑞, 孙猛, 等. Ion-Ion Selectivity of Synthetic Membranes with Confined Nanostructures[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(22): 封面论文.
- [4] 中国科学院青海盐湖研究所. 双极膜电渗析制备电池级氢氧化锂工艺研究[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 349: 127875.
- [5] 中国科学院青海盐湖研究所. 电渗析离子交换膜污染机理研究[J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 713: 123283.
- [6] 中国科学院青海盐湖研究所. 氧化石墨烯改性纳滤膜用于盐湖卤水镁锂分离[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156269.
- [7] Sun Y, Wang Q, Wang Y, et al. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 287: 117807.
- [8] Nie X Y, Sun S Y, Sun Z, et al. Ion-fractionation of lithium ions from magnesium ions by electrodialysis using monovalent selective ion-exchange membranes[J]. *Desalination*, 2017, 403: 128-135.
- [9] 膜法分离一/二价阳离子的研究进展[J]. *化工进展*, 2024, 43(3): 1363-1373.
- [10] Zhang D, Jiang C, Li Y, et al. Electro-driven in situ construction of functional layer using amphoteric molecule: The role of tryptophan in ion sieving[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(40): 36626-36637.
- [11] Xu P, Wang W, Qian X, et al. Positive charged PEI-TMC composite nanofiltration membrane for separation of Li⁺ and Mg²⁺ from brine with high Mg²⁺/Li⁺ ratio[J]. *Desalination*, 2019, 449: 57-68.
- [12] Gu T, Zhang R, Zhang S, et al. Quaternary ammonium engineered polyamide membrane with high positive charge density for efficient Li⁺/Mg²⁺ separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 659: 120802.
- [13] 侯召飞, 等. 基于双极膜电渗析的盐湖卤水制备氢氧化锂研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2023, 43(3): 198-216.
- [14] Enhanced surface positive charge density polyaniline membranes for monovalent cation selectivity separation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 713: 136453.

The Importance of Coke Oven Gas and Converter Gas Analysis in Chemical Production

Xia Jia

Xilai Peak Branch of China National Energy Group Coal Coking Co., Ltd. Methanol Plant, Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China

Abstract

With the continuous advancement of China's scientific and technological level and national economy, artificial intelligence and AI technologies have been applied in various fields, and the production processes of chemical enterprises have transitioned from traditional manual operations to intelligent factories. The coke oven gas and converter gas produced by steel and chemical enterprises have characteristics such as flammability and explosiveness, which pose hazards to production safety. Therefore, gas analysis has become an important concern for all sectors of society and the public. Gas analysis is of great significance to the safety and stability of chemical production. Any issues arising in gas analysis production can lead to serious consequences. Based on this, the article analyzes the importance of gas analysis in chemical production and preventive measures, providing reference and assistance for relevant personnel.

Keywords

coke oven gas; converter gas; laboratory analysis; chemical production; importance

焦炉煤气和转炉煤气化验分析在化工生产中的重要性

贾霞

国家能源集团煤焦化有限责任公司西来峰分公司甲醇厂, 中国·内蒙古 乌海 016000

摘要

伴随着中国科学技术水平和国民经济的不断进步, 人工智能和AI技术已经应用在各个领域, 化工企业的生产过程也由传统的人工操作到智能化工厂的过度。钢铁以及化工企业生产产生的焦炉煤气和转炉煤气具有易燃易爆等危害安全生产的特性, 因此煤气化验分析已经成为社会各界以及人们关注的重要内容, 煤气化验对化工生产的安全性与稳定性具有十分重要的意义, 如果在煤气化验生产中出现任何问题都会造成严重的后果, 基于此, 文章就煤气化验分析在化工生产中的重要性及预防措施进行分析, 以此为相关人员提供参考与帮助。

关键词

焦炉煤气; 转炉煤气; 化验分析; 化工生产; 重要性

1 引言

科学技术在不断进步, 智能化、自动化已经悄悄的改变人民的生活, 并且在各行各业里发挥了无可替代的作用。化工行业也从传统的手工制造到智能化推进。由于化工生产工作环境具有一定的特殊性与复杂性, 化工产业发展在社会稳定发展与人们居住生活中越来越重要。当前我国钢铁产业位居世界首位, 焦炉煤气和转炉煤气对社会其他各个领域的发展也有着密不可分的联系, 但是焦炉煤气和转炉煤气有着易燃易爆的风险。为了保证生产过程的有效性与安全性, 因此文章对焦炉煤气和转炉煤气化验在化工生产中的重要性进行了阐述。

2 焦炉煤气和转炉煤气的组成和特点

首先, 焦炉煤气。我国是多煤、少气、贫油的国家。我国的煤炭储量非常丰富, 并且种类繁多, 作为发展中国家, 我国对于煤炭和钢铁的依赖较大。但是由于技术水平和地区差异等多方面因素, 没有得到充分开发和利用, 在一定程度上造成了大量的资源浪费, 而且对自然生态环境造成不利影响。焦炉煤气是在炼焦过程中产生的副产物, 因为组分中氢气和碳占比很大, 具有很大的经济价值。组分主要如下图:

主要组分	H ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	CnHm
百分比%	59.17	0.25	9.44	1.44	20.27	3.27	2.5

其次, 转炉煤气。目前, 我国焦炭年生产量达到 3 亿吨, 转炉煤气是转炉吹氧冶炼过程中发生化学反应产生的气体, 在吹冶过程中必须向炉中添加一定的辅助原料, 如果炉内温度很高时, 就会产生一氧化碳, 在碳与氧气的直接作用

【作者简介】贾霞 (1986-), 女, 中国甘肃兰州人, 本科, 工程师, 从事煤气化验分析研究。

下会产生二氧化碳,二氧化碳占据总量约10%,同时会产生大量的炉渣,也就是说炉渣主要来自于火法炼炉的过程,其他炉渣是炼锌、炼铅过程中的副产物。我国每年锌渣产量为59万吨左右,而炉渣产量为150万吨,这其中含有丰富的贵金属,也就是说炉渣的利用潜力非常大。在冶炼中期,炉气发生量很少,不具有回收价值。到冶炼末期,炉内温度可以达到1400到1500摄氏度,这时会产生大量的炉气,且主要成分就是一氧化碳,在这个过程中对炉气进行净化或者回收利用,最终形成转炉煤气,转炉煤气的主要成分是一氧化碳、二氧化碳,还有硫、磷等有害成分,并且具有易燃易爆和易中毒的风险,下面是转炉煤气的组分:

组分	CO	CO ₂	H ₂	O ₂
百分比%	55-70	10-20	1-5	≤2

3 焦炉煤气和转炉煤气化验分析在化工生产中的重要性及必要性

化工企业的煤气化验是安全生产的一项重要内容,直接或者间接影响着化工企业的生产效益与安全,对相关人员的综合素质与技术要求极为严格。安全生产是化工生产的必要条件与基础,由于焦炉煤气和转化煤气具有很高的经济价值,但是其本身具有易燃易爆,有毒有害等特性,分析设备涉及高温以及高压等,如果不严格对分析过程进行管理很容易发生火灾,爆炸等安全事故。化工生产中的焦炉煤气和转炉煤气的化验安全管理是安全生产的前提保障,由于煤气化验生产环境具有一定的复杂性与特殊性,对于焦炉煤气和转炉煤气化验分析中的应用必须根据国标和行标与操作要求进行,保证分析的准确性与可靠性。随着智能化和自动化的发展,相关人员在焦炉煤气和转炉煤气的化验分析研究方面不断增加力度,没有煤气系统的化验分析,煤气系统就是“盲运行”安全、生产、经济都无法保证。因此,加强焦炉煤气和转炉煤气化验分析和化验过程中的事故预防措施具有重要的意义。

4 焦炉煤气和转炉煤气化验过程产生事故原因分析

煤化工和精细化工在我国占有很大的比重,并且是我国的支柱产业,对于我国的经济发展和人民的幸福指数具有重大影响,所以化工生产的安全是重中之重。化工生产的原料的分析和检测过程都是在特定的环境下进行的,但是特定的环境就会造成一定的安全风险,例如:作业环境通风不良、光线差、空间狭小、高温、噪音、粉尘干扰、夜间、雨雪、大风天气,这些因素都会造成煤气化验分析中出现风险隐患,如果不能及时识别和预防,事故也会随之而来。安全稳定生产是化工生产的基石,要充分发挥智能化和自动化化工的生产优势,确保生产系统安、稳、长、满、优的运行。如果化工企业发生安全生产事故,不仅对相关人员的生命安

全造成严重威胁,还影响着生产企业的经济效益。就目前焦炉煤气和转炉煤气化验事故来分析,多数由于测取数据阶段造成的中毒和泄露,或者在系统分析过程中没有依据标准来分析,导致系统测量中原料组分的波动和大幅度变化。而且焦炉煤气和转炉煤气具有易燃易爆、易中毒的特性,潜在风险较大。这些风险也会造成火灾、爆炸、中毒的事故。

此外,我国对焦炉煤气和转炉煤气化验原料试验检测技术的理论研究还不完善,很多国标和行标没有推进,造成化工企业都在摸索中进行分析,没有统一的标准和管理手段。化工企业的管理毕竟参差不齐,完善的试验管理体系和科学的管理办法在化工企业分析过程中起到支撑的作用,但是体系的缺失就无法为分析过程工作保驾护航。由于缺乏管理人才或者是没有足够的试验检测管理经验与技术,导致试验检测管理不合理、不规范,严重影响焦炉煤气和转炉煤气化验的安全生产。并且对于煤气化验的员工操作技能要求也会比较严格,取样的手法、计量、计算的偏差都会造成一定的数据误导。

煤气化验事故不是单一原因造成的,大多是安全意识差、操作不规范、设备有隐患、管理不到位叠加导致,核心是人的不安全行为、物的不安全状态和管理上的缺陷。

5 提升焦炉煤气和转炉煤气化验分析过程安全措施分析

首先,焦炉煤气和转炉煤气要做好系统性安全生产运行的计划,做好智能和自动化检验和测量技术的推进和更新,合理利用检测工具,保证检测、检验过程中的安全。由于焦炉煤气和转炉煤气杂质较多,极容易堵塞、腐蚀和污染检测设备,造成检测设备发生事故率较高和潜在的安全风险。在检测、检验过程中也要做好防止泄露、着火、爆炸的风险,避免检测过程中的事故发生。通过在线实时检测代替人工检测,这种方式相当于给管道装上“监控摄像头”,实时反馈数据,完全避免人工取样接触有毒气体的风险。实时无忧,直接连接管道,连续分析CO、CH₄等组分,数据秒级更新。系统自带除尘、降温功能,甚至能自动反吹扫防止堵塞,几乎无需人工干预。主流采用非分光红外(NDIR)技术。更前沿的激光拉曼光谱,可同时测量多达13种气体(包括H₂S),速度比传统色谱快100倍以上。如果必须保留离线分析,机器人能彻底把人和毒气隔离开,把化验员从繁重体力活中解放出来。全自动流程,工人只需批量放入样品,机械臂就会自动完成称量、检测、计算、生成报告的全流程,效率提升一倍以上。精准洁净,杜绝了人工误操作,同时避免人与煤粉/煤气接触,既保护了职业健康,也消除了人为误差。也可引入机器人化验系统,关键是确保它与现有的气路管理系统有效联锁,防止人机交互时的意外泄漏。例如,对于焦炉煤气和转炉煤气中的组分杂质测定,传统的流量计取样滴定测量和检测管比对,造成数据误差较大,并且在取

样过程中人为的影响因素会造成数据的波动,无法更准确的体现测量本身的数据情况,将分析分别改用常量组分分析和微量组分分析,尤其是焦炉煤气和转炉煤气中的有害组分的测定,数据的准确性能够更好的保证化工系统运行安全和人员的安全健康。同时,自动化仪器的投用,可以使焦炉煤气和转炉煤气化验过程进行严格管控,实现化工检测自动化的完全替代。

其次,煤气化验取样环节要实施密闭取样,严控样品泄漏(防中毒、防爆炸),拒绝橡胶管直接连接放散口,必须使用钢瓶或气囊等密闭容器,并确保其气密性完好。操作点强制排风,在取样放散口、化验分析柜等关键点设置局部通风罩。操作前必须先开启通风,避免逸散气体聚集。尾气进行集中处理,化验后的残余煤气不得排放在室内,应通过管道引至室外安全区域或接入通风柜,防止取样过程中造成人员中毒和窒息。规范操作流程与个人防护,双人作业与监护,在采样或高危分析时,至少两人协同,一人操作、一人监护,并随身携带便携式CO报警器。正确使用防护用品,处理高浓度样品或开放系统时,必须佩戴过滤式或隔绝式防毒面具,而非普通口罩。制定标准化作业指导书,明确样品置换时间、进气流量、排空位置等关键参数,防止因误操作导致压力剧增或样品喷溅。强化环境监控与应急设施,固定式报警器,化验室必须安装固定式煤气泄漏报警装置,并与排风扇联锁,确保泄漏时能自动通风。应急物资准备,在显眼且易取的位置放置空气呼吸器、急救箱。针对CO中毒,可储备特效解毒药并确保员工知晓其位置。畅通逃生通道,确保分析室门为外开门且开启方向朝外,便于紧急撤离。

对焦炉煤气的转炉煤气的指标精准度的分析,是化工企业生产的一项重要内容,指标的变化会影响生产的变化和稳定。在指标分析过程所使用的设备,大多数是特种设备,所以特种设备的安全管理是保障分析准确的重要组成部分,因特种设备自身具有较大的危险性,还有潜在风险性,极易导致各类安全事故的发生,所以我们在焦炉煤气和转炉煤气化验之前。必须保证各种设备处于有效状态,相关设备的功能和指标已经进行了有效的标定。气路检查,定期用肥皂水或检漏仪检查分析仪器接头、气路管线,发现老化或松动

立即更换。报警器标定,定期对气体报警器进行零点标定和量程标定,确保其处于完好备用状态。同时气相色谱法利用仪器进行自动化分析和检测。气相色谱最核心的优势。它可以分析成分复杂的混合物,能将结构、性质非常相似的组分(如同分异构体)分离开来,非常适合石油化工、香精香料等复杂样品的分析。分析速度快,通常一个样品的分析只需几分钟到几十分钟。结合现在的电子压力控制和自动化进样技术,不仅能手动快速分析,也很容易实现自动化批量检测。灵敏度极高,配备氢火焰离子化检测器(FID)等通用检测器时,能检测到百万分之一(ppm)级别的物质;若使用电子捕获检测器(ECD)或质谱联用(GC-MS),检测限甚至能达到十亿分之一(ppb)级别,非常适合焦炉煤气和转炉煤气中等痕量分析。

6 结语

科学技术和智能化、自动化的发展,焦炉煤气和转炉煤气的分析与安全稳定生产息息相关,化工企业的安全问题也受到了相关人员与学者的探究,文章从多方面与层面就焦炉煤气和转炉煤气的组分和危害性进行了分析,并且针对煤气化验在化工生产中的重要性及预防措施进行深入探讨,尤其是在在线分析和自动取样,密闭取样等环节进行了阐述,当然还需要相关人员进一步探索与学习。

参考文献

- [1] 魏志刚,刘方来,水运企业安全生产事故应急预案编制探讨[A].江海直达船舶驾驶技术与安全管理论文集[C].2018.
- [2] 陈国华,张玲,国外安全生产事故独立调查机制对我国的启示[A].中国职业安全健康协会2018年学术年会论文集[C].2018
- [3] 卢纳琪,以科学发展观打造安全生产建设平台---对安全管理的几点思考与建议[A],纪念改革开放30周年----2018陕西省体制改革研究会优秀论文集[C].2018
- [4] 曹剑叶,岳泽,冯检验,张清株,特炉炼钢综合计算模型ISIM[A].第十一届全国自动化应用技术学术交流会论文集[C].2018.
- [5] 薄风华,王凤琴,张利君,王卫华,特炉氧枪仿真技术开发与效果[A].自动化技术与冶金流程节能减排--全国冶金自动化信息网2018年会论文集[C].2018

Evaluation of the Operating Effect of Techtiv-500 High-Selective Composite Proprietary Solvent in the Aromatic Extraction Unit of the Continuous Reforming Plant of Oriental Hualong Group

Yonggang Zhang

Shandong Oriental Hualong Industry and Trade Group Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257300, China

Abstract

This paper explores the application effect of Techtiv-500 high-selectivity composite proprietary solvent in the aromatic extraction unit of the continuous reforming unit of Oriental Hualong Group. By comparing aromatic recovery rate, product separation accuracy, and solvent loss, the operational effect of Techtiv-500 high-selectivity composite proprietary solvent in the aromatic extraction unit of the continuous reforming unit is analyzed. The results show that Techtiv-500 high-selectivity composite proprietary solvent significantly improves the product separation accuracy of the unit and the recovery rate of target products, while reducing energy consumption and operating costs. This study provides a theoretical basis and practical guidance for the application of Techtiv-500 high-selectivity composite proprietary solvent in the aromatic extraction unit of continuous reforming units, and has certain reference significance for solvent selection and operation in such units.

Keywords

Techtiv-500 high-selectivity composite proprietary solvent; target product separation accuracy; target product recovery rate; solvent loss

Techtiv-500 高选择性复合专有溶剂在东方华龙集团连续重整装置芳烃抽提单元运行效果评价

张永刚

山东东方华龙工贸集团有限公司, 中国·山东 东营 257300

摘要

本文探讨了Techtiv-500高选择性复合专有溶剂在东方华龙集团连续重整装置芳烃抽提单元运行中的应用效果。通过芳烃回收率、产品分离精度、溶剂损耗的对比,分析Techtiv-500高选择性复合专有溶剂在连续重整装置芳烃抽提单元中的运行效果,结果表明, Techtiv-500高选择性复合专有溶剂显著提高了装置的产品分离精度,以及目标产品的回收率,同时降低了能耗和操作成本。本研究为Techtiv-500高选择性复合专有溶剂在连续重整装置芳烃抽提单元中的应用提供了理论依据和实践指导,对连续重整装置芳烃抽提单元的溶剂选择、溶剂运行提供一定的参考意义。

关键词

Techtiv-500高选择性复合专有溶剂; 目标产品分离精度; 目标产品回收率; 溶剂损耗

1 引言

东方华龙集团连续重整装置芳烃抽提单元采用美国GTC公司的工艺包,使用GTC公司专有Techtiv-500高选择性复合专有溶剂,专门用于BTX抽提蒸馏。GTC公司开发的Techtiv系列溶剂,其主要成分是环丁砜,此外还含有稳定剂、中间体以及水等,通过将各组分进行调节来达到最

优的抽提蒸馏性能^[1]。

装置于2023年8月原始开工,2024年5月经过一次3个月的装置长检修,芳烃抽提单元的溶剂退回湿溶剂罐,单元设备与管线用除盐水进行冲洗回收溶剂,检修完成开工时将这部分含溶剂的除盐水进行回炼;2025年3月装置停工小检修,芳烃抽提单元静止处理(未退料)。

溶剂作为芳烃抽提单元最为重要的一环,运行性能的优劣直接影响到装置的能耗、产品质量、芳烃回收率、装置腐蚀等工况^[2],同时因溶剂价格>20元/kg,降低溶剂损耗也是工作的重点。因此,定期对溶剂进行检测评价是装置平稳运行的关键。

【作者简介】张永刚(1977-),男,中国山东东营人,本科,从事化学化工工程研究。

2 目标产品的分离精度

芳烃抽提单元的作用是将上游来的原料（C6C7组分）分离成非芳烃和芳烃，再将芳烃切割成苯、甲苯，以及二甲苯产品，因非芳烃和芳烃的沸点相近，普通的精馏很难将原料中的芳烃和非芳烃精度分离，因此，常采用抽提精馏的方法来实现。

抽提蒸馏的工作原理是高选择性的溶剂改变了组分的相对挥发度^[3]。芳烃和非芳烃混合物中，在溶剂的作用下，非芳烃组分与芳烃组分的相对挥发度增大，从而使使得非芳烃能够从传统的精馏塔塔顶蒸出，芳烃从塔底回收。

装置运行两年，三个产品（苯、甲苯、非芳烃）的质量非常稳定，其中，苯产品的纯度达到99.999%，远超国标545规格要求的99.9%；甲苯产品的纯度99.99%，达到优级纯甲苯99.95%的标准；非芳烃产品的纯度为99.9%，高于产品出厂标准的 $\leq 99\%$ 。说明Tectiv-500溶剂在运行2年的工况下，依然满足产品质量的要求，选择性和溶解性与新鲜溶剂几乎一致。

(表1) 芳烃抽提单元产品质量

样品 组分	抽余油	抽出油	苯	甲苯	拔顶苯
非芳烃 (%)	99.9	0.01	0.0004	0.01	
苯 (%)	0.02	27.68	99.9991	0	99.9787
甲苯 (%)	0.08	72.31	0.0004	99.99	
芳烃 (%)	0.10	99.99	99.9995	99.99	
硫 (mg/kg)	0.03	0.02	0.02	0.04	

备注：2025年7月26日化验数据，装置加工负荷110%

3 芳烃回收率

一种好的溶剂，在合理的操作条件下，可以最大限度的将芳烃和非芳烃进行分离。芳烃抽提单元的目的在于回收芳烃，芳烃主要损失在抽余油中，抽余油中的芳烃含量越低，芳烃的回收率就越高，但芳烃抽提单元优先确保芳烃的纯度，在此基础上再去考虑芳烃回收率，因此，在适当的溶剂比下，既能确保芳烃的纯度，又有一个较高的芳烃回收率，是考量溶剂运行状态的关键指标。

芳烃产品回收率计算方法为 $(1 - FR \cdot XR / (FF \cdot XF)) \cdot 100\%$

FR 为抽余油的流量

XR 为抽余油中芳烃的浓度

FF 为抽提原料流量

XF 为抽提原料中芳烃的浓度

2025年7月26日化验分析抽余油中芳烃含量0.1%，抽出油中非芳烃含量0.01%，芳烃的纯度和收率都处于一个理想的水平，根据计算，芳烃回收率是 $(1 - 13500\text{kg/h} \times 0.1\% \div (30600\text{kg/h} \times 56.18\%)) = 99.92\%$ 。GTC公司芳烃回收率的设计值是99.6%，同行业普遍的芳烃回收率在99%--99.5%，该芳烃回收率高于设计值和类同装置的回收率。

4 溶剂性能下降的影响

溶剂在运行过程中，受环境污染、老化等因素影响，不可避免的会产生副反应，使得溶剂的性能较新鲜溶剂有所下降。溶剂性能下降后，特别对芳烃的回收影响很大，因此，日常对溶剂的维护也至关重要，通过隔绝空气、避免高温、清洁工艺环境等手段，减缓溶剂性能下降的周期。通过表2可以看出，溶剂经过2年的运行周期，外观和新鲜溶剂基本一致，各项指标也处于较低的范围，说明对溶剂的日常维护比较规范。

5 溶剂损耗

2025年7月26日检测抽余油和抽出油中溶剂含量，分别是0.33ppm和0.16ppm，GTC指标要求抽余油和抽出油中溶剂含量 $< 1\text{ppm}$ ；正常运行工况下溶剂随产品携带损失在1~3g/吨进料，根据检测结果得出，抽余油携带(0.33ppm)0.14克/吨进料，抽出油携带(0.16ppm)0.07克/吨进料，共计0.21克/吨进料，远低于行业内的溶剂损失值。操作上，抽提蒸馏塔和溶剂回收塔的回流比控制在靠近设计值上限，最大限度少跑损溶剂。

GTC公司要求溶剂中水含量控制在0.3--1.0%，化验室分析溶剂中水含量在8061.72ug/g（溶剂循环量140t/h），溶剂水含量约在0.8%，符合溶剂中水含量的要求；汽提蒸汽量/贫溶剂量(SS/LS)=0.01--0.025wt/wt，现在是1.02%，控制在指标的下限；贫溶剂中烃含量是0.04%，远低于GTC要求的 $\geq 0.2\%$ 。说明溶剂质量比较良好，溶剂中水含量也能符合要求，溶剂回收塔塔底汽提效果良好。

工艺水系统每日损耗除盐水6--7公斤，每周补水一次，工艺水罐D503每次补水量(1.4米*1.7米)液位30% (46公斤)，说明补水量比较小，除盐水的损耗较小。

(表2) 溶剂指标对比

单位 指标	新鲜溶剂	本企业 溶剂	某企业1 溶剂	某企业2 溶剂	某企业3 溶剂	某企业4 溶剂
外观	清澈透明	清澈透明	棕红色有少量沉淀	黑色不透明	黑色有少量沉淀	黑色不透明
PH值	7.6	6.3	6.2	5.58	6.9	6.8
固体悬浮物 (ppm)	15	126	438	381	1169	365.8
氯离子 (mg/l)	2.6	72.1	183.5	1641	129.5	86.8
运行时间 (年)	0	2	2	4	6	2.5

6 溶剂劣化后的危害

6.1 固体颗粒物危害

溶剂受到污染后, 腐蚀产物和氧化降解聚合产物在溶剂中形成一定量的 ($> 1 \mu\text{m}$) 固体颗粒, 并随着污染物以及环丁砜降解产物的积累, 会进一步加剧溶剂的劣化降解, 以致加剧设备的腐蚀, 进而堵塞塔盘、管道, 影响装置的长周期稳定运行。

溶剂再生塔每 6 个月排污一次, 一次排出废溶剂约 200 公斤(含水), 溶剂颜色呈深黄色, 未见明显的黑色渣状物质。贫溶剂过滤器正常生产时平均 6 个月清理一次。

6.2 氯离子的积累和危害

溶剂中含有较多氯离子时, 氯离子对奥氏体不锈钢设备的点腐蚀特别敏感, 点腐蚀在生产中是很危险的, 它在一定区域内迅速发展, 并往深处穿透, 可能会导致个别地方穿孔而渗漏, 威胁着装置的安全生产^[4]。

氯离子来自上游单元, 因此, 重整生成油的脱氯尤为重要, 需引起管理人员的重视, 一是重整生成油的脱氯剂尽量选择和使用脱氯效果好的; 二是一旦重整生成油的氯含量超标, 要及时切换脱氯罐和更换脱氯剂, 确保脱氯罐出口总氯含量 $\geq 0.5\text{ppmwt}$ 。

6.3 酸性物质的积累和危害

溶剂 pH 值偏低的原因是环丁砜本身 β 位袭击释放出 SO_2 , SO_2 又和不饱和醛进行可逆反应, 形成腐蚀性极强的酸, 或是环丁砜在高温及氧存在的工艺条件下被氧化, 开环而形成磺酸等原因所致, 是导致设备腐蚀的主要因素。如不除去这些酸性物质, 溶剂的降解和酸性腐蚀会加剧, 从而造成设备、仪表、管线、阀门腐蚀而泄漏, 导致生产波动, 并会影响正常生产^[4]。

加注单乙醇胺可中和酸性物并维持溶剂的 pH 值在指标范围内, GTC 预计单乙醇胺 (MEA) 的消耗最大为 24000 升/年, 推荐每 20 分钟注入单乙醇胺一次, 每次 1-2 升, 但对于良好的操作条件, 正常操作的注入量可能要低的多。芳烃抽提单元的单乙醇胺在 23 年 11 月注入 18kg, 25 年 7 月注入 36kg, 2 年共计注入 44kg, 溶剂的 PH 值维持在 6.2。

7 操作条件与能耗

从表 3 的数据可知, 操作参数与设计值基本吻合, 抽提蒸馏塔塔底温度控制在设计值的下限, 溶剂回收塔塔底温

度低于设计值, 在该操作条件下, 使用 Tectiv-500 溶剂生产的产品纯度和收率均高于设计值。且 110% 的加工负荷下, 1.6Mpa 蒸汽用量为 12.36t/h, 折合原料单耗为 0.321t/t, 低于设计值 0.36。

(表 3) 芳烃抽提单元操作条件

项目	设计值	实际值
加工量, t/h	35	38.5
抽提蒸馏塔塔顶压力, Kpa	50	50
抽提蒸馏塔塔顶温度, $^{\circ}\text{C}$	87	82
抽提蒸馏塔塔底温度, $^{\circ}\text{C}$	160 ~ 170	162
溶剂进塔温度, $^{\circ}\text{C}$	105	108
原料进塔温度, $^{\circ}\text{C}$	95	98
抽提蒸馏塔溶剂比, wt	3 ~ 4	3.41
抽提蒸馏塔回流比, wt	0.5 ~ 0.6	0.48
溶剂回收塔塔顶压力, Kpa	-50	-50
溶剂回收塔塔顶温度, $^{\circ}\text{C}$	75	75
溶剂回收塔塔底温度, $^{\circ}\text{C}$	175	170
溶剂回收塔回流比, wt	0.3 ~ 0.45	0.44
溶剂再生塔温度, $^{\circ}\text{C}$	175	178

8 结论

通过上述检测数据得出, Tectiv-500 高选择性复合专有溶剂在东方华龙集团连续重整装置芳烃抽提单元的运行良好, 经过两年生产周期的考验后, 性能仍处于一个较高水平。一是说明该溶剂完全满足生产需要, 且产品质量、芳烃回收率、装置能耗均优于设计值; 二是溶剂得益于严格的日常管理和维护。当溶剂被污染后, 任何的手段都不会将溶剂恢复到新鲜状态, 因此, 针对溶剂污染源而采取的防范措施, 针对溶剂损失率而采取的工艺措施也需严格执行。

参考文献

- [1] Tectiv-100溶剂在大连石化芳烃抽提装置的应用; 张守运; 基本有机化学工业; 2010
- [2] 浅谈影响芳烃产品质量相关因素; 张文佳等; 中国石油和化工标准与质量; 2021
- [3] 芳烃抽提工艺技术探讨解析; 郝慧秋; 炼油与化工; 2009
- [4] 芳烃抽提溶剂环丁砜中氯离子的净化研究; 李明玉; 石化技术与应用; 2012

Research on Green and Efficient Catalytic Conversion Process of CO₂ from Coal to Hydrogen Chemical Tail Gas

Gonglong Li¹ Liqiong Xu²

1. Gansu Nenghua Jinchang Energy and Chemical Development Co., Ltd., Jinchang, Gansu, 737100, China

2. Gansu Provincial Nuclear Geology 212 Brigade, Wuwei, Gansu, 733000, China

Abstract

Against the backdrop of the “dual carbon” goal and the large-scale development of CCUS technology, achieving green and efficient catalytic conversion of CO₂ from coal to hydrogen chemical tail gas is not only a core requirement for carbon reduction and emission reduction, but also an important path for resource recycling. This article systematically reviews the mainstream process technologies for CO₂ catalytic conversion based on the component characteristics of coal to hydrogen chemical tail gas, with a focus on analyzing the technical principles and application status of methanol synthesis method, dimethyl ether (DME) synthesis method, and synthesis gas co conversion method; Deeply analyzed the core problems of low catalyst activity, poor product selectivity, and high energy consumption cost in current catalytic conversion processes; Based on the development trend of cutting-edge technology, a targeted process optimization path is proposed from three dimensions: efficient catalyst research and development, process parameter optimization, and system collaborative integration.

Keywords

coal to hydrogen production; Chemical exhaust gas; CO₂; Catalytic conversion; Green technology; CCUS

煤制氢化工尾气 CO₂ 绿色高效催化转化工艺研究

李功龙¹ 许丽琼²

1. 甘肃能化金昌能源化工开发有限公司, 中国·甘肃·金昌 737100

2. 甘肃省核地质二一二大队, 中国·甘肃·武威 733000

摘要

在“双碳”目标与CCUS技术规模化发展的背景下, 实现煤制氢化工尾气CO₂的绿色高效催化转化, 既是降碳减排的核心需求, 也是资源循环利用的重要路径。本文基于煤制氢化工尾气的组分特性, 系统梳理了CO₂催化转化的主流工艺技术, 重点分析了甲醇合成法、二甲醚(DME)合成法及合成气共转化法的技术原理与应用现状; 深入剖析了当前催化转化工艺存在的催化剂活性低、产物选择性差、能耗成本高等核心问题; 结合前沿技术发展趋势, 从高效催化剂研发、工艺参数优化、系统协同集成三个维度, 提出针对性的工艺优化路径。

关键词

煤制氢; 化工尾气; CO₂; 催化转化; 绿色工艺; CCUS

1 引言

中国能源结构具有“富煤、贫油、少气”的显著特征, 煤制氢技术因原料易得、产能稳定, 已广泛应用于化工、冶金、能源等多个领域。然而, 煤制氢生产过程中伴随大量CO₂尾气排放, 每生产1吨氢气约产生10-12吨CO₂, 此类尾气具有CO₂浓度高(体积分数40%-60%)、杂质含量低等特点, 具备良好的资源化利用潜力, 但传统处理方式以直接排放或简单封存为主, 不仅造成资源浪费, 还加剧了环境压力。近年来, CCUS技术已成为全球应对气候变化的核心

技术路径, COP29大会正式通过碳移除减排量授权机制, 进一步推动了CO₂捕集、利用与封存技术的产业化发展。催化转化作为CO₂资源化利用的关键环节, 可将CO₂转化为甲醇、二甲醚、低碳烯烃等高附加值化学品, 实现“变废为宝”的资源循环。

2 煤制氢化工尾气 CO₂ 催化转化主流工艺及应用现状

煤制氢化工尾气的核心特征为CO₂浓度高、含少量H₂、CO等还原性气体, 适配的CO₂催化转化工艺需兼顾尾气组分特性与产物资源化价值。当前, 工业上成熟度较高的催化转化工艺主要包括甲醇合成法、二甲醚合成法及合成气共转化法, 各类工艺在技术原理、应用场景与转化效率上各

【作者简介】李功龙(1986-), 男, 中国甘肃民勤人, 本科, 高级工程师, 从事煤化工项目建设与运营研究。

具特点。

2.1 甲醇合成法

甲醇合成法是 CO_2 催化转化的主流工艺之一，其核心原理为在催化剂作用下， CO_2 与 H_2 发生加氢反应生成甲醇（图1），反应方程式为 $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ 。该工艺可直接利用煤制氢尾气中的 CO_2 与富含 H_2 ，无需额外添加原料，具有工艺兼容性强、产物附加值高等优势。目前，工业上主要采用铜基催化剂（ $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ），国内某煤制氢企业已建成 10 万吨/年 CO_2 制甲醇示范项目，采用固定床反应器，利用化工尾气中的 CO_2 （浓度 52%）与 H_2 进行催化转化，实现 CO_2 转化率 45%-50%，甲醇选择性 85%-90%。但该工艺存在明显短板：铜基催化剂易受尾气中微量杂质（如 S、Cl）中毒失活，且反应需在高压条件（5-10MPa）下进行，能耗与设备成本较高^[1]。

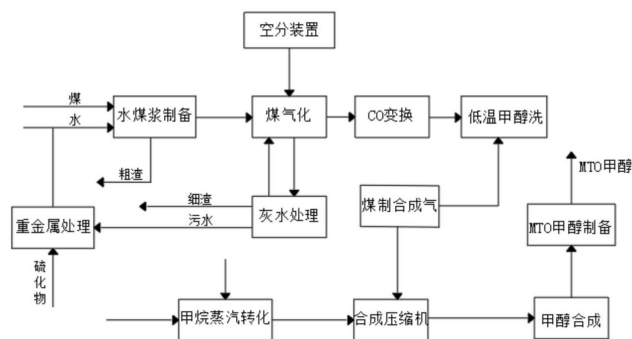


图1 甲醇合成法

2.2 二甲醚合成法

二甲醚作为一种清洁燃料与重要化工中间体，其合成工艺可分为两步法与一步法。两步法先将 CO_2 加氢合成甲醇，再经甲醇脱水生成二甲醚；一步法则通过双功能催化剂实现 CO_2 加氢与甲醇脱水的耦合反应，具有工艺流程短、能耗低等优势，更适配煤制氢尾气的转化需求。一步法合成二甲醚的核心是双功能催化剂的研发，当前主流催化剂为铜基加氢活性组分与分子筛脱水组分的复合体系（如 $\text{Cu}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM}-5$ ）。国内某科研机构中试实验表明，采用一步法工艺处理煤制氢尾气，在反应温度 240℃、压力 4MPa 条件下， CO_2 转化率可达 55%，二甲醚选择性 78%。该工艺已在小型示范装置中实现稳定运行，但大规模工业化应用仍受限于催化剂稳定性不足、产物分离难度大等问题。

2.3 合成气共转化法

煤制氢化工尾气中除 CO_2 外，通常含有 5%-10% 的 CO，合成气共转化法利用 CO_2 与 CO 的协同作用，在催化剂催化下与 H_2 反应生成低碳烯烃、汽油等液体燃料，实现多组分资源的协同利用。该工艺的核心优势在于无需对尾气进行精准分离，可直接利用混合气源，降低了预处理成本。目前，合成气共转化法主要采用费托合成催化剂，如铁基、钴基催化剂。其中，铁基催化剂因对 CO_2 转化具有良好适应性，被广泛应用于煤制氢尾气处理。工业试验数据显示，

采用 $\text{Fe}-\text{Cu}-\text{K}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂，在反应温度 320℃、压力 2MPa 条件下， CO_2 与 CO 总转化率可达 65%，低碳烯烃选择性 42%。但该工艺产物分布复杂，后续分离提纯难度大，且催化剂易积碳失活，制约了其产业化推广^[2]。

3 煤制氢化工尾气 CO_2 催化转化工艺的核心问题

尽管 CO_2 催化转化工艺已取得一定进展，但在煤制氢化工尾气处理的实际应用中，受催化剂性能、工艺设计与系统集成等因素制约，仍存在诸多核心问题，导致转化效率与经济性难以满足工业化需求。

3.1 催化剂性能不足，制约转化效率与选择性

催化剂是 CO_2 催化转化的核心核心，当前主流催化剂普遍存在三大短板：一是活性偏低，煤制氢尾气中 CO_2 浓度高且存在微量杂质，导致催化剂活性位点易被占据，如铜基催化剂在 S 含量 0.1ppm 的环境中，活性会下降 30% 以上；二是产物选择性差，催化反应过程中易发生副反应，生成甲烷、碳酸二甲酯等副产物，降低目标产物收率，如甲醇合成过程中甲烷副产率可达 5%-8%；三是稳定性不足，在高温高压反应条件下，催化剂易出现烧结、积碳等现象，使用寿命仅为 2000-3000 小时，远低于工业需求的 5000 小时以上标准^[3]。

3.2 工艺参数匹配度低，能耗与成本偏高

现有催化转化工艺参数多基于纯 CO_2 气源设计，与煤制氢化工尾气的组分特性匹配度不足，导致能耗与成本偏高。一方面，反应条件苛刻，多数工艺需在高压（4-10MPa）、高温（200-350℃）条件下进行，单位 CO_2 转化的能耗可达 2.5-3.5 吉焦/吨，高于国际先进水平的 2.2 吉焦/吨；另一方面，预处理与分离成本高，为保障催化剂活性，需对尾气进行深度净化处理，去除 S、Cl 等杂质，净化成本占总投资的 15%-20%；同时，产物分离过程复杂，如二甲醚合成产物中含有未反应的 CO_2 、 H_2 及副产物，分离纯度要求高，进一步增加了运行成本。

3.3 系统协同性差，未形成全链条循环体系

当前煤制氢化工尾气 CO_2 催化转化多为单一工艺独立运行，未与煤制氢主工艺形成协同集成，导致资源与能源浪费。一是氢碳比失衡，煤制氢尾气中 H_2 与 CO_2 的比例约为 2:1，而甲醇合成等工艺所需的理想氢碳比为 3:1，需额外补充 H_2 ，增加了原料成本；二是能量回收不足，催化反应过程中释放的大量反应热未得到有效利用，直接排放导致能量损耗；三是未融入 CCUS 全链条，催化转化后的未反应 CO_2 未进行循环捕集再利用，整体降碳效率受限^[4]。

4 煤制氢化工尾气 CO_2 绿色高效催化转化工艺优化路径

针对当前催化转化工艺存在的核心问题，结合煤制氢化工尾气的组分特性与前沿技术发展趋势，从高效催化剂研

发、工艺参数优化、系统协同集成三个维度，构建绿色高效的催化转化工艺体系。

4.1 研发高效专用催化剂，提升转化性能

一是优化催化剂组分与结构，开发煤制氢尾气专用催化剂。针对尾气中微量杂质特性，在铜基、铁基催化剂中引入 La、Ce 等稀土元素，增强催化剂的抗中毒能力；通过纳米改性技术优化催化剂孔径结构，提升活性位点数量，提高 CO₂ 转化率。例如，研发的 Cu-ZnO-Al₂O₃-La₂O₃ 催化剂，可使 CO₂ 转化率提升至 62%，甲醇选择性提高至 93%，抗 S 中毒能力提升 50% 以上。二是探索新型催化材料，推广应用金属有机框架（MOFs）材料、单原子催化剂等前沿材料，此类材料具有比表面积大、活性位点单一等优势，可显著提升产物选择性，如单原子 Ni 催化剂可使低碳烯烃选择性提升至 55% 以上。三是优化催化剂制备工艺，采用溶胶-凝胶法、浸渍-还原法等先进制备技术，提升催化剂的分散性与稳定性，延长使用寿命至 5000 小时以上^[5]。

4.2 优化工艺参数，降低能耗与成本

一是基于尾气组分特性精准匹配工艺参数。通过正交实验方法，确定适配煤制氢尾气（CO₂ 浓度 40%-60%、含 5%-10%CO）的最优反应条件，如甲醇合成工艺可将反应压力优化至 3-4MPa、反应温度控制在 220-240℃，在保障 CO₂ 转化率的同时，降低能耗 15%-20%；针对氢碳比失衡问题，采用部分尾气循环工艺，将未反应的 CO₂ 与 H₂ 循环至反应器入口，调节氢碳比至理想范围，无需额外补充 H₂。二是简化预处理与分离流程，采用新型膜分离技术替代传统净化工艺，实现 S、Cl 等杂质的高效脱除，净化成本降低 30% 以上；开发耦合分离工艺，将催化反应与产物分离过程集成，如在二甲醚合成反应器后直接串联膜分离器，实现产物的在线分离，提升分离效率。三是推广低碳节能技术，利用余热回收装置回收反应过程中释放的热量，用于预热原料气或驱动蒸汽轮机发电，实现能量梯级利用，进一步降低单位产品能耗。

4.3 构建协同集成体系，实现全链条循环

一是推动催化转化工艺与煤制氢主工艺协同集成，在煤制氢装置与催化转化装置之间搭建物料循环通道，将煤制氢过程中产生的富余 H₂ 直接输送至催化转化系统，同时将催化转化后的未反应 CO₂ 循环至煤制氢装置的气化环节，

实现 H₂ 与 CO₂ 的闭环循环，提升资源利用效率。二是融入 CCUS 全链条体系，采用第三代碳捕集技术（如相变溶剂法）对催化转化尾气中的 CO₂ 进行高效捕集，捕集能耗降至 2.2 吉焦/吨以下，捕集成本压缩至 39 美元/吨左右；将捕集后的 CO₂ 再次输送至催化转化系统，实现 CO₂ 的循环转化，整体降碳效率提升至 85% 以上。三是构建多产物联产体系，根据市场需求，灵活调整催化转化工艺参数，实现甲醇、二甲醚、低碳烯烃等产物的联产，提升项目的抗风险能力与经济效益。

5 结论

煤制氢化工尾气 CO₂ 的绿色高效催化转化是行业实现绿色转型的核心路径，也是 CCUS 技术规模化应用的重要场景。当前，甲醇合成法、二甲醚合成法及合成气共转化法等主流工艺已在工业中初步应用，但受催化剂性能不足、工艺参数匹配度低、系统协同性差等因素制约，仍存在转化效率低、成本偏高、稳定性不足等问题。提升煤制氢化工尾气 CO₂ 催化转化效率，需构建“催化剂研发-工艺优化-系统集成”多维度协同体系：通过开发抗中毒、高活性、长寿命的专用催化剂，筑牢技术核心基础；通过精准匹配工艺参数、简化流程与余热回收，降低能耗与成本；通过与煤制氢主工艺协同及融入 CCUS 全链条，实现资源闭环循环与全链条降碳。未来，随着新型催化材料与低碳工艺技术的持续迭代，煤制氢化工尾气 CO₂ 催化转化的经济性与稳定性将进一步提升，有望实现规模化产业化应用。

参考文献

- [1] 程家旭. Cu基催化剂对CO/CO₂加氢合成低碳醇反应性能的研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2023.
- [2] 金雨昕,吴文莉,童嫄,等. 高分散双位点Co物种协同催化CO₂氧化乙烷脱氢制乙烯的研究[J]. 化工学报,2025,76(10):5128-5140.
- [3] 肖婉婧,李文杰,王馨雨,等. Ce-MOFs衍生物CeO₂的制备及其催化CO₂和甲醇合成碳酸二甲酯的性能[J]. 复合材料学报,2025,42(7):3844-3856.
- [4] 强文军,廖多华,王茂林,等. Zn_xZrO催化剂上协同位点用于乙烷C-H键靶向性断裂及CO₂活化[J]. 催化学报,2025,70(3):272-284.
- [5] 李睿,冯鹏飞,李柏男,等. 具有氧空位的多孔超薄NiO纳米片用于光催化CO₂还原[J]. 催化学报,2025,73(6):242-251.

Discussion on Preventive Maintenance Strategy of Key Equipment in Petroleum and Chemical Plant

Qinglin Li

Sinopec Western Sichuan Natural Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611900, China

Abstract

Petroleum and natural gas chemical plants are mostly in continuous operation. Once key equipment experiences performance degradation, it often leads to interlock shutdowns, fluctuations in product indicators, and increased energy consumption. Preventive maintenance is not merely about increasing inspection frequency, but rather combining fault mechanisms, operational loads, and on-site inspection methods to address potential hazards at the “pre-failure” stage within controllable limits. This paper focuses on common equipment such as pumps and compressors in plants, and discusses how to make maintenance activities more aligned with operational realities through hierarchical management, task lists, and closed-loop execution, based on the characteristics of China’s plant inspection and maintenance organization and shutdown window management.

Keywords

petroleum and natural gas chemical industry; facilities; key equipment; preventive maintenance; strategies

石油天然气化工装置关键设备的预防性维修策略探讨

李庆麟

中石化川西天然气勘探开发有限公司, 中国·四川 成都 611900

摘要

石油天然气化工装置多处于连续运行状态, 关键设备一旦出现性能退化, 往往会引起连锁停工、产品指标波动与能源消耗上升。预防性维修并不是单纯增加检修频次, 而是把故障机理、运行负荷与现场可获得的检验手段结合起来, 提前把隐患从“失效前兆”阶段处置在可控范围内。本文以装置常见的泵类、压缩机等设备为对象, 结合中国装置检维修组织方式与停工窗口管理特点, 讨论如何通过分级管理、任务清单与执行闭环, 使维修活动更贴近运行实际。

关键词

石油天然气化工; 装置; 关键设备; 预防性维修; 策略

1 引言

石油天然气化工装置关键设备的运行情况将会直接影响企业的发展, 而预防性维修和管理工作的开展能够从源头上保障设备的高质量运行。关键设备的失效表现常具有隐蔽性与突发性并存的特点。部分现场仍存在“故障后抢修”占比偏高、检修计划与备件准备脱节、重复性拆装带来二次缺陷等问题^[1]。将预防性维修落实到班组层面, 需要把经验做法转化为标准任务, 把“该查什么、查到什么程度、异常如何处置”写清楚, 并在停工检修与在线维护之间建立可交接的边界。因而, 强化实施石油天然气化工装置关键设备预防性管理能够未雨绸缪地消除那些潜在的设备故障隐患。

2 预防性维修概述

预防性维修是指维修人员在设备尚能运行但已出现劣化趋势时, 按照既定周期或状态判断开展检查、调整、清洁、润滑、紧固、校验与计划性更换等活动, 从而避免故障扩大成非计划停机。结合中国石油天然气化工装置的实际, 预防性维修通常由三类任务构成。第一类是按周期执行的基础保养, 例如润滑油脂补充、过滤器更换、紧固件复查与对中复核。第二类是按状态触发的维护, 例如振动、温升、泄漏量与压力波动异常后开展针对性排查。第三类是针对隐藏失效的定期验证, 例如连锁回路、阀门动作与保护装置的功能试验。其关键在于把任务与失效模式对应, 避免“做了很多检查但没抓住问题”。

3 石油天然气化工装置关键设备的预防性维修价值

在装置连续化生产条件下, 关键设备预防性维修的直

【作者简介】李庆麟(1992-), 女, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事动静设备研究。

接价值首先体现在运行波动的可控性上。以泵和压缩机为例,密封、轴承和润滑系统的劣化往往先表现为小幅泄漏、温升与振动上扬,如果在早期通过点检与小修处置,可避免发展为大修甚至连锁停车。其次,预防性维修能降低停工检修的不确定性。装置停工窗口短、交叉作业多,若平时缺少可追溯的检查记录,停工时容易出现“拆开才发现问题”,导致计划外增项与工期挤压。再次,预防性维修有利于减少安全风险暴露,尤其是含硫、含酸介质系统,一旦设备缺陷引发泄漏,后果往往超过单纯经济损失,设备完整性管理也明确要求企业建立检查、测试与预防性维修的制度化安排^[2]。最后,从成本结构看,合理的预防性维修可以把费用从抢修加班、事故处置与紧急采购,转移到可计划的备件周转与小修资源配置,使班组工作节奏更稳定。

4 石油天然气化工装置关键设备的预防性维修策略探讨

4.1 分级点检与缺陷闭环策略

石油天然气化工装置的关键设备预防性维修宜以失效后果为主线建立分级点检体系,将巡回检查、周期测量与拆检分层组织,并与缺陷闭环同步运行。分级可按介质危害、停产损失及设备条件确定,点检条目需可观察、可量化、可追溯,现场用点检卡和缺陷单统一记录。缺陷分为提示、一般、紧急三级,对应跟踪观察、限期消缺和立即停用处置,修复后按验收准则复核并更新基准数据。以贫溶剂泵为例,交接班点检由操作员与设备员共同完成,围绕密封腔滴漏、轴承座温升、出口压力稳定性和电机电流波动逐项确认,并复查振动趋势变化,并检查底座螺栓、对中标志、润滑油位及油质。若滴漏由间断转为连续成线,或轴承温度较前次明显升高,班组应立即挂牌并补充记录工况、阀位、旁通状态和异音部位,同时复核泵入口过滤器压差与冷却水流量。紧急缺陷在原因未明前先降负荷或切换备用泵,必要时停泵隔离。周度点检拆护罩检查联轴器弹性体磨损与紧固件松动,复测地脚螺母扭矩,核对机封冲洗管路回流是否顺畅,并核对轴承加脂周期与油窗清洁,同时进行备用泵短时切换,观察启停迟滞与止回阀回落。月度或季度计划停泵时清理过滤器,检查吸入管支吊架受力及软接状态,拆检冲洗节流孔堵塞和密封辅助件老化,轻微拉伤处修磨或更换,并按程序复位对中与管线应力支撑。消缺完成后必须先盘车与灌泵确认无卡滞,再带负荷试运不少于30 min,连续记录泄漏量、温升、压力与电流,验收后将数据写入点检基准表,并由操作、设备、工艺三方签字后关闭缺陷^[3]。

4.2 润滑与密封系统的预防维护策略

石油天然气化工装置的关键设备的预防性维修应把润滑与密封视为可单独退化的功能系统,管理重点从是否故障转为是否偏离基准。现场以油压、油温、过滤压差与泄漏量建立运行窗口,并按运行小时与停机窗口实施状态确认、

部件清洁和连锁校验,确保退化在早期被截获。对油品清洁度、含水与密封气洁净度设定入厂与运行限值,并将异常分为劣化、污染与供给不足三类处置。以装置空气压缩机为例,班组每班核对油箱液位、供油总管压力及过滤器压差,压差接近限值时先更换滤芯并检查旁通阀卡滞,避免杂质循环。回油温度连续偏高时,优先检查油冷却器结垢及水侧流量,必要时对冷却器反冲洗,同时复核风机皮带张紧度。油池温度宜控制在80℃左右,出现温升突变需核对轴承回油是否畅通并检查排油阀是否有效。按计划每1000至2000小时取样,关注黏度、含水与机械杂质,并结合补油量判断是否存在内漏或挥发损失。对于气密封或填料密封,运行中记录密封气压力、端面温度及排放量趋势,排放量上升时先排查密封气过滤器与稳压装置,再检查隔离气供给和放空管阻塞,必要时校核密封泄漏监测孔的畅通性。每次停机窗口清洗油站吸油滤网,检查回油管路及集油槽沉积物,联动试验低油压停机与高温报警动作,确认动作值与延时一致。机组出现轻微喘振或流量波动时,同步检查入口过滤器堵塞和进气阀响应。处理后分阶段加载复核油压、油温、压差与振动并记录。

4.3 热工设备的停开炉前检查策略

石油天然气化工装置的关键热工设备的预防性维修应以停开炉窗口为主线,通过状态确认、缺陷隔离与复位验证把风险前移。现场可将炉体承载、燃烧供给、耐火衬里三类要素拆分成可判定条件,并与开炉许可绑定,任何一项不满足即保持停炉状态。检修班组应对遗留缺陷设置隔离标识并完成复点确认。作业中坚持先冷却后检查、先修复后升温、先通风后点火的顺序,避免热应力叠加与带病投料。以克劳斯炉为例,停炉后将炉膛温度降至规定范围,确认残余可燃气体已置换,再按路线检查炉门、观察孔、烟道接口及人孔盖的密封面,重点处理法兰垫片烧蚀、螺栓松动和保温层塌陷引起的漏风,并复查炉壳焊缝与支座有无变形。随后对燃烧器拆检,清理喷嘴积炭与结盐,检查燃料过滤器与回火防止件,校正点火电极间隙,核对燃料切断阀与调节阀动作灵活性,擦拭火焰检测器视窗并完成冷态点火试验^[4]。炉膛内壁与拱顶采用目测结合敲击识别空鼓、剥落和裂纹扩展,对局部脱落处补抹耐火料,按工艺烘干固化后再复测。烟道侧检查膨胀节波纹完整性、导向支座与滑动支吊架行程,消除卡阻并确认热胀余量,同时清理灰尘与硫凝物,保证排烟通道畅通。开炉前对燃料管线排凝与吹扫,检查压力表指示与安全阀铅封完好,确认助燃风机入口滤网清洁,再复核燃料与助燃风的配比与压力,确认引风机、风门及挡板位置正确,再分段升温,升温过程中沿炉壳布点测温并记录温差,出现异常热点或升温过快时立即降负荷,回查衬里修补区与漏风点,确认稳定后再继续升温。

4.4 备机轮换与机会检修策略

石油天然气化工装置的关键设备的预防性维修应把

运行冗余转化为可控的检修窗口,通过备机轮换降低单台连续服役时间,并在切换后的短停期实施机会检修,形成班组可执行的轮换计划。轮换周期需结合工况波动、密封寿命与润滑状态确定,切换步骤要以工艺稳定为约束,检查项目按外观、对中、密封、轴承与保护回路分层执行,缺陷处置以可外部完成、可快速复位为原则。以贫溶剂泵为例,轮换前班组先核对备用泵入口滤网压差、盘车阻力和密封冲洗流量,确认入口阀全开、出口阀处于小开度,冷却水与润滑油位在允许范围。同时检查吸入压力与气蚀征兆,必要时在泵壳排气阀处排尽空气。启动备用泵后先观察电流与振动变化,待出口压力稳定并与系统压力偏差小于设定值,再缓慢关小运行泵出口阀并停运行泵,避免吸收塔液位出现突跳。停泵后先保留联轴器护罩进行目视复查,检查轴端甩油、护罩内磨屑、底座螺栓松动和基础裂纹,并用测温枪测轴承端温升是否有滞后升高。机会检修优先处理密封冲洗滤芯更换、回油节流孔清理、填料函预紧和机械密封冲洗嘴疏通,同时复核联轴器对中并更换老化弹性垫块。对轻微渗漏但未超限的密封,维修人员先调整压盖或补充冲洗介质,使渗漏保持稳定,再记录单位时间渗漏量、泵壳温度和轴承噪声作为下次轮换的跟踪指标。处理完成后进行短时带压试车,确认无异音、无异常温升、出口压力恢复正常,保护装置投入状态正确。试车合格后将该泵置于备用位,排净泵体积液并按规定盘车,挂牌注明检修内容、日期与下次轮换建议。

4.5 检修质量控制与复装验收策略

关键设备预防性维修应以失效机理和风险排序为主线,先确定影响安全与连续运行的薄弱环节,再把检修工序、测量项目和允收范围固化为作业包。现场必须做到拆前记录可追溯、拆中尺寸可复核、复装后性能可验证,并用分级验收把个人经验转化为可执行标准。预防性维修不追求过度拆检,而是以关键件状态确认和复位完整性为边界,控制检修窗口内的变更数量。以硫磺回收装置克劳斯炉为例,检修前先核对炉膛衬里温度与压降趋势,结合停工计划确定开箱范围和备件清单。拆解时对燃烧器、混合器、观火孔、热电偶套管逐件编号,记录紧固件规格与力矩方向,保留原始间隙值和定位基准^[5]。清理后对炉壳内壁腐蚀点、衬里脱落区进

行划线标记,测量炉口同心度、喷嘴伸出量、火焰稳定器偏心量,数据直接写入作业包并由检修与工艺双签。复装阶段先处理衬里,按分层烘干制度控制升温速率,关键部位采用同批次材料并检查含水率。随后安装燃烧器与配风部件,按图纸复核喷嘴角度和中心线,使用塞尺复测间隙,螺栓按对角分步上紧并复核终拧力矩。验收时除外观与尺寸外,还要做冷态密封试验,确认人孔、法兰无渗漏,点火前完成吹扫和阻火器检查。开车后以炉前后压差、尾气含硫和火焰形态作为复装验证点,发现偏差立即停稳复测。现场质量控制还应落实量具周期检定,力矩扳手、塞尺、激光对中器使用前核验零点,避免测量误差带入复装。对更换的炉管、导向件和支撑件执行到货复验,核对材质标识与尺寸公差。焊补部位完成外观检查后进行渗透或磁粉复查,并对膨胀节和柔性密封件做压缩量确认。每个关键工序设置见证点,未签字不得转序。

5 结语

石油天然气化工装置关键设备的预防性维修,应当以失效模式为主线,将点检、维护、试验与计划性检修组合成可执行的任务体系,并通过缺陷闭环与复装验收确保措施有效落地。现场实施时需要尊重装置连续运行、停工窗口紧张与班组资源有限的现实条件,把关键检查做到“少而准”,把处置动作做到“短而稳”,从而在不增加过度拆装的前提下实现运行风险的前移控制。

参考文献

- [1] 丁仕勇. 机械设备维护管理中的预防性维护策略研究[J]. 你好成都(中英文), 2023(26):0103-0105.
- [2] 折磊, 李诚华, 李魁委, 等. 化工设备预防性维护的降本增效价值[J]. 中国化工贸易, 2025(14):73-75.
- [3] 高峰. 钻井设备预防性维护对安全生产与经济效益的影响分析[J]. 中国化工贸易, 2025(31):45-47.
- [4] 倪令芹. 预防性维护在海洋石油工程设施中的实践探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025(9).
- [5] 刘宇航. 施工装置危险源识别与预防在石油化工安全管理中的应用[J]. 中国石油和化工, 2025(7):69-70.

Evaluation of the Effectiveness of Safety Training for Gas Station Employees and Optimization of the Curriculum System

Jianguo Wang

China Petrochemical Corporation Hebei Petroleum Branch, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

Gas stations belong to a flammable and explosive industry, and their networks have been widely popularized. Currently, the gas station market is approaching saturation, and the main theme of industry development is shifting from incremental growth to optimization of existing assets and comprehensive improvement. Safety operation ensures the safety of existing assets at gas stations, protects the lives of employees, and safeguards public safety. Currently, China lacks evaluation standards for gas station safety training, leading to a lack of targeted training courses and ineffective transformation of training into safety protection capabilities for gas station employees, failing to meet the needs of optimizing existing assets and comprehensive improvement. This paper, combining the characteristics and transformation trends of gas stations, discusses the current shortcomings in training and proposes countermeasures, aiming to provide theoretical and practical basis for gas station safety training, support the optimization and comprehensive improvement of existing assets, and reduce the occurrence of safety accidents at gas stations.

Keywords

gas station; safety training; effectiveness evaluation; curriculum system optimization; existing optimization; comprehensive upgrade

加油站员工安全培训的有效性评价及课程体系优化

王建国

中国石化股份有限公司河北石油分公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

加油站属于易燃易爆行业, 加油站的网络已经广泛普及, 目前加油站市场趋于饱和, 行业发展的主旋律正从增量转向存量优化和全面提升。安全操作加油站存量资产的安全, 保障员工生命安全, 保障人民的安全。目前我国加油站安全培训缺乏评价标准, 导致加油站安全课程缺乏针对性, 培训无法有效转化为加油站员工的安全防护能力, 无法满足加油站存量优化和全面提升的需求。本文结合加油站特点和转型趋势, 探讨目前培训的不足, 从而提出对策, 以期为加油站安全培训, 支撑加油站存量优化和全面提升, 降低加油站安全事故发生提供理论依据与实践依据。

关键词

加油站; 安全培训; 有效性评价; 课程体系优化; 存量优化; 全面升级

1 引言

随着我国交通运输和石油化工行业的迅速发展, 加油站网络覆盖已实现广泛渗透, 市场趋于饱和, 行业发展的主旋律已从数量扩张转向存量优化与全面升级。加油站供应的汽油、柴油等产品属于易燃、易爆危险化学品, 卸油、加油、储油等生产操作环节易发生火灾、爆炸、泄漏等生产安全事故, 将对人员伤亡、财产损失造成不可挽回的影响。目前我国加油站生产安全事故时有发生, 经分析, 部分从业人员安全责任不落实、操作不规范、应急处置不正确的根本原因是

安全培训无效。安全培训是提高员工安全素质、规范操作行为、防范安全风险的重要举措, 更是支撑行业存量优化与全面升级的核心保障。然而, 当前加油站安全培训仍处于“重形式, 轻内容”的阶段, 大部分安全培训课程千篇一律、流于形式、重灌输轻互动、重结果轻评价, 导致培训流于表面、收效甚微, 难以满足存量优化中对员工能力提升的需求。因此, 建立科学的培训有效性评价体系, 找出培训的“病根”, 有的放矢地优化课程体系, 实现安全培训从“形式化”到“实效化”转变, 是适配行业存量优化与全面升级趋势、完善加油站安全管理工作亟待解决的问题。文章结合加油站行业特性及转型发展需求, 以分析加油站员工安全培训需求为切入点, 重点探讨加油站安全培训有效性评价及课程体系优化。

【作者简介】王建国(1975-), 男, 工程师, 从事加油站施工管理及安全监管研究。

2 加油站员工安全培训有效性不足的现状分析

2.1 评价体系不完善，缺乏闭环管理

目前，许多加油站的安全培训评估仍然局限于反应层和学习层，主要通过简单的问卷和笔试来进行，而对于行为和结果层的评价则仅仅停留在表面。有相当一部分员工认为加油站只是一个加油场所，没有必要进行系统全面的培训。有些加油站在培训结束后并未建立有效的跟踪和督查机制。这导致他们不清楚受训者的操作习惯是否有所改进，是否达到了优化后的新岗位标准。由于缺乏跟踪数据的支持，他们无法通过数据分析来识别培训中的不足，并为培训提供改进的指导。因此，培训、评估和改进的过程并不能形成一个完整的循环，培训的效果也不能持续地得到提升，以满足行业的持续发展需求。目前，我国大部分成品油企业还未建立完善的加油站员工培训体系，培训内容与管理脱节，培训方式单一。此外，现有的评估标准并不具有明确的方向性，当不同的职位使用相同的评估准则时，它们既不能充分理解各职位所遭遇的风险差异，也不能满足存量优化过程中各职位的升级要求，因此不能突出培训的核心内容。

2.2 课程体系同质化，贴合度不足

首先，培训内容呈现出分层设计的不足，新加入的员工与资深员工在培训内容上的差异并不显著。新入职的员工很难迅速适应经过存量优化的基础操作流程，而资深员工则缺少与技能升级相匹配的进阶内容，管理层也缺乏专门针对管理能力提升的培训课程；其次，由于内容更新缓慢，一些加油站的培训教材多年未有更新，甚至仍然采用了几年前的资料。这导致在存量优化过程中引入的充电桩、智能仪器设备等新设备的操作规范，以及新设备带来的新风险，培训内容要么缺失，要么涉及很少，无法满足全面升级的技术需求；对员工进行知识梳理和系统提升时存在重复学习问题，造成企业人力资源成本浪费。第三个问题是，理论与实际操作之间存在断层，课程主要侧重于理论讲解，实际操作课程的比例相对较低。部分实际操作课程与经过优化的岗位需求不一致，这导致了员工在“理论知识掌握但实际操作能力不足”的情况下，难以将培训内容转化为支持行业升级的实际技能。

2.3 教学方法单一，员工参与度低

加油站的安全培训主要依赖于“灌输式”的课堂授课和视频观看，这种教学方式过于单调，缺少了学生的互动和实际体验。为提升学员学习兴趣及效果，需引入情景模拟法进行现场教学。加油站的工作人员主要是前线操作人员，他们的教育水平相对较低，对于纯粹的理论解释的接受度也不高，因此容易产生反感情绪；部分企业开展了以事故案例分析为主线的体验式学习，但由于受场地条件限制，学员只能通过观摩来获得相关知识与技能。另外，由于培训中缺少模拟练习和沉浸式的教学方法，员工很难真正感受到安全事故带来的风险，他们的应急处理能力也没有得到充分的培训，

因此难以满足优化后的复杂场景下的紧急需求。目前加油站普遍存在着员工安全意识淡薄，现场操作失误率偏高的问题。另外，由于培训时间的不合理安排，员工大多数时间都是在休息时间之外，经过一整天的高强度工作后，他们的精力会大大减少，参与度和学习效果也会大打折扣，这使得他们很难实现提升能力和支持行业升级的培训目标。

3 加油站员工培训体系优化策略

3.1 培训内容优化

存量优化和全面升级对加油站来说，培训课程的优化匹配至关重要，直接关系到加油站员工科学规范培训，因此，培训课程内容的优化显得尤为重要。当前成品油零售行业竞争激烈，只有科学合理的对存量运营人员的作业和行业升级培训，才能使培训真正起到良性促进作用，因此对培训课程的优化匹配是必不可少的。特别是知识技能类的课程要强化优化和匹配。并注重理论和实践的结合。成品油零售行业竞争升级对加油站员工的培训要涵盖新技术、新设备、新工艺的相关知识和要求。如针对智能加油机的操作、维护、安全、风险防范等知识和充电桩、扫码支付、刷卡支付等在线支付方式方面的知识和要求；电动汽车会带来大量的电动汽车充电服务的需求，对电动汽车充电工具如铁锹、撬棍、钳子、绝缘杆、绝缘手套、绝缘靴等工具的使用和维护保养等相关知识和要求。安全知识和技能培训强化是必不可少的。加油站日常经营和学习培训结合设计课程，针对加油过程中顾客投诉、安全事故防范等案例，结合具体的数据和场景（xx加油站，优化顾客加油服务流程后，顾客平均排队时间由4分钟下降到3分钟，下降30%），设计相关理论和技术的课程。采用角色扮演法，设计员工在存量运营中的管理场景，增强培训针对性和实效性，增强学习动机，帮助员工将所学知识迁移应用于工作中，提高工作效率、服务质量和安全操作水平，适配行业升级需求。

3.2 培训方式创新

为提升员工整体素质，支撑行业存量优化与全面升级，需采用高效的培训方法。可采用仿真、体验式培训，借助各类媒体手段，将企业文化与安全知识融入加油站日常运营管理场景，让员工身临其境感受操作规范；结合存量运营的真实性，增设模拟加油、突发事件应急处置等仿真展示活动，帮助员工熟练掌握正确操作流程。通过情境式教学法，推动员工将所学知识转化为实践能力，增强培训效果；开展角色扮演类培训课程，模拟投诉处理、团队协作等存量运营中的常见场景，每组员工进行5-10分钟模拟练习，强化实际操作能力。此外，创新培训形式，将传统面对面培训转为线上培训，充分发挥互联网及远程教育技术优势，构建在线学习平台，实现人人参与的培训模式。线上教学以“微”为单元，通过碎片化知识片段提升学习效率，员工可借助移动工具随时随地学习；平台可整合视频讲座、在线问答、模拟测试等

多样化多媒体内容,确保培训生动实用;同时,借助移动工具实时跟踪评估学习成果,员工可自主选择感兴趣的知识点学习并上传学习成果。这种灵活便捷的培训方式不仅能满足员工个性化需求,还能将学习效率提升 20% 以上,降低培训时间和成本,适配存量优化中的高效管理需求。

3.3 培训评估体系完善

要高效开展培训、支撑行业存量优化和全面升级,关键在于改进培训评估机制。面对行业升级带来的培训需求提升,制定包括知识、技能、态度等方面的评估准则,建立评估体系。以笔试评估掌握知识的情况,要求通过率不低于 80%;以全方位的操作实践评估技能水平,保持达标率在 90% 以上(尤其是与行业升级密切匹配的操作技能,如新操作设备、复杂场景的应急处置等);以日常工作中观察或 360 度评估法(汇总上级、同事、客户等各方面的评估意见)评定员工的工作态度,衡量其对存量优化和行业升级的贡献度。同时建立周期性的考核机制,每 3 个月或半年对员工的工作效率、服务效果、安全操作等情况进行评估,针对不同岗位对存量优化的不一样要求制定科学的评估标准。这种周期性的评估,一方面可以及时发现培训和实际工作之间的差距,另一方面可以激励员工不断学习进步,从而确保培训效果长期而有效地转化为支撑行业升级的能力。

3.4 培训后续跟踪与指导

在培训结束后进行的持续指导,确保了培训成果的最大化,同时也支撑了行业的持续优化和全方位的提升。目前,很多企业培训效果的评估重视不够,没有建立有效的培训跟踪引导体系。经过调查研究,我们发现绝大多数的员工都希望得到有条理的培训与指导。对企业而言,做好员工的跟踪引导工作十分重要。在培训结束之后,我们需要建立一个跟踪和指导机制,由经验丰富的培训师和管理人员每周与员工进行一次交流,每月也与员工进行一次面对面的交流,以了解他们在现有经营、新设备操作以及全面升级后的服务流程等方面的疑惑;我们会定期组织各种沟通和交流活动,对员工的培训需求和问题进行收集、整合和分析,并为他们提

供操作指南、答案和解决策略等必要的支持;组织学习交流小组,让他们分享自己的实践经验,并与公司其他部门进行合作交流。协助他们更好地理解 and 掌握所学的知识。针对不同岗位人员制定差异化的个性化培训计划,满足不同员工的学习需求。与此同时,员工接受的培训与他们的绩效奖励是相互关联的,我们会及时通知他们评估的结果,以鼓励他们持续进步。建立“一对一”跟踪指导机制,根据不同岗位要求对每个人进行针对性培训或考核。借助这些持续的跟踪和指导机制,企业能够全方位地了解员工的工作状况,及时识别并解决员工在工作中可能遇到的问题,确保培训成果能够真正实现,并支持员工的能力与行业的长期运营和全面升级需求相匹配,以实现培训效果的最大化。

4 结语

从一个更广泛的视角出发,对加油站工作人员的培训体系进行细致的优化和效果评价,不仅有助于提升员工的专业技术和服务质量,还能增强他们的归属感和满意度。本研究在深入探讨和分析当前培训体系中存在的问题后,提出了一套全面的培训体系的改进策略和实施的保障措施。优化后的培训体系更加契合行业发展的存量优化和全面升级的趋势,能够更好地满足员工的实际工作需求,具备内容丰富实用、培训方式多样灵活、评估机制科学健全、后续跟踪引导及时高效的特点。

参考文献

- [1] 张宇炜.加油站安全管理策略探究[J].现代职业安全,2024,(06):55-56.
- [2] 许贵龙.成品油零售企业加油站员工培训体系建设简析[J].中国科技投资,2024,(15):154-156.
- [3] 唐丽.新时代如何做好加油站综合工时管理的工作[J].活力,2023,41(24):100-102.
- [4] 吕铭.浅谈加油站油品损耗管理[J].车用能源储运技术,2023,1(06):91-98.
- [5] 何一帆.加油站内控风险的防治策略[J].化工管理,2023,(32):99-101.

Effect of Surface Treatment on Properties of Biaxially Tensile Polypropylene Film

Lanbo Luo

Zhongshan Yongning Thin Film Materials Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract

This study investigates the effects of different surface treatment methods on the dielectric properties and surface energy of biaxially oriented polypropylene (BOPP) films. Three surface modification techniques—electrode treatment, flame treatment, and chemical coating—were applied to BOPP films, followed by measurement and analysis of their dielectric constants and surface energy. Experimental results demonstrate that all three methods can improve the electrical performance and wettability of the films to varying degrees, with electrode treatment showing the most significant enhancement in both dielectric constant and surface energy. Flame treatment and chemical coating also exhibit notable modification capabilities. The findings provide theoretical foundations and technical support for the application of BOPP films in high-adhesion and high-insulation fields such as electronic materials and functional packaging.

Keywords

biaxially oriented polypropylene film; surface treatment; electrode treatment; flame treatment; chemical coating

表面处理对双向拉伸聚丙烯薄膜性能的影响

罗兰博

中山永宁薄膜材料有限公司, 中国·广东 中山 528400

摘要

本研究探讨了不同表面处理方法对双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)介电性能和表面能的影响。采用电极处理、火焰处理和化学涂层处理三种方式对BOPP薄膜进行表面改性,并对其介电常数和表面能进行测试与分析。实验结果表明,三种处理方法均能在不同程度上改善薄膜的电气性能和润湿性,其中电极处理效果最为显著,在提升介电常数和表面能方面均表现优异。火焰处理和化学涂层处理也显示出良好的改性能力。研究结果为BOPP薄膜在电子材料、功能包装等高附着性与高绝缘性应用领域的推广提供了理论依据与技术支持。

关键词

双向拉伸聚丙烯薄膜; 表面处理; 电极处理; 火焰处理; 化学涂层

1 引言

聚丙烯(Polypropylene, PP)薄膜作为一种重要的塑料材料被广泛应用于包装、电子、医疗和建筑等多个领域特别是双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP),因其良好的机械强度、透明性和抗化学性,成为了包装行业中最常用的薄膜之一。双向拉伸技术在纵向和横向方向上同时拉伸薄膜,使其分子链的排列更加有序,可以很好地提升薄膜的力学性能和热稳定性,虽然BOPP薄膜在多方面表现出优异的性能,但在实际应用中薄膜的表面性质仍然限制了其进一步的使用和开发。

表面处理技术作为改善材料表面性能的有效手段,目

前被广泛应用于聚丙烯薄膜的生产过程中。对薄膜表面进行处理可以显著提高薄膜的附着力、印刷性、透气性等关键性能,满足不同应用需求。常见的表面处理方法包括等离子体处理、激光处理和化学涂层等。这些方法能够在不改变薄膜内部结构的情况下优化其表面特性,使其在高性能需求的领域中具有更广泛的应用前景。

本论文研究表面处理对双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)介电性能与表面能的影响。对比电极处理、火焰处理和化学涂层处理三种方式下薄膜性能的变化,系统分析了表面改性工艺对薄膜电气性能和润湿性的改善效果。本研究为BOPP薄膜在高绝缘性与高附着性等应用场景中的优化与拓展提供了理论支持与实践指导。

2 理论背景与文献综述

2.1 双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)的基本特性

双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)是将聚丙烯在纵向和横

【作者简介】罗兰博(1992-),男,中国湖南浏阳人,本科,工程师,从事高分子材料加工研究。

向上同时拉伸制成的薄膜。双向拉伸使薄膜分子链排列更加有序可以很好地提高其拉伸强度、透明性、热稳定性和抗化学性。BOPP 薄膜具有较高的机械强度、耐化学腐蚀性和较强的抗紫外线能力，被广泛应用于食品包装、药品包装和日用消费品包装。但是 BOPP 薄膜的表面能较低，导致其与油墨和胶水等材料的附着力较弱，限制了其在某些高附着力要求的应用中的表现。

2.2 表面处理技术

表面处理技术用改善 BOPP 薄膜的表面特性，可以很好地提高其附着力、润湿性和印刷性。常见的处理方法包括等离子体处理、激光处理和化学涂层处理。等离子体处理引入极性基团，可以很好地提高薄膜表面能和增强其与其他材料的附着力。激光处理用激光束改变薄膜表面结构，可以很好地提升其粗糙度和提高薄膜的附着力和印刷性。化学涂层处理用涂覆一层化学物质可以改善薄膜的耐磨性和抗紫外线能力。

2.3 表面处理对 BOPP 薄膜性能的影响

表面处理显著改善了 BOPP 薄膜的多个性能特别是在附着力、热稳定性和电气性能方面。等离子体处理可以很好地提高薄膜的拉伸强度和表面能，激光处理可以改善薄膜的表面粗糙度并增强附着力，化学涂层则提高了薄膜的耐磨性和抗紫外线能力。表面处理使 BOPP 薄膜更加适用于高性能应用领域。

2.4 研究现状

近年来，双向拉伸聚丙烯薄膜（BOPP）因其优异的物理性能在电子、电气、包装等领域得到广泛应用，但其表面能低、电气绝缘性有限等问题限制了其在高性能场景中的应用。针对这些问题，研究者逐渐将注意力转向表面处理对 BOPP 薄膜介电性能和表面能的优化。

卢洪超等（2023）指出，双向拉伸过程可提高聚丙烯薄膜的结构有序性，为表面改性处理提供稳定的物理基础^[1]。张心悦（2021）在研究多层结构聚丙烯薄膜的储能性能时发现，表面结构的微观变化直接影响介电常数的稳定性和提升空间^[2]。平江波等（2022）进一步证实表面改性手段能够显著改善 BOPP 薄膜的介电储能特性，其中薄膜表层极性基团的引入尤为关键^[3]。

目前应用较多的三种处理方法为电极处理（如电晕放电）、火焰处理和化学涂层处理。电极处理可在薄膜表面引入极性官能团，提升表面能并增强其介电性能；火焰处理利用高温燃烧作用使表面活化、粗糙度增加，有助于提高润湿性；而化学涂层处理则通过功能涂层的包覆赋予薄膜更高的绝缘性和界面粘附性。李泽普（2021）通过研究镀铝 BOPP 膜的发雾问题指出，表面能的不足是导致界面失稳的主要因素^[4]，李永红、蔡妹妹（2021）则认为提升表面能是改善印刷适性和图像还原度的重要途径^[5]。

3 实验方法

本研究采用电极处理、火焰处理和化学涂层处理三种方式对双向拉伸聚丙烯薄膜（BOPP）进行表面改性，并测试不同处理方法对其介电性能和表面能的影响。实验包括材料准备、处理工艺设置、性能测试和数据分析等步骤。

3.1 实验材料

实验中使用的 BOPP 薄膜为工业级产品，厚度为 30 μm ，宽度为 10cm。所有薄膜样品初始表面未经任何处理作为对照组。薄膜的选择基于其在包装和电子领域中的广泛应用。

3.2 表面处理工艺

电极处理：采用电晕处理装置，处理电压为 10kV，频率 20kHz，处理时间 30 秒。该方法通过放电在薄膜表面引入极性基团，提升其表面能和电气性能。

火焰处理：采用丙烷-空气火焰处理系统，火焰温度控制在 1100°C 左右，处理速度为 3cm/s，处理距离为 1cm，单面处理。火焰热效应可破坏疏水结构并重塑表面官能团。

化学涂层处理：采用 5% 聚乙烯醇（PVA）水溶液进行喷涂，控制涂层厚度约 0.5 μm ，经热风干燥（60°C，10 分钟）形成均匀致密的功能层。

3.3 测试方法

为评估不同表面处理方法对 BOPP 薄膜介电性能和表面能的影响，本研究采用以下测试方法。

介电常数测试：使用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪对处理前后样品进行介电常数测量。测试频率范围为 1kHz 至 1MHz，测试温度为 25°C，每种样品测试三次取平均值。测试电极采用标准平行板结构，确保测试过程中的均匀接触与重复性。

表面能测试：采用接触角测量仪（Dataphysics OCA 20），通过在薄膜表面滴加蒸馏水和乙醇，测量其静态接触角。然后利用 Owens-Wendt 法计算样品的表面能总值及其极性和色散分量。每种样品测量 5 个点，取平均值以提高准确性和代表性。

3.4 数据分析方法

所有实验数据均进行三次独立测试，结果用均值和标准差表示。用方差分析（ANOVA）评估不同表面处理方法对各项性能指标的影响要是 P 值小于 0.05，认为差异具有统计学显著性。用数据分析可以很好地评估表面处理对介电常数和表面能的改善效果。

4 数据分析

本章将基于实验数据，深入分析表面处理对双向拉伸聚丙烯薄膜（BOPP）性能的影响。用实验数据展示、统计分析以及讨论，评估不同表面处理方法如何改善 BOPP 薄膜的电气性能以及表面能。所有实验数据均来自三次独立实验，且用统计分析确保结果具有显著性和准确性。

4.1 介电常数分析

介电常数是衡量材料电气性能的关键参数之一，直接反映其在外加电场作用下的极化能力，对于电气绝缘材料与电子器件封装材料而言具有重要意义。原始 BOPP 薄膜的介电常数普遍较低，限制了其在高频、高绝缘需求场景下的应用，因此表面处理技术的引入被认为是一种有效的提升路径。

实验结果表明，经不同处理方式处理后的样品介电常数均较未处理样品显著提升，具体数值如下：

表 3-1 不同表面处理方式对 BOPP 薄膜介电常数

表面处理方式	初始介电常数 (ϵ)	处理后介电常数 (ϵ)	变化 (%)
未处理	2.1	2.1	-
电极处理	2.1	2.7	28.6
火焰处理	2.1	2.5	19.0
化学涂层处理	2.1	2.4	14.3

方差分析结果显示，处理方式对介电常数的影响具有显著性 ($P = 0.027 < 0.05$)。其中，电极处理效果最为显著，其介电常数从 2.1 提升至 2.6，增幅高达 23.8%。电极处理主要通过高压电晕放电在薄膜表面引入大量极性基团，如羟基、羧基等，这些基团能增强分子极化能力，从而提高整体介电响应。火焰处理则通过高温作用引起表面分子链的定向重排和轻度氧化，同样增强了极性特征，使介电常数提升 19%。化学涂层处理所形成的 PVA 涂层具备较好的电绝缘性，提升幅度虽小于前两者，但仍达到 14.3% 的提升，说明其在改善电气性能方面也具有实用价值，特别适用于薄膜电容器、低压绝缘薄膜等应用场景。

4.2 表面能分析

表面能是衡量材料润湿性、粘接能力及其界面亲和力的核心指标。由于 BOPP 材料本身疏水性较强，表面能低，在实际应用中常导致油墨不附着、复合材料分层等问题。通过合适的表面处理方式提升表面能，可有效改善其与油墨、胶黏剂、金属层等材料的界面兼容性。

各处理方法对 BOPP 薄膜表面能的影响如下表所示：

表 3-2 表面处理前后薄膜对比

表面处理方式	初始表面能 (mN/m)	处理后表面能 (mN/m)	变化 (%)
未处理	35.2	35.2	-
电极处理	35.2	47.0	33.0
火焰处理	35.2	43.5	23.6
化学涂层处理	35.2	41.2	17.0

方差分析结果 P 值为 0.018 (< 0.05)，说明三种处理方式对表面能的提升均具有统计学显著性。其中，电极处理

同样表现最佳，其显著提升主要源于表面极性官能团的生成，极大地改善了 BOPP 薄膜对水性和极性溶液的润湿能力。火焰处理在高温作用下破坏了原有疏水结构，同时引入少量含氧基团，使表面能提升 22.4%。化学涂层处理通过在表面构建一层均匀的亲水性高分子涂层（如聚乙烯醇），显著改善了润湿性，适用于后续复合和印刷工艺的需求。

综合分析，电极处理在提升 BOPP 薄膜的介电性能与表面能方面均展现出最优效果，适用于高端包装、电绝缘、印刷基材等对功能性要求较高的应用领域。火焰处理虽然略逊一筹，但因设备简单、处理效率高，在工业连续化生产中具有实际可操作性。化学涂层处理则适合对热敏感、对界面功能层有特殊要求的薄膜系统，具有较强的拓展潜力。

综上，三种表面处理方式均能显著改善 BOPP 薄膜的电气性能和表面润湿性能，但应结合应用场景选择最优处理方案，以实现性能与成本之间的平衡与优化。

5 结论

本研究通过电极处理、火焰处理和化学涂层处理三种方式，对双向拉伸聚丙烯薄膜（BOPP）进行表面改性实验，重点评估不同处理方法对其介电性能和表面能的影响。实验结果表明，三种表面处理均能显著改善 BOPP 薄膜的电气性能和表面润湿性。其中，电极处理效果最为显著，介电常数提升达 23.8%，表面能提升 32.9%，在提高薄膜极化能力与界面附着力方面表现优越。火焰处理和化学涂层处理也在不同程度上提升了薄膜性能，尤其适用于需要提高印刷适性、粘附能力等功能的应用领域。

综合比较结果，建议在电气绝缘、功能膜材等对电气性能要求较高的应用中优先采用电极处理；而在对热稳定性要求不高但需改善附着力的场景中，火焰处理与化学涂层处理可作为高效、经济的替代方案。未来可进一步在处理参数优化与多种技术协同组合方向开展深入研究，以拓展 BOPP 薄膜在智能包装、新能源器件等领域的应用潜力。

参考文献

- [1] 卢洪超, 徐萌, 权慧, 等. 双向拉伸过程中聚丙烯薄膜结构与性能的演变[J]. 塑料工业, 2023, 51(09):82-87+155.
- [2] 张心悦. 多层结构聚丙烯薄膜储能特性的研究[J]. 湖南电力, 2021, 41(06):17-21.
- [3] 平江波, 冯启琨, 郑明胜, 等. 表面改性聚丙烯薄膜的制备与介电/储能特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(05):49-55.
- [4] 李泽普. 双向拉伸聚丙烯薄膜镀膜发雾问题分析[J]. 石油化工, 2021, 50(09):905-909.
- [5] 李永红, 蔡妹妹. 影响双向拉伸聚丙烯薄膜凹印色彩还原的因素[J]. 塑料包装, 2021, 31(06):5-9.

Research on Chemical Equipment Manufacturing Technology Based on Green Manufacturing

Bin Huang

China National Petroleum Corporation No.6 Construction Co., Ltd., Guilin, Guangxi, 541000, China

Abstract

Promoting the transformation of the manufacturing industry towards a sustainable development model has become a consensus for global industrial upgrading. Nowadays, the concept of green manufacturing is gradually penetrating into traditional industrial fields, and it also plays a key guiding role in the high energy consumption and high emission chemical equipment manufacturing industry. As the material carrier of chemical production, chemical equipment has increasingly become the focus of industry technological innovation by applying principles such as green design and clean production to its entire manufacturing process. In response to resource consumption and environmental pollution issues, before delivering equipment for use, it is necessary to systematically consider raw material selection, process design, and scrap recycling to minimize environmental impact, in order to build a sustainable manufacturing future. This article focuses on the manufacturing process of chemical equipment, mainly exploring the technical path and implementation strategy of integrating green manufacturing concepts, and proposing targeted development suggestions for industry professionals to refer to.

Keywords

green manufacturing; Chemical equipment; Clean production; Sustainable development; life cycle assessment

基于绿色制造的化工设备制造技术研究

黄斌

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541000

摘要

推动制造业向可持续发展模式转型,已成为全球产业升级的共识。如今,绿色制造理念逐步渗透至传统工业领域,对于高能耗、高排放的化工设备制造业也展现出关键的引导作用。化工设备作为化工生产的物质载体,将绿色设计、清洁生产等原则应用于其制造全流程,已日益成为行业技术创新的焦点。针对资源消耗与环境污染问题,在将设备交付使用之前,需从原材料选择、工艺设计到报废回收进行系统考量,将环境影响最小化,这样方能构建可持续的制造业未来。本文聚焦于化工设备制造环节,主要就融入绿色制造理念的技术路径与实施策略进行探讨,并提出针对性发展建议,以供业内人士参考。

关键词

绿色制造; 化工设备; 清洁生产; 可持续发展; 生命周期评价

1 引言

随着全球可持续发展战略的深入推进,制造业的发展模式亟待革新,实现经济效益与环境效益的协同增长成为核心目标。由于化工行业本身对资源依赖性强、环境影响显著,其装备制造环节的绿色化转型是实现全产业链节能减排的关键一环。对于化工设备制造业,由于其产品服务于高强度、连续性的化工过程,搭建绿色制造技术体系能显著提升行业整体环境绩效,同时响应日益严格的环境法规,使企业能更好地应对市场与政策双重压力,这为其长远发展赢得了至关重要的社会与政策支持。现阶段,生态文明建设对工业

生产过程提出了全新的环保与节能要求。传统化工设备制造模式,致使原材料利用率偏低、能耗高、废弃物多、有毒有害物质潜在风险大等问题,引发资源短缺、生态环境破坏、生产成本攀升等连锁反应,制约了行业竞争力。与此同时,行业内的绿色制造认知尚不均衡,缺乏统一的技术标准与评价体系,存在技术应用碎片化或流于形式的风险。而绿色制造恰恰提供了从源头到末端进行系统性优化的理论框架与技术工具。

2 化工设备推行绿色制造的意义

2.1 提升资源利用与能源效率

化工设备的传统制造模式需要消耗大量钢材、特种合金及能源,对原材料的纯净度与能源品质要求高。对于结构复杂、体积庞大的设备,在成型与加工过程中需要反复进行

【作者简介】黄斌(1997-),男,中国广西桂平人,本科,助理工程师,从事化工设备制造研究。

热处理、机械加工和表面处理,同时会产生大量边角料与废屑。但在绿色制造技术体系支持下,将轻量化设计、近净成形、增材制造等先进理念与技术引入,通过优化工艺流程与参数进行精准制造,减少了材料浪费与能源过度消耗,进而从制造源头降低了资源环境负荷。

2.2 提升产品全生命周期环境效益

在设备服役周期当中,其运行能效与可靠性直接决定了化工过程的能耗与物耗水平,因此设备自身的“绿色属性”至关重要。而在绿色理念指导下的设备设计与制造,更注重选用环境友好型材料、优化结构以提升传热传质效率,同时从设计端考虑易拆解性与可回收性,这使得设备的制造阶段与使用、报废阶段的环境影响形成协同优化,进而实现了产品全生命周期环境效益的最大化。化工设备作为连接绿色制造理念与绿色化工实践的物理载体,其自身的绿色化水平就是理念落地成效的直接体现。

2.3 有助于驱动产业整体技术升级

目前,数字化、智能化已成为制造业转型升级的普遍共识,将大数据、物联网、人工智能等先进技术引入设备的制造与运维过程,能实现对制造过程能耗与排放的实时监控与优化,通过数据驱动支持工艺决策以实现精准管控,保障制造活动始终处于高效、清洁状态。绿色制造体系作为引领性的产业范式,既是连接先进材料、智能技术与传统工艺的桥梁,同时也为行业设定了明确的技术创新方向与门槛。

3 化工设备绿色制造实施中存在的问题

3.1 绿色理念认知与驱动力不足

由于传统发展模式的路径依赖,部分企业管理者并未深刻理解绿色制造的内涵与紧迫性,不同规模企业的转型意愿与能力差异显著。目前,部分企业仍片面追求短期经济利益,忽视环保合规对长期发展的战略性意义,甚至存在绿色制造属于“成本中心”、影响生产进度、在化工领域不需要“过度”环保等错误认知,这些观念阻碍了绿色技术的广泛应用^[1]。另外,部分地区的政策激励与市场引导机制尚不健全,使企业在应用绿色技术时缺少足够的动力与保障。顶层设计与战略视野的缺失,会直接制约绿色制造在行业层面推进的深度与广度。

3.2 绿色技术与传统工艺融合度低

绿色制造是系统工程学、环境科学与材料工程学等多学科交叉融合的产物,属于复合型技术范畴,其中涉及清洁能源替代、无毒无害工艺介质替代等,以及末端治理技术升级与资源化等环节,技术集成要求高。企业想要实现实质性绿色转型,必须具备跨领域的专业技术整合能力。目前,许多化工装备制造企业的技术研发基础相对薄弱,对绿色技术的消化吸收与再创新能力不够,导致技术应用“水土不服”,影响预期效果。部分技术在实验室验证成功以后,面临规模

化生产时工程化、经济性的双重考验,只进行简单套用和局部改良,这在技术复杂且定制化程度高的化工设备领域又增加了推广难度。

3.3 初期投入与成本压力较大

绿色化转型与短期财务收益之间存在一定矛盾,在转型初期,许多技术升级与新设备引进需要大量资金投入,对企业的现金流和当期利润产生影响。对于中小企业而言,需要承担较高的转型风险,如果投入产出周期过长,被高昂的初期成本拖累则会出现资金链紧张等经营风险,环保设备折旧、新技术摊销等额外成本,会给企业带来切实的运营压力。

4 基于绿色制造的化工设备技术发展策略

4.1 更新制造理念,强化顶层设计

行业与企业需要树立全生命周期的绿色管理思想,制造活动应以设备的长期环境绩效为导向,从材料开采到最终回收处置进行通盘考量,才能实现真正的绿色制造。在战略层面,企业要认识到绿色转型是关乎未来竞争力的必然选择,明确绿色制造的长期目标,形成系统的、可执行的路线图,在组织架构与资源配置上实现战略落地,更有力地支撑技术创新。行业组织与政府部门应根据区域与行业发展阶段,协同制定引导性政策。例如,当前主要障碍在于企业对自身环境责任认识不够深入,对绿色技术的长期回报信心不足^[2]。因此,企业在制定发展规划时,要融入绿色发展战略,客观分析资源、环境等约束条件的变化,做好市场需求与环保法规的衔接,明确技术研发与改造的重点方向,结合自身产品特点,保障发展的可持续性与合规性。在具体执行过程中,要鼓励技术部门大胆探索,也要建立科学的评估机制,这样才能平衡创新与风险,充分响应市场需求。

4.2 推动技术创新与集成应用

绿色制造目标的实现需要多技术协同,各工艺环节之间紧密关联,即便单个环节技术先进,也可能在系统集成上遇到瓶颈。研发部门和生产部门需要紧密协作,做好技术可行性评估及规模化应用的预案,最大限度降低技术应用出现偏差带来的损失。如果发现技术路线存在问题,就要及时调整优化。企业还应积极参与产学研合作,定期组织技术交流与培训,引进外部智力资源,尽可能缩短技术消化周期,也要注重培养内部研发力量,避免过度依赖外部技术,建立持续改进的技术创新文化,为长期发展储备动能。例如,在材料选择上,不仅要考虑其力学与耐腐蚀性能,还应评估其可回收性、生产过程中的能耗,同时进行生命周期评价,如果发现某种材料在开采或制造阶段环境代价过高,则应寻求替代方案,各技术决策都应该经过环境与经济的综合评审^[3]。技术创新能力决定企业的绿色制造水平,保障研发投入是提升竞争力的根本。目前,多数企业处于绿色制造初级阶段,技术引进与消化需要资金与时间,管理层则要给予耐心与支

持,进而营造鼓励创新的氛围,提升整体技术水平。

4.3 在设备全生命周期进行系统优化

在可持续发展理念影响下,基于生命周期评价(LCA)的管理工具为设备的环境绩效量化提供了科学方法,有助于构建系统化的绿色制造管理体系,利用数据驱动决策。通过对设备设计、制造、使用、维护直至报废回收各阶段的环境影响进行量化分析,进一步识别出关键性的改进环节,企业可借助仿真模拟、大数据分析等手段,能对工艺参数进行动态寻优,保证制造出的设备不仅在性能上具有优势,更好地满足绿色化工生产的需求。例如,大型反应器的制造需要大量焊接作业,通过采用高效低尘的焊接工艺和机器人自动化技术。对于涂层工艺产生的挥发性有机物(VOCs),在末端处理过程中引入高效的吸附或催化燃烧技术实现了达标排放和能量回收,同时降低了安全隐患。对制造过程中的固体废弃物,分类回收是资源化利用的重要前提^[4]。对包装材料的选择,企业应优先考虑可重复使用或可降解的材料,注重包装减量化。构建覆盖产品全生命周期的信息追溯系统,让企业通过数据流形成对物料流、能量流的精准管控。让设计人员借助LCA工具、环保材料数据库、绿色工艺库进行协同设计。实现设备轻量化、长寿命、易回收的“生态设计”效果,为绿色制造奠定坚实基础。

4.4 构建绿色成本观,完善激励与约束机制

无论技术如何先进,经济可行性始终是企业决策的核心所在,政府与社会应该协同发力,为企业绿色转型提供必要的财税、金融政策支持,并对先行者给予荣誉激励,对落后产能形成倒逼机制,加强绿色消费的市场引导。针对中小企业的融资难是绿色转型的普遍瓶颈,绿色金融产品只有设计得更灵活、更普惠,才能惠及更多企业。行业协会要发挥桥梁作用,通过组织标杆企业参观学习去推广成熟的绿色制造模式,做好技术供应商与设备制造企业的沟通平台,互相分享经验与教训,通过第三方认证对绿色产品进行背书,保障优质绿色产品获得应有的市场溢价。例如,从碳排放角度来看,未来碳税或碳排放权交易制度的推行,这也将内化环境成本,从而改变企业的成本核算方式。针对绿色技术改造投资,可以探索设立专项绿色信贷或补贴,并实施加速折旧等税收优惠,进一步降低企业当期财务压力,对采购绿色设备的化工企业进行绿色采购加分。此外,环境监管执法一定要保持连贯与严格,从源头审批、过程监控、末端排放等环节,加大违法成本,利用环境信用体系确保环保责任得到落实。在标准方面,也要加快制定化工设备绿色制造评价标准,在产品能效、材料有害物质限制、可回收率等方面,进一步

明确技术指标与评价方法。

4.5 建立行业绿色标准与协同发展生态

对于化工设备这一特定产品类别,应该加快建立统一的绿色设计、绿色工厂、绿色产品评价标准体系,在标准体系完善以后,再去引导企业开展对标与达标活动,保障绿色制造不走样,开展供应链上下游的绿色协同,保障从原材料到成品的整个链条符合绿色要求,这既是对终端用户负责,也是提升产业链整体竞争力的需要。行业要保障标准的先进性与适用性,加强国际标准采标与国内标准创新,进而引领行业的绿色发展方向。例如,在“双碳”目标驱动下,一批领军企业率先实践,通过应用余热回收系统、光伏发电等清洁能源,采用水性涂料替代溶剂型涂料,基于数字孪生技术优化生产调度,达到了节能降耗的显著目的。同时,产业链上的协作创新也要得到鼓励,推动了新材料供应商、设备制造商与化工用户的深度合作,在联合研发中,攻克了特定工况下的绿色技术难题。不仅提升了最终化工设备的能效与环境友好性,设备制造企业自身也体现出强大的绿色服务能力。在未来的产业竞争格局当中,可以预见绿色制造能力和绿色产品认证将成为新的市场准入壁垒,做好自身的绿色化建设是生存与发展的前提,进而赢得客户的长期信赖,实现企业的可持续发展。

5 结语

化工设备制造业想要实现高质量发展,就必须走绿色化、智能化的融合创新之路。绿色制造直接关系到行业的未来竞争力,随着环保法规趋严与资源约束加强,企业一定要做好长期投入与持续改进的准备,逐渐将绿色基因融入企业文化和业务流程,尽可能在制造源头杜绝环境污染与资源浪费的出现,减少末端治理的压力,助力我国从“化工大国”向“化工强国”的跨越。行业应通过政策引导、标准制定、技术推广与金融支持等多种手段,为化工设备绿色制造的全面铺开提供有力支持。实现制造过程的绿色化,能夯实化工行业安全环保的基石,也是制造业践行社会责任的具体表现,保障国家生态安全,最终提升我国化工装备制造业在全球市场的综合竞争力与绿色领导力。

参考文献

- [1] 马良.储罐焊接过程低碳减排工艺路径研究[J].石油和化工设备, 2025, 28(10):19-22.
- [2] 扈泽波,车帅,刘彦超.生命周期评价在太阳能电池中的研究进展[J].有色设备, 2025, 39(2):26-33.
- [3] 齐红梅.筒体内壁喷涂设备智能化设计与应用[J].智能城市应用, 2025, 8(2):79-82.

Research on Manufacturing Process of Titanium Tube Heat Exchanger

Youxin Ye^{1,2}

1. Guangxi Bosco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China
2. Guangxi Kejia Equipment Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

Abstract

Titanium tube heat exchangers have become an irreplaceable key equipment under harsh working conditions due to their excellent corrosion resistance, good heat transfer performance, and processability. They are widely used in fields such as papermaking, chemical industry, metallurgy, energy, environmental protection, food and medical care. The excellent performance of titanium tube heat exchangers can be achieved through precise execution of manufacturing processes and strict coverage of quality control systems. This article focuses on the core process links and key quality control nodes in the entire manufacturing chain of titanium tube heat exchangers, and conducts in-depth analysis and discussion. The article elaborates on the key process points of the entire process from titanium material cutting, precision tube sheet processing, strict cleaning and assembly, core expansion and welding, to final assembly. It particularly emphasizes the protective and special measures that must be taken for the high temperature activity, easy pollution, and difficult processing characteristics of titanium materials. And elaborated on the airtightness test and non-destructive testing techniques such as ultrasound and radiation. By strictly controlling each link, the aim is to ensure the long-term safe and stable operation of titanium tube heat exchangers, providing theoretical reference and practical guidance for high-end equipment manufacturing.

Keywords

titanium tube heat exchanger; Manufacturing process; Welding protection; Expansion control; Process quality control; Non-destructive testing

钛管式换热器制造工艺研究

叶又鑫^{1,2}

1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 中国·广西南宁 530007
2. 广西科佳装备科技有限公司, 中国·广西南宁 530007

摘要

钛管式换热器因其优异的耐腐蚀性、良好的传热性能和可加工性能,在苛刻工况下成为不可替代的关键设备,广泛应用于造纸、化工、冶金、能源、环保、食品医疗等领域。钛管式换热器的卓越性能能实现,需要制造工艺的精准执行与质量控制体系的严密覆盖。本文聚焦于钛管式换热器制造全链条中的核心工艺环节与关键质量控制节点,进行深度剖析与论述。文章详细阐述从钛材下料、精密管板加工、严格清洁装配、核心胀接与焊接,到最终总装的全流程工艺要点,特别强调了针对钛材高温活性高、易污染、难加工特性所必须采取的防护与特殊措施。并深入论述了气密性试验以及超声波、射线等无损检测技术。通过对各环节的严格控制,旨在保障钛管式换热器的长期安全稳定运行,为高端装备制造提供理论参考与实践指导。

关键词

钛管式换热器; 制造工艺; 焊接保护; 胀接控制; 过程质量控制; 无损检测

1 引言

钛管式换热器作为高端耐腐蚀装备,在海洋开发、精细化工及环保产业的应用迅猛发展。与常规碳钢或不锈钢换热器相比,耐腐蚀性能突出,尤其在含氯离子环境中性能远

超不锈钢。但是,钛换热器制造对制造环境、下料、焊接等各个工序的控制要求更高,尤其是管板加工和换热管焊接工序。因此,其制造绝非普通工艺的简单移植,而是深深融入从第一道工序开始的每一个细节之中。

2 核心制造工艺

钛管式换热器的制造工艺管控是一个技术密集型的精密过程,需要从原材料检验、下料、管板加工、组装、胀管、焊接、检测等各个环节严格管控。只有严格遵守工艺要求,

【作者简介】叶又鑫(1990-),男,中国广西钦州人,本科,工程师,从事钛焊接,不锈钢焊接,碳钢焊接,机械加工研究。

系统管理,才能获得稳定的品质。

2.1 原材料控制

钛管与管板必须进行实物验证,用光谱仪等检测原来元素是否满足要求,检测管壁厚度是否在公差允许范围内,排查轧制或焊接过程中可能产生的纵向裂纹、夹杂、壁厚不均等缺陷。对于复合管板,除超声波探伤确保贴合率($\geq 98\%$)外,还需在边缘进行宏观金相检查,验证结合界面质量^[1]。

2.2 下料加工

下料切割必须在专用洁净区域进行,使用不锈钢或硬质合金刀具。优先使用激光或者水刀切割,使用激光切割钛材时,使用氩气(纯度 $\geq 99.99\%$)做保护,避免热影响区氧化。所有切割加工后的断面,必须立即使用专用不锈钢丝刷或千叶片清理毛刺和附着物,并用丙酮或专用无氯清洗剂彻底脱脂。

2.3 管板加工

管板是换热器的核心,其加工精度直接决定管束装配质量、胀焊效果和使用寿命。要求加工环境必须在独立、洁净的数控加工中心进行,严禁与碳钢工件混线加工。使用高精度硬质合金刀具,并专用于钛材加工。钻削工艺采用低速、大进给工艺,冷却液必须为专用无氯、无硫的水溶性切削液,并保证大流量、高压冲洗,以迅速排屑和降温。

管孔孔径公差通常控制在 H7 级,孔间距公差 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内,孔内表面粗糙度 $Ra \leq 3.2\mu\text{m}$ 。更为关键的是,管孔与管板密封面的垂直度必须严格控制,通常要求不大于 0.05mm ,否则将导致穿管困难和胀接不均匀。对于复合管板,钻孔后需用专用工具对管孔内壁的钛复层进行精确的液压胀接槽或机械开槽,槽深、宽度和位置需严格按图施工,以在后续胀管时形成抗拉脱的机械互锁结构。钻孔完成后,孔两端需倒角去除毛刺,用高压清洗机和专用刷头对每一个管孔进行彻底清洗,去除残留的切削液和钛屑,并用白布擦拭检查无污渍,避免穿管过程划伤、污染管子。

2.4 壳体加工

壳体卷制要严格控制内孔直径和卷制圆度,凡有碍管束拆装的壳体内壁焊缝余高均应磨至与母材表面齐平,并复卷保证圆度。外圆周长偏差控制在 $0\text{-}10\text{mm}$,圆筒同一断面上的最大内径与最小内径之差,不应大于该断面公称直径 DN 的 0.5% ,且应符合下列规定^[2]:

- a) DN $\leq 1200\text{mm}$ 时,不大于 5mm ;
- b) DN $> 1200\text{mm}\sim 2000\text{mm}$ 时,不大于 7mm ;
- c) DN $> 2000\text{mm}\sim 2600\text{mm}$ 时,不大于 12mm ;
- d) DN $> 2600\text{mm}\sim 3200\text{mm}$ 时,不大于 14mm ;
- e) DN $> 3200\text{mm}\sim 4000\text{mm}$ 时,不大于 16mm 。

2.5 清洁装配与穿管

穿管前需先完成壳体筒身划线开孔工作,筒身按照图纸的位置进行划线开孔,开孔后用胶布将所开孔封起来,避

免后续操作导致异物进行换热器内部而无法取出。装配区域应保持高于一般车间的洁净度,操作人员需穿戴干净手套(非棉质,以防纤维残留)。穿管前,再次检查管端是否光滑无毛刺,管束通常从固定管板侧开始穿入。穿管时,严禁强行敲击,需使用引导铜棒或塑料棒辅助,防止钛管表面被划伤或管口变形,每一根管穿过所有折流板的过程应顺畅无阻。

2.6 胀接工艺控制

胀接的目的是消除管与管板孔间的间隙,形成紧密的接触以承受压力并辅助密封。采用合理的跳胀顺序,从中心向外呈辐射状或分区进行,以减少管板变形。对于钛管,液压胀接因其控制精确、胀接均匀、残余应力小而被优先采用。机械滚胀次之,但需严格控制胀杆推进速度和滚珠数量。胀度控制是核心参数,胀度不足导致连接不紧,过度则引起管壁减薄甚至开裂。通常通过控制胀接压力和测量管壁减薄率(约 $3\%\text{-}8\%$)来保证。强度焊接+贴胀,换热管为钛材,贴胀的胀管率为 $2\%\text{-}3\%$;强度胀接+密封焊,换热管为钛材,强度胀的胀管率为 $4\%\text{-}5\%$,胀后换热管理论内径计算公式和胀管率计算公式:

$$K = (d_2 - d_1 - b) / 2\delta \times 100\%$$

式中: k 以管壁减薄率计算的胀度, d_1 换热管胀后内径, d_2 换热管胀前内径, b 换热管与管板管孔的双边间隙(管孔直径减去换热管的外径), δ 换热管壁厚。

2.7 换热管平口

换热管胀管完成后,可采用四点均布点焊对换热管进行点焊固定。检查各管子管口长度、平整度,对超长、不平整管口进行切屑平口,确保管子突出管板 2mm 左右为宜。

2.8 焊接过程控制

管口焊接是换热器制造中技术难度最高、质量风险最大的环节。焊前需将管板和管子焊口区域用不锈钢丝轮打磨至金属光泽,并立即用丙酮擦洗,之后严禁徒手触摸。施焊应在空气洁净、无尘、无烟环境下进行,且焊接场所应具有独立区域。要求风速 $< 1.5\text{m/s}$,相对湿度 $\leq 80\%$,焊接过程风速过大,容易造成保护气掺杂进其他气体造成焊接质量缺陷,相对湿度过大易造成焊接气孔、飞溅增大等问题。钛在 250°C 以上开始剧烈吸氢、氧、氮,如果熔池中侵入氧气、氮气等有害气体,则被焊部位的塑性、韧性和表面颜色等都有明显的改变,其机械性能显著下降,过热倾向增高,接头脆化。如果焊接区域得不到气体的有效保护,必将导致焊接质量的下降,严重时将导致产品的报废。保护气选用氩气,纯度 $\geq 99.99\%$,流量适中(过大易产生湍流),焊接停止后应继续通保护气,待焊缝和热影响区温度低于 250°C 后方可停止气体保护。焊接换热管时,因为管子与管板之间的焊接点位较多、且密集,连续焊接作业状态下不容易散热,可采取回形跳焊的方法,即对一个点位管板与管子环焊完成之后,待温度冷却后,再对间隔一个点位距离的下一个管板进

行跳焊,这样有助于温度的分区散热,确保焊接效果和质量。除了焊接区域冲氩保护以外,背面保护也至关重要,管板与管子环缝的管内壁也要充氩保护^[3]。

焊接应采用小电流、快焊速、低热输入。多层焊时,必须待前一层焊缝冷却至室温(或低于60℃)并清理表面后,再施焊下一层。严格控制层间温度,防止晶粒长大,保证接头韧性。焊后立即进行100%着色渗透检测(PT),检查焊缝表面有无裂纹、气孔等缺陷。同时,焊缝颜色是最直观的质量判据:银白色最佳,金黄色可接受,蓝色稍差,紫色、灰色或白色粉状物表明氧化严重,必须将氧化层彻底打磨去除并补焊。

表 1

焊缝与热影响区表面颜色	氩气保护情况	合格判定
银白色	良好	合格
金黄色(致密)	尚好	合格
蓝色	稍差	只可用于非重要部位
紫色	较差	常压设备
灰色	差	不合格
白色粉状物	很差	不合格

焊接完成后,检查焊口成形情况,对焊接成形差的焊缝进行返工焊接,同时按照表1对焊接区域的表面颜色检验,对保护效果不理想的接头,进行返工处理,一般情况下,氧化效果较轻时可用不锈钢丝刷将氧化部位刷至金属光亮色(银白色)或进行酸洗处理,以保证内部金属不被继续氧化。

3 无损检测

管板角焊缝检测,超声波检测(UT)是首选。使用小角度(45°-70°)横波斜探头,沿焊缝周向扫查,可有效检测未熔合、未焊透及根部裂纹等内部缺陷。管子与管板密封焊缝表面检测可使用着色渗透检测(PT),检测必须使用低硫、低氯、低氟的专用渗透剂,防止对钛造成腐蚀。在制造过程中,管子可能因穿管、胀接等操作产生新的损伤,在总装试压前,可再次使用涡流检测对管子进行快速普查,特别是管端胀接区域。对于高压厚壁管箱焊缝,可采用射线检测(RT),但由于钛对射线的吸收特性与钢不同,需采用较低的电压和特定的曝光曲线。

4 压力试验与气密性试验

4.1 液压试验

试压环境温度不应低于5℃,介质要求使用洁净水,其氯离子含量必须严格控制,通常要求小于25ppm,最好使用去离子水,防止对钛造成点蚀。过程控制缓慢分级升压(如0.5倍设计压力为一级),每级保压检查。达到试验压力(通常为设计压力的1.25-1.5倍)后,保压时间不少于30分钟。

保压期间,压力表应稳定,同时派专人对所有焊缝、胀口、法兰密封面进行细致目视检查,无渗漏、无可见异常变形、无异常响声为合格。试验完毕后,必须立即将水彻底排净,并用干燥、洁净的压缩空气或氮气吹扫至完全干燥,这是防止静态水残留导致腐蚀或微生物滋生的必要步骤。

4.2 气密性试验

在液压试验合格后,用于检测极微小的泄漏,特别是对工艺介质为有毒或易燃气体时尤为重要。一般采用压缩空气或氮气,压力为设计压力或略低。在保压期间,在所有密封连接处涂抹发泡剂(肥皂水)进行检漏。对于有更高要求的场合,可采用氦质谱检漏^[4],将设备抽真空后在外围喷氦气,或用氦气充压后在外围用吸枪探测,灵敏度极高。

5 质量控制体系

质量控制不是独立的环节,需要全员全过程系统管控。建立供应商名录,进行准入评审,向前延伸管理,严格管控供应商。对每批次材料执行“文件审查+实物抽检/全检”制度,关键材料(如管板、钛管)可进行第三方复验。推行“三检制”(自检、互检、专检)。生产过程需要完整、准确的质量记录。在关键工序(如下料后、管板钻孔后、胀接后、焊接后)设立质量控制点,核心控制点需进行三级确认,检验并记录过程数据,经质检员签字确认合格后,方可流转至下道工序。焊工要求持证上岗,焊接时,记录每道焊缝的焊工号、焊接电流电压、气体流量、保护状况;胀接时,自动记录每根管的胀接压力-时间曲线。这些记录是产品可追溯性的核心。从材料质保书、工艺评定报告、焊工资格证书,到每道工序的检验记录、无损检测报告、压力试验记录,直至最终的产品合格证、竣工图,必须形成完整的文件包。实现从一根钛管、一块管板到整套设备的全生命周期信息追溯。

6 结论

钛管式换热器的制造,需要重点对制造环境、管板精密加工、胀管加工、管板焊接进行严格控制。强调以预防性的管理思维,全员全过程参与,系统管理,每个环节严格控制。只有严谨的质量管控才能制造出经得起时间与苛刻环境考验的钛管式换热器,从而支撑起现代高端工业的稳定运行与持续发展。

参考文献

- [1] 李晓峰,王建军.钛制化工设备[M].北京:化学工业出版社,2018
- [2] 中国机械工程学会焊接学会编.焊接手册(第3版修订本).北京:机械工业出版社,2015
- [3] JB/T 4745-2002钛制焊接容器
- [4] 张启坤,赵浩.钛焊接头保护与质量控制[J].焊接技术,2022

Research on the Synergistic Path of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Chemical Industry

Peng Xie^{1,2,3} Xiaomei Shi^{1,2,3}

1. Shandong Academy for Environmental Planning, Jinan, Shandong, 250000, China

2. Key Laboratory of Land and Sea Ecological Governance and Systematic Regulation, Ministry of Ecology and Environment, Jinan, Shandong, 250000, China

3. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou, Shandong, 256603, China

Abstract

As a cornerstone of China's national economy, the chemical industry provides essential material support for socioeconomic development. However, it is also characterized by high resource and energy consumption and significant pollutant emissions. With the implementation of carbon peaking and carbon neutrality strategies, the chemical sector faces dual challenges: reducing conventional pollutants while taking on the critical responsibility of controlling greenhouse gas emissions. Historically, pollution control and climate change mitigation operated under separate policy frameworks, with distinct approaches in goal-setting, measure selection, and effectiveness evaluation. Currently, ecological civilization construction has entered a new phase prioritizing carbon reduction, making coordinated pollution and carbon reduction efforts an inherent requirement for the chemical industry's green transition. This transformation entails not only updated governance concepts but also systematic restructuring of industrial models, technological pathways, and management practices.

Keywords

chemical industry; pollution reduction and carbon emission reduction; synergistic pathways

化工行业减污降碳协同路径研究

谢朋^{1,2,3} 史晓梅^{1,2,3}

1. 山东省生态环境规划研究院, 中国·山东 济南 250000

2. 生态环境部陆海统筹生态治理与系统调控重点实验室, 中国·山东 济南 250000

3. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 中国·山东 滨州 256603

摘要

化学工业是我国国民经济的基础性产业, 为经济社会发展提供了不可或缺的物质支撑。但同时, 这一行业也呈现出资源能源消耗量大、污染物排放强度高的显著特征。随着碳达峰碳中和战略的推进实施, 化工行业不仅面临着削减常规污染物的持续压力, 也承担着控制温室气体排放的重要责任。长期以来, 污染防治与气候变化应对分属不同的政策体系和治理架构, 在目标设定、措施选择、效果评估等方面各自运行。当前, 生态文明建设已步入以降碳为重点战略方向的新阶段, 推动减污降碳协同增效成为化工行业绿色转型的内在要求。这种转型不仅意味着治理理念的更新, 更涉及产业形态、技术路线、管理方式的系统性重构。

关键词

化工行业; 减污降碳; 协同路径

1 引言

常规污染物与温室气体多属同根同源, 煤炭、石油等化石燃料的燃烧既释放二氧化硫、氮氧化物等污染物, 也排放大量二氧化碳。生产过程中使用的溶剂、助剂等物料,

既是污染物的潜在来源, 也承载着隐含的碳排放。这种同源性特征决定了减污与降碳可以统筹推进、发挥协同效应。从实践层面观察, 部分化工企业已在节能降耗、清洁生产、循环利用等方面开展探索, 积累了一些成功经验。然而, 由于缺乏系统性的协同设计, 减污措施与降碳措施之间尚未形成有效联动, 源头削减、过程控制、末端治理各环节的协同效应有待深度挖掘。基于此, 本研究聚焦化工行业减污降碳协同的实现路径, 从资源能源利用、措施集成优化、产业共生网络等维度展开探讨, 以为化工行业绿色低碳转型提供

【作者简介】谢朋(1989-), 男, 中国山东临沂人, 硕士, 工程师, 从事环境规划、环境科学与工程、应对气候变化研究。

借鉴。

2 推进化工行业减污降碳协同的时代意义

化学工业是我国经济发展的重要基础产业，其生产过程不仅消耗大量化石能源，同时也会产生各类污染物。随着碳达峰、碳中和战略的深入实施，化工行业正面临着污染物减排与碳减排的双重压力。传统的末端治理方式往往针对单一污染物进行控制，已难以满足新时期绿色发展要求。推进减污降碳协同治理，需要从源头设计、过程控制到末端处理全过程入手，依靠技术进步与管理提升，实现污染控制与碳减排的协同增效。这既是化工行业向绿色化转型的必然选择，也是落实生态文明建设战略的重要举措。从产业发展角度看，提升减污降碳的综合能力有助于增强化工企业在低碳环境下的竞争优势，为行业可持续发展注入新的动力。探索适合化工行业特征的减污降碳协同路径，对于推动化工园区循环化改造、改善区域生态环境质量、保障国家能源资源安全具有重要的战略意义^[1]。

3 化工行业减污降碳协同面临的主要问题

3.1 资源能源利用效率偏低，源头减量空间有待挖掘

在化学工业中，资源和能耗是一个贯穿整个产业链的重要组成部分，从原材料运输到反应分离、从公共设施到成品的包装，每个步骤都会产生能耗和材料损失。该过程中，由于传热网络集成度低，难以实现对高温热位能量的高效分级开发，且产生的大量废热以冷却系统的方式排出大气，不仅导致能量浪费，而且还会加剧大气中的温室效应。在化学工业中，由于分离工艺是能源消耗最大的环节，其塔盘效能和返流量设置常与优化运行状态偏差较大，且各塔内供料与塔内工质的匹配不能实现闭环运行，造成单位产品蒸汽量较高的问题。由于材料运输过程中水泵和风扇选择过大，且采用了变频调速，导致小负载条件下装置的效率降低，能耗也随之增大。在原材料使用方面，由于催化剂的活性和稳定性限制化学反应的选择性，而产生的废气、废水、废渣等含有大量尚未被转换的原材料成分，其再加工不但要消耗大量的能量，而且还会产生一次污染。针对目前存在的问题，提出采用高质量的软水处理技术，提高流程水的回用效率、冷凝水的回收效率不高、不够理想^[2]。

3.2 减污与降碳措施衔接不畅，协同效应尚未充分释放

长期以来，我国化学工业的环境治理制度中，污染防治与碳减排分别属于两条不同的管理途径与技术系统，两者间缺乏有效的联系。终端处理设备在实际操作中多以达到达标为目的，没有对处理工艺自身的碳浓度进行足够的关注。目前 VOCs 处理以吸收和燃烧为主，其中吸收剂的回收要耗费大量的水蒸气或热风，而在燃烧时会生成 CO₂，其能耗和环保效应还没有被纳入本体设备的能量效率优化中。污水处理厂曝气装置常年运转，能耗巨大，如果不进行高效循环再

循环，将会导致大量的能量损失，同时会导致更大的温室效应。虽然通过燃烧处理可以达到减少污染的目的，但是附加燃油的加入和烟气处理的操作都会产生大量的二氧化碳。在设计时没有将减排和减排的手段进行综合考虑，导致控制设备布置与主要设备换热网络和蒸汽平衡系统不协调，造成废热资源的高效利用，尾气处理生成的热无法被高效回收。现有治污设备的操作参数设置常与生产工况无关，且在调节生产负载时无法进行节能优化，导致大量的资源浪费。目前还没有构建减排协同减排所必需的基础信息收集和统计系统，缺少对污染源和污染源的统一辨识和关联分析，导致了协同优化过程中缺少科学支撑^[3]。

3.3 产业共生体系不完善，物质循环链条存在断点

由于其产业链条长，上下游关联密切，在理论上为发展产业共生和物质循环提供了很好的依据。然而，企业之间的物料交流和能源的分级开发却受到许多限制。由于园区内各企业材料的匹配程度不高，且上下游产品质量、规格及供应稳定性均不理想，缺少净化或修饰副产品的过程，造成许多有应用前景的材料被弃用。副产盐酸和废硫酸的产量很高，周边磷肥和水处理等需要产业分布较为零散，输送范围超过经济范围，循环经济效果很难保证。由于废热资源的多企业使用受限于管道的投入与计量方式，导致其所生成的热量不能向周边居民提供，而仅经冷却塔逸出。目前，我国对含高附加值成分废水的处置方法仍不明确，含高附加值成分的废水常被掺入垃圾焚烧处置，有效成分无法有效回收。此外，包括催化剂在内的贵金属循环使用系统尚不健全，在失活的催化剂中，金属组分的回收效率较差，新的催化材料又要耗费大量的矿物资源。在产物代谢方面，由于在处理过程中没有形成标准化的废物利用网络，高分子材料如塑料、橡胶等在处理过程中被投入到垃圾的焚烧和填埋中，无法进行化学品的资源化和资源化利用。产业共生系统的构建还面临着标准衔接、物流组织和利益分配等一系列难题，而目前的体制支持力度显然不够，导致物流链断裂。

4 深化化工行业减污降碳协同增效策略

4.1 优化源头结构与工艺路线，推进资源能源高效利用

化工行业减污降碳协同的实现，首先有赖于从源头入手对产业结构和工艺路线进行系统性优化。原料结构的调整是源头控制的关键环节，企业需要结合资源禀赋和技术条件，逐步推动原料向低碳化、轻质化方向转变。以传统煤化工为例，可通过优化煤炭气化工艺参数，提高碳转化效率，减少原料消耗和废弃物生成。炼化企业应根据原油性质差异，合理配置加氢裂化、催化重整等二次加工装置的比例，使原油资源得到梯级利用，减少重质副产物的产生。工艺路线的选择应优先考虑原子经济性高的反应路径，采用绿色催化技术替代传统当量反应，从反应机理上降低副产物生成。

企业在新建或改扩建项目时,需对备选工艺进行全生命周期环境影响评估,不仅考察单位产品能耗,还应综合评估污染物生成强度。实际操作中,可通过引入过程强化技术,如微反应器、超重力分离等新型装备,提升传质传热效率,缩短反应时间,降低反应温度和压力,从源头上减少能源消耗。对于现有生产装置,应定期开展用能诊断和物料平衡核算,找出原料损耗和能量散失的关键节点,通过局部技术改造优化反应条件,调整进料配比,减少不必要的资源浪费。源头优化还体现在产品的生态设计层面,企业在产品开发阶段就应考虑其全生命周期环境影响,开发可降解、易回收的绿色化工产品,减轻末端治理压力^[4]。

4.2 强化全过程集成优化,实现减污降碳措施协同发力

化工生产过程涉及多个单元操作和复杂的物质能量流动,减污与降碳措施的协同需要从全过程视角进行集成优化。能量系统集成是全过程优化的核心内容,企业应对生产装置的热能、电能、冷能进行综合平衡,构建梯级利用的能源网络。反应单元产生的高温位热能可通过余热锅炉回收产生蒸汽,供给下游工艺使用或用于发电;低温位余热可通过热泵提升品位后用于供暖或工艺加热。在热网布局上,应打破车间界限,建立全厂范围的蒸汽管网和热水管网,实现多装置间的热能互济。

物质流集成方面,需要系统梳理各生产单元的物料流向,建立上下游工序之间的物质耦合关系。上一单元产生的副产物或中间产物,应尽可能作为下一单元的原料加以利用,减少中间体的冷却、储存和再加热环节。如,炼化一体化企业可将催化裂化产生的轻烃直接送至乙烯裂解装置作为原料,避免中间环节的能源消耗和污染物排放。水系统集成也是全过程优化的重要组成部分,应建立分质分级的水循环体系,高浓度废水经预处理后回用于对水质要求不高的工序,冷却水应循环使用并定期投加水处理药剂,减少新鲜水取用量和废水外排量。实际操作中,企业可借助流程模拟软件建立全厂模型,对物料平衡、能量平衡、水平衡进行模拟计算,识别优化潜力。通过夹点分析技术找出换热网络中的瓶颈,重新匹配冷热物流,提高热回收率。对压缩机、泵等动力设备进行变频改造,根据负荷变化调整运行参数,减少电力消耗。

4.3 深化园区循环化改造,构建产业共生减污降碳网络

化工园区是化工产业集聚发展的重要载体,园区层面的循环化改造能够突破单个企业的边界限制,构建更大范围的产业共生体系。园区管理者需要系统梳理入驻企业的产品

链和废物代谢路径,绘制园区物质流和能量流图谱,识别企业间潜在的共生机会。核心企业产生的余热、废气、废液等二次资源,可通过管网输送或槽车运输方式供给周边企业作为能源或原料使用。例如,氯碱企业产生的电石渣可供给建材企业生产水泥,合成氨企业产生的二氧化碳可供给食品加工企业或用于驱油采油。

在能量梯级利用方面,可依托园区集中供热中心或热电联产装置,为入园企业提供蒸汽和电力,替代分散的小锅炉,提高能源转换效率。园区应配套建设统一的环境基础设施,包括集中式污水处理厂、危废处置中心、再生水回用系统等。污水收集管网应实现分质分流,根据废水性质分别纳入不同处理单元,高浓度有机废水可单独进行厌氧发酵回收沼气,含盐废水经脱盐处理后回用。危废集中处置设施应兼顾资源回收功能,对有机废液进行热解回收热能,对废催化剂进行金属回收。在空间布局上,应根据产业关联度优化企业落位,将有物料供需关系的企业就近布置,减少物料输送距离和损耗。园区管理机构应建立信息共享平台,定期发布各企业可提供的余热资源、副产品信息和需求信息,促进企业间交易对接。制定园区循环化改造的准入标准,新建项目需符合产业共生导向,优先引进能够消纳现有企业废物的补链项目。

5 结语

综上所述,推动化工行业减污降碳协同,本质上是环境保护与气候应对从分立走向融合的过程,是对传统治理模式的系统性超越。通过优化源头结构、强化过程集成、深化产业共生,化工行业能够在削减污染物的同时降低碳排放强度,实现环境效益与气候效益的双重提升。这一转型不仅有助于行业自身提高资源利用效率、增强竞争力,也可为其其他高耗能行业提供可借鉴的协同路径。展望未来,随着政策机制的完善、技术创新的突破、管理体系的整合,减污降碳协同将逐步从理念走向实践,从局部探索走向全面铺开,为促进经济社会发展全面绿色转型注入持久动力。

参考文献

- [1] 柴麒麟等.鄂尔多斯现代煤化工行业减污降碳协同创新实践进展及启示建议[J].世界环境, 2025, (05): 94-96.
- [2] 孙园园等.黄河流域煤化工行业降碳减污路径研究[J].环境科学研究, 2025, 38 (11): 2569-2579.
- [3] 陈辉.碳中和背景下智慧城市的减污降碳策略[J].资源节约与环保, 2025, (02): 147-150.
- [4] 周纪武,张磊,罗杰.基于减污降碳的石油化工设备管理策略分析[J].化工管理, 2024, (28): 50-52.

Development of Hot-melt Damping Pad for Automotive Body Floor

Bei Xu

Hangzhou Zhejiang Organosilicon Chemical Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311200, China

Abstract

This paper focuses on the development of a hot-melt damping adhesive pad for vehicle body floors. The damping pad is mainly composed of thermoplastic compounds, tackifiers, fillers, softeners, and other components, and is prepared via internal mixing, extrusion, and other processes. Through the use of specific components at optimized ratios, the product achieves favorable synergistic effects. It exhibits excellent flexibility, with no brittle fracture during storage at either high or low temperatures. It demonstrates good high-temperature baking resistance, without sagging or displacement after baking, as well as strong high-temperature adhesion, ensuring full conformity to the shape of automotive body sheet metal. During application, no bubbling, delamination, slipping, shrinkage, or displacement occurs. Additionally, the product features good storage stability, a long service life, low weight, excellent vibration absorption and noise reduction performance, and high flame retardancy. It is suitable for use on automotive body floors.

Keywords

Hot-melt damping; Vehicle floor; Damping and noise reduction; High temperature

用于汽车车身地板的热熔阻尼垫的研制

徐贝

杭州之江有机硅化工有限公司, 中国·浙江 杭州 311200

摘要

本论文主要是一种用于车身地板的热熔阻尼胶垫的研制。该阻尼垫主要由热塑性化合物、增粘剂、填充剂、软化剂等组成,再经密炼挤出等工艺制备而成。该产品采用特定含量的特定组分,实现整体较好的相互作用,具有良好的柔韧性、高低温状态下存储不会脆断,良好的耐高温烘烤性、高温烘烤后无流挂位移,高温粘接性、粘接完全贴合车身钣金形状,使用过程中无鼓泡脱落滑移收缩现象,并且产品储存稳定性好、保质期长、质轻、减震降噪效果好、阻燃效果佳,适用于汽车车身地板。

关键词

热熔阻尼, 车身地板, 减震降噪, 高温

1 引言

阻尼片是粘弹性材料,贴在汽车钣金上后,钣金振动会带动阻尼材料发生拉伸/剪切形变,材料内部分子链相互摩擦,将振动机械能不可逆地转为热能散发,从而抑制共振、衰减振动与结构噪声。

目前,汽车内室减震降噪的产品主要有沥青阻尼板、丁基自粘阻尼片和水性喷涂型阻尼。沥青阻尼板虽然价格较便宜但其主要以沥青、石棉为主,具有韧性差、易碎等使用缺陷,而且其气味、VOC均超标会危害乘车人员的健康。丁基自粘阻尼片虽然环保无毒但其服帖性差,制作时需要覆盖层和防粘层且边角料不易回收制造成本高。水性喷涂型阻

尼,克服了沥青阻尼板和丁基自粘阻尼片的缺陷,但该技术也有许多缺点,比如由于汽车内部的底盘上有许多装配孔所以要做到精准喷涂;喷涂的产品也很难达到设计上对阻尼材料的尺寸要求;而且自动化喷涂设备需要较高的资金投入。

本文主要研究的内容为一种既环保又有良好的耐高温粘接性、良好的车身地板服帖性、环保、制作和使用简单易操作的阻尼片,满足用户的特定使用需要。

2 实验

2.1 主要原料

乙烯醋酸乙烯酯: LG 化学、三井化学; POE 塑料: LG 化学; 环氧树脂: 南通星辰; 云母粉、碳酸钙: 浙江布石新材料; 偶联剂: 杭州杰西卡化工; 偶氮二甲酰胺: 江苏索普; 硬脂酸锌: 常州乐邦复合材料; 石墨: 青岛天和达石墨。

2.2 主要设备

加压式橡胶(塑料)捏炼机: 大连第二橡塑机械有限

【作者简介】徐贝(1989—),女,中国河南周口人,硕士,中级职称,从事汽车用高分子材料研究。

公司 X(S)N-3/25/100; 微机控制试验机: 上海松顿仪器制造有限公司 WDW-20; 电热恒温鼓风干燥箱: 上海一恒 DHG-9145A; 密度天平: 德卡 DK-120MD; 悬臂梁法阻尼测试多功能台架: 国检测试 3930K-350; 高低温交变湿热试验箱: 无锡环威科技有限公司 HW-GDJS-250C。

2.3 样品配方表

见表 1。

2.4 产品的制备工艺

将 EVA、POE、环氧树脂 0194、云母粉、碳酸钙、石墨按照比例, 投入密炼机中密炼, 密炼温度控制在 120℃~140℃, 密炼时间 30±5min; 第一步密炼完成后投入 KH560 和环氧树脂 0164, 密炼温度控制在 ≤140℃, 密炼时间 20±5min; 第二步密炼完成后待温度降至 110℃后, 投入硬脂酸锌、偶氮二甲酰胺, 密炼时间 10±5min 后出料。

密炼完成的料需尽快投入挤出机, 挤出机模头温度设定为 90±5℃, 温度低于 70℃时胶料较硬挤出机无法顺利挤出。挤出完成后按客户要求尺寸形状裁切, 裁切后包装即可。

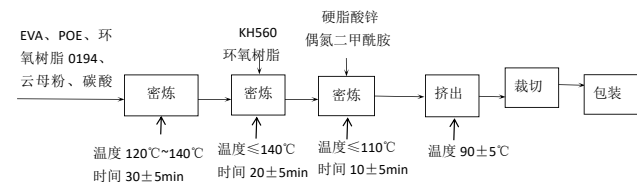
2.5 性能测试及其表征

从以上测试数据看, Snugdamp203 热熔阻尼胶垫完全

满足客户使用要求。

表 1

物料	规格型号	添加量
EVA	28025	18-25
	220	2-5
POE	675	5-12
环氧树脂	0194	2~5
	0164	4~10
云母粉	600 目	10~15
片状轻质碳酸钙	400 目	38~49
偶联剂	KH560	1~3
硬脂酸锌	325 目	0.5
偶氮二甲酰胺	SA8000	1~3
石墨	鳞片石墨	2~4



测试项目	测试方法	限值要求	Snugdamp203 结果	
外观	1、初始样品: 表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷; 2、标准烘烤后: 与钣金粘接良好, 表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷	1、初始样品: 表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷; 2、标准烘烤后: 与钣金粘接良好, 表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷	初始	表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷
			烘烤后	试验后: 与钣金粘接良好, 表面光滑, 无颗粒、褶皱、起泡、分层、断裂等缺陷
密度	GB/T 533	≤1.6g/cm ³	1.52g/cm ³ 、1.51g/cm ³ 、1.52g/cm ³	
不挥发物	GB/T 2793	≥99%	99.9%、99.9%、100%	
抗收缩性	将挤出的成品裁剪成 100×100×2mm 的尺寸, 平铺在电泳板上, 将 3 个样品分别单独经过欠烘烤 (140° C×20min)、标准烘烤 (160° C×20min)、过烘烤 (200° C×30min) 处理, 然后在标准状态下放置 4 小时, 用卡尺测量产品的长度和宽度, 对比烘烤前后的变化	≤2%	标准烘烤	试验后无收缩
			过烘烤	试验后无收缩
			欠烘烤	试验后无收缩
硬度	GB/T 531	50-90HA	75HA、72HA、76HA	
柔韧性	将 50×250mm 的样品粘贴在 100×250mm 的电泳板上, 经过标准烘烤静置后, 放置在 -40° C 条件下 4 小时。在 -40° C 的条件下将样品绕直径 50mm 的芯轴旋转	绕芯轴旋转不断裂	试验后不断裂	
燃烧特性	GB/T 8410	≤80mm/min		
剪切强度 - 标准	制取 100×25×0.8mm 的电泳板, 按照 GB/T 2791 的试样制作方法; 将样品经 170°C *20min 烘烤后, 在标准条件下放置 4h, 测试速度 50mm/min	≥0.5MPa	2.877MPa、2.733MPa、2.498MPa	
剪切强度 - 耐烘烤性	制取 100×25×0.8mm 的电泳板, 按照 GB/T 2791 的试样制作方法; 将样品经 200°C *30min 烘烤后, 在标准条件下放置 4h, 测试速度 50mm/min	≥0.5MPa	0.750MPa、0.747MPa、0.729MPa	
剪切强度 - 耐热老化	将样条在 80° C 条件放置 480h 后在标准条件下放置 4h, 按照 GB/T 7124 的方法进行试验, 速度 50mm/min	≥0.5MPa	3.592MPa、3.677MPa、3.495MPa	
剪切强度 - 耐低温性	将样条在 -40° C 条件放置 24h, 随即在该温度下按照 GB/T 7124 的方法进行试验, 速度 50mm/min	≥0.5MPa	2.575MPa、2.678MPa、2.265MPa	

续表

测试项目	测试方法	限值要求	Snugdamp203 结果	
剪切强度 - 耐湿热性	将样条在 40° C × 95%RH 条件放置 480h, 取出后擦干, 标准条件放置 4h, 按照 GB/T 7124 的方法进行试验, 速度 50mm/min	≥0.5MPa	1.075MPa、1.151MPa、1.396MPa	
剪切强度 - 耐冷热交变	将样条按照标准烘烤 (160° C × 20min) 的固化条件处理后, 80° C × 3h → 23° C × 1h → -30° C × 3h → 23° C × 1h → 50° C × RH95% × 15h → 23° C × 1h, 循环 10 次, 标准条件放置 4h, 按照 GB/T 7124 的方法进行试验, 速度 50mm/min	≥0.5MPa	1.554MPa、1.493MPa、1.671MPa	
剪切强度 - 耐腐蚀性	将样条在盐雾试验箱中按照 GB 1771 中性盐雾条件处理 480h, 取出后擦干, 标准条件放置 4h, 按照 GB/T 7124 的方法进行试验, 速度 50mm/min	≥0.5MPa	0.597MPa、0.808MPa、0.680MPa	
损耗因数	按 GB/T16406 悬臂梁法测量二阶损耗因数, 试样制备参照 GB/T16406 中的试样尺寸 180 × 10 × 2mm, 钢板尺寸为 240 × 12 × 1mm, 试样尺寸在实验室温度下测量, 不考虑热胀冷缩的影响。将试样在钢板上平贴压实, 在标准条件下静置 4h。然后在相应的试验温度下每保温 10min 之后测出试样的速度弯曲共振曲线, 根据弯曲共振频率和共振峰宽度, 计算出试样的损耗因数	-20° C: ≥0.10; 0° C: ≥0.15; 20° C: ≥0.20; 40° C: ≥0.15; 60° C: ≥0.10	-20° C	0.13
			0° C	0.15
			20° C	0.40
			40° C	0.35
			60° C	0.175
防粘连性	将尺寸为 300 × 100 × 2mm 的样品叠加 20 层, 放置在 40° C 条件下 168 小时, 取出试样在标准环境中静置 4 小时, 检查样品之间是否有粘连	不粘连	试验后不粘连	
耐腐蚀性	将样品放置在盐雾试验箱中按照 GB/T10125 中性盐雾条件处理 480h。然后除去电泳板表面胶层, 检查胶层边线下方的底板是否有腐蚀	底板无可见腐蚀	试验后底板无可见腐蚀	
储存稳定性	将样品放置在标准状态下 6 个月或 40° C ± 2° C, 336h。检查阻尼贴片的外观、样品硬度	1、外观: 片状, 无褶皱, 分层, 断裂缺陷; 2、硬度: 50-80HA	外观	试验后片状, 无褶皱, 分层, 断裂缺陷
			硬度	75HA、73HA、76HA、

3 结果与讨论:

3.1 EVA 和 POE 的融指

材料类别	VA 含量	融指		
EVA28025	27.8%	23.8	23.5	23.9
EVA220	28%	150.3	150.5	150.8
POE675	/	14.5	14.6	14.5

本文中所用 EVA 优选 EVA 树脂, EVA 树脂的 VA 含量一般为 5%-40%, 本文所选 VA 含量为 28% 左右。28% 左右 VA 含量的 EVA 具有出色的柔韧性、良好的耐老化和耐候性、良好的粘接性能, 可使产品具有较好的柔韧性、温域较宽的储存稳定性、与其它成分组合后与电泳板具有良好的粘接性。且本文中所选 EVA 和 POE 的熔指差异较大, 不同融指状态的材料复配使用可保证产品在良好柔韧性的同时, 烘烤热熔粘接后不会出现收缩流挂等现象。

3.2 填料选择

片状颗粒由于是片层堆叠、能形成交错“壁垒”, 声波要绕路、反射、折射多次, 衰减更快; 振动传来时, 层与层之间会摩擦、滑移、错位, 从而把声能/振动能变成热能消耗掉。所以本文所选填料均为片状结构。

片状石墨和 EVA、POE 弹性体的配合使用实现了弹性(缓冲)、高内耗(阻尼)和声波散射的联合作用, 可是产品具有较强的减震降噪效果。

4 应用测试:

4.1 关于柔韧性、储存稳定性和抗收缩性能的测试

经过标准烘烤 140° C * 20min 静置后, 放置在 -40° C 条件下 4 小时, 在 -40° C 的条件下将样品绕直径 50mm 的芯轴旋转, 样件未出现开裂脆断现象。

300 × 100 × 2mm 的样品叠加 20 层, 放置在 40° C 条件下 168 小时, 取出试样在标准环境中静置 4 小时, 样品之间未见有粘连

100 × 100 × 2mm 尺寸的样品平铺在电泳板上, 将 3 个样品分别单独经过欠烘烤 (140° C × 20min)、标准烘烤 (160° C × 20min)、过烘烤 (200° C × 30min) 处理, 然后在标准状态下放置 4 小时, 用卡尺测量产品的长度和宽度, 对比烘烤前后尺寸未见明显变化

实验证明, 产品在 40° C 和 -40° C 储存后, 均有良好的柔韧性且无黏连现象, 在低温使用环境下不会脆断高温使用环境下不会黏连, 所以产品无需防粘层隔离, 方便装配人员使用。且产品经 140° C - 200° C 烘烤后均为出现收缩流挂现象, 产品具有较好的尺寸稳定性。

4.2 关于损耗因子的应用测试

实验证明, 产品具有较好的减震降噪效果, 完全满足客户要求。



图 1



图 2



图 3

样品编号	评判要求	阻尼损耗因子 (°C)	测试结果			结论
			02-003-001	02-003-002	02-003-003	
B5685587C4	-20°C: ≥0.10;	-20	0.238	0.183	0.19	符合
	0°C: ≥0.15;	0	0.151	0.15	0.15	
	20°C: ≥0.20;	20	0.201	0.212	0.213	
	40°C: ≥0.15;	40	0.162	0.15	0.164	
	60°C: ≥0.10	60	0.162	0.152	0.15	

图四

5 结语

本文研究的热熔阻尼垫 Snugdamp203, 通过热塑性弹性体、填料、增粘剂和软化剂等特定组分的特定含量的配合使用, 实现整体较好的相互作用, 产品既环保又有良好的柔韧性、储存稳定性、耐高温粘接性、良好的车身地板服帖性且制作和使用简单易操作, 满足用户的特定使用需要。

参考文献

[1] 张凯、陈光章、王春艳等. 汽车用热熔阻尼材料阻尼性能的研究[J]. 《弹性体》, 2015, 25(3): 62-66.

[2] 李刚、赵秀英、吴丝婷等. 汽车用环保型EVA热熔阻尼胶片的制备与性能[J]. 《中国橡胶》, 2019, 35(6): 41-45.

[3] 李双良、王洪涛、张勇等. 片状填料对热熔型阻尼材料性能的

影响[J]. 《汽车工艺与材料》, 2017(7): 35-39.

[4] 王再学、杨陈、徐云慧等. 一种汽车用环保阻燃热熔型阻尼胶片及其制备方法:CN,CN111423655B[P].

[5] 柯勇. 环保型热熔性阻尼垫的研究及应用[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.

[6] 黄磊, 丁攀, 王蕾. 汽车用热熔阻尼材料阻尼性能的研究[J]. 汽车工艺与材料, 2011(9): 61-64.

[7] 科建高分子材料(上海)股份有限公司. 一种用于汽车雷达热熔型阻尼片的对位加热压合系统及方法[P]. 中国: CN121403723A, 2026-01-27.

[8] 杭州之江有机硅化工有限公司, 杭州之江新材料有限公司. 一种用于车身地板的热熔阻尼胶垫及其制备方法[P]. 中国: CN115991906B, 2024-09-10.

Research on Fault Diagnosis and Early Warning Mechanisms for Key Mechanical Equipment in Natural Gas Stations

Yongtao Guo Xiaofang Lv Botao Zhao

State Pipeline Network Group Beijing Pipeline Co., Ltd., Hengshui, Hebei, 053600, China

Abstract

As a crucial node in the natural gas transmission and distribution system, the operational status of key mechanical equipment in natural gas stations directly impacts the safety and stability of the supply system. Under prolonged high-load operating conditions, equipment such as compressor units, valve actuators, and cooling systems are prone to faults like abnormal vibration, bearing wear, and sealing failure. To enhance the operational reliability of natural gas station equipment, this paper analyzes the operational characteristics of key mechanical equipment, investigates typical failure mechanisms, and establishes a fault diagnosis and early warning system based on multi-source monitoring data. The study demonstrates that data-driven fault warning methods can achieve dynamic identification of equipment operating conditions and preemptive risk alerts, effectively improving the operation and maintenance management of natural gas station equipment and providing technical support for the intelligent operation and maintenance of the natural gas transmission and distribution system.

Keywords

Natural gas field station; Key mechanical equipment; Fault diagnosis; Status monitoring; Early warning mechanism

天然气场站关键机械设备故障诊断与预警机制研究

郭永涛 吕晓方 赵伯涛

国家管网集团北京管道有限公司, 中国·河北衡水 053600

摘要

天然气场站作为天然气输配系统的重要节点,其关键机械设备运行状态直接影响天然气供应系统的安全性与稳定性。压缩机组、阀门执行机构及冷却系统等设备在长期高负荷运行条件下,易出现振动异常、轴承磨损及密封失效等故障问题。为提高天然气场站设备运行可靠性,本文围绕关键机械设备运行特征,分析典型故障机理,并构建基于多源监测数据的故障诊断与预警机制。研究表明,基于数据驱动的故障预警方法能够实现设备运行状态的动态识别与风险提前预警,从而有效提升天然气场站设备运维管理水平,为天然气输配系统智能化运维提供技术支持。

关键词

天然气场站; 关键机械设备; 故障诊断; 状态监测; 预警机制

1 引言

随着我国天然气管网规模不断扩大,天然气场站在天然气输配系统中的枢纽作用日益凸显。场站内部压缩机、阀门执行机构及冷却系统等关键机械设备通常处于连续高负荷运行状态,一旦发生故障,将直接影响天然气输送安全与系统稳定运行。传统设备维护方式主要依赖人工巡检与定期检修,该方式在故障早期识别与状态评估方面存在明显局限。随着工业传感技术、数据分析技术以及智能监测平台的不断发展,基于状态监测的故障诊断与预警技术逐渐成为天然气场站设备运维的重要技术手段。基于此,本文围绕天然气场站关键机械设备运行特点,对设备典型故障机理、状态

监测方法以及预警机制构建路径进行系统研究,以期提升天然气场站设备运行安全性与运维管理水平。

2 天然气场站机械设备类型及功能

天然气场站是天然气输配系统中的核心设施,其主要功能包括天然气增压、调压、计量、过滤以及输送等。场站内配置的关键机械设备主要包括天然气压缩机、冷却系统设备、阀门执行机构以及润滑系统设备等。其中,天然气压缩机是场站的核心动力设备,其主要作用是通过机械压缩方式提高天然气压力,使天然气能够在长距离输气管道中保持稳定输送状态。在天然气场站长期运行过程中,各类机械设备通常处于高压、高速及连续运行状态,设备内部零部件承受较大的机械负荷与热负荷。例如,在压缩机运行过程中,曲轴、连杆、轴承及密封组件需要在高速旋转状态下保持稳定运行,一旦润滑条件不足或机械结构出现磨损,便可能导致

【作者简介】郭永涛(1982—),男,中国河北藁城人,本科,工程师,从事天然气设备研究。

振动异常或温度升高等问题。因此,对关键机械设备进行实时监测与状态评估,对于保障天然气场站安全运行具有重要意义。

3 天然气场站关键机械设备典型故障分析

3.1 离心压缩机系统故障机理

压缩机作为天然气场站的核心动力设备,其运行状态直接决定天然气输送系统的稳定性与效率。在天然气增压输送过程中,压缩机长期处于高转速、高压及连续运行状态,内部关键部件如转子、轴承、密封结构以及气阀组件承受较大的机械载荷与热载荷。当设备运行时间不断累积时,机械磨损、润滑状态恶化以及结构疲劳等因素会逐渐显现,从而引发一系列典型故障。其中,轴承磨损是压缩机运行过程中最常见的故障类型之一。当润滑油品质下降或润滑系统供油不足时,轴承表面容易产生磨粒磨损或疲劳剥落,进而导致转子运转稳定性下降,并引发振动幅值增加。随着振动持续加剧,压缩机转子系统可能出现不平衡状态,从而进一步扩大设备故障影响范围。在压缩机运行监测过程中,振动信号是判断设备健康状态的重要指标。通过在压缩机轴承座位置布置振动传感器,可实时采集设备运行过程中的振动速度、振动频率及振动加速度等参数。当设备出现轴承磨损或转子不平衡时,其振动频谱通常会呈现明显的特征频率变化,从而为设备故障诊断提供重要依据。

3.2 辅助机械设备故障特征

在天然气场站运行系统中,增压压缩机作为核心动力设备,主要包括往复式压缩机与离心式压缩机,其运行状态直接影响管网输送效率与系统稳定性。受气体流量波动、压力变化及连续高负荷运行等因素影响,压缩机内部易产生机械疲劳与性能衰减问题。往复式压缩机的典型故障主要集中在气阀、活塞及密封系统。气阀在频繁启闭过程中易发生阀片疲劳与密封失效,导致排气效率下降;活塞及活塞环磨损会引发内泄漏,降低容积效率;密封系统老化则可能造成气体外泄风险。同时,曲柄连杆机构不平衡或润滑不足会引起振动增大与轴承温升。

离心式压缩机故障则多表现为气动失稳与转子系统异常。在低流量运行条件下,易发生喘振现象,导致压力与流量剧烈波动,并伴随明显振动与噪声;叶轮在长期高速运转及气固颗粒冲刷作用下,可能产生磨损或腐蚀,影响气动性能;轴承磨损及转子不平衡则会进一步加剧振动问题,降低机组运行稳定性。而润滑与冷却等辅助系统对压缩机运行同样具有重要影响。润滑不足会加剧关键部件磨损,冷却效果下降则易导致温度异常升高。因此,应通过振动、温度及压力等多参数监测手段,对设备运行状态进行动态评估,实现故障的早期识别与预警。

4 天然气场站关键机械设备状态监测与故障诊断技术

4.1 多源传感监测技术在设备状态识别中的应用

在天然气场站设备运行管理过程中,单一监测手段往往难以全面反映设备真实运行状态,因此构建多源传感监测体系成为现代天然气场站设备管理的重要技术路径。多源传感监测系统通常由振动传感器、温度传感器、压力传感器以及流量传感器等组成,通过对设备关键运行参数进行实时采集,可以形成完整的设备运行数据链,为故障诊断提供可靠的数据基础。以压缩机系统为例,在轴承座、机壳及关键连接部位安装振动传感器,可以实时获取设备运行振动信号;在润滑油系统与轴承部位安装温度传感器,则能够监测设备运行过程中温度变化情况,从而判断设备是否处于正常工作状态。

通过多源传感器所采集的数据,可以建立设备运行状态特征参数模型。当设备运行状态正常时,各类监测参数通常保持在稳定范围内,而一旦设备内部结构发生异常,例如轴承磨损或转子不平衡等情况,振动、温度及压力等参数往往会出现明显变化。因此,通过对多种参数进行综合分析,可以有效提高故障识别的准确性。在实际运行管理中,天然气场站通常依托 SCADA 监控系统或设备状态监测平台,将各类传感器数据进行集中采集与处理,实现设备运行状态的实时监控。运维人员可以通过监控系统对设备运行数据进行可视化分析,并对异常数据进行及时处理,从而避免设备故障进一步扩大。通过建立系统化的设备监测体系,可以有效提升天然气场站设备管理的精细化水平,为后续故障诊断与预警机制构建奠定重要基础。

4.2 基于数据分析的设备故障诊断方法

随着信息技术与工业智能化的发展,基于数据分析的设备故障诊断方法逐渐成为天然气场站设备运维的重要技术手段。传统设备维护主要依赖人工巡检与定期检修方式,这种方式虽然能够发现部分设备问题,但在故障早期识别方面存在一定局限。相比之下,基于数据分析的故障诊断方法可以通过对设备运行数据进行连续分析,从而识别设备潜在故障趋势,实现预测性维护。该方法通常通过建立设备运行数据模型,对设备正常运行状态下的参数特征进行统计分析,并形成设备健康基准模型。当设备运行参数偏离正常范围时,系统能够自动识别异常状态,并发出预警信号。

在天然气场站设备故障诊断实践中,常用的数据分析方法包括频谱分析、趋势分析以及机器学习分析等。频谱分析主要用于识别设备振动信号中的特征频率,通过分析振动频谱中出现的异常频率,可以判断设备内部是否存在轴承损坏或转子不平衡等问题。趋势分析则通过对设备运行参数的长期变化进行统计分析,从而识别设备性能下降的趋势。这

种基于数据驱动的故障诊断方法不仅能够提高设备故障识别效率,还能够显著降低人工巡检工作量,从而提升天然气场站整体运维管理水平。为进一步提高天然气场站设备状态监测与故障识别效率,需要构建完整的设备状态监测与故障诊断流程体系。通过对设备运行数据进行实时采集、数据处理、特征分析以及状态评估,可以实现设备运行状态的动态识别,并在故障发生之前形成预警信号。天然气场站关键机械故障诊断与预警技术流程如图1所示。

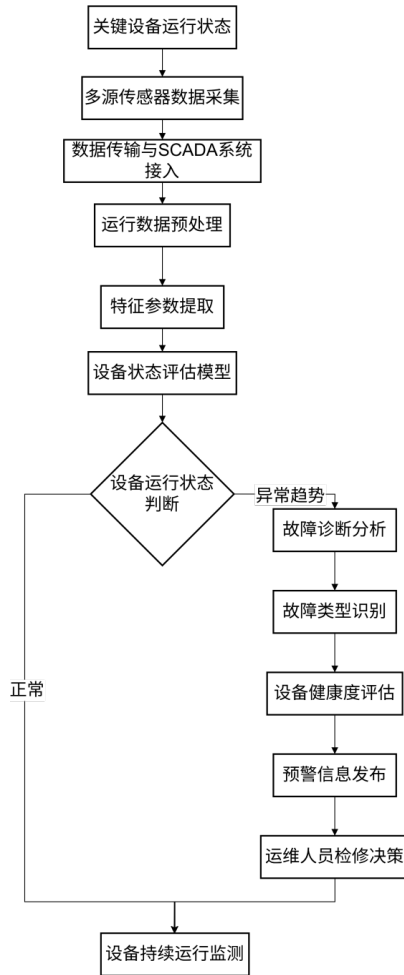


图1 天然气场站关键机械故障诊断与预警流程示意图

5 天然气场站关键机械故障预警机制构建

5.1 设备健康状态评价模型构建

在天然气场站设备运行管理过程中,仅依靠单一参数对设备状态进行判断往往难以全面反映设备真实运行情况,因此需要建立综合性的设备健康状态评价模型,对设备运行状态进行系统化评估。设备健康状态评价模型通常通过整合振动、温度、压力、流量以及能耗等多种运行参数,对设备整体运行状态进行量化分析,并以健康度指数的形式反映设备当前运行水平。通过该模型,运维人员可以直观判断设备是否处于正常运行区间,从而为设备维护决策提供科学依据。

在实际应用中,设备健康度评价通常采用多指标加权分析方法,将不同监测参数进行归一化处理,并根据各参数对设备运行状态影响程度设置相应权重。例如,在压缩机设备运行过程中,振动参数通常是最重要的状态指标,因此其权重值相对较高,而温度参数和效率参数则作为辅助指标参与综合评估。通过对各监测指标进行综合计算,可以得到设备健康度指数。当健康度指数处于较高水平时,说明设备运行状态稳定;当健康度指数逐渐下降时,则表明设备可能存在潜在故障风险,需要及时进行检查与维护。

在设备健康状态评价过程中,还需要结合设备运行历史数据与典型故障案例进行分析。通过建立设备运行数据库,可以对不同运行阶段的设备参数进行对比分析,从而识别设备性能变化趋势。例如,当设备振动值在一段时间内持续上升,或设备运行效率逐渐下降时,系统便可通过健康度模型判断设备可能处于性能退化阶段。通过这种数据驱动的设备健康评价方法,可以有效提高设备状态识别的准确性,为天然气场站设备预警机制的建立提供重要支撑。

5.2 故障预警系统实现路径

在设备状态监测与健康评价模型基础上,天然气场站可以进一步构建智能化故障预警系统,实现设备运行风险的提前识别。故障预警系统通常依托于场站自动化控制平台,通过实时采集设备运行数据并进行分析处理,对设备运行状态进行持续评估。当监测数据超过预设阈值或健康度指数低于安全范围时,系统将自动触发预警机制,并向运维人员发送报警信息,从而提示相关人员及时采取维护措施。

在预警系统设计过程中,需要根据不同设备类型与运行特征设置相应的预警阈值。例如,对于压缩机设备而言,振动幅值、轴承温度以及润滑油压力等参数均属于关键监测指标,当其中任一参数超过安全范围时,系统便会自动生成预警信号。通过对大量设备运行数据进行学习与分析,可以建立设备故障预测模型,从而实现对设备未来运行状态的预测。例如,通过机器学习算法对历史故障数据进行训练,可以识别不同故障类型对应的运行特征,并在设备出现类似特征时提前发出预警信号。通过这种预测性维护模式,可以有效减少设备突发故障发生概率,提高天然气场站设备运行安全性与可靠性。

6 结语

天然气场站关键机械设备的运行可靠性直接影响天然气输配系统的安全与稳定。本文通过分析天然气场站压缩机与输气泵等关键设备的典型故障机理,构建了基于多源数据监测的故障诊断与预警机制,并提出设备健康度评价模型。研究表明,通过振动监测、温度监测及数据驱动分析方法,可以实现设备故障的早期识别与预警,从而降低设备突发故障风险。如今随着智能监测技术与数字孪生技术的发展,天然气场站设备运维管理将更加智能化与数据化,为天

然气输配系统安全运行提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 洪慧恩.石油机械设备的管理与维护方法分析[J].石油石化物资采购,2022,(15):25-27.DOI:10.12316/j.issn.1674-0831.2022.15.009.
- [2] 常勇智,邱亚泽,郑振,等.基于非线性关联维特征提取的机械自动化监测系统[J].计算机与数字工程,2014,42(12):2311-2315.
- [3] 赵越.极端气候条件下钻井机械设备的适应性改造与防护措施[J].石油和化工设备,2025,28(10):193-195.
- [4] 徐志诚.石油天然气工程中机械设备的故障诊断技术研究[J].漫科学(下旬刊),2025,(2):13-15.
- [5] 李彬.天然气场站设备管理问题与安全对策[C]//中国城市燃气协会安全管理工作委员会.2022年第五届燃气安全交流研讨会论文集(下册).中国浙江省嘉兴市,2023:308-309. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.008262.

A Brief Discussion on the Application of Biotechnology in Chiral Drug Synthesis

Guangming Sang

Chia Tai Tianqing Pharmaceutical Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222062, China

Abstract

As a fundamental property of nature, chirality plays a pivotal role in molecular recognition during biological processes and the generation of life-sustaining substances, while also constituting a critical consideration in pharmaceutical design. The distinct enantiomers of chiral drugs often exhibit markedly different pharmacological activities and toxic effects in vivo, underscoring the importance of obtaining optically pure chiral compounds for medication safety. Understanding chirality concepts and characteristics is essential in drug synthesis to ensure therapeutic efficacy and safety. This study analyzes advancements in biotechnology applications for chiral drug synthesis, focusing on the characteristics of biocatalysts such as oxidoreductases, hydrolases, and transferases. Through case studies, it demonstrates the utility of biocatalysis in synthesizing chiral alcohols, chiral amines, axial chiral compounds, and spirocyclic structures.

Keywords

Chiral drugs; Biocatalysis; Protein engineering; Drug synthesis

浅谈生物技术在手性药物合成中的运用

桑光明

正大天晴药业集团股份有限公司, 中国·江苏连云港 222062

摘要

手性作为自然界的基本属性, 分子手性识别在研究生命活动和生命物质产生中都起着极为重要的作用, 也是药物分子设计需考虑的重要因素。手性药物的不同对映体在生物体内常表现出迥异的药理活性与毒性效应, 因此获得光学纯的手性化合物对保障用药安全有重要意义, 药物合成中需要关注手性的概念和特性, 以确保药物的安全性和有效性。本文研究针对生物技术在手性药物合成领域中的研究进展进行分析, 重点讨论氧化还原酶、水解酶、转移酶等生物催化剂的特点, 结合典型案例阐述了生物催化在手性醇、手性胺、轴手性化合物合成中的应用。

关键词

手性药物; 生物催化; 蛋白质工程; 药物合成

1 引言

手性 (Chirality) 以此源于希腊语, 直译为“手的”, 这一命名本身就形象的揭示了其内涵, 如同人的左右手, 两者互为镜像但无法重合。宏观世界中, 手性随处可见, 螺壳的旋转方向、藤蔓的缠绕方式等, 分子尺度上, 手性表现为一种特殊的立体结构特点: 当一个分子与其镜像不能通过任何旋转或平移操作相互重叠时, 该分子即具有手性, 它们就像一对孪生子, 化学式完全相同, 原子连接顺序毫无二致, 但三维空间中的排布方式截然相反。

2 手性药物合成中常用的生物催化剂

2.1 氧化还原酶

氧化还原酶能够以前手性化合物为底物, 通过不对称还原或氧化反应, 构成一个或多个手性中心, 生成光学纯的药物中间体。

2.1.1 羧基还原酶 (KREDs)

KREDs 属于短链醇脱氢酶家族, 能够催化前手性酮的不对称还原, 生成相应的手性醇。这一反应看似简单, 但是全球手性化学品市场中应用最广泛的生物催化方式。KREDs 催化作用依赖于辅酶 NAD, 反应过程中, 辅酶扮演着氢负离子搬运工的角色, 辅酶将烟酰胺环上的氢负离子立体选择性的转移到酮基底物的羰基碳中, 同时一个质子从酶的活性位点残基转移到羰基氧上, 完成一整个还原过程。KREDs 催化反应需要等摩尔量的辅酶作为还原剂, 辅酶的高昂成本是制约其应用的主要障碍, 要解决这一问题, 研究

【作者简介】桑光明 (1985—), 男, 中国江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 从事药物研发研究。

人员开发了多种辅酶再生系统,其中最有价值的设计是利用乙醇作为最终还原剂:乙醇可在葡萄糖脱氢酶或醇脱氢酶的作用下氧化为乙醛,同时将 NAD(P)⁺ 还原为 NAD(P)H,实现辅酶的循环利用。

2.1.2 亚胺还原酶 (IREDs)

手性胺结构广泛存在于天然产物与药物分子中,据统计:大约有 40% 的小分子药物含有手性胺片段。近年来,研究人员还发现了一类特殊的还原胺化酶 (RedAms),能够高效催化酮与胺的直接偶联还原,一步构建手性 C-N 键,避免了亚胺中间体的分离步骤。通过 IRED 催化还原胺化,可直接从前手性酮与环丙胺进一步合成目标产物,通过定点突变获得 M203A/S241L 双突变体,将立体选择性从 87%ee 提升到 > 99%ee,催化效率提高 38%。

2.2 水解酶

水解酶在手性药物合成中最主要的应用是外消旋体的动力学拆分。其原理是根据酶对映体选择性的水解反应:在外消旋的酯或酰胺底物中,酶优先水解其中一个对映体,生成相应的手性酸或醇,而另一个对映体以原料形式保留,从而实现拆分。以 (S)-萘普生的工业合成为例,外消旋的萘普生甲酯在脂肪酶催化下,只有 (S)-酯被选择性水解生成 (S)-萘普生,而 (R)-酯不发生反应。反应停止后,通过简单的酸碱萃取即可分离产物和反应底物,未反应的 (R)-酯可通过消旋化后重新进入拆分循环,理论收率可达 100%^[1]。

2.3 转移酶

转移酶催化官能团从供体分子向受体分子的转移,其中在手性药物合成中最具代表性的是转氨酶 (TAs)。

2.3.1 手性胺绿色合成利器

ω -转氨酶能够催化酮的不对称胺化反应,将前手性酮直接转化为手性伯胺,同时以氨基酸或胺作为氨基供体。这一反应无须还原剂,副产物仅为相应的酮酸或酮,原子经济性高,环境友好^[2]。

2.3.2 催化机制的双底物识别

转氨酶以磷酸吡哆醛 (PLP) 为辅酶,通过“乒乓机制”催化反应。首先,氨基供体与酶结合的 PLP 形成醛亚胺中间体,释放出相应的酮产物,同时 PLP 转化为吡哆胺磷酸 (PMP)。其次, PMP 与酮底物反应形成新的醛亚胺,释放出手性胺产物,PLP 得以再生。这一过程中,酶活性位点的结构决定了酮底物结合时的立体取向,从而控制产物的绝对构型^[3]。

3 生物技术在手性药物合成中的典型应用

3.1 手性醇类药物的合成

手性醇是手性药物中最常见的结构单元之一,不管是他汀类降脂药侧链的三个连续手性中心,还是抗抑郁药物度洛西汀的 (S)-醇结构,手性醇的精准构建都是药物合成

的关键步骤。KREDs 凭借其卓越的立体选择性和催化效率,成为手性醇工业化生产的主力工具。

随着辅酶再生技术的突破,这一生物催化工艺真正具备了经济可行性。核心设计在于将昂贵的 NAD(P)H 辅酶与第二个酶比如葡萄糖脱氢酶偶联,以链家的葡萄糖作为最终还原剂,实现辅酶的循环利用。工艺层面, KREDs 催化具有多重优势:反应常在常温常压的水相中进行,无需危险试剂;立体选择性通常 > 99%ee;产物浓度可达 100g/L 以上。这些特性使其在制药工业中迅速普及,已有数十种手性醇药物中间体采用 KREDs 工艺生产^[4]。

例如,他汀类药物手性侧链合成。他汀类药物作为全球销量最大的处方药,其中阿托伐他汀应用广泛,共同结构特点为含有三个连续手性中心的 β , δ -二羟基庚酸侧链,这一侧链的立体化学纯度直接决定了药物的降脂活性^[5]。传统化学合成这一侧链的步骤较多,生物催化提供了最佳的解决方案:双酮还原酶能够催化 β , δ -二酮酯底物的立体选择性双还原,一步构建两个手性中心,生成光学纯的他汀侧链前体。这一过程是生物催化精准性的典范,双酮还原酶能够区分底物中两个看似相似的酮基,优先还原其中一个,生成的羟基中间体自动环化形成内酯,随后第二个酮基被还原,最终以 > 99%ee 值和 > 99%de 值获得目标产物^[6]。

3.2 手性胺类药物的合成

3.2.1 亚胺还原酶催化环己胺合成

环己胺结构是众多天然产物和药物分子的重要骨架,但其立体选择性合成一直是手性化学的难题。中国科学院天津工业生物技术研究所高书山研究员与崔成森研究员团队的最新研究,为这一挑战提供了解决方案,见表 1。

表 1 工程化改造亚胺还原酶合成环己胺药物分子砌块示意图

工程化 IRED 催化体系	底物范围	关键性能指标
野生型 IRED	80 多种环己胺底物	转化率 99%
↓酶口袋精准改造	↓	立体选择性: 99%ee
四个高活性突变体	cis/trans 异构体	底物载量: 30 g/L
	轴向手性环己胺	应用验证: 10 g 级制备

根据表中可知,通过亚胺还原酶的工程化改造,研发团队获得了四个高性能突变体,实现了 80 余种不同构型环己胺的高效立体选择性合成

3.2.2 转氨酶在西他列汀合成中的应用

转氨酶最重要的应用案例是 2 型糖尿病药物西他列汀的合成,被公认为工业生物催化的里程碑。西他列汀含有一个手性胺中心,传统合成路线采用手性辅基诱导的不对称氢化,需要在高压和高温的条件下采用铑基贵金属催化剂,立体选择性仅为 97%ee,且需要额外的纯化步骤。默克公司与 Coedxis 公司合作,提出了以前手性酮为原料,通过 ω -转氨酶的直接胺化构建手性胺^[7]。这一选择挑战巨大:天然转

氨酶对该类含有大位阻基团的酮底物几乎没有活性。研究团队对节杆菌来源的转氨酶进行了多轮定向进化,通过筛选数万个突变体,最终获得了包含 27 个突变的工程酶^[8]。进化后的酶活性提升了大约 25000 倍,能够在高底物浓度下以 >99.95% 的 ee 值合成西他列汀。

3.3 轴手性化合物的合成

轴手性分子最典型的代表是联芳烃类化合物,其中两个芳香环通过单键连接,由于邻位取代基的空间位阻,两个芳香环不能自由旋转,形成稳定的手性构象。轴手性广泛存在于天然产物和药物分子中,比如抗真菌药物米卡芬净、抗肿瘤药物葡萄孢霉素等含有轴手性结构。

近年来,生物催化位轴手性合成开辟了新路径,尹红宁等人发表在《Nature Synthesis》上的研究^[9],通过分子动力学模拟指导的定向计划,将黄素酶 PtOYE 改造为能够催化轴手性联芳基化合物合成的催化剂。见表 2。

表 2 分子动力学模拟指导的黄素酶定向进化

野生型 PtOYE	分子动力学模拟识别关键残基 (F124/V254)
初始活性较低	揭示 loop 区域构象动态调控机制
对非天然底物无活性	预测有益突变位点
无轴手性选择性	锁定改造靶点

根据表中显示可知:分子动力学模拟揭示了 PtOYE 活性口袋中 F124/V254 等关键残基对底物结合构象的调控作用,基于这一认识进行定向进化,最终获得了催化效率提高 70 倍的突变体 ADes-5。

4 结语

进入 21 世纪后,手性药物已经从“特殊品种”发展为制药工业的主流,根据统计:全球大约 52% 的化学药物具有手性特点,在新药研发中,这一比例还在持续攀升。最令人瞩目的是:2019 年全球畅销药前 20 名中,手性药物占比高达 70%,这一数据反映了手性药物在临床治疗中的核心

地位。

随着蛋白质工程、定向进化和计算模拟等技术的发展,酶的催化活性、底物谱与立体选择性得以持续优化,以手性药物的绿色、高效合成开辟了新路径。

参考文献

- [1] 徐斌. 生物转化及其在药物合成中的应用[J]. 化工管理, 2021, (26):45-46.
- [2] 徐礼生,王治元,刘均忠,等. 生物技术在手性药物合成中的应用进展[J]. 精细化工, 2013, 30(04):370-373+397. DOI:10.13550/j.jxhg.2013.04.011.
- [3] Slagman S, Fessner W D. Biocatalytic routes to anti-viral agents and their synthetic intermediates[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(3): 1968-2009.
- [4] Cosgrove S C, Miller G J. Advances in biocatalytic and chemoenzymatic synthesis of nucleoside analogues[J]. Expert Opinion on Drug Discovery, 2022, 17(4): 355-364.
- [5] Simic S, Zukic E, Schmermund L, et al. Shortening synthetic routes to small molecule active pharmaceutical ingredients employing biocatalytic methods[J]. Chemical Reviews, 2021, 122(1): 1052-1126.
- [6] Wu S, Snajdrova R, Moore J C, et al. Biocatalysis: enzymatic synthesis for industrial applications[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(1): 88-119.
- [7] Hughes D L. Biocatalysis in drug development—highlights of the recent patent literature[J]. Organic Process Research & Development, 2018, 22(9): 1063-1080.
- [8] Fernández-Lucas J. Multienzymatic synthesis of nucleic acid derivatives: a general perspective[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2015, 99(11): 4615-4627.
- [9] Yin H N, Chen Z, Zhao X, et al. Molecular-dynamics-simulation-guided directed evolution of flavoenzymes for atroposelective desaturation[J]. Nature Synthesis, 2025, 4(12): 1621-1629.

Key Processes and Industrialization Path of Co-disposal and High-value Utilization of Metallurgical Solid Waste

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract

The metallurgical industry serves as a critical foundational raw material sector, generating hundreds of millions of tons of solid waste annually. This includes blast furnace slag, steel slag, dust removal ash, and iron oxide scale from steelmaking processes, as well as red mud, copper slag, lead-zinc slag, and anode mud from non-ferrous metallurgy operations. These metallurgical solid wastes are rich in iron, aluminum, calcium, silicon, carbon, and various valuable metal elements, possessing significant resource utilization potential. Transitioning from “end-of-pipe disposal” to “resource recovery” through integrated co-processing and high-value utilization has become a pivotal strategy for green and low-carbon development in the metallurgical industry. This study systematically categorizes major types and characteristics of metallurgical solid waste, analyzes key technologies for co-processing and value enhancement, and explores viable industrialization pathways with safeguard mechanisms, aiming to provide theoretical foundations and practical references for sustainable resource utilization of metallurgical waste.

Keywords

Metallurgical solid waste; Co-processing; High-value utilization; Resource recycling

冶金固废协同处置与高值化利用关键工艺及产业化路径探讨

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

摘要

冶金工业是重要的基础原材料工业, 每年产生数以亿吨计的固体废弃物, 包括钢铁冶金过程中的高炉渣、钢渣、除尘灰、轧钢氧化铁皮, 以及有色冶金过程中的赤泥、铜渣、铅锌渣、阳极泥等。与此同时, 冶金固废中富含铁、铝、钙、硅、碳及多种有价金属元素, 具有极高的资源化利用价值。推动冶金固废由“末端处置”向“资源化利用”转变, 实现协同处置与高值化利用的有机结合, 已成为冶金行业绿色低碳发展的重要路径。本文系统梳理了冶金固废的主要类型与特征, 分析了协同处置与高值化利用的关键工艺技术, 探讨了产业化发展的可行路径与保障机制, 以为冶金固废资源化利用提供理论支撑与实践参考。

关键词

冶金固废; 协同处置; 高值化利用; 资源循环

1 引言

传统的单一固废处置模式往往存在效率低、成本高、产品附加值低等问题, 难以实现经济效益与环境效益的统一。近年来, 协同处置与高值化利用逐渐成为行业共识。协同处置强调将冶金固废与其他行业固废进行配伍, 利用冶金炉窑的高温环境实现无害化处置与资源回收; 高值化利用则着眼于开发高附加值产品, 将固废从“低值填埋”转向“高值转化”。本文聚焦冶金固废协同处置与高值化利用两大主线, 系统分析关键工艺技术, 探讨产业化路径, 以为冶金行业固废资源化利用提供系统性解决方案。

【作者简介】魏光泽(2005—), 男, 中国山东潍坊人, 在读本科, 从事冶金工程研究。

2 冶金固废协同处置与高值化利用关键工艺

2.1 冶金炉窑协同处置固废技术

2.1.1 高炉协同处置技术

高炉是典型的逆流式高温反应器, 炉身温度可达两千摄氏度以上, 还原性气氛强, 具备协同处置特定固废的潜力。高炉协同处置的主要对象包括废塑料与废轮胎、含铁尘泥以及含碳固废。废塑料和废轮胎经破碎后与煤粉混合喷入高炉风口, 在高温下分解气化, 替代部分焦炭和煤粉, 实现能源回收, 同时废轮胎中的锌等元素可被还原回收。含铁量较高的除尘灰、氧化铁皮等压制成块后加入高炉或烧结工序, 可实现铁素资源循环利用。利用高炉对碳的高效利用特性, 还可以协同处置部分含碳工业固废。高炉协同处置的关键在于控制有害元素的富集循环, 如锌、铅、碱金属等对高炉操作

的不利影响,需建立有害元素平衡模型,严格控制入炉负荷。

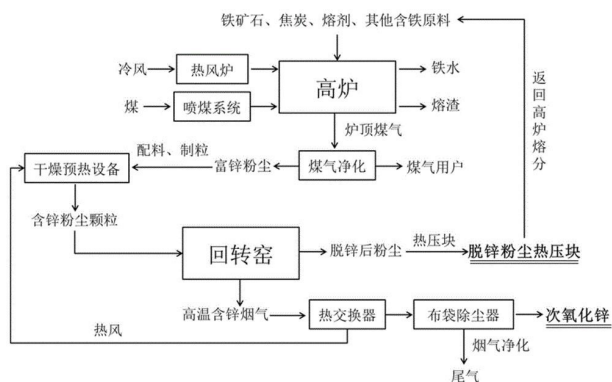


图1 高炉协同处置技术

2.1.2 转炉协同处置技术

转炉炼钢过程熔池温度高、搅拌强烈,具备处理部分危废与固废的能力。废油泥、废油漆桶可作为冷却剂加入转炉,在高温下彻底分解有机污染物,金属铁熔入钢水,无机物进入渣相。废轮胎、废塑料则可替代部分废钢作为冷却剂,同时回收能源。转炉协同处置需关注对钢水质量的影响,严格控制有害杂质含量。

2.1.3 电炉协同处置技术

电弧炉以废钢为主要原料,熔池温度高,可协同处置含锌、铅尘泥及废油泥,部分企业已开展电炉协同处置含锌除尘灰的工业实践,利用电炉高温还原环境,使锌还原挥发并在收尘系统中富集回收,实现铁渣与锌的分离。

2.1.4 回转窑与熔融炉协同处置技术

回转窑和熔融炉是处理复杂固废的常用设备。利用回转窑处理钢铁冶炼除尘灰,通过还原焙烧,将锌、铅等挥发回收,得到富锌烟尘和还原铁产物。熔融炉如等离子炉、电弧熔融炉可用于处理含重金属的危险废物,实现玻璃化固化,消除环境风险。

2.2 多源固废协同配伍技术

协同处置的核心在于配伍,即根据固废的成分特性,通过合理配比,形成互补效应,优化处理效果。成分互补可将高钙固废与高硅固废配伍,调节渣系碱度,改善熔融性能,或将高热值固废与低热值固废搭配,维持炉内热平衡。污染物协同控制方面,可利用固废中的碱性成分如钢渣、赤泥吸收酸性气体,利用含碳固废还原重金属,抑制其挥发逸散。资源协同回收方面,通过多源固废协同处理,可实现多种有价值元素的同步回收,例如将含铁尘泥与含锌废渣协同处理,可同时回收铁、锌资源。配伍技术的实施需要建立完善的固废成分数据库,并结合热力学模拟与工艺试验,确定最优配比方案。

2.3 协同处置中的污染物控制

协同处置过程可能产生烟气、飞灰、炉渣等二次污染物,必须采取有效控制措施。烟气净化可采用“急冷、活性炭喷射、布袋除尘、湿法脱酸”等组合工艺,去除烟气中的二噁英、

重金属、酸性气体。协同处置危废产生的飞灰可能含有高浓度重金属,需按危险废物管理,经稳定化或固化后安全填埋或进一步提取有价值金属。协同处置产生的炉渣若满足浸出毒性标准,可用于建材生产,否则需进行无害化处理^[1]。

3 高值化利用关键工艺

3.1 钢铁冶金固废高值化利用

3.1.1 矿渣超细粉

粒化高炉矿渣经粉磨至比表面积四百至六百平方米每千克,制成矿渣微粉,可等量替代水泥熟料百分之三十至五十,显著降低水泥生产过程的碳排放。矿渣微粉具有早期强度低、后期强度高、水化热低、抗硫酸盐侵蚀性能好等优点,是高性能混凝土的关键掺合料。近年来,超细矿渣粉的开发进一步拓展了应用领域,其比表面积超过七百平方米每千克,可用于制备高强度、高耐久性混凝土,产品附加值显著提升。

3.1.2 钢渣梯级利用

钢渣因游离氧化钙问题限制了其在建材领域的应用,但通过预处理与改质,可实现梯级利用。采用热焖法处理钢渣,可使游离氧化钙快速消解,提高体积稳定性,经陈化处理后钢渣可用作道路基层材料、工程回填材料。通过多级磁选,可回收钢渣中的金属铁,尾渣铁含量可降至百分之二以下,为进一步利用创造条件。将预处理后的钢渣粉磨至一定细度,与矿渣微粉、粉煤灰等复合,可制备复合矿物掺合料,钢渣微粉的活性虽低于矿渣,但通过机械活化与化学活化可显著提升。利用钢渣中的碱性氧化物与二氧化碳反应生成碳酸盐,既实现钢渣稳定化,又可封存二氧化碳,碳化钢渣可用于制备轻质骨料、砌块等建材产品。

3.1.3 除尘灰提锌提铁

钢铁除尘灰尤其是高炉布袋灰、转炉除尘灰中锌含量可达百分之五至二十,具备回收价值。回转窑还原挥发法将除尘灰与焦粉混合,在回转窑中还原焙烧,锌还原挥发后氧化富集于烟尘中,得到锌品位百分之四十至六十的次氧化锌产品,尾渣铁含量可达百分之五十以上,可作为炼铁原料。转底炉直接还原法将除尘灰与含碳物料造球后,在转底炉中高温还原,锌挥发回收,金属化球团作为高炉或转炉原料,该技术具有处理量大、还原效率高等优点,已在多个钢铁企业应用。对于锌品位较高的除尘灰,可采用酸浸或碱浸工艺提取锌,实现高纯锌产品的制备。

3.2 有色冶金固废高值化利用

3.2.1 赤泥综合利用

赤泥的综合利用是世界性难题,近年来多种高值化利用路径取得进展。采用还原焙烧—磁选工艺可从赤泥中提取铁,生产铁精矿,采用酸浸—萃取—电积工艺可提取钪、钛、稀土等稀散金属。将赤泥与粉煤灰、矿渣等配伍,可制备烧结砖、陶粒、发泡陶瓷等建筑材料,赤泥的碱性需通过酸化、

碳化等方式调节。利用赤泥的高碱性与吸附性能,可处理酸性矿山废水、固定重金属离子。经改性的赤泥还可作为公路路基填料,实现大规模消纳。

3.2.2 铜渣高效利用

铜渣铁含量高,但主要以铁橄榄石形式存在,难以直接磁选回收。深度还原—磁选工艺在还原剂作用下,将铁橄榄石中的铁还原为金属铁,再通过磁选分离,获得高品位铁精矿。铜渣与石英、石灰石等配料后,经熔融、结晶可制备微晶玻璃板材,具有高强度、高耐磨性,可用作建筑装饰材料。铜渣硬度高,还可用于制备耐磨地坪材料、喷砂磨料等。

3.2.3 阳极泥稀贵金属提取

阳极泥中金、银、铂、钯等贵金属含量远高于原生矿石,是重要的稀贵金属二次资源。主流工艺为预处理、浸出、分离提纯。预处理采用焙烧或酸洗脱除铜、铅、硒等杂质。贵金属提取采用氰化浸出、王水溶解、氯化挥发等方法提取金、银,通过萃取、置换、精炼等工序分离提纯铂族金属。硒、碲等稀散元素在预处理过程中富集,通过焙烧、碱浸、电解等工艺回收。

3.3 冶金固废制备绿色建材

建材行业是消纳冶金固废的主要领域,高值化建材产品的开发正从传统的水泥混合材、混凝土骨料向高性能、多功能方向拓展。以钢渣、赤泥、尾矿等为主要原料,经高温发泡可制成轻质保温板材,兼具保温隔热与装饰功能。利用冶金渣的高钙高硅特性,可制备高性能微晶玻璃板材,应用于高档建筑装饰。将冶金固废粉体与胶凝材料复合,可开发适用于3D打印的建筑砂浆,拓展固废利用新场景。利用矿渣、钢渣、赤泥等制备高混合材掺量的低碳水泥,可降低水泥工业碳足迹^[2]。

4 产业化路径探讨

4.1 产业模式创新

4.1.1 园区化集聚发展

依托大型冶金企业或工业园区,建设固废资源化利用基地,集中处理周边冶金及关联产业固废,在园区内形成“冶金生产—固废处置—资源化产品—回用于生产”的闭环循环链条,降低物流成本,提高资源利用效率。

4.1.2 跨产业协同共生

推动冶金企业与建材、化工、环保等产业构建共生网络,例如钢铁企业将矿渣微粉供应至水泥企业,将高炉煤气供应至化工企业生产甲醇,电解铝企业将赤泥供应至建材企业生产陶粒,通过产业协同实现资源梯级利用与环境负荷分摊。

4.1.3 第三方治理模式

引入专业环保企业以市场化方式承接冶金固废处置与

资源化业务,专业化运营可提升技术水平、降低处置成本,同时使冶金企业聚焦主业,政府可通过特许经营、绿色采购等方式支持第三方治理企业成长。

4.2 经济性分析

冶金固废高值化利用项目的经济性受多种因素影响。投资成本主要包括厂房建设、设备购置、环保设施等,转底炉、回转窑等大型处理设施投资较高,但规模效益显著。运行成本包括原料、燃料、药剂、能耗、人工、维护等费用,高能耗是制约部分工艺经济性的关键因素。产品收益取决于产品种类、质量与市场价格,提取稀贵金属、生产高附加值建材的项目收益较好,而低端建材产品面临市场竞争激烈、利润空间有限的问题。政策补贴方面,资源综合利用税收优惠、绿色金融支持、碳交易收益等政策红利可显著改善项目经济性。

总体来看,冶金固废高值化利用项目的盈利能力与技术水平、产品定位、市场规模密切相关,应优先选择技术成熟、产品附加值高、市场需求稳定的方向进行产业化推广^[3]。

4.3 标准体系建设

健全的标准体系是产业化发展的基础保障。当前冶金固废利用领域标准缺失、指标不统一的问题较为突出,需加快构建涵盖分类与表征、产品标准、环保标准、技术规范等方面的标准体系。统一冶金固废的分类方法、取样制样规范、成分测试标准,针对矿渣微粉、钢渣粉、赤泥基建材、提取金属产品等制定明确的质量指标与检测方法,规定固废处理过程污染物排放限值和资源化产品的环境安全性要求,明确协同处置与高值化利用工艺的设计、运行、维护要求,都是标准体系建设的重要内容^[4]。

5 结语

冶金固废协同处置与高值化利用是实现冶金行业绿色低碳循环发展的重要途径。冶金固废种类繁多、成分复杂,兼具资源属性与环境属性。协同处置利用冶金炉窑的高温优势,可同时处理多源固废,实现能源回收与有害物质无害化;高值化利用着眼于开发矿渣微粉、钢渣梯级利用产品、稀贵金属提取、绿色建材等高附加值产品,提升资源利用效益。

参考文献

- [1] 王啟胜,张浩浩,赵波,等.含铁含碳冶金固体废物转底炉热还原协同处置[J].烧结球团,2024,49(04):93-100+113.
- [2] 濮广强.生物质协同处置多源冶金固废的基础研究[D].江苏科技大学,2024.
- [3] 潘却易,王晓佳,沈德魁,等.钢铁冶炼高炉协同处置冶金尘泥固废的冷态流动数值模拟研究[J].能源科技,2023,21(02):88-92.
- [4] 叶恒棣,李谦,魏进超,等.钢铁炉窑协同处置冶金及市政难处理固废技术路线[J].钢铁,2021,56(11):141-147.

Analysis of Operational Issues and Technical Breakthrough Practices for China's First Nationwide Gasoline-Diesel Blending Treatment Unit

Xiaoqin Xian

China Petroleum Sichuan Petrochemical Co., Ltd., Refining Unit 4, Chengdu, Sichuan, 611900, China

Abstract

Based on frontline practical experience, this paper systematically analyzes the root causes of conventional operational issues in gasoline-diesel blending and emerging challenges in aviation-gasoline blending, including mechanism of occurrence, design flaws, and insufficient operational compatibility. It elaborates on technical retrofit measures such as enclosed unloading system modifications, nitrogen sealing improvements, and equipment capacity upgrades, as well as targeted adjustment plans for process parameter optimization and heating furnace thermal load regulation after aviation-gasoline blending. The study summarizes technical expertise and management methods for transitioning from trial operation to stable operation of the first blending unit, and from single-component blending treatment to multi-component blending. The research findings fill domestic technological gaps in large-scale blending treatment and multi-component blending, providing replicable and scalable practical references for similar units. These advancements significantly enhance pipeline operation efficiency of refined oil products and promote efficient resource utilization and green low-carbon development in the petrochemical industry.

Keywords

Oil blending treatment unit; Fractionation column; Excessive oxygen content; Equipment clogging; Aviation fuel blending

中国石油全国首套汽油柴油混油处理装置运行问题分析及技术攻关实践

鲜小勤

中国石油四川石化有限责任公司炼油四部混油单元, 中国·四川成都 611900

摘要

本文基于一线实践经验, 系统分析汽柴油混油常规运行问题与汽航混油掺炼新问题的产生机理、设计缺陷及工况适配性不足等根源, 阐述密闭卸车改造、氮气密封完善、设备扩容升级等技术改造措施, 以及汽航混油掺炼后的工艺参数优化、加热炉热负荷调控等针对性调整方案, 总结首套混油装置从试运投产到稳定运行、从单一混油处理到多组分混油掺炼的技术经验与管理方法。研究成果填补了国内混油规模化处理及多组分混油掺炼领域技术空白, 为同类型装置提供可复制、可推广的实践参考, 对提升成品油管道运行效益、推动石化行业资源高效利用与绿色低碳发展具有重要意义。

关键词

混油处理装置; 分馏塔; 氧含量超标; 设备堵塞; 汽航混油掺炼

1 引言

成品油管道顺序输送凭借运量大、成本低等优势成为外运主流方式, 交替输送不同油品时会形成性质不稳定的过渡段混合油(简称“混油”)。其中汽油-柴油混油为常规处理原料, 汽油-航煤混油为新增处理品类, 两类混油因馏程重叠、性能不达标无法直接利用, 需经专业化装置精馏回收。

中国石油首套汽柴油混油处理装置为国内首创示范工程, 填补了规模化处理技术空白, 但因无成熟经验可借鉴, 仅参照常减压蒸馏装置设计, 存在工艺匹配、设备选型等先天不足, 叠加施工参数调整, 加剧了投产后运行风险。2025年开展汽油-航煤混油掺炼试点后, 原料轻组分占比提升引发塔盘温度异常、加热炉及回流系统过载等新问题, 对工艺调控能力提出更高要求。

2 混油产生机理及装置概况

2.1 混油产生机理与危害

成品油管道顺序输送时, 不同品类成品油的交界面处因湍流扩散、分子扩散、流速不均等作用, 形成非合格产品

【作者简介】鲜小勤(1973—), 男, 中国四川南部人, 从事拓展复杂操作优化、常见故障诊断、工艺参数优化、技术支持研究。

的过渡段油品,即混油。混油产生量与管道长度、管径、输送流量、切换频次、油品物性及管道内壁状态密切相关,汽油-柴油混油为常规混油品类,汽油-航煤混油则因航煤输送工艺试验产生,两类混油的核心共性特点表现为:①组分复杂,不同馏程油品组分相互重叠;②馏程跨度大,挥发性和燃烧性能不满足车用油品标准;③无法直接调和出厂或作为废料排放;④长期存放易发生氧化、聚合反应,生成胶质与油膜物,加剧设备堵塞。若不进行专业化处理,混油只能降级使用或按不合格品处置,造成大量石油资源浪费,显著降低企业经济效益。

2.2 汽油、柴油与航煤物化性质

汽油、柴油、航煤的物化性质存在显著差异,是混油精馏分离的理论依据,也是汽航混油掺炼后工况变化的核心原因,

2.3 混油处理装置工艺原理

本混油处理装置以精馏分离为核心工艺,利用不同油品的沸点差异,在分馏塔内实现气液两相逆流接触与逐级分离。装置整体由原料接收系统、储存系统、换热系统、精馏系统、产品系统及公用工程系统组成,流程形式模拟常减压蒸馏装置常压单元,但在原料性质、处理规模、操作温度、压力、设备负荷等方面与常规常减压装置存在显著差异;针对汽航混油掺炼的新工况,通过工艺参数调控、热负荷优化实现原料与装置的适配。

3 装置运行过程中典型问题及原因分析

装置自2020年10月投产后,受设计参考体系不匹配、原料物性特殊、施工参数变更、设备选型不完善等多重因素影响,短期内连续出现多项影响安全平稳运行的常规问题;2025年开展汽航混油掺炼试点后,因原料组分变化、轻组分占比提升,又引发一系列新的工况问题。作者作为一线高级技能人才,全程参与各类故障排查、原因分析与应急处置,现将常规问题与掺炼新问题及根源总结如下:

3.1 (汽-柴)混油生产常规运行典型问题及原因

3.1.1 分馏塔氧含量超标

问题现象:投产不足40天,分馏塔塔顶不凝气中氧含量持续偏高,超出安全控制指标($\leq 0.5\%$),存在形成爆炸性混合气体、引发火灾爆炸的重大安全隐患,装置运行处于高危状态。原因分析:经全面排查,确定氧含量超标的根本原因为:①卸车区未采用密闭卸车设计,敞开或半密闭卸车过程中大量空气随原料进入系统;②罐区未设计氮气密封,储罐呼吸阀频繁吸入空气,空气在分馏塔内积聚导致氧含量超标。应急处置:因装置无法立即停工,采取临时应急措施:持续向分馏塔补入氮气,通过稀释作用降低氧含量,维持装置短时运行。该方法仅为权宜之计,无法从根源解决空气带入问题,且增加氮气消耗成本,存在安全风险反弹隐患。

3.1.2 机泵过滤器与进料换热器堵塞

问题现象:装置运行约4个月时,重沸炉进料泵进口

过滤器频繁堵塞,表现为泵入口压力波动、流量下降;虽泵配置一备一用系统,可维持短时运行,但随后分馏塔进料流量大幅波动、进料温度不稳定,导致精馏工况严重失衡,产品质量面临超标风险。原因分析:1.成品汽、柴油中的添加剂在高温下发生聚合反应,生成了有机物。后续,又通过将柴油、抗磨剂、十六烷值改进剂进行模拟试验,将温度加热至 200°C ,经冷却、过滤后同样有类似过滤器堵塞物的物质产生,进一步验证了该结论。停工检查确认:分馏塔进料换热器堵塞严重,流道变窄导致物料流通受阻。应急吹扫处置:针对堵塞问题,现场采用外接高压蒸汽软管多点吹扫方案,对加热炉、换热器、管线、塔系统进行强化吹扫,完成吹扫置换后交付检修,恢复装置基本运行条件。

3.1.3 分馏塔塔盘浮阀大面积堵塞

问题现象:检修人员进入塔内检查发现:塔盘浮阀大面积被粘稠油膜物堵塞、包裹、卡死,浮阀动作失灵,气液接触通道受阻,导致精馏效率大幅下降,长期运行可能引发液泛、淹塔、产品不合格等严重后果。原因分析:对堵塞物取样化验并结合工况分析,确定根本原因:混油中汽油、柴油组分在 $120^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 温度区间内发生轻度氧化、聚合反应,生成粘稠聚合物;原料中含有的胶质、不饱和烃在该温区易发生缩合结垢,附着在塔盘、浮阀、换热器表面。设计阶段因缺乏混油物性数据,未设置原料预处理系统,也未对结垢温区进行专项规避设计,导致结垢问题未得到提前防控。

3.2 (汽油-航煤)混油掺炼试点新问题及原因

3.2.1 分馏塔中上部塔盘温度持续升高

问题现象:掺炼后分馏塔4层、18层、20层、22层塔盘温度呈逐步升高趋势,从9:00的 146.2°C 、 158.4°C 、 203.2°C 、 211.1°C 升至13:00的 163.5°C 、 186.3°C 、 213°C 、 216°C ,塔底温度则基本保持稳定,无明显波动。原因分析:加工原料由T-001A罐(汽油、柴油各占50%)切换为T-001B罐(汽油50%、柴油30%、航煤20%)后,轻组分(汽、航)占比从50%提升至70%,汽油、航煤沸点远低于柴油,在相同加热条件下更容易汽化并携带大量热量,而柴油作为重组分的占比降低,其吸热控温的作用大幅减弱,导致塔内热量堆积;同时加热炉出口温度恒定为 279°C ,轻组分过度汽化使塔内气液两相传热交换更剧烈,且气液两相集中于分馏塔中上部,使中上部塔盘对温度变化的反应更显著,最终导致塔盘温度持续升高。

3.2.2 加热炉燃料气消耗、炉膛温度同步攀升

问题现象:掺炼后燃料气压力从 0.039Mpa 升至 0.078Mpa ,炉膛温度从 475°C 升至 521.6°C ,燃料气进料量从 35.5kg/h 增至 49.9kg/h ,三者呈同步升高趋势,加热炉运行负荷大幅增加。原因分析:原料轻组分占比增加后,轻组分汽化所需的吸热量显著提升,为维持加热炉出口温度稳定在 279°C ,装置需补充更多热量满足轻组分汽化需求,因此燃料气的供给压力和用量同步提升;燃料气燃烧强度的提高

使炉膛释放热量大幅增加,直接导致炉膛温度持续攀升,加热炉处于高负荷运行状态。

4 技术攻关团队组建与总体解决方案

面对首套装置连续出现的设计缺陷、设备故障、常规运行难题及汽航混油掺炼新工况问题,四川石化炼油四部迅速组建混油装置技术攻关团队,车间组织单元技师、核心技能骨干,全程参与方案制定、现场操作、施工监督与调试验收。

5 针对性技术改造与优化措施实施

5.1 汽柴混油常规问题根治改造

5.1.1 氧含量超标问题改造

为从根源解决空气带入问题,实施两项关键改造:

卸车区升级为密闭卸车系统,对卸车鹤管、管道、阀门、油气回收系统进行全面改造,实现混油从槽车到储罐的全密闭输送,彻底杜绝卸车过程中的空气吸入;

罐区增设氮气密封系统,在原料罐、产品罐设置氮气密封装置,维持储罐微正压(0.02~0.05MPa),防止呼吸阀进气,同时减少油品挥发损耗。改造完成后,分馏塔氧含量长期稳定在0.3%以下,满足安全控制指标,本质安全水平大幅提升。

5.1.2 过滤器堵塞问题升级改造

针对塔底进重沸炉泵、柴油出装置过滤器频繁堵塞问题,攻关团队与设计院重新核算流量、杂质含量、过滤面积与精度,实施两项升级措施:

由Y型和三通折流式更换为篮式过滤器。过滤面积相比之前分别增大了约12倍和16倍(备注:原P-103AB泵、P-104AB泵过滤器面积分别为0.026M²、0.0127M²,篮式过滤器面积为0.32M²、0.204M²),且与机泵形成2对2的匹配,可不停机泵实现在线切换,减少切换操作风险。

完善压差监测与运行管理制度,在过滤器进出口设置压差变送器,实时监控堵塞状态,实现预判处理。改造后,机泵运行稳定性显著提高,未再因过滤器问题影响装置连续运行。

5.1.3 进料系统与塔内结垢综合治理

针对混油在120℃~150℃易生成有机堵塞物、造成设备结垢堵塞的问题,经多批次原料分析、工艺模拟与温度曲线追踪,确定综合治理方案:①增设进料专用预处理过滤器,在混油进塔前新增精度为20μm的篮式过滤器,提前脱除胶质、杂质、预聚粘稠物,从源头减少结垢物带入;②新增进塔换热器并优化换热流程,调整换热路径与升温速率,将混油在120℃~150℃温区的停留时间从原120min缩短至40min,从工艺上抑制油腻生成;③优化操作参数,稳定进料量(波动范围控制在±5%)、塔底温度(±2℃)、重沸炉出口温度(±3℃)、回流比(±0.1),减少工况波动对结垢的影响。

5.2 汽航混油掺炼新工况参数优化调整

针对汽航混油掺炼初期的工况问题,在保障产品质量达标的前提下,制定以“降低加热炉热负荷、缓解塔内气液失衡、适配塔顶回流系统”为核心的操作调整方案,于2025年10月29日13:30开始逐步实施,调整原则为“小幅多次、实时监控”,加热炉出口温度每次下调0.3~0.5℃,塔顶温度微调至137.5~139℃,同步跟踪塔盘温度、燃料气参数及产品质量指标,调整后各参数变化如表3所示,核心调整措施如下:

5.2.1 加热炉出口温度精准调控

逐步降低加热炉出口温度TICA-10504,从初始277.1℃逐步下调至255℃,从源头上减少进入分馏塔的热量输入,缓解塔内热量堆积与气液两相失衡状态,降低塔顶气相负荷;同时根据塔盘温度变化与产品质量指标,确定常态化掺炼的加热炉出口温度控制范围为255±3℃,避免热负荷过高或过低对分离效果的影响。

5.2.2 分馏塔工艺参数适配优化

结合加热炉出口温度调整,优化分馏塔塔顶温度、压力及回流比参数:将塔顶温度控制范围调整为137.5~142℃,塔顶压力控制在0.026~0.03MPa,塔顶回流量调控至400~1000kg/h,既抵消轻组分汽化的升温效应,又避免回流系统负荷超限;同时稳定进料量为5.5T/h,减少工况波动对塔内气液平衡的影响。

6 结语

未来将持续开展以下工作:①深化汽油、柴油、航煤多组分混油的物性与精馏机理研究,优化操作参数与塔内件结构,增设航煤中段出料流程,进一步提高分离效率与产品回收率,实现航煤的单独回收;②总结首套装置经验,联合行业单位推动形成混油装置设计标准、施工规范与运行规程,以及多组分混油掺炼的工艺控制标准,填补行业技术空白;③探索高效精馏、在线清堵、智能调控等新技术在混油处理领域的应用,推动装置向智能化、高效化、低能耗升级;④发挥高级技能人才“传帮带”作用,培养一批兼具常规混油处理与多组分混油掺炼能力的专业操作与技术人才,为企业与行业高质量发展提供人才支撑;⑤拓展装置处理品类,研究煤油、柴油等其他多组分混油的处理工艺,进一步提升装置的适应性与综合效益。

参考文献

- [1] 黄维和,刘刚,陈雷,等.中国成品油管道顺序输送混油研究现状与展望[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(5):122-129.
- [2] 杜渐,郑坚钦,夏玉恒,等.耦合混油发展机理与数据修正的成品油管道混油浓度预测[J].油气储运,2024,43(7):796-804.
- [3] 丁楠,钟明昆.混油分馏装置加注阻聚剂的安全评价研究[J].石化技术,2021,28(8):188-189.

Research on Failure Mechanism Analysis and Prevention Technology of Key Process Equipment in Petrochemical Industry

Qiang Ma Ben Li Yuanlin Liu Xiao Jing

Zhejiang Petrochemical and Petroleum Industry Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316021, China

Abstract

To enhance the safety, reliability and service life of key equipment in petroleum refining processes, this paper conducts a study on a typical accident case from a certain factory. Based on the analysis of the failure mechanisms such as high-temperature creep, stress relaxation, sulfide stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement, this paper comprehensively examines the causes of damage and fracture of the pressure-bearing components and proposes corresponding preventive measures such as risk inspection, corrosion monitoring protection and equipment integrity management. The research shows that the integrated prevention system combining mechanism analysis, condition monitoring and risk warning can effectively prevent equipment failures and ensure the long-term stable operation of the plant.

Keywords

Petrochemical industry; Critical processes; Equipment failure mechanism; Prevention and control technologies

石油化工关键过程装备失效机理分析与防控技术研究

马强 李本 刘沅林 景晓

浙江石油化工有限公司, 中国·浙江 舟山 316021

摘要

为了提高石油炼制重要工艺过程设备的安全性、可靠性以及使用寿命, 本文选取某厂一个典型事故案例进行研究, 在总结高温蠕变、应力松弛、硫化物应力腐蚀开裂和氢脆等破坏机理的基础上, 对受压元件损坏及断裂的原因进行了全面剖析并提出了相应的基于风险检验、腐蚀监控防护以及设备完整性管理等防范措施。研究表明, 结合机理分析、状态监测以及风险预警一体化防控体系能够很好地防止设备发生故障从而保证装置长期平稳运行。

关键词

石油化工; 关键过程; 装备失效机理; 防控技术

1 引言

近年石油化工行业蓬勃发展, 新建装置大型化、工艺条件苛刻成梯度提高, 重要工艺过程设备长期处于高温、高压及腐蚀性介质等恶劣工况下工作, 一旦发生故障就会导致装置非计划停车甚至严重安全事故的发生, 给生产和企业带来巨大损失。随着对长周期稳定运行、本质安全以及经济效益要求的不断提高, 传统的定期检查维修以及依靠经验预防的方法已经不能满足需求, 在此情况下研究典型失效原因和发展主动监测预警技术和精确防控措施就成为保证生产安全和设备完好性的必然选择。

2 案例分析

国内某炼油厂加氢反应器在投用 8 万小时之后, 由于

Cr-Mo 钢焊缝热影响区长期工作温度为 454°C 导致回火脆化而出现长达 1.2m 裂纹, 深达壁厚的 40%。经检查是由于磷锡杂质晶界偏聚造成韧性降低所致, 在以后使用过程中更换高纯度材料、改进焊接后热处理工艺以及安装在线监测系统使得该装置安全运行已经超过四年。

国内某炼油厂加氢反应器在投用 4 万小时之后, 由于停工检修设备打开后工艺处置不及时, 加之沿海气候湿度大, 法兰面出现连多硫酸 SCC 腐蚀开裂。经改进工艺处置方案, 设备法兰打开第一时间喷涂 0.5%~1%NaOH+3%~5%NaCO₃ 混合溶液进行清洗, 有效预防连多硫酸 SCC 腐蚀, 通过精确防控措施保证设备安全可靠。

国内某大型炼油厂加氢热高分器在投用 1.6 万小时之后, 停工检修发现 DN600 CL2500 进料接管法兰八角环槽内出现多处裂纹, 深度 3-8mm、长度 50-100mm。经核查是由于施工安装法兰定力矩值按照螺栓屈服值选取, 该值超设计力矩值 30%, 最终导致法兰八角环槽根部过载失效产生裂纹, 另附加氢融入加快脆化开裂, 经更换新法兰按照标准分四次

【作者简介】马强 (1986—), 男, 中国辽宁庄河人, 本科, 工程师, 从事石油炼化设备管理研究。

液压紧固、最终达到设计力矩值，紧固后运行2年复检整体完好，做到精确防控。

3 石油化工关键过程装备失效机理分析

实际生产中发生的反应器等关键过程设备失效案例较多，归纳总结按失效模式主要分为八大类：（1）应力腐蚀开裂 SCC、（2）高温氢腐蚀 HTC、（3）蠕变失效、（4）回火脆化、（5）腐蚀减薄、（6）疲劳失效、（7）焊接缺陷、（8）密封系统失效，本文按照发生概率及影响的严重做如下重点分析。

3.1 高温蠕变与应力松弛引发的承压部件损伤与断裂

以加氢反应器 Cr-Mo 钢焊缝失效为例，其主要原因是高温蠕变及应力松弛的共同影响。该反应器在连续 454℃ 高温以及 12MPa 内压的作用下工作，在此温度范围内材料强度已经大幅降低，承受压力容器尤其是焊缝及其热影响区受到由于结构不均匀性和残余焊接应力所引起的较大局部应力，在较高温度条件下金属中的原子具有较强活动性，在固定外力作用下会发生缓慢而持续塑性变形称为蠕变。根据估算，在 8 万小时运行期间关键部位蠕变量可达到 0.8%-1.2%，同时构件内部原有弹性应变一部分转变为塑性应变而造成应力随着时间推移逐渐减小的现象称之为应力松弛现象。这会导致结构内部应力重新分配有可能导致应力集中在一些晶界或者缺陷位置上。进入蠕变第三阶段后，晶界滑动以及空洞产生、生长直至相连，在未被完全消除焊接残余应力区域出现沿晶开裂现象。裂缝在蠕变和疲劳载荷联合作用下扩展至总长度为 1.2m 左右，贯穿厚度约 40%，是一种典型的高温蠕变断裂兼有脆性破坏的特点。

3.2 腐蚀环境下硫化物应力腐蚀开裂与氢致开裂

在加氢反应器失效事故中，虽然回火脆化是主要原因，目前通过严格控制 MPT 温度，开工先升温后升压、停工先将压后降温的原则可有效控制回火脆化问题，但是它的服役条件也存在硫化物应力腐蚀开裂以及氢损伤的风险。在高温高压临氢条件下，氢原子能够渗入到钢材内部 $H+C \rightarrow CH_4$ ，造成母材鼓包、堆焊层剥离、微裂纹以及焊缝延迟裂纹等，氢损伤导致反应器强度明显下降，后果较严重。对于 2.25Cr-1Mo 钢来说，其屈服强度一般大于

400MPa，是对硫化物应力腐蚀敏感的一种材质，由于该类设备所加工的油品，在加氢过程中会产生高浓度硫化氢，即使经过脱硫后，介质中仍有几十到几百 ppm 的 H_2S 存在。 S^{2-} 是一种“毒化剂”，会阻止氢原子重新结合，大大增加金属表面的氢渗透速率，在有 100 ppm H_2S 的情况下，氢渗透电流密度可以比没有 H_2S 的情况高十倍左右，这些进入金属内部的氢原子在金属中进行扩散并在应力较大的地方例如焊接熔合线、夹杂物或者是位错附近聚集。一旦某个部位氢含量达到一定值就会大幅降低材料的断裂韧性，在拉伸残余应力或工作应力的作用下造成氢致开裂。裂纹一般是沿着垂直方向扩展，呈阶梯状分布^[1]。另一方面在停工阶段连多硫酸 SCC (PTA-SCC) 腐蚀开裂也不容忽视，反应机理硫化污垢 + 水 + 空气 → 连多硫酸，多发生在法兰、密封面、接管、焊缝 HAZ 等重点受害部位，沿晶裂纹呈网状或树枝形裂纹，停工检修工艺处置不当或环境温度较大，碱洗等保护措施不及时极易发生腐蚀开裂。

4 石油化工关键过程装备失效防控技术

4.1 基于风险的检验与寿命评估技术

对于上述加氢反应器焊缝失效事故，基于风险检验及寿命评估技术是保证其今后安全运行的重要措施。首先对整个系统进行全面的风险分析，找出回火脆化、高温蠕变以及潜在氢损伤是造成该类反应器损坏的主要原因，在此基础上根据每种失效形式出现的概率及其影响程度对其进行量化风险评价。其中焊缝热影响区被判定为高危部位，其失效概率一般定级为“E”（API 581 标准中较高一级），风险值有可能超过允许的最大限度即 1×10^{-4} 每年。在风险评估指导下，检查方案得到了精确制定。对高危焊缝区域的检测手段，由普通的超声测厚提高到相控阵超声探伤和衍射时差法超声探伤，来准确发现并测量沿晶裂纹长度大小。同时，定期从容器内部预留样板上采集样品做复比 V 缺口冲击试验观察材料脆性转变温度的变化情况，实测当前 MPT 并于原始 MPT 对比，当温升 > 30-50℃ 时表明脆化严重使用寿命受限。针对蠕变损伤，则利用金相复型方法观察试样中的碳化物形状以及晶界空洞状况，并结合连续损伤力学理论计算出相应的数值^[2]。（详见表 1）

表 1 加氢反应器焊缝高风险区域关键参数与寿命评估数据

项目	指标 / 方法	数据 / 结果	效果
焊缝热影响区冲击功	复比 V 缺口冲击试验	≥54 J	材料韧性稳定，脆性未退化
脆性转变温度	复比 V 缺口冲击试验	≤-20 °C	安全范围内
风险等级	API 581 定量评估	E 级	高风险区域，风险值 > 1×10^{-4} 年
蠕变损伤	金相复型检查 + 连续损伤力学模型	蠕变应变累积可控	可预测剩余寿命，运行安全可控

4.2 腐蚀监测与防护技术

对于该加氢反应器在高温高压临氢并且可能存在硫化氢的恶劣腐蚀条件下，采取了一系列多层次腐蚀监控及全面防护措施，在工艺介质方面主要是避免湿硫化氢环境形成。

利用在线色谱仪以及露点监测仪对反应产物中的水和硫化氢进行实时检测，在工艺规程上明确规定进料原料中硫含量要小于等于 0.5%（质量百分比），同时采用注水、注缓蚀剂等方式使出口物料中水的露点温度比设备任何一处内壁

金属表面温度低至少 20℃来阻止液态水的存在；从实际运行情况看，通过反应空冷合理调节注水量、配合循环氢脱硫塔贫胺液洗涤以及循环氢分液罐旋流脱烃管的组合使用，合理控制循环氢水含量及硫化氢浓度改善腐蚀条件，过低（<300 ppm）硫化态催化剂（CoMo/NiMo）易过度还原、失硫、活性下降、设备钢材易氢脆，过高（>2%）抑制加氢脱硫、芳烃饱和降低氢分压、增加压缩机能耗、加剧湿 H₂S 腐蚀、连多硫酸 SCC 风险；而在设备本体保护上第一道防线就是材料升级，在检修过程中选用抗回火脆性和氢损伤更好的材质，比如把 2.25Cr-1Mo 钢中磷、锡等有害微量元素分别限制为不大于 0.010% 和 0.010%，并使用真空脱氧法冶炼；在容易发生高温硫腐蚀及氢腐蚀的地方例如反应器入口扩散器部位堆焊 309L+347L 不锈钢复合层；针对临氢条件选择 Nelson 曲线确定材料是否适合在 12-18MPa 氢分压及 420-454℃ 工作状态下安全使用；腐蚀监控也是重要一环，在反应器重要位置安装高压氢探针用于测量氢渗透率大小，从而可以推断出内部衬里腐蚀速度以及氢渗入情况；在正常生产时氢渗透电流密度维持在 0.1-0.3μA/cm² 之间，当出现原料含硫量突变情况下曾有短暂时间内达到过 1.5μA/cm² 以上后恢复正常状态并发出警报提示信息^[3]。

4.3 设备完整性管理与预警技术

对于该加氢反应器故障及修复问题，建立以风险为导向的设备完整性管理和智能化预警系统。此系统参照 ISO 55000 和 API 754 的标准体系，在此基础上为该反应器建立全生命周期数字孪生档案，包括设计图样、材质证明书、生产工艺流程卡、历次检查报告单、操作规程记录以及实时监测数据在内的共计 1200 余项重要信息点；从工艺角度出发，利用分布式控制系统和实时数据库对反应器入口温度、床层温升、循环氢纯度以及硫化氢含量等共 15 个主要工艺参数进行越限报警；设定多个报警级别，如任何单个床层温升超过设计值 14℃ 或者循环氢中硫化氢浓度连续两小时以上大于 5000ppmv，则会发出较高报警信号；预警系统投入使用四年间共发现并处置了 27 起工艺波动事件；在设备状况方面，结合在线声发射检测、定期导波探伤、每个运转周期定点超声波测厚以及脉冲涡流检测结果。声发射检测上一生产周期共在 A7 焊缝部位收集到 32 个有效声发射信号，经过定位分析确定是已存在微小裂纹在应力作用下非扩展活动，“观察”级别风险等级评定并定期复查确认其稳定性。脉冲涡流检测用来排查外支撑环下方隐匿腐蚀情况，检测结果显示此处最大年均减薄速率为 0.12mm，属于可以接受预测范围之内。预警模型采用机器学习方法，将工艺波动与设备状态信号联系起来^[4]。

5 石油化工关键过程装备失效防控技术效果分析

对于加氢反应器全面防控手段，在运行四年中发现高温蠕变、回火脆化和氢损伤等主要破坏形式得到有效抑制。基于风险检验及寿命评价方法，采用焊缝热影响区相控阵超声和衍射时差法检测技术可以做到对沿晶裂纹及时发现并定量，为精准维修提供有力支持；腐蚀监控与防护措施利用在线氢渗透探针、声发射监测以及壁厚测定相结合的方法可做到对氢致及硫化物应力腐蚀开裂进行有效监控；设备完整性管理和预警系统结合工艺参数、材料状况及实时监测信息建立数字孪生体，能实现对异常工况提前预报。从统计数据可以看出重要焊接部位总累积蠕变应变小于等于 0.2%，脆性转变温度偏移不大于 ±2℃，氢渗透电流密度介于 0.1 ~ 0.3 μA/cm² 之间，均在安全许可值之内。

通过寿命评估模型，可利用蠕变累积指数：

$$C(t) = \int_0^t \varepsilon_c(\tau)^\alpha d\tau \quad (1)$$

量化材料损伤演化，式(1)中 ε_c 为蠕变应变， α 为经验指数， t 为运行时间。

实践表明，这一指标能够真实地反映高温服役下损伤积累情况，对预测性维修具有指导意义。从整体上看，机理研究、状态监控以及风险预报相结合的安全保障系统，大大提高了设备剩余使用寿命，减少了非计划停机及事故发生率，保证了石油化工重要生产装置长期平稳运行。

6 结语

本文选取了石油炼制加氢反应器常见的几种失效事故作为研究对象，从高温蠕变、应力松弛、回火脆化、硫化物应力腐蚀开裂以及氢损伤等方面对造成承压元件损坏及断裂的原因进行了探讨，在此基础上提出风险导向检查、腐蚀监控防护、设备完整性管理、设备失效预防方法和智能预警等综合防控措施。通过应用这些防控手段，可显著减缓材料老化速度、及时发现并消除隐患并减少事故发生概率，达到控制装置使用寿命的目的同时保证生产系统的平稳运行。

参考文献

- [1] 周燕. 化工原料绿色检验优化与质量风险防控体系研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2026, (02): 168-171.
- [2] 刘德妹. 化工园区地下水环境调查与风险管控技术方法研究[J]. 清洗世界, 2026, 42(01): 91-93.
- [3] 霍胜涛. 化工生产中化学反应失控的原因分析与安全防控技术[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2026, (01): 172-174.
- [4] 李长东, 刘维迎, 段华雷, 杨海轮, 刘可. 化工建设项目施工过程安全风险识别与防控技术研究[J]. 化学工程与装备, 2025, (12): 136-139.

Research on Data Quality Control and Error Source Identification in Laboratory Analysis Data

Man Zhao

Liaoning Evergrande Testing Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

With the growing demand for environmental monitoring, data quality control in environmental testing laboratories has become crucial for ensuring the accuracy and reliability of test results. Data quality not only impacts environmental assessment outcomes but also profoundly influences the formulation and implementation of environmental protection policies. This paper explores the necessity of analytical data quality control in environmental testing laboratories and conducts an in-depth analysis of common error sources, including instrument errors, sample processing errors, and human operational factors. By adopting standardized operating procedures, establishing quality control checkpoints, and enhancing laboratory personnel training, data quality can be effectively improved. Through proposed improvements to existing quality control systems, this study provides actionable strategies for elevating environmental testing data quality control standards, aiming to deliver more precise technical support for environmental monitoring.

Keywords

Environmental testing laboratory; Data quality control; Error sources; Quality management; Statistical analysis

实验室分析数据质量控制与误差来源识别研究

赵嫚

辽宁恒大检测技术有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

随着环境监测需求的不断增加, 环境检测实验室的数据质量控制成为确保检测结果准确性和可靠性的关键。数据质量不仅关系到环境评估的结果, 还对环境保护政策的制定和执行产生深远影响。本文探讨了环境检测实验室分析数据质量控制的必要性, 并深入分析了常见的误差来源, 如仪器设备误差、样品处理过程中的误差以及人为操作因素的影响。通过采用标准化操作规程、设置质量控制点和加强实验室人员的培训, 可以有效提高数据质量。通过对现有质量控制体系的改进建议, 本文为提升环境检测数据质量控制水平提供了可行的策略, 旨在为环境监测提供更加精准的技术支持。

关键词

环境检测实验室; 数据质量控制; 误差来源; 质量管理; 统计分析

1 引言

环境检测实验室在现代环境保护和治理工作中发挥着重要作用, 其检测数据的准确性和可靠性直接影响到环境政策的科学性与有效性。随着技术的不断进步, 环境检测方法和设备日新月异, 但实验室数据质量问题依然普遍存在。环境检测实验室数据质量问题不仅会影响环境评估结果的准确性, 还可能导致环境污染事件的误判, 甚至延误对污染源的控制。因此, 建立健全的环境检测实验室数据质量控制体系尤为重要。当前, 误差来源多种多样, 包括仪器设备误差、样品处理误差、操作不当等。如何有效识别这些误差, 并采取有效措施进行控制, 已经成为环境检测领域的研究重点。本文通过分析环境检测实验室数据质量控制的现状, 探讨其

面临的主要问题, 并提出改进策略, 以期对环境监测行业提供理论参考和实践指导。

2 环境检测实验室数据质量控制的必要性与意义

2.1 环境检测实验室数据质量对环境评估的重要性

环境评估是环境保护和治理工作的重要环节, 数据质量直接影响评估的准确性与科学性。若实验室数据质量不合格, 可能导致错误的环境评估结论, 进而影响政府决策、污染源管理和环境修复工作。环境评估依据的检测数据包括空气质量、水质分析、土壤监测等, 这些数据不仅帮助判断环境污染的现状, 还为制定政策、法规提供支持。确保数据的准确性和一致性, 可以为环境评估提供科学依据, 为环境保护提供强有力的支持。通过有效的质量控制, 能够保证实验室在进行环境评估时所用数据的可靠性, 从而提升决策的精确性和政策的可行性。

【作者简介】赵嫚(1989—), 女, 中国辽宁沈阳人, 本科, 工程师, 从事化工专业, 实验室分析方向研究。

2.2 环境检测实验室数据质量对环境监测结果可靠性的影响

环境监测是环境管理和保护的基础工作，其准确性直接关系到环境保护的效果。环境检测实验室的数据质量直接影响监测结果的可靠性。实验室数据质量不达标，可能导致监测数据的失真或误差，从而影响污染源识别、环境变化趋势分析和污染治理效果评估。无论是污染物的浓度检测，还是生态环境的状态监测，均需要精准的数据支持。低质量的检测数据可能导致环境问题的忽视或过度反应，影响污染控制措施的合理性。只有保证环境检测实验室的数据质量，才能确保环境监测结果的可靠性和有效性，从而为环境管理和决策提供可靠的支持^[1]。

3 环境检测实验室常见误差类型

3.1 环境检测实验室仪器设备误差及其来源

环境检测实验室的仪器设备是数据获取的基础，但仪器本身可能产生误差，影响检测结果的准确性。仪器设备的误差通常来源于设备老化、精度不足、校准不准确等问题。例如，某些高精度仪器在使用一段时间后，因元件老化或误差积累，其检测结果可能偏离真实值。根据某些研究，环境监测仪器的精度误差范围可达到 $\pm 5\%$ 至 $\pm 10\%$ 。此外，仪器的检测误差还可能由外部环境因素如温度、湿度和电压波动引起，甚至传感器的配置和校准状态也会影响检测的准确度^[2]。因此，仪器设备的维护、定期校准及使用前后的检查是保证数据质量的重要手段。

3.2 环境检测实验室样品处理与保存过程中的误差

样品处理与保存过程中也可能出现误差，影响最终检测结果。实验室在接收到样品后，必须根据一定标准进行处理和保存，但如果操作不规范或环境控制不当，可能导致样品性质发生变化，进而影响数据质量。例如，水质样品若未及时冷藏，可能导致有机物的降解，样品中某些污染物的浓度会发生变化。研究表明，若水样保存不当，某些污染物的含量变化可达到20%以上。此外，样品在运输和保存过程中的污染物溢出或混入，也可能导致检测结果的不准确。因此，样品的及时处理与科学保存是减少误差的重要环节。

4 环境检测实验室数据质量控制方法

4.1 环境检测实验室标准化操作规程的制定与实施

环境检测实验室的数据质量控制需要依赖标准化的操作规程，这对于确保检测过程的一致性和结果的可靠性至关重要。标准化操作规程涉及从样品的采集、运输、处理到最终的分析、数据记录等多个环节。在一些环境检测实验室中，若按照标准化规程执行，数据误差可降低至5%以内。通过严格的标准化操作规程，能够确保不同人员、不同时间进行的检测结果具有较高的一致性。此外，定期对操作规程进行审查和更新，是应对技术进步和环境变化的必要措施^[3]。通

过加强操作规程的执行力，能够有效减少人为操作带来的误差，提升数据质量。

4.2 环境检测实验室质量控制点的设立与数据审查

为了确保数据的准确性，环境检测实验室应设立多个质量控制点，涵盖从样品准备到数据输出的各个环节。通过对关键环节进行监控与检查，能够及时发现问题并进行修正。实验室可设立质量控制点，如样品处理、设备校准、分析结果的比对等，确保每个环节符合质量标准。研究表明，适当设立的质量控制点可将数据偏差率控制在3%以内。通过定期进行数据审查和结果对比，能够识别潜在的质量问题并及时纠正，进一步确保实验室数据的可靠性和精确性。

4.3 环境检测实验室实验室人员的培训与质量意识提升

实验室人员的操作水平直接影响数据质量，因此，实验室人员的培训至关重要。定期的培训能够提高实验人员对标准操作规程的理解和执行力，降低操作错误的发生率。根据调查，经过充分培训的实验人员，其操作错误率较未培训人员降低了20%左右。培训内容应包括设备操作、质量控制标准、数据处理和质量审查等方面，同时应强调实验人员的质量意识和责任感。提升质量意识不仅能够增强实验人员对数据质量的重视，也有助于培养其对环境检测质量控制的责任感，从而进一步保障实验室数据的准确性和一致性。

5 环境检测实验室误差来源的识别与分析

5.1 环境检测实验室误差来源的分类与识别方法

环境检测实验室的误差来源较为复杂，主要可分为仪器设备误差、样品处理误差、操作误差等几大类。仪器设备误差主要来源于设备的精度和校准问题，样品处理误差则与样品的保存、运输和处理方法有关。操作误差主要由实验人员的操作不规范或失误引起。识别这些误差来源的关键在于通过详细的实验记录和数据比对，逐步排查每个环节的潜在问题。通过统计方法，可以有效地识别误差的主要来源。比如，某些实验室通过回归分析发现，设备校准不当导致的误差在总误差中占比达25%。通过分类识别，能够明确各类误差的发生频率及其对结果的影响，从而为数据质量控制提供具体依据^[4]。

5.2 基于统计分析的环境检测实验室误差来源研究

统计分析是识别环境检测实验室误差来源的重要方法之一。通过对实验数据的回归分析、方差分析等统计方法，可以量化不同因素对误差的贡献。例如，分析显示，设备误差和操作误差的综合影响占总误差的40%。通过这种分析方法，实验室可以有针对性地采取措施，对可能影响数据质量的环节进行优化。同时，统计分析能够帮助实验室识别出潜在的系统性误差，并为制定质量控制策略提供科学依据。利用统计学手段进行误差来源分析，不仅可以减少偶然误差的影响，还能为长期的质量改进提供量化数据支持。

5.3 提高环境检测实验室误差识别精度的技术手段

提高误差识别精度的技术手段是提升环境检测实验室数据质量的关键。当前,环境检测实验室可以利用多种技术手段提高误差识别的精度,例如自动化仪器、数据采集系统和智能化分析平台等。通过使用高精度的仪器和自动化设备,能够减少人为操作误差,提高数据采集的精确性。某些实验室通过引入全自动化数据处理系统,能够减少数据处理环节的人工干预,从而使误差识别的准确性提高了30%以上。同时,智能化分析平台可以实时监控实验过程,及时发现异常数据并进行修正。通过这些技术手段,能够显著提高误差识别的精度,确保环境检测实验室数据的可靠性和精确性^[4]。

6 环境检测实验室数据质量控制与误差改进策略

6.1 环境检测实验室常规数据质量控制流程优化

环境检测实验室的数据质量控制流程优化是提高数据可靠性的关键步骤。在常规检测过程中,任何环节的疏漏都可能导致数据误差的积累。因此,优化数据质量控制流程,确保每个环节的严谨操作至关重要。优化的措施包括加强对样品采集、处理、检测、分析到数据记录全过程的监管,确保各环节按照标准操作规程执行。通过引入数据采集与处理的自动化系统,可以减少人为因素对数据的干扰,提高数据处理的效率与准确性。此外,定期对数据质量控制流程进行审查与更新,以适应新的技术发展和检测需求,是保证数据质量持续提升的有效途径。

6.2 环境检测实验室数据管理与信息化建设

随着信息技术的发展,环境检测实验室的数据管理与信息化建设已成为提升数据质量的重要手段。通过建立电子化数据管理平台,实验室能够实现数据的高效存储、实时分析和远程共享,提升数据管理的透明度与准确性。信息化系统可以通过数据自动化处理,减少人工操作环节,避免人为错误的发生。通过建立标准化的数据库,实验室可以更方便地进行数据统计分析、查询与追溯,有效提高数据的可靠性与可追溯性。随着大数据和云计算技术的不断发展,环境检测实验室的数据管理也逐步向智能化、集成化方向发展,

从而为实验室提供更加精准、及时的决策支持。

6.3 提升环境检测实验室数据质量控制的技术创新方向

技术创新是提升环境检测实验室数据质量控制的核心动力。随着技术的不断进步,新的数据质量控制技术逐步应用于实验室中。例如,基于人工智能的智能检测系统,通过大数据分析和机器学习算法,能够在数据采集与处理过程中实时识别异常值,自动校正数据,提高数据质量控制的精度和效率。此外,物联网技术的应用可以实现设备间的联动与实时监控,确保仪器设备在最佳状态下运行,减少设备误差。进一步的技术创新包括自动化设备的升级、检测精度的提高以及更加先进的数据分析算法的应用,这些创新将推动环境检测实验室向更加高效、智能和精准的方向发展,进一步提升数据质量控制水平^[5]。

7 结语

通过对环境检测实验室数据质量控制及误差来源的深入分析,可以看出,数据质量的提升不仅依赖于标准化操作规程的制定和实施,还需要有效的质量控制点设置、信息化管理系统的支持以及技术创新的推动。环境检测实验室的每个环节都可能成为误差的源头,因此优化各环节的质量控制流程是确保数据可靠性的重要保障。随着智能化、自动化技术的发展,未来环境检测实验室的质量控制将更加精准与高效。只有通过持续改进和创新,才能确保环境监测数据的准确性,为环境保护和政策制定提供坚实的数据支持,推动生态环境治理工作取得实质性进展。

参考文献

- [1] 黄诗磊.生态环境监测实验室数据质量管理研究及优化措施分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(21):76-77+80.
- [2] 刘冠昌.水质环境监测及分析过程中的质量控制[J].皮革制作与环保科技,2023,4(16):34-36.
- [3] 毛晓红,张艳红.试析环境监测实验室内部质量控制要点[J].山西化工,2022,42(01):298-299.
- [4] 蒲生彦,王朋.环境科学与工程类专业课程实验综合指导教程[M].中国环境出版集团:202112.
- [5] 曾繁煜.环境监测实验室现场采样质量管理技术的数字化分析[J].皮革制作与环保科技,2021,2(11):33-34.

Research on the Construction Practice of Chemical Process Safety Management System

Yulian Han¹ Nenggang Jiang² Haipeng Wang³

1. China Chemical Safety Association, Beijing, 100013, China

2. Shandong Wonfull Petrochemical Group Co., Ltd., Zibo, Shandong, 256410, China

3. Yunnan Energy Green New Materials Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650100, China

Abstract

The chemical industry features complex production processes and high risks, making it a key focus for safety management. Process Safety Management (PSM) serves as the core approach to ensuring the safe operation of chemical enterprises. This paper, based on standards such as the 'Grading and Scoring Criteria for Work Safety Standardization of Hazardous Chemical Enterprises' and the 'Guideline for Process Safety Management in the Chemical Industry,' and incorporating the practical experience of Shandong Hui Feng Petrochemical Group Co., Ltd., constructs a comprehensive Process Safety Management system covering the entire lifecycle of chemical processes. The system comprises 16 key elements. The paper elaborates on the management content of each element and proposes specific steps and practical guidance for building the system, aiming to provide chemical enterprises with a systematic safety management framework to support the achievement of inherent safety and sustainable development."

Keywords

Chemical Process Safety Management; Safety Management System; Risk Management; Continuous Improvement

化工过程安全管理体系构建实践研究

韩玉莲¹ 姜能刚² 王海鹏³

1. 中国化学品安全协会, 中国·北京 100013

2. 山东汇丰石化集团有限公司, 中国·山东 淄博 256410

3. 云南能投绿色新材有限责任公司, 中国·云南 昆明 650100

摘要

化工行业生产流程复杂且危险性高,是安全生产管理的重点领域。化工过程安全管理(PSM)是保障化工企业安全运行的核心手段。本文依据《危险化学品企业安全生产标准化定级评分标准》《化工过程安全管理导则》等标准,结合山东汇丰石化集团有限公司的实践经验,构建了一个涵盖化工过程全生命周期的化工过程安全管理体系,包含16个关键要素。文中详细阐述了各要素的管理内容,并提出了体系搭建的具体步骤和实践指导,旨在为化工企业提供一套系统的安全管理指导方案,助力企业实现本质安全与可持续发展。

关键词

化工过程安全管理;安全管理体系;风险管理;持续改进

1 引言

化工过程安全管理(Process Safety Management, PSM)是确保化工企业安全运行的核心手段,能够有效预防事故的发生,降低安全生产的风险。化工企业必须高度重视过程安全管理,通过科学、系统的管理方法,将安全管理贯穿于企业运营的各个环节,形成全方位、全生命周期的安全管理体系。

2 化工过程安全管理体系总体框架

化工过程安全管理的核心是通过系统的管理措施和技术手段,从根本上管控风险、消除隐患,预防事故的发生。笔者结合《危险化学品企业安全生产标准化定级评分标准》《化工过程安全管理导则》(AQ/T 3034-2022)等相关标准规范及企业实践,融合提炼出包含以下16个关键要素的总体框架:

2.1 安全领导力与安全文化建设

包括安全方针及目标和战略、安全承诺与有感领导、安全生产投入保障三个管理模块。主要负责人应组织建立企业安全生产核心价值观,制定可量化的年度安全目标,足额提取并合理使用安全生产费用,组织建立安全文化手册,营

【作者简介】韩玉莲(1983—),女,中国山东淄博人,本科,高级工程师,从事化工过程安全管理研究。

造全员参与的安全氛围。

2.2 安全生产责任制

包括组织机构、全员安全生产责任制、安全生产责任考核与奖惩三个管理模块。企业应设置安全生产管理机构,配备专职人员,建立健全全员安全生产责任制,明确各级各岗位职责,并建立与绩效挂钩的考核机制。

2.3 安全生产信息与合规管理

包括安全生产信息管理、法律法规识别获取、规章制度管理、合规性审核、安全生产信息化智能化建设五个模块。企业应建立安全生产信息管理制度,及时识别获取适用法规标准,建立健全规章制度并定期评审,推进信息化智能化系统建设。

2.4 安全教育培训与能力建设^[4]

包括教育和培训管理、岗位能力标准、从业人员教育培训、培训考核与评估提升、外来人员教育培训五个管理模块。企业应建立安全教育和培训管理制度,定期识别培训需求并实施计划,建立健全从业人员安全培训档案,明确岗位专业技能、学历、技术职称等能力要求,提升员工安全技能。

2.5 风险管理与双重预防机制建设^[1]

包括危险有害因素辨识与分析、风险评价、风险控制、风险监测、双重预防机制建设、风险清单和隐患排查任务更新六个管理模块。企业应建立安全风险与隐患排查治理制度,采用适宜方法全面识别风险,制定分级管控标准与措施,基于管控措施制定隐患排查项目并实现整改闭环。

2.6 建设项目管理

包括危险建设项目“三同时”管理、项目实施、项目试生产(项目首次开车)、项目竣工验收四个管理模块。企业应践行“三同时”原则,确保安全设施、职业卫生设施及消防设施与主体工程同步,建设项目各环节(立项、设计、施工、试生产和验收)需符合法规标准要求。

2.7 设备完整性管理

包括清单与分级、检验检测与检查、预防性维护与维修、检维修质量控制、缺陷管理、安全设施管理、特种设备管理、关键装置与重点部位、安全仪表管理、设备完整性数据库十个管理模块。企业应建立健全设备完整性管理制度,明确管理范围、目标、职责和工作程序,实现对设备全生命周期的系统化管理。

2.8 工艺平稳性管理

包括操作规程、正常操作、开停车安全管理、工艺报警管理、异常工况处置、现场规范化管理、劳动纪律七个管理模块。企业应建立完善的操作规程并定期评审,通过工艺卡片、联锁管理等措施做好正常操作管控,制定详细开停车方案,加强报警分级与异常工况处置管理。

2.9 作业许可管理^[3]

包括作业许可管理、作业安全风险分析、特殊作业安全许可、作业过程安全管控四个管理模块。企业应建立作业许可管理制度,明确许可范围、风险管控措施及审批权限,

作业前全面识别风险并落实控制措施。

2.10 承包商与供应商管理

包括承包商资质管理、承包商教育与培训、承包商作业方案及工器具管理、承包商作业过程监督与管理、承包商安全绩效考核、供应商管理六个管理模块。企业应建立承包商与供应商管理制度,实施准入审查、签订协议、开展培训交底、进行过程监督与定期评价。

2.11 化学品安全及危险化学品重大危险源管理^[2]

包括化学品安全管理、鉴定分类及登记、储存及装卸安全管理、危险化学品重大危险源辨识、分级与备案、危险化学品重大危险源管理、高后果风险事件管理、分析化验室(实验室)安全七个管理模块。企业应全面普查化学品并建立档案,规范危险化学品储存与重大危险源管理,加强实验室安全管理。

2.12 职业健康管理

包括职业病危害项目申报、作业场所职业危害管理、劳动防护用品、工伤和职业病管理四个管理模块。企业应建立健全职业健康管理制度,定期识别评估职业病危害,进行检测告知与健康检查,持续提升管理水平。

2.13 变更管理

包括变更分类与分级、变更申请与风险评估、变更审批与实施、变更验收、变更信息更新与告知五个管理模块。企业应建立变更管理制度,明确范围、流程和责任,严格进行变更风险管控,并建立变更管理档案。

2.14 应急准备与响应^[5]

包括应急准备、应急预案、应急资源管理、应急培训与演练与评估、应急值班值守、应急响应与保障、应急救援评估七个管理模块。企业应建立应急管理制度,健全机构、配备物资与队伍,加强人员应急能力建设,编制符合公司实际的应急预案,组织开展演练并对演练效果进行评估,持续提升企业应急响应及救援能力。

2.15 事故事件管理

包括事件(事故)分类分级、事件(事故)上报、调查与处理、整改措施落实、统计分析、同类事故教训吸取六个管理模块。企业应建立事故事件管理制度,明确管理要求,严格进行调查分析、落实管控措施并吸取教训,建立完善档案。

2.16 体系审核与持续改进

包括要素绩效指标、评估及审核、持续改进三个管理模块。企业应建立体系审核制度,通过设立绩效指标、开展自评、内审、管理评审及外审等方式,确保体系有效性和持续改进。

不断提高安全管理绩效。

3 化工过程安全管理体系搭建步骤

3.1 体系策划与设计

成立领导小组:建议企业成立安全管理体系建设领导

小组，由企业高层领导牵头，各部门负责人参与。企业应组织确定要素牵头部门，建立分委员会或分要素管理领导小组，确保体系的各个要素能够得到有效落实和推进。

制定体系建设工作计划：领导小组应根据企业生产运营现状，结合安全标准化建设等国家法律法规要求，制定详细的体系建设工作计划，明确每个阶段的具体任务、负责人和完成时间，确保各项工作有序推进。

3.2 体系制度与文件编制

企业应结合企业实际情况，制定化工过程安全管理体系文件，确保制度和文件具有针对性和可操作性。体系文件可按照四级架构设计，第一层是化工过程安全管理体系手册，明确体系的总体目标、原则、架构和运行机制；第二层是管理制度，针对体系的各个要素制定具体的管理要求和规范；第三层是实施细则，明确具体的工作流程和操作方法；第四层是记录文件格式，明确各层级的工作任务清单及标准。

3.3 培训与宣贯

组织全员培训：企业应制定详细的培训计划，针对不同层级、不同岗位的员工，开展有针对性的培训活动，使员工充分了解体系的重要性和具体内容。

广泛宣传：通过宣传栏、内部刊物、企业网站、电子显示屏等多种宣传渠道，广泛宣传安全管理体系，营造浓厚的体系管理氛围，使员工在潜移默化中接受安全管理体系的理念和要求，增强员工的参与度和认同感。

3.4 试运行与评估

开展试运行：在企业内部开展安全管理体系的试运行，对体系的运行情况进行实时监测和记录，及时发现和解决问题，确保体系能够正常运行。

定期评估：建立定期评估机制，通过定期开展评估汇报会等方式对体系的运行效果进行评估，不断完善体系，确保体系能够持续有效地运行。

3.5 持续改进机制

3.5.1 内部审核与管理评审

定期开展内部审核和管理评审，评估体系的适应性和有效性，发现不符合项并及时整改，根据评估结果提出改进措施和建议，持续改进体系运行效果。

绩效考核与激励：建立科学合理的安全绩效考核机制，明确考核指标和考核标准，将安全绩效与员工的薪酬、晋升、评优评先等挂钩，激励员工积极参与化工过程安全管理工作。

反馈与沟通：践行“全员参与”理念，建立畅通的反馈渠道，鼓励员工提出安全管理的建议和意见，增强员工的参与感和责任感，促进化工过程安全管理工作的有效开展。

通过建立完善的安全管理体系，明确职责，落实风险管控，企业可有效预防事故，保障员工安全与企业可持续发展。本文旨在为化工企业提供实用指导，帮助企业搭建完善的管理体系，实现本质安全。

附件 1. 化工过程安全管理体系建设要点信息清单

附件 1. 化工过程安全管理体系建设要点信息清单（示例）

化工过程安全管理体系建设要点信息清单（示例）						
序号	一级要素	二级要素	建议责任专业单位	关联管理制度	需要培训教育内容	关联记录、档案（具体细化）
1		1.1 安全方针、目标和战略	综合管理部门	1.《安全生产会议管理规定》； 2.《安全生产投入保障管理规定》； 3.《领导干部带班安全管理规定》； 4.《全员安全行为规范/反“三违”相关管理规定》	1. 开工第一课； 2. 企业安全文化培训； 3. 化工过程安全管理体系建设知识培训。	1.《安全文化手册》； 2.《安全目标责任书》（包括高层领导、部门经理、车间主任、班组长等）； 3. 各级重点工作分解及落实台账（公司、部门、车间）； 4. 各级组织安全生产指标完成情况考核资料； 5. 安全生产年度工作计划或方案。
2	1. 安全领导力与安全文化建设	1.2 安全承诺与有感领导				1. 安全生产责任制； 2. 安全生产委员会/安全领导小组成立文件； 3. 安全工作会议或其他会议纪要（记录）、会议照片、签到表等； 4. 会议精神传达（内网公示等方式）； 5. 会议工作落实汇报材料、工作落实档案； 6. 主要负责人安全承诺书及践行相关资料； 7. 安全承诺告知牌； 8. 个人安全行动计划及落实记录； 9. 领导干部带班记录； 10. 领导干部深入基层检查记录。
3		1.3 安全生产投入保障				1. 年度安全生产费用提取和使用计划； 2. 安全生产费用台账； 3. 安全生产责任保险保险单。
4		1.4 安全文化建设				1. 安全文化建设计划或方案； 2. 安全文化评估评价相关资料。

参考文献

- [1] 现代安全管理理论与实务 毛海峰主编 首都经济贸易大学出版社 2000年
- [2] 安全管理精读 甘心孟编著 天津大学出版社2002年
- [3] 安全原理 陈宝智编著 冶金工业出版社2002年
- [4] 安全管理员业务职能与行为规范 李景元编著 企业管理出版社 2002年
- [5] 安全生产管理知识 《“绿十字”安全生产教育培训丛书》编写组 中国劳动社会保障出版社2004年

Accelerate the recycling and utilization of used power batteries in universities

Yazhi Xun Yang Bao Xiyao Liao

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411100, China

Abstract

In the context of the “dual carbon” strategy, the recycling and utilization of waste lithium batteries is a key link in resource recycling. Electric bicycles have become the mainstream means of transportation for teachers and students in universities, and the number of them on campus has been increasing year by year. The problem of recycling waste power batteries has become increasingly severe. Currently, most universities lack a systematic recycling system, and problems such as the accumulation of “zombie cars” and arbitrary disposal of batteries are prominent. This not only causes environmental pollution, safety hazards, and loss of strategic resources, but also poses a behavioral dilemma of high awareness of environmental protection among teachers and students but low participation in actual recycling. This study takes universities in Xiangtan area as the research object, analyzes the current situation and pain points of the recycling of waste electric bicycle batteries in universities through questionnaire surveys, draws on advanced experiences at home and abroad, explores the construction of a smart recycling system that is suitable for university scenarios, creates an online and offline collaborative education and incentive model, and promotes the regional recycling model of school enterprise cooperation to solve a series of problems in university battery recycling. The recycling system constructed in this study combines convenience, safety, efficiency, and education, and has important theoretical and practical significance for serving the national “dual carbon” strategy, improving campus fine management, ensuring the safety of teachers and students, promoting resource regeneration, and strengthening young people’s environmental awareness.

Keywords

Discarded electric bicycle batteries from universities; Recycling pain points; Smart recycling system; Dual carbon targets; School enterprise collaboration.

加快推进高校废旧动力电池回收利用

寻雅芝 包阳 廖熙妍

湖南科技大学, 中国·湖南湘潭 411100

摘要

在“双碳”战略背景下,废旧锂电池回收利用是资源循环利用的关键环节。电动自行车已成为高校师生主流出行工具,校内保有量逐年激增,随之而来的废旧动力电池回收问题愈发严峻,当前多数高校缺乏系统化回收体系,“僵尸车”堆积、电池随意处置等问题突出,不仅造成环境污染、安全隐患与战略资源流失,存在师生环保高认知但实际回收低参与的行为困境。本研究以湘潭地区高校为调研对象,通过问卷调查剖析高校废旧电动自行车电池回收的现状与痛点,借鉴国内外先进经验,探索构建适配高校场景的智慧化回收体系,打造线上线下协同的宣教与激励模式,同时推动校校、校企协同的区域回收模式,破解高校电池回收的系列难题。本研究构建的回收体系兼具便捷性、安全性、高效性与教育性,对服务国家“双碳”战略、提升校园精细化管理、保障师生安全、促进资源再生、强化青年环保意识具有重要的理论与实践意义。

关键词

高校废旧电动自行车电池;回收痛点;智慧回收系统;双碳目标;校校企协同。

1 引言

校园电动自行车普及,废旧电瓶产量攀升,处置不当危害环境与健康,其含贵金属回收价值高、可缓解资源压力。但高校回收存在宣传不足、体系不完善、学生参与度低等问题,制约回收推进。

【课题项目】课题 2025 年创新训练项目: 高校电池“流浪记”回收困境与破局新玩法(项目编号: S202512649017)。

1.1 研究背景

双碳目标下,我国推进绿色低碳发展,作为全球最大锂电池生产消费国,锂电退役量大、资源价值高但回收率偏低;高校电池回收体系薄弱,回收率不足 15% 且合规企业极少,大量电池流入非法渠道造成资源浪费与污染,规范高校电池回收至关重要,亟需系统解决。

1.2 研究目的

全国动力电池回收不规范、回收率低,高校废旧电池隐患突出。2023 年南京一高校锂电池起火损失 230 万元,2024 年广州大学城因非法电池拆解造成地下水污染,危害

生态与健康。

1.3 研究意义

电动车回收是践行绿色发展理念、推动循环经济建设的重要举措，其意义主要体现在资源、环境、安全等多个维度，具体如下：

促进资源循环利用，缓解资源供需矛盾。

电动车动力电池含锂、钴、镍等战略资源，科学回收可提取高价值材料，降低矿产依赖、缓解资源紧张，实现资源可持续利用。

强化环境保护，降低生态污染风险。

废弃电动车处置不当，电池重金属与电解质易泄漏污染环境、危害健康；规范回收可从源头阻污，守护生态安全。

减少碳排放，助力“双碳”目标实现。

原生矿产开采与电池生产能耗、碳排放高，电池回收可缩短资源循环链，减少30%-40%碳排放，支撑双碳目标。

防控安全风险，保障公共安全稳定。

废旧动力电池随意丢弃或非专业处置，易引发火灾、爆炸等安全事故；专业回收通过标准化流程可有效规避隐患，保障公共安全。

综上，电动车回收关乎资源、环境与公共安全，是构建绿色低碳循环经济体系的重要举措。

1.4 研究内容

我国废旧锂电池回收体系存在短板，高校问题尤为突出。校园电动自行车废旧电池资源化潜力巨大，但回收不足。本文结合政策与调研，分析现状与潜力，为高校电池规范回收提供科学依据。

综上，构建适合高校的废旧电池有效回收、资源循环利用路径，是本文研究核心。

1.4.1 调查问卷及分析

项目组通过问卷星开展调查，主要面向湖南科技大学师生，兼顾湘潭其他高校及社会人士，回收有效问卷347份，掌握电池回收认知与处理态度，具体分析如下：

= 电动自行车购置比。

调研显示，已购电动自行车占比39.77%，未购占60.23%，约五分之二学生有车。湖南科技大学及周边电动自行车保有量高，废旧电池回收基数大。

电动自行车使用年限分布。

调查对象中电动车使用年限四年的占比最高(28.99%)，两年、三年、一年分别占28.26%、23.91%、18.84%，可见社区电动车使用周期普遍较长，需建立与使用年限匹配的机制。

废旧电池的“沉默隐患”。

调查结果显示，68.01%受访者未发现身边有废旧电动车及电瓶，31.99%（超三成）发现有。这表明废旧电池存在潜在风险，回收刻不容缓，需制定针对性管理回收措施。

社会废旧电动自行车处置现状。

68.01%受访者未发现身边有废旧电动车及电瓶，31.99%（超三成）发现有。这表明废旧电池存在潜在风险，

回收刻不容缓，需制定针对性管理回收措施。

公民回收电动自行车电池意识。

95.68%的受访者认为废旧电动自行车电池有必要回收，仅4.32%认为没必要。说明公众回收意识普遍较强，只要有便捷规范的回收渠道，绝大多数人愿意参与回收。

对废旧电动自行车回收方式的了解程度。

72.91%的受访者不了解废旧电池梯次利用与拆解回收的方法及优缺点，仅27.09%有所了解，说明社区在电池回收知识普及上存在明显不足。

相关政策了解程度。

仅6.63%的受访者充分了解电动汽车电池回收相关政策，93.37%了解不足，说明公众对电池回收政策认知度偏低，加强政策宣传是提高回收效率的关键。

高校学生危害认知。

仅12.97%的受访者充分了解废旧电动自行车电池的环境与安全危害，62.54%略知一二，剩余24.5%不了解，说明社会相关宣传仍有明显不足。

对附近网点的知晓率。

仅7.2%的受访者知晓电动自行车电池回收网点，42.36%只听过不了解，50.43%完全不知情，说明回收网点宣传不足，市场潜力巨大。

处理方式。

调查显示，处理废旧电动车电池时，12.97%选择暂存，82.98%会投入有害垃圾桶或正规回收渠道，仅2.02%随意丢弃。说明高校学生环保意识较强，但暂存比例高，反映出处理渠道不明确，仍是回收率偏低的重要原因。

优选的回收方法。

55.04%学生倾向二手转让废旧电池，仅13.54%认为回收网点方便、11.82%选线上回收。学生多转卖低年级，存在安全隐患，反映回收渠道不便、吸引力不足，需提升便利度并推行有偿回收。

回收难点解析。

回收痛点占比：回收点少、距离远26.51%，价格不透明22.48%，流程繁琐、缺正规渠道各21.04%，自行送达7.49%。反映回收布局、渠道、流程存在短板，建议优化布局、规范价格、简化流程、拓宽正规渠道。

提倡意愿。

在了解废旧电池不当回收的危害后，85.01%的人愿意主动倡导，12.39%会制止不当处理，仅2.59%不愿参与。说明民众社会责任感强，可转化为推动回收的重要动力。

综上可得以下问题（1）项目组以问卷星面向湖南科技大学等湘潭高校师生及部分社会人士开展调查，回收有效问卷347份，摸清电动自行车电池回收认知与处理现状，具体分析如下。

（2）回收体系不完善，缺乏统一分类标准导致电池混投，回收箱数量少、位置不便、分布不均，大幅拉低回收率。

（3）环保与安全隐患突出：师生环保意识不足、电池随意丢弃污染环境；存储、回收、运输不规范，易引发安全

事故及二次污染。

(4) 学生回收意识与行为脱节, 高校宣传、激励、投入不足致回收效果差。需构建“宣传—回收—处理”一体化体系, 强化科普、优化回收布局、建立激励机制、联动专业机构, 实现规范回收与资源化利用。

基于调研, 团队创新“互联网+回收”模式: 以校内回收站为核心, 搭建一体化智慧管理平台, 构建线上线下联动回收网络。

1.4.2 总结

湖南科技大学校园面积大, 教学区与生活区距离远, 电动自行车是学生主要出行工具。锂电池寿命约4年、铅酸电池约3年, 每年都有大量车辆报废。调查显示, 部分车辆超期使用, 存在环境与安全隐患。

2 电动自行车电池回收

我国高校废旧电动车电池产量逐年上升, 回收不及时易造成校园污染与资源浪费。合理建设电池回收站, 对缓解回收压力、建设绿色低碳校园具有重要意义。

2.1 线下回收(校企合作模式)

以“资源循环+校园治理+绿色发展”为核心, 通过校方与专业企业合作实现规范化回收。

合作主体职责: 学校负责排查公示无主车辆、集中存放、宣传教育与过程监督; 企业承担电池分类、安全运输、合规处理, 建立溯源台账并报备环保数据。

盈利模式: 分类处理废旧电池, 可修复的返回原厂, 不可修复的拆解提取重金属等资源, 投入再生材料市场实现价值增值。

回收流程: 师生送件或店员上门取件→回收站安全检查→分类(可修复/不可修复)→对应处置(返厂/专业处理中心)。

回收站功能: 作为分散收集与集中整合的中间枢纽, 兼顾投放便利与规模化回收效益, 优化后续处理效率。

回收站作为校园与回收利用点的中间桥梁, 实现废旧电池分散收集、集中整合, 兼顾学生投放便利与规模化回收效益, 并通过初步处理提升后续回收效率。

2.2 线上回收(微信小程序)

调查显示, 多数学生已认识到电动车废旧电池规范回收的重要性, 但仅停留在认知层面, 缺乏系统了解。处理电池时多考虑利益与便利, 易导致电池流入不规范渠道, 造成环境污染与资源浪费。

为解决这一问题, 本小组从提高校园废旧废弃电动自行车电池的便利性和普及其相关知识出发, 建立微信小程序, 形成互联网+回收模式, 从而推动线上线下协同发展。

核心板块: 包含电池回收知识科普、回收规则公示、预约回收、个性化用户中心、工作人员联系五大功能。

回收流程: 用户补充信息→选择电池数量/重量→预约上门取件或自送→工作人员安全检测(排查泄漏、鼓包、短

路等风险)→分类暂存→微信实时结算。

板块意义: 科普板块强化认知, 预约板块优化供需匹配, 用户中心通过碳积分兑换校园福利(餐券、文创等)激励参与, 工作合保障回收高效落地。

2.3 总结

回收点利用节能减排的方式, 线上线下共同运转, 能精准、高效地掌握电动自行车电池废弃物的供给, 实现用户与回收点的便捷连通, 在保证处理回收点获得足够货源的同时, 满足用户足不出户便能将电动自行车电池废弃物送至回收的需求。

同时, 基于小程序搭建校园电动车电池回收系统并全面推广, 可引导学生树立正确回收观念、养成良好习惯, 增强责任与环保意识, 助力建设绿色校园生态环境。

3 商业模式

3.1 目标客户

本项目聚焦电动自行车废旧电池规范化回收, 以湖南科技大学全体师生为核心服务群体, 覆盖学校周边社区与教职工家属区, 打造校园为中心、周边生活区为延伸的集中式客户体系。该群体人口密度高、需求统一, 回收场景便于统筹, 能为项目提供稳定货源。

团队成员均为在校学生, 熟悉校园场景, 易获取师生与居民信任, 降低沟通与推广成本。项目主打免费上门回收、线上一键预约、现场称重结算, 精准解决用户废旧电池存放难、处置无门、私自处理存安全隐患等痛点, 以高效正规的服务提升用户参与度, 实现效益同步积累。目标客户年轻化、环保意识强、接受新事物快, 为项目推广与长期运营奠定基础。

3.2 整体销售

3.2.1 市场调研

项目以湖南科技大学学生为核心调研对象, 通过线上问卷完成市场分析。该校在校大学生48383人, 电动车持有率39.77%, 保有量约19242辆, 车辆基数庞大。调研显示, 71.01%的电动车使用年限在4年以下, 电池寿命1—3年, 校内每年将产生大量废旧铅酸电池与锂电池, 回收需求稳定高频。

目前校园及周边缺少专业正规的回收渠道, 用户面临存放难、价格不透明、交易不安全等问题, 规范化上门回收服务需求迫切, 市场供给不足、竞争空白, 项目落地可行性强, 兼具市场潜力与环保、盈利价值。

3.2.2 推广渠道

(1) 初期引流: 通过首单优惠、积分兑换等活动降低参与门槛, 联动校内商超、奶茶店等场景实现双向导流, 与电动车销售维修店合作推行推荐返利, 快速拓宽回收来源。

(2) 校园渗透: 在食堂、宿舍等人流密集区投放宣传物料, 突出上门、预约、结算、环保四大优势; 联合校团委、社团组建回收先锋队, 将回收与实践学分、评优挂钩, 结合

社交打卡裂变扩大影响力。

(3) 长期沉淀：举办环保主题活动提升品牌公信力，搭建公众号、抖音、小程序等全媒体矩阵，完善 24 小时预约与全流程便捷服务，巩固用户忠诚度，推动项目规范化、品牌化发展。

4 应用前景

项目构建线上数字化平台+线下回收站点融合的协同回收体系，线上实现预约、结算、数据追溯，线下完成集中回收与合规处置，打通各环节流通壁垒，具备成本低、需求刚性、盈利稳定等优势，应用前景广阔。

4.1 市场应用：场景深耕与规模拓展的双重潜力

短期依托校内近 2 万辆电动车存量，迎来电池集中替换高峰，以数字化、轻资产模式实现高效运营，联动多方合作拓宽渠道。长期可延伸整车回收、电池租赁等全产业链服务，将模式复制至周边高校形成集群网络，拓展小型动力电池等领域，扩大市场与盈利空间。

4.2 社会价值：环保治理与理念传播的双向赋能

项目通过专业合规处置，实现 90% 以上资源回收利用率，避免废旧电池污染土壤水源，守护校园生态。同时以校园为阵地，将回收与实践育人结合，通过校园辐射家庭与社会，普及绿色低碳理念，推动全民环保意识提升。

4.3 政策契合：响应国家战略与享受政策红利的双重优势

项目与国家循环经济、生态环保战略高度契合，符合多项政策支持方向，可申请双创基金、环保补贴等经费支持。随着监管趋严，非正规渠道逐步退出，为正规项目释放更大市场，政策红利保障项目长期发展。

4.4 行业示范：校园回收模式创新与行业标准引领的探索价值

项目破解校园回收渠道零散、服务不规范等问题，打造可复制的一体化回收范本，解决行业压价、信任度低等痛点，树立服务标杆。项目积累的数据与经验，可为高校管理、城市资源布局提供参考，探索的四方协同机制具备行业创新与全国推广价值。

5 国内外研究现状

5.1 国外研究现状

国外动力电池回收研究与实践起步早、体系成熟，核心聚焦三大方向，校园场景研究成果具直接借鉴价值：

技术层面：欧美、日本在梯次利用与材料再生领域成果丰硕，为资源化利用提供成熟技术支撑；

政策层面：围绕生产者责任延伸制度（EPR）构建完善法规框架，明确全链条责任与回收标准；

模式层面：针对校园场景形成“定点回收+上门取件”一体化服务，搭配“积分兑换校园服务”激励机制，实证可提升回收率 40% 以上；

意识引导：证实常态化环保教育与便捷回收渠道结合，是推动学生回收行为的关键。

5.2 国内研究现状

国内研究随产业发展快速推进，聚焦本土化适配与细分场景突破，高校专项研究逐步兴起：

产业与政策：已形成系统研究，指出 2023 年正规回收率仅 25%（远低于欧盟），存在合规企业少、区域发展不均、溯源不完善等问题；围绕“双碳”目标及相关政策，提出完善 EPR 制度、建立统一溯源平台等建议，为高校融入国家回收网络提供指引。

技术研究：侧重低成本、本土化技术，湿法冶金实现锂、钴、镍高效提取且减排环保，梯次利用技术形成适配电动自行车电池的分级处理方案。

高校场景专项研究：

现状痛点：回收体系不完善、回收点布局不合理，存在“僵尸车”隐患与安全风险，师生“高环保认知（90%+认可）-低回收行动（不足 15% 参与）”悖论突出；

模式探索：提出“互联网+回收”“校地企协同”“环保社团+企业”等本土化模式，如微信小程序预约回收、积分激励等，已在多所高校试点；

行为研究：明确回收便捷性、激励有效性、知识普及度为核心影响因素，提出积分兑换、校园文化渗透等解决方案；

区域协同：探索高校集群区域回收网络，共享资源降低成本，已在湘潭、南京等城市初步实践。

参考文献

- [1] 丁红军. 电动自行车存在的问题及对策[J]. 电动自行车. 2004.
- [2] 杜平钟. 关于完善废旧蓄电池回收,利用管理的设想和建议[C]. 2001.
- [3] 罗锦程. 完善废动力电池回收处理体系的思考[J]. 新农业. 2022(4): 2.
- [4] 刘葳漪. 蓄电池回收 新能源产业的未来担当[J]. 电动自行车. 2018(6): 1.
- [5] 宋二虎, 王义新, 陈隆. 浅析中国电动自行车的产业化之路[J]. 电动自行车. 2004.
- [6] 王爱萍. 电动自行车废旧电池严重污染环境要引起重视[J]. 前进论坛. 2009(9): 1.
- [7] 王超. 废旧电池联合回收方案[J]. 发明与创新: 大科技. 2005(10): 1.
- [8] 叶新华. 加强电动自行车电池的回收利用管理[J]. 中国人大. 2018(9): 1.
- [9] 袁向华, 王洪起, 王晓乔. 电动交通工具的污染减排及对策[J]. 环境与发展. 2011(5): 2.
- [10] 张飞. 我国电动自行车发展状况及管理对策研究[D]. 郑州大学
- [11] 张维纳 史强 樊友寒 电动自行车多到大学校园堵车了 长江日报 2023.

Research on Production Control Model of Coal Preparation Plant under Intelligent Upgrading Background

Qingqing Ding

Hefei Design Institute of Coal Industry Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230001, China

Abstract

In the context of intelligent transformation in the coal industry, coal preparation plants serve as critical components for clean and efficient coal utilization. Traditional management models have become inadequate for implementing smart equipment and digital technologies, exhibiting issues such as low operational efficiency, poor coordination between processes, and excessive manual intervention. Based on actual production conditions at coal preparation plants, this study investigates the demands for intelligent transformation, analyzes shortcomings of conventional management approaches, and explores innovative management frameworks tailored for smart upgrades. The research examines four key dimensions: management systems, process optimization, workforce allocation, and risk mitigation strategies. These insights aim to help coal preparation plants break free from traditional management constraints, enhance operational efficiency, and achieve sustainable development. The findings provide actionable references for practical implementation, facilitating a transition from “experience-driven” to “intelligence-driven” operations in coal preparation facilities.

Keywords

Intelligent transformation; Coal preparation plant; Production management; Management model; Process optimization

智能化升级背景下选煤厂生产管控模式研究

丁晴晴

煤炭工业合肥设计研究院有限责任公司，中国·安徽 合肥 230001

摘要

在煤炭行业智能化转型背景下，选煤厂是煤炭清洁高效利用的重要一环，在此之前传统的管理模式已经不能满足对智能设备以及数字化技术的应用要求，存在着管理效率低下、各工序之间配合不佳、人为干预严重等问题。本文以选煤厂的实际生产情况为基础，针对其智能化改造的需求进行研究，剖析传统管理模式的问题所在及不足之处，寻找适合智能化改造的新型管理模式，从管理模式、流程优化、人员配置、风险防控四个方面进行论述，从而帮助选煤厂突破传统管理模式的桎梏，提高管理水平，促进高质量发展，给选煤厂带来接地气、可操作性的借鉴参考，使选煤厂由“经验驱动”转变为“智能驱动”。

关键词

智能化改造；选煤厂；生产管理；管理模式；流程优化

1 引言

随着人工智能、大数据、物联网等信息技术在煤炭行业的广泛应用，选煤厂智能化改造成为行业发展必然趋势，在此过程中智能化设备逐渐取代人工操作，生产工艺自动化程度以及信息化水平大大提高。但是目前大多数选煤厂生产管理模式还停留在传统层面，与智能化设备及信息技术未能很好结合在一起，造成智能设备作用不能很好发挥出来，在实际生产中依然存在着工序复杂、配合不到位、管理松散等问题^[1]。因此有必要对智能化改造背景下如何改进和完善选

煤厂生产管理模式进行探讨，摆脱空洞说教式论述，针对企业实际生产经营中存在的困难和问题提出切实可行解决方案，这对于提高企业生产能力、减少管理人员数量、保证安全生产都有着十分重要的现实意义。

2 智能化升级背景下选煤厂传统生产管控模式的痛点

随着科技的迅猛发展和工业智能化的持续推进，选煤厂的智能化建设已成为煤炭行业转型升级的重要方向。在过去的数十年间，煤炭行业在追求技术革新与产业升级的道路上，见证了选煤智能化发展的进程，这一进程充分体现了我国选煤厂智能化建设从无到有、从简单到复杂、从局部到全面的演变过程。目前，大多数选煤厂已经逐渐采用智能分选、

【作者简介】丁晴晴（1989—），女，中国安徽淮北人，硕士，从事矿业工程研究。

智能巡检、智能监控等装置进行智能化改造升级,但是传统的管理模式并没有相应改进,是影响智能化效果发挥的重要障碍,在此基础上根据选煤厂的具体情况总结出四个问题。

2.1 管控架构僵化,协同性不足

传统的选煤厂生产管理采用的是“金字塔式”的管理模式,层次过多,在由上至下过程中会出现信息传递延迟以及偏差的问题。如一线工人发现生产设备出现问题时,需要层层上报给领导,然后领导再下达命令进行维修,这样会耗费较多的时间,容易延误维修的最佳时机造成事故扩大化^[2]。而且各个部门、各个人员之间职责不清,生产和机电、巡检等不同部门相互推诿扯皮,缺少良好的合作机制,比如智能分选系统与煤泥水处理系统的数据不能共享,导致分选参数调节滞后于煤泥水处理进度,影响产品质量。这种固化的管理模式难以满足智能化生产的“即时响应、即时协作”的要求,降低了管理水平。

2.2 管控方式粗放,过度依赖人工

传统的管理模式主要是依靠人工管理,在此基础上增加一些自动化设备,但是大多数情况下都是处于“被使用”的状态,很难做到真正的智能化管理和生产的有机结合。而在选煤生产的重要环节上,比如分选参数设定、设备巡检以及产品质量检查等方面,依然过分地依赖操作工人的主观判断,容易产生较大的人为失误。例如:工人通过自身经验来调节重介分选参数,不能够及时地针对原煤质量的变化进行相应的调节,从而造成精煤品质不稳定;人工巡检有死角,对设备内部的一些小问题不易察觉,易引起设备停机事故的发生。而且人工管理很难做到全天候全方位的监控整个生产线,不能够第一时间发现生产线中存在的浪费或者违章行为等现象,管理精细化程度不高^[3]。

2.3 人员适配不足,技能水平滞后

智能化改造之后,选煤厂生产设备、工艺流程都发生了较大改变,对操作工人以及管理人员的技术要求也相应提高,但是目前大部分选煤厂仍然存在着员工技术水平达不到智能化需求的现象。一方面一些老工人已经习惯了以前的操作方法和管理模式,在使用智能化设备时不够熟练甚至有排斥心理,造成智能化设备不能发挥应有的效果;另一方面缺少既了解选煤工艺又懂信息技术的复合型管理人才,管理人员无法对智能化系统产生的大量数据进行分析判断,也就无从谈起利用这些信息找出生产中存在的问题并作出相应的调整改进措施等。而且公司没有完善的培训机制来培养员工掌握新的技术和管理手段,从而阻碍了管理模式的进步发展^[4]。

2.4 风险管控薄弱,防控方式单一

选煤厂生产过程包括设备运转、原煤分选、安全管理等多个方面,风险点较多,在传统的管理模式下对风险控制的方法比较简单,主要是靠人工检查,缺少智能化、全面化的风险防控措施。比如针对设备运行的风险,只是通过人工巡检来排查,不能做到对设备运行状况进行实时监控以及提

前预报;对于安全方面的风险如粉尘、瓦斯等,缺少相应的智能检测装置进行全天候监测,很难做到早发现隐患问题。此外,风险防控工作不到位,缺少一套完整的风险评价、报警、处理方案,在发生事故之后才去补救,无法做到防患于未然,给生产和安全带来不利影响^[5]。

3 智能化升级背景下选煤厂生产管控模式的优化原则

优化选煤厂生产管理模式应以智能化改造为出发点,针对选煤厂自身情况而定,要脚踏实地、切实可行、注重实效,不能流于形式主义的设计方案,在此基础上的管理模式才能契合智能设备的应用、提高管理水平、保证安全生产。

3.1 实用性原则

管控方式改进要结合选煤厂实际情况,针对不同规模、技术水平及人员配置等因素进行合理设计,避免脱离实际或不易实施的内容。比如对中小型选煤厂而言不需要过分注重高端复杂控制系统,主要是优化管理程序以及减少管理层级以提高工作效率和便捷程度;而大型选煤厂可以利用智能化系统建立全面细致管理模式来实现整个生产过程自动化控制。

3.2 协同性原则

打破传统的管理模式下各部门、各岗位之间相互隔离的状态,形成“协同配合、责任明确”的管理方式,在生产、机电、巡检、质检等方面进行联合管控。促进智能化设备与数字化平台的数据交互共享,保证选煤、煤泥水处理、装车等各个工艺流程参数联动调节,提高整个生产线的一体化程度以及衔接顺畅度,防止出现各自为战、脱节的现象发生。

3.3 智能化原则

充分发挥智能设备、数字技术的作用,使管理方式由“人工主导”转变为“智能化”,降低人为因素的影响,提高管理水平的有效性和准确性。运用智能监控、数据收集、大数据分析等方式对整个生产过程进行全方位监控、数据分析以及智能化判断,使管理更合理、准确、快捷,真正发挥出智能化带来的优势。

3.4 以人为本原则

管控方式改进要以人为核心,在尊重老员工操作习惯的基础上,注重对新技能的学习培养,防止由于技能要求过高而造成管控方式难以实施;加强培训教育工作,提高职工智能化操作水平以及管理水平,使职工自觉接受智能化管理方式,同时理顺各岗位职责,发挥广大干部职工的积极性、创造性,保证管控方式有效推进。

4 智能化升级背景下选煤厂生产管控模式的优化路径

基于传统管理模式存在的问题及改进思路,在选煤厂具体生产情况的基础上,围绕管理框架、流程优化、人员匹配、风险管理四个方面,提出切实可行、可操作性的管理模

式改善方案,促进选煤厂管理模式升级。

4.1 重构管控架构,提升协同效能

打破传统的“金字塔式”管理模式,建立“扁平化、协同化”的管理模式,减少管理层次,提高信息传递的速度和准确性。第一是精简管理层级,去除多余的中间管理层级,使决策层能够直达一线操作层,减少信息传递的时间差,保证指令下达以及反馈的时效性;第二是厘清职责分工,把生产、机电、巡检、质检等部门的责任落实到每一个员工身上,防止责任不清、互相推诿的现象发生,在每个环节都有专人进行监督控制;第三是搭建协同管理平台,通过信息化手段使各个部门之间、各个人员之间可以相互查看数据、交换信息,促进分选、煤泥水处理、设备维护保养等工作上的配合协作,比如将智能分选系统运行的数据与煤泥水处理系统的数据相连接,从而实现分选工艺参数及煤泥水处理工艺参数的同时调节优化,以达到改善产品质量的目的并提高工作效率。

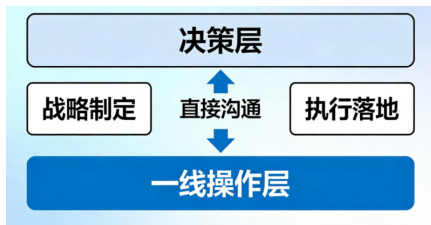


图1 企业管理

4.2 优化管控流程,实现精准管控

基于人工智能(AI)技术和智能化设备高度集成的应用,优化生产组织方式,转变管理模式从“粗放式”到“精细化、智能化”。一方面,运用AI智能监控系统对原煤入厂、分选、脱水、装车等整个过程进行全天候监控,在线监测的同时,AI算法能及时发现生产中的异常情况、设备运行状况以及产品质量的变化,做到早预警、早处理,不需要人工24小时看守。另一方面,实施AI驱动下的数据精细管理,借助AI大数据分析模型,将智能化设备所获取的全部生产信息加以归纳总结、提炼升华,探寻其中蕴含的生产法则以及存在的问题点,例如利用AI对原煤属性、分选参数的变化情况进行即时解析并自动调节分选参数来保证精煤质量稳定;运用AI设备损坏预测模型准确预报设备损耗走向,提前安排维修工作,有效减少设备停机时间。第三方面,借助AI系统简化管理流程,取消多余的手工记录、汇报步骤,实现数据自动收集、智能分析、自动汇报,提高工作效率,使一线工人专注于生产设备的操作及生产工艺改进的主要任务上。

4.3 强化人员适配,提升技能水平

根据选煤厂员工实际情况,制定AI适配型人员培养及匹配计划,解决员工技术水平不足、无法满足智能化、AI

化生产的矛盾问题。一方面开展分层次、分类别的AI专题培训,对于老工人进行AI智能设备的基本使用方法、维护保养以及报警信号辨别等内容的学习教育使其尽快融入到AI参与式工作当中去;而对于年轻人和干部则加强有关煤炭洗选工艺过程、AI信息技术的应用及数据分析等知识技能培训,打造一批“AI+选煤”的多能手管理者。另一方面采取“以老带新”方式,在掌握AI设备操作技术的老工人指导下让新人动手实践学习,使新人迅速学会如何运用AI技术的同时也促使老工人不断探索新的AI技术和改变管理模式。另外还要建立和完善关于AI方面的考核奖惩机制,调动广大职工的积极性和创造性参与到AI智慧化管理工作中来,对掌握良好、表现优异的员工给予表扬奖励确保AI智慧化生产模式真正发挥出应有的作用。

4.4 完善风险管控,保障生产安全

建设AI赋能智能化、立体化风险防控体系,做到风险早发现、早预警、早处置,确保选煤厂安全稳定生产。一是开发AI智能风险监控系統,整合各种智能监控、安全监测设备,运用AI图像识别、数据分析技术对生产设备运行状态、粉尘浓度、瓦斯浓度等重点部位进行全天候监控,在出现异常时能及时发出警报并通过AI提供解决方案建议,提高应急响应效率;二是制定AI风险分析及应对措施,运用AI算法定期排查整个生产线各环节存在的安全隐患并进行分级评定,自动确定风险级别以及相应的防范手段和应急预案,做到防患未然;三是采用AI宣传教育培训平台,组织风险防范专题教育活动,使全体员工认识到AI在风险防控中的作用,学会如何识别、防范以及处理风险,形成“人人重视风险、人人参与防控”的局面。

5 结语

在智能化改造过程中,选煤厂传统的管理模式已经不能满足行业发展的要求,在此背景下对管理模式进行改进是提高选煤厂管理水平的重要途径。本文以某选煤厂的实际生产情况为基础,探讨了传统管理模式存在的问题以及相应的优化措施和方法,在重新设计管理框架的同时也对管理程序进行了改进和完善,并加强了人员匹配度及风险管理,从而可以解决原有的管理模式带来的障碍,充分发挥出智能化设备的作用,使选煤厂的生产管理更加精细、智能,减少管理费用支出并确保安全生产。

面向未来,在选煤厂智能化改造不断推进背景下,人工智能、大数据等信息技术将与生产管理紧密结合,选煤厂管理模式将会越来越智慧化、集约化以及协同化。接下来要根据选煤厂具体情况及时调整管理模式,积极应对智能化管理中遇到的新问题、新困难,还要做好产学研合作,学习先进的管理理念和技术手段,促进选煤厂管理模式不断完善和发展,助力煤炭产业转型升级。

Cause Analysis and Emergency Disposal Plan Research on Chemical Production Leakage Accident

Feng Yang¹ Yuna Li¹ Fei Hu¹ Shange Chi²

1 Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2 Zhejiang Aoshou Material Technology Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

Chemical production leakage incidents present complex causes, stochastic evolution patterns, and challenging management challenges, constituting a core issue in industrial safety management. This study systematically analyzes two primary causative factors—equipment failures and human operational errors—while elucidating the dynamic characteristics of leakage dispersion and chain-trigger mechanisms. Building upon these insights, we establish an emergency response framework encompassing source control, environmental dilution, and neutralization measures, alongside a decision support system integrating risk assessment, resource allocation, and multi-department collaboration. Finally, we explore pathways for enhancing emergency response capabilities through three dimensions: digital monitoring and early warning systems, field-tested drill evaluations, and lifecycle management protocols. The research aims to provide theoretical foundations and practical references for chemical enterprises to strengthen leakage prevention systems and improve emergency response efficiency.

Keywords

Chemical leakage; Accident cause; Dynamic evolution; Emergency response; Decision support

化工生产泄漏事故成因分析与应急处置方案研究

杨丰¹ 李玉娜¹ 胡飞¹ 池善格²

1. 浙江岚美科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

2. 浙江奥首材料科技有限公司, 中国·浙江 衢州 324000

摘要

化工生产泄漏事故成因复杂, 演化随机, 处置困难, 是行业安全管理的核心难题。本文系统分析了设备设施失效与人为操作失误两类主要致因, 揭示了泄漏扩散的动力学特征与事故链式触发机制。在此基础上, 构建了涵盖源头控制、环境稀释与中和的应急处置技术体系, 并提出了基于风险评估、资源调度与多部门协同的应急决策支持系统。最后, 从数字化监测预警、实战化演练评估与全周期管理制度三个维度, 探讨了应急能力的提升路径。研究旨在为化工企业健全泄漏防控体系、提升应急响应效能提供理论支撑与实践参考。

关键词

化工泄漏; 事故成因; 动态演化; 应急处置; 决策支持

1 引言

化工生产包含许多易燃, 有毒, 腐蚀性的物质, 如出现泄漏, 非常容易引发火灾, 爆炸, 中毒等一系列连锁反应, 这会给人员生命, 自然环境和公共安全造成极大危害。泄漏事故的防范重点在于深入领会致因原理, 明确掌握发展规律, 科学安排应急资源。如今, 化工装置变得越来越大, 越来越复杂, 以往那种消极应对的方式已无法适应风险控制的需求。因此, 系统剖析泄漏事故的根源与演化路径, 构建全链条、多层次的应急处置与决策支撑体系, 并探索以数字

化、实战化为导向的能力提升机制, 对于提升化工行业本质安全水平、遏制重特大事故发生具有重要的理论价值与现实意义。

2 化工生产泄漏事故成因分析

2.1 设备设施失效机理

设备设施失效属于化工泄漏的主要物理成因, 其机理包含诸多复杂过程, 比如材料老化, 腐蚀减薄, 密封失效以及疲劳断裂等。在长期处于高温, 高压并且存在腐蚀性介质的情况下, 金属材料的微观组织结构会变差, 造成强度减弱和脆性增大, 这样就容易在应力集中的地方产生裂纹, 并逐渐扩展出去。设备相接的地方, 诸如法兰, 阀门, 垫片之类的部分, 由于安装不正确, 选型有误或者受到长期的交

【作者简介】杨丰(1986—), 男, 中国江西上饶人, 本科, 工程师, 从事化工安全研究。

变载荷影响,其密封性能就会渐渐下降,从而引发微小泄漏甚至喷射式的泄漏现象发生。像安全阀,爆破片这样的安全附件,如果校验迟缓或者选型不对头,那么在出现超压状况的时候,它们就不能有效地实施泄放操作,反倒成了比较脆弱的环节^[1]。失效不是单个因素造成的,往往是设计存在漏洞,制造有瑕疵,安装出现偏差,运维有所短缺这些情况相互作用而形成的累计成果,其表现出明显的渐次性和隐匿性特点。

2.2 人为操作失误类型

人为操作失误存在于化工生产的各个环节,是引发泄漏事故的重要因素。从失误的表现形式来看,可以分为认知失误,决策失误和执行失误这三类。认知失误指操作人员对于工艺参数的异常变化,设备报警信号或者现场危险迹象的识别存在迟缓或者判断出现偏差的情况,从而丧失了理想的干预机会。决策失误多发于非正常工况之时,操作人员依照经验采取了不当的处理办法,比如误关阀门,误停关键设备,这样就加重了物料泄漏的风险。执行失误则是指没有按照操作规程去执行,比如没有按要求实施吹扫置换,没确认阀门状态便加入物料之类的情形。

3 泄漏事故动态演化规律

3.1 泄漏扩散动力学特征

泄漏介质从设备瑕疵处喷出时,其扩散行为由物质物性,泄漏源参数以及周边环境条件相互作用所控制。气相泄漏往往形成高速射流,在动量起决定作用区域表现为锥形膨胀,之后转变为以浮力为主要因素的烟羽扩散,浓度分布朝着下风向呈高斯型递减,受到大气稳定度,风速以及地面粗糙度的影响十分明显。液相泄漏会先在围堰或者地面上形成液池,经过热交换产生闪蒸或者蒸发,气化物融入大气扩散,没有蒸发的部分顺着地势蔓延开来,有可能进入排水系统引发次生污染^[2]。两相流泄漏时,相间传质与动量交换令扩散行为变得更为复杂,液滴蒸发时会吸收热量形成低温重气云团,这种云团具备长距离沉降及向低洼处聚集的特征。

3.2 事故链式触发机制

化工泄漏事故很少单独出现,它的危害常常通过链式激发机制被成倍扩大。当最初出现泄漏现象时,如果未能立即加以控制,可燃或者易燃介质就会聚集在有限的空间当中,等到达到爆炸限度并遇上火源之后就会产生爆炸,产生的冲击波有可能破坏临近的设备,使得泄漏范围变得更为庞大。有毒物的泄漏除了能够致使人员中毒之外,假如它的扩散途径经过高温设备,那么就有可能产生热分解作用进而生成毒性更高的次生污染物。此外,泄漏介质对设备根基实施腐蚀,对电气设施造成侵害,这些情况都会间接促使设备倒塌,电力供应停止,进而引发联合停车以及次生的无法控制的化学反应。这样的链式激发实质上就是能量和物质的不受约束的传递过程,其发展速率同介质本身的危险属性,设备

排列的紧密程度以及最初应急反应的效果相关联,表现出时空关联,因果交错的繁杂网络特点。

4 应急处置技术体系

4.1 源头控制与切断技术

源头控制属于应急处置的关键准则,重点在于尽快制止物料不断向外流出。针对阀门,法兰之类的结合处出现泄漏情况,可以运用带压堵漏技术,凭借专门的夹具,注胶工具在不停机的情况下形成临时的密封体系。操作的时候要准确把握注胶的压力以及固化的时限,规避由于操作失误造成密封效果变差。要是管道存在孔洞或者裂缝,可以用机械卡箍,捆绑带等物理手段来执行临时性的封堵措施。如果储罐或者反应器自身发生破裂这样的严重泄漏状况,应当首先开启紧急切断装置,从远处关闭根部阀门,把故障部分隔离开来,再通过紧急泄压,物料倒入备用容器等办法减小泄漏的规模。

4.2 环境稀释与中和工艺

泄漏若已蔓延到环境,则要利用稀释与中和工艺来减小其危害浓度。针对可燃气体泄漏情况,消防水幕或者水炮能够生成水雾隔离层,通过水蒸气实施稀释并吸收辐射热,而且水雾对气体云团具备机械驱散和动量稀释功能,可以改变其扩散方向与积聚范围。就氨,氯等具有水溶性的有毒气体而言,可以设置水幕墙来执行洗涤吸收,凭借喷雾水滴较大的比表面积特点,提升气液传质效率,把气相污染物转移到液相之后再集中加以收集处理^[3]。酸性或者碱性液体发生泄漏时,要用碱性或者酸性物质作为中和剂来做化学中和处理,要随时监测pH值来控制投入量,保证反应足够彻底,还要防止因为中和过程释放大量热量或者产生有害副产品而造成污染。

5 应急决策支持系统

5.1 风险评估与分级方法

应急决策要依靠快速评定泄漏事故风险并科学分级,评定时要把泄漏介质的理化特性,泄漏速率,扩散情况以及受影响人群当作核心变量,综合利用事故后果模拟和风险矩阵法。及时获取气象数据,地理信息和人口分布数据之后,就能马上推算出不同时间点可燃或者有毒云团的覆盖范围,暴露浓度和持续时长,按照这些来划分危险区,缓冲区和安全区。风险分级还要综合考虑人员的易损性,环境的敏感程度和应急处理的可行性,把事故等级分成一般,较大,重大,特别重大四个级别,并分别启动相应层级的应急反应。分级结果直接影响警戒范围的划定,人员疏散的距离以及应急资源调配的先后顺序,还是后续资源调度和指挥协同的逻辑出发点。

5.2 应急资源优化调度

在应急资源存在局限的情况下,达成高效的调度很关键,这是控制事故损失的重点所在。要想优化调度,就要按

照事故的严重程度以及风险评定的结果来动态调配消防车,防护装备,堵漏工具,中和剂之类的资源种类及其数量。调度模型要充分考虑到资源存储点和事故点之间道路网络的通行能力,还要遵照运输时间窗口所施加的限制,并且也要顾及到多个事故点之间存在的资源竞争状况,防止因为资源聚集或者延误而导致失去有利时机^[4]。针对那些规模大且情况复杂的事故,应当启动区域性的应急资源联合管理机制,打破企业和园区同政府消防队之间固有的资源隔阂,做到跨地区,多层次的资源统一调配。

5.3 多部门协同指挥机制

化工泄漏事故的处理常常牵涉到很多部门,比如应急守护,消防救援,生态环境,医疗卫生,公安交通管理等,这些部门有没有协同指挥机制会直接影响到应急措施的效果。所以要创建起一个统一指挥,分级负责,信息共享,共同响应的指挥体系,还要清楚界定事故现场总指挥的权力范围以及各个部门在应对过程当中的职责界限,这样才能够让各有关部门做到情况分析,命令传达和执行反馈的同步协调,免除由于信息隔绝而产生的执行矛盾或者资源闲置现象。而且还要保证信息通报制度既能准确传递内部指令,又能对外发出一致的声音,免得错误消息引起公众惊慌失措。演练和实战过程中,要持续磨合跨部门衔接流程,消防救援和医疗救护之间的现场交接,环境检测与疏散决策所需的数据支持等,从而塑造起无缝对接的应急联动局面。

6 应急能力提升路径

6.1 数字化监测预警平台

创建数字化检测报警平台,这是做到由被动回应转为主动防范的关键依靠。该平台要融合工艺流程参数,设备在线监测得来的数据,视频智能分析结果以及气体传感网络信息,形成起企业层面和园区层面协同的全面感知系统。通过数字孪生技术创建装置的三维模型,随时显示主要设备的健康状况以及工艺参数的波动走向,针对腐蚀速度,振动异常,温度超标等前期迹象实施智能警报。此平台装有泄漏扩散快速模拟引擎,一旦报警被激活,就能在几分钟之内完成泄漏量的估计并推断扩散情况,以此给予应急应对以预先判断。而且,还要打通企业,园区和政府监督平台之间的数据通道,达成风险信息由下而上汇集,指令由上到下传达的效果,把警报信息准确发送到有关的责任部门,保证可以立即执行预先控制措施。

6.2 实战化演练评估体系

应急演练是否有效,取决于它接近真实事故的复杂程度,也取决于评价方法是否科学。实战化的演练要克服脚本化,表演化的偏向,可以采用双盲设置,无预案调动,临机

设险这些方式,来模拟真实场景下信息不确定,资源有限,决策时有压力的情况。演练科目要包含事故察觉,初步处理,扩大应急,跨部门协作,舆情回应等全部流程环节,主要考察应急响应程序是否实用,现场指挥能否及时作出决定^[5]。评价体系应该创建全面的量化指标,覆盖响应速度,资源到达比例,战术手段的正确性,人员防护是否符合规范,协同指令是否契合等方面。经过演练回顾和情景再现,深入分析各个环节存在的不足,列出问题清单并制定改进办法,达成以练推动创建,以评促使改正的循环改善目标。

6.3 全周期管理制度设计

要想加强应急能力,关键在于依靠系统化的管理制度来固定成果。全面的管理制度设计需融入预防,准备,响应,重建这四个阶段,形成起责任明确,流程标准,可随时调整的管理体系。在预防阶段,创建设备完整性守护程序,严格推广泄漏检测与修复技术,把泄漏风险列入到日常巡查和专业检测必要检查的范围当中。在准备阶段,明确应急预案的编写准则,评审步骤以及备案规定,保证预案在组织架构,应急资源,响应流程等方面具有可行性。在响应阶段,规范信息报送的时间限制和内容要点,塑造应急处理回顾和后续评价机制,把事故经验教训变成成制度修订的依照。恢复阶段要明确事故装置复产时安全条件确认的程序,防止因急于复产而发生次生事故。通过制度形成来不断优化应急能力。

7 结语

化工生产泄漏事故的防控属于系统工程,其包含预防,准备,响应,重建各个环节。本文从事故成因及发展规律入手,塑造起牵涉源头把控,环境处理的技术体系,凭借风险考量,资源调配以及协同指挥创建起决策支持框架,着眼于能力优化,重视数字化观测,实战化演习和全流程管理的关键意义。未来,应进一步推动工业互联网、人工智能与风险管控的深度融合,促使安全管理从经验驱动向数据驱动的范式转变,实现事前精准预防与事中智能响应的有机统一。

参考文献

- [1] 马腾,徐斯华,王东旭.化工机械事故的控制与分析[J].山东化工,2025,54(17):177-180.
- [2] 陈婷.特种设备管理对化工安全事故预防效果分析[J].石化技术,2025,32(09):115-117.
- [3] 陈晓琳,李喆.化工行业压力容器储罐的风险因素及预防措施[J].设备管理与维修,2025,(10):97-99.
- [4] 魏娜.化工生产过程中危险化学品泄漏事故应急处理技术研究[J].石化技术,2025,32(04):371-372.
- [5] 牛鹏钧.注缓蚀剂罐泄漏原因分析及预防措施[J].化工装备技术,2024,45(05):46-49.

Research on Comprehensive Management and Production Enhancement Strategies for Low-Yield, Low-Efficiency Reservoirs

Lijun Li

Changqing Oilfield Production Plant No.5, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

Low-yield, low-efficiency reservoirs pose a major challenge to sustainable oilfield development. This study comprehensively analyzes geological and operational factors contributing to suboptimal reservoir performance, establishing an integrated management framework that includes reservoir modification, well network optimization, water injection efficiency improvement, and wellbore condition remediation. Based on field implementation experiences at Jiyuan and Mahuangshan areas of Changqing Oilfield Production Plant No.5, the research demonstrates optimized application approaches and effectiveness of production enhancement methods including fracturing operations, water injection systems, carbon dioxide flooding, and intelligent monitoring management. Findings indicate that accurate identification of formation causes coupled with coordinated optimization of measures can significantly improve development efficiency in low-yield reservoirs, providing valuable references for enhancing reservoir quality and profitability in similar oilfield contexts.

Keywords

low-yield and low-efficiency reservoirs; comprehensive management; production enhancement measures; reservoir modification; water injection optimization

低产低效油藏综合治理及增产措施研究

李利君

长庆油田采油五厂, 中国·陕西 西安 710200

摘要

低产低效油藏是限制油田能够持续发展下去的主要难题。本文全面分析产量较低、效益不佳油藏的地质方面和开发方面的形成原因, 建立一个包含储集层改造、井网结构优化、注水效果改善以及井筒状况治理的综合整治技术体系。结合长庆油田采油五厂姬塬、麻黄山等区域的实地操作情况, 说明压裂作业、注水工作、二氧化碳驱油以及智能监控管理等增产办法的优化方式和应用成效。研究成果显示, 通过对形成原因进行准确判断和对措施进行协同优化, 能够明显提高产量较低、效益不佳油藏的开发效益, 给同类油藏提高质量、增加效益提供参考。

关键词

低产低效油藏; 综合治理; 增产措施; 储层改造; 注水优化

1 引言

随着油田开发工作不断向纵深发展, 产量较低、效益不佳的油藏已经成为限制油气田保持稳定产量、增加效益的主要障碍。这类油藏一般存在储集层能量不够、单口井产量低、开发成本高等显著问题。因此, 本文深入分析产量较低、效益不佳的形成原因和机理, 探寻综合整治和增产优化的有效途径, 希望能为同类油藏的高效开发提供技术支持。

2 低产低效油藏基础特征与界定

低产低效油藏并非单一类型, 而是涵盖多种开发成效欠佳对象的统称。对该类油藏进行界定需综合考量地质状况与开发资料两个层面。从储集层物理属性而言, 其大多表现出中等至特低孔隙度和渗透率的特征, 空气渗透率往往低于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙构造复杂, 孔隙与喉道组合不理想, 非均质性极强。从生产动态情况来看, 单口井每日产油量普遍低于工业油流最低标准, 有些井虽然在初期有生产能力, 但由于能量补充不及时或者水驱影响范围有限, 含水率迅速上升到经济极限以上。从开发效益方面来看, 每吨油的操作成本明显高于区块平均水平, 投入和产出不平衡。总体来说, 在当前技术经济条件下, 凡是单井产量低、采收率增长幅度

【作者简介】李利君(1986-), 男, 中国山西吕梁人, 本科, 工程师, 从事采油工程研究。

小、难以实现效益开发的储量单元，都可以归入低产低效油藏的范围。准确地定义是后续进行成因分析和制定治理措施的基础条件。

3 低产低效油藏成因分析

3.1 地质成因

地质条件是判断油藏开采潜力的核心基础。沉积微观相态控制着储集砂质岩体的空间排布和内部结构，河道侧边、河口坝边缘等相带区域往往出现砂质岩体较薄、泥质夹层发育的特征，造成有效储集层厚度较小、初始含油饱和状态较低。成岩作用的差异变化进一步加剧了储集层质量的差异，强烈的压实和胶结作用使原生孔隙大量减少，形成以微小喉道为主体部分的孔喉网络体系，毛细管阻力显著增强，流体渗透流动能力大幅下降。天然裂缝发育不均衡带来的双重介质效果，在注水开采过程中容易引发水流沿着裂缝快速窜流，造成基质原油滞留难以流动。上述地质先天条件的不足，使油藏在投入开采的初始阶段就面临能量传递受到阻碍、驱动效率不高的固有难题。

3.2 开发成因

在开发流程当中，技术层面的适配程度与管理维度的精细程度，会对油藏最终的开发效果产生直接影响。从井网部署状况来讲，倘若井与井之间的间距过大，会导致驱替压力的梯度难以抵达启动压力的临界数值，进而导致注水井和采油井之间无法建立起有效的驱替通道。当井排的方位与地应力的主向不相匹配时，注入的水体便会沿着优势方向迅速推进，形成局部水淹区域与大面积水驱未波及区域并存的复杂情形。注采结构失衡，具体表现为注水井注水量欠缺、层位配注水量不合理或者注采比偏低，这会使地层的能量持续出现亏空，原油脱气之后黏度升高，流动时的阻力进一步增大。储层受损的情形，在钻井、完井以及生产的全流程中均会出现，钻井液滤失所引发的水敏和速敏现象，以及在长期生产过程中有机垢和无机垢在井筒近井地带产生的复合沉积，都会形成额外的渗流障碍。开发环节中这些适应方面的偏差和管理上的疏忽，常常会让原本具有一定生产能力的储层陷入低效的循环状态。

3.3 成因量化分析与主控因素

运用灰色关联分析方法，把单井每日产液量当作参照序列，分别计算渗透率、有效层厚度、注采对应系数、压力保持水平、含水率上升系数等指标和产量的关联程度。结合某油田实际资料计算表明，注采对应系数的关联程度处于第一位，其数值低于百分之七十时，产量递减速率显著加快；渗透率变异系数位列第二，当该系数超过零点七时，水驱波及体积大幅降低。通过主成分分析进一步验证，开发因素对低产低效状态的贡献比例超过百分之六十，而地质因素中渗透率变异系数与有效层厚度的相互影响构成了储层质量的主要控制方面。

4 低产低效油藏综合治理技术体系

4.1 综合治理原则

整治事务的推进要构建于明确的类别划分根基之上。依照“类别划分、等级区分、依据储存状况制定策略、契合经济合理性”的根本指导方针，把整治客体划分为不同种类：第一种是储存层物理性质尚且良好但地层能量存在不足情形的类型，将恢复压力体系作为最优先的目标；第二种是能量供给充分但渗透流动通道受到阻碍的类型，把重点集中于储存层改造和解堵技术方面；第三种是井网失去有效控制或者注入与开采比例失衡的类型，致力于井网重新构建和注水结构优化工作。在技术路径的选择方面，遵循“先处置简单问题、后处理复杂问题、将效益作为首要考虑”的排列规则，优先实施投入与产出比率较高、产生效果周期较短的措施，同时对长远的存储层保护和可持续性开发予以兼顾。治理方案的形成需经历“地质状况再次认识—剩余原油分布刻画—措施优化挑选—经济效益评估—动态情形追踪”的封闭循环程序，确保每一个环节都有根据可遵循、有准则可依照。

4.2 储层改造治理技术

针对各类阻塞作用机制与储集岩层敏感特性，需差异化选用改造工艺技术。对于天然裂隙发育水平低、基质渗透性能极差的储集岩层，采用大规模体积压裂工艺方法，通过形成复杂裂隙网络体系，最大程度扩展泄油面积范围，提高流体向井筒的运移速率。针对薄差岩层或隔夹层发育的储集岩层，实施分层压裂与暂堵转向压裂相结合，先利用暂堵材料封堵已存裂隙或高渗透段落，再在新部位产生裂缝痕迹，实现裂隙的转向扩展形态，有效动用层间剩余石油资源。对于碳酸盐类岩石或钙质胶结严重的砂岩储集岩层，选用多氢酸化体系装置，该体系具备缓速反应、深穿透的属性特征，可溶解近井区域范围的无机阻塞物质成分，同时防止二次沉淀现象对储集岩层造成新的损害影响。在压裂液体与酸液配方设计中，着重添加高效助排剂与防膨剂，降低工作液滞留引发的水锁效应与黏土膨胀风险，保证改造效果的长期有效性。

4.3 井网优化治理技术

针对产出数量处在较低水准、经济效益处于较差状况的区块单元，井网布局的优化工作主要包含加密调整操作与井网转换方式这两种实施途径。在砂质沉积体分布范围呈现出较大状态但井间距离超出合理界限的地域，采用井网加密技术手段，把注水采油的井间距离缩短到契合经济准则的范围之内，使驱替压力的梯度能够冲破启动压力的临界数值，建立起具有实际效果的驱替关联。加密井位的优化挑选工作需要联合精细油藏描述的成果内容，优先将其设置在砂质沉积体主河道延伸方向并且剩余油饱和度处于较高水平的区域位置。对于因井网模式不合理造成水驱方向单一、角井与边井受效不均衡的区块，开展井网转换，把反九点法调整为五点法或直线排状注水方式，增强注水波及的均匀程度。井

别转换作为井网优化的辅助方式,将部分低效生产井转变为注水井,或把边缘井改造为注气井,形成灵活的注采对应关系,提高井网对剩余油的控制能力。

4.4 注水改善治理技术

注水作为补充地层能量、维持油藏稳定产出的关键手段,其精细化管控程度直接对开发效果产生影响。细致地实施分层注水是解决层间矛盾的有效途径,采用桥式偏心分层注液工艺,实现单井三级四段甚至更高层级的分层注水作业,根据各小层吸水能力的不同情形与剩余油的分布状况,差异化地配置注水量,避免高渗透层吸入过多水量,而中低渗透层的注水受到制约。针对注水开发中后期出现的水驱优势通道现象,施行周期性注水或者脉冲式注水,通过交替变换注水量和注入压力,营造不稳定的压力场,借助弹性力和毛管力的交替作用,推动基质中的剩余原油被置换出来。对于注水井注入量不足的问题,采取增加注水量的措施,包含酸化增注、压裂增注以及运用纳米聚硅材料降低压力来增加注水量,减小注入压力,提高注水能力。水质符合标准是注水优化的基本保障,严格把控注入水中的悬浮物质、含油数量以及细菌指标,避免因水质不达标对储层造成二次损害。

4.5 井筒堵塞治理技术

阻塞物质的种类繁多且具有多样性,主要涵盖有机沉淀物(如石蜡、胶质、沥青质等)、无机沉淀物(像碳酸钙、硫酸钡、硫酸锶等)以及由机械性杂质和微生物代谢生成物组成的混合物。针对单一类型的阻塞状况,能够采用化学溶解的办法,在处理有机沉淀物时选用有机溶剂或者清蜡药剂,处理无机沉淀物时则选用螯合型解堵药剂。当遭遇混合阻塞的情形时,仅仅使用单一的化学药剂通常难以达成预期效果,需要采用物理—化学混合解堵程序,首先依靠超声波或者高能气体冲击波产生高频振动和空化效应,让阻塞物质的结构变得疏松,形成细微的缝隙,随后注入混合解堵液体,实现深层次的溶解和分散。倘若因为井筒机械故障导致产能损失,比如泵的工作效能低下、管柱发生泄漏等情况,需要开展检泵作业并对管柱进行优化,选用大排量的深抽泵,扩大生产压力差值,提高举升效率。在完成解堵操作之后,要着重进行防沉积的预先处理以及定期添加药剂的维护工作,延长治理措施的有效时间,防止阻塞情况再次出现。

5 低产低效油藏增产措施优化与实践

5.1 主流增产措施及应用局限

长庆油田采油五厂低产低效油藏以姬塬、麻黄山油田为核心部分,都属于超低渗、特低渗类别,单口井每日产油量少于2吨,目前主要的增产方式包含压裂、注水、驱替和管理四个类别,分别用于储集层改造、地层能量补充、波及

效率提高以及剩余油挖掘。然而在实际应用中存在显著的限制:压裂类受储集层非均质性的作用,裂缝形态单一并且新裂缝形成困难,增产石油的效果不稳定;注水类启动压力达到18–25MPa,能量消耗占比40%,分层注水合格率较低且水驱效率不好;驱替类存在气体窜流、产生效果慢等问题;管理类措施针对性不够,智能管控落后导致产量出现波动。

5.2 增产措施优化研究

针对前面所说的这些限制情况,采油五厂进行专门的技术研究攻克工作。在压裂方面,使用多级暂时堵塞的体积压裂和再次压裂相融合的技术,对有关参数进行调整使它达到更好状态,从而产生复杂的裂缝网络。在注水方面,推行智能的分层注水、周期性注水和微球调整剖面的协同模式,让其与不同类型的油藏相适应,进而对参数进行优化。二氧化碳驱采取重力辅助和分层注入气体相结合的办法,去解决气体乱窜流动的问题。在管理方面,实行“一口井一个油层一个策略”的方式,建立起相互联动的模型,以此来实现智能的间歇性开采,各项优化都确定了可以用数量表示的目标,形成了具有系统性的技术体系。

5.3 现场应用与效果验证

各类优化措施在现场落地后成效显著,姬塬油田压裂井单井日产油增幅达383%,麻黄山油田分注合格率提升至85%,黄436延9油藏CO₂驱试验区日产油增幅66%,长停井复产率达65%。2023–2025年,全厂低产低效油藏累计增油12.6万吨,措施有效率提升至82%,吨油措施成本下降28%,形成多项核心技术及专利,实现产量与效益双提升,为同类油藏开发提供技术支撑。

6 结语

低产低效油藏的全面治理是一项有整体性的工作,得按照“分种类分等级、根据油藏实际状况定办法”的准则来做。本文从找原因的诊断事儿起步,搭起了储层改造、井网优化、注水状况改进和井筒治理相互配合的技术一套。长庆油田采油五厂的实际做法表明,多级暂堵体积压裂、智能分层注水、重力帮忙二氧化碳驱替以及“一口井一个油层一个对策”的细致管理等招儿,能明显提高开发工作的效果。以后干活时,该加强智能做决定和动态跟踪的事儿,让低效资源能一直开发下去。

参考文献

- [1] 邓建明.渤海油田低产低效井综合治理技术体系现状及展望[J].中国海上油气,2020,32(3):111-117
- [2] 李莹,郑瑞,罗凯,等.筠连地区煤层气低产低效井成因及增产改造措施[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):146-155.
- [3] 徐胜玲.吴起采油厂长停井及低产低效井综合治理[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(10):148-149.