

水利工程金属结构防腐涂层性能及寿命测试

韩伟泽

河北省水利工程局集团有限公司, 河北石家庄, 050000;

摘要: 本研究聚焦于水利工程金属结构防腐涂层, 对其物理屏障、电化学保护等核心性能维度予以明确界定, 并对多种性能测试方法进行优化与创新。构建多因素耦合寿命评估模型, 针对涂层自身性能、工况环境等关键影响因素开展量化分析。在此基础上, 提出配方优化、施工管控等提升涂层性能与延长其使用寿命的路径, 为增强水利工程金属结构防腐的可靠性、降低运维成本提供了重要支撑。

关键词: 水利工程; 金属结构; 防腐涂层; 核心性能; 寿命测试

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.046

水利工程金属结构所处服役环境复杂, 腐蚀问题会对工程的安全性及使用寿命产生直接影响, 而防腐涂层作为核心防护手段至关重要。本研究聚焦于涂层的核心性能及其测试优化、寿命评估模型的构建以及影响因素的分析, 旨在探寻性能优化与寿命延长的技术路径, 从而为水利工程金属结构的防腐工作提供理论支撑和实践参考。

1 水利工程金属结构防腐涂层核心性能及测试方法优化

1.1 防腐涂层核心性能维度界定

水利工程金属结构长期服役于复杂严苛工况, 其防腐涂层需满足物理屏障、电化学保护、环境适配性三大核心性能, 三者协同决定防腐效果与服役稳定性。物理屏障性能为基础, 通过连续致密膜层阻断水、氧气、氯离子等腐蚀介质渗透, 降低基体氧化还原反应概率; 电化学保护性能针对牺牲阳极型涂层(如富锌涂层), 依靠自身组分优先腐蚀为基体提供阴极保护, 延缓腐蚀速率; 环境适配性要求涂层耐受水利工程特有的干湿交替、水流冲刷、温度波动、紫外线照射及生物附着等应力, 避免开裂、剥落、老化等失效现象。

相较于普通工业金属结构防腐涂层, 水利工程用涂层性能要求更具特殊性: 一是耐水性与耐氯离子腐蚀性要求更高, 沿海、河口及盐碱地区工程中, 高浓度氯离子易穿透涂层引发点蚀、缝隙腐蚀, 对涂层致密性和抗渗透能力构成严苛挑战; 二是抗冲刷磨损性能突出, 水流携带泥沙、杂物的长期冲刷易导致涂层磨损破损, 须具备优异附着力和耐磨性; 三是长效稳定性要求严格, 水利工程金属结构多为大型关键设施, 维修更换难度大、成本高, 涂层服役寿命需达10—20年以上, 抗老化、抗疲劳性能要求显著高于普通场景。

1.2 核心性能测试方法创新与应用

传统防腐涂层性能测试多基于实验室静态模拟, 难以真实反映水利工程复杂工况下的性能表现。近年来, 工况模拟动态测试、非破坏性检测及多因素耦合测试技术快速发展, 大幅提升了测试的真实性与准确性。

物理屏障性能测试方面, 传统盐雾试验、浸泡试验仅能单一模拟腐蚀介质渗透, 无法体现水流冲刷、温度波动等影响。创新采用“动态冲刷—浸泡耦合测试装置”, 调节水流速度(0.5—3m/s)、模拟不同水质(淡水、盐水、含沙水), 结合电化学阻抗谱(EIS)实时监测涂层阻抗值变化, 可精准评估实际服役条件下的抗渗透性能。测试中通过EIS图谱分析电容、电荷转移电阻等参数演变, 当阻抗值降至 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下时, 判定物理屏障功能显著失效。同时, 采用激光共聚焦显微镜(LSCM)观察涂层表面及截面微观结构, 直观分析孔隙率、致密性与抗渗透性能的关联性, 为配方优化提供微观数据支撑。

针对牺牲阳极型涂层开展电化学保护性能测试, 传统极化曲线法难以体现涂层在长期服役过程中的保护稳定性。本研究创新性地引入“循环极化—电化学噪声联合测试技术”, 模拟涂层出现磨损、划伤等破损情况, 监测自腐蚀电位、极化电阻以及电化学噪声信号的变化, 以此评估涂层在破损状态下的阴极保护能力和自我修复潜力。以富锌涂层为例, 通过测试其在不同破损程度下保护电流的持续时间, 当电流降至 $0.1 \mu \text{A}/\text{cm}^2$ 以下时, 判定涂层的电化学保护功能失效。同时, 结合X射线光电子能谱(XPS)分析腐蚀产物的成分, 揭示电化学腐蚀的机理, 为提高涂层保护的长效性提供理论支撑。

环境适配性测试重点关注抗冲刷磨损、抗老化及抗生物附着性能。抗冲刷磨损测试摒弃传统失重法, 采用“冲蚀磨损—附着力同步测试装置”, 模拟水流冲刷的

同时,通过拉开法实时监测附着力变化,当附着力降至3.5MPa以下(GB/T5210-2020标准)时,判定失去抗冲刷能力。抗老化测试创新采用“紫外老化-湿热老化交替测试”,模拟户外昼夜温差、干湿交替及紫外线照射环境,通过测试老化前后光泽度、色差、硬度及附着力变化评估抗老化性能,结合傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析分子结构降解规律,揭示老化机理。抗生物附着测试通过构建模拟水体生物群落(藻类、贝类)环境,监测表面生物附着量及强度,为水下金属结构涂层选型提供依据。

2 防腐涂层寿命评估模型构建与影响因素分析

2.1 涂层寿命评估核心理论与模型创新

防腐涂层服役寿命指从投入使用到防腐性能降至失效阈值的时间,其评估需基于性能衰减规律,结合工况环境构建科学精准的预测模型。传统模型多采用单一因素拟合(如时间线性衰减模型),忽略多环境因素耦合影响,预测结果与实际偏差较大。近年来,多因素耦合非线性寿命评估模型成为研究热点,核心是将性能衰减视为腐蚀介质渗透、环境应力作用、涂层自身老化等多因素共同作用的非线性过程,通过引入耦合系数实现精准预测。

基于灰色系统理论与BP神经网络的耦合寿命评估模型,是水利工程防腐涂层寿命评估的重要创新方向。该模型先通过灰色关联分析,筛选出氯离子浓度、水流速度、温度波动、紫外线强度等关键影响因素,确定各因素关联权重;再以关键因素为输入变量,以阻抗值、附着力、腐蚀电流密度等性能衰减指标为输出变量,构建BP神经网络模型,通过大量试验数据训练优化参数,实现性能衰减规律非线性拟合;最后结合失效阈值反推服役寿命。与传统模型相比,该耦合模型可有效处理多因素耦合不确定性问题,预测误差控制在10%以内,显著提升评估准确性。

基于加速老化试验与Arrhenius方程的寿命外推模型,在水利工程领域应用广泛。该模型通过设计高温高湿、高浓度盐雾、强紫外线照射等加速老化试验,缩短性能衰减周期,获取加速环境下的寿命数据;基于Arrhenius方程建立加速老化因子与实际服役环境因子的关联关系,将加速寿命数据外推至实际服役寿命。需注意确保加速因子合理性,避免加速环境与实际差异过大导致结果失真,可通过引入环境相似度系数修正加速因子,提升模型适用性。

2.2 涂层寿命关键影响因素量化分析

水利工程防腐涂层寿命受涂层自身性能、工况环境因素及施工质量三大类因素影响,各因素相互作用制约,共同决定最终寿命。量化分析各因素影响程度,可为配方优化、质量控制及寿命延长策略制定提供科学依据。

涂层自身性能是内在核心影响因素,主要包括致密性、附着力、抗老化性、电化学稳定性及厚度均匀性等。激光共聚焦显微镜测试表明,涂层孔隙率每降低1%,抗渗透寿命提升8%—12%;附着力从3.5MPa提升至5.0MPa时,抗冲刷磨损寿命提升50%以上;加速老化试验显示,添加抗紫外线吸收剂、抗氧剂的涂层,抗老化寿命提升30%—40%。此外,涂层厚度偏差超过 $\pm 20\mu\text{m}$ 时,局部易发生早期腐蚀,整体寿命缩短20%—30%。

工况环境因素是外在关键影响因素,不同工程服役环境差异较大,因素作用程度不同。沿海及河口工程中,氯离子浓度为主要影响因素,水体中氯离子浓度每升高1000mg/L,涂层寿命缩短15%—20%;水流速度影响呈非线性,低于1m/s时影响较小,超过2m/s后,每提升0.5m/s,抗冲刷寿命缩短10%—15%。内陆工程中,温度波动与紫外线照射为主要因素,温度波动幅度每增加 10°C ,疲劳寿命缩短8%—10%;紫外线强度每提升 $10\text{W}/\text{m}^2$,抗老化寿命缩短12%—15%。同时,泥沙含量每增加50mg/L,涂层磨损寿命缩短8%—12%,生物附着也会加速涂层失效。

施工质量是重要保障因素,良好施工可充分发挥涂层性能,施工缺陷则导致早期失效。表面处理、涂层施工工艺及固化工艺是关键环节:金属基体表面粗糙度控制在 $\text{Ra}3.2\text{—}6.3\mu\text{m}$ 时附着力最佳,表面处理不彻底(存在油污、铁锈等)会使附着力下降40%—60%;喷涂压力、距离、稀释比例等参数不合理,会导致涂层出现针孔、流挂等缺陷,使寿命缩短30%—50%;固化温度、时间不足会导致固化不完全,硬度、致密性及耐磨性下降,寿命缩短20%—30%。

3 防腐涂层性能优化与寿命延长技术路径

3.1 涂层配方优化与新型防腐涂层研发

基于性能测试与寿命影响因素分析,优化涂层配方、研发新型涂层,是提升防腐性能、延长服役寿命的核心路径。配方优化核心是调整成膜物质、颜填料、助剂比例,提升致密性、附着力等核心性能,增强环境适配性。

成膜物质优化方面,传统环氧树脂涂层附着力和耐腐蚀性优异,但抗老化性差,户外易粉化开裂。通过引入胺固化改性环氧树脂、环氧丙烯酸酯改性树脂,结合聚氨酯树脂复合改性,可显著提升抗老化性与柔韧性。

试验表明,环氧-聚氨酯复合涂层抗紫外线老化寿命较传统环氧涂层提升60%以上,柔韧性提升30%,可应对结构变形与振动。颜填料优化方面,采用纳米 TiO_2 、 SiO_2 、 ZnO 等替代传统颜填料,利用小尺寸效应和表面效应填充涂层孔隙,提升致密性、抗老化性及抗菌性。添加5%—8%纳米 SiO_2 的环氧涂层,孔隙率降低40%以上,抗渗透寿命提升50%,抗生物附着性能显著增强。助剂优化方面,添加UV-327、UV-329等抗紫外线吸收剂,1010、168等抗氧剂及流平剂,可进一步提升抗老化性、施工性能,延长寿命。

新型防腐涂层研发聚焦多功能集成与长效防腐,智能自修复、纳米复合、牺牲阳极—屏蔽复合等涂层应用研究取得显著进展。智能自修复涂层通过嵌入环氧树脂、异氰酸酯微胶囊或形状记忆聚合物,涂层出现微裂纹时可实现自修复,修复效率达80%以上,寿命较传统涂层提升70%以上。纳米复合涂层采用多种纳米粒子协同改性,同步提升致密性、抗老化性与抗腐蚀性,纳米 ZnO -纳米 SiO_2 复合改性环氧涂层耐盐雾寿命达1500小时以上,较传统涂层提升80%以上。牺牲阳极—屏蔽复合涂层采用“牺牲阳极层+屏蔽层”双层结构,协同实现阴极保护与介质屏蔽,适用于海洋、河口等严苛环境,服役寿命可达20年以上。

3.2 施工质量控制与服役期维护策略

良好施工质量是涂层性能发挥的前提,科学服役期维护是寿命延长的重要保障。针对施工与维护关键环节,制定针对性措施,可有效避免早期失效,延长服役寿命。

施工质量控制贯穿表面处理、涂层施工、固化养护及质量检测全过程。表面处理严格遵循GB/T8923-2022标准,采用抛丸或喷砂除锈替代手工除锈,确保表面无杂质,粗糙度控制在 $\text{Ra}3.2\text{—}6.3\ \mu\text{m}$,除锈后4小时内(相对湿度 $<60\%$)完成涂层施工。涂层施工根据类型选择合适工艺,优化参数确保厚度均匀、表面平整,无针孔等缺陷,如高压无气喷涂环氧涂层时,压力控制在 $0.3\text{—}0.5\text{MPa}$,距离 $30\text{—}50\text{cm}$,稀释比例5%—10%。固化养护严格按产品说明书控制温度与时间,环氧涂层固化温度 $20\text{—}25^\circ\text{C}$ 、时间不少于72小时,聚氨酯涂层固化温度 $15\text{—}30^\circ\text{C}$ 、时间不少于48小时。质量检测采用

外观检查、厚度检测、附着力检测等多种方法,不合格涂层及时修补重涂。

服役期维护采用“定期检测、及时修补、定期重涂”全生命周期方案。定期检测根据工程重要程度与环境严苛性制定周期:重要工程(大型水库闸门、引水枢纽)1—2年/次,一般工程3—5年/次,检测内容包括涂层外观、厚度、附着力、电化学性能等。及时修补针对不同缺陷采取对应措施,轻微缺陷(小面积粉化、针孔)采用打磨清理后补涂,严重缺陷(大面积剥落、锈蚀)需彻底清除失效涂层,重新进行表面处理与施工。定期重涂根据寿命评估结果,在性能降至失效阈值前完成,重涂前清理失效旧涂层,打磨完好部分确保新旧涂层结合良好。此外,可采取涂刷防污涂料、定期清理泥沙杂物、阴极保护与涂层防腐复合防护等辅助措施,进一步延长寿命。

4 结束语

综上所述,水利工程金属结构防腐涂层的性能与使用寿命直接关系到工程的长期安全运行。本文所提出的性能测试优化方法、寿命评估模型以及技术优化路径,能够有效解决涂层防腐方面的关键问题。未来,需结合工程实际情况,深入推进相关技术的应用,持续优化涂层配方及维护策略,推动水利工程防腐技术的质量提升与升级,确保基础设施实现长期稳定服役。

参考文献

- [1]刘永胜,匡涛,熊浩奇,等.水工金属结构防腐失效行为及工艺改进措施[J].中国水运,2025,(16):65-67.
- [2]牛耕.水利闸门金属结构防腐处理技术研究[J].水上安全,2025,(11):1-3.
- [3]范云伟,简平,殷黎明,等.纳硅金属防腐漆在人民渠水工钢闸门防腐养护中的应用研究[J].四川水利,2020,41(05):4-6+13.
- [4]蒋天元.基于水利水电工程金属结构腐蚀分析与防腐措施控制研究[J].黑龙江水利科技,2020,48(03):151-153.
- [5]杜敏.某长距离供水工程输水管道防腐设计探讨[J].全面腐蚀控制,2019,33(04):79-80.