

水利机械金属结构防腐蚀工艺优化实践探讨

刘雅婧 王春雨

水利部长春机械研究所 吉林 长春 130012

摘要:水利机械金属结构作为水利工程的关键部分,长时间处于高湿度、多介质侵蚀的复杂环境,腐蚀问题对于工程安全运行构成直接威胁,同时还会致使巨额经济损失。基于此,文章结合水利机械金属结构腐蚀环境与现有工艺短板,系统剖析防腐蚀工艺的优化办法,并且提出全生命周期防护保障举措,从而为水利工程金属结构的长久安全运行给予技术支持。

关键词:水利机械;金属结构;防腐蚀工艺;优化实践;复合防护

引言:水利工程属于战略性基础设施,主要保障国家水资源安全、防洪减灾以及粮食安全,而水利机械金属结构则是水利工程的“筋骨”,例如闸门、压力钢管、拦污栅、启闭机等,其运行状况直接影响着工程功能的发挥。我国水利工程数量庞大,经统计,仅大型水库就有700多座,各类金属结构的总规模达到数千万吨。然而这些金属结构长期暴露在大气、水下、干湿交替、含沙水流冲击等复杂的腐蚀环境之中,腐蚀问题愈加突出。结合相关数据,我国每年因金属腐蚀产生的经济损失高达数千亿元,其中水利设施腐蚀占比较大,部分水利机械金属结构因腐蚀使得使用寿命大幅缩短,降至设计年限的60%-70%,这不仅增加了维护检修的成本,还有可能引发闸门失效、管道泄漏等严重的安全事故。

1 水利机械金属结构腐蚀环境与现有工艺短板

1.1 典型腐蚀环境与腐蚀特征

水利机械金属结构的腐蚀环境呈现多维度、复杂的特性,据《水工金属结构防腐蚀技术规范》,可将其划分成大气区、浪溅区、水位变动区、水下区以及泥下区这五大区域。不同区域的腐蚀机理与速率有着明显差异^[1]。其中,大气区主要受紫外线、酸雨、湿度的影响,会致使涂层老化、钢材锈蚀,浪溅区和水位变动区由于氧气供给充足、电解质流动持续,形成了氧浓差电池,腐蚀速率能达到大气区的3-5倍,碳钢腐蚀速率最高可到1.2mm/年,是腐蚀最严重的区域。比如,长江流域某船闸人字门运行7年后,该区域便出现了深度超过2mm的多发性腐蚀坑;水下区面对淡水侵蚀、微生物腐蚀,水流滞缓区域很容易发生微生物诱导腐蚀;泥下区则受到土壤腐蚀与电化学腐蚀的双重作用,这导致防护面临不小的难度。另外,受沙水流的冲刷、冰凌撞击等物理作用的影响,会提高涂层磨损以及金属基体损伤,从而形成“冲刷-腐蚀”协同破坏的效应。

1.2 现有防腐蚀工艺存在的短板

1.2.1 表面预处理工艺不达标

表面预处理是保障防腐效果的重要环节之一,现部分工程项目更多注重对成本的控制,因而将喷砂除锈降改为手工除锈方式,致钢材表面清洁度欠佳,所残留锈迹、氧化皮、油污等会严重影响涂层附着力,使涂层结合力降低超30%。另外粗糙度控制精度不足,未达40-75 μm 之合理范围,难以构建有效“机械咬合”,使得涂层易剥落、起泡^[2]。

1.2.2 传统防腐材料性能局限

长期处于湿热环境下,传统的环氧树脂涂层容易出现氧化、水解反应,进而降低涂层附着力。常规防腐涂料因为没有抗菌功能,对硫酸盐还原菌等微生物腐蚀无法处理。在高紫外线、高盐雾等极端环境当中,涂层容易出现粉化、龟裂的情况,使得防护寿命不长。另外含铬酸盐等高风险物质的部分传统涂料,不符合绿色环保的要求。

1.2.3 防护体系适配性不足

目前采用的防护方案主要为单一涂层或单一热喷涂技术,没有结合实际情况和需求进行针对性设计。比如,将适用大气区的涂层体系用于水位变动区。这种情况会导出因难以承受频繁的干湿交替与水流冲击,影响防护效果;压力钢管内壁没有按照要求采用具有耐磨防腐性能的材料,因而无法有效抵御高速含沙水流的冲刷腐蚀^[3]。

1.2.4 施工与运维管理粗放

施工期间没能运用标准化的管控方式,致使焊缝、边角之类关键部位处置不够全面,焊渣、飞溅物没有彻底清理干净,成为腐蚀的薄弱;涂层施工厚度不均,部分区域的干膜厚度没能达到设计的要求。另外,运维环节借助的精准监测手段匮乏,不能实时确切知晓腐蚀的情形。过多依靠定期的巡检,很容易出现“过度维护”或

“维护得不及时”这类问题,使得管理成本得到了提升。

2 水利机械金属结构防腐蚀工艺优化方向与技术路径

2.1 表面预处理工艺升级:筑牢防护基础

2.1.1 精准化除锈工艺的运用

推广高压水喷射除锈以及激光清洗技术,以此来取代传统的手工除锈和普通喷砂除锈。高压水喷射除锈是借助于高压水流去冲击钢材表面,可将锈迹、氧化皮以及氯化物残留等有效清除掉,其清除率可达到99%以上,并且并不会产生粉尘污染,适宜于原位施工的场景。激光清洗技术则是依靠高能激光束将锈蚀层进行分解,拥有清洁度高、对基体损害较小、精准而且可控的特性,适合对焊缝、边角等复杂部位实施处理,并且并不会产生粉尘污染。在具体实施中,需要严格按照新规范要求展开操作,对关键区域的喷砂除锈等级提高到Sa3级,以此保证钢材表面不存在可见油脂、污垢、氧化皮以及铁锈的问题^[4]。

2.1.2 实现粗糙度的精确调控

借助优化喷砂介质、调整喷砂压力与距离的方式,将钢材表面粗糙度精确地控制在40-70 μm 的适宜范围之内。对于不同的防护材料,有针对性地调整粗糙度参数:如热喷涂金属涂层适宜50-75 μm 的粗糙度,以便提高涂层与基体的机械结合力度,高性能涂料涂层适宜40-60 μm 的粗糙度,防止粗糙度过高致使涂层局部厚度不够的状况发生,并且运用粗糙度仪进行实时检测,要保证每平方米检测点数最少为3个,检测的合格率要达成100%。

2.2 新型防腐材料应用:提升防护性能

2.2.1 功能化涂层材料

运用石墨烯的高阻隔性和导电性,构建起“阴极保护+屏蔽保护”的双重防护机制。将其作为底漆来应用,可使防护寿命延长到25年之上;二是功能化涂层材料的环氧玻璃鳞片涂料。经由鳞片在涂层中形成曲折的渗透路径,有效地阻隔腐蚀介质的侵入^[5]。当干膜厚度达到600 μm 以上时,适宜用于水位变动区以及浪溅区,防护期可达到25年以上;三是功能化涂层材料的自修复水性聚氨酯涂料。加入微胶囊化缓蚀剂,当涂层出现破损时可自动释放修复物质,72小时的自修复率可以达到90%以上,并且VOC含量低,契合环保要求。第四项为石墨烯无溶剂耐磨减阻涂料,适合用于压力钢管内壁,可抵御高速含沙水流的冲刷与气蚀,干膜厚度达到600 μm 就可符合使用需求,

2.2.2 高性能热喷涂材料

推广稀土锌铝合金丝以及合金涂料,运用添加铈、

钕等稀土元素的方式对锌铝合金进行改性,提高涂层的耐腐蚀性以及耐磨性。这种材料耐盐雾试验可达到3000小时,借助电弧热喷涂工艺形成的复合涂层,使用寿命预期超过30年,综合使用成本降低35%。另外,优化热喷涂材料配比,针对海洋性气候区域,研发高铝含量的锌铝合金材料,提高抗盐雾腐蚀的能力,

2.2.3 环保型辅助材料

全面替换含铬酸盐等有毒有害辅助材料,选用环保型除油剂、钝化剂。运用水性稀释剂开展推广工作,针对施工期间的VOC排放进行降低操作,从而满足新规范中关于环保以及健康防护方面提出的要求。

2.3 复合防护体系构建:实现精准适配

2.3.1 大气区防护体系

选择“石墨烯锌底漆和云铁中间漆以及聚氨酯面漆”配套方案,总干膜厚度大概是260 μm ,石墨烯锌底漆能够提供阴极保护,云铁中间漆构建屏蔽层,聚氨酯面漆拥有良好的耐候性,可有效地抵挡紫外线与酸雨的侵蚀,且保光保色性非常强^[6]。

2.3.2 浪溅区与水位变动区防护体系

运用“高压水除锈并且环氧玻璃鳞片涂层加上聚氨酯封闭漆”复合体系,干膜厚度不可低于600 μm ,或者借助“稀土锌铝合金热喷涂并且环氧封闭漆和聚氨酯面漆”体系,利用热喷涂的阴极保护以及涂层的屏蔽保护的双重作用,抵御干湿交替与水流的冲击。

2.3.3 水下区及泥下区防护体系

选用“无机富锌底漆以及环氧云铁中间漆以及聚氨酯面漆”配套方式,总干膜厚度在270 μm 左右,以此提升防水防潮以及耐土壤腐蚀的能力。对于水下闸门这类关键的结构,运用“涂层并且阴极保护”联合防护手段,借助牺牲阳极或者外加电流法来进行辅助防护,填补涂层破损后的防护缺失情况。

2.3.4 压力钢管内壁防护体系

选用“石墨烯无溶剂耐磨减阻涂料”单一涂层或者“环氧底漆以及耐磨陶瓷涂层”复合体系,干膜厚度超过600 μm ,抵挡高速含沙水流的冲刷以及气蚀,同时把水流阻力降低,将能源利用效率提升。

2.4 智能化施工与监测技术融合:提升管控水平

2.4.1 智能化施工管控

借助AI视觉针孔检测系统来代替人工检测,以此提高检测工作效率。这种方式能够精准地识别出涂层针孔、气泡等各类缺陷;运用自动化喷涂机器人,可对涂层施工进行有效控制。在这环节中,需要保证干膜厚度偏差被控制在 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内;另外,创建施工全过程数字化档案,

最好表面预处理参数、涂料配比、施工环境等相关数据的记录，从而达成质量可追溯的目标。

2.4.2 全生命周期监测预警

在金属结构关键之处埋入嵌入式腐蚀传感器，主要是对腐蚀电位、Cl⁻浓度、温度、结构应变等参数开展实时性监测；针对水下结构，选用无线电位遥测技术，每两小时对阴极保护状态数据进行一次采集，依靠机器学习算法来分析监测数据，能提前30天对腐蚀失效风险发出预警，准确率在85%以上。另外，还可利用红外热成像技术与电化学阻抗谱相联合的方式，定期对涂层完整性展开评估，达成“事前预警、精准维护”的目的。

3 防腐蚀工艺优化的保障措施

3.1 严格执行规范标准

积极落实《水工金属结构防腐蚀技术规范》所提的各项要求，不断规范防腐蚀工作，具体包括设计、施工、检验、验收、维护等流程。在设计环节中，依据腐蚀环境等级，开展有针对性的防护方案设计工作，使防护体系与结构使用年限相契合；在施工阶段，对表面预处理质量、涂料配比、施工环境等关键环节给予严格把控，坚决杜绝违规施工；验收阶段，借助第三方检测机构来实施质量验证工作，保证涂层附着力、干膜厚度、清洁度等这些指标能达到标准。

3.2 加强技术研发与推广

鼓励企业和科研院校展开深入合作，主要围绕新型防腐材料、智能化施工设备、精准监测技术方面进行研发，重点攻克极端环境防护材料、自修复材料、无线传感监测这些关键技术，合理构建“基础研究以及工程验证”的技术转化机制。另外还要加强行业技术方面的交流，积极推广优秀优化案例与成熟技术，以此来提高行业整体的防腐水平。

3.3 建立全生命周期管理体系

构建“设计-施工-运维”的全生命周期防护管理模式，通过建立防腐工程的电子档案，可对施工数据以

及监测数据、维护记录这些信息进行有效整合，使得数据长期能够进行追溯。另外，相关人员还需定期对腐蚀状态进行评估，按照监测数据制定精准的维护方案，避免出现“过度维护”或是“维护缺失”的情况，针对达到了使用年限的防护层，需及时开展翻新改造的工作，以保证金属结构处在有效防护的状态之中。

3.4 强化环保与安全管控

施工过程中应严格执行环保要求，合理运用环保型的材料以及无粉尘的除锈工艺，以此来减少VOC的排放以及粉尘的污染。同时还要强化施工人员的健康防护意识，配备专业防护装备，并进行安全技术培训工作，从而防止涂料中毒、机械伤害等安全事故的出现。最后，建立环保以及安全的应急预案，以此应对施工过程中当中的突发环境和安全方面的问题。

结语：

综上所述，通过对水利机械金属结构防腐蚀工艺的合理优化，能够进一步保障我国水利工程安全运行，有效降低生命周期成本。针对现阶段面临的复杂腐蚀环境以及传统工艺存在的不足，需要采取合理的方式对工艺进行优化，从而实现可持续发展目标。

参考文献

- [1]王继洋.基于智能算法的农田水利机械调度优化系统设计[J].南方农机,2025,56(13):80-82+86.
- [2]孟繁宇.水利机械设备的智能化改造与升级[J].智慧中国,2025(6):96-97.
- [3]彭书斌,庄乾彪,张科鹏,马腾.辽宁金哨水利枢纽生态机组水力机械设计研究[J].东北水利水电,2025,43(1):15-17.
- [4]唐会东.基于深度学习的农田水利灌溉机械运行异常检测方法[J].南方农机,2025,56(6):123-125.
- [5]姜力铭.农业节水灌溉技术及灌溉机械在农田水利工程中的应用[J].南方农机,2025,56(14):73-75.
- [6]杨文强,汪勤钢,万法龙.水利泵站机械制造与设备工程的协同优化研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(11):298-300.