



# 河口船闸金属结构重防腐涂层体系的 适应性研究\*

李春泽<sup>1</sup>, 吴林键<sup>1</sup>, 陆茵茵<sup>2</sup>, 晏世海<sup>3</sup>, 张文豪<sup>4</sup>, 刘明维<sup>1</sup>, 陈宗楠<sup>1</sup>

- (1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;  
2. 盐城市港航事业发展中心, 江苏 盐城 224000; 3. 重庆伟航建设工程有限公司, 重庆 401133;  
4. 中国电建集团中南勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410014)

**摘要:** 河口船闸频繁暴露在干湿交替与盐水入侵耦合作用下的特殊腐蚀环境, 会加速金属结构防腐涂层的劣化, 严重威胁其使用寿命和运营安全。针对这一问题, 设计一套高频干湿循环自动化试验机, 以模拟河口船闸实际服役环境, 遴选5种典型重防腐涂层体系进行室内加速腐蚀试验, 采用失光率分析、附着力测试、电化学阻抗谱分析等手段, 对涂层体系的失光特性、界面结合强度、低频阻抗模值及开路电位等关键参数进行涂层防腐效能分析。重点探讨涂层材料及涂层厚度对其防腐性能的影响, 揭示了传统重防腐体系在干湿交替与盐水入侵耦合环境中的劣化规律。结果表明: 聚氨酯面漆附着力和保光性优于氯化橡胶, 且随着涂层厚度增加(如720 μm体系)能显著提升各电化学指标表现。涂层劣化呈现初期急剧、后期趋缓的特征, 综合性能退化与膜厚及材料特性密切相关, 综合分析环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆、聚氨酯面漆(720 μm体系)整体表现更好。

**关键词:** 河口船闸; 重防腐涂层; 氯离子侵蚀; 干湿循环; 适应性

**中图分类号:** U641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2026)02-0127-10

## Adaptability of heavy anti-corrosion coating system for metal structure of estuarine ship lock

LI Chunze<sup>1</sup>, WU Linjian<sup>1</sup>, LU Yinyin<sup>2</sup>, YAN Shihai<sup>3</sup>, ZHANG Wenhao<sup>4</sup>, LIU Mingwei<sup>1</sup>, CHEN Zongnan<sup>1</sup>

- (1. National Inland Waterway Improvement Project Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Port and Shipping Development Center of Yancheng City, Yancheng 224000, China;  
3. Chongqing Weihang Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing 401133, China;  
4. China Power Construction Corporation South China Institute of Geotechnical Investigation & Design Co., Ltd., Changsha 410014, China)

**Abstract:** The frequent exposure of the estuarine ship lock to the special corrosive environment of alternating dry and wet conditions and saltwater intrusion can accelerate the deterioration of the anti-corrosion coating on the metal structure, seriously threatening its service life and operational safety. To address this issue, a high-frequency dry-wet cycle automated testing machine is designed to simulate the actual service environment of the estuary ship lock. Five typical heavy-duty anti-corrosion coating systems are selected for indoor accelerated corrosion tests. The key parameters of the coating systems, such as gloss loss, adhesion, low-frequency impedance modulus, and open-circuit potential, are analyzed for coating anti-corrosion effectiveness using methods such as gloss loss analysis,

收稿日期: 2025-06-07 录用日期: 2025-08-04

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279124, 52209156); 江苏交通运输厅科技项目(LSXGH-KT-ZMTC); 重庆交通大学大学生创新创业训练计划项目(s202510618010)

作者简介: 李春泽(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工金属结构及材料研发。

通信作者: 吴林键(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港口与海岸工程结构及材料。Email: wljabgf@126.com

adhesion testing, and electrochemical impedance spectroscopy analysis. The influence of coating materials and coating thickness on the anti-corrosion performance is emphasized, and the deterioration laws of traditional heavy-duty anti-corrosion systems in the alternating dry and wet conditions and saltwater intrusion coupling environment are revealed. The results show that the adhesion and gloss retention of polyurethane topcoat are superior to those of chlorinated rubber, and the electrochemical indicators can be significantly improved with the increase of coating thickness (such as the 720  $\mu\text{m}$  system). The coating deterioration shows a characteristic of rapid initial deterioration followed by a gradual slowdown. The overall performance degradation is closely related to the film thickness and material properties. Comprehensive analysis indicates that the epoxy zinc-rich primer, epoxy mica intermediate coat, and polyurethane topcoat (720  $\mu\text{m}$  system) perform better overall.

**Keywords:** estuarine locks; heavy anti-corrosion coating; chloride attack; wet-dry cycle; adaptability

河口船闸是建于入海口附近的通航建筑物,其特殊的地理位置和运行环境使其金属结构面临着极为复杂的腐蚀挑战。在灌泄水作业过程中,船闸金属结构频繁暴露于干湿交替的环境<sup>[1]</sup>,同时受到盐水入侵等多因素耦合作用<sup>[2-4]</sup>,导致腐蚀速率显著增加,严重影响其使用寿命和结构安全性。

为了确保河口船闸金属结构的长期稳定运行,优化和改进重防腐涂层体系显得尤为重要。近年来,国内外学者对金属结构的防腐蚀技术进行了大量研究<sup>[5-10]</sup>,但在河口船闸这种特殊服役环境下的系统性研究仍相对较少,重防腐涂层的劣化规律尚不明确。

本文针对河口船闸金属结构在干湿交替与盐水入侵耦合作用下的特殊腐蚀环境开展试验,系统评估传统重防腐涂层体系的防腐效能。通过对比分析现行国家与行业防腐规范的技术要求,遴选5种典型涂层体系,并设计高频干湿循环自动化试验机进行室内加速腐蚀试验,模拟河口船闸实际服役工况下的劣化过程。试验对关键参数进行综合分析,揭示传统重防腐体系在干湿交替与盐水入侵耦合环境中的失效规律,旨在为优化河口船闸金属结构防腐蚀技术方案提供参考。

## 1 试验研究

### 1.1 试验材料及试验方案

鉴于河口船闸的特殊地理环境,结合 SL/T 105—2025《水工金属结构防腐蚀技术规范》<sup>[11]</sup>和 JTS/T 209—2020《水运工程结构防腐蚀施工规范》<sup>[12]</sup>中干湿

交替区所规定的涂层体系,选取氯化橡胶类、聚氨酯类涂料、环氧富锌涂料、无机富锌涂料、环氧云铁涂料、热喷涂铝等6种重防腐涂层原料,以底漆、中间漆、面漆的形式进行相互组合,涂覆于已进行除锈处理的钢试样表面上,其中采取100 mm×100 mm×2 mm的Q235B方形试样,用以开展模拟河口船闸真实服役环境下盐水入侵高频干湿循环试验。

为探究成膜厚度对钢结构防腐效果的影响,本文选取了5种防腐涂层体系,并通过调整各层涂层的厚度进行比较分析,见表1。其中涂层体系1~3为SL/T 105—2025《水工金属结构防腐蚀技术规范》中干湿交替区所规定的涂层体系,涂层体系4、5则根据JTS/T 209—2020《水运工程结构防腐蚀施工规范》中的规定设置涂层体系,厚度均满足规范要求。所使用的涂层材料的信息见表2。

表1 船闸金属结构防腐涂层体系  
Tab. 1 Anti-corrosion coating system for metal structure of ship lock

涂层体系	涂层组合	涂层原料	涂层厚度/ $\mu\text{m}$ (推荐)	总厚度/ $\mu\text{m}$	规范备注
1	底层	环氧富锌	80	240	SL/T 105—2025
	中间层	环氧云铁	80		
	面层	氯化橡胶	80		
2	底层	无机富锌	80	240	SL/T 105—2025
	中间层	环氧云铁	80		
	面层	氯化橡胶	80		
3	底层	热喷涂铝	80	240	SL/T 105—2025
	中间层	环氧云铁	80		
	面层	氯化橡胶	80		

续表 1

涂层体系	涂层组合	涂层原料	涂层厚度/ $\mu\text{m}$ (推荐)	总厚度/ $\mu\text{m}$	规范备注
4	底层	环氧富锌	100	500	JTS/T 209—2020
	中间层	环氧云铁	200		
	面层	聚氨酯	200		
5	底层	环氧富锌	120	720	JTS/T 209—2020
	中间层	环氧云铁	200		
	面层	聚氨酯	400		

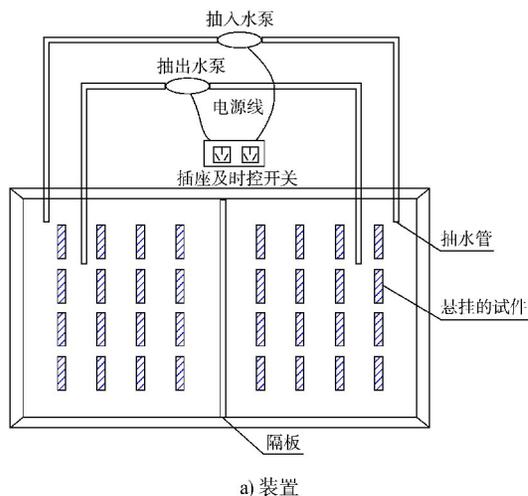
表 2 涂层材料具体信息

Tab. 2 Specific information on coating materials

涂层原料	主要成分	价格/ (元· $\text{kg}^{-1}$ )
氯化橡胶防腐漆	氯化橡胶树脂、改性树脂	25.00
聚氨酯类涂料	聚氨酯树脂、主剂和固化剂	32.70
环氧富锌涂料	环氧树脂、锌粉、固化剂	31.70
无机富锌涂料	锌粉、无机硅酸盐、固化剂	27.70
环氧云铁涂料	环氧树脂、云母氧化铁、固化剂	26.50
热喷涂铝	$\geq 99.5\%$ 的工业纯铝	24.10

模拟盐水入侵影响下船闸金属结构重防腐涂层体系的服役环境, 试验系统包括高频干湿自动化干湿循环和紫外光加速耐候试验机。试验装置及系统的设置, 见图 1。

其中根据 GB/T 1865—2009《色漆和清漆人工气候老化和人工辐射暴露滤过的氙弧辐射》<sup>[13]</sup> 使用紫外加速老化试验箱, 试验箱运行模式为连续运行, 运行期间相对湿度为 50%~60%, 运行温度为 63 °C, 平均辐射强度在距离试样表面 30 cm 范围内为 8.3 W/m<sup>2</sup>; 结合船闸高频干湿交替试验系统要求, 确定运行干湿循环周期为 80 min, 干湿比为 1:1, 腐蚀溶液浓度为 0.5%。



a) 装置



b) 紫外光加速耐候试验机

图 1 试验装置及系统设置

Fig. 1 Experimental setup and system configuration

## 1.2 试验内容

### 1.2.1 试验步骤

1) 涂层体系选取, 见 1.1 试验材料及试验方案。

2) 试样制备与筛选。制备 80 块涂层试件, 经边角打磨后筛选出 56 块厚度均匀 ( $\pm 5 \mu\text{m}$ )、外观无缺陷的试件用于试验。

3) 试验环境控制。将试件置于带透空垫板 (高 1 cm) 的高频干湿循环自动化试验箱内, 确保工作面朝上。干燥阶段通过强制通风保证完全干燥 (湿度  $< 10\%$ ), 湿润阶段完全浸入 0.5% NaCl 溶液, 然后将高频干湿循环自动化试验箱放置于紫外线加速耐候试验箱内, 紫外辐照强度恒定 ( $8.3 \text{ W/m}^2$ )。

4) 试验系统调试。采用紫外加速耐候试验箱 (与高频干湿循环系统联动运行)。定期检查水位泵、时控开关及溶液浓度 (每 5 d 更换)。

5) 分批试验设计。受限于设备容量, 每次放入 16 块试样, 按 5、10、15 d (类推至 35 d) 分批次试验, 避免交叉污染。

6) 数据采集与分析。初始值测量: 涂层厚度、附着力、光泽度、低频阻抗。周期性检测: 每 5 d 取样, 记录形貌、膜厚、附着力等参数, 分析时变规律。

7) 电化学测试。为全面评估防腐涂层体系的电化学性能, 构建了标准的三电极测试系统, 采用 SCE (饱和甘汞电极) 参比电极、铂片辅助电极, 并在 3.5% NaCl 溶液中测量开路电位和阻抗谱。

该电化学测试系统的结构组成, 见图 2。

试件浸泡至设定时间后, 以无水乙醇清洁表面, 置于电解池中, 待开路电位波动 <3 mV/5 min 后开始测量。

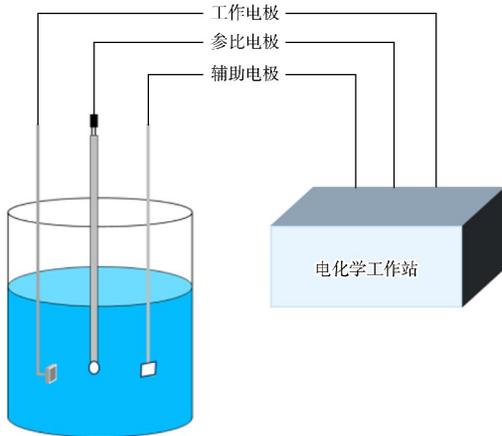


图 2 电化学测试系统

Fig. 2 Electrochemical test system

### 1.2.2 试验方法

1) 涂层腐蚀形貌: 试样达到设定暴露时间后取出, 采用目视法及光学显微镜(50×)观察表面宏观形貌, 记录变色、起泡、剥落等缺陷的面积占比(ImageJ 软件分析)。

2) 涂层附着力: 使用 PosiTest AT-A 附着力测试仪(量程 0~20 MPa)测定涂层与基材的黏结强度。每组涂层体系取 4 个平行试样, 测试前在标准环境(23±2)°C,(50±5)%RH 下固化 7 d, 结果取平均值。

3) 膜厚: 采用磁性测厚仪(Elcometer 456, 精度±2 μm), 探头垂直接触涂层表面, 随机选取 5 点测量, 取平均值作为膜厚值。

4) 光泽度: 使用 60°角光泽度仪(BYK-Gardner micro-TRI-gloss), 参照 GB/T 9754—2007 校准后测量。高光泽涂层(>70 GU)补充 20°角数据, 低光泽涂层(<10 GU)补充 85°角数据。

5) 开路电位(open circuit potential, OCP): 采用三电极体系, 电解液为 3.5% NaCl 溶液, 记录无外加电流下自然腐蚀电位(采样间隔 1 h, 持续 24 h)。

6) 电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS): 在开路电位下, 施加 5 mV 正弦波扰动信号, 频率范围 10<sup>-2</sup>~10<sup>5</sup> Hz(Gamry Reference 600+阻抗分析仪)。通过 ZSimpWin 软件拟合等效电路, 计算涂层孔隙率及电容值。

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层形貌

有机防腐涂层体系在重腐蚀环境中具有防腐效果好、涂刷简便、成本低等诸多优点, 5 类防腐涂层体系在紫外加速老化与盐水高频干湿交替联合作用下, 船闸金属结构带防腐措施钢试样防腐效果的试验系统中取出达到浸泡时间的试样, 获得在不同暴露时间下各类重防腐涂层体系形貌变化规律。为对比各涂层体系在不同老化阶段的表观形貌变化, 本文选取表 1 所列的船闸金属结构防腐涂层体系, 在不同老化时间节点进行观察与拍摄, 涂层试样的表观形貌变化情况见表 3, 从左至右分别为老化 0、7、14、21、28、35 d 的涂层形貌, 对应的等效时间为 0、252、504、756、1 008、1 260 d(3.5 a)。

表 3 重防腐涂层体系表观形貌

Tab. 3 Appearance morphology of heavy anti-corrosion coating system

涂层体系	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
1						
2						

续表3

涂层体系	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
3						
4						
5						

在浸泡 35 d 的时间里, 试样表面除了光泽度明显的变化外, 无其他明显损伤、起泡、脱落、裂痕或锈蚀, 在试验的最后试样表面外围有一些白色产物且擦拭不掉。

## 2.2 涂层附着力

### 2.2.1 附着力形貌

附着力反映涂层与金属基体结合力, 是决定涂层防护作用的重要因素之一, 并且涂层附着力直接影响金属的防腐性能和服役寿命, 是评价涂层耐久性能的重要参数<sup>[14-17]</sup>。

各类涂层体系附着力破坏形貌见表 4, 在 0 d 时 5 种类型涂层体系均在面漆与附着力黏结剂之间破坏, 破坏形貌一致, 面漆有少许涂层掉落。当老化试验进行到 15 d 时涂层体系拉拔测试破坏于面漆与中间漆处, 其破坏面积均超过 90%, 说明面漆在经历 15 d 的紫外老化试验后已经降解; 25 d 时其破坏面已经能看到部分底漆, 表明面漆和底漆都有损坏; 直到试验结束, 涂层体系 1 和 3 的涂层被整体拔起, 钢基材裸露面积近 100%, 涂层体系 2、4、5 的钢基材只有少部分涂层覆盖, 其裸露面也可达 80%, 但裸露的钢基材完好如初并未发现锈蚀痕迹, 试验全过程表明经过 35 d 的紫外老化及干湿交替重防腐涂层体系已经接近失效, 此时还具有一定的防腐性能。

表 4 重防腐涂层体系附着力测试形貌  
Tab. 4 Adhesion test morphology diagram of the heavy anti-corrosion coating system

涂层体系	0 d	15 d	25 d	35 d
1				
2				
3				
4				
5				

### 2.2.2 附着力数值

盐水高频干湿交替与紫外老化加速试验作用下涂层体系附着力整体均呈现变小趋势, 试验完成后测试 4 个附着力值, 取出异常值后求平均值, 得到船闸金属结构重防腐涂层体系的附着力变化曲线, 见图 3。

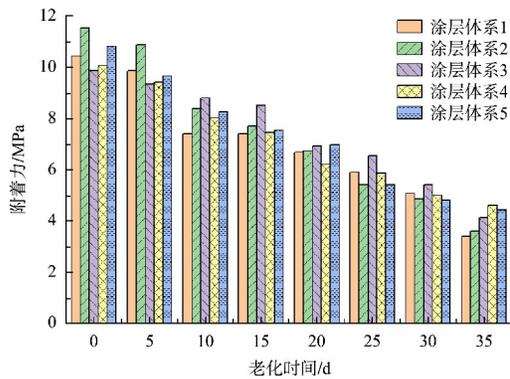


图3 重防腐涂层体系附着力随老化时间的变化  
Fig. 3 Variation of adhesion of heavy anti-corrosive coating system with aging time

图3表明,在试验初期各防腐涂层体系附着力较好都处于10~12 MPa,结合附着力形貌图,试验中其断裂面在面漆与黏结剂接触部分,说明涂层体系与钢基材的附着力优于测试值。随着试验时间的增加涂层附着力值呈线性下降,直到试验结束附着力值整体为4~5 MPa,对比初始值下降严重。结合表3都有钢基材裸露,表明附着力测试形貌与数值匹配程度好。在干湿交替及紫外老化作用下船闸金属结构防腐涂层体系受腐蚀溶液中的腐蚀介质 $H_2O$ 、 $Cl^-$ 、 $O_2$ 渗入涂层内部使涂层发生降解,导致防腐涂层与钢基材黏结能力下降严重。从附着力数值来看,虽涂层体系1、2的初始附着力较大,但其附着力损失率分别达67.4%、68.7%,相比于涂层体系3、4、5的附着力损失率(58.3%、54.3%、59.0%)更大,表明涂层体系1、2在盐水入侵与干湿交替耦合环境下的长期性能较差,而面漆是聚氨酯的涂层体系4的损失率最小(54.3%),并且在经过35 d的老化时间后附着力仍达4.59 MPa,附着力耐久性最佳。

### 2.3 涂层膜厚及光泽度

试验过程中对各防腐涂层体系膜厚进行监测,结果显示膜厚变化较小,均保持在15  $\mu m$ 范围内波动,反映出在老化环境下具有较好的厚度稳定性,其变化情况见图4。太阳光中的紫外光容易使

有机涂层发生光降解<sup>[18]</sup>,水溶液中的腐蚀离子和杂质易使其发生水降解,从而导致涂层膜厚发生变化。

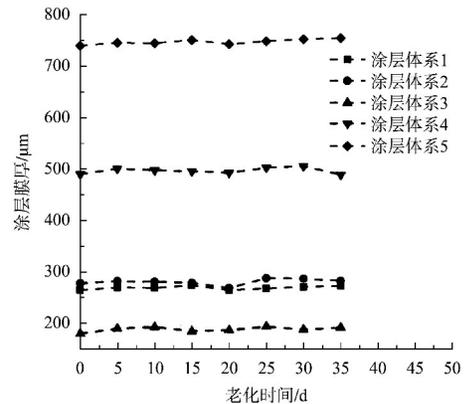


图4 重防腐涂层膜厚随时间的变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of heavy anti-corrosive coating film thickness over time

根据GB/T 9754—2007《色漆和清漆不含金属颜料的色漆漆膜的20°、60°和85°镜面光泽的测定》<sup>[19]</sup>规定,按60°镜面角测定试样涂层体系的光泽度。根据试验测试结果,按照GB/T 1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》<sup>[20]</sup>标定涂层在每个老化阶段的失光等级,并在失光率随老化时间变化曲线中标注。

加速老化试验结果表明,各类涂层体系在前5 d仅出现轻微失光,失光率均小于15%;但至第20 d(等效服役时间约2 a)时,失光率普遍超过50%,达到严重失光等级。试样在前15 d阶段失光速率较快,随后增幅趋缓,进入缓慢失光阶段。由此可见,从严重失光发展至完全失光的过程将持续较长时间,是涂层服役寿命的主要阶段,其变化趋势见图5。从试验结束的最大失光率来看,面漆是氯化橡胶的涂层体系1、2、3失光率约为70%,而面漆是聚氨酯的涂层体系4、5失光率约为65%,表明面漆聚氨酯体系相比氯化橡胶体系有较高的保光性。

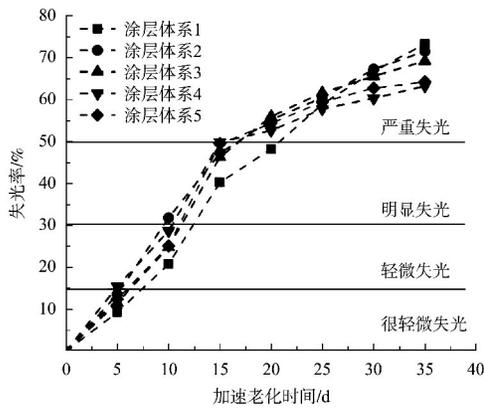


图 5 重防腐涂层体系失光率随老化时间变化曲线  
Fig. 5 Variation curve of light loss rate of heavy anti-corrosive coating system with aging time

### 2.4 涂层电化学分析

传统的电化学测试方法, 如 OCP、电化学阻抗谱, 不仅可以评估金属涂层的耐腐蚀性, 还可以提供腐蚀保护过程的直接证据和细节<sup>[21]</sup>。

#### 2.4.1 OCP 测试

在电化学测试中, 涂层体系放入电解池溶液后, 其 OCP 不会立即稳定, 而是随时间逐渐趋于平衡。为明确其稳定过程, 对初始阶段 OCP 变化进行监测, 其变化趋势见图 6。因此在试验初期对 3 个电化学平行试样进行测试, 大约在 1 200 s 后变化不足  $\pm 5$  mV, 后续试验均在 OCP 稳定后进行测试。

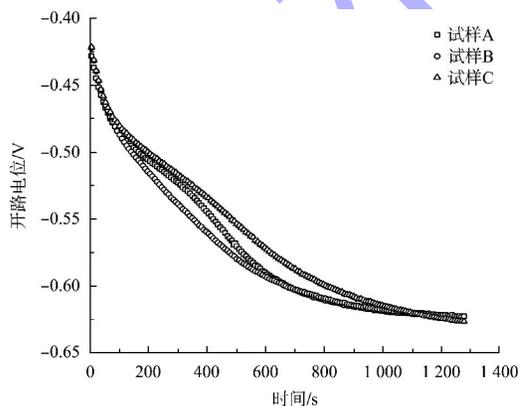


图 6 防腐涂层体系开路电位稳定的时间  
Fig. 6 The time for stable open-circuit potential of anti-corrosion coating system

采用 OCP 测试方法对重防腐涂层体系进行测试, 研究了不同浸泡时间下各类涂层的开路电位变化情况, 测试结果见图 7。对于重防腐涂层来

说, OCP 值越小, 说明涂层内部腐蚀介质的扩散越明显, 并且随浸泡时间的延长, 其向负方向移动, 表明腐蚀介质在涂层内部已逐渐扩散, 到达金属基体表面后, 其变化趋于稳定。

各涂层体系的 OCP 初始值均在  $-325$  mV 上下, 在试验前 10 d, OCP 均无明显变化, 处于动态平衡中, 而后 OCP 开始呈现线性下降趋势; 试验结束时其最终值仍然大于裸金属开路电位 ( $-650$  mV), 由此可见涂层仍具有防腐性能。综合分析, 涂层体系 1 的初始 OCP 值较大, 但下降速率最快, 在老化时间 35 d 后 OCP 值最小, 表明其长期性能较差。涂层体系 2、3、4 在老化 35 d 后 OCP 值相近, OCP 与涂层体系种类变化关系不显著, 而具有更大涂层厚度的涂层体系 5 的初始 OPC 值和老化 35 d 后的 OCP 值均明显高于涂层体系 4, 涂层厚度越大 OCP 表现越好, 在 35 d 试验时间后相比其他厚度仍具有较高的 OCP。

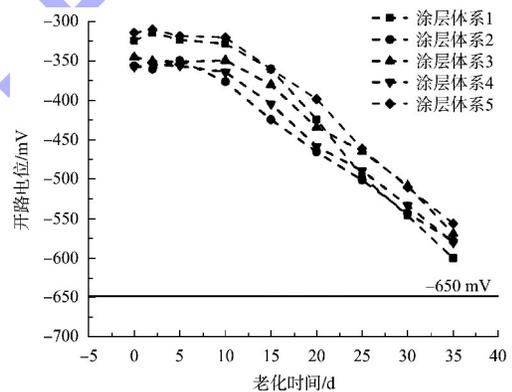


图 7 重防腐涂层体系开路电位随时间的变化曲线  
Fig. 7 Variation curve of open-circuit potential of heavy anti-corrosive coating system over time

#### 2.4.2 阻抗变化

不同频率下涂层体系阻抗发生变化, 统计得到涂层体系低频阻抗模值  $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$  随老化试验时间的变化趋势, 并据此绘制曲线, 相关测试结果分别见图 8、9。

由图 9 可知, 各涂层体系初始低频阻抗模值  $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$  分别为  $1.02 \times 10^{10}$ 、 $1.81 \times 10^{10}$ 、 $2.24 \times 10^{10}$ 、 $8.60 \times 10^{10}$ 、 $3.45 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 由此, 厚度越大的涂层体系低频阻抗模值越大。此外, 低频阻抗模值  $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$  在两天时有一个短暂上升, 可能由于

涂层体系中的物质与腐蚀溶液中的物质反应导致，随后在各自的试验周期下均呈现下降趋势，直到试验结束低频阻抗模值  $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$  分别为  $1.78 \times 10^7$ 、 $3.12 \times 10^7$ 、 $3.45 \times 10^7$ 、 $7.73 \times 10^7$ 、 $1.08 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，从低频阻抗模值的下降来看，厚度较大的涂层体系随试验的老化下降越大，这是由于在涂刷过程中厚涂层内部更易产生孔隙，且干燥时间相同的情况下内部固化反应不完全，但总体来说还是厚度越大的涂层体系低频阻抗模值  $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$  越大。聚氨酯涂层体系 4、5 的低频阻抗模值大于氯化橡胶涂层体系 1、2、3，且厚度最大的涂层体系 5 表现最优。

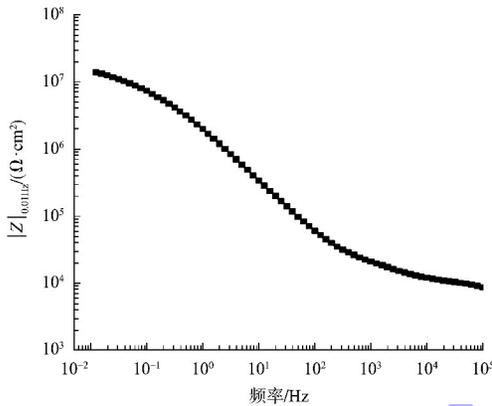


图 8 涂层体系阻抗 Bode 模图

Fig. 8 Bode pattern of impedance of coating system

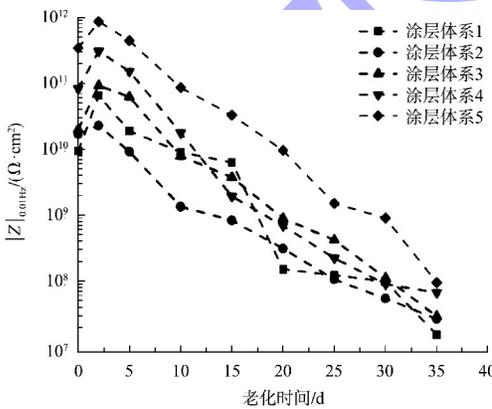


图 9 重防腐涂层体系在模拟溶液中的阻抗模量随时间的变化曲线

Fig. 9 Impedance modulus variation curve of heavy anti-corrosive coating system in simulated solution over time

### 2.5 综合评价

依据此次试验所得数据，统计各项指标以评价各涂层体系的防腐性能，并综合考虑其成本经

济性和施工便捷性，对各涂层体系进行打分，具体评分结果见表 5，打分依据如下。

1) 涂层体系形貌：涂层形貌经过 35 d 的老化时间后变化不大，且 5 类涂层体系外观形貌接近，考虑涂层经 35 d 老化时间后，形貌均有轻微改变，统一打 4 分。

2) 附着力：根据图 3 的数据分析，对各涂层经 35 d 老化时间后的剩余附着力进行排序，表现最好的涂层体系 4 打 5 分，以此类推，涂层体系 5、3、1、2 分别打 4、3、2、1 分。

3) 膜厚：经过统计分析表明，各涂层体系在 35 d 的老化时间内都能保持在  $15 \mu\text{m}$  的范围内波动，劣化程度相近，统一打 4 分。

4) 光泽度：经过 35 d 的老化时间后，对各涂层体系的失光率大小进行排序，失光率最小的涂层体系 4 打 5 分，以此类推，涂层体系 5、3、2、1 分别打 4、3、2、1 分。

5) 开路电位：对经过 35 d 老化时间后各涂层体系的开路电位表现进行打分，开路电位最大的涂层体系 5 打 5 分，以此类推涂层体系 3、2、4、1 分别打 4、3、2、1 分。

6) 低频阻抗：对经过 35 d 老化时间后各涂层体系的阻抗表现进行打分，阻抗最大的涂层体系 5 打 5 分，以此类推涂层体系 4、3、2、1 分别打 4、3、2、1 分。

7) 经济性：根据表 2 中各涂层材料的单价，并综合考虑各涂层体系的膜厚，对每种涂层体系的经济性进行打分，价格越低打分越高，涂层体系 3、2、1、4、5 分别打 5、4、3、2、1 分。

综合以上打分情况，5 分表示性能优异、4 分表示性能良好、3 分表示性能中等、2 分表示性能一般、1 分表示性能较差，并计算各项性能指标的平均值，计算公式如下：

$$\bar{F} = \frac{\sum F_i}{i} \quad (1)$$

式中： $\bar{F}$  为综合评价分数； $F_i$  为某一项性能指标分数； $i$  为性能指标个数。

表5 重防腐涂层体系性能指标综合评价

Tab. 5 Comprehensive evaluation of performance indicators of heavy anti-corrosive coating system

涂层体系	形貌	附着力	膜厚	光泽度	开路电位	低频阻抗	经济性	平均值
1	4	2	4	1	1	1	3	2.28
2	4	1	4	2	3	2	4	2.85
3	4	3	4	3	4	3	5	3.71
4	4	5	4	5	2	4	2	3.71
5	4	4	4	4	5	5	1	3.85

综上所述,对传统重防腐涂层体系试验效果进行分析,从面漆的失光率来看,聚氨酯面漆比氯化橡胶面漆保光性更好;从低频阻抗及附着力来看,涂层体系膜厚提高有利于提高防腐效果,环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆、聚氨酯面漆涂层体系整体表现更好。

### 3 结论

1) 重防腐涂层体系附着力初始值为10~12 MPa,试验进行重防腐涂层体系下降较快仅剩约4 MPa,从附着力形貌来看,35 d的老化试验重防腐涂层体系整体脱落,有部分或全部钢基材裸露,涂层体系已接近失效。

2) 从失光率来看,聚氨酯面漆比氯化橡胶面漆保光性更好,重防腐涂层体系在试验初始阶段失光率增长迅速,15 d以后增长缓慢。

3) 涂层体系越厚,初始低频阻抗模值 $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$ 越大,720  $\mu\text{m}$ 的重防腐涂层初始值为 $3.45 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,试验结束低频阻抗模值 $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$ 为 $1.08 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,表明膜厚增加对防腐效果有一定的提升效果。

4) 综合比较各防腐涂层体系,开路电位的初始值在-325 mV,试验前10 d无明显变化,处于动态平衡,随着试验进行开路电位开始线性下降;试验结束时的最终值仍然大于裸金属开路电位(-650 mV),说明涂层接近失效时较裸露金属仍具有一定的防腐效果。

### 参考文献:

- [1] 易春龙,索双富. 水工钢闸门的腐蚀原因分析与防护措施[C]//第六届国际热喷涂研讨会暨第七届全国热喷涂年会论文集. 北京:中国表面工程协会,2003:228-232.  
YI C L, SUO S F. Corrosion analysis and protection method for steel gate [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Thermal Spray and the 7th National Thermal Spray Conference. Beijing: China Surface Engineering Association, 2003: 228-232.
- [2] LIU Y W, ZHANG J, WEI Y H, et al. Effect of different UV intensity on corrosion behavior of carbon steel exposed to simulated Nansha atmospheric environment[J]. Materials chemistry and physics, 2019, 237: 121855.
- [3] ZHANG N, LIAN Z W, ZHANG W C, et al. Exploring the corrosion behavior of low-Ni Cu-P-Cr-Ni weathering steel with different P contents in a simulated atmospheric environment [J]. Journal of materials engineering and performance, 2023, 32(1): 44-54.
- [4] ZHANG W H, YANG S W, GENG W T, et al. Corrosion behavior of the low alloy weathering steels coupled with stainless steel in simulated open atmosphere [J]. Materials chemistry and physics, 2022, 288: 126409.
- [5] WEN J X, LI H. Thermal spray coatings for protection against microbiologically induced corrosion: recent advances and future perspectives [J]. Journal of thermal spray technology, 2022, 31(4): 829-847.
- [6] 周华强,周林. 水库闸门金属结构防腐处理技术研究[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(11): 142-145.  
ZHOU H Q, ZHOU L. Research on anti-corrosion treatment technology for metal structures of reservoir gate [J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2024, 47(11): 142-145.
- [7] 许旭东,蔡一平,王延艳. 水工金属结构防腐涂层附着力试验与分析[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(5): 65-69.  
XU X D, CAI Y P, WANG Y Y. Experiment and analysis of adhesion of anti-corrosive coatings on hydraulic metal structures [J]. Water conservancy construction and management, 2024, 44(5): 65-69.

- [8] LIU S D, ZHAO C Y, HUANG H L. Research progress of intelligent anti-corrosion coatings and their healing agents[J]. *Advanced materials technologies*, 2025, 10(11): 2401669.
- [9] ZHANG W, YAN W H, ZHAO X R, et al. Research on two-dimensional layered materials for metal corrosion protection: Advances and challenges [J]. *Progress in organic coatings*, 2024, 194: 108589.
- [10] 秦永坤, 李伟雄, 李岩, 等. 三峡船闸输水廊道反弧门涂层失效及腐蚀原因分析[J]. *水运工程*, 2023(9): 106-111.
- QIN Y K, LI W X, LI Y, et al. Reasons for coating failure and corrosion of reversed radial gate in water conveyance gallery of Three Gorges ship lock [J]. *Port & waterway engineering*, 2023(9): 106-111.
- [11] 水工金属结构防腐蚀技术规范: SL/T 105—2025[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2025.
- Technique specifications for anti-corrosion of hydraulic steel structure: SL/T 105-2025 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2025.
- [12] 水运工程结构防腐蚀施工规范: JTS/T 209—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Code for anti-corrosion construction of water transport engineering structures: JTS/T 209-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [13] 色漆和清漆: 人工气候老化和人工辐射曝露滤过的氙弧辐射: GB/T 1865—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Paints and varnishes: artificial weathering and exposure to artificial radiation: exposure to filtered xenon-arc radiation: GB/T 1865-2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [14] 骆光杰, 周茂强, 李野, 等. 海浪飞溅区钢管桩纤维增强高性能树脂复合涂层质量评价[J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(1): 74-78.
- LUO G J, ZHOU M Q, LI Y, et al. Quality evaluation of fiber reinforced high performance resin composite coating in the splash zone of offshore wind power steel pipe piles [J]. *New building materials*, 2023, 50(1): 74-78.
- [15] 张东亚, 苏雅丽. 防腐蚀涂层配套体系的层间附着力的研究[J]. *上海涂料*, 2023, 61(3): 28-32.
- ZHANG D Y, SU Y L. Study on the inter-coat adhesion of anti-corrosive coating matching system [J]. *Shanghai coatings*, 2023, 61(3): 28-32.
- [16] 陈芳, 郑耀臣, 宋永东. 丙烯酸聚氨酯清漆的层间附着力[J]. *涂料工业*, 2004, 34(7): 47-49, 63.
- CHEN F, ZHENG Y C, SONG Y D. Adhesion between coatings layers of acrylic polyurethane clear finish [J]. *Paint & coatings industry*, 2004, 34(7): 47-49, 63.
- [17] 武英英, 陈莉, 杨楠, 等. 低密度型硅橡胶基防热涂层的附着力评价方法探讨[J]. *上海涂料*, 2023, 61(6): 44-48.
- WU Y Y, CHEN L, YANG N, et al. Discussion on evaluation method of adhesion of silicone rubber based thermal protection coating with low-density [J]. *Shanghai coatings*, 2023, 61(6): 44-48.
- [18] 黄林清, 胡宗伟, 李继, 等. 成都地区自然气候暴露试验与人工加速老化试验的相关性研究[J]. *绿色环保建材*, 2020(11): 32-33.
- HUANG L Q, HU Z W, LI J, et al. Correlation between natural climate exposure test and artificial accelerated aging test in Chengdu area [J]. *Green environmental protection building materials*, 2020(11): 32-33.
- [19] 色漆和清漆: 不含金属颜料的色漆漆膜的 20°、60° 和 85° 镜面光泽的测定: GB/T 9754—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Paints and varnishes: determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20°, 60° and 85°: GB/T 9754-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [20] 色漆和清漆: 涂层老化的评级方法: GB/T 1766—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Paints and varnishes: rating schemes of degradation of coats: GB/T 1766-2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [21] CAO F T, GAO G Y, FENG Y M, et al. Electrochemical properties of metallic coatings[J]. *Metals*, 2022, 12(12): 2125.