

02
2026



化工技术与应用

Chemical Technology and Application

Volume 3 · Issue 2 · March 2026 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)



化工技术与应用 Chemical Technology and Application

Volume 3 · Issue 2 · March 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



China National Knowledge Infrastructure

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 2 · March 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 化工储罐群安全监测系统的设计与风险预警模型构建 / 化开强
- 4 科技成果转化影响因素及提升路径探析 / 李欢欢
- 7 原油储运全流程质量管理实践路径与价值重塑 / 李佳欣
- 10 高温碱熔-电感耦合等离子体发射光谱法测定铁矿石中二氧化硅的含量 / 叶成美
- 13 强化加油站现场风险管控筑牢油品加注全流程安全防线 / 王世龙
- 16 聚氯乙烯糊树脂生产工艺优化及质量控制研究 / 杨凯
- 19 石油化工设备安装技术及项目管理 / 何伟康
- 22 甲醇装置工艺风险分析及安全防护措施研究 / 孙汇涛
- 25 供水泵站自动化系统设计与谐波治理技术研究 / 庄志刚
- 28 不对称小分子催化合成工艺研究 / 李运波
- 31 城镇燃气管道施工技术要点及注意事项分析 / 冯赟
- 34 沿江 LNG 接收站气化器选型及能量综合利用 / 刘靖亚
- 37 半纤维素极限浓缩关键技术研发与分离效率提升路径探索 / 刘洁 罗云刚 乔宏威 陈依玲 徐玉凤
- 40 基于 PDCA 循环的化工企业安全生产标准化持续改进机制研究 / 孙磊
- 43 基于耐候性与耐磨性提升的公路标线涂料改性研究 / 宋华
- 46 提升核辐射安全监管水平的有效措施研究 / 黄英辉
- 49 液压驱动隔膜计量泵不上量故障分析 / 邵现田
- 53 安全生产视域下化工安全管控途径探索 / 钟林
- 56 醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽系统优化与能效提升 / 梁吉强
- 59 水合氧化铬吸附剂及其制备工艺研究 / 廖荣
- 62 基于废润滑油/重质油/沥青的碳纳米材料绿色提取工艺及性能研究 / 赵鑫 李富亮
- 65 乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀原因分析 / 尤朝辉 罗涨宾 孙永猛 张坤
- 68 ICP 分析技术在汽油中微量铁锰铅硅元素检测中的应用研究 / 黎春
- 71 不同提取方法所得檀香油香气成分分析 / 牛丽敏 甘望宝 单丽君
- 77 醋酸高纯度精制技术研究与工业化应用 / 冯宇涛
- 80 天然气管道阴极保护防腐技术失效成因与整改措施研究 / 崔雅光 吴毅辉
- 83 功能化填料增强聚丙烯复合材料界面设计及应用研究 / 罗兰博
- 86 双重预防机制在煤化工企业安全生产管理中的深化应用 / 罗满
- 89 进出口常见果蔬中农药残留快速检测应用研究 / 赵朋
- 92 BDO 对高晶点 PBAT 性能改善的研究 / 杨朋海 杨晓倩 王荣霞 何光朝
- 96 微反应器技术在芳胺类重氮化合成中的应用及安全性改进 / 夏星宇
- 99 化工安全生产“五防”管理 / 高彭 孙连亮
- 102 采矿、化工、冶金、建材四大行业职业病危害检测与评价技术应用研究 / 李强
- 105 矿山企业职业卫生管理体系运行效果评价研究 / 杨晓君
- 108 化工园区重大危险源风险评估方法研究 / 陆晓强

- 1 Design of Safety Monitoring System and Risk Early Warning Model for Chemical Storage Tank Group / Kaiqiang Hua 40
- 4 Analysis of Factors Affecting the Transformation of Scientific and Technological Achievements and the Paths for Enhancement / Huanhuan Li 43
- 7 The Practical Path and Value Redefinition of Quality Management Throughout the Entire Process of Crude Oil Storage and Transportation / Jiaxin Li 46
- 10 High-temperature Alkali Fusion - Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry for Determining the Silica Content in Iron Ore / Chengmei Ye 49
- 13 Strengthen On-site Risk Management at Gas Stations to Fortify the Safety Defense Across the Full Fueling Process / Shilong Wang 53
- 16 Research on Process Optimization and Quality Control for Polyvinyl Chloride Paste Resin Production / Kai Yang 56
- 19 Petrochemical Equipment Installation Technology and Project Management / Weikang He 59
- 22 Research on Process Risk Analysis and Safety Prevention and Control Measures of Methanol Plants / Huitao Sun 62
- 25 Design of Automation System for Water Supply Pump Station and Research on Harmonic Suppression Technology / Zhigang Zhuang 65
- 28 Study on Catalytic Synthesis Process of Asymmetric Small Molecules / Yunbo Li 68
- 31 Analysis on Key Construction Technologies and Precautions for Urban Gas Pipelines / Yun Feng 71
- 34 Selection of Gasifiers and Comprehensive Utilization of Energy for LNG Terminals Along the Yangtze River / Jingya Liu 77
- 37 Research and Development of Key Technologies for Hemicellulose Ultra-Concentration and Exploration of Pathways to Improve Separation Efficiency / Jie Liu Yungang Luo Hongwei Qiao Yiling Chen Yufeng Xu 80
- Research on the Continuous Improvement Mechanism of Work Safety Standardization in Chemical Enterprises Based on PDCA Cycle / Lei Sun 43
- Research on the Modification of Road Marking Coatings Based on Improved Weather Resistance and Wear Resistance / Hua Song 46
- Research on Effective Measures to Enhance Nuclear Radiation Safety Regulation / Yinghui Huang 49
- Failure Analysis of the Hydraulic-Driven Diaphragm Metering Pump's Failure to Deliver Required Flow Rate / Xiantian Shao 53
- Exploration of Chemical Safety Management Approaches from the Perspective of Work Safety / Lin Zhong 56
- Optimization and Energy Efficiency Improvement of the Steam Generation System Utilizing Waste Heat from the Top of the Acetic Acid Distillation Column / Jiqiang Liang 59
- Research on Chromium Oxide Hydrate Adsorbent and Its Preparation Process / Rong Liao 62
- Research on Green Extraction Process and Performance of Carbon Nanomaterials from Waste Lubricating Oil/Heavy Oil/Asphalt / Xin Zhao Fuliang Li 65
- Analysis of the Causes of Corrosion in the Intercooler of the Ethylene Plant Cracked Gas Compressor / Chaohui You Zhangbin Luo Yongmeng Sun Kun Zhang 68
- Application of ICP Analysis Technology in the Detection of Trace Iron, Manganese, Lead and Silicon in Gasoline / Chun Li 71
- Analysis of Aromatic Components in Sandalwood Essential Oil Obtained by Different Extraction Methods / Limin Niu Wangbao Gan Lijun Shan 77
- Research on High-Purity Acetic Acid Purification Technology and Its Industrial Application / Yutao Feng 80
- Research on the Causes of Failure and Rectification Measures for Cathodic Protection Anti-corrosion Technology in Natural Gas Pipelines / Yaguang Cui Yihui Wu

- 83 Interface Design and Application Research of Functionalized Fillers Reinforced Polypropylene Composite Materials / Lanbo Luo
- 86 Deepening Application of Dual Prevention Mechanism in Safety Production Management of Coal Chemical Enterprises / Luo Man
- 89 Research on Rapid Detection Technology for Pesticide Residues in Common Imported and Exported Fruits and Vegetables / Peng Zhao
- 92 Research on the Performance Improvement of High Crystallinity PBAT by BDO / Penghai Yang Xiaoqian Yang Rongxia Wang Guangchao He
- 96 Application and Safety Enhancements of Microreactor Technology in Aromatic Amine Diazotization Synthesis / Xingyu Xia
- 99 Chemical Safety Production “Five Preventive Measures” Management / Peng Gao Lianliang Sun
- 102 Research on the Application of Occupational Disease Hazard Detection and Evaluation Technologies in Four Major Industries: Mining, Chemical Industry, Metallurgy, and Building Materials / Qiang Li
- 105 Research on the Evaluation of Operational Effectiveness of Occupational Health Management Systems in Mining Enterprises / Xiaojun Yang
- 108 Research on Risk Assessment Methods for Major Hazard Sources in Chemical Industrial Parks / Xiaoqiang Lu

Design of Safety Monitoring System and Risk Early Warning Model for Chemical Storage Tank Group

Kaiqiang Hua

China Pingmei Shenma Group Nylon Chemical Company, Pingdingshan, Henan, 467000, China

Abstract

As a key facility for the storage and transportation of hazardous chemicals, the safety level of chemical storage tank groups directly affects enterprise operations and environmental safety. In recent years, frequent leakage and explosion accidents have exposed issues such as lagging monitoring and insufficient early warning. Based on the risk characteristics of storage tank groups, this paper constructs an intelligent safety monitoring system that integrates multi-source sensor information, combining edge computing and big data analysis to achieve real-time perception and dynamic early warning. The system realizes full lifecycle monitoring of storage tanks through parameter acquisition, status recognition, and risk model calculation, and designs a three-layer system architecture with a risk assessment model integrating fuzzy analytic hierarchy process and Bayesian network. Experiments show that the system's early warning accuracy reaches 93.7%, significantly improving monitoring precision and response speed, providing a scalable intelligent approach for the safety management of chemical storage tank groups.

Keywords

chemical storage tank cluster; safety monitoring; risk early warning; multi-source data fusion; intelligent sensing

化工储罐群安全监测系统的设计与风险预警模型构建

化开强

中国平煤神马集团尼龙化工公司, 中国·河南·平顶山 467000

摘要

化工储罐群作为危险化学品储运的关键设施,其安全水平直接影响企业运行与环境安全。近年来泄漏、爆炸事故频发,暴露出监测滞后与预警不足等问题。本文基于储罐群风险特征,构建融合多源传感信息的智能安全监测系统,结合边缘计算与大数据分析实现实时感知与动态预警。系统通过参数采集、状态识别与风险模型计算,实现储罐全生命周期监控,并设计三层系统架构与融合模糊层次分析—贝叶斯网络的风险评估模型。实验表明,系统预警准确率达93.7%,显著提升监测精度与响应速度,为化工储罐群安全管理提供可推广的智能化路径。

关键词

化工储罐群; 安全监测; 风险预警; 多源数据融合; 智能感知

1 引言

化工行业具有高风险与高复杂度特征,储罐群作为原料和产品储存核心设施,是潜在危险的集中载体。一旦发生泄漏或爆炸,后果极为严重。传统监测依赖人工巡检与局部传感采集,存在数据孤立、信息滞后与响应缓慢等问题,难以满足现代化工企业对实时与智能化管理的需求。随着物联网、大数据和人工智能的发展,构建智能化储罐群安全监测体系成为趋势。本文提出基于多源传感融合与智能分析的监测系统,实现储罐状态的实时感知与风险预测,为化工企业安全管理提供科学支撑与技术保障。

【作者简介】化开强(1994-),男,中国河南商丘人,本科,助理工程师,从事化学工程与工艺研究。

2 化工储罐群安全监测的系统需求与特征

2.1 储罐群安全风险的复杂性

化工储罐群作为高危化学品的集中存储单元,其风险特征呈现出多源性与耦合性。风险来源主要包括物理、化学与环境三大类因素。物理风险体现在罐体结构老化、焊缝疲劳、腐蚀穿孔及温压异常等方面,极易引发泄漏与爆炸;化学风险源于储存介质的挥发、氧化反应与静电积聚,在高温高压环境下容易造成链式反应与二次灾害;环境风险则受气温、湿度、风速、光照及雷电等自然条件影响,可能导致罐区压力波动或防护系统失效。不同风险因素相互作用,使事故表现出突发性、扩散性与难以预测性。研究表明,多起化工事故均由多重因素叠加诱发,例如温度上升引发压力异常、阀门密封老化导致泄漏扩大等。因此,建立多维度、动态化的安全监测与风险识别体系,对实现储罐群本质安全具

有重要意义^[1]。

2.2 传统监测模式的局限性

目前多数化工企业在储罐安全管理中仍依赖人工巡检和定点监测,监测数据的时效性与完整性不足。传感器分布密度低、采样频率有限,导致数据无法连续反映设备运行状态。虽然部分系统已引入自动化监控仪表,但数据采集仍呈现孤立化,缺乏统一的通信与管理标准,难以实现多设备间的联动与对比分析。现行风险预警机制多采用静态阈值判断模式,忽略了环境扰动、设备老化及操作波动等动态因素的影响,容易导致误报或漏报。例如,在季节性温差变化或物料波动情况下,固定阈值模型无法有效反映实际风险水平。此外,传统系统缺乏对数据的深度挖掘与趋势预测能力,安全监测更多停留在被动报警层面,难以支撑现代化化工企业对智能化、前瞻性风险预控的需求^[2]。

2.3 智能监测系统建设的必要性

面对储罐群复杂的运行环境与动态风险特征,传统监测体系亟须向智能化、网络化方向转型。智能安全监测系统通过多源传感信息融合与边缘计算技术,能够实现对储罐运行状态的实时感知与趋势分析。依托物联网技术,储罐、传感器、控制系统与云端平台形成完整的“感知—传输—分析—决策—执行”闭环,实现信息互联与数据共享。系统通过大数据分析机器学习算法,识别异常模式、预测潜在隐患,并可根据风险等级自动触发联动响应与应急处置。同时,智能监测系统支持跨区域数据汇聚与集中管理,为企业提供全生命周期的安全运行档案。该体系的构建不仅提升了事故预防能力,还实现了从“事后响应”向“事前预测”的管理转变,推动化工储罐群安全管理向数字化与智能化的新阶段迈进^[3]。

3 化工储罐群安全监测系统的总体架构设计

3.1 系统总体框架

化工储罐群安全监测系统整体采用分层架构设计,分为数据采集层、通信传输层与决策控制层三个核心部分。数据采集层通过布设温度、压力、液位、气体浓度、振动等多种类型传感器,实现对储罐内部与外部环境参数的实时采集,确保监测数据的全面性与连续性。通信传输层利用5G、NB-IoT与光纤通信等多通道冗余传输方式,实现低延迟、高可靠的数据传输,支持远距离、多节点的分布式监测需求。决策控制层由边缘计算网关与云端分析平台组成,边缘端实现数据预处理与本地决策,云端负责深度分析、模型推理与可视化展示。各层之间通过安全加密协议实现双向通信与数据校验,构建“采集—传输—分析—响应”闭环体系,确保系统具备高实时性与高容错性,为储罐群运行安全提供全生命周期的智能监管支撑^[4]。

3.2 硬件与传感系统设计

系统硬件设计坚持“高精度监测、模块化部署、冗余

化防护”的原则,形成多层次、多点位的智能感知网络。传感部分包括温度、压力、液位、可燃气体、有毒气体及振动等模块,均采用防爆型数字传感器,以适应复杂的化工环境。数据采集模块具备高速采样与多通道输入能力,可实现毫秒级数据获取与同步处理。边缘计算节点集成本地处理芯片与AI算法模块,具备数据压缩、噪声过滤及异常初筛功能,有效降低通信带宽占用,提高系统响应速度。为增强系统稳定性,监测网络采用双网冗余与无线自组网技术,当主网络异常时,备用通道自动切换,确保数据不丢失、通信不中断^[5]。

3.3 软件平台与数据处理架构

软件平台基于分布式计算框架构建,支持多源数据的并行处理、异构协议解析与跨系统数据交互。系统由数据管理、智能分析与可视化展示三大模块组成。数据管理模块负责数据的采集、清洗、存储与调用,利用时间序列数据库(TSDB)实现高频采样数据的快速检索与长期归档。分析模块结合大数据分析机器学习算法,对传感数据进行多维建模与模式识别,能动态捕捉储罐运行中的微小异常趋势,及时生成风险预警信号。可视化模块采用三维数字孪生技术,将储罐群布局、设备状态与报警信息进行动态展示,支持多终端(PC、移动端、控制台)实时访问,实现统一管理 with 应急指挥。

4 风险预警模型的构建与算法设计

4.1 风险评估指标体系的建立

化工储罐群的安全风险呈现多维性与动态性特征,仅依靠单一监测变量难以全面反映系统安全状况。为此,本文构建了包含设备状态、环境因素与管理行为三类要素的综合风险评估指标体系。设备状态指标主要包括罐体完整性、腐蚀速率、液位变化率、压力稳定性及阀门密封可靠性,用以反映设施健康状况;环境指标涵盖温度、湿度、风速、气体浓度及光照强度,用以刻画外部条件变化对安全的影响;管理类指标则包括巡检频次、维护周期、安全培训执行率与应急预案完善程度,反映人为管理因素的控制能力。通过层次分析法(AHP)确定各指标的相对权重,构建风险综合评分模型,实现多源风险因子的量化表达。

4.2 模糊层次分析与贝叶斯网络融合模型

针对化工储罐群监测中存在的确定性与模糊信息,本文提出模糊层次分析(FAHP)与贝叶斯网络(BN)相结合的融合模型。FAHP通过模糊判断矩阵对风险因素权重进行量化,消除专家评估的主观偏差,形成稳定的模糊权重集。贝叶斯网络则基于风险事件之间的因果关系建立有向无环图结构,对储罐运行参数(如温度、压力、液位、气体浓度)进行动态概率推理。模型可根据实时监测数据对节点条件概率进行自适应更新,实现事故概率的时序修正与风险状态的动态演化。FAHP解决了多因素模糊权重分配问题,而贝叶斯网络强化了因果推断能力,两者结合使模型具备多变

量条件下的预测鲁棒性。实际应用结果显示,该融合模型在储罐泄漏、过压及腐蚀失效风险预测中准确率达92%以上,显著优于传统静态评估方法。

4.3 多源数据融合与异常检测算法

化工储罐群运行过程中,来自温度、压力、液位、气体浓度等多源传感器的数据存在噪声干扰、采样漂移及信息冗余问题。为提高数据可信度与风险识别精度,系统引入卡尔曼滤波与小波去噪算法对采集信号进行动态滤波与平滑处理。随后采用主成分分析(PCA)提取多维数据中的关键特征参数,降低数据维度并剔除冗余变量。为实现对潜在风险的实时识别,系统引入孤立森林(Isolation Forest)算法构建异常检测模型,通过分析数据点在特征空间中的孤立程度,实现异常状态自动识别。该算法能够有效检测温度异常上升、液位突变、气体浓度异常波动等隐性危险信号。系统在检测到异常后自动触发风险预警机制,并联动控制系统启动应急响应。

5 系统应用与性能验证

5.1 储罐区监测系统部署实践

本研究在某大型化工园区的苯类储罐群开展系统部署与实证研究。监测系统共布设传感单元146套,覆盖22个储罐与7个关键管线节点,形成多层次、全覆盖的监测网络。系统实时采集温度、压力、液位、气体浓度等关键参数,并通过边缘计算节点进行数据预处理,实现异常识别与本地缓存。运行结果显示,系统数据刷新率稳定在2秒/次,报警延迟控制在3秒以内,相较于传统DCS监控系统,响应速度提升近60%。系统支持监测数据的三维可视化展示,实现储罐运行状态的动态呈现与趋势分析。应用实践表明,系统在提升监测精度与报警可靠性方面表现显著,能够有效支撑储罐群的安全运行与风险预控。

5.2 风险预警模型应用效果

为验证风险预警模型的准确性与实用性,研究团队对系统运行三个月的数据进行了分析比对。期间系统共触发预警27次,其中有效预警25次,准确率达93.7%。基于贝叶斯网络的动态风险推理机制可有效识别多参数耦合引发的潜在隐患。例如,当罐区温度异常升高并伴随可燃气体浓度波动时,模型自动判断为高风险状态并触发提前预警,为操

作人员争取了关键处置时间。模型输出的风险等级与人工巡检结果高度一致,验证了算法在复杂环境下的可靠性与适应性。研究结果表明,系统具备较强的预测性与预防性,为化工储罐群的事前管控提供了数据支撑与决策依据。

5.3 系统稳定性与扩展性测试

为检验系统的长期运行能力与可扩展性能,研究开展了连续24小时高负载运行测试。测试结果显示,系统在持续监测与数据写入情况下运行稳定,未出现数据丢失、通信中断及节点掉线现象。CPU占用率维持在45%以下,内存利用率均衡,满足工业现场的高并发与高可靠性要求。系统具备良好的扩展性与移植性,支持新设备的自动注册与自适应配置,可在不同储罐区快速部署与复制。通过云端集中管理平台,可实现多厂区远程监控、统一调度及分级权限管理,形成跨区域、分布式的安全监管网络。验证结果表明,该系统不仅运行稳定,而且具备持续扩展与智能协同的能力,为化工企业集团化安全管理提供了高效的技术支撑。

6 结语

化工储罐群的安全监测与风险预警是化工企业实现本质安全的关键环节。本文构建的基于多源信息融合的安全监测系统与融合型风险预警模型,实现了从数据采集到智能决策的全流程优化。系统在结构上实现了层级分布式管理,在功能上实现了实时监测、趋势分析与动态预警的有机结合。通过模糊层次分析与贝叶斯网络融合的算法框架,提升了风险预测的准确性与适应性。实际应用结果表明,该系统可有效提升储罐群安全监管水平,降低事故发生率与经济损失,为化工行业安全生产提供了科学依据与可复制的解决方案。

参考文献

- [1] 伍捷.基于声发射技术的化工储罐和管道的安全缺陷检测与评估[J].化工安全与环境,2025,38(07):89-92.
- [2] 马龙,杜亚君.化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全连锁控制参数优化[J].流程工业,2025,(09):16-19.
- [3] 纵恒,王文伟,陈阳娟.大型石油化工储罐区消防安全系统设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(09):1259-1263.
- [4] 韩苹.化工储罐区安全评价研究及评价过程计算软件[D].郑州大学,2006.
- [5] 郭晓雪.数据不确定性下化工储罐区火灾爆炸风险评估与安全投资优化分配方法研究[D].中国科学技术大学,2023.

Analysis of Factors Affecting the Transformation of Scientific and Technological Achievements and the Paths for Enhancement

Huanhuan Li

China National Petroleum Refining and Chemical Co., Ltd., Beijing, 100029, China

Abstract

The transformation of scientific and technological achievements in oil refining enterprises is constrained by multiple factors, including the mismatch between the achievements and industrial demands, the imperfect transformation mechanism, and the insufficient collaboration among industry, research, education, and application. The underlying reasons can be attributed to the differences in development mechanisms between enterprises and universities and research institutions, the conflict between goal orientation and cost-benefit perspective, and the insufficient attention given to intellectual property rights and risk-sharing mechanisms. To enhance the transformation effect, it is necessary to strengthen the R&D model dominated by enterprise needs, improve the assessment and evaluation mechanism, equity distribution mechanism, and risk-sharing mechanism, deepen the collaboration among industry, research, education, and application, and build an effective connection chain from the research and development stage to the application stage, thereby promoting the transformation of scientific and technological achievements into real productive forces.

Keywords

transformation of scientific and technological achievements; oil refining enterprises; industry-research collaboration; mechanism optimization

科技成果转化影响因素及提升路径探析

李欢欢

中海石油炼化有限责任公司, 中国·北京 100029

摘要

炼油企业科技成果转化受多重因素制约, 包括成果与产业需求之间存在不匹配状况、转化机制呈现不完善状态、产学研用协同程度不足。深层原因可归结为企业与高校院所发展机制存在差异, 目标导向及成本收益观产生冲突, 以及知识产权与风险分担机制未得到充分重视。若要提升转化效果, 则需强化以企业需求为主导的研发模式, 完善考核评价机制、权益分配机制与风险共担机制, 深化产学研用协同合作, 构建从研发环节到应用环节的有效衔接链条, 进而推动科技成果向现实生产力转化。

关键词

科技成果转化; 炼油企业; 产研协同; 机制优化

1 引言

科技成果标准需求分析是转化的首要环节。科技成果向标准转化过程中, 首要步骤是对科技成果标准需求展开分析, 并根据分析结果设计路线图。炼油行业作为流程型工业中具有典型代表性的行业, 其技术进步在很大程度上依赖于科研成果向工业应用转化的效率。然而, 当前炼油企业在科技成果转化过程中普遍面临成果与需求脱节、转化机制运行不畅、产学研协同程度不深等现实困境, 这些困境对创新效能的充分释放形成了制约。基于此种情况, 本研究将重点聚焦于炼油企业科技成果转化的影响因素及深层原因, 并对切

实可行的提升路径展开探寻, 旨在为推动行业技术革新提供参考依据。

2 炼油企业科技成果转化影响因素

2.1 科技成果和产业需求不匹配

在炼油企业科技成果转化的长期实践进程中, 科技成果与产业需求之间存在的不匹配问题较为突出。一方面, 部分科研项目将关注重点过度倾斜于技术指标的前沿性追求与理论维度的突破性探索, 却未能以炼油生产的实际状况作为充分且坚实的立足基点, 这使得相关成果在工艺适配性、经济可行性以及操作稳定性等多个关键维度上, 与现场实际需求之间形成了较为明显的实质性差距。另一方面, 企业在提出具体技术需求的实践过程中, 往往将目光集中于短期范畴内的降本增效目标达成或达标排放任务完成等具体问题

【作者简介】李欢欢(1989-), 女, 中国陕西人, 硕士, 工程师, 从事科研管理研究。

之上,普遍缺乏对前瞻性技术布局与系统性解决方案的清晰规划与整体设计,这直接造成研发端在精准把握攻关方向方面面临较大的现实困难与实施障碍^[1]。上述供需两端出现的错位现象,不仅显著延长了科技成果从实验室环境迈向工业应用场景的时间周期,也大幅增加了中试验证环节与工程放大过程的反复性成本投入。更为关键的是,许多具备创新性特征的技术成果,由于无法迅速且有效地嵌入现有的生产体系之中,不得不面临被搁置的无奈处境。长此以往,科研投入未能顺利且高效地转化为现实形态的生产力,企业技术升级进程与创新驱动机制之间逐渐形成了难以跨越的断层,进而对炼油行业整体竞争力的持续提升构成了实质性的制约。

2.2 科技成果转化机制不完善

在炼油企业科技成果转化的动态过程中,机制层面的不完善问题集中体现为转化动力的显著不足与科研激励机制的客观缺失。从企业内部视角观察,尚未构建形成覆盖研发环节、中试阶段以及产业化进程的全链条顺畅衔接机制。科研人员在实际工作中往往将完成技术研发任务作为主要职责,对于后续转化环节既缺乏明确的责权界定体系,也缺少持续参与的内在动力。现有的考核评价体系过度偏重于论文产出数量、专利申请规模等显性成果指标,而对科技成果在工业场景实际应用过程中的效果表现关注程度明显不足,这种状况难以有效引导科研力量向解决生产实际问题的方向合理倾斜^[2]。与此同时,激励手段呈现出较为单一的特征,成果转化所创造的经济效益与科研人员的个人收益之间关联性较弱,价值贡献在收益分配体系中未能获得充分且合理的体现。这种机制层面存在的固有缺陷,不仅极大地削弱了科研人员推动成果落地实施的积极性与主动性,也使得大量具备发展潜力的技术成果在从实验室向生产装置转化的过程中面临缺乏持续推进动力的现实困境,最终对科技成果向现实生产力的有效转化形成了实质性的制约^[3]。

2.3 产学研用协同不够

在炼油企业科技成果转化的具体过程中,产学研用协同效能不足的问题表现得较为突出。高校及科研院所的研究重心普遍置于前沿领域探索与理论层面的创新工作,而企业则将关注点集中于生产运行过程中实际难题的解决。双方在研究目标设定、技术成熟度要求以及成果评价标准构建等方面存在显著差异,这直接导致研发方向与应用需求之间难以形成有效的对接机制与联动效应。从合作模式角度分析,大多停留在单一项目委托实施或短期技术咨询服务的层面,普遍缺乏长期稳定的联合攻关机制作为支撑。在研发过程中,企业技术人员的深度参与程度明显不足,应用场景的反馈信息存在滞后现象,这些因素共同导致相关成果在工艺匹配性与操作适应性方面存在先天性的结构性缺陷。除此之外,产学研各方在成果转化过程中的责权利界定处于模糊不清的状态,利益分配机制与风险分担模式缺乏制度化的安排与

规范化的设计,协同效应难以得到充分有效的发挥。这种松散脆弱的合作关系,极大地限制了创新要素的高效流动与优化配置,使得大量科研成果被迫止步于实验室阶段或中试环节,难以真正融入炼油生产的完整链条体系之中[4]。

3 影响炼油企业科技成果转化效果的深层原因

3.1 发展机制差异

炼油企业作为以安全生产、成本控制与投资回报为运行逻辑核心的生产经营主体,对技术成熟度、稳定性和经济性有较高要求,倾向于在风险可控前提下引入经充分验证的解决方案。与之显著不同的是,高校和科研院所遵循学术导向的发展机制,其评价体系侧重于科研项目数量、论文发表层级与学术影响力,且研究周期相对灵活,在技术从实验室走向工业应用的过程中,对工程化验证与迭代优化投入不足。这种在目标取向、时间尺度与风险承受能力上存在的机制差异,成为制约科技成果转化的深层原因之一,致使双方合作时难以形成统一推进节奏。企业认为成果尚不具备落地条件,科研方却可能认为技术已具创新性,认知差异叠加机制壁垒,无形中增加了成果转化的协调成本与推进阻力[5]。

3.2 目标导向与成本收益观的冲突

在炼油企业科技成果转化进程中,以生产经营为核心的企业,其技术引入决策高度依赖成本收益分析,对研发投入、中试改造及生产衔接等环节均要求明确回报预期与可控风险边界,因而倾向选择短期内可见效益、实施路径相对成熟的技术方案。而遵循学术创新导向的高校及科研院所追求技术前沿性与理论价值,对成果从实验室到工业放大所需的工程化投入、周期延宕及试错成本缺乏充分预估。这种目标导向与成本收益观的根本冲突成为深层制约因素,使得企业面对尚需进一步验证的科研成果时倾向持审慎甚至回避态度,不愿承担前期投入与潜在损失;而科研方则认为技术创新价值未获充分认可。双方在投入意愿与效益评判上的分歧,直接削弱了科技成果向工业化应用迈进的可行性。

3.3 知识产权与风险分担机制疏忽

在炼油企业科技成果转化中,产学研各方合作之初往往对成果产生的知识产权归属、权利行使及收益分配缺乏明确约定,这一对知识产权与风险分担机制的疏忽成为影响转化效果的深层原因之一。技术突破后,各方易在权益划分上产生争议,甚至延误转化进程。同时,科技成果从实验室走向工业应用需经历中试验证、工艺适配、装置改造等多个环节,每个阶段均存在技术失败、成本超支或生产波动等现实风险。然而,因风险分担机制缺失,企业顾虑承担主要投入与潜在损失,科研机构缺乏承担工程化风险的意愿与能力,双方均倾向将不确定性转嫁给对方。这种权责不清与风险规避并存的状态,使许多具备应用潜力的成果在转化初期便因利益分配难达成共识或风险责任无法落实而停滞不前,难以进入工业化实施阶段。

4 炼油企业科技成果转化效果提升路径探析

4.1 强化企业需求主导研发

强化企业需求主导研发,是提升炼油企业科技成果转化效果的关键路径。企业需以自身生产工艺、装置特点以及转型升级方向为立足点,对制约提质增效、安全环保、节能降耗等方面的关键技术瓶颈进行系统梳理,进而形成清晰的需求清单与技术指标,让研发方向与生产实际实现深度绑定。同时,应改变以往被动承接外部成果的合作模式,主动参与到研发立项、过程跟踪以及工业验证等各个环节当中,将生产现场出现的技术难题直接转化为科研攻关课题。企业技术团队要全程介入中试验证与工艺适配阶段,及时反馈应用场景的实际约束条件,以此确保成果从源头就具备工业可行性与经济合理性。此外,还应建立起内部需求与外部研发资源的对接平台,由企业主导确定技术路线与评价标准,引导高校、科研院所围绕企业所需开展有针对性的研究,使科研成果在诞生之初就明确应用出口,有效降低后续转化过程中的试错成本与衔接难度。

4.2 完善科研成果转化机制

完善科研成果转化机制,需从考核评价体系、权益分配与风险共担三个维度进行协同推进。在考核评价方面,要打破单纯以论文、专利数量作为衡量标准的传统模式,将成果在炼油生产中的实际应用效果、解决现场技术难题的贡献度以及所产生的经济效益纳入评价体系,以此引导科研人员面向生产一线开展攻关。在权益分配方面,需在合作之初就明确各方在成果转化中的权利归属与收益比例,建立起与贡献相匹配的分配机制,让科研人员在成果落地过程中能够获得合理回报,从而形成持续参与的内生动力。在风险共担方面,应构建企业与科研机构共同投入、共同承担的合作框架,针对中试验证、工业放大等关键环节设立专项保障措施,明确各方在技术失败或成本超支情形下的责任边界,降低单一主体对不确定性的过度顾虑。通过这样的系统性机制优化,为科技成果从实验室平稳走向生产装置提供制度保障。

4.3 深化产学研用协同作用

深化产学研用协同作用的关键在于构建利益共享、风险共担、分工明确的深度融合机制。企业作为需求提出方与

应用承载方,需全程参与研发立项、中试验证与工业放大等各个环节,确保技术攻关始终围绕生产实际展开。高校与科研院所则发挥基础研究优势与前沿技术储备作用,为企业提供持续的技术支撑与创新来源。三方需要建立常态化交流平台,推动科研人员深入生产现场了解实际工况,同时让企业技术人员参与研发过程掌握技术原理,在互动中消除认知隔阂。此外,应探索共建联合实验室、中试基地等实体化合作载体,围绕炼油行业共性关键技术开展长期稳定的攻关,形成从基础研究到工业应用的无缝衔接链条。通过明确各方在合作中的角色定位与责权边界,促进创新要素在产学研用之间高效流动,使协同真正转化为推动成果落地的合力。

5 结论

综上所述,炼油企业科技成果转化效果未达理想状态,根源在于成果供给与产业需求出现脱节,转化机制存在不健全问题,产学研协同关系较为松散。深层层面涉及发展机制存在差异、目标取向存在分歧以及权益风险安排存在缺失。提升转化效果,需从源头着手强化企业需求的主导地位,在过程方面完善考核评价、权益分配与风险共担机制,在模式层面深化产学研用的实质性协同。只有通过系统性的机制改革,打通研发与应用之间的制度壁垒,才能够促进创新要素实现有效配置,推动科技成果真正落地并转化为现实生产力。

参考文献

- [1] 冷鑫.科技成果转化效率影响因素和提升策略研究——以陕西省咸阳市为例[J].新西部, 2022, 40(5): 78-82.
- [2] 章磊.军民科技成果转化政策扩散的时空特征、影响因素与组态路径研究[C]//第二十一届中国科技政策与管理学术年会论文摘要集, 2023, 15(2): 112-116.
- [3] 高超锋, 刘静, 胡斌, 童为光.高校科技创新成果转化影响因素与提升路径研究——基于PLS-SEM与fsQCA的实证分析[J].数学的实践与认识, 2024, 54(3): 201-208.
- [4] 强健.科技成果转化标准的路径与影响因素分析[J].内蒙古科技与经济, 2022, 38(7): 45-49.
- [5] 张惠锋.科技成果转化标准的提升路径与影响因素研究[J].标准科学, 2023, 41(4): 33-37.

The Practical Path and Value Redefinition of Quality Management Throughout the Entire Process of Crude Oil Storage and Transportation

Jiaxin Li

Victory Oilfield Branch Company, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

In the context of the dual-carbon goals and digital transformation in the industry, crude oil storage and transportation, as the core hub of the energy industry chain, requires breaking the boundaries of traditional control and constructing an integrated system of “technology integration - engineering control - risk prevention - culture cultivation - innovation transformation”. This paper, based on practical experience from production stations and depots, elaborates on the implementation path of full-process quality management from five dimensions: new technology integration application, refined control of storage and depots and pipelines, dynamic prevention of quality risks, green quality management and collaborative integration with new energy, and quality culture cultivation. It can provide a replicable practical model for the high-quality development of the crude oil storage and transportation industry.

Keywords

oil storage and transportation; quality management; integration of new technologies; quality risk management

原油储运全流程质量管理实践路径与价值重塑

李佳欣

胜利油田分公司, 中国·山东 东营 257000

摘要

在双碳目标与数字化转型的行业背景下, 原油储运作为能源产业链的核心枢纽, 其全流程质量管理需打破传统管控的边界限制, 构建“技术融合-工程管控-风险防控-文化培育-创新转化”的一体化体系。本文结合生产站库实践经验, 从新技术融合应用、储库与管道工程精细化管控、质量风险动态防控、绿色质量管理与新能源协同融合、质量文化培育五大维度, 阐述全流程质量管理落地路径, 可为原油储运行业高质量发展提供可推广的实践范式。

关键词

原油储运; 质量管理; 新技术融合; 质量风险管控

1 引言：原油储运质量管理的时代命题

当“双碳”目标成为能源行业的发展底色, 当数字化转型重构传统产业的管控逻辑, 原油储运这一连接开发与炼化消费的纽带, 其质量管理已不再局限于单一环节的点状把控, 而需升级为覆盖“交接-化验-存储-外输-管道”的全流程系统性守护体系。从站库实践来看, 面临人工化验效率低、能耗管控难度高、管道风险识别被动等行业共性痛点, 这正是当前原油储运领域质量管理困境的典型缩影。

原油储运全流程质量管理, 核心在于以“全要素协同”打破环节壁垒, 以“新技术赋能”替代经验依赖, 以“绿色低碳”重塑质量内涵。从原油库的“碳中和”实践到输油管道的智能监测, 从化验做样机器人的设想研究到数字孪生模

型的场景仿真, 当代原油储运质量管理已超越“合格交付”基础目标, 迈向“安全高效、低碳协同、价值创造”更高维度。本文结合行业实践与典型案例, 解析全流程质量管理的落地路径, 为能源行业高质量发展提供参考。

2 新技术融合：重构全流程质量管理的“智能内核”

人工智能、物联网、工业互联网等新技术, 并非简单的工具叠加, 而是重塑原油储运质量管理逻辑的核心支撑。在站库生产实践中, 推动新技术深度渗透全流程关键节点, 助力质量管控从“事后追溯”转向“事前预判”, 从“人工干预”转向“智能闭环”。

2.1 化验做样机器人：突破“化验瓶颈”的实践创新

原油交接后的化验环节, 是质量管控的首道关键关口。传统人工取样存在“样品代表性不足、检测效率低、数据反馈滞后”的问题, 在质量管控机遇中也明确识别。为突破这

【作者简介】李佳欣(2000-), 女, 中国山东东营人, 本科, 助理工程师, 从事储运工艺、质量管理等研究。

一困境,部分企业开展调研、设想引入“取样-预处理-检测-数据联动”一体化化验做样机器人^[1],将单样品密度、有机氯、含水检测时间从60分钟压缩至15分钟,效率提升6倍;通过与工业互联网平台实时联动,检测数据10秒内上传,若超标则自动触发报警指令,形成“检测-调控”瞬时闭环。可提高外输原油质量检测效率、精确性,适应化工工退休现状,减少人员职业病伤害,切实保障原油外输质量和人员职业健康。

2.2 工业互联网:构建全流程质量数据协同网络

“数据孤岛”是传统质量管理的核心障碍,交接数据分散于计量阀组、化验数据留存于实验室、存储数据局限于罐区、外输数据滞留于泵站,信息割裂导致管控滞后。通过构建互联网平台,整合关键设备、生产参数、管道腐蚀监测设备等3262个数据采集点,实现全流程质量状态“一屏掌控”:罐区温度传感器实时传输原油温度数据,外输泵站压力传感器动态捕捉压力波动,管道光纤监测仪持续追踪泄漏风险,所有数据经边缘计算处理后反馈至管控中心,异常响应时间缩短。以数据驱动替代经验判断,确保每一组质量数据精准可溯。

2.3 数字孪生与区块链:强化质量管控的信任支撑

数字孪生技术为油气储库质量管控提供“虚拟仿真-实际调控”双向通道。通过构建数字孪生模型,模拟稀油、稠油等不同原油类型,以及环境温度变化下的质量波动:当模拟显示环境温度骤降5℃时,模型能提前预判原油粘度上升趋势,自动推送加热盘管参数调整建议,规避结蜡风险;在管道管理中,模型可复现腐蚀传感器采集的管道壁厚数据,预测未来腐蚀速率,为维护计划制定提供科学依据。

区块链技术则为质量追溯注入“不可篡改”的信任保障。在原油外输环节,区块链系统记录“交接取样-化验结果-外输计量-压力参数”全环节数据,每条数据附带时间戳与操作人信息,上游采油厂、中游储运企业、下游炼化厂可按权限查询,成为产业链质量协同的“信任纽带”。

3 工程管控:筑牢全流程质量管理的“硬件基石”

原油储运全流程质量管理,需以储库与管道两大核心工程的“本质安全”为根基。从储库的分质分储优化,到管道的完整性监测,再到新能源与传统储运的协同融合、工程建设的精益管控,每个环节的质量把控,都是全流程质量稳定的核心支撑。

3.1 原油储库:以“分质+温控”保障存储质量

原油储库是存储阶段质量保障的关键载体,温度波动、混油存储易导致原油品质下降。行业调研显示,不同品质原油混储会使炼化企业加工能耗增加,轻烃挥发量增加。国内典型原油库通过“分质分储+智能温控”实现质量与能耗协同优化。

分质分储精准匹配:根据原油性质,将储罐分类编配,如重质低硫低酸原油专储供炼化企业生产汽油、柴油,重质高硫高酸原油专储供加氢装置加工,避免混储导致的质量降级。

动态温控模型优化:以含水率、粘度等为输入变量,环境温度为干扰变量,结合“储运量-换热量”曲线分析,构建动态温控模型,明确稀油、稠油最优温度区间,自动调整加热参数,降低温度波动,减少结蜡量。

绿色低碳技术融合:将“碳中和”融入储库管理,利用光伏发电;采用“绿能三级梯级利用”技术回收蒸汽凝结水余热,换热器传热效率提升;配套VOCs回收装置和环保检测装置,减少挥发性有机物排放;合规充分利用空间种植草皮,打造“花园式”油库;储油罐集成“抑爆型三重密封”、浮顶支柱采用无挥发支柱、导向柱可伸缩密封套等工艺,实现储罐油气挥发减少90%^[2];排水采用雨污分流设计,对污染雨水、清洁雨水、工业污水进行分类收集、处置,配备雨水在线监测系统,实现清洁排放;工艺管道保温应用新型复合硅酸盐保温材料,减少管道散热损失等,让绿色低碳成为储库质量管理的重要维度。

3.2 集输管道:以完整性管理保障输送安全

集输管道是原油储运的“核心动脉”,腐蚀、泄漏等风险直接影响输送质量与安全。可参考“风险量化管控”思路,构建管道完整性管理体系,形成“风险识别-评估-预警-修复”全流程闭环:输油管道沿线部署腐蚀传感器与光纤泄漏监测仪,实时采集管道外壁腐蚀速率、土壤电阻率数据;基于AGA与EGIG数据库,引入管道服役年限、维护频率等修正系数,构建定量风险评价模型^[3];开发风险可视化平台,设定预警和报警响应程序。

3.3 新能源融合:以协同创新拓展质量内涵

随着“双碳”目标推进,新能源与油气储运的融合成为质量管理的新方向。在北方地区原油库试点地热加热技术,为寒冷地区原油库绿色质量管理提供新路径。探索“天然气+光伏+储能”多能互补模式:光伏供电用于站内设备运行,储能系统平衡天然气处理负荷波动,既降低传统电能消耗,又通过供电稳定性保障处理工艺参数稳定,使天然气外输纯度提升;在管道领域,试点利用管道沿线光伏电站为阴极保护系统供电,既确保防腐效果稳定,又减少电网供电依赖。实践表明,新能源融合不仅是低碳要求,更能通过能源供应稳定性间接提升油气储运质量管控水平,实现“绿色”与“优质”的协同共赢。

4 风险防控:构建全流程质量管理的“安全屏障”

油气储运环节多、覆盖跨度大、风险点分散,质量风险管控需从“被动应对”转向“主动防控”,通过闭环管理,将质量隐患消除在萌芽状态。

4.1 全维度风险识别：消除“质量盲区”

质量风险的隐蔽性决定识别工作需“全覆盖、无死角”。建立涵盖“设备-工艺-环境-人员”四大维度的风险识别体系：设备维度，通过定期诊断识别螺杆泵机械密封泄漏、储罐浮盘倾斜等风险，提前预测、采取对策；工艺维度，分析分质分储切换、外输流程调整可能引发的质量波动，及时响应、规避风险；环境维度，关注暴雨、低温等极端天气对储罐加热、管道输送的影响，如冬季低温导致的管道凝管风险；人员维度，排查操作不规范、智能装备操作不熟练等人为风险。以输油管道为例，风险识别团队需要监测管道本体腐蚀，同步跟踪沿线土壤电阻率变化、第三方施工干扰等外部风险，建立“管道风险台账”，实现风险点“动态更新、逐一销号”。

4.2 定量风险评估：科学量化“风险等级”

“凭经验判断风险”是传统管理的短板，定量风险评估模型则让管控更精准。科研团队计划结合风险量化方法，基于“ $\text{风险} = \text{概率} \times \text{后果}$ ”构建模型：失效概率参考数据库确定基础值，再结合管道服役年限、维护频率等参数修正；失效后果则按泄漏量、影响范围、经济损失量化。这种“数据驱动”的评估方式，避免“一刀切”的管控弊端，让资源精准投向高风险环节，隐患处置效率提升。

5 质量文化：培育全流程质量管理的“软实力”

技术与工程是质量管理的“硬支撑”，质量文化则是“软实力”，从制度要求转化为员工的自觉行动，从“被动遵守”升级为“主动追求”。通过“全员参与、培训赋能、案例推广”，培育具有油气储运特色的质量文化。

5.1 全员参与：深化“质量责任”认知

质量不是单一部门的职责，而是每个岗位的核心任务。将质量责任分解至各岗位：交接岗确保原油取样代表性，化验岗保障检测数据精准，罐区岗维持储罐温度稳定，外输岗控制压力波动。同时建立“质量 KPI 考核机制”，将化验准确率、风险预警及时率、外输合格率纳入绩效考核，与薪酬直接挂钩，例如开展“质量明星”评选，每月表彰在质量管控中表现突出的员工，通过典型引领让“人人关心质量、人人创造质量”成为普遍氛围。

5.2 培训赋能：提升“质量能力”水平

智能时代的质量管理，对员工能力提出新要求——既

要掌握传统工艺，也要熟练操作智能装备。构建“培训-实践-激励”三位一体人才培养体系：培训内容围绕化验做样、管道风险评估、质量体系等应用展开，实践环节建立“导师制”，由专家一对一指导年轻员工；激励方面，对取得管道完整性管理、阴极保护 CPI 等资质的人员给予奖励，激发学习积极性；针对性开发 VR 仿真培训系统，模拟储罐泄漏、管道腐蚀等场景，提升员工实操能力。提高质量技术人才占比，为全流程质量管理提供坚实的“人才支撑”。

6 挑战与展望

当前油气储运全流程质量管理面临三重挑战：新技术与业务场景融合深度不足，新场景适配能力欠缺；跨部门数据协同存在壁垒，信息流通效率偏低；人才技能迭代滞后，出现“数字化能力强、现场工艺经验弱”断层问题，导致新技术的质量管控价值未充分释放。

未来，全流程质量管理将向“更智能、更绿色、更协同”升级。技术维度，深化智能协同，打通数据壁垒，实现质量数据全环节可追溯、跨部门共享，推动虚拟仿真与实际运维实时联动。绿色层面，锚定碳达峰目标，强化多能互补管控，拓展光伏、余热、地热应用，实现绿色与优质协同。协同维度，联动油田开发与炼化业务，建立“产供储销”质量协同机制，构建“智能技能+工艺经验”双轨培训体系，打造适配智能管理的人才队伍。

油气储运全流程质量管理是技术创新、工程管控、风险防控、文化培育的有机统一。实践证明，新技术赋予智能内核，工业互联网就数据网络；工程管控筑牢硬件基石，管道完整性管理保障本质安全；风险防控构建安全屏障，闭环处置消除隐患；质量文化培育软实力，形成全员参与的良性循环。未来，该模式将成为行业高质量发展核心支撑，为实现国家能源安全与环保目标提供坚实保障。

参考文献

- [1] 佟帅,黄东浩,马丽娜,等.自动化验机器人系统中运动规划与控制的研究[J].电脑编程技巧与维护,2025,(06):88-90.DOI:10.16184/j.cnki.comprg.2025.06.002.
- [2] 陆取.大型外浮顶原油储罐安全管理浅析[J].石油化工技术与经济,2025,41(06):46-50.
- [3] 林冬,王毅辉,秦林.国外管道失效数据库建设对我国管道风险管理的启示[J].焊管,2012,35(10):64-66+72.DOI:10.19291/j.cnki.1001-3938.2012.10.014.

High-temperature Alkali Fusion - Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry for Determining the Silica Content in Iron Ore

Chengmei Ye

Nanping Geological Team of Fujian Province, Nanping, Fujian, 353000, China

Abstract

Iron ore is an essential raw material in steel production, and its chemical composition significantly affects the quality of steel during the smelting process. In this experiment, the Thermo ICP-AES 7200 inductively coupled plasma emission spectrometer was used for analytical testing, obtaining the experimental analysis spectral data and spectral graph for silicon. Compared with the national standard method, the relative error range of this method is between -1.51% and 0.29%. Therefore, using this method to determine the silica content in iron ore yields results that are basically the same as those determined by the national standard method, with no significant difference, and deviations are within the range specified by the national standard, proving that this experimental method is precise and reliable. A method was established to determine the silica content in iron ore by high-temperature alkali fusion treatment and hydrochloric acid extraction to prepare rock sample solutions, followed by determination using inductively coupled plasma emission spectrometry.

Keywords

high-temperature alkaline fusion; inductively coupled plasma emission spectroscopy; iron ore; silicon dioxide

高温碱熔 - 电感耦合等离子体发射光谱法测定铁矿石中二氧化硅的含量

叶成美

福建省南平地质大队, 中国·福建 南平 353000

摘要

铁矿石是钢铁生产中不可缺少的原材料, 它里面的化学成分在冶炼过程严重影响着钢铁的质量。本次实验采用Thermo ICP-AES 7200等离子发射光谱仪进行分析测试, 获得硅元素的试验分析谱线数据和试验分析谱线图。本次方法与国标方法相对比, 它们的相对误差范围在-1.51%~0.29%区间。因此, 使用本次方法测定二氧化硅在铁矿石中的含量, 与国家标准方法测定结果基本相同, 没有显著差异, 偏差在国家标准规定范围内, 证明本次试验方法精确可信。确立了以高温碱熔处理和盐酸提取, 制备岩石样品母液, 采用电感耦合等离子体发射光谱法测定铁矿中二氧化硅含量的方法。

关键词

高温碱熔; 电感耦合等离子体发射光谱法; 铁矿石; 二氧化硅

1 引言

随着我国经济的快速发展和城市工业化进程的加速, 铁矿的核心用途是作为生产钢铁的核心原材料, 进而广泛应用于建筑、机械制造、汽车、船舶等领域, 并衍生出资源循环利用及期货市场调节等延伸价值。铁矿石是钢铁生产中不可缺少的原材料, 它里面的化学成分在冶炼过程严重影响着钢铁的质量。在众多化学成分中, 硅是一个关键因素。铁矿石的含硅量并不是一个固定值, 而是因矿石类型和产地

而异。一般来说, 铁矿石中的硅含量范围在 0.02% 至 8% 之间。这个范围内的硅含量对铁矿石的冶炼性能和钢铁产品的质量有着重要影响。

铁矿中二氧化硅的测定方法有许多, 常用的如滴定法、重量法、X 射线荧光光谱法和紫外分光光度法等, 但使用高温碱熔 - 电感耦合等离子体发射光谱法, 对铁矿石中二氧化硅进行检测的方法较少见, 通过本次实验结果显示, 该方法具有操作简单快速, 检测结果准确度高、精密度好, 测试过程对环境污染少和成本便宜等优点。完全能用于矿山企业和钢铁生产企业了解和控制铁矿石中的硅含量, 对于提高钢铁生产效率、降低成本以及保证产品质量具有重要意义。

【作者简介】叶成美 (1987-), 女, 中国福建寿宁人, 本科, 工程师, 从事土壤、岩石矿物、水质分析研究。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

超纯水(电阻率:18.2 MΩ·cm, 20℃);氢氧化钠(上海远澈化工科技有限公司产品,优级纯);盐酸(广东光华科技有限公司产品,优级纯);硝酸(广东光华科技有限公司产品,优级纯),二氧化硅标准溶液(国家标准物质,GNM-SSIO2-022-2013,浓度为1000 mg/L),无水乙醇(西陇科学股份有限公司产品,化学纯)。

铁矿石标准参考样:本次方法利用国家标准物质铁矿标准参考样,其编号分别为 GBW07218a 和 GBW07218。

2.2 设备与仪器

超纯水机(SU-SI-20LW):四川德立世科技有限公司;

(Therme ICP-AES 7200)等离子发射光谱仪:美国赛默飞, MW PRO-HP;

马弗炉:上海向北实业有限公司;

电子天平(BS124,精确到0.0001g);电子天平(JY02,精确到0.01g);

银坩埚,250ml 玻璃烧杯,250ml 玻璃容量瓶,玻璃棒、25ml 玻璃滴定管。

2.3 测定方法

2.3.1 仪器工作参数条件

本次实验方法使用的主要设备仪器有电感耦合等离子体发射光谱仪和高温碱熔马弗炉,它们检测时的工作参数分别见下表1和表2。

表1 发射光谱仪工作参数

元素	谱线/nm	等离子体观测	观测距离/mm	等离子体流速/(L/min)	辅助气体流速/(L/min)	雾化器/(L/min)	功率/W
Si	251.611	垂直	15	15	0.2	0.55	1300

表2 高温碱熔马弗炉工作参数

阶段	升温功率/W	升温时间/min	运行温度/℃	运行时间/min
1	2500	90	600-700	30

2.3.2 样品前处理

准确称取0.1000克样于银坩埚中,加入无水乙醇数滴,确保样品都湿润,然后放在电炉上烤干,用天平称取1.00克优级纯NaOH于样品上,带好手套小心得将银坩埚放入已到700℃的马弗炉中熔25分钟,关闭电源。再过5分钟从马弗炉中取出银坩埚置于台面上的石棉板上冷却。冷到室温时,再用钳子夹银坩埚放到250ml烧杯中,加入玻璃棒,用100ml的量杯量取沸水100ml在边搅边加入烧杯中,待剧烈反应停止后,在不断搅拌下迅速加入HCl 20ml(此时要快速,以防二氧化硅析出,导致结果偏低),洗出银坩埚后要先将银坩埚洗净烘干放好,待烧杯中的样品冷却至室温移入250ml容量瓶中,用超纯水稀释刻度摇匀备用,空白试验照着样品实验同步进行制备,空白至少两个。

表3 分析谱线

元素	谱线/nm
Si	251.611、212.412、288.158、221.667、250.690、252.851、185.067、198.898、390.552

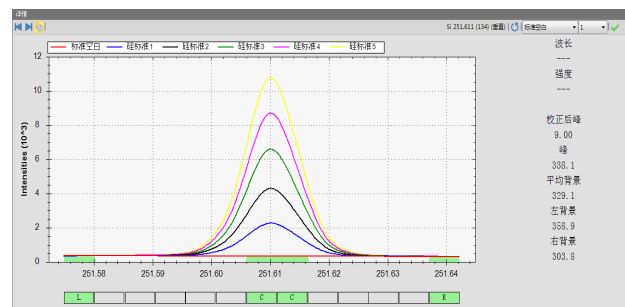


图1 硅的谱线图

3 试验分析与结果

3.1 试验分析谱线的选择

本次试验采用Therme ICP-AES 7200等离子发射光谱仪进行分析测定,获得硅元素的试验分析谱线数据(见表3)和试验分析谱线图(见图1)。通过表3试验数据确定,硅元素有9条分析谱线可以选择,试验分析时通常采用谱线灵敏度高,背景值低,没有自吸现象,信背比高、基体干扰较小的谱线作为试验分析谱线。试验数据中硅元素251.611nm谱线灵敏度高,背景值低,信背比高,且信号强度大,通过图1确定,实验测定时硅251.611nm没有自吸现象、没有共存元素干扰,所以本次试验选定检测的分析谱线为硅251.611nm。

3.2 方法线性范围和检出限

本方法使用二氧化硅的标准储备液(浓度为1000mg/L)用超纯水稀释10倍,其标准浓度为100mg/L作为标准工作液,把工作标准液用25ml刻度滴定管依次加入0、5、10、15、20、25ml于100的玻璃容量瓶中,其浓度为0、5、10、15、20、25mg/L的标准曲线,并用超纯水稀释刻度,摇匀备用。

然后,实验采用空白溶液和工作标准溶液绘制标准工作曲线,连续测定空白溶液10次,使用仪器计算,采用3倍标准偏差计算测试方法的检出限,测定结果(见下表4)。由表4确定本次试验方法硅元素的相关系数为0.9995,检出限为0.0064mg/L,符合规范要求,具有较好的线性关系和

检出限。

表 4 本方法测定 Si 元素的质量浓度范围和检出限

元素	相关系数 R	质量浓度范围/(mg/L)	检出限/(mg/L)
Si	0.9995	0-25	0.0064

3.3 精密度和回收率

本次试验样品对像为 2 份铁矿石样品，倒 10ml 备用样品液体，分别连续进行实验平行测定 7 次，其测试结果见表 5。参照 DZ/T0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》的技术要求规定，进行精密度测定时，重复测定次数至少为 6，被测组分在检出限三倍以内，精密度(RSD)小于 15%，在检出限三倍以上，精密度(RSD)小于 10%，本试验重复测定次数为 5，铁矿石样品中硅含量在在检出限三倍以上范围，精密度在允许范围之内，检测结果说明本法精密度好。

同时进行加标试验，加入不同质量浓度的硅元素工作标准溶液到这两份铁矿石样品中，对其连续进行测定 3 次，用其平均值计算回收率，其测试结果见表 6。通过表 6 确定，该试验方法测定硅元素试验成果的回收率分别为 104% 和 110%。参照 DZ/T0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》的技术要求规定，被测组分在 ppm 级，回收率范围 104%~110%，检测成果表明该方法测定硅元素的数据准确度高。

表 5 方法精密度试验结果

样品序号	元素	测定值/%	平均值/%	RSD/%
1	Si	3.50、3.54、3.55、3.46、 3.46、3.48、3.45	3.49	1.17
2	Si	2.58、2.62、2.59、2.58、 2.60、2.65、2.63	2.61	1.02

表 6 加标回收试验结果

元素	本底值/%	加标量/%	测定值/%	回收率/%
Si	3.49	0.50	4.01	104
	2.61	0.50	3.16	110

3.4 对比试验

采用 2 个铁矿石中二氧化硅标准参考样 [国家标准物质，编号分别是 GBW07218a)、GBW07218]，用本实验方法与 GB/T6730-1986《国家标准局·铁矿石化学分析法》测定结果进行对比试验，测试成果数据见表 7。参照《地质矿产实验室测试质量管理规范》的技术要求规定，方法准确度为测定平均值与标准值的偏差，标准值含量范围在三倍检出限以上时，相对误差(RE)范围要求在 $\pm 15\%$ ，由表 7 可知，本次方法与国标方法对比，它们的相对误差范围在 $-1.51\% \sim 0.29\%$ 区间。因此，使用本次方法测定二氧化硅在铁矿石中的含量，与国家标准方法测定结果基本相同，没有显著差异，偏差在国家标准规定范围内，证明本次试验方法精确可信。

表 7 加标回收试验结果

元素	样品编号	标准值/%	本方法测定值/%	国标方法值/%	RE/%
Si	GBW07218a	3.48	3.49	3.47	0.29
	GBW07218	2.65	2.61	2.62	-1.51

4 结论

通过上述实验，确立了以高温碱熔处理和盐酸提取，制备岩石样品母液，采用电感耦合等离子体发射光谱法测定铁矿中二氧化硅含量的方法。岩石样品处理和制备过程简洁方便，安全易懂；实验方法准确度高，精密度好。同时，与滴定法、重量法、X 射线荧光光谱法、紫外分光光度法等方法相比较，能很好的减少了酸碱等化学试剂的使用量，保障测试人员的健康，降低对周围环境的污染和破坏，提高了实验效率降低了实验成本。因此，本实验方法的确立，能为测定铁矿中二氧化硅含量提供了一种快速、准确、有效、安全的检测方法，也拓展了实验测试的思维。

参考文献

- [1] 中华人民共和国地质矿产行业标准DZ/T0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》，北京，中国标准出版社，2007.
- [2] GB/T6730-1986《国家标准局·铁矿石化学分析法》.
- [3] 《岩石矿物分析》，北京，地质出版社，第四版，2011.

Strengthen On-site Risk Management at Gas Stations to Fortify the Safety Defense Across the Full Fueling Process

Shilong Wang

China National Petroleum Corporation Xinjiang Sales Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Gas stations are typical flammable and explosive business premises. During the unloading, storage, metering, refueling, and abnormal disposal processes of oil products, there are characteristics such as the flow of flammable media, static electricity accumulation, frequent personnel interaction, and continuous equipment operation. Once on-site control fails, it is highly likely to cause fires, explosions, leaks, and secondary environmental risks. Based on the oil refueling business chain, a systematic study is conducted on the construction path of on-site safety defense lines at gas stations, focusing on four levels: risk identification, process interruption, warning linkage, and closed-loop improvement. The risk management of gas stations should not be limited to single point institutional constraints, but should form a full process control system of “clear job responsibilities, standardized operation control, online equipment monitoring, procedural abnormal handling, and closed-loop review and rectification”, in order to substantially improve the on-site intrinsic safety level and operational stability.

Keywords

gas station; on-site risk management; fuel refueling

强化加油站现场风险管控筑牢油品加注全流程安全防线

王世龙

中石油新疆销售有限公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

加油站属于典型的易燃易爆经营场所，油品在卸油、储油、计量、加油及异常处置过程中同时伴随可燃介质流动、静电积聚、人员交互频繁和设备连续运行等特征，一旦现场控制失效，极易引发火灾、爆炸、跑冒滴漏和次生环境风险。基于油品加注业务链条，围绕风险识别、过程阻断、预警联动和闭环改进四个层面，系统研究加油站现场安全防线构建路径。加油站风险治理不能停留于单点制度约束，而应形成“岗位责任清晰化、作业控制标准化、设备监测在线化、异常处置程序化、复盘整改闭环化”的全过程管控体系，才能实质性提升现场本质安全水平和运营稳定性。

关键词

加油站；现场风险管控；油品加注

1 引言

加油站经营活动涉及汽油等危险化学品，依法属于危险化学品经营许可管理范围；现行《中华人民共和国安全生产法》要求生产经营单位建立健全全员安全生产责任制、规章制度和双重预防机制，主要负责人对本单位安全生产全面负责；AQ 3010—2022《加油站作业安全规范》自2023年4月1日起实施，系统覆盖卸油、加油、油罐计量以及设备使用、维护和检修等作业；GB 50156—2021则从场站设计和施工层面对加油站安全技术要求作出规定。

【作者简介】王世龙（1988—），男，中国四川简阳人，本科，工程师，从事加油站管理研究。

2 加油站现场风险链条与失控机理

2.1 全流程风险链条识别

加油站现场风险并非孤立存在，而是沿“卸油—储油—输送—计量—加油—异常处置”连续传导。卸油环节若发生油品错卸、静电跨接失效或余量核对不清，风险会直接向储罐空间和通气系统转移；储油环节若液位监测、通气管理、油气回收或密闭性保持不到位，则容易形成可燃蒸气聚集和逸散；加油环节则因人员最密集、车辆最频繁、瞬时操作最集中，成为点火源控制和行为管控的关键界面 [1]。生态环境部门发布的 GB 20952—2020 明确将卸油、储存和加油全过程纳入油气排放控制范围，也说明加油站安全与环保风险本质上具有同源耦合特征。

2.2 人员行为、设备状态与环境条件的耦合致险

现场事故往往不是单一因素造成，而是人的不安全行

为、物的不安全状态和管理缺陷在特定环境下叠加放大所致[2]。如作业人员对油品牌号核对不严、顾客靠近油箱口前未释放静电、设备密封件老化、加油枪回位不及时、夜间能见度下降、雷雨天气防护不到位等情形,均可能使原本可控的小偏差演化为突发事件。危险化学品企业安全风险隐患排查治理导则指出,事故隐患本质上包括物的不安全状态、人的不安全行为和管理上的缺陷,这一判断同样适用于加油站现场风险分析。

2.3 当前现场管控的主要薄弱环节

从实际运行看,不少加油站虽已建立制度文本,但仍存在风险识别停留在静态台账、班前确认流于形式、现场监护针对性不强、异常报警与处置脱节、承包商和临时作业管控薄弱等问题。尤其在节假日高峰、夜间交接班、设备故障切换和卸油与营业交叉时段,管理注意力容易分散,导致“制度在墙上、风险在现场、整改在纸上”的现象。因而,提升加油站安全水平的关键,不是单纯增加检查频次,而是把高风险节点真正转化为可感知、可验证、可追踪的控制点[3]。

3 油品加注全流程安全防线构建

3.1 卸油环节前移控制

卸油是加油站最具系统性风险的环节,应建立“入站确认—静电释放—介质核对—过程监护—收尾复核”五步控制链。依据AQ 3010—2022相关要求,卸油作业应具备密闭卸油条件,现场至少配备2具手提式干粉灭火器和2块灭火毯;进入卸油区作业人员应先释放人体静电,卸油人员应将防静电跨接线连接到油罐车专用接地端并确认接触良好,油罐车静置进行静电释放5 min后,方可进行计量、取样和卸油;卸油前还应核对罐车单据、油品名称牌号及储罐剩余容量。由此可见,卸油安全的核心不在“开始操作”本身,而在作业前的条件确认是否充分[4]。

3.2 储油与设备设施运行控制

储油系统是加油站风险控制的基础单元,应围绕液位、

密闭、通气、接地和油气回收五个方面实施连续控制。AQ 3010—2022明确提出油罐计量宜采用电子液位计,防雷、防静电设施和接地装置应每半年至少检测1次并建立检测档案;GB 20952—2020则要求加油站对卸油、储油和加油时排放的油气采用以密闭收集为基础的油气回收方法进行控制,建立油气回收系统技术档案和运维记录。基于此,储油单元应同步配置液位报警、渗漏巡检、通气系统状态确认和油气回收运行维护制度,使地下储罐由“被动封存”转变为“状态可视、异常可警、责任可追”的动态安全单元。

3.3 加油作业实时控制与异常阻断

加油作业面对顾客、车辆与设备的即时交互,是现场管理最容易出现行为偏差的环节。AQ 3010—2022要求在加油作业前确认车辆停稳、熄火,提示客户在靠近油箱口前先释放人体静电;加油枪应为自封式,汽油加油流量不应大于50 L/min;若发生油料滴漏、溢洒或其他影响加油安全的情况,应立即停止加油并及时处置。基于这些要求,现场控制应突出“三个即时”:即时确认车辆状态和油品信息,即时观察枪口、接头和地面状态,即时阻断跑冒滴漏与顾客不当行为[5]。换言之,加油员不是简单的操作执行者,而是安全接口的第一响应者。为进一步增强加油作业现场风险控制内容的可视化表达,可将不同作业节点的主要风险源、典型失控表现及对应控制措施进行归纳,如表1所示。该表能够将前文关于卸油、储油、加油及异常处置的分散论述整合为可操作的现场控制清单,有助于突出全过程风险管控的系统性和层次性。

从表1可以看出,加油站现场风险并非集中于单一工序,而是贯穿卸油、储油、加油、设备运行及应急处置全过程。不同节点虽然表现形式存在差异,但其共性在于一旦前端识别、过程监护或异常阻断不到位,局部风险便可能沿作业链条快速传导并放大。因此,现场安全管理应坚持“环节识别—措施匹配—责任到岗—异常即停”的控制思路,以实现风险源头压降与全过程协同防控。

表1 加油站油品加注全过程关键风险点及控制要点

作业环节	主要风险源	典型失控表现
卸油作业	静电积聚、油品错卸、接口松动、罐容核对失误	跑油、混油、油气大量挥发、局部可燃气体浓度升高
储油运行	液位异常、通气不畅、罐体密封不良、油气回收失效	冒罐、渗漏、油气逸散、储罐运行状态异常
加油作业	顾客违章行为、车辆未熄火、加油枪回位不及时、软管磨损	枪口滴漏、油品溢出、局部起火风险增大、现场秩序失控
设备运行	加油机故障、电气老化、防雷防静电设施失效	设备误动作、报警频发、电火花风险增加
站区环境	高温天气、雷雨天气、外来火源、车辆碰撞	可燃蒸气聚集、火源引燃、附属设施受损
应急处置	处置流程不清、器材取用不及时、信息报告滞后	初期险情扩大、现场混乱、应急响应迟缓

4 现场风险管控执行机制优化

4.1 双重预防机制与岗位责任穿透

加油站风险治理要落地,首要前提是把责任由站长层面穿透到班组、岗位和作业动作。《安全生产法》要求生产经营单位建立全员安全生产责任制和双重预防工作机制,危

险化学品企业安全风险隐患排查治理导则进一步强调企业应对安全风险全面管控,对事故隐患治理实行闭环管理。基于此,加油站可将风险单元划分为卸油区、埋地储罐区、加油岛、配电及机房区、便利店和站房公共区,并按岗位分别明确“谁检查、查什么、什么状态必须停、停后谁处置”。只有责任颗粒度细化到动作级别,现场管理才能从“口头提

醒”升级为“标准执行”。

4.2 信息化监测预警与联动处置

在日常运行中，现场风险并不总以显性事故出现，更多表现为液位波动异常、油气回收效率下降、接地检测不合格、设备报警频发、加油机异常停机等“弱信号”。因此，风险管控应从人工巡查主导转向“人工巡查+在线监测+异常联动”复合模式，将液位计、可燃气体报警、视频监控、紧急切断、油气回收运行状态和设备故障记录纳入统一监测逻辑。对重复报警、短期复发故障和交接班未闭环事项，应设置升级处置阈值，避免问题在低等级状态下长期积累，最终跨越成事故事件。该机制实质上是把事后处置前移为过程预警。

4.3 教育培训、承包商管理与应急演练

现场安全能力最终取决于人员。除本单位员工外，卸油驾驶员、维保人员、施工单位和第三方检测机构同样构成风险链的重要参与者。相关政策解读和法规要求均强调作业人员应经安全教育培训合格后上岗；《生产安全事故应急预案管理办法》规定，危险化学品经营等重点单位应编制相应应急预案，并在公布之日起20个工作日内按规定备案，同时至少每半年组织一次生产安全事故应急预案演练。由此，加油站应把培训对象从“正式员工”扩展至所有入站作业人员，把演练内容从“消防器材使用”扩展为卸油泄漏、加油区跑油、车辆碰撞、停电停机和雷雨天气停业处置等场景化演练。

加油站异常事件处置的关键不在于单纯“事后救援”，而在于通过快速识别、及时停机、现场隔离、分级响应和事后复盘形成闭环控制。尤其对于跑冒滴漏、设备报警、局部起火隐患等常见场景，若能够在初始阶段完成风险阻断并同步启动信息报告程序，往往能够有效防止险情扩大，进而提升现场处置效率和整体安全韧性。

5 持续改进与安全绩效提升路径

5.1 标准化作业与班组精细化管理

班组是加油站安全管理最基本、也最容易失真的一层。推进标准化作业，不应停留在张贴流程图和口头交底，而应将卸油确认、班前设备点检、加油岛巡查、交接班复核、异常登记等动作固化为记录表单和班组清单，并通过抽查、互查和视频回放验证执行质量。对于高温、雷雨、大客流、夜间作业等风险放大时段，应实施差异化管控，适当提高巡视

频次和现场负责人在岗要求，使班组管理真正具备对风险波动的响应能力。

5.2 指标考核与闭环整改机制

加油站安全绩效评价应避免只看“有没有事故”，而应建立覆盖前端预防和过程控制的指标体系。建议将卸油前确认完成率、静电接地检测合格率、设备故障当班闭环率、油气回收维护到位率、异常报警响应时长、应急演练达标率、班组违章纠正率等作为核心指标，并与站长、班长和岗位员工绩效挂钩。对于重复性问题，应坚持“问题复盘—原因分层—措施定责—整改验收—效果复评”的闭环路径，防止同类隐患反复出现。安全管理只有完成从“查出问题”到“消除成因”的转变，才算真正有效。

现代加油站风险管理不应把安全、环保和运营效率割裂处理。油气回收系统运行良好，不仅能够满足GB 20952—2020对卸油、储油、加油全过程排放控制的要求，也能减少站区可燃蒸气逸散，降低职业暴露和火灾爆炸风险；防雷、防静电检测档案健全和设备维保到位，既有助于满足合规要求，也能降低设备突发故障造成的停机损失。由此，现场风险管控越成熟，加油站的营业连续性、顾客服务稳定性和周边环境友好性就越高，安全治理与经营绩效并非对立关系，而是相互促进的协同关系。

6 结语

加油站安全防线的稳固程度，决定于全过程控制是否真正落实到现场动作、设备状态和人员行为三个层面。围绕卸油前移控制、储油状态监测、加油过程阻断、双重预防运行、信息化预警联动以及培训演练闭环，可构建覆盖日常经营与异常处置的系统化治理框架。

参考文献

- [1] 胡丽雅.上海市加油站地下水中甲基叔丁基醚污染状况调查及健康风险评估[J].环境污染与防治,2022,44(12):1652-1656.
- [2] 黎广宾,安华明.基于Bowtie方法的加油站事故分析[J].消防科学与技术,2024,43(1):12-18.
- [3] 冯雨钦,刘扬,刘畅通,等.加油站油气回收系统VOCs泄漏FID现场检测方法及其效果分析[J].环境工程学报,2022,16(5):1748-1756.
- [4] 胡婕,胡瑾秋,胡靖,等.基于IRML-STAMP的舰船加油系统风险因素识别方法[J].安全与环境工程,2024,31(2):51-61.
- [5] 董震宇,孙嘉斌.品牌授权加油站的中国石油品牌风险控制措施研究[J].车用能源储运技术,2024,(4):83-88.

Research on Process Optimization and Quality Control for Polyvinyl Chloride Paste Resin Production

Kai Yang

Zhongyan Anhui Tianchen Chemical Co., Ltd., Hefei, Anhui, 231607, China

Abstract

As a crucial versatile polymer material, polyvinyl chloride paste resin is widely used in artificial leather, wallpapers, flooring materials, gloves, plastic-coated products, and sealing materials. The product performance directly impacts downstream processing stability and final product quality. With increasing market demands for particle size distribution control, plasticizer absorption efficiency, paste viscosity stability, and purity standards, traditional production methods have shown limitations in polymerization control, process stability maintenance, impurity management, and quality fluctuation mitigation. This study focuses on optimizing production processes and quality control for polyvinyl chloride paste resin, analyzing key performance influencing factors, exploring optimization strategies for polymerization reactions, additive systems, post-processing techniques, and comprehensive quality management. Through practical production case studies, the research summarizes process improvement outcomes to provide actionable references for enhancing product quality and operational efficiency in paste resin manufacturing enterprises.

Keywords

PVC paste resin; production process; process optimization; quality control; emulsion polymerization; product performance

聚氯乙烯糊树脂生产工艺优化及质量控制研究

杨凯

中盐安徽天辰化工有限公司, 中国·安徽 合肥 231607

摘要

聚氯乙烯糊树脂作为重要的通用型高分子材料,广泛应用于人造革、壁纸、地板革、手套、浸塑制品及密封材料等领域,其产品性能对下游加工稳定性和终端制品质量具有直接影响。随着市场对糊树脂粒径分布、增塑剂吸收性、糊黏度稳定性及纯净度要求不断提高,传统生产模式在聚合控制、过程稳定、杂质管理和质量波动抑制方面逐渐显现不足。文章围绕聚氯乙烯糊树脂生产工艺优化与质量控制展开研究,分析影响产品性能的关键因素,探讨聚合反应、助剂体系、后处理及全过程质量管理的优化路径,并结合生产实际总结工艺改进效果,以期为糊树脂生产企业提升产品质量和生产水平提供参考。

关键词

聚氯乙烯糊树脂; 生产工艺; 工艺优化; 质量控制; 乳液聚合; 产品性能

1 引言

聚氯乙烯糊树脂是以氯乙烯单体为主要原料,通过乳液聚合或微悬浮聚合等方式制得的细颗粒树脂,具有粒径细、分散性好、易塑化加工等特点,在软质聚氯乙烯制品生产中占有重要地位。与普通悬浮法聚氯乙烯相比,糊树脂对聚合过程控制精度和产品质量稳定性要求更高,尤其在粒径结构、表观密度、挥发分、鱼眼数和糊流变性能等方面更为敏感^[1]。当前,随着下游制品向高端化、精细化方向发展,企业不仅要保证产量和装置运行稳定,更需要通过工艺优化实现产品性能的一致性和可控性。基于此,系统研究聚氯乙烯糊树脂生产工艺优化及质量控制问题,对于提高产品竞争

力、降低生产波动和促进行业高质量发展具有重要意义。

2 聚氯乙烯糊树脂生产特点及影响质量的关键因素

2.1 聚氯乙烯糊树脂生产工艺的基本特点

聚氯乙烯糊树脂生产通常以氯乙烯单体、水、分散介质、乳化剂、引发剂和必要的助剂为基础,在一定温度、压力和搅拌条件下完成聚合反应,再经脱气、汽提、洗涤、脱水和干燥等工序制得产品。该产品生产过程具有反应体系复杂、影响变量较多和质量敏感性强等特点^[2]。由于糊树脂主要依靠微细粒子在增塑剂中的分散形成塑化浆料,因此树脂颗粒粒径及其分布状态会直接影响糊黏度、流动性和储存稳定性。生产中任何环节控制不当,都可能导致产品出现粗粒增多、糊黏度异常、挥发分偏高或杂质含量上升等问题。由此可见,糊树脂生产并非简单完成聚合反应即可,而是要

【作者简介】杨凯(1996-),男,中国甘肃人,本科,助理工程师,从事聚氯乙烯糊树脂研究。

求从原料配比到后处理全过程实现精细化控制。

2.2 影响产品质量的主要工艺因素

糊树脂产品质量受多项工艺因素共同作用,其中聚合温度、反应压力、搅拌强度、乳化剂体系及引发剂加入方式尤为关键。聚合温度会影响单体转化速率和聚合粒子生长过程,若温度波动较大,容易造成颗粒结构不均一,进而影响糊树脂的吸油值和黏度表现。搅拌条件决定了体系分散状态及传热传质效率,搅拌不足可能导致局部聚集和反应不均,搅拌过强又可能破坏粒子稳定性^[3]。乳化剂种类与配比直接关系到粒子成核数量和表面状态,不合理的助剂体系会带来颗粒粗化和后续糊料稳定性下降。后处理阶段的脱气、洗涤和干燥质量同样重要,残余单体、挥发分及外来杂质若控制不到位,产品外观和加工适应性都会受到影响。

2.3 当前生产中存在的主要质量问题

从实际生产情况看,部分企业在糊树脂制造过程中仍存在工艺参数波动较大、过程控制精度不足和质量管理前移不够等问题。一些装置在聚合过程中对温度和压力变化响应不够及时,导致不同批次产品粒径分布差异明显,表现为糊黏度不稳定、增塑剂吸收性能波动较大。还有部分企业在乳化剂和引发剂使用上更多依赖经验配方,缺乏基于产品性能目标的动态优化,造成产品适应性较弱。后处理环节中,若汽提不充分、洗涤不彻底或干燥条件控制失衡,容易使产品残留单体偏高、白度下降或出现结块现象。此外,原料纯度、设备洁净度和包装环境管理不足,也可能引入微量杂质,最终影响高端制品加工质量。上述问题表明,糊树脂质量提升必须以系统化工艺优化和全过程质量控制为支撑。

3 聚氯乙烯糊树脂生产工艺的优化路径

3.1 聚合反应条件的精细化优化

聚合反应阶段是决定糊树脂基础性能的核心环节。为提高产品稳定性,应围绕温度、压力、搅拌和反应时间建立更为精细的控制体系。温度控制应保持平稳连续,尽量缩小波动区间,以确保聚合速率均衡和粒子形成过程稳定。对于不同型号糊树脂,还应依据目标粒径、聚合度及下游用途设置差异化的反应温度曲线,而不能采用单一固定模式。压力控制则关系到氯乙烯单体在体系中的分布状态和聚合环境稳定性,应通过自动调节手段减少压力突变对产品结构带来的干扰。搅拌系统优化也不可忽视,需根据反应釜结构、装料量和乳液体系特征合理匹配转速与桨叶形式,以提升传热传质效率并维持体系均匀。通过反应条件的精细化调控,可有效改善粒径分布和产品批次一致性。

3.2 乳化剂及助剂体系的协同优化

糊树脂性能在很大程度上取决于乳化剂及助剂体系设计。合理的乳化剂体系不仅能稳定聚合乳液状态,还能调节粒子成核、粒径控制及表面特性,从而影响树脂糊化性能和流变行为。在工艺优化中,应结合产品用途对乳化剂类型、

离子特征和添加比例进行系统筛选,避免因单一乳化剂作用有限而造成体系稳定性不足。引发剂的选择与投加节奏同样关键,其分解速率和自由基释放特征会影响聚合反应平衡及粒子成长过程^[4]。必要时还应加入适量分子量调节剂、消泡剂和稳定剂,以改善反应环境并减少副反应。助剂体系的优化不能仅关注反应阶段,还需考虑其对后续洗涤、干燥和产品应用性能的影响。只有实现各类助剂间的协同匹配,才能兼顾生产稳定性与产品质量。

3.3 后处理工艺的稳定性改进

聚合完成后的后处理工艺,是确保糊树脂纯净度和外观品质的重要保障。脱气和汽提环节应重点控制残余单体去除效率,降低产品中氯乙烯单体残留水平,满足安全与环保要求,同时避免影响下游加工环境。洗涤工序则应保证乳化剂残留、可溶性杂质及微量盐类被充分去除,减少其对糊料稳定性和制品外观的不良影响。脱水和干燥阶段需要兼顾效率与产品保护,若干燥温度过高或时间过长,可能导致颗粒表面状态变化甚至轻微热降解;若控制不足,则易造成水分偏高、储存结块和包装后性能波动。因此,在后处理优化中,应通过设备参数匹配、在线监测和标准化操作,保持各工序衔接稳定,防止前端优良反应成果在后段处理中被削弱。

4 聚氯乙烯糊树脂质量控制的重点内容

4.1 原料质量控制与过程前移管理

高质量糊树脂产品离不开稳定可靠的原料基础。氯乙烯单体纯度、水质状况、乳化剂品质、引发剂活性以及各类助剂的稳定性,都会对最终产品质量产生直接影响。若原料本身存在杂质偏高、水分异常或活性波动,后续再通过工艺修正往往难以彻底消除影响。因此,企业应将质量控制前移到原料采购与入厂检验环节,建立严格的供应商评价制度和原料验收标准。对于关键原料,可结合历史使用数据开展波动分析,及时识别潜在风险。同时,还应强化储存与输送过程管理,防止原料在使用前发生污染、分层或性能衰减。过程前移管理的意义在于,从源头降低质量异常发生概率,为后续稳定生产打下坚实基础。

4.2 关键质量指标的动态检测与分析

糊树脂质量评价应建立在关键指标持续监测基础上。常见控制指标包括粒径及粒径分布、表观密度、挥发分、残余单体、杂质含量、白度以及糊料黏度和稳定性等。这些指标不仅反映产品本身品质,也能倒推生产过程是否处于合理状态。例如,粒径分布变化往往与乳化体系和聚合条件波动相关,糊黏度异常则可能反映树脂表面特性或颗粒结构存在偏差。企业应通过在线检测与离线化验相结合的方式,增强对产品状态的实时掌握能力。对于容易波动的指标,还应建立趋势分析机制,而不是仅以单次检测结果判断合格与否。通过动态监测、数据分析和异常追溯相结合,可使质量控制从结果判定转向过程预警,提高问题发现和处理的及时性。

4.3 生产标准化与质量追溯体系建设

在现代化生产条件下,单靠经验管理已难以满足糊树脂高质量生产需要,必须通过标准化和追溯化手段提升控制水平。生产标准化要求企业对配料、升温、保温、助剂投加、脱气、洗涤、干燥和包装等关键步骤形成明确操作规范,并确保不同班组、不同批次执行尺度一致。这样可以减少人为操作差异带来的质量波动。与此同时,还应建立较为完整的质量追溯体系,将原料批号、生产时间、主要工艺参数、设备状态和检验结果进行关联记录。一旦出现糊黏度异常、颗粒粗化或下游应用投诉,即可快速追溯到相应工序和影响因素,缩短问题排查周期。质量追溯体系不仅有助于问题整改,也为工艺持续优化和经验沉淀提供了数据基础。

5 工艺优化与质量控制协同实施的实践意义

5.1 有助于提升产品稳定性与市场适应性

糊树脂在多个行业的应用中,特别是在生产人造革、壁纸和发泡制品时,用户对产品稳定性有着较高的要求。不同批次的糊树脂如果在糊黏度、吸塑性性能和杂质水平上存在明显差异,往往需要频繁调整加工参数,进而影响生产效率和最终成品的质量。通过工艺优化与质量控制的协同推进,企业可以确保产品在粒径结构、流变性能和纯净度等方面的一致性,从而提升市场适应性。对于企业而言,产品的稳定性不仅能够有效减少客户的投诉,还能提高下游用户在工艺适配方面的便利性,进而增强与客户的长期合作关系。产品稳定性本身成为了高附加值的竞争优势,它标志着企业从价格竞争逐步向质量竞争转型的基础,也是企业提升市场竞争力的关键因素。

5.2 有助于降低消耗并提高装置运行效率

工艺优化的意义不仅仅在于改善产品的性能,还能带来能源消耗、物料消耗和设备运行效率等多方面的综合效益。通过对聚合条件的合理优化,反应过程的稳定性显著提高,副反应和设备停机的概率减少,进一步降低了单体损耗和蒸汽、电力等资源的消耗。同时,优化助剂体系能够减少不必要的原料浪费,提升反应的利用效率。稳定的后处理工艺则有助于减少不合格品的产生,避免返工,降低干燥、包装和仓储等环节的额外成本。随着质量控制体系的不断完善,生产过程中的偏差能够被及时识别并纠正,从而使整个生产流程更加顺畅。这表明,工艺优化与质量控制的协同实

施,不仅改善了质量管理,还为企业的降本增效和精益生产能力的提升提供了有力支持。

5.3 有助于推动企业绿色化和高质量发展

在化工行业加速向绿色、安全和高质量转型的大背景下,聚氯乙烯糊树脂生产企业也面临着环保要求和市场升级的双重压力。通过优化工艺和加强质量控制,企业不仅能够降低残余单体的排放,减少能耗和副产物的生成,还能提高资源利用效率,满足绿色生产的要求。产品质量的稳定性提升使企业更具能力开发适用于高端领域的专用树脂,从而推动产品结构的优化升级。与此同时,基于数据分析的过程控制和质量追溯体系建设,能够促进企业管理现代化水平的提升。这些措施表明,工艺优化与质量控制不再是单纯的技术问题,而是关系到企业可持续发展和行业转型升级的关键因素。通过这些措施的落实,企业不仅能够适应行业发展趋势,还能够市场竞争中占据更有利的地位。

6 结语

聚氯乙烯糊树脂生产工艺优化及质量控制,是保障产品性能、提升企业竞争力和推动行业高质量发展的关键环节。由于糊树脂对聚合条件、助剂体系和后处理工序极为敏感,任何细小波动都可能在产品粒径、糊黏度、纯净度和加工适应性上得到放大。因此,企业必须坚持系统思维,从原料控制、反应调节、助剂协同、后处理改进到质量检测与追溯管理各环节同步发力,形成全过程、精细化的生产控制模式。实践表明,只有将工艺优化与质量控制深度融合,才能真正实现产品稳定、消耗降低、装置高效和市场竞争力提升。今后,随着自动化控制和数据化管理水平不断提高,聚氯乙烯糊树脂生产将进一步向精准化、绿色化和高附加值方向发展。

参考文献

- [1] 包飞,李宝玉,贾小姣,等.聚氯乙烯生产过程质量控制与改进措施[J].中国氯碱,2025,(05):10-13.
- [2] 张琦.聚氯乙烯合成树脂的生产工艺环保技术[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(10):40-41.
- [3] 王拓,芦明.聚氯乙烯糊树脂黏度的影响因素研究[J].天津化工,2025,39(06):60-62.
- [4] 叶有林.聚氯乙烯合成树脂的生产工艺环保技术分析[J].绿色环保建材,2016,(02):18+25.

Petrochemical Equipment Installation Technology and Project Management

Weikang He

China National Petroleum Corporation Sixth Construction Co., Ltd., Tianshui, Gansu, 741202, China

Abstract

The installation of petrochemical equipment is a critical link in the industrial chain, directly impacting production safety, operational efficiency, and economic benefits. This paper systematically analyzes the development trends and application characteristics of equipment installation technology, exploring key issues in the installation process from multiple dimensions such as safety, project duration, resources, and technical standards. Through in-depth analysis of project management systems, construction planning, risk control, quality acceptance, and cost optimization, practical management strategies are proposed.

Keywords

petrochemical equipment installation; project management; safety risk control; construction schedule optimization; quality and cost management

石油化工设备安装技术及项目管理

何伟康

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·甘肃天水 741202

摘要

石油化工设备安装是产业链中至关重要的环节,直接影响生产安全、运行效率和经济效益。本文系统分析了设备安装技术的发展趋势和应用特点,从安全、工期、资源和技术标准等多维度探讨了安装过程中存在的关键问题。通过对项目管理体系、施工计划、风险控制、质量验收和成本优化等环节的深度剖析,提出了具有可操作性的管理策略。这些策略不仅针对当前技术瓶颈提供解决路径,同时注重资源合理调配和安全保障。研究表明,科学的项目管理方法与技术执行规范的结合,是提升石油化工设备安装整体效能的核心手段。

关键词

石油化工设备安装; 项目管理; 安全风险控制; 施工计划优化; 质量与成本管理

1 引言

石油化工行业的发展对设备安装提出了更高的要求,技术复杂性、工艺精度、安全标准的提高,使安装环节成了项目成败的关键因素。传统的安装方式存在着安全隐患、工期拖延以及资源分配不均等种种问题,不但会造成项目成本的增加,而且会阻碍技术革新。设备安装项目管理要从系统角度出发,把技术执行、风险控制、质量控制和成本控制结合起来,形成一套可以复制的管理方法。

2 石油化工设备安装技术总体分析

2.1 石油化工设备安装技术发展趋势

石油化工设备安装技术正向高精度、智能化、系统集成方向发展。安装过程越来越依靠信息化管理工具,施工计划、设备定位、资源调度等都用数字化平台进行可视化控制。

技术更新不单是设备精度的提高,也是施工方案的改良、风险评判水平的加强。未来的发展趋向是项目管理同技术执行相结合,用标准化的作业和智能的监控来削减人为的干扰,从而提升施工效率并保证安全。行业要实现技术更新的同时加强操作规范,保证新技术落地可行并且能产生实际效益。

2.2 石油化工设备安装技术应用特点

设备安装技术在石油化工项目中系统性较强,工序繁杂,协作密集。施工环节包含管道、压力容器、电气和自动化设备的同步布置,任何一个环节出现偏差都会造成连锁反应。技术应用讲究精确定位、紧密配合,并且要求施工人员有跨专业理解的能力。项目管理中技术执行要同工期、资源、质量标准一起调整,用信息化、流程化的方式减少误差、冲突,提高安装效率、提高项目整体可靠性。

3 石油化工设备安装存在的主要问题

3.1 设备安装施工中的安全隐患分析

施工安全问题在石油化工设备安装中比较突出,有高

【作者简介】何伟康(1997-),男,中国甘肃甘谷人,本科,初级,从事化工设备安装研究。

处作业、压力容器吊装、复杂管道焊接等。安全隐患是由操作规程执行不到位、现场管理不一致、设备协调不及时所造成的。隐患控制措施有创建全面风险清单,开展动态风险监控并加强施工人员培训。依靠标准化作业流程、实时监测以及应急预案三者相融合的方式,在施工过程中可以有效地减少事故的发生。安全管理不但是合规的要求,更是保证项目顺利进行、提高经济效益的前提。

3.2 工期延误与资源调配难题解析

工期延误一般是由设备交付延迟,施工资源冲突以及复杂的工序之间相互依赖所造成的。资源调配难题牵涉到人力、机械、材料等各方面的多层次协调。优化策略有创建动态调度模型、利用关键路径法预估工期风险、推进跨部门信息共享等。根据预判出的瓶颈环节来对资源进行优先级调整,在不增加成本的情况下可以达到施工节奏平衡的目的。系统化调度、及时调整可以提高项目对外部变化的适应性,减少由于延误所造成的连锁影响。

3.3 技术执行与标准适应性问题研究

技术标准在石油化工设备安装中有指导作用,但是实际施工中会出现标准和现场条件不完全符合的情况。问题有设计方案同施工环境相冲突,施工方法不合乎更新标准,专业人员对标准的理解存在差异。解决办法要创建标准执行评价体系,加强技术培训,推进施工方案的适应性改良^[1]。采用动态调整施工方法、加强标准执行监督的方式,保证技术落地的同时又不会影响到施工效率和质量的稳定,降低返工和安全隐患的发生。

4 石油化工设备安装项目管理操作方法

4.1 项目管理体系在安装项目中的应用

在石油化工设备安装项目中,创建科学的项目管理体系是保证施工高效、安全的主要方式。该体系应该包括资源整合、任务分解、信息流动、绩效考核等各个环节。资源整合要对人力、设备、材料实行分层管理,利用数字化平台来完成资源的实时跟踪以及动态调配。任务分解要将大型安装作业拆分成可控模块,每一个模块都要有具体的负责人、完成标准和时间节点,并且要形成跨专业协作的机制,保证各个环节之间能够顺利地衔接。信息流动策略认为项目各个层次的数据要保持同步,依靠移动终端、施工监控、云端数据库等手段对施工进度、设备状况、安全指标等进行实时更新,给决策提供可靠的依据^[2]。绩效考核的设计要与关键绩效指标相结合,用量化考核的方式完成情况、施工效率、安全合规度等来形成闭环反馈,使管理体系可以自我优化。体系实施时,可以把技术标准、施工流程、质量要求纳入到管理体系当中去,使每一个施工环节的操作都被规范化的约束所影响,又留有弹性调整的空间来应对现场的变化。通过管理流程、技术应用、信息平台的融合,项目管理体系在安装项目中实现了资源优化、效率提高,也加强了风险防控、质量保

证,给整个施工周期提供了一个可以执行的操作框架。

4.2 安装施工计划与进度管理具体方法

施工计划及进度管理属于石油化工设备安装项目高效运转的重要依托。施工计划的制定要依靠全面的工程数据,把复杂的工序分解成可以执行的时间节点,每一个节点都有施工顺序、需要的资源以及重要的控制点。进度管理策略重视动态调整以及风险缓冲,创建起实时监督系统,就施工进度,资源耗费和任务达成状况展开不间断跟踪。施工计划要纳入可视化工具,甘特图、关键路径法等都可以用来使项目管理团队在出现延误或者资源冲突的时候,能够快速地对节点、优先级进行调整。根据工序间的相互制约情况来安排资源分配方案,把主要的生产设备和人员集中到瓶颈工序上,依靠跨工序间的协调来缩短等待时间,从而提高整个工程的速度。施工节点管理注重同步性、连贯性,用阶段性验收加进度评价的方式保证每个模块完成之后可以顺利过渡到下一个环节。计划优化还要对外部因素进行预测,即气候状况、物流周期以及供应商供货能力等都会被考虑进来,并且会把它们包含到计划模型当中,从而缩减因这些不确定性而给总进度造成的不良影响。利用系统化、可调整、信息化的施工计划及进度管理手段,项目组可以在保证安全、质量的基础上最大限度地提高施工效率,达到高标准安装的目的^[3]。计划与进度管理策略要将施工节点同资源运用、质量把控和安全防护融合起来,从而创建起一个闭环的控制体系。策略延伸就是创建施工动态调整机制,每天、每周开展进度评审,及时察觉延误趋向并立刻改变资源优先次序以及任务先后次序,保证整个施工进度不会因为局部的瓶颈而受阻。

4.3 风险识别与安全防护管理实践

设备安装过程中的风险识别和安全防护管理要贯穿于整个施工周期之中,还要同项目管理体系紧密结合在一起。第一种就是建立多层次风险分类体系,将施工操作、设备状况、人员调度、外部环境等全部因素都包括进去,然后利用定量和定性分析手段找出主要的风险来源。安全防护策略用标准化作业流程、风险分级控制、动态监测来达到风险可控的目的。施工现场应设置实时监控、数据采集系统,对高危环节实施连续跟踪,出现异常立即反馈给管理中心,及时处理。风险管理还要联系资源调度策略,把重要的设备、专业人员集中在高风险时段进行集中部署,减少风险暴露的概率。安全培训与演练属于策略的重要组成,用模拟高危场景、操作规范来加强施工人员的风险意识以及应急处置能力。风险控制机制要依靠跨部门协作,创建起预警、响应以及评价闭环,从而达成对风险的早发觉、早干涉并加以追踪的效果。将风险识别、现场防护、培训演练、动态监测相结合之后,安全管理工作由原来的静态标准变成了可以执行的操作方法,设备安装的过程在高效运转的同时,实现了安全可控,项目安全目标和施工效率同时得到提升。风险管理策略更加强调施工全过程的闭环控制,用分阶段的风险评价以及即时

的数据反馈来达成不断的改善。策略为建立动态风险优先级排序机制,施工阶段、环境条件、资源状态等都属于关键因素,用加权法来计算得出结果,从而达到高危环节集中安排的目的。安全防护策略向上游延伸,用多级演练、迅速下达指令、设立现场应急小组等办法加快事故的处理速度。风险控制执行策略是数据分析加现场监控,用异常事件追踪、偏差记录、事件复盘来形成知识库,给后续施工提供策略优化的依据。资源优化和安全管理联动策略就是对高危作业的时间窗口、人员轮换、机械使用等进行合理的安排,从而提高风险控制的效率,又不会影响到施工的节奏和进度。

4.4 设备安装质量控制与验收策略

设备安装质量控制要从施工全过程进行系统化管理,策略核心就是预防为主、过程控制相结合。安装前要创建全面的技术标准库,把设备制造规范、设计要求、施工操作规程整理成可以执行的操作清单,给施工环节质量执行提供指导。质量管理策略有施工前材料、设备检验,安装过程持续监测,关键节点阶段性验收等。材料、设备检验用量化指标和记录追踪的方式进行,把合格的数据同施工计划一起更新,保证安装条件符合标准要求。施工过程质量控制就是制定作业指导书、操作规范,对每个工序的操作要求、允许偏差、测量方法进行规定,从而达到对安装精度、管道接口、压力容器定位、焊接质量的实时控制。关键节点验收策略重视多层次检查,依靠专业监理、技术工程师以及现场管理人员等各方面来展开验收工作,对设备完成度、连接精度以及系统功能实施全面的检查,并把验收结果纳入到项目管理信息系统当中,从而给后续施工和调试赋予可靠的依据。质量控制策略还有数据反馈和持续改进机制,施工过程中产生的偏差及改进措施经由系统加以记录、剖析并传递,给后续作业给予参照,促使施工方法不断改良升级。采用标准化管理、过程控制、阶段验收相结合的方式,可以保证安装质量控制精度和功能上达到要求,又提高了施工效率,形成了闭环管理,使设备安装达到预期的设计和运行要求,保证项目整体目标的顺利实现。

4.5 成本控制及安装资源优化管理方案

成本控制及资源优化管理要在石油化工设备安装流程当中塑造起全过程策略体系,依靠前期规划,动态调度并展

开持续改进,从而达到经济效益的最大化。前期工作即建立详细的预算模型,把人工、设备、材料、运输和不可预见费用都列入量化的计算当中,并且规定出各项资源投入的标准以及容差范围。动态调度策略把施工计划同资源利用实时监测结合起来,对重要设备,专业人员以及材料实施优先安排,从而保证高需求节点所需资源供应充裕,并且经由改变非关键部分的资源耗费达成均衡。资源优化管理重视跨工序协调以及多项目共享,把施工设备、技术队伍、材料储备纳入同一个管理平台之中,依靠预测算法和历史数据开展资源调配工作,从而提升利用率,削减闲置与重复投入。成本控制机制与绩效考核、反馈调整相结合,把实际支出同预算展开持续对比,剖析偏差并加以修正,塑造起动态控制闭环。采用信息化管理、精细化资源调度、数据驱动优化的方式,可以实现投资效率的最大化,也可以保证施工质量、进度,使项目在高效、可控的条件下完成安装任务,提高项目的经济性、执行力。

5 结语

石油化工设备安装不单是施工任务,也是系统管理和技术执行的结合点。本文对技术特点、施工难题以及项目管理方法做了详细的分析,从而得出安全、进度、质量、成本优化的主要途径。有效的项目管理要精细到每一个环节,即施工计划的及时修改、风险的随时更新和资源的最优分配。标准化的操作以及质量检验体系,都是保证设备可靠性的手段。对于行业来说,把技术同管理结合起来,不但可以提高安装效率,而且可以降低潜在的风险,从而形成可持续发展的模式。未来石油化工设备安装项目要使策略的应用、数据的支持、现场的管理形成一个闭环,使管理和技术融合在一起。

参考文献

- [1] 王兆海.石油化工装置氧气管道安装技术与项目管理的协同研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025(22):118-120.
- [2] 刘智菱.大型煤化工项目中的设备采购管理策略分析[J].石油化工建设,2024,46(S1):45-46.
- [3] 寇戈.石油化工设备安装技术及项目管理策略[J].读报参考,2024(1):71-72.

Research on Process Risk Analysis and Safety Prevention and Control Measures of Methanol Plants

Huitao Sun

Henan Pingmei Shenma Group Shoushan Carbon Materials Co., Ltd., Xuchang, Henan, 461713, China

Abstract

Methanol occupies a fundamental raw material position in the modern coal chemical industry system. Its production units have distinct high-risk characteristics, including long process flows, harsh operating conditions, pronounced material flammability and toxicity, and high system interconnectivity, making safety management challenging at a relatively high level in the chemical industry. To further strengthen full-process risk management effectiveness in methanol production and improve the inherent safety level of the units, this paper takes widely used coal-to-methanol and coke oven gas-to-methanol processes as research objects. Based on a systematic review of typical production processes and operational features, HAZOP and FMEA combined analysis methods are applied to identify hazards and quantify risk levels in key units such as synthesis gas preparation, methanol synthesis, distillation separation, and product storage and transportation, clarifying the distribution characteristics of major hazard sources and high-risk loss-of-control scenarios. Following the safety governance approach of source reduction, process control, and emergency backup, a safety prevention and control framework covering the entire lifecycle of unit design, construction, operation, and maintenance is established from two levels: process inherent safety improvement and key technical protection, and the construction of safety management systems and emergency preparedness. Targeted and practical safety technical solutions and management measures are proposed.

Keywords

Methanol production unit; process safety risk; hazard identification; risk assessment

甲醇装置工艺风险分析及安全防控措施研究

孙汇涛

河南平煤神马集团首山碳材料有限公司, 中国·河南 许昌 461713

摘要

甲醇在现代煤化工产业体系中占据基础性原料地位, 其生产装置具有工艺流程长、工况条件苛刻、物料燃爆毒性突出、系统关联度高等显著高危属性, 安全管控难度处于化工行业较高水平。为进一步强化甲醇生产全流程风险管控效能, 提升装置本质安全等级, 本文以较为普遍的煤制甲醇及焦炉煤气制甲醇工艺为研究对象, 在系统梳理典型生产流程与运行特点的基础上, 运用HAZOP与FMEA联合分析手段, 对合成气制备、甲醇合成、精馏分离及产品储运等关键单元开展危险有害因素识别与风险等级量化研判, 明确装置重大危险源分布特征与高风险失控情景。遵循源头消减、过程管控、应急兜底的安全治理思路, 从工艺本质安全改良与关键技术防护、安全管理体系构建与应急保障建设两个层面, 搭建覆盖装置设计、建设、运行及检维修全生命周期的安全防控框架, 提出具备针对性与可操作性的安全技术对策与管理举措。

关键词

甲醇生产装置; 工艺安全风险; 危险辨识; 风险评价

1 引言

在现代煤化工产业规模化、集约化持续推进的大背景下, 甲醇产业产能与产量规模长期位居全球前列, 产品应用场景不断向甲醇制烯烃、清洁燃料、有机合成及新能源领域延伸, 已成为支撑国家能源化工体系平稳运行的关键基础化学品。甲醇生产装置以合成气制备、催化合成、精馏提纯、产品储存与输送为主体流程, 全流程伴随高温、高压、易燃、易爆及有毒有害等多重危险属性, 甲醇蒸气爆炸极限区间在

6.0%~36.5%左右, 闪点仅11℃, 系统内氢气、一氧化碳、硫化氢等介质同时具备强烈燃爆性与人体毒害性, 单一设备失效或工艺参数偏离均有可能引发泄漏、火灾、爆炸及中毒窒息等重特大安全事件, 造成人员伤亡、财产损毁、环境破坏与负面社会影响。

当前甲醇行业在安全运行层面仍面临诸多现实问题, 部分装置本质安全设计水平偏低, 老旧设备设施存在老化劣化隐患, 企业风险辨识工作系统性与全面性不足, 安全防护措施呈现碎片化特征, 安全管理模式与现代化工艺运行要求匹配度不高, 传统事后处置型安全管理难以满足新时代化工安全生产管控标准。开展甲醇装置全流程工艺风险系统化分

【作者简介】孙汇涛(1988-), 中国河南叶县人, 本科, 中级, 从事化工安全研究。

析,构建科学完备、层级清晰、协同联动的安全防控体系,有助于推动风险管控从事后应对向事前预防转型、从局部管控向系统治理升级、从经验管理向精准施策跨越,对保障甲醇装置长周期安稳运行、化解重大安全风险、提升煤化工行业整体本质安全水平具备重要理论意义与实践价值。

2 甲醇装置工艺特征与风险辨识基础

2.1 典型工艺流程与运行特性

甲醇工业化生产以煤制甲醇、焦炉煤气制甲醇为两大主流技术路线,整体工艺流程高度相近,均由四大核心工序串联构成,各工序运行工况与风险特点差异明显。煤制甲醇以煤炭为原料,经气化反应生成粗煤气,通过变换工序调整氢碳比例、脱碳工序脱除酸性组分后获得合格合成气;焦炉煤气制甲醇以炼焦副产焦炉煤气为原料,经脱硫、脱苯、精制提纯后获得满足反应条件的合成气,两类工艺后续均进入甲醇合成、精馏提纯及产品储存输送环节,最终产出符合国家标准精甲醇产品。合成气制备工序为前置关键单元,煤制煤气化炉运行温度可达1300~1500℃,操作压力3~8MPa,设备长期处于高温冲刷与介质腐蚀环境,焦炉煤气预处理则要求将硫含量控制在0.1ppm以下,对净化精度要求严苛;甲醇合成工序属于强放热催化反应过程,操作压力5~15MPa、反应温度200~300℃,氢碳比、温度、压力等参数控制精度要求高,是全装置风险最为集中、事故后果最为严重的核心单元;精馏提纯工序采用多塔连续精馏实现甲醇与水、杂醇油等杂质分离,塔器、换热器、机泵类设备数量多,静密封点分布密集,易出现超压、液泛、介质泄漏等异常工况;产品储存输送工序多采用常压或低压储罐储存甲醇,通过管道及装卸设施完成物料输送,静电积聚、挥发性气体聚集、密封点泄漏为主要风险表现形式。

2.2 风险辨识方法与危险有害因素分类

为实现甲醇装置风险全面、精准、无遗漏识别,本文采用HAZOP危险与可操作性分析结合FMEA故障模式与影响分析的组合辨识模式,HAZOP分析面向连续工艺流程,以引导词搭配工艺参数识别系统偏离、诱发原因、事故后果及现有防护措施,FMEA分析面向设备、仪表、阀门、密封结构等关键部件故障模式,实现工艺流程系统风险与单体设备部件风险双重覆盖,同时开展重大危险源判定,保障风险辨识结果科学严谨、贴合生产实际工况。

按照危险来源与作用形式,将甲醇装置危险有害因素划分为两大类:第一类是为物料本身固有的危险特性,甲醇、氢气、一氧化碳、硫化氢等均属于甲类易燃易爆危险化学品,遇到明火、静电、高温表面、摩擦火花等点火能量即可发生燃烧爆炸,一氧化碳与硫化氢可经呼吸道侵入人体造成急性中毒甚至死亡,甲醇可通过皮肤接触、呼吸吸入对人体神经系统及代谢系统产生损害;第二类为工艺与设备相关危险性,包括高温高压引发设备超压破裂、反应热量积聚失控,介质腐蚀、疲劳损伤造成设备管线失效泄漏,仪表失灵、

联锁失效导致关键参数失控,静电、雷击、公用工程中断诱发系统性风险,以及人员误操作、特殊作业不规范带来的人为管理风险,各类风险相互耦合、交叉影响,易形成连锁性安全事故。

3 甲醇装置工艺风险分析与评估

3.1 全流程核心工序风险辨识

甲醇合成工序为全装置风险等级最高单元,反应过程放热量大,对原料气氢碳配比、冷却水量、催化剂活性敏感度高,一旦出现氢碳比失衡、冷却系统故障、催化剂结焦失活等情况,极易造成反应热量无法及时移出,引发合成塔超温超压,导致设备塑性变形、焊缝开裂、密封结构失效;合成系统高压法兰、阀门、管件密封点数量较多,长期在交变工况下运行易出现密封面损伤、垫片老化失效,造成甲醇及合成气持续性泄漏,泄漏气体与空气混合形成爆炸性混合气,在点火源作用下可迅速发生空间爆炸;原料气中硫、氯、砷等微量杂质超标会造成催化剂永久性中毒失活,不仅会造成生产运行中断,还可能引发系统压力波动与工况紊乱。

合成气制备、精馏提纯与储存输送工序同样存在不容忽视的系统性风险。合成气制备单元中,煤气化炉炉管与炉壁长期受高温熔渣与高速气流冲刷,易出现壁厚减薄、烧穿、开裂等缺陷,变换与脱碳设备长期接触酸性介质,发生均匀腐蚀与应力腐蚀的概率较高,粗煤气泄漏可同时引发火灾爆炸与人员中毒双重风险;精馏单元回流比、加热蒸汽量、进料流量控制失调易造成塔内液泛、压力骤升,再沸器与冷凝器换热效率下降会导致塔内温度分布失常,加剧设备腐蚀与介质泄漏风险;储存输送单元中,储罐氮封系统失效会造成甲醇挥发性气体在罐顶聚集,形成爆炸性危险环境,输送管线流速控制不当会加剧静电积聚,机泵密封、法兰连接部位为泄漏高发点位,装卸作业操作失误可进一步扩大事故影响范围。

3.2 风险等级评估与重大危险源界定

本文采用风险矩阵法与风险优先数RPN相结合的方式开展风险等级量化评价,风险优先数计算公式为: $RPN = \text{事故发生概率}(O) \times \text{事故严重程度}(S) \times \text{故障检测难度}(D)$,按照RPN数值将风险划分为高、中、低三个等级, $RPN \geq 100$ 为高风险, $50 \leq RPN \leq 99$ 为中风险, $RPN < 50$ 为低风险。经系统性评价,甲醇合成塔超温超压、合成气高压泄漏、催化剂中毒失活、气化炉烧穿、甲醇储罐区泄漏等情景RPN值均处于高风险区间,为装置安全管控核心重点;精馏塔超压、设备管线腐蚀减薄、机泵密封泄漏等归为中风险,一般仪表偏差、轻微结垢堵塞等划分为低风险。依据危险化学品重大危险源辨识标准,结合甲醇装置物料储存量、压力等级及危险特性,对装置重大危险源进行界定与分级:甲醇储罐区、甲醇合成反应系统、合成气储罐区、精馏系统均构成危险化学品重大危险源,其中甲醇合成系统与甲醇储罐区物料储存量大、压力等级高、事故后果极端严重,划定

为一级重大危险源；精馏系统与合成气储罐区风险后果相对可控，划定为二级重大危险源。

4 甲醇装置安全防控措施

4.1 工艺本质安全优化与技术防控措施

本质安全优化是甲醇装置风险源头防控的根本路径，通过工艺方案设计、设备选型、流程简化从根源降低危险物料在线量与失控可能性。工艺设计阶段优先选用等温反应器、高效内冷式合成塔，保障反应热量稳定移出，避免局部超温失控；采用持液量更低的微通道反应器、紧凑型换热设备，减少易燃易爆物料在线滞留量，大幅降低泄漏爆炸事故后果严重程度；优化工艺流程平面布局，减少非必要中间储罐与迂回管线，合理划分生产区、储存区、公用工程区，设置充足安全距离、防火堤与防爆隔离设施，遏制事故多米诺效应蔓延。

关键技术防控举措聚焦过程精准控制与异常工况紧急处置，构建多层次安全防护架构，设备设施层面，对合成塔、气化炉、压缩机、精馏塔等核心设备实施全生命周期检测与完整性管理，定期开展壁厚测量、无损检测、腐蚀监测，选用高强度密封组件与耐腐蚀材质，降低静密封点泄漏概率；安全附件层面，为高压设备规范配备校验合格的安全阀、爆破片、压力表、温度计、紧急切断阀，保障超压泄放与紧急隔离功能稳定可靠；监测监控层面，在泄漏高发区域、储罐区、机泵区设置可燃及有毒气体检测报警器、在线泄漏监测系统、静电接地监测装置，实现风险状态实时感知；自动化控制层面，搭建DCS集中控制系统与ESD紧急停车系统，对温度、压力、流量、液位、氢碳比等关键参数实现实时监控、超限报警与自动连锁保护，在异常工况下自动切断进料、启动紧急冷却与泄压程序，切断事故发展链条。

4.2 安全管理体系完善与应急保障防控措施

系统化安全管理是甲醇装置风险防控长效稳定的重要

支撑，以制度体系、人员能力、过程管控为核心构建全方位管理防控网络。建立健全工艺安全管理体系，完善设备操作规程、安全作业规程、变更管理制度、检维修管理制度、隐患排查治理制度，明确各层级、各岗位安全生产责任，严格落实安全生产责任制；强化从业人员安全技能培训教育，围绕工艺风险、操作要点、联锁逻辑、异常处置、应急逃生等内容开展常态化培训与实操考核，执行关键岗位持证上岗制度，杜绝无证上岗与违章操作；严格特殊作业安全管控，动火、受限空间、高处、吊装、临时用电等作业严格执行作业票审批制度，作业前开展风险识别与安全技术交底，落实气体检测、通风置换、现场监护等防护措施，严防违规作业诱发安全事故；建立常态化风险排查与闭环管理机制，定期开展全装置系统性风险识别与HAZOP复核，对隐患实行台账化管理、限期整改、复查销号，实现风险动态清零。

5 结语

甲醇装置属于典型高温高压、易燃易爆、有毒有害类危险化工装置，风险具备系统性、耦合性、突发性强等特征，主要风险集中于甲醇合成、合成气制备、产品储存输送三大核心单元，甲醇合成系统与甲醇储罐区为一级重大危险源，超温超压、介质泄漏、反应失控、催化剂中毒是最易诱发重特大事故的高风险情景。采用HAZOP与FMEA融合风险分析手段，能够全面识别全流程危险有害因素，结合风险矩阵法与RPN风险优先数开展定量评价，可科学划分风险等级、界定重大危险源，为实施精准化防控提供可靠依据。

参考文献

- [1] 张树才,张艳. 甲醇储罐区安全风险分析与应急处置措施[J]. 安全、健康和环境,2022,22(07):45-48.
- [2] 王建军,李丽. 化工装置安全仪表系统SIL定级与验证方法研究[J]. 自动化仪表,2021,42(08):76-80.
- [3] 吴宗之,多英全. 化工过程安全管理理论与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2021.

Design of Automation System for Water Supply Pump Station and Research on Harmonic Suppression Technology

Zhigang Zhuang

Dunhuang Yuanquan Urban Operation Service Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 736200, China

Abstract

Based on the major livelihood project of the expansion and renovation of the booster pump room at the Shazhou Water Plant in Dunhuang City, this article addresses the pain points of outdated equipment, high energy consumption, and severe data isolation in multiple water sources at the old pump station. The author, as the project technical leader, led the upgrade and renovation of the automation system for the entire plant. This article details how the author designed a redundant control system based on the Siemens S7-1500 series PLC, constructed a fiber optic ring network covering the three plants in Shazhou, Qilizhen, and Shazao Dun, and innovatively introduced active filtering and reactive power compensation technology with a 7% reactance rate into the low-voltage power distribution system, solving the problem of harmonic pollution in the power grid caused by frequency converter group control. Through this technological transformation, a modern management model of "unmanned duty and less personnel on duty" was achieved at the pump station, with an annual comprehensive electricity saving rate of over 15%. This study provides a replicable technical template for the automation upgrade of long-distance water supply pump stations in arid areas of Northwest China.

Keywords

pump station automation; SCADA system; PLC redundant control; harmonic suppression; centralized control of multiple water plants

供水泵站自动化系统设计与谐波治理技术研究

庄志刚

敦煌渊泉城市运营服务有限公司, 中国·甘肃 兰州 736200

摘要

本文基于敦煌市沙州水厂加压泵房扩容改造这一重大民生工程, 针对老泵站设备陈旧、能耗高、多水源地数据孤岛严重等痛点, 由笔者作为项目技术负责人主导了全厂自动化系统的升级改造。本文详细阐述了笔者如何设计基于西门子S7-1500系列PLC的冗余控制系统, 构建覆盖沙州、七里镇、沙枣墩三厂的光纤环网, 并创新性地引入7%电抗率的有源滤波与无功补偿技术, 解决了变频器群控带来的电网谐波污染问题。通过本次技改, 实现了泵站“无人值班、少人值守”的现代化管理模式, 年综合节电率达15%以上。本研究为西北干旱地区长距离供水泵站的自动化升级提供了可复制的技术范本。

关键词

泵站自动化; SCADA系统; PLC冗余控制; 谐波治理; 多水厂集控

1 引言

项目概况与技术背景介绍, 【项目拔高】本项目为“敦煌市沙州水厂加压泵房扩容改造项目”, 旨在将供水能力提升至6.0万m³/d, 以满足敦煌市区日益增长的用水需求。工程涉及沙州水厂、七里镇水厂及沙枣墩水厂三个独立站点的控制系统整合。【个人角色】笔者作为项目技术总工, 负责从技术方案制定、设备选型、PLC程序编写到系统联调的全过程。面对老站(敦煌自来水公司老系统)存在的数据

无法远传、阀门故障频发、电能质量差等历史遗留问题, 笔者提出了“顶层规划、分步实施、数据融合”的技改思路。

2 自动化监控系统的架构设计

根据《敦煌自来水送水泵自动控制系统方案》及招标文件要求, 笔者设计了分层分布式的计算机监控系统, 实现“站控层、现地层、调度层”三级控制。

2.1 硬件系统配置

笔者选用德国西门子工业级产品构建核心控制层, PLC控制站采用S7-1500H系列PLC(CPU1517H), 配置双机热备, 确保在单机故障时切换时间小于300ms, 保障供水连续性。网络架构利用单模铠装光缆(总长12.2km)构建千兆工业以太环网, 连接三个水厂及后备水源地, 解决数据孤岛问题。

【作者简介】庄志刚(1977-), 男, 本科, 工程师, 从事高、低压配电及其自动化控制及地表、地下水生产工艺技术在相关领域的应用研究与工程实践。

现场仪表选配超声波液位计、电磁流量计（精度 0.5 级）及压力变送器，实现全站数据的精准采集。

2.2 软件与功能实现

组态软件采用 WINCC 7.5 开发上位机监控界面，实现了工艺流程图的动态显示、实时/历史趋势分析、报警记录及报表打印功能。WEB 发布笔者主导开发了基于 B/S 架构的 WEB 发布系统，使得沙枣墩水厂中控室及授权手机端可实时浏览全网数据，实现了“集中调度、分散控制”。

3 关键技术难点与解决方案

3.1 低压配电系统的谐波治理技术（技术创新点）

在对扩容改造新增多个大功率水泵变频器造成电网侧谐波严重超标以及对原有的电容器、精密仪表的安全构成威胁的问题进行深入剖析的基础上，项目组采用先进的检测技术和创新的技术手段成功攻克了该工程难题。其一利用电能质量分析仪对整个系统进行全面细致的测试检查，发现 5 次和 7 次谐波电流过大是引起原电容补偿柜反复损坏的主要原因；根据以上诊断结论，放弃了传统的单纯电容补偿方法，在低压配电系统的设计上增加了新的调谐滤波补偿设备，其主要特点是使用了 7% 电抗率智能电抗器。这种设备的工作原理就是串联这个智能电抗器使滤波补偿支路的谐振频率降到 204Hz 以下，这样就巧妙地避开了有害的 5 次（250Hz）、7 次（350Hz）谐波频率范围，从根本上杜绝了谐振引起的谐波放大的危险。采取这项技术改造之后，获得了良好的治理成效：系统的电网谐波电压总畸变率（THDu）由改造前的 8% 下降到 2% 以内，而且系统的功率因数一直保持在 0.95 以上良好状态。这不仅彻底消除谐波造成的频繁跳闸及电器发热现象的发生，也为整个供水自动化系统的持续可靠平稳运行奠定了基础。^[1]

3.2 多水厂数据融合与冗余通讯

对于多水厂的数据整合以及冗余通讯中存在的关键技术问题，进行了详细的探讨并提出了相应的对策措施。本工程的设计集中控制系统的主要难点在于把位于不同地点的沙州水厂、七里镇水厂和沙枣墩水厂各自独立的自动化系统进行集成与数据整合。由于各水厂原有的控制系统的结构和技术标准不一致导致了严重“信息孤岛”。^[2]

因此，作为项目的技术负责人，制定了为达到高可靠性通信以及深度集成控制的目标措施。从网络结构上采用了一种新的方式即以沙枣墩水厂为中心节点，“中心交换机+光纤环网”的结构形式，在调度中心所在的沙枣墩水厂安装了高性能的工业核心交换机，在各个分厂安装可以进行网络管理的三层工业交换机，使用单模铠装光缆形成一个物理冗余的千兆工业以太环网把三个厂区以及备用取水泵站的控制系统串联在一起构成一个整体的一个快速通讯平台。这样就消除了信息孤岛问题，也为实现集中监视、数据共享打下了坚实的硬件基础。

在可靠性保障以及安全防护方面，本项目采用多层冗余及隔离措施。一方面，在硬件上部署工业级防火墙、安全隔离网闸（网闸），从物理上将生产控制网络与办公信息网络进行有效分离，防止来自办公网络的恶意攻击对生产控制系统造成影响；另一方面，考虑到光缆易受到外界因素损坏而产生断开的情况，在环型结构基础上增加链路冗余设计并配合使用快速环网自愈协议，在出现单条光纤线路由于施工或者自然灾害等原因发生断裂后，可以在几毫秒之内发现异常并且立即切换至备用路径以恢复连接从而保证了控制命令下发、数据回传等关键生产业务连续性和平稳运行。通过以上“融合架构”、“冗余通讯”的技术手段的应用使得该系统克服了兼容性和远距离传输的问题同时形成了一个具有较高灵活性、安全性以及稳定性的多个水厂联合监控平台的基础框架，为今后实现“集中调度、分散控制”的管理模式提供了重要的技术支持。^[3]

3.3 阀门与水泵的联动控制优化

在多水厂集控模式下供水泵站自动化系统中，阀门与水泵连锁控制优化是保证设备运行安全、提高供水可靠性的关键所在。为了解决以往控制方式下容易发生的阀门气蚀破坏以及管网水锤等现象，在此对算法改进及参数整定进行研究，建立了精确配合的连锁控制系统。

在防气蚀控制方面，对 PLC 控制程序进行了改进，在其中加入了变频器频率以及阀门开度之间的连锁关系。传统的单独控制方式中，由于误判工况，阀门经常会在很小的开启程度下长时间工作，水流经过狭窄的阀口时流速增大、压力下降，如果压力小于该温度下的饱和蒸汽压，则会发生水的汽化产生气泡，在水流到高压区域的时候气泡破裂，所产生的微射流及冲击波会对阀门内部造成不断的冲刷，最后导致阀门关闭不严甚至损坏。而连锁算法通过对变频器输出频率和阀门开度进行实时采集并建立起二者之间的联系：当发现阀门开度小于设定值时就启动频率调节功能，使电机减速从而减少供水量来防止小开度下高速水流冲击；如果阀门开度一直处在危险范围内就会报警提醒操作人员及时处理问题。这样就从根本上解决了引起气蚀的水流动力学条件，经过实践应用证明可以将阀门气蚀破坏率降低 90% 以上，大大提高了阀门的服务年限。

从恒压供水控制方面来看，通过对 PID 控制器进行改进，达到了对管网压力精确稳定的控制效果。传统的 PID 由于其自身的参数匹配程度不够容易造成压力超调或者滞后的情况，在管网压力变化幅度较大情况下，水流速度的变化会导致水锤效应的发生，瞬时的压力值可以达到正常工作压力的 3~5 倍左右，给管道、水泵等带来极大的危害。采取的是离线设定加上在线自动调节的方式来进行 PID 整定，在此基础上使用 Ziegler-Nichols 方法得到初始的 PID 参数后再加上模糊控制逻辑来根据管网的压力偏差以及偏差的变化率实时地改变比例系数、积分时间和微分时间使得系统能

能够在各种不同的供水需求下都具有良好的响应能力。经过现场调试发现优化之后的 PID 控制系统可以使管网的压力波动控制在 $\pm 0.02\text{MPa}$ 范围内,有效的防止了由于压力突变而引起的流速变化从而避免了水锤现象的发生。而且稳定的压力环境也减少了管道接口处漏水的风险,使管网漏损降低大约 15%,提高了整个供水系统的综合效率。

通过防气蚀联锁算法和改进 PID 控制相结合,提出的阀门及水泵联动控制系统不仅克服了以往控制方式下存在的设备安全问题而且使供水过程更加精确平稳地进行下去,从而为多个水厂集中监控模式下的供水泵房自动控制系统提供了一种有效的解决方案。

4 施工管理与质量控制

在敦煌地区特有的自然环境影响下,通信工程施工管理和质量控制存在较大的昼夜温差以及较多的风沙天气等不利因素,在此情况下需要有相应对策和技术手段来应对以保证通讯设备的良好工作状态。

在电缆铺设方面,根据敦煌当地情况,在施工过程中选择铠装单模光缆用于通讯传输。这种光缆在外层增加了金属铠装保护层,有很好的抗拉强度、抗压能力,在施工时可以避免受到外力破坏,也能防止老鼠、白蚁等啃咬造成损害,解决室外以及地下的线路易损的问题。为了提高光缆的安全等级,在敷设时使用穿钢管理地敷设的方式。选用的钢管是三布四油防腐钢管,防腐层是由油漆和玻璃纤维布复合而成,有较好的电气绝缘性、防水性和防生物侵蚀的能力,适合敦煌地区的土质条件,可以阻止钢管被腐蚀导致防护效果下降。埋深方面严格按照大于 1.2m 的要求进行控制,这样做的目的是考虑到敦煌地区存在冻土层的情况,以免光缆受土壤冻结膨胀的影响而损坏,同时也减少了风沙或者人为因素对光缆造成的威胁。施工时遵守电缆敷设的相关规定,在开挖沟槽之后,先铺一层 10cm 厚的细砂垫层,起到对光缆的缓冲作用,以防尖锐物体划伤光缆表皮;放线的时候要保证从线盘上慢慢放出,不能出现拧花、打结的现象,在拐弯的地方弯曲半径不得小于光缆直径的 15 倍,以免内部纤

芯断裂;光缆铺设完毕后,先回填 20cm 厚的细砂,然后铺上红砖或者混凝土板,最后再进行土方回填,形成多重保护措施。

防雷接地系统是保证敦煌地区通信设备在雷雨天气正常运行的基础,在施工时采取严密的等电位连接措施,把通信机房内所有设备机壳、金属线槽、门窗、电缆屏蔽层等金属物用铜带与铺设在活动地板下的网格状地网相连通,构成法拉第笼式接地系统。这样可以降低回路电阻,防止由于设备之间电位差而产生的触电事故的发生以及减少电磁干扰对精密电子产品的影响。为了保证防雷接地的效果,在施工中采用符合国家标准要求的接地材料并按规范进行安装,接地电阻实测值小于 1Ω ,远远好于国家规定的要求为 4Ω 。说明该接地装置有较好的泄流能力,在雷雨季节能快速把雷电流导入大地,避免雷电流损坏通信设备。另外,在施工期间定期测量接地电阻值以确保接地系统的可靠性,在敦煌地区多风沙的情况下也制定了定期维护方案,及时清除接地体周围的沙尘,以免积沙影响到接地效果。

5 结论与展望

本次技改工程由笔者主导,历时 60 天,圆满完成了沙州水厂加压泵房的扩容改造任务。工程成效可靠性提升,通过 PLC 冗余和光纤环网建设,系统可用性达到 99.9%。能效提升,通过变频调速与谐波治理,水泵机组综合效率提高,年节电量预估达 50 万度。管理升级,实现了三个水厂“一张图”管理,大幅降低了人工运维成本。随着智慧水务的发展,建议下一步引入数字孪生技术,建立泵站水力模型,实现从“自动化”向“智能化”的跨越。

参考文献

- [1] 刘宇,姜雪,薛伟强. 泵站工程中技术供水系统的应用分析 [J]. 冶金设备管理与维修, 2025, 43 (04): 51-53+57.
- [2] 厉泽辉. 供水泵站自动化监控系统设计探讨 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (08): 126-128+132.
- [3] 曹扬. 离心泵供水泵站自动化系统变频运行工况研究 [J]. 山西水利科技, 2022, (04): 31-35.

Study on Catalytic Synthesis Process of Asymmetric Small Molecules

Yunbo Li

Qilu Pharmaceutical Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Asymmetric small molecule catalysis serves as a core technology for green chiral synthesis, offering advantages such as mild reaction conditions, easy catalyst modification, and absence of metal residues. It has become a widely adopted technique for preparing chiral compounds in pharmaceutical and fine chemical industries. It is imperative to establish clear methodologies for designing and optimizing asymmetric small molecule catalysts, as well as to refine catalytic synthesis reaction systems. Key strategies include rigorous screening of reaction solvent systems, precise control of core process parameters, auxiliary regulation of reaction additives, and multi-parameter synergistic control of reaction systems. These approaches will enable better utilization of asymmetric small molecule catalytic synthesis advantages, facilitating the development of chiral synthesis processes toward higher efficiency, environmental sustainability, and cost-effectiveness.

Keywords

asymmetric small molecules; catalytic synthesis process; technological application; production quality

不对称小分子催化合成工艺研究

李运波

齐鲁制药有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

不对称小分子催化是绿色手性合成的核心技术, 具备反应条件温和、催化剂易修饰、无金属残留等相应优势, 是现阶段医药、精细化工领域制备手性化合物的常用技术。明确不对称小分子催化剂设计与优化方法、完善不对称小分子催化合成反应体系是十分必要的。需要紧抓反应溶剂体系筛选、核心反应工艺参数调控、反应添加剂的辅助调控及反应体系多参数协同调控等关键要点明确技术应用路径, 更好地发挥不对称小分子催化合成工艺优势, 助力手性合成工艺向高效、绿色、低成本发展。

关键词

不对称小分子; 催化合成工艺; 技术应用; 生产质量

1 引言

手性化合物作为生物医药、农药、功能材料等相应领域应用较为广泛的化合物, 其立体纯度对于产品性能和安全性能会起到至关重要的影响。传统手性合成方法存在金属污染、原子经济性差、步骤繁琐等相应问题, 无法满足生产需求。不对称小分子催化以手性有机小分子为催化剂, 可通过分子间弱相互作用实现立体选择性控制, 规避金属催化的残留问题, 是近年来的研究重点。在不对称小分子催化合成工艺应用期间明确不对称小分子催化剂的设计与优化方法是十分重要的一环。

2 不对称小分子催化剂的设计与优化

2.1 催化剂核心结构设计

不对称小分子催化剂的结构设计可以更好地保障催化性能, 需要从手性诱导、活性调控、稳定性等核心出发进行催化剂分析。可先建立手性活性中心, 借助天然手性骨架或人工合成手性模块, 确保手性诱导专一性, 为后续的反应奠定良好的基础和保障。在此之后需对催化活性位点布局作出科学调整, 匹配酸碱、氢键、共价键等活化位点, 实现底物高效活化, 提高反应速率, 同时需要做好分子空间位阻和电子效应的调控, 生成专属催化微环境, 有效遏制副反应发生。在催化剂设计中除了需要考量后续的反应需求及催化性能要求以外, 还需从溶解性、耐受力和合成成本等多个维度来进行设计优化并适当简化制备流程, 避免因催化剂结构过于复杂导致后续应用受到较大的限制和影响^[1]。

【作者简介】李运波(1982-), 男, 中国河北邯郸人, 硕士, 工程师, 从事药物合成研究。

2.2 催化剂结构改性方向及性能影响

就现阶段来看原始小分子催化剂存在催化效率低、选择性不足、稳定性较差等相应问题，这时则可通过定向结构改性实现性能升级。改性中可紧抓骨架衍生、双功能化构建和官能团修饰三大关键方向展开分析。在官能团修饰中可引入不同极性、位阻的取代基，调节催化剂电子云分布与空间

结构，提高催化活性和立体选择性。骨架衍生中可调整手性骨架的环结构拓宽催化剂的底物适用范围。在双功能化改性中可通过活化位点的科学设置活化底物并与手性控制协同作用，提高催化效果。需注意不同改性方式对小分子催化剂性能的影响是相对较大的，如表1所示，需根据实际情况来科学选择改进方式并作出优化和调整。

表1：不同改性方式对小分子催化剂性能的影响

改性方式	催化活性提升度	立体选择性变化	底物适用范围	结构稳定性
官能团修饰	明显提升	显著优化	小幅拓宽	保持稳定
骨架衍生化	中度提升	有效优化	大幅拓宽	略有提升
双功能化构建	大幅提升	极致优化	中度拓宽	明显提升

2.3 催化剂性能筛选与评价

在催化剂性能筛选的过程中需要以催化活性、立体选择性、稳定性、经济性为重要评价指标，通过多重措施确定最优选择。催化活性将会直接影响反应转换率，即催化剂在使用以后的底物活化能力。立体选择性以产物对应选择性为判断依据，可以衡量手性诱导效果^[2]。稳定性主要分析的是催化剂在反应条件下的结构完整性和重复使用性能，经济性主要考察的是催化剂在制作、合成及回收上所需要消耗的成本。在催化剂性能筛选与评价的过程中需要摒弃单一性能突出、成本过高、适用范围相对较窄的催化剂，引入适配工业化生产、综合性能优异的催化剂，为后续各项工作的开展奠定良好的基础和保障。

3 不对称小分子催化合成反应体系调控

3.1 反应溶剂体系筛选

溶剂是不对称小分子催化合成反应体系中十分重要的板块，对于催化剂的溶解性、活化效率和反应立体选择性都会产生较大的影响和冲击。在反应溶剂体系筛选和分析的过程中应始终遵循匹配催化机制、兼顾反应效率的原则，结合溶剂极性、质子性差异分析不同类型溶剂是否适配于催化体

系。可以将溶剂划分为质子性溶剂、极性非质子溶剂和非极性溶剂三种类别，这其中质子性溶剂可能会和催化剂形成氢键竞争，适配的催化体系相对较少，以酸性催化体系为主。极性非质子溶剂可以有效溶解催化剂和底物，减少副反应，是小分子催化反应的优先选项。非极性溶剂的传质效率较高，但是极性底物溶解能力相对偏弱，可以应用于非均相催化反应。在溶剂筛选期间应根据催化剂类型、底物性质来对溶剂类型进行科学选择，避免影响后续催化过程^[3]。

3.2 核心反应工艺参数调控

在不对称小分子催化合成工艺分析中明确核心工艺参数是确保催化反应效率和产物质量的重要前提，主要核心工艺参数包含反应温度、时间、底物浓度等。这其中反应温度对于反应速率和立体选择性影响较大，温度较低可以提高选择性，但是反应速率会受到影响，温度较高则相反，需找到最佳温度区间。反应时间对于底物转化程度影响较大，时间过短很容易会出现转换不完全等相应问题，而时间过长则可能会出现产物消旋化。底物浓度影响的则是反应传质效率，浓度过低会导致反应缓慢，浓度过高则可能会影响催化剂活性。需要根据不同催化体系来对催化参数和反应参数作出精准调控，确定合理区间，如表2所示。

表2：不对称小分子催化反应参数调控范围

工艺参数	调控合理区间	核心调控目标	禁忌控制范围
反应温度	-20°C ~ 80°C	平衡反应速率与立体选择性	> 80°C (催化剂失活)
反应时间	2h~72h	保证底物完全转化	> 72h (产物消旋/分解)
底物浓度	0.1mol/L~2.0mol/L	提升传质效率与反应收率	> 2.0mol/L (副反应激增)

3.3 反应添加剂的辅助调控作用

反应添加剂是不对称小分子催化合成工艺体系中十分重要的辅助性调控试剂，可以有效提高催化反应效率及选择性。常见的反应添加剂包含酸碱调节剂、稳定剂、相转移助剂等不同类别，其中酸碱调节剂可以调整反应体系的pH值，能够满足催化剂活性位点的活化需求，规避酸碱环境失衡导致的催化剂失活问题。稳定剂可稳定反应中间体，抑制副反应发生，减少产物消旋化。相转移助剂可以应用于非均相反应体系，为相间传质及反应速率提升提供更多帮助。在添加

剂使用期间需要做好用量控制，否则则可能会影响催化过程的正常开展，降低反应立体选择性，可通过对照实验的设置精准确定添加量^[4]。

3.4 反应体系多参数协同调控

在不对称小分子催化合成的过程中单一参数优化往往无法达成预期的目标，这时则需要通过多参数协同调整达到更好的催化合成效果。例如可紧抓溶剂、温度、浓度、添加剂进行参数分析，通过实验分析确定如何提高反应转化率、产物选择性、工艺稳定性，确定参数的最优配比，有效避免

出现拮抗作用,达到协同增效的效果。通过协同调控形成稳定、高效、可控的催化反应体系,避免单一条件调控导致反应波动过大、选择性不稳定等相应问题的出现。以脯氨酸衍生物催化丙酮与苯甲醛的不对称 Aldol 反应为例,该反应是合成手性 β -羟基酮的核心反应。实验中选用 (S)-四氢吡咯并 [2,1-b] 恶唑烷-5-酮作为催化剂,溶剂筛选为二氯甲烷/水(体积比 9:1)的混合体系,既保证催化剂溶解性又避免质子溶剂对氢键作用的干扰;反应温度控制在 0°C,平衡立体选择性与反应速率;添加 10mol% 的三乙胺作为酸碱调节剂,稳定催化剂活性位点;底物浓度设定为 0.5mol/L,避免传质效率不足。最终反应收率达 88%,产物对映体过量值 (ee) 高达 96%,相较于单一参数调控,多参数协同优化使选择性提升 15%,收率提高 20%。

4 不对称小分子催化合成工艺优化策略

4.1 绿色化工工艺优化

就现阶段来看推动合成工艺绿色化、低碳化发展俨然已经成为了合成工艺发展的主流方向,尤其是在“既要金山银山,又要绿水青山”、双碳目标、生态文明建设等多重背景下降低不对称小分子催化合成所需要消耗的能源和对环境的污染与影响成为了社会关注的焦点问题。为此,推动不对称小分子催化合成工艺绿色化建设是十分必要的,可以从原料、溶剂、反应过程、产物分离等各个环节进行深入分析确定绿色化工工艺优化方向及落实路径,提高催化合成效果,同时降低催化合成成本和能耗。例如在原料选择中可引入可再生手性原料、绿色低毒溶剂,替代传统挥发性有毒溶剂,进而规避不对称小分子催化合成过程中所带来的环境污染问题^[9]。再例如可通过反应步骤及流程的优化提高原子经济性,减少副产物排放。还可通过产物分离工艺优化借助简单萃取、重结晶等多种方式有效规避分离流程带来的能耗和试剂浪费,达到全程绿色化建设的目标,为化工行业的可持续发展及经济发展与环境保护矛盾的协调打下坚实基础。

4.2 高效化工工艺优化

高效化工工艺可以进一步提高催化效率,缩短反应周期,降低生产成本,这也是不对称小分子催化合成工艺优化和调整的重点与核心。可通过催化剂负载化、反应连续化推动不对称小分子催化合成工艺升级,将小分子催化剂负载于固相载体,实现催化剂的快速分离和循环使用,有效降低催化剂

成本。而想要达成这一目标可借助超声、微波等相应物理辅助手段增强反应传质传热,提高反应速率,并通过推进间歇反应向连续流反应转换达到自动化生产、连续化生产的目标,大幅提高生产效率,降低生产过程中的人工成本和能耗成本^[6]。

4.3 工业适配性优化

实验室工艺向工业化转化是工艺发展的必然趋势,在这个过程中需要解决的问题则是放大效应、工艺稳定性问题和成本控制问题。可通过工艺参数容错范围的提升降低原料波动、设备运行状态等多重因素对反应所产生的影响,确保工艺放大稳定性。同时在操作流程上也需做出进一步调节,确保工艺流程转型后可借助常规反应设备来进行生产,降低对特殊精密仪器的依赖性。还可通过催化剂回收、溶剂循环工艺的优化和调整有效降低单位产品的生产成本,提高工艺经济效益,为实验室技术向工业化生产平稳过渡打下坚实基础。

5 结语

就现阶段来看不对称小分子催化合成工艺仍旧存在较多的技术瓶颈,例如催化剂催化活性较低、底物适用范围较窄、反应体系调控机制需要进一步完善、工艺放大效应显著等等。而在未来不对称小分子催化合成工艺会向着标准化、绿色化、智能化、产业化发展,还可借助人工智能技术、大数据技术等相应现代化技术实现自动化生产使该项技术可以更好地适配于不同行业的发展需求。

参考文献

- [1] 王宇,罗倩婷,何华锋,等. 有机小分子催化不对称 Aldol 反应的研究进展 [J]. 化学试剂, 2026, 48 (02): 18-29.
- [2] 李本鹏. 不对称催化疏手性化合物的合成及其生物活性研究 [D]. 贵州大学, 2025.
- [3] 杨懿涵,宋仕昱,郑娜,等. 基于脯氨酸催化不对称羟醛缩合反应的综合性实验设计 [J]. 化工时刊, 2025, 39 (05): 81-87.
- [4] 周玉,马明,陈月琴,等. 手性的控制: 不对称催化研究进展 [J]. 广州化工, 2025, 53 (19): 17-20.
- [5] 李晖,殷亮. 手性有机硒化合物的催化不对称合成研究进展 [J]. 化学学报, 2025, 83 (10): 1237-1251.
- [6] 刘丹. 可见光-有机小分子协同催化的不对称自由基反应研究进展 [J]. 大学化学, 2025, 40 (06): 118-128.

Analysis on Key Construction Technologies and Precautions for Urban Gas Pipelines

Yun Feng

Yinchuan Yueneng Natural Gas Ningxia, Yinchuan, Ningxia, 756001, China

Abstract

To improve the safe operation performance of urban gas pipelines, it is necessary to strengthen technical control over key construction links, closely identify various potential safety hazards during the whole construction process, and comprehensively optimize the construction quality of gas pipelines. This study focuses on the key points of urban gas pipeline construction technology, deeply analyzes the matters requiring key attention in the construction process, and provides a practical reference for relevant practitioners in the industry.

Keywords

urban gas pipeline; construction technology; key points for attention

城镇燃气管道施工技术要点及注意事项分析

冯赞

银川阅能天然气, 中国·宁夏 银川 756001

摘要

为增强城镇燃气管道的安全运用性能, 需强化关键施工环节的技术管控, 全程密切排查施工过程中的各类安全隐患, 全面优化燃气管道施工质量。本研究聚焦城镇燃气管道施工技术的核心要点, 深入剖析施工过程中需重点关注的各类事项, 为行业相关从业人员提供切实可行的参考依据。

关键词

城市燃气管道; 施工工艺; 关注要点

1 引言

随着我国经济社会与科学技术的迅猛发展, 城市化建设进程持续加快, 城市现代化发展伴随着天然气需求量的大幅攀升, 推动城市区域内燃气管道铺设范围不断扩大。但城市化建设的提速也使得我国土地资源愈发紧张, 给城镇燃气管道施工带来了诸多现实考验。因此, 在城镇燃气管道施工实施过程中, 需细致考量各项技术细节, 强化施工安全管控研究, 确保施工质量与安全。

2 城镇燃气工程的施工特性

(1) 环境条件制约性强。燃气工程以户外施工为主, 对施工环境有着严苛要求, 一旦遭遇降雨、大风等恶劣天气, 需立即停止施工, 待环境条件符合施工标准后方可恢复作业。因此, 燃气工程施工前期, 需全面梳理各类环境影响因素, 制定科学合理、灵活适配的施工计划, 最大限度降低自然条件对施工进度和质量的不利影响。

(2) 对周边环境及居民生活存在干扰。一方面, 受工期约束, 施工企业需合理加快施工进度, 在此过程中难免产生施工噪声, 对周边居民日常生活造成影响; 另一方面, 管道地下挖掘作业会不可避免地破坏地面环境, 影响地面交通的正常通行。因此, 管道施工需在保障施工质量的前提下, 加快施工进度、缩短施工周期, 并做好施工后的地面恢复与环境整治工作。

(3) 施工需多方协同协助。由于管道施工涉及范围广泛, 涵盖多个施工环节, 部分施工场景需政府相关部门出面协调解决场地、交通等相关问题。此外, 还需做好施工现场周边人员的疏导工作, 规范设置安全防护措施, 防范各类施工安全风险, 保障施工有序推进。

3 城镇燃气管道安装及施工技术影响因素

3.1 人的因素

城镇燃气管道安装作业环境复杂艰险、风险等级较高, 对施工质量的要求极为严格, 任何细微的安装瑕疵都可能引发燃气泄漏事故, 进而造成环境污染, 威胁周边居民生命财产安全。这就要求施工人员必须具备扎实的专业技能, 熟练掌握相关施工技术规范 and 操作流程。但目前我国燃气管道安

【作者简介】冯赞(1988-), 男, 回族, 中国宁夏固原人, 本科, 工程师, 从事机械设计工程(燃气设计)研究。

装领域普遍存在专业技术人员匮乏的问题，部分施工人员对施工技术的掌握不够全面系统，难以满足施工质量要求。同时，施工人员队伍呈现老龄化趋势，年轻施工人员吃苦耐劳意识不足，整体专业素养偏低，且多数未接受过系统的职业发展规划与技能培训，导致部分高风险施工环节安全事故频发，严重威胁工程施工质量。

3.2 环境挑战

城镇燃气管道施工环境复杂多变，易受恶劣天气及各类施工条件的制约。气候条件是影响施工的重要因素，高温、暴雨、严寒等恶劣天气不仅会影响施工效率，甚至可能导致施工暂停，严重延误工程进度。此外，施工区域的交通状况、工程地质条件、水文地理特征等环境因素，也会对工程建设造成诸多阻碍，需提前开展详尽的环境调查，全面掌握各类环境参数，为施工顺利推进提供保障。

3.3 材料与设备因素

燃气具有易燃、易爆、腐蚀性强的特性，因此在城镇燃气管道安装过程中，需对管道材料进行特殊处理，并严格开展安全性能检测，确保材料符合燃气输送要求。但目前国内多数施工单位在管道安装设备的日常维护保养方面存在明显不足，部分设备存在超量、超龄使用的现象，设备老化、故障频发，亟需及时维修或更新，否则会影响施工效率，甚至引发施工质量与安全问题。

3.4 综合考量

城镇燃气管道安装施工是一项复杂且艰巨的系统性工程，需结合城市建设整体规划进行科学设计，全面预判施工过程中可能出现的各类问题，并提前制定针对性应对措施。此外，还需加强与政府、公路管理部门、执法部门等相关机构的沟通协调，完善各项审批手续，确保施工合法合规推进。

3.5 管理体制不足

当前城镇燃气管道施工管理工作存在精细化程度不足、管理流程不规范、审批手续不标准等问题，这些问题不仅降低了施工管理效率，还增加了安全事故发生的风险，且一旦发生安全事故，造成的人员伤亡和财产损失难以弥补。

4 案例分析

本项目聚焦某城市市区及其周边地区的燃气管道建设，计划铺设新建燃气管道总长度约 50 公里，同步建设相应的调压站 1 座、储气柜 1 座。该工程涵盖内容广泛，包括燃气管道铺设、调压站构建、储气柜安装、阀门井施工、管道防腐处理、管道压力测试及整个系统调试等，预计项目建设周期为 12 个月。

4.1 施工准备

1. 工程管理架构：结合项目规模与施工特性，设立项目经理部，明确各职能部门的具体工作职责和工作流程，在此基础上，制定详细、可操作的施工组织计划，明确施工进度、质量标准和安全要求。2. 人力资源调配：组建专业施工

团队，团队成员涵盖管道安装、电气工程、防腐处理、系统调试等多个领域的专业技术人员，对所有团队成员开展岗前专业技能培训和安全培训，确保其具备相应的作业能力。3. 材料与设备采购：根据项目实际施工需求，严格筛选供应商，选购符合国家质量标准的燃气管材、阀门组件、连接法兰、防腐材料及各类施工工具、设备，确保材料和设备适配工程需求。技术文档审核：全面搜集《施工图纸》及相关技术文件，组织专业技术人员开展审核工作，重点核查施工方案的可行性和技术参数的合理性，确保施工方案科学可行。

4.2 管道铺设

施工技术：本项目采用地下管道铺设方式，通过挖掘机进行沟槽挖掘作业，挖掘完成后由人工对沟槽底部进行细致清理，确保沟槽底部平整、无杂物。管道连接主要采用焊接和法兰连接两种方式，关键技术要点如下：铺设前需采用专业测量设备对沟槽位置进行精确测量和标线，确保管道走向符合设计要求；管道焊接采用双面焊接工艺，严格控制焊接参数，保障焊接接头的强度和密封性；所有管道连接点均需进行密封处理，防范燃气泄漏问题。质量控制方面，重点监控管道坡度、各管段间距、埋设深度等关键参数，定期开展质量巡查，及时整改施工过程中出现的质量问题，确保管道铺设质量符合相关标准。

4.3 调压站建设

本项目采用现浇混凝土结构与预制构件相结合的施工方式，同步完成室内设备的安装调试工作。关键技术环节包括：混凝土浇筑过程中采用分层浇筑、分层振捣的方式，确保混凝土填充密实、无空隙；预制构件定位需精准无误，构件之间的连接需牢固可靠，严格按照设计要求进行固定；室内设备配置需严格遵循施工图纸，确保设备安装位置和安装精度符合标准。质量保证措施方面，安排专业人员全程监督混凝土浇筑过程，严格控制混凝土配合比和浇筑质量；对预制构件的装配精度进行严格检测，不符合要求的及时整改；对已安装完成的室内设备进行全面细致的检查和调试，确保设备运行正常。

4.4 储气柜安装

施工方法：采用预制式储气柜，现场组装安装。技术关键点在于，预制储气柜进场前需实施严格的质量检验，核查构件尺寸、材质等关键参数，确保其符合设计要求，保障现场组装精度；安装过程中，需确保储气柜与基座之间的连接稳固可靠，防范后期运行过程中出现松动、泄漏等问题。质量控制方面，重点加强对预制储气柜质量的监管，严格控制现场组装作业的精度要求，组装完成后对储气柜进行全面细致的密封性检测和性能测试，确保其符合使用要求。

5 城镇燃气管道施工技术注意事项

5.1 完善管道施工前期准备

燃气管道施工前期准备工作是保障整个安装工程质量

的关键，必须全面、细致落实各项准备措施。首先，开展全面的技术交底工作，明确施工过程中的技术关键点、施工难点及注意事项，通过强化专业培训，让施工团队成员熟练掌握操作规范和流程，减少因人为操作失误导致的质量问题。其次，编制详细的施工计划，明确各施工环节的作业标准和进度要求，为现场施工提供清晰指引，有效管控项目整体进展。此外，正式动工前，需彻底开展安全隐患排查工作，全面评估并妥善处理施工区域的各类潜在风险因素；对施工所用材料和机械设备进行全面检测，重点排查故障隐患，及时做好维修保养工作，保障工程顺利推进。最后，建立健全应急响应机制，制定完善的应急预案，定期开展应急演练，提升施工人员应对突发状况的处置能力，降低施工风险，保障项目安全。

5.2 明确管道安装施工难点

城镇燃气管道安装过程中存在诸多技术难点，需重点把控、精准突破。首先是管段制造环节，需严格遵循施工规范明确制造标准和关键要点，管段制造完成后，必须经过严格的质量检验，检验合格后方可进入后续安装环节，严禁不合格管段投入使用。其次是焊接工艺应用环节，焊接质量直接关系到燃气管道的密封性和安全性，是防范燃气泄漏的关键，需根据管道材质和施工要求，精准控制焊接电流、电压、焊接速度等参数，确保焊接接头质量合格。最后是管道防火措施落实环节，鉴于燃气易燃、易爆的特性，需结合管道材料、施工环境等因素，制定针对性的防火防护方案，加强施工现场防火管理，配备充足的消防器材，保障管道系统长期稳定运行。

5.3 绿色环保施工技术

在城镇燃气管道工程施工过程中，既要保障施工质量，也要践行绿色环保理念，科学选取施工材料。为响应节能环保要求，应优先选用绿色环保、经济实用的施工材料，既能有效减少对环境的污染，又能提升资金利用效率。此外，采用先进的绿色施工技术，可进一步优化施工流程、提升施工效率，减少施工过程中的能耗和污染物排放，避免因施工不当导致的返工或后期维修问题，全面满足城镇燃气管道建设的各项标准 [3]。

5.4 强化施工人员技术培训

施工团队的专业技能和综合素质是保障管道工程质量的关键因素。因此，在项目启动之初，需对所有施工人员开展全面的专业技能培训和安全教育培训，不仅要强化施工人员的安全意识和责任意识，还要使其熟练掌握最新的施工技术、操作规范和先进施工设备的使用方法。在实际施工过程中，要求每位施工人员严格遵循操作规程开展作业，加强自我检查和相互监督，及时发现并整改施工过程中的质量问题，确保各施工环节质量符合预期标准。

6 城镇燃气管道施工的注意事项

6.1 城镇燃气管道施工过程中存在的常见问题

当前，城镇燃气管道建设过程中仍存在诸多质量问题，严重影响施工质量及后期运行安全。部分施工单位在铺设燃气管道时，未严格遵循国家相关标准和施工规范，导致施工质量未达到要求，给管道后期运行埋下严重安全隐患。此外，在燃气管道、焊接材料、防腐材料选用过程中，缺乏必要的质量检验环节；部分施工单位对阀门等关键部件未进行预压试验，或试验后未张贴合格标识，导致后续施工人员无法准确判断部件是否符合施工需求。在管道搬运过程中，部分施工人员采用直接吊装管口的方式，易造成管口变形，影响管道正常使用；施工过程中，若未彻底清理管道内部的杂物（如焊缝边缘的铁锈、飞溅物、熔渣等），也会对管道密封性和使用寿命造成不利影响。

6.2 加强燃气管道施工质量控制，提升施工安全水平

城镇燃气管道施工专业性极强，对施工质量的要求极为严格。施工单位必须严格遵守国家相关法律法规和施工规范，建立健全质量与安全否决机制，对施工过程中的质量和安全问题实行“零容忍”。燃气管道建设不能单纯依赖监理单位的监督，建设单位也需提高重视程度，设立专门的质量监管部门，与监理单位协同配合，开展全方位、全过程的质量监督工作，防范暴力施工、偷工减料等不良行为。同时，详细记录施工过程中的管道材料用量、管件规格、土方量、穿越长度等关键信息，确保工程结算时能够准确反映实际施工工作量，避免出现虚报、误报现象。

7 结语

综上所述，燃气属于高危易燃易爆物质，一旦发生泄漏或操作不当，极易引发安全事故，威胁人民群众生命财产安全和公共安全。因此，在城镇燃气管道施工过程中，必须精准把握施工技术要点，全面掌握各项注意事项，科学规划施工工序，严格按照相关标准和要求开展施工。

参考文献

- [1] 何锡俊.城镇燃气管道施工过程中的质量控制研究[J].中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(17): 15-16.
- [2] 杨红梅.城镇燃气工程管道安装及其相关施工分析[J].佳木斯职业学院学报, 2018(07): 490+493.
- [3] 杨进彩.城镇燃气管道施工技术重点及其注意事项[J].建筑工程技术与设计, 2018, 000(016):510.
- [4] 赵政泽.城镇燃气管道施工技术重点及注意事项分析[J].低碳世界, 2024, 14(3):136-138.
- [5] 安喆.城镇燃气管道施工技术重点与注意事项[J].山西化工, 2021, 41(6):86-88.

Selection of Gasifiers and Comprehensive Utilization of Energy for LNG Terminals Along the Yangtze River

Jingya Liu

Jiangsu Huaxin Yongnan Energy Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

As the global energy structure transitions towards low carbon, liquefied natural gas (LNG) is becoming increasingly important as a clean energy source. LNG receiving terminals along the Yangtze River face unique challenges in vaporizer selection and thermal energy utilization due to restrictions imposed by Yangtze River ecological protection policies and water intake conditions. This paper takes a project at an LNG receiving terminal downstream of the Yangtze River as a case study, systematically analyzing the technical characteristics and application scenarios of open rack vaporizers (ORVs), intermediate medium vaporizers (IFVs), and submerged combustion vaporizers (SCVs). It proposes a comprehensive solution based on the utilization of waste heat from steel mill circulating water. The study shows that domestically produced IFV equipment has significant advantages in operating costs, footprint, and environmental adaptability. Combined with steel mill circulating water (temperature $\geq 30^{\circ}\text{C}$, flow rate 5620t/h), it can achieve combined heat and power supply, with an annual energy saving rate of 18.5% and a reduction in carbon emissions of 23,000 tons. This research provides an integrated technical and economic solution for the sustainable design of LNG receiving terminals along the Yangtze River.

Keywords

liquefied natural gas (LNG); intermediate medium vaporizer (IFV); circulating water utilization; combined heat and power supply; low carbon economy

沿江 LNG 接收站气化器选型及能量综合利用

刘靖亚

江苏华鑫永南能源科技有限公司, 中国·江苏 苏州 215000

摘要

随着全球能源结构向低碳化转型,液化天然气(LNG)作为清洁能源的重要性日益凸显。沿江LNG接收站因受限于长江生态保护政策与取水条件,其气化器选型及热能综合利用面临独特挑战。本文以长江下游某LNG接收站项目为例,系统分析了开架式气化器(ORV)、中介质式气化器(IFV)和浸没燃烧式气化器(SCV)的技术特性与适用场景,提出基于炼钢厂循环水余热利用的综合方案。研究表明:国产IFV设备在运行成本、占地面积及环境适应性方面优势显著,结合钢厂循环水(温度 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、流量5620t/h)可实现冷热联供,年节能率达18.5%,减少碳排放2.3万吨。本研究为沿江LNG接收站的可持续设计提供了技术经济一体化解决方案。

关键词

液化天然气(LNG); 中介质式气化器(IFV); 循环水利用; 冷热联供; 低碳经济

1 引言

1.1 研究背景

全球LNG贸易量从2010年的2.8亿吨增长至2022年的4.1亿吨,中国作为最大进口国占比达21%^[1]。沿江地区因工业密集、能源需求旺盛,成为LNG内河运输的核心市场。然而,长江流域严格的生态保护政策(如《长江保护法》)对取排水提出严苛要求,传统海水气化方案难以实施,亟需探索新型能源耦合模式。

1.2 国内外研究进展

国际层面,日本川崎重工开发的IFV技术已实现余热发电与LNG冷能回收的集成应用^[2];国内学者顾安忠等提出利用钢厂循环水作为热媒的可行性^[3],但缺乏实际工程验证。

本文通过长江下游某LNG接收站项目为例(以下简称该项目),本着节能、降低气化操作费用的原则,结合该项目与周边炼钢厂循环水的有效利用,就SCV、ORV和IFV气化器从型式对比、气化器配置方案、国产化应用、长江取水政策、热源循环水利用等方面进一步分析。探讨该项目炼钢厂循环水 and 气化器的综合利用方案是否可行。

【作者简介】刘靖亚(1985-),男,中国吉林白山人,工程师,从事项目管理研究。

2 气化器类型与性能分析

LNG 接收站常用的气化器型式主要包括：开架式气化器（Open Rack Vaporizer，简称 ORV）、中介介质式气化器（Intermediate Fluid Vaporizer，简称 IFV）和浸没燃烧式气化器（Submerged Combustion Vaporizer，简称 SCV）三种气化器。

2.1 技术原理

(1) ORV：通过海水与 LNG 直接换热，效率受水温限制（ $\geq 5.5^{\circ}\text{C}$ ）；

(2) IFV：采用丙烷等中介介质间接换热，适应低温热源（ $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ）；

(3) SCV：燃烧天然气加热 LNG，适用于极端工况但运行成本高。

2.2 关键参数对比

根据使用的频率，LNG 气化器可以分为基本负荷型和应急调峰型^[3]。基本负荷型使用频率高、气化量大，选型时主要考虑的是设备的运行成本。应急调峰型是为了补充用气高峰时供气量的不足或应急需要，其工作特点是使用率低、工作时间是随机性的，具有紧急启动的功能，选型时要求设备投资尽可能低，而对运行费用则不太苛求。

表 1 接收站 LNG 气化器关键参数对比

气化器类型	浸没燃烧式气化器 (SCV)	开架式气化器 (ORV)	中介介质式气化器 (IFV)
热效率 (%)	90-100	70-75	85-90
单位能 (kw/t)	45-50	15-18	12-14
占地面积 (m ²)	3000	8000	5000
设备投入 (万元)	1500	1500	2000
使用频率	调峰型	基本负荷型	基本负荷型

表 2 气化器能力

	AAV 气化器	AAV 加热器	SCV	中压 IFV	高压 IFV
一阶段 (60 万吨)	71.5t/h	71.5t/h	71.5t/h	/	/
二阶段 (240 万吨)	/	/	/	150t/h	206t/h

3.2.2 应用案例

IFV 国产化近几年国内发展较快，均已有实际应用业绩。如中石化天津 LNG 接收站二期项目 IFV 气化器全部选择国产，说明其一期 IFV 气化器运行良好，国产化 IFV 气化器技术已经成熟可靠。中海油江苏滨海 LNG 接收站 ORV 气化器全部选择国产，均在制造中，国产气化器设备发展势头良好。

该项目一阶段拟设置 16 台 AAV 空温气化器和 1 台 SCV 浸没燃烧式气化器；二阶段拟设置 1 台中压 IFV 和 2 台高压 IFV 中间流体式气化器。IFV 气化器可选择国产设备以降低设备投资。

3 气化器选型及 IFV 国产化现状

3.1 气化器选型

因该项目 LNG 接收站属于应急调峰型。一阶段气化外输量仅为 60 万吨/年，故设置 16 台空温式气化器以及 1 台浸没燃烧式气化器即可，以较低的成本满足一阶段气化需求；

二阶段气化外输量为 240 万吨/年，使用频率属于基本负荷型；考虑到空温式气化器气化能力较小，若要匹配该气化外输量占地过大；开架式气化器占地较广，配套设施投资也大，ORV 用水更要重新收集增压才能返回，而浸没燃烧式气化器后期运行成本较高；IFV 气化器在各种环境条件下都能保持良好的性能。综合比较后，该项目选择运行成本低、占地小、投资适中的 IFV 中介介质式气化器。

3.2 国产 IFV 气化器现状

3.2.1 技术突破

国内厂商（如江苏中圣、航天晨光）通过引进消化再创新，实现 IFV 核心部件国产化：

(1) 高效换热管：采用波纹管设计，传热系数提升 30%；

(2) 智能控制系统：基于 PLC 的温差自适应调节，能耗降低 12%。

4 沿江 LNG 接收站的资源约束与政策挑战

4.1 长江取水限制

根据国务院长江水利委员会实施取水许可制度细则（长水资管【2020】650 号）要求：长江取水 1 万方/天以内当地政府审批；超过 1 万方/天需在长江委审批。

4.2 生态环保约束

根据环保方面的设计要求，冷排水温度低于 5 $^{\circ}\text{C}$ 可能破坏水生生态。气化 562t/h 的 LNG 大约需要 22480t/h 长江水，水量消耗大，远超许可阈值，气化后冷排水不允许直接排入长江。

4.3 替代方案的必要性

该项目虽毗邻长江沿线，有着丰富的长江水资源，但是

若就近从长江取水需要单独设置工艺取水平台，需采用泵增压后输送至后方库区，沿途管线长，所需管径大，整条陆域管廊带钢结构建设投资达3.2亿元，且环保风险高。转向钢厂循环水利用可规避政策限制，降低前期投资35%。

5 炼钢厂循环水综合利用方案

该项目现场临近炼钢厂，炼钢厂作为工业领域的重要组成部分，在生产过程中会产生大量的废水。这些废水如果直接排放，不仅会对环境造成严重的污染，还会浪费宝贵的水资源。

所以，为了实现该项目与炼钢厂循环水热源综合利用，经过实地调研，根据炼钢厂和接收站各自的生产/检修周期安排、供热/供冷量等情况，确定炼钢厂热循环水供应与接收站冷量供应的匹配性，再根据匹配性情况确定是否需要增设其它供能或储能设施；

5.1 热源匹配性分析

5.1.1 循环水温

根据调研，钢厂电力分厂全年凝汽器出水水温平均值在37.5℃，冬季最低30℃，夏季水温最高在45℃（这个受负荷和环境温度影响会有偏差），钢厂循环水温度完全能够满足IFV气化器热源介质温度要求。

5.1.2 循环水量

根据设计计算，该项目采用IFV气化器可允许换热温差为20℃，气化用水约5620t/h，钢厂发电四个项目循环水量均能满足IFV气化器流量要求，具体见下表：

表3 钢厂循环水量一览表

序号	发电项目	设计循环水量 (t/h)	实际循环水量 (t/h)
1	一、二期煤气发电	12000	10000
2	三、四期煤气发电	12000	10000
3	五期煤气发电	6000	5000
4	80MW 煤气发电	12500	12000

5.1.3 循环水质

参照GB/T50050-2017《工业循环冷却水处理设计规范》，该项目中间介质式气化器所采用钢厂循环水作为热媒，水质条件较优。其IFV热源水质要求和钢厂循环水实际水质对比见表3。

5.2 钢厂循环水管网建设

另外，该项目钢厂煤气发电项目距离LNG接收站仅为11.5公里，需要埋地建设11.5公里双管线（供/回水），采用高密度聚乙烯（HDPE）材料，防腐寿命达30年，总投资1.8亿元。

表4 循环水质对比一览表

序号	检测项目	IFV 热源水质指标	钢厂循环水水质（实际）
1	重金属离子	无汞离子铜离子含量 < 10*10 ⁻⁹	一般不含汞离子铜离子含量 < 50*10 ⁻⁹
2	固体悬浮物	< 80mg/L (10.4NTU)	< 10mg/L(1.3NTU)
3	PH 值	6.8-9.5	8-9
4	温度	> 25℃	> 30℃

6 经济效益与碳减排

6.1 成本对比

表5 取水投资表对比

项目名称	设备初期投资(亿元)	年运行维护成本(万元)
长江取水方案	3.2	1200
钢厂循环水方案	1.8	680

6.2 环境效益

(1) 节能：年节约电能 1.2×10^7 kWh，折标煤3960吨；

(2) 减排：减少CO₂排放2.3万吨/年，相当于种植12.5万棵树。

7 结论与建议

IFV国产化技术成熟且在沿江LNG接收站中综合性能最优，钢厂循环水方案可降低46%投资并实现冷热资源高效利用，该模式推广后预计全国沿江LNG项目年减排CO₂潜力可达50万吨；未来还将进一步探索LNG冷能的多元化利用路径，推动冷能空分、冷能发电、冷库及制冰等应用落地，同时尝试将LNG冷能与数据中心相结合，挖掘冷能利用的更多价值。

参考文献

- [1] IEA. LNG Market Report 2023[R]. Paris: IEA Publications, 2023.
- [2] 川崎重工. 高效LNG气化器技术白皮书[R]. 东京: 川崎重工, 2021.
- [3] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

Research and Development of Key Technologies for Hemicellulose Ultra-Concentration and Exploration of Pathways to Improve Separation Efficiency

Jie Liu Yungang Luo Hongwei Qiao Yiling Chen Yufeng Xu

Korla Zhongtai Textile Technology Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract

Hemicellulose is widely used in fields such as bio-based materials, food additives, pharmaceutical intermediates, and new energy materials. However, current industrial extraction and separation technologies for hemicellulose generally suffer from low extraction solution concentration, complex impurity components, and poor separation efficiency, severely impacting subsequent processing and production stages. Based on this consideration, this paper focuses on the key technology of hemicellulose extreme concentration, systematically elaborating on three major technical aspects: composite membrane separation and concentration, vacuum membrane distillation concentration, and alcohol precipitation-membrane separation synergistic concentration. Targeted pathways for improving hemicellulose separation efficiency are proposed, aiming to provide theoretical insights and practical references for the industrial production of hemicellulose.

Keywords

hemicellulose; extreme concentration; key technologies; separation efficiency; career path

半纤维素极限浓缩关键技术研发与分离效率提升路径探索

刘洁 罗云刚 乔宏威 陈依玲 徐玉凤

库尔勒中泰纺织科技有限公司, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要

半纤维素在生物基材料、食品添加剂、医药中间体、新能源材料等领域得到广泛应用,但是,就当前的半纤维素工业化提取与分离技术来看,普遍存在提取液浓度低、杂质组分复杂、分离效率不佳的问题,使得半纤维素的后续加工生产环节受到严重影响。基于对这一方面的考虑,本文将半纤维素极限浓缩关键技术作为研究对象,就复合膜分离浓缩、真空膜蒸馏浓缩、醇沉-膜分离协同浓缩三大关键技术要点予以系统阐述,针对性提出半纤维素分离效率提升路径,旨在为半纤维素工业化生产提供理论借鉴与实践参考。

关键词

半纤维素; 极限浓缩; 关键技术; 分离效率; 提升路径

1 引言

在半纤维素提取、浓缩、分离环节,浓缩效果差、分离效率低的难题始终影响着提取液的高值化利用,限制了半纤维下游产业的规模化发展,同时,也浪费了大量的生物质资源。为突破半纤维素极限浓缩的技术壁垒,提升分离效率,需要从原料预处理、多元技术协同、操作参数精准调控、设备结构优化改进等多个层面着手,以探索出一条经济性与实用性兼备的分离效率提升路径。

2 半纤维素极限浓缩关键技术研发

2.1 复合膜分离浓缩技术

复合膜分离浓缩技术的基本原理是借助于多层不对称膜结构设计与功能层界面改性,实现半纤维素大分子与溶剂、小分子杂质的高效分离。与单一膜材料相比,复合膜具有高截留、低通量的特点,快速透过水分、单糖、有机酸、无机盐等小分子杂质。并且,采用复合膜进行分离浓缩作业,全过程均可以在常温、低压条件下进行,无需相变、无需添加化学分离试剂,最大程度保留半纤维素的天然分子结构、聚合度与生物活性。并且该技术操作简便、设备占地面积小、自动化水平高。

比如利用耐碱纳滤-超滤复合膜对竹材半纤维素水解液进行浓缩操作时,主要采用聚砜超滤支撑层与聚酰胺纳滤功

【作者简介】刘洁(1989-),男,中国甘肃白银人,本科,工程师,从事人造纤维素纤维研究。

能层复合制备,通过界面聚合工艺调控功能层孔径,将截留分子量精准设定为 800Da,适配竹材半纤维素分子量分布区间,工艺操作压力稳定控制在 2.5MPa,料液温度恒定维持在 45℃,料液流速调控为 2.0m/s 以缓解浓差极化现象。在连续稳态运行工况下,该复合膜体系对半纤维素的截留率高达 98.6%,初始膜通量稳定在 18.2L/(m²·h),连续运行 12h 后膜通量衰减率仅 6.3%,经过多级浓缩处理后,半纤维素质量浓度能够从初始的 12.5g/L 提升至 68.3g/L,浓缩倍数达 5.47 倍,计算公式如下:

$$N = \frac{C_1}{C_0} \quad (1)$$

公式(1)中,N为浓缩倍数,C₁为浓缩后半纤维素质量浓度(g/L),C₀为初始半纤维素质量浓度(g/L),利用该公式能够精准量化浓缩效果,为工艺参数优化、浓缩效率评估提供重要的参考依据。

表 1 真空膜蒸馏浓缩技术浓缩玉米芯半纤维素料液的技术参数

技术参数	数值	参数说明
进料温度	65℃	半纤维素料液进入膜组件的控制温度
料液流速	1.5L/min	膜组件进料侧料液循环流动速率
膜下游真空度	0.095MPa	膜组件渗透侧真空压力控制值
初始膜通量	11.9kg/(m ² ·h)	浓缩启动阶段单位膜面积水分通量
8h 稳定膜通量	9.5kg/(m ² ·h)	连续运行 8h 后稳态单位膜面积水分通量
半纤维素截留率	99.99%	体系对半纤维素大分子的截留效率
极限浓缩倍数	5.9 倍	浓缩前后半纤维素质量浓度比值
能耗降低率	40% 以上	相比传统蒸发浓缩的能耗优化幅度

2.3 醇沉 - 膜分离协同浓缩技术

醇沉-膜分离协同浓缩技术有效解决了单一醇沉工艺溶剂消耗量大、固液分离困难、溶剂回收成本高、浓缩效率有限等问题,具有浓缩周期短、极限浓缩倍数高、浓缩过程污染小的特点。该技术以食品级乙醇作为沉淀剂,调控料液体系的乙醇浓度、pH 值、温度与搅拌参数,能够使溶解状态的半纤维素分子快速聚集、析出形成沉淀,实现半纤维素的初步高效富集,大幅提升料液中半纤维素固含量,降低后续膜分离工段的处理负荷。之后,再通过膜分离技术对醇沉混合悬浊液进行精准固液分离,高效截留半纤维素沉淀,并快速透过乙醇溶剂与小分子水溶性杂质,使半纤维素精浓缩与溶剂同步回收。

比如利用该技术浓缩杨木半纤维素提取液,首先向杨木半纤维素提取液中匀速添加无水乙醇,调控体系乙醇体积分数至 75%,调节体系 pH 值至 7.0,在 25℃ 恒温条件下以 60r/min 转速搅拌 30min,促进半纤维素分子充分聚集沉淀,初步富集处理后,半纤维素固相含量从初始 3.1% 提升至 32.6%。然后,将醇沉后得到的半纤维素悬浊液,送入截留分子量 1000Da 的耐醇纳滤膜系统,在操作压力 1.8MPa、料液温度 30℃、错流流速 1.2m/s 的工艺条件下,进行固液

2.2 真空膜蒸馏浓缩技术

该技术突破了传统热浓缩、单一膜分离的工艺局限,操作温度仅需要 60-70℃,远低于传统蒸发浓缩温度,属于低温浓缩工艺,可彻底避免高温环境下半纤维素多糖链断裂、降解、变色等问题,最大程度保留半纤维素的分子完整性与功能活性。并且,在真空负压环境下,能够大幅降低水的沸点,提升水分传质驱动力,减少热量损耗,其疏水膜可以完全截留半纤维素大分子,与单一膜分离技术相比,浓缩极限优势表现得尤为明显^[1]。

比如利用真空膜蒸馏浓缩技术对玉米芯半纤维素料液进行浓缩处理,其浓缩结果表明:该技术对半纤维素的截留率高达 99.99%,几乎实现半纤维素的零流失。经过浓缩处理后,料液中半纤维素质量浓度从初始 15.2g/L 提升至 89.7g/L,并且料液中糠醛、乙酸等发酵抑制物浓度从 0.46g/L 降至 0.23g/L,具体的技术参数如表 1 所示。

分离与乙醇溶剂回收。该纳滤膜系统对醇沉后半纤维素沉淀的截留率达 99.2%,乙醇溶剂透过率达 89.5%,半纤维素最终质量浓度达到 102.3g/L,总浓缩倍数达 8.18 倍,远高于单一膜分离或单一醇沉工艺。另外,该技术不仅实现半纤维素的超高倍数浓缩,还能够同步深度脱除料液中的水溶性多糖、无机盐、色素等杂质,浓缩后半纤维素产物纯度超过 92%,完全满足食品、医药、功能材料等高端领域的应用要求^[2]。

3 半纤维素分离效率提升路径

3.1 原料定向预处理改性

导致半纤维素分离效率低的主要原因是由于农林生物质原料天然的细胞壁致密结构所致,

针对这一问题可以通过对原料的定向预处理改性,提高分离效率。这一措施的关键是高效破坏生物质细胞壁的致密超分子结构,选择性断裂半纤维素与木质素之间的酯键、醚键等共价键连接,增大原料孔隙率与比表面积,从源头降低后续分离过程的传质阻力与解离难度。以玉米芯原料的定向预处理改性为例,主要利用蒸汽爆破-酸碱协同改性方式,通过瞬间泄压产生的机械剪切力与热化学作用,初步破坏玉

米芯细胞壁致密结构。这一过程的蒸汽爆破压力为 1.8MPa、高温保压时间 90s。这道工序结束后,采用浓度 0.5% 的稀硫酸溶液,在 80℃ 恒温条件下辅助处理 60min,选择性断裂半纤维素与木质素之间的连接键,再通过 1% 氢氧化钠溶液常温中和调节料液 pH 值,完成全流程定向预处理改性。经过预处理之后的玉米芯原料细胞壁结晶度从原始的 62.3% 大幅降至 31.7%,原料内部孔隙率提升 4.2 倍,半纤维素与木质素的结合键断裂率高达 89.6%,半纤维素的溶出活性显著提升,为验证分离效率的提升效果,可以利用下面的方式计算原料细胞壁解离效率:

$$\eta = \left(1 - \frac{X_1}{X_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

公式(2)中, η 为原料细胞壁解离效率, X_1 为预处理后原料结晶度, X_0 为原料原始结晶度,利用该公式能够有效验证经过改性处理后半纤维素分离效率的提升效果。该技术可以根据不同生物质原料的组分特性、细胞壁结构差异,灵活调整预处理强度与作用方式,适配玉米芯、秸秆、竹材、木材等各类农林原料的预处理需求。另外,在预处理过程中,通过控制温度、压力、试剂浓度、处理时间等关键参数,精

准平衡细胞壁解构效果与半纤维素保护力度,杜绝过度预处理引发的半纤维素降解、杂质溶出增多、试剂残留等问题,使得化学试剂用量大幅降低,废水排放大幅减少,其环保性与经济性进一步凸显^[3]。

3.2 分离体系耦合强化

该处理方法整合两种及以上不同分离工艺,构建协同互补的新型分离体系,可强化半纤维素与木质素、纤维素及小分子杂质的分离效果,改善浓差极化、膜污染、分离滞后等问题。以超声辅助-膜分离耦合技术分离竹材半纤维素为例,在操作压力 2.2MPa、料液温度 40℃、错流流速 1.5m/s 的条件下,超声能破坏胶体团聚与悬浮杂质,缓解浓差极化,加快半纤维素传质,显著提升分离效率。除该技术外,微波辅助萃取、酶解-膜分离、萃取-吸附等耦合体系,可依据料液特性与工况灵活选用。这类耦合工艺既能提高半纤维素收率、分离速率与产物纯度,深度脱除杂质,减轻后续处理压力、降低生产成本;同时设备模块化、可控性好,便于工业化放大与自动化生产,有效破解了半纤维素传统分离效率低、能耗高、污染突出的行业难题,也是目前生物质精炼领域的主流技术方向。数据如表 2 所示。

表 2 超声辅助-膜分离耦合强化体系的分离效率提升数据

分离工艺	膜通量 (L/(m ² ·h))	半纤维素分离收 (%)	木质素脱除率 (%)	分离周期 (h)	膜污染衰减率 (%)
单一膜分离	13.9	67.2	61.5	8.0	12.4
超声-膜分离耦合	21.3	82.6	79.2	4.8	5.8
工业化提升幅度	+52.7%	+15.4%	+17.7%	-40%	-6.6%

3.3 精准调控分离过程

针对半纤维素浓缩过程中的提取液分离过程,可以基于半纤维素分离热力学、动力学机理进行精准调控,建立分离参数与分离效率、产物品质的量化关联模型,实现对分离全流程关键参数的实时监测、精准调控与动态优化,最大化匹配半纤维素溶出、传质、截留、纯化的最优工艺条件,以减少非目标副反应与半纤维素无效损失,保障分离过程始终处于高效、稳定、可控的最优运行状态。比如对采用膜分离技术的过程参数进行调控时,可以基于响应面法与正交试验设计,系统分析料液 pH 值、分离温度、进料流速、操作压力、浓缩比等关键参数对分离效率的交互影响规律,建立半纤维素分离效率多参数响应优化模型,最终确定最优精准调控工艺条件与参数,其中:料液 pH 值 8.5、分离温度 42℃、进料流速 1.8m/s、操作压力 2.0MPa、浓缩比 5:1。经过精准调控处理,半纤维素与膜表面的静电排斥作用达到最优状态,能够有效避免半纤维素在膜表面的吸附损失,并且分离效率、产物品质与工艺经济性均实现同步优化^[4]。

从上面列举的例子可以看出:针对各项分离工艺参数进行实时动态调整,能够持续维持高效分离状态。这一过程无需人工反复试错,便可以快速锁定最优参数区间,大幅缩短工艺调试周期,降低人为操作误差带来的效率损失。与此同时,该提升路径无需对现有生产设备进行大规模改造,仅

通过工艺参数的精准优化即可实现分离效率的显著提升,具有投资成本低、操作简便、适配性强、见效快等优势,这就给降本增效目标的实现创造了有利条件。

4 结语

通过对复合膜分离浓缩、真空膜蒸馏浓缩、醇沉-膜分离协同浓缩三大关键技术基本原理及应用优势的分析,能够发现半纤维素极限浓缩已经逐步形成一个科学、高效、完整、成熟的技术体系,浓缩效果显著提升。而在分离效率提升方面,通过原料定向预处理改性、分离体系耦合强化、精准调控分离过程,极大强化了半纤维素分离技术的高效性、经济性与环保性,这就为半纤维素的规模化、工业化生产与应用提供了强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈志文,巨朝阳,余梦婷,等.木质纤维素生物质转化分子模拟研究进展[J].化工生产与技术,2025,31(06):22-29+8-9.
- [2] 杨威,袁然,李蒙.华中地区南荻生物质品质性状分析与半纤维素糖化研究[J].湖南农业科学,2025,(11):37-42.
- [3] 冯万里,曾新堂,贾梓裕,等.大豆皮半纤维素的提取工艺优化及其酯化改性研究[J].粮食与油脂,2025,38(10):16-23.
- [4] 林政明,杜桂涛,余晗,等.半纤维素基高内相Pickering乳液的制备与应用[J].林产化学与工业,2026,46(01):45-55.

Research on the Continuous Improvement Mechanism of Work Safety Standardization in Chemical Enterprises Based on PDCA Cycle

Lei Sun

Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, Qinghai, 816000, China

Abstract

Chemical enterprises face a common problem in their safety production standardization construction: “well-established systems but weak improvement.” The failure of continuous improvement mechanisms is the core bottleneck restricting the enhancement of safety management levels. This paper introduces the PDCA cycle theory and constructs a continuous improvement mechanism for safety production standardization in chemical enterprises based on the PDCA cycle. It systematically elaborates the closed-loop logic of standardization operation and iterative upgrade from four stages: Plan (P), Do (D), Check (C), and Act (A). Combined with the latest implemented policies and standards such as GB 45673-2025, three practical pathways are proposed: leadership-driven, digital empowerment, and deep integration of the dual prevention mechanism. The research shows that embedding the PDCA cycle into the entire standardization process can effectively solve the problem of insufficient driving force for continuous improvement, promoting the transformation of enterprise safety management from formal compliance to intrinsic safety.

Keywords

PDCA cycle; chemical enterprises; safety production standardization; continuous improvement; dual prevention mechanism

基于 PDCA 循环的化工企业安全生产标准化持续改进机制研究

孙磊

青海盐湖工业股份有限公司, 中国·青海 格尔木 816000

摘要

化工企业安全生产标准化建设在实践中普遍存在“体系健全但改进乏力”的问题,持续改进机制失效是制约安全管理水平提升的核心瓶颈。本文引入PDCA循环理论,构建了基于PDCA的化工企业安全生产标准化持续改进机制,从策划(P)、实施(D)、检查(C)、改进(A)四个阶段系统阐述了标准化运行与迭代升级的闭环逻辑。结合最新实施的GB 45673-2025等政策标准,提出了领导驱动、数字化赋能及双重预防机制深度融合三条实践路径。研究表明,将PDCA循环嵌入标准化全过程,能够有效破解持续改进动力不足的困境,推动企业安全管理从形式合规向本质安全转型。

关键词

PDCA循环; 化工企业; 安全生产标准化; 持续改进; 双重预防机制

1 绪论

化工行业因其生产工艺复杂、物料易燃易爆、装置高温高压等固有特点,长期面临严峻的安全生产挑战。当前,化工企业安全生产标准化建设已取得阶段性进展,但实践中仍普遍存在“体系健全却效果不彰”的现象——制度文件完备但运行流于形式,持续改进机制失效,难以实现安全管理水平的实质性跃升。这一困境的根源在于:标准化体系虽然提供了结构框架,却缺乏推动其动态优化的内生动力。因此,

将PDCA循环理论深度嵌入安全生产标准化运行全过程,构建持续改进的闭环机制,成为破解这一困境的关键路径。

2 理论逻辑与政策背景

2.1 PDCA循环与持续改进的理论逻辑

PDCA循环(Plan-Do-Check-Act)由戴明提出,是质量管理与持续改进的核心方法论,包含策划、实施、检查、改进四个依次递进又循环往复的阶段。安全生产标准化的本质是一种体系化、动态化的管理过程,其运行模式与PDCA循环具有高度契合性——标准化体系的搭建、运行、考评与提升,天然对应PDCA的四个阶段。然而,传统PDCA在安全生产领域的应用仍面临“持续改进失效”的突出问题,

【作者简介】孙磊(1988-),中国甘肃民勤人,本科,助理工程师,从事钾肥生产领域的安全方面研究。

即 P → D → C → A 循环在完成一轮后往往停滞，缺乏自我迭代的内在驱动力。LS-PDCA 模式在传统 PDCA 基础上引入领导驱动（Leadership）和体系支撑（Support），为破解这一困境提供了新的理论视角。传统 PDCA 与 LS-PDCA 模式的对比如表 2-1 所示。

表 2-1 传统 PDCA 与 LS-PDCA 模式对比表

对比维度	传统 PDCA 模式	LS-PDCA 模式
循环驱动者	制度流程自发运行	领导层战略驱动
改进持续性	易在一轮循环后停滞	形成自我迭代能力
资源保障	缺乏主动配置	领导层直接支持
典型问题	“体系健全但改进失效”	持续改进有效落地

2.2 政策背景与标准化发展的新态势

近年来，化工安全生产标准化建设进入政策密集出台期，呈现三大新态势。一是标准体系整合升级。强制性国家标准《危险化学品企业安全生产标准化通用规范》（GB 45673-2025）于 2025 年 11 月起实施，整合了 7 项行业标准，从安全领导力、设备完整性、变更管理等 14 个方面提出管理要求，并明确要求企业“按照 PDCA 模式持续改进”。二是治理模式转型深化。应急管理部 2025 年工作部署聚焦“一防四提升”主线，推进双重预防机制数字化应用和安全治理模式向事前预防转型。三是技术创新驱动变革。“工业互联网+危化安全生产”建设规范系列标准和安全生产数字化管理国标的发布，为标准化持续改进注入了数字化、智能化的技术动能。

3 基于 PDCA 的持续改进机制构建

3.1 P 阶段（策划）：标准化目标设定与风险辨识

持续改进的起点在于科学策划。化工企业应以 GB 45673-2025 的 14 项管理要素为框架，结合自身工艺特点和风险特征，制定安全生产标准化改进目标。策划阶段的核心工作包括：基于双重预防机制开展系统性风险辨识与评估，确定风险分级管控清单；对照新标准要求识别管理短板，如设备完整性管理不足、变更管理流程缺失等；设定量化的阶段改进目标，并分解至各部门责任清单。此外，高危细分领域的安全风险专项治理要求也应纳入策划范围，确保改进目标与最新政策导向同频。

3.2 D 阶段（实施）：标准化要素落地与过程执行

实施阶段是将策划转化为行动的关键环节。企业应围绕 GB 45673-2025 的 14 个管理要素逐项推进标准化建设：一是落实安全生产责任制，构建主要负责人、技术负责人、操作负责人的责任链条，尤其要强化重大危险源安全包保责任体系的落地执行；二是实施设备全生命周期管理，从设备选型、安装、运行到检维修各环节实现标准化管控；三是规范特殊作业管理，严格执行动火、受限空间等特殊作业审批流程，应用移动视频监控等技术手段实现作业全过程可视化管理。实施过程中需注重“三层运行”机制——管理层推进、

执行层落实、监督层检查，避免标准化要求悬空。

3.3 C 阶段（检查）：标准化运行评估与绩效测量

检查阶段承担着发现偏差、识别改进空间的功能。标准化运行评估可从两个维度展开：一是企业内部自评，依据 GB 45673-2025 的要素要求，采用量化打分方式定期评估各要素达标程度；二是依托双重预防机制数字化系统，通过系统自动抓取隐患整改率、风险预警响应率等关键绩效指标，实现运行状态的可视化监测与动态评价。评估过程应聚焦标准化体系运行中的薄弱环节，如制度落地偏差、风险管控漏洞、应急响应滞后等问题，为后续改进提供精准靶向。

3.4 A 阶段（改进）：问题整改与标准化体系迭代

改进是 PDCA 循环实现持续提升的归宿。在评估结果基础上，企业应建立“发现—分析—整改—验证”的隐患整改闭环机制，确保每项问题均得到根本性解决。同时，将评估中暴露的共性问题 and 深层次矛盾纳入标准化体系的修订优化中，推动管理体系迭代升级。企业基于评估结果开展 PDCA 循环改进，能够针对性优化管理流程并更新风险数据库，推动企业从形式合规向本质安全转型，并建立动态适应能力。PDCA 各阶段核心任务与标准化要素的对应关系见表 3-1。

表 3-1 PDCA 各阶段核心任务与标准化要素对照表

PDCA 阶段	核心工作内容	对应的标准化要素 (GB45673-2025)
P (策划)	风险辨识、目标设定、改进计划	风险管理、目标与计划、变更管理
D (实施)	责任制落实、设备管理、特殊作业管控	安全责任制、设备完整性、作业安全
C (检查)	自评打分、绩效监测、隐患分析	绩效测量与监测、内部审计
A (改进)	隐患整改、体系迭代、标准化升级	持续改进、管理评审

3.5 PDCA 循环持续改进机制总体流程图

为直观展示 PDCA 循环与安全生产标准化持续改进机制的运行逻辑，图 3-1 给出了该机制的总体流程。

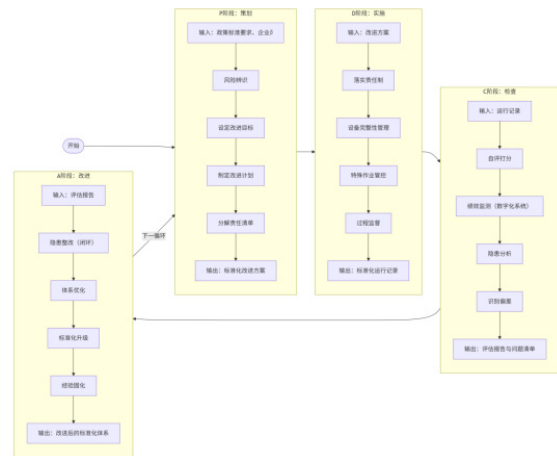


图 3-1 PDCA 循环持续改进机制总体流程图

4 持续改进的实践路径

4.1 领导驱动与组织保障

持续改进机制运行的关键在于领导层的战略引领。LS-PDCA 模式强调领导作用贯穿 PDCA 全过程——领导层不仅是资源提供者，更是改进目标制定者、执行过程推动者和评估结果运用者。具体落实需从三方面着手：一是安全承诺与文化建设，主要负责人公开承诺持续改进目标，并通过带班检查、安全宣讲等方式传递决心，形成自上而下的改进文化；二是资源保障与权责配置，为 PDCA 各阶段匹配数字化系统、人员编制等专项资源，明确各层级职责边界；三是绩效问责，建立由主要负责人牵头的持续改进领导小组，每季度评审运行绩效，将改进成效（如隐患整改率、标准化评分提升幅度）纳入管理人员考核，权重不低于 30%。此外，应设立跨部门协调机构，负责 PDCA 各阶段的横向协同推进。

4.2 数字化赋能与智能化提升

数字化技术为持续改进注入新动能。企业应从三方面构建赋能体系：第一，建设一体化安全风险管控平台，整合重大危险源监控、气体报警、视频分析、人员定位等数据，实现风险动态研判、隐患排查在线管理、特殊作业实时监控等功能集成，为 C 阶段（检查）提供实时数据支撑。第二，推动 PDCA 数据闭环：P 阶段利用历史隐患数据辅助目标设定；D 阶段通过移动终端派发执行标准化任务；C 阶段自动生成绩效仪表盘，展示要素达标率和整改进展；A 阶段利用大数据分析识别共性问题的根因，支撑体系优化。第三，探索智能化预警，对频繁报警、逾期未整改等异常进行分级预警，有条件的企业可试点 AI 视频分析自动识别违规作业，实现从“人防”到“技防”的转变。

4.3 双重预防机制与标准化深度融合

双重预防机制聚焦风险辨识与隐患治理的动态过程，安全生产标准化侧重于管理体系的系统构建，二者以 PDCA 循环为纽带实现深度融合。具体路径为：P 阶段以风险辨识评估结果确定标准化改进的重点领域，如根据风险矩阵设置“风险管理”要素的管控指标；D 阶段将风险分级管控要求转化为标准操作规程，对红色风险区域实施提级管理；C 阶段通过双重预防数字化系统实时监测风险管控有效性，自动抓取隐患发现率、风险预警响应率等 KPI 并与自评打分联动；A 阶段将隐患治理中暴露的系统性管理漏洞反馈至标准化体系修订，触发管理制度根本性优化。同时建立风险-标准映射矩阵，将每类风险对应的管控措施与 GB 45673-2025 中的要素条款对应，形成动态更新的“风险驱动式”检查清单。这种深度融合推动标准化建设从“静态达标”转向“动

态优化”。三条实践路径的核心措施与预期效果汇总如表 4-1 所示。

表 4-1 持续改进实践路径措施汇总表

实践路径	核心措施	预期效果
领导驱动与组织保障	安全承诺、资源保障、绩效问责、横向协同	权责明晰、改进文化形成
数字化赋能	一体化平台、PDCA 数据闭环、智能预警	精准识别偏差、技防替代人防
双重预防机制融合	风险辨识驱动目标、分级管控嵌入执行、隐患治理反哺体系、风险-标准映射	静态达标转向动态优化

5 结论与展望

PDCA 循环为化工企业安全生产标准化的持续改进提供了科学的理论框架和操作路径。通过策划—实施—检查—改进四个阶段的系统设计，将领导驱动、数字化赋能和双重预防机制融入标准化运行全过程，能够有效破解当前标准化建设“体系完备但改进乏力”的现实困境，推动企业安全管理从形式合规向本质安全转型。展望未来，随着 GB 45673-2025 的全面实施和“工业互联网+危化安全生产”标准的落地，化工企业应进一步探索 PDCA 循环与人工智能、大数据分析等新技术的融合路径，构建更加智能、高效的持续改进机制，为实现化工行业高质量发展和高水平安全的良性互动提供坚实保障。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 危险化学品企业安全生产标准化通用规范: GB 45673-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [2] 中华人民共和国应急管理部. 化工和危险化学品生产经营企业重大生产安全事故隐患判定准则: AQ 3067-2026[S]. 北京: 应急管理部, 2026.
- [3] 中华人民共和国应急管理部. “工业互联网+危化安全生产”建设规范 第1部分: 总则: AQ 3064.1-2025[S]. 北京: 应急管理部, 2025.
- [4] 甘华军, 田健. PDCA和SDCA双循环在化工安全生产管理中的应用探索[J]. 山西化工, 2024, 44(2): 204-207.
- [5] 林艺松, 何文忠. 基于PDCA循环理论的化工生产企业安全管理长效机制研究[J]. 广东化工, 2021, 48(23): 43-45.
- [6] 周锋, 刘君, 赵寅, 等. 领导驱动型安全生产管理体系长效运行机制研究[J]. 能源科技, 2025, 23(6): 82-86.
- [7] 应急管理部办公厅. 关于印发2025年危险化学品安全监管工作要点及有关工作方案的通知: 应急厅函〔2025〕60号[EB/OL]. (2025-03-01).

Research on the Modification of Road Marking Coatings Based on Improved Weather Resistance and Wear Resistance

Hua Song

Nanjing Xinliang Transportation Facilities Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

To address the issue of shortened service life caused by insufficient weather resistance and wear resistance in road marking coatings, this study investigates performance enhancement through material modification. First, the microscopic mechanisms of coating aging and wear are analyzed, identifying ultraviolet radiation, thermal-humid cycling, and vehicular loading as the primary factors leading to performance degradation. Based on this, suitable weather-resistant modifiers and wear-resistant fillers are selected, and the formulation of composite modified coatings is optimized. By preparing modified samples and designing accelerated aging and wear tests, the effects of UV aging and thermal-humid cycling on coating performance are systematically studied, along with the wear characteristics under different loading conditions. The results indicate that the modified materials effectively delay the photo-oxidative degradation of the coating matrix and enhance the surface abrasion resistance. This study provides a theoretical basis for the formulation design and engineering application of high-performance road marking coatings.

Keywords

road marking coatings; weather resistance; wear resistance; modification mechanism; performance evaluation

基于耐候性与耐磨性提升的公路标线涂料改性研究

宋华

南京鑫亮交通设施有限公司, 中国·江苏南京 211100

摘要

针对公路标线涂料在服役过程中因耐候性与耐磨性不足导致使用寿命偏短的问题, 本文开展基于材料改性的性能提升研究。首先分析涂料老化与磨损的微观机理, 明确紫外辐射、温湿循环及车辆荷载是性能衰减的主要诱因。在此基础上, 筛选适宜的耐候改性剂与耐磨填料, 优化复合改性涂料的配比方案。通过制备改性试样并设计加速老化与磨损试验, 系统研究紫外老化、温湿循环对涂料性能的影响规律, 探讨不同载荷条件下的磨损特性。结果表明, 改性材料能够有效延缓涂料基体的光氧降解进程, 增强涂层表面抗磨削能力。本文为高性能公路标线涂料的配方设计与工程应用提供了理论依据。

关键词

公路标线涂料; 耐候性; 耐磨性; 改性机理; 性能评价

1 引言

公路标线属于道路交通安全管理的关键形成局部, 其可视性与耐久性同行车安全以及道路通行效率休戚相关。传统标线涂料长时间置于户外之后极易发生粉化、褪色以及剥落之类的老化状况, 受到车辆不断碾压和磨损的影响, 反光能力和识别度会极速下滑。因此, 提升标线涂料的耐候性和耐磨性就成了道路工程材料界的研究焦点。改性技术把功能性的添加剂或者填料加入到涂料基体当中, 可以明显加强涂层对于环境的适应能力和力学方面的性能^[1]。本文先做理论剖析, 再深入探究改性材料的作用原理、配方优化的办法以及性能评定的方式, 希望给公路标线涂料的技术革新提供科

学依据。

2 耐候性与耐磨性提升的理论基础

2.1 涂料老化与磨损的机理分析

公路标线涂料处于户外服役环境时, 会受到紫外辐射、温度变化、水分侵蚀以及车辆轮胎不断摩擦的影响。紫外光促使涂料基料高分子链发生断裂和交联现象, 造成涂层表面出现微裂纹并且慢慢粉化。在温湿交替的过程中, 水分渗透涂层内部使界面结合力减弱, 冻融现象令涂层结构更为松散。而磨损现象体现为轮胎与标线表面存在微观切割以及疲劳脱落的情况, 粗糙峰相互碰撞致使材料渐渐从基体剥离。这些老化和磨损机理相互关联, 共同决定了标线涂料的服役期限。

2.2 改性材料对性能提升的作用机制

改性材料通过物理共混或者化学键合的方式融入涂

【作者简介】宋华(1971-), 男, 中国江苏泰州人, 从事化学工程研究。

料基体当中,从诸多方面来加强耐候性和耐磨性。耐候改性剂像紫外吸收剂以及受阻胺光稳定剂,可以捕捉自由基并且遮挡有害的紫外光,推迟高分子材料的光氧降解反应。耐磨填料比如陶瓷微粉和纤维状材料,在涂层里塑造起加强骨架,提升涂层的硬度及其抗剪切能力。改性材料还能够提升涂料与路面基层之间的附着力,缩减界面的瑕疵,进而防止因应力集中而产生的涂层剥离现象^[2]。复合改性策略依靠多组分的协同作用,达成耐候性和耐磨性的共同改良。

3 改性材料筛选与配方设计

3.1 耐候改性剂与耐磨填料的优选

耐候改性剂的筛选要着重关注它对紫外光的吸收效率及其与涂料基料的相容性。受阻胺类光稳定剂由于自由基捕获力强且持久性佳,所以被列为首选,紫外吸收剂则用于遮挡短波紫外线。耐磨填料的选取需综合考量硬度、粒径分布以及与树脂的浸润性。高硬度陶瓷填料可突出优化涂层抗划伤能力,纤维状填料则通过桥接效应来约束裂纹扩展。填料粒径过大时会减小涂层的致密度,粒径过小时又难以起到加强效果,因而必要确定恰当的粒径范围。

3.2 复合改性涂料的配比优化

复合改性涂料的配比改良需协调耐候性与耐磨性相互制约的关系。耐候改性剂添加量少时抗老化效果不突出,添加量过多也许会影响涂料的施工性能及力学强度。耐磨填料的掺入量要控制在合理范围内,填料加入过量会造成涂层脆性增大,并且与基料结合不好。基料、改性剂和填料存在协同作用,所以要形成多目标改良准则,把耐候性指标和耐磨性指标当作评定依照。通过调节各组分的相对含量,可以促使改性涂料在老化速率和磨损速率上达成理想兼顾。

4 试样制备与试验方法

4.1 改性标线涂料的制备工艺

改性标线涂料的制作采用高速分散与研磨结合的工艺路线。先按照比例把基料树脂和溶剂混匀,然后在搅拌下慢慢加入耐候改性剂,确保其完全溶解或者分散到树脂体系当中。接着加入耐磨填料和助剂,提升搅拌速度来达成各组分的均匀分布。混合好的浆料要经过三辊研磨机加工,让填料颗粒变得越发细小,而且改良其在基料里的分散状况^[3]。在制作的时候还要控制好温度,防止改性剂发生分解,能得到流动性佳且储存稳定的改性标线涂料。

4.2 耐候性加速试验方法

耐候性加速试验把紫外老化试验箱和温湿循环试验箱结合使用。紫外老化试验按有关标准来设置辐照强度以及温度循环参数,模仿自然环境当中太阳紫外辐射给涂层带来的逐步损害效果。温湿循环试验安排高温高湿和低温干燥相互轮换运行的状态,探究涂层在温度和水分不断交替影响下抵抗开裂和脱落的能力。在试验期间定时采集样品,检测涂层的色差、粉化程度以及附着力等参数,根据性能衰退曲线评

判各种改性方案的耐候性能好坏。

4.3 耐磨性测试方法

耐磨性评定可采用旋转橡胶砂轮法或者线性磨耗试验法。评定之前要将改性涂料均匀涂抹在标准底板上,并彻底使其固化。评定期间需施加预设的载荷,还要控制好磨耗行程。通过测量涂层在指定磨耗次数前后质量的减小量或者厚度的减小量,以此来评判其耐磨性能。若想模仿实际交通荷载所包含的各种复杂状况,可以设置不同等级的载荷以及不同的磨耗介质展开对比评定。评定完毕之后应当查看磨痕的形态,剖析涂层发生磨损的原因是磨粒磨损、疲劳脱落还是黏着传递。

4.4 微观表征与性能测试方法

要想了解改性材料改善涂料性能的深层原理,就要做微观层面的表征分析。用扫描电子显微镜来观察涂层断面以及被磨损表面的细微形态,分析填料的分布状况以及磨损之后裂纹的延伸方向。通过红外光谱分析可以监测到涂料基料在经过紫外老化前后特征官能团发生的变化,以此来评判光氧降解的程度。利用热重分析去考量改性涂料是否稳定,看填料和基料二者之间有没有热适应性。接触角测定能够表现涂层表面的湿润情况,从侧面显示出它抵抗水分渗透的能力。上述微观表征和后面的宏观性能检测相互验证,有助于形成起改性效果和微观结构之间的联系。

5 耐候性试验结果分析

5.1 紫外老化对涂料性能的影响

紫外老化会引发涂料表面产生大幅的光氧降解反应,高分子主链发生断裂,造成涂层力学性能下滑。辐照时间不断增长时,未经过改良的涂料会出现较为明显的颜色改变和表面粉化情况,光泽度明显下降。紫外辐射先破坏涂料表层的树脂基料,使得填料颗粒失去包裹而暴露在外表面。加入了紫外吸收剂和光稳定剂的改良涂料,可以有效地抑制自由基链式反应,延迟表面降解的速度。长时间辐照之后,改良涂层仍然保留较好的完整性和颜色稳定性。

表 4-1 改性前后涂料的耐候性试验结果对比

评价指标	未改性涂料	改性涂料
色差 (ΔE)	较大	显著减小
粉化等级	较高	保持较低水平
附着力保留率	较低	明显提高
预估服役寿命	基准	明显延长

5.2 温湿循环下的性能演变

温湿循环时,水分渗入涂层内部,并聚集在涂料与基底界面处。高温下水分膨胀形成内应力,低温下水分结冰造成体积膨胀力,二者交替影响致使界面结合强度逐步减小。未改性的涂层经过多次温湿循环之后,会产生起泡现象,局部发生剥落,附着力大幅下降。而含有疏水性组分的改性涂料以及添加了增强剂的涂层,其水分渗透途径变少,抗拉强

度有所加强。完成循环试验之后,改性涂层的附着力保留率明显优于未改性的涂层,表明其对于温湿老化的抵抗能力得到了提升。

5.3 改性涂料的耐候性评价

综合紫外老化和温湿循环试验的结果来看,改性涂料在各个评价指标上都要优于未改性涂料。色差变化的幅度大幅缩减,粉化等级一直保持在比较低的水平,这显示出耐候改性剂起到了预期的保护作用。按照加速老化试验来推算等效的服役年限,改性涂料的预期使用寿命被明显延长^[4]。往涂料里加入耐候改性剂,并没有给涂料的施工性能带来不良影响,涂层的干燥速度和流平性仍然符合施工需求。所以,所给出的改性配方在加强耐候性方面有着突出的效果。

6 耐磨性试验结果分析

6.1 不同载荷下的磨损特性

涂层的磨损量随着载荷的增多而呈非线性增长态势。在小载荷情况下,磨损大多体现为表面微凸体被磨平,当载荷加大时,磨粒压入的深度变大,切削效果变强,材料去除的比率明显提升。未经过改性的涂层在承受较高载荷的时候,会出现大面积的涂层脱落现象,其磨损机理由磨粒磨损转为疲劳剥层。而经过改性的涂层因为硬质填料具备承载能力,即便处于较高的载荷之下,其表面的形态仍然能够维持较为完整。载荷对于磨损特性产生影响,体现在摩擦系数的变动情况当中,在高载荷状态下,摩擦系数逐步变得稳定。

6.2 改性填料对耐磨性的提升规律

耐磨填料被采用之后,涂层的磨损行为发生了很大的改变,填料的硬度、粒径以及分布状况都会影响到改良的效果。硬质填料在遭受磨损的时候能够起到抵抗磨粒切割的作用,所以磨耗大多出现在填料周围的树脂基体里面。纤维状填料凭借其桥接功能来阻止裂纹向涂层内部延伸,减小疲劳剥落现象的发生。填料的含量有着一个合适的范围,在这个范围之下加强效果不明显,超出这个范围之后由于填料发生团聚而导致性能下滑。改性涂层的磨损量随着填料含量增多

先是减小,后来又小幅增大。

6.3 综合性能评价与改性效果验证

从综合耐候性与耐磨性试验结果来看,新研发的改性标线涂料在这两方面均有大幅优化。耐候改性剂和耐磨填料一同加入,并未出现不良交互影响,其在涂料系统里分别起到作用而且相互配合^[5]。相比于未改性的涂料,经过改性的涂料在加速老化试验之后其耐磨性留存比例更大,表明耐候性改良间接有益于耐磨性能的保存。综合性能评价表明,改性涂料的综合使用寿命明显延长,能够更好地适应复杂户外服役环境。

7 结语

本文针对公路标线涂料存在耐候性与耐磨性不够这一工程现象展开系统性改良研究。依据老化及磨损原理可知,紫外辐射、温湿交替变化以及车辆负载都是造成性能下降的关键要素。通过优选耐候改性剂与耐磨填料并优化复合配比,建立了改性涂料的设计方案。通过对制作流程加以控制以及对检测手段实施规划来确保该项研究具备重现价值和可信度。改性涂料无论是在紫外光老化环境下还是在温湿度反复变化的情况下都能体现出较好的抗老化特性,在承受较大压力摩擦时其抗磨能力也仍然较好。此项研究给高性能公路标线涂料的研发提供了理论层面的指引以及技术方面的参照范例。

参考文献

- [1] 米涛.基于废玻璃粉渣的不同公路标线涂料耐候性与抗滑性试验研究[J].交通世界,2025,(36):20-22.
- [2] 李贤珍.公路路面标线涂料的性能优化研究[J].运输经理世界,2025,(33):157-159.
- [3] 苟海波,袁明园,周启伟.反应型标线涂料在云南山区高速公路标线修复中的应用[J].城市道桥与防洪,2024,(08):280-283+30.
- [4] 王川,刘世亮,马川义,等.高速公路高性能热熔型道路标线涂料的研制[J].山东交通科技,2024,(03):89-92+102.
- [5] 高明东.公路标线热熔涂料常见问题及解决方法[J].科技视界,2015,(22):297+332.

Research on Effective Measures to Enhance Nuclear Radiation Safety Regulation

Yinghui Huang

Hechi Environmental Emergency and Solid Waste Technology Center, Hechi, Guangxi, 546300, China

Abstract

With the continuous expansion of China's nuclear technology applications, the number of radiation sources has steadily increased, and the regulatory targets have become increasingly complex. Traditional regulatory approaches have gradually revealed shortcomings in terms of precision, real-time responsiveness, and systematicness. Based on the practical needs of nuclear radiation safety regulation, this paper identifies key tasks requiring immediate attention and proposes a series of actionable measures to improve regulatory standards. The study demonstrates that only through coordinated efforts—including enhanced personnel training, upgraded monitoring equipment, the establishment of information platforms, strengthened corporate accountability, and intensified emergency drills—can a more efficient and scientific nuclear radiation safety regulatory framework be established.

Keywords

nuclear radiation; safety regulation; emergency response; regulatory capacity

提升核辐射安全监管水平的有效措施研究

黄英辉

河池市环境应急和固体废物技术中心, 中国·广西 河池 546300

摘要

随着中国核技术应用范围持续拓展, 辐射源数量不断攀升, 监管对象越来越复杂, 传统监管方式在精准性、实时性、系统性方面渐渐暴露出欠缺之处。本文依据核辐射安全监管的现实需求, 梳理现阶段应着重关注的重点任务, 基于此提出一系列具备操作性的提高监管水平的举措。研究显示, 只有经由强化人员培训、完善监测装备、搭建信息化平台、压实企业责任、加强应急演练等多方面协同推进, 方可建立更为高效、科学的核辐射安全监管模式。

关键词

核辐射; 安全监管; 应急响应; 监管能力

1 引言

核能、核技术在当代社会里的运用已经深入至能源生产、医疗卫生、工业检测、农业育种等诸多领域。这般广泛的技术渗透一方面带来了一定的经济效益与社会效益, 另一方面也对公共安全、环境安全提出了更高要求。核辐射因其看不见、闻不到、触不着的特性, 使得其潜在危害具有高度的隐蔽性和突发性。一旦发生辐射事故, 不仅可能造成直接的人员伤亡和环境污染, 还可能引发公众恐慌甚至社会秩序的混乱。因此, 核辐射安全监管工作绝非无关紧要的备用手段, 而是保障核技术持续发展的前提条件。鉴于上述实际背景, 本文尝试从提高监管水平的角度出发, 全面探讨强化核辐射安全监管的有效举措, 期望能为相关决策与实践给予参考。

2 核辐射安全监管重点任务

2.1 高风险移动放射源实时监控

移动放射源在油田测井、探伤作业、医疗移动式治疗设备等诸多场景中有着广泛应用, 其最为突出的特点是使用地点频繁变动, 监管对象始终处于持续流动的状态。传统的静态台账式管理方式难以契合这种动态特性, 极易出现放射源去向不明、使用记录不全等状况^[1]。倘若移动放射源在运输或者使用过程中出现丢失、被盗亦或是失控的情况, 查找与回收的难度相较于固定源要大得多。所以, 建立针对高风险移动放射源的实时监控模式理应成为监管工作的关键所在。这不仅涉及监控技术的选用与部署, 还关乎不同地区监管部门的协同配合机制。

2.2 核技术利用单位辐射安全许可

任何单位若要涉及核辐射的活动, 均须事先获取辐射安全许可, 而这表明该单位的人员资质、设备条件、防护措施、管理制度都已通过监管部门的审查。不过在实际执

【作者简介】黄英辉(1977-), 男, 壮族, 中国广西河池人, 本科, 工程师, 从事环境保护工程研究。

行进程里，许可制度的有效性并非仅仅由审批环节的严格程度决定，还在于后续的监督检查是否到位。有些单位取得许可后渐渐放松管理，人员流动致使持证岗位出现空缺，设备老化后防护设施未及时更新，倘若这些情况长久得不到纠正，许可制度将会流于形式。所以说，监管工作的重点任务之一便是强化对持证单位的常态化监督检查，以保证许可条件在整个运营周期都能得以维持。

2.3 放射性废物收贮与处置管理

放射性废物收贮与处置管理直接关系到核辐射安全的长期稳定性。和一般工业废物不一样，放射性废物的危害时期有可能长达数十年，甚至数万年之久。这便决定了对于废物的管理，无法采用“产生一批、处理一批”这种随意的方式，而是一定要建立起一套从废物产生，到分类、暂存、运输，再到最终处置的全链条管理模式。当下中国在放射性废物收贮方面，依旧存在着诸多问题，比如区域能力不平衡，部分废物暂存时间过长、最终处置场容量有限等。尤其是在一些核技术利用单位比较分散，且废物产生量不大的地区，收贮模式的覆盖面、响应速度都需要进一步提高。要是无法妥善解决放射性废物的出路问题，那么前端所产生的废物就会持续积压，渐渐演变成新的风险源。

2.4 核与辐射事故应急响应能力

事故应急响应并非日常监管工作那种简单的延伸，其实是一套独立存在且需专门去做准备的工作模式。该模式涵盖应急预案的编制、修订，应急组织的建立、运行，应急资源的储备、调配、应急信息的收集、发布等多个子系统。在许多情形下，事故最终造成的后果并非完全由事故本身严重程度决定，很大程度上取决于应急响应的速度、有效性。快速且准确的响应能够在事故刚开始的时候就把它控制住，防止事态进一步扩大，然而迟缓又混乱的响应则有可能让小事演变成大灾难。因此，提高应急响应能力要贯穿核辐射安全监管工作的整个过程，任何时候都不可有丝毫放松。

3 提升核辐射安全监管水平的有效措施

应大力传承并落实好核安全监管，运用四十年宝贵经验实现高水平核安全、保障核事业高质量发展的目标。把完善体系提升能力、加快推进核安全监管现代化作为工作主线，将统一思想认识和贯彻落实方针政策作为当前工作的关键着力点，把强化前瞻引领、更好统筹发展和安全作为把握未来工作主动权的重要抓手，积极的开展重点项目安全监管、核安全法规标准制修订、核安全监管能力提升等重点工作的，为加快核强国建设做出积极的贡献。

3.1 实施监管人员持证上岗培训

监管工作质量的高低，根本上是由监管人员的专业素质、职业能力所决定的。核辐射安全监管工作关联着核物理、辐射防护、环境监测、法律规范等诸多领域的知识，这对从事该工作的人员的综合素质有着很高要求^[2]。设立持证上岗

制度，意味着每一位进入监管队伍的人员，都要经过系统培训并通过严格考核，以此保证他们具备履行岗位职责所需要的基本知识与技能。需要注意的是，持有资格证并非就万事大吉了，伴随技术的进步、法规的更新，监管人员还得定期参与继续教育、复训考核，从而维持其专业能力的时效性。如此举措能够有效防止监管队伍里出现“外行管理内行”的尴尬状况，还能促使每一位监管人员始终处于学习的状态。

3.2 配齐便携式监测设备及省级实验室

核辐射监管工作需要监测数据的支持，不管是日常检查里的现场快速判断，还是事故状况下的应急监测，都依靠可靠的技术装备。便携式监测设备有灵活机动、响应快的特性，适用于现场筛查、可疑物品检测、初步剂量评估等场景。监管部门要依照不同地区辐射源分布的特点、工作需求，给一线监管人员配备充足数量且性能可靠的便携式监测仪器，还要建立定期检定和维护制度，保证设备一直处于可用状态。省级实验室的建设也很重要。便携式设备可解决现场筛查问题，不过碰到复杂样品分析、核素识别、精确剂量测定等情形时，就需要依靠实验室的精密仪器和专业技术人员。省级实验室应当负责区域内疑难样品分析、事故样品确认、技术仲裁等职责，建立与现场监测设备相互补充的技术支撑模式。

3.3 建立辐射源在线监控平台

在线监控平台会把辐射源的位置信息、剂量率数据、设备状态参数等，实时传送到监控中心。如此一来，监管人员不用出门就能了解辖区内辐射源的动态信息。要是放射源脱离屏蔽、超出设定区域或者剂量率异常升高，平台会自动发出报警信号，提醒监管人员及时处理。这种技术手段让监管的实时性和精准性得到了很大提高，对高风险移动放射源的管理效果更显著。移动放射源在运输时是否按预定路线行驶、是否在规定地点作业、有无未经授权的移动，通过在线监控平台都能清楚知晓。当然，在线监控平台建设不能只看重技术先进性，还得充分考虑系统稳定性、数据安全性、使用便捷性，保证平台能真正为实际监管工作服务，而不是成为新负担。

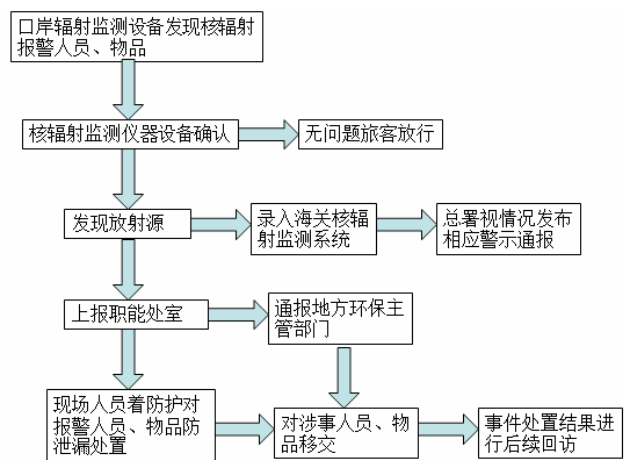


图 1 核辐射报警事件在线处置流程

3.4 落实企业风险排查主体责任

政府监管资源存在着一定的局限性,仅仅依靠监管部门自身的力量,很难做到对所有辐射源、所有使用环节都实现全面覆盖。由此,有必要充分激发企业的积极性,促使企业成为风险排查工作的首要责任主体。企业身为核技术利用的直接执行方,对于自身设备的运行情况、人员的管理水准、潜在的风险点最为清楚。监管部门需要借助制定清晰明确的风险排查指南、建立企业自查报告制度、进行随机抽查复核等一系列方式,对企业加以督促,使其能够定期针对自身的辐射安全状况展开全面排查^[3]。针对排查过程中发现的各类问题,企业要建立整改台账,详细明确整改的时间期限、责任人,并且要将整改情况如实汇报给监管部门。这样的制度设计并非是要把监管责任全部推给企业,而是要在政府监管与企业自律之间建立起一种良好的互动关系。企业自查的质量越高,政府监管的针对性便会越强,双方资源的配置效率也会随之越高。

3.5 开展辐射事故应急联动演练

虽然应急预案编写得非常完善,装备配备得非常齐全,然而倘若未经过实战化演练的检验,那么其有效性终究是会受到质疑的^[4]。应急联动演练与一般的培训或者桌面推演有所不同,它需要多个部门、多个层级在近似真实的模拟场景中协同进行行动。演练过程能够对应急通讯是否顺畅、应急资源是否到位、应急指令是否清晰、应急行动是否协调等一系列问题进行检验。借助演练所暴露出来的问题、薄弱环节,正是改进应急准备工作的方向所在。定期展开应急联动演练对培养应急人员的心理素质、默契程度是有帮助的,能让各部门在真正面临事故时迅速进入角色,减少因慌乱或者沟通不畅而造成的延误。演练结束之后需要进行认真的复盘与评估,把演练中发现问题逐一条目记录下来并制定改进措施,

以此确保每一次演练都能够带来应急能力的实际提高^[5]。

4 结语

总的来说,核辐射安全监管直接关联公众健康、环境安全、社会稳定。在核技术利用产业迅速发展的情形下,传统监管手段呈现出一定的滞后性,需要从人员、装备、信息平台、企业责任、应急演练等多个方面协同提高。本文提出的一系列举措互相支撑,其中人员持证培训是基础保障,便携设备、省级实验室增强了技术支撑能力,在线监控平台达成了动态精准监管,企业主体责任的落实弥补了政府资源的不足,应急联动演练把日常监管和突发事件处置有效衔接起来。唯有统筹推进这些措施,才能够建立适应新时代要求的核辐射安全监管模式,为核技术的安全利用与可持续发展给予坚实保障。

参考文献

- [1] 郭姗姗,侯备,高燕,朱亚男,梁应凤,刘柳.基于Citespace的护理人员在核与辐射事件中研究热点的可视化分析[J].辐射防护,2025,45(06):638-644.
- [2] 张毓,任银银,潘亚萍,蔡婉婉,陈丹.基于CiteSpace的核辐射医学救援研究热点与趋势的可视化分析[J].中国急救复苏与灾害医学杂志,2025,20(10):1391-1398.
- [3] 黄斌,唐薇,颜齐声,黄宇倩,韦玫豆,牙磊,黄昭翔.基于网络药理学及分子对接技术探讨“黄芪-当归”药对抗核辐射的作用机制[J].医药前沿,2025,15(22):1-7.
- [4] 张磊,葛晓阳.核应急监测系统技术分析与优化路径——以自组网辐射监测小球为例[J].环境监控与预警,2025,17(02):93-97+104.
- [5] 许钟予.解码秦山核电核安全“密码”——专访生态环境部华东核与辐射安全监督站主任冯建平[J].中国核工业,2025,(02):18-20.

Failure Analysis of the Hydraulic-Driven Diaphragm Metering Pump's Failure to Deliver Required Flow Rate

Xiantian Shao

Shandong Binhua New Materials Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256600, China

Abstract

The hydraulic-driven diaphragm metering pump is a critical piece of equipment for precise material dosing and stable conveying in chemical plants. Prolonged continuous operation often leads to issues such as insufficient or failed dosing, directly affecting the plant's stable operation. This paper analyzes this frequent failure system, identifies contributing factors—including blockage of the oil replenishment valve, failure of the exhaust valve, air accumulation in the hydraulic chamber, diaphragm damage, and operational issues with valves and pipelines—and proposes troubleshooting solutions and preventive measures tailored to the pump model. These recommendations provide technical support for rapid on-site troubleshooting, reduced downtime, and maintained production stability.

Keywords

diaphragm; hydraulic metering pump; failure to deliver full capacity; fault analysis; oil make-up valve

液压驱动隔膜计量泵不上量故障分析

邵现田

山东滨华新材料有限公司, 中国·山东 滨州 256600

摘要

液压驱动隔膜计量泵是化工装置物料精准投加与稳定输送的关键设备, 长期连续运行易出现不上量、上量不足故障, 直接影响装置平稳运行。本文针对该高频故障系统分析, 明确补油阀堵塞、排气阀失效、液压腔积气、隔膜损坏、阀件及管路操作问题等诱因, 结合机型特点给出排查处置方案与预防建议, 为现场快速排障、减少停机、保障生产稳定提供技术支持。

关键词

隔膜; 液压计量泵; 不上量; 故障分析; 补油阀

1 故障现象概述

自装置投用以来, 装置区内液压驱动隔膜计量泵在连续运行过程中, 多次出现不上量或上量不足的典型故障, 已成为影响装置稳定运行的关键设备问题。其中“不上量”表现为泵体正常运转, 但介质完全无法输送、出口流量为零, 直接造成介质输送中断, 迫使对应生产单元降负荷甚至临时停车; “上量不足”则是泵具备一定输送能力, 但实际流量远低于工艺设计值, 无法满足反应配比、药剂投加、物料传输等核心工艺需求, 导致反应不完全、产品质量波动、能耗与物料损耗上升^[1]。

该类故障频发、影响面广、排查周期长, 不仅降低生产效率, 破坏工艺稳定性, 还易引发连锁问题, 增加安全风险与运维成本。为快速定位原因、规范处置流程、减少非计划停机, 本文系统梳理故障成因、分级排查步骤、处理措施

及长效预防方案, 形成标准化处置指南, 为现场运维提供技术支持。

2 不上量故障原因及排查处理方法

2.1 补油阀堵塞

2.1.1 故障根源

补油阀是维持液压计量泵液压系统油量平衡、压力稳定的核心部件, 其堵塞或卡涩是导致不上量的最常见原因。油箱内润滑油长期运行后易出现氧化变质、乳化含水、杂质超标等问题; 氧化会使润滑油黏度上升、流动性变差, 形成胶质沉积物; 乳化则是水分混入油液后, 油液呈乳白色浑浊状态, 润滑与密封性能急剧下降; 系统内金属碎屑、密封件磨损残渣、外界灰尘等杂质, 会随油液循环附着在补油阀阀芯与阀球位置^[2]。

• 上述问题会直接导致补油阀阀芯卡涩、动作失灵, 阀球密封面因异物卡阻或长期冲刷出现磨损、划痕, 无法形成有效密封, 最终丧失补油功能。液压腔因缺油无法建立稳定工作压力, 隔膜无法正常往复做功, 介质输送能力大幅下降,

【作者简介】邵现田(1990-), 男, 中国山东滨州人, 硕士, 工程师, 从事化工设备管理与维修研究。

表现为不上量或流量持续偏低。

- 不同型号泵的补油阀安装位置不同——PM7120-S-E、PM880-S-E 型泵补油阀位于设备外部，便于直接拆解；7660-S-E 型泵补油阀集成于油箱内部，需打开油箱盖后检修。

2.1.2 排查处理

停机泄压后，按型号规范拆解补油阀，取出阀芯与阀球，用指定清洁润滑油冲洗阀腔，清除胶质与杂质。检查阀球密封面，轻微划痕可抛光修复，磨损密封失效则更换总成。同步更换变质乳化润滑油，用专用清洗剂清洗油箱及油道，避免二次污染。装配后按标准补油，手动盘车确认阀芯灵活，再开机试运行，观察流量恢复情况。

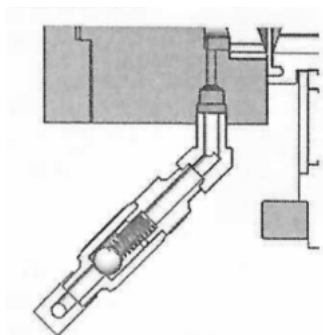


图 1 补油阀结构及安装位置示意图

2.2 排气阀（自动泄放阀）失效

故障根源：排气阀承担液压腔自动排气、维持压力建立的关键功能，其失效会直接导致气体无法排出、压力建立失败。排气阀核心密封部件 O 型圈，在长期高温、高压、介质侵蚀环境下，易出现老化硬化、破损、变形、丢失等问题，造成密封失效、内漏严重；排气阀阀芯易被油液杂质卡涩，阀座因频繁启闭出现磨损、凹痕，导致阀门关闭不严，气体持续滞留液压腔内，压力无法正常建立。

按结构形式，排气阀分为集成式与分离式两类：集成式排气阀的气体不直接排至大气，而是回流至蜗轮蜗杆油箱，空气经扰动后会通过补油阀再次进入泵头，形成“气阻循环”，是导致不上量的典型隐性原因；分离式排气阀支持手动按压阀芯排气，但排气速度慢、效率低，仅适用于小气量、小流量工况^[4]。

排查处理：

通用排气操作：拧下排气阀，从阀口持续补充清洁液压油，强制排出系统内气体。

集成式排气阀（图 a）：泵头排出气体不直接排至大气，而是回流至蜗轮蜗杆油箱，空气经蜗轮蜗杆扰动后，通过补油阀再次进入泵头，引发不上量。可以在油箱加油孔盖处开孔（图 3，以 PM7120 型泵为例）实现主动排气，同时为加油孔盖加装防护帽（需预留 1-2mm 排气管隙，避免完全扣合），防止雨水、杂质进入油箱。

分离式排气阀（图 b）：可通过手动按压阀芯排气，但

效率较低，适合小流量排气场景；

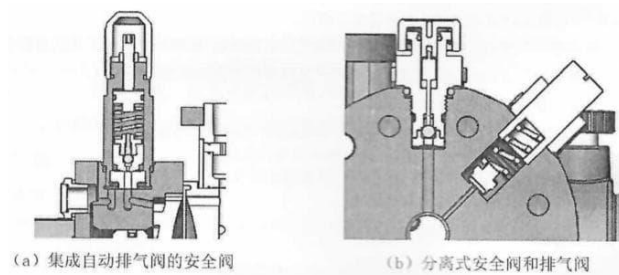


图 2 排气阀类型示意图

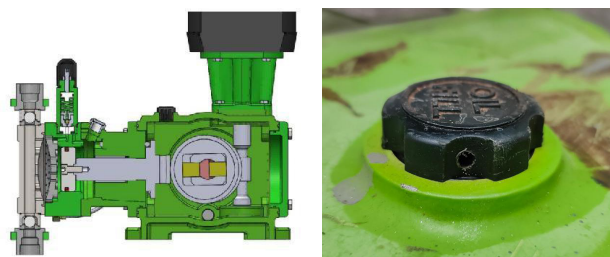


图 3 PM7120 型泵油箱加油孔盖排气改造示意图

3 液压腔内积气

故障根源：液压腔是压力传递的核心空间，安装调试、维修重启、油液更换等操作后，若排气不彻底，空气会残留于液压腔内形成气袋。气体具有可压缩性，会大幅削弱压力传递效率，导致隔膜无法获得稳定推力，介质无法被正常推送，表现为出口流量波动、压力不稳、完全不上量。积气问题在新泵投用、检修后重启、长期停机再启动时尤为高发。

排查处理：

静态排气：拆下排气阀，手动缓慢盘车（转动泵轴），同时向液压腔内连续补充液压油，利用活塞往复运动将气体推向排气阀口排出，直至盘车全程无气泡溢出、油流连续无间断；

动态排气：启动泵，将行程设定为 20% 低负荷运行，避免高负荷气蚀损伤部件；从排气阀口持续补油，观察出口介质状态，直至介质无气泡、流量稳定、压力平稳，表明积气已彻底排净。

4 隔膜损坏或密封不良

故障根源：隔膜是隔离介质与液压油、实现压力转换的核心弹性部件，分单隔膜与双隔膜结构。单隔膜在交变压力、介质腐蚀及机械磨损下，易破裂、穿孔、老化开裂，导致液压油泄漏、压力无法传递。双隔膜易出现密封件老化变形、隔膜与泵头密封面杂质残留或安装错位，引发内漏、液压压力不足。隔膜破损会造成介质与液压油互窜，影响输送稳定，产生污染与泄漏，严重时危及设备与生产安全。

排查处理：停机泄压后拆解泵头，对单隔膜检查表面完整性，查看有无裂纹、穿孔、鼓包、溶胀现象；对双隔膜

重点检查中间密封件状态与密封面贴合度；隔膜破损、密封件老化时，必须更换原厂同规格配件，严禁使用非标替代品；装配前彻底清洁密封面，去除杂质、划痕与油污，确保安装对中、压紧力均匀，无偏载、无翘曲；装配完成后按规范排气、补油，试运行观察有无渗漏、流量是否恢复正常。

5 行程调节过小

故障根源：计量泵输出流量与行程设定值呈正相关，行程直接决定隔膜 / 活塞的往复位移量。若行程设定值低于10%，单位时间内介质吸入与排出量极小，现场易误判为“不上量”。该问题多由操作失误、工艺参数调整后未复位、新手误操作等导致，属于典型的操作类故障，排查优先级较高。

排查处理：查看行程指示器读数，确认设定值是否处于极低区间；按每次5%~10%的幅度逐步调大行程，每调整一次保持运行5~10分钟，观察出口流量与压力变化；流量随行程增大而稳定提升时，继续调整至工艺需求流量；若调整后流量无变化，立即转向其他故障点排查。

6 润滑油液位过低

故障根源：润滑油为液压系统提供补油、润滑、冷却功能，油箱视镜液位是判断油量的直观依据。当液位低于最低刻度线时，补油阀吸入口暴露，无法吸入足量油液，液压腔持续缺油、压力建立不足，隔膜推力不够，最终导致不上量。液位偏低多由长期未检查、油液渗漏、蒸发损耗、未及时补充等原因造成。

排查处理：通过油箱视镜检查液位，标准液位应处于1/2~2/3刻度区间；液位不足时，补充设备说明书指定牌号润滑油，严禁不同型号油液混用，防止油液变质、密封件溶胀；补充后观察液位是否快速下降，若存在异常下降，排查油箱、管路、泵头密封处有无渗漏点并及时处理。

7 安全阀故障（泵体 / 系统）

故障根源

安全阀是系统压力保护核心部件，分为泵体安全阀与系统安全阀，故障均会导致内漏、压力不足。泵体安全阀常见问题：压力设定值低于工艺需求，未达到工作压力即提前泄压；安全阀与泵头连接体密封垫破损、箱体密封面划伤，造成持续性内漏。系统安全阀常见问题：阀芯被杂质卡涩、密封面磨损、压力设定偏低，导致介质回流、系统压力无法建立。安全阀故障典型表现为：泵体运转正常、有噪音，但出口压力偏低、流量不足，甚至完全不上量。

排查处理

校准压力：按设备额定压力重新校准安全阀（泵体安全阀压力建议略高于工艺压力5%~10%）；

密封修复：更换破损的连接体密封垫，用细砂纸（800

目以上）修复箱体轻微划伤的密封面；

部件更换：若安全阀阀芯或阀座磨损严重，需直接更换安全阀总成，对于系统安全阀，可以关闭安全阀的根部阀，来排除系统安全阀是否内漏。

8 系统单向阀损坏

故障根源：系统单向阀负责保证介质单向流动、防止回流，是维持出口压力与流量的关键。阀芯被介质杂质卡涩无法闭合、密封面长期冲刷磨损、阀体受外力破损，均会导致管线中的介质大量回流至泵出口，现场表现为出口压力偏高、但流量几乎为零，是易误判的高频故障点。

排查处理：停机关闭上下游阀门，泄压后拆解系统单向阀，取出阀芯与阀座；清除杂质、结垢，检查密封面完整性，轻微磨损可抛光修复，严重变形、破损时更换阀芯或单向阀总成；装配时确保阀芯活动灵活、密封严密，无卡滞、无偏斜。

9 泵体单向阀故障

故障根源：泵体单向阀位于泵头进出口，直接控制介质吸入与排出。介质中颗粒、胶体、结垢物附着阀芯，会造成阀芯堵塞、启闭失灵；阀内O型圈老化破损、密封面不严，会导致吸入阶段漏气、排出阶段回流，介质无法稳定输送。该故障在含杂质、易结晶介质工况下高发。

排查处理：拆解泵体单向阀，用工艺介质兼容的溶剂清洗阀芯（避免损伤密封面）；检查O型圈是否完好，破损时更换同规格密封件；装配前确保阀座无划痕，阀芯活动灵活。

10 入口过滤器堵塞

故障根源：计量泵入口过滤器滤芯被介质中的杂质堵塞，介质无法正常吸入泵腔。

排查处理：拆卸入口过滤器，取出滤芯清洗（可反吹或用溶剂浸泡），若滤芯破损或堵塞严重需更换；同时检查上游介质预处理系统，必要时增设前置过滤装置，降低杂质含量。

11 系统管路排气不彻底

故障根源：入口、出口管路安装、检修后若未彻底排气，管内积气会形成气阻，阻碍介质流动，导致流量不足、压力波动。常规系统气阻多发生在高点、弯头、阀门处；倒灌式系统入口管路因重力作用不易积气，气阻多集中在出口管路。

排查处理：

常规系统：对入口管路进行排气（打开管路排气阀或松动法兰），排气后重新灌泵，确保管路内充满介质；

倒灌式系统：入口管路因重力作用通常无气阻，可松开出口阀门法兰（松开1-2扣），启动泵后观察出口——

若介质呈“脉冲状输出”(一股一股排出)且伴随稳定压力,即为正常;若流量无脉冲或压力波动大,需进一步排查管路堵塞或密封问题。

12 总结

液压驱动隔膜计量泵“不上量”故障,根源主要集中在阀类失效、介质传输受阻、液压系统异常及操作参数偏差四大方面,可归纳为三类问题。一是阀件故障,包括补油阀堵塞、排气阀失效、安全阀内漏、单向阀损坏等,需按泵型拆解检修,重点检查密封件与压力校准精度。二是介质与润滑异常,如液压腔积气、润滑油液位不足或变质、入口过滤器堵塞、管路气阻等,可通过排气、补油、清洗或更换滤芯快速处理。三是部件与操作问题,如隔膜破损、行程调节过小,需更换原厂配件并逐步优化操作参数。

通过梳理故障对应关系与处理流程,可快速定位问题,减少输送中断对生产工艺的影响。同时建议建立定期维护机制,开展润滑油检测、过滤器清洗及阀件密封性抽检,从事后修复转向事前预防,保障计量泵稳定运行,提升生产系统连续性与可靠性。

13 结语

综上,液压驱动隔膜计量泵不上量故障诱因复杂、排查繁琐,对生产连续性影响较大。本文构建了故障识别、根源定位、处置修复的标准化体系,可有效提升处置效率,降低装置波动与安全风险。现场应在快速处理基础上,建立润滑油监测、过滤器清洗、阀件抽检及密封件预防性更换机制,推动设备管理从事后维修向事前预防转变,保障装置安全稳定运行。

参考文献

- [1] 李涛. 基于深度学习的泵设备故障诊断研究进展 [J]. 仪器仪表用户, 2026, 33 (02): 129-132.
- [2] 吴智怀,王志伟. 基于SAE-ELM的液压泵故障诊断方法研究 [J]. 冶金设备, 2025, (06): 32-38.
- [3] 伍林. 隔膜式计量泵打量不足原因分析与处理 [J]. 天津化工, 2025, 39 (S1): 16-19.
- [4] 梁彬,秦琪,范志卿. 含油污水输送泵不上量故障分析与处理 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (05): 283-286.
- [5] 谢志远,钱杰. 加氢精制高速齿轮泵不上量及解决方案探析 [J]. 广东化工, 2020, 47 (21): 125-126+118.

Exploration of Chemical Safety Management Approaches from the Perspective of Work Safety

Lin Zhong

Jiangxi Sanshi Nonferrous Metals Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi, 338000, China

Abstract

Work safety forms the foundation for the sustainable development of the chemical industry. From a work safety perspective, chemical safety management faces multifaceted challenges encompassing institutional frameworks, technological advancements, managerial practices, and cultural factors, necessitating the establishment of systematic improvement pathways. This paper explores diversified approaches to chemical safety management through three dimensions: institutional innovation, technological innovation, and cultural cultivation. At the institutional level, it proposes enhancing the work safety accountability system, deepening the dual prevention mechanism, and establishing a full lifecycle safety management model. Technologically, it advocates leveraging IoT, AI, and digital twin technologies to build round-the-clock monitoring networks and risk early-warning systems, thereby shifting safety management toward proactive prevention. Culturally, it emphasizes internalizing safety values and innovating training systems. The synergistic integration of these three dimensions contributes to elevating production safety standards in chemical enterprises and achieving sustained improvements in safety performance.

Keywords

work safety perspective; chemical industry; safety management; application approaches

安全生产视域下化工安全管控途径探索

钟林

江西三石有色金属有限公司, 中国·江西 新余 338000

摘要

安全生产是化工行业可持续发展的基础。安全生产视域下, 化工安全管控面临制度、技术、管理、文化等多重困境, 制定系统化的改进路径。本文从制度创新、技术创新和文化培育三个方面, 探讨化工安全管控的多元化途径。制度层面, 提出完善安全生产责任体系、深化双重预防机制、构建全生命周期安全管理模式; 技术层面, 依托物联网、AI技术、数字孪生技术等, 构建全天候监测网络、风险预警模型等, 推动安全管控朝着主动预防转型; 文化层面, 强调安全价值观内化、培训体系创新等。三者协同作用, 有助于提高化工企业生产安全水平, 实现安全绩效的持续改进。

关键词

安全生产视域; 化工; 安全管控; 应用途径

1 引言

化工行业是国民经济的支柱产业, 但其生产过程普遍涉及高温高压、易燃易爆、有毒有害等高风险因素, 长期位列高危行业。近年来, 全国生产安全事故总量呈下降趋势, 但矿山、化工、烟花爆竹等领域非法违法生产行为有所抬头, 防范遏制重大事故的压力依然较大。化工企业普遍面临着工艺复杂、风险叠加、管理滞后等问题, 如何在安全生产视域下提高安全管理水平, 是当前化工行业关注的重点问题。本文旨在探索化工安全管控的多元化路径, 从制度设计、技术应用到文化培育三个方面构建管理框架, 能够为化工企业安

全管理体系优化与安全绩效持续改进提供指导。

2 化工安全管控面临的困境

尽管近年来, 化工行业的安全管理水平有所提升, 但实际管控中依然面临着多层面、系统性的困境。这些困境相互交织, 影响安全绩效的改善。

2.1 制度层面

我国从制度层面虽然构建了《安全生产法》《危险化学品安全法》等法律体系, 但实践中依然存在着“合法企业非法生产”的监管盲区。部分企业虽未取得相应资质, 但是在隐蔽时段、隐蔽场所从事非法违法生产活动, 给监管带来了不小的挑战。同时, 危险化学品全链条监管涉及应急管理、生态环境、交通运输等多个部门, 部门之间的信息共享不畅、执法标准不一, 从而容易形成碎片化管理局面^[1]。

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

2.2 技术层面

化工生产具有非线性、强耦合的复杂特点,传统技术手段在风险预测和预警方面具有明显的局限性。当前很多企业依赖人工巡检和定期检测的模式,无法实现对工艺参数异常、设备早期故障的实时感知。虽然物联网、大数据技术逐步引入,但系统集成度普遍不足,各种安全监测系统之间的数据孤岛问题突出,无法形成统一的风险态势图。

2.3 管理层面

很多化工企业依然沿用传统经验式管理模式,安全管理决策依赖个人经验而非数据驱动。这种管理模式面对现代化工日益复杂的工艺过程力不从心。过程安全管理(PSM)理念虽然得到一定的推广,但实际落实却存在困难。双重预防机制在部分企业中沦为“台账工程”,风险识别与隐患排查存在“两张皮”的问题,风险分级管理措施缺乏针对性,隐患整改闭环不到位^[2]。

2.4 文化层面

安全文化建设的形式化问题突出,很多企业的安全文化以喊口号、搞活动为主,无法真正将安全价值观内化为员工的自觉行为。由于安全生产绩效往往不直接体现在短期经济效益上,部分企业在成本压力下“重生产、轻安全”的倾向难以根除。此外,事故经验学习机制不完善,隐瞒、谎报小事故小事件的现象时有发生,导致组织无法从失败中真正学习,安全文化陷入重复犯错的恶性循环中。

3 制度创新路径

制度创新是化工安全管控朝着系统化发展的基础保障,体系化建设强调以制度为枢纽,实现责任、机制、流程与空间治理的有机统一。

3.1 完善安全生产责任体系

明确的权责划分是制度创新的基础。要构建企业主体责任、园区监管责任和政府属地管理责任“三位一体”的责任链。从企业层面,法定代表人和实际控制人为同一责任人,逐级分解安全指标,落实全员安全生产责任制;从化工园区层面,可借鉴某化工园区构建的安全生产重点工作清单的模式,明确源头防控、日常检查、打非治违、应急救援四项职责,推动园区管理机构朝着主动监管发展^[3]。

3.2 深化双重预防机制

风险分级管理与隐患排查治理均为制度创新的依据。精细化风险识别要覆盖所有工艺单元和作业活动,按照红、橙、黄、蓝四级绘制“四色图”,并且明确每一级风险的管控责任与措施。隐患排查则要按照“排查—登记—整改—验收—销号”的闭环流程,对重大隐患实施挂牌督办。实践中,企业按照“一风险预案”的管理模式,将双重预防机制嵌入日常生产运营,防止沦为“台账工程”。

3.3 构建全生命周期安全管理模式

制度设计应贯穿化工项目的全生命周期。首先,规划

设计阶段,严格执行安全设施“三同时”制度,开展工艺安全审查。其次,建设施工阶段。加强承包商资质审核与特殊作业管控。再次,生产运行阶段。落实统一安全管理、变更管理和设备完整性管理^[4]。最后,退役拆除阶段,制定专项安全方案,规范危废处置预设后备清洗置换。全生命周期管理保证了安全要求在各个阶段的无缝衔接,避免了“设计-运行-拆除”分段脱节。

3.4 优化化工园区安全治理体系

化工园区作为风险聚集的区域,要构建专门制度体系。根据《化工园区安全风险排查治理导则》,推动“十有两禁”整治对策,力争达到D级(较低风险)园区标准。完善园区封闭化管理、公共管廊监测、应急资源储备等基础设施,构建园区统一的安全管理平台。同时,强化入园项目安全准入,禁止高风险、低水平的落后产能进入,从源头上降低园区整体风险。

4 技术创新路径

技术创新是推动化工安全管控朝着主动预防转型的动力。以物联网、人工智能、数字孪生为代表的智能技术,重塑了化工安全生产的技术底座,为风险感知、预警决策提供创新性解决路径。

4.1 构建全天候监测网络

物联网技术通过部署各类传感器与智能摄像头,实现对生产装置、储罐区、管廊等关键区域的实时数据采集与传输。借助计算机视觉分析技术,可自动识别人员违章行为和异常状态,替代传统人工巡检的间歇性盲区。智能感知系统将安全生产从静态监控升级为动态追踪,显著提高了风险早期发现的及时性和准确性^[5]。

4.2 人工智能与风险预警

人工智能技术在化工安全中的应用体现在以下三个层面:(1)AI视觉分析。可24小时不间断监测6种以上危险行为,检测准确率可达98%。(2)AI大数据分析。通过对历史运行数据的机器学习,预测设备故障趋势、优化工艺参数、挖掘事故类型。(3)AI知识管理,利用生成式大语言模型将法规标准、事故案例转化为安全知识图谱,使安全管理系统具备逻辑推理能力。

4.3 数字孪生与虚拟仿真

数字孪生技术通过1:1精准复刻物理工厂,构建可视化虚拟镜像。核心价值体现在三个方面:(1)实时同步监测。孪生模型与实体装置数据联动,一旦参数异常即发出预警。(2)应急模拟推演。快速模拟火灾、泄漏等事故场景,必选最优处置方案,辅助智慧决策。(3)沉浸式培训。在零风险的虚拟环境中进行实操演练,显著提高员工的应急响应能力。

4.4 工业大模型与智能决策

随着工业大模型(ILMs)融入,化工安全管控正从感

知智能向认知智能演进。大模型能够融合多模态数据比如文本、图像等,打破传统模型在处理复杂非线性过程时的局限。通过构建“工安知识大脑”,系统可自动生成风险分析报告、推荐管控措施、辅助事故调查归因,为管理层提供可解释的决策支持^[6]。

5 文化培育路径

安全文化培育作为化工安全管控的根基,人因管理是连接文化理念与日常操作的关键桥梁。二者协同发挥作用,才可以达到管理的安全要求。

5.1 安全文化的内涵与价值

化工安全文化作为组织内部共同持有的价值观、态度和行为规范的总和。决定了安全制度是否能够切实落地、技术手段能否发挥作用等。积极的安全文化表现为“人人讲安全、层层负责任”。相关研究表明:安全文化成熟的企业,事故率可降低50%以上。因此,文化培育不是锦上添花,而是安全管控不可缺少的内在动力。

5.2 安全教育培训体系的创新

传统的“填鸭式、灌输式”培训存在周期长、效率低、实操风险性高的问题。创新培训体系需要从以下三个层面入手:(1)分层分级。针对管理层、技术员、一线操作人员、承包商等不同群体定制针对性的培训内容。(2)培训形式多元化。可在培训中引入VR/AR虚拟仿真培训系统,让培训人员能够在零风险的环境中模拟泄漏处置、火灾逃生等场景。见图1。(3)案例驱动。将本企业或行业真实事故转化为情景模拟题,组织复盘讨论。通过理论+虚拟操作+案例分析的培训模式,有利于提高化工企业各级人员的安全素养和应急处理能力。



图1 化工虚拟仿真实训

5.3 人因工程与行为安全管控

人因事务是导致化工事故发生的主要因素之一。人因工程关注操作界面设计、作业流程安排、疲劳管理等因素对人为差错的影响;行为安全(BBS)则关注于通过观察、反馈、强化等手段纠正错误行为。具体管理对策为:针对关键操作实施双人确认模式;构建违章行为数据库,分析高频违章的类型、时间以及人群特点;推行“安全观察与沟通”制度,鼓励员工相互提醒、相互监督。

5.4 学习型安全组织的构建

事故是最好的借鉴案例,但前提是要具有从失败中总结成功关键的能力。因此,可构建学习型安全组织,构建非惩罚性的事件报告机制,鼓励员工主动上报未遂事件、微小异常;构建跨专业的事故调查团队,运用根因分析方法比如故障树等筛查系统缺陷;还可构建经验共享平台,将典型事件转化为培训案例,并且依照事故经验修订操作规程,通过持续优化提高操作的安全性。

6 结语

化工行业的安全管理是一项复杂工程,本文从安全生产视域出发,提出制度创新为基础保障、技术创新为核心驱动、文化培育为内在动力的管理对策,三者相互支撑。实践证明,只有将刚性制度约束、智能技术支撑与柔性文化深度融合,才可构建起立体化、预防性的安全管理体系。未来,企业还需要持续强化全员安全责任意识、推动安全文化走向习惯化,真正实现“本质安全”的目标。

参考文献

- [1] 王宇,高宇龙.智慧化工生产安全管控系统在煤化工企业的应用[J].科技与创新,2026(1):215-217+221.
- [2] 杨敏.基于数字化转型的无机化工安全生产智能管控模式综述[J].聚酯工业,2026,39(1):178-180.
- [3] 周勇,郭嘉,熊芸,何禄英,吴华东,刘根炎,喻发全.化工安全生产事故案例分析及其在化工安全与环保课程教学中的应用[J].化工设计通讯,2026,52(3):83-85.
- [4] 刘述作.煤化工生产过程安全管控与风险防控研究[J].中国科技期刊数据库 工业B,2026(1):077-080.
- [5] 张晓芳,信召阳,姚京裕.化工企业生产过程安全风险分级管控研究[J].流程工业,2026(3):55-57.
- [6] 郭彦玲,许丽娜.化工企业生产安全风险因素识别与管控研究[J].石油石化物资采购,2026(2):118-120.

Optimization and Energy Efficiency Improvement of the Steam Generation System Utilizing Waste Heat from the Top of the Acetic Acid Distillation Column

Jiqiang Liang

Lu Zhishen New Materials (Shandong) Co., Ltd., Dezhou, Shandong, 253000, China

Abstract

To achieve effective recovery and utilization of the waste heat from the top of the acetic acid distillation column, this paper thoroughly analyzes the challenges currently faced in waste heat recovery for steam generation, such as medium corrosion and parameter fluctuations, and proposes comprehensive optimization measures including the adoption of corrosion-resistant materials and staged cascade heat exchange. Additionally, the study examines the waste heat utilization project at the main distillation column top implemented by Shandong Luzhishen New Materials Company, which employs a dual-supply system combining “Ehara low-temperature waste heat for steam generation and low-temperature waste heat for chilled water production” to enable hierarchical waste heat recovery. The research demonstrates that the proposed optimization strategies and the Ehara dual-supply system effectively address the corrosion and energy efficiency bottlenecks in acetic acid system waste heat recovery, significantly improving waste heat utilization efficiency while substantially reducing steam procurement costs and power consumption.

Keywords

acetic acid distillation; waste heat recovery; steam generation; energy efficiency improvement

醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽系统优化与能效提升

梁吉强

鲁志伸新材料(山东)有限公司, 中国·山东 德州 253000

摘要

为实现对醋酸精馏塔顶余热的有效回收与利用。本文细致分析了当前余热回收制取蒸汽面临的介质腐蚀、参数波动等挑战,并提出升级耐腐蚀材料、分段梯级换热等综合优化措施。同时,针对主蒸塔塔顶余热利用项目,对其采用“溴化锂机组吸收低温余热制取蒸汽+低温余热制取低温冷冻水”双联供装置,实现对余热的梯级回收进行详尽探讨。研究表明,所提出的优化策略及双联供装置,可有效解决醋酸体系余热回收的腐蚀与能效瓶颈,在显著提升余热利用率的基础上,极大降低蒸汽外购与电力消耗。

关键词

醋酸精馏; 余热回收; 蒸汽制取; 能效提升

1 引言

醋酸作为重要的基础有机化工原料,其精馏过程通常会排出大量的气相余热,具备极高的回收价值^[1]。然而,当前工业现场多采用循环水或空冷器直接冷却,不仅白白浪费大量热量,而且还增加了冷却系统的负荷,即便部分企业尝试设置蒸汽发生器回收余热,长期运行也面临诸多瓶颈,比如产气压力不稳、出现锈蚀情况等。为改善这一状况,就要对醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽展开深入研究,通过提出一套涵盖材料选择、热泵协同和分段换热的系统性优化路径

【作者简介】梁吉强(1987-),男,中国山东东平人,本科,工程师,从事醋酸、醋酐、醋酸纤维素生产与技术研究。

体系,为醋酸精馏系统的节能降碳改造提供有利参考。

2 当前醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽面临的挑战

2.1 醋酸强腐蚀性

在醋酸精馏塔顶排出的气相物料中,醋酸、溶剂质量分数通常在70-95%之间,当换热器壁面温度低于醋酸-溶剂-水混合物的露点时,气相中的醋酸和水冷凝之后,就会在金属表面形成液膜。该液膜具有较强的酸性,极易在不锈钢表面引发点蚀和缝隙腐蚀,若选用钛材耐腐蚀材料,那么设备的一次性投资就会大幅度增加,这也成为制约余热回收系统长期稳定可靠运行的首要瓶颈。

2.2 余热品位波动大

醋酸精馏塔的操作工况会受到上游合成工段、进料组

成等多种因素影响,并且塔顶的温度也在 80-110°C 范围内波动,这一温度区间对应的饱和蒸汽压力仅为 0.05-0.15MPa,属于低压蒸汽范畴。然而,当塔顶温度降至 90°C 以下时,所产蒸汽压力可能低于 0.07MPa,难以直接并入厂区低压蒸汽管网,当塔顶温度升至 105°C 以上时,蒸汽压力又可能超出部分用汽设备的设计范围,这无疑会严重影响余热制取蒸汽系统的可靠性和经济性。

2.3 换热效率偏低

在传统塔顶余热回收方案中,更多是采用普通管壳式换热器作为蒸汽发生器,由于醋酸侧在冷凝过程中的传热系数较低,并且为了有效防止流速过高加剧冲刷腐蚀,实际操作就会采用限制管程流速的措施,这会极大降低传热效率。另外,工程设计上也会为了保护换热器不被酸液腐蚀,也会将塔顶气相冷却至远低于露点的温度,以确保换热壁面始终处于非冷凝的状态。这种做法虽能缓解腐蚀问题,却使大量中低品位热量被循环水或空冷器带走,无法转化为可以利用的蒸汽或热水。

3 醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽系统优化与能效提升的策略

3.1 耐腐蚀材料与防露点设计

对醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽系统进行优化,首先就要从材料升级和工况控制两个维度入手,既要提高换热管束自身的耐腐蚀能力,又要主动避免冷凝液膜形成。①选用高耐腐蚀合金材料。对于换热管的材质,应摒弃常规的不锈钢,优先选择钛钕合金。由于这些材料的点蚀当量大于 40,在醋酸、溶剂质量分数 70-95% 的工况下,可以将年腐蚀率控制在 0.05mm 以内。针对管板和壳体,可考虑采用碳钢衬聚四氟乙烯或搪瓷结构,这样可以避免异种金属接触产生的电偶腐蚀^[2]。②主动式壁温控制防露点。通过采用降膜式蒸汽发生器,实现对除盐水侧入口温度和流量的有效调节,确保换热管壁面温度始终高于醋酸-水混合物的露点。同时,还可在设备上安装在线露点仪,并与除盐水调节阀构成连锁回路,在监测到壁温接近露点时,就会自动增大除盐水流量或提高给水温度,保证气相醋酸不会在壁面上冷凝,以此从根本上解决酸液腐蚀的问题。

3.2 机械蒸汽再压缩与吸收式热泵协同

要使醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽切实满足厂区的用汽需求,就要注意协同配置机械蒸汽再压缩和吸收式热泵,在解决产汽压力过低且不稳定问题的同时,切实提升余热的品位。①配置机械蒸汽再压缩系统。当塔顶温度稳定高于 95°C 时,就可启用单级离心压缩机,将塔顶气相直接压缩至 0.5-0.8MPa,压缩后的过热蒸汽直接作为精馏塔再沸器的热源,以实现热量自循环,并减少外供蒸汽。②配置吸收式热泵。当塔顶温度较低或厂区电力成本较高时,就可改用溴化锂吸收式热泵,通过将厂区内废蒸汽作为驱动热源,从

塔顶余热中提取热量,并实现对低压蒸汽的有效制取。③实行协同切换控制。通过设置智能控制器,并根据塔顶温度、电力价格、蒸汽管网压力等实时数据,自动决策机械蒸汽再压缩系统或吸收式热泵的启停与负荷分配,以此实现全工况范围内的最低运行成本。

3.3 分段换热与能量梯级利用

考虑到传统余热回收系统换热效率偏低,有大量中低品位热量会被循环水带走,未能实现能量的分质分级利用,这时就可采取分段换热的策略,实现对蒸汽的依次制取,以提升综合能效。①高温段制取低压蒸汽。让塔顶气相首先进入降膜式蒸汽发生器,然后利用 100-115°C 的高温段热量,产制 0.15-0.3MPa 的饱和蒸汽,使这部分蒸汽直接并入厂区低压蒸汽管网,主要用于工艺加热或罐区保温。②中温段预热锅炉给水。对于经过高温段换热后的气相,可使其温度降低至 100°C 左右以后,再进入到钛材板式换热器中,使之与自除盐站的常温补水进行换热,待预热至 80-90°C 后,将预热后的给水送入蒸汽发生器,形成热量闭环,并减少蒸汽发生器所需的额外加热量。③低温段驱动吸收式制冷。塔顶气相经过中温段后,温度通常会降低至 70-85°C 左右,这时已经不具备直接产汽的经济性,就可将该部分余热直接用于驱动溴化锂吸收式制冷剂,实现对冷冻水的有效制取,直接供厂区夏季冷却或工艺吸收降温使用^[3]。

4 实际案例分析

4.1 项目概况

鲁志伸新材料(山东)有限公司位于德州市临邑县林子镇龙岗大街东段路北,主营业务为醋酸酯类及醋酸下游精细化学品的生产与销售。厂区实际生产运营时,所设有的醋酸精馏塔会持续排出温度在 80-100°C 之间的气相物料,主要成分是醋酸和水,流量较为稳定。在改造之前,这部分高温气相是直接进入循环水冷凝器冷却,大量余热被循环水带走并散失在环境中,不仅造成能源浪费,还加重了冷却水系统的负荷。与此同时,厂区多个工段需要低压蒸汽用于再沸器升温、罐区保温和冬季采暖,夏季吸收工段还需要低温冷冻水进行降温。为降低外购蒸汽和电力成本,提高能源利用效率,公司决定对主蒸塔塔顶余热进行回收改造,制取生产所需的蒸汽和冷冻水,最终采用的是溴化锂冷热系统低温余热综合利用方案。

4.2 装置介绍

溴化锂冷热低温余热制取蒸汽、低温余热制取低温冷冻水装置包含溴化锂冷热低温余热制取蒸汽系统(见图1)和蒸汽喷射压缩器两方面内容。前者主要是利用中、低温热能驱动,在采用低温冷却水的条件下,制取热量少于但温度高于中、低温热源的热量,通过将部分中热能转移到更高品位,从而提高热源的利用品位。后者则是使高压蒸汽通过喷嘴加速形成高速射流,在喷嘴出口产生低压区,然后对低压

蒸汽进行抽吸，并在混合后经扩压器降速升压，最终输出所需压力的流体。

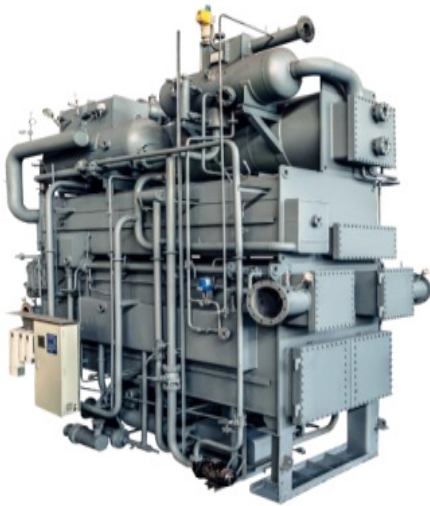


图1 溴化锂冷热低温余热制取蒸汽系统

4.3 工作流程

在利用低温余热制取蒸汽系统和蒸汽喷射压缩机制取饱和蒸汽时，其实际工作流程见图2，具体包括：①塔顶汽管道。通过在塔顶汽原主管道上开口，将其均分为两路，让其分别进入到2台低温余热制取蒸汽装置中，单台流量控制为70t/h。在塔顶汽经过制取蒸汽系统被吸收热量后，就会被冷凝为液态，温度也降低至74℃左右，分为两路液体进入原冷凝、冷却装置。②冷却水管道。来自厂区的32℃左右的冷却水，依然分成两路分别进入到低温余热制取蒸汽装置中，待升温至38℃并流后，直接返回厂区冷却水回水管道。③蒸汽补水管。直接通过补水泵，将90℃的蒸汽凝水分别补至2台低温余热制取蒸汽装置中，完成对0.2MPa负压蒸汽的有效制取。④蒸汽喷射压缩机。来自厂区的高压蒸汽，直接通过蒸汽喷射压缩机抽取低温余热制取蒸汽装置的0.2MPa蒸汽，并在进行混合以后，对压力0.45MPa饱和蒸汽的有效制取，这部分蒸汽则直接并入厂区原来的蒸汽管道，实现循环利用。

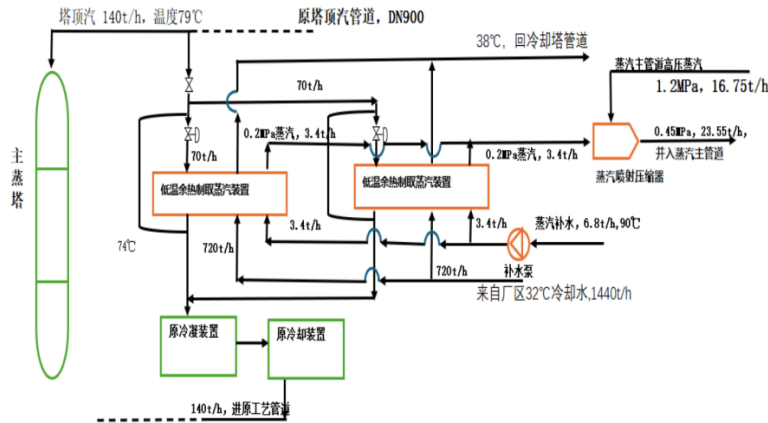


图2 制取蒸汽系统运行流程图

4.4 取得效果

该项目自投入运行以来，取得了较好的效果。①蒸汽自产。一台低温余热制取蒸汽装置产汽量为3.4t/h，蒸汽价格为165元/t，运行时间为8000h/年，节省蒸汽费用按2台机组全部运行计算，节省蒸汽费用达到897.6万元，满足了全厂低压蒸汽需求的一部分。②余热回收效率。在利用低温余热制取蒸汽系统和蒸汽喷射压缩机制取饱和蒸汽后，厂区精馏塔塔顶余热综合利用率由原本的52%提升至86%，实现了蒸汽、预热给水和冷冻水的梯级利用。③综合经济效益。用计算出的节省蒸汽费用减去制取蒸汽耗电费和冷却水补水费用，方案年节省运行费用达到694.05万元。同时，该方案的实施还减少了循环水系统的热负荷和厂区的碳排放，具有良好的环保效益。

5 结语

醋酸精馏塔顶余热回收制取蒸汽是实现化工行业节能

降碳的重要途径，实践中应该从工程实际情况出发，在系统把握当前余热回收制取蒸汽所面临挑战的基础上，灵活采用涵盖了耐腐蚀材料选与防露点设计、分段换热与能量梯级利用等措施进行优化改进。所引入的实际案例也验证了，根据自身情况搭建利用低温余热制取蒸汽系统+蒸汽喷射压缩机方案，不仅取得了每台低温余热制取蒸汽装置产汽量3.4t/h的应用效果，还极大提升了厂区余热综合利用率，为化工行业绿色低碳转型提供了强有力的支撑。

参考文献

- [1] 司泽华.新型蒸汽驱动热泵精馏过程强化研究与应用[D].天津大学,2023.
- [2] 陈颢.精馏系统能量集成与太阳能利用协同优化研究[D].天津大学,2022.
- [3] 王传成.精馏塔顶高温气体综合利用与过程控制[J].氮肥技术,2021, 07(22): 27-29.

Research on Chromium Oxide Hydrate Adsorbent and Its Preparation Process

Rong Liao

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

Abstract

As a mesoporous adsorbent with high performance, hydrated chromium oxide holds significant application value in the treatment of vanadium-containing wastewater from the chromium salt industry. This paper provides a systematic review of the research progress on two types of hydrated chromium oxide adsorbents— γ -CrOOH and $\text{Cr}(\text{OH})_3$ —covering their structural characteristics, mainstream preparation methods, vanadium adsorption performance, mechanisms of action, and regeneration techniques. It compares the distinct process features of hydrogen reduction, alkaline precipitation, hydrothermal treatment, and calcination methods, elucidates the structure-function relationships between specific surface area, pore structure, and adsorption performance, and summarizes an adsorption mechanism dominated by chemical adsorption with electrostatic attraction playing a supplementary role. The findings aim to provide theoretical references for the development and industrial application of hydrated chromium oxide adsorbents.

Keywords

hydrated chromium oxide; adsorbent; preparation process; vanadium contamination; wastewater treatment

水合氧化铬吸附剂及其制备工艺研究

廖荣

湖北振华化学股份有限公司, 中国·湖北黄石 435000

摘要

水合氧化铬作为具备高效性能的介孔吸附材料,在铬盐工业含钒废水治理相关工作中应用价值颇高。本文对 γ -CrOOH与 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 两类水合氧化铬吸附剂的研究进展予以系统综述,梳理其结构相关特性、主流制备工艺、钒吸附表现、作用机理及再生应用,比较氢气还原、碱沉淀、水热、焙烧法各自的工艺特征,揭示比表面积、孔结构和吸附性能的结构—功能关系,归纳化学吸附为主、静电吸引为辅的吸附机制,以期水合氧化铬吸附剂的研发和工业化应用提供理论参考。

关键词

水合氧化铬; 吸附剂; 制备工艺; 钒污染; 废水处理

1 引言

我国铬盐产量在全球产量里占35%。在无钙焙烧绿色工艺推广之后,铬酸盐浸出液里钒的浓度高达 $560\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。高毒性的五价钒不仅影响铬盐产品品质,还会污染环境、危害人体健康,需将钒含量降至 $45\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。传统除钒法存在分离效果差、成本高、易产生二次污染等弊端;吸附法因操作简便、处理高效且可回收钒资源,现已成为主流技术。水合氧化铬(γ -CrOOH、 $\text{Cr}(\text{OH})_3$)具备介孔结构丰富、羟基活性高、钒吸附选择性强、化学稳定性良好等优势,是极具应用潜力的除钒吸附剂。现阶段相关研究虽多,但鲜有针对其制备工艺、结构—性能关系、应用前景的系

统性综述。本文全面梳理现有研究成果,归纳核心关键技术,以期该类吸附剂的性能优化与工业化应用提供参考与支撑。

2 水合氧化铬吸附剂的结构与表面特性

水合氧化铬是铬元素和羟基、氧原子结合所形成的无机介孔材料,主要以 γ -CrOOH(羟基氧化铬)和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (氢氧化铬)两种核心形态为主;其结构与表面特性是决定吸附性能的核心支撑,也是制备工艺设计的关键目标。

2.1 物相及微观结构

γ -CrOOH属于斜方晶系无定形结构,为亮绿色粉体,微观上表现为片层混乱无序的堆叠状态,无明显团聚现象。该疏松结构为钒离子提供了充分的传质通道,其晶相纯度较高,不含其他铬氧化物杂相;比表面积稳定在 $80\text{—}120\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,孔径集中区间为 $20\text{—}40\text{nm}$,属于典型介孔材料。

$\text{Cr}(\text{OH})_3$ 为无定形两性氢氧化物,颗粒呈疏松多孔絮状;

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

冷冻干燥技术可最大限度保留其孔隙完整性,比表面积最高可达 $312.70\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔体积为 $0.48\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,孔径分布在 7—20nm。其孔隙率与活性位点密度远高于 $\gamma\text{-CrOOH}$ 。两种材料的 XRD 衍射峰均无尖锐特征,无定形结构会产生大量不饱和配位位点,是实现高效吸附的结构基础。

2.2 表面化学特性

水合氧化铬表面有大量 -OH、Cr-O-H、Cr-O 等活性官能团,这些基团是与钒离子结合的核心。在酸性条件下, $\gamma\text{-CrOOH}$ 表面羟基易发生质子化,形成带正电的吸附位点,可与五价钒离子形成特异性螯合键; $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 表面同时存在酸性位点与碱性位点,等电点约为 7.0,在 pH2.0—9.0 范围

内表面带正电荷,既能通过静电吸引吸附钒酸根阴离子,其表面羟基也可参与配位反应,实现双重吸附作用^[1]。

水合氧化铬化学稳定性优异,在酸性、中性及弱碱性水体中不溶解、不崩解,无铬离子溶出风险,符合水处理材料环保标准,也是其适用于工业废水处理的重要特性。

3 水合氧化铬吸附剂的制备工艺

制备工艺直接对水合氧化铬的物相、比表面积、孔隙结构与吸附活性起决定作用。目前国内外比较主流的制备方法包含氢气还原法、碱沉淀法、水热法、焙烧法,四种工艺的原料、条件、产品性能以及优缺点的对比详见表 1。

表 1 水合氧化铬吸附剂不同制备工艺对比

制备方法	核心原料	工艺条件	饱和吸附容量 / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
氢气还原法	铬酸钾 / 铬酸钠	450℃、 H_2 还原、 N_2 保护	9.6—9.8
碱沉淀法	重铬酸钾、硼酸	室温 ~ 100℃、碱滴定、陈化	30.2—32.8
水热法	重铬酸钾、硼酸	250℃、高压、pH=11	8.5—9.2
焙烧法	重铬酸钾、硼酸	600—1050℃、球磨焙烧	5.2—6.1

3.1 氢气还原法

氢气还原法是专门针对制备 $\gamma\text{-CrOOH}$ 的工艺,以铬酸钾、铬酸钠这类六价铬盐为原料,运用氢气的还原性把六价铬定向还原为三价铬的羟基氧化物。该工艺主要参数为还原温度、升温速率和气氛保护:把还原温度维持在 450℃ 时,还原反应处于最充分的情形,产物没有出现杂相;以 $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率进行,可避免局部过热造成孔结构坍塌;把氮气作为保护气,能够防止还原产物二次氧化。

该工艺的有利之处是原料适配铬盐工业副产物,不用额外开展提纯,产物有高纯度、结晶度可控,利于工业大规模化生产;不足之处是需进行高温反应,能耗比沉淀法更高,且仅可制备 $\gamma\text{-CrOOH}$ 单一产品。

3.2 碱沉淀法

碱沉淀法是高活性 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 制备的主流工艺,把三价铬盐(氯化铬、硝酸铬)当作原料,通过滴入氢氧化钠、氨水碱液使氢氧化铬沉淀析出,结合陈化以及冷冻干燥处理来得到介孔产品。工艺核心部分是沉淀速率、陈化时间及干燥方式:缓慢地滴加碱液可防止局部碱过多使颗粒致密化;陈化 3.5h 能使颗粒均匀地发育生长,孔隙结构最为发达;冷冻干燥可使颗粒不发生团聚,保障介孔结构完整。

该工艺反应条件温和、设备简单实用、比表面积可灵活控制,制备得到的 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 吸附性能最优,是实验室及中试阶段优先选用的工艺;不足之处是三价铬原料成本高于六价铬,沉淀母液需无害化处理,环保成本相对偏高。

3.3 水热法与焙烧法

水热法以重铬酸钠为铬源、硫化钠为还原剂,在 pH=11 强碱性、250℃、3.5MPa 的高温高压条件下制备水合氧化铬。该工艺需使用高压反应釜,设备投资大、能耗偏高,产物晶型度高、孔隙率低,吸附效果较差,仅适用于特殊晶

型材料制备,极少应用于吸附剂规模化生产。

焙烧法将铬盐与硼酸混合后经高温焙烧制得产物,工序简单、原料廉价,但高温易造成产物烧结、孔隙坍塌,比表面积不足 $50\text{m}^2/\text{g}$,吸附容量仅为碱沉淀法的六分之一,目前已逐步被淘汰^[2]。

4 水合氧化铬吸附钒离子的作用及影响因素

水合氧化铬吸附五价钒离子的性能十分出色,适配铬盐工业含钒废水、钒矿冶炼废水等诸多场景,静态、动态吸附性能和工业适配性的相关情况见表 2。

表 2 水合氧化铬吸附剂钒吸附性能对比

吸附剂种类	最佳 pH	吸附时间 / h	钒去除率 / %	出水浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
$\gamma\text{-CrOOH}$	2.0	10	99.75	0.75
$\text{Cr}(\text{OH})_3$	2.0—9.0	14	99.84	0.81

4.1 静态吸附性能

$\gamma\text{-CrOOH}$ 最佳吸附所对应的 pH 值为 2.0。于该条件下,钒离子以 VO_2^+ 形式而存在,同吸附剂表面质子化的羟基构建起 Cr-O-V 螯合键;吸附 10 小时之后就能够达到平衡,钒的去除情况是去除率达 99.75%,出水浓度远低于《钒工业污染物排放标准》(GB26452-2011)所规定的限值。

$\text{Cr}(\text{OH})_3$ 有着更强的吸附适配性,在 pH2.0 到 9.0 的宽区间内,去除率都保持 95% 以上;最佳吸附所对应的 pH 是 7.0,吸附 14 小时就达到了平衡,出水浓度降到了 $0.81\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可以直接对中性工业废水加以处理,不用对 pH 做调节,有效降低处理成本。

4.2 动态吸附性能

动态吸附是采用固定床反应器来进行的,流速、装填高

度、初始钒浓度是起核心作用的影响因素。以 0.75mL/min 的较慢流速、6—8cm 的较高装填高度、 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低初始浓度可显著提升处理效率；其中 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 对低浓度含钒废水的处理量可至 89.7BV， $\gamma\text{-CrOOH}$ 可以达到 39BV 的处理量，出水浓度都稳定低于 1.0mg/L ，可做到连续性的工业处理。

4.3 吸附性能的影响因素

溶液 pH: pH 对钒离子存在形态与吸附剂表面电荷起决定作用，是至关重要的影响因素。 $\gamma\text{-CrOOH}$ 仅在强酸性条件当中高效， $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 适合宽 pH 范围。

共存离子: 水体中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等常见离子对吸附无明显干扰， $\gamma\text{-CrOOH}$ 的除钒率一直保持在 97% 以上， $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 达到了 99.6% 以上。

温度: 吸附过程是自发的吸热反应，温度在 25—60℃ 升高，可使吸附速率和容量提升，30℃ 时就可以达成最优的吸附效果^[3]。

吸附剂结构: 比表面积越大、介孔所占的比例越高，吸附的容量越高。 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 拥有高比表面积，这是它性能比 $\gamma\text{-CrOOH}$ 好的核心要素。

5 吸附与解吸再生机理

5.1 吸附机理

水合氧化铬对五价钒的吸附，是化学吸附为主、静电吸引为辅的协同过程。 $\gamma\text{-CrOOH}$ 的吸附以化学吸附为主，在酸性条件下表面羟基质子化，与 VO_2^+ 发生螯合作用，生成稳定的 Cr 与 O、V 配位化合物。该过程符合拟二级动力学方程，吸附速率由化学反应控制。

$\text{Cr}(\text{OH})_3$ 存在两种吸附机理：在 pH 值 2.0 至 9.0 范围内，其表面带正电，与钒酸根阴离子 ($\text{H}_2\text{V}_{10}\text{O}_{28}^{4-}$ 、 $\text{HV}_{10}\text{O}_{28}^{5-}$) 产生静电吸引作用；表面羟基与钒离子形成配位键，进一步强化吸附效果。热力学拟合结果表明，两种吸附剂的吸附过程均符合 Langmuir 等温模型，以单分子层形式吸附，吸附过程自发且不可逆^[4]。

5.2 解吸与再生机理

实验采用 NaOH 碱性溶液进行解吸，通过 OH^- 置换吸附态钒离子，实现吸附剂再生与钒资源回收。 $\gamma\text{-CrOOH}$ 采用 0.6%NaOH 溶液、液固比 10:1，煮沸 4min，解吸率接近 100%； $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 采用 2.2%NaOH 溶液、液固比 50:1 处理，解吸率不低于 99%。

解吸后的钒离子可通过铵盐沉钒工艺富集回收，产品纯度可达 98% 以上；再生吸附剂经 5 次循环使用后，除钒率仍高于 95%，循环使用性能良好，可大幅降低工业应用成本，实现“废水处理、钒回收、吸附剂再生”一体化。

6 结语

水合氧化铬是铬盐含钒废水治理可选用的优质吸附材料， $\gamma\text{-CrOOH}$ 和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 均具备介孔发达、羟基活性高、除钒效率出众的特性。氢气还原法与碱沉淀法为其核心制备工艺，可精准调控材料结构与吸附活性。该材料对五价钒的吸附以化学吸附为主、静电吸引为辅，能够实现高效解吸再生，进而完成钒资源回收，工业适配性良好。未来研究需聚焦改性优化、成型制备及工艺集成，推动水合氧化铬吸附剂工业化落地，为重金属污染治理与钒资源循环利用提供高效技术支撑。

参考文献

- [1] 周爱国,霍英杰,吴俊晔,陈云浩,赵俊德,陈彦霖,郑家乐,葛天舒.二氧化碳直接空气捕集固态胺吸附剂研究进展[J].化工进展,2026,45(2):902-922.
- [2] 武洁,武泽文,王峰,张琦,唐忠锋.电石渣改性制备 CO_2 吸附剂的研究进展[J].无机盐工业,2025,57(11):1-930.
- [3] 桂昌青,王雅静,凌长见,王怀有,唐忠锋.氧化镁基二氧化碳吸附剂的制备及改性研究进展[J].无机盐工业,2023,55(8):77-83.
- [4] 赵继旭,胡建龙,邵立南,郑曦,梁存珍.HCl浓度对水合氧化铁复合吸附剂P吸附效能的影响[J].复合材料学报,2021,38(4):1139-1146.

Research on Green Extraction Process and Performance of Carbon Nanomaterials from Waste Lubricating Oil/Heavy Oil/Asphalt

Xin Zhao Fuliang Li*

Shandong North Zite Special Oil Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255304, China

Abstract

In response to the issues of high cost, significant energy consumption, and complex processes associated with traditional carbon nanomaterial preparation methods, this paper proposes a green process for extracting carbon nanomaterials from waste lubricating oil, heavy oil, or asphalt through membrane filtration combined with solvent extraction. The effects of key process parameters—including pretreatment, operating temperature ($\leq 120^{\circ}\text{C}$), pressure (0.2-1.0 MPa), and membrane material selection—on separation efficiency were systematically investigated. The results demonstrate that this process successfully extracts carbon nanomaterials with a size range of 0.7–50 nm and achieves size-based classification, with product purity as high as 99.0%. Among the tested feedstocks, petroleum asphalt yielded the highest carbon nanomaterial recovery rate, reaching 2.2–3.5%. Compared with conventional methods such as graphite arc discharge and chemical vapor deposition, the proposed approach offers significant advantages, including low raw material cost, simple process flow, mild operating conditions, low energy consumption, and environmental friendliness. The obtained carbon nanomaterials exhibit well-defined morphology and high specific surface area, demonstrating promising application potential in fields such as energy storage, environmental remediation, and composite materials. This study provides a new pathway for the low-cost, green preparation of carbon nanomaterials and the high-value utilization of carbon-containing waste and heavy resources.

Keywords

carbon nanomaterials; waste lubricating oil; heavy oil; asphalt; membrane separation; solvent extraction; resource utilization

基于废润滑油 / 重质油 / 沥青的碳纳米材料绿色提取工艺及性能研究

赵鑫 李富亮*

山东北方淄特特种油股份有限公司, 中国·山东 淄博 255304

摘要

针对传统碳纳米材料制备方法成本高、能耗大、工艺复杂等问题, 本文提出了一种以废润滑油、重质油或沥青为原料, 通过膜法过滤结合溶剂萃取提取碳纳米材料的绿色工艺。系统考察了预处理、操作温度 ($\leq 120^{\circ}\text{C}$)、压力 (0.2-1.0 MPa) 及膜材料选择等关键工艺参数对分离效果的影响。结果表明, 该工艺能成功提取尺寸范围为0.7-50 nm的碳纳米材料, 并实现按尺寸分级, 产品纯度高达99.0%。其中, 以石油沥青为原料的碳纳米材料收率最高, 可达2.2-3.5%。与传统石墨电弧法、化学气相沉积法等相比, 本方法具有原料成本低廉、工艺流程简单、操作条件温和、能耗低以及环境友好等显著优势。所获碳纳米材料形貌规整、比表面积高, 在能源存储、环境修复及复合材料等领域展现出良好应用潜力。本研究为碳纳米材料的低成本绿色制备及含碳废料/重质资源的高值化利用提供了新途径。

关键词

碳纳米材料; 废润滑油; 重质油; 沥青; 膜分离; 溶剂萃取; 资源化利用

1 引言

碳纳米材料凭借其独特的小尺寸效应、表面效应及量

子效应, 在能源、电子、生物医药和复合材料等领域具有广阔的应用前景^[1]。然而, 其规模化应用受限于现有制备技术。传统方法如石墨电弧法^[2]、化学气相沉积法 (CVD)^[3]、激光蒸发法^[4]及固相热解法等, 普遍存在原料成本高、工艺复杂、能耗大、可能引入金属催化剂污染等问题^[5]。另一方面, 随着工业发展, 每年产生大量废润滑油(我国约800万吨/年)、重质油及沥青等含碳废料或低值资源, 若处置不当将造成严重的环境压力^[6]; 而传统重质油加工(如溶剂脱沥青)工艺的产品附加值有限^[7]。

【作者简介】赵鑫(1987-), 男, 中国宁夏银川人, 从事润滑油应用研究。

【通讯作者】李富亮(1975-), 男, 中国山东聊城人, 硕士, 正高级工程师, 从事润滑油和导热油的产品研发和应用研究。

因此,开发从上述廉价或废弃含碳原料中提取高值碳纳米材料的新技术,兼具废物资源化与材料低成本制备的双重意义,是当前的研究热点之一^[8]。本研究基于专利技术(CN113088324B)^[9],系统探讨了以废润滑油、重质油或沥青为原料,通过“预处理-膜法过滤-溶剂提取”耦合工艺制备碳纳米材料的工艺特性。重点分析了工艺参数的影响,评估了产品性能,并与传统方法进行了对比,旨在为该技术的优化与工业化应用提供科学依据。

2 实验部分

2.1 原料与试剂

原料包括:工业/车用废润滑油(如液压油、齿轮油、发动机油等)、密度 $> 0.85 \text{ g/cm}^3$ 的重质油或油砂沥青、石油沥青/煤焦沥青/天然沥青。

试剂:分析纯乙醇、三氯甲烷、四氯化碳等有机溶剂。

膜材料:耐高温、耐溶剂的陶瓷或金属纳滤膜。

2.2 实验方法

参照授权专利 CN113088324B 的工艺流程^[9]。

2.2.1 预处理

废润滑油:于130-150℃、真空条件下脱水,防止水分影响膜分离。

重质油/沥青:采用有机溶剂(如四氯化碳)按1:1(V/V)比例稀释,以降低黏度,防止膜污染。

2.2.2 膜法过滤

将预处理后的原料在特定条件下进行循环浓缩纳滤。温度:废润滑油体系:60-120℃;重质油/沥青体系: $\leq 50^\circ\text{C}$ 。压力:0.2-1.0 MPa。分级:采用系列孔径(0.7, 1.0, 2.0, 5.0, 10, 20, 50 nm)纳滤膜,实现0.7-50 nm碳纳米材料的尺寸分级分离。

2.2.3 溶剂提取与纯化

萃取:用有机溶剂(如四氯化碳)对膜过滤浓缩液进行萃取(温度 $\leq 50^\circ\text{C}$),分离得到油-溶剂混合物及富含碳纳米材料的混合液。纯化:将上述混合液通过纳滤膜或反渗透膜(条件:温度 $\leq 50^\circ\text{C}$,压力0.2-2.0 MPa)进一步提纯,最终获得高纯度碳纳米材料,溶剂与油相可回收利用。

表1 不同原料提取碳纳米材料的主要工艺条件

原料类型	预处理方式	膜过滤温度 / °C	操作压力 / MPa	溶剂类型
废润滑油	真空脱水	60-120	0.2-1.0	四氯化碳等
重质油	溶剂稀释	≤ 50	0.2-1.0	四氯化碳等
沥青	溶剂稀释	≤ 50	0.2-1.0	四氯化碳等

2.3 分析与表征

采用透射电子显微镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)观察碳纳米材料的形貌和尺寸分布。通过X射线衍射(XRD)和拉曼光谱分析材料的结构特征。使用热重分析(TGA)评估材料的热稳定性。通过N₂吸附-脱附测

定材料的比表面积和孔结构参数。采用X射线光电子能谱(XPS)分析表面元素组成和化学状态。

3 结果与讨论

3.1 碳纳米材料提取效果分析

采用本工艺可从三类原料中成功提取尺寸分级明确的碳纳米材料(0.7-50 nm)。如表2所示,原料类型显著影响产品收率。石油沥青的碳纳米材料收率最高(2.2-3.5%),远高于废润滑油(0.3-0.53%)和重质油(0.35-0.52%)。这归因于沥青富含多环芳烃和缩合芳烃,是形成碳纳米材料的理想前驱体^[10]。所有产品纯度均达99.0%,表明该工艺能高效分离碳纳米材料与油相杂质。

表2 不同原料提取碳纳米材料的收率与纯度

原料类型	碳纳米材料尺寸范围 / nm	收率 / %	纯度 / %
废润滑油	0.7-50	0.3-0.53	99.0
石油沥青	0.7-50	2.2-3.5	99.0
重质油	0.7-50	0.35-0.52	99.0

产品尺寸分布呈现原料依赖性。废润滑油中较大尺寸(20-50 nm)材料比例较高,而石油沥青更易得到小尺寸(0.7-2 nm)材料[9]。这种差异与原料分子结构和组成直接相关。

3.2 工艺参数优化分析

3.2.1 温度的影响

温度是调控分离效率的关键。对于废润滑油,60-120℃为适宜范围,能有效降低黏度、提高过滤通量,同时避免油品高温老化产生新胶质。对于易结焦的重质油和沥青,需将温度控制在50℃以下,以防止膜孔堵塞并保持碳材料结构完整性。

3.2.2 压力的影响

适宜的操作压力范围为0.2-1.0 MPa。适度提高压力可增加过滤通量,但压力过高可能导致小尺寸纳米材料穿透膜孔,影响截留率,甚至损伤膜结构,尤其是在分离 $< 2 \text{ nm}$ 的材料时需格外注意。

3.2.3 膜材料的选择

陶瓷和金属纳滤膜因其优异的耐有机溶剂性、机械强度及热稳定性,是本工艺的理想选择。相比有机膜,它们能有效避免溶胀、老化等问题,保障了工艺的长期稳定运行。优化膜孔径分布和表面性质是进一步提高分离选择性的关键。

3.3 与传统制备方法的对比分析

表3对比了本方法与几种传统碳纳米材料制备方法的综合性能。本方法在原料成本、工艺复杂度、能耗及环境影响方面均展现出显著优势。其采用廉价或废弃原料,在近常温条件下操作,无需金属催化剂,避免了传统高温法(如CVD需500-1000℃)的高能耗,且工艺流程简单,环境友好。

表3 不同碳纳米材料制备方法的综合比较

制备方法	原料成本	工艺复杂度	能耗水平	产品纯度	环境影响
石墨电弧法	高	中等	高	高	中等
化学气相沉积 (CVD)	中等	高	中等	中等	中等
激光蒸发法	高	高	高	高	中等
固相热解法	中等	中等	中等	中等	中等
本方法	低	低	低	高	低

3.4 碳纳米材料的性能与应用前景

本方法提取的碳纳米材料具有形貌规整、尺寸均匀、比表面积高等特点。

能源存储：可作为锂离子电池负极材料或超级电容器电极材料。研究表明，沥青基纳米多孔碳在 3M KOH 电解液中比电容可达 130-180 F/g^[10]。**环境修复：**凭借高比表面积和丰富表面官能团，对 CO₂（吸附量 3-4 mmol/g）、有机污染物及重金属离子具有良好吸附性能，可用于碳捕获及水/气净化^[11]。**复合材料：**作为增强相可显著提升聚合物、陶瓷或金属基复合材料的力学、导电及热学性能。其低成本特性利于高性能低成本复合材料的开发。

3.5 技术经济性与环境效益分析

经济性：原料成本极低，工艺流程简单，设备投资与运行成本可控。初步估算，处理每吨废润滑油可产生约 3000 美元的附加值，经济性显著。**环境效益：**实现了危险废物的高值资源化，源头减污。过程温和，无剧烈化学反应，溶剂可循环利用，符合绿色化学原则。若与现有废油全加氢净化工艺结合，可实现再生油收率超 98%，极大提高资源利用率^[12]。同时，为重质油加工提供了提取高值纳米材料的新思路，提升整体产业链价值。

4 结论与展望

本研究开发了一种从废润滑油、重质油或沥青中绿色提取碳纳米材料的新工艺。通过耦合膜分离与溶剂萃取技术，在温和条件下（≤ 120℃，0.2-1.0 MPa）成功实现了 0.7-50 nm 碳纳米材料的高效分级提取，产品纯度达 99.0%。该工艺具有原料廉价易得、过程简单、能耗低、环境友好等突出优点，为碳纳米材料的低成本规模化制备及含碳废料/重质资源的高值化利用提供了创新性解决方案。

未来建议：（1）深入优化膜材料（如表面改性）以提高分离效率、选择性和膜寿命。（2）开展中试放大研究，推动该技术的工业化应用示范。（3）拓展所获碳纳米材料在催化、传感等新兴领域的应用研究。（4）探索本工艺与

现有石油加工流程（如溶剂脱沥青、重油组合工艺）的深度集成，构建更高效、经济的石油资源全组分高值利用新模式。

参考文献

- [1] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon [J].*Nature*, 1991, 354(6348): 56-58.
- [2] Ebbesen T W, Ajayan P M. Large-scale synthesis of carbon nanotubes [J].*Nature*, 1992, 358(6383): 220-222.
- [3] Thess A, Lee R, Nikolaev P, et al. Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes [J].*Science*, 1996, 273(5274): 483-487.
- [4] Guo T, Nikolaev P, Thess A, et al. Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization [J].*Chemical Physics Letters*, 1995, 243(1-2): 49-54.
- [5] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 柴永明, 刘宾, 张忠东, 等. 废润滑油再生技术现状及发展趋势分析[J]. *化工进展*, 2023, 42(5): 2457-2470.
- [7] 赵锁奇, 孙学文, 许志明, 等. 一种重质油加工的组合工艺: CN102807892A[P]. 2012-12-05.
- [8] Wang Y, Pan Z, He Y, et al. Sustainable synthesis of carbon nanomaterials from asphalt and their application in supercapacitors[J].*Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140123.
- [9] 山东英利新材料技术有限公司. 一种从废润滑油、重质油或沥青中提取碳纳米材料的方法: 中国, CN113088324B[P]. 2023-04-07.
- [10] Wang Y, Pan Z, He Y, et al. Sustainable synthesis of carbon nanomaterials from asphalt and their application in supercapacitors[J].*Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140123.
- [11] Sevilla M, Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage [J].*Energy & Environmental Science*, 2014, 7(4): 1250-1280.
- [12] 柴永明. 废润滑油全加氢净化绿色再生技术[J]. *化工科技*, 2025.

Analysis of the Causes of Corrosion in the Intercooler of the Ethylene Plant Cracked Gas Compressor

Chaohui You Zhangbin Luo Yongmeng Sun Kun Zhang

Sinopec Zhongyuan Petrochemical Co., Ltd., Puyang, Henan, 457000, China

Abstract

As a critical component of the ethylene plant cracking gas compressor, interstage coolers play a key role in enhancing equipment stability, efficiency, and safety. This article focuses on the characteristics of ethylene processes and industrial features, comprehensively analyzing corrosion-inducing factors such as process media, equipment design, and operating conditions. Emphasizing the importance of addressing interstage cooler corrosion, it clarifies the underlying logic of anti-corrosion measures. By implementing effective strategies in areas such as media treatment, operational optimization, and monitoring systems, the article proposes establishing a robust framework to address corrosion issues in cracking gas compressor interstage coolers, resolving problems like equipment leakage and declining heat transfer efficiency, thereby promoting the transformation and upgrading of ethylene production systems.

Keywords

ethylene production; cracking gas; compressor; interstage cooler; causes of corrosion

乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀原因分析

尤朝辉 罗涨宾 孙永猛 张坤

中国石化中原石油化工有限公司, 中国·河南 濮阳 457000

摘要

段间冷却器作为乙烯装置裂解气压缩机的重要组成部分,在提升设备运行的稳定性、高效性与安全性等方面发挥着关键性作用,文章着眼乙烯工艺特点与产业特性,综合介质、设备、工况等段间冷却器腐蚀诱发原因,着眼冷却器腐蚀处理的重要性,廓清防腐处理的底层逻辑,从介质处理、工况优化、监测体系等层面出发,采取有效举措,建立健全裂解气压缩机段间冷却器腐蚀问题应对体系,解决设备泄漏、换热效率下降等问题,助推乙烯生产体系的转型升级。

关键词

乙烯制备;裂解气;压缩机;段间冷却器;腐蚀原因

1 引言

间段冷却器由核心传热组件、支撑固定组件、密封连接组件等组成,依托合理的结构布局实现高温裂解气的快速冷却,为压缩机高效平稳运转提供有力支撑。在高温、高压等系列因素影响下,间段冷却器极易出现腐蚀问题,技术人员在总结过往有益经验的前提下,针对间段冷却器腐蚀诱因,创新防腐体系,健全应对路径,强化相关模块组件维护与管理效能。

2 乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀诱发原因

2.1 介质因素

裂解气中含有的 H_2S 、 CO_2 等酸性组分,在冷却器运行

过程中与管程冷却水发生反应,生成酸性水溶液,破坏冷却器金属表面的钝化膜,引发均匀腐蚀与点蚀,其中 H_2S 的腐蚀作用具有隐蔽性强、发展速度快的特点,易在换热管内壁形成腐蚀坑,逐步导致管壁减薄、泄漏失效^[1]。同时,裂解气中携带的微量 Cl^- 、 F^- 等卤素离子,会穿透金属钝化膜的薄弱区域,引发应力腐蚀开裂,尤其在冷却器管板与换热管连接的焊缝处,卤素离子的富集会加剧腐蚀速率,形成局部腐蚀失效点。裂解气中含有没有完全分离的重质油组分、焦粉等杂质,会在冷却器内壁沉积,形成污垢层。污垢层在很大程度上会阻碍热量传递,导致局部温度升高,加剧介质的腐蚀活性。

2.2 设备因素

部分乙烯装置选用普通碳钢或低合金钢材作为冷却器换热管与管板材质,此类材质的耐酸性、耐点蚀性能较差,无法适应裂解气与冷却水的复合腐蚀环境,尤其在高温高压工况下,材质的腐蚀疲劳强度大幅下降,容易出现腐蚀开裂。

【作者简介】尤朝辉(1986-),男,中国河南登封人,本科,工程师,从事于乙烯装置裂解气压缩机操作与维护研究。

在结构设计层面,冷却器管板与换热管的连接方式、折流板的布置间距等设计不合理,会导致壳程裂解气流动产生涡流,形成局部负压区与介质滞留区,加剧介质的局部富集与腐蚀。密封结构设计存在缺陷,如垫片选型不当、法兰密封面加工精度不足,会导致冷却水与裂解气交叉泄漏,两种介质混合后形成更强腐蚀性的混合体系,加速冷却器的腐蚀失效。设备制造过程中的焊接缺陷、表面处理不彻底等问题,会导致金属表面存在微观裂纹、氧化皮等缺陷,这些缺陷成为腐蚀介质的侵入点,降低设备的腐蚀防护能力,诱发局部腐蚀失效,导致腐蚀隐患长期积累。

2.3 工况因素

裂解气压缩机在负荷调整、启停操作等过程中,段间冷却器的运行温度、压力会发生剧烈波动,导致金属材料产生热应力与机械应力,应力集中现象会破坏金属表面的钝化膜,形成应力腐蚀开裂的敏感区域,尤其在设备启停频繁的工况下,应力腐蚀的累积效应会大幅缩短冷却器的使用寿命。冷却水 pH 值偏低、硬度超标、微生物含量过高,会加剧冷却器管程的腐蚀与结垢,其中 pH 值过低会增强冷却水的酸性,加速金属腐蚀^[2]。硬度超标会导致水垢沉积,引发垢下腐蚀;微生物繁殖会产生代谢产物,形成生物膜,与腐蚀介质协同作用,加剧设备腐蚀。裂解气酸性组分含量突然升高、杂质含量超标,会导致冷却器的腐蚀环境急剧恶化,超出设备的腐蚀承受能力,引发突发性腐蚀失效。

3 乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀处理的重要性

3.1 保持设备运行的稳定性

段间冷却器发生腐蚀后会导致换热管内壁减薄、泄漏,进而影响裂解气的冷却效果,导致压缩机入口温度超标,引发压缩机负荷波动、振动加剧等问题,严重时会导致压缩机非计划停机,中断乙烯生产流程。通过科学的腐蚀处理,可有效降低冷却器的腐蚀速率,修复腐蚀缺陷,维持设备的结构完整性与换热效能,确保冷却器能够持续稳定地发挥冷却作用,为裂解气压缩机的平稳运行提供保障。同时,腐蚀处理可减少设备的故障频次,降低设备运维成本,避免因腐蚀失效导致的生产中断,保障乙烯生产的连续性,对于大型乙烯装置而言,能够有效提升生产计划的执行力,减少因设备故障带来的产能损失,推动乙烯生产体系的稳定运行。

3.2 提升设备运行的安全性

段间冷却器腐蚀泄漏后,裂解气中含有的易燃易爆、有毒有害组分可能会与冷却水混合,引发泄漏、爆炸、中毒等事故,威胁操作人员的人身安全与设备的安全运行^[3]。腐蚀导致的设备结构强度下降,在高温高压工况下可能会引发设备破裂,造成严重的安全事故。通过有效的腐蚀处理,

及时发现并消除冷却器的腐蚀隐患,强化设备的腐蚀防护能力,避免腐蚀失效引发的安全事故,保障生产现场的安全稳定。腐蚀处理过程中,同步完善设备的安全防护体系,优化腐蚀监测与预警机制,提升设备运维的安全性与规范性,实现对腐蚀风险的精准管控,为乙烯装置的安全生产提供坚实保障。

3.3 确保设备运行的高效性

段间冷却器发生腐蚀后,换热管内壁会形成腐蚀产物与污垢沉积,导致换热系数下降,冷却效果变差,为了维持压缩机的正常运行,需要消耗更多的能源来提升冷却效果,导致生产能耗攀升,腐蚀导致的设备泄漏,会造成裂解气的损耗,降低乙烯产品的产能与收率,影响生产效益。通过科学的腐蚀处理,可清除换热管内壁的腐蚀产物与污垢,修复腐蚀缺陷,恢复冷却器的换热效能,降低生产能耗,延长冷却器的使用寿命,减少设备更换成本,提升设备的运行效率与利用效率。腐蚀处理过程中,结合设备运行实际,优化冷却器的运行参数与维护方案,提升设备的换热效率,推动乙烯生产朝着节能、高效、低碳的方向发展。

4 乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀问题应对策略

4.1 健全完善介质处理工艺

针对介质因素引发的腐蚀问题,技术人员应当立足乙烯工艺特点,健全完善介质预处理与净化工艺,从源头降低腐蚀介质的危害,构建全流程介质腐蚀防控体系。在裂解气预处理环节,优化脱硫、脱碳工艺,采用高效脱硫剂与脱碳剂,精准控制裂解气中 H₂S、CO₂ 等酸性组分的含量,将其控制在设备腐蚀承受范围内。增设精密过滤装置,有效去除裂解气中携带的焦粉、重质油等杂质,减少杂质沉积引发的垢下腐蚀^[4]。在冷却水处理环节,构建智能化水质调控体系,实时监测冷却水的 pH 值、硬度、微生物含量等参数,通过添加缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂等药剂,调节冷却水水质,抑制冷却水的腐蚀与结垢。采用循环水旁滤处理技术,去除循环水中的悬浮物与杂质,提升冷却水的洁净度,减少腐蚀介质的积累。建立介质组分实时监测机制,及时预警介质组分波动引发的腐蚀风险,实现对介质腐蚀的精准防控,推动介质处理工艺朝着精细化、智能化方向升级。

4.2 优化调整防腐技术方案

结合设备腐蚀特点与运行工况,优化调整防腐技术方案,强化设备的腐蚀防护能力,实现腐蚀防护的针对性与长效性,突破传统防腐技术的局限性。在材质优化方面,结合冷却器的腐蚀环境,选用双相不锈钢、钛合金等耐酸性、耐点蚀、耐应力腐蚀性能优异的特种钢材,替代传统普通碳钢与低合金钢材,提升设备的抗腐蚀能力,如表 1 所示:

表 1 双相不锈钢、钛合金参数统计表

材质类型	具体牌号 / 类型	耐酸性参数 (25℃, 腐蚀速率)	耐点蚀参数 (PREN 值 / 临界点蚀温度)	耐应力腐蚀性能
双相不锈钢	B2101 (氮合金化经济型)	3.0-4.0 g/m ² ·h (酸性介质); 在 H ₂ S、CO ₂ 混合酸性环境中腐蚀速率 ≤ 0.1mm/a	PREN 值 ≥ 24; 临界点蚀温度 ≈45℃	耐 Cl ⁻ 应力腐蚀开裂, 腐蚀疲劳性能优良, 屈服强度是 300 系列不锈钢的 2 倍
钛合金	钛钯合金 (Ti-Pd)	硫酸 (< 5%): 常温下腐蚀速率 ≤ 0.01mm/a; 强酸性混合介质中腐蚀速率 ≤ 0.03mm/a	临界点蚀温度 > 120℃, 完全耐受高浓度 Cl ⁻ 环境, 无点蚀风险	耐应力腐蚀性能优于纯钛, 可承受高温高压工况下的应力冲击, 不易开裂

针对于换热管等组件, 工作人员按照技术规范, 通过防腐层喷涂等处理方式, 进行组件表面的防腐处理, 强化设备的防腐能力, 延长设备使用寿命, 降低故障发生概率。同步, 做好冷却器结构做好必要的优化处理, 对管板、换热管的连接方式进行调整, 考虑到连接区域的结构强度与耐久性, 工作人员可以采用胀焊结合工艺, 确保连接区域的物理性能、力学性能符合预期。

4.3 科学规范设备运行参数

工作人员坚持问题导向, 综合分析设备工况环境, 对设备运行参数做出必要的调整, 对设备操作流程进行优化, 形成科学、规范的设备运行管控模式, 通过这种方式, 避免操作不当引发冷却器腐蚀问题, 确保设备模块始终处于良性区间。

建立健全裂解气压缩机、段间冷却器协同管理机制, 运用大数据技术、人工智能技术, 掌握压缩机负荷参数, 通过发掘核心数据, 制定压缩机负荷调控方案, 针对性地优化温度、压力等指标, 确保压缩机运行的平稳性, 有效释放热应力, 减少机械应力的积累, 保证应力腐蚀的应对能力^[5]。工作人员还需要做好冷却水温度、流量、水体质量的监控, 根据监控结果, 即时介入, 确保冷却水的冷却效果, 避免引发冷却器温度异常升高等问题, 降低设备腐蚀的发生概率。在此基础上, 常态化做好冷却水系统的维护, 对污垢、腐蚀产物按照行业有关规定进行清理, 同时, 做好设备启停、负荷调整等常规性设备维护工作, 根据维护工作的要求, 针对性做好专业化、主题化培训, 借助这种方式, 增强人员对冷却器的管护能力。

4.4 建立设备腐蚀监测体系

工作人员要结合实际, 打造全周期腐蚀检测机制, 对冷却器腐蚀问题进行实时监测、科学预警以及精准介入, 实现腐蚀问题的超前应对, 补齐过往冷却器腐蚀问题的处理短板。具体来看, 工作人员遵循冷却器腐蚀规律, 结合结构特点与工况环境, 合理设置腐蚀监测点, 依托超声波检测、红

外线成像检测等技术方案, 实时、精准获取换热管、管板等关键性区域的腐蚀速度、腐蚀程度, 判定腐蚀缺陷, 实现冷却器腐蚀问题的定向分析, 增强腐蚀问题处置的针对性与有效性。

完善腐蚀数据分析评估平台, 借助大数据技术以及人工智能神经网络, 对获取的腐蚀监测数据进行采集、分析、存储、共享以及应用, 绘制冷却器腐蚀问题发展曲线, 归纳腐蚀问题发展规律, 对腐蚀严重程度、危害性进行分析。同时, 考虑到冷却器工况环境的复杂性以及防腐处理要求的严格性, 工作人员在做好上述的过程基础上, 还应当结合乙烯生产工艺特点, 建立健全冷却器腐蚀风险评估模型, 引入数学算法, 结合实时检测数据, 做好冷却器的腐蚀风险的定期评估, 工作人员依据分析结果, 明确腐蚀防控的重点环节与措施, 制定针对性的冷却器腐蚀问题处理方案。

5 结语

文章系统剖析段间冷却器腐蚀的诱发原因, 从介质处理、防腐技术、运行参数、监测体系四个维度, 提出了具有创新性与针对性的应对策略, 构建了全流程、多维度的腐蚀防控体系, 有效填补了传统防腐工作中针对性不足、长效性欠缺的短板。

参考文献

- [1] 马红杰, 周尖, 丁少辉等. 乙烯装置裂解气压缩机段间冷却器腐蚀原因分析[J]. 炼油技术与工程, 2024 (6): 38-42.
- [2] 王哲, 杨华栋, 杨彦红等. 探究原料重质化趋势下裂解气压缩机结垢腐蚀处理对策[J]. 粘接, 2026 (1): 177-180.
- [3] 张志飞, 薛新超, 董亚龙等. 乙烯装置裂解气压缩机“5年1修”的探索实践[J]. 乙烯工业, 2025 (4): 23-26.
- [4] 李景平, 贾立翔, 赵明辉. 基于能效监测的裂解气压缩机组效率提升对策[J]. 石油石化节能与计算, 2025 (7): 93-94.
- [5] 贾会平. 乙烯装置裂解气压缩机系统的设计研究[J]. 化工设计, 2025 (2): 6-10.

Application of ICP Analysis Technology in the Detection of Trace Iron, Manganese, Lead and Silicon in Gasoline

Chun Li

China Inspection and Certification Group Guangdong Co., Ltd. Daya Bay Branch, Huizhou, Guangdong, 516000, China

Abstract

The accurate determination of trace amounts of iron, manganese, lead, and silicon in gasoline is of significant importance for fuel quality control and engine performance evaluation. However, spectral and non-spectral interferences caused by the complex organic matrix severely limit the detection accuracy. In this study, inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) was employed, combining matrix matching and standard addition methods to correct matrix effects. Additionally, improvements in radio frequency power, atomization gas flow rate, and internal standard elements were applied to compensate for signal fluctuations and enhance analytical stability. Sample pretreatment involved a combined approach of dilution and microwave digestion, along with the selection of characteristic spectral lines and interference correction algorithms, effectively overcoming C₂ band spectral overlap and inter-element cross-interference. The results show that the method detection limits for Fe, Mn, Pb, and Si were 0.8, 0.5, 1.2, and 2.0 μg/L, respectively, with spiked recovery rates between 95% and 105%, and relative standard deviations below 5%. This method achieved simultaneous and accurate determination of multiple elements.

Keywords

ICP-OES; trace elements in gasoline; matrix interference correction; standard addition method; spectral interference correction

ICP 分析技术在汽油中微量铁锰铅硅元素检测中的应用研究

黎春

中国检验认证集团广东有限公司大亚湾分公司, 中国·广东 惠州 516000

摘要

汽油中微量铁、锰、铅、硅的准确测定对燃料质量控制跟发动机性能评估有着重要意义,但是繁复有机基体带来的光谱与非光谱干扰严重制约检测精度。根据此,本研究依据电感耦合等离子体发射光谱技术,融合基体匹配与标准加入法校正基体效应,并凭借改良射频功率、雾化气流速及内标元素补偿信号波动,增强分析稳定性。样品前处理使用稀释与微波消解相结合方案,辅以特征谱线选择跟干扰校正算法,有效克服C₂带谱重叠及元素间交叉干扰。结果表明,方法检出限分别为Fe 0.8、Mn 0.5、Pb 1.2、Si 2.0 μg/L,加标回收率95%–105%,相对标准偏差低于5%,实现了多元素同步准确测定。

关键词

ICP-OES; 汽油中微量元素; 基体干扰校正; 标准加入法; 光谱干扰校正

1 引言

随着社会对环保要求的不断提高和燃料质量监管的日益严格,汽油中微量元素的检测成为了燃料质量控制的重要环节。铁、锰、铅、硅等元素在汽油中的含量不仅直接影响发动机的性能,还与燃烧效率、排放水平及环境污染密切相关。电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)技术因其高灵敏度、广泛的元素适用性和优异的检测能力,成为了分析汽油中微量元素的理想工具。通过优化样品前处理技术和仪器参数,如内标法、标准加入法和基体匹配等手段,能够有效克服基体干扰,精确测定铁、锰、铅、硅等元素的浓度。

【作者简介】黎春(1986–),女,壮族,中国广东惠州人,本科,助理工程师,从事化工分析研究。

本文旨在探讨 ICP-OES 技术在汽油中微量铁、锰、铅、硅元素检测中的应用,分析其原理与技术优势,并提出相应的优化措施,期望为提高燃料质量监控提供理论依据和技术支持。

2 ICP-OES 技术原理与应用概述

电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)技术基于高温等离子体对样品中元素的激发,能够精确测定元素的浓度。ICP-OES 的工作原理是将样品通过雾化器转化为气溶胶,在高温等离子体中使样品中的原子或离子激发到高能态。当原子或离子从激发态返回基态时,会释放出特征光谱线,检测器通过捕捉这些光谱信号来分析元素的浓度。利曼科技的 Prodigy7 电感耦合等离子体发射光谱仪是目前应用于分析领域的一款先进仪器,具有高分辨率光谱系统和先进的信号处

理算法^[1]。该仪器采用全谱直读技术,可以对复杂基体中的多种元素进行高效分析。Prodigy7 仪器配备了改进的高温等离子体源,确保高灵敏度和精确的信号响应,特别适用于汽油中铁、锰、铅、硅等微量元素的检测。通过优化射频功率、雾化气流速和背景校正等操作条件,Prodigy7 能够有效减少基体干扰,提供稳定可靠的分析结果。此外,结合内标法、标准加入法和基体匹配技术,该仪器的分析性能进一步得到提升,为汽油质量监控提供了可靠的技术保障^[2]。

3 汽油中目标元素的样品前处理方法

3.1 汽油基体对 ICP 检测的干扰特性

汽油基体对 ICP 检测的干扰主要表现为光谱与非光谱干扰。光谱干扰源于共存分子发射谱带跟目标元素谱线的重叠,如 C₂ 分子带对 Fe 248.327 nm 的干扰。非光谱干扰则囊括基体抑制致使的传输能力下降,以及硅氧烷在进样系统表面沉积引发的记忆效应。借助针对性校正方略,如谱线选择与仪器条件改良,可将干扰影响降至最低,保证检测准确性。汽油中目标元素 ICP 检测的主要干扰特性及缓解措施如表 1.1 所示。

表 1.1 汽油中目标元素 ICP 检测的主要干扰特性及缓解措施

目标元素	干扰类型	主要干扰源	干扰机制简述	干扰程度 (相对标准偏差 RSD%)	关键分析谱线 (nm)	主要缓解措施
Fe	光谱干扰	C ₂ 分子带 (240–245 nm)	C ₂ Swan 带与 Fe 谱线重叠	+12.3% (校正前)	248.327	多点背景校正与高分辨率光栅
Mn	非光谱干扰 (基体抑制)	烷烃 (C ₈ –C ₁₂)	气溶胶传输效率下降	-18.7% (10% v/v 基体)	257.610	内标法 (Y) 与雾化优化
Pb	光谱干扰	TiO 分子带 (283 nm)	TiO α-band 与 Pb 谱线重叠	+34.5% (含 Ti 时)	283.306	选用次灵敏线 (220.353 nm)
Si	非光谱干扰 (记忆效应)	硅氧烷 (如 D4/D5)	SiO ₂ 在石英表面沉积	信号衰减 41% (连续进样后)	251.611	氩气反吹与 HF 清洗程序
通用影响	物理干扰	芳烃、烯烃等	改变溶液物化性质,加剧雾化不稳定	RSD 升高 3.8–5.2 个百分点	—	优化样品引入系统与内标监控

3.2 有机基体消解策略选择

有机基体消解方针的选择需依据汽油样品的理化特性及目标元素的赋存形态。对于可溶性较好且金属浓度较低的样品,直接稀释法融合有机溶剂稀释跟基体匹配校正可有效维持元素稳定性,避免挥发损失。当样品基体冗杂或存在沉淀风险时,湿法酸消解借助强氧化性酸破坏碳链结构,实现铁、锰、铅、硅的彻底释放。若消解能力要求更高,则使用微波辅助消解,利用高温高压强化反应动力学,明显加强消解完全度。每一步骤后均需实行消解效果评估,保证无残余碳化物干扰后续 ICP 分析,保障检测准确性^[3]。

4 ICP 检测参数优化与方法验证

4.1 稀释与内标校正技术优化

稀释技术的改良过程需要平衡基体效应与检测限之间的矛盾,汽油样品一般使用有机溶剂实行适度稀释以减少其粘度以及碳含量,过高的稀释倍数虽然能缓解基体干扰却可能致使目标微量元素信号低于仪器检出限,实验说明选择异丙醇或二甲苯作为稀释剂并在 5 至 10 倍范围内实行稀释可以取得较好的折中效果。内标校正技术的引入意在监控并补偿分析过程中的信号漂移与基体抑制,选用钪、铈等元素作为内标物其关键在于内标元素需具备跟待测元素相似的分析行为且在样品中本底浓度极低,凭借在线加入内标溶液并实时监测内标信号的变化,仪器可以自动校正因进样能力波动或等离子体不稳定引起的测量误差,该方法明显增进了铁、锰、铅、硅等元素定量分析的准确度跟精密度,其加标

回收率可以稳定在 95% 至 105% 的满意区间。

4.2 分析谱线筛选与背景校正

分析谱线的筛选过程需要融合考量待测元素的特征谱线强度与潜在光谱干扰情况,针对汽油基体繁复的有机组分可能产生的分子谱带跟共存元素谱线重叠现象,研发团队系统评估了铁、锰、铅、硅各元素多条灵敏线跟次灵敏线的信背比及线性范围,优先选取那些受碳氢化合物燃烧产物及常见添加剂干扰最小的谱线作为分析线,譬如铁的 259.940 nm 与 238.204 nm 谱线均具备良好的分析特性,而锰的 257.610 nm 谱线则因其相对较高的灵敏度与较低的光谱背景被确定为最佳选择,铅的 220.353 nm 谱线跟硅的 251.611 nm 谱线同样经过类似评估流程可以确认,背景校正方针则使用离峰测量法,在分析谱线两侧选取无特征发射的背景点实行信号采集,借此扣除由基体连续背景与杂散光带来的非特征信号,保证检测结果具备优异的准确度跟精密度^[4]。

5 多元素同步检测能力与干扰控制

5.1 检出限与精密度评估指标

为评估 ICP-OES 方法的性能,对 Fe、Mn、Pb、Si 四种元素的检出限与精密度实行了系统测定。方法检出限借助分析 11 次空白溶液的标准偏差计算得出,结果分别为 Fe 0.8 μg/L、Mn 0.5 μg/L、Pb 1.2 μg/L、Si 2.0 μg/L,均满足汽油中痕量元素分析要求。精密度凭借连续测定同一加标样品 7 次实行验证,其相对标准偏差 (RSD) 均低于 5%,说明方法有着良好的重复性跟稳定性。2020–2024 年 Fe、Pb 元素检出限与 RSD 变化趋势如图 3.1 所示。

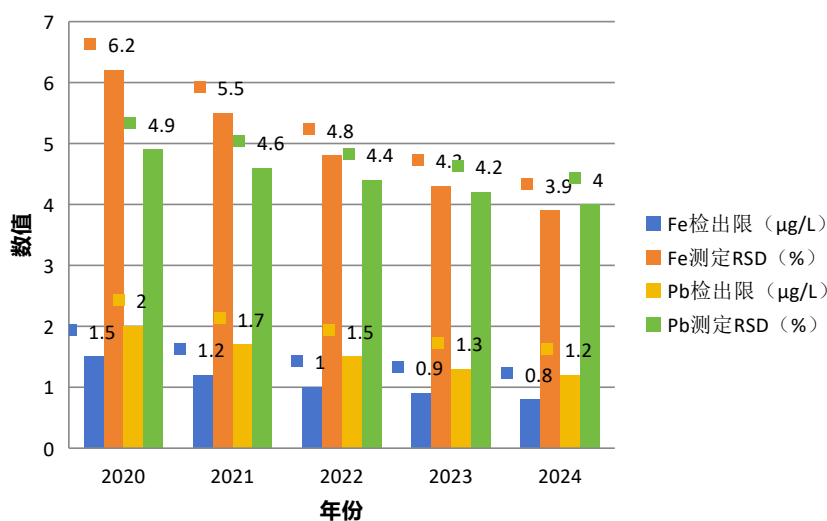


图 3.1 2020–2024 年 Fe、Pb 元素检出限与 RSD 变化趋势

数据显示,通过持续优化仪器参数与样品前处理流程,Fe 元素的检出限在五年间从 1.5 µg/L 稳步下降至 0.8 µg/L,同时方法精密度(RSD)由 6.2% 改善至 3.9%,验证了该方法在长期应用中的可靠性与持续改进潜力。

5.2 铁锰铅硅共存体系的光谱重叠分析

铁锰铅硅共存体系的光谱重叠分析构成 ICP 技术应用于汽油多元素检测的重点考验,此类元素在特定波长处存在谱线相互干扰的现象,譬如铁的 259.940 纳米谱线跟锰的 259.373 纳米谱线邻近可能产生重叠,铅的 220.353 纳米谱线则容易受到硅基体连续背景辐射的影响,该类光谱干扰直接致使各元素特征信号分辨困难并影响定量结果的准确性,现代全谱直读 ICP 光谱仪一般配备高分辨率光学系统跟先进的干扰校正算法,借助数学建模对重叠谱峰实行剥离与解析,继而在冗杂的汽油基质中实现铁锰铅硅四种微量元素的准确区分跟同步测定。同时借助绘制加入量与仪器响应值的线性关系曲线外推求得原始样品浓度,这两种方法有效克服了汽油繁复有机基体带来的信号抑制或增强效应,为获得准确的铁、锰、铅、硅等元素的定量结果给予了核心的技术保障^[5]。

6 结论

电感耦合等离子体原子发射光谱法依赖高温氩等离子体实现汽油中铁、锰、铅、硅的高效原子化跟特征谱线激发,

其信号强度与元素浓度呈良好线性关系,为痕量金属及类金属元素的定量分析给出了坚实的物理基础,基体匹配跟标准加入法协同校正汽油冗杂有机基质引起的雾化能力差异跟激发抑制效应,内标法融合钷或铽实时监控信号漂移,稀释介质优选异丙醇或二甲苯并控制 5–10 倍稀释倍数,在保障信背比的时候明显削弱碳基分子带干扰,Fe 259.940 nm 与 Mn 257.610 nm 等高选择性谱线配合离峰背景校正及全谱数学剥离算法,成功规避 Fe–Mn 谱线邻近重叠跟 Pb 受 Si 背景辐射影响等共存干扰,方法检出限达 0.5–2.0 µg/L,七次重复测定 RSD 均低于 5%,加标回收率稳定于 95%–105%,验证了该技术在汽油实际样品中同步、准确、可靠测定四种目标元素的工程适用性与质量控制能力。

参考文献

- [1] 于冰,王雯丹,刘波,赵庸,王硕. 汽油中硅元素分析的研究进展[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):119-121.
- [2] 刘世涛. ICP-OES法测定轻质油中硅含量研究[J].化学工程与装备,2024,(11):104-107.
- [3] 夏华荣,金迪芳,曹薇. ICP-OES法检测汽油中铅铁锰硅元素的方法研究[J].中国检验检测,2024,32(03):9-13.
- [4] 卓可强,田盼盼,董丹丹. ICP-OES法测定汽油中的铁锰铅及硅元素[J].山东化工,2022,51(04):121-123.
- [5] 徐大智,陈冬梅,杨帆,吉豪杰. ICP-OES检测C5轻烃中硅质量分数的研究[J].当代化工,2021,50(12):3005-3008.

Analysis of Aromatic Components in Sandalwood Essential Oil Obtained by Different Extraction Methods

Limin Niu Wangbao Gan Lijun Shan*

Beijing Delan Hechuang Biotechnology Co., Ltd., Huaibei, Anhui, 235000, China

Abstract

In order to draw parallels between the aromatic quality disparities of sandalwood essential oils obtained through divergent extraction methodologies, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was utilised to analyse the aroma components and their concentrations in oils derived from steam distillation and supercritical CO₂ extraction. The results of the study identified a total of 71 aroma compounds, with a high proportion of alcohol compounds such as Z- α -santalol, β -santalol, cis-austalol, and cis-cinnamyl alcohol, accounting for over 85% of the total content. In addition, 39 and 48 compounds were identified in sandalwood essential oils obtained via steam distillation and supercritical CO₂ extraction, respectively, with 16 compounds being common to both methods. This finding suggests that the extraction methods employed significantly influence the composition of the essential oil, and that the presence of different extraction methods results in a marked variation in the aroma components of the sandalwood essential oil.

Keywords

sandalwood essential oil; steam distillation; supercritical CO₂ extraction; aroma component analysis

不同提取方法所得檀香精油香气成分分析

牛丽敏 甘望宝 单丽君*

北京德兰合创生物科技有限公司, 中国·安徽 淮北 235000

摘要

为比较不同提取方法所得檀香精油的香气品质差异, 采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测分析水蒸气蒸馏法和超临界CO₂萃取法所得檀香精油的香气成分及含量。结果共检出71种香气化合物, 其中, Z- α -檀香醇、 β -檀香醇、顺式澳檀醇、顺式香榭醇等醇类化合物较多, 相对含量达85%以上。此外, 水蒸气蒸馏法和超临界CO₂萃取法所得檀香精油中分别检出39和48种化合物, 16种共有化合物, 说明不同提取方法对檀香精油的香气成分具有显著影响。

关键词

檀香精油; 水蒸气蒸馏法; 超临界CO₂萃取法; 香气成分分析

1 引言

檀香(*Santalum album* L.)是檀香科檀香属半寄生的一种珍贵药材和香料, 主要产于印度迈索尔地区、印度尼西亚帝汶群岛、马来西亚及澳大利亚等热带地区, 我国广东、台湾等地亦有引种栽培^[1]。作为全球高端香料市场的重要战略资源, 檀香素被冠以“香料之王”与“绿色黄金”的双重美誉, 其经济价值主要在于心材和精油^[2,3]。檀香精油(Sandalwood essential oil, SEO)是从檀香中提取的具有特殊香气的挥发性油状物质, 其核心香气成分包括 α -檀香醇和 β -檀香醇

(占比达80%左右)^[4], 化学结构属于倍半萜醇类, 具有稳定的环状骨架和羟基官能团, 既能赋予檀香精油甜润的木质调香气特征, 又具有镇静安神、抗菌、抗病毒、抗肿瘤等多种药理活性^[5,6]。由于檀香精油的市场需求持续旺盛, 而檀香树生长缓慢、生长环境严苛, 精油提取效率有限, 导致檀香树被过度开采, 精油产量下滑, 交易价格持续攀升, 甚至超过5000美元/千克^[7]。而且印度对印度白檀(*Santalum album*, 老山檀)实施全球最严格的砍伐与出口管制, 核心是全面禁止原木或粗材出口、严格管控人工林采伐、仅有限开放深加工制品出口。因此探究檀香精油的提取工艺, 提高有限资源的利用率已经成为一项急需解决的课题。

檀香精油的提取方法包括水蒸气蒸馏法、超临界萃取法、溶剂萃取法、亚临界流体萃取法、酶辅助萃取法等^[8]。其中水蒸气蒸馏法和超临界CO₂萃取法最为常用。水蒸气蒸馏法是最传统且最常见的一种提取方式, 其设备要求简单、提取产物天然无污染, 但提取效率较低, 且只能提取低

【作者简介】牛丽敏(1999-), 女, 中国河南人, 硕士, 从事香精香料香气成分分析研究。

【通讯作者】单丽君(1979-), 女, 中国浙江人, 硕士, 工程师, 从事天然食用香精提取、美拉德反应生香、酶解生香、配方及生产工艺方向研究。

沸点成分^[9]。超临界 CO₂ 萃取法具有提取效率高、化学稳定、无溶剂残留等特点,被视为环境友好且高效节能的新型提取技术,在食品、医药、化妆品等众多领域得到广泛应用。涂永元^[10]利用超临界 CO₂ 萃取法提取澳檀精油,并对其工艺进行优化,最终得到的精油提取率达 6.26%,且能有效保持精油原有的天然木质香调。周凤等^[11]探究了萃取温度、萃取时间、萃取压力等因素对檀香精油提取率的影响,提升了檀香精油提取效率,同时为檀香精油的工业化生产提供了参考数据和研究方向。

檀香精油品质的高低与提取方法密切相关。该研究通过 GC-MS 分析水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油的香气成分和含量,评价其香气品质差异,为檀香精油的提取生产和质量评估提供参考依据。

2 材料与仪器

檀香:檀香木原料由北京德兰合创生物科技有限公司提供(海南引种的印度白檀),原料经粉碎、过 40 筛后备用。

试剂:氦气(纯度 99.999%)和二氧化碳(纯度 99.5%):南方特种气体有限责任公司;无水硫酸钠(分析纯):国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇(色谱纯):科隆化学品有限公司。

仪器设备:电子分析天平(BSA124S):上海赛多利斯贸易有限公司;数显控温电加热套(ZNHW):巩义瑞力仪器设备有限公司;水蒸气蒸馏装置;超临界萃取仪(HLSFE-12LX2):广州市浩立生物科技有限公司;气相色谱-质谱联用仪(6890-5973N):美国安捷伦科技公司。

3 实验方法

3.1 檀香精油提取

水蒸气蒸馏法:取 100 g 白檀粉和 1 L 超纯水于 3 L 圆底烧瓶中混合均匀,水蒸气蒸馏提取 24 h 后,取上层油状提取液,用无水硫酸钠干燥、过滤后即得檀香精油。

超临界 CO₂ 萃取法:取 100 g 白檀粉于萃取罐中,CO₂ 流量为 20 L/h,萃取压力 25 MPa、萃取温度 60 °C、萃取时间 4 h,萃取结束后收集檀香精油样品。

精油得率(%) = 提取所得精油质量 / 檀香原料质量 × 100 %

3.2 檀香精油香气成分检测

样品预处理:用无水乙醇稀释至体积分数为 10 %,取 1.0 ml 至液相进样瓶中,迅速拧紧瓶盖,待检。

色谱条件:Agilent DB-WAX UI 毛细色谱柱(60 m × 250 μm × 0.25 μm),载气为 99.999 % 高纯度氦气,流速为 1.0 ml/min;进样量 0.2 μl,分流比 20:1;采用程序升温模式,起始温度 40 °C,保持 3 min,以 7 °C/min 速度升至 120 °C,保持 1 min,以 4 °C/min 速度升至 200 °C,再以 2 °C/min 速度升至 240 °C 保持 20 min;进样口温度 240 °C,检测器温度 250 °C。

质谱条件:电离源 EI,电离能量 70 eV,发射电流 200 μA,

离子源温度 230 °C,四极杆温度 150 °C,接口温度 250 °C,全扫描模式,质量扫描范围 30~500 m/z。

定性与定量分析:利用软件内置的 NIST 数据库和公司自建库对物质进行检索匹配,筛选相似度 80 % 以上的物质,根据样品保留时间进行定性分析,采用峰面积归一化法进行定量分析。

3.3 数据处理与分析

实验数据经三次独立重复验证后以平均值呈现。使用 Microsoft Office 2016 和 JMP Pro 18 完成基础数据整理,使用 GraphPad Prism 8 进行数据可视化处理,完成作图。

4 结果与分析

4.1 檀香精油提取率

按照 2.1 提取方法制得的 2 种檀香精油均为澄清油状液体,且具有檀香特有的木质调香气,不同提取方法所得檀香精油得率结果见表 1。由表 1 可知,超临界 CO₂ 萃取法提取的檀香精油得率为 3.97 %,显著高于水蒸气蒸馏法,同时提取时间较水蒸气蒸馏法节省 20 h。此外,超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油的颜色较深,木质香味更饱满醇厚。这说明采用超临界 CO₂ 萃取法提取檀香精油的时间更短,提取效率更快,精油得率更高,香气品质更佳。

表 1 不同提取方法所得檀香精油得率和理化性质

提取方法	提取时间/h	精油得率/%	精油外观及性质
水蒸气蒸馏法	24	2.56	透明浅棕色油状液体,气味柔和醇厚,浓郁木质香调
超临界 CO ₂ 萃取法	4	3.97	透明无色油状液体,带有沉稳木质香调

4.2 檀香精油香气成分分析

为揭示不同提取方法对檀香精油香气品质的影响,利用 GC-MS 联用技术对 2 种檀香精油的挥发性化合物进行检测,结果共鉴定出 71 种化合物,包括醇类 22 种、烯类 22 种、醛类 2 种、酸类 2 种、酮类 6 种、酯类 3 种、杂环类 10 种、其他类 4 种,如表 2 所示。进一步分析发现,水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油中分别含有 39 和 48 种化合物,16 种共有化合物,这说明不同提取方法对檀香精油的挥发性香气化合物具有显著影响,超临界 CO₂ 萃取法能更好地保留样品香气成分。

图 1 直观地反映了水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油的挥发性化合物种类和相对含量。由图 1A 可知,超临界 CO₂ 萃取法提取的化合物种类较多,醇类和烯类化合物位居前列。由图 1B 可知,2 种檀香精油中醇类化合物的相对含量最高,分别占总挥发性物质的 85.071% 和 88.607%。涂永元^[12]研究发现澳檀精油的主要成分为醇类化合物,且醇类占比达 80% 以上,与该研究结果一致。

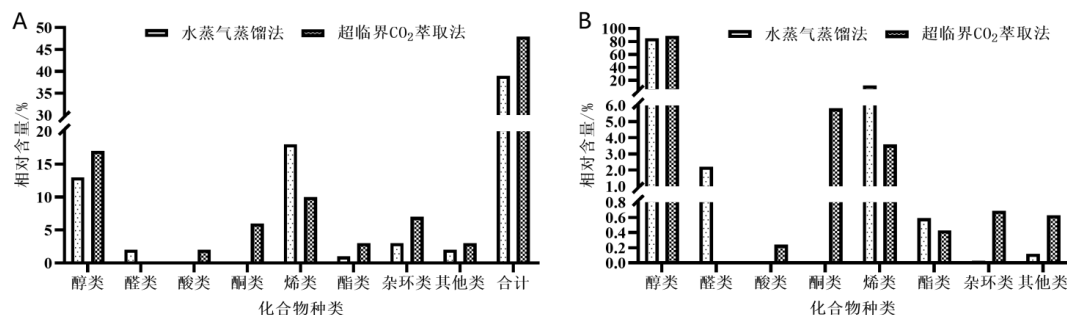


图 1 不同提取方法所得檀香精油挥发性化合物种类和相对含量

醇类是构成檀香精油特征香气的主要挥发性化合物，其中 α -檀香醇和 β -檀香醇作为核心成分，协同作用，共同构成其典型的木质香韵与持久性的感官特征^[13,14]。进一步分析发现，Z- α -檀香醇的相对含量最高，与前人研究结果一致^[15]。Z- α -檀香醇在 2 种檀香精油中的相对含量分别为 34.221 % 和 41.340 %。 β -檀香醇次之，相对含量为 23.918 %~29.009 %。研究表明， β -檀香醇的含量虽低于 α -檀香醇，但其对檀香精油的香气贡献程度却更高^[16]。8-雪松烯-13-醇、顺式溴檀醇、顺式香榧醇、橙花叔醇、螺环檀香醇和反式- α -佛手柑醇也是 2 种檀香精油所共有的醇类化合物，其中，顺式溴檀醇、顺式香榧醇和螺旋檀香醇的相对含量较高，分别为 6.120 %~8.527 %、4.826 %~6.480 %、1.255 %~1.428 %。此外，溴檀醇、 α -佛手柑醇、 α -红没药醇和 α -檀香醇的相对含量较高，分别为 1.738 %、6.418 %、1.223 % 和 1.693 %，但它们只存在于超临界 CO₂ 萃取法提取的檀香精油中，这可能与他们的沸点较高，无法随水蒸气挥发逸出有关。

烯类化合物仅次于醇类，在 2 种檀香精油中的相对含量为 3.589 %~11.978%。姜黄烯、表- β -檀香烯、姜烯、 α -佛手柑烯、 α -檀香烯和 β -红没药烯是 2 种檀香精油共有的烯类化合物。其中， α -佛手柑烯在水蒸气蒸馏法制得的精油中含量最高，为 7.128%，而在超临界 CO₂ 萃取法中仅占 0.691 %，这可能与其高挥发性和低极性特点有关。表- β -檀香烯、 α -檀香烯和姜黄烯是檀香精油的重要组成成分，与精油的香气品质和生物活性密切相关，其在 2 种檀香精油

中的相对含量分别为 1.262 %~1.327 %、0.457 %~0.726 % 和 0.406 %~0.575 %。水蒸气蒸馏法制备的檀香精油中烯类化合物种类和含量均显著高于超临界 CO₂ 萃取法，这可能与高温蒸馏时化合物的氧化降解或高温水解有关。

醛类化合物仅检测出糠醛和甲位檀香醛，其中甲位檀香醛的相对含量较高，为 2.206 %。但醛类化合物只存在于水蒸气蒸馏法制得的精油中，这可能是因为醛类并非檀香的主要香气成分，而是水蒸气蒸馏高温过程中由醇类前体物质发生脱氢氧化反应转化为了醛。酸类化合物包括氧代乙酸和蝶呤-6-羧酸，并且它们仅存在于超临界 CO₂ 萃取法提取的檀香精油中，这可能是因为酸类物质在蒸馏过程中极易发生不可逆分解，而超临界 CO₂ 萃取的低温环境完整保留了这些酸类物质。酮类化合物检测出 1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮、2,3-二氢咪唑-4-醇-2-酮等 6 种香气成分，其中 1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮相对含量较高，为 4.278 %。但酮类化合物仅在超临界 CO₂ 萃取法提取的精油中检测到，这可能是酮类化合物在高温蒸馏过程中发生异构化、氧化降解或高温水解导致的。酯类化合物检测出甲基丙烯酸 2-羟乙酯、苯丙胺-3-甲酸乙酯和乙酸檀香酯 3 种，其中，乙酸檀香酯为 2 种檀香精油所共有，相对含量为 0.295 %~0.588 %。杂环及其他类香气化合物检测出 1-(2-呋喃甲基)-1H-吡咯、2,4,6-三甲基吡啶等 14 种，其中，对伞花烃为 2 种檀香精油所共有，相对含量为 0.061 %~0.430 %。

表 2 不同提取方法所得檀香精油 GC-MS 分析结果

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量 /%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO ₂ 萃取法
醇类	1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基-3-环己烯-1-醇	1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-methyl-3-Cyclohexen-1-ol	ND	0.843%
	2-甲基-5-((R)-6-甲基庚-5-烯-2-基)二环[3.1.0]己烷-2-醇	2-Methyl-5-((R)-6-methylhept-5-en-2-yl)bicyclo[3.1.0]hexan-2-ol	ND	0.100%
	4-甲基- α -(1-甲基-2-丙烯基)苯甲醇	4-methyl- α -(1-methyl-2-propenyl)-Benzenemethanol	ND	0.119%
	8-雪松烯-13-醇	8-Cedren-13-ol	0.636%	0.546%
	雪松醇	Cedrol	0.278%	ND
	顺式溴檀醇	cis-Lanceol	6.120%	8.527%
	顺式香榧醇	cis-Nuciferol	4.826%	6.480%

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量 /%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO ₂ 萃取法
醇类	表-β-檀香醇	epi-β-Santalol	ND	0.430%
	溴檀醇	Lanceol	ND	1.738%
	橙花叔醇	Nerolidol	0.172%	0.157%
	螺环檀香醇	Spiro Santalol	1.428%	1.255%
	反式-α-佛手柑醇	trans-α-Bergamotol	0.484%	0.772%
	Z-Z-β-檀香醇	Z-Z-β-Santalol	21.682%	ND
	Z-α-檀香醇	Z-α-Santalol	41.340%	34.221%
	α-佛手柑醇	α-Bergamotol	ND	6.418%
	α-红没药醇	α-Bisabolene	ND	1.223%
	α-杜松醇	α-Cadinol	0.357%	ND
	α-桉叶醇	α-Eudesmol	0.404%	ND
	α-檀香醇	α-Santalal	ND	1.693%
	甲位松油醇	α-Terpineol	0.017%	ND
	β-桉叶醇	β-Eudesmol	ND	0.167%
	β-檀香醇	β-Santalol	7.327%	23.918%
醛类	糠醛	Furfural	0.007%	ND
	甲位檀香醛	α-Santalal	2.206%	ND
酸类	[(氨基羰基)氨基]氧代乙酸	[(aminocarbonyl)amino]oxo-Acetic acid	ND	0.036%
	蝶呤-6-羧酸	Pterin-6-carboxylic acid	ND	0.205%
酮类	1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮	1-(1H-imidazol-2-yl)-1-Pentanone	ND	4.278%
	2,3-二氢咪唑-4-醇-2-酮	2,3-Dihydroindole-4-ol-2-one	ND	0.355%
	2-苄基环己酮	2-Benzylcyclohexanone	ND	0.674%
	2-噻唑烷硫酮	2-Thiazolidinethione	ND	0.187%
	3-甲基-2-(1,3-戊二烯基)-2-环戊烯-1-酮	3-methyl-2-(1,3-pentadienyl)-2-Cyclopenten-1-one	ND	0.197%
	顺式-5-甲基-螺[3.4]辛烷-1-酮	cis-5-methyl-Spiro[3.4]octan-1-one	ND	0.128%
烯类	(+) 环苜蓿烯	(+) Cyclamenol	0.030%	ND
	1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯	1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-yl)cyclohexa-1,3-diene	ND	0.100%
	2-薷烯	2-Carene	ND	0.065%
	4-亚甲基-6-(1-亚丙烯基)环辛烯	4-methylene-6-(1-propenylidene)-Cyclooctene	ND	0.100%
	β-龙胆烯	β-Longipinene	0.026%	ND
	β-檀香烯	β-Santalene	0.855%	ND
	双环大牻牛儿烯	Bicyclogermacrene	0.060%	ND
	花侧柏烯	Cuparene	0.072%	ND
	姜黄烯	Curcumene	0.575%	0.406%
	D-柠檬烯	D-Limonene	0.004%	ND
	E,E-α-合金欢烯	E,E-α-Copalene	ND	0.184%
	表-β-檀香烯	epi-β-Santalene	1.262%	1.327%
	长叶烯	Longifolene	0.009%	ND
	姜烯	Zingiberene	0.144%	0.120%
	α-佛手柑烯	α-Bergapten	7.128%	0.691%
	α-雪松烯	α-Cedrene	0.162%	ND
	α-依兰油烯	α-Muurolene	0.007%	ND
	α-檀香烯	α-Santalene	0.726%	0.457%
	β-红没药烯	β-Bisabolene	0.839%	0.139%
	γ-依兰油烯	γ-Muurolene	0.014%	ND
γ-萜品烯	γ-Terpinene	0.009%	ND	
δ-杜松烯	δ-Cadinene	0.056%	ND	

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量 /%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO ₂ 萃取法
酯类	甲基丙烯酸 2- 羟乙酯	2-Hydroxyethyl methacrylate	ND	0.069%
	苯丙胺 -3- 甲酸乙酯	Amphetamine-3-methyl acetate	ND	0.061%
	乙酸檀香酯	Santalyl Acetate	0.588%	0.295%
杂环类	1-(2- 呋喃甲基)-1H- 吡咯	1-(2-furanylmethyl)-1H-Pyrrole	0.008%	ND
	2,4,6- 三甲基吡啶	2,4,6-trimethyl-Pyridine	ND	0.074%
	3-(4,8- 二甲基 -3,7- 壬二烯基)- 呋喃	3-(4,8-dimethyl-3,7-nonadienyl)-Furan	ND	0.086%
	3- 苯基哌啶	3-phenyl-Piperidine	ND	0.032%
	4-(2- 氨基丙基)-2- 甲氧基苯酚	4-(2-aminopropyl)-2-methoxy-Phenol	ND	0.033%
	8,14- 环氧乙烷	8,14-Cedranoxide	0.013%	ND
	榄香素	Elemicin	ND	0.374%
	甲基丁香酚	Methyleugenol	0.004%	ND
	N- 甲酰基 -DL- 丙氨酸	N-Formyl-DL-alanine	ND	0.059%
	妥卡尼	Tocainide	ND	0.036%
其他类	1- 氯 -5- 甲基己烷	1-chloro-5-methyl-Hexane	ND	0.162%
	3,5- 二甲苯丙胺	3,5-Dimethylamphetamine	ND	0.033%
	对伞花烃	p-Cymene	0.061%	0.430%
	松针提取物	Pine Needle Tyrol Unk A	0.063%	ND

注：“ND”表示未检测出该化合物。

5 结论

该研究通过 GC-MS 对比分析了水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油的挥发性化合物成分和含量, 结果共检测出 71 种香气化合物, 其中, Z- α - 檀香醇、 β - 檀香醇、顺式檀香醇、顺式香榭醇等醇类化合物种类较多, 相对含量较高, 分别占总挥发性物质的 85.071% 和 88.607%, 这表明醇类物质对檀香精油的核心香气骨架占据决定性地位。进一步分析发现, 水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法所得檀香精油中分别检测出 39 和 48 种化合物, 16 种共有化合物, 这说明不同提取方法对檀香精油的挥发性香气化合物具有显著影响, 超临界 CO₂ 萃取法在保留易挥发、热降解的香气化合物组分方面具有显著优势, 而水蒸气蒸馏则容易导致热敏性成分降解或损失, 从而造成香气化合物指纹图谱差异。该研究结果可为檀香精油的提取工艺、质量评估和产业化发展提供科学参考。未来应继续加强对檀香精油提取工艺的深入研究, 提高檀香精油提取效率和产品利用率, 以推动檀香产品的开发创新和可持续发展。

参考文献

- [1] KUMARG R, CHANDRASHEKAR B, RAO M, et al. Pharmaceutical importance, physico-chemical analysis and utilisation of Indian sandalwood(*Santalum album* Linn.) seed oil[J]. *Journal of Pharmacognosy Phytochemistry*, 2019, (8): 2587-2592
- [2] TEIXEIRA S J A, KHER M M, SONER D, et al. Sandalwood: basic biology, tissue culture, and genetic transformation[J]. *Planta*, 2016, 243(4): 847-887
- [3] 李香. SaAREB家族基因调控檀香精油合成的相关通路分析[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2025

- [4] ZHANG Y, YAN H, NIU M, et al. Multiple strategies for increasing yields of essential oil and obtaining sandalwood terpenoids by biotechnological methods in sandalwood[J]. *Trees*, 2017, 32(1): 17-28
- [5] 王雨辰. 檀香烯及其衍生物在酿酒酵母中的优化生物合成[D]. 昆明: 云南大学, 2020
- [6] SHARIFI-RAD J, QUISPE C, TURGUMBAYEVA A, et al. *Santalum* Genus: phytochemical constituents, biological activities and health promoting-effects[J]. *Z Naturforsch CJ Biosci*, 2022,
- [7] TEIXEIRA S J, KHER M, SONER D, et al. Sandalwood: basic biology, tissue culture, and genetic transformation[J]. *Planta*, 2016, 243(4): 847-887
- [8] CHAMUTPONG S, CHEN C J, CHAI PRATEEP E O. Optimization ultrasonic-microwave-assisted extraction of phenolic compounds from *Clinacanthus nutans* using response surface methodology[J]. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2021, 12(2): 190
- [9] 田程飘, 宋雅玲, 许海棠, 等. 超临界和水蒸气蒸馏提取沉香精油成分分析及抗氧化、抑菌活性对比研究[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(18): 4000-4008
- [10] 涂永元. 檀香精油提取方法、成分及抗氧化活性比较研究[J]. *中国食品添加剂*, 2025, 36(08): 8-14
- [11] 周凤, 平措南加, 左谷, 等. 超临界CO₂萃取檀香精油工艺研究[J]. *中国高新技术*, 2020, (22): 150-152
- [12] 涂永元. 澳洲檀香精油工艺提取及其成分分析的研究[J]. *化学试剂*, 2025, 47(03): 46-52
- [13] 唐静. 基于生物计算筛选偏好 β -檀香烯的檀香烯合酶突变体

[D]昆明: 云南大学, 2023

[14] GIRI V P, PANDEY S, SHUKLA P, et al. Facile fabrication of sandalwood oil-based nanoemulsion to intensify the fatty acid composition in burned and rough skin[J]. ACS Omega, 2024, 9(6): 6305-6315

[15] 晏婷婷, 陈媛, 尚丽丽, 等. 不同产地檀香木心材挥发性化学成分比较及识别[J]. 木材工业, 2019, 33(04): 18-21+26

[16] BALDOVINI N, DELASALLE C, JOULAIN D. Phytochemistry of the heartwood from fragrant Santalum species:a review[J]. Flavour Fragr J, 2011, 26(1): 7-26

Research on High-Purity Acetic Acid Purification Technology and Its Industrial Application

Yutao Feng

Yulin Coal Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719053, China

Abstract

High-purity acetic acid, as an important basic organic chemical raw material, is widely used in electronic chemicals, pharmaceutical intermediates, and high-end materials. With the development of the fine chemical industry, higher requirements have been put forward for the purity and impurity control of acetic acid. The traditional production process has certain limitations in dehydration, impurity removal, and stability control, making it difficult to meet the quality standards of high-end applications. Focusing on the key issues in the acetic acid purification process, a systematic analysis of distillation separation, adsorption purification, membrane separation, and composite processes was conducted. Combined with industrial practice, the process optimization and integration application mode were discussed. Through in-depth research on the key factors affecting purity improvement, a technically feasible solution was proposed, providing theoretical basis and practical reference for the large-scale production and quality stability of high-purity acetic acid.

Keywords

acetic acid; high-purity; purification technology; distillation separation; industrial application

醋酸高纯度精制技术与工业化应用

冯宇涛

延长石油榆林煤化, 中国·陕西 榆林 719053

摘要

高纯度醋酸作为重要的基础有机化工原料, 在电子化学品、医药中间体及高端材料等领域具有广泛应用。随着精细化工产业的发展, 对醋酸纯度与杂质控制提出了更高要求。传统生产工艺在脱水、去杂及稳定控制方面存在一定局限, 难以满足高端应用场景的质量标准。围绕醋酸精制过程中的关键问题, 对精馏分离、吸附净化、膜分离及复合工艺等技术路径展开系统分析, 结合工业实践探讨其工艺优化与集成应用模式。通过对影响纯度提升的关键因素进行深入研究, 提出具有工程可行性的技术方案, 为高纯度醋酸的规模化生产与质量稳定提供理论依据与实践参考。

关键词

醋酸; 高纯度; 精制技术; 精馏分离; 工业化应用

1 引言

醋酸作为现代化工体系中的关键基础原料, 其产业链延伸广泛, 涉及醋酸乙烯、醋酸纤维及多类有机溶剂等重要产品, 在精细化工与材料制造领域具有重要地位。随着高端制造业的发展, 电子级与医药级应用对醋酸纯度提出了更为严格的要求, 微量杂质的存在已成为制约其应用性能的关键因素。尽管传统工艺在工业级生产中已形成成熟体系, 但在进一步提升纯度过程中, 水分、醛类以及金属离子等杂质的去除仍面临较大挑战。为突破这一瓶颈, 精制技术逐步由单一分离手段向多技术耦合方向发展, 通过精馏、吸附与膜分离等工艺的协同应用, 优化分离路径并强化过程控制, 实现

对杂质的分级去除与精准调控。在此基础上, 结合先进监测与控制技术, 可进一步提升产品质量的稳定性。对相关精制技术进行系统梳理与分析, 对于推动醋酸生产向高纯度与高附加值方向转型具有重要意义。

2 醋酸高纯度精制的理论基础与关键问题

2.1 醋酸体系的物性特征与分离难点

醋酸体系在分离过程中呈现出显著的热力学复杂性, 其与水之间形成共沸行为, 使传统精馏方法在常规操作条件下难以实现彻底分离。该体系的相对挥发度较低, 气液平衡关系对温度与压力变化敏感, 导致分离过程对操作条件依赖性较强。体系中往往伴随存在甲醇、乙醛及酯类等轻组分与中间产物, 这些组分在不同温区内具有交叉挥发特征, 易在塔内形成分布重叠, 从而干扰主组分的有效分离。由于物性差异有限, 单纯依赖常压精馏难以达到高纯度要求, 需通过

【作者简介】冯宇涛(1986-), 男, 中国陕西榆林人, 本科, 中级, 从事化学工程与工艺研究。

调节操作压力、引入萃取剂或采用耦合分离手段强化分离驱动力。对相平衡特性的深入研究与工艺条件的精细调控,是突破分离瓶颈、提升分离效率的关键基础。

2.2 杂质来源与影响机制

醋酸体系中的杂质来源具有多元性,其组成与含量受生产工艺及运行条件的共同影响。原料气中的微量组分在反应过程中可能转化为副产物,形成醛类、酯类及轻质有机物等杂质,这些组分在精制阶段表现出复杂的分布行为。设备材料在长期运行中可能发生微量溶出,带入金属离子杂质,对产品纯度及稳定性产生潜在影响。醛类与酯类物质在储存条件下具有一定反应活性,可能进一步参与缩合或水解反应,改变体系组成并引发质量波动。杂质的存在不仅降低产品纯度,还可能对后续应用产生连锁影响,如在高端制造领域引发性能偏差。因此,在精制过程中需针对不同来源的杂质建立分级控制策略,通过工艺手段实现有效去除与稳定控制。

2.3 高纯度指标体系与质量控制要求

高纯度醋酸的质量评价体系以主含量与杂质控制为核心,其标准在不同应用领域中呈现出差异化要求。一般情况下,产品主含量需达到99.9%以上,同时对水分、色度及有机杂质含量设定严格限值。在电子级及精细化工应用中,对金属离子与微量有机杂质的控制更为严苛,往往需达到ppm甚至ppb级别,以确保材料在后续工艺中的稳定表现。质量控制体系需覆盖从原料处理到成品输出的全过程,通过在线监测与实验室检测相结合的方式,对关键指标进行动态跟踪。数据反馈机制能够及时反映工艺波动,并指导操作参数调整,使产品质量保持在目标范围内。通过构建系统化的质量控制框架,可以在复杂生产环境中实现高纯度醋酸的稳定输出与持续优化。

3 醋酸精制关键技术路径

3.1 精馏分离技术的优化应用

精馏作为醋酸精制体系中的关键分离手段,其效率与稳定性直接决定产品纯度与装置运行水平。在实际应用中,通过多塔串联的流程组织,可将复杂分离任务分解至不同塔段,使各塔在特定操作条件下实现针对性分离,从而提升整体效果。减压操作能够改变体系的相平衡特性,降低沸点并增强水分挥发能力,有助于提高脱水效率并减少热负荷。在塔内结构方面,填料与塔板的合理选择对传质过程具有重要影响,高效结构填料凭借较大的比表面积与良好的液体分布性能,可显著强化气液接触,提高分离精度。与此同时,回流比与进料位置等操作参数需结合具体体系进行优化,使分离效率与能耗之间保持协调关系。通过对工艺路径与设备结构的系统优化,精馏技术能够在满足高纯度要求的同时,实现稳定且经济的运行状态。

3.2 吸附与离子交换净化技术

在精馏难以彻底去除的微量杂质控制方面,吸附与离

子交换技术发挥着重要作用。吸附材料通过其多孔结构与表面活性位点,对有机杂质及部分极性组分具有较强的捕集能力,能够在精制后期实现深度净化。活性炭因其丰富的孔隙结构,在去除微量有机杂质方面表现稳定,而分子筛材料则可根据孔径选择性吸附特定分子,提高净化的针对性。离子交换树脂在去除金属离子杂质方面具有显著优势,其通过离子交换机制实现杂质的有效去除,从而提升产品纯度与稳定性。在工艺配置中,吸附与离子交换单元通常与精馏过程形成衔接关系,通过前后工序的协同作用,实现多层次净化。对吸附剂性质与运行周期的合理控制,有助于维持系统长期稳定运行,并提高整体分离效率。

3.3 膜分离与耦合工艺发展

膜分离技术在醋酸精制领域逐渐展现出重要应用价值,其以分子尺度差异为基础,实现对组分的选择性分离。渗透汽化过程利用不同组分在膜材料中的溶解度与扩散速率差异,使水分优先透过膜层,从而达到脱水目的。在与传统精馏工艺的耦合应用中,膜分离可作为强化单元嵌入流程,通过减少精馏负荷与降低回流需求,实现整体能耗的优化。膜材料性能对分离效果具有决定性影响,其选择需兼顾选择性、通量与耐久性,以适应工业运行条件。操作参数的合理设定同样关键,通过控制温度、压力及流速等因素,可在保证分离效率的同时延缓膜污染与性能衰减。随着材料科学与过程集成技术的不断发展,膜分离及其耦合工艺将在高纯度醋酸生产中发挥更加重要的支撑作用。

4 工艺集成与过程强化策略

4.1 多技术耦合的流程设计

在高纯度醋酸精制过程中,复杂杂质体系的存在使单一分离技术难以兼顾效率与选择性,多技术耦合成为提升整体性能的重要路径。通过将精馏、吸附与膜分离等单元进行系统集成,可以在不同工艺阶段针对不同性质的杂质实施差异化处理,从而形成层级清晰、分工明确的精制流程。精馏单元主要承担主体分离任务,实现水分及低沸点杂质的去除;吸附过程用于捕获微量极性或难分离组分;膜分离则在末端实现精细筛分,进一步提高产品纯度。在流程设计中,需要对各单元的衔接关系进行优化,使物料流向与能量利用形成协同机制,避免重复分离或能量浪费。同时,应综合评估设备投资强度、运行费用及维护难度,使技术集成在满足分离效果的基础上具备可持续运行能力。通过多技术耦合,可以在复杂体系中实现效率与精度的统一,提升整体工艺水平。

4.2 过程参数优化与能耗控制

过程参数的合理设定是保障精制系统高效运行的关键因素,其直接影响分离效果与能源消耗水平。在精馏操作中,温度分布与回流比决定了分离效率与能耗之间的平衡关系,适当优化可在保证纯度的前提下降低蒸汽消耗;压力条件的调节则有助于改善传质过程并降低设备负荷。在吸附与膜分

离单元中,流速、浓度及操作周期等参数同样需要精细控制,以确保装置在最佳工况下运行。借助先进控制系统,可对关键参数进行连续监测与动态调节,使生产过程在波动条件下保持稳定状态。热集成技术的引入能够实现不同单元之间的能量回收与再利用,从而有效降低整体能耗。通过系统化的参数优化与节能措施,可以在提升产品质量的同时,实现生产成本与资源消耗的协同降低。

4.3 自动化与智能化控制技术

自动化与智能化技术的发展为精制过程提供了新的支撑手段,使传统生产模式向高效、精准与可预测方向转变。在实际应用中,通过配置在线分析仪器与传感系统,可以对关键组分含量、温度与压力等参数进行实时采集,并通过数据平台进行集中处理与分析。基于模型的控制方法能够对工艺过程进行预测与调节,使操作参数随工况变化自动优化,从而维持系统在最佳运行区间。智能算法的引入使控制策略具备自适应能力,能够根据历史数据不断修正控制模型,提高调节精度与响应速度。自动化水平的提升不仅减少了人为操作带来的不确定性,也增强了生产过程的安全性与稳定性。

5 工业化应用与工程实践

5.1 典型工艺流程与装置设计

在工业生产体系中,高纯度醋酸的制备通常依赖多级分离与深度净化技术的协同应用,其工艺路径具有明显的系统性与层级性。原料进入装置前需经过预处理环节,以去除悬浮杂质及部分易挥发组分,为后续精制过程提供稳定基础。核心分离单元多采用多塔精馏体系,通过不同塔段的温度梯度与回流比控制,实现水分及低沸点杂质的逐级分离。在此基础上,进一步引入吸附净化与膜分离技术,对痕量杂质进行深度去除,使产品纯度达到高端应用要求。装置设计过程中需要综合考虑物料平衡与能量耦合,通过热集成与流程优化降低能耗,并提升系统整体效率。

5.2 运行稳定性与质量控制实践

在高纯度醋酸的连续生产过程中,运行稳定性直接关系到产品质量与装置寿命。长期运行条件下,腐蚀问题、吸附剂性能衰减以及膜组件污染均可能对系统造成不利影响,进而引发分离效率下降或产品波动。因此,有必要建立以预防性维护为核心的运行管理机制,对关键设备进行周期性检

查与状态评估,通过材料选择优化与工艺条件调控降低腐蚀风险,同时根据运行数据及时更换吸附剂与膜组件,以维持分离性能的稳定。质量控制体系需贯穿生产全过程,通过在线检测与离线分析相结合的方式,对关键指标进行多点监测,并借助数据分析手段识别潜在波动趋势,实现对产品纯度的动态调控。

5.3 经济性分析与应用前景

高纯度醋酸的生产涉及多级分离与精细化处理,其设备投入与运行成本相对较高,但在高端应用领域具备显著的附加值优势。通过对工艺流程的持续优化以及能量利用效率的提升,可以在一定程度上降低单位产品能耗与生产成本,从而改善整体经济性。规模化生产为成本控制提供了重要路径,随着装置能力的扩大,固定成本得以分摊,生产效率进一步提高,使产品在市场上具备更强竞争力。从需求侧来看,电子化学品、精细化工及医药制造等领域对高纯度原料的要求不断提升,推动高纯度醋酸需求持续增长。

6 结语

醋酸高纯度精制技术的发展,是推动化工产业迈向高端化的重要支撑。通过将精馏、吸附与膜分离等多种分离手段进行协同集成,可以针对复杂体系中的不同杂质实现分级去除与精准控制,从而显著提升产品纯度与稳定性。在工业化应用过程中,工艺路径的优化与过程参数的精细调控,对提高分离效率与降低能耗具有决定性作用。与此同时,过程监测与控制技术的引入,使生产运行更加稳定可控,减少波动对质量的影响。随着新型功能材料与智能控制方法的不断发展,高纯度醋酸的制备将呈现更高效率与更强适应性,其在电子化学品、医药制造及高性能材料等领域的应用空间也将持续拓展。

参考文献

- [1] 王永超.醋酸甲酯精制工艺中加压精馏塔釜部醋酸甲酯纯度的控制[J].化工设计通讯,2019,45(01):112.
- [2] 王旭芳.醋酸甲酯精制工艺中加压精馏塔釜部醋酸甲酯纯度的控制[J].安徽科技,2017,(09):50-51.
- [3] 牛南钢.醋酸妊娠双烯醇酮的精制工艺.湖北省,湖北芳通药业股份有限公司,2015-04-08.
- [4] 赵薇.醋酸仲丁酯精制过程研究[D].天津大学,2010.
- [5] 盖丽芳,尚会建,彭丽敏,等.高纯度醋酸甲酯精制新工艺[J].河北工业科技,2007,(01):19-20+57.

Research on the Causes of Failure and Rectification Measures for Cathodic Protection Anti-corrosion Technology in Natural Gas Pipelines

Yaguang Cui Yihui Wu

Xi'an Oil and Gas Transportation Branch, Northwest Pipeline Company, State Pipeline Network, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

As the medium for natural gas transportation, pipelines are mostly laid underground, exposed to complex external service environments, making them prone to corrosion, which affects the safe and stable operation of pipelines and the continuous delivery of natural gas. Cathodic protection is a key technical measure to prevent corrosion in buried natural gas pipelines and extend their service life. This paper combines field surveys and inspection analyses to review the operational status of cathodic protection systems in natural gas pipelines, identify operational faults and defects, analyze the technical causes of failures, clarify the hidden fault characteristics triggered by different factors, assess the impact of faults, and propose targeted rectification measures and operational control methods. It provides technical references for the detection and repair of cathodic protection system failures in natural gas pipelines, enhances the application level of pipeline corrosion prevention technology, and ensures the safe and stable operation of long-distance natural gas pipelines.

Keywords

natural gas pipeline; cathodic protection; corrosion prevention failure; rectification measures

天然气管道阴极保护防腐技术失效成因与整改措施研究

崔雅光 吴毅辉

国家管网西北公司西安输油气分公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要

天然气管道作为天然气输送载体,多采用埋地敷设,外部服役环境复杂,易发生腐蚀,影响管道安全稳定运行与天然气连续输送。阴极保护是预防埋地天然气管道腐蚀、延长管道使用寿命的关键技术手段。本文结合现场勘查与检测分析,梳理天然气管道阴极保护系统运行现状,排查运行故障与缺陷,剖析故障技术成因,明确不同因素引发的隐性故障特征,评估故障影响程度,提出针对性整改对策与运行管控方法,为天然气管道阴极保护系统故障检测与修复提供技术参考,提升管道防腐技术应用水平,保障长输天然气管道安全平稳运行。

关键词

天然气管道; 阴极保护; 防腐失效; 整改措施

1 引言

长输天然气管道所处的工作环境比较复杂,在土壤侵蚀、机械损伤等因素的影响下,管材裂纹和泄漏的风险将会大幅度上升,给沿线用户带来安全隐患,需要积极分析防范。近年来,我国市场经济平稳发展,城市化和工业化步伐加快,各地长输天然气管道敷设里程数增加,覆盖范围更广,潜在的管材腐蚀风险也在不断增多。开展天然气管道阴极保护系统防腐失效原因分析及针对性整改策略研究,可解决管道防腐日常运维难题,提升管道全生命周期防腐质量,保障管道

及天然气输送安全,推动能源产业安全、高质量发展。

2 天然气管道阴极保护防腐技术核心原理与应用现状

2.1 阴极保护技术基本工作原理

埋地天然气管道钢制基体的腐蚀属于电化学腐蚀,阴极保护技术通过将保护管道与外部电源连接,使管道成为电化学腐蚀体系中的阴极,抑制阳极溶解,从而实现对管道基体的防护。常用阴极保护方式分为牺牲阳极保护系统与外加电流保护系统两类。牺牲阳极保护系统利用电位较负的牺牲阳极材料作为阳极发生溶解,释放保护电流对管道进行防护,该方式无需外接电源,适用于中小型城镇管网及土壤电阻率较低区域;外加电流保护系统借助直流电源与阳极地床

【作者简介】崔雅光(1986-),男,中国陕西咸阳人,本科,管道管理技师,从事阴保、腐蚀、防护研究。

构建防护系统,主动向管道输送保护电流,具有保护距离长、电流输出调节灵活的特点,广泛应用于长距离高压管道^[1]。两类阴极保护方式均需依托完好的管道防腐层,形成“防腐层+阴极保护”双重防护体系,二者协同作用方可实现有效防护。

2.2 天然气管道阴极保护系统应用现状

目前国内阴极保护技术已实现广泛应用,长输管道普遍采用外加电流阴极保护,城镇中低压管道多采用牺牲阳极保护,整体技术应用效果良好。但经长期运行,受施工质量、运行环境变化、运维管理等多重因素影响,部分管道阴极保护系统未达到设计预期效果,防护效能逐年衰减。尤其老旧管道及复杂工况地段,防腐层破损、第三方破坏、杂散电流干扰、阳极失效等问题频发,阴极保护失效比例逐年上升。此外,部分项目设计未充分结合施工条件、施工质量管控不到位、运行维护监测缺失,导致系统无法长期维持防腐效能,管道腐蚀风险持续存在。

2.3 阴极保护失效判定核心指标

天然气管道阴极保护失效判定主要依据保护电位、保护电流、阳极状态三项核心指标。依据相关标准,埋地钢质管道阴极保护电位(饱和硫酸铜参比电极)宜控制在 $-0.85\text{V}\sim-1.2\text{V}$ 区间:电位高于 -0.85V 表明管道未得到有效保护,低于 -1.2V 易引发析氢腐蚀,导致防腐层脱落;保护电流需维持在设计范围,电流异常下降或持续低于设计值,可判定系统失效;牺牲阳极剩余量低于初始重量85%、外加电流阳极地床接地电阻大幅超出设计值,亦直接判定为系统失效。通过持续监测管道保护电位、保护电流及阳极工作状态,可及时识别阴极保护失效隐患,为失效原因排查提供依据^[2]。

3 天然气管道阴极保护防腐技术失效成因分析

3.1 防腐层破损与老化引发的失效

防腐层是阴极保护的首要防护屏障,防腐层失效是导致阴极保护失效的最主要原因,因此防腐层管控至关重要。一方面,管道敷设阶段补口补伤工序管控缺失,存在除锈不彻底、加热温度失控、材料黏结性能不足等问题,导致补口位置防腐层出现剥离、开裂,形成漏电与腐蚀薄弱点;另一方面,管道服役期间受土应力、地下水冲刷、第三方施工破坏等外力作用,局部防腐层出现划痕、剥离、穿孔,局部破损会大幅增加管道整体电流需求,造成阴极保护系统输出电流不足,管道电位快速回落至失效区间^[3]。此外,防腐层材料质量低劣或服役年限过长,会直接引发材料老化、降解与性能失效。劣质防腐层在土壤、地下水、温度交变等长期作用下,易出现粉化、开裂、剥离等问题,无法有效隔绝腐蚀介质;长期服役的防腐层则因自然老化,绝缘性能持续下降,漏电点不断增多、漏电量持续增大,使阴极保护系统需要输出远超设计值的电流才能维持保护。当系统电流输出达到极

限仍无法满足防腐需求时,管道保护电位迅速偏离合格区间,最终造成阴极保护整体失效,管道钢基体直接暴露在腐蚀环境中,大幅提升腐蚀穿孔、泄漏等安全事故的发生风险。

3.2 阴极保护系统自身设备与施工缺陷

阴极保护系统自身设备故障与施工不规范是导致失效的核心内部因素。牺牲阳极保护系统中,阳极材质与土壤电阻率不匹配、阳极填料配制不合理、阳极与管道焊接连接不良,会造成阳极接地电阻过大、电流输出不足,同时引发阳极异常消耗、提前失效;外加电流保护系统中,直流电源设备老化、输出电压/电流不稳定、阳极地床埋深不足、填料流失,导致阳极地床接地阻抗增大,电流输出效率降低。外加电流系统中绝缘接头、绝缘法兰等绝缘构件安装不规范、密封材料老化,出现漏电或搭接现象,造成保护电流大量泄漏,无法形成有效保护回路,导致管道局部完全失去阴极保护。

3.3 外部环境干扰与运维管理缺失

外部杂散电流侵入与运维管理不当是导致失效的主要外部因素。城镇区域天然气管道邻近电气化铁路、高压输电线路、地铁等电气设施,大量直流、交流杂散电流侵入管道,干扰管道电位,引发局部过保护或欠保护,加剧管道腐蚀;土壤电阻率过高、地下水污染超标等不良地质条件,增大电流传输阻抗,削弱阴极保护防护效果。部分运维单位未定期开展系统检测,管道保护电位、电流、阳极使用寿命等参数长期未监测,无法提前识别失效隐患;系统失效后原因排查不科学,整改措施盲目实施,导致失效问题反复出现。同时,部分运维人员专业能力不足,无法规范开展参数调整、失效抢修等作业,进一步加剧系统失效风险。

3.4 案例分析

某城镇老旧小区天然气低压管网,管道规格 $\Phi 57-\Phi 108$,总长约2km,采用镁合金牺牲阳极阴极保护与3PE防腐层,运行8年后出现管道腐蚀穿孔,故障频发,阴极保护系统失效。检测人员对管网17个检测点开展保护电位测试,测试数据见表1。

表1 小区天然气管道阴极保护电位测试数据

测试编号	测试地点	保护电位(相对饱和硫酸铜电极)	运行状态备注
1	1号测试桩	-0.896V	保护不足
2	2号测试桩	-0.790V	保护不足
3	1单元调压箱中压段	-0.594V	完全失效
4	1单元调压箱低压段	-0.592V	完全失效
5	2单元调压箱中压段	-1.401V	过保护
6	2单元调压箱低压段	-0.647V	完全失效

由表1可知,仅2号测试桩对应部分中压管段处于保护状态,其余测试桩保护电位均高于 -0.85V 合格阈值,低压管道全部失效。经开挖检测发现:管道防腐层破损点共42处,管道浸泡于地下积水内,与周边消防管、污水管通

过地下积水形成金属搭接,同时受邻近高压电缆杂散电流干扰,最终导致阴极保护系统整体失效。

4 天然气管道阴极保护防腐失效针对性整改措施

4.1 防腐层修复与完整性管控整改

针对防腐层破损、老化问题,实施精准修复并强化全过程管控。一方面,采用防腐层检漏仪对管道全线开展检漏作业,定位破损位置,记录漏点坐标与破损面积;少量漏点采用补伤片密封修复,大面积、成段破损及老化管段重新实施防腐层施工,严格执行除锈等级 ST3 级、施工间隔不大于 2 小时、环境湿度小于 85% 的工艺规范,强化补口与直管段施工质量管控,确保防腐层与管道紧密黏结。另一方面,执行防腐层每 2 年一轮的全面检测制度,采用专业检测设备逐段排查防腐层完整性,对检测发现的破损、剥离、老化等缺陷及时开展补伤修复,消除新增漏点^[4]。同时在管道沿线、关键地段、施工敏感区域设置醒目警示标识与防护设施,明确管道位置与保护要求,严格防范第三方开挖、碾压、碰撞等施工破坏行为,最大限度减少防腐层意外破损,降低因破损导致的保护电流损耗,保障阴极保护系统稳定运行。

4.2 阴极保护系统设备优化与施工整改

从源头整改阴极保护系统自身缺陷。牺牲阳极系统:更换与现场土壤电阻率匹配的高品质镁合金阳极,重新配制阳极填料并完整包裹阳极,阳极埋设深度不低于 1.5m,强化阳极与管道焊接连接质量,降低接地电阻;外加电流系统:更换老旧直流电源设备,将输出参数校准至设计值,翻新阳极地床并补充填料,降低地床接地电阻,保障电流稳定输出。对绝缘接头、绝缘法兰等构件开展专项检测,更换老化、漏电构件,做好防水密封处理,杜绝电流泄漏;梳理保护回路,排查并清除管道周边无效金属搭接,确保保护电流有效作用于管壁。

4.3 杂散电流干扰治理与运维体系完善

针对外部干扰问题,实施专项杂散电流防护。电气化铁路沿线布设屏蔽排流装置、耦合母排,分流侵入管道的杂散电流,降低干扰影响;高土壤电阻率地段采用深井阳极地床、柔性阳极,优化电流传输路径,提升防护效果。强化日常运维管理:组建专业运维团队,安装远程在线监测系统,实时监控保护电位、电流强度,建立故障预警阈值,实现失

效提前预警;加强运维人员专业培训,规范系统检测、参数整定、故障维修等作业流程;建立标准化失效排查体系,针对不同失效类型制定专项整治规范,定期开展整改验收,形成“监测-排查-维修-复检”闭环管理^[5]。

4.4 长效防腐运维技术保障措施

为巩固整改成效,构建长效技术保障机制。强化新建管道前期勘察,结合土壤地质、周边设施条件,合理选型阴极保护与防腐层材料,优化设计方案,严格施工与监管管控,杜绝先天缺陷;推进老旧管道防腐及阴极保护系统升级改造,逐步淘汰老旧设备与失效防腐层,提升系统可靠性。建立管道防腐及阴极保护全生命周期档案,完整记录系统设计、施工、检测、数据、整改等信息,为后期运维与故障排查提供数据支撑;加强行业技术交流,引进应用新型防腐监测与修复技术,持续优化运维措施,全面提升天然气管道阴极保护防腐水平。

5 结语

天然气管道阴极保护防腐失效是防腐层破损、系统自身缺陷、外部干扰、运维管理等多因素耦合作用的结果,不同工况下失效诱因组合存在差异。现场施工与检测人员需精准识别核心失效因素,制定专项整改方案并严格落实。强化防腐层完整性管理、提升阴极保护系统设备质量、消除杂散电流干扰、规范现场运维管理,是解决阴极保护失效、恢复管道有效防护的关键举措。同时,需持续推进阴极保护故障智能诊断、科学修复等技术研发应用,强化管道全生命周期防腐管理,研发适配复杂工况的防腐修复技术,满足天然气管道阴极保护系统稳定性需求,为行业安全高效发展提供技术支持。

参考文献

- [1] 刘贝贝.长输天然气管道防腐层及阴极保护技术研究[J].化工管理,2026,(01):121-124.
- [2] 王翔.基于阴极保护技术的天然气长输管道防腐方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(21):33-35.
- [3] 丁融.长输天然气管道阴极保护常见缺陷与解决措施研究[J].现代工程科技,2025,4(01):113-116.
- [4] 朱云伟.参比管试片法在天然气长输管道阴极保护中的应用[J].山西化工,2024,44(04):182-183.
- [5] 胡志强,王兴见,李平.某天然气管道杂散电流干扰对阴极保护效果的影响研究[J].石油管材与仪器,2023,9(01):71-75.

Interface Design and Application Research of Functionalized Fillers Reinforced Polypropylene Composite Materials

Lanbo Luo

Zhongshan Yongning Film Material Ltd., Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract

Polypropylene has been widely utilized in engineering materials due to its excellent processability and cost advantages. However, insufficient interfacial compatibility remains a limiting factor for enhancing composite material performance. The introduction of functionalized fillers offers a novel approach to optimize interfacial structures. Through surface modification and interfacial design, molecular-level interfacial bonding can be strengthened to achieve synergistic performance improvements. This study systematically analyzes the mechanisms of functionalized fillers in polypropylene composites, focusing on interfacial structure evolution, filler functionalization methods, and performance modulation patterns. Typical applications are also employed to explore interfacial design strategies. Research findings demonstrate that rational construction of interfacial transition layers and controlled interfacial interactions significantly improve mechanical properties and thermal stability, providing valuable insights for developing high-performance polypropylene composites.

Keywords

functionalized filler; polypropylene; interface design; composite materials; performance modulation

功能化填料增强聚丙烯复合材料界面设计及应用研究

罗兰博

中山永宁薄膜材料有限公司, 中国·广东 中山 528400

摘要

聚丙烯因其加工性能良好与成本优势,在工程材料领域得到广泛应用,但其界面相容性不足制约了复合材料性能提升。功能化填料的引入为界面结构优化提供了新的路径,通过表面改性与界面设计,可在分子层面增强界面结合,实现性能协同提升。本文围绕功能化填料在聚丙烯复合材料中的作用机理,从界面结构演化、填料功能化方式及性能调控规律等方面进行系统分析,并结合典型应用探讨界面设计策略。研究表明,合理构建界面过渡层并调控界面相互作用,可显著改善力学性能与热稳定性,为高性能聚丙烯复合材料开发提供参考。

关键词

功能化填料; 聚丙烯; 界面设计; 复合材料; 性能调控

1 引言

随着高分子材料向高性能与多功能方向发展,聚丙烯复合材料在汽车、电子及建筑领域中的应用不断拓展。传统填料增强体系中,界面相容性不足导致应力传递效率降低,限制材料性能发挥。功能化填料通过引入活性基团或改变表面结构,使其与聚丙烯基体形成更加稳定的界面结合,从而改善复合材料整体性能。界面作为连接不同组分的重要区域,其结构与性质对材料行为具有决定性影响。在当前材料研究中,界面设计逐渐成为关键技术之一。围绕功能化填料与界面结构的关系展开研究,对于推动聚丙烯复合材料性能提升具有重要意义。

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

2 功能化填料与界面结构基础

2.1 功能化填料的类型与特征

功能化填料是通过化学或物理方法对填料表面进行改性,使其具有特定的界面活性,从而增强复合材料的整体性能。常见的功能化填料包括无机颗粒填料、纤维增强材料及纳米填料等。无机颗粒填料如硅酸盐和陶瓷颗粒,因其优异的力学性能和耐高温特性,常用于增强材料的硬度和强度。纤维增强材料如玻璃纤维和碳纤维,具有良好的抗拉强度和韧性,可以有效提高复合材料的抗冲击性能。纳米填料由于其高表面积和纳米尺度效应,能够在复合材料中提供更好的界面结合和增强效果。不同类型的填料在功能化处理后,可以与聚丙烯形成更强的界面相互作用,显著提高材料的力学、热学和化学性能。填料的尺寸、形貌及表面性质对复合材料的界面结构有着重要影响,不同类型的填料在复合体系

中的表现差异化,影响着材料的整体增强效果。

2.2 界面过渡层的形成机制

在功能化填料的作用下,复合材料的界面区域会形成一层具有一定厚度的过渡层,该层起到连接基体与填料的作用,并承载应力的缓冲与传递功能。过渡层的形成机制涉及分子链吸附、扩散及化学反应等多个因素。填料表面的改性能够调节分子链的排列方式,使其与基体之间形成更稳定的界面结构。在功能化填料的影响下,过渡层的化学和物理特性得到改善,这不仅增强了填料与基体的结合力,还提高了界面的耐久性与稳定性。过渡层的稳定性直接关系到复合材料的综合性能,过渡层较薄或不均匀可能导致界面结合不良,进而影响材料的力学性能与可靠性。通过调控填料的表面性质,尤其是引入合适的界面活性剂或偶联剂,可以有效优化过渡层的结构,使界面更加均匀与稳定,进而提升复合材料的整体性能。

2.3 界面结构与材料性能关系

界面结构在复合材料中扮演着至关重要的角色,其质量直接影响到材料的力学性能、耐久性以及其他功能特性。良好的界面结合能够有效提高材料的强度和韧性,确保应力在材料内部均匀分布,避免局部应力集中引发裂纹。反之,界面缺陷如界面结合不良、过渡层不均匀等,往往会导致裂纹的扩展和材料的失效,显著降低材料的可靠性。界面结构的优化不仅影响材料的力学性能,还对热性能、抗冲击性及加工性能产生重要影响。特别是在高温、高湿等极端环境下,良好的界面结合能够显著提高材料的耐久性,延长其使用寿命。因此,界面结构在复合材料设计中的优化是至关重要的,设计时应考虑如何改善界面结合、优化过渡层结构,以最大化材料的整体性能和应用效果。

3 功能化填料界面设计方法

3.1 表面化学改性技术

表面化学改性技术通过引入功能基团,显著改善填料与聚丙烯基体之间的相容性,进而提升复合材料的整体性能。通过化学改性,填料表面能够获得更高的反应活性,从而在界面上形成更为稳定的结合结构。这种方法可有效增强界面粘结力,提高材料的力学强度、耐热性及抗老化能力。常见的改性方式包括偶联处理和表面接枝等。偶联剂通过形成化学键合,改善填料与基体的相互作用,增强其界面结合力。而表面接枝则通过在填料表面接入功能性分子,进一步提高界面的稳定性。这些表面化学改性方法能够根据不同材料体系的需求选择应用,适应性强,且在复合材料的制备中具有广泛的应用前景。通过精确调控改性过程,可以有效改善复合材料的力学、热学和化学性能,提升其在实际应用中的表现。

3.2 物理结构调控与界面优化

填料的形貌与分散状态对聚丙烯复合材料的界面结构

有着重要影响。通过控制填料粒径、形状以及分散状态,可以调节填料与基体之间的接触面积,从而优化界面结构,增强材料的力学性能。较小粒径的填料可提供更大的表面积,有助于提高填料与基体的接触程度,而特定形状的填料能够更好地形成均匀分布,从而增强材料的整体稳定性。物理结构调控使填料能够在基体中形成连续的网络结构,这对于提高复合材料的强度、韧性及稳定性至关重要。良好的分散状态有助于减少填料的团聚现象,从而确保其均匀分布在基体中,避免局部性能的差异。物理结构的优化不仅有助于提升复合材料的机械性能,还能改善其热稳定性和抗冲击性,使材料在不同应用环境中表现出更高的可靠性。

3.3 多功能填料协同设计

在复合材料的设计中,单一填料往往难以满足材料在力学、热学等多个方面的性能需求。通过引入多种功能化填料,能够实现性能的协同提升,满足更为复杂的应用要求。在多功能填料协同设计中,不同类型的填料在界面区域相互作用,形成更加复杂的结构,从而使复合材料在各个性能维度上得到全面优化。例如,加入具有增强力学性能的填料与改善热稳定性的填料,可以使材料同时具备优异的抗拉强度和热稳定性。此外,填料的协同作用还能够改善材料的加工性与表面性能,使其在实际应用中更加稳定与可靠。通过精心设计不同填料的组合,可以实现力学性能与功能性能的综合优化,进一步提升复合材料的综合性能与应用范围。多功能填料协同设计为复合材料的发展开辟了新的方向,尤其在高性能要求的领域具有广泛的应用潜力。

4 界面设计对性能调控的作用机制

4.1 力学性能提升机理

功能化填料在聚丙烯复合材料中的应用,显著增强了材料的力学性能。填料通过优化界面结合,使应力在复合材料中的传递更加高效,进而提高材料的强度与刚度。填料的引入改变了材料的微观结构,尤其是在增强相和基体之间形成稳定的界面结合,能够有效地将施加的外部应力传递至增强相。与此同时,界面过渡层的优化,使得该层能够在应力作用下吸收部分能量,减缓裂纹扩展的速度。这种机制不仅提高了材料的整体抗拉强度,还增强了材料的韧性,使其在受到外部冲击或负荷时表现出更好的耐久性与抗裂纹传播能力。因此,界面结构的优化在提升材料力学性能方面起着至关重要的作用,为聚丙烯复合材料在汽车、建筑等高强度应用领域提供了坚实的技术支撑。

4.2 热性能与稳定性改善

界面结构的设计对材料的热性能有着至关重要的影响。在高温环境下,材料的热稳定性成为其长期使用的关键因素。功能化填料通过优化热传导路径,能够显著提升复合材料的热稳定性。填料的分散与界面结合的优化,使得热能够更有效地在复合材料中传递,避免局部温度过高造成材料

性能的退化。特别是在高温条件下,稳定的界面结构不仅有助于提升材料的热导率,还能防止因热膨胀不均导致的界面脱落或裂纹形成,从而延长材料的使用寿命。通过界面调控,填料与基体之间的热传递路径得以优化,提高了材料的热稳定性,使其适用于更广泛的高温应用场景,如汽车发动机部件、电气设备外壳等。界面优化在提升复合材料的热性能中起到了关键作用,尤其是在高温环境下保障其长期稳定的性能表现。

4.3 耐久性与环境适应性增强

复合材料的耐久性与环境适应性在其长期使用过程中至关重要,特别是在复杂环境条件下的应用。界面稳定性直接影响复合材料的耐久性能,功能化填料能够有效增强界面结合力,进而提高材料的抗老化能力。优化后的界面结构使得材料能够在极端环境条件下保持稳定性能,例如高湿、高温或紫外线照射等环境因素的影响。功能化填料通过增强界面结合力,有助于延缓材料因老化产生的性能下降,减少材料在长时间使用过程中的物理和化学劣化。同时,界面结构优化还能够减少外部环境对材料的侵蚀,如水分或化学物质对材料表面的侵害。通过提升复合材料的抗老化能力,优化后的界面结构使其在各种复杂环境中表现出更强的适应性和耐久性,从而延长了使用寿命。界面设计的改进不仅增强了复合材料的环境适应性,还使其在可持续性和长期使用性能方面具备了更大的优势。

5 功能化填料增强聚丙烯复合材料的应用实践

5.1 汽车轻量化材料中的应用

在汽车制造领域,轻量化设计已成为提升燃油效率与减少排放的关键措施。聚丙烯复合材料由于其优异的轻质和高强度特性,广泛应用于汽车结构件中。通过添加功能化填料,能够有效增强聚丙烯的界面结构,从而提高其机械强度与耐冲击性能,这使得复合材料能够满足车体结构件对强度与安全性的要求。例如,增强材料的刚性和韧性可以确保汽车在碰撞过程中更好地保护乘客。界面优化技术不仅增强了复合材料的物理性能,还提升了其长期使用中的稳定性和可靠性,从而进一步推动了汽车行业的轻量化设计。轻量化材料不仅降低了车身重量,减少了能耗,同时还提高了汽车的整体性能,为现代汽车工业的可持续发展提供了技术支持。

5.2 电子与电气材料中的应用

在电子与电气设备的生产过程中,复合材料发挥着越来越重要的作用。为了满足电子器件在高温环境下稳定运行的需求,复合材料需要具备良好的热稳定性与优异的电气绝缘性能。通过在复合材料中引入功能化填料,能够显著改善其热传导性能和电绝缘特性。这些填料的功能化设计使得材料不仅能够有效散热,还能在高电压和高频环境下提供出色的电气隔离性能,适用于如电器外壳、绝缘层和结构件等部件。界面设计在复合材料中起着至关重要的作用,通过优化填料与基体材料之间的结合界面,能够显著提升复合材料的力学和电气性能,确保其在各种复杂环境下的可靠性和长期稳定性。随着智能电子产品的广泛应用,对电子复合材料的需求愈加苛刻,功能化填料与界面设计的应用将为电子工业提供更加高效且稳定的材料解决方案。

6 结语

功能化填料在聚丙烯复合材料中的应用为界面结构设计提供了关键的技术路径。通过优化填料与基体之间的界面相互作用,并调控过渡层结构,可以显著提升复合材料的力学、热学和化学性能。这种优化不仅增强了材料的强度和韧性,还提高了其耐久性和稳定性,为实际应用提供了更广阔的可能性。未来的研究应集中在开发新型功能化填料及更精细的界面调控方法,以推动聚丙烯复合材料向高性能、多功能方向发展。随着技术的不断进步,这些复合材料将在汽车、电子、建筑等多个领域展现出更加广泛的应用前景,推动工业和环保领域的创新与发展。

参考文献

- [1] 呼晶.基于聚丙烯的高储能材料结构设计与性能研究[D].长春工业大学,2022.
- [2] 王礼军,赵伟健,章立清,等.滑石粉增强聚丙烯复合材料的热氧化性能[J].塑料,2025,54(05):111-115.
- [3] 赵冷.湿热环境下玄武岩与玻璃纤维增强聚丙烯复合材料长期性能研究[D].哈尔滨工业大学,2025.
- [4] 孔小寅.长玻纤增强聚丙烯复合材料的研究进展[J].造纸装备及材料,2020,49(03):52+72.
- [5] 李代文.连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的制备及性能研究[D].浙江理工大学,2019.

Deepening Application of Dual Prevention Mechanism in Safety Production Management of Coal Chemical Enterprises

Luo Man

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

Abstract

Addressing continuous coupling and energy-intensive operational scenarios in coal chemical plants, this study validates the theoretical applicability of a dual prevention mechanism combining “preliminary hierarchical control + feedback-based closed-loop governance.” It proposes an implementation pathway starting with scenario-based risk identification and ending with closed-loop remediation: Establishing hierarchical standards integrating HAZOP and LEC methodologies coupled with LOPA to form a dynamic risk database; Driving closed-loop hazard management through IoT monitoring and event correlation analysis; Connecting early warning systems to work order execution chains via OPC UA integration with semantic models for MES, DCS, and SIS systems; Developing a three-tiered evaluation framework comprising outcome-process-support metrics and AHP weight assessment. Engineering case studies demonstrate significant improvements: Accident rates decreased from 0.8 incidents/year to 0.1, hazard rectification completion rate increased from 85% to 98%, median response time for red-orange risk incidents reduced from 14 hours to 6 hours, DCS alarm effectiveness rose from 43% to 76%, invalid alarm suppression rate improved from 18% to 41%, SIS interlock health status enhanced from 0.92 to 0.97, stable operation days for major hazard sources extended from 180 to 320 days, and bypass compliance rate increased from 88% to 99%. These results validate the mechanism’s capability to incorporate major hazard sources, highly toxic media, and interlock failures into a hierarchical, verifiable, and traceable governance framework.

Keywords

dual prevention mechanism; coal chemical industry; risk classification and control; hidden danger investigation and management; integrated safety management

双重预防机制在煤化工企业安全生产管理中的深化应用

罗满

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司，中国·新疆哈密 839000

摘要

面向煤化工连续耦合与能量密集的工况场景，本文论证了双重预防机制“前置分级管控+反馈闭环治理”的理论适配性，提出以场景化风险识别为起点、处置闭环为终点的深化路径：构建HAZOP与LEC耦合的分级标准并对接LOPA，形成动态风险数据库；以物联网监测与事件关联驱动隐患闭环；通过OPC UA与语义模型融合MES、DCS、SIS，打通预警到工单的执行链；建立结果—过程—支撑三层指标与AHP权重评估体系。工程案例表明，事故发生率由0.8次/年降至0.1次/年，隐患整改完成率由85%升至98%，红橙级风险处置时效中位数由14 h缩短至6 h，DCS报警有效率由43%升至76%，无效告警抑制率由18%升至41%，SIS连锁健康度由0.92升至0.97，重大危险源稳定运行天数由180 d增至320 d，旁路合规率由88%升至99%。结果验证该机制可将重大危险源、剧毒介质与连锁失效纳入可分级、可核验、可追溯的治理路径。

关键词

双重预防机制；煤化工；风险分级管控；隐患排查治理；一体化安全管理

1 引言

煤化工装置普遍存在高温高压、剧毒介质与复杂连锁的耦合特征，启停、吹扫与连锁切换阶段的非常规性使系统脆弱性显著放大。传统做法中风险识别不全面、隐患处置不闭环与连锁管理不精细等痛点，难以支撑对重大危险源的持续稳态控制。国家层面推动双重预防机制为流程工业提供了

可操作的总体框架，但在煤化工这一高能强耦合场景下仍需实现场景化、动态化与数字化落地。基于此，本文以场景化辨识为入口，探索将HAZOP、LEC与LOPA融合用于风险分级，将隐患治理从阶段性抽查升级为事件驱动的闭环链条，并在MES、DCS、SIS等系统间构建一体化数据底座与联动逻辑。同时建立覆盖结果、过程与支撑维度的量化评估与权重体系，旨在验证双重预防机制在煤化工中的理论适配与工程有效性，为行业实现系统性、现场化与时序化安全治理提供可复制路径。

【作者简介】罗满（1984-），男，中国新疆哈密人，本科，工程师，从事煤化工安全管理研究。

2 双重预防机制在煤化工企业的理论适配性分析

鉴于煤化工工艺的连续耦合与能量密集特性,双重预防机制的核心内涵可概括为把风险分级管控作为前置屏障,把隐患排查治理作为反馈修正,两者以场景化风险识别为起点、以处置闭环为终点,借助循环反馈把控制措施的有效性不断迭代。结合鄂尔多斯煤制烯烃与榆林煤制油装置的运行场景可见,高温高压设备如气化炉、加氢反应器在4 MPa、500 °C以上条件下运行,热应力与密封磨损易触发容器超压与泄漏;含毒介质如CO、H₂S、NH₃在变换、净化、硫回收单元存在多点逸散路径;而DCS集散控制系统与SIS安全仪表系统的交互、联锁逻辑失配以及ESD紧急停车旁路管理不到位,往往在启停、吹扫、联锁切换阶段放大系统脆弱性。需重点关注的是,双重机制把风险识别不全面、隐患处置不闭环等痛点纳入统一框架:依靠基于危险能量强度的能量分级与LOPA层级防护分析矩阵对气化、变换、合成等关键单元实施分层控制,把高等级风险绑定隔离、联锁、惰化等硬隔离措施,把中低等级风险嵌入作业许可与作业前JHA作业危害分析;同时把隐患治理流程固化为发现、交办、整改、复核与追溯的闭环,并且与MOC变更管理制度、临时旁路台账、检维修隔离清单进行对接,在装置启停窗口期和非正常工况下保持动态更新。由此推导,双重预防机制能够把重大危险源、剧毒介质与联锁失效等典型风险纳入可分级、可核验与可追溯的治理路径,契合煤化工企业对系统性、现场化与时序化安全管理的迫切需求^[1]。

3 双重预防机制在煤化工企业的深化应用路径

3.1 风险分级管控体系的优化构建

鉴于煤化工装置高温高压、毒性介质与联锁复杂的耦合情境,本研究把风险分级管控的起点前移至工艺单元的场景化辨识,对气化、合成、精馏等单元构建HAZOP与LEC耦合方法:以节点偏差与原因—后果链梳理危险源清单,借助发生可能性L、暴露频度E、后果严重度C的定性定量打分,形成工艺偏差—风险等级—控制措施的对应关系。从分级标准来看,设定红、橙、黄、蓝四级:红级对应高暴露且后果致命的能量释放与剧毒介质失控,要求把隔离、联锁、惰化与本质安全设计作为必选项;橙级面向联锁失配、超限波动等高影响中频事件,要求把双通道联锁、旁路授权与在线监测固化到操作规程;黄色聚焦检维修、动火与受限空间等中等风险情境,要求把作业许可、作业前作业危害分析与气体检测执行到位;蓝色覆盖常规偏差与一般管理缺陷,要求把点巡检与岗位自查予以常态化。进一步观察发现,静态清单难以应对启停与非正常工况的快速变化,需构建动态风险数据库,把HAZOP结论、LEC评分、变更管理、旁路台账以及DCS与SIS报警数据进行关联,形成按单元、时间窗口与作业活动维度的风险台账;并且把风险等级的变更、

处置责任与时限、复核结论写入数据版本历史,借助可视化看板呈现红橙热点、趋势与闭环状态,使分级管控在生产节律中得以持续迭代^[2]。

3.2 隐患排查治理机制的动态升级

立足煤化工装置在启停切换与联锁切换阶段呈现的快速风险累积特性,隐患排查治理需要从阶段性抽查转向流程化闭环管理,以把问题识别、处置与复核拎成一条可追溯的链条。本研究把流程起点设置为排查任务生成,任务来源覆盖定期点检、非正常工况专项排查以及来自DCS与SIS报警的事件触发,并把任务与设备位号、工艺节点和风险等级进行绑定,生成面向具体场景的检查清单。现场检查环节围绕P&ID与作业活动双主线展开,检查人员借助移动终端完成标准项核对与异常项补充说明,同时把测温枪读数、便携式气体检测数据与照片证据固化到记录结构中。问题记录环节把隐患按照工艺偏差、设备失效与作业违章三大类进行归档,并标注临时控制措施与建议风险等级;整改指令下发环节把处置责任、时限与资源需求明确到岗位,涉及工艺参数变更或联锁策略调整的事项同步触发变更管理与临时旁路审批流程;验收销号环节由独立复核方进行到场确认,依据复核标准对有效性、持续性与副作用进行核验,验收通过后把记录归入装置级知识库,若复核不通过则自动回退至整改阶段并更新时限与措施,从而使闭环在数字化单元体系内得以稳定运行^[3]。

进一步观察到传统人工巡检难以及时捕捉参数突变,本研究把物联网智能监测纳入隐患早期识别路径,在气化、变换与合成单元布置温度与压力传感器、H₂S与CO电化学探头以及阀位与振动监测点,借助边缘计算节点进行阈值与变化率双阈判别,并把DCS过程报警、SIS联锁动作和在线监测信号进行事件关联,生成分级预警与任务工单。需重点关注的是,为防止预警泛化导致处置疲劳,预警逻辑引入时序窗口与空间邻近约束,把同一设备与相邻管线的多源异常合并归并,同时把旁路状态与检维修隔离清单作为过滤条件,减少非有效告警。由此推导,隐患从被动发现转向事件驱动触发,排查链条在秒级时域内开始运转,处置节奏与生产节律同步。

本研究立足煤化工企业对问题本质治理的现实需求,建立隐患溯源分析模型,把五步追问、因果图与障碍失效分析进行整合,并把HAZOP偏差结论、LOPA防护层失效信息以及历史隐患台账构成数据输入,输出设计缺陷、维护不当、操作偏差与组织管理四类根本缘由及其权重分布。针对高权重缘由,系统自动推荐结构性对策库,如把隔离级别提升、把联锁冗余通道配置、把作业许可要点增补与把培训内容定制化纳入长期措施包,并与年度技改、标准修订和人员能力提升计划对接。这样,隐患排查从事件层面的修补转向机理层面的重构,动态升级的治理链把短期整改与长期预防贯通到一个可核验、可迭代的管理框架中。

3.3 双重机制与现有安全管理系统的融合路径

面向煤化工的连续耦合场景，双重预防机制与既有信息系统的融合聚焦数据交互的颗粒度与时效。面向MES制造执行系统，需要把生产计划、批次切换、检修窗口以及工单状态纳入风险判别前置条件，用来修正启停与非正常工况的风险基线。面向SIS安全仪表系统，需要获取联锁回路健康度、旁路与投退记录以及需求动作计数，以支撑对高等级风险的快速识别与分层处置。进一步观察到，DCS报警与SIS动作存在时序耦合，一体化平台还需把两类事件进行关联与归并，抑制重复派发与误触发。

4 双重预防机制深化应用的效果评估

4.1 评估指标体系的构建

结合双重预防机制的前置屏障与反馈闭环，本研究把效果评估定位为对风险识别充分性、处置及时性与结果安全性的综合刻画。指标体系按结果、过程与支撑三类展开：结果层关注百万工时事故发生率、重大危险源稳定运行天数、联锁需求动作失效率；过程层聚焦风险分级管控覆盖率、红橙级风险处置时效中位数、隐患整改完成率与复核一次通过率、DCS报警有效率与抑制率；支撑层纳入SIS联锁健康度、旁路合规率、作业许可合规指数、MOC变更闭环率、人员能力达标率。各指标均设定统一口径与取样窗口，并把启停、批次切换与联锁切换单独标识为高权场景。

从数据来源来看，评估数据由SIS与DCS实时事件、MES计划与批次记录、作业许可与工单系统闭环状态汇聚获得，采集链路对接OPC UA与API并以位号为主键进行语义映射。进一步观察发现，不同装置与时段存在负荷与检修对指标的扰动，本研究把极差标准化与时间权重修正结合运用，把非正常工况与启停窗口纳入计分修正项，使横向对比与纵向趋势具有可比性。指标定义强调可核验性，例如把风险分级管控覆盖率界定为进入动态风险数据库的场景数除以应识别场景数，把隐患整改完成率分解为按期完成与一次通过两项并行打分，从而把治理质量与治理效率同步纳入刻画。

权重分配采用层次分析法构建目标层、准则层与指标层三层结构，以鄂尔多斯煤制烯烃与榆林煤制油两套装置的生产与安环骨干开展成对比较，形成判断矩阵，进行一致性检验后得到权重向量。采用几何平均法求解权重，计算表达如下。

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{1/n}}$$

其中， w_i 表示第*i*个指标的权重， a_{ij} 为判断矩阵中第*i*个指标相对于第*j*个指标的重要性标度， n 为参与权重计算的指标数量。

在权重确定后，把各指标按月度与季度进行归一化计分并加权求和，输出装置级综合安全绩效得分，同时生成过程与支撑子维度得分，以便定位薄弱项。需重点关注的是，模型内置数据质量评分与缺失惩罚因子，把异常缺报与迟报转换为分值扣减，并把启停窗口的高权事件以时间邻近权重进行修正，使评估结果能够反映非正常工况下的真实风险水平。由此推导，评估体系在不改变生产节律的前提下，把双重预防机制的运行有效性沉淀为可计算、可追溯与可迭代的量化框架。

5 结语

研究表明，将风险分级管控作为前置屏障、将隐患闭环治理作为反馈调节，并以场景化识别与处置闭环贯穿全过程，能够显著提升煤化工装置在启停与联锁切换等高权场景下的安全韧性。以动态风险数据库、事件关联与移动工单为核心的数字化链条，使高等级风险实现快识别、快处置与可追溯；与MES、DCS、SIS的语义融合及标准化接口，为预警、许可、变更与旁路管理提供了一键贯通的执行通道；结果—过程—支撑三层指标与AHP权重模型，将治理有效性沉淀为可计算与可比的绩效刻画。实践同时提示成功落地的前提条件包括位号与语义统一、时间同步与数据质量保障、告警治理与功能安全标准对齐、旁路授权与MOC刚性执行。未来可在跨装置泛化、预测性维护与韧性评估、知识库持续学习等方面深化，进一步提升极端与非正常工况下的主动防御能力，并推动双重预防机制与企业经营管理一体化协同，形成安全绩效与生产节律同频共振的长效机制。

参考文献

- [1] 陈海莲.双重预防机制下化工企业安全管理优化研究[J].品牌与标准化,2025,(06):158-160.
- [2] 李志伟,黄起中,赵开功,张晓蕾.煤化工企业双重预防数字化平台构建与应用[J].中国安全科学学报,2024,34(S1):172-178.
- [3] 袁亮,肖文东,蒋洋,赵军,梅晶,张教.基于双重预防机制的化工园区信息系统研究与设计[J].现代化工,2025,45(S1):370-374+380.
- [4] 彭健锋,李林蔚.双重预防机制在长输油气管道的探索与实践[J].石化技术,2025,32(11):94-96.
- [5] 罗兆琛,胡炜杰,卢永前,陈焕鑫,欧政.基于数字化转型的石化企业双重预防机制运行效果提升策略[J].现代化工,2024,44(S2):13-18.

Research on Rapid Detection Technology for Pesticide Residues in Common Imported and Exported Fruits and Vegetables

Peng Zhao

Heihe Customs, Heihe, Heilongjiang, 164300, China

Abstract

Pesticides are widely used in fruit and vegetable cultivation to effectively control pests and diseases and enhance yields. However, improper application may lead to excessive residue levels, compromising the quality and safety of imported/exported produce and disrupting trade circulation. As a critical tool for monitoring pesticide residues, rapid detection technology offers advantages such as operational simplicity, rapid results, and cost control, making it a cornerstone of quality supervision in the import-export sector. This paper clarifies the core principles and technical features of rapid pesticide residue detection for common fruits and vegetables, reviews the mechanisms and key applications of mainstream rapid detection technologies, analyzes prominent issues in current detection practices, and proposes targeted optimization strategies. The research aims to enhance the efficiency and accuracy of rapid pesticide residue detection, standardize trade circulation, and provide theoretical support and practical references for ensuring food safety.

Keywords

imported/exported fruits and vegetables; pesticide residues; rapid detection; detection technology; quality supervision

进出口常见果蔬中农药残留快速检测应用研究

赵朋

黑河海关, 中国·黑龙江 黑河 164300

摘要

农药在果蔬种植中广泛应用,可有效防控病虫害、提升产量,但不合理使用易导致残留超标,影响进出口果蔬质量安全与贸易流通。快速检测技术作为把控进出口果蔬农药残留的关键手段,具有操作简便、检测快速、成本可控等优势,已成为进出口果蔬质量监管的核心支撑。本文明确进出口常见果蔬农药残留快速检测的核心内涵与技术特征,梳理主流快速检测技术的原理与应用要点,剖析当前检测应用过程中存在的突出问题,提出针对性优化策略,为提升进出口果蔬农药残留快速检测效率与准确性、规范果蔬贸易流通、保障食品安全提供理论支撑与实践参考。

关键词

进出口果蔬; 农药残留; 快速检测; 检测技术; 质量监管

1 引言

果蔬是进出口贸易中的重要农产品,其质量安全直接关系到消费者健康、贸易信誉与行业发展。农药残留是影响进出口果蔬质量安全的主要隐患,超标残留不仅会损害人体健康,还可能引发贸易壁垒,影响果蔬进出口贸易的顺利开展。

传统农药残留检测技术流程复杂、耗时较长、检测成本高,难以满足进出口果蔬批量检测、快速通关的需求。快速检测技术凭借高效、便捷、低成本的优势,逐步取代传统检测技术的部分应用场景,成为进出口果蔬农药残留筛查与监管的重要手段。优化快速检测技术应用模式,解决应用过

程中的各类问题,提升检测准确性与效率,对规范进出口果蔬贸易、保障食品安全具有重要意义。

2 进出口常见果蔬农药残留快速检测的核心内涵与技术特征

2.1 核心内涵

进出口常见果蔬农药残留快速检测,是指采用便捷、高效的检测技术与方法,对进出口果蔬中可能存在的农药残留进行快速筛查与定量、定性分析,判断其残留量是否符合进出口贸易相关标准的检测过程。其核心目标是快速识别农药残留超标果蔬,防范质量安全风险,保障贸易双方合法权益,推动果蔬进出口贸易有序开展。

检测对象涵盖进出口常见果蔬品类,检测范围包括杀虫剂、杀菌剂、除草剂等各类常用农药,检测结果需满足进

【作者简介】赵朋(1995-),中国黑龙江海伦人,本科,专业技术十二级,助理工程师,从事化学研究。

出口国家或地区的农药残留限量标准,为果蔬通关、贸易验收提供科学依据。

2.2 技术特征

进出口果蔬农药残留快速检测技术需适配贸易通关的特殊需求,具备鲜明的技术特征。高效快捷是核心特征,检测流程简化,检测周期短,可实现批量样本同步检测,满足果蔬快速通关的时效要求。操作简便,无需复杂的仪器设备及专业的操作技能,可在现场开展检测,降低检测门槛。

成本可控,检测试剂与仪器的投入成本相对较低,适合大规模推广应用,尤其适用于进出口口岸的批量筛查。准确性达标,检测结果需具备一定的精准度,能够有效区分合格与超标样本,为质量监管提供可靠支撑。适应性强,可适配不同品类果蔬的检测需求,能够应对不同基质、不同农药残留类型的检测场景,具备广泛的应用范围。

3 进出口常见果蔬农药残留主流快速检测技术及应用要点

3.1 免疫分析法

免疫分析法基于抗原抗体特异性结合原理,通过检测抗原抗体结合过程中产生的信号变化,实现对农药残留的定性或定量检测。该技术特异性强,能够精准识别目标农药残留,不受其他杂质干扰,检测灵敏度较高,可检测出微量农药残留。

应用过程中需注重试剂的稳定性,严格控制检测温度与反应时间,确保抗原抗体充分结合,提升检测准确性。样本前处理需简化且规范,去除果蔬基质中的干扰物质,避免影响检测结果。该技术适用于单一或少数几种特定农药残留的快速筛查,广泛应用于进出口果蔬中杀虫剂、杀菌剂等常见农药的检测。

3.2 色谱快速检测法

色谱快速检测法以色谱分离技术为核心,通过分离果蔬样本中的农药残留组分,结合检测器实现对残留量的定量分析。该技术分离效果好,可同时检测多种不同类型的农药残留,检测精度高,能够满足进出口贸易对检测准确性的严格要求。

应用时需优化色谱条件,合理调整流动相比例、柱温与检测波长,提升分离效率与检测灵敏度。样本前处理需注重提取与净化步骤,确保提取液中农药残留组分纯度,减少基质干扰。该技术适用于进出口果蔬中多种农药残留的同步检测,尤其适用于对检测精度要求较高的贸易场景。

3.3 光谱快速检测法

光谱快速检测法利用农药分子对特定波长光的吸收、发射或散射特性,通过检测光谱信号的变化,实现对农药残留的快速筛查。该技术检测速度快,无需复杂的样本前处理,可实现无损检测,适合大批量样本的快速筛查。

应用过程中需选择合适的检测波长,避免果蔬基质自身光谱的干扰,提升检测的特异性与准确性。针对不同品类

果蔬,需优化检测参数,适配不同基质的检测需求。该技术适用于进出口果蔬农药残留的初步筛查,可快速区分合格与疑似超标样本,为后续精准检测提供参考。

3.4 生物传感器检测法

生物传感器检测法结合生物识别技术与传感技术,通过生物识别元件特异性识别农药残留,将生物信号转化为可检测的电信号、光信号等,实现对农药残留的快速检测。该技术检测速度快、灵敏度高,操作简便,可实现现场实时检测,适配进出口口岸的检测需求。

应用时需注重生物识别元件的稳定性与特异性,定期校准传感器,确保检测信号的准确性与可靠性。样本前处理需简单高效,减少对生物识别元件的损伤,保障检测效果。该技术适用于进出口果蔬中微量农药残留的快速检测,具有广阔的应用前景。

4 进出口常见果蔬农药残留快速检测应用中的现存问题

4.1 检测技术适配性不足

不同品类果蔬基质差异较大,部分快速检测技术对特定果蔬基质的适配性较差,易受基质干扰,导致检测准确性下降。部分检测技术仅适用于单一或少数几种农药残留的检测,难以满足进出口果蔬中多种农药残留同步检测的需求,检测覆盖面有限。部分快速检测技术的检测灵敏度不足,难以检测出微量农药残留,无法满足部分国家或地区严格的农药残留限量标准,影响检测结果的有效性与适用性。

4.2 检测人员专业素养不足

快速检测技术的规范应用需要具备一定的专业知识与操作技能的检测人员。当前部分进出口口岸的检测人员专业素养不足,缺乏对快速检测技术原理、操作流程的深入掌握,操作过程中易出现操作不规范、参数设置不合理等问题,影响检测结果的准确性。部分检测人员缺乏质量控制意识,对检测过程中的细节把控不到位,未严格按照检测标准开展操作,导致检测结果出现偏差。检测人员的培训与考核机制不完善,难以实现专业能力的持续提升,无法适配快速检测技术的发展与应用需求。

4.3 质量控制体系不完善

进出口果蔬农药残留快速检测缺乏完善的质量控制体系,检测过程中的质量管控环节薄弱。部分检测机构未建立规范的检测标准与操作流程,检测过程缺乏统一的管控要求,导致不同检测批次、不同检测人员的检测结果差异较大,检测结果的可靠性不足。检测试剂与仪器的质量管控不到位,部分检测试剂稳定性较差、仪器精度不足,且未定期进行校准与维护,影响检测结果的准确性。检测结果的审核与验证机制不完善,难以及时发现检测过程中的误差与问题,无法保障检测结果的科学性与有效性。

4.4 标准体系不健全

不同国家或地区的进出口果蔬农药残留限量标准存在

差异,部分快速检测技术的检测标准与进出口贸易标准不匹配,检测结果无法直接作为通关依据,需进行二次检测,影响检测效率与贸易通关速度。国内快速检测技术的标准体系不健全,缺乏统一的检测方法、检测指标与质量评价标准,不同检测机构的检测规范不统一,导致检测结果缺乏可比性。部分快速检测技术的标准更新不及时,无法适配新型农药残留的检测需求,影响检测技术的应用效果。

5 进出口常见果蔬农药残留快速检测应用的优化策略

5.1 优化检测技术,提升适配性与灵敏度

加强快速检测技术的研发与优化,结合不同果蔬基质的特性,开发适配性强的检测技术,减少基质干扰,提升检测准确性。针对进出口果蔬中多种农药残留同步检测的需求,研发多组分快速检测技术,扩大检测覆盖面,实现多种农药残留的同步筛查与定量分析。

提升检测技术的灵敏度,优化检测试剂与仪器性能,实现微量农药残留的精准检测,满足不同国家或地区的农药残留限量标准。推动不同检测技术的融合应用,结合各类技术的优势,构建复合型快速检测体系,提升检测效率与准确性。

5.2 规范样本前处理流程,提升检测可靠性

建立适配不同果蔬品类的标准化样本前处理方法,明确提取、净化的操作步骤与参数,统一前处理规范,减少操作差异对检测结果的影响。优化样本前处理技术,开发简便、高效、快速的前处理方法,缩短前处理时间,提升检测效率,与快速检测技术的高效性相适配。

加强前处理试剂与设备的研发与应用,提升提取与净化效果,有效去除果蔬基质中的干扰物质,保障检测结果的准确性与重复性。强化前处理操作的质量管控,明确操作规范与考核标准,确保检测人员严格按照标准开展前处理操作。

5.3 强化人才培养,提升检测人员专业素养

建立完善的检测人员培训体系,定期开展快速检测技术原理、操作流程、质量控制等方面的专项培训,提升检测人员的专业知识与操作技能。邀请行业专家进行授课指导,分享检测经验与技术要点,帮助检测人员解决应用过程中的难点问题。

建立科学的检测人员考核机制,将操作规范性、检测准确性等纳入考核范围,定期进行考核评估,激励检测人员提升专业能力。加强检测人员的质量控制意识培养,强化检测过程中的细节把控,确保检测操作规范、数据真实可靠。

5.4 完善质量控制体系,保障检测质量

建立健全进出口果蔬农药残留快速检测质量控制体系,制定统一的检测标准与操作流程,明确检测过程中的质量管控要求,实现检测全流程的标准化、规范化管控。加强检测试剂与仪器的质量管控,严格筛选优质检测试剂与仪器,定期进行校准与维护,确保试剂稳定性与仪器精度。

建立检测结果审核与验证机制,安排专业人员对检测数据进行审核,定期开展检测结果验证工作,及时发现检测过程中的误差与问题,确保检测结果的科学性与有效性。加强检测机构的资质管理,规范检测机构的运营行为,提升检测机构的检测能力与服务水平。

5.5 健全标准体系,对接贸易需求

加强与进出口国家或地区的标准对接,梳理不同国家或地区的农药残留限量标准,优化快速检测技术的检测标准,确保检测结果能够直接作为通关依据,提升贸易通关效率。建立健全国内快速检测技术标准体系,制定统一的检测方法、检测指标与质量评价标准,实现不同检测机构检测规范统一,提升检测结果的可比性。

建立标准动态更新机制,及时跟踪新型农药的使用情况与进出口贸易标准的变化,更新检测标准与检测指标,适配新型农药残留的检测需求,提升快速检测技术的适用性与前瞻性。加强标准的宣传与推广,确保检测人员、贸易企业准确掌握相关标准,推动标准的有效实施。

6 结语

快速检测技术是进出口常见果蔬农药残留监管的核心手段,具备高效、便捷、成本可控等优势,能够有效满足进出口果蔬批量检测、快速通关的需求,对保障果蔬质量安全、推动贸易流通具有重要作用。当前主流的快速检测技术包括免疫分析法、色谱快速检测法、光谱快速检测法、生物传感器检测法,各类技术各具优势,适用于不同的检测场景。

进出口常见果蔬农药残留快速检测应用过程中,仍存在检测技术适配性不足、样本前处理存在短板、检测人员专业素养不足、质量控制体系不完善、标准体系不健全等问题,影响检测效率与准确性。通过优化检测技术、规范样本前处理流程、强化人才培养、完善质量控制体系、健全标准体系,能够有效解决上述问题,提升快速检测应用水平,为进出口果蔬质量监管提供可靠支撑。

参考文献

- [1] 张敏. 农产品农药残留快速检测技术应用研究[J]. 食品科学, 2024, 45(06): 301-307.
- [2] 李娟. 进出口果蔬农药残留检测技术现状与优化路径[J]. 检验检疫科学, 2024, 34(02): 78-83.
- [3] 王浩. 免疫分析法在果蔬农药残留快速检测中的应用[J]. 食品检测技术, 2023, 11(08): 45-50.
- [4] 刘佳. 色谱快速检测技术在进出口果蔬农药残留检测中的应用研究[J]. 中国农学通报, 2024, 40(09): 123-128.
- [5] 陈阳. 生物传感器在农药残留快速检测中的应用进展[J]. 传感器技术, 2024, 43(03): 1-7.
- [6] 赵伟. 进出口果蔬农药残留快速检测质量控制体系构建[J]. 质量与标准化, 2024(04): 67-70.
- [7] 孙丽. 果蔬农药残留快速检测标准体系优化研究[J]. 农产品质量与安全, 2023(06): 89-94.

Research on the Performance Improvement of High Crystallinity PBAT by BDO

Penghai Yang¹ Xiaoqian Yang¹ Rongxia Wang¹ Guangchao He²

1. Xinjiang Tianye (Group) Co., Ltd., Shihezi, Xinjiang, 832000, China

2. Sinochemistry Donghua Tianye New Materials Co., Ltd., Shihezi, Xinjiang, 832000, China

Abstract

This study focuses on using 1,4-butanediol (BDO) blending modification to reduce the grain number of polybutylene terephthalate/butylene terephthalate (PBAT), particularly eliminating the gel point formed by excessive cross-linking reactions, thereby enhancing PBAT performance and optimizing the optimal BDO addition amount. Experimental results indicate that an appropriate BDO addition amount can effectively disrupt macromolecular entanglement and microcrystalline regions during blending modification, reduce stress concentration, improve crystalline uniformity, and ultimately synergistically optimize PBAT's comprehensive properties such as tensile strength, elongation at break, and melting point. This study provides an effective modification approach to enhance PBAT performance and reduce the gel point during film formation.

Keywords

PBAT; blending modification; crystal grains; composites

BDO 对高晶点 PBAT 性能改善的研究

杨朋海¹ 杨晓倩¹ 王荣霞¹ 何光朝²

1. 新疆天业(集团)有限公司, 中国·新疆石河子 832000

2. 中化学东华天业新材料有限公司, 中国·新疆石河子 832000

摘要

本研究聚焦于利用1,4-丁二醇(BDO)共混改性改善高晶点聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)的性能,特别是消除由于过度交联反应形成的晶点,提升PBAT的综合性能,优选出最佳的BDO添加量。试验结果表明,合适的BDO添加量在共混改性过程中可有效破坏大分子的缠结和微晶区,不仅降低了集中应力,而且改善了结晶的均匀性,最终协同优化了PBAT的拉伸强度、断裂伸长率、熔点、熔融指数等综合性能。本研究为提升PBAT的综合性能,减少成膜时的晶点提供了一种有效的改性途径。

关键词

PBAT; 共混改性; 晶点; 复合材料

1 研究背景

随着全球环境问题的日益严峻,可降解塑料的研究与开发受到了人们的广泛关注。聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)作为一种新型的生物可降解塑料,具有良好的力学性能、加工性能和生物降解性,在包装、农业、医疗卫生等领域具有广阔的应用前景^[1]。PBAT在合成时仍有一些问题,诸如合成过程中酯交换反应不完全或局部缩聚不均匀,导致残留的扩链剂形成局部结晶区域。大分子量分子因链段

运动性差,容易形成缠结或微晶区^[2]。这样产生的晶点会作为应力集中源,在拉伸过程中导致拉伸强度和断裂伸长率下降,在实际应用中无法满足使用场景要求。

近年来,国内外学者对醇类共混改性和PBAT性能改善进行了研究,取得了一些重要的研究成果。2023年陕洁等人,在PBAT合成中采用了二次扩链法,讨论了扩链剂的用量与晶点数量的关系,当扩链剂过量且反应不完全时晶点数量明显增加^[3]。兰光明等人提出了一种PBAT树脂薄膜中高晶点的处理方法,其使用醇类物质和扩链剂,使薄膜中的晶点有效减少^[4]。

PBAT醇类共混改性作为一种有效的改性方法,对于提高PBAT的性能和减少晶点数量具有重要的意义。未来,随着研究的不断深入和技术的不断进步,PBAT醇类共混改性将会在可降解塑料领域得到更广泛的应用。

【基金项目】生物可降解材料关键技术开发与应用创新团队(项目编号:2024DB011)。

【作者简介】杨朋海(2000-),男,中国新疆石河子人,本科,助理研究工程师,从事生物可降解材料研究。

2 试验部分

2.1 实验原料及设备

2.1.1 主要材料

高晶点 PBAT, 中试合成自制; 1,4-丁二醇 (BDO), 上海麦克林生化科技有限公司; 芥酸酰胺, 江西智联新材料有限公司。

2.1.2 主要仪器

真空干燥箱, DEF-6053, 上海一恒科学仪器有限公司; 电子天平, ME4002, 梅特勒-托利多仪器公司; 哈克挤出机, 赛默飞世尔科技公司; 高速混合机 SHR-10A, 江苏联冠科技发展有限公司; 注塑机 MA900 III /280 SE, 海天塑机集团有限公司; 切粒机, 宁波立欧机械设备有限公司; 熔融指数仪, MF20, 美国英斯特朗公司; 电子万能试验机, 5966, 美国英斯特朗公司; 傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), Nicolet iS20, 美国赛默飞科技公司; 差示扫描热量仪, 德国耐驰仪器有限公司; 降解材料专用吹膜机, ACAD SJ28-80/300A。

2.2 样品的制备

按 PBAT、BDO 和芥酸酰胺总质量为基准 100 份, 调整各组分含量, 制定不同 BDO 含量共混改性的 PBAT 配方 7 组, 具体见表 1。

表 1 BDO 共混改性 PBAT 配方

组分 序号	PBAT	BDO	芥酸酰胺
1	99.8	0	0.2
2	99.55	0.25	0.2
3	99.3	0.5	0.2
4	99.05	0.75	0.2
5	98.8	1	0.2
6	98.55	1.25	0.2
7	98.3	1.5	0.2

按上表配方称取 PBAT 和芥酸酰胺, 将其加入高速混合机中, 在常温下, 以 100r/min 的转速搅拌, 在搅拌过程中逐滴加入 BDO, 使得与 PBAT 混合均匀, 再以 200r/min 的转速搅拌 10min, 得到 PBAT/BDO 共混料。使用哈克双螺杆挤出机, 将 7 组 PBAT/BDO 共混料在 150℃ 下熔融挤出、冷系统冷却后造粒, 得到 PBAT/BDO 共混改性颗粒。

3 性能测试

3.1 拉伸性能测试

参照相关标准 GB/T 1040, 使用电子万能材料试验机测试 1A 型样条的拉伸强度和断裂伸长率。

3.2 热力学性能测试

使用差示扫描量热仪 (DSC) 测试 PBAT 粒料或样条

的熔融温度和结晶温度。

3.3 FTIR 测试

样品表面必须清洁, 无污染物、水分和溶剂残留, 样品应尽可能均匀, 厚度在 0.01-0.05 mm 之间。

3.4 熔融指数测试

按照 GB/T3682-2000 对颗粒进行测试, 试验条件为温度 190℃, 负荷 2.16kg。

4 结果与讨论

4.1 BDO 添加量对高晶点 PBAT 拉伸性能的影响

BDO 作为高晶点 PBAT 改性过程中的扩链剂或改性剂, 其添加量对 PBAT 的拉伸性能有显著影响。图 1 是不同 BDO 添加量与高晶点 PBAT 共混改性后, 通过注塑工艺制备 1A 型样条, 放置 24 小时后, 使用电子万能材料试验机进行拉伸测试的数据。

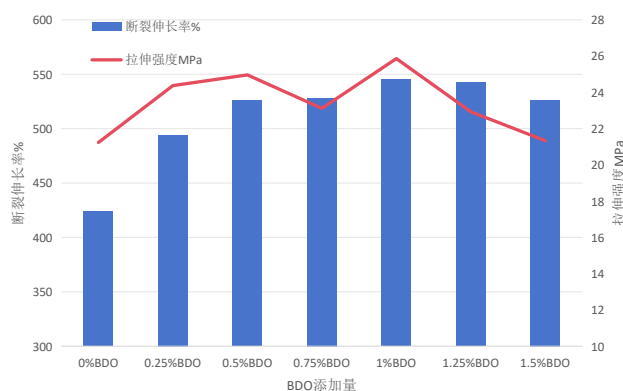


图 1 BDO 添加量对高晶点 PBAT 拉伸性能的影响

由图 1 数据可以看出, 随着 BDO 添加量的增加, 共混改性后的 PBAT 拉伸强度、断裂伸长率逐渐升高, 当 BDO 添加量达到 1% 后缓慢下降。这是因为添加 BDO 发生共混改性解离了晶点中的大分子量分子, 将大尺寸晶区切割成更小更均匀的微小晶区, 降低了应力分布不均而断裂的风险。同时, BDO 与端羧基发生酯化, 修复断裂的分子链, 减少低分子量片段, 从而提高了拉伸性能。当 BDO 添加过量会有自团聚的现象, 分子量过高或交联过度, 导致加工流动性差, 可能形成缺陷, 结晶度过高且晶粒粗大, 导致材料变脆。因晶界应力集中, 易引发裂纹扩展, 拉伸强度下降。材料失去韧性, 表现为典型脆性断裂, 断裂伸长率也大幅降低。根据检测数据综合分析, 1%BDO 添加量的 PBAT 性能更优异。

4.2 BDO 添加量对高晶点 PBAT 热力学性能的影响

BDO 添加量对高晶点 PBAT 的热力学性能影响显著, 主要体现在结晶行为、热稳定性及动态力学性能等方面。图 2 是不同 BDO 添加量与高晶点 PBAT 共混改性后, 使用差示扫描热量仪测试的数据。

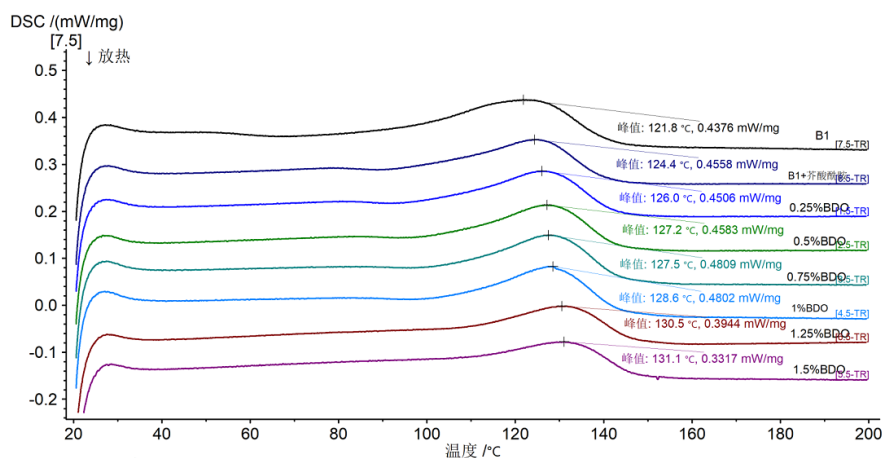


图2 BDO添加量对高晶点PBAT热力学性能的影响

由图2可以看出,随着BDO添加量增多,熔点逐渐升高。随着共混改性作用的发生,BDO分子链的-OH攻击PBAT分子链内部的酯键,导致链断裂和重组。随着分子链重组的酯键增加,提高了分子量和链的规整性,形成更完善、更均匀的晶体,所以需要更高能量的熔融焓,致使熔融温度升高。但是,过量BDO可能导致相分离,残留未反应单体或低分子量产物,成为热分解引发点,降低热稳定性。由此可以看出,1%BDO添加量可以有效改善PBAT分子链长度与结晶质量,实现结晶质量与段链分布的协同优化。

4.3 BDO添加量对高晶点PBAT红外光谱的影响

BDO的添加量对高晶点PBAT的红外光谱(FTIR)影响主要体现在特征官能团吸收峰的变化上,这些变化与结晶行为,即高晶点形成以及分子结构修饰相关。图3是不同

BDO添加量与高晶点PBAT共混改性后,通过压片工艺制备1mm厚的圆片,使用傅里叶变换红外光谱仪测试数据显示。

BDO本身羟基伸缩振动峰(O-H)在3200-3500 cm^{-1} 范围内有一个宽而强的吸收峰。如果反应消耗了BDO的-OH和PBAT的-COOH(其-OH也会参与氢键),此区域的峰形和强度会减弱。由图3可以看出,未添加BDO的峰值最高,添加1.5%的峰值最低。游离羧酸的羧基峰通常出现在~1710-1725 cm^{-1} ,随着BDO添加量的增多,反应后端羧基被消耗,~1710-1725 cm^{-1} 处的“肩峰”或宽峰应明显减弱。

酯基伸缩振动峰是PBAT吸收峰的主要特征。PBAT主链和反应新生成酯键在1710-1725 cm^{-1} 会出现强而尖锐的吸收峰。添加BDO反应后会生成新酯键,此主峰强度会增加,由图3可以看出,随着BDO添加量的增多,此峰明显增强。

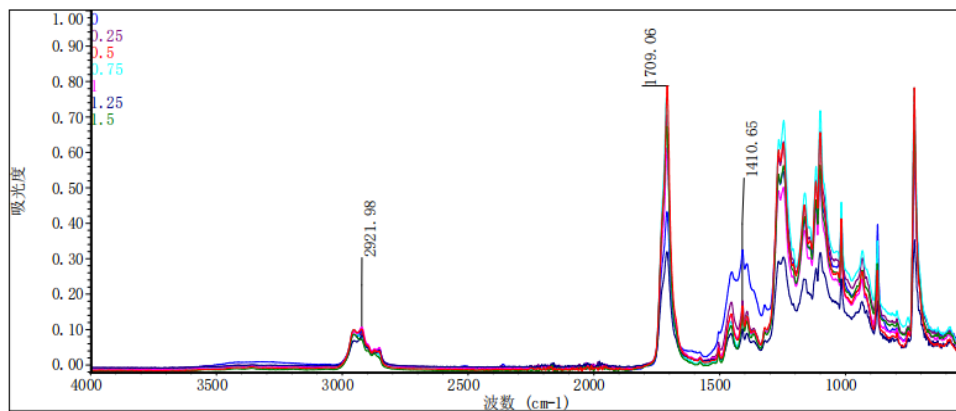


图3 BDO添加量对高晶点PBAT红外光谱的影响

4.4 BDO添加量对高晶点PBAT熔融指数的影响

图4是不同BDO添加量与PBAT共混改性反应后,使用熔融指数仪测试数据显示。

由图4可以看出,随着BDO添加量的增多,熔融指数逐渐升高,分析原因可能为:由于BDO的-OH攻击PBAT分子链内部的酯键,导致链断裂和重组,可能导致分子量降

低或分布变化;BDO的-OH与PBAT末端的-COOH发生酯化反应,生成新的酯键和水,反应生成的水在熔体体系中难以有效脱除,会抑制反应正向进行,甚至导致水解降解;BDO是小分子物质,添加量过多会充当体系的润滑剂,使熔融指数急剧上升。所以从熔融指数检测结果中不能直接得出最佳BDO的添加量,需根据其他检测结论判定。

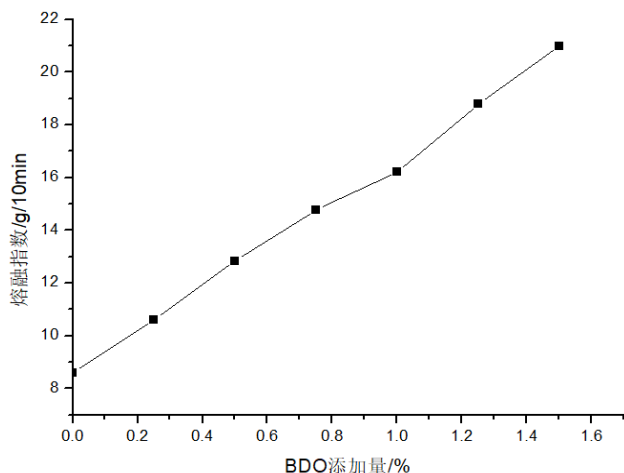


图4 BDO添加量对高晶点PBAT熔融指数的影响

4.5 BDO添加量对膜面晶点的改善情况

不同BDO添加量与PBAT共混改性后,通过降解材料专用吹膜机,膜面情况分析如下:根据对膜面晶点书统计,每平方厘米内的晶点个数,随着BDO添加量的增加,膜面的晶点明显减少。

为提高PBAT力学性能,原料在合成过程中添加扩链剂进行反应,由于过量的扩链剂,使得材料从线性热塑性塑料转变为三维网络结构,形成了晶点。BDO为小分子物质,可以拆解三维网络结构,可作为温和的成核剂,促进PBAT形成更多、更小的晶核,使结晶更均匀;再者BDO还会起到增塑剂的作用,减少低分子量酯类物质的团聚,改善晶点

与PBAT基体的界面相容性,促进了PBAT的局部运动,减小晶点尺寸。

5 结论

本文以高晶点PBAT为基料,添加不同量的BDO进行共混改性,采用双螺杆挤出机挤出、造粒、注塑工艺制备出共混改性后的PBAT,通过拉伸、DSC、熔融指数、红外等检测。根据BDO共混改性后的PBAT性能变化,具体结论如下:

(1)由BDO共混改性高晶点PBAT后的拉伸性能和热力学性能检测数据分析可知,BDO的添加量为1%时,PBAT的综合性能最为优异。

(2)根据FTIR检测图、熔融指数和膜面情况可以得出,不同的BDO添加量呈现出一定的趋势,说明BDO与PBAT的共混改性在向正向反应进行。因此,最优的BDO添加量还需要以共混改性前PBAT的晶点含量情况而定。

参考文献

- [1] 杨帆,吴宏,马双翼,彭江洪,姜天伟,孙闯闯. PBAT及其改性复合材料的研究进展与应用[J]. 广东化工, 2024, 51 (21): 17-19+76.
- [2] 王翼嵩. 生物可降解聚酯PBAT链结构调控及性能研究[D]. 导师:王文俊;李希. 浙江大学, 2024.
- [3] 陕洁,朱桂丹,齐艳杰,吴霞,牟芬. 聚对苯二甲酸己二酸-丁二醇酯的合成[J]. 塑料, 2024, 53 (03): 83-87+148.
- [4] 兰光明,刘建,李平,尚祖明. 一种PBAT树脂薄膜中高晶点的处理方法: 辽宁省, CN117645779A[P]. 2024-03-05.

Application and Safety Enhancements of Microreactor Technology in Aromatic Amine Diazotization Synthesis

Xingyu Xia

Federal Pharmaceutical (Inner Mongolia) Co., Ltd., Bayannur, Inner Mongolia, 015000, China

Abstract

The diazotization reaction of aromatic amines serves as a critical unit process in the synthesis of dyes, pharmaceuticals, pesticides, and fine chemicals. However, this reaction exhibits rapid exothermic release and significant temperature rise, coupled with poor stability of diazide salts. Traditional batch reactor production often suffers from localized overheating and product decomposition, leading to batch variability and safety risks. Microreactor technology leverages advantages such as micro-scale channels, efficient mixing, rapid heat transfer, and low liquid hold-up to achieve instantaneous uniform reactant contact and timely heat removal, significantly suppressing side reactions and providing a safer, more controllable engineering approach for aromatic amine diazotization. This paper analyzes the fundamental applications, process advantages, risk control strategies, and safety improvement measures of microreactors in aromatic amine diazotization synthesis, while also discussing key engineering considerations—including material selection for equipment and channel structure optimization—to enhance the intrinsic safety of such reactions.

Keywords

microreactor technology; aromatic amine; diazotization synthesis; process safety; continuous flow reaction

微反应器技术在芳胺类重氮化合成中的应用及安全性改进

夏星宇

联邦制药(内蒙古)有限公司, 中国·内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要

芳胺类重氮化反应在染料、医药、农药、精细化学品合成里是重要的单元过程。不过此反应放热速度快、温升剧烈,重氮盐稳定性不佳,传统釜式生产会出现局部过热及产物分解情况,存在批次波动、安全风险。微反应器技术依靠微尺度通道、高效混合、快速换热还有低持液量等优点,能够实现反应物瞬间均匀接触、热量及时移出,极大抑制副反应发生,给芳胺重氮化过程给予了更具安全性、可控性的工程化途径。本文针对微反应器在芳胺类重氮化合成中的应用基础、工艺优势、风险控制、安全改进策略进行分析,同时也探讨了设备材质选择、通道结构优化等工程化要点,以期提升该类反应的本质安全水平提供实用参考。

关键词

微反应器技术; 芳胺; 重氮化合成; 过程安全; 连续流反应

1 引言

芳胺类化合物通过重氮化反应能够生成重氮盐,这些重氮盐可进一步用于偶合、取代、水解等反应,在精细化工产业链里属于应用广泛的关键中间步骤。不过,重氮化过程一般会涉及酸性模式、亚硝化试剂、不稳定中间体,该反应对于温度、混合状态、加料比例还有停留时间都比较敏感。传统间歇釜依靠分批投料、人工调控,放大之后容易出现传热不均匀、反应失控、副产物增多等问题。微反应器技术具有连续化、模块化、精准化的特点,能够提高危险反应的本质安全水平,对于芳胺类重氮化的工业化生产有着重要意义。

【作者简介】夏星宇(1996-),男,中国四川人,本科,助理工程师,从事精细化工、重氮化反应、氧化反应研究。

2 芳胺类重氮化合成的反应特点与安全需求

2.1 芳胺重氮化反应具有较强的放热与瞬时性特征

芳胺重氮化反应一般是在酸性环境里进行,芳胺盐在亚硝化活性物种接触以后会快速生成重氮盐。这个反应过程的速率比较快,还会出现明显的放热现象,要是混合不充分或者局部原料浓度过高,就容易形成温度热点,进而导致重氮盐分解、副反应增多甚至压力异常。在传统釜式生产之中,搅拌桨对宏观混合有一定的作用,不过在大体积模式内很难完全消除微观混合差异,特别是在投料口附近更容易出现局部过量的情况。芳胺底物有多种类型,不同的取代基会改变反应活性、中间体稳定性,使得工艺控制变得更复杂。重氮化合成不只是化学反应问题,还是传热、传质和安全管理共同影响的工程问题。

2.2 重氮盐中间体不稳定带来过程风险

重氮盐作为芳胺重氮化反应的关键产物，同时也是具有较高安全风险的中间体之一。有部分重氮盐对于温度、光照、pH值变化、杂质颇为敏感，要是在模式里停留的时间过长，就有可能出现分解、偶联或者其他非目标转化的情况。在工业生产当中，要是需要对重氮液进行长时间的暂存或者转移，那么风险会随着物料的积累而升高。尤其是在放大条件下，大量不稳定中间体集中存在，一旦冷却出现失效、搅拌出现异常或者操作有所延迟，事故后果便可能会被放大^[1]。对于芳胺重氮化的安全改进而言，应当尽可能减少危险中间体的存量、停留时间，促使重氮盐能够在线生成、在线输送并且即时消耗，而这恰恰是微反应器技术能够发挥优势的关键所在。

2.3 传统釜式工艺存在放大控制难题

釜式重氮化工艺具备一定成熟度，设备通用性良好，不过其安全性对操作经验、外部冷却能力有着较高度度的依赖。在小试阶段，反应相对比较容易实现控制，然而当进入中试、生产规模后，模式体积会有所增大，换热面积与反应体积的比例会出现下降，导致放热移除能力相对显得不足。为确保安全，企业常常会采用较低温度、缓慢滴加、延长反应时间等方式，不过这将会降低生产效率，并且有可能增加副反应发生的机会。釜式生产还存在批次差异比较明显、过程数据连续性欠缺、异常预警滞后等一系列问题。随着精细化化工行业对于安全、环保、稳定质量的要求不断提高，仅仅依靠经验式控制已难以满足高风险反应的现代化生产需求。

3 微反应器技术应用于芳胺重氮化合成的优势

3.1 微尺度结构显著强化混合与换热

微反应器一般是由微通道、微混合器、换热模块、流体连接单元构成的，其通道的尺度比较小，流体的接触距离也短，所以能够在较短的时间当中达成均匀混合的状态。当芳胺溶液、酸性介质、亚硝化试剂进入到微混合结构之后，便能够快速形成均一的反应环境，进而减少由局部浓度差所引发的副反应^[2]。微通道具备较高的比表面积，反应产生的热量能够迅速传递到外部的控温介质当中，从而让模式的温度维持在相对稳定的范围之内。对于重氮化这种放热速度快且对温度敏感的反应来说，混合、换热效率的提高能够直接对选择性与安全性有所改善。微反应器并非单纯地缩小反应容器，而是借助工程结构来改变反应过程的控制方式。

3.2 连续流模式能够有效降低危险物料的持有量

微反应器大多采用连续流的方式运行，物料会依据设定好的流速进入反应单元，在反应完成之后便立刻流出。和釜式反应一次性处理大量物料的情况不一样，微反应器在任何一个时刻的持液量是比较小的，就算出现了局部异常的状况，系统内危险物料的总量也会受到一定的限制。对于不稳定的重氮盐来说，这种低持液量的特性能够降低热分解或者

失控扩大的可能性。连续流还方便达成重氮盐“生成就使用”的目的，把重氮化段与后续的偶合、卤代或者水解反应段进行串联，减少中间罐暂存、人工转运。危险中间体不会大量暴露在开放的操作环境中，这样既提高过程的安全性，又减轻了人员接触的风险。

3.3 精准控制提高反应稳定性与产品质量

微反应器技术借助计量泵、温控系统、压力监测、在线分析手段，能够对反应过程实施连续控制。芳胺重氮化反应对于原料比例、酸度、反应时间、温度有着较强的依赖性，微反应器能够凭借流速调节来达成稳定的停留时间，借助模块化控温维持反应区间的一致，通过在线监测及时察觉异常趋势。与传统批次生产相比较，连续流工艺更容易获取可追溯的过程数据，这对产品质量稳定、工艺放大验证有益。在医药中间体、高品质染料生产中，批间一致性常常对后续工艺的顺利程度起到决定作用，微反应器的精准化控制为芳胺重氮化提供了更为可靠的质量保障。

4 微反应器在芳胺类重氮化合成中的应用路径

4.1 在线重氮化与后续反应耦合应用

芳胺类重氮化合成的理想状态，是让重氮盐作为短寿命中间体在系统内部持续不断地被生成，而且生成后能快速进入后续的转化过程。微反应器能够把芳胺预处理、亚硝化反应、重氮液调节、后续偶合反应连接成一个连续的流程，使得各个反应单元在封闭的管路里面共同运行^[3]。在偶氮染料中间体制备的时候，重氮化与偶合反应的衔接可以减少重氮液的停留时间，降低其分解的风险，还能改善色光、纯度的稳定性。对于某些芳基卤化、羟基化或者取代反应而言，也可以借助连续流条件让中间体及时被消耗掉。此路径的关键并非去追求单个反应器的高速度，而是在于建立起反应链条的安全闭合、质量的连续控制。

4.2 针对不同芳胺底物进行工艺适配

芳胺结构有所不同会使溶解性、反应活性、重氮盐稳定性受到影响。带有吸电子或者供电子取代基的芳胺，在重氮化过程中的表现不一样，有些底物溶解性不太好，容易形成悬浮模式或者有盐类析出。在应用微反应器时，不能单纯套用统一的工艺，而要依据底物的物理性质来选择适宜的溶剂模式、进料形态、混合结构、通道形式。对于容易沉淀的模式，可以采用通道较大的管式反应器、静态混合元件或者带有防堵塞设计的连续装置，对于高活性底物，则需要强化温度控制和停留时间控制。底物适配展现了微反应器工艺开发的专业性，只有将化学性质与设备特征结合起来，才能够获得稳定的运行效果。

4.3 从实验研究向工业化连续生产延伸

微反应器于实验室阶段常常展现出比较好的反应效率，然而在工业化应用方面，仍存在诸多问题亟待解决，诸如长周期运行、设备清洗、原料波动、控制系统可靠性、生

产组织模式等。对于芳胺重氮化连续生产而言,不应盲目扩大单个微通道尺寸,而应借助编号放大、模块并联或者多级反应单元组合等方式来提高产能。在工业设计过程中,要将反应器、泵送系统、换热系统、尾气处理、废液收集、安全联锁等方面进行全面统筹考量^[4]。装置运行之前,还应当进行危险与可操作性分析,清晰明确温度超限、流量偏差、压力升高、冷却失效等异常情况的处置逻辑。微反应器工业化的关键所在,便是把实验室所具备的优势转化为稳定、易于维护且能够实施监管的生产能力。

5 微反应器技术对重氮化安全性的改进策略

5.1 建立低库存、短停留的本质安全模式

对于芳胺类重氮化合成的安全改进而言,将降低危险物料存量当作工艺设计的一项重要原则是很有必要的。微反应器采用连续小体积的运行方式,这样能让重氮盐在反应系统里保持较低的持有量,进而避免在传统釜式工艺中出现大量不稳定中间体集中生成、长时间停留所引发的风险。短停留时间的设计可以减少重氮盐受到温度波动、酸度变化、杂质影响的机会,以此降低热分解、副反应、压力异常发生的概率。在流程布置方面,应尽可能减少大体积重氮液暂存的环节,使得重氮盐生成后能够迅速进入后续的转化或淬灭单元。确实需要设置缓冲装置的时候,也应当严格限制其容积,并且配备冷却、压力释放、状态监测等措施。低库存并非是降低管理要求,而是借助工程化设计来缩小风险后果,提高异常状态下的切断、隔离、处置能力。

5.2 完善在线监测与自动联锁控制

微反应器的安全优势要借助稳定的仪表系统、自动控制平台来达成。芳胺重氮化连续装置需对进料流量、反应温度、系统压力、酸度变化、冷却状态、关键原料供应状况予以持续监测,并且把相关数据归入统一的控制逻辑之中。要是出现泵送偏差、通道压降升高、换热能力降低或者温度超出设定边界的情况,系统就要及时发出警报,并且依据风险等级自动停止关键原料进料,启动冲洗、降温、旁路转移或者安全排放程序。在线监测还能够用来识别物料配比异常、通道堵塞趋势、反应状态波动,为预防性维护提供参考依据^[5]。与单纯依赖人工巡检相比,自动联锁具备响应快速、执行稳

定、记录完整等特性,是芳胺重氮化连续生产实现安全可控的重要支撑。

5.3 加强堵塞、腐蚀与尾气风险控制

芳胺重氮化模式里常常会出现无机盐析出、底物溶解度不够、局部结晶或者副产物沉积等情况,要是处理得不合适,就容易造成通道堵塞、压降上升、局部停留时间变长,从而对反应稳定性产生影响。在工艺开发阶段,要进行物料溶解性、析晶温度、颗粒形成趋势、长周期运行适应性的评价,并且通过原料过滤、浓度优化、管路保温、合理设计流速、定期清洗来降低堵塞风险。酸性介质和亚硝化环境对设备材料的要求也比较高,反应器、密封件、阀门、管路都需要有相应的耐腐蚀性能,以此防止材料老化造成泄漏。重氮化过程中有可能产生气体释放或者尾气污染,装置要设置密闭收集、吸收处理、压力保护、排放监测措施。安全管理必须涵盖进料、反应、输送、尾气处理、维护操作的整个过程。

6 结语

微反应器技术给芳胺类重氮化合成带来了从间歇经验控制转变为连续精细控制的实际途径。该技术具备高效混合、快速换热、低持液量、便于自动化联锁等特性,可有效改进重氮化反应中放热快、中间体不稳定、放大风险高等问题。在实际运用里,企业要依据芳胺底物特性、沉淀风险、设备材料、后续反应需求来进行系统设计,不能将微反应器单纯当作通用替代设备。将来,要促使反应工程、安全评价、在线检测、连续后处理协同进步,让微反应器技术在精细化工安全生产中发挥更为稳固、更为成熟的功效。

参考文献

- [1] 李涛.芳胺苯并噻唑类杂环偶氮分散染料的合成与工业设计[D].济南大学,2021.
- [2] 张万圣.微反应器中合成弱碱性芳胺类分散染料工艺研究[D].常州大学,2021.
- [3] 邱金晶.弱碱性芳胺的稳定重氮盐制备及其在偶氮分散染料合成中的应用[D].大连理工大学,2019.
- [4] 王美怡,曹刚.新型5-取代苯磺酰胺类化合物的合成及表征[J].化学试剂,2016,38(11):1121-1124.
- [5] 颜廷良.弱碱性芳胺为重氮组分的偶氮型分散染料清洁合成研究[D].大连理工大学,2013.

Chemical Safety Production “Five Preventive Measures” Management

Peng Gao Lianliang Sun

1. Luxi Chemical Group Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252211, China
2. Shandong Liaocheng Luxi Nitro Compound Fertilizer Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252211, China

Abstract

The “Five Preventive Measures” management for chemical safety production is constructed as a systematic defense line from five dimensions: process, equipment, operation, work, and site. Process prevention of out-of-control relies on full life cycle hazard source identification and protective layer control. Equipment prevention of failure shifts to risk-based preventive integrity management. Operation prevention of errors and work prevention of violations are achieved through standardized procedures, error-proof design, and rigid constraints such as isolation and supervision to regulate behaviors. Site prevention of loss of management is achieved through grid-based inspections and leadership on-duty to eliminate responsibility blind spots, and through the dual integration of hazard investigation and risk control and performance indicators-driven continuous improvement, forming a management pattern that supports each other: pre-emptive prevention, process constraints, and closed-loop supervision.

Keywords

inherent safety; behavioral norms; closed-loop supervision; barrier system

化工安全生产“五防”管理

高彭 孙连亮

1. 鲁西化工集团股份有限公司, 中国·山东 聊城 252211
2. 山东聊城鲁西硝基复肥有限公司, 中国·山东 聊城 252211

摘要

化工安全生产“五防”管理围绕工艺、设备、操作、作业和现场五个维度构建系统化防线。工艺防失控依托全生命周期危险源辨识与保护层管控, 设备防失效转向基于风险的预防性完整性管理。操作防失误与作业防违规通过标准化程序、防错设计及许可、隔离、监护等刚性约束规范行为。现场防失管以网格化巡查与领导带班消除责任盲区, 并通过隐患排查与风险管控双线融合、绩效指标驱动持续改进, 形成事前预防、过程约束与闭环监督相互支撑的管理格局。

关键词

本质安全; 行为规范; 闭环监督; 屏障体系

1 引言

化工生产事故通常是以工艺失控、设备损坏或者人为差错这样的形式呈现出来的, 然而其深层的原因大多可以追溯到前期辨识工作不充分、维护策略滞后、行为约束松弛或者现场监管缺位等情况。把安全管控工作聚焦在“工艺防失控、设备防失效、操作防失误、作业防违规、现场防失管”这五个维度上, 并非是对传统管理工作的简单归类, 而是尝试在技术屏障、行为规范以及监督闭环之间建立起清晰的逻辑

层次。本文就针对此展开, 一项一项地分析各个“防”的核心方法以及相互衔接的关系, 期望能够为构建事前预防与过程约束一体化的管理体系提供参考。

2 工艺与设备的本质安全防线

2.1 工艺防失控: 覆盖全生命周期的危险源辨识与保护层管控

工艺防失控工作是以覆盖全生命周期的危险源辨识作为基础的, 从概念设计阶段开始, 就要通过反应危害评估以及危险与可操作性分析, 逐个节点地穷举偏差原因并且锁定高风险场景。基于辨识的结果, 要通过保护层分析来构筑基本过程控制、安全仪表、泄放装置以及应急响应等多层独立防护, 要严格审查每一道保护层的独立性, 杜绝共因失效的情况发生。安全连锁的旁路必须要经过授权并且限期恢复, 保护层功能测试要按照周期来执行^[1]。工艺变更时, 必须重

【作者简介】高彭(1988-), 男, 中国山东聊城人, 本科, 中级注册安全工程师, 从事化工行业全场景安全管控体系落地与技术迭代, 石油化工企业系统性安全风险防控体系建设研究。

新评估保护层能否满足要求,及时调整设定值或增设防护手段,使风险始终处于受控状态。

2.2 设备防失效:以预防性策略为核心的完整性管理与缺陷监测

设备防止失效要求把管理的重点从被动的抢修转变为预防性的策略,核心的手段是基于风险的检验以及以可靠性为中心的维护工作。必须为每一台设备建立包含设计参数、历史检验情况以及工况波动情况的全寿命档案,通过进行腐蚀回路分析以及损伤模式的判别,确定壁厚减薄、环境开裂等典型的劣化形式,并且布置定点测厚、在线探针以及振动频谱等多参数的监测工作,实现对早期缺陷的持续捕捉。检出减薄、裂纹或密封泄漏后,须经强度核算与残余寿命评定确定处置措施,严禁未经工程评估的超限暂缓^[2]。当工艺介质或者负荷发生变更的时候,应该重新校核设备材质以及防护措施的有效性。把在线监测、定期检查以及处置验证连接成递进的闭环,才能够让每一处异常都可以追溯,每一项决断都有依据,从而有效地阻止设备突然失效的情况发生。

2.3 安全联锁与报警系统的功能完好性维持

安全联锁与报警系统的功能完好性维持,是防止工艺偏差演变为事故的关键屏障。这些系统在投入使用之前必须经过验证,确认逻辑准确,响应时间和执行元件的动作符合设计的规格,并且不可以擅自降低等级或者旁路。在生产运行期间,必须建立覆盖传感器、逻辑控制器和最终执行元件的定期功能试验的规程,依据安全完整性等级的要求明确检验的周期和方法,确保没有检测到的危险失效概率始终处于可以接受的范围之内。对报警系统而言,应实施报警合理化审查,消除滋扰报警,设定优先级,并定期开展回路校验,防止因常置静默或频繁闪报导致操作者响应钝化。任何涉及联锁设定值、报警阈值或者旁路状态的变更,都必须经过正式的风险评估和授权,在规定期限内恢复并且如实记录,以此保证每一道安全防御始终处于完好并且可以使用的状态^[3]。

2.4 变更管理框架下的工艺与设备协同风险审查

变更管理是连接工艺安全与设备完整性的纽带,任何涉及工艺介质、操作参数、设备材质或联锁逻辑的变动,均须在实施前启动协同风险审查,并严格界定实质性变更与同类替换,不得以“同类”为名规避程序。审查须由工艺、设备、仪表及安全专业人员共同参与,逐项核对保护层有效性、材质密封适应性及联锁设定值调整需求,涉及多单元的变更还应分析上下游影响。方案批准后续更新工艺安全信息与操作规程,投用前完成人员培训,投用后设复核节点以验证效果并防范次生风险^[4]。

3 操作与作业的行为规范体系

3.1 操作防失误:标准化程序验证与人机界面防错设计

操作防失误的首要任务并非苛求操作者永不出错,而

是通过规程设计与系统约束使错误不易发生、发生即被阻断。标准化操作程序必须逐条明确动作序列、工艺限值和异常判断准则,并以现场模拟检验其可执行性,杜绝凭经验口头变通的模糊空间。关键操作步骤应该和保护系统响应建立明确的对应关系,让操作者知道每一次干预的后果边界。在人机界面这个层面,必须要推行防错设计:关键阀门和开关应该具备位号标识、防误触结构或者动作连锁保护。控制系统显示页面应该按照任务进行组态,用颜色、趋势和限值标记来突显异常情况。对于可能会导致重大后果的指令,应该设置确认和复核步骤,避免单次误击直接触发危险动作。规程一旦进行修订或者设备组态发生变更,必须要用实际操作条件重新进行走通验证,确保文件和实际情况保持一致^[5]。这种由严整规程和合理界面共同构筑起来的屏障,正是把人的疏漏从风险源头进行遏制的根本途径。

3.2 作业防违规:特殊作业许可、能量隔离与全过程监护

作业防违规的重心在于对特殊作业实施许可、隔离以及监护的全链条刚性约束。动火、受限空间等特殊作业必须要预先开展风险分析工作,一项一项地甄别火灾、中毒或者能量意外释放等危险因素,根据这些来确定防护措施和许可条件。许可必须要经过书面签批,明确范围、时限以及气体检测结果,严格禁止越权审批或者事后补签。能量隔离须严格执行上锁挂牌程序,对涉及的能源逐路断开并验证,避免残留危险能量。作业全程必须要设置经过培训合格的专职监护人,持续监测环境变化情况,制止违章行为,出现异常情况时立即组织撤离。作业完毕之后必须要一项一项地清点人员和工器具,经过确认之后才可以终结许可^[6]。把许可、隔离和监护连接成为三道不可逾越的关口,才能够遏制作业环节的违规冲动。

3.3 人为差错辨识与岗位操作能力动态评估

人为差错辨识要求正视操作者注意力波动、判断迟滞和习惯性偏离等固有局限,将各类差错细分为技能型、规则型和知识型,为不同岗位定制预防策略。通过借助操作记录的回溯以及模拟演练的方式,识别出规程存在歧义、界面存在误导或者疲劳排班等这些诱发的条件,依据这些情况来优化规程的表述内容、增设执行确认的步骤并且调整轮班的结构,而不是简单地去追究个人的责任。对于岗位操作能力开展动态的评估工作,需要在理论考核之外,通过进行现场演练、紧急停机模拟以及异常工况推演等方式,持续地检验人员对于偏离的感知速度、诊断的准确程度以及动作的熟练程度。评估的结果应该和车间主管、培训部门进行共享,将其作为在岗复训、资格再确认或者任务调整的依据,从而让能力始终能够契合风险控制的实际需要。

3.4 基于智能监控的违章行为预警与纠偏

智能监控手段的运用,意在将违章行为的发现节点从事后追溯迁移至事先阻断。依靠涵盖重大危险源区、管廊、

装卸站台以及主要操作通道的视频智能识别模块,能够对未佩戴安全帽、闯入电子围栏、作业时监护人脱岗等这些典型的违章形态进行连续的捕捉以及实时的标记。再辅以人员定位与电子作业票数据进行联动,系统触发违章警报之后就可以按照风险等级进行分级推送至属地负责人、当班调度或者专职监督终端,实现声光与文字预警的即时投射。对于系统高频捕获的同类违章倾向,应该提取其时段、区域与岗位关联的特征,将其作为修订操作规程、增设物理隔离或者强化定向培训的可靠依据。预警模型的阈值以及算法的参数必须经过定期的验证,避免大量滋扰警报导致响应出现钝化,确保预警信息精确、纠偏动作及时,从而让人防缺位的地方能够得到技防有效的填补。

4 现场与责任的闭环监督机制

4.1 现场防失管:属地网格化巡查与领导干部带班履职

现场防失管的核心在于消除区域责任盲区与时段管理空档。属地网格化巡查将装置区、罐区和公用工程界区划分为若干管理网格,逐一明确责任人、巡检路线、检查要点与频次,发现问题即录入闭环管理流程并限期整改。与之并行,领导干部带班要求在关键时段驻守现场,对高风险作业及异常工况直接调度,抽检巡查质量以防延误处置。两者共同构成空间与时间交织的双重防线,使现场始终处于有效掌控之中。

4.2 隐患排查治理与风险分级管控的双线融合运行

隐患排查治理与风险分级管控的双线融合,要求将风险辨识的成果直接转化为排查清单,使每项管控措施的失效情况可被列为具体检查条目,避免排查与风险脱节。对于排查过程中发现的新增或者变异的隐患,必须要回传到风险数据库当中,重新对其等级进行评定并且调整管控的策略,从而形成一种“以风险来确定排查重点、以隐患来促进风险更新”的双向循环模式。针对重大隐患要实施挂牌督办以及溯源分析的工作,以此来推动技术或者管理标准进行根本上的修订。这两条线是彼此驱动的,而不是并行孤立的状态,要持续不断地压缩风险向事故演化的空间。

4.3 应急物资、消防设施与最小应急单元的常态备勤

应急物资、消防设施与最小应急单元的常态备勤,重在确保事故初起时响应资源即时可用。像灭火器、空气呼吸器、防爆工具以及堵漏器材这些物品,必须要按照标准进行定点配置,并且要定期进行点检和轮换,严格禁止挪用或者超期服役的情况发生。消防泵、泡沫系统以及喷淋装置应该

经过连锁测试来确认其是完好的,并且要保持自动启动的状态。最小应急单元是由当班的骨干人员组成的,要明确集合信号、任务分工以及通信频道,定期开展不预先通知的实战拉动活动,以此来检验防护穿戴、工艺切断以及初始控灾这些环节的衔接效率。物资要在位、设施要有效、人员要就绪,这三者是缺一不可的,只有这样才能够第一时间遏制事态的扩大。

4.4 “五防”绩效衡量指标与管理评审的系统改进

“五防”管理需转化为可量化、可追踪的绩效指标,分别为工艺、设备、操作、作业和现场五个维度设定领先指标与滞后指标,如保护层可用率、设备缺陷关闭周期、操作验证合格率、作业许可闭环率和隐患逾期项数等。管理评审工作应该定期汇聚各维度的偏离趋势以及共性失效模式,要杜绝回避深层矛盾的数据堆砌现象,针对重复发生的偏差要启动专项改善课题,并且通过典型事件回溯来检验指标体系的预警灵敏度和措施的有效性,从而让“五防”从离散的要求凝结成为持续递进的系统闭环。

5 结论

综上所述,“五防”管理的要义并非构筑互不关联的单独壁垒,而是将工艺与设备的固有安全、操作与作业的行为规范以及现场的监督闭环联结为相互制约的整体。工艺危险源辨识为设备完整性提供输入,设备可靠运行支撑作业安全;严密规程与许可制度将人的行为导入可控轨道,网格化巡查与动态评估则持续检验屏障有效性。实现这一体系不能仅停留在制度文本,更需依靠领先与滞后指标的联动分析驱动管理评审,通过隐患回溯、变更审查和责任履职的刚性闭环,将被动应对转化为主动消缺,使安全绩效改善根植于体系自我优化的内生循环之中。

参考文献

- [1] 曹亚慧,石如珠,谢颖,等.可燃气体报警器的检定方法研究及在化工安全生产应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(03):31-33.
- [2] 黄峰.化工企业安全生产风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制实践研究[J].中国轮胎资源综合利用,2023,41(03):45-48.
- [3] 谈毅.新环境下化工企业安全生产数字化管理及应用优化研究[J].中国轮胎资源综合利用,2023,41(03):52-55.
- [4] 汤新红,王辉.化工生产过程典型安全问题与应对策略[J].化纤与纺织技术,2024,53(02):112-115.
- [5] 陈亮亮,刘婷婷.化工安全生产管理与事故应急管理策略[J].化纤与纺织技术,2024,53(02):108-111.

Research on the Application of Occupational Disease Hazard Detection and Evaluation Technologies in Four Major Industries: Mining, Chemical Industry, Metallurgy, and Building Materials

Qiang Li

Taiyuan Fuxingshun Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

As fundamental pillar industries, mining, chemical industry, metallurgy, and building materials face significant occupational health challenges, with frequent occurrences of dust exposure, noise pollution, toxic substances, high temperatures, and vibration. The incidence rates of pneumoconiosis, noise-induced hearing loss, and occupational poisoning remain persistently high. Drawing on over a decade of frontline experience, the author has conducted more than 320 detection studies, 116 current status evaluations, and 42 control effectiveness assessments across these four sectors. By analyzing process characteristics, the study identifies hazard patterns and key detection parameters, examines existing issues throughout the entire workflow, and proposes optimization strategies covering site selection, sampling procedures, evaluation methods, risk classification, and engineering control measures. Results demonstrate that standardized detection combined with graded evaluation is crucial for source prevention of occupational diseases, providing valuable insights for enterprises, regulatory authorities, and technical institutions.

Keywords

key industries; occupational disease hazards; on-site testing; risk classification; prevention and control measures

采矿、化工、冶金、建材四大行业职业病危害检测与评价技术应用研究

李强

太原市福兴顺科技有限公司, 中国·山西太原 030000

摘要

采矿、化工、冶金、建材为基础性支柱产业, 职业病危害问题突出, 粉尘、噪声、毒物、高温、振动多发, 尘肺病、噪声聋、职业中毒发病率居高不下。笔者结合十余年一线工作, 完成四大行业检测 320 余项、现状评价 116 项、控效评价 42 项, 结合工艺特点梳理危害规律与检测要点, 剖析全流程现存问题, 从布点、采样、评价、分级、工程治理提出优化方案。结果表明, 标准化检测+分级评价是职业病源头防控关键, 可供企业、监管及技术机构参考。

关键词

重点行业; 职业病危害; 现场检测; 风险分级; 防控对策

1 引言

依据《职业病防治法》等法规, 采矿、化工、冶金、建材被划入职业病重点监管目录。据国家卫健委监测数据, 近五年全国重点行业监测企业超 30.7 万家, 7000 余万份职业健康体检中, 疑似职业病 7.67 万例, 尘肺病占报告职业病 90% 以上, 绝大多数集中在四大行业。笔者自 2010 年在华北、山西区域开展职业卫生技术服务, 在项目实操中发现大量企业存在防护闲置、检测造假、外包用工管理缺位等问题。立足一线实测数据, 本文梳理行业危害特征、检测与评

价要点, 查摆现存问题并制定优化方案, 助力企业落实“预防为主、防治结合”的防治方针。

1.1 采矿行业(煤矿+非煤矿山)

采矿分为井工与露天开采, 全流程主要危害为矽尘/煤尘、噪声、CO 等有毒气体、手传振动。井工掘进、采煤产生高游离二氧化硅粉尘, 是矽肺主要诱因; 凿岩设备带来手传振动, 易诱发手臂振动病; 爆破产生一氧化碳、氮氧化物, 通风不良时易集聚中毒。井下风机、破碎机噪声普遍超 85dB (A)。地面选煤、矿石筛分扬尘波动大; 露天开采配套工程机械叠加扬尘噪声。井下外包用工占采掘人员六成以上, 流动性大、体检落实难, 是职业病高发群体。

1.2 化工行业(煤化工、精细化工、化肥)

行业核心危害为苯系物、氨、硫化氢、甲醇、粉尘与噪声。

【作者简介】李强(1985-), 男, 中国山西长治人, 本科, 中级, 从事职业卫生研究。

煤化工气化、脱硫装置易发生介质泄漏；化肥灌装岗位氨气挥发明显，高温季节易引发急性呼吸道损伤；精细化工投料、合成大量使用苯系物，长期接触损伤造血系统；催化剂加工产生铬、锰重金属烟尘。锅炉房、原料粉碎工序产生噪声与有机粉尘，中小厂通风排毒设施闲置普遍，密闭车间毒物积聚，巡检人员多点累积接触加剧健康风险。

1.3 冶金行业（炼钢、炼铁、有色冶炼）

炼铁高炉出铁区域温度常年超 38℃，易引发热射病；高炉煤气含高浓度 CO，管道泄漏可造成急性中毒。烧结、配料产生含铁粉尘；酸洗、电镀岗位产生铬、镍重金属蒸气。全车间轧机、风机、破碎机连续高噪声运行。大型企业自动化程度较高，中小民营冶金仍大量人工上料、出渣，作业人员每日接触危害 4~6h，多重危害叠加。

1.4 建材行业（水泥、石材、砖瓦）

石材、水泥加工以矽尘、水泥尘、噪声为主要危害。石灰石破碎、石材干式打磨粉尘游离 SiO₂ 多大于 10%，是矽肺高发诱因；球磨机、切割机持续高噪声。露天原料堆场无围挡，大风造成无组织扬尘。行业小微企业、作坊数量多，除尘、喷淋设施配置不足，务工人员体检与劳保管理不完善。

1.5 共性危害规律

粉尘、噪声全行业覆盖；化工、冶金附带毒物、高温，采矿独有井下毒气与手振，建材以矽尘危害最突出。大中型企业自动化程度高、接触时间短，中小私企设备老旧，操作工每日接触危害 2~6h；全行业外包临时工体检缺失，是隐患高发群体。

2 职业病危害现场检测实施要点（定期检测实操）

现场定期检测是量化工作场所职业病危害浓度、判定岗位达标与否的基础性工作，全流程严格遵照《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》、《工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素》、《工作场所有害因素职业接触限值第 2 部分：物理因素》国家标准执行，结合四大行业生产工艺、车间布局、设备运行特征差异化布设采样点位、区分采样时长，杜绝一刀切式统一布点模式。

2.1 布点设置原则与分行业细化要求

职业病危害采样布点遵循产尘噪声源头优先、人员实际作业点位优先、超标高发区域优先三大基本原则。

1. 采矿行业：井下采掘工作面、岩巷掘进点位、皮带转载转运点、绞车房列为必布检测点位；井下巷道依据井下风流走向，分别在上风侧作业区、人员操作工作面、回风巷道关键节点分层布点，矿山爆破作业结束后，避开扬尘与有毒气体浓度峰值时段，等待井下风流置换达标后再开展气体与粉尘采样；露天矿山在挖掘作业面、破碎站、原料堆料场下风向增设对照监测点位。

2. 化工行业：反应釜区、危化品灌装岗位、催化剂投料间、危化品药剂库房、锅炉房为核心布点区域；多层密闭

生产厂房按照地面操作层、中层设备层、高层检修层分层布点，管道法兰、阀门等点位单独增设监测点位，污水预处理车间、废气处理区同步补充毒物采样点。

3. 冶金行业：高炉出铁平台、烧结配料车间、酸洗电镀工段、主风机房、轧钢车间分区布点，高温作业点位在采集粉尘、噪声数据同时，同步记录环境干球、湿球温度与环境湿度，用于后续高温危害分级判定。

4. 建材行业：石灰石破碎、原料粉磨、石材切割打磨、水泥成品装车等所有产尘点位实现布点全覆盖，露天原料堆场在上风向、下风向分别设置参照点位，对比无组织扬尘扩散浓度变化。

2.2 现场采样全流程质量控制措施

采样仪器与现场操作质控直接决定检测数据真实性，从仪器校验、分项目采样规范、样品留存三方面落实管控：

1. 仪器管控：粉尘采样器、个体噪声剂量计、大气采样器、气相色谱配套吸附管等全部检测仪器进场前经过法定计量技术机构周期检定，检定证书在有效期内。

2. 粉尘采样管控：总粉尘与呼吸性粉尘分开独立采样，同一作业点位同步采集平行双样，用于实验室数据复核；采矿矽尘、建材石材粉尘样品单独封装留存，全部送具备资质实验室采用焦磷酸法测定粉尘游离二氧化硅含量，完善粉尘危害分级关键参数。

3. 化学毒物采样管控：结合毒物限值类型（MAC 最高容许浓度、PC-TWA 时间加权平均容许浓度、PC-STEL 短时间接触容许浓度）灵活选用长时间个体采样或短时间定点采样。

4. 噪声采样管控：固定岗位采用 8h 等效连续 A 计权噪声实测，多声源叠加的复合型车间采用网格多点连续测量；装载机、井下凿岩机等移动作业设备，采样人员跟随作业人员全程动态实测个体噪声剂量。

2.3 数据整理与结果科学判定

采样结束后整理原始记录、现场工况记录，实验室出具原始数据后对照限值划分达标、超标点。针对超标检测项目备注超标诱因。摒弃仅凭单点瞬时浓度数据判定岗位整体达标情况的粗放模式，结合岗位每日实际作业时长、轮岗排班制度，精准核算时间加权平均接触浓度，部分岗位实行四班三运转、间断巡检作业，需按照实际有效接触时间折算危害暴露水平，为后续风险分级与评价编制提供精准数据支撑。

3 职业病危害评价技术要点（预评价 / 控效 / 现状评价）

职业病危害评价分为预评价、控制效果评价、现状评价三类。现状评价以年度检测与职业健康体检资料为依据；控效评价依托项目试运行实测数据；预评价参考同类企业资料开展风险预判，三类评价均遵循资料核查、风险分级、整改方案编制三步工作流程。

3.1 现场工程与管理资料核查

一是对照设计文件核查除尘、隔声、局部排风、应急

喷淋、高温降温等防护设施安装及运行情况,记录闲置失效设备;二是核查劳保用品采购、发放台账,实地抽查用品实际佩戴情况,排查型号不符、弃用防护用品问题;三是查阅管理制度、历年检测报告、员工体检、培训、警示标识、设施维保等档案,矿山、化工项目额外核查有限空间管理及应急演练资料。

3.2 危害程度与岗位风险分级

依据 GBZ/T229 分级标准,结合检测数据、岗位接触时长与防护运行状态,划分三级风险:高风险为粉尘、毒物超标、防护缺失岗位,如井下掘进、石材干磨、化工灌装等;中风险为检测结果临近限值、防护局部破损、劳保佩戴不规范岗位;低风险为指标达标、防护完备、以间断巡检为主的中控岗位,分级结果作为整改优先级依据。

3.3 分级制定整改方案

按整改周期分三类措施:短期(1个月)补齐警示标识、防护用品、修补设备密闭;中期(1~6个月)加装喷淋、隔声罩、改造局部排风;长期依托年度大修淘汰老旧设备,实施自动化技改,从源头降低危害。

3.4 三类评价差异化要求

预评价处于项目设计阶段,依靠类比项目数据预判危害,从设计端提出防护配置建议;控效评价在试生产后实施,对照预评价内容逐项核查防护落地情况,未达标工序限期整改,验收合格方可投产。

4 当前四大行业检测与评价现存突出问题

结合一线项目调研,四大行业在现场检测、技术评价、企业职业卫生管理方面普遍存在短板,中小民营企业问题尤为突出。

4.1 现场检测问题

部分矿山、化工、建材企业为规避整改,采样期间减产停机、设备空载运行,人为压低有害因素浓度,造成检测数据失真。个别技术机构为压缩成本随意删减关键布点、缩短采样时长,不符合 GBZ159 采样规范;粉尘检测普遍仅测总尘,游离二氧化硅送检率偏低,缺少矽尘分级的关键依据。

4.2 评价编制现存缺陷

不少评价报告套用固定模板,未结合项目工艺、厂区实际编写,整改措施空洞无落地细则;风险分级仅参考单次检测数值,忽略岗位工时与轮岗模式,分级结果脱离现场实情;控效评价核查流于形式,前期防护设计要求难以落地核查。

4.3 企业管理短板

中小工厂除尘、排风设备长期闲置失修,防护设施沦为应付检查摆设;劳保用品虽按需配发,但员工佩戴率不足50%,企业缺少日常监管;外包劳务人员岗前、在岗及离岗体检缺失,职业病隐患累积突出。

5 优化四大行业检测与评价工作对策

围绕检测管控、报告编制、分类治理、宣教监管、技

术升级五个方面制定整改举措。

5.1 规范现场检测管理

采用突击式随机采样,联合监管部门规避企业停产避检,采样影像、布点图纸、原始记录统一归档留存;严格落实粉尘样品游离二氧化硅送检要求,规范全流程采样质控。

5.2 优化评价编制质量

摒弃模板化写作,结合各行业生产特点定制报告内容,整改方案明确责任与工期;依托工时核算时间加权浓度,科学划分风险等级;现状评价同步核查往期整改成效,构建“检测-评价-整改-复测”闭环管理。

5.3 分行业隐患专项治理

采矿:完善皮带密闭与湿式喷雾,井下增设 CO 在线监测装置;化工:优化反应釜密闭排毒,高危投料实现自动化改造;冶金:高温岗位优化轮岗,高炉区域加装一氧化碳报警装置;建材:石材加工推行湿法作业,破碎工位配套密闭除尘与堆场喷淋。

5.4 压实企业主体责任与行业监管

高风险岗位每年开展职业健康体检,异常人员及时调岗;常态化职业卫生警示教育,依托奖惩机制提高劳保佩戴率;卫健部门不定期抽查检测报告,从严惩处出具虚假资料的第三方机构。

5.5 智能化技术赋能管控

在采掘、破碎、化工灌装等高风险点位安装粉尘、毒物在线监测装置,实现 24h 实时监控;推广生产线密闭化、自动化改造,从源头减少人员有害因素接触。

6 结论与展望

四大行业从业人员基数大,粉尘噪声为共性管控重点,毒物、高温、振动分行业管控。标准化检测是危害量化基础,科学分级评价是隐患治理前提。当前行业存在企业主体责任缺位、第三方技术服务不规范、中小厂硬件短板突出等问题。后续依托国标持续优化布点与评价逻辑,从工程、个体、制度三面落实防控。伴随行业自动化升级,作业环境持续改善,新发职业病逐步下降,助力健康中国职业健康建设落地。

参考文献

- [1] 中华人民共和国职业病防治法(2018修正)[S].
- [2] GBZ2.1-2019、GBZ2.2-2007工作场所有害因素职业接触限值[S].
- [3] 国家卫生健康委.近五年全国重点行业职业病监测通报[R].2024.
- [4] 《职业卫生与应急救援》编辑部.工矿企业职业病工程防控对策[J].职业卫生与应急救援,2024,42(3).
- [5] GBZ159-2004工作场所空气中有害物质监测的采样规范[S].
- [6] GBZ/T229.1~4-2010 工作场所职业病危害作业分级[S].
- [7] 国家卫生健康委办公厅.重点行业尘肺病专项治理实施方案〔2023〕12号[Z].
- [8] 李建峰.建材石材加工行业矽尘危害现状及防控技术研究[J].中国工业医学杂志,2023,36(5).

Research on the Evaluation of Operational Effectiveness of Occupational Health Management Systems in Mining Enterprises

Xiaojun Yang

Shanxi Zhongcheng Anxin Safety Technology Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046000, China

Abstract

The mining production environment is complex and dynamic, with numerous hazardous factors such as dust, noise, and toxic/hazardous gases persistently present, making it a high-risk sector requiring stringent occupational health management. The occupational health management system serves as a fundamental framework for mining enterprises to standardize hazard control, prevent occupational diseases, and safeguard employee health, playing a critical role. Although many mining companies have established standardized management frameworks, common issues include misalignment between policies and actual operational conditions, overly rigid procedures, and lack of targeted measures, significantly compromising system effectiveness and compliance with safety requirements. This paper briefly outlines the core principles of occupational health management systems tailored to mining environments, examines prominent challenges encountered during implementation, proposes optimization strategies based on industry characteristics, enhances system efficacy, strengthens occupational health safeguards, and provides actionable insights for daily management and refined occupational health practices in mining enterprises.

Keywords

mining enterprises; occupational health management system; operational effectiveness; issues; optimization strategies

矿山企业职业卫生管理体系运行效果评价研究

杨晓君

山西众诚安信安全科技有限公司, 中国·山西 长治 046000

摘要

矿山生产环境复杂多变、危险源因素众多, 粉尘、噪声、有毒有害气体等职业危害长期存在, 是职业卫生管理的重点高危行业。职业卫生管理体系作为矿山企业规范管理职业危害, 预防和控制职业病的发生、保障员工身心健康的基本制度, 在其中起着非常关键的作用。尽管许多矿山企业建立了职业卫生管理体系的模板化框架体系, 然而普遍存在着制度和现场实际情况不切合、流程过于僵化、措施缺乏针对性的问题, 严重制约了矿山企业的职业卫生管理体系实效性和符合性, 不能满足安全生产需要。文章结合矿山现场实际简要介绍了职业卫生管理体系的主要内涵并就运行中暴露出的突出问题进行了深入研究。根据矿山特点, 采取相应优化策略, 提高矿山职业卫生管理体系的有效性, 确保矿山的职业健康安全防线, 并为矿山企业日常管理和精细化管理职业卫生工作提供借鉴。

关键词

矿山企业; 职业卫生管理体系; 运行效果; 问题; 优化对策

1 引言

矿山生产作业具有较大的风险, 贯穿地下开采、露天采场、矿石处理和运输筛分等作业过程都处于职业危害之中, 该岗位从业人员罹患尘肺病及噪声聋等职业病的可能性极大, 严重影响他们的生命健康安全。影响矿山安全生产和健康发展。随着相关法律法规体系的健全完善, 我国大部分矿山企业建立健全了职业卫生管理体系并使之正常运行规

范。实际工作中存在一些矿山企业重制度建设轻执行实施, 重合规轻实效现象, 导致体系形同虚设, 无法将现场作业的职业危害隐患有效消除。为此需要对职业卫生管理体系的有效性进行评估, 发现管理体系运行中的缺陷与不足, 改进和完善管理措施, 提高矿山职业卫生管理工作水平, 保障员工的生命健康, 规范企业的安全生产。这在现实中具有重大意义。

2 矿山企业职业卫生管理体系运行概况

为贯彻落实国家职业健康法律法规的要求, 矿山企业建立了较为完善的职业卫生管理机制, 分别以控制作业场所

【作者简介】杨晓君(1983-), 男, 中国山西长治人, 本科, 工程师, 从事职业病危害因素研究。

危害、员工健康管理、制度和流程管理和应急处理4个环节为核心内容,构建起了覆盖矿山企业全部生产活动、各工作岗位及所有从业人员的全覆盖、全方位监控^[1]。基础工作包括识别和监测职业危害因素,强化对作业场所的安全防护和管理,实施员工职业健康体检,进行职业卫生教育培训,整治职业病危害因素,处理紧急情况等多个方面。与一般的安全管理不同,其职业卫生管理工作主要关注的是对长期存在并不易觉察的因素的控制,并针对粉尘、噪声、振动、有害气体及高温高湿等特定环境危害因素,通过持续地检查,加以规范性的管理和治理,追求从根本上控制、过程治理以及最后消除职业危害。矿山企业建立职业卫生档案,记录危害因素检测、人员体检及培训记录,实现全过程管理。针对岗位差异制定相应管理措施,针对危害较大的工作地点进行额外设置防护设施,并设立警示区域等。平时根据检查巡查情况,及时进行改进和纠正,采取不断改进的防护措施,降低职业病发生风险,保证一线从业人员的身体健康与合法权益。

3 矿山企业职业卫生管理体系运行存在的主要问题

3.1 体系建设同质化,贴近现场实际不足

现阶段大部分矿山企业职业卫生管理模式大同小异,缺少特性和针对性。大部分的企业照搬模式化的职业卫生管理模式,不考虑各自的采矿工艺、作业条件和岗位特征对管理模式进行个性化调整,对于井工矿和露天矿,一线采掘工作面 and 二线后勤单位,它们之间的职业危害特性对比悬殊显而易见。然而有些单位却采用相同的职业卫生管理模式,对高危岗位缺乏专项的管理规定内容烦冗、琐碎,对低风险岗位监管烦琐苛细,造成该体系在现场运行中无法有效执行^[2]。有的单位不能及时地对生产工艺与作业条件进行变更,导致其体系内容与现行生产方式相抵触,不满足现场职业卫生工作的需要,使体系运行成了走过场。

3.2 现场执行流于形式,闭环管控缺失

在矿山职业卫生管理体系运行过程中制度落实不到位问题严重。许多公司都重视对台账的管理、整理和迎接检查而忽视了现场经常性监督管理。危害监测流于形式只做每年一次的危害因素常规检测没有开展日常动态监测工作难以及时发现作业中粉尘超标、设备噪声等异常情况。隐患整治不到位存在隐患排查不彻底、整改不深入、复查缺位等现象,尽管对部分隐患进行了表面处理却没有从工艺、设备及管理上根本消除从而导致隐患反复发生。安全管理不到位对于岗位上劳动防护用品的发放和佩戴监督成为一种摆设矿工在生产活动中心存侥幸心理违章使用或不按规定穿戴现象比比皆是缺乏严格的约束措施。

3.3 人员管理欠缺专业性与安全意识薄弱

职工能力的不足是体系有效运行最大的阻力。从管理

层来看,大多数矿山职业卫生管理人员兼多职,缺乏必要的培训。对危害辨识、控制措施及标准掌握不够深入,工作一般停留在表面现象的处理上,缺乏专业化管理的能力和水平。基层工人,多数文化素质偏低,不了解职业危害的隐性危害和长效作用。普遍存在着重生产轻健康的错误意识,认为无伤害就是安全的片面认识。企业职业卫生培训方式单一,内容匮乏,主要是看文件看录像,内容缺乏实用性知识(防护、识别隐患等),收不到教育的实际效果。

3.4 考核激励不到位管控积极性不高

完善评估是保证体系正常运转的必要条件,但是许多矿山企业还没有建立起完整的职业卫生评估和奖惩机制。在企业的安全生产评估中,企业注重提高生产和预防事故的能力,而职业卫生管理评估所占比例不大,还不很明确。评估的重点多侧重于档案资料的完整上,忽略了对现场作业效果、工人健康保障以及隐患整改质量的评估。但又因没有健全的奖惩制度,致使工作做得好的单位及个人得不到鼓励;对于违章行为和监管疏忽惩罚不力,导致管理人员缺乏积极性,员工缺少遵规防护的积极性,此体制缺乏发展动力。

4 提高矿山企业职业卫生管理体系运行效果的对策

4.1 优化体系框架,贴近矿山现场量身定制制度

企业必须改变管理方法,结合自身的生产条件、岗位作业的危害特性设计个性化的管理制度。企业要集合专业队伍全面深入细致地排查各个岗位和流程存在的职业卫生危害,并准确确定各岗位的要害所在,以此有针对性地修订、补充完善规章制度和作业流程以及管控标准。针对井下工作场合以及露天开采作业的不同特点具体确定粉尘危害、噪声危害以及有害气体等不同的防治方案。具体的划分出各岗位的管理职责,详细地规定操作规范和整改措施办法,建立并形成动态变化的企业管理制度,针对生产技术、设备更迭、场所变化等适时调整制度的具体要求,使其制度规定与生产实际零距离接触,高度具体实用。

4.2 紧盯现场应用,打造闭环式全链条管理模式

职业卫生管理的重点从“资料齐全”转移到关注“实际效果”上,形成排查、管控、整改、复查等一系列的闭环管理体系。1 必须做好日常安全隐患的及时排查,并且要改变过去的每年一次检测方式,我们采取日常巡查、月检和季查相结合的方式,形成了全方位检查模式,我们能实时监控采掘作业面以及一些破碎工区等高危地区,时刻监督危害因素的变化情况。对职业卫生风险进行严格全过程监管,明确责任人,规定时限及标准,并跟踪整改进展。整改完成后我们要进行全面核查验证其准确性与实效性。避免形式主义清除隐患无死角^[3]。3 加大现场安全监督和的力度,并形成一套详尽的劳保用品发放、穿戴、更换制度并安排专门人员进行每日巡视对违章穿戴着装现象进行纠正并对责任者严肃

处理,确保各项防护措施落实到位。

4.3 加强人员培训,提高全员职业卫生素质

对管理者与一线工人分层培训,全面提升职工职业卫生管理与防护能力的综合素质。不断提升管理人员技能水平,通过不断组织进行专业培训,在矿山危害的鉴定、评价、排查、法规和应急管理中投入较大精力和时间。培养出一支高素质的职业卫生管理工作队伍,提高对职业卫生工作的管理水平。设计了针对一线矿工的特别培训计划,改变了传统教育培训的老面孔,并以岗位需求为起点进行实战化培训。通过现场示范、案例剖析、隐患识别演练等手段使员工对自身的岗位危险源和防范措施及自救方法有了直观地认识^[1]。持续加强对职业病危害警示教育,在分析研究矿山常见的职业病案例方面狠下功夫,提高了对保护自身健康的知识理解,扭转“重生产轻健康”的观念并自觉地采取行动加以预防。

4.4 完善考核,促进体系运转

完善职业卫生评比、奖惩制度。把执行职业卫生评比制度的效果列为公司安全生产评比制度的首要条款,明显增加评比的比例。简明评比的重点内容,削减台账资料的繁琐模式,注重现场控制与管理,隐患治理闭环等重点工作,重视员工防护和培训效果,认真地修订岗位评分细则,使评分更准确有效。设立清晰明朗的奖励评价机制。对职业卫生管理成绩突出,在防止事故方面成效显著的部门和员工进行表彰,对在管理和行为中存在疏忽,违反相关规定,隐患整治不力等行为的当事人予以严厉追究其相关责任。采取奖励与

惩罚相结合的形式广泛调动大家的积极性、主动性,保证了公司职业卫生管理制度正常有效地运行。

5 结语

职业卫生管理是矿山安全生产管理的重要组成部分,员工的成长离不开企业的发展。现阶段职业卫生管理体系存在制度设计与实际情况不相适应、现场落实执行不到位、人员素质不高、考核机制不完善等诸多问题,并且上述问题给矿山企业的职业卫生管理体系统一实施效果造成严重不良影响。矿山企业在生产作业中需要密切结合具体情况进行管理,在打破传统模式基础上实施个性化建立体系、开展闭环式的作业控制、提高人员综合能力以及完善相关考核激励制度,从而实现应用实施方面的显著提升。能够有效防止对作业活动的职业危害从源头进行控制,并且严格过程控制,采取闭环式处理,极大提升了矿山企业的职业健康和安全生产水平,不断推动安全、健康的高品位发展模式的矿山行业发展之路。

参考文献

- [1] 李庚辰. 职业健康企业创建在冶金矿山的应用及实践[J]. 现代矿业, 2022, 38 (07): 220-223.
- [2] 范鹏辉, 刘凯, 张璘, 王鑫, 董一文, 康宁, 叶萌. 2018—2020年中国八省小微型非煤矿山企业硅尘暴露职业健康风险评估[J]. 卫生研究, 2022, 51 (02): 251-259.
- [3] 邢鹏, 李振雪, 曲春清, 孙文非, 孙凯丽, 边朝卿. 大连市30家非煤矿山开采企业职业卫生现状调查[J]. 职业卫生与应急救援, 2021, 39 (01): 80-84+102.

Research on Risk Assessment Methods for Major Hazard Sources in Chemical Industrial Parks

Xiaoqiang Lu

Nantong Zilang Biomedical Technology Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226407, China

Abstract

Chemical industrial parks are an important part of China's industrial production. However, due to the presence of numerous high-risk chemicals and equipment in these parks, safety issues have been a key concern for society. The identification of major hazards and risk assessment has become a core component in ensuring the safe operation of these parks. This study focuses on the risk assessment of major hazards in chemical industrial parks, analyzing the basic concepts, theoretical methods, and different assessment frameworks and models. By combining both quantitative and qualitative analysis methods, it explores how data support and computational tools can enhance the accuracy and efficiency of the assessments. The aim of this study is to provide a systematic risk assessment method for the safety management of chemical industrial parks, ensuring that these parks can better identify and mitigate potential hazards, reduce the likelihood of accidents, and improve safety levels.

Keywords

chemical industrial parks; major hazards; risk assessment; quantitative analysis; emergency plans

化工园区重大危险源风险评估方法研究

陆晓强

南通紫琅生物医药科技有限公司, 中国·江苏南通 226407

摘要

化工园区是我国工业生产的重要组成部分,但由于化工园区内存在大量的高风险化学品与设备,其安全问题一直是社会关注的重点。重大危险源的识别与风险评估成为保障园区安全运营的核心内容。本研究针对化工园区重大危险源进行风险评估,分析了风险评估的基本概念、理论方法以及不同的评估框架和模型。通过结合定量与定性分析方法,探讨了如何通过数据支持与计算工具提升评估的准确性和效率。本研究旨在为化工园区的安全管理提供一种系统化的风险评估方法,确保园区能够更好地识别与防范潜在危险,减少事故发生的可能性,提升园区的安全水平。

关键词

化工园区; 重大危险源; 风险评估; 定量分析; 应急预案

1 引言

随着化工行业的快速发展,化工园区的安全问题变得越来越突出。园区内生产设施复杂,涉及多种高风险化学品,潜在的危险源众多。因此,如何科学、准确地进行重大危险源的风险评估,已经成为化工园区安全管理中的关键问题。有效的风险评估能够帮助管理者识别潜在的危险源,并通过制定合理的应对措施,最大限度地减少事故发生的可能性。当前,许多园区仍面临着风险评估方法不完善、数据处理能力不足等问题,亟需创新与完善相关的评估方法与技术。本文将重点探讨化工园区重大危险源的风险评估方法,介绍常用的定量与定性分析方法,并结合实际案例分析其在园区安全管理中的应用效果。

【作者简介】陆晓强(1987-),男,中国江苏南通人,本科,中级职称,从事化工安全研究。

2 化工园区重大危险源风险评估的基本概念

2.1 重大危险源的定义与分类

重大危险源是指在化工园区中,可能对人身安全、环境及财产造成严重威胁的危险源。根据其性质,重大危险源可分为化学危险源、物理危险源和生物危险源等几类。化学危险源包括易燃、易爆、有毒化学品及其反应过程,物理危险源主要涉及高温、高压设备及机械设备,生物危险源则是指生物制品及微生物的潜在威胁。根据国家安全生产法和相关规定,化工园区中的危险源应依据其引发事故的可能性和后果严重性来进行分类。危险源的分类有助于制定相应的管理措施和风险应对策略,从而减少事故的发生。

2.2 风险评估的基本理论与方法

风险评估是对化工园区内危险源可能引发事故的可能性与后果进行综合评价的过程。主要包括风险识别、风险分析、风险评价和风险控制四个步骤。风险识别通过对化学品

特性、操作过程及环境因素的分析,识别出潜在的危险源。风险分析方法常采用定性与定量相结合的方式,结合经验性知识和数据模型进行深度分析。风险评价依据的是评估模型,如事件树分析(ETA)和故障树分析(FTA),根据分析结果评估危险源发生事故的概率及其后果的严重性^[1]。风险控制则依据评估结果,通过制定控制措施、优化作业流程及实施安全管理来减少事故的发生。风险评估方法的准确性和科学性对园区的安全管理至关重要。

3 化工园区重大危险源识别与风险评估框架

3.1 危险源识别方法

危险源识别是风险评估的首要步骤,涉及对化工园区内所有可能存在的危险源进行详细识别。常见的危险源识别方法包括检查清单法、Hazop分析法(危害与可操作性分析)和故障树分析法等。在某化工园区的危险源识别过程中,通过Hazop分析法共识别出14个主要危险源,其中包括高温反应釜的压力过高、储罐泄漏、管道腐蚀等。这些危险源与化工园区的安全生产密切相关。通过对这些危险源的全面分析,可以更准确地识别潜在的危险,并为后续的风险评估和控制措施提供依据。

3.2 风险评估框架的构建

风险评估框架的构建是基于化工园区的具体特点,结合科学的理论模型来评估园区内危险源的风险水平。以某化工园区为例,采用了多层次、多维度的风险评估框架。框架包括危险源的分类、风险矩阵的构建和多种评估模型的运用。通过风险矩阵将可能的风险事件进行量化,评估不同情景下的风险等级,并为园区制定不同的应对策略提供支持。在评估过程中,对每一类危险源按照其发生的概率和可能造成的后果进行综合评估,确保园区能针对各类风险采取相应的控制措施。

3.3 风险评估模型的选择与应用

风险评估模型的选择应依据化工园区的具体情况进行定制,常用的评估模型包括事件树分析(ETA)、故障树分析(FTA)和层次分析法(AHP)。以某化工园区的危险源为例,通过FTA模型对设备故障引发的事故进行深入分析,发现某些设备存在较高的故障率,且一旦发生故障,可能引发严重的化学品泄漏事故。通过事件树分析进一步分析了不同故障模式下事故的可能性及其后果,结果显示设备故障可能导致的风险事件占比为40%。根据评估结果,园区决定实施更严格的设备维护与检查措施,以降低设备故障引发事故的风险。

4 化工园区重大危险源风险评估的定量与定性分析

4.1 定性分析方法在危险源评估中的应用

定性分析方法主要通过专家判断和历史数据对危险源进行初步评估,应用广泛且灵活。常见的定性分析方法包

括危害与可操作性分析(HAZOP)和故障模式影响分析(FMEA)。在某化工园区的危险源评估中,通过HAZOP分析法,对园区内的10个关键工艺进行了深入分析。该方法通过逐步对操作流程中的每个环节进行评估,识别出可能的危险源。比如,化学品储存区域通过HAZOP分析,发现了阀门老化可能导致泄漏的风险。定性分析的关键在于专家小组的经验,结合化学品的性质、操作环境以及设备条件,进行综合判断。通过这种方法,在园区内发现了5个高风险源,其中包括液化气泄漏、反应釜过压等^[2]。分析结果为后续的定量分析提供了方向,确保了风险评估的全面性和准确性。

4.2 定量分析方法与风险量化模型

定量分析方法通过数据和数学模型来评估风险的发生概率和后果的严重性,常用的技术包括故障树分析(FTA)和事件树分析(ETA)。在某化工园区的风险评估中,使用了FTA模型对设备故障引发的风险进行量化。以反应釜设备为例,通过FTA分析,得出该设备故障的发生概率为0.02,且在故障发生时可能引发化学品泄漏,损失达到500万元。通过这些数字模型,能够量化每个风险源的具体威胁水平。该评估过程中,还采用了Monte Carlo模拟对多种潜在风险场景进行了仿真。模拟结果显示,化学品泄漏事件的概率为0.01,但一旦发生,可能造成的环境污染和设备损失达到较高水平。定量分析为化工园区管理层提供了清晰的决策支持,确保了风险控制措施的有针对性。

4.3 定量与定性相结合的评估方法

定量与定性相结合的评估方法能够弥补单一方法的不足,综合考虑专家经验和数据分析。在某化工园区的风险评估中,首先通过定性分析方法识别出所有潜在的危险源,并对其初步分类。例如,专家组通过HAZOP分析发现,园区内的3个化学品存储设施存在高泄漏风险,且操作流程中有多个高风险环节。随后,使用定量分析方法,对这些危险源进行了进一步的风险量化,应用故障树分析和事件树分析模型,分别计算了各风险源的发生概率及其经济损失。结合定性分析结果,园区管理者能够准确识别出最需要关注的风险源,并为这些高风险源设定了优先处理级别。通过两者结合,评估不仅涵盖了潜在风险的全面识别,还提供了量化的风险数据,确保了评估过程的高效性和准确性。这种方法使得园区能够在实际应用中更加有效地实施安全管理和风险控制措施^[3]。

5 化工园区重大危险源风险评估中的数据支持与计算工具

5.1 数据收集与处理方法

在化工园区的重大危险源风险评估过程中,数据收集与处理是基础性工作。通过对园区生产、环境和安全等方面的数据进行收集和整理,确保风险评估具备充分的数据信息

支持。例如,在某化工园区内,收集了30个不同工艺流程的安全数据,其中包括设备故障率、化学品泄漏量、事故频率等数据。收集的数据通过标准化处理后,进行统计分析,计算出不同风险源的发生概率和可能后果。数据处理过程中,采用了数据清洗和缺失值填补技术,确保了数据的准确性与完整性。这些处理后的数据为后续的风险分析与评估提供了坚实的基础,确保了评估结果的可靠性。

5.2 风险评估计算工具与软件应用

在进行化工园区的风险评估时,风险评估计算工具和软件的应用至关重要。常用的软件工具包括Hazop分析软件、风险矩阵计算工具和Monte Carlo模拟软件。在某化工园区的风险评估中,使用了Hazop分析软件对15个关键生产设备进行了安全评估。通过计算,发现其中5个设备的风险值较高,特别是与化学品储存相关的设备,发生事故的可能性为3%。此外,使用Monte Carlo模拟对多种风险情景进行了仿真,分析结果显示,储罐泄漏的最大潜在损失可达200万元。通过这些工具的应用,园区管理层能够准确掌握每个危险源的风险情况,并基于此制定相应的控制策略。

5.3 数据可视化在评估中的作用

数据可视化技术在化工园区的风险评估中具有重要作用。通过可视化工具将复杂的风险数据转化为直观、易理解的图表,帮助决策者迅速识别和判断潜在风险。例如,在某化工园区的评估中,通过可视化技术,绘制了风险矩阵图和事故发生概率分布图。数据可视化显示,某些高风险操作的发生概率较高,特别是在化学品的储存和运输过程中,事故发生的概率高达8%。通过风险热力图,园区管理者能够快速识别出高风险区域,并优先采取风险控制措施^[4]。数据可视化不仅提高了风险评估的效率,也为园区的安全管理决策提供了直观依据。

6 化工园区重大危险源风险评估的管理对策与应用

6.1 基于评估结果的风险控制措施

在化工园区的风险评估过程中,根据评估结果,制定相应的风险控制措施至关重要。以某园区的评估为例,基于对15个危险源的评估结果,采取了包括强化设备维护、升级储罐安全系统等具体控制措施。对于发生概率较高的化学品泄漏事故,园区实施了双重密封技术,并增设了自动报警系统,确保泄漏事故能够在初期被发现并及时处理。此外,还加强了操作人员的安全培训和应急演练,提高了园区的整体安全水平。通过这些控制措施的实施,园区的安全管理水平得到了显著提升。

6.2 应急预案与应急响应机制

应急预案和应急响应机制是化工园区风险管理的关键组成部分。在风险评估中,针对评估中识别的高风险区域和危险源,园区制定了相应的应急预案。例如,对于化学品泄漏事件,园区制定了详细的应急响应程序,包括泄漏检测、疏散人员、启动消防系统等。针对不同类型的事故,园区分别设立了专门的应急小组,负责快速响应。通过定期的应急演练,提升了员工的应急反应能力,确保了在实际事故发生时,能够快速有效地采取措施,最大限度地减少事故损失。

6.3 评估结果在园区安全管理中的应用

风险评估的结果直接影响园区的安全管理策略。在评估完成后,园区根据评估结果对安全管理流程进行了优化调整。对于评估中识别出的高风险点,园区增加了监控设施,并引入了先进的自动化控制系统。例如,在化学品储存区,增加了温湿度传感器和实时监控系统,确保储存环境的安全。此外,园区还对操作流程进行了优化,减少了不必要的风险暴露。评估结果还为园区的长期安全战略提供了数据支持,确保了园区安全管理的持续改进和提升^[5]。通过这些应用,园区的事故发生率显著降低,安全生产环境得到了保障。

7 结语

通过对化工园区重大危险源的风险评估,本文探讨了定性与定量分析方法的应用及其结合方式。定性分析方法为危险源识别提供了基础,帮助专家团队发现潜在的风险源,而定量分析则通过数学模型对风险进行了精准量化,确保评估结果的可靠性。结合两者的优势,可以实现全面、准确的风险评估,进而为园区安全管理提供有效支持。通过实施科学的风险评估和控制措施,园区可以降低事故发生的概率,提升安全管理水平,为化工园区的可持续发展提供保障。

参考文献

- [1] 张鑫.化工园区重大危险源安全评价处置优化研究[J].中国轮胎资源综合利用,2026,(03):196-198.
- [2] 王杰,张明广,程晋强,蒋军成,王爽,江嘉仪.化工园区重大危险源安全风险防控体系研究进展[J].中国安全科学学报,2026,36(01):146-156.
- [3] 施方桂.化工园区重大危险源事故风险分析及应急救援体系研究[D].导师:王飞跃;刘明娣.中南大学,2022.
- [4] 许晓元,朱红亚.基于重大危险源辨识的化工园区消防站规划方法[A].2020中国消防协会科学技术年会论文集[C].2020:722-726.
- [5] 王起全,刘志刚,杨鑫刚,刘建,王睿智.化工园区重大危险源风险情景构建分析[J].中国安全科学学报,2020,30(08):63-69.