

闸门钢结构腐蚀机理与防护技术在水电工程中的应用研究

安润序

汉江水利水电（集团）有限责任公司丹江口水力发电厂 442700

DOI:10.12238/ems.v7i12.16382

[摘要] 闸门钢结构是组成水电工程的重要组成部分,它是控制水电工程水流量和控制水电位进行水电工程运行所必不可少的部件,但是在长期的运行过程中,闸门钢结构经常会处于高湿压含离子环境中,极易受到各类形式腐蚀的破坏,直接影响闸门的安全运行及使用寿命。本文围绕着常见水电工程运行中闸门钢结构面临的服务条件对闸门钢结构的腐蚀原因及闸门钢结构腐蚀破坏程度发展的过程进行分析,详细揭示了环境条件、材料因素、电化学反应间相互作用影响效应;对比闸门钢结构传统防腐方法和新技术处理的效果,探究了防腐过程中传统防腐手段和新技术手段的协同效果;结合工程实例,说明防腐措施可有效提升工程使用寿命和节约工程维护成本。

[关键词] 闸门钢结构; 腐蚀机理; 防护技术; 水电工程

引言

随着我国大型水力发电工程和信息化发展,闸门钢构件成为重点管理对象,其安全性、耐用性问题日趋突出。受水质变化、流速变化、温湿度变化等多种因素影响,闸门钢构件易受到严重腐蚀破坏,腐蚀不仅会导致材质硬度降低还会造成堵塞、弯折或者结构稳定性遭到破坏。传统保护方式在高压和剧烈的冲击条件下作用明显受限,因而应该建立改良材料、智能监控、全面保护的全防御体系。本文选择闸门钢构件为研究对象,首先从腐蚀机理上研究其产生和发展的过程,继而从科技构架上探索出保护思路并实现了保护手段的整合,再以典型工程实例对这些手段的保护效果及发展走向进行总结,为我国水力发电项目长效运营和设备全寿命周期管理提供借鉴。

1 闸门钢结构腐蚀机理与环境作用特征分析

1.1 水电工程运行环境对闸门钢结构腐蚀的影响规律

对水电工程闸门钢结构而言,其服役环境恶劣且复杂,包含有环境驱动腐蚀现象。闸门处于水中、大气、地表三者的交汇地带,所以其会受到温度、湿度、水中化学成分、水流速率等多种环境因素综合作用的影响;而水中溶解氧含量、酸碱值、氯化物含量、悬浮颗粒含量是影响其钢构件腐蚀速率的决定性因素。在高浓度氧气的水体中,由于电位局部不均,电化学阳极区和阴极区的电势发生偏差,发生了氧化和还原反应,构成了电化学腐蚀体系。高速水流对铁的钝化膜

冲击、促进了氧向钢铁表面传递并进行离子交换,增加了腐蚀速率。与此同时,在较高温度下,反应动力学增快,并促进金属离子的释放;而在低温时,由于冻结融化引起的频繁冻结导致的疏松小空隙或裂痕,也将成为腐蚀的重点部位。

1.2 闸门钢结构主要腐蚀类型及其形成机理

不同的腐蚀种类产生在闸门钢构件投入使用的过程中,因不同环境、压力、材质影响所造成的腐蚀过程,具有明显的地域性和多样化组合特点。腐蚀形式中最常见的是电化学腐蚀,是由于金属表面氧化物与溶液的电解质接触而产生的。当闸门水下安装后,导致闸门金属表面产生电势差,所以铁元素产生于阳极流失转化为离子,阴极部分进行氧气还原作用或是氢离子的还原过程。由于局部存在电势差以及氧浓度差的存在,进而导致电化学腐蚀不断的增强某一区域,最终导致金属表面的不断侵蚀。一般而言,缝隙腐蚀多集中在螺栓结合、焊缝边界以及密封圈等缝隙的场所,由于该处水体流动相对不利以及氧供应不足,进而形成氧差电池,故而该缝隙内部位多表现为阳极位置,从而进一步加剧了该部位金属元素的溶解损耗。

1.3 闸门钢结构腐蚀损伤演化与寿命退化规律

闸门钢结构出现的逐渐、分阶段的腐蚀破坏,这一过程大致可分为初期的表面层剥离阶段、中期的区域扩散阶段以及整个钢构件的腐蚀阶段。在这一早期阶段,外在的影响造成钢结构的表面保护层或者涂层的部分破损,使得局部产生

局部微腐蚀反应，并且这所产生的腐蚀产物在一定程度上能形成新的保护膜，可以对自身的腐蚀起到暂时的自我修复作用。但如果这种外在刺激还在存在并加重之后，便会使得保护层脱落，造成更多的金属暴露在外，腐蚀加速进行。此时我们会发现腐蚀坑以及腐蚀沟开始相互连接，局部腐蚀加剧使得钢材的面积减小，并且局部受力更加集中。一般情况下这一时期会出现非规律性的生锈痕迹和小裂口，出现了腐蚀与压力结合的情况。由于腐蚀的物质会扩大，接头处以及螺丝连接处更容易出现剥落断裂情况。末期阶段，随着腐蚀的加剧以及疲劳的影响出现裂缝贯穿以及降低承重能力，可能造成部件出现不稳或者阀门变形。

2水电工程闸门钢结构防护技术体系构成与性能对比分析

2.1 传统防护技术体系及其局限性分析

水电厂建设及运营早期阶段闸门钢构件维护多采用传统电刷漆与阴极保护相结合的防护形式，由于其技术成熟、使用成本较低、施工维护方便成为目前的主要维护方式。其中防锈漆施工是在铁皮表面形成一道物理隔离层以阻隔金属元素与腐蚀介质之间的直接接触，从而缓减了电化学反应的进程。环氧类漆、氯化橡胶漆、聚氨酯漆等属于常用的防腐涂层，具有黏结力和耐磨性好等特点。但受到水的冲击以及泥沙冲击的影响，涂层可能出现鼓泡、脱落、破裂等情况，进而导致部分区域的保护功能失效。针对某一区域的损坏，腐蚀性会加速渗入，导致产生局部损坏或全面性损坏。应用热喷涂的方法对钢铁结构进行保护，利用高温熔化的金属（如锌、铝、锌合金等）喷覆到钢表面，形成一种能够防腐的金属涂层，既可以起到防护作用，也可以起到防腐缓释作用。

2.2 新型防腐材料与复合防护技术的发展趋势

随着材料学及表面工程科学技术的进步，新材料和新型复合型涂装防护技术在水利工程中广泛使用是一个必然趋势，新技术能够增强涂装防腐阻损能力，增强防护体系的智能性和自修复性。如在防腐性涂料中高分子复合涂料因其成膜牢固性高，耐磨性能好等特点已成为新型防腐涂料主要选择。如环氧、聚脲、氟碳树脂等涂层能够形成牢固并连续的涂膜，隔绝了水分的入侵，并阻止了化学腐蚀的侵蚀。聚脲具有优异的粘接性和弹性，可以抵抗由钢结构热胀冷缩产生的变形，从而增加涂层破损时间。陶瓷及无机复合涂料因其

强度高、抗冲击性强、耐高温，已在水工闸门高压部位得到较好的应用效果。通过等离子喷涂制备的紧密结构的陶瓷涂层对磨砂和气体侵蚀有很好的保护作用。

2.3 智能监测与防护系统在腐蚀控制中的应用前景

随着智能生产与信息化技术的高度融合，智能检测与保护技术已逐渐成为闸门腐蚀管理的新趋势。通过实现“感知—解析—反馈”的闭合循环实现从腐化识别到防卫策略调整的全部自动化控制。“在线监控技术”是实现智力防卫的有效手段。通过布置电子化学传感器、腐化电压检测器、湿度传感器和气温传感器等测量设备，可以实时获取闸门结构的电势场分布及其环境参数。防腐层破损和阳极保护电流异常报警，防护系统自己监测并报警提示以避免腐蚀的持续。通过分析数据以及数字化双胞胎的使用，已经将腐蚀监测由“记录现状”转变为“预测趋势”。用累积很长一段时间的数据来建立代表闸门结构的腐蚀趋势的模型，然后给出闸门结构的状态可视化及防腐效能的评估报告。

2.4 防护体系综合性能评价与优化设计方向

闸门钢结构防护系统的性能优劣并非单纯由单一技术指标决定，而是取决于整套方案在恶劣工况下的协同作用与持续可靠性。面对水电设施所处环境的多样性及防护要求的特殊性，需要从防腐蚀效能、使用寿命、成本效益、安装便捷度以及运维便捷性等多个层面进行全面评估。传统防护涂层尽管技术完善、操作简便，但在潮湿多水和剧烈冲刷条件下性能容易衰退；多层复合防护系统凭借多种材料的协同效应大幅增强了抗老化能力，然而实际操作繁琐且经济投入较大；智能型防护技术虽然具备动态监测与自主调节功能，但传感器精度与数据处理系统的可靠性仍是制约因素。由此可见，设计优化的关键在于使防护手段与使用场景达到高度契合，确保防护系统在整个使用周期内维持稳定高效的防护效果。

3闸门钢结构防护技术在水电工程中的工程实践与应用效果分析

3.1 闸门钢结构防护工程设计原则与实施流程

水电工程中闸门钢结构的防护设计与施工是确保设施长期稳定运行的关键环节，其设计理念需满足“安全稳定、经济高效、生态友好、便于维护”的综合标准。防护措施的规划应当建立在环境腐蚀程度分析的基础上，综合考虑闸门运行特点、构造形态、材质特性以及使用年限等因素进行整体设计。在方案制定初期，必须准确划分闸门的服役环境区域，包括

完全浸没区域、间歇性浸没区域以及持续暴露区域等,这些不同区域的水质成分和溶解氧含量存在明显差异,直接影响防护系统的具体配置方案。通过腐蚀程度评估与耐蚀材料优选,制定保护层配置方案及厚度规范。上游区域需优先考虑抗冲刷特性,而下游部位则需强化防潮抗氧化功能。设计阶段必须重点分析构件应力分布特征与焊接节点布局,防止在应力集中部位出现防护性能下降的情况。

3.2 典型水电工程闸门防护技术应用案例分析

当前大中型水电项目的闸门钢结构防护技术正经历从传统方式向多元复合与智能调控的转型过程。实际工程监测数据表明,各类防护系统在复杂工况下的性能表现存在明显分化。以某特大型水电站的工程实践为例,该工程的高压区弧形闸门长期承受剧烈水流冲刷及高浓度泥沙磨损。项目初期选用的常规环氧树脂防护涂层,在投入使用 36 个月后即发生大面积鼓包脱落,部分结构表面甚至形成了深度腐蚀凹坑。在后续施工中,工程方采用了“陶瓷防护层与阴极保护”相结合的双重防护方案。其中陶瓷材料形成的保护层显著增强了结构表面的耐磨损性能,同时通过施加阴极电流有效抑制了金属构件的电化学腐蚀速率。实际运行数据表明,这种组合防护技术使设施的使用寿命延长了 1.8~2.2 倍,日常维护工作量也大幅减少。

3.3 闸门防护体系运行监测与维护管理优化

闸门防护系统的日常监测与维护工作,直接关系到工程设施能否持续稳定运行。以往依靠人工检查的方式存在诸多不足,包括检测间隔过长、检查范围有限以及问题反馈不及时等弊端,难以及时捕捉到潜在的腐蚀风险。随着水电行业信息化建设的推进,防护体系正在向“数据采集—智能分析—实时维护”的新型管理模式转型。在运行监测过程中,需要重点整合多种数据来源,通过安装电位检测装置、环境参数传感器以及电流监控设备,实现对闸门表面状况的持续动态监测。通过对监测数据的深度解析,系统能够绘制出腐蚀发展趋势曲线,便于及时发现潜在风险并发出精确警报。一旦监测到电位波动异常或保护层破损情况,系统将自动启动维修响应程序。维护策略优化的核心在于形成合理的判断标准和操作规范。依据风险程度构建多级维保框架,针对各类腐蚀问题采取定制化处理方案。

3.4 基于可持续发展的闸门防护技术创新方向

未来水电工程闸门防护技术正经历从传统“被动防护”向

“智能监测—主动修复—动态优化”全生命周期管理的转型。其发展重点在于通过可持续技术路线,达成结构可靠性、环境友好性与经济可行性的协同提升。在材料创新层面,环保型功能材料的研发成为关键突破点,包括低 VOC 复合涂层、水性环氧树脂体系以及生物可降解无机防腐剂的应用,这些材料能有效降低施工环节对生态环境的不良影响。当前,具有自主修复特性的智能防护涂层正成为学界关注焦点。当涂层表面产生细微损伤时,其内部微囊结构会主动释放修复物质,自动填补缺陷部位,显著提升防护层的耐久性。防护系统的智能化转型与数字化升级正逐步成为行业发展趋势。借助人工智能技术与海量数据分析手段,能够实现对腐蚀状况的智能识别与风险预警。

结语:

水电工程中闸门钢结构面临的腐蚀问题,是影响设施安全稳定运行的关键制约因素,其形成原因具有多元复合特性,涵盖环境条件、电化学过程、材料特性及结构设计等多方面作用机理。本研究基于腐蚀作用原理,深入探讨了闸门钢结构在多重环境因素共同作用下的腐蚀行为特征及其发展过程,揭示了各类腐蚀形态的产生原理与破坏特征。在防护技术方案的系统评估中发现,尽管传统涂装工艺和阴极保护方法具备完善的应用经验,但在复杂工况条件下的多维度腐蚀防护需求方面存在明显局限;而将新型多功能防护材料与智能化监测手段相结合的技术路线,为实现长期有效的腐蚀防护开辟了新的可能性。

[参考文献]

- [1] 王瑞明. 水工钢闸门腐蚀分析及防腐处理 [J]. 现代工程项目管理, 2024, 3 (17): 133-135.
- [2] 方瑞龙. 水利泵站钢闸门腐蚀因素与防腐对策分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2024 (33): 154-156.
- [3] 付鹏. 新泉寺泵站钢闸门腐蚀设计方案探讨 [J]. 湖南水利水电, 2024 (4): 20-21.
- [4] 王豪斌, 竦凯洁, 高海峰, 等. 某水库水工钢闸门的安全检测与评估 [J]. 小水电, 2024 (4): 75-77.
- [5] 李勤 丁鹏 余鹏翔. 基于数据回归法的水工钢闸门承载应力特性分析 [J]. 人民长江, 2023, 54 (S02): 208-210.

作者简介: 安润序, 出生年月: 1998 年 3 月 19 日, 男, 汉族, 籍贯: 山东省济南市长清区, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 水利水电。