

水利水电工程金属结构防腐技术升级与长效运维实践研究

杜好德 李卓

南水北调中线信息科技有限公司 北京 100000

摘要: 水利水电工程中,金属结构防腐至关重要。本文先分析金属结构腐蚀机理与关键影响因素,接着阐述防腐技术升级路径,包括新型材料研发、表面处理优化、智能化技术集成;再探讨长效运维管理模式与实践策略,涵盖全生命周期管理、运维技术体系构建、维护策略优化;最后研究技术升级与运维实践协同机制,涉及技术-管理协同、人员能力建设、持续改进机制,为金属结构防腐与运维提供参考。

关键词: 水利水电工程;金属结构;防腐技术;长效运维;协同机制

引言:水利水电工程中,金属结构广泛应用。但受复杂环境等因素影响,金属结构易发生腐蚀,影响工程安全与运行效率。腐蚀问题不仅增加运维成本,还可能引发安全事故。因此,深入研究金属结构防腐技术升级与长效运维实践十分必要。通过分析腐蚀机理、探索防腐技术升级路径、构建长效运维管理模式,可有效提升金属结构抗腐蚀能力,保障水利水电工程稳定运行。

1 水利水电工程金属结构腐蚀机理与关键影响因素

1.1 腐蚀类型与机理分析

在水利水电工程中,金属结构面临的腐蚀状况复杂多样,电化学腐蚀是较为常见且危害较大的一类^[1]。析氢腐蚀多发生在酸性较强的环境里,金属作为阳极失去电子被氧化,溶液中的氢离子在阴极得到电子生成氢气,这一过程不断进行,金属逐渐被消耗。吸氧腐蚀则在中性或弱酸性环境中占据主导,金属同样在阳极被氧化,而溶液中的溶解氧在阴极获得电子,与水结合生成氢氧根离子,持续破坏金属结构。化学腐蚀同样不可忽视。高温氧化现象在金属处于高温环境时频繁出现,金属与空气中的氧气直接发生化学反应,生成金属氧化物,随着时间推移,氧化物层不断增厚,导致金属性能下降。硫化物腐蚀也不少见,当金属与含硫物质接触,在特定条件下会发生化学反应,生成硫化物,这些硫化物往往疏松多孔,无法有效保护金属,加速了腐蚀进程。微生物腐蚀是特殊环境下的腐蚀形式。硫酸盐还原菌在缺氧环境中较为活跃,它们能将硫酸盐还原成硫化物,产生的硫化物对金属有强烈腐蚀作用,并且微生物的代谢活动还会改变金属表面的微环境,进一步促进腐蚀发生。

1.2 关键影响因素

环境因素对金属结构腐蚀影响显著。水质不同,所含离子种类和浓度有差异,对金属的腐蚀作用也不同。湿度高会加速电化学腐蚀和化学腐蚀的进行。温度升高会加

快化学反应速率,促进腐蚀发展。溶解氧含量高则有利于吸氧腐蚀的进行。材料因素也至关重要。不同金属材质的化学性质和电化学性质不同,耐腐蚀能力有别。金属表面状态,如粗糙度、有无缺陷等,会影响腐蚀介质与金属的接触情况,进而影响腐蚀速率。合金成分的改变可以改善金属的耐腐蚀性能。结构因素方面,应力状态会使金属产生裂纹,为腐蚀介质提供侵入通道,加速局部腐蚀。几何形状复杂的金属结构,存在缝隙、角落等部位,容易积存腐蚀介质,导致局部腐蚀严重。连接方式不同,如焊接、螺栓连接等,会产生不同的电位差,引发电偶腐蚀。运维因素中,涂层老化会使涂层失去保护作用,金属直接暴露在腐蚀环境中。机械损伤会破坏金属表面的保护层,为腐蚀创造条件。维修周期不合理,不能及时对腐蚀部位进行处理,会导致腐蚀问题愈发严重。

2 金属结构防腐技术升级路径

2.1 新型防腐材料研发与应用

在金属结构防腐领域,新型高性能涂层材料的研发与应用正成为关键突破点。纳米改性涂料凭借独特的纳米结构,能显著提升涂层的致密性和附着力,有效阻挡腐蚀介质的侵入,增强金属结构的耐腐蚀能力^[2]。自修复涂层则具有智能特性,当涂层出现微小损伤时,内部含有的修复成分可自动迁移至损伤部位,实现自我修复,延长涂层的使用寿命,为金属结构提供持久保护。耐蚀合金材料的发展也为防腐提供了新选择。双相不锈钢兼具奥氏体不锈钢的韧性和铁素体不锈钢的强度,在多种腐蚀环境下表现出良好的抗腐蚀性能,尤其适用于对耐蚀性要求较高的水利水电工程金属结构。钛合金以其优异的耐腐蚀性和高强度,在海洋等恶劣腐蚀环境中展现出巨大潜力,成为金属结构防腐的理想材料之一。复合防护技术将不同防腐手段有机结合,发挥出协同效应。涂层与阴极保护联合应用,涂层作为第一道防线阻挡大部

分腐蚀介质, 阴极保护则对涂层破损处等薄弱环节进行补充保护, 二者相辅相成, 大大提高了金属结构的整体防腐效果。

2.2 表面处理技术优化

表面处理技术的优化对提升金属结构防腐性能至关重要。预处理工艺改进方面, 超高压水射流清洗利用高压水流的冲击力, 能有效去除金属表面的污垢、锈蚀等杂质, 且不会对金属基体造成损伤。激光除锈则通过高能激光束瞬间汽化金属表面的锈蚀层, 实现高效、精准的除锈, 为后续防腐处理提供良好的表面条件。表面强化技术可增强金属表面的性能。喷丸强化通过高速弹丸撞击金属表面, 使表面产生塑性变形, 形成残余压应力层, 提高金属的抗疲劳性能和耐腐蚀性。激光熔覆能在金属表面熔覆一层具有特殊性能的合金涂层, 改善金属表面的耐磨、耐蚀等性能。纳米涂层制备技术为金属结构防腐带来新途径。原子层沉积可精确控制涂层厚度和成分, 制备出均匀、致密的纳米涂层, 有效隔离腐蚀介质。电化学沉积则通过电化学反应在金属表面沉积纳米颗粒, 形成具有特殊结构的涂层, 提升金属的防腐能力。

2.3 智能化防腐技术集成

智能化防腐技术正逐渐改变金属结构防腐的模式。腐蚀监测传感器如电化学噪声传感器、光纤光栅传感器等, 可实时监测金属结构的腐蚀状况, 及时反馈腐蚀信息, 为防腐措施的调整提供依据。电化学噪声传感器的采样频率可达100-1000赫兹, 能在1秒内采集一次腐蚀数据; 光纤光栅传感器的精度可达 ± 1 微应变, 能准确感知金属结构的微小变化。基于大数据的腐蚀预测模型借助机器学习算法, 对大量腐蚀数据进行深度分析, 挖掘数据背后的规律, 实现对金属结构腐蚀趋势的精准预测, 提前制定防腐策略。自适应阴极保护系统中的智能恒电位仪可根据金属结构周围的腐蚀环境变化, 自动调整输出电流, 使阴极保护效果始终处于最佳状态, 确保金属结构得到持续、有效的保护。

3 长效运维管理模式与实践策略

3.1 全生命周期运维管理框架

在金属结构长效运维管理中, 全生命周期理念贯穿始终。设计阶段是起点, 需着重优化防腐方案, 综合考量环境、金属材质, 选适配防腐技术和材料, 并进行耐久性设计, 从源头提升金属结构抗腐蚀能力, 延长寿命^[9]。施工阶段质量把控与工艺标准化至关重要, 严格遵循规范标准, 精细管理每道防腐工序。从表面处理到涂层涂刷, 再到阴极保护装置安装, 都要操作规范、质量可靠, 为金属结构长期稳定运行打基础。运行阶段要实施动态监测

与预防性维护, 利用先进设备技术, 实时掌握金属结构腐蚀状况和环境参数变化, 提前制定预防性维护计划, 及时采取措施, 防止腐蚀恶化。例如, 腐蚀速率超0.01毫米/年时, 及时调整阴极保护电流, 降至0.005毫米/年以下; 涂层厚度减20%以上时, 及时补充。检修阶段需进行状态评估与修复策略制定, 定期全面检查金属结构, 评估腐蚀程度和剩余寿命, 制定科学合理修复策略, 选合适修复技术和材料, 确保修复后恢复原有性能和安全性。一般每1-2年全面检查一次, 剩余寿命低于5年时, 制定详细修复计划, 采用电化学修复或金属喷涂等技术修复。

3.2 运维技术体系构建

完善的运维技术体系是长效运维管理的支撑。在线监测技术可实现对金属结构腐蚀速率实时监测和涂层完整性检测。通过在关键部位安装传感器, 能够及时获取腐蚀数据, 为运维决策提供及时准确的信息。例如, 在金属结构的关键连接部位安装腐蚀速率传感器, 实时监测腐蚀速率, 数据采集频率为1次/分钟; 在涂层表面安装涂层完整性传感器, 当涂层出现破损时, 能在1秒内发出警报。定期检测技术如超声波测厚、红外热成像检测等, 可定期对金属结构进行全面检查。超声波测厚能精确测量金属厚度变化, 测量精度可达 ± 0.01 毫米, 每3-6个月对金属结构进行一次超声波测厚检测; 红外热成像检测可发现金属表面的异常温升, 从而判断是否存在腐蚀隐患, 每1-2年进行一次红外热成像检测。无损检测技术包括涡流检测、射线检测等, 在不破坏, 检测内部缺陷和腐蚀情况。这些技术能够发现早期微小的腐蚀问题, 为及时采取维护措施提供依据。涡流检测的检测频率可达1-10千赫兹, 能检测出金属表面以下0.1-5毫米范围内的缺陷; 射线检测的射线能量可根据金属厚度选择100-300千伏, 能检测出金属内部的裂纹、气孔等缺陷, 每2-3年进行一次无损检测。

3.3 维护策略优化

维护策略优化是提升运维效果的关键。基于风险等级的分级维护, 根据金属结构不同部位的重要性、腐蚀风险程度等因素, 划分风险等级, 对高风险区域优先处理, 合理分配维护资源, 提高维护效率。同时建立分级维护的动态评估机制, 定期对风险等级进行重新评估, 依据金属结构实际腐蚀状况和运维效果, 及时调整风险等级和对应的维护策略, 确保分级维护的科学性和有效性。修复技术选择要综合考虑多种因素。对于局部腐蚀, 可采用局部补涂的方法; 对于较为严重的腐蚀, 电化学修复、金属喷涂等技术能够有效恢复金属结构的性能。维护周期并非一成不变, 需根据腐蚀速率与环境变化进行动态调整。

当腐蚀速率加快或环境条件恶化时,缩短维护周期;反之,可适当延长维护周期,实现维护成本与效果的平衡。此外,还应建立维护策略的反馈与改进机制,收集维护过程中的实际数据和问题反馈,对维护策略进行持续优化,不断提高维护策略的针对性和实用性。

4 技术升级与运维实践的协同机制

4.1 技术-管理协同框架

在金属结构防腐领域,实现技术升级与运维实践的协同,首要任务是开展防腐技术与运维需求的匹配性分析^[4]。深入探究不同金属结构所处环境、使用功能等运维需求,结合现有防腐技术的特点与优势,精准定位技术应用场景,确保防腐技术能够有效满足运维实际要求。技术升级对运维模式产生着深刻影响。新型防腐材料和智能化监测技术的应用,可减少人工巡检的频次与强度。以往需要大量人力定期检查的环节,如今借助智能设备即可实时获取金属结构状态信息。同时,高性能防腐技术能延长金属结构的维护周期,降低运维成本,提升运维效率。运维反馈是驱动技术优化的重要力量。通过对金属结构腐蚀监测数据的深入分析,能够发现现有防腐材料和技术在实际应用中的不足。这些数据为材料研发人员提供了改进方向,促使他们针对性地优化材料配方和性能,推动防腐技术不断进步。

4.2 人员能力建设

人员能力是技术升级与运维实践协同的关键支撑。开展专业技术培训,让运维人员掌握新型涂层施工工艺、智能监测设备操作方法等,提升他们的专业技能水平,确保能够正确应用新技术、新设备,培训时长可根据培训内容确定,一般为3-7天。组建跨学科团队,将材料科学、腐蚀工程、信息技术等领域的专业人才汇聚在一起。不同学科背景的人员相互交流、协作,能够从多个角度解决金属结构防腐中的复杂问题,促进技术与运维的深度融合,团队规模可根据项目需求确定,一般为5-15人。建设运维知识库,将运维过程中的经验教训、标准规范等

进行系统整理和沉淀。这为运维人员提供了丰富的参考资源,有助于他们快速解决实际问题,同时也为新入职人员提供了学习平台,促进运维团队整体能力的提升。

4.3 持续改进机制

建立技术迭代路径,推动金属结构防腐技术从被动防护向主动防护转变。不断研发和应用具有自我修复、智能感知等功能的先进防腐技术,提前预防腐蚀问题的发生。优化运维流程,从传统的定期维护向预测性维护升级^[5]。借助大数据分析和人工智能技术,对金属结构腐蚀趋势进行精准预测,提前制定维护计划,实现运维资源的合理配置。设立创新激励机制,对在技术成果转化、运维效率提升等方面做出突出贡献的人员给予奖励。激发人员的创新积极性,营造良好的创新氛围,推动技术升级与运维实践协同机制不断完善和发展。

结束语

水利水电工程金属结构防腐与长效运维是一项长期且复杂的任务。通过防腐技术升级与运维实践协同,从技术、管理、人员等多方面发力,可有效提升金属结构抗腐蚀能力,降低运维成本,保障工程安全稳定运行。持续完善技术迭代路径、优化运维流程、激发人员创新积极性,能推动金属结构防腐与运维水平不断提升,为水利水电事业发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]张少鹏.水利水电工程金属结构安装施工质量的控制[J].工程建设与设计,2025(21):164-166.
- [2]周华强,周林.水库闸门金属结构防腐处理技术研究[J].水电站机电技术,2024,47(11):142-145.
- [3]赵义基.水工金属结构埋件的长效防腐研究[J].水上安全,2024(18):187-189.
- [4]贾涛涛.六安市某排涝站金属结构设计研究[J].水电站机电技术,2024,47(3):59-61.
- [5]褚霄洁,夏晔,李雪清.水利工程金属结构质量检测中的重点检测内容[J].数字化用户,2024(7):23-24.