

# 水利水电工程金属结构防腐防护的技术策略研究

陈虎东

中国长江电力股份有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6916

**[摘要]** 水利水电工程金属结构长期处在复杂的水环境中,腐蚀问题对工程的安全和使用寿命造成严重的影响。本文分析其腐蚀现状,从复合防护、环保材料、智能监测等方面建立新的防腐技术策略,配套标准化施工等实施措施,为工程金属结构防腐防护实践提供技术支持。

**[关键词]** 水利水电工程; 金属结构; 防腐防护

**中图分类号:** TV731 **文献标识码:** A

Research on technical strategies for anti-corrosion protection of metal structures in water conservancy and hydropower projects.

Hudong Chen

China Yangtze River Power Corporation Limited

**[Abstract]** Long-term exposure of metal structures used in water conservancy and hydropower facilities to Water Environments can lead to corrosion, affecting the engineering's safety and durability. The current state of corrosion is analysed; An innovative anti-corrosion technology Strategy based on composite protection, environment-purifying materials and smart surveillance technologies has been developed; Implementation plans such as standardisation construction have also been proposed to offer technical assistance for the application practice of engineering metal Structures' anti-corrosion protection work.

**[Key words]** Water conservancy and Hydropower Projects; Metal Structures; Anti-corrosion Protection

水利水电工程金属结构是工程的主要承力和功能部件,长期在含电解质、高湿、高流速的复杂水环境中工作,电化学腐蚀、冲磨腐蚀等问题较多,焊接部位、水下结构等处的腐蚀风险较大。现有的防腐技术存在着防护层附着力差、电位分布不均等缺陷,必须从技术融合、材料革新、监测升级三个方面创建符合工程实际情况的防腐防护体系,保证金属结构长久稳定运行。

## 1 水利水电工程金属结构腐蚀现状分析

水利水电工程金属结构腐蚀受材料特性、结构设计、环境因素三方面影响,腐蚀类型以电化学腐蚀为主,伴生化学腐蚀、微生物腐蚀、冲磨腐蚀等复合型腐蚀问题。由于焊接部位热影响区金相组织发生变化,腐蚀速率是不焊接区的2~3倍,是腐蚀高发区。水下结构受电解质分布不均的影响,阴极保护电位不能均匀地覆盖到整个水下结构上,从而产生保护盲区。高流速区金属结构被水流携带的硬质颗粒冲刷,常规防护涂层容易剥落,基体金属暴露出来之后加快腐蚀。钢结构表面处理清洁度达不到Sa2.5级,氧化皮、油污残留会直接导致防护层附着力下降,造成涂层起泡、龟裂等问题。腐蚀不但会使得金属结构的强度下降,还会引起结构的变形,而且还会增大工程的维护成

本,降低工程的整体运行稳定性,是影响水利水电工程耐久性的重要因素<sup>[1]</sup>。

## 2 创新型防腐防护技术策略构建

### 2.1 复合防护,深度融合显成效

复合防护技术就是将多种防护技术结合起来,形成金属结构全方位的防护体系,重点在于使涂层防护和电化学防护相融合,克服单一防护技术存在的不足。涂层防护部分采用梯度过渡涂层工艺,对焊接部位使用专用底漆,底层用高渗透性、抗水性底漆,上层用高机械强度、抗紫外线防护涂料,减小涂层接口应力集中,提高焊接区域防护层的贴合度和耐久性。表面处理严格按Sa 2.5级喷砂除锈标准执行,表面粗糙度控制在40~80 μm之间,用多角度可调喷砂设备消除复杂结构部位的处理盲区,用钢丸钢砂混合磨料并建立回收系统,防止磨料二次污染,保证防护层与基体的机械咬合力。电化学防护环节优化辅助阳极布置方案,大型水工金属结构用均匀对称布置方式,圆形管道类结构用环形布置,重点防护部位用线性布置,精确规划阳极数量、间距和埋设深度,使保护电位稳定在-0.85V到-1.2V之间,解决水下结构电位分布不均问题<sup>[2]</sup>。同时采用牺牲阳极和外加电流双重保护,淡水环境用锌阳极,海水等高腐蚀环境下用铝镁合金阳极,

外加电流系统配备高精度参比电极和稳定电源设备,达到对金属结构的持续电化学防护,形成涂层防护阻隔腐蚀介质、电化学防护抑制金属电化学反应的协同防护效应。

### 2.2 环保材料, 创新应用促发展

环保型防腐材料的研发与应用主要集中在低污染、高适配、长寿命的特点上,根据水利水电工程的不同腐蚀环境来选择合适的材料并进行创新应用。聚脲弹性体涂层属于高抗冲磨环保材料,依靠交联网络结构带来的高弹性、高耐磨性,适合闸门槽、泄洪洞这些高速水流的地方,韧性及伸长率可以很好地分散水流冲击应力,防止涂层脆性开裂和剥离,解决传统环氧煤沥青、聚氨酯涂层抗冲磨性能差的问题。水性无机富锌涂料取代传统溶剂型涂料,用水作为分散介质减少挥发性有机化合物(VOC)排放,锌粉含量高、阴极保护效果好,适合于钢结构表面长效防腐,针对焊缝处电位分布不均问题,采用焊缝专用封闭剂改善涂料成膜性能,提高涂层整体防护效果。纳米改性防腐涂层是在环氧树脂、聚氨酯等基材中加入纳米氧化物,使涂层晶粒细化,提高涂层的致密性和耐腐蚀性,纳米颗粒的填充效应可以减少涂层针孔、裂纹等缺陷,使金属结构腐蚀速率降低,涂层使用寿命比传统材料大大延长。缓蚀剂采用环保型有机缓蚀剂和无机缓蚀剂复配的方式,抑制型和钝化型缓蚀剂联合使用,在金属表面形成一层致密的保护膜,降低金属与腐蚀介质之间的反应活性,在淡水循环水系统中按0.05%浓度连续投加,可以有效地降低金属结构的腐蚀速率,而且不会产生二次污染,符合水利水电工程生态环保的要求。

### 2.3 智能监测, 预警系统保安全

智能监测预警系统是以实时感知、数据解析、提前预警为特征,把电化学传感、红外热像、无损检测等技术结合起来,对金属结构腐蚀状态进行全生命周期动态监测。在金属结构重要腐蚀部位安装电化学传感器,对腐蚀电位、腐蚀电流等电化学参数进行连续监测,利用传感器高灵敏度、高精度的特点,及时发现金属结构早期腐蚀信号,准确判断腐蚀发展态势<sup>[3]</sup>。根据结构腐蚀风险点合理布置传感器的安装位置,焊缝部位、水下结构、高流速区增加传感器的布设密度,并且定时对传感器进行标定和维护,保证监测数据的准确度。红外热像监测采用非接触式检测方式,用以捕捉金属结构表面热辐射差别,找出由于腐蚀造成的表面组织改变和内部隐患,适合于大面积、复杂结构的快速检测,能很好地发现隐藏的腐蚀问题,而且检测时不破坏金属结构本体。无损检测技术将超声波、射线、磁粉检测手段结合起来,用超声波检测来准确测量防护层厚度和金属基体内部腐蚀坑深度,用射线检测来查找焊接部位内部的裂纹、夹渣等缺陷,用磁粉检测来识别金属表面的微裂纹,从而达到对腐蚀缺陷的全方位、细致化的检测。监测系统安装数据处理平台,对采集到的电位、电流、热辐射、结构缺陷等数据实施及时解析并做出趋势预估,创建腐蚀等级评判准则,一旦监测数据超出阈值就会发出预警信号,为防腐防护维护赋予精确的时间节点和部位指向,实现由“事后维修”转向“事前预警、事中管控”的转变。

## 3 技术策略实施保障措施

### 3.1 标准化施工, 流程规范提质量

标准化施工是防腐防护技术策略落地见效的保证,创建全流程施工质量控制体系,使施工准备至后期养护各个环节都标准化、规范化地执行。施工准备阶段对进场材料做全性能检测,防腐涂料、阳极材料、缓蚀剂等应查验质量证明文件,随机抽取样品复验其耐腐蚀性、附着力、电化学性能等指标,不合格的材料不得进入施工现场。施工设备全部调试、校准,喷砂设备、喷涂设备、检测仪器等要保证运行精度,建立设备维护保养台账,定期进行检修和标定。施工过程阶段制定专项施工工艺规程,涂层涂装严格控制稀释比例、涂装温度和涂装遍数,环氧树脂涂料稀释比例控制在1:1到1:6之间,涂装温度保持在25℃左右,多层涂装时保证前道涂层完全固化后再进行后道涂装,涂层厚度控制在200-300 μm。阴极保护系统安装严格按照阳极布置方案执行,控制阳极间距和埋设深度,电缆连接做防腐密封处理,安装完成后进行电位测试,保证保护电位达到设计标准<sup>[4]</sup>。质量检验阶段实行“三检制”,操作人员自检、质检员专检、监理工程师终检层层把关,涂层质量检测采用电火花检测排查针孔缺陷,超声波检测测量涂层厚度均匀性,附着力测试采用划格法或拉开法,保证涂层附着力达到2级以上。电化学防护系统检测保护电位和电流,找出阳极失效、电缆断开等毛病。后期养护阶段制定防护层养护规程,确定养护周期和养护措施,在高湿、高盐环境下缩短养护检查周期,及时处理防护层轻微损伤,防止腐蚀问题加重。

### 3.2 学科融合, 团队建设强支撑

防腐防护技术的实施要依靠跨学科、复合型专业团队的技术支持,创建起材料科学、结构工程、电化学、检测技术、信息技术等多学科融合的团队体系,从而达成技术研发、施工执行、监测保养的全方位技术保证。团队组建重视专业人才合理搭配,吸纳材料专业人才负责防腐材料选型、改性和应用研究,结构工程人才负责金属结构腐蚀风险点分析和防护方案结构适配设计,电化学人才负责电化学防护系统设计和调试,检测技术人才负责监测设备布设和检测数据解析,信息技术人才搭建智能监测数据处理平台,实现各个专业人才优势互补。人才培养建立常态化的培训交流机制,定时安排技术人员参加防腐防护领域前沿技术的培训,学习新型材料、智能监测设备的应用技术。加强同科研院所、高校的产学研合作,进行联合技术攻关,解决工程实际中出现的防腐技术问题,培养出一批后备技术人才。组织技术人员参加类似工程的施工观摩、经验交流,吸取先进的施工工艺、管理方法,提高团队的操作水平和创新能力。技术管理建立技术交底和技术复核制度,施工前技术负责人对施工人员进行详细的施工工艺、质量标准、安全注意事项的技术交底。施工过程中对重要工序做技术复核,及时发现并改正施工偏差,保证技术策略的准确执行。建立技术档案管理制度,对施工过程、检测数据、维护记录等进行全方位的归档,给以后工程提供技术参考。

### 3.3 政策引领, 资金保障促发展

政策引领和资金保障给防腐防护技术的创新研发和工程应用赋予制度和物质支持, 由政策引导来规范行业发展, 资金投入促使技术创新和成果转化。政策上出台水利水电工程金属结构防腐防护技术规范和质量验收标准, 规定防腐防护技术要求、施工标准、验收指标, 为工程实施提供政策依据。创建技术创新激励机制, 对研发新型防腐材料、智能监测系统的企业或单位给予政策支持, 推动防腐防护技术更新换代。加强行业监管, 把金属结构防腐防护质量纳入水利水电工程质量监督体系, 加大对工程竣工验收中防腐防护质量的检查力度, 促使施工单位重视防腐防护工作。资金上创建多元化的资金投入体系, 政府加大水利水电工程防腐防护技术研究的财政专项经费投入力度, 重点扶持环保型防腐材料、智能监测预警系统等关键技术的研发和中试。工程建设单位将防腐防护资金单独列项, 保证防腐材料、防腐施工工艺、防腐监测设备等资金的投入, 防止由于资金不足而出现材料以次充好、施工工序简化的现象。鼓励社会资本投入防腐防护技术的产业化进程之中, 促使新型防腐材料以及智能监测设备进入大规模生产环节, 缩减技术应用的成本。资金管理实行专项核算和审计制度, 对防腐防护专项资金的使用实行全过程监管, 保证防腐防护专项资金的专款专用, 提高防腐防护专项资金的使用效率。对技术研发和工程应用的资金投入进行效益评价, 按照评价结果来调整资金投入的方向, 促使资金向性价比高、实用性好的防腐防护技术集中<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

水利水电工程金属结构防腐防护是保证工程安全、提高耐久性的重要环节。腐蚀具有复合型、多区域高发的特点, 单一的技术不能满足要求。创建复合防护、环保材料、智能监测三者融合的创新技术途径, 加上标准化施工、跨学科团队组建、政策资金扶持的全过程支撑, 可以很好地解决防护层失效、电位分布不均、监测滞后等问题。未来要继续推动技术创新, 加强材料、结构和技术与信息技术的融合, 改善技术及保障体系, 促进水利水电工程的高质量发展。

#### [参考文献]

- [1]吴育松.水利水电工程金属结构安装施工质量控制对策探析[J].现代工程科技,2025,4(24):189-192.
- [2]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.
- [3]李鑫.水利工程金属结构防腐检测与防护技术研究[J].区域治理,2025(13):0103-0105.
- [4]张文博.飞机金属结构的腐蚀类型与防护技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(4):047-049.
- [5]迟晓平,彭小明.水利水电工程金属结构制作安装细节质量控制[J].水电快报,2023,44(S2):24-26.

#### 作者简介:

陈虎东(1986--),男,汉族,湖北松滋人,中级工程师,硕士研究生,研究方向:水工金属结构。