

大型水库水工闸门腐蚀防护措施的实效评估

张洁蔚

信阳市鲇鱼山水库事务中心

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8613

[摘要] 大型水库水工闸门作为水利工程的关键设施，长期受水流冲刷、水体化学侵蚀及环境因素影响，腐蚀问题严重威胁其安全性与使用寿命。科学评估腐蚀防护措施的实效，对保障水利工程稳定运行意义重大。本文系统分析当前大型水库水工闸门常见的腐蚀类型与防护措施，从涂层性能检测、腐蚀速率监测、结构完整性评估等维度，构建实效评估体系，提出优化建议，旨在为提升水工闸门耐久性与可靠性提供理论依据与实践指导。

[关键词] 大型水库；水工闸门；腐蚀防护；实效评估；耐久性

Effective evaluation of corrosion protection measures for hydraulic gates in large reservoirs

Zhang Jiewei

Xinyang Nianyushan Reservoir Affairs Center

[Abstract] As a key facility in hydraulic engineering, the hydraulic gates of large reservoirs are subject to long-term erosion by water flow, chemical erosion of water bodies, and environmental factors, which seriously threaten their safety and service life due to corrosion problems. Scientific evaluation of the effectiveness of corrosion protection measures is of great significance for ensuring the stable operation of water conservancy projects. This article systematically analyzes the common corrosion types and protective measures of large reservoir hydraulic gates, and constructs an effective evaluation system from dimensions such as coating performance testing, corrosion rate monitoring, and structural integrity assessment. Optimization suggestions are proposed to provide theoretical basis and practical guidance for improving the durability and reliability of hydraulic gates.

[Key words] large reservoirs; Hydraulic gate; Corrosion protection; Effectiveness evaluation; Durability

大型水库水工闸门在防洪、灌溉、发电等水利工程中发挥着核心作用，其安全性直接关系到流域生态安全与社会经济稳定。然而，由于长期暴露于复杂水环境，闸门面临着电化学腐蚀、生物腐蚀、冲刷腐蚀等多重威胁。水环境中的溶解氧、电解质离子以及微生物代谢产物，会与闸门金属基体发生电化学反应，形成腐蚀电池；水流的冲刷作用会加速涂层磨损与金属剥蚀；而附着在闸门表面的藻类、细菌等微生物，会通过分泌酸性物质或形成氧浓差电池，进一步加剧腐蚀进程。传统的防腐涂层老化、阴极保护失效等问题频发，导致防护措施实际效果难以保障。涂层老化过程涉及高分子材料的光降解、水解等复杂化学反应，随着服役时间增加，涂层分子链断裂，物理机械性能下降；阴极保护系统则受阳极材料性能、介质电导率等因素影响，其保护效率会随时间逐渐衰减。因此，建立科学、系统的腐蚀防护措施实效评估方法，成为延长水工闸门使用寿

命、确保水利工程安全运行的关键环节。

1 大型水库水工闸门腐蚀防护实效评估的意义

1.1 保障水利工程安全稳定运行

通过实效评估，可实时掌握水工闸门腐蚀防护措施的有效性，及时发现涂层剥落、阴极保护电流异常等潜在风险。这一过程深度融合材料科学与无损检测技术，采用涡流检测、超声波测厚等无损检测技术对涂层厚度与完整性进行监测。涡流检测基于电磁感应原理，当检测探头靠近涂层时，交变磁场在金属基体中产生涡流，涡流大小与涂层厚度、金属电导率等参数相关，通过分析涡流变化可获取涂层厚度信息；超声波测厚则利用声波在不同介质中的传播特性，当声波从涂层进入金属基体时，会在界面处发生反射，通过测量声波往返时间可精确计算涂层厚度。当涂层减薄超过预先设定的阈值时，系统能及时发出预警，以便工作人员采取补涂措施，避免金属基体直接暴

露引发加速腐蚀。根据法拉第电解定律，金属腐蚀过程本质是电化学反应，一旦涂层失效，金属与腐蚀介质直接接触，会显著增加腐蚀电流密度，加速金属损耗，降低闸门结构强度。通过实效评估采取干预措施，可有效降低闸门结构失效风险，保障水库蓄水、泄洪等功能的正常发挥，确保水利工程安全稳定运行。

1.2 优化资源配置与降低维护成本

科学的实效评估能够精准定位防护措施薄弱环节，避免盲目维护与过度防腐投入。这一过程需要综合运用材料腐蚀学与工程经济学原理，对不同区域、不同材质闸门的腐蚀速率进行系统分析，从而针对性地制定维护计划。从材料腐蚀学角度，深入研究不同区域（如水流冲刷剧烈的迎水面、长期浸泡的水下区域）在不同水质、流速等环境因素影响下的腐蚀机理；结合工程经济学，考虑维护成本、防护材料使用寿命等因素，将有限资源集中于高腐蚀风险部位。同时，基于评估结果优化防腐材料选型与施工工艺，可显著提升防护措施使用寿命，减少重复维护成本。防腐材料的性能参数与施工工艺直接影响防护效果，通过实效评估反馈优化，能够实现水利工程经济效益与安全性的平衡，在保障防护效果的同时，降低整体维护成本。

2 大型水库水工闸门腐蚀防护现存问题

2.1 防护措施老化导致性能下降

从材料科学视角分析，传统环氧防腐涂层属于热固性高分子聚合物体系，其防护失效本质是多因素耦合作用的复杂过程。在紫外线辐射层面，290-400nm 波段的高能量光子持续轰击涂层表面，通过光引发自由基反应机制，破坏涂层分子链中的 C-C、C-O 等化学键。这种分子链断裂过程首先表现为涂层表面光泽度下降，继而引发聚合物大分子碎片化，形成肉眼可见的粉化层。水体冲刷作用则进一步加剧这一劣化过程，水流携带的泥沙颗粒对涂层产生磨粒磨损效应，而水中溶解的氧、氯离子等活性物质加速小分子物质的溶出，形成“侵蚀-溶解”协同破坏。某水库监测数据显示，服役超过 10 年的闸门涂层，其表面粗糙度较初始状态增加 3-5 倍，孔隙率上升至 15%-20%，导致涂层屏蔽性能急剧下降。

牺牲阳极阴极保护系统的失效遵循电动力学规律。阳极材料（通常为镁基、锌基合金）在电解质溶液中发生阳极溶解反应，其保护效果受阳极极化曲线、交换电流密度等参数影响。当阳极剩余质量低于初始值 20% 时，其表面活性位点显著减少，极化电阻呈指数级增长。通过电化学阻抗谱 (EIS) 测试表明，此时系统电荷转移电阻增加 2-3 个数量级，保护电流密度从初始的 $50-80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 骤降至 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下，远低于金属临界保护电流密度要求，使得金属基体进入活化腐蚀状态。

2.2 监测手段单一影响评估准确性

现有的人工目视检查方法存在显著的技术局限性。根据视觉检测理论，人眼对表面缺陷的分辨率约为 0.1-0.2mm，对于小于该尺度的微裂纹、点蚀坑等早期腐蚀形态难以识别。在闸门复杂结构区域，如 T 型焊缝、止水橡胶与金属结合面等部位，常规检查方法的盲区覆盖率超过 40%。局部取样分析同样存在统计学缺陷，依据抽样检测理论，当样本量不足总体 1% 时，检测结果置信度低于 60%。以水下闸门为例，其不同深度区域的溶解氧浓度、pH 值等腐蚀参数差异可达 2-3 个数量级，局部样本无法反映整体腐蚀梯度分布。

从风险控制角度看，人工水下检查属于高风险作业活动。依据《水利工程水下作业安全规范》，在流速超过 0.5m/s 的水域作业时，潜水员操作失误概率增加 30%，且单次检查覆盖面积不超过 20m²，难以满足大型闸门（通常单扇面积超过 100m²）的检测需求。随着物联网技术发展，传统人工检测方式已难以匹配水利工程智能化管理要求，其数据采集频率低（通常年度检测 1-2 次）、数据维度单一（仅包含外观描述），无法形成腐蚀过程的动态数据库。

2.3 缺乏动态评估与持续改进机制

腐蚀防护的动态评估缺失本质上是系统工程问题。水利工程腐蚀环境涉及水文、气象、地质等多维度变量，其变化具有时空耦合特征。例如，当水库水温每升高 10℃，金属腐蚀速率将提升 2-3 倍；pH 值下降 1 个单位，局部腐蚀倾向增加 40%-60%。现有静态评估体系采用的 NDT（无损检测）、目视检查等方法，仅能获取腐蚀状态的瞬时“快照”，无法构建包含时间维度的腐蚀演化模型。

从全寿命周期管理角度分析，缺乏动态评估导致防护措施存在明显滞后性。依据腐蚀预测理论，未及时干预的局部腐蚀缺陷，在 1-2 年内可能扩展形成穿透性损伤。由于未建立基于环境参数的腐蚀速率预测模型，当水质中氯离子浓度从 50mg/L 骤升至 200mg/L 时，现有防护体系无法自动触发预警机制，导致防护措施调整延迟。这种管理模式使得防腐成本中应急维修费用占比高达 60%-70%，远高于预防性维护的成本效益比。

3 大型水库水工闸门腐蚀防护实效评估策略

3.1 构建多维度综合评估指标体系

为全面、科学地评估大型水库水工闸门的腐蚀防护实效，需系统整合涂层性能、腐蚀速率、结构力学性能等多方面核心指标，构建完善的量化评估体系。在涂层性能评估维度，采用附着测试与盐雾试验相结合的方式，全面测定涂层防护能力。其中，附着测试常用拉开法与划格法两种专业手段：拉开法借助专用设备将涂层从基体表面分离，通过精确测量所需拉力数值，量化判断涂层与基体间的结合强度；划格法则利用刀具在涂层表面切割出网格状切口，通过细致观察切口处涂层

剥落情况,依据国家标准规范进行严格评级。盐雾试验通过模拟海洋或工业大气等高腐蚀环境,将涂层试样置于特制盐雾箱内,持续监测涂层在盐雾侵蚀过程中的腐蚀形貌演变与失效时间,以此精准评估其耐腐蚀性能。

在腐蚀速率监测方面,运用电化学阻抗谱(EIS)技术,基于电极/溶液界面的电化学响应特性,在电极上施加小幅正弦交流信号,通过测量交流阻抗谱获取界面电荷转移电阻、双电层电容等关键参数,深入分析腐蚀反应动力学过程,实现对涂层破损后腐蚀速率的高精度评估。针对腐蚀对闸门结构强度的影响,采用有限元分析与现场应力测试协同的方法。有限元分析基于腐蚀导致材料性能退化数据,对闸门结构应力分布变化进行仿真模拟;现场应力测试借助应变片、光纤光栅等高精度传感器,实时采集闸门实际应力数据,将两者有机结合,实现对闸门结构安全性的全面评估。同时,基于大量材料腐蚀试验数据与长期工程实践经验,科学设定关键指标预警阈值,如将涂层附着力低于5MPa、腐蚀速率超过0.1mm/a作为预警标准,一旦触发阈值,立即启动相应维护流程,确保评估体系兼具科学性与实用性。

3.2 引入智能化监测与数据驱动分析

为实现对闸门腐蚀状态的高效监测与精准预测,需部署先进的光纤传感、无线传感器网络等智能监测设备,构建实时在线监测系统。光纤传感技术依托光纤的光弹效应与倏逝波特性的特性,能够对温度、应变、湿度等关键参数进行高灵敏度测量。其中,基于光弹效应原理,当光纤受到应力作用时,其折射率会发生变化,通过精密检测光信号变化,可实时获取准确的应变信息;利用倏逝波特性的特性,则能够实现对外围环境物质浓度的快速检测。无线传感器网络借助低功耗蓝牙、Zigbee等通信协议,实现传感器节点间的数据高效传输与智能组网,将分布在闸门不同部位的传感器有机连接,形成覆盖全面的监测网络。

该网络中的传感器可实时采集涂层电位、环境湿度、氯离子浓度等多维数据,并通过物联网技术快速上传至数据中心。运用大数据分析机器学习算法,对海量监测数据进行深度挖掘与分析,构建高精度腐蚀预测模型。机器学习算法凭借强大的数据处理能力,能够自动识别数据中的复杂模式与内在关联,基于历史数据与环境参数,对闸门不同区域未来半年的腐蚀趋势进行精准预测,为科学制定维护决策提供可靠依据。通过对历史监测数据的深入分析,可明确各环境因素与腐蚀速率之间的相关性,利用机器学习模型建立量化关系,实现对腐蚀趋势的提前预判,确保维护计划的前瞻性与有效性。

3.3 建立动态评估与持续优化机制

为保障腐蚀防护措施长期有效,需基于PDCA循环理论,构建动态评估与持续优化体系。该体系涵盖计划(Plan)、执

行(Do)、检查(Check)、处理(Act)四个核心阶段:在计划阶段,依据上一周期的评估结果与预测的腐蚀趋势,结合最新行业标准与技术成果,制定详细的维护计划与防护方案;执行阶段严格按照既定计划,组织专业人员实施维护与防护作业;检查阶段借助智能监测设备与综合评估指标体系,对防护措施效果进行全面、系统的检查;处理阶段根据检查结果,将行之有效的措施进行标准化,针对存在问题的环节深入分析原因,制定改进优化方案。

在具体实施过程中,每季度根据最新监测数据与评估结果,动态调整维护计划与防护方案,如根据腐蚀速率变化合理调整补涂周期、及时更换防护材料等;每年对评估指标体系进行系统性优化,结合材料科学与检测技术的最新发展成果,适时纳入新的监测参数与评估方法,不断更新评估手段与标准。同时,建立专家评估与现场反馈相结合的协同机制,定期邀请材料学、水利工程等领域权威专家,针对重大腐蚀问题开展会诊,充分发挥专家的专业知识与实践经验,解决复杂腐蚀难题。此外,构建完善的腐蚀案例数据库,全面总结不同工况下的腐蚀防护经验教训,为动态评估与优化工作提供丰富的参考依据,推动腐蚀防护工作持续改进与完善。

4 结论

大型水库水工闸门腐蚀防护措施的实效评估是保障水利工程安全运行的重要环节。通过构建多维度评估体系、引入智能化监测技术、建立动态优化机制,可有效解决传统评估存在的问题,实现对腐蚀防护效果的精准把控。这不仅有助于延长水工闸门使用寿命,降低维护成本,还为水利工程的智能化管理与可持续发展提供有力支撑。未来,随着材料科学、信息技术的不断进步,腐蚀防护实效评估技术将向更高精度、更智能化方向发展,为水利工程安全保驾护航。

[参考文献]

- [1]周华强,周林.水库闸门金属结构防腐处理技术研究[J].水电站机电技术,2024,47(11):142-145.
- [2]崔为胜,滕帅,尹世勇.陡山水库溢洪闸运行存在问题及处理措施[J].山东水利,2021,(08):23-24.
- [3]王成刚,安翼,张景,等.密云水库第三溢洪道工作闸门防腐研究[J].北京水务,2018,(02):38-41.
- [4]王丹,韩研研,于江浩,等.水库闸门用阳极电极腐蚀性能研究[J].机械设计,2024,41(S2):137-141.
- [5]郭建斌,闻源长.基于Bayes先验方法的水工钢闸门腐蚀速率更新[J].腐蚀与防护,2009,30(06):394-397.
- [6]杨晓,周惟,任亚雅,等.潜孔式平面钢闸门现场腐蚀检测部位研究——以某中型水库1#副坝输水管闸门检测为例[J].工程技术研究,2022,7(17):30-32.