

水利水电工程金属结构防腐技术创新与应用

杨小春

江西翔瑞建设工程有限公司，江西 宜春 336000

摘要：本文深度聚焦水利水电工程金属结构防腐这一关键议题。传统防腐技术在长期应用中弊端凸显，耐久性欠佳，难以抵御复杂环境长期侵蚀，致金属结构过早腐蚀；环保性差，施工时释放有害物质，威胁生态与人体健康。基于此，剖析新型防腐材料研发、防腐工艺优化等创新路径，并详述其在闸门、压力钢管等结构中的实践应用。研究证实，创新防腐技术能大幅延长金属结构寿命，为工程安全筑牢根基，助力水利水电工程可持续发展。同时，本文还探讨了智能防腐监测技术和绿色环保防腐技术的最新进展，这些技术不仅提高了防腐施工的效率与准确性，还显著降低了对环境的负面影响。

关键词：水利水电工程；金属结构；防腐技术创新；应用

水利水电工程作为国家重要的基础设施，其金属结构（如闸门、压力钢管、启闭机等）在长期运行过程中，面临着复杂的水环境和恶劣的自然条件，极易发生腐蚀。金属结构的腐蚀不仅会降低其力学性能和使用寿命，还可能引发安全事故，影响工程的正常运行和效益发挥。传统的金属结构防腐技术，如油漆涂装、热喷涂等，在一定程度上能够起到防腐作用，但存在耐久性不足、环保性差、施工复杂等问题，难以满足现代水利水电工程对金属结构防腐的高要求。因此，开展水利水电工程金属结构防腐技术创新与应用研究，对于提高工程金属结构的防腐性能、延长使用寿命、保障工程安全稳定运行具有重要的现实意义。

一、水利水电工程金属结构防腐现状与问题

（一）传统防腐材料耐久性不足

传统水利水电工程金属结构防腐多采用油漆涂装、热喷涂等材料和工艺。油漆涂装虽施工简便、成本较低，但在长期水浸泡、水流冲刷及紫外线照射下，易出现涂层老化、脱落现象，导致金属结构直接暴露于腐蚀环境中^[1]。热喷涂工艺形成的防腐涂层，在复杂应力及环

境变化下，易产生裂纹、剥落，失去防腐功能。例如，一些小型水库的闸门，采用普通油漆涂装进行防腐处理，运行数年后，涂层出现大面积脱落，金属表面出现严重锈蚀，影响了闸门的正常使用和安全性。

（二）防腐工艺环保性差

传统防腐工艺在施工过程中往往会产生大量有害物质，对环境造成严重污染。油漆涂装过程中使用的溶剂型涂料，含有大量的挥发性有机化合物（VOCs），这些物质排放到空气中，会形成光化学烟雾，危害人体健康和环境质量。热喷涂工艺在高温下会产生金属粉尘和有害气体，不仅对施工人员的身体健康构成威胁，还会对周边生态环境造成破坏。随着环保要求的日益严格，传统防腐工艺的环保性问题已成为制约其发展的关键因素^[2]。

（三）防腐施工与维护难度大

水利水电工程金属结构通常体积庞大、形状复杂，且多处于水下或潮湿环境，给防腐施工和维护带来了很大困难。在施工方面，对于一些大型压力钢管，其内部空间狭窄，施工人员在操作过程中难以保证涂层质量的均匀性和完整性。在维护方面，由于金属结构腐蚀的

隐蔽性，很难及时发现腐蚀问题并进行修复。当发现腐蚀严重时，往往需要进行大规模的维修甚至更换，这不仅增加了工程成本，还会影响工程的正常运行。例如，一些大型水电站的引水钢管，由于运行环境复杂，难以定期进行全面检查和维护，导致部分钢管出现严重腐蚀，给工程安全带来了隐患^[3]。

（四）防腐成本与效益矛盾突出

传统防腐技术虽然成本相对较低，但由于其耐久性差，需要频繁进行维护和修复，导致长期防腐成本大幅增加。同时，因金属结构腐蚀引发的安全事故和工程停运，还会造成巨大的经济损失和社会影响。例如，一些小型水利工程因金属结构防腐不到位，导致闸门损坏、压力钢管泄漏等问题，不仅需要投入大量资金进行抢修，还会影响周边地区的农业灌溉、工业用水和居民生活用水，造成不可估量的损失。因此，如何在保证防腐效果的前提下，降低防腐成本，提高防腐效益，是当前水利水电工程金属结构防腐面临的重要问题。

二、水利水电工程金属结构防腐技术创新方向

（一）新型防腐材料研发

为提高金属结构防腐性能，研发新型防腐材料成为关键。纳米材料因其独特的物理和化学性质，在防腐领域展现出巨大潜力。纳米颗粒可填充防腐涂层中的微孔和缝隙，增强涂层的致密性和屏蔽性，有效阻止腐蚀介质渗透。同时，纳米材料还具有抗菌、自修复等功能，可进一步提高涂层的防腐性能和使用寿命。例如，纳米二氧化钛在光照下可产生光催化效应，分解涂层表面的有机污染物，抑制微生物生长，防止生物腐蚀。此外，高性能复合防腐材料也是研发的重点方向。通过将不同性能的材料进行复合，可充分发挥各材料的优势，实现防腐性能的协同提升。如将有机涂层与无机涂层复合，既具有有机涂层的柔韧性和附着力，又具

备无机涂层的高硬度和耐高温性能，可满足复杂环境下金属结构的防腐需求^[4]。

（二）防腐工艺改进与优化

改进和优化防腐工艺是提高金属结构防腐质量的重要手段。热喷涂工艺可通过优化喷涂参数、改进喷涂设备等方式，提高涂层的结合力和致密性。例如，采用超音速火焰喷涂技术，可使喷涂颗粒获得更高的速度和能量，与金属基体形成更牢固的冶金结合，提高涂层的耐腐蚀性能和耐磨性能。同时，开发新型热喷涂材料，如陶瓷涂层、金属陶瓷复合涂层等，可进一步拓展热喷涂工艺的应用范围。电镀工艺方面，可研发环保型电镀液和新型电镀工艺，减少有害物质的排放。如采用脉冲电镀技术，可精确控制电镀过程，提高镀层的质量和性能，同时降低能耗和环境污染。此外，还可探索将多种防腐工艺相结合，形成复合防腐工艺体系，发挥不同工艺的优势，提高金属结构的整体防腐性能^[5]。

（三）智能防腐监测技术应用

智能防腐监测技术可实现对金属结构腐蚀状况的实时、动态监测，为防腐措施的制定和调整提供科学依据。通过在金属结构表面安装传感器，如电化学传感器、光纤传感器等，可实时监测金属结构的腐蚀电位、腐蚀速率等参数。当监测到腐蚀状况异常时，及时发出预警信号，以便采取相应的防腐措施。例如，在一些大型水利水电工程的金属结构上安装智能腐蚀监测系统，可实现对关键部位的长期监测，提前发现腐蚀隐患，避免因腐蚀引发安全事故。同时，利用大数据分析和人工智能技术，对监测数据进行处理和分析，建立腐蚀预测模型，预测金属结构的腐蚀发展趋势，为工程的长期维护和管理提供决策支持。

（四）绿色环保防腐技术探索

随着环保意识的不断提高，绿色环保防腐技术成为未来发展的趋势。水性防腐涂料以水

为溶剂,不含有害有机溶剂,具有环保、无毒、安全等优点。通过改进水性防腐涂料的配方和性能,提高其防腐效果和施工性能,可逐步替代传统的溶剂型涂料。例如,一些新型水性环氧防腐涂料,具有良好的附着力和耐腐蚀性能,可广泛应用于水利水电工程金属结构的防腐。此外,生物防腐技术也是绿色环保防腐的重要研究方向。利用微生物或其代谢产物对金属进行防腐处理,具有无污染、可再生等优点。虽然目前生物防腐技术还处于研究阶段,但随着生物技术的不断发展,有望在未来得到广泛应用。

三、水利水电工程金属结构防腐技术创新应用案例

(一) 新型防腐材料在闸门中的应用

在某大型水库的闸门防腐工程中,鉴于传统防腐材料在复杂水环境及长期运行下易出现涂层老化、脱落,导致金属结构腐蚀的问题,采用了新型纳米复合防腐涂料进行防腐处理。该涂料巧妙地将纳米材料与有机树脂复合,纳米材料的微小尺寸和独特结构赋予了涂料诸多优异性能。纳米颗粒能够均匀分散在树脂基体中,填充涂层中的微孔和缝隙,形成致密的防护层,有效阻止水分、氧气及腐蚀性离子的渗透,从而赋予涂料良好的耐水性。在耐腐蚀性方面,纳米材料的化学稳定性可抑制金属与腐蚀介质之间的化学反应,降低腐蚀速率。同时,纳米复合结构增强了涂层的内聚力和与金属基体的附着力,使其具备出色的耐磨性,可抵御水流冲刷和颗粒撞击带来的磨损。施工前,对闸门表面进行严格的除锈和清洁处理,采用喷砂或抛丸等方法去除金属表面的锈迹、氧化皮和杂质,使表面达到一定的粗糙度,确保涂层与基体之间形成牢固的机械咬合,提高附着力。

(二) 防腐工艺改进在压力钢管中的应用

某水电站的压力钢管长期处于高水压、强

水流和复杂水质环境下,传统防腐工艺难以满足防腐要求。传统工艺形成的防腐涂层在高水压下易被渗透,强水流冲刷会导致涂层磨损,复杂水质中的化学物质会加速金属腐蚀。为提高压力钢管的防腐性能,采用了超音速火焰喷涂与有机涂层复合的防腐工艺。首先,对压力钢管表面进行喷砂除锈处理,利用高速喷射的砂粒冲击金属表面,去除锈迹、氧化皮和旧涂层,使表面达到一定的清洁度和粗糙度,为后续涂层的附着提供良好的基础。然后,采用超音速火焰喷涂技术喷涂陶瓷涂层,该技术通过将燃料和氧气混合燃烧产生高温高速气流,将陶瓷粉末加热至熔融或半熔融状态,并加速喷射到钢管表面,形成致密的陶瓷涂层。陶瓷涂层具有高硬度和高耐磨性,能够有效抵御水流冲刷和颗粒撞击,减少钢管表面的磨损。最后,在陶瓷涂层表面涂覆高性能有机涂层,有机涂层具有良好的柔韧性和耐腐蚀性,能够填充陶瓷涂层表面的微小孔隙,增强涂层的整体密封性,同时缓冲外界应力对陶瓷涂层的影响,提高涂层的耐腐蚀性和柔韧性。通过这种复合防腐工艺,压力钢管的防腐性能得到了显著提升。

(三) 智能防腐监测技术在启闭机中的应用

为实时掌握启闭机金属结构的腐蚀状况,某水利工程在启闭机上安装了智能腐蚀监测系统。启闭机作为水利工程中控制闸门启闭的关键设备,其金属结构在长期运行过程中会受到环境因素和机械应力的影响,容易发生腐蚀,而传统的定期检查方式难以及时发现早期腐蚀问题。该系统采用电化学传感器和光纤传感器,电化学传感器通过测量金属结构与电解质溶液之间的电化学参数,如腐蚀电位、腐蚀电流密度等,实时反映金属的腐蚀状态;光纤传感器则利用光纤的光学特性,检测金属表面的应变、温度等参数,间接判断腐蚀情况。通过数据采集装置将监测数据传输至监控中心,利用大数据分析和人工智能技术对数据进行处

理和分析。大数据分析能够对海量的监测数据进行存储、整理和挖掘,找出数据中的规律和趋势;人工智能技术则可以通过建立腐蚀预测模型,根据实时监测数据预测金属结构的腐蚀发展趋势。当监测到腐蚀速率超过设定阈值时,系统自动发出预警信号,提醒管理人员及时采取防腐措施。

(四) 绿色环保防腐技术在小型水利工程中的应用

在一些小型水利工程中,传统防腐工艺使用的溶剂型涂料含有大量挥发性有机化合物(VOCs),在施工过程中会释放到空气中,对施工人员和周边环境造成危害,同时施工过程复杂,成本较高。为减少防腐施工对环境的污染,采用了水性防腐涂料进行金属结构防腐处理。例如,某小型灌溉渠道的闸门和渡槽,采用水性环氧防腐涂料进行涂装。水性环氧防腐涂料以水为溶剂,不含有害有机溶剂,具有环保、无毒、安全等优点。施工前,对金属结构表面进行简单的打磨和清洁处理,去除表面的油污、铁锈和杂质,使表面具有一定的粗糙度,即可满足涂装要求,无需复杂的喷砂除锈等工序,降低了施工难度和成本。施工过程中,水

性防腐涂料无有害气体排放,对施工人员和周边环境无危害,改善了施工环境,保障了施工人员的身体健康。同时,水性涂料施工简便,可采用刷涂、滚涂或喷涂等方式,对施工设备和场地要求较低。经过一段时间的运行,对金属结构进行检查发现,涂层质量良好,防腐效果显著。

结束语

水利水电工程金属结构防腐技术创新与应用是保障工程安全稳定运行、延长使用寿命的关键。通过对传统防腐技术存在的问题进行分析,明确了新型防腐材料研发、防腐工艺改进与优化、智能防腐监测技术应用以及绿色环保防腐技术探索等创新方向。在具体应用案例中,新型防腐材料、改进的防腐工艺、智能防腐监测技术和绿色环保防腐技术均取得了良好的防腐效果,降低了防腐成本,提高了工程的经济效益和社会效益。未来,随着科技的不断进步,应继续加强水利水电工程金属结构防腐技术创新,推动防腐技术向高效、环保、智能化方向发展,为水利水电工程的可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 蒋天元. 基于水利水电工程金属结构腐蚀分析与防腐措施控制研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(3): 3-4.
- [2] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 陆恒昌, 彭伟, 赵洪山, 徐德祥. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(04): 558-582.
- [3] 王丽娜. 水利水电工程金属结构腐蚀的有关研究[J]. 名城绘, 2019(1): 294-300.
- [4] 余国权. 水利水电工程金属结构腐蚀的有关研究[J]. 内蒙古水利, 2018(05): 74-75.
- [5] 方芳. 金属结构防腐检测方法在水电、风电工程中的应用与研究[C]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集(第六分册). 长江三峡技术经济发展有限公司.