



# 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<sup>\*</sup>

刘明维, 杜 波, 吴林键, 张 洪, 刘永明

(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 河口船闸金属结构服役于盐水上溯入侵及船闸在运行过程中由于频繁灌泄水而产生的高频干湿交替腐蚀环境, 船闸金属结构(闸阀门、系船设施等)在该特殊环境下的腐蚀特征尚未知。通过开展盐水高频干湿交替下钢试样腐蚀试验, 分析不同氯盐浓度、干湿制度下钢试样腐蚀形貌、腐蚀速率的变化规律。在此基础上, 开展聚氨酯、环氧煤沥青、氯化橡胶防腐涂料在该特殊腐蚀环境下的适应性研究。结果表明: 盐水高频干湿交替作用会显著加速钢材的腐蚀速率, 其加速程度随干燥时间的增大有所减小; 碳钢在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀速率为淡水环境的 5.0~6.0 倍, 为海洋潮汐环境的 1.5~2.0 倍。根据各类防腐涂料在上述特殊腐蚀环境下的宏观形貌及附着力指标实测值, 结合技术经济分析, 建议采用氯化橡胶类涂料作为河口船闸金属结构的防腐材料。

**关键词:** 盐水入侵; 高频干湿交替; 腐蚀速率

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0096-08

## Corrosion characteristics of metal structure for ship lock under saltwater intrusion and drying-wetting alternation

LIU Mingwei, DU Bo, WU Linjian, ZHANG Hong, LIU Yongming

(Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education,

National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The metal structure of estuarine ship locks is used to resist upstream saltwater intrusion and the corrosive high-frequency drying-wetting alternating environment caused by frequent water filling and emptying during the operation of ship locks. The corrosion characteristics of the metal structure (gate valve, mooring facilities, etc.) in this special environment, however, are unknown. Therefore, this paper conducts corrosion tests of steel samples under high-frequency drying-wetting alternation of saltwater and analyzes the change rules of corrosion morphologies and corrosion rates of steel samples under different concentrations of chlorine salt and different drying and wetting regimes. On this basis, it investigates the adaptability of the anti-corrosive coatings of polyurethane, epoxy coal tar pitch, and chlorinated rubber in this special corrosive environment. The results show that the high-frequency wetting-drying alternation of saltwater can considerably accelerate the corrosion rate of steel, and the acceleration degree decreases with the increase in drying time. The corrosion rate of carbon steel in the high-frequency drying-wetting alternating environment of saltwater is about 5.0 to 6.0 times that in a freshwater environment.

收稿日期: 2022-07-01

\*基金项目: 重庆市英才计划项目(cstc2021ycjh-bgzxm0053); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B13); 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020030); 长江重庆航道工程局委托项目(cqjt-2021-204)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论方面的教学与研究。

and 1.5 to 2.0 times that in an ocean tidal environment. According to the measured macro-morphology and adhesion of various anti-corrosive coatings in the above special corrosive environment and the technical and economic analysis, it is suggested that chlorinated rubber coatings should be used as anti-corrosive materials for the metal structure of estuarine ship locks.

**Keywords:** saltwater intrusion; high-frequency drying-wetting alternation; corrosion rate

船闸是通航建筑物的一种主要形式,一般用于保证船舶安全过闸<sup>[1]</sup>。闸门则是船闸系统不可或缺的重要组成部分,其工作可靠性直接影响内河航运整体安全运行<sup>[2]</sup>。水工钢闸门在运行过程中,由于船闸频繁灌泄水而产生的干湿交替作用及水流冲刷、腐蚀介质、微生物等影响,使得闸门沿高程方向上发生不同程度的腐蚀,即在不同干湿比下,同一干湿交替循环内,干燥时间与浸没时间的占比不同,水位变动区内不同位置的金属结构腐蚀程度也不尽相同。海洋潮差区环境变化比大气区及全浸区更复杂,电化学与化学涂料的防腐效果较差,位于河口位置的船闸建筑物受盐水上溯入侵,船闸结构所处服役环境与内河淡水环境不同,但可类比于海洋腐蚀环境,加之船闸在运行过程中由于频繁灌泄水的调度,使得船闸金属结构受盐水干湿交替作用的频率比海洋环境的全日潮或半日潮高出数倍甚至数十倍,这将极大程度地加速盐水对船闸结构的腐蚀,增加金属结构的防腐难度。因此,研究河口船闸金属结构在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀特征与防腐措施具有重要价值。

目前,对于钢结构腐蚀行为的研究主要集中在海洋潮汐环境的全日潮或半日潮下的干湿交替区。穆鑫等<sup>[3]</sup>研究表明低碳钢试样在潮差区不同位置的腐蚀规律不同,在中潮区和低潮区的腐蚀速率高于最高潮区及全浸区的腐蚀速率; Yu 等<sup>[4]</sup>研究表明碳钢在干湿循环条件下发生点蚀,在全浸环境下发生一般腐蚀,由于干燥过程中锈层通气和氯化物浓度的差异,将导致干湿交替环境下试样的腐蚀速率大于全浸区; Han 等<sup>[5]</sup>研究表明在干湿交替条件下,碳钢的腐蚀速率显著增加,约为自然环境中腐蚀速率的3倍; 张艳等<sup>[6]</sup>研究表明在不同浓度的NaCl溶液全日潮干湿交替作用

下,新型钢制车身NSB耐蚀钢试样在3.5% NaCl溶液中的腐蚀电流密度最大;李平<sup>[7]</sup>研究表明在半日潮干湿交替作用下,X60管线钢在中、低潮区的腐蚀速度要快于最高潮区及最低潮区的腐蚀速度;黄涛等<sup>[8]</sup>研究表明在全日潮环境下,不同光照条件对Q450NQR1耐候钢的腐蚀行为不同,在腐蚀前期腐蚀速率大小依次为半光照、无光照和全光照,腐蚀中后期腐蚀速率由大到小依次为半光照、全光照和无光照;张庆普等<sup>[9]</sup>以60 min为1个干湿交替循环,研究干湿交替海水环境对碳钢腐蚀速率的影响,得出干湿交替环境的干湿比越大,对碳钢腐蚀的加速作用越显著,且加速作用存在极大值。

综上所述,河口船闸金属结构服役于盐水上溯入侵及船闸在运行过程中由于频繁灌泄水产生的高频干湿交替特殊腐蚀环境,船闸金属结构在该特殊环境下的腐蚀特征尚未知。因此,本文以不同浓度的NaCl溶液作为盐水入侵河口船闸所形成腐蚀环境中的模拟溶液,对Q235A碳钢进行不同氯盐浓度下盐水高频干湿交替的腐蚀试验,以海洋潮汐模拟环境下的碳钢试样作为对比组,通过分析碳钢试样的腐蚀形貌及平均腐蚀速率,揭示碳钢在盐水高频干湿交替环境下的腐蚀特征。此外,通过对聚氨酯、环氧煤沥青、氯化橡胶这3类防腐涂料的宏观形貌及附着力指标等进行测试分析,探明船闸金属结构各类防腐涂料在特殊服役环境下的适应性。

## 1 试验方案

选取Q235A钢作为试样材料,将其加工成尺寸为边长30 mm、厚度2 mm的钢试样,对其进行打孔,用于干湿交替试验时悬挂处理。参照GB/T 8923.1—2011《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清

洁度的目视评定 第一部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》<sup>[10]</sup>进行除锈，并用无水乙醇溶液清洗，冷风吹干后在干燥箱中备用。

试验前采用 bsm-120.4 分析天平(精度 0.1 mg)测定碳钢试样质量后，用绝缘线对试样进行悬挂处理；采用 NaCl(分析纯)配制质量分数分别为 0%、1.0%、3.5% 的盐溶液(分别用以模拟淡水环境、部分海水入侵以及全部海水入侵)作为干湿交替腐蚀试验的腐蚀溶液。

试验的干湿交替循环周期及干湿制度(干湿比)根据某河口船闸闸室水位历时曲线拟定。根据调研得知船闸运行时间为 8 h/d，闸室内灌、泄水水位差为 10 m，船舶单次进、出闸室时间约为 15 min，单次灌、泄水时间约为 10 min，船闸闸室内的水位历时曲线见图 1。可以看出，船闸闸室干湿循环周期为 80 min，则干湿交替频率为 6 次/d，根据水位历时曲线计算得到高程分别为 -1、1、3、5、7、9 m 位置处船闸金属结构对应不同的干湿时间，结果见表 1。其中闸门高程为 0~4、4~6、6~10 m 分别对应低、中、高水位区，闸门高程 0 m 以下为全浸区。

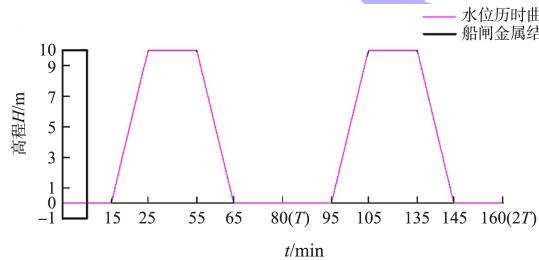


图 1 船闸闸室内水位历时曲线

表 1 船闸闸门不同高程位置所对应的干湿时间

高程/m	闸门高程/m	干燥时间/min	浸泡时间/min
8~10	8	72	8
6~8	7	56	24
4~6	5	40	40
2~4	3	24	56
0~2	1	8	72
<0	-1	0	80

碳钢试样干湿交替试验装置如图 2 所示。在浸泡时间期间，将试样放入腐蚀溶液中，达到相应规定时间后，将试样取出并悬挂在溶液上方干燥，完成 1 次干湿交替循环，如干湿制度(干湿比)为 8 min:72 min 时，即先将试样放入腐蚀溶液中浸泡 72 min 后，取出干燥 8 min，即完成 1 次干湿交替循环，干湿交替频率为 6 次/d，其余时间将试样悬挂在溶液上方。以海洋潮汐环境下的碳钢试样作为对照组，采用 NaCl(分析纯)配制质量分数为 3.5% 的盐溶液作为海洋潮汐环境腐蚀溶液，将碳钢试样放入溶液中浸泡 12 h 后取出，悬挂在溶液上方干燥 12 h，以此完成 1 个潮汐循环。对碳钢试样分别试验 3、6、9、12、16 d 后取出。

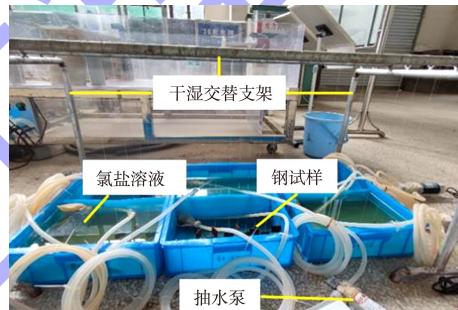


图 2 碳钢试样干湿交替试验装置

记录不同时间下碳钢腐蚀后的宏观形貌，对比分析不同条件下碳钢除锈前、后表面形貌变化；根据 GB/T 16545—2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》<sup>[11]</sup>配制除锈液(500 mL 密度为 1.19 g/mL 盐酸+3.50 g 六次甲基四胺+蒸馏水，配制成 1 000 mL 溶液)对试样进行除锈，将试样放入除锈液中，在室温(25 °C)下浸泡 10 min。待腐蚀产物去除后，用自来水冲洗并用毛刷轻刷试样表面，再用蒸馏水冲洗，之后在无水乙醇中彻底清洗，使用吹风机吹干冷却后用 bsm-120.4 分析天平测定试样剩余质量。采用失重法<sup>[12]</sup>计算试样的腐蚀速率，计算公式为：

$$R = \frac{K(m-m_1)}{2(ab+bc+ca)\rho t} \quad (1)$$

式中：R 为钢试件的平均腐蚀速率，mm/a；K 为常数，取  $8.76 \times 10^4$ ；m 为腐蚀试验前试样的质量，g； $m_1$  为去除腐蚀产物后试样的质量，g；a、b、c

分别为试样的长度、宽度、厚度, mm;  $t$  为腐蚀试验时间, h;  $\rho$  为试样密度, g/cm<sup>3</sup>, 碳钢取 7.86 g/cm<sup>3</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 腐蚀形貌

碳钢试样在质量分数不同的 NaCl 溶液中高频干湿交替 16 d 并除锈前、后的局部宏观表面面貌见图 3。可以看出, 碳钢试样在 3 种不同的腐蚀溶液中均呈现出: 不同干湿制度下的碳钢试样锈蚀程度有所不同, 在全浸区的锈蚀程度最低, 腐蚀产物疏松, 锈层较薄, 有碳钢基体颜色露出; 在干湿交替区腐蚀产物密实且锈层较厚, 除锈后可见到凹凸不平的腐蚀坑, 且表面腐蚀坑较全浸区更深且覆盖面积更广, 说明碳钢在干湿交替区的锈蚀程度更为严重。此外, 碳钢在 3 种腐蚀溶液

中均出现: 中、低水位的腐蚀产物较高水位厚且密实度较大, 腐蚀产物包括完全氧化的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 及尚未完全氧化的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 除锈后呈现大量的腐蚀坑, 较高水位和全浸区更深且密集, 且多为黑色的腐蚀坑, 这说明碳钢在中、低水位的锈蚀程度比高水位的锈蚀程度大。

对比图 3a)~c) 可知: 同一干湿交替制度下, 碳钢在含有氯离子溶液中的腐蚀产物比在无氯离子溶液中多、厚, 且锈层更为致密, 腐蚀面貌更加参差不齐, 除锈后钢基材表面的腐蚀坑也更深, 局部腐蚀更为严重, 特别是在质量分数为 1.0% NaCl 溶液中点蚀现象更加明显, 点蚀坑较深且密集, 表明了碳钢在盐水高频干湿交替作用下的腐蚀更严重, 尤其在质量分数为 1.0% NaCl 溶液中碳钢试样的锈蚀程度最高。

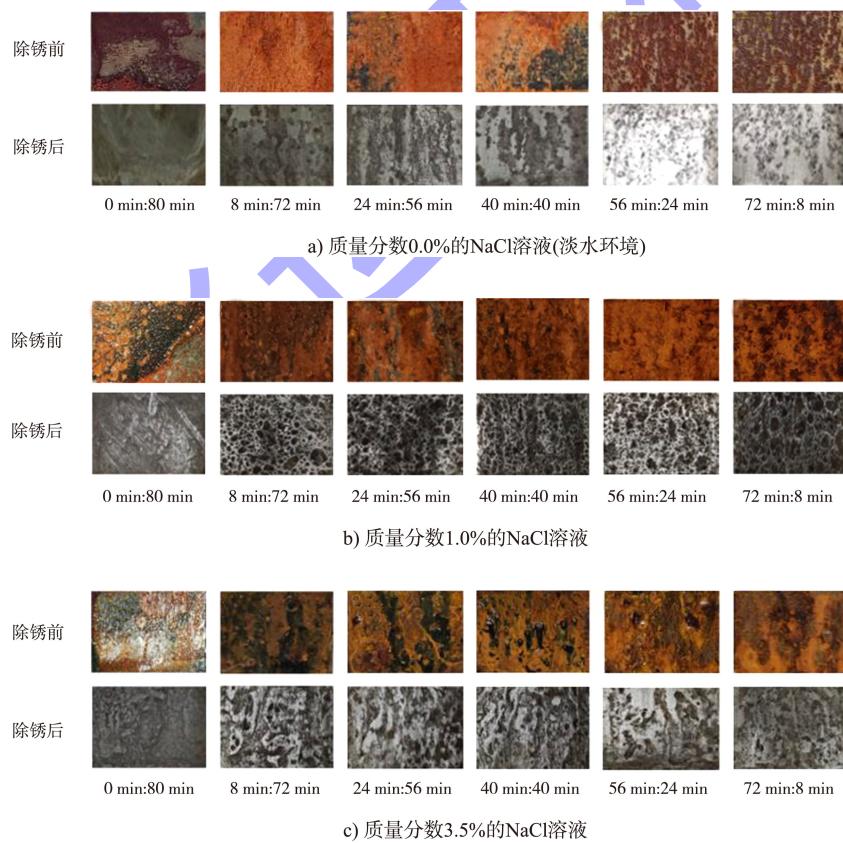


图 3 碳钢试样干湿交替 16 d 除锈前、后的腐蚀面貌对比

### 2.2 腐蚀速率

根据每个时间段下 3 个平行试样的平均腐蚀质量损失, 根据式(1)求得碳钢试样腐蚀速率的平

均值, 以此反映该暴露时间内的平均腐蚀速率  $R$ 。不同氯盐浓度下碳钢试样平均腐蚀速率时空分布见图 4。可以看到: 淡水环境中高频干湿交替作用

加速碳钢试样腐蚀的效果不明显；而在氯盐溶液中，高频干湿交替环境对碳钢试样腐蚀起到了非常显著的加速作用，其腐蚀速率明显高于全浸区，与腐蚀形貌分析结果一致；碳钢试样在 3 种腐蚀溶液中均出现腐蚀速率随干湿比（干燥时间）的增大而有所减小的现象，干湿制度为 8 min:72 min、24 min:56 min、40 min:40 min 下的腐蚀速率较其余干湿制度大，表现为中、低水位腐蚀程度较高水位和全浸区严重。根据碳钢试样的宏观腐蚀形貌及腐蚀速率，可初步划分得到碳钢在盐水高频干湿交替环境下的腐蚀区域：当干湿制度为 8 min:72 min、24 min:56 min、40 min:40 min 时，碳钢试样的腐蚀程度最为严重，其他干湿交替区次之，全浸区腐蚀程度最低，结果见表 2。

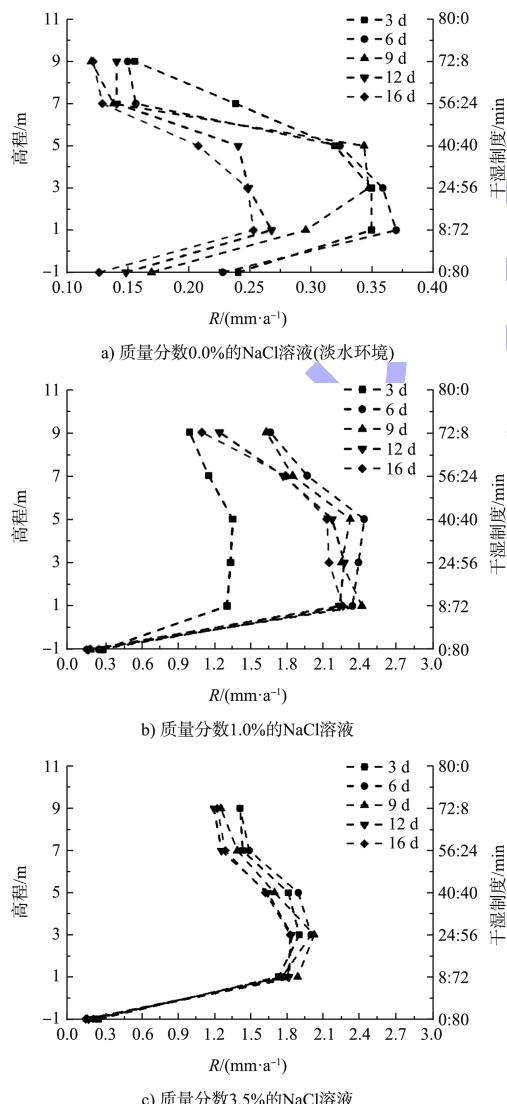


图 4 不同氯盐浓度下碳钢试样平均腐蚀速率时空分布规律

表 2 碳钢腐蚀区域划分

位置	腐蚀程度	高程 $H/m$	对应干湿制度/ (min:min)
干湿交替区	最严重	$1 \leq H \leq 5$	8:72~40:40
	次严重	$0 < H < 1$ 、 $5 < H < 9$	0:80~8:72、 40:40~72:8
	一般	$H < 0, H > 10$	0:80, 80:0
全浸区、大气区			

对比图 4a)~c) 可知，碳钢试样在淡水环境的腐蚀速率较小，其干湿交替区的最大腐蚀速率仅  $0.37 \text{ mm/a}$ ，与氯盐溶液下全浸区的腐蚀速率  $0.30 \text{ mm/a}$  相差不大，而质量分数为 1.0%、3.5% NaCl 溶液中干湿交替区最大腐蚀速率分别为  $2.40$ 、 $1.95 \text{ mm/a}$ ，为淡水环境干湿交替区最大腐蚀速率的  $5.0\sim6.0$  倍，说明含有腐蚀介质氯离子的高频干湿交替环境也会加速碳钢试样的腐蚀，这与腐蚀形貌分析结果一致。此外，对比图 4b)、c) 可看出，碳钢试样在质量分数为 1.0%、3.5% NaCl 溶液中全浸区的腐蚀速率相差不大，均约为  $0.30 \text{ mm/a}$ ，而在干湿交替区的腐蚀速率有明显的不同，说明腐蚀溶液中的氯离子浓度对碳钢试样在干湿交替区的腐蚀有一定的影响；碳钢试样在质量分数 1.0% NaCl 溶液中的锈蚀程度更大，这与腐蚀形貌分析结果一致。由此说明，在盐水高频干湿交替环境中，并不是溶液中氯离子浓度越大，碳钢的锈蚀就越严重。

同一干湿制度下，碳钢试样在盐水高频干湿交替环境与海洋潮汐环境下的腐蚀速率对比见图 5。可以看出，碳钢试样在海洋潮汐环境中的最大腐蚀速率为  $1.30 \text{ mm/a}$ ，其值为淡水环境下的 3 倍，但相比于盐水高频干湿交替环境该值更小。经计算分析，碳钢试样在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀速率为海洋潮汐环境的  $1.5\sim2.0$  倍，说明碳钢在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀程度更为严重。

本文碳钢腐蚀速率结果与任呈强等<sup>[13]</sup>研究的管线钢腐蚀结果相比，其腐蚀速率与本文碳钢在淡水环境中的最大腐蚀速率相差不大，而本文在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀速率比他们的结果要大  $2.0\sim3.0$  倍；与文献[3]的碳钢腐蚀速率结果相比，本文碳钢在质量分数 3.5% NaCl 环境中的腐蚀

速率与其最大腐蚀速率相同, 均为 $2.00\text{ mm/a}$ ; 对比文献[9]的试验结果, 其半光照、 $2.0\%$  NaCl溶液中腐蚀速率为本文碳钢在盐水高频干湿交替区腐蚀速率的 $1.0\sim 3.0$ 倍, 分析其原因主要为干湿交替制度与试验环境(光照条件)的不同。

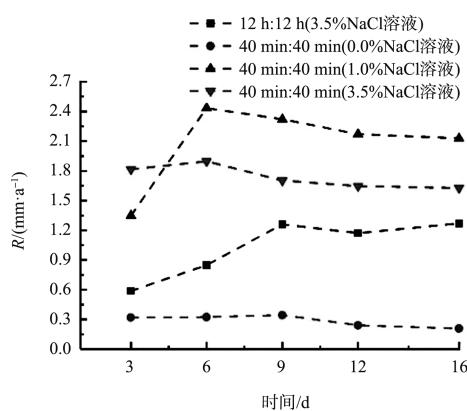


图 5 碳钢试样在盐水高频干湿交替环境与海洋潮汐环境下腐蚀速率对比

从上述试验结果可以看出, 盐水高频干湿交替环境下的碳钢腐蚀程度较淡水环境及海洋潮汐环境严重很多。然而, 船闸金属结构的代表性防腐涂料在这种服役环境中的适应性尚未知。因此, 有必要进一步开展针对金属防腐涂料在盐水高频干湿交替环境中的适应性研究。

### 3 典型金属结构涂层材料适应性研究

为探明船闸金属结构防腐涂料在盐水高频干湿交替环境中的适应性, 本文对 911 聚氨酯(PU)、环氧煤沥青(EP)、XC1-01 氯化橡胶(CR)3 种典型的防腐涂料在盐水高频干湿交替环境中的防腐性能展开研究, 对比分析 3 种防腐涂料在该特殊服役环境中的适应性。

采用手工涂刷方法分别将 3 种防腐涂料涂覆于经除锈处理后的 3 组碳钢试样表面上, 室温固化 1 周, 涂层干膜厚度为 $(300\pm 5)\mu\text{m}$ (采用 MinTest 600 涂层测厚仪测定)。在紫外老化箱(温度为 $63^\circ\text{C}$ , 光照强度为 $0.86\text{ W/m}^2$ 的恒温恒光照)中对带有防腐涂层的碳钢试样进行干湿制度为 $8\text{ min}:72\text{ min}$ 的盐水高频干湿交替腐蚀试验, 腐蚀溶液为质量分数 $1.0\%$ 的 NaCl 溶液, 以纯紫外

老化作用下的涂层试样作为对照组。根据文献[14]得知, 金属结构防腐涂层在紫外老化箱中老化 $1.0\text{ h}$ 相当于自然暴露环境下的 $1.5\text{ d}$ , 试验 $10$ 、 $15$ 、 $20\text{ d}$ (分别对应暴露环境下的 $360$ 、 $540$ 、 $720\text{ d}$ )后取出相应的涂层试样。采用 PosiTestAT. A 涂层附着力测试仪测定试验前、后的涂层附着力。

#### 3.1 涂层宏观形貌

经过紫外老化及盐水高频干湿交替加速劣化后, PU、EP、CR 防腐涂层试样表面宏观形貌如图 6 所示。

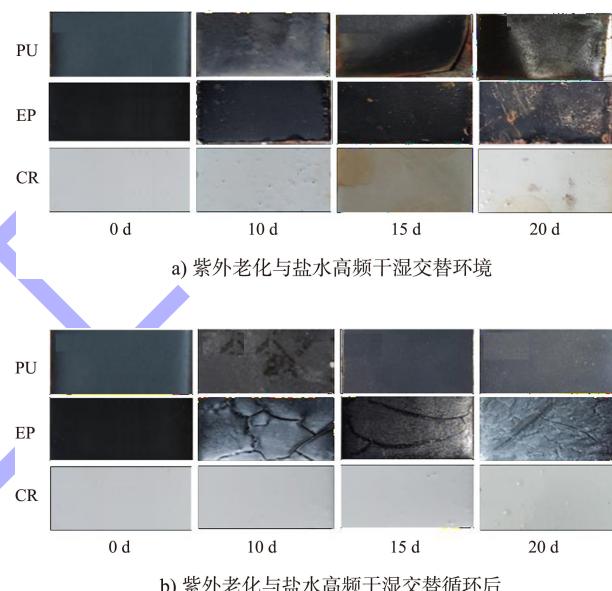


图 6 紫外老化与盐水高频干湿交替循环后涂层宏观形貌变化

由图 6 可知: 1) 盐水高频干湿交替环境对涂层性能的影响比紫外老化作用大; 试验 $10\text{ d}$ 后, PU 涂层在盐水高频干湿交替环境下表面发生了大面积鼓泡现象, 而在纯老化作用下涂层表面无明显变化。2) EP 涂层在盐水高频干湿交替环境下涂层表面出现少量的微小气泡, 完整性较 PU 涂层好, 边角处涂层小范围失效破坏, 在纯紫外老化作用下涂层表面出现较浅的裂纹, 但涂层表面仍具有光泽性。3) CR 涂层表面在 2 种环境下都只出现少量微小气孔, 涂层完整性好。4) 随着紫外老化时间的推移, 盐水高频干湿交替环境下的 PU 涂层与碳钢基体逐渐出现了局部脱离现象, 最终与碳钢基体完全脱开; EP 涂层表面起泡逐渐破裂, 破裂处的涂层局部失效, 边角处失效涂层缓慢扩

张; CR 涂层表面仍无太大变化。5)根据盐水高频干湿交替前、后的涂层试样表面宏观形貌变化得到 3 种涂层在盐水高频干湿交替环境中的适应性为: CR>EP>PU。

### 3.2 附着力变化

涂层附着力是衡量涂层性能的重要指标之一, 附着力越高, 说明涂层与金属基体结合强度越大, 防护性能越好<sup>[15]</sup>。紫外老化与盐水高频干湿交替循环下 3 种涂层附着力随时间的变化曲线见图 7。

可以看出, 随着紫外老化与盐水高频干湿交替循环时间的延长, 3 种涂层的附着力均呈现下降趋势。对比图 7a)、b) 可明显看出, 涂层试样在紫外老化与盐水高频干湿交替共同作用下的附着力下降程度远大于纯紫外老化作用, 试验 20 d 时, 前者涂层附着力变化值均为 1.0 MPa 以上, 为纯紫外老化环境下涂层附着力变化值的 4.0~6.0 倍, 可见, 盐水高频干湿交替作用对涂层附着力的影响大于紫外老化作用。由图 7a) 可看出, CR 涂层的初始附着力最大, 达到 2.6 MPa, PU 涂层最差, 在紫外老化与盐水高频干湿交替循环作用下 3 种涂层的附着力下降率分别为 100% (PU)、80.5% (EP)、54.7% (CR)。相比之下, CR 涂层在盐水高频干湿交替环境中的适应性较其余 2 种涂层好, PU 涂层适应性最差, 与涂层表面宏观形貌分析结果一致。

表 3 各类防腐涂料的适应性分析

防腐涂料	附着力	纯紫外老化作用		紫外老化与盐水干湿交替作用		防护效果	经济性	综合等级
		形貌	涂层附着力	形貌	涂层附着力			
PU	★★★	★★★	★★	★	★	★	★★★★	★
EP	★★★	★★★	★★	★★	★★	★★	★★★	★★
CR	★★★★	★★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★	★★★

注: ★★★★ 表示优异, ★★★ 表示良好, ★★ 表示中等, ★ 表示较差。

由表 3 可以看出, 在纯紫外老化环境及紫外老化与盐水干湿交替环境下 XC1-01 氯化橡胶涂层表现出较好的防护效果。基于本文选用的 3 种防腐涂料(911 聚氨酯涂料、环氧煤沥青涂料、XC1-01 氯化橡胶涂料), 综合考虑涂层的经济性和耐久性等方面的问题, 建议在河口船闸金属结构采用 XC1-01 氯化橡胶涂料作为面漆。

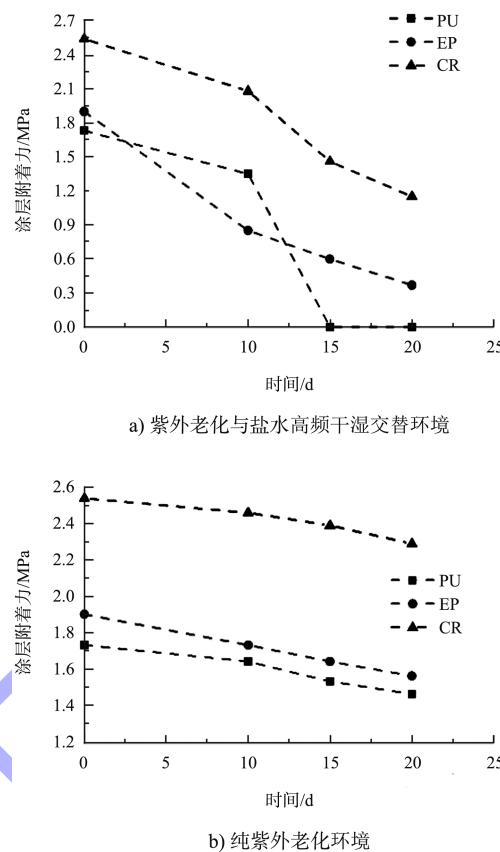


图 7 各类防腐涂层附着力随时间的变化规律

根据试验实测结果, 可以明确这 3 种典型防腐涂料在盐水高频干湿交替服役环境下对金属结构的防护效果, 综合对比碳钢试样涂层表面形貌、涂层附着力等性能指标, 得到各防腐涂料在河口船闸处的适应性程度, 见表 3。

### 4 结论

1) 碳钢在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀速率随干湿比的增大有所减小, 表现为中、低水位腐蚀程度较高水位和全浸区严重。根据碳钢试样的宏观腐蚀形貌及腐蚀速率时空分布规律, 划分得到河口船闸金属结构的腐蚀区域: 位于低水位水面以上 1~5 m 处的干湿交替区为腐蚀最严重区

域, 其他干湿交替区为腐蚀次严重区域, 全浸区及大气区为腐蚀一般区域。

2) 碳钢在盐水高频干湿交替环境中的腐蚀程度比淡水环境及海洋潮汐环境严重。其腐蚀速率为淡水环境的 5.0~6.0 倍, 且为海洋潮汐环境下的 1.5~2.0 倍。

3) 盐水高频干湿交替循环作用对涂层失效的影响程度大于紫外老化作用。本文选用的 3 种典型船闸金属结构防腐涂料在盐水高频干湿交替环境中的适应性表现为: XC1-01 氯化橡胶涂料适应性最好, 911 聚氨酯涂料适应性最差。

## 参考文献:

- [1] 王鹏, 卜丁. 某船闸工程船闸闸室结构优化设计[J]. 水运工程, 2012(9): 142-144.
- [2] 王贤龙, 吴庞, 王鹏, 等. 多传感信息融合的闸门状态监测系统研究[J]. 水运工程, 2022(1): 157-164.
- [3] 穆鑫, 魏洁, 董俊华, 等. 低碳钢在模拟海洋潮差区的腐蚀行为的电化学研究[J]. 金属学报, 2012, 48(4): 420-426.
- [4] YU J X, WANG H K, YU Y, et al. Corrosion behavior of X65 pipeline steel: comparison of wet-dry cycle and full immersion[J]. Corrosion science, 2018, 133: 276-287.
- [5] HAN W, PAN C, WANG Z Y, et al. A study on the initial corrosion behavior of carbon steel exposed to outdoor wet-dry cyclic condition[J]. Corrosion science, 2014, 88: 89-100.
- [6] 张艳, 曹荐. NSB 耐蚀钢在 NaCl 溶液干湿交替作用下的电化学腐蚀行为[J]. 宽厚板, 2015, 21(3): 32-35, 48.
- [7] 李平. X60 管线钢在模拟潮差区初期腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(2): 338-344.
- [8] 黄涛, 陈小平, 王向东, 等. 光照对 Q450NQR1 耐候钢在干湿交替下腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(12): 1762-1769.
- [9] 张庆普, 杨海洋, 王佳, 等. 干湿交替环境状态对碳钢海洋腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 222-229.
- [10] 中国船舶工业综合技术经济研究院, 中国船舶工业集团公司第十一研究所, 山东开泰集团有限公司, 等. 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第一部分: 未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级: GB/T 8923. 1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [11] 江苏省船舶金属材料质量监督检验中心, 冶金工业信息标准研究院, 江阴市南方管件制造有限公司, 等. 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除: GB/T 16545—2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [12] 航空工业部第六二一所. 腐蚀试验结果的重量损失测定和腐蚀产物的清除: HB 5257—1983[S]. 北京: 航空工业出版社, 1983.
- [13] 任呈强, 李丽, 王煦, 等. 管线钢在干湿交替环境下的腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4): 272-275, 280.
- [14] 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.
- [15] 王贵容. 干湿交替及阴极保护对环氧涂料防腐性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

(本文编辑 王璁)

(上接第 19 页)

## 参考文献:

- [1] 中共中央国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[R/OL]. (2021-02-24) [2022-04-28]. [http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content\\_5588654.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm).
- [2] 国家发展和改革委员会, 中华人民共和国交通运输部. 全国沿海港口布局规划[R/OL]. (2006-09-12) [2022-04-28]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630\\_3320031.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3320031.html).
- [3] 交通运输部规划研究院. 大连东北亚国际航运中心发展研究[R]. 北京: 交通运输部规划研究院, 2017.
- [4] 交通运输部, 发展改革委, 财政部, 等. 关于建设世界一流港口的指导意见[R/OL]. (2019-11-13) [2022-04-28]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623\\_3314876.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623_3314876.html).
- [5] United Nations Conference On Trade And Development. Review Of Maritime Transport 2021[R]. Geneva: United Nations, 2021.
- [6] 中国经济信息社. 2021 年新华-波罗的海国际航运中心发展指数报告[R]. 北京: 中国经济信息社, 2021.
- [7] 中国报关协会, 北京睿库贸易安全及便利化研究中心. 2021 年十大海运集装箱口岸营商环境测评报告[R]. 北京: 中国报关协会, 2021.
- [8] World Bank Group. Doing Business 2022[R]. Washington: World Bank Group, 2022.

(本文编辑 赵娟)