

工业机械设备设施防腐涂装工艺优化及防护效果研究

杨海

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026080006

摘 要 : 工业机械设备设施的腐蚀问题严重影响其服役寿命、运行安全性及生产成本,防腐涂装是最经济有效的防护手段之一。本文针对现有工业机械设备防腐涂装工艺中存在的涂装前处理不规范、涂料体系选型与配套性差、施工过程控制不严及质量检测体系不完善等问题,从涂装前处理、涂料体系与涂层结构、施工与固化参数、质量检测与过程控制四个核心环节,设计了系统性的工艺优化方案。通过以 Q235 碳钢为基体的对比实验,采用中性盐雾试验、物理力学性能测试、电化学性能测试及微观形貌分析等方法,对优化前后的涂装防护效果进行验证。实验结果表明,优化后的防腐涂装工艺可显著提升涂层的耐腐蚀性、附着力、硬度及耐磨性,降低腐蚀电流密度、提高涂层致密性,1000h 中性盐雾试验后涂层腐蚀面积占比不足 5%,防护效果大幅优于传统工艺。本文研究可为工业机械设备设施防腐涂装工艺的工程应用与优化升级提供理论依据和实践参考。

关 键 词 : 工业机械设备;防腐涂装;工艺优化;涂装前处理

Research on Optimization of Anti corrosion Coating Process and Protection Effect for Industrial Machinery and Equipment Facilities

Yang Hai

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : The corrosion problem of industrial machinery and equipment facilities seriously affects their service life, operational safety, and production costs. Anti corrosion coating is one of the most economical and effective protective measures. This article addresses the problems of non-standard pre-treatment, poor selection and compatibility of coating systems, lax construction process control, and incomplete quality inspection systems in the existing anti-corrosion coating process for industrial machinery and equipment. A systematic process optimization plan is designed from four core links: pre-treatment, coating system and structure, construction and curing parameters, quality inspection and process control. Through comparative experiments using Q235 carbon steel as the substrate, neutral salt spray test, physical and mechanical performance testing, electrochemical performance testing, and microstructure analysis were used to verify the coating protection effect before and after optimization. The experimental results show that the optimized anti-corrosion coating process can significantly improve the corrosion resistance, adhesion, hardness, and wear resistance of the coating, reduce the corrosion current density, and improve the coating density. After 1000 hours of neutral salt spray test, the corrosion area of the coating accounted for less than 5%, and the protective effect was significantly better than traditional processes. This study can provide theoretical basis and practical reference for the engineering application and optimization upgrade of anti-corrosion coating technology for industrial machinery and equipment facilities.

Keywords : industrial machinery and equipment; anti corrosion coating; process optimization; pretreatment before painting

引言

多数工业机械设备长期服役于复杂恶劣的环境中,面临着大气、水汽、酸碱盐介质、机械摩擦等多重因素的侵蚀,金属基体易发生腐蚀失效,表现为表面锈蚀、涂层脱落、结构破损等现象,不仅会缩短设备服役寿命、增加设备维修与更换成本,严重时还会引发设备故障、生产中断,甚至造成安全事故,带来巨大的经济损失和安全隐患。近年来,国内外学者针对工业防腐涂装技术开展了大量研究,在新型防腐涂料研发、涂装工艺改进等方面取得了一定进展,但现有研究多侧重于单一环节的优化或实验室层面的性能验证,缺乏结合

工业生产实际工况，对涂装全流程（前处理、涂料选型、施工、固化、检测）的系统性优化研究，且对优化工艺的实际防护效果缺乏全面、系统的实验验证，导致研究成果难以有效转化为工程应用，无法从根本上解决工业机械设备的腐蚀难题。基于此，本文针对现有工业机械设备防腐涂装工艺存在的核心问题，结合工业生产实际工况，开展防腐涂装工艺的系统性优化研究，设计科学合理的优化方案，涵盖涂装前处理、涂料体系与涂层结构、施工与固化参数、质量检测与过程控制四个核心环节。通过实验室对比实验，从耐腐蚀性、物理力学性能、电化学性能等方面，全面评价优化工艺的防护效果，验证优化方案的有效性和可行性，旨在解决传统涂装工艺存在的痛点，提升工业机械设备防腐涂装质量和防护水平，延长设备服役寿命，降低生产成本，为工业机械设备设施防腐涂装工艺的工程应用与优化升级提供理论依据和实践参考。

一、现有防腐涂装工艺问题剖析

（一）涂装前处理工艺存在的问题

现有大部分的防腐涂料侧重实验室研制，重视材料的性能，未注重与工程实际情况和现场施工的适应性^[1]。涂装前处理是防腐涂装的基础，核心是去除设备基体表面油污、铁锈等杂质，形成洁净粗糙表面，其质量直接决定涂层附着力和防护效果^[2]。当前多数企业前处理工艺存在诸多不规范问题，除油不彻底，传统除油方式易留油污或除油剂，导致涂层起泡、脱落，破坏涂层连续性；除锈不达标，人工打磨效率低、质量不均，喷砂除锈参数不当，影响涂层与基体结合强度；钝化处理缺失或不规范，部分企业省略该环节或工艺参数不合理，钝化膜防护效果差，且工件前处理后放置过久易再次氧化，导致前处理失效，影响涂层质量。

（二）涂料体系选择与配套性问题

涂料体系的选择及配套性是防腐涂装效果的核心，不同工况的机械设备对涂料耐腐蚀性、耐磨性、耐高温性等要求不同，选型不合理或配套性差会降低涂层防护性能、缩短使用寿命^[3]。当前主要存在三大问题，涂料选型与工况不匹配，部分企业未充分考虑设备服役环境（如腐蚀介质、温湿度、机械载荷等），盲目选用通用型涂料，无法满足实际需求，如化工设备用普通醇酸涂料会快速老化脱落，高温设备用不耐温涂料会软化粉化。涂料配套性差，多涂层体系中，企业为降本选用不同厂家、类型涂料，或底漆与面漆干燥、固化条件不匹配，导致层间附着力差、剥离、开裂、起泡^[4]。涂料质量参差不齐，部分企业选用不合格涂料，涂层致密性差、孔隙率高，易引发设备腐蚀，且耐老化、耐磨性差，缩短服役寿命。

（三）施工工艺与过程控制问题

施工工艺与过程控制是防腐涂装质量的关键，施工参数控制不当会直接影响涂层性能与防护效果，当前主要存在四大问题。涂层厚度不均，人工涂刷操作不规范、喷涂参数控制不当，导致厚度偏差大，无法达到设计要求。施工环境控制不严，缺乏防尘、防潮、控温设备，温度、湿度、粉尘等因素引发涂层开裂、起泡、表面有颗粒等缺陷。干燥与固化参数不合理，为赶进度缩短干燥时间、固化温湿度控制不当，导致涂层起泡、硬度不足、老化加速等问题。施工人员操作不规范，缺乏专业培训，涂刷顺序、喷涂角度等不当，出现流挂、漏涂等缺陷，降低防护效果。

二、防腐涂装工艺优化方案设计

（一）涂装前处理工艺优化

针对现有涂装前处理除油不彻底、除锈不达标、钝化不规范等问题，结合工业生产实际，从三大核心环节优化，保障前处理质量，为后续涂装筑牢基础^[5]。除油采用碱洗 + 水洗 + 溶剂复洗复合工艺，替代传统单一方式，控制碱洗温度60~80℃、时间15~20min，清水冲洗后用环保有机溶剂复洗，确保无油污残留。除锈根据基体材质和锈蚀程度选方式，喷砂除锈需达Sa2.5级以上，手工除锈达St3级以上，喷砂参数优化后确保除锈彻底且表面粗糙度达标，手工打磨后吹净灰尘，立即进入钝化环节。钝化采用环保磷酸锌钝化剂替代铬酸盐，控制浓度5%~8%、温度40~50℃、时间5~8min，冲洗后80~100℃烘干10~15min。同时严控前处理后工件放置时间不超过2h，超时需重新处理。

（二）涂料体系与涂层结构优化

结合机械设备服役工况，优化涂料体系选型、完善涂层结构，可保障涂料适用性与配套性，提升涂层防护性能^[6]。涂料选型需按服役环境分类：普通大气环境采用环氧富锌底漆 + 环氧云铁中涂 + 聚氨酯面漆，实现长效防腐；化工、冶金等强腐蚀环境选用环氧玻璃鳞片底中涂 + 氟碳面漆，阻挡腐蚀介质渗透；高温（>150℃）环境采用有机硅耐高温底面漆，保障高温下性能稳定。同时选用符合国标、口碑良好的涂料，确保各项指标达标。涂层结构优化需合理分配厚度，底漆60~80μm、中涂80~100μm、面漆40~60μm，总厚度180~240μm，可按工况调整。选用同一厂家配套涂料，严控涂刷间隔，确保前一层完全干燥固化后再涂下一层，避免层间剥离、起泡、开裂等问题。

（三）施工与固化工艺参数优化

为解决施工工艺与过程控制问题，优化施工方式、环境及固化参数，规范操作，保障涂装质量稳定^[7]。施工方式结合工件结构尺寸选择，大面积平整表面采用喷涂，参数控制为喷枪压力0.3~0.5MPa、距离200~300mm、速度30~50cm/s、角度90°，涂层厚度偏差±10μm内；小型复杂结构采用刷/滚涂，遵循“先上后下、先左后右、先难后易”原则，用测厚仪实时检测并及时调整。施工环境搭建专用车间，控温15~35℃、湿度≤60%、粉尘≤10mg/m³，禁止恶劣天气露天施工并保持通风。固化参数按涂料类型优化，确保完全固化。同时加强施工人员专业培训，涵盖涂料

性能、工艺参数等内容,考核合格后方可上岗,减少人为影响。

（四）质量检测与过程控制体系优化

为确保涂装质量达标,需建立完善的质量检测与过程控制体系,对涂装全流程严格监控^[9]。前处理需按标准抽样检测,除油采用水膜法(5min 水膜不破裂脱落),除锈采用目视法与粗糙度仪($Ra_{40\sim 80}\mu m$,无杂质),钝化采用盐雾试验(5%NaCl 溶液浸泡24h 无锈蚀变色),不合格工件需重新处理。施工过程中,涂层厚度用测厚仪逐点检测(每平方米 ≥ 5 点),涂刷质量目视检查无漏涂、流挂等缺陷,每2h 检测一次施工环境。涂层固化后检测附着力(划格无脱落)、耐腐蚀性(中性盐雾试验1000h 无异常)及物理力学性能,确保符合设计要求。同时建立全过程台账实现可追溯,成立质量控制小组优化工艺,建立质量反馈机制,分析不合格原因并采取改进措施,避免同类问题重复发生。

三、优化工艺的防护效果实验与评价

（一）实验设计与试样制备

实验旨在通过实验室加速腐蚀、物理力学性能、电化学性能测试及微观形貌分析,对比优化前后防腐涂装工艺的防护效果,验证优化方案有效性,为工业应用提供实验依据^[9]。试样以工业常用 Q235 碳钢为基体,尺寸100mm $\times$ 50mm $\times$ 5mm,分两组制备:对照组采用传统涂装工艺,实验组采用优化后工艺。试样制备流程为基体打磨→除油→除锈→钝化→烘干→底漆涂刷→固化→中涂涂刷→固化→面漆涂刷→固化,严格控制参数,确保两组涂层总厚度一致($200\pm 10\mu m$),经目视检查无漏涂、流挂等缺陷后用于实验。实验仪器包括盐雾试验箱、划格试验仪、电化学工作站、SEM 等;试剂有5%NaCl 溶液、碱性除油剂、钝化剂及各类涂漆,均符合国家标准。

（二）实验室加速腐蚀试验与效果分析

采用中性盐雾试验(NSS)对两组试样进行加速腐蚀试验,按照 GB/T 10125-2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》标准执行,试验条件:盐雾浓度5%NaCl 溶液,溶液温度35℃,盐雾沉降量1~2mL/(h $\cdot$ cm²),试验时间1000h。试验过程中,每24h 观察一次试样表面状态,记录涂层的起泡、脱落、锈蚀情况,试验结束后,计算涂层的腐蚀面积占比,评价涂层的耐腐蚀性。试验结果表明:对照组试样在盐雾试验480h 后,表面开始出现起泡现象,随着试验时间的延长,起泡数量增多、面积扩大,720h 后涂层开始出现脱落,露出基体,1000h 后,涂层腐蚀面积占比达到35%以上,基体表面出现明显锈蚀;实验组试样在盐雾试验

1000h 后,表面无明显起泡、脱落现象,仅局部出现轻微变色,涂层腐蚀面积占比不足5%,基体表面无锈蚀。由此可见,优化后的涂装工艺可显著提升涂层的耐腐蚀性,延长涂层的服役寿命。

（三）涂层物理力学性能测试

对两组试样涂层的附着力、硬度、耐磨性进行测试,具体方法及结果如下:附着力采用划格试验法(GB/T 9286-1998),划格间距1mm,经胶带撕拉后观察,对照组附着力等级为2级(局部脱落),实验组为0级(无脱落),说明优化工艺可显著提升涂层与基体结合强度^[10]。硬度采用 D 型邵氏硬度计(GB/T 2411-2008),随机选取5个测试点取平均值,对照组硬度65D,实验组82D,表明优化工艺可提升涂层硬度及抗划伤能力。耐磨性采用磨损试验仪(GB/T 1768-2006),试验载荷10N、转速500r/min、时间100min,对照组磨损量0.08g,实验组0.03g,说明优化工艺可增强涂层耐磨性,减少机械磨损破坏。

（四）涂层电化学防护性能研究

采用电化学工作站,通过动电位极化曲线和交流阻抗谱(EIS)测试两组试样涂层的电化学防护性能。测试介质为3.5%NaCl 溶液,温度25℃,试样测试前浸泡介质24h 以保证充分接触。动电位极化曲线测试范围-1.5V~0.5V(相对于SCE),扫描速度1mV/s,以腐蚀电流密度和腐蚀电位评价性能。结果显示,对照组腐蚀电流密度 $1.2\times 10^{-6}A/cm^2$ 、腐蚀电位-0.65V,实验组分别为 $8.5\times 10^{-8}A/cm^2$ 、-0.42V,实验组性能更优,可有效抑制基体腐蚀。EIS 测试频率范围 $10^{-2}Hz\sim 10^5Hz$,交流信号幅值10mV,以阻抗值评价涂层致密性。实验组涂层阻抗值($10^5\Omega\cdot cm^2$)远大于对照组($10^4\Omega\cdot cm^2$),且呈现明显容抗弧,说明优化后涂层致密性更好,能有效阻挡腐蚀介质渗透,防护效果优良。

四、结束语

本文围绕工业机械设备设施防腐涂装工艺优化及防护效果展开系统性研究,针对传统涂装工艺存在的前处理不规范、涂料配套性差、施工控制不严及质量检测不完善等核心痛点,从涂装全流程出发,设计了涵盖前处理、涂料体系、施工固化及质量管控的综合优化方案,并通过实验室对比实验验证了优化工艺的有效性。本文提出的优化方案具有较强的工程实用性和可操作性,可直接应用于各类工业机械设备的防腐涂装生产,为企业降低设备腐蚀损耗、延长设备服役寿命、控制生产成本提供了切实可行的技术路径。

参考文献

[1] 杨新挺. 钢结构防腐涂装施工工艺的优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库(引文版) 工程技术, 2025(10):025-028.
[2] 杨振波, 师华, 张津. 涂料废水处理及相关设施防腐涂装设计 [J]. 涂料工业, 2015, 45(10):42-49.
[3] 林奕龙. 工业涂装 VOCs 综合整治对策研究——以福建某钢管企业防腐生产线为例 [J]. 低碳世界, 2022, 12(11):31-33.
[4] 梁盼予. 晋中市工业涂装工序挥发性有机物治理现状及减排对策 [J]. 山西化工, 2023, 43(5):256-258.
[5] 张晓玲, 樊金侠, 张雪珍. 衬氟防腐技术在石油机械上的应用探究 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 B, 2018(1):00167-00167.
[6] 齐祥安, 龙磊军. 重防腐涂装技术应用研究 (一)[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(8):57-60.
[7] 沈萌. 港口机械设备防腐涂装与维护探讨 [J]. 中国科技期刊数据库 科研, 2015(10):00144-00144.
[8] 汪元泽 [J]. 石油天然气管道工程的关键防腐技术分析 [J]. 市场周刊·理论版, 2020(79):138-138.
[9] 张振忠. 天然气管道工程防腐关键技术分析 [J]. 市场周刊·理论版, 2020(41):186-186.
[10] 彭芳, 赵剑, 曹晓锋. 浅谈机械设备和基础设施的腐蚀与防护 [J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(12):12-13.