



冲蚀-锈蚀共同作用下港工钢构件腐蚀模型研究*

代川¹, 吴林键¹, 刘明维¹, 祖福兴², 纪旭东¹, 胡珍¹, 张斯琪¹

(1. 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;

2. 中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 内河大水位变幅区域内港口工程钢构件受到水流冲刷、泥沙冲击等作用, 导致钢构件表面涂层破坏严重, 涂层发生局部破坏后钢构件直接裸露在潮湿环境之中, 使大水位变幅区域成为内河港口钢构件锈蚀最严重的区域, 严重威胁码头结构的承载能力和使用安全。为了有效模拟并预测该区域钢构件锈蚀特征, 结合内河环境作用等级开展针对内河港工钢构件的水沙冲蚀-钢材锈蚀循环交替加速劣化试验。通过分析不同冲-锈时间、不同冲蚀角度、不同循环次数下钢试件腐蚀试验数据, 建立综合室内及现场数据的水工钢构件腐蚀模型。结果表明: 可通过水沙冲蚀-钢材锈蚀试验模拟内河大水位变幅区域钢构件锈蚀状态; 大水位变幅区域内钢构件从上到下锈蚀深度增加, 循环次数越多锈蚀越严重; 大水位变幅区域内钢构件正常服役年限远低于设计使用年限。

关键词: 大水位变幅区; 钢构件; 腐蚀; 锈蚀预测模型

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0038-09

Corrosion model of steel component for port engineering under coupled effect of erosion and rusting

DAI Chuan¹, WU Linjian¹, LIU Mingwei¹, ZU Fuxing², JI Xudong¹, HU Zhen¹, ZHANG Siqi¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China Railway Changjiang Transport Design Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: In areas with significant water level fluctuations in inland rivers, steel components of port engineering are subjected to the effects of water flow scouring and sediment impact, leading to severe damage of surface coatings on steel components. Once local coating failure occurs, the steel components are directly exposed to the humid environment, making significant water level fluctuation regions become the most severely corroded areas for steel structures in inland river ports, which poses a serious threat to the bearing capacity and operational safety of wharf structures. To effectively simulate and predict the corrosion characteristics of steel components in these regions, we conduct an accelerated cyclic deterioration test combining water-sediment scouring and steel corrosion, taking into account the environmental grade of inland rivers. By analyzing corrosion test data of steel specimens under different scour-corrosion time, erosion angles, and cycle numbers, we develop a corrosion model for hydraulic steel components, incorporating both laboratory and field data. The results show that the water-sediment scouring and steel corrosion tests can simulate the corrosion state of steel components in regions with significant water level fluctuations. Corrosion depth of steel components in such regions increases from top to bottom, and the corrosion becomes more severe with more cycles. The normal service life of steel components in these regions is far shorter than their designed service life.

Keywords: large water level fluctuation region; steel component; corrosion; rusting prediction model

收稿日期: 2024-12-18

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279124); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2022-重点-41); 重庆交通大学研究生科研创新项目(2024S0044)

作者简介: 代川(1999—), 男, 硕士, 研究方向为港口工程结构计算及智能运维。

在长江上游内河大型枢纽港码头建设中,为了适应大水位差、大流速及大水深等复杂条件,码头下部使用大量钢结构。通过现场调研发现数个洪水期后钢构件表面涂层大量脱落,钢构件锈蚀严重,且不同高程处钢构件锈蚀程度存在较大差异,见图1。在大水位变幅区域内,钢构件锈蚀程度随着高程的增加而减弱,高程越高钢构件受到水沙冲蚀以及自然锈蚀的概率就越小;相较于大气区和水下区,大水位变幅区域内钢构件锈蚀情况最严重。

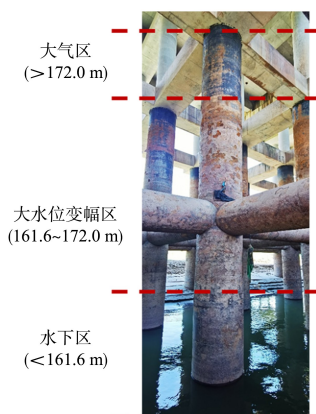


图1 钢构件锈蚀情况

Fig. 1 Corrosion situation of steel components

基于此类现象,国内外常按照不同高程或不同损伤程度进行环境作用等级划分:姜帆等^[1]在冻融环境下按桥梁所在地区气象条件确定冻融环境等级分区,按桥梁构件的小环境条件(水饱和、溅射、浸泡等)确定环境作用等级;加拿大(CSA)标准^[2-3]综合考虑暴露条件、结构构件类型和腐蚀严重程度,将水下区划分为C-3级,将潮汐浪溅区和大气盐雾区划分为C-L或C-XL级;刘明维等^[4]依托某代表性内河枢纽港工程多次开展水工钢构件锈蚀程度的现场检测试验揭示不同钢构件锈蚀程度的时空分布规律,并提出所依托工程的水工钢构件锈蚀经验模型;田玉婉等^[5]通过对比钢在室内和室外环境中的腐蚀形貌、腐蚀产物、腐蚀动力学及腐蚀机理等方面的差异,对模拟加速腐蚀和大气暴露腐蚀之间的相关性进行定性和定量的评价。在腐蚀试验方面,王欣等^[6]在海口大气环境下对Q235钢进行为期180 d的自然暴露试验

和喷洒质量分数3.1% NaCl溶液的加速自然暴露试验,通过腐蚀形貌、腐蚀深度以及腐蚀后拉伸性能的对比,研究加速条件对钢试样初期腐蚀行为的影响;张宇等^[7]利用中性盐雾干/湿交替腐蚀试验模拟海洋环境,进行加速腐蚀试验,通过测量腐蚀试件的质量变化,建立钢材均匀腐蚀模型;Hoeppe等^[8]和Sankaran等^[9]均采用平均蚀坑深度作为特征参量对材料的剩余寿命进行预测,得出的结果与试验值吻合较好。

目前针对海洋、大气、环境下作用等级划分已有大量研究,尚缺乏内河大水位变幅、大流速、大含沙量这类复杂环境下作用等级划分的研究;已有研究对室内加速试验与现场原位试验之间的相关性进行评价并建立锈蚀程度预测模型,此类锈蚀深度预测模型多为大气环境以及海洋环境,与内河水沙冲蚀与锈蚀结合的腐蚀机理存在较大区别,针对内河大水位变幅区这种特殊服役环境的锈蚀模型研究相对较少;现场试验虽然能准确把握钢构件锈蚀特征,但需要持续检测,消耗大量人力物力,所以可通过室内试验结合少数现场试验对钢构件锈蚀深度进行有效预测。

为此,本文结合长江上游某水文站历年水文资料对内河环境作用等级进行划分,设计并开展室内钢试样水沙冲蚀-通电锈蚀循环交替试验模拟内河水工钢构件服役环境,对其锈蚀特征进行分析,并结合长江上游某大型枢纽港现场钢构件锈蚀数据建立水工钢构件腐蚀深度预测模型,在大幅减少现场试验人力物力的基础上,对内河水工钢构件服役状态进行提前研判,为内河枢纽港码头结构长期承载性能研究奠定坚实基础。

1 试验设计

1.1 试验工况

根据长江上游某水文站多年水位历时曲线及已有文献资料^[10],统计得到内河枢纽港码头大水位变幅区域内特征水位,利用处于各特征高程以上和以下的时间,推求两者之间比值得到各特征高程处干湿比,见表1。

表 1 干湿比结果
Tab. 1 Results of wet-dry ratio

高程/m	时间/d		干湿比
	干	湿	
172.0	245	121	约 2:1
166.6	184	181	约 1:1
161.6	121	245	约 1:2

根据历年水文资料确定水位-流速-含沙量三者之间的关系，结合前文所得到的特征水位对内河环境进行等级划分，见表 2。

已有研究表明^[11]，水沙冲蚀试验中增大或减小冲蚀工况中某个指标，冲蚀的规律不会发生改变。本文通过水流流速不变、增大含沙量的方式达到冲蚀阶段的加速效果，选取特征水位对应含

沙量放大 25 倍设置室内含沙水流所需要的含沙量（每个干湿比对应含沙量率定过程已由文献[10]描述，本文不再赘述），以此达到钢试样冲蚀阶段的加速效果，选用 0.01 A 恒定电流仪进行通电锈蚀以达到锈蚀阶段的加速效果，试验工况见表 3。循环 40 次，共计 360 片钢试件，钢试件为厚 3 mm、边长 30 mm 的正方形薄片。

表 2 环境作用等级划分
Tab. 2 Classification of environmental exposure levels

环境作用等级	高程/m	流速/(m·s ⁻¹)	含沙量/(kg·m ⁻³)
L1	172.0~<174.0	2.12~<2.25	2.24~<2.73
L2	166.6~<172.0	1.67~<2.12	1.13~<2.24
L3	161.6~<166.6	1.12~<1.67	0.49~<1.13

表 3 试验工况
Tab. 3 Experimental condition table

工况	干湿比	冲刷角度/(°)	流速/(m·s ⁻¹)	泥沙质量/kg	冲蚀时间/h	锈蚀时间/h	加速干燥时间/h	单次循环时间/h
1~3	2:1	0、90、180	2.12	2.66	16	16	40	72
4~6	1:1	0、90、180	1.67	1.36	24	24	24	72
7~9	1:2	0、90、180	1.12	0.59	32	32	8	72

1.2 试验方案

锈蚀试验条件参照 GB/T 41951—2022《金属和合金的腐蚀建筑用钢连接部件及钢构件耐腐蚀性能测试方法》^[12]及枢纽港现场服役环境；依据预试验结果，确定单次最大锈蚀时间为 32 h，单工况最大锈蚀总时间为 53 d；通电加速锈蚀方法参考文献[13]描述的贴面法，即为了加快试件锈蚀速度在试件表面覆盖一层饱含 NaCl 电解质溶液的吸水海绵，见图 2；将泡沫板平铺于试验场地，随后将试件规则摆放于泡沫板上，用强磁铁将各试件进行连接；将导线从稳压直流电源正极接出，另一头接到试件上，随后用导线将不同分组的各个试件串联起来，然后从试件接入电解池中，最后用导线从电解池接回电源负极，最终形成一个完整的电流回路；将饱含 NaCl 电解质溶液的吸水海绵覆盖于试件表面后打开电源，调节电源电流与电压大小到目标值后开始通电。

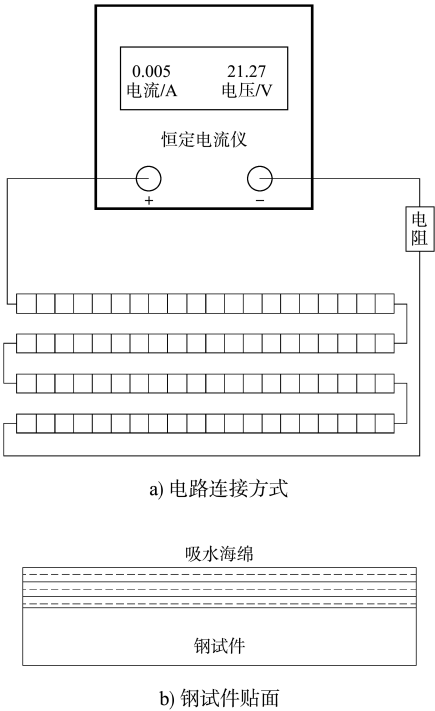


图 2 通电加速锈蚀方法
Fig. 2 Method of accelerating rusting by electrification

冲蚀试验操作过程: 根据现场不同高程对应的水流流速设置对应的室内试验流速; 将试件固定在承载器上并放入水槽中, 见图3; 调节搅拌机挡位控制含沙水流流速以达到现场冲蚀效果; 加速效果依靠放大含沙量实现。

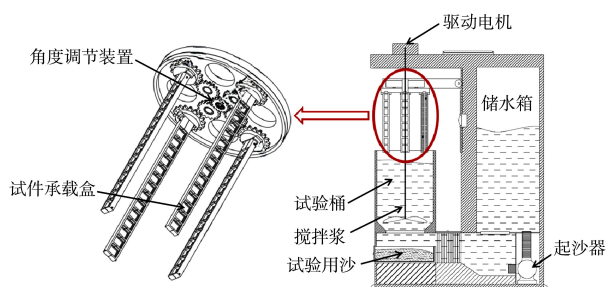


图3 冲蚀试验布置

Fig.3 Layout of erosion test

将打磨好的试件按照不同工况平铺于加速锈蚀试验场地的泡沫板上, 连接好电路之后采用直流电源开始给试件通电; 通电时间达到预定时间之后结束通电, 通电结束后将试件转移至水沙冲蚀场地, 将试件有序放入承载器上, 紧接着将不同工况下的试件放入不同的冲蚀桶内(不同冲蚀桶对应不同流速及不同含沙量); 冲蚀时间达到预定时间后结束冲蚀试验, 随后对试件各个指标进行测定; 测定完成后时间进入下一次冲-锈循环, 以此类推直至试验结束。

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

本文选用 EPSON 扫描仪对锈蚀后的钢构件形貌进行宏观形貌采集, 通过观察钢试件在不同循环后表面形态的变化对钢试件锈蚀宏观形貌进行分析。每次冲-锈循环结束后对钢试件的宏观形貌进行采集, 可直观地对钢构件锈蚀特征进行评价, 可对其损伤程度及锈蚀发展趋势进行有效评估。

2.1.1 不同干湿比

不同干湿比工况下各钢试件表面见图4。可以看出, 经历40次循环后, 不同干湿比工况下各钢试件锈蚀规律并不明显, 3种干湿比下钢试件产生大量锈蚀产物, 试件表面同时存在大量浮锈和锈锈, 不同干湿比所对应的钢试件均发生整体锈蚀。



a) 干湿比2:1

b) 干湿比1:1

c) 干湿比1:2

图4 不同干湿比工况下钢试件表面

Fig.4 Surface of steel specimen under different wet-dry ratio conditions

2.1.2 不同冲蚀角度

不同冲蚀角度下各钢试件表面见图5。可以看出, 经历40次循环后, 不同冲蚀角度下各钢试件均发生严重锈蚀, 钢试件产生大量锈蚀产物, 试件表面存在大量浮锈, 浮锈脱落后存在大量锈锈, 不同冲蚀角度所对应的钢试件均发生整体锈蚀; 进一步对其形貌进行分析, 40次循环后, 0°冲蚀工况下浮锈基本脱落, 表面存在大面积锈锈, 90°冲蚀工况下浮锈部分脱落, 表面呈现为浮锈、锈锈占比相当, 180°冲蚀工况下浮锈保存完整, 试件表面存在大片状浮锈, 未见锈锈显露。



a) 0°冲蚀

b) 90°冲蚀

c) 180°冲蚀

图5 不同冲蚀角度下钢试件表面

Fig.5 Surface of steel specimen under different erosion angles

2.1.3 不同循环次数

不同循环次数下各钢试件表面见图6。整体上看, 从循环开始到40次循环结束, 试件锈蚀发展状态表现为局部点蚀—大面积锈锈—整体锈锈; 进一步分析, 第1次循环结束后试件形貌表现为试件各区域出现独立的锈锈点, 并有连接成局部锈锈的趋势, 第20次循环结束后试件形貌表现为大面积锈锈, 仅剩余少部分区域未锈锈, 第40次循环结束后试件形貌表现为整体锈锈, 试件表面浮锈脱落后又开始形成下一阶段浮锈, 此时试件表面既有浮锈又有锈锈。

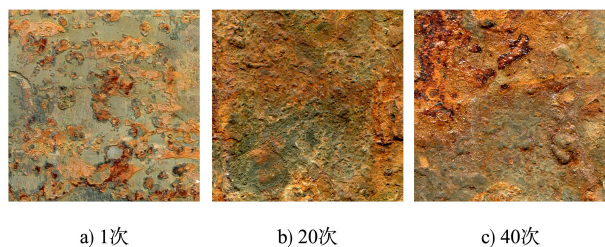


图 6 不同循环次数下钢试件表面

Fig. 6 Surface of steel specimen under different number of cycles

2.2 质量损失

将钢试件放置于配制好的酸性液中进行多次浸泡，每次浸泡后对试件质量进行测量，当试件质量不再发生改变时酸洗完成，记录最终质量。

2.2.1 不同干湿比

不同干湿比工况下钢试件的质量损失见图 7。可以看出，随着循环次数的增加，钢试件的质量损失越大；不同干湿比所对应的质量损失曲线明显分层，具体表现为：干湿比越小（高程越低），质量损失越大，锈蚀钢试件锈蚀越严重。

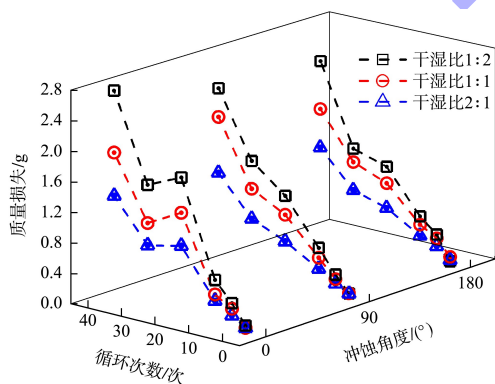


图 7 不同干湿比工况下钢试件的质量损失

Fig. 7 Mass loss of steel specimen under different dry-wet ratio conditions

2.2.2 不同冲蚀角度

不同冲蚀角度下钢试件的质量损失见图 8。可以看出，随着循环次数的增加，钢试件的质量损失越大；不同冲蚀角度所对应的质量损失曲线无明显分层现象，但仔细分析同一干湿比下各冲蚀角度间数据不难看出：0°冲蚀工况下质量损失最大，180°冲蚀工况下质量损失最小，0°冲蚀工况下钢试件锈蚀更严重。

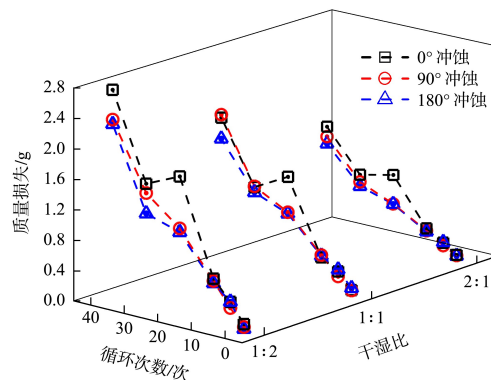


图 8 不同冲蚀角度下钢试件的质量损失

Fig. 8 Mass loss of steel specimen under different erosion angles

2.3 锈蚀深度

2.3.1 不同干湿比

不同干湿比工况下钢试件的锈蚀深度见图 9（本文采用的数据为锈蚀深度平均值）。可以看出，随着循环次数的增加，钢试件的锈蚀深度越大；不同干湿比所对应的锈蚀深度曲线明显分层，具体表现为：干湿比越小（高程越低），锈蚀深度越大，钢试件锈蚀越严重。

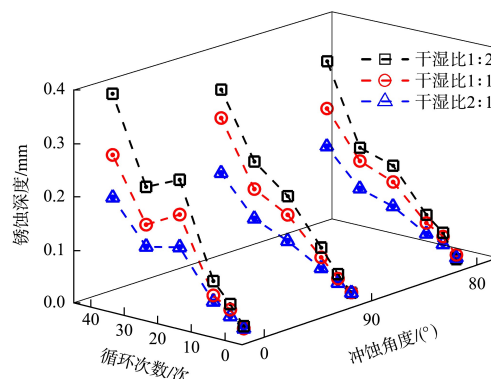


图 9 不同干湿比工况下钢试件的锈蚀深度

Fig. 9 Rust depth of steel specimen under different wet-dry ratio conditions

2.3.2 不同冲蚀角度

不同冲蚀角度下钢试件的锈蚀深度见图 10。可以看出，随着循环次数的增加，钢试件的锈蚀深度越大；不同冲蚀角度所对应的锈蚀深度曲线无明显分层现象，但仔细分析同一干湿比下各冲蚀角度间数据不难看出：0°冲蚀工况下锈蚀深度最大，180°冲蚀工况下锈蚀深度最小，0°冲蚀工况下钢试件锈蚀更严重。

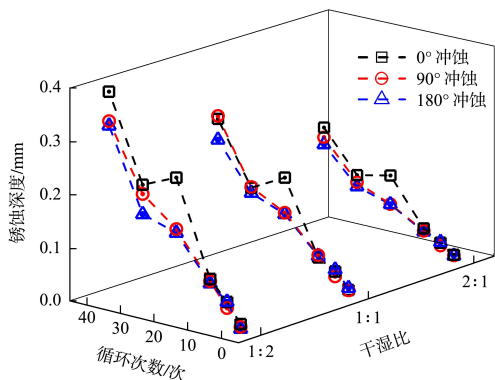


图 10 不同冲蚀角度下钢试件的锈蚀深度
Fig. 10 Rust depth of steel specimen under different erosion angles

2.4 质量损失率

2.4.1 不同干湿比

不同干湿比工况下钢试件的质量损失率见图 11。可以看出,随着循环次数的增加,钢试件的质量损失率越大;不同干湿比所对应的质量损失率曲线明显分层,具体表现为:干湿比越小(高程越低),质量损失率越大,钢试件锈蚀越严重。

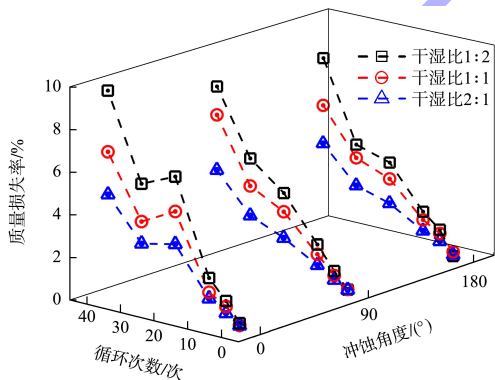


图 11 不同干湿比工况下钢试件的质量损失率
Fig. 11 Mass loss rate of steel specimen under different wet-dry ratio conditions

2.4.2 不同冲蚀角度

不同冲蚀角度下钢试件的质量损失率见图 12。可以看出,随着循环次数的增加,钢试件的质量损失率越大;不同冲蚀角度所对应的质量损失率曲线无明显分层现象,但仔细分析同一干湿比下各冲蚀角度间数据不难看出:0°冲蚀工况下质量

损失率最大,180°冲蚀工况下质量损失率最小,0°冲蚀工况下钢试件锈蚀更严重。

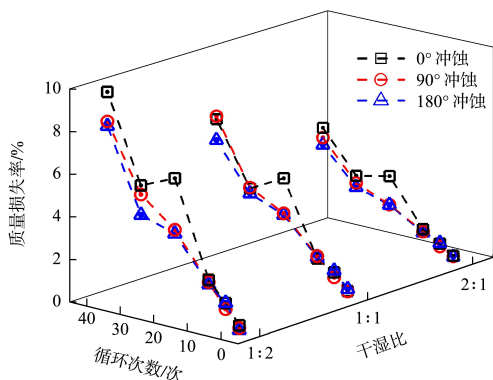


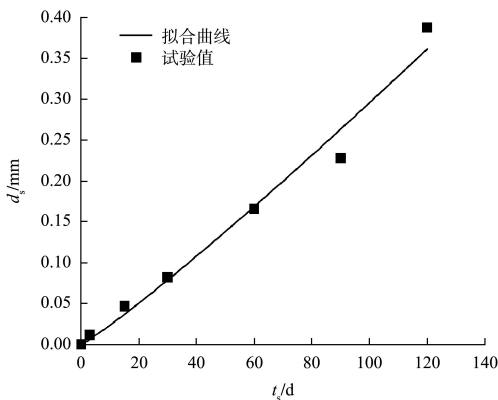
图 12 不同冲蚀角度下钢试件的质量损失率
Fig. 12 Mass loss rate of steel specimen under different erosion angles

2.5 锈蚀深度预测模型

基于室内试验和现场试验分别获取室内及现场钢构件锈蚀规律分布特征,基于室内锈蚀数据推导基于室内试验的钢构件锈蚀模型,用现场试验得到的锈蚀规律对室内钢构件锈蚀模型进行修正和率定,最终得到针对内河框架式码头水工钢构件的锈蚀模型,此锈蚀模型考虑高程 h 、冲-锈时间 t_s 等参数,可对框架式码头在不同时间下不同高程的钢构件剩余厚度进行预测。

2.5.1 基于室内试验的锈蚀深度模型

通过室内试验所得数据,建立不同高程 h 下锈蚀深度 d_s 与冲-锈时间 t_s 之间的关系见图 13。



a) $h=161.6$ m

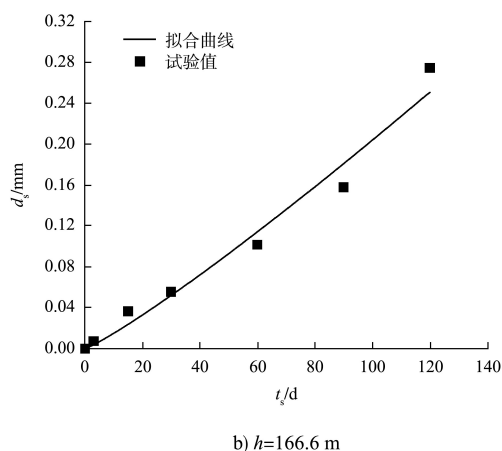
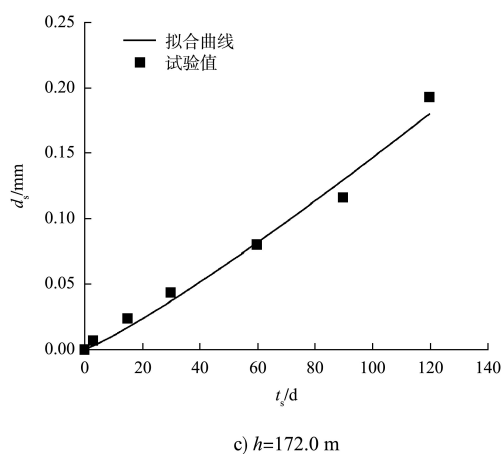
b) $h=166.6$ mc) $h=172.0$ m

图 13 锈蚀深度随冲-锈时间变化的曲线

Fig. 13 Corrosion depth variation curves with erosion time

由图 13 可得, 锈蚀深度与冲蚀时间存在明显的指数函数关系, 不同高程下锈蚀深度与时间的关系可用以下公式表示:

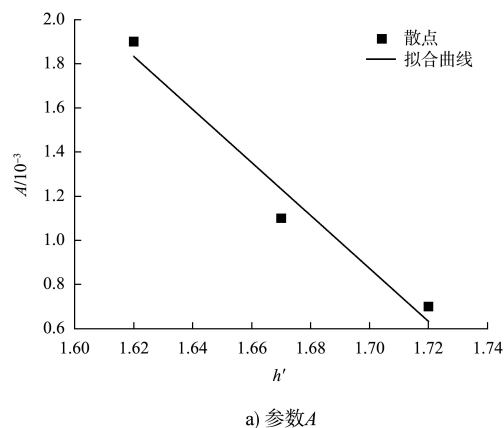
$$d_s = At_s^B \quad (1)$$

不同高程下锈蚀深度与时间拟合公式中参数 A 、 B 值见表 4。可以看出, 锈蚀深度 d_s 的大小受到 A 、 B 的影响, 因此需要建立锈蚀深度与 A 、 B 的对应关系, 见图 14, 基于此可得到不同高程下锈蚀深度与试验时间的经验公式, 为方便计算, 引入无量纲高程 $h' = h/100$ 。

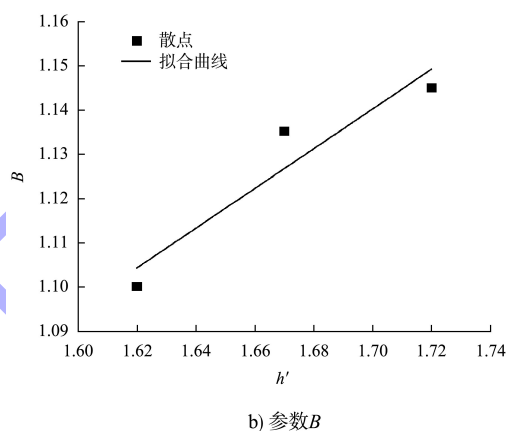
表 4 锈蚀深度与试验时间的拟合公式

Tab. 4 Fitting formula of corrosion depth and test time

高程/m	拟合公式	R^2	A	B
172.0	$d_s = 0.0007 t_s^{1.1451}$	0.9756	0.0007	1.1451
166.6	$d_s = 0.0011 t_s^{1.1353}$	0.9626	0.0011	1.1353
161.6	$d_s = 0.0019 t_s^{1.1002}$	0.9731	0.0019	1.1002



a) 参数A



b) 参数B

图 14 参数与无量纲高程的关系曲线

Fig. 14 Relationship curves of parameters and dimensionless elevation

对上述关系进行拟合, 则有:

$$A = 0.0213 - 0.0111h' \quad (2)$$

$$B = 0.03770 + 0.4190h' \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)中, 获得基于室内试验的锈蚀深度预测方程:

$$t_s = [d_s / (0.0213 - 0.0111h')]^{\frac{1}{0.03770 + 0.4190h'}} \quad (4)$$

式中: d_s 为室内试验的锈蚀深度; t_s 为室内试验的冲-锈时间。

2.5.2 现场试验修正的锈蚀深度模型

基于现场钢构件锈蚀深度检测试验所得数据对上述锈蚀深度预测模型进行修正。将室内试验不同循环次数后各环境作用等级下钢试样锈蚀深度与现场试验不同服役时间后各高程钢构件锈蚀深度进行对比, 见表 5。

表5 现场试验与室内试验结果对比

Tab. 5 Comparison of field and laboratory test results

高程/m	d/mm	t_x/d	t_s/d
172	0.039 8	97	30
	0.093 3	203	60
	0.104 1	230	90
	0.175 8	358	120
166	0.057 6	111	30
	0.146 0	259	60
	0.154 0	272	90
	0.262 0	442	120
161	0.077 8	118	30
	0.189 7	271	60
	0.203 8	294	90
	0.348 2	454	120

注: d 为锈蚀深度; t_x 为现场试验时间; t_s 为室内试验时间。

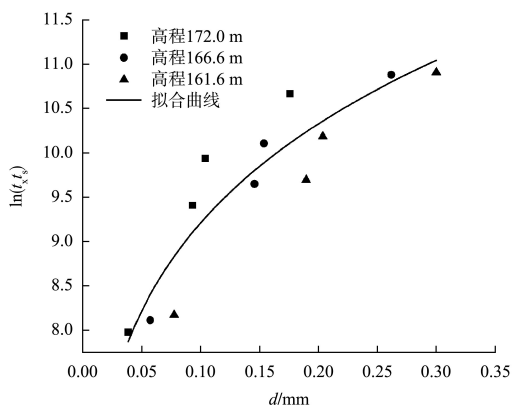
在不同锈蚀深度所对应的现场试验所需时间 t_x 与室内试验所需时间 t_s 的关系, 见表6。

表6 不同高程下 t_x 与 t_s 的关系Tab. 6 Relationship between t_x and t_s at different elevations

高程/m	$\ln(t_{x1}t_{s1})$	$\ln(t_{x2}t_{s2})$	$\ln(t_{x3}t_{s3})$	$\ln(t_{x4}t_{s4})$
172.0	7.98	9.41	9.94	10.67
166.6	8.11	9.65	10.11	10.88
161.6	8.17	9.70	10.18	10.91

注: $t_{x1} \sim t_{x4}$ 为 $t_{s1}=30\text{ d}$ 、 $t_{s2}=60\text{ d}$ 、 $t_{s3}=90\text{ d}$ 、 $t_{s4}=120\text{ d}$ 时对应的现场试验时间。

不同高程下 t_x 、 t_s 与锈蚀深度的变化关系见图15。

图15 t_x 、 t_s 与锈蚀深度的变化关系Fig. 15 Variation relationship of t_x and t_s with corrosion depth

$\ln(t_x t_s)$ 与锈蚀深度的变化可用指数函数表示, 相关系数 R^2 为 0.836 18, 表达式为:

$$\ln(t_x t_s) = 13.48 d^{0.17} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 可确定基于现场试验修正的室内试验的钢构件锈蚀深度寿命预测方程为:

$$(d/A)^{\frac{1}{b}} t = \exp(13.48 d^{0.17}) \quad (6)$$

$$t_x = \frac{\exp(13.48 d^{0.17})}{[d/(0.021\ 3 - 0.011\ 1h')]^{\frac{1}{0.037\ 70 + 0.419\ 0h'}}} \quad (7)$$

式中: d 为锈蚀深度, mm; t 为试验时间, d。

依据长江上游某大型枢纽港下部钢结构实际厚度参数, 即预留锈蚀厚度 3 mm、钢构件初始厚度 16 mm, 通过式(7)计算, 在 166.6 m 高程时, 钢构件锈蚀 3 mm 所需时间为 2.00 a, 锈蚀 16 mm 所需时间为 28.61 a, 即服役时间达到 28.61 a 后钢构件完全锈蚀, 远低于钢构件设计使用寿命。

基于文献[4]的枢纽港现场试验的寿命预测模型, 现场钢构件锈蚀深度达到 16 mm 所需时间为 28 a, 由此可知本文建立的模型预测结果比已有文献提出的模型预测结果相近, 但由于已有文献建立模型时所采用数据为锈蚀深度最大值, 本文采用数据为平均值, 故基于现场试验的锈蚀深度预测模型预测服役寿命略短。

3 结论

1) 本文探明内河大水位变幅区域钢构件锈蚀规律: 高程越高, 锈蚀厚度越小; 循环次数越多, 锈蚀越严重。

2) 本文通过室内加速试验对大水位变幅区域现场钢构件锈蚀情况进行有效模拟, 建立综合室内与现场试验数据的钢构件锈蚀深度预测模型。结果显示, 服役时间达到 2.00 a 时达到预留锈蚀厚度, 服役时间达到 28.61 a 时钢构件完全失效, 远低于钢构件设计使用寿命。

3) 本文通过对比基于现场试验的锈蚀深度预测模型, 验证了模型的合理性, 可利用室内加速试验结果对现场钢构件锈蚀情况进行评估。

参考文献:

- [1] 姜帆, 翁昌年, 温宇宁. 辽宁地区桥梁结构环境类别分区研究[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2014, 16(3): 5-8.
- JIANG F, WENG C N, WEN Y N. Study on environment zoning for bridge structure in Liaoning Province [J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2014, 16(3): 5-8.
- [2] Design of concrete structures: CSA A23. 3-19[S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [3] Concrete materials and methods of concrete construction/ test methods and standard practices for concrete: CSA A23. 1: 19[S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [4] 刘明维, 代川, 吴林键, 等. 内河枢纽港水工钢构件锈蚀特征时空分布规律[J]. 水运工程, 2024(5): 28-35, 48.
- LIU M W, DAI C, WU L J, et al. Spatial and temporal distribution law of rusting characteristics of hydraulic steel component in inland river hub port[J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 28-35, 48.
- [5] 田玉琬, 程学群, 李晓刚. 海洋大气腐蚀的室内模拟加速试验方法研究[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 781-784.
- TIAN Y W, CHENG X Q, LI X G. A study of simulated indoor accelerated testing method for marine atmospheric corrosion [J]. Corrosion & protection, 2014, 35(8): 781-784.
- [6] 王欣, 秦术杰. Q235 钢在海口大气环境中自然暴露与加速条件下的初期腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2023, 47(10): 9-15.
- WANG X, QIN S J. Initial corrosion behavior of Q235 steel under natural exposure and accelerated conditions in Haikou atmospheric environment [J]. Materials for mechanical engineering, 2023, 47(10): 9-15.
- [7] 张宇. 耐候钢和高性能钢的腐蚀疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- ZHANG Y. Study on corrosion fatigue behavior of weathering steel and high performance steel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [8] HOEPPNER D, CHANDRASEKARAN V, TYLOR A. Evaluation of the fretting corrosion behavior of the proximal pad taper of a modular hip design [C]// International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity. Proceedings of Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Dayton: ICAF, 1999: 253-258.
- [9] SANKARN K K, PEREZ R, JATA K V. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: modeling and experimental studies [J]. Materials science and engineering(A), 2001, 297(1/2): 223-229.
- [10] 何加斌. 水沙冲蚀-钢材锈蚀交替下港工钢构件防护涂层损伤劣化试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- HE J B. Experimental study on damage degradation of protective coating for port steel members under water and sand erosion-steel corrosion alternation [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [11] 曾丽琴. 大流速含沙水流环境下粘弹性防腐涂层的损伤试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- ZENG L Q. Experimental study on damage of viscoelastic anticorrosive coatings under sand flow at high velocity[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [12] 金属和合金的腐蚀 建筑用钢连接部件及钢构件耐腐蚀性能测试方法: GB/T 41951—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- Corrosion of metals and alloys-test method for the corrosion resistance of construction steel joint and member: GB/T 41951-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [13] 温婷. 钢筋混凝土构件通电锈蚀试验适用性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2014.
- WEN T. Applicability study on electrifying corrosion methods of reinforced concrete members [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2014.

(本文编辑 王璁)