

化工与机械进展

 SYNERGY
PUBLISHING PTE. LTD.

Volume 3
Issue 08

August 2025

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

化工与机械进展

Volume 3 · Issue 8 · August 2025 · ISSN 3029-2395(Print) 3029-2409(Online)

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

 Google Scholar

 Crossref

 CNKI 中国知网
www.cnki.net

ISSN 3029-2395 08 >

9 773029 239256

中文刊名: 化工与机械进展

ISSN: 3029-2395 (纸质) 3029-2409 (网络)

出版语言: 华文

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

出版社名称: 新加坡协同出版社

Serial Title: Progress in Chemical Engineering and Machinery

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

Language: Chinese

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

Publisher: Synergy Publishing Pte. Ltd.

《化工与机械进展》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明 / Copyright

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

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

Synergy Publishing Pte. Ltd.

电子邮箱 /E-mail: contact@s-p.sg

官方网址 /Official Website: www.s-p.sg

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



期刊概况:

中文刊名: 化工与机械进展

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

出版语言: 华文

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

出版社名称: 新加坡协同出版社

出版格式要求:

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

出刊及存档:

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

作者权益:

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

评审过程:

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

化工与机械进展

Volume 3 Issue 8 August 2025
ISSN 3029-2395 (Print) 3029-2409 (Online)

主 编

竹 涛

Tao Zhu

编 委

蒋 军 Jun Jiang

焦林郁 Linyu Jiao

银凤翔 Fengxiang Yin

胡 焱 Yi Hu

潘 伟 Wei Pan

谢成钢 Chenggang Xie

郭乃信 Naixin Guo

- 1 浅析成品油库中的油气回收技术
/ 刘丹 研究
/ 毛瑞阳 朱宇德
- 4 自动化技术在化工机械中的创新应用与发展趋势
/ 王金宝 57 660MW 超临界汽轮机低压缸排汽压力优化技术研究
/ 廉波
- 7 基于三轴数控铣床的铝合金曲面零件加工工艺优化
研究 60 低密度水泥浆固井技术的探讨
/ 邹天喜 巩红甫 吴亚光 陈宝钦 王宏伟
- 11 炼油厂转动设备全生命周期可靠性优化与故障溯源方
法探讨 63 煤化工气化装置长周期运行维护技术研究
/ 吴梦姣
- 14 市政污水厂双碳管控平台的智能化应用研究
/ 高研 赵磊 张明义 李林 李强 66 油性涂料生产过程中静电危害分析与系统性防控的
研究
/ 倪春荣
- 17 从一个专利审查案例看如何答复专利审查意见
/ 孟树勋 70 优化贮柜布料行车传动系统
/ 李林 江铭 姜黎明 杨遵伟 刘克洋
- 21 火电厂汽轮机振动故障的诊断与处理方法研究
/ 郑祥华 雷犁兵 孙中臣 74 半导体薄膜 CVD 设备腔体流场仿真与工艺均匀性优化
研究
/ 戚艳丽
- 24 火电厂电气一次设备故障检测与维修要点研究
/ 孙中臣 雷犁兵 郑祥华 77 基于逆向工程的摩托车覆盖件设计
/ 付斌
- 27 面向 3D 打印的点阵结构构建及其评价
/ 张明合 80 拟薄水铝石的老化及晶相转变过程研究
/ 郭俊超
- 30 石油储运容器用高强度钢管焊接工艺优化及接头性能
研究 83 基于过程模拟的化工设备节能改造优化策略
/ 张太远
- 33 智能快速测硫仪常见问题分析处理与研究
/ 图雅 庞文娟 陈影 86 不锈钢焊接工艺研究
/ 叶又鑫
- 36 卡尔多炉控制系统优化
/ 田树清 89 煤炭洗选设备智能化运维管理策略研究
/ 朱会刚
- 39 焦化余热回收利用系统优化对综合能耗的影响分析
/ 李维民 92 干气制乙苯装置物耗能耗分析及控制手段
/ 周建龙
- 42 模块化建造技术在高寒地区油气田地面设施中的应
用与挑战分析 95 化工安全风险分级管控与隐患排查机制研究
/ 赵永鑫
- 45 电气自动化设备的安全风险分析与防范策略
/ 袁子惠 98 船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升
/ 聂广宁
- 48 叉车操作过程风险辨识与评价
/ 张喜飞 101 城市燃气管网泄漏风险评估与应急处置技术研究
/ 亚库普江·麦提赛伊迪 马晓辉
- 51 基于农艺农机融合的玉米全程机械化生产模式优化
/ 张永胜 104 基于 CK3M 控制器的 OLED 激光设备的设计与实现
/ 凌步军 朱鹏程 袁明峰
- 54 过程控制系统中现场仪表信号传输的干扰抑制策略
/ 陈人杰 107 数控加工过程中刀具磨损的智能监测与补偿技术研究
/ 陈人杰

- 1 Analysis of oil and gas recovery technology in refined oil depot
/ Dan Liu
- 4 Innovative Application and Development Trend of Automation Technology in Chemical Machinery
/ Jinbao Wang
- 7 Research on Optimization of Processing Technology for Aluminum Alloy Curved Surface Parts Based on Three-axis CNC Milling Machine
/ Yongli Wang Yulong Dai
- 11 Study on reliability optimization and fault traceability of rotating equipment in refinery life cycle
/ Junsu Xing
- 14 Research on the intelligent application of the dual-carbon control platform in municipal wastewater plants
/ Yan Gao Lei Zhao Mingyi Zhang Lin Li Qiang Li
- 17 How to respond to patent examination opinions from a patent examination case
/ Shuxun Meng
- 21 Study on diagnosis and treatment of steam turbine vibration fault in thermal power plant
/ Xianghua Zheng Libing Lei Zhongchen Sun
- 24 Study on fault detection and maintenance of primary electrical equipment in thermal power plant
/ Zhongchen Sun Libing Lei Xianghua Zheng
- 27 Construction and evaluation of lattice structures for 3D printing
/ Minghe Zhang
- 30 Research on Optimization of Welding Processes and Joint Properties of High-Strength Steel Pipes for Petroleum Storage and Transportation Containers
/ Yinsheng Han
- 33 Analysis and Handling of Common Problems with Intelligent Rapid Sulfur Analyzer
/ Ya Tu Wenjuan Pang Ying Chen
- 36 Optimization of Kaldor Furnace Control System
/ Shuqing Tian
- 39 Analysis on the influence of optimization of coking waste heat recovery system on comprehensive energy consumption
/ Weimin Li
- 42 Analysis on application and challenge of modular construction technology in surface facilities of oil and gas fields in alpine regions
/ Shijia Xing
- 45 Safety Risk Analysis and Prevention Strategies for Electrical Automation Equipment
/ Zihui Yuan
- 48 Risk identification and evaluation of forklift operation process
/ Xifei Zhang
- 51 Optimization of whole-process mechanized production mode of corn based on integration of agronomy and agricultural machinery
/ Yongsheng Zhang
- 54 Research on interference suppression strategies for field instrument signal transmission in process control systems
/ Ruiyang Mao Yude Zhu
- 57 Research on exhaust pressure optimization technology of 660MW supercritical steam turbine low-pressure cylinder
/ Lian Bo
- 60 Discussion on low-density cement slurry cementing technology
/ Tianxi Zou Hongpu Gong Yaguang Wu Baoqin Chen Hongwei Wang
- 63 Research on long-term operation and maintenance technology of coal, chemical gas and gasification device
/ Mengjiao Wu
- 66 Research on Static Electricity Hazard Analysis and Systematic Prevention and Control in the Production Process of Oil based Coatings
/ Chunrong Ni
- 70 Optimize the transmission system of the cabinet fabric crane
/ Lin Li Ming Jiang Liming Jiang Zunwei Yang Keyang Liu
- 74 Simulation of Flow Field and Optimization of Process Uniformity in Semiconductor Thin Film CVD Equipment Chamber
/ Yanli Qi
- 77 Design of Motorcycle Covering Parts Based on Reverse Engineering
/ Bin Fu
- 80 Study on aging and crystal phase transformation of pseudo boehmite
/ Junchao Guo
- 83 Optimization strategy of energy saving transformation of chemical equipment based on process simulation
/ Taiyuan Zhang
- 86 Study on welding process of stainless steel
/ Youxin Ye

- 89 Research on intelligent operation and maintenance management strategy of coal washing equipment
/ Huigang Zhu
- 92 Analysis and Control Measures of Material Consumption and Energy Consumption of Dry Gas to Ethylbenzene Unit
/ Jianlong Zhou
- 95 Study on risk classification control and hidden danger investigation mechanism of chemical safety
/ Yongxin Zhao
- 98 Control of residual stresses in ship structure welding and improvement of fatigue life
/ Guangning Nie
- 101 Research on risk assessment and emergency treatment technology of urban gas pipeline leakage
/ Yakupjiang·Maitisaiyidi Xiaohui Ma
- 104 Design and Implementation of OLED Laser Equipment Based on CK3M Controller
/ Bujun Ling Pengcheng Zhu Mingfeng Yuan
- 107 Research on intelligent monitoring and compensation technology of tool wear in CNC machining process
/ Renjie Chen

Analysis of oil and gas recovery technology in refined oil depot

Dan Liu

Sinopec Sales Co., Ltd. Hunan Petroleum Branch, Changsha, Hunan 410000, China

Abstract

Under the current situation of continuous growth in the demand for refined oil products, the issue of oil vapor loss in storage facilities has become increasingly severe. Such losses not only lead to resource waste and compromise management efficiency but also cause environmental pollution. This paper provides a comprehensive analysis of oil vapor recovery technologies in refined oil storage facilities, aiming to enhance management quality and support the sustainable development of petroleum enterprises.

Keywords

refined oil storage facilities; oil vapor recovery; storage facility management

浅析成品油库中的油气回收技术

刘丹

中国石化销售股份有限公司湖南石油分公司, 中国·湖南长沙 410000

摘要

在当前成品油需求持续增长的态势下, 成品油库所产生的油气损耗问题愈发严峻。此类油气损耗不仅会导致油气资源的浪费, 降低成品油库的管理质量, 还会对周围的生态环境产生污染。本文重点针对成品油库中的油气回收技术进行了详细的分析, 旨在提高成品油库管理质量, 为石油企业的进一步发展提供保证, 以供参考。

关键词

成品油库; 油气回收; 油库管理

1 引言

伴随社会经济发展速率的持续提升, 成品油的市场需求亦日益增长。为保证成品油工业的稳定发展, 加强成品油库的建设与管理至关重要。但是, 成品油库在接收、卸载成品油资源过程中产生的蒸发损耗, 却对成品油库的管理质量与管理安全构成了威胁。油气回收技术是现阶段控制油气损耗的有效方法。如何正确利用油气回收技术, 提高成品油库管理质量与安全, 仍需开展更为深入的研究。

2 油气排放的回收的必要性

在成品油库管理过程中, 油气资源的蒸发损耗问题的危害不容忽视。首先, 在装油期间蒸发的油气资源, 会造成油品质量与数量的损失, 使石油企业遭受巨大的经济损失。其次, 从成品油库管理工作中损耗的油气资源, 会挥发到大气环境当中, 引起大气污染问题。最后, 油气资源属于易燃

易爆品。蒸发到大气环境中的油气资源一旦遇到明火, 将有可能发生火灾事故或爆炸事故, 对相关工作人员的身体与健康与安全产生威胁。而加强油气回收技术的应用, 则能够有效降低成品油库管理中的油气损耗及相关危害。

3 成品油库中的油气回收技术

3.1 吸收法

吸收法是非常实用的一种油气回收技术, 在成品油库中的应用非常广泛。这种油气回收技术强调以“相似相溶”为原理, 利用吸收剂内油气混合物溶解度的差异, 将油气资源与其他成分成功分离出来。与其他油气回收技术相比, 吸收法的应用优势在于油气回收工艺简单、适应能力强^[1]。若想利用吸收法实现油气资源的成功回收, 需要对吸收剂进行合理的选择。因为石油蒸汽在进入吸收塔的填料层之后, 会与吸收剂一起进行逆向流动。这样, 绝大多数的石油蒸汽会在喷淋塔, 被溶解为液态汽油。而没有被溶解的石油蒸汽, 将会被再次送入吸附塔, 被再次吸收。

3.2 吸附法

吸附法是现阶段相对成熟的一种油气回收技术, 应用到成品油库中, 可以保证油气资源的回收效率。这种油气回

【作者简介】刘丹(1992-), 女, 中国湖南邵阳人, 硕士, 工程师, 从事油品销售企业库站环保管理, 节能降碳管理研究。

收技术的应用,强调根据油气资源与空气之间的吸附力,和油气与吸附剂之间的吸附力存在明显差异,来成功分离油气资源与空气。若想利用吸附法,成功回收蒸发到大气环境中的油气资源,需要对吸附剂的选择予以高度的重视。目前,常用的吸附剂主要有活性炭、沸石分子筛、金属有机骨架材料和吸附树脂等几种^[2]。其中,活性炭吸附剂对于油气资源的吸附效果最好,且油气资源回收操作极为便捷,回收设备维护极为简单。但是,若要保证油气资源的吸附效果,则需定期更换吸附剂,并对吸附设备进行有效的维护。但这,又会使石油企业在日常运营过程中承担更多的经济压力。

3.3 冷凝法

冷凝法也是广泛应用于成品油库中的一种油气回收技术。这种油气回收技术的应用需要在换热器的支持下,将挥发油气资源与低温介质进行热交换处理。这样,就会大幅度降低挥发油气资源的温度,并使气态的油气资源转化为液态。同时,将没有冷凝的尾气排放到大气环境当中,实现成品油的成功回收^[3]。站在油气回收角度,制冷温度越低,油气的回收效果也就越好,但相应的能量消耗也就越多。所以,在应用冷凝法进行油气资源回收的时候,不仅要同时对油气回收效益予以重点考虑,还要对制冷成本进行有效分析。

3.4 膜分离法

一般情况下,已经挥发的油气资源中存在的烃类分子大小,与空气分子并不一样。受到外力压力后,在特定膜中的渗透率也会存在差异。根据这一原理,就可以利用膜分离法,将烃类分子与空气分子成功分离开。在应用膜分离法回收油气资源的时候,为了保证油气回收效果,需要在进入膜分离之前,先对挥发性混合气进行加压处理和冷凝处理,然后再借助压差让油气分子优先通过薄膜,使油气资源成功的脱离出混合气。

4 成品油库中的油气回收技术的常见应用形式

4.1 冷凝法与吸附法组合应用

冷凝法强调在低温环境中将气态油气转化为液态油气,并在此基础上以一种相对安全的方式实现油气回收。成品油库的建设规模越大,每天蒸发到大气环境中的油气资源量就越多。为了将成品油库中蒸发到大气环境中的油气资源浓度控制到国家允许范围内,可以采用深低温配置^[4]。同时,为了控制油气回收过程中的能量消耗,还需要将冷凝法与吸附法进行组合应用,借助两种油气回收技术的优势联合,加强油气回收成本的控制。根据实践,将这两种油气回收技术组合应用在一起,可以明显降低油气回收成本,提高石油企业的经济效益。而且,挥发油气长时间处于低温环境当中,就不会因为高浓度油气压缩而发生火灾爆炸等安全事故,油气回收过程更加安全。

4.2 吸附法与吸收法组合应用

将吸附法与吸收法组合在一起,应用到成品油库的油

气回收过程中,需要利用吸附罐交替运行。即先对挥发的油气资源进行吸附、解吸富集处理,再进行贫油吸收,使之形成富油,并储存到储罐当中^[5]。当石油企业处于间歇运行与连续运行相结合的工况时,就建议利用吸附法与吸收法相结合的方式,对挥发油气进行高效率回收,以使成品油库日常运转过程中排放出的油气浓度处于国家标准范围内。

4.3 吸收法与冷凝法组合应用

将吸收法与冷凝法组合在一起,也可以应用到成品油库的油气回收过程中。但是,这种组合应用方法的应用难以接受吸收塔的高度和大体积。而且,在处理量与塔高等因素的影响下,吸收尾气的达标率略有降低。要想确保气体的出口浓度符合国家相关部门制定的标准,就必须要对吸收塔的高度进行优化设计。

4.4 吸收法与膜分离法组合应用

将吸收法与膜分离法组合在一起,在油气回收中的应用非常广泛。与其他油气回收组合应用方法相比,吸收法与膜分离法的组合应用可以利用汽油本身,对汽油油气进行回收,且回收工艺方面表现出了工艺成型便捷、处理量弹性大等优势。但是,最终的油气回收效果也受到膜材料本身性能的影响。

4.5 吸收法与冷凝法与吸附法组合应用

某些成品油库的建设规模非常大,日常运营过程中产生的油气损耗也比较严重,单纯使用使用两种油气回收技术,根本不能满足成品油库的油气回收需求。再加上油气回收设备无法维持长时间运行状态,需要石油企业承担较大的能量消耗成本和设备维修成本。为了保证油气回收的高效性、经济性与安全性,可以采用多级油气回收工艺,将吸收法、冷凝法和吸附法组合在一起进行应用。

5 成品油库中的油气回收技术应用注意事项

5.1 合理选择油气回收技术

若要将油气回收技术科学且合理地应用于成品油库,需精准掌握每种油气回收技术的应用优势与劣势,并结合实际状况,甄选适宜的油气回收技术,同时做出是否将两种及以上油气回收技术进行组合应用的决策。表1为各种油气回收技术的应用比较。表2为各种油气回收技术组合应用比较。

表 1: 各种油气回收技术的应用比较

主要油气回收技术	应用优势	应用劣势
吸收法	操作容易,适用性强,安全有保证	对油气浓度有限制,吸收容量有限
吸附法	油气回收率高,油气排放浓度低,能耗小	油气回收成本高,容易形成高温环境,油气回收风险较大
膜分离法	技术先进,油气回收率高,占地面积小	技术瓶颈明显,膜生产与膜寿命存在限制
冷凝法	易操作,安全有保证	能耗大,油气回收率低,设备成本高

表 2: 各种油气回收技术组合应用比较

油气回收技术组合应用法	应用优势	应用劣势
吸收法与冷凝法组合应用	油气回收系统运行稳定, 后续处理难度小	能耗高、存在二次污染风险
吸收法与膜分离法组合应用	油气回收效率高, 可应对复杂油气成分, 具有较强的灵活性和可扩展性	油气回收设备较复杂, 膜的性能稳定性不确定, 且存在二次污染
冷凝法与吸附法组合应用	安全有保证, 能够满足高浓度油气的回收需求	能耗大, 设备运行维护要求苛刻
吸附法与吸收法组合应用	废气净化效率高。吸收剂采用罐区物料, 投资小, 能耗小	需要使用吸收剂, 吸收剂需要定期更换, 油气回收工艺参数控制要求高, 自动化水平高
吸收法、冷凝法与吸附法组合应用	安全有保证, 可以实现长期运行, 技术可塑性强	油气回收成本高, 设备运行维护复杂

5.2 优化油气回收系统的设计

优化油气回收系统的设计, 也有利于油气回收技术在成品油库中的应用。在油气回收系统的优化设计中, 需要注意以下几方面。首先, 需要明确油气回收系统是一个有机的整体, 在对油气回收系统进行优化设计的时候, 需要对成品油库的建设规模、油气回收系统的设计位置等问题进行重点考虑^[6]。其次, 在正式开始油气回收系统的设计之前, 需要对整个成品油库进行全方位的考察, 并在此基础上进行油气回收系统的优化设计, 确保油气回收系统与成品油库的本身运行系统相协调。

5.3 加强油气回收系统的密封管理

加强油气回收系统的密封管理, 也是将油气回收技术成功应用到成品油库中的关键, 主要作用在于提升油气回收系统硬性性能, 防止出现油气资源泄露等问题, 对周围生态环境产生污染, 对工作人员的身体与健康与生命安全产生威胁。所以, 在应用油气回收技术的时候, 不仅要加强油气回收系统的优化设计, 还需要对油气回收系统的密封性能进行重点管理与控制^[7]。首先, 对油气回收系统中使用到的各种密封部件进行定期检查, 及时更换已经老化的密封部件, 并将性能差的密封材料换成性能更好的密封材料。其次, 加强油气浓度的监测, 及时发现油气回收技术应用过程中的泄露问题, 并采取针对性的应对措施。最后, 对油气回收技术的应用密封性能进行定期评估, 并采取针对性的密封性能维护措施, 降低油气回收技术的应用成本, 提高油气回收技术的应用效果。

6 结语

综上所述, 在成品油库管理工作中, 加强油气回收技术的应用至关重要, 不仅可以有效减少油气资源的浪费, 还能显著降低环境污染风险, 保障工作人员的安全健康, 提升整体运营效率。目前, 常用的油气回收技术非常多, 且各有各的应用优势与应用劣势。只有合理选择油气回收技术, 优化油气回收系统的设计, 并加强油气回收系统的密封管理, 才能够充分发挥油气回收技术的综合效益, 确保成品油库的高效、安全和环保运行, 实现资源利用与环境保护的双赢局面。

参考文献

- [1] 季节. 油气回收技术研究及在某成品油库改造中的应用[J]. 广州化工, 2023, 51(12): 35-37, 41.
- [2] 陈楠楠, 王娜娜. 油气回收技术的发展与应用[J]. 机械工程与自动化, 2024(3): 213-214.
- [3] 胡艳辉, 胡剑. 成品油库吸附式油气回收系统的设计与管理研究[J]. 清洗世界, 2021, 37(2): 87-88.
- [4] 曾豪能. 成品油库油气回收技术改造的探索与研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(7): 163-165.
- [5] 王智. 成品油库油气回收技术改造[J]. 现代工程科技, 2022, 1(12): 70-73, 77.
- [6] 母莉娜, 张柳, 方海明. 油气回收技术研究进展[J]. 能源研究与管理, 2025, 17(2): 146-155.
- [7] 黄梅梅. 油气回收与达标治理技术分析[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(6): 117-119.

Innovative Application and Development Trend of Automation Technology in Chemical Machinery

Jinbao Wang

Inner Mongolia University of Technology, Ordos, Inner Mongolia, 017200, China

Abstract

With the deepening of Industry 4.0, the integration of chemical machinery industry and automation technology has become the core driving force for industry transformation, upgrading and efficiency improvement. This article systematically reviews the current application status of automation technology in the field of chemical machinery, analyzes the implementation paths of key technologies such as PID control, distributed control system (DCS), and intelligent sensors in the chemical machinery industry, and explores the significant advantages of automation technology in improving production efficiency, ensuring safety production, and optimizing product quality. Based on the bottleneck of industry development, this paper analyzes the challenges currently faced such as technology integration, cost control, and talent shortage, and looks forward to future development trends from three dimensions: intelligence, digitization, and greening. Research has shown that the deep integration of chemical machinery and automation technology is not only the key to enhancing the competitiveness of enterprises, but also an inevitable choice to promote the sustainable development of the chemical industry.

Keywords

chemical machinery; Automation technology; Intelligent control; Safety production; development trend

自动化技术在化工机械中的创新应用与发展趋势

王金宝

内蒙古工业大学, 中国·内蒙古鄂尔多斯 017200

摘要

随着工业4.0的深入推进, 化工机械行业与自动化技术的融合成为行业转型升级和效率提升的核心驱动力。本文系统梳理了自动化技术在化工机械领域的应用现状, 剖析了自动化技术: PID控制、分布式控制系统(DCS)、智能传感器等关键技术的在化工机械行业的实现路径, 探讨了自动化技术在提升生产效率、保障安全生产、优化产品质量等方面的显著优势。结合行业发展瓶颈, 分析了当前面临的技术整合、成本控制及人才短缺等挑战, 并从智能化、数字化、绿色化三个维度展望了未来发展趋势。研究表明, 化工机械与自动化技术的深度融合不仅是提升企业竞争力的关键, 更是推动化工行业可持续发展的必然选择。

关键词

化工机械; 自动化技术; 智能控制; 安全生产; 发展趋势

1 引言

化工行业是国民经济重要支柱, 生产具高温、高压、有毒有害特点, 对生产效率和安全性要求严苛。传统化工机械生产依赖人工, 存在效率低、误差率高和安全隐患问题。随信息技术等发展, 自动化技术渗透化工机械全流程, 成破解行业困境关键 [2]。从单机自动化到智能工厂, 其应用从简单控制到系统集成跨越发展。当前, 化工企业引入DCS、PID、智能传感器等实现精准监测、智能调控和安全隐患预警。但因市场需求多元和环保要求提高, 应用仍面临技术标准不统一、兼容性差、成本高问题。在此背景下, 梳理应

用现状、提炼技术路径、分析挑战与趋势, 对化工行业智能化转型有重要意义 [3]。

2 自动化技术在化工机械中的应用现状

2.1 生产流程自动化

自动化技术广泛应用于化工机械生产全流程, 涵盖原料采集、加工、产品存储与运输, 实现连续化、集约化生产。在原料处理环节, 借助自动化输送带、智能配料系统等精准控制原料配比与输送速度, 如某化工企业用高精度称重传感器与流量计, 使原料利用率提升超 10% [4]。加工环节, 应用数控机床、工业机器人等实现切割、焊接、装配等工序自动化, 某案例引入 6 轴工业机器人后, 生产效率提高 30%, 人工成本降低 50%。产品检测与包装环节, 自动化优

【作者简介】王金宝 (1992-), 男, 中国内蒙古人, 本科, 从事机械设计制造及其自动化研究。

势显著,自动化检测设备利用机器视觉与激光测量技术,检测效率比人工提升超5倍;自动化包装线结合机器人与传送带,大幅减少包装人工干预。

2.2 设备监控与故障诊断

实时监控与故障预警是化工机械自动化核心应用场景。在设备部署温度、压力、振动等传感器,结合数据采集分析系统,可实时掌握设备运行状态。如某企业自动监控系统用高精度传感器对关键设备24小时监测,参数超阈值时自动预警并调整工艺参数。故障诊断技术基于大数据分析机器学习算法,对比设备历史与实时数据,实现故障提前预测。例如某化工企业预测性维护系统用振动传感器监测设备,结合故障模式库,降低设备故障率20%,缩短维修时间30%。远程诊断技术应用使技术人员能通过AR眼镜远程指导维修,提升故障处理效率[4]。

2.3 安全控制系统

化工生产风险高,对安全控制要求高,自动化技术应用提高了生产安全性。紧急停车系统(ESD)整合传感器与逻辑控制器,异常时可迅速关停设备,避免事故扩大。如某煤化工企业ESD系统响应仅15ms,成功避免管道泄漏爆炸事故[7]。安全仪表系统(SIS)采用三冗余(TMR)架构,有容错控制与快速响应能力,能为关键设备提供安全保障。危险与可操作性分析(HAZOP)技术与自动化系统结合,模拟生产偏差与风险场景,为安全管控提供数据支持。某案例显示,应用HAZOP分析后,安全事故发生率降低70%[1]。

3 自动化技术在化工机械中的关键技术

3.1 控制算法与系统

比例积分微分控制(PID)是化工机械自动化的基础技术,目前80%以上的控制器采用PID类型。基于分布式控制系统(DCS)的PID性能评测与优化系统,可实现对控制参数的实时调整与优化,某系统通过建立三级评测模型,使装置运行稳定性提升20%[2]。先进控制算法如模型预测控制(MPC)、模糊控制等,进一步提升了复杂化工过程的控制精度,在精细化学品生产中,产品纯度可提高1%-2%[5]。

3.2 传感器与网络通信技术

传感器是自动化系统的“感知器官”,其精度与稳定性影响控制效果。在环境监测中,温湿度、气体传感器可监测有毒气体浓度;在设备控制中,位移、力传感器可操控机械臂、阀门等设备。某企业激光位移传感器测量精度达 $\pm 0.01\text{mm}$,确保装配工序一致性[3]。而网络通信技术为数据传输与远程控制提供支撑,工业以太网、物联网(IoT)技术实现设备与控制系统实时互联,5G技术的低延迟特性让远程监控与智能决策成为可能。

3.3 机器人与智能装备

工业机器人在化工机械中的应用从简单搬运拓展到复杂操作。焊接机器人利用电弧跟踪技术,实现管道、容器高

精度焊接,焊缝合格率达99.5%;涂装机器人采用静电喷涂技术,使涂料利用率提升30%,改善涂层厚度均匀性。协作机器人实现人机协同作业,在危险环境替代人工完成投料、取样等操作,降低人员暴露风险。智能仓储与物流装备是自动化技术的重要应用。自动化立体仓库借助堆垛机与智能调度系统,实现物料自动存取与库存管理,提升空间利用率50%;AGV替代传统叉车,完成车间内物料柔性运输,使物流效率提升40%。

4 自动化技术应用的趋势分析

4.1 提升生产效率与质量

自动化技术通过减少人工干预、优化生产流程,显著提升了化工机械的生产效率。自动化流水线可实现24小时不间断生产,某案例显示,其生产周期较传统模式缩短40%;同时精确的程序控制使产品质量一致性大幅提升,某化工产品的合格率从85%提高至99%。此外自动化系统的快速响应能力,可使企业更灵活地应对市场需求变化,缩短产品交付周期[3]。

4.2 保障生产安全

化工生产的高风险性因自动化技术的应用得到有效缓解。通过实时监控、自动预警与紧急停车系统,可以及时发现并处理安全隐患,减少事故发生率。某统计数据显示,应用自动化安全系统的企业,工伤事故率降低60%以上[6]。

5 自动化技术应用的趋势分析

5.1 技术整合难度大

化工机械自动化涉及控制算法、传感器、网络通信等多领域技术,系统整合难度较高。不同厂商的设备接口不统一、通信协议不兼容等问题,导致“信息孤岛”现象普遍存在[2]。解决策略涵盖以下几个方面:一是建立行业统一的技术标准,以此推动设备与系统的兼容性设计;二是采用模块化架构,借助中间件实现不同系统之间的对接;三是引入工业互联网平台,达成数据的集中管理与共享[3]。

5.2 成本投入过高

化工生产所具有的高风险性,因自动化技术的运用而得到了有效的缓解。依托实时监控、自动预警以及紧急停车系统,能够及时察觉并处理安全隐患,从而降低事故的发生概率。有统计数据表明,应用了自动化安全系统的企业,其工伤事故率下降幅度超过60%。机器人替代人工在高温、高压、有毒环境中作业,从根本上避免了人员伤亡风险。

6 自动化技术应用的趋势分析

6.1 技术整合难度大

人工智能技术融入将推动化工机械自动化向更高层次发展。机器学习算法可通过分析历史数据预测反应转化率等优化生产参数,实现工艺自优化;自主决策系统能依据市场需求自动调节生产计划,增强企业柔性制造实力。智能机器

人环境适应能力将进一步提升，可独立完成复杂装配、检测等工作，降低对人工编程的依赖。

6.2 成本投入过高

数字孪生技术有望成为化工机械自动化领域的关键发展方向。借助搭建设备及生产过程的数字模型，能够达成全生命周期的虚拟仿真与优化工作。在设计阶段，数字孪生可模拟设备运行状态，提前发现设计缺陷；在生产阶段，通过虚实交互可实时调整工艺参数，提升生产效率 [5]。

7 结语

在化工行业发展中，自动化技术与化工机械深度融合是必然趋势。此融合优势突出，能提升生产效率、保障生产安全。但目前仍面临技术整合难、前期投入高、专业人才匮乏等挑战。随着智能化、数字化和绿色化技术发展，化工机械自动化将迈向更先进完善。企业提升技术创新能力、培养专业人才，政府完善政策扶持体系和行业标准。政企协

同发力，才能推动自动化技术在化工机械领域的应用。通过多方努力，化工行业将从“传统制造”向“智能制造”转型升级，为国民经济可持续发展提供支撑。

参考文献

- [1] 邓金艳. 化工机械设备与电气自动化控制的有机融合探讨[J]. 模具制造,2024,24(8):168 - 170.
- [2] 袁聆峰. 化工机械设备与电气自动化控制的有机融合[J]. 四川化工,2024,27(1):58 - 60.
- [3] 郝瑞卿,任谦. 解析化工机械设备与电气自动化控制的有机结合[J]. 粘接,2021,46(5):119 - 123.
- [4] 李西锋. 机械设备自动化技术在化工机械制造中的应用[J]. 化工自动化及仪表,2024,51(4):571 - 576.
- [5] 朱荣荣. 机械自动化技术在化工安全生产中的应用研究[J]. 当代化工研究,2023(6):108 - 110.
- [6] 代智毅. 煤化工安全生产中机械自动化技术的应用[J]. 今日自动化,2022(9):98 - 100.

Research on Optimization of Processing Technology for Aluminum Alloy Curved Surface Parts Based on Three-axis CNC Milling Machine

Yongli Wang Yulong Dai

School of Intelligent Manufacturing, Sichuan Vocational and Technical College of Mechanical and Electrical Engineering (Pangang Party School), Panzhihua, Sichuan, 617000, China

Abstract

This paper analyzes the characteristics, structural requirements and process routes of curved surface parts, discusses the technical features and process schemes of curved surface parts processing, optimizes the tool path and cutting parameters on CAM software, and conducts actual processing verification on a three-axis CNC milling machine to produce parts that meet the structural and precision requirements of the parts. With numerical control technology as the core support, combined with tool dynamics optimization, path planning and digital tools, efficient and high-precision processing can be achieved. In the future, it is necessary to further explore adaptive processing strategies and intelligent parameter adjustment technologies to meet the more complex requirements of curved surface manufacturing. Formulating and implementing reasonable processing techniques is an important means to enhance the efficiency and quality in the numerical control machining process. The data analysis and operation process analysis in the text are not comprehensive.

Keywords

Cutting method; parameter optimization; milling processing

基于三轴数控铣床的铝合金曲面零件加工工艺优化研究

王永力 代玉龙

四川机电职业技术学院(攀钢党校)智能制造学院, 中国·四川 攀枝花 617000

摘要

针对曲面零件的特点、结构要求及工艺路线等进行分析,讨论曲面零件加工技术特点和工艺方案,在CAM软件上对走刀路线和切削参数进行优化,在三轴数控铣床上进行实际加工验证,制作出满足零件结构及精度要求的零件。数控技术为核心支撑,结合刀具动力学优化、路径规划与数字化工具,可实现高效高精度加工。未来需进一步探索自适应加工策略与智能参数调整技术,以应对更复杂的曲面制造需求。制定并实施合理的加工工艺是提升数控加工过程中效率与质量的重要手段。文中的数据分析和操作过程解析并非面面俱到。

关键词

切削方法; 参数优化; 铣削加工

1 引言

1.1 零件实例

由于圆滑的设计有很多的优点,工业上许多的零件设计都会包含曲面,而曲面加工相对难度要大一些^[1]。在机械加工领域,手工编程加工曲面效率低且易出错,因此使用CAM软件编程优化刀轨路径,模拟加工过程,预测加工过程中的问题并及时调整从而节省时间和成本。本文从装夹工艺、切削参数和加工路径规划等方面提出优化策略,通过加工工艺方案分析及判定,择优使用方案,完成零件的制作并达标。

【作者简介】王永力(1990-),男,中国四川绵阳人,高级技师,从事数控加工等课程的教学工作研究。

1.2 结构分析

图一所示为一个等比例缩小的类齿轮箱上盖的零件,壁厚比例适中,不属于薄壁件。外表面有四个用于与齿轮箱体相配合的螺钉孔,包含两个台阶孔,四个端盖配合孔,螺钉孔与内腔相较整体布局呈不对称状态。整体规整简单无异形结构,但相切曲面较多,可供选择的装夹位置较少。

1.3 精度要求

零件底面有平面度 $\leq 0.04\text{mm}$ 的要求,内腔表面粗糙度为 $\text{Ra}3.2\mu\text{m}$,其余表面粗糙度为 $\text{Ra}6.3\mu\text{m}$,未注尺寸公差按GB/T 1804-2000标准执行,精度要求合理。

1.4 设备选择

该零件为箱体类零件,可采用铣削和磨削方法完成零

(4) 钳工工序使用整形锉对所有的锐边进行倒棱, 并使用游标卡尺和千分尺检验尺寸公差和技术要求是否合格。

根据所使用的刀具、材料特性和机床性能, 优化后的工艺参数见表二。

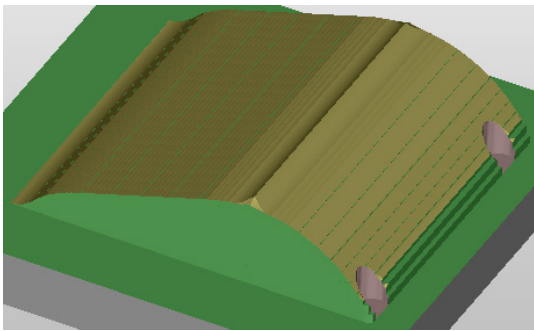
表二 工艺优化后的切削参数

刀具	D10	D6	D6R3	D2	
转速 (r/min)	S6000	S6000	S6000	S6000	
进给 (mm/min)	F3500/F1000	F2500	F1000	F450	
步距 (mm)	XY	2	1	0.1	/
	Z	20	0.5	0.3	0.1
余量 (mm)	侧面	0.3	0.2	0	0
	底面	0.3	0.2	0	0

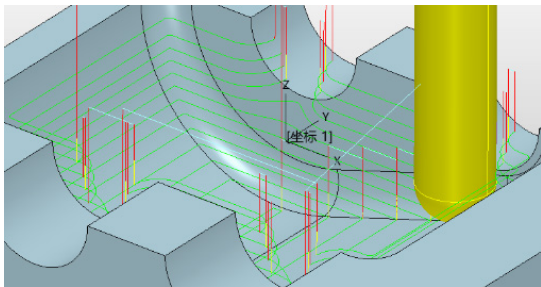
5 工艺比较

5.1 方案一

先铣出一平面作为基准来装夹定位, 以确保侧面与下底面的垂直度, 翻面装夹定位依靠垫片找平, 其平行度依赖于虎钳夹持顶面精度和垫片精度。如图五、六所示, 上曲面、内腔与其四个端盖配合半圆面与内腔曲面因使用优化前工艺的等高线切削方法, 导致表面残留高度较高, 无法满足图纸要求。使用等高线切削方法生成的刀轨在加工时, 球头铣刀处于贴合曲面逐层下刀的状态。多用到球头铣刀以提高刀具与曲面的拟合度, 这时在选择进刀方式时应避免垂直进刀。



图五 等高线仿真切削效果 (其一)

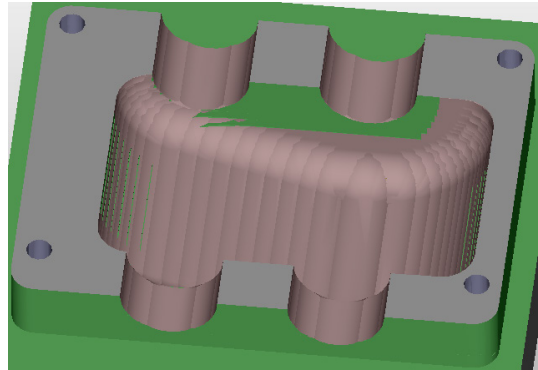


图六 等高线仿真切削效果 (其二)

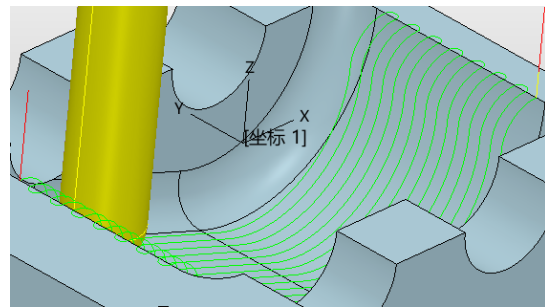
5.2 方案二

与方案一类似, 先加工出零件底平面使得翻面装夹时有了现成的精基准定位平面, 底面垫片支承与虎钳夹持限制

了零件的四个方向的自由度, 装夹可靠, 从而保证了上曲面与下底面的平行度。两次对刀找正即可完成零件加工。平行铣削方法生成的刀轨直接沿曲面曲率方向进行切削。如图七、八所示, 后者相比前者可以在使用相同刀具的前提下, 增大切削步距且依然能够保证表面质量与尺寸精度。最为重要的是切削参数在 CAM 辅助下, 最大限度发挥机床性能。



图七 等高线切削刀轨



图八 平行铣削刀轨

5.3 零件上曲面部分加工程序

```

N1 G40 G17 G94 G49 G90 G21 G54
N2 G91 G28 Z0.0
N3 G28 X0.0 Y0.0
N4 S6000
N5 M03
N6 G05.1 Q1
N7 M08
N8 S6000
N9 G05.1 Q1
N10 G90 G00 X15.191 Y-17.599
N11 Z20.0
N12 Z4.988
N13 G01 Z2.988 F500.0
N14 X15.187 Y-17.593 Z2.834 F1500.0
N15 X15.175 Y-17.588 Z2.681
N16 X15.156 Y-17.583 Z2.528
N17 X15.128 Y-17.578 Z2.376
N18 X15.093 Y-17.573 Z2.226
    
```

- N19 X15.05 Y-17.568 Z2.078
- N20 X14.999 Y-17.563 Z1.932
- N21 X14.941 Y-17.558 Z1.79
- N22 X14.876 Y-17.554 Z1.65
- N23 X14.803 Y-17.549 Z1.514
- N24 X14.724 Y-17.545 Z1.382
- N25 X14.638 Y-17.54 Z1.254
- N26 X14.546 Y-17.536 Z1.13
- N27 X14.447 Y-17.532 Z1.012
- N28 X14.342 Y-17.529 Z.899
- N29 X14.232 Y-17.525 Z.791

5.4 时间与质量

加工效率方面的差距见图九、十，可见使用合理的编程方法和工艺参数对降本增效有着重要作用。经比较，方案二工艺简单，加工效率相对高，可以满足精度要求，如图八所示，由于采用了更加合理的切削参数和平行铣削精加工方法，加工效率得到提升，表面光洁无残留余量，满足了图纸要求。因此采用方案二进行该零件的铣削加工。

工序		
>	VoluMill3x 1	✓
>	VoluMill3x 2	✓
>	二维偏移粗加工 2	✓
>	等高线切削 1	✓
>	斜面切削 2	✓
>	VoluMill3x 3	✓
>	VoluMill3x 4	✓
>	二维偏移粗加工 1	✓
>	等高线切削 2	✓
>	斜面切削 1	✓
总时间: 89.66m		

图九工艺优化前加工总时间

工序		
>	VoluMill3x 1	✓
>	VoluMill3x 2	✓
>	二维偏移粗加工 1	✓
>	平行铣削 1	✓
>	斜面切削 1	✓
>	VoluMill3x 3	✓
>	VoluMill3x 4	✓
>	二维偏移粗加工 2	✓
>	平行铣削 2	✓
>	斜面切削 2	✓
总时间: 26.47m		

图十工艺优化后加工总时间

6 过程优化要点

6.1 技术辅助

如图十所示，通过 CAM 软件进行虚拟仿真加工，优化切削参数和加工路径，可以减少空行程时间、切削过程中的残留高度，并能够更精确地控制刀具的运动轨迹，从而显著提高曲面零件的加工效率和精度^[4]。



图十 CAM 仿真加工优势

6.2 粗精基准的选择

选择零件底面作为粗基准，因为底面相对平整，且与其他主要加工表面有一定的位置关系。采用互为基准的方式将已加工表面作为精基准，如此减少定位误差。

6.3 整体工艺

在实际生产当中提倡采用工序集中方法，可以减少零件的装夹次数，有利于保证加工精度，提高生产效率。并通过优化切削参数，有目的性的分配粗、精加工节拍，以减少进给时间，降低加工成本。且选用何种材料、设备、刀具、夹具以及 CAM 软件来进行加工都是影响加工质量与效率的主要因素，需根据实际情况去系统的考虑^[5]。

7 结语

曲面加工的合格需要使用球头铣刀和使残留高度最小化的走刀路线。文中的数据分析和操作过程解析并非面面俱到。希望此文能为学习者、从业者带来启发。

参考文献

- [1] 彭发金.加工中心高速切削技术在复杂曲面加工中的应用探索[J].产业创新研究,2024,(18).
- [2] 李丹.基于五轴数控机床的复杂曲面加工研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(10).
- [3] 华茂发.数控机床加工工艺[M].机械工业出版社,2000.
- [4] 李蓓华.铣工(数控铣工). 三级[M].中国劳动社会保障出版社,2019.
- [5] 廖德建,王令其,顾雪艳.CAM中曲面加工方法的选择[J].机械设计与制造,2001,(05).

Study on reliability optimization and fault traceability of rotating equipment in refinery life cycle

Junsu Xing

Cangzhou Refinery, Hebei Province, Cangzhou, Hebei, 061000, China

Abstract

In oil refining facilities, rotating equipment such as pumps, compressors, turbines, and fans, which operate under high loads and frequent operational fluctuations, have become critical weak points in production systems. Traditional maintenance models dominated by “post-failure repairs and experience-based approaches” struggle to meet the triple constraints of enhanced safety, reduced carbon emissions, and cost efficiency. To address this challenge, this study innovatively establishes a reliability assessment framework covering the entire lifecycle from “design, manufacturing, installation, operation, maintenance, to decommissioning.” Additionally, it proposes a fault traceability technology integrating multi-source industrial big data, mechanistic models, and knowledge graphs. Through practical implementation at a million-ton-per-day refinery, this framework and methodology have been validated to improve the reliability of rotating equipment, ensuring safe, stable, and efficient refining operations. Key words: refinery; rotating equipment; reliability engineering; fault traceability; whole life cycle

炼油厂转动设备全生命周期可靠性优化与故障溯源方法探讨

邢军锁

河北省沧州炼油厂, 中国 · 河北 沧州 061000

摘要

在炼油装置里, 泵、压缩机、透平、风机等转动设备, 因长期处于高运行负荷且工况波动频繁的状况, 成了生产系统的薄弱之处。传统运维模式以“事后检修、经验主导”为主, 难以满足当下高安全性、低碳排放以及降本增效这三重约束条件。为解决这一问题, 本文创新性地构建了涵盖“设计-制造-安装-运行-检修-退役”全链条的可靠性评估框架。同时, 提出了一条融合多源工业大数据、机理模型与知识图谱的故障溯源技术路线。通过将该框架和技术路线应用于某千万吨级炼油厂的实际生产中, 进行实践验证, 旨在提升炼油装置转动设备的可靠性, 保障炼油生产安全、稳定、高效运行。

关键词

炼油厂; 转动设备; 可靠性工程; 故障溯源; 全生命周期

1 引言

石油炼制企业在保障装置连续稳定运行的同时, 还需应对能源成本上升、碳排放约束趋严与市场波动等多重挑战。统计显示, 转动设备基金属损坏、润滑劣化及过程扰动引起的非计划停机占炼油厂总停机时间的 60% 以上, 其中 70% 可归因于前期设计与安装阶段的隐患被延迟暴露。传统基于定期检修的维护策略对潜在失效的感知不足, 往往导致“过维修或欠维修”并存, 形成安全与经济双重压力。近年随着传感器网络、云边协同与人工智能的快速发展, 面向设备全生命周期的可靠性管理理念逐渐从理论走向落地。然而, 如何在转动设备复杂耦合工况与高噪声数据环境下实现精准溯源、如何将优化策略与现有管理体系无缝对接, 依旧缺乏系统化研究。本文拟从理论框架、模型方法、工程应

用与价值评估四个层面展开探讨, 以期为炼油行业提供可操作、可迭代的解决方案。

2 全生命周期可靠性理论框架

2.1 概念界定与特征阐释

全生命周期可靠性 (LCR) 聚焦于设备或系统在整个生命周期内, 涵盖需求定义、设计、制造、安装、运行、检修、退役等各阶段, 维持预期功能、规避失效, 并在资源环境限制下达成性能最优的能力。它突破了传统仅聚焦运行期稳定性评估的局限, 将可靠性视为贯穿不同时间段与系统环节的综合属性。

LCR 具有显著的核心特征。动态性方面, 设备使用中性能会因时间、载荷、环境条件等因素改变, 呈现出性能退化速率的非线性变化。所以, 可靠性评估需具备实时数据采集、状态更新以及模型重构的能力, 以精准掌握设备状态。

阶段耦合性上, 生命周期各阶段紧密相连、互为因果^[1]。前期设计选型与制造精度对后期维护频率、维修成本甚至设

【作者简介】邢军锁 (1967-), 男, 中国河北石家庄人, 工程师, 从事设备基础知识研究。

备报废时间影响重大,像材料选择和连接结构的合理性就直接影响着设备的疲劳寿命。

经济-环境双目标导向也是其重要特征。在追求可靠性提升时,LCR注重降低能耗、减少碳排放、提高可再利用率等绿色目标,力求实现经济性与可持续性的平衡发展,为设备或系统的全生命周期管理提供全面且科学的指引。

2.2 生命周期阶段对可靠性的影响机理

LCR的系统性要求在设备或系统全生命周期的每个节点,都需明确可靠性影响路径。在需求与设计阶段,这是决定设备固有可靠性的核心环节。此阶段会界定系统的工作环境边界、故障容忍阈值以及设计裕度,对全生命周期失效风险的影响超过50%。比如航空发动机压气机叶片,若设计时未考虑应力集中部位的局部强化,服役时就极易因疲劳裂纹而提前失效。制造与安装阶段同样关键。加工精度、公差控制、热处理一致性等制造质量因素,对初始可靠性起着决定性作用,约占故障贡献率的30%。安装过程中,若连接件预紧力不合适或润滑措施不到位,也会埋下早期故障隐患。运行与检修阶段,可靠性表现受负载波动、工况稳定性、运维策略等多种因素影响。维护周期设置不合理、备件质量有偏差,都可能引发二次损伤^[2]。而且,运行期间对失效机理的识别与预测能力,会影响剩余寿命评估的准确性。退役与再制造阶段,再制造既能节省原材料和能源,又能通过智能检测与功能恢复技术延长关键部件寿命。合理的退役策略有助于实现绿色闭环管理,提升整个系统的环境可靠性。

2.3 指标体系构建与权重分配

为了实现LCR的可量化评价,本文基于国际标准(如IEC-60300《可靠性管理体系》、ISO-55000《资产管理》)与行业实践,构建了多维度的LCR指标体系。该体系涵盖以下五个一级指标:

固有可靠性(R_0):衡量设备在理想状态下的不间断运行能力。

可维修性(Mttr):指设备出现故障后修复所需的平均时间,反映维护便捷性。

可用度(A):代表设备在任意时刻可用的概率,是运行效率的重要表征。

安全风险系数(Risk_S):结合失效模式严重性与频率,评估对人员、设备及环境的潜在风险。

碳排放当量(CEQ):综合制造、使用与报废过程中产生的碳排放,体现环境影响。

在二级指标设置方面,涵盖设计裕度、失效率、失效模式严重性指数(FMECA)、运行能效比、检修间隔、生命周期碳强度等19个指标,具有较强的可操作性与行业适配性。

权重分配采用层次分析法(AHP)结合德尔菲法专家打分,并经现场历史失效数据校正,最终得出各阶段对LCR贡献的定量比重:

设计阶段:0.25,重在构型选择与性能冗余;

制造阶段:0.15,强调精度控制与一致性;

安装阶段:0.10,关注初始配合精度与无损接入;

运行阶段:0.30,考虑状态监测与风险应对;

检修阶段:0.12,体现备件质量与策略合理性;

退役阶段:0.08,量化可再利用性与环境友好性。

该权重体系体现了以运行安全与节能环保为核心的评价导向,既保留了通用可靠性体系的可比性,又引入绿色指标响应碳中和诉求。

3 基于大数据的故障溯源模型

3.1 数据采集与治理策略

炼油厂中转动设备(如压缩机、泵、风机)广泛分布,种类繁多,涉及运行参数、健康状态及维护历史等多维数据^[3]。为了实现全量信息的有效采集与整合,系统首先建立了覆盖全场景的统一命名空间与语义标签体系,确保不同设备与数据源之间的信息一致性与可扩展性。

在数据传输方面,采用OPC-UA与MQTT协议混合架构:对传统DCS与PLC系统使用OPC-UA接入,保证工业级稳定性;对边缘智能传感器使用轻量的MQTT,实现秒级采样与远程配置,显著提高了数据采集的实时性与灵活性。

针对振动、声发射、油液光谱等高频信号的噪声污染问题,本文设计了基于改进CEEMDAN(完全集合经验模态分解)的小波自适应去噪算法,通过自动选取最优分解尺度与重构阈值,使信号的信噪比平均提升了12dB。对长期趋势项及数据漂移问题,则采用多项式拟合残差剔除与指数滑动窗口技术联合处理,有效提升了建模阶段的数据稳定性与代表性。

在数据治理层,引入贝叶斯置信区间修正机制,通过先验分布与经验数据融合,动态调整指标异常判断的上下限区间,显著减少误报与漏报率,为后续建模提供可靠数据基础。

3.2 多源信息融合与因果图推断

不同类型的数据在时空维度上存在显著差异,如过程参数为分钟级采样、振动信号为毫秒级、维保记录则为非结构化文本。为打通这一数据鸿沟,本文提出Transformer-TCN并行融合模型:使用Transformer结构提取序列中的远程依赖特征,TCN结构捕捉局部时序动态,二者互补以实现多尺度建模。

融合后的深度特征通过嵌入到预构建的设备知识图谱中,与结构化语义节点(如“冷却不足”“干气密封失效”等)进行对齐,实现信息的统一语义映射。该知识图谱由经验规则与数据驱动路径共同构建,兼顾物理机制解释与数据演化特征。

在推理层,本文引入时序贝叶斯网络(T-BN),结合

麦基-灰靶因果度量方法,对潜在故障路径的因果可信度进行量化评估^[4]。与传统相关性分析不同,该方法可辨识“因”的优先顺序与“果”的时滞特征,提升了因果链建模的可信性与可解释性。

在某催化裂化装置的循环气压缩机实际案例中,系统通过该模型准确溯源出“密封气压力波动→干气密封失效→轴承振动异常”的完整故障链,因果路径识别准确率提升至94%,相比人工巡检,平均故障定位时间从2小时缩短至38分钟,显著增强了运行安全保障能力。

4 优化策略与实施路径

在设备设计阶段,本文基于多学科设计优化(MDO)思想,将热-力-流体的多物理场模型与轴承寿命预测算法进行耦合建模,充分考虑在API-610/API-617等行业标准约束下的结构可靠性与能效性能之间的协同关系。通过构建多目标函数,最小化轴承疲劳损伤密度和单位能耗,在保障机械强度与工况适应性的同时,优化系统能效结构。采用蒙特卡罗-遗传算法混合优化框架,有效提高了求解效率与全局收敛性。优化结果显示,泵类设备的综合能效指标 η_C 提升了3.7%,设计冗余降低8%,为后期运行阶段节省约23%的能耗打下基础。

在运行与检修阶段,构建了残余寿命预测模型(RUL-GAN),该模型融合了生成对抗网络(GAN)与变分自编码器(VAE),能够在小样本失效数据场景下准确建模设备的寿命分布^[5]。模型输出的不确定性区间经过贝叶斯修正,并与企业的库存管理系统与人员排班模块集成,实现检修任务的智能排程。通过动态生成最优的检修窗口与资源调配方案,降低因过度维护或突发停机带来的运营风险。系统上线一年后,非计划停机次数从每年7.2次下降至2.8次,年均直接经济损失减少约310万美元,有效提升了设备可用度与管理效率。

在设备全生命周期尾端,本文引入多目标整数规划模型对退役设备进行再制造决策。模型以剩余技术寿命、再制造成本、碳减排潜力和兼容性为约束与目标,建立了设备再利用的优化框架。求解过程中引入蚁群-粒子群混合智能算法,在提高解的多样性基础上保障求解速度。实证数据显示,经模型推荐的再制造比例由原18%提升至36%,单位设备

生命周期碳排放下降14%。该方案不仅响应了“双碳”政策要求,还推动了高值零部件的闭环回收与材料循环利用,为企业建立绿色供应链奠定基础。

5 案例研究与效果评估

江苏沿海某4400 kt/a炼油厂自2022年起引入本文方法,覆盖260台关键转动设备。系统按照“全连接-边缘分析-云端优化”三层架构部署,并与现有MES、SAP-PM无缝集成。运行至2025年3月,系统累计捕捉潜在失效事件187起,其中48起被提前两周以上定位并排除,避免停机损失约1.2亿人民币。

引入净现值(NPV)与回收期(ARR)评估模型,系统总投资约3800万元,两年零四个月即可收回。能效提升与碳排放削减每年带来额外收益900万元,三年综合收益-成本比达到3.6。安全层面,装置级风险矩阵中“高危”单元数量下降60%,HSSE季度考核稳居集团前列。

6 结语

炼油企业正处于数字化与低碳化深度耦合的转型关键期。本文围绕转动设备,提出了覆盖全生命周期的可靠性指标体系与多源数据驱动的故障溯源模型,并在大型炼油厂的实践中验证了技术有效性与经济可行性。研究表明,依托动态可视化监测、因果推断与智能决策,可以显著降低失效率、能耗及碳排放,为行业提供了一条“安全-高效-绿色”并举的治理路径。未来工作将进一步整合生成式AI在异常情景补全与运维知识迁移方面的潜力,并拓展到化学品与氢能装置,以支撑更宽场景的设备可靠性管理。

参考文献

- [1] 廉磊.基于过程分析的炼油厂酸气脱硫新工艺及其控制策略的研究[D].华南理工大学,2024.
- [2] 吴越,冯多学,李盼,等.大型炼油厂PSA氢提纯单元运行经验与故障处理[J].炼油技术与工程,2024,54(03):24-27+31.
- [3] 李供法.炼油厂低温热联合利用技术及应用[J].山东化工,2023,52(22):177-181+184.
- [4] 张哮.炼油厂烟气轮机在线监测及故障诊断技术应用[J].设备管理与维修,2023,(16):178-180.
- [5] 贾宝民.浅谈炼油厂生产优化及受控管理[J].石化技术,2023,30(04):247-249.

Research on the intelligent application of the dual-carbon control platform in municipal wastewater plants

Yan Gao Lei Zhao Mingyi Zhang Lin Li Qiang Li

Hebei Construction Investment Engineering Construction Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

This article focuses on the intelligent application of the dual carbon control platform for municipal sewage treatment plants. In response to the lack of a professional carbon emission monitoring system for domestic sewage treatment plants, a dual carbon management platform covering modules such as data collection, system control, and dynamic monitoring is proposed. This platform helps enterprises achieve refined operational management and promote the low-carbon transformation and sustainable development of municipal sewage plants by accurately measuring carbon emission data, implementing real-time dynamic monitoring, and realizing multidimensional data visualization.

Keywords

municipal sewage treatment plant; Dual carbon control platform; Intelligent application

市政污水厂双碳管控平台的智能化应用研究

高研 赵磊 张明义 李林 李强

河北建投工程建设有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

本文聚焦市政污水厂双碳管控平台的智能化应用展开研究针对国内污水处理厂缺乏专业碳排放监测体系缺失的问题, 提出构建涵盖数据采集、系统管控、动态监测等模块的双碳管理平台。该平台通过精准计量碳排放数据、实施实时动态监测以及实现多维数据可视化, 助力企业实现精细化运营管理, 推动市政污水厂的低碳转型与可持续发展。

关键词

市政污水厂; 双碳管控平台; 智能化应用

1 引言

当前国内污水处理厂普遍面临专业碳排放监测体系匮乏的问题, 尚未建立完善的碳信息管理系统, 难以实现全流程、动态化的碳排放监管。在此背景下构建一套智能化的水务碳管理平台, 势在必得。该系统具备碳排放数据精准计量高效处理的核心能力, 涵盖数据采集、系统管控、动态监测、碳排放分析、报表生成等核心模块, 同时需具备良好的可移植性, 以方便在不同区域推广应用。

2 市政污水厂双碳管控平台的建设

2.1 安全设计与其他扩展

- (1) 具备完善的用户信息管理与身份验证机制。
- (2) 确保每位登录用户拥有专属账号及独立密码, 若

发生密码遗失情况, 必须经由系统管理员执行账户凭证重置操作^[1]。

(3) 集成高级安全管控模块, 包含密码策略配置、个性化菜单定制、角色权限划分、操作权限分配及多语言词典管理等核心功能, 同时要求用户管理体系兼容域控制器集成方案。

(4) 系统需经过充分验证, 消除程序逻辑缺陷与重大系统漏洞, 具备操作容错机制以避免人工失误。当出现客户端异常或网络波动时, 需确保服务持续可用且数据完整性不受影响。系统须配备完善的数据备份方案与专用工具, 支持在紧急情况下迅速复原系统功能及业务数据。

(5) 支持多环境并行部署方案, 分别适配软件开发、参数配置、质量测试、人员培训及生产运行等不同场景需求。同时需内置数据同步机制, 保障各环境间配置参数的统一性, 并实现跨环境数据可逆迁移能力。

(6) 针对机密信息及系统关键数据(包括用户隐私等敏感内容)实施数据脱敏或加密措施, 所选用的加密技术满足规定的安全等级标准。

【作者简介】高研(1988-), 女, 中国河北保定人, 硕士, 工程师, 从事市政给水、排水工程项目设计及咨询研究。

(7) 在数据传输过程中实施加密保护, 采用的加密方案达到规定的安全强度要求。

系统整体架构(如图1)具备优秀的扩展能力, 具体表现为: 支持跨厂区分布式部署, 实现各生产基地数据独立存储, 同时集团层面实施集中管控。

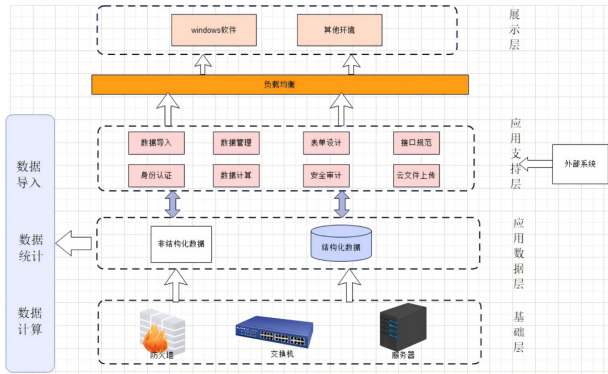


图1 数字化平台技术框架图

通过集成监控组件并开发数据传输日志功能, 确保数据交换过程的安全可靠、内容完整且时效性达标。采用规范化接口设计, 有效提升与其他业务系统的兼容性[4]。

2.2 框架设置

(1) 表现层: 终端架构采用前后端解耦设计, 兼容浏览器/服务器访问模式。依据预设路由策略将请求分发至目标服务节点, 实现多节点间的流量动态分配机制。

(2) 服务层: 安全管控体系对能源管理系统所有访问者实施身份核验, 仅开放已授权用户的系统入口, 采用网关代理模式统一对外服务接口。

(3) 数据存储层: 底层需兼容关系型数据库与时序数据库双引擎, 实现运行数据和归档数据的物理隔离, 同时具备跨时间维度的混合查询能力[2]。

2.3 运行环境与接口设计

(1) 采用云端部署方案, 兼容多平台运行环境, 可实现虚拟化平台安装、容器化部署等多样化实施方式, 适配各类服务器操作系统。

(2) 具备双节点集群热备机制等高级架构设计, 确保单个工作站发生异常时, 不会对整体网络环境中的软件运行造成中断。

(3) 适应业务数据规模与系统功能的动态增长需求, 便于后续运维管理工作的开展。

(4) 后台数据管理模块采用数据与文件分离存储策略, 支持数据服务器与应用服务器的分布式架构配置方案[3]。

在碳排放计量模型方面, 既要实现各环节碳排放量的精确测算, 又要具备评估整体系统、各功能单元及具体设备的碳减排潜力能力; 碳排放动态监测技术通过在指定监测区域内部署数据采集终端, 将相关数据传输至中央服务器, 最终汇聚至管理平台, 实现全流程数字化监控功能; 数字化管

理平台具备实时数据采集与排放监测功能, 内置标准化报告模板库, 支持自动化报告生成[4]。该平台通过多维数据可视化呈现分析结果, 为运营决策提供数据支撑, 助力企业实现精细化运营管理。系统可自动生成优化建议方案, 帮助用户提升运营效率, 其碳排放流程如图2所示。

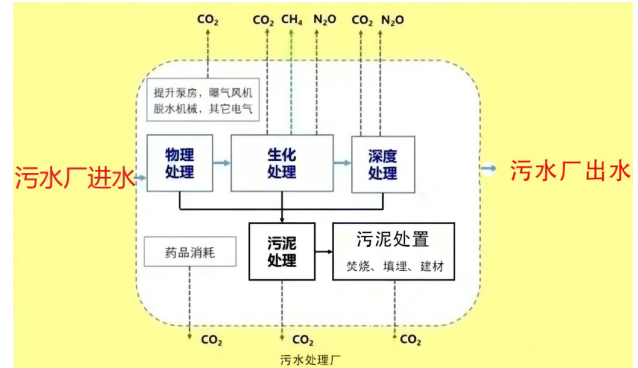


图2 污水厂碳排放流程图

3 市政污水厂双碳管控平台的关键功能模块

3.1 碳数据管理与碳报告

针对碳排放信息的评估, 通常选取特定周期(如季度或财年)内各业务单元温室气体排放总量、单位产值排放强度以及能源消耗相关排放(涵盖电力供应、热能使用、燃料燃烧及原材料加工环节)及其波动情况等参数。这些量化指标能够全面呈现组织碳排放现状, 特别是单位产值排放与能源消耗相关排放(涉及电力供应、热能使用、燃料燃烧及原材料加工环节), 更能准确反映生产过程中的间接排放特征。

碳排放报告是指对特定机构在运营周期内各业务环节产生的直接与间接温室气体排放量进行系统核算, 形成完整的温室气体排放清单^[5]。该报告为企业及政府部门实施排放监管、应对气候风险与把握低碳发展机遇提供关键决策支持。报告格式严格遵循地方环保部门制定的标准模板, 支持在线编辑与数据修正, 最终通过官方指定渠道完成提交。这一机制显著提升了企业数据申报效率, 实现了排放数据的规范化管理。

3.2 碳全景与碳结构

碳全景模块作为低碳管理系统的核心监控界面, 采用可视化驾驶舱设计理念。该模块全面展示污水处理厂的实时排放指标、排放构成、碳资产总值及减排贡献度等关键参数。特别值得注意的是, 系统通过整合碳资产价值与生产能耗数据(包括电力、药剂、水资源等消耗), 精准呈现碳排放中间过程, 为跨项目/子公司间的间接排放绩效对比分析提供有力支撑。

碳结构分析聚焦于特定项目或下属企业的温室气体排放状况, 通过多维度比较实现深度解析, 包括产品碳足迹对比、排放范围界定差异以及各环节排放占比评估。该分析体系包含六大核心组件, 其中: 碳流可视化模块采用双重视角

剖析碳排放总量，一方面基于核算标准划分直接排放源（范畴一），另一方面则针对间接排放（范畴二）进行系统性对比研究。

- 碳排放分布：采用柱状图形式展示三类产品的碳排放量占比，便于直观比较各产品对环境的影响程度。

- 年度排放趋势：汇总历史排放数据形成趋势线，帮助决策者掌握碳排放的年度波动规律。

- 碳排放构成分析：依据碳核算标准，分解 Scope1 和 Scope2 排放源，揭示各环节的污染贡献比例。

- 减排能力对比图：通过可视化手段呈现不同工艺单元在碳减排方面的相对表现，凸显技术差异。

- 双碳目标追踪器：设置动态进度条监控 2030 碳达峰与 2060 碳中和的推进情况，既对标规划指标又实现实时管控。

3.3 碳对比

碳对比功能作为低碳管控系统的核心组件，其设计初衷在于实现跨项目与时间维度的数据交叉分析。该模块通过建立差异化比较机制，识别潜在优化空间，为生产布局调整与产能升级提供多角度决策支持。

- 横向分析：支持系统内多个项目数据的同步比对。

- 时序分析：针对单一项目不同周期（按月）的数据演变追踪。

基于碳核算数据的可视化呈现系统，集成排放贡献率分析、排放强度评估、排放密度测算、强度趋势演变、总量比较及结构分解等多元化图表展示。这种立体化的数据呈现方式不仅便于管理层的汇报总结，更为产品线优化与产能规划提供了全面的决策参考框架。

针对城市污水处理设施，构建碳排放全景监测系统，开发集成化碳管控平台，有效支撑市政污水处理领域碳减排体系构建，为低碳经济发展提供科学决策依据和可视化智能管理支撑。

4 市政污水厂双碳管控平台的智能化应用

4.1 核心应用场景与案例

市政污水厂双碳管控平台的智能化应用主要聚焦于提升碳排放管理的精准度与效率，通过集成先进技术实现全链条的智能化监控与优化。其核心应用场景涵盖碳排放数据的实时采集、动态监测、深度分析及优化策略生成等多个层面。

案例一：智能数据采集与监控在某大型市政污水厂，双碳管控平台通过部署智能传感器和数据采集终端，实现了对污水处理过程中碳排放的实时监测。平台能够自动采集包括电力消耗、热能使用、燃料燃烧等在内的关键碳排放数据，并通过云端传输至中央服务器进行分析。这一应用显著提高了

数据采集的准确性和时效性，为后续的碳排放管理和优化提供了坚实基础。

案例二：碳排放分析与优化建议另一家市政污水厂利用双碳管控平台的碳排放分析功能，对污水处理过程中的碳排放进行了全面剖析。平台通过内置的碳排放计量模型和数据分析算法，精确计算了各环节的碳排放量，并识别出潜在的减排空间。基于这些分析结果，平台自动生成了针对性的优化建议，如调整工艺流程、优化设备运行参数等，有效降低了碳排放强度。

4.2 效果评估与持续改进

在市政污水厂双碳管控平台的智能化应用过程中，效果评估与持续改进是不可或缺的重要环节。通过定期评估平台的应用效果，可以及时发现存在的问题和不足，并采取有效措施进行改进和优化。

一方面，平台通过内置的数据分析模块，对碳排放数据进行深度挖掘和分析，生成详细的碳排放报告和优化建议。这些报告和建议为管理者提供了直观的数据支持和决策依据，有助于他们更好地了解污水处理过程中的碳排放情况，并制定更加科学合理的减排策略。

另一方面，平台还具备持续改进的能力。通过不断收集用户反馈和实际需求，平台可以不断优化和完善其功能和服务。例如，针对用户提出的数据可视化需求，平台可以增加更加直观、易用的数据可视化界面；针对用户提出的优化建议生成需求，平台可以进一步优化算法模型，提高优化建议的准确性和实用性。

5 结语

综上所述，市政污水厂双碳管控平台的智能化应用在提升碳排放管理精准度与效率方面发挥了重要作用。通过核心应用场景的实践和效果评估与持续改进的机制建设，平台的建设与优化为市政污水厂的低碳转型和可持续发展提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 郭怡.高标准出水对污水厂实现双碳目标的影响及减排对策分析[J].净水技术,2022(S2):111-114+126.
- [2] 陈睿星,肖倩,朱紫薇.城市污水系统碳排放结构及减排路径研究——以深圳市为例[J].给水排水,2025,51(1):49-54.
- [3] 孙晓辉,陈蓝,董紫君,等.市政污水处理厂碳排放核算及降碳实施路径[J].环境保护科学,2024,50(5):76-85.
- [4] 郝强,陈国斌,谢宇灿,等."双碳"背景下我国市政污泥磷回收技术进展及发展趋势[J].环境保护前沿,2024,14(5):1149-1157.
- [5] 何智丽,李静,蔡坤河,等.基于"双碳"目标的城镇污水厂优化应用研究[J].广东化工,2023,50(20):133-137.

How to respond to patent examination opinions from a patent examination case

Shuxun Meng

Shijiazhuang Haitian Intellectual Property Agency Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050011, China

Abstract

This paper emphasizes that the specific structure, positional relationship and connection relationship of the present application are the main distinguishing technical features of the present application. The invention purpose, technical solution, working process, and the technical effect produced in this application are all different from those in the comparative documents. The above-mentioned distinguishing technical features of the present application cannot provide technical inspiration from the comparative documents. Moreover, the working processes of the limit frame, universal ball, two universal ball platforms, clamps and other components of the present application are different from those of the comparative documents, and their effects on maintaining the wheel set posture are naturally different. This article starts from how to determine whether a claim has inventiveness. Through the study of cases in the patent examination stage, it analyzes the details and parameters of the specific structure and the issues that should be noted during the inventiveness examination.

Keywords

Test bench, rail contact, fatigue, rail contact fatigue test bench, creativity

从一个专利审查案例看如何答复专利审查意见

孟树勋

石家庄海天知识产权代理有限公司, 中国·河北 石家庄 050011

摘要

本文强调本申请的具体结构和位置关系以及连接关系是本申请的主要区别技术特征。本申请的发明目的、技术方案、工作过程、所产生的技术效果与对比文件的皆不同。本申请的上述这些区别技术特征并不能从对比文件中得到技术启示,而且本申请的限位框、万向球、两个万向球平台、卡箍等部件的工作过程与对比文件的工作过程不同,它们保持轮对姿态的效果自然不同。本文以权利要求如何判断是否具备创造性为出发点,通过对专利审查阶段案例的研究,分析了具体结构的细节和参数在创造性审查时应注意的问题。

关键词

试验台, 钢轨接触, 疲劳, 钢轨接触疲劳试验台, 创造性

1 案例介绍

发明名称为一种考虑轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳试验台的专利申请, 本申请权利要求 1 的内容如下(参见图 1, 图 1 中未记载的附图标记参见发明专利公开说明书, 授权公告号 CN117309646B):

1、一种考虑轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳试验台, 具有反力架(1)、轮对(6)、左钢轨(7a)、右钢轨(7b)、左轨枕(9a)、右轨枕(9b)、多个扣件(8)、左底座(12a)、右底座(12b), 其特征在于所述的考虑轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳试验台还具有左垂向作动器(2a)、右垂向作动器(2b)、卡箍(14)、两个万向球平台(15)、呈纵

向设置的导向筒(4)、能沿导向筒上下滑动的垂向导柱(5)、能升降的左承载平台(11a)、能升降的右承载平台(11b)和用于调整所述轮对(6)的摇头角的限位框(3); 左垂向作动器(2a)的底座和右垂向作动器(2b)的底座皆安装在反力架(1)的顶部, 限位框(3)和导向筒(4)皆安装在反力架(1)的顶部, 左垂向作动器(2a)的动力输出端、右垂向作动器(2b)的动力输出端分别与轮对(6)的车轴的两端铰接; 限位框(3)上安装有呈前后相对设置的两个万向球平台(15), 卡箍(14)与轮对(6)的车轴固定连接, 卡箍(14)的前后两侧各与一个万向球平台(15)通过球铰相连接, 垂向导柱(5)的底部与轮对(6)的车轴固定连接, 左底座(12a)固定安装在左承载平台(11a)上, 右底座(12b)固定安装在右承载平台(11b)上。

【作者简介】孟树勋(1965-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 助理研究员, 从事专利代理/专利代理师研究。

专利局审查员检索到一篇对比文件:

对比文件 1 (CN113125175A, 20210716) 公开了一种

轮轨滚动滑动接触加载试验装置（参见图 2，图 2 中未记载的附图标记参见对比文件 1 的发明专利申请公开说明书），包括反力架 2、轮对 7、试验钢轨 6、支撑台 5、垂向加载动作器 11；反力架 2 上设有垂向加载动作器 11，轮对 7 包括通过轮轴相连接的两个车轮，所述轮轴端部设有轴箱 17，所述轴箱 17 上设有悬挂装置 14，所述轮对 7 通过所述悬挂装置 14 与所述垂向加载动作器 11 相连接。反力架 2 上还设有用于实现框架连同轮对的水平角度调整从而模拟车轮通

过曲线的框架横向水平调节装置 15，并与所述轮对固定框架 8 相连接；横向水平调整装置，可以实现框架连同轮对的水平角度调整^[1]。

专利局的审查意见认为，在对比文件 1 的基础上结合本领域技术人员的常用技术手段得到权利要求 1 请求保护的该技术方案对本领域技术人员而言是显而易见的，权利要求 1 不具备突出的实质性特点及显著的进步，不具备专利法第二十二条第三款所规定的创造性。

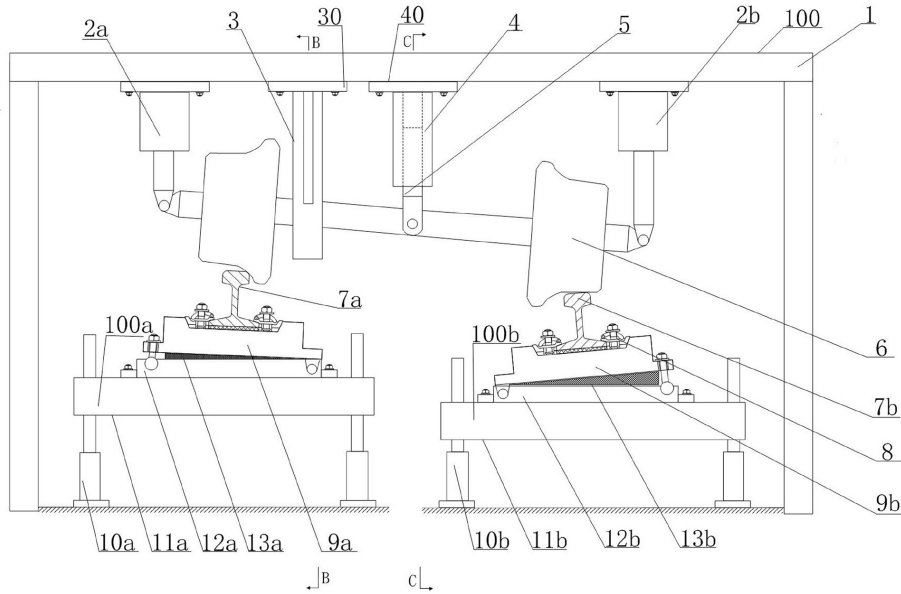


图 1

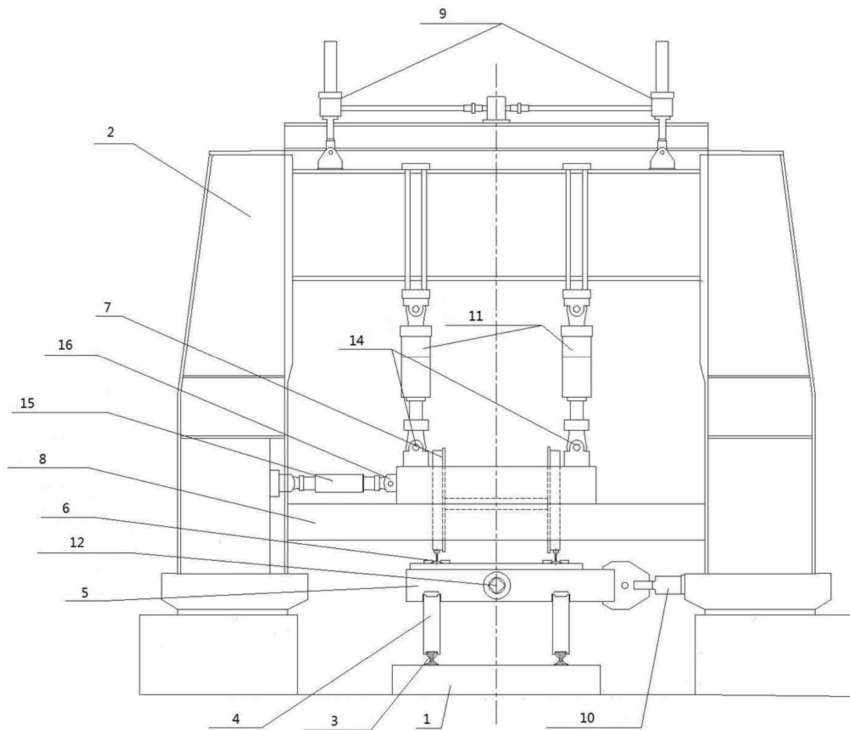


图 2

2 修改案例的权利要求书，使本申请的区别技术特征占主导地位

对原权利要求书进行了修改，详细修改内容是申请人将原权利要求6、8与原权利要求1合并，即将原权利要求6、8的特征部分补入原权利要求1，从而形成新的权利要求1。这样，新的权利要求1中增加了反力架(1)的具体结构、限位框(3)的具体结构、限位框(3)安装在反力架(1)的顶部的具体结构、导向筒(4)安装在反力架(1)的顶部的具体结构、卡箍(14)的具体结构及安装位置、垂向导柱(5)与轮对(6)的车轴固定连接的结构。

本申请新的权利要求1与对比文件1的区别技术特征在于：试验台还包括左轨枕、右轨枕、多个扣件、左底座、右底座、能升降的左承载平台、能升降的右承载平台，左底座固定安装在左承载平台上，右底座固定安装在右承载平台上；左垂向作动器的动力输出端、右垂向作动器的动力输出端分别与轮对的车轴的两端铰接^[2]；本发明还包括卡箍、两个万向球平台、呈纵向设置的导向筒、能沿导向筒上下滑动的垂向导柱和用于调整所述轮对的摇头角的限位框；限位框和导向筒皆安装在反力架的顶部，限位框上安装有呈前后相对设置的两个万向球平台，卡箍与轮对的车轴固定连接，卡箍的前后两侧各与一个万向球平台通过球铰相连接，垂向导柱的底部与轮对的车轴固定连接。反力架(1)具有顶框(100)、第一横梁(101)、第二横梁(102)、第三横梁(103)和第四横梁(104)，所述顶框(100)的前后内侧面分别具有前凹槽(1001)和后凹槽(1002)，第一横梁(101)的前后两端、第二横梁(102)的前后两端、第三横梁(103)的前后两端和第四横梁(104)的前后两端分别由前凹槽(1001)和后凹槽(1002)限位；限位框(3)具有两个纵向板(31)、两个筋板(32)和滑板(30)，两个纵向板(31)呈相对设置并与滑板(30)固定连接，两个筋板(32)分别位于两个纵向板(31)的外侧，两个筋板(32)与滑板(30)以及相对应的纵向板(31)固定连接，两个万向球平台(15)分别安装在两个纵向板(31)的内侧壁上而呈前后相对设置；限位框(3)安装在反力架(1)的顶部的结构是，限位框(3)与第二横梁(102)位置相对，所述第二横梁(102)上具有两排开口槽，每排开口槽对应设置两个螺栓螺母连接件，每个螺栓螺母连接件中的螺栓穿过开口槽以及滑板(30)上的连接孔而将限位框(3)与反力架(1)的顶部可拆卸地固定连接在一起；导向筒(4)安装在反力架(1)的顶部的结构是，导向筒(4)与第三横梁(103)位置相对，导向筒(4)的顶端固定有滑板体(40)，所述第三横梁(103)上具有两排开口槽，每排开口槽对应设置两个螺栓螺母连接件，每个螺栓螺母连接件中的螺栓穿过开口槽以及滑板体(40)上的连接孔而将导向筒(4)与反力架(1)的顶部可拆卸地固定连接在一起；卡箍(14)位于限位框(3)的下部，卡箍(14)由前后对称设置的两个半圆形箍体和两个连接螺栓构成，两

个连接螺栓将两个半圆形箍体与轮对(6)的车轴固定连接；垂向导柱(5)的底部与轮对(6)的车轴固定连接的结构是，垂向导柱(5)的底部固定有U型叉(51)，销轴(16)横穿过轮对(6)的车轴并与该车轴固定连接，销轴(16)的两端与U型叉(51)的两个伸出臂固定连接。这样，申请的区别技术特征占了主导地位^[3]。

3 案例分析

对比文件1公开了一种轮轨滚动滑动接触加载试验装置，对比文件1的加载试验装置包括设置于地面的基础底面(1)和跨越设置于所述基础底面(1)上方的反力架(2)，所述基础底面(1)上设有支撑台钢轨(3)，所述支撑台钢轨(3)上设有对应的轨道滚轮(4)，支撑台(5)设有所述轨道滚轮(4)上，所述支撑台(5)上设有试验钢轨(6)，所述试验钢轨(6)上设有轮对(7)，所述轮对(7)外部设有用于固定的轮对固定框架(8)，所述反力架(2)上设有框架抬升装置(9)，所述轮对固定框架(8)经所述反力架(2)与所述框架抬升装置(9)相连接，所述反力架(2)上还设有横向加载动作器(10)和垂向加载动作器(11)，并分别与所述支撑台(5)和所述轮对(7)对应连接，所述支撑台(5)上还设有纵向加载动作器(12)，所述纵向加载动作器(12)还与平台纵移驱动(13)相连接。参见对比文件1的说明书第[0020]段至第[0025]段，对比文件1包括以下目的：(1)双轮(轮对)-双钢轨滚动-滑动运动试验装置；(2)采用钢轨纵向运行来模拟轮轨运行状态；(3)实尺1:1，没有缩比带来的误差；(4)三向加载并在轮对上施加扭矩，再现滚动-滑动的轮轨接触状态；(5)平台加纵向驱动轴，使得钢轨可以前后纵向运动。

对比文件1未公开本发明的上述区别技术特征，即通过限位框和万向球的配合实现对轮对摇头角的支撑调节，试验平台包括两个万向球平台，限位框上安装有呈前后相对设置的两个万向球平台，卡箍与轮对的车轴固定连接，卡箍的前后两侧各与一个万向球平台通过球铰相连接，反力架(1)、限位框(3)的具体结构以及限位框(3)安装在反力架(1)的顶部的具体结构、导向筒(4)安装在反力架(1)的顶部的具体结构、卡箍(14)的具体结构、垂向导柱(5)的底部与轮对(6)的车轴固定连接的具体结构。这些区别技术特征的具体结构和位置关系以及连接关系是本申请的区别技术特征。本申请的发明目的、技术方案、工作过程、所产生的技术效果与对比文件1的皆不同。本申请的上述这些区别技术特征并不能从对比文件1中得到技术启示，而且本申请的限位框、万向球、两个万向球平台、卡箍等部件的工作过程与对比文件1的工作过程不同，它们保持轮对姿态的效果自然不同。尽管本申请和对比文件1都能模拟车轮在直线或曲线线路条件下实际的轮轨接触关系的问题，但本申请更好地解决了单一线路条件下轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳问题^[4]。

因此说,本申请新的权利要求1的技术方案与对比文件1明显不同,对比文件1并不能给出将其技术特征用于权利要求1以解决其技术问题的启示,在对比文件1的基础上结合本领域的常用技术手段得不到新的权利要求1所要求保护的技术方案。新的权利要求1所要求保护的技术方案相对于对比文件1和本领域的常用技术手段以及它们的结合具有非显而易见性。

参见本申请的说明书,本发明的试验过程是:首先根据所要试验的轮轨接触位置,将轮对的左右两个车轮分别放在左钢轨和右钢轨上(即将轮对分别放在左右两段钢轨上),其次通过限位框调整轮对的摇头角;轮对旋转到某一位置时,将导向筒内的垂向导柱的底部与轮对的车轴固定(可以是垂向导柱底端的销轴与车轴相固定),这就只保留了轮对的垂向和侧滚自由度;最后通过左、右垂向作动器在车轴(轮轴)上施加特定的垂向载荷,可以实现车轮对左、右钢轨不同的动力作用。另外,通过调整左、右承载平台的高度可以实现左、右钢轨不同的高度,然后进行轮对在直线或曲线线路条件下的钢轨接触疲劳试验,实现不同的轨底坡,可以将不同的斜楔(即左斜楔、右斜楔)安装进去。与现有技术相比,本发明的有益效果是:

第一,本发明的试验台由于采用了独立的承载平台(左、右承载平台),可实现不同的左、右钢轨的高度,进行直线或曲线线路条件下的钢轨接触疲劳试验,具有较大的试验灵活性,避免了单一线路条件下的钢轨接触疲劳试验,更贴合实际应用。

第二,本发明的试验台通过作动器(左、右垂向作动器)对车轮施加不同的垂向载荷,来实现车轮对左、右钢轨不同的动力作用,进行不同载荷对钢轨接触疲劳试验研究。

第三,本发明的试验台采用真实的轮对及钢轨,从而考虑了轮轨接触几何特性,更真实地模拟了轮轨接触关系,有效地开展钢轨接触疲劳试验研究。

第四,本试验台能模拟车轮实际的轮轨接触关系,可实现复杂载荷下轮轨接触行为,不仅可以做钢轨接触疲劳试验,还可以做扣件系统疲劳的综合试验。

综上所述,本发明提供了一种考虑轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳试验台,它工作可靠,操作简单,灵活性强,能模拟车轮在直线或曲线线路条件下实际的轮轨接触关系,

可实现复杂载荷下轮轨接触行为、钢轨疲劳以及扣件系统疲劳的综合试验,解决了单一线路条件下轮轨接触几何特性的钢轨接触疲劳问题,能用于高速列车、重载列车及城市轨道交通轮轨系统的动态试验。该试验台能够提高试验效率、缩短试验周期、降低试验成本,并且可以模拟钢轨实际的滚动接触疲劳受力状态。经试验,与相关的钢轨接触疲劳试验台相比,同等试验条件下,本发明的试验周期缩短了15%以上,试验成本降低了17%以上。

4 结论

结合以上所述,本申请新的权利要求1中的上述具体结构是本领域技术人员通过反复实验、创造性劳动得来的,确定具体结构的细节和参数并不能从对比文件1中得到技术启示,也未能从现有技术中得到技术启示,因此,本领域技术人员不能仅仅通过简单的逻辑分析和推理就能得到新的权利要求1所要求保护的技术方案,同时难以预期其技术效果。因此,相对于对比文件1和本领域的常用技术手段以及它们的结合,新的权利要求1取得了意料不到的技术效果,它的这些技术效果优于对比文件1以及本领域的常用技术手段和它们的结合所产生的技术效果。因此,相对于对比文件1和本领域的常用技术手段以及它们的结合,新的权利要求1具有突出的实质性特点和显著的进步,具备专利法第22条第3款规定的创造性。

上述论述得到了专利局审查员的认可,被授予发明专利权,专利号ZL202311408621.9,专利权人:石家庄铁道大学。

本文以当前申请人、专利局审查员、专利代理人所涉及的权利要求如何判断是否具备创造性为出发点,通过对专利审查阶段案例的研究,分析了具体结构的细节和参数在创造性审查时应注意的问题。

参考文献

- [1] 发明专利公开说明书,授权公告号CN117309646B。
- [2] 发明专利申请公开说明书,公布号CN113125175A。
- [3] 国家知识产权局,专利审查指南[M],知识产权出版社,2010年1月第1版。
- [4] 中国专利教程,专利审查,专利文献出版社,1994年3月第1版,主编:吴伯明,黄益芬。

Study on diagnosis and treatment of steam turbine vibration fault in thermal power plant

Xianghua Zheng Libing Lei Zhongchen Sun

Huaneng Yunnan East Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

During the operation of thermal power plants, steam turbine vibration faults are a common issue. Proper vibration fault diagnosis and the rational selection of treatment methods based on fault causes are essential to ensure stable and reliable turbine operation, thereby maintaining power generation efficiency. This article focuses on this critical aspect, discussing both diagnostic methods and treatment approaches for steam turbine vibration faults in thermal power plants. Through this analysis, we aim to provide valuable references for professionals in vibration fault diagnosis and management, ultimately enhancing the efficiency and capability of addressing steam turbine vibration issues.

Keywords

thermal power plant; steam turbine; fault diagnosis; treatment method

火电厂汽轮机振动故障的诊断与处理方法研究

郑祥华 雷犁兵 孙中臣

华能云南滇东能源有限责任公司, 中国·云南 曲靖 655000

摘要

在火电厂运行期间汽轮机振动故障是较为常见的故障, 做好振动故障诊断并根据故障原因来合理选定处理方法是十分必要的, 只有这样才能确保汽轮机运转的稳定性和可靠性, 进而保障火电厂发电效率, 需引起关注和重视。本篇文章也将目光集中于此, 主要从火电厂汽轮机振动故障诊断及处理方法两个方面来展开论述。希望通过本篇文章的探讨和分析可以为相关工作人员的振动故障诊断及处理提供更多参考与借鉴, 提高汽轮机振动故障诊断效率和处理能力。

关键词

火电厂; 汽轮机; 故障诊断; 处理方法

1 引言

科技研究的不断深入和发展使得现阶段人们生产生活中的电子设备越来越多, 在这样的背景下社会的电能需求变得越来越大, 火电厂建设规模也因此变得越来越大。而在火电厂运行期间, 汽轮机运行的稳定性和可靠性对于火电厂的供电稳定性会起到极大的影响, 必须引起关注和重视, 振动故障作为火电厂汽轮机运转过程中的常见故障, 相关人员更需要明确诊断故障的诊断方法及不同问题的处理方法, 提高振动故障的处理能力。

2 火电厂汽轮机振动故障的诊断

为提高火电厂汽轮机振动故障诊断的效率和质量, 精确锁定故障类型及位置, 相关人员可从诊断流程出发抓住如下几个关键点, 提高振动故障诊断的能力和效果。首先,

相关人员需要落实数据采集工作, 借助压电式加速度传感器、磁电式速度传感器等相应的振动传感器对火电厂汽轮机轴承、缸体等相应关键部位进行检测, 收集数据信息, 了解振动位移速度、加速度等相应参数。同时, 在数据收集整合的过程中还需要记录火电厂汽轮机的运转数据, 例如机组转速、负荷、蒸汽参数、润滑油温油等等, 为后续问题分析处理提供更多参考^[1]。

其次, 需要做好数据处理与分析。相关人员可通过频谱分析来更好的明确振动的主要频率成分, 判断是同步振动、异步振动还是分频、倍频振动。例如, 在振动频谱分析的过程中工作人员发现, 振幅随转速升高而增大, 振动以一倍频为主, 可以着重考量转子不平衡的问题, 而不对中故障常伴有二倍频成分, 轴向振动较为明显^[2]。相关人员可根据振动相位特征相位判断分析振动是否具有方向性, 确定故障部位。例如转子弯曲会引发振动问题, 这时振动相位相对而言较为稳定, 同时会随转速变化而有规律的变化。在数据处理分析的过程中相关人员还可通过历史数

【作者简介】郑祥华(1977-), 男, 中国云南江川人, 本科, 高级工程师, 从事火电厂汽机管理研究。

据对比分析的方式来收集更多资料，为故障类型的分析提供更多帮助。一般情况下在火电厂汽轮机振动故障诊断的过程中常见的故障主要包含转子不平衡、转子不对中、油膜震荡、动静摩擦、基础松动、气流激振等等，如图1所示。不同类型的特质是存在鲜明差异的，可通过不同类型问题的外在特征来提高诊断效率，快速锁定问题，并针对性的选择处理方案和解决对策。

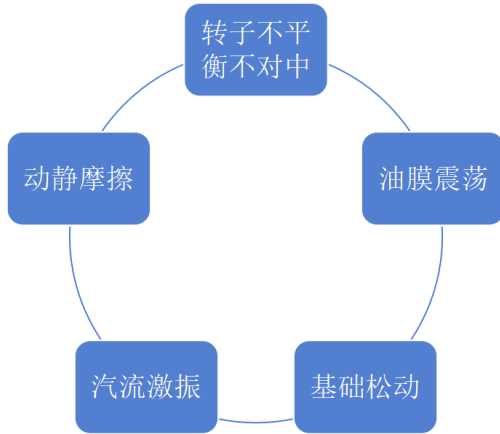


图1：火电站汽轮机振动故障的常见原因

3 火电站汽轮机振动故障的处理方法

3.1 转子不平衡与不对中的处理

转子不平衡或不对中问题是汽轮机振动故障的常见原因，尤其是转子不平衡是较为典型的振动故障，在转子不平衡处理的过程中相关工作人员需着重考量的则是如何通过质量偏心消除、矫正来对汽轮机振动故障进行处理，在处理的过程中需结合转子的特性具体问题具体分析。若火电站汽轮机中转子为刚性转子，这时工作人员则可采用动平衡法。在转子两端的平衡面上添加或去除相应的平衡块，对问题进行解决。这就需要工作人员在平衡块质量分析的过程中先通过振幅检测来确定不平衡的相位和幅值，然后根据相应的公式来计算分析如何调整平衡块的质量和安装角度。还可通过试重法的方式保障平衡块质量及安装角度科学合理，试重法是指工作人员可在不平衡位置添加已知质量的试重，然后通过振动变化测试的方式来确定最终的平衡质量。但是若火电站汽轮机的转子为柔性转子，相关工作人员在转子不平衡问题处理的过程中则需要通过高速动平衡进行处理，引入专业的设施设备，在临界转速及工作转速下落实矫正工作，保证在各阶临界转速下转子振动都能够满足要求。除此之外，若是出现转子部件脱落、腐蚀等相应情况也很容易会带来转子不平衡问题，进而引发汽轮机振动故障。这时相关工作人员则可通过表面清理、损坏修复配合平衡矫正的方式来达到较好的问题处理效果，如图2所示。



图2：转子不平衡处理方法

在转子不对中问题分析的过程中需要从径向不对中和角向不对中两个维度来展开分析。在此基础之上通过联轴器或成轴位置的调整保障转子轴心线对中。在实际问题解决的过程中，首先相关工作人员可以借助激光对中仪测量转子的对中偏差，获得径向位移数据和角向偏差数据，在此基础之上根据联轴器连接的转子特性具体问题具体分析。若为刚性联轴器，这时则可通过电机或汽轮机轴承座高度调整的方式对问题进行解决，达到径向对中的目标。若转子不对中问题为角向偏差问题，可通过联轴器端面的平行度调整进行解决。若联轴器为弹性联轴器，这时则可通过更换弹性元件的方式来补偿不对中问题。但是在弹性元件选择的过程中应当控制其长度，保障其偏差在允许范围内。若火电厂汽轮机为多转子系统，这时相关工作人员则需要从基准转子开始落实转子位置调整工作，然后重新测量振动和对中数据，直到满足汽轮机运转需求以后完成故障处理^[3]。

3.2 油膜振荡处理

在油膜振荡处理的过程中相关工作人员需要从滑动轴承油膜特性改善及限制振动发展两个维度来分析解决对策和处理方案，具体可从如下几点着手做出优化和调整解决故障问题。

首先，相关工作人员可通过润滑油参数的调整来改善油膜特性，通过润滑油黏度提升来保证油膜承载力。在此基础之上可通过油温控制避免因温度过高导致黏度下降，在温度控制上可以将阈值范围控制在40~45℃，控制方法较为简单，可以通过调整冷凝器的冷却水量实现预期目标。在此之后还需检查润滑油的油压，判断是否存在油压不足问题，通过清洗油滤网、检查油泵等多种方式来进行解决。

其次，相关工作人员可通过轴承结构的优化和调整解决振动故障，例如可以引入可倾瓦轴承，利用其瓦块可活动的特性自适应调整油膜形状，限制涡动。

再次，可通过轴承长径比增大、轴承间隙缩小等多种方式来保障油膜稳定性。但是需要注意的则是轴承间隙过小也很容易会出现润滑不良问题。

最后，可通过降低负荷的方式有效避免因转子转速过高进而导致油膜震荡的情况，这就需要根据仪器设备的参数型号具体问题具体分析，对共振区间数值作出准确的判断，然后降低转速，在保障振动稳定之后再逐步恢复^[4]。

3.3 动静摩擦的处理

动静摩擦问题必须引起关注和重视,若处理不及时则很容易会出现转子弯曲、叶片损坏等相应问题,甚至可能会影响零件的使用寿命。这时相关工作人员就需要通过监测工作的开展实时监测摩擦振动,若出现摩擦振动问题则应当通过基础负荷控制来有效降低转速,减少摩擦。若因暖机不足、上下高温温差过大等相应问题引发转子热弯曲,进而出现摩擦问题,相关工作人员需及时关闭机械设备并通过盘车来有效消除热弯曲问题,在保障转子温度均匀后重新启动设备,在启动设备的过程中应严格按照规范要求确定暖机时间和升速速率,避免上下缸温差超过百 50℃。

另外,动静间隙过小也很容易会引发摩擦问题,这时相关工作人员也需要关闭设备,然后通过间距测量来分析是否是由间隙过小引发的摩擦,若存在该类问题则可通过修刮汽风片、调整隔板位置来适当的扩大间隙。在检修工作落实的过程中相关工作人员还需要检测是否因摩擦导致转子出现划痕或变形问题,若出现该类问题应及时修复。

3.4 基础松动与共振处理

基础松动问题也会带来振动故障,而在故障处理的过程中相关工作人员首先需要通过外观检查的方式判断基础螺栓的紧固程度是否达到了标准要求,若出现螺栓松动问题则需通过复紧的方式对问题进行解决,必要的情况下可通过更换高强度螺栓和防松螺母来避免因螺栓松动引发振动故障^[5]。

其次,在外观检查的过程中应当紧抓基础混凝土的外观检查来展开分析,判断是否存在裂缝问题,若存在该类问题则可引入水泥浆或环氧树脂进行修复,保障基础强度达标。

再次,基础刚度不足也很容易会出现振动问题,针对该类问题,相关工作人员可通过浇筑混凝土配重块等多种方式让基础配重上升,配合刚性支撑来保障基础刚度达标。此外,若在检查工作落实的过程中发现机组与基础的连接不够牢固或弹性支撑的弹性元件出现老化问题,这时则需通过更换元件的手段来对问题进行解决。

3.5 汽流激振

在汽流激振问题处理的过程中,相关工作人员首先需

结合汽轮机的型号特点及火电厂的运行需求来明确汽轮机的运行参数,并对其参数作出适当调整,有效避免汽轮机因工况不稳定引发振动故障。在运行参数调节的过程中工作人员需紧抓蒸汽压力、蒸汽流量等相应关键点做好参数控制,有效降低气流的脉动和冲击。

其次,叶片通道结垢、腐蚀等相应的问题也会导致气流不够均匀引发振动问题,这时相关工作人员应停止汽轮机运转,然后通过叶片表面清理修复等相应工作的有效落实对该类问题进行解决。

最后,若经检测发现气流机振动问题的构成原因是汽轮机级间间隙不合理,这时相关工作人员则可通过隔板叶轮的轴向位置调节来对间隙做出适当控制,有效避免因气流径向力的波动引发气流激振问题^[6]。

4 结语

火电厂汽轮机在运转的过程中振动故障是较为常见的,必须引起关注,相关工作人员需明确振动故障的诊断流程,紧抓转子不平衡不对中、油膜振荡、动静摩擦、基础松动和共振以及气流激振等相应关键问题,明确处理对策,提高问题解决效率和解决质量。

参考文献

- [1] 阿不都热依木·依米提. 火电厂汽轮机异常振动问题与原因探析[J]. 电力设备管理, 2025, (08): 59-61.
- [2] 阎晓君. 火电厂汽轮机振动故障与诊断技术措施探析[J]. 电力设备管理, 2025, (06): 74-76.
- [3] 滕鲁. 火电厂汽轮机常见的振动故障分析及故障诊断技术[J]. 电力设备管理, 2024, (15): 69-71.
- [4] 邹少聪. 火电厂汽轮机振动异常原因及故障判断研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60 (05): 180-182.
- [5] 李建飞. 火电厂汽轮机异常振动故障排查技术的研究[J]. 中国设备工程, 2024, (07): 207-209.
- [6] 王杰. 火电厂汽轮机振动故障和诊断技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60 (01): 17-19.

Study on fault detection and maintenance of primary electrical equipment in thermal power plant

Zhongchen Sun Libing Lei Xianghua Zheng

Huaneng Yunnan East Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

In the context of modern economic development, electricity demand continues to grow while higher requirements are placed on power generation quality and efficiency in thermal power plants. Electrical primary equipment plays an indispensable role in thermal power plant operations. However, common operational issues with generators, transformers, and other devices often affect overall plant efficiency. To address this, it is crucial to implement practical fault detection measures and optimize maintenance strategies based on actual conditions, thereby ensuring stable plant operations. This paper analyzes key fault detection techniques and maintenance approaches for electrical primary equipment in thermal power plants, aiming to enhance operational efficiency, reduce failure risks, and facilitate smooth production processes.

Keywords

thermal power plant, electrical primary equipment, fault detection, maintenance points

火电厂电气一次设备故障检测与维修要点研究

孙中臣 雷犁兵 郑祥华

华能云南滇东能源有限责任公司, 中国·云南 曲靖 655000

摘要

现代化经济发展背景下, 电力需求日益呈现增长趋势, 同时对火电厂发电质量和效率提出了更高的要求。在火电厂生产活动中, 电气一次设备发挥不可或缺的重要作用, 但是发电机、变压器等设备运行中往往会出现一些故障问题, 影响整体火电厂的运行效率。基于此, 要结合实际情况, 做好电气一次设备故障检测工作, 优化故障维修要点, 保障火电厂运行质量。文章主要对火电厂电气一次设备故障检测要点和维修策略进行分析, 从而有效提升电气一次设备运行效率, 减少故障发生几率, 促进火电厂生产活动的顺利进行。

关键词

火电厂; 电气一次设备; 故障检测; 维修要点

1 引言

电气一次设备运行状态与整体火电厂生产效率息息相关, 一旦一次设备频繁出现故障问题, 会很大程度上降低火电厂发电效和质量, 难以满足社会经济发力的电力需求。基于此, 火电厂要做好电气一次设备故障检测和维修工作, 完善检测和维修制度, 跟踪分析判断电气设备工作状态, 提前采取合理的故障预防措施, 减少设备故障出现几率, 促进火电厂高效发展。

2 火电厂电气一次设备故障检测与维修意义

2.1 减少设备安全事故

电气一次设备故障会限制火电厂的可靠性运行, 甚至

引发电力供应隐患, 不利于整体电力网络的安全可靠性运行。基于此, 做好电气一次设备故障检测与维修工作, 才能动态跟踪设备运行状态, 提前发现可能出现的故障问题, 并及时采取针对性的应对措施, 把设备故障发生几率控制在最小化。同时能够减少检修人员的工作压力, 降低工作强度, 提高整体电气一次设备故障检测与维修工作效率。

2.2 延长设备使用寿命

电气一次设备在火电厂运行发展中占据重要地位, 其使用寿命直接关系到火电厂经济效益。如果设备故障检测与维修工作不到位, 不仅影响发电效率, 且缩短设备使用寿命, 甚至提前退役^[1]。针对这种情况, 火电厂需要及时采取合理的设备故障检测与维修工作, 及时发现设备老化、损坏、发热等故障问题, 并采取针对性的应对措施, 保障一次设备始终保持良好的运行状态, 延长使用寿命。

2.3 控制设备运营成本

传统的检修模式容易出现设备过修、欠修问题, 致使

【作者简介】孙中臣(1984-), 男, 中国山东济宁人, 本科, 工程师, 从事火电厂电气设备检修工作管理研究。

设备运营成本较高,甚至引起火电厂停产、停运等问题,严重加大火电厂运行成本。基于此,火电厂需要加大电气一次设备状态检修力度,动态监测设备运行状态,有效预防设备故障问题的出现,进而解决设备养护维修成本,促进火电厂整体经济效益的增加。

3 火电厂电气一次设备常见故障及应对措施

3.1 绝缘故障

这是电气一次设备常见故障之一,引起因素有:环境湿度过高,致使绝缘材料受潮,降低绝缘性能;温度过高,致使绝缘层加速老化;设备制造过程中存在缺陷问题、运行过程中的机械应力等问题,也会影响设备绝缘性能^[2]。针对绝缘故障,需要对电气设备运行环境进行合理调控,保障环境温度、湿度符合设计要求;做好泄漏电流监测工作,定期组织开展局放检测工作,并利用红外成像技术对绝缘层温度变化情况进行动态观察,这样可以帮助工作人员第一时间发现设备绝缘性能变化情况,进而采取针对性的应对措施。

3.2 导线故障

一次设备之间主要是通过导线连接起来的。一旦导线受潮、磨损、老化等问题,会引起导线绝缘层破损,这样一来导向直接暴露在空气中,再加上混线现象,引起短路故障;导向运行环境温度较高,容易引起接头发热现象,致使接触面氧化,这样一来容易引起导线接触不良现象,甚至引起电弧、电火花、电火灾等安全事故。针对导线故障问题,需要利用红外成像技术对设备接头进行检测和观察,一旦发现导电回路发热问题,需要采取合理措施进行处理;当电气一次设备出现停运现象时,需要对导电回路电阻进行检测,观察是否存在导电回路电阻加大的现象,进而采取针对性的防控措施,减少安全事故的出现几率^[3]。

3.3 接地故障

电气接地故障容易引起电力系统短路、自动设备误动、保护设备拒动等问题,甚至引起爆炸事故。电气接地包含直流系统接地和交流系统接地。前者故障影响因素有:直流线路进水、电气设备受潮;接线松动、电缆绝缘性能低;电缆老化、损伤;蓄电池漏液等。针对接地故障,工作人员需要对电缆进行正确接地,尤其可以利用圆形接地降低设备电压;正确设置接地导体,完善设备内部专用检测系统,制定定期检测机制,控制设备安全循环运行,促进发动机的安全运行。工作人员需要优化接地设计,全面了解设备材料、性能缺陷、防腐效果等,定期检查和维修,避免出现接地接触不良问题,促进电厂安全可靠运行^[4]。

3.4 变压器故障

(1)内部故障,即变压器绕组短路问题、引出线接地故障问题。一旦出现短路问题,容易引起电流增大、油面增加,致使变频器异常噪声,电压波动较大,致使变压器风扇现象。(2)外部故障,即引出线相近故障、绝缘套管短故障、

变压器铁芯过热故障等。针对变压器故障问题,需要采取合理的检修措施,即(1)通过个人感官检修,如观察油位情况、绝缘电阻损耗情况等;鼻子闻;耳朵听设备振动、异常噪音;手摸设备过热问题。(2)利用电磁实验进行检测,并结合绝缘电阻、电源电压、介质损耗等情况进行评价。(3)利用光谱分析油中溶解气体情况,这样可以判断变压器缺陷。精确检查变压器含水率,评估绝缘性能。(4)利用电子方式激活-确定技术检测特殊故障。(5)检查内部机油最佳限值,利用红外技术检测油层温度,分析变压器实际油温与设计油温的差异^[5]。

3.5 发电机故障

发电机故障问题原因有:冷水系统漏氢、转子匝之间短路、滑环故障等。针对冷水系统漏氢故障,需要利用专用仪器设备定期检测发电机密封盖的密封状态,避免氢气管道出现断电问题,减少漏氢现象,同时提高冷却水监测频率,提高冷却水质量。针对转子匝之间短路问题,需要对发电机密闭油系统内部整洁性进行定期检查,防止发电机出现连续低压运行状态,进而减少不良回油问题的出现几率,防止电机转子空气循环管混入杂质。针对滑环故障,需要实时监测碳刷、滑环运行状态,定期清洁进气口过滤器,做好滑环底部防锈工作。

3.6 断路器故障

当断路器出现短路故障时,会主动堵截电路,极大安全隐患出现几率;电厂机组运行中的小姑丈,也会引起断路器失灵问题^[6]。针对以上问题,需要安装断路器寿命评估软件,这样能够对断路器数量、制动电路进行实时计算,进而精准评估断路器寿命。利用红外成像、紫外成像方法,就是利用光纤测温、红外无线测温、弧光保护相结合的方式,协同检测真空开关状态,保障断路器始终处于良好的运行装台

4 火电厂电气一次设备故障检测与维修要点

4.1 完善维修管理制度

火电厂需要结合实际情况,制定完善的设备运行规程、设备检修规程,同时制定健全的设备日常维护规程管理制度。在设备运行规程中,要明确设备运行工况,合理设计设备操作顺序方法,并明确注意事项。在检修规程中,要提出明确的设备检修项目和标准,进一步提高设备检修工艺,使其达到预期效果。火电厂还需要结合自身情况,制定完善的日常维护制度,尤其需要在互联网技术支持下,组织开展线上检测、带电检测、预防性试验等,从而提高设备检修和维护效率。制定健全的预防检修与维护体系,构建完善的投运设备使用情况数据库,完善详细的预防性管理计划,优化操作流程,科学管理设备磨损情况,避免出现设备闲置现象,有效控制单个设备的工作量^[7]。其中火电厂电气一次设备检修质量评价标准如图1所示。

检修质量等级	A级	B级	C级	D级
检修工艺执行度	完全满足要求	基本满足要求	部分满足要求	不满足要求
检修质量合格率	≥95%	≥90%	≥85%	<85%
设备可靠性提升	明显提升	有所提升	有限提升	未提升
检修成本控制	优	良	一般	差

图1 火电厂电气一次设备检修质量评价标准

4.2 实施常态化设备巡检

火电厂结合实际情况，构建完善的电气一次设备检测与维护制度，为日常检修工作的开展提供科学指导，尤其要精确设备检修内容、周期和标准。尤其要健全设备徐建制度，

明确每日巡检项目、巡检标准；每周巡检内容清单、巡检标准；每月巡检项目清单、巡检标准等。在此环节中，需要提高重要设备的巡检次数，明确巡检清单标准和重点，实现分层分级巡检，及时发现设备缺陷问题库。

4.3 做好设备数据监测工作

新时期，火电厂需要采取新型的状态检修模式，对设备运行过程中产生的各类数据进行全面采集和分析，同时结合设备类型、级别的差异性，对其进行分级对待。如针对大型电力设备，要选择专业检测设备实时监测，及时发现设备异常，并采取针对性的措施排除故障；在线监测氧化锌避雷器泄漏电流、全电流情况，判断避雷器缺陷故障问题，采取合理的预防措施，减少设备损坏问题^[8]。在火电厂运行中引入智能设备，突出体现状态检修模式的预测性、即时性功能，并强化数据积累，强化综合数据分析，形成设备状态信息综合评估体系，为设备检修工作的开展提供完善的数据支持。其中，火电厂电气监控系统在线监测方案如图2所示。

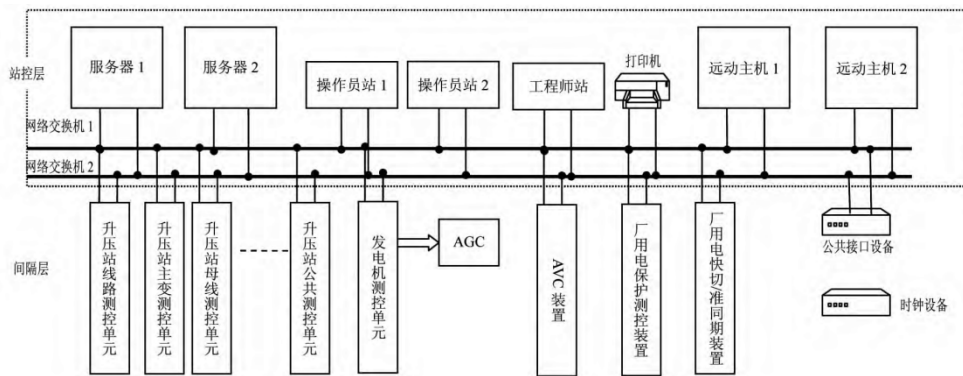


图2 火电厂电气监控系统在线监测方案

4.4 其他方面

(1) 定期保养消耗品、磨损件。在电气一次设备运行过程中，要对变压器油的呼吸硅胶、发电机励磁系统的碳刷、旋转电机的轴承润滑油等消耗品、磨损减进行定期保养和更换。要做好室外导线金具、螺栓等设备防腐措施。

(2) 消除设备缺陷。构建设备缺陷管理制度，评估设备缺陷等级，实施分层分级审批机制。针对不能消除的缺陷，需要制定严格的预防措施，完善应急预案，严格处置危害性较大的紧急缺陷，避免危害人身健康。

5 结论

综上所述，为了提高火电厂运行质量和效率，需要做好电气一次设备的检修和维修工作，尤其要对断路器、发电机、接地等故障问题的及时检测和维修，减少设备故障问题的出现几率。此外要完善设备检修管理制度，实施常态化设备巡检制度，做好设备数据监测工作，优化设备保养，消除设备缺陷，从而保障火电厂的可靠性运行。

参考文献

- [1] 彭云. 变电站一次设备故障诊断与维护技术 [J]. 工业控制计算机, 2025, 38 (06): 175-176.
- [2] 柏文超. 火电厂电气一次设备状态检修的有效措施分析 [J]. 锅炉制造, 2025, (03): 57-59.
- [3] 王佳. 火力发电厂电气一次设备常见故障分析[C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(七). 国能寿光发电有限责任公司, 2024: 199-201.
- [4] 李小梦. 火电厂电气一次设备故障检测与维修分析 [J]. 中国机械, 2023, (23): 96-99.
- [5] 徐青. 火电厂电气一次设备故障检测与维修探究 [J]. 中国设备工程, 2022, (19): 187-189.
- [6] 姜星安, 邵芃源. 探究火电厂电气一次设备的状态检修措施 [J]. 电气时代, 2022, (08): 63-65+68.
- [7] 邓昕昂. 火电厂电气一次设备故障检测与维修 [J]. 设备管理与维修, 2022, (06): 83-85.
- [8] 王娜. 火力发电厂电气一次设备故障及排查重点 [J]. 中国高科技, 2021, (17): 87-88.

Construction and evaluation of lattice structures for 3D printing

Minghe Zhang

Guangdong Dongji Electromechanical Equipment Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

To address the urgent need for lightweight multifunctional structures in aerospace and bone implants, this paper proposes an integrated 3D printing method combining gradient lattice design, evaluation, and manufacturing. A heterogeneous model with continuous rod diameter variation is constructed using BCC cells, deriving analytical relationships between specific surface area, porosity, and rod diameter through experimental verification with $< 3\%$ error. The finite element model using $7 \times 7 \times 7$ cells demonstrates that quadratic gradient can maintain peak strength while reducing weight by 32%. FDM-printed Cross-BCC gradient specimens validate the process feasibility, successfully achieving 19% weight reduction and 28% stress reduction in aircraft bearing brackets. This provides a practical technical approach for structural-functional integration under extreme service conditions.

Keywords

lattice structure, additive manufacturing, BCC structure, gradient structure

面向 3D 打印的点阵结构构建及其评价

张明合

广东海吉机电设备有限公司, 中国·广东广州 510000

摘要

面向航空航天与骨植入体对轻质多功能结构的迫切需求, 本文提出可3D打印的梯度点阵设计-评价-制造一体化方法。基于BCC胞元构建杆径连续变化的非均质模型, 推导出比表面积与孔隙率、杆径的解析关系并通过实验验证误差 $< 3\%$ 。利用 $7 \times 7 \times 7$ 胞元有限元模型揭示, 二次函数梯度可在减重32%的同时保持峰值强度。FDM打印Cross-BCC梯度试件验证了工艺可行性, 并成功用于飞机轴承支架轻量化, 实现19%减重与28%应力下降, 为极端服役环境下的结构-功能一体化提供可直接落地的技术路线。

关键词

点阵结构、增材制造、BCC结构、梯度结构

1 引言

点阵结构因其可编程的胞元构型、可调控的孔隙特征以及可扩展的多物理耦合能力, 正在重塑“轻质高强”概念的内涵。通过调整胞元的拓扑、杆径及空间分布, 可在同一构件中实现刚度、热导、电磁波衰减等性能的梯度匹配, 从而把传统“材料选择”问题转化为“几何编程”问题。更重要的是, 其内部连续而贯通的空隙网络为对流换热、骨长入及生物固定提供了天然通道, 使结构不仅承载, 更主动参与环境和生命过程的能量与信息交换。

然而, 点阵结构的工程落地仍面临三大瓶颈: 一是微结构参数与宏观性能之间缺乏统一的解析模型, 导致设计试错成本高; 二是梯度变化带来的几何突变易引发打印缺陷,

工艺窗口狭窄; 三是多功能评价维度割裂, 难以在单一计算框架内完成力-热-生耦合预测。因此, 建立“几何-性能-工艺”全链条闭环, 成为决定点阵结构能否从实验室走向极端服役场景的关键。本文即在此背景下, 提出面向3D打印的梯度点阵设计-评价-制造一体化方法, 期望以可量产的增材工艺, 为航天器与骨植入体提供兼具承载与功能属性的下一代结构解决方案。

2 均质点阵结构模型概述

均质点阵结构以“单胞-阵列”思想为核心, 通过将一种拓扑构型在三维空间周期性排布, 获得宏观均一、微观有序的轻质多孔实体。本文选用体心立方(BCC)作为基础胞元: 在边长为 a 的立方体骨架内, 八根圆柱杆连接立方顶点到体心, 节点处以球体过渡消除应力集中; 当 a 取5 mm、杆径 d 与节点球径 D 以0.618比例协同缩放时, 单胞在SolidWorks中一次建模即可通过线性阵列快速生成 $7 \times 7 \times 7$

【作者简介】张明合(1980-), 男, 中国安徽宿州人, 本科, 工程师, 从事机械与自动化研究。

阵列,整体尺寸 35 mm^3 ,兼顾有限元统计收敛与打印机成形腔约束。模型另存为 STL 并经 Magics 修复,确保后续打印路径与仿真网格一一对应。

在均质框架下,所有单胞共享同一组几何参数,因此孔隙率 ϕ 、比表面积 S_v 及相对密度 ρ^* 仅由杆径 d 唯一决定。实验与理论对照表明: d 由 0.4 mm 增至 1.6 mm 时, ϕ 自 92% 递减至 67% , S_v 由 0.57 mm^{-1} 降至 0.26 mm^{-1} ,误差 $< 3\%$ 。该单调映射关系为后续梯度设计提供了基准数据库;同时,均质阵列打印出的 ABS 试件压缩曲线呈现典型弹-塑-压实三阶段特征,峰值平台与仿真结果偏差 $< 5\%$,验证了“几何-性能”解析模型的可信性。

3 均质点阵结构模型设计

3.1 点阵结构单元体结构设计

3.1.1 设计方法

当前点阵结构单胞的获取途径大体可归为三类:正向参数化建模、数学函数驱动建模和逆向反求建模。正向参数化建模以 SolidWorks、UG、Creo 等 CAD 平台为主要载体,设计人员首先依据目标性能选定胞元拓扑(如 BCC、FCC、SC、Octet 等),随后在草图环境中约束杆件轴线、节点球径及过渡圆角等关键尺寸,通过“拉伸-旋转-阵列-布尔”四步操作完成单胞实体化;当胞元参数需要批量调整时,可借助 CAD 平台的二次开发接口(SolidWorks VBA、UG/Open API 等)将几何尺寸链接至外部 Excel 表格,实现“一键更新”式参数驱动。该方法优势在于几何完整度高、可直接对接 CAE/切片软件,适合工程化落地;缺点则是面对高阶曲面或梯度变径时,特征树复杂度呈指数级上升,人工维护成本高。数学函数驱动建模则利用 MATLAB、Grasshopper 或 nTopology 等平台,以隐函数 $f(x, y, z)=0$ 或参数方程 $r(u, v, w)$ 描述杆件中轴线及截面半径,通过控制函数系数即可在毫秒级完成单胞重构;其长处是易于生成连续梯度或混沌孔洞等复杂形态,且天然兼容拓扑优化输出的密度场,但对工程师的数学抽象能力要求较高,且生成的 STL 面片数量庞大,需二次简化才能用于打印。逆向反求建模依托三维扫描仪或显微 CT 获取实体点云,经 Geomagic Design X、Mimics 等软件进行曲面拟合与降噪后,直接导出实体模型;该路线可忠实地复现天然骨小梁或已验证的试件形貌,规避了“设计-验证”反复迭代,然而扫描精度受设备分辨率和试件表面反光特性限制,且难以对孔径、杆径等微观参数进行统计意义上的精确控制。

综合考虑可重复性、工艺兼容性与团队技术储备,本文选用“正向参数化建模为主,数学函数驱动为辅”的混合策略。

3.1.2 品胞单元选择

点阵结构模型是一种在三维空间中周期性重复的结构,并且相互之间均匀且过渡连接。选择合适的单元类型非常重

要。常见的品胞单元有面心立方品胞、体心立方品胞和密排六方品胞等。BCC 点阵结构是一种晶体结构,由原子组成的三维排列。它的几何形状是一个由六个面构成的立方体,每个角落有一个原子,在立方体中心也有一个原子。品格常数是立方体的边长乘以 $\sqrt{2}$ 的倒数,也就是立方体的对角线长度的一半。BCC 点阵结构具有体心对称性,也就是说,从任何一个点出发向相对位置相同的四个点各连接一条向量,这四条向量的长度相同,且互相垂直,其形状可以看作一个立方体内接一个球形^[3]。

3.2 点阵结构的参数

3.2.1 孔隙率的测量

多孔结构的孔隙率定义为材料内部孔隙体积与总体积之比,是衡量其孔隙特性的核心指标,通常以百分数表示。孔隙率越大,表明材料内部空隙越多、实体部分越少,整体密度随之降低,进而带来透气性、吸附能力或其他功能性能的显著提升。实际测量时,可按以下排水法操作。

3.2.2 比表面积

本文将比表面积定义为规则点阵单元体中所有圆柱梁外表面积之和与单元体体积之比。以 BCC、FCC、SC 三种典型均质点阵为例,建模时先由 SolidWorks 生成单胞,再经两次阵列得到 $7 \times 7 \times 7$ 的实体模型;单元体边长记为 a ,圆柱梁半径记为 r ,则单胞体积 $V_0=a^3$ 。对于三根正交圆柱梁相贯形成的骨架,其外露表面积 A 可分解为三部分:两两圆柱相交产生的双圆柱交贯面、三圆柱共同相交的三圆柱交贯面及剩余圆柱面。经数学推导并化简^[4],双圆柱交贯面面积公式为 $2\pi r^2(2-\sec^{-1}\sqrt{2})$,三圆柱交贯面面积公式为 $3\pi r^2(6-4\sqrt{2})$,剩余圆柱面面积公式为 $3 \times 2\pi r \cdot a-3\pi r^2(2\sqrt{2}-2)$ 。将上述三项相加并除以单胞体积,可得比表面积 S_v 的通用表达式 $S_v=[3\pi r(2a-r(4\sqrt{2}-4))]/a^3$ 。为验证公式的有效性,本文对 BCC 结构按 7 mm 、 10 mm 、 12 mm 、 15 mm 四种杆径进行了参数化计算:随着杆径增大,实体体积占比上升,孔隙率由 92% 降至 67% ,比表面积则由 0.57 mm^{-1} 递减至 0.26 mm^{-1} ,与实验称重法测得的数据误差小于 3% ,证明了理论模型的准确性。

4 非均质点阵结构模型设计

均质点阵结构的优势在于只需构建一个单元体然后对其进行阵列就可以形成实体,但是相对来说,由于均质点阵结构内部单元体单一,所以对点阵结构内部不同位置的结构性能和力学参数不能进行有效的调控。

非均质点阵结构中存在不同的材料和形状,这些不同的材料和形状可以相互补充,从而提高整个结构的稳定性。相比之下,均质点阵结构中只有一种材料和形状,容易出现单一点失效导致整个结构崩塌的情况。非均质点阵结构中存在不同的材料和形状,这些不同的材料和形状可以相互补充,从而提高整个结构的机械性能,如强度、韧性等。

梯度点阵结构是一种将点阵结构按照某种规律进行渐进性变化,使得物质具有逐渐改变的物理和化学性质的结构。例如,可以通过将晶体的晶粒大小、晶体取向或成分在空间上呈现逐渐变化的方式来制备梯度点阵结构薄膜。这种结构的应用领域广泛,例如用于能量转换器件、传感器、催化剂等领域。梯度点阵结构的制备需要掌握多学科交叉的技术,如材料制备、工艺技术、表征和模拟等。

异构区域若想可靠衔接,需确保相邻层在连接界面共享一致的几何参数,例如相同杆径。据此,本文选取两类 BCC 构型——均质与杆径梯度——作为研究对象,前者杆径恒定,后者杆径沿厚度方向连续变化,但层间交界面杆径保持一致,以避免突变诱发的应力集中。为兼顾计算效率与统计代表性,经网格无关性验证后,将单胞阵列规模定为 $7 \times 7 \times 7$,该尺度在 $5 \times 5 \times 5$ 基础上已能收敛至稳定宏观性能,从而为后续梯度构型优化奠定可靠基准。

5 点阵结构的 3D 打印成型及应用

5.1 点阵结构的打印

本文打印仅仅只是描述具体的打印过程中的操作步骤,点阵结构三维模型通过 Solidworks 三维软件,首先构建每个点阵结构的单元体,例如 BCC 单元体,在一个平面中画出两个垂直的圆柱体,然后画出与已知平面相交 45° 的对称轴,接着利用对称命令,得到 BCC 单元体。^[9]将三维模型另存为 STL 文件并导入切片软件,在软件中缩小 50 倍,切片完成后得到 GX 格式文件,然后通过 U 盘导入到 FDM 打印机中进行打印。本次使用的打印机为 Flashforge Finder,外观采用黑色、红色的颜色配置,整体尺寸为 $420\text{mm} \times 420\text{mm} \times 420\text{mm}$,喷嘴口径为 0.4mm ,打印精度为 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$,构建尺寸为 $140 \times 140 \times 140\text{mm}$,属于单喷头机型。

5.2 点阵结构的应用

点阵结构作为一种非实体新型轻质结构,具有许多优异的特性,其高比强度高比刚度的特性能够在保证承载能力的同时极大地减少材料的损耗,起到节约成本,提高材料利用率的作用。本节将使用点阵结构对飞机轴承支架模型进行轻量化设计,首先通过使用 Solidwork 三维建模软件构建出标准的轴承支架模型,再对其进行拓扑优化。

本文中 will 使用 Cross 点阵结构对其轻量化设计,所以需要构建 Cross 杆状结构模型,杆状结构模型如下图所示。图中使用的是直接过度方式会产生较大的应力集中,本文使用常见的优化设计将连接处改为圆角过渡设计,能够有效的避免应力集中,从而获得更好的结构。

在获取优化空间后,将杆状结构填充设计空间部分,可通过使用简单布尔运算对其优化空间进行填充,但是通过布尔运算获取的结构模型可能会导致部分单胞不完整,那么它的性能将不好预测,所以最好使用不同棱长的杆状多孔结

构互相配合能达到更好的效果,因为时间等原因,所以本文中使用的是简单布尔运算进行代替。后使用 Solidwork 中的装配体配合,将其嵌入轴承支架模型中即可完成对飞机轴承支架模型的轻量化设计,结合有限元分析软件 Abaqus 对其受力情况进行分析,再后续进一步优化设计。

在实际应用过程中,由于不同的杆状结构表现出不一样的性能特征,在不同的应用场景下应选择合适的多孔结构以达到轻量化设计要求,点阵结构还具有高能量吸收能力、良好的热性能、高阻尼、生物相容性等特性。已有研究表明,这些优异特性在航空航天、汽车制造、生物医疗、体育运动等领域都有了很大的应用。

6 结语

本研究从“让结构适应功能”而非“让功能迁就结构”的新视角出发,系统回答了“如何设计—如何评价—如何制造—如何应用”点阵结构的全链条问题。理论上,我们给出了比表面积与孔隙率、杆径的封闭解,填补了微结构参数与宏观性能定量关联的空白;方法上,构建了以 BCC 为骨架、杆径梯度为调节变量的非均质模型库,并通过 $7 \times 7 \times 7$ 胞元尺度证明了模型的统计收敛性,为后续多尺度优化奠定了可扩展的计算框架;工艺上,FDM 打印实验证实,只要杆径梯度变化率控制在 0.02 mm 以内,即可在保证成形精度的同时消除层间裂纹;应用上,飞机轴承支架案例表明,梯度点阵不仅实现减重增效,还把传统“后处理减重”变为“设计即减重”,为航天器、导弹壳体、人体植入物等严苛服役场景提供了“一次打印、多重功能”的解决方案。未来工作将沿三条主线展开:一是引入机器学习逆向设计,以性能指标直接驱动微结构拓扑生成,进一步缩短迭代周期;二是开发基于激光选区熔化(SLM)的钛合金梯度点阵,验证其在骨小梁模量匹配及长期生物力学稳定性上的临床价值;三是建立涵盖热、电、磁耦合场的多物理评价平台,实现点阵结构在防隔热、电磁屏蔽、能量收集等跨尺度功能的一体化设计。

参考文献

- [1] 王靖宇,常正.多级点阵结构压缩性能设计与分析[C]//北京力学学会第30届学术年会.中国农业大学,2024.
- [2] 赵雨,张羽翔,程琰,等.基于3D打印的模块化点阵结构创意设计研究[J].北京服装学院学报(自然科学版),2024,44(2):23-29.
- [3] 赵政.基于密度法的梯度点阵结构多目标优化设计[D].大连理工大学,2023.
- [4] 江尧峰,许明三,曾寿金,叶建华,韦铁平,谢伟鹏.SIM 成型 316,体心立方点阵结构力学性能优化[J].塑性工程学报,2023,30(04):178-186.
- [5] 徐香新.理想八面体点阵结构力学模型优化及力学性能测试分析[J].力学季刊,2021,42(04):696-706.

Research on Optimization of Welding Processes and Joint Properties of High-Strength Steel Pipes for Petroleum Storage and Transportation Containers

Yinsheng Han

Beijing Longshengtaike Petroleum Pipe Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

The application of high-strength steel pipes in petroleum storage and transportation containers plays a crucial role in enhancing container safety and durability. The optimization of welding processes is one of the key factors affecting joint performance. This paper explores methods to optimize welding processes for high-strength steel pipes, focusing on analyzing how various parameters during the welding process influence joint properties. Through systematic evaluation of the advantages and disadvantages of different welding techniques, combined with advancements in material mechanics and welding technologies, this study proposes optimized solutions to improve joint strength and ductility. The improved welding process effectively enhances the mechanical properties and corrosion resistance of steel pipe joints, ensuring safe operation of petroleum storage and transportation containers.

Keywords

high-strength steel pipes; welding processes; joint properties; petroleum storage and transportation; optimization

石油储运容器用高强度钢管焊接工艺优化及接头性能研究

韩银生

北京隆盛泰科石油管科技有限公司, 中国·北京 100000

摘要

高强度钢管在石油储运容器中的应用对提高容器的安全性和耐用性具有重要意义。焊接工艺的优化是影响接头性能的关键因素之一。针对这一问题, 本文探讨了高强度钢管焊接工艺的优化方法, 重点分析了焊接过程中的各项参数对接头性能的影响。通过系统分析不同焊接方法的优缺点, 结合材料力学性能和焊接技术的发展, 提出了提高接头强度和延展性的优化方案。优化后的焊接工艺能够有效提高钢管接头的力学性能和抗腐蚀性, 为石油储运容器的安全使用提供保障。

关键词

高强度钢管; 焊接工艺; 接头性能; 石油储运; 优化

1 引言

高强度钢管在石油储运容器中广泛应用, 因其优异的力学性能和耐腐蚀特性, 在提高储运容器安全性和使用寿命方面发挥了重要作用。随着对容器性能要求的不断提高, 焊接工艺的优化成为提升钢管接头性能的关键因素。传统焊接工艺存在一定的局限性, 难以完全满足高强度钢管对接头强度和耐用性的要求。优化焊接工艺, 不仅能够改善接头的力学性能, 还能提升容器在恶劣环境中的耐腐蚀能力。通过研究焊接过程中各参数的变化对接头性能的影响, 探索出一条提高石油储运容器焊接质量的有效路径, 已成为业界亟待解决的重要课题。

【作者简介】韩银生(1977-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事石油天然气管道技术服务, 监造等研究。

2 高强度钢管焊接工艺的基本原理与发展现状

2.1 高强度钢管的材料特性分析

高强度钢管具有较高的强度、良好的耐腐蚀性和良好的焊接性, 广泛应用于石油、化工等行业中的储运容器及其他关键结构。其主要成分为碳、铬、镍、钼等合金元素, 这些合金元素的加入使钢管的力学性能得到显著提高。高强度钢管在使用过程中, 需承受较大的压力与温差变化, 因此要求钢管的耐压性、抗裂纹扩展性和耐腐蚀性能达到较高标准。焊接高强度钢管时, 通常会选择合适的填充材料和焊接工艺, 以保持其力学性能和化学稳定性。材料的热处理过程也直接影响钢管的焊接性能, 如热影响区的金属组织变化会影响接头的强度和韧性。了解这些材料的特性有助于为焊接工艺优化提供基础依据。

2.2 焊接工艺对钢管接头性能的影响

焊接工艺对钢管接头的性能具有重要影响。不同的焊

接方法,如TIG焊、MIG焊、激光焊接等,会导致接头区域的晶粒结构、应力分布及耐腐蚀性发生变化。焊接过程中,温度场和应力场的分布影响着焊接接头的微观组织和宏观性能,过高或过低的焊接温度均可能导致接头的力学性能不达标,甚至出现裂纹、气孔等缺陷。焊接速度、焊接电流等工艺参数的变化,也会影响接头的热影响区、焊缝金属的组织结构。优化这些工艺参数,能有效提高焊接接头的强度和稳定性,保证钢管在实际使用中的安全性和耐久性。

2.3 国内外高强度钢管焊接技术的研究现状

随着高强度钢管的应用领域不断扩大,国内外对高强度钢管焊接技术的研究也逐步深入。目前,国内的研究多集中在提高焊接接头强度与提高抗腐蚀性的技术上,且研究主要集中于低合金高强度钢管和不锈钢管的焊接工艺优化。国外在焊接高强度钢管方面的研究多采用先进的焊接技术,如激光焊接、自动化焊接技术等,取得了显著成果。采用激光焊接能够有效提高接头的焊接质量,减少热影响区的区域大小,提升焊接接头的强度和韧性。采用智能化控制的焊接工艺也逐渐成为趋势,这些技术不仅优化了焊接参数,还提高了焊接过程的自动化和精确性,为高强度钢管焊接技术的提升提供了新的思路。

3 高强度钢管焊接工艺优化的关键因素

3.1 焊接温度对接头性能的影响

焊接温度是影响高强度钢管焊接质量的关键因素之一。焊接过程中的热输入过高或过低,都可能对接头性能造成不良影响。过高的焊接温度容易导致焊缝金属的过度熔化,从而增加裂纹的风险,同时也会引起热影响区的晶粒粗化,降低接头的强度和韧性。相反,焊接温度过低会导致焊缝的接合不良,甚至无法完全熔合,导致接头强度下降。在实际焊接过程中,需要精确控制焊接温度,保持在一个适当范围内,以确保焊接接头的强度和韧性能够满足设计要求。

3.2 焊接速度与焊接应力的关系

焊接速度对接头性能的影响也不容忽视。焊接速度过快可能导致焊接温度不足,焊缝未能完全熔化,形成缺陷,而焊接速度过慢则会导致过多的热量输入,进而导致热影响区的区域增大,影响钢管的机械性能和抗腐蚀性。焊接速度与焊接应力之间的关系也直接影响焊接接头的质量。在焊接过程中,焊接应力可能引发接头的裂纹或变形,特别是在高强度钢管焊接时,应力的集中会加剧接头的损伤。合理控制焊接速度和应力分布,能够有效提升焊接接头的综合性能,确保钢管在复杂环境下的使用安全。

3.3 焊接填充材料的选择与配比

焊接填充材料对焊接接头的性能具有至关重要的作用。选用合适的填充材料可以有效提升接头的机械性能与耐腐蚀性能。高强度钢管焊接时,填充材料的成分必须与母材的化学成分相匹配,才能达到理想的焊接效果。填充材料的碳

含量、合金元素比例等直接影响焊缝金属的晶体结构和力学性能。在实际操作中,不同焊接方法下填充材料的选择也有所不同,合适的填充材料不仅能改善焊缝的韧性和抗拉强度,还能提高焊缝的耐腐蚀性,减少焊接过程中可能出现的缺陷。

4 高强度钢管焊接接头性能的评估方法与实验研究

4.1 焊接接头的力学性能测试

焊接接头的力学性能测试是评价焊接质量的基础手段之一。力学性能测试通常包括拉伸试验、弯曲试验、冲击试验等,通过这些试验可以获取接头的抗拉强度、屈服强度、延伸率等重要指标。拉伸试验能够直接反映焊接接头的承载能力,而弯曲试验则能测试接头在弯曲应力下的变形能力和破坏模式。冲击试验用于评估接头在低温或高温条件下的韧性表现。通过这些测试结果,可以分析焊接接头的强度和韧性,进一步为优化焊接工艺提供数据支持。

4.2 腐蚀性能的实验方法与结果

焊接接头的腐蚀性能对钢管在长期使用中的安全性至关重要,特别是在石油储运等高腐蚀环境中,腐蚀性问题尤为突出。腐蚀试验通常采用盐雾试验和浸泡试验等方法,模拟不同环境条件下的腐蚀影响。盐雾试验是在加速的腐蚀环境中,通过对焊接接头进行盐雾喷雾,测试其在盐水或潮湿环境中的耐腐蚀性,能够快速评估接头表面的腐蚀行为。浸泡试验则通过将焊接接头长时间浸泡在具有一定腐蚀性的溶液中,模拟实际使用环境中的腐蚀情况,测试其在长期暴露下的耐腐蚀性。通过这些试验,可以揭示不同焊接工艺对接头腐蚀性能的影响,为优化焊接工艺提供实验数据支持,从而改善焊接接头的耐腐蚀性能,提高高强度钢管在严苛环境中的使用寿命。

4.3 接头缺陷的检测与分析

焊接接头的缺陷检测是确保焊接质量的重要环节。常用的缺陷检测方法包括超声波检测、X射线检测和磁粉检测等,这些方法能够有效识别焊接接头中的裂纹、气孔、夹杂物等缺陷。通过对缺陷的分析,可以评估接头的质量,判断是否符合设计要求。裂纹是高强度钢管焊接过程中最常见的缺陷之一,通常发生在焊接热影响区或接头的应力集中区域。气孔和夹杂物则可能影响焊接接头的韧性和抗拉强度,缺陷的检测和分析是确保焊接质量的必要步骤。

5 高强度钢管焊接工艺优化方案的提出与实施

5.1 优化焊接工艺参数的方案设计

为了提高高强度钢管焊接接头的综合性能,优化焊接工艺参数是关键。焊接电流、电压、焊接速度和焊接温度等工艺参数的合理调整,能够直接影响焊接接头的强度和韧性。通过实验数据分析,设计出最佳的工艺参数组合。适度提高焊接电流,能够增加焊缝的熔深和焊缝金属的强度,而

适当降低焊接速度,能够提高焊缝金属的流动性,减少焊接缺陷的产生。通过合理控制热输入,能够减少热影响区的范围,防止因过大的热输入导致接头脆性增加,从而提升焊接接头的耐用性和可靠性。

5.2 基于实验结果的优化效果验证

焊接工艺优化的效果必须通过实际实验进行验证。通过一系列焊接实验,可以评估优化后的工艺对接头力学性能、抗腐蚀性等方面的影响。实验可以通过拉伸试验、弯曲试验以及冲击试验等来验证接头的强度和韧性,进一步测试优化工艺对抗腐蚀性能的改善。通过对比优化前后的焊接样品,能明确看出优化方案的实际效果,从而为焊接工艺的进一步改进提供可靠依据。优化后的工艺还可以确保焊接接头在长时间使用中的稳定性和耐久性,满足高强度钢管在严苛工作环境中的要求。

5.3 优化工艺的应用实践与效果分析

经过实验验证的焊接工艺优化方案,可以广泛应用于实际生产中。通过对不同工程项目的焊接工艺进行调整,能够验证优化方案的实际效果。针对不同规格的钢管,优化后的焊接工艺参数能够确保接头在强度、韧性和耐腐蚀性方面的优异表现。在实际应用中,焊接工艺的优化不仅提高了焊接接头的质量,还延长了高强度钢管的使用寿命,尤其是在石油储运容器等高要求的领域,确保了容器的安全性和可靠性。优化工艺的灵活性使其能够适应不同生产环境的需求,提高了生产效率和经济效益。

6 高强度钢管焊接工艺优化的未来发展方向

6.1 先进焊接技术的应用前景

激光焊接、电子束焊接以及机器人自动化焊接等先进焊接技术在高强度钢管的焊接中逐渐占据主导地位。这些技术具备高精度和高效率的特点,能够减少人为操作带来的误差,同时提升焊接接头的力学性能和质量。激光焊接以其极小的热影响区和精确的能量控制优势,能够有效避免传统焊接中常见的焊接变形、裂纹以及气孔等缺陷。电子束焊接通过精细的电子束能量集中,实现深熔透的焊接效果,适用于较厚钢管的焊接。而机器人自动化焊接可以通过精确控制焊接轨迹和参数,确保焊接质量的稳定性和一致性,极大提高生产效率和焊接接头的可靠性。这些新技术的普及和应用无疑会推动高强度钢管焊接技术的发展,并使其在更为复杂的工程应用中发挥作用。

6.2 智能化焊接工艺的发展趋势

智能化焊接工艺的发展将为高强度钢管焊接领域带来深刻变革。通过实时监控和数据采集,焊接过程中的各项参数可被精准控制和调整,确保焊接接头的质量始终保持在最

佳水平。智能焊接系统结合了先进的传感器技术和人工智能算法,可以在焊接过程中实时检测焊缝质量,自动识别潜在的缺陷,并根据检测结果及时调整焊接参数。这种高度自动化的焊接过程大幅度减少了人工干预,提高了生产效率,并且能有效减少人为错误的影响。智能化焊接工艺不仅能提升焊接质量,还能优化焊接过程,降低生产成本,特别是在高强度钢管焊接中,这种技术能够确保焊接接头在极端环境下的长期可靠性。

6.3 高强度钢管焊接质量控制技术的提升

焊接质量控制技术的提升使得高强度钢管焊接变得更加精确和可靠。无损检测技术在焊接质量控制中发挥着重要作用,能够在不破坏材料结构的前提下,检测出焊接接头中的各种缺陷,如裂纹、气孔和夹渣等。常用的无损检测方法包括超声波检测、X射线检测和磁粉检测,它们能够高效地发现焊接缺陷并定位问题区域,从而确保焊接质量的稳定性和可靠性。随着无损检测技术的不断完善,缺陷发现与修复变得更加高效。智能化控制系统的引入,使焊接过程中的实时监控和反馈更加及时,能够在出现误差时迅速调整焊接参数,从而提高接头的稳定性和耐用性。这些技术的不断创新,不仅提升了焊接质量,也为高强度钢管在石油储运等领域的安全应用提供了坚实保障。

7 结语

高强度钢管在石油储运容器中的应用具有重要意义,而焊接工艺的优化对接头性能至关重要。通过合理设计焊接工艺参数,结合先进的焊接技术和无损检测方法,能够有效提升接头的力学性能和耐腐蚀性,从而确保钢管在复杂环境中的稳定性和安全性。实验验证和实际应用表明,优化后的焊接工艺不仅提高了接头的质量,还延长了钢管的使用寿命。未来,随着智能化和自动化技术的不断发展,焊接工艺将更精细化、高效化,为高强度钢管的应用提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 邢维升.焊接工艺技术在高强度材料中的应用探索[J].冶金与材料,2025,45(06):34-36.
- [2] 王知行.低合金高强度钢焊接粗晶热影响区组织-性能关系数字化研究[D].北京科技大学,2025.
- [3] 李雅茹,孙金山,董千,等.高强度钢管约束下小直径乳化炸药爆速特性[J].工程爆破,2025,31(01):89-94.
- [4] 易焱,任小倩,雷雪霏,等.钢管混凝土拱桥钢格子梁安装施工关键技术研究[J].北方交通,2025,(01):28-32.
- [5] 王彦冰,李孟鸽.高强材料对方钢管混凝土柱滞回性能的影响分析[J].广东建材,2025,41(01):22-24.

Analysis and Handling of Common Problems with Intelligent Rapid Sulfur Analyzer

Ya Tu Wenjuan Pang Ying Chen

Inner Mongolia Baogang Steel Union Co., Ltd. Coal Coking Chemical Branch, Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

The automatic sulfur measuring instrument is used for the analysis of coal quality and coke sulfur index. In the actual experiment, data anomalies are often caused by various interferences. This paper briefly discusses the various interfering factors and solutions in the field experiment. Through the analysis and research of common problems with sulfur analyzers, the main factors affecting the abnormal detection results of sulfur analyzers are determined to include system parameters, airtightness of the gas path system, purification device and filter, electrolyte, sample weight, overload operation, and ceramic boat machine. Through strict control of the operating process, standard comparison, control of material declaration, equipment and facility maintenance, etc., the detection ability of sulfur analyzers is improved to ensure the effectiveness of detection data.

Keywords

sulfur analyzer; data validity; Common problems; improvement measures

智能快速测硫仪常见问题分析处理与研究

图雅 庞文娟 陈影

内蒙古包钢钢联股份有限公司煤焦化工分公司, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要

全自动测硫仪是用于煤质及焦炭硫分指标的分析设备, 实际实验过程中经常发生因各种干扰造成的数据异常。本文对现场实验过程中产生的各种干扰因素及解决经验进行浅谈。通过对测硫仪常见问题的分析与研究, 确定了影响测硫仪造成检测结果异常的主要因素包括系统参数、气路系统气密性、净化装置及过滤器、电解液、试样重量、超负荷运行以及瓷舟规格几项内容, 通过严格管控操作过程、进行标准对照、管控材料申报、设备设施维护等几方面措施, 提高测硫仪检测能力, 保证检测数据的有效性。

关键词

测硫仪; 数据有效性; 常见问题; 改进措施

1 引言

我公司是一家承接煤焦化相关产品的检测单位, 包括煤质、水质、煤化油等。其中用于煤和焦炭中全硫含量检测的主要设备是全自动测硫仪。

全自动测硫仪检测原理是根据 GB/T214-2007 煤中全硫的测定方法中库仑滴定法, 煤样在 1150℃ 高温条件及催化剂的作用下, 在净化过的空气流中燃烧, 煤中各种形态的硫均被燃烧分解为 SO_2 和少量 SO_3 气体, 生成的二氧化硫进入含有碘化钾和溴化钾的电解池中, 被电解生成的碘或溴滴定, 之后根据法拉第电解定律计算试样中全硫的含量。

2 快速测硫仪检测过程中的影响因素

2.1 传动系统影响因素

测硫仪送样装置为轴承传动模式, 采用横式连续送样设计, 轴承带动链条逆时针转动将送样槽水平传送一个瓷舟距离, 送样卡槽向上传动, 后下降与盛样盘相切, 轴承带动链条继续传动, 后试样被送样杆, 推进燃烧管中。送样槽在移动、升起、降落后, 由于系统传动位移不均匀会导致送样槽与试样脱位, 发生“夹死”, 此时试验失败。有时发生“夹死”现象时, 系统指令依然运行, 传动系统的电机继续运转, 导致送样盘电机继续向前推动试样, 直至电机过载跳电, 发生类似问题会严重影响设备的使用寿命, 缩短或直接烧坏传动电机。或者因传动系统指令发生错误, 导致燃烧管持续烧灼一种试样, 传动系统紊乱导致的试样无法正常退出燃烧管, 异径燃烧管内有大约 70mm (1150℃) 的恒温加热区, 前面瓷舟无法退出燃烧管, 后面瓷舟的试样偏离高温燃烧带不能完全燃烧, 生成的气体硫化物不足以代表真实实验数据, 硫

【作者简介】图雅 (1982-), 女, 蒙古族, 中国内蒙古包头人, 本科, 工程师, 从事煤化工研究。

化物气体采集失真，造成数据偏离或异常的问题。

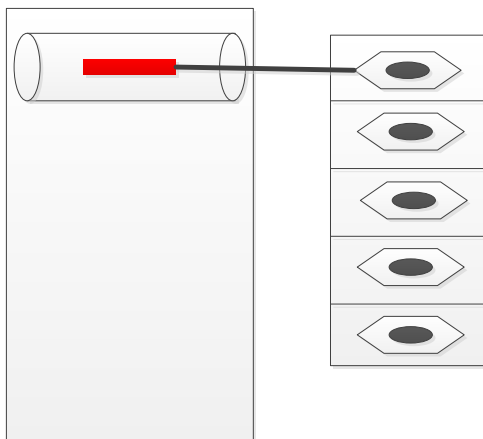


图 1 试样传动俯视图

2.2 气路系统的影响因素

全自动测硫仪的气路系统也是十分重要的组成部分，在进行标准样对照前进行气密性检查，开动抽气及供气泵，将抽气流量调节至 1000mL/min，关掉电解池旁边的进气阀，

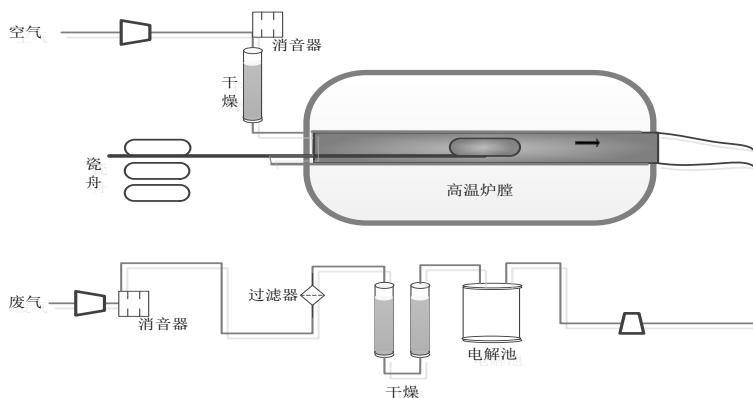


图 2 测硫仪气路图

2.4 电解液的影响因素

正常情况时，电解液为无色或者浅黄色透明状液体，PH 值为 1-3，配制方法^[1]是称取碘化钾、溴化钾各 5.0g，溶于 (250~300) mL 水中并在溶液中加入 10mL 冰乙酸。配置电解液其主要作用是二氧化硫被碘化钾溶液吸收，以电解碘化钾溶液所产生的碘和溴进行滴定。根据库伦定律，电解所消耗的电量计算煤中全硫的含量^[1]。电解液中含有 OH⁻、I⁻、Br⁻ 等离子，由于电位不同决定了某些离子放电的优先顺序和析出物质的能力，而冰乙酸由于它的冰点温度决定了配置电解液的条件较为严苛，当温度低于冰乙酸的冰点温度时，配置的电解液溶解度会降低，消耗电流增加，所测得硫含量会偏高。同时电解将样品分解成离子，在电解过程中，电解池内需要提供足够的混合和搅拌，所以电解池内部有磁力搅拌器，用以保证电解时间的准确性和电解产物的充分反应，电解液在使用过程中会不断变色，由无色或者浅黄色，到颜色逐渐加深，其电解效果会逐渐减弱，电解液的 PH 值小于

降至 300mL/min 以下，如果没有达到则检查气路是否存在漏气的情况，例如净化装置丝扣不紧，净化装置自身有裂纹，或者电解池安装不紧固，电解池杯体有裂痕或者外界因素导致的气路系统有漏气的现象，最终导致空气进入系统的流量小，煤样燃烧生成的氧化硫不能全部与电解液发生滴定反应，数据结果异常。

2.3 净化装置及过滤器的影响因素

净化装置中的蓝色硅胶主要是用于对反应生成的气体和进入系统的空气进行干燥过滤，否则进入高温炉中的未进行干燥的空气中所含的水分与生成的二氧化硫或者三氧化硫反应生成其他物质影响检测结果，同时为了防止产生的废气中带有水分，在废气进行排放前要进行过滤。所以要及时观察硅胶的颜色，如果发现硅胶柱内的硅胶一半以上变色则及时进行更换，替换下的变色硅胶可以放入烘箱内烘烤直至恢复原色可以循环使用。在安装净化器时容易发生丝扣不紧固的情况，使得净化装置处于漏气的状态。过滤器中的脱脂棉需及时更换，否则脱脂棉过载造成失效，烟尘进入气路中造成堵塞，影响数据结果。

1 时，所测得的全硫量会偏低。

2.5 试样重量的影响因素

用万分位天平称取 50mg 试样，误差值在 ±0.2，试样量的多少直接影响检测结果，试样量每增加 1mg，全硫量增加 2% 的量，表 1 为增加试样量后所测得的含硫量的比较，所以试验证明煤炭的全硫量的重量直接影响全硫量。

表 1 增加试样量后含硫量比较

试样重量 (mg)	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4
50 ± 0.2	1.06	1.26	0.72	0.39
50+1 ± 0.2	1.09	1.28	0.73	0.40
增加百分数	2.7%	1.5%	1.3%	2.5%

2.6 设备超负荷运行的影响因素

大批量上样，导致现场综合分析试样骤增，设备运行时间长，气路系统中过滤棉效果降低，粉尘进入系统，导致设备的气路系统不畅，影响检测结果；或者由于设备运行时间过长，电解池中电解液 PH 值降低，碘化钾不能够完全吸

收硫化物,导致检测结果异常;又或者异径燃烧管燃烧温度长时间高温,温控装置异常而导致的检测结果异常。

2.7 瓷舟对于测硫仪的影响因素

瓷舟材质为素瓷或者刚玉制品,装样部分为 60mm,全自动测硫仪 820 型的瓷舟外径宽为 12mm,测硫仪 1200 型外径宽为 16mm,瓷舟过宽或过窄都会直接影响设备正常运行,瓷舟过宽导致 1200 全自动机械臂“过劲”使得瓷舟产生裂纹,瓷舟过窄导致全自动机械臂夹样力度不够,试样掉落,试验失败。测硫仪 820 型也存在此类问题,820 为链条式传动系统,瓷舟过宽容易发生传动架打翻瓷舟的问题,导致传动架与瓷舟“夹死”,试验失败。

3 改进措施

3.1 传动系统影响因素的改进措施

更改控制系统的指令,调整送样卡槽运行速度,为了改善电机控制系统的“送样卡槽位移运行参数”,在合理的速度上,送样卡槽位移运行参数过快,增加了卡槽运行速度,增加了卡槽打翻试样的概率,所以即使在工作任务较重的情况下,为了确保所以送样卡槽位移运行的效率,参数设定在合理的区间内^[2]。

考虑到行程参数“送样卡槽运行速度”在不同的“时间段”具有不同的特性,因此该冲突可以从“时间”上进行调节。1) 将系统设置中第一步进样时间更改为 4.8",驻留时间为 40";第二步进样时间更改为 5",驻留时间为 0";第三步进样时间更改为 5",驻留时间为 240";退样至炉口时间更改为 6.5",驻留时间为 5"。2) 调节样品瓷舟的放置位置,预先实验总结出,瓷舟与盛样盘及送样卡槽在空间有效区域的放置方位,使送样卡槽、盛样盘的运行时无触碰点,只在推送至石英舟过程时与送样卡槽相切,解决设备卡样问题。3) 设备运行前检查进样杆,进样杆过松或过紧会导致送样不到位,增加卡样风险。4) 设备运行前检查进样滑槽是否有异物,异物导致前进行程受阻,进样不到位,增加卡样风险。

3.2 气路系统及过滤系统影响因素的改进措施

使用前进行气密性检查,进入人工检测窗口,启动气泵,加紧过滤器进气口,检查流量计位置,是否在 250mL/min,如果在则气密性良好。同时检查过滤器、电解池及净化管是否漏气,如果漏气对硅胶净化器和电解池各个接口进行旋紧检查;其次对于过滤器,检查其硅胶的颜色,如果颜色有变化,则建议更换内部硅胶,同时对更换下的硅胶做干燥处理;长时间使用测硫仪要观察过滤棉的情况,发现过滤棉发黑或发乌时极易容易堵塞气道,在当前试样检测完毕后,暂停运行,更换过滤棉,不得在设备运行中进行更换,否则容易发生气路漏气导致的试验数据异常。

3.3 电解液使用的改进

领用电解液时,应对电解液的 PH 值进行预先检测,要求电解液的 PH 值在 1-3,电解液可以反复使用,当电解液的 PH 值小于 1 时,予以废弃。这是由于随着电解液酸度的

不断增加,光敏反应增强会额外生成 I 和 Br₂ 为非极性,导致硫的结果偏低,其次注意观察电解液的颜色,正常颜色为无色或淡黄色,颜色加重时说明其内部的碘量增加,需要重新配置或更换电解液,如果电解液颜色发白,检查电解池接头或者检查所连接的线路是否存在断线,或者电解液被污染,重新对电解池进行清洗,或者重新配置电解液,同时对所盛电解液的容器进行清洗或更换,对于电解池清洗注意选用 75° 以上的酒精对电解池中的电极片进行清洗,将电解池内部及电极片上的反应物擦拭干净,否则影响电解过程^[3]。最后需要注意的是电解池内搅拌转子的速度,转子的功能是将电解出的碘和溴得到充分的扩散,速度过快或者过慢都会影响电解效果。值得注意的是电解液的存放及使用温度不得低 15℃,如果在冬季操作室温度低于 15℃时,对测硫仪进行升温至 1150℃,同时开启电解池内搅拌装置,随炉温恒定 30min 以上再进行试样检测工作。

3.4 针对试样重量准确性的改进

针对试样重量超差的情况,严格按照标准进行称量,定期对电子天平进行送检,定期对电子天平进行校准,保证有标签有记录,对所检查数据有迹可循,保证称量的准确度;其次对煤及焦炭含硫量称量及结果进行数据备份,天平室设有电子监控设备,随时对称量的准确性进行监督检验。

3.5 针对操作过程及设备设施的改进

正规渠道引进合规瓷舟,瓷舟的质地影响瓷舟的使用寿命和工作效率,要求瓷舟具有耐高温的性质,瓷舟的宽度一致,否则极易发生瓷舟炸裂或者送样过程翻车的严重后果。称取试样必须为 50mg ± 0.2 的范围值内,否则由于试样量的增减导致所测硫的含量存在误差,不足以作为参考值使用。

4 效果

采取以上改进措施后,测硫仪运行得到了有效的改进,首先卡样问题次数得到了控制;其次因测硫仪送样杆发生指令异常,试样反复燃烧的问题得到了有效的控制;因电解液问题导致的数据偏离问题得到了有效改善;因气路问题的导致的数据异常得到了改善。

5 结论

测硫仪常见问题在于气路系统的气密性和电解液部分,通常人们会忽略这两部分,恰恰是这部分的忽略容易导致数据小范围偏离,操作者不易察觉。系统部分在严格控制操作者的操作过程后,一般不会发生系统指令性错误。

参考文献

- [1] 欧阳星星,任昀,肖克,等. 硫化物标准物质在线监测仪校准中的选择与优化研究[J]. 盐科学与化工,2025,54(5):32-36.
- [2] 孙磊,张学林,王以堃. 紫外荧光测硫仪标准物质制备和校准方法研究[J]. 计量与测试技术,2025,51(4):68-71,75.
- [3] 栾文娟,潘涛,张磊,等. 浅析库伦定硫仪煤中全硫测定值偏高的原因及解决办法[J]. 仪器仪表标准化与计量,2023(5):46-48.

Optimization of Kaldor Furnace Control System

Shuqing Tian

ZIJIN MINING GROUP COMPANY LIMITED, Longyan, Fujian 364204, China

Abstract

This article introduces the process of technical transformation and optimization of the control system of the Kaldor furnace in Zijin Copper Industry's rare and precious plant. By repeatedly comparing and analyzing the communication interruption and stuttering issues, lack of system redundancy, and unreasonable program logic in the original control system, the optimal performance plan (improving system stability by about 40%) has been determined. After determining the plan, a detailed construction plan was created, and the operation is currently stable and smooth without any problems caused by the system. It is stable and reliable. I hope to provide reference for optimizing control systems for more smelting enterprises.

Keywords

control system; technological improvement and optimization; system redundancy; program logic

卡尔多炉控制系统优化

田树清

紫金矿业集团股份有限公司, 中国·福建 龙岩 364000

摘要

本文介绍了紫金铜业对其稀贵厂卡尔多炉的控制系统进行技改优化的过程。对原控制系统存在的通讯中断和卡顿问题, 没有系统冗余的问题, 以及程序逻辑不合理等问题, 通过反复对比分析, 确定最佳行性方案(提升系统稳定性约百分之四十)。确定方案后制作详细的施工计划, 完成后目前运行稳定流畅, 没有出现类似因系统而造成问题, 稳定可靠。希望能为更多冶炼企业的控制系统优化提供参考。

关键词

控制系统, 技改优化, 系统冗余, 程序逻辑

1 引言

2012年紫金铜业稀贵厂引入当时较为先进的卡尔多炉DCS控制系统, 由于未曾对系统迭代升级, 其在实际生产使用过程中逐渐暴露出多种问题。2022年, 稀贵厂针对DCS系统现有问题实施了一系列改造措施, 使系统运行的稳定性和安全性有了显著提升。

2 DCS 控制系统现有问题

紫金铜业有限公司稀贵厂所使用的卡尔多炉DCS系统是在2012年成套从国外进口而来。其设计风格和思路与国内不同, 在当时是处于比较先进的水准, 但是随着产品和操作系统的更新换代, 它已经逐渐满足不了实际需求, 主要在使用过程中易出现卡顿、信号丢失、通讯终端等系统故障, 轻者无法操作, 重者停机。同时, 卡尔多炉DCS系统目前为单控制器系统, 由两台独立的控制器分别控制两套系统, 其中

一套控制卡尔多炉及其配料系统, 另一套则控制烟气系统。这就导致单控制器系统运行时, 若控制器出现错误或掉电时将停止工作, 造成生产停摆并存在安全风险。且目前两套系统之间存在连锁, 任一系统停止工作, 则两套系统都会停止。

3 原因分析

3.1 软硬件不兼容问题

由于未曾对老旧软件更新换代, 部分硬件更新换代使得软件和硬件之间兼容性越来越差, 致使系统数据刷新缓慢, 严重时指令和数据丢失甚至系统死机。

3.2 系统无冗余问题

卡尔多炉DCS系统目前为单控制器系统, 由两台独立的控制器分别控制两套系统, 其中一套控制卡尔多炉及其配料系统, 另一套则控制烟气系统, 且两系统间存在连锁功能。这就导致单控制器系统运行时, 任一系统出现故障停机, 另一个系统也会终止工作, 造成生产停摆存在一定的安全风险。

3.3 通讯不畅问题

公司于2021年前后陆续推行智能化, 对数据的处理量

【作者简介】田树清, 男, 中国吉林桦甸人, 本科, 中级职称, 从事自动控制, 智能化研究。

倍增,我们的控制系统通讯设备和技术还停留在十年前,这就出现了通讯延迟,终端,响应时间长。

通过对紫金铜业稀贵厂卡尔多炉 DCS 系统进行系统性的优化改造,解决老旧主控器、操作站主机的不稳定性而引起的数据刷新速度缓慢、系统崩溃等风险,重新组态为冗余控制系统,提高系统稳定性和可维护性,降低生产安全风险延长。

4 改进措施

4.1 DCS 平台软件升级

工程师站软件升级为 ABB 2019 版 ACS900 系列上位机软件、下位机软件,操作员站软件由 DigiVis V9.2 SP1 升级为 Freelance Operations Standard (DigiVis 2019)。Freelance Operations Standard 是基于微软 Windows 系统的图形化用户接口软件,提高了过程操作的易用性和性能,HMI 组态完全集成到 Freelance 工程师站中,节省工程量。最新版本为 2019 版,其在可扩展性,可用性,连接性,兼容性和安全性等各方面有了显著提升^[1]。

其中几项新优点对我们的问题解决很重要:

- ①用于快速显示选择的用户特定功能键分配;
- ②记录操作员的所有操作,包括姓名和时间戳;
- ③系统诊断,下沉到现场设备范畴,允许扩展现场设备诊断;

④统一的过程报警/消息的理念,清晰地排列显示消息及操作员提示;

⑤最多 16 个用户组/访问配置文件,最多 1000 个用户,可为每个用户设定特定密码(可选安全锁软件)。通过“扩展用户管理”解决方案,扩展了其用户管理功能,即“安全锁”功能。该功能使用 Windows 用户帐户,支持本地帐户和域帐户。使用此新功能,可以满足中央密码管理、密码复杂性或密码老化规则等典型需求^[2];

⑥提供对所选标签自动生成的动态联锁显示的访问(通过与 OPC 或趋势服务器连接);

⑦提供对外部信息的访问,如 PDF 文档、现场视频、标准操作程序(SOPs)^[3];

4.2 DCS 主控器升级

DCS 主控器由 ABB AC800F 升级为 AC900F 系列 PM 904F 控制器。

PM 904F 控制器为 AC 900F 系列最新的 PLUS 版本 CPU 模块。扩展了标准 CPU 模块 PM 902F 的功能。其支持多达四个 PROFIBUS 或 CAN 通信接口并且有更大的应用程序存储空间。此外还有一个特定的存储空间用于永久存储掉电时需要保存的变量值,这些变量用于例如累积计时器或计量数据^[4]。

其接口包含四个内置的可自由配置的以太网口,支持系统总线冗余,Modbus TCP/IP,UDP 或 TCP 收发以及

IEC60870-5-104 Telecontrol 通信协议。包括:

①两个串行端口,支持 Modbus RTU/ASCII 或者 IEC60870-5-101 通信协议。

②四个插槽用于通信接口:PROFIBUS 主通信模块支持集成线冗余。③CAN 总线模块用于连接 Freelance Rack I/O。

④PM 904F 控制器可直接连接最多 10 个 S700 本地 I/O 模块。此种 I/O 系列提供高紧凑型可配置模块,支持混合型输入输出,在一个模块中可以同时存在模拟量和数字量 I/O,节省空间。

PM 904F 控制器部分技术参数如下表所示:

表 1 PM 904F 控制器技术参数表

运行内存	48MB
电池支持内存	16MB
CPU 频率	800MHz
本地 I/O 模块的数量	最大 10 个
功耗	24W
电源	24V DC
实时时钟,带备用电池	是
任务执行	周期性(可配置的周期时间 5 ms)
	事件驱动的(预定义的事件)
	尽可能快的(PLC 模式)
串行接口	2 个串口:RS-232 or RS-485,支持 Modbus RTU/ASCII 或者 IEC60870-5-101 通信协议。
网络接口	4 个以太网接口
外网温度(存储)	-40...+85° C
外网温度(操作)	-20...+70° C

同时,配备 Profibus 通信主模块、液晶屏、总线空槽模块、备份电池、冗余电源切换装置、直流电源等模块。

4.3 操作员站操作系统升级

由 win 7 升级为 win 10 64 位专业版,满足 DCS 平台软件的兼容性需求,保证控制系统稳定。

4.4 合并 DCS 控制程序并重新组态为冗余控制系统

稀贵厂卡尔多炉原 DCS 控制系统采用两套单控制器,一台 AC800F 系列控制器控制卡尔多炉及其配料系统,另一台控制烟气系统。其网络拓扑图如图 1 所示。

方案计划将该 DCS 控制系统升级为冗余控制器,将原来的两套控制程序合并,将两台 AC900F 系列控制器重新组态为冗余控制系统,由其中一台控制器同时控制全部系统,另一台控制器做冗余切换备用。新 DCS 控制系统的网络拓扑图如图 2 所示。

在合并 DCS 控制程序、重新组态冗余控制系统的项目实施中存在较大风险,为减少风险特制定以下方案:

①提前将两套控制程序上传,在现场实施之前预先完成程序合并,并进行模拟测试工作,提前排查程序合并中的问题并解决;

②升级时间选在2022年1月份卡尔多炉炉修期间，炉修时间为7天，在此期间没有生产作业，届时将对现场设备停电、停气，防止升级时现场设备误动作造成事故；

③设备到场验收、安装、通讯检测及卡件检测完成后，进行程序下发；

④升级期间，保留原控制器和其他设备，同时对原程序进行备份。升级过程若出现短期内无法解决的问题，可以及时进行恢复，保障生产；

⑤程序升级后，先采用仿真模式进行试运行，试运行通过后，再进行联机运行。

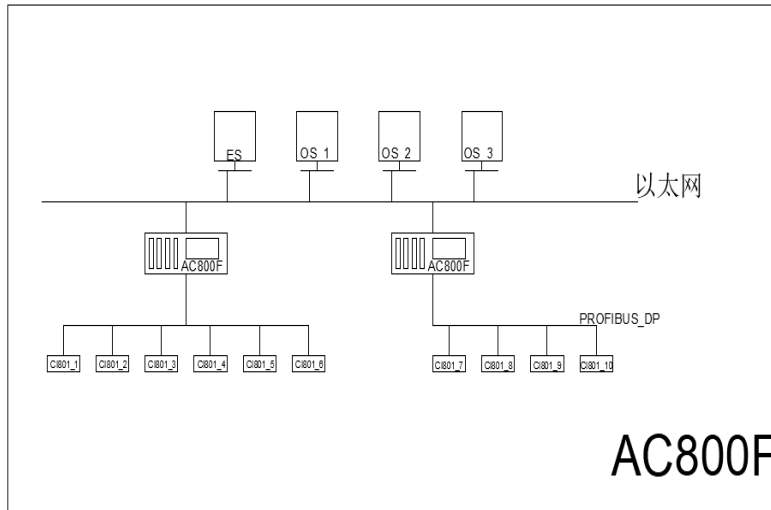


图1 网络拓扑图1

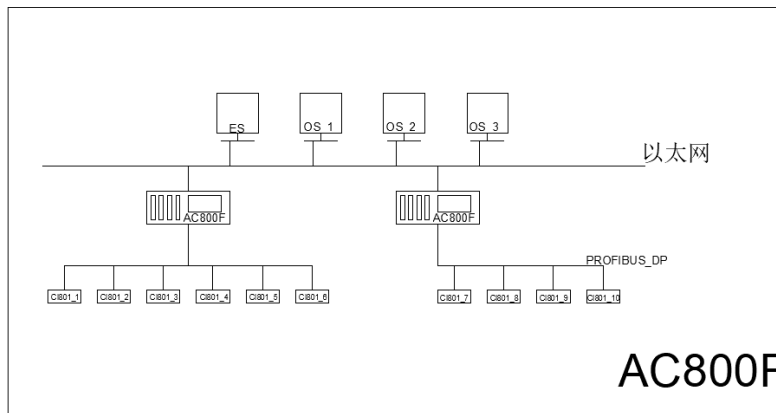


图2 网络拓扑图2

4.5 程序优化

由于这套系统从国外进口过来时间久远，期间其他的设备陆续升级提产，但是主系统由于是外国做的，一直没有变更。为了更好地使用，我们对其程序中不合理的进行更改，对需要增加的进行重新编辑制作。

5 结语

通过一系列技术改造，在解决了系统不兼容、易卡顿、信号丢失和无冗余等问题，经过一年来的观察，通讯事故为零，因为系统问题出现事故为零，整个生产系统的安全可靠性提升百分之四十五，技改后的系统还有与其他系统兼容性更好、现场仪表通讯支持更多通讯方式等优势。在长达半

个月的技改时间里，通过合理安排，保证了新旧系统技改期间生产的稳定性，希望对有类似问题的企业能起到参考帮助作用。

参考文献

- [1] ABB, Freelance 800F系统组件. Freelance 800F系统工程培训, 2015, 2.3:15-28.
- [2] 陈贵银、祝福, PLC的基础知识. 工程案例化西门子, (2019):3-13.
- [3] 王啸东.PLC控制系统设计方法解析[J].自动化与仪器仪表, 2011(01): 43-44.
- [4] 王岩, 浅谈PLC控制技术的特点和发展方向[J].兰州工业高等专科学校学报, 2011,18(01): 40-44.

Analysis on the influence of optimization of coking waste heat recovery system on comprehensive energy consumption

Weimin Li

Henan Pingdingshan Dongxin Coking Co., Ltd., Pingdingshan, Henan, 467045, China

Abstract

As a critical component of steel production systems, coking processes generate substantial residual heat during high-temperature energy release. Failure to properly recover this waste heat leads to both energy waste and environmental pollution. This study examines the composition of residual heat resources and current recycling challenges within typical coking operations. Guided by energy efficiency objectives, we explore key technological pathways for optimizing recovery systems. Through systematic thermal balance analysis, multi-source coupling integration, process redesign, and hierarchical heat utilization are implemented. Empirical data from industrial applications demonstrates optimized energy consumption patterns before and after implementation. Results indicate that scientifically configured heat recovery pathways can effectively reduce unit coke production energy consumption while enhancing thermal efficiency, delivering significant economic and environmental benefits. The research provides practical guidance for coking enterprises in achieving energy conservation, emission reduction, and green development.

Keywords

coking process; waste heat recovery; system optimization; energy consumption analysis; energy saving transformation

焦化余热回收利用系统优化对综合能耗的影响分析

李维民

河南省平顶山市东鑫焦化有限公司, 中国·河南·平顶山 467045

摘要

焦化工艺在钢铁冶炼体系中具有重要地位, 其高温热能释放过程中伴随大量余热排放, 若未合理回收, 将造成能源浪费和环境污染。本文基于典型焦化生产流程, 分析余热资源的构成及当前回收利用存在的问题, 并以能效提升为导向, 探讨回收系统优化的关键技术路径。在系统热平衡基础上, 利用多源耦合、流程再设计与热能分级利用等手段进行系统性优化, 并结合实际工程数据, 评估优化前后对综合能耗的影响。研究结果表明, 科学配置余热回收路径可有效降低单位焦产能耗, 提高热效率, 具有良好的经济与环境效益。本文研究对焦化企业节能降耗、绿色发展具有现实指导意义。

关键词

焦化工艺; 余热回收; 系统优化; 能耗分析; 节能改造

1 引言

随着能源结构转型与碳达峰、碳中和目标的逐步推进, 焦化行业面临愈发严峻的能效管理与环保压力。焦化过程作为高温热化学反应体系, 其副产的高温煤气、蒸汽、烟气等蕴含大量余热资源。但由于工艺设计、设备配置及热能梯级利用体系不健全, 余热利用率普遍不高, 能源浪费现象较为严重。焦化企业若能系统性优化余热回收路径, 不仅有助于降低单位能耗和运营成本, 还可提升能源利用效率, 实现绿色转型。

本文结合当前主流焦化流程, 以多种余热形式为研究对象, 通过数据建模与热能耦合路径优化分析, 深入探讨余

热回收系统在节能减排中的作用机制。通过实证研究, 评价优化改造对焦化综合能耗的具体影响, 提出针对性建议, 为焦化行业高质量发展提供理论支持与实践路径。

2 焦化生产中余热的构成与利用现状

2.1 焦化余热的来源与特征

焦化工业是煤炭清洁利用的重要途径, 其工艺过程主要包括炼焦、煤气净化和副产品回收等多个环节^[1]。在这些环节中, 尤其是炼焦阶段所产生的高温烟道气、荒煤气及冷凝过程中释放的热量, 是典型的高品质余热资源, 具有显著的回收利用价值。其中, 炼焦炉在进行干馏过程时, 炉内温度高达 1000°C 以上, 而排出的荒煤气温度通常在 750°C 以上, 含有大量显热和部分可燃成分; 同时, 烟道废气温度也普遍在 400°C 至 500°C 之间, 具备良好的热交换和回收潜力。此外, 在煤焦油、苯、萘等副产品的冷凝回收过程中, 也伴

【作者简介】李维民(1979-), 男, 中国山西交口人, 从事焦化、炼焦、化工研究。

随大量低品位余热的释放。

这些余热资源具有几个鲜明特征：一是温度高，热品位好，适合用于发电、供热等高能耗环节；二是连续性强，焦化生产通常为24小时连续作业，热源稳定，可支撑稳定回收系统运行；三是波动小，由于焦炉炉温和烟气流量可控，余热参数变化幅度相对较小，便于热交换系统的调节和优化^[2]。这些特点决定了焦化余热若能科学、高效地加以回收和利用，将极大地提升系统热效率，降低能源消耗，对实现焦化行业节能减排具有重要意义。

2.2 当前回收路径的主要问题

虽然国内大多数焦化企业已建成余热锅炉、烟气换热器、余热发电装置等基础设施，尝试对焦化过程中的余热进行利用，但整体回收效率和经济性仍不尽理想。在实践中，焦化余热利用存在以下几个关键问题：

热源与用热单元之间的耦合不足。在一些企业中，热能的供应侧与需求侧缺乏系统化的匹配设计，导致高温热源被用于低温热负荷，造成能源品位浪费。例如，荒煤气热能原本可用于驱动蒸汽轮机发电，却被简单用于低温供暖，无法发挥其应有的高效价值。

二次传热路径导致能效损失。部分企业的热回收系统采用多级换热或长距离热力输送方式，在热传导过程中存在明显的热损失，尤其在低温段余热利用中更为突出。此外，由于换热器效率有限、传热介质流量波动等原因，系统总体热利用率偏低。

自动化控制与响应能力不足。当前多数焦化企业的热能调节系统仍以手动或低水平自动控制为主，缺乏对热负荷变化的快速响应机制，致使在热源波动或用热需求变化时，系统调节滞后，换热效率下降，甚至造成部分余热排放。

余热回收系统运维管理不到位。在一些企业中，余热设备运行维护缺乏系统培训和专业人员支撑，换热器结垢、管道堵塞、阀门失灵等问题频发，严重影响设备运行稳定性和热效率的发挥。

这些问题的存在不仅降低了焦化余热的实际利用率，也制约了焦化行业进一步推进节能降耗、提升经济效益的步伐。

2.3 国内外技术发展趋势

在全球“双碳”目标背景下，焦化余热利用技术正在不断升级和优化。国际上，欧美、日本等工业强国已在焦化余热利用方面积累了成熟经验，普遍采用梯级利用、多能互补、智能调控等技术路径，实现了能源在多个温度层级的高效转化^[3]。例如，日本某钢铁集团通过将荒煤气热能用于蒸汽驱动压缩系统，并进一步与城市集中供热系统对接，基本实现了焦化装置“热能自给”和“零热排放”。此外，国外企业在热能系统设计中强调余热与电、冷、动力等多种能源形式协同转化，提升整体系统的能效水平。

我国近年来也在积极推进焦化余热回收的集成化与智

能化建设。一些大型焦化企业试点建立了联合汽轮发电系统，利用高温荒煤气驱动蒸汽轮机发电，同时利用余蒸汽供暖或参与工业用热。在部分新建或改扩建项目中，还开始引入分布式能源系统，实现热电联供与余热远程利用。此外，一些企业在系统集成方面积极采用热泵技术、余热蓄能系统等先进工艺，提高余热回收的稳定性与灵活性。

尽管如此，我国焦化行业在余热利用的实际应用中仍面临一些突出挑战：如系统设计规范不足、集成度低、运行参数不稳定、能效评估机制缺失等。当前部分余热回收项目仍停留在“设备拼装”而非“系统集成”的水平，热能流动路径不清晰，过程控制能力弱，缺乏基于数据驱动的智能调度系统。

因此，未来焦化余热的高效利用必须走向系统化、智能化、集成化方向。需从工艺设计、设备选型、系统运行到数据管理等各环节进行系统优化，推动形成标准化、模块化的余热利用技术体系^[4]。同时，政府层面可通过设立专项补贴、制定能效评价标准、推广典型案例等方式，加快技术在行业内的推广应用。通过政策引导与技术创新双轮驱动，焦化行业有望实现绿色、高效、低碳的发展目标，为我国节能减排与资源循环利用作出积极贡献。

3 系统优化路径设计与分析

3.1 余热耦合模式重构

优化焦化余热系统的首要任务，是实现热源与用热对象之间的高效匹配与动态协调。当前余热利用普遍存在热源单一、利用方式僵化等问题，难以应对焦化生产过程中负荷波动和能源需求多样化的实际情况。因此，需以热电联产思路为基础，重构焦化余热耦合模式，构建涵盖荒煤气、烟道气、冷却水等多源热能的互补体系，推动煤气加热、蒸汽驱动与热水供应之间的柔性转换和联动利用。通过系统化规划热能流向，实现从热源采集、能量转化到用热分配的全过程协同，提高整体能源利用效率。

在此基础上，应采用高效换热设备（如板式换热器、管壳式换热器等）和可调节动态控制阀门，构建“智能调节+反馈控制”的闭环系统，实现对热能流动路径的灵活切换与调控，及时响应工况变化，保障系统运行稳定性和能效水平。

同时，应注重对不同温度等级余热的科学分级与合理利用，实现热能的“梯级利用”。高温荒煤气应优先用于驱动蒸汽锅炉并带动汽轮机发电，形成高品质热能的最大化转化；中温烟道气可用于热水生产、工业换热等中温需求；而低温冷却水所携带的余热则适合用于生活热水供应、厂区供暖等场景。通过热能品位分层利用，可显著减少热损耗，提升余热系统的经济性和节能性。

3.2 流程再设计与系统集成

传统焦化工艺流程设计往往以“单工序最优化”为导

向,导致各工艺段之间运行相对独立,缺乏统一的能量协调机制。热能传递路径被割裂,形成“就地散热”“分散利用”等低效现象,制约了焦化余热的系统性利用。因此,有必要对现有焦化流程进行再设计,推动各环节之间的热能循环耦合。

建议以“焦炉—余热锅炉—汽轮发电—热水供应”作为主干路径,构建一体化、闭环式余热利用平台。将焦炉出口高温荒煤气或烟气直接引入余热锅炉,实现第一层次热能采集;再利用产生的高压蒸汽驱动汽轮机发电,形成第二层次热能转化;之后通过低压蒸汽或排汽为热水系统供能,满足工业及生活热水需求,形成完整的热电联产循环链条。

此外,流程再设计还应同步引入自动化和智能化控制系统,集成DCS(集散控制系统)、PLC(可编程逻辑控制器)等技术设备,对温度、流量、压力等关键工艺参数实现实时监控与动态调节。通过建立数据采集与模型预测机制,构建智能决策控制平台,实现各节点之间热能传递的最优路径选择与负荷平衡,从而进一步提升整个系统的灵活性、安全性与热效率,为焦化企业迈向绿色、高效、智能化运营提供坚实的技术支撑。

4 优化改造后系统综合能耗分析

4.1 改造前能耗状况

以某年产80万吨焦的焦化厂为研究样本,改造前该厂焦化工序能源利用效率较低。单位焦炭耗约为145kg标准煤当量每吨(kgce/t),热能回收率不足40%。这意味着大量余热未得到有效利用,白白排空,系统运行能效远未达到理想状态,不仅造成能源的极大浪费,还增加了企业的生产成本。

4.2 改造措施及成效

1. 余热回收率提升:实施以余热锅炉升级、蒸汽管网改造、换热设备增设为核心的技术优化后,焦炉荒煤气的热能回收率大幅提升至95%以上,烟气余热利用率提高到72%。这表明优化后的系统能够更充分地捕获和利用生产过程中产生的余热,减少了能源的散失^[5]。

2. 发电能力增强:通过蒸汽余热驱动汽轮机实现热电联产,系统发电能力提升至35kWh/吨焦,显著减少外购电量约40%。这一改变不仅降低了企业对外部电网的依赖,还进一步提高了能源的综合利用效率,实现了能源的梯级利用。

3. 单位能耗降低:综合折算后,单位焦炭能耗降低至128kgce/t,能耗下降幅度达11.7%。这一数据直观地反映了优化改造在降低能源消耗方面的显著效果。

4. 系统热力效率提高:改造后能源利用各环节协同增

强,系统热力效率由原来的68%提升至82%。结合实际运行工况测算,该厂全年节约标准煤近1.4万吨,减少二氧化碳排放量超过4万吨。这不仅提高了能源使用效益,降低了企业运营成本,还显著提升了环境友好性,为焦化行业的节能减排和可持续发展提供了有力支撑,充分验证了余热系统优化在焦化行业节能降碳中的应用价值与推广潜力。

5 经济与环境效益评估

从经济角度分析,焦化余热系统优化虽前期投资较高,但其回收期相对较短。以本文所研究焦化厂为例,系统升级总投资约为3800万元,主要用于设备更新与控制系统改造。节能降耗带来的直接经济收益包括电费节省、蒸汽外供、运行成本降低等,年均收益约达1100万元,投资回收期为3.5年。

从环境效益看,系统优化有效减少烟气排放温度与热量,降低冷却水使用量,有助于改善厂区热污染问题。同时,减少碳排放与有害气体释放,提升企业环保绩效。在碳交易机制逐步落地背景下,其减排收益亦将成为长期经济价值来源。

6 结语

焦化行业作为高能耗、高排放产业,其节能减排潜力巨大。本文围绕焦化余热回收利用系统,深入分析了其存在的问题与系统性优化路径,并以实际工程案例验证了其节能降耗成效。研究表明,通过优化热能耦合结构、重构工艺流程、引入智能调控手段等措施,可显著提升余热利用效率,降低单位焦炭能耗,实现经济与环境效益双赢。

未来焦化企业应从系统工程角度出发,构建集成化、智能化、低碳化的热能管理平台,并结合区域能源协同机制,进一步拓展余热外供与综合利用路径,为实现绿色焦化和低碳发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李文吉.SDS脱硫脱硝技术在焦炉余热回收中的应用[J].化肥设计,2024,62(05):37-39.
- [2] 高拥军,张磊,李华.焦炉上升管中荒煤气余热回收的结焦问题研究[J].当代化工研究,2024,(01):134-136.
- [3] 屈克林,钱虎林,王涛.焦炉上升管余热回收温度预警系统应用研究[J].安徽冶金科技职业学院学报,2023,33(04):4-5+14.
- [4] 李臻.堆积床层气固换热特性与高温散料余热回收新工艺研究[D].北京科技大学,2023.
- [5] 徐爱英,王建林,杨星,等.浅谈上升管余热回收在宁钢焦化厂的应用[C]//中国金属学会.2023全国冶金焦化流程节能减排创新技术研讨会会议文集.宁波钢铁有限公司,2023:51-54.

Analysis on application and challenge of modular construction technology in surface facilities of oil and gas fields in alpine regions

Shijia Xing

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

Abstract

Oil and gas field development in high-altitude regions faces harsh environmental conditions, constrained by extreme weather, complex geology, and limited construction windows. These challenges result in tight schedules, cost control difficulties, and significant safety and environmental pressures for surface infrastructure projects. Modular construction technology, characterized by factory prefabrication and rapid on-site assembly, has been widely adopted for such facilities. This paper first outlines the fundamental principles and operational processes of modular construction, then analyzes its typical application models and achievements in infrastructure development including gathering stations and heating stations. Through practical case studies, it explores technical bottlenecks encountered during high-altitude applications, particularly in structural cold resistance and transportation coordination, while proposing optimization recommendations. Research demonstrates that modular construction technology effectively addresses the complexities of high-altitude environments, serving as a crucial support for green, safe, and efficient oil and gas field development. Future efforts should focus on strengthening standardization, innovating design approaches, advancing intelligent manufacturing, and enhancing collaborative capabilities to fully unlock its potential value.

Keywords

modular construction; alpine region; oil and gas field; surface facilities; application challenges

模块化建造技术在高寒地区油气田地面设施中的应用与挑战分析

邢世佳

大庆油田有限责任公司, 中国 · 黑龙江 大庆 163000

摘要

高寒地区油气田开发环境恶劣, 受极端气候、复杂地质及短施工窗口期影响, 地面工程建设面临工期紧、成本难控、安全环保压力大等难题。模块化建造技术因具备工厂预制、现场快速拼装的特点, 被广泛应用于油气田地面设施建设。本文先梳理其基本原理与流程, 剖析在集输站、加热站等设施建设中的典型应用模式及成效。同时, 结合实践探讨该技术在高寒区应用时, 在结构防寒、运输组织等方面遭遇的瓶颈问题, 并提出优化建议。研究表明, 模块化建造技术能应对高寒复杂环境, 是油气田绿色、安全、高效开发的重要支撑。未来需加强标准建设、创新设计、推进智能制造、提升协同能力, 释放其潜力价值。

关键词

模块化建造; 高寒地区; 油气田; 地面设施; 应用挑战

1 引言

油气田地面工程是油气田开发的关键支撑环节, 直接关系到资源开发的效率、安全与经济性。随着我国油气勘探开发重心向西部、东北等高寒地区转移, 地面工程建设面临自然环境恶劣、地质条件复杂、施工周期受限等诸多挑战。高寒地区常年低温、昼夜温差大、冻土层深厚, 常规现浇建

造工艺难以满足快速、高质、安全的工程需求。与此同时, 绿色低碳、智能高效、施工安全等对工程建设提出更高要求。

模块化建造技术以“标准化设计、工厂化预制、模块化施工、数字化交付”为核心, 强调工程实体的模块化设计、工厂集成制造、现场快速拼装, 能显著缩短工期、降低风险、提升质量与安全管控能力。近年来, 国内外诸多高寒油气田项目陆续采用模块化建造技术, 实现了工程质量、进度和成本的全面提升。但受限于气候、运输、接口等现实条件, 模块化建造在高寒区的推广应用仍面临诸多挑战。本文将聚

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

焦模块化建造技术在高寒地区油气田地面设施建设中的应用实践、关键技术及主要难点,分析未来发展方向和优化策略,为推动高寒区油气田地面工程建造模式创新提供理论支持与技术参考。

2 模块化建造技术原理及其在高寒油气田地面设施建设中的应用模式

2.1 模块化建造技术的基本原理与流程

模块化建造是一种以工业化思维推进建筑和工程项目的新型建造方式。它是将整个建筑或工程实体按照功能、结构或设备单元进行科学拆分,形成若干标准化、系列化的模块。这些模块在工厂内完成高精度的预制、加工、组装和检测,然后运输至施工现场进行吊装、拼接、系统集成和调试。其核心流程包括前期策划与整体方案设计、模块拆分与标准化设计、工厂制造与质量检测、现场运输与吊装、系统集成与功能调试,形成完整的闭环。

模块化建造注重全生命周期管理,强调从设计、采购、制造、运输、安装到后期运维的全流程一体化、协同作业。通过BIM等信息化手段,实现全过程数字化建模、工艺仿真、进度管控和质量追溯,提高项目管控的精细化和透明度。与传统建造方式相比,模块化建造显著减少现场作业时间和用工量,极大缩短工期,有效降低高温、高空、复杂地形等施工环境下的安全风险。同时,工厂化生产确保了构件质量的一致性和可控性,提高了工程整体质量与安全水平。模块化建造正成为绿色建筑、智慧建造和高质量工程项目的重要发展方向。

2.2 高寒地区油气田地面设施的模块化建造适应性

高寒地区油气田地面设施包括集输站、动力站、加热站、分输站、计量间等多个功能单元,需应对极端低温、强风、冰雪等恶劣自然条件,对设施的保温、防冻、结构耐久性和运行安全性提出了更为严苛的要求。模块化建造以工厂高精度预制为核心优势,有效规避了现场施工过程中因严寒天气导致的质量波动和进度延误。通过将复杂的焊接、设备集成、保温层敷设等工序转移到工厂内完成,实现对关键工艺和质量的严格管控,显著减少冬季施工窗口期压力,提升整体施工效率。

在实际应用中,油气田地面工程通常采用设备集成模块、工艺管廊模块和装配式房屋模块等多种模式。各类模块在工厂内已集成好主体结构、工艺管道、机电设备及保温防冻系统,运至现场后可实现快速吊装、精准拼接和高效调试。针对高寒环境,模块设计特别强化了保温层厚度,优化了结构防冻性能,并采用灵活、可靠的接口连接方式,确保模块拼装后的整体密封性与耐久性,有效保障油气田地面设施在极端气候下的长期安全稳定运行。

2.3 典型工程案例分析

近年来,国内多个高寒油气田项目成功应用模块化建

造技术,取得显著成效。以西北某油气田地面集输站为例,项目采用全模块化建造方式,工厂预制率超过70%,大幅提升了构件加工的标准化和质量可控性。现场施工周期相比传统工艺缩短了约40%,尤其在冬季极端低温条件下,现场作业天数显著减少,有效缓解了施工窗口期紧张的问题,提高了工程进度的可控性和安全性。此外,东北某大型天然气处理厂项目通过设备模块化和工艺集成设计,成功应对了极端寒冷气候和冻土基础施工的复杂挑战。该项目不仅优化了保温和防冻措施,还实现了节能降耗和绿色施工目标,降低了环境影响。

这些案例充分证明,模块化建造技术能够有效破解高寒地区油气田地面工程中普遍存在的工期短、气候恶劣、施工资源匮乏等难题。通过将复杂工序集中于工厂生产,减少现场施工风险,提升工程质量和安全水平。模块化建造为高寒油气田项目提供了科学、高效、环保的建造新路径,推动了我国油气田基础设施建设向智能化、工业化方向发展,具有广泛的推广价值和应用前景。

3 高寒地区模块化建造技术的关键优势与成效分析

3.1 提升工期效率和资源利用

高寒地区施工周期受气候影响显著,常规建造方式因冻融交替、气温骤降等常出现停工、返工和延误。模块化建造通过工厂预制和现场快速拼装,显著降低现场作业强度和消耗。模块工厂化生产减少了对工程进度的制约,项目整体工期压缩30%~50%。同时,模块设计便于材料标准化采购和批量制造,提高了资源利用效率,减少材料浪费和库存积压,降低了施工能耗和碳排放,助力绿色低碳发展。

3.2 保障施工质量和安全管理

工厂环境优于现场,模块预制过程中工艺控制精度高,易于实现多道工序集成、自动化加工和全程检测,大幅提升了工程实体的一致性与稳定性。高寒地区户外作业条件恶劣,模块化建造将高风险工序内移,降低人员伤害和安全事故概率。标准化模块设计和安装,有效减少了焊缝、连接等薄弱环节,提升了结构整体性和抗震防冻能力。通过全过程信息化管理,实现质量追溯、风险预警和动态管控,为高寒区工程建设安全保驾护航[1]。

3.3 推动技术创新与产业升级

模块化建造促进了油气田工程建设的流程再造和产业升级。工程信息模型(BIM)、智能制造、数字孪生等新技术在模块设计、制造、运输和装配各环节得到集成应用,提升了设计精度和建造智能化水平。工厂集成制造催生了新型建筑工业化体系,推动上下游协同创新。模块化理念引导企业加大研发投入,促进标准化、系列化、智能化装备技术发展,推动高寒地区油气田工程建设向更高质量、更高效率、更高安全性转型。

4 高寒地区油气田地面设施模块化建造面临的主要挑战

尽管模块化建造在高寒区应用成效显著,但实际推广过程中仍遇到多方面技术和管理难题。

4.1 结构防寒和模块适应性不足

高寒区极端低温对材料性能、结构防护和保温系统提出更严苛要求。部分模块化设计标准源于常温地区,保温厚度、材料韧性、接口密封等未能完全满足极端环境需求,影响了运行可靠性和维护便捷性。模块体积大、结构复杂,对防冻、防腐、抗风雪能力设计要求更高,需强化工程参数的适应性优化[2]。

4.2 运输与现场拼装组织难度大

高寒地区地广人稀、交通条件差,超大超重模块运输路线复杂,受道路、桥梁承载能力和气候影响较大。运输过程中,模块易受低温冲击、振动和冻融损伤,需特殊加固和保护。现场拼装窗口期有限,对吊装设备、工人技术和安全管控要求更高,稍有疏漏易造成工期延误和质量隐患。

4.3 接口集成和系统调试复杂

模块化建造需多专业、多系统同步设计和协同集成。现场接口对接环节多、技术标准不一,易出现管线错位、系统不兼容、信息误差等问题,影响整体运行效率。高寒区调试周期短,复杂工艺和自动化系统联调压力大,突发问题难以及时处置,考验工程管理和技术支撑能力。

4.4 质量与安全管控难题

高寒环境下部分工序无法完全内移,现场焊接、保温修补等易受气温和风雪影响,存在质量波动和安全风险。工厂与现场质量标准衔接、责任界定、验收流程等需进一步明确。异地制造和分段运输造成监理和验收链条延长,易出现质量管理盲区 and 责任推诿[3]。

5 优化高寒区油气田模块化建造应用的对策建议

针对上述挑战,推进高寒区油气田地面设施模块化建造技术发展,需要多方协同创新、持续优化。

5.1 加强高寒区专属模块化标准体系建设

应针对极端低温、冻土、强风雪等环境特征,制定差异化模块设计、制造、运输和安装标准,明确保温厚度、材料性能、接口密封等参数。鼓励模块化产品系列化、标准化研发,推动行业标准与地方规范衔接,提升模块系统的环境适应性和互换性。

5.2 完善全流程数字化协同管理

推广 BIM、数字孪生和智能制造平台,实现设计、采购、制造、运输、安装全过程数据贯通与动态监控。将模型数据延伸到数字化交付环节,推动模块化建设从“规模覆盖”向

“精深发展”转型。通过数字化仿真优化运输路径和拼装方案,提升风险预判和应急响应能力。建立项目全生命周期数字档案,支撑工程后期运维与技术升级[4]。

5.3 创新运输与现场施工组织

结合高寒区交通和地理特点,优化模块分拆与组合方式,合理控制模块体积和重量。研究模块拆解、结构稳定性等技术,开发高寒区专用模块运输装备和吊装工艺,增强现场装配的灵活性与安全性。加强与地方政府、交通管理部门的协作,提前规划运输路线、设置应急预案,提升整体物流效率和安全保障能力。

5.4 强化多专业协同与系统集成能力

项目策划阶段即组织多专业联合设计,提前识别和解决接口风险。推广模块一体化设计和工厂预装调试,减少现场系统集成压力。完善工厂与现场的质量标准、验收流程和责任机制,推动第三方质量监督和智能监测手段应用,提升质量与安全管理水平[5]。

5.5 加强人才培养与技术攻关

建立模块化建造高寒区技术人才培养体系,提升工厂、运输和现场各环节人员的专业能力与协同意识。鼓励产学研用联合攻关,围绕高寒区新材料、新工艺、智能装备等关键技术,持续突破技术瓶颈,助力油气田工程建设能力升级。

6 结语

模块化建造技术为高寒地区油气田地面设施建设带来了突破性变革,极大提升了施工效率、工程质量与安全保障能力,推动了绿色低碳与智能建造的发展进程。面对极端环境和复杂工况带来的挑战,模块化建造仍需在标准适应性、集成协同、智能制造和全过程管理等方面持续创新。未来,高寒区油气田地面设施模块化建造技术的发展,应以标准化为核心、数字化为支撑、智能化为引领、协同化为保障,进一步释放工业化建造潜力,推动油气田开发向高质量、可持续、智能化方向迈进。通过多方协作与技术创新,高寒区模块化建造必将在能源工程领域展现更大价值,为我国油气资源开发和能源安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张振兴.油气田地面集输系统拓扑布局优化研究进展[J].山东化工,2022,51(02):64-66+70.
- [2] 汤林,云庆.油气田地面生产系统提质增效助力上游业务高质量发展[J].油气田地面工程,2019,38(01):1-6.
- [3] 唐长明,胡志峰,张翠云,等.油气田压裂用柴油机配机要求及发展展望[J].内燃机与动力装置,2017,34(03):75-78.
- [4] 黄涛,柳敏.油气田地面工艺及技术发展[J].化工管理,2014,(32):240.
- [5] 李海,高寒偏远地区油气田井场智能监测与管控系统关键技术研究.河北省,华北石油通信公司,2013-09-26.

Safety Risk Analysis and Prevention Strategies for Electrical Automation Equipment

Zihui Yuan

Guangxi Occupational Safety Technology Development Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

The widespread application of electrical automation equipment in industrial systems has promoted the improvement of production efficiency, but its accompanying safety risks cannot be ignored. High voltage environment, complex control logic, device aging and human operation errors during long-term operation may all induce equipment failures or safety accidents. In response to these risk characteristics, it is urgent to establish a systematic identification mechanism and a scientific prevention and control system. Multi-dimensional collaborative control should be carried out from technical structure, management process, and operational behavior to strengthen equipment protection and operational environment guarantee. By integrating multi-level dynamic evaluation, standardized operating procedures, and advanced protective technologies, the incidence of accidents can be effectively reduced, the overall safety level of the system can be improved, and the sustainable and stable operation of electrical automation equipment can be achieved.

Keywords

electrical automation equipment; Security risks; Operational hazards; Protective technology; management system

电气自动化设备的安全风险分析与防范策略

袁子惠

广西职安科技发展有限公司, 中国·广西 南宁 530000

摘要

电气自动化设备在工业系统中的广泛应用推动了生产效率的提升,但其伴随的安全风险亦不容忽视。高压环境、复杂控制逻辑以及长期运行过程中的器件老化和人为操作失误,均可能诱发设备故障或安全事故。针对这些风险特征,亟需建立系统化的识别机制和科学的防控体系,从技术结构、管理流程和操作行为等多维度协同控制,强化设备本体防护与运行环境保障。通过多层次的动态评估、标准化操作规程和先进防护技术的集成应用,可有效降低事故发生率,提升系统整体安全水平,实现电气自动化设备运行的可持续与稳定。

关键词

电气自动化设备; 安全风险; 运行隐患; 防护技术; 管理体系

1 引言

随着智能制造和工业数字化的不断推进,电气自动化设备在各类生产系统中的应用规模持续扩大。这类设备集成了复杂的电力驱动与逻辑控制功能,运行过程对稳定性与安全性的要求极高。然而,在高强度、长周期的工况条件下,设备容易受到环境干扰、结构疲劳及人为操作偏差的影响,从而引发电气故障或系统停机等风险事件。安全问题不仅影响生产进度和设备寿命,更可能造成重大人身与财产损失。因此,有必要从系统层面对电气自动化设备的安全风险进行深入剖析,探索可操作的防范路径,以实现设备安全与生产效能的协同提升。

【作者简介】袁子惠(1985-),中国黑龙江牡丹江人,硕士,工程师,从事安全生产咨询、安全评价研究。

2 电气自动化设备运行中的主要安全风险类型

2.1 高压电击与短路事故的成因与特征

电气自动化设备在运行中长期处于高压状态,电压等级达到380伏及以上时若绝缘性能下降或防护措施不到位,极易引发电击事故。在潮湿环境或电缆破损时,漏电电流可能达到10毫安以上,对操作人员构成致命威胁。短路事故多发生于回路负载突增、电缆绝缘破损或导线间距不当等场景,瞬间电流可升至额定值的10倍以上,造成接线端烧毁、设备爆炸或电气火灾。高压系统中接触器、变压器、断路器若选型不当或长期超负荷运行,也会因温升过高导致内部击穿。电弧产生和接地不良亦可能诱发回路不稳定现象,进而引起连续故障,扩大事故范围。

2.2 设备老化与接线松动引发的隐患问题

电气自动化设备运行年限超过5年后,内部元件如电容、电感、电机绕组等逐渐出现性能衰退,绝缘电阻降低至5兆

欧以下,导致局部放电、发热与设备间歇性故障。接线端子在长期高频振动、电热交替作用下产生松动,接触电阻升高至1欧以上时会引起导体发热,进而烧蚀端头或引起塑壳碳化。控制柜内若未定期清理积尘或检修,接线松动区域可能积聚碳化颗粒并形成短路路径。

2.3 系统控制失灵与误操作带来的安全威胁

电气自动化设备依赖 PLC、继电器保护装置及远程控制系统进行运行协调,一旦程序逻辑中存在条件跳转错误或信号交互混乱,会导致错误执行。控制失灵时常表现为输出延迟、反馈中断或自锁失效,可能造成设备无预警启停、运动机构卡滞或机械臂突发运动。误操作行为包括参数设定不当、启停顺序颠倒、手动操作未断电等,尤其在无操作互锁和权限管理的环境下,错误指令容易直接传输到执行单元。

3 安全风险形成的技术与管理因素分析

3.1 控制系统设计缺陷对设备稳定性的影响

电气自动化系统控制架构若未充分考虑冗余设计与容错机制,将导致在局部故障条件下系统整体失控。PLC 编程中若存在未闭合的逻辑路径或信号优先级冲突,在实际运行中会引起输出行为与预期不符。传感器布设不合理、采样频率过低或干扰滤波措施不足,可能使控制系统无法及时捕捉关键参数变化。控制电路设计中若未设置过流保护、电压隔离或应急停机功能,一旦负载异常增长,将迅速影响主控模块的响应能力。此外,过度依赖单一控制节点,缺乏分布式控制支持,也会在发生突发情况时使设备失去快速恢复能力,造成非计划性停机或损毁。

3.2 运行维护机制不完善引发的安全漏洞

电气自动化设备的运行维护依赖于周期性检修、预防性检测和记录管理的闭环体系,一旦流程存在断点,将导致隐患无法及时发现。部分企业未建立月度电气巡检制度或未进行绝缘测试、电缆拉力复查等必要工序,使设备在运行中积累故障风险。缺少标准化的维保记录,易导致重复性问题追溯困难。维保作业流程中若未规范断电挂牌制度,检修人员易在带电状态下操作,增加人身风险。临时性维修手段如跳线、短接、绕开保护模块虽可短期恢复运行,但易形成结构性安全隐患。长期缺失检测的环境参数如湿度、电磁干扰水平等亦可能对控制设备产生慢性干扰。

3.3 人员操作规范缺失与培训机制不健全

操作人员在面对电气自动化设备时需具备准确识别信号状态、理解控制逻辑、掌握应急处理的能力,若培训不到位,将显著增加事故概率。部分企业未设置岗位准入门槛,非专业人员参与设备操作,在参数设定、负载切换和应急处理中常出现误操作。缺乏岗前培训、日常演练与年度复训制度,导致员工对系统故障报警、跳闸逻辑与安全互锁机制了解不足,无法快速响应异常状况。值班记录流于形式,交接班环节中信息传递不畅,使隐性故障延续运行。语言不清的

操作手册、非图形化界面、无在线帮助系统均可能影响人员对复杂系统的掌控能力,从而埋下事故风险。

4 重点环节的风险识别与动态评估机制分析

4.1 关键节点电气回路的连续监测策略

电气自动化设备运行过程中,电流、电压和温度等关键参数的异常波动往往是安全风险的早期信号。为实现对回路状态的动态掌控,可在配电系统中部署具备实时上传功能的传感器,对每一个节点进行24小时不间断数据采集。监测周期设置为10秒,单日可产生8640组数据,配合分析系统进行连续性评估。在一条额定负载为16安培的控制回路中,当电流持续超过18安培长达60秒,即触发预警机制,并通过短信和监控平台同步推送报警信息。温度监测模块设定阈值为65℃,一旦超过即启用强制通风装置与断电保护。红外热像仪在一次检测中可扫描128个节点温升图像,通过图像识别技术判定发热点位置与强度变化趋势,提前介入处理。对于接线端子、电缆头等易出故障区域,使用红外测温与电流互感器配合,实现对单一节点每小时平均值、峰值与波动幅度的持续记录,构建趋势数据库。通过历史数据回溯与现值对比,评估设备在不同工况下的稳定性,实现对潜在失效模式的定量识别与预先预警。

4.2 PLC 控制逻辑与反馈系统的风险建模方法

PLC 系统的稳定性直接决定了电气自动化设备的运行安全水平。在构建风险模型过程中,需对输入输出信号路径进行离散化处理并建立布尔代数逻辑矩阵。在一个典型工业装配线中,PLC 系统包含24个输入节点与16个输出端口,共生成384种逻辑联动路径,其中存在72种路径具备交叉执行风险。通过逻辑推演分析发现,反馈响应延迟超过120毫秒时,易产生误触发或自锁失效,造成系统误动作。应用故障树分析方法将384条路径分解为32个主要故障源,通过概率赋值计算得出触发概率大于0.05的高风险点12个。为加强控制稳态,应在每一个逻辑输出点配置反馈确认信号,当反馈丢失超过3次即标记为非正常状态。嵌入反逻辑验证模块后,系统在运行模拟测试中将误动作发生率从4.2%降低至0.7%。对输出延迟大于150毫秒的路径进行分段隔离处理,使逻辑链条在故障条件下具备自我中断与信息回流能力。通过模拟120小时设备连续运行场景,建立动态变化曲线并评估控制指令响应一致性,有效提高故障应对策略的实效性 with 系统容错能力。

4.3 故障数据采集与预警信号的智能分析应用

在电气自动化系统中,构建以时间序列为基础的数据采集机制是实现智能预警的关键步骤。采集频率设定为每3秒一次,每日可获得28800组数据,涵盖电压、电流、频率、相角、功率因数、温度、谐波等16个参数。系统接入变电站级 SCADA 平台后,日均数据存储量可达2.5GB,借助数据仓库对近180天的历史数据进行聚类分析,提取15种典

型故障前兆特征。例如,在变频控制系统中,电流波动频率超过每分钟25次即为高频扰动信号,与散热风扇效率下降高度相关。预警系统设定故障判断条件为参数波动持续超过设定标准3分钟且变幅大于15%,即自动触发等级报警。报警信息通过内部局域网推送至维护终端并同步短信通知值班人员,平均响应时间控制在8秒以内。在历史数据分析中,突发短路事件发生前20分钟内均可观测到电流值的明显波动和相位差偏移达8度以上。通过引入基于卷积神经网络的预测模型,对报警数据进行精准分类和趋势回归,实现对高风险故障的提前24小时预警覆盖率达到91%。结合数据挖掘技术与反馈闭环机制,可持续提升系统风险应对的主动性与智能化水平。

5 电气自动化设备的安全风险的有效防范策略

5.1 安全规程落实,强化标准操作流程

电气自动化设备在运行过程中安全规程的规范化程度直接决定了事故发生的可能性,制定覆盖安装、调试、运行、检修、停机的全流程操作手册,可有效统一作业标准。规范操作流程要求操作人员在执行启停操作、电气切换、参数调整前进行双人核查和记录留档,杜绝无依据操作行为。作业现场设置明显的安全标识、断电挂牌提示与风险区域隔离设施,提升可视化安全意识。在操作台设定多级权限机制,设定不同工种和级别的操作权限,防止误操作干扰系统正常运行。推行班前风险交底、事中监督、事后复盘机制,将经验固化为标准文本并定期修订,保证规程与设备更新同步。通过设立专项监督小组对操作流程执行情况进行抽检考评,形成闭环管理体系,切实推动规范执行。

5.2 技术防护升级,推进智能保护装置应用

随着电气自动化设备复杂度的不断提升,传统被动防护手段已难以应对多样化风险源。引入智能断路器、剩余电流动作保护器、电弧抑制装置等先进防护元件,可对过载、短路、接地等故障实现毫秒级切断。将设备状态信息实时采集并接入SCADA或DCS平台,构建运行状态可视化体系,使管理者能够实时掌握负载、温升、电流波动等关键数据。采用具备自诊断功能的保护模块,如过热报警继电器、相序监测器等,增强故障定位与自主恢复能力。在大型控制系统中增设逻辑联锁与断电隔离层级,确保在任一保护点动作后

系统可快速中断危险源并阻止联级蔓延。结合UPS与浪涌保护系统减少电网波动干扰,保障设备稳定运行,全面提升电气系统的主动防御能力。

5.3 运维体系完善,构建全周期监测机制

构建覆盖设计、施工、运行、维保与报废全过程的电气设备运维管理体系,可有效提升风险防控的系统性与前瞻性。在设备安装阶段引入电气测试及标准化验收流程,对绝缘电阻、电压等级、接地电阻等进行量化验收,形成数字档案。在运行阶段采用带有数据记录功能的智能监测模块,对电压、电流、频率、温升等参数进行周期采集与异常预警分析。通过设立月度维护、季度检测、年度评估机制,对关键部位如断路器、接触器、母排系统开展热成像、红外扫描、泄露电流测试等专项检查。在运维系统中嵌入设备寿命评估模型,实现备件更换预测与计划性检修管理。系统发生异常时通过自动生成维修工单并联动调度响应,实现从预警到处置的快速闭环,提高全周期风险识别与干预效率。

6 结语

电气自动化设备在提升生产效能与控制精度的同时,也伴随着多元化的安全风险。通过系统分析高压电击、设备老化、控制失灵等典型隐患,可为后续风险识别与防范提供明确方向。从设计优化、运维管理到操作规范,多维度构建风险防控体系已成为保障设备安全运行的核心策略。结合先进监测技术与智能防护装置的集成应用,能够实现风险源的动态追踪与实时干预,提升整体系统的稳定性与安全性。未来在电气自动化快速发展的进程中,持续优化安全机制将是保障高质量运行的重要支撑。

参考文献

- [1] 杜斌,郝敬密.建筑电气安装过程中的安全风险管理与防范技术研究[J].建筑工人,2025,46(07):25-27.
- [2] 廖德辉,黄鹏飞,刁德森,梁松清,黄超,李海勇.深化安全风险管控体系落地,推进二次远程运维模式优化[J].云南电业,2025,(01):26-30.
- [3] 李德明,肖俊.电力工程照明设备安装的安全管理与风险控制研究[J].中国照明电器,2025,(01):143-145.
- [4] 夏丽丽,周卫.探析化学类研发实验的安全风险管控[J].现代职业安全,2025,(01):91-93.

Risk identification and evaluation of forklift operation process

Xifei Zhang

Inner Mongolia Xinte Silicon Material Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014100, China

Abstract

Forklifts, as the most widely used special equipment in industrial facilities, have seen frequent safety incidents in recent years. Ensuring safe operation remains a significant management challenge for many organizations. Drawing from personal work experience and acquired safety knowledge, this study analyzes forklift operations through case studies of driving, parking, and cargo handling processes. By examining accident cases, it identifies risk factors and applies the Job Hazard Analysis (JHA) method to conduct risk assessments. Recommendations are proposed across personnel management, engineering measures, safety training, emergency response, and personal protective equipment (PPE) to enhance workplace safety. These insights aim to provide practical guidance for industry professionals.

Keywords

forklift; operation; accident; risk identification; measures

叉车操作过程风险辨识与评价

张喜飞

内蒙古新特硅材料有限公司, 中国·内蒙古 包头 014100

摘要

叉车是目前场内车辆使用最多的一种特种设备, 近几年关于叉车操作的安全事故频繁发生, 叉车的安全操作是目前很多单位的一大管理难点。作者以个人的工作实践经验、掌握的部分安全知识, 通过对叉车的操作过程分析, 以开车、停车、装卸货等运行过程为例, 结合叉车各类事故案例仔细分析其中的危险因素, 利用JHA方法进行风险辨识, 从人员管理、工程技术措施、安全培训、应急处置、个人防护等方面进行制定相应建议措施, 希望对大家的工作有所帮助。

关键词

叉车; 操作; 事故; 风险辨识; 措施

1 引言

1.1 研究背景及意义

叉车作为现代工业与运输业不可或缺的搬运车辆, 承担着对成件托盘货物进行高效装卸、精准堆垛以及短距离运输作业的重任, 国际标准化组织 ISO/TC110 将其明确界定为工业车辆, 国内则将其列为特种设备范畴。它广泛应用于仓储、工厂生产车间等场景, 助力大型物件运输, 常见的有燃油机驱动型和电池组驱动型。然而, 叉车操作过程复杂, 涉及诸多环节, 存在多种潜在风险, 开展叉车操作过程风险辨识与评价, 对保障人员安全、减少事故损失、提升作业效率具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

据统计, 在制造业与物流业蓬勃发展的大背景下,

我国叉车行业持续释放积极信号。2022年叉车行业产量119.36万辆, 2023年攀升至123.37万辆, 2024年突破了130万辆, 每年以大于3%速率稳步攀升。这一增长不仅彰显出叉车市场需求的强劲, 也体现了行业自身的蓬勃活力, 能够为物料搬运领域的高效运作提供了有力支撑。(如图1-1所示)



图 1-1 近年中国主要叉车产量

【作者简介】张喜飞(1988-), 男, 中国内蒙古乌兰察布人, 本科, 职称中级, 从事化工安全管理研究。

随着现代工业的发展迅速,仓库、工厂车间、码头等需要大量搬运作业的场所越来越多,人工搬运渐渐不上发展节奏。对于越来越复杂化的、作业场地的变化,各类叉车的制造适应能力也逐步提高。随着叉车制造业的大力发展,为各大型仓库、工厂车间、码头、港口等需要搬运大量货物的场所提供了非常便利的条件。但随之而来的安全问题亦不容忽视,近年来,叉车事故频发不断,据不完全统计,叉车事故每年造成约85人死亡,六分之一的工作场所死亡涉及叉车。

1.3 研究内容及技术路线

本课题主要通过通过对叉车的操作过程分析,以开车、停车、装卸货等过程为例,结合叉车各类事故案例仔细分析其中的危险因素,进行风险辨识,从而制定相应建议措施,希望对叉车安全管理工作有所帮助。

2 叉车的基础知识

叉车在起重运输设备中发展起步较晚,但如今国内叉车制造品种丰富、类型多样,起重量覆盖0.5t至50t。改革开放以来,我国积极引进并开发新技术、新设备,在叉车上应用液力变矩器、液压转向等先进技术,选用高强度宽视野门架等优质部件,让叉车操作更简便省力、机动性强,安全性与可靠性显著提升,作业效率大幅提高。^[1]

2.1 叉车的功能

线叉车,在工业领域还有着自动装载机、自动升降机等别称,它属于无轨流动的起重运输机械,凭借独特的设计与强大的性能,在物料搬运中发挥着不可替代的作用。

使用叉车具有诸多显著优势。其一,能大量减轻工人劳动强度、节约劳动力。据实际统计,一台叉车可替代10-15个装卸、搬运工人,大幅降低了人力成本。其二,拉升了仓库容积的利用率。叉车可以轻松地将货物堆叠到较高的位置,充分利用仓库的垂直空间,使仓库能够容纳更多货物。其三,叉车操作灵活,可在狭窄的通道和有限的空间内作业,适应多种复杂的工作环境,有效提高了物料搬运的灵活性和精准性,为企业的生产和物流运作提供了有力保障,推动整个行业向高效、智能的方向发展。

2.2 叉车的特点

(1) 在国内,常见的叉车货叉起升高度在2~4m之间,有些特殊用途的叉车货叉的起升高度可达到7-9m左右,方便在工厂车间、仓库、车站、码头等集中地方装卸物资,搬运机件等作业^[2]。

(2) 叉车的作业生产率在起升车辆中有相对优势,它的行驶速度快、转弯半径小,车叉的起升速度、爬坡能力也很强,适合在相对狭小空间作业。

(3) 由于叉车具备机动性和牵引能力较强的优点,根据不同特点,电瓶式叉车较适合在室内作业,内燃式叉车在室内室外均可进行作业。

(4) 叉车主要用于装卸作业和短途搬运作业,不适用

长途搬运作业。

3 叉车操作过程的风险辨识

通过收集的一些事故分类统计,特列出5类叉车典型事故进行风险辨识,从事故风险、事故原因、处理方法、预防措施4点进行逐一分析讨论。^[3]

3.1 叉车装卸事故

事故风险:在装卸过程中装载的货物坠落导致人员伤亡。

事故原因:

- (1) 操作升降动作太快,未倾斜作业。
- (2) 违章超速行驶,急刹车等。
- (3) 货物捆绑不牢固或货物装载不合适。

处理方法:

- (1) 严格按照操作规程作业,叉车升降、倾斜操作时缓慢、平稳。
- (2) 厂内道路速度限制在15~20km/h,厂房、库房内速度限制在5~10km/h。
- (3) 将货物摆放整齐,捆绑牢靠,转载高度、宽度符合要求。

3.2 违章载人事故

事故风险:叉车负重作业过程中,没有确认载重,货物超载或位置太靠叉头位置,导致车体失衡尾部发生翘起,为了平衡车辆两端,安排作业人员站到车体后部增加配重。行驶过程不稳定,车头车尾成了跷跷板,后部突然翘起或落下,造成人员摔落受伤或死亡。

事故原因:

(1) 没有确认载重,装载载荷超过容许额定载重量,装配不合适。

- (2) 操作不当,违规安排作业人员站在配重上方。

处理方法:

- (1) 装载前确认货物重量,合理装配货物,作业前最好先试叉几次。
- (2) 按照叉车安全操作规程进行作业,不许载人。
- (3) 定期对操作者及相关作业人员进行安全培训教育。

预防措施:

- (1) 货叉或车身上严禁载人,严禁超载。
- (2) 加强操作人员安全培训考核,杜绝违章现象发生。

3.3 叉车操作工作危害分析(JHA)

工作危害分析法评估赋值

$$R=L \times S$$

式中:R—风险度

L—事件发生的可能性

S—事件发生后果严重性

通过风险辨识标准,结合工作经验,进行简单的工作危害分析(JHA),以下为分析记录,见表3-1。^[5]

4 叉车安全操作建议

叉车操作人员必须经过专业培训、按照国家有关规定经特种设备安全监督管理部门考核合格,取得国家统一格式的特种作业人员证书,方可从事相应的作业,严禁无证上岗操作。通过以上分析总结,专门结合本人个人能力水平,查阅相关资料后,总结了部分安全操作规程,特作以下建议。^[4]

4.1 作业前准备

- (1) 需要工作人员检查车辆外观、框架是否完好。
- (2) 检查操作杆、方向盘等是否灵敏正常。
- (3) 检查报警蜂鸣、灯光、喇叭信号是否完好正常。
- (4) 需要检查启动按钮及制动等性能是否可用。
- (5) 燃料、润滑油是否满足作业需求。
- (6) 应检查液压泄漏情况并及时维护保养。
- (7) 电瓶式叉车还应检查电池、电路等性能。

4.2 行驶操作

- (1) 厂区内驾驶叉车速度不得超过 15km/h, 室内速度不得超过 5km/h。
- (2) 行驶过程中货叉位置不应太高或太低, 货叉底端距地面高度应保持在 200 — 400mm 左右, 门架应向后微倾。
- (3) 通过公司内道路路口时, 应做到“一慢、二看、三通过”。
- (4) 转弯时, 需要先发出信号, 鸣笛后缓慢通过, 禁止急速转弯。
- (5) 要随时注意上空有无障碍物, 避免刮碰。载物行驶时, 应减速行驶。
- (6) 禁止行驶中急刹车。
- (7) 下坡时严禁熄火滑行, 严禁在斜坡上转向行驶^[5]。
- (8) 与其他车辆、物体保持安全距离。

表 3-1 叉车操作工作危害分析 (JHA) 记录表

分析人员		张喜飞				日期		2022.7.15		
工作 / 任务		叉车操作装卸工作			工作区域	车间				
序号	工作步骤	危害或潜在事件	主要后果	现有安全控制措施	后果严重性 (S)	可能性 (L)	风险值 (R)	风险等级及颜色	建议措施	备注
1	作业前检查	人员检查	驾驶人是否持有有效证件	无证上岗	持证上岗、安全培训	1	1	1	D 级	定期培训
	设备检查	叉车是否在有效效验周期中。启动前检查刹车、油门、轮胎胎压	机械故障	每天对叉车进行检查		1	1	1	D 级	无
2	作业	启动	叉车前后有人、有物、发生碰撞	人员伤亡、设备损坏	起步前, 观察四周, 确认前后方路况, 先鸣笛, 后缓慢起步	2	1	2	D 级	专人专车
		行驶	超速行驶或违规操作引发事故、急转弯时人员跌落	机械伤害、人员伤亡、财产损失	严格遵守岗位操作规程、厂区限速标识	1	2	2	D 级	车辆限速
			进入防爆区域未戴火星灭火器	火灾爆炸	进入库区车辆必须佩戴火星灭火器	2	2	4	C 级	配备防爆叉车
		叉物件	叉的位置不对, 引发物料倾翻, 叉车上升后又齿下方站人, 液压系统失灵	机械伤害、人身伤害等事故	岗位操作规程、安全培训	1	2	2	D 级	试叉确认
	上下坡	引发翻车、碰撞	人身伤害、财产损失	岗位操作规程、安全培训	1	1	1	D 级	车辆限速	
3	结束作业	停车	应将叉车制动, 降下升降机, 停熄发动	其他事故	作业后全面检查	1	1	1	D 级	维护保养

5 结论

总之, 本课题通过五类叉车典型事故分析、(JHA) 辨识评价及个人的安全操作建议对叉车的安全操作风险辨识做出了部分论述。由此可得出结论: 叉车操作过程的安全事故风险完全可以通过工程技术、管理措施、安全培训、个人防护等进行预防。

参考文献

[1] 中国机械工业联合会.GB/T 5182-2008叉车 货叉 技术要求和试

验方法[S].北京: 2008.

[2] 中国机械工业联合会.工业车辆 叉车货叉在使用中的检查修复 GB/T 17910-1999[S].北京: 1999.

[3] 陆刚.预防叉车作业事故[J].劳动保护.2012,(11): 80-81

[4] 郎艳菁. 叉车安全作业与养护分析[J]. 引文版: 工程技术, 2016(5): 231-231.

[5] 王晓宇. 叉车作业人因可靠性分析与评价研究[J]. 现代制造技术与装备.2021,(10).doi:10.3969/j.issn.1673-5587.2021.10.026.

Optimization of whole-process mechanized production mode of corn based on integration of agronomy and agricultural machinery

Yongsheng Zhang

Comprehensive Support Center of Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Xilingol League, Xilingol, Inner Mongolia, 026000, China

Abstract

In recent years, as one of China's major staple crops, the advancement of full-process mechanization in corn production has become a critical component for achieving agricultural modernization and ensuring food security. With the expansion of agricultural production scales and profound changes in labor structures, corn cultivation urgently requires mechanized coordination across all stages from land preparation, sowing, field management to harvesting and straw disposal. This paper systematically reviews the current development status of full-process mechanization in corn production, thoroughly analyzes prominent issues and technical bottlenecks in the integration of agronomy and agricultural machinery, and proposes optimization strategies for integrated mechanized corn production models focusing on crop adaptability, field cultivation patterns, innovation in agricultural equipment, and operational process optimization.

Keywords

Corn; Agronomic-Agricultural Machinery Integration; Full-Process Mechanization; Production Model Optimization; Sustainable Development

基于农艺农机融合的玉米全程机械化生产模式优化

张永胜

锡林郭勒盟农牧局综合保障中心, 中国·内蒙古 锡林郭勒 026000

摘要

近年来, 玉米作为我国主要粮食作物之一, 其生产全程机械化水平的提升已成为实现农业现代化、保障粮食安全的关键环节。随着农业生产规模的扩大及劳动力结构的深刻变化, 玉米生产亟须实现从整地、播种、田间管理到收获、秸秆处理等各环节的机械化协同。本文系统梳理了当前玉米全程机械化的发展现状, 深入分析农艺与农机融合中存在的突出问题与技术瓶颈, 从玉米品种适应性、田间栽培模式、农机装备创新与作业流程优化等方面, 提出了面向农艺农机融合的玉米全程机械化生产模式优化策略。

关键词

玉米; 农艺农机融合; 全程机械化; 生产模式优化; 可持续发展

1 引言

玉米作为我国三大主粮之一, 在保障国家粮食安全、促进农民增收及带动农业机械化进程中发挥着不可替代的作用。近年来, 随着农业生产方式的变革与农村劳动力结构的深刻调整, 传统依赖人力和简单机械作业的玉米生产方式已难以适应现代农业发展的要求。全程机械化不仅是提高玉米生产效率和降低成本的有效手段, 也是实现农业绿色发展与规模化经营的基础。玉米全程机械化涵盖整地、播种、施肥、中耕除草、病虫害防治、灌溉、收获、秸秆还田等多个

作业环节, 涉及农艺措施与农机装备的高度协同。

然而, 在实践中由于农艺措施与农机装备衔接不畅、机械适应性不足、品种结构与田间管理模式与机械化需求错位等问题, 制约了玉米全程机械化生产效率和作业质量的提升。农艺与农机融合不仅涉及技术创新, 更要求品种、模式、装备、管理等多维度的系统协同。本文以农艺农机深度融合为切入点, 系统梳理玉米全程机械化的现状与挑战, 探讨模式优化的关键路径和集成创新策略, 旨在为玉米高效、绿色、可持续机械化生产提供理论基础和实践参考。

【作者简介】张永胜(1971-), 男, 本科, 中国内蒙古凉城人, 高级工程师, 从事农业技术推广、农业机械研究。

2 玉米全程机械化发展的现状与农艺农机融合需求

2.1 玉米生产全程机械化的发展态势

我国玉米生产的机械化进程近年来取得显著进步，机械化作业水平大幅提升。根据相关统计，全国主要玉米产区的整地、播种、收获等环节的机械化率已接近或超过90%，部分发达地区已基本实现生产全过程机械化。各类大型高效机械的推广应用，如联合整地机、精量播种机、自走式喷杆喷雾机、大型联合收获机等，为玉米大田生产提供了装备保障。同时，农机作业服务组织和农机合作社等新型农业经营主体发展迅速，推动了机械化生产社会化服务的普及。然而，从全产业链看，玉米生产全程机械化发展并不均衡，尤其在播种精量、田间管理智能化、秸秆高效处理、收获损失控制等关键环节仍有明显短板。多数机械装备与农艺要求之间的协同不足，制约了机械作业的适应性与作业质量。例如，一些高产玉米品种因株型、穗位等性状与机械作业匹配度不高，导致播种不匀、收获损失大、秸秆处理困难等问题，亟须推动农艺农机一体化发展。

2.2 农艺农机融合的现实挑战

当前，玉米全程机械化在农艺与农机融合方面面临诸多挑战。首先，品种适应性不足是突出问题，许多主栽玉米品种在选育过程中偏重高产，忽视了机械作业的需求，导致播种难以实现均匀播种和稳定播深，收获环节常出现籽粒夹带、脱粒不净等问题，影响作业质量和效率。其次，田间栽培模式与机械化需求存在错位，过度密植、深播、窄行距等传统农艺措施不利于大型机械高效作业，限制了机械作业的顺利开展。第三，机械装备的通用性与适应性不足，市场上适应不同地块和多样农艺需求的高效专用机具供给不足，作业标准化和机械协同水平有待提升。第四，作业流程和管理模式创新滞后，缺乏围绕全程机械化的生产组织体系和农机调度机制，导致生产各环节衔接不畅，影响整体效率。此外，土壤条件、区域气候、地块规模及基础设施等多元环境因素交织，使得农艺农机融合面临更高的技术和管理要求。解决这些问题，需要加快推进农艺与农机技术的深度集成，通过加强适宜机械化品种选育、优化田间栽培模式、创新智能农机装备、完善作业流程与管理机制，建立起品种—模式—装备—管理—服务的全链条协同优化体系，推动玉米全程机械化向高效、智能、绿色方向发展。

2.3 农艺农机融合对全程机械化生产的价值

推动农艺与农机深度融合，是实现玉米高产、优质、低耗和环保生产目标的关键举措。农艺农机融合的核心在于以农艺需求引领机械装备创新，以先进机械性能推动农艺技术升级，实现品种、栽培模式、机械装备和管理措施的多维协同优化。一方面，通过选育适宜机械化作业的玉米品种，以及优化种植密度、播种行距、田间布局等栽培模式，显著提升田间管理、病虫害防控和收获环节对机械的适应性，减

少生产环节的人为干预，促进标准化作业。另一方面，围绕玉米全程机械化需求，加快高效、智能农机具的创新研发，推动播种、植保、灌溉、收获、秸秆处理等全流程机械化作业的落地与普及，提升作业效率和作业质量。同时，融合数字农业、物联网和信息化管理手段，促进农机作业的智能调度与精准服务，拓展机械化作业应用场景，实现生产过程的精细化与可持续发展。通过农艺与农机的良性互动和协同创新，能够不断推动玉米生产向高效、绿色、智能方向迈进，为现代农业发展注入新动力。

3 农艺农机融合下玉米全程机械化生产模式的关键优化路径

3.1 适宜机械化的玉米品种创新与推广

品种是实现玉米全程机械化生产的基础保障。传统玉米品种多以追求高产为主，往往忽视了对机械作业适应性的考量。随着农艺农机融合进程的加快，必须强化适宜机械化作业的玉米品种选育，重点关注株型紧凑、株高适中、穗位高度一致、结实性强、抗倒伏能力强、籽粒易脱粒等关键性状。近年来，部分地区已积极开展机械化专用玉米品种的试点培育与推广，如紧凑型、高秆短穗型等，显著提升了玉米播种、田间管理和收获环节的机械化效率和作业质量。与此同时，应加强品种的区域适应性测试和机具作业匹配性评价，建立健全“品种—机械”协同选育机制，为实现玉米全程机械化生产提供坚实的遗传基础和栽培保障，推动现代玉米产业高质量发展。

3.2 田间栽培模式与农艺措施的协同优化

合理的田间栽培模式是提升玉米机械化作业效率的重要保障。应根据所用机具性能和实际田块条件，科学优化行距、株距、播种深度和地块平整度，积极推广适宜机械化作业的宽窄行、等行距、标准化平整地块等栽培模式。这不仅便于机械精准作业，还能提升作业效率和作物产量。在田间管理环节，要统筹推进水肥一体化、病虫害绿色防控、秸秆还田等综合措施，减少机械作业过程中的障碍和损耗。通过精准农业技术的应用，实现播种、施肥、植保等环节的智能化决策和精准作业，有效提升农艺管理与机械作业之间的协同性。同时，大力推广无人驾驶、智能控制、遥感监测等现代农业技术手段，为田间作业提供实时数据支撑和科学决策支持，助力玉米生产全程机械化与智能化水平的持续提升。

3.3 高效智能农机装备与作业流程优化

机械装备的创新升级是实现玉米生产全程机械化的核心驱动力。围绕整地、播种、田间管理、收获及秸秆处理等关键环节，应加快研发适应性强、智能化程度高的专用机械装备，如多功能联合整地播种机、变量施肥机、自走式喷雾机、高效收获与秸秆还田一体机等，提升机具的通用性和作业场景的适应能力。同时，积极推动机械装备的标准化、模块化体系建设，实现不同作业环节之间的高效衔接与协同。

作业流程应借助信息化管理平台,开展作业计划、机械调度、过程监控和绩效评估,科学优化作业路径,减少机械空驶和重复作业,有效提升整体作业效率和资源利用率。此外,要加快推进农机社会化服务体系建设,完善机械维修保障、作业技能培训及信息化服务,提升农机作业的专业化和规模化水平,推动玉米产业链机械化运营能力的持续提升。

4 典型区域玉米农艺农机融合全程机械化生产实践分析

4.1 东北黑土地:农田改造与机械应用并重,提升全链条机械化水平

东北黑土地作为玉米主产区,在农艺农机融合推动全程机械化生产方面成效斐然。当地积极开展农田宜机化改造,大力推进大田标准化建设,为机械化作业创造了良好条件。选用适宜机械化作业的玉米品种,并采用宽窄行种植模式,从种植源头适配机械化需求。

在生产环节,大型联合整地机、精量播种机和自走式玉米收获机等先进农机得到广泛应用。这些农机不仅作业效率大幅提高,作业质量也显著提升,收获损失率明显降低,生产成本随之下降。同时,农机合作社、作业服务队等新型主体的积极参与,成为推动机械作业社会化与服务化的重要力量。它们整合农机资源,提高了农机利用率,优化了生产组织方式,让机械作业更加高效有序,实现了从整地、播种到收获的全链条机械化,为玉米生产的规模化、标准化发展奠定了坚实基础。

4.2 黄淮海平原:智能技术赋能,构建数字化融合生产体系

黄淮海平原的规模化玉米种植基地,借助智能农业技术实现了农艺农机的深度融合。通过集成应用无人机遥感、变量施肥、精准播种、病虫害智能防控等先进手段,构建起数字化、智能化的生产体系。田间作业各环节紧密协同,从播种到收获的每一个步骤都能实现精细化管理与实时监控,确保了生产过程的高效与精准。

此外,当地注重产学研用结合,开展“品种—农艺—农机”协同创新示范。科研机构、企业和农户紧密合作,将最新的科研成果快速转化为实际生产力,形成了一批可复制、可推广的机械化生产模式,为玉米全程机械化和绿色高质高效发展提供了有益借鉴和宝贵经验。

5 基于农艺农机融合的玉米全程机械化模式优化的策略建议

5.1 加强顶层设计与政策引导

完善的顶层设计和政策体系是农艺农机深度融合、优化玉米全程机械化生产模式的基础。要明确品种选育、装备研发、社会化服务等各环节的职责分工,构建合理的利益激励机制。同时,推动农机购置补贴、科研创新、人才培养等

政策向融合方向倾斜,为融合发展提供有力的政策保障和资金支持,激发各方参与融合发展的积极性和主动性。

5.2 强化技术集成与创新能力

科研院所、高校和企业应联合开展工作,针对适宜机械化的玉米品种选育、农机装备研发与模式创新发力,建立多元协同创新平台,整合各方资源,实现优势互补。加快数字农业、智能制造、大数据等新技术在玉米全程机械化中的深度集成与推广,提升农业生产的智能化、精准化水平,提高生产效率和质量。

5.3 完善社会化服务和管理机制

鼓励发展农机合作社、作业服务组织等新型经营主体,完善农机作业、维修、培训、信息服务等全产业链社会化服务体系,为农民提供全方位、一站式的服务。健全农机作业标准与质量评价机制,推动机械化作业的规范化、标准化,保障作业质量,提高农业生产的稳定性和可靠性。

5.4 加强农民培训与技能提升

加大对农民和农机手的培训力度,普及农艺农机融合理念与实用技术,提高生产者机械化操作和农艺管理的综合能力。通过培训,培育一批懂技术、善管理的新型职业农民和农机专业人才,为农艺农机融合发展提供人才支撑。

5.5 深化“品种—农艺—农机”一体化示范推广

建设农艺农机融合的玉米全程机械化生产示范区,集成推广适宜的品种、模式与装备,形成可复制、可推广的典型模式,以点带面,带动区域机械化水平整体提升。

6 结语

基于农艺农机融合的玉米全程机械化生产模式,是现代农业发展的必由之路。通过品种创新、模式优化、装备升级和服务体系完善,能够有效破解玉米机械化生产中的技术瓶颈与管理难题,提升生产效率、降低成本、保障质量,为我国粮食安全和农业现代化进程提供坚实支撑。面向未来,需持续推进农艺农机协同创新,加强政策引导和技术集成,完善社会化服务与人才体系,构建多元融合、高效协同、绿色智能的玉米机械化生产新格局。随着新一代信息技术与农业机械装备的深度融合,玉米全程机械化将在更高层次实现高效、可持续发展,助力我国农业高质量迈向新阶段。

参考文献

- [1] 李芹芹,吴圣,邹玮.贵州省农业机械化发展的政策体系优化研究[J].农业科技管理,2024,43(06):24-28.
- [2] 魏明明.农业机械化助力乡村振兴的影响与作用[J].甘肃农业,2024,(12):6-10.
- [3] 李亚芝.“小方块”里有大机遇[N].吕梁日报,2024-12-24(001).
- [4] 范志华,李爱芹,杨光.吉林省农业机械化发展存在问题与建议[J].农业工程,2024,14(12):14-19.
- [5] 黄照东.农业机械化在宣威高效农业种植技术中的应用[J].农村实用技术,2024,(12):111-112+116.

Research on interference suppression strategies for field instrument signal transmission in process control systems

Ruiyang Mao Yude Zhu

Henan Yongmei Carbon Fiber Co., Ltd., Shangqiu, Henan, 476000, China

Abstract

The process control system, as an important component of industrial automation, relies heavily on the accurate transmission of field instrument signals for its operational stability. However, under complex electromagnetic environments and multiple sources of interference, field signals are easily affected by various forms of interference such as conduction and radiation, leading to data distortion, control anomalies, and even system failures. To enhance the anti-interference capability of signal transmission, this paper systematically analyzes the types and propagation mechanisms of interference in the transmission of field instrument signals. It explores effective mitigation measures from aspects such as identification of electromagnetic interference sources, hardware shielding and isolation design, system redundancy layout, optimized grounding strategies, and maintenance management, aiming to provide feasible paths and technical support for improving the signal stability and anti-interference level of process control systems.

Keywords

process control; field instruments; signal transmission; electromagnetic interference; suppression strategies

过程控制系统中现场仪表信号传输的干扰抑制策略研究

毛瑞阳 朱宇德

河南永煤碳纤维有限公司, 中国·河南 商丘 476000

摘要

过程控制系统作为工业自动化的重要组成部分,其运行稳定性在很大程度上依赖于现场仪表信号的准确传输。然而,在复杂电磁环境和多源干扰背景下,现场信号极易受到传导、辐射等多种干扰的影响,造成数据失真、控制异常,甚至系统故障。为提高信号传输的抗干扰能力,本文围绕现场仪表信号传输中的干扰类型与传播机制进行系统分析,从电磁干扰源识别、硬件屏蔽隔离设计、系统冗余布置、接地策略优化及运维管理等方面探讨有效的抑制措施,旨在为提升过程控制系统的信号稳定性和抗干扰水平提供可行路径与技术支持。

关键词

过程控制; 现场仪表; 信号传输; 电磁干扰; 抑制策略

1 引言

随着自动化水平的不断提高,过程控制系统在能源、化工、冶金等行业的应用愈发广泛,而系统中大量依赖现场仪表获取实时数据作为反馈依据,确保控制策略的闭环执行。仪表信号的可靠传输直接决定着控制系统对生产过程的感知和响应能力。然而,工业现场通常存在大量高频电气设备、大功率负载、频繁开关操作等干扰源,导致模拟量、电流环及数字信号在线传输过程中易受干扰,影响测量准确性与控制精度。传统干扰抑制手段多为局部响应式措施,难以系统解决根本问题。因此,有必要从信号源、传输链、系统结构和管理机制等多维度出发,探索更为系统、主动、高效的干扰抑制策略,以实现现场仪表信号传输全过程的有效保障。

【作者简介】毛瑞阳(1995-),男,中国河南商丘人,本科,助理工程师,从事电气、仪表及自动化控制研究。

2 过程控制系统中现场仪表信号传输特性分析

2.1 信号类型与传输模式概述

过程控制系统中现场仪表输出的信号类型主要包括模拟信号、数字信号和脉冲信号,传输模式涵盖电压信号、电流环信号、RS485等串行通信协议形式。模拟信号多为4~20mA电流形式,具有较强抗干扰能力,适用于远距离传输。数字信号则依赖于通信协议在控制器与传感器之间交换数据,常见协议包括Modbus、Profibus及CAN等,具有较高的数据传输速率和容错性能。脉冲信号用于频率量测或计数控制场景,对传输稳定性要求较高。

2.2 传输链路结构及其抗干扰薄弱环节

仪表信号从采集端传至控制端经历传感器输出、接线端子连接、传输电缆传递、隔离转换、电源供电等多个环节。每个环节对信号完整性和抗干扰能力的影响均不可忽视。接线端子接触电阻波动可能导致信号衰减或失真,尤其在湿

热、高粉尘环境中更易发生连接不牢问题。传输电缆长度超过 50 米时，感应噪声和线间串扰显著增加，屏蔽不良或接地方式错误将加剧干扰影响。电源干净程度直接影响信号基准稳定性，当同一电源供电多个仪表时，电源纹波噪声将通过信号地线传入控制系统，形成内部干扰环路，进而降低整体系统的抗干扰性能。

2.3 复杂工业现场环境下的干扰来源

工业现场环境复杂多变，常见干扰源包括电动机启停、电焊设备、变频器、电力变压器、雷击感应等强电设备及自然因素引发的电磁波辐射。电动机瞬间启动可引起电网压降与浪涌电流，幅值可达 100A 以上，对低压信号线路造成强烈干扰。变频器工作频率在 2kHz 至 16kHz 区间，产生的高频脉冲通过空间辐射或电缆耦合方式传入信号线路，引发数据抖动或误触发。电焊设备在开弧瞬间产生大量电磁脉冲，其频谱宽至上百 MHz，极易干扰模拟量信号传输。雷击感应形成的浪涌电压可在未直接击中设备的情况下，通过地线传导进入控制系统，造成信号异常甚至设备损坏。潮湿、高温、高粉尘等环境亦会使接插件、端子老化，进而诱发接触不良型干扰事件，影响信号的连续性与准确性。

3 电磁干扰类型及其传播路径解析

3.1 传导干扰与辐射干扰的生成机制

传导干扰由高频电流通过导体传播至信号链路，主要形式包括差模干扰与共模干扰。在频率范围 5kHz 至 30MHz 之间，工业现场设备产生的大量开关波动信号通过电源线及控制线传导至仪表系统。差模干扰沿两根导线之间传播，频率高达 10MHz 时易诱发传感器信号失真，共模干扰则沿导线与地之间传播，可产生超过 20V 的干扰电压。辐射干扰则由快速电流变化产生的电磁场向外辐射，作用半径在 2 米至 10 米范围内较为显著。当电缆未屏蔽或布线过长时，辐射信号在频率超过 100MHz 时易引发串扰和误码。高频干扰源多为变频器、开关电源及无线通信装置，其频谱密集，且与仪表信号频段存在重合，形成复杂干扰场，给信号传输带来极大挑战。

3.2 信号线与电源线干扰耦合途径

信号线与电源线之间存在电容耦合、电感耦合及阻抗耦合等路径，形成多种干扰耦合通道。在电缆间距小于 5cm、平行布线长度超过 10 米的情况下，电容耦合可导致高频电压串入低压信号线，诱发误触发与信号偏移。电感耦合主要由电流变化产生的磁场引发，特别是在开关电源瞬间启动过程中，5A 以上的电流变化将引起超过 1V 的瞬态干扰电压。阻抗耦合常见于地线共享或接地不良场景，在系统地电位差超过 2V 时，共模干扰通过回路注入信号系统，造成数据偏移与通信中断。不同路径上的耦合效应往往叠加产生复合干扰，必须在布线布局、屏蔽连接与地线设计上同时发力，才能实现有效抑制。

3.3 地环流与空间电场的交叉干扰问题

地环流问题主要源于多点接地结构中地电位差异所引发的回流电流，当控制柜与现场设备分别接地且电位差大于 1V 时，将产生 1A 以上的低频环流电流，通过信号屏蔽层反馈至仪表系统，引起共模电压变化，致使测量数据出现周期性跳变。空间电场干扰则源自电力设备或无线通信设备所产生的高频场能，频率可达 900MHz 以上，信号线若布设在 10 米以上裸露空间段，电场强度超过 3V/m 时即可能触发信号扰动。地环流与空间干扰作用往往叠加，形成低频与高频共存的复合干扰形态，对模拟信号尤其敏感，造成电压漂移、信号丢失与传输中断，若无良好的单点接地、屏蔽接地分离及电缆屏蔽层完整性控制，则极易引发信号系统的稳定性问题。

4 系统层面抗干扰能力的构建路径

4.1 PLC 输入通道的抗干扰冗余设计

PLC 作为过程控制系统的核心控制单元，其输入通道若未具备足够抗干扰能力，将直接影响数据采集的稳定性。通过配置滤波模块可在输入端实现 10Hz 至 1kHz 范围内的低通滤波，有效抑制高频干扰信号。在 DI 和 AI 模块设计中引入共模抑制比超过 80dB 的差分输入电路，能显著降低外部共模电压带来的信号偏移。在干扰较强的电磁环境中，采用双通道冗余输入策略，PLC 对同一信号并行采集，并设置数据一致性校验阈值，误差控制在 0.1% 以内，当某一通道信号出现扰动时，系统可自动切换至冗余通道，保持控制逻辑稳定。输入模块间采用光电隔离技术，隔离耐压达到 2500V 以上，可在电源波动频率达到 60Hz、幅度波动超过 15V 的场景下依然保持信号可靠。冗余设计不仅增强系统抗干扰强度，也为后期信号异常诊断提供技术支持。

4.2 通信协议容错机制与数据纠错算法

过程控制系统中数字通信占据主导地位，其稳定性直接依赖协议容错能力与数据处理机制。Modbus 协议中增加 CRC16 校验算法后可检测出 99.998% 的随机位错误，在数据包长度为 8 字节的场景下，每秒通信速率为 9600bps 时，误码率低于 10^{-6} 。Profibus 协议在帧结构中引入重复确认机制，通信中出现单次丢帧后系统能在 2ms 内重新发送数据，确保周期性数据采集不中断。对于误码影响大的远距离通信，采用 Hamming (15,11) 纠错算法可在 11 位有效数据基础上纠正 1 位错误、检测 2 位错误，保证通信准确率高于 99.99%。部分系统结合时钟同步机制，实时比对时间戳，若延迟超过 15ms 即触发异常判别逻辑，实现对干扰触发型误传的预警与剔除，有效提升抗干扰能力。

4.3 模块化布线与分布式 I/O 策略的干扰规避作用

过程控制系统布线结构对抗干扰能力有直接影响，模块化布线方式通过将信号传输路径细分为控制柜内段、接线盒段与现场设备段，使单段电缆长度控制在 30 米以内，

降低线缆对电磁场的接受面积,从而减少感应电压。在模块间接口处引入 EMI 滤波器,其截止频率设定在 150kHz 至 10MHz 范围内,可抑制 90% 以上高频干扰信号。分布式 I/O 架构则将信号采集模块部署至现场,数据通过工业以太网或总线方式传回主控单元,相比集中式结构减少信号电缆长度 80% 以上。在实际部署中,现场 I/O 模块至 PLC 主站通信延迟控制在 5ms 以内,数据丢包率低于 10^{-4} 。分布式架构允许在不同区域配置独立电源和接地系统,有效隔离地电位差引起的共模干扰,使系统在复杂现场条件下仍能保持数据传输的高稳定性和抗干扰性能。

5 现场维护与运行阶段的干扰管理对策

5.1 定期检测与记录干扰信号异常事件

过程控制系统在运行过程中常因电磁环境变化或设备老化而引发干扰问题,建立有效的干扰检测与记录机制是保障系统长期稳定运行的基础。通过配置在线信号质量监测模块,可实时采集模拟信号波形及数字信号稳定性参数,将波动超过 $\pm 0.5V$ 或频繁发生误码的现象识别为异常事件,并自动记录事件发生时段、持续时间、信号变化特征等数据。在仪表接入端增设带有自诊断功能的信号隔离模块,可对传入干扰幅度超过 3V 的瞬态信号进行分级标记,辅助判断干扰强度变化趋势。将所有异常记录统一上传至后台数据库,结合事件频率与影响范围评估干扰等级,制定定期分析与评估报告,明确高风险干扰点。通过定期检测与数据积累,可为系统维护提供决策依据,提前发现隐性干扰风险,避免问题扩散至控制逻辑层面。

5.2 运维人员抗干扰意识与处理规范建设

现场运维人员在抗干扰管理中承担着识别、响应与修复的关键职责,加强其抗干扰意识和操作规范是提升系统运行可靠性的根本保障。在培训体系中应加入关于电磁干扰类型、传播途径及典型故障表现的模块,要求人员掌握信号异常与干扰源关联的判断逻辑,并能够对不同干扰情形采取针对性措施。在规程层面制定干扰处理操作手册,涵盖测量设备使用方法、屏蔽接地检查流程、电缆布局规范及应急处理方案,细化至每个环节的电气安全距离、电阻值参考范围和接线要求。现场管理制度中明确每季度开展一次抗干扰巡检,内容包括接地电阻测试、电源噪声测量及接插件完整性检查,巡检结果须存档备案。通过规范培训与制度化操作,确保运维人员在面对复杂干扰时具备足够的辨识能力和处

置能力,降低人为操作造成的干扰放大风险。

5.3 干扰源快速定位与故障排查技术支持体系完善

在复杂工业现场,干扰源往往具有隐蔽性与突发性,构建高效的定位与排查技术体系对于干扰抑制具有重要意义。通过配置便携式频谱分析仪与电磁干扰定位探头,现场可快速对疑似干扰区域进行频段扫描与强度比对,当信号峰值超过 50dB μ V 时自动触发报警标志。系统中嵌入的实时数据监控平台可对各通道波动幅值进行动态曲线记录,并设置 $\pm 10%$ 为异常判定阈值,形成图谱与干扰源特征比对库,辅助定位。结合接地环路分析仪与红外热像仪,分别检测地电流分布与设备发热异常,在排查中形成电磁与热电特征的多维交叉验证,提高定位精度。建立多部门协同响应机制,自动将干扰事件推送至运维、技术与安全部门,按照预设工单流程完成处理闭环。系统性构建干扰排查技术支持平台,有助于压缩故障定位周期,提升对突发性干扰的响应速度和修复效率。

6 结语

现场仪表信号传输的稳定性直接关系到过程控制系统的运行安全与调节精度。在电磁环境复杂、干扰源密集的工业场景中,仅依赖单点防护手段难以实现长期可靠的信号传输保障。本文从信号链路特性、电磁干扰机制、系统设计优化及运维策略等多个层面提出系统性的干扰抑制路径,强调构建多层次、可预判、具备反馈闭环的抗干扰体系。通过软硬件协同与现场管理机制联动,不仅能够增强系统抵御复杂干扰的能力,还可为工程实践提供可复制、可扩展的技术支撑。未来,应持续推进干扰治理机制的数字化、集成化发展,以全面提升自动化控制系统的稳定性与安全性。

参考文献

- [1] 罗经纬.智能化仪器仪表中传感器信号无线传输技术研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):23-24+27.
- [2] 杨波,严刚刚.LoRa无线网关在仪表阀门信号传输的应用研究[A].首届全国石油和化工仪控设计与应用论文大赛论文集[C].中国机电一体化技术应用协会、湖北省安全生产技术协会、湖北省化学品安全协会、湖北省应急救援协会:2025:51-60.
- [3] 蔡浩晖.质量流量计信号传输方式对计量结果的影响[J].石油工业技术监督,2025,41(04):34-37+68.
- [4] 段红松,谢礼飞,肖路,杨金权.工业现场仪表温度跳变现象的分析[J].电子工艺技术,2022,43(04):234-237.

Research on exhaust pressure optimization technology of 660MW supercritical steam turbine low-pressure cylinder

Lian Bo

Hebei Dingzhou Power Plant, Dingzhou, Hebei, 073000, China

Abstract

In water-scarce regions, 660MW supercritical air-cooled units have become the primary power generation equipment due to their significant water-saving advantages. However, their low-pressure cylinder exhaust pressure remains highly susceptible to environmental factors, posing multiple challenges to efficiency improvement. Compared with wet-cooled units, air-cooled units exhibit more pronounced impacts of exhaust pressure fluctuations on coal consumption during power generation. This paper thoroughly analyzes the influencing mechanisms of environmental parameters, air-cooled island performance, and turbine operating conditions on exhaust pressure based on the characteristics of air-cooled units. It proposes a comprehensive optimization technical solution encompassing air-cooled island optimization, dynamic operational parameter control, and intelligent early warning systems, providing robust technical support for efficient operation of supercritical air-cooled units.

Keywords

supercritical steam turbine; air-cooled unit; low-pressure cylinder

660MW 超临界汽轮机低压缸排汽压力优化技术研究

廉波

国能河北定州电厂, 中国·河北定州 073000

摘要

在缺水地区, 660MW 超临界空冷机组凭借显著的节水优势成为主力发电设备, 但其低压缸排汽压力受环境因素影响极大, 效率提升面临诸多挑战。相较于湿冷机组, 空冷机组排汽压力的变化对发电煤耗的影响更为明显。本文针对空冷机组的特性, 深入剖析环境参数、空冷岛性能、汽轮机运行工况等对排汽压力的影响机制, 提出涵盖空冷岛优化、运行参数动态调控、智能预警等多维度的优化技术方案, 为超临界空冷机组的高效运行提供全面的技术支撑。

关键词

超临界汽轮机; 空冷机组; 低压缸

1 引言

在我国北方缺水地区的火电建设中, 空冷机组的占比比较大。660MW 超临界空冷机组通过空气直接冷却汽轮机排汽, 相比湿冷机组能节省大量水资源, 但空冷系统的换热效率极易受环境温度、风速等因素影响, 导致排汽压力波动范围较大, 远超湿冷机组。这种排汽压力的不稳定, 使得机组发电效率受到严重制约, 造成了不小的发电损失, 节能潜力巨大。空冷机组低压缸排汽压力是影响其效率的核心因素。夏季高温时, 排汽压力常常大幅升高, 导致机组热效率显著下降; 而冬季低温时, 若控制不当, 又容易引发空冷凝汽器冻结的风险。因此, 针对空冷机组的特性开展排汽压力优化研究, 对于平衡节水与效率提升、推动“双碳”目标的实

现具有重要的现实意义。

2 空冷机组排汽压力影响因素分析

2.1 环境参数影响

环境温度是影响空冷机组排汽压力的首要因素。随着环境温度的升高, 排汽压力会呈现上升趋势, 这种变化在不同季节表现得尤为明显。夏季高温时, 排汽压力会大幅攀升; 冬季低温时, 排汽压力虽会降低, 但需时刻防范管束冻结问题。

风速与风向对空冷岛的换热效果影响深远。当风速达到一定程度时, 会引发空冷岛的“热风回流”现象, 即热空气在风机的抽吸作用下反向流入空冷岛, 使得进风温度升高, 进而导致排汽压力上升。不同的风向也会对热风回流的程度产生影响, 某些特定风向可能会加剧这一现象。太阳辐射会增加空冷岛管束的吸热量, 在夏季正午等太阳辐射强烈的时段, 这种影响更为突出, 会使排汽压力有所上升。此外,

【作者简介】廉波(1985-), 男, 蒙古族, 中国辽宁朝阳人, 本科, 工程师, 从事空冷机组节能优化研究。

大气压力的变化也会对排汽压力产生影响,在高海拔地区,由于大气压力较低,排汽压力受其影响更为明显^[1]。

2.2 空冷岛性能参数影响

空冷岛的散热面积与清洁度直接决定了其换热效率。660MW空冷机组通常配置多个冷却单元,每个单元都有一定的散热面积。当翅片表面积聚灰尘等杂质到一定程度时,会严重影响换热效率,导致排汽压力上升。

风机的运行参数对排汽压力的影响也不容忽视。轴流风机的转速变化会直接影响风量,转速降低会使风量减少,从而导致排汽压力上升。部分机组由于风机变频控制策略不够合理,在低负荷时过度降低转速,往往会造成排汽压力骤升的情况。空冷凝汽器管束的布置方式同样会影响排汽压力。顺流管束与逆流管束的配比、管束之间的间距等设计若不合理,会导致气流分布不均,使得局部区域的排汽压力出现较大偏差。

2.3 汽轮机运行工况影响

机组负荷的变化会通过改变排汽量影响空冷系统的热负荷。在一定的负荷区间内,排汽量与负荷呈线性关系,排汽压力会随着负荷的升高而上升。在低负荷运行时,排汽量减少会使排汽压力降低,但此时可能会引发逆流管束冻结,需要通过热风再循环等方式进行调节。汽轮机排汽温度与空冷岛进风的温差(端差)需要控制在合理范围内。当端差超过一定限度时,表明空冷岛的换热效率已严重下降,排汽压力也会因此偏离设计值较多。

3 空冷机组排汽压力优化技术方案

3.1 空冷岛性能提升技术

3.1.1 智能清洗与除垢技术

采用机器人干冰清洗系统定期对翅片表面进行清洁,选择合适直径的干冰颗粒和喷射压力,能够有效去除灰尘、柳絮等杂质,提高翅片的清洁度,进而提升换热效率,降低排汽压力。在冬季,采用热风再循环防冻技术,通过合理调节再循环挡板的开度,将逆流管束进口温度控制在适宜范围内,既能避免冻结情况的发生,又能减少排汽压力的波动。

3.1.2 风机群智能调控技术

构建基于环境参数的风机变频控制模型,根据不同的温度区间,合理设置风机转速和热风再循环的开启程度。在温度较低时,适当降低风机转速并开启一定程度的热风再循环;在温度适中时,使转速随温度线性调节;在温度较高时,采用满转速并启用喷雾降温等辅助手段。采用风机群协同控制算法,根据各单元的温度分布动态调整风机转速,使空冷岛的温差控制在较小范围内,减少局部热点的出现,从而降低排汽压力的波动幅度,同时提高风机运行的经济性。

3.2 环境适应性优化技术

3.2.1 热风回流防治技术

在空冷岛四周加装防风导流板是解决热风回流问题的

有效措施。导流板采用高强度铝合金材料制成,具有良好的耐腐蚀性和抗风能力。在设计过程中,需要根据空冷岛的布局、当地的主导风向和风速等因素,合理确定导流板的高度和角度。一般来说,导流板的高度为3-6m,角度可在0-45°之间调节。通过优化导流板的布置,能够形成有效的空气屏障,引导热风向远离空冷岛进风口的方向扩散,减少热风回流现象的发生。在实际应用中,还可以在导流板上安装风速传感器,根据实时风速自动调整导流板的角度,以适应不同的风况,进一步提高热风回流防治效果,降低因热风回流导致的排汽压力上升。在夏季高温时段,启用喷雾降温系统,在空冷岛进风口设置高压喷雾装置,通过喷雾降低进风温度,从而降低排汽压力^[2]。该系统在耗电与节水效益方面具有良好的平衡性,经济性显著。

3.2.2 太阳辐射遮蔽技术

在空冷岛顶部加装可伸缩遮阳棚能够有效减少太阳辐射对空冷岛管束的加热作用。遮阳棚采用轻质复合材料制成,如玻璃纤维增强塑料,具有重量轻、强度高、耐老化等优点,重量通常控制在5kg/m²以下,不会对空冷岛的结构产生额外的负荷。遮阳棚的面积与空冷岛的散热面积相匹配,能够完全覆盖空冷岛的顶部区域。在控制方面,遮阳棚配备有太阳辐射传感器和自动驱动装置,在夏季正午等太阳辐射强烈的时段,当太阳辐射强度超过800W/m²时,自动展开遮阳棚;在傍晚或阴天,当太阳辐射强度低于300W/m²时,自动收起遮阳棚,以保证空冷岛在夜间或光照较弱时能够充分散热。通过这种方式,能够减少管束因太阳辐射吸收的热量,降低管束表面温度,从而提高换热效率,降低排汽压力。此外,遮阳棚还具有一定的防雨和防尘功能,能够减少雨水和灰尘对空冷岛的影响,延长设备的使用寿命。

3.3 运行参数动态优化技术

3.3.1 排汽压力设定值动态修正

建立基于环境温度的排汽压力最优曲线是实现排汽压力精准控制的基础。该曲线通过对机组长期运行数据的分析和拟合得到,综合考虑了环境温度、机组负荷、空冷岛性能等多种因素。在低温时段,当环境温度低于0℃时,为了防止空冷凝汽器冻结,将排汽压力设定值控制在6.0-7.0kPa的相对较高水平;在温度适中的时段,当环境温度在0-25℃之间时,排汽压力设定值随温度的升高呈线性递增趋势,温度每升高1℃,设定值提高0.1-0.2kPa,以实现机组的经济运行;在高温时段,当环境温度超过25℃时,将排汽压力设定值严格控制在汽轮机安全运行的上限范围内,通常不超过10.0kPa,以确保机组的安全稳定运行。通过DCS系统实时比对实际排汽压力与设定值,自动调节风机转速和喷雾系统等,实现闭环控制,确保排汽压力始终处于最优区间。

3.3.2 汽轮机与空冷岛协同调节

在低负荷运行时,采用“滑压运行+热风再循环”模式能够有效提高机组的经济性。滑压运行是指汽轮机的主汽

压力随负荷的降低而降低,在30%-50%的低负荷区间,主汽压力按照一定的曲线随负荷线性下降,以减少节流损失,提高汽轮机的内效率。同时,为了维持空冷岛的排汽压力稳定,避免因排汽量减少导致的逆流管束冻结,系统会合理开启热风再循环挡板,开度通常在20%-40%之间。通过热风再循环,将部分heated空气引入空冷岛,增加空冷系统的热负荷,维持排汽压力在6.5-7.0kPa的合理范围内。这种协同调节方式能够在保证机组安全运行的前提下,显著降低低负荷时段的发电煤耗。在高负荷时段,优化抽真空系统的运行,确保真空泵入口压力控制在合理范围内,及时排出不凝结气体,避免其积聚导致排汽压力上升,同时通过对真空泵进行变频改造等方式,提高其运行效率^[3]。

3.4 智能监控与预警系统

构建空冷机组数字孪生平台是实现机组智能化运行的重要支撑。该平台以物理机组为原型,通过三维建模技术构建与实际机组完全一致的虚拟模型,集成了环境参数、空冷岛状态、汽轮机运行数据等多个监测点的信息,监测点数量可达数百个,包括温度、压力、流量、振动、转速等多种参数。平台采用实时数据采集和传输技术,将现场传感器采集的数据实时传输至虚拟模型中,实现虚拟模型与物理机组的同步运行。利用机器学习等人工智能技术,对历史运行数据进行分析 and 挖掘,建立排汽压力预测模型,能够准确预测未来1-2小时内的排汽压力变化趋势。当预测值即将超过安全阈值时,系统会通过声光报警、短信通知等多种方式提前发出预警,以便工作人员及时采取措施进行调整,避免事故的发生。

4 优化效果验证与经济性分析

4.1 优化效果综合评估

通过对空冷机组实施上述优化技术方案后,排汽压力得到有效降低,且波动幅度显著减小,机组运行的稳定性得到极大提升。在夏季高温时段,能够将排汽压力控制在安全范围内,避免了因超温导致的跳闸事故;在冬季低温时段,通过有效的防冻结措施,实现了排汽压力的稳定运行,未再发生冻结事故。机组的发电煤耗有所降低,风机等设备的耗电率也得到有效控制,整体运行效率得到提升。同时,空冷岛的换热效率明显改善,各项性能参数均处于合理区间。

4.2 经济性分析

从经济性角度来看,优化方案的实施能够带来显著的

节煤收益和节电收益。在节煤方面,由于机组发电煤耗的降低,按照机组年运行5500小时、额定功率660MW计算,每年可节省大量的标准煤。以平均降低的煤耗计算,年节煤量相当可观,按照当前市场标准煤价格计算,年节煤收益十分显著。在节电方面,风机、真空泵等设备通过变频改造和智能调控,耗电量大幅减少,每年可节约大量的电能,按照工业用电价格计算,年节电收益也较为可观。虽然优化改造需要一定的初始投资,但从长期运行来看,投资回收期较短,经济性优良。

4.3 环保与社会效益

优化方案的实施在环保方面具有积极而深远的意义。通过减少标准煤的消耗,能够显著降低二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放。按照年节煤量计算,每年可减少大量的二氧化碳排放,为实现“双碳”目标做出积极贡献;同时,二氧化硫和氮氧化物的排放量也相应减少,有助于降低酸雨等环境问题的发生概率,改善空气质量,保护生态环境。该技术方案在提升机组效率的同时,保持了空冷机组的节水优势,单位发电量的耗水率维持在较低水平,较湿冷机组节约了大量水资源,实现了节水与节能的协同增效,具有良好的社会效益。

5 结论与展望

综上所述,660MW超临界空冷机组排汽压力优化需要克服环境敏感性强、系统耦合复杂等难点,通过空冷岛性能提升、环境适应性调控、智能系统支撑等一系列技术手段,能够实现排汽压力的有效降低和机组运行效率的显著提升。未来的研究可以从多个方向进一步深化,如开发基于人工智能的自适应控制算法,实现风机群与喷雾系统更精准、快速的协同调节;研究新型高效的空冷散热器材料,进一步提升换热效率;探索“风光储+空冷机组”联合运行模式,利用新能源电力驱动空冷系统,降低厂用电率。通过持续的技术创新,不断推动空冷机组向更高效率、更优经济性的方向发展。

参考文献

- [1] 程志峰. 600MW级超超临界汽轮机盘车装置优化探析[J]. 中国设备工程, 2023, (S2): 155-157.
- [2] 曾伟光. 600 MW亚临界汽轮机低压缸轴承检修优化[J]. 发电设备, 2023, 37(02): 131-135. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2023.02.011.
- [3] 邓海涛, 高鹏. 一台超临界空冷600MW汽轮机次末级叶片断裂故障诊断及原因分析[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(03): 221-222+228.

Discussion on low-density cement slurry cementing technology

Tianxi Zou Hongpu Gong Yaguang Wu Baoqin Chen Hongwei Wang

China National Petroleum Group Bohai Drilling No. 1 Cementing Branch, Renqiu, Hebei, 062000, China

Abstract

In the context of the rapid economic and social development of our country, the complexity and depth of geological conditions faced by oil extraction projects are increasing, which puts forward higher requirements for cementing technology. Low-density cement slurry cementing has been increasingly used as a technology that integrates the advantages of cost and cementing quality, and storage protection. Based on this, this paper first elaborates on low-density cement slurry based on relevant research and practice, and then discusses the application points of this technology, including material selection, thickening time management, pressure monitoring, water loss ratio control and annulus mud replacement for reference.

Keywords

oil extraction; low-density cement slurry; cementing technology; Apply; investigate

低密度水泥浆固井技术的探讨

邹天喜 巩红甫 吴亚光 陈宝钦 王宏伟

中国石油集团渤海钻探第一固井分公司, 中国·河北任丘 062000

摘要

在我国经济社会迅猛发展背景下, 石油开采工程所面临地质条件复杂性以及深度不断加大, 这就给固井技术提出了更高的要求。而低密度水泥浆固井作为一项集成本优势、固井质量以及储存保护众多优点的技术得到了日益广泛地应用。基于此, 本文结合相关研究及实践先就低密度水泥浆进行阐述, 随后针对该项技术探讨其包括物料选择、稠化时间管理、压力监控、失水比控制以及环空泥浆置换等几方面应用要点, 以供参考。

关键词

石油开采; 低密度水泥浆; 固井技术; 应用; 探讨

1 引言

低密度水泥浆固井技术中的固井是指通过套管, 将水泥浆注入井下, 至井底后, 沿着套管和底层间的环空上返。经过一段时间固化, 泥浆逐步形成水泥环。开展该技术的主要目的是固定井内套管, 利用水泥加固套管之外的环形空间, 避免井壁出现窜通现象。研究低密度水泥浆固井技术, 有利于提高相关项目的技术质量, 提高水泥加固效果。

2 低密度水泥浆概述

石油开采中, 低密度水泥浆是指密度小于普通 Portland 水泥浆 200kg/m³ 的固井浆液, 其密度介于 1.60-1.85g/cm³ 之间。由于能降低环空静压, 防止对地层裂缝的激活而被广泛应用于高渗透带、裂缝敏感层和煤层气层等复杂地层等项目固井施工中。其特征是采用比重小的掺合料(如膨润土、膨胀珍珠岩、发泡剂、中空微珠)加入缓凝剂、流变调节剂等,

使低密度水泥浆具有足够的凝结强度, 并通过稠化时间和失水率的严格控制来保证泵送时的稳定性。同时再通过严格控制浆液滤失和加重剂的比例, 避免因其他原因造成的井壁破裂^[1]。

3 低密度水泥浆固井技术应用

3.1 配制体系优化与现场校正措施

在我国西部油气田地层普遍表现出高温低压或地层破裂压力梯度低的复杂环境下, 低密度水泥浆固井技术的应用需从配制体系优化与现场校正两方面同步推进以满足井下安全与固井质量双重要求。首先, 配制体系中需选用膨润土-轻质骨料复合体系以实现目标密度控制, 其中膨润土质量分数控制在 3.5%-5.0%, 轻质材料优选空心微珠(密度 0.4-0.6 g/cm³)并按质量比 25%:35% 添加, 通过高速剪切分散设备控制剪切速率在 5000-7000 rpm, 并保持连续剪切时间不低于 15 min, 确保浆液体系分散性与均匀性; 其次, 出于提高体系抗高温能力及控制稠化行为, 在其中加入 0.4-0.6% 的缓凝剂(二乙醇胺)、有机硅交联剂复合调控稠化曲线形, 在此条件下浆体于 150℃时应具有 90~120min

【作者简介】 邹天喜(1972-), 男, 中国河南信阳人, 高级技师, 从事固井专业施工研究。

的初凝时间。随后将完成的实验室配方在现场进行液体密度和流变性能微调,使用静态、动态密度计对浆液密度变化区间持续测量,并根据地层压力剖面对比试验地层的压力情况,通过地面密度调整来保持井底压力和地层孔隙压力差值在安全窗口之内(一般宜小于 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$)^[2]。此外,为提高泡沫浆稳定性,可控制发泡剂质量分数为 $0.7\%\sim 1.2\%$,并且配合使用泡沫稳定剂(如十二烷基硫酸钠)来使泡径分布均匀,有利于浆液在流动过程中的结构完整性。现场取样按每5min测一次密度、流变参数及初凝时间,按API标准流变仪控制浆液在 $25\sim 35\text{Pa}\cdot\text{s}$ 范围内流动,以满足浆液输送的稳定性及井下顶替效果。最后,浆体注入前通过井口温控设备测量入井温度并结合井深温度剖面进行校正,从而实现对实验室稠化时间误差予以修正。

3.2 稠化时间实时控制与施工泵送方案

在低密度水泥浆固井施工中,为适应中国油田高地温和裂缝发育地层的井况,需构建以稠化时间实时调控为核心的施工泵送方案。配浆阶段应依据井深预测地层温度剖面与静态压力分布,制定缓凝剂优化配比,采用多组分缓凝体系并进行梯度升温试验,获取高温条件下稠化时间—温度响应曲线,并根据井下温度实际剖面修正曲线阈值,形成可指导现场施工的配方模型。泵送实施前,设置高灵敏度热电偶与井筒壁温监测探头,结合地层热传导模型对井下实时温度场进行动态拟合,以实时校准稠化窗口变化。正式泵注阶段采取双阶段注入模式,前置短段低密度浆液作为稠化响应探测段,结合高频压力回放系统监测其黏度增长趋势与泵压波动,判断反应启动点后立即切换全井段泵注。同时在环空密封的密度层次需求上,配置轻质浆与加重浆双系统,先以低密度段封隔上部环空,随后不停顿切换至加重浆实施下部致密充填,并注意保持该过程中密度转换处泵压稳定防止出现界面紊乱。为实时监测稠化过程中的异常变化,在泵送主段过程中同步布设井口与井下电子压力传感器,结合井底温度探头形成联动监测系统,实时记录浆体受温固化进程与泵压响应曲线,一旦发现压力突变、返浆速率异常或温度曲线偏移,立即暂停泵送操作,快速调整缓凝剂投加比例或浆体密度至修正区间。全流程中需严格控制浆体流动时间与环空置换效率,确保稠化时间窗口内完成井筒空间完整充填与有效封隔,提升固井质量与地层适应性。

3.3 环空泥浆置换与浆帽建设技术

受石油井况复杂影响,在低密度水泥浆固井时必须做好环空泥浆的高效置换和稳定的浆帽构建以保证固井质量。鉴于井筒下方很容易造成地层不稳定,所以在钻进作业的时候,应先用高密度预封浆进行前置泵注,这样能对环空泥浆和初始封隔界面起到稳定作用,同时抑制环空泥浆扰动与界面紊流。接下来就是低密度水泥浆泵注,该环节流速要严格控制,具体根据井筒的结构以及井下的温度和压力环境作为基础来进行分析计算确定一个速度梯度曲线,以保证流速不

会导致环空中残留泥浆或者是剪切混合。同时借助于橡胶管柱塞辅助体系引浆液转化界面,以使浆液两个部分之间的流动状态与边界清晰、浆帽界面的剪切扰动降至最低,从而增强浆帽外形完整度和稳定性。在增加环空的悬浮刚性和抗沉降能力上需要注入质量分数可调的抗沉降剂-缓凝剂复配体系,同时借助于密度差来确定浆帽的最优高度区间,从而让浆帽在井下具有良好的静态固化过程。在泵送末端,通过设置井口并配备高精度的在线密度监测装置读取循环出砂的密度曲线信息,将低密度浆液返出时所对应的位置精确识别出来,以判别置换的完成情况。在泵送末端停止后,在水泥初凝前利用井口静液法和微压干扰检测法进行检测,并根据实测的压力响应变化曲线,得到浆帽胶凝高度以及封隔的完善程度。此外,若石油开采时面对地层渗透性差异大或存在双产层、断裂带分布的复杂井筒,应采取分层分点注入联合可控偏心管汇系统开展多段位变速注浆,在达到分区精准置换及浆帽多点构建同时避免水泥浆窜槽与层间互溶。

3.4 失水比控制与过滤特性管理

在我国石油复杂地层条件下开展低密度水泥浆固井作业时,针对高渗透性层段失水特性控制应基于滤失调控剂体系的定向优化,优先采用羟丙基瓜尔胶与聚阴离子纤维素(PAC)复配体系,通过调节高分子分散度及粒径分布,实现滤失量控制在API标准15mL以内,同时确保浆液流变性能匹配井段排布结构;实验阶段利用中压滤失仪进行动态滤失曲线模拟,构建时间—滤失体积标准曲线并结合井段渗透率模型进行参数修正,校核滤失变化在稠化临界前后时段内的敏感节点;施工过程中部署在线失水监测单元,实时记录浆液循环过程中的滤失率与泵压变化趋势,结合随钻地层压力资料进行数据拟合,识别突发滤失异常位置;当监测数据表明滤失率突破设定上限,采用提高膨润土分散稳定度与增配钠型膨润土比例措施,在不影响静水压梯度前提下提升滤失屏障效果;对于裂缝发育或微裂隙强渗段,在后置浆中掺加短切聚丙烯纤维或微膨胀型有机封堵颗粒,借助流固耦合渗透机制填充微裂缝通道并构建滤饼结构层;特殊井段则使用渐变式滤失调控工艺,前段水泥浆密度设计为 $10.5\sim 11.0\text{lb/gal}$ 范围内,滤失控制剂比例维持高水平,至后段根据井眼倾角与井筒返排特性适度降低封堵剂掺量,以平衡滤失控制与返排效率;现场以动态滤失杯进行浆液滤失效果快速验证,确保浆液体系滤失性能与井下地层渗透性高度匹配,避免环空压降诱发井壁坍塌或环空循环阻断现象的发生^[3]。

3.5 静压与环空压力监测与校核

低密度水泥浆固井技术应用中实时监测、校核静压与环空压力是非常重要的环节。首先,在施工前要依据地层测井资料和控制压钻井参数进行多个层段的静压分布建模,然后根据预计循环压力以及回压计算出设计泵压、尾压和地层破裂压力的安全裕度,最后通过水泥浆密度和排量的控制程序

来进行相应的优化。其次,在泵送时要在套管外环空安装2个或更多的石英压阻式压力传感器,布置位置分别为产层顶界、弱层及井眼扩大部分,当浆液前沿进入到不同的层段时就会实时记录环空的压力变化值以及与理论静压梯度之间的差距,如果在某一部位发现存在局部超压现象,就立刻要调节泵速、稠化时间和转用低密度掺气浆液体系,以实现压力回控^[4]。为应对非预期压增,应在地层弱点段设计泄压孔道或配置机械式放压阀,设定最大压力门限值,当触发阀门动作后,通过环空泄压实现井壁保护。固井结束后,应持续开展静态压力降监测,利用压力数据的自然回落速率与稳定性分析胶结体体积稳定性及顶替效率是否达到设计预期,并识别潜在微环隙发育迹象。随后封闭管柱进行24小时以上静压保压测试,校验封隔器密封性与返排通道完整性;测试期间要求每10分钟采集一次压力数据,并分析其稳定性曲线。施工全部结束后,应使用井下程控压力记录仪获取连续压力数据曲线,结合施工时采集的泵压、排量、密度等参数,重新回代至地层压力模型,开展多参数校核计算,确认施工全过程中环空压力始终处于安全控制窗口内,从而验证低密度水泥浆体系设计与操作参数的匹配性与合理性。

3.6 温度梯度适应与胶结质量提升措施

受油气井固井所面临地层温度梯度达80~120℃/km等恶劣高温环境影响,低密度水泥浆易出现的早期稠化和胶结失效情况下,需要通过综合的手段来提高其温度适应性和胶结质量的稳定性。首先,在实验室环境下需要根据目标井段的地层温度剖面,采用相应的热梯度控制高温高压稠化试验系统,在稠化曲线上应用线性升温控温装置模拟井深热环境,对稠化曲线进行温度修正,保证实验数据与井下实际情况一致。其次,现场施工中在井口处加装套管加热器给水泥浆的输送进行预热补偿、或向浆液内加入相变储热材料(例如:聚乙烯醇复合材料)来迟缓浆体温升速率,防止因过早稠化造成的膨胀破坏。另外,在低密度水泥浆的配制中采用具有较高热稳定性的环氧改性硅酸盐类复合掺合料,借助其在高温环境内能够生成空间网状结构而提高胶体间的结合

强度、抑制游离水的析出以及有利于界面密实性的改善^[5]。除此之外,在对水泥浆拌合后的高温段泵送过程中也需要及时根据温度参数的变化来调节缓凝剂(例如:磷酸酯类、有机羧酸盐类)的添加量,同时利用PLC自动加药装置以使加药量比例得到准确地控制,以免由于浓度过大而导致水泥石强度下降。最后,在井下设置热电偶阵列开展多点温度实时监测,并根据稠化时间预测模型调整泵送节奏以及浆液流变性。同时低密度水泥浆入井静置环节须确保套管内压稳定,以防止由于热膨胀诱发微裂缝形成影响胶界面连续性。

4 结语

本文针对我国石油开采工程中低密度水泥浆固井技术,结合陆上与海上油田的真实井况,选取配制体系、稠化控制、环空置换、失水管理、压力监测与高温适应六项关键技术进行系统探讨。每项技术均依据专业施工实践提供详细操作流程,力求步骤清晰、逻辑严谨。通过上述技术的严格实施,能够在保障环空压力可控、胶结质量稳定以及施工安全的前提下,提升固井工程整体可靠性。本文所述方法可供国内石油工程技术人员在类似复杂地层与精细施工条件下参考应用。

参考文献

- [1] 杨威,刘仕康,薛雷.渤海浅层大位移井固井水泥浆技术[J].石油化工应用,2023,42(12):37-41.
- [2] 马力平.探析低摩阻耐压防漏低密度水泥浆固井技术[J].石化技术,2025(5).
- [3] 尹剑宇.低失水低密度水泥浆体系的研究与性能评价[D].东北石油大学,2021.
- [4] 秦江,宋凯,文华,等.纳米低密度水泥浆体系在页岩油水平井固井中的应用[J].长江大学学报(自然版)理工卷,2021(002):018.
- [5] 卢海川,王琼,郭秋实,赵烁森,安少辉,高继超.国内外固井低密度水泥浆体系研究综述[J].精细石油化工进展,2020,21(4):5.

Research on long-term operation and maintenance technology of coal, chemical gas and gasification device

Mengjiao Wu

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

Abstract

This paper focuses on long-term operation and maintenance technologies for coal chemical gasification units, conducting an in-depth analysis of key factors affecting prolonged system performance. Key factors include burner wear, quench ring blockage and wear, fluctuations in oxygen-to-coal ratio, pressure variations in gasifiers, and coal quality variations (including changes in ash melting point, moisture content, and particle size). To address these issues, the study proposes a series of maintenance measures: improving burner and quench ring designs, enhancing equipment maintenance management (establishing inspection and maintenance systems), stabilizing process operations (precisely controlling oxygen-to-coal ratios and gasifier pressures), establishing monitoring systems, and optimizing coal blending strategies. Practical case studies validate the effectiveness of these measures, providing actionable technical references for coal chemical enterprises to achieve stable long-term operation of gasification units.

Keywords

coal chemical industry; gasification device; long cycle operation; maintenance technology

煤化工气化装置长周期运行维护技术研究

吴梦姣

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司, 中国·新疆哈密 839000

摘要

本文聚焦煤化工气化装置长周期运行维护技术, 深入剖析了影响装置长周期运行的关键因素, 涵盖烧嘴磨损、激冷环堵塞与磨损、氧煤比波动、气化炉压力波动以及煤质波动(涉及灰熔点、水分、粒度变化)。针对这些因素, 提出了改进烧嘴和激冷环、加强设备维护管理(建立巡检与检修制度)、稳定工艺操作(精确控制氧煤比和气化炉压力)、检测体系与优化配煤方案等一系列维护技术措施。通过实际案例验证了这些措施的有效性, 为煤化工企业实现气化装置长周期稳定运行提供了切实可行的技术参考。

关键词

煤化工; 气化装置; 长周期运行; 维护技术

1 引言

煤化工作为我国重要的能源化工产业, 对于保障国家能源安全和推动经济发展具有不可替代的作用。气化装置作为煤化工的核心环节, 其运行稳定性直接关乎整个煤化工生产系统的效率与效益。实现气化装置的长周期运行, 能够显著降低生产成本、减少设备维修频次、提高产品产量与质量, 进而增强企业的市场竞争力。然而, 在实际运行过程中, 气化装置面临着诸多挑战, 如设备磨损严重、工艺条件波动、煤质变化等, 这些因素均可能导致装置停车, 影响长周期运行。因此, 深入研究煤化工气化装置长周期运行维护技术具有紧迫性和重要性。基于此, 本文将对煤化工气化装置长周期运行维护技术展开研究。

【作者简介】吴梦姣(1994-), 女, 中国山西临汾人, 本科, 助理工程师, 从事煤气化研究。

2 影响煤化工气化装置长周期运行的因素

2.1 设备磨损

烧嘴作为气化装置关键部件, 在高温、高压恶劣工况下运行, 易因固体颗粒冲刷和高温火焰炙烤产生磨损与热腐蚀。随运行时间增加, 磨损加剧会导致雾化效果变差、燃烧不充分, 影响气化效率, 严重时引发泄漏迫使装置停车。激冷环负责冷却和洗涤高温合成气, 其狭窄通道易因飞灰沉降、水中钙镁硅等离子析出结垢而堵塞, 粗渣颗粒还会造成卡涩与磨损。这些问题会导致激冷水分布不均, 引发下管偏流、合成气带灰带水增加、炉膛压差增大等, 威胁装置长周期运行。

2.2 工艺稳定性

氧煤比是气化反应的关键参数, 直接影响炉内温度和反应速率。过高会导致设备超温、耐火砖损坏加剧; 过低则造成煤燃烧不充分、气化效率降低、炉渣含碳量升高。实际

生产中,因煤质变化、输送波动、氧气流量控制不准等,氧煤比难稳在最佳值,频繁波动严重影响装置稳定。气化炉压力稳定对反应至关重要。压力波动多由下游负荷变化、设备故障(如压缩机故障、调节阀失灵)、操作不当等引起。波动过大会破坏反应平衡,导致气流不稳,影响煤与氧气混合及反应进程,还可能引发设备振动、加速磨损。

2.3 煤质波动

煤的灰熔点是影响气化过程的重要指标,不同煤种差异大。煤种更换或配煤比例不合理时,入炉煤灰熔点可能偏离设计值:过高则难形成良好熔渣,易导致炉渣粘结、堵塞排渣口;过低则熔渣流动性过强,过度冲刷耐火砖,缩短其寿命。煤的粒度分布也影响显著:粒度过大,煤反应不充分,炉渣含碳量增加;粒度过小,易造成煤粉输送管道堵塞,且易被气流带出,同样影响效率。

3 煤化工气化装置长周期运行维护技术措施

3.1 优化设备设计

3.1.1 改进烧嘴结构与材质

针对烧嘴易磨损的问题,研发新型烧嘴结构,如采用多层复合结构,内层选用耐高温、耐腐蚀的合金材料,外层采用高强度的隔热材料,既能提高烧嘴的耐高温性能,又能有效降低热传导,减少烧嘴头部的热腐蚀^[1]。同时,优化烧嘴喷头的设计,使粉煤气化更加均匀,降低冲刷磨损。某企业采用新型的夹套式烧嘴结构,将烧嘴使用寿命从原来的1000-1500小时延长至2000-2500小时。在材质方面,选用高铬镍合金、陶瓷复合材料等高性能材料制造烧嘴,这些材料具有优异的耐磨、耐蚀性能,能够显著提高烧嘴的抗磨损能力。

3.1.2 优化激冷环设计

为解决激冷环堵塞和磨损问题,对激冷环的结构进行优化设计。增大激冷环缝隙宽度,降低颗粒卡涩概率,增加水膜厚度和稳定性。例如,将激冷环缝隙宽度从原来的3mm增大至5mm,有效减少了飞灰颗粒的沉积和堵塞。优化缝隙形状,采用外扩型(喇叭口向下)设计,有利于水流扩散和冲刷,减少流动死区。同时,在激冷环内部增设导流结构,使激冷水分布更加均匀。选用耐高温腐蚀、耐磨损的镍基合金等材料制造激冷环,提高其使用寿命。

3.2 加强设备维护管理

3.2.1 建立完善的设备巡检制度

制定详细的设备巡检计划,明确巡检内容、巡检路线、巡检时间和责任人。操作人员每小时进行一次现场巡检,重点检查设备的温度、压力、振动、声音等参数,及时发现设备运行中的异常情况^[2]。技术人员每日进行深度巡检,对设备的运行状况进行全面评估,分析设备参数的变化趋势,判断设备是否存在潜在故障隐患。管理人员每周开展综合巡检,对设备维护管理工作进行监督和指导,确保巡检制度的

有效执行。建立设备巡检台账,详细记录每次巡检的结果,对发现的问题进行跟踪记录,直至问题得到彻底解决。

3.2.2 定期进行设备检修与维护

依据设备运行状况与寿命,制定科学检修计划。计划停车时,对气化装置全面检修,涵盖烧嘴、激冷环及各类阀门管道等,检修需重点关注水冷壁管磨损与腐蚀:用超声波测厚仪检测壁厚,对比数据判断磨损速率;检查管壁高温氧化、熔渣侵蚀痕迹,尤其气流冲刷严重区域。若局部磨损超标,需及时补焊或换管段防泄漏。同时,清理管外熔渣积灰,可采用高压水射流或机械方式;检查内部水循环系统,确保无堵塞泄漏、水流均匀,并做压力试验。严格检测烧嘴,磨损超范围及时更换;对激冷环高压水清洗并检查磨损,必要时修复更换;检测维护阀门管道密封与流通性能。检修要按规程操作,完成后全面调试试运行,确认正常方可投产。

3.3 稳定工艺操作

3.3.1 精确控制氧煤比

采用先进的自动化控制系统,对氧煤比进行精确控制。通过安装高精度的流量计,实时监测煤和氧气的流量,并将信号传输至控制系统。控制系统根据设定的氧煤比目标值,自动调节氧气和粉煤的流量调节阀,确保氧煤比始终保持在最佳范围内。同时,引入先进的控制算法,如自适应控制、预测控制等,提高氧煤比控制的精度和响应速度。某企业采用自适应控制算法对氧煤比进行控制,在煤质发生变化时,系统能够自动快速调整氧煤比,使气化炉温度波动范围控制在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内,有效保证了气化反应的稳定进行。此外,加强对操作人员的培训,提高其对氧煤比重要性的认识和操作技能,使其能够在出现异常情况时,及时、准确地进行手动干预调整。

3.3.2 稳定气化炉压力

为稳定气化炉压力,在下游工序设置压力缓冲装置,如缓冲罐、气柜等,减少下游工序负荷变化对气化炉压力的影响。同时,优化气化装置的压力控制系统,采用先进的压力调节阀和控制算法,提高压力控制的稳定性和精度。例如,采用串级控制策略,将气化炉压力作为主控制参数,下游工序的压力作为副控制参数,通过两个控制器的协同工作,实现对气化炉压力的精确控制。加强对设备的维护管理,确保压缩机、调节阀等设备的正常运行,避免因设备故障导致压力波动。建立压力异常应急预案,当气化炉压力出现异常波动时,操作人员能够迅速按照预案采取有效的措施进行处理,如调整负荷、切换设备等,确保气化装置的安全稳定运行。

3.4 强化煤质管控

3.4.1 建立煤质检测与分析体系

在煤源采购环节,加强对入厂煤的质量检测,建立严格的煤质验收标准。每批入厂煤都要进行全面的煤质分析,包括灰分、水分、挥发分、固定碳、灰熔点、硫分等指标的

检测。采用先进的检测设备和方法,如工业分析仪、灰熔点测定仪、元素分析仪等,确保检测结果的准确性和可靠性。同时,对不同煤种的特性进行深入分析,建立煤质数据库,为配煤和气化工艺调整提供数据支持^[1]。在生产过程中,定期对入炉煤进行煤质检测,实时掌握煤质变化情况。当煤质出现较大波动时,及时调整配煤比例或气化工艺参数,以保证气化装置的稳定运行。

3.4.2 优化配煤方案

根据不同煤种的特性,结合气化装置的设计要求,制定科学合理的配煤方案。通过对多种煤种进行掺配,使入炉煤的各项指标达到最佳匹配状态,如控制灰熔点在合适范围内,调整煤的发热量、挥发分等指标,以满足气化反应的需要。采用先进的配煤技术,如基于数学模型的优化配煤方法,根据煤质数据库中的数据和气化反应的数学模型,计算出最佳的配煤比例。同时,利用在线煤质检测设备,对配煤过程进行实时监测和调整,确保配煤质量的稳定性。例如,某企业通过优化配煤方案,将入炉煤的灰熔点稳定控制在1300-1350℃之间,有效减少了炉渣粘附和耐火砖磨损问题,提高了气化装置的运行稳定性和气化效率。

4 实际案例分析

某煤化工企业的粉煤气化装置在运行初期,面临多项问题导致连续运行周期较短(不足40天)。设备方面,粉煤水冷壁气化炉的局部管壁磨损严重,尤其在燃烧区附近,运行约300小时后管壁厚度就减少1.5mm,存在爆管风险;烧嘴因高温冲刷和煤粉磨损,使用寿命仅1200-1500小时,频繁更换导致非计划停车。工艺方面,氧煤比波动较大(±3%),导致气化炉温度波动范围达±60℃,进一步加剧了水冷壁的热疲劳损伤;煤质波动(灰熔点波动范围1250-1400℃、粒度分布不均匀)则引发炉内结渣和煤粉输送不稳定,影响反应效率。

针对上述问题,该企业实施了一系列针对性措施:将烧嘴材质升级为陶瓷复合材料,喷头结构改为多通道旋流设计,增强雾化效果并减少冲刷磨损;对水冷壁拐角及异形结构处、水冷壁管焊缝及表面不平整处、合成气出口附近区域等采用堆焊耐磨合金层(厚度3mm),并优化炉膛内气流

分布,降低局部冲刷强度。建立“小时巡检+每日专项检测”制度,操作人员每小时记录水冷壁进出口水温、压力差等参数,技术人员每日使用红外测温仪检测炉壁温度分布,停车检修时检查水冷壁内表面;制定季度检修计划,重点对水冷壁进行超声波测厚和水循环系统清洗。引入智能控制系统,结合在线煤质分析仪数据,实时调整氧煤比,控制精度提升至±0.8%;在下游工序增设2台缓冲罐,稳定气化炉压力波动(控制在±0.05MPa以内)。建立多煤种配煤模型,通过掺配低灰熔点煤(30%)和高稳定性煤(70%),将入炉煤的灰熔点稳定在1300-1350℃,同时采用分级破碎工艺,确保煤粉粒度(80%通过100目筛)合格率达95%以上。

实施后,装置运行状况显著改善:粉煤水冷壁气化炉的管壁磨损速率降至0.3mm/300小时,使用寿命延长至1500小时以上;烧嘴使用寿命提升至2500-3000小时;氧煤比和气化炉温度波动分别控制在±1%和±15℃以内,煤质波动对装置的影响大幅降低。最终,装置连续运行周期从不足40天延长至150天以上,年减少非计划停车5次,生产效率提升30%,年增经济效益约2000万元。

5 结语

综上所述,煤化工气化装置的长周期稳定运行是提升企业效益与竞争力的关键所在。本文所探讨的维护技术措施,从设备优化到工艺管控,再到煤质管理,形成了一套较为完整的解决方案。实际案例表明,这些措施能有效延长装置运行周期,减少故障停机。未来,随着技术的不断发展,还需进一步探索智能化、数字化的维护手段,结合大数据分析等技术,实现对装置运行状态的精准预判和高效管控,持续提升气化装置的运行可靠性与经济性,为煤化工产业的可持续发展注入更强动力。

参考文献

- [1] 林权.石油化工项目中四喷嘴水煤浆气化装置实现长周期稳定运行优化研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(11):086-089.
- [2] 程鸿博,申家君,夏健楠,韩超,邹晓敏.煤化工装置长周期运行管理措施研究[J].氮肥技术,2025,46(2):44-47.
- [3] 安海泉,刘臻,冯长志,鲍金源,王峰,郑锦泉.大型气化装置智能运行与管控平台研发与应用[J].中国煤炭,2023,49(11):71-79.

Research on Static Electricity Hazard Analysis and Systematic Prevention and Control in the Production Process of Oil based Coatings

Chunrong Ni

COSCO Kansai Coatings (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 201512, China

Abstract

The production of oil-based coatings involves a large amount of flammable organic solvents and powders, among which many materials with high electrical resistivity are prone to static electricity accumulation. Once the energy reaches the minimum ignition energy (MIE), it is highly likely to cause fire and explosion accidents. This article systematically analyzes the static electricity risk sources during the process based on relevant charging mechanisms and discharge theories; Deeply explored the impact of key parameters such as resistivity, relaxation time, and minimum ignition energy on risk level; Adopting four levels of systematic prevention and control, including engineering control (grounding, flow rate limitation, etc.), process optimization (feeding method optimization, etc.), online monitoring (static electric field strength, etc.), and safety management (risk assessment, operating standards, etc.). By analyzing case studies and applying quantitative risk assessment models, the effectiveness is verified, providing theoretical support and practical guidance for improving the intrinsic safety of oil-based coating production.

Keywords

static electricity hazard; Oil based coatings; Minimum ignition energy (MIE); Fire and explosion; Electrostatic charging mechanism; Inert protection; Static dissipation; Antistatic agent; risk assessment

油性涂料生产过程中静电危害分析与系统性防控的研究

倪春荣

中远关西涂料(上海)有限公司, 中国·上海 201512

摘要

油性涂料生产涉及大量易燃有机溶剂和粉料等, 其中不乏高电阻率特性物料极易导致静电积累, 能量一旦达到最小点火能量(MIE), 极易引发火灾爆炸事故。本文基于相关起电机理与放电理论, 系统分析了过程中的静电风险源; 深入探讨了电阻率、弛豫时间、最小点火能量等关键参数对风险等级的影响; 采用工程控制(接地、限制流速等)、工艺优化(进料方式优化等)、在线监测(静电场强等)与安全管理(风险评估、操作规范等)的四层次、系统化防控。通过案例分析及定量风险评估模型应用, 验证有效性, 为油性涂料生产本质安全的提升提供理论支撑、实践指南。

关键词

静电危害; 油性涂料; 最小点火能量(MIE); 火灾爆炸; 静电起电机理; 惰化保护; 静电消散; 抗静电剂; 风险评估

1 引言

油性涂料凭借其优异的施工成膜性、防护性及装饰等, 在工业、建筑等领域得以广泛应用。其生产过程通常包含树脂溶解、颜料/填料分散、调漆、过滤灌装等。过程中经常会大量使用甲苯、二甲苯、酯类、酮类等有机溶剂, 以及钛白粉、有机颜料等粉料, 其中大多具有较高的体积电阻率($> 10^{12} \Omega \cdot m$), 属于优良绝缘体。在管道输送、搅拌、研磨、过滤、灌装等一些环节中, 极易产生并积累静电。当能量积累到可燃性蒸汽/粉尘云的最小点火能量(通常 0.1 -

0.3 mJ) 并放电时, 极易成为点火源引发火灾甚至爆炸。

本文从静电产生的机理出发, 结合油性涂料生产特点, 深入剖析了各环节的静电风险特征, 并基于最新标准规范和工程实践, 建立一套科学、系统的静电防控体系, 为油性涂料生产的本质安全设计与管理提供专业性借鉴。

2 静电产生机理与风险理论

2.1 机理

接触-分离: 不同材质紧密接触时, 界面处发生电子或离子转移, 当两者快速分离时(如溶剂在流动中、粉体投料中), 部分电荷来不及回流, 导致各自带上等量异号电荷。尤其是在绝缘介质中。

流动电流(Streaming Current): 高电阻率液体(如溶

【作者简介】倪春荣(1972-), 男, 中国上海人, 本科, 从事化工管理研究。

剂、树脂等)在管道中流动,正负电层被破坏,随流体迁移形成流动电流(I_s)。流速越快、管径越小、电导率越低,电流越大。

感应起电:带电体接近孤立导体时,导体在静电场作用下发生电荷变化,两端出现正负相反的感应电荷。

粉体起电:粉体颗粒在输送、研磨、筛分等过程中,颗粒与颗粒、颗粒与设备壁发生碰撞摩擦,导致电荷转移与积累。

2.2 静电积聚与放电

产生的静电荷若不能及时泄放(消散),会逐渐积聚,形成高电位,当达到击穿场强时,便会发生放电、产生火花。

2.3 关键风险评估参数

电阻率(ρ):是衡量物料导电情况的核心参数。液体的体积电阻率 $\rho_v > 10^{10} \Omega \cdot m$ 时易积累静电; $\rho_v < 10^6 \Omega \cdot m$ 时电荷消散较快,风险较低。

弛豫时间(τ):表示电荷在材料中消散快慢的参数, $\tau = \epsilon_r * \epsilon_0 / \sigma$ (ϵ_r : 相对介电常数; ϵ_0 : 真空介电常数; σ : 电导率)。 τ 越小,消散越快。由此设备/系统的弛豫时间远小于工艺操作时间才比较安全。最小点火能量(MIE):可燃性蒸气/粉尘云能被电火花点燃的最小能量。涂料用溶剂蒸气 MIE 多在 0.1-0.3 mJ 范围(如甲苯 ~0.24mJ, 二甲苯 ~0.2mJ); 炭黑、钛白粉等粉尘 MIE 约 5-15 mJ。只要静电火花能量超过 MIE 即构成有效点火源。燃烧爆炸极限范围(LEL/UEL):溶剂蒸气/粉尘浓度必须处于该范围内(下限 LEL 至上限 UEL)才能被点燃。通常 25%LEL 作为警戒值。

3 静电风险源分析

3.1 原料储存与投料

储罐进料:液面上部或高速进料、飞溅等极易产生高电荷。顶部空间蒸气浓度若处于爆炸极限范围内,极易引起燃烧甚至爆炸。

粉体投料:投料时,粉体颗粒与料袋、设备壁摩擦碰撞,极易产生大量静电,投料时附近易形成高浓度粉尘云极可能处于爆炸极限范围内,极易引发粉尘爆炸。

溶剂树脂投料:桶装倾倒时、管道进入生产釜时(尤其是悬空进料),同样极易产生静电积聚情况(若未采取有效措施)。

3.2 预混合与搅拌

预混合:树脂投入溶剂或多种溶剂混合搅拌时,接触分离起电显著。

颜料/填料加入:将粉体加入液体基料中及初期搅拌产生摩擦起电。高速分散(Dissolver):齿状分散盘高速旋转(线速度可达 20-30 m/s)产生强烈剪切力,使物料间、与盘/壁间剧烈摩擦,极易产生静电。

3.3 研磨(砂磨机/球磨机)

物料高速循环:浆料在泵驱动下高速通过管道、狭窄

研磨腔(珠磨机)或物料与研磨介质剧烈碰撞摩擦,产生流动电流和摩擦电荷。

研磨腔体内部:充满浆料和运动介质,是电荷产生和积聚的高风险区。但由于密闭,溶剂蒸气可能饱和。

3.4 调和(稀释、调粘、调色)

添加溶剂、树脂、色浆调整时,若快速倾倒、飞溅易产生静电。

3.5 过滤

涂料通过高比表面积滤材(如滤袋、滤芯)时,发生剧烈的固-液分离和摩擦,尤其滤材为绝缘材质(如聚丙烯、尼龙)时极易产生静电。

3.6 输送与转移

管道:液体原料、涂料通过管道(尤其非金属管道)输送时,流动电流会持续产生。如静电导除控制不力,极易在容器内积累电荷,并在容器间隙产生火花放电风险。

3.7 灌装

油性涂料从灌装头进入容器时,两者间存在电位差或灌装头由于液体电荷转移带电,间隙处极易引发火花放电。这是油性涂料灌装线最典型的风险点。

液体灌装冲击:液体下灌装冲击容器底面或液面,飞溅、气泡等会加剧电荷产生。

人体静电:人体带静电(可能因摩擦带高压静电 >10kV),触摸设备时亦易发生人体放电。

薄膜等绝缘材料:包装线上塑料薄膜等绝缘材料摩擦起电,也可能吸附粉尘或产生放电。

4 静电防控系统化策略

静电防控是一个系统工程,需采取综合的管控措施,宜采用“预防产生、促进消散、避免积聚、消除点火源、降低爆炸性环境”的多重防护(Layers of Protection)。

4.1 工程控制措施(Engineering Controls)

可靠接地或等电位连接(Bonding & Grounding):原则:所有金属设备(反应釜、砂磨机、过滤罐装壳体、管道、法兰等)必须通过低阻抗($< 10 \Omega$, 推荐 $< 1 \Omega$)可靠连接到工厂接地网。严禁有游离导体在操作区域的存在,这是最基础、最重要的措施!设备材质与静电消散:设备主体及管线首选碳钢、不锈钢等金属材料,并确保良好联通和接地。不可避免使用非导体时(如视窗等):宜采用静电消散型材料($\rho_v = 10^4 - 10^9 \Omega \cdot m$),使电荷能在毫秒至秒级安全泄放。对无法更换的绝缘管道/部件,可考虑缠绕金属丝并接地。流速控制:液体:推荐流速 $< 1 m/s$,管径增大可适当提高,但通常不超过 7 m/s。对于高电阻率溶剂($\rho_v > 10^{10} \Omega \cdot m$)和管道末端(如灌装口),需进一步降低(如 $< 1 m/s$)。粉体(气流输送):对于粒径 $> 100\mu m$ 的粉体,建议速度 $< 20-25 m/s$;对于更细或易起电粉体,需更低(如 $< 15 m/s$)。采用密相输送可有效降低速度和起电强度。惰化保护(Inerting):原理:向设备顶部空

间或粉体处理系统中充入惰性气体（常用 N₂），降低氧气至极限浓度（LOC）以下（通常 < 8-10% v/v），可使爆炸性环境无法形成。但需注意惰性气体聚集操作工位，防人员窒息。

环境湿度控制 (Humidification): 增加空气相对湿度 (RH) 可显著加速电荷消散。通常 RH > 60-65% 但需考虑物料吸水性、腐蚀性，是否影响质量。设置防静电区：在灌装、可燃粉体投料等高危区域设置防静电工作区 (ESD Protected Area)。强制穿戴防静电服（面料电阻率 $10^5 - 10^9 \Omega$ ）、防静电鞋/靴（鞋底电阻 < $10^9 \Omega$ ）。入口处设置人体综合电阻测试仪。严禁止在危险区穿脱衣物。

4.2 工艺措施优化 (Process Optimization)

使用抗静电剂 (Antistatic Agents, ASA): 添加少量 (ppm 级) ASA (多为离子型或非离子型表面活性剂) 到物料中，提高其电导率 (降低 ρ_v 至 $10^6 - 10^8 \Omega \cdot m$)，可显著加速电荷弛豫消散。

优化进料方式: 液体：储罐进料采用底部进料 (浸没管)，避免顶部喷溅。生产罐投料可采用沿管壁流入的方式。粉体采用大倾角锥形料斗、振动下料等，促进粉体密实流动，减少扬尘。真空上料机使用导电软管和接地料斗，避免喷溅或湍流。合理设置静置时间：在过滤后、灌装前设置足够的静置时间 (如 15-30 分钟)，让液体内部积聚的电荷充分弛豫消散。设备避免使用高压蒸汽或空气，防止产生强静电和形成爆炸性混合物。推荐惰性气体吹扫或湿法清洗设备。

4.3 监测与报警 (Monitoring & Alarming)

在关键设备 (过滤罐装、粉体处理设备等) 附近安装非接触式静电场强计或电位计，实时监测并设定报警阈值 (如 > 10 kV/m 或 > 5 kV)。

在管道上安装在线电荷密度计或电流表，监测流动电流评估风险和控制流速。

在储罐区、灌装区等安装可燃气体探测器 (LEL%)，实时监测并联动通风或停机。

惰化区域必须配备在线分析仪，并具备报警和连锁功能。接地状态监测：在灌装点各设备安装静电导除监测连锁装置 (Grounded Circuit Monitor)，确保可靠接地且连接良好时才开启。

4.4 安全管理措施 (Safety Management)

进行全面静电安全风险评估，确定风险等级 (如 LOPA, HAZOP 分析)，制定针对性的防控措施，并严格执行操作规程 (SOP)。全员进行静电危害与防控的强制性培训。设备维护与检验：建立接地系统、静电消散设备、连锁装置、监测仪表的定期检查、测试和维护制度。应急预案：对静电引发火灾爆炸的情况需制定专项应急预案，并定期演练。

5 案例分析和定量风险评估模型的应用

5.1 案例：溶剂储罐进料火灾事故

某年产 5 万吨油性涂料公司通过顶部敞口方式，用泵

将甲苯 ($\rho_v \sim 2.5 \times 10^{13} \Omega \cdot m$, MIE ~ 0.24 mJ) 快速打入储罐时，发生剧烈喷溅。罐内积聚的静电荷在释放发生火花放电，引燃了顶部空间的甲苯蒸气导致爆炸火灾。失效分析：风险源：顶部喷溅进料、未控制流速、罐体及管道可能接地不良、未用 N₂ 封。点火源：火花放电。爆炸环境：灌顶蒸气浓度进入爆炸范围。改进措施：改为底部进料管口浸没液面；控制进料流速 (< 1 m/s)；确认储罐及管道可靠接地；增设顶部空间氮封系统及氧含量监测；在进料管口安装防静电连锁装置 (导电不良连锁停泵)。

5.2 案例：某油性涂料公司灌装区人体静电起火事故

简述: 某穿着化纤服和胶鞋的操作工在灌装聚氨酯清漆 (含乙酸乙酯, MIE ~ 0.46 mJ) 的 200L 金属桶区域。当其手接近灌装枪头时，发生刷形放电，引燃了灌装口溶剂蒸气。失效分析：风险源：灌装口蒸气逸散浓度超过 LEL、人体活动摩擦起电。点火源：人体静电放电管理失效：未强制穿着防静电服/鞋；人员培训不到位。改进措施：防静电区域操作强制穿着防静电服、鞋；铺设防静电地板并可靠接地；人员进入时触摸静电导除装置导除人体静电；加强防静电安全培训和监督；减少蒸气逸散 (如改进枪头密封、局部排风等)。

5.3 应用定量风险评估模型的示例

以管道输送二甲苯溶剂 ($\rho_v = 10^{13} \Omega \cdot m$) 至生产储罐为例：流动电流 (I_s): 假设流速 $v=5$ m/s, 管径 $d=0.05$ m, 得 I_s 量级约为 10^{-6} A。储罐入口处电位 (V): $V = I_s * R$ (R 为储罐对地电阻)。若 $R=10^{10} \Omega$ (绝缘不良)，则 V 可达 10^4 V (10kV)! 若 $R < 10 \Omega$ 则 V 可忽略。评估放电风险：10kV 电位下，若存在游离导体 (如未接地的取样勺、液位计浮球等) 靠近罐壁，发生放电起火的能量 W 可估算为 $W = 0.5 * C * V^2$ (C 为游离导体电容，假设 50pF)。计算得 $W \sim 2.5$ mJ, 远远大于二甲苯 MIE (0.2 mJ)，火灾风险极高! 该风险评估模型的计算显示可靠接地 (将 R 降至 < 10Ω) 对限制电位、降低放电起火的至关重要，验证了控制流速的必要性，提示了游离导体存在的巨大风险。

6 结论与展望

静电危害是油性涂料生产中潜藏的重大安全风险，是一项涉及多学科 (静电学、化学工程、材料科学、安全工程) 的系统性防控工程。

展望:

抗静电新型材料研发: 开发效率更高、适用性更宽 (耐溶剂、耐高温)、添加量更低、对涂料性能影响更小的 ASA。

智能化监测与防控: 利用物联网、大数据及智能预警；发展基于大语言模型的预测性维护和自适应控制。

深化设计本质安全: 在工艺和设备设计阶段更深入地融入防静电理念。

持续跟进国际先进标准，结合实践，推动防静电安全

标准（如 GB 12158）的不断完善、提升。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 12158-2006 防止静电事故通用导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [2] Robinson K .NFPA 77 Recommended Practice on Static Electricity Recommended Revisions - (ppt)[C]//AIMCAL R2R Conference USA 2018: Roll 2 Roll Web Coating and Finishing: With SPE s FlexPackCon, Phoenix, Arizona, USA, 28-31 October 2018, Volume 1 of 2.2019.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60079-32-1: Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance[S]. Geneva: IEC, 2019.
- [4] Britton, L. G. Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations (2nd ed.). New York: Wiley-AIChE, 2012.
- [5] Glor, M. Electrostatic Hazards in Powder Handling. Letchworth: Research Studies Press Ltd, 1988.
- [6] Pratt, T. H. Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions. New York: Wiley-AIChE, 2000.
- [7] Jones, T. B., & King, J. L. Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [8] Lüttgens, G., & Wilson, N. Electrostatic Hazards (Revised ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- [9] Cross, J. A. Electrostatics: Principles, Problems and Applications. Bristol: Adam Hilger, 1987.
- [10] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts. OSHA 3371-08, 2009.

Optimize the transmission system of the cabinet fabric crane

Lin Li Ming Jiang Liming Jiang Zunwei Yang Keyang Liu

Sichuan Tobacco Industry Co., Ltd. Shifang Cigarette Factory, Deyang, Sichuan, 618000, China

Abstract

The storage cabinet fabric crane plays an important role in the tobacco production line, and the design of its transmission system is crucial for the stable operation of the equipment. The storage cabinet fabric crane adopts a single motor reducer as the power source, which drives the belt to rotate through chain transmission. The main transmission shaft is connected to the sprocket walking wheel component through a flat key, transmitting two powers. This design results in significant bidirectional loads on the flat keys and keyways, making them prone to wear and tear, leading to the failure of the fabric crane transmission and equipment malfunctions. This article proposes a split type sprocket walking wheel component scheme, which uses two flat keys to transmit the power of driving and belt rotation respectively, effectively reducing the wear of the main transmission shaft and avoiding the transmission failure of the fabric driving. The improved transmission system runs smoothly, significantly improving the stability and reliability of the equipment, which is of great significance for improving product quality and production efficiency.

Keywords

Storage cabinet; chain drive; key connection; drive shaft; improvement

优化贮柜布料行车传动系统

李林 江铭 姜黎明 杨遵伟 刘克洋

四川中烟工业有限责任公司什邡卷烟厂, 中国·四川 德阳 618000

摘要

储柜布料行车在烟草制丝生产线中扮演着重要角色,其传动系统的设计对于设备的稳定运行至关重要。储柜布料行车采用单个电机减速器作为动力源,通过链传动带动皮带转动,主传动轴通过平键连接链轮行走轮构件,传递两个动力。这种设计导致平键及键槽承受较大的双向负荷,容易磨损,造成布料行车传动失效,引发设备故障。本文提出了一种分体式的链轮行走轮构件方案,采用两个平键分别传递行车行走和皮带转动的动力,有效降低了主传动轴的磨损,避免了布料行车传动故障。改进后的传动系统运行平稳,显著提高了设备的稳定性和可靠性,对提高产品质量和生产效率具有重要意义。

关键词

储柜; 链传动; 键连接; 传动轴; 改进

1 储柜简介

1.1 储柜工作原理

储柜是烟草制丝生产线中的重要设备,用于储存和均匀布料。其主要组成部分包括柜体头部、柜体、柜体尾部、输送链带、布料行车和电缆支架等。布料行车在储柜上作往复运动,将上道工序送来的物料逐层均匀地铺在底带上。当布料行车运动到储柜一端时,安装在布料行车上的接近开关感应到此端的挡铁,电控柜接收到该接近开关发出的电信号后,控制电机反向转动,布料行车反向运行。这一过程通过程序控制,确保布料行车在储柜上往复运动,实现物料的均匀分布。

1.2 储柜工艺任务

储柜的主要工艺任务是储存不同的物料,调节整线的均衡生产,平衡各工艺段单位时间产能的差异,实现各产品牌号计划的优化配置。具体来说,储柜有以下几个重要功能:

1. 储存物料: 储柜可以储存一定量的物料,确保生产

线在换料或设备维护时能够继续运行,减少停机时间。

2. 调节生产: 储柜可以平衡各工艺段的产能差异,使生产线的运行更加平稳。例如,当某个工艺段的产能较低时,储柜可以暂时储存多余的物料,待产能恢复后再继续输送。

3. 优化配置: 储柜可以根据生产计划,对不同牌号的物料进行优化配置,提高生产效率和产品质量。

4. 物料处理: 储柜可以对物料进行一定的处理,如使混合后的物料更加充分地吸收前道工序施加到物料上的水分、料液等,达到工艺要求。此外,储柜还可以平衡物料的温度和水分,使其满足下一道工序的来料要求标准。

储柜的这些功能对于整个生产过程的稳定性和产品质量的提升具有重要意义。因此,储柜的设计和运行需要充分考虑这些工艺任务,以确保其能够高效、稳定地运行。

1.3 储柜布料行车传动系统

储柜布料行车的传动系统(如图1)是其核心部件之一,其设计和运行状态直接影响到布料行车的性能和可靠性。布

料行车的传动系统主要由电机减速器、主传动轴、链轮行走轮构件和皮带传动部分组成。通过主传动轴带动链轮行走轮构件转动，行走轮在储柜上部轨道上滚动，使布料行车能够沿着轨道直线往返运动。同时，链轮行走轮构件通过链条传动，带动皮带主动辊转动，张紧在主动辊和被动辊上的皮带通过摩擦力作用转动。

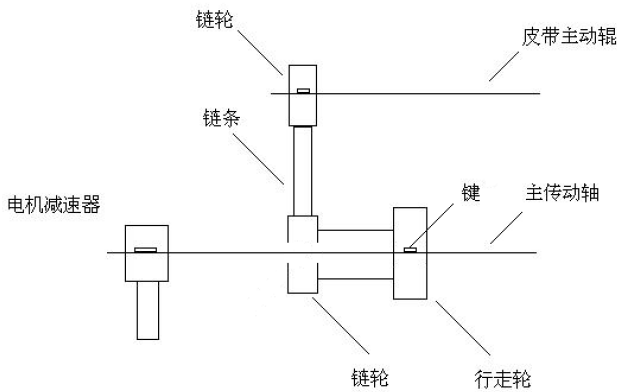


图1 布料行车传动系统示意图

主传动轴与链轮行走轮构件通过一个平键连接，传递了布料行车行走和皮带转动的两个动力。这种设计虽然结构简单，但在实际运行中存在一些问题。首先，平键及键槽承受较大的双向负荷，容易磨损。其次，布料行车在启动和反向时，会产生较大的振动和冲击力，进一步加剧了键连接部位的磨损。这些问题导致布料行车传动失效，引发设备故障，影响生产效率和产品质量。

2 存在的问题

在实际生产过程中，储柜布料行车的传动系统暴露出了一些问题，这些问题严重影响了设备的稳定运行和生产效率。主要问题包括：

2.1 布料行车启动和反向时振动大

布料行车在启动和反向时，会产生较大的振动和冲击声音。这种振动不仅影响设备的运行稳定性，还可能导致设备部件的损坏。例如，布料行车的主传动轴和平键在频繁的启动和反向过程中，承受较大的冲击力，容易导致磨损和疲劳损坏。此外，这种振动还可能影响材料的均匀分布，降低产品质量。

2.2 传动失效

布料行车在运行过程中，有时会出现不能行走或皮带不转动的情况。经过故障维修发现，主传动轴和平键磨损严重，导致不能有效传递动力。这种传动失效不仅影响生产进度，还增加了设备维修成本和停机时间。例如，每次拆卸、修复和安装布料行车主传动轴需要4小时，而修复主传动轴通常需要委外维修，进一步延长了故障处理时间。

2.3 设备维护成本高

由于主传动轴和平键的磨损问题，设备的维护成本较

高。频繁的维修和更换部件不仅增加了维修工作量，还导致设备的使用寿命缩短。此外，设备的停机时间也增加了生产成本，影响了企业的经济效益。

3 故障原因分析

为了彻底解决储柜布料行车传动系统的问题，需要对故障原因进行深入分析。通过实际运行中的观察和维修经验，发现以下主要原因：

3.1 单一动力源的负荷过大

储柜布料行车采用单个电机减速器作为动力源，减速器带动主传动轴转动，主传动轴通过平键连接带动行走轮转动。行走轮与链轮通过圆筒固定，形成链轮行走轮构件。这种设计使得主传动轴需要同时传递布料行车行走和皮带转动的两个动力。由于两个动力的负荷较大，平键及主传动轴键槽承受较大的双向负荷，容易磨损，导致布料行车传动失效。

3.2 链条传动的冲击力

根据工艺需求，储柜进料时，布料行车采用来回一层的布料方式。工作时，皮带进行往复运动布料，链条需频繁反向。链条传动时松边和紧边互换，每次换向都会对行走轮键连接部位（如图2）产生一个冲击力。这个冲击力经过连接筒的杠杆放大作用，进一步加剧了键和键槽的磨损，引起储柜布料行车故障。

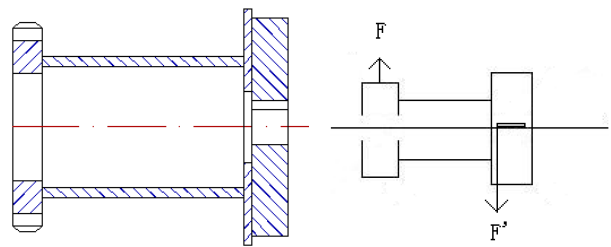


图2 链轮行走轮构件及受力图

4 解决问题的思考

为了有效解决储柜布料行车传动系统的问题，需要从减少或消除主传动轴键槽磨损入手。综合故障原因分析及设备实际情况，提出了以下几种改进方案：

4.1 增加动力源

方案描述：

为了解决储柜布料行车传动系统中主传动轴负荷过大的问题，可以考虑增加一个动力源。具体来说，使用现有的电机减速器作为带动布料行车行走的动力源，再新增一套电机减速器，专门用于带动皮带转动。这样，两个动力源及其传动机构相互独立，互不影响，从而分担了主传动轴传递的负荷，有效减少了主传动轴的磨损。

优缺点分析：

优点：从根本上解决问题：通过增加一个动力源，彻底解决了主传动轴负荷过大的问题，避免了因负荷过大导致

的故障。合理分配负荷：两个动力源分别承担不同的任务，使得传动系统的负荷分配更加合理，提高了设备的稳定性和可靠性。提升设备寿命：减少了主传动轴的磨损，延长了设备的使用寿命，降低了设备的维护成本。

缺点：增加设备复杂性：需要新增一套电机减速器，这不仅增加了设备的复杂性，还需要对皮带主动辊和电气控制系统进行相应的改动。实施成本高：新增一套电机减速器及其配套设备需要较大的投资，包括设备采购、安装调试等费用。改造时间长：实施该方案需要较长的时间，包括设备采购、安装调试以及对现有系统的改造等，这可能会对生产进度产生一定的影响。空间限制：新增设备需要占用一定的空间，而现有设备的安装位置可能已经较为紧凑，难以容纳额外的设备。

结论：虽然增加动力源的方案在理论上可以有效解决问题，但由于实施成本过高、改造复杂且需要较大的投资和较长的改造时间，因此不适用于当前的设备改造需求，最终否定了此方案。

4.2 加大主传动轴的尺寸

方案描述：

另一种可能的解决方案是加大主传动轴的尺寸。通过增大主传动轴的直径，可以相应地增大键槽的尺寸，从而选用更大、更长的平键。这样可以提高主传动轴的承载能力，使其能够承受更大的扭矩，从而减少键槽的磨损，延长设备的使用寿命。

优缺点分析：

优点：提高承载能力：通过增大主传动轴的尺寸，可以显著提高其承载能力，减少键槽的磨损，延长设备的使用寿命。结构简单：该方案不需要对传动系统进行大规模的改造，只需对主传动轴进行重新设计和加工，相对较为简单。

缺点：空间限制：受设备实际安装空间的限制，主传动轴的尺寸提升空间有限，难以大幅度提高其承载能力。改造复杂：虽然不需要新增设备，但加大主传动轴的尺寸可能需要对设备的其他部件进行相应的调整，如轴承、联轴器等，增加了改造的复杂性和成本。成本增加：重新设计和加工主传动轴需要一定的费用，加上对其他部件的调整，总体成本仍然较高。

结论：尽管加大主传动轴的尺寸可以在一定程度上解决问题，但由于设备空间的限制，该方案的可行性较低，难以满足当前设备改造的需求，因此不可行。

4.3 改进主传动轴及链轮行走轮构件

方案描述：

经过综合分析，提出了改进主传动轴及链轮行走轮构件的方案。具体来说，将链轮行走轮构件分成独立的链轮和行走轮构件。在主传动轴上设计两个键槽，用两个平键分别传递布料行车行走和皮带转动的动力。这样可以有效分摊负荷，减少单一平键受到的磨损，从而提高传动系统的稳定性

和可靠性。

优缺点分析：

优点：实施容易：该方案不需要对设备进行大规模的改造，只需对主传动轴和链轮行走轮构件进行重新设计和加工，相对较为容易实施。成本较低：不需要新增设备，改造成本相对较低，适合当前的设备改造需求。提高稳定性：通过两个平键分别传递两个动力，可以有效降低主传动轴的磨损，提高设备的稳定性和可靠性。技术成熟：该方案的技术相对成熟，不需要复杂的安装调试过程，可以快速实施并投入使用。

缺点：技术投入：需要对主传动轴和链轮行走轮构件进行重新设计和加工，需要一定的技术投入和时间成本。加工精度要求高：两个键槽的加工精度要求较高，需要确保其与平键的配合精度，否则可能影响传动效果。

结论：综合考虑以上优缺点，改进主传动轴及链轮行走轮构件的方案具有较高的可行性，可以作为改进实施方案。

4.4 方案分析选择

通过对以上三种方案的优缺点进行综合分析，最终选择了方案4.3，即改进主传动轴及链轮行走轮构件。该方案不仅能够有效解决主传动轴磨损的问题，而且实施成本较低，适合当前的设备改造需求。具体来说，该方案通过将链轮行走轮构件分成独立的链轮和行走轮构件，并在主传动轴上设计两个键槽，用两个平键分别传递两个动力，有效分摊了负荷，减少了单一平键受到的磨损，提高了传动系统的稳定性和可靠性。此外，该方案的实施相对容易，不需要对设备进行大规模的改造，也不需要新增设备，改造成本较低，适合当前的设备改造需求。

通过上述分析和选择，我们确定了改进主传动轴及链轮行走轮构件的方案，为储柜布料行车传动系统的改进提供了明确的方向和实施路径。

5 方案实施

5.1 链轮行走轮构件的改进

将现有的链轮行走轮构件解体，保持行走轮的原有结构，链轮增加一轮毂，轮毂焊接在现有链轮盘中，取消中间连接筒，制成行走轮和链轮两个独立构件。改进后的链轮行走轮构件（如图3）所示。

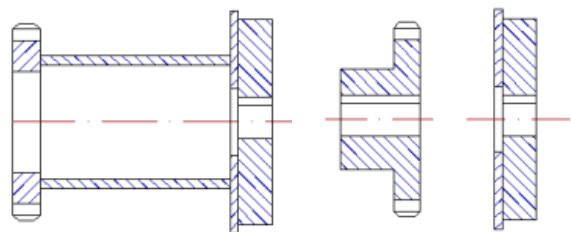


图3 改进前行走轮

改进后行走轮

5.2 主传动轴的改进

在主传动轴上加工一处键槽，与链轮轮毂对应。改进后的主传动轴（如图4）所示。

5.3 改进后的传动系统

改进后的传动系统通过两个平键分别传递布料行车行走和皮带转动的动力。这种设计有效分摊了负荷，减少了单一平键受到的磨损，提高了传动系统的稳定性和可靠性。

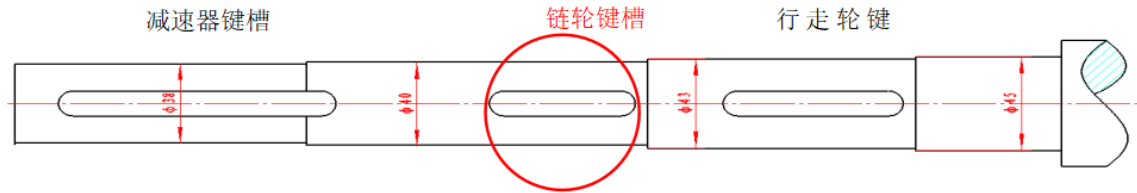


图4 改进后主传动轴

6.2 经济效益

此次改进有效减少了因布料行车传动系统设计缺陷引起的停机断料，减少了设备的维修维护工作量，提高了设备稳定运转率。通过减少停机时间和维修成本，显著提高了生产效率和经济效益。具体来说，改进后的设备运行更加稳定，减少了因设备故障导致的生产中断，提高了产品质量和生产效率。此外，设备的使用寿命也得到了延长，进一步降低了企业的设备更新成本。

6.3 生产效率提升

改进后的布料行车传动系统运行更加平稳，减少了因设备故障导致的生产中断。这不仅提高了生产效率，还确保了产品质量的稳定性，减少了停机时间和维修成本。

6 效果验证

6.1 运行效果

对储柜布料行车主传动轴和链轮行走轮机构改进后，对储柜生产运行进行了长时间的追踪观察。改进后的布料行车在储柜进料过程中，运转平稳，转向时噪音小，使用了近一年时间，键连接未见明显磨损。改进至今未发生一起布料行车传动失效故障。

7 结论

通过对储柜布料行车传动轴的改进，有效解决了布料行车传动系统的问题。改进后的传动系统运行更加平稳，显著提高了设备的稳定性和可靠性。通过减少停机时间和维修成本，显著提高了生产效率和经济效益。此次改进不仅解决了当前设备的运行问题，还为类似设备的改进提供了参考和借鉴。

参考文献

- [1] 胡建军.烟草制丝工艺培训教材.北京:国家烟草专卖局职业技能鉴定指导中心
- [2] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社, 2007
- [3] 李继庆.机械设计基础[M].北京:高等教育出版社, 2006

Simulation of Flow Field and Optimization of Process Uniformity in Semiconductor Thin Film CVD Equipment Chamber

Yanli Qi

Piotech Chuangyi (Shenyang) Semiconductor Equipment Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110171, China

Abstract

This article focuses on the theoretical exploration of the flow field in the cavity of semiconductor thin film chemical vapor deposition (CVD) equipment, and systematically analyzes the inherent correlation between flow field characteristics and process uniformity. By reviewing the theoretical application framework of computational fluid dynamics in CVD chamber flow field simulation, the influence mechanism of key factors such as inlet mode, gas parameters, and chamber structure on flow field distribution was explored. The construction principle of the flow field simulation model was explained from a theoretical perspective, and the variation laws of flow field characteristics under different conditions were analyzed. Based on theoretical analysis, potential paths for optimizing process uniformity were proposed.

Keywords

semiconductor thin film; CVD equipment; Cavity flow field; Numerical simulation; Process optimization

半导体薄膜 CVD 设备腔体流场仿真与工艺均匀性优化研究

戚艳丽

拓荆创益(沈阳)半导体设备有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110171

摘要

本文围绕半导体薄膜化学气相沉积(CVD)设备腔体流场展开理论探索,系统分析了流场特性与工艺均匀性之间的内在关联。通过梳理计算流体力学在CVD腔体流场仿真中的理论应用框架,探讨了进气方式、气体参数及腔体结构等关键因素对流场分布的影响机制。从理论层面阐述了流场仿真模型的构建原理,剖析了不同条件下流场特性的变化规律,并基于理论分析提出了工艺均匀性优化的潜在路径。

关键词

半导体薄膜; CVD 设备; 腔体流场; 数值仿真; 工艺优化

1 引言

化学气相沉积作为制备高质量半导体薄膜的核心技术,其工艺过程的稳定性与精确性直接决定了薄膜的物理化学性能。CVD 设备腔体作为薄膜沉积的核心反应空间,其内流场特性对反应气体的传输、混合、吸附及反应过程具有决定性影响,是制约薄膜均匀性的关键因素。

随着计算技术的进步,数值仿真方法已成为研究复杂流场问题的重要手段。通过构建精准的物理模型与数学方程,CFD 技术能够直观呈现腔体内气体流动、热量传递与物质运输的动态过程,为理解流场与工艺均匀性的关联提供了有效工具。当前,学界对 CVD 腔体流场的研究已从早期

的经验性探索转向理论驱动的系统性分析,但在流场多物理场耦合机制、复杂结构下的流动规律及优化策略的普适性等方面仍存在诸多待探索的理论空间。

2 CFD 仿真模型的理论构建

计算流体力学为 CVD 腔体流场的理论研究提供了系统化的分析工具,其仿真模型的构建需要基于严谨的物理理论与合理的简化假设,以准确捕捉流场的关键特性。仿真模型的构建过程涉及几何建模、网格划分、控制方程选择及边界条件设定等多个环节,每个环节的理论合理性都直接影响仿真结果的可靠性。

几何模型的构建是流场仿真的基础,其理论核心在于在保证关键结构特征的前提下实现合理简化。实际 CVD 腔体结构往往较为复杂,包含进气系统、排气系统、衬底承载台、加热装置等多个部件,完整复刻所有细节会导致计算量

【作者简介】戚艳丽(1985-),女,中国黑龙江佳木斯人,硕士,工程师,从事集成电路高端薄膜装备制造研究。

急剧增加,甚至超出当前计算能力。因此,几何建模过程中需要基于理论分析对结构进行简化处理,对于对流场影响较小的细微结构,如微小的连接缝隙、表面粗糙度等,可以适当忽略;而对于进气口、出气口、喷淋头等对流场分布起决定性作用的关键部件,则需精确建模。几何模型的简化程度需要在计算精度与效率之间寻求平衡,通常需通过理论分析判断结构特征对流动的影响程度,确定合理的简化方案。例如,当研究重点为气体在衬底表面的分布时,对腔体远端的非关键区域可采用较大程度的简化,以减少计算资源的消耗。

网格划分作为连接几何模型与数值计算的桥梁,其理论依据在于将连续的流场空间离散为有限的计算单元,通过数值方法求解控制方程。在网格划分过程中,需要基于流动理论对网格进行优化设计,在流场变化剧烈的区域,应采用加密网格以捕捉局部流动细节;而在流场变化平缓的区域,则可适当降低网格密度,以提高计算效率。网格类型的选择也需根据腔体结构特征与流动特性确定,对于复杂几何形状,非结构化网格具有更好的适应性;对于规则结构区域,结构化网格能够提供更高的计算精度。此外,网格独立性验证是确保仿真结果可靠性的重要环节,通过理论分析不同网格密度下计算结果的变化趋势,确定满足精度要求的最小网格规模。

控制方程的选择需基于流场的物理特性,反映流动过程的基本规律。CVD腔体流场的仿真通常采用连续性方程、动量方程、能量方程及组分输运方程构成的方程组,描述质量、动量、能量及物质组分的守恒规律。连续性方程基于质量守恒定律,反映流体密度与速度场之间的关系;动量方程描述流体运动与所受作用力之间的平衡,包含惯性力、压力梯度、粘性力等作用项;能量方程基于能量守恒定律,考虑热传导、对流及化学反应热等能量传递过程;组分输运方程则描述各反应气体组分的浓度变化,包含对流、扩散及化学反应源项。对于不可压缩流体,可采用简化的连续性方程;对于高马赫数流动,则需考虑流体的可压缩性。

边界条件的设定是仿真模型理论合理性的重要保障,其需要基于实际物理过程进行准确描述。进气口边界条件通常根据工艺参数设定,包括气体流速、温度、组分浓度等,理论上应反映气体进入腔体时的初始状态。对于速度入口边界,需根据质量流量守恒计算入口流速;对于压力入口边界,则需设定入口总压与静压。出气口边界通常设定为压力出口,反映腔体的排气压力,理论上应保证气流在出口处充分发展,各物理量的法向梯度为零。壁面边界条件的设定需考虑流体与壁面的相互作用,对于固体壁面,通常采用无滑移边界条件,即壁面处流体速度为零;对于加热壁面,需根据加热方式设定温度边界或热流边界,反映壁面的传热特性。衬底表面作为薄膜沉积的关键区域,其边界条件还需考虑化学反应动力学特性,设定合理的反应速率模型,以反映反应

物在表面的消耗与产物的生成过程。对称边界条件可用于具有几何对称性的腔体结构,通过理论分析利用对称性简化计算模型,减少计算量。^[1]

3 流场特性的理论影响因素分析

进气方式、气体参数及腔体结构作为影响流场特性的三大核心因素,其理论作用规律构成了流场调控的基础。

进气方式通过决定气体初始流动方向与分布形态,对整个腔体流场产生根本性影响。轴向进气方式中,气体沿腔体轴线方向进入反应空间,理论上易形成中心区域的高速射流,这种射流效应会导致气体在衬底表面形成中心高边缘低的流速分布,进而造成反应物浓度的径向差异。射流的强度与范围受入口流速与腔体直径比的影响,流速越高、腔体直径越小,射流效应越显著,流场的不均匀性也越强。径向进气方式通过腔体侧壁引入气体,理论上能够更快地实现气体在横截面上的扩散,但由于气流冲击壁面后的反射作用,易在进气口对侧形成回流区,导致该区域气体更新缓慢,形成浓度低谷。喷淋式进气作为一种优化的进气方式,通过多孔结构将气体分散为多个细小气流,理论上可实现气体的初步均匀分布,减少射流与回流现象。喷淋头的结构参数,如孔径大小、分布密度、喷射角度等,对气体初始分布具有关键影响,合理设计的喷淋结构能够有效降低流速梯度,为后续流场均匀性奠定基础。

气体参数的变化通过改变流动状态与传输特性,对流场分布产生显著影响。气体流量作为核心参数,其理论影响主要体现在对雷诺数的调控上,流量增加会导致雷诺数增大,推动流动状态从层流向湍流过渡。在层流范围内,适当提高流量可加快气体更新速率,减少副产物积累,但过高流量会使流动进入过渡流或湍流状态,引发流场扰动。气体组分比例通过改变混合气体的物理性质影响流场特性,不同气体的密度、粘度差异会导致流动行为的变化,尤其在多组分气体混合过程中,组分扩散效应可能引发自然对流,改变流场结构。气体进口温度不仅影响气体物理性质,还会改变腔体的温度梯度分布,进而影响自然对流强度。当进口气体温度与腔体壁面温度差异较大时,自然对流作用增强,可能与强制对流形成复杂的耦合效应,破坏流场的稳定性。

腔体结构作为流场的约束空间,其几何特征直接决定流动路径与分布形态。腔体长径比是影响流场均匀性的关键参数,理论上过长的腔体易导致气体在流动过程中逐渐衰减,形成沿轴向的浓度梯度;而过大的直径则可能使中心区域气体流速过低,形成滞流区。内部构件的布置对局部流场具有重要调控作用,气体分布板通过节流与分流作用,能够有效改善进气的均匀性,其开孔率与分布方式需要根据流动理论进行优化设计。衬底承载台的形状与高度会改变近表面流场特性,合理的设计能够促进反应气体向衬底表面传输,减少边界层厚度,提高传质效率。挡板等导流结构可用于抑

制回流与漩涡,引导气体流动方向,但其布置不当可能引发新的流动扰动,反而降低流场均匀性。^[2]

4 工艺均匀性优化的理论路径

基于 CVD 腔体流场特性的理论分析,工艺均匀性优化需要从流场调控、参数匹配及结构设计等多个维度构建系统性策略,通过理论指导实现薄膜沉积过程的精准控制。优化策略的核心在于建立流场特性与工艺均匀性之间的定量关联,通过调控关键影响因素实现目标流场的构建。

流场仿真驱动的参数优化是实现工艺均匀性的重要路径,其理论基础在于通过数值模拟揭示参数变化对流场的影响规律,建立参数、流场、均匀性的映射关系。进气参数的优化需重点关注流量与流速的匹配,基于层流流动理论,在保证反应气体充分更新的前提下,控制雷诺数处于稳定层流范围,减少湍流扰动。进气组分的优化需考虑各组分的扩散系数差异,通过调整组分比例与进口浓度,平衡不同气体的传输速率,减少因扩散差异导致的浓度不均匀。温度参数的优化应致力于构建均匀的温度场分布,减少自然对流干扰,理论上可通过优化加热装置布局、控制升温速率等方式实现温度梯度的最小化。同时,需考虑温度与气体物理性质的耦合效应,通过理论计算确定最佳温度区间,兼顾反应活性与流场稳定性。

腔体结构的优化设计是改善流场均匀性的根本途径,其理论依据在于通过改变流动空间形态调控流场分布。进气系统的结构优化需聚焦于气体的初始分布均匀性,喷淋头设计应基于流体分布理论,采用多孔均匀分布结构,使气体喷出后形成均匀的速度场。理论研究表明,喷淋孔的孔径与间距需根据气体流量与粘性特性进行匹配,确保各孔道流量一致。腔体扩张角的优化可有效抑制射流效应,通过理论计算确定合理的扩张角度,使高速气流在进入腔体后平稳减速,减少中心与边缘的流速差异。内部导流结构的布置应基于流动仿真结果,在易形成回流与死区的位置设置导流板,引导气体流动路径,消除局部滞流现象。衬底区域的结构优化需重点关注近表面流场特性,通过设计合理的承载台高度与形状,促进反应气体向衬底表面的传输,减少边界层厚度,提高浓度分布均匀性。

多物理场耦合调控是应对复杂流场问题的理论创新方向,其核心在于综合考虑流体流动、热量传递与化学反应的

相互作用,建立多场耦合的理论分析框架。流场与温度场的耦合调控需通过理论计算量化自然对流与强制对流的相互作用,通过优化进气参数与温度分布,实现两种对流效应的协同或抑制,避免流场扰动。流场与化学反应的耦合调控应基于反应动力学理论,分析不同流场条件下反应速率的分布规律,通过调控流场使反应速率的空间分布与目标薄膜均匀性匹配。多目标优化算法为复杂参数空间的寻优提供了有效工具,理论上可通过建立以均匀性、效率、能耗为目标的优化模型,采用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法,求解 Pareto 最优解集,为工艺参数选择提供理论依据。这种多目标优化思路能够综合平衡各项性能指标,避免单一目标优化导致的顾此失彼问题。

动态调控策略为应对工艺波动提供了理论解决方案,其核心在于建立流场特性的实时监测与反馈调节机制。基于流场仿真的虚拟传感技术可通过理论模型预测关键位置的流场参数,为实时调控提供依据。动态进气调节系统能够根据流场监测结果实时调整各进气口的流量与比例,实现流场的在线优化。理论研究表明,采用自适应控制算法可有效补偿工艺扰动对流场的影响,维持流场稳定性。此外,基于机器学习的工艺优化方法通过挖掘历史仿真数据与实验数据,建立流场参数与工艺均匀性之间的非线性映射模型,实现工艺参数的智能预测与优化,为复杂 CVD 过程的精准调控提供了新的理论路径。

5 结论

本研究通过计算流体力学(CFD)数值模拟方法,对半导体薄膜 CVD 设备腔体的流场特性进行了系统性仿真分析,探究了气体流动状态、压力分布及反应物输运行为对薄膜沉积均匀性的影响规律。基于仿真结果,提出了优化腔体结构设计、调整进气参数及优化基片台温度分布的工艺改进方案,显著提升了薄膜厚度与成分的均匀性。^[3]

参考文献

- [1] 吴勇,郭于洋,孙清云,等.CVD金刚石薄膜与涂层制备技术及关键领域应用研究进展[J].表面技术,1-23.
- [2] 潘红星,吴晓磊,宋军营,等.基于QC方法降低CVD单晶金刚石激光加工裂纹研究[J].超硬材料工程,2025,37(02):33-38.
- [3] 赵丹,向星承,詹宇,等.立式雾化辅助CVD系统的设计与实现[J].微纳电子技术,2025,62(01):158-163.

Design of Motorcycle Covering Parts Based on Reverse Engineering

Bin Fu

Tianjin Institute of Internal Combustion Engines, Tianjin, 300000, China

Abstract

Traditional motorcycle cover design relies heavily on empirical models, which are difficult to fully meet the comprehensive requirements of modern industry for motorcycles. The proposal of reverse engineering has gradually shifted the design concept from “experience oriented” to “data-driven”. This process emphasizes the use of three-dimensional digital means to accurately transform physical information into virtual models, in order to achieve high-precision reconstruction of structural features and appearance surfaces, changing the design logic of motorcycle coverings. The complexity of cover design determines that parameters become an indispensable requirement, and reverse engineering provides solid theoretical support for this goal. This article is based on reverse engineering, analyzing its application value in motorcycle cover design and exploring practical application strategies.

Keywords

reverse engineering; motorcycle; cover design

基于逆向工程的摩托车覆盖件设计

付斌

天津内燃机研究所, 中国·天津 300000

摘要

传统的摩托车覆盖件设计多依赖于经验模型, 难以充分满足现代工业对摩托车的综合要求。逆向工程的提出使得设计思路逐渐由“经验导向”转变为“数据驱动”, 这一过程强调利用三维数字化手段将实物信息精确转化为虚拟模型, 以实现对外观特征与外观曲面的高精度重建, 改变了摩托车覆盖件设计逻辑。覆盖件设计的复杂性决定了参数成为不可或缺的要求, 而逆向工程恰恰为这一目标提供了坚实的理论支撑。本文基于逆向工程, 分析其在摩托车覆盖件设计中的应用价值, 探讨实际应用策略。

关键词

逆向工程; 摩托车; 覆盖件设计

1 引言

逆向工程的本质是对既有产品结构信息的再认知与再构建, 其理论框架强调数据还原和信息重组的统一性。在摩托车覆盖件设计领域, 覆盖件造型曲面的连续性以及局部结构的力学稳定性都对设计过程提出了更为苛刻的要求。传统的设计范式往往受到主观建模与造型经验的制约, 导致结果在设计精度方面存在偏差。逆向工程引入三维扫描、点云优化与曲面重建这些环节, 将物理对象的信息转化为可控的数学模型, 使设计过程具备精确性。其理论优势不光体现在几何拟合的高保真度, 更体现在模型参数化约束的实现, 从而推动覆盖件设计逐步走向系统化的轨道。

2 逆向工程概述

逆向工程是一种基于实物特征进行信息重建的技术路径, 其理论核心在于通过对已有产品的几何形态与结构参数进行分析, 从而生成可供设计使用的数字化模型。这一过程强调设计人员要从客观数据出发, 避免过度依赖主观经验, 让设计活动更具科学性。逆向工程的价值不单体现在信息获取的便利性, 更重要的是为后续设计提供了准确的数据支撑, 确保模型在结构完整性和几何连续性上保持高度一致。逆向工程的出现推动了设计逻辑的转变, 传统设计往往以先设想再建模为主, 而逆向工程则以实物数据为出发点, 强调结果与过程的关系。这种设计思维的转变带来更高的可靠性, 使设计能够在较短时间内建立精度较高的模型。其理论意义在于重新定义了数据与设计的关系, 形成由信息主导的设计框架, 而非以人为主导的经验模型。逆向工程所蕴含的另一层价值在于提升设计体系的可控性。其通过对数据进行规范化处理, 减少产品在功能、外观以及装配上的偏差, 进

【作者简介】付斌(1994-), 本科, 工程师, 从事汽车摩托车类机械研究。

而保证后续优化与改进环节能够建立在稳定的基础之上。逆向工程应用到摩托车覆盖件的设计中，不仅加深了对产品本身的认知，也推动了设计科学化的持续进程。

3 逆向工程在摩托车覆盖件设计中的应用价值

3.1 缩短摩托车覆盖件设计周期

摩托车覆盖件的设计过程通常涉及复杂的外观曲面，以及多维度的功能约束，传统模式下从初始构思到完整建模往往需要较长时间。而逆向工程的引入使这一过程由经验驱动转变为数据驱动，设计人员可以在获取准确几何信息的前提下更快完成模型建立。数据的直接获取减少了多次修正的环节，从而压缩了整体设计周期。同时，覆盖件设计中的时间消耗不仅体现在建模环节，还体现在后续的修改环节。逆向工程所生成的模型具备更高的一致性，能够在较早阶段揭示结构设计中潜在的结构冲突。这种前置的发现减少了后续返工的可能，让整个设计工作能够以更紧凑的节奏推进。周期缩短的意义并不仅在于节约时间，更在于让研发流程与市场需求保持同步，确保设计成果能够在合适的窗口期内实现转化。

3.2 降低摩托车覆盖件设计成本

传统的摩托车覆盖件设计流程因依赖大量的人工建模和多次试验，容易导致资源投入过高。逆向工程则可以通过直接获取精确的几何信息，使设计过程对前期试错的依赖减弱，从而减少了不必要的重复投入。由此带来的直接效益是研发成本的降低，而这种降低并非单一环节的节约，而是贯穿于设计的全过程。覆盖件设计的成本消耗不光体现在建模和试制阶段，还体现在对误差修正和结构调整的反复投入。逆向工程提供的高保真数据能够最大程度减少偏差，使修改环节更为有效。这种方法可以在早期建立准确的数字化模型，使得设计工作能够避免后期大规模的返工，而返工本身往往就是造成设计成本上升的主要原因。设计活动因此能够在有限预算内保持更高的效率，也提升了成本控制能力。

3.3 提高摩托车覆盖件设计精度

摩托车覆盖件涉及到外观曲线的连续性、装配面的严密性以及功能区域的匹配度，对精度的要求极为严格。逆向工程以高精度的数据采集为基础，将实物表面的几何特征直接转化为数字化模型，这种由数据驱动的方式减少了建模过程中因人为操作而引入的误差。覆盖件在尺寸控制和曲面拟合方面因此也具备更高的稳定性，为后续的结构优化提供了可靠的前提。同时，覆盖件设计中存在大量复杂的自由曲面，传统建模方法在曲面过渡和细节还原上容易出现偏差。逆向工程可以整合点云数据，使生成的曲面更接近实际物理形态，以此来提升模型的精确性，这种高水平的还原能力使得覆盖件在实际生产中能够更好地保证装配精度与外观质量。

4 基于逆向工程设计摩托车覆盖件策略

4.1 应用激光扫描采集三维数据，提高设计精度

设计人员在实际操作中，通常需要先确保周围环境光照条件均匀，避免外界杂光干扰扫描信号。由于覆盖件本身表面存在反射区域，因此在摆放覆盖件时必须根据曲面特点选择合适的位置，使激光能够尽可能全面地覆盖关键区域。设计人员会根据覆盖件的大小和形态调整扫描分辨率，较小的覆盖件区域需要较高的分辨率，以此来捕捉细节特征，而大面积的平直表面则可采用较低的分辨率，以提升扫描效率。同时，设计人员要使激光头沿既定轨迹逐步移动，通过激光束与物体表面的相互作用形成点状反射信号，设备即时将这些信号转化为空间坐标数据。为了避免遗漏，设计人员会控制扫描路径的重叠率，确保各个区域都被完整覆盖。当设计人员扫描到复杂曲面区域时，单一角度往往无法获得完整信息，这时设计人员通常会借助多角度扫描的方式来弥补死角。通常覆盖件边缘和转折部位是最容易丢失数据的区域，因此这些部位在扫描过程中会被重点关注，必要时采用局部精细扫描的方式进行补充。此外，设计人员为了提升扫描效率在操作中往往会结合移动装置，使覆盖件在短时间内完成全方位的扫描。这样可以避免因手动移动带来的不稳定性，同时确保数据在时间维度上具有连续性。整个过程需要设计人员具备良好的空间判断能力，以便合理规划扫描路径，减少重复操作与空白区域。

4.2 利用点云清理异常数据，提升模型可靠性

设计人员在面对原始点云时，往往会发现其中夹杂着噪点、悬浮点或重叠点，这些异常信息通常是由多种因素共同导致。设计人员会在专业软件中导入数据，利用密度分布方式观察点云的整体结构。在这一过程中，设计人员可以借助自动化算法，直观判断哪些区域存在过度密集或稀疏现象，从而识别潜在的异常点。设计人员利用点云清理异常数据过程中，会采用多种手段，删除主要针对明显偏离整体形态的孤立点，平滑则用于修正边界区域的突兀过渡，重采样则在保证关键几何特征的前提下调整点的分布，使整体数据更均匀。对于覆盖件表面复杂的曲率变化区域，设计人员在点云清理时需要格外谨慎，既要去除噪声，又不能破坏原有几何特征。同时，设计人员会将覆盖件分区处理，在软件中存在遮挡的部分，逐点检查点云的连续性。某些情况下，如果覆盖件表面存在细小裂缝，设计人员会用局部插值的方法进行修补，使数据表面保持完整。

4.3 综合设计要素建立参数模型，方便后续修改

在覆盖件的逆向建模中，设计人员往往会将点云数据转化为具备可控属性的参数化模型，操作的核心在于把外形几何与工程要求统一到一个系统之中，从而为后续调整提供结构化的基础。建模工作通常从整体轮廓线的提取开始，通过曲线约束确定基本形态，再依托基准面与参考点建立坐标

体系,使覆盖件的空间位置得到准确定义。在参数化过程中,设计人员会将复杂表面划分为若干特征单元,并为每个单元设置相应的控制参数。摩托车覆盖件的曲面区域常被定义为由控制线条驱动的曲面块,这些曲面块通过相互约束保持连续与平顺。与此同时,孔位、边缘倒角以及安装接口等结构特征也会被提炼为可调整的参数,使模型在形态变化时仍能保持功能的完整性。此外,参数模型的建立并非单纯依赖几何拟合,而是需要在设计软件中不断调整。设计人员往往会对关键参数进行分级管理,将决定整体造型的参数放在上层控制,将影响局部形态的参数放在下层细化,以此实现清晰的层次关系。

结束语:逆向工程在摩托车覆盖件设计中的应用,已由单纯的产品再现转向系统化的创新路径。激光扫描实现了三维数据的精准获取,点云清理保证了模型的可靠性,参数化建模为后续修改提供了灵活条件,多目标优化则在功能、性能与制造约束之间实现了协调。设计活动因而摆脱了经验依赖,逐步走向数据驱动。随着这一方法论的深入应用,摩托车覆盖件设计将在技术革新与产业升级中展现更强的引领力量。

参考文献

[1] 龙娟娟,奚陶,全亮,贺晓辉.基于逆向工程的摩托车覆盖件设计

[J]. 机械工程师, 2024, (02): 1-3+7.

[2] 吴栋华,许晨杰,黄靖.摩托车覆盖件设计方法研究(1)[J]. 摩托车技术, 2015, (12): 48-51.

[3] 张琦.基于Image ware和UG的摩托车覆盖件曲面逆向设计[J]. 摩托车技术, 2012, (06): 47-49.

[4] 牟小云.基于反求工程的摩托车覆盖件冲压模设计及加工仿真[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (07): 175-177+180.

[5] 文少波,张海鸥,邹政耀.基于逆向工程的摩托车覆盖件设计[J]. 机械设计与制造, 2011, (01): 57-59.

[6] 陈旭,徐磊,王喻,贺娜.摩托车覆盖件的三维数字化设计[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2009, 23 (11): 1-5.

[7] 程军涛,段明德,刘鑫,李明利,王荣智.摩托车覆盖件的逆向设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2009, 30 (05): 21-23+27+109.

[8] 宋卫海.逆向工程在摩托车模具设计中的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, (03): 77-79.

[9] 陈恭锦,刁俊通. Imageware在摩托车覆盖件反求工程中的应用[J]. 机械, 2005, (04): 38-40.

[10] 曾华明,李华基.摩托车覆盖件逆向设计中的技术思路[J]. 金属成形工艺, 2004, 22 (02): 25-27+30.

Study on aging and crystal phase transformation of pseudo boehmite

Junchao Guo

Zhongzhou aluminum plant, Qixian town, Xiuwu County, Jiaozuo, Henan, 454174, China

Abstract

pseudo thin water alumina is a very important precursor of alumina, which has broad application prospects in catalysts and adsorption materials. The crystal transformation behavior in the aging stage will have an important impact on the physical and chemical properties of the products. The regulation of the process is an important scientific problem to be solved in this field. In actual production, the conversion of pseudo boehmite alumina to boehmite, γ -Al₂O₃ and other systems usually affects its specific surface area, pore structure and other important performance indicators. Revealing the phase transition mechanism and reaction kinetics is the key to the preparation of high-performance Al₂O₃ materials. The deepening and expansion of this field will provide a broader idea for the development of new functional materials.

Keywords

pseudo thin water alumina; Aging; Crystalline phase transition

拟薄水铝石的老化及晶相转变过程研究

郭俊超

河南省焦作市修武县七贤镇中州铝厂, 中国·河南焦作 454174

摘要

拟薄水氧化铝是一类非常重要的氧化铝前体, 在催化剂和吸附材料等方面有着广阔的应用前景。其时效阶段的晶型转化行为, 将会对制品的理化性质产生重要的影响, 该工艺的调控是该领域亟待解决的重要科学问题。实际生产中, 拟薄水氧化铝转化为一水软铝石、 γ -Al₂O₃等物系的过程通常会影响到其比表面积和孔结构等重要性能指标。揭示相变机制和反应动力学特性, 是制备高性能Al₂O₃材料的关键。该领域的深化和拓展将为发展新的功能材料提供更为广泛的思路。

关键词

拟薄水氧化铝; 老化; 晶相转变

1 引言

根据中国有色金属工业协会最新行业报告显示, 2024年我国薄水铝石年产能预计达到65万吨, 其中约55万吨将实际投入生产。研究表明, 80-100℃过程中, 拟薄水氧化铝-低水铝石相的转化周期一般为12-48 h, 相变激活能在60-80 KJ/mol之间。中国科学院工艺研究院的实验结果显示, 在陈化期间, 当pH为8.5~10.5时, 产品的比表面积可以高达250~350 m²/g。然而, 对其微观机理尚不清楚。

2 拟薄水铝石老化过程机理研究

2.1 碳化法合成拟薄水铝石的初始成胶机制

在碳化法制备伪薄水铝石时, 反应初期的成胶工艺对

产品的性质有很大的影响。目前, 工业上普遍使用的是铝酸钠溶液(NaAl(OH)₄)与CO₂气体反应, 将最终pH值(按HG/T 3927-2007)进行调控。在初始阶段, CO₂通氧速度保持在0.8-1.2 L/min范围内, 水中[Al(OH)₄]⁻离子逐渐转变成[Al(OH)₃(H₂O)₃]⁰。申请人前期研究表明, 该体系的pH值降低到起始温度35%~40%(时间为45-60 min), 是凝胶形成的临界点。这时, 使用诸如Malvern Mastersize 3000之类的激光颗粒分析器, 可以探测到50-80纳米的初期胶体颗粒。实验结果显示, 当反应温度为65±2℃, 搅拌速度为300 rpm时, 可以得到具有最小颗粒尺寸(PDI<0.2)的初始粒子。在该工艺条件下, 通过添加0.05-0.1 wt% PEG2000溶液, 可以将溶液中的Zeta电势保持在+35 mV, 有效地抑制了后期粒子的聚集^[1]。

2.2 老化过程中胶体结构的演变规律

拟薄水氧化铝在时效处理中的结构演化对产物的孔隙结构及物相的纯净程度有重要的影响。利用小角X射线衍射技术(SAXS)对80℃陈化6 h后的胶体颗粒进行了

【作者简介】郭俊超(1983-), 男, 中国河南焦作人, 本科, 工程师, 从事烧结法氧化铝生产技术, 精细氧化铝生产技术研究。

Ostwald 熟化, 颗粒尺寸由 85 nm 增加到 120 nm (以 6 nm/h 的速度)。BET 实验发现, 随着陈化时间的增加, 其比表面由 350m²/g 急剧下降到 280m²/g, 与 TEM 观测到的片状粒子边界起皱。在陈化过程中, Na⁺ 的含量可明显调节其结构演化。试验结果表明, 将氢氧化镁的质量分数控制在 0.8~1.2 克/L 之间, 可以使产品中的软铝石 (γ -AlOOH) 的含量小于 5%; 但当浓度大于 1.5 克/L 时, 与常压下的含杂质相比较, 可达 15%~20%。利用分级陈化技术 (起始温度 80°C, 后 8 h 60°C), 结合脉冲超声 (2 h, 20 kHz, 200 W), 制备出尺寸均匀、孔容达 0.8 mL/g 的高质量产物。

2.3 晶相转变的动力学控制与工业调控

拟薄水铝石-过渡型氧化铝的转变是影响其高温稳定性的重要因素。DSC 测试结果表明, 在空气气氛中, 加热速度为 10°C/min 时, 样品的相变吸收峰值在 450~550°C 之间 (依据 JCPDS421-1307)。利用 XRD 技术对样品进行了 XRD 跟踪研究, 结果表明, 在 500°C 焙烧条件下, 样品中产生了具有明显的相分离结构 ($2\theta=45.8^\circ$ 和 67.0°)。实际生产证明, 将焙烧温度调节到 3~5°C/min, 并在 300°C 下进行 2 h 的保温, 可以将 L- 酸位比例调到 1.2~1.5 (用吡啶-吸收线吸收)。国内一家触媒制造企业已证明, 将水蒸气 (水蒸气压力 0.15-0.2 atm) 加入焙烧工艺中 (水蒸气压力 0.15-0.2 atm) 可以显著提升 20% 左右, 800°C 焙烧 4 h 后其比表面仍然大于 180 m²/g。提高分子筛内的水解离活性, 使分子筛更加稳固。特别地, 在该体系中加入 0.3 wt% 氧化镧, 可以实现从 1150°C 到 1250°C 的转变, 提高催化剂的服役寿命。

3 拟薄水铝石晶相转变动力学与热力学

3.1 相变动力学模型构建

利用等温时效技术, 对拟薄水铝石相转变的动态进行了研究, 并利用 X 射线衍射对样品中各组分的影响进行了定量测定。试验温度为 80~120 摄氏度, 间隔 1 h 采样一次。在 Avrami-Erofeev 动力学模型的应用研究中, 针对拟薄水铝石老化过程的相变动力学分析显示, 当反应体系温度维持在 90°C、pH=9.5 的条件下, 计算得到的表观活化能为 68.5 kJ/mol, 对应的 Avrami 指数 n 值约为 1.2。试验的关键在于: 精确地调控陈化锅的温度 (± 0.5 摄氏度), 采用 pH 值在线监测器 (精确度 ± 0.05) 来保持体系的稳定性, 采样结束后马上用冰水进行终止。采用 Arrhenius 公式进行拟合, 获得了 $a=2.3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 的指数, 为工业上的过程放大提供了依据。结果表明, 在 Al 含量大于 0.8 mol/L 时, 体系的相变速度显著降低, 并伴随着生成的多个铝-羟基多聚物^[2]。

3.2 热力学参数测定

利用 STAS449F3 测量了拟薄水铝石相变的热力学性质。试验条件: 加热速度为 10 摄氏度/分钟, 在氮气气氛下, 在 30~600 摄氏度的温度下进行。DSC 图显示, 220~280°C 处

有一个较显著的吸收峰值, 这与伪薄水氧化铝向低水铝石相转化的反应相一致, 其焓变为 85.6 J/g。热重分析表明, 这一相的质量损耗在 15% 左右, 与理论值 (14.7%) 基本一致。用 Kissinger 法对其进行了分析, 得出了其相变激活能为 72.3 kJ/mol, 并与等温试验值吻合较好。试验的主要方法是: 将试样在 105 摄氏度下进行 2 h 的烘干, 称取 8~10 毫克放入氧化铝坩锅中, 并用空的坩锅作参照。

3.3 微观机制研究

利用高分辨透射电镜 (HRTEM, JEM-2100F) 对材料在相变中的组织演化进行研究。在 200 kV 的脉冲激励下, 利用超薄切片技术进行了样品的制备。研究表明, 在相变初始阶段, 拟薄水氧化铝粒子的表层会生成厚度为 3-5 nm 的薄水铝石非晶, 并经界面反应逐渐深入。通过对其晶体结构的研究, 发现其晶面和其母体相 (002) 具有特殊的位向关系: [010] bö hmite // [001] pseudoboehmite。通过理论模拟, 我们发现这种定向关联的界面能达到 0.86 J/m², 远小于无规取向 1.23 J/m²。结果表明, 在晶体中, 晶体中的相变倾向于在晶体中的晶界位错或晶体中出现, 并且晶体的激活能较未被破坏的晶体表面降低 15% 左右。利用 APT (APT) 对两相间的相界区域进行分析, 结果显示: OH⁻ 在两相间存在 2.5 倍以上的浓度梯度, 证明了质子传输为相变速度的主控环节。研究结果将为实现相变过程的精确控制奠定基础。

4 拟薄水铝石工艺调控与性能优化

4.1 老化工艺优化

拟薄水铝石相结构的精准控制是实现其晶体结构取向转变的重要步骤。在该过程中, 根据 HG/T 3927-2007 行业规范, 将其设定为 80 \pm 2°C, 12 h 后再以 1°C/min 的速度逐渐升高到 100°C, 这一过程中, 利用 PID 温度调节系统, 保证了该过程中的温升不大于 ± 0.5 摄氏度。中国铝郑州研究所的实验结果表明, 采用这种升温方法, 可以将一水软铝石产率提高到 95%, 比常温时效快 30% 左右。在生产过程中, 需要将热传导油循环通到反应器的夹套内, 设置三套 PT100 型温度传感器, 对各部位的材料进行实时监控, 保证整个反应器的温度场的均匀分布。采用 pH 值 (准确度 ± 0.01) 实时监控 pH 值的变化, 以铝组分的水解平衡为基础, 研究 pH 值的动态调节机制。将起始 pH (使用 0.1 摩尔/L 的氨水溶液) 调整到 9.5~10.0, 并且在陈化期间, 以适当的稀释硝酸 (5% 重量) 在陈化期间保持 pH 的稳定性。北京化学工业学院课题组前期研究表明, 当 pH 值变化为 ± 0.3 时, 产品的比表面积可以达到 280~320 m²/g 的稳定性。在实际的工作中, 为了防止由于局部的酸性而引起的胶粒聚集, 需要建立一套全自动的滴定系统。在完成反应之后, 马上用 15 倍固载量 (V/W) 的去离子水将其清洗成中性^[3]。

利用变频转速 (50~500 转/分) 和叶片型式 (三叶斜桨) (直径/釜径之比 0.4) 对混合力进行了优选。试验结

果显示,当固体质量分数为15%时,当混合速度为 200 ± 20 rpm时,物料的体积传质系数最高(0.015 s^{-1});速度太小,传质不均匀,太大,容易发生剪切断裂。为了避免涡流影响,需要在反应器中安装4个隔板(宽/釜之比为0.1)。通过对该工艺条件的分析,发现该工艺能有效地将产品在不同批之间的孔尺寸分布误差小于0.5 nm。在生产过程中,需要配置转矩监控装置,在转矩变化超出额定值10%时,能及时发出警报,以避免因浆料不均而引起的局部过热现象。

4.2 产物性能调控

拟薄水铝石型时效产品的性质控制是其制备工艺的一个重要重要步骤。对于《石油炼制催化剂用拟薄水铝石》(HSH/T 0589-2018),用于催化材料支撑的氧化铝必须具有 $250\sim 350 \text{ m}^2/\text{g}$ 的比表面。前期研究发现,通过调控陈化温度,可以准确调控材料的比表面积:在 $60\sim 90^\circ \text{C}$ 处理后,材料的比表面积由 $380 \text{ m}^2/\text{g}$ 降低到 $220 \text{ m}^2/\text{g}$,且该过程与团聚状态有很大关系。在实验过程中,将伪薄水铝石浆液放入恒温水浴反应器中,以300转/分的转速进行静止陈化,两h采样一次。调节比表面积核心是热处理时间和热处理温度之间的耦合效应, 80°C 条件下8h的时效可以达到 $280 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

多孔介质孔隙的定向调节是一个复杂而又复杂的过程。通过对聚乙二醇(PEG2000)和聚乙二醇(PEG6000)的研究,发现聚乙二醇(PEG2000)可以在一定程度上调控其孔道结构:PEG2000可以在 $3\sim 5 \text{ nm}$ 范围内生成 $8\sim 12 \text{ nm}$ 的大孔($8\sim 12 \text{ nm}$)。在制备工艺中,先将1%~3%的PEG模板剂添加到拟薄水铝石浆液中,然后进行熟化处理。中国石油化工北京化学工业研究所的试验结果显示,以PEG4000为模板,经12h(pH 值9.5, 90°C)陈化12h后,得到了 $6\sim 8 \text{ nm}$ 、最大孔直径7.2纳米、孔容达 0.65 mL/g 的超细纳米材料。该孔道结构对重质油裂解反应的催化性能有较好的影响。在反应过程中,酸中心的构建是决定反应活性的关键。 $\text{NH}_3\text{-TPD}$ 试验表明,通过调控陈化进程中的 pH 可以调控材料的表面酸度:随着陈化 pH 的降低,材料中的酸位浓度由 $0.35\sim 0.52$ 毫摩尔/克上升到 0.52 毫摩尔/克。在实际应用中,通过稀释的硝酸或氨溶液对 pH 进行动态调整,并利用精确的 pH 仪对其进行实时监控。为提高酸度,可以在陈化末期添加 $0.5\sim 1.0$ 重量%的磷酸水,使得P以 PO 立方(PO)的形态存在于氧化铝的晶格中。通过对拟薄水铝石衍生物进行磷基修饰,可以使FCC催化剂的催化裂解性能增加15%。

4.3 工业化应用研究

将实验室研究成果进行产业化,是拟薄水氧化铝产业化研究的关键。根据中国石化学会的统计,2024年我国FCC催化材料的市场需求量预计突破18万吨,其中拟薄水氧化铝作为关键组分,其使用比例已提升至45%左右。通

过分步放大实验,首先在5升的反应器上进行实验,然后逐渐扩大到500L的规模。主要的工艺技术指标有:陈化过程中的温控要求为 85 ± 2 摄氏度,使用可编程控制器进行温控,保证了产品的温控精度不大于 ± 0.5 度; pH 保持在9.5-10.5之间,使用计量泵进行氨水的自动调整;搅拌速度在120-150转/分之间,使用双倾斜叶片的叶轮,保证了系统的充分搅拌。通过对一家触煤厂的小试研究,发现放大后产品的比表面积误差小于 $\pm 5\%$,孔容积的重现率大于95%。

面向大规模批量制造的新方法,具有连续的反应釜结构,可以保证原料在 $8\sim 12 \text{ h}$ 内的滞留时间,保证反应过程中的工作压力在 $0.3\sim 0.5 \text{ MPa}$ 之间。其主要工艺为:将固体成分12%~15%的拟薄水氧化铝浆液通过预热炉加热到 90°C ,然后再经过三级连续的三段式的老化池,每个阶段都设有 pH 值监测及自动调整设备。中国石化长岭石化有限公司的实际使用情况说明:采用连续工艺,可以减少30%的能源消耗,提高2~3个百分点的产量。本装置配置DCS自动监控装置,可对20多项操作指标进行实时监控,如温度, pH ,流量等,保证了产品的稳定运行。

根据SH/T0340-2017对该催化剂进行了评定。将优选出的拟薄水铝土与其他组分如分子筛和粘结剂按照一定的配比进行复配,然后喷射干燥成形,得到了一种新型的催化材料。其特性试验主要有:利用ACE设备对其进行微反活(70)的测定;用磨耗指标试验($\geq 3.5\%$)评价其机械强度; $\text{NH}_3\text{-TPD}$ 法研究了催化剂表面的酸中心的分布。实际生产结果显示,该新型催化剂能使柴油产量增加1.5%~2%,焦收率下降0.3%~0.5%。通过12个月的运行追踪,发现该工艺的催化剂消耗降低了8%,装置产能提高了5%^[4]。

5 结语

综上所述,研究拟薄水铝石的时效和物相变化规律,有助于深入理解其形成机制,并为制备新型高效氧化铝材料奠定基础。该项目的实施将为进一步提高催化剂载体和吸附材料的综合性能提供理论依据。利用在线测试与理论仿真相结合的手段,构建更为准确的相变动力学模型,从而达到对其性质的准确控制,促进有关行业的技术进步。

参考文献

- [1] 郭锦春,鲍俊,桑小义,等.拟薄水铝石老化 pH 对氧化铝载体及加氢催化剂脱硫性能的影响[J].石油炼制与化工,2024,55(10):15-23.
- [2] 林锦,王芳珠,吕灵灵.工业原料制备大孔拟薄水铝石及在异佛尔酮选择性加氢中的应用[J].应用化学,2023,40(01):79-90.
- [3] 单雪松,袁帅,杨雪,等.阴离子对拟薄水铝石结晶生长的影响[J].石油炼制与化工,2022,53(10):34-41.
- [4] 王栋斌,郑峰伟,周正,等.碳化法制备拟薄水铝石的研究进展[J].广州化工,2020,48(21):1-4.

Optimization strategy of energy saving transformation of chemical equipment based on process simulation

Taiyuan Zhang

Jining Mingsheng New Material Co., Ltd., Jining, Shandong, 272100, China

Abstract

This study investigates energy-saving optimization strategies for chemical equipment through process simulation, exploring the fundamental principles of process simulation technology, its applications in chemical engineering, and existing limitations. It analyzes energy efficiency evaluation methods, common energy-saving retrofitting technologies, and their practical outcomes. Through concrete case studies, the research examines three key approaches: single-unit energy-saving design, process simulation-based optimization, and multi-unit collaborative retrofitting strategies. Case studies include single-unit upgrades using shell-and-tube heat exchangers, parameter optimization combining modeling and genetic algorithms, and system-wide coordinated retrofitting. These findings provide robust support for balancing energy consumption with cost efficiency while maximizing overall system energy savings, thereby facilitating the low-carbon transition in the chemical industry.

Keywords

process simulation; chemical equipment; energy saving transformation

基于过程模拟的化工设备节能改造优化策略

张太远

济宁明升新材料有限公司, 中国 · 山东 济宁 272100

摘要

本文围绕基于过程模拟的化工设备节能改造优化策略展开研究, 阐述了过程模拟技术的基本原理、在化工工程中的应用及局限性, 分析了化工设备能效评价方法、常见节能改造技术及应用效果。重点结合具体实例, 探讨了单设备节能改造方案设计、基于过程模拟的方案优化以及多设备协同节能改造优化策略, 包括以列管式换热器为例的单设备改造、利用模型与遗传算法的参数优化, 以及系统的协同改造等。为平衡能耗与成本、实现系统整体节能效益最大化提供有力支撑, 助力化工行业低碳转型。

关键词

过程模拟; 化工设备; 节能改造

1 引言

化工行业高能耗问题突出, 设备节能改造对降本减排至关重要, 过程模拟技术可为此提供精准支持, 但当前改造存在方案匹配度低等问题。本文围绕相关策略展开研究, 通过梳理过程模拟基础、分析设备能效与节能技术、探讨改造方案设计与模拟优化, 为提升改造科学性与系统性提供参考, 助力行业低碳发展。

2 过程模拟技术概述

2.1 过程模拟的基本原理

过程模拟是指用数学模型表达化工过程中物质运动、

能量传递和化学反应等行为, 从而对过程行为进行预测、分析和优化的过程, 最重要的是可以代替或者辅助实验, 节约研发和改造费用, 并且能够获得比真实情况更加准确的过程设计。常见的过程模拟软件有流程级模拟 (AspenPlus、ChemCAD)、内部流动传热模拟 (Fluent、COMSOL Multiphysics) 以及动态过程模拟 (HYSYS), 不同的工具具有不同的特点, 可以根据不同尺度的对象选取不同的软件。建立模拟模型需根据物料衡算、能量衡算、动量衡算及反应动力学理论确定所要建立的模型种类, 并基于模型输入端提供的设备结构参数、操作参数、介质物性参数等关键数据信息通过数学方程建立模型框架; 根据模型种类选择相应的求解方法, 包括数值求解方法和解析求解方法, 一般说来, 在化工过程模拟时多采用数值求解方法, 通过对模型不断迭代使其输出结果收敛至合理范围之内, 最终得到定量的过程描述。

【作者简介】张太远 (1973-), 男, 中国山东济宁人, 本科, 副高级工程师, 从事化工工艺节能技术与自动化研究。

2.2 过程模拟在化工工程中的应用

过程模拟在整个化工工程的设计、运行及优化中均起着非常重要的作用：设计阶段根据建好的全流程或者单设备模拟模型，在施工前可以预先虚拟验证各种不同的工艺路线、设备的选择与参数设定等是否合理，比如仿真某台给定条件下不同管径的换热器的传热效率，以最小能耗为目标来选择最优设计方案，避免出现设计不合理的情况而导致后期改造成本增加；运行阶段通过应用基于实时数据驱动的动态模拟模型来监测设备与系统的运行情况，预测关键参数变化趋势，一旦存在异常的工况，则发出预警，根据报警信息进行调整操作参数使装置正常稳定运行；优化阶段可以通过过程模拟对多变量的敏感性分析来识别影响系统能耗或产能的关键因素，并采用不同参数下过程的模拟，寻找到最优的操作区间或者最佳改造方案，做到节能降耗、提高生产率的目的；对一些复杂化工系统而言，可以通过过程模拟优化达到超越经验的传统方式优化所带来的局限性，寻找到更加精准的优化目标。

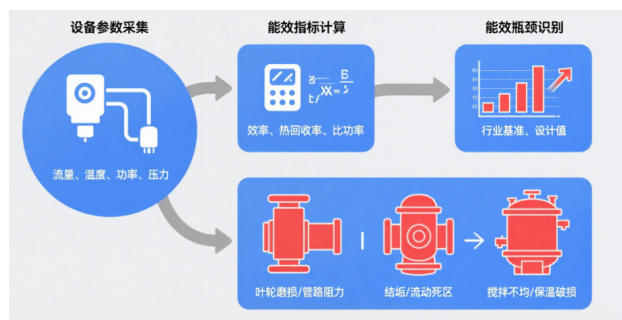
2.3 过程模拟的局限性与挑战

过程模拟技术在应用中面临着模型假设与现实复杂性的差距及模拟精度与计算效率难以平衡的局限性与挑战：一方面，为简化计算，模拟模型常基于理想化假设，如忽略设备微小结构缺陷、假设介质物性均匀或简化复杂反应机理等，但实际化工过程中存在诸多不确定性因素，如物料成分波动、设备老化导致的性能衰减、流场非理想分布等，这些假设与现实的偏差可能使模拟结果与实际存在误差，影响对设备真实运行状态的反映；另一方面，追求高模拟精度往往需要构建更精细的模型，这会显著增加计算量，导致模拟耗时延长，甚至难以在工程决策所需时间内完成求解，而若为提升计算效率简化模型，则可能牺牲精度，无法准确捕捉关键过程细节，尤其在涉及多设备协同的复杂系统模拟中^[1]。

3 化工设备的节能改造技术

3.1 化工设备能效分析

化工设备的能效分析是节能改造的基础，其核心在于通过科学的评价指标与方法量化设备能耗水平，并精准识别能效瓶颈。设备能效评价指标需结合设备类型确定，例如泵类设备常用轴功率利用率、效率，换热器则以传热系数、热回收率为关键指标，压缩机可采用比功率衡量，这些指标能直观反映设备能量转换与利用的效率；评价方法包括基准对比法、能量平衡法及热力学分析法。在能效瓶颈识别方面，需结合设备运行数据与能量流分析，例如泵的能效瓶颈可能源于叶轮磨损导致的扬程下降、管路阻力过大引起的额外能耗，换热器的瓶颈多表现为结垢导致传热系数降低、折流板设计不合理造成的流动死区，反应釜则可能因搅拌不均匀使反应不完全、保温层破损导致散热损失增加等，通过定位这些瓶颈，可明确节能改造的重点方向。具体如图1所示。



(图1：化工设备能效分析流程图)

3.2 常见节能改造技术

常见的化工设备节能改造技术主要围绕能量的高效利用与回收展开，其中热回收与余热利用技术通过装设换热器、余热锅炉等设备，将工艺过程中产生的废热回收并用于预热原料、加热工艺介质或产生蒸汽供其他工序使用，减少对额外能源的依赖；高效压缩机与泵的应用则聚焦于提升动力设备的能量转换效率，例如采用变频调速技术使压缩机、泵的输出功率与实际负荷动态匹配，避免“大马拉小车”的能耗浪费，或选用新型叶轮、蜗壳设计的高效机型，降低机械损耗与水力损失；能源回收装置的优化设计针对设备运行中可回收的能量形式进行升级，如在离心式压缩机出口设置能量回收透平，利用高压介质的余压驱动透平发电或带动其他设备，或对蒸汽疏水阀、凝结水回收系统进行改造，减少蒸汽泄漏与闪蒸损失，提升能源循环利用率^[2]。

3.3 节能技术的应用效果

节能技术的应用在提升化工设备效率、降低能耗方面成效显著，例如某化工厂通过在精馏塔系统中增设余热回收换热器，将塔顶蒸汽的冷凝热用于预热进料，使再沸器的蒸汽消耗降低约15%-20%，精馏系统整体能耗下降12%；某化肥厂将传统离心泵更换为变频调速泵后，根据生产负荷动态调节转速，单台泵的平均功率消耗减少25%-30%，年节电可达数万度。从经济性角度评估，节能改造虽需前期投入设备购置与安装成本，但通常可在1-3年内通过能耗费用节约实现投资回收，如某石化企业对压缩机系统进行能量回收透平改造，初期投资约80万元，改造后年回收电能折合经济效益约35万元，投资回收期不足2.5年；从环境效益来看，能耗降低直接减少了化石能源的消耗，进而降低了二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放，以年节能量1000吨标准煤计算，可减少二氧化碳排放约2600吨，对推动化工行业低碳转型具有积极意义^[3]。

4 化工设备节能改造方案设计与模拟优化

4.1 单设备节能改造方案设计

单设备节能改造方案设计需结合不同类型化工设备的能耗特性制定针对性策略：对于换热器，其能耗主要源于传热效率不足导致的能量浪费，可采用强化传热技术，如在管程或壳程加装螺旋纽带、折流杆等扰流元件，通过破坏边界

层流动增强湍流程度以提升传热系数,或选用石墨烯涂层、金属多孔材料等高效换热材料减少热阻,实施路径包括根据设备尺寸定制扰流元件规格、进行材料兼容性测试及安装后的传热性能标定;某精细化工企业列管式换热器回收 180℃ 反应釜尾气热量,运行 3 年后传热效率降 25%,症结为壳程流垢。改造方案:加装螺旋纽带扰流元件、换花瓣形折流板、用石墨烯涂层换热管。Fluent 模拟显示,壳程流速均匀性提升,传热系数升至 1100 W/(m²·K);实际运行热回收率提升。对于泵与压缩机,能耗多因输出功率与实际负荷不匹配或机械/水力损失过大,采用变频调速改造可通过传感器实时监测流量、压力等参数,由控制系统调节电机转速使输出功率动态适配负荷,降低空载损耗,而叶轮切削优化则通过精确计算切削量缩小叶轮直径,减少过剩扬程以降低轴功率,实施时需结合设备运行曲线确定最优切削量及变频范围,并进行改造后的工况验证;对于反应釜,主要能耗损失为热量通过器壁向环境的散热,优化保温结构可采用多层复合保温材料,并在保温层外增设金属防护壳减少空气对流散热,确保改造后热损失率降低至行业标准范围内^[4]。

4.2 基于过程模拟的方案优化

在基于过程模拟的方案优化中,需将单设备节能改造方案的具体参数,如换热器扰流元件的直径、长度及间距等尺寸参数与顺排或错排的布置方式,泵与压缩机变频器的频率调节范围,反应釜保温层的材料导热系数及厚度等,代入已构建的设备能耗模型;通过过程模拟工具运行模型,获取不同参数组合下改造方案的能耗表现数据。通过设备能耗模型,输入螺旋纽带直径、螺距、涂层材料导热系数等参数模拟发现:直径 5mm、螺距 200mm、导热系数 600 W/(m·K)时,传热效率提升;直径 6mm、螺距 150mm 时,传热效率提升更大,但投资增加且泵耗上升。经遗传算法以“年节能收益-改造投资”为目标优化,最终选定 5mm+200mm+600 W/(m·K)方案,较其他方案缩短 0.5-1.2 年,印证了模拟优化在平衡能耗与成本中的价值。在此基础上,采用遗传算法等多目标优化算法,将能耗数据与改造所需的设备购置、安装调试等成本数据作为算法输入,不断调整改造参数的取值范围,筛选出兼顾低能耗与合理成本的参数组合,最终确定在技术可

行性与经济合理性之间达到平衡的最优改造方案^[5]。

4.3 多设备协同节能改造优化

针对化工流程中设备间存在的紧密关联性,多设备协同节能改造优化需先构建包含设备特性、物料与能量传递关系的协同能耗模型,该模型需整合各设备的输入输出参数及相互作用规律;通过过程模拟工具运行此模型,可量化分析单设备改造对上下游设备能耗的连锁反应,避免因孤立改造导致系统整体能效不升反降的问题。以某煤化工园区“精馏塔-换热器-循环泵”系统为例,初始仅对精馏塔塔顶冷凝器做余热回收,但因未考虑循环泵与换热器匹配性,导致泵出口扬程富裕 20%,额外能耗抵消了 30% 的节能收益。通过 Aspen Plus 全流程协同模型整合参数模拟发现:将精馏塔回流比降至 3.0,换热器传热面积增 10%,泵转速降至 1200r/min,系统总能耗下降,设备负荷匹配度提高,印证了协同优化的必要性。在此基础上,通过模拟不同工况下设备间的匹配参数,识别制约系统能效的关键协同瓶颈,进而设计针对性的协同改造方案;对泵组进行负荷分配调整,根据系统总流量需求动态调控各泵的运行台数与转速,实现泵组总能耗最低。

5 结语

综上所述,本文系统分析了该技术的原理、应用及局限,探讨了单设备与多设备协同改造的模拟优化策略,形成完整技术路径。研究表明,结合过程模拟的改造可实现节能效益最大化,未来需进一步完善模型,提升复杂系统优化效率。

参考文献

- [1] 房会伟.化工装置在“碳中和”目标下的节能技术应用[J].设备管理与维修,2024,(16):194-196.
- [2] 廖宇.化工设备升级与节能改造方法分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(12):33-35.
- [3] 李涛.化工设备升级改造和节能技术探讨[J].中国设备工程,2023,(03):216-218.
- [4] 李响.“碳中和”背景下化工设备节能改造技术研究进展[J].化工装备技术,2023,44(01):4-8.
- [5] 乔平.试论化工设备升级改造和节能技术[J].当代化工研究,2020,(17):148-149.

Study on welding process of stainless steel

Youxin Ye^{1,2}

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

Abstract

the quality of stainless steel welding directly affects the product performance and service life of the equipment. This paper systematically expounds the technical points of the whole process of stainless steel welding, including common defects and their causes, construction environment, process control, advantages and disadvantages of different welding methods and selection. By analyzing the applicable scenarios and operation specifications of different welding methods, this paper summarizes the common problems and causes of welding cracks and deformation, and provides a complete set of quality control system for engineering practice. This paper mainly puts forward professional suggestions for the construction environment, process control and other links that are easy to be ignored, in order to help welding technicians comprehensively improve the quality and efficiency of stainless steel welding.

Keywords

stainless steel welding; Welding cracks; Temperature and humidity; Welding method; pickling

不锈钢焊接工艺研究

叶又鑫^{1,2}

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

摘要

不锈钢焊接质量直接影响设备的产品性能和使用寿命, 本文系统阐述了不锈钢焊接的全流程技术要点, 包括常见缺陷及其成因、施工环境、工艺控制、不同焊接方法优劣及选择等方面。通过分析不同焊接方法的适用场景与操作规范, 总结焊接裂纹与变形等常见问题及其成因, 为工程实践提供了一套完整的质量控制体系。本文主要针对施工环境、工艺控制等易被忽视的环节提出了专业建议, 旨在帮助焊接技术人员全面提升不锈钢焊接质量与效率。

关键词

不锈钢焊接; 焊接裂纹; 温湿度; 焊接方法; 酸洗

1 引言

不锈钢凭借其优异的耐腐蚀性、良好的机械性能和表面特性, 广泛应用于环保、化工、食品医药等诸多领域。随着工业技术的不断发展, 不锈钢的应用范围持续扩大, 对其焊接质量的要求也日益提高。然而, 不锈钢焊接过程中存在诸多技术难点, 包括热裂纹敏感性高、焊接变形大、晶间腐蚀风险等, 这些都给焊接施工带来了严峻挑战。

不锈钢焊接的特殊性主要源于其物理化学特性。奥氏体不锈钢对硫、磷等微量杂质极为敏感, 焊接时易形成低熔点共晶, 增加了热裂纹的产生风险。与普通碳钢相比, 不锈钢具有较低的导热系数(约为碳钢的1/3)和较高的热膨胀系数(比碳钢大1.5倍), 这导致焊接时热量集中且变形倾

向显著增加。同时, 不锈钢中的铬元素在450-850℃温度区间内容易与碳结合形成碳化铬, 造成晶界贫铬区域, 严重降低材料的耐腐蚀性能。

2 不锈钢焊接常见问题及其成因

不锈钢焊接过程中由于材料特性和工艺因素的影响, 容易出现多种问题, 主要包括以下几类:

2.1 焊接裂纹

不锈钢焊接裂纹主要分为热裂纹、冷裂纹和应力腐蚀裂纹三大类, 每种裂纹的成因和特征不同, 具体如下:

热裂纹是不锈钢焊接中最常见的缺陷之一, 主要包括结晶裂纹和液化裂纹。结晶裂纹主要发生在焊缝中心, 液化裂纹出现在热影响区, 由于晶界局部熔化导致。由于不锈钢中的硫、磷等杂质在晶界形成低熔点共晶凝固时拉应力导致开裂, 焊接工艺不当(电流过大、焊接速度过快, 加剧熔池成分不均)等问题造成。奥氏体不锈钢对热裂纹尤为敏感, 特别是含硫、磷等杂质元素较高时更为严重, 生产过程中需

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

严格控制。

冷裂纹常见于热影响区，包括氢致裂纹和淬硬裂纹。主要由于焊材或环境中的氢在冷却时聚集，引发脆性开裂（如奥氏体不锈钢对氢敏感）；焊接后快速冷却，残余应力导致裂纹；结构刚性大或预热不足时，焊接应力无法释放。

应力腐蚀裂纹为延迟性裂纹，发生在特定腐蚀环境中。主要由于环境中的氯离子（Cl⁻）或高温碱液环境诱发，焊接后未消除应力，与腐蚀介质协同作用导致。

2.2 焊接变形

焊接热输入不均，局部高温加热导致材料膨胀，冷却后收缩不均，产生变形。不锈钢导热性差，热量易集中，加剧变形。焊接过程中，熔池凝固和热影响区相变会产生内应力，当应力超过材料屈服强度时，引发翘曲或扭曲。不锈钢热膨胀系数较高（如304不锈钢约为碳钢的1.5倍），相同热输入下变形量更大。刚性不足的薄板结构或复杂焊缝布局（如长焊缝、交叉焊缝）易因应力集中变形。电流过大、焊速过慢、坡口设计不合理等，会增加热输入和收缩应力。

2.3 气孔缺陷

不锈钢焊接由于氢、碳、氮元素控制异常导致产生氢气孔、CO气孔和氮气孔。保护气体不足或污染，惰性气体（如氩气）纯度不足、流量不当或喷嘴堵塞，导致熔池保护不良，空气中的氧气、氮气侵入焊缝，气体管路漏气或焊接环境有强风，破坏气体保护效果。焊件或焊材污染，母材或焊丝表面存在油污、水分、锈迹、油漆等杂质，高温下分解产生气体（如氢气、一氧化碳），焊剂受潮或保存不当，焊接时释放水蒸气。焊接工艺参数不当，电流过小、电压过高或焊接速度过快，导致熔池凝固过快，气体无法逸出，电弧过长或摆动幅度过大，增加空气侵入风险。

2.4 未熔合与未焊透

由于不锈钢熔池流动性差、导热慢，易出现层间未熔合，根部未焊透，坡口边缘未熔合等缺陷。

2.5 晶间腐蚀

晶间腐蚀是奥氏体不锈钢焊接后的典型问题，在450-850℃的敏化温度区间，碳化铬在晶界析出，导致晶界附近形成贫铬区，耐蚀性显著下降，在腐蚀环境中，贫铬区优先被腐蚀。

3 不锈钢焊接过程控制

为了提供不锈钢焊接品质，需要在焊接环境温湿度控制、风速、焊材烘烤、气体保护、坡口等方面进行严格控制。与普通碳钢焊接相比，不锈钢焊接对环境条件的要求更为严格，这主要源于不锈钢材料本身的特性及其焊接工艺的特殊性。

3.1 环境温度与湿度的控制要求

环境温度对不锈钢焊接的影响不容忽视。当环境温度低于0℃时，焊接接头冷却速度加快，容易导致热影响区硬

化，增加冷裂纹风险。对于铬不锈钢（如马氏体不锈钢），低温环境下焊接必须进行预热处理，预热温度通常控制在80-100℃。即使是焊接性能较好的奥氏体不锈钢，在低温环境下焊接时也应采取适当的保温措施，如使用预热枪对焊接区域进行局部加热，或搭建保温棚维持焊接环境温度在5℃以上。

环境温度是另一个关键控制因素。不锈钢焊条药皮容易吸潮，当环境温度过高时，焊条中的水分在焊接高温下分解为氢和氧，氢原子融入熔池会导致焊缝产生气孔，并增加氢致裂纹的风险；而氧则会与熔池中的合金元素反应，降低焊缝金属的耐腐蚀性能。因此，不锈钢焊接应在相对湿度不超过60%的环境中进行。当环境温度超过这一限值时，必须对焊条进行严格烘干：钛钙型药皮焊条需在150℃烘干1小时，低氢型药皮焊条则需在200-250℃烘干1小时。烘干后的焊条应存放在100-150℃的保温筒内，随用随取，外露超过2小时应重新烘干，但重复烘干次数不宜超过3次，否则会导致药皮开裂剥落。

3.2 防风措施

不锈钢焊接对风极为敏感，风速>0.5m/s可能破坏保护气体层，导致焊缝氧化、产生气孔等缺陷。因此，在室外或有风环境进行不锈钢气体保护焊时，必须采取有效的防风措施，如搭建防风棚、使用防风屏等。对于TIG焊接，保护气体流量一般为815L/min（根据电流大小调整），喷嘴至工件的距离不应超过15mm，以确保良好的气体保护效果。

3.3 焊接区域洁净度管理

不锈钢焊接对焊接区域洁净度要求较高，焊接区域应保持清洁，避免灰尘、油污等污染物，这些污染物在高温下会分解产生有害气体，污染熔池，导致焊缝产生气孔、夹杂等缺陷。特别是在化工、食品、医药等行业的不锈钢设备焊接中，对焊缝洁净度要求更高。施工前应用丙酮或酒精彻底清理焊接坡口及两侧50mm范围内的油污、铁锈等杂质，必要时可涂刷白石灰粉浆以防止飞溅物粘附，焊后再予以清除。

3.4 焊接场所的通风与换气要求

焊接过程中会产生有害气体和金属烟尘，尤其是六价铬化合物，对人体健康危害极大。因此，在密闭空间内进行不锈钢焊接时，必须设置有效的通风系统，但需注意通风气流不应直接吹向焊接区域，以免影响保护气体效果。可采用顶部抽风或侧向吸风的方式，保证空气流通的同时，又不干扰焊接过程。

通过系统控制上述因素，可以为不锈钢焊接创造良好的施工条件，有效降低焊接缺陷发生率，提高焊缝质量和性能。除了以上要求，在实际工程中，还需根据具体材料类型和产品要求，选择合适的焊接方法，制定针对性焊接控制方案，并在焊接过程中严格执行，确保焊接各环节处于受控状态。

4 焊接方法选择

不锈钢焊接的焊接方法较多，常见的焊接方法有手工电弧焊、二氧化碳保护焊、钨极氩弧焊、埋弧焊、激光焊、等离子焊接等，根据焊接材料厚度、工艺要求、成本控制

等进行选择，不同焊接方法的优缺点和应用场景有：

焊接方法的种类很多，在实际操作中，焊接人员应根据具体材料类型、焊接方法和产品使用环境，灵活应用这些原则，并结合实际经验不断优化工艺参数和操作技巧，以达到最佳的焊接效果，提升焊接品质。

表一 不锈钢焊接方法优缺点

序号	焊接方法	优点	缺点	适用场景
1	手工电弧焊 (SMAW)	设备简单，成本低；操作灵活，适合户外作。	焊接质量依赖焊工技术，焊接速度慢，焊缝质量不稳定，易产生气孔、裂纹、氧化和变形。	适用于厚度 3mm 以上的不锈钢小批量生产，建筑、维修及野外作业。
2	二氧化碳保护焊 (GMAW)	效率高，熔深大，成本较低，适合自动化生产。	飞溅较大，焊缝外观较差；保护气体可能影响不锈钢耐腐蚀性	适用于中厚板焊接（如结构件、车辆、容器制造），但对表面质量要求不高的场合
3	钨极氩弧焊 (GTAW)	焊缝质量高、变形小、气孔少，无焊渣。	速度慢，效率低，对焊工技术要求高，设备成本较高	适用于薄板、精密焊接（如管道、食品设备、化工容器）及高要求外观的场合
4	埋弧焊 (SAW)	焊接效率高，适合厚板；焊缝质量稳定，成型好，无弧光辐射。	设备复杂，灵活性差，仅适合平焊或小角度焊接，焊剂需清理。	适用于大型厚壁结构（如压力容器、储罐、船舶）的批量生产。
5	激光焊 (LBW)	能量集中，变形小，焊接速度快，精度高，可自动化集成。	设备昂贵，对工件定位和参数调整要求严格。	适用于微型设备、精密仪器及高精度焊接需求。
6	等离子焊接 (PAW)	高温高能，适用于多种不锈钢材质，焊接质量高。	设备复杂，操作难度大，成本较高。	适用于高品质焊接，如化工设备、高压管道、压力容器

5 焊后酸洗处理

不锈钢焊接完成后需要进行酸洗，通过酸洗处理，不锈钢制品可获得理想的表面状态和最优的耐腐蚀性能，这一工艺在化工设备、食品机械、医疗器械等领域具有不可替代的重要作用，焊后酸洗的要求有：

5.1 酸洗注意事项

操作人员必须穿戴防酸服、面罩、橡胶手套及防酸靴，必须在焊接完成后 24 小时内进行酸洗处理，最佳窗口期为焊接后 48 小时，对于高温焊接 (> 350℃) 的接头，应在冷却至 80℃ 以下立即处理。重点处理焊缝区（包括熔合线两侧各 20mm 范围），可分多次酸洗；对热影响区采用梯度酸洗方式，随焊缝距离增大缩短酸洗时间，角焊缝需保证酸液充分接触内凹区域。焊缝飞溅物机械清理要使用不锈钢专用钢丝刷，去除焊接氧化色（彩虹色），直至露出金属本色，对咬边、气孔等缺陷应先修补再酸洗。

5.2 溶液特殊性要求

推荐使用专用焊道酸洗膏（含 58% HNO_3 +35% HF +增稠剂），对奥氏体不锈钢采用低温（40-50℃）稀酸（58% HNO_3 +12% HF ），双相钢需添加 0.5-1.5% 柠檬酸抑制选择性腐蚀。

焊后酸洗是不锈钢焊接质量控制的关键环节，通过焊后酸洗，修复因高温氧化损失的钝化膜，提升焊接接头品质，为渗透检测 (PT) 提供理想表面，提高微裂纹的检出率，改善不锈钢表面外观，可同时实现表面美观性和使用可靠性的双重提升。

6 结语

不锈钢焊接质量控制是一个系统工程，需要从材料选择、工艺设计、过程控制和焊后处理等多个环节进行综合管控。针对不同类型的不锈钢，应采取差异化的焊接策略。

参考文献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会 编. 焊接手册 (第3版修订本). 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [2] 陈勇;陆建华;徐育焱;王业方;张涛;张梦贤;不同焊接工艺下304 不锈钢薄壁管件纵缝微观组织及力学性能研究[J].热加工工艺, 2022,v.51;No.585(11).
- [3] 栗卓新;李冬梅;杨玉君.不锈钢的高效、低成本、自动化焊接技术—— CO_2 气保护不锈钢药芯焊丝电弧焊[J].兵器材料科学与工程,2001(02).
- [4] 林百春;.不锈钢表面处理:酸洗、钝化与抛光[J].材料开发与应用,2006(03).

Research on intelligent operation and maintenance management strategy of coal washing equipment

Huigang Zhu

National Energy Group Xinjiang Coal and Gas Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831700, China

Abstract

Coal is an important energy resource in our country and plays a pivotal role in the development of the national economy. Coal washing is an important link in improving coal quality and reducing environmental pollution, and coal washing equipment is its core. With the continuous progress of science and technology, intelligent technology is becoming more and more widely used in various fields, and the intelligent operation and maintenance management of coal washing equipment has become an important trend. Intelligent operation and maintenance management can not only improve equipment operation efficiency and reduce failure rate, but also optimize the production process and improve the economic and environmental benefits of enterprises. Therefore, in-depth research on the intelligent maintenance and management strategy of coal washing equipment is a hot topic in related industries.

Keywords

coal washing equipment; intelligent operation and maintenance; Management Strategy

煤炭洗选设备智能化运维管理策略研究

朱会刚

国家能源集团新疆煤制气有限公司, 中国·新疆 昌吉 831700

摘要

煤炭是我国重要的能源资源,对国民经济的发展起着举足轻重的作用。煤的洗选是提高煤质和减少环境污染的重要环节,洗煤设备是其核心。随着科学技术的不断进步,智能化技术在各个领域中的应用越来越广泛,煤炭洗选设备的智能运维管理已成为一个重要的趋势。智能运维管理不仅可以提高设备运行效率,减少故障率,而且可以优化生产流程,提高企业经济效益与环保效益。因此,对煤炭洗选装备的智能维护与管理策略进行深入研究,为当前相关行业的热门课题。

关键词

煤炭洗选设备;智能化运维;管理策略

1 引言

在煤洗选生产中,设备的稳定运行对提高生产效率、提高产品质量至关重要。然而,传统的人工运维管理模式存在效率低、响应速度慢、故障诊断精度低等问题,难以满足现代洗选企业高效精准运维的需求。智能运维管理以物联网、大数据分析和人工智能等先进信息技术为基础,实现对设备的实时监控、故障预警和远程故障诊断。该管理模式能有效地对设备运行数据进行整合,优化运行过程,提高设备运行可靠性,延长设备寿命。同时,智能运维管理也可以辅助企业进行决策支持,以应对市场变化与技术挑战,增强核心竞争能力。

【作者简介】朱会刚(1986-),男,中国宁夏贺兰人,本科,助理工程师,从事机电管理工作,在各类输送设备、煤炭洗选设备、化工装备等研究。

2 煤炭洗选设备运维现状与技术挑战

2.1 运维管理现状分析

目前,煤炭洗选装备运行维护模式仍然以经验为主导,存在三个问题:①状态感知滞后,主要依靠人工巡检记录,关键指标(轴承温度、振频、油压等)采集时间长达2-4个小时,难以及时发现故障征兆。二是诊断方法粗放,主要依靠“听声、看表、摸温度”等主观判断,难以准确识别介质旋流器磨损程度和滤布堵塞状况等隐蔽故障^[1]。三是维修决策僵化,以定期计划维修为主,造成“过度维修”占30%以上,“维护不足”占突发故障的25%。有研究表明,我国洗选厂设备综合效率只有65%-70%,落后于国际先进水平15-20个百分点,运行管理滞后已成为制约我国洗选行业发展的重要瓶颈。

2.2 智能化转型的技术挑战

推进洗选装备智能化运营面临三大技术障碍:一是设备异构性强,洗选流程涉及机械、液压、电气、控制等多类

设备,其接口协议不统一;二是数据采集需兼容10多个标准,如Modbus, Profinet, OPC UA等,造成“信息孤岛”现象严重;三是洗选装备智能化运行面临三大挑战:1)洗选装备智能化运行面临三大难题:1)设备异构性强。二是运行工况复杂,原煤煤质波动、分选介质浓度变化、负荷冲击等因素使得运行参数呈现强非线性特性,传统阈值判断方法容易出现虚假报警(虚警率高达20-30%)^[2]。(3)决策模型适配性差,一般工业装备故障诊断算法很难迁移到洗选场景,如跳汰机“床层松弛度-风压相关性模型”需要结合煤粒度分布进行动态调整,否则诊断准确率将降低40%以上。此外,老设备改造难度大,操作人员技能断层,数据安全保护不足,使得实现智能化改造更加困难。

3 煤炭洗选设备智能化运维体系架构

3.1 体系框架设计

基于“感知-分析-决策-执行”的闭环思路,构建四层智能运维系统:感知层采用振动、红外测温、超声波流量计等智能终端,对振动、温度、流量、压力等关键参数进行高频率(1 kHz)的高频率测量^[3]。在传输层,采用“5G+工业以太网”混合组网,保证数据传输实时性(延迟<50 ms)和可靠性(丢包率<0.1%)。数据层以边缘计算网关和云平台为基础,对数据进行净化、融合和存储,形成一个动态的数据库,包括设备日志、运行日志和维修记录;应用层将智能算法和业务过程相结合,实现状态监控、故障诊断和维修优化等功能,使整个运维过程数字化和智能化。

3.2 核心技术支撑

该体系的运行依赖于物联网(IoT)技术来实现设备的泛在性连接,基于低功耗广域网(LPWAN)部署传感网络,以无线振动传感器(电机、泵等)作为旋转部件,采用有线压力变送器(如溜槽、水箱等)来保证数据采集的全面性和经济性。利用大数据分析技术,建立多维度特征库,采用时序分析方法提取运行趋势特征,并利用频谱分析对故障频率进行识别。本项目以智能决策为目标,以随机森林为基础,以强化学习为基础,研究基于强化学习的维修计划优化方法,利用同类设备数据,缩短训练周期,提高小样本条件下的自适应能力。

4 煤炭洗选设备智能化运维关键策略

4.1 多维度状态监测策略

建立“设备-系统-流程”三层监控网络,是实现洗选装备智能化运行的基础。在设备层面,针对不同类型设备的结构特点和失效模式定制监测方案:针对重介质旋流器,采用高频超声测厚(10 kHz)技术,在易磨损区域(锥段、柱体等)布置8个监测点,实时采集壁厚变化数据,当单次测量值偏差大于3 mm或者月平均磨损量大于1.2 mm时,自动触发预警,比人工检测效率提高40倍以上,并可有效捕捉局部异常磨损^[4]。采用“压力-油液-温度”三位一体

的监测方案,在主油路上安装高精度压力传感器(测量精度 $\pm 0.2\%$ FS),实时记录压滤过程中的夹紧力和进料压力的变化;采用激光粒子计数器和介质损耗检测仪同步分析油液污染程度(NAS等级8-10,预警阈值)、水分含量(高于0.1%时报警)和粘度变化;同时,在液压泵出口处加装红外测温传感器,实现对油温异常升高(高于55℃)的监测,实现多参数协同诊断。系统层面,依托数字孪生技术,构建1:1比例洗选系统虚拟镜像,利用工业互联网平台实时映射跳汰机床高(测量精度 ± 2 mm)、气压、进料量,旋流器进口压力、介质密度、分流比等关键参数实时映射到虚拟空间。基于计算流体动力学(CFD)开展多场耦合数值模拟,模拟不同煤质和负荷条件下的流场分布(速度偏差大于15%时标记异常)、浓度场梯度(当介质密度变化大于 ± 0.03 g/cm³时触发分析)和设备受力状况,利用虚拟调试提前识别系统瓶颈,如跳汰机相邻风阀动作时差大于0.3 s时,虚拟系统预测床层松弛度异常,提前给出调整建议。

4.2 精准化故障诊断策略

通过“特征提取-模式识别-成因溯源”的三级诊断方法,实现对洗选装备故障的精确定位和深度解析,为洗选装备维修决策提供科学依据。针对洗选装备运行信号的非平稳强耦合特性,采用小波包分解的方法,对不同频段的振动信号进行8级分解,提取不同频段的能量特征;针对电机、水泵等旋转机械(如电机、水泵等),以1-10 kHz频率范围内的故障特征频率(如齿轮的断齿频率是转速的整数倍),利用希尔伯特-黄变换(HHT)对非线性信号进行处理,实现微弱故障特征的有效提取。采用多源信息融合的方法,构建28维高维特征向量,采用主成分分析方法,降低计算复杂度,保留95%以上的信息。在模式识别阶段,基于改进卷积神经网络(CNN)模型,构造故障分类器,针对洗选装备故障样本分布不均的情况,利用SMOTE算法对小样本进行超抽样,使得各类故障样本的比例小于1:3。在此基础上,引入注意机制强化关键特征权重,在250-500 Hz范围内增加旋流器振动信号权重,提高压滤系统压力波动特征的关注程度,实现类似装备故障诊断知识向目标设备迁移,使模型训练样本量降低40%。将旋流器堵塞、电机轴承早期故障、风门堵塞等12种典型故障诊断准确率提高到92%以上,其中早期剥落故障识别提前量比传统方法提高3-5天。

4.3 动态化维护决策策略

构建以预测维修为主,预防维修为辅的混合决策模型,实现洗选装备维修资源优化配置,在保证设备可靠性的前提下,降低维护成本。在此基础上,构建基于长-短记忆网络的跳汰机电磁电磁阀、旋流器进给阀等关键部件剩余寿命预测误差小于 ± 8 小时。当预测值小于72小时时,系统会自动启动预测维修工作单,该工作单包括工件型号(如跳汰机电磁阀采用2W-160-15型)、所需工具(如转矩扳手、万用表)、标准工作时间(30分钟)等,并与生产计划系统

进行接口分析,对今后48小时内的生产间隙(如中班结束后至夜班开始前的2小时窗口)进行自动调度维护时间,避免非计划停机,使跳汰机因电磁阀故障造成的非计划停机次数降低75%^[5]。采用多元线性回归方法,以累计运行时间、处理原煤量、煤质硬度(以普氏硬度系数f值为表征)、入料粒径分布(<0.5mm)为输入参数,采用多元线性回归算法,计算替换周期修正系数,如进料煤中小于0.5mm颗粒占30%以上,可缩短更换周期20%-25%;同时,结合在线监测数据(过滤布透光率降低至初始值60%等),动态调整易损零件库存周转率提高40%,采购成本下降18%。

4.4 协同化管理优化策略

建立“人-机协同,虚实相生”的管理模式,以流程重构和组织协同为手段,提高洗选装备智能运维效率。在组织结构上,突破“设备科-生产车间-维修班”垂直管理模式,建立由设备工程师3人(熟悉洗选设备结构及原理),算法专家2人,生产调度员2人,数据分析师1人(处理监控数据),中心配备数字孪生监控大屏,实时显示设备健康状况(红黄绿三种颜色)、当前工作进度(完成率、介耗)、生产目标达成情况(精煤产率、介耗)等关键信息,并采用“7×24小时”轮班制度,确保及时响应故障。在流程优化方面,对故障处理流程进行规范化的“接警-诊断-派单-维护-验收”五个步骤,每一个步骤都有清晰的时限和质量标准。在接警阶段,系统需要对故障进行自动识别和推送(响应时间不超过5分钟)。诊断部分需要在30分钟之内完成故障原因的分析 and 解决,派单环节通过手机APP向维修人员推送工作单,明确维修内容、备件需求和安全注意事项。维护部分按照操作规程进行,关键步骤(如旋风罩更换时的拧紧力矩)需拍照并上传存档。在验收阶段,将维修前后的设备参数(振动值、处理量等)进行对比,来验证维修效果。整个流程由工作流引擎自动流转,逾期未完成的部分会自动提醒相关人员,将故障平均处理时间由4.2小时减少到1.8小时。

5 案例应用

5.1 工程概况

大型国有矿井洗选厂具有年产800万吨的生产能力,主要设备有:LTG14型跳汰机3台,Φ1200型重介质旋流器2台,XAZG4000型压滤机4台,并配以相应的输送和筛分设备。在2024年引入智能运维管理系统之前,设备停机时间平均为12.5小时,维修费用占生产总成本18.7%,且存在故障响应滞后、维修过多等问题。

5.2 实施方案

完成三项技术改造:第一,在生产过程中部署128台智能传感器,覆盖电机轴承、液压系统、关键阀门等,采集频率设定在500Hz以上,并通过5G专用网络传输到云平台。二是以3年3200条历史数据为基础,建立洗选装备故障诊断模型,并对其中12种典型故障进行识别,如旋流器磨损、跳汰机组空气阀等12种典型故障进行识别。三是建立维修决策平台,将设备日志、维护记录、生产计划等数据进行集成,自动生成工作单,并对资源进行调度。

5.3 应用效果

经过半年的运行,取得明显的效果:设备故障停工平均每月8.1小时,降低了35.2%;维修费用减少28%,为13.5%;故障诊断的平均时间由4.2小时减少到1.5小时,响应速度提高64.3%。其中,重介质旋流器预警准确率达91%,提前发现7处严重磨损隐患,避免3-5天停产。同时,对滤布换布周期进行动态调整,使滤布耗降低19.6%,验证智能维护策略的有效性和经济性。

6 结语

综上,实现煤炭洗选设备的智能化运维管理,是实现煤炭工业转型升级的必然选择。不仅可提高设备的运行效率,提高设备的可靠性,而且具有明显的经济和环保效益。随着智能化技术的不断开发与应用,洗选设备运行管理向高效率、高精度、智能化方向发展。未来,要进一步加强技术研究与应用,促进智能运维管理与煤炭洗选生产的深度结合,为煤炭工业的可持续发展提供强有力的支持,促进我国能源工业的高质量发展。

参考文献

- [1] 连孟杰.选煤厂洗选设备监测监控系统研究[J].矿业装备,2024,(12):97-99.
- [2] 叶俊良.新型筛分设备在煤炭洗选行业的应用及影响[J].商业,2024,(21):90-92.
- [3] 母长春,杨国峰.我国智能化选煤厂技术与展望[J].选煤技术,2024,52(03):1-8.
- [4] 田田.PLC控制系统在煤炭洗选设备中的应用[J].能源与节能,2024,(04):58-61.
- [5] 张潮.煤炭洗选设备运行中的常见问题及其解决措施[J].能源与节能,2024,(03):265-267+270.
- [6] 谭兴富,郭金亮,徐虎彪.煤化工洗选机械设备运行状态监测方法[J].化工自动化及仪表,2024,51(01):128-132.

Analysis and Control Measures of Material Consumption and Energy Consumption of Dry Gas to Ethylbenzene Unit

Jianlong Zhou

CNOOC Ningbo Daxie Petrochemical Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315812, China

Abstract

The process route of our company's ethylbenzene unit adopts the third-generation technology of Sinopec's gasphase method dry gas to ethylbenzene (SGEB), and the catalysts of this technology are respectively the alkylation catalyst and the alkyl transfer catalyst by the Shanghai Research Institute of Petrochemical Industry and the Beijing Research Institute of Petroleum Science, respectively. The process flow adopts the raw material depropanization and reaction product combined process flow technology developed by the Luoyang Petrochemical Engineering Company, which is composed of raw material pre-treatment, reaction, separation, heat carrier and public utilities other systems. The production cost of the ethylbenzene unit is mainly concentrated on the public utilities energy and the consumption of raw materials, among which the cost of raw materialzene accounts for 60% ~ 70% of the total cost, and it is crucial to reduce the energy consumption and material consumption of the unit for the economic of the dry gas to ethylbenzene unit.

Keywords

raw material; benzene consumption; three agents; energy consumption; energy

干气制乙苯装置物耗能耗分析及控制手段

周建龙

中海石油宁波大榭石化有限公司, 中国·浙江 宁波 315812

摘要

我公司乙苯装置工艺路线采用中国石化的气相法干气制乙苯技术(SGEB)(第三代技术),该技术的催化剂分别采用上海石油化工研究院研究开发的烷基化催化剂和北京石油科学研究院开发的烷基转移催化剂,工艺流程采用洛阳石化工程公司开发的原料脱丙烯和反应产物分离组合工艺流程技术,由原料预处理、反应、分离、热载体和公用工程等系统组成。乙苯装置的生产成本主要集中在公用工程能源和原料的消耗,其中原料苯的成本占总成本的60%~70%,降低装置的能耗和物耗对于干气制乙苯装置的经济效益至关重要。

关键词

原料; 苯耗; 三剂; 能耗; 节能

1 物耗分析

1.1 物耗投入及产出

乙苯装置主要原料为催化干气和苯,催化干气由DCC联合装置送入界区,苯由芳烃抽提送入界区,不足部分外购卸入罐区,由泵送入界区;

辅助材料为烷基化催化剂、烷基转移催化剂、瓷球和热载体;主要产品为乙苯,通过管道直接送至苯乙烯装置或输送至罐区乙苯班产罐做为苯乙烯装置原料;副产品烷基化尾气,送入工厂燃料气管网作为加热炉燃料使用;副产品丙苯,作为汽油调和组分送出乙苯装置;副产品高沸物作为苯乙烯装置吸收剂,管道送入下游苯乙烯装置使用;副产品富丙烯干气通过管道输送至DCC装置气压机入口回收丙烯

或去燃料气系统作为燃料;副产品不凝气通过管道输送至装置燃料气分液罐,作为装置燃料气。

1.2 物料平衡

装置物料平衡见表1。

1.3 三剂消耗

辅助材料消耗指标见表2。

2 减少和降低物耗的手段和措施

2.1 降低装置苯耗

2.1.1 苯耗分析

乙苯装置的苯耗总分为化学苯耗和物理苯耗。化学苯耗是由化学反应引起的苯耗,包括生成乙苯、丙苯、二苯和高沸物等所引起的苯耗;物理苯耗是分离过程产生的苯耗和跑冒滴漏引起的苯耗。乙苯装置苯耗的计算主要由以下几部分组成:

【作者简介】周建龙(1991-),男,中国甘肃酒泉人,本科,工程师,从事化工生产技术管理研究。

表1 装置物料平衡

入方		出方		
项目	原料量,t/h	项目	产品及副产品,t/h	收率,%
	设计值		设计值	设计值
催化干气	27.41	乙苯	35.77	66.02
新鲜苯	26.77	丙苯	0.25	0.46
		高沸物	0.12	0.22
		富丙烯干气	0.85	1.57
		烷基化尾气	16.37	30.21
		不凝气	0.82	1.51
合计	54.18		54.18	100

表2 辅助材料消耗指标

序号	名称	型号	单位	设计消耗	备注
1	烷基化催化剂	SEB-08/12	T	45.5	一次装填、寿命2年
2	烷基转移催化剂	AEB-1H	T	35	一次装填、寿命4年
3	瓷球	Φ15/Φ6/Φ3	T	51.82	使用周期随催化剂
4	热载体	LQD-330	T	~200	一次装填(寿命取决于产品规格及使用状况)

1) 生成乙苯产品(目的产物)的苯耗, 化学反应方程式为: $C_2H_4 + C_6H_6 = C_6H_5C_2H$ 。通过装置目前运行状态可算实际苯耗为 0.751, 达到了设计的要求, 但还存在优化的空间;

2) 干气中 C_3 、 C_4 等不饱和烯烃与苯发生烷基化反应消耗的苯, 生成丙苯、二甲苯、二乙苯高沸物等副产物;

3) 烃化尾气、富丙烯干气、不凝气等处携带苯或者苯系物的苯耗;

4) 装置的跑冒滴漏引起的苯耗。这一点包括装置各动静密封点的严密性、切水的控制、阀门的严密性、排液的频次等。

2.1.2 降低苯耗的手段

原料苯的消耗占总成本的 60%~70%, 降低装置的苯耗对于节能降耗的意义不言而喻。目前装置主要采取了以下措施以降低原料苯的消耗。

1) 优化脱丙烯塔 T-101 的操作, 控制净化干气中丙烯含量不超过 300ppm, 减少生成丙苯、二甲苯等而造成苯耗的增大和乙苯产品质量的不合格;

2) 优化脱丙烯塔 T-101 的操作, 加强对深冷吸收的关注, 防止吸收剂随净化干气夹带至烃化反应器, 造成吸收剂的损失和对催化剂的破坏;

3) 在一定范围内尽可能低的降低送往界外的富丙烯干气的温度, 减少其中吸收剂的夹带。建议在 V-103 顶增设富丙烯气体脱液设备, 使其中的吸收剂回收下来, 减少补充吸收剂的频次;

4) 优化烃化反应的操作, 在工况发生变化时及时调整反应操作条件, 防止反应中乙苯选择性降低, 副产物的量增加, 造成苯的化学损耗;

5) V-103、V-108 切水操作时内操注意监控界位, 避免将物料过多排放, 造成苯的损耗;

6) 优化尾气吸收塔 T-103 进料深冷工艺的操作, 降低

尾气中芳烃的携带。

7) 优化脱非芳塔 T-105 不凝气温度的控制, 降低不凝气中苯的携带;

8) 控制 T-104 塔釜苯含量 $\leq 0.05\%$ (wt), 防止苯带入乙苯产品中造成苯的损失和苯乙烯装置能耗的增加;

9) 尽可能低的控制乙苯塔塔釜乙苯含量, 以防造成乙苯的浪费;

10) 尽量回收高沸物中的多乙苯, 提高乙苯的产量;

11) 降低装置的跑冒滴漏。

2.2 降低化工三剂的消耗

化工三剂的消耗对于装置生产成本影响较大, 因为化工三剂一般大多价格昂贵, 所占投入成本较高。对于本装置而言, 化工三剂主要包括烷基化和烷基转移催化剂、瓷球以及导热油, 主要控制手段如下:

1) 催化裂化干气进装置之前必须要经过一个脱硫过程, 以除去干气中的 H_2S , 通过优化干气水洗操作, 将脱硫剂含量控制在 5ppm 以下;

2) 控制脱后干气丙烯含量不超过 300ppm, 减少因丙烯与苯烷基化反应生成丙苯而造成的苯耗, 还可以减少丙苯、异丙苯、甲苯和二甲苯的生成, 可以降低反应温度, 延长催化剂的再生周期和使用寿命;

3) 脱后干气应尽可能降低液态乙苯夹带, 减少由此造成的催化剂结焦现象;

4) 烃化反应操作条件的控制。由于烷基化反应是强放热反应, 过量的苯亦可撤走大量反应热, 从而降低烷基化反应器的温度。进入烷基化反应器的循环苯温度, 视反应情况在 $340^\circ C \sim 430^\circ C$ 之间调节, 保证一段床层入口温度维持在 $320^\circ C \sim 400^\circ C$, 进而获得良好的反应效果。催化剂使用初期, 在确保转化率的基础上, 应尽可能采用较低的反应温度, 以

延长催化剂的使用寿命；

5) 烷基转移操作条件的控制。

①升温可以提高烷基转移反应的速率，但如果升温速度太快，将导致催化剂失活速度加快，因此必须严格控制反应温度和升温速度；

②日常操作时，根据出口组成和多乙苯转化率微幅调整温度：在确保转化率前提下，尽可能按低温控制烷基转移反应，延长烷基转移催化剂寿命；

③烷基转移反应停工时应先将温后降压，防止反应器内物料汽化损坏催化剂；

6) 严格控制进入催化剂床层机械杂质的携带量，防止堵塞催化剂孔道，降低催化剂活性和使用寿命；

7) 热载体系统操作过程控制

①热载体系统停车时，必须待热载体温度降至 90℃以下方可停止热油循环泵 P-124A/B/C 运行；

②系统充装新的热载体后，必须重新升温脱水、排气；

③热载体最高工作温度不得超过其许用温度，高温状态时要确保热载体循环良好。

3 物耗能耗

乙苯装置设计单位能耗为 132.71kg 标油 / t 乙苯，能耗主要集中在塔釜重沸器加热蒸汽和燃料气的消耗。装置的节能在工艺操作上有技术创新，减少能源的无谓浪费。

3.1 设计角度

1) 采用高效板式（本装置采用高效绕管式，也能达到设计要求，属专利产品）换热器充分回收吸收剂所含的热量，同时能够解析过度吸收的乙烯，减少塔釜加热量的使用；

2) 烷基化反应产物用于加热循环苯，充分回收反应热；

3) 新鲜苯与循环苯换热以使循环苯最大限度的烷基化反应产物的热量；

4) 烷基转移料与循环吸收剂换热，充分回收循环吸收剂所含的热量；

5) 解析塔、循环苯塔、乙苯精馏塔和丙苯塔塔顶产生 0.25MPa 蒸汽和 0.35MPa 蒸汽供苯乙烯装置使用；

6) 循环苯塔顶剩余部分热量和多乙苯塔顶热量产生高温热水送至系统管网；

7) 选用高效电机，以降低装置电耗；

8) 设备及管道布置尽量紧凑合理，从而减少热量损失和动力损失；

9) 相较于第二代干气制乙苯，设催化干气脱丙烯系统，降低苯耗。

3.2 实际生产

1) 降低解析塔 T-102 塔顶压力至 0.55MPa，在保证富剂解析效果的前提下，进一步降低塔釜加热量；

2) 循环苯和烃化反应产物器 E-110 和烃化反应产物和吸收塔低液换热器采用绕管式换热器，最大限度回收烃化反应热，进而降低了循环苯加热炉燃料气的用量；

3) 优化烃化反应操作，在保证各反应器床层不超温的前提下（30℃以内），以尽可能低的苯稀比进行生产，以降低燃料气的用量和电能；

4) 采用新型的烷基化催化剂 SEB-12，苯稀比进一步降低，降低了循环苯量，进而降低了降低燃料气的用量和电能；

5) 相比同类装置，由于我公司催化装置采用 DCC 工艺，催化干气中乙烯含量较 FCC 工艺高，烃化反应温升相应较高，因此投用各段冷激苯，降低各床层出口温度，达到精准控制温升的目的，此项操作也为同类装置提供了操作经验；

5) 降低循环苯塔操作压力，由 0.50MPa 降至 0.45MPa，进一步降低塔釜 3.5MPa 蒸汽用量，大大节约了蒸汽用量，经济效益可观，也是装置探究节能降耗的重大成果；

6) 经过积极探索研究，在保证塔顶塔釜在工艺指标范围内的前提下，停用脱非芳塔 T-105 塔釜 1.0MPa 加热蒸汽，节约蒸汽约 2.7t/h，也创造了巨大的经济效益；

7) 在保证塔釜二乙苯不超标的前提下，降低 T-108 塔釜温度（设计 245℃，目前控 216℃），以减少热源的使用量；

8) 以尽可能低的苯烃比进行反烃化操作，进一步降低装置能耗；

9) 优化各塔操作，在保证分离要求的前提下尽量减少塔的回流比；

10) 停用 P-118，T-107 塔釜物料通过压力差自压进入 T-108，以减少电能的消耗；

11) 停用 P-128，利用位差提供所需的动力，以减少电能的消耗；

12) 加强设备及管道保温，以减少散热损失；

13) 加强各密封点的排查，减少装置的跑冒滴漏；

14) 本装置通过生产优化，为充分循环利用有限资源，达到节能减排效果，利用乙苯装置 120℃ 的低温水余热，产 0.35MPa 蒸汽，在乙装置西侧增加工艺热水余热回收装置。余热产汽正常可利用 600t/h 热煤水余热，向苯乙烯装置提供 11.79t/h 低低压蒸汽。该项目作为合作能源项目，进一步降低装置能耗。

4 结语

通过对装置的不断优化，使装置的物耗能耗显著降低，降低了生产成本，当然，节能降耗的最终手段还是需要工艺技术的革新达到效益的最大化，优化革新生产工艺才是未来发展的方向和目标。稀乙烯液相法技术的工业化应用将进一步降低干气制乙苯装置能耗。

参考文献

- [1] 30万t/年乙苯装置基础设计，中海石油宁波大榭石化有限公司，2014.2：工艺部分
- [2] 曲帅卿，姜立涛，邓雪峰，催化裂化干气制乙苯装置苯耗高的原因分析及改进措施探讨，中外能源，2008,3：84-88
- [3] 李淑红，张仲利，稀乙烯制乙苯技术浅议，炼油技术与工程，2008,3：24-26

Study on risk classification control and hidden danger investigation mechanism of chemical safety

Yongxin Zhao

Wanhua Chemical (Sichuan) Co., Ltd., Meishan, Sichuan, 620010, China

Abstract

This study addresses core safety management challenges in chemical enterprises by establishing a dual-prevention mechanism integrating risk classification and hidden danger investigation. It provides an in-depth analysis of the severe accident-prone conditions within chemical industries, identifying root causes across six dimensions: human factors, equipment, materials, operational methods, environmental impacts, and management systems. The research outlines comprehensive risk identification methodologies and establishes a “four-color four-level” risk assessment framework with corresponding control measures. A systematic review of risk management processes, implementation approaches, and accountability mechanisms highlights the intrinsic connection between “risk-driven investigation” and “investigation-driven control” within the dual-prevention system. The study proposes coordinated operational workflows and key principles, ultimately forming a dynamically optimized safety management chain. These findings provide practical pathways and theoretical foundations for enhancing risk anticipation capabilities and eliminating accident risks in chemical enterprises.

Keywords

chemical safety; risk assessment; hierarchical control; investigation and management

化工安全风险分级管控与隐患排查机制研究

赵永鑫

万华化学(四川)有限公司, 中国·四川眉山 620010

摘要

本文围绕化工企业安全管理的核心问题展开, 构建风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制, 详细剖析了化工企业事故频繁发生的严峻形势以及“人、机、料、法、环、管”层面的深层次原因。阐述了风险辨识全面覆盖的范围及科学方法, 明确了风险评估“四色四级”标准以及分级管控措施。系统梳理了风险管控措施有效性排查治理流程、多种方法以及责任跟踪机制, 指出双重预防机制“风险引领排查、排查完善管控”的内在关联, 提出了协同运行的流程与要点, 此项研究形成了动态优化安全管理链条, 为化工企业提升风险预控能力、消除事故隐患提供了实践路径与理论支撑。

关键词

化工安全; 风险评估; 分级管控; 排查治理

1 引言

近年来, 虽说化工安全生产监管力度不断加大, 但重特大事故仍旧频发, 造成了人员伤亡以及财产损失, 还对生态环境以及社会稳定形成了严重威胁。事故揭示出化工企业在风险识别不全、管控措施不完善、措施有效性排查治理不彻底等方面存在不足。基于此, 构建科学高效的风险分级管控和隐患排查治理机制, 实现双机制协同运行, 成为防范化解化工安全风险、提升本质安全水平的关键措施, 有着关键的现实意义。

2 化工企业安全现状剖析

2.1 化工企业事故频发的严峻形势

化工行业作为国民经济支柱产业, 目前安全生产形势依旧较为严峻, 近期多个地区化工园区连续出现安全生产事故。沿海某化工企业反应釜发生爆炸, 致使生产装置摧毁、企业倒闭、周边企业不得不停产整顿, 甚至导致所在化工园区关闭。位于内陆的某化肥厂发生液氨泄漏事件, 造成厂外公交车人员中毒, 甚至使得周边居民紧急疏散, 生产生活秩序受到严重干扰。这类事故大多伴随有毒气体扩散、持续燃烧及爆炸等次生灾害, 造成人员伤亡, 而且对周边的水体、土壤以及空气都造成了污染, 事故发生之后大多时候会引发区域性的安全恐慌, 冲击地方经济发展的信心, 暴露了化工行业在高风险环境下安全生产保障能力方面存在薄弱环节, 突出了强化安全生产管理的迫切需求。

【作者简介】赵永鑫(1987-), 男, 中国四川平昌人, 本科, 中级, 从事化工安全风险管控研究。

2.2 事故背后的深层次原因

事故诱因呈现出复杂复合型特性，其核心问题聚焦于管理体系构建及执行层面。人员操作方面，部分员工安全意识较为淡薄，习惯性违规操作的情况频繁发生，在特殊作业环节监护也有所缺失。设备设施方面，关键设备设施缺乏维护保养或未按厂家维护保养标准开展工作，防腐防渗措施缺失或失效，老旧设备带病或超负荷运行等问题较为突出。环境条件方面，高温、高压、腐蚀及潮湿等气候环境因素会加速设备设施老化。规划布局方面，存在部分厂区间和装置间布局较为混乱，未按法规要求规划布局等问题致使风险叠加。管理机制方面，存在管理机制缺失，管理机制和能力与风险管控要求不匹配，机制运行偏差较大，风险分级仅仅浮于表面，隐患排查只是“查而不改”或排查缺乏针对性，安全责任制未能得到有效落实，企业安全文化存在缺失，重产量轻安全的理念十分根深蒂固，应急处置能力不足加剧了事故后果。

3 化工企业安全风险分级管控体系构建

3.1 风险识别的范围与方法

3.1.1 全面覆盖的风险识别评估范围

风险辨识要实现对生产全链条以及全要素的覆盖。在纵向方向上，贯穿从原辅料采购开始，历经生产加工、仓储运输，一直到废弃处置等各个环节，横向方面则需延伸至工艺过程、设备设施、作业活动及周边环境等多个维度，具体而言包含原辅料采购和储存输送，生产装置里的反应精馏、流体输送过程及设备管道阀门关键设备设施等，储罐区的危化品储存与转运系统，公用工程中的供电、供气、供热、制冷、控制设备设施以及特种设备运行状态等。同时也要涉及非常规作业场景，如动火、受限空间、临时用电、盲板抽堵、起重、高处、射线、打开设备断开管道、LTT及动土断路等特殊作业。还需要关注极端天气、周边环境变化等外部因素，以此确保毫无遗漏地识别存在的风险点，为后续的分级管控奠定基础^[1]。

3.1.2 科学有效的风险识别方法

依据化工企业的特性运用HAZOP、BOWTIE、FMEA、MSG、SLC及JHA等多元化识别方式方法开展识别，其中HAZOP识别工艺过程危害，BOWTIE、FMEA、MSG、SLC识别设备设施危害，SLC、JHA识别作业活动危害。如安全检查表法（SLC）按照法规标准来编制清单，对设备合规性展开系统性排查；作业危害分析法（JHA）针对具体的操作步骤，逐个识别潜在的伤害；故障类型和影响分析法（BOWTIE/FMEA）将重点置于关键设备，梳理故障模式以及后果；危险与可操作性研究（HAZOP）借助团队研讨，

剖析工艺参数偏差所带来的风险。借助HAZOP等软件工具提高辨识精准度，结合员工经验反馈构建动态识别机制，每3-5年开展专项辨识与全面辨识相融合，以此保证可及时发现新风险、新隐患，形成立体化的识别网络。

3.2 风险评估与分级标准

3.2.1 风险评估的流程与要点

评估流程依照“识别—分析—判定”的闭环模式展开。明确风险源的属性以及其影响的范围，结合工艺条件来分析事故发生的可能性，其中包括设备出现故障的概率、人员出现失误的概率等方面，还要对后果的严重程度进行评估，涉及到人员伤亡、财产遭受损失、环境受到影响等多个维度。关键之处在于依据企业的实际情况构建评估模型，对于关键装置运用定量分析方法，比如采用矩阵法（LRS）来计算风险值，而对于辅助系统则采用定性分析方式，综合专家们的意见来判定风险等级，评估工作需要进行动态更新，当工艺发生变更、设备出现老化情况时要及时重新评估，以此保证评估结果与实际的风险状态保持一致^[2]。

3.2.2 严谨明确的风险分级标准

分级运用“四色四级”体系，其中红色意味着极高风险，即有可能致使群死群伤或者引发重大环境灾难的风险，像剧毒气体出现泄漏的情况；橙色表示高风险，其有可能造成个别人员伤亡或者带来较大财产损失，例如反应釜出现超压的状况；黄色是中风险，有引发轻微伤害或者导致设备损坏的可能性，比如管道出现滴漏的现象；蓝色为低风险，仅仅可能会导致轻微影响，像防护用品缺失这种情况。分级标准要明确判定的依据，比如结合事故发生的频率以及后果等级来制定矩阵表，还要细化各个等级风险的管控责任主体，以此保证分级结果可得以执行并且可以追溯。

3.3 风险管控措施的制定与实施

管控措施依照“分级施策、精准防控”的原则来执行，具体从工程技术、管理程序、教育培训、个人防护用品（PPE）、应急处置及洋葱模型（IPL）等方面识别现有管控措施和制定风险降低管控措施。对于极高风险的情况，要马上停止生产进行整改，配备双重防控系统，联锁报警以及紧急切断装置，同时还要制定专项应急预案，面对高风险的状况，需制定技术改造方案，增添防护设施，比如防爆墙、气体检测报警仪等，强化作业许可管理^[3]。处于中风险时要定期开展检查维护工作，优化操作规程，加强对员工的培训。属于低风险则需要落实日常巡检工作，及时纠正轻微的违规行为。在实施的过程中，明确责任部门以及完成的时限，建立措施跟踪落实台账，借助现场核查、效果评估来保证管控到位有效，形成“措施制定—执行—验证—优化”的动态管理机制，持续降低风险等级。

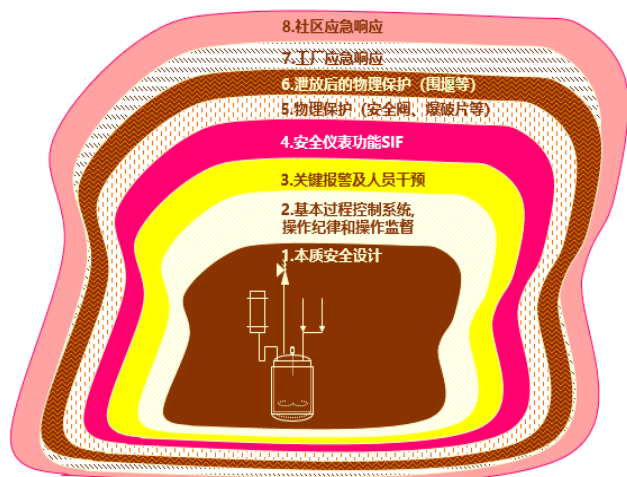


图3 工艺过程风险控制洋葱模型

4 化工企业安全风险隐患排查治理机制建设

4.1 隐患排查流程与方法

4.1.1 系统规范的隐患排查流程

隐患排查要构建一个完整的闭环流程,即“计划—实施—分析—整改—评估—改进”流程,按照风险分级的结果来制定年度排查计划,详细明确各个阶段的排查重点、负责部门以及时间节点。在实施阶段,组建专业的排查小组,依据标准清单开展现场核查工作,运用“看、闻、问、测、记”四步法,查看设备的具体状态、询问操作流程情况、检测关键参数数值、记录隐患的详细细节。排查结束后对隐患进行分级分类,分析其形成原因以及可能引发的后果,形成书面报告提交给管理层进行审议。对于确认的隐患,同时纳入治理台账,明确整改措施、资金保障以及完成时限,保证排查过程可追溯、隐患问题不会遗漏。

4.1.2 多样化的隐患排查方法

依据化工企业的风险特性,运用多层次的排查方式,如日常巡检、周隐患排查、专项隐患排查、季节检查、综合隐患排查及节假日和重大活动检查等。巡检由岗位员工依照规定频次来进行,着重检查设备的运行状况以及作业环境,专项排查针对季节性风险或者特定环节,组织技术骨干展开深入排查,综合排查每季度由安全生产管理部门负责牵头,联合生产技术、生产管理、设备等专业管理部门和主要负责人参与的全面检查。引入信息化手段,借助手持终端实时上传隐患信息,运用视频监控系统远程巡查关键区域,同时构建员工举报奖励机制,激励一线人员反馈整改隐性隐患,结合第三方专业机构的评估,形成“人机结合、全员参与”的立体排查网络,提高隐患发现的全面程度与精准程度。

4.2 隐患治理的责任体系与跟踪反馈

隐患治理采用“分级负责、一岗双责”的责任体系,企业主要负责人对重大隐患治理承担全面责任,分管领导引领落实分管领域的隐患整改工作,装置经理/负责人作为本装

置隐患治理的首要责任人,具体安排整改实施,岗位员工负责本岗位隐患的自我检查与纠正,构建隐患治理责任清单,明确从隐患识别、评估直至整改验收的整个流程的责任主体,将治理成效纳入绩效考核范畴。在跟踪反馈环节,施行“周调度、月通报”制度,对于限期内未完成整改的隐患启动预警机制,组织专题会议剖析原因并调整措施。整改完成后,由安全管理部门会同相关科室进行验收,依靠现场复核以及资料审查来确认隐患已消除,针对重大隐患治理效果开展后续评估,形成“责任落实—过程跟踪—验收销号—效果评估”的闭环管理模式,保证隐患整改达到彻底到位的效果。

5 化工企业安全风险分级管控与隐患排查双机制协同运作模式

5.1 风险分级管控与隐患排查治理的内在联系

风险分级管控以及隐患排查治理乃是化工企业安全管理的“一体两翼”,二者彼此依存、相互支撑。风险分级管控可为隐患排查给予精准导向,借助系统性辨识以及分级,明确高风险区域、关键环节以及薄弱部位,让隐患排查可以聚焦重点、做到有的放矢,防止出现盲目性以及形式化。隐患排查治理则属于风险分级管控的动态验证与深化,排查所发现的隐患可反哺风险评估体系,凭借剖析隐患成因修正风险等级划分标准,补充原本风险辨识里未覆盖的盲区。

5.2 双机制协同运作的流程与要点

双机制协同运作要求构建起“风险引领排查、排查完善管控”的闭环流程,起初要以风险分级的结果作为根基,制定有差异化的隐患排查计划,对于高风险区域实施高频次的专项排查工作,针对低风险区域则采取常规的巡检方式,排查过程中发现的隐患会马上录入管理系统,同时关联对应的风险点,分析隐患是否因为管控措施失效所导致,启动风险等级的复核工作。

6 结语

化工企业的安全生产管理工作需要依靠风险分级管控以及隐患排查这两种机制深度融合,借助全链条的风险辨识以及精准的分级管控可筑牢事故预防的第一道防线,依靠闭环隐患排查以及责任跟踪治理,可守住安全管理的最后关口,这两种机制协同运作所形成的动态优化链条,可以有效解决“重处置轻预防”的管理难题。在实践中,需要持续完善数字化共享平台,强化跨部门协同以及全员参与,借助常态化评估推动机制迭代升级。

参考文献

- [1] 贾亮. 化工企业安全风险管控和隐患排查管理探究 [J]. 当代化工研究, 2024, (10): 191-193.
- [2] 沈立彬. 化工企业安全风险管理及隐患排查管理策略 [J]. 化工管理, 2023, (05): 115-118.
- [3] 刘建兵. 化工企业安全风险管理和隐患排查管理措施 [J]. 现代盐化工, 2022, 49 (03): 106-108.

Control of residual stresses in ship structure welding and improvement of fatigue life

Guangning Nie

Shanghai COSCO Shipping Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai, 201913, China

Abstract

Residual stress in ship structure welding is a key factor affecting the stability and safety of ship structures. Its existence can significantly reduce the fatigue resistance of materials and shorten the service life of ships. The research aims to regulate residual stress and improve fatigue life through systematic strategies, in order to promote the development of green and intelligent shipbuilding. Methodologically, a multi-scale residual stress control technology system is constructed, covering optimization of welding process design, precise control of process parameters, and innovation in post weld treatment; Promote systematic collaborative optimization of welding materials and processes, including the application of low matching materials, development of new welding technologies, and dynamic adjustment of process parameters; Implement a full lifecycle health monitoring and intelligent maintenance strategy, integrating IoT, digital twin, and intelligent maintenance technologies. Systematic control strategy is the key path to achieving long service life and high reliability operation of ship structures.

Keywords

ship structure; Welding; Residual stress; Regulation

船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升

聂广宁

上海中远海运重工有限公司, 中国 · 上海 201913

摘要

船体结构焊接残余应力是影响船舶结构稳定与安全的关键因素, 其存在会显著降低材料抗疲劳性能, 缩短船舶服役周期。研究旨在通过系统化策略调控残余应力并提升疲劳寿命, 助力绿色智能造船发展。方法上, 构建多尺度残余应力调控技术体系, 涵盖焊接工艺设计优化、过程参数精准控制及焊后处理创新; 推进焊接材料与工艺的系统性协同优化, 包括低匹配材料应用、新型焊接技术开发及工艺参数动态调整; 实施全生命周期健康监测与智能维护策略, 集成物联网、数字孪生及智能维修技术。系统化调控策略是实现船舶结构长寿命、高可靠运行的关键路径。

关键词

船体结构; 焊接; 残余应力; 调控

1 引言

船体结构于复杂海洋环境里长期投入使用, 焊接残余应力身为影响结构稳定性的关键要素, 会致使材料抗疲劳性能降低, 以及可能造成裂纹萌生以及扩展, 对船舶安全构成威胁, 提高船体疲劳寿命是延长服役周期以及降低全生命周期成本的核心办法, 在这样的背景状况下, 对焊接残余应力展开系统化调控并且优化疲劳寿命管理策略, 变成推动绿色智能造船技术发展的关键所在。本文从技术体系构建、工艺协同优化及智能维护三方面展开探讨, 为提升船体结构可靠性提供理论支撑与实践路径。

【作者简介】聂广宁(1985-), 男, 中国河南开封人, 本科, 工程师, 从事船体结构、制造修理、结构焊接等研究。

2 船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升的必要性

船体结构在长时间的服役进程里承受着复杂的交变载荷、波浪冲击以及腐蚀环境, 其安全性和耐久性对于船舶的运营安全以及使用寿命有着直接的关联, 焊接是船体建造过程中最为主要的连接方式, 在焊缝以及热影响区不可避免地产生产残余应力, 这些残余应力有可能引发焊接变形以及尺寸不稳定, 还会与外部载荷叠加在一起, 使得应力集中加剧, 成为疲劳裂纹萌生和扩展的关键引发因素。

2.1 残余应力是影响结构稳定与安全的关键因素

在焊接进程当中, 局部出现不均匀的加热以及冷却状况, 使得材料产生塑性变形, 冷却结束之后便形成了复杂的残余应力场, 一般在焊缝区域呈现为高拉应力状态, 此种内应力在没有外部载荷的情形下已然存在于结构内部, 当船

舶在海上航行之时,波浪载荷跟结构自重共同作用于焊缝,残余拉应力会提升局部应力水平,加快材料屈服,引发早期开裂。在船体应力集中的区域,像是角焊缝、开孔处或者结构突变的部位,残余应力与工作应力的叠加效应更加明显,极容易引发脆性断裂或者疲劳失效,要借助焊后热处理、振动时效或者超声冲击等技术手段,有效释放或者均化残余应力,降低其对结构安全的潜在威胁,保证船体在复杂工况下的结构稳定性^[1]。

2.2 提升疲劳寿命是延长船舶服役周期的核心途径

船体结构遭受破坏大多是因为疲劳损伤,其中焊接接头大多时候是疲劳强度较为薄弱的地方,残余拉应力会降低接头的疲劳极限,使裂纹萌生寿命缩短,研究显示,当焊缝表面存在残余拉应力时,其疲劳强度有可能下降超过30%,运用锤击强化、喷丸处理或者高频机械冲击等表面强化技术,可在焊趾区域引入有益的残余压应力,有效抑制裂纹扩展,提升焊接接头的疲劳性能。优化焊接工艺来减少咬边、未熔合等初始缺陷,也可以从根源上改善疲劳行为,在高应力区域采用全熔透焊缝设计并做平滑过渡处理,降低应力集中系数,对提升关键部位的抗疲劳能力很关键。

2.3 系统化调控策略助力绿色智能造船发展

随着船舶朝着大型化、高速化以及轻量化方向不断发展,对于结构可靠性的要求也在日益提升,把残余应力调控以及疲劳寿命评估融入船舶设计和制造的整个流程当中,构建起覆盖工艺优化、过程监控直至焊后处理的系统化管理机制,这样做可提升产品质量,也可减少后期维修与返工情况的发生,降低全生命周期成本。结合数字化孪生与大数据分析技术,达成残余应力预测以及疲劳寿命仿真,为结构优化提供科学依据,推动船体制造朝着智能化、可持续的方向迈进^[2]。在这一系统化调控进程中,还注重绿色理念的深度融合。选用环保型焊接材料与低能耗焊接设备,从源头上减少能源消耗与污染物排放。同时,利用智能监控系统实时采集焊接过程中的能耗数据,精准分析并优化能源使用效率。针对焊后处理环节,研发绿色高效的残余应力消除技术,如激光冲击强化等,在提升疲劳寿命的同时降低对环境的影响。通过将绿色制造与智能调控有机结合,不仅能够满足船舶行业高质量发展的需求,更能在全球绿色航运转型浪潮中抢占先机,实现经济效益与环境效益的双赢。

3 船体结构焊接残余应力调控与疲劳寿命提升的策略

3.1 多尺度残余应力调控技术体系构建

焊接残余应力的形成属于热-力-冶金多物理场耦合作用下的复杂过程,针对其调控需要从焊接工艺设计、过程控制以及焊后处理这三个方面来构建多尺度技术体系,在工艺设计阶段的时候,借助优化焊接顺序以及拘束度控制,可有效地降低残余应力的积累,比如说,采用对称跳焊、分段退

焊等顺序策略,可打破热输入的连续性,让结构内部应力场相互抵消,对于厚板结构而言,依靠预留反变形量或者使用弹性夹具,可减少焊接过程中的刚性拘束,降低残余拉应力峰值。

焊接过程的控制重点在于对热输入参数进行精确调节,热输入量由公式 $Q = \eta UI/v$ 确定,它对焊缝以及热影响区的温度梯度有着直接的影响,倘若热输入过高,就会致使晶粒粗化,并且残余应力增大,要是热输入过低,又有可能引发未熔合等缺陷,借助构建热输入、残余应力以及组织性能之间的量化关系模型,可确定最佳的工艺窗口。一般情况下,把热输入控制在 15 至 25kJ/cm 的范围之内,同时配合适宜的层间温度,也就是 100 至 200℃,来让焊缝区的残余拉应力降低超过 30%,另外运用脉冲焊接、激光-电弧复合焊等新型热源技术,可借助缩短热作用时间或者细化熔池形态,抑制残余应力的产生。

传统的机械消除法,像是振动时效以及锤击,尽管可在一定程度上释放应力,然而却存在着处理深度受限,并且容易引发二次损伤等问题,现代的处理技术更偏向于借助材料塑性变形或者相变来诱导压应力,超声波冲击强化技术,也就是 UIT 技术,它借助高频振动撞针在焊缝表面产生微区塑性变形,可形成深度达到 1mm 的压应力层,让焊趾部位残余压应力处于 -200 至 -300MPa 之间,延缓疲劳裂纹萌生。局部热处理是依靠感应加热或者火焰加热使材料发生相变,利用马氏体向贝氏体或者珠光体的转变体积收缩,在焊缝区引入有益压应力,改善接头韧性,对于封闭舱室或者复杂结构而言,可以采用柔性加热毯或者电磁感应技术来实现精准控温,防止整体热处理带来的结构变形风险^[3]。

利用有限元分析即 FEA 来开展焊接过程仿真,可构建涉及热传导、相变潜热以及蠕变效应的多场耦合模型,精准预测不同工艺参数情形下的应力分布状况,借助参数化扫描以及敏感性分析,可迅速筛选出最优的工艺组合,以此减少物理试验的次数,比如在某大型集装箱船的建造过程当中,依靠模拟并优化焊接顺序,使得关键节点残余应力的标准差得以降低。依靠有限元分析可深入剖析不同材料在焊接时的热力耦合行为,为新型船舶材料的焊接工艺开发提供理论支撑,模拟过程中能清晰呈现焊缝及热影响区的微观组织演变,提前预判可能出现的焊接缺陷,像裂纹萌生位置、夹杂物分布等,在工艺设计阶段采取针对性措施进行规避,基于 FEA 建立的数据库可不断积累经验数据,借助机器学习算法挖掘数据价值,实现工艺参数的智能推荐,加速绿色智能造船中焊接工艺的迭代升级,提升船舶制造的质量与效率。

3.2 焊接材料与工艺的系统性协同优化

焊接材料的挑选对于接头性能以及残余应力状态有着直接的影响,传统高强钢进行焊接的时候,大多时候会选用等强匹配的材料,然而高强度的焊缝会加大结构的拘束度,使得残余应力的水平有所提高,当下的研究比较倾向于采用

低匹配或者梯度匹配的材料,借助降低焊缝强度的方式来减少拘束应力,并且利用细晶强化或者第二相强化机制来维持接头的综合性能。比如说,在EH40船用钢焊接过程中,采用低氢型药芯焊丝并配合适当的热输入控制,可让焊缝区的残余拉应力从480MPa降低到320MPa。

新型焊接材料的研发为残余应力的调控给予了全新思路,金属粉芯焊丝凭借对药芯成分加以优化,比如添加Ti、B等微合金化元素,可在焊缝当中形成细小的针状铁素体,在维持接头强度的情况下,把断裂韧性提高到120J以上,使裂纹扩展速率得到延缓,对于铝合金船体结构而言,运用ER5356焊丝并配合MIG焊工艺,借助控制Mg元素的烧损率,使其低于5%,可得到没有气孔、裂纹缺陷的优质接头,残余应力水平相较于传统焊材降低了35%。自保护药芯焊丝的应用可以省去保护气体,适应野外或者封闭舱室的焊接要求,其独特的渣系设计还可在焊缝表面形成压应力层,提高抗疲劳性能。

焊接工艺的创新是降低残余应力的关键手段,激光-电弧复合焊接技术借助高能激光束对母材给予预热,使得电弧能量密度得以提升三至五倍,于30mm厚板对接时达成单面焊双面成形的效果,焊接热输入降低为传统方法的三分之一,残余应力峰值相应降低百分之六十,搅拌摩擦焊即FSW,作为固态焊接技术,完全消除了熔化焊所存在的气孔、裂纹缺陷,其接头疲劳性能相较于MIG焊提升两至三倍,特别适用于铝合金船体结构的制造。针对曲面或者复杂结构而言,机器人协同焊接系统借帮助位混合控制,可实现0.5mm级的轨迹精度,焊接速度、电流、电压等参数需要依据材料厚度、接头形式进行动态调整,举例来说,在薄板焊接过程中,适度提高焊接速度可缩短热作用时间,减少残余应力的积累,而对于厚板,就需要采用多层多道焊,借助控制层间温度来促使氢逸出,避免冷裂纹的生成。

3.3 全生命周期健康监测与智能维护策略

船体结构出现疲劳损伤时会呈现出隐蔽性以及渐进性的特性,传统的定期检修方式很难做到精准维护,借助物联网的智能监测系统可实时收集结构应力、应变以及温度等参数,经过数据融合和特征提取,建立起残余应力松弛、裂纹萌生以及扩展的动态演化模型,光纤光栅也就是FBG传感器由于有抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,成为船体监测的理想选择。在关键节点布置分布式FBG阵列,可以达成毫米级空间分辨率的应变测量,联合雨流计数法的疲劳寿命评估模

型,可提前6至12个月预测裂纹萌生的位置,为维修决策提供数据方面的支持。

借助构建涉及几何模型、材料属性以及载荷历史等要素的虚拟船体,可实时呈现物理实体的应力状态以及损伤演化情况,数字孪生系统融合了有限元分析、机器学习算法以及实时监测数据,可针对3000个以上危险节点展开动态评估,提升结构安全性预测的准确率,一旦监测数据与数字模型的偏差超出设定阈值,系统便会自动触发预警机制,同时生成包含维修方案、成本估算以及工期预测等内容的智能报告,达成从“被动维修”至“主动预防”的转变。

对于表面裂纹而言,采用冷压强化以及自动磨粒流复合工艺,可在不拆卸结构件的情况下实现裂纹闭合以及表面强化,处理成本相较于传统焊接修补降低了40%对于深埋裂纹来说,基于相控阵超声也就是PAUT的精准定位技术,可让钻孔止裂孔径从 $\Phi 30\text{mm}$ 减小到 $\Phi 15\text{mm}$ 降低了结构强度损失。增材制造技术在维修领域的应用越来越广泛,凭借激光熔覆或者电弧增材修复裂纹,可实现近净成形加工,减少材料去除量以及热影响区范围,降低维修过程中残余应力的引入,基于断裂力学的Paris公式,结合实际载荷谱与材料S-N曲线,可以建立船体结构疲劳寿命预测模型。借助引入残余应力修正系数,一般取值在0.7-0.9之间,可更准确地反映残余应力对裂纹扩展速率的影响。

4 结语

船体结构焊接残余应力的系统化调控与疲劳寿命提升是一项涉及材料、工艺、监测与维护的综合性工程。通过构建多尺度残余应力调控技术体系、实现焊接材料与工艺的协同优化,以及建立全生命周期健康监测与智能维护策略,可显著降低结构失效风险,延长船舶服役周期。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的深度融合,船舶焊接技术将向智能化、绿色化方向加速演进,为海洋装备的高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1] 邹江平. 船体结构残余应力的形成与控制[J]. 船舶标准化工程师, 2022, 55 (04): 7-9.
- [2] 屠潭泓. 船体结构焊接变形预测与控制研究[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29 (05): 101-102.
- [3] 赵健. 影响船体焊接结构件残余应力的因素及消除方法研究[J]. 无线互联科技, 2020, 17 (01): 139-140.

Research on risk assessment and emergency treatment technology of urban gas pipeline leakage

Yakupjiang·Maitisaiyidi Xiaohui Ma

Xinjiang Hotan Xinjie Energy Co., Ltd., Hotan, Xinjiang, 848000, China

Abstract

Urban gas pipeline networks serve as critical infrastructure for energy supply, residential services, and industrial operations. However, aging pipelines, complex environmental conditions, and external damage frequently lead to gas leaks, triggering severe disasters such as fires and explosions that endanger public safety and urban infrastructure. In this context, the development of scientific risk assessment systems and efficient emergency response technologies has become imperative for the industry's sustainable growth. This study focuses on urban gas pipeline leakage incidents, systematically analyzing accident patterns globally while examining key aspects like risk classification and real-time monitoring. Through case studies from typical cities, we propose an intelligent risk management and emergency response framework leveraging IoT, big data, and AI technologies. Research findings indicate that improving risk classification models, enhancing multi-dimensional monitoring, innovating technical equipment, and optimizing emergency protocols can significantly enhance pipeline safety and emergency response capabilities, thereby strengthening urban resilience and ensuring public safety.

Keywords

urban gas pipeline network; leakage risk assessment; emergency response; dynamic monitoring; intelligent management; safety warning

城市燃气管网泄漏风险评估与应急处置技术研究

亚库普江·麦提赛伊迪 马晓辉

新疆和田新捷能源有限公司, 中国·新疆和田 848000

摘要

城市燃气管网是城市能源供应、居民生活与工业生产的关键支撑。但受管网老化、环境复杂、外力破坏等因素影响,燃气泄漏事件频发,引发火灾、爆炸等严重灾害,严重威胁公共安全与城市运行。在此背景下,科学的风险评估体系与高效的应急处置技术成为燃气行业高质量发展的必然需求。本文聚焦城市燃气管网泄漏,系统梳理国内外事故特征,剖析风险分级、动态监测等关键环节,归纳应急处置技术创新实践。结合典型城市案例,提出依托物联网、大数据、人工智能的智能化管理与应急响应体系。研究表明,完善风险分级模型、强化多维监控、创新技术装备、优化预案流程,可提升管网本质安全与应急处置能力,为城市韧性建设和公共安全提供保障。

关键词

城市燃气管网; 泄漏风险评估; 应急处置; 动态监控; 智能管理; 安全预警

1 引言

城市化浪潮下,燃气管网系统作为城市“生命线”,广泛分布于城市各区域。然而,其埋深大、覆盖广、环境复杂等特性,使管道在长期运营中面临腐蚀、第三方破坏、地质灾害等多重风险。燃气泄漏极易引发爆炸、火灾等重大事故,威胁人民生命财产与社会稳定。

因此,开展科学泄漏风险评估、建立高效应急处置体系至关重要。近年来,国内外学者虽在相关领域取得诸多进

展,但在模型科学性、监测全面性等方面仍存短板。本文聚焦城市燃气管网泄漏风险评估与应急处置技术,综合事故案例、理论研究与工程实践,从风险辨识到应急处置技术创新,提出适配智慧城市与新型城镇化的管理技术路径,为管网安全运行与应急管理提供参考。

2 城市燃气管网泄漏风险成因与事故特征

2.1 管网老化与结构性隐患

大量城市燃气管道始建于较早时期,受当时技术条件限制,部分管道采用了早期工艺,所选用材料的耐久性存在明显不足。在长期运行过程中,这些管道犹如“带病上岗”,极易出现腐蚀穿孔、接口松动、焊缝老化等一系列结构性隐患,仿佛一颗颗“定时炸弹”,随时可能引发燃气泄漏事故。

【作者简介】亚库普江·麦提赛伊迪(1997-),男,维吾尔族,中国新疆和田人,本科,助理工程师,从事燃气工程研究。

不仅如此,管道在运行中还会受到多种外力影响。管道受力变形、管基沉降,以及地震、地质变迁等自然灾害,都可能对管道造成局部损伤,使原本微小的渗漏点逐渐扩大,进一步加剧了安全风险。同时,城市燃气管道布局错综复杂,穿越道路、河流、建筑等不同区域,这给管道的修复与检测工作带来了极大困难。^[1] 隐患排查与治理周期长,使得管道健康状况难以得到及时改善,持续恶化的情况时有发生,给城市公共安全带来了严峻挑战。

2.2 外部环境与人破坏风险

在城市建设蓬勃发展的当下,市政工程、道路施工、地铁挖掘、地下管廊改造等第三方施工活动极为频繁。这些施工犹如“无形的利刃”,极易在不经意间误伤埋藏于地下的燃气管道,成为近年来燃气泄漏事故高发的关键诱因。部分区域的环境条件更是雪上加霜,地下水位波动、土壤腐蚀性**强**以及季节冻融等因素,如同“慢性毒药”,不断侵蚀管道外防护层,使其损坏加剧,进一步放大了燃气泄漏的风险。此外,施工管理存在的漏洞、信息传递的不畅以及应急协同的不足,使得一旦发生燃气泄漏事故,难以迅速有效地控制局面,往往导致事故损失不断扩大,给城市公共安全和居民生活带来严重威胁。

2.3 运行管理与监控能力不足

当前,部分燃气企业在设施管理方面存在诸多亟待解决的问题,暴露出管理体系的薄弱环节。设施资产底数不清是突出问题之一,由于信息化建设滞后,企业难以全面、准确地掌握自身设施资产状况,导致在规划、维护和更新时缺乏科学依据。同时,缺乏全生命周期资产管理和隐患档案,使得设施从规划、建设到运行、退役的全过程管理缺乏系统性和连贯性,隐患排查与治理难以形成闭环。

日常巡检手段单一,管网运行状态实时监控覆盖面有限,进一步削弱了企业的风险防控能力。特别是早期铺设的中小口径支管道、入户管线等薄弱环节,不仅可能造成燃气浪费,更会严重威胁周边居民的生命财产安全。^[2] 燃气企业必须正视这些问题,加快信息化建设,完善管理体系,提升风险防控水平。

3 城市燃气管网泄漏风险评估体系与模型构建

3.1 风险辨识与分级指标体系

科学的风险评估以系统性辨识和分级为基础,综合考虑管道材料、敷设年限、埋深、地质环境、周边建筑、管网压力、历史隐患、第三方活动强度等多维因素,构建多层次、多参数的风险指标体系。常用方法包括层次分析法、模糊综合评判、失效概率分析、贝叶斯网络等。通过指标权重分配与量化分析,对不同区域、类型、环节的管网风险进行分级,形成风险分布图,实现隐患“精准画像”。

3.2 量化风险评估模型

在燃气管网风险分级的基础上,构建量化风险模型

是精准评估风险、保障安全运行的关键举措。该模型需综合考量管道失效概率、泄漏量、扩散速度、周边人员暴露度以及潜在经济损失等多维度参数,这些参数相互关联、相互影响,共同决定了事故发生的可能性与严重程度。

为准确量化事故发生的概率和后果严重度,可采用蒙特卡洛模拟、模糊概率、事件树分析等先进方法。蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样,模拟各种可能的风险场景;模糊概率能处理不确定性信息,提高评估的准确性;事件树分析则可清晰地展示事故发展路径和可能结果^[3]。

近年来,数值模拟软件与GIS空间分析的深度融合,为风险评估带来了新的突破。二者结合能够动态预测泄漏扩散路径、危险影响半径等关键信息,为事故预防策略的制定和应急资源的合理布控提供坚实、科学的决策依据,有力推动燃气管网安全管理向精细化、智能化迈进。

3.3 动态监测与预警技术集成

在物联网、大数据、无线传感等前沿技术的深度融合下,现代燃气管网正经历着一场智能化变革。通过在管网中广泛布设压力、流量、气体浓度、温度等多维智能传感器,构建起了一张全方位、实时性的数据感知网络。这些传感器如同敏锐的“神经末梢”,能够不间断地采集管网运行的关键数据,并对异常事件进行主动识别,让潜在的安全隐患无所遁形。

基于大数据分析机器学习算法,系统搭建起了异常模式识别与泄漏智能预警平台。它就像一位经验丰富的“安全卫士”,通过对海量数据的深度挖掘和分析,精准识别出可能预示泄漏的异常模式,并及时发出预警。一旦检测到风险,平台可自动推送风险告警信息,并联动应急处置机制,迅速采取应对措施^[4]。这不仅极大地提升了泄漏发现的及时性,更使燃气管网管理迈向了科学化、智能化的新高度。

4 城市燃气管网应急处置技术与创新实践

4.1 泄漏检测与定位技术进步

燃气管道安全关乎城市能源供应与居民生活稳定,其泄漏检测技术也在不断革新。早期,主要依赖传统人工巡检与肥皂水检漏。人工巡检效率低,且易受人员经验、体力等因素影响,难以全面覆盖管网,对隐蔽泄漏点更是力不从心;肥皂水检漏虽简单直接,但仅适用于局部小范围检测,无法满足大型复杂管网的需求。

随着科技发展,多元化检测技术应运而生。高灵敏度气体检测仪能精准捕捉空气中微量燃气;新一代装备进一步提升了检测效能,移动式气体检测、无人机巡检、光纤传感等,可快速巡查大型复杂管网。此外,基于地理信息系统的泄漏溯源与路径模拟技术,能为大范围、隐蔽性强的泄漏事故应急处置提供有力技术支撑。

4.2 源控与隔离技术优化

燃气管道一旦发生泄漏,迅速控制泄漏源并隔离危险

区域是防止事故扩大、保障生命财产安全的关键。传统方式下,人工关闭阀门不仅效率低下,而且在危险环境中操作,人员面临极大安全风险。近年来,智能远程阀控系统的广泛应用带来了变革。借助先进的通信与自动化控制技术,该系统实现了远程一键关断功能,操作人员可在安全区域快速切断泄漏区段燃气供应^[5]。此外,柔性气囊封堵、应急带压堵漏等新技术的出现,进一步丰富了封堵手段。它们能适应不同管径、压力及工况下的快速封堵需求。而动态压力调控与分布式隔离技术的结合,可根据管网实际运行情况,精准调整压力分布,实现高效隔离,显著提升了复杂管网事故处置的效率和安全性。

4.3 应急救援与善后处置体系建设

城市燃气泄漏事故应急救援强调多部门联动与流程标准化。应急指挥系统依托GIS和信息化平台,整合调度燃气企业、消防、公安、医疗等资源,规范现场侦检、人员疏散、火灾扑救、医疗救护、环境修复等环节。救援队伍配备呼吸防护、检测装备、通信设备等专业工具,提升现场处置和救援效率。事故善后处置包括残余气体清理、管道维修加固、周边环境修复、受灾群众安置与心理疏导等,实现事故影响最小化和社会秩序恢复。

5 智能化管网风险管理与应急体系创新

5.1 智能平台建设与信息集成

在燃气管网管理领域,借助物联网、大数据和云平台等前沿技术,构建覆盖全市域的燃气管网风险管理与应急处置智能平台已成为必然趋势。该平台犹如一个“智慧大脑”,将实时监控、数据分析、预警推送、应急联动以及资源调度等多项功能集于一体。

通过物联网技术,大数据和云平台则负责对海量数据进行存储、处理和分析,实现管网的“全景感知”。多源信息的汇聚与可视化展示,为风险评估提供了全面、准确的数据支持,使决策分析更加科学合理。同时,借助该平台还能开展预案演练,提前发现潜在问题并加以完善。这种一体化管理模式,极大地提升了管网安全的预测性和主动防控能力,能够提前发现隐患并及时采取措施,将风险扼杀在萌芽状态,保障燃气管网的安全稳定运行。

5.2 大数据与人工智能驱动下的决策优化

依托大数据平台,可对燃气管网全生命周期的运行数据进行全面采集和深入分析。这些数据不仅包括管网本身的

运行参数,还融合了历史事故信息、风险点分布、维修记录以及环境参数等多方面内容。通过对这些数据的深度挖掘,能够实现隐患的自动识别和趋势预测,提前感知管网可能出现的问题。

人工智能技术的引入,则为应急响应提供了更强大的支持。它可以优化应急响应路径,根据实际情况快速规划出最佳救援路线;合理分配资源,确保人员、物资和设备能够在最短时间内到达现场;还能进行风险演化模拟,自动生成多情景应急预案。智能调度算法可根据现场情况动态调整资源分配,保障现场处置工作高效有序进行。这一系列举措显著提升了决策的科学性和应急响应速度,为燃气管网的安全运行提供了坚实保障。

6 结语

城市燃气管网安全管理与应急处置能力建设,是保障城市韧性与公共安全的重要基础。本文系统梳理了燃气管网泄漏风险成因、事故特征、风险评估体系、应急处置技术及智能化管理模式,提出基于智能监测与大数据分析的综合防控策略。未来,城市燃气管网需持续推进信息化、智能化、标准化建设,加强多元主体协同与政策支持,完善隐患排查、动态评估和应急预案体系,推动应急技术装备创新,实现“防—控—治—救”一体化闭环管理。唯有如此,才能切实提升城市燃气管网本质安全和突发事件应急处置能力,为现代城市安全发展和人民生命财产安全提供坚强保障。

参考文献

- [1] 陈旭东.基于人工智能优化的城市燃气管网泄漏检测与定位系统研究[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会.2025人工智能与工程管理学术交流会议论文集.徐州中石油昆仑燃气有限公司;2025:232-233.
- [2] 张刚,钟炎鑫,庄学良,等.城市燃气管网泄漏检测系统构建与实验设计[C]//《煤气与热力》杂志社有限公司.中国燃气运营与安全研讨会(第十三届)论文集(上册).平湖市天然气有限公司;2024:33-38.
- [3] 李聪,徐子烜,王雨情,等.城市燃气管网泄漏事故分析知识图谱构建及应用研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(10):5-12.
- [4] 卢新鹏,侯佩欣.城市燃气管网泄漏的智能检测应用与展望[J].低碳世界,2020,10(09):48-49.
- [5] 曹博宇.城市燃气管网泄漏诊断及应急研究[D].北京建筑大学,2018.

Design and Implementation of OLED Laser Equipment Based on CK3M Controller

Bujun Ling Pengcheng Zhu Mingfeng Yuan

Jiangsu Yawei-Lis Laser Technology co.,Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

Since 2020, the domestic display panel industry has been in a stage of rapid development, with a significant improvement in the localization level of OLED display panels, and global OLED production capacity is gradually shifting towards China. Domestic panel equipment manufacturers, such as Han's Laser, Delong Laser, Mawei Laser, and Yawei Aios, have each developed their own flagship products, leading to fierce market competition. To expand their product lines, each manufacturer must ensure that their products meet customer requirements for efficiency, stability, processing accuracy, and other production demands. The application of axis controllers has greatly improved production efficiency, equipment precision, servo stability, and product quality. This article analyzes and introduces precision laser processing equipment equipped with CK3M axis controllers, achieving high-speed and high-precision control objectives.

Keywords

CK3M, precision laser, high-speed and high-precision, stability

基于 CK3M 控制器的 OLED 激光设备的设计与实现

凌步军 朱鹏程 袁明峰

江苏亚威艾欧斯激光科技有限公司, 中国·江苏苏州 215000

摘要

2020年以来,国内显示面板行业一直处于高速发展的阶段,OLED显示面板国产化水平显著提高,全球OLED产能正逐渐向中国倾斜。国内面板设备制造厂商,如大族激光、德龙激光、迈为激光,亚威艾欧斯等,都已形成自己的主打产品,同时也形成了激烈的市场竞争,各个厂商间的产品必须满足客户的效率、稳定性、加工精度等生产要求,才能将自己的产品发展壮大。轴控制器的应用,极大的提高了生产效率、设备精度、伺服稳定性,提升了产品质量。本文对配置CK3M轴控制器的精密激光加工设备进行分析介绍,实现高速高精的控制目标。

关键词

CK3M、精密激光、高速高精、稳定性

1 OLED 行业发展概述

1.1 OLED 概念

OLED, 全称为 Organic Light-Emitting Diode (有机发光二极管), 亦被称作有机发光半导体, 是当前主流的显示屏幕技术之一。该技术利用在电流激发下能够发光的有机半导体材料, 赋予了每个像素独立发光的能力, 因此, 在智能手机、平板电脑、车载显示屏、电视等多种类型的显示设备上均得到了广泛的应用与认可。

1.2 OLED 发展历程

1979年, 一项划时代的发现由华裔科学家邓青云博士在实验室中偶然揭开——发光有机蓄电池的诞生, 这一发现标志着 OLED 产业的璀璨序幕正式拉开。随后, 在 1987 年,

柯达公司引领潮流, 推出了首款商用 OLED 双层器件, 以其超薄、深邃的黑色表现以及超快的响应速度, 充分展示了 OLED 技术的卓越性能。1997 年, 日本先锋公司开创性地将 OLED 技术应用于车载音响, 由此开启了 OLED 商用的蓬勃兴起。

进入 2002 年至 2005 年间, OLED 的应用领域迅速拓宽, 不仅涉足车载显示器、相机、手持游戏机等领域, 虽然这一时期的应用主要集中在小面板产品上, 但其潜力已初露锋芒。2013 年, LGD 与 SMD 两大巨头相继推出 55 英寸 OLED 电视, 同年, 三星也推出了首款曲面屏手机, 标志着 OLED 技术在大屏幕和移动设备上的重大突破。

2017 年, 随着 iPhone X 采用 AMOLED 屏幕, OLED 技术在手机领域的渗透率急剧攀升, 开启了新的篇章。而到了 2019 年, 三星、华为与摩托罗拉相继发布折叠屏手机, 这一创新不仅推动了手机形态的变革, 更预示着手机市场迎

【作者简介】凌步军 (1983-), 男, 中国江苏扬州人, 本科, 副高级, 从事精密加工控制研究。

来了一个崭新的折叠屏时代。

近年来，OLED 产业发展得到国内政策的明确支持。OLED 行业作为先进制造业，在国民经济中占有重要地位，因此受到国家产业政策的大力支持。目前我国在 OLED 制造领域已经有了技术突破，核心竞争力与日俱增，但是在多个细分领域尚处于被“卡脖子”的状态。因此，国家制定了一系列政策鼓励和支持 OLED 技术在材料、面板、工艺及市场应用等方面的突破和创新，尽早实现 OLED 全产业链国产化。

1.3 OLED 行业现状

目前韩国厂商凭借先发优势，在技术、产能、市场等方面占据了较大的优势。其中，三星电子刚性产能最早于 2007 年实现量产，并于 2017 年成功开始供货 iPhone X 屏幕，目前占据全球 OLED 市场的领先地位。^[1]

中国大陆厂商在 OLED 行业也在快速崛起。产能端，目前国内 AMOLED 产线仅次于韩国。其中，京东方三条（成都、绵阳、重庆）柔性 AMOLED 合计产能 144K/月（6 代线），在中小尺寸领域仅次于三星，位列全球第二。市场端，中国大陆厂商出货份额接近五成，2023 年 Q3 全球智能手机 OLED 面板出货，三星以 51.9% 份额排名第一，京东方 16.6% 紧随其后，维信诺、天马和华星光电份额分别为 10.3%、7.6%、6.6%。其中，京东方更从 2021 年开始，成功打入苹果 iPhone 供应链，和三星、LGD 一起为 iPhone 供应 OLED 屏幕。

2 OLED 激光设备设计方案

2.1 OLED 机构设计

OLED 设备机构包括上下料机构、上料单元、预对位、翻转、精对位、激光切割、下料单元、检测单元等。设备床身采用大理石制造，充分保证设备的稳定性。关键移动伺服采用直线电机控制，保证伺服本身的高精度。设备上采用大量视觉定位系统，抓取面板上的定位 Mark 点，减小激光切割的偏移。^[2]图 1 所示，为 OLED 模组设备结构设计示意图。

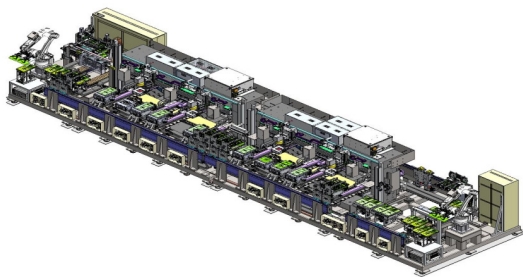


图 1 机械设计示意图

2.2 OLED 控制系统设计

整机控制系统采用 PC + CK3M 控制器的控制方案，多个 CK3M 控制器分别控制上料段、切割段、下料段、检测段。伺服驱动器分为模拟量和总线控制方式，直线电机全部采用模拟量控制，Z 轴旋转电机采用总线控制。模拟量伺服接

至 CK3W-AX1515N 的 AMP 端口和 ENC 端口，限位传感器信号接至 CK3W-AX1515N，采用全闭环方式由 CK3M 控制伺服运动。总线伺服直接通过网线连接到 CK3M 控制器的 EtherCAT 端口。直线电机采用雅科贝思品牌动定子，伺服驱动器选用三菱 J4-A 系列。光栅尺选用 RENISHAW Tonic 系列，高稳定性镀金钢带，带聚合物保护涂层，配有自粘背衬胶带，刻度间距 20μm，线性度 ±3μm/m。设备配备 UPS 不间断电源，防止激光器及伺服突发断电问题，保证设备断电后能正常停机。整机控制系统配备安全回路设计，由安全 PLC 控制，安全 PLC 通常都有两个处理器，通常处理器是由两个不同厂家进行提供，同时进行解码和执行。^[3]安全 PLC 的诊断和检测比常规的 PLC 的检测要多很多，所以相对来说硬件和软件的设计更复杂，检测和诊断的范围也更广泛，更细致。图 2 所示为 PC 与 CK3M 控制器构成的控制系统基础框架。

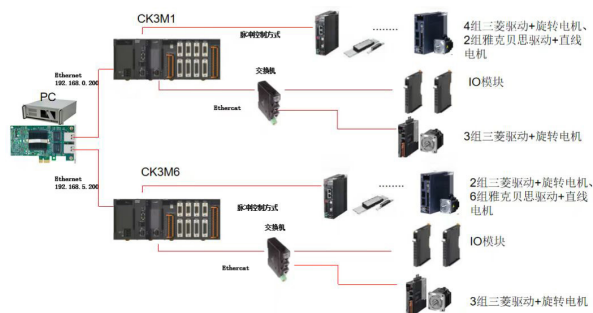


图 2 PC & CK3M 控制器方案基础框架

2.2.1 CK3M 控制器介绍

CK3M 控制器，作为一款专为超高速响应精密直线电机驱动控制、纳米级定位控制等核心设备量身打造的强大运动控制利器，其出身于半导体制造装置领域，并因此收获了客户的一致赞誉。这款控制器以其紧凑的外壳设计，巧妙融合了 Programmable Multi Axis Controller 的卓越运动控制性能，同时兼容多家厂商产品，并赋予了欧姆龙新一代运动控制器以极高的开发自由度。

CK3M 凭借其独特优势，能够助力客户设备突破重重限制，充分释放其高性能潜力。请参考图 3，该图详细展示了 CK3M 系统的标准配置。

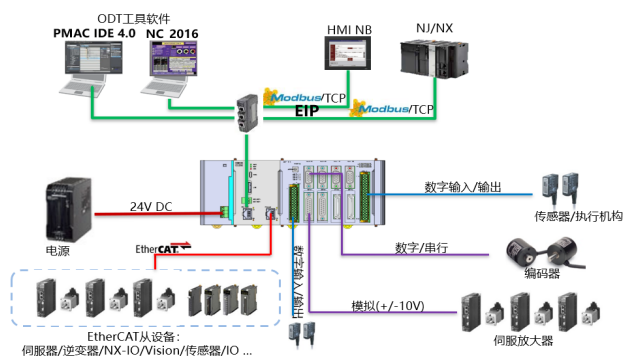


图 3 CK3M 系统标准配置

2.2.2 CK3M 控制器主要特点

①凭借超高速同步控制及高速伺服循环实现高精度的轨迹控制

CK3M 控制器以其卓越的高精度轨迹控制技术，引领着精密加工领域的新潮流。它凭借超高速同步控制与高速伺服循环的完美结合，实现了前所未有的运动控制精度。具体而言，CK3M 控制器能够达成伺服循环 50 μ s/5 轴的顶尖水平。

通过超高速反馈机制，CK3M 能够迅速接收并处理来自系统的反馈值，随后在指令值中做出精准修正，从而确保实际运动轨迹与设计值高度吻合。

②高扩展性

CK3M 控制器以其卓越的高扩展性，为用户提供了广泛的选择与灵活的配置。它全面支持高性能光栅尺、磁栅尺等精密测量设备，同时兼容 A/B 相信号及串行接口 (I/F)，确保在采用高性能光栅尺时，能够实现超高精度的定位控制。这一特性使得 CK3M 在精密制造与定位控制领域展现出无与伦比的优势。

不仅如此，CK3M 控制器还兼容多种驱动器控制方式，包括基于模拟指令的传统控制、DirectPwm (直接脉宽调制) 以及先进的 EtherCAT 总线通讯等。通过 CK3M 的精准控制，这些电机能够执行复杂而精细的机械动作，满足各种高精度加工与定位需求。

③高自由度

CK3M 控制器搭载了高自由度的 Programmable Multi Axis Controller (可编程多轴控制器) 架构，为客户提供了广阔的创意空间与定制可能。借助这一架构，客户不仅能够自由创建并实现自己的独特算法，还能将各种创新想法转化为现实。

为了满足客户在算法开发方面的多样化需求，CK3M 支持多种编程语言，包括强大的 C 语言以及专为可编程多轴控制器设计的 G 代码等。

更进一步的是，CK3M 允许客户在控制器内部添加自己编写的伺服算法。这一特性使得客户能够针对各种不同类型的机构进行深度优化控制，从而进一步提升设备的性能与精度。无论是复杂的机械结构还是高精度的定位需求，CK3M 都能通过客户自定义的伺服算法实现精准而高效的控制。

④丰富的功能选择

CK3M 控制器集多种核心功能于一身，为用户提供了全面的控制解决方案。这些功能包括但不限于运动学正逆解、位置比较 PS0、龙门交叉解耦、前瞻功能、振动抑制、

补偿表功能以及 PWM 控制等。每一项功能都是 CK3M 控制器强大性能的体现，它们共同协作，能够轻松应对各种复杂场景下的控制需求。

此外，CK3M 控制器的前瞻功能能够预测并提前调整设备的运动轨迹，从而有效避免振动和冲击；振动抑制功能则进一步增强了设备的稳定性和耐用性；补偿表功能则允许用户根据实际需求对设备的控制参数进行微调，以实现更高的精度和性能。而 PWM 控制功能则为用户提供了灵活的电机控制方案，使得设备能够根据不同负载和工况进行自适应调整。

3 设计成果

经过全面的项目研发测试及客户试用验证，我们基于轴控制器的精密激光切割设备已成功达到客户量产标准。该设备整体尺寸约为长 15 米、宽 3.5 米、高 3 米，支持 AGV 自动上料或手动投放 Tray 盘两种方式，下料同样灵活，可通过 AGV 或手动方式取出至 Tray 盘。在高速运行状态下，设备能够稳定满足客户 4.5 秒的生产节拍要求，切割精度控制在 $\pm 30\mu$ m 以内，产品良率超过 99%，稼动率更是高达 96% 以上。此外，直线电机的最高速度可达 2.5 米/秒，伺服移动定位精度保持在 5 μ m 以内，重复移动定位精度更是精确至 2 μ m 以内。

这款 OLED 精密激光切割设备，凭借其高水平的自动化控制能力，能够精准完成 OLED 模组的切割、打孔、倒角、减膜等多道工序，成为手机、穿戴设备、车载显示屏生产线上的关键设备。^[4] 针对此类精密激光切割设备的控制系统需求，我们特别设计了一套控制方案，该方案不仅满足了整机控制系统对实时性、高稳定性、高响应性、高精度及高效率的严苛要求，还具备模块化设计、灵活开放的显著特点，为后续其他精密设备的拓展应用与升级提供了坚实的技术支撑与广阔的可能性。^[5]

参考文献

- [1] 徐征,宋丹丹,赵谔玲,等.OLED、柔性、透明化显示技术及有机发光材料的发展和挑战[J].现代显示,2009(6):5-10.
- [2] 金成龙,李青.OLED显示技术概要及应用领域的发展趋势[J].数字技术与应用,2020,38(8):216-219.
- [3] 佚名.欧姆龙:可编程多轴控制器CK3M系列[J].今日制造与升级,2018(8):59.
- [4] 常爱珍 朱创.浅谈OLED屏幕在汽车上的应用[J].汽车电器,2023(5):51-52+55.
- [5] 中信证券.OLED:产业爆发在即上游设备率先受益[J].股市动态分析,2017(17):46.

Research on intelligent monitoring and compensation technology of tool wear in CNC machining process

Renjie Chen

Tacheng District Wusu Vocational and Technical School, Wusu, Xinjiang, 833000, China

Abstract

With the advancement of intelligent manufacturing, CNC machining technology has been widely adopted in industrial production. Tool wear significantly impacts processing accuracy, efficiency, and cost. This paper systematically analyzes the mechanisms, types, and characteristics of tool wear during CNC machining, exploring its effects on processing quality and production efficiency. Based on this research, we propose intelligent monitoring methods and compensation techniques for tool wear, including dynamic adjustment of machining parameters, tool path and compensation correction, online compensation through adaptive control systems, and digital twin optimization. The study aims to provide references for advancing intelligent development in CNC machining, offering theoretical support and technical guidance for CNC machining education and intelligent manufacturing practices in vocational colleges.

Keywords

CNC machining; tool wear; intelligent monitoring; compensation technology

数控加工过程中刀具磨损的智能监测与补偿技术研究

陈人杰

塔城地区乌苏职业技术学校, 中国·新疆 乌苏 833000

摘要

随着智能制造的发展, 数控加工技术在工业生产中应用广泛, 而刀具磨损对加工精度、效率及成本具有重要影响。本文针对数控加工过程中刀具磨损问题, 系统分析了刀具磨损的机理、类型及特征, 探讨其对加工质量和生产效率的影响。在此基础上, 提出了刀具磨损的智能监测方法与智能补偿技术路径, 如加工参数动态调整、刀具轨迹与刀补修正、自适应控制系统在线补偿以及数字孪生优化方法。旨在推动数控加工的智能化发展提供参考与借鉴, 为中职数控加工教学与智能制造实践提供理论支持和技术参考。

关键词

数控加工; 刀具磨损; 智能监测; 补偿技术

1 引言

数控加工技术作为现代制造业的核心支撑, 在智能制造体系中具有举足轻重的地位。然而, 在加工过程中, 刀具作为关键工艺环节的直接执行者, 其磨损状态不仅影响加工精度和表面质量, 还关系到生产效率与成本控制。传统的刀具磨损监测方式主要依赖人工经验和定期检测, 存在精度低、滞后性强和干预频繁等问题, 难以满足智能制造环境下对高效率与高可靠性的要求^[1]。近年来, 随着传感器技术、大数据分析、人工智能和数字孪生等新兴技术的发展, 刀具磨损的智能监测与补偿逐渐成为研究热点, 值得深入进行探究。

【作者简介】陈人杰(1996-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 助理讲师, 从事数控加工工艺优化, 数控机床装调维修与技术改造研究。

2 刀具磨损的机理与特征分析

2.1 刀具磨损的主要类型及表现形式

数控加工中刀具处于高温高压和高速的强摩擦环境, 磨损类型多样而复杂, 主要磨损形式有后刀面磨损、前刀面沟蚀、粘结磨损与崩刃等。

①背面磨损: 是刀具与工件已加工表面长期摩擦所致, 其典型特征是在刀具后刀面形成均匀的磨损带。背面磨损虽发生较为缓慢, 但一旦超过允许宽度, 便会直接导致工件尺寸精度下降, 是衡量刀具寿命的重要指标。

②前刀面的坑蚀: 主要是由于切屑对刀具面的相对高速剧烈切削和化学扩散作用造成的, 造成前刀面产生凹坑, 改变切削刃的几何形状, 增大切削力, 加剧后续磨损。

③粘结磨损: 在低速切削或者难加工材料切削中比较常见; 切削温度高会导致工件材料与刀具的黏附、积屑瘤形成, 切削刃轮廓因此不稳定, 进而导致被加工面粗糙度变差

以及周期性剥落从而造成加工误差增大。

④崩刃和裂纹失效：是刀具失效较常见的形式；由于刀具在切削过程交变应力和热冲击，导致刀尖部位的微裂纹发生发展而导致局部缺口直至刀具完全断裂。此类失效较为突发，对加工操作安全的影响较大^[2]。

综上所述，一般情况下刀具磨损表现为单一机理与多种机理叠加的现象，比如背面磨损与坑蚀并存、粘附磨损与崩刃并存。故对于磨损机理与表现的认知体系，为实现智能监测与补偿提供了基础。

2.2 刀具磨损对加工质量与效率的影响

刀具磨损不仅是刀具自身性能退化的表现，更直接决定了加工质量、生产效率及制造成本。其影响可从以下几个方面展开。

①直接影响加工精度和表面质量。刀具切削刃位置的偏移以及坑蚀与积屑瘤现象使得工件尺寸慢慢出现超差；表面粗糙度增加甚至会形成条痕、划伤、烧蚀或完全失去零件装配功能和寿命。

②对被加工件加工过程稳定的影响。刀具的磨损导致切削力增大，刀具对机床系统的载荷波动增大，容易引起颤振和工艺系统不稳定。容易导致加工件精度降低及刀具的突然折断等影响设备安全的问题发生。

③刀具破损加大能耗和成本。刀具破损导致的切削力增大，增大主轴功率，加速机床各部分磨损，缩短机床寿命，加大刀片更换次数，增加停机时间和刀片损耗；若破损检测不及时，会导致整批报废品，造成巨大损失。

因此，研究切削过程中刀具磨损规律并设计出可靠的切削刀具磨损动态监测和补偿方法，是提高加工稳定性并建立智能制造体系必不可少的措施。

3 刀具磨损的智能监测方法研究

3.1 基于传感器的实时监测技术

基于传感器检测技术是通过加工过程产生的力、振动、声发射、温度等加工参数物理信号进行检测，分析其与刀具磨损状态间的相互关系，从而对刀具磨损进行监测及判断的技术手段^[3]。

①在磨损状态下获取切削力信号：磨损状态下刀具的切削力的均值与波动范围均逐渐增大，利用高精度动力试验台测试三向切削力，并配合频谱与特征参数提取等，较为客观地得到刀具的磨损状态。

②切削振动信号可以体现刀具与被切削件的互作用关系。刀具磨损使切削系统刚度、阻尼参数发生改变，导致振动频谱中产生特征频率成分，通过加速度传感器测振并用时频域分析技术、小波包分解等技术可以得出刀具磨损识别。

③在刀具微裂纹以及崩刃的早期检测上，声发射信号作为一种高灵敏度的非接触式监测手段也有突出优势。在切削过程中，由于刀具与工件材料发生塑性变形和摩擦，从而

导致产生一种频率高，幅值、频率和能量分布有较大变化的声发射信号，可以用其幅值、频率和能量分布变化规律来实现磨损的早期预警。

④温度信号监测。刀具切削区的刀具、切屑和工件相互摩擦会造成切削温度升高，温升速度与磨损程度有关。利用红外或热电偶测温间接测量刀具的切削区温度，可以间接表征磨损程度^[4]。

3.2 基于图像处理与机器视觉的刀具磨损检测

图像和计算机视觉技术是通过刀具图像的获取与分析来实现刀具表面磨损特征识别的，具有直观、非接触以及可视的优点。刀具在线监测应用较为广泛的形式是对刀具换刀或换期停机时的检测，主要通过使用工业相机或显微镜对刃口进行高清拍摄，以图像分析的形式对磨损特征部位进行分析，利用边缘检测、轮廓特征识别和纹理特征分析，对刀具磨损带宽度、坑蚀面积和裂纹分布等几何特征参数进行提取，近期提出的深度学习技术在刀具图像分类和识别上已实现了90%以上的精度和鲁棒性，可以用于对不同磨损失效类型进行自动判断及分级。

3.3 基于人工智能与大数据的刀具磨损建模与预测

基于人工智能与大数据的建模预测方法是刀具磨损监测研究领域的发展趋势。主要思路是构建大量的加工过程数据，在人工智能机器学习或深度学习算法下建立磨损状态与多源信号间的非线性映射关系，完成对刀具磨损状态的分类、回归以及寿命预测。在应用过程中，常用的有SVM、随机森林、极限学习机（简称ELM）等机器学习算法。将切削力、振动、声发射等信号的特征参数输入建模，可以直接实现对磨损量的识别。近年来，随着深度学习算法的兴起，如卷积神经网络（简称CNN）、长短时记忆网络（简称LSTM），这些深度学习算法对高维时序信号的处理能力很强，可以直接建模与预测磨损的动态演化过程，实现刀具剩余寿命（简称RUL）估计。

3.4 多信息融合的综合监测方法

近年来学界以及工业界逐步开始重视多信息融合的综合监测方法，即对各个传感器数据、图像信息以及预测模型等信息进行融合以达到对刀具磨损更为全面、更为准确的判定。实际运用上可以先采用信号层融合方式，即将各个传感器采集的力、振动、声发射等信号进行结合以得到更为综合的有代表性的特征；也可以采用特征层融合方式，对主成分分析（PCA）、独立成分分析（ICA）或者深度特征学习等进行融合以完成不同的信号来源的特征的降维和特征的融合。

4 刀具磨损的智能补偿技术路径

当前主要补偿技术路径包括基于加工参数动态调整、刀具轨迹与刀补修正、结合自适应控制的在线补偿以及基于数字孪生的优化管理。

4.1 基于加工参数动态调整的补偿策略

刀补便是最为简单的加工参数动态调整式刀具磨损补偿。其基本原理是利用测量切削力、振动、切削温度等磨损判别表征信号,实时修正切削速度、进给量、切削深度等参数,以降低磨损对加工精度带来的影响。

首先,通过采集实时的加工信号由人工智能或者基于数据的模型估计刀具磨损状态,并根据估计的磨损状态及时改变切削速度,例如铣削过程中,刀具磨损增加使得切削力增加时,降低铣削进给速度以减少铣削过程中的摩擦、减缓热量的堆积以提升刀具的使用寿命^[5]。

其次,对于深孔加工或硬质材料加工,可以通过改变吃刀量或断屑加工的方式,分次切削降低磨损率。如孔加工时,若检测到刀尖磨损加大,可以减小每次吃刀,分次加工,保证孔径加工精度的同时降低刀具负担。

最后,不停车换刀的连续生产战略,该方法不需要停机换刀,可以在生产过程中连续进行,但对检测精度、反馈响应速度要求比较严格,并且需要建立完善的加工参数—磨损的模型来确保换刀决策的科学性与安全性。

4.2 基于刀具轨迹与刀补修正的智能补偿

刀具轨迹与刀补修正技术通过修改数控程序或刀具路径,直接补偿磨损引起的几何偏差。传感系统或图像系统得到刀具的磨损信息,进行磨损量对应于刀具刃口偏移量和刀尖形貌变化量计算。磨损量经偏移量-刀补值转化,直接修正到数控机床的刀具偏移表或刀路规划上。

例如在加工平面或者曲面的零件中,通过检测刀具刃口的磨损后,可以根据磨损宽度和深度对刀具轨迹进行补偿,从而达到加工尺寸和设计尺寸相符。主要针对公差要求非常高的高精度零件,比如在加工航空航天零件、模具型腔时,对零件的表面精度要求非常高,此时就可以通过刀补修正将加工所产生的公差偏差进一步减小。此外,还可以根据加工工艺直接离线进行仿真加工时,提前将刀具磨损所产生的刀具轨迹偏移量计算出来,通过提前完成补偿,能够实现工件的加工补偿,从而提高加工的效率 and 精度。优点就是补偿精度较高,可以比较直接地应用在目前常用的数控系统上,但是对刀具磨损的检测精度、刀具加工程序计算能力、数控系统在刀具补偿时的响应速度要求比较高。

4.3 结合自适应控制系统的在线补偿方法

自适应控制系统通过建立加工过程闭环反馈机制,实现刀具磨损的实时补偿。由传感器实时测量切削力、振动、温度等多源信息,并对数据处理算法作出刀具磨损状态判定,再由控制器作出相应的实时反馈而自动调整切削参数或刀具走刀路线的实时补偿,即在线补偿。例如数控铣削过程

中,若实时检测发现切削力增加则说明刀具磨损或刀具刃口崩刀,此时系统可以自动调整进给量、切削深度或执行刀补修正,从而不会影响加工精度。

采用适应性控制方法实现了闭环过程的动态监测,能够及时响应突发磨损和突发工艺异常,但对硬件传感器精度、硬件数据处理能力和控制算法的鲁棒性等条件要求较高,需统筹兼顾系统稳定性和安全性。

4.4 基于数字孪生的刀具磨损补偿与优化

数字孪生技术通过建立加工对象与刀具的虚拟模型,实现磨损状态的预测、仿真和优化补偿。第一,对加工过程中获取的加工过程数据(切削力、振动、刀温、磨损图像等)进行在虚拟环境中的刀具和工件的动态还原和刀具磨损三维动态可视化,同时,结合数控机床的动态仿真,可预测刀具磨损对加工质量的影响结果并输出最佳刀补参数和最佳加工策略。例如,在曲面零件加工中,通过数字孪生预测刀具磨损引起表面的尺寸误差,调整刀具的轨迹路径或切削参数,从而使最终的零件符合设计要求的精度公差等。

其次,通过数字孪生对刀具寿命进行预测和维修维护,完成刀具的全生命周期管理。数字孪生方法能进行预测、可视和最优管理,但虚拟模型必须建立高精度模型,同时保持完整和实时的传感数据采集,消耗较大的技术投入和计算资源。

5 结语

随着智能制造的快速发展,数控加工技术在工业生产中扮演着越来越重要的角色,而刀具磨损作为影响加工精度、效率和成本的关键因素,成为中职数控教学 and 实际生产中亟需解决的问题。未来,应进一步推进传感器技术、人工智能、数字孪生等多领域技术的融合应用,构建高效、智能的刀具管理体系,为智能制造环境下的数控加工教学与生产提供可靠保障。

参考文献

- [1] 张维. 刀具磨损监测技术在数控铣床加工中的应用分析[J]. 中国机械, 2025, (14): 46-48+52.
- [2] 钟勇. 汽车零部件数控加工中刀具磨损监测及补偿技术[J]. 汽车知识, 2025, 25(03): 71-73.
- [3] 祝清伟. 高速数控铣削中刀具磨损对加工精度的影响研究[J]. 中国机械, 2024, (35): 48-51.
- [4] 潘峰. 复杂曲面加工下高速数控铣削刀具磨损故障检测[J]. 装备制造技术, 2024, (06): 129-131+145.
- [5] 王剑敏. 数据驱动的复杂结构件数控加工刀具磨损预测方法[D]. 南京航空航天大学, 2022.