

化工与机械进展

 SYNERGY
PUBLISHING PTE. LTD.

Volume 3
Issue 12

December 2025

ISSN 3029-2395(Print) 3029-2409(Online)

化工与机械进展

Volume 3 · Issue 12 · December 2025 · ISSN 3029-2395(Print) 3029-2409(Online)



 SYNERGY
PUBLISHING PTE. LTD.
Tel: +65 65881289
E-mail: contact@s-p.sg
Website: ojs.s-p.sg



中文刊名: 化工与机械进展

ISSN: 3029-2395 (纸质) 3029-2409 (网络)

出版语言: 华文

期刊网址: <https://ojs.s-p.sg/index.php/hgyjxjz>

出版社名称: 新加坡协同出版社

Serial Title: Progress in Chemical Engineering and Machinery

ISSN: 3029-2395 (Print) 3029-2409 (Online)

Language: Chinese

URL: <https://ojs.s-p.sg/index.php/hgyjxjz>

Publisher: Synergy Publishing Pte. Ltd.

《化工与机械进展》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明 / Copyright

协同出版社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协同出版社所有。

All articles and any accompanying materials published by Synergy 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). Synergy Publishing Pte. Ltd. reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Synergy Publishing Pte. Ltd.

电子邮箱 /E-mail: contact@s-p.sg

官方网址 /Official Website: www.s-p.sg

地址 /Address: 12 Eu Tong Sen Street, #07-169, Singapore 059819



期刊概况:

中文刊名: 化工与机械进展

ISSN: 3029-2395 (Print) 3029-2409 (Online)

出版语言: 华文

期刊网址: <https://ojs.s-p.sg/index.php/hgyjxjz>

出版社名称: 新加坡协同出版社

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
- 中国知网 (CNKI)、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。

化工与机械进展

Volume 3 Issue 12 December 2025
ISSN 3029-2395 (Print) 3029-2409 (Online)

主 编

竹 涛

Tao Zhu

编 委

蒋 军 Jun Jiang

焦林郁 Linyu Jiao

银凤翔 Fengxiang Yin

胡 焱 Yi Hu

潘 伟 Wei Pan

谢成钢 Chenggang Xie

郭乃信 Naixin Guo

- 1 机电一体化装备的能效优化与碳排放建模分析
/ 周冠华
- 4 化工安全管理制度执行力的影响因素及提升策略
/ 童魁
- 7 汽油发动机缸内积碳导致的质量问题分析与解决对策
/ 潘海朝 魏娜 申展
- 10 中小企业安全生产标准化建设难点与对策
/ 陈惠星
- 13 复分解法生产农业用硝酸钾工艺与成本控制
/ 石闻国
- 16 高温合金精密加工技术研究进展：从传统切削到特种加工的挑战与展望
/ 赵书豪 李昌 赵一楠 韩兴
- 19 基于 FANUC0i-TD 数控系统利用宏程序加工梯形螺纹
/ 张普 秦旭东 李凯 杨嘉豪 张肖
- 22 石油化工设备腐蚀机理、案例分析及综合防护策略研究
/ 吴宏伟
- 25 基于反应动力学的乙烯裂解炉模拟及优化研究
/ 王瑜
- 28 长输管道阴极保护效果评判相关问题研究
/ 宫研科
- 31 YY/T 0696-2021 神经和肌肉刺激器输出特性参数综合测试系统研发
/ 单超 强小龙 张超 刘纪明
- 35 弱磁检测技术在石化管道完整性保障中的应用
/ 杜建 钱文振 李云飞 魏恩泽
- 38 冶金机械润滑系统中润滑剂性能优化策略分析
/ 苏贤涌
- 1 Energy efficiency optimization and carbon emission modeling analysis of mechatronic equipment
/ Guanhua Zhou
- 4 Influence Factors and Improvement Strategies of Chemical Safety Management System Execution
/ Kui Tong
- 7 Analysis and Solution of Quality Problems Caused by Carbon Deposit in Gasoline Engine Cylinder
/ Haichao Pan Na Wei Zhan Shen
- 10 Difficulties and Countermeasures in the Construction of Work Safety Standardization for Small and Medium-sized Enterprises
/ Huixing Chen
- 13 Production process and cost control of potassium nitrate for agriculture by ammonium nitrate double decomposition method
/ Wenguo Shi
- 16 Research Progress of Precision Machining Technology for High Temperature Alloys: From Traditional Cutting to Special Machining Challenges and Prospects
/ Shuhao Zhao Chang Li Yinan Zhao Xing Han
- 19 Macro Programming for Machining Ladder Thread Based on FANUC0i-TD CNC System
/ Pu Zhang Xudong Qin Kai Li Jiahao Yang Xiao Zhang
- 22 Research on Corrosion Mechanism, Case Analysis and Comprehensive Protection Strategies of Petrochemical Equipment
/ Hongwei Wu
- 25 Simulation and Optimization of Ethylene Cracking Furnace Based on Reaction Kinetics
/ Yu Wang
- 28 Research on the Evaluation of the Effect of Cathodic Protection for Long-distance Pipeline
/ Yanke Gong
- 31 Translation of "Development of a Comprehensive Testing System for Output Characteristic Parameters of Nerve and Muscle Stimulators Based on YY/T 0696-2021
/ Chao Shan Xiaolong Qiang Chao Zhang Jiming Liu
- 35 Application of weak magnetic detection technology in petrochemical pipeline integrity assurance
/ Jian Du Wenzhen Qian Yunfei Li Enze Wei
- 38 Analysis of Lubricant Performance Optimization Strategy in Lubrication System of Metallurgical Machinery
/ Xianyong Su

Energy efficiency optimization and carbon emission modeling analysis of mechatronic equipment

Guanhua Zhou

Qinhuangdao Water Supply Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract

As a critical energy-consuming component in manufacturing systems, mechatronic equipment directly impacts energy efficiency and carbon emissions through performance variations. Under the dual carbon goals, the importance of energy-saving and low-carbon operations has grown significantly. However, challenges such as mismatched power matching, crude control strategies, frequent load fluctuations, and inadequate condition assessment make energy consumption and emission quantification difficult. This study analyzes energy consumption mechanisms from drive systems, actuators, control logic, and operational characteristics. A carbon emission model integrating electrical energy consumption, mechanical efficiency degradation, load coupling, and lifecycle data is developed to dynamically evaluate emission intensity across different operating conditions. Results demonstrate that this model effectively identifies potential energy efficiency improvements, providing actionable pathways for enterprises to reduce energy costs and advance green manufacturing.

Keywords

mechatronic equipment; energy efficiency optimization; carbon emission modeling

机电一体化装备的能效优化与碳排放建模分析

周冠华

秦皇岛排水有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066000

摘要

机电一体化装备是制造系统中的关键能耗单元,其性能变化直接影响能源利用率与碳排放水平。在“双碳”目标推动下,装备节能与低碳运行的重要性不断提升。然而,动力匹配不当、控制策略粗放、负荷波动频繁及状态评估不足等问题,使能耗偏高与排放难以量化。研究从驱动系统、执行机构、控制逻辑与工况特性等方面分析能耗形成机理,构建融合电能消耗、机械效率衰减、负荷耦合及寿命周期信息的碳排放模型,实现不同工况下排放强度的动态评估。结果显示,该模型能够有效识别能效提升空间,为企业降低能耗成本与推进绿色制造提供可行路径。

关键词

机电一体化装备; 能效优化; 碳排放建模

1 引言

随着制造业数字化与智能化进程不断加快,机电一体化装备在加工、搬运与装配中的应用规模持续扩大,促使生产系统能源需求显著上升,电能消耗占比不断提高。研究表明,装备环节的效率损失已成为车间能耗的主要来源,而现有能耗核算与碳排放评估体系仍不够完善,精细化管理能力不足,使大量节能潜力未被有效利用。在“双碳”政策背景下,企业亟须构建可量化、可预测、可优化的装备能效管理体系。通过将运行状态、工艺参数、负荷特性与环境因素纳入碳排放模型,可实现对能耗敏感区间与排放异常的准确识别,为节能决策提供依据。本研究围绕能效机理、碳排放建模与优

化路径展开分析,为提升装备能效与推动绿色制造提供理论支持。

2 机电一体化装备能效特征与影响机理

2.1 动力系统能效损失及其成因

机电一体化装备动力系统主要包括电机、传动机构及执行装置,系统能效受机械摩擦、传动误差、电机负载率、磁阻损耗等因素共同作用。在加工类装备中,高速主轴的转速波动及冷却系统长期运行往往导致额外能耗;在自动化输送装备中,驱动电机低负载运行较为普遍,电机效率长期处于非最优区间。部分装备因设计阶段未充分考虑工作循环特征,导致电机选型偏大,额定功率远高于实际需求,使电能浪费持续累积。此外,传动部件磨损与润滑状态衰减会降低机械效率,设备服役周期越长,能耗上升趋势越明显。

【作者简介】周冠华(1983-),男,中国河北秦皇岛人,本科,助理工程师,从事机电研究。

2.2 控制策略与运行状态的不匹配性

装备能效除硬件因素外,还受到控制策略的直接影响。部分企业仍采用定值控制或周期性调节,未能根据实时负载变化进行动态调控,导致执行机构输入能量与实际需求存在偏差。以气动元件辅助的机电装备为例,若流量控制阀长期处于高开度,压缩空气消耗将明显增加。另一些装备因缺乏运行数据反馈机制,无法根据设备疲劳程度和响应特性自动调整参数,使能效状态与生产节奏难以保持一致。此外,环境温度变化、工件属性差异及操作节拍波动均会导致能耗偏离预期,进一步增加碳排放模型构建难度。

2.3 工艺负荷波动对能耗的叠加效应

在制造系统中,工艺过程具有显著的时序性与动态性,负荷波动频繁且幅度较大。装备在高峰负荷阶段易出现电流冲击,造成瞬时能量浪费;在低负荷阶段,设备仍需维持基本运行状态,导致固定能耗占比增加。部分加工工艺因切削阻力不稳定,使主轴功率呈周期性跳变,能效曲线难以保持平滑。装备群协同生产时,节拍差异会形成负荷不均衡,使车间供能系统必须保持高裕量设计,间接提升整体能耗水平。

3 机电一体化装备碳排放建模原则与核心方法

3.1 碳排放边界及排放源识别

构建机电一体化装备的碳排放模型,需要明确排放边界并识别全部相关排放源,这是建立科学核算体系的前提条件。对于以电力驱动为主的装备,其碳排放主要来自运行过程中消耗的电能,通过当地电网平均碳排放因子可将电量转换为等量碳排放值。对于搭载液压系统、气动系统或其他辅助动力装置的装备,还应将液压泵、电磁阀、压缩空气站等外围设备的能耗纳入计算,因为这些系统虽然不直接参与加工,但与主机协同运行,其耗能也间接构成装备整体碳排放的一部分。此外,装备在维修保养、换刀、润滑、夹具更换等环节中可能会产生间接排放,例如润滑油生产和消耗过程中的碳排放、维修用电的额外能耗等,需通过生命周期评价的方法进行补充计量。

3.2 基于多源数据融合的能效参数建模框架

机电装备运行过程中产生大量多维度数据,包括电流、电压、扭矩、转速、压力、流量、振动、温度以及工艺参数等,这些数据之间具有明显的非线性耦合关系,使能效建模无法依赖单一参数描述。为实现对能耗行为的精确刻画,需要构建以多源数据融合为核心的建模框架,将设备的动力学特性、工艺负荷变化与健康状态纳入统一表达体系。模型可采用机理模型与数据驱动模型结合的方式:机理模型可描述电机效率、传动链损耗、执行机构运动特性等物理过程,为能耗预测提供结构化约束;数据驱动模型则擅长在复杂工况下捕捉非线性关系,例如主轴振动与切削阻力之间的隐含相关、温度变化对摩擦损失的影响等。在具体实现中,可采用神经网络、梯度提升树、多任务学习网络及融合注意力机制

的深度模型,通过对多维数据的权重分配,提高对能耗关键因素的识别能力。通过数据融合框架,可实现运行状态、工艺负荷及设备健康指标的协同表达,为碳排放量化与能效预测提供精确基础。

3.3 装备生命周期维度的碳排放动态分析模型

装备在生命周期内的能效表现并非静态,其效率会随着磨损、老化、维护质量与工艺调整而变化。因此,碳排放建模需引入时间维度,通过状态转移函数描述效率衰减路径。生命周期模型可划分为调试期、稳定运行期、衰退期三个阶段,在不同阶段设定差异化能效参数。对于关键部件,如轴承、丝杠、齿轮等,可根据健康状态指标建立衰减函数,使模型能动态反映装备的真实运行状态。通过与维修记录、工艺日志等信息的联合计算,可对未来排放趋势进行预测,支撑碳资产管理与节能改造决策。

4 装备能效优化的关键策略与实现路径

4.1 动力系统优化与执行机构节能改造

动力系统优化是提升能效的核心环节。电机选型需要依据工艺需求进行匹配,通过分析负载曲线获得最优额定功率区间,避免过度设计。部分场景可采用永磁同步电机以提升能效水平,并通过矢量控制策略降低电磁损耗。在传动环节,可选用低摩擦轴承、高性能润滑剂及高精度齿轮,以改善传动效率。在执行机构方面,通过升级伺服驱动器、更新高效丝杠与滑台、优化制动能量回馈结构等手段,可显著提升机械效率。对于具备频繁启停特征的装备,可引入能量回收模块,将制动能量转化为电能供系统使用,降低外部供能需求。

4.2 数据驱动的自适应智能控制策略

智能控制策略的引入使装备能根据负载变化自动调整运行参数,实现能量按需供应。通过构建工况识别模型,可实时判断设备当前处于空载、轻载或重载状态,并根据分类结果调节转速、供气量、冷却强度及泵阀开度等关键参数。对于加工类装备,可采用基于预测模型的前馈控制策略,根据切削阻力趋势提前调整主轴负载,减少能耗峰值。在自动化装备中,可通过路径规划优化和任务节奏协调降低空载运行比例。控制策略还可与设备健康监测系统联动,根据磨损程度自动修正能效参数,使控制指令更贴近实际运行需求。

4.3 工艺路径重构与生产系统协同优化

装备能效不仅由设备本身决定,还与工艺路径与生产节奏密切相关。工艺优化可通过调整刀具参数、选择合理加工顺序、优化夹具布局等方式降低负荷波动。生产系统层面,可通过多装备协同调度降低高峰时段负荷集中问题,使能源供给系统更趋稳定。通过建立工艺能源数据库与排放指标库,可对不同路径的能耗与排放表现进行比对,选择表现更优的生产方案。在柔性生产线中,可通过任务分配算法使高能耗装备在低谷时段运行,减少对外部能源系统的冲击,提高系统整体效率。

5 碳排放建模在能效管理中的应用与案例分析

5.1 装备运行能效的实时监控与优化决策支持

在工业生产过程中，机电一体化装备的运行状态呈现高频波动与多维耦合特征，使能效水平易受到负荷变化、部件磨损及工艺扰动等因素影响。将碳排放模型嵌入能源管理系统，可实现从设备层到系统层的全链路监控。通过采集电流、电压、转速、扭矩、振动、温度等多源数据，系统能够构建设备能效画像，实时呈现能耗变化轨迹与排放强度曲线。监控界面可对关键指标进行动态比对，如单位能耗、碳排放因子、效率衰减率等，使管理人员及时掌握设备运行趋势。当模型识别到能效偏离正常区间，例如负载率下降、功率峰值异常增加或传动效率衰减时，系统会自动给出诊断提示，指出可能涉及的部件、工艺环节或控制参数，并推送相应调优建议。基于预测模型的前瞻性判断能力，还可提前识别潜在的高能耗风险，支持生产管理者按需调整生产节拍、计划性保养与任务调度，实现从被动节能向主动优化的转变。依托这一机制，可在不影响生产连续性的前提下，使装备保持高效运行状态，提高能源利用质量。

5.2 碳排放评估在装备选型与更新改造中的作用

装备生命周期内的碳排放水平不仅源于运行能耗，还受到设计方案、驱动方式、制造工艺及维护策略的影响。在新装备选型或旧装备改造过程中，依托碳排放模型可量化不同技术路线的长期能源成本与环保效益，为企业提供决策依据。通过对比不同电机类型的负载效率曲线、传动结构的能量损失特征以及控制系统的调节精度，可从碳排放视角筛选能效表现更优的装备方案。在具备液压、气动与电驱综合系统的装备中，模型可计算不同系统组合下的碳排放强度，为装备配置提供数据支持。对于服役周期较长的设备，模型可基于状态衰减函数预测后续运行阶段的排放趋势，估算继续使用的能耗成本和可能带来的排放压力。当预测结果显示设备能效下降明显且维护成本增高时，企业可据此判断是否进行技术升级，如更换高效电机、优化传动模组、更新伺服系统等。由于模型能够量化改造前后节能量与减排量，因此能够帮助企业评估改造投资回收期，提高设备更新的经济合理性与决策科学性。

5.3 典型装备应用案例的模型验证与效果分析

以自动化工厂中常见的搬运装备为例，为验证碳排放模型的有效性，对其长期运行数据进行采集与分析。数据包

括整机电流波形、负载扭矩变化、加速度响应、制动次数及运动路径信息。在模型构建阶段，通过物理机理与数据驱动方法结合的方式，建立负载率—功率—排放因子之间的动态对应关系。应用模型对不同任务周期进行预测后发现，该装备在多数搬运环节存在较长时段的轻载运行区间，负载率低于额定值的 25%，导致固定能耗占比较高，整体能效偏低。针对这一问题，研究团队对装备的运行路径进行重构，通过减少无效位移、优化速度曲线并调整加速与制动策略，使系统能量分配更加平稳。与此同时，对控制参数进行修订，使伺服系统能够根据负载变化进行动态调节。经过优化后，设备的平均能耗降幅约为 18%，碳排放强度降低了约 16%，模型预测曲线与实际测量值的拟合度较高，说明模型在不同工况下均能准确反映能效变化趋势。该案例验证了碳排放模型在装备节能分析与运行优化中的适用性，为后续推广提供可参考的实践依据。

6 结语

机电一体化装备作为制造业的重要组成部分，其能效水平与碳排放表现不仅影响企业能源成本，也关系到产业绿色发展的宏观布局。本研究从能效机理、碳排放建模与优化策略三个维度展开系统阐述，构建了多源数据驱动的能效分析框架与生命周期模型，提出了动力系统优化、智能控制、工艺重构与系统协同的综合节能路径。研究内容可为制造企业开展装备节能诊断、碳排放评估、技术改造与绿色管理提供理论依据和技术方法。随着工业互联网与 AI 技术进一步普及，未来装备能效管理将向更高精度、更强智能化方向发展，实现制造系统的持续低碳运行与能源利用优化。

参考文献

- [1] 任健,侯尹.机电一体化技术在智能机械装备上的应用及趋势思考[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):78-80.
- [2] 陈英.考虑碳减排约束的感应炉机电一体化节能变频控制方法[J].工业加热,2025,54(02):70-74.
- [3] 杨前会.机械及机电一体化技术在垃圾焚烧发电过程中的节能减排研究[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流会论文集(下).浙江伟明环保股份有限公司,2024:65-67.
- [4] 张吉福.机电一体化在可再生能源设备中的创新应用[J].产业科技创新,2024,6(04):8-11.

Influence Factors and Improvement Strategies of Chemical Safety Management System Execution

Kui Tong

Jiangsu Yabang Wal Dye Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

The chemical industry is characterized by high risk and complexity, and the effective implementation of safety management systems is the core guarantee for preventing safety accidents. Currently, although some chemical enterprises have established a sound system, frequent accidents occur due to insufficient enforcement. Research shows that approximately 70% of chemical safety accidents originate from failures in the execution of systems, rather than technical or equipment defects. Based on the production practices of chemical enterprises, this paper deeply analyzes the key factors affecting the enforcement of safety management systems from four dimensions: the system itself, personnel quality, supervision mechanisms, and technical support. It systematically reveals the internal connections and coupling effects among these factors. Combined with typical industry cases, this paper further proposes targeted improvement strategies such as building personalized system frameworks, strengthening personnel capability development, improving full-chain supervision, and innovating technological applications. The aim is to form an integrated comprehensive management solution combining "people, systems, technology, and management", providing systematic theoretical and practical references for chemical enterprises to break through enforcement bottlenecks, build long-term safety mechanisms, and achieve the goal of inherent safety.

Keywords

Chemical Safety; Management System; Execution Power; Influencing Factors; Improvement Strategies

化工安全管理制度执行力的影响因素及提升策略

童魁

江苏亚邦华染料有限公司, 中国·江苏 连云港 222000

摘要

化工行业具有高危性、复杂性特点, 安全管理制度的有效执行是防范安全事故的核心保障。当前部分化工企业虽建立完善制度体系, 却因执行力不足导致事故频发。研究表明, 约70%的化工安全事故根源在于制度执行环节的失效, 而非技术或设备缺陷。本文基于化工企业生产实践, 从制度本身、人员素养、监管机制、技术支撑四个维度, 深入剖析影响安全管理制度执行力的关键因素, 系统揭示了各因素间的内在关联与耦合效应。结合行业典型案例, 本文进一步提出了构建个性化制度体系、强化人员能力建设、完善全链条监管、创新技术应用等针对性提升策略, 旨在形成“人、制度、技术、管理”四位一体的综合治理方案, 为化工企业突破执行力瓶颈、构建长效安全机制、实现本质安全目标提供系统的理论与实践参考。

关键词

化工安全; 管理制度; 执行力; 影响因素; 提升策略

1 引言

化工产业作为国民经济支柱产业, 其生产过程涉及易燃易爆、有毒有害等危险化学品, 且工艺流程复杂、反应条件严苛, 安全风险贯穿生产全链条。安全管理制度作为规范生产行为、管控安全风险的核心手段, 其执行力直接关系到企业安全生产水平与员工生命财产安全。近年来, 国内化工行业安全事故仍时有发生, 如某石化企业因操作人员未严格执行动火作业审批制度引发爆炸, 某化工园区因应急处置流

程落实不到位扩大事故后果。这些事故暴露的核心问题并非缺乏制度, 而是制度执行力的严重缺失。

据统计, 约70%的化工安全事故与制度执行不到位直接相关。这种现象背后反映了当前化工企业安全管理面临的深层次挑战: 制度设计与实际操作的脱节、人员安全意识与专业技能的不足、监管体系的系统性缺陷, 以及技术支撑能力的滞后。本文基于对多家化工企业的实地调研和案例分析, 从多维度探讨影响安全管理制度执行力的关键因素, 并提出系统化的提升策略, 旨在为化工企业构建更有效的安全管理体系提供参考。

【作者简介】童魁(1988-), 男, 中国安徽铜陵人, 本科, 工程师, 从事化工安全生产相关研究。

2 化工安全管理制度执行力的影响因素

2.1 制度本身的科学性与适配性不足

制度质量直接决定执行效果。部分化工企业安全管理制度存在“三重三轻”问题：

一是重形式轻实效。许多企业制定安全管理制度时，往往简单照搬国家标准或行业规范，未结合自身工艺特点、设备状况及风险分布进行针对性调整。例如，某精细化工企业直接套用大型石化企业的反应釜操作规程，导致制度要求与现场实际严重脱节，操作人员在执行过程中发现诸多不适用条款，最终导致制度形同虚设。这种现象在中小型化工企业中尤为普遍，其根本原因在于缺乏专业的制度设计能力和风险评估技术。

二是重宏观轻细节。许多企业的安全管理制度停留在原则性要求层面，对具体操作的关键节点、异常情况处置步骤等界定模糊。以“危险化学品装卸管理制度”为例，多数企业制度仅笼统规定“专人监护”，但未明确监护人员的具体职责、监护频次要求、异常情况判断标准及应急处置措施，导致现场执行缺乏明确依据。这种制度设计上的模糊性，给执行环节留下了过多的自由裁量空间，极易因个人理解差异导致执行标准不一。

三是重制定轻更新。安全管理制度应当是一个动态完善的体系，然而现实中许多企业制度一经制定便长期不变，未能随工艺升级、设备更新、法规修订而及时调整。例如，某农药生产企业引入新型催化工艺后，未及时修订相应的安全操作规程，操作人员仍沿用旧有规程，最终因参数控制不当引发反应失控。这种现象反映了企业安全管理体系的僵化，缺乏持续改进机制。

2.2 人员素养与执行意愿的双重制约

人员是制度执行的主体，其专业能力与执行意愿直接影响执行效果：

专业素养方面，一线操作人员往往缺乏系统的安全培训，对制度的理解停留在表面层次。以设备巡检制度为例，许多操作人员将其视为应付检查的形式化工作，未能掌握异常参数的识别方法和风险判断标准。某化工厂的调查显示，超过60%的操作工无法准确描述其所操作设备的关键安全参数范围。这种专业能力的不足，直接导致制度执行效果大打折扣。

技术管理人员同样存在能力短板，许多安全管理人员缺乏一线操作经验，在制度宣贯时难以用通俗易懂的语言解读专业要求，导致信息传递过程中出现严重“衰减”。这种现象在大型化工集团中尤为明显，总部制定的制度在层层传达至基层时，往往失去了其原有的精确性和可操作性。

执行意愿方面，企业安全文化的缺失是主要障碍。许多企业仍存在“重生产轻安全”的倾向，当生产任务与安全要求发生冲突时，管理层往往默许简化安全流程。某石化企业的调研发现，在赶工期期间，近40%的安全检查项目被

简化或跳过。此外，缺乏有效的激励约束机制也是重要因素。多数企业对合规执行者缺乏实质性奖励，对违规行为的处罚也往往流于形式，导致“执行与不执行无差异”的消极心态蔓延。

2.3 监管机制的弱化与缺位 有效的监管是制度落地的重要保障，当前监管机制存在明显短板：

权责划分不清是首要问题。企业内部安全、生产、技术等部门的监管职责存在交叉或空白地带。以设备安全检查为例，往往同时涉及设备管理部门、安全管理部门和使用部门，出现问题时容易相互推诿。外部监管方面，由于监管人员数量有限，多采取“运动式”检查方式，缺乏持续性的约束力。

监管方式粗放制约了监管效果。企业内部监管多依赖人工现场检查，难以覆盖全流程所有环节，且难以发现隐蔽性违规行为。外部监管则过度依赖企业自查报告，缺乏有效的核验手段。某省应急管理部的统计显示，超过80%的隐患是由企业自查发现，而监管部门现场检查发现的隐患不足20%，这反映出监管方式的局限性。

问责机制乏力削弱了监管的威慑力。对制度执行不到位的行为，多数企业仍停留在批评教育、小额罚款等浅层次处理，未能与员工的职务晋升、绩效考评等切身利益挂钩。对管理层的问责更是流于形式，某化工厂发生设备损坏事故后，仅对当班操作工进行处罚，未追究相关管理人员的责任。这种问责的不平衡严重挫伤了员工执行制度的积极性。

2.4 技术支撑体系的滞后性 技术手段的落后严重制约了制度执行力的提升：

风险监测技术方面，中小型企业普遍依赖人工巡检，缺乏关键工艺参数的实时监测设备。某农药企业的反应釜未安装压力自动报警装置，操作人员依靠手工记录数据，难以及时发现异常情况。即便是大型企业，也存在设备老化、数据采集延迟等问题，无法为制度执行提供及时可靠的技术支撑。

信息化管理水平低下是普遍现象。多数企业尚未建立一体化的安全管理信息系统，制度传达、培训记录、检查整改等环节仍依赖纸质文档，导致信息传递效率低下、追溯困难。某化工园区的调查显示，超过70%的企业仍在在使用纸质安全检查表，检查结果录入和统计分析严重滞后。

应急技术装备不足直接影响应急处置制度的落实。许多企业的应急救援设备配备不足或维护不善，如防毒面具过期、应急喷淋装置失效等现象时有发生。这种技术装备的缺失，使得即使有完善的应急制度，在实际事故中也无法有效执行。

3 化工安全管理制度执行力的提升策略

3.1 构建科学适配的制度体系

推动制度“个性化”制定。企业应组建由安全专家、

技术人员、一线操作工共同参与的制度编制团队,运用HAZOP(危险与可操作性分析)、JSA(工作安全分析)等专业风险评估方法,系统梳理生产流程中的风险点。例如,针对精细化工企业的间歇式生产特点,应明确每批次进料的精确计量标准、升温速率控制范围等具体参数,确保制度要求与现场操作高度契合。

强化制度“精细化”表达。采用“原则+流程+案例”的三维结构,对关键操作步骤进行可视化呈现。以动火作业审批制度为例,可绘制详细的审批流程图,明确每个环节的责任人、时间要求和输出文档,同时附上典型违规案例及其后果分析,增强制度的可读性和可操作性。某大型石化企业通过这种方式,使制度理解错误率降低了35%。

建立制度“动态化”更新机制。明确安全管理部门的制度更新主体责任,建立季度评审制度,结合法规变化、工艺设备更新、事故案例教训等,及时修订完善相关制度。同时建立制度评估指标体系,通过执行率、偏差率、事故率等数据量化评估制度有效性,为持续改进提供依据。

3.2 提升人员素养与执行意愿

构建分层分类培训体系。针对一线操作人员,开展“理论+实操”的双轨培训,重点讲解制度条款的操作要求和风险后果,采用现场模拟、VR体验等创新方式提升实操能力。对技术管理人员,重点开展制度解读能力培训,使其掌握将专业要求转化为通俗指令的方法。建立“师带徒”机制,由经验丰富的员工指导新人熟悉制度执行要点,某化工企业通过这种方式使新员工适应期缩短了50%。

完善激励约束机制。树立“安全优先”的企业文化,管理层在各类决策中明确安全制度的刚性地位,杜绝因生产压力而妥协安全要求的行为。建立“正向激励+反向约束”的双驱动机制,将制度执行情况与员工绩效考评、晋升发展直接挂钩。某化工集团引入安全积分制度,员工的安全行为可获得实质奖励,使制度主动执行率提升了28%。

3.3 完善全链条监管机制

厘清监管权责边界。通过制度明确企业内部各部门的监管职责,建立责任矩阵。安全管理部门负责制度执行的统筹监督,生产部门负责本部门操作环节的日常监管,技术部门负责工艺相关制度执行的技术核查。外部监管方面,推动应急管理部门采用“双随机、一公开”检查方式,结合无人机巡检、在线监测数据核查等技术手段,提高监管的覆盖面和精准度。

创新监管方式。搭建企业安全监管信息化平台,整合人员定位、视频监控、设备状态等数据,实现制度执行情况的实时追踪和智能预警。引入第三方专业机构开展独立安全审计,利用其专业优势弥补企业内部监管的不足。某化工园

区通过引入第三方监管,使隐患整改率提高了40%。

强化问责机制。制定《制度执行问责细则》,建立从操作层到管理层的全链条问责体系。对发生安全事故或重大隐患的,不仅要追究直接责任人的责任,还要倒查相关管理人员的监管责任及制度制定部门的源头责任。某化工企业实施管理层安全责任连带制度后,管理人员的现场监督频次增加了65%。

3.4 强化技术支撑体系建设

升级风险监测技术。中小型企业应优先配备关键工艺参数的自动监测与报警设备,如反应釜压力温度联锁装置、有毒气体浓度探测器等。大型企业可构建“物联网+大数据”监测系统,实现设备运行状态、人员操作行为的实时可视化监控。例如,通过智能视频分析技术自动识别员工未佩戴防护用品等违规行为,实现即时预警和闭环管理。

推进信息化管理。建立一体化安全管理信息系统,实现制度发布、在线培训、考核测试、检查整改的全流程数字化管理。检查人员通过移动终端实时上传隐患照片及整改要求,系统自动跟踪整改进度并生成分析报告。某化工企业实施移动巡检系统后,检查数据录入时间减少了70%,整改效率提升了45%。

完善应急技术装备。根据企业风险特点科学配备应急救援设备,建立设备定期维护校准制度,确保始终处于完好备用状态。搭建应急演练数字化平台,通过虚拟现实技术模拟不同事故场景下的应急处置流程,提升员工对应急制度的执行能力。某化工园区通过定期开展数字化应急演练,使员工应急响应时间缩短了30%。

4 结语

化工安全管理制度执行力的提升是一项系统工程,需要从制度质量、人员素养、监管机制、技术支撑等多个维度协同推进。企业作为安全管理的责任主体,必须从源头优化制度体系,确保制度的科学性和适用性;以人员能力建设为核心,提升全员的安全意识和执行能力;以完善监管机制为保障,建立权责清晰、方式创新、问责有力的监管体系;以技术创新为支撑,运用现代化手段提升安全管理效能。

参考文献

- [1] 李永锋. 化工安全管理及事故应急管理的策略分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(05): 52-54.
- [2] 张洪明. 化工安全生产管理中的问题与对策分析[J]. 现代盐化工, 2024, 51(02): 87-89.
- [3] 马博. 浅谈化工安全管理的普遍问题 and 对策[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(28): 19-21.
- [4] 王建国. 化工企业安全管理执行力提升路径研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(04): 112-116.

Analysis and Solution of Quality Problems Caused by Carbon Deposit in Gasoline Engine Cylinder

Haichao Pan Na Wei Zhan Shen

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Prolonged operation of gasoline engines often leads to carbon deposits in cylinders due to factors such as insufficient fuel atomization, incomplete combustion, and lubricant carryover. These deposits impair combustion efficiency, cause engine knock, reduce power output, and worsen emissions. This study combines field testing with laboratory experiments to analyze the formation mechanisms, characteristic manifestations, and performance impacts of carbon deposits. Through microscopic structure analysis and chemical composition testing, we reveal their physicochemical properties. Using kinetic simulations, we investigate airflow patterns and thermal load distribution in the combustion chamber, proposing a comprehensive management system that includes fuel optimization, injection strategy adjustments, clean combustion design, and periodic maintenance. Results demonstrate that these integrated measures can reduce carbon deposit thickness by approximately 40%, improve combustion efficiency by 3.6%, and decrease particulate emissions by 25%, validating the effectiveness and engineering feasibility of this solution.

Keywords

gasoline engine; in-cylinder carbon deposits; combustion efficiency; quality control; clean combustion technology

汽油发动机缸内积碳导致的质量问题分析与解决对策

潘海朝 魏娜 申展

长城汽车股份有限公司, 中国·河北保定 071000

摘要

汽油发动机在长期运行中, 因燃油雾化不充分、燃烧不完全及润滑油上窜等因素, 易产生缸内积碳, 导致燃烧效率下降、爆震、功率衰减及排放恶化。本文结合实车与实验研究, 分析了积碳的形成机理、特征表现及其对性能的影响, 并利用显微结构与化学成分检测揭示其物理化学特性。通过动力学仿真探讨燃烧室气流与热负荷分布规律, 提出燃油优化、喷射策略调整、清洁燃烧设计与周期维护的综合治理体系。结果显示, 综合措施可使积碳厚度降低约40%, 燃烧效率提升3.6%, 颗粒物排放减少25%, 验证了该方案的有效性与工程可行性。

关键词

汽油发动机; 缸内积碳; 燃烧效率; 质量控制; 清洁燃烧技术

1 引言

随着汽车工业节能与排放标准的持续提升, 汽油发动机的燃烧系统正向高压压缩比、缸内直喷(GDI)与小型化方向发展。然而, 这种高效燃烧模式在改善动力输出与经济性的同时, 也带来了缸内积碳问题的加剧。缸内直喷发动机(GDI)相较传统歧管喷射(MPI)系统, 其喷油器直接位于燃烧室内, 喷油压力高、燃烧温度大, 油气在高温环境中极易形成局部高碳残留。长期积碳不仅改变燃烧室几何形状, 还会破坏进气流场、影响喷油雾化质量, 从而导致燃烧不完全与排放超标。此外, 积碳颗粒还可能吸附燃油中的重质组分与金属杂质, 在高温条件下生成复合碳层, 进而引起

发动机爆震、动力损失及冷启动困难。本文从积碳形成机理出发, 结合多源实验数据与工程案例, 对缸内积碳引发的典型质量问题进行系统分析, 探讨其对发动机热效率、动力性与排放特性的综合影响, 并提出科学的预防与治理对策, 以期作为发动机设计与后期维护提供理论依据与工程参考。

2 汽油发动机缸内积碳的形成机理与影响因素

2.1 积碳的物理化学形成机制

汽油发动机缸内积碳的形成是燃油热解、聚合及氧化反应的综合作用的结果, 其核心过程为高温环境下碳氢化合物的裂解与重组。燃油在喷射雾化过程中, 若液滴粒径过大或喷雾偏离最佳气流区, 会在燃烧室壁面附着并经高温蒸发, 产生碳烟和胶质残留物。这些中间产物经氧化聚合后形成致密碳膜。润滑油上窜至燃烧区后, 其添加剂在高温下分解生成金属氧化物微粒, 与燃油残渣结合形成复合碳层, 增强积碳的

【作者简介】潘海朝(1987-), 男, 本科, 工程师, 从事汽油发动机开发及质量问题解决方向研究。

附着力与硬度。研究表明,燃烧不完全及润滑油参与燃烧是积碳生成的主要驱动因素。尤其在冷启动或低负荷工况下,燃烧温度不足以完全氧化碳氢残留,导致碳沉积速率显著提升,使积碳逐渐从表面附着演变为结构固化。

2.2 燃油品质与喷油方式的影响

燃油组分与喷射特性直接决定积碳的生成倾向。高芳香烃含量的燃料在高温下易生成碳烟,其不饱和键结构促进聚合反应,是喷油嘴尖端与燃烧室壁面形成胶质沉积的关键因素。而含氧燃料可改善燃烧速率与完全度,降低碳残留量。汽油直喷(GDI)发动机虽然提升了燃烧效率,但因喷射方向与活塞顶壁距离较短,喷雾附壁和油膜沉积更易发生。喷油时机、喷射角度及气流组织的轻微偏差都会导致局部混合气过浓区形成,成为碳化核心。此外,喷油器内部的微沉积物会改变喷雾锥角与粒径分布,使雾化质量下降,形成“沉积加剧—喷雾恶化—积碳再生”的正反馈机制,加速积碳的累积过程。

2.3 进气系统与通风结构设计的影响

进气系统的设计与通风策略对积碳生成具有重要影响。曲轴箱通风系统(PCV)若回油效率不足或管路设计不合理,会使含油气混合物在进气歧管与进气阀背面凝结成油膜,为积碳提供前驱物来源。在缸内直喷发动机中,因喷油嘴不再清洗阀面,进气阀碳沉积更加严重。废气再循环系统(EGR)中的微颗粒与未燃气体进入进气系统后,与油雾共同参与化学反应,形成坚固的复合碳层,降低进气流道截面积与流速,导致空气流量下降和燃烧不均匀。实验表明,当进气阀表面沉积厚度超过0.6 mm时,流量系数下降约8%,燃烧稳定性明显恶化。由此可见,合理的通风结构与EGR流量控制是抑制缸内积碳的重要工程途径。

3 缸内积碳的特征表现与性能影响分析

3.1 燃烧特性恶化与爆震倾向增强

缸内积碳改变了燃烧室的几何形态与热负荷分布,使局部压缩比升高,导致燃烧温度场出现非均匀性。积碳表面因其较高的热容与导热性,易形成局部高温“热点”,在高压环境下成为自燃源,引发提前燃烧或爆震。研究表明,当积碳厚度达到0.8 mm时,燃烧峰值提前 2° CA左右,爆震发生频率增加约40%。为抑制爆震,控制系统通常需延迟点火时刻,使有效燃烧相位后移,从而造成燃烧效率下降2%~3%。此外,积碳的多孔结构会吸附燃油并在高温下发生二次蒸发,使燃烧初期混合气浓度偏离设计值,火焰传播速率减慢,燃烧中心偏移,导致热释放率波动加剧,燃烧稳定性显著恶化。

3.2 进气系统效率下降与功率损失

进气阀及歧管表面的积碳会改变进气通道的流动截面与表面粗糙度,显著降低空气流量与充气效率。数值仿真表明,当进气阀背面沉积厚度超过0.6 mm时,流量系数下降

约8%,气流速度分布畸变,混合气形成不均,导致燃烧不完全。发动机在高负荷工况下表现为功率下降与响应迟滞,燃油经济性显著降低。气流受阻还导致燃烧室温度升高,排气温度随之上升约 20°C ,三元催化器负荷加重,热衰减速度加快。长期运行下,排放中CO和HC浓度显著增加,颗粒物排放超标,整机热平衡被破坏,燃烧系统的稳定性与耐久性明显下降。

3.3 怠速不稳与机油消耗异常

缸内积碳使燃烧过程的初期火焰传播路径受扰,造成燃烧速率不均与火焰中心偏移,各缸燃烧相位不同步,从而引起怠速工况下的扭矩波动与发动机振动增强。积碳颗粒还可能进入活塞环区域,造成环槽磨损与油道堵塞,破坏密封性能。机油在高温高压环境下易被卷入燃烧室参与燃烧,导致机油消耗率显著上升。试验表明,当积碳厚度超过0.7 mm时,机油消耗可增加约20%,并伴随明显的蓝烟排放。过量机油燃烧还会在火花塞电极形成绝缘积碳层,导致点火能量衰减、冷启动困难和失火频发。这一连锁效应不仅降低发动机可靠性,也对尾气排放系统造成长期负担,缩短三元催化器寿命。

4 积碳检测与诊断方法研究

4.1 基于燃烧信号的实时诊断

缸内燃烧压力信号是识别汽油发动机积碳引发燃烧异常的重要依据。通过缸内压力传感器实时采集燃烧压力曲线,可量化燃烧相位、压力上升速率及爆震能量等关键参数。积碳导致燃烧室几何形状变化,通常表现为燃烧峰值提前、压力上升速率异常增加及高频爆震信号增强等特征。采用短时傅里叶变换(STFT)对燃烧信号进行时频分析,可揭示燃烧相位漂移与压力脉动的动态变化;结合小波包分解(WPD)技术,可在多尺度下分离有效信号与背景噪声,从而提高诊断灵敏度与鲁棒性。通过统计不同工况下的燃烧峰值分布与频带能量比,可建立积碳程度与燃烧异常的对应模型。实验验证显示,当燃烧峰值提前角超过基准值 1.5° CA时,缸内积碳厚度普遍超过0.6 mm,表明该方法可实现非侵入式积碳诊断,为发动机智能监控提供有效手段。

4.2 声学振动信号分析方法

发动机缸内积碳会改变燃烧与机械系统的振动响应特性,其引发的爆震、敲击及气流紊流会在特定频段产生可识别的结构噪声。基于声学阵列与振动加速度传感器的多通道同步采集系统,可对发动机外部声压与内部振动信号进行时空关联分析。通过快速傅里叶变换(FFT)与包络解调技术,可提取出积碳诱发的特征频率信号。研究表明,当缸内积碳厚度超过0.5 mm时,系统的主特征频率集中于4~6 kHz范围,且谱峭度与峰值因子显著增加,说明燃烧冲击与结构共振发生叠加。进一步利用独立成分分析(ICA)与模式识别算法,可区分燃烧型积碳与机械型积碳的信号特征,实现积碳类型

的定量识别。该方法适用于发动机台架与实车状态下的在线检测,具有较高的实时性与可操作性。

4.3 可视化与显微检测技术

在发动机停机与维护阶段,采用可视化检测手段可直接获取积碳的形态与成分信息。利用高清内窥镜成像技术可在不拆解发动机的情况下观测燃烧室与进气阀表面的积碳分布特征。结合扫描电子显微镜(SEM)分析,可对积碳的微观形貌进行结构解析,揭示其分层特征与颗粒形态。研究发现,缸顶与气门背面积碳呈多层堆叠结构,底层致密、上层疏松,颗粒尺寸多集中于1~10 μm 范围。通过能谱分析(EDS)可进一步确定化学组成,结果显示积碳中主要元素为C、O、Fe、Ca、Zn等,其中金属氧化物含量与润滑油添加剂成分密切相关。部分样品中检测到硫化物与碳酸盐复合物,表明高温燃烧与润滑油氧化是积碳形成的主导因素。该显微检测方法不仅能揭示积碳生成机理,还可为润滑油配方优化与防积碳材料研发提供科学依据,为发动机设计改进与故障溯源提供量化的实验支撑。

5 缸内积碳的控制与治理策略

5.1 燃油与润滑油体系优化

燃油与润滑油的化学组成直接决定了缸内积碳的生成倾向。燃油中芳香烃与高分子烃类在高温环境下易发生聚合反应,形成胶质与沉积物,是积碳的主要来源。因此,采用低芳香烃、高含氧燃料可促进完全燃烧,减少未燃残留。通过在燃油中添加清净分散剂、抗氧化剂及金属钝化剂,可有效阻断积碳前驱物的生成。研究表明,含有聚异丁烯胺(PIBA)的汽油能显著降低喷油嘴沉积物厚度约30%,同时改善燃烧均匀性。润滑油体系方面,应优化基础油黏度指数与低灰分配方,减少金属钙、镁添加剂的高温分解产物在燃烧室内沉积。高性能润滑油采用低硫磷添加剂体系,可降低活塞环槽积碳与油耗率。综合配比调整与化学改性,使润滑体系具备更高的热稳定性与氧化抑制能力,为防控缸内积碳奠定基础。

5.2 喷射与燃烧系统优化

燃油喷射与燃烧控制策略是抑制积碳生成的关键环节。通过调节喷射压力与喷油时刻,可显著改善燃油雾化特性与油气混合均匀性。当喷射压力提升至15 MPa以上时,雾化粒径可控制在20 μm 以下,附壁现象明显减少。采用双喷射策略(分层喷射与均质喷射结合)可兼顾冷启动工况与高负荷燃烧需求,使燃烧过程更加稳定。气流导向设计与滚流强化可促进混合气分布均匀性,避免局部富油区形成高温积碳核。燃烧闭环控制系统通过缸压传感器实时监控燃烧过程,结合模型预测控制(MPC)算法,实现点火提前角与

喷油脉宽的动态修正,确保空燃比恒定在最佳范围。研究表明,应用闭环燃烧控制后,燃烧效率提高3%,积碳生成速率降低25%,燃油经济性与排放性能得到同步优化。

5.3 结构与材料防碳化设计

结构与材料改进在减少高温碳沉积中发挥关键作用。针对燃烧室壁面与气门区热负荷集中的特点,采用低导热涂层技术(如陶瓷氧化铝、氧化锆涂层)可有效降低局部表面温度峰值,减少燃油蒸发残留与焦化反应。对喷油嘴针阀、进气阀及燃烧室顶面进行镀膜或等离子喷涂处理(如DLC或CrN涂层),可显著提高抗附碳能力与润滑稳定性。结构设计上,应优化PCV(曲轴箱通风系统)路径与EGR(废气再循环)流量分配,减少油雾与废气回流至燃烧区,防止油气在阀背面沉积。对于长期运行的发动机,可采用化学清洗与物理除碳相结合的维护方案,如利用氢氧分解清洗或核桃砂喷洗实现阀腔与燃烧室的定期清洁。试验表明,经综合防碳化设计与维护策略应用后,发动机燃烧稳定性提升显著,积碳厚度降低约40%,有效延长了部件寿命并改善了NVH表现,为汽油发动机清洁燃烧与高效运行提供了可靠的技术支撑。

6 结语

汽油发动机缸内积碳问题是影响发动机可靠性、经济性与排放性能的关键因素。研究表明,积碳的生成具有燃料物理化学特性、喷射方式、通风系统与材料热稳定性等多重耦合机制,其治理必须坚持“源头控制、过程优化与周期维护”相结合的思路。本文提出的燃油改性、喷射控制、材料防碳化与智能诊断一体化方案,在实验验证中表现出显著的降碳与提效效果。未来,应在发动机开发阶段引入积碳预测模型与数字孪生仿真,实现从设计端的主动防控。通过整合传感监测、大数据分析与人工智能算法,可构建“自学习—自清洁—自诊断”的智能燃烧系统,为绿色动力技术与高效燃烧控制提供可持续的发展方向。

参考文献

- [1] 常雪嵩,王晨曦,王岩,等.某车辆汽油发动机排气门烧蚀原因分析[J].客车技术与研究,2025,47(01):58-62.
- [2] 刘少飞,秦宏宇.关于喷油器头部积碳对燃油雾化的影响[J].时代汽车,2024,(06):161-163.
- [3] 陈泽健,苏财茂.汽车发动机积碳的成因及处理方法研究[J].机电信息,2024,(02):69-71+75.
- [4] 王法林.浅谈汽车运用中发动机积碳的成因与危害[J].科技风,2020,(20):129.
- [5] 江伟,夏兵.积碳对燃油发动机性能影响分析[J].长春工业大学学报,2020,41(02):180-187.

Difficulties and Countermeasures in the Construction of Work Safety Standardization for Small and Medium-sized Enterprises

Huixing Chen

Lianyungang Xinjiang Environmental Protection Materials Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

As small and medium-sized enterprises (SMEs) play a vital role in China's economy, the construction of standardized safety production in these enterprises has become particularly important. Although the national and local governments have gradually introduced a series of policies to promote the improvement of safety production management in SMEs, they still face numerous challenges in the process of building safety production standards. Issues such as insufficient funding, weak safety awareness, and outdated technologies and equipment significantly hinder the effectiveness of safety management. Therefore, strengthening the standardized safety production construction in SMEs and improving their safety management levels have become key measures for achieving sustainable development.

Keywords

Small and medium-sized enterprises; safety production; standardized construction; technological innovation; safety management

中小企业安全生产标准化建设难点与对策

陈惠星

连云港新江环保材料有限公司，中国·江苏·连云港 222000

摘要

随着中小企业在我国经济中占据重要地位，其安全生产标准化建设显得尤为重要。尽管国家及地方政府逐步出台了一系列政策，促进中小企业安全生产管理水平的提升，但中小企业在安全生产标准化建设中依然面临诸多挑战。资金不足、安全意识薄弱、技术和设备落后等问题严重制约了企业安全管理的有效性。因此，加强中小企业安全生产标准化建设，提升其安全管理水平，已成为实现可持续发展的关键措施。

关键词

中小企业；安全生产；标准化建设；技术创新；安全管理

1 引言

中小企业是我国经济的基础力量，推动着地方经济的发展和就业的稳定。然而，由于多方面的因素，中小企业在安全生产方面普遍存在较为突出的问题，尤其是在安全生产标准化建设方面。中小企业由于资金、技术、人员等资源的限制，往往无法全面建立健全的安全管理体系，也难以进行技术创新和设备更新。与此同时，企业内部安全文化建设相对薄弱，员工的安全意识和技能培训滞后。我国对中小企业安全生产的监管力度虽然逐渐加大，但依然存在许多执行力不足、规范不统一等问题。安全生产是企业可持续发展的基

础，提升中小企业的安全生产标准化水平，不仅能够保障员工的生命安全和企业的生产稳定，也有助于企业提高市场竞争力、增强社会责任感。

2 中小企业安全生产标准化建设的重要性

2.1 提高企业安全管理水平

中小企业的安全管理水平直接影响到企业的生产效率和经营稳定性。随着社会对安全生产要求的日益提高，企业必须加强安全管理，确保生产活动的有序进行。通过实施安全生产标准化建设，企业可以建立健全的安全管理制度，明确各级责任，规范操作流程，使安全管理更加系统化和标准化。企业在落实安全标准的过程中，可以及时发现潜在的安全隐患，采取有效措施进行防控，避免事故的发生。随着安全管理体系的逐步完善，企业的生产效率也能得到提升。安全生产标准化不仅有助于提升企业的管理水平，还能提高员

【作者简介】陈惠星（1979-），男，中国江苏常熟人，本科，工程师，从事多年专注化工安全生产、环保、节能等方面的研究。

工的安全意识,从而创造一个更为安全、稳定的工作环境。通过标准化的管理手段,企业能够不断提高自身的综合管理水平,增强市场竞争力,进而提升企业的综合实力。

2.2 保障员工生命安全与健康

保障员工生命安全与健康是每个企业的责任,也是企业可持续发展的基础。中小企业作为劳动密集型单位,员工的安全问题尤为重要。安全生产标准化建设能够帮助企业建立完善的安全保障机制,确保员工在工作过程中的生命安全。通过标准化的安全操作规程,企业可以有效减少操作不当、设备故障或环境问题导致的安全事故。严格的安全检查和设备维护措施能够最大限度地消除潜在的安全风险,减少工伤事故的发生。此外,员工的身体健康同样需要关注,尤其是在高温、噪音、粉尘等恶劣环境下工作的员工。通过安全生产标准化建设,企业可以为员工提供更加科学的健康保障措施,从而提升员工的工作积极性和忠诚度。最终,企业通过保障员工的生命安全和身体健康,不仅能减少安全事故的经济损失,还能提升企业的社会责任感和形象,促进企业的长期稳定发展^[1]。

2.3 促进企业可持续发展

中小企业的可持续发展不仅仅依赖于资金、技术等硬件条件,还需要依靠强有力的安全保障机制。随着环保政策和社会责任要求的不断加强,安全生产标准化建设已成为企业可持续发展的关键要素。通过实施安全生产标准化,企业能够在确保安全的基础上提升生产能力和技术水平,进而实现长期稳定发展。企业的安全管理标准化不仅有助于减少生产事故的发生,还能够提升企业的社会责任感和公信力。在激烈的市场竞争中,具备较高安全生产标准化水平的企业更容易赢得消费者和合作伙伴的信任,从而获得更多的商业机会和市场份额。通过推动安全生产标准化建设,企业还可以提升资源利用效率,减少因事故和安全问题造成的资源浪费。这些积极影响相互作用,有助于企业走向绿色、可持续发展的道路,推动企业健康稳步前进。

3 中小企业安全生产标准化建设的难点

3.1 资金和资源的不足

中小企业在安全生产标准化建设过程中面临的首要难题是资金短缺。与大型企业相比,中小企业的资金状况通常较为紧张,企业的资源投入有限,难以满足安全生产标准化所需的资金支持。安全生产标准化建设需要大量的资金用于设备更新、技术引进、安全管理系统的建设以及员工的培训等方面。然而,许多中小企业面临资金不足的问题,难以负担高额的建设成本,导致标准化建设进展缓慢。此外,企业缺乏充足的资金还使得其在安全设施建设和安全技术改造方面的投入大打折扣,安全生产的基础设施和技术水平无法得到及时提升。资金短缺不仅影响了企业对安全生产的投入,也制约了企业安全管理能力的提升。企业需要在资金、

资源有限的情况下,采取更加灵活和高效的方式推动安全生产标准化建设,确保不因资金问题影响生产安全。

3.2 安全文化和意识的欠缺

安全文化是企业安全管理的重要组成部分,它直接影响到员工的安全行为和工作态度。很多中小企业在安全文化建设方面投入不足,导致企业的安全生产意识薄弱,管理层和员工普遍缺乏对安全生产的高度重视。部分企业的管理层对安全生产的认知不够深刻,未能将安全生产纳入企业发展的核心内容,导致安全管理体系不健全,安全标准化建设推进缓慢。在员工层面,部分员工缺乏必要的安全生产知识和意识,对工作中的潜在危险因素缺乏足够警觉,容易发生事故。企业的安全文化建设不仅要提升管理者的安全决策能力,还需要加强员工的安全教育和培训,培养员工的安全生产意识,使其能够在工作中自觉遵守安全操作规程,减少人为失误带来的安全隐患。

3.3 技术和设备的落后

中小企业由于资金投入不足,技术和设备的更新改造较为滞后,导致其在安全生产标准化建设中的技术基础较为薄弱。许多中小企业仍然使用传统的生产设备,缺乏符合现代安全标准的安全防护设备。老旧的设备不仅容易出现故障,而且安全防护功能不全,无法有效避免生产过程中可能出现的安全风险。与此同时,企业在安全管理方面缺乏先进的技术支持,无法及时掌握和应用最新的安全管理技术和设备,导致其安全生产水平滞后。技术和设备的落后使得企业在开展安全生产标准化建设时面临巨大的困难,难以实现生产过程的全面安全保障。因此,中小企业必须加大对技术创新和设备更新的投入,引入先进的安全生产技术,提升设备的安全性能,从而为安全生产标准化建设提供技术支持^[2]。

3.4 人员培训和管理不足

中小企业普遍存在人员培训和管理不足的问题,安全生产的知识和技能培训缺乏系统性和针对性。很多中小企业没有完善的员工安全培训机制,导致员工对安全生产的认知水平较低,未能掌握必需的安全操作技能。企业也往往没有专门的安全管理团队,导致安全生产管理工作缺乏专业性和系统性。在实际操作中,员工容易忽视安全操作规程,导致安全事故的发生。企业需要加强对员工的安全生产培训,提高其安全操作技能,强化员工的安全意识和应急处理能力。此外,企业还需要配备专业的安全管理人员,通过科学的管理手段提升安全管理水平,确保安全生产标准化建设能够顺利实施。

4 中小企业安全生产标准化建设的对策

4.1 加大资金投入和政策支持

中小企业在安全生产标准化建设中的资金不足问题亟待解决。政府可以出台更多优惠政策,提供专项资金支持,帮助中小企业承担安全生产设施的改造和技术创新所需的

资金。特别是对有潜力的中小企业,政府可以通过低息贷款、财政补贴、税收减免等手段,为其提供必要的资金支持,降低其资金压力。此外,企业应根据自身实际情况,加强与金融机构的合作,探索金融支持的多样化途径,争取更多的金融贷款。通过加大资金投入,企业能够在安全生产方面进行更多的技术引进与设备更新,提高生产过程的安全性。随着资金保障的改善,企业可以更有信心进行全面的安全生产标准化建设,提升其整体安全管理水平。企业还应建立安全生产专项资金管理机制,确保资金的合理使用,避免因资金不足而导致标准化建设停滞或进展缓慢^[3]。

4.2 提升安全管理意识与文化

安全生产标准化的实施离不开企业全员的共同努力,尤其是管理层对安全生产的高度重视。中小企业必须从上到下提升安全管理意识和安全文化,形成全员参与、全员重视的良好氛围。管理层应当定期组织安全生产培训,开展安全生产宣传活动,使员工深刻理解安全管理的重要性。安全文化的培育不仅体现在日常管理中,还要通过企业文化的建设,使安全成为企业文化的重要组成部分。企业可以通过建立安全奖惩制度、设立安全文化活动等方式,激励员工积极参与安全管理工作,提高员工的安全责任感。通过文化的引导,员工能够自觉遵守安全规章制度,并在工作中不断提高安全操作技能。只有当企业上下都形成了强烈的安全生产意识,安全生产标准化建设才能落到实处,保障企业的长远发展。

4.3 强化技术创新与设备更新

技术创新和设备更新是提升中小企业安全生产标准化建设的重要举措。随着科技的发展,新的安全管理技术不断涌现,企业应当积极跟进,应用最新的技术手段来提高安全管理水平。企业可以根据自身的实际情况,引入智能化、数字化的安全生产管理系统,实时监控生产环境中的安全数据,预防事故的发生。例如,通过物联网技术,企业可以实时监测设备运行状况,及时发现设备故障,防止事故的发生。设备的更新同样不可忽视,老旧的设备容易出现故障,增加事故发生的风险。企业应定期对设备进行检查与更新,淘汰陈旧设备,使用符合安全标准的新型设备。技术创新和设备更新不仅能够提升企业的生产效率,还能有效避免人为失误带来的安全隐患,为中小企业的安全生产提供技术

保障。

4.4 夯实员工安全培训与技能提升

员工是安全生产的直接参与者,提升员工的安全技能和操作水平至关重要。企业应当建立完善的员工安全培训体系,定期开展安全教育和应急演练,提高员工对安全生产的认知和应对突发事件的能力。安全培训不仅要包括基本的安全知识,还应关注具体的操作技能,确保员工能够熟练掌握安全操作流程,防止因操作不当导致的事故。企业可以通过多样化的培训形式,如现场教学、在线学习、模拟演练等,提高培训的效果和参与度^[4]。与此同时,员工应当接受持续性的技能提升,保持与行业标准同步。定期的培训和技能考核能够有效提高员工的安全操作水平,降低安全事故的发生率,确保安全生产标准化建设取得实效。此外,企业还应通过设立岗位安全责任制,明确每个岗位的安全职责,激励员工主动参与安全管理工作,增强员工的安全责任感。

5 结语

中小企业在安全生产标准化建设过程中面临诸多挑战,但这一工作对企业的长远发展至关重要。通过加强资金投入、提升安全管理意识、强化技术创新和设备更新,以及夯实员工安全培训,企业可以有效应对当前的难点,提升整体安全管理水平。安全生产标准化建设不仅有助于保障员工生命安全、提高企业安全管理能力,还能够促进企业的可持续发展。随着政策支持力度的不断加强和企业管理水平的逐步提高,安全生产标准化将成为中小企业实现高质量发展的重要保障。企业应持续推动安全生产工作,全面提升生产环境的安全性,减少事故发生率,保障员工健康,增强社会责任感,从而为企业的未来发展打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 程业宝.安全生产双重预防机制在中小企业的实践困境与对策[J].湖北应急管理,2025,(21):66-67.
- [2] 陈梦洁.中小企业安全生产标准化建设面临的问题与对策分析[J].上海安全生产,2025,(07):61-63.
- [3] 甘志航,黄榆程.汲取事故教训强化中小企业安全生产管理的思考——基于重庆市两起典型事故的启示[J].中国减灾,2025,(11):58-59.
- [4] 周怡萌.四川省P园区中小企业安全生产监管的问题与对策研究[D].导师:詹恂;廖治刚.电子科技大学,2025.

Production process and cost control of potassium nitrate for agriculture by ammonium nitrate double decomposition method

Wenguo Shi

Yunnan Ouroham Fertilizer Technology Co., Ltd., Luliang, Yunnan, 655600, China

Abstract

The production equipment, process and process of potassium nitrate for agriculture by ammonium nitrate double decomposition method were upgraded and optimized. Raw material potassium chloride and ammonium nitrate ratio, concentration and production system concentration, temperature adjustment test summed up the ideal operation control point, During the test, the process and equipment were optimized to achieve stable and high yield, and the product quality was 100% first grade. Energy consumption reduced to 1.2 tons of steam per ton of potassium nitrate, 100 KWh of electricity, Raw material consumption per ton of potassium nitrate consumption of 750kg, 820kg ammonium nitrate

Keywords

potassium nitrate for agriculture; ammonium nitrate; potassium chloride; double decomposition; optimization

复分解法生产农业用硝酸钾工艺与成本控制

石闻国

云南欧罗汉姆肥业科技有限公司, 中国·云南 陆良 655600

摘要

通过对硝酸铵复分解法生产农业用硝酸钾的工艺进行系统性升级, 重点对关键生产设备实施了优化与更换。在深入试验的基础上, 对原料氯化钾与硝酸铵的投料配比、溶液浓度及系统整体浓度、温度等核心工艺参数进行了精细调整, 确立了理想的操作控制点。此次改造有效稳定并提升了生产效率, 实现了稳产高产目标。产品质量得到显著保障, 达到100%一等品标准。同时, 能耗与物耗显著降低, 最终实现每吨硝酸钾产品仅消耗蒸汽1.2吨、电力100千瓦时, 原料消耗则稳定在氯化钾750千克、硝酸铵820千克的先进水平。

关键词

农业用硝酸钾; 硝酸铵; 氯化钾; 复分解; 优化

1 引言

为提升生产效能与产品质量, 通过对10万吨/年农业用硝酸钾生产线进行全面升级, 系统优化了设备配置、工艺流程及控制方法。该生产线采用自主开发的85%硝酸铵水溶液与氯化钾为原料, 运用液相复分解全循环真空蒸发降温工艺, 替代传统夹套、风冷降温方式, 并引入一效、二效、三效蒸发系统, 部分设备采用钛材, 显著杜绝跑、冒、滴、漏现象, 降低能耗, 实现环保低碳生产。根据设计标准, 每吨农用硝酸钾的原料消耗指标为: 62%氯化钾的氯化钾0.76吨, 100%硝酸铵0.83吨。然而实际生产中的消耗量长期高于设计值。为此, 通过系统调整原料配比、浓度, 并结合生

产系统整体浓度与温度开展系列试验, 同步优化工艺流程并更换部分设备, 最终总结出理想的生产工艺参数、操作控制方法与关键控制点。

2 硝酸铵法生产农用硝酸钾工艺

硝酸钾与氯化铵的生产系统构成两个相互关联的工艺回路。具体而言, 在硝酸钾回路中, 30%氯化钾溶液与返回的氯化铵母液混合, 经闪蒸器及结晶器进行真空蒸发与降温冷却, 析出硝酸钾晶体; 晶体随后经稠厚器沉淀及自然离心机分离, 再经流化床干燥至水分含量低于0.5%, 得到成品硝酸钾。分离硝酸钾后的母液则与85%硝酸铵溶液混合, 进入氯化铵回路。在氯化铵回路中, 混合液经三效蒸发系统浓缩后, 同样通过闪蒸器与结晶器进行真空蒸发降温, 使氯化铵结晶析出; 晶体经稠厚器沉淀及离心分离后, 作为产品直接输出(无需干燥)。分离氯化铵后的母液返回至硝酸钾

【作者简介】石闻国(1970-), 男, 中国云南陆良人, 工程师, 从事化工生产管理研究。

回路循环使用，形成连续闭路循环^[1]。相较于传统小规模间歇式生产方式，本生产线通过优化物料输送与工艺控制，实现了硝酸铵溶液与硝酸钾母液按设定比例连续、均匀地投入

氯化铵回路，同时氯化钾溶液与氯化铵母液亦连续、稳定地进入硝酸钾回路，从而建立起高效、连续的联合生产工艺。

工艺流程见图 1。

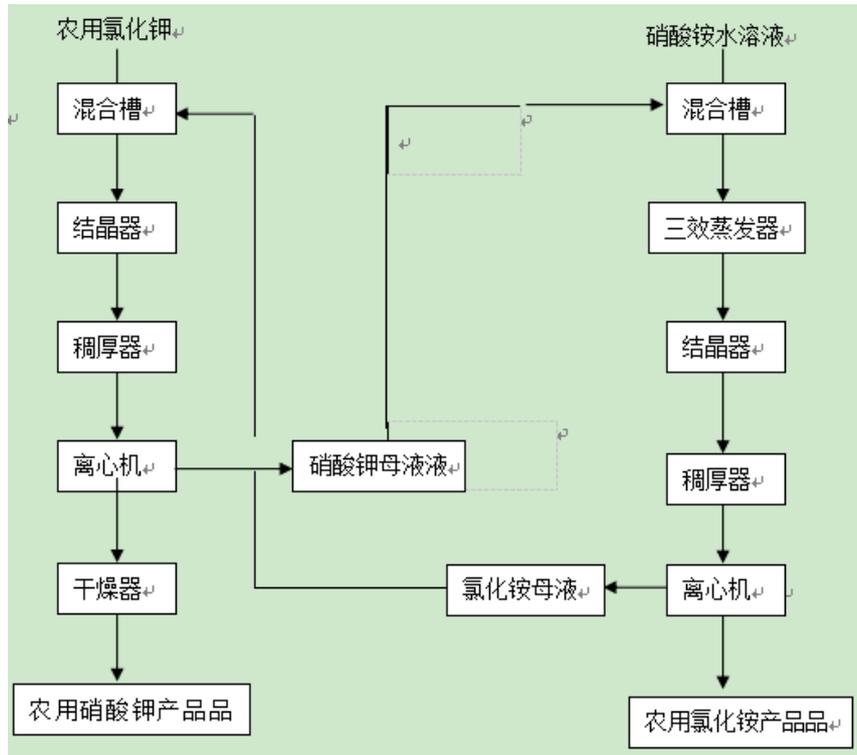


图 1 工艺流程图

3 氯化钾、硝酸铵消耗试验

按国家标准《农业用硝酸钾》GB/T20784-2018 标准要求硝酸钾一等品指标为 K₂O 的质量分数 ≥44.5%，总 N 的质量分数 ≥13.5%。

3.1 硝酸钾产品中氧化钾和总氮含量变化与原料消耗试验数据对比

表 1 每 1 吨硝酸钾消耗硝酸铵、氯化钾试验结果

K ₂ O %	硝酸铵消耗量 /kg			氯化钾消耗量 kg
	总 N 含量 13.5%	总 N 含量 14%	总 N 含量 14.3%	
44.5	819.36	822.12	826.27	746.35
44.8	822.23	824.23	828.39	751.29
45	823.87	826.17	830.16	755.10
45.3	826.02	828.28	832.08	760.09

由表 1 可见，K₂O 含量从 45.3% 下降到 44.5%、总 N 由 14.3% 下降到 13.5%，每吨硝酸钾产品氯化钾消耗节约了 13.74Kg，硝酸铵消耗节约了 12.72Kg。生产过程中优化氯化钾和硝酸铵的配给使硝酸钾产品得到一等品即可，降低产品成本。

3.2 氯化铵产品中氧化钾含量的变化与原料消耗试验数据对比

由表 2 可见，K₂O 含量从 5% 下降到 2% 的时候每生

产一吨硝酸钾，可降低氯化钾消耗 29.9Kg，可降低硝酸铵消耗 34.3Kg。

表 2 每 1 吨农业用硝酸钾消耗硝酸铵、氯化钾试验结果

K ₂ O 含量 %	硝酸铵消耗量 Kg	氯化钾消耗量 Kg
2	798.35	735.79
3	819.89	749.97
5	832.65	765.69

由此可看出氯化铵中 K₂O 的含量对原料消耗影响最大，生产中要以控制氯化铵中的 K₂O 含量为原料消耗的关键控制点。

4 硝酸钾、氯化铵结晶温度分析

从多相图图 2 可以看出，如图中 a 点，当温度为 0℃ 时 a

点位于 KNO₃ 的结晶区，冷却时 KNO₃ 将结晶析出，溶液组成点沿 KNO₃-a 结晶射线移动，直至与 0℃ 的等温线相交于 b 点。若将分离出 KNO₃ 结晶后组成为 b 的溶液在 60℃ 下蒸发，由于在 60℃ 下 b 点属于 NH₄Cl 结晶区，随着水分的减少 NH₄Cl 将析出^[2-3]。也就是说温度越低硝酸钾结晶区越大，溶解度越小，生产操作中硝酸钾结晶器冷却温度越低硝酸钾的结晶量越大，但是温度降的越低降温成本越高并且硝酸钾中氯离子会增高，经试验硝酸钾大量析出的

温度范围在 30--40 ℃。结合上述情况经试验加生产实践论证硝酸钾结晶器冷却温度控制在 20—23℃最为经济。

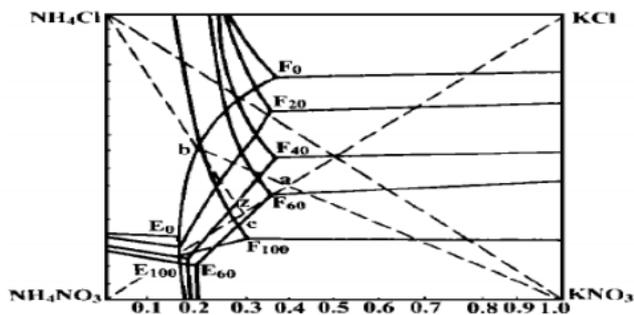


图 2 KCl-NH₄NO₃ KNO₃+NH₄Cl 系统溶解多相图

氯化铵结晶量随着结晶温度的下降而增加同时氯化铵中 K₂O 的含量也将增加，如果温度继续下降至 50℃以下这个情况更明显，因为他已经交叉了硝酸钾结晶区。如果温度上升到 70℃以上氯化铵结晶量就很少了，结合上述情况经试验加生产实践论证氯化铵冷却结晶温度控制在 57—60℃最为经济，即考虑了氯化铵产量也考虑了氯化铵中 K₂O 的含量也兼顾了系统稳定性。

5 生产过程关键控制点

在硝酸钾与氯化铵联合生产体系中，KCl、NH₄NO₃、KNO₃ 和 NH₄Cl 在系统内依不同温度条件共存并处于动态平衡。各组分在不同温度下的结晶行为由其溶解度决定，其结晶速率与析出量直接受系统内溶液浓度的影响，即与溶液的

过饱和度密切相关。为维持生产过程的稳定性，关键在于对系统浓度进行有效控制。实际生产中，通常采用测定波美度或溶液比重的方法，作为监测与调节系统浓度的重要手段。

提升生产线系统自动化程度确保原料氯化钾溶液、硝酸铵溶液浓度稳定。

提升生产线系统自动化程度确保流量稳定，特别是原料氯化钾溶液、硝酸铵溶液和母液的流量稳定，根据系统含量勤于计算调整两种原料与两种母液的投入量。

提升生产线系统自动化程度确保硝酸钾结晶器温度、氯化铵结晶器温度稳定。

加强稠厚器、离心机管理，随时检查稠厚器沉淀情况，避免硝酸钾细小晶体带到氯化铵系统也避免氯化铵细小晶体带到硝酸钾系统，硝酸钾系统、氯化铵系统均采用稠厚器自然连续沉淀然后离心机分离，不用人工倒罐清理，改变了大多数工厂氯化铵结晶要经过过滤网过滤然后清水洗涤再离心机分离，降低了水的补充量降低了能耗也降低了人工成本，随时检查离心机筛网情况确保筛网完好，根据逃晶情况定期测量筛网间隙。

参考文献

- [1] 张罡,沈晃宏.复分解循环法生产硝酸钾工艺设计.无机盐工业[J].1996(5).
- [2] 王向荣.化肥生产的相图分析[M].北京:化学工业出版社,1977:215-233.
- [3] 苏裕光,王向荣.无机化工生产相图(二)化学肥料[M].北京:化学工业出版社,1992:71-78.44-46.

Research Progress of Precision Machining Technology for High Temperature Alloys: From Traditional Cutting to Special Machining Challenges and Prospects

Shuhao Zhao¹ Chang Li¹ Yinan Zhao² Xing Han^{1*}

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

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract

High-temperature alloys are extensively utilized in aerospace and gas engines, yet their exceptional machinability challenges impose stringent requirements on processing efficiency and surface integrity. This review synthesizes the latest advancements in conventional and specialized machining technologies—including mechanical, grinding, electrolytic, EDM, and arc machining—conducting comparative analyses of material removal, processing quality, and application scenarios. The findings demonstrate that grinding excels in precision forming but is heat-sensitive; electrolytic machining eliminates mechanical stress but is constrained by flow field limitations; EDM demonstrates strong structural adaptability but generates recast layers; while arc machining achieves high efficiency but suffers from insufficient surface stability. Current challenges primarily involve multi-physical field coupling mechanisms and surface integrity preservation. Future research will focus on elucidating machining mechanisms to establish unified quality standards.

Keywords

superalloy; precision machining; special machining; surface integrity; intelligent manufacturing

高温合金精密加工技术研究进展：从传统切削到特种加工的挑战与展望

赵书豪¹ 李昌¹ 赵一楠² 韩兴^{1*}

1. 辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

2. 华中科技大学, 中国·湖北武汉 430074

摘要

高温合金在航天与燃气中有广泛应用, 但其显著的难加工性, 对加工效率、表面完整性提出更高要求。本文综述了机械加工、磨削加工、电解加工、电火花加工和电弧加工典型传统与特种加工技术的最新研究进展, 从材料去除、加工质量及适用场景等方面进行了比较。结果表明, 磨削加工精密成形但易受热影响; 电解加工无机械应力但受流场制约; 电火花加工结构适应性强但存在重铸层; 电弧加工效率高但表面稳定性不足。当前挑战主要集中在多物理场耦合机理及保持表面完整性。未来将探寻加工机理以构建统一的质量标准。

关键词

高温合金; 精密加工; 特种加工; 表面完整性; 智能制造

1 引言

进入 21 世纪以来, 中国工业体系正由 "大规模制造" 向 "高质量制造" 与 "自主可控" 加速迈进。航空发动机、燃气轮机、航天动力装置以及核能涡轮系统普遍在高温、高速、强腐蚀环境下工作, 其核心部件需要优异的性能。以镍

基高温合金为代表的材料, 因其高工作温度、出色的抗氧化和抗腐蚀特性, 成为此类关键热端部件的主导材料^[1]。

然而, 高温合金的复杂组织结构和强化机制, 如 γ' 强化相、碳化物分布等, 虽然提升了其服役性能, 但也直接导致了难加工性, 如工具磨损率高、表面质量差、残余应力大等问题。

因此, 在中国推进 "先进制造 + 智能制造" 背景下, 解决高温合金高质量高效率加工问题, 具有重要战略意义。有必要系统梳理国内外在高温合金加工方面的研究现状与技术进展。

【作者简介】赵书豪 (2005–), 男, 中国山西大同人, 本科, 从事机械、特种加工研究。

【通讯作者】韩兴 (1982–), 女, 中国辽宁人, 硕士, 副教授, 从事机械工程研究。

2 传统加工技术研究现状

2.1 机械加工

机械加工作为最传统的材料去除方式，是现代制造体系的基础工艺之一。早期的机械加工主要依靠车、铣、镗等基本切削方式，通过刀具与工件的相对运动去除材料。随着机床结构与刀具材料的不断发展，机械加工逐渐从手工操作走向数控化、自动化，实现了稳定的尺寸加工能力和较高的表面质量，为复杂零件的大规模制造奠定了基础。

进入数控与高速加工时代后，机械加工具备了多轴联动、高转速主轴与更强的热稳定性，能够加工整体叶片、薄壁件和高曲率面等复杂结构。刀具材料和涂层体系不断升级，使机械加工在应对高温合金等难加工材料时有更高的加工效率和更好的切削稳定性。同时，切削参数优化、振动抑制和误差补偿技术的应用，使机械加工的精度与一致性不断提升。

2.2 磨削加工

磨削加工是一种利用高速旋转磨料对工件表面进行微切削、实现材料去除的加工方法。自第一台磨削机床问世以来，该技术迅速发展，目前在机械制造业中约占40%的应用比例，成为现代制造体系中不可或缺的重要环节。随着新材料发展、结构设计革新、计算机技术与现代控制理论相结合，磨削技术不断向高效、低损伤和超精密方向演进，并衍生出多种适应不同工件特性的磨削方式，广泛用于金属、陶瓷、复合材料及非金属材料的粗加工与精加工。与此同时，磨削装备也由传统单功能机床发展为多轴联动的智能化复合装备，展现出更广的工业应用潜力^[2]。

砂带磨削因其散热充分，能有效降低工件表面温度，减少热损伤。相关研究提出了描述涂层磨料砂带特性的参数体系，揭示了不同粒度砂带加工不同材料时的表面质量差异。有学者提出基于离散元素的自由曲面表示方法，实现了磨削过程的实时仿真与可视化，可有效预测复杂曲面的磨削误差^[3]。机器人砂带磨削技术也逐渐成熟，通过高精度力控及姿态校准，可提升复杂曲面的磨削质量。

在超精密磨削方面，研究者利用多轴超精密磨削设备，通过球形砂轮平行磨削技术成功加工出长径比较大的保形光学内表面；提出了斜轴磨削方法，通过倾斜磨削主轴实现小直径砂轮对深腔凹面的有效加工；同时构建了球形砂轮平行磨削系统，实现了大尺寸蓝宝石光学整流罩内外表面的超精密加工，并对高陡度磨削过程中的砂轮磨损行为进行了系统分析，成功加工出高精度光学内表面及微型非球形结构，展示了磨削在复杂、微结构制造领域的潜力。

3 特种加工技术研究现状

3.1 电解加工

电解加工（ECM）是一种基于电化学阳极溶解原理的无接触加工方法，利用工件作为阳极在电解液中发生溶解，实现材料去除。该方法的重大优势在于加工过程中无机械应力

和热影响区，工具电极磨损极小，特别适用于高温合金复杂曲面和精密结构的加工，如航空发动机叶片和整体叶盘^[4-5]。因电解加工的材料去除率较低，且易受电解液流场和间隙控制的影响，导致非目标腐蚀问题较为突出。近年来，研究者们通过优化电极设计、脉冲控制和辅助介质等方式显著提升了其加工精度和效率。

在深小孔加工领域，研究分析了电压、脉宽等参数对材料去除效率的影响，通过参数优化实现了孔壁均匀性和圆度的改善。工业上已构建了用于整体叶片的生产线。国内团队创新性地提出“旋印电解加工”工艺，成功应用于高凸台回转体零件加工。

群孔结构电解加工是另一重要分支，包括掩膜电解和管电极电解两种形式，已广泛用于多孔结构件的制造^[6]。射流电解加工则通过高速电解液射流形成局域反应区，实现局部材料去除，避免了传统浸没式加工的非目标腐蚀。通过引入气膜屏蔽、同轴喷吸等技术，进一步提升了射流电解的可控性与加工质量。

总体而言，电解加工在高温合金精密成形方面取得了显著进展，尤其在微结构和曲面加工的自由度上，但仍需进一步解决电解液腐蚀控制和多场耦合模拟的挑战，以实现更高效的工业化应用。

3.2 电火花加工

电火花加工（EDM）通过阴阳极间介质击穿形成的瞬态放电通道，将电能转化为热能熔化并抛出材料，实现无接触去除。该方法适用于高温合金的复杂腔体和微孔加工，具有高精度和低工具损耗的特点，但加工速度较慢，且易产生重铸层和热影响区^[7]。近年来，研究焦点转向介质优化、电极设计和辅助冷却，以平衡效率与表面完整性。2023-2025年间，EDM的建模、优化和可持续性方面取得了关键进展，特别是在AI驱动的模拟和绿色介质的应用上。

有研究发现提高峰值电流和脉宽可提升材料去除率，但会影响表面粗糙度。

3.3 电弧加工

电弧加工利用电极与工件间电离形成的等离子体通道产生高温热源，实现材料瞬态熔融与高效去除。该方法以高材料去除率著称，适用于高温合金的粗加工，但易导致重铸层厚和表面不均。研究在冲液环境中实现了高去除率，验证了电弧放电的高效性。国内提出了电熔爆加工技术，通过强电流快速熔化材料并在高速工作液冲击下爆裂，与传统方法相比优势明显。电弧车削可获得较大的单边切深和极高的去除率。国内多所大学团队在短电弧铣削、不同介质与极性影响、高效放电机理等方面开展了系统性研究，构建了相应机床平台与仿真模型^[9-10]。通过结合超声振动、磁场辅助、机械-流体耦合断弧等技术，逐步提升了加工稳定性和表面质量。电弧加工在效率提升和稳定性控制上取得了突破，但多场耦合机理的深入研究仍将决定其向精密复合加工的演进潜力。

4 当前挑战与问题分析

尽管磨削加工、电火花加工和电弧加工在高温合金制造领域取得了十分显著的进展,但整体加工体系仍面临多方面挑战。首先,高温合金在高强度、高硬度及复杂组织结构共同作用下,呈现出强烈的难加工性。在磨削加工中,局部高温导致砂轮磨粒发生磨钝、脱落或结合剂热损伤,使加工过程出现热裂纹、烧伤和表层组织异常;在深切削或高效磨削下,工件表面残余拉应力和微裂纹对零件疲劳寿命构成威胁。

电火花加工方面,其放电本质决定了重铸层、微裂纹及热影响区不可避免。尽管近年来通过优化介质、电极结构及脉冲参数可在一定程度上改善表面质量,但重铸层去除、放电稳定性和材料去除效率之间仍存在难以兼顾的矛盾。特别是在复杂腔体加工中,碎屑排出困难、放电间隙波动及电极损耗均会引起轮廓畸变甚至加工中断。

此外,多数加工方法的工艺窗口较窄,加工参数优化依赖经验与反复试验,而多物理场模型尚不完善,使得加工过程难以实现预测性与可控性。更为重要的是,在中国航空发动机和高端装备制造加快自主化突破的背景下,高温合金产量与需求量之间长期存在较大缺口,使得加工过程中的材料利用率、表面完整性与最终服役寿命成为影响产业竞争力的关键因素。现阶段难以在工程应用中实现高效率、高一致性与可复制的稳定加工能力,使复合加工技术的发展不仅是学术问题,更是制约产业链高端制造能力提升的核心瓶颈。高温合金材料昂贵,加工中产生的边界损伤、过切、报废风险直接推高制造成本。在当前高端装备快速发展的背景下,如何提升加工效率、表面完整性与尺寸一致性,仍是制约产业化应用的核心问题。

5 发展趋势与未来展望

面向航空发动机、燃气轮机及先进能源装备的高温合金加工需求,未来加工技术的发展趋势主要体现在以下三个方向。

首先,在机理研究层面,需要进一步深化多物理场耦合模型,通过建立包含温度场、应力场、流场与放电行为的综合模型,阐明磨削热损伤、电火花放电成坑、电弧等离子体作用下材料熔融与再凝固过程的本质机制。通过提高机理模型的可预测性,可为工艺窗口设定、参数优化及表面完整性控制提供理论支撑。

其次,在工艺装备与控制方面,加工过程将逐步从“经验调节”向“智能控制”转变。高速磨削设备、电火花智能电源、电弧功率模块与温度监测、力信号、放电电压电流等实时数据结合,形成闭环调控系统。借助数字孪生技术,可实现加工状态预测、参数自动优化和表面质量预判,提高加工稳定性并减少试切成本。

再次,在工艺体系建设方面,高温合金表面完整性要求将促使研究从传统“去除材料”转向对“组织演化与性能保持”的关注。针对磨削过程的热效应、电火花的重铸层产

生、电弧加工的放电形貌演变,应建立表面完整性评价指标体系,包括表层晶粒细化、残余应力分布、微裂纹抑制及成分再分布规律,为加工质量量化与标准化提供依据。

6 结语

高温合金作为航空发动机、燃气轮机及耐高温构件的关键材料,其优异的力学与化学稳定性也使其成为典型的难加工材料。当前,磨削加工、电火花加工和电弧加工分别在精密加工、高深径比结构成形和高效粗加工方面发挥着不可替代的作用,但各项技术在加工效率、表面完整性和参数可控性方面仍存在明显限制。

磨削加工虽能获得较高的尺寸精度和低粗糙度,但易产生热损伤与工具磨损;电火花加工适用于微结构与复杂腔体,但表面重铸层及加工速度难以完全满足工程化需求;电弧加工具备极高的去除率,却受到表面质量波动和放电不稳定的制约。现阶段,对多物理场耦合规律、界面材料行为及加工过程反馈控制的研究仍不足,使得工艺设计依赖经验、加工窗口狭窄。

未来,通过深化机理模型、完善智能调控系统及构建标准化的表面完整性评价体系,可推动高温合金加工从经验驱动走向模型驱动与智能制造,提高工效率与一致性。随着理论认知和装备能力不断提升,高温合金加工技术将为中国高端装备的自主制造与可靠服役提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] Zhang L X, Shi J M, Li H W, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of ZrB₂SiCC ceramic and GH99 superalloy joints brazed with a Ti-modified FeCoNiCrCu high-entropy alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 97: 230-238.
- [2] 张兵,何泽,刘淑秀,等.浅谈砂带磨削技术在工程机械行业的应用[J].*物流工程与管理*,2010,32(06):168-169.
- [3] Weinert K ,Blum H ,Kuhlenkötter B , et al.New methods for calculating the force distribution w-ithin belt grinding processes.[J]. *Production Engineering*,2007,1(3):285-289.
- [4] 袁奎.轧辊用M42高速钢电解加工阴极优化设计及极间间隙检测方法研究[D].贵州大学,2022.
- [5] 李晶.二维旋转超声辅助磨削-电解除电展成加工机理及试验研究[D].扬州大学,2022.
- [6] 李红英,张明岐,冯健,等.照相电解加工技术的发展与应用[J].*航空制造技术*,2015,(Z2):57-60.
- [7] 单题元.钛合金电火花加工工艺及加工机理研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [8] Wang X ,Liu Z ,Qiu M , et al.Mechanism of Electrical Discharge Machining Ablation[J].*Materials and Manufacturing Processes*,2014,29(11-12):1367-1373.
- [9] 梁楚华,朱志坚,杨明洁.电熔爆技术发展现状及展望[J].*现代制造工程*,2004,(01):98-100.
- [10] 吴国庆,廖萍,汪希平.电熔爆机床的噪声和电磁辐射测控研究[J].*电加工与模具*,2003,(06):29-31+70.

Macro Programming for Machining Ladder Thread Based on FANUC0i-TD CNC System

Pu Zhang Xudong Qin Kai Li Jiahao Yang Xiao Zhang

Shaanxi Construction Machinery Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

As a widely used transmission thread in mechanical engineering, trapezoidal threads are extensively applied in machine tool lead screws and screw jacks. These threads offer advantages such as high transmission efficiency and strong load-bearing capacity. However, their machining process remains challenging, requiring advanced techniques and specialized tools. With the advancement of CNC technology, macro-program machining has demonstrated unique advantages in trapezoidal thread processing, effectively enhancing both precision and efficiency. Moreover, a thorough understanding of the relationship between helix angle and tool selection is crucial for optimizing the machining process and extending tool life. Therefore, comprehensive analysis of trapezoidal thread machining techniques holds significant practical value^[1]. Taking the MJ-520 CNC lathe from Jinan No.1 Machine Tool Factory as an example, this paper introduces an efficient macro-program-based machining method for trapezoidal threads using the FANUC0i-TD CNC system. By programming variable parameters to control layered cutting depth and tooth profile feed trajectories, the method achieves integrated roughing and finishing operations, significantly improving thread surface quality, pitch accuracy, and machining efficiency. This approach provides valuable references for batch processing of similar transmission components.

Keywords

trapezoidal thread; NC programming; macro program; layered cutting

基于 FANUC0i-TD 数控系统利用宏程序加工梯形螺纹

张普 秦旭东 李凯 杨嘉豪 张肖

陕西建设机械股份有限公司, 中国·陕西 西安 710200

摘要

梯形螺纹作为一种常见的传动螺纹, 在机械领域中应用广泛, 如机床的丝杠、螺旋千斤顶的螺杆等。其具有传动效率高、承载能力强等优点。然而, 梯形螺纹的加工难度较大, 对加工工艺和刀具要求较高。随着数控技术的发展, 数控宏程序加工在梯形螺纹加工中展现出独特的优势, 能够有效提高加工精度和效率。同时, 深入理解螺旋升角与刀具的关系, 对于优化加工过程、延长刀具寿命至关重要。因此, 对梯形螺纹加工工艺进行全面分析具有重要的现实意义^[1]。本文以济南第一机床厂 MJ-520 数控车床为例, 介绍基于 FANUC0i-TD 数控系统, 利用宏程序实现梯形螺纹的高效加工方法: 通过变量编程控制分层切削深度、牙型进给轨迹, 实现粗、精加工一体化, 显著提升螺纹表面质量、螺距精度及加工效率, 为同类传动件的批量加工提供参考。

关键词

梯形螺纹; 数控编程; 宏程序; 分层切削

1 零件图分析

现以如图 1 所示的零件为例

如图 1 所示, 梯形螺纹是 Tr80 × 12。可以算车需要的一些数据信息。

牙高: $0.5 \times 12 + 0.5 = 6.5$

牙底宽: $0.366 \times 12 - 0.536 \times 0.5 = 4.124$

螺纹小径: $80 - 6.5 \times 2 = 67$

中径: $80 - 0.5 \times 12 = 74$

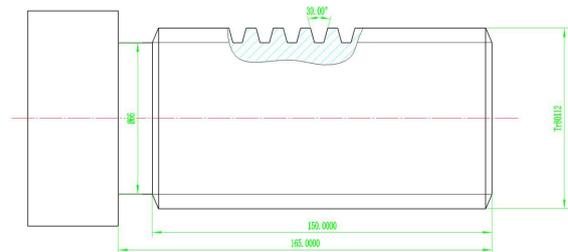


图 1 梯形螺纹零件图

2 加工思路解析

说到刀具轨迹分析, 定位点非常重要, 就是如何定位牙型上的点, 这里的定位点不是我们平常所说的“安全距

【作者简介】张普(1981-), 男, 中国陕西西安人, 高级工程师, 从事机械加工研究。

离”，而是把牙型的点定位出来。要加工梯形螺纹只要在安全距离处，先定位好“齿形”的形状，然后依次用G32车削。如图2（1）部分所示：

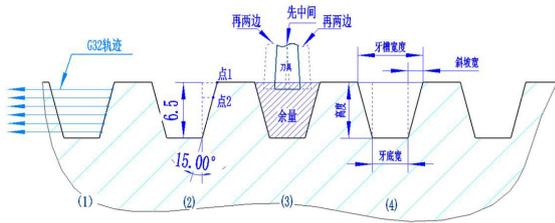


图 2

这些点如何求？其实所有牙型螺纹都可以通过三角函数求得。通过图2（2）部分可以得知，当完成两条辅助线时，形成了直角三角形，这样每个点就可以利用正切三角函数算出。“15°”是个定量值，而点的位置是随着高度的变化而变化的，宏程序编程就是变量编程，这里可以用一个变量表示高度。由图2（4）部分可以发现，牙槽的宽度与牙底宽、斜坡宽存在一个等式关系：牙槽宽度 = 牙底宽 + 2 × 斜坡宽。实际编程中真正的牙槽宽度应该是：牙底宽 + 2 × 斜坡宽 - 刀具宽度^[2]。

“点”的问题解决了，还需要解决一个重要问题——粗加工。如果只是按照牙型来走的话，那么轨迹只是精加工轨迹，不能直接用于加工。粗加工一般分为直进法、斜进法和左右借刀法。本文主要用切槽刀加工所以只能采用左右借刀法，如图2（3）部分所示。此方法有两个优势：一是X方向进刀少刀具损耗小节约刀具成本，二是在Z向赶到时，会以刀宽的90%长度作为赶刀量而提高加工效率。

3 刀具及刀具注意事项

刀具选用3mm的直槽刀。用直槽刀加工梯形螺纹时，需围绕螺旋升角适配、刀具角度校准、旋转后刀宽变小三个核心问题解决，具体注意事项及方案如下：

螺旋升角的选择与判断（是否需要转动刀具）

螺旋升角（ λ ）是决定刀具是否需转动的关键，其本质是避免刀具主后刀面与工件螺纹牙侧发生干涉，同时保证牙型精度。图3为螺旋升角展开图，由图可算出螺旋升角： $\lambda = \arctan(P / (\pi \times d_2))$ 。

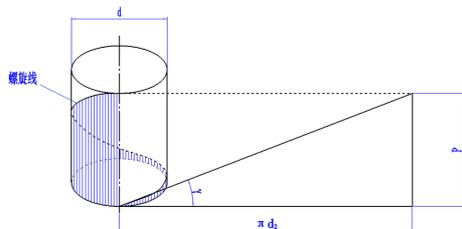


图 3

判断标准：

当 $\lambda \leq 3^\circ$ 时：螺纹升角小，干涉风险低，无需转动刀具，直接按直槽刀常规方式装夹即可。

当 $\lambda > 3^\circ$ 时：必须转动刀具，否则主后刀面会与工件剧烈摩擦，导致刀具磨损、螺纹表面粗糙，甚至崩刀。

螺旋升角计算：需先通过公式计算实际升角，再决定是否转动。

刀具转动角度的设定（转动多少、向哪个方向转）

刀具转动的核心是让刀具主切削刃与螺纹螺旋线方向一致，消除干涉，图4为设计的可转刀套。

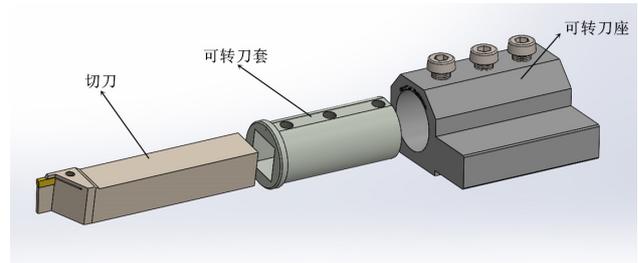


图 4

转动角度：刀具转动角度必须等于螺纹的螺旋升角（ λ ），且需保证刀具主后刀面与螺纹牙侧的间隙（一般 $\geq 0.1\text{mm}$ ），避免摩擦。

转动方向：需与螺纹旋向匹配，方向错误会导致切削力异常、牙型歪斜。

加工右旋螺纹：刀具应顺时针转动（从主轴方向看向工件）。

加工左旋螺纹：刀具应逆时针转动（从主轴方向看向工件）。

图5为刀转之后的对比图。

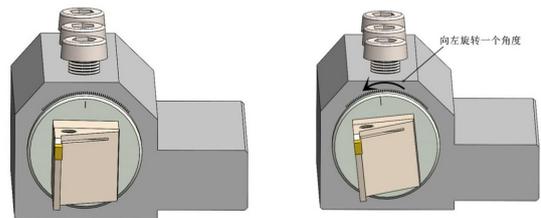


图 5

刀具转动后刀宽变窄

刀具转动时，刀刃宽度有变化，直接影响螺纹牙底宽度，从而引起螺纹尺寸精度，编程时需要算出旋转后的刀刃宽度。通过图6示意图可以具体算车实际刀宽。



图 6

由三角函数可以算出：转角度后的实际刀宽 = 刀宽

× COS (λ)

4 宏程序编制及解析

上述是一部分固定程序，作为简述思路及加工使用。
只要选择合适的刀具，改变红色字体参数（螺纹参数

不同），配以完整程序，就可以加工不同的梯形螺杆、梯形螺母以及蜗杆零件^[3]。

5 加工效果

见图 7 至图 9。

O0001	
G97 M3 S400	
T0202 M8	3mm 宽度的切槽刀
G0 X84 Z10	这里的 Z10 是定位基准，后面程序中左右进刀的起点都是以 Z10 为基准
#1=6.5	把牙的总高作为自变量，然后递减即可
WHILE[#1 GE 0] DO1	如果高度没车到 0，说明还没有车到小径尺寸
#10=[0.366*12-0.536*0.5]+TAN[15]*#1*2-3	后面的 3 为刀宽（#10 是当前牙高所对应的牙槽总宽，这里的刀宽没有考虑到旋转后刀宽变化）
#11=#10/2	两边借刀，所以要除以 2
G0 X[67+#11*2]	小径 + 双边牙高等于大径，当 #1 的值变化了，就意味着“大径”也变了，从而实现进刀
G32 Z-155 F12	
G0 X84	
Z10	
#2=0	#2 表示借刀时的基准，从 0 增加到 #11 结束
WHILE[#2 LE #11] DO2	



图 7 Tr80 × 12 螺杆

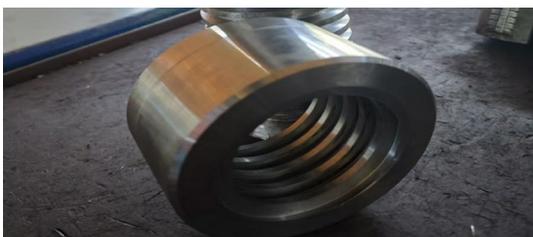


图 8 Tr80 × 12 螺母

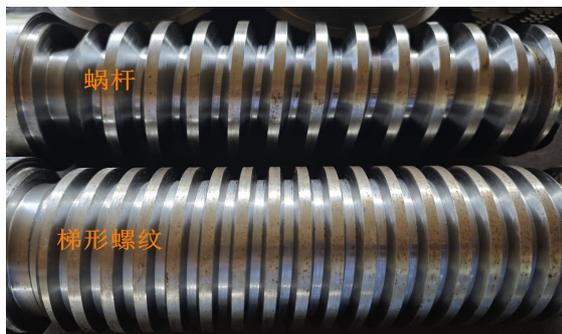


图 9 梯形螺杆和蜗杆对比（同一程序加工，改变个别参数）

6 结语

随着科技和生产的发展，机械设计与制造中具有特殊用途的零件越来越多。特别是各种梯形螺纹、蜗杆以及异形螺纹的加工，此类零件是由于各种机械设备中的结构特点和用途而设计及制造出来的。而在实际生产中，也会经常会出现许多结构相似，但品种多数量少的零件。这些零件在某些特征上变化不定，按常规加工方法，往往需要用成型刀加工。但零件品种多，所以成型刀需要量很大，为了降低加工成本，采用变量编程此类问题即可解决。在编程时我们只要稍加分析与总结，找出他们之间共同点，把这些共同点设为变量应用到程序中，往往编制出一个程序通过改变其中共性的变量就可以解决一类问题，从而使我们在加工相类似零件时，只需改变其中几个变量中的赋值，就可以采用此程序进行零件加工，大大节省了编程时间，而且在运用时准确性也大大提高，工作效率也有很大的提高^[4]。

参考文献

[1] 曾金平.浅谈在数控车床上运用宏程序加工多线梯形螺纹轴的应用[J].时代汽车,2023,(08):141-143.
 [2] 黄宏班,陈德志,黄振金.采用数控车床加工双线梯形螺纹的方法研究[J].南方农机,2024,55(23):161-164.
 [3] 赖高清,张正.数控宏程序在实际生产中的应用分析[J].电子元器件与信息技术,2023,7(09):69-72.DOI:10.19772/j.cnki.2096-4455.2023.9.019.
 [4] 杨香港.宏程序在梯形螺纹加工中的应用[J].今日制造与升级,2024,(11):72-75.

Research on Corrosion Mechanism, Case Analysis and Comprehensive Protection Strategies of Petrochemical Equipment

Hongwei Wu

Lianyungang Petrochemical Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

Corrosion is the primary factor threatening the safety, stability and long-term operation of the petrochemical industry, causing huge economic losses and potential environmental and safety risks every year. This paper systematically expounds the common types of corrosion and their mechanisms in the petrochemical environment, with a focus on the most widely used carbon steel equipment and stainless steel equipment as representative corrosion-resistant materials. Through specific case analysis, it deeply explores the causes of uniform corrosion, local corrosion (such as pitting corrosion, under-deposit corrosion) and environmentally sensitive fracture (such as wet hydrogen sulfide damage) in carbon steel; and reveals the complexity of local corrosion such as pitting and stress corrosion cracking in stainless steel under specific conditions (such as chloride environment, polythionic acid environment). On this basis, this paper proposes a multi-level and systematic comprehensive protection strategy covering correct material selection, process optimization, corrosion monitoring, corrosion inhibitor application, surface treatment and advanced coating technology, aiming to provide theoretical basis and practical guidance for the integrity management and extended operation of petrochemical equipment.

Keywords

Petrochemical; Equipment corrosion; Carbon steel; Stainless steel; Corrosion mechanism; Protection strategy

石油化工设备腐蚀机理、案例分析及综合防护策略研究

吴宏伟

连云港石化有限公司, 中国·江苏·连云港 222000

摘要

腐蚀是威胁石油化工行业安全、稳定、长周期运行的首要因素, 每年导致巨大的经济损失与潜在的环境和安全风险。本文系统阐述了石油化工环境中常见的腐蚀类型及其机理, 重点聚焦于应用最为广泛的碳钢设备和代表耐蚀材料的不锈钢设备。通过具体案例分析, 深入探讨了碳钢由均匀腐蚀、局部腐蚀(如点蚀、垢下腐蚀)到环境敏感断裂(如湿硫化氢破坏)的成因; 同时揭示了不锈钢在特定条件下(如氯化物环境、连多硫酸环境)发生的点蚀、应力腐蚀开裂等局部腐蚀的复杂性。在此基础上, 本文提出了一套涵盖正确选材、工艺优化、腐蚀监测、缓蚀剂应用、表面处理及先进涂层技术的多层次、系统化的综合防护策略, 旨在为石油化工设备的完整性管理和延寿运行提供理论依据与实践指导。

关键词

石油化工; 设备腐蚀; 碳钢; 不锈钢; 腐蚀机理; 防护策略

1 引言

石油化工生产过程涉及高温、高压、多种易燃易爆、有毒及腐蚀性介质(如烃类、氢气、硫化氢、氯离子、有机酸、环烷酸等)的复杂环境。设备与管道长期处于此种严苛工况下, 腐蚀失效成为不可避免的严峻挑战。据国内外相关统计, 因腐蚀造成的损失约占石化行业总产值的3%-5%, 其中突发性腐蚀事故带来的停产损失、安全风险及环境危害尤为严重。因此, 深入理解不同材质设备, 特别是基础材料碳钢和主力耐蚀材料不锈钢的腐蚀行为, 并制定有效的防控措施, 对实现装置的“安、稳、长、满、优”运行具有决定性意义。

【作者简介】吴宏伟(1974-), 男, 中国辽宁海城人, 本科, 工程师, 从事化工机械设备研究。

本文将从腐蚀科学角度出发, 结合工程实际案例, 对两类设备的典型腐蚀问题进行剖析, 并构建系统性的防护体系。

2 石油化工设备常见腐蚀类型概述

石化设备的腐蚀形态多样, 主要可分为以下几类:

均匀腐蚀: 在设备整个暴露表面发生的相对均匀的材料减薄, 通常由持续的化学或电化学反应引起。虽易于预测和设计裕量补偿, 但大面积减薄仍可致承压失效。

局部腐蚀: 危害性远大于均匀腐蚀, 包括:

点蚀: 高度局部化的腐蚀, 形成深孔, 易引发穿孔泄漏。

缝隙腐蚀: 发生在垫片、螺纹、沉积物下方等狭窄缝隙内的局部加速腐蚀。

电偶腐蚀: 两种不同电位的金属在电解质中接触, 电

位较负的金属(阳极)加速腐蚀。

晶间腐蚀:沿金属晶界发生的选择性腐蚀,导致材料强度骤降。

应力腐蚀开裂(SCC):在特定腐蚀介质和拉应力(残余应力或工作应力)共同作用下发生的脆性开裂,极具隐蔽性和灾难性。

腐蚀疲劳:在交变应力和腐蚀环境联合作用下发生的开裂。

环境敏感断裂:如湿硫化氢环境下的氢鼓包(HB)、氢致开裂(HIC)和应力导向氢致开裂(SOHIC)。

3 碳钢设备的腐蚀原因分析与案例

碳钢因其良好的力学性能、加工性能和低成本,广泛应用于温度、压力及腐蚀性相对较低的容器、管道、储罐及结构件中。其腐蚀主要源于其热力学不稳定性。

3.1 主要腐蚀原因分析

电化学腐蚀(水相腐蚀):这是碳钢最普遍的腐蚀形式。当设备表面存在电解质水膜(如冷凝水、含水工艺介质)时,形成阳极($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)和阴极(如 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$)区域,构成腐蚀电池。水中溶解的氧气、二氧化碳、硫化氢等气体均会强烈促进阴极过程,加速腐蚀。

3.2 酸性介质腐蚀

· HCl 腐蚀:主要来源于原油中无机盐(MgCl_2 、 CaCl_2)在加热水解、或工艺过程中引入的氯。HCl在低温部位(如常减压塔顶系统)遇冷凝水形成稀盐酸,对碳钢产生剧烈的均匀3.3腐蚀和点蚀。

· H_2S 腐蚀:湿 H_2S 环境除造成均匀腐蚀外,更危险的是氢渗透进入钢中,引发氢鼓包(HB)、氢致开裂(HIC),以及在焊缝等高应力区引发应力导向氢致开裂(SOHIC)。

· 环烷酸腐蚀:存在于某些高酸值原油中,在高温(220°C - 400°C)下与铁反应生成油溶性环烷酸铁,表现为流线型的沟槽状腐蚀,特别在高速湍流区更为严重。

· CO_2 腐蚀:在含水油气系统中, CO_2 溶解形成碳酸,导致碳钢发生以山地形腐蚀和点蚀为特征的局部腐蚀,腐蚀速率受温度、分压、流速等因素影响。

氧腐蚀:在锅炉给水、循环水系统中,溶解氧是导致碳钢腐蚀穿孔的主要原因,形成溃疡状的腐蚀坑。

垢下腐蚀:当设备表面结垢(如锈垢、水垢、生物粘泥)后,垢层下形成缺氧的闭塞区,与周围富氧区构成浓差电池,导致垢下区域成为阳极而加速腐蚀,且常伴随碱化或酸化。

4 典型案例分析

· 案例一:常减压装置塔顶冷凝系统碳钢管束穿孔
· 现象:初馏塔、常压塔顶的冷凝冷却器碳钢管束,在运行数月后发生多处泄漏,管内壁可见密集的溃疡状腐蚀坑。

· 分析:原油中的氯化盐在加热炉段水解生成HCl,随油气馏分升至塔顶。在空气冷却器或水冷却器的低温部

位,HCl与冷凝水结合形成低温盐酸(pH可低至2-4)。同时,塔顶注氨或注胺(中和剂)不当或分布不均,导致局部区域氯离子浓度高、pH值低,引发强烈的电化学腐蚀和点蚀。此外,若注水不足或注水中和剂浓度波动,会加剧局部腐蚀。

· 腐蚀类型:HCl均匀腐蚀与点蚀,可能伴有垢下腐蚀。

· 案例二:含硫污水汽提装置原料水罐底板氢鼓包开裂

· 现象:原料水罐定期检验时,发现碳钢板内壁有大面积鼓包,铲除鼓包处涂层后,可见鼓包表面有细微裂纹,金相检验证实为HIC。

· 分析:原料水中含有高浓度 H_2S 、 NH_3 和 CN^- 。 H_2S 在水中电离产生 H^+ ,其腐蚀产物 FeS 膜会促进原子氢[H]向钢中渗透。钢中的MnS夹杂物等缺陷处是氢原子结合为氢分子(H_2)的聚集点,产生巨大压力导致层状分离(鼓包)和内部微裂纹(HIC)。 CN^- 的存在会毒化 FeS 膜,进一步加速氢渗透。

· 腐蚀类型:湿 H_2S 环境下的氢鼓包(HB)和氢致开裂(HIC)。

5 不锈钢设备的腐蚀原因分析与案例

不锈钢(以奥氏体304/316L为代表)依靠表面形成的致密 Cr_2O_3 钝化膜获得耐蚀性。其腐蚀往往发生在钝化膜局部破坏或处于不稳定状态时。

5.1 主要腐蚀原因分析

氯化物应力腐蚀开裂(CI-SCC):这是奥氏体不锈钢最具威胁的失效模式之一。在含有氯离子(即使浓度很低,如ppm级)的水溶液中,处于拉应力状态(残余应力、工作应力)和特定温度范围(通常 $>60^\circ\text{C}$)的不锈钢设备,极易发生CI-SCC。裂纹通常为穿晶、树枝状或混合型,发展迅速。

点蚀与缝隙腐蚀:氯离子、溴离子等卤素离子能局部破坏钝化膜,在设备表面缺陷、夹杂物或沉积物下引发点蚀。缝隙处由于滞流、缺氧和离子浓缩,更易发生自催化加速的缝隙腐蚀。

连多硫酸($\text{H}_2\text{S}_x\text{O}_6$, $x=3-6$)应力腐蚀开裂(PTA-SCC):发生在停工期间。当设备在含 H_2S 环境中运行后,表面生成硫化铁锈垢。停工开盖时,空气中的氧和水蒸气与硫化铁反应生成连多硫酸。在敏化态(碳化物在晶界析出导致晶界贫铬)的不锈钢设备上,连多硫酸与拉应力共同作用,引发沿晶型应力腐蚀开裂。

酸腐蚀:不锈钢的钝化膜在强还原性酸(如盐酸、稀硫酸)或强氧化性酸(如高温浓硫酸)中可能不稳定,导致全面腐蚀。在含有 F^- 、 Cl^- 的酸中,腐蚀更为剧烈。

晶间腐蚀:奥氏体不锈钢在 $450-850^\circ\text{C}$ 温度区间(如焊接热影响区)敏化后,晶界贫铬,在特定介质(如氧化性酸)中发生晶间腐蚀。超低碳(如304L、316L)或稳定化钢种(321、347)可有效避免。

5.2 典型案例分析

· 案例三:加氢装置流出物空冷器(REAC)管箱

开裂

· 现象: 316L 不锈钢制造的 REAC 管箱在运行数年后, 于焊缝热影响区发现网状裂纹, 导致泄漏。

· 分析: 反应流出物经冷却后, 在空冷器入口处存在气液两相, 水相中浓缩了 NH_4Cl 、 NH_4HS 等盐类及溶解的 H_2S 。 NH_4Cl 结晶温度较高, 易在管箱壁沉积, 吸水潮解后形成高浓度 Cl^- 的液膜。管箱焊接残余应力高, 壁温通常在 Cl^- -SCC 敏感区间。 Cl^- 在拉应力和温度共同作用下, 引发氯化物应力腐蚀开裂。

· 腐蚀类型: Cl^- -SCC。

· 案例四: 催化裂化装置不锈钢波纹管膨胀节开裂

· 现象: 装置停工检修期间, 304 材质烟气管道膨胀节在打开后不久, 于波峰处发现大量沿晶裂纹。

· 分析: 烟气中含 SO_x , 运行中在波纹管表面形成含硫化铁的垢层。停工开盖后, 空气进入, 硫化铁与氧、水反应生成连多硫酸。波纹管在冷加工和安装过程中存在高残余应力, 且 304 不锈钢在焊接或冷加工后可能处于敏化态, 从而满足了 PTA-SCC 发生的所有条件 (敏化态、拉应力、连多硫酸介质)。

· 腐蚀类型: 连多硫酸应力腐蚀开裂 (PTA-SCC)。

6 综合防护策略与解决方案

针对上述腐蚀问题, 必须采取“预防为主、监测为辅、多措并举”的综合治理方针。

6.1 设计与选材优化

碳钢设备: 根据腐蚀环境严格计算腐蚀裕量。在湿 H_2S 环境, 选用抗 HIC 钢板 (控制 P、S 含量, 采用 Ca 处理改善夹杂物形态等)。对于 HCl 环境, 可考虑升级为蒙乃尔合金 (Monel 400) 内衬或整体钛材。

不锈钢设备: 针对 Cl^- -SCC 风险, 优先选用双相不锈钢 (如 2205), 其抗 Cl^- -SCC 和点蚀能力远优于 316L。对于高温高酸环境, 可选用高合金奥氏体不锈钢 (如 904L) 或镍基合金 (如 Inconel 625, Hastelloy C276)。避免不锈钢在敏化温度区间长期使用, 焊接后进行固溶处理或使用低碳 / 稳定化钢种。

6.2 工艺防腐

中和与缓蚀: 对于塔顶系统, 优化“三注” (注水、注中和剂、注缓蚀剂)。注水稀释腐蚀介质; 注氨或有机胺精确控制 pH 值; 注成膜型缓蚀剂在金属表面形成保护膜。对于循环水系统, 采用缓蚀阻垢剂、杀菌剂综合处理。

工艺控制: 优化操作参数, 避免设备在露点温度以下运行, 防止 HCl 等冷凝。控制流速, 避免冲刷腐蚀和沉积。在停工期间, 对不锈钢设备进行碱洗中和 (如采用碳酸钠溶液) 以预防 PTA-SCC。

6.3 表面处理与涂层

内壁涂层 / 衬里: 碳钢设备内壁应用高性能防腐涂料 (如环氧酚醛、玻璃鳞片涂料) 或橡胶衬里、玻璃钢衬里。储罐

底板可采用牺牲阳极 + 环氧涂层联合保护。

外壁保温层下腐蚀 (CUI) 防护: 对不锈钢和碳钢设备, 在保温层下施加耐高温防腐涂层, 并做好保温层的防水密封, 定期检查。

6.4 电化学保护

阴极保护: 广泛应用于埋地管道、储罐外底板、海水冷却器等。通过外加电流或牺牲阳极 (如锌、铝阳极), 使被保护金属成为阴极, 抑制其腐蚀。

阳极保护: 适用于在浓硫酸等钝化性介质中的不锈钢或碳钢设备, 通过施加阳极电流维持钝化膜稳定。

6.5 在线监测与完整性管理

腐蚀探针: 安装电阻探针、电感探针或电化学探针, 实时监测腐蚀速率。

在线测厚: 定点定时进行超声波在线测厚, 监控设备减薄趋势。

失效分析与 RBI: 对腐蚀失效件进行深入分析, 根除原因。实施基于风险的检验 (RBI), 优化检修周期和检验重点, 将资源集中于高风险设备。

7 结语

石油化工设备的腐蚀是一个涉及材料、环境、力学和电化学的复杂系统性问题。碳钢的腐蚀主要表现为以水为媒介的电化学腐蚀和酸性介质下的均匀 / 局部腐蚀, 其防护重点在于“隔离”和“中和”。而不锈钢的腐蚀则更具隐蔽性和突发性, 集中于钝化膜局部破坏引发的点蚀、缝隙腐蚀及各类应力腐蚀开裂, 其防护核心在于“选对材料”和“控制敏感条件”。

实践表明, 单一措施难以应对复杂的腐蚀挑战。必须建立从设计选材、工艺控制、防护技术到在线监测和完整性管理的全生命周期腐蚀控制体系。未来, 随着新材料 (如非晶合金涂层、超级双相钢)、新监测技术 (如光纤传感、无线传感网络) 和人工智能预测模型的发展, 石油化工设备的腐蚀防护将朝着更精准、更智能、更主动的方向演进, 为行业的安全绿色可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 中国腐蚀与防护学会. 石油工业中的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [2] API RP 571 - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry[S]. 2020.
- [3] 李晓刚, 等. 材料腐蚀与防护概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [4] Fontana M G. Corrosion Engineering[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [5] NACE SP0170-2017 - Protection of Austenitic Stainless Steels and Other Austenitic Alloys from Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking During Shutdown of Refinery Equipment[S].
- [6] 徐春明, 杨朝合. 石油炼制工程[M]. 第五版. 北京: 石油工业出版社, 2022.

Simulation and Optimization of Ethylene Cracking Furnace Based on Reaction Kinetics

Yu Wang^{1,2}

1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

2. Second Branch of Olefins Division Guoneng Group Ningxia Coal Industry Company, Yinchuan, Ningxia, 750411, China

Abstract

To address the issues of low energy efficiency and difficult optimization of ethylene yield in ethylene cracking furnaces, this study focuses on the key equipment, the ethylene cracking furnace. Based on the Aspen Plus software, a full-process model coupling molecular reaction kinetics and coking kinetics was constructed. By comparing the simulation errors of the Kumar model and the 25 reaction kinetics model, it was determined that the 25 reaction kinetics model (with an ethylene yield error <8%) is more suitable for industrial cracking processes. The Kumar Coking Model II (with a hydrogen yield error of 2.16%) was used to describe the coking behavior of the furnace tubes. A systematic analysis was conducted on the effects of parameters such as feedstock, temperature, pressure, and vapor-to-hydrocarbon ratio on ethylene yield and effective energy loss. The results show that naphtha feedstock at 910°C, 4.5 bar, and a vapor-to-hydrocarbon ratio of 0.35-0.5 achieves an ethylene yield of 33.13wt%, with optimal economic performance. The radiant section is the primary source of effective energy loss (accounting for 62.38%).

Keywords

ethylene cracking furnace; reaction kinetics; Aspen Plus simulation; energy efficiency analysis

基于反应动力学的乙烯裂解炉模拟及优化研究

王瑜^{1,2}

1. 西安科技大学, 中国·陕西 西安 710000

2. 国能集团宁夏煤业公司烯烃二分公司, 中国·宁夏 银川 750411

摘要

为解决乙烯裂解炉能效低、乙烯产率难优化的问题,以关键设备乙烯裂解炉为研究对象,基于Aspen Plus软件构建耦合分子反应动力学与结焦动力学的全流程模型。通过对比Kumar模型与25反应动力学模型的模拟误差,确定25反应动力学模型(乙烯产率误差<8%)更适用于工业裂解过程;采用Kumar结焦Model II(氢气产率误差2.16%)描述炉管结焦行为。系统分析原料、温度、压力、汽烃比等参数对乙烯产率及有效能损失的影响,结果表明:石脑油原料在910°C、4.5 bar、汽烃比0.35-0.5条件下,乙烯产率达33.13wt%,且经济性最优;辐射段为有效能损失主要来源(占比62.38%)。

关键词

乙烯裂解炉; 反应动力学; Aspen Plus模拟; 有效能分析

1 引言

乙烯作为石油化工产业的核心基础原料,其产能与质量直接决定了塑料、合成橡胶、精细化工等下游产业的发展水平,是衡量国家工业化程度的关键指标。蒸汽裂解工艺作为当前乙烯生产的主流技术(占比超90%),其核心设备乙烯裂解炉的能耗占全流程总能耗的65%以上^[1],且碳排放强度高,节能降耗潜力巨大^[2]。

由于多数动力学模型未耦合结焦行为,难以反映炉管

结焦对传热与产率的长期影响,能效分析多局限于能量衡算,缺乏基于有效能理论的不可逆损失定位,因此,本研究通过Aspen Plus构建耦合反应动力学与结焦动力学的全流程模型,结合有效能分析识别能效瓶颈,为乙烯裂解炉的高效优化提供系统性解决方案。

2 乙烯裂解炉动力学模型构建与验证

2.1 动力学模型选择与验证

2.1.1 Kumar模型验证

Kumar模型包含1个一次反应与21个二次反应,普适性较强,但需将石脑油设为虚拟组分(密度0.701g/mL,分子量87.81)。在Aspen Plus中输入反应方程与动力学参数,模拟条件为:温度1073 K、石脑油流量0.5cm³/min、汽烃

【作者简介】王瑜(1987-),男,中国陕西榆林人,本科,工程师,从事材料与化工研究。

比 1.42。结果显示，乙烯产率误差达 -30%，丙烯误差 -94%（表 2.1），主要因虚拟组分无法真实反映石脑油复杂组成，模拟结果偏离工业实际。

表 2.1 Kumar 模型产率与 Aspen Plus 模拟结果对比

产品	Kumar 模型产率	Aspen Plus 产率	误差
C ₂ H ₄	16%	11.2%	-30%
C ₃ H ₆	10%	0.6%	-94%

2.1.2 25 反应动力学模型验证

通过文献查找发现，张朝环^[3]通过对齐鲁石化北方裂解炉进行模拟计算，由于裂解都为轻质油，其各组分确定并且 C 原子数均小于 4，建立了确定反应物组分的具体的动力学数学模型，整个模型共计 25 个反应式。采用相同模拟方法，结果显示：乙烯产率误差 -7.6%，乙烷误差 -4.2%，氢气误差 -4.8%（表 2.4），误差显著低于 Kumar 模型，可作为本研究的动力学基础。

表 2.4 25 反应动力学产率与 Aspen Plus 模拟结果对比

产品	25 反应动力学产率 (wt%)	Aspen Plus 产率 (wt%)	误差
H ₂	1.85	1.76	-4.8%
CH ₄	10.6	4.5	-57.5%
C ₂ H ₄	33.13	30.6	-7.6%
C ₂ H ₆	12.67	12.14	-4.2%
C ₄ H ₁₀	0.163	0.15	-7.97%
C ₅ 以上	3.56	4.6	29.2%

2.2 结焦动力学模型建立

炉管结焦会增加热阻与压降，缩短运行周期。采用

Kumar 结焦 Model II 进行动力学模拟，通过对比模拟与工业氢气产率（误差 2.16%），验证该模型可准确预测结焦速率（图 1），结焦速率随温度升高呈指数增长，1000℃以上增速显著加快。

表 2.5 氢气生成摩尔分率的验证

产品	25 反应动力学产率 (%v/v)	Aspen Plus 产率 (%v/v)	误差
H ₂	1.85	1.89	-2.16%

3 乙烯裂解炉全流程建模与参数优化

3.1 裂解炉结构与建模方法

乙烯裂解炉由对流段、辐射段与急冷系统组成：

对流段建模：采用 Heater 模块模拟原料预热 (FPH-1/2)、蒸汽过热 (HTC) 与锅炉给水加热 (ECO-1/2)，用 HeatX 模块模拟急冷换热器 (TLE)，将裂解气从 847.2℃ 冷却至 508℃，同时产生 9-12 MPa 高压蒸汽；

辐射段建模：以 RPlug 模块模拟裂解反应，RGibbs 模块模拟燃料气燃烧（燃料气组成表 7，压力 1 bar，过剩氧 3-5%），出口烟气温度 1200℃；

3.2 工艺参数对乙烯产率的影响

3.2.1 原料影响

对比石脑油、纯乙烷、纯丙烷、乙烷 - 丙烷混合物 (0.8:0.2) 的乙烯生成量（表 8）：纯乙烷乙烯质量流率最高 (5482.46 kg/h)，但石脑油 (5288.23 kg/h) 因价格低、来源广，经济性更优，故选择石脑油为基准原料。

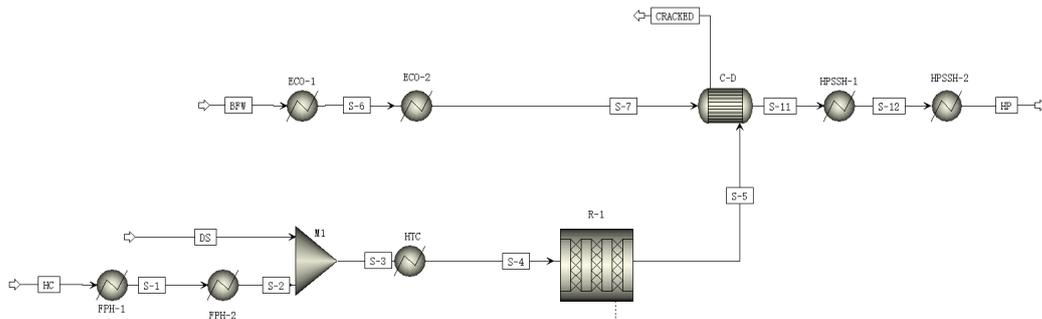


图 3.1 对流段与冷却系统的建模

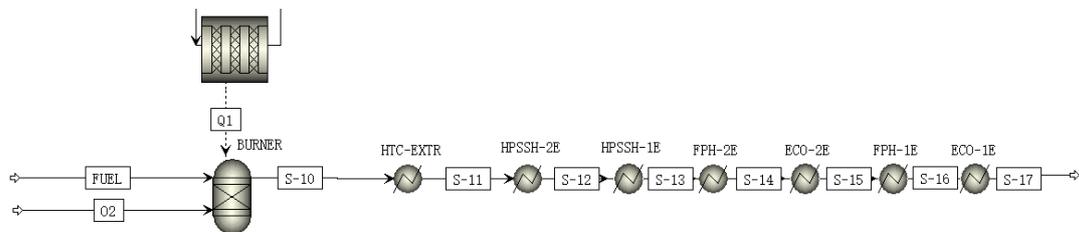


图 3.2 负荷转移整体效果

表 3.1 不同原料对乙烯生成的影响

原料	原料转化率 (%)	乙烯质量流率 (kg/h)
石脑油原料	0.524	5288.23
纯乙烷	0.572	5482.46
纯丙烷	0.683	2887.14
0.8 乙烷, 0.2 丙烷	0.586	4698.96
纯丙烯	1.000	431.124
纯丁烷	1.000	5436.28

3.2.2 温度影响

通过灵敏度分析 (750-1450℃) 发现, 乙烯产率随温度升高先增后减, 910℃时达峰值。温度过低则裂解不完全, 过高则加剧二次裂解与结焦, 导致乙烯选择性下降。

3.2.3 压力影响

压力对乙烯产率呈非线性影响 (图 3.2): 低压 (<4.5 bar) 有利于热力学平衡向气相体积增大的主反应移动, 但反应速率降低; 高压 (>4.5 bar) 虽加快反应, 却促进结焦。4.5 bar 时乙烯产率达 0.2125 (摩尔分率), 为最优压力。

3.2.4 汽烃比影响

汽烃比 (0.2-1.0) 升高可降低烃分压、抑制结焦, 但会稀释反应物浓度。汽烃比 0.35-0.5 时, 乙烯产率与抑焦效果平衡, 过高则导致热负荷增加、能效下降。

4 热损失分析与有效能损失分布

4.1 热损失分析

辐射段: 将辐射段炉壁的热损定义为 $Q_{wall-loss}$, 炉体表面积为 A_{wall} , 炉壳表面平均温度为 T_{avg} , 环境温度为 T_{air} , 炉壳总传热系数为 U_{wall} ($W/m^2 \cdot k$) 我们以常见的乙烯裂解炉为例, 长宽高分别为 25m, 5m, 6m, 则 $A_{wall}=610m^2$ 。而 U_{wall} 乙烯裂解炉一般范围为 1-3 ($W/m^2 \cdot k$), 我们采取中等保温的炉子, 所以取 $U_{wall}=2$ ($W/m^2 \cdot k$), 炉壳平均温度在 280℃, 环境温度一般在 30℃, 而热损失公式为:

$$Q_{wall-loss} = A_{wall} * U_{wall} * (T_{avg} - T_{air})$$

通过计算得出 $Q_{wall-loss}=305kW$ 。

对流段: 通过工业烟道气出口温度反推, 采用 MHeatX 模块模拟, 各换热单元热损失如表 4.1 所示。

4.2 有效能损失分布

全系统总有效能损失 36295.38 kW, 辐射段损失最大

(22640.00 kW, 占比 62.38%), 其次为对流段 (12549.23 kW, 34.57%), 冷却系统最小 (1106.15 kW, 3.05%) (表 4.2)。辐射段高损失源于燃烧不完全与高温传热不可逆, 需优先优化。

表 4.1 对流段每一段传热热损失

模块	热损失 (Gcal/h)
ECO1	0.201
FPH1	0.451
ECO2	0.382
FPH2	0.602
HPSSH1	1.767
HPSSH2	3.329
HTC	0.248

表 4.2 乙烯裂解炉有效能损失

模块	有效能损失 (kW)	占比 (%)
对流段	12549.23	34.57
辐射段	22640.00215	62.38
冷却系统	1106.15113	3.05
总计	36295.38328	100

5 结语

25 反应动力学模型 (乙烯产率误差 < 8%) 与 Kumar 结焦 Model II (氢气误差 2.16%) 可精准描述乙烯裂解与结焦过程, 适用于工业裂解炉模拟; 石脑油原料在 910℃、4.5 bar、汽烃比 0.35-0.5 条件下, 乙烯产率达 33.13 wt%, 且经济性最优; 辐射段为有效能损失核心区域 (占比 62.38%), 需通过优化燃烧器结构与炉管排布降低损失;

参考文献

- [1] Benfeng Yuan, Yu Zhang, Wenli Du, Meihong Wang, Feng Qian. Assessment of energy saving potential of an industrial ethylene cracking furnace using advanced exergy analysis[J]. Applied Energy, 2018, 113583(254):1-2.
- [2] 陈梦君, 陈贤雷, 毛玲娟. 基于 SPYRO 的以柴油为原料乙烯裂解炉模拟与优化 [J]. 当代化工, 2023, 52 (4): 914-919.
- [3] 张朝环. 乙烯裂解炉内燃烧与裂解反应过程数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2008.

Research on the Evaluation of the Effect of Cathodic Protection for Long-distance Pipeline

Yanke Gong

China National Petroleum Pipeline Network Group Co., Ltd., Central China Branch, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

Long-distance pipelines play a vital strategic role in oil and gas transportation and storage systems, where their operational lifespan and safety performance are directly determined by the effectiveness of anti-corrosion systems. As the core technology for controlling electrochemical corrosion, cathodic protection faces challenges during long-term operation due to multiple factors including geological variations, soil resistivity changes, coating aging, electrochemical interference, and measurement errors, leading to uncertainties in assessing protection efficacy. This study systematically analyzes key factors affecting protection effectiveness and evaluation methods based on cathodic protection mechanisms. It examines the limitations of the traditional “-850 mV (Cu/CuSO₄ reference electrode)” criterion in complex environments and proposes a comprehensive evaluation system incorporating multiple parameters such as steady-state potential, transient response, AC interference, and coating integrity. Through multi-source monitoring data fusion and intelligent algorithm modeling, the research achieves dynamic identification and quantitative analysis of cathodic protection status, providing theoretical foundations and engineering support for optimizing anti-corrosion design and operational maintenance of long-distance pipelines.

Keywords

long-distance pipeline; cathodic protection; potential measurement; corrosion assessment; polarization criterion

长输管道阴极保护效果评判相关问题研究

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

长输管道在油气输送与储运体系中具有重要战略意义, 其运行寿命和安全水平直接取决于防腐体系的有效性。阴极保护作为控制电化学腐蚀的核心技术, 在长期运行中受地质环境差异、土壤电阻率变化、涂层老化、电化学干扰及测试误差等多重因素影响, 导致防护效果评判存在不确定性。本文从阴极保护机理出发, 系统分析影响防护效果的关键因素与评判方法, 探讨传统“-850 mV (Cu/CuSO₄参比电极)”判据在复杂环境下的局限性, 提出基于稳态电位、瞬态响应、交流干扰与涂层完整性等多维参数的综合评估体系。研究通过多源监测数据融合与智能算法模型构建, 实现阴极保护状态的动态识别与量化分析, 为长输管道防腐设计优化与运行维护提供理论依据与工程支撑。

关键词

长输管道; 阴极保护; 电位测量; 防腐评估; 极化判据

1 引言

长输管道作为国家能源输送的重要基础设施, 其服役环境复杂, 易受电化学腐蚀影响, 导致泄漏与结构失效。阴极保护作为关键防腐技术, 通过外加电流或牺牲阳极使金属表面电位降低至安全区间, 从而抑制腐蚀反应。实践表明, 阴极保护效果受涂层完整性、土壤电阻率、杂散电流与监测精度等多因素影响, 单一电位判据难以全面反映防护状态。本文在总结阴极保护原理的基础上, 系统分析长输管道阴极保护效果评判的关键参数与控制要素, 探讨多源数据融合与

智能监测在评估中的应用, 以期构建科学的综合评价体系, 为管道防腐运行与安全管理提供技术支持。

2 阴极保护原理与作用机制

2.1 阴极保护的基本原理

阴极保护技术的理论基础源于电化学腐蚀控制原理, 其核心目标是通过外加电流或电化学位差, 使金属结构表面成为腐蚀体系中的阴极, 从而抑制阳极溶解反应。其基本原理在于降低金属电位, 使阴极反应速率大于阳极反应, 形成受控的极化状态, 实现电化学腐蚀电流的转移。阴极保护分为两种主要形式: 外加电流阴极保护 (ICCP) 与牺牲阳极阴极保护 (SACP)。前者通过整流电源向金属结构施加直流电流, 使电位降至腐蚀电位以下, 适用于长输管道及大型

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

钢结构；后者依靠更活泼的金属（如镁、锌、铝）自发溶解提供电流，常用于中小型防腐工程。阴极保护的关键在于极化电位控制，需确保金属表面电位处于 -850 mV 至 -1200 mV 之间。若电位过负，可能引发氢析出、涂层剥离与金属氢脆等问题；若保护不足，则难以有效抑制腐蚀反应。因此，设计中应兼顾保护电流密度、极化特性与土壤环境因素，实现阴极电位的动态平衡与长期稳定。

2.2 阴极保护系统组成与运行模式

阴极保护系统的运行效率依赖于其结构配置与控制方式。系统通常由整流电源装置、阳极地床、参比电极、测试桩及监测终端构成。整流装置提供可调电流源，阳极地床则通过埋设在土壤中的导电材料（如混合金属氧化物阳极、硅铁阳极）实现电流分布。参比电极用于测量管地电位，是控制与评判保护效果的基准。测试桩可实现定期检测与长期数据采集。运行模式方面，阴极保护系统一般分为恒电流控制、恒电位控制及自动调节控制三类。恒电流模式结构简单但适应性差；恒电位控制通过闭环反馈机制，根据实时电位变化自动调整电流输出，可显著提高防护精度。近年来，基于物联网（IoT）与云计算的智能化阴极保护系统逐步推广，实现了电位、电流及环境参数的远程监测与自适应调节，为长输管道运行维护提供了数字化管理手段。

2.3 阴极保护与防腐涂层的协同作用

阴极保护的有效性离不开防腐涂层的支撑，两者共同构成复合防护体系。防腐涂层在金属表面形成隔离层，可显著减少暴露面积与腐蚀反应点，从而降低阴极保护电流需求。研究表明，良好的涂层可使阴极保护电流需求量降低至裸管的1%以下。然而，当涂层发生老化、起泡、剥落或形成微裂纹时，局部电流密度将急剧上升，形成“热点”区域，易导致局部过保护或氢析出，削弱涂层附着力并加速破坏。为实现长期协同防护，应选择与阴极保护电位兼容的涂层材料，如环氧煤沥青、聚乙烯三层结构及熔结环氧涂层（FBE）。此外，施工阶段应严格控制涂层厚度与固化工艺，运行期应定期开展涂层电阻率检测与修复维护。通过在设计层面优化“涂层—阴极保护”匹配关系，可显著提高系统防腐寿命与整体经济性，实现长输管道的全寿命周期防护。

3 阴极保护效果评判的主要方法

3.1 稳态电位法与 -850 mV 判据

稳态电位法是目前阴极保护效果评判中最常用、最具代表性的方法。其依据为管道钢表面相对于 Cu/CuSO_4 参比电极的电位应低于 -850 mV ，此时金属表面被有效极化，腐蚀速率大幅下降。该判据的理论基础在于，当电位降低至 -850 mV 以下，阴极反应速率超过阳极反应，金属失去电子能力显著减弱，从而实现电化学保护。然而，在复杂地质环境下，该方法存在一定局限性。其测量结果受土壤电阻率、涂层完整性及杂散电流干扰影响显著，容易导致电位误判。

同时，对于厚涂层管道，管地电位难以反映实际极化状态，可能出现“电位达标而局部未保护”现象。研究表明，当土壤电阻率超过 $2000\ \Omega\cdot\text{cm}$ 时， -850 mV 判据的准确性下降，应结合极化电位和电流分布进行综合修正^[1]。

3.2 断电瞬态电位法

断电瞬态电位法（Instant-Off Potential Method）通过短时间切断外加电流系统，测量瞬时电位变化，剔除电解质电阻降影响，获取更接近金属真实极化状态的电位值。此方法较稳态法更能反映阴极保护的实际情况，尤其适用于受强交流干扰或杂散电流影响的管段。断电瞬态法操作过程包括同步断电、瞬时采样与延迟测量，其关键在于时间控制精度。实验表明，采样延迟超过 100 ms 将引入显著误差。该方法虽具高准确性，但在长输管道现场应用中受限于断电同步设备要求高、操作复杂、测试成本高等问题。

3.3 交流干扰与电流分布测试法

在电力线、轨道交通及高压输电走廊附近运行的管道，交流电磁干扰会对阴极保护效果产生显著影响。交流干扰不仅导致管地电位波动，还可能引发交流腐蚀（AC Corrosion），造成金属局部溶解。为准确评估阴极保护状态，可通过布设交流电压与电流密度监测点，结合土壤电阻率数据分析电流分布特征。通常，当交流电压超过 15 V 或电流密度超过 $30\text{ A}/\text{m}^2$ 时，存在腐蚀风险。采用多点同步监测与电位传感网络可实现干扰源定位及影响区段识别。电流分布测试法则通过沿管道布设电位梯度测点，分析阴极保护电流衰减规律，判断电流分布均匀性。结合三维电场模拟与地质数据，可实现防护区段的定量评估^[2]。

4 影响阴极保护效果评判的关键因素

4.1 涂层性能与老化效应

防腐涂层是长输管道阴极保护体系的核心组成部分，其完整性直接决定电流分布的均匀性与防护效果。涂层老化、剥落、气泡及微裂纹会造成电流泄漏或局部短路，使阴极保护系统出现“过保护”或“欠保护”现象。涂层电阻率降低后，保护电流将集中流向缺陷区域，引发电化学腐蚀加速。研究表明，涂层电阻率每下降一个数量级，阴极保护电流需求量将增加约3倍，显著降低系统效率。为保证涂层长期性能，应建立定期检测机制，采用电位扫描法、交流电流衰减法等手段获取涂层屏蔽效应与损伤分布。近年来，红外热像技术和声发射检测在涂层隐裂识别中得到应用，可实现非接触式、实时监测，提升缺陷定位精度。通过综合分析涂层老化规律与电流分布特征，可为阴极保护系统提供动态修正依据，延缓防腐体系性能衰退。

4.2 土壤环境与电化学生理

土壤理化特性与外部电磁环境是影响阴极保护效率的重要外部因素。土壤电阻率越高，保护电流传播阻力越大，造成电位不均与局部欠保护；高盐分或高湿度土壤则易产生

电流集中,诱发过负电位和氢析出,导致涂层剥离或金属氢脆。温度变化对极化过程亦有显著影响,在冻土或干旱区,土壤含水率波动会使保护电流不稳定。此外,电化学干扰如直流牵引电流、交流杂散电流及雷击感应,会破坏阴极保护电位平衡,引发周期性腐蚀。为应对上述问题,应布设土壤电阻率测点,结合电场分布模拟分析,优化阳极地床布局与电流控制策略。通过在干扰区段加装去耦合装置及电位稳定器,可有效抑制杂散电流影响,保持阴极保护电位的连续性与均衡性^[3]。

4.3 测试方法与测量误差

阴极保护效果评判的准确性在很大程度上取决于测试方法与测量精度。管地电位测量作为主要评判依据,易受参比电极位置偏差、接触电阻及仪器漂移的影响,导致结果误判。例如,参比电极若未垂直布设或与管道间存在电势梯度,将产生 50 ~ 100 mV 的系统误差。为减少测量偏差,应采用双电极同步采集法,并在测试前进行电极校准。断电瞬态法虽能更真实反映极化电位,但操作复杂且易受环境干扰。为实现高精度测试,可采用智能采集系统结合多点测量与动态修正算法,对数据进行滤波与标准化处理。此外,标准化操作规程的建立对确保不同地区、不同管段测试结果的可比性至关重要。只有在测量体系、数据处理与结果分析全过程实现规范化,才能为阴极保护效果评判提供科学依据与可重复的评价结果。

5 阴极保护效果评判的改进策略

5.1 建立综合评估指标体系

阴极保护效果的准确评判应从单一电位标准向多维度指标体系转变。仅以 -850 mV 判据判断保护状态,难以全面反映不同环境下的防护实际。应建立涵盖极化电位、交流干扰电压、涂层完整性、土壤电阻率及保护电流密度等多参数的综合评估体系。极化电位可反映管道表面反应活性;交流干扰电压揭示外部电磁环境影响;电流密度与土壤电阻率关系可反映保护均匀性。通过多源数据融合技术,对静态测量与动态变化进行联合分析,利用统计学模型或主成分分析法(PCA)提取关键指标,实现防护状态的量化与可视化表达。同时,应建立数据权重体系,对不同环境因子赋予相应权重,构建客观、可追溯的阴极保护综合评价模型,为运维决策提供量化依据^[4]。

5.2 引入智能监测与数据模型分析

随着数字化与智能化技术的发展,阴极保护的监测方式正从周期性人工检测向实时自动化监控转变。基于物联网(IoT)架构的监测系统能够实时采集管地电位、电流密度、土壤湿度与温度等参数,并通过无线传输汇聚至云端平台,

实现状态可视化管理。通过引入机器学习与神经网络算法,可建立阴极保护状态识别与预测模型,对异常数据自动标记与风险预警。模型可根据历史数据动态更新,实现故障趋势预测与干扰源定位。例如,基于支持向量机(SVM)的模式识别算法可实现过保护与欠保护区段的快速判别,大幅提升巡检效率与响应速度。智能监测的引入使阴极保护系统由“静态评估”迈向“动态管理”,实现从经验判断向数据驱动决策的转变。

5.3 完善标准与规范体系

阴极保护评判的标准化是实现科学评估与跨区域比较的基础。目前国内相关标准多源于上世纪研究成果,部分评判参数与现代管道运行环境存在脱节。应结合新型防腐材料、复杂地质环境及现代监测手段,对现行标准进行修订与完善。新标准应明确不同地区、不同土壤类型下的电位判据修正系数,提出动态极化与瞬态响应等综合评估方法,规范测量设备精度与数据处理流程。建议建立国家级阴极保护评估数据库,通过大样本数据校准评判准则,实现标准参数的科学化与智能化更新。同时,应完善行业管理与技术培训体系,推动阴极保护评估标准与国际接轨,为管道防腐技术的持续改进与科学监管提供制度保障^[5]。

6 结语

长输管道阴极保护是保障管道安全运行和延长服役寿命的重要技术措施。当前的评判方法在实践中仍存在局限,单一电位判据难以准确反映复杂电化学环境下的保护状态。本文通过分析阴极保护评判的关键问题与影响因素,提出基于多参数综合评价与智能化监测的改进路径,为长输管道防腐体系的科学评估提供参考。未来,应加快构建标准化、数据化、智能化的阴极保护管理体系,实现从经验判断向科学决策的转变,为我国能源输送基础设施的安全高效运行提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 李旭,陆涛,吴昊男.长输管道阴极保护与防腐层完整性管理实践研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(五).国家石油天然气管网集团有限公司西北分公司银川输油气分公司,2025:405-409.
- [2] 范志刚,刘玉辉,刘庆栋.长输石油管道阴极保护技术的应用分析[J].化工管理,2025,(08):115-118.
- [3] 张俊斌.浅谈长输(油气)管道的阴极保护有效性检测性能影响的对比研究[J].全面腐蚀控制,2018,32(09):61-67.
- [4] 赵志峰.长输管道腐蚀防护系统安全性动态评价方法研究[D].西安科技大学,2017.
- [5] 臧琰,汤江文,唐勇,等.石油天然气长输管道阴极保护采集电位智能分析模型研究[J].中国测试,2024,50(S1):182-190.

Translation of “Development of a Comprehensive Testing System for Output Characteristic Parameters of Nerve and Muscle Stimulators Based on YY/T 0696-2021

Chao Shan¹ Xiaolong Qiang² Chao Zhang³ Jiming Liu³

1. Heilongjiang Institute for Drug Control, Harbin, Heilongjiang, 150088, China

2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Medical Device Testing Center, Nanning, Guangxi, 530021, China

3. Kingpo Technology Development Limited, Dongguan, Dongguan, 523869, China

Abstract

Nerve and muscle stimulators play a significant role in pain management, rehabilitation therapy, and neurological function recovery, with their output characteristics directly affecting treatment efficacy and patient safety. The YY/T 0696-2021 standard provides specifications for measuring output characteristic parameters. This study designs and develops a comprehensive testing system to accurately measure key parameters such as voltage, current, pulse width, and frequency of stimulators. The system employs a modular design, integrating high-precision data acquisition, signal processing, and automated analysis functions. Experimental validation confirms that the system meets the standard's requirements, with a measurement error of less than 0.5%, a repeatability standard deviation below 0.2%, and significantly improved testing efficiency compared to traditional methods. This paper elaborates on the system's design principles, experimental validation, and application prospects, offering an efficient solution for quality control of medical devices.

Keywords

nerve and muscle stimulators; YY/T 0696-2021; Output characteristics; Comprehensive testing system; medical device

YY/T 0696–2021 神经和肌肉刺激器输出特性参数综合测试系统研发

单超¹ 强小龙² 张超^{3*} 刘纪明³

1. 黑龙江省药品检验研究院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150088

2. 广西壮族自治区医疗器械检测中心, 中国·广西 南宁 530021

3. 东莞市精邦机械科技有限公司, 中国·广东 东莞 523869

摘要

神经和肌肉刺激器在疼痛管理、康复治疗及神经功能恢复中发挥重要作用, 其输出特性直接影响治疗效果和患者安全。YY/T 0696-2021标准为输出特性参数的测量提供了规范。本研究设计并研发了一种综合测试系统, 用于精确测量刺激器的电压、电流、脉冲宽度、频率等关键参数。系统采用模块化设计, 集成高精度数据采集、信号处理和自动化分析功能, 通过实验验证其性能满足标准要求。测试结果显示, 系统测量误差小于0.5%, 重复性标准差低于0.2%, 测试效率显著优于传统方法。本文详细阐述了系统的设计原理、实验验证及应用前景, 为医疗器械质量控制提供了高效解决方案。

关键词

神经和肌肉刺激器; YY/T 0696-2021; 输出特性; 综合测试系统; 医疗器械

1 引言

神经和肌肉刺激器通过电脉冲刺激神经或肌肉组织,

广泛应用于慢性疼痛缓解、肌肉功能恢复及神经康复等领域。随着设备功能复杂化, 其输出特性(如脉冲幅度、频率、波形完整性)对治疗效果和安全性至关重要。YY/T 0696-2021《神经和肌肉刺激器输出特性的测量》标准为设备性能评估提供了统一规范, 要求对输出电压、电流、脉冲宽度、频率等参数进行高精度测量, 并确保测试系统具备抗干扰能力和可追溯性。

【作者简介】单超(1984–), 中国黑龙江讷河人, 高级工程师, 从事医疗器械产品质量测试评价及相关研究。

【通讯作者】张超(1987–), 中国安徽合肥人, 硕士, 高级工程师, 从事仪器仪表与测控研究。

传统测试方法多依赖示波器或万用表等通用仪器，需人工记录数据，效率低且易引入误差。此外，现有设备难以实现多参数同步测量，无法完全满足 YY/T 0696-2021 的综合测试需求。谷歌学术检索表明，近年来相关研究多集中于单一参数优化，缺乏集成化测试系统。因此，本研究基于 YY/T 0696-2021 标准，研发了一种自动化、高精度的综合测试系统，旨在提升测试效率和可靠性。

2 背景与相关工作

2.1 YY/T 0696-2021 标准概述

YY/T 0696-2021 标准替代了 2008 年版，适用于 YY 9706.210-2021 范围内的神经和肌肉刺激器，规定了以下关键参数的测量要求：

输出电压和电流：测量峰值电压 / 电流、有效值及波形特性。

脉冲宽度：评估脉冲持续时间，范围通常为 $50\mu\text{s}$ 至 $500\mu\text{s}$ 。

频率：测量脉冲重复频率，通常为 1Hz 至 200Hz。

波形完整性：分析输出信号的上升 / 下降时间及畸变程度。

标准强调测试系统需具备高精度（误差 $<1\%$ ）、抗干扰能力和数据可追溯性，以确保结果可靠。

2.2 现有测试技术的局限性

传统测试方法多采用手动操作，依赖示波器（如 Keysight DSOX3034T）或专用测试仪，存在以下问题：

效率低：手动记录和分析数据耗时长，单次测试需数分钟。

精度不足：人为操作易引入误差，尤其在高频或低幅值信号测量中。

功能单一：现有设备难以同时测量多种参数，需多次切换仪器。

近年来关于神经和肌肉刺激器测试的研究多聚焦于单一参数（如脉冲宽度）优化，鲜有综合测试系统的开发。因此，研发一款集成化、自动化的测试系统具有重要意义。

3 系统设计

3.1 系统总体架构

综合测试系统采用模块化设计，包含以下核心模块：

信号采集模块：采集刺激器的输出电压、电流和波形数据。

信号处理模块：对信号进行滤波、放大和数字化处理。

控制与分析模块：基于嵌入式系统实现测试自动化，计算关键参数。

人机交互模块：提供图形化界面，设置测试参数、显示结果并导出报告。

系统架构如图 1 所示。

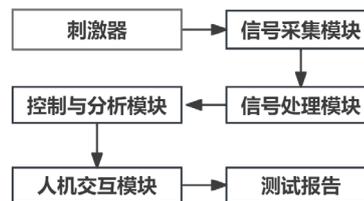


图 1 系统总体架构

图 1 说明：刺激器输出信号经采集模块传输至信号处理单元，数字化后由控制模块分析，结果通过人机交互模块呈现。

3.2 硬件设计

3.2.1 信号采集单元

信号采集单元采用高精度电压传感器（INA128）和电流传感器（ACS712），配合 16 位模数转换器（ADS1115），采样率达 100kHz，测量精度为 0.1%。系统支持宽范围输入：

电压：0-500V（峰值）。

电流：0-100mA（峰值）。

脉冲宽度： $10\mu\text{s}$ -1ms。

为适应不同刺激器输出，采集单元支持可调增益放大，动态范围达 80dB。

3.2.2 信号处理单元

信号处理单元包括：

低噪声放大器：增益范围 10-100 倍，噪声水平 $<1\mu\text{V}$ 。

带通滤波器：频率范围 0.1Hz-10kHz，去除环境噪声和 50Hz 工频干扰。

微控制器：选用 STM32F4 系列，具备 32 位 ARM Cortex-M4 内核，主频 168MHz，支持实时信号处理。

3.2.3 电源与安全设计

系统采用光电隔离技术，将测试电路与控制电路隔离，符合 YY 9706.102-2021 电磁兼容要求。电源模块提供 $\pm 5\text{V}$ 和 $\pm 12\text{V}$ 稳定输出，确保测量稳定性。

3.3 软件设计

软件基于 Python 开发，使用 PyQt5 构建图形化界面，集成以下功能：

测试流程自动化：根据 YY/T 0696-2021 标准，自动执行测试序列。

信号分析：采用快速傅里叶变换（FFT）分析频率，基于峰值检测算法计算脉冲宽度和幅度。

数据管理：支持 CSV、PDF 格式报告生成，数据存储于 SQLite 数据库。

软件流程如图 2 所示。

图 2 说明：软件初始化硬件后，执行测试序列，处理信号数据，生成可视化结果并存储。

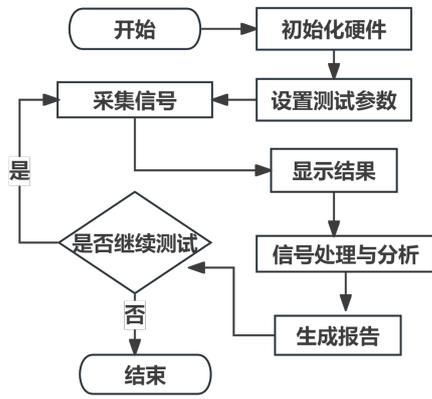


图 2 软件流程图

3.4 抗干扰设计

为应对复杂电磁环境，系统采用以下措施：

屏蔽设计：信号采集模块使用金属屏蔽罩，降低外部电磁干扰。

差分输入：减少共模噪声，提高信噪比。

数字滤波：软件端采用卡尔曼滤波算法，进一步提升数据质量。

4 实验方法

4.1 测试设备与环境

实验选用三款市售神经和肌肉刺激器（型号 A：低频 TENS，型号 B：中频 EMS，型号 C：混合型）作为测试对象。测试环境控制在：

温度：25 ± 2℃。

湿度：50 ± 10%。

电磁环境：符合 IEC 60601-1-2 标准。

参考仪器为 Keysight DSOX3034T 示波器（带宽 350MHz，采样率 5GSa/s），用于验证系统测量结果。

4.2 测试流程

设备连接：将刺激器输出端连接至测试系统输入端口，确保阻抗匹配。

参数设置：设置采样率 100kHz，测试时长 10s，测量参数包括峰值电压、电流、脉冲宽度、频率。

数据采集：系统自动采集信号，实时显示波形。

结果分析：计算参数值，与参考仪器对比，评估误差。

4.3 性能指标

系统性能通过以下指标评估：

测量精度：误差 <0.5%。

重复性：10 次测量标准差 <0.2%。

- 测试效率：单次测试耗时 <30s。

抗干扰能力：在 50Hz 干扰下，信噪比 >60dB。

5 实验结果

5.1 参数测量结果

表 1 展示了三款刺激器的测试结果与参考仪器的对比。

表 1 测试系统与参考仪器的测量结果对比

设备	参数	本系统测量值	参考仪器测量值	误差 (%)
A	峰值电压 (V)	50.12	50.05	0.14
A	脉冲宽度 (μs)	200.3	200.0	0.15
A	频率 (Hz)	100.2	100.0	0.20
B	峰值电流 (mA)	10.05	10.00	0.50
B	脉冲宽度 (μs)	150.4	150.0	0.27
C	峰值电压 (V)	120.45	120.50	0.04
C	频率 (Hz)	50.1	50.0	0.20

5.2 系统性能分析

精度：所有参数误差均 <0.5%，满足 YY/T 0696-2021 要求。

重复性：10 次测量标准差为 0.12%-0.18%，表明系统稳定性高。

效率：平均测试耗时 25s，较手动测试（约 120s）提升约 5 倍。

抗干扰能力：在 50Hz 工频干扰下，信噪比达 65dB，波形无明显畸变。

图 3 展示了设备 A 的输出波形，验证了系统的波形捕获能力。

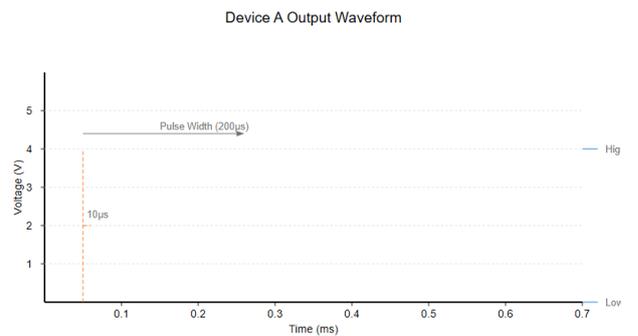


图 3 输出波形示例

图 3 说明：设备 A 的输出波形，横轴为时间 (ms)，纵轴为电压 (V)，显示清晰的矩形脉冲，上升时间约 10 μs。

5.3 统计分析

为进一步验证系统可靠性，对设备 A 进行 100 次重复测试，脉冲宽度的测量结果分布如图 4 所示。

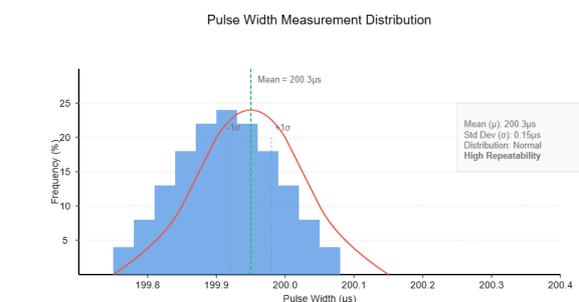


图 4 脉冲宽度测量分布

图4说明:脉冲宽度测量值的直方图,均值为 $200.3\mu\text{s}$,标准差为 $0.15\mu\text{s}$,呈正态分布,表明系统具有高重复性。

6 讨论

6.1 系统优势

与传统测试方法相比,本系统具有以下优势:

综合性:支持多参数同步测量,覆盖YY/T 0696-2021全部要求。

自动化:一键测试功能减少人工干预,提升效率。

高精度:16位ADC和数字滤波算法确保测量误差 $<0.5\%$ 。

用户友好:图形化界面简化操作,支持多格式报告导出。

6.2 应用前景

该系统适用于以下场景:

生产环节:用于出厂质量检测,确保设备符合标准。

认证测试:支持YY/T 0696-2021标准认证流程。

研发支持:为新型刺激器开发提供精准测试工具。

系统模块化设计使其可扩展至其他医疗电气设备,如心电图机或电疗仪的测试。

6.3 局限性与改进方向

尽管系统性能优异,仍存在以下局限:

测试范围:当前系统优化于低频和中频刺激器,高频($>10\text{kHz}$)信号测量需改进。

成本:高精度传感器和微控制器增加了制造成本。

便携性:系统体积较大,不适于现场测试。

未来改进方向包括:

开发高频信号处理模块,扩展测试范围。

优化硬件选型,降低成本。

设计便携式版本,满足现场测试需求。

7 结语

本研究基于YY/T 0696-2021标准,成功研发了一种神经和肌肉刺激器输出特性参数综合测试系统。实验验证表明,系统测量精度高(误差 $<0.5\%$)、重复性好(标准差 $<0.2\%$)、效率高(测试耗时 $<30\text{s}$),完全满足标准要求。系统集成高精度硬件和自动化软件,为医疗器械质量控制提供了高效工具。未来将进一步优化系统功能,扩展应用场景,降低成本,为行业发展提供更大支持。

参考文献

- [1] YY/T 0696-2021 神经和肌肉刺激器输出特性的测量. 国家药品监督管理局, 2021.
- [2] YY 9706.102-2021 医用电气设备电磁兼容检测项目. 国家药品监督管理局, 2021.
- [3] JJF2264—2025 神经肌肉刺激仪校准规范 国家市场监督管理总局, 2024
- [4] IEC 60601-1-2:2014 医用电气设备电磁兼容性要求. 国际电工委员会, 2014.

Application of weak magnetic detection technology in petrochemical pipeline integrity assurance

Jian Du Wenzhen Qian Yunfei Li Enze Wei

Shandong Province Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250101, China

Abstract

As critical infrastructure in the petrochemical industry, the integrity of pipelines directly impacts production safety and economic efficiency. Weak magnetic detection technology, with its unique advantages, is playing an increasingly vital role in pipeline integrity assurance. This paper provides a detailed explanation of the technical principles of weak magnetic detection, delving into its applications through pipeline inspection processes, data processing and analysis, defect identification and evaluation. It explores challenges and countermeasures in practical implementation while forecasting future development trends. The study aims to offer theoretical and technical support for enhancing pipeline integrity assurance in the petrochemical sector.

Keywords

weak magnetic detection technology; petrochemical pipeline; integrity assurance; application analysis

弱磁检测技术在石化管道完整性保障中的应用

杜建 钱文振 李云飞 魏恩泽

山东省天然气管道有限责任公司, 中国·山东 济南 250101

摘要

石化管道作为石化行业的关键基础设施,其完整性直接关系到生产安全与经济效益。弱磁检测技术凭借独特优势,在石化管道完整性保障中发挥着日益重要的作用。本文详细阐述弱磁检测技术原理,从石化管道检测流程、弱磁检测数据的处理与分析等方面深入分析其在石化管道检测中的应用,包括检测流程、数据处理与分析、缺陷识别与评估,探讨应用中的挑战与应对策略,并对未来发展趋势做出展望,旨在为提升石化管道完整性保障水平提供理论与技术支持。

关键词

弱磁检测技术; 石化管道; 完整性保障; 应用分析

1 引言

石化管道在石油、化工等诸多领域广泛布用,执行着原油、成品油、天然气与各类化工原料的输送事宜,基于石化管道长时间处在复杂服役情形里,受诸如腐蚀、应力、机械损伤等多因素的波及,管道完整性面临极大挑战困境,对弱磁检测技术在石化管道完整性保障当中的应用展开深入剖析,在提升管道检测精度、保障管道安全运作方面,有不可忽视的现实意义。

2 弱磁检测技术原理

2.1 弱磁检测的基本原理

2.1.1 磁致伸缩效应

所谓磁致伸缩效应,是铁磁性材料在磁场作用下长度

或体积会出现变动,若材料遭外力作用进而产生形变,其内部的磁场分布会出现一定的变动,对石化管道这个事物,经过长久的服役阶段,鉴于内压、外载、温度更迭等因素起作用,管道材料将出现应力与应变,该应力应变会借助磁致伸缩效应,造成管道表面磁场分布产生改变,由此引发弱磁的信号。

2.1.2 磁记忆效应

所谓磁记忆效应,即铁磁性材料遭受载荷作用以后,就算载荷已去除,材料内部依旧留存特定的磁性改变,该种磁性变化跟材料曾承受的最大应力状态是有关的,在石化管道里,若管道出现缺陷或存在应力集中区,受力过程里,这些部位会形成较大应力,按照磁记忆效应原理,这些区域会衍生出独特的磁记忆特征,经由对这些磁记忆特征的探查,可鉴别管道里的缺陷以及应力集中的位置^[1]。

2.2 弱磁检测的关键技术要素

2.2.1 磁传感器技术

堪称弱磁检测技术的核心要素,其性能对检测灵敏度与准确性有直接影响,弱磁检测用到的磁传感器,主要是磁

【作者简介】杜建(1984-),男,中国山东滕州人,硕士研究生,经济师、工程师,主要研究方向为长输天然气管道运营、管道完整性管理。

通门传感器、霍尔传感器、巨磁阻传感器（GMR）、隧道磁阻传感器（TMR）、原子磁力仪这些，各类磁传感器的特性与适用范畴存在差异。

2.2.2 信号处理与分析技术

由磁传感器获取的弱磁信号一般极其微弱，且易被各种各样的噪声干扰，应采取有效的信号处理与分析手段提取实用信息，常见的信号处理途径有滤波、降噪、放大、特征提取等不同形式，滤波技术可剔除信号里的高频噪声与低频干扰，提高信号在噪声中的占比；以小波变换、自适应滤波等为代表的降噪措施可进一步抑制噪声水平，突出呈现弱磁信号特征；放大技术可把微弱弱磁信号放大至可检测程度；特征提取可自处理后的信号提取可反映管道缺陷、应力集中现象的特征参数，诸如信号的峰度值、均值数、方差量、频率构成等，依靠对这些特征参数开展分析处理，可达成对管道完整性的估量和缺陷的辨识^[2]。

3 弱磁检测技术在石化管道检测中的应用

3.1 石化管道检测流程

3.1.1 检测前的准备工作

开始石化管道弱磁检测前，需开展全面且充分的筹备工作，需对检测管道基础信息开展收集与整理工作，囊括管道的材料、规格大小、铺设办法、服役年数、运行状态等，这些资料对拟定合理检测方案以及剖析检测结果有重大参考意义，要依照管道属性与检测要求，选定恰当的弱磁检测设备以及磁传感器具，还得对设备做校准、调试相关事宜，让设备性能契合检测规定，有必要对检测人员实施培训，促使其掌握检测设备操作途径及检测进程，获得信号处理与分析基础能力。

3.1.2 现场检测实施

开展现场检测这一工作之际，把弱磁检测仪器安装到管道表面，让磁传感器与管道密切贴合，保障对管道表面弱磁信号精准检测，就不同种类的管道而言，不妨采用有差异的检测途径，若谈及埋地的管道，能采用便携式检测装置，顺着管道走向开展分段式检查；若涉及架空铺设的管道，能采用在线式检测系统，完成管道的实时督察，处于检测执行阶段，应维持检测设备平稳运行，杜绝因设备晃动、移动而出现干扰信号，必须规范记录检测的所处位置、时间区间等资讯，利于后续针对检测数据实施分析处理^[3]。

3.1.3 检测后的数据分析与报告编制

检测达成后，需针对采集得来的弱磁信号数据做分析与处理，借助信号处理技术对原始数据实施滤波、降噪之类的预处理，清理掉噪声干扰，增强信号水准，依靠特征提取跟模式辨认手段，开展对处理后信号的分析，甄别管道内或许存在的缺陷与应力集中区域，且对其位置、大小以及危害的严重度进行估算，凭借检测结果编订检测报告，报告所含内容为检测管道基本信息详情、检测采用方法、检测实际结

果、缺陷分析与评价、建议跟措施等，为管道维护与管理事务提供科学层面的依据。

3.2 弱磁检测数据的处理与分析

3.2.1 数据预处理

鉴于开展检测期间，各类噪声会对弱磁信号产生干扰，诸如电磁干扰状况、环境背景噪声、传感器产生的各类噪声，该类噪声会干扰信号的真实表现和可靠水平，需对采集的数据开展预先的处理，数据预处理的关键目的是消除噪声的干扰，增高信号的信噪关系。普遍采用的预处理手段有低通滤波、高通滤波、带通滤波，还有如小波变换等，低通滤波可剔除信号里的高频噪声，维持低频信号成分留存；高通滤波可去除掉低频干扰，留存高频信号组分；带通滤波能筛选特定频率区间的信号，去掉非选定频率的噪声；小波变换属于时频分析手段，能对信号于不同的时间、频率尺度实施分析，依靠对小波系数的处置，可切实地去除噪声干扰，提取信号特征实质。

3.2.2 特征提取与模式识别

进行特征提取时，从预处理后的弱磁信号提取能反映管道缺陷以及应力集中的特征参数，这些特征参数可充当模式识别的输入项，用以判别管道是否完整，普遍采用的特征提取方式有时域特征提取、频域特征提取及时频域特征提取，时域特征提取主要是提取诸如信号峰值、均值、方差、脉冲宽度之类的参数；频域特征提取借助傅里叶变换等手段把信号转变至频率域，提取信号频率的组成成分、功率谱这类参数；时频域特征提取以结合时域与频域分析方法为途径，好比短时傅里叶变换、小波包变换等手段，可更充分、全面地体现信号特征^[4]。

模式识别借助提取的相关特征参数，采用既定分类算法对管道完整性状态予以判断，支持向量机（SVM）、人工神经网络（ANN）、决策树等属于常用模式识别办法，以统计学习理论为根基的分类手段里包含支持向量机，凭借觅取一个精良分类超平面，厘分不同类别的数据；人工神经网络呈现出极强的非线性映射与自学习本领，可自主从海量数据里摸索信号特征跟管道完整性状态的关联；决策树是采用树结构形式的一种分类途径，依靠特征参数对比与判别，逐步判定管道完整性所属类别。

3.3 石化管道缺陷识别与评估

3.3.1 缺陷类型与特征分析

在石化管道服役阶段，也许会出现各式各样的缺损，诸如腐化迹象、裂隙迹象、孔眼迹象、变形迹象，各类型缺陷生成的弱磁信号，特征呈现出差异，正常情况下，腐蚀缺陷常引起管道壁厚变窄，引起局部磁场强度呈现变化，其弱磁信号体现为特定范围的磁场梯度变动；裂纹缺陷会引起磁力线出现异常畸变，引发显著的弱磁信号，信号特征体现为急剧脉冲或骤变；孔洞缺陷会让磁场产生局部性的泄漏，引发明显的弱磁异常区间；变形缺陷将引发管道应力分布的

转变,依靠磁致伸缩效应与磁记忆效应让弱磁信号有相应变化,经对这些缺陷特征分析归纳,可形成缺陷类型与弱磁信号特征间的对应匹配,为缺陷辨识供给支撑。

3.3.2 缺陷评估方法

完成管道缺陷的识别后,必须对缺陷严重程度进行评判,判定是否需对管道实施维修或替换,一般采用的缺陷评估方法,有基于信号强度的、基于缺陷尺寸反演的及基于风险的评估方法,信号强度评估法,依据弱磁信号强度大小对缺陷严重程度作出判断,信号强度不断攀高,基本上说明缺陷严重度提升;基于缺陷尺寸反演的评估做法,是设置弱磁信号跟缺陷尺寸的数学模型,借助检测到的弱磁信号反演得出缺陷尺寸,好比长度、深度、宽度等规模,进而对缺陷严重度进行评估;基于风险的评估方法综合顾及缺陷的样式、规模、所在方位,以及管道运行状况和周边环境等情形,预估管道引发事故的风险级别,依照风险等级明确对应的维护举措。

4 弱磁检测技术应用中的挑战与应对策略

4.1 应用中的挑战

4.1.1 复杂环境干扰

石化管道一般处在复杂的工业环境当中,周边分布着各类电磁干扰源,诸如大型马达、变压器、高压线缆等,此等电磁干扰会对弱磁检测信号产生极具破坏性的干扰,引发信号失真态,降低检测结果精准度,管道表层的涂层、保温层以及周边金属构件等,均会干扰弱磁信号的传播与检测,抬高了检测的难度层级。

4.1.2 缺陷信号的复杂性

不同种类与规格的缺陷所生成的弱磁信号呈现出复杂性和多样性,且缺陷信号往往微弱异常,往往会被噪声埋没,因管道材料的不均匀属性、应力分布的复杂属性以及检测过程中的诸多不确定方面,让缺陷信号特征提取及识别的难度增大,不易精准断定缺陷的种别、位置与严重程度大小。

4.1.3 检测设备的局限性

弱磁检测设备在灵敏度、分辨率与稳定性等维度上,还存在一定的短板,难以符合对微小及复杂缺陷开展高精度检测的规范,检测设备适用范围存在一定局限,就一些材质特殊、结构特殊的管道而言,说不定不能进行有效的检测。

4.2 应对策略

4.2.1 抗干扰技术措施

为减轻复杂环境干扰对弱磁检测信号造成的干扰,可采用一系列抗干扰技术举措,采用屏蔽类技术手段,对检测设备与磁传感器采取电磁屏蔽相关举措,减少外界电磁干扰

的进犯;对检测设备电路设计进行改良,采用如滤波、降噪的电路技术,增进设备抗御干扰的实力;恰当抉择检测的时段与地点,尽可能躲开强电磁干扰源作业的时段与所处区域;在数据处理开展期间,采用自适应滤波、卡尔曼滤波等一流的信号处理手段,进一步遏制噪声的干扰现象,增强信号品质^[5]。

4.2.2 信号处理与识别算法优化

基于缺陷信号呈现出的复杂性,得持续优化信号处理与识别算法才行,深度挖掘缺陷信号产生机制及传播特性规律,结合起先进的数学理论跟方式,恰似深度挖掘、人工智能这类,进行更有效的特征提取及模式识别算法开发,强化复杂缺陷信号的鉴别能力,构建大批的缺陷样本素材库,采集并分析不同类别、不同规格缺陷的弱磁信号,对识别算法进行训练及优化,让算法的精确性与可靠性更上一层楼。

4.2.3 检测设备的研发与改进

加大弱磁检测设备研发相关的投入规模,逐步提高检测设备的性能层级,研究并开发高灵敏度、高分辨率、高稳定性的新型磁传感器,增强对细微缺陷与微弱信号的探测效能;着手检测设备结构设计的优化事宜,令其更契合不同类别管道检测要求;借助前沿的制造工艺跟材料,增进设备的稳定可靠及经久耐用程度。

5 结语

弱磁检测技术作为一种具有独特优势的无损检测技术,在石化管道完整性保障中具有广阔的应用前景。采用实施抗干扰技术举措、优化信号处理及识别算法、开展检测设备研发改进等应对策略予以解决。未来,弱磁检测技术将朝着多技术融合之路、智能检测数据分析领域、微型便携设备研制方向拓展,逐步增进其于石化管道完整性维护中的应用水平层级,为石化行业安全稳定运转给予更可靠技术支撑。

参考文献

- [1] 王轲,黄成橙,王鹏.深度学习在油气管道漏磁检测领域的应用[J].无损检测,2024,46(12):93-99.
- [2] 章卫文,翁志良,孙静.细长缺陷特征对管道漏磁检测的影响研究[J].机械设计与制造工程,2024,53(11):80-84.
- [3] 陈子严,赵弘.掺氢天然气管道氢损伤管外漏磁检测机构设计[J].机床与液压,2024,52(15):75-81.
- [4] 刘斌,罗宁,武梓涵,等.基于双磁场的管道非体积损伤检测研究[J].仪器仪表学报,2024,45(08):77-91.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412812.
- [5] 孙杰.弱磁检测技术在石化管道完整性保障中的应用[J].无损探伤,2023,47(01):36-39.DOI:10.13689/j.cnki.cn21-1230/th.2023.01.004.

Analysis of Lubricant Performance Optimization Strategy in Lubrication System of Metallurgical Machinery

Xianyong Su

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract

In metallurgical production, the operational efficiency of mechanical equipment is significantly influenced by lubrication systems. Inadequate lubrication not only accelerates component wear and increases energy consumption but may also lead to premature equipment failure or even safety incidents. Therefore, to ensure safe and efficient metallurgical production, it is essential to prioritize lubricant performance and implement effective optimization strategies to enhance lubricant properties. This approach improves the operational status of metallurgical machinery lubrication systems, thereby achieving cost reduction and efficiency improvement in production. Based on this, the article provides an overview of metallurgical machinery lubrication system operations and explores optimization strategies for lubricant performance through the application of performance testing methods. Considering the characteristics and limitations of lubricating oils and greases, this paper introduces the application of intelligent oil-gas lubrication technology in the metallurgical industry.

Keywords

metallurgical machinery; lubrication system; lubricant properties; optimization strategy; intelligent oil-gas

冶金机械润滑系统中润滑剂性能优化策略分析

苏贤涌

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要

在冶金生产中机械设备的运行效益会受到润滑系统的较大影响,若润滑不当,不仅会加剧零部件磨损、提高能耗,还可能引发设备早期失效甚至安全事故,所以想要确保冶金生产的安全、高效,则必须对润滑剂性能予以高度重视,采取有效的优化策略提高润滑剂性能,进而达到提高冶金机械润滑系统的运行状态,实现冶金生产的降本增效。基于此,文章分析了冶金机械润滑系统运行的相关概述,结合润滑剂性能测试方法的应用,对优化冶金机械润滑系统润滑剂性能相关策略进行了有效探讨。针对润滑油及润滑脂的特点和弊端,本文对智能油气润滑新技术在冶金行业应用进行了推广介绍。

关键词

冶金机械; 润滑系统; 润滑剂性能; 优化策略; 智能油气

1 引言

在国民经济体系中,冶金工业作为重要基础产业会对整个国家经济、社会发展产生直接影响。工业生产离不开对机械设备的使用,而冶金机械的安全、稳定、高效运行又需要润滑系统作为保障,其中润滑剂的性能更是对机械运行效率、使用寿命、维护成本等产生直接影响。冶金机械设备的运行具备强度高、负荷重、时间长等特点,常规的润滑方法无法满足冶金生产要求。加强对绩效润滑系统润滑剂性能的优化,更是冶金生产领域需要积极探索解决的难题。针对润滑剂性能的优化,积极探索科学合理的润滑剂选型与使用策略,对于提高冶金机械设备的运行效益有着十分重要的现实

意义。

2 冶金绩效润滑系统运行的相关概述

在冶金生产中机械润滑系统极为关键,是生产设备得以正常运行,确保生产效率,实现节能降耗的重要保障。可以说,润滑系统的运行直接关系到冶金生产的安全性、高效性。一般来说,冶金机械润滑系统主要包括润滑油系统、润滑脂系统两个部分,其中润滑油系统又涉及油箱、油泵、冷却系统、过滤系统、油压控制系统等组成部分的设计,实现对冶金机械润滑点的润滑油输送;润滑脂系统则主要是在脂润滑器的作用下对润滑点进行润滑脂的直接输送、润滑。这些润滑剂的使用,都是以降低机械运行过程中零部件摩擦、磨损为直接目的,实现生产降噪、效能提升与延长机械寿命^[1]。冶金机械运行过程中,润滑剂性能与质量、运行温湿度、设备状态、润滑剂使用方法、运维保养措施等,都会对润滑

【作者简介】苏贤涌(1984-),男,中国江西上饶人,硕士,高级工程师,从事钢铁冶设备采购管理及质量管理研究。

系统运行的稳定性、高效性产生直接影响，这就突出了润滑剂选择额度重要性。冶金机械运行的安全、持续、高效，需要确保润滑系统润滑剂较好的抗磨性、抗氧化性、抗腐蚀性等良好性能，通过对润滑系统的结构构造与运行原理进行深入研究，探索出优化润滑剂使用的有效策略，是提高冶金生产能效的重要措施。

冶金机械润滑系统的运行效果会受到润滑剂选择与性能的直接影响，其中，不同的润滑剂类型、粘度、抗氧化性、耐高温性能等，在实际的润滑效果与生命周期上也有着一定差别，同时润滑系统的设计、安装、运行等也会对润滑性能产生直接影响。润滑剂的均匀分配需要依靠对润滑设备类型、布局等的合理选择、设计，以有效的运维管理实现，以及重视做好对润滑剂、润滑系统等定期检测、清洗、更换，才能确保冶金机械较高的生产效能。

3 冶金机械润滑系统润滑剂性能测试

3.1 实地取样与室内分析

冶金机械润滑系统中润滑剂性能的评估以及润滑油在润滑系统中的表现关系需要借助性能测试来确定。首先进行实地取样，在冶金机械运行的现场进行润滑剂样品的采集，然后在实验室进行专业的性能测试，进而分析出润滑剂的实际使用性能，同时明确润滑剂处于不同工况下的变化情况。在进行润滑剂的实地取样过程中，对取样点与取样方法的确定至为关键。对于取样点的选择，应结合润滑系统运行特点、润滑剂使用要求等的综合考虑，准确把握关键润滑部位、润滑剂流动方向、润滑剂的温度变化情况，以确保样品的准确性与代表性，尤其是注意避免遭受外界污染等影响实验结果的可靠性^[2]。实验室分析则是采用化学实验与物理实验等方式对于实地采集的润滑剂样品进行全面的性能测试，获得润滑剂中的基础油、添加剂、杂质等的成分、含量分析，其中黏度试验、浸润度试验、闪点试验、凝固点实验、腐蚀性实验、抗氧化性实验是润滑剂实验室实验的固定项目，也是润滑剂选型与使用的重要依据来源，也是冶金机械润滑系统中润滑剂性能改进与优化的重要依据。

3.2 润滑剂性能测评

冶金机械润滑系统中润滑剂性能的全面测评是对其适用性、适用性评估的重要依据。一般来说，润滑剂性能测评需全面包括以下几个方面：一是润滑性能测评。降低摩擦，减少磨损是润滑剂使用的主要作用，因此润滑剂摩擦系数、磨损量的评估也是润滑性能评估的重要内容，如四球摩擦实验、磨损试验等。二是抗氧化性测评。主要是通过高温、高压环境下润滑剂氧化安定性与酸值的测试，以此来评估润滑剂的氧化、分解水平。三是冷却性能测评。冶金机械运行产热较大，设备的长时间高效运作对润滑剂的冷却性能提出较高要求。通过应用热导率测定方法、恒温挥发试验等方法，测量润滑剂热导率、热稳定性，以此来评估其冷却性能。四

是渗透性测评。润滑剂的作用发挥需要确保其能够渗透到摩擦表面形成油膜，才能达到降低摩擦磨损的目的，主要是通过对其浸润度、溶解度的测量进行润滑剂渗透性能的评估、测定。五是抗乳化性测评。冶金生产过程中润滑剂和水接触会出现乳化现象，主要采用失水试验、乳化试验等来测量润滑剂和水之间的混合性，以此来评估其抗乳化性。

4 冶金机械润滑系统中润滑剂性能优化策略

4.1 工况分析与润滑剂选型匹配

首先，应对冶金机械所处的高温、重载、粉尘、腐蚀等复杂工况进行系统性评估，包括载荷谱、温度梯度、润滑点运动模式、介质污染特征等；基于该分析，构建润滑剂选型框架，如需在高温 ($> 150^{\circ}\text{C}$) 与重载状态工作，则优先选用具备高粘度基础油、优良氧化安定性与抗剪切稳定性的润滑脂或润滑油（例如重载-高温专用润滑脂）。其次，应将润滑剂基础油类型（矿物油、合成油、酯类）与增稠剂体系（如钙基、锂基、复合磺酸钙）与设备润滑点热环境、振动情况、润滑周期及污染水平一一匹配。再次，要依据冶金设备润滑回路（油脂集中润滑/油循环/多点自动润滑）确定润滑剂的流动性、泵送适用性以及低温启动性指标。最后，对选定润滑剂进行现场小范围试用监测其油膜稳定性、磨损率变化、油体参数变化情况，确认其与设备负载工况兼容后再在系统中全面推广。

4.2 优化添加剂配方

对于冶金机械润滑系统而言，润滑剂性能的重要性毋庸置疑。对于润滑剂性能的优化改进，首先要从高性能基础油的合理选择着手，比如采用聚 α -烯烃（PAO）、酯类油、聚醚等高温性能、氧化稳定性、黏温特性更佳的合成油来代替矿物油作为润滑剂的基础油，或者是针对温度变化较大的情况下选择高粘度指数的基础油，在摩擦表面形成均匀、稳定的润滑膜，以此来满足冶金机械生产的润滑需求^[3]。或者是合理添加纳米二氧化硅、纳米四氧化三铁等纳米材料，来提高润滑剂的抗摩擦、抗磨损性能，降低机械生产能量损耗，优化设备运行工况。其次，在优化添加剂配方方面。可结合冶金机械的具体情况，综合分析润滑剂的物理化学实验测评，选择合适的添加剂，以此达到优化润滑剂性能的目的。比如，对于轧机轴承、齿轮等载重位置的润滑，可合理使用如硫化物、磷化物、氯代物、硼酸盐等极压抗磨添加剂，进而能够在高负荷和边界润滑条件下形成保护膜，防止金属直接接触与磨损；合理使用胺类、酚类等抗氧化剂，延缓油品在高温下的氧化变质，延长换油周期的同时，有效减少油泥和酸性物质生成，保护设备不被腐蚀；其他诸如抗乳化剂、防锈防腐剂、分散剂、清净剂、摩擦改进剂等合理使用，都能有效优化润滑剂性能。除此之外，针对超高温、真空、强辐射等液体润滑剂不适用液体润滑剂的极端工况，可合理使用石墨、二硫化钼、聚四氟乙烯等固体润滑添加剂来提高

润滑系统的性能。

4.3 优化润滑剂的使用方法

润滑剂的使用方法也会对冶金机械润滑系统的运行产生直接影响,同时优化润滑剂的使用方法也是提高润滑剂性能的重要措施。一是优化润滑剂添加方式。润滑剂在冶金机械中的分布情况、使用效果等会受到润滑剂添加方式的直接影响。一般来说,需要确保润滑剂在机械表面形成均匀分布的润滑膜,才能确保润滑效果最大化。通过对润滑剂喷洒方式的合理优化,以及改进喷洒设备的方式,确保润滑剂能够全面、均匀、长时间覆盖至需要润滑的部件整体。二是优化润滑剂黏度与润滑膜厚度。润滑剂的黏度会影响润滑膜的形成与效果的持续性。通常情况下,润滑剂的润滑效果与其黏度、膜厚度成正相关关系。通过合理、准确的实验测评,对润滑剂组分与配方进行调整,得到机械标准运行工况下润滑剂的最佳黏度与厚度,确保机械运行过程中润滑膜的高度稳定。三是要优化润滑系统设计。润滑剂性能的优化需要通过加强对润滑系统的优化设计与管理,才能实现最佳的润滑效果。通过引入自动润滑系统对润滑剂的用量与润滑频率进行精准控制,避免润滑过多或润滑不足,熟悉按需润滑。加强对润滑剂的清洁度管理,通过使用精度较高的过滤器对去除润滑剂中的杂质与磨损颗粒,提高润滑剂的纯度。做好对润滑剂状态的在线监测与油液分析,通过对润滑剂的黏度、颗粒度、酸值、水分等的定期监测,及时发现润滑剂使用存在的问题,进而采取针对性的应对措施^[4]。

4.4 优化润滑剂生产、应用成本

在冶金机械生产过程中,润滑剂的使用量较大,优化润滑剂生产、应用成本,也是优化润滑剂性能的重要策略。在润滑剂的生产方面,通过对润滑剂的合成工艺进行改进、优化,实现原料利用率、生产效率的最大化,能够有效降低润滑剂的生产、应用成本。或者是加强对可代替产品,新型润滑剂的开发,也是实现润滑剂性能降本增效的重要策略。除此之外,在应用管理方面,还需要重视做好对润滑剂的管理与节约使用,避免不必要的消耗浪费。比如,在机械设备的日常维护过程中,对润滑系统中废弃、沉积的润滑剂进行及时清洗、更换,也是降低润滑剂使用浪费的重要措施。以及通过对润滑剂添加频率、添加量的合理调整,切实将润滑剂的使用控制在合理范围,也能实现润滑剂使用降本增效的效果。

4.5 优化润滑管理

加强对润滑剂性能测试的标准化化管理,也是优化冶金机械润滑系统润滑剂性能的重要策略。通过加强对润滑剂性能测试方法的研究,提高润滑剂性能测试的准确性、全面性、可靠性,为润滑剂的最优选择提供依据。比如,通过开发高温高压多因素耦合试验平台等与冶金机械运行实际工况更为接近的测试设备与方法,引入智能感知与数字仿真技术等,推动传统的经验型润滑剂性能测试的智能化转变,切实

提高润滑剂性能的测试水平。在润滑剂技术的创新与优化方面,需要重视加强对润滑剂成分、配方等的优化改进,通过加强对基础油类型的选择把控,合理设计添加剂体系,引入纳米粒子等新型功能材料,加强多学科方法融合等,切实提高润滑剂的抗摩擦、抗磨损、承载力等关键性能,实现润滑剂综合性能的显著提升,更好地适应复杂环境下冶金机械的润滑需求。同时需要加强对润滑剂使用与管理的宣传、培训,切实提高设备操作、管理、维护等人员对于润滑剂使用的认识,实现对润滑剂的正确使用、管理,充分发挥润滑剂性能效果。除此之外,还应加强对冶金机械润滑系统运行的监控,针对维护工作实施建档管理,准确、全面记录润滑剂的检查、维护情况,为提高润滑剂的使用性能提供依据。

5 冶金润滑系统中新技术智能油气润滑应用

针对以上润滑油及润滑脂的特点和弊端,本文介绍推广目前流行的智能油气润滑技术,智能油气润滑简单说就是把润滑油和压缩空气精准混合,通过数字化系统按需输送到设备关键部位,彻底告别传统润滑的粗放模式。具体表现上,这套系统能对每个润滑点单独设定供油时间和油量,像“精准滴灌”一样直达摩擦点;同时配备在线监测和预警功能,不管是缺油、油嘴堵塞,还是油水混合等问题,都能实时发现并精准定位故障点,还能通过云端平台远程监控和调整参数。其已经从精准供油向智慧运维及绿色低碳全面升级,核心趋势可概括为更智能、更精准、更绿色、更集成、材料新、服务好。

中冶京诚已将智能油气润滑实际应用在几条酸轧机组上,效果十分显著。一方面大幅降本增效,油耗较传统方式大幅降低,部分改造后月均油耗降幅超 27%,油泥产生量也下降 60% 以上,减少了润滑油浪费和后续处理成本;另一方面设备稳定性大幅提升,压缩空气形成的正压能阻挡乳化液等杂质侵入,轴承温度显著降低,基本杜绝了轴承烧损、轧辊黏连等故障,延长了设备寿命,减少了停机维修时间。此外还更环保,避免了润滑油泄漏污染,配合相关系统优化后,还能辅助减少含酸废水排放,符合绿色生产要求。

对行业而言,这一应用有着重要引领意义。它破解了酸轧机组恶劣工况下的润滑难题,为行业提供了可复制的智能润滑方案;推动了钢铁行业酸轧机组从传统运维向数智化、绿色化转型,助力行业在降本增效的同时实现低碳环保目标;也彰显了自主集成技术的优势,为钢铁装备核心系统的国产化升级和技术革新提供了有力支撑^[5]。

6 结语

综述可知,润滑剂的性能会对冶金机械润滑系统的运行效果、使用寿命等产生直接影响,进而影响生产效益。大家需要重视加强对润滑剂性能实验、分析等工作的高度重视,探索优化润滑剂性能的有效策略,为冶金机械的高效率、长寿命运行提供保障。而智能油气润滑技术的发展趋势正从

根本上重塑润滑行业，带来多维度的变革。其精准润滑技术大幅降低润滑油消耗量，推动了行业从规模扩张向质量效益提升转型。

参考文献

- [1] 张明.冶金机械润滑系统中润滑剂性能优化策略研究[J].中国金属通报, 2024(12):174-176.
- [2] 马威.润滑油在冶金机械设备检修中的应用研究[J].大众科学, 2024, 45(4):29-31.
- [3] 秦晓敏,高云龙,冯磊.冶金机械设备润滑技术研究与应用[J].冶金与材料, 2025, 45(4):89-91.
- [4] 王超,曾良才,陈娟,等.油润滑下不同槽宽网状织构表面润滑特性研究[J].机床与液压, 2023, 51(22):7-11.
- [5] 毛召芝, 沈志前等.绿色数智化流体系统推进酸轧联合机组工艺技术变革再造,中国会议, 2023.