

北方沿海地区水工钢闸门腐蚀与保护研究

梁姝颖

天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300204

摘 要： 本文先简要介绍水工钢闸门在北方沿海地区的运行情况及腐蚀问题；之后，详细分析钢闸门腐蚀现象及其对安全运行和运维成本的影响；接着，从材料、环境和微生物等多个角度探讨腐蚀发生的原因；进而，提出了相应的保护措施和策略；最终，通过案例研究验证了保护方法的有效性，并展望水工钢闸门防腐蚀未来的发展趋势，提出了优化改进的建议。

关 键 词： 水工钢闸门；北方沿海地区；腐蚀现象；腐蚀原因；保护措施

Study On Corrosion And Protection Of Hydraulic Steel Gate In North Coastal Area

Liang Shuying

Tianjin Water Planning Survey and Design Co., LTD., Tianjin 300204

Abstract： In this paper, the operation and corrosion of hydraulic steel gates in the northern coastal areas are briefly introduced. After that, the corrosion phenomenon of steel gate and its influence on safe operation and operation and maintenance cost are analyzed in detail. Then, the causes of corrosion are discussed from the perspectives of materials, environment and microorganisms. Then, the corresponding protection measures and strategies are put forward. Finally, the effectiveness of the protection method is verified through a case study, and the future development trend of anti-corrosion of hydraulic steel gate is prospected, and suggestions for optimization and improvement are put forward.

Keywords： hydraulic steel gate; northern coastal areas; corrosion phenomenon; corrosion causes; protective measure

引言

水工钢闸门作为水利工程中的重要组成部分，广泛应用于北方沿海地区的河道、水库、船闸等工程。由于北方沿海地区气候特点为寒冷、潮湿，且受海洋环境影响，钢闸门在运行过程中面临着严重的腐蚀问题。这些腐蚀问题不仅影响了钢闸门的正常运行，还可能导致结构安全隐患，增加维修成本，缩短使用寿命。

一、钢闸门腐蚀现象及影响

金属的腐蚀是金属受环境介质的化学或电化学作用而被破坏的现象。金属的腐蚀遍及国民经济各个领域，给国民经济带来了巨大的损失。水工钢闸门作为一种控制和拦截水的设施，为水利枢纽工程中的重要组成部分。近年来，随着国内外水利水电建设的飞速发展，水工钢闸门在水利工程中得到了广泛的应用^[1]。在北方沿海地区，钢闸门的腐蚀问题尤为突出，这不仅关系到工程设施的稳定运行，也直接影响着水利工程的安全性和经济性。

（一）腐蚀现象描述

1. 实地观察和调研中发现的腐蚀现象

在北方沿海地区的水利枢纽中，对钢闸门进行了细致的现场

观察与调研，发现腐蚀现象普遍且明显。钢闸门表面出现了不同程度的锈斑，有些区域甚至出现了锈瘤和层状剥落。特别是在湿度高、盐分含量大的环境下，腐蚀速率显著加快。

2. 腐蚀部位和特征

腐蚀现象在钢闸门的迎水面、水下区域以及暴露在大气中的金属构件上尤为严重。这些区域的腐蚀特征是均匀腐蚀与局部腐蚀的结合，其中局部腐蚀主要体现为点蚀和缝隙腐蚀，这些形态在严重情况下可能导致构件的结构性损坏，甚至断裂。

（二）腐蚀影响分析

腐蚀对钢闸门的影响广泛且深远。它不仅削弱了钢闸门的力学性能，降低了强度和塑性，影响其承载能力和抗动态载荷能力，而且在严重腐蚀下可能导致结构失效和安全事故。腐蚀还增

加了运维成本，因为加速了磨损，缩短了使用寿命，增加了维修和更换频率^[9]。这不仅加重了经济负担，还可能因维修停工影响水利工程的正常运行。从长远来看，腐蚀可能导致连锁反应，增加其他设施的维护成本。

二、腐蚀原因分析

钢闸门的腐蚀是一个复杂的过程，涉及多种因素的相互作用。为了有效预防和控制腐蚀，需要深入分析其成因。以下是对腐蚀原因的详细分析。

（一）材料因素

钢闸门的腐蚀与其所用钢材的化学成分和微观结构紧密相关。碳、硫、磷等元素的含量直接影响钢材的耐腐蚀性，高碳含量虽然提升硬度但降低韧性，增加腐蚀裂纹的风险。晶粒尺寸和位错密度等微观结构特征也在腐蚀中起关键作用，细小晶粒的钢材通常表现出更好的耐腐蚀性。不同类型的钢材在腐蚀敏感性上存在显著差异，例如不锈钢因含有铬、镍等合金元素而具有较好的耐腐蚀性，但在特定环境下也可能发生点蚀^[10]。

（二）环境因素

1. 长期浸于各种水中的环境

钢闸门在各种水环境中长期浸泡时，腐蚀过程受到多种环境因素的影响。溶解氧作为电化学腐蚀的关键因素，海水中的高盐分通过增强导电性，加速腐蚀。同时，水的 pH 值对腐蚀速率有显著影响，无论环境是酸性还是碱性，都可能加速腐蚀。

2. 干湿交替的环境

第一，干湿交替会导致钢闸门表面形成电解质溶液，进而形成局部电池，从而加速电化学腐蚀过程。第二，湿润和干燥区域之间的氧浓度差异也会形成氧浓差电池，这同样会促进局部腐蚀的发生。

3. 高速水流的冲击环境

在高速水流作用下，钢闸门主要受到物理磨损和腐蚀加速的影响。水流中的沙粒和硬质颗粒对钢闸门表面造成冲击磨损，削弱保护层；同时，高速水流可能破坏保护层，使基材暴露，加速腐蚀。

4. 泥沙、漂浮物、冰凌的磨拆环境

在这种环境下，钢闸门的腐蚀特点主要表现为物理磨损和局部腐蚀。泥沙、漂浮物和冰凌的机械作用会刮擦钢闸门表面，破坏保护层，从而暴露出易腐蚀的基材。这种物理磨损可能导致局部磨损和腐蚀，形成凹槽或孔洞^[11]。

5. 水面或水上部分的潮湿气氛和飞溅水雾环境

潮湿环境和水雾中的盐分加速了钢闸门的电化学腐蚀。水蒸气形成的潮湿环境为腐蚀反应提供了条件，而水雾中的盐分形成电解质层，进一步加速腐蚀。此外，湿度导致的电化学不均匀性促使钢闸门表面形成微电池，引发局部腐蚀。

总之，这些环境因素共同作用于钢闸门，导致了复杂的腐蚀现象，因此在设计和维护钢闸门时，必须考虑这些因素以采取适当的防腐措施。

（三）微生物因素

1. 微生物在腐蚀过程中的作用机制

微生物通过其代谢活动，在金属表面形成生物膜，这一过程能够促进局部电池的形成，进而加速腐蚀过程。具体而言，微生物通过其新陈代谢作用，能够在金属表面形成生物膜，这些生物膜不仅为腐蚀反应提供了有利的环境，而且能够直接参与电化学反应，从而导致金属的溶解，进一步加剧了腐蚀过程^[15]。

2. 微生物种类和数量对腐蚀的影响

不同种类的微生物对腐蚀的影响存在显著差异。例如，硫酸盐还原菌（SRB）能够将硫酸盐还原为硫化氢，这一过程显著加速了金属的腐蚀速率。微生物的密度和生物膜的厚度也会影响腐蚀速率，通常情况下，生物膜越厚，其腐蚀作用越显著。因此，有效地控制微生物的生长是减缓钢闸门腐蚀的关键措施之一。

三、钢闸门保护方法探讨

针对钢闸门在北方沿海地区的腐蚀问题，采取有效的保护措施是确保其长期稳定运行的关键。

（一）涂料防腐

涂料防腐技术通过在金属表面形成连续的防护涂层，阻断金属与腐蚀介质的直接接触。环氧类涂料因其耐化学性和附着力而广受欢迎。钢材表面需清洁无油污、无锈蚀，以增强涂料与基材的黏附力。涂料系统设计需考虑使用环境，如海水中盐分浓度、温度变化，以确保适应复杂环境并提供有效防腐。

（二）金属热喷涂

金属热喷涂技术通过高温熔化粉末并高速喷射至钢闸门表面，形成致密保护涂层。这种涂层与基材结合力强，耐腐蚀性能好。常用的材料如锌、铝及其合金能在表面形成牺牲阳极，有效防腐^[16]，喷锌技术在闸门防腐中广泛应用。然而热喷涂铝锌，要求表面处理及环境条件都十分严格，而且不允许有漏喷，一旦出现露铁点会加速铝层的腐蚀。

（三）阴极保护

阴极保护是通过外加电流的方式，保护金属不受腐蚀的技术，它是利用电化学原理，通过在金属表面施加电流，使金属表面成为电化学反应的阴极，从而抑制金属腐蚀的方法，通常采用外加电流法或牺牲阳极法，从外部向被保护体提供电子，消除露点阴、阳极之间的电位差，没有了电位差也就消除了腐蚀电流，降低了金属表面的腐蚀速率，从而实现对金属结构的保护。

（四）不锈钢材料

采用不锈钢材料是提升钢闸门耐腐蚀性的有效手段之一。通过在钢材中掺入铬、镍、钛等合金元素，可以制造出具备更强耐腐蚀性能的不锈钢材料。不锈钢材料按照基体组织通常可分为奥氏体、铁素体和马氏体等，特别是铁素体相和奥氏体相约各占一半的双向不锈钢，兼备了奥氏体不锈钢的优良韧性、焊接性与铁素体不锈钢的高强度和耐氯化物的两项优点，作为新型可焊接的结构材料在水工闸门海洋环境中得到应用，该材料能够显著增强钢闸门的整体耐蚀性，但其成本相对较高，并且在极端腐蚀条件下仍可能遭受腐蚀^[17]。

四、案例研究

（一）案例选择与背景

1. 选择北方沿海地区水工钢闸门工程

本案例选取了位于北方沿海地区的一座大型水利枢纽中的钢闸门作为研究样本。该水利工程凭借其独特的地理位置、特定的气候条件以及使用年限，在腐蚀问题上展现出显著的典型性，从而为腐蚀研究提供了具有代表性的研究对象。

2. 工程背景和运行状况介绍

该水利枢纽工程建于20世纪90年代，肩负着防洪、排涝等多重功能。钢闸门作为工程的关键组成部分，长期暴露于海水和高湿度环境中，面临严峻的腐蚀挑战。自投入运行以来，钢闸门已经历了多次维修和防腐处理，以应对其持续的腐蚀问题。

（二）腐蚀状况分析

1. 对选定工程的腐蚀状况进行现场调研和分析

对钢闸门的腐蚀状况进行了详尽的现场调研，采用了宏观检查、腐蚀产物分析、厚度测量以及金相分析等多种技术手段。这些方法的综合应用能够全面地收集和分析钢闸门的腐蚀数据，从而获得了关于其腐蚀状况的详细信息。

2. 腐蚀部位、程度和原因的详细分析

调研结果显示，钢闸门的腐蚀现象主要集中在迎水面和水下区域，特别是铰链和密封部位。腐蚀的程度从轻微的表面锈蚀到严重的局部侵蚀不等，表明腐蚀问题具有多样性和复杂性。分析原因发现，海水中的盐分、温度变化、微生物活动，以及钢闸门材料本身的缺陷是导致腐蚀的几个关键因素^[8]。这些因素的相互作用，加剧了腐蚀过程，对钢闸门的长期稳定运行构成了挑战。

（三）保护措施实施与效果评估

1. 在选定工程中实施保护措施

为应对腐蚀挑战，对其实施了包括涂料防腐、阴极保护和金属热喷涂在内的综合防腐策略。这些措施的实施旨在为钢闸门提供长期、高效的防护，以保障其结构的完整性和功能的持久性。

2. 对保护效果进行定期评估和跟踪

在保护措施实施后，对钢闸门的防腐效果进行了持续地跟踪和评估。通过对比分析腐蚀速率、维护周期和成本，观察到这些保护措施有效地降低了腐蚀速率，并显著延长了钢闸门的使用寿命，从而验证了其防腐效果的持久性和有效性。

（四）案例分析总结

1. 总结案例分析中的成功经验和不足之处

案例分析揭示了综合防腐措施在钢闸门保护中的有效性和重要性。成功的经验涵盖了准确的问题诊断、合理的保护方案设计和严格的施工质量控制。尽管如此，也存在一些不足之处，例如保护措施的实施成本较高，某些技术操作较为复杂。

2. 提出改进措施和建议

基于对案例的深入分析，提出以下建议：应进一步优化防腐方案，通过成本控制和施工效率的提升，实现更经济、高效的防腐效果。之后，加强对新型防腐材料和技术的研发与应用，以应

对日益加剧的腐蚀挑战^[9]。最终，建议建立一个长期的腐蚀监测系统，以实现对接闸门腐蚀状况的实时监控和预测，从而为腐蚀防护提供更加精准和有效的支持。

五、发展趋势与建议

（一）结合当前科技水平和市场需求预测未来发展趋势

当前，钢闸门防腐技术正向着高效、环保和智能化方向发展，得益于材料科学、腐蚀科学和信息技术的进步。市场需求对长效、低成本防腐解决方案的增长，以及对环境保护的重视，推动了绿色防腐技术的发展。未来，高性能防腐材料、智能化腐蚀监测、环保型防腐技术和综合防腐策略将成为主流，共同推动钢闸门防腐技术的进步。

（二）分析新材料、新技术在钢闸门保护中的应用前景

新材料和技术的进步为钢闸门提供了创新的防腐方法。自修复材料能自动修复损伤，延长防腐涂层的寿命，降低维护成本。纳米技术，尤其是纳米涂层，提供高密度的保护层，有效防止腐蚀^[10]。随着技术进步，阴极保护技术变得更加高效和精确，能实时监控腐蚀状态。环保法规的加强也推动了绿色防腐技术的发展，如生物源防腐剂和水性涂料，减少了对环境的影响。

结束语

在钢闸门腐蚀保护的探索过程中，不仅积累了宝贵的经验，也见证了科技进步为防腐保护带来的新机遇。面对北方沿海地区特有的腐蚀挑战，坚信通过不懈的努力和创新，可以有效预防和控制腐蚀问题，确保水利工程的安全与长效运行。呼吁行业内外加强合作，推动新材料和新技术的研发与应用，提升腐蚀保护的水平和效率。同时，也期待政策层面的支持和引导，为防腐技术的发展创造有利条件。

参考文献

- [1] 刘兴燕. 关于水工钢闸门的防锈喷涂施工工艺探讨[J]. 江西水利科技, 2023, 49(06): 460-465.
- [2] 蔡一平, 杨良泽, 许旭东, 等. 水工钢闸门局部腐蚀演化特征分析[J]. 江苏水利, 2023, (10): 56-60. DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2023.10.015.
- [3] 杨林. 平面钢闸门维修养护实践与建议[J]. 治淮, 2024, (06): 59-60.
- [4] 王飞雁. 浅谈水电站钢闸门的腐蚀原因及防腐处理技术[J]. 小水电, 2023, (03): 62-64.
- [5] 郭建斌, 孙鹏, 陈吉丰, 等. 闸门受蚀构件的力学性能衰减特性[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(04): 113-118.
- [6] 唐璇, 周靖. 静水条件含腐蚀缺陷钢闸门静力特性分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(02): 103-109.
- [7] 张凤来. 锈蚀因素对弧形钢闸门静力性能影响的研究与分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(01): 116-118.
- [8] 梁健伟. 浅谈西河水(船)闸门防腐工程的设计方案[J]. 珠江水运, 2021, (14): 68-70. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.14.032.
- [9] 王姣, 朱振寰, 胡强. 锈蚀对弧形钢闸门静力性能的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2021, (11): 128-135.
- [10] 陈金. 浅谈水工钢闸门的防腐及维修养护[J]. 清洗世界, 2024, 40(06): 186-188.