



# 石墨烯锌粉涂料在船闸钢结构防腐中的应用

冯学刚<sup>1</sup>, 刘 耕<sup>1</sup>, 荣仲尼<sup>2</sup>

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 广东好邦石墨烯新材料科技有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 针对船闸钢结构防腐重涂修复难、影响船闸检修工期等问题, 深入分析船闸钢结构腐蚀的机理和需求, 全面了解行业前沿的技术、材料和工艺, 详细介绍石墨烯锌粉涂料在船闸钢结构防腐中的应用。通过案例运用、比较分析, 从多方面对石墨烯锌粉涂料和传统防腐体系进行对比, 得出石墨烯锌粉涂料较环氧富锌涂料性能有较大提高; 石墨烯锌粉涂料与热喷锌防腐性能相当, 但更加便捷、环保。通过典型防腐方案的全寿命经济效益对比得出, 石墨烯锌粉涂料环保性好、实施方便、全生命周期成本低, 是一种值得推广的船闸钢结构防腐材料。

**关键词:** 船闸钢结构; 检修工期; 石墨烯锌粉涂料; 热喷锌; 环氧富锌涂料

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0108-05

## Application of graphene zinc powder coating in anti-corrosion of steel structures in ship locks

FENG Xue-gang<sup>1</sup>, LIU Geng<sup>1</sup>, RONG Zhong-ni<sup>2</sup>

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Guangdong Good-Brand Graphene Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** The anti-corrosion recoating and repair of steel structures in ship locks are difficult and influence the maintenance period of the ship locks. In response, this paper deeply analyzes the corrosion mechanism and anti-corrosion demand of steel structures in ship locks and outlines relevant cutting-edge technologies, materials, and processes. In addition, the paper introduces in detail the application of graphene zinc powder coating in the anti-corrosion of steel structures in ship locks. Through case application and comparative analysis, this paper compares the graphene zinc powder coating and a traditional anti-corrosion system in many aspects and concludes that the performance of the graphene zinc powder coating is much better than that of a zinc-rich epoxy coating. Graphene zinc powder coating is comparable to thermal sprayed zinc in anti-corrosion but is more convenient and environmentally friendly. As indicated by the comparison of the life-cycle economic benefits among typical anti-corrosion schemes, the graphene zinc powder coating has good performance in environmental protection, convenient implementation, and low life-cycle cost, becoming an anti-corrosion material worthy of promotion for steel structures of ship locks.

**Keywords:** steel structure in ship lock; maintenance period; graphene zinc powder coating; thermal sprayed zinc; zinc-rich epoxy coating

随着国民经济和科学技术的发展, 人们充分认识了腐蚀带给国民经济的严重损失。船闸设有大型人字工作闸门、反向弧形工作阀门、检修叠

梁闸门、检修阀门、浮式系船柱、拦污栅及启闭设备等设施。船闸钢结构、启闭设备及土建部分通常以 10~12 a 为一个大修周期, 大修历时根据

船闸检修内容不同而不等, 一般持续 1 个月以上<sup>[1]</sup>, 其中船闸钢结构除锈防腐是影响船闸检修工期的一项关键工程, 所需时间一般占检修工期的 50% 以上。因此, 船闸钢结构防腐保护年限和修复效率影响着检修工期, 由此造成的船闸断航也影响着船闸能否满足航运需求。

船闸钢结构所处的环境工况较特殊和复杂, 投入运行后, 检修维护较困难, 故研究长效防腐方案特别重要。理想的防腐措施和材料应具有使用寿命长、施工期短、重涂修复方便、低碳环保、经济性佳等优点。

## 1 船闸钢结构腐蚀原因

钢结构腐蚀是金属材料与周围环境相互作用, 在界面发生化学、电化学、生化反应及物理作用而破坏的现象。船闸工作闸门长期浸于水中或处于干湿交替环境, 易发生电化学腐蚀; 工作阀门受到含沙水流冲击磨蚀和高速水流冲击气蚀, 易发生物理腐蚀; 船闸钢结构同时受真菌、藻类和细菌影响也易发生生化腐蚀, 钢结构多为静水环境, 多属于电化学腐蚀, 水和大气是其腐蚀中的电解质。

船闸钢结构制造、加工使用过程中存在组织形式、成分、表面状态和介质的不均匀, 当浸入电解质中时, 金属表面便形成许多宏观或微观的阳极区和阴极区, 两极之间通过介质产生微电流, 发生电池反应(图 1)。电子从阳极区向阴极区移动, 阳极区失去电子, 一部分金属就会成为离子溶于电解质中, 使得阳极区金属受到腐蚀<sup>[2]</sup>, 化学反应式可表示为:

阳极区发生金属的溶解:



阴极区发生氧化剂的还原:



后化学反应:

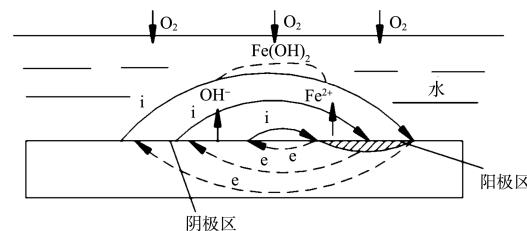
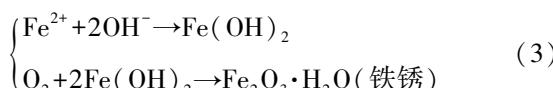


图 1 钢结构腐蚀原理

## 2 国内外船闸钢结构防腐现状

JTS/T 209—2020《水运工程结构防腐蚀施工规范》中钢结构防腐体系主要有钢结构涂层、钢结构金属热喷涂、钢结构包覆有机复合层、钢结构牺牲阳极阴极保护和钢结构外加电流阴极保护等防腐工艺组成。针对船闸钢结构, 常采用钢结构涂层和钢结构金属热喷涂。

### 2.1 防腐机理

钢结构防腐材料的防腐蚀作用主要有 4 个方面: 1) 屏蔽作用。涂层涂覆于金属表面, 使电解质(水、氧、氯离子等)与金属界面无法直接接触, 从而阻止或减缓金属的电化学腐蚀<sup>[3]</sup>。2) 湿附着力。指在水存在下的附着力, 保证水和氧不能在金属表面快速扩散, 进而减缓金属腐蚀。3) 颜料缓蚀作用。在水存在的情况下, 涂料中含有的防锈颜料解离释放出缓蚀离子, 抑制金属腐蚀的进程。4) 牺牲阳极的阴极保护作用。涂层中含有的活泼金属粉体(如锌粉)可作为牺牲阳极, 起着保护阴极金属基体的作用。

### 2.2 涂层保护

涂料保护防腐体系通常由底漆、中间漆和面漆组成, 其中底层应用较多的为富锌类涂料, 其工艺流程为钢结构表面预处理后进行涂装。因无金属热喷涂环节, 具有污染小、能耗低和重涂修复便捷的优点, 但同时存在防腐效果欠佳的缺点(图 2)。经多年实践证明, 水工领域富锌防腐体系的防腐寿命一般在 5~10 a, 之后需进行维护涂装, 给工程带来较大的运营成本及人力负担, 且在维护过程中去除浮锈和旧涂层的施工难度大, 防护效果也达不到新建时期的水平。



图 2 传统涂料腐蚀

### 2.3 金属热喷涂保护

金属热喷涂保护防腐体系中尤以热喷锌工艺应用较为广泛,其原理是在金属表面形成一层锌防腐层,然后在锌层表面涂装涂料封闭层。热喷锌工艺流程为:先利用氧气、乙炔或电热源将锌雾化,然后通过压缩空气和专用工具(喷枪)将雾化的锌超高速喷到金属表面(图3)。金属热喷涂保护具有良好的防腐蚀性能,但同时也存在污染大、能耗高和重涂修复困难的缺陷。

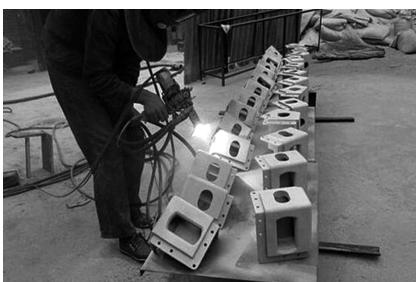


图 3 热喷锌施工工艺

### 2.4 防腐材料发展趋势

为保证防腐效果,目前船闸钢结构防腐领域仍然以高污染、高能耗但防腐性能好的金属热喷涂+涂料封闭防腐体系为主,而环保性较好的富锌类涂料防腐体系因其防腐效果一般,只能用在防腐要求较低的部件(如埋件)。鉴于金属热喷涂工艺污染大,易对涂装工人身体造成伤害,同时现有环保和职业健康标准越来越严,热喷金属技术已在逐步退出防腐领域。GB/T 18226—2015《公路交通工程钢构件防腐技术条件》中提出逐步淘汰镀锌、喷锌等高污染高能耗工艺。虽然水运行业仍在使用热喷金属工艺,但在防腐领域更趋于环保和耐久性的大环境下,防腐材料更新换代是大势

所趋,一种更加节能环保、实施更加方便的新型防腐涂料正在逐步得到推广和应用。

## 3 石墨烯锌粉涂料

### 3.1 防腐机理分析

目前,金属热喷涂保护(Zn)和涂料保护(环氧富锌)是重防腐体系中较重要的、使用最普遍的防腐措施,其最主要的功能作用是在腐蚀环境中通过牺牲锌粉达到保护阴极(钢铁基体)的目的。要想达到好的阴极保护效果,要求涂层中含有大量的导电粒子锌粉,形成顺畅的微导电通路,在腐蚀介质的侵蚀下使得锌粉发生氧化反应,从而发挥涂层中锌粉的有效作用。但随着腐蚀的继续,涂层中的锌粉被氧化生成各种锌盐、导电性下降,有可能阻碍电子的有效传输,造成部分锌粉不能失电子,起不到阴极保护作用<sup>[4]</sup>。

石墨烯锌粉涂料是将石墨烯材料与富锌涂料相结合形成的一种高性能防腐涂料。石墨烯具有超高的强度、优越的导电性能和对腐蚀介质优异的屏蔽性能,将其引入到防腐涂料中可以充分发挥其特性:一方面,利用石墨烯特有的结构和性质,如小尺寸效应和特殊的二维片层结构和疏水性,使石墨烯填充到涂层的孔洞和缺陷中,并形成层层叠加的致密的物理隔绝层,以阻挡环境中的腐蚀介质进入基体,防止腐蚀发生;另一方面,利用石墨烯的导电性和锌粉的阴极保护性,石墨烯在整个涂层中“导电搭桥”,形成立体导电网络,大大提高了锌粉的利用率,充分发挥锌粉的阴极保护性能,进而大幅度提升涂层的防腐性能。

### 3.2 关键性能参数

相比富锌涂料防腐体系,石墨烯锌粉涂料防腐体系的防腐性能提高了2倍以上,其中核心指标附着力由6.6 MPa提升至13.5 MPa,耐盐雾性能由600 h提升至1 440 h(划痕法),最高可超过3 000 h。

相比金属热喷涂保护防腐体系,石墨烯锌粉防腐体系达到相当防腐效果的前提下,耐冲击性

可达 50 cm, 且更加节能环保, 后期重涂修复更加方便。

### 3.3 船闸钢结构应用石墨烯锌粉涂料的可行性

1) 优秀的防腐性能。石墨烯的“迷宫”效应、憎水性、憎油性和导电性, 使其作为填料用于防腐涂料可大幅提升涂层的防腐性能。

2) 便捷的重涂修复性能。石墨锌粉涂料采用直接冷喷涂, 没有现场热喷涂环节, 操作实施更加便捷, 施工工艺优于金属热喷涂体系, 应用在船闸钢结构检修维护防腐中更具优势。

3) 节能的低碳环保方案。石墨锌粉涂料减少了热喷环节, 相比金属热喷涂工艺可有效降低施工能耗, 焊接加工过程中减少锌蒸汽对人体健康的危害, 人员健康及生产施工环境得到优化。

4) 石墨烯锌粉涂料在船闸及航运工程中的应用。2019—2020 年, 石墨烯锌粉涂料已经应用在葛洲坝拦污栅防腐维护、三峡大坝附属钢结构维护(图 4)、岷江犍为航电枢纽泄洪冲沙闸闸门等项目, 至今使用已超过 2 a, 涂层外观良好, 无粉化、无锈点。此外, 岷江龙溪口航电枢纽工程船闸钢结构正在应用石墨烯锌粉涂料防腐, 在工厂涂装和现场拼装过程中均表现出优异的防腐蚀指标。



a) 维护前



b) 维护后

图 4 三峡大坝锁定梁维护前后

## 4 石墨烯锌粉涂料与传统防腐蚀材料对比

### 4.1 性能参数

#### 4.1.1 与传统涂层保护比较

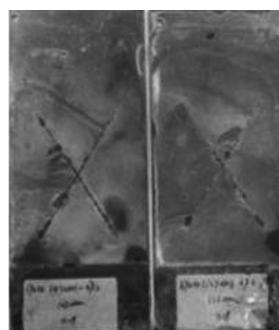
相比于传统富锌漆, 石墨烯锌粉涂料在附着力、耐盐雾性能等技术指标上有很大程度的提高, 见表 1。如图 5 盐雾试验照片, 相比于环氧云母漆和环氧富锌底漆, 石墨烯锌粉涂料表现出优异的耐盐雾性能。

表 1 石墨烯锌粉涂料与传统富锌底漆技术要求对比

防腐体系	表干时间/h	附着力(划格法)	附着力(拉开法)/MPa	柔韧性/mm	抗冲击性/cm	耐盐雾性能(划叉法)	耐 3% 盐水浸泡	不挥发分中金属锌含量/%
传统富锌底漆	≤1	≤1 级	6±	≤2	50	168 h, 涂层不起泡, 不脱落	72 h, 涂层不起泡, 不脱落	≥60
石墨烯锌粉涂料	≤1	≤1 级	16±4	≤2	50	2 500 h, 涂层不起泡, 不脱落	2 200 h, 涂层不起泡, 不脱落	≥40
试验方法	GB/T 1728	GB/T 9286	GB/T 5210	GB/T 1731	GB/T 1732	GB/T 1771	GB/T 1763	HG/T 3668



a) 环氧云母底漆(80 μm, 2 160 h)



b) 石墨烯锌粉涂料(76 μm, 4 320 h)



c) 进口环氧富锌底漆(80 μm, 720 h)



d) 石墨烯锌粉涂料(76 μm, 1 440 h)

图 5 盐雾试验结果

#### 4.1.2 与金属热喷涂保护(Zn)比较

相比于金属热喷涂保护(Zn)，石墨烯锌粉涂料与热喷锌体系具有相当的防腐性能(表2)，

30个周期(1个周期=168 h)环境谱试验表明，其核心指标附着力由6.6 MPa提升至13.5 MPa。

表2 石墨烯锌粉涂料与热喷锌防腐方案性能对比

防腐体系	基材	涂层	干膜厚度/ $\mu\text{m}$	起泡等级	生锈等级	开裂程度	剥落等级	划线处扩蚀宽度/mm	附着力/MPa
热喷锌	冷轧钢板 (表面处理 等级为Sa2.5)	热喷锌	80						
		环氧云铁中间漆	60	0	Ri0	1(S2)	0	5	6.6
		氯化橡胶面漆	100						
石墨烯锌 粉涂料	石墨烯锌粉涂料 环氧中间漆 聚氨酯面漆	石墨烯锌粉涂料	80						
		环氧中间漆	100	0	Ri0	0	0	4	13.5
		聚氨酯面漆	100						

#### 4.2 全寿命周期经济效益

为充分对比石墨烯锌粉涂料与传统防腐体系，参考《广东省通用安装工程综合定额》进行3种防腐措施的全寿命周期经济效益对比。由表3可知，尽管石墨烯主材成本较高，但整体成

本呈现下降趋势，并且涂层中锌粉的利用率由原先的10%提高到90%以上，施工方案与传统涂装体系无区别。从全寿命周期计，维护次数及总成本明显降低，减少了对金属锌资源的依赖，可节约大量资源。

表3 石墨烯锌粉涂料与传统防腐体系全生命周期经济效益对比

防腐体系	首次使用材料 及施工成本/ (元· $\text{m}^{-2}$ )	涂装层厚/ $\mu\text{m}$				防腐年 限/a	周期内防腐维修	20 a 费用/ (元· $\text{m}^{-2}$ )	全寿命 周期成本	
		热喷锌	底漆	中间漆	面漆					
富锌涂 料体系	140	0	80	100	100	280	5~10	20 a 内需重涂4次，覆涂需打磨至钢铁，成 本高	560	最高
热喷锌+ 涂层体系	240	120	80	80	80	360	20	每5 a 重涂1次面漆，达到20 a 使用防腐 寿命后现场热喷锌维修困难，采用富锌涂 料维修前处理须打磨至钢铁，覆涂成本高	400	较高
石墨烯锌粉 涂料体系	190	0	100	100	80	280	20	每10 a 重涂一次面漆，直接覆涂，无需打 磨，成本更低	260	很低

### 5 结语

1)热喷锌结合涂层防腐体系的防腐效果好，但污染大、能耗高、打磨重涂修复困难；富锌涂料防腐涂装工艺污染和能耗相对较低，但是防腐性能达不到工程需求。

2)石墨烯锌粉涂料与热喷锌体系具有相当的防腐性能，石墨烯锌粉涂料在附着力、耐盐雾性能和耐盐水性能等技术指标上较环氧富锌涂料有很大程度的提高。

3)石墨烯锌粉涂料环保性好、实施方便、全生命周期成本低，是一种值得推广的船闸钢结构

防腐材料。

### 参考文献：

- [1] 马丽佳, 陈一梅. 一种基于经济寿命理论的船闸大修周期确定方法 [J]. 水运工程, 2010(3): 121-125.
- [2] 耿希明. 三峡船闸钢闸门防腐技术应用 [J]. 水运工程, 2015(5): 161-164.
- [3] 王晶晶, 苏孟兴. 船舶高性能防腐涂料研究进展 [J]. 涂料技术与文摘, 2017, 38(7): 37-48, 53.
- [4] 孙春龙, 关迎东. 石墨烯在环氧锌粉涂料中的应用研究 [J]. 中国涂料, 2017, 32(2): 14-17, 31.

(本文编辑 王传瑜)