

水工钢结构防腐处理的新方法探索

吴春光

卓资县水利局, 中国·内蒙古 乌兰察布 012300

摘要: 水工钢结构长期服役于潮湿、多介质腐蚀的复杂水环境, 传统防腐方法存在耐久性不足、维护成本高、环保性欠佳等问题。本文结合水工钢结构的服役特点与腐蚀机理, 从新型防腐材料研发、复合防护技术构建、智能化防腐监测与维护体系搭建等维度, 探索水工钢结构防腐处理的创新方法, 分析各类新方法的技术原理、适用场景及应用优势, 旨在为提升水工钢结构的服役寿命、降低工程运维成本提供理论支撑与实践参考。

关键词: 水工钢结构; 腐蚀机理; 防腐新材料; 复合防护技术; 智能化防腐

Exploration of New Method for Anti-corrosion Treatment of Hydraulic Steel Structure

Wu Chunguang

Zhuozi County Water Resources Bureau, China Inner Mongolia Ulanqab 012300

Abstract: Hydraulic steel structures are subjected to complex aquatic environments with prolonged exposure to moisture and multi-media corrosion. Conventional anti-corrosion methods face challenges including inadequate durability, high maintenance costs, and environmental sustainability issues. This study investigates innovative anti-corrosion solutions for hydraulic steel structures by integrating their operational characteristics and corrosion mechanisms. The research explores three key dimensions: development of novel anti-corrosion materials, construction of composite protection technologies, and establishment of intelligent monitoring and maintenance systems. Through analyzing the technical principles, applicable scenarios, and advantages of these innovative approaches, the study aims to provide theoretical support and practical references for extending the service life of hydraulic steel structures and reducing engineering operation and maintenance costs.

Keywords: Hydraulic steel structure; Corrosion mechanism; New anticorrosive materials; Composite protection technology; Intelligent anticorrosion

0 引言

水工钢结构作为水利工程核心构件在水闸、大坝、渡槽和跨海桥梁上得到了广泛的应用, 结构稳定与否直接影响着水利工程是否能够安全地运行。但是水工钢结构在淡水、海水和土壤侵蚀的复杂腐蚀环境中长期存在, 容易产生电化学腐蚀、应力腐蚀和微生物腐蚀等各种腐蚀破坏, 在材料科学、智能监测技术飞速发展的背景下, 开发环保高效、耐久性好、适配水工场景等新型防腐技术已成为业界关注的焦点。在此基础上, 重点研究了水工钢结构防腐处理新途径, 对已有技术瓶颈进行了梳理, 并对创新技术路径进行了探讨, 以期水利工程长效安全运行提供技术保障。

1 水工钢结构腐蚀机制分析

1.1 以电化学腐蚀为主的氧化还原

水工钢结构腐蚀以电化学腐蚀为核心机制, 实质为金属与电解质溶液反应生成原电池, 钢结构表面出现电位不同时, 阳极区金属会丧失电子进行氧化反应产生金属

离子流入溶液中; 阴极区进行还原反应, 例如溶解氧接收电子产生氢氧根离子等^[1]。如海水环境下钢结构表面碳钢由于组分不均匀而形成微电池时, 阳极区铁原子被溶解成 Fe^{2+} , 阴极区氧被还原成 OH^{-} , 两者结合后产生 $Fe(OH)_2$ 并进一步被氧化成铁锈 ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)。结果表明: 水中溶解氧含量大于 $2mg/L$, 钢铁的腐蚀速率显著增大, 该现象在水电站水库表现得尤为突出, 由于水流循环不畅而造成溶解氧的富集。

1.2 环境因素协同腐蚀

水工钢结构腐蚀速率受到了多重环境因素的协同作用, 在化学因素中, 氯离子为关键诱因, 半径较小, 穿透性较高, 能够破坏金属的表面钝化膜并加快腐蚀进程。以沿海地区为例, 当海水氯离子含量大于 $50mg/L$, 钢结构的腐蚀速率可以增加几倍。物理因素中, 水流速度通过影响腐蚀产物积累与极化作用改变腐蚀速率: 高流速 ($>1m/s$) 冲刷腐蚀产物, 暴露新鲜金属表面, 加剧腐蚀; 低流速 ($<0.1m/s$) 则导致产物堆积, 形成氧浓差电池, 加速

局部腐蚀。温度对反应速率也有明显的影响，水温每上升 10℃，腐蚀速率就会提高一倍左右，热水电站水温超过 30℃往往会引起严重的腐蚀问题。

2 水工钢结构防腐处理的新方法

2.1 稀土合金材料的改性及电弧热喷涂技术

稀土合金材料改性和电弧热喷涂技术作为增强水工钢结构防腐性能最主要的创新途径，以其优良的附着性和抗腐蚀能力在高温、高盐雾水工环境下表现出了显著的优越性，本技术采用稀土元素改性传统防腐合金粉末，添加稀土元素能有效地细化合金晶粒并增强涂层致密度和均匀性，同时加强了涂层和钢结构基体之间的结合力，从而避免了由于涂层脱落而导致局部腐蚀的问题^[2]。施工环节中，电弧热喷涂技术是采用高温电弧熔化改性稀土合金粉末，熔滴经高速气流喷溅到钢结构表面形成一层厚度均一、组织密实的防护涂层。与传统热喷涂技术相比较，稀土合金改性涂层抗电化学腐蚀能力增强显著，能够有效地阻隔水环境下氯离子和氧离子等腐蚀介质和钢结构基体之间的接触。在实际操作中，这项技术特别适合于长时间或半时间被水淹没的水工部件，如水闸闸门和渡槽钢结构支架。

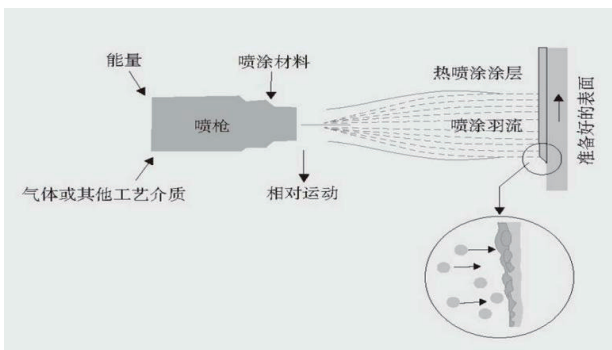


图1 电弧热喷涂技术

2.2 高性能和功能化涂料体系的革新

高性能和功能化涂料体系的创新是解决水工钢结构腐蚀环境复杂问题的核心方法，通过材料配方优化和功能设计，打破传统防腐涂料耐久性较差和功能单一等局限性新型水工防腐涂料体系采用水性聚氨酯、氟碳树脂等作为成膜材料，避免了传统溶剂型涂料的高污染缺点，同时具有环保和耐候性^[3]。在配方设计上，研究者们引入了纳米二氧化钛和石墨烯作为功能性填料，添加纳米材料可以在涂层内形成紧密的物理阻隔网络从而有效减缓腐蚀介质渗透速度，石墨烯的层状结构具有“迷宫效应”，这有助于进一步延伸腐蚀物质到达钢结构基底的途径，功能化设计使涂料具有更加实用属性，例如加入防污剂后的涂料能够抑制水工环境下海洋生物、微生物的粘附，从而避免生物腐蚀和物理磨损协同破坏；该具有自修复功能智能涂料能够在涂层产生微小裂缝后，利用内置修复剂自动渗出达到裂

缝愈合并保持防护体系完整，本涂料体系可用于各种水工钢结构表面保护，特别是跨海桥梁钢结构、水电站压力钢管及其他关键构件的表面保护效果显著，通过长时间户外暴露试验和水环境浸泡试验证实了该涂层具有耐盐雾、耐湿热和耐紫外线老化性能，各项指标优于传统涂料，提供一种水工钢结构同时具有防护性和功能性的方案。

表1 高性能和功能化涂料体系

核心方法	应用方法
高性能和功能化涂料体系的创新	解决水工钢结构腐蚀环境复杂问题的核心方法
材料配方优化和功能设计	打破传统防腐涂料耐久性较差和功能单一等局限性
新型水工防腐涂料体系	采用水性聚氨酯、氟碳树脂等作为成膜材料
环保和耐候性	避免了传统溶剂型涂料的高污染缺点
功能性填料	引入了纳米二氧化钛和石墨烯

2.3 智能化、绿色化的表面预处理和施工技术

智能化和绿色化的表面预处理和施工技术是确保水工钢结构防腐工程施工质量的先决条件，经过技术升级后达到前处理效果和施工环保性双方面的改善，传统的钢结构表面预处理大多采用喷砂除锈技术进行除锈，粉尘污染较重，除锈质量不够稳定，新型绿色预处理技术的核心是高压水射流除锈技术，本实用新型利用高压水流对钢结构表面锈蚀层和氧化皮进行撞击，并结合环保型除锈剂进行辅助除锈，达到了无粉尘、无噪音高效除锈效果，同时，避免传统喷砂技术给钢结构基体造成过多损失。基于此，将智能化技术融入其中，进一步提高预处理精准度，并通过配备视觉识别系统和智能设备能够对钢结构表面除锈等级和粗糙度进行实时检测，保证表面预处理质量满足防腐施工标准要求。从施工技术上看，采用智能化喷涂机器人使防腐涂层施工自动化和标准化，机器人能够针对钢结构复杂形状调节喷涂角度和速度，本实用新型确保涂层厚度均一，解决人工喷涂漏喷和厚涂不均匀现象，绿色化施工技术注重全过程环保管控，可以将施工废料集中回收，污水经过沉淀过滤循环使用，将施工对周围水环境影响降至最低。这一技术体系的运用不仅促进水工钢结构防腐工程施工效率和质量的稳定，也符合水利工程可持续发展理念，促进水工防腐施工向智能化、绿色化转变升级。

2.4 陶瓷复合涂层防护技术

陶瓷复合涂层保护技术作为一种适用于极端水工腐蚀环境下的高端防腐技术，以其优异的耐高温、耐磨损和耐腐蚀性能成为水工钢结构在高应力和强腐蚀条件下的一种理想保护方案，本技术利用溶胶-凝胶法和等离子喷涂法在金属基体材料上复合氧化铝和氧化锆陶瓷材料，从而制备了一种既具有陶瓷材料高硬度又具有金属材料高韧性的

复合材料涂层。陶瓷相的出现使涂层具有优良的物理和化学稳定性,能够承受水工环境下酸碱介质、强氧化剂对涂层的冲刷,而涂层具有高硬度的特点,能够有效地抵抗水流冲刷、泥沙磨损和其他物理作用使钢结构表面损伤速率减小,通过加入金属相,成功地解决了纯陶瓷涂层存在的脆性过大和容易开裂的问题,从而增强了涂层的抗冲击性和与界面的结合强度。在实践中,陶瓷复合涂层主要用于水电站水轮机叶片和泄洪闸导流槽这类经受高速水流冲刷和腐蚀介质共同影响的部件,并进行了试验,这种材料的耐磨性是传统防腐涂层的超过10倍,并且在高度腐蚀的水环境中,其使用寿命可以超过15年。另外,涂层隔热性能好,能有效地阻挡高温水流对钢结构基体造成的热破坏,扩大了涂层在高温水工条件下的适用范围。陶瓷复合涂层防护技术的开发和应用,弥补了水工钢结构在极端工况防腐技术上的不足,为高难度水利工程安全运营提供坚实技术保证。

2.5 阴极保护和涂层的防护体系优化

阴极保护和涂层联合防护体系的优化是水工钢结构长效防腐至关重要的策略,这两种防护技术协同工作显著提高防护体系可靠性和耐久性,单一涂层防护容易因涂层破损导致点蚀发生,单一阴极保护具有能耗大、防护范围受限等特点,联合防护体系优势互补一下优化的联合防护体系采用高性能防腐涂层作为第一道防护屏障,屏蔽了绝大部分腐蚀介质对钢结构的暴露,减轻了阴极保护系统负荷;采用牺牲阳极阴极保护或者外加电流阴极保护作为辅助保护方式,在涂层发生断裂时阴极保护系统能够及时保护断裂处钢结构基体避免局部腐蚀扩大。体系优化时,研发人员精准计算判断涂层厚度和阴极保护参数之间是否相匹配,并采用数值模拟技术对防护体系在不同条件下的工作情况进行了仿真,对牺牲阳极排列位置和个数进行优化,促进保护电流均匀分布。同时将智能化监测系统集成到防护体系中,达到实时监测防护体系运行状况的目的,并通过钢结构表面设置腐蚀传感器能够及时反馈涂层的完整性、阴极保护电位及其他关键参数,方便运维人员进行预防性维护。这种联合防护体系广泛应用于跨海大桥钢箱梁和港口码头钢桩这类大型水工钢结构,防护寿命比单一防护技术延长了2-3倍,降低项目全生命周期运行维护成本,是水工钢结构防腐领域中使用最为广泛和成熟的技术体系。

3 水工钢结构防腐处理新方法的应用效果

3.1 长效防护,降低综合成本

水工钢结构防腐新途径的运用,使结构抗腐蚀能力得到根本增强,防护周期得到显著延长,与传统防腐技术相比较,新型防腐材料和复合防护体系协同作用可以有效地

阻隔氯离子、氧离子和其他腐蚀介质在水环境下的穿透,减缓钢结构电化学腐蚀和应力腐蚀的损伤过程,明显提高了防护层耐久性和稳定性。增加防护寿命直接降低后期养护频率,减少防腐工程重复建设费用。同时新方法在材料性能优化和防护体系设计等方面达到前期施工成本和后期运维成本之间的均衡,从而避免由于经常检修而导致项目停运丢失,从全生命周期的角度出发,减少水工钢结构综合防腐费用,为水利工程长期安全运行提供一种经济有效的解决途径。

3.2 提高了施工效率和环境友好性

水工钢结构新型防腐方法从施工技术层面上实现智能化和绿色化更新,显著提高防腐工程效率,采用智能化表面预处理设备和自动化喷涂技术,使传统施工过程中烦琐的人工操作流程得到简化,除锈、涂装过程标准化操作,减少单工序工期和总体工期,从环境友好性角度来看,新方法优先选择水性涂料和无溶剂防腐材料,取代传统的高污染高挥发性溶剂型涂料,以降低施工期有害气体排放量。绿色化预处理技术摒弃粉尘污染较重的喷砂除锈方法,减少施工对周围水环境和土壤环境影响,满足现代水利工程绿色施工发展需要,使施工效率提高和生态环境保护协同推进。

4 结语

水工钢结构防腐处理作为确保水利工程安全持久运行的关键一环,技术创新需要紧密结合水工场景腐蚀特性和工程现实需要。研究开发新型防腐材料,建设复合防护技术,建立智能化监测维护体系等措施为破解传统防腐技术之痛提供了一种行之有效的方案。今后研究仍需要在材料性能、技术适配性和成本控制上进一步突破瓶颈,促进防腐技术向绿色化、智能化和长效化发展。通过多学科技术融合和创新,水工钢结构抗腐蚀能力一定会得到显著提高,从而为中国水利工程高质量发展构筑起一道安全屏障。

参考文献:

- [1] 宋九江. 滨海地区强腐蚀环境钢结构防腐技术探讨和研究[J]. 建筑工人, 2025,46(11):19-20.
- [2] 许志敏, 蔡一平, 王煦等. 环保型低表面处理环氧厚浆涂料在江苏水工钢结构防腐维修中的应用[J]. 江苏水利, 2022(03):5-9.
- [3] 陆星儿, 吴泽俊. 水工钢结构防腐涂层剥离失效机理研究[J]. 中国航海, 2024,47(S1):159-171.

作者简介: 吴春光(1982.01-), 男, 汉族, 本科, 北京工业大学, 内蒙古自治区乌兰察布市卓资县人, 工程师, 研究方向: 主要从事水利水电工程方面研究。