



# 国内某高水头船闸人字门运行近20年后 腐蚀状况评价及原因分析\*

李岩, 秦永坤, 刘欣欣, 朱锡昶

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

**摘要:** 在国内某高水头船闸停航检修期间, 对其人字门的腐蚀状况进行全面检测。按涂层所处闸门位置不同, 划分为大气区、水位变动区和水下区, 分别进行腐蚀评估、涂层起泡破坏及门体腐蚀的原因分析。结果表明: 随着接近涂层设计使用年限, 船闸人字门普遍存在大面积涂层起泡问题, 起泡层下门体腐蚀问题逐渐凸显, 涂层损伤总面积占门体面积的6.5%~12.7%。总体上, 人字门防护涂层损伤失效过程分为有机涂层起泡、热喷铝层腐蚀发展、热喷铝层作为牺牲阳极抑制钢基体局部腐蚀3个阶段。此外, 指出零星涂层修复难以达到长效防腐的效果, 针对人字门防腐提出整体维修涂层和施加阴极保护的延寿建议。

**关键词:** 高水头船闸; 人字门; 腐蚀评估; 腐蚀原因

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0115-08

## Corrosion evaluation and reason of miter gates of a domestic high head ship lock after serving for almost 20 years

LI Yan, QIN Yongkun, LIU Xinxin, ZHU Xichang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** During the suspended shipping period of a domestic ship lock, corrosion situations of its miter gates are fully detected. The corrosion level evaluation and the reasons analyses of coating blistering and steel gate corrosion are conducted corresponding to the region divided on basis of the position of anti-corrosion coating on the miter gate, namely atmosphere zone, water level fluctuation zone and submerged zone, respectively. The results show that coating blistering is commonly presented on the miter gate of this ship lock and the corrosion below blistering layer became gradually prominent as the coating effective life approaches. The total area of coating damage regions is in the proportion of 6.5%–12.7% of the miter gates. In general, the damage and failure process of protection coating on the miter gate can be separated into three stages: blistering of organic coating, corrosion development of thermal spraying aluminum layer, consumption of aluminum layer acted as sacrificial anode to suppress local corrosion of steel substrate. Moreover, it is pointed out that a long-term anti-corrosion effect is difficult to be achieved with piecemeal coating repair. An alternative method with respect to prolonging the service life of miter gates, including overall maintenance of anti-corrosion coating and the application of cathodic protection is proposed in present work.

**Keywords:** high head ship lock; miter gate; corrosion evaluation; corrosion reason

船闸是我国内河航道上重要的通航建筑物, 其安全稳定运行直接影响内河航运的效率和效益。对于内河船闸, 其水工金属结构的防腐蚀通常要求寿命长、施工周期短等, 以尽量降低停航检修

对航运的影响。国内内河航道上的某大型高水头船闸为双线平行布置的船闸, 每线船闸设12扇人字钢闸门作为工作门, 按不同构件(如面板、端板、主梁翼缘板等)分别采用Q345B、Q345D、

收稿日期: 2024-01-22

\*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y422006)

作者简介: 李岩(1976—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事水工与港工结构腐蚀防护研究工作。

DH32 型钢材制造。在制造过程中, 门体采取热喷涂铝和涂料封闭的联合防腐蚀措施, 涂层设计自钢基体至表面依次为热喷涂铝 120  $\mu\text{m}$ 、磷化底漆 5  $\mu\text{m}$  和氯化橡胶面漆 100  $\mu\text{m}$ , 设计保护年限 20 年以上。船闸人字门自首次防腐施工后, 至今已运行近 20 年, 其防腐蚀涂层已基本达到设计使用年限, 局部位置和区域的构件腐蚀问题凸显。

目前, 针对海水环境中金属材料及结构的腐蚀问题已有较多研究。刘明维等<sup>[1]</sup>研究河口船闸金属结构在盐水高频干湿交替环境下的腐蚀特征, 盐水高频干湿交替作用会加速钢的腐蚀, 腐蚀速率为淡水环境的 5~6 倍; 杨博均等<sup>[2]</sup>针对江河入海口处的淡海水交替环境, 研究 Q235 钢在不同水环境中的腐蚀行为, 发现碳钢在海水环境下的耐蚀性最差, 淡水环境的影响是海水环境的 53%。然而, 淡水环境对钢的腐蚀行为的影响是一个复杂的过程, 流动水体的流速、溶解氧含量、化学组分等因素都会对钢的电化学腐蚀和冲刷腐蚀造成不利影响<sup>[3-4]</sup>。特别对于内河航道上的多级船闸, 由于船舶过闸需求, 多级闸室需频繁灌泄水, 产生干湿交替作用以及流体冲刷等影响, 导致水工钢闸门在不同高程部位发生不同程度的腐蚀。

因此, 本文针对国内某内河船闸的腐蚀问题, 利用停航检修的时机, 根据船闸各级闸门的运行水位特征, 分区域检测人字门大气区、水位变动区和水下区的腐蚀状况, 分析防腐蚀涂层失效及门体腐蚀的原因, 旨在为后期防腐蚀维修时间节点及技术方案的确定提供基础数据, 指导船闸人字门的防腐维修维护。

### 1 测试方法

SL 101—2014《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》<sup>[5]</sup>要求, 按照 50% 的抽样比例对船闸单线人字门进行腐蚀检测, 每级闸首抽检 1 扇, 共计 6 扇人字门, 自上游往下游依次编号  $N_1 \sim N_6$ 。如图 1 所示, 船闸人字门采用薄壁开口的非对称结构, 上游面为整块挡水面板, 下游面为梁格空腔, 其中  $N_1 \sim N_4$  人字门梁格 24 层, 检测面积约为 1.03 万  $\text{m}^2$ /扇,  $N_5$ 、 $N_6$  人字门梁格 23 层, 检测面积约为 1.00 万  $\text{m}^2$ /扇。由于船闸各级闸首高程和

闸室运行水位高度的差异以及水库库容水位的影响,  $N_1 \sim N_6$  人字门门体沿高程方向上的腐蚀环境存在差异, 上部构件长期处于露天大气环境, 中部构件随着运行过程水位升降, 经常处于干湿交替环境, 下部构件常年处于水下。为便于统计分析, 将每扇人字门的上游面和下游面按照梁格层数(自上而下)近似划分为大气区、水位变动区、常年水下区 3 个区域, 分区域进行涂层老化损坏及门体腐蚀状况检测评估, 并综合评定人字门各分区的腐蚀程度, 具体分区见表 1。

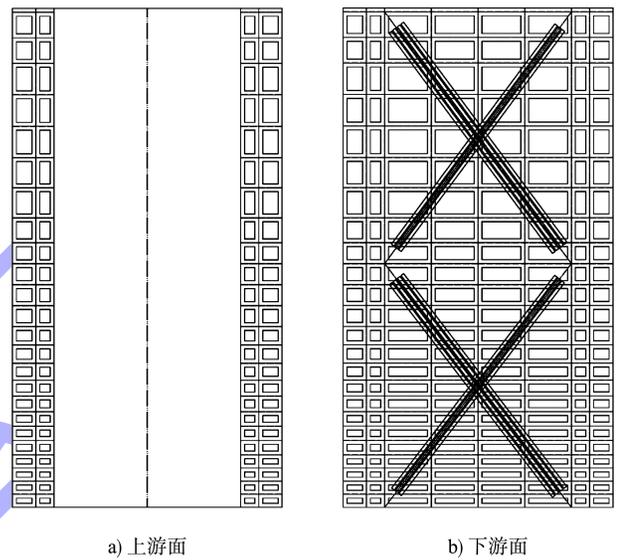


图 1 船闸人字门结构

表 1 人字门按梁格层数划分区域

人字门	大气区	水位变动区	水下区
$N_1$	上游面 1 层	2~5 层	6~24 层
	下游面 1~5 层	6~17 层	18~24 层
$N_2$	上游面 1 层	2~17 层	18~24 层
	下游面 1~9 层	10~16 层	17~24 层
$N_3$	上游面 1~2 层	3~17 层	18~24 层
	下游面 1~9 层	10~17 层	18~24 层
$N_4$	上游面 1~3 层	5~17 层	18~24 层
	下游面 1~9 层	10~18 层	19~24 层
$N_5$	上游面 1~3 层	4~17 层	18~23 层
	下游面 1~8 层	9~15 层	16~23 层
$N_6$	上游面 1~3 层	4~16 层	17~23 层
	下游面 1~8 层	9~16 层	17~23 层

依照涂层老化的评级方法<sup>[6-8]</sup>, 采用天鹅绒布法评定涂层的粉化等级, 对照规范中的标准图片, 对涂层的起泡等级和剥落等级进行综合评定。根据

防腐涂层后期维修需要, 对于不规则的涂层破坏及腐蚀区域, 以最大破坏长度和最大破坏宽度尺寸绘出外接矩形框格, 将其面积近似作为损伤区域面积。

## 2 人字门腐蚀状况

图 2 为船闸人字门涂层损伤失效面积检测结果。如图 2a)、2b) 所示,  $N_1 \sim N_6$  人字门涂层损伤失效总面积分别为 1 307、928、833、1 239、1 018 和 654  $m^2$ , 其中处于最上游的  $N_1$  人字门涂层损伤面积达门体面积的 12.7%。对于人字门大气区, 防腐蚀涂层起泡、剥落及门体腐蚀状况不明显, 少量区域发生涂层面漆起泡, 见图 3a), 涂层损伤失效面积大部分在 30  $m^2$  以下, 均未超过闸门整体检测面积的 1.0%。特别是人字门迎水面, 大气区涂层基本完好, 以涂层的粉化、失光失色问题为主。对于水位变动区, 人字门的涂层损伤失效面积明显增加, 大部分闸门涂层损伤面积约占整体检测面积的 2.3%~4.3%。涂层出现大面积的起泡现象, 局部起泡下发生热喷涂金属层或钢基体的腐蚀, 出现大量白色腐蚀产物堆积, 见图 3b)。对于常年水下区, 迎水面和框架面涂层损伤失效总面积大幅度增加, 普遍在 500  $m^2$  以上, 损伤面积占门体总面积比例的 4.7%~9.6%, 其中  $N_1$  人字门迎水面和框架面水下区涂层损伤面积最大达 990  $m^2$ 。人字门常年水下区涂层起泡密集程度增加, 并且存在明显的淡水贻贝附着现象, 清除表面起泡层及附着物, 出现大量的钢基体腐蚀产物, 见图 3c)。

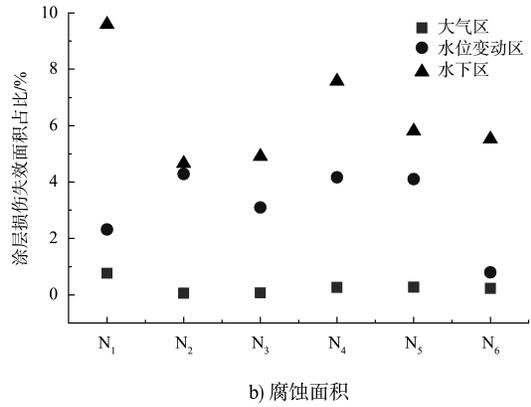


图 2 船闸人字门涂层损伤及腐蚀面积统计



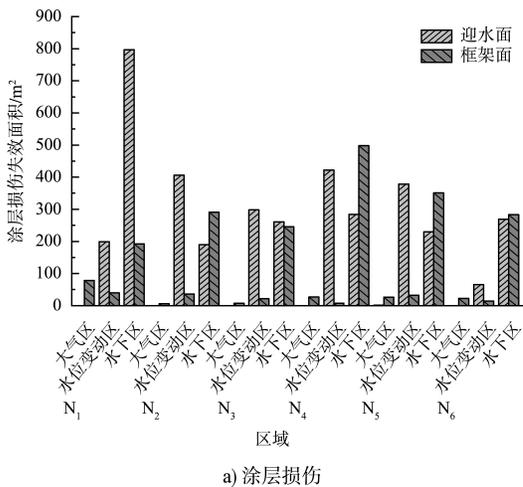
a) 大气区



b) 水位变动区



c) 水下区



a) 涂层损伤

图 3 不同区域腐蚀状况

### 2.1 人字门大气区腐蚀状况

图4为船闸人字门大气区涂层外观状况。可以看出,人字门迎水面和框架面大气区涂层总体上保持完整,未出现涂层大面积起泡、剥落和明显腐蚀情况,腐蚀程度综合评定为A级(轻微腐蚀),见图4a)。人字门大气区涂层存在粉化现象,经测试,天鹅绒试布上沾有较多涂料微颗粒,见图4b),粉化等级为3级。结合人字门服役工况,其大气区每日有一定时间段处于光照环境,在强紫外线长期影响下,有机涂层的高分子链会发生断裂,其交联结构遭受破坏,造成涂层老化、降解<sup>[9]</sup>。人字门大气区局部的涂层起泡主要集中在下游框架面,起泡大小等级为S4或S5级,起泡密度等级为3~5级。总体上,如图4c)和4d)所示,框架面大气区涂层起泡处于3个阶段:1)有机涂层/热喷金属层界面起泡,热喷铝金属层完好;2)热喷铝层发生腐蚀,起泡层下可见明显的白色腐蚀产物堆积;3)局部热喷铝层消耗明显,钢基体开始腐蚀,出现大量的褐色腐蚀产物,局部形成明显的蚀坑。



a) N<sub>6</sub>人字门迎水面涂层粉化



b) N<sub>6</sub>人字门涂层粉化微颗粒



c) N<sub>2</sub>人字门框架面热喷铝层腐蚀产生白锈



d) N<sub>4</sub>框架面局部钢基体发生腐蚀

图4 船闸人字门大气区涂层粉化级起泡层下的腐蚀状况

### 2.2 人字门水位变动区腐蚀状况

图5为船闸人字门水位变动区的涂层外观状况。人字门的水位变动区交替受到阳光照射和淡水浸泡作用,其表面防腐蚀涂层存在大面积起泡现象,起泡层下可见明显的腐蚀产物堆积,腐蚀程度综合评定为B级(一般腐蚀)。对于水位变动区,结合图2、5a)、5b)可以看出,人字门迎水面涂层损伤失效面积普遍远高于下游框架面,迎水面涂层起泡大小等级均达到S5级,起泡密度等级以5级为主,而框架面起泡大小等级为S4或S5级,不同区域的起泡密度等级分布在2~5级。与大气区相比,水位变动区涂层起泡层下白色和褐色腐蚀产物堆积普遍增多,说明该区域热喷稀土铝金属层的消耗速率加快,局部区域热喷金属层消耗殆尽,钢基体多处发生腐蚀。特别是人字门迎水面门叶横向拼装焊缝处,其中N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub>人字门的涂层起泡及门体腐蚀区域沿横向焊缝呈带状分布,局部区域的涂层已剥落失效见图5c)、5d)。其原因可能是焊接区域及热影响区受焊接工艺、不均匀温度等因素的影响,造成材料组织成分差

异、残余应力或焊缝缺陷等的存在, 导致该区域容易遭受局部腐蚀, 加速防腐蚀涂层的破坏<sup>[10]</sup>。



a)  $N_2$ 人字门迎水面涂层起泡



b)  $N_6$ 人字门框架面涂层起泡



c)  $N_1$ 人字门迎水面焊缝区域起泡、腐蚀



d)  $N_2$ 人字门迎水面焊缝区域起泡、腐蚀

图 5 船闸人字门水位变动区涂层起泡及对接焊缝附近腐蚀状况

### 2.3 人字门水下区腐蚀状况

图 6 为船闸人字门常年水下区的涂层外观状况。如图 6a)、6b), 人字门水下区存在涂层大面积严重起泡现象, 局部剥落失效, 且门体表面附着大量的淡水贻贝, 清除起泡层和生物附着层, 可见明显的白色或褐色腐蚀产物, 局部区域形成明显蚀坑, 腐蚀程度综合评定为 B 级(一般腐蚀)。对于人字门水下区, 迎水面涂层起泡等级以 5(S5)级为主, 而框架面水下区涂层起泡程度不均匀, 起泡大小等级为 S3~S5 级, 起泡密度等级为 2~5 级。结合图 2、3 可以看出, 人字门水下区涂层起泡、腐蚀面积比例显著高于水位变动区和大气区, 尤其是  $N_1$  人字门, 其迎水面大部分区域常年处于水下, 涂层起泡损伤问题最为突出, 迎水面水下区涂层损伤失效面积超过下游框架面的 4 倍。人字门水下区大多附着淡水贻贝, 不同人字门贻贝聚集密度存在差异, 总体上, 迎水面贻贝附着相对于框架面更密集。此外, 人字门水下区是历次船闸防腐维修的重点区域, 然而修补涂层的起泡现象普遍存在, 形成大量的腐蚀产物堆积, 见图 6c)、6d)。



a)  $N_3$ 人字门迎水面贻贝附着及涂层起泡



b)  $N_2$ 人字门迎水面贻贝附着腐蚀



c) N<sub>4</sub>人字门框架面贻贝附着及涂层起泡



d) N<sub>6</sub>人字门框架面修补涂层起泡

体逐渐发生腐蚀，随着腐蚀的不断深入形成明显的蚀坑。人字门涂层起泡及腐蚀机理见图 8。



a) N<sub>1</sub>人字门涂层起泡破裂



b) N<sub>5</sub>人字门起泡沫层下白色腐蚀产物堆积



c) N<sub>2</sub>人字门钢基体腐蚀，形成蚀坑

图 6 船闸人字门水下区涂层起泡及淡水贻贝附着状况

### 2.4 涂层起泡及锈蚀原因

船闸人字门钢基体表面采用热喷涂铝加涂料封闭，在大气区由于有机封闭层和铝表面钝化层的存在，能够稳定发挥防腐蚀作用。然而，防腐蚀涂层体系在水位变动区和水下区涂层起泡、锈蚀普遍存在，主要可以分为 3 个阶段，如图 7 所示：a) 表面有机涂层起泡，热喷涂铝金属层尚未发生明显腐蚀；b) 热喷涂铝层局部腐蚀，起泡层下生成明显的白色铝腐蚀产物，通常称为白锈<sup>[11]</sup>；c) 腐蚀介质渗透到热喷金属层/钢基体界面，钢基

图 7 船闸人字门涂层起泡及门体腐蚀发展过程

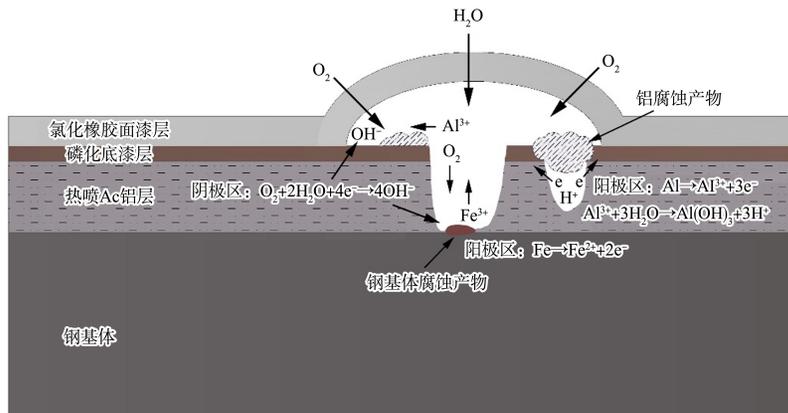


图 8 人字门涂层起泡及腐蚀机理

第 1 阶段以有机涂层起泡为主, 起泡层下充满清水, 见图 7a)。由于高分子链断裂等原因, 有机涂层表面产生微缺陷,  $O_2$  和  $H_2O$  从缺陷处渗透到涂层/金属界面, 形成局部腐蚀电池。在开始阶段, 阴极区和阳极区基本处在同一位置, 阴极发生  $O_2$  的还原消耗, 产生  $OH^-$ 。由于阴极区  $O_2$  的消耗和氧原子扩散渗透腐蚀产物的难度较大, 原腐蚀区域的阴极反应停止, 阴极转移到涂层/金属界面处氧气充足的区域, 阳极反应还在界面处继续发生, 逐渐形成分离的阴极区和阳极区。为了保持界面处电中性, 阳离子向新的阴极区传输, 生成腐蚀产物, 导致涂层剥离。此时, 涂层剥离前端  $OH^-$  不断积累, pH 值升高, 这些区域在渗透压作用下吸水鼓泡, 发生涂层阴极起泡<sup>[12-13]</sup>。通常, 由于热喷涂铝层中部分铝颗粒未达到充分熔融状态, 涂层存在孔隙缺陷, 在腐蚀介质作用下缺陷处发生局部腐蚀<sup>[14-15]</sup>。

第 2 阶段涂层表面处  $O_2$  供应较充分, 铝发生阳极溶解, 生成  $Al^{3+}$ , 进一步与水反应生成白色腐蚀产物  $Al(OH)_3$ , 见图 7b), 疏松的腐蚀产物加剧涂层体积膨胀、起泡, 其电化学反应为:



随着阳极反应的进行, 大量腐蚀产物堵塞孔隙缺陷, 导致腐蚀介质向孔隙的扩散受到限制, 进一步形成了局部腐蚀闭塞区, 闭塞区内氧气逐渐消耗, 形成贫氧区。由于供氧差异, 贫氧区的阴极氧气还原电流密度小于阳极金属溶解电流密度, 富氧区阴极电流密度大于阳极电流密度, 在供氧差异腐蚀电池作用下贫氧区 pH 值降低, 引发贫氧区内阳极行为的变化, 加速金属的阳极溶解。此外, 由于闭塞区内溶液的扩散和对流受阻, 孔隙内  $H^+$  浓度较高, 致使孔隙内金属铝难以形成钝化, 加速溶解<sup>[16]</sup>。当闭塞区内  $H^+$  浓度足够高时, 进一步诱发氢气析出, 也会加剧有机

涂层起泡<sup>[17]</sup>。

第 3 阶段腐蚀介质渗入热喷稀土铝层/钢基体界面, 稀土铝涂层作为牺牲阳极, 对钢基体提供阴极保护。但是, 随着热喷涂稀土铝层的不断消耗, 难以对裸露钢基体形成连续的阴极保护, 局部钢基体开始发生阳极溶解, 生成褐色腐蚀产物, 逐渐形成明显的蚀坑, 见图 7c)。

### 3 结语

1) 高水头船闸人字门迎水面和框架面涂层起泡、腐蚀问题普遍存在。人字门大气区涂层以粉化为主, 未发生大面积腐蚀, 涂层损伤失效面积未超过门体面积的 1.0%, 腐蚀程度综合评定为 A 级; 水位变动区和水下区涂层出现大面积起泡现象, 有明显的蚀斑、蚀坑, 涂层损伤面积分别占人字门门体面积的 2.3%~4.3% 和 4.7%~9.6%, 腐蚀程度综合评定均为 B 级。

2) 人字门水位变动区和水下区涂层损伤的初期阶段主要是有机涂层起泡。随着热喷涂稀土铝层的局部腐蚀, 腐蚀产物逐渐堆积堵塞铝涂层孔隙缺陷, 形成“闭塞电池”作用下的铝涂层腐蚀深入。当腐蚀通道渗入到钢基体, 铝涂层作为牺牲阳极, 使钢基体得到保护, 但随着铝涂层的不断腐蚀消耗, 钢基体的腐蚀难以避免。

3) 人字门防腐蚀涂层使用已接近 20 年, 水位变动区和水下区涂层的零星修补已达不到长寿命腐蚀保护的使用要求。建议在入字门未出现大面积腐蚀前, 对损伤涂层进行整体维修, 并对其结合强度进行测试评价。此外, 对于入字门的水位变动区和水下区建议施加牺牲阳极阴极保护, 以延长其服役寿命。

### 参考文献:

- [1] 刘明维, 杜波, 吴林键, 等. 盐水入侵与干湿交替共同作用下船闸金属结构腐蚀特征研究[J]. 水运工程, 2023(4): 96-103.

[2] 杨博均, 魏木孟, 姚敬华, 等. 45#钢和 Q235 在不同水环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 102-108.

[3] 朱雅仙, 朱锡昶, 葛燕, 等. 流动淡水中钢的腐蚀行为研究[J]. 水利水运工程学报, 2002(2): 7-11.

[4] 赵林章, 董洪汉, 李频, 等. 淡水环境中水工钢闸门腐蚀机理及影响因素研究[J]. 江苏水利, 2018(3): 6-10, 14.

[5] 河海大学, 水利部水工金属结构安全监测中心. 水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程: SL 101—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[6] 中海油常州涂料化工研究院, 昆山市世名科技开发有限公司, 亚太拉斯材料试验技术集团有限公司. 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.

[7] 中海油常州涂料化工研究院, 黑龙江省质量监督检测研究院, 陕西宝塔山油漆股份有限公司, 等. 色漆和清漆 涂层老化的评价缺陷的数量和大小以及外观均匀变化程度的标识 第 2 部分: 起泡等级的评定: GB/T 30789. 2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[8] 中海油常州涂料化工研究院有限公司, 中华制漆(深圳)有限公司, 广州合成材料研究院有限公司, 等. 色漆和清漆 涂层老化的评价 缺陷的数量和大小以及外观均匀变化程度的标识 第 5 部分: 剥落等级的评定: GB/T 30789. 5—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[9] 满成, 国景一, 孙议祥, 等. 典型防护涂层体系在南极大气环境中的失效行为研究[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 27-35.

[10] 魏欢欢, 雷天奇, 郑东东, 等. Q690 高强钢对接焊缝加速腐蚀试验研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(4): 675-680.

[11] 孙建波, 王勇, 路民旭, 等. 电弧喷涂铝涂层在海洋环境中的腐蚀机理[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11): 1029-1033.

[12] 杨海, 陆卫中, 李京, 等. 水环境中防腐涂层失效机理研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(6): 452-457.

[13] 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.

[14] 李言涛, 刘建国, 侯保荣. 喷涂铝覆盖层在实海浪飞溅区的腐蚀行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(5): 1243-1247.

[15] 靳子昂, 朱丽娜, 刘明, 等. 热喷涂技术制备铝涂层及其在 3.5%NaCl 溶液中耐腐蚀性的研究现状[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 220-229.

[16] 刘毅, 魏世丞, 王玉江, 等. 热喷涂铝稀土涂层的腐蚀磨损行为研究[C]//中国机械工程学会. 2011 年全国青年摩擦学与表面工程学术会议论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2011: 282-285.

[17] 刘存, 赵卫民, 陈虹宇. 海洋工程热喷铝涂层的腐蚀电化学行为[J]. 材料保护, 2016, 49(10): 5-8.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 114 页)

[4] 刘长波, 朱玉君, 吴双, 等. 长江上游老虎梁险滩航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 126-132, 157.

[5] 符航睿. 山区河流减沙条件下复杂滩险航道整治研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[6] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

[7] 张继铭. 枢纽下游弯道过渡段浅滩演变特性及整治措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[8] 李家世, 何熙, 谢玉杰. 山区河流弯曲分汊型浅滩整治技术[J]. 珠江水运, 2021(17): 79-80.

[9] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-4—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[10] 许光祥, 曾锋. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.

[11] 许光祥, 邓明文, 童思陈, 等. 急滩通航水力工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[12] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81, 92.

(本文编辑 王璁)