

水利工程中金属结构防腐新技术研究

文 / 张金荣 青岛润天丰实业有限公司

摘要：水利工程是国民经济的重要组成部分，在防洪、发电和灌溉等方面扮演着举足轻重的角色。其中，闸门、给水管道等金属结构长期使用，使用环境复杂，腐蚀风险大，腐蚀不仅会导致金属结构强度降低，寿命缩短，而且会引发安全事故，影响水利工程的正常运行。因此，迫切需要开展金属结构防腐新技术研究，以保障水利工程的耐久性、可靠性与安全性，促进其可持续发展。

关键词：水利工程；金属结构；防腐新技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.073

引言

随着我国水利工程建设规模的不断扩大，水工建筑物金属结构的防腐问题越来越突出。由于水流、水质冲刷，干湿交替和微生物的作用，使金属结构表面不断地受到冲蚀破坏。传统防腐方法已越来越显示出其局限性，已不能满足日益增长的工程需要。在这一背景下，探索防腐新技术是水利领域亟待解决的重要问题，目的是提高金属结构的耐腐蚀性，降低维修费用，保证水利设施的长期稳定运行，并为水利事业发展提供强有力的支持。

一、水利工程中金属结构腐蚀的原因分析

（一）化学腐蚀

水利工程中化学腐蚀是引起金属结构腐蚀的一个重要因素。在水利工程中，金属结构经常受到多种化学物质的影响。金属与干燥气体发生化学反应，生成相对应的化合物。例如，铁锈会和空气中的氧气发生氧化反应，生成铁锈物（主要成分为氧化铁等）。另外，当金属结构接触到水时，如果水里溶解了酸、碱等化学物质，同样会发生化学反应，破坏金属表面原本的结构，使其逐渐被腐蚀。这种化学腐蚀过程往往是一种持续不断的化学反应，对水工建筑物的强度与完整性造成严重影响，直接威胁水利工程的安全与使用寿命^[1]。

（二）盐害劣化

水利工程金属结构的盐害劣化不能忽视。水利工程中广泛使用的混凝土材料，其含有的盐、拌和水、添加剂等是引起盐害劣化的主要原因。随着水的蒸发，盐分被带入混凝土表面并沉淀下来。这些晶体盐会在混凝土表面形成结晶压力，从而引起裂缝。同时，盐类也会在金属表面生成电解液，为电化学腐蚀提供了有利条件。在这种环境中，金属结构内部会生成原电池，加速其腐蚀速度，造成结构锈蚀和强度下降，进而影响水利工程的正常使用寿命。

（三）冻害劣化

在水利工程中，冻害劣化引起的金属结构腐蚀问题尤为突出。水闸和其他混凝土结构中含有大量的水分子，当环境温度下降到一定程度时，水分子就会凝固成冰，由于冰的密度比水小，所以它的体积会大大增加，对混

凝土结构产生很大的膨胀力。在冻融循环作用下，混凝土内部产生微裂缝，并不断扩展、贯通，最终破坏混凝土的整体性及密实性。混凝土是金属结构的外部保护层，一旦混凝土受到破坏，就不能有效防止水、氧、腐蚀性离子等腐蚀性物质渗入。这使得金属结构直接暴露于恶劣环境中，加速了金属的腐蚀进程，最终导致金属结构强度降低、耐久性下降，严重威胁水利工程在寒冷季节以及长期运行中的安全性和稳定性。

二、水利工程中金属结构防腐新技术分析

（一）高性能防腐涂料技术

在水利工程中，金属结构的防腐显得尤为重要，而高性能防腐涂料技术是其中的关键。首先，新型高性能防腐涂料的耐候性有了很大提高。水利工程中金属结构长期暴露在室外，经受日晒、风雨腐蚀和气温变化等多种因素的共同作用。该涂料能有效抵抗紫外辐射，防止涂层长期暴露导致的老化、褪色和粉化，并能在不同的气候环境中保持不变，为金属表面提供持久的保护。其次，它优良的耐化学腐蚀性使其能够在复杂的水环境下工作。无论工业废水中含酸、碱、盐，还是淡水中含有大量微生物，均可形成一道稳定的屏障，阻止化学物质与金属发生反应，防止腐蚀。此外，它优异的耐磨性，使其能够在湍急的水流和泥沙的冲刷下安然无恙。高速水流卷起的泥沙就像砂纸一样，不停地打磨着金属表面，而高性能防腐涂料则利用自身的韧性，减少磨损对涂层的损伤，保持涂层的完整性。然后，先进的涂料配方是获得这些优异性能的基础。通过对树脂、颜料和助剂的合理配比，对涂料进行化学结构优化，使涂料具有更强的防护性。同时，还需要精确的喷涂技术。通过对喷涂压力、间距、角度、厚度等参数的控制，保证涂料与金属基体的结合强度，提高涂料的附着力和耐久性，有效延长了水利设施的使用寿命，保证水利工程的安全稳定运行。

（二）金属热喷涂技术

金属热喷涂是水利工程中一种极具应用前景的防腐技术。首先，金属热喷涂技术利用热源加热金属或合金至熔化状态，在高压气流作用下雾化喷射至金属结构表

面,在其表面形成一层紧密粘附的涂层。该技术具有火焰、电弧等多种热源可供选择,适用于不同工况、不同材质的热源,保证了工艺的灵活性与适应性。其次,采用此技术制备的金属防腐涂层具有明显的致密性特征。这种紧密的结构,就像是一层坚固的屏障,将腐蚀性介质和金属基体隔绝开来。水里的腐蚀性物质和空气中的氧化性物质都很难渗透到金属表面,因此,腐蚀发生的几率大大降低,从而大幅提高了防腐效果。然后,常见的金属喷镀材料如锌、铝等也起着关键性作用。锌、铝具有优良的抗腐蚀性能,喷涂于金属基体表面后,既可利用自身特性抗腐蚀,又可发挥阴极保护作用。在电解液环境下,以锌、铝为阳极,以牺牲自身为代价,保护金属基体,形成电化学保护机制,进一步提升了整体防腐性能。实践证明,该技术在水利工程中具有广泛的应用前景,无论在淡水或海水环境下,面对水流冲刷或湿空气腐蚀,金属热喷涂技术均表现出优异的防腐性能,可以有效保证水利工程金属结构的长期稳定运行,降低维修费用,减少安全隐患^[2]。



图1 金属热喷涂技术

(三) 电化学保护技术

电化学保护是水利工程中的一项重要技术。首先,其核心思想是利用外加电流或电势差异,精确调控金属表面电化学状态,从而有效抑制腐蚀反应的发生。该技术的科学意义在于深入研究金属腐蚀的电化学本质,通过人为干预改变金属表面的电子流向及电势分布,从而破坏腐蚀发生的电化学条件。其次,在电化学保护技术中,阴极保护是一种常用方法,其工作机理是将阴极电流输入到金属结构中。在水利工程中,金属结构在接上阴极保护电流后,表面电位将出现负向偏移,使整个表面向阴极转变。在此条件下,可以有效抑制金属表面的氧化反应,在有腐蚀性介质存在的条件下,可以大大降低金属的腐蚀损耗。此外,阳极保护技术也

有不同的发展方向,该技术通过对金属表面进行设计,形成了一层致密、稳定的氧化物保护膜。这层保护膜就像是给金属穿上了“铠甲”一样,可以有效阻止腐蚀性介质和金属基体的直接接触,从而阻止腐蚀进程的继续发展。因此,阳极保护技术是一项重要的技术,它能有效保持金属结构的完整性和功能。在水利工程的实际应用场景中,电化学防护技术可以根据具体需要,灵活应用于大坝闸门、水电站的压力管道以及各种泵站的金属构件。通过对不同金属结构的特性及工作环境的精确调控,实现了对水工金属结构的长期、可靠防护,可保障水利设施的安全稳定运行,减少腐蚀带来的经济损失与安全风险。

(四) 复合防腐涂层技术

在水利工程中,复合防腐涂层是一项具有创新性和高效性的新技术。首先,复合防腐涂层技术的实质是将多种防腐材料和技术集成在一起,形成具有多种防腐机理的复合防腐涂层,它突破了单一防腐方法的限制,将各种防腐元素有机地结合在一起。例如,将防腐涂层的成膜性、金属喷涂的物理阻隔性和电化学保护的电化学调控性能有机结合起来。其次,利用防腐涂层在金属表面生成连续致密的有机膜,初步实现物理隔离,防止水、氧、酸、碱等腐蚀介质直接接触。同时,采用金属喷涂技术,在涂层表面涂覆一层金属涂层,进一步提高了涂层的致密度和耐磨性。常见的金属喷镀材料,如锌、铝,除了本身具有优良的抗腐蚀性能外,还具有阴极保护功能^[3]。在此基础上,引入电化学防护技术,从电化学层次赋予涂层更强的保护能力。通过调控外加电流或电位差,改变金属表面电化学状态,抑制腐蚀反应。在该复合系统中,各种防腐机理相互协同。物理隔离层降低了腐蚀介质渗透速度,金属防腐层提高了涂层力学强度及耐腐蚀性能,电化学保护从微观角度对腐蚀过程进行主动干预。在水利工程中,无论是大型金属闸门,还是输水管道的金属管件,复合防腐涂料均表现出优异的性能,它能适应不同水质、水流、气候等因素的变化,显著提高涂层的耐蚀性和耐久性,保证水利工程的长期稳定运行,降低工程的运营成本,并提升水利工程的综合效益。

(五) 纳米防腐技术

首先,纳米防腐技术的核心是充分发挥纳米材料独特的性能,从而达到优异的防腐效果。纳米材料因尺寸小、表面效应、量子尺寸效应等特点,在防腐领域具有广阔的应用前景。其次,将纳米材料与防腐涂层相结合是其应用的关键环节。在防腐涂层中加入纳米二氧化硅、氧化铝等纳米材料后,可显著影响涂层的微结构。纳米 SiO_2 颗粒细小且均匀地分布于涂层体系中,填充涂层分子之间的间隙,使涂层更加致密,从微观层次上构筑起一道更加坚固的屏障,将腐蚀性介质阻挡在外。同时,

添加纳米氧化铝可显著提高涂层的硬度,提高其抗外部机械磨蚀能力,使其在水利工程面临水流冲刷、泥沙冲刷等严酷环境下不受损伤,保持其防腐性能。此外,该技术具有较好的致密度、硬度等性能,并能提高涂层与金属基体的结合强度。这种附着力保证了镀层在长时间使用时不会脱落,始终与金属表面紧密结合,对金属结构进行持久、稳定的保护。然后,纳米材料还可赋予涂层一定的自修复能力,当涂层受到轻微损伤时,纳米材料可以在一定程度上促使其自修复,延长有效保护时间,从而提高整体结构的抗腐蚀性和耐久性,为水利结构长期稳定运行提供强有力的保障^[4]。

三、水利工程中金属结构防腐施工质量控制

(一) 材料选择与检验

在水利工程金属结构防腐施工中,材料选择与检验是一个重要环节。在水利工程中,防腐材料的选用要严格按照具体要求进行。例如,为了适应水利工程中复杂的水环境和多变的气候条件,对涂料的耐水、耐候、耐化学腐蚀等提出了更高要求。喷涂锌、铝材料必须具有较高的纯度和均匀的粒度,以保证在金属表面形成致密、稳定的防腐涂层。材料进场前,必须严格执行质量检验程序,按批次抽样,利用专业设备及技术方法,对涂料的粘度,干燥时间,附着力,化学成分,粒度分布等进行全面测试。只有所有的材料都符合防腐要求,才能使用,并在施工过程中保证防腐施工的质量。另外,防腐施工质量检测仪器应经计量检定合格并在有效期内,以确保检测结果的准确性。通过这些细致的质量控制措施,可以有效地延长水利工程金属结构的使用寿命,保障工程的安全和稳定性。

(二) 表面处理质量控制

金属结构表面处理的好坏,直接影响到防腐涂料的粘接效果。表面光洁度要求非常高,油、尘、锈等杂质必须完全清除,否则将影响镀层和金属的结合力。粗糙度也有明确的标准,为了增加涂层和金属之间的接触面积,提高结合强度,一般通过喷砂、除锈等方法使表面粗糙度达到一定程度。在前处理过程中,要严格按照规范的操作规程进行,如喷砂时要掌握好压力、角度及间距,保证除锈效果均匀,不伤及金属基体,在酸洗过程中,酸浓度、温度、时间的精确控制是关键,其质量控制的关键是表面要有均匀的金属光泽,不能有明显的油脂、污垢、氧化皮和铁锈,同时表面的粗糙度要达到设计要求,这样才能为下一步的防腐涂料施工创造条件。

(三) 施工环境监控

施工环境对防腐效果有很大的影响,所以在施工过程中要密切监测周围的温度、湿度和风速等情况。温度过高或过低,均会影响涂料的固化速度及品质,通常最佳温度为5~35℃。湿度过高时,空气中水分容易凝结成膜,造成涂料起泡和脱落,所以湿度宜控制在85%以内。

风速过大会造成涂料被吹散,喷雾不均匀,影响涂料的厚度及质量。当风速超过某一限制时,应立即停止喷涂。遇有暴雨、大雪、大风等特殊天气时,应暂停施工,对已处理过的金属表面及未固化涂层采取有效保护措施,如覆盖防雨布、设置防风屏障等,避免雨水冲刷、粉尘污染和环境因素对施工质量的损害,保证防腐施工在适宜的环境中进行^[5]。

(四) 施工队伍培训与资质管理

防腐施工质量也取决于施工队伍的专业素质。因此,必须对施工人员进行全面的技术培训,熟悉防腐施工各步骤和质量控制要点,培训内容包括涂料配制和喷涂技术,金属热喷涂设备的操作规程,电化学防护系统的安装和调试。只有熟练掌握了这几项技术,才能保证正确的施工过程。同时,对施工队伍进行资质审查和监管也是非常重要的。审查内容应包括企业的营业执照,资质证明,过往工程业绩等,以保证企业能够承担水利工程金属结构的防腐工程。在施工期间,要加强对施工团队的监管,严格按照规范和设计的要求进行施工,及时纠正违反操作规程或者质量不达标行为,确保施工质量的专业可靠,为水利工程金属结构防腐提供强有力的保证。

结语

总之,水利工程中金属结构防腐是一个非常重要的问题,它直接影响着工程的安全运行与使用寿命。本文在对腐蚀原因进行深入分析的基础上,结合高性能防腐涂料、金属热喷涂、电化学防护、复合防腐涂层和纳米防腐等新技术的研发和应用,有效提高了金属结构的防腐性能。同时,施工质量控制是保证防腐效果的关键,涉及到选材、表面处理、环境监测和施工人员管理。因此,通过本项目实施,可为水利工程金属结构提供全方位的防护,保障其耐久性、可靠性与安全性,并为水利工程可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 范云伟,简平,殷黎明,张学明. 纳硅金属防腐漆在人民渠水工钢闸门防腐养护中的应用研究[J]. 四川水利,2020,41(05):4-6+13.
 - [2] 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(03):151-153.
 - [3] 杜敏. 某长距离供水工程输水管道防腐设计探讨[J]. 全面腐蚀控制,2019,33(04):79-80.
 - [4] 杨振杰. 水工金属结构防腐分析[J]. 四川水泥,2015,(07):87.
 - [5] 张立文,王进军. 水闸金属结构防腐处理措施分析[J]. 山东工业技术,2014,(19):41.
- 作者简介:张金荣,1989.02.26,女,汉,山东省青岛市莱西市,本科,中级工程师,研究方向:水利工程。