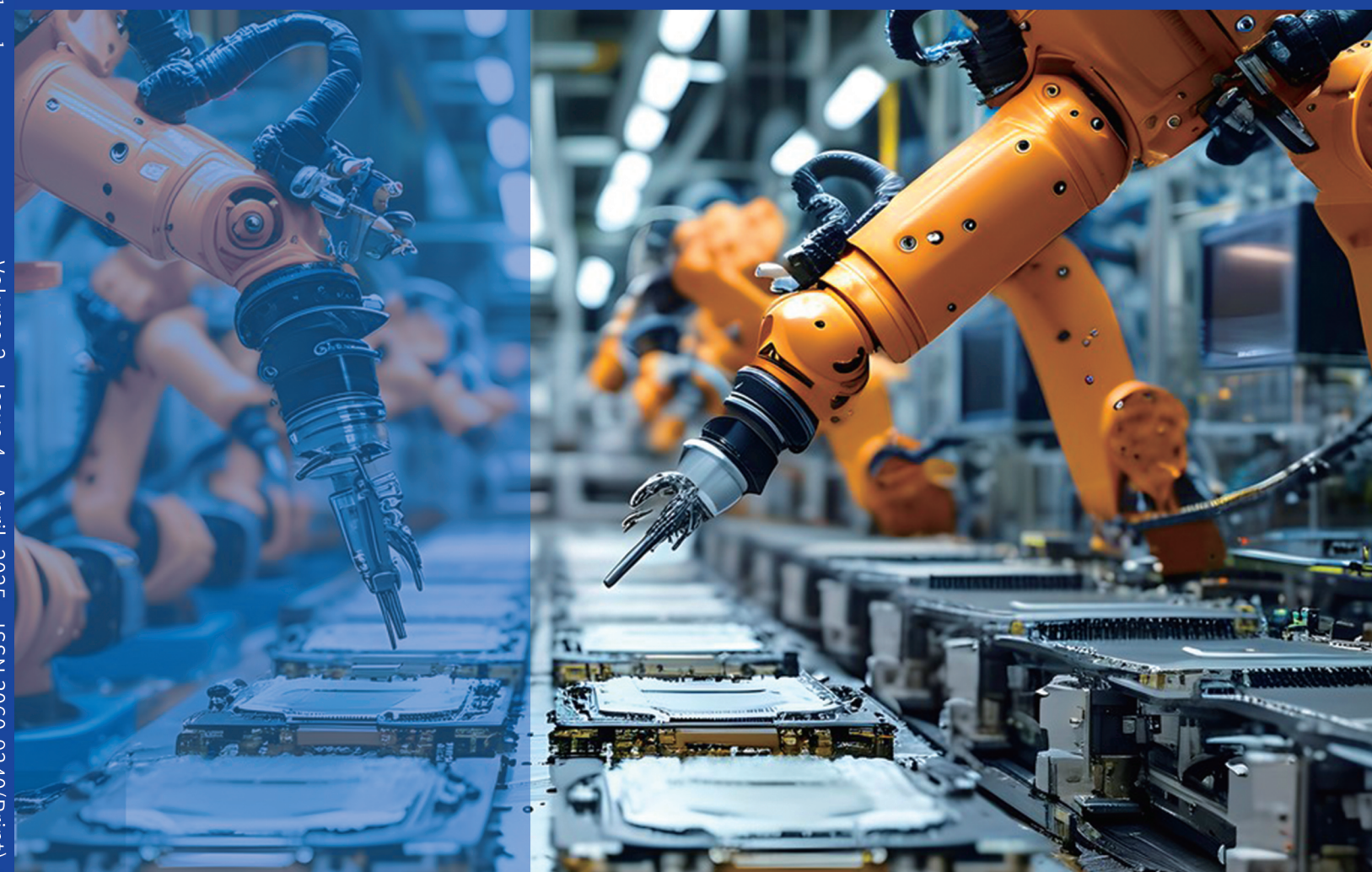


现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 4 • April 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



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

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

中文刊名：现代工业与技术

ISSN：3060-9240（纸质）3060-9259（网络）

出版语言：华文

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

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

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

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《现代工业与技术》征稿函

期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN：3060—9240（Print） 3060—9259（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-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。

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

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



现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 4· April 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

编委会

主 编

蒋 晶 郑州大学

编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

郭乃信 通力电梯有限公司

1	工业系统中吸收式热泵技术的应用对策思考 / 方志军				/ 张龙华
4	管道运输中的流体力学特性及其对能效的影响研究 / 郑冰	25	钢铁涂层液含铬废水处理零排放工艺的应用研究 / 刘沙河 黄连松		
7	探讨模块化设计方法在机械设计中的应用 / 印宇	28	再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法 / 李乐 韩明明 刘新文 王加栋		
10	高效立式电动拉床整体结构设计探析 / 朱晓东	31	下向焊接工艺在油气长输管道焊接中的运用对策 / 陈强		
13	基于新型催化剂的烟气脱硫脱硝协同反应路径优化研究 / 李宏宇	34	高分子复合材料合成及性能调控 / 郭茂林		
16	炼油废水化学需氧量贡献物质的研究 / 曲鲁静 陈会仙	37	44dtex/48f 全消光细旦涤纶高弹 DTY 的开发 / 张慧敏 周文龙		
19	面向小批量锻造生产的柔性安全操作规程生成与验证方法 / 董国立	40	智能化技术赋能爆破器材生产线优化 / 郭小华 唐棠		
22	基于 LCC 理念的沥青混凝土路面综合养护方法探析	43	海底电缆中间接头状态监测设计技术研究 / 顾勇 陈伟毅		
		46	水下中压大功率无线电能耦合传输谐振补偿设计 / 许凌月 张鹏 朱逸云 迟震 张志峰		

1	Thoughts on Application Countermeasures of Absorption Heat Pump Technology in Industrial Systems / Zhijun Fang			of chromium-containing wastewater from steel coating solution / Shahe Liu Liansong Huang
4	Study on Fluid Dynamics Characteristics in Pipeline Transportation and Its Influence on Energy Efficiency / Bing Zheng	28		Optimization method of weld quality for water regeneration pipeline welding robot / Le Li Mingming Han Xinwen Liu Jiadong Wang
7	This paper discusses the application of modular design method in mechanical design / Yu Yin	31		Application strategy of down-welding technology in long distance oil and gas pipeline welding / Qiang Chen
10	Analysis on the overall structural design of high-efficiency vertical electric lathe / Xiaodong Zhu	34		Synthesis and performance control of polymer composites / Maolin Guo
13	Research on Optimization of Synergistic Reaction Path for Flue Gas Desulfurization and Denitrification Based on New Catalysts / Hongyu Li	37		Development of 44dtex/48f fully dull fine denier polyester high elastic DTY / Huimin Zhang Wenlong Zhou
16	Research on the Contributing Substances of Chemical Oxygen Demand in Refining Wastewater / Lujing Qu Huixian Chen	40		Intelligent technology enables the optimization of blasting equipment production line / Xiaohua Guo Tang Tang
19	A flexible safety operation procedure generation and verification method for small batch forging production / Guoli Dong	43		Research on the Design Technology of Monitoring the State of Intermediate Joints in Submarine Cables / Yong Gu WeiyiChen
22	Analysis of comprehensive maintenance method of asphalt concrete pavement based on LCC concept / Longhua Zhang	46		Resonant Compensation Design for Underwater Medium-voltage High-power Wireless Power Coupling Transmission / Lingyue Xu Peng Zhang Yiyun Zhu Zhen Chi Zhifeng Zhang
25	Application study of zero discharge process in treatment			

Thoughts on Application Countermeasures of Absorption Heat Pump Technology in Industrial Systems

Zhijun Fang

Jiangxi Copper Group Guixi Smelter, Guixi, Jiangxi, 335424, China

Abstract

The operation of industrial systems generates substantial emissions of exhaust gases, wastewater, and waste heat, which has become a critical bottleneck constraining sustainable industrial development. According to 2023 statistics from the International Energy Agency (IEA), 54% of global industrial energy consumption is lost as waste heat, with medium-temperature waste heat (80~150°C) accounting for as much as 38% of this total - equivalent to approximately 7.8×10^{18} J of energy wasted annually. In this context, absorption heat pump technology has emerged as one of the most promising solutions for industrial waste heat recovery due to its unique thermally-driven characteristics. Through thermodynamic cycles, this technology can effectively transform low-grade industrial waste heat into usable thermal energy. It not only enables heat recovery at scales of several gigajoules (GJ) per hour, but can also improve overall industrial system energy efficiency by more than 20%.

Keywords

industrial systems; absorption heat pump technology; waste heat recovery; application

工业系统中吸收式热泵技术的应用对策思考

方志军

江西铜业集团贵溪冶炼厂，中国·江西 贵溪 335424

摘 要

工业系统的运行伴随着大量废气、废水和废热的排放，已成为制约工业可持续发展的关键瓶颈问题。根据国际能源署（IEA）2023年统计数据，全球工业能耗总量的54%以余热形式流失，其中80-150°C中温区余热占比高达38%，相当于每年约 7.8×10^{18} J的能量被浪费。在这一背景下，吸收式热泵技术因其独特的热驱动特性，成为工业余热回收领域最具前景的技术方案之一。该技术通过热力学循环将低品位工业余热转化为可用热能，不仅能实现每小时数吉焦（GJ）级的热能回收，更能使工业系统整体能效提升20%以上。

关键词

工业系统；吸收式热泵技术；余热回收；应用

1 引言

工业生产虽然能够推动人类生产力的进步与发展，但是工业系统运行中产生的能源消耗之大，也对社会经济的进一步发展产生了影响。如何对工业余热进行回收，提高工业系统运行中的能源利用率，减少能源浪费问题，成为现阶段相关从业者亟待解决的问题。将吸收式热泵技术应用到工业系统当中，具有十分重要的意义。但是，如何将吸收式热泵技术应用到工业系统当中，却是一个值得深入思考的问题。

2 吸收式热泵技术原理及系统特性

2.1 技术基本原理

吸收式热泵是一种以热能为驱动力的高效能量转换装

置，其工作原理基于热力学吸收循环，可有效的将低温余热热量提取出来，通过工质对的吸收—解吸的方式进行内循环，转化为中温热源，以达到实现热能的品位提升。满足实际工艺系统的运行需求。该系统主要由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液热交换器以及节流装置等主要核心组件。

2.2 工质体系分析

作为吸收式热泵的关键要素，热交换介质是热泵能否搞笑运行的关键。氨水（ $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ ）工质溶液和溴化锂（ $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ ）工质溶液就是吸收式热泵技术得到有效应用的关键之一。当前工业应用中采用的这两类工质，各有优势。

2.3 系统工作流程

目前，溴化锂工质溶液是现阶段应用最广泛的工质之一，作为吸收式热泵采用的主要工质^[1]。吸收式热泵系统运行过程可分为四个主要阶段（如图1所示），其分为发生过程—冷凝过程—蒸发过程—吸收过程的循环流程。

【作者简介】方志军（1993-），男，中国江西上饶人，本科，工程师，从事热能与动力工程研究。

表 1 溴化锂和氨水工质性能

工质性能	溴化锂 (LiBr-H ₂ O)	氨水 (NH ₃ -H ₂ O)
优点	制冷剂（水）汽化潜热大，无结晶风险（在适当浓度范围内）	适用温度范围广（-60 ~ 200℃）
缺点	对碳钢等金属材料具有腐蚀性，腐蚀速率可达 0.3-0.5 mm/year（140℃工况）	需增设精馏装置，系统复杂度提高约 30%

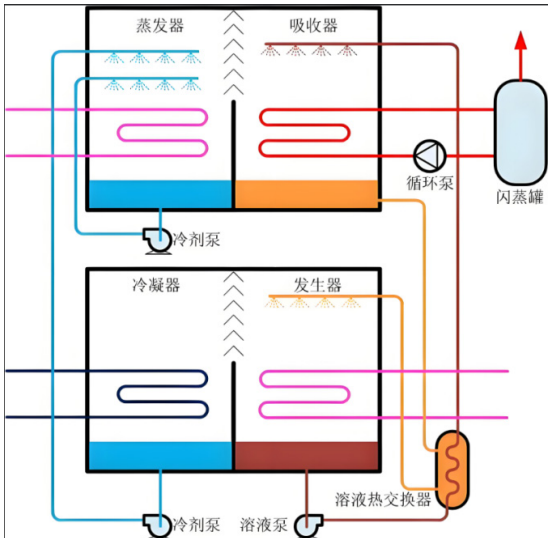


图 1 吸收式热泵系统运行流程

高温烟气或高温蒸汽(余热)把稀溶液在发生器中加热，产生制冷剂蒸汽(发生过程)；产生的制冷剂蒸汽进入冷凝器中放热凝结，并把热量传递给工艺用水(冷凝过程)；凝结后的液态制冷剂通过冷剂泵经节流后送入蒸发器内，然后吸收低温热源的热量后蒸发(蒸发过程)；蒸发后的制冷剂蒸汽被来自发生器的浓溶液吸收，同时释放吸收热(吸收过程)；整个循环过程将低温热源汇集后传递给工艺热水，达到回收低温余热的目的。

2.4 技术优势与现存局限分析

吸收式热泵技术相较于传统压缩式热泵具有显著的节能优势，其电能消耗仅相当于压缩式系统的 20%，这一特性使其在工业节能领域具有独特价值。系统采用热驱动原理，可直接利用 80-150℃ 的工业废热作为驱动能源，实现能源的梯级利用。

在结构设计方面，由于没有压缩机等运动部件，系统运行噪音控制在 60dB 以下，大幅改善了工作环境。然而，该技术仍存在若干亟待突破的局限：首先，系统体积较压缩式热泵增大 30-50%，这对安装空间提出了更高要求；其次，部分负荷性能下降明显，当负荷率降至 50% 时，系统 COP 值将衰减约 25%；此外，较高的初始投资成本（约 5000 元 /kW）也在一定程度上限制了技术推广。

3 工业系统中吸收式热泵技术的应用必要性

3.1 工业能源利用现状与挑战

现代工业生产过程中存在着突出的能源利用效率问题，该问题目前已成为各行业亟待解决的问题，是制约工业绿色

发展的主要瓶颈。

工业过程中的余热损失主要通过三个主要途径流失：首先是锅炉排烟系统，其排放温度通常在 150-250℃ 之间；其次是工艺冷却水系统，带走的余热温度在 60-90℃ 范围；最后是各类生产设备的表面散热，温度维持在 80-120℃ 水平。这些废热若不加以回收利用，不仅造成巨大的能源浪费，还会对环境产生额外的热污染。特别值得注意的是，在钢铁、石化等高耗能行业，余热损失比例甚至超过 50%，这既增加了生产成本，又加剧了碳排放压力。

3.2 余热回收的技术经济价值分析

吸收式热泵技术在工业余热回收领域展现出显著的综合效益。从能源效益角度来看，该技术可提升工业系统整体能源利用率 20-35%，每回收 1GJ 余热相当于节约标准煤 34.12kg，大幅降低了能源消耗强度。经济效益方面，实际工程案例表明，典型项目的投资回收期稳定在 2.5-4 年之间，通过优化系统运行管理，可实现年运行成本降低 15-25%，具有较好的投资价值。在环境效益维度，单套吸收式热泵系统年均可实现 5000-10000 吨 CO₂ 减排，同时通过闭式循环设计可减少冷却水用量 30% 以上，有效缓解了工业用水压力。

这些效益指标充分证明了吸收式热泵技术在推动工业绿色低碳转型中的重要价值，为工业企业实施节能改造提供了可靠的技术选择。值得注意的是，随着碳交易市场的完善和能源价格波动，该技术的经济回报率有望进一步提升。

3.3 技术应用的意义

吸收式热泵技术在工业领域的推广应用具有深远的价值意义，主要体现在以下三个方面：首先，是调整能源的结构方面，该项技术可以有效的替代传统意义上的燃煤锅炉，将能源转变为清洁能源，达到的高效利用的目的，实现能源的梯级利用，显著优化工业用能结构，并成为推动工业绿色转型的重要技术支撑。

表 2 典型行业余热回收潜力分析

行业	余热温度 (℃)	回收潜力 (%)	适用 AHP 类型
石化	90-180	40-55	第一类
钢铁	150-350	30-45	第二类
食品	60-120	50-65	第一类

4 工业系统中吸收式热泵技术的优化应用策略

4.1 高效余热回收技术创新应用

吸收式热泵技术在工业余热回收领域的创新应用需要

系统性的技术升级方案。以溴化锂溶液工质系统为例,其在燃气锅炉烟气余热回收中的实际运行数据显示,对于120-180℃温度区间的烟气余热回收率可达65%以上,展现出显著的技术优势。然而,深入分析表明现有系统仍存在两个关键性技术瓶颈:一是效能指标偏低,COP值普遍维持在1.4-1.6区间,未能充分发挥技术潜力;二是余热二次利用率不足,仅达到30-40%的水平。

针对这些问题,本研究提出三个维度的优化措施:首先,建立基于热力学分析的余热品位分级利用体系,通过精确计算确定最佳回收比例,实现能量的梯级利用;其次,对热交换器传热结构进行创新设计,采用波纹管等强化传热技术,可使传热系数提升20-25%,显著改善换热效率;第三,重点优化工质循环系统,开发新型高效溶液泵,预计可降低循环功耗15-20%。这些技术创新措施的实施,将有效突破当前的技术瓶颈,为吸收式热泵技术在工业领域的规模化应用奠定坚实基础。

4.2 系统集成与协同优化实施策略

吸收式热泵系统的性能提升必须采用整体优化的系统工程方法,重点从三个维度推进集成优化工作。在多维度系统集成方面,首先需要实现热力系统与生产工艺流程的深度耦合,确保热能供需的精准匹配;其次要开发具有自适应特性的先进调控算法,提升系统动态响应能力;最后应构建多能互补的综合能源体系,实现不同能源形式的协同优化。在关键技术优化方向上,重点包括:采用多级吸收技术可使系统效率提升12-15%;基于夹点分析原理重构换热网络,显著改善热回收效率;建立考虑能耗、成本、可靠性等多目标的优化模型,实现运行参数的最优配置。

4.3 新型工质与材料的研发应用方向

为应对日益严格的环保要求和技术挑战,新型工质和材料的研发应用已成为吸收式热泵技术发展的关键突破口。从表4的新型工质性能比较可以看出,传统LiBr-H₂O工质虽然工作温区适中(5-150℃)、COP值较好(1.5-1.8),但存在腐蚀性高、环保性一般的缺陷;相比之下,新兴的离子液体工质不仅拓宽了工作温区(-20-200℃),提升了

COP值(1.6-2.0),更兼具低腐蚀性和优良环保性的特点;而NH₃-H₂O工质则在超低温领域(-60℃)展现出独特优势。

基于此,研发工作应重点聚焦三个方向:首先,在高性能工质体系方面,需要开发具有更宽温区适应性的离子液体工质,研究纳米流体添加剂对工质性能的增强作用,并通过实验优化工质配比;其次,在新型结构材料领域,应着力研发耐腐蚀复合传热管、高性能防腐涂层和新型密封材料;最后,在系统兼容性研究上,要深入探究工质-材料相互作用机理、长期运行稳定性规律以及失效机理分析。

5 结语

综上所述,吸收式热泵技术在工业中的应用潜力非常大。但是,受到多方面因素的影响,吸收式热泵技术的应用还有很多不成熟之处,如:系统运行稳定性不足(负荷波动下COP波动达±25%)、经济性门槛较高(初始投资较压缩式系统高40-60%)、环境适应性受限(极端工况下效率衰减20-25%)。

未来要提高余热回收技术,不但需要加强系统与集成技术的优化应用,同时也要提升新型工质与材料的研究与应用,才能从根本上提高吸收式热泵系统的运行性能,为工业系统的绿色、生态化发展提供保证,为实现"双碳"目标做出重要贡献。

参考文献

- [1] 冶永福. 热电厂利用“吸收式热泵”进行余热供暖技术的分析研究[J]. 节能,2020,39(6):132-134.
- [2] 张建平. 吸收式热泵技术在工业余热回收中的应用与前景[J]. 科技资讯,2024,22(16):206-208.
- [3] 赵云凯,姜晓静. 吸收式热泵利用排汽余热(火用)分析[C]//全国工业烟气余热深度回收利用技术与产业发展论坛论文集. 2019:112-115.
- [4] 杨向儒,刘仁杰,高飞. 清洁能源耦合吸收式热泵技术研究现状[J]. 模型世界,2023(5):58-60.
- [5] 周勇,郝日鹏,魏航,等. 基于吸收式热泵技术的区域清洁供暖研究[J]. 工业加热,2021,50(9):36-40.

Study on Fluid Dynamics Characteristics in Pipeline Transportation and Its Influence on Energy Efficiency

Bing Zheng

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

Abstract

As a crucial method for modern energy and material transportation, pipeline transport efficiency is profoundly influenced by fluid dynamics characteristics. The motion state of fluids within pipelines, their physical properties, and interactions with structural conditions directly determine system pressure loss, energy consumption levels, and operational stability. By analyzing the differences in flow patterns between laminar and turbulent flows, defining Reynolds numbers, studying boundary layer effects, and examining how viscosity, density, and temperature regulate flow behavior, we can reveal the underlying mechanisms of energy loss. Additionally, parameters such as pipe diameter, component structures, and surface roughness play critical roles in flow resistance formation and energy transfer. Combining control strategies with numerical simulation optimization techniques enables effective enhancement of transport efficiency and energy consumption control, providing theoretical support and technical pathways for efficient energy system operation.

Keywords

Fluid dynamics characteristics; Pipeline transportation; Energy efficiency analysis; Flow state; Structural parameters

管道运输中的流体力学特性及其对能效的影响研究

郑冰

吉林梦溪工程管理有限公司, 中国 · 吉林 吉林 132000

摘 要

管道运输作为现代能源与物料传输的重要方式, 其运行效率受到流体力学特性的深刻影响。流体在管道内的运动状态、物理属性及与结构条件的相互作用, 直接决定了系统的压损程度、能耗水平及运行稳定性。通过分析层流与湍流的流态差异、雷诺数界定、边界层效应以及粘度、密度、温度等因素对流动行为的调节作用, 可揭示能效损耗的内在机制。同时, 管道直径、构件结构与表面粗糙度等参数在流阻形成与能量传递中扮演关键角色。结合控制策略与数值模拟优化手段, 可有效实现输送效率提升与能耗控制的目标, 为能源系统的高效运行提供理论支持与技术路径。

关键词

流体力学特性; 管道运输; 能效分析; 流动状态; 结构参数

1 引言

随着能源基础设施的不断升级, 管道运输在油气、水资源和化工物料等大宗流体的远距离输送中发挥着不可替代的作用。相比其他运输方式, 管道系统具有连续性强、自动化程度高、运行成本低等优势, 但其能效水平却受到流体力学行为的显著影响。流体在管道中的运动并非理想状态, 而是受到流速、粘性、湍流发展、构件干扰等多重因素的调制, 进而导致压损增加和能源浪费。与此同时, 管道系统的结构设计、运行工况与流体属性之间存在复杂耦合, 优化这些变量之间的关系成为提升运输效率的关键。本文从流体力学视角出发, 系统探讨管道运输中的流动特性与能耗之间的

联系, 并提出具有针对性的能效优化路径, 以期对相关工程提供技术依据。

2 管道运输中流体运动状态的基本特征

2.1 层流与湍流条件下的流速与压力分布规律

在管道内进行流体输送时, 流体的流动状态对速度分布和压力梯度的影响极为关键。层流状态下流速呈抛物线分布, 中心流速最大, 靠近壁面的速度趋于零, 压降主要由黏性摩擦引起。湍流状态下速度分布趋于扁平化, 流体颗粒间动能交换频繁, 导致沿程压损显著增加。流速的波动性与压力变化在湍流中更加剧烈, 使得流场特征复杂化。管道断面上不同位置的速度梯度与流体黏性形成剪切应力, 对能量损耗造成直接影响。

2.2 雷诺数临界值对流态变化的判定机制

雷诺数是判断管道内流体流态的重要参数, 其定义为

【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研究。

惯性力与黏性力的比值,数值大小直接决定流动状态的转变。当雷诺数低于约 2000 时,流体维持稳定层流状态,流线平行无扰动;超过 4000 后,流动呈现明显的湍流特征,能量交换强烈,压损剧增。临界值区间之间的过渡状态对系统运行稳定性提出挑战,微小扰动可能触发流动失稳。雷诺数受流速、管径和流体黏度共同影响,在实际工程中通过控制这些变量可延缓湍流的产生。对雷诺数与压损、流速分布等物理量的函数关系进行分析,有助于预测系统能耗变化趋势,指导参数优化,提升运行效率^[1]。

3 管道系统结构对流体行为的调控作用

3.1 管径与输送流量的数学关系建模

管道直径是决定流体输送能力的核心参数,与流量之间存在显著的非线性关系。在层流状态下,根据哈根-泊肃叶定律,体积流量与管径的四次方成正比,管径变化对输送能力影响显著。在湍流状态中,尽管流量受管径控制仍较为明显,但还需考虑流态不稳定带来的附加损耗。增大管径虽能降低流速和摩阻系数,但也增加建设成本与占地面积。因此,需结合伯努利方程、连续性方程及能量损失模型进行综合建模,求解在不同输送需求和管道长度条件下的最优管径。通过参数优化分析,可在保障输送效率的前提下降低泵送能耗,实现系统经济性与运行能效的平衡。

3.2 局部构件引发的流动阻力与压损变化

在实际管道系统中,弯头、三通、阀门等局部构件不可避免地会对流体产生附加阻力。这些构件改变了流线方向与速度分布,使局部区域出现漩涡、回流和湍动现象,导致能量损失集中。局部阻力通常用阻力系数表征,其数值受构件几何形状、流体状态与安装方式影响较大。例如直角弯头较大曲率弯头的阻力系数更高,压降也更显著。不同构件的组合方式对系统总阻力贡献不同,通过布置优化与形状改进可在不影响功能的基础上减少局部能耗。研究这些构件的流动干扰特征及其与主流相互作用规律,有助于在系统设计阶段进行有效调控,提高整体输送效率与运行经济性。

3.3 内壁粗糙度对摩阻系数与能耗的影响

管道内壁的粗糙度对流体运动形成直接干扰,尤其在湍流状态下,其作用更为显著。粗糙表面会增加边界层扰动强度,形成小尺度旋涡结构,导致流体动能向热能转化加剧,引发能耗升高。摩阻系数作为衡量壁面摩擦效应的参数,随粗糙度提升而增大,并在临界雷诺数后呈非线性增长趋势。工程中常采用内衬材料、喷涂涂层或抛光处理等方法降低粗糙度,减小摩擦力损失。不同材料与处理方式对流阻的抑制效果存在差异,应结合实际工况进行比选。通过实验测定与数值模拟手段对粗糙度与摩阻变化规律进行量化建模,有助于提升输送系统的能效表现与使用寿命。

4 流体物理性质对运输能效的作用机理

4.1 粘度参数对压力损失和泵功的耦合效应

流体的粘度直接影响其在管道中的流动状态和所需的能量输入。高粘度流体在流动过程中产生的剪切阻力显著增强,使得沿程压降明显加大,从而要求泵机提供更大的驱动力以维持预定流速。此过程中的能量转化效率会受到粘性耗散的持续削弱,导致整体泵功需求急剧上升。不同粘度条件下的摩阻特性变化不仅改变了管道内的速度分布形态,也对系统压损模型的适用性提出挑战。在实际工况中,流体粘度往往与温度相关,呈现出非线性变化趋势,因此需要在控制系统中嵌入动态调节功能以适应粘度波动对流动特性的影响。在层流状态下粘度占主导作用,能耗主要集中于内摩擦力所致的压降;而在湍流状态中,虽然惯性力主导流场,但粘度依然通过影响临界雷诺数及边界层行为间接控制能量损耗。因此在系统设计与运行管理中,应准确测定并动态跟踪流体粘度参数,通过模型化耦合分析粘度变化与泵功需求之间的定量关系,实现输送功耗的最优调配^[2]。

4.2 密度波动对流动惯性与动能传递的影响

密度作为衡量流体单位体积质量的基本参数,在管道运输中对惯性特征及动能传递效率起到关键控制作用。密度增大会显著提升流体在单位体积内所蕴含的动能,同时也提高了流体在加速、减速及方向改变时的惯性阻力,对输送系统中的流动调节机制构成挑战。密度变化还将影响管内压强梯度与静压力分布规律,进而作用于泵机的负载响应。对于多相混输或存在温度梯度的系统,密度分布呈现非均匀状态,在垂直管段中尤为显著,常引发分层流、回流及不稳定区的形成,从而造成能耗激增。密度波动还对声速传播速度、压缩性响应和压力波动特征构成干扰,使系统更易发生振荡和共振现象,降低流动效率与结构安全性。因此在设计和运行管道系统时,应将密度波动纳入输送模型中,对流体动能的空间传递路径进行细化解析,借助惯量控制、质量守恒方程与能量守恒关系实现对密度变化带来的能效波动进行动态调节,以稳定运输状态与降低能源消耗。

4.3 温度对体积流量与黏滞力的双重调节

温度作为影响流体物性的重要变量,其在管道输送中的变化会同时作用于流量规模与阻力大小。温度升高通常会降低流体的动态粘度,削弱分子间作用力,使流体更容易克服摩擦力,从而降低压降并减少所需泵功。然而,温度变化还会引起体积膨胀或压缩,从而影响流量恒定性。对于液体而言,高温可导致体积膨胀率上升,增加输送体积流量;对于气体,温度提升对体积变化的敏感性更强,流量波动幅度更大,需通过流量计与调控阀实现精细调节。温度变化还影响流动状态转变的临界条件,使层流与湍流之间的临界雷诺数发生偏移,引发流动不稳定,进而增加系统的能耗与控

制复杂度。温度场不均所造成的热对流与密度差驱动现象也可能在特定管段内形成局部流动扰动,干扰主流路径的稳定性。因此在热敏感型流体输送系统中,应将温度参数纳入实时监控与调节环节,通过保温材料、热交换设备与在线调温技术维持温度稳定,在保障体积流量充足的同时有效抑制因黏滞力波动带来的能耗不确定性。

5 提升管道运输能效的流体力学控制策略

5.1 通过变频控制实现压力与流速的动态匹配

管道运输中的能效提升不仅依赖于静态结构优化,还需要动态控制手段以适应工况波动。变频控制作为泵机运行管理的重要方式,可通过调整电机频率实现泵速与输送需求的同步变化,从而优化压力与流速之间的耦合关系。在高流量低阻力时,变频控制能有效降低泵转速,避免过度输送导致的能量浪费;在高阻力状态下,系统可自动提升频率以维持目标流速,提升响应效率。该策略适用于昼夜负荷差异显著或物料粘度随时间变化的工况,尤其在长距离输送与多级加压系统中表现出较强的节能潜力。通过构建压力传感反馈回路与控制逻辑函数,实现对变频参数的实时调整,使流速控制具备前馈预测与反馈修正功能,从而提升系统整体流动稳定性与能效水平^[3]。与传统定速控制相比,变频控制减少了泵的空载运行时间,延长了设备使用寿命,并使系统具备更高的柔性调度能力,是构建高效输送系统不可或缺的流体力学控制手段。

5.2 优化管网布设以降低能量损耗与回流干扰

管道网络的布局对整体输送能效具有决定性影响。合理的布设方式能够减少流动路径中的弯折、分支和高落差区域,从而有效降低沿程压降和局部能量损耗。在多点供输场景中,通过环状管网结构提升流动均衡性,避免单侧压力集中带来的震荡现象。分支节点的数量与角度应精确控制,以减少回流干扰与流向反复改变引发的能耗上升。高低落差段的设计需结合重力势能进行优化布置,利用高位势流体下泄驱动低位输送,实现自然流动与机械输送的能量协同。管道长度、内径与转角的匹配也需在设计阶段进行数值模拟分析,以判定在不同流量条件下的最小阻力路径。通过网络简化与路径优化方法压缩不必要的管段长度,可有效降低总阻力与泵机负荷,提升单位能耗下的输送效率。将布设优化策

略与现场运行数据联动,可实现动态调整与局部修正,提升复杂网络系统下的整体能效水平。

5.3 利用计算模拟强化系统级流动效率管理

随着数值仿真与多物理场建模技术的发展,基于计算流体力学的模拟手段已成为管道运输能效管理的重要工具。通过建立涵盖管径、流速、压力、温度等参数的三维耦合模型,可在设计阶段对系统进行虚拟测试与能量分析,预测不同运行方案下的能耗指标及流场演化趋势。模拟结果可用于识别高压损区域、流场紊乱位置与局部能耗集中点,进而指导结构调整与运行策略优化。在实际运行过程中,可结合实时监测数据与仿真模型进行联合分析,构建数字孪生平台,实现对能效变化的前瞻性判断与主动响应。对多种流体类型、复杂工况与多源动力协同系统进行模拟比对,可提升参数匹配的精度与调整速度^[4]。通过迭代优化算法与能效目标函数的耦合计算,使系统调控由经验驱动转向数据驱动,提升能效管理的科学性与可执行性。模拟辅助决策为提升管道输送系统运行效率、降低能耗成本提供了可量化、可验证的支撑路径。

6 结语

管道运输系统的能效水平深受流体力学特性的制约,流动状态、物性参数与结构配置之间的耦合关系决定了能耗表现的优劣。通过系统分析层流与湍流规律、雷诺数判定机制、边界层影响,以及粘度、密度、温度等因素的作用机理,可为能效优化提供理论基础。结合变频调控、管网优化与计算模拟等控制策略,能够在保障输送稳定性的同时实现能源使用效率的最大化。今后应持续深化对流体行为的多维建模与动态响应机制研究,推动管道运输系统向节能、高效、智能方向发展。

参考文献

- [1] 陈利琼,熊珍宝,赵翔,张开.轻烃管道泄漏扩散规律研究[J].流体机械,2025,53(04):93-101+109.
- [2] 黄尊地,谭梦成,许振国,常宁,符澄.低真空管道列车激波特性风洞试验研究[J].交通运输工程学报,2025,25(02):108-117.
- [3] 马云龙,饶丹骄.化工配管布局管道材料选择与耐腐蚀性能研究[J].化学工程与装备,2025,(04):120-122.
- [4] 文孝贵,段单峰.计算流体力学在充填料浆管道输送模拟分析的应用及研究发展方向[J].矿业研究与开发,2022,42(12):18-23.

This paper discusses the application of modular design method in mechanical design

Yu Yin

Jiangsu Xinyang New Material Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225127, China

Abstract

Against the backdrop of rapid industrial modernization, the mechanical design sector is undergoing profound transformations while facing heightened demands for technical expertise. The implementation of modular design methodology in contemporary mechanical engineering has become essential to ensure operational efficiency, reduce development costs, enhance product quality, and align equipment with modern technological requirements. This approach enables continuous optimization of mechanical functions and structural systems, thereby establishing a robust foundation for industry innovation. This paper analyzes application pathways for modular design in mechanical engineering, demonstrating its effectiveness in improving design

Keywords

modular design; Mechanical design; application

探讨模块化设计方法在机械设计中的应用

印宇

江苏新扬新材料股份有限公司，中国·江苏 扬州 225127

摘 要

在现代化工业高速发展背景下，机械设计行业变革日渐深入，同时对设计水平提出了更高的要求。其中，在现代化机械设计中引入模块化设计方法，才能保障机械设备的高效化开展，并减少设计成本，提高设计质量，确保机械设备更加符合现代发展需求。通过模块化设计方法的应用，可以持续性优化机械设备功能和系统结构，为机械设备行业的创新发展奠定良好基础。文章主要对模块化设计在机械设计中的应用路径进行分析，从而有效提升机械设计效果，有效提升机械设备、制造水平生产质量。

关键词

模块化设计；机械设计；应用

1 引言

在机械设备中引入模块化设计理念，能够推动现代机械设备的批量化和规模化生产，满足机械设备的个性化生产需求。通过这种方式，可以有效提升机械设计效率，减少成本。在模块化设计应用中，能够结合机械类型实现模块合理划分，并科学划分模块功能，做好模块编码、组装工作，对数字化设计方法进行合理应用，进而提升机械设备质量，有效控制成本，保障企业经济效益的增加。

2 模块化设计概念及优势

2.1 模块化设计概念

模块化设计方法就是对系统进行统一划分，形成若干个相对独立、自主的模块，且对不同模块之间进行优化组合

和连接，促进系统功能的优化完成。其中模块化设计在机械设计中的应用流程如图 1 所示。在机械设计中引入模块化设计方法，能够集成管控多个功能模块，且实现多个程序协同工作，协同完成不同指令。模块化设计特点体现为：模块化，各个功能模块相对独立，专门负责特定功能，且不同模块之间具备明确的接口、约束条件；独立性，各个模块之间能够独立设计、制造、测试、维护，且针对整个系统具备统一接口、协议；可替换性，不同模块之间能够相互替换，为后续升级、改进提供保障；可扩展性，能够结合实际需求适当增加、替换响应模块。模块化设计方法在机械设计中的应用方式有：横向式，保持原产品不变的情况下，通过模块化设计方法设计出变种形态，该方式方便操作，易于推广；纵向式，即保持原产品不变的情况下，统筹设计相同形式中不同规格的产品^[1]。

【作者简介】印宇（1994-），男，中国江苏扬州人，硕士，从事机械设计和飞行器设计研究。

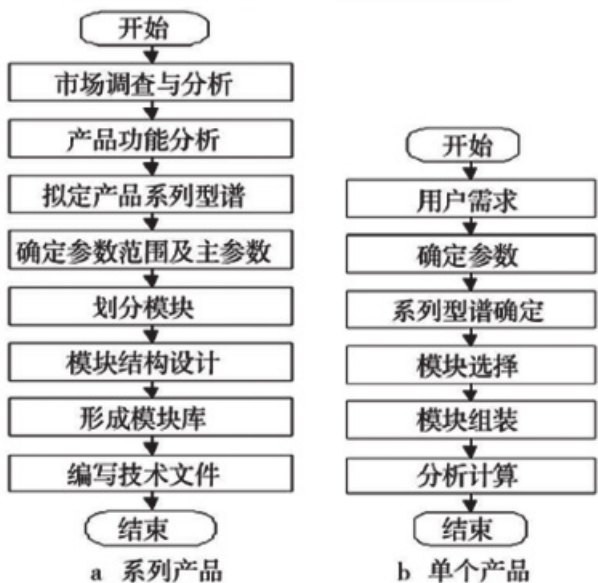


图1 模块化设计在机械设计中的应用流程

2.2 模块化设计优势

在机械设计中引入模块化设计方法，可以结合市场、客户的实际需求，针对性选择相对应的模块，进而促进机械设备产品的持续性优化，这样可以节约成本，减少设计成本投入，有效提高整体设计效益，该方法在小型生产厂中得到广泛推广和应用。在模块化设计前，需要做好全面的市场调研工作，结合市场发展需求，明确产品基础功能，进而开展针对性设计，同时对不同模块进行优化组合，进而获得目标产品。在设计环节中，还能够根据需求，灵活性调整模块系统，对供给模块系统进行专业化创新，这样能够及时创新模块设计理念，促进产品功能的丰富性、结构的完好性^[2]。在机械设计中引入模块化设计方法，还能够保障机械产品性能稳定性，尤其在设计前，需要对设计需求进行细化，并利用筛选功能，严谨组合特定模块，保障设计的机械产品能够与市场、客户需求保持契合性，有效提高机械产品使用率。通过模块化设计方法的应用，能够提高机械制造专业性，保障机械产品功能稳定性，同时能够明确产品功能，满足用户个性化需求，为后续维修工作的开展提供便利，把设计制造成本控制到最小化。通过模块化设计方法的应用，能够促进各个系统模块的集成化管理，主要是因为模块化设计属于由浅入深的设计过程，具有极强的整体性和系统性，能够对产品结构全设计过程进行有效规范，形成有机模块结构和知识产品信息，促进模块设计目标的完成。

3 模块化设计方法在机械设计中的应用要点

3.1 模块划分

在机械设计中应用模块化设计方法，要提前做好模块划分工作，尤其要精准分析机械系统结构、功能，然后结合实际功能需求，把整个机械系统合理划分为若干个相对独立

的模块，不同模块负责不同的结构功能，只有这样才能有效提高设计效果。通常情况下，功能域与结构域在信息需求、表达方式方面存在很大差异性，两者在空间映射方面存在一定的函数关系^[3]。功能域能够分解产品特征，才能获得产品功能结构映射图，同时以此为依据全面分析该结构单位能否作为模块。例如在数控机床设计环节中，能够利用模块化设计方法对机床进行合理划分，形成若干个独立模块，其中常见模块类型有主轴模块、工作台模块、进给系统模块，这些模块都能够进行独立的工作运行，如设计、制造、测试等，同时设置了统一的接口、协议等，这样可以对不同模块进行有机组合与连接，这样能够实现数控机床功能多样化。

3.2 确定功能

完成模块划分工作后，需要确定不同模块的功能，并对各个模块之间的功能联系进行深入分析。部分模块只具备单一功能，而部分模块的功能较为复杂且多样，因此实现原理也是多样化的。同时机械设备内部功能模块零部件的集成化水平较高。基于此，不同模块之间需要保持紧密联系，并确保各个模块位置之间保持良好的配合度和协调性^[4]。例如，数控机床刀具检测装置模块的功能较为单一，就是刀具功能进行检测；刀具模块功能包含刀具夹紧、定位、松开等功能。此外还包含若干个模块共同负责一个功能的现象，其中涉及工件旋转功能、卡爪模块、工作台模块、主变速箱模块等。

3.3 模块编码

对完成划分后的模块进行编码标准，通过这种方式可以对各个模块的参数、属性、规格进行整体性管理设计，同时标注特定名称。通过编码还可以整合化管理各个功能模块间的内在关联性。只有这样才能促进模块设计整体性管理，并促进机械产品优化研究和开发。在实际应用中，需要结合机械零件的特点，开展相对应的零件优化工作，这样才能最大程度上发挥模块化设计的价值作用^[5]。例如，在数控立式车床机械产品模块编码环节中，需要构建标准化的模块设计规则，这样才能对各类产品实现分类化管理，促进数控立式机床产品的高校研发。在机械设备中应用模块化设计方法，需要完善编码工作，保持合理性、完整性、独特性、易操作性。

3.4 模块组装

模块组装工作的开展，能够合理配置整个机械设计中的不同模块，最大程度上发挥各个模块的功能作用。在模块组装过程中，需要保障组装完整性，并优化处理不同模块之间的结合面，科学布局。由于不同模块具备更换功能，一旦在运行过程中出现异常情况，就能够结合实际情况第一时间进行更换，且不会影响其他模块的正常运行，减少负面影响^[6]。在组装过程中要做好接口处理工作，确保接口规格满足设计要求，并实现标准化处理，有效提高模块组装效果。

3.5 数字化设计

数字化设计就是利用数字化编码方式、数字化计算方

式,实现各个模块的合理划分,尤其要渗透计算机设计能力,这样能够代替人工操作,减少人工模块划分中的主观影响,保障机械设计水平的提高,满足未来市场发展需求。

3.6 产品性能测试

在机械产品出厂前需要做好性能测试工作,才能保障机械产品结构应力强度、防护效果满足客户、市场预期标准要求。在模块化设计应用中,各个模块之间需要通过多样化的方式进行连接,其空间分布形式夜市多样化,基于此各个模块之间形成特定的制约关系,一旦出现外部应力,就会在一定程度上降低各个模块之间的连接紧密性。所以,在机械产品出厂前需要做好结构强度测试工作,并选择受力能力较强的材料。在防护性能测试中,需要全方位评估防水、防电、防尘、防风等性能。只有通过性能测试后,才能进行规模化生产和推广^[7]。

4 模块化设计方法在机械设计中的应用场景

4.1 数控机床上的应用

数控机床主要利用计算机控制方式,以便对机械设备进行自动化加工。一般情况下,数控机床包含结构模块、传动模块、控制模块等模块。在数控机床上引用模块化设计方法,需要结合车床整体性能,对其模块进行合理划分,以便对所有基础参数进行集成控制,同时把各个功能模块划分为最小单元,充分呈现模块化设计价值作用^[8]。在该环节中,要对用户需求、市场需求等多种因素进行综合考虑。在模块化设计方法支持下,能够把数控机床进行均衡划分,使其形成若干个相对独立的模块,且各个模块都可以独立完成专门的功能,进而简化数控机床设计、加工流程,简化后期维护、升级过程。

4.2 预测模糊控制技术

预制控制技术就是对生产环节中所产生的所有数据进行全方位收集和分析,结合分析结果,精准预测机械在生产过程中出现的问题。该技术应用围绕数据开展,并以时间为指标,在控制海量数据的基础上,构建精准化、模块化的控制模型。利用该模型,可以对机械设备运行环节中的潜在问题进行实时监控、精确分析,进而保障机械设备的可靠性运行。在模糊控制系统辅助作用下,管理人员可以精确控制生产环境,并对生产流程进行合理性简化,持续性优化目标公众节点,有效提升数据收集、分析、处理效率和精度。同时在模糊控制系统支持下,工作人员还可以结合实际需求,灵活性搭配不同的技术,充分发挥不同技术的优势,提升整体

机械设备自动化运行效率。

4.3 在齿轮减速器上的应用

在齿轮减速器模块设计作业前,需要做好市场调研工作,进而提出相对应的模块化设计策略,进而满足市场实际需求。尤其要结合设备参数,明确具体的系列型谱,同时及时查找减速器主要参数,进而确定最终的系列型谱。此外还需要优化进行模块化技术设计,分析设计所需的基本功能,明确需要设计模块功能,并确定设计过程中需要的材料属性、结构规格等;要结合实际需求针对性生产模块成型,进而促进齿轮减速器设计流程的全面性^[9]。在设计全系列模块过程中,需要对齿轮减速器系统参数指标、储存进行明确,并以此为依据,优化调整全系列模块设计结果,并对其进行标准化处理,突出体现模块化设计优势。通过这种方式,能够提高零部件的通用化程度,把设计成本控制在最小化,为后续便捷化管理创建良好条件。

5 结语

综上所述,在机械设计中引入模块化设计方法,能够有效提升机械设计效果,保障机械设计质量,促进机械行业的长远发展。在具体应用中,要做好模块划分、编码等工作,并出厂前进行性能测试,有效发挥模块化设计方法的价值作用。

参考文献

- [1] 吴旭志. 模块化设计方法在机械设计中的应用研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53 (05): 74-76.
- [2] 刘海婴,杨锦涛. 模块化设计方法及其在机械设计中的应用 [J]. 科技风, 2023, (04): 65-67.
- [3] 闫加杰,刘雅婷,王康龙,等. 机械设计中模块化设计方法的应用 [J]. 今日制造与升级, 2022, (10): 157-159.
- [4] 方占萍. 模块化设计方法及其在机械设计中的运用探讨 [J]. 农机使用与维修, 2021, (04): 37-38.
- [5] 张宽. 模块化设计方法在机械设计中的应用探讨 [J]. 世界有色金属, 2019, (15): 213-214.
- [6] 辛鹏. 模块化设计方法在机械设计中的应用分析 [J]. 湖北农机化, 2019, (16): 51.
- [7] 夏凡. 模块化设计方法在机械设计中的运用探讨 [J]. 中国设备工程, 2019, (16): 220-222.
- [8] 庆燕飞. 试论模块化设计方法及其在机械设计中的运用 [J]. 南方农机, 2019, 50 (15): 121.
- [9] 刘双龙,王兵. 模块化设计方法在机械设计中的应用探析 [J]. 装备制造技术, 2018, (09): 168-171.

Analysis on the overall structural design of high-efficiency vertical electric lathe

Xiaodong Zhu

Nantong Xinfeng Precision Machinery Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226000, China

Abstract

With the increasing demand for high precision, accuracy, and green machine equipment in the manufacturing industry, the design and modification of the vertical electric lathe, as one of the important process manufacturing equipment, is particularly important for improving its overall structural performance. Especially for fine craftsmanship production and highly automated production processes, vertical electric lathes play a very important role. However, the existing vertical electric lathe has problems such as poor stability, high energy consumption, and low processing accuracy, which cannot fully play the important role of vertical electric lathe in modern industry. Therefore, how to improve equipment performance and reduce equipment energy consumption under high-precision processing conditions is an urgent problem that needs to be solved.

Keywords

vertical electric lathe; Overall structural design; intelligentization

高效立式电动拉床整体结构设计探析

朱晓东

南通新冯精密机械有限公司, 中国 · 江苏 南通 226000

摘 要

随着制造业对于高精度、精确性与绿色机器设备的需求不断增加, 作为重要的工艺制造设备之一的立式电动拉床的设计改型对其结构整体性能的提升尤为重要。特别是对于精细工艺生产和高度自动化的生产环节, 立式电动拉床更是发挥着十分重要的作用。但是现有的立式电动拉床存在稳定性差、能耗大、加工精度不高等问题, 因而无法发挥立式电动拉床在现代化工业中的重要作用, 因此在高精度的加工条件下如何提升设备的性能和降低设备能耗是当前亟需解决的问题。

关键词

立式电动拉床; 整体结构设计; 智能化

1 引言

基于当前科技水平和发展趋势, 以及对制造技术效率与精确度日益增长的需求, 立式电动拉床在现代生产过程中占据着重要地位。本文将针对现有问题进行深入分析, 明确高质量立式电动拉床的功能需求, 并提出符合当今机械加工生产需求的创新型解决方案, 以期全面提升设备性能, 并推动其在精密加工生产过程中的广泛应用。

2 本文研究目的与意义

虽然目前立式电动拉床能够适应部分制造企业的需求, 但是对于一些精度要求和工作效率都极高的加工任务而言, 仍然存在缺陷。首先, 设备刚性较差, 设计的强度不足。面对高压力长时间的加工, 设备的刚性不足, 容易造成设备和

刀具振动, 影响工件加工精度和加工质量。其次是整体能耗较大。由于采用传统的动力设计以及控制系统设计不足, 电动拉床长时间连续加工能耗大, 不能满足节能减排的要求。再次是智能化程度低, 由于现有智能技术应用在电动拉床上的精度和实时情况的监测, 很难应对高精度、复杂情况下拉床自动化调整, 不能满足电动拉床高精度使用的要求。最后, 可调性较差。大部分传统设计的电动拉床, 不能满足各种规格工件的加工, 无法实现其可调性, 也很难及时满足不断变化的市场需求。

3 立式电动拉床整体结构设计要求分析

3.1 设计需求分析

立式电动拉床的总体结构设计应从满足高精度、高效率、节能以及运行稳定等功能需求出发。在符合现代工业加工要求的基础上, 立式电动拉床的设计应遵循以下几个关键原则:

首先, 立式电动拉床必须具备高精度的生产能力。生产过程中, 机械构件的振动、强度和稳定性直接影响产品的

【作者简介】朱晓东 (1971-), 男, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事机床制造领域研究。

加工质量。因此,设计时需要优化机械结构,以增强设备的稳定性,减少因振动引起的加工精度损失^[1]。

随着智能化技术的迅猛发展,立式电动拉床的设计也应融入一定的智能化管理功能。这些功能能够实时监控产品状态,并根据生产过程中变化的需求进行自动调节,从而保障生产过程的稳定性和精确性。最后,为了响应环保需求,设计时应注重提升电动拉床的工作效率,减少能耗,以提高其整体环保性能。通过这些措施,立式电动拉床不仅能够满足生产需求,还能有效降低能源消耗,推动可持续发展。

3.2 结构稳定性与刚性要求

在立式电动拉床的设计中,结构刚性和稳定性对加工精度至关重要。在高速、大负荷运行时,若结构刚性不足,容易导致振动和变形,从而影响加工精度。因此,确保结构的刚性成为设计中的核心问题^[2]。为提高结构的刚性,设计改进对策应包括:优化关键部位的结构设计以减少部件干扰;增强结构强度和稳定性以减少振动和变形;提升负载能力以减小外部负载对结构的影响;设计高效支撑结构确保平衡稳定;适当增加机床支撑结构件的自重;采用更大直径和更高负载的滚珠丝杆。此外,合理的负载分配能够确保各部件受力均匀,避免局部过载。通过这些措施的实施,将有效提升电动拉床的加工精度和长期运行的稳定性。图1为立式电动拉床的结构图。

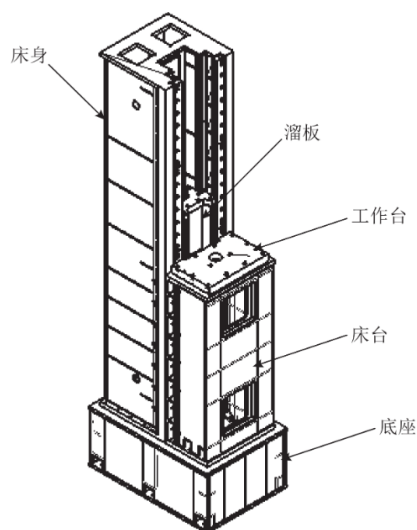


图1 立式电动拉床的结构图

首先,设计时,拉床的底座、床身要满足足够的刚性。一般底座、床身是整台拉床的承载部分,其刚性会直接影响拉床的稳定状态。底座、立柱、床身、床台设计采用HT300等高性能铸件,刚性大、吸振性好,经过500-600℃去应力退火和多道人工时效处理工序,保证了立式电动拉床的刚性和结构强度。主溜板导轨选用THK直线导轨,该品牌导轨刚性好、加工精度高、颠覆力矩小。夹刀体为合金钢制作,淬火硬度高,采用气缸夹紧式,经过气缸带动一套机构夹持拉刀柄部。其次,设备应具备强大的承载能力和长久的使用寿命。立式电动拉床在高负载下应能够长期稳定运行,确保工作状态始终如一。其次,拉床的主驱动电机为伺服电机,

其良好的电机加减速性能可大幅度减少拉床的运动冲击;拉床选用高刚性、重载滚珠丝杆,消除了主丝杆的抖动和变形对加工精度的影响;拉床主丝杆采用皮腔保护套保护,确保拉削加工过程中的铁屑不会粘到主丝杆上,充分保证拉床主丝杆一直处于高精度状况下运转;拉床配有多只减振垫铁,使得拉床在整个加工过程中基本处于无振动状态,充分保证了拉刀的使用寿命和零件加工的表面粗糙度。

其次,在精密加工过程中,全系统的运行特性及响应特性发挥着重要的作用。通过对驱动装置、传动系统及切削力的分析,优化驱动系统的选型,减少动态负载对结构带来的影响,改善系统运行的稳定性。

4 立式电动拉床结构设计方案

4.1 立式电动拉床的总体结构方案

高效立式电动拉床的设计思路是提高设备的功效、确保加工质量、提高生产效率。在设计之初首先要保证结构强度,保证各零件在高速运行状态下的稳定性以及承受高负载的能力^[3]。该设备的组成主要分为三部分,分别是主机架、传动系统和控制系统。其中主机架是整个设备最基本的部件,应该通过合理的选材以及结构设计来实现高强度和稳定性。而对于传动系统来说,其任务是为所有运动部件提供能量,因此设计时需要考虑效率、稳定性、能耗之间的平衡。最后控制系统的引入是赋予整合设备智能化的重要因素,在设计时需要充分考虑现代化工艺的需求以及设备的自动化调整能力,力求通过零件的搭配使拉床的生产效率和加工精度达到最优化,从而获得最大产能。

4.2 关键部件设计

4.2.1 传动系统设计

传动系统的设计对立式电动拉床的性能水平以及运行的稳定性影响很大。首先我们需要在选取电机上保证电机具有足够的输出功率且具有较高的利用效率;同时所选择的电机具有较高的功率密度以及节能特征,能有效控制整个系统的能耗;其次传动系统的构建中,采用高精度伺服电机驱动结合减速机的设计能够使电动拉床具有优异的动力响应性以及精确控制性,符合电动拉床的高精度、高效率的要求,并能提高能源利用率;同时要重点考虑传动装置的承载和耐损特性,保证设备在长时间高负载作用下,不会产生过度磨损。

4.2.2 控制系统设计

为了提高立式电动拉床自动化和精密性加工效果,需重视拉床控制系统的设计,引进智能化控制技术对拉床控制系统至关重要。控制系统负责对加工过程的实时监测和调整。首先,将数字化控制平台嵌入控制系统中,控制平台完成各类数据分析、切削速度和进给率的确定、刀具最佳路径的计算等工作,提高了加工效率和加工质量。其次,控制系统要拥有大量数据收集并分析数据的能力,通过安装在设备上的传感器对设备工作状态进行实时检测,再将这些检测数据回传到数控平台上,控制系统根据从数控平台上收集到的

数据自动调整各类切削参数来确保机床加工的平稳性以及产品质量。最后,控制系统还要具有远程控制的功能和故障诊断的功能,这使得操作人员可以通过网络轻松地调整设备参数、或者监控设备运行状态,提高了智能化管理的水平。

5 设计优化与创新

5.1 结构优化方法

5.1.1 材料选择与优化

在进行结构优化时,首先需要选用合适的材料以增强拉床的承载能力和使用寿命。选择材料时,采用高强度合金钢或铸铁等具有较高抗压强度、良好抗振性能以及良好耐久性的材料。根据经验,合金钢的抗拉强度通常可达到800–1200 MPa,铸铁 HT300 的抗拉强度则在 300Mpa 以上,这使得设备在高负荷下运行时能够保持良好的稳定性。此外,针对高频振动部件,还可采用振动阻尼材料进行局部增强,降低振动影响,进一步提高设备稳定性。

5.1.2 受力均衡与结构加强

通过合理的结构设计,确保机床受力均匀分布,避免局部受力过大导致的设备损坏。对于高负载部位,可以通过加大横梁截面面积或加强连接部分的结构来提升其承载能力。例如,使用复合型梁结构,可以有效提高结构的刚性和抗弯能力,减少因不均匀受力导致的变形。通过有限元分析(FEA),可以精确预测各部件的应力分布情况,并根据分析结果进一步优化结构设计。

5.1.3 简化机构与模块化设计

采用模块化设计,可以有效减少设备的复杂度,从而降低零件数目。根据最新研究,模块化设计不仅能够提升生产效率,还能降低生产和维护成本。通过减少复杂组件的设计,可以提高组装精度,并在设备故障时实现快速更换,缩短停机时间。传统机床硬轨结构,导轨和机床床身为一体铸造成型,然后对导轨安装面和定位面进行机加工,保证足够的加工精度,工作台和导轨为滑动配合,装配时须通过铲刮工艺保证装配精度。现在改用模块化线轨结构,线轨结构内部为滚珠或滚柱结构的滚动摩擦,极大减少了摩擦阻力,降低了设备负载,从而可以选用功率较小的伺服电机。同时,选用模块化线轨结构,大幅度减少了装配工作量,在机床导轨出现磨损时可以快速更换,提高了机床维修时零部件的互换性。对于装配工艺中需要精确对接的部件,采用自动化定位和精密检测技术,进一步提升了组装质量。在进行机床精度调整时,使用先进的芯轴调整法,可方便地将上下抓刀体、工作台定位孔的同轴度调整到设计要求的装配精度。

5.2 节能技术应用

5.2.1 变频驱动技术

高效的变频调速技术可有效降低电机的能耗。在传统电机运行中,功率输出通常是恒定的,导致能源浪费。而采用变频调速技术后,电机根据负载需求自动调节转速,减少了不必要的功率消耗。根据相关测试数据,采用变频驱动后,

电机的能效比可提升约 20-30%。此外,智能化调速系统能够根据负载变化自动优化功率输出,确保最大功率输出时仍能保持较高的电源利用率。

5.2.2 热加工技术

对于高负载、高温环境下工作的零件,应采用先进的热加工技术,如感应加热或电弧熔炼等,以确保零件在高温环境下仍能维持其机械性能。例如,采用特殊的高温合金材料制造关键零件(如轴承、齿轮等),这些材料在 500–800° C 环境下仍能保持较高的强度和稳定性,避免因高温导致的性能衰减。

5.2.3 传动系统的优化

机械传动系统的能效优化是提升整体节能水平的重要措施。通过采用高精度的滚珠轴承和低摩擦的润滑油,可以有效减少传动系统中的摩擦损耗,从而提高能量利用率。根据实验数据,优化后的滚珠轴承摩擦力可降低约 10%-15%,从而减少 5%-8% 的总能耗。此外,合理的齿轮传动设计和高效传动比的选择也能进一步提升传动效率,降低能量浪费。

5.3 精密加工与高效性提升

为了实现精确制造和有效增加收益,一定要在制造过程中就考虑精确制造的可靠性要求,零件强度和稳定性对制造精确性的影响最大,所以零件强度和稳定性问题在设计活动之初就必须进行优化设计。然后可以借助智能管理系统对制造过程中的各种参数进行管控,并在制造过程中对变化加以调整,以此保证精确制造。除此之外还可以通过采用最新刀具技术和冷却技术达到提高制造质量和精确制造效果。对于高精度制造来说,采用精良刀具以及恒温技术能够有效减少切削力和切削热变形,提升制造精度。最后就是通过多元一体化联动工作方式和自动化调配系统,可以最大程度提高自动化生产效率并减少人为介入。

6 结语

本研究较为详细地分析了高效立式电动拉床的整机结构,提出了高效立式电动拉床设计方法。我们采用全新的设计理念解决了传统拉床的各种弊端和不足,大幅提升了拉床设备的综合性能。同时,我们对拉床的控制系统和驱动系统进行了改进,使其生产能耗显著降低,满足了现代制造企业节约资源、保护环境的要求。可以预测,随着自动化及智能化的发展,未来的立式电动拉床还需要对其结构进一步优化,以便于提升拉床的加工性能及拉床智能化的发展,满足未来更高端的生产需求。

参考文献

- [1] 刘建华; 王瑞鹏; 赵宏涛. 立式电动拉床的结构优化与性能分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 45-50.
- [2] 陈永辉; 许建新; 李伟龙. 基于自动化控制的高效电动拉床设计研究[J]. 制造业技术, 2022, 41(8): 63-68.
- [3] 张彦杰; 高志华; 孙国锋. 高效立式电动拉床的动力学分析与优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021, 48(3): 22-27.

Research on Optimization of Synergistic Reaction Path for Flue Gas Desulfurization and Denitrification Based on New Catalysts

Hongyu Li

Datang Nanjing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

SO₂ and NO_x emitted from industrial flue gas are the main sources of air pollution. At present, due to the problems of high equipment investment, high operating cost and low synergy efficiency of traditional desulfurization and denitrification technologies, the development of efficient and synergistic purification technologies has become a research hotspot in the field of environmental engineering. This paper takes the new type of catalyst as the core and systematically analyzes the basic mechanism of the synergistic reaction of flue gas desulfurization and denitrification. In the paper, the structure of the catalyst is optimized from three dimensions: the design of active components of the catalyst, the modification of the carrier, and the screening of co-catalysts. Then, combined with process parameters such as reaction temperature, space velocity, and reactant concentration for regulation, the optimization strategy of the synergistic reaction path is finally proposed. This research provides theoretical support and technical reference for the industrial application of industrial flue gas co-purification technology, which is of great significance for reducing the emission of air pollutants and improving air quality.

Keywords

New type catalyst; Flue gas purification; Synergistic desulfurization and denitrification; Regulation of process parameters

基于新型催化剂的烟气脱硫脱硝协同反应路径优化研究

李宏宇

大唐南京环保科技有限公司，中国·江苏 南京 211100

摘 要

工业烟气中排放的SO₂与NO_x是造成大气污染的主要源头，现阶段因为传统的脱硫脱硝技术存在这设备投资高、运行成本大、协同效率低等问题，所以开发高效协同的净化技术便成为了环境工程领域的研究热点。本文便以新型催化剂为核心，系统地分析烟气脱硫脱硝协同反应的基本机理，在文中从催化剂活性组分设计、载体改性、助催化剂筛选三个维度入手来优化催化剂结构，再结合反应温度、空速、反应物浓度等工艺参数进行调控，最终提出了协同反应路径的优化策略。该研究为工业烟气协同净化技术的工业化应用提供了理论支撑与技术参考，对于降低大气污染物排放、改善空气质量具有重要的意义。

关键词

新型催化剂；烟气净化；脱硫脱硝协同；工艺参数调控

1 引言

电力、钢铁、化工等行业排放的烟气中，SO₂与NO_x是最为最主要的大气污染物，它们也是形成酸雨、光化学烟雾的关键前驱体，对于生态环境与人体健康造成了严重的威胁。目前在实践当中，由于传统脱硫技术（如石灰石-石膏法）与脱硝技术（如SCR法）多为独立运行，因此存在着设备占地面积大、药剂消耗多、二次污染风险高等弊端，且NO_x在脱硫过程中易被氧化为NO₂，有几率会加剧设备地腐蚀与

二次污染，该情况难以满足协同净化的需求。所以开发能够同时实现SO₂与NO_x高效脱除的协同净化技术，成为了解决工业烟气污染的核心突破口。而催化剂作为协同反应的核心，其活性、选择性与稳定性直接决定了协同净化的效率，虽然传统催化剂（如V₂O₅-WO₃/TiO₂）在脱硝领域地应用比较成熟，但对SO₂的吸附与转化能力却较弱，还易受到SO₂中毒的影响，导致协同效率比较低下。

2 烟气脱硫脱硝协同反应基本机理

烟气脱硫脱硝协同反应的本质是在催化剂的作用之下，利用氧化剂（如O₂、NH₃、H₂O₂等）将SO₂与NO_x同时转化为无害物质（如(NH₄)₂SO₄、N₂、H₂O等），其核心反应

【作者简介】李宏宇（1989-），女，中国吉林榆树人，本科，助理工程师，从事热能与动力工程、脱硫脱硝研究。

过程涉及到了吸附、活化、氧化还原三个关键的步骤。其中在吸附阶段, SO_2 与 NO_x 分子会通过物理吸附(范德华力)或化学吸附(化学键作用)附着于催化剂表面活性位点, 此时 SO_2 易与催化剂表面羟基(-OH)结合形成 HSO_3^- 、 SO_3^{2-} 等中间物种, NO_x 因分子极性较弱, 则需借助催化剂活性组分的电子转移作用才能实现稳定吸附。而在活化阶段, 催化剂活性组分(如过渡金属氧化物)会通过价态变化(如 $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 、 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$)提供电子, 以此将吸附的 NO_x 活化生成 NO_2^- 、 NO_3^- 等活性中间体, 同时还会促进 O_2 分子在催化剂表面的解离, 进而形成活性氧物种(O_2^- 、 O^-), 为后续的氧化还原反应提供了氧化剂。对于氧化还原阶段来说, 活化后的 SO_2 中间体与 NO_x 中间体会发生协同反应, 此时 SO_2 被氧化为 SO_4^{2-} , NO_x 则被还原为 N_2 , 若以 NH_3 为还原剂, 还会发生 NH_3 选择性还原 NO_x 的反应($4\text{NH}_3+4\text{NO}+\text{O}_2\rightarrow 4\text{N}_2+6\text{H}_2\text{O}$), 再配合 SO_2 与 NH_3 反应生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 即可实现 SO_2 与 NO_x 的同步脱除^[1]。然而传统的催化剂在协同反应中存在着两大瓶颈: 一是 SO_2 吸附后易在催化剂表面形成硫酸盐(如 $\text{V}_2(\text{SO}_4)_3$), 七覆盖活性位点将导致催化剂中毒; 二是 NO_x 活化需要较高的反应温度, 但该温度与 SO_2 最佳吸附温度不匹配, 就会导致协同反应的温度区间狭窄。

3 新型催化剂的设计与制备

3.1 活性组分的筛选与掺杂改性

活性组分是催化剂实现 SO_2 与 NO_x 吸附、活化的核心, 可传统的单一活性组分(如 V_2O_5 、 MnO_2)难以同时满足脱硫与脱硝的需求, 所以采用双活性组分或多活性组分掺杂成为了新型催化剂设计的关键方向。实践当中, 过渡金属氧化物 CeO_2 具有优异的储氧与释氧能力, 其 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 的价态循环可促进活性氧物种的生成, 进而增强 NO_x 的活化效率; MnO_2 则具有较强的氧化性能, 它可将 SO_2 氧化为 SO_4^{2-} , 同时对 NO_x 还具有一定的吸附能力, 上述二者形成的 Ce-Mn 双活性组分可产生协同效应, 得以提升催化剂的协同净化性能。

3.2 载体的选择与复合改性

载体作为活性组分的支撑骨架, 其比表面积、孔结构、表面酸性与稳定性均影响着催化剂的性能。由于传统的单一载体(如 TiO_2 、 Al_2O_3)存在着比表面积小、表面酸性不足等问题, 因此应该采用复合载体来实现优势互补。而在复合载体中引入介孔分子筛(如 MCM-41 、 SBA-15), 能够进一步地调控载体孔道结构, 建议将孔径控制在 2-5nm, 该数值可促进反应物分子在催化剂内部的扩散, 有助于减少内扩散阻力。另外载体改性还可通过表面羟基化处理得以实现, 即采用水热法在载体表面引入大量 -OH 基团, 进而增强 SO_2 的化学吸附能力, 同时还能抑制硫酸盐的形成, 使得催化剂的抗硫中毒性能得到提升。

3.3 助催化剂的筛选与添加

尽管助催化剂不直接参与到主要的反应之中, 但其可

通过调节催化剂表面电子性质、优化活性位点分布, 来提升催化剂的活性与稳定性。若将碱金属(如 K 、 Na)作为助催化剂, 可经由增加催化剂的表面碱性位点, 来增强对酸性气体 SO_2 的吸附能力, 同时话可以促进 SO_2 向 SO_4^{2-} 的转化。而碱土金属(如 Mg 、 Ca)可提高催化剂的热稳定性, 具有抑制活性组分烧结团聚的效果。当在 $\text{Ce-Mn/TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂中添加 0.5%-1% 的 K_2O 时, SO_2 的脱除率可提升 5%-8%, 且催化剂在 450℃ 高温下仍能保持良好的结构稳定性。在此基础上, 稀土元素(如 La 、 Nd)也可作为助催化剂, 它可与活性组分形成固溶体, 用于调控活性组分的电子结构, 使 NO_x 的活化效率得到提升, 且 La 的添加可使 NO_x 脱除率提升 3%-5%, 同时还会降低反应活化能^[2]。但值得一提的是, 助催化剂的添加需控制最佳用量, 若过量添加易导致活性位点被覆盖, 反而会降低催化的剂活性, 因此需通过正交实验来优化助催化剂种类与添加比例, 确保能够实现协同性能的最大化。

4 脱硫脱硝协同反应路径优化策略

4.1 基于催化剂结构的反应路径调控

催化剂的结构决定着协同反应的路径与效率, 即通过优化活性组分分布、载体孔结构与助催化剂添加, 便可构建高效的协同反应路径。首先在活性组分分布调控方面, 可以采用浸渍法将 Ce-Mn 双活性组分均匀负载于 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合载体表面, 以此确保活性位点的暴露率, 进而减少活性组分团聚导致的活性损失; 同时通过调控焙烧温度(500-600℃), 使其能够形成稳定的金属氧化物晶相(如 MnO_2 、 CeO_2), 达到增强活性组分与载体相互作用、提升催化剂稳定性的效果。其次在载体孔结构调控方面, 应该将复合载体孔径控制在 3-4nm, 既保证了反应物分子(SO_2 、 NO_x 、 NH_3)的快速扩散, 又可通过孔道限域效应增强中间体的稳定性, 从而促进协同反应的进行^[3]。最后是助催化剂的添加, 通常可以通过调节催化剂表面酸碱性, 来优化 SO_2 吸附与 NO_x 活化的反应条件, 使其形成“ SO_2 吸附- NO_x 活化-协同转化”的高效反应路径。具体来说: SO_2 先在催化剂表面碱性位点吸附形成 HSO_3^- , 随后在活性氧物种作用下氧化为 SO_4^{2-} ; NO_x 则在 Ce-Mn 活性组分作用下活化生成 NO_2^- , 再与 NH_3 反应生成 N_2 ; 同时 SO_4^{2-} 会与 NH_3 反应生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 以此实现了 SO_2 与 NO_x 的同步脱除。

4.2 基于工艺参数的反应路径优化

工艺参数在实践当中是影响协同反应路径与效率的重要外部因素, 对此可以通过调控反应温度、空速、反应物浓度与还原剂用量, 进一步地优化协同反应路径, 促使净化效率得到提升。基于上述内容而言, 反应温度对于协同反应的影响最为显著, 如果温度过低(低于 250℃)催化剂的活性不足, NO_x 的活化效率就会变低, NO_x 脱除率便会低于 80%; 若温度过高(高于 450℃) SO_2 易与催化剂表面活性组分形成稳定硫酸盐, 进而导致催化剂中毒, 同时 NH_3 还易发生氧化反应($4\text{NH}_3+5\text{O}_2\rightarrow 4\text{NO}+6\text{H}_2\text{O}$), 反而会增加

NO_x地排放。因此应将反应温度控制在 300-400℃, 这样才能同时满足 SO₂ 吸附与 NO_x 活化的需求, 以实现协同效率的最大化。而空速是反映反应物与催化剂接触时间的参数, 通常空速过低 (低于 15000h⁻¹) 会导致设备的处理量小, 导致运行成本增加; 若空速过高 (高于 25000h⁻¹) 便会缩短反应物与催化剂的接触时间, 致使脱除效率降低^[4]。一般情况下, 空速控制在 15000-20000h⁻¹ 适宜, 此时 SO₂ 与 NO_x 脱除率分别稳定在 98% 与 92% 以上, 还能保证设备的处理效率。在反应物浓度方面, SO₂ 浓度过高 (高于 3000mg/m³) 极易导致催化剂硫中毒, 对此需通过前置脱硫装置将 SO₂ 浓度控制在 1000-2000mg/m³; 虽然 NO_x 浓度对脱除效率的影响较小, 但仍然需要保证 NH₃ 与 NO_x 的摩尔比 (NH₃/NO_x) 为 1.0-1.2, 因为过量 NH₃ 会导致氨逃逸, 然后造成二次污染, 可不足还会降低 NO_x 的脱除率。

4.3 基于抗中毒性能的反应路径稳定化

在工业烟气脱硫脱硝的协同反应体系中, 催化剂硫中毒是制约催化剂长期稳定运行与工艺经济性的核心瓶颈问题。原因是在协同反应过程中, SO₂ 易与催化剂活性组分 (如过渡金属氧化物) 反应生成稳定的硫酸盐 (如 MnSO₄、V₂(SO₄)₃), 而这类硫酸盐会紧密地附着于催化剂表面活性位点, 或者是堵塞催化剂的孔道结构, 致使活性位点的数量锐减、反应物分子扩散阻力增大, 最终将引发催化剂活性持续衰减, 甚至是完全失活。因此需要通过催化剂结构优化与反应条件精准调控的协同策略, 来抑制硫酸盐形成、促进硫酸盐脱附或分解。

就催化剂结构优化层面入手, 应该从活性组分调控与载体改性双维度来构建抗硫体系。一方面要选用 CeO₂ 作为核心活性组分或助催化剂, 因为其独特的 Ce³⁺/Ce⁴⁺ 价态循环特性发挥着三重抗硫作用: 第一是 CeO₂ 具有优异的储氧与释氧能力, 它在协同反应中可通过 Ce³⁺ → Ce⁴⁺ 的氧化过程释放活性氧物种, 进而强化 NO_x 的活化效率, 同时 Ce⁴⁺ → Ce³⁺ 的还原过程还可与 SO₂ 发生竞争性吸附, 达到减少 SO₂ 与其他活性组分 (如 MnO₂) 接触概率的效果; 第二是 Ce³⁺ 与硫酸盐中的 O²⁻ 存在着强相互作用, 其可破坏硫酸盐的晶格结构, 促使硫酸盐分解为 SO₂ 与 CeO₂, 以实现活性位点的再生; 第三是 CeO₂ 的引入可调控催化剂表面的酸碱性, 经由降低 Lewis 酸位点的强度, 来减少 SO₂ 的强吸附 (化学吸附) 比例, 达到抑制硫酸盐初始形成的目的。另一方面即在载体设计中引入 Al₂O₃ 构建复合载体, 原理是利用 Al₂O₃ 与 SO₂ 的选择性反应特性, 使其形成对活性组分的保护屏障。因为 Al₂O₃ 与 SO₂ 反应生成的 Al₂(SO₄)₃ 具有良好的热稳定性与分散性, 并不会像 MnSO₄ 那样紧密地覆盖活性位点, 反而可作为临时储硫位点。当反应条件发生波动时 (如温度升高), 通过缓慢地释放 SO₂, 就能避免 SO₂ 短时间内大量与活性组分发生反应^[5]。

而在反应条件调控层面, 则需围绕着硫酸盐分解动

力学与催化剂再生效率设计出精准的操作参数。其中反应温度是影响硫酸盐形成与分解平衡的关键参数: 一旦温度低于 300℃, 硫酸盐的分解活化能就比较高 (约 80-100kJ/mol), 此时分解的速率缓慢, SO₂ 就易在催化剂表面持续地吸附并生成硫酸盐。若温度升高至 350-400℃时, 硫酸盐分解活化能会有显著地降低 (降至 40-60kJ/mol), 其分解速率将提升 3-5 倍, 从而可有效地平衡 SO₂ 的吸附与分解过程, 避免了硫酸盐的累积。虽然温度超过 450℃时能进一步地加快硫酸盐分解, 但会导致 NH₃ 还原剂发生氧化副反应 (4NH₃+5O₂ → 4NO+6H₂O), 反而增加了 NO_x 排放, 甚至还可能会引发催化剂活性组分烧结 (如 CeO₂ 晶粒长大), 因此 350-400℃成为了兼顾硫酸盐分解与反应选择性的最优温度区间。

5 结语

本文以新型催化剂作为核心, 系统地研究了烟气脱硫脱硝协同反应路径的优化策略。在文章通过分析协同反应机理, 从催化剂活性组分设计、载体改性、助催化剂筛选三个维度优化了催化剂结构, 随后结合反应温度、空速、反应物浓度等工艺参数调控, 构建了高效、稳定的协同反应路径。经研究表明, 掺杂 Ce-Mn 双活性组分的 TiO₂/Al₂O₃ 复合载体催化剂, 在优化的工艺条件下 (300-400℃、空速 15000-20000h⁻¹、NH₃/NO_x=1.0-1.2), 即可实现 SO₂ 脱除率 98.5% 以上、NO_x 脱除率 92% 以上, 并且具有良好的抗硫中毒性能与循环稳定性。该研究不仅丰富了烟气协同净化的理论体系, 也为新型催化剂的工业化应用提供了技术层面的支撑。但当前的研究仍存在一些不足, 如催化剂制备成本较高、复杂烟气成分 (如重金属、粉尘) 对催化剂性能的影响尚未明确, 所以未来需进一步地优化催化剂制备工艺、降低成本, 同时还需开展复杂烟气条件下的催化剂性能研究, 旨在推动协同净化技术在电力、钢铁、化工等行业的广泛应用。

参考文献

- [1] 张雷. 基于燃煤烟气脱硝的NH₃选择性催化还原技术中铈基催化剂的性能研究[D]. 山东省: 南京大学, 2015. DOI: 10.27235/d.cnki.gnjju.2015.000127.
- [2] 王宝岚. 基于碳基催化剂的烧结烟气低温SCR脱硝实验研究[D]. 东北大学, 2019. DOI: 10.27007/d.cnki.gdbeu.2019.000904.
- [3] 王向民. 基于快速SCR反应的低温含硫烟气脱硝实验及理论研究[D]. 重庆市: 重庆大学, 2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000323.
- [4] 孙培亮. 基于碳基催化剂和吸附还原解耦的CO脱硝及脱硫过程研究[D]. 山东省: 山东大学, 2022. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2022.000344.
- [5] 冯楚淇, 石焱, 胡长庆, 等. 基于吸附材料的烟气脱硫脱硝反应动力学研究进展[J]. 当代化工研究, 2025, (04): 12-14. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.04.004.

Research on the Contributing Substances of Chemical Oxygen Demand in Refining Wastewater

Lujing Qu Huixian Chen

Petrochina Yunnan Petrochemical Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650300, China

Abstract

Chemical Oxygen Demand (COD) refers to the amount of oxidant consumed for the oxidation and decomposition of reductive substances in water when treating water samples with strong oxidants under strictly specified conditions. It is usually expressed as the mass of oxygen consumed per unit volume of water sample (mg/L). It is an important comprehensive indicator for evaluating the degree of organic pollution in water bodies. In response to the persistent problem of COD exceeding the standard in the wastewater discharged from the catalytic flue gas desulfurization device, through systematic literature review, in-depth analysis of the oxidation reaction mechanism, and combined with a large number of laboratory tests and water quality analysis, the main material components that contribute significantly to COD were finally identified, including residual reductive inorganic ions and some refractory organic substances. This research result provides a reliable basis for the subsequent optimization of process parameters, adjustment of operating conditions or introduction of advanced treatment measures, which is conducive to the effective control of COD in wastewater and its compliance with discharge standards.

Keywords

Catalytic flue gas removal; Chemical Oxygen Demand (COD); contributing substances

炼油废水化学需氧量贡献物质的研究

曲鲁静 陈会仙

中石油云南石化有限公司, 中国·云南 昆明 650300

摘 要

化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 是指在严格规定的条件下, 利用强氧化剂处理水样时, 水中还原性物质被氧化分解所消耗的氧化剂的量, 通常以单位体积水样消耗的氧的质量表示 (mg/L)。它是评价水体受有机物污染程度的重要综合性指标。针对催化烟脱硫装置外排废水 COD 持续超标的问题, 通过系统查阅文献资料、深入分析氧化反应机理, 并结合大量实验室测试与水质分析, 最终识别出对 COD 贡献较大的主要物质组分, 包括残留的还原性无机离子、部分难降解有机物等。这一研究结果为后续优化工艺参数、调整操作条件或引入深度处理措施提供了可靠依据, 有助于实现废水 COD 的有效控制与达标排放。

关键词

催化烟脱; 化学需氧量 COD; 贡献物质

1 引言

化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 是评价水体受有机及还原性物质污染程度的关键性指标。其定义是指: 在强酸性及加热条件下, 以重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 作为氧化剂, 处理水样时所消耗的氧化剂量, 折算成相对应的氧的质量浓度, 单位为毫克/升 (mg/L)。该指标综合反映了水体中可被化学氧化的溶解性物质和悬浮物总量, 是污水达标排放的核心约束性指标之一, 对于评估水体环境质量与污染负荷至关重要。

在国家“双碳”战略和环保执法加强的背景下, 石油炼制行业面临严格的环保合规要求。为满足 GB31570-2015 中对催化裂化烟气 SO_2 的排放限值, 湿法脱硫技术广泛应用, 虽高效脱除 SO_2 , 却产生难处理的脱硫废水。该废水成分复杂, 含高浓度钠盐、有机胺、催化剂粉末等, 导致 COD 显著偏高。而随着 Q/SH 0796-2022 将外排 COD 限值降至 50mg/L, 传统“物化+生化”组合工艺面临挑战, 高盐废水严重抑制微生物活性, 造成处理系统运行不稳定。因此, 开发兼顾达标排放与经济可行的废水处理技术, 已成为行业亟需突破的关键难题。

催化烟气脱硫装置的排水能否稳定达标, 直接关系到企业环保合规与运行绩效。目前, 该装置面临的核心问题是排水 COD 持续偏高, 难以满足严苛的排放标准, 对企业构成

【作者简介】曲鲁静 (1987-), 女, 中国山东烟台人, 本科, 工程师, 从事水质环保研究。

系统性环保风险。监测数据表明,排水 COD 长期超出设计控制值,严重影响稳定运行。然而,现行标准方法 HJ 828-2017 (重铬酸盐法)虽能准确测定 COD 总量,却难以有效支撑污染溯源。因其测定的是水样中所有可被重铬酸钾氧化的物质(包括有机物和还原性无机离子)所消耗氧的总当量,无法区分各类还原性物质的具体贡献。这种“总和表征”的检测特性,导致环保技术人员在进行故障诊断与治理决策时陷入双重困境:难以判断高 COD 结果中,究竟有多少比例源于真正需要关注的有机污染物,又有多少比例是由共存的无机还原性物质(干扰项)贡献的;无法指明造成 COD 升高的具体是哪些种类的有机物或无机物。

深入解析 COD 构成成分的迫切性体现在三个维度:从工艺优化角度,需明确主要贡献因子是否源于装置运行参数偏移导致的副产物累积;从处理技术角度,需判定现有生化或物化处理单元对特定污染物的去除效率;从源头控制角度,需追溯污染物是否来自原料携带、反应副产或设备腐蚀。这种多层次的成因分析需求,要求建立超越常规检测的技术诊断体系。破解这一技术难题需要构建多维度的分析策略:首先应通过特征污染物筛查锁定异常组分;其次需结合在线监测数据与工艺参数进行关联分析,挖掘 COD 波动与工况变化的对应关系;最后应引入高级氧化实验等模拟手段,通过控制变量法验证不同污染物的降解特性。只有通过这种系统化的技术攻关,才能突破传统检测方法的局限性,实现 COD 构成解析的技术突破,为装置优化运行提供精准的决策依据。

2 数据统计、查阅文献、学习工艺流程初步推断 COD 贡献物质

2.1 外排废水数据 COD 统计

催化裂化烟脱装置外排废水 COD 指标为 $\leq 120\text{mg/L}$,自 3 月以来,该装置排水多次出现 COD 超标的现场,更为严峻的是超标并非偶发,其 COD 数值持续维持在高位水平,未能有效回落至达标范围,为了深入分析此问题,系统收集并整理了该装置近 6 个月排水的 COD 监测数据。3 月至 9 月期间,装置排水的 COD 浓度持续偏高,未能有效降低。其数值波动也较大,最高值为 499mg/L ,最低值也达到 60.0mg/L ,值得注意的是,这六个月的平均 COD 值为 134mg/L ,已明显超出设定的 120mg/L 控制指标。

2.2 查阅文献

通过系统查阅相关环境科学与水质分析领域的文献资料,对化学需氧量这一关键水质指标的认知得到了深化。文献明确指出,COD 值实质性地表征了水体受还原性物质污染的综合程度。这一指标之所以重要,在于它通过强氧化剂(如重铬酸钾)在特定条件下的氧化作用,量化了水中可被化学氧化的物质总量。值得注意的是,这些消耗氧气的还原性物质来源复可大致区分为无机组分与有机组分两大类。无

机组分方面,文献中普遍提及并强调了几类典型污染物:亚硝酸盐(NO_2^-)、硫化物(S^{2-} 或 H_2S)以及亚铁盐(Fe^{2+})^[1]。这些物质在水体中同样具有较强的还原能力,会显著贡献于 COD 的测定值。然而,水体中更大比例、通常更受关注的还原性物质是种类繁多的有机物。文献广泛涉及了多种有机污染物类别。这一认识对本课题的后续研究具有明确的指导意义。它清晰地揭示了 COD 作为污染负荷综合指示剂的本质,并系统梳理了其贡献者——既包含特定的无机还原物,更涵盖了极为广泛的有机污染物谱系。

2.3 装置工艺流程及原理

装置通过处理使烟气中的大部分 NO_x 和 SO_2 被脱出。烟气中的氮氧化物与碱液反应,当碱过量时生成亚硝酸盐;当氮氧化物过量时生成亚硝酸盐和硝酸盐,亚硝酸盐不稳定,能被空气氧化成硝酸盐,但氧化效果不好,亚硝酸盐未被氧化完全,即亚硝酸盐是贡献 COD 的来源。烟气中的 SO_2 与碱液反应,当碱过量时生成亚硫酸盐;当 SO_2 过量时,生成亚硫酸氢盐。亚硫酸盐和亚硫酸氢盐不稳定,能被空气氧化成硫酸盐。但若氧化效果不好,亚硫酸盐未被氧化完全,亚硫酸根也是贡献 COD 的来源^[2]。

对炼油装置排水 3 月至 9 月的分析项目的数据进行统计,求出这 6 个月数据的平均值统计结果,其中具有还原性的项目中二价铁的含量仅为 0.32mg/L ,对 COD 贡献值影响不大,可以忽略其影响;而无机还原离子亚硫酸根 321.6mg/L 、亚硝酸根 58.63mg/L 的含量较大,对 COD 的贡献值较大;总有机碳含量 21.8mg/L ,也对 COD 值有贡献。

通过上述方法进行研究分析,初步推断对 COD 有贡献的可能是亚硝酸根、亚硫酸根、总有机碳等还原性物质。

3 COD 的各种组分的具体贡献值研究

3.1 无机组分对 COD 的贡献值

3.1.1 亚硝酸根对 COD 的贡献值 (mg/L)

实验室使用亚硝酸根标准物质配制 25、50、100、200、500mg/L 的标准溶液来测试亚硝酸根对 COD 的贡献值,实验结果统计如表 1,根据表 1 内的统计数据进行曲线拟合, $y=3.7472x-3.4308$,相关系数 $R^2=0.9996$ 。

表 1 亚硝酸根对 COD 的贡献值 (mg/L)

亚硝酸根浓度 (mg/L)	0	25	50	100	200	500
COD 测试值 (mg/L)	0	8	13	28	55	138

由表 1 的数据统计可以看出,亚硝酸根对 COD 的贡献值呈直线上升的趋势,且线性较好,相关系数达到 0.9996,亚硝酸根对 COD 的贡献值约为 3.75 个亚硝酸根贡献 1 个 COD 值。

3.1.2 亚硫酸根对 COD 的贡献值 (mg/L)

实验室使用亚硫酸根标准物质配制 100、500、800、1000mg/L 的标准溶液来测试亚硫酸根对 COD 的贡献值,实验结果统计如表 2,根据表 2 内的统计数据进行曲线拟合,

$y=5.3566x+25.759$ ，相关系数 $R^2=0.9967$ 。

表 2 亚硫酸根对 COD 的贡献值 (mg/L)

COD 测试值 (mg/L)	0	12	85	140	187
亚硫酸根浓度 (mg/L)	0	100	500	800	1000

由表 2 的数据统计可以看出，亚硫酸根对 COD 的贡献值呈直线上升的趋势，且线性较好，相关系数达到 0.9967，亚硫酸根对 COD 的贡献值约为 5.36 个亚硫酸根贡献 1 个 COD 值。

3.2 有机组分对 COD 的贡献值

根据相关文献描述，在没有无机还原性物质存在的情况下，同一稳定水体总有机碳（简称 TOC）与 COD 具有较好的线性关系，大致是 1:2.6。为此，我们也开展了相应的实验。实验室使用 TOC 标准物质配制 5、10、25、50mg/L 的标准溶液来测试 TOC 对 COD 的贡献值，实验结果如表 3，根据表 3 内的统计数据进行曲线拟合， $y=2.5988x-0.1779$ ，相关系数 $R^2=0.9997$ 。

由表 3 的数据统计可以看出，TOC 对 COD 的贡献值呈

直线上升的趋势，且线性较好，相关系数达到 0.9997，TOC 对 COD 的贡献值约为 1 个 TOC 贡献 2.60 个 COD 值。

表 3 TOC 对 COD 的贡献值 (mg/L)

TOC 浓度 (mg/L)	0	5	10	25	50
COD 测试值 (mg/L)	0	12	27	64	130

4 COD 理论估算与实际对比

根据数据分析，烟气脱硫废水中的 COD 主要来源于三种物质：亚硝酸根 (NO_2^-) 约占 10%，亚硫酸根 (SO_3^{2-}) 贡献约 55%，总有机碳 (TOC) 约占 30%，三者合计接近 100%，印证了它们是该废水 COD 的绝对主体来源。其中，亚硫酸根离子的贡献率毫无疑问地成为影响该废水 COD 水平的最关键因子，其浓度变化对最终 COD 值具有主导性影响。这一基于实际检测数据的定量解析结果，清晰地揭示了不同物质对 COD 的贡献权重^[3]。明确识别出亚硫酸根是最大的贡献源，为后续针对性地优化烟气脱硫工艺、特别是调控与亚硫酸盐生成或转化相关的关键操作参数，提供了直接且可靠的数据支撑。

表 4 COD 理论估算值

COD	亚硝酸根			亚硫酸根			TOC			
COD 实际测试值 (mg/L)	亚硝酸根实际测试值 (mg/L)	亚硝酸根对 COD 的理论贡献值	亚硝酸根对 COD 的理论贡献比例 (%)	亚硫酸根实际测试值 (mg/L)	亚硫酸根对 COD 的理论贡献值	亚硫酸根对 COD 的理论贡献比例 (%)	TOC 实际测试值 (mg/L)	TOC 对 COD 的理论贡献值	TOC 对 COD 的理论贡献比例 (%)	理论贡献值占实际数据百分比 (%)
279	54.34	14.49	5.19	849.2	158.43	56.79	25	65.00	23.30	85.28
233	56.02	14.94	6.41	726.5	135.54	58.17	23.8	61.88	26.56	91.14
185	57.46	15.32	8.28	576	107.46	58.09	25.9	67.34	36.40	102.77
176	58.72	15.66	8.90	501	93.47	53.11	24.1	62.66	35.60	97.61
155	59.2	15.79	10.18	445.2	83.06	53.59	22.3	57.98	37.41	101.18

5 结语

通过系统性的试验分析与数据比对，我们成功明确了该炼油装置排水中化学需氧量（COD）的主要来源构成。实验数据清晰表明，亚硝酸盐 (NO_2^-)、亚硫酸盐 (SO_3^{2-}) 以及总有机碳 (TOC) 对应的可氧化组分，是构成排水 COD 的关键贡献物质。我们将实际检测获得的 COD 数据，与基于这三种物质化学特性进行的理论耗氧量估算值进行了交叉验证。对比结果具有高度说服力：亚硝酸盐、亚硫酸盐和 TOC 三者对实测总 COD 的综合贡献占比范围在 85% 至 103% 之间。这一显著占比意味着它们几乎构成了该排水 COD 的全部主体。这一结论并非单一数据点支撑，而是源

于详实的实验数据与严谨理论计算的相互印证，因此具有充分的可靠性。它为后续催化烟气脱硫装置的工艺参数优化与运行调整，提供了至关重要的基础性依据。明确主要贡献因子，将有助于我们更精准地控制源头排放，提升装置的环保运行效能。

参考文献

[1] 曹臣等，废水处理生物出水COD构成的解析-以焦化废水为例【J】.环境化学，2012,31（10）：1494-1501
[2] 李宁，催化裂化烟气脱硫脱硝装置废水COD超标原因分析及应对措施【J】.石油炼制与化工，2021,52（01）：126-130
[3] 李琦等，白洋淀典型水域COD的组成及各组分贡献【J】环境化学，2023,44(09):4915-4926

A flexible safety operation procedure generation and verification method for small batch forging production

Guoli Dong

Hebei Second Machinery Industry Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050031, China

Abstract

This study investigates the development of safety-oriented operational guidelines for small-batch forging manufacturing processes and establishes technical methodologies to validate their applicability. A flexible operational guidance framework is proposed, utilizing intelligent tools to dynamically update safety protocols based on processing requirements, equipment specifications, and work environment conditions for diverse production scenarios. The research begins with analyzing common hazards in small-batch forging operations and challenges in developing operational guidelines, followed by detailed explanations of flexible guideline creation processes including data acquisition, task modeling, and method risk assessment. Subsequent discussions focus on verification and improvement strategies to enhance operational safety and efficiency in real-world production environments. Case studies demonstrate the feasibility and effectiveness of this technology, highlighting promising research trends in industrial applications.

Keywords

small-batch forging; flexible operational protocols; safety regulations; production processes; protocol validation; intelligent technologies

面向小批量锻造生产的柔性安全操作规程生成与验证方法

董国立

河北第二机械工业有限公司, 中国 · 河北 石家庄 050031

摘要

本工作主要探讨了如何为小批量锻造制造过程创建安全的操作指导并且验证其适用性的技术方法, 提出了一种灵活性操作指导的创建和验证方法。利用智能化的工具根据加工任务的需求、设备的功能以及作业环境进行操作指导的动态更新以适应多样化的生产作业。我们首先对小批量锻造制造过程常见危险和操作指南编纂所面临的挑战进行分析, 再针对灵活性操作指南创建进行具体阐述, 包括数据采集和处理、任务建模和方法风险评估。然后对灵活性操作的验证和改进方式进行探讨以保证在真实生产环境中提高操作安全和效率。最后通过实例阐述和验证了该技术应用的可行性和效果, 展示了具有应用前景的研究趋势。

关键词

小批量锻造; 柔性操作规程; 安全规程; 生产过程; 规程验证; 智能化技术

1. 引言

虽然小批锻造生产可以制作出高精度高质量的产品, 但小批生产因其复杂多样且变化的生产方式制定和实施安全作业要求存在很大的挑战。传统生产工艺作业要求是固化机械的且不灵活, 并无法灵活满足生产不同的需求, 这会造成安全隐患。随着人工智能的发展, 能从其收集的数据中处理和优化算法, 我们可以根据生产工艺、机器特性、工作环境来生成和测试可灵活的并为安全作业, 并在实际制造过程中不断对安全作业要求进行优化。因此, 本研究的目的是为

基于生产的生产工艺、机器特性及生产环境来生成和测试安全操作生产的要求, 以提高生产安全和生产性能, 同时也能让我们小批量锻造生产更智能化的解决问题。

2. 研究背景与意义

2.1 小批量锻造生产现状与挑战

中小批量锻造生产作为当代工业制造的主要生产组织形式, 广泛应用于航空航天、交通运输、能源等领域高端装备制造制造业, 相较于大规模连续生产形式, 生产数量少、工艺条件苛刻、产品个性化特点突出。但随之带来了一系列的问题, 首先, 由于生产的种类更多且每种类别所对应的工艺不同, 加大了生产过程的管理, 其次, 生产时间短, 组织困难, 生产流程与生产线协同困难, 可能造成生产效率低下。最后, 工艺过程随着技术发展变化、影响产品品质安全的因素等方

【作者简介】董国立(1976-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事企业安全生产研究。

面都使得生产过程受波动影响较大,可能带来生产过程安全隐患增加的问题。

2.2 安全操作规程的必要性与现有问题

安全生产操作规程的作用便是确保安全地进行生产,尤其是在小批量产品生产的工艺规程,严格遵守安全生产操作规程的重要性更加突出。一方面,在小批量产品生产过程中,产品的类型众多且产品工艺条件不断变化,这就导致安全生产操作规程具有一定的弹性。盲目严格地依照安全生产操作规程可能会忽略许多潜在的安全隐患,容易导致生产事故发生;另一方面,制定、执行完善的安全生产操作规程能切实避免安全事故,提高安全生产系数,保护职工的身心健康与生活质量^[1]。

3. 小批量锻造生产安全操作规程设计的挑战

3.1 小批量锻造生产的工艺特点

3.1.1 工艺多样性与复杂性

由于小批量锻造件生产涉及产品种类众多,每次生产量较少,在生产过程中工艺路线频繁变化,生产过程中任何一个阶段都可能存在工艺技术应用的变化,例如同一套机床也可能出现不同的加工技术,需要调整操作程序和工装设备等。因此,传统的死板定式的工作程序标准已经不能适应工作内容日益复杂多变的工作环境需求。因此,采用柔性和智能的方式如何制订能够适应各种工艺需要的安全工作程序成为程序设计中的挑战性课题。

3.1.2 灵活性与生产周期的关系

灵活性和生产周期也是小批量锻造件生产过程中需要兼顾的相关内容,在每批次的产品生产周期较短的情况下,同时生产批次之间的工艺和生产环境也有所不同。因此,在安全执行规则设计中需要极大的灵活性,以适应每批次生产时存在的工艺、生产环境的变化情况。如果死板的规定无法做到随时遵循,会导致其不能适用于多样生产环境中的安全防护需求,由此可能会造成不必要的风险因素。而灵活的规定可以随时根据生产时遇到的实际生产环境进行相应调整,既可以保障生产效率的提升,又可以满足生产过程中规避生产风险需求^[2]。

3.2 安全隐患与设计难点

3.2.1 常见安全隐患分析

在大规模生产中常见风险涉及高温灼伤、电力故障、机器故障及操作人员失误等。首先是,加工工序中热源加工的高温要求让工作人员必须直接接触高温设备或原料,存在被高温灼伤、火焰灼烧等突发状况的可能;其次是,大型复杂锻造设备质量大,结构复杂,且在过程中如果出现设备故障会导致严重的安全隐患,比如设备掉落到地,或是对设备操作者的伤害;再次是,由于小型生产的反复测试优化工艺流程,增加了设备不稳定性以及事故发生的潜在性;最后,由于生产过程中特有的工艺技术要求以及生产者的操作

不当容易造成生产错误、事故风险增加等问题。

3.2.2 安全规程设计的局限性

传统工业安全标准在小批量锻造生产过程中,由于其形态和结构各异、存在随意性等问题,并不能满足针对具体工业参数进行变化和更新的要求。首先,当前安全标准中多数操作较为死板,并不能根据各项生产材料和设备进行实时的调整;其次,由于锻造生产过程中生产环境可能存在变化,一些原有安全标准并没有注意到生产环境中安全生产的变化,不能及时对原有的标准进行补充和更新;最后,传统安全操作标准都是以静态为主,不能充分结合实时的生产信息,进行相应的调整和优化,进一步降低标准的使用效率。因此,要想有效解决以上问题,应有效利用新一代信息技术手段,为小批量锻造生产设计并制定一套较为灵活的、具有动态安全操作流程的方案,可以实现各个工况生产条件下的安全性操作。

4. 柔性安全操作规程生成方法

4.1 数据采集与处理

在形成灵活的安全工作流程期间,首先要获得有关小批量锻造生产环节的大量信息,并整理它们作为制定进一步的工作准则的基础。这些信息可能是各种各样的,可以包括机械工具的使用情况、员工行为和行为方式、加工程序的设定参数、环境条件(温度、湿度、噪声等等)以及历史事故和伤害的信息记录等。这些信息的采集可以采用一系列的方法,如用传感器、使用机器人视觉或手工记录来保证信息的完整、准确。

收集了丰富资料却并未能够将该信息即刻使用来制定规范规则,还需要将这些信息进行进一步数据加工处理,即去除冗余信息,将结果进行标准转化甚至消除干扰项,以保证信息的精确度及标准化。尤其当针对的是小批量锻造时,由于制造方式多种多样且每一批次均有所不同,所以可能会出现很多变化性影响,所以前期将原始数据做适当加工是非常必要且有利的,这是制定出适用于执行之灵活规范所必须的。该步完成后我们会得到可用的数据可用作下一步搭建工作模型,分析危险程度评估及安全深层次研究,以求我们的制定规则准确贴近实际情况^[3]。

4.2 作业流程建模

一般来说,建立任务过程模型会采用流程图、状态图等方法,并利用各种各样的节点、箭头来表示执行流程及各个阶段的逻辑关系。在建立过程中,需要注意的是,制造过程越多元复杂,模型的建立越能直观地体现每种工序变化所带来独特的制作路径。同时该模型还应该有一定弹性,可以随实际状况对其进行实时修订以适应小批量生产中突然发生的变化。例如,如果某一技术参数出现更改,模型就会自动产出对应的符合安全操作标准的作业工序,指示人员按照最安全的方式来操作。

4.3 安全评估方法

在设计弹性化安全生产活动过程中,保证弹性安全工作的基本前提就是安全评估。安全评估是运用危险性评估分析生产过程中生产线上的各种不安全因素,找出存在的危险性因子,并为工作线设计提供导向。安全评估常用的手段一般都具有定性与定量的特点,具体评估内容往往与生产技术、机器运转、员工作业等各个方面的因素相关联。

常用的事故评价方法包括故障类型与影响分析、危害及可操作性分析、失效模式和效应分析等。这些方法可以帮助我们评估每一个生产过程中的危险因素,对危险危害因素的风险程度、风险频率进行评估,形成规范安全操作程序,利用安全评估方法可以提前发现设计中存在的安全隐患,防止或减小危害事故的发生^[4]。

5. 柔性安全操作规程的验证与优化

5.1 规程验证的必要性与方法

在完成灵活安全操作流程设计后,需要通过确认步骤来确保流程的适用性和有效性。这个流程的主要目的是使过程确定此流程能在真正的生产中使用而且能够高效安全,以便于找出原有流程的问题并进行改正,或者做以改善,在实际的环境中更好的保护我们。

其一是因为小批量锻造生产过程较为复杂多变,制定的规则可能会存在不完全适合现实的生产场景和情况,通过验证规则可检验它们是否具有一定的宽容度和满足不同生产状况,以便更有效地制定和执行规则。其次,通过验证可验证其有效性,避免和排除安全问题。再次,规则优化可以借助验证实现,便于规则的完整和合理。

5.1.1 规程验证流程

根据一般规范审查流程包含的主要环节,首先是确定审查目的和审查方式,并在生产状况基础上决定是用仿真实地进行审查还是应用实地进行审查。其次进行首次审查,确定规则的合适性以及适用性,我们需要在此阶段收集与整理我们所需要信息数据。如果在审查过程中发现了规则的不完善之处,我们需要做改变以及完善。最后完成了审查报告,整理了学习的体会,作为今后继续完善以及运用的借鉴资料。

5.1.2 规程验证中的关键技术

流程确认的过程中,主要技术包括数据采集分析技术、仿真技术与决定辅助系统等。其中,数据采集和分析技术是通过连续的监控和记录生产线上各参数的情况,对测试提出相关的数据基础;仿真技术是通过仿真营造出一个虚拟的场景,来模拟生产线上各种情况下的工艺的表现,并对是否适用进行判断。决定辅助系统则是对生产线上各检测和测试阶段的数据进行有效的分析,提出相关可行性的建议,确

保测试阶段的高效与精准。

5.2 规程优化策略

5.2.1 基于反馈的规程调整

针对灵活安全的操作规定而言,它是一项需要不断和实际生活相呼应,不断变动的要求。从一线生产人员的工作绩效、机器出现的故障现象和出现的事故数量等方面获取资料进行参考,使用此类通过实际生活反馈的结果对相关规定进行修改和革新,及时及时应运生产中的结果,对相关操作规则进行合理的修改。例如某个特定的生产程序存在诸多安全隐患,可以通过此类反馈,修正操作规定,以符合实际生产需要,减小潜在威胁。

5.2.2 优化算法与模型的选择

改进柔性安全操作流程需要选择恰当的优化方法与模型。常见的优化方法有基因优化法、PSO(粒子群优化)法、模拟退火法等,在不同的环境下经多次迭代优化寻找出最优安全操作流程,同时对于优化模型而言,采用机器学习优化模型可以依据大量数据进行自我调节以适应不同环境维持较高灵活度和安全度。不断优化改进优化方法和模型能够帮助其在线更新优化柔性安全操作流程以适应生产过程中需求的变化^[5]。

6 结语

本文建立的小批量锻造生产过程中基于数据采集及处理的安全操作手册的编撰与确定的方法,基于生产过程中所采集的数据分析、处理技术以及生产工作流程的建模技术来对生产过程中进行的安全评价体系进行应用,从而基于这些方法能够灵活构建出安全操作手册,并且通过对某产品的实例性实验得到了充分的证明,该方法满足了不同批次不同产品加工的要求,实现了该手册的有效更新,促进了安全性及生产效率的提升。本方法对操作手册的检验、优化策略的有效提升,也使得本手册的安全风险得到有效降低,操作规范得到有效保证,为增加手册的适用性和稳定性提供了充足的可能性,具有广阔的前景。

参考文献

- [1] 王泽宇; 许晓彤. 基于人工智能的锻造生产安全管理系统研究[J]. 机械工程学报, 2023(7): 125-130.
- [2] 陈志伟; 刘海龙; 李浩文. 小批量生产中的智能化控制与安全策略[J]. 工业工程, 2022(12): 45-50.
- [3] 杨天宇; 张玉松. 复杂生产环境下安全操作规程的智能生成与验证方法[J]. 安全与环境学报, 2023(4): 58-64.
- [4] 李志恒; 郑涛; 魏凯. 锻造生产过程中的安全风险评估与控制策略[J]. 现代制造技术, 2021(5): 75-80.
- [5] 刘子杰; 赵俊; 李建华. 小批量锻造生产的灵活操作规程生成与优化研究[J]. 机械设计与制造, 2022(11): 92-97.

Analysis of comprehensive maintenance method of asphalt concrete pavement based on LCC concept

Longhua Zhang

Hangzhou Luda Highway Engineering Company, Hangzhou, Zhejiang, 310006, China

Abstract

China's national highways, provincial roads, and rural roads span vast areas with numerous nodes. Engineering projects face complex natural environments, social conditions, and transportation challenges. Therefore, it is essential to adopt a full lifecycle perspective, scientifically analyze pavement conditions based on traffic flow and climate factors, and determine optimal maintenance timing and measures for asphalt pavements to address technical challenges in maintenance. Meanwhile, establishing an integrated maintenance system for asphalt pavements requires comprehensive research and optimization of evaluation standards, maintenance schedules, and strategies to achieve maximum effectiveness, extend service life, and enhance road efficiency. Drawing from the author's recent practical experience, this paper proposes several innovative approaches for comprehensive maintenance of asphalt concrete pavements using full lifecycle theory, offering valuable references for industry peers.

Keywords

LCC concept; asphalt pavement; comprehensive maintenance; method

基于 LCC 理念的沥青混凝土路面综合养护方法探析

张龙华

杭州路达公路工程公司, 中国 · 浙江 杭州 310006

摘 要

我国的普通国省道及农村公路点多面广, 工程项目所面对的自然环境、社会环境, 以及道路运输条件十分复杂。因此, 需从整个路面生命周期出发, 根据路面实际状况, 结合交通流量、气候条件, 科学分析判断沥青路面的舒适养护时机、养护措施, 解决养护难的技术难题。同时, 沥青路面综合养护体系的构建是一个复杂而系统的工程, 需要我们在评价标准、养护时机、养护措施等多个方面进行深入的研究和优化, 以期达到最佳的养护效果, 延长路面的使用寿命, 提高道路的使用效率。本文通过作者在近几年来类似的工作经验, 以基于全寿命周期理论, 阐述沥青混凝土路面综合养护方法提出几点想法, 供同行参考。

关键词

LCC理念; 沥青路面; 综合养护; 方法

1 引言

随着我国高等级公路建设迅猛发展、规模扩大, 传统养护技术及运营管理模式难以适应。目前问题集中在: 现有养护方式与现代交通技术差距渐大, 难以满足养护需求; 养护管理与现实差距大; 养护定额和规范与新型材料及设备不适应, 养护效果不佳; 养护作业关键技术问题多且缺乏针对性。

实践表明, 普通国省道及农村公路养护、运维、施工

成本在全寿命周期占比小, 加强全寿命周期道路养护管理是明智选择。

我国高等级公路多数沥青路面进入养护维修期, 因为大流量和车辆载重比例的不断提升, 沥青路面所承受的压力也在不断增加, 导致路面损坏速度加快, 养护维修工作变得更为频繁和紧迫。同时, 通过近年来主管部门对于路面全寿命周期管理的认识不断加深, 也预示着养护工作正从传统的矫正性养护向更为科学、前瞻的预防性养护转变。

总之, 沥青路面综合养护目标是借助科学技术提升和维持路面品质, 需在科学管理下, 在合适时机采取合适养护措施。

笔者认为, 基于全寿命周期的沥青路面综合养护体系, 应重点需要解决以下 3 个问题:

①系统优化沥青路面综合养护的评价标准。

【基金项目】杭州市交通运输学会科技项目(项目编号: Hzjt202402)。

【作者简介】张龙华(1985-), 男, 中国江苏南京人, 本科, 高级工程师, 从事土木工程研究。

②沥青路面综合养护时机的精准决策。

③综合养护措施的合理选择。

2 沥青路面全寿命周期 (LCC) 概念的提出

基于全寿命 (LCC) 理念, 是基于建设项目全寿命管理中针对路面在营运阶段的狭义管理理念, 旨在通过道路营运过程中如何更好的养护好基础设施, 包括路面, 以最佳状态服务于交通运输的管理模式。

这一新概念的核心在于, 将沥青路面的养护管理, 并贯穿于整个使用周期。通过全寿命周期的成本分析、性能预测以及养护决策优化, 实现路面性能的最大化维持和养护成本的最小化。具体而言, 该概念强调在路面建设的初期就考虑其未来的养护需求, 制定科学合理的养护规划, 确保路面在全寿命周期内都能保持优良的使用性能。同时, 通过实时监测和数据分析, 及时调整养护策略, 以适应路面性能的实际变化, 从而达到延长路面使用寿命、提高行车安全性和舒适性的目的。

3 沥青路面综合养护的评价标准

3.1 沥青路面使用性能的评价指标

沥青路面综合养护的评价标准, 其核心任务在于对沥青路面各类病害进行细致而系统的量化分析。我们通过系统分析, 就沥青路面的整体使用性能进行系统分析。这些评价指标的设定, 旨在为养护工作人员提供一个清晰、明确的养护决策依据, 帮助他们准确判断路面的实际状况, 从而制定出科学合理的养护方案。

此外, 沥青路面使用性能评价指标在构建沥青路面预防性综合养护时机评价标准中至关重要。因此, 这些评价指标不仅是养护决策的重要参考, 更是预防性综合养护体系构建的基础和关键。

3.1.1 沥青类路面使用状况评价指标

沥青类路路面的使用状况评价指标一般包括基本指标和其它指标 2 个方面。

基本指标, 主要包括路面损坏状况指标 PCI、路面行驶质量指标 RQI、路面车辙深度指标 RDI、路面结构强度指标 PSSI。这些指标是评价沥青路面使用状况的关键指标。

其它指标, 包括路面抗滑性能指标 SRI 和路面磨损指数 PWI 等, 也是反映路面使用状况的重要指标。

这些指标不仅能够准确反映沥青路面的承载能力和耐久性, 还能够为养护工作人员提供重要的参考依据, 辅助他们进行科学合理的沥青路面养护决策。

3.1.2 整体评价指标

整体评价指标能够聚焦于某一类或某几类具体的病害, 对它们进行深入细致的分析与评估, 从而更准确地把握病害的发展态势, 为养护时机的确定提供更为可靠的依据。例如, 当沥青路面仅出现轻微的车辙病害时, 通过路面车辙深度指标 RDI 这一分项评价指标, 就可以及时了解车辙的发展程度,

进而判断是否需要进行预防性养护, 而无需考虑其他并未出现的病害类型对整体路面性能的影响。这样不仅可以提高养护决策的效率, 还能有效节约养护成本。无疑会更加贴近实际工程的具体需求。

3.2 预防性综合养护时机的评价标准

根据国家现行的预防性综合养护时机评价标准, 笔者根据浙江省普通国省道及农村公路沥青路面所存在的典型病害类型及其严重程度, 对上述分项评价指标进行了进一步的分析与细化。例如, 针对 PCI (路面损坏状况指数), 结合浙江省不同地区的气候特点、交通流量以及路面材料特性, 制定了更为细致的分级评价标准, 将路面损坏状况划分为轻微、中度、重度三个等级, 并对应不同的养护措施建议。对于 RQI (路面行驶质量指数), 则根据车辆行驶的平稳性、舒适性要求, 设定了具体的阈值范围, 当 RQI 值低于某一阈值时, 即表明路面行驶质量下降, 需要进行相应的预防性养护。同样地, RDI (路面车辙深度指数) 和 SRI (路面抗滑性能指数) 也根据浙江省的实际情况, 制定了相应的评价标准和养护建议, 以确保沥青路面在不同使用阶段都能保持良好的使用性能。基于国家现行预防性综合养护时机的评价标准, 针对浙江省范围的沥青路面预防性综合养护时机评价标准, 其取值标准一般为 PCI (83-90), RQI (82-91), RDI (83-92), SRI (82-87), PSSI (≥ 75)。

然而, 要实现这种高效的预防性养护, 必须满足两个至关重要的关键条件: 首先是选择恰当的时机, 其次是采用适宜的养护方法。所谓恰当的时机, 指的是能够准确识别并确定进行综合预防性养护的最佳时刻, 即在设备或系统尚未出现明显故障迹象之前, 通过科学分析和数据监测, 找到最为合适的时机进行养护, 以确保养护效果的最大化和资源利用的最优化^[2]。

3.3 沥青路面使用性能的预测指标

沥青路面使用性能预测的核心目标是明确预防性综合养护措施的最佳实施时机, 并使评价标准与之匹配。通过建立各指标与路面服役时间的动态关联模型, 可实现路面性能退化的量化预测。具体而言, PCI 值随使用年限增长呈非线性下降趋势, 当其降至 83 以下时, 表明路面已进入预防性养护临界期; RQI 值与行车速度波动率呈负相关, 当平整度衰减导致行车速度标准差超过 5km/h 时, 需考虑实施平整度恢复措施; RDI 值增长超过 15mm 时, 车辙深度将显著影响排水功能, 需及时进行车辙填充处理; SRI 值低于 82 时, 路面抗滑能力不足, 雨天事故率将上升 30% 以上; PSSI 值接近 75 临界点时, 表明结构承载力已接近设计极限, 需采取结构性补强措施。基于多指标协同分析的预测模型, 可构建路面性能衰减的预警体系, 为预防性养护时机的精准判定提供科学依据。综合分析和预测这些指标, 能准确判断路面使用性能, 为预防性综合养护提供科学依据, 提高养护针对性和有效性, 延长路面寿命, 降低成本, 提升道路运输的安

全性与舒适性。

3.4 预防性综合养护时机的确定

确定其最佳的预防性综合养护时机,应选取典型沥青路面,进行预防性综合养护最佳时机的确定,具体如下:

RQI: 某典型段的实测值 86, 而沥青路面预防性综合养护时机评价标准为 82~91, 根据该路段 RQI 发展趋势, 介于 2027 年至 2029 年之间, 经综合测评, 该典型沥青路面最早预防性综合养护时间为: 年

RDI: 实测某典型路段得 87.58, 其预防性养护时机可按式计算: 根据实测数据和趋势变化, 我们得出以下结论: 沥青路面预防性综合养护时机评价标准为 RDI 为 83~90, 根据该路段 RDI 发展趋势, 介于 2028 年至 2030 年之间, 经综合测评, 该典型沥青路面最早预防性综合养护时间为: 年

SRI: 实测某典型路段得 84.44, 其预防性养护时机可按式计算: 根据实测数据和趋势变化, 我们得出以下结论: 沥青路面预防性综合养护时机评价标准为 SRI 为 82~87, 根据该路段 SRI 发展趋势, 介于 2027 年至 2030 年之间, 经综合测评, 该典型沥青路面最早预防性综合养护时间为: 年

PSSI: 实测某典型路段得 97.97, 其预防性养护时机可按式计算: 根据 PSSI 趋势分析, 随时间增加, 其预测结果未递减, 原因是沥青路面使用性能预测数据集中, PSSI 实测数据本身处高水平, 致 PSSI 模型无法有效捕捉和预测低值数据。基于此分析结果, 可确定某典型路段沥青路面预防性综合养护最佳时机。本文根据前三项的分析, 确定某公路典型路段采取预防性综合养护最佳时机为 2028 年。

4 沥青路面预防性综合养护措施的选择

沥青路面预防性综合养护措施的选择, 一方面应综合运用现有技术手段, 对路面裂缝、车辙、平整度等关键指标进行实时监测和数据分析, 以便精准把握养护时。同时, 通过数据深度分析, 运用最优路径模型, 准确识别出各种因素对路面性能的影响程度, 进而为每个养护路段推荐最为合适的预防性综合养护措施。

4.1 沥青类路面预防性养护措施

沥青路面的预防性养护主要有局部修补、罩面和路面专项养护。

局部修补即针对路面出现的局部病害, 如裂缝、坑槽等, 通过填充、灌缝、贴缝等工艺进行修复。罩面措施则是在原有路面上加铺一层新的沥青混合料, 形成罩面层, 以改善路面的平整度、抗滑性和耐久性。路面专项养护, 即通过铣刨原有路面表层或全部结构层, 然后重新铺筑新的沥青混合料, 以恢复路面的使用性能。

局部修补的核心目标在于延缓病害发展、延长路面使

用寿命并提升使用性能, 罩面的目的提升路面的耐久性, 延长其使用寿命。根据不同的路面状况和需求, 可以选择不同类型的罩面材料, 如薄层罩面、超薄罩面等, 以达到最佳的养护效果。

路面专项养护。是根治沥青类路面的各类早期病害, 它通过高效的拌和设备对这些材料进行均匀拌和, 制备出性能优良的新沥青混合料, 将这种新制备的沥青混合料均匀摊铺到已经铣刨处理过的沥青路面位置, 并进行压实作业, 以确保路面的平整度和密实度, 恢复路面的正常使用功能。值得注意的是, 对于铣刨重铺类而言, 只有就地热再生属于预防性综合养护措施的范畴, 因此, 对于沥青路面的预防性综合养护而言, 铣刨重铺类指的就是就地热再生^[1]。

4.2 预防性综合养护措施的选择

选择一个符合我省地域特性的、能够满足实际工程需要的, 沥青路面预防性综合养护措施非常重要。

沥青路面预防性综合养护措施选择需要一个多重因素组成的选择模型, 即以预测准确率在判断养护措施选择的可靠性, 并决定选用的具体措施。图 5 为某农村公路典型路段根据其调查所得沥青路面病害特征及严重程度、外界因素等多个参数进行建模, 所构建的沥青路面预防性综合养护措施选择模型。该模型是综合考虑施工现场数据修正与调整, 对所测试的应变变量 (PCI、RDI、SRI 和 PSSI) 通过系统整合与自然数排序, 并在一系列数据分析基础上所形成的集合。

根据数据分析, 微表处作为土层的数字模型, 在测试集上的表现相对较好, 具体体现在: 模型的预测准确率高达 94, 37, 而铣刨罩面 (2cm), 由此可知, 该类典型路段的最佳养护措施选择为封层类, 若采用铣刨罩面应排序最后。

5 结语

研究与推广基于全寿命管理的沥青路面综合养护关键技术, 不仅能够显著提升我国当前路面养护管理的整体水平, 优化养护工作的效率, 还为路面养护的综合管理、施工、运行、维修及相关法规制定提供了可持续发展的框架, 成为推动路面养护管理不断完善的坚实基础。沥青路面的综合养护应以全寿命周期管理的思路进行科学的管理与决策, 这对于公路管理部门来说具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] 赵帅, 张金喜, 崔来军. 基于动态权重的路面使用性能指数评价方法研究[J]. 中外公路, 2017, 37(05): 51-55.
- [2] 李永刚. 沥青路面预防性养护技术在农村公路中的运用[J]. 智能建筑与工程机械, 2024, 6(6): 10-12.
- [3] 陆飞飞. 国省干线公路路面病害机理及大中修方案研究[J]. 交通世界, 2024(15): 135-137.

Application study of zero discharge process in treatment of chromium-containing wastewater from steel coating solution

Shahe Liu¹ Liansong Huang²

1. Wuhan Xinyuan Water Environment Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hunan, 430000, China

2. Yangzijiang Cold Rolling Co., Ltd., of China Shagang Group, Suzhou, Jiangsu, 215625, China

Abstract

Achieving zero discharge of chromium containing wastewater in the steel coating industry is the key to solving environmental bottlenecks and resource constraints. This article systematically studies the zero emission process chain that integrates pretreatment, deep chromium removal, efficient concentration, and end solidification. Through the verification of the Yangzijiang Cold Rolling Project at Shagang (with a scale of 480 m³/d), it is shown that the combination process of “chemical oxidation-reduction precipitation → advanced detoxification oxidation → contact oxidation biodegradation → nanofiltration membrane salt separation → high-pressure reverse osmosis → three effect evaporation crystallization” can achieve zero emissions throughout the entire process: the effluent reuse rate is $\geq 97\%$, the reuse water meets industrial reuse standards, and the leaching toxicity of chromium containing sludge after stabilization is lower than the national standard limit. Technical and economic analysis shows that the cost of treating one ton of water is about 28.5 yuan, and chromium resource recovery can reduce the overall cost by 18% -25%. Research has shown that qualitative resource utilization and multi-level barrier control are the core paths to achieve a balance between environmental and economic benefits.

Keywords

chromium containing wastewater; Zero emissions; recycling; Salt crystallization; Evaporative solidification

钢铁涂层液含铬废水处理零排放工艺的应用研究

刘沙河¹ 黄连松²

1. 武汉新源水务环境工程有限公司, 中国·湖南 武汉 430000

2. 中国沙钢集团杨子江冷轧有限公司, 中国·江苏 苏州 215625

摘 要

实现钢铁涂层行业含铬废水零排放是破解环保瓶颈与资源约束的关键。本文系统研究了集成预处理、深度除铬、高效浓缩与末端固化的零排放工艺链。通过沙钢杨子江冷轧工程实例验证（规模 480 m³/d），表明“化学氧化还原沉淀 → 高级解毒氧化 → 接触氧化生物降解 → 纳滤膜分盐 → 高压反渗透 → 三效蒸发结晶”组合工艺可实现全流程零排放：出水回用率 $\geq 97\%$ ，回用水满足工业回用标准，含铬污泥经稳定化后浸出毒性低于国家标准限值。技术经济分析显示吨水处理成本约 28.5 元，铬资源回收可降低综合成本 18%-25%。研究表明，分质资源化与多级屏障控制是实现环境效益与经济效益平衡的核心路径。

关键词

含铬废水；零排放；资源回收；分盐结晶；蒸发固化

1 引言

钢铁部件镀铬及铬酸盐钝化处理在提升产品性能的同

时，产生富含高毒性六价铬（Cr(VI)）的废水。传统处理技术虽能达标排放，但仍存在水资源浪费、铬资源流失及含铬危废处置难题。随着“水十条”、《工业废水循环利用实施方案》等政策推动，以及部分地区对重点企业强制零排放的要求，开发经济可行的含铬废水零排放（Zero Liquid Discharge, ZLD）技术势在必行。零排放核心目标在于废水深度处理并回用，溶解性固体转化为固态产物回收或安全处置。本文聚焦钢铁涂层行业，研究含铬废水零排放工艺集成、工程应用瓶颈与资源化路径，为行业绿色升级

【作者简介】刘沙河（1970-），男，硕士，高级工程师，从事环保水处理，膜分离材料的应用技术研究。

【作者简介】黄连松（1971-），男，本科，科长助理，从事冷轧生产机组（酸连轧、硅钢退火、普板、锡板和电镀锡）生产废水的排放收集及处理研究。

提供技术支撑。

2 废水特性及零排放核心挑战：

典型水质：Cr(VI)：5000-8000 mg/L，总溶解固体(TDS)：3000-15000 mg/L(以 Na₂ SO₄ 、NaCl 为主)，pH2-6，钙、镁含量 1200-3100mg/L， COD 含量 1100-1800mg/L 及含微量重金属(Ni、Zn)、油脂及表面活性剂。

零排放核心挑战：毒性污染物深度去除：Cr(VI) 需彻底还原去除并防止再氧化；高 COD 的降解与钙、镁离子去除问题：高盐废水高效浓缩：克服膜结垢与蒸发腐蚀问题；分质资源化： 分离回收铬、钠盐及水资源；末端残渣安全处置： 含铬浓缩物需惰性化处理以满足填埋或利用标准；成本可控性： 降低能耗与化学药剂消耗。

3 零排放工艺链构建与关键技术：

3.1 预处理与深度除铬单元

3.1.1 化学氧化还原沉淀（保障性铬离子去除）：

酸性条件（pH=2.5）下投加 NaHSO₃（或 FeSO₄）将 Cr(VI) 还原为 Cr(III)，碱性沉淀（pH=9.0）生成 Cr(OH)₃ 污泥，总铬去除率 >99.5%，优化方向：ORP 在线控制还原剂投加，减少药剂过量；复合絮凝剂（如 PFS+PAM）降低污泥含水率至 85% 以下。

3.1.2 化学中和沉淀单元（钙、镁离子去除）

碱性条件（pH=9-11.5）下投加 NaCO₃（或 NaHCO₃）将钙镁离子碱性沉淀（pH=9.0）生成 CaCO₃、MgCO₃ 污泥，总钙、镁去除率 >99.8%。

3.2 解毒接触氧化生化单元（降解 COD）：

利用双氧水、臭氧等强氧化剂对废水中大分子有机物进行破链，再利用耐盐菌（芽杆菌、海鲜球菌、红菌等），在有氧的条件下进行生化，降解废水中 COD，使得上清液 COD 控制在 100mg/L 以下，后续串联生物滤池，利用有氧、

厌氧复合菌落，保证出水 COD 值小于 50mg/L。

3.3 膜浓缩与减量单元

3.3.1 纳滤（NF）分盐：

利用 NF 膜对二价离子(SO₄²⁻)的高截留率(>95%) 与一价离子(Cl⁻) 部分透过特性，将废水分离为富硫酸钠(NF 浓水)与富氯化钠(NF 产水)两股水流 [2]。优势：为后续蒸发结晶获得高纯度单盐奠定基础，规避混盐处置难题。

3.3.2 高压反渗透(HPRO)/ 碟管式反渗透(DTRO)：

对 NF 产水及部分 NF 浓水进行极限浓缩，将 TDS 提升至 15-20% 以上，产水回用于生产线(回用率 ≥75%)。关键：高效阻垢剂（如专用含磷聚合物）与定期化学清洗控制膜污染。

3.4 蒸发结晶与末端固化单元

高效节能蒸发技术（电能替代蒸汽），处理 NF 分离后的富盐水流（如富 Na₂ SO₄ 浓水）。产出：蒸馏水（回用）与结晶盐浆。某工程显示，MVR 比多效蒸发节能 60% 以上 [3]。

分质结晶与盐资源化：通过控制结晶条件（温度、过饱和度），分别从富 Na₂ SO₄ 和富 NaCl 液中结晶出无水硫酸钠（元明粉）和氯化钠。

品质控制：结晶盐经洗涤、干燥，纯度可达 Na₂ SO₄ ≥98%、NaCl ≥ 97.5%，满足《工业无水硫酸钠》（GB/T 6009-2014）等标准，可用于玻璃、印染等行业。

含铬污泥 / 残渣稳定化：化学还原沉淀单元产生的含铬污泥及蒸发残液（含少量未结晶重金属），采

用水泥固化、化学稳定化（如硫化钠 + 铁盐）或高温烧结（制备陶粒）等手段，降低铬浸出毒性。

达标保障：固化体满足《危险废物填埋污染控制标准》（GB 18598-2019）浸出限值（总铬 ≤4.5 mg/L，Cr(VI) ≤1.5 mg/L）[4]。

表 1 含铬废水零排放核心单元功能与目标

工艺单元	核心功能	关键指标 / 目标	资源化产品 / 去向
化学氧化还原沉淀	Cr(VI) 还原为 Cr(III) 并沉淀 去除	总铬去率 >99.5%，出水 总铬 <1.5 mg/L	含铬污泥（待稳定化）
化学中和沉淀	钙、镁沉淀	总去除率 >99.0%	含钙镁污泥（作为建材 原料回收）
解毒接触氧化	降解 COD	COD<200mg/L	为后续工艺提供保障
生物滤池	再分解去除 COD	COD<50mg/L	为后续工艺提供保障
膜浓缩减量分离	深度浓缩减量	回收率 ≥75%，浓缩 液 TDS>15%	高品质产水回用
蒸发结晶脱盐	结晶分离	蒸汽能耗 <40 kWh/t 水，结晶盐纯度 >98%	无水硫酸钠、氯化钠
稳定化 / 固化	无害化处理含 铬污泥及浓缩 残液	固化体铬浸出浓度 满足 GB 18598-2019	安全填埋或建材利 用

4 工程案例：沙钢冷轧厂零排放项目：

项目规模： 废水处理量 480 m³/d, (20 吨 / 小时), 水源为含镀铬漂洗水、钝化废液等废水水质：总铬离子为 3-5 万 mg/L, 钙、镁离子 2000-2500mg/L, COD 为 3000mg/L (主要为丙烯酸树脂、有机清洗剂等), 氯离子 4000mg/L, PH1-2^[5]。

工艺流程：废水收集 → 氧化还原去铬装置 → 化学沉淀去钙镁装置 → 耐盐生物接触滤池 → 预处理超滤装置 → NF 分盐装置 → HPRO 浓缩 (产水回用) → 多效蒸发结晶 (分别处理 NF 浓水与 HPRO 浓水) → 结晶盐干燥包装 → 含铬污泥 / 残渣水泥固化。

运行效果：水资源回用：HPRO 产水 + 蒸发器蒸馏水，总回用率 98%，水质达到《城

市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923-2005)。

资源回收：年回收工业级无水硫酸钠 (Na₂ SO₄ 、 NaCl) 混合物约 360 吨 / 年 (纯度 97.0%)。

末端固废：污泥与蒸发残渣经水泥固化 (水泥：废渣 =1:3)，浸出液总铬 0.8 mg/L、Cr(VI) 未检出，按一般固废填埋处置。

NF 分盐优化：采用抗污染卷式 NF 膜，结合在线电导监测实现 DS 与 LS 精准分离，保障硫酸钠盐纯度。

蒸发器热力耦合：将 HPRO 浓水热交换预热进料，降低蒸发器蒸汽能耗 15%。

铬在线监测与反馈控制：在离子交换出水设置 Cr(VI) 在线分析仪，超标时自动切换备用并报警。

5 技术经济性分析与优化方向：

成本构成与敏感因素：能源 (电、蒸汽) 约占 40-50%，膜更换占 20-30%，药剂与维护占 15-20%，人工与折旧占 10-15%。降低能耗 (如选用高效 MVR、回收余热)、提升膜寿命、优化药剂投加是降本关键。

资源化价值驱动：铬资源回用、工业盐销售收入可显著抵消运行成本。当废水含铬量 >100 mg/L 且盐分高时，资源化经济效益更显著。建立区域盐资源消纳渠道是项目可持续性的保障。

高级氧化预处理：臭氧高级氧化、耐盐降解有机物，降低膜污染与蒸发发泡风险^[6]。

高压反渗透技术：利用高浓度汲取液实现低能耗预浓缩，降低后续 RO/ 蒸发负荷。

铬渣材料化利用：研究含铬污泥制备铬铁合金或铬系颜料，实现高值化利用。

6 结语

本研究通过集成“预处理除铬、钙镁 - 耐盐生物接触滤池—膜法分盐与浓缩减量—蒸发结晶固化”的工艺链，成功实现了钢铁涂层含铬废水零排放与资源化目标。工程实践表明：化学还原沉淀结合化学沉淀可确保 Cr(VI)、钙、镁离子深度净化；通过耐盐生物接触滤池解毒降解 COD；纳滤分盐与膜浓宿减量是实现硫酸钠与氯化钠高品质回收的关键前置；多效蒸发结晶具有显著节能优势；末端含铬固废经稳定化可达到安全处置要求。资源回收 (铬、盐、水) 显著提升项目经济性。

参考文献

- [1] Zhao, Y., et al. (2022). Resource recovery from chromium-containing wastewater by ion exchange and its reuse in the electroplating process. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134965. (铬资源回用经济性分析)
- [2] Li, R., et al.(2023). Efficient separation of sulfate and chloride from high-salinity chromium-containing wastewater using nanofiltration: Performance and fouling control. *Desalination*, 558, 116642.(纳滤分盐 最新研究)张宏亮,等.(2023).MVR 蒸发系统在电镀废水零排放中的应用与节能分析. *水处理技术*,49(5),122-126.(国内 MVR 工程能耗数据)
- [3] Wang, Z., et al. (2024). Hybrid forward osmosis-membrane distillation for advanced oncentration of chromium-rich wastewater: Energy efficiency and mitigation of membrane fouling. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149982. (正渗透前沿应用)
- [4] Jiang, S., et al.(2024). Selective separation and recovery of sodium sulfate and sodium chloride from high-salinity wastewater by selective electrodialysis. *Separation and Purification Technology*,330, 125330. (电驱动膜分盐研究)
- [5] 生态环境部.(2019).危险废物填埋污染控制标准 (GB 18598-2019) .
- [6] 国家发展改革委等.(2021).工业废水循环利用实施方案.(政策依据)

Optimization method of weld quality for water regeneration pipeline welding robot

Le Li Mingming Han Xinwen Liu Jiadong Wang

China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

With the widespread implementation of reclaimed water utilization projects, ensuring welding quality in reclaimed water pipeline systems has become critical. Welding robots have emerged as essential equipment for achieving efficient and high-quality welding processes. This study focuses on optimizing weld seam quality in reclaimed water pipeline welding robots, conducting an in-depth analysis of key influencing factors including welding process parameters, robotic motion control, and welding environment conditions. To address these challenges, we propose a comprehensive optimization framework encompassing intelligent process parameter optimization algorithms, precise trajectory planning with compensation mechanisms, and adaptive environmental control systems. Case studies demonstrate that the proposed optimization methods significantly enhance weld seam quality while reducing defect rates, thereby ensuring safe and reliable operation of reclaimed water pipeline engineering projects.

Keywords

reclaimed water pipeline; welding robot; weld quality; optimization method

再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法

李乐 韩明明 刘新文 王加栋

中建八局第二建设有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

摘 要

随着再生水利用工程的广泛开展, 再生水管道焊接质量至关重要, 而焊接机器人是实现高效、高质量焊接的关键设备。本文聚焦再生水管道焊接机器人焊缝质量优化问题, 深入分析影响焊缝质量的主要因素, 包括焊接工艺参数、机器人运动控制、焊接环境等。针对这些因素, 提出一系列优化方法, 涵盖焊接工艺参数的智能优化算法、机器人运动轨迹的精确规划与补偿、焊接环境的适应性控制等方面。通过实际案例验证, 所提出的优化方法可显著提升再生水管道焊接机器人焊缝质量, 降低焊接缺陷率, 为再生水管道工程的安全可靠运行提供保障。

关键词

再生水管道; 焊接机器人; 焊缝质量; 优化方法

1 引言

再生水回用是缓解我国水资源短缺的重要手段, 而再生水管线作为再生水输送的关键基础设施, 其施工质量直接影响再生水的安全可靠运行。焊接是再生水管线连接的关键环节, 良好的焊接质量保证其长期运行中承受内水压、防渗漏和抗环境腐蚀的能力。再生水管道采用传统手工焊接方法, 存在焊接效率低, 焊接质量受操作者技术水平影响大, 劳动强度大, 作业环境恶劣等问题。随着自动化程度的提高, 焊接机器人以其高效率、高精度和高稳定性的特点, 逐步被应用于管道焊接领域。然而, 由于再生水管线材料规格多, 焊接环境复杂, 在焊接过程中易受多因素影响, 易产生气孔、

裂纹、未熔合等缺陷, 严重影响管线的综合性能。因此, 深入研究再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法具有重要的现实意义。

2 影响再生水管道焊接机器人焊缝质量的主要因素

2.1 焊接工艺参数

焊接工艺参数是影响焊接质量的一个重要因素。焊接电弧的热输入量取决于焊接电流与电压, 过高的电流或过高都会增加焊缝的熔宽, 增大余高, 甚至发生烧穿; 但电流过小或过低都会造成熔深不够, 造成焊缝不能完全熔合。过快的焊速将缩短熔池存在时间, 气体无法逸出, 容易产生气孔; 焊接速度过慢, 焊缝热影响区扩大, 晶粒粗大, 力学性能下降。引线长度过大, 焊丝电阻增加, 熔速增加, 溅射增加; 引丝长度过小, 对电弧稳定性有较大影响^[1]。

【作者简介】李乐 (1985–), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 中级工程师, 从事道路工程研究。

2.2 机器人运动控制

焊接机器人的运动控制精度对焊缝成形质量有很大影响。为满足焊接工艺的要求,机器人的轨迹、速度和加速度必须满足焊接工艺的要求。在管线焊接过程中,机器人需要沿管线圆周方向连续焊接,如果轨迹偏离太大,将导致焊缝出现错边和不均匀等缺陷。另外,在起动、制动和转向过程中,若不能很好地控制加速度,将导致焊接电弧不稳定,从而导致焊接缺陷的产生(图1)。



图1 焊接机器人

2.3 焊接环境

再生水管线的焊接环境一般比较复杂,可能会受到风、温、湿等多种因素的影响。当风速太大时,保护气体会被吹走,焊缝金属会与氧、氮等气体发生化学反应,从而产生气孔、氧化皮等缺陷。环境湿度过大,会使焊条、焊丝等焊接材料受潮,影响电弧稳定性,增加氢含量,造成焊缝开裂。环境温度过低,焊缝金属冷却速率过快,不能充分细化晶粒,导致焊缝韧性、抗裂性能下降^[2]。

2.4 管道材质与规格

再生水管道材料不同,其焊接性能存在较大差异,如不锈钢管导热系数高、线膨胀系数大,在焊接过程中容易出现变形、开裂等缺陷。为避免产生白口组织,必须严格控制球墨铸铁管的焊接线能量。此外,大直径厚壁管线对焊接线能量的要求更高,对焊接工艺要求更高^[3]。管道规格主要涉及公称直径和壁厚。公称直径根据再生水的水量需求、流速等因素确定,以满足输送能力;壁厚则依据管道的工作压力、埋设深度及土壤条件等设计,确保管道在运行过程中有足够的强度和刚度,保障再生水安全、稳定输送,减少泄漏等事故的发生。

3 再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法

3.1 焊接工艺参数智能优化算法

再生水管线焊接机器人的焊接质量主要由焊接电流、焊接电压、焊接速度和伸出长度等因素决定。传统方法主要

依靠人工经验和试凑法确定参数,耗时耗力,难以与复杂多变的焊接场景进行精确匹配,造成焊接质量不稳定。智能优化算法是一种高效的求解方法,其典型代表就是遗传算法。该方法模拟生物进化的自然选择和遗传机理,对焊接工艺参数进行编码,形成初始种群。利用熔深、熔宽、缺陷率等焊接质量指标,构建适合度函数,实现对焊接过程中的个体的评价。通过选择操作保留优质个体,交叉操作交换基因信息生成新的个体,通过变异操作引入随机变异提高种群多样性。通过多次迭代,逐步逼近最佳参数组合;微粒群算法也有很好的表现。该算法把各参数组合作为粒子进行飞行搜索。粒子根据自己的历史最佳位置以及种群的历史最佳位置来调整自己的速度和方向,从而达到快速收敛的目的。结合焊接实验数据,建立焊接工艺参数与焊缝质量之间的数学模型,采用智能优化算法对模型进行求解,实现对焊接工艺参数的快速精确求解,有效提高焊接质量,降低气孔、裂纹等缺陷,提高焊接效率和稳定性^[4]。

3.2 机器人运动轨迹精确规划与补偿

在再生水管线焊接过程中,机器人的运动轨迹是否准确直接关系到焊缝成形的质量。通过离线编程,实现对机器人轨迹的预先规划。根据管线的几何尺寸和焊接工艺要求,建立管线及机械手的三维模型,实现对焊缝轨迹的准确计算(图2)。在此基础上,综合考虑机器人的运动学与动力学特性,对其运动轨迹进行优化,以保证机器人运动过程中的速度和加速度平稳,避免因急停急启造成的焊接电弧不稳定性;但在实际焊接过程中,由于管线的安装误差和机器人的位置误差,使得实际的焊接轨迹与规划轨迹有一定的偏差。为实现这一目标,需要引入传感器来实现实时监控和补偿。激光跟踪仪可实现对机器人实际位姿的高精度测量,并将测量结果反馈给控制器。利用位置误差反馈、力/力矩阻抗补偿等补偿算法,对机器人的运动指令进行实时修正,使机器人回归规划轨迹;利用视觉传感器对焊缝进行实时采集,并利用图像处理技术提取焊缝特征,对机器人的运动是否精确进行判断。在此基础上,对焊接工艺参数进行调整,确保焊缝对齐,避免出现错边、不连续等缺陷,提高焊接质量,满足再生水管道的长周期稳定运行需求^[5]。

3.3 焊接环境适应性控制

再生水管线的焊接环境复杂多变,受风场、湿度和温度等多种因素的影响。当风速太大时,保护气体被吹走,焊缝金属接触氧、氮,形成气孔、氧化铁皮。因此,通过设置防风棚,有效地降低焊接速度,创造相对稳定的焊接环境。同时,根据风速的变化,对保护气体的流量及成分进行适当的调整,以保证对焊缝的充分保护;环境湿度过大,焊接材料受潮,电弧稳定性下降,氢含量增加,容易产生裂纹。处理方法包括:用加热设备预热、干燥焊条和焊丝,除去湿气。通过增加焊接电流、提高焊接电压、增加电弧能量等措施,克服湿度对焊接质量的影响;在低温环境中,焊缝金属

因冷却速率过快而不能细化晶粒,导致材料的韧性及抗裂性下降。采用预热处理工艺提高管线的温度,降低管线的冷却速率。采用低氢电极,多层多道焊接,选用适当的材料及工艺,可减少裂纹的发生。通过对焊接环境因素的综合控制,为焊接机器人创造合适的作业环境,从而保证焊接质量的稳定可靠。

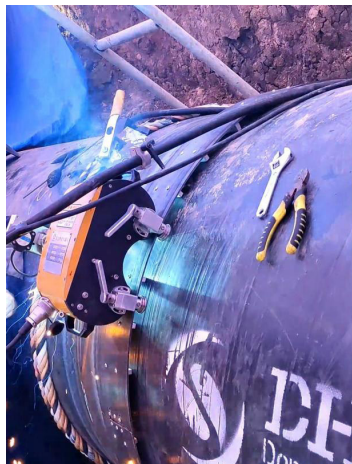


图2 焊接机器人焊缝

3.4 基于多信息融合的焊缝质量在线监测与反馈控制

为实时掌握焊缝质量,及时调整焊接工艺,采用多源信息融合技术对焊接过程进行在线监控和反馈控制具有重要意义。该系统集成用于监测焊接电信号的电流和电压传感器、焊缝及其周围温度的温度传感器、焊缝表面的可视化检测、焊缝内部缺陷的超声/射线传感器等。

在此基础上,采用多源信息融合算法,综合分析传感器采集到的数据,提取焊缝几何尺寸、表面粗糙度、内部缺陷种类和位置等与焊缝质量密切相关的特征参量。建立焊接质量与工艺参数间的动力学模型,实现对焊接质量的实时评价。当焊接质量异常时,反馈控制系统会快速响应,按照预先设定的控制策略对焊接工艺参数进行调整。当检测到焊缝熔深不够时,系统会自动增加焊接电流或者减慢焊接速度;如发现表面有气孔,应及时调节保护气流或焊接环境。本以再生水管线焊接机器人为研究对象,通过闭环控制,实时动态优化焊缝质量,保证再生水管线焊接机器人始终处于最佳工作状态,有效提升焊接质量稳定性与一致性,保证再生水管线工程安全可靠运行。

4 实际案例分析

以某再生水管线工程为例,利用焊接机器人完成管线

的焊接,管线的直径800 mm,壁厚10 mm。焊接初始阶段,焊接工艺参数设定不合理,机器人运动控制精度不高,焊接环境干扰严重,焊缝缺陷率高达15%。

针对以上问题,提出一种焊接质量优化方法。首先,采用遗传算法优化焊接工艺参数,经多次迭代,最终确定2020 A,24 V,18 cm/min的焊接速度。在此基础上,通过离线编程实现机器人轨迹的精确规划,并采用激光跟踪器实时补偿机器人的运动轨迹。同时,在焊接现场设置防风棚,将风速控制在1 m/s以内,同时对焊接材料进行预热干燥。在此基础上,采用多源信息融合技术实现焊缝质量在线监测,实现焊缝质量状态的实时监控,实现焊接工艺参数的实时调整。

在此基础上,通过对焊缝质量的检测,发现焊缝缺陷率明显下降到3%以内,熔深、熔宽、余高均达到设计要求,表面质量良好,无气孔、裂纹、未熔合等缺陷。实践表明,该方法是可行的,可有效地改善再生水管线焊接质量,减少缺陷率。

5 结语

再生水管线焊接机器人的焊接质量优化是一项复杂的多学科、多因素综合问题。针对再生水管道焊接机器人焊接过程中存在的关键问题,从焊接工艺参数、运动控制、焊接环境等方面进行深入研究,提出焊接工艺参数智能优化算法、机器人运动轨迹精确规划与补偿、焊接环境自适应控制、多源信息融合的焊缝质量在线监控与反馈控制等关键技术。通过实例验证,可有效提高再生水管道焊接机器人焊接质量,降低焊接缺陷率,保障再生水管道安全可靠运行。在此基础上,结合人工智能、物联网等技术,对再生水管道焊接机器人焊缝质量优化方法进行研究与创新,为实现高品质、高效率的管线焊接提供技术支撑。

参考文献

- [1] 刘云松,杨 帅,韩明明. 浅谈再生水管道焊接自动化技术应用与发展趋势[J]. 工程建设与发展,2025,4(5):107-109.
- [2] 郝国辉,刘伟,张新,等. 大直径DREC管道的复合式新型焊接接头施工技术[J]. 建筑施工,2019,41(10):1896-1898.
- [3] 杨成伟. 探析长输天然气管道焊接裂纹成因及控制措施[J]. 中国航班,2023(3):66-69.
- [4] 刘文亮. 再生水钢管施工质量控制研究[J]. 电脑校园,2019(11):2580-2581.
- [5] 王振民,宋哲龙,迟鹏,等. 类人机器人焊接技术研究现状与展望[J]. 机电工程技术,2025,54(4):1-13.

Application strategy of down-welding technology in long distance oil and gas pipeline welding

Qiang Chen

State Pipeline Group Western Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

China's vast territory boasts substantial oil and gas reserves. With socioeconomic development, the demand for these resources continues to grow, necessitating extensive construction of long-distance pipeline networks for efficient resource distribution. The application of downhole welding technology in pipeline fabrication not only enhances welding quality but also proves particularly effective in challenging field environments. This approach enables cost-efficient operations while ensuring reliable pipeline performance. This paper analyzes practical implementation strategies for downhole welding in oil and gas pipeline systems, demonstrating how such techniques can significantly improve welding precision and promote intrinsic safety in pipeline infrastructure.

Keywords

downward welding process; long oil and gas pipeline; welding

下向焊接工艺在油气长输管道焊接中的运用对策

陈强

国家管网集团西部管道有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘 要

我国幅员辽阔, 油气储备量较大, 同时随着社会经济的发展, 油气资源需求量呈现增长趋势, 需要大量建设油气长输管道, 实现油气资源的高效调度。其中, 在油气长输管道焊接作业中运用下向焊接工艺, 能够提高焊接质量, 且对恶劣的野外作业环境较为适应, 促进焊接作业的高效、低成本实施, 促进油气长输管道的高质量运行。文章主要对下向焊接工艺在油气长输管道焊接工作中的运用策略进行分析, 从而有效提升焊接质量, 促进油气长输管道的本质安全。

关键词

下向焊接工艺; 油气长输管道; 焊接

1 引言

在现代化石油工业发展背景下, 油气长输管道系统综合性逐渐提升, 且油气管输管径日趋增大, 建设规模日益拓展, 覆盖率升高, 对油气管输本质安全提出了更高的要求。基于此, 需要选择合适的焊接工艺, 尤其要对下向焊接技术进行优化应用, 进而提高对野外作业条件的适应性, 提高焊接质量, 强化结构强度, 促进油气运输的安全可靠, 为我国社会经济高速发展提供动力支持。

2 下向焊接工艺特点

当前, 下向焊接技术日渐成熟, 在我国管道建设施工

中发挥了越来越重要的作用。通常情况下, 管道焊接施工作业需在野外进行, 此环节中的难点就是转动钢管并保持熔池水平。为了提高焊接效果, 就需固定钢管, 并通过全方位环形焊缝方式进行组对焊接, 在此过程中就需要应用到下向焊接技术。其下向焊接就是从管道顶部(近零点位置)引弧, 从上到下开展全方位焊接的操作技术^[1]。这是一种高效快速的焊接方式, 且焊缝美观性较高, 能够保障焊接质量, 同时减少焊接过程中的材料使用量, 并降低人工劳动强度。在下向焊接作业中需要选择小缝隙、大钝边等坡口工艺参数, 因此焊接质量要求高, 焊接效率要均衡; 同时需要使用专业焊条, 能够提高电弧吹力, 保障燃烧稳定性, 同时飞溅范围小, 能够提高焊条融合速度, 实现电弧、熔池的大幅度保护。

3 下向焊接工艺流程

3.1 布管

布管的质量与组对焊接速度息息相关。在钢管收尾衔接过程中, 需要把相邻管口呈现锯齿形态排布, 并错开管口,

【作者简介】陈强(1979-), 男, 中国新疆乌鲁木齐人, 本科, 副高级工程师, 从事油气储运及长输管道工程与附属工程、油田地面建设, 长输管道运维、道路、桥梁、隧道工程研究。

方便作业人员及时清理管道内的杂物，同时修整坡口。

3.2 管口清理

在钢管组对前，需要彻底清理管道内的杂物、脏污等，保持干净整洁，同时要对管口坡口进行彻底清理，如油污、水分、熔渣等，利用专业设备（角磨机、直磨机）打磨坡口内侧毛刺，确保坡口边缘露出金属光泽^[2]。

3.3 坡口检查及修整

完成管口清理作业后，需要做好坡口检查工作，尤其要精准测量坡口角度、钝边尺寸；同时，还需要详细检查管口是否存在缺陷问题，如压痕、裂纹、椭圆等。对发现的缺陷问题，要立即修整。

3.4 组对

本文以沟上组对方式为例。在管道下方放两个管墩，同时保持管底与地面保持 0.6 米的间距。为了保障管道稳固性，需要使用土堆对管墩进行压实。此外还需要使用对口器（内置、外置）进行管口组对，并结合焊接技术的实际要求，灵活性调整组对间隙^[3]。如有管口错边超标，需要将其均衡分散到整个圆周上。

3.5 焊接

本文以外对口器组对为例。在下向焊施焊程中，需要按照以下流程进行操作：（1）根焊。在油气长输管道焊接过程中，往往需要单面焊双面成形的工艺要求，同时对背面焊缝要求较高，需要保障焊波（或称焊缝成形）均匀性。根焊既可以提高管道根部焊接透彻性（完全熔透），同时还不会烧穿根部。在根焊作业中，需要选择短弧、小规范的焊接，焊接过程中，需要从管接头往前 10 毫米的位置引弧，在该位置设置熔池，需要在短时间内对焊条压底（促进熔透），并使用短弧焊接方式，保障焊条以直线状态高效、均匀向下运条。当焊接作业超过管周长一半以上后，才能拆卸外对口

器，因此需要把根焊切换为多个均匀的小段。最后需要使用专业角磨机彻底清理熔渣、飞溅等。（2）热焊及填充焊。完成根焊作业后，需要在五分钟（有些长输管道工程另有规定）之内开展热焊作业，这样才能对层间温度进行严格控制，进而提高焊接质量。该焊接环节，需要保障熔深值符合设计要求，且不能烧穿根焊缝，促进焊缝均匀性。在焊缝填充环节中，需要始终遵循窄、薄、快速的要求，焊道宽度控制在 15 毫米以内^[4]。当技术人员或焊工在使用自保护药芯焊丝半自动焊对填充层进行焊接，同时要对整个焊道进行彻底打磨和清理，才能开展下一层焊接。其中，焊丝干伸长度需要控制在 25 毫米左右，适当提高焊接电弧，保障焊接速度均匀性，使用多层多道直线向下焊接的模式进行操作。（3）盖面焊。该方式可以对焊缝进行充分满填，能促进焊缝形成良好外观。在部分焊点实施作业中，需要把焊接电流进行合理控制，防止发生下坠、咬边问题。下向焊盖面焊道宽度不能超过 15 毫米，焊缝余高需要超过管平面 1 毫米左右。

4 下向焊接工艺在油气长输管道焊接中的运用分析

4.1 全纤维素型下向焊接技术

该技术应用中，需要确保焊接机械具备“陡降外特性”，即电压—电流特性曲线（U-I 曲线）；同时在焊接过程中，需要焊接机对电流具备较高的适量值；适当提升焊接机的静特性曲线，这样才能有效缩小熔滴过渡效果。油气长输管道焊接作业中，往往会受到环境因素的影响，难以保障焊接机械准确进入焊接位置，因此要选择纤维素型焊条的下向焊接技术，尤其可以实现打底焊，进而形成单面焊双面成形^[5]。需要注意的是，在仰焊环节中，防止重力作用引起熔滴形成凹陷现象，同时减少铁水、焊条粘连等现象。其中，全纤维度焊条焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 全纤维度焊条焊接工艺参数

焊道名称	填充金属	直径 mm	极性	焊接方向	电流 A	电压 V	焊缝 cm/min
根焊	E6010	3.2	正极	向下	55-90	24-35	7-15
热焊		4.0	反极		100-150	22-35	15-40
填充焊							15-25
盖面焊							15-20

4.2 半自动下向焊接技术

较为常见的半自动下向焊接技术就是以 CO₂ 或 Ar+CO₂ 混合气体作为保护气体的 STT（表面张力过渡）型半自动下向焊接技术，主要是利用二氧化碳（CO₂）活性气体的保护作用完成焊接。这种方法的成本较低，经济性突出且焊接效率较高，形成的焊缝较为美观，产生的飞溅较少，伸长变化较少。

4.3 复合焊接施工技术

纤维素加药芯焊丝的半自动下向焊接技术，就是通过热焊接、打底焊等方式，把药芯焊丝形式的半自动盖面填充

处理的技术。该方式在较高级别的钢管材质是有运输管道焊接施工中得到广泛应用。STT+ 药芯焊丝的半自动下向焊接技术，是利用实心焊丝气体形成的保护作用，促进下向热焊接、打底焊，进而利用药芯焊丝焊接技术来进行盖面填充处理^[6]。该技术在高强度管道焊接中发挥重要作用。自保护药芯焊丝半自动下向焊技术的抗风能力较强（通常可以抵抗 4 ~ 6 级风），尤其适合野外作业，其中施工过程中的药粉中含有一定量的造气剂、造渣剂、脱氧剂、脱氮剂。在焊接环节中会形成“气-渣联合保护”，进而确保自保护药芯焊丝半自动焊具有较强的抗风能力。此外该技术的焊接效率较

高,药芯焊丝能够实现连续焊接,焊渣薄,容易脱渣,焊接效率较高。该技术能够形成较高质量的焊缝,使用的焊条较少,形成的焊缝缺陷不多,同时能够降低焊缝氢含量。该技术的综合成本较低,使用打辅助工装较少,整体焊接成本较低。

5 下向焊接工艺在油气长输管道焊接中的注意事项

5.1 做好全面分析

下向焊接工艺在长距离、大管径的金属油气运输管道建设中发挥了重要作用,尤其适合高强度、高钢级(X70、X80及以上)类型的油气管道施工作业^[7]。在施工前,需要对该技术在施工过程中的注意事项进行全方位分析,进而采取可行性的应对措施,防止焊接环节中出现异常情况,保障焊接作业的顺利进行。

5.2 选择合适的焊条和焊机

纤维素焊条性能较为优越,其中含有一定量的有机造气剂,在施焊时,有机造气剂会得到分解,转化为一氧化碳、二氧化碳气体,这些气体能够高效保护熔池和电弧。在焊接环节中,会产生少量的残留熔渣,并对熔池表面进行覆盖,这样才能强化对焊缝金属的保护效能。这种焊条在使用过程中会产生较大的电弧吹力,产生的熔渣较少,在恶劣的野外焊接作业中进行良好适应。在选择焊机时,通常需要使用直流逆变下向焊接专用焊机,在焊接过程中需要创造满热弧(维持稳定热弧)、电弧推理调节、焊条防污等条件,进而更好的适应野外恶劣环境。

5.3 提前进行预热处理

为提高焊接质量,需对整体施工区域进行预热处理。预热可有效减少打底焊过程中出现的粘条现象,有助于保持焊接电流的稳定性,从而进一步增强坡口的熔合效果^[8]。在实际施工环节中,作业人员需要结合施工工艺、施工材料等,选择是否需要开展预热处理,同时要实时测量预热过程中的温度,结合实际情况严格控制预热温度。

5.4 按照合理顺序进行焊接

在下向焊接作业中,为确保焊接质量、效率与安全,需严格遵循流水作业模式,并结合小直径管道与大直径管道在结构特点、施工难度及人员配置上的差异,针对性选择适配的焊接方法。如焊接小直径时,需要安排两名专业人员按照从上到下的模式依次焊接;焊接大直径时,就要操作人员从顶部开始操作,另一名操作人员在既定位置焊接。如果焊接范围较大,需要适当增加一名焊工进行操作。其中,下向焊接工艺顺序如图1所示。

6 大力推广全自动焊下向焊工艺

传统手工电弧焊或半自动焊对比全自动焊而言,在管

道焊接中存在效率低(单道焊速慢)、质量依赖焊工技能(易出现气孔、未熔合等缺陷)、劳动强度大(高空/野外作业环境差)等问题,尤其在长输油气管道、城市燃气管网、化工压力管道等工程中,焊接质量和效率直接影响工程进度与安全。全自动焊下向焊工艺通过机械自动化控制焊接参数,结合“向下立焊”的熔池重力自填充特性,具有焊接速度快(效率提升30%-50%)、质量稳定(缺陷率降低80%以上)、人工依赖低(减少高级焊工需求)、适应复杂工况(如大管径、厚壁管)等显著优势,是当前管道焊接技术升级的核心方向。

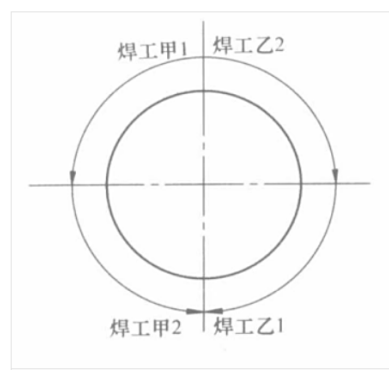


图1 下向焊接工艺顺序图

7 结语

综上所述,当前下向焊接技术已在油气长输管道焊接工程实现规模化应用。该技术通过提升焊接效率、改善焊缝成型质量,不仅能形成外观规整的焊道,还具有显著的焊材节约优势。其在管道焊接中的广泛应用,有效保障了焊接接头的密封性能,提升了油气输送系统的运行安全性,对推动我国油气长输管道建设的高质量发展具有重要工程价值。

参考文献

- [1] 郝鹏骞. 直埋供热管道无补偿冷安装直埋敷设中下向自动焊接工艺试验[J]. 安装, 2025, (09): 27-29.
- [2] 林睿南,熊猛,于操,等. 油气管道焊接技术现状及发展趋势[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2025, 40 (02): 95-105.
- [3] 王伟. 油气管道施工工艺优选及安装工程控制研究[J]. 石油和化工设备, 2025, 28 (02): 76-78+82.
- [4] 杜长森. 长输管道下向焊自动化焊接技术[J]. 金属加工(热加工), 2024, (05): 73-76.
- [5] 张胜玉. 下向焊技术在油气长输管道中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41 (20): 191-194.
- [6] 姚佳林,王海涛,杨建铨. 天然气管道焊接中下向焊技术的运用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40 (13): 233-234.
- [7] 王营. 石油管道焊接中下向焊技术的运用分析[J]. 当代化工研究, 2020, (07): 104-105.
- [8] 李晓彪. 浅谈下向焊技术在石油管道焊接中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40 (07): 185-186.

Synthesis and performance control of polymer composites

Maolin Guo

Hangzhou Yanqu Information Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

As an important frontier in the field of polymer composite materials, advances in their synthesis and performance regulation technologies have laid the foundation for the development of novel functional materials. By designing the structure of polymerizable monomers, controlling polymerization reaction conditions, and optimizing interfacial compatibility, ordered construction of multicomponent systems can be achieved, significantly enhancing their mechanical, thermal, and electrical properties. Under strategies such as the incorporation of nanofillers, surface modification, and crosslinked network regulation, these composite systems exhibit distinctive advantages in structural stability and functional integration. In recent years, extensive research has focused on their microstructural evolution, performance characterization methods, and structure-property correlation mechanisms, providing both theoretical foundations and technical support for their applications in aerospace, electronic devices, and biomedical fields, while also promoting the exploration and implementation of green and sustainable synthesis pathways.

Keywords

polymer composite materials; polymerization reaction; interfacial compatibility; performance regulation; structural characterization

高分子复合材料合成及性能调控

郭茂林

杭州研趣信息技术有限公司, 中国 · 浙江 杭州 310000

摘要

作为材料科学领域的重要方向,其合成与性能调控技术的进步为新型功能材料的开发奠定了基础。通过设计聚合单体结构、控制聚合反应条件以及优化界面相容性,可实现多组分材料的有序构筑,显著改善其力学、热学与电学性能。在纳米填料引入、表面改性及交联网络调控等策略作用下,复合体系在结构稳定性与功能集成性方面表现出独特优势。近年来,学界围绕其微观结构演化规律、性能表征方法及结构-性能关联机制进行了大量研究,为高分子复合材料在航空航天、电子器件、生物医用等领域的应用提供了理论依据与技术支持,也推动了绿色、可持续合成路径的探索与实践。

关键词

高分子复合材料; 聚合反应; 界面相容性; 性能调控; 结构表征

1 引言

因其轻质高强、功能可设计、适应性强等优势,已成为材料科学研究的前沿方向之一。随着工业产品向高性能与多功能化转型,单一聚合物材料在力学、热学或环境稳定性等方面的局限日益凸显,复合化策略成为提升综合性能的有效途径。通过分子层面设计聚合单体及反应路线,可在保持轻量化特性的同时引入增强相、功能相,实现力学强度、热稳定性、导电性等多重性能的集成。与此同时,界面相容性控制与微观结构调控已被证明是影响性能的关键因素,推动了高分子复合材料从经验驱动向机理导向的研究范式转变,对先进制造、能源器件与生物材料等领域的发展具有重要战

略意义。

2 高分子复合材料合成的理论基础

2.1 高分子链结构与化学键能的构筑原理

化学高分子复合材料的性能来源于分子链结构与化学键能的协同作用,高分子链段中碳碳主链赋予了较高的柔顺性,而芳香族环结构则提升了分子链的刚性与耐热性。通过控制单体官能团的排列方式,可形成规整度较高的线型或支化链,规整度达到 85% 以上时,分子间堆砌紧密,晶区含量提高到 65%,显著增强材料的力学强度。共价键结合能普遍在 350 kJ/mol 以上,使分子骨架具备优异的热稳定性,氢键与范德华力的引入增加了链段间的次级作用力,赋予复合体系更高的界面结合力,为实现宏观性能调控奠定了分子基础。

2.2 聚合反应动力学与热力学控制机制

聚合反应过程中单体转化率、聚合度及分子量分

【作者简介】郭茂林(1996-),男,本科,助理工程师,从事材料的各种特性指标检测(孔隙度,元素含量,形貌结构等)研究。

布受动力学速率常数与反应焓变的制约,速率常数在 60℃ 时为 $2.1 \times 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 升温至 80℃ 时增至 $4.7 \times 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明活化能直接影响链增长速率。反应的放热值约为 -75 kJ/mol, 当体系散热不足时易引发自加速效应, 导致分子量分布系数增至 2.3 以上。通过控制引发剂浓度、抑制剂种类与溶剂极性, 可在热力学允许范围内调节自由能差, 使聚合反应趋向生成热力学稳定的高分子链段, 实现分子结构可控与性能的定向设计。

2.3 复合材料界面相容性与界面化学作用

界面相容性决定复合体系应力传递效率, 极性差异较大的组分在界面处易形成孔隙与微裂纹, 导致界面剪切强度下降到 18 MPa 以下。通过引入马来酸酐、环氧等极性相容剂, 可在界面生成酯键或醚键, 形成致密化学交联网络, 使剪切强度提升到 42 MPa, 断裂伸长率提高 30%。表面活性剂的定向吸附可降低界面张力约 45%, 改善界面润湿性, 促进填料相与基体相的界面层互穿。界面处的氢键、离子键及 $\pi-\pi$ 堆积作用进一步增强界面结合力, 为微观结构的稳定构建提供化学支撑^[1]。

3 高分子复合材料的合成工艺路线

3.1 溶液共混与乳液聚合的工艺特点

溶液共混法通过将聚合物溶解于极性溶剂中再均匀混合, 黏度控制在 $0.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时可获得分散性较好的预混液, 经旋涂成膜后孔隙率低于 2.5%, 适用于制备薄膜型复合材料。乳液聚合法在水相中进行, 自由基引发效率可达 85%, 粒径分布集中在 120 nm 以内, 有利于形成高比面积的聚合颗粒。该工艺乳化剂用量为 5 wt%, 体系稳定时间可维持 72 h 以上, 利于大规模连续化生产。两者结合可在常压、60℃ 条件下实现复合反应, 能耗约 0.9 kWh/kg, 具备较高的经济性与环境友好性。

3.2 原位聚合与接枝共聚的工艺集成

原位聚合可在无溶剂环境下直接于填料表面引发聚合反应, 单体转化率可稳定在 93% 以上, 使聚合链段与基体界面形成共价键, 提高界面结合能约 2 倍。接枝共聚通过在分子主链上引入反应性基团, 再接枝功能单体实现界面化学耦合, 接枝率控制在 15% 时材料韧性提升 42%, 同时保持拉伸强度在 85 MPa 水平。两种工艺集成应用可在反应釜内实现一步合成, 反应时间控制在 3 h 内, 体系残余单体含量低于 0.2%, 显著减少后处理负担并提升批次间一致性, 适应工业规模化制备要求。

3.3 高能物理场辅助复合的工艺创新

高能物理场包括超声、等离子体、电子束等手段, 可在复合过程中实现分子链断裂、活性基团暴露及界面重构。超声功率控制在 600 W 时, 填料团聚粒径从 480 nm 降至 95 nm, 分散度显著提升。等离子体处理时间 60 s 后, 表面能提高至 78 mN/m, 使界面接触角降低 40°, 显著增强润湿性。

电子束辐照剂量在 150 kGy 时, 交联密度提升 63%, 材料热变形温度从 95℃ 升至 142℃。该类物理场技术可在常温常压条件下实现快速加工, 能耗低于 0.5 kWh/kg, 兼具高效性与绿色性, 拓展了复合工艺的新路径^[2]。

4 高分子复合材料的微观结构调控

4.1 纳米填料分散行为对晶区结构的影响

纳米填料粒径通常在 20~80 nm, 表面积大、界面能高, 易发生团聚导致晶区缺陷率升高到 12% 以上, 通过表面改性处理可使填料表面能降低至 32 mN/m, 分散度提高 70%。分散良好的纳米粒子可作为晶核诱导聚合物链有序排列, 使晶区尺寸增大至 120 nm, 结晶度提升到 68%, 从而提高材料的模量与热稳定性。填料在晶区与非晶区交界处形成界面层, 厚度约 8 nm, 能有效抑制分子链的松弛运动, 降低玻璃化转变温度波动, 提升结构稳定性与力学性能的一致性, 为后续性能调控提供结构基础。

4.2 界面层次结构与相态演化的调控策略

界面层次结构决定复合体系相分布的连续性与稳定性, 界面区域厚度控制在 10 nm 以内可实现应力均匀传递, 避免局部应力集中导致裂纹扩展。通过构建梯度界面结构, 使极性组分在界面区浓度逐渐递增, 可降低相界面能约 35%, 抑制相分离行为, 提升界面结合强度。相态演化过程中, 升温速率控制在 2℃/min 可获得更稳定的双相结构, 相区尺寸维持在 150 nm 左右, 有助于实现硬相增强与软相韧化的平衡。界面区形成的互穿网络结构可延缓相界移动速率, 使材料在长期服役中保持稳定的力学和热学性能。

4.3 交联密度与分子链取向的协同控制

交联密度是决定材料力学强度与热稳定性的关键参数, 交联剂用量控制在 2.5 wt% 时, 交联密度达到 $1.6 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$, 拉伸强度提高至 95 MPa。热拉伸取向比为 3 时, 可使分子链平均取向度达到 0.82, 模量提升约 65%, 同时显著降低应变诱导松弛速率。交联网络的存在限制了链段运动自由度, 使取向结构在高温下仍能维持稳定, 热变形温度可升至 145℃^[3]。通过控制交联密度与取向度的匹配关系, 可实现刚性与韧性的协调, 提升复合材料在高载荷与高温环境下的结构可靠性和使用寿命。

5 高分子复合材料的宏观性能优化

5.1 力学强度与韧性匹配的性能耦合设计

化学高分子复合材料在力学性能设计中需要兼顾高强度与高韧性, 通过构建刚柔相间的多相体系实现应力传递与能量吸收的协同作用。增强相体积分数控制在 25% 时, 拉伸强度可达 108 MPa, 断裂伸长率仍维持在 62%, 支化链段与线性链段交错共聚可形成双尺度应力释放通道, 在冲击速率 3.2 m/s 条件下吸收能量提高 38%, 同时断裂能提高至 2.8 kJ/m²。链段取向度达到 0.81 时可提高模量 60%, 而链段间的柔性段则赋予高韧性, 形成强度与韧性平衡的宏观力学性

能体系。

5.2 热稳定性与阻燃性能的协同提升路径

化学高分子复合材料在高温环境中的稳定性与阻燃性直接决定其服役安全性,通过高稳定性骨架设计与炭层形成机制的集成可实现协同提升。分子链中芳香环含量达到48%时,热分解起始温度提升至325℃,热失重速率降低41%,说明分子骨架稳定性显著增强。磷氮系阻燃剂添加量控制在10 wt%时,极限氧指数上升至34,燃烧残炭率提高到30%,可在火焰中形成致密保护层抑制热分解。引入硅氧骨架可在高温下促进无机陶瓷状炭层生成,使材料热变形温度从95℃提升到145℃。微胶囊化膨胀型阻燃剂在300℃时膨胀倍率达18倍,能迅速形成隔热层降低燃烧速率约65%,热稳定与阻燃性能的协同提升为高温环境下使用提供保障^[4]。

5.3 导电性与阻隔性的功能化集成调控

化学高分子复合材料的导电与阻隔性能通常存在耦合竞争,通过多尺度结构设计可实现兼顾。碳纳米管添加量为3 wt%时体积电导率可达 1.2×10^2 S/cm,但气体渗透系数升高到 3.6×10^{-15} cm³·cm/cm²·s·Pa,说明导电网络会破坏阻隔层连续性。通过在碳纳米管表面包覆聚酰亚胺层构建核壳结构,可维持阻隔率在86%同时保持电导率在 8.5×10^3 S/cm。石墨烯片层厚度约1.1 nm时在基体中形成交错层状堆叠,扩散路径长度增加2.7倍,使氧气渗透系数降低至 1.4×10^{-16} cm³·cm/cm²·s·Pa。双尺度导电网络嵌入层状阻隔结构形成互穿连续相,可在不牺牲阻隔性的条件下构建稳定导电通道,实现电性能与阻隔性能的功能化集成调控。

6 高分子复合材料性能调控的表征与评估

6.1 结构—性能关联的多尺度表征技术

化学高分子复合材料性能调控依赖结构解析与性能响应的关联分析,多尺度表征可揭示分子链构型、相区分布与宏观力学特性之间的映射关系。分子尺度采用核磁共振测定官能团转化率,可精确至0.1%,有助于判断交联反应完整度;傅里叶红外谱中C=O峰强度增加23%代表酯化程度提升,链段极性增强。纳米尺度通过透射电镜观察填料团聚状态,分散度从0.42提升至0.83时晶区尺寸由75 nm增至125 nm,结晶度提升19%。小角X射线散射分析显示相区界面厚度在8 nm以内时应力集中度降低37%。宏观尺度利用动态力学分析测定储能模量在25℃为1.8 GPa,在120℃仍保持0.9 GPa,说明链段松弛受限。多尺度数据整合可构建结构参数与性能指标的回归模型,相关系数可达0.92,为性能预测提供量化基础。

6.2 性能调控效果的定量评价体系构建

性能调控效果评价需建立多维指标体系与加权算法实现综合判定,通过主成分分析法提取力学、热学、电学、阻

隔性等核心指标,贡献率总和可达86%。力学部分设定拉伸强度、冲击韧性和模量权重为0.25,热学部分以热分解温度、热导率和热膨胀系数权重为0.20,电学部分以体积电导率、介电常数权重为0.20,阻隔性部分以气体渗透系数、水蒸气透过率权重为0.15,其余0.20分配给耐老化与化学稳定性。各项指标标准化后计算综合性能指数PI,当PI达到0.85时表示性能提升显著,在不同批次材料间偏差控制在±5%以内。通过设定阈值区间可快速筛选不达标样品,提升工艺开发效率约42%,降低材料研发周期约30%,实现性能调控效果的量化评估与决策支持。

6.3 服役环境下长期性能演化的加速测试

长期性能演化评估依赖加速老化平台模拟多场耦合环境,通过温湿、紫外、载荷等参数控制重现服役损伤机理。测试温度设定为85℃,相对湿度90%,紫外辐照强度0.78 W/m²,循环载荷频率3 Hz,历时240 h后可重现5年环境损伤。测试期间力学模量下降幅度为38%,断裂伸长率降低至原值的62%,质量损失率达到4.7%。Arrhenius模型拟合得出寿命预测常数 $k=1.3 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$,可推演在60℃下的使用寿命约8.2年。微观结构通过扫描电镜观察发现孔隙率从1.8%增至6.5%,界面剥离面积占比达18%,傅里叶红外谱显示C—O—C峰强度降低27%表明链段断裂加剧^[5]。加速测试可在较短周期内获得性能衰减曲线,为复合材料耐久性设计与服役安全评估提供定量依据。

7 结语

化学高分子复合材料的合成与性能调控研究为材料科学的跨越式发展提供了坚实支撑,其在分子设计、界面工程、工艺创新及性能评估等方面的系统性探索,已逐步形成从结构构筑到功能实现的全链条技术体系。通过多尺度协同调控,可实现力学、热学、电学及阻隔等多重性能的功能化集成,为满足极端环境与高可靠性应用需求奠定基础。未来,该领域仍需强化结构—性能关系机理解析,推动绿色低碳合成路径与智能化表征技术的发展,以实现材料设计的精准化与产业化制备的高效化,拓展高分子复合材料在前沿工程与战略产业中的应用边界。

参考文献

- [1] 王宗涛,邱玉浩,李政洁,崔智博,赵亚奇,冯巧.己二酸基环氧树脂类玻璃高分子及其玻纤增强复合材料[J].高分子通报,
- [2] 边琦,徐子凡,任启文,李鹏鹏.生物可降解高分子材料在农林领域的研究前沿[J].环境科学与技术,2025,48(08):103-114.
- [3] 胡建鹏,刘显铜.高分子树脂共混制备木塑复合材料研究进展[J].世界林业研究,2025,38(03):77-83.
- [4] 胡海悦.生物质废弃物在材料中资源化利用的研究进展[J].云南化工,2025,52(06):33-37.
- [5] 刘启予,刘伟峰,邱学青.基于界面相容性增强的木质素/高分子复合材料构筑策略[J].化工进展,2025,44(05):2733-2745.

Development of 44dtex/48f fully dull fine denier polyester high elastic DTY

Huimin Zhang Wenlong Zhou

Jiangsu Hengke New Materials Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226368, China

Abstract

This paper mainly discusses the impact of changes in key texturing processes on the performance of 44dtex/48f fully dull high elastic yarn products. It addresses the characteristics of dull yarns and implements corresponding process optimizations to develop high-quality products. The results indicate that when producing fully dull polyester high elastic DTY 44dtex/48f, suitable processing speed, increased temperature in the first heating chamber, closure of the second heating chamber, selection of soft polyurethane friction disks, and optimization of combinations can yield fluffy, qualified fully dull DTY products.

Keywords

fully dull; high elasticity; DTY

44dtex/48f 全消光细旦涤纶高弹 DTY 的开发

张慧敏 周文龙

江苏恒科新材料有限公司, 中国 · 江苏 南通 226368

摘 要

主要讨论了关键加弹工艺变化对44dtex/48f全消光高弹丝产品性能的影响, 并针对消光丝的特点, 进行相应的工艺优化, 开发出品质优良的产品。结果表明: 生产全消光涤纶高弹DTY 44dtex/48f时, 合适的加工速度, 提高第一热箱的温度, 第二热箱关闭, 选用材质柔软的聚氨酯摩擦盘及优化组合, 可以获得蓬松性良好, 质量合格的全消光DTY产品。

关键词

全消光; 高弹; DTY

1 引言

随着国内外聚酯产能的大规模扩张, 涤纶长丝的市场竞争日益激烈, 产品利润空间越来越小, 生产企业只有通过生产技术的大胆突破创新, 开发出高技术含量、高附加值的产品, 才能提高效益, 增强企业在市场上的竞争力^[1]。用全消光长丝开发的全消光织物, 手感柔软、光泽柔和、色彩鲜艳, 织物的悬垂感好, 在高档男女服装和装饰布领域得到了广泛的应用。另外, 全消光纤维中所含纳米级 TiO₂ 是一种稳定、无毒无味的紫外线吸收剂, 制成的织物具有抗紫外功能, 可用于羽绒服、运动服、泳衣、帐篷等^[2]。

本文在总结实践经验的基础上, 我们持续优化生产工艺, 现已成功量产 44dtex/48f 全消光高弹 DTY。生产流程稳定顺畅, 产品质量指标均达到标准, 染色效果也满足后续加工客户的需求。

2 试验

2.1 原料

本公司生产的 65dtex/48f 全消光涤纶 POY, 原丝批号为 NG16。

2.2 生产设备及测试仪器

拉伸变形装置: 巴马格全自动 eAFK 型加弹机;

表 1 DTY 检验仪器

仪器名称	型号
加弹机	ATF-1500 FOUR
缕纱测长仪	YG086
全自动单纱强力机	YG023B- III
全自动长丝卷缩率测试仪	YG368
残余扭矩测试仪	GY363
烘箱	YG368

【作者简介】张慧敏(1995-), 女, 中国江苏徐州人, 本科, 助理工程师, 从事化学纤维的工艺及其制备方法研究。

2.3 生产工艺流程

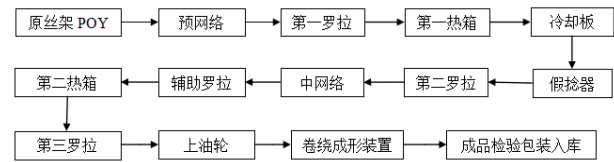


图 2 DTY 生产工艺流程

2.4 主要加工条件

表 3 DTY 主要加工条件

项目	加工速度 / m.min-1	牵伸 倍数	D/Y	变形热 箱温度 /℃	定型热 箱温度 /℃	定型 超喂 /%	卷绕 超喂 /%
参数	580	1.60	1.75	180	--	-3.2	-2.9

3 实验结果与分析

3.1 加工速度 YS

全消光 POY 添加了二氧化钛，含量在 2.2-2.3%，高含量的 TiO₂ 会破坏内部结构。与半消光纤维相比，全消光纤维的拉伸性能较差。为了确保生产的稳定性和产品的高弹性特点，加工速度应该选择较低的水平。

表 4 不同加工速度情况对比表

加工速度 / (m/min)	断头情况	DTY 毛丝 情况	染色情况
500	断头少	无毛丝	袜带平整，细腻，色差 均匀
580	断头少	无毛丝	袜带平整，细腻，色差 均匀
660	断头略增加	极少量毛丝	袜带平整，细腻，色差 出现
740	断头较多	毛丝增多	袜带平整，细腻，轻微 色差

通过上述的试验结果，随着加工速度的增加，断头会增加，毛丝数量增加，袜带比色差也会随着显现。当加工速度增加时，盘片对 DTY 的作用力也会增加，加速了对纤维结构的破坏，所以出现上述情况。

由于车间首次生产全消光高弹涤纶 44dtex/48f DTY 产品，为保证 DTY 的产品质量，选定 580 m/min 的加工速度。在后续生产中，必要时也可适当增加生产速度^[1]。

3.2 拉伸倍数

纤维之间的拉伸倍数是由第一罗拉与第二罗拉的速度差实现的，是加弹生产的一项重要工艺参数。拉伸倍数直接影响 DTY 纤维的物理性能，包括强度、伸度和卷缩率等。因此，合理选择拉伸倍数是维持生产稳定性的关键因素。提高拉伸倍数会增强 POY 的拉伸应力，促进非晶区分子链的取向和结晶，进而提升 DTY 的强度。但若张力过大，单丝

易断裂，形成毛丝或断头。如果拉伸倍数过低，张力小，易波动、打滑，产生紧捻^[3]。

表 5 不同拉伸倍数情况对比表

拉伸 倍数	T1 张力 (cN)	伸长率 /%	断裂强 度 (cN/ dtex)	卷曲 收缩 率 /%	毛丝情况	染色性
1.63	20-22.3	17.5-19.1	3.60	27.6	有毛丝	一般
1.61	18.1-19.4	18.5-20.5	3.68	27.9	有毛丝	一般
1.595	16.9-17.8	20-22.1	3.75	28.5	无毛丝	较好
1.58	14.5-16.0	21-23	3.73	29.2	无毛丝	较好
1.56	13.8-14.8	22-25	3.78	29.5	无毛丝	较好

由表 4 可以看出，拉伸倍数过高时，单丝易断裂，导致 DTY 强度下降。为确保强度达标，应避免过高的拉伸倍数。由表中也可以看出拉伸倍数低，加捻张力偏小，不足以维持加捻所需要的张力。

在综合考虑生产稳定性和产品性能的前提下，选择 1.595 的拉伸倍数较为适宜。在此条件下，生产的 DTY 产品在强度、伸长率、卷曲度和染色均匀性等方面均能满足客户要求。

3.3 变形热箱温度

第一热箱又称变形热箱，主要作用就是在张力作用下对丝条进行拉伸和扭曲，并对拉伸和扭曲所产生的形变进行紧张热定型。DTY 纤维的卷曲收缩率和染色均匀性都与之有关。合适的变形温度条件有助于形成良好的大分子结构，从而提升 DTY 的染色性能^[2]。

表 6 不同 H1 温度情况对比表

H1 温度 (℃)	伸长率 /%	断裂强度 (cN/dtex)	卷曲收缩率 /%	染色性
160	22.8	3.76	26.8	较好
170	21.8	3.74	27.9	较好
180	22.1	3.75	28.5	较好
190	19.5	3.67	29.2	一般
200	18.5	3.58	30.8	较差

从表 5 可以看出，随着变形热箱温度的提高，纤维变形的温度充足，分子链的活动能力增加，假捻变形更加充分，卷曲收缩率增加，纤维变得更有弹性。

当变形温度增加到 190℃时，纤维分子链内部非晶区反而会增加，局部软化、粘连易产生紧点，使纤维的断裂强度及断裂伸长率下降，不同锭位的纤维差异会加大，导致色差会逐渐显现直至比较明显。所以变形热箱温度不宜过高，并结合 580 m/min 的生产速度，变形热箱温度选择 180℃为宜，这样既保证了物理指标，又兼顾了染色性能^[3]。

3.4 摩擦盘

摩擦盘按材质主要分为陶瓷及聚氨酯两种，摩擦盘按组合可分为导入盘、工作盘、导出盘三种，其中导入盘受力最大，一般选用陶瓷盘。导出盘做成刀口状，可消除紧点，

一般选用陶瓷盘。本车间的工作盘材质均为聚氨酯，俗称 PU 盘。弹性体材料的聚氨酯盘相对硬质材料的陶瓷盘，有着假捻效果好、不易打滑、对纤维的破坏性很小、产生雪花量少等优点，可以大大提高丝条的强度^[4]。但聚氨酯盘的使用寿命短，一般为 12 个月左右。

表 7 不同摩擦盘品牌情况对比表

摩擦盘品牌	伸长率/%	断裂强度 (cN/dtex)	T2 张力 (cN)	T2 张力 CV/%
CPU	21.3	3.68	15-16	0.9-1.05
腾高	21.5	3.70	15.5-16.5	0.8-0.9
YAMASE	22.1	3.75	16-17	0.75-0.8

CPU、腾高和 YAMASE 品牌的盘片材质均为聚氨酯，这三种盘片的硬度大小顺序为：CPU<腾高<YAMASE。YAMASE 盘片是最硬的，盘片表面相对光滑，摩擦系数小，耐磨性更好，使用寿命更长^[4]。

3.5 D/Y 比

D/Y 比指摩擦盘表面线速度与丝条离开假捻器的速度之比。D/Y 比是控制捻度的重要工艺参数，主要影响丝条的

捻度及解捻张力。D/Y 比主要影响张力 K 值，K 值的计算方法为：K 值 = 解捻张力 / 加捻张力。

表 8 不同 K 值情况对比表

D/Y	K 值	T2 张力 (cN)	卷曲收缩率/%
1.90	0.65	11-11.5	28.0
1.75	0.70	12-13	28.9
1.65	0.75	13-14	28.5
1.55	0.9	15.5-16	27.6

从表 8 可以看出，D/Y 比越低，解捻张力越大，K 值越大，生产中易造成张力波动，导致假捻效果不稳定，出现单丝不能加捻。但 44dtex/48f 这种张力较小的全消光高弹细旦品种，K 值太小导致解捻张力过小，会导致解捻不充分，易出现紧点。因此，在全消光涤纶 44dtex/48f 的生产中，D/Y 比应控制在 1.65-1.9 之间，K 值趋向于 0.65-0.75，卷曲收缩率适中，毛丝较少，生产稳定，DTY 产品蓬松^[5]。

3.6 DTY 产品质量指标

见表 9。

表 9 DTY 产品质量指标

项目	纤度 /dtex	纤密度变 异/%	断裂强度 / cN.dtex-1	断裂强度 变异/%	断裂伸长 率/%	断裂伸长 变异/%	卷曲收缩 率/%	沸水收缩 率/%	含油率/%	网络度 / 个 · 米 ⁻¹
指标	43.6	0.47	3.85	2.03	21.89	5.63	25.58	3.45	2.56	151

4 结语

在全消光细旦涤纶 POY 的拉伸变形加工过程中，考虑到 TiO2 对 POY 加工性能的影响，应选择材质柔软的聚氨酯摩擦盘，并进行优化组合，同时选用合适的加工速度、拉伸倍数、D/Y 比、变形温度，以改善加工效果，减少纤维损伤，提高产品质量。

生产全消光细旦涤纶 DTY 时，增加预网络，提高单丝间的抱合力和上油均匀性，减少毛圈的产生。

通过不断的技术创新与实践，我们克服了 44dtex/48f 全消光高弹产品生产中的挑战，确保了产品的手感、光感以及各项性能均达到行业高端水平，为客户提供高附加值的优质原料。

参考文献

[1] 林稳,王春燕,张银鸿,等. 83 dtex/36 f 毛毛虫形全消光涤纶FDY

染色均匀性的影响因素探讨 [J]. 合成纤维工业, 2025, 48 (04): 102-106.

[2] 吴忠亮,丁聪,李苗,等. 熔体直纺278 dtex/192 f全消光扁平涤纶POY的生产工艺 [J]. 合成纤维, 2025, 54 (06): 24-28. DOI:10.16090/j.cnki.hcxw.2025.06.011.

[3] 李明,徐兴国,沈虹,等. Wings Flex设备纺全消光涤纶FDY的工艺探讨 [J]. 合成纤维, 2025, 54 (05): 18-22. DOI:10.16090/j.cnki.hcxw.2025.05.004.

[4] 陈晖,张桂萍,徐敏标,等. 异形全消光聚酯拉伸纤维生产工艺探讨 [J]. 合成纤维, 2025, 54 (05): 23-26. DOI:10.16090/j.cnki.hcxw.2025.05.008.

[5] 张红霞,程小明,吕治家. 全消光雅赛尔织物防紫外线性能测试 [J/OL]. 棉纺织技术, 1-5[2025-09-09]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1132.TS.20241225.1709.004>.

Intelligent technology enables the optimization of blasting equipment production line

Xiaohua Guo Tang Tang

Poly Jiulian Gansu Jiulian Baiyin Xuesong Branch China Gansu Baiyin, Lanzhou, Gansu, 730900, China

Abstract

As critical infrastructure for national economic and defense development, blasting equipment production demands inherent safety, quality stability, and operational efficiency. Traditional manufacturing lines suffer from human intervention, imprecise process parameter control, high safety risks, and severe information silos. The Industry 4.0 era presents new opportunities through intelligent technologies including IoT, big data, AI, machine vision, and industrial robotics. This paper systematically explores smart technology applications in blasting equipment production, covering intelligent sensing/data acquisition, real-time production control, online quality monitoring, smart logistics/warehousing, and digital twin-based process optimization. Case studies and comparative analyses demonstrate how these innovations enhance intrinsic safety, ensure product consistency, boost productivity, and reduce costs. The paper concludes with current challenges and outlines future directions for technological integration and advanced implementation.

Keywords

Blasting equipment; Intelligent manufacturing; Production safety; Internet of Things (IoT); Artificial Intelligence (AI)

智能化技术赋能爆破器材生产线优化

郭小华 唐棠

甘肃久联民爆器材有限公司, 中国 · 甘肃 兰州 731499

摘要

爆破器材作为国民经济与国防建设的关键基础物资, 其生产过程的本质安全性、质量稳定性及效率至关重要。传统生产线存在人为因素影响大、工艺参数控制精度低、安全风险高、信息孤岛化严重等问题。随着工业4.0时代的到来, 以物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、机器视觉和工业机器人等为代表的智能化技术为解决这些问题提供了全新路径。本文系统阐述了智能化技术在爆破器材生产线中各个环节的具体应用, 包括智能感知与数据采集、生产过程智能控制、质量在线智能检测、智能物流与仓储以及基于数字孪生的全流程优化。通过分析应用实例和数据对比, 论证了智能化技术在提升生产本质安全水平、保障产品质量一致性、提高生产效率和降低运营成本方面的显著成效。最后, 对当前面临的挑战进行了总结, 并展望了未来技术融合与深度应用的发展方向。

关键词

爆破器材; 智能制造; 安全生产; 物联网(IoT); 人工智能(AI)

1 引言

爆破器材, 主要包括工业炸药、雷管、索类火工品等, 广泛应用于矿产开采、水利水电、交通建设、地质勘探及国防军工等领域。由于其本身具有易燃易爆的高危险性, 其生产过程一直被列为国家严格监管的高风险作业。传统的爆破器材生产线虽然历经多次技术改造, 实现了初步的机械化和自动化, 但仍然面临诸多严峻挑战: (1) 安全风险高: 大量工序仍需人工直接参与或近距离操作, 人员暴露于危险环境, 人为失误是引发安全事故的主要因素; (2) 质量波动大: 关键工艺参数(如温度、压力、配比、转速等)多依赖经验

控制, 精度和稳定性不足, 导致产品性能批次间差异显著; (3) 生产效率瓶颈: 各生产单元自动化程度不一, 信息交互不畅, 形成“自动化孤岛”, 整体调度和协同效率低下; (4) 溯源管理困难: 生产、仓储、流通数据记录多采用纸质表单, 信息不连贯、易篡改、难追溯, 一旦发生质量问题, 追查原因异常困难。

近年来, 智能制造浪潮席卷全球制造业, 其核心是通过新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合, 实现生产全流程的数字化、网络化和智能化。将智能化技术引入爆破器材这一特殊行业, 不仅是技术发展的必然趋势, 更是从根本上提升其安全生产水平、实现产业转型升级的战略需求。本研究旨在系统探讨物联网、大数据、AI、机器视觉等智能化技术在爆破器材生产线中的具体应用场景与集成方案, 分析其带来的优化效果, 并为未来的深入应用提供思

【作者简介】郭小华(1981-), 男, 苗族, 中国贵州贵阳人, 本科, 工程师, 从事民爆行业工作及研究。

路和借鉴。

2 智能化技术体系构成

爆破器材生产线的智能化改造是一个系统工程，其技术支撑体系主要由以下几个层面构成：

感知执行层：通过各类高精度、防爆型传感器（如温度、压力、流量、图像、位移传感器）和 RFID 标签，实时采集设备状态、环境参数、物料信息和人员操作行为。执行机构包括防爆工业机器人、智能数控装备、AGV（自动导引运输车）等。

网络传输层：利用工业以太网、5G、LoRa、Wi-Fi 6 等网络技术，构建覆盖全厂区的工业互联网网络，实现感知层数据的高速、稳定、低延时传输，打通“信息孤岛”。

平台支撑层：搭建工业云平台或本地化部署的工业大数据平台，作为数据的汇聚、存储、管理和分析中心。同时，集成数字孪生技术，构建生产线的虚拟映射模型。

应用智能层：基于平台数据，运用机器学习、深度学习等 AI 算法，开发各类智能应用，如工艺参数优化、设备

预测性维护、智能安全预警、质量在线判定等，实现核心业务的智能化决策与控制。

3 智能化技术在生产线各环节的应用与优化

3.1 基于 IoT 的智能感知与数据采集优化

传统生产线数据采集频次低、覆盖面窄。通过部署防爆型的物联网传感器网络，可实现对全生产线“人、机、料、法、环”全要素状态的实时感知与监控。

应用示例：在乳化炸药生产的乳化、冷却、敏化工序，在设备关键节点布置温度、压力、流量和转速传感器，数据实时上传至监控系统。一旦监测值偏离设定安全阈值，系统可自动报警并联动执行机构（如关闭阀门、启动急停），将事故遏制在萌芽状态。

优化效果：实现了从“事后补救”到“事前预警、事中控制”的转变，大幅提升了生产过程的本质安全水平。同时，海量的实时数据为后续的工艺优化和大数据分析奠定了坚实基础。

表 1 智能感知应用点及效果示例

生产环节	监测参数	所用传感器	优化效果
原料配制	重量、流量	高精度防爆称重模块、流量计	配比精度从 $\pm 2\%$ 提升至 $\pm 0.5\%$ ，保障产品基础性能
乳化过程	温度、压力、转速	防爆热电偶、压力变送器、转速传感器	实时调控，避免“过乳化”或“乳化不全”，质量更稳定
装药包装	药卷重量、长度	高精度称重传感器、机器视觉	100% 在线检重，杜绝不合格品流入下道工序
仓库管理	温湿度、库存位置	温湿度传感器、RFID	实现环境自动调控和库存精准化管理，降低仓储风险

3.2 生产过程的智能控制与自适应优化

基于 PLC/DCS 的传统自动化控制属于“固定逻辑”控制，无法应对原料特性微小波动和环境变化。引入 AI 算法，可实现生产过程的智能自适应控制。

应用示例：利用机器学习算法（如神经网络、支持向量机）对历史生产数据（原料参数、环境温度、工艺参数设定值、最终产品质量）进行学习训练，构建产品质量预测模型。系统根据当前原料和环境状况，通过模型实时推理，动态调整乳化温度、搅拌速度、冷却水流量等关键工艺参数的设定值，使生产过程始终保持在最优状态。

优化效果：打破了依靠老师傅经验的传统模式，实现了以最终产品质量为导向的闭环优化控制。有效减少了质量偏差，提高了优等品率，同时降低了能耗。某企业应用后，产品性能标准差降低了 30%，能耗下降约 8%。

3.3 基于机器视觉的质量在线智能检测

质量检测是保障爆破器材安全性的最后一道关口。传统人工检测效率低、劳动强度大、主观性强且易漏检。

应用示例：在雷管装配线末端，部署高速工业相机和光源系统，采集每发雷管的外观图像。利用深度学习目标检测算法（如 YOLO、Faster R-CNN），自动识别并定位编码不清、表面缺损、尺寸偏差、部件漏装等缺陷。系统可在毫秒级内完成判别，并驱动机械手将不合格品自动剔除。

优化效果：实现了 100% 全检，检测准确率可达 99.9% 以上，远高于人工检测的 95%。同时，解放了劳动力，避免了人员与危险品的长期直接接触。检测数据可实时上传 MES 系统，生成质量报表，便于追溯与分析。

3.4 智能物流与仓储管理

爆破器材的原材料和成品运输、仓储是高风险环节。应用 AGV、智能立库等方法，可实现“人药分离”。**应用示例：**在厂区内规划无人驾驶路线，使用防爆 AGV 小车自动搬运炸药原材料和成品卷。成品入库时，通过 RFID 技术自动识别信息，堆垛机将其自动存入防爆智能立体仓库中的指定货位。库房管理完全由 WMS（仓库管理系统）调度，无人进入库区。

优化效果：极大减少了仓储和转运环节的人工参与，从根本上降低了此过程中的安全风险。提高了物流效率和空间利用率，实现了库存的精准、实时可视化管理。

3.5 基于数字孪生的全流程可视化与仿真优化

数字孪生（Digital Twin）是智能化的高级形态，为物理生产线创建一个完全对应的虚拟模型。

应用示例：构建包含设备几何模型、物理模型、规则模型和行为模型的生产线数字孪生体。它与实体生产线通过 IoT 数据实时同步交互。操作人员可在三维可视化界面上直观地监控全线运行状态。更重要的是，可以在数字孪生体上

进行工艺参数模拟调试、生产线布局优化、应急预案演练和人员培训，而无需中断实际生产或承担安全风险。

优化效果：提供了一个安全、低成本的生产系统测试和优化平台，支持决策的科学化。实现了从“黑箱”生产到“透明化”管理的飞跃，为 predictive maintenance（预测性维护）

和更深层次的自主优化提供了可能。

4 应用效益分析

对某实施智能化改造的乳化炸药生产线进行对比分析，其关键指标提升如下：

表 2 智能化改造前后关键指标对比

指标类别	改造前	改造后	提升幅度
生产效率	班产 60 吨	班产 75 吨	+25%
产品合格率	98.5%	99.95%	+1.45 个百分点
单位产品能耗	基准值	下降 12%	-
生产线上直接操作人员	15 人 / 班	5 人 / 班 (中控室)	-66.7%
安全事故发生率	偶发	近乎为 0	显著降低
质量数据可追溯性	部分纸质记录，追溯难	全流程数字化，秒级精准追溯	根本性改善

由此可见，智能化技术的应用带来了综合性的巨大效益，尤其在安全、质量和效率这三个核心维度上表现突出。

5 结语

将智能化技术深度融入爆破器材生产线，已成为行业提升本质安全水平、实现高质量发展的必由之路。本文系统论述了物联网、人工智能、机器视觉、数字孪生等技术在感知监控、过程控制、质量检测、物流仓储和全流程优化等方面的具体应用与显著成效。实践证明，智能化改造能够极大地减少人工直接参与，实现精准化、柔性化生产，构建一个可知、可控、可优的现代化生产体系。

然而，当前的发展仍面临一些挑战：一是初始投资成本高昂，对中小企业构成一定压力；二是跨领域复合型人才短缺，既懂爆破工艺又懂信息技术的专家匮乏；三是数据安全性与网络安全风险突出，需构建坚固的防护体系；四是相关技术标准与规范尚不完善。

未来，爆破器材的智能化发展将呈现以下趋势：一是 5G+IIoT（工业物联网）的融合将实现更广泛和更可靠的设备互联与数据互通；二是 AI 算法将从“辅助优化”向“自主决策”演进，实现更高水平的自动化；三是数字孪生技术将与物理实体的交互更加深入，实现真正的虚实联动与预测性控制；四是区块链技术的引入将进一步增强产品质量溯源和数据防篡改的能力。

总之，尽管前路挑战犹存，但以智能化技术驱动爆破

器材生产模式的变革浪潮不可逆转。需要政府、企业、科研院所协同努力，共同推动这一特殊行业向着更安全、更高效、更绿色的方向持续演进。

参考文献

[1] 周明, 李磊. 工业4.0背景下民爆行业智能制造发展路径研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(3): 1-7.

[2] 王建国, 赵鑫, 孙斌. 基于数字孪生的智能生产线建模与仿真优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1310-1322.

[3] 陈鹏, 刘强, 张伟. 机器视觉在工业雷管外观缺陷检测中的应用研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 82-86.

[4] 工业和信息化部. 《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》[Z]. 2021.

[5] Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.

[6] 肖立平, 郭学永. 基于物联网的乳化炸药生产线远程监控系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(4): 297-301.

[7] 韩亚斌, 付跃升, 黄浩. 人工智能在火工品生产质量控制中的应用展望[J]. 火工品, 2022(2): 55-59.

[8] 中国爆破器材行业协会. 民用爆炸物品行业智能制造试点示范案例汇编[R]. 2022.

[9] 刘千里, 王泽普. 工业大数据在流程工业工艺优化中的应用综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2499-2520.

Research on the Design Technology of Monitoring the State of Intermediate Joints in Submarine Cables

Yong Gu WeiYiChen

Zhongtian Ocean System Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226010, China

Abstract

In the ocean observation system, the intermediate joint of the submarine cable is a relatively fragile link. When the joint is damaged due to external forces and is in a critical state of damage, the system can temporarily operate normally. However, after a period of time, the system suddenly becomes completely paralyzed, and the sea conditions may not allow offshore construction, resulting in the loss of ocean data for a period of time. This will cause a linear decrease in the system's operating rate. This system installs MEMS temperature and humidity sensors, strain gauges, and acceleration sensors at the joint, using low-power software and hardware design to monitor temperature and humidity, resistance changes (deformation), angle, and acceleration at the joint. The Kalman filter algorithm is used to process the data, and when abnormal temperature and humidity, strain voltage, angle, and acceleration are detected, an alarm is issued to predict faults in advance and handle them in advance.

Keywords

Intermediate joint of submarine cable; Low power consumption; Temperature and humidity; Strain gauges; Acceleration; give an alarm; Anticipate faults

海底电缆中间接头状态监测设计技术研究

顾勇 陈伟毅

中天海洋系统有限公司, 中国 · 江苏 南通 226010

摘 要

海洋观测系统中, 海底电缆中间接头是较脆弱的环节, 当接头处由于外力原因损坏, 处于损坏的临界状态, 系统暂时能正常运行, 但过一段时间后, 系统突然全面瘫痪, 而此时海况可能并不允许出海施工, 而使海洋数据丢失一段时间, 这会造成系统运行率的直线下降。本系统在接头处安装MEMS温湿度传感器、应变片和加速度传感器, 采用低功耗软硬件设计, 来监测接头处的温湿度、阻值变化(形变)、角度和加速度, 并采用卡尔曼滤波算法处理数据, 在监测到温湿度、应变电压、角度和加速度异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。

关键词

海底电缆中间接头; 低功耗; 温湿度; 应变片; 加速度; 告警; 预知故障

1 引言

海洋观测系统中, 海底电缆中间接头是较脆弱的环节, 当接头处由于外力原因损坏, 处于损坏的临界状态, 系统暂时能正常运行, 但过一段时间后, 系统突然全面瘫痪, 而此时海况可能并不允许出海施工, 而使海洋数据丢失一段时间, 这会造成系统运行率的直线下降^[1]。

2 设计方案

2.1 概述

本系统在海底电缆中间接头处安装 MEMS 温湿度传感器、应变片和加速度传感器, 采用低功耗软硬件设计, 来监

测接头处的温湿度、应变电压(形变)、角度和加速度, 并采用卡尔曼滤波算法处理数据。在监测到温湿度、应变电阻、加速度和角度异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。

2.2 控制拓扑图

如上图所示, 系统包括温湿度传感器、加速度传感器、应变片传感器、CPU 芯片和通信芯片。

温湿度传感器采集温度和湿度; 加速度传感器采集加速度和角速度, CPU 收到数据后计算出角度值, 并通过卡尔曼滤波算法对角度进行滤波处理; 应变片遇到形变时, 电阻发生变化, 并通过直流电桥产生不平衡电压, CPU 的模拟采样采集到电压数值, 并通过卡尔曼滤波算法对电压值进行滤波处理; 当 CPU 监测到温湿度、应变电压、加速度、角速度和角度数值异常时, 通过串口通信芯片发送事件信息给主控系统。

【作者简介】顾勇(1989-), 男, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事海洋观测技术及仪器的研究。

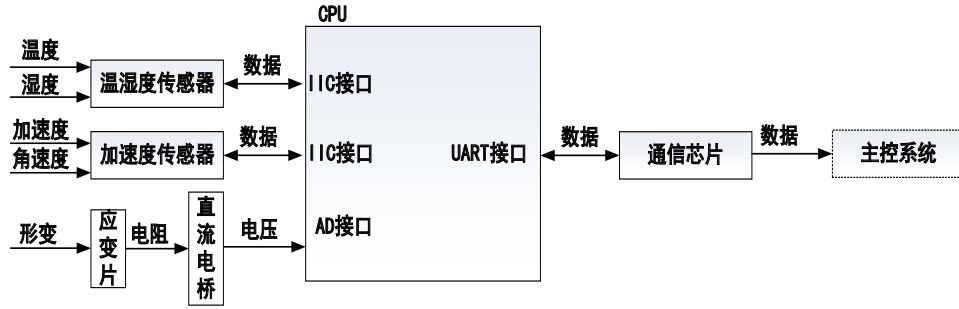


图 1 控制拓扑图

2.3 温湿度数据采集设计概要

温湿度传感器采用 MEMS 传感器类型的，MEMS 技术允许在较小空间内集成多个传感器功能，同时保持较低功耗。比如 Bosch 的 BME680 等温湿度传感器。

2.4 姿态数据采集设计概要

姿态传感器也是采用 MEMS 传感器类型，比如 Bosch 的 BMI160 等加速度传感器。

加速度传感器采集 x、y、z 的加速度和角速度数据。

2.5 卡尔曼滤波算法简介

从理论上讲，卡尔曼滤波算法曾经被称为线性最小均方估计子，因为它利用含有噪声的线性传感器（数据）使线性随机系统的均方估计误差最小化^[2]。

线性随机系统的离散时间模型具有下列形式：

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}\omega_{k-1} \quad (1.4.1-1)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (1.4.1-2)$$

其中，零均值不相关随机过程 $\{\omega_k\}$ 和 $\{v_k\}$ 在 t_k 时刻的协方差分别为 Q_k 和 R_k 。对应的卡尔曼滤波器方程具有下列形式^[2]：

$$\hat{x}_{k(-)} = \Phi_{k-1} \hat{x}_{(k-1)+} \quad (1.4.1-3)$$

$$P_{k(-)} = \Phi_{k-1} P_{(k-1)+} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (1.4.1-4)$$

$$\hat{x}_{k(+)} = \hat{x}_{k(-)} + \bar{k}_k (z_k - H_k \hat{x}_{k(-)}) \quad (1.4.1-5)$$

$$\bar{k}_k = P_{k(-)} H_k^T (H_k P_{k(-)} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (1.4.1-6)$$

$$P_{k(+)} = P_{k(-)} - \bar{k}_k H_k P_{k(-)} \quad (1.4.1-7)$$

其中，符号 (-) 表示变量的先验值（测量值中的信息被利用以前的值），符号 (+) 表示变量的后验值（测量值中的信息被利用以后的值）。x 为系统状态变量，z 为测量值，变量 $\bar{k}_k$ 为卡尔曼增益， Φ 为状态转移矩阵，Q 为噪声的协方差矩阵，P 为协方差矩阵，H 为灵敏度矩阵，G 为过程噪声耦合矩阵，R 为测量噪声协方差矩阵。

2.6 角度理论计算

欧拉角旋转顺序为：偏航（Z 轴， Ψ 符号表示）- 俯仰（Y 轴， θ 符号表示）- 横滚（X 轴， λ 符号表示），将导航坐标系 n 经过三次旋转，旋转后与载体坐标系 b 对齐。

可以得到如下方向余弦矩阵^[3]：

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \lambda \sin \theta \cos \psi - \cos \lambda \sin \psi & \sin \lambda \sin \theta \sin \psi + \cos \lambda \cos \psi & \sin \lambda \cos \theta \\ \cos \lambda \sin \theta \cos \psi + \sin \lambda \sin \psi & \cos \lambda \sin \theta \sin \psi - \sin \lambda \cos \psi & \cos \lambda \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.4.2-1)$$

$$C_b^n = [C_n^b]^T \quad (1.4.2-2)$$

当传感器静止或者低频运动时，地理坐标系坐标系重力场

$$g^n = [0 \quad 0 \quad g]^T \quad (1.4.2-3)$$

载体坐标系，即传感器测量值，重力场分量

$$g^b = [g_x^b \quad g_y^b \quad g_z^b]^T \quad (1.4.2-4)$$

$$\begin{aligned} g^b &= C_n^b g^n \\ &= [-\sin \theta * g \quad \sin \lambda \cos \theta * g \quad \cos \lambda \cos \theta * g]^T \\ &= [g_x^b \quad g_y^b \quad g_z^b]^T \end{aligned}$$

可以得出

$$\theta = \sin^{-1} g_x^b / g \quad (1.4.2-5)$$

$$\lambda = \tan^{-1} g_y^b / g_z^b \quad (1.4.2-6)$$

当传感器静止或者低频运动时，地理坐标系坐标系磁力场

$$m^n = [\cos \sigma \quad 0 \quad \sin \sigma]^T \quad (1.4.2-7)$$

载体坐标系，即传感器测量值，磁力场分量

$$m^b = [m_x^b \quad m_y^b \quad m_z^b]^T \quad (1.4.2-8)$$

$$m^b = C_n^b m^n \quad (1.4.2-9)$$

结合式 (1.4.2-1) 和式 (1.4.2-9) 可以得出：

$$m_x^b = \cos \theta \cos \psi \cos \sigma - \sin \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-10)$$

$$m_y^b = (\sin \lambda \sin \theta \cos \psi - \cos \lambda \sin \psi) \cos \sigma + \sin \lambda \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-11)$$

$$m_z^b = (\cos \lambda \sin \theta \cos \psi + \sin \lambda \sin \psi) \cos \sigma + \cos \lambda \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-12)$$

(1.4.2-11) * $\sin \lambda$ + (1.4.2-12) * $\cos \lambda$ ，可得

$$m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda = \sin \theta \cos \psi \cos \sigma + \cos \theta \sin \sigma \quad (1.4.2-13)$$

(1.4.2-11) * $\cos \lambda$ - (1.4.2-12) * $\sin \lambda$, 可得

$$m_y^b \cos \lambda - m_z^b \sin \lambda = -\sin \psi \cos \sigma \quad (1.4.2-14)$$

(1.4.2-13) * $\sin \theta$ + (1.4.2-10) * $\cos \theta$, 可得

$$(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta = \cos \psi \cos \sigma \quad (1.4.2-15)$$

(1.4.2-14) / (1.4.2-12), 可得

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{m_y^b \sin \lambda - m_z^b \cos \lambda}{(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta} \right) \quad (1.4.2-16)$$

综上所述可得:

$$\theta = \sin^{-1} g_x^b / g \quad (1.4.2-5)$$

$$\lambda = \tan^{-1} g_y^b / g_z^b \quad (1.4.2-6)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{m_y^b \sin \lambda - m_z^b \cos \lambda}{(m_y^b \sin \lambda + m_z^b \cos \lambda) \sin \theta + m_x^b \cos \theta} \right) \quad (1.4.2-16)$$

2.7 角度实际计算

先利用滑动滤波算法和阈值滤波算法对加速度和角速度数据进行简单的滤波, 考虑到姿态传感器放置在水下金属腔体, 传感器无法测量地磁场数据, 所有仅用加速度值带入式 (1.4.2-5) 和式 (1.4.2-6) 计算出横滚角和俯仰角, 然后利用上述卡尔曼滤波算法对角度进行滤波处理。卡尔曼滤波算法核心代码如下:

卡尔曼参数初始化

kalman_est_value = 0; (估计值任意初值)

kalman_est_cov = 0.1; (估计协方差任意不为 0 的值)

kalman_meas_cov = 0.2; (测量协方差任意不为 0 的值)

卡尔曼增益计算

kalman_gain = kalman_est_cov * sqrt(1 / (kalman_est_cov * kalman_est_cov + kalman_meas_cov * kalman_meas_cov));

本次滤波值估计值

kalman_est_value = kalman_est_value + kalman_gain * (kalman_meas_value - kalman_est_value);

更新估计协方差

kalman_est_cov = sqrt(1 - kalman_gain) * kalman_est_cov;

更新测量协方差

kalman_meas_cov = sqrt(1 - kalman_gain) * kalman_meas_cov;

偏航角采用角速度积分的方法计算, 计算方法如下:

angle_z = angle_z + w_z_value * t;

其中 w_z_value 为 z 方向的角速度值, t 为采样周期。

2.8 应变片数据采集

2.8.1 电阻应变片工作原理^[4]

电阻应变片的工作原理是基于敏感栅中的金属丝的应

变效应, 即在金属导体产生形变时, 它的电阻值发生相应变化。例如一根金属电阻丝, 在其未受力时, 原始电阻值为 $R=L/S$ 。当该丝受到轴向拉力 F 作用时, 电阻值的相对变化为 $dR = dL/S - LdS/S^2 + LdS/S$ 。因此可通过测量变化后电阻值来确定作用力 F 。

2.8.2 直流电桥测量电路

测量电路如下图所示, R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为桥臂电阻, R_1 为电阻应变片, E 为电压源。

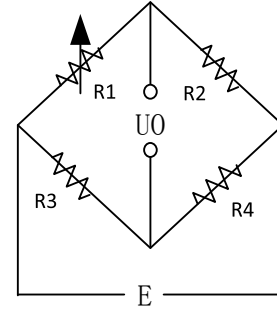


图 2 直流电桥测量电路

初始状态设计电路, 使 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 此时电桥平衡, $U_0 = 0V$; 当应变片 R_1 阻值发生变化时, 可以通过如下公式^[4]计算出 U_0 值。

$$U_0 = E \frac{R_4 \Delta R_1 / R_3 R_1}{(1 + \Delta R_1 / R_1 + R_2 / R_1)(1 + R_4 / R_3)} \quad (1.5.2-1)$$

3 控制软件流程

系统在监测到湿度超过阈值并且持续 1 分钟, 则上报告警信息至主系统; 监测到加速度、角度、应变片电压超过阈值, 并且 1 分钟后继续判断应变片电压是否超过阈值, 则上报告警信息至主系统。具体流程图如下图所示:

4 结语

本系统在监测海底电缆中间接头处的温湿度、加速度、角度和应变电压数据异常时, 发出告警, 从而提前预知故障, 提前处理。本系统为海底电缆中间接头状态监测设计技术提供了一种低成本思路, 从理论上讲可以提前预知故障, 从而提高系统运行率。

参考文献

- [1] 顾勇, 倪晶晶, 张志峰, 等. 海缆接头状态监测装置: 中国, ZL 2023 2 2901304.2[P]. 2024-05-28.
- [2] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. 卡尔曼滤波理论与实践 (MATLAB版) (第四版) [M]. 刘郁林, 陈邵荣, 徐舜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.7: 1-2, 176.
- [3] 郑淑孟. 基于 MEMS 惯性传感器的人体姿态和位移检测[D]. 广州: 暨南大学, 2015: 17.
- [4] 吴祥晨, 吴扬杰, 王柳烟. 电阻应变片测量电路的灵敏度研究与误差分析 [J]. 智能应用, 2014, 03 (044): 51.

Resonant Compensation Design for Underwater Medium-voltage High-power Wireless Power Coupling Transmission

Lingyue Xu Peng Zhang Yiyun Zhu Zhen Chi Zhifeng Zhang

Zhongtian Ocean System Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 600522, China

Abstract

Marine observation networks rely on efficient and reliable energy transmission technologies for long-term operation. Traditional dry-mate or wet-mate connectors suffer from electrochemical corrosion and sealing failures under high-pressure, high-salinity conditions, leading to reduced efficiency and higher maintenance costs. This study investigates a mid-voltage high-power wireless power transfer (WPT) system using an LCC-S resonant compensation topology to enhance energy supply reliability and environmental adaptability. Experimental results show that the proposed system achieves stable constant-voltage output across a wide load range, a peak efficiency of 90.4% (compared to 78.2% with conventional SS topology), and maintains temperatures below 60°C during 8-hour continuous operation, demonstrating its practical feasibility. The LCC-S topology effectively addresses challenges in voltage regulation and efficiency optimization for underwater WPT applications. Future work will focus on high-permeability core materials, electromagnetic shielding, and fault-tolerant designs for deep-sea high-pressure environments.

Keywords

Wireless Power Transfer; LCC-S Type; Resonant Compensation; Constant Voltage Output; Efficiency Optimization

水下中压大功率无线电能耦合传输谐振补偿设计

许凌月 张鹏 朱逸云 迟震 张志峰

中天海洋系统有限公司, 中国·江苏南通 600522

摘要

海洋观测网络是深海环境监测与数据采集的核心, 其长期稳定运行离不开高效、可靠的能源传输技术。传统干/湿插拔式电连接器因金属插芯腐蚀问题会导致可靠性下降与维护成本增加。为解决该问题, 本研究聚焦于水下中压大功率无线电能传输(WPT)技术, 针对水下中压大功率场景的特殊需求, 本文提出基于电感-电容-电容-串联电容(LCC-S)型谐振补偿拓扑的无线电能传输系统架构, 从而提升海洋观测装备的能源供给可靠性及环境适应性。实验表明: 所设计的LCC-S型WPT系统在宽负载范围内具有稳定的恒压输出, 系统最高传输效率达90.4%; 8小时连续运行测试中, 系统温度最高不超过60°C(空气中), 并且可始终保持高效传输, 从而验证了工程应用可行性。本研究证实LCC-S型谐振补偿拓扑能够适用水下复杂的应用环境, 可以解决水下中压大功率无线电能传输的恒压控制与效率优化难题。未来将继续开展深海高压环境下的高磁导率磁芯材料、电磁场局部屏蔽技术、故障冗余技术的相关研究, 推动水下无线电能传输技术的规模化工程应用。

关键词

无线电能耦合; LCC-S型; 谐振补偿; 恒压输出; 效率优化

1 引言

海洋科学研究对海底环境参数的长期连续监测具有迫切需求, 海底观测网络通过集成多种传感器视线对海底环境的持续性监测^{[1][2]}。海底观测网络的稳定运行依赖高效能源供应体系, 传统解决方案多采用干/湿插拔连接器进行传输, 如日本海底地震观测网采用的同轴电缆系统, 以及我国同济

大学主导的“海底长期观测网络试验节点”项目中应用的接驳盒技术^{[1][3]}。此类技术虽可实现大功率传输, 但金属插芯在海水电解环境下的电化学腐蚀问题显著增加运维成本。浙江大学等机构通过阴极倒极法延缓电极结垢, 虽延长了维护周期, 仍未从根本上解决接触式传输的物理局限性^[4]。

相较之下, 新型无线电能耦合装置通过消除固定电缆连接, 在提升系统维护便利性和降低工程成本方面展现出显著优势。根据不同的电能传输机理, 无线电能传输可被划分为: 电场耦合式和磁场耦合式、微波式、激光式、超声式^[5]。不同种类的技术对比分析表明磁场耦合式在数十厘米范围内兼具传输效率高(>80%)、抗偏移能力强和穿透性优异等特性, 特别适用于大功率稳定传输场景, 因而成为水下应

【基金项目】中天海洋系统有限公司科技项目(项目编号: C-24JSW002)。

【作者简介】许凌月(1991-), 女, 中国江苏南通人, 本科, 工程师, 从事海底观测网研究。

用的首选方案。

典型无线电能传输系统采用电气隔离的双边架构设计，其能量转换过程遵循电磁感应原理。系统设计中，谐振补偿网络通过无功功率补偿可有效提升传输效率，传统串联-串联/串联-并联/并联-串联/并联-并联补偿拓扑^[6-7]虽结构简单，但存在谐振元件灵敏度高、增益不可调的缺陷，而 LCC-S 结构能够完成系统输出电压与功率的解耦设计，可以降低负载变化对系统影响的敏感性，具有更高的设计自由度，因而适用于中高功率场景。

基于如上对比，本研究采用 LCC-S 型来设计无线电能耦合传输系统，通过灵活的参数调整，开发出匹配水下功率需求的系统，并且根据理论仿真结果搭建了实验样机。

2 系统结构

2.1 系统结构

本系统采用模块化架构设计，由六个核心功能模块构成：直流电源、逆变器、谐振补偿网络、磁耦合器、整流滤波电路、DC-DC 电源，其拓扑架构如图 1 所示。

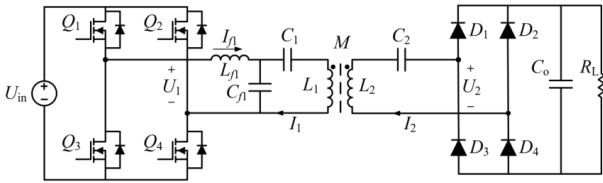


图 1 无线电能耦合传输系统拓扑图

其中，为初级侧全桥逆变电路的 4 个 MOS 管，为次级侧全桥整流电路的 4 个整流二极管，和分别为电磁耦合器的初级侧和次级侧线圈的自感，为电磁耦合器的互感，是初级侧串联补偿电感，为初级侧并联补偿电容，为初级侧串联补偿电容，为次级侧整流滤波电容。

2.2 谐振参数设计

基于 LCC-S 补偿结构的无线电能传输系统拓扑架构通过互感等效可简化为图 2 所示电路模型。系统设计需重点考虑如下关键参数：谐振电容参数、谐振电感参数、耦合电感参数。

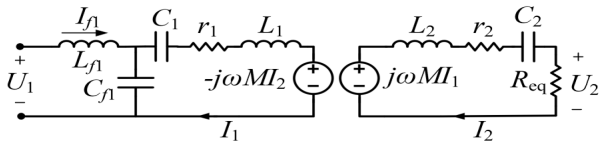


图 2 等效 LCC-S 补偿拓扑

当直流电源经全桥逆变器转换为设定频率的方波信号时，其电压波形可通过傅里叶级数展开表示为：

$$U_1 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4U_m}{n\pi} \sin(\omega n t) \quad (1)$$

式中， U_1 为输入电压幅值， U_m 为输入电压， ω 为角频率， $n=1,3,5,\dots$ ， t 为时间。对于连接全桥整流电路的负载电阻 R_L ，其等效交流阻抗 R_{eq} 可等效为：

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (2)$$

为实现系统谐振工作状态，LCC-S 补偿网络的参数需满足以下约束条件：

$$\omega^2 L_{f1} C_{f1} = 1 \quad (3)$$

$$\omega^2 L_2 C_2 = 1 \quad (4)$$

式中， ω 为系统谐振角频率， r_1, r_2 分别为耦合器线圈 L_1, L_2 的内阻， L_{f1} 为初级侧补偿电感， C_{f1} 为初级补偿电容， L_2 为次级侧电感， C_2 为次级谐振补偿电容。满足上述谐振条件时，次级侧输出电压 U_2 可推导为：

$$U_2 = I_2 R_{eq} = \frac{M U_1 R_{eq}}{L_{f1} (R_{eq} + r_2)} \quad (5)$$

M 为耦合互感。根据以上公式，忽略各元件内阻时，可以推出以下结论：

在忽略元件内阻的理想条件下，理论分析表明：次级侧输出电压仅与耦合互感 M 、初级补偿电路输入 U_1 、初级侧补偿电感 L_{f1} 相关，展现出与负载无关的恒压输出特性。当系统以恒压源供电且参数固定时，在耦合状态稳定的工作条件下，次级侧输出可维持恒定电压水平。这一特性使得 LCC-S 型无线电能传输系统在工程应用中具有显著优势。

结合如上分析，设定系统参数如下：

基于前述理论分析，设定无线电能传输系统参数如下：后端配置降压斩波型直流转换模块，实现输入电压 400-600VDC 范围至 375VDC 恒压输出，工作频率设定为 50kHz，系统最大传输功率设计目标为 2.5kW。选定核心参数如下：DC-DC 模块的输入电压为 500V，初级电感参数为 190 μ H，次级电感 290 μ H，耦合系数 0.85，初级补偿电感 150 μ H。

根据 LCC-S 拓扑谐振条件，关键补偿元件参数计算公式如下：

$$C_{f1} = \frac{1}{\omega^2 * L_{f1}} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 * (L_1 - L_{f1})} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 * L_2} \quad (8)$$

式中， C_{f1} 为初级补偿电容， C_1 为初级谐振补偿电容， C_2 为次级谐振补偿电容。

代入预设参数进行理论计算：初级补偿电容 C_{f1} 为 67.5nF，初级谐振补偿电容 C_1 为 253nF，次级谐振补偿电容 C_2 是 34.9nF。

3 仿真验证

基于理论推导建立 LCC-S 型无线电能传输系统仿真模型,核心参数配置如表 1 所示。该模型采用 500V 直流输入源,工作频率设定为 50kHz,谐振网络参数严格依据公式 (6)-(8) 计算值进行配置。

表 1 LCC-S 型无线电能传输系统参数配置表

参数名称 / 单位	取值
U1/V	500
F/Hz	50k
L1/ μ H	190
L2/ μ H	290
l/ μ H	150
/nF	67.5
/nF	253
/nF	34.9

通过设置 10 Ω 与 1 Ω 两种典型负载条件,观测系统动态响应特性:

谐振网络输出特性

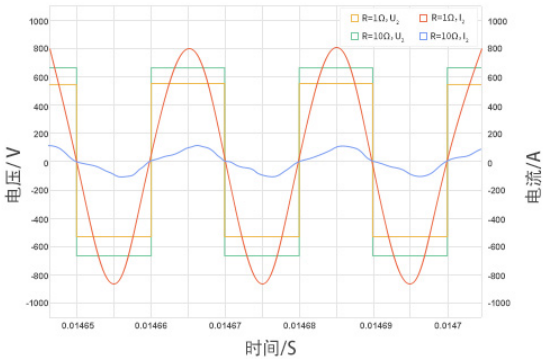


图 3

当负载阻值为分别为 10 Ω 和 1 Ω 时,谐振补偿后电压、电流情况 (蓝色: U_2 , 红色: I_2)

根据图 3,可以观察出在谐振补偿后,电压波动较小,维持在 500V 上下,经过后级全桥整流电路处理后,输出电压维持在设计值;而电流则根据负载需求发生了显著变化。

效率特性验证

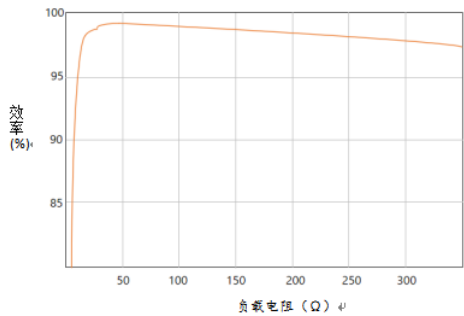


图 4 不同负载条件下的传输效率

图 4 系统能效测试可以得出,磁耦合效率始终维持在 95% 以上,与负载变化呈弱相关性。仿真验证系统整体效率在额定负载范围内达到 85% 以上。

实验数据表明,所提出的 LCC-S 拓扑补偿在宽负载范围内可保持稳定的恒压输出,系统综合效率达 85% 以上,为后续工程化应用提供了理论依据。

4 测试验证

4.1 样机测试

基于理论设计与仿真结果,研制了 LCC-S 型无线电能传输实验样机。实验样机包含高频逆变模块、LCC-S 谐振网络及散热系统;整体装配形态为圆柱型,其结构设计充分考虑了电磁兼容性与热管理需求。

采用可编程直流电源 (0-1000V/20kW) 与电子负载 (600V/90A) 构建测试平台,经测试得出,在额定 1kW 负载工况下,系统整体效率达到 90.4%,与理论仿真结果系统整体效率在额定负载范围内达到 85% 以上吻合。动态负载切换过程中电压恢复时间 <100 μ s。

4.2 性能验证与工程适用性

实验数据与仿真结果的误差控制在 5% 以内,验证了理论模型的准确性。实测效率较仿真预测值提升,主要源于以下优化措施: (1) 采用低损耗磁芯材料降低涡流损耗; (2) 优化电路板布局减少寄生参数影响; (3) 实施动态频率跟踪补偿频率漂移。

该实验样机在连续 8 小时运行测试中,温度最高不超过 60 $^{\circ}$ C (室温 10 $^{\circ}$ C),一般海洋观测网络布放在深层海底水域 (1000 米以下),此区域海水温度稳定在 2 $^{\circ}$ C ~4 $^{\circ}$ C,低于测试时室温,散热条件更佳。表明系统具备良好的工程化应用潜力,可满足高功率非接触电能传输场景的技术要求。

5 结语

本文介绍了水下中压大功率的无线电能耦合传输的应用场景及其系统整体拓扑。为了提高系统传输效率,利用互感耦合理论对 LCC-S 型谐振补偿设计建立了数学模型,推导得出了次级侧输出电压公式,从而得出 LCC-S 型无线电能耦合传输系统具有恒压输出的特点;结合谐振条件约束,搭建了包含补偿电容、电感等关键参数的数学模型,并通过仿真验证发现了当负载阻抗变化时,输入电流呈现动态调节能力,而输出电压呈现恒压输出的特点。实验样机测试数据证明了系统的整体传输效率大于 90%,由此验证了 LCC-S 谐振补偿设计适用于中压大功率的水下无线电能耦合传输系统的场景应用,后续研究将拓展至电磁场屏蔽、软开关控制技术,进一步提升系统的稳定性。

参考文献

[1] 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱[J]. 科技导报, 2021, 39 (03): 71-79.

- [2] 刘长华,王春晓,王旭,等. 锚定式海洋水体剖面观测技术的研究与应用[J]. 海洋科学, 2019, 43 (12): 139-147.
- [3] 冯迎宾. 海底观测网能源供给方法及故障定位技术研究[D]. 中国科学院大学,2014.
- [4] 金波,张志峰,张锋,等. 一种海底观测网电极切换和维护系统:浙江,CN201410155915.X[P], 2014-07-23.
- [5] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等.无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术,2023,42(2):48-67.
- [6] 王亚晓,王鹏坤. 磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43 (11): 58-65.
- [7] 庄亚杰. 磁耦合谐振无线电能传输系统的拓扑结构研究[D]. 兰州理工大学, 2020.