

乌鲁瓦提水电站金属结构腐蚀防控与检修技术研究

左明明

新疆维吾尔自治区塔里木河流域乌鲁瓦提水利枢纽管理中心

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6956

[摘要] 乌鲁瓦提水电站作为塔里木河流域控制性骨干工程,其金属结构(包括弧形闸门、人字闸门及各类启闭机)长期处于高含沙水流、强紫外线辐射、昼夜温差大及盐碱土壤等极端复杂环境中,面临着严峻的腐蚀失效风险。金属结构的完好与否直接关系到电站的防洪安全、发电效益及大坝的整体稳定性。本文系统综述了乌鲁瓦提水电站金属结构所处的特殊环境腐蚀机理,深入分析了闸门门叶、止水系统及启闭机传动部件的典型腐蚀形态与演化规律;探讨了以“表面预处理-高性能涂层体系-阴极保护”为核心的综合防腐技术路径;详细阐述了基于无损检测技术的腐蚀状态评估方法与全生命周期检修策略。

[关键词] 乌鲁瓦提水电站; 金属结构; 闸门; 启闭机; 腐蚀防控; 高含沙水流; 无损检测; 全生命周期管理

中图分类号: TV741 文献标识码: A

Research on Corrosion Prevention and Control as well as Maintenance Technology for Metal Structures at the Uluwati Hydropower Station

Mingming Zuo

Uluwati Water Conservancy Hub Management Center, Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] As a pivotal control project in the Tarim River Basin, the Uluwati Hydropower Station's metal structures—including arc gates, herringbone gates, and various hoisting mechanisms—have endured prolonged exposure to extreme conditions: high-sediment flows, intense ultraviolet radiation, significant diurnal temperature variations, and saline-alkali soils, posing substantial corrosion risks. The integrity of these metal structures directly impacts the station's flood control safety, power generation efficiency, and overall dam stability. This paper systematically examines the corrosion mechanisms under the station's unique environmental conditions, analyzes typical corrosion patterns and evolution trends in gate leaves, water-stop systems, and hoisting mechanism components, and proposes an integrated corrosion prevention strategy centered on "surface pretreatment-high-performance coating systems-cathodic protection." It also details corrosion assessment methodologies utilizing non-destructive testing technologies and comprehensive lifecycle maintenance strategies.

[Key words] Uluwati Hydropower Station; Metal structures; Gates; Hoisting machines; Corrosion prevention and control; High-sediment flow; Non-destructive testing; Full life cycle management

引言

新疆维吾尔自治区地处我国西北内陆,气候干燥,蒸发量大,且塔里木河流域泥沙含量极高,这种独特的自然地理环境对水利工程的金属结构提出了极为严苛的挑战。乌鲁瓦提水电站位于和田河下游,是塔里木河综合治理的关键控制性工程,承担着防洪、灌溉、发电及生态补水等多重功能。其金属结构系统庞大而复杂,主要包括泄洪排沙底孔弧形闸门、进水口人字闸门、深孔工作闸门以及配套的液压启闭机、卷扬式启闭机等设备。这些金属构件长期浸泡或暴露于高流速、高含沙量的水体中,

同时承受着强烈的太阳紫外线辐射、剧烈的温度变化以及土壤中的氯离子侵蚀。

长期以来,由于环境条件的恶劣性和维护资金的限制,部分早期建设的金属结构出现了不同程度的腐蚀、磨损和疲劳损伤,如门叶钢板锈蚀穿孔、焊缝开裂、止水橡胶老化失效、启闭机钢丝绳断丝及齿轮箱锈蚀卡阻等。这些问题不仅增加了设备的运行能耗和维护成本,更可能引发突发性安全事故,威胁大坝安全。传统的“事后维修”模式已无法适应现代水利工程对安全性、经济性和耐久性的要求。因此,深入研究乌鲁瓦提水电站金

属结构的腐蚀机理,构建科学有效的腐蚀防控体系,优化检修技术与策略,已成为当前水利行业亟待解决的重要课题。本文旨在全面梳理该工程金属结构的腐蚀现状,分析关键技术难点,总结防腐与检修的成功经验,并探讨未来智能化、绿色化的发展趋势,以期提升我国西北干旱区水利枢纽金属结构的运维水平提供系统性指导。

1 乌鲁瓦提水电站金属结构腐蚀环境特征与机理分析

理解腐蚀发生的物理化学环境是制定防控策略的基础。乌鲁瓦提水电站的金属结构腐蚀并非单一因素作用的结果,而是多种环境因子耦合效应的产物。

1.1 高含沙水流冲刷与空蚀磨损协同效应

和田河以含沙量高著称,尤其在汛期,水流中携带大量粒径不一的石英砂颗粒。当高速水流通过闸门槽或流经门叶表面时,泥沙颗粒对金属表面产生强烈的切削和冲蚀作用。这种机械磨损会破坏金属表面的钝化膜和防腐涂层的完整性,使基体金属直接暴露于腐蚀介质中,从而加速电化学腐蚀进程。更为严重的是,在高流速区域,泥沙的撞击容易诱发局部空化现象,形成微射流冲击金属表面,导致材料发生空蚀剥落^[1]。在“冲刷-磨损-腐蚀”的三向协同作用下,金属结构的损耗速率远超单纯的水化学腐蚀或单纯的机械磨损,特别是在弧形闸门的支铰部位和门叶下缘,常出现严重的减薄甚至穿孔现象。

1.2 干湿交替与盐碱土壤的电化学腐蚀

水库水位频繁升降导致闸门及启闭机部分结构长期处于干湿交替状态。在水位变动区,氧气供应充足,且水分蒸发后盐分浓缩,形成了高浓度的电解质溶液,极易诱发电化学腐蚀。特别是塔里木河流域土壤中含有较高的氯化物和硫酸盐,这些腐蚀性离子通过毛细作用渗入混凝土结构或直接接触金属构件,显著降低了金属的耐蚀性。对于埋入土下的启闭机基础及轨道梁,土壤电阻率低且含有氯离子,构成了典型的土壤腐蚀环境,导致钢结构底部和连接螺栓发生严重的点蚀和应力腐蚀开裂。此外,该地区昼夜温差极大,金属热胀冷缩产生的交变应力与腐蚀介质的共同作用,极易诱发应力腐蚀裂纹,尤其是在焊接残余应力集中的焊缝区域^[2]。

1.3 强紫外线辐射与大气老化效应

新疆地区海拔较高,大气稀薄,紫外线辐射强度远高于东部地区。长期暴露在阳光下的启闭机钢结构、栏杆、走道板及外露的油漆涂层,会受到紫外线的强烈光氧化作用。高分子材料(如橡胶止水、油漆漆膜)在紫外线照射下会发生链断裂、交联或降解,导致材料变硬、脆化、龟裂和粉化。一旦防腐涂层失去保护作用,金属基体将直接暴露于高温、高湿和强紫外线的环境中,加速氧化生锈。这种大气老化效应使得外露金属结构的表面状态恶化速度加快,若不及时修补,锈蚀将迅速向深层发展,严重影响结构的承载能力和外观形象。

2 典型金属结构腐蚀形态识别与无损检测评估技术

准确识别腐蚀形态并量化评估损伤程度,是制定检修方

案的前提。现代无损检测技术在这一过程中发挥着不可替代的作用。

2.1 闸门门叶与止水系数的腐蚀形貌特征

闸门门叶是受腐蚀最严重的部件之一。在乌鲁瓦提工程中,常见的腐蚀形貌包括:均匀腐蚀导致的整体壁厚减薄,主要发生在门叶背水面和水位变动区;点蚀坑,多出现在焊缝热影响区及涂层破损处,具有隐蔽性强、危害大的特点;缝隙腐蚀,常见于门叶与止水座环的连接缝隙、拉杆连接处等积水死角;以及磨蚀坑,由泥沙冲刷造成,通常呈蜂窝状分布。止水系统方面,橡胶止水带因长期浸泡和紫外线老化,常出现龟裂、变形、脱落或永久压缩变形,导致止水失效,进而引起门叶背面漏水,加剧局部腐蚀。此外,门叶表面的拉毛、划痕等缺陷也会成为腐蚀的起始点^[3]。

2.2 启闭机传动系统的磨损与锈蚀耦合分析

启闭机作为动力执行机构,其传动部件(钢丝绳、滑轮组、齿轮箱、液压缸)的腐蚀与磨损同样值得关注。钢丝绳在潮湿环境中易发生氢脆和电化学锈蚀,加之反复弯曲和泥沙磨损,断丝率显著增加。齿轮箱内若密封不良,雨水或湿气侵入会导致润滑油乳化,加速齿轮和轴承的磨损与锈蚀。液压缸活塞杆表面若镀层受损,在含沙水流冲刷下极易发生拉伤和点蚀,导致漏油。对于启闭机的轨道梁,除了底部的土壤腐蚀外,轨道顶面因车辆行走摩擦导致防腐层磨损,进而引发锈蚀,影响启闭机运行的平稳性。

2.3 基于多源融合的无损检测与寿命评估方法

针对上述复杂的腐蚀形态,传统的人工目视检查已难以满足精度要求。目前,乌鲁瓦提水电站逐步引入了多源融合无损检测技术。超声波测厚仪用于精确测量门叶钢板的剩余厚度,识别均匀减薄和局部点蚀深度;磁粉探伤和渗透探伤用于检测表面及近表面的裂纹和缺陷;射线探伤(RT)则用于评估焊缝内部的质量状况。针对水下和隐蔽部位,采用了水下机器人(ROV)搭载高清摄像和声呐成像系统,实现了对闸门槽、门叶背面的全方位扫描。此外,利用涡流检测技术评估导电涂层的厚度和附着力,通过红外热成像技术发现涂层下的脱层和空洞。基于采集到的海量数据,结合腐蚀速率模型和有限元分析,可以建立金属结构的数字孪生模型,预测其剩余使用寿命,为决策提供科学依据^[4]。

3 综合腐蚀防控体系构建与关键检修技术应用

面对复杂的腐蚀环境,单一的防护措施往往难以奏效,必须构建“源头控制-过程防护-末端治理”的综合防控体系,以及合理应用检修技术。

3.1 高性能涂层体系设计与表面预处理工艺

涂层防护是金属结构防腐的第一道防线。针对乌鲁瓦提的环境特点,推荐采用“环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+聚氨酯面漆”或“无机硅酸锌底漆+氟碳面漆”的重防腐涂层体系。底漆需提供优异的阴极保护性能和附着力,中间漆增强屏蔽作用,面漆则需具备极强的耐候性、抗紫外线和耐冲刷能力。表面预处

理是涂层成功的关键,必须严格执行Sa2.5级或Sa3级喷砂除锈标准,彻底清除油污、氧化皮、焊渣及旧涂层,并控制表面粗糙度在40-70 μm 之间,以增加涂层锚固力。

3.2 牺牲阳极与外加电流联合阴极保护技术

对于长期浸没在水下的金属结构,仅靠涂层是不够的,必须辅以阴极保护技术。在乌鲁瓦提水电站,广泛采用了牺牲阳极法,即在门叶、闸门槽及启闭机支架上安装铝锌铝合金或镁合金阳极块,利用电位差原理,使被保护金属成为阴极而免受腐蚀。对于大型水工金属结构或涂层破损严重的区域,可升级为外加电流阴极保护系统(ICCP),通过直流电源向被保护体施加负电流,强制其极化至免蚀区。该系统配备恒电位仪和参比电极,可根据环境水质变化自动调节输出电流,确保保护电位始终处于最佳范围。在实际应用中,常采用“涂层+牺牲阳极”或“涂层+外加电流”的联合保护模式,既降低了电流消耗,又提高了保护的可靠性。

3.3 结构优化设计与防冲耐磨材料应用

从设计源头入手,优化金属结构形态也是防控腐蚀的重要手段。例如,改进闸门止水结构,采用双面止水或充水封头设计,减少缝隙腐蚀风险;在易受泥沙冲刷的部位(如门叶下缘、导叶边缘),堆焊碳化钨硬质合金或喷涂陶瓷复合材料,显著提高抗磨蚀性能。对于启闭机钢丝绳,选用镀锌高强度钢丝并涂抹专用润滑脂,定期更换为不锈钢芯钢丝绳以提高耐腐蚀性。

4 检修策略优化与工程实践案例分析

科学的检修策略能够有效平衡安全与成本,通过典型案例的实践验证了综合防控技术的有效性。

4.1 基于状态监测的预防性检修策略实施

改变了过去“坏了再修”或“定期大修”的粗放模式,建立了基于设备健康状态的预防性检修策略。利用在线监测系统实时采集振动、温度、电流、泄漏等数据,结合定期无损检测结果,动态评估设备健康状况。根据评估结果,将检修任务分为“日常巡检”、“计划性消缺”和“大修改造”三个等级。对于轻微锈蚀,安排日常保养进行打磨补漆;对于中度腐蚀或磨损,制定专项修复计划,利用停机窗口进行局部加固和涂层重涂;对于严重损伤或达到寿命极限的部件,立即启动大修或更换程序。这种分级管理策略,既避免了过度维修造成的资源浪费,又防止了维修不足引发的安全事故^[5]。

4.2 典型工程案例: 弧形闸门门叶腐蚀修复与加固

以乌鲁瓦提水电站某号弧形闸门为例,该闸门投运十余年后,门叶腹板出现多处点蚀和冲刷坑,最大深度达8mm,且部分焊缝存在微裂纹。检修团队首先采用高压水射流和喷砂技术彻底

清除锈蚀层,对焊缝进行UT和MT检测,确认无结构性裂纹后,对点蚀坑进行挖补焊接修复,并打磨平整。随后,重新涂装了三层重防腐体系,并在门叶底部安装了铝锌铝合金牺牲阳极块。修复完成后,经过两个汛期的运行监测,未发现新的腐蚀迹象,振动值稳定在允许范围内。此次修复不仅恢复了闸门的过流能力,还延长了其服役寿命至少15年,节约了更换新门叶的巨额资金,取得了显著的经济和社会效益。

4.3 启闭机液压系统密封升级与防锈处理

针对启闭机液压系统频繁漏油和油缸锈蚀的问题,实施了密封系统升级和防锈改造。将原有的普通橡胶密封圈更换为耐高温、耐老化的氟橡胶组合密封件,并改进了防尘圈结构,有效阻止泥沙进入油缸。同时,对油缸活塞杆表面进行了激光熔覆碳化钨处理,大幅提高了硬度和耐磨性。在液压油箱和管路外部,涂刷了隔热防腐涂料,减少了环境温度对液压油性能的影响。改造后,液压系统泄漏率降至零,故障停机时间减少了90%,启闭动作更加平稳可靠。

5 结语

乌鲁瓦提水电站金属结构的腐蚀防控与检修是一项涉及材料科学、力学、电化学及机械工程等多学科的系统工程。面对高含沙水流、强紫外线及盐碱环境的严峻挑战,必须摒弃传统的经验主义,转而依靠科学的腐蚀机理分析和先进的检测评估技术。通过构建“高性能涂层+阴极保护+结构优化”的综合防控体系,并结合基于状态的预防性检修策略,可以有效遏制金属结构的腐蚀进程,延长设备使用寿命,保障电站的安全稳定运行。

【参考文献】

- [1]武鹏波,孙帅辉,郭鹏程,等.水轮机涂层冲击磨损和空蚀行为研究[J].水利学报,1-14[2026-04-15].
- [2]陈晓华,满成,甄永泰,等.海上光伏关键结构的腐蚀与防护综述[J].中国腐蚀与防护学报,2026,46(02):315-326.
- [3]郭穗,张鹏,艾远高,等.基于角度测量的弧门开度检测方法研究与应用[J].水电站机电技术,2026,49(02):54-60.
- [4]龙腾,管国荣,陈健,等.群洞效应对穿越活动断层高压水工隧洞群抗错断性能的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2026,45(02):509-524.
- [5]树森,吴立亚.水闸结构健康状况检测及评价方法研究[J].中国科技纵横,2026,(02):122-124.

作者简介:

左明明(1990--),男,汉族,湖南省岳阳市湘阴县人,大学本科,当前职称:水利工程师,研究方向:水电站的防腐防控方向。