

Innovative Application and Long-term Management Mechanism of Anti-corrosion Technology for Metal Structure of Hydropower Station

Wei Xiao

Wuling Electric Power Co., Ltd. Wannipo Hydropower Plant, Changsha, Hunan, 410029, China

Abstract

As the core infrastructure for clean energy production, the metal structures of hydropower stations (such as gates, pressure steel pipes, and opening/closing equipment) are critical components ensuring the safe and stable operation of the project. These structures are subjected to harsh working conditions over long periods, including water environments, alternating dry and wet conditions, intense stress, and complex medium erosion. Corrosion has become a prominent bottleneck that restricts their service life, affects project safety, and increases maintenance costs. According to statistics, the economic losses caused by corrosion in the metal structures of existing hydropower stations in China exceed billions of yuan annually. In some older projects, the corrosion rate of metal structures reaches 0.2~0.5mm/years, far exceeding the safety allowance. Therefore, promoting the innovative application of anti-corrosion technologies and establishing a scientific and comprehensive long-term management mechanism are of great practical significance and strategic value for improving the quality of hydropower station projects, reducing maintenance costs, and ensuring energy security.

Keywords

Hydropower station; Metal structure; Anti-corrosion technology; Innovative application; Long-term management

水电站金属结构防腐蚀技术的创新应用与长效管理机制

肖为

五凌电力有限公司碗米坡水电站，中国·湖南长沙410029

摘要

水电站作为清洁能源生产的核心基础设施，其金属结构（如闸门、压力钢管、启闭设备等）是保障工程安全稳定运行的关键组成部分。这些结构长期处于水环境、干湿交替、强应力及复杂介质侵蚀的恶劣工况中，腐蚀问题成为制约其使用寿命、影响工程安全且增加运维成本的突出瓶颈。据统计，我国现有水电站金属结构因腐蚀造成的经济损失每年超过数十亿元，部分老旧工程的金属结构腐蚀率高达0.2~0.5mm/年，远超安全允许范围。因此，推动防腐蚀技术的创新应用，构建科学完善的长效管理机制，对于提升水电站工程质量、降低运维成本、保障能源安全具有重要的现实意义和战略价值。

关键词

水电站；金属结构；防腐蚀技术；创新应用；长效管理

1 引言

作为我国清洁能源体系的核心组成部分，水电站在“双碳”目标推进中承担着至关重要的战略角色，而闸门、压力钢管、启闭设备等金属结构，是实现水电站挡水、泄洪、发电等核心功能的关键载体。这些结构长期服役于淡水、海水、泥沙冲刷、干湿交替及应力集中的复杂环境中，腐蚀问题成为难以回避的共性难题。研究旨在为水电站金属结构防腐蚀工作提供“技术可行、管理科学”的完整解决方案，助力提升工程耐久性与安全性，降低运维成本，为水电行业的可持

续发展提供有力保障。

2 水电站金属结构腐蚀的危害与成因分析

2.1 腐蚀的核心危害

金属结构的腐蚀本质是金属与周围环境发生电化学或化学作用而产生的破坏过程，其危害贯穿于水电站建设与运行的全生命周期。从安全层面看，腐蚀会导致金属构件强度下降、韧性降低，引发结构开裂、变形甚至失效。例如，压力钢管内壁腐蚀会导致壁厚减薄，在高压水流作用下可能发生爆管事故，造成停机停产及重大经济损失；闸门主梁腐蚀会降低其承载能力，极端情况下可能出现闸门坠落，威胁大坝安全。从经济层面讲，腐蚀不仅增加了金属结构的维修、更换成本，还会因设备故障导致停机损失，延长工期。此外，

【作者简介】肖为（1996—），男，中国湖南衡阳人，本科，助理工程师，从事水力发电机组维护研究。

腐蚀产物可能污染水体,影响生态环境,与水电站绿色发展的理念相悖。

2.2 腐蚀成因的多维度解析

水电站金属结构的腐蚀是多因素共同作用的结果,主要可分为环境因素、材料因素及施工与运维因素三大类。环境因素是腐蚀发生的外在条件,水电站金属结构多处于淡水、海水或含泥沙、污染物的复杂水环境中,水中的溶解氧、氯离子、硫酸盐、pH值等都会加速腐蚀进程。例如,沿海水电站的金属结构受氯离子侵蚀,易发生点蚀和应力腐蚀;大坝泄洪闸门因长期处于干湿交替环境,腐蚀速度是全浸环境的3~5倍。材料因素是腐蚀发生的内在基础,早期水电站金属结构多采用普通碳钢,其耐腐蚀性较差,虽经过基础防腐处理,但长期使用后防护层失效即易发生腐蚀;部分构件焊接工艺不当,导致焊缝处存在应力集中,易引发应力腐蚀开裂。施工与运维因素则直接影响腐蚀防护效果,施工阶段若防腐涂层涂刷不规范、厚度不均或存在漏涂,会形成腐蚀通道;运维阶段若未及时对腐蚀隐患进行检测和处理,会导致腐蚀问题不断恶化。

3 水电站金属结构防腐蚀技术的创新应用

3.1 新型防腐涂层技术

3.1.1 纳米改性防腐涂层

纳米材料因具有优异的物理化学性能,被广泛应用于防腐涂层的改性。将纳米二氧化钛、纳米氧化锌等粒子分散到环氧树脂、聚氨酯等基体树脂中,可显著提高涂层的致密性、耐磨性和耐腐蚀性。该涂层还具有好的耐冲击性,能适应闸门启闭过程中的机械磨损。

3.1.2 氟碳防腐涂层

氟碳涂料以氟树脂为主要成膜物质,具有极强的化学稳定性、耐候性和耐腐蚀性,被称为“防腐涂料之王”。其分子结构中的C-F键能极高,不易被腐蚀介质破坏,可在恶劣环境下长期保持涂层性能。在水电站压力钢管外表面应用氟碳涂层时,通过喷砂除锈达到Sa2.5级标准后,采用高压无气喷涂工艺施工,涂层结合力强,耐水浸泡、耐紫外线老化性能优异。

3.1.3 自修复防腐涂层

自修复防腐涂层通过在涂层中加入微胶囊或形状记忆材料,当涂层出现微小裂纹时,微胶囊破裂释放缓蚀剂或修复剂,自动填补裂纹,阻止腐蚀介质渗透。例如,将含有苯并三氮唑缓蚀剂的微胶囊分散到丙烯酸酯涂层中,当涂层因机械损伤出现裂纹时,缓蚀剂释放并吸附在金属表面,形成保护膜,实现腐蚀的主动抑制^[1]。

3.2 电化学防腐蚀技术

3.2.1 智能化阴极保护技术

传统阴极保护技术存在保护电位难以精准控制、监测不便等问题。智能化阴极保护技术通过集成传感器、数据采集模块和智能控制系统,实现了保护电位的实时监测与自动

调节。例如,在水电站压力钢管内壁采用外加电流智能化阴极保护系统,通过分布在钢管不同位置的参比电极实时采集电位数据,经控制系统分析后,自动调整阳极输出电流,确保钢管表面电位始终处于-0.85~-1.2V的最佳保护区间。该技术不仅提高了保护的精准性,还能通过数据平台实现远程监控和故障预警。

3.2.2 牺牲阳极优化技术

针对传统牺牲阳极寿命短、电流输出不稳定的问题,新型牺牲阳极材料通过成分优化,提高了电流效率和使用寿命。同时,采用数值模拟技术对阳极的布置方式进行优化,根据金属结构的形状、尺寸及腐蚀环境,确定阳极的数量、位置和间距,实现均匀防护。例如,在水电站闸门的门叶和支臂上,采用铝合金牺牲阳极与防腐涂层联合防护,阳极间距通过数值模拟计算确定为3~5m,既保证了防护效果,又避免了阳极材料的浪费,较传统布置方式节省阳极用量20%以上。

3.3 表面改性与复合防护技术

3.3.1 激光表面改性技术

利用高能量密度激光束对金属表面进行处理,使表面形成一层致密的淬火层或合金层,提高金属的硬度、耐磨性和耐腐蚀性。在水电站水轮机转轮叶片表面应用激光表面淬火技术后,叶片表面硬度从HB200提升至HB500以上,耐气蚀和腐蚀性能显著增强,使用寿命从3~5年延长至8~10年。该技术还具有加热速度快、变形小、无污染等优点,适用于复杂形状构件的表面处理。

3.3.2 热喷涂复合涂层技术

热喷涂技术通过将熔融状态的喷涂材料高速喷射到金属表面,形成涂层,常用材料包括锌、铝、不锈钢、陶瓷等。近年来,热喷涂复合涂层技术得到广泛应用,结合了不同材料的优势。例如,在水电站闸门轨道表面采用“铝锌合金涂层+氧化铝陶瓷涂层”复合防护,铝锌合金涂层提供阴极保护,氧化铝陶瓷涂层提供物理屏障,两者协同作用,使轨道的耐磨损和耐腐蚀性能较单一涂层提升了3倍以上,有效解决了闸门运行过程中轨道的腐蚀磨损问题。

3.4 智能化检测与监测技术

3.4.1 无损检测技术创新

传统无损检测技术如超声波检测、磁粉检测等,存在检测效率低、对操作人员技能要求高等问题。新型无损检测技术如相控阵超声波检测、涡流阵列检测、红外热成像检测等,实现了腐蚀缺陷的快速、精准检测。例如,采用相控阵超声波检测技术对水电站压力钢管的焊缝腐蚀缺陷进行检测,可通过多阵元探头同时发射超声波,快速扫描焊缝区域,生成清晰的缺陷图像,检测精度较传统超声波检测提升了50%,检测效率提升了3倍以上。

3.4.2 在线监测系统构建

通过在金属结构关键部位布置腐蚀传感器,如电化学传感器、电阻探针传感器,结合物联网、大数据技术,构建

腐蚀在线监测系统,实现腐蚀状态的实时监测与数据分析。该系统可实时采集金属结构的腐蚀速率、防护层状态、环境参数(如水温、pH值、氯离子浓度)等数据,通过数据平台进行分析处理,当监测数据超过阈值时,自动发出预警信号^[2]。

4 水电站金属结构防腐蚀长效管理机制的构建

4.1 全生命周期管理

4.1.1 设计阶段

将防腐蚀设计纳入金属结构设计的核心内容,进行针对性的腐蚀风险评估。根据水电站的地理位置、水环境条件、金属结构的工况的不同,选择合适的金属材料 and 防腐蚀技术方案。例如,沿海水电站应优先选择耐氯离子腐蚀的不锈钢或耐候钢,同时配套阴极保护和氟碳涂层复合防护方案;对于处于干湿交替环境的闸门,应加强涂层厚度和耐磨性设计。此外,设计中应考虑后续运维的便利性,预留腐蚀检测和维修的空间。

4.1.2 施工阶段

严格执行防腐蚀施工规范,加强施工质量控制。建立施工质量责任制,明确施工单位、监理单位的职责,对施工全过程进行监督。施工前,对金属表面进行预处理(如除锈、除油),确保表面清洁度和粗糙度符合要求;施工过程中,严格控制防腐涂层的涂刷厚度、固化时间,以及阴极保护系统的安装精度;施工完成后,进行严格的质量检测(如涂层附着力检测、阴极保护电位检测),合格后方可进入下一工序。

4.1.3 运行维护阶段

建立常态化的腐蚀监测与维护机制。结合在线监测系统和定期无损检测,及时掌握金属结构的腐蚀状态,制定针对性的维护方案。对于轻微腐蚀,及时进行补涂或局部修复;对于严重腐蚀,制定专项整改方案,进行更换或加固处理。同时,建立腐蚀维护档案,记录金属结构的腐蚀情况、维护措施及效果,为后续管理提供数据支撑。

4.2 制度保障体系

4.2.1 完善标准规范

结合行业发展现状和技术创新成果,修订和完善水电站金属结构防腐蚀相关的标准规范,明确防腐蚀技术要求、施工质量标准、检测方法及维护周期。例如,制定《水电站金属结构纳米防腐涂层应用技术规范》《智能化阴极保护系统运行维护规程》等,为防腐蚀工作提供技术依据。

4.2.2 建立考核机制

将防腐蚀工作纳入水电站运营管理的考核体系,明确考核指标(如金属结构腐蚀速率、维护成本、故障停机时间等),对相关单位和人员进行考核。对防腐蚀工作成效显著的单位和个人给予奖励;对因管理不善、施工质量问题导致

严重腐蚀事故的,追究相关责任,形成“奖优罚劣”的激励约束机制。

4.3 技术创新与人才培养

4.3.1 推动技术研发与转化

加强产学研合作,鼓励水电站运营企业、科研机构、高校联合开展防腐蚀技术研发,重点攻克长效防腐材料、智能化监测设备、高效修复技术等关键技术难题。建立技术成果转化机制,将实验室研发的新技术、新材料快速应用到实际工程中,提升防腐蚀技术的产业化水平。

4.3.2 加强人才培养

建立多层次的人才培养体系,培养一支既懂技术又懂管理的防腐蚀专业队伍。通过高校专业设置、企业内部培训、行业技术交流等方式,提升相关人员的专业素养。例如,高校开设“水电工程防腐蚀技术”相关专业课程,培养专业技术人才;企业定期组织施工人员、运维人员参加防腐蚀技术培训,提升实操能力;行业协会举办防腐蚀技术研讨会,促进技术交流与人才成长。

4.4 信息化管理平台

构建水电站金属结构防腐蚀信息化管理平台,整合设计、施工、运行、维护等全生命周期的数据资源,实现数据共享与高效管理。平台应具备以下功能:一是数据采集功能,实时采集腐蚀监测数据、施工质量数据、维护记录等;二是数据分析功能,通过大数据技术对数据进行分析,预测腐蚀发展趋势,为维护决策提供支持;三是远程监控功能,实现对金属结构腐蚀状态的远程实时监控,及时发现隐患;四是档案管理功能,建立完整的金属结构防腐蚀档案,便于查询和追溯。通过信息化管理平台,可显著提升防腐蚀管理的效率和精准性,为长效管理提供技术支撑^[3]。

5 结语

水电站金属结构的防腐蚀工作是保障工程安全稳定运行、降低运维成本、推动水电行业绿色发展的重要举措。近年来,纳米改性防腐涂层、智能化阴极保护、激光表面改性等创新防腐蚀技术的应用,显著提升了金属结构的防腐蚀能力;而全生命周期管理、制度保障、技术创新与信息化平台构建等长效管理机制的完善,则为防腐蚀工作的持续推进提供了保障。展望未来,水电站金属结构防腐蚀技术与管理将向更加智能化、长效化、绿色化的方向发展。

参考文献

- [1] 祝存恩. 氯碱化工生产腐蚀机理及多层次防腐蚀技术体系研究[J]. 当代化工研究, 2025, (17): 109-112.
- [2] 岳为民, 杨红发, 熊思勇, 等. 金属阀门的腐蚀与防护[J]. 阀门, 2025, (06): 670-674.
- [3] 郝良刚. 水性丙烯酸氨基金属防腐蚀涂层的合成制备及技术性能研究[J]. 聚酯工业, 2025, 38(03): 8-10.