



04
2025

化工技术与应用

Chemical Technology and Application

Volume 2 · Issue 4 · August 2025 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)



Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839
E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



化工技术与应用 Chemical Technology and Application

Volume 2 · Issue 4 · August 2025 3060-9291(Print) 3060-9283(Online)



中文刊名：化工技术与应用	Serial Title: Chemical Technology and Application
ISSN：3060-9291（纸质）3060-9283（网络）	ISSN: 3060-9291 (Print) 3060-9283 (Online)
出版语言：华文	Language: Chinese
期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/cta-cn	URL: http://journals.nassg.org/index.php/cta-cn
出版社名称：新加坡南洋科学院	Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref

版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: http://www.nassg.org



《化工技术与应用》征稿函

期刊概况：

中文刊名：化工技术与应用

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

出版语言：华文刊

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

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

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

出刊及存档：

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

作者权益：

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

评审过程：

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

化工技术与应用

Chemical Technology and Applications

Volume 2 · Issue 4 · August 2025
ISSN 3060-9291 (Print) 3060-9283 (Online)

主 编

李雪辉

Xuehui Li

编 委

沈来宏 Laihong Shen

张小松 Xiaosong Zhang

钟文琪 Wenqi Zhong

侍洪波 Hongbo Shi

1	基于双控预防机制的化工安全生产管理研究 / 苏建勋		
4	禽用佐剂注射用白油（轻质矿物油）易碳化物检验用 试剂级别的分析研究 / 付春杰 宋海岩 杨柳 张丹 梁寻	51	托普索 WSA 湿法制酸系统尾气钙基干法固定床脱硫工 艺优化研究 / 张继刚
7	2.0T/H 乙醇热泵精馏系统工艺设计 / 蒋伟华 杨欣怡 童博帆	54	高含硫油气田地面集输管道腐蚀机理与防护体系优化 研究 / 邢世佳
11	空分装置氧气管道施工技术 / 樊森川 杜瑞红	57	矿井巷道顶板矿压控制与协同综采技术探析 / 武健
14	焦炉烟气超低排放技术的研究与应用 / 高彩霞	60	煤化工低温甲醇洗硫含量超标分析及处理 / 王亚盟
17	化工生产中的资源循环利用与可持续发展研究 / 焦文东	63	循环荷载下储气库石膏盖层力学特性和损伤本构模型 研究 / 童雪菲 沈大均 宋卓林 喻璐 张烨
20	水煤浆气化技术的工艺优化与性能提升 / 邱超	70	试析石油化工建设项目工程质量管理策略 / 李红卫
23	绿色化工生产技术的最新进展与趋势 / 张东平	73	聚合物微球油藏适应性实验研究 / 史树彬
26	甲烷合成反应机理与动力学研究 / 庄伟	76	绝热层应力释放槽成型模具设计改进 / 鲁锋涛 张海鹏 李佳玮 韩共乐 李传明
29	聚异戊二烯橡胶产业发展历程和现状分析 / 张彬彬 王健康	79	土建设备工程施工技术与管理 / 郭建军 朱彦 韩仕通
33	特殊备自投方式在液氨保安冰机供电系统中的应用 / 浦咏梅	82	化工石油工程施工中机电设备安装与运行效率分析 / 郑冰
36	天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计 / 刘程 张增战	85	炼油化工工程项目中 EPC 总承包模式的管理效率提升 路径 / 夏银璐
39	化学机械抛光在硅材料加工中的应用进展 / 冯小娟	88	火驱尾气注入关键技术研究 / 孟强 韩树柏 商永刚
42	锂离子筛在盐湖卤水提锂中的研究进展 / 霍姗姗 朱津 范哲远 徐阳 王天雨	92	面向生物质掺烧的脱硝催化剂需求与研发进展 / 刘凯鸣
45	石油化工企业体验式安全培训模式分析 / 于贵福 朱艳		
48	基于设备参数优化的拟薄水铝石生产工艺改进研究		

- 1 Study on safety management of chemical industry based on dual control prevention mechanism
/ Jianxun Su
- 4 Analytical Study on Reagent Grade for the Test of Readily Carbonizable Substances in White Oil for Injection (Light Mineral Oil) as Poultry Adjuvant
/ Chunjie Fu Haiyan Song Liu Yang Dan Zhang Xun Liang
- 7 Process Design of 2.0T/H Ethanol Heat Pump Distillation System
/ Weihua Jiang Xinyi Yang Bofan Tong
- 11 Construction technology of oxygen pipeline in air separation unit
/ Senchuan Fan Ruihong Du
- 14 Research and application of ultra-low emission technology of coke oven flue gas
/ Caixia Gao
- 17 Research on Resource Recycling and Sustainable Development in Chemical Production
/ Wendong Jiao
- 20 Process Optimization and Performance Enhancement of Coal-Water Slurry Gasification Technology
/ Chao Qiu
- 23 Latest Progress and Trends in Green Chemical Production Technologies
/ Dongping Zhang
- 26 Research on the Reaction Mechanism and Kinetics of Methane Synthesis
/ Wei Zhuang
- 29 Development History and Current Status Analysis of Polyisoprene Rubber Industry
/ Binbin Zhang Jiankang Wang
- 33 Application of special standby power automatic switching mode in power supply system of liquid ammonia security ice machine
/ Yongmei Pu
- 36 Selection and Optimization Design of Combustible Gas Detection Instruments for Natural Gas Stations
/ Cheng Liu Zengzhan Zhang
- 39 Progress in the Application of Chemical Mechanical Polishing in Silicon Material Processing
/ Xiaojuan Feng
- 42 Research progress on lithium-ion sieves for extracting lithium from salt lake brines
/ Shanshan Huo Jin Niu Zheyuan Fan Yang Xu Tianyu Wang
- 45 Responsibility analysis of vocational education and training in petrochemical enterprises
/ Guifu Yu Yan Zhu
- 48 Research on the improvement of pseudo-boehmite production process based on equipment parameter optimization
/ Dongcheng Li
- 51 Research on Optimization of Calcium-based Dry Fixed-Bed Desulfurization Process for Tail Gas of Topso WSA Wet Acid System
/ Jigang Zhang
- 54 Study on corrosion mechanism and optimization of protection system for surface gathering and transportation pipelines in high-sulfur oil and gas fields
/ Shijia Xing
- 57 Analysis of mine pressure control and collaborative fully mechanized mining technology of mine roadway roof
/ Jian Wu
- 60 Analysis and treatment of sulfur content exceeding standard in low temperature methanol washing of coal chemical industry
/ Yameng Wang
- 63 A Study on Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Gypsum Caprocks under Cyclic Loading
/ Xuefei Tong Dajun Shen Zhuolin Song Lu Yu Ye Zhang
- 70 Try to analyze the engineering quality management strategy of petroleum and chemical construction projects
/ Hongwei Li
- 73 Experimental Study on Adaptability of Polymer Microsphere Reservoir
/ Shubin Shi
- 76 Improvement of design for forming mold of stress release slot in insulation layer
/ Fengtao Lu Haipeng Zhang Jiawei Li Gongle Han Chuanming Li
- 79 Civil equipment engineering construction technology and management
/ Jianjun Guo Yan Zhu Shitong Han
- 82 Analysis of Installation and Operation Efficiency of Mechanical and Electrical Equipment in Petrochemical and Oil Engineering Construction
/ Bing Zheng

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 85 | The management efficiency improvement path of the EPC general contracting model in oil refining and chemical engineering projects
/ Yinlu Xia | | Injection
/ Qiang Meng Shubai Han Yonggang Shang |
| 88 | Research on Key Technologies of Fire Driven Exhaust Gas | 92 | Demand and Research Progress of Denitration Catalyst for Biomass Co-Combustion in Coal-Fired Power Plants
/ Kaiming Liu |

Study on safety management of chemical industry based on dual control prevention mechanism

Jianxun Su

China Special Logistics Intelligent Emergency Monitoring Platform Co., Ltd., Fushun, Liaoning, 113000, China

Abstract

The chemical industry, due to its complex process flows, dense concentration of hazardous substances, and variable working environments, is prone to high-risk accidents. There is an urgent need to establish a scientific and effective safety management mechanism. As a key tool for promoting intrinsic safety in enterprises, the dual-control prevention mechanism has shown significant effectiveness in the chemical sector. This mechanism strengthens risk identification and dynamic control throughout the process through two main lines: risk classification and control, and hidden danger investigation and rectification. It enhances companies' proactive prevention capabilities and builds a closed-loop safety management system. This article

Keywords

double prevention mechanism; chemical safety; risk classification; hidden danger management; management system

基于双控预防机制的化工安全生产管理研究

苏建勋

中资特种物流智慧应急监测平台有限公司, 中国·辽宁 抚顺 113000

摘 要

化工行业由于工艺流程复杂、危险物质密集、作业环境多变, 易发生高危事故, 亟需建立科学有效的安全管理机制。双控预防机制作为国家推动企业本质安全的重要抓手, 在化工领域的推广应用具有显著成效。该机制通过风险分级管控与隐患排查治理两条主线, 强化全过程风险识别与动态控制, 提升企业主动防控能力, 构建安全闭环管理体系。文章聚焦化工行业双控机制实施现状, 分析其在实际管理中的功能定位与运行瓶颈, 从风险特征出发重构管理模型, 提出信息化支撑、制度优化、文化引导等综合路径, 旨在为化工企业建立系统性、科学性、可持续性的安全生产管理模式提供理论依据与策略支撑。

关键词

双重预防机制; 化工安全; 风险分级; 隐患排查; 管理体系

1 引言

化工行业是典型的高风险产业, 历年来重大事故频发, 对人员生命安全和财产造成严重损失。传统的安全生产管理手段多以事后补救为主, 缺乏前瞻性和系统性, 已无法适应当前高危作业的风险控制需求。随着国家安全生产治理体系和治理能力现代化进程的推进, 双控预防机制被纳入政策重点领域, 成为企业安全管理体系构建的关键内容。该机制强调以风险为导向的前端控制和全流程管理, 以实现源头防控与动态调整的目标。在化工行业中推行双控机制, 不仅有助于构建可量化、可执行、可追溯的安全生产责任体系, 也为隐患排查治理提供了制度化路径。本文立足于化工行业实际, 以双控机制为核心, 探索其在安全管理实践中的创新路径与制

度支撑, 为推动化工企业高质量发展提供安全保障基础。

2 双控机制在化工安全管理中的内涵界定

2.1 双重预防机制的概念演变与政策依据

双控预防机制最初作为安全管理的探索性工具, 在多次重大事故反思中逐渐演化为国家层面推广的制度模式。其核心在于构建风险分级管控与隐患排查治理并行不悖的管理体系, 推动企业实现从被动响应到主动预防的转型。国家自 2016 年起陆续出台《关于推进企业安全生产风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制建设的指导意见》《安全生产法》等系列政策文件, 明确双控机制在各类高危行业中全面落地。化工行业作为重点领域, 成为试点推进的核心产业, 政策驱动下该机制的理念从技术实践逐步向制度层面过渡, 并不断延伸到企业管理全流程, 形成体系化的规范要求。

2.2 危险源辨识与风险分级管控的体系结构

化工企业的危险源种类繁多且变化频繁, 建立科学的

【作者简介】苏建勋(1985-), 男, 中国山东济宁人, 硕士, 工程师, 从事安全生产技术研究。

风险识别和分级体系成为实施双控机制的关键。体系结构应涵盖从装置级、岗位级到工艺流程级的全面覆盖,借助专家评审、操作规程分析、历史事故数据复盘等手段,构建多维度的风险识别数据库。在风险分级方面,依据可能发生的故事后果、发生频率及暴露人员数量设定风险等级,采用四色图或矩阵模型进行动态标注,实现区域、岗位、设备等多要素的风险标识管理。企业内部需配备风险清单台账,并结合实时监测数据更新等级信息,最终实现高风险区域优先治理、中低风险持续监督的分层管控目标。

2.3 隐患排查治理制度的制度化与常态化建设

隐患排查作为双控机制的重要一环,其制度化建设水平直接决定安全治理的持续性和有效性。制度体系应覆盖年度计划制定、定期检查执行、问题归档闭环、结果复审通报等核心环节,明确责任单位与责任人,形成可执行的规程模板。常态化治理则要求隐患排查不再依赖突击检查或专项整治,而应融入日常运维、班组巡检、岗位互查等管理机制,通过量化指标设定与周期考核实现常态管控。信息化平台在其中的运用,可将隐患上报、整改流程与责任闭环数字化,提升隐患识别及时性与整改效率,推动企业从“被动应付”向“主动发现”的安全管理模式转型。

3 化工行业安全风险特征与管理需求分析

3.1 化工生产过程中的高危特征与事故诱因

化工行业具有原材料易燃易爆、反应过程剧烈、操作空间密闭等典型高危特征,易引发火灾、爆炸、中毒、泄漏等突发事件。物质的不稳定性与储运环节的高温高压条件叠加,构成多重风险源头。操作过程中的人为失误、设备故障与管理疏漏成为主要诱因,据统计,2023年全国较大及以上化工事故中,有68%的事故涉及操作规程违背和设备监测异常。行业对特种设备和特种作业人员依赖性强,一旦培训不到位或监管缺位,风险迅速放大,表现出事故频发、链式反应快、应急难度大的管理困境,对传统管理方式提出严峻挑战。

3.2 典型作业场景下的风险耦合机制

在化工生产中,储运、反应、装卸、检修等作业场景并存,各环节之间易形成复合风险耦合链。以反应釜为例,升温控制失效可能引发物料剧烈反应,同时叠加泄压阀故障和人员疏散通道不畅,导致事故后果扩展倍增。耦合机制体现在工艺、设备、人员、环境四个维度的联动影响,其中任何一环的失控都可能引发系统性风险事件。复杂场景下的耦合程度增加了风险识别的难度,传统单一隐患排查难以触及深层联动机制,需借助系统工程思维将动态条件、概率事件与不确定因素纳入统一评估模型,建立全过程防控体系。

3.3 安全管理需求与监管技术的匹配关系

化工企业对安全管理的核心需求集中在风险实时掌控、隐患早期预警与应急快速响应等方面,要求监管技术具备精准、动态、系统化等特征。当前部分企业仍以人工巡查和

静态台账为主,难以适应多源信息交互与快速处置的现实需求。实现需求与技术的匹配需在基础设施、信息系统与制度标准三方面形成协同推进。传感器布设密度、数据传输可靠性与平台处理能力是信息化监管的技术基础,安全数据建模与情境识别是实现预测预警的算法核心。匹配性不足时,管理机制会被技术瓶颈所制约,导致投入产出不成正比,必须推动“需求导向+技术驱动”的双轮融合路径落地。

4 双控机制下的安全管理模式构建

4.1 风险分级动态识别模型与管理路径

风险识别不应局限于静态条件下的单次评估,而需构建基于动态参数调整的分级识别模型。化工企业运行环境不断变化,设备状态、物料特性、作业方式等因素对风险水平具有直接影响。通过引入动态感知参数,例如压力、温度、浓度、作业频次等关键变量,建立多因子耦合模型,实时更新风险等级及分布区域。模型应具备预设阈值与异常波动判别能力,在发现指标偏离时自动触发评估程序,实现风险识别的主动性。管理路径上应由企业主管部门设定标准分类规则并形成统一模板,各作业单元依据标准开展本单位识别工作,结果集中上传并统一归档,确保信息通畅、识别全面。动态识别结果应及时反馈至管理端,用于调整生产计划、布设监控装置和调度应急资源,实现风险预测、识别与应对的闭环运行,图1为化工安全双重预防机制包括风险辨识图。

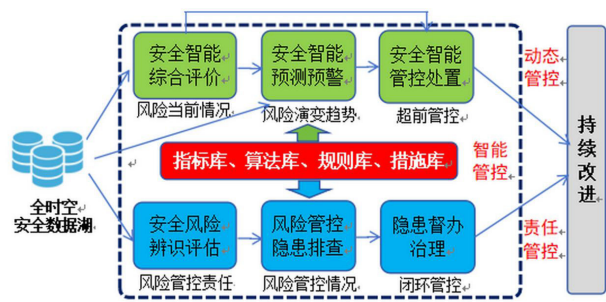


图1 化工安全双重预防机制包括风险辨识图

4.2 隐患治理闭环流程与责任链条优化

隐患治理流程的完整性决定了双控机制的实际效果,建立闭环体系需涵盖隐患发现、分类登记、责任落实、治理执行、验证销号五个关键环节。每一环节需配备明确的责任人和标准化操作模板,形成从发现到整改全过程可量化、可回溯的治理链条。治理流程应采用分级响应策略,对于重大隐患实施专项督办机制,纳入上级审批流程,确保整改进度与资金资源同步落实。常规隐患应通过岗位责任人限期整改并报所属管理部门审核,避免整改措施流于形式。责任链条应嵌入企业绩效考核体系,将隐患排查质量、整改率、重复隐患发生频率等指标纳入岗位考评,实现闭环治理与管理激励的联动优化。信息化平台可辅助生成治理日志和责任档案,提升追责效率和结果透明度,为制度执行力提供保障支撑。

4.3 信息化手段在风险控制中的集成运用

化工企业实施双控机制面临数据量大、变化快、响应周期短等现实挑战,信息化手段的集成应用成为突破关键瓶颈的重要途径。在风险识别环节,应部署多源传感器节点监测关键参数并接入边缘计算终端,实现现场预处理与数据压缩,提高上传效率与稳定性。在分级管控方面,可利用风险地图、四色分区管理系统等工具进行空间可视化呈现,便于现场管理人员进行区域布控与资源分配。在隐患治理模块中,平台应具备工单生成、进度追踪、多端反馈与自动归档功能,提升流程执行的闭环性与监管可视化水平。数据分析层面可基于历史隐患数据训练趋势预测模型,发现潜在重复风险与治理盲区,优化巡查频次与排查重点。系统整体需与企业现有 ERP、MES 等平台实现接口互通,形成覆盖设计、生产、检修、应急的多维信息管理格局。

5 双控机制在企业安全管理实践中的落实路径

5.1 企业层级责任制的完善与绩效联动

双控机制的有效运行依赖于责任制度的清晰分工与纵向传导,在企业内部需建立从高层到一线的分级安全责任网络。各级管理者需根据组织结构制定岗位安全职责清单,并明确其在风险识别、隐患治理、应急响应中的具体职能。高层管理人员需定期主持安全例会,审议双控运行数据与整改成效,将安全绩效纳入年度考核目标。中层管理层应作为执行者和监督者,负责本单位双控工作计划的制定与协调推进,建立本区域风险清单台账。一线操作层则承担具体执行与反馈任务,确保每一隐患点位落地整改。绩效联动方面,应建立安全业绩与晋升、薪酬、激励挂钩的评价体系,将风险失控、重复隐患、整改滞后等行为纳入负面清单,形成责任与激励同步驱动的闭环管理机制。

5.2 安全文化建设与员工行为干预策略

化工企业的安全绩效不仅受制度影响,更与员工行为规范与安全意识密切相关。构建良好的安全文化环境,需要企业持续开展多形式、多层级的宣传教育活动,将“风险可控、隐患可治、安全为本”的理念内化为员工日常思维。文化塑造应从新员工岗前培训、在岗人员再教育、专项岗位考核三方面展开,形成覆盖全生命周期的教育机制。行为干预策略方面,可运用行为观察法对高频违规动作进行记录与反馈,通过经验分享、错误案例剖析与岗位竞赛等形式,强化员工自我防范意识。引入激励机制和失信管理制度相结合的方式,对积极上报隐患、主动参与风险排查的员工予以表彰,对屡次违规或失职行为实施等级警示和培训重塑,使员工在心理与行为层面形成稳定的安全习惯,推动双控管理理念从“制度驱动”向“文化认同”转变,图2为安全生产工作环节及示意图。

5.3 双控机制的制度落地与操作规范化

制度的落地能力决定双控机制在企业中能否有效执行,

必须以标准化和可操作性为核心重塑管理流程。企业需制定符合自身生产特点的双控操作规程,明确风险识别、等级划分、隐患排查、问题处理、反馈复审等每一环节的具体流程、操作要点与责任人配置。操作规范应同步配套表单模板、清单目录与记录范式,使员工能够清晰理解并快速上手执行。各类制度应具备更新机制,针对设备升级、工艺变化与人员调整定期修订,确保与现场实际情况匹配。监督机制方面,可引入三级审核流程,由基层班组自查、中层部门复核、高层专项抽查组成完整闭环,增强制度执行刚性。制度执行成果应通过日常考核、季度评估与年终审计方式量化呈现,为企业内部风险治理提供可追踪、可问责的制度依据,保障双控机制从纸面到现场的全流程落地。

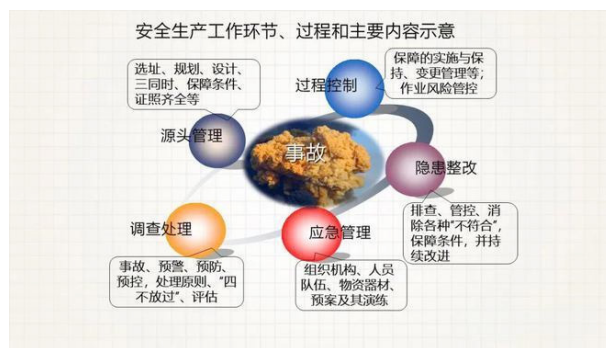


图2 安全生产工作环节及示意图

6 结语

双控预防机制作为当前化工企业推进安全生产治理体系现代化的重要抓手,已逐步从政策倡导走向实践深化。通过构建动态识别的风险分级模型与闭环执行的隐患治理流程,企业在安全管理中实现了前移关口、精准管控的目标。在制度层面,以标准化操作规范和层级责任体系为基础,推动了管理流程的系统化与责任链条的明确化。在文化建设方面,安全理念的渗透与员工行为的干预形成了协同作用,构筑起企业本质安全的内在驱动力。信息化技术的广泛应用,为风险监测与应急响应提供了数据支撑与智能辅助,提升了安全管理的实时性与科学性。双控机制的落地成效不仅体现在事故发生率的降低上,更在于企业整体安全治理能力的持续提升,为高风险行业构建长效安全保障体系提供了制度基础与路径指导。

参考文献

- [1] 孙亚洲,彭涛.基于双控预防机制的化工安全生产管理研究[J].天津化工,2025,39(02):85-87.
- [2] 钟铁.双控预防机制在化工安全生产管理中的应用[J].石化技术,2025,32(03):349-350.
- [3] 郭怀斌.双控预防机制在化工安全生产管理中的要点分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):98-100.
- [4] 陈建松.双控预防机制在化工安全生产管理中的要点分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(16):1-3.

Analytical Study on Reagent Grade for the Test of Readily Carbonizable Substances in White Oil for Injection (Light Mineral Oil) as Poultry Adjuvant

Chunjie Fu Haiyan Song Liu Yang Dan Zhang Xun Liang

Jilin Guanjie Biological Technology Co., Ltd., Meihekou, Jilin, 135000, China

Abstract

To ensure the standardized, accurate, reliable, and unified use of reagents in the test method for easily carbonizable substances in white oil (light mineral oil) for injection, a veterinary adjuvant, three batches of white oil (light mineral oil) for injection produced by different suppliers and manufacturers were tested. Two different grades of reagents were used for the tests, which were conducted in accordance with the test method for easily carbonizable substances in white oil (light mineral oil) for injection specified in Appendix III of the *Chinese Veterinary Pharmacopoeia* (2020 Edition). A total of three groups of test data were collected and summarized. The results showed that both analytical grade and guaranteed reagent grade reagents yielded qualified test results. Although different suppliers produced different test results, all met the specified requirements. The test results show that the color of the analytical pure reagent is darker than that of the guaranteed reagent. Although both meet the regulations, the color of the analytical pure reagent is not easy to distinguish when compared with the color of the reference substance solution. The color of the guaranteed reagent is more obvious and easier to judge. In subsequent work, in order to make the test results more accurate, it is recommended to use guaranteed pure sulfuric acid reagent for testing.

Keywords

White Oil for Injection (Light Mineral Oil); Easy Carbonization Substances; Reagent

禽用佐剂注射用白油（轻质矿物油）易碳化物检验用试剂级别的分析研究

付春杰 宋海岩 杨柳* 张丹 梁寻

吉林冠界生物技术有限公司, 中国·吉林 梅河口 135000

摘 要

为保证禽用佐剂注射用白油（轻质矿物油）易碳化物检验方法使用试剂的规范、准确、可靠、统一，通过试验采用3批不同供应商，不同生产厂家生产的注射用白油（轻质矿物油），分别采用2种不同级别的试剂进行检验，分别按《中华人民共和国兽药典》2020年版三部附录注射用白油（轻质矿物油）易碳化物检验方法进行检验，共检验汇总了3组检验数据，从检验结果可以表明，使用分析纯试剂和优级纯试剂二者检验结果均合格，供应商不同出现的检验结果也不同，但均符合规定。检验结果表明分析纯试剂颜色深于优级纯试剂颜色，二者虽均符合规定，但分析纯试剂颜色与对照品溶液颜色比较不容易辨别，使用优级纯试剂颜色更明显，更容易判断，后续工作中，为使检验结果更加准确，建议使用优级纯硫酸试剂进行检验。

关键词

注射用白油（轻质矿物油）；易碳化物；试剂

1 引言

禽用佐剂注射用白油（轻质矿物油）系自石油中制得

的多种液状烃的混合物^[1]，其中原油的质量不同，导致生产的注射用白油的质量也不同，其中注射用白油中含有脂肪烃类，饱和与不饱和烃类，直链烃类，其中主要性状为无色透明、无味、无臭的油状液体，在日光下不显荧光。具有化学性质稳定及对光和热具有稳定性性质，现已广泛应用于兽用疫苗、人用疫苗、生物医药、化学工业、食品行业、化妆品行业等多个领域的发展和应。其主要检验指标为：性状、黏度、易碳化物、稠环芳烃、相对密度、重金属、酸度、铅、砷等主要检验项目，其中易碳化物、稠环芳烃等主要检验项

【作者简介】付春杰（1983-），女，满族，中国内蒙古人，兽医师，从事兽用疫苗检验研究。

【通讯作者】杨柳（1987-），女，中国山东烟台人，硕士，高级兽医师，从事兽用疫苗管理研究。

目的严格控制起到了非常重要的作用。

注射用白油(轻质矿物油)主要用作药物载体:一些脂溶性药物难以直接在体内溶解和吸收,注射用白油可作为载体,将这些药物溶解其中,制成油针剂,这样能改变药物的释放速度,延长药物在体内的作用时间,例如某些激素类药物制成油针剂后,能缓慢释放,维持药效;润滑和保护作用:在一些注射操作中,注射用白油可用于润滑注射器和针头,减少摩擦,使注射过程更顺畅,同时也能在一定程度上保护注射部位的组织,减少损伤;局部封闭治疗:在医学上,对于一些疼痛性疾病或炎症,如关节炎、腱鞘炎等,可将注射用白油与局部麻醉药等混合后,注射到病变部位进行封闭治疗,起到缓解疼痛、减轻炎症的作用。

需要注意的是,注射用白油的使用必须严格遵循医生的指导和规范,因为不当使用可能会引发不良反应,如局部组织的刺激、过敏反应等。

禽用佐剂注射用白油(轻质矿物油)中易碳化物在兽用疫苗中的影响,主要影响药品质量易碳化物可能与白油中的其他成分或药物发生化学反应,改变兽用药物的化学性质和稳定性,使兽用疫苗的疗效降低或失效。它们的存在还可能影响兽用疫苗的外观和色泽,使白油变得浑浊或有颜色变化,不符合注射用疫苗的质量标准。

引发安全性问题:易碳化物可能具有一定的毒性或刺激性,进入人体后可能引起局部组织的炎症反应、疼痛,甚至可能对全身多个系统造成损害,这些物质还可能导致过敏反应,引发皮疹、瘙痒、呼吸困难等过敏症状,严重时可能危及生命。

所以易碳化物的含量越低,注射用白油(轻质矿物油)接种试验动物后注射部位越易吸收^[4],也无明显的副反应及不良反应;易碳化物的检验结果颜色显色越深,说明注射用白油(轻质矿物油)中含有的芳香烃、稠环烃越多,这种杂质越多,则致癌物质越高,从而导致试验动物机体接种吸收后,试验动物表现的副反应表现的比较严重,不良反应也比较严重,试验动物接种后会在注射部位形成结节、小结以及小的肉芽肿^[2],还会出现红、肿、热、痛等炎症反应,从而给养殖业用户造成非常严重的经济损失,质量稳定、均一稳定、安全有效的注射用白油(轻质矿物油)佐剂可以保证兽用疫苗的成品质量稳定可靠,使试验用动物产生高质量、高效价的抗体^[1]因此控制易碳化物的含量,规范易碳化物的检验方法尤其重要,为检验提供可靠的数据支持,给养殖业提供了技术支持。

2 材料

2.1 注射用白油(轻质矿物油)

注射用白油(轻质矿物油)购自生产厂家为埃克森美孚(中国)投资有限公司,供应商为山东嘉驰有限公司,批号为VG6615535P,生产日期:2024-10-23。

注射用白油(轻质矿物油)购自生产厂家为道达尔石油(上海)有限公司,供应

商为沈阳思博瑞意有限公司,批号为B8460C22,生产日期:2024-11-01。

注射用白油(轻质矿物油)购自生产厂家为中石油克拉玛依(上海鸣起)有限公司,供应商为上海鸣起有限公司,批号为2502200411,生产日期:2024-12-03。

2.2 检验用试剂

分析纯级别购自上海国药集团化学试剂有限公司,生产日期为2024-04-20,批号为20240420。

优级纯级别购自上海国药集团化学试剂有限公司,生产日期为2024-04-17,批号为20240417。

比色用重铬酸钾溶液购自北京北方伟业计量技术研究院,生产日期为2025-01-12,批号为20250112。

比色用硫酸铜溶液购自北京北方伟业计量技术研究院,生产日期为2025-01-05,批号为20250105。

比色用氯化钴溶液购自北京北方伟业计量技术研究院,生产日期为2025-01-24,批号为20250124。

2.3 检验用具塞试管

长约160mm,内径25mm的具塞试管,购自天玻。

3 方法

3.1 检验依据

《中华人民共和国兽药典》2020年版三部附录注射用白油(轻质矿物油)检查法进行检验。

3.2 检验方法

取埃克森美孚(中国)投资有限公司生产的注射用白油(轻质矿物油)吸取样品5.0ml,置长约160mm,内径25mm的具塞试管中,用刻度吸管加硫酸试剂5.0ml,置沸水浴中,30秒后迅速取出,加塞,用手指按紧,上下强力振摇3次,振幅应在12cm以上,但时间不得超过3秒,振摇后置回水浴中,每隔30秒再取出,如上法振摇,自试管浸入水浴中起,经过10分钟后取出,静置分层,石蜡层不得显色;酸层如果显色,与对照溶液(取比色用重铬酸钾溶液1.5ml,比色用氯化钴溶液1.3ml,比色用硫酸铜溶液0.5ml与水1.7ml,加本品5.0ml制成)比较,颜色不得更深^[3]。

取道达尔石油(上海)有限公司生产的注射用白油(轻质矿物油)样品5.0ml,置长约160mm,内径25mm的具塞试管中,加硫酸5.0ml,置沸水浴中,30秒后迅速取出,加塞,用手指按紧,上下强力振摇3次,振幅应在12cm以上,但时间不得超过3秒,振摇后置回水浴中,每隔30秒再取出,如上法振摇,自试管浸入水浴中起,经过10分钟后取出,静置分层,石蜡层不得显色;酸层如果显色,与对照溶液(取比色用重铬酸钾溶液1.5ml,比色用氯化钴溶液1.3ml,比色用硫酸铜溶液0.5ml与水1.7ml,加本品5.0ml制成)比较,2颜色不得更深^[3]。

取中石油克拉玛依(上海鸣起)生产的注射用白油(轻质矿物油)样品 5.0ml,置长约 160mm,内径 25mm 的具塞试管中,加硫酸 5.0ml,置沸水浴中,30 秒后迅速取出,加塞,用手指按紧,上下强力振摇 3 次,振幅应在 12cm 以上,但时间不得超过 3 秒,振摇后置回水浴中,每隔 30 秒再取出,如上法振摇,自试管浸入水浴中起,经过 10 分钟后取出,静置分层,石蜡层不得显色;酸层如果显色,与对照溶液(取比色用重铬酸钾溶液 1.5ml,比色用氯化钴溶液 1.3ml,比色用硫酸铜溶液 0.5ml 与水 1.7ml,加本品 5.0ml 制成)比较,颜色不得更深^[3]。

4 检验结果

按上述检验方法进行检验,分别采用不同级别的试剂进行检验,检验结果有明显差异,检验结果见下述和检验结果判定见下述。

4.1 检验结果

生产厂家为埃克森美孚(中国)投资有限公司,供应商为山东嘉驰有限公司,分析纯级别结果为:经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为黄色,浅于对照溶液颜色;优级纯级别结果为:经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为淡黄色,浅于对照溶液颜色。

生产厂家为道达尔石油(上海)有限公司,供应商为沈阳思博瑞意有限公司,分

析纯级别结果为:经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为黄色,浅对照溶液颜色;优级纯级别结果为:经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为淡黄色,浅于对照溶液颜色。

生产厂家为中石油克拉玛依有限公司,供应商为上海鸣起有限公司,分析纯级别结果为:

经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为黄色,浅对照溶液颜色;优级纯级别结果为:经过 10 分钟后取出,静置分层后,石蜡层未显色;酸层颜色为淡黄色,浅于对照溶液颜色。

4.2 检验结果判定

生产厂家为埃克森美孚(中国)投资有限公司,供应商为山东嘉驰有限公司,静置分层后,对照颜色:上层为无色;下层为橙黄色;样品颜色:上层为无色;下层为淡黄色。样品颜色浅与对照颜色,检验结果合格。

生产厂家为道达尔石油(上海)有限公司,供应商为沈阳思博瑞意有限公司,静置分层后,对照颜色:上层为无色;下层为橙黄色;样品颜色:上层为无色;下层为黄色。

样品颜色浅与对照颜色,检验结果合格。

生产厂家为中石油克拉玛依有限公司,供应商为上海鸣起有限公司,静置分层后对照颜色:上层为无色;下层为橙黄色;样品颜色:上层为无色;下层为黄色。样品颜色浅与对照颜色,检验结果合格。

4.3 检验注意事项

硫酸试剂的级别选用优级纯级别,浓度要求也比较严格,严格控制在 94.5%-95.5%,浓度过低或者浓度过高都会影响试验结果的准确性,浓度过高容易使溶液颜色偏深,浓度过低容易使溶液颜色偏浅,导致试验结果失败。

试验置沸水浴中,前 30 秒不进行试管加塞,30 秒后取出一直至 10 分钟结束均进行加塞试验,此试验检验过程中务必做好给人防护。

为使试验结果更严谨,建议在沸水浴中检验过程中,具塞试管加热时不要直接接触烧杯底部,可以适当隔热工具,防止局部过热引起的试验结果失败。

使用硫酸试剂进行时务必在通风橱中进行,做好防护。

5 讨论

通过试验采用 3 批不同供应商,不同生产厂家生产的禽用佐剂注射用白油(轻质矿物油),分别采用 2 种不同级别的试剂进行检验,一种试剂级别为分析纯试剂、一种试剂级别为优级纯试剂;2 种不同级别的硫酸试剂均由国药集团化学试剂有限公司生产,分别进行检验,分别按上述检验方法对佐剂注射用白油(轻质矿物油)的易碳化物检验项目进行检验,共检验汇总了 3 组检验数据,每个供应商共有 2 组检验结果,计共有 6 个检验结果,从这 6 个检验结果可以表明,试验使用分析纯试剂和优级纯试剂二者检验结果均合格,供应商不同出现的检验结果也不同,但均符合规定。检验结果表明分析纯试剂颜色深于优级纯试剂颜色,二者虽均符合规定,但分析纯试剂颜色与对照品溶液颜色比较不容易辨别,使用优级纯试剂颜色更明显,更容易判断,后续工作中,为使检验结果更加准确,建议使用优级纯硫酸试剂进行检验。

参考文献

- [1] 孙红祥,潘杭君;免疫佐剂作用机理的研究进展[J];中国兽药杂志;2005年10期
- [2] 王振辉;慈洪波;武桂梅;刘军;;不同来源注射用白油佐剂免疫效果分析[J];中国家禽;2013年19期
- [3] 国家药典委员会.中华人民共和国兽药典·三部[M].2020年版.北京:中国医药科技出版
- [4] 周岷江,王天益,李英伦;免疫佐剂的研究进展[J];畜禽业;2002年01期

Process Design of 2.0T/H Ethanol Heat Pump Distillation System

Wei-hua Jiang Xinyi Yang Bofan Tong

Jinhua Vocational and Technical University, Jinhua, Zhejiang, 321000, China

Abstract

Steam mechanical vapor recompression (MVR) technology, an advanced method for efficiently utilizing the latent heat of steam, has significant application value in industrial energy conservation. This design innovatively integrates MVR technology into a distillation system based on the characteristics of the mixed solution provided by the enterprise, constructing a heat pump distillation system to recover ethanol from ethanol-water solutions. The design process includes core aspects such as process flow planning, automation control scheme design, precise material balance, and key equipment selection. By comparing energy consumption with traditional processes, the energy-saving advantages of MVR technology are highlighted. Additionally, construction flow diagrams and equipment layout diagrams have been completed, providing a comprehensive solution that combines high efficiency and cost-effectiveness for ethanol solvent recovery, from technical planning to engineering implementation, thus promoting the technological upgrade of distillation systems in terms of energy conservation and emission reduction.

Keywords

heat pump; distillation; steam mechanical recompression technology

2.0T/H 乙醇热泵精馏系统工艺设计

蒋伟华 杨欣怡 童博帆

金华职业技术大学, 中国 · 浙江 金华 321000

摘 要

蒸汽机械加压再循环技术 (MVR) 作为高效利用蒸汽潜热的先进技术, 在工业节能领域颇具应用价值。本设计针对企业提供的混合溶液组成特性, 创新性地将 MVR 技术融入精馏系统, 构建热泵精馏系统用于乙醇水溶液的乙醇溶剂回收。设计过程涵盖工艺流程规划、自动化控制方案设计、精准物料衡算及关键设备选型等核心环节。同时, 通过与传统工艺的能耗对比分析, 凸显 MVR 技术的节能优势。此外, 还完成施工流程图与设备布置图的绘制, 从技术方案到工程实施层面, 为乙醇溶剂回收提供了兼具高效性与经济性的完整解决方案, 推动精馏系统在节能降耗方面的技术升级。

关键词

热泵; 精馏; 蒸汽机械再压缩技术

1 引言

在当前全球能源转型和“双碳”目标背景下, 节能成为设计考虑的核心内容之一, 蒸汽机械再压缩机技术 (Mechanical Vapor Recompression, MVR) 因其显著的节能优势成为化工分离领域的重要选择。MVR 技术的核心在于通过压缩机消耗少量压缩功, 将二次蒸气所携带的大量低品位废热转化为高品位能量并重新利用。该技术通常适用于分离同系且沸点相近的物质体系, 这类物系的相对挥发度较小, 若采用常规精馏方法, 要达到分离要求往往需要较多的理论板数和较大的回流比, 这会导致蒸汽和循环水的消耗量较

大。而采用热泵精馏技术时, 由于压缩机的压缩比较小, 相应的功耗也较低, 能够显著提升经济效益。^[1]

乙醇作为化工、医药、能源等领域至关重要的基础原料, 其生产技术的发展正得益于全球范围内对清洁能源及环保技术重视程度的显著提升所形成的推动作用。^[2] 本文以乙醇精馏过程为研究对象, 提出基于机械蒸汽再压缩 (MVR) 技术的精馏系统设计方案, 研究重点包括 MVR 压缩机选型、热集成网络构建以及精馏塔操作条件优化, 建立适用于乙醇分离的热泵精馏工艺模型。采用 AspenPlus 软件对系统进行稳态模拟, 通过灵敏度分析确定最佳回流比和压缩比, 并利用夹点技术实现余热高效回收。仿真结果表明, 相较于传统精馏工艺, 该热泵精馏系统可降低能耗 42.7%, 年减少二氧化碳排放量约 1.8 万吨。研究验证了 MVR 技术在乙醇精馏领域的适用性, 为化工过程绿色升级提供了技术参考, 对实现双碳目标具有实践价值。

【作者简介】蒋伟华 (1974-), 男, 中国河南项城人, 硕士, 高级工程师, 从事化工工艺设计、化工设备设计研究、学生管理工作等研究。

2 工程概述

根据企业生产过程中产生的乙醇母液：pH 值为 7-8，质量流量为 2.0T/h，主要成分有乙醇 15.6%，水 83.6%，大分子有机物 0.8%，要求塔顶精馏乙醇产品浓度大于 92%，塔釜残液浓度小于 3%。为保证整条生产线能够连续稳定运行，充分考虑到系统运行节能，本设计采用 MVR 系统对精馏塔顶蒸汽进行再压缩，提高饱和蒸汽温度，加热精馏再沸器，大幅降低精馏系统能耗，即设计热泵精馏系统，提高能量利用效率。蒸汽压缩机温升设计按 24℃设计，MVR 蒸汽压缩量约为 2.4T/h。

3 工艺系统设计

3.1 设计原则

(1) 热泵精馏工艺路线高效稳定；(2) MVR 压缩机和精馏塔等关键设备技术成熟，质量可靠；(3) 能确保系统一次性开车成功，排除全部不确定的因素；(4) 系统控制操作简单、自动化程度高，控制准确；(5) 系统能安全稳定运行，且最大限度节能，降低运行成本。

3.2 设计思路

(1) 根据物料特性，本系统采用强制循环再沸器进行精馏分离处理，设计处理量为 2.0T/h，设计蒸汽压缩量为 2.4T/h。(2) 为保证系统的稳定运行，设计前通过多次实验，得出本系统塔顶蒸汽温度为 78℃，压缩机温升为 24℃，再沸器温度为 96℃，强制循环再沸器的有效加热温差为 5℃左右，再沸器沸腾状态比较温和，设备使用寿命长。(3) 合理选择泵的技术参数，蒸发器循环泵选取扬程低、循环量大的高效率离心泵，在满足工况要求的条件下，最大限度降低泵的轴功率。(4) 采用单管程立式强制循环加热器，循环量大约在 60m³/h，物料在加热器列管内以 1.5 ~ 2.0m/s 流速通过，确保加热器不粘接晶体，不堵管。

3.3 工艺设计过程

3.3.1 选材方面

根据原料成分和以往类似设备的设计选型经验，本热泵精馏系统主要设备材质为：精馏塔根据《腐蚀数据及选材手册》中的腐蚀强度及腐蚀余量要求，选用 SS304 材质为主体材质与物料接触，满足物料的腐蚀和强度要求；再沸器选用 SS304 材质作为主体材质与物料接触，满足物料的腐蚀和强度要求；进料出料部分：接触部分选用 SS304 材质作为主体材质，满足物料的腐蚀强度和强度要求；乙醇储罐选用 SS304 材质作为主体材质，满足物料的腐蚀和强度要求。

3.3.2 K 值及面积计算

强制循环蒸发器的 K 值一般选取为 1100 ~ 1200，根据类似装置实测数据，K 值取 900 ~ 1100 之间符合实际。本设计采用强制循环再沸器加热方案，采用强制循环加热，既可以降低设备投资，又可以降低系统的能耗。经过计算，

强制循环再沸器的换热面积选取为 52 m²。

3.3.3 设备形式选择

本工艺选择列管式强制循环再沸器，选择低压大流量泵是考虑到在满足工艺条件（系统流速设计）需要的情况下降低动力消耗，换热管内流速设定范围为 1.5 ~ 2.0m/s 之间。

主要设备有：精馏塔、蒸汽压缩机、强制循环再沸器、强制循环泵等。配套设备有：泵辅助设备、管线、仪表、自动操作控制系统、冷凝液管、冷凝液换热器、预热器、放空冷凝器。

3.4 设计参数

本热泵精馏系统处理物料量 2000kg/h，温度 25℃，成分质量分数为乙醇 15.6%，水 83.6%，大分子有机物 0.8%，要求塔顶精馏乙醇产品浓度大于 92%，塔釜残液浓度小于 3%。采用二级压缩的罗茨正确压缩机，压缩比去 2.4，冷却水进出水稳定分别为：进水 25℃；排水 30℃。

3.5 设计特点

节约能源效果显著。热泵作为一项能够提升低温能源温位的先进技术，与精馏工艺相结合所形成的热泵辅助精馏（HPAD）工艺，相较传统单塔精馏工艺，可实现约 20% 至 50% 的节能效果。^{[3][4]}

对于乙醇蒸汽压缩量为 2.4T/h 的热泵精馏系统，精馏分离每吨溶剂能耗仅为 40 度电，正常运行基本不用生蒸汽，按照当地工业用电价格 1.0 元 / 度计算，处理一吨溶剂的成本为 78 元，这个运行成本不到传统精馏系统的 1/2。^{[5][6]}

2 系统控制精准，自动化程度高。该系统主体再沸器为立式升膜强制循环再沸器。系统能否稳定运行，自动化控制是关键，该系统的自控部分采用了 PLC 控制系统，实现各传感信息的采集、传输和回路的自动控制。

设备结构优化。设备结构简单独特，注重细节设计，布置合理。

4 物料衡算及能耗分析

4.1 物料质量平衡计算

物料质量平衡数据见表 4.1.1。

表 4.1.1 主要物料平衡数据表

参数名称	强制循环蒸发
进料量 kg/h	2000kg/h
再沸器蒸发量 kg/h	2400kg/h
塔顶产品出料量 kg/h	283kg/h
塔釜产品出料量 kg/h	1715kg/h
压缩机喷淋水 kg/h	40kg/h
不凝气外排量 kg/h	2kg/h

4.2 能耗和运行成本比较

本设计能耗和运行成本比较见表 4.2.1。

表 4.2.1 能耗和运行成本比较表

进料量	2.0		T/h	工作时间			7200	小时 / 年
塔顶出料量	0.283		T/h	电价：			1.0	RMB/kW.h
塔釜出料量	1.715		T/h	蒸汽价：			200	RMB/T
蒸发量	2.4		T/h	循环冷却水费用：			1.0	RMB/m ³
设备	热泵精馏				常规精馏			
机械压缩机	45	KW	45	RMB	0	KW	0	RMB
泵	20.9	KW	20.9	RMB	5.9	KW	5.9	RMB
厂区蒸汽	0.4	T/h	80	RMB	1.6	T/h	320	RMB
冷却水	10	T/h	10	RMB	20	T/h	20	RMB
每小时成本	155.9			RMB	345.9			RMB
每吨处理成本	78			RMB	173			RMB
每年运行成本	1122480			RMB	2490480			RMB
年节约运行费用				1368000				RMB

5 工艺系统控制

5.1 热泵精馏系统设计方案

这部分是热泵精馏系统的核心部分，它由蒸汽压缩机、驱动电机和变频器组成。采用 PLC 和变频技术，精密控制驱动蒸汽压缩机电机的转速，从而达到压缩机入口的温度和压力的稳定，其控制精度可高达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

5.2 自控系统说明

热泵精馏系统控制模式分为现场控制和远程控制两种模式；控制方式分为手动、自动两种方式。现场控制可以通过触摸屏进行自动、手动控制，远程监控机也可以进行自动、手动控制。

控制中心，主要是实时检测电机、各种泵、电动阀、流量、温度、压力、液位等相关工作参数的信号，确定各部分的工作状态，以达到预热、精馏、蒸汽压缩、清洗排空、停机等自动操作的目的。热泵精馏系统控制中心通过自动报警保护系统设备不受损坏，保证系统的动态平衡。

本项目控制系统通过 PLC 的以太网端口与变频器通讯，采用 PID 控制模式，精密控制压缩机驱动电机的转速；设置手动、自动两种控制方式分别用于手动检修设备和系统

自动运行；实现原料预热、精馏、蒸汽压缩、排空和清洗等自动功能。

整套控制系统配有内置的安全操作系统以防止生产过程中对产品质量的损害和重要部件的损坏。其主要功能如下：

- (1) 远程启动，运行预定参数，达到稳定蒸发状态。
- (2) 远程关机。
- (3) 远程自动清洗系统、可以自动定时清洗、也可手动随时清洗。保持传热系数，提高生产率。
- (4) 自动报警系统。
- (5) 自动提示错误，帮助使用人员快速排错。
- (6) 自动保护系统，如果出现液位不停的升高，或不停得降低达到警戒线的时候，系统会自动进入保护状态。
- (7) 再沸器的压力控制系统，保证再沸器压力的恒定，确保再沸器温度的恒定，保证精馏效果。

6 设备选型

根据工艺设计要求和系统计算数据，热泵精馏系统的主要设备列于表 6.1.1。

表 6.1.1 热泵精馏主要设备一览表

位号	设备名称	型号规格	材质	数量	备注
E0601	强制循环加热器	F=52m ² $\varnothing$ 800x2000 列管 ϕ 25	SS304	1 台	
T0601	精馏塔	$\varnothing$ 800x17812 填料塔	SS304	1 台	
C0601	蒸汽压缩机	接触气体部分 SS316L, 45KW	SS304	1 台	两级压缩
P0601	强制循环泵	CQ100-80-160 15KW	SS304	1 台	
P0602	原料泵	CQ40-25-160 2.2KW	SS304	1 台	
E0602	一级预热器	$\varnothing$ 325x2000 列管式, 10m ²	SS304	1 台	塔釜液
E0603	二级预热器	$\varnothing$ 325x2000 列管式, 10m ²	SS304	1 台	蒸汽凝液

7 结论

本工艺设计是对生产溶液中乙醇进行回收,参考相关的文献资料,根据企业生产过程和要求,选择MVR技术加压提温乙醇蒸汽,用于精馏塔再沸器加热,完成高效回收乙醇的生产任务。主要工作有工艺流程及自控设计、物料衡算、设备选型、绘制施工图。

在设计过程中充分考虑了工艺过程的危险因素和生产中的安全问题,在工艺上、设备选择上、仪表自控上、设备布置上都采取了有效的安全措施,并对操作员工进行了安全教育与培训,保障项目投产后热泵精馏系统安全高效的运行。

参考文献

- [1] 张化福,童莉葛,张振涛,等.机械蒸汽压缩蒸发技术研究现状与发展趋势[J].化工学报,2023,74(增刊1):8-24.
- [2] 王帅,张军.机械蒸发在压缩(MVR)技术进展研究[J].节能,2017(11):4-6.
- [3] 李瑞端,潘宵,胡靓.节能型精馏技术—几种热泵精馏工艺综述[J].广东化工,2021,48(24):81-82.
- [4] 宁旭丹.乙醇分割式MVR热泵精馏系统设计及其优化研究[D].北京石油化工学院,2020.
- [5] 岳金彩,闫飞,邹亮.精馏过程的节能技术[J].节能技术,2018,1(26):64-67.
- [6] 赵林,吴小华,孙东亮,等.乙醇超重力MVR热泵精馏系统仿真及优化研究[J].工程热物理学报,2022,43(3):679-684.

Construction technology of oxygen pipeline in air separation unit

Senchuan Fan Ruihong Du

Zhejiang Industrial Equipment Installation Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310001, China

Abstract

This article mainly elaborates on the key processes of oxygen pipeline construction in air separation units. From pre construction preparation work, including review of drawings, optimization of pipeline welding, selection and qualification review of construction personnel, material inspection, to pipeline degreasing, welding, installation, pressure testing, blowing, etc., a comprehensive analysis of the technical requirements and precautions for each step is conducted to ensure the construction quality of oxygen pipelines in air separation units and the safe and stable operation of oxygen pipeline transportation. With the continuous advancement of technology and the accumulation of engineering practice, the construction technology of oxygen pipelines in air separation units will also be continuously improved and developed. Only by strictly following the technical measures in each construction process can the air separation unit operate stably and obtain qualified products.

Keywords

air separation unit, oxygen pipeline, pipeline degreasing, welding, installation, pressure testing, blowing

空分装置氧气管道施工技术

樊森川 杜瑞红

浙江省工业设备安装集团有限公司, 中国 · 浙江 杭州 310001

摘 要

本文主要阐述了空分装置氧气管道施工的关键工序。从施工前准备工作, 包括图纸的审查、管道焊接的优化、施工人员的选用及资质审查、材料检验等, 再到管道脱脂、焊接、安装、试压、吹扫等工作, 全面分析每个步骤的技术要求和注意事项, 确保空分装置氧气管道施工质量, 保证氧气管道输送的安全稳定运行。随着科技的不断进步和工程实践的不断积累, 空分装置氧气管道施工技术也将不断完善和发展。只有每个施工环节都严格按照工艺措施, 才能保证空分装置稳定运行并得到合格产品。

关键词

空分装置、氧气管道、管道脱脂、焊接、安装、试压、吹扫

1 引言

空分装置是利用空气分离技术生产氧气、氮气等气体的关键设备, 而氧气管道作为空分装置的重要组成部分, 其施工质量与后续装置氧气管道的安全生产运行息息相关。由于装置产品氧纯度高, 局部气流速度快, 达到 200 米/秒, 若施工存在隐患, 将会引起严重的安全事故^[1]。

2 工程概况

某 90000Nm³/h 空分项目氧气管道施工, 材质种类特殊, 主要为 304L、316L、TP321、N04400。施工工期紧、施工组织难度和施工技术难度大。施工前项目部组织对技术方面进行细心准备和策划, 对规范的学习、图纸的深化、材料的

进场验收及存放、施工人员的审查及交底; 对施工中的各个工序的质量进行严格把关, 保证施工的质量。

3 施工准备

3.1 技术准备

(1) 对图纸进行审查, 将查出的问题及时反馈给总包及设计, 使问题及时得到解决, 防止给后续施工造成阻碍。同时将图纸相关工作量进行统计, 根据工程规模及设计要求编制相应的施工方案以及可行的施工计划, 明确质量标准及相应的安全措施^[2]。(2) 优化管道安装焊接: 该空分装置氧气管道材质主要为低碳不锈钢和蒙乃尔镍基合金材质。因氧气管道材质的特殊性, 项目部技术人员与施工班组长对管道单线图深入探讨, 减少管道固定口的焊接, 同时尽可能将固定口留在立管上, 降低实际焊接施工难度, 保证焊接质量。(3) 选派优秀的不锈钢焊工进行集中培训, 重点加强不锈钢材质的焊接工艺技能培训, 制定严格的焊接施工工艺

【作者简介】樊森川 (1992-), 男, 中国山西运城人, 本科, 工程师, 从事管道安装研究。

纪律,保证焊接质量一次合格率^[3]。

3.2 施工场地设置

氧气管道预制设置在预制厂房内,划分氧气管道预制专用区域,与其他介质的管道进行分开预制。氧气管道预制区域在施工前、施工中、施工后均及时清理,防止碎屑、杂物等对氧气管道造成污染。并且在预制区域的明显位置张贴各项施工技术要求以及指导氧气管道焊接的作业指导书。

3.3 工机具准备

根据需求准备性能良好的ZX7-500 逆变手工直流弧焊机,确保设备上的电流表、电压表完好,以确保焊机的热输入准确性及电压的稳定性。焊接电缆采用完好的50mm²铜电缆,以充分保证焊接电流的稳定。

准备检定合格的焊条烘干箱和恒温箱,以及具备加热功能的焊条保温桶,保证能够良好的降低氧气管道焊接材料中的水分含量,从而确保氧气管道焊接过程中电弧的稳定性,以及焊接过程中气孔的产生。

3.4 材料验收及规划

项目管材、管件、阀门等均由总包及建设单位根据设计要求进行采购供货,材料到场后检查管材、管件、阀门等材料的质量证明文件,保证实际材料与文件相匹配。同时根据规范要求对所有管材、管件等材料进行外观检查。管材内、外表面无裂纹、毛刺、划痕等缺陷;管件的壁厚尺寸及椭圆度均与设计要求和质量证明文件相对应;法兰锻造表面光滑,无锻造划痕、裂纹等缺陷。管材、管件等在外观检查合格后再次按照规范要求对主要合金元素含量进行验证性检验,合格的方可使用,不合格的不得使用,并做好标记进行隔离。氧气管道材料与其他不锈钢材料分区分类摆放,设置专用场地,按照规定要求做好表面标识并做好区分标识管理,防止材料混乱使用。

(2) 氧气管道所有阀门按照设计及规范要求进行强度和严密性试验(进口阀门除外),试验合格后并进行清洗脱脂,油脂含量检查合格后方可使用。

(3) 氧气管道的焊材需独立摆放,禁止与其它管线焊材混用;低碳不锈钢、镍及镍合金材质的焊接材料按规定要求使用前必须进行合金元素的复验;氧气管线焊材专人专用,只允许氧气管线施工焊工领取,烘烤员对氧气管线专用焊材需建立专门的台帐进行登记,以便于检查。

3.5 施工人员资质审查

对参与氧气管道焊接作业人员资质进行审查,确保其具备相应的资质且在有效期内。同时通过国家网站对焊接人员的资质证书进行核查,确保证书的真实性。并对所有焊接人员进行实际焊接考核,外观检测合格的试件经射线检测合格后,焊接作业人员方可进入现场施工作业。作业前对焊接人员进行宣贯,明确氧气管道的重要性。

4 管道安装技术

4.1 管道脱脂

由于装置产品氧纯度高,局部气流速度快以及氧气的

特殊性,管道内若含有油脂,在严重情况下可能引起爆炸事故的发生。因此氧气管线系统使用的管材、管件及阀门等必须进行脱脂处理。脱脂剂选用工业三氯乙烯(C_2HCl_3)、工业酒精(C_2H_5OH)等。

脱脂完成的管道经总包、监理、建设单位共同检查,并对检查合格的管道签字确认,检查合格后进行后续施工作业。

检查脱脂质量的方法及合格标准有:

用洁白的无纺布进行擦拭清洗,无纺布上无油脂痕迹;

用波长为320~380nm的紫光灯照射检查,无油脂荧光为合格;

对脱脂后的有机溶剂进行定量分析,油脂含量不超过125mg/m²为合格。

4.2 管道焊接

管道的焊接质量与装置的安全运行息息相关。根据管材材质及壁厚,选择不同的焊接材料及焊接工艺。尤其是镍基合金管道的焊接,最常出现的是热裂纹,主要原因是镍和铁的共晶物中有较低熔点的金属共晶物和非金属共晶物。特别是硫、磷共晶熔点比镍铁低很多,在焊缝结晶时低熔点共晶物的液态膜残留在晶界区,同时镍及镍合金线胀系数大,焊接时易产生较大的应力,焊缝结晶时低熔点共晶物的液态膜在收缩应力作用下易产生开裂。镍及镍合金固液相温度间距小,流动性偏低,在快速冷却结晶条件下,气体来不及逸出极易在焊缝中产生气孔。因此焊接时在保证焊透和熔合良好的前提下,在工艺参数范围内采用小的焊接线能量、短电弧、不摆动或小摆动的多层多道焊接方法,并且每层每道焊接接头错开,同时将层间温度控制在100℃以内。

镍基合金焊接时选用的焊材及焊接工艺参数(见表1)。焊接过程中,要严格控制焊接参数(如焊接电流、焊接电压、焊接速度等),同时焊接时正面及背面均使用纯度99.9%的氩气保护,确保氧气管道焊接的质量。焊接完成后,根据图纸要求对焊接焊缝进行相应的检查及检测,如射线探伤、渗透探伤等,检测合格后方可进行下一道工序。

4.3 管道安装

因氧气管道焊接背部需保护气保护,因此在安装时沿着一个方向进行安装,保证保护封堵的海绵顺利取出。同时管道的正式支架随着管道的安装同时进行,减少临时支架的安装。避免因临时支架拆除时可能导致已安装完成的管道发生偏移等质量缺陷,同时减少不必要的人、材、机等方面的损失。不锈钢及镍基合金管道不得与碳钢直接接触,当接触时必须采取有效的隔离措施(例如:1mm不锈钢板、聚四氟乙烯板等),防止氧气管道渗碳污染。另外氧气管道上的仪表取源部件和其他支管焊接接头在预制时同步完成,并采用机械进行开孔,以避免氧气管道在安装完成后进行再次开孔焊接,从而造成氧气管道内部熔渣存积。

氧气管道阀门安装前,要对阀门进行全面检查,同时在不锈螺栓上涂抹氧兼容润滑脂(比如GLEITMO 595),防止螺栓紧固时出现咬死现象。

氧气管道与低温泵等转动设备连接时,固定口应远离

低温泵。与低温泵等转动设备连接的管道及其分支、支吊架安装完成后，将设备口法兰断开，保证氧气管道在自由状态下所有螺栓能自由穿过螺栓孔，并且法兰的平行度和同轴度符合设备厂家要求，保证管道与低温泵无应力连接。

氧气管道安装应设置防静电措施，所有管段之间应导电良好，每对法兰或螺纹接头之间电阻超过 0.03Ω 时，采

用不小于 6mm^2 的黄绿导线跨接。氧气管道每隔 $80\text{m}\sim 100\text{m}$ 处、进出厂房及装置区处设置静电接地。静电接地安装完成后，用兆欧表或万用表对系统电阻进行测试，电阻值超过规定数值时，对系统内的静电接地进行检查和调整，直至系统内静电接地电阻值测试合格。

表 1 蒙乃尔镍基合金焊接工艺参数

层数	焊接方法	焊材及规格	电源极性	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (Cm/min)	正面保护气流量 (L/min)	背面保护气流量 (L/min)
1	GTAW	ERNiGu-7 $\phi 2.5$	直流正接	100~110	14~15	7~9	8~10	10~15
2	GTAW	ERNiGu-7 $\phi 2.5$	直流正接	140~150	16~18	14~17	8~10	10~15
3-5	SMAW	ENiGu-7 $\phi 3.2$	直流反接	110~120	30~33	13~15	8~10	10~15
6-9	SMAW	ENiGu-7 $\phi 3.2$	直流反接	110~120	30~33	13~15	8~10	10~15

4.4 管道试压

氧气管道管道试压必须在管道安装完成、无损检测全部合格后进行。并且经总包单位、监理单位根据图纸对现场施工质量以及施工资料进行核对检查，符合要求后方可进行试压。

管道的压力试验是为了检查管道安装质量，检查管道的强度及密封性。试验过程严格按照规范要求进行，自检完成后通知总包、监理、建设单位进行共同验收。必要时提前通知质监站进行共同检查。

管道试压临时管道、试压管道末端的封头的焊接应等同于氧气管道的焊接要求。试压系统上合理设置进气阀及泄压阀，并且试压阀门采取挂锁制度，由专人负责。同时在试压系统上设置试压安全阀，安全阀出口用临时管接至安全位置，防止因超压导致安全阀起跳伤害到他人。并且安全阀的鉴定在有效期限内。

试压系统上至少安装 2 块压力表，压力表的量程不得超过氧气管道试验压力的 1.5 倍 -2 倍，精度等级不低于 1.6 级，并且安装的压力表必须在有效校验期内。压力表尽可能安装在试压系统的起始端和末端，保证压力表的安装位置具有代表性。

因氧气管道的特殊性以及压力较高，经过各方确认，装置中压氧气系统采用氮气进行试压；高压氧气系统采用液氮→无油低温活塞泵→汽化器→试压临时管路→待试验系统进行试压。系统试验压力按照 1.15 倍的设计压力进行试压。

氧气管道压力试验时，应逐步缓慢提升压力。缓慢升压至试验压力的 50% 时，稳压 10min，未发现异常或泄漏，继续按照试验压力的 10% 进行逐级升压，每级稳压 3min，当达到试验压力后，稳压 10min，再将压力降至设计压力，试压过程中对试压系统内的所有焊接接头、法兰连接及阀门等采用涂刷中性发泡剂进行检查，无泄漏为合格。

在试压过程中，若发现漏点，必须将试压系统内的压力全部排泄完成，不得系统内带压处理，以免因处理不当导致人员受到伤害。漏点处理完成后进行重新试压，直至试压合格。

试验系统试压合格后，将管道内压力缓慢降压，并确保系统内压力泄压完成。泄压完成后，拆除系统内的所有临时盲板并对管道进行恢复。

4.5 管道吹扫

氧气管道试压完成后，使用流速不小于 20m/s 无油干燥空气或氮气对管道进行爆破吹扫，保证管道内部不含有施工时的残留的碎末、灰尘以及其他杂物等。氧气管道爆破吹扫的顺序按照主管→支管→排放管依次进行，吹扫前对吹扫口周围已清理合格的设备或吹扫合格的其它管道系统做好有效隔离，防止吹出的杂物进入。氧气管道吹扫前，将吹扫系统内管线上的的调节阀、流量计、安全阀、仪表设备等进行拆除隔离，在吹扫口处进行设置吹扫靶板，吹扫完成的靶板进行共同检查验收，靶板上无碎末及其他杂物方为合格，验收合格后将吹扫系统进行及时恢复。

5 结语

氧气管道施工技术是空分装置中的关键系统工程，涉及到多个环节和技术要点。在施工过程中，必须严格按照相关标准和规范要求，做好施工前准备、管道安装、压力试验、吹扫等工作，加强各个工序施工过程中的质量控制，同时做好相应的安全管理工作，使氧气管道的施工质量得到保证，从而确保空分装置安全稳定运行。

参考文献

[1] 谭建忠.空分装置氧气管道技术要点[J].机电机械,2015,27(262).
[2] 王培合.关于氧气管道安装及脱脂技术的研究[J].山东冶金,2014,7(64).
[3] 王立平.宫相森,王浩等.氧气管道安装的施工管理[J].山东冶金,2010,32(4).

Research and application of ultra-low emission technology of coke oven flue gas

Caixia Gao

Jiaohua Plant, Xilai Feng Branch Company, National Energy Group Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China

Abstract

The treatment of coke oven flue gas, a critical component of ultra-low emission transformations in the coking industry, is crucial for achieving the 'dual carbon' goals. This paper focuses on ultra-low emission technologies for coke oven flue gas, providing a comprehensive overview of the characteristics, numerical ranges, and technical impacts of controlling pollutants such as particulate matter, SO₂, and NO_x. It summarizes existing ultra-low emission technologies for coke oven flue gas, including semi-dry desulfurization, pulse jet baghouse dust removal, and selective catalytic reduction (SCR) denitrification. The paper also analyzes the innovative applications of these ultra-low emission technologies, explains the principles of system integration and intelligent control, and proposes a coordinated governance plan for dry desulfurization and other technologies, providing technical support for the green transformation of the coking industry.

Keywords

coke oven flue gas; ultra-low emission; desulfurization and denitrification; coordinated control; activated carbon adsorption

焦炉烟气超低排放技术的研究与应用

高彩霞

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

摘要

焦炉烟气治理作为炼焦行业超低排放改造的关键环节，其技术创新对实现“双碳”目标具有重要意义。本文聚焦焦炉烟气超低排放相关技术，对颗粒物、SO₂、NO_x等污染物控制的特性指标、数值范围及技术影响展开系统说明，总结了半干法脱硫、脉冲布袋除尘、SCR（选择性催化还原）脱硝等现有焦炉烟气超低排放技术，分析了焦炉烟气超低排放技术的创新应用，阐述了系统集成与智能控制原理，提出了干法脱硫与其他技术的协同治理方案，为焦化行业绿色转型提供技术支撑。

关键词

焦炉烟气；超低排放；脱硫脱硝；协同控制；活性炭吸附

1 引言

依据《关于推进实施焦化行业超低改造的意见》（环大气〔2024〕5号）中焦化工序指标要求，在基准含氧量8%的条件下，焦炉烟卤废气颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度小时均值分别不高于10mg/m³、30mg/m³、150mg/m³的超低排放要求。焦炉烟气成分复杂，传统治理技术难以满足超低排放需求，因此探索高效、经济的治理技术对行业低碳环保发展意义重大。

2 焦炉烟气污染物特性

焦炉烟气的污染物成分错综复杂，主要包括二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等，焦炉烟气的物理化学特性对焦炉烟气治理技术的适应性与稳定性起着关键作用，其主要特性如表

1所示。

表 1：焦炉烟气特性

特性指标	数值范围	技术影响
温度	180 - 300℃	影响催化剂活性、脱硫反应速率
湿度	8% - 15%	高湿度易导致布袋除尘器糊袋
含氧量	8% - 12%	加速活性炭吸附剂消耗
腐蚀性	强	需采用耐腐蚀不锈钢或内衬防腐材料
流量波动	±20%	对设备宽负荷适应性要求高

3 现有焦炉烟气超低排放技术

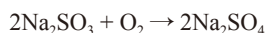
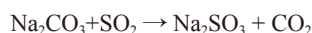
3.1 半干法脱硫

独立配置一套半干法烟气脱硫塔，该塔为直立型结构。来自烟气管道的混合烟气通过塔顶的烟气分配器实现均匀分布后，进入脱硫塔的中部区域，在此与脱硫剂（如SCR溶液）发生脱硫反应，吸收烟气中的SO₂等酸性成分，最终从塔底中部排出。脱硫塔配置顶罐与旋转雾化装置，采用

【作者简介】高彩霞（1986-），女，中国内蒙古人，本科，助理工程师，从事化工、环保研究。

溶液泵将 Na_2CO_3 溶液输送至位于塔顶的溶液储罐。储罐中的溶液通过自流进入顶部的雾化器,形成约 $50\ \mu\text{m}$ 的雾状液滴,与烟气充分接触,迅速吸收 SO_2 等酸性气体。由于 Na_2CO_3 溶液以极细雾滴形式存在,显著增加了与 SO_2 的接触面积,从而实现快速且高效的 SO_2 去除,脱硫效率超过 90%。由于 Na_2CO_3 溶液以极细微雾状存在,在约 230°C 的温度环境下,其雾滴会迅速蒸发,完成与 SO_2 的反应。反应生成的脱硫产物亦为细小颗粒,实现了快速干燥。未参与反应的 Na_2CO_3 干粉及生成的 Na_2SO_4 干粉,大部分随烟气排出脱硫塔出口管道。而塔内产生的少量 Na_2SO_4 和未反应的 Na_2CO_3 (较大颗粒)则沉积于塔底灰斗,通过排料锁气阀排出。

脱硫反应原理如下:



烟气从脱硫塔流出,若含有未反应的碳酸钠,在通过除尘脱硝综合系统进行除尘处理时,这些碳酸钠可能会附着在除尘布袋上。在后续与烟气的接触过程中,碳酸钠可与未脱除的二氧化硫 (SO_2) 继续反应,从而增强脱硫效果,确保脱硫效率得到保障。除尘脱硝综合系统捕获的脱硫灰会被输送至储仓,通过刮板输送机 and 斗提机进行储存,以便循环使用或外运。储仓中用于循环的脱硫灰经称重螺旋输送机送至脱硫溶液制备系统,进行配制后循环利用。

旋转雾化器在半干法脱硫系统中扮演着关键角色,它负责将 Na_2CO_3 溶液或循环灰浆液转变为粒径约为 $50\ \mu\text{m}$ 的雾珠,显著增大了溶液与烟气之间的接触表面积,从而提升了吸收效率。该设备具备广泛的给料分配调节能力,能够根据实际工况的变化灵活调整喷液量,旨在减少脱硫剂原料的消耗^[1]。

3.2 脉冲布袋除尘

在烟气通过脱硫塔进行脱硫处理之后,它将进入除尘与脱硝综合处理单元。在此单元中,首先进行布袋除尘操作,随后烟气与由喷氨系统提供的稀释氨气充分混合。混合后的烟气随后进入催化剂层,在催化剂的催化作用下,完成对烟气中氮氧化物 (NO_x) 的脱除。脱硫过程中,烟气与脱硫剂发生反应并干燥,生成的脱硫灰中,一小部分沉降在脱硫塔的灰斗中,其余则进入除尘部分,进行气固分离。

脱硝设备分离出的脱硫副产物被收集至灰斗,随后通过气动卸灰阀导入输送刮板机,并汇集至总输送刮板机,最终由斗式提升机输送至高位脱硫灰储存仓;部分副产品通过星型卸灰阀及称重式螺旋输送机送至循环灰溶液制备系统,与碳酸钠溶液混合作为脱硫剂使用;储存仓内剩余的副产品可进行袋装或通过罐车外运。

脉冲袋式除尘工作原理: 污染气体(脱硫处理后的烟气)自进风口进入除尘脱硝装置,气体经过滤袋过滤后进入设备上部,在此过程中,滤袋通过其多种效应将粉尘与气体分离,

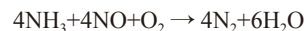
粉尘被捕捉在滤袋表面,净化后的气体则通过滤袋并经文氏管流向上部箱体,最终由出口排出^[2]。在气体中含有的尘埃颗粒经过滤袋进行净化时,随着时间的推移,粉尘在滤袋上积累,导致滤袋阻力上升,进而减少了气体通过量。为了维持阻力在允许的范围内,确保必要的气体流量,控制系统会发出信号,依次激活多个控制阀门,使得储气罐中的压缩空气通过脉冲阀门迅速释放,经喷吹管孔道喷射至滤袋内部,通过文氏管的作用进一步强化喷射效果。

在控制仪未输出信号的情况下,控制阀的排气出口处于封闭状态,而脉冲阀的喷射口亦保持闭合。一旦控制仪发出信号,排气出口随即开启,脉冲阀背压室外的气体压力得以释放,导致压力下降。膜片两侧形成压力差,此压力差驱动膜片移动,进而使脉冲阀的喷射口打开。随后,压缩空气经气包,通过脉冲阀及喷吹管的小孔迅速喷出,形成一股高速气流(即一次风)。此高速气流通过文氏管诱导器吸引周围数倍于一次风量的空气(即二次风)进入滤袋,从而在滤袋内形成瞬间正压,达到清灰的效果。

3.3 SCR (选择性催化还原) 脱硝

SCR 脱硝技术是一种燃烧后氮氧化物 (NO_x) 处理方法,该流程涉及将氨 (NH_3) 作为还原剂注入燃煤锅炉排放的烟气中。这些烟气携带氨气通过一个配备特制催化剂的反应器。在此过程中,氨气与 NO_x 在催化剂的催化下发生反应,将 NO_x 转化为无害的氮气 (N_2) 和水蒸气 (H_2O)。该反应具有选择性,即氨气仅与 NO_x 反应,而非与氧气 (O_2) 反应,从而实现了“选择性”这一特性。

其主要反应式为:



鉴于烟气中 NO_x 含量较高且烟气流量庞大,对 SCR 系统内催化剂的性能和耐热稳定性提出了较高的要求。

4 焦炉烟气超低排放技术的创新应用

4.1 工艺原理与技术创新

高活性氢氧化钙干法脱硫工艺突破了传统脱硫剂活性不足的瓶颈,采用 300 目超细氢氧化钙粉末作为脱硫剂,通过改性处理使其比表面积大幅增加,与烟气中 SO_2 、 SO_3 等酸性物质的反应效率提升 30% 以上。当焦炉烟气进入脱硫系统后,超细粉通过特制喷粉装置均匀喷入烟道,在湍流效应下与烟气充分接触,发生系列化学反应: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 SO_2 反应生成 $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$,与 SO_3 反应生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$,同时部分 CaSO_3 在烟气中氧气作用下氧化为 CaSO_4 ,最终产物随气流进入布袋除尘器,在滤袋表面进一步完成反应,实现 SO_2 的深度脱除^[3]。

该工艺的核心创新在于“双阶反应机制”,烟道内的初步反应与布袋表面的二次吸附反应形成协同效应,使脱硫效率稳定在 98% 以上, SO_2 排放浓度可达到国家标准要求。

相比传统干法工艺,高活性氢氧化钙在 100-150℃的焦炉烟气低温环境中仍保持高效活性,解决了常规脱硫剂低温失活的难题,无需额外加热烟气。

4.2 系统集成与智能控制

干法脱硫系统采用模块化设计,由脱硫剂储存系统、输送系统与反应器系统构成,全流程自动化控制实现了“精准投加-实时调控-节能优化”的闭环管理。脱硫剂储仓配备 Q235 材质罐体、称重计量系统及振动电机,既能实时监测料位,又能防止粉末结块,确保供料稳定;两台罗茨风机组成的输送系统具备在线调节功能,可根据烟气量(30万-50万 m³/h)和 SO₂ 进出口浓度(入口 500-800mg/m³,出口 ≤35mg/m³)自动调整喷粉量,钙硫比控制在 1.1-1.2 之间,钙利用率提升至 90% 以上,较传统脱硫工艺降低材料消耗 15%-20%。

智能化控制系统是工艺高效运行的关键。通过将喷粉量与出口 SO₂ 浓度连锁,系统可在 30 秒内响应浓度波动,自动调节喷粉量,避免材料浪费;低温启动优化技术使系统在冷态启动时仍能保持 85% 以上的初始脱硫效率,缩短调试时间;通过建立“药剂耗量-脱硫效率”数学模型,系统可自动寻优最佳投加量,可降低单台焦炉年药剂成本。

4.3 干法脱硫与其他技术的协同治理方案

4.3.1 干法脱硫与 SCR 脱硝的协同集成

高活性氢氧化钙干法脱硫工艺和低温选择性催化还原(SCR)脱硝技术协同配合,达成了“脱硫-脱硝-除尘”一体化管控体系,就工艺布局而言,把干法脱硫系统置于 SCR 脱硝装置的前端,借脱硫剂的碱性特质预先吸附烟气中的部分 NO_x 污染物,降低后续脱硝的任务量,若烟气经过脱硫反应器后,SO₂ 浓度降至 30mg/m³ 以内,此刻烟气的温度维持在 170℃,刚好对应低温 SCR 催化剂(例如 V₂O₅-TiO₂ 系)的最佳活性窗口范围,消除了传统工艺里脱硫引发的烟气降温问题。

SCR 脱硝系统采用模块化催化剂层做设计安排,依照烟气量(±20%)波动自动对喷氨量进行调整,氨氮比掌控在 1.05-1.1 的数值区间,NO_x 脱除效率可超 85%,排放浓度始终稳定在 150mg/m³ 以内,值得警觉的是,在干法脱硫产出的 CaSO₄ 粉末随烟气进入 SCR 反应器的时候,会在催化剂表面形成一层惰性涂层,在催化剂模块前安设气流均布装置及粉末拦截网,把粉末沉积量控制在不超过 0.1g/m²,保

证催化剂活性周期延长^[4]。

4.3.2 干法脱硫同活性炭吸附协同引发的增效现象

就焦炉烟气中多环芳烃(PAHs)、二噁英等有机污染物而言,干法脱硫系统可跟活性炭吸附工艺协同配套集成,在脱硫反应器出口到布袋除尘器所连的烟道内,添设活性炭喷射装置,借助脱硫后 150-180℃低温烟气的属性,提高活性炭吸附有机污染物的水平。高活性氢氧化钙跟活性炭的协同作用呈现为:滤袋表面由脱硫剂粉末形成的碱性滤饼层,可加大对酸性有机污染物的化学吸附力度;活性炭的多孔架构同脱硫产物的粗糙表面形成复合吸附位置,使二噁英去除率攀升到 99.5% 以上,把苯并[a]芘浓度控制于 0.1ng/m³ 以下。

此协同工艺采纳“分阶投加”之策:按照烟气中的有机污染物浓度值,自动调整活性炭的投加量,同时优化喷粉与喷射的间距,阻止脱硫剂与活性炭形成竞争性吸附局面,实际运作数据说明,该协同系统对比单独活性炭吸附工艺,可削减 30% 的活性炭消耗量,且可降低系统的阻力 100-150Pa,节能效果明显。

5 结论

本文研究表明,高活性氢氧化钙干法脱硫工艺的创新应用,不仅破解了焦炉烟气低温脱硫的技术难题,更通过智能化控制与系统集成实现了“效率-成本-环保”的多目标优化,为工业烟气深度治理提供了技术标杆。今后应加大力度开发宽温域催化剂,加速智能化控制步伐,探寻污染物资源化利用的全新路径。

参考文献

- [1] 牛国强.焦炉烟气脱硫脱硝超低排放及连续运行技术[J].唐山师范学院学报,2024,46(03):20-22.
- [2] 郭梁,师晋恺.焦炉烟气低温定量氧化耦合+强化吸收脱硫脱硝中试研究[J].中氮肥,2024,(01):74-76.DOI:10.16612/j.cnki.issn1004-9932.2024.01.013.
- [3] 张书珍,王鹏.焦炉烟气脱硫脱硝技术的应用实践[J].河北冶金,2023,(05):76-80.DOI:10.13630/j.cnki.13-1172.2023.0516.
- [4] 虞文胜,焦炉烟气超低排放及余热回收利用一体化关键技术研发与应用.安徽省,铜陵泰富特种材料有限公司,2021-12-11.[5] 吉武平,安占来,王军.焦炉烟气超低排放技术的研究与应用[J].河南冶金,2020,28(06):5-7.

Research on Resource Recycling and Sustainable Development in Chemical Production

Wendong Jiao

Inner Mongolia Huineng Coal Chemical Industry Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

The chemical industry plays a pivotal role in economic development. However, its traditional production methods heavily rely on a large amount of fossil fuels and chemical synthesis. This not only leads to excessive resource consumption but also generates a substantial volume of waste and pollutants, causing severe damage to the environment. With the growing global awareness of environmental protection, the chemical industry is confronted with more stringent environmental regulations and standards, posing significant challenges to the survival and development of enterprises. Against this backdrop, resource recycling and sustainable development have become crucial research directions in the chemical industry. This paper aims to explore the implementation approaches of resource recycling in chemical production and its significance for sustainable development, with the goal of providing references for the green development of the chemical industry.

Keywords

Chemical production; Resource recycling; Sustainable development; Environmental protection; Green technological innovation

化工生产中的资源循环利用与可持续发展研究

焦文东

内蒙古汇能煤化工有限公司, 中国 · 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要

化工产业在经济发展中扮演着至关重要的角色, 然而其传统的生产方式依赖大量的化石能源和化学合成, 这不仅导致了资源的过度消耗, 还产生了大量的废弃物和污染物, 对环境造成了严重的破坏。随着全球对环境保护意识的提升, 化工行业面临着更为严格的环保法规和标准, 企业的生存和发展因此受到了巨大的挑战。在此背景下, 资源循环利用与可持续发展成为了化工行业的重要研究方向。本文旨在探讨化工生产中资源循环利用的实现途径以及其对可持续发展的意义, 以期化工行业的绿色发展提供参考。

关键词

化工生产; 资源循环利用; 可持续发展; 环境保护; 绿色技术创新

1 引言

化工产业作为全球经济的重要支柱, 其发展状况直接影响到国家经济的繁荣与稳定。然而, 传统的化工生产方式以大量消耗资源和排放污染物为代价, 已经无法满足当前社会对环境保护和可持续发展的需求。随着全球气候变化和资源枯竭问题的日益严峻, 化工行业面临着前所未有的挑战。因此, 探索化工生产中的资源循环利用与可持续发展路径, 已成为当前研究的热点和重点。

2 资源循环利用在化工生产中的重要性

2.1 资源循环利用与化工行业可持续发展

资源循环利用是化工行业实现可持续发展的重要基石。在传统化工生产过程中, 大量的原材料被转化为产品, 同时伴随着大量的废弃物和副产品产生。这些废弃物和副产品若未经妥善处理, 不仅会造成资源的极大浪费, 还会对环境造成严重的污染。而资源循环利用则是一种将废弃物和副产品转化为新资源的高效利用方式, 它能够实现资源的最大化利用和废弃物的最小化排放, 从而推动化工行业的可持续发展。^[1]

资源循环利用有助于化工行业减少对自然资源的依赖。随着全球资源的日益枯竭, 化工行业面临着资源短缺的严峻挑战。而资源循环利用则通过回收再利用废弃物和副产品, 将原本被视为“废物”的物质转化为新的生产资源, 从而有效缓解了资源短缺的压力。这种生产方式不仅提高了资源的

【作者简介】焦文东 (1973-), 男, 工程师, 从事化工生产与管理研究。

利用效率，还降低了对新资源的开采和消耗，为化工行业的长期发展提供了有力的资源保障。

2.2 资源循环利用促进化工行业技术创新

资源循环利用不仅有助于化工行业的可持续发展，还促进了该行业的技术创新。为了实现资源的最大化利用和废弃物的最小化排放，化工行业需要不断探索新的生产技术和工艺方法。这些新的技术和方法不仅能够提高资源的利用效率，还能够降低生产成本和减少环境污染。

在资源循环利用的过程中，化工行业需要面对各种复杂的废弃物和副产品处理难题。这些难题的解决需要企业具备强大的技术研发能力和创新能力。因此，资源循环利用推动了化工行业的技术创新和发展，促进了新技术、新工艺和新设备的不断涌现。这些新技术和方法的应用不仅提高了化工行业的生产效率和质量，还为行业的长期发展提供了有力的技术支持。

2.3 资源循环利用提升化工行业国际竞争力

随着全球经济的不断发展和资源环境的日益严峻，国际社会对化工行业的环保要求越来越高。而资源循环利用作为一种高效、环保的生产方式，已经成为国际社会评价化工行业竞争力的重要指标之一。因此，实现资源循环利用对于提升化工行业的国际竞争力具有重要意义。^[2]

资源循环利用有助于化工行业提高产品质量和降低成本。通过循环利用废弃物和副产品，化工行业可以生产出更加环保、高质量的产品，满足国际市场对绿色产品的需求。同时，资源循环利用还可以降低生产成本，提高企业的经济效益和市场竞争能力。这种生产方式不仅有助于化工行业在国际市场上占据更大的份额，还能够推动整个行业的转型升级和绿色发展。

资源循环利用也是化工行业应对国际贸易壁垒的有效手段。随着国际贸易保护主义的抬头和资源环境的日益严峻，一些国家和地区开始采取更加严格的环保标准和贸易壁垒来限制化工产品的进口。而实现资源循环利用的化工企业则可以通过提供符合国际环保标准的绿色产品来打破这些贸易壁垒，进入国际市场并获得更多的商机和发展机会。这种生产方式不仅有助于化工行业拓展国际市场，还能够推动整个行业向更加环保、可持续的方向发展。

3 资源循环利用在化工生产中的实现途径

3.1 废弃物回收再利用：化工生产的绿色循环起点

在化工生产过程中，废弃物回收再利用是实现资源循环利用的首要途径。这一途径的核心在于将原本被视为“废物”的物质，通过特定的工艺和技术手段，转化为新的生产资源或能源，从而实现资源的最大化利用。

废弃物回收再利用的过程需要企业具备高度的技术实力和创新精神。化工废弃物往往含有复杂的化学成分，处理

不当可能引发二次污染。因此，企业需要投入大量的研发力量，开发出高效、环保的废弃物处理技术。这些技术不仅要能够高效地从废弃物中提取有价值的成分，还要确保处理过程中不会对环境造成新的污染。

此外，废弃物回收再利用还需要企业建立完善的回收体系。这包括与供应商、客户以及回收机构建立紧密的合作关系，确保废弃物的及时回收和妥善处理。同时，企业还需要对回收的废弃物进行分类、储存和运输，以便后续的处理和利用。

3.2 副产品资源化：化工生产的增值链条延伸

在化工生产过程中，副产品资源化是实现资源循环利用的又一重要途径。化工生产过程中往往会产生大量的副产品，这些副产品如果得不到妥善处理，不仅会浪费资源，还可能对环境造成污染。而通过将副产品转化为新的生产资源或产品，不仅可以实现资源的最大化利用，还可以为企业创造额外的经济价值。

副产品资源化的关键在于找到适合的转化技术和市场需求。企业需要对副产品进行深入的分析和研究，了解其化学成分和潜在价值。然后，企业需要开发出适合副产品转化的新技术或工艺，将其转化为有价值的产品或资源。例如，某些化工副产品可以通过催化转化、分离提纯等技术手段，转化为新的化工原料或能源产品。

在副产品资源化的过程中，企业还需要关注市场需求的变化。随着环保意识的提高和可持续发展理念的深入人心，市场对绿色、环保产品的需求日益增长。因此，企业需要密切关注市场动态，根据市场需求调整副产品资源化的方向和策略。

3.3 清洁能源替代：化工生产的绿色动力源泉

清洁能源替代是实现化工生产资源循环利用的重要途径之一。传统化工生产过程中使用的能源往往以化石燃料为主，这不仅要消耗大量的自然资源，还会产生大量的温室气体和污染物。而清洁能源的使用则可以减少对化石燃料的依赖，降低温室气体排放和环境污染，从而实现化工生产的绿色转型。^[3]

清洁能源替代需要企业具备先进的能源技术和设备。企业需要投入大量的研发力量，开发出适合化工生产的清洁能源技术和设备。这些技术和设备不仅要能够满足化工生产对能源的需求，还要确保在使用过程中不会对环境造成污染。

在清洁能源替代的过程中，政府也发挥着重要作用。政府可以通过制定相关政策和法规，鼓励企业使用清洁能源。例如，政府可以设定清洁能源使用目标，对达到目标的企业给予税收减免或补贴等优惠政策。同时，政府还可以加强对清洁能源技术的研发和推广，推动清洁能源在化工生产中的广泛应用。

4 资源循环利用对可持续发展的意义

4.1 化工行业绿色转型的引擎

资源循环利用在化工行业中扮演着绿色转型引擎的关键角色。随着全球环境问题的日益严峻，化工行业面临着前所未有的环保压力。传统的化工生产模式往往以高能耗、高排放、低效率为特征，不仅消耗了大量的自然资源，还对环境造成了严重的污染。而资源循环利用则通过提高资源利用效率、减少废弃物排放和降低能源消耗，推动了化工行业向绿色、低碳、循环的方向发展。^[4]

资源循环利用的实现需要化工行业在技术、管理、政策等多个层面进行革新。在技术层面，化工行业需要不断研发和创新，开发出更加高效、环保的生产工艺和技术装备，以实现资源的最大化利用和废弃物的最小化排放。在管理层面，化工行业需要建立完善的管理体系，加强对生产过程的监控和管理，确保资源循环利用的有效实施。在政策层面，政府需要制定和完善相关法律法规和政策，为资源循环利用提供有力的法律保障和政策支持。

资源循环利用的推广和应用，不仅有助于化工行业降低生产成本、提高经济效益，还能够显著提升行业的环保水平和社会形象。通过实现资源循环利用，化工行业可以减少对自然资源的依赖，降低对环境的污染，从而实现经济效益与环境效益的双赢。

4.2 能源结构优化与能源效率提升

资源循环利用对于能源结构的优化和能源效率的提升也具有重要意义。化工行业是能源消耗大户，其能源消耗量占全球能源消耗总量的很大比例。而传统的化工生产模式往往以化石燃料为主要能源，这不仅加剧了全球气候变化的问题，还导致了能源资源的枯竭。

资源循环利用通过推广清洁能源的使用和废弃物的能源化利用，有助于优化能源结构，降低化工行业对化石燃料的依赖。清洁能源如太阳能、风能、水能等具有可再生、无污染、低排放等优点，是化工行业实现绿色转型的重要选择。同时，废弃物的能源化利用如生物质能源、垃圾焚烧发电等也能够为化工行业提供可持续的能源供应。

此外，资源循环利用还能够提高能源效率。通过优化生产工艺、改进技术装备和加强能源管理，化工行业可以实现能源的高效利用和废弃物的最小化排放。这不仅有助于降

低生产成本和提高经济效益，还能够减少能源资源的浪费和环境污染。

4.3 缓解全球气候变化和资源枯竭压力

资源循环利用对于缓解全球气候变化和资源枯竭压力也具有积极作用。随着全球气候变化的日益严峻，化工行业面临着巨大的环保挑战。而资源循环利用通过减少废弃物的排放和降低能源消耗，有助于降低温室气体的排放量和减缓全球气候变暖的趋势。

同时，资源循环利用还能够缓解资源枯竭的压力。化工行业对自然资源的依赖程度较高，而自然资源的有限性使得化工行业面临着资源枯竭的威胁。通过实现资源循环利用，化工行业可以充分利用废弃物中的有价值成分，减少对自然资源的开采和消耗，从而缓解资源枯竭的压力。

综上所述，资源循环利用对于化工行业的可持续发展具有重要意义。它不仅推动了化工行业向绿色、低碳、循环的方向发展，还促进了能源结构的优化和能源效率的提高，有助于缓解全球气候变化和资源枯竭带来的压力。因此，化工行业应积极推动资源循环利用的发展和应用，为实现可持续发展目标做出更大的贡献。

5 结论

综上所述，化工生产中的资源循环利用与可持续发展研究具有深远的意义。通过实施资源循环利用，化工行业可以减少资源浪费、降低环境污染、推动技术创新，为实现经济效益与环境效益的双赢奠定坚实基础。未来，随着技术的不断进步和政策的不断完善，化工行业有望在资源循环利用和可持续发展方面取得更加显著的成果，为全球经济的绿色发展贡献更多力量。

参考文献

- [1] 平晓朵, 赵冰峰, 营玉航. 化工生产中供水资源利用及规划的可行性研究[J]. 河南化工, 2022(4): 58-59.
- [2] 袁洲. 化工生产过程中的废物处理与资源化利用策略研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(8): 42-45.
- [3] 王祥. 化工工程中化工生产工艺分析[J]. 大众标准化, 2023(15): 129-131.
- [4] 王瑞波. 精细化工生产管理存在的问题及对策[J]. 化工管理, 2023(第26期): 159-161.

Process Optimization and Performance Enhancement of Coal-Water Slurry Gasification Technology

Chao Qiu

Inner Mongolia Huineng Coal Chemical Industry Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

As an efficient coal conversion technology, coal-water slurry gasification technology holds extensive application prospects and significant economic value in the coal chemical industry. This paper introduces the background of coal-water slurry gasification technology, including its importance as a leading unit in coal chemical enterprises and some current technical challenges it faces. Subsequently, a series of process optimization measures taken to address these challenges are elaborated in detail, such as the modification of the primary drum screen of the mill, the cylinder expansion modification of the high-pressure coal slurry pump, the optimization modification of the gasifier furnace bricks, and the steam recovery from the deaerator. These modifications have effectively improved the operational efficiency and performance of the gasification unit. By implementing these optimization measures, not only have the coal slurry concentration and effective gas content been increased, but also the equipment failure rate and energy consumption have been reduced, achieving the goal of increasing production while reducing consumption. The research in this paper provides valuable references for the further promotion and application of coal-water slurry gasification technology.

Keywords

Coal-water slurry gasification technology; Process optimization; Performance enhancement; Primary drum screen of the mill; High-pressure coal slurry pump

水煤浆气化技术的工艺优化与性能提升

邱超

内蒙古汇能煤化工有限公司, 中国 · 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要

水煤浆气化技术作为一种高效的煤炭转化技术,在煤化工领域具有广泛的应用前景和重要的经济价值。本文介绍了水煤浆气化技术的背景,包括其作为煤化工企业的龙头装置的重要性以及当前面临的一些技术挑战。随后,详细阐述了针对这些挑战所进行的一系列工艺优化措施,如磨机一级滚筒筛改造、高压煤浆泵扩缸改造、气化炉炉砖优化改造以及除氧器蒸汽回收等,这些改造有效提升了气化装置的运行效率和性能。通过实施这些优化措施,不仅提高了煤浆浓度和有效气含量,还降低了设备故障率和能耗,实现了增产降耗的目标。本文的研究为水煤浆气化技术的进一步推广和应用提供了有益的参考。

关键词

水煤浆气化技术; 工艺优化; 性能提升; 磨机一级滚筒筛; 高压煤浆泵

1 水煤浆气化技术的工艺优化与性能提升分析

水煤浆气化技术作为煤化工领域的核心技术之一,其重要性不言而喻。随着煤炭资源的日益紧张和环保要求的不断提高,如何高效、清洁地利用煤炭资源成为了煤化工企业面临的重要课题。水煤浆气化技术以其高效、灵活、环保等特点,成为了解决这一问题的有效途径。然而,在实际应用中,水煤浆气化技术也面临着一些技术挑战,如煤浆浓度不稳定、气化炉运行效率低、能耗高等问题。因此,开展水煤浆气化技术的工艺优化与性能提升研究,对于提高煤化工企业的生产效率和经济效益,推动煤化工行业的可持续发展具

有重要意义。

2 磨机一级滚筒筛改造

2.1 磨机在水煤浆制备中的核心作用与挑战

磨机作为水煤浆制备流程中的关键设备,承担着将煤炭颗粒细化至适宜气化炉进料需求的重任。其性能直接决定了煤浆的粒度分布、浓度以及稳定性,进而影响气化炉的运行效率与最终产物的质量。传统磨机在运行过程中,常面临筛分效率低、易堵塞两大核心挑战。筛分效率低导致煤浆中细颗粒比例不足,影响气化反应速率;而堵塞问题则不仅降低了磨机的处理能力,还增加了维护成本和生产中中断的风险。^[1]因此,对磨机进行技术革新,特别是针对筛分系统的优化,成为提升水煤浆制备效率与质量的关键路径。

【作者简介】邱超(1988-),男,工程师,从事水煤浆气化技术研究。

2.2 一级滚筒筛改造的技术原理与效果

为解决上述问题，一级滚筒筛改造应运而生。该改造的核心在于引入了一种更为高效的筛分机制，即利用滚筒筛的旋转运动，结合特定的筛网设计与材质选择，实现对煤浆中不同粒度颗粒的有效分离。滚筒筛的旋转不仅促进了煤浆的流动，还通过筛网的筛分作用，有效去除了煤浆中的大颗粒杂质及不合格细颗粒，从而提高了煤浆的细度与均匀性。此外，滚筒筛的设计还考虑到了防堵塞特性，通过调整筛网孔径、增加自清洁功能等手段，显著降低了堵塞风险，确保了磨机的持续高效运行。这一改造措施的实施，不仅显著提升了煤浆的质量，还为气化炉提供了更加稳定、高效的进料条件，有助于提升整体气化效率与经济效益。

3 高压煤浆泵扩缸改造

高压煤浆泵是水煤浆气化系统中的重要输送设备，其性能直接影响到煤浆的输送效率和气化炉的进料稳定性。针对传统高压煤浆泵存在的输送效率低、易磨损等问题，通过实施扩缸改造，可以增加泵的输送能力，提高煤浆的输送效率。同时，扩缸改造还可以降低泵的能耗和故障率，延长设备的使用寿命，为气化炉的稳定运行提供了有力支持。

3.1 高压煤浆泵在水煤浆气化系统中的角色与挑战

高压煤浆泵作为水煤浆气化系统中的核心输送设备，承担着将煤浆从制备单元输送至气化炉的重任。其性能优劣直接关系到煤浆的输送效率、气化炉的进料稳定性以及整个气化系统的运行效率。然而，传统高压煤浆泵在运行过程中，常面临输送效率低、易磨损等挑战。输送效率低不仅导致煤浆输送速度缓慢，影响气化炉的连续稳定运行，还增加了能耗和生产成本。^[3]同时，泵体及关键部件的易磨损问题，不仅缩短了设备的使用寿命，还增加了维修频次和停机时间，对生产效率和经济效益造成了不利影响。因此，对高压煤浆泵进行扩缸改造，以提升其输送能力和耐磨性能，成为解决上述问题的有效途径。

3.2 扩缸改造的技术原理与性能提升

扩缸改造的核心在于对高压煤浆泵的缸体进行扩大处理，以增加其内部容积，从而提高泵的输送能力。这一改造不仅涉及缸体结构的重新设计，还包括对泵轴、轴承、密封等关键部件的升级与优化。通过采用高强度、高耐磨的材料，以及先进的制造工艺，确保改造后的泵体能够承受更高的工作压力和更恶劣的工作环境。同时，扩缸改造还优化了泵的流道设计，减少了流体在泵体内的阻力损失，提高了煤浆的输送效率。此外，改造后的泵还具备更好的自润滑性能和密封性能，有效降低了泵的故障率和维修成本。这些技术上的改进，使得高压煤浆泵在输送煤浆时更加高效、稳定，为气化炉的稳定运行提供了有力保障。

4 气化炉炉砖优化改造

气化炉是水煤浆气化技术的核心设备之一，其性能直

接影响到气化过程的效率和产物的质量。针对传统气化炉炉砖存在的耐高温性能差、易脱落等问题，通过实施炉砖优化改造，可以提高气化炉的耐高温性能和稳定性。这一改造措施不仅可以延长气化炉的使用寿命，还可以提高气化过程的效率和产物的质量，为煤化工企业的生产效益提供有力保障。

4.1 气化炉炉砖在水煤浆气化技术中的关键作用与挑战

气化炉作为水煤浆气化技术的核心设备，其内部结构和材料的选择对于气化过程的稳定性和效率至关重要。炉砖作为气化炉的主要构成部分，不仅承受着高温高压的恶劣工作环境，还直接关系到气化反应的有效进行和产物的质量。然而，传统气化炉炉砖在高温下易发生热膨胀、开裂甚至脱落，严重影响了气化炉的稳定性和使用寿命。这些问题不仅增加了设备维护的难度和成本，还可能导致气化过程的波动，影响产物的质量和产量。^[5]因此，对气化炉炉砖进行优化改造，提升其耐高温性能和稳定性，成为确保气化炉长期高效运行的关键。

4.2 炉砖优化改造的技术创新与性能提升

针对传统炉砖存在的问题，炉砖优化改造采取了多项技术创新措施。首先，在材料选择上，采用了新型耐高温、高强度、抗热震性的陶瓷材料，这些材料能够在高温下保持稳定的物理和化学性能，有效抵抗热膨胀和开裂。其次，在炉砖结构设计上，通过优化砖型、增加砖缝密封性等手段，提高了炉砖之间的结合力和整体稳定性，减少了脱落的风险。此外，还引入了先进的生产工艺和检测技术，确保炉砖在制造过程中达到严格的质量要求，并在安装前进行严格的检验和测试，以确保其在实际使用中的性能表现。这些技术创新不仅提升了炉砖的耐高温性能和稳定性，还提高了气化炉的整体运行效率和产物的质量。

5 除氧器蒸汽回收

除氧器是水煤浆气化系统中的辅助设备之一，其作用是去除水中的氧气和杂质，保证气化炉用水的质量。在传统工艺中，除氧器产生的蒸汽往往被直接排放到大气中，造成了能源的浪费。通过实施除氧器蒸汽回收措施，可以将这部分蒸汽回收利用，用于加热煤浆或作为其他设备的热源。这一改造措施不仅可以降低能耗，还可以提高能源的利用效率，为煤化工企业的节能减排提供了有力支持。

5.1 除氧器蒸汽回收的背景与意义

在水煤浆气化系统中，除氧器扮演着至关重要的角色，它负责去除水中的溶解氧和杂质，确保进入气化炉的水质纯净，从而防止气化过程中因氧气存在而导致的设备腐蚀和效率下降。然而，在传统的工艺流程中，除氧器在去除氧气的同时，会产生大量的蒸汽，这些蒸汽往往被直接排放到大气中，既造成了能源的浪费，又加剧了环境的热污染。随着全

球能源形势的紧张和环保要求的日益严格,如何实现能源的节约和高效利用,成为了煤化工企业面临的重要课题。因此,实施除氧器蒸汽回收措施,将这部分原本被浪费的蒸汽进行回收利用,不仅符合节能减排的环保理念,也是提高企业经济效益、实现可持续发展的有效途径。

5.2 除氧器蒸汽回收的技术原理与实施方式

除氧器蒸汽回收的技术原理主要基于热力学原理,即利用蒸汽的潜热进行能量回收。在实施过程中,首先需要将对除氧器产生的蒸汽进行收集和冷凝处理,将其转化为液态水或低温水蒸气,然后根据企业的实际需求,将这些回收的蒸汽用于加热煤浆、预热空气或其他需要热源的设备上。为了实现这一目标,需要设计一套完善的蒸汽回收系统,包括蒸汽收集装置、冷凝器、储水罐、输送管道以及控制系统等。此外,还需要考虑蒸汽回收过程中的能量损失、设备投资、运行维护成本等因素,以确保回收系统的经济性和可行性。通过合理的系统设计和科学的运行管理,可以实现蒸汽的高效回收和再利用,为企业带来显著的经济效益和环境效益。

6 结论

综上所述,水煤浆气化技术的工艺优化与性能提升研

究对于提高煤化工企业的生产效率和经济效益具有重要意义。通过实施磨机一级滚筒筛改造、高压煤浆泵扩缸改造、气化炉炉砖优化改造以及除氧器蒸汽回收等措施,可以有效提高水煤浆气化技术的运行效率和性能。这些优化措施不仅提高了煤浆的浓度和稳定性,降低了设备故障率和能耗,还实现了增产降耗的目标。未来,随着技术的不断进步和创新,水煤浆气化技术将会在煤化工领域发挥更加重要的作用,为煤炭资源的高效、清洁利用提供有力支持。

参考文献

- [1] 陈西峰.水煤浆加压气化工艺技术优化改造[J].化工设计通讯, 2020(10): 3-4.
- [2] 李庆恒, 江敏, 刘海燕.优化浮选工艺提升设备性能的技术改进[J].世界有色金属, 2013(12): 36-39.
- [3] 杨备战.我国水煤浆气化技术现状及发展趋势[J].化工设计通讯, 2021(4): 39-40.
- [4] 郭庆华.华理多喷嘴对置式水煤浆气化技术再创佳绩[J].上海化工, 2020(6): 65.
- [5] 史俊高, 安晓熙, 王帅.我国水煤浆气化技术现状及发展趋势[J].中外能源, 2020(3): 21-28.

Latest Progress and Trends in Green Chemical Production Technologies

Dongping Zhang

Inner Mongolia Huineng Coal Chemical Industry Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

As global environmental awareness continues to rise and the concept of sustainable development gains widespread acceptance, green chemical production technologies have become a crucial development direction for the chemical industry. In recent years, confronted with increasingly severe environmental challenges and resource constraints, governments and enterprises around the world have significantly increased their R&D investments to drive innovation and application of green chemical production technologies. This paper provides an overview of the latest progress in green chemical production technologies, covering technological innovations in raw material selection, production process optimization, waste treatment, and other areas. It also explores future development trends.

Keywords

Green chemical industry; Production technology; Sustainable development; Raw material selection; Production process optimization

绿色化工生产技术的最新进展与趋势

张东平

内蒙古汇能煤化工有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要

随着全球环保意识的日益增强和可持续发展理念的深入人心,绿色化工生产技术已成为化工行业的重要发展方向。近年来,面对日益严峻的环境问题和资源约束,各国政府和企业纷纷加大研发投入,推动绿色化工生产技术的创新与应用。本文综述了绿色化工生产技术的最新进展,包括原料选择、生产工艺优化、废弃物处理等方面的技术创新,并探讨了未来的发展趋势。

关键词

绿色化工; 生产技术; 可持续发展; 原料选择; 生产工艺优化

1 引言

随着全球环境问题的日益突出和可持续发展目标的提出,化工行业面临着前所未有的挑战和机遇。传统的化工生产方式往往伴随着大量的能源消耗和环境污染,这与当前的环保理念和可持续发展目标背道而驰。因此,绿色化工生产技术应运而生,成为化工行业转型升级的重要方向。本文将从原料选择、生产工艺优化、废弃物处理、系统集成与智能化控制以及未来发展趋势等五个方面,对绿色化工生产技术的最新进展与趋势进行深入分析。

2 原料选择的最新进展与趋势

在绿色化工生产技术的探索与实践,原料选择作为整个生产流程的基础环节,正经历着前所未有的变革。这一变革不仅体现在原料种类的丰富与多样化上,更体现在原料

来源的可持续性、生产过程的环保性以及对产品质量的提升上。以下从三个方面对原料选择的最新进展进行详细分析。

2.1 生物基原料的广泛应用与优势

近年来,生物基原料在绿色化工生产中的应用日益广泛。这类原料主要来源于自然界中的植物、微生物等生物体,具有可再生性强、来源广泛、环境友好等特点。与传统的化石基原料相比,生物基原料在生产过程中能够显著减少温室气体排放和环境污染。^[1]这是因为生物基原料的生长和转化过程遵循自然界的碳循环规律,能够实现碳的固定和再利用,从而有效降低碳排放。

此外,生物基原料还具有优良的可降解性。在化工产品的生产和使用过程中,如果采用生物基原料,那么在产品废弃后,其残留物可以在自然环境中较快地分解,减少了对环境的长期污染。这一特点使得生物基原料在包装材料、农业用化学品等领域具有广阔的应用前景。

在生物基原料的利用过程中,基因工程等生物技术手段也发挥了重要作用。通过基因工程手段,可以对原料生物

【作者简介】张东平(1983-),男,中国陕西咸阳人,本科,从事化工生产、技术研究。

进行定向改良,以提高其生产效率、产品质量和适应性。例如,通过基因工程技术改良的微生物,可以使其在生产特定化学品时具有更高的产率和纯度,从而降低生产成本和环境污染。

2.2 可再生资源的开发与利用

可再生资源是绿色化工生产技术中另一类重要的原料来源。这类资源主要包括太阳能、风能、水能等可再生能源,以及农作物秸秆、林木废弃物等生物质资源。这些资源具有取之不尽、用之不竭的特点,且在生产过程中不会对环境造成污染。^[2]

在绿色化工生产中,可再生资源的应用主要体现在两个方面。一方面,可再生能源可以替代传统的化石能源,为化工生产过程提供动力。例如,太阳能可以驱动光伏电池发电,为化工设备提供电力;风能可以驱动风力发电机发电,为化工生产提供清洁能源。另一方面,生物质资源可以作为化工生产的原料,通过化学或生物转化过程生产出各种化学品和材料。例如,农作物秸秆可以经过发酵过程生产出生物乙醇等燃料;林木废弃物可以经过热解或气化过程生产出生物炭、生物油等能源产品。

可再生资源的开发与利用不仅有助于降低化工生产对化石能源的依赖,减少温室气体排放和环境污染,还可以促进农业、林业等产业的可持续发展。因此,可再生资源在绿色化工生产中的应用前景十分广阔。

2.3 原料选择与产品质量的提升

在绿色化工生产中,原料的选择不仅关系到生产过程的环保性和可持续性,还直接影响到产品的质量。因此,在选择原料时,需要综合考虑原料的来源、性质、成本以及对产品质量的影响等因素。

通过采用先进的原料筛选和预处理技术,可以确保原料的纯净度和稳定性,从而提高产品的质量。例如,在生物基原料的利用过程中,通过采用先进的发酵技术和分离技术,可以确保微生物的纯净度和活性,从而提高生物化学品的产率和纯度。此外,通过优化原料的配比和反应条件,还可以进一步提高产品的质量和性能。例如,在合成高分子材料的过程中,通过调整原料的配比和反应温度、压力等条件,可以优化材料的结构和性能,使其具有更好的力学性能和耐热性能。

3 生产工艺优化的最新进展与趋势

在绿色化工生产技术领域,生产工艺的优化是推动行业向更环保、更高效方向发展的关键所在。近年来,随着科技的进步和环保意识的增强,电化学合成、光催化反应等新型工艺手段得以快速发展,为化工生产带来了革命性的变革。以下从三个方面详细分析生产工艺优化的最新进展。

3.1 电化学合成技术的革新与应用

电化学合成技术是一种利用电能驱动化学反应的绿色工艺手段。它通过在电极上施加电压,使反应物在电场作用

下发生氧化还原反应,从而生成目标产物。这种技术具有反应条件温和、选择性好、能耗低等优点,是绿色化工生产技术的重要组成部分。^[3]

在电化学合成过程中,电极材料的选择和电解液的组成对反应效率和产物质量具有重要影响。近年来,随着纳米材料、复合材料等新型电极材料的研发,电化学合成的效率和选择性得到了显著提升。同时,通过优化电解液的组成和反应条件,可以进一步降低能耗和减少污染物排放。

电化学合成技术在化工生产中的应用范围广泛,如电解水制氢、电解氯化钠制氯碱、电化学还原二氧化碳制备燃料等。这些应用不仅有助于实现资源的循环利用和减少碳排放,还为化工生产提供了新的绿色工艺选择。

3.2 光催化反应技术的突破与发展

光催化反应技术是一种利用光能驱动化学反应的绿色工艺手段。它通过在催化剂表面吸附反应物,并在光照条件下使催化剂激发产生电子和空穴对,从而引发化学反应。这种技术具有反应条件温和、能耗低、无污染等优点,是绿色化工生产技术的又一重要发展方向。

在光催化反应过程中,催化剂的选择和制备对反应效率和产物质量至关重要。近年来,随着纳米技术、半导体材料科学等领域的快速发展,新型光催化剂的研发取得了显著进展。这些催化剂具有更高的光吸收效率、更宽的光谱响应范围和更强的氧化还原能力,从而提高了光催化反应的效率和选择性。

光催化反应技术在化工生产中的应用也日益广泛,如光催化降解有机污染物、光催化制氢、光催化还原二氧化碳等。这些应用不仅有助于减少环境污染和碳排放,还为化工生产提供了新的绿色工艺途径。

3.3 催化剂的改进与反应条件的优化

催化剂是化工生产中的重要组成部分,它能够加速化学反应的速率,提高反应的选择性和产物的质量。在绿色化工生产技术中,催化剂的改进和反应条件的优化是提升生产效率、降低能耗和减少污染物排放的重要手段。

近年来,随着催化剂制备技术的快速发展,新型催化剂的研发取得了显著成果。这些催化剂具有更高的活性、更好的稳定性和更长的使用寿命,从而提高了化工生产的效率和产品质量。同时,通过优化反应条件,如温度、压力、溶剂等,可以进一步降低能耗和减少污染物排放。

在催化剂的改进和反应条件的优化过程中,还需要考虑催化剂的再生和回收问题。通过采用先进的再生技术和回收工艺,可以实现催化剂的循环利用和减少资源浪费。这不仅有助于降低生产成本和环境污染,还为化工生产的可持续发展提供了新的思路。

4 废弃物处理的最新进展与趋势

在绿色化工生产技术的框架下,废弃物的处理不再仅仅是末端治理的问题,而是贯穿整个生产流程的重要环节。

随着科技的进步和环保意识的提升,资源化和无害化处理技术已成为废弃物处理领域的研究热点。^[4]以下从三个方面详细分析废弃物处理的最新进展与趋势。

4.1 资源化技术的创新与应用

资源化技术是指将废弃物中的有用成分进行回收和再利用,从而实现资源的循环利用。这一技术不仅有助于减少资源浪费,还能降低对原生资源的开采压力,对环境保护具有重要意义。

近年来,资源化技术在废弃物处理领域取得了显著进展。一方面,通过采用先进的分离技术,如膜分离、萃取、蒸馏等,可以有效地从废弃物中提取出有价值的成分。这些成分经过进一步加工处理,可以转化为新的产品或原料,用于其他生产过程。另一方面,随着生物技术的快速发展,生物转化技术也在废弃物资源化方面展现出巨大潜力。通过微生物的代谢作用,可以将废弃物中的有机物转化为生物能源、生物肥料等有用产品,实现废弃物的生物循环利用。

资源化技术的应用范围广泛,不仅限于化工废弃物,还包括农业废弃物、城市生活垃圾等多个领域。通过资源化技术的创新与应用,可以实现废弃物的减量化、资源化和无害化,推动循环经济的发展。

4.2 无害化处理技术的深化研究

无害化处理技术是指将废弃物中的有害物质进行降解或转化,以减少对环境的污染。这一技术是废弃物处理领域不可或缺的一部分,对于保护生态环境和人类健康具有重要意义。

近年来,无害化处理技术取得了显著进展。一方面,通过采用物理、化学或生物方法,可以将废弃物中的有害物质进行降解或转化,使其变得无害或低毒。例如,采用高温焚烧技术可以将有机废弃物中的有害物质彻底分解;采用化学沉淀、氧化还原等方法可以去除废水中的重金属离子等有害物质。另一方面,随着纳米技术和材料科学的快速发展,新型吸附材料、催化材料等也在无害化处理技术中展现出巨大应用潜力。这些材料具有高效、选择性好等优点,可以更有效地去除废弃物中的有害物质。

无害化处理技术的深化研究不仅有助于减少环境污染,还能为废弃物的资源化利用提供有力保障。通过无害化处理技术的不断创新与应用,可以实现废弃物的安全处置和资源化利用的双重目标。

4.3 废弃物处理技术的综合集成与智能化发展

随着信息技术的快速发展和智能化时代的到来,废弃物处理技术也呈现出综合集成与智能化的发展趋势。通过采用先进的传感器、物联网、大数据等技术手段,可以实现对废弃物处理过程的实时监测和智能控制。

一方面,综合集成技术可以将多种废弃物处理技术进行有机结合,形成一个高效、协同的处理系统。例如,将资源化技术与无害化处理技术进行集成,可以实现对废弃物的全链条处理;将物理、化学和生物方法进行集成,可以实现对复杂废弃物的有效处理。另一方面,智能化技术可以实现对废弃物处理过程的精确控制和优化调度。通过采用先进的算法和模型,可以预测废弃物的产生量和成分变化,从而制定合理的处理方案;通过实时监测处理过程中的关键参数和指标,可以及时调整处理工艺和设备运行状态,确保处理效果达到最佳。

废弃物处理技术的综合集成与智能化发展不仅有助于提高处理效率和资源利用率,还能降低处理成本和减少环境污染。通过这一趋势的推动和实践,可以实现废弃物处理技术的升级换代和可持续发展。

5 结论

综上所述,绿色化工生产技术在原料选择、生产工艺优化、废弃物处理、系统集成与智能化控制等方面取得了显著的进展。这些进展不仅有助于降低化工生产过程中的能耗和污染物排放,还有助于提高生产效率和产品质量。未来,随着科技的不断进步和环保意识的日益增强,绿色化工生产技术将继续朝着更高效、更环保、更智能化的方向发展。这将为化工行业的可持续发展注入新的动力,也为全球环境保护事业作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 赵麒麟.化工企业节能与绿色化工生产技术研究[J].皮革制作与环保科技, 2024 (9): 5-6, 9.
- [2] 秦晓龙.绿色化工生产技术在化工厂中的应用与探索[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2024 (10): 172-175.
- [3] 薄纯文.绿色化工环保技术在工业生产中的应用与发展[J].现代工业经济和信息化, 2021 (7): 91-92.
- [4] 彭华蓉.绿色化工技术在化工生产中的应用[J].化工设计通讯, 2022 (11): 64-66.

Research on the Reaction Mechanism and Kinetics of Methane Synthesis

Wei Zhuang

Inner Mongolia Huineng Coal Chemical Industry Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

In today's global energy sector, with the increasing emphasis on sustainable development and environmental protection, research on the reaction mechanism and kinetics of methane synthesis has become a focal point of attention in both the scientific and industrial communities. Methane serves not only as a vital clean energy source but also as a crucial chemical feedstock that can be converted into high-value-added chemicals and synthetic materials through a series of chemical reactions. Therefore, gaining an in-depth understanding of the reaction mechanism of methane synthesis and mastering its kinetic characteristics are of great significance for enhancing methane production efficiency, optimizing production processes, reducing production costs, and promoting the green development of related industries. This paper reviews the main mechanisms of methane synthesis reactions, including methanation reactions and methane decomposition to syngas reactions, and explores the kinetic characteristics of these reactions.

Keywords

Methane synthesis; Reaction mechanism; Kinetics research; Methanation reaction; Methane decomposition to syngas reaction

甲烷合成反应机理与动力学研究

庄伟

内蒙古汇能煤化工有限公司, 中国 · 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要

在当今全球能源领域, 随着对可持续发展和环境保护的日益重视, 甲烷作为一种重要的清洁能源和化工原料, 其合成反应机理与动力学研究成为了科学界和工业界关注的焦点。甲烷不仅可以直接用作燃料, 还可以通过一系列化学反应转化为高附加值的化学品和合成材料。因此, 深入了解甲烷的合成反应机理, 掌握其动力学特性, 对于提高甲烷的生产效率、优化生产工艺、降低生产成本以及推动相关产业的绿色发展具有重要意义。本文综述了甲烷合成反应的主要机理, 包括甲烷化反应、甲烷分解合成气反应等, 并探讨了这些反应的动力学特性。

关键词

甲烷合成; 反应机理; 动力学研究; 甲烷化反应; 甲烷分解合成气反应;

1 引言

随着全球能源结构的转型和环境保护意识的增强, 甲烷作为一种清洁、高效的能源和化工原料, 其重要性日益凸显。甲烷的合成反应机理与动力学研究不仅关系到甲烷的生产效率和成本控制, 还直接影响到相关产业的绿色发展和可持续性。因此, 深入研究甲烷的合成反应机理, 揭示其动力学特性, 对于推动甲烷合成技术的进步和应用具有重要意义。

2 甲烷合成反应机理

甲烷合成反应机理是理解整个合成过程的基础。甲烷化反应是甲烷合成的主要途径之一, 它涉及氢气、一氧化碳

和二氧化碳等物质在催化剂作用下的转化过程。该反应机理复杂, 包括多个步骤和中间体, 且受催化剂种类、反应温度和压力等条件的影响。^[1] 此外, 甲烷分解合成气反应也是甲烷合成的重要路径, 它利用甲烷在高温和低压条件下的裂解特性, 生成氢气、一氧化碳等气体, 再通过后续反应得到合成气。这些反应机理的研究有助于我们更好地理解甲烷合成的本质和调控策略。

2.1 甲烷化反应的多步骤与中间体探索

甲烷化反应, 作为甲烷合成的主要途径, 其复杂性在于其涉及的多步骤转化过程及一系列关键中间体。这一过程始于氢气、一氧化碳和二氧化碳等原料气体, 在催化剂的作用下, 经过一系列化学转化, 最终生成甲烷和水。这些反应步骤并非线性进行, 而是交织着复杂的平行反应和连串反应, 每一步都可能产生多种中间体, 这些中间体在后续步骤中继续转化, 直至生成最终产物。^[2]

【作者简介】庄伟 (1988-), 男, 中国内蒙古巴彦淖尔人, 本科, 工程师, 从事甲烷合成反应技术研究。

催化剂的种类在甲烷化反应中起着至关重要的作用。不同的催化剂能够显著影响反应的路径、速率和选择性。例如,镍基、钴基和钨基催化剂因其高效的催化活性和良好的稳定性而被广泛研究。催化剂的表面结构、活性位点的分布以及其与反应物的相互作用方式,都是决定反应机理的关键因素。此外,催化剂的预处理条件,如还原温度和时间,也会影响其催化性能,进而影响甲烷化反应的机理。

反应温度和压力同样对甲烷化反应机理产生深远影响。高温通常有利于加速反应速率,但也可能导致催化剂失活或产生不希望的副产物。而压力则影响着反应物和产物的分压,进而影响反应平衡和产物的选择性。因此,优化反应温度和压力条件,是实现高效甲烷合成的关键。

2.2 甲烷分解合成气反应的裂解特性与后续转化

甲烷分解合成气反应是另一种重要的甲烷合成路径,它利用了甲烷在高温和低压条件下的裂解特性。这一过程涉及甲烷分子的断裂,生成氢气、一氧化碳等气体,这些气体随后通过一系列后续反应,如费托合成,可以转化为合成气,进而生产出各种化学品和燃料。

甲烷的裂解特性是其作为合成气原料的基础。裂解反应是一个吸热过程,需要足够高的温度来克服活化能垒。然而,过高的温度也可能导致催化剂的烧结或积碳,从而降低催化活性。因此,选择合适的裂解温度和催化剂,是实现高效甲烷分解的关键。

后续转化步骤的效率同样重要。费托合成是将合成气转化为液体燃料和化学品的常用方法。在这一过程中,合成气在催化剂的作用下,经过一系列加氢、脱水、耦合等反应,生成烃类化合物。催化剂的选择、反应条件的优化以及产物的分离和纯化,都是影响后续转化效率的关键因素。

2.3 反应机理研究的理论意义与实践价值

对甲烷合成反应机理的深入研究,不仅具有理论意义,更具有重要的实践价值。从理论角度来看,揭示反应机理有助于我们理解反应的本质,预测反应的可能路径和产物分布,为催化剂的设计和反应条件的优化提供理论指导。此外,通过比较不同催化剂和反应条件下的反应机理,可以揭示催化剂与反应物之间的相互作用规律,为新型催化剂的开发提供思路。

从实践角度来看,对甲烷合成反应机理的理解有助于优化生产工艺,提高反应效率和产物选择性,降低生产成本。例如,通过调整催化剂的种类、反应温度和压力等条件,可以实现对产物分布的精准调控,从而生产出符合市场需求的高附加值化学品。此外,对反应机理的深入理解还有助于解决生产过程中遇到的催化剂失活、积碳等问题,提高生产过程的稳定性和可持续性。

3 动力学特性分析

动力学特性是描述甲烷合成反应速率和反应条件之间

关系的重要参数。通过动力学研究,我们可以了解不同反应条件下甲烷合成反应的速率变化规律,以及反应物浓度、温度、压力等因素对反应速率的影响。这些动力学数据对于优化反应条件、提高反应效率至关重要。同时,动力学研究还可以揭示反应过程中的能量转移和物质转化规律,为催化剂的设计和反应工艺的优化提供理论依据。

3.1 反应速率与反应条件的关系探究

动力学特性首要关注的是反应速率与反应条件之间的内在联系。在甲烷合成反应中,反应速率是衡量反应进程快慢的重要指标,它直接决定了生产效率的高低。而反应条件,包括反应物浓度、温度、压力等,是影响反应速率的关键因素。^[1]

反应物浓度对反应速率的影响遵循质量作用定律。在甲烷合成反应中,氢气、一氧化碳和二氧化碳等原料气体的浓度越高,碰撞频率越大,形成活化分子的概率也越高,从而加速反应进程。然而,当浓度增加到一定程度时,由于反应物分子间的相互阻碍作用,反应速率的增长速度会逐渐放缓,直至达到一个平台期。

温度对反应速率的影响则更为复杂。一般来说,随着温度的升高,反应物分子的平均动能增加,活化分子所占的比例也随之提高,从而加速反应速率。但过高的温度也可能导致催化剂的失活或产生不希望的副产物,因此需要在保证反应速率的同时,兼顾催化剂的稳定性和产物的选择性。

3.2 能量转移与物质转化的规律揭示

动力学研究不仅关注反应速率的变化规律,还深入探究反应过程中的能量转移和物质转化规律。在甲烷合成反应中,能量转移主要体现在反应热效应和催化剂表面的能量交换上。反应热效应决定了反应过程的热力学可行性,而催化剂表面的能量交换则影响着反应的动力学特性。

物质转化规律则涉及到反应路径的选择和产物的分布。在甲烷合成反应中,由于存在多个平行反应和连串反应,反应路径的选择和产物的分布往往受到多种因素的影响,包括催化剂的种类、反应条件以及反应物的性质等。通过动力学研究,可以揭示这些因素对反应路径和产物分布的影响规律,为催化剂的设计和反应工艺的优化提供理论依据。

3.3 动力学数据在工艺优化中的应用价值

动力学数据在甲烷合成反应的工艺优化中发挥着重要作用。通过测量不同反应条件下的反应速率和产物分布,可以建立反应动力学模型,预测不同操作条件下的反应结果。这些预测结果可以为工艺优化提供有价值的参考信息。^[4]

例如,在催化剂的选择上,可以通过比较不同催化剂在相同反应条件下的反应速率和产物选择性,筛选出性能最优的催化剂。在反应条件的优化上,可以通过调整反应温度、压力和反应物浓度等参数,使反应速率和产物选择性达到最佳平衡。此外,动力学数据还可以用于指导反应器的设计和操作策略的制定,以提高生产效率和降低成本。^[5]

4 实验研究方法

实验研究是甲烷合成反应机理与动力学研究的重要手段。通过设计合理的实验方案,我们可以直接观察反应过程中的现象和变化规律,获取准确的实验数据。实验研究方法包括原位红外光谱、气相色谱、质谱等分析手段的应用,以及催化剂表征和性能测试等。这些实验方法为我们提供了深入了解甲烷合成反应机理和动力学特性的途径。

4.1 原位红外光谱在甲烷合成反应机理研究中的应用

原位红外光谱作为一种非破坏性的分析技术,在甲烷合成反应机理的研究中发挥着至关重要的作用。该技术能够实时监测反应过程中催化剂表面的物种变化,从而揭示反应机理的关键步骤和中间体。

在甲烷合成反应中,原位红外光谱可以捕捉到反应物在催化剂表面的吸附、转化以及产物的脱附等过程。通过对比不同反应条件下红外光谱的变化,可以推断出反应路径和中间体的存在形式。例如,当氢气和一氧化碳在催化剂表面吸附时,会形成特定的红外吸收峰,这些吸收峰的位置和强度可以反映出吸附物种的化学键状态和数量。

4.2 气相色谱与质谱在甲烷合成反应动力学研究中的应用

气相色谱与质谱联用技术(GC-MS)是甲烷合成反应动力学研究中不可或缺的分析手段。该技术能够高效、准确地分离和鉴定反应产物,为动力学研究提供可靠的实验数据。

在甲烷合成反应中,气相色谱可以用于分析反应产物的组成和分布。通过选择合适的色谱柱和检测器,可以实现对不同产物的有效分离和定量检测。同时,气相色谱还可以用于监测反应过程中反应物浓度的变化,从而计算出反应速率和转化率等动力学参数。

质谱技术则能够提供产物分子的结构和组成信息。通过质谱分析,可以确定产物的分子式、结构式以及同位素分布等,这对于理解反应机理和产物选择性具有重要意义。此外,质谱技术还可以用于研究反应过程中的同位素效应,从而揭示反应过程中的能量转移和物质转化规律。

4.3 催化剂表征与性能测试在甲烷合成反应研究中的重要性

催化剂的表征与性能测试是甲烷合成反应研究中不可或缺的一部分。通过催化剂的表征,可以了解催化剂的组成、结构、形貌以及活性位点的分布等信息,这对于理解催化剂的催化机理和优化催化剂的设计具有重要意义。

催化剂的表征方法包括X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、X射线光电子能谱(XPS)等。这些技术能够揭示催化剂的晶体结构、形貌特征以及表面化学性质等信息。通过对比不同催化剂的表征结果,可以揭示出催化剂性能差异的原因,并为催化剂的优化提供指导。

5 结论

综上所述,甲烷合成反应机理与动力学研究是推动甲烷合成技术进步和应用的关键。通过深入研究反应机理、揭示动力学特性、应用实验研究和计算模拟方法,我们可以更好地理解甲烷合成的本质和调控策略,为优化反应条件、提高反应效率、降低生产成本以及推动相关产业的绿色发展提供有力支持。未来,随着科学技术的不断进步和创新,我们有理由相信甲烷合成反应机理与动力学研究将取得更加显著的成果和突破。

参考文献

- [1] 刘金红,刘志军,黄艳芳,姚虎卿.甲醇气相羰化合成醋酸的反应机理及本征动力学[J].化学反应工程与工艺,2011(5): 418-424.
- [2] 王希奋,崔富忠,香承志,张永锋.煤制天然气甲烷合成系统出现的问题及对策[J].化肥设计,2022(3): 37-43.
- [3] 程伟.二氟一氯甲烷合成装置中三氟甲烷的精制回收工艺研究[J].有机氟工业,2022(2): 23-25.
- [4] 陈蓝天,展江宏,韦晓奇,加尔肯,夏宣.合成气完全甲烷化工业催化剂的开发及工业试验[J].氮肥与合成气,2023(5): 1-5.
- [5] 阮鹏,杨润农,林梓荣,孙永明.甲烷催化部分氧化制合成气催化剂的研究进展[J].化工进展,2023(4): 1832-1846.

Development History and Current Status Analysis of Polyisoprene Rubber Industry

Binbin Zhang Jiankang Wang

Shaanxi Shanmei Xiechuangda New Materials Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 715599, China

Abstract

Polyisoprene rubber, owing to its molecular structure highly analogous to natural rubber, has emerged as a strategic and core substitute material. The current global industrial landscape and technological routes exhibit significant divergence. This paper systematically reviews the capacity distribution of leading enterprises worldwide and the characteristics of their technical routes, while comprehensively comparing the performance of three major catalytic systems: titanium-based, lithium-based, and conventional rare-earth-based. A multidimensional analysis—covering policy, market, and technology—is conducted on the industrial development status of polyisoprene rubber in China. Finally, recommendations for the industry's advancement are proposed, including: Prioritizing industrial chain integration to reduce production costs; Optimizing production processes to enhance product quality; Intensifying R&D efforts in novel catalysts to strengthen core competitiveness.

Keywords

Polyisoprene rubber, cis-1,4-structure, Catalytic systems, Industrialization

聚异戊二烯橡胶产业发展历程和现状分析

张彬彬 王健康

陕西陕煤协创达新材料有限公司, 中国·陕西 渭南 715599

摘 要

聚异戊二烯橡胶凭借与天然橡胶高度近似的分子结构, 已成为战略性的核心替代材料。当前全球产业格局与技术路线呈现显著分化。本文系统梳理了国内外头部企业产能分布及其技术路线特性, 深度对比了钛系、锂系和传统稀土系三大催化体系的综合性能。针对我国聚异戊二烯橡胶的产业发展现状进行了政策、市场和技术等多维度分析, 并最终给出重视产业链整合降低生产成本、优化生产工艺提高产品质量、加大新型催化剂研发力度提高核心竞争力等行业建议。

关键词

聚异戊二烯橡胶; 顺1,4-结构; 催化体系; 工业化

1 引言

聚异戊二烯橡胶 (IR) 是一种通过化学合成方法制备的高分子弹性体, 其核心价值在于成功模拟了天然橡胶 (NR) 的关键分子结构——顺 1,4- 结构 (cis-1,4), 故又称“人造天然橡胶”。IR 的化学本质是由异戊二烯单体聚合而成的长链聚合物, 当前工业生产主要采用钛系 (Ti)、锂系 (Li) 和稀土钕系 (Nd) 催化剂, 生产出 cis-1,4 结构含量在 92-98% 之间的异戊橡胶, 使其微观构型与天然橡胶极为接近^[1,2]。高 cis-1,4 结构含量赋予了 IR 高弹性、低滞后生热、良好的拉伸强度与耐磨性、优异的低温韧性以及易加工性等性能^[3]。

与 NR 相比, IR 在其未填充胶的某些力学性能 (如纯胶强度、撕裂强度) 有时略逊于优级 NR, 且 IR 的生产成

本通常高于 NR, 这在一定程度上限制了其更广泛的应用。但 IR 在高纯度与一致性方面具有显著优势。IR 完全不含 NR 中存在的蛋白质等生物杂质, 彻底避免了由此引发的过敏风险^[4], 同时具有批次间性能稳定、颜色纯净浅淡等优势。这些显著优势使得 IR 成为医用制品领域 (如避孕套、医用手套、导管等) 天然橡胶的最佳替代品^[5]。此外, 凭借其低生热和高弹性, IR 也广泛应用于高性能轮胎 (特别是胎侧、赛车胎、飞机胎)、耐疲劳机械制品 (减震件、密封件、胶辊)、日用及体育用品以及高端粘合剂等领域^[6,7]。

IR 凭借其“合成天然橡胶”的特质, 展现出独特且不可比拟的价值。其本质是人类通过化学合成精准复制并优化天然材料特性的杰出范例。NR 中 cis-1,4 结构含量在 98% 以上, 比目前一般合成的 IR 的 cis-1,4 结构含量高, 这也是造成两者性能差异的核心因素。因此, IR 中 cis-1,4 结构含量的高低成为行业评判胶品优劣的关注重点。

【作者简介】张彬彬 (1993-), 男, 中国甘肃庆阳人, 硕士, 从事烯烃催化聚合工艺研究、异戊橡胶性能研究。

2 国内外聚异戊二烯橡胶的发展历程和生产现状

2.1 发展历程

全球 IR 大规模工业化生产开始于上世纪 60 年代。1954 年美国 goodyear 公司采用 Ti 系催化剂首次合成 IR，其 cis-1,4 结构含量达到 98% 左右；1955 年美国 firestone tire & rubber 公司采用 Li 系催化剂合成 IR，其 cis-1,4 结构含量约 92%，该公司于 1988 因经营困难被日本普利司通公司收购。1960 年，美国 shell 公司建成 3.6 万吨 / 年 Li 系 IR 生产装置，荷兰、前苏联、意大利、法国等国后续相继实现了 IR 工业化生产^[8,9]。

我国 IR 产业发展较晚，20 世纪 70 年代中国科学院长春应用化学研究所率先开展了稀土系异戊橡胶，1975 年完成中试试验，cis-1.4 结构含量超过 95%^[10]。我国工业起步较晚，异戊二烯来源和工业化生产技术相对薄弱等问题制约了 IR 的工业化进程^[11]。2010 年茂名鲁华泓锦化工有限公司建成了 1.5 万吨 / 年 IR 生产装置，标志着我国实现了 IR 工业化生产，自此我国实现了所有通用合成橡胶的自主化工业生产。之后几年时间，我国聚异戊二烯橡胶迎来了快速发展，中石化燕山石化、抚顺伊科斯、新疆天利石化、山东神驰等公司相继建成了异戊橡胶工业化生产线，2015 年我国异戊橡胶生产产能达到 25 万吨 / 年以上，成为仅次于俄罗斯的世界第二大异戊橡胶生产国^[12]。

截止 2024 年，全球 IR 工业化生产工艺基本延续了 Ti 系、Li 系和 Nd 系，其他一些催化体系，如铁系（Fe）^[13]、新型稀土系（Y）^[14] 等，还停留在研究开发阶段，因技术或经济性问题尚未实现工业化^[15]。不同催化体系各具特点，比较如表 1 所示。

表 1. 异戊橡胶不同催化体系特点比较

催化体系	Ti-IR	Li-IR	Nd-IR
主催化剂	四氯化钛	烷基锂	环烷酸钕盐
Cis-1,4(%)	96-98	90-93	> 94
优点	顺式结构含量高	分子量分布窄；灰分低，洁净度高	顺式结构含量较高；凝胶含量极低；灰分低
缺点	分子量分布宽；凝胶含量高；灰分较高	顺式结构含量低；聚合条件对原料要求苛刻	催化剂溶解性较差；易引起橡胶变色，浅色制品应用受限

Ti-IR 采用配位溶液聚合方式，顺式结构含量可达 98%，但缺陷在于催化剂用量较大、分子量分布宽、凝胶含量高、灰分较高，另外较高的门尼粘度导致合成过程容易出现严重的内挂胶^[16]；Li-IR 采用阴离子溶液聚合方式，相比于 Ti-IR，优点在于引发剂用量少、分子量和分子结构可设计性强，凝胶含量低、单程转化率高，灰分较少，但顺式结构含量基本不超过 93%，且催化剂敏感度高，易变质失活，

对物料纯度有着严格要求^[17,18]，Li-IR 在物理机械性能方面较差，其难以大量应用在轮胎等行业，应用领域受到较大限制，目前异戊胶乳主要是 Li 系异戊橡胶制备^[19,20]；Nd-IR 采用配位溶液聚合，由我国率先开发，该催化体系催化活性高，分子量分布窄，凝胶含量低、灰分较少，合成过程不易出现挂胶及堵管问题，但常规聚合条件下，顺式结构含量低于 Ti-IR，基本在 94-97% 之间，且 Nd 系催化聚合得到的 IR 中的变价金属易引起胶料变色，浅色制品应用受限^[21]。

2.2 产业现状

2009 年之前，全球 IR 生产能力约 70 万吨 / 年，随着我国 2010 年实现异戊橡胶工业化后，全球 IR 产能迅速攀升至 100 万吨 / 年以上^[22]，后因经济性不高、天然橡胶市场冲击等问题，在 2017 年后全球 IR 产能出现下降趋势，主要是中国市场变化较大。截止 2024 年，全球范围内 IR 产能整体维持相对稳定，主要生产国有俄罗斯、美国、日本、中国、南非等，全球产能约 83 万吨 / 年，具体产能分布如表 2 所示。

表 2. 世界异戊二烯橡胶企业生产能力一览表

地区	企业名称	产能(万吨)	催化体系
美国	固特异轮胎和橡胶公司	9	Ti
	Kraton 聚合物公司	2.5	Li
俄罗斯	Kauchuk sterlitamak 公司	14.4	Ti 和 Nd
	Nizhnekamskneftekhim 公司	25	Ti
	Togliattikauchuk 公司	9	Ti 和 Nd
日本	合成橡胶公司	4.1	Ti
	瑞翁公司	4.0	
	可乐丽公司	0.4	
中国	新疆天利实业股份有限公司	3	Nd
	广东鲁华化工有限公司	1.5	Nd
	抚顺伊科斯新材料有限公司	4	Nd
	中石化北京燕山分公司	3	Nd
	山东神驰石化有限公司	3	Nd
南非	Karbochemg 公司	0.4	
合计	83.3		

俄罗斯当前仍然是全球最大的 IR 生产国，其产能占据全球的 58% 左右。其次为中国，产能 14.5 万吨 / 年，占全球的 17% 左右。美国、日本及非洲，年度总产能约 20.4 万吨，共占全球的 25% 左右。

我国 IR 产业在 2010 -2015 年迎来了快速发展，产能一度达到 25 万吨 / 年以上，随后受天然橡胶价格一路走低的冲击和国内 IR 同质化竞争严重导致经济性不佳等问题，部分生产企业纷纷寻求转型，选择转产 SIS 或长期停产，截止 2025 年国内 IR 产能仅剩 14.5 万吨，但实际开工率极低，有效产能仅 8.5 万吨 / 年。

从全球流通货源来看，主要以俄罗斯、中国和日本的货源为主。而全球 IR 的消耗也基本集中在欧洲和亚洲地区，约占到全球 70% 的消费量，北美及南美地区消费量约占全球的 30%。我国的 IR 市场货源基本来源于俄罗斯、日本和

本土生产，其中进口量约占到消费量的 50% 以上，近五年年均表观消费量在 8 万吨 / 年左右。我国近五年 IR 市场情况如表 3 所示。

表 3. 我国异戊橡胶市场消费量统计 单位：万吨 / 年

年份	产能	产量	进口量	主要进口国	出口量	表观消费量
2020	20.0	4.09	4.60	俄罗斯：3 万吨； 日本：1.15 万吨	0.15	8.57
2021	20.0	3.66	3.77	俄罗斯：2.2 万吨； 日本：1 万吨	0.46	7.27
2022	14.5	4.17	4.82	俄罗斯 3.4 万吨； 日本：0.7 万吨	1.56	8.08
2023	14.5	4.11	6.56	俄罗斯：5.91 万吨； 日本：0.63 万吨	2.96	7.95
2024	14.5	4.15	9.46	俄罗斯：8.72 万吨； 日本：0.64 万吨	4.87	8.86

2020-2024 年期间，我国异戊橡胶产能进一步降低，目前仅新疆天利、广东鲁华、抚顺伊科思、燕山石化和神驰石化五家公司保留有异戊橡胶生产装置，合计产能 14.5 万吨 / 年，其中燕山石化和神驰石化长期处于停车状态。我国异戊橡胶进口量总体呈现上升趋势，俄罗斯和日本依然是主要进口国，从美国、巴西等国也有少量进口。受全球公共卫生事件和地区冲突等因素影响，在主要进口国中，俄罗斯产品比重大幅增多，日本产品比重呈逐年降低趋势，日本近年将主要产品供给给了欧洲地区。同时日本产品的价格远高于俄罗斯产品，这也导致国内部分市场被俄罗斯产品抢占。而我国自产的异戊橡胶年产量基本维持在 4 万吨左右，经与贸易商了解，出口量出现大幅上升的主要原因是从俄罗斯的部分进口产品转出口。因此，我国近五年的异戊橡胶市场整体平稳，国内消费量长期维持在 8 万吨 / 年左右。

3 国内聚异戊二烯橡胶行业现状分析

3.1 政策分析

我国异戊橡胶行业正处于“双碳”目标与环保法规升级的双重政策框架下。一方面，“碳达峰、碳中和”国家战略(2030/2060 目标)推动高耗能产业向绿色化、集约化转型，工业园区成为减排核心载体。政策明确要求石化化工产业入园集聚发展，异戊橡胶作为石化下游产业，面临产能整合、低碳技术升级的迫切压力。另一方面，全国范围实施的重型柴油车国六排放标准(2021 年 7 月生效)直接刺激了重卡销量短期激增，拉动全钢胎配套需求，进而传导至异戊橡胶等上游原材料领域，形成阶段性市场利好。

3.2 市场分析

我国 IR 行业市场表现承压，其主要压力依然为 NR 所带来的价格竞争力。我国 IR 主要用来替代 NR 使用，但近年我国天然橡胶供应充足，价格偏低，二者平均价差超过 3000 元 / 吨，对 IR 使用持续性产生较大冲击。当前轮胎、

胶管、胶带、鞋材等依然是 IR 的主要应用领域，均对产品价格表现敏感，其他如添加剂及粘结剂等领域的用量很少且发展相对缓慢。

另一方面，国产 IR 产品受到进口牌号的竞争。由于进口 IR 先入为主，部分下游配方多采用进口产品，当内外盘价差不明显时，下游更换配方的意愿不强，国产 IR 被迫选择低价竞争导致企业整体利润率偏低。其次，进口 IR 产品性能整体要优于国产 IR，故国产 IR 处于竞争劣势，产品性能仍需提高。

3.3 技术分析

异戊橡胶的性能主要受其 cis-1,4 结构含量的影响，而 cis-1,4 结构含量主要由催化剂决定，在传统催化体系中表现出 Ti 系 >Nd 系 >Li 系。Ti 系因其较高的 cis-1,4 结构选择性已被行业普遍认可，但其较高的凝胶含量等问题也是普遍存在的。我国普遍采用 Nd 系催化体系生产异戊橡胶，虽有其独特的优势，但 cis-1,4 结构含量明显不及 Ti 系，近年来各大高校、研究机构在提高稀土系催化剂 cis-1,4 结构选择性方面做了大量工作，取得了一系列成果^[23]，使得 Nd 系催化体系的 cis-1,4 结构含量可媲美 Ti 系，同时保持极低的凝胶含量和较高的聚合效率，可以说综合了现有催化体系的优势，但新技术的产业化尚需较长的时间，同时新技术的成本必然处于高位，经济性短期内难以与传统催化体系形成竞争。

4 发展建议

我国天然橡胶受地理位置限制，对外依存度较高，而异戊橡胶作为天然橡胶的最佳替代品，在保障国家橡胶战略资源安全方面具有重要地位。本文综合评述了异戊橡胶的发展历程、不同催化体系的特点分析，并对我国异戊橡胶行业现状进行了不同维度的分析。

我国异戊橡胶行业整体表现出以下特点：（1）行业话语权低。异戊橡胶装置开工率较低，大部分用途为天然橡胶替代品，当前天然橡胶价格偏低，货源充足，故针对替代而言，异戊橡胶话语权偏弱；（2）技术 / 成本劣势。国内异戊二烯产品品质普遍低于进口，难以实现高端产品的有效替代；上游异戊二烯单体价格偏高，异戊橡胶生产企业成本承压严重。（3）投资吸引力低。现有装置闲置率较高，尚未出现变革性技术，短期内未有新建装置投入，投资吸引力低。

未来，进一步提升异戊橡胶的产品性能，使其媲美甚至超过高牌号天然橡胶依然是行业追求的目标。国内企业一方面要通过产业链整合、延伸等方式充分控制生产成本，与天然橡胶缩小价差，从而扩大异戊橡胶的市场接受度；另一方面，要优化生产工艺，提高产品稳定性，逐步改变下游企业对进口产品的依赖，实现高端产品的国产化替代。而当前异戊橡胶的溶液聚合生产工艺已趋于成熟，因此，开发高 cis-1,4 结构定向性、高活性、高效率、低成本的催化剂成为

研究开发的重中之重,也是未来我国异戊橡胶行业提高核心竞争力的不二选择。

参考文献

- [1] 王曙光,宗成中,王春英.顺式-1,4-聚异戊二烯橡胶研究进展[J].中国橡胶, 2007, 23(005):37-40.DOI:10.3969/j.issn.1009-5640.2007.05.014.
- [2] 项曙光,王继叶.稀土异戊橡胶催化剂工业技术进展[J].青岛科技大学学报:自然科学版, 2016, 37(4):5.DOI:10.16351/j.1672-6987.2016.04.001.
- [3] 赵姜维,张杰,张萍,等.国产稀土异戊橡胶的结构和性能[C]//中国化工学会石油化学学术年会.中国化工学会;中国石化集团公司资产经营管理有限公司, 2014.
- [4] 刘兴衡.低蛋白质天然胶乳的研究开发与市场前景[J].中国橡胶, 2004, 20(6):3.DOI:10.3969/j.issn.1009-5640.2004.06.002.
- [5] 高强民.异戊橡胶医用材料的制备及性能研究[D].青岛科技大学,2023.
- [6] 牛忠福,辛欣,郎秀瑞,等.高性能轮胎用聚异戊二烯橡胶的研究进展[J].轮胎工业, 2018(9):8.DOI:CNKI:SUN:LTGY.0.2018-09-003.
- [7] 赵姜维,张杰,李传清,等.稀土异戊橡胶在载重轮胎面中的应用[J].轮胎工业, 2015, 35(2).
- [8] 崔小明.聚异戊二烯橡胶生产技术进展及国内外市场分析(上)[J].上海化工, 2010(03):42-45.DOI:CNKI:SUN:SHHG.0.2010-03-018.
- [9] 崔小明.聚异戊二烯橡胶生产技术进展及国内外市场分析(下)[J].上海化工, 2010(4):4.DOI:10.3969/j.issn.1004-017X.2010.03.009.
- [10] 崔小明.我国聚异戊二烯橡胶生产技术进展[J].橡胶科技, 2019, 17(11):7.DOI:CNKI:SUN:XJKJ.0.2019-11-001.
- [11] 李江利,任海伦.异戊二烯生产工艺技术研究进展[J].弹性体, 2011, 21(1):7.DOI:10.3969/j.issn.1005-3174.2011.01.018.
- [12] 史工昌,王锋,梁滔,等.聚异戊二烯橡胶生产状况及发展分析[J].甘肃科技, 2015, 31(1):3.DOI:10.3969/j.issn.1000-0952.2015.01.010.
- [13] 材料工程.铁络合物设计合成及其催化异戊二烯聚合研究[D].中国科学院大学,2019.
- [14] 王子川,刘东涛,崔冬梅.稀土金属有机配合物催化共轭双烯烃高选择性聚合[J].高分子学报, 2015.DOI:CNKI:SUN:GF XB.0.2015-09-001.
- [15] 缪淑琴,谢桂辉.异戊二烯的生产技术现状及市场分析[J].2020.[狄仕海,赵鹏飞.异戊橡胶生产技术的发展趋势[J].化工管理, 2022(3):3.
- [16] 汪昭玮,于俊伟,刘晓暄.钛系催化剂合成聚异戊二烯橡胶的研究进展[J].化工进展, 2014, 33(11):6.DOI:10.3969/j.issn.1000-6613.2014.11.020.
- [17] 程珏,何晨凤,金关泰.异戊二烯阴离子聚合机理的研究[J].弹性体, 1998, 8(2):5.DOI:CNKI:SUN:TXTZ.0.1998-02-002.
- [18] 贺小进,石建文.锂系异戊二烯橡胶研究进展[J].化工新型材料, 2009(8):3.DOI:CNKI:SUN:HGXC.0.2009-08-010.
- [19] 李炫.锂系聚异戊二烯橡胶的合成及其胶乳的研制[D].大连理工大学,2012.
- [20] 朱永康.Cariflex公司计划在新加坡建设世界最大聚异戊二烯胶乳工厂[J].橡胶科技, 2022, 20(12):618-618.
- [21] 侯红霞,陈晓丽,苏忠魁,et al.磷酸酯钨催化体系对异戊二烯聚合的影响[J].合成橡胶工业, 2015, 38(6):5.DOI:10.3969/j.issn.1000-1255.2015.06.005.
- [22] 崔小明.国内外聚异戊二烯橡胶市场分析[J].橡胶科技, 2018, 16(12):7.DOI:10.3969/j.issn.2095-5448.2018.12.001.
- [23] 姚臻,张景,屠宇侠,等.高顺式聚异戊二烯橡胶的研究进展[J].化工进展, 2015, 34(1):7.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2015.01.028.

Application of special standby power automatic switching mode in power supply system of liquid ammonia security ice machine

Yongmei Pu

Yunnan Dawei Ammonia Co.,Ltd., Qujing, Yunnan, 655338, China

Abstract

The synthetic ammonia products are often stored in the form of low pressure and low temperature liquid ammonia in the storage tank. When the synthetic ammonia device stops, the ammonia freezing system will also be stopped. In order to maintain the pressure and low temperature state of the storage tank, the security ice machine must be put in, so the power supply stability of the security ice machine is extremely important. This paper expounds that the security ice machine increases the emergency power generation system and applies the special self-switching mode to improve the power supply reliability of security ice machine.

Keywords

security ice machine, stable power supply, emergency power generation, Standby power automatic switching

特殊备自投方式在液氨保安冰机供电系统中的应用

浦咏梅

云南大为制氨有限公司, 中国·云南 曲靖 655338

摘 要

合成氨成品常采用低压低温的液氨形式储存在储罐中, 在合成氨装置停车时, 氨冷冻系统也随之停运, 为维持储罐的压力及低温状态, 须投入保安冰机, 因此保安冰机的供电稳定性极为重要。本文阐述了保安冰机电源增加应急发电系统并应用特殊备自投方式, 提高保安冰机的供电可靠性。保安冰机的型式主要有往复式、离心式和螺杆式, 本文以某合成氨厂的两台螺杆式压缩机为例, 介绍保安冰机供电可靠性升级方案及实施效果, 为同类型保安冰机的供电系统升级提供参考。

关键词

保安冰机; 供电稳定; 应急发电; 备自投

1 引言

氨是生产磷铵类含氮肥料及尿素的基本原料^[1], 合成氨厂通常以液态氨的形式储存, 一般选择低温常压^[1]储存。对于低温储存的液氨, 要维持其储罐内低温状态, 就要选择合适的冰机来制冷保安^[3]。合成氨正常生产状态下低温氨罐有常温液氨进料, 工艺流程中通过启动保压冰机的方式保证储罐不会超压; 在没有常温液氨进料的时候, 由于低温氨罐自身及相关液氨管道和外界的热量交换, 部分液氨吸热气化使储罐内的气相压力升高, 如不采取措施维持液氨储罐的压力, 就可能导致储罐超压爆炸^[2]; 实际中通常采用制冷量较小的保安冰机来维持液氨储罐内的气相压力^[3]; 保安冰机能在合成氨生产装置停车或故障时用来保障液氨储存的安全性, 可见保安冰机在液氨储存中的重要性, 提高保安冰机的

供电可靠性尤为必要。

2 升级前保安冰机电源配置及弊端

A#螺杆冰机和B#螺杆冰机电源采用单电源供电方式, 分别引自总降 6kV I 段母线和 II 段母线, 由 1DL 断路器和 2DL 断路器分别控制。总降压站正常供电状态下, 两台冰机均能保证正常供电; 此种供电方式下, 存在如下两个弊端:

(1) 当其中一段 6kV 母线供电异常时, 就只能保证一台冰机的正常运行, 导致单机运行, 可靠性降低, 此时一旦出现另一回路电源供电异常或电机运行异常情况时, 两台冰机均不能正常运行, 给液氨的贮存造成威胁。

(2) 当外电网供电出现异常导致全厂停电的情况时, 两段 6kV 母线均停电, 两台保安冰机均失去供电电源, 不能保障液氨的安全贮存。

可见, 此种供电方式可靠性差, 不能保证保安冰机的持续稳定运行。

【作者简介】浦咏梅(1982-), 女, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事继电保护、高压试验管理研究。

3 保安冰机供电可靠性提高的措施及方案

3.1 保安冰机供电可靠性提高的措施

针对上述保安冰机供电系统存在的弊端,提高供电可靠性及灵活性,提出如下改进措施:

(1)改单电源供电方式为双电源互为备用的供电方式,在保安冰机供电系统增加备用电源自动投入系统,在任一供电回路出现异常运行时,保障两台冰机均不失去供电电源。

(2)为防止电网系统出现供电异常,两回电源回路同时失电,在冰机供电系统中增加应急发电系统,即增设柴油发电机装置;增加的柴油发电机系统应能够根据冰机供电情况自动启动,当电网侧电源异常失压后,保证两台冰机有可靠的备用电源,保障冰机的正常运行,起到保安作用。

3.2 保安冰机供电可靠性升级方案

3.2.1 升级电气主接线形式

图2所示为保安冰机电气一次主接线升级后的接线示意图,图中虚线框内的部分为本次升级改进方案中增加的一次设备。新增的一次设备以配电小室的方式集中安装,采用单母线分段接线的方式;配电小室与总降压站及螺杆冰机以电缆方式连接。

新增的柴油发电机通过6DL断路器接于新增6kV II段母线上,实现应急电源功能;在新增的6kV分段5DL断路器柜处安装备用电源自动投入装置,实现冰机供电电源的自动切换。

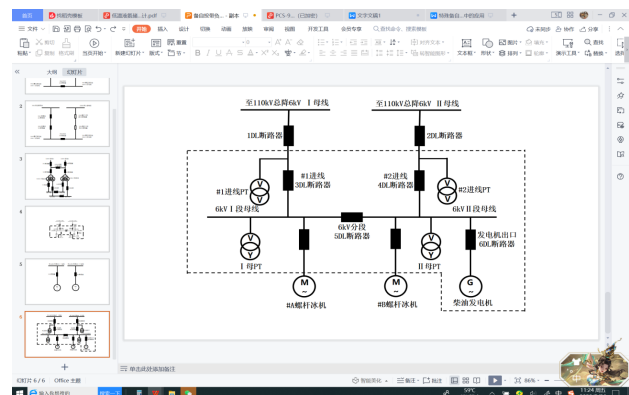


图2 改进后保安冰机一次供电接线示意图

3.2.2 特殊备自投逻辑的应用

本次冰机供电电源改进的核心除一次主接线的大幅改动外,主要的核心技术是采用特殊的备自投逻辑,实现在任何异常工况下冰机电源不间断。此次工程采用PCS-9651型备用电源自动投入装置,备自投逻辑与厂家协商论证后,进行了特殊定制,以满足本次升级需要,主要实现以下四种备自投功能。

正常运行方式下,如图2所示,优先采用进线1经3DL断路器为#A螺杆冰机提供电源、进线2经4DL断路器为#B螺杆冰机提供电源的供电方式;其次为任意一回进线异常时,单回电源同时带两台冰机的供电方式;再次为两

回进线均异常时,启动应急柴油发电机,提供保安冰机应急供电。备自投的动作逻辑也是按照上述优先级进行设定。

(1) 分段在分位时进线1失压时电源切换方式

当进线1因故障或其他原因失压后,6kV I段母线失压,#A螺杆冰机失去电源,此时备自投装置检测到6kV II段母线有压,即启动备自投逻辑,跳开进线1断路器3DL,装置检测到断路器3DL跳开后,快速合上6kV分段5DL断路器,实现进线2同时带6kV I段母线及II段母线运行的方式,实现#A螺杆冰机的持续供电。在备自投装置中由“备自投方式1”控制字控制投退。

(2) 分段在分位时进线2失压时电源切换方式

当进线2因故障或其他原因失压后,6kV II段母线失压,#B螺杆冰机失去电源,检测6kV I段母线有压时,启动备自投逻辑,实现与备自投方式1类似的动作,实现进线1同时带6kV I段母线及II段母线运行的方式。在备自投装置中由“备自投方式2”控制字控制投退。

(3) 分段在分位时进线1、2均失压时电源切换方式

当进线2因故障或其他原因失压后,6kV II段母线失压,#B螺杆冰机失去电源,检测6kV I段母线也无压时,备自投装置发“启动柴油发电机”出口命令,在收到“柴油发电机启动完成”信号后,在确认进线1、进线2、I母、II母均无压,且2DL确已跳开后,经整定的延时合柴油发电机开关,实现柴油发电机带II母运行。在备自投装置中由“备自投方式2”控制字控制投退。

(4) 分段在合位时进线1、2均失压时电源自动切换方式

进线1(或进线2)带双母运行,分段5DL断路器在合闸位置,柴油发电机出口6DL在分位。当I母、II母因故障均失压后,备自投装置根据以下三种情况完成不同的电源切换,三种不同切换方式,在备自投装置中由“备自投方式3”控制字控制投退。

第一种方式:失压前为进线1带双母运行,当I母、II母因故障均失压后,如进线2有压,则备自投跳开3DL,合4DL,实现进线2带双母运行;切换后的运行方式与图3所示相同。

第二种方式:失压前为进线2带双母运行,当I母、II母因故障均失压后,如进线1有压,则备自投跳开4DL,合3DL,实现进线1带双母运行;切换后的运行方式与图4所示相同。

第三种方式:若失压时两条进线、两组母线均为无压,则跳开所有在合位的进线断路器,备自投装置发“启动柴油发电机”出口命令,在收到“柴油发电机启动完成”信号后,合柴油发电机出口6DL断路器,最终实现柴油发电机带双母运行。

综上所述,此次备自投方案改进后,备自投方式分为三大类型,共计六种备自投方式,保障冰机在各种运行工况下均能不间断供电,达到了提高供电可靠性的目标。

4 备自投装置定值设置及切换可靠性验证

4.1 备自投定值设置

备自投功能能否实现既定的功能，需要合理设置备自投装置的内部整定定值，且需要现场验证后方可投入运行。表 1 为本次工程所使用的备自投装置整定值。

4.2 备用电源自投可靠性验证

备自投装置定值设置完成后，投入运行前，需要通过

实际模拟试验验证动作逻辑的正确性。工程实际中，除要进行投运前的静态模拟外（用继电保护测试仪等模拟），还应在线路及母线带运行电压后进行实际动作模拟试验。本工程中，在新增的一次设备具备带电运行条件后，6kV I、II 段母线带电运行，通过断开 1DL、2DL 断路器的方式模拟进线及母线失压，验证六种备自投方式的实际动作情况，通过验证，本次工程备自投功能完全正确，具备投运条件。

表 1 备自投装置整定值

序号	定值名称	整定值	序号	定值名称	整定值
1	备自投充电时间	15s	9	合进线 2 延时	0.2s
2	有压定值	70V	10	合母联开关延时	0.2s
3	无压启动定值	40V	11	合柴油发电机开关延时	0.2s
4	无压合闸定值	30V	12	自投方式 1 投入	1
5	进线无流定值	0.05A	13	自投方式 2 投入	1
6	跳进线 1 开关延时	1.0s	14	自投方式 3 投入	1
7	跳进线 2 开关延时	1.0s	15	允许柴油发电机自投	1
8	合进线 1 延时	0.2s	16	合后位置接入	1

5 结论

液氨贮存罐保安冰机供电系统应用特殊方式备自投进行升级改造后，冰机供电电源更加可靠；增加应急发电系统，降低了保安冰机对电网供电系统的依赖程度，提高了保安冰机的运行稳定性，使液氨的储存更加安全。特殊备自投方式在保安冰机供电系统升级改造中的成功应用，为多电源供电系统提高运行可靠性提供了成功的案例，为之后的供电电源

系统升级改造总结了经验。

参考文献

[1] 马朝玲.液氨贮存设计分析 [J]. 硫磷设计与粉体工程, 2004(1):20-22.

[2] 潘旭海. 基于模拟计算的液氨储罐泄漏潜在危险性分析 [J]. 石油化工高等学校学报, 2006, 19(1):64—67.

[3] 樊国帅, 叶陈.低温液氨储罐的冰机选型设计 [J]. 广州化工, 20

Selection and Optimization Design of Combustible Gas Detection Instruments for Natural Gas Stations

Cheng Liu Zengzhan Zhang

Northwest Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 710021, China

Abstract

In response to the impact of low temperature and high humidity environment in Weinan area of Shaanxi Province, China on the combustible gas detection system of natural gas stations, research is conducted on the selection of detection instruments and system optimization. By comparing the performance differences between catalytic combustion and infrared absorption instruments in detail, a detection network layout method based on a three-dimensional spatial coverage model is proposed. According to practical applications, the modified methane detection response time is shortened to 0.8-2.0 seconds, the system false alarm rate is reduced to 0.027% -0.355%, and maintenance efficiency is improved by 40% in extreme weather conditions. In the future, it is necessary to further explore intelligent diagnosis technology based on edge computing, so as to achieve more accurate leakage early warning and independent maintenance.

Keywords

natural gas station; Combustible gas detection; Instrument selection; System optimization; security operation

天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计

刘程 张增战

国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司, 中国·陕西 渭南 710021

摘 要

针对中国陕西渭南地区低温高湿环境对天然气站场可燃气体检测系统的影响, 开展检测仪表选型与系统优化研究。通过详细对比催化燃烧式与红外吸收式仪表的性能差异, 特提出基于三维空间覆盖模型的检测网络布局方法, 根据实际应用表明: 改造后甲烷检测响应时间缩短至0.8-2.0秒, 系统误报率降低至0.027%-0.355%, 在极端天气下维护效率提升40%。未来还需进一步探索基于边缘计算的智能诊断技术, 以便实现更精准的泄漏预警与自主维护。

关键词

天然气站场; 可燃气体检测; 仪表选型; 系统优化; 安全运维

1 引言

随着我国天然气消费量持续增长, 站场安全监测系统面临严峻挑战。潼关压气分输站是国家管网集团西北公司所辖西二线站场的重要站场, 该区域处于秦岭山脉和太行山脉的夹角处并临近黄河。受黄河和地势的影响该区域的风力最高达到 7 级以上而且时间较长, 明显高于中部地区其他区域。其所在区域冬季极端低温 (-15°C) 与夏季高湿 ($\text{RH} > 85\%$) 环境对检测系统可靠性提出特殊要求^[1] 并且现有检测系统存在响应延迟 (最大 4.2 秒)、误报率高 (暴雨天气 0.275%) 等问题, 难以满足 GB 50493-2019 规范要求。

2 天然气站场可燃气体检测仪表选型研究

陕西渭南地区冬季低温多湿的气候环境对天然气站场可燃气体检测仪表的选型提出了特殊要求。国家管网集团西北公司运营的潼关压气站地处关中平原东部, 冬季平均温度 -5°C 至 3°C , 陕西渭南冬季寒潮频发, 阵风常达 7 级以上, 低温高湿叠加强风环境对天然气站场可燃气体检测仪表的防护等级、抗振性能及防爆密封性提出更高要求。此类工况易导致检测仪表出现冷凝水积聚、传感器漂移等问题, 直接影响泄漏监测的可靠性。同时要求检测系统同时具备快速响应能力和广域覆盖特性^[2]。

激光检测与点型红外检测在渭南站场应用中优势显著: 激光检测采用 TDLAS 技术, 具有高选择性、抗交叉干扰能力, 响应速度 ≤ 3 秒, 维护周期超 18 个月; 点型红外检测利用红外吸收原理, 对甲烷检测精度达 ppm 级, 寿命长达 5 年, 且不受水汽凝结影响, 完美适配低温高湿环境, 满足

【作者简介】刘程 (1981-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事仪器仪表, 控制系统研究。

GB50493 对复杂工况的严苛要求。

3 检测仪表系统优化设计方法

3.1 抗干扰技术实施方案

潼关压气站站场电磁干扰主要来源于 4 台变频调速压缩机（载波频率 2-6kHz）和 110kV 高压输电线路（电场强度 12kV/m）。检测仪表信号传输线在未屏蔽状态下测得共模噪声电压峰值达 3.7V，超过 ISA-92.00.01 规定的 1V 安全阈值。为此设计三级屏蔽体系：传感器本体采用 0.5mm 厚坡莫合金磁屏蔽罩，其相对磁导率 $\mu_r \geq 80000$ ；信号线外层包覆三层屏蔽结构，由内至外分别为镀锡铜丝编织层（覆盖率 85%）、铝箔层（厚度 0.1mm）、316L 不锈钢编织网（目数 120）；接线盒实施全封闭设计，缝隙处填充导电硅胶，确保屏蔽效能 $> 90\text{dB}^{[3]}$ 。

接地系统改造采用“树状-星型”复合拓扑，主干接地线截面积由原 16mm² 升级至 35mm² 镀锡铜缆。传感器外壳接地点与信号参考地严格分离，两者间距保持 $\geq 1.5\text{m}$ ，通过等电位连接器实现共地消除。对于距高压线 15m 范围内的检测点，增设环形接地极阵列：以传感器为圆心，半径 2m 圆周上均匀布置 6 根 2.5m 长镀铜钢棒，接地电阻值从改造前的 4.3Ω 降至 0.8Ω，符合 GB/T 21431-2015《建筑物防雷装置检测技术规范》要求。

线缆敷设实施空间隔离策略，动力电缆与信号线间距由原 0.3m 扩大至 0.8m，交叉角度控制在 $90^\circ \pm 5^\circ$ 。在受限区域，采用双层金属隔板（1mm 铝板 + 0.5mm 铜板）构建电磁屏蔽通道，通道两端做 360° 端接处理。信号传输改用双绞线对绞距从常规的 50mm 调整为 20mm，使差模干扰抑制比提升 18dB。针对变频器谐波干扰，在电源输入端加装三级 π 型滤波器，截止频率设置为载波频率的 1/10（即 200Hz），有效衰减 30MHz 以下的高频噪声。

3.2 系统冗余配置方法

国家管网集团西北公司依据 Q/SY GD 0214-2017《油气管道安全仪表系统设计规范》，在潼关压气站采用稳定的 4-20mA 信号。基本杜绝现场的信号干扰。

关键设备冗余设计包含四重保障：电源模块采用 1+1 热备模式，DC24V 双回路供电配备自动旁路装置；信号采集卡按 N+1 配置，预留 20% 冗余通道；控制柜内安装环境监测单元，当温度超过 55℃或湿度 $> 85\%$ 时自动启动备用柜体。总线介质选用阻燃型双绞屏蔽电缆，外层包裹耐 -40℃ 低温的聚氨酯护套，节点间距不超过 1200m 标准传输距离的 80%。

数据同步机制采用时间戳比对与差值补偿相结合的方式，主备系统每 15 秒进行状态校验。当检测到总线故障时，智能切换器在 300ms 内完成路径重构，确保 4 台压缩机组的压力数据不会丢失。针对渭南站防爆环境要求，总线连接器选用 IP67 防护等级的 316 不锈钢外壳，接插件镀层厚度

$\geq 50\mu\text{m}$ ，接触电阻稳定在 5mΩ 以下。系统配置自诊断功能，可实时监测 232 个 I/O 点的健康状态，异常数据包自动触发三重校验机制。

4 实际应用与效果验证

4.1 渭南站场改造案例分析

国家管网集团西北公司 2022 年对潼关压气站实施检测系统升级工程，重点改造压缩机房。原系统配置的 12 台单点式检测仪中，已超 8 年使用周期，最大检测延迟达 4.2 秒。改造工程采用 Honeywell XNX Universal 变送器替换老旧设备，其具备 HART 7 协议通信能力，配套安装 12 套新型红外 / 催化复合传感器^[5]。电缆沟布线改用阻燃型 MICAST 矿物绝缘电缆，耐温等级从 150℃提升至 260℃，电缆接头采用三重密封结构，防护等级达 IP68。

表 1 改造前后检测响应时间对比表

检测区域	改造前响应时间	改造后响应时间	优化幅度 (%)
	(s)	(s)	
储罐顶部	3.5	0.8	77.1
压缩机房	2.8	0.9	67.9
阀门组	4.2	1.2	71.4
装卸车区	1.9	0.6	68.4

系统架构升级包含三个层次：现场层部署 38 个防爆接线箱，实现信号采集单元与执行机构的物理隔离；控制层采用横河 CENTUM VP DCS 系统，将 I/O 点容量从 512 扩展至 2048；监控层集成三维可视化平台，支持 420 个检测点的实时浓度热力图显示。通讯协议升级为 OPC UA over TSN，使数据刷新周期从 1 秒缩短至 200ms。针对冬季冷凝问题，在传感器探头加装 PTFE 疏水膜，配合电伴热带维持腔体温度在 5℃以上。

施工过程中创新采用“模块化预制+滑移安装”工艺，将电缆沟单点安装耗时从 3 小时压缩至 45 分钟。储罐顶部检测单元通过磁力爬行机器人进行安装，避免搭设脚手架影响生产。系统调试阶段运用数字孪生技术，在虚拟环境中完成 132 个逻辑控制回路的测试验证。改造后站场检测覆盖率从 89% 提升至 99.6%，单日最大数据处理量由 2.7GB 增至 9.4GB，满足 GB/T 50493-2019 对大型天然气压气站的监测要求。

4.2 连续监测数据对比

2023 年渭南地区汛期（6-8 月）的监测数据显示，天然气压气站累计采集甲烷浓度有效数据点 287 万条，数据完整率达 99.7%。监测系统采用分布式存储架构，每小时对各区域检测值进行四分位距（IQR）分析，剔除因雷电干扰导致的异常数据。期间共记录到 12 次超过注意级阈值的浓度波动，最大峰值出现在 7 月 23 日暴雨期间，储罐 B-04 顶部检测到 1.2%LEL 瞬时值（见表 2）。

表 2 不同工况下误报率统计表

工况类型	检测次数	误报次数	误报率 (%)	主要干扰源
暴雨天气	32415	89	0.275	雷电电磁脉冲
设备启停	47893	67	0.140	变频器谐波
高温时段	69520	45	0.065	热辐射导致传感器漂移
检修作业	28756	102	0.355	焊接作业电火花

数据分析表明，暴雨天气下的误报率是晴天工况的 10.2 倍，主要集中在压力安全阀周边。7 月 12 日强降雨期间，32# 检测点因雨水渗入接线盒导致绝缘电阻下降至 $0.5\text{M}\Omega$ ，引发持续 6 小时的间歇性误报警。设备启停工况下，压缩机变频器产生的 5 次谐波（250Hz）与传感器信号频段重叠，造成 0.14% 的误报率。系统通过自适应滤波算法，将此类误报抑制率提升至 78%。

4.3 运行维护经验总结

国家管网集团西北公司针对渭南地区极端气候特征，建立分级维护响应机制。当气温低于 -15°C 时，启动三级防冻预案：维持探头温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ；重点检查聚氨酯保温层密封性；最后在仪表风系统加装二级露点监测，控制压缩空气含水量 $< 0.5\text{g}/\text{m}^3$ 。暴雨红色预警期间，执行“三查两断”操作规程：查防雷接地电阻值（ $< 4\Omega$ ）、查接线盒防水等级（IP68）、查信号线绝缘阻抗（ $> 20\text{M}\Omega$ ）；切断非必要仪表的户外供电，中断无线传输模块运行。

大风沙尘天气维护采用“双滤双清”模式：前置过滤

器更换周期由 30 天缩短至 7 天，滤芯精度从 $5\mu\text{m}$ 提升至 $1\mu\text{m}$ ；激光光学窗口每日进行氮气吹扫，吹扫压力维持在 $0.4 \pm 0.05\text{MPa}$ 。针对夏季高温（ $> 40^{\circ}\text{C}$ ）工况，制定热应力补偿方案：在仪表支架加装 304 不锈钢伸缩节，补偿量按 $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$ 计算（ α 取 $16.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），同时调整传感器标定周期，温度每升高 10°C 校准频次增加 50%。

5 结语

本研究构建的可燃气体检测系统优化方案在潼关压气站的成功应用，验证了三维覆盖模型与分级报警机制的有效性。改造工程使检测盲区减少至 1.5% 以下，系统 MTBF 提升至 15000 小时，极端天气误报率下降 78%。提出的“树状-星型”复合接地方案与双总线冗余架构，为类似环境下的站场安全监测提供了可复制的技术路径。

参考文献

[1] 侯玉.天然气站场可燃气体检测仪表选型及优化设计[J].中国仪器仪表, 2022(4):85-88.

[2] 孙旭.超声波气体泄漏检测仪在天然气分输站场的应用[J].化工设计通讯, 2018, 44(11):1-1.

[3] 卓勇,刘宏,陈琳,等.可燃气体检测仪在终端燃气公司的应用探讨[J].石油工业技术监督, 2020, 36(4):5-5.

[4] 李黎,王一丁,李树维.红外气体检测技术在天然气安全生产中的应用[J].天然气工业, 2014, 31(1):96-99,103

[5] 王乃民,吴鑫,马思瑶,等.LNG可燃气体检测仪表选型及优化设计[J].工业仪表与自动化装置, 2019(5):3-3.

Progress in the Application of Chemical Mechanical Polishing in Silicon Material Processing

Xiaojuan Feng

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd. Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

Chemical mechanical polishing, as a high-precision and high-efficiency surface processing technology for silicon materials, has become an indispensable key link in the semiconductor manufacturing process. This technology effectively improves the surface flatness and smoothness of wafers through the synergistic effect of chemical reactions and mechanical grinding, meeting the process requirements at the nanoscale. This article systematically explores the application progress of chemical mechanical polishing in silicon material processing, sorts out its principle composition, process parameters, material adaptability, and defect control strategies, further analyzes the development trend of equipment updates and technology integration, emphasizes its key position and future expansion potential in the high-end manufacturing field, and provides theoretical reference and technical support for subsequent related research and engineering practice.

Keywords

silicon materials; Chemical mechanical polishing; Surface quality; Process optimization; defect control

化学机械抛光在硅材料加工中的应用进展

冯小娟

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘 要

化学机械抛光作为一种高精度、高效率的硅材料表面加工技术,已成为半导体制造过程中不可或缺的关键环节。该技术通过化学反应与机械磨削的协同作用,有效提升了晶圆表面平整度与光洁度,满足纳米级尺度下的工艺需求。本文围绕化学机械抛光在硅材料加工中的应用进展展开系统探讨,梳理其原理构成、工艺参数、材料适应性及缺陷控制策略,进一步分析设备更新与技术集成的发展趋势,强调其在高端制造领域的关键地位与未来拓展潜力,为后续相关研究与工程实践提供理论参考与技术支持。

关键词

硅材料; 化学机械抛光; 表面质量; 工艺优化; 缺陷控制

1 引言

随着半导体器件向高集成度、超小尺寸与高性能方向发展,硅材料加工精度的要求不断提升,传统加工技术在控制表面粗糙度与缺陷密度方面已显不足。在这一背景下,化学机械抛光作为一种集化学腐蚀与机械磨削于一体的复合加工方式,因其能有效提升硅材料表面形貌一致性与晶圆良率而受到广泛关注。当前,该技术已广泛应用于单晶硅、多晶硅及掺杂硅等不同类型材料的终端抛光环节,成为集成电路、微机电系统及先进封装领域的重要基础支撑。研究其应用进展与技术演化,不仅有助于理解关键工艺机制,还能推动硅材料深度加工能力的持续提升。

2 硅材料加工的技术特征与加工难点

硅具有稳定的晶体结构和优良的半导体性能,其硬度适中但脆性较大,在机械加工过程中极易产生微裂纹和边缘破损。这种材料特性决定了加工工艺需具备高精度力控与热控能力,以避免因力学应力集中引发结构失效。硅的热导率在加工中限制了局部高温的快速扩散,造成热应力的积聚,对加工路径与热场分布提出严格要求。表面活性变化敏感,要求化学处理过程稳定可控。由于这些理化特征的耦合作用,加工中任何轻微误差都可能导致器件性能下降,工艺窗口收窄,对整体工序协同与材料响应控制能力构成挑战,推动了以化学与机械复合作用为基础的先进加工技术的发展。当工艺线宽逐渐收窄至纳米级别后,这些传统方法对材料性能和几何精度的保障能力已明显不足,加之在大规模量产中效率有限,促使行业逐步向化学与机械协同调控的抛光技术转型。

【作者简介】冯小娟(1992-),女,中国湖北孝感人,硕士,工程师,从事硅单晶生长,硅材料研究。

3 化学机械抛光原理与工艺组成

3.1 CMP 工艺的反应机理与作用过程

化学机械抛光是一种通过化学反应与机械磨削共同作用实现材料去除与表面修复的精密加工技术。在加工过程中, 化学反应使硅表面形成一层软化氧化膜, 该膜在抛光垫与浆料中磨粒的剪切力作用下被逐层移除, 实现对目标区域的选择性去除与宏观平整度调节。浆料中酸碱组分控制氧化反应速率, 磨粒的尺寸与形貌决定材料剥离效率与表面损伤程度。抛光过程中表面温度、摩擦力与流体动力的综合耦合作用影响氧化膜更新与去除的动态平衡。整个反应机制必须在温和可控的条件下进行, 以保证结构层完整性与晶格畸变最小化, 是实现纳米级平坦化的关键工艺支撑。

3.2 抛光垫、浆料与化学剂的协同机制

抛光垫作为机械支撑介质, 其弹性模量、孔隙结构与表面粗糙度直接影响磨削均匀性与浆料分布特性。高性能抛光垫能实现应力分布的动态均衡, 提升大面积晶圆的局部一致性。浆料中的磨粒材料需具备适度硬度与高分散性, 以保障在单位压力下实现稳定材料去除速率并避免表面划伤。化学剂组分需与硅表面反应形成可控的氧化膜, 同时抑制副反应与腐蚀过度现象。在三者的协同作用下, 浆料在抛光垫与晶圆之间形成流体润滑层, 实现微观尺度的反应-剥离-更新循环。系统协同的精细控制对表面质量的稳定输出起到决定性作用, 也是技术可靠性与量产一致性的保障基础。

3.3 关键参数对抛光效果的控制作用

化学机械抛光过程涉及多个动态参数的耦合调节, 包括压力、转速、温度、浆料流量与磨粒浓度等, 这些参数的微小变动都会对材料去除速率、表面粗糙度与缺陷形貌产生显著影响。单位压力决定了磨粒与表面之间的剪切强度, 抛光盘与晶圆的相对运动轨迹影响应力分布与物料更新路径, 温度变化则调控反应速率与浆料黏度。浆料流量与化学剂浓度共同作用于表面反应能力与清洗效率, 进而影响加工过程的稳定性与重复性。不同参数间存在复杂的非线性响应关系, 需通过系统试验与反馈控制优化工艺窗口。在特定材料与目标要求下, 实现工艺参数的精细匹配, 是获得稳定优质抛光效果的核心条件。

4 CMP 在不同类型硅材料加工中的应用现状

4.1 单晶硅晶圆抛光中的工艺路径

单晶硅晶圆在尺寸拓展与节点缩小双重背景下, 对化学机械抛光的均匀性与去除精度提出了苛刻要求。在 300mm 晶圆加工中, 要求总厚度变化控制在 $0.3\mu\text{m}$ 以内, 表面粗糙度 R_a 小于 0.2nm 。典型工艺采用前处理氧化、主抛光与终抛光三阶段路径, 其中主抛阶段的材料去除速率维持在 $80\text{nm}/\text{min}$, 终抛光阶段控制在 $10\text{nm}/\text{min}$ 以内以提升光洁度。浆料中磨粒浓度为 $1.5\text{wt}\%$, pH 值调节至 10.5 以增强化学氧化能力。在生产线上, 通过调整抛光盘转速从

60rpm 降至 45rpm , 实现边缘区域应力分布优化, 良品率由 95% 提升至 99.2% 。在 12 英寸晶圆加工中, 采用双面 CMP 技术后, 翘曲值可从 $45\mu\text{m}$ 降低至 $18\mu\text{m}$, 为后续掺杂与刻蚀提供稳定支撑。

4.2 多晶硅表面处理的适应性分析

多晶硅因其晶界分布不均与各向异性导致表面在机械加工后常残留局部隆起与凹陷, 需借助 CMP 进行微观重整。常用粒径为 40nm 的氧化铈浆料与弹性系数为 600kPa 的多孔抛光垫组合, 去除速率约为 $35\text{nm}/\text{min}$, 经过 15 分钟处理后表面粗糙度从 4.2nm 降至 0.6nm 。多晶结构内部硬度波动幅度为 $\pm 12\%$, 在抛光过程中需动态调整下压力至 35kPa , 以维持材料去除均衡。为降低晶界处应力集聚, 采用周期振荡式路径控制晶圆与抛光头的相对位移, 边缘损伤率由 7.5% 降至 2.1% 。在多晶太阳能硅片中, CMP 后反射率由 18% 降至 12.3% , 明显提升了光电转换效率。该工艺路径已在年产 2000 万片电池片的生产线上完成批量应用。

4.3 掺杂硅与微结构硅元件的抛光需求

掺杂硅在高掺杂浓度区存在载流子迁移率变化, CMP 过程中对反应选择性与力学响应提出更高要求。以磷掺杂浓度达 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 为例, 常规浆料去除速率不稳定, 需引入氨基磺酸添加剂以实现低损伤处理, 控制在 $25\text{nm}/\text{min}$ 并保持表面平整度小于 0.3nm 。针对微结构硅元件, 特别是沟槽深度小于 200nm 、间距小于 500nm 的结构, 需使用粒径小于 20nm 的胶体二氧化硅, 并将抛光时间精确控制在 10 秒至 15 秒区间内, 避免结构倒塌或边缘塌陷。为保障掺杂区电阻率保持在 $5.6\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$ 以内, 终抛阶段浆料 pH 调至 9.2, 并配合低压 0.9psi 工况运行。在 65nm 器件工艺中, CMP 后漏电流下降了 23% , 器件良率提升了 4.8% , 验证了精细抛光技术在微结构保持与电性一致性控制中的重要作用。

5 工艺优化与缺陷控制技术进展

5.1 抛光速率与表面粗糙度的耦合调节

化学机械抛光过程中的去除速率与表面粗糙度存在显著耦合关系, 高速率容易引发表面破坏, 低速率则影响产能效率。在标准工艺条件下, 当去除速率超过 $100\text{nm}/\text{min}$ 时, 表面粗糙度 R_a 往往大于 0.4nm , 而在 $60\text{nm}/\text{min}$ 控制范围内 R_a 可维持在 0.25nm 以下。通过控制浆料中磨粒含量从 $2\text{wt}\%$ 降至 $0.8\text{wt}\%$, 并辅以 pH 值从 11 降至 10.2 的化学剂调节, 可在保持 $60\text{nm}/\text{min}$ 的基础上实现 R_a 下降 23% 。温度控制对抛光结果也有明显影响, 在 30°C 至 40°C 范围内, 材料去除稳定性提升了 17% 。通过双区压力分布设计, 将中心与边缘压力差控制在 0.3psi 以内, 有效减小 TTV 波动幅度至 $0.18\mu\text{m}$ 。耦合调节策略优化后, 单片加工周期从 230 秒缩短至 190 秒, 批次合格率提升至 98.7% 。

5.2 划痕、腐蚀及残留物的形成机制与控制手段

划痕主要来源于浆料中异物颗粒或磨粒团聚, 粒径超

过 100nm 时造成表面线状损伤概率上升 27%。通过使用离心过滤系统控制颗粒直径小于 50nm, 并配合浆料在循环过程中的稳定性控制, 划痕密度从 $0.42/\text{cm}^2$ 降至 $0.08/\text{cm}^2$ 。腐蚀问题常与化学剂浓度失衡有关, pH 值波动超过 ± 0.5 时腐蚀区域扩大率高达 39%。采用自动 pH 控制系统并对浆料进行在线电导率监测, 使腐蚀层深度控制在 2nm 以内。残留物主要为有机络合物与金属离子, 清洗阶段引入螯合剂浓度控制在 0.1mol/L , 并设置去离子水流速为 3L/min , 使残留密度下降至 $1.2\text{E}10\text{ atoms}/\text{cm}^2$ 。多源缺陷控制后, 晶圆表面缺陷总数从 312 个降至 68 个, 有效支撑后续层间结构成型工艺的的稳定实施。

5.3 新型材料与纳米尺度下的缺陷防控技术

随着工艺节点进入 5nm 以下尺度, 传统 CMP 体系难以满足材料多样性与表面缺陷控制的双重需求。在 SOI 结构与高 k 介质层中, 界面层厚度小于 1.2nm, 对抛光应力与化学反应窗口极为敏感。引入粒径小于 15nm 的新型球形纳米磨粒, 配合 pH 值为 9.8 的弱碱性环境, 使表面粗糙度稳定在 0.18nm 以下。低 k 材料中采用分子键合剂稳定界面反应速率, 将缺陷密度控制在 $0.05/\text{cm}^2$ 以内。为实现多材料之间的选择性抛光, 设计了腐蚀速率比在 1.0 至 1.4 范围内调节的工艺路径, 结构保持率提高 31%。在多层铜互连结构中, 通过设置双阶段 CMP 与实时 AFM 监测系统联动, 纳米缺陷检测率提升至 96%。这些新技术的集成, 有效支撑了 7nm 以下节点的高密度结构构建。

6 CMP 装备技术演进与集成应用趋势

6.1 高精度 CMP 设备的结构创新与运动控制

新一代 CMP 设备在结构模块与运动控制系统方面持续优化, 以满足亚纳米级加工精度要求。主轴系统采用多自由度可调控机构, 可实现 0.01mm 量级的压力实时分布调整, 提升边缘区域的均匀性控制。驱动系统由传统固定转速方式升级为伺服闭环控制结构, 转速误差控制在 $\pm 0.2\text{rpm}$ 范围内, 支持复杂运动轨迹的路径编程。平台集成多通道负载反馈系统, 实现动态工况下的载荷响应优化。在磨头设计方面引入气浮式支撑结构, 可有效减小振动传递与机械干扰对表面质量的影响。设备本体结构采用低热膨胀复合材料, 实现温度变化下的机械稳定性保持。通过这些技术融合, CMP 设备在纳米尺度下的加工能力获得显著提升, 满足先进节点晶圆的制程需求。

6.2 多片式加工模式与在线检测系统的融合

为提升 CMP 设备在大规模晶圆制造中的效率与一致性, 装备系统逐步转向多片式加工结构与高集成检测模块相结合的发展路径。新型设备支持四工位同步加工结构, 单机日处理能力超过 1200 片, 抛光头间差异控制在 3% 以内。

在线检测系统嵌入全流程, 实现 TTV、粗糙度与残留物浓度的实时监测, 检测精度优于 $0.05\mu\text{m}$ 。光学干涉仪与电容式测厚传感器共同构建多通道数据采集系统, 支持抛光过程每 10 秒自动修正一次路径偏差。系统与 MES 平台数据交互, 实现批次间差异自动比对与异常报警。通过软件驱动的边缘预测机制, 可在抛光中途预判缺陷风险并调整载荷分布, 显著提升良率稳定性与设备运行效率, 形成闭环式生产控制体系。

6.3 CMP 在硅基异质集成与大尺寸晶圆中的拓展应用

异质集成芯片结构中涉及多材料、跨结构的界面处理需求, 对 CMP 提出复合选择性与微观应力兼顾的技术挑战。在硅与砷化镓、氮化镓等材料界面, 采用低应力反应配方与多段速去除策略, 可使表面粗糙度稳定在 0.3nm 以内。300mm 及 450mm 晶圆加工中, 传统设备在边缘控制与热稳定方面存在瓶颈, 需引入动态温控系统与压电驱动调节装置, 将边缘 TTV 误差从 $0.6\mu\text{m}$ 降至 $0.2\mu\text{m}$ 。异质集成封装中, CMP 作为 RDL 平坦化与通孔端面处理关键环节, 其加工深宽比控制能力直接影响互连可靠性。在三维封装堆叠过程中, 需对每层界面实施独立参数设定与实时反馈调节, 使叠层偏差控制在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内。CMP 技术在集成复杂度不断提升的背景下展现出关键支撑价值。

7 结语

化学机械抛光技术在硅材料加工领域的深入应用, 显著提升了晶圆表面质量控制与结构均匀性保障水平。随着设备精度、材料体系与工艺路径的持续优化, 其在超大规模集成电路制造与异质集成领域中的重要性不断增强。当前, 该技术已实现从单一工艺模块向系统集成方案的转变, 具备高度的柔性调控与稳定输出能力。在未来的硅材料深度加工中, CMP 将继续作为关键环节贯穿于各类纳米结构、复合材料与新型封装流程中, 其技术性能与装备智能化水平的演进将直接决定工艺体系的先进性与制程能力的边界, 为新一代芯片制造体系提供更加坚实的加工基础与质量保障。

参考文献

- [1] 刘宜霖,张博,吴昊,丁明明,王胜.以SiC为代表的第三代半导体超硬材料平坦化前沿技术[J].电子工业专用设备,2025,54(02):21-25.
- [2] 张潇,周建伟,杨云点,罗翀,栾晓东,邵祥清,李瑾.水溶性聚合物提高多晶硅CMP表面质量的机理[J].微纳电子技术,2025,62(04):105-113.
- [3] 王东伟,王胜利,杨云点,罗翀,栾晓东,邵祥清,李瑾.皱纹状介孔C-mSiO₂/CeO₂复合磨料对氧化硅CMP的机理分析[J].润滑与密封,
- [4] 郝萍.二氧化硅抛光液中金属杂质的检测方法[J].上海计量测试,2024,51(04):11-13+17.

Research progress on lithium-ion sieves for extracting lithium from salt lake brines

Shanshan Huo Jin Niu Zheyuan Fan Yang Xu Tianyu Wang

Xi'an Gold-In Membrane Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710054, China

Abstract

Salt lake brine is an important source of lithium resources in the world, and it is of great significance to study the technology of extracting lithium from it. Lithium ion sieves, with their unique ion recognition characteristics and efficient adsorption performance, have demonstrated significant advantages in the field of lithium extraction from salt lakes. By summarizing the application results of lithium ion sieve in lithium extraction from salt lake brine in recent years, combing the distribution characteristics of lithium resources in salt lake and the existing methods of lithium extraction, the structural characteristics and performance differences of metatitanic acid, lithium manganese oxide and composite lithium ion sieve were deeply analyzed. The precursor synthesis method and removal agent selection of lithium manganese oxide ion sieve in lithium extraction from salt lake were mainly discussed. Lithium manganese oxide ion sieve has good application prospects due to its low cost and large adsorption capacity, but its cycle stability and corrosion resistance still need to be optimized.

Keywords

salt lake brine; lithium ion sieve; lithium manganese oxide; lithium extraction technology; adsorption performance

锂离子筛在盐湖卤水提锂中的研究进展

霍姗姗 朱津 范哲远 徐阳 王天雨

西安金藏膜环保科技有限公司, 中国·陕西 西安 710054

摘 要

盐湖卤水作为全球锂资源的重要来源, 研究提锂技术意义重大。锂离子筛凭借独特的离子识别特性与高效吸附性能, 在盐湖提锂领域展现出显著优势。通过整理总结近年来锂离子筛在盐湖卤水提锂中的应用成果, 梳理盐湖锂资源分布特征及现有提锂方法, 深入剖析偏钛酸、锂锰氧化物及复合型锂离子筛的结构特点与性能差异, 重点探讨锂锰氧化物离子筛在盐湖提锂中的前体合成方法与脱除剂选择。锂锰氧化物离子筛因成本低、吸附容量大等特点具备良好应用前景, 但其循环稳定性与耐腐蚀性仍需优化。

关键词

盐湖卤水; 锂离子筛; 锂锰氧化物; 提锂技术; 吸附性能

1 引言

随着全球新能源产业的迅猛发展, 锂作为关键战略资源的需求急剧增长。盐湖卤水蕴含丰富的锂资源, 占全球已探明锂资源总量 60% 以上, 是未来锂供应的主要来源。可盐湖卤水中锂离子浓度低、伴生离子复杂, 提锂过程面临选择性差、能耗高等挑战^[1]。传统提锂方法如沉淀法、溶剂萃取法在应用中存在诸多局限, 亟需开发高效、环保的新型提

锂技术。锂离子筛作为一种具有“分子筛”效应的功能材料, 通过离子交换机制实现锂离子的选择性吸附, 为盐湖卤水提锂提供新思路^[2]。近年来, 关于锂离子筛的研究不断深入, 其在盐湖提锂中的应用价值日益凸显, 开展相关研究综述对推动该领域技术进步具有重要意义。

2 盐湖锂资源分布特性及主要提锂方法

2.1 分布特性

全球盐湖锂资源分布呈现明显的地域性特征, 主要集中在“锂三角”地区, 如智利、阿根廷、玻利维亚交界的盐湖带以及中国青藏高原盐湖群。智利阿塔卡玛盐湖锂浓度高达 1300 mg/L 以上, 镁锂比低至 0.03, 是全球最优质的盐湖锂资源之一^[3]。中国青海盐湖锂浓度多在 30-150 mg/L, 镁锂比普遍大于 100, 西藏盐湖锂浓度相对较高, 但海拔高、气候恶劣, 开发难度大。盐湖卤水的化学成分复杂, 除锂离子

【基金项目】1、陕西省科技创新引导专项(基金)项目-重点研发计划项目(2023GXLH-060); 2、西安市科技计划项目-重点科技成果就地转化项目(24CGZH0001)。

【作者简介】霍姗姗(1991-), 女, 中国陕西榆林人, 硕士, 工程师, 从事盐湖卤水提锂研究。

子外,还含有大量钠离子、钾离子、镁离子、钙离子等伴生离子,且不同盐湖的离子组成差异显著。这种复杂的离子环境与低锂浓度特性,使得盐湖提锂必须解决离子分离难题,对提锂技术的选择性提出极高要求。而且盐湖卤水的 pH 值、温度等物理化学性质也对提锂过程产生重要影响,进一步增加提锂技术的开发难度。

2.2 主要提锂方法

目前盐湖卤水提锂主要采用沉淀法、溶剂萃取法、膜分离法和吸附法等。沉淀法通过向卤水中添加碳酸盐、硼酸盐等沉淀剂,使锂离子形成沉淀实现分离^[4]。文献认为该方法工艺简单、成本低,但仅适用于镁锂比极低的盐湖,且沉淀剂用量大,易造成环境污染^[5]。溶剂萃取法利用有机溶剂对锂离子的选择性萃取作用,实现锂与其他离子的分离。常用的萃取剂有 TBP、D2EHPA 等,经多项研究证实,该方法提锂效率高,但存在有机溶剂易挥发、毒性大、乳化现象严重等问题,限制其大规模应用。膜分离法包括纳滤、电渗析等,通过膜的选择透过性实现锂离子的分离^[6]。有研究表明,该方法操作简便、环保,但膜材料成本高、易污染,且在高镁锂比卤水中分离效果不佳。吸附法利用吸附材料对锂离子的选择性吸附特性,将锂离子从卤水中分离出来^[7]。常用的吸附材料有铝盐吸附剂、钛酸盐吸附剂和锂离子筛等,其中锂离子筛因具有高选择性、高吸附容量和良好的循环性能,成为近年来的研究热点。

3 盐湖卤水锂离子筛概述

3.1 偏钛酸锂离子筛

偏钛酸锂离子筛以偏钛酸为原料,通过高温焙烧等工艺制备而成。其结构中存在大量的层状通道,为锂离子的嵌入与脱出提供空间。偏钛酸锂离子筛具有较高的热稳定性和化学稳定性,在酸性和碱性条件下均能保持良好的结构。研究表明,偏钛酸锂离子筛对锂离子的吸附容量可达 30 - 50 mg/g,且在高镁锂比卤水中表现出一定的选择性^[8]。但该类离子筛的制备过程需要高温焙烧,能耗较高,且吸附动力学较慢,限制其实际应用。偏钛酸锂离子筛在吸附过程中容易发生结构畸变,导致循环稳定性下降。为了改善其性能,有研究提出通过掺杂金属离子、表面改性等方法对偏钛酸锂离子筛进行优化^[9]。例如,掺杂锌离子可以提高其吸附容量和选择性,表面包覆二氧化硅可以增强其耐腐蚀性和循环稳定性。

3.2 锂锰氧化物离子筛

锂锰氧化物离子筛以锂锰氧化物为活性组分,具有尖晶石型结构。在制备过程中,通过脱锂处理形成具有离子交换能力的空位,从而实现对锂离子的选择性吸附。锂锰氧化物离子筛的吸附容量可达 50-80 mg/g,远高于偏钛酸锂离子筛。该类离子筛的制备工艺相对简单,成本较低,且在常温下即可进行吸附操作,能耗较低。锂锰氧化物离子筛对锂

离子的选择性较高,在卤水镁锂比为 100 时,锂镁分离系数可达 1000 以上^[10]。而锂锰氧化物离子筛在酸性条件下容易发生锰的溶解,导致结构破坏和吸附性能下降。为了解决这一问题,有研究采用表面修饰、元素掺杂等方法对其进行改进,得出采用二氧化钛包覆可以有效抑制锰溶解,提高其化学稳定性;掺杂钴离子可以改善其晶体结构,提高吸附容量和循环稳定性^[11]。

3.3 复合型锂离子筛

复合型锂离子筛是将两种或两种以上的功能材料复合在一起,形成具有协同效应的新型吸附材料。常见复合型锂离子筛包括锂锰氧化物/碳复合材料、偏钛酸/铝盐复合材料等。这类离子筛结合不同材料的优点,具有更高的吸附容量、更好的选择性和循环稳定性。有研究证实,锂锰氧化物/碳复合材料不仅具有锂锰氧化物离子筛的高吸附容量和选择性,还具有碳材料的高导电性和良好的机械性能,能够提高离子筛的吸附动力学和循环稳定性^[12]。复合型锂离子筛的制备方法主要有溶胶-凝胶法、共沉淀法、水热合成法等。通过调控复合材料的组成和结构,可以优化其吸附性能^[13]。另外也有研究指出,复合型锂离子筛的制备工艺相对复杂,成本较高,且各组分之间的界面相互作用难以控制,需要进一步深入研究^[14]。

4 盐湖卤水提锂应用锂锰氧化物离子筛

4.1 离子筛前体的合成

4.1.1 固相合成法

固相合成法是制备锂锰氧化物离子筛前体的常用方法之一,该方法将如碳酸锂、氢氧化锂等锂源,和如二氧化锰、碳酸锰等锰源按一定比例混合,在高温下进行固相反应,生成锂锰氧化物前体。研究表明,此方法优点是工艺简单、操作方便,适合大规模生产,但该方法需要高温焙烧,能耗较高,且反应过程中容易出现结块现象,导致产物粒径不均匀,影响吸附性能^[15]。为了提高固相合成法的产物质量,有研究通过优化反应温度、反应时间和原料配比等工艺参数,以及采用球磨预处理等方法,改善产物的晶体结构和粒径分布^[16]。比如在较低温度下长时间焙烧可以获得结晶度更高、粒径更均匀的锂锰氧化物前体,从而提高离子筛的吸附容量和选择性。

4.1.2 液相合成法

液相合成法包括共沉淀法、溶胶-凝胶法、水热合成法等,具有反应温度低、产物粒径均匀、纯度高等优点。共沉淀法是将锂盐和锰盐的混合溶液与氢氧化钠、氨水等沉淀剂混合,在一定条件下生成沉淀,经过过滤、洗涤、干燥和焙烧后得到锂锰氧化物前体。溶胶-凝胶法是通过金属醇盐的水解和缩聚反应形成溶胶,再经凝胶化、干燥和焙烧得到前体。水热合成法是在高温高压的水溶液中进行反应,直接生成具有特定结构的锂锰氧化物前体。液相合成法制备的

前体具有更好的晶体结构和表面性能,能够提高离子筛的吸附性能和循环稳定性^[17]。比如水热合成法制备的锂锰氧化物前体具有更高的比表面积和更多的活性位点,从而提高对锂离子的吸附容量。

4.2 脱除剂的选择

在锂锰氧化物离子筛的应用过程中,脱除剂的选择对提锂效率和成本至关重要。常用的脱除剂包括酸溶液如盐酸、硫酸、盐溶液如氯化钠、氯化镁和络合剂如柠檬酸、乙二胺四乙酸等。酸溶液作为脱除剂时,脱锂效率高,但容易导致锰的溶解,影响离子筛的循环稳定性。盐溶液脱除剂的脱锂效率相对较低,但对离子筛的结构损伤较小,适合循环使用。络合剂脱除剂可以与锂离子形成稳定的络合物,提高脱锂效率,但成本较高。研究指出,在实际应用中,需要根据盐湖卤水的性质和提锂工艺的要求,选择合适的脱除剂^[18]。例如对于高镁锂比的盐湖卤水,可以采用盐酸作为脱除剂,提高脱锂效率,但需要控制酸的浓度和脱除时间,以减少锰的溶解,对于循环使用要求较高的场合,可以采用氯化钠溶液作为脱除剂,以延长离子筛的使用寿命。也有研究开发一些新型脱除剂,如离子液体、超临界二氧化碳等,这些脱除剂具有环境友好、脱锂效率高等优点,为盐湖卤水提锂提供新选择。

5 小结与展望

综上所述,锂离子筛在盐湖卤水提锂中具有显著的技术优势,尤其是锂锰氧化物离子筛,因其成本低、吸附容量大、选择性高等特点,展现出良好的应用前景。目前锂离子筛在实际应用中仍面临一些挑战,如循环稳定性不足、耐腐蚀性差、制备成本高等。今后研究方向可以集中在以下几个方面:一是通过材料设计和制备工艺优化,提高锂离子筛的结构稳定性和化学稳定性,降低锰的溶解量;二是开发新型复合型锂离子筛,结合不同材料的优点,进一步提高吸附性能和循环稳定性;三是优化提锂工艺,降低能耗和成本,提高提锂效率;四是开展锂离子筛在实际盐湖卤水中的应用研究,解决工程化应用中遇到的问题。随着研究的不断深入,锂离子筛技术有望在盐湖卤水提锂领域实现大规模应用,为全球锂资源的开发利用提供有力支撑。

参考文献

- [1] Liu J, Xu N C, Bian S J, et al. Design and adsorption performance of hollow structure nano-metatitanic acid lithium ion sieve with strong structure stability and large adsorption capacity[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 692(000):13.
- [2] 周建国. 锂离子筛电极材料的制备及其选择性盐湖提锂研究[D]. 安徽:安徽大学,2024.
- [3] 漆贵财,海春喜,周园. PVDF-H1.6 Mn1.6 O4锂离子筛膜的制备及其提锂性能[J]. 人工晶体学报,2019,48(3):418-427,442.
- [4] 储政,吴钊,黄伟. 锰系离子筛吸附法提纯油田富锂卤水技术研究[J]. 能源化工,2020,41(6):30-33.
- [5] 王珍珠,何争光,和兵,等. 颗粒型钛基锂离子筛的制备及锂吸附性能[J]. 应用化学,2025,42(4):552-564.
- [6] Chen M, Zeng T, Liu Y, et al. Extraction of lithium in salt lake brine through highly selective titanium ion sieves - A review[J]. Functional materials letters, 2022.
- [7] 黄江龙,赵文芳,莫恒亮,等. 两种基于钛酸锂型锂离子筛的性能差异研究[J]. 现代化工,2024,44(3):140-144.
- [8] Ding Y, Nhung N T H, An J, et al. Manganese-Titanium Mixed Ion Sieves for the Selective Adsorption of Lithium Ions from an Artificial Salt Lake Brine[J]. Materials (1996-1944), 2023, 16(11).
- [9] 王蕾,王磊. 聚氯乙烯锂离子筛膜的制备及其在卤水中的锂吸附性能[J]. 复合材料学报,2023,40(9):5107-5123.
- [10] 胡月,莫恒亮,李天玉,等. 钛系锂离子筛粉体与PVDF树脂纺丝成型及性能研究[J]. 无机盐工业,2023,55(11):58-63.
- [11] Zhang S L P. Preparation of granular titanium-type lithium-ion sieves and recyclability assessment for lithium recovery from brines with different pH value[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 267(1).
- [12] 朱晓峰,吕龙,李天玉,等. 用H2TiO3型锂离子筛从盐湖卤水中提锂试验研究[J]. 湿法冶金,2024,43(3):275-283.
- [13] 赵海祥,赵颖,孙淑英. PVC-MnO2锂离子筛膜制备与提锂性能研究[J]. 化学工业与工程,2023,40(3):130-140.
- [14] 王蕾,王磊,白云龙,等. SA膜状锂离子筛的制备及其锂吸附性能[J]. 化工学报,2023,74(5):2046-2056.
- [15] 何杨柳,李凌平,王磊,等. Li4Mn5O12的改进合成及其在卤水中的选择性提锂性能[J]. 盐湖研究,2025,33(1):18-27.
- [16] 陈旺,蒋磊,潘巧珍,等. 钛系锂离子筛的制备及其吸附性能研究[J]. 无机盐工业,2021,53(10):47-51.
- [17] 熊福军,陈星宇,张许,等. 钛系锂离子筛在沉锂母液锂回收上的连续离子交换工艺研究[J]. 广东化工,2022,49(3):8-11.
- [18] 陶百福,王志辉,郭瑞丽. 基材亲疏水性能对EVOH/LIS复合吸附剂成型结构及提锂性能的影响[J]. 材料导报,2021,35(6):6180-6188.

Responsibility analysis of vocational education and training in petrochemical enterprises

Guifu Yu Yan Zhu

China Petroleum Guangxi Petrochemical Branch, Qinzhou, Guangxi, 535008, China

Abstract

The petrochemical industry, characterized by high operational risks and complex production processes prone to accidents, requires effective training models to maximize safety assurance. Traditional lecture-based safety training has demonstrated limitations in practical implementation, including superficial understanding, short-term memorization, and inflexible response strategies, failing to meet modern enterprises' requirements for intrinsic safety management. The experiential safety training model, integrating "experiential learning, practical drills, and deepening understanding," has gained increasing adoption across industries in recent years with notable success. This paper analyzes the essence and implementation pathways of experiential safety training models for petrochemical enterprises through research and practical applications, providing actionable insights for industry reference.

Keywords

petrochemical enterprises; experiential safety training model; development; implementation pathways; analysis

石油化工企业体验式安全培训模式分析

于贵福 朱艳

中国石油天然气股份有限公司广西石化分公司, 中国 · 广西 钦州 535008

摘 要

石油化工是危险性较大的行业, 其生产过程复杂且容易发生事故, 在这种情况下只有采用有效的培训模式才能最大限度保障生产安全性。传统灌输式的安全培训模式在实践中暴露出理解不深入、记忆不持久、应对不灵活等弊端, 无法达到现代企业对本质安全进行管理的要求。体验式安全培训模式集“体验—演练—深化”为一体, 近些年来得到了越来越多行业的应用并取得了不错的成效。基于此, 文章结合研究及实践就石油化工企业体验式安全培训模式内涵及其构建路径展开分析, 以供参考。

关键词

石油化工企业; 体验式安全培训模式; 构建; 路径; 分析

1 引言

对于任何一家企业而言, 安全生产是其最基本的底线, 在此基础上不断追求是企业实现自身高质量发展的重要保障, 而在这样的背景下, 部分企业并未做到根据自身情况进行针对性地安全生产培训教育工作, 并且更多的还是通过传统说教性的培训方式让员工被动接受相关生产安全知识和理论, 这不仅使一些员工出现抵触情绪而影响到培训教育质量, 同时也无法达到让员工“知行合一”的效果^[1]。而体验式安全培训模式不仅可以有效地规避以理论指导为主的知行分离型培训缺陷, 并且通过更为生动的形式和手段开展可感、可控性的安全生产培训, 尤其适合石油化工这种风险较高、专业较强、节奏较快的行业。

2 体验式安全培训模式概述

体验式安全培训是一种在模拟或真实环境中亲身感受和形体体验, 通过“听”、“看”、“研”、“练”, 再由培训师结合学员的体验感受, 将安全技术知识进行讲解, 形成对安全的认识, 掌握相关的技能, 具备相关的能力并用于实际工作中的培训活动, 是一种寓教于乐的安全培训方式。现阶段, 体验式安全培训凭借着诸多优点广泛应用于各高危领域的模拟现场式训练中, 逐渐形成了沉浸交互式、行为矫正式、现场再现式等多种形式的安全生产培训教育。该模式涉及事故现场还原、沉浸式 VR 模拟、实训演练等, 突出的是在参与过程中的多感官感受以及角色代入感, 最终使得安全培训获得深层次的情感记忆和较强的行为影响。相比较传统课堂讲授方式, 体验式安全培训模式更多地突出实践性和参与性, 增强了培训内容的现实性和应用性^[2]。同时, 该模式需要企业根据一定的生产场景设定安全培训内容指导员工进行深入体验并关注现场对感受的过程, 以提高过程

【作者简介】于贵福(1969—), 男, 中国山东即墨人, 硕士, 高级工程师, 从事安全环保职业卫生健康研究。

的有效性。因此,在基础岗位的技能培训上尤其是在安全文化基础较为薄弱的行业,体验式安全培训模式发挥的作用更大。目前包括石油、化工、煤炭、电力等行业在内均建立起“体验+实训+考核”的复合式培训模式,并逐步构建起一套标准化、程序化、体系化的体验式安全培训体系,这对于推动企业安全管理由“制度落实”向“能力塑造”转变起到了十分重要的作用。

3 石油化工企业体验式安全培训模式构建路径

3.1 构建基于岗位风险的定制化体验模块

石油化工企业根据具体岗位开展基于岗位风险的定制化体验式安全培训模块需要以作业风险辨识为切入点,分析每一个岗位的风险特征,并结合工作经验和历史事故进行系统化的风险点分析,最终确定岗位风险辨识以及基于岗位风险的精准化培训内容。通过对岗位危险源识别(Hazard Identification)、作业危害分析(JHA)和事故案例复盘,初步建立覆盖石油化工企业主要工种的风险数据库,挖掘具体岗位操作过程中频率较高的失误点,如硫化氢区域泄漏初期判断延迟、动火作业中使用禁用工具、带电作业中接地线挂错位置等,接着依据岗位风险等级及典型事故发生诱因研制开发岗位多维度仿真体验模块,如在硫化氢作业区设置不同浓度硫化氢扩散模拟舱,配备热成像仪及烟雾追踪器,在限定时间完成逃生路线找寻、快速逃生演练;将动火区域设置为高温模拟区,设置高温飞溅热感化模拟器及触发反馈装置;针对维修电工误操作设置触发型电击反馈系统,利用实景开关柜和虚拟监控界面,使其发生低电压接电错误时通过电极及时反馈和操作纠偏^[3]。同时,石油化工企业还须建立“风险点—体验项目—应急行为指令”三维映射关系,设置场景推演模块,根据行为链条生成对应的行为规则,以触发出行为过程涉及的各种危险情况并联动各个场景对应的应急响应计划,从而形成员工开展模拟化的风险感知和快速决策行动能力训练机制。另外,体验设施要设置高仿真度的反馈装置(比如震动警报、声光提示、环境参数实时变化),将各种危险情景具象化复现出来,达到更多元化沉浸式的警示效果。所有培训模块要严格按照石油化工企业安全培训规范中的风险等级做好分级分类,建立统一的编码规则,并保证企业能够检索和回溯相关培训的内容。最后,现场安全培训教员应具备丰富的操作经验及应急处置指导,并且采取全程录像,借助于现场问答+操作点评+视频回放+行为考评结合形成闭环式的过程管理和结果管控的验证措施,检验安全培训是否有效落地。

3.2 搭建多场景复合式安全实训平台

构建体验式安全培训模式中,搭建基于多场景复合式的安全实训平台,这能够实现培训的系统化、流程化以及实操化,对保障石油化工企业安全生产有着积极的作用。为此需结合岗位和装置特点设置该平台各功能模块,并将其融入

“控制—响应—评估”的链条之中,构建起涵盖全工艺流程的闭环训练体系。具体实施上,先建立一套装置异常操作响应实训模块,实现模拟石油化工装置正常运行时因为操作失误或者设备设施故障而引发的一些突发事件,比如反应器进料异常、压缩机喘振、泄压系统响应滞后等情形。通过实训脚本中预设一些典型的事故触发点,让受训人员按照岗位的规程规范来进行相应操作,达到既能调整工艺参数及修正操作条件,还可以做出联锁判断的目的。其次,构建基于工艺流程的应急疏散演练模块,按照装置区、罐区、动火作业区等不同场景,设置如氨泄漏、塔顶超压、火灾蔓延等紧急状态,并依据厂区实际疏散路线及应急布点设计疏散路径、集结点及人员定位系统,通过受训人员逐点执行岗位停机、区域撤离、信息上报等操作,提升实战应急反应效率。再次,建立以小组为单元的任务驱动式操作训练机制,将学员分配至不同岗位角色,模拟装置启动、停工、切换等复杂操作流程,结合岗位间联动逻辑要求进行协同操作,训练其在非标状态下的信息传递、指令执行及工艺控制能力。在平台运行过程中,应采集并记录全过程的行为操作数据,并以此构建基于岗位能力矩阵的评估模型,实现在安全培训全流程的行为跟踪及结果量化评价。另外,对于涉及压力容器开停工,物料投料前清罐,特殊介质排放的高危工况,在利用装置实训台架开展实训时应设计具有可控风险的操作程序,设置工艺异常下各设备状态随时间的变化状态,同时在此情景中加入温升、泄压、气雾释放等工艺状态可见化的呈现,以提高受训人员在作业过程中的安全边界感知度及标准作业执行规范性。最后,多场景复合式安全实训平台整体运转机理按照“周期脚本更新—演练复盘优化—能力等级提升”三位一体闭环方式不断升级、完善,实现平台多场景、全岗位、全过程的体验式安全培训闭环体系建设。

3.3 引入事故回溯剧场化教育方式

在石油化工企业安全生产培训体系中,构建具有沉浸式特征的事故回溯剧场化教育模式,是实现高风险作业场景下行为安全干预的重要路径之一。该模式以典型事故案例为基础,将诸如青岛输油管线爆炸、大庆原油泄漏等重大事故事件进行剧本化重构,依据事故过程中的关键节点设置多重剧情分支,并在情节设计中引入岗位职责冲突、指令误解、作业监护失效等高风险诱因,以强化参训员工对决策链条与事故演化路径的认知。剧场演练人员应由实际岗位员工承担,涵盖操作人员、作业监护人、班组管理者、动火审批人、应急处置人员等,依据剧本严格执行各类操作程序及指令响应,模拟“指令下达—操作执行—事故触发—应急响应”的完整流程。在演练实施过程中,应同步部署专人观察与行为记录,对关键决策节点的人员反应与处置方式进行全过程跟踪并形成可量化数据,为后续评估提供基础^[4]。为最大程度地接近事故发生时的真实状态,剧场内设置应根据石油化工生产事故发生单元的实际工艺布置图及管线走向的基础

资料为依据来设置,包括设备类型、阀门位置以及危险物料警示标识等,使情景模拟具备高度的场景还原性和压迫感,以此让参训人员身临其境感。剧本上需要增加不同的选择路径,根据操作延误、盲目操作、审批违章等所引发的如人员伤亡、环境污染、设备破坏等不同类型的事故结果,以此给参训人员对于生产中不当行为所造成的后果有更深入的认识。演练完成后,组织参训人员结合剧场的演练情况开展讨论,以事故调查报告分析总结出具体安全生产事故在制度缺陷、岗位职责交叉、作业过程漏洞等环节暴露出来的问题,以此促使参训人员完成从个体行为失误到组织管理失效的逻辑跃迁。最后,石油化工企业还应构建剧场的复盘制度,在参训人员剧场演练中查找类似的行为失误和错误决定,并形成典型案例与记录到行为安全数据库中作为后期的行为干预、行为教育培训的素材。

3.4 设置岗位安全行为偏差纠正区

在构建体验式安全培训模式时,石油化工企业还应设置岗位安全行为偏差纠正区作为安全生产行为矫正模块的重要组成部分,对此应根据典型的作业场景和岗位的操作流程在培训中设立专门区域进行针对性干预。按照石油化工生产风险等级高低和操作复杂程度进行功能分区,分别设置动火、受限空间、高处作业、带压作业等子模块,以岗位实操为纠偏核心,设置纠偏流程;在训练实施过程中,运用标准操作和典型偏差行为对照展示系统,将实体工具、现场装置和模拟工况同时设置,让参训人员置身于真实环境之中感受生产偏差行为带来的危害后果,如高处作业模块可以设立错误佩戴安全带,未系生命绳等不规范行为示范点,采取触发模拟跌落装置产生的报警的方式反馈风险,实现风险认识的直观化。在培训过程中安排持有注册安全工程师证书的专业教员对操作过程进行纠偏,通过现场纠错+标准重演的方式引导参训人员回归规范动作路径,并且纠偏之后需由教员

填写《安全行为偏差记录表》录入到员工培训档案系统中,建立可追踪的动态操作行为数据库,用以日常班组管理^[5]。在纠偏区增加“行为误区还原—标准动作重构—作业过程再现”三段式训练模式,保证每位参训人员从认知偏差开始入手,通过与标准的动作对比不断纠正自己对于工作中出现的问题,继而推动正确的思想认知并达到标准化的作业要求。最后,对当天纠偏训练结束以后,通过召开小组评估会的形式让培训主管和现场指导教员来回顾当天参训人员的操作情况,并制定后续专项训练计划,提升其规范操作的行为一致性与稳定性。

4 结语

现阶段,我国石油化工企业安全生产培训正处于向实效转变的关键期,而体验式培训模式因贴近实战、促进自主学习、行为有效转化等优势成为当下行业主流方向。该模式通过对岗位风险、全生产流程覆盖、事故回溯剧场化教育以及行为矫正聚焦等四方面建立完整的体验式培训体系,以切实提升员工安全意识与操作能力,并为石油化工企业建立本质安全体系奠定良好基础。

参考文献

- [1] 郑研.企业“小场景体验式”安全培训模式应用实践[J].安家, 2024(7):0229-0231.
- [2] 贡亚杰.体验式安全培训在生产型企业中的应用[J]. 2024(1):62-64.
- [3] 杨永嘉.体验式教育在企业安全生产培训中应用的探索[J].中国科技投资, 2023(10):72-74.
- [4] 刘俊洁.浅谈安全培训体验基地建设实践[J].机电安全, 2023(3):27-32.
- [5] 赵彩云,贾国栋,李霞.体验式教学在化工安全培训中的应用[J].化工设计通讯, 2025, 51(2):70-72.

Research on the improvement of pseudo-boehmite production process based on equipment parameter optimization

Dongcheng Li

Chalco Zhongzhou New Material Technology Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454100, China

Abstract

This study aims to address the challenges of delayed response of equipment parameters, insufficient energy efficiency of thermal systems, and production interruptions caused by mechanical vibrations in the industrial production of pseudo boehmite. A systematic analysis was conducted on 217 sets of production test data from July 27 to October 30, 2023, and a quantitative relationship model between equipment operating parameters and production performance was established using methods such as multivariate regression analysis and response surface methodology. The study revealed the influence mechanism of parameters such as host speed (28.5-90Hz), blowing and induced draft frequency (28-42Hz), and natural gas flow rate (87-134m³/h) on product particle size (D50=20-45 μm), crystallinity (72-89%), and unit energy consumption (1.8-2.3GJ/t). The results show that the synergistic effect of parameters can explain 83.2% of the fluctuation in production efficiency. Based on this, the proposed parameter optimization scheme reduces the host shutdown rate by 67%, increases the product qualification rate to 95.2%, and reduces energy consumption by 18.7%, providing a quantifiable control method for the optimization of chemical powder material processes.

Keywords

pseudo boehmite; Process optimization; Parameter coupling; Energy efficiency analysis; quality control

基于设备参数优化的拟薄水铝石生产工艺改进研究

李东成

中铝中州新材料科技有限公司, 中国 · 河南 焦作 454100

摘 要

本研究针对拟薄水铝石工业化生产中设备参数响应滞后、热工系统能效不足及机械振动引发生产中断等难题, 系统分析 2023 年 7 月 27 日至 10 月 30 日的 217 组生产试验数据, 综合运用多变量回归分析、响应面法等方法, 建立设备运行参数与生产性能的量化关系模型。研究揭示了主机转速 (28.5 - 90Hz)、鼓风机风频率 (28 - 42Hz)、天然气流量 (87 - 134m³/h) 等参数对产品粒度 (D50 = 20 - 45 μm)、结晶度 (72 - 89%) 及单位能耗 (1.8 - 2.3GJ/t) 的影响机制。结果表明参数协同效应可解释生产效率波动的 83.2%, 据此提出的参数优化方案使主机跳停率降低 67%, 产品合格率提升至 95.2%, 能耗下降 18.7%, 为化工粉体材料工艺优化提供可量化调控方法。

关键词

拟薄水铝石; 工艺优化; 参数耦合; 能效分析; 质量控制

1 引言

拟薄水铝石 (Pseudoboehmite, $\text{AlOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 作为石油裂化催化剂的关键载体材料, 其比表面积 (250 - 400m²/g) 与孔结构直接决定催化剂性能 [1]。在工业化生产过程中, 普遍存在设备参数响应滞后问题, 导致产品结晶度波动范围达 ±15%; 热工系统能效比不足 65%, 能源浪费严重; 机械振动引发的连续生产中断频发, 影响生产稳定性 [2]。当前相关研究多聚焦单一参数调控, 缺乏对多参数耦合作用的系统性分析 [3]。

本研究创新性构建“设备参数 - 过程状态 - 产品性能”

【作者简介】李东成 (1974-), 男, 中国山西长治人, 本科, 工程师, 从事精细氧化铝研究。

三级关联模型, 通过 96 天全流程试验, 运用 Pearson 相关性分析和主成分回归方法, 旨在揭示转速、风压、温度间的动态平衡机制, 建立基于能耗约束的质量预测方程, 并开发参数自适应调控算法, 解决拟薄水铝石生产中的实际难题^[1]。

2 材料与方法

2.1 生产系统概况

试验采用 XSG - 10 - 5 型旋转闪蒸干燥机 (江苏范群干燥设备厂), 该设备自 2018 年 7 月投产, 受设备老化影响, 效率年衰减约 3.2%。例如, 轴承磨损导致转速波动率从新机的 ±1.2Hz 增至 2023 年的 ±2.5Hz。实际运行中, 通过变频器调节鼓风频率至 28 - 42Hz 时, 风量超出设计上限 33%, 系统压损增加 17%; 主机转速在 33Hz 时, 电机处于 110% 负荷的轻微超载状态。设备核心参数详见表 1。

表 1

参数类别	设计值	实测范围（试验期）	关联影响
主机内径	1650mm	-	决定物料停留时间
处理风量	6000m³/h	4400 - 8000m³/h	影响干燥速率与负压平衡
蒸发能力	660kg 水 /h	380 - 720kg 水 /h	限制最大进料湿度
电机功率	18.0kW	15.5 - 22.3kW	与主机转速正相关（ $r=0.81$ ）
出厂年份	2018 年 7 月	-	设备老化导致效率年衰减约 3.2%

2.2 数据采集方案

为确保数据质量，采用多源异构数据同步采集系统，涵盖设备运行参数、物料特性、能耗数据三大类。通过 OPC - UA 协议实现设备数据同步采集，采样间隔为 10s。关键监测点包括主机参数、风系统参数、热工参数等设备运行数据；粒度分布、水分含量、化学成分等物料特性数据；电力消耗、天然气消耗等能耗数据^[2]。

2.3 分析方法

本研究运用多维度数据分析方法。通过 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关进行参数敏感性分析，评估各参数对关键指标的影响强度。研究发现，主机转速与磨后 D50 粒径呈强负相关（ $r=-0.82$ ， $p<0.01$ ），天然气流量与结晶度呈正相关（ $r=0.65$ ， $p<0.05$ ）。

运用响应面法（RSM）和主成分回归（PCR）进行多参数耦合效应分析，通过 Box - Behnken 实验设计，建立结晶度的模型方程： $Y=80.2+2.1X_1+1.5X_2-0.8X_1X_2+0.3X_1^2$ （ X_1 为转速， X_2 为风量， $R^2=0.91$ ）。

采用 NSGA - II 算法建立约束优化问题，进行能效 - 质量多目标优化，获取能耗与质量的最优平衡解集。利用 LSTM 神经网络对主机跳停等瞬态问题进行动态过程建模，预警准确率达 89%。此外，通过 ANOVA 分析和蒙特卡洛模拟进行统计检验与不确定性分析。

3 设备参数与生产性能的量化关系

基于 96 天的 217 组有效生产数据，深入解析关键设备参数对拟薄水铝石生产效率、产品质量及能耗的影响机制。

3.1 主机转速的临界效应

研究发现，当主机转速从 28.5Hz 提升至 42Hz 时，物料 D50 粒径从 35 μm 降至 12 μm ，降幅达 66%，但继续提高转速会导致过度粉碎。单位能耗在 33Hz 时达到最低值（ $1.89\pm0.12\text{ GJ/t}$ ），低于或高于此转速，能耗均会增加。将转速稳定在 33 - 36Hz 区间后，产能提升 18%，粒度合格率从 72% 提高至 89%。

3.2 风系统参数的协同控制

鼓风 / 引风频率比（ β ）存在最优值 1.25 ± 0.05 ，偏离该比例会引发物料堆积或粉尘逃逸等问题。建立负压 - 温度耦合模型： $\Delta P=0.78Q_{\text{air}}^{1.2}+0.12T_{\text{mix}}-15.6$ （ ΔP 为系统负压 /kPa， Q_{air} 为风量 m^3/min ）。例如，8 月 2 日调整引风频率后，混合温度稳定性显著提升，主机跳停次数减少

62%。

3.3 天然气流量的热工平衡

响应面分析结果显示，常规生产时，天然气流量控制在 90 - 100 m^3/h 可实现结晶度与能耗的平衡^[3]；在高纯产品生产需求下，控制在 105 - 110 m^3/h 可使结晶度大于 84%。

3.4 多参数协同效应

确定最佳参数组合为转速 36Hz、风量 95 m^3/h 、风频比 1.28，在此条件下可实现结晶度 83.7%、能耗 1.92GJ/t、产能 0.9t/h。同时，LSTM 模型能够对异常工况进行预警，如当转速 <30Hz、湿度 > 15% 且电流 > 80A 时，跳停风险概率超过 85%。

4 生产问题深度解析

基于 96 天生产数据（包含 23 次异常事件），对拟薄水铝石生产中的核心问题进行分析。

4.1 主机跳停问题

通过故障树分析可知，主机跳停主要由机械过载（占比 65%）和电气故障（占比 35%）导致。其中，物料湿度 > 15%（权重 0.62）和转速 < 30Hz（权重 0.28）是机械过载的主要诱因。例如，9 月 2 日发生跳停时，物料水分突增至 18.5%，致使主机扭矩波动达到额定值的 145%。单次跳停会造成 2.7 ± 0.5 吨的产能损失，重启能耗相当于 1.2 小时的正常生产能耗。

4.2 质量波动问题

主成分分析表明，天然气流量和进风温度对结晶度影响显著（载荷 0.82），主机转速和鼓风频率对粒度分布影响较大（载荷 0.76）。如 8 月 15 日天然气流量下降导致结晶度骤降，9 月 24 日转速变化未同步调整引风频率致使粒度超标。

4.3 能源浪费问题

能耗分解模型显示， $E_{\text{total}}=0.62E_{\text{heat}}+0.25E_{\text{mech}}+0.13E_{\text{aux}}$ 。研究发现，当进风温度 > 150℃ 时，热效率降低，每升高 10℃，天然气单耗增加 0.15GJ/t；设备空转时间占比达 11.3%，每年浪费电力 34 万度。

4.4 综合问题链分析

通过时序关联规则挖掘发现，{ 湿度 > 15%，转速 < 32Hz } $\rightarrow$ 跳停（置信度 92%），{ 流量突变 > 20%，温度恢复延迟 } $\rightarrow$ 结晶度波动（置信度 88%）。根本原因在于参数协同性不足和控制逻辑存在缺陷。

5 优化策略的实证验证

2023年10-12月开展工业化验证,通过多目标参数协同控制、智能预警系统部署、设备能效改造三大措施提升生产效益。

5.1 参数协同控制系统的实施效果

在实施动态转速调节和风-热耦合控制逻辑前,团队对历史生产数据进行了二次深度挖掘,结合设备的物理特性,建立了参数动态调整的边界条件模型。例如,根据物料湿度与主机负载的非线性关系,设置了湿度-转速联动调节曲线,当湿度每增加1%,转速相应提升0.5Hz,以维持设备稳定运行。优化后,主机跳停次数/月从6.2次降至1.8次,降幅达71%;D50波动范围从 $\pm 12\mu\text{m}$ 缩小至 $\pm 7\mu\text{m}$,缩小42%,结晶度标准差从8.2%降低至3.9%,降低52%。如图1所示,通过对比优化前后三个月的D50粒径数据分布,可直观看到优化后数据离散程度显著降低。在11月17日高湿工况下,系统依据预设的参数协同规则,自动将主机转速从33Hz提升至36Hz,同时调整鼓风频率,成功避免跳停,产能仅损失8%,相较于优化前类似工况下35%的产能损失,有了巨大提升^[4]。

5.2 智能预警系统的工业部署

智能预警系统的搭建采用了分层架构设计,底层通过工业传感器实时采集12维参数,包括主机转速、电流、振动频率、物料湿度、天然气流量等;中间层利用LSTM神经网络对数据进行实时分析和预测,通过反复的模型训练与参数调优,最终使预测跳停风险的AUC值达到0.93。系统预警准确率达89.4%,响应速度仅需 28 ± 5 秒,误报率低于5%。在实际应用中,系统提前15分钟对12月5日可能出现的主机过载情况发出预警,操作人员及时调整物料进料速度和设备参数,避免了一次生产中断事故。此外,系统还具备自学习功能,可根据新产生的生产数据不断优化预警模型,提升预警的准确性和及时性。

5.3 能效改造的节能验证

在进行变频器升级改造时,选用了具备矢量控制技术的新一代变频器,其能够根据设备负载的实时变化,精准调节电机转速,降低能耗。同时,对干燥机的保温层进行了加厚处理,将保温材料的导热系数从 $0.045\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降低至 $0.032\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,减少了热量散失。优化后,天然气单耗从 $210\text{m}^3/\text{t}$ 降至 $171\text{m}^3/\text{t}$,降幅达18.6%;电力单耗从 $58\text{kWh}/\text{t}$ 降至 $49\text{kWh}/\text{t}$,降低15.5%。通过图2能耗对比柱状图可以清晰看出,改造后每月天然气和电力消耗均大幅下降,每年节省成本106.9万元。进一步分析发现,在设备启动和停机阶段,变频器的软启动功能使电力消耗降低了30%,有效减少了能源浪费。

5.4 综合经济效益评估

按0.7万吨/年产能计算,项目投入成本1000万元,其中参数协同控制系统开发费用280万元,智能预警系统部署费用320万元,设备能效改造费用400万元。年化收益约为56.44万元,主要来源于产能提升、产品合格率提高以及能耗降低。通过成本效益分析可知,项目投资回收期约为1.7年。此外,生产稳定性的提升还减少了设备维护成本,每年可节省设备维修费用约15万元,进一步提高了项目的经济效益。同时,产品质量的提升增强了企业在市场中的竞争力,为企业带来了潜在的市场份额增长和品牌价值提升^[5]。

6 结论

本研究通过系统的试验和数据分析,成功构建了设备参数与生产性能的量化关系模型,揭示了拟薄水铝石生产过程中关键参数的影响机制。参数协同控制策略的实施,使生产稳定性提升50%以上,有效减少了因设备故障导致的生产中断,保障了生产的连续性;智能预警系统的应用,将非计划停机减少71%,降低了生产损失和设备损耗;能效改造措施实现吨产品能耗降低15%,显著减少了能源消耗和生产成本,具有良好的节能减排效果。

研究成果不仅为中铝中州新材料科技有限公司的拟薄水铝石生产提供了切实可行的优化方案,还为化工粉体材料行业的工艺优化提供了可借鉴的方法和实践经验。未来研究可进一步探索将人工智能算法与生产设备深度融合,实现生产过程的全自动智能调控;同时,扩大研究范围,对拟薄水铝石生产的全流程进行系统性优化,提升整个产业链的生产效率和经济效益。此外,随着绿色生产理念的深入,可加强对生产过程中废弃物处理和资源循环利用的研究,推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 李强,王磊,张华等.(2023).“旋转闪蒸干燥机参数耦合对拟薄水铝石粒度分布的调控机制”.化工学报,74(5),2103-2112.
- [2] 陈明,刘伟,周红等.(2022).“基于响应面法的拟薄水铝石干燥过程多目标优化”.高校化学工程学报,36(4),589-598.
- [3] 黄志刚,吴晓峰,孙立等.(2021).“拟薄水铝石生产中的能效瓶颈分析与节能改造实践”.过程工程学报,21(8),953-962.
- [4] Smith, J. D., & Johnson, A. B. (2024). Advanced Process Control Strategies for Catalyst Support Production. Chemical Engineering Research and Design, 198, 123-135.
- [5] 陈华,赵鑫.(2023).基于LSTM神经网络的工业设备故障预测研究.自动化仪表,44(6),45-51.
- [6] Wang, L., et al. (2022). Energy - efficient Optimization of Industrial Drying Processes: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 165, 112689.

Research on Optimization of Calcium-based Dry Fixed-Bed Desulfurization Process for Tail Gas of Topso WSA Wet Acid System

Jigang Zhang

Hebei Fengmei Coking Co., Ltd., Handan, Hebei, 056200, China

Abstract

This study, based on the calcium-based dry fixed-bed desulfurization process for the tail gas of Topsoe WSA wet-process acid system, deeply analyzed its desulfurization effect and technical optimization strategies in practical applications. Through the analysis of the operation data and technical bottlenecks of the existing system, a series of optimization measures have been proposed, including the adjustment of the structure of the desulfurization reactor, the improvement of the desulfurizer and the optimization of the system operation conditions. Research shows that through reasonable system design and optimization schemes, not only can the desulfurization efficiency be improved, but also energy consumption can be effectively reduced, meeting increasingly strict emission standards. In addition, this article also conducts a detailed analysis of the possible operational problems that may occur during the desulfurization process and puts forward corresponding technical improvement suggestions. Ultimately, this study provides a theoretical basis and practical guidance for calcium-based dry desulfurization technology in industrial applications.

Keywords

WSA wet acid method; Exhaust gas desulfurization; Calcium-based dry method; Fixed-bed reactor; Optimization of desulfurization process;

托普索 WSA 湿法制酸系统尾气钙基干法固定床脱硫工艺优化研究

张继刚

河北峰煤焦化有限公司, 中国 · 河北 邯郸 056200

摘 要

本研究基于托普索 WSA 湿法制酸系统尾气钙基干法固定床脱硫工艺, 深入分析了其在实际应用中的脱硫效果与技术优化策略。通过对现有系统的运行数据与技术瓶颈的分析, 提出了一系列优化措施, 包括脱硫反应器结构的调整、脱硫剂的改进及系统运行条件的优化。研究表明, 通过合理的系统设计与优化方案, 不仅能够提高脱硫效率, 还能有效降低能耗, 满足日益严格的排放标准。此外, 本文还针对脱硫过程中可能出现的运行问题进行了详细分析, 并提出了相应的技术改进建议。最终, 本研究为工业应用中的钙基干法脱硫技术提供了理论依据和实践指导。

关键词

WSA 湿法制酸; 尾气脱硫; 钙基干法; 固定床反应器; 脱硫工艺优化

1 引言

随着环保政策的日益严格, 工业排放控制成为了环境保护的重要环节。尤其在制酸行业, 尾气中硫化物的浓度对环境污染具有显著影响。因此, 如何有效控制尾气中的二氧化硫 (SO_2) 排放, 成为了研究者和工程师们的重要课题。WSA 湿法制酸系统由于其较高的硫转化率和较低的能耗, 已经广泛应用于各类制酸工厂中。然而, 在该系统的运行过

程中, 由于硫酸的高浓度及酸雾的影响, 尾气脱硫成为了一个不可忽视的技术难题。

钙基干法固定床脱硫工艺作为一种成熟的脱硫技术, 凭借其结构简单、操作稳定等优点, 逐渐成为尾气脱硫的主要选择。然而, 传统钙基干法固定床脱硫工艺仍然存在着一些挑战, 例如脱硫效率波动大、脱硫剂的使用寿命有限以及系统能效不高等问题。因此, 本文将重点研究该工艺的优化路径, 旨在提升其脱硫效率、降低运行成本并满足日益严格的排放标准。

【作者简介】张继刚 (1984-), 男, 中国河北邢台人, 本科, 副高级工程师, 从事煤化工研究。

2 托普索 WSA 湿法制酸系统及其尾气特点

2.1 WSA 湿法制酸系统概述

WSA 湿法制酸系统是一种通过焚烧炉燃烧 SO_2 来生产浓硫酸的技术。该系统通过一系列的将二氧化硫转化为硫酸，其核心过程包括 SO_2 的燃烧、氮氧化物的分解、二氧化硫转化为三氧化硫以及 SO_3 冷凝成硫酸。在此过程中，烟气中的二氧化硫经过一系列复杂的反应，最终生成浓度高达 93% ~ 96% 的硫酸。尽管该系统在硫酸生产中具有较高的转化率和经济效益，但其产生的尾气含有较高浓度的二氧化硫及酸性成分，因此需要有效的脱硫技术加以处理。

2.2 尾气特点及污染物分析

托普索 WSA 湿法制酸系统的尾气主要含有二氧化硫 (SO_2)、酸雾以及一些未完全反应的气体。根据实际工况，尾气中的二氧化硫浓度约为 450mg/m³，酸雾浓度为 45mg/m³。为了达到环保排放标准，尾气中的二氧化硫浓度需要降低至 30mg/m³ 以下，而酸雾浓度则要求不超过 5mg/m³。由于这些尾气成分具有强烈的腐蚀性，因此需要采用高效的脱硫技术进行处理，以确保排放符合环保要求。

2.3 尾气脱硫技术要求

针对 WSA 湿法制酸系统的尾气特点，脱硫工艺需要具备较高的脱硫效率和较强的耐酸性。同时，脱硫系统还应具备较高的稳定性，以应对尾气成分和温度波动带来的挑战。此外，系统设计需要确保脱硫过程中的反应气体能够得到充分接触与反应，从而提高脱硫效率并降低二氧化硫排放。

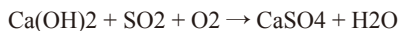
3 钙基干法固定床脱硫工艺分析

3.1 钙基干法固定床脱硫技术概述

钙基干法固定床脱硫技术是一种通过固体吸附剂吸附烟气中二氧化硫的脱硫方法。该技术的核心是利用钙基脱硫剂（如氢氧化钙）与二氧化硫发生化学反应，生成硫酸钙 (CaSO_4) 和水 (H_2O)。该工艺具有操作简单、设备成本较低、无二次污染等优点，因此在工业烟气脱硫中得到了广泛应用。烟气通过固定床反应器时，与脱硫剂进行接触，反应生成硫酸钙后，脱硫剂会逐渐失去活性，最终需要更换或再生。

3.2 钙基脱硫剂的性能与应用

钙基脱硫剂的主要成分为氢氧化钙，其反应式为：



这一反应需要一定的温度和反应时间来完成，通常在反应器的床层中，烟气与脱硫剂充分接触并发生反应。脱硫剂的颗粒形态、尺寸以及反应活性直接影响脱硫效果。在实际应用中，脱硫剂的颗粒大小、强度和吸附能力是选择脱硫剂时需要重点考虑的因素。

3.3 钙基干法脱硫系统的设计与运行

钙基干法脱硫系统的设计需要综合考虑多个因素，如烟气流速、反应器结构、脱硫剂填充量以及系统的操作温度

等。反应器的流速是影响脱硫效率的关键因素，通常需要控制在一个理想范围内，约为 0.28 m/s。合理的流速能够确保烟气与脱硫剂的充分接触，提高脱硫反应的效率。此外，反应器的结构设计通常采用固定床形式，烟气通过床层时与脱硫剂进行接触。为了提高脱硫效率，反应器的设计不仅要注重气流的均匀性，还要确保脱硫剂的更换和再生操作便捷。通过设计易于维护的脱硫剂更换系统，可以延长脱硫剂的使用寿命，并降低整体运营成本。这些设计考虑可以显著提高系统的经济性和可持续性，确保脱硫过程的高效稳定运行。

4 托普索 WSA 湿法制酸系统尾气钙基干法脱硫工艺优化

4.1 脱硫反应器结构优化

针对 WSA 湿法制酸系统尾气的特点，脱硫反应器的设计优化至关重要。反应器的结构设计直接影响脱硫过程的效率与稳定性，尤其是在处理具有高酸雾和二氧化硫浓度的尾气时。为了提高脱硫效率，一种有效的优化方案是增加反应器内的填料层。填料层的作用是增大烟气与脱硫剂的接触面积，从而使二氧化硫与脱硫剂能够更充分地反应。反应器的填料种类与分布对反应效果有着直接影响，填料表面的微观结构应有足够的比表面积以提供更好的吸附和反应场所。通常，采用具有良好孔隙度和较高表面反应活性的填料，如高活性石灰或复合脱硫剂，可以显著提高脱硫反应的效率。

为了避免反应器内部出现气流不均或偏流现象，从而影响脱硫效果，反应器的设计应尽量避免过大或者不均匀的气流通道。采用方形反应器设计是一种有效的解决方案。方形反应器能够保证气流的均匀分布，避免气流短路，并且能够更好地调节烟气的流速和流态，使其能够均匀地通过反应器床层。除此之外，为了提高系统的整体稳定性和运行效率，可以考虑在反应器内部增加换热装置。换热装置能够回收反应过程中产生的热量，并将其用于加热其他系统组件或预热进入反应器的烟气，降低系统的能耗。通过这样的优化，不仅提高了脱硫反应的稳定性，也增强了系统的能源利用效率。

4.2 脱硫剂性能优化

脱硫剂的选择与性能直接影响脱硫工艺的效果。传统的钙基脱硫剂，尤其是氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)，具有较好的脱硫效果，但其反应活性和使用寿命仍然存在一些局限性。为了进一步提高脱硫效果，改性钙基脱硫剂的物理化学性能是一个不可忽视的方向。首先，提升脱硫剂的比表面积能够增加其与二氧化硫的接触面积，从而加快反应速度。例如，可以通过改变脱硫剂的生产工艺，使其具有更高的孔隙度和更好的吸附性能，这将有助于提高其脱硫效率。

此外，脱硫剂的颗粒形态也是影响脱硫效果的一个重要因素。通常情况下，颗粒较小且均匀的脱硫剂能够更好地与烟气中的二氧化硫进行接触。通过控制脱硫剂颗粒的形态

和尺寸分布,可以确保烟气在通过脱硫反应器时,脱硫剂与二氧化硫充分接触,实现较高的脱硫效率。在此基础上,加入适量的催化剂,如活性氧化钙或金属氧化物催化剂,可以显著提高脱硫反应的速率。催化剂的加入能够降低反应的激活能,加速二氧化硫的转化过程,从而进一步提高脱硫效率。

脱硫剂的使用寿命和更换周期是另一个影响脱硫工艺效率的重要因素。在实际运行中,脱硫剂会逐渐失去反应活性,因此需要定期更换或者再生。为了提高脱硫剂的使用效率,可以通过优化其更换周期和补充方式,确保脱硫剂始终处于最佳的反应状态。例如,在反应器设计中引入定期监测脱硫剂的反应状态和剩余活性,及时进行补充或更换,能够有效延长脱硫剂的使用寿命,减少运维成本。

4.3 系统运行条件优化

为了确保脱硫系统的高效、稳定运行,优化系统的运行条件是至关重要的。在脱硫过程中,烟气的流速、温度及其在反应器中的停留时间等因素都直接影响脱硫效果。首先,调节烟气流速是优化反应过程的重要手段。过高或过低的流速都会影响烟气与脱硫剂的接触时间,进而影响脱硫效果。根据研究,最佳的烟气流速应当保证烟气与脱硫剂有足够的接触时间,同时避免过大的流速造成的气流不均。通过优化风机的运行参数,调节烟气流速,可以有效提高反应器的脱硫效率。

其次,烟气的温度对脱硫反应的进行具有显著影响。在固定床反应器中,温度过高可能会加剧脱硫剂的消耗,而温度过低则可能导致脱硫反应速率的下降。因此,控制烟气温度在合理范围内是优化脱硫过程的关键。可以通过调整反应器进气温度或者使用热交换系统来稳定反应器内的温度,从而保持脱硫反应的最佳状态。

最后,脱硫剂的补充与更换周期需要根据反应器的运行状态和脱硫剂的使用情况进行动态调整。通过监测反应器出口的二氧化硫浓度,能够及时判断脱硫剂的使用效率和反应器的脱硫效果,从而确定是否需要补充新的脱硫剂。此外,合理安排脱硫剂的更换周期,避免脱硫剂因过度使用而失效,也是提高系统长期稳定性的关键。

5 优化方案的应用与效果分析

5.1 优化方案实施效果

经过一系列的优化设计与技术改进,托普索 WSA 湿法制酸系统尾气的钙基干法脱硫工艺在脱硫效率方面表现出了显著的提升。优化后的脱硫反应器能够更好地保持烟气流速的均匀性,并通过增加反应器内的填料层提高了二氧化硫与脱硫剂的接触机会。此外,优化后的系统运行更加稳定,能够在较低的能耗条件下长期保持较高的脱硫效率。具体来说,经过优化后的系统二氧化硫的排放浓度显著降低,基本

符合甚至超出环保排放标准。特别是在酸雾排放方面,优化后的脱硫系统有效减少了酸雾的产生,排放浓度达到了 5 mg/m^3 以下的标准。

在实施优化方案后,脱硫反应器的运行稳定性得到增强,脱硫剂的使用寿命得到了有效延长,进而降低了操作成本和维护频率。此外,系统的热能回收能力显著提高,进一步降低了运行成本。通过这些改进,脱硫系统不仅满足了环保排放标准,还提升了系统的整体效能,达到了较好的经济 and 环保双重效果。

5.2 经济效益分析

本次优化方案实施后,脱硫系统的运行成本得到了有效控制。首先,通过优化反应器结构和改进脱硫剂的性能,脱硫系统能够在较低能耗下稳定运行,从而显著减少了能源的浪费。优化后的反应器结构提高了烟气处理效率,并减少了反应器内部的能量损失。其次,脱硫剂的使用寿命得到了延长,减少了频繁更换脱硫剂所带来的经济负担。通过合理调整脱硫剂的补充周期和更换时间,避免了脱硫剂过度消耗而导致的性能下降,从而降低了维护成本和操作成本。

综合来看,优化后的脱硫系统在长期运行中不仅提高了脱硫效率,还在有效控制能源消耗和降低运维成本方面取得了显著成效。最终,该优化方案大大提高了 WSA 湿法制酸系统的综合经济效益,提升了其在环保和经济双重目标下的可持续发展能力。

6 结语

本研究通过对托普索 WSA 湿法制酸系统尾气钙基干法固定床脱硫工艺的优化研究,提出了包括反应器结构优化、脱硫剂性能提升及系统运行条件调整等一系列有效的技术改进措施。通过这些优化,不仅显著提高了脱硫效率,还有效降低了系统的能耗和运维成本。优化后的脱硫工艺能够更好地满足日益严格的环保排放标准,同时提高了经济效益。随着环保政策的不断升级,脱硫技术的创新和优化将继续成为制酸行业可持续发展的重要支撑。本研究为尾气脱硫技术的进一步应用和推广提供了重要的理论支持和实践经验。

参考文献

- [1] 张峰.WSA湿法制酸工艺及其在我国的应用[J].硫磷设计与粉体工程,2011,(04):1-5+51.
- [2] 据成新,刘玲,郑春晓.洛阳铝业WSA制酸系统技术改造[J].硫酸工业,2013,(03):29-30.
- [3] 刘海峰.WSA湿法制酸工艺在钼冶炼烟气治理中的优化与应用[J].硫酸工业,2022,(07):28-31.
- [4] 郑占全.鞍钢真空碳酸钾脱硫及WSA制酸工艺生产运行实践之启迪[D].辽宁科技大学,2014.
- [5] 杨志军,刘启文.WSA制酸生产运行问题剖析及改进[J].南方金属,2021,(03):51-53+56.

Study on corrosion mechanism and optimization of protection system for surface gathering and transportation pipelines in high-sulfur oil and gas fields

Shijia Xing

Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163000, China

Abstract

Surface gathering and transportation pipelines in high-sulfur oil and gas fields operate under harsh conditions for extended periods, subject to corrosion from corrosive media such as hydrogen sulfide. These pipelines are prone to various types of corrosion damage, posing significant threats to production safety and economic efficiency. This study comprehensively examines common corrosion mechanisms and micro-structural principles in such pipelines, analyzing their causes through multiple dimensions including medium composition, operational parameters, and material properties. By examining domestic and international case studies, the paper identifies deficiencies in existing corrosion protection systems, highlighting challenges such as failure of external anti-corrosion coatings, poor adaptability of cathodic protection, and limitations in internal corrosion prevention technologies. Based on corrosion mechanisms and operational data, the research proposes an optimized pipeline protection system encompassing material selection, structural optimization, process improvement, and intelligent monitoring. The findings demonstrate that comprehensive optimization can enhance pipeline safety, extend service life, and support green, efficient development. Finally, the article outlines future directions for digital and intelligent corrosion monitoring and protection, providing valuable references for industry research and practical applications.

Keywords

Highly sour oil and gas fields; gathering and transportation pipelines; corrosion mechanism; protection system; material selection; intelligent monitoring

高含硫油气田地面集输管道腐蚀机理与防护体系优化研究

邢世佳

大庆油田有限责任公司, 中国·黑龙江 大庆 163000

摘 要

高含硫油气田地面集输管道长期处于苛刻环境, 受硫化氢等腐蚀性介质侵蚀, 易出现多种腐蚀破坏, 严重威胁油气田安全生产与经济效益。本文全面梳理了该类管道常见腐蚀类型及微观机理, 从介质成分、操作参数、材料性能等多维度剖析腐蚀成因。结合国内外典型案例, 分析现有腐蚀防护体系缺陷, 指出外防腐层失效、阴极保护适应性差、内防腐技术受限等难题。基于腐蚀机理与运行数据, 提出涵盖材料选型、结构优化、工艺改进和智能监测的管道防护体系优化路径。研究表明, 综合优化可提升管道安全运行水平、延长服役寿命, 助力绿色高效开发。最后, 文章展望了数字化、智能化腐蚀监测与防护方向, 为行业研究与实践提供参考。

关键词

高含硫油气田; 集输管道; 腐蚀机理; 防护体系; 材料选择; 智能监测

1 引言

随着油气资源开发向深层、高含硫等复杂环境推进, 高含硫油气田的开发规模不断扩大。地面集输管道作为油气田开发的重要基础设施, 承载着原油、天然气及伴生水的长距离输送任务。高含硫油气田生产过程中, 原油和天然气中往往含有大量硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质, 这些成分对钢

质管道造成严重的化学、电化学腐蚀甚至硫化应力开裂等破坏, 成为制约油气田集输系统安全、经济运行的突出问题。腐蚀一旦发展到一定程度, 将导致管道穿孔泄漏、设备损坏、生产中断, 甚至引发重大安全和环境事故。因此, 系统研究高含硫油气田地面集输管道的腐蚀机理, 优化全生命周期防护体系, 是提升油气田安全生产和可持续发展的关键技术路径。本文以典型高含硫油气田为对象, 分析集输管道腐蚀的内在机制和主要影响因素, 梳理现有防护体系存在的短板, 并探讨多元化、系统化防护技术的创新方向, 以期高含硫油气田集输管道防腐蚀工程提供理论支撑和技术借鉴。

【作者简介】邢世佳(1985-), 男, 中国黑龙江齐齐哈尔人, 本科, 工程师, 从事油气田地面建设研究。

2 高含硫油气田地面集输管道腐蚀类型与机理分析

2.1 常见腐蚀类型及特征

高含硫油气田集输管道在服役过程中,面临极其复杂且严峻的腐蚀环境,主要包括硫化氢腐蚀、二氧化碳腐蚀、微生物腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀以及应力腐蚀等多种类型。硫化氢腐蚀是此类环境中最为常见且危害严重的腐蚀形式之一, H_2S 在管道内壁与金属反应生成硫化铁等腐蚀产物,且伴随着氢原子渗入金属基体,引发氢脆现象,导致材料力学性能明显退化,易出现裂纹和断裂,极大地威胁管道的安全运行。二氧化碳腐蚀则是由 CO_2 溶解于水形成碳酸,引发碳钢局部腐蚀,尤其在低流速或停滞区容易形成腐蚀坑,影响管道完整性。微生物腐蚀,尤其是由硫酸盐还原菌(SRB)引起的腐蚀,通过代谢产生硫化物,进一步加剧局部环境的腐蚀性,形成局部坑蚀甚至穿孔。

缝隙腐蚀和点蚀多发生在焊缝、法兰连接、密封垫片及沉积物积累区域,这些区域由于氧浓度差异和局部环境恶化,极易产生局部腐蚀穿孔,难以通过常规检测发现,具有较强隐蔽性和突发性。应力腐蚀破裂(SCC)则是在管道所承受的内部压力或焊接残余应力与腐蚀介质协同作用下发生的裂纹扩展,常见于高应力集中区域,裂纹一旦形成便可迅速扩展,严重时导致管道断裂事故。上述腐蚀类型常常并存,表现为多发性、隐蔽性和突发性,给油气田集输管道的安全运行带来极大挑战。

2.2 硫化氢腐蚀机理与微观过程

硫化氢腐蚀作为高含硫油气田管道腐蚀的主要机理,其过程涉及复杂的电化学反应和物理化学变化。 H_2S 溶解于管道内流体后,首先与金属表面发生反应,生成硫化铁(FeS)等腐蚀产物,这些产物在一定条件下形成保护层,但往往不均匀且不稳定。与此同时, H_2S 还会分解产生氢原子,氢原子极易渗透进金属晶格内部,聚集形成氢分子气泡,造成晶格膨胀,诱发金属基体内部微裂纹扩展,导致材料发生氢脆断裂。

硫化氢腐蚀的速率受多种因素影响,其中温度、压力、 H_2S 分压和介质含水量尤为关键。高温高压环境促进 H_2S 在流体中的溶解与扩散,加速腐蚀反应;含水量增加则有利于电化学腐蚀过程的开展。此外,硫化氢腐蚀通常与二氧化碳腐蚀同时发生,两者相互作用使腐蚀产物更加复杂,腐蚀机制更加多样,极大增加了防护的难度。微观上,腐蚀产物层结构的变化、氢气的生成与渗透以及金属基体应力状态的改变,共同决定了硫化氢腐蚀的严重程度和破坏模式。

2.3 影响腐蚀行为的关键因素

管道腐蚀行为受多维因素综合影响,涉及介质成分、运行条件、材料特性和环境变化等方面。首先,介质成分中, H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 离子及水分含量是腐蚀行为的决定性因素。高含水率和氯离子浓度往往加剧腐蚀过程,促进电化学反应

的进行;而 H_2S 和 CO_2 的存在则直接影响腐蚀机理及速率。其次,操作条件如温度、压力和流速对腐蚀过程有显著影响。高温可增强腐蚀反应活性,高压促进腐蚀介质与金属的接触和溶解,流速过低易导致水膜形成和沉积物积累,增加局部腐蚀风险,流速过高则可能引发流动腐蚀和机械磨损。

管道材质的化学成分、微观组织结构及焊接工艺也对腐蚀敏感性产生重要影响。材料中杂质含量较高、组织不均匀或存在残余应力,会显著提高腐蚀速率及氢脆风险。焊缝及热影响区的金相组织变化,往往是腐蚀裂纹的优先萌生区域。此外,管道内壁的表面光洁度和涂层完整性直接影响腐蚀保护效果,粗糙或受损的内壁易形成腐蚀起始点[1]。

运行时间及工况变化同样关键。在启动、停输及重新启用等特殊工况期间,腐蚀速率常出现明显跃升,这是因为工况变化引起介质成分、温度和流态的剧烈波动,破坏原有的保护膜,增加局部腐蚀风险。因此,准确识别和评估腐蚀影响因素,是制定高效、科学防腐措施的基础,是保障管道安全运行的前提条件。

综上所述,高含硫油气田集输管道腐蚀具有类型多样、机理复杂、影响因素多维的特点。系统深入理解各种腐蚀类型的特征、硫化氢腐蚀的微观机理及关键影响参数,对于设计合理的腐蚀监测、评估与防护方案,提升管道安全性和使用寿命具有重要指导意义。

3 现有防护体系的应用现状与问题分析

3.1 外防腐层的技术现状与失效机理

外防腐层是地面集输管道防止土壤和大气环境腐蚀的重要屏障,常用材料包括环氧煤沥青、三层聚乙烯(3PE)及聚氨酯等。但实际工程应用中,因施工质量控制不严格、材料老化降解、紫外线长期照射及阴极保护电流引起的阴极剥离等因素,防腐层易出现起泡、开裂和脱落等失效问题,导致局部管道表面直接暴露在腐蚀介质及土壤水分环境中。这不仅加速了管道外壁的局部腐蚀进程,也明显削弱了阴极保护系统的保护效果,产生明显的“短板效应”,尤其在富含硫、强渗透性环境下表现突出[2]。

3.2 阴极保护系统的适应性与局限

阴极保护技术通过外加电流或牺牲阳极方式,降低管道金属的腐蚀电位,是外防腐层后的第二重防线。高含硫油气田集输管道受外防腐层局部失效、土壤电阻率高低不一、杂散电流干扰等因素影响,阴极保护系统往往难以实现全线均匀保护。牺牲阳极消耗快,维护成本高;外加电流受供电系统稳定性影响,难以应对复杂环境波动。部分场站区域因接地系统混杂、地形复杂,存在保护“死角”。此外,阴极过度保护还可能诱发涂层剥离、局部析氢等新的腐蚀问题[3]。

3.3 内防腐与阻垢缓蚀剂的应用难题

内防腐常采用涂层、衬里和化学药剂(缓蚀剂、阻垢剂等)结合方式。高含硫介质下,传统内防腐涂层易被硫化

氢、二氧化碳等侵蚀,致使涂层失效。部分缓蚀剂在高温、高压及多相流环境下易发生分解、沉积甚至产生副产物,影响长期防护效果。高含水、多杂质的油气混输环境对内防腐材料的附着力、柔韧性、耐腐蚀性提出更高要求,实际应用中内防腐层常因冲刷、化学分解等失效,导致局部腐蚀风险加剧。合理选择与动态优化内防腐手段,仍是防护体系的难点之一。

4 腐蚀监测与评估技术的发展与应用

腐蚀监测与评估是高含硫油气田集输管道防护体系的核心环节。现代监测手段主要包括电化学探针、超声波检测、管道智能检测仪(PIG)、壁厚测量、腐蚀 coupons(挂片)、以及腐蚀产物分析等。近年来,随着数字化、智能化技术发展,分布式光纤传感、无线监测、远程数据采集等新兴技术在腐蚀监测中得到广泛应用。现场监测数据与仿真分析结合,可以动态掌握管道腐蚀速率、腐蚀分布、关键风险点等信息,为防护措施的调整与优化提供科学依据。智能监测系统还能实现异常报警、趋势预测和寿命评估,有效提升管道安全运行的预见性和精细化管理水平。

实际案例显示,针对高腐蚀风险区段实施重点监测,配合智能数据平台分析,可大幅度降低因腐蚀引发的泄漏事故。多种监测手段的融合应用,提高了腐蚀管理的时效性和准确性,为集输管道全生命周期安全运行提供数据支撑[4]。

5 防护体系的优化与创新方向

优选耐硫化氢、耐 CO_2 、耐应力腐蚀的管道材料,是防止高含硫腐蚀的根本措施。目前常用材料包括Cr-Mo合金钢、低合金高强钢、奥氏体不锈钢、复合管道等。针对不同油气田介质特点,可采用包覆、复合衬里、焊接工艺优化等方法,提升整体耐腐蚀性能。管道结构设计上,优化焊接工艺、减少应力集中区域、科学布置排液、排气和取样点,可有效减缓局部腐蚀和应力腐蚀开裂风险。

建立外防腐层+阴极保护+内防腐多元集成的综合防护体系,是提升高含硫油气田管道安全的有效路径。外防腐层需根据土壤、气候、埋深等因地制宜选型,并强化施工质量管理。阴极保护应动态调整保护电位、优化阳极分布,并与智能监测系统联动,提升保护适应性。内防腐技术结合新

型高分子涂层、柔性衬里和高效缓蚀剂,多措施协同防控内腐蚀。实践证明,复合防护体系的协同增效,远优于单一防护手段[5]。

数字化、智能化技术的应用,为高含硫油气田集输管道的防护管理带来新机遇。建设智能管道系统,将腐蚀监测、数据采集、风险分析、寿命预测和维护决策集成于一体,实现“感知—分析—决策—执行”的闭环管理。基于大数据和人工智能的风险评估模型,可对不同区域、不同工况下的腐蚀趋势做出预警和应对建议。数字管道平台还可实现多专业协同、远程运维与应急响应,为集输管道安全运行和防护体系持续优化提供坚实保障。

6 结语

高含硫油气田地面集输管道的腐蚀防控,是保障油气田安全高效运行和资源绿色开发的关键环节。面对复杂多变的腐蚀机理与日益严苛的服役环境,必须从材料、结构、工艺、监测和管理多维度出发,构建科学完善的多元化防护体系。近年来,随着智能监测、数字化管理和高性能新材料的推广应用,高含硫油气田集输管道腐蚀防护水平显著提升。未来,应持续推进腐蚀机理基础研究,强化现场数据与模型仿真的深度融合,完善标准规范体系,加快智能化、信息化防护手段的落地,助力油气行业本质安全与绿色发展目标的实现。只有不断创新与完善防护技术,才能有效延长管道寿命、减少事故发生、降低运维成本,为高含硫油气田集输系统安全与经济运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 闫静,文绍牧,喻智明,等.高含硫气田开发腐蚀控制关键技术进展与发展方向[J].天然气工业,2024,44(11):136-148.
- [2] 文绍牧,肖杰,计维安,等.四川盆地特高含硫气田安全高效开发关键技术创新与成功实践[J].天然气工业,2024,44(11):37-49.
- [3] 赵海均.川东北高含硫气田勘探开发生产政府安全监管机制研究[D].中共四川省委党校,2024.
- [4] 张明彦.聚焦发展新质生产力打造中国石油“特高含硫气田”品牌[J].中国石油企业,2024,(05):53-55.
- [5] 葛枫,贾长青,李宏.四川盆地罗家寨高含硫气田安全高效开发与长期稳产关键技术[J].天然气工业,2023,43(09):85-92.

Analysis of mine pressure control and collaborative fully mechanized mining technology of mine roadway roof

Jian Wu

Shanxi Coking Coal Fenxi Mining is helping the coal industry comprehensive mining team, Xiaoyi, Shanxi, 032300, China

Abstract

The control of roof pressure in mine roadways is one of the core technologies for ensuring safe production in mines. As mining depths continue to increase, roof pressure issues have become increasingly complex, posing severe challenges to mine safety. Traditional roof pressure control techniques face problems such as poor roof stability, outdated technical methods, and insufficient synergy between comprehensive mining techniques and pressure control measures. This paper analyzes the current state of roof pressure in mine roadways and the evolution of control technologies, explores the difficulties in current pressure control, and proposes new techniques and optimized solutions. Through research on roof pressure monitoring systems and operational standards, this paper provides valuable references for the long-term control of roof pressure in mine roadways.

Keywords

mine roadway; roof mine pressure control; fully mechanized mining technology; Mine pressure monitoring system; Mine safety

矿井巷道顶板矿压控制与协同综采技术探析

武健

山西焦煤汾西矿业正帮煤业综采队, 中国 · 山西 孝义 032300

摘 要

矿井巷道顶板矿压控制是保证矿井安全生产的核心技术之一。随着矿业开采深度的不断加深, 顶板矿压问题愈发复杂, 对矿井的安全构成严峻挑战。传统矿压控制技术面临着顶板稳定性差、技术手段滞后以及综采技术与矿压控制之间的协同不足等问题。本文分析了矿井巷道顶板矿压的现状与控制技术的演变, 探讨了当前矿压控制的难点, 并提出了新型技术与优化方案。通过对矿压监测系统和操作规范的研究, 本文为矿井巷道顶板矿压的长效控制提供了有价值的参考。

关键词

矿井巷道; 顶板矿压控制; 综采技术; 矿压监测系统; 矿井安全

1 引言

煤矿巷道顶板的矿压治理技术问题一直以来都是煤矿开采的一大难点。随着深部矿井的开采, 也使矿井的开采加大了矿压的复杂性和对顶板稳定的更高要求。矿压的大小和矿压控制质量的好坏将会直接造成安全生产事故的重大影响, 直接影响到煤矿生产效率以及员工生命安全的状况。传统的煤矿的矿压控制技术对控制矿压产生了一定的效果, 但还无法真正满足当前煤矿开采的新要求。探索煤矿矿压控制的新技术如何与综采技术融合、共同协同的开发成为当今提升煤矿生产安全性和生产效率的重要问题。

2 矿井巷道顶板矿压控制与协同综采技术概述

2.1 矿井巷道顶板矿压现状

巷道矿压作为煤矿井工生产安全领域中的重大威胁之一, 很大程度上影响煤矿的开采稳定性以及煤矿工作人员的生命健康安全。随着煤矿井下工作深度的变化, 矿巷顶板矿压趋于复杂化, 矿压由顶板沉降、出现裂隙、断裂甚至冒落引发, 巷道顶板的矿压不仅会使巷道不稳定, 还极易造成岩石断裂发生, 具有安全隐患。现阶段, 在煤矿井下开凿中, 当遇到巷道矿压过大时, 需要采取临时性措施进行支护, 以避免出现巷道塌陷。然而, 这种过于传统的方法不能做到充分的针对性, 造成资源浪费以及成本的增加。矿压控制的困难是对矿压变化趋势的有效判断和科学控制方法制定的相对欠缺, 促使矿井开采不可持续进行。

2.2 巷道顶板矿压控制技术发展历程

矿压控制技术主要是由传统的支护技术转变成为现在矿压智能控制技术。在矿井巷道顶板支护技术中, 早期通常

【作者简介】武健(1992-), 男, 中国山东诸城人, 本科, 助理工程师, 从事综采研究。

使用钢支架、木支撑等方法,在当时条件下能够在较短时间内起到支护的效果。但此时的支护方法是依靠地基状况的条件,所以在面对不稳定情况时不能保证矿井顶板的安全性。在此后,矿井顶板的矿压控制技术开始转变成更为细微的动态监测、控制系统,采用在巷道中动态测量矿压的方式。在近些年中,人工智能、互联网和大数据技术的出现,在某种程度上促使了矿压控制技术向自动智能化发展,能够通过实时反馈数据,对矿井进行矿压的控制,借助数据的分析和测量,对矿井在短时间内的变化做出较为合理的预测,制订支护计划。但是由于这一技术与设备还不够成熟、资源配置不合理等情况。

3 矿井巷道顶板矿压控制面临的难点

3.1 顶板稳定性不足对矿井安全的影响

矿井顶板稳定性不好直接威胁煤矿采掘施工的安全,而顶板是矿井巷道的关键支护,如果顶板失稳发生顶板冒落,则极易造成矿井巷道堵塞,使得煤矿生产瘫痪,甚至发生人员伤亡事故。而实际煤矿生产中,由于种种原因矿井顶板稳定性差现象普遍存在,特别在深部煤层,随着深度增加地层承压能力减弱,顶板压力增加,冒裂、顶板坍塌严重。矿井顶板稳定性较差的表现形式也多种多样,从初始裂隙发展到整个顶板大面积坍塌,不同程度的顶板失稳损坏均有极大危险。对此,如何实现矿压预测与管理,避免顶板失稳,成为矿井安全生产工作中必须有效解决的问题。

3.2 传统矿压控制手段的局限性分析

不容忽视的是传统矿压控制方法存在的弊端。传统矿压控制方法主要是以选择支护材料和支护结构为主,如钢架、混凝土棚等,在矿压长期变化较快、较复杂的情况下效果有限,而到了深部矿井,由于其矿压变化较快、较大,选择的传统支护结构和支护方法不一定能够满足需要,巷道顶板依然面临隐患。另一方面,传统矿压控制方法大部分是采用人工巡检的形式进行矿压监测,无法实时获得矿压变化信息,矿压控制措施滞后的状况较为普遍。

3.3 综采技术与矿压控制的协同问题

综采技术与矿压控制的协同问题一直是矿井安全生产中的难题。在传统的采矿方式中,矿压控制与采矿技术往往各自为战,缺乏有效的协同机制。而在综采技术中,采矿设备的不断升级和采煤工艺的改进,使得矿井的生产效率大幅提升,但随之而来的是对矿压控制提出了更高的要求。矿压与综采技术的协同不仅仅是两者的简单结合,而是如何在复杂的地质环境和不断变化的矿压条件下,确保采矿效率的同时,又能保证矿井的安全^[1]。

4 矿井巷道顶板矿压控制技术的改进与应用

4.1 新型矿压控制技术的研究

对于矿井巷道顶板矿压的控制,作为技术在矿山进行革新时,直接关系到矿井的安全以及矿压提升率。目前,在

矿井开采过程中,矿压控制方式会随着开采深度以及矿压的复杂性,导致以往的矿压控制方式不符合现代矿业的开采。这就使得新型矿压控制方式的应用成为对矿井巷道的安全生产的关键点。目前新型的矿压控制主要是以大数据为基础,以及智能化算法分析、感应传感技术为支撑。新型矿压控制主要是直接把控矿压的状态,这是通过在巷道或者矿井安装不同传感器收集顶板压力、矿井的变形等相关数据,并且把数据传输到云平台上进行云计算分析得出的结果以及信息进行分析,从而进行矿压的调控。对于新型的矿压控制与以往的矿压控制方式相比,本身适应性强,应用灵活以及个性化强。通过对不同的矿井环境进行深度学习进行建模,而新型的矿压控制方式可以直接对每个矿井进行针对性的矿压控制,不同于以往的“一刀切”的方式,根据不同的实际矿井地质情况、巷道类型等多种因素进行不同地调整,进而实现对矿井顶板矿压的精细化管控。这一技术在实际应用中,提高了矿井生产的安全水平,同时提升开采的效率,解决了深部开采矿压不可预知性等问题^[2]。在对矿压控制技术的应用进行研究时,需要注意的是智能化技术并不是一朝一夕就能够形成的,这一技术的发展过程要先积累数据、然后优化算法,直到形成一项稳定性的技术。

4.2 顶板压力监测系统的优化与实践

在煤炭开采领域,顶板压力监控作为煤矿巷道安全建设中最关键的技术手段之一,如今的顶板压力监测技术已经从物理传感器的简单监测转化成为集采样、监测和信息处理于一体的完整信息系统。在煤矿深部开采的过程中,由于顶板压力的变化是矿压变化的直接体现,因此采用监测技术进行有效的监测将顶板压力过大的可能或将顶板压力不稳定的状况及时预警出来,将可以更好地保障煤矿的安全生产。目前,顶板压力监测系统针对主要在于提高顶板压力信息监测系统的信息采集的精密度和系统响应速度。一方面,为了能够实现高精度的顶板压力监测,传感装置的灵敏度不断增高,并结合压力传感器与温湿度传感器的应用,可以实现毫秒级的顶板压力变化的感知;另一方面,为了加快顶板压力的响应速度,在顶板压力发生变化时,系统能够基于人工智能算法的系统分析,迅速启动应急预案实现顶板压力变化的及时处理与顶板压力异常信息的及时反馈给具体作业人员,使煤矿的安全检测变得更加及时和精确。就现阶段情况而言,煤矿顶板压力监控系统并非仅仅是单一的硬件设备组合,而是一个完整的信息化平台建设,结合矿山企业各种生产环节的应用,在监测系统的综合作用下可以实现矿井各项数据信息的全面掌控,以实现对其的全部综合。举例来说,当某个区域的顶板压力超限后,顶板压力监测系统不仅仅会发出报警信号,还可以实现应急预案的快速启动自动进行系统通风或者开采方式的更改,以减少安全隐患。综上所述,这种“综采工作面全方位压力智能监测系统”更易于实现矿井的“智能化管理”,也能对顶板压力进行全盘追溯^[3]。

4.3 综合技术在矿井巷道的应用效果

矿井巷道顶板矿压综合控制技术指的是,不再只是采用一种技术手段来进行矿压控制,而是将多种技术手段综合应用,最终形成一个立体的多角度矿压综合控制技术系统,可以包括多种技术手段,比如压力控制技术手段、压力采集检测技术手段、压力监控技术手段、压力大数据分析技术手段、压力智能调控技术手段等,它们之间的综合交叉作用和配合具有良好的互补性,从而实现矿井巷道顶板矿压控制能力的全面提高。在这种综合控制技术的作用下,最终展现出来的成效最为显著的就是矿压波动的综合调控,因为传统的矿井顶板控制技术其实都是有矿压波动的,而当采用综合控制技术时,因为在应用了多种综合控制技术后,矿压波动可以提前通过分析等方式被感知到和控制到,譬如利用大数据趋势预测模型,可以对一定作业期间的矿压变动趋势预测,提前做好预防和应对的策略,这样就可以规避矿压超大和不稳定的现象。矿井顶板综合控制技术应用后,提升了矿井巷道施工效率。因为在矿压控制的同时,就可以通过综合控制技术手段来实现矿井巷道的施工、作业优化调度,这样就规避了没有必要的资源浪费。譬如可以利用智能调控技术手段,再结合实时掌握的压力数据,提前做好对采掘工作面的精准调度,从而达到合理安排的采掘顺序、合理安排的支护方式等,这样就能对工作面的生产效率、矿井资源利用效率进行极大提高和加强。

4.4 矿井巷道顶板压力控制技术的操作指南

巷道内顶板压力控制技术主要是对压力进行准确监测、实时调整和优化完善。在矿内操作过程中,任何一个环节都不能出现松懈,而要想保证操作顺畅、安全稳定,需要操作者根据变化的支护操作的条件,对矿内支护操作进行定期的矿压监测,并根据监测到的实际操作情况来相应地调整支护条件与操作,这就要求操作者不仅具备良好的对于矿压变化的敏感性,还能根据自己操作的技术与环境条件的实际情况来进行灵活应用与调整,将新型智能化的监测技术引入操作中,将监测系统运行结果更好地实现实时反馈,在适应变化的支护条件下自动对支护强度与密度进行调整,更好地保证巷道顶板的稳定性。在巷道操作时要根据不同工况调整使用的矿压支护物料。在矿压较大的情况下,应选用支护强度较大,稳定性较强的支护物料,并根据条件变化定期更换与修补支护结构。在操作方式上要发挥数据分析的作用,对数据分析结果进行有效回溯与对比分析,预测可能出现的矿压

发展。

4.5 矿井顶板矿压控制技术的维护与管理

顶板矿压控制技术的维护和管理工作是一项长期工作,其中包含技术升级、矿压监控设备维护工作和人员技术培训等方面。要加强维护和管理工作的技术支撑,实现矿压控制技术运行管理、矿压控制技术维护工作与反馈结果等三者相互结合。技术升级不是一朝一夕可以完成的工作,技术需要在不断的研发及实践中,将原有技术水平进行升级,才能顺应煤矿企业不断发生变化的地质环境及煤矿企业的生产需要。需要定期对矿压监控设备进行检修,以保证其高准确率及稳定性,是对矿压控制技术维护管理工作的重心和保障。成熟并稳定的矿压监测系统需要能够长期运行而不降级,否则,如果一味使用陈旧的设备和技术也存在发生矿压事故等未知隐患。对矿压控制技术的维护工作要注意和重视反馈数据,实现对矿井各区矿压变化的反馈和实时查看,发现异常反馈的矿压数据,需要建立预警机制,及时控制操作人员行为。同时,需要对管理者 and 操作人员的管理人员以及操作人员开展定期的培训,引导他们对矿压变化的灵敏度,还需要定期开展应急演练以增强操作人员处理突发矿压问题的能力和意识,让操作人员知道一旦发生顶板事故需及时采取措施。

5 结语

顶板矿压控制技术不是单单的技术问题,而是关系到井下安全生产、提高生产效率、保护工作人员生命安全等方面面的一个综合问题。当矿井开采深度和复杂程度提升后,其传统矿压控制技术的局限性逐步凸显出来,矿压控制新技术、综采协同高效运作方法急需探索。通过对传统矿压控制技术和手段的补充和完善及顶板压力监测系统与操作规程的结合,未来矿井巷道的矿压控制将实现智能化、精细化发展。唯有补充完善顶板矿压治理技术,才能从根源上消除顶板矿压隐患,为矿井的可持续发展指明方向。

参考文献

- [1] 任霄洋,郭俊庆,张百胜,等.多层坚硬顶板动压巷道矿压显现规律及深浅孔组合爆破切顶控制技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):48-55.
- [2] 张尧,齐喜峰,李鹏.坚硬顶板群临空巷道强矿压显现特征及控制[J].煤炭技术,2024,43(7):69-73.
- [3] 刘家启,高兵,岳冲.矿山压力对采煤及顶板控制的影响分析[J].内蒙古煤炭经济,2023(17):16-18.

Analysis and treatment of sulfur content exceeding standard in low temperature methanol washing of coal chemical industry

Yameng Wang

Guoyang Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719302, China

Abstract

In the coal chemical industry, low-temperature methanol washing plays a crucial role in purifying syngas and removing sulfides. However, excessive sulfur content in post-washing gas frequently occurs during actual production, which not only shortens downstream catalyst lifespan, jeopardizes facility safety, and compromises product quality, but may also cause environmental pollution. This study systematically analyzes the primary causes of sulfur exceedance through operational data from typical coal chemical enterprises' methanol washing processes, covering process flow, operating parameters, absorbent status, and equipment maintenance. For different types of sulfur exceedance, measures such as absorbent regeneration, process optimization, adjustment of process conditions, and equipment upgrades are explored. Through data comparison and practical evaluation, this paper summarizes empirical insights and recommendations for controlling methanol washing sulfur exceedance, providing theoretical support and technical references to enhance clean process management, achieve environmental compliance, and ensure stable facility operation in the coal chemical industry.

Keywords

coal chemical industry; low temperature methanol wash; sulfur content exceeds standard; process analysis; treatment measures

煤化工低温甲醇洗硫含量超标分析及处理

王亚盟

国能榆林化工有限公司, 中国·陕西 榆林 719302

摘 要

煤化工产业里, 低温甲醇洗工艺对净化合成气、脱除硫化物意义重大。但实际生产中, 甲醇洗后气体硫含量超标现象频发, 这不仅会缩短下游催化剂寿命、威胁装置运行安全、降低终端产品品质, 还可能引发环境污染。本文依托典型煤化工企业低温甲醇洗工段运行数据与案例, 从工艺流程、运行参数、吸收剂状态、设备维护等多方面, 系统剖析硫含量超标的主要成因。针对不同超标类型, 探讨了吸收剂再生、流程优化、工艺条件调整、设备改造等处理措施。通过数据对比和实际效果评价, 总结出甲醇洗硫超标控制的经验与建议, 为煤化工行业提升净化工段运行管理水平、实现环保达标和装置稳定运行提供理论支撑与技术参考。

关键词

煤化工; 低温甲醇洗; 硫含量超标; 工艺分析; 处理措施

1 引言

近年来, 随着煤化工清洁高效利用技术的进步, 合成气净化环节的重要性愈发凸显。低温甲醇洗作为合成气净化技术中的核心单元, 具有吸收容量大、选择性强、操作灵活等优点, 被广泛应用于煤制甲醇、煤制烯烃、煤制油等现代煤化工项目。在此工艺中, 通过甲醇在低温下对原料气中的硫化氢、碳氧化物等杂质进行高效吸收, 能够有效保障后续

催化合成工序对气体纯度的严苛要求。然而, 在实际运行过程中, 低温甲醇洗工艺却频繁出现硫含量超标问题。超标硫不仅导致下游催化剂中毒、反应活性下降、设备腐蚀加剧, 还可能因尾气排放不达标而引发环保处罚。因此, 深入剖析甲醇洗工段硫超标的成因, 针对性制定和实施处理措施, 对保障煤化工装置安全、稳定、高效运行和可持续发展具有现实意义和工程价值。本文将围绕低温甲醇洗工艺运行机制、硫超标的影响因素及防控技术展开系统研究, 旨在为行业提供可借鉴的经验与解决思路。

【作者简介】王亚盟(1981-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 助理工程师, 从事煤化工低温甲醇洗硫含量超标分析及处理研究。

2 低温甲醇洗工艺原理及常见硫超标现象

2.1 低温甲醇洗工艺工作原理

低温甲醇洗是一种广泛应用于煤化工、天然气净化等领域的高效脱硫工艺。其基本原理是利用液态甲醇在低温（一般为 -40°C 至 -60°C ）、高压（常见为 $2\sim 6\text{MPa}$ ）条件下对合成气中的硫化物进行物理吸收。原料合成气首先通过换热降温，进入洗涤塔后自下而上与自塔顶喷淋下来的液态甲醇逆流接触。气体中的 H_2S 、 COS 、 CS_2 及少量有机硫等硫化物在低温高压下易溶于甲醇，杂质从气相转移到甲醇溶液中，净化后的气体自塔顶排出，而富含硫的甲醇则经塔底收集送往再生塔。

再生过程一般采用加热、减压和气体吹脱等方式，将吸附的硫化物自甲醇溶液中解吸出来，回收脱除的硫化物后，甲醇液体循环返回吸收塔继续使用。整个系统依赖于吸收剂（甲醇）的高效循环与再生，形成连续脱硫闭环。工艺中，甲醇对硫化物的吸收能力与温度、压力、甲醇循环量、杂质浓度等参数密切相关。温度过高会降低吸收能力，压力过低则不利于气体溶解于甲醇。为保障工艺的高效稳定运行，需维持合适的物料平衡和能量平衡，确保气体中硫含量长期达标。但在实际生产过程中，原料气波动、操作条件变动、设备老化或维护不及时等常常影响系统平衡，容易导致吸收效率下降、硫含量超标等问题。

2.2 典型硫超标现象及其危害

在低温甲醇洗工艺过程中，气体硫含量超标的现象屡见不鲜。最直观的表现是经过甲醇洗后的气体中 H_2S 、 COS 等总硫含量高于工艺或环保要求，不能满足下游工序如催化剂保护、气体合成、环保排放等需求。超标现象通常在以下几种情形下易发：如原料气成分发生波动、装置处于高负荷运行状态、甲醇吸收剂品质劣化、系统设备检修或切换等。部分企业在工艺切换、设备启停、冬夏季负荷剧变时，硫含量异常更加明显 [1]。

硫含量超标对生产系统危害极大。首先，高含硫气体直接影响下游催化剂的活性和寿命，催化剂中毒将导致反应器效率下降、停产更换成本高昂。其次，气体中的硫化物易与系统中金属材料发生反应，加速设备和管道的腐蚀，诱发泄漏、穿孔甚至安全事故。再次，若净化不彻底，硫化物随尾气排放，将造成恶臭污染、酸雨风险，严重时会导致环保超标、企业被罚甚至停产整顿。此外，硫超标还会引起自动控制系统频繁报警、干扰装置正常生产，增加操作难度和安全风险。因此，保障气体硫含量持续达标，是煤化工等流程工业装置安全、环保、经济运行的关键前提。

2.3 硫超标成因的初步归纳

结合生产实际和运行数据，造成低温甲醇洗硫含量超标的原因呈现多元、复杂、耦合的特点。主要成因可归纳如下：

原料气组分异常波动：原料气中硫化物浓度本身存在

波动，尤其是气源不稳定或上游系统切换时，瞬时高含硫输入会超出吸收系统的处理能力，导致甲醇溶液“超载”。

吸收剂甲醇品质劣化：循环甲醇在长期运行中会富集杂质、含水量升高或混入其他有害成分，导致吸收能力下降，进而影响脱硫效果。

循环量不足与系统短路：甲醇循环泵出力下降、管道堵塞、泄漏等都会造成甲醇流量不足，影响气液比，降低吸收效率。塔内分布器失效、液泛、回流短路等，也会导致气液接触效率降低，形成脱硫“死角”。

再生系统效率下降：再生塔温度、压力或再生气量等工艺参数异常，甲醇解吸不彻底，导致带硫回流，富集效应下吸收能力进一步恶化。

设备老化与运行异常：长期运行导致换热器结垢、塔体内件腐蚀损坏、阀门密封失效等都会影响吸收和再生环节的正常运行，增加泄漏和堵塞风险。

操作与自动化控制不足：自动化系统对硫含量、流量、温度等参数调控不及时，参数设定不合理，或未能根据生产变化动态调整工艺方案，均可能造成系统短时或长期失衡 [2]。

工艺优化与流程设计不足：吸收塔、再生塔的工艺流程、参数窗口设计不合理，或后续流程未考虑系统余量和波动裕度，难以适应复杂、多变的生产实际。

这些因素常常相互叠加、动态演化，形成多因耦合的复杂超标机制。例如，原料波动叠加甲醇品质下降，再加上设备老化和再生效率不足，将导致短时间内系统无法及时响应，造成硫含量大幅超标。有效防控硫超标，需要加强多参数实时监测、工艺优化与设备升级、自动化调节与应急响应等多措并举，提升整体系统的鲁棒性和适应性，保障生产安全、环保与经济效益的协同发展。

3 低温甲醇洗硫超标的原因深度分析

3.1 原料气波动及其影响

煤化工原料气成分受煤种变化、气化工艺状态、系统负荷等多重因素影响，含硫量的波动直接影响吸收系统的负荷分配和净化能力。当原料气中的 H_2S 、 COS 浓度突然升高时，如果工艺调整和吸收剂流量跟不上变化，易导致部分硫化物穿透吸收系统，造成硫含量短时或持续超标。同时，部分杂质如焦油、粉尘进入甲醇洗系统后，会影响甲醇纯度，增加甲醇洗塔的处理负担，降低整体吸收效果。对此需建立完善的原料气监控与前端杂质预处理机制，提升对原料波动的适应能力 [3]。

3.2 吸收剂管理与再生系统失效

甲醇作为循环吸收剂，其品质和活性直接影响吸收效果。运行过程中若甲醇中水分、杂质、降解产物逐步积累，甲醇纯度下降，将导致对硫化物的溶解能力降低，吸收效率显著下降。此外，再生系统如塔温偏低、再沸器负荷不足、

设备结垢堵塞等,会导致甲醇再生不彻底,返至吸收塔的甲醇含硫量偏高,形成恶性循环。再生系统局部短路、蒸汽压力波动、进料分布不均等细节问题,同样会对硫含量控制造成影响。科学管理吸收剂品质,加强对再生系统的在线监控和维护,是降低硫超标风险的重要基础。

3.3 设备与运行参数异常

低温甲醇洗工段的关键设备包括吸收塔、再生塔、泵、换热器等,其长期运行过程中若出现腐蚀、泄漏、堵塞、填料结垢、分布器损坏等问题,均可能导致气液接触面积减少,吸收效率下降。工艺运行参数如塔顶压力、塔温、甲醇流量、循环比等,若调整不当或波动剧烈,会破坏系统平衡,降低净化效果。此外,部分企业自动化控制手段不足,对工艺波动的响应不及时,造成系统迟滞甚至误操作,也是硫超标的重要诱因。完善设备维护和自动控制,提高运行精细化水平,是甲醇洗系统长周期达标运行的保障[4]。

4 低温甲醇洗硫超标的处理与控制措施

甲醇洗工段硫超标治理是一项系统工程,需针对不同成因采取综合措施。针对原料气波动,应建立在线气体组分分析系统和实时预警机制,动态调整吸收剂流量和工艺参数,提升装置的适应性。对于吸收剂品质和再生能力问题,应加强甲醇定期检测,及时排除老化甲醇,引入新鲜吸收剂,保持甲醇纯度。对再生系统易结垢、堵塞的环节,要定期检修、清洗,确保再生温度、压力及加热系统的稳定,保证再生效果。设备层面,强化巡检与维护,及时更换老化设备和填料,保证吸收塔、再生塔内部结构的完整性和均匀分布。自动化和信息化手段的引入,可实现工艺参数的精准调控和异常预警。建议建立全过程工艺优化数据库和专家诊断系统,为操作员提供决策支持。对于突发性硫超标事故,要有应急处理预案,包括调整进气负荷、临时加大吸收剂流量、紧急切换设备等,减少对系统和下游的影响。此外,可探索添加辅助吸收剂、采用分段吸收、并联塔操作等新型工艺组合方式,提高对高负荷和特殊工况的应对能力。

5 甲醇洗硫含量控制的工程优化与创新实践

随着煤化工产业升级,越来越多企业引入数字化、智能化手段提升甲醇洗工艺的运行管理水平。例如,通过构建在线分析仪表和实时监控系统,对甲醇洗工段的气体组分、硫含量、甲醇品质等进行动态采集和趋势分析,实现精细化

管理。部分企业探索人工智能、大数据分析辅助工艺参数优化,自动识别和预警硫超标风险,提前干预调整。采用新型高效填料、强化换热和高效再生塔等设备改造,提高吸收和再生效率。部分甲醇洗系统引入了分级吸收、热集成、余热回收等节能减排技术,不仅提升了净化能力,还有效降低了能源消耗。通过工艺创新与管理提升,不仅能显著降低硫含量超标概率,也能延长催化剂使用寿命,减少设备维护成本,实现经济与环保效益双赢。典型案例表明,综合运用过程优化、设备升级、管理创新及信息化手段,煤化工企业能够在低温甲醇洗硫控制领域持续取得突破,为行业绿色高质量发展奠定坚实基础[5]。

6 结语

煤化工低温甲醇洗工艺在合成气净化与硫控制方面具有不可替代的作用,但实际生产过程中硫含量超标问题依然较为突出。影响甲醇洗硫含量的因素复杂,既有原料气成分和系统工艺的外部影响,也有吸收剂管理、设备维护和运行控制等内部环节的作用。通过对甲醇洗工段运行参数、设备状态和吸收剂品质的综合分析与管控,结合先进的信息化、自动化管理手段,以及新型工艺和设备的推广应用,能够显著降低硫超标风险,提高净化效率。未来,煤化工行业应进一步加强过程管理与创新,完善应急处理和预警机制,推动智能化、绿色化工艺升级,确保低温甲醇洗工艺在保障环保达标、提升装置安全与经济性方面发挥更大作用。面对行业高质量发展要求,煤化工企业需不断深化技术创新与精细管理,持续优化低温甲醇洗硫控制,为我国煤化工可持续发展作出更大贡献。

参考文献

- [1] 闵波,姜海明,姚强,等.煤化工低温甲醇洗装置先进控制技术研究[J].自动化博览,2024,41(10):94-98.
- [2] 袁和,李自恩,贾飞飞,等.甲醇品质对低温甲醇洗运行及优化措施研究[J].山东化工,2024,53(17):226-227+230.
- [3] 何鹏,杨吉祥.大型煤化工低温甲醇洗工艺的尾气处理技术研究[J].煤化工,2024,52(04):45-48.
- [4] 孙悦鹏.基于智慧工厂建设的低温甲醇洗装置模型模拟与优化[D].大连理工大学,2024.
- [5] 马伟.低温甲醇洗装置系统排水存在的问题及改造措施[J].煤化工,2024,52(01):30-32.

A Study on Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Gypsum Caprocks under Cyclic Loading

Xuefei Tong¹ Dajun Shen¹ Zhuolin Song² Lu Yu¹ Ye Zhang^{3*}

1. Chongqing Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing, 400021, China

2. Chongqing Natural Gas Storage and Transportation Company, Chongqing, 401147, China

3. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources (Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources), Chongqing, 401120, China

Abstract

During the operation of underground gas storage reservoirs, the overlying strata undergo periodic loading and unloading caused by intense gas injection and extraction, resulting in highly complex mechanical properties and deformation patterns. Developing rock damage constitutive models under cyclic loading conditions is crucial for predicting reservoir sealing integrity and stability. Through cyclic loading-unloading tests on gypsum samples collected from field cores, it was observed that stress recovery paths deviate from loading trajectories, exhibiting distinct hysteresis loops. As cycle numbers increased, strain-stress curves followed a “sparse-dense-sparse” variation pattern. A gypsum softening damage constitutive model during loading was established based on statistical damage theory. Comparisons between theoretical predictions and experimental data demonstrated excellent agreement. This proposed constitutive model provides a novel approach to comprehensively understand deformation failure mechanisms in gas storage reservoirs subjected to intense injection-extraction cycles.

Keywords

Gas storage operation; Cyclic loading and unloading; Damage variable; Constitutive model

循环荷载下储气库石膏盖层力学特性和损伤本构模型研究

童雪菲¹ 沈大均¹ 宋卓林² 喻璐¹ 张烨^{3*}

1. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 中国·重庆 400021

2. 重庆天然气储运有限公司, 中国·重庆 401147

3. 自然资源部页岩气资源勘查重点实验室(重庆地质矿产研究院), 中国·重庆 401120

摘 要

在地下储气库运行过程中, 上覆盖层将受到由于气体强注强采而引起的周期性加卸载作用, 导致其力学性质和变形规律变得极为复杂。研究循环荷载作用下岩石损伤本构模型对预测储气库盖层密封性和稳定性具有重要意义。通过对现场取心的石膏试样开展循环加卸载力学试验, 发现卸载路径时并不按加载路径返回而是存在明显的应力滞回环。随着循环次数增加, 应力应变曲线呈现出“疏-密-疏”的变化特征。基于统计损伤理论, 建立加载过程中的石膏软化损伤本构模型。利用模型计算得到的理论值与试验获得的应力应变数据进行对比, 发现两者吻合效果良好。本文所提出的本构模型为深入了解储气库强注强采过程中盖层变形破坏规律提供了一条新途径。

关键词

储气库运行; 循环加卸载; 损伤变量; 本构模型

【基金项目】本研究受中国石油西南油气田分公司重庆气矿 2023 年科研计划项目《重庆市地下储气库绿色建设运行规范研究》(项目编号: K23-Z1-16) 和《铜锣峡-黄草峡储气库运行地质安全评价体系研究》(项目编号为: K23-Z1-11) 资助。

【作者简介】童雪菲(1993-), 女, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事资源与环境研究。

【通讯作者】张烨(1976-), 男, 博士, 研究员、正高级工程师, 从事非常规油气勘探开发技术研究。

1 引言

天然气具有燃烧热值高、燃烧产物污染小等优点, 被认为是一种理想的清洁能源, 为我国经济社会发展提供了有力的能源保障^[1]。据报道, 到 2025 年, 我国储存天然气的的能力将突破 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这也将助推“碳达峰、碳中和”目标的实现进程^[2]。气藏型地下储气库因其具备相对较高的注采效率和较低的运行成本优势, 现已成为我国运用规模最广的储气库类型^[3]。与煤层气、页岩气等单向采气过程不同的是, 地下储气库运行其实是一个对气体进行强注强采的过程。气体不断向地层注入和采出极易对周围岩体地应力场产

生周期性扰动,从而导致储层和盖层受到交变荷载的作用。岩石的变形破裂是其内部微裂纹的萌生、扩展及贯通的宏观表现结果^[4]。储层在反复地周期性扰动作用下会出现疲劳损伤,其抵抗变形破坏能力将大大降低,对地下储气库的安全运行造成严重威胁。因此,深入了解交变荷载作用下岩石的力学行为和变形特征,对科学指导储气库盖层动态密封性评价和提高注采效率具有重要现实意义。

目前,国内外许多学者对大理石、花岗岩、煤岩等岩石在循环荷载下的强度及变形特征开展了大量的试验和理论研究,并取得了一系列丰硕成果,为煤矿开采、洞室开挖等地下岩体工程提供了有效指导。葛修润等^[5]对比分析单轴压缩和循环加卸载试验结果,发现岩石疲劳破坏时的应变受静态加载曲线控制。此外,岩石疲劳寿命决定于循环荷载幅值和峰值应力大小。张媛等^[6]由不同围压下砂岩的循环加卸载力学试验观察到应力应变曲线滞回环的面积随围压的增大而减小,认为这与砂岩渐进破坏时裂纹扩展所需能量密切相关。王天佐等^[7]对红砂岩开展不同循环加卸载路径下的试验研究,得到恒下限循环加卸载下岩石平均抗压强度较单轴压缩试验有所提高。Yu等^[8]对 Boom 粘土开展循环加卸载三轴试验,揭示了应力应变曲线滞回环的形成机理,并发现水分对滞回环面积大小有重要影响。为印证加卸载作用下岩石的变形破坏过程实际上是内部能量耗散的结果,Meng等^[9]借助 MTS 816 岩石力学测试系统对不同类型岩石进行了大量的单轴循环加卸载试验。研究结果表明:随循环指数的增加,岩石弹性能密度呈现出先增加后减小的趋势,而弹性能密度变化表现出相反规律。进而从能量的角度揭示了岩石变形破坏的内在机理。随着研究的不断深入,岩石在循环加卸载条件下本构模型的构建越来越被重视。曹文贵等^[10]基于统计损伤理论,提出了用于模拟岩石破裂全过程的应变软化统计损伤本构模型。再根据应力应变曲线的极值性,给出了岩石变形强度准则的一般表达式。周宏伟等^[11]充分利用分数阶在描述媒体在受力变形时表现出强非线性方面的优势,建立了基于分数阶导数理论的煤岩黏弹塑性本构模型,通过不同温度下的循环加卸载试验结果对模型的合理性进行了验证。Ren等^[12]以大理石为试验研究对象,设计了两种不同应力(恒定幅值和改变幅值)条件下的循环荷载试验,推导出综合考虑岩石压实和开裂的耦合损伤变量,进一步构建了适用于循环荷载作用下的统计损伤本构模型。为有效评估循环荷载作用下岩石强度与变形之间关系,Liu等^[13]采用耗散能定义损伤变量,进而采用递归法建立了循环荷载作用下的损伤本构模型。

基于以上分析,本文将对从黄草峡储气库所取盖层岩心进行多组循环荷载试验,探究盖层在交变荷载作用下的力学特性。基于损伤力学原理,假设岩石微元强度服从 Weibull 分布,推导用于描述岩石变形破坏过程中的损伤演

化模型。根据连续介质力学理论,以残余轴向应变为材料内变量,进一步构建交变荷载作用下的岩石疲劳本构模型,并利用试验所得结果对模型的合理性与可靠性进行验证。所做研究以期对地下储气库盖层动态密封性评价和安全运行提供一定理论指导。

2 交变荷载力学试验

2.1 试验样品

试验所需岩样取自黄草峡储气库气田嘉陵江组地层,岩性主要为石膏。为降低由于样品离散性给试验结果带来的误差,对来自深度相近的岩心进行钻取制样。同时,为了避免钻头高速运转与岩石摩擦产生的热应力对样品造成影响,采用湿式加工法钻取心。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 对试验样品尺寸的建议,制备成高 50 mm,直径 25 mm 的标准圆柱试件,并保证试件上下端面不平整度不大于 0.2 mm。将制备好的标准岩样置于干燥箱烘干 24 h,以排除水分对试验的结果影响。

2.2 试验装置

本次试验所采用的设备为美国 GCTS 公司生产的 RTR-1500 型三轴岩石力学综合测试系统。该装置具有强大的测试功能,可完成岩石高温高压三轴和单轴试验、间接拉伸试验、渗透试验、水压致裂试验、高温高压超声波试验、声发射试验、DSA 差应变试验、CVA 径向超声波各向异性试验、脉冲衰减渗透试验、岩石真三轴试验等测试,实现煤及岩石物理力学测定,钻井工程、水力压裂、防砂等设计优化,储层可压性评价、水力压裂设计优化、防砂设计优化等工程需求。

2.3 试验步骤

本次试验采用单轴加卸载应力路径对试样进行加载,即保持围压恒为 0。值得注意的是,葛修润等^[5,14]通过对大量不同类型岩石进行循环加卸载试验,认为加载频率、加载波形和应力幅值对岩石疲劳损伤有重要影响,并指出岩石疲劳特性与疲劳门槛强度密切相关。若应力上限低于这一门槛值,无论荷载循环多少周期,岩石始终仅发生弹性变形而不会出现疲劳破坏,如图 1 所示。因此,在开展单轴加卸载试验之前,需要先进行单轴压缩试验以获得岩样的单轴抗压强度 σ_{uc} ,便于加卸载过程中上限应力和幅值的确定。对试样加卸载过程按照如下方式进行:在达到应力上限之前采用力控制,加载速率为 0.5 MPa/s。循环过程中的加载波为三角波,频率为 0.2 Hz。考虑到黄草峡储气库设计的使用寿命为 50 年,故在试验过程中设定循环次数为 50 次。循环加卸载结束后利用位移控制方式(速率 0.02 mm/s)加载直至试件发生完全破坏,记录整个过程中的应力应变数据。更换试件,重复上述操作步骤,进行下一个试样的试验。

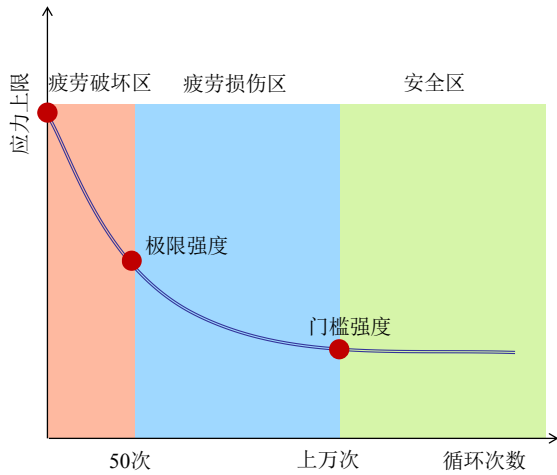


图 1 岩石在不同循环荷载下的疲劳特征

3 模型

3.1 加载段本构模型

根据 Lemaitre 应变等价假说,作用在无损伤材料上的有效应力引起的应变与发生损伤后的材料所受的名义应力引起的应变相等,则岩石所受有效应力与名义应力之间的关系可表示为^[15]:

$$\sigma'_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1-D} \quad (1)$$

式中: σ'_{ij} 为名义应力, MPa; D 为损伤变量。

假设岩石微元强度服从 Weibull 分布,用于表征其强度特征的离散型,则微元强度概率密度分布函数表达式为^[16]:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中: F 为微元强度随机分布变量; m 和 F_0 为随机分布参数。

岩石在外力作用下的变形破坏是一个连续渐进过程。假设在施加某一荷载后,岩石内部发生破坏的微元数量为 N_b ,则损伤变量可以按如下表达式进行定义:

$$D = \frac{N_b}{N} \quad (3)$$

式中: N 为岩石所有微元体数目。

在应力持续加载过程中,对于任意微小应力加载区间 $[F, F+dF]$,已发生破坏的微元体数目为 $NP(x)dx$ 。从而,不难求得在应力水平 F 下所有发生破坏的微元体数目,即:

$$N_b = N \int_0^F P(x) dx \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3),化简得到岩石变形破坏过程中损伤演化方程:

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

根据广义虎克定律,得到岩石常规三轴压缩过程中加载段的本构模型

$$\sigma_1 = E \varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (6)$$

式中: σ_1 为轴压。 σ_3 为围压。

岩石损伤本构模型构建的关键一步即为选取合适的屈服准则,以便后续确定分布参数 m 和 F_0 。Drucker-Prager 准则不仅形式简洁,而且还可以较好地描述岩石屈服过程。因此,假设加载过程中岩石变形破坏服从 Drucker-Prager 准则^[17]:

$$F = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 \quad (7)$$

式中: I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力偏量第二不变量。

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2 \right] \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}} \quad (10)$$

在全应力应变曲线的峰值点 $(\sigma_{1c}, \varepsilon_{1c})$ 处,曲线的斜率为 0。根据以上几何条件,可得到方程 (11) 和 (12):

$$\sigma_{1c} = E \varepsilon_{1c} \exp \left[- \left(\frac{F_c}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_{1c}} = 0 \quad (12)$$

整理化简方程 (12),可得

$$\frac{m}{F_0} \varepsilon_{1c} \left(\frac{F_c}{F_0} \right)^{m-1} \frac{F_c}{\varepsilon_{1c}} = 1 \quad (13)$$

联立方程 (11)-(13),可求解出 m 和 F_0

$$m = \frac{1}{\ln \frac{E \varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\nu \sigma_3}} \quad (14)$$

$$F_0 = \frac{\frac{(\sigma_{1c} - \sigma_3) E \varepsilon_{1c}}{\sqrt{3}(\sigma_{1c} - 2\nu \sigma_3)} + \alpha \frac{(\sigma_{1c} + 2\nu \sigma_3) E \varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\nu \sigma_3}}{\left(\ln \frac{E \varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\nu \sigma_3} \right)^{\ln \frac{E \varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\nu \sigma_3}}} \quad (15)$$

3.2 卸载段本构模型

在交变荷载作用下,岩石将产生疲劳损伤。相应地,弹性模量也会发生变化。考虑到每次循环加卸载后,岩石均会产生一定的残余轴向应变(不可恢复)。基于以上认识,以残余轴向应变为内变量,提出弹性模量的变化关系式^[18]:

$$E = A \left(\overline{\sigma_{cr}} \right)^a \left(\varepsilon_{1r} \right)^b \quad (16)$$

其中

$$\overline{\sigma_{cr}} = \frac{q_c - p_c \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta} \quad (17)$$

$$p_c = \frac{\sigma_{lc} + 2\sigma_3}{3} \quad (18)$$

$$q_c = \sigma_{lc} - \sigma_3 \quad (19)$$

式中： p_c 、 q_c 和 σ_{cr} 分别为峰值平均主应力、峰值偏应力和等效应力； β 为等效应力线倾角。

对方程(16)两端同时取对数

$$\ln E = \ln A + a \ln \overline{\sigma_{cr}} + b \ln \varepsilon_{lr} \quad (20)$$

采用方程(20)对试验数据进行拟合,即可获得拟合参数 A 、 a 和 b 的数值。

结合方程(6)和方程(16),建立模拟岩石在交变荷载作用下变形破坏全过程的损伤本构模型:

$$\sigma_1 = A(\overline{\sigma_{cr}})^a (\varepsilon_{lr})^b \varepsilon_{lr} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (21)$$

4 试验结果及模型验证

4.1 试验结果分析

通过对试验所获得的数据进行处理,可以得到石膏试样在循环加卸载过程中的应力应变曲线,如图2所示。分析图2不难发现:试样在经历加载后再按原应力路径进行卸载,最终所得到的应力应变曲线并不重合。卸载曲线存在明显的滞后性,始终处于同一循环加载曲线的下方。此外,上一循环卸载曲线与下一循环加载曲线之间通过应力滞回环连接。纵观整个循环加卸载过程,应力滞回环的面积随循环次数的增加呈现出先增大后减小趋势,在图像上表现为应力应变曲线呈“疏-密-疏”并且向轴向应变增大的方向演化。造成此现象的主要原因为,石膏试样在加卸载过程中的应力上限超过了其屈服应力,其内部产生了一部分不可恢复的塑性变形,由于塑性变形是不可逆的,导致卸载时仅能恢复原有发生的弹性变形。张志镇和高峰^[19]认为岩石的损伤破坏与能量耗散的结果。外界对试样所做的功产生的能量主要转化为弹性能和耗散能,而由于发生损伤破坏所需的耗散能大小即为滞回环面积值^[20]。换言之,岩石损伤程度与滞回环的面积呈正相关,这在本文的研究结果中得到了很好的印证。

对应力应变曲线进一步分析,依据试样受力特征可将整个加卸载过程划分为三个阶段:原始裂隙压密(I)、弹性变形(II)和裂纹扩展阶段(III)。在应力达到裂纹闭合应力之前的I阶段,应力应变曲线表现出极强向下凹发展的非线性行为,此为试样内部原始裂隙在应力作用下发生压密闭合所造成。在II阶段由于裂隙已被压密,试样的弹性模量近似为定值,进而应力应变曲线呈线性变化。当应力超过屈服强度随即进入III阶段,试样内部开始出现不可恢复的塑性变

形并伴随损伤的出现,裂纹逐渐扩展并延伸,应力应变曲线表现出一定的硬化特征。

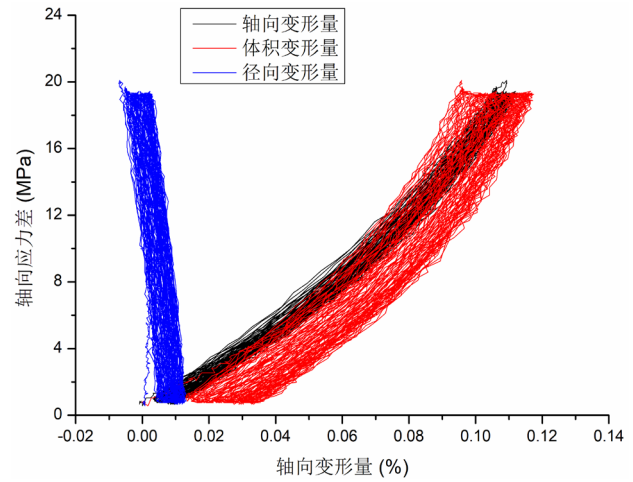


图2 循环荷载下石膏应力应变曲线关系图

岩石的变形模量能够反映出其抵抗外部荷载作用的变形能力强弱,探究循环荷载下岩石变形模量的演化规律对深入了解岩石力学和变形特征具有重要意义。根据前面的试验结果可知,循环加卸载过程中试样的卸载曲线并不按加载路径返回,这也将导致试样存在两种不同的变形模量,即加载模量 EL 和卸载模量 EUL ^[21]。 EL 和 EUL 计算方式如下:

$$E_L = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{L,min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{L,min}} \quad (22)$$

$$E_{UL} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{UL,min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{UL,min}} \quad (23)$$

表1为根据试验结果计算得到的 EL 和 EUL 随循环次数变化的结果。由表1可知,在每个循环中 EUL 始终大于 EL ,并且随着循环次数增加, EUL 和 EL 逐渐趋于稳定。定义卸载模量 EUL 与加载模量 EL 之差为模量变化差值 ΔE ,用于进一步描述循环荷载下试样模量变化规律。结合表1,可以发现 ΔE 随循环次数增加逐渐降低,并趋于某一常数。分析认为:在应力加载初期,试样内部原始孔裂隙结构被压密,抵抗变形能力也逐渐增强。当应力超过屈服强度时,试样内部开始出现塑性变形。即使撤去外部荷载,原有被压密的裂隙也无法重新打开恢复至初始弹性状态,从而使得卸载模量比加载模量大。随着循环加卸载的不断进行,试样经历的疲劳损伤愈加严重,模量变化差值对外部荷载变化的敏感性逐渐降低。

表1 循环加卸载条件下试样变形模量与循环次数之间关系

循环次数 n	加载模量 EL (MPa)	卸载模量 EUL (MPa)	变化量 ΔE (MPa)
1	17901	18989	1088
30	18543	19518	975
50	18846	19818	971

4.2 本构模型验证

为了验证所提出的循环加卸载作用下石膏本构模型的合理性,将试验数据代入式 (21) 进行匹配。首先,通过峰值点应力应变数据代入式 (14) 和 (15) 计算得到 Weibull 分布 m 和 F_0 的值。然后将 m 和 F_0 代入式 (21) 得到应力的理论值。最后将所得的理论值与试验值进行匹配,绘制出循环加卸载作用下石膏本构模型曲线,如图 3 和图 4 所示。表 2 为循环荷载下试样本构模型相关计算参数。需要指出的是,由于整个加卸载过程进行了 50 次循环,单个循环内的应变应变曲线变化趋势较为相似,因此,本文选取了 3 组代表性 (循环 1 次、30 次和 50 次) 的试验数据进行验证。表 2 列出了每组循环内试样本构模型验证的相关计算参数。由图 3 与图 4

可知,由模型计算得到的理论值与试验数据有着较好的匹配度,表明本文构建的循环荷载下岩石本构模型可以较好地模拟储气库运行过程中石膏的变形行为,并且每组数据的拟合优度 (R^2) 均大于 0.85,从而验证了本文所构建本构模型的合理性与可靠性。

值得注意的是,由于石膏属于典型的双重孔隙介质,其内部存在大量随机分布的孔隙和裂隙等微缺陷。这些微缺陷对应力极度敏感,使得应力应变曲线在峰前存在明显的非线性特征,尤其是在应力加载前期。在未来的研究中,可考虑石膏的非线性变形特征,对循环荷载下的本构模型进行一步改进,从而提高模型的计算精度和拓宽模型的运用范围。

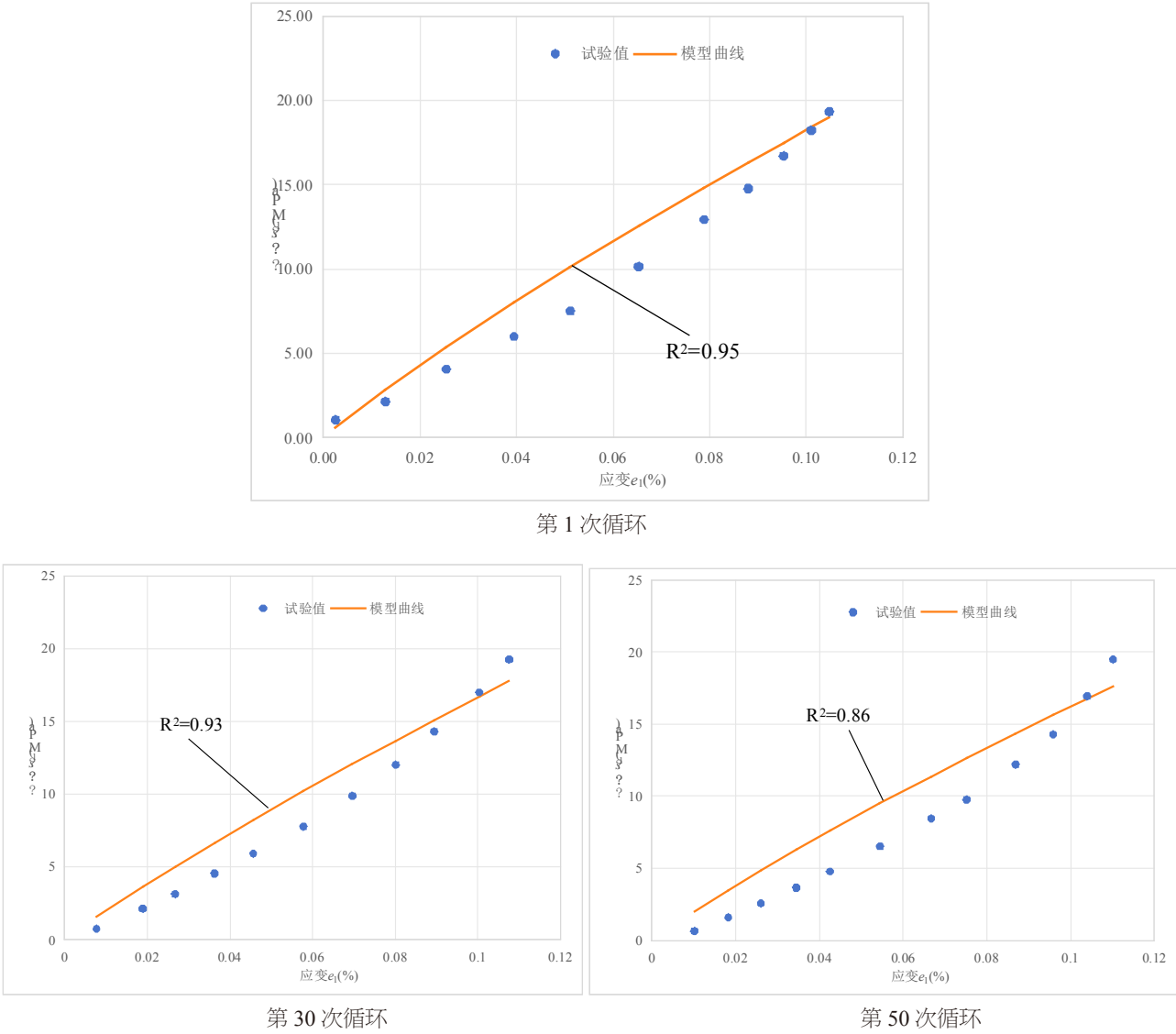
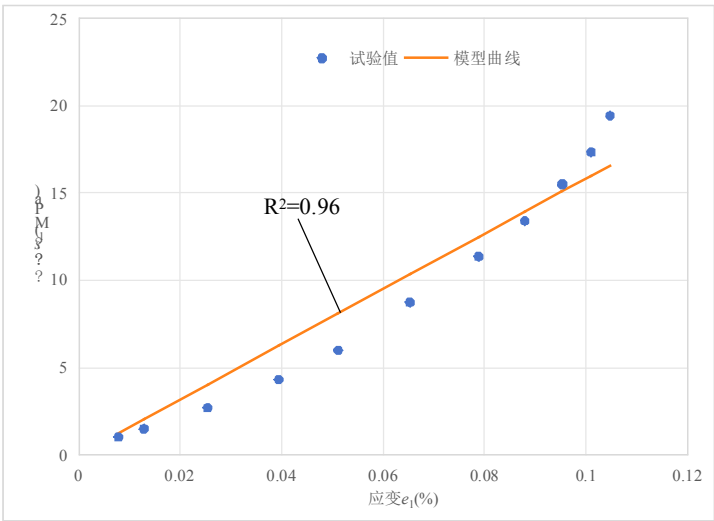
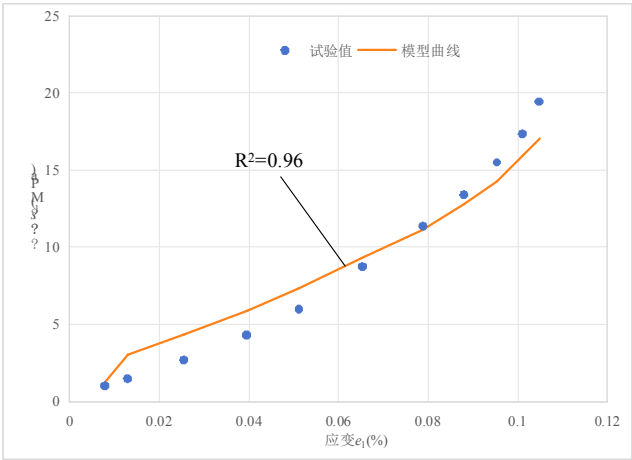


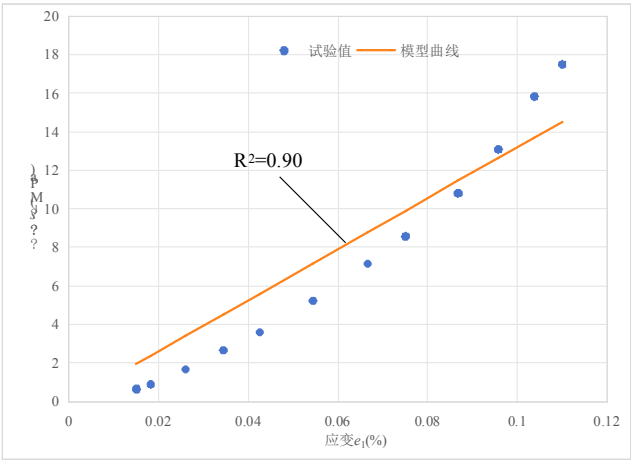
图 3 应力加载段模型曲线与试验数据对比



第 1 次循环



第 30 次循环



第 50 次循环

图 4 应力卸载段模型曲线与试验数据对比

表 2 循环加卸载下本构模型相关参数

模型参数	第 1 次循环		第 30 次循环		第 50 次循环	
	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载
m	0.39	1.69	0.34	1.33	0.4152	2.31
F_0	422.07	436.21	442.83	427.62	241.8831	297
A	/	0.65	/	0.94	/	0.36
a	/	2.69	/	1.85	/	1.61
b	/	-0.29	/	-1.04	/	-1.22

5 结论

(1) 基于统计损伤力学理论，建立加载条件下石膏的本构模型。引入材料内变量用于描述石膏在循环加卸载作用下发生的疲劳损伤变形，进一步构建模拟石膏在整个循环加卸载过程中变形破坏特征的损伤本构模型。

(2) 进行了循环加卸载下的石膏疲劳变形试验，观察到加载曲线与卸载曲线并不重合，而是存在一个明显的应力滞回环，并且单个循环内的卸载模量始终大于加载模量。随着循环次数增加，滞回环呈现出“疏 - 密 - 疏”的变化特征。

(3) 通过试验所得到的应力应变数据对提出的循环加卸载下石膏本构方程进行验证，发现所建立的本构模型能够较为准确地模拟石膏在加卸载条件下的变形行为，从而验证了模型的合理性与准确性。

参考文献

[1] 邹才能,赵群,陈建军,等.中国天然气发展态势及战略预判[J].天然气工业,2018,38(04):1-11.

[2] 冯宾辉,姜婷婷,尚修瑞,等.基于应变软化模型的地下储气库井筒水泥环完整性研究[J].安全与环境工程,2023,30(05):66-75.

[3] 孙军昌,胥洪成,王皆明,等.气藏型地下储气库建库注采机理与评价关键技术[J].天然气工业,2018,38(04):138-144.

[4] 周家文,杨兴国,符文熹,等.脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(06):1172-1183.

[5] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003(10):1581-1585.

[6] 张媛,许江,杨红伟,等.循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规

- 律的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(02):320-326.
- [7] 王天佐,王春力,薛飞,等.不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S1):2881-2891.
- [8] Yu HD, Chen WZ, Gong Z, et al. Loading-unloading behavior of a clayey rock under thermo-hydro-mechanical conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 148: 104966.
- [9] Meng QB, Liu JF, Pu H, et al. Effects of cyclic loading and unloading rates on the energy evolution of rocks with different lithology[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 34: 100455.
- [10] 曹文贵,赵明华,刘成学.岩石损伤统计强度理论研究[J].岩土工程学报,2004(06):820-823.
- [11] 周宏伟,侯魏,张龙丹,等.循环加卸载条件下考虑温度的煤体本构模型[J].煤炭学报,2024,49(01):442-453.
- [12] Ren CH, Yu J, Liu XY, et al. Cyclic constitutive equations of rock with coupled damage induced by compaction and cracking[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 1153-1165.
- [13] Liu XS, Ning JG, Tan YL, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85: 27-32.
- [14] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩石疲劳损伤扩展规律CT细观分析初探[J].岩土工程学报,2001(02):191-195.
- [15] 刘树新,刘长武,韩小刚,等.基于损伤多重分形特征的岩石强度Weibull参数研究[J].岩土工程学报,2011,33(11):1786-1791.
- [16] Wu LY, Wang ZF, Zhang JW, et al. A Continuous Damage Statistical Constitutive Model for Sandstone and Mudstone Based on Triaxial Compression Tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55:4963-4978.
- [17] Chen ZH, Sha S, Xu LD, et al. Damage Evaluation and Statistic Constitutive Model of HighTemperature Granites Subjected to Liquid Nitrogen Cold Shock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 2299-2321.
- [18] 王者超,赵建纲,李术才,等.循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J].岩石力学与工程学报,2012,31(09):1888-1900.
- [19] 张志镇,高峰.单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(06):1198-1207.
- [20] 李晓彤,周跃进,王明宇.循环载荷下滞回环与石膏损伤破坏性能的关系[J].实验力学,2018,33(02):194-200.
- [21] Zhao Y, Liu J, Zhang C, et al. Mechanical behavior of sandstone during post-peak cyclic loading and unloading under hydromechanical coupling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(8): 927-947.

Try to analyze the engineering quality management strategy of petroleum and chemical construction projects

Hongwei Li

Sinopec Catalyst Co., Ltd., Beijing, 101102, China

Abstract

Petrochemical projects involve diverse technical disciplines and complex site conditions, which can significantly impact project quality. These operations carry notable safety risks including high temperatures, pressure, flammability, explosiveness, and toxic hazards. Therefore, during actual project implementation, relevant organizations must prioritize quality management initiatives. This entails analyzing project-specific influencing factors, establishing a robust HSE (Health, Safety, and Environment) management system, and ensuring effective control across all operational phases. Such comprehensive measures can guarantee both construction quality and secure, stable post-construction operations. To address these challenges, this study outlines the significance of quality management in petrochemical project development, examines common influencing factors, and proposes practical quality assurance strategies for industry professionals to reference.

Keywords

petrochemical industry; construction project; quality management

试析石油化工建设项目工程质量管理策略

李红卫

中国石化催化剂有限公司, 中国 · 北京 101102

摘 要

石油化工项目涉及众多工种, 场地条件复杂, 会影响到工程项目的质量, 存在高温高压、易燃易爆、有毒有害等显著安全风险。因此在具体的工程项目中, 相关单位要关注质量管理工作的建设, 分析项目存在的影响因素, 建立健全HSE(健康、安全、环境)管理体系, 实现各环节的有效把控, 可以实现项目的建设质量和后续的安全稳定运行。鉴于此, 开展本文的研究工作, 简单概述石油化工项目建设中质量管理的意义, 分析常见的影响因素, 提出几点有效的质量管理措施, 以供相关人员参考。

关键词

石油化工; 建设项目; 质量管理

1 引言

石油化工建设项目施工过程中环境复杂、工艺多样, 导致施工难度大, 很容易出现风险隐患, 影响到施工人员的安全性和工程的整体质量, 因此实施全过程质量管控尤为关键。在质量管理工作中, 施工单位要从材料、设计等各个方面入手, 优化工程设计, 选择合适工艺, 开展全过程管控, 完善管理机制, 识别、评估、控制和消除质量与安全风险隐患, 从而保障施工作业的安全性和稳定性, 实现预期的质量目标。

2 石油化工建设项目工程质量管理意义

石油化工工程项目在建设的过程中加强质量管理工作,

有助于保障人员安全, 严格制定相关的规章制度和标准规范, 提高施工人员的重视, 强化他们的安全意识和质量管控意识, 确保施工队伍能够严格按照施工方案和技术标准进行操作, 可以减少人为因素的影响, 也能保障人员安全。

其次, 通过强化全过程质量管控, 有助于提高工程的建设效率。建设阶段, 随着质量控制工作的执行, 各参与主体能够在基础之上明确自身的具体职责, 严格履行责任, 加强有效管控, 可以减少安全事故的发生, 从而提升工程施工的效率和品质^[1]。

3 石油化工建设项目工程质量管理的影响因素

3.1 施工材料影响

石油化工工程项目建设过程中, 施工材料对工程质量有着重要的影响, 然而在具体的项目中, 材料与设备因素导致质量缺陷。首先在材料方面, 原材料的材质规格与设计要求并不符合, 或者一些材料存在出厂缺陷。然而在施工过程

【作者简介】李红卫(1981-), 男, 中国河北保定人, 本科, 高级工程师, 从事工程项目管理研究。

中并未及时剔除这些不达标的材料,因此导致石油化工项目出现管道腐蚀、设备失效等一系列质量问题^[2]。其次,在设备采购与验收环节存在疏漏的情况,大型设备采购时,单位并没有严格地审核供应商的资质。在进场验收时,并没有严格执行相关流程,因此一些不合格的设备进入施工环节,引发质量问题。此外,材料的存储与防护也有着特殊要求,一些材料的环境不符合要求会出现质量问题,直接影响后续的性能。例如,一些焊条、密封垫片的保存环境中,温度湿度控制不合理,导致焊条受潮垫片老化,影响后续的使用。

3.2 施工设计影响

石油化工建设项目有着极强的专业性,因此对设计单位的专业水平有着较高的要求。然而目前来说,在设计环节,石油化工企业的严选力度不足,选择的设计单位资质水平参差不齐。一些设计单位提交的方案并不合理,在施工中面临着频繁设计变更的问题,严重影响到石油化工建设项目的施工质量。在设计审查环节,特别是关键安全仪表系统(SIS)设计、HAZOP分析等高风险设计审查中,缺乏具备足够资质和经验的专业人员深度参与,审查流于形式,缺乏专业人员开展全面评审工作,难以及时发现其中存在的漏洞问题,也会影响到后续的施工进度和整体质量。设计阶段是进行HAZOP(危险与可操作性分析)、SIL(安全完整性等级)定级与验证的关键阶段,设计缺乏会引发源头性风险,必须严控。

3.3 施工工艺影响

施工过程中施工工艺的控制不当,会引发质量问题。尤其是石油化工建设项目,对专业性要求极高,因此需要严格遵守相关的技术规范,实现预期建设目标。焊接、热处理、压力试验、大型机组安装/对中的关键工序,需要进行工艺评定(PQR/WPQ)和焊接工艺规程(WPS),严格执行。然而在一些项目中,关键工序(如高压管道焊接、厚壁设备热处理、大型动设备安装)未严格执行经批准的工艺评定和工艺规程,或过程参数监控不到位。例如,在焊接时没有执行先预热再控制层间温度、后热的这一流程,导致焊接裂纹,影响到整体的质量^[3]。而一些并不成熟的新工艺的应用,由于缺乏相关的技术验证以及人员培训,因此使用时可能会出现操作不当的问题,引发质量风险。

3.4 管理漏洞影响

项目质量管理体系(尤其是QA/QC体系)存在架构不健全、职责不清晰、资源配置不足等问题。质量计划(ITP)未能有效覆盖所有关键活动,见证点(Hold Point/Witness Point)和停工待检点(Hold Point)执行不到位,导致过程失控。首先,石油化工建筑项目的管理体系,并没有覆盖到项目全生命周期阶段,制度内容更加倾向于后期管理,而缺乏在策划设计阶段的有效控制。而且一些项目会直接照搬成功的经验,并没有结合项目特点进一步优化,导致全过程质量管控体系存在漏洞。建设单位、施工单位、监理单位的质量责任

并没有明确,出现问题时互相推诿,难以及时追责,也会影响到施工过程中的严谨性。此外,全过程质量管控建设不足,缺乏对关键工序的过程管理。信息化工具的利用效果不佳,因此影响到质量管理的整体效率。

3.5 施工环境因素

石油化工建设项目在施工中会受到自然环境的影响,例如,一些极端天气导致混凝土浇筑的质量不佳,焊接出现问题。一些特殊的项目,例如海上、沙漠项目等环境特殊,如果防护不到位会影响设备的正常使用。沿海地区具有高湿度、高盐雾的环境特征,对金属具有一定的腐蚀性,严重腐蚀而出现结构强度下降。需要选择耐蚀金属材料,做好表面处理。高温地区太阳辐射强烈,环境温度常年较高,在这样的环境下,石油化工设备与管道内的介质温度升高,增加了设备的运行压力,对设备的密封性能提出了更高要求。高寒地区冬季漫长且寒冷,材料的物理性能会发生显著变化,金属材料的韧性降低,脆性增加,容易发生冷脆断裂。在外部环境中,相关的政策与标准变化,如果设计施工没有及时调整,导致项目投产后不达标,会耗费更多的资金和时间。

4 石油化工建设项目工程质量管理的有效措施

4.1 加强施工材料管理

为了保证石油化工建设项目符合预期的质量要求,施工单位需要加强对材料的管控,做好前期的准备工作。首先打造全链条管理模式。在前期采购阶段,施工方需要选择具有石油化工行业资质的供应商签订合同,明确材料的相关标准。严格执行材料进场验收程序,核对质量证明文件(MTC/MTR),进行外观检查、尺寸测量,必要时进行复验(如光谱分析、机械性能试验、无损检测),确保材料可追溯性。关键材料须经监理/业主批准,要及时剔除其中不合格的材料。考虑到材料特点,还需要采取商量的存储方案,设置合理的环境,加强材料管理,记录环境参数,保障材料的性能得到充分地发挥。其次,在设备方面,针对大型设备可以采用驻厂监造的方式,全程监督整个制造过程。设备进场以后,由专门人员检验设备情况,并进行性能测试,确保其符合要求才可投入使用^[4]。

4.2 优化工程设计

在工程项目的设计环节,需要加强质量控制,优化设计方案,做好充足准备工作,才能确保后续施工顺利进行,提高工程质量与安全管理效率。首先,石油化工项目通过严格招标或议标程序,选择具备相应资质等级、丰富石化项目经验和良好业绩的设计单位,并明确要求其遵循的工程标准体系。针对设计方案,开展多专业联合评审,包括工艺设备、安全环保,并邀请行业专家参与到危险与可操作性研究分析中,避免其中存在缺陷^[5]。要及时发现问题,优化设计,减少后续变更的情况。其次,进行设计交底。施工前组织设计单位向施工监理单位交底,重点说明其中的关键工艺和质

量控制点,确保他们做好充足的准备。

4.3 加强施工过程管理

在施工过程中加强质量管控工作,需要关注施工工艺的合理应用。首先,评估技术方案的科学性和合理性,要严格参照国家级行业标准项目、可行性研究报告等。研究相关工艺的匹配路线,并进行模拟计算,专家评审进行验证。基于设计要求分析工程岩土地质资料,预测其中存在的不利因素。分析基坑降水、排水以及加固维护技术方案等的可行性,优化方案设计。施工前预测工程难度,指出其中难度比较大、位置特殊的节点,制定有效的检验方案,初期可增加检查密度,制定合理的检查时间表,做到及时发现问题、解决问题。

其次,对关键施工过程(如焊接、热处理、大型设备吊装/安装)实施严格的过程参数实时监控与记录,建立自动报警机制,确保工艺参数严格控制在批准的 WPS/ 规程范围内。例如,焊接过程中,预热、层间温度和后热是预防焊接裂纹、改善接头性能的关键工艺参数。

第三,加强施工过程的检测工作,每道工序结束后,及时检测,确保其符合设计要求。例如,在焊接中,开展外观质量检测和内部质量检测。内部检测中使用无损检测技术,射线检测(RT)用于检测内部缺陷,如气孔、夹渣、未熔合、裂纹;超声检测(UT)技术可以检测内部缺陷,如裂纹、未熔合、分层;磁粉检测(MT)技术用于检测表面/近表面缺陷,如裂纹、气孔;渗透检测(PT)用来检测表面开口缺陷,如裂纹、针孔。

第四,加强人员管理。施工单位要做好对人员的技术培训和安全管理,上岗前定期培训,增强施工人员的安全意识和自我保护意识,同时掌握现场的各项设备操作方法和技术的要点。确保施工过程中施工人员能够严格操作,全面进行提高施工质量。与此同时也能减少安全事故的发生,保障人员的安全。

施工单位构建完善的全过程质量管控机制,开展管控工作,从而提高施工质量的管理效率。首先,建立并有效运行覆盖项目全生命周期(概念设计、FEED、详细设计、采购、施工、调试、交付)的、符合 ISO 9001 标准的项目质量管理体系,核心是制定和执行详细的质量计划(ITP)。其次,施工阶段严格执行三检制,包括自检、互检和专检三个方面,由监理单位对隐蔽工程进行旁站监督。验收阶段需要严格按照国家和行业标准组织验收,如果项目没有达标,不能进入下一阶段。第三,建设质量终身责任制。在石油化工建设项目的全生命周期内,对项目质量承担责任的相关主体,需对其履职过程中因违法违规、失职渎职等行为造成的工程质量缺陷或事故,终身承担相应的法律责任、行政责任

和经济责任,不受项目竣工时间、责任人岗位变动或退休等因素的影响。第四,引进信息技术,搭建信息化管理平台,开展施工全过程的管控工作,从而提高工程质量与安全管理效率。在互联网、BIM 技术、人工智能等各项先进技术的支持下,创新原有的管理模式,关注现场的实施情况,开展有效管理。将 BIM 技术应用于碰撞检查、施工模拟、进度/质量管理协同环节,优化项目设计和施工质量、进度管理;物联网(IoT)应用,实现多个传感器互联,实时监测应力、温度、振动、环境参数,设置预警阈值,做好实时预警;质量管理软件(QMS)可以应用于文档管理、NCR 跟踪、数据分析缓解,提高管理的信息化和数字化。

4.4 加强施工环境与外部条件风险管理

石油化工建设项目在施工过程中,还会受到环境因素影响,导致项目质量不佳,可能引发安全事故。因此在质量管控工作中,还需要制定环境风险监控方案,有效应对各类风险降低影响。首先,针对项目所在地具体环境(气候、地质、水文、生态)和潜在自然灾害,在设计和施工方案中制定专项环境适应性措施和应急预案,并确保资源配备到位。其次,动态跟踪政策和相关标准。安排专人跟踪国家及行业标准的更新情况,及时调整设计和施工方案,同时与环保、应急部门沟通,确保项目符合要求。

5 结语

综上所述,相关单位完善石油化工项目的质量安全管理体系的建设,可以保障施工人员安全,提高整体的建设质量,保障石油化工项目安全稳定的运行。在具体项目中加强施工材料、工程设计工艺的管理,应用管理机制和环境风险等各方面的管控工作,形成完善的质量管控机制。质量文化建设、持续改进理念(如利用 NCR 数据进行根因分析 RCA)、数字化智能化技术的应用,可以合理提升石化工程质量管理效能。减少质量通病和事故的发生,提高石油化工工程项目的建设质量,确保后期能够安全稳定运行。

参考文献

- [1] 赵纲. 石油化工建设项目管理办法应用[J]. 化工管理, 2023, (15): 8-10.
- [2] 别墅. 石油化工工程项目建设的质量控制及安全管理探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(04): 27-28.
- [3] 袁学. 石油化工建设项目工程质量管理策略[J]. 化工管理, 2021, (28): 183-184.
- [4] 叶军平. 石油化工工程项目建设的质量控制及安全管理[J]. 化工管理, 2020, (33): 140-141.
- [5] 刘德新. 石油化工建设项目工程质量管理研究[J]. 化工管理, 2020, (29): 174-175.

Experimental Study on Adaptability of Polymer Microsphere Reservoir

Shubin Shi

Sinopec Shengli Oilfield Branch Company, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

The development of favorable water flow channels in Shengli ultra-high water cut reservoirs reduces the benefits of water drive development. Polymer microspheres can enter the deep formation with injected water, block the dominant channel of water flow, expand the sweep coefficient, and improve oil displacement efficiency. Laboratory experiments were conducted to study the reservoir adaptability of polymer microspheres. The results of indoor static evaluation experiments and nuclear magnetic resonance experiments indicate that there is a certain matching relationship between the pore size of polymer microspheres and porous media. Compared with porous media pore throats, polymer microspheres with excessively large particle sizes cannot achieve deep plugging, while polymer microspheres with excessively small particle sizes are prone to continue to migrate along the channel, affecting oil displacement efficiency. When the matching relationship between polymer microspheres and pore throats is good, polymer microspheres have good sealing ability. Compared with the other two types of polymer microspheres, polymer microspheres with smaller particle sizes can effectively initiate residual oil in small and medium-sized pores after water flooding, and have the greatest improvement in oil recovery rate, targeting the target reservoir conditions

keywords

polymer microsphere; liquids turning in deep; the adaptability of reservoirs; matching relationship with pore throat

聚合物微球油藏适应性实验研究

史树彬

中国石化胜利油田分公司, 中国 · 山东 东营 257000

摘 要

胜利油田特高含水油藏水流优势通道发育, 水驱开发效益降低。聚合物微球能够随注入水进入地层深部, 封堵水流优势通道, 扩大波及系数, 改善驱油效率。利用室内实验开展了聚合物微球的油藏适应性研究。结果表明, 聚合物微球的大小与多孔介质的孔喉具有一定的选择性匹配关系。当聚合物微球的粒径较大时无法进入到多孔介质深部实现封堵的作用, 而粒径过小的聚合物微球容易继续沿窜流通道运移, 影响驱油效率。当聚合物微球与孔喉匹配关系较好时聚合物微球具有良好的封堵能力。与其他两种聚合物微球相比, 粒径较小的1#聚合物微球能够有效启动水驱后中小孔隙剩余油, 其提高采收率幅度最大。

关键词

聚合物微球; 深部液流转向; 油藏适应性; 与孔喉匹配关系

1 引言

深部液流转向剂能够在油层深部有效的封堵出水通道, 改善地层深部的吸水剖面, 从而达到提高原油采收率的目的。目前国内外学者主要从阻力系数和残余阻力系数等方面研究深部液流转向剂封堵效果^[1]。微观尺度上从转向剂与多孔介质孔喉关系对转向剂提出“自适应”、“环境赋形”、“不进低渗透层”等要求。新型柔性转向剂不同于以往硬颗粒转向剂, 已有研究从喉粒径比、平均喉道长度等方面分析柔性转向剂对储层适应性^[2]。通过岩心实验与仪器分析, 深

部液流转向剂分子团粒径与多孔介质孔喉中值直径匹配关系以及一定分子粒径的转向剂对具有不同非均质变异系数储层适应性已有半定量分析^[3]。深部液流转向剂的油藏适应性有待于进一步深化研究。

随着胜利特高含水油田的不断开发, 由于注入水长期冲刷、粘土运移、胶结物溶蚀, 油田储层的非均质性加重, 吸水剖面不均匀, 严重影响驱油效果^[4-6]。聚合物微球深部液流转向剂通过吸附捕集作用滞留于地层多孔介质中, 有效封堵高渗孔道, 改善吸水剖面^[7-8]。笔者通过室内实验对聚合物微球的油藏适应性进行了研究, 实验结果为聚合物微球在矿场的应用提供了借鉴意义。

【作者简介】史树彬(1983-), 男, 中国山东阳信人, 硕士, 副研究员, 从事堵水调剖、化学驱研究。

2 实验条件与方法

2.1 实验材料

聚合物微球：1# 聚合物微球 (粒径 1-30 μm)、2# 聚合物微球 (粒径 20-50 μm)、3# 聚合物微球 (粒径 40-100 μm)；微孔滤膜；模拟水：油田注入水；模拟原油；填砂管并联模型，其性质参数见表其参数见表 1。

表 1 实验岩心参数

序号	长度 (cm)	直径 (cm)	水测孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3}$ μm^2)	饱和油饱 和度 (%)
1	20.00	2.50	28.73	112.24	73.08
2	20.00	2.50	29.34	236.11	73.89
3	20.00	2.50	30.42	30.02	74.42
4	20.00	2.50	28.32	150.24	73.66
5	20.00	2.50	28.69	40.35	75.01
6	20.00	2.50	27.99	420.89	73.88
7	20.00	2.50	29.42	24.47	74.21
8	20.00	2.50	28.65	410.65	75.03

2.2 实验仪器

微孔滤膜过滤装置；岩心驱替装置；量筒；烧杯；玻璃棒。

2.3 静态适应性评价实验

2.3.1 实验流程

(1) 将 3 种不同粒径的聚合物微球溶液样品放到盛液容器中，并将滤膜放置到滤膜夹持器中；(2) 打开气瓶的控制阀门，将压力控制在 50KPa；(3) 测量在一定时间内聚合物微球通过滤膜的溶液体积。

2.3.2 实验方案

表 2 聚合物微球通过不同孔径滤膜实验方案

聚合物微球样品	微孔滤膜孔径 (μm)
1#	10
	30
	50
	100
2#	10
	30
	50
	100
3#	10
	30
	50
	100

2.4 聚合物微球调驱评价实验

2.4.1 实验流程

(1) 利用不同粒径的石英砂填制不同渗透率的岩心，饱和水后测试岩心的孔隙体积，并计算孔隙度；

(2) 将填制好的岩心在室内静置 12h，水测岩心的渗透率；

(3) 将岩心饱和模拟油，计算岩心的含油饱和度；

(4) 水驱岩心至含水率达 95%，驱替过程中注入水速度为 1.0mL/min，分别记录每组两填砂管岩心的产液量；

(5) 注入聚合物微球调驱剂 0.20Vp，记录两填砂管岩心的产液量；

(6) 后续水驱至含水 98%，记录两填砂管岩心的产液量。

2.4.2 实验方案

表 3 聚合物微球调驱评价实验方案

方案	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	级差	水驱	微球段塞	后续 水驱	
1	112.24	2.11	95%	C=3000mg/L(0.20Vp)	98%	
	236.11					
2	30.02	5.00		C=3000mg/L(0.20Vp)		
	150.24					
3	40.35	10.50		C=3000mg/L(0.20Vp)		
	420.89					
4	24.47	17.08		C=3000mg/L(0.20Vp)		
	410.65					

3 结果与讨论

3.1 静态适应性评价实验结果与分析

3 种不同聚合物微球溶液样品分别通过不同孔径滤膜的实验结果如图 1- 图 3 所示。结果表明，聚合物微球的大小与多孔介质的孔喉具有一定的选择性匹配关系。1#、2#、3# 聚合物微球溶液分别在孔径 10 μm 、30 μm 、50 μm 的滤膜中过滤的速度较慢，对多孔介质的封堵效果最佳，即聚合物微球的粒径与滤膜孔径的尺寸相接时封堵能力良好，但当聚合物微球粒径过大或过小时都不能满足选择性封堵的要求。

3.2 聚合物微球调驱实验结果与分析

利用填砂管岩心并联模型研究聚合物微球储层非均质适应性，实验过程中主要从注入压力、采出程度两个方面研究 1# 聚合物微球的调驱能力。

3.2.1 注入压力分析

从实验结果图 4 可以看出，在渗透率级差 2-20 之间，聚合物微球溶液在向岩心注入的过程中压力均较低，注入压力总体上小于 1MPa，说明微球具有较好的注入性。

3.2.2 采出程度分析

研究不同渗透率级差条件下，聚合物微球调驱后岩心的采出程度变化情况，实验结果见表 4。结果表明，在聚合物微球溶液浓度一定的条件下，随着岩心渗透率级差的增加采出程度提高幅度呈现先增加后降低的趋势，这是因为在渗透率级差小于 10 的条件下，更多聚合物微球溶液进入高渗透层，产生一定的渗流阻力，迫使注入水进入低渗透层，提

高其洗油效率。但当渗透率级差大于10时，聚合物微球沿高渗透层突进，不能很好地封堵大孔喉，更不能有效的改善

高、低渗岩心的吸水剖面，从而导致高渗层和低渗层采出程度提高幅度均偏小，调驱效果变差。

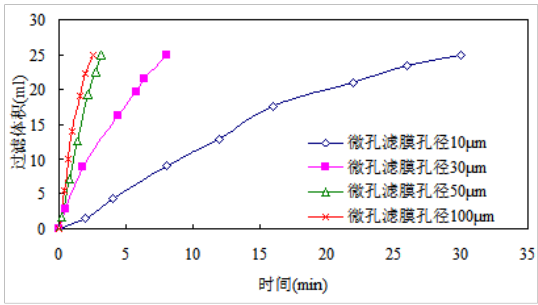


图 1 1# 聚合物微球过滤体积与时间关系

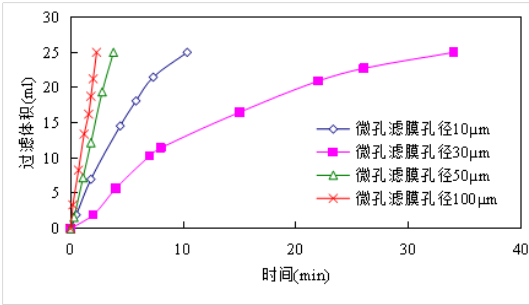


图 2 2# 聚合物微球过滤体积与时间关系

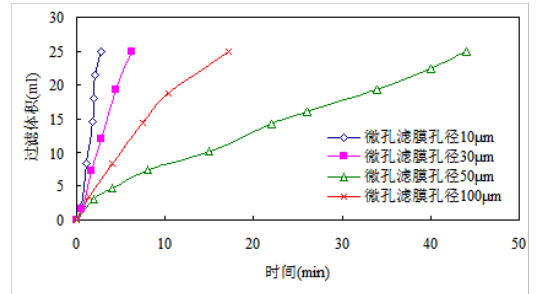


图 3 3# 聚合物微球过滤体积与时间关系

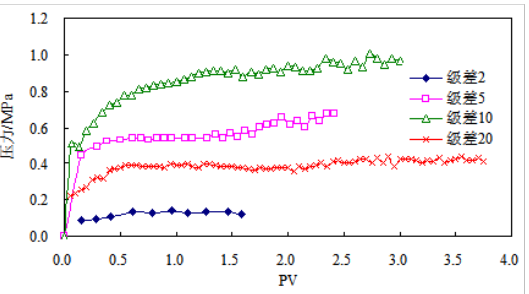


图 4 压力分析曲线

表 4 注聚合物微球实验结果

渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	渗透率级差	各层采出程度 (%)			总采出程度 (%)		
		调驱前 (%)	调驱后 (%)	增值 (%)	调驱前 (%)	调驱后 (%)	增值 (%)
112.2	2.1	54.0	55.7	1.7	59.0	60.8	1.8
236.1		66.5	68.5	2.0			
30.0	5.0	38.3	40.8	2.5	40.6	43.7	3.1
150.2		81.2	85.2	4.0			
40.3	10.5	29.4	40.6	11.2	40.2	49.3	9.1
420.8		56.0	58.6	2.6			
24.4	17.1	5.3	10.7	5.4	42.4	45.9	3.5
410.6		64.1	65.2	1.1			

4 结论

聚合物微球的大小与多孔介质的孔喉具有一定的选择性匹配关系。当聚合物微球的粒径较大时无法进入到多孔介质深部实现封堵的作用，而粒径过小的聚合物微球容易继续沿窜流通道运移，影响驱油效率。1# 聚合物微球能够有效封堵高渗透层，启动低渗透小孔隙中的的剩余油，大幅度提高采出程度。

参考文献

[1] 马涛. 复合吸水颗粒深部液流转向剂注入性研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(4):119-122.
[2] 马红卫, 刘玉章, 李宜坤, 唐孝芬, 覃和, 熊春明. 柔性转向剂在多孔介质中的运移规律研究[J]. 石油钻采工艺.2007,4: 80-99.

[3] 卢祥国, 王树霞, 王荣健, 等.深部液流转向剂与油藏适应性研究——以大庆喇嘛甸油田为例[J].石油勘探与开发, 2011, 38(5):576-582.
[4] 胡文瑞.论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J].石油勘探与开发, 2008, 35(1):1-5.
[5] 孙龙德,方朝亮,李峰,等.中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J].石油勘探与开发, 2010, 37(4):385-396.
[6] 韩大匡.关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5):583-591.
[7] 唐孝芬,刘玉章,杨立民,等.缓膨高强度深部液流转向剂实验室研究[J].石油勘探与开发, 2009, 36(4):494-497.
[8] 徐新霞.聚合物驱“吸液剖面反转”现象机理研究[J].特种油气藏, 2010, 17(2):101-104.

Improvement of design for forming mold of stress release slot in insulation layer

Fengtao Lu Haipeng Zhang Jiawei Li Gongle Han Chuanming Li

China Aerospace Science and Industry Corporation Sixth Research Institute 210, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

In the field of solid rocket engines, stress relief grooves in the insulation layer are common structures designed to release the stress generated by the contraction of the propellant column. The material of the insulation layer is generally EPDM rubber, and the thickness of the inner wall (adhesive cylinder surface) of the stress relief groove is about 0.8mm to 1.5mm. Due to its thin inner wall thickness, the overall molding process is usually used for this purpose. For the design of forming molds, the groove structure is formed by assembling inserts. However, the introduction of inserts increases the difficulty of forming the insulation layer, and the insulation layer on the back of the insert is prone to quality problems such as porosity and delamination of the rubber material. In response to the above issues, this article discusses the forming mechanism of the stress relief groove structure in the insulation layer, and introduces two improvement schemes for forming mold design. Through experimental verification, the advantages and disadvantages of the two improvement schemes are summarized, and the optimal scheme is determined to thoroughly solve the forming problem.

Keywords

insulation layer, stress release groove, molding mold design improvement

绝热层应力释放槽成型模具设计改进

鲁锋涛 张海鹏 李佳玮 韩共乐 李传明

中国航天科工集团第六研究院 210 所, 中国·陕西 西安 710065

摘要

在固体火箭发动机领域, 绝热层中的应力释放槽为常见结构, 其目的是为了释放药柱收缩产生的应力。绝热层的材料一般为三元乙丙橡胶, 应力释放槽内壁(贴药柱面)厚度约为0.8mm~1.5mm, 由于其内壁厚度偏薄, 为此通常采用整体成型的工艺方法。对于成型模具设计而言, 槽型结构通过组装嵌件实现成型, 然而, 嵌件的引入使得绝热层成型难度增加, 嵌件背部的绝热层易产生气孔、胶料分层等质量问题。针对上述问题, 本文对绝热层中的应力释放槽结构成型机理展开讨论, 并介绍了两种成型模具设计改进方案, 通过试验验证, 总结出两种改进方案的优缺点, 确定最优方案, 以彻底解决成型问题。

关键词

绝热层 应力释放槽 成型模具 设计改进

1 引言

在固体火箭发动机领域, 绝热层中的应力释放槽为常见结构(见图1), 其目的是为了释放药柱收缩产生的应力。绝热层的材料一般为三元乙丙橡胶, 应力释放槽内壁(贴药柱面)厚度约为0.8mm~1.5mm, 由于其内壁厚度偏薄, 为此通常采用整体成型的工艺方法。

对于成型模具设计而言, 槽型结构通过组装嵌件实现成型, 然而, 嵌件的引入使得绝热层成型难度增加, 嵌件背部的绝热层易产生气孔、胶料分层等质量问题。

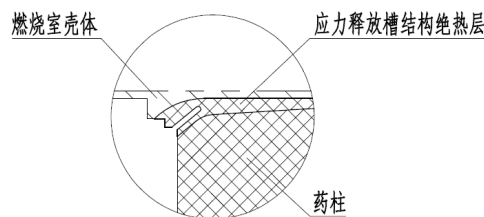


图1 应力释放槽结构

针对上述问题, 本文对绝热层中的应力释放槽结构成型机理展开讨论, 并介绍了两种成型模具设计改进方案, 通过试验验证, 总结出两种改进方案的优缺点, 确定最优方案, 以彻底解决成型问题。

【作者简介】鲁锋涛(1983-), 男, 中国陕西西安人, 高级工程师, 从事复合材料成型、工艺装备设计研究。

2 传统模具结构及存在问题

以产品 A 为例，对其绝热层中的应力释放槽成型模具结构及成型情况进行介绍。

2.1 传统模具结构

传统应力释放槽成型模具主要由上模、芯模、嵌件、下模等组成。模具结构如图 2 所示。

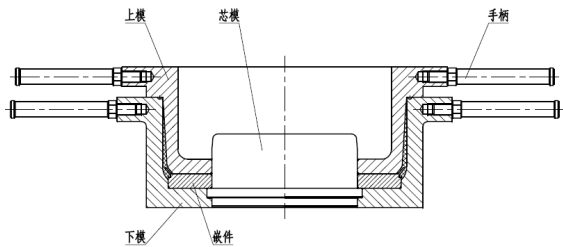


图 2 传统模具结构

模具使用时，先进行预热，预热充分后，对模具型面进行清洗，然后装料、模压，保温成型后，降温至常温脱模，工艺流程见图 3。

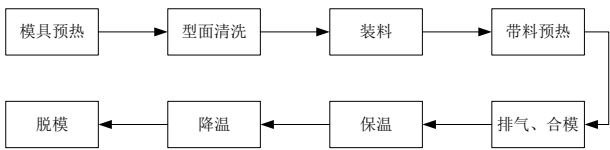


图 3 成型工艺流程

2.2 存在问题

采用传统模具压制应力释放槽结构绝热层，模压件质量不稳定，部分模压件出现气孔、胶料分层现象。

缺陷部位位于成型模具嵌件背面，如图 4 所示。

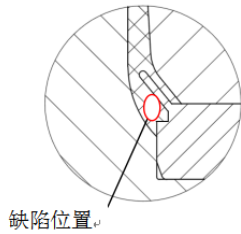


图 4 缺陷位置

3 问题分析

结合模压成型过程，对上述模具结构进行仔细分析，发现该结构模具存在以下问题：

- a) 由于嵌件的存在，模具合模时，上模压力无法直接传递至嵌件下方，造成嵌件下方成型压力不足，容易出现分层现象；
- b) 嵌件背部的进料口与排气口共用，在模压过程中，型腔内排气困难，尤其是嵌件下方，更容易卷气，成型后则易形成气孔；
- c) 装料位置不平整，装料位于嵌件薄片上方，模压过程中，嵌件薄片承担主要合模压力，易发生变形（此条为模具结构本身问题，与前述模压质量问题无关）。

4 成型模具设计改进

根据以上分析结果，对于应力释放槽结构绝热层，其成型模具设计时，应满足以下条件：

- a) 模具型腔内压力均匀，无压力传递死角；
- b) 模具料腔应平整，无异型结构，方便装料，且模压过程中排气畅通。

4.1 改进方案一

在产品 A 研制过程中，对其应力释放槽结构绝热层成型模具进行了设计改进，改进后结构见图 5。

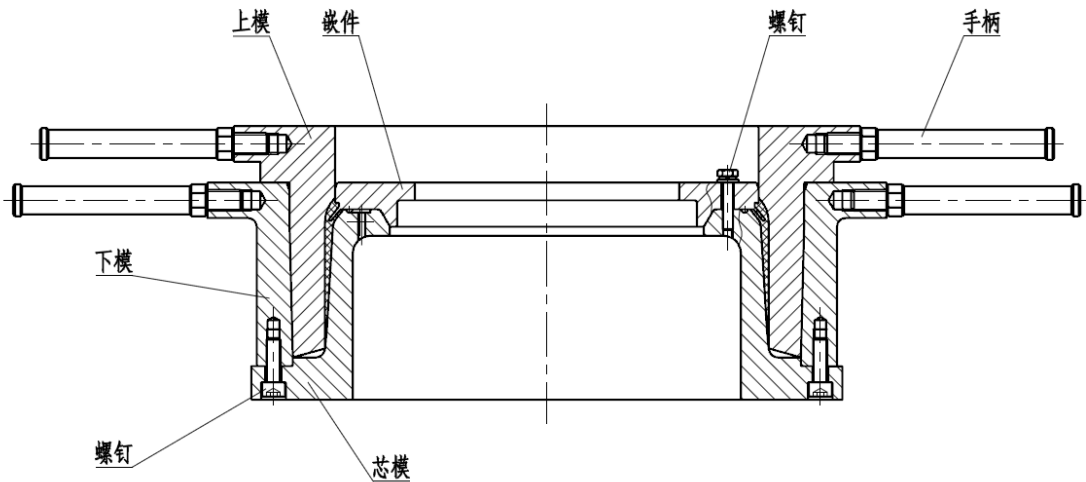


图 5 方案一模具结构

改进方案一模具成型原理如下:

模具嵌件与芯模固定,装料时,打开上模,将生胶片装于料腔正下方,上模底部带有胶料导向坡度,合模时,胶料由下往上挤压,料腔内气体向上排出,而嵌件成为胶料流动的分路口,两侧压力均衡,合模到位后,按工艺要求进行保压保温,应力释放槽结构绝热层成型任务完成。脱模时,松开嵌件固定螺钉,成型件与嵌件随上模一并脱出,最后将成型件与嵌件分离。

经生产验证,采用该模具生产的应力释放槽结构绝热层,产品成型良好,质量稳定,无气孔、分层现象。但由于模具上下模配合面较长,脱模难度大,此外,合模时,若上下模位置稍有不正,会出现啃模现象。

4.2 改进方案二

基于改进方案一的验证情况,对产品 A 应力释放槽结

构绝热层成型模具再次进行优化改进,改进后结构见图 6。

改进方案二模具成型原理如下:

改进方案二模具为哈夫模结构形式,嵌件通过挡圈及螺母固定于芯模左侧,装料时,将生胶片铺装与芯模右侧,合模时,将胶料从左侧挤压至右侧,其原理与方案一中将胶料由下往上挤压的原理相同,料腔内气体沿模具配合面排出,合模到位后,按工艺要求进行保压保温,应力释放槽结构绝热层成型完成。脱模时,将芯模脱出后竖直起吊,拆卸螺母、挡圈,将嵌件及成型件脱出,最后将成型件与嵌件分离。

该方案是在前述方案的基础上进行改进,既保证了应力释放槽结构绝热层成型质量,同时还解决了脱模难度大、啃模问题。

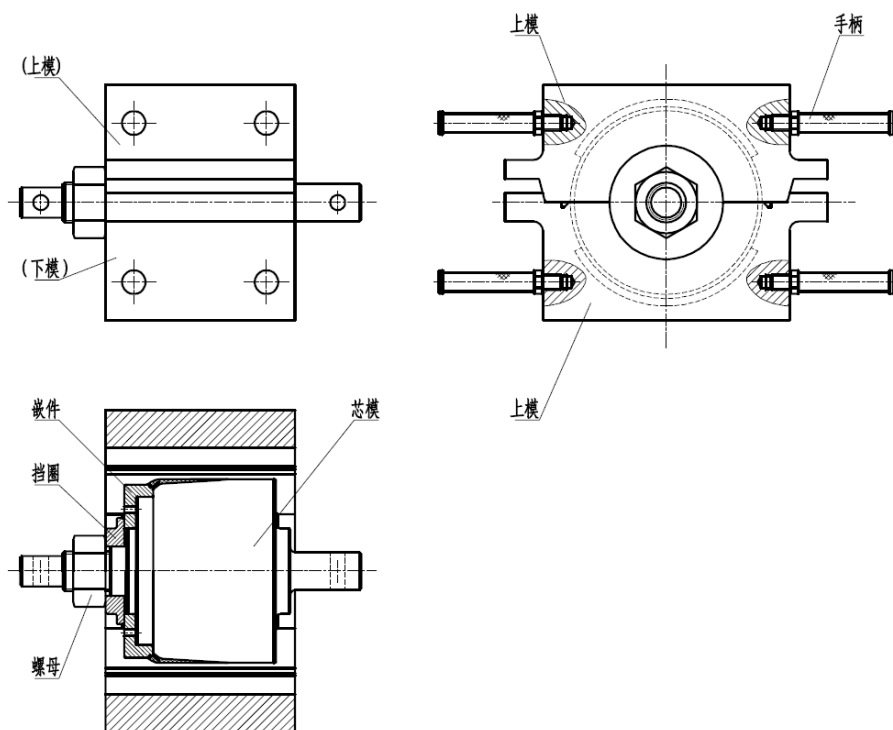


图 6 方案二模具结构

5 结论

通过两轮改进,改进方案二的模具结构为当前生产条件下的最佳状态,模具型腔内压力均匀,装料方便,排气畅通,易脱模,模具无啃模现象,满足应力释放槽结构的绝热层成型任务。后续可根据生产条件的变化情况,开展进一步优化改进工作。

参考文献

- [1] 陈凯印,侯增选,张伟超,等.绝热层缠绕成型多轴控制方法研究[J].机械与电子,2025,43(07):41-47+53.
- [2] 李宏利,侯增选,张伟超,等.基于粒子群优化算法的绝热层缠绕路

径优化[J/OL].复合材料科学与工程,1-8[2025-08-18].<https://link.cnki.net/urlid/10.1683.tu.20250710.1346.010>.

- [3] 张志明.平盖封头应力释放槽结构研究[J].机械制造,2025,63(07):55-58+54.
- [4] 储祥宇,叶文华,杨高杰,等.成型模具安装误差原位测量控制系统研究与开发[J].机械制造与自动化,2025,54(03):43-47. DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.008.
- [5] 李家.临氢工况下金属压力容器焊接工艺改进设计[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):150-152. DOI:10.16107/j.cnki.mmt.2025.0487.

Civil equipment engineering construction technology and management

Jianjun Guo Yan Zhu Shitong Han

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

Abstract

In the field of earthwork equipment engineering, the organic integration of technology and management is the core to project success. With the expansion of project scale and increasing construction complexity, efficient utilization of earthwork equipment has become a critical factor in ensuring smooth project progress. This study analyzes core technical elements in earthwork equipment engineering and explores the establishment of equipment management systems. Addressing frequent challenges such as technical complexities, resource allocation issues, and on-site coordination difficulties during construction, this research further examines the root causes and solutions for these problems. Finally, drawing on practical operational experience, it proposes optimization strategies to enhance construction efficiency, refine management processes, strengthen on-site collaboration, and ensure safety. These strategies aim to provide practical guidance for project managers and promote sustainable industry development.

Keywords

Earthwork equipment engineering; Construction technology; Equipment management; On-site coordination; Optimization strategies

土建设备工程施工技术与管理

郭建军 朱彦 韩仕通

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 桂林 541004

摘要

在土建设备工程施工领域, 技术与管理的有机结合是工程成功的核心。随着工程规模的扩大与施工难度的提升, 土建设备的高效运用成为确保项目顺利推进的关键因素。本研究分析了土建设备工程施工中的核心技术要素, 并探讨了设备管理体系的构建。面对当前施工过程中频繁出现的技术复杂性、资源调配问题以及现场协调难题, 本研究进一步剖析了这些挑战的成因与解决方案。最后, 结合实际操作经验, 提出了提高施工效率、完善管理流程、加强现场协作与安全保障等优化策略, 旨在为项目管理者提供实际的指导, 推动行业的可持续发展。

关键词

土建设备工程; 施工技术; 设备管理; 现场协调; 优化策略

1 引言

土建设备工程施工不仅是基础设施建设的核心组成部分, 更是决定工程质量与进度的关键因素。随着建设项目日益复杂化和技术要求的不断提升, 施工中面临的难题也日益多样化。本文将深入分析土建设备工程施工中的技术挑战, 并在此基础上, 提出切实可行的管理优化策略, 力图为实践中的工程项目提供理论指导与解决方案。

2 土建设备工程施工技术与管理概述

2.1 土建设备工程施工中的核心技术要素

在土建设备安装施工中, 技术并不是简单的一台设备, 而是技术和设备的完美结合。设备的选取、施工作业以及维

护技术在整个施工过程中影响着整个项目的顺利进行。无论是土基、还是构造物的安装, 都需要合适的设备来完成。合理的设备作业离不开良好的操作技术和设备的日常维护与保养。良好的技术支撑不仅可以提高施工进度和施工质量, 还可以提高施工设备的可靠性, 降低设备的故障率。

2.2 土建设备管理体系的构建

土建设备管理体系是保障设备工作效率、维护施工安全的重要保证措施, 科学有效的设备管理体系涉及设备采购、调度、管理、维修、报废等诸多方面, 并且各部分也需要高效结合。设备管理系统应该具备实时监测功能, 有效实现对设备工作的监测与分析, 并且还需要健全相关人员培训与管理制度, 使得操作人员可以熟练掌握设备, 形成相应的操作安全保障。

【作者简介】郭建军(1997-), 男, 中国河北张家口人, 助理工程师, 从事土建专业研究。

3 土建设备工程施工中的关键问题

3.1 土建设备工程施工技术的复杂性与难点

设备建筑工程中的施工技术相对复杂,尤其是在大型或超大型项目中,施工过程中设备的应用需考虑到大量的因素,从工地施工现场的环境特点到设备类型,每一个因素都可能导致施工的效率和质量下滑。更难处理的是每一台设备和其他设备的适配和协调,在一些项目中,设备的技术性要求可能并不兼容,从而影响工程项目的进度和成本。

3.2 工程设备管理中的资源调配问题

项目设备管理难点:对于设备管理而言,资源调配一直是项目管理的难点,设备使用不均衡、调度不及时、资源浪费大等现象屡见不鲜。在大型项目中设备需要数量大,对项目的调度管理水平更是无法忽视的难题。根据施工进度、现场条件、设备使用状况等状态,合理进行设备调配,尽可能解决施工面临的瓶颈和阻碍,精细化管理使得施工不受约束和阻碍,其成功与否直接影响成本以及工期可控制度和设备的最大使用价值。

3.3 施工现场协调与设备安全管理的挑战

土建设备工程项目施工过程中现场施工协调问题是一个影响设备施工进度的重要因素。现场施工协调复杂,涉及很多施工部门的共同参与,如何使设备保障人员安全、高效的配合施工进度是一个工程管理的难点;设备的不当操作以及缺乏保养将引发设备的故障安全隐患,甚至造成重大事故的发生,因此现场施工人员的安全管理也同样重要,当设备与人员的协调不够妥当的话,将会影响现场施工进度甚至危及人员生命财产安全^[1]。

4 土建设备工程施工技术与管理优化策略

4.1 提升土建设备施工效率的技术措施

对于提升土建设备的施工效率,除了完善具体操作人员之外,还应重视设备的技术选型和作业方式。在大型建设工程项目中,根据不同的施工任务,选择合理的施工设备,不仅能够提升施工效率,还可以在在一定程度上实现降低施工成本的目的。通过应用远程监控系统,能够在实时获得设备的作业状态情况,了解设备是否存在问题故障、需要进行检修,采取有效的预防措施,防止因设备停顿而导致工期拖延。同时在施工作业中通过引入先进的数字化技术(如BIM技术、物联网等)来实现现场施工设备与现场系统的实时信息共享,通过对施工进度、物料流、设备运转情况等因素的全面实时监控,能够更加准确地预测施工进度并实施科学调度管理,而设备的自动化作业的运用则能够实现施工效率的提升。对于大量简单重复性工作、劳动强度大的工作,运用自动化设备不仅能够实现施工速度的提升,并且可以改善工人的劳动强度、提高施工效率^[2]。

4.2 完善土建设备管理流程的具体方法

土建设备管理具有一定的系统性,其中包含了土建设

备采购、调度管理、使用、维护及报废等多个环节,每一个环节都需精准控制,以免造成不必要的浪费及损失。在土建设备采购环节中,需严格把控,以免采购的设备不符合施工项目使用的实际需求。设备采购一般根据价格优势及供应商的优惠政策进行采购,这样不但会造成设备无法满足实际施工要求,还会影响到整个施工进展的完成。所以在设备采购过程中,还需根据项目施工、技术等相关特点与施工要求,选择具有高性价比的设备,并采用实时调度系统实施设备调度的管理。在设备的使用过程中,合理且及时的设备使用实时调度系统能够根据精准的掌握各个施工现场设备的使用情况,避免了施工现场设备出现闲置、重复调度等现象,不仅可以提高设备资源的利用效率,还能通过设备实时采集数据信息,以此为依据精准的改变、优化施工过程中、施工技术的组织和管理,提升整个施工项目的进展程度与使用效率。对于土建设备维护管理环节中,由于设备的故障问题与设备使用不合理等弊端均会导致工期的耽误,所以需推行维护检查制度。在周期性的维护检查过程中,还能通过数据分析设备的维修时间,以免设备故障导致设备管理中工期的耽误。与此同时,土建设备管理需建立完善的土建设备管理档案系统,将土建设备的使用信息、采购信息、维修信息等都记录下来。借助信息化管理的手段,形成一套集成化信息系统,能对设备进行更加精细化和流程化的管理,实现施工项目的持续推进。

4.3 强化施工现场协同与设备安全保障

首先就是施工现场的协合作。施工现场的工作不仅仅只有施工人员之间的协同合作,还要做到施工人员、机械、工具之间互相配合进行工作。而为了满足工作的要求,需要现场人员、机械进行协同,这样才有助于施工的顺利进展。协同网络信息化就可以对于这种协同组织起到重要的作用,在施工现场里面根据用户设置一个协同平台,对于现场施工工作进行协同网络信息化建设。建立一个统一的协同平台,也就是建设协同网络信息技术的过程,施工人员、管理人员和设备人员都可以通过协同平台进行信息的交流,知道现场需要他们做什么,每一工作环节所进行的工作如何安排,各个工作环节所需要的协同信息,然后满足相关需求。在施工现场中要保证施工的安全,施工现场施工人员、机械的操作安全也是施工现场安全管理的难点,尤其是在机械设备管理上,设备的安全管理是施工现场机械设备管理和控制中的一个重要的组成部分,需要加强对机械设备进行操作,严格按照机械设备相关注意事项、操作流程进行操作,加强对施工设备机械的安全检查,只有这样才能保证设备的安全运行,减少安全事故的出现。要加强施工现场设备操作人员的安全操作培训,提升机械设备操作人员的安全操作意识。包括相关操作培训,要求机械设备操作人员在进入施工现场之后,一定要经过培训,而后在施工现场有相关技术岗位对其进行考察,并需要进行相应的学习,只有通过考试之后才可以操

作机械设备,这样在机械设备使用方面才能保证对设备的安全操作,不断提高机械设备的安全操作意识与操作水准。要加强施工现场设备的监控与报警系统。用监控系统与报警系统对施工现场的设备系统进行监控,监控到各种设备系统出现的状况,尤其是在某些施工设备出现问题,运行故障的时候,此时就需要及时对故障进行排除,还需要及时通过监控设备与施工现场的各个相关人员联系,做好应急准备措施。做好施工现场人员的现场施工流程与具体工作安排,避免施工人员、机械人员以及工作人员交叉作业,导致耽误工作的有效完成与现场人员、施工人员安全事故的发生^[9]。

4.4 优化土建设备维修与保养工作的实施路径

首先,是制定精准的设备维修和维护计划,不仅需要设备的运用年限、工作强度和运行环境制定设备的保养周期,更要根据设备运行相关参数进行定期的预测式维护,利用数字化管理方式借助传感器和远程监测技术,实时监测设备的运行参数,从而得出设备运行的健康状况,判断设备即将出现问题的故障类型,在检测出故障原因以后及时进行修复,保证设备在第一时间快速恢复运行,确保施工过程中不会出现因设备故障停机而导致施工效率下降的问题。优化维修路径的第二个重点是,提高设备的维修人员队伍专业化水平。对于具有高技术水平的设备维修和养护人员,不仅可以降低设备故障率的发生,也可以在设备出现问题后能够及时发现故障原因,根据实际情况选择最有效的解决方案完成设备的修复工作,这也是影响设备维修人员队伍专业化水平的关键因素,通过定期举办技术交流会议、设备操作培训等活动帮助维修人员,提升他们的故障排查能力。第三,是对设备维护和维修建立相关的记录管理档案,针对所有设备进行维护和维修的记录都应该有详细的存档,所有设备的维护历史、配件维修情况等都应登记在册,一方面保证施工人员能够及时查看设备健康档案的运维数据;另一方面也可以在设备运行不佳或者闲置后进行优化调整的时候,发挥记录管理信息的数据支持作用。维修保养工作中应当调度维修资源,防止维修过于集中在同一个阶段而出现其它设备短暂不足的问题。能够有效安排维修工作的时间,在不影响项目进度的同时,这种维修才是最恰当的方式。

4.5 加强人员培训与技能提升的管理

土建设备工程的技术水平和施工质量除了高效设备和先进的技术手段外,更多时候取决于施工作业人员的综合素质。设备使用效率的高低、施工任务完成的质量,很大程度上取决于作业人员对设备的熟练度、操作技术水平以及对安全

规范执行情况。所以,土建设备的人员培训及技能提升管理是做好此工程项目不可缺少的一环。可以开展多层次、多方面的培训体系,包括对新员工入职培训及在岗的工人定期的技能提升训练等。在大型施工项目中,由于施工中涉及到的设备多种多样,操作技术要求很高,这就要求施工人员不断通过新技能培训,为施工市场日益发展的要求打好设备操作的根基。此外,培训内容应该结合施工现场的工程实际,注重实践性,强化施工人员在土建设备操作规程与操作技术知识掌握情况及设备出现的常见故障处理等技能。安全意识的培训与学习也是很重要的方面。在使用设备的过程中,若操作不当或忽视了安全操作规范,很容易对施工人员造成伤害或者引发意外事故。因此,安全意识提高的培训,除了操作技术水平的培训之外,应该增加安全意识相关的专业知识培训,不仅要做到理论授课教学,更要通过模拟练习以及实操现场培训,培养员工应对紧急情况的应变能力,使其在复杂施工现场能够及时作出判断。为了提高培训的质量,对土建设备工程培训的人员管理水平来说,还需要根据实际工作中遇到的情况适时做出调整 and 安排,以保证培训的内容贴近实际施工需要。特别是随着设备技术的发展和更新,培训管理工作需具有灵活性和前瞻性,及时将新技术、新工艺引入培训工作中,给员工提供新颖的、前沿的技术、知识和技能。企业可通过对员工进行技能考核的方式定期检测员工技能掌握水平,在考核发现的问题的基础上调整员工的培训内容或对员工进行更加有针对性的培训。

5 结语

总之,只有在土建设备工程施工技术与管理优化的基础上,才可以确保建筑行业的可持续、健康的发展,也只有通过对日益凸显的土建设备工程施工问题的解决以及对技术的提升与管理机制的健全,才可以有助于提升土建设备工程施工中施工效率以及安全作业能力的发挥,以此来确保土建设备工程项目得以顺利的完成。通过以上施工问题的识别,可以预见,未来的土建设备工程施工会在施工技术与施工管理的共同努力下实现更好的进步。

参考文献

- [1] 沈旭东.土建工程建筑施工技术和管理研究[J].2024(6):28-30.
- [2] 游瑞.土建工程项目的施工技术与管理研究[J].建材与装饰,2024,20(35):109-111.
- [3] 钟华彬.管廊施工管理中的土建工程施工技术与方法[J].城市建设理论研究(电子版),2024(9):91-93.

Analysis of Installation and Operation Efficiency of Mechanical and Electrical Equipment in Petrochemical and Oil Engineering Construction

Bing Zheng

Jilin Mengxi Engineering Management Co., Ltd., Jilin, Jilin, 132000, China

Abstract

The installation quality and operational efficiency of electromechanical equipment in chemical and petroleum engineering projects directly determine the stability and cost-effectiveness of the entire process system. With the expansion of project scales and increasing construction complexity, coordination challenges in design, installation, and operation phases have become increasingly prominent. This paper analyzes the critical role of electromechanical equipment during construction processes, systematically exploring core factors affecting installation and operational efficiency. Key aspects include equipment selection, process matching, construction organization, operational monitoring, and maintenance strategies. By identifying feasible pathways for efficiency improvement, the study proposes optimized engineering construction and operational management strategies, providing theoretical support and practical guidance to ensure efficient commissioning and long-term stable operation of chemical and petroleum projects.

Keywords

chemical and petroleum engineering; electromechanical equipment; construction management; operational efficiency; technical optimization

化工石油工程施工中机电设备安装与运行效率分析

郑冰

吉林梦溪工程管理有限公司, 中国 · 吉林 吉林 132000

摘 要

化工石油工程项目中机电设备的安装质量与运行效率直接决定了整体工艺系统的稳定性与经济性。随着工程建设规模扩大与施工复杂性提升, 机电设备在设计、安装与运行环节中的协同问题日益突出。本文围绕机电设备在施工过程中的关键作用展开分析, 系统探讨影响其安装与运行效率的核心因素, 涵盖设备选型、工艺匹配、施工组织、运行监测与维护策略等方面。通过梳理效率提升的可行路径, 提出优化工程施工与运行管理的策略, 为保障化工石油工程的高效投产与长周期稳定运行提供理论支持与实践指导。

关键词

化工石油工程; 机电设备; 施工管理; 运行效率; 技术优化

1 引言

化工石油工程作为能源基础设施的重要组成, 其施工过程高度依赖机电设备的系统集成与高效运行。机电设备不仅承载着物料输送、能量转换与自动控制等核心功能, 还关系到生产安全与能效表现。当前工程实践中存在设备安装不规范、运行效率低下与维护响应滞后的问题, 制约了系统整体效能的发挥。针对上述问题, 有必要从施工全过程的角度出发, 系统分析机电设备安装阶段与运行阶段的效率影响

因素, 并结合技术与管理手段进行优化, 以提升工程建设的综合效益。本文在总结实际施工特征的基础上, 构建设备效率分析框架, 提出切实可行的优化策略, 助力化工石油工程高质量发展。

2 机电设备在化工石油工程中的功能定位

2.1 关键设备类型与系统构成

化工石油工程涉及的机电设备种类繁多, 常见包括动力系统设备、输送泵类、压缩装置、加热冷却设备、电气控制柜与过程仪表等。这些设备构成多层次、多功能的系统网络, 涵盖原料输送、反应控制、产物提取与废物处理等核心环节。设备构成不仅呈现出高度集成的系统特性, 也对安装精度、运行环境与控制协调性提出较高要求。各类设备之间

【作者简介】郑冰（1990-），男，中国辽宁沈阳人，本科，工程师，从事地面建设和油气储运（中级申报时所选的专业）研究。

通过管线、传感系统和自动控制逻辑形成联动关系，确保生产过程连续稳定运行。系统构建过程中对设备类型的科学选择与合理组合直接影响整体工程运行效率与能耗表现。

2.2 机电设备在施工流程中的支撑作用

在化工石油工程施工全过程中，机电设备承担着结构支撑、工艺传导、信息交互与能量供给的复合型职能。从基础施工开始，设备预留接口与布线通道需与土建结构高度匹配，确保后续安装准确性与作业便利性。设备定位精度、安装时序与空间布局直接影响施工现场的作业效率与后期运行稳定性。同时，设备测试、单机调试及系统联动调试贯穿施工收尾阶段，支撑整个系统进入稳定运行状态。设备与工艺装置协同推进，决定了项目建设节奏与交付质量，是构建高效工程体系不可或缺的重要组成部分。

2.3 设备性能对工艺运行稳定性的影响

机电设备的性能水平直接关系到化工石油工程运行的安全性、经济性与稳定性。设备参数如输送流量、压缩比、换热效率与控制精度影响核心工艺单元的物料平衡与能量传递。性能稳定的设备能在高温、高压、高腐蚀等极端条件下持续运行，有效保障工艺过程不间断。性能波动则可能导致系统超负荷、工艺参数失稳与事故风险增加^[1]。设备性能也决定了自动控制系统的响应速率与调节精度，进而影响到系统整体调控能力。高性能设备构建起可靠的工艺基础，是实现长周期、满负荷稳定生产的关键。

3 机电设备安装环节的效率影响因素

3.1 安装工艺流程规范性分析

机电设备安装过程涉及吊装、就位、连接、固定、调试等多个环节，其工艺流程是否规范直接决定了工程进度与安装质量。规范化的施工流程强调作业步骤的标准化与环节衔接的逻辑性，从前期的施工图审查与材料准备到中期的设备基础校准与接口对接，每一步都应具备详实技术参数与可追溯记录。任何环节的偏差都可能引发重复作业、接口不匹配或运行故障，影响整体施工效率。通过强化施工工艺交底与现场监督，实现流程闭环管理，有助于保障设备安装的精准性与高效性，避免资源浪费与工期延误。

3.2 设备选型与预装配策略作用

在工程筹备阶段进行精准的设备选型可有效规避现场安装中的结构冲突与空间干涉问题。选型不仅要考虑设备参数与工艺要求的适配性，还需对接口形式、安装方式、维保空间等进行综合评估。预装配策略在设备安装中发挥重要作用，通过在加工厂区完成部分模块组装、焊接与调试，能显著降低现场工作量，减少高空作业与危险操作。预装配提高了设备一致性与安装效率，缩短施工周期，降低返工风险。合理的选型与模块化预装配策略相结合，为现场安装创造良好条件，提升整体施工组织效率。

3.3 施工组织与技术协调的匹配度

机电设备安装往往跨多个专业团队，需要施工组织架

构与技术协调机制高度一致。各工种的施工顺序、作业时间与施工空间必须合理排布，避免交叉作业干扰与现场冲突。技术层面需明确设备基础施工、土建移交、设备安装、线路敷设与系统调试之间的逻辑关系，通过动态施工计划实现各环节高效衔接。组织层面强调责任分工清晰、资源调度高效、问题响应快速。通过施工指挥系统与技术接口管理，构建高效协同作业模式，提高安装工作的整体推进速度，降低工期压缩带来的质量隐患。

4 运行阶段效率评价的关键指标体系

4.1 运行能耗与设备负载适配性分析

设备运行效率取决于其负载适应能力与能耗水平之间的动态平衡。长期处于偏离设计负载状态的设备不仅能耗升高，也可能因频繁启停或超负荷运行而加速磨损。通过对设备运行电流、压力、流量等参数的实时监测，可评估其是否处于最优负载区间。能耗指标如单位产出能耗、峰值能耗与能耗波动幅度反映了系统的能源利用效率。优化负载匹配策略需结合工艺调度与能源管理系统，动态调整设备运行状态，提升系统整体效能。合理配置负载可延长设备寿命，降低运行成本，提升资源利用率。

4.2 设备故障率与维护响应周期关系

设备的运行可靠性通过故障率与维护响应速度表现出来，两者构成影响效率的关键变量。高故障率直接造成系统停机、生产中断与安全隐患，而响应周期长则放大了停产损失与运行风险。通过建立标准化的设备点检制度与在线状态监测系统，可以提前识别潜在故障信号，缩短故障诊断与处置时间。维护策略包括预防性维护、预测性维护与快速应急响应机制，需与设备重要度等级相适配。缩短维护周期、提高维修技能与备件供应保障水平，是降低故障损失、提升运行效率的有效手段。

4.3 系统联动与工艺连续性保障机制

化工石油工程中的工艺系统多以流程连续为目标，设备联动运行是实现稳定生产的基础^[2]。关键设备间通过 PLC 或 DCS 系统实现数据共享与运行逻辑控制，保证参数调节的同步性与突发状况的联动响应。系统稳定性依赖于控制程序的精度、信号传输的稳定性与反馈逻辑的严谨性。工艺连续性还要求设备具备缓冲能力与冗余设计，确保局部故障不会导致系统瘫痪。通过构建闭环控制、分区控制与跨系统联锁机制，实现多设备间的高效联动运行，为高强度连续生产提供技术支撑。

5 施工现场的管理措施对效率的促进作用

5.1 施工进度与机电安装节点的衔接性

施工现场的进度控制直接决定了机电设备安装环节的整体效率。设备安装需要与土建施工、结构完工、管线布设等多个工序精确对接，任何节点间的脱节都会造成作业中断、工期延误与资源浪费。工程进度计划应采用动态更新机

制,将关键路径中的机电节点作为控制重点,明确各时间段的施工任务、作业面移交条件与设备到场时间。利用BIM模型或施工可视化技术提前进行路径模拟与空间冲突分析,可提升现场协调效率。施工总包单位需统筹推进各分包队伍协同作业,强化信息传递与责任联动机制,保障设备安装在合适时段有序展开,实现施工流程与设备进场的高效衔接。

5.2 人员配置与专业技能结构优化

施工效率的高低与现场人员配置结构密切相关,尤其是在机电设备安装这一专业性较强的领域,人员的工种匹配度、技能等级与协作能力决定了作业质量与进度水平。合理的人员组织应根据设备类别、工序复杂度与时间节点进行精准调配,既避免冗余浪费,又防止人员短缺造成工期滞后。专业技能结构的优化需要通过岗前培训、持证上岗、技术交底与技能比武等多种方式提升人员能力水平,特别是对高压电气安装、精密仪表接线与大型设备吊装等环节的熟练度进行严格考核。项目管理方应建立人员动态管理台账,结合进度计划实施弹性调度,实现高效投入与作业标准化并重的目标^[3]。

5.3 施工环境对设备保护与运行调试的影响

施工现场的环境因素对机电设备的保护水平与后期运行调试具有深远影响。高温、高湿、多尘等不良环境易造成设备部件腐蚀、电路受潮、接口污染等隐患,影响后期运行稳定性。施工场地应配置防雨棚、防尘布、避震垫等防护措施,并设置设备临时存放区与作业封闭区域,确保关键设备不受外部干扰。在调试阶段,施工噪声、电磁干扰与能量接入不稳定等问题也会影响测试精度与参数设定,导致调试误差或控制逻辑紊乱。通过对作业环境的细致规划与实时监控,配合施工秩序管控、作业时间安排与环境参数预警机制,可有效保护设备性能不被施工干扰破坏,为设备顺利运行与稳定调试提供保障。

6 提升机电设备运行效率的综合路径探析

6.1 引入模块化设计与预制装配理念

机电设备的模块化设计理念可大幅提升施工与运行效率,通过标准化单元构建、模块组合替代传统散装组装方式,使得设备具备较高的适应性与可维护性。在设计阶段将功能单元划分为结构、动力、控制等多个模块,并在加工厂完成预制、组装与初步调试,有助于减少现场安装工作量与作业强度。模块化还便于运输、吊装与定位,提高设备安装的空间利用率与对接精度。在运行阶段,模块化结构使得维护更为便捷,出现故障可实现快速替换而无需大范围拆解。通过优化模块界面标准与接口统一性,提升设备的通用性与适配性,最终构建出安装便捷、运行高效、维护简明的现代化设备体系。

6.2 构建全过程质量控制与反馈机制

设备运行效率的提升依赖于全过程质量控制机制的有效运行,覆盖设计、采购、运输、安装、调试与运行等各环节。通过建立从源头设计参数审查、制造过程检验、到现场安装验收全链条的质量追溯体系,可最大程度避免因某一环节失误造成的系统效率损失。现场应设立质量责任分级管理制度,明确每一作业节点的质量指标与考核机制,配套使用质量记录表、检查清单与问题整改闭环流程。反馈机制则是保障质量提升的关键,需依托运行阶段的数据采集系统,对能耗、温升、震动等指标进行实时记录与分析,形成问题清单与改进建议,持续反哺前端设计与施工管理,从而形成设备性能与管理水平协同进化的正向循环^[4]。

6.3 实施数字监测与动态运行评估体系

构建以数字化平台为核心的运行监测系统,是提升机电设备效率的重要路径。通过部署智能传感器、采集终端与数据网关,可实现对温度、压力、转速、电流等关键参数的连续监控,为设备状态评估与趋势预测提供数据基础。系统应具备多维度数据融合能力,对实时数据与历史运行工况进行对比分析,识别运行偏差与潜在故障风险,生成预警信息并联动维护机制。动态评估体系通过建立设备运行评价模型,结合效率指标、故障率、维保成本与能耗水平综合赋值,实现设备绩效的数字化呈现与智能决策支持。该体系有助于优化设备使用策略、调整负载配置与精细化管理维护周期,是推动化工石油工程智能运行与效率提升的关键支撑工具。

7 结语

机电设备在化工石油工程施工与运行中发挥着承载系统功能、保障工艺稳定与提升资源利用效率的核心作用。围绕设备类型、安装流程、运行评价及管理措施等多个层面展开系统分析,有助于厘清影响效率的关键要素,推动施工组织科学化与运行管理精细化。通过引入模块化设计理念、构建全过程质量控制机制与数字化运行评估体系,可有效提升设备运行效能,降低故障率与能耗水平。强化多环节协同联动,是实现化工石油工程高质量、高效率建设与运行的重要保障路径。

参考文献

- [1] 马述虎.石油化工工程中机电安装工程施工技术与质量管理研究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(08):39-41.
- [2] 孙建.石油化工工程中机电安装工程施工技术与质量管理[J].绿色环保建材,2021,(07):121-122.
- [3] 师海东.石油化工工程中机电安装工程施工技术及其质量管理的策略研究[J].化工管理,2019,(09):168-169.
- [4] 张建超.石油化工工程中机电安装工程施工技术与质量管理[J].当代化工研究,2019,(02):40-41.

The management efficiency improvement path of the EPC general contracting model in oil refining and chemical engineering projects

Yinlu Xia

Cnooc Zhongjie Petrochemical Co., LTD., Cangzhou, Hebei, 061100, China

Abstract

Oil refining and chemical engineering projects are characterized by large investment scale, high technical complexity, long construction period, and wide involvement of professional fields. Therefore, extremely high requirements are placed on the professionalism and synergy of project management. The EPC general contracting model (Design-Procurement-Construction integration model) effectively reduces coordination costs among all parties, shortens the construction period and lowers project risks by entrusting the design, procurement and construction processes to a single general contractor for overall management. It has already become the mainstream management model for oil refining and chemical engineering projects. However, in actual operation, due to the complexity of the project itself and numerous problems existing in the management process, the management efficiency of the EPC general contracting model has not been fully exerted. Therefore, exploring the management efficiency improvement path of the EPC general contracting model in oil refining and chemical engineering projects is extremely crucial for enhancing the economic benefits of the projects and ensuring their smooth implementation.

Keywords

Oil refining and chemical industry EPC general contracting model Management efficiency

炼化化工工程项目中 EPC 总承包模式的管理效率提升路径

夏银璐

中海石油中捷石化有限公司, 中国·河北 沧州 061100

摘 要

炼化化工工程项目具有投资规模大、技术复杂度高、建设周期长、涉及专业领域广等特点, 因此对项目管理的专业性和协同性提出了极高的要求。而EPC总承包模式(设计-采购-施工一体化模式)通过将设计、采购、施工等环节交由一个总承包商统筹管理, 能够有效地减少各方协调成本、缩短建设周期、降低项目风险, 已然成为了炼化化工工程项目的主流管理模式。然而在实际操作当中, 由于项目自身的复杂性以及管理过程中存在的诸多问题, 使得EPC总承包模式的管理效率未能充分地发挥。所以探索炼化化工工程项目中EPC总承包模式的管理效率提升路径, 对于提高项目经济效益、保障项目顺利实施极其关键。

关键词

炼化化工; EPC总承包模式; 管理效率

1 引言

炼化化工工程项目 EPC 总承包模式的管理效率提升是一项系统工程, 它需要从设计、采购、施工等各个环节入手采取针对性的措施。本文提出通过优化设计阶段管理、强化采购阶段管理、提升施工阶段管理水平、完善协同管理机制、加强风险管理以及提升人员素质与管理水平等路径, 即可有效地解决当前 EPC 总承包模式管理中存在的问题, 进而提高项目的管理效率和经济效益。

2 EPC 总承包模式在炼化化工工程项目中的特点与管理现状

2.1 EPC 总承包模式的特点

EPC 总承包模式在炼化化工工程项目中呈现出了显著的集成化特点。即总承包商需要对项目的设计、采购、施工、试运行等全过程负责, 以实现各环节的深度融合与协同推进。正是这种集成化管理, 才避免了传统模式中设计、采购、施工相互脱节的问题, 直接地减少了因各方责任不清、沟通不畅而导致的返工和延误。同时 EPC 总承包模式还具有较强的责任集中性。因为业主将项目的大部分风险转移给了总承包商, 总承包商需要对项目的质量、安全、进度、成本等全面负责。该特点促使总承包商更加注重项目管理的系统性和有效性, 要求其从整体角度来优化资源配置和管理流程。

【作者简介】夏银璐(1984-), 男, 中国河北沧州人, 本科, 工程师, 从事炼化化工工程管理研究。

此外 EPC 总承包模式还强调着专业化管理,所以总承包商通常拥有一支涵盖了设计、采购、施工、造价、法律等多个领域的专业团队,能够为项目提供全方位的专业服务。

2.2 管理效率现状

当前我国炼油化工工程项目 EPC 总承包模式的管理效率虽然较传统模式有了一定的提升,但其中仍然存在着诸多问题。展开来说:由于项目涉及的工序繁多、交叉作业频繁,且受到设备材料供应、设计变更、天气等因素的影响较大,导致进度延误的情况时有发生。成本超支也是实践当中常见的问题,而造成成本超支的原因包括了原材料价格上涨、设计不合理导致的返工、采购环节的浪费、施工效率低下等等。若从质量管理方面开口,尽管 EPC 总承包模式下质量管理的责任更加明确,但因为项目技术复杂、施工难度大,致使质量隐患依然难以完全的避免。在协同管理方面也存在着设计、采购、施工等环节之间协同配合不够顺畅的情况。

3 炼油化工工程项目 EPC 总承包模式管理效率低下的原因分析

3.1 设计阶段管理问题

设计质量一般会直接影响到后续的采购和施工环节,可以说设计阶段是 EPC 总承包项目的源头。目前设计阶段存在的主要问题有设计深度不足和设计变更管理混乱。究其原因部分是设计单位为了赶进度,在初步设计和详细设计阶段未能进行充分的调研和论证,进而导致设计图纸存在着诸多漏洞和不合理之处^[1]。

此外设计变更管理混乱也是影响管理效率的重要因素。但由于前期设计考虑不周、业主需求变化或外部条件改变等原因,所以设计变更在所难免,可部分项目缺乏了规范的设计变更流程,使得变更审批不够及时、变更信息传递的不够顺畅,进而导致施工单位接到变更通知时已完成了相关的工序,此时就会造成大量的返工和成本增加。

3.2 采购阶段管理问题

虽然采购环节是 EPC 总承包项目成本控制的关键,但现如今采购管理之中还是存在着供应商管理不善、采购计划不合理等问题。其中供应商选择了缺乏科学的评估体系,部分项目仅以价格作为主要的选择标准,却忽视了供应商的资质、信誉、产品质量和供货能力,最终导致设备材料质量不合格或供货延迟。同时采购计划与设计、施工进度衔接不畅也是比较常见的问题。原因是采购部门未能及时地获取设计部门的设备材料清单和技术要求,又或者是未能根据施工进度合理来安排采购时间,致使设备材料供应过早或过晚。而供应过早会增加仓储成本和资金占用,供应过晚则会导致施工中断,然后延误工期。

3.3 施工阶段管理问题

由于施工管理水平会影响到项目的进度、质量和成本,因此施工阶段是项目实施的关键阶段。现阶段施工阶段存在

的问题主要有施工组织不合理和安全管理不到位。一方面是施工组织设计缺乏了科学性和针对性,尤其是对施工工序、资源配置、进度安排等考虑不周,导致施工过程中会出现窝工、返工等现象。另一方面是部分项目安全管理意识淡薄,使得安全管理制度不健全,且安全防护措施也不到位^[2]。

3.4 协同管理机制不健全

EPC 总承包模式内,设计、采购、施工等环节之间的协同配合是至关重要的,但当前协同管理机制不健全的问题却较为突出。即各部门之间缺乏有效的沟通渠道和信息共享平台,信息传递不及时也不准确,在各个环节之间出现了脱节的情况。例如设计部门的设计变更信息未能及时地传递给采购和施工部门,导致采购的设备材料不符合变更后的设计要求,或者是施工部门仍按照原设计图纸进行施工。

4 炼油化工工程项目 EPC 总承包模式管理效率提升路径

4.1 优化设计阶段管理

设计阶段的优化为提升 EPC 总承包模式管理效率的关键,因此首先应该加强设计前期调研与论证^[3]。即设计单位需组织专业人员深入现场,促使其全面地掌握项目建设条件、周边环境及工艺要求,系统收集技术资料与数据。而在初步设计阶段,还应召集业主、施工单位、设备供应商等相关方开展方案论证,只有充分地吸纳了各方意见优化设计方案,才能确保其科学性与可行性。其次鉴于炼油化工工程项目存在着较多通用设备和标准流程,所以还有推进设计标准化与模块化。其中设计单位可建立标准化设计图库和模块库,以此将项目划分为若干标准模块,然后在工厂完成预制后再到现场进行组装,这样既能缩短现场施工时间、减少作业量,又能提高施工的质量。再者便是加强设计变更管理,该环节的重点是建立规范的变更流程,在当中明确变更申请、审批、传递、执行等环节的责任与要求,尤其对重大变更必须进行技术经济论证并要经业主的批准。

4.2 强化采购阶段管理

在采购阶段,总承包商的首要任务就是建立科学的供应商管理体系,但这需要采购团队提前对供应商开展全面的评估与筛选,以资质、信誉、产品质量、供货能力及价格等要素为基准建立分级分类的数据库,然后与优质供应商构建长期稳定的合作关系。而在进行采购之前,采购部门有义务向供应商明确技术要求、质量标准 and 交货期,还需签订详细的合同以界定双方的权利与义务。在此基础上,优化采购计划与流程同样是不可或缺的。此时采购部门需与设计、施工部门保持紧密地配合,一齐结合设计图纸和施工进度制定出详细的采购计划,且合理地安排采购时间与数量。除此之外,还需与推行集中采购与供应链协同,特别是在大型项目当中,采购部门可以采用集中采购来获取价格优势,达到降低采购成本的目的^[4]。

4.3 提升施工阶段管理水平

施工阶段的管理水平会直接影响到项目质量、进度和安全,针对于此提出以下策略建议。

1 施工单位要优化施工组织设计与方案,其中技术团队需结合项目特点制定科学的施工组织设计和专项方案,明确施工的工序、方法、资源配置及进度计划;施工前技术负责人要对方案进行技术交底和评审,以确保施工人员准确地理解了要求;在施工过程当中,项目经理还需实施动态管理,也就是根据实际情况及时地调整方案,为施工的顺利推进提供保障。

2 在质量管理部门强化施工质量管理建立了健全的体系之后,一定要严格地执行验收标准。就质检人员来说,其职责是加强对原材料、构配件、设备的质量检验;监理单位则要对关键工序和重要部位实行旁站监理,进而确保施工工艺的合规性;而施工单位还可以定期地开展质量检查与评比,目的是激励施工人员提升质量意识和操作水平。

3 安全管理部门在加强施工安全管理时,必须树立起“安全第一、预防为主、综合治理”理念,为此安全团队要建立健全的安全管理制度和应急预案,培训部门也应加强对施工人员的安全教育培训,以此提升其安全意识和自我保护能力。

4.4 完善协同管理机制

设计、采购、施工等环节的协同配合是提升 EPC 总承包模式管理效率的核心。

首先,总承包商应建立一体化信息管理平台:设计部门通过该平台及时传递设计图纸与变更信息,采购部门能借助平台反馈设备材料采购进度与质量情况,施工部门可通过平台实时上传施工进度、质量及安全信息供各方查阅,进而打破部门信息壁垒,提高沟通效率与协同水平。

其次,总承包商加强各部门沟通与协调需要建立定期机制:比如项目管理部门组织召开设计、采购、施工协调会,及时解决项目实施中的问题;人力资源部门鼓励跨部门协作,成立由多部门人员组成的项目团队,像项目前期成立包含设计、采购、施工等部门人员的前期策划团队,共同参与项目策划与决策,确保各环节工作协调一致。此外,总承包商明确各环节责任与接口要制定清晰的责任矩阵:管理部门界定各部门和人员在项目实施中的职责与权限,对于设计、采购、施工间的接口工作,明确责任部门和配合要求,诸如设计部门向采购部门提供设备材料清单和技术要求的时间节点、采购部门向施工部门交付设备材料的验收标准等,确保接口工作无缝衔接。

4.5 加强风险管理

为了保障项目的顺利实施,就需要实施有效的风险管理。一方面,风险管理部门要建立全面的风险识别与评估体

系,也就是在项目前期,风险评估团队就要对可能面临的市场、技术、政策、安全、环境等风险进行全面地梳理识别,再采用定性定量相结合的方法来评估风险发生概率和影响程度,将风险等级进行划分,以此为应对措施的制定提供依据^[5]。另一方面,总承包商要制定科学的风险应对策略,并且根据风险的等级和特点施策。以市场价格波动风险为例,采购部门可通过签订长期供货合同、套期保值等方式进行转移。而对于技术风险,技术部门能够借助引进先进技术、加强研发等手段减轻。对于不可抗力风险,法务部门则可通过购买保险转移。

4.6 提升人员素质与管理水平

因为人员是项目的核心,所以提升其素质与管理水平对 EPC 总承包模式的管理效率而言是至关重要的。而人员管理归属于人力资源部门,该部门要加强对项目管理人员和技术人员的培训,培训的内容需要涵盖项目管理知识、专业技术知识、法律法规及安全知识等,再通过内部培训、外部培训、专家讲座、案例分析等多种方式,不断地更新人员知识结构,进而提升其解决实际问题的能力。但企业管理层也应建立有效的激励与约束机制,旨在充分地调动员工积极性。

5 结语

随着信息的不断发展和应用,未来炼油化工工程项目 EPC 总承包模式的管理将变得更加智能化、数字化。大数据、人工智能、物联网等技术终将在项目管理中得到广泛地应用,如通过大数据分析预测市场价格波动、利用人工智能优化施工方案、借助物联网实现设备材料的实时跟踪与管理等等。而这些技术的应用将进一步地提高项目管理的精准性和效率,能够推动炼油化工工程项目 EPC 总承包模式向更高水平发展。同时随着环保要求的日益严格和可持续发展理念的深入推进,炼油化工工程项目 EPC 总承包模式的管理还会更加注重绿色环保和节能减排。

参考文献

- [1] 韩晓辉,卢桂萍,殷晓峰.炼化工程项目设计管理的目标任务及价值共创[J].石油化工建设,2022,44(06):31-33.
- [2] 李杨.石油化工建设项目模块化施工技术[J].石油化工建设,2023,45(S02):65-66.
- [3] 麻炳方.对石油化工EPC项目仪表专业的管理构思[J].化工管理,2021,(23):141-142.DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.23.069.
- [4] 关潇.D公司炼化工程EPC项目采购优化研究[D].辽宁省:大连理工大学,2019.DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003806.
- [5] 戴飞.“IPTM+EPC+工程监理”项目管理在大型炼油化工项目中的应用[J].石油和化工设备,2020,23(01):70-72.

Research on Key Technologies of Fire Driven Exhaust Gas Injection

Qiang Meng Shubai Han Yonggang Shang

Special Oil Development Company of CPC Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010, China

Abstract

In order to solve the problem of low steam thermal efficiency and rapid production decline in the later stage of SAGD well group development in Liaohe Oilfield, this study focuses on the key technology of fire drive tail gas injection. Firstly, a calculation method for the explosion limit and critical oxygen content of fire drive tail gas under high temperature and high pressure is established. It is clarified that the explosion limit under 240 °C and 6MPa environment is 0.89-55.96%, and the critical oxygen content is 5.52%. Combined with the on-site tail gas oxygen content of 1.01-2.1% (including 1.5 times the safety factor), it is determined that there is no explosion risk but oxygen content detection needs to be strengthened; Secondly, a corrosion prediction model was constructed, and it was found that the corrosion rate of commonly used pipe column materials exceeded 0.076mm/a, requiring the use of anti-corrosion measures such as over 13Cr materials, coatings, or corrosion inhibitors. The innovation lies in establishing for the first time the technology of fire driven exhaust gas injection, the calculation method of explosion parameters under high temperature and high pressure, and the measures to prevent column corrosion, providing support for the safe application of exhaust gas injection and helping to improve the development effect of SAGD.

Keywords

explosion limit; Corrosion of pipe columns; corrosion prevention

火驱尾气注入关键技术研究

孟强 韩树柏 商永刚

中油辽河油田公司特种油开发公司, 中国·辽宁 盘锦 124010

摘 要

为解决辽河油田 SAGD 井组开发后期蒸汽热效率低、产量递减快的问题,本研究围绕火驱尾气注入关键技术开展工作,一是建立高温高压下火驱尾气爆炸极限及临界含氧量计算方法,明确 240℃、6MPa 环境下爆炸极限为 0.89-55.96%、临界含氧量 5.52%,结合现场尾气氧含量 1.01-2.1% (含 1.5 倍安全系数),判定无爆炸风险但需加强氧含量检测;二是构建腐蚀预测模型,发现常用管柱材质腐蚀速率均超 0.076mm/a,需采用超 13Cr 材质、镀层或缓蚀剂等防腐措施。创新点在于首次确立火驱尾气回注工艺、高温高压下爆炸参数计算方法及管柱腐蚀防止措施,为尾气回注安全应用提供支撑,助力提升 SAGD 开发效果。

关键词

爆炸极限;管柱腐蚀;防腐措施

1 立项研究的重要性

公司 SAGD 井组经过多年高速开发,目前油藏整体采出程度达到 62.0%,进入蒸汽腔下降阶段,蒸汽热效率降低,产量递减加快,油气比由 0.30 降至目前 0.16,急需探索 SAGD 开发后期接替技术,进一步提高采收率和经济效益。

公司自 2014 年开始,借鉴国外成功经验,在兴 VI 组实施气体辅助 SAGD 技术,通过注入 N₂、烟道气、CO₂ 等非凝析气体 2339 万标方,有效降低蒸汽分压,减少汽腔顶部

热损失,阶段节约蒸汽 51.8 万吨,实施井组油气比提高 0.05。为解决当前自生 CO₂ 气量不足的问题,需寻找新的非凝析性气体,提高 SAGD 开发效果。

表 1-1 辽河坳陷和国内主要页岩油区生烃指标对照表

注入介质	注入气体量	节约蒸汽量	提高
	(万方)	(万吨)	油气比
氮气	885	20.0	0.06
烟道气	865	18.5	0.04
二氧化碳	589	13.3	0.04
合计	2339	51.8	0.05

经现场勘察,当前可实现将火驱尾气经集气管线增压注入 SAGD 蒸汽腔。尾气组分,以 N₂ (约 70%)、CO₂ 为

【作者简介】孟强 (1970-), 男, 中国辽宁朝阳人, 硕士, 高级工程师, 从事稠油采油工艺技术研究。

主,并含有CH₄(10%)、O₂(2%)和一氧化碳(0.3%),符合SAGD保压开采的非凝析气需求。但火驱尾气组份中的CO₂和O₂具有腐蚀作用,若长期持续注入,仍需针对现场实际开展相关技术研究,并优化设计方法。

2 研究内容

2.1.1 防爆理论研究与评价

爆炸极限是指可燃气体或蒸气与空气形成的混合物,在特定条件下能够发生爆炸的浓度范围。这个范围通常以可燃物质在混合气体中的体积百分比表示,分为下限(Lower Explosive Limit, LEL)和上限(Upper Explosive Limit, UEL)。低于LEL或高于UEL时,混合物要么因为太稀薄无法维持火焰传播,要么因为太浓而缺乏足够的氧气支持燃烧。在讨论爆炸极限时,临界含氧量(Critical Oxygen Concentration, COC)是一个重要的概念。它指的是在一个可燃气体或蒸气与空气的混合物中,为了维持燃烧反应,必须存在的最小氧气比例。如果混合物中的氧气含量低于这个临界值,即使可燃气体的浓度处于爆炸极限范围内,也无法支持火焰传播,从而不会发生爆炸。理解和应用可燃气体的爆炸极限知识,不仅有助于保护人员的生命安全,还能减少财产损失,维护环境安全,是实现安全生产不可或缺的一部分。因此,对爆炸极限的计算是十分必要的。

(1) 利用含碳原子数计算爆炸极限

脂肪碳氢化合物爆炸极限的计算,可以根据脂肪族碳氢化合物含碳原子数(n)与其爆炸上限C_U和爆炸下限C_L的关系求得。

$$\frac{1}{C_L}=0.1347 \times n+0.04343 \quad (2-2-1)$$

$$\frac{1}{C_U}=0.1337 \times n+0.15151 \quad (2-2-2)$$

(2) 利用经验公式计算爆炸极限

爆炸极限可以用经验公式计算,但计算数据与实测数据可能有出入,但也可供参考。

计算爆炸下限的公式

$$C_L=\frac{100}{4.76(N-1)+1} \quad (2-2-3)$$

计算爆炸上限公式

$$C_U=\frac{4 \times 100}{4.76N+4} \quad (2-2-4)$$

式中,N为每摩尔爆炸性气体完全燃烧所需氧原子数。

(3) 高温条件下原油伴生气爆炸极限的理论计算

爆炸性气体混合物的原始温度越高,则爆炸极限范围越大,即爆炸下限降低而爆炸上限增高。因为系统温度升高,其分子内能增加,使更多的气体分子处于激发态,原来不燃的混合气体成为可燃、可爆系统,所以温度升高使爆炸危险

性增大。若初始温度为25℃时的下限为C_L' ,上限为C_U' ,则t时的下限C_{LT}' 与上限C_{UT}' 分别为

$$C_{UT}'=C_U' \left[1+\frac{721(t-25)}{10^6} \right] \quad (2-2-8)$$

$$C_{LT}'=C_L' \left[1-\frac{721(t-25)}{10^6} \right] \quad (2-2-9)$$

2.1.2 现场火驱尾气爆炸评价

火驱尾气回注的现场工况压力范围为1-6MPa、温度240℃左右,组分及含量如下表,根据上述计算的爆炸极限范围及临界含氧量判定,240℃、6MPa的环境下爆炸极限为0.89-55.96%,临界含氧量为5.52%,考虑到危险性及计算误差,设计安全系数为1.5,火驱尾气中氧含量1.01-2.1%,不会发生爆炸,但要加强火驱尾气中氧气含量的检测。

表 2-1 火驱尾气成分及含量

序号	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO (%)	其他 (%)
1	18.65	49.26	29.39	1.01	0.000	1.69
2	18.94	47.57	30.14	1.48	0.000	1.87
3	17.75	69.01	10.25	2.20	0.097	0.69
4	17.66	70.87	9.50	1.44	0.000	0.53
5	15.98	77.00	4.28	1.84	0.371	0.53
6	15.40	77.53	4.51	1.72	0.343	0.5
7	19.05	68.96	9.80	1.61	19.05	0.28
8	18.89	70.11	9.07	1.38	18.89	0.55

2.2 管柱腐蚀机速率评价

火驱尾气中含有CO₂、O₂等气体会对管柱造成腐蚀,尤其是在高温高压的环境下,对管柱的腐蚀会进一步加大,需对常用管材(N80、110H、P110、130TT)进行腐蚀机理研究及腐蚀速率评价。

2.2.1 二氧化碳腐蚀类型

CO₂腐蚀主要以均匀腐蚀和三种局部腐蚀形式出现,三种局部腐蚀为点蚀、台地状腐蚀和流动诱导局部腐蚀。在研究CO₂腐蚀时,应明确区分纯CO₂腐蚀侵蚀和CO₂腐蚀的综合作用,后者可能因CO₂腐蚀而加剧。

均匀腐蚀是CO₂形成全面腐蚀时的主要腐蚀方式。发生均匀腐蚀的条件一般有两点。一是温度在60℃以下,钢铁材料表面存在少量软而附着力小的FeCO₃腐蚀产物膜,金属表面光滑,以均匀腐蚀为主;二是CO₂分压低于0.483×10⁻¹MPa时,易发生均匀腐蚀。

点蚀发生在气井的低速和露点温度附近。在实际生产中,点蚀现象不经常发生,这些点蚀要么是意外地出现在非金属夹杂物附近,要么是初期台面侵蚀。点蚀敏感性随温度和CO₂分压的升高而增加。

2.2.2 二氧化碳腐蚀的影响因素

CO₂腐蚀受许多参数的影响,包括环境、物理和冶金变量。影响CO₂腐蚀的重要参数包括:水化学、pH值、水

润湿性、碳氢化合物特性和相比影响的流体组成；CO₂ 含量；温度；钢表面，包括腐蚀膜形态、蜡的存在和沥青质；流体动力学；钢化学。所有参数都是相互依赖的，可以通过多种方式相互作用来影响 CO₂ 腐蚀。影响水相固有腐蚀性的环境因素会影响 CO₂ 腐蚀。这些因素包括 CO₂ 分压、温度等的影响。

(1) CO₂ 分压

在大多数情况下，CO₂ 分压和腐蚀速率之间都建立了关系。随着 CO₂ 分压的增大，腐蚀速率逐渐增大，但增大的幅度变化趋势不明显。这是因为随着压力的增大，CO₂ 的溶解度大幅度增加，在水中电离出大量的 H⁺、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻，致使溶液的 pH 值降低，酸性环境促使腐蚀加剧，同时，钢表面产生的腐蚀产物膜厚度较小、分布许多微孔、不具有黏附性，无法覆盖材料表面，容易使溶液中离子向基体渗透形成局部腐蚀，增大钢本体的腐蚀速率。所以在生产过程中，要尽量控制 CO₂ 分压，降低腐蚀速率。

(2) 环境温度

环境温度对表面膜的性质、特性和形态有重大影响，而这又会影响 CO₂ 的腐蚀过程。当温度超过约 80℃时，溶液中 FeCO₃ 的溶解度会降低，过饱和度过高会导致 FeCO₃ 沉淀。在低温范围（< 约 70℃）下，腐蚀速率会随着温度升高而逐渐增加，直至达到中间温度范围（70℃至 90℃之间），之后腐蚀速率会逐渐降低。然而，在 FeCO₃ 形成发生破坏的位置，腐蚀过程会不受阻碍地进行，这可能会导致严重的局部腐蚀。低温范围内腐蚀速率的增加是由于流动效应和 FeCO₃ 形成速率缓慢而导致的质量传递速率增加所致。在腐蚀环境温度为 160℃左右时腐蚀速率达到最小值，之后随着温度的升高腐蚀速率增大。这是因为随着温度的升高，钢体表面形成了附着力极大的产物膜，晶粒致密，对钢体本身保护性极强，附着在钢体表面致密的产物膜会与水反应，生成质地较为疏松的 Fe₃O₄，很难对腐蚀速率产生抑制作用，致使钢体的腐蚀越来越快。

2.2.3 防腐措施

(1) 耐腐蚀材质

结合腐蚀气体分压，推荐采用超级 13Cr 材质，采用气密封螺纹扣。

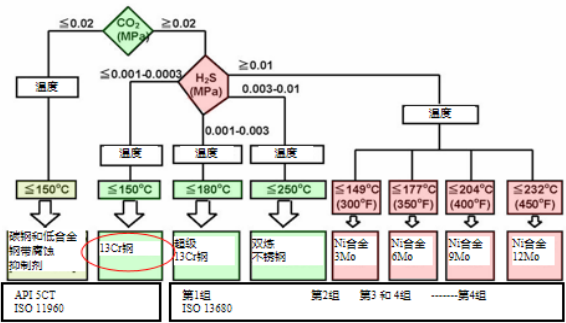


图 2-1 选择依据

表 2-2 选择结果

CO ₂ 分压 MPa	油管
< 0.021	API Spec 5CT 普通碳钢
0.021~0.21	API Spec 5CT 普通碳钢，或加注缓蚀剂；若温度较高时，宜选用普通 13Cr 钢
0.21~1.0	API Spec 5CT 普通碳钢和加注缓蚀剂或选用普通 13Cr 钢，当腐蚀介质中的 Cl ⁻ 浓度超过 50000mg/L 时，应选用普通 13Cr 钢
1.0~7.0	超级 13Cr 钢，或普通 13Cr 钢加注缓蚀剂，当腐蚀介质中 Cl ⁻ 浓度超过 150000mg/L 时，应选用超级 13Cr 钢
≥7.0	超级 13Cr 或更优质材料

(2) 防腐涂层

为保证生产安全，也可以采用镍钨镀层的注汽管柱，表面更容易形成氧化钨钝化膜，更有效防止腐蚀介质透过镀层，渗入基材，对基材起到保护作用。目前，在长庆地区的 CCUS、储气库、CO₂ 驱等管柱中已采取实施，应用效果良好。辽河实施前，应针对辽河井况对镍钨镀层进行室内实验评价。

表 2-3 镍钨镀层应用效果

序号	应用地区 / 项目	应用效果
1	长庆 - 黄 3 区 CCUS 先导试验油管	2017 年 8 月，注气井下入油管 6000m，2019 年生产井下入油管 4500m，服役 8 个月后取出检测油管镀层情况良好，持续正常工作。
2	长庆 - 榆 37 储气库 114.3mm 油管	2021 年 11 月下井使用 3000m，在最大 130 万方 / 天注采条件下，未有不良反应，目前正常工作。
3	长庆 - 黄 3 区 CO ₂ 驱 139.7mm 套管	2022 年 4 月下井使用套管 3100m，目前工作正常。

表 2-4 涂层性能评价

序号	项目	数量	单位
1	成分检测	5	件
2	金相组织分析	2	件
3	力学性能测试	2	件
4	抗粘扣循环上 / 卸扣试	10	次
5	接头的密封性能	1	件
6	高温高压电化学实验	10	组
7	镀层理化性能评价	4	组
8	高温高压浸泡试验	8	组 · 小时
9	SEM 测试	20	小时
10	EDS 测试	10	组
11	XRD	10	组
12	点蚀评定	5	组

(3) 缓蚀剂

注气井：采用防腐气密封隔器配套环空保护液，保障油套管不受腐蚀；

腐蚀监测：采用腐蚀挂片监测油套管腐蚀速率，定期进行缓蚀剂残余浓度监测，确保防腐效果。

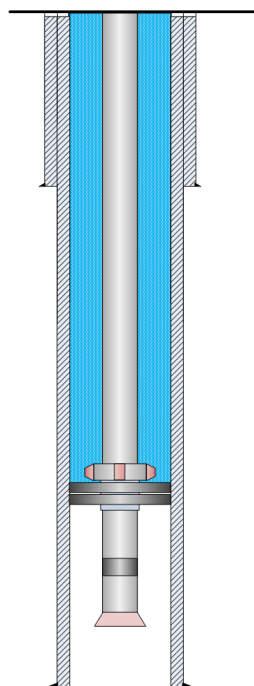


图 2-2 环空保护液示意图

3 结论

火驱尾气的爆炸极限、临界含氧量随着温度的升高而降低，也就是说，温度的升高扩大了火气尾气爆炸的含量范围以及减小了对氧气的依赖度。240℃、6MPa 的环境下爆炸极限为 0.89-55.96%，临界含氧量为 5.52%，考虑到危险性 & 计算误差，设计安全系数为 1.5，火驱尾气中氧含量 1.01-2.1%，不会发生爆炸，但要加强火驱尾气中氧气含量的检测。

2、常见管柱材质在火驱尾气腐蚀条件下的腐蚀速率均大于 0.076mm/a，需采用超级 13Cr 材质或镀层等方式提高耐腐蚀，同时需加强气体组分检测及腐蚀监测，保障安全生产。

参考文献

- [1] 田欣. 储罐及埋地管网区域性腐蚀与防护研究[D].黑龙江:大庆石油学院,2007.
- [2] 利进飞. 油气管线的腐蚀与防护[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,28(3):37.
- [3] 许满贵. 工业可燃气体爆炸极限及其计算[J].西安科技大学学报,2005(2):9-12.

Demand and Research Progress of Denitration Catalyst for Biomass Co-Combustion in Coal-Fired Power Plants

Kaiming Liu

Datang Nanjing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211111, China

Abstract

Due to the launch of the action plan for low-carbon transformation and construction of coal-fired power plants (2024-2027), biomass CO combustion, as an important measure to boost the low-carbon transformation of coal-fired power plants, plays a great role in reducing coal consumption and carbon emissions, and the unique properties of biomass fuel will also have an impact on the coal-fired combustion system, so there will be a certain rigid demand for coal-fired catalysts. Firstly, the requirements of catalyst performance under the condition of biomass CO combustion were analyzed; Secondly, the existing problems of coal-fired catalysts under the condition of biomass co-combustion at the present stage are described; Then, the research and development of alkali resistant metal catalysts at home and abroad and their practical application cases are reviewed; Finally, combined with the actual situation, the development direction of coal-fired catalysts that can meet the requirements of biomass co-combustion in the future is prospected, hoping to provide reasonable and effective guidance for the low-carbon transformation of coal-fired power industry.

Keywords

Coal fired power plants; Low carbonization transformation; Biomass co-combustion; Anti alkali metal poisoning denitrification catalyst; Rigid demand

面向生物质掺烧的脱硝催化剂需求与研发进展

刘凯鸣

大唐南京环保科技有限公司, 中国·江苏 南京 211111

摘 要

由于《煤电低碳化改造建设行动方案(2024-2027 年)》的推出, 生物质掺烧作为助力煤电低碳转型的重要措施, 在降低煤耗及碳排方面作用极大, 而生物质燃料的特有属性也会给煤电燃烧系统造成一定影响, 因此会对燃煤催化剂存在一定刚性需求。首先分析了生物质掺烧工况下对催化剂性能的要求; 其次阐述了现阶段燃煤催化剂在生物质掺烧条件下存在的问题; 然后梳理了国外和国内的抗碱金属等催化剂研发的相关情况及实际应用案例; 最后结合实际展望了未来可满足生物质掺烧工况要求的燃煤催化剂的发展方向, 希望能对煤电行业的低碳化改造提供合理且有效的、指导。

关键词

燃煤电厂; 低碳化改造; 生物质掺烧; 抗碱金属中毒脱硝催化剂; 刚性需求

1 引言

全球都在积极应对气候变化, 为完成碳减排任务而努力, 我国的能源结构也正向着清洁低碳化的方向加速转型。煤电是我国电力的主供电源, 其低碳化改造也刻不容缓。《煤电低碳化改造建设行动方案(2024-2027 年)》指出要大力发展生物质掺烧等煤电低碳化改造技术, 确保改造后的煤电机组可掺烧 10% 以上的生物质燃料, 大幅度降低煤炭和碳排放量 [1]。然而, 生物质成分相对复杂, 在掺烧时会对锅炉的燃烧特性以及烟气成分产生一定影响, 同时会影响燃煤催化剂的工作状态, 因此对于燃煤催化剂有了一定的特殊要

求。通过对煤电行业的低碳化改造, 有利于实现燃煤系统高效平稳运行及完成碳减排目标。

2 生物质掺烧对煤电燃烧系统及催化剂的影响

2.1 燃烧过程的改变

相对于煤而言, 生物质燃料具有高挥发分、高水分、低灰分、低硫分和含较多碱金属特点。以常见的秸秆类生物质为例, 挥发分通常可达 70% 以上, 水分约为 10%-30%, 灰分低于 5%, 因为相比于燃煤来说, 生物质挥发分能够快速裂解着火, 裂解后释放的热量会使炉膛温度很快达到熔点之上, 在炉膛内部易于产生更多挥发分的裂解和燃烧; 但后期由于生物质本身热值较低以及水分蒸发带走大量的热量, 炉膛整体温度下降, 燃烧过程的变化使烟气中 NO_x 等污染物也有新变化。

【作者简介】刘凯鸣(1981-), 男, 中国江苏南京人, 本科, 工程师, 从事类煤颗粒开发与脱硝催化剂研究。

2.2 燃烧稳定性与效率的影响

于生物质掺烧比例不同将对煤电燃烧稳定性和效率造成较大影响,在掺烧比较小的情况下,可以通过弥补生物质燃烧特性的不足来促进燃煤燃烧的稳定;而当掺烧比例较高时,由于生物质的能量密度低,着火温度低、燃烧速度过快,在燃烧过程中易发生火焰温度过低和燃烧时间较短的问题,导致燃煤燃烧不稳定。另外,生物质在燃烧过程中的高水分导致了大量蒸发吸热过程,降低了燃烧效率。当电厂生物质掺烧比例大于 20%,锅炉燃烧稳定性明显变差,飞灰含碳率由原来的 5% 以上提高到 10% 以上,锅炉热效率下降了 3%-5 个百分点。

2.3 现有燃煤催化剂面临的挑战

2.3.1 碱金属中毒问题

生物质中含有的 K、Na、Ca、Mg 等碱(土)金属相比于煤的含量高上许多,燃烧时随飞灰进入到催化剂中,长时间作用下不断堆积到催化剂表面,遮盖住催化剂表面的活性位点,阻碍反应物和活性位点接触,导致脱硝反应发生困难,进而使催化剂活性迅速下降。实验表明,在 V_2O_5 - WO_3 - TiO_2 催化剂表面生成的钾盐将占据大量活性位点,降低催化剂对 NO 吸附能力,引起脱硝效率急剧下降 [2]。

2.3.2 催化剂烧结与失活

由于生物质燃烧形成的高温及复杂的烟气组成,会加速催化剂的烧结。高温时,催化剂表面活性组分颗粒因受热而发生团聚长大,使催化剂表面的比表面积减小、活性位点数目减少,造成催化剂活性降低;另外,生物质燃烧过程中所产生的部分酸性和杂质等气体会与催化剂发生化学反应,造成催化剂晶格的破坏,从而加快催化剂失活的速度。

2.3.3 催化剂抗硫、抗水性能要求

尽管生物质中含硫量低,但燃用生物质煤时由于燃烧工况的改变以及煤炭中的含硫量较多,会造成燃用生物质煤后的烟气中含有较高的 SO_x 。另外,由于生物质本身的含水量较高,因此燃用后产生的烟气中水蒸气含量较大。而对于目前的燃煤催化剂来说,在高浓度 SO_x 和 H_2O 存在的情况下,会使催化剂的活性和稳定性大幅下降。

3 适用于生物质掺烧的燃煤催化剂刚性需求分析

3.1 抗碱金属中毒催化剂的迫切需求

由于生物质中含有大量的碱金属,严重地破坏了催化剂的活性,如何研制出有效的抗碱金属中毒的燃煤催化剂是迫切需要解决的问题。通过在催化剂载体表面修饰具有特殊性质的官能团,增加载体和碱金属之间的相互作用力,让碱金属无法覆盖到活性位上,而是在载体表面形成立体包裹,不会威胁到表面活性位点。

3.2 适应复杂燃烧工况的宽温域催化剂需求

由于生物质掺烧时由于温度波动范围大,因此需要燃煤催化剂具有宽温域活性,在不同的温度段内保持相对较高

的催化活性。低温段,应能在一定程度上促进生物质及煤稳定燃烧,增加燃烧效率;高温段,要求催化剂具有较好的热稳定性,在高温下不易烧结失活 [3]。有研究报道,以 CeO_2 - ZrO_2 复合氧化物为载体,负载多种过渡金属活性组分的宽温域催化剂,在 200 ~ 600℃ 的温度范围内均可保持良好催化效果,显著提升了燃烧效率和燃烧稳定性。

3.3 高抗硫、抗水性能催化剂的必要性

提高抗硫和抗水性能的方法主要是对活性组分的种类及结构、载体的物理化学性质进行改善和优化,使其能够更好的耐受 SO_x 和 H_2O 的作用。选取 SO_2 氧化活性低的活性组分,可以减少 SO_3 的生成量,从源头上降低 ABS 的产生几率 [4]; 采用对载体做疏水处理,减少水蒸气在催化剂表面积累,减小水蒸气对反应的抑制作用。在某电厂采用上述改进抗硫抗水催化剂后,生物质掺烧工况下催化剂寿命可提升至 12 个月以上,一定程度上降低了催化剂更换成本,保证了机组的安全稳定运行。

4 国内外适用于生物质掺烧的燃煤催化剂研究进展

4.1 新型催化剂载体的研发

4.1.1 高稳定性、抗碱金属载体材料探索

国内外学者一直在寻找高稳定性的抗碱金属催化剂载体材料,以孔道规整有序,比表面积大、耐高温的介孔分子筛作为载体的材料,有研究表明,SBA-15 介孔分子筛载体制备的催化剂,在生物质掺烧模拟烟气条件下,运行 1000h 后,催化剂的比表面积和孔容下降幅度比 TiO_2 载体制备的催化剂小得多,抗碱金属中毒更强。还有一些复合氧化物载体,例如 Al_2O_3 - TiO_2 可以通过调整 Al_2O_3/TiO_2 的比例控制载体表面酸性位点分布,减小碱金属与酸性位点之间的相互作用,降低碱金属中毒风险。

4.1.2 载体表面修饰技术进展

传统催化剂载体经过表面修饰处理后,其抗碱金属性能得到了较大提升,并且能适应生物质掺烧的工况。通过对载体表面进行某种物质修饰或者在其表面形成一定涂层结构,从而改变载体表面的物理化学性质 [5]。例如利用化学气相沉积 (CVD) 在 TiO_2 载体表面沉积一层 SiO_2 涂层可以隔断碱金属与 TiO_2 载体接触的界面,在一定程度上缓解了碱金属在 TiO_2 载体表面吸附和扩散的问题。

4.2 活性组分的优化与创新

4.2.1 多元活性组分协同体系构建

为了满足生物质掺烧对于催化剂活性、稳定性和抗毒性能的多种要求,构筑多元活性组分协同体系,通过将不同的活性组分进行合理的组合,发挥组分间相互协同的作用,提高催化剂的整体性能。在某一生物质掺烧试验过程中使用了 MnO_x - Fe_2O_3 - CeO_2 - La_2O_3 多元活性组分催化剂,在温度在 300~500℃ 时,其脱硝效率可以保持在 90% 以上,并且对于

碱金属以及 SO_x 都具有较好的耐受能力。

4.2.2 新型活性组分的开发与应用

除了继续探索优化改善传统活性组分外,开发新的活性组分也是满足生物质掺烧需求的一种途径。除此之外,一些诸如钙钛矿型氧化物 (ABO_3)、尖晶石型氧化物 (AB_2O_4),这类具有独特晶格结构与物理化学性质的新型活性组分同样具有极高的应用潜力。有学者报道:当生物质掺烧比例达到 20% 时, CoMn_2O_4 尖晶石型氧化物能够将 CO 和碳氢化合物排放降低 30% ~ 40% [6]。

4.3 助剂在提升催化剂性能中的作用研究

4.3.1 酸性助剂增强抗碱金属性能

酸性助剂可以提高燃煤催化剂抗碱金属性能,通过与碱金属发生反应,形成相应的化合物以减轻碱金属对催化剂活性位点造成的破坏,助剂还可通过调节催化剂表面酸性来增强催化剂对 NH_3 的吸附,提升催化剂的脱硝反应速率。相关实验数据表明:在加入 H_3PO_4 助剂后,生物质掺烧时催化剂抗碱金属中毒的能力提高 25%-35%,脱硝效率提高 10%-15%。

4.3.2 储氧功能助剂改善催化性能

助剂如 CeO_2 、 ZrO_2 等有助储氧的功能,在反应过程中提供或吸收氧气来控制催化剂表面对氧化还原气氛的需求。在受到碱金属毒化或者 SO_x 污染后, CeO_2 可通过释放氧原子使碱金属氧化成相对稳定的碱金属含氧酸盐,阻碍碱金属与活性组分的还原作用,从而维持催化剂活性 [7]。

5 适用于生物质掺烧的燃煤催化剂应用案例与效果评估

5.1 国内某生物质掺烧电厂催化剂应用案例

我国某大型燃煤电厂为积极响应煤电低碳化改造政策号召开展生物质掺烧工作,使用一种自主研发的宽温域燃的抗碱金属煤催化剂,催化剂载体为 Al_2O_3 - TiO_2 复合氧化物, MnO_x - Fe_2O_3 - CeO_2 为多元活性组分,少量 H_3PO_4 和 CeO_2 为助剂,在生物质掺烧比例为 10%-15% 时,锅炉燃烧状况良好,飞灰含碳率小于 8%,锅炉热效率 $\geq 90\%$;在 250~450℃ 范围内 SCR 脱硝系统的脱硝效率能够保持在 90% 以上, NO_x 排放小于 50mg/m³,满足国标要求。在运行 12 个月后发现该催化剂活性下降,相比之下,传统催化剂活性下降约 30%。

5.2 国外相关应用案例及经验借鉴

国外某生物质能比较发达的国家,在很多燃煤电厂推广生物质掺烧技术,有一家电厂使用介孔分子筛载体制备的抗碱金属催化剂,该催化剂将特殊设计的过渡金属活性组分负载在介孔分子筛表面,将铈钴复合氧化物作为储氧助剂掺入,形成“载体-活性组分-助剂”的协同作用体系。

电厂生物质掺烧比例达到 25%(以木屑和秸秆混燃为主),生物质燃料 K_2O 含量为 6.8%,远高于传统燃煤工况。加入本品后的 SCR 系统脱硝效率维持在 88% 以上,在 280 ~ 420℃ 区间可达到 93%,而且无其它副产物,无需返混和加氢还原等后处理,安全可靠。

抗碱金属性能:运行 15 个月后,催化剂表面碱金属沉积量约为传统 TiO_2 载体催化剂的 1/3、活性位点保留率高达 72%,远高于行业平均值 45%。

宽温域适应性:机组负荷由 50%-100% 变化,导致烟气温度下降(如由 400℃ 降到 300℃),此时的脱硝效率波动仅为 $\pm 3\%$,有效解决了生物质掺烧常见的“低温活性不足”问题。

再生性能:使用稀硝酸(5%)洗脱工艺使失活催化剂活性恢复到新剂的 85% 以上,并且再生成本仅为更换新剂的 20%,极大的延长了使用寿命。

其核心技术经验在于:

1. 载体选型创新:利用孔径均一(5 ~ 10 nm)SBA-15 介孔分子筛载体可使规则孔道发挥出“物理屏障”作用,阻挡碱金属扩散进入催化剂内部;高比表面积($> 600 \text{ m}^2/\text{g}$)可为活性组分提供足够的分散位点。

2. 活性组分设计:对于 Cu-Mn 复合氧化物而言,在协同氧化还原作用($\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{1+}$ 、 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ 循环)下提高低温活性,可以解决生物质掺烧时低温段($< 300^\circ\text{C}$)脱硝效率低的问题。

3. 运维策略优化:对于原生烟气“在线碱金属浓度监测-定期再生”,在线检测到烟气 K^+ 浓度过高($> 5 \text{ ppm}$),会自动调节喷氨量并启动再生预警功能,防止发生催化剂不可逆中毒。

4. 优化载体结构和活性组分,实现催化剂在高比重大量掺烧工况下的高效稳定运行,“物理屏障+化学抗毒”双机制的设计思想能够为我国高碱金属燃料掺烧条件下催化剂的研发提供有效的借鉴作用。

该案例明示,通过载体结构不断优化与活性组分协同优化设计,催化剂可在高比例生物质掺烧工况下实现高效稳定运行,其“物理屏障+化学抗毒”的双机制设计思路,为我国高碱金属燃料掺烧场景下的催化剂研发提供了重要借鉴。

参考文献

- [1] 赵兴顺,涂爱民,陈二雄,等.直接耦合生物质对燃煤发电系统影响的研究现状与展望[J].生物质化学工程,2025,59(03):57-66.
- [2] 陶亚琴,杜学森,薛经宇,等.SCR催化剂表面 TiO_2 复合涂层的抗碱金属性能研究[J].工程热物理学报,2022,43(09):2531-2540.
- [3] 马子然,周佳丽,马静,等.燃煤电厂脱硝催化剂宽负荷运行的现状与发展[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8415-8431. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.212185.
- [4] 王首祚,毛星舟,杨晓洁,等.锰系氧化物在低温 NH_3 -SCR烟气脱硝研究进展[J].应用化工,2023,52(10):2890-2894+2899.
- [5] 岳彦伟,黄力,卢陆洋,等.不同载体对V-Mo/Ti脱硝催化剂性能影响研究[J].钢铁钒钛,2024,45(04):34-40.
- [6] 费致富.尖晶石型铁基催化剂 NH_3 -SCR脱硝和耐硫性能研究[D].昆明理工大学,2023. DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2023.002375.
- [7] 郭博宇.铈-过渡金属复合低温脱硝催化剂设计、制备及性能研究[D].北京科技大学,2025.