

冷喷锌技术在水利工程金属结构防腐中的应用刍议

车迎春

天津市水务规划勘测设计有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i6.6423

[摘要] 本文首先阐述了水利工程金属结构的腐蚀成因与防腐蚀措施,然后介绍了冷喷锌技术原理与性能特点,并且结合水利工程实际应用场景,分析其在水工钢结构等关键部位的应用效果及技术要点,通过案例论证其经济效益。研究表明,冷喷锌具有附着力强、阴极保护长效、施工便捷、环境友好等突出优点,是提升水利工程金属结构耐久性的重要技术手段,具有广阔的推广前景。

[关键词] 冷喷锌; 水利工程; 金属结构; 腐蚀防护; 阴极保护; 环保涂层

中图分类号: TV **文献标识码:** A

Discussion on the application of cold spray zinc technology in the corrosion protection of metal structures in water conservancy projects

Yingchun Che

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

[Abstract] This article explores the anti-corrosion mechanism and performance characteristics of cold spray zinc technology. It analyzes its application effects and technical points in critical areas of water engineering structures, such as steel structures, by considering practical applications in water conservancy projects. The article also demonstrates its economic benefits through case studies. Research indicates that cold spray zinc offers significant advantages, including strong adhesion, long-lasting cathodic protection, convenient construction, and environmental friendliness. It is an important technical means to enhance the durability of metal structures in water conservancy projects and has broad prospects for promotion.

[Key words] cold spray zinc; water conservancy project; metal structure; corrosion protection; cathodic protection; environmental coating

1 前言

根据中国腐蚀与防护学会等权威机构发布的《中国腐蚀状况及控制战略研究》结果表明,中国每年因腐蚀造成的经济损失约占国内生产总值(GDP)的3%-5%,以2023年中国GDP约126万亿元人民币计算,年腐蚀损失在3.78万亿至6.3万亿元人民币之间,防腐蚀工作的严峻性在各行业引起广泛的重视。

水利工程是国家基础设施的重要组成部分,其金属结构设备长期暴露在水、大气、干湿交替甚至海水、工业废水侵蚀的严苛环境中,加之高温、高湿、高盐等环境因素,导致金属结构设备腐蚀速率远高于普通大气环境,腐蚀问题严重威胁工程安全与耐久性。冷喷锌技术作为一种高效、环保的防腐方法,以其独特的防腐机理和优异的施工性能,为解决水利工程金属防腐难题提供了新思路,应用潜力巨大。

2 腐蚀的成因和防腐蚀措施

2.1 腐蚀的成因

水利工程金属结构设备的腐蚀是一个复杂的电化学反应,

包括受到溶解氧、阴离子(Cl^- , SO_4^{2-})、干湿交替、水流、微生物等多重因素影响的过程,主要包含以下几个关键阶段:

2.1.1 腐蚀电池的形成

• 阳极区: 钢表面存在化学或物理性质不均匀的区域(如晶界、位错、杂质、应力集中区、不同金相组织、涂层缺陷处等)。这些区域电位较低,更容易失去电子发生氧化反应。

• 阳极反应: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (铁溶解, 变成铁离子进入溶液)

• 阴极区: 钢表面电位较高的区域(如相对纯净的铁素体、氧化膜完整处), 这些区域接收从阳极区流过来的电子。

• 阴极反应: 需要去极化剂(主要是溶解氧)来消耗电子, 常见的阴极反应包括:

• 氧还原反应(中性/碱性环境): $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ (最常见的因素)

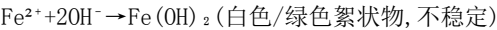
• 氢离子还原反应(酸性环境): $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (在局部酸化区域可能发生, 如点蚀坑内)

• 电解质: 水(地表水、地下水、潮湿空气中的水膜)充当

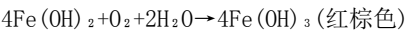
了离子传输的介质,水中溶解的盐分(如 Cl^- , SO_4^{2-})大大提高了电解质的导电性,加速腐蚀。

2.1.2 锈蚀产物的形成与发展

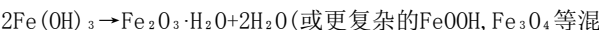
阳极区产生的 Fe^{2+} 离子扩散进入电解质溶液,阴极区产生的 OH^- 离子也扩散进入溶液, Fe^{2+} 和 OH^- 相遇,生成初始的腐蚀产物——氢氧化亚铁:



氢氧化亚铁在水中的溶解氧作用下进一步氧化:



氢氧化铁脱水,形成常见的铁锈,其主要成分是水合氧化铁:



2.1.3 锈层的特性

- 疏松多孔: 锈层通常不紧密、具有多孔性,不能阻隔氧气和水渗透到金属基体表面。
- 吸湿性: 锈层能吸附和保持水分,使电解质持续存在。
- 导电性: 某些锈蚀产物(如 Fe_3O_4)具有一定的导电性,可能参与阴极反应。
- 体积膨胀: 铁转化为铁锈后体积显著增大(可达2~6倍),产生内应力,导致保护性涂层起泡、剥落,加速局部腐蚀。
- 腐蚀形态: 基体表面均匀腐蚀危害相对可控,可通过设计预留腐蚀裕量处理;点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀则危害更大,叠加固有荷载、交变荷载极具破坏性。

2.2 水利工程金属结构防腐蚀措施

表1 常用防腐方案特点比较

防腐方案 对比项目	涂料防腐	热浸镀锌	热喷锌	冷喷锌
防腐性能	涂层系统由底漆、中间漆和面漆组成,为屏蔽式保护,防腐年限较短。	将钢构件浸入高温熔化的锌液中,使构件表面附着锌层,效果较好,水利工程需用涂料封闭。	将锌丝高温熔化后高速喷到钢构件表面,涂层有5~15%的孔隙率,不能单独成膜,须用涂料封闭。	涂层干膜含锌96%以上,可单独成膜作为钢结构内部保护,复合涂层的防腐年限可增加2倍以上。
施工要求	表面预处理至Sa 2.5级,涂装作业相对湿度RH<85%,钢材表面温度必须高于露点温度3℃,预处理与涂装之间间隔时间尽量短且≤8h。	表面处理工艺要求Sa3级,施工周期长,从酸洗到钝化要经过近10道工序,必须在生产线上完成,不可现场施工。	表面预处理至Sa 2.5级,涂装作业相对湿度RH<85%,钢材表面温度必须高于露点温度3℃,预处理与涂装之间间隔时间尽量短且≤8h。	表面预处理至Sa 2.5级,涂装作业相对湿度RH<85%,钢材表面温度5~40℃,预处理与涂装之间间隔时间0.5~24h。
环境影响	环保性能较差,稀释剂中含有甲苯二甲苯丙酮等有机物,涂装作业应在防腐车间内完成,并应做好人员防护。	对环境有污染,且对人体有害,在镀锌和施工过程中挥发有锌蒸汽,如吸入人体内会患“铸工热”病症。	操作时有噪音、粉尘、热和弧光辐射问题,作业应在防腐车间内完成,污染大,能耗高,对人体伤害严重。	环保型产品,成分内不含铅、铬、汞等重金属,无毒,对环境和人体安全影响较小,做好一般防护可满足施工要求。
防腐年限	约为5~8年。	约8~10年。	约10~20年。	约15~25年。
首次投入成本	约1200元/t。	约2500~3000元/t。	约2000元/t。	约1500元/t。
全寿命周期维护成本 (按50年考虑)	防护对象寿命周期内需6~10次防腐,维护成本为首次防腐投入成本×次数。	防护对象寿命周期内需5~6次防腐,维护成本为首次防腐投入成本×次数。	防护对象寿命周期内需3~5次防腐,维护成本为首次防腐投入成本×次数。	防护对象寿命周期内需2~3次防腐,维护成本为首次防腐投入成本×次数。

水利工程金属结构防腐蚀措施包括涂料防护、阴极保护、热

浸镀锌、热喷锌(铝或铝锌合金)、冷喷锌等,其中涂料防护应用最广泛,常与热浸镀锌、热喷锌组成复合涂层联合防腐;冷喷锌方案可单独成膜形成防腐保护,也可复合涂层增加防腐年限;阴极保护适用于水质导电性较高的水环境,一般需要结合其它防腐措施,常用防腐方案如表1所示:

3 冷喷锌技术原理与特性

3.1 技术原理

冷喷锌也称冷涂锌,是一种常温施工的富锌防腐涂层技术,其核心组分是极高纯度(通常≥96%)的锌粉颗粒,分散在由特殊树脂构成的粘结剂中,喷涂后固化形成的涂层,锌粉颗粒间、锌粉与基体钢铁间形成紧密的导电接触网络。

3.2 双重防腐机理

阴极保护: 锌的电极电位(-0.76V)远低于铁(-0.44V),当涂层存在破损或孔隙时,锌作为阳极优先腐蚀,保护作为阴极的钢铁基体。

屏障保护: 固化后的树脂粘结剂形成致密的物理屏障,有效阻隔水、氧气和腐蚀性离子(如 Cl^- , SO_4^{2-})与钢铁基体接触。

长效防腐: 在钢材防腐过程中,导电包覆树脂和超细锌粉共同作用,使冷喷锌涂层能同时提供阴极保护和屏障保护,防腐寿命远可达15~25年。

可复涂性与修复性: 新旧冷喷锌层、冷喷锌与其他兼容涂层(如环氧、聚氨酯面漆)间附着力好,便于局部修复和重涂维护。

耐磨损与抗冲击: 锌粉硬度较高,赋予涂层较好的耐机械损伤能力。

施工便捷: 常温喷涂,无需大型热工设备,不受工件尺寸限制,适合现场施工及局部维修。冷喷锌防腐机理如下图所示:

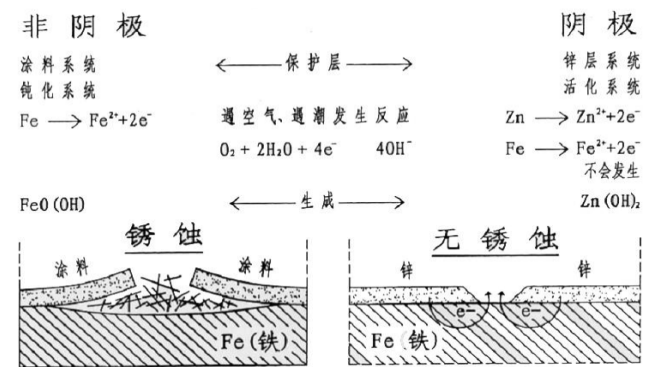


图1 冷喷锌工艺防腐机理

4 冷喷锌在水利工程中的应用

冷喷锌技术在水利工程中的具体应用包括闸门、压力钢管、拦污栅、启闭机、钢栈桥及钢支撑等结构,常用于新建设备防腐或旧设备维护及修复翻新。

配套体系: 喷砂Sa2.5级→冷喷锌底漆封闭(膜厚60~100 μm)→环氧中间漆(膜厚80 μm)→氯化橡胶面漆(或环氧面漆,膜厚80~100 μm)。

优势：有效防止焊缝、缺陷处及安装损伤部位的腐蚀，常温施工，适应露天环境，不影响受力构件机械性能。

5 应用关键技术与质量控制

(1) 表面处理：应达到Sa2.5级(近白级)喷砂除锈标准，表面粗糙度(Rz)40-70 μm为宜，清洁干燥无油污，这是决定冷喷锌涂层寿命的关键。

(2) 材料选择：确保锌粉纯度≥96%，干膜中的含锌量≥80%。

(3) 施工工艺：环境温度高于露点3℃，相对湿度<85%。

(4) 膜厚与附着力检测：施工中和完工后应使用磁性测厚仪检测膜厚，使用拉拔式附着力测试仪检测涂层与基体、涂层间的附着力(通常要求≥5MPa)。

(5) 缺陷修复：对针孔、漏喷等缺陷及时修补，确保涂层完整性。

6 典型案例分析(示例)

湖南双牌水电站进水弧形闸门原涂层老化失效后门体锈蚀，表面喷砂除锈后，采用冷喷锌底漆、中间漆、面漆的防腐体系进行修复，施工完毕涂层状况良好，施工前后情况如图2所示。



图2 双牌水电站进水弧门采用冷喷锌防腐修复

其他项目如三峡水利枢纽、广西大藤峡水利枢纽、吉林珥春河水利工程、四川岷江犍为航电枢纽等重点水利工程均选用冷喷锌技术。此外，冷喷锌技术还广泛的应用于桥梁、建筑、轨道交通、石油化工、港口码头、市政环保等工程的钢结构防腐项目，限于篇幅不再赘述，部分应用见表2示。

表2 近年应用冷喷锌技术的部分案例

项目名称	应用情况	备注
三峡水利枢纽	泄洪闸深孔弧形工作闸门维修防腐方案	水利水电工程
广西大藤峡水利枢纽	浮箱式检修闸门维修防腐方案	水利水电工程
四川岷江犍为航电枢纽	新建工作闸门和尾水闸门防腐方案	水利水电工程
吉林珥春河水利工程	新建液压钢坝闸门防腐方案	水利水电工程
港澳大桥	CA01 标段组合梁防腐方案	桥梁工程
福建海西大厦	装配式建筑钢结构防腐方案	建筑工程

7 结语

冷喷锌技术凭借其独特的阴极保护与屏障保护双重防腐机制、卓越的长效性、优异的附着力与耐磨性、良好的环保性能及便捷的施工，成为解决钢结构防腐难题的有效利器，在水利工程中的应用尤其是解决施工中的现场焊缝防腐问题，技术经济优势明显，减少了对大型设备的依赖，同时把对环境的不利影响也降到了最低。

随着材料性能的不断优化、施工工艺的持续进步、环保要求的日益提高，冷喷锌技术在水利工程金属结构防腐中将发挥越来越重要的作用，为保障国家水利基础设施的安全性、耐久性以及经济运行提供强有力的技术支撑。在新建工程和维修项目中，建议充分考虑并积极推广采用冷喷锌防腐体系。

[参考文献]

[1]李敏风.冷涂锌的性能和应用[J].电镀与涂饰,2014,33(18):788-790.

[2]杨焰,肖邵博,万长鑫,等.冷涂锌涂层的防腐蚀性能[J].腐蚀与防护,2016,37(03):245-248.

[3]张鹏,黄彬,廖有为.冷喷锌在水利水电工程钢结构防腐领域的应用[J].湖南水利水电,2017,(06):36-39.

[4]胡士信.阴极保护工程手册[M].化学工业出版社,2005

[5]廖有为.冷涂锌涂料[M].化学工业出版社,2017.

作者简介：

车迎春(1979--),男,汉族,天津市人,全日制本科,高级工程师,研究方向：水利工程金属机构。