



# 内河枢纽港水工钢构件锈蚀特征 时空分布规律\*

刘明维, 代川, 吴林键, 曾丽琴, 何加斌

(重庆交通大学, 国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:** 内河枢纽港框架直立式码头下部结构多采用钢护筒、钢靠船构件、纵横撑等钢构件, 钢构件具有强度高、塑性好等优点的同时也存在易锈蚀、耐腐蚀性差等问题, 水工钢构件锈蚀对内河枢纽港长期运营安全存在严重威胁。为了探究水沙冲刷条件下内河枢纽港水工钢构件锈蚀规律, 依托某代表性内河枢纽港工程, 开展针对其水工钢构件锈蚀程度的现场检测试验。通过对不同排架、高程、受水沙冲刷方向等钢构件试验数据结果的详细对比分析, 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。结果表明: 钢构件的锈蚀厚度随服役时间的增加而增大, 但随着高程的增加而逐渐减小; 同一高程位置处, 构件迎水面的锈蚀程度相较于侧水面、背水面更严重。

**关键词:** 内河枢纽港; 钢构件; 锈蚀; 时空分布

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0028-08

## Spatial and temporal distribution law of rusting characteristics of hydraulic steel component in inland river hub port

LIU Mingwei, DAI Chuan, WU Linjian, ZENG Liqing, HE Jiabin

(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)

**Abstract:** The substructure of frame vertical wharf in inland river hub port mostly uses steel sheathing, steel docking components, longitudinal and transverse bracing and other steel components, steel components have the advantages of high strength, good plasticity and other advantages at the same time have easy to rust, poor corrosion resistance and other problems. The hydraulic steel component rusting is a serious threat to the safety of long-term operation of the inland river hub port. In order to investigate the rusting law of hydraulic steel components in inland river hub ports under the condition of water and sand erosion, relying on a representative inland river hub port project, we carry out on-site testing for the degree of rusting of its hydraulic steel components. Through the detailed comparative analysis of the test data results of steel components with different rows, elevations and erosion directions, we reveal the spatial and temporal distribution law of the corrosion degree of different steel components, and propose an empirical rusting model of hydraulic steel components for the relying project. The results show that the rusting thickness of steel components increases with the increase of service time, but decreases with the increase of elevation. At the same elevation position, the rusting degree of components facing the water surface is more serious than that of the side water surface and the back water surface.

**Keywords:** inland river hub port; steel component; rusting; spatial and temporal distribution

收稿日期: 2023-09-13

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279124); 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0097)

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的教学与研究。

大型枢纽港口是实施“一带一路”倡议, 推进长江经济带、成渝地区双城经济圈及长江上游航运中心建设等国家战略的重要基础设施。通过调研长江上游多个大型港口码头水工钢构件服役状态, 发现经过4~6个洪水期后, 钢构件表面涂层大范围脱落, 导致钢构件长期暴露在水位变动区的大气和水环境之中, 钢构件锈蚀十分严重, 见图1。



图1 钢构件锈蚀情况

在内河枢纽港长期服役过程中, 受汛期大流速含沙水流冲蚀影响, 防腐涂层遭到破坏, 钢基材逐渐暴露出来, 暴露的钢基材在水位变动区受到水流作用后开始锈蚀<sup>[1-2]</sup>, 锈蚀产物会不断受到含沙水流的冲蚀作用而掉落, 水位变动形成干湿交替环境, 使钢构件锈蚀更加迅速, 钢构件锈蚀导致其壁厚变薄、受力面积减小, 钢构件材料属性发生改变, 造成承载能力下降, 在荷载作用下, 构件连接处、施工焊接处等薄弱环节的受力状况可能发生突变<sup>[3-4]</sup>; 在中水位工况下, 钢纵、横撑完全锈蚀后码头整体变形会达到初始状态的2.76倍, 最大应力会达到初始状态的1.77倍<sup>[5]</sup>, 严重影响码头的长期运营安全。

综合来看, 针对钢构件锈蚀问题已有大量学者开展了相关研究<sup>[6-10]</sup>, 但是针对港口钢构件锈蚀问题的研究鲜有文献报道, 其中朱锡昶等<sup>[11]</sup>通过对浙江省1座运行10年的高桩板梁式码头钢管桩的腐蚀破坏状况进行检测并分析得出该工程钢管桩锈蚀特点; 杨松等<sup>[12]</sup>研究Q345B低合金钢锈蚀后的力学特性, 结果表明钢材锈蚀后的应力-应变曲线变化明显, 发现其屈服强度、极限强度等指

标均随非均匀锈蚀率呈线性或非线性退化。然而针对内河枢纽港在不同时空分布下钢构件锈蚀规律的分析尚缺乏系统研究。为此, 本文依托长江上游某大型铁公水联运枢纽港(简称“枢纽港”), 开展针对水工钢构件运行多年后的锈蚀厚度现场检测试验, 深入分析枢纽港重要水工钢构件锈蚀特征及其时空分布规律, 为钢构件防护区域选择提供科学依据, 预测枢纽港水工钢构件服役寿命, 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 工程概况

枢纽港是我国内河最大的铁公水多式联运枢纽港, 其定位为内陆型开放口岸、国际多式联运综合枢纽、内陆自由贸易港核心区, 中欧班列和长江黄金水道在这里汇聚, 是国家建设“一带一路”、“长江经济带”的重要节点。枢纽港多用途码头采用钢护筒全直桩框架码头新型结构形式, 见图2。港口开始运行以来, 服役状况良好, 起到了较好的示范作用, 为其他铁公水联运枢纽港及专业化重点港建设中提供范例。

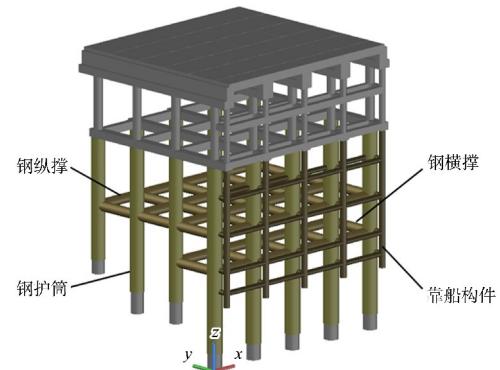


图2 枢纽港架空直立式码头结构

## 2 现场检测试验

### 2.1 试验方案

本文按照纵向(上游→下游)、横向(江侧→岸侧)、垂向(从大气区→水位变动区→水下区)顺序对枢纽港开展多次现场水工钢构件厚度检测试验, 揭示钢构件腐蚀规律。

试验采用超声波测厚仪检测钢构件剩余厚度, 使用无线手提打磨机对钢构件进行初步除锈, 打

磨至表面钢构件部分裸露出后, 测量钢构件的腐蚀剩余厚度, 每个测点进行测量 5 次并记录对应

数据。选取枢纽港多用途泊位进行钢构件锈蚀检测测点布设, 具体选取的排架见图 3。

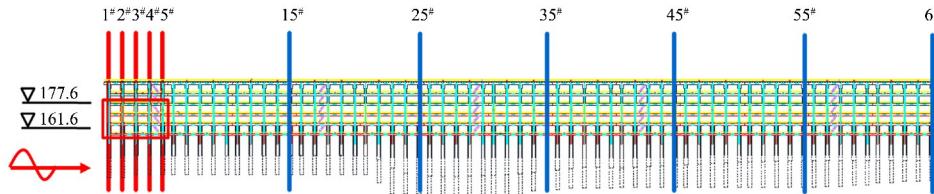


图 3 枢纽港多用途泊位 (单位: m)

## 2.2 钢护筒及靠船构件测点布设

枢纽港包括多个结构段, 但考虑迎水面受来流来沙影响最为严重, 后方受扰流影响来流流速放缓, 因此在迎水侧的第 1 个水工结构段应作为检测重点。在水位变动区内选择 161.6、166.6 和 172.0 m 作为检测高程, 每个高程选择迎、侧、背水面 3 个测点(第 1 榼排架迎水面因悬空无检测条件, 故无相关数据), 选择第 1 个结构段 5 榼排架作为主要检测对象, 并选取剩余排架均匀布设 6 榼排架作为纵向对比, 系统分析水工钢结构的锈蚀影响规律。在 11 榼排架各布设 3 个高程处的测点, 在每个高程的 3 个方向均布设 1 个测点, 共计 186 个, 见图 4。

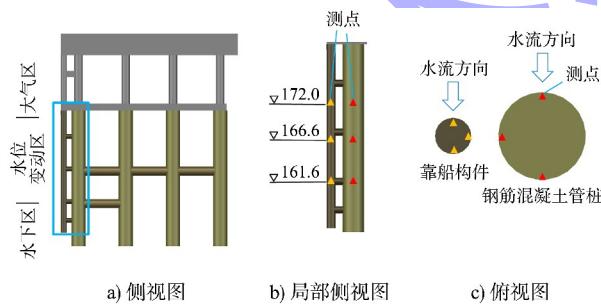


图 4 钢护筒及靠船构件检测测点布设 (单位: m)

## 2.3 钢纵、横撑测点布设

码头下部共有 2 层钢纵、横撑结构, 选择第 1 个结构段 5 榼排架作为检测对象, 考虑水位变动情况, 在水位 166.6 m 处布设测点, 测点布置在钢纵、横撑的顶点位置, 共计 90 个测点, 见图 5。

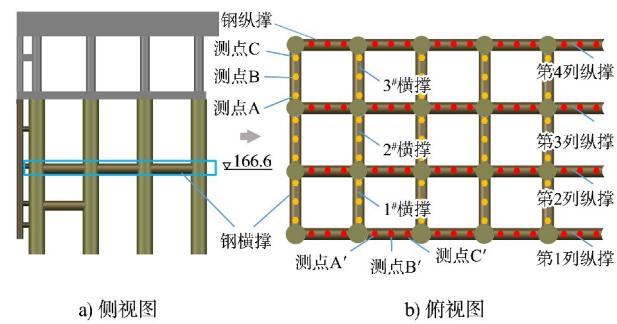


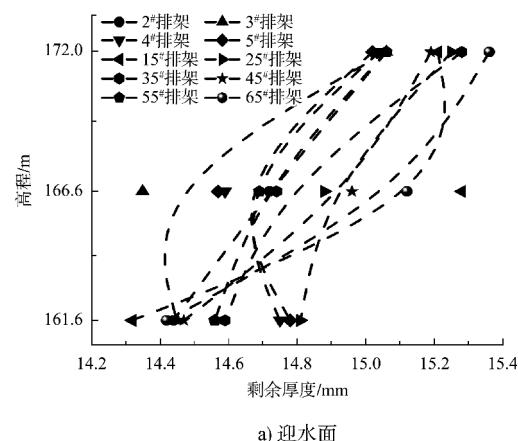
图 5 钢纵、横撑检测测点布设 (单位: m)

## 3 结果与分析

### 3.1 钢护筒锈蚀特征时空分布规律

#### 3.1.1 沿高程方向分布规律

钢护筒迎水面、侧水面、背水面和平均剩余厚度见图 6。由图 6a) 可看出, 随着高程的增加, 钢护筒迎水面剩余厚度随之增大; 由图 6b) 可看出, 随着高程的增加, 钢护筒侧水面剩余厚度随之增大; 由图 6c) 可看出, 随着高程的增加, 钢护筒背水面剩余厚度随之增大; 由图 6d) 可看出, 随着高程的增加, 钢护筒剩余厚度随之增大。



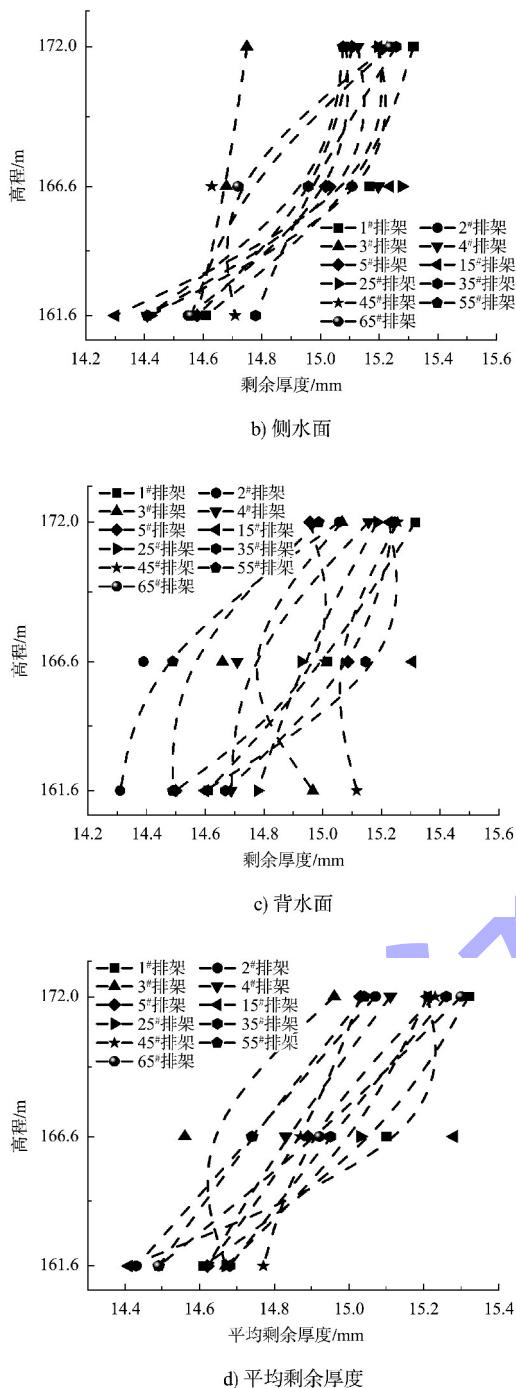


图6 钢护筒剩余厚度

综上, 钢护筒在竖直方向上随着高程的改变会发生明显变化, 具体表现为, 高程为 161.6 m 处的钢护筒锈蚀最严重, 高程为 172.0 m 处的钢护筒锈蚀剩余厚度最大, 随着高程的增加, 钢护筒锈蚀情况随之减弱, 钢护筒剩余厚度越大。

### 3.1.2 沿水流方向分布规律

沿水流方向钢护筒平均剩余厚度分布见图 7。可以看出, 钢护筒沿水流方向分布情况与锈蚀厚度变化相关性不大, 但可明显看出高程对钢护筒锈蚀厚度的影响较大。

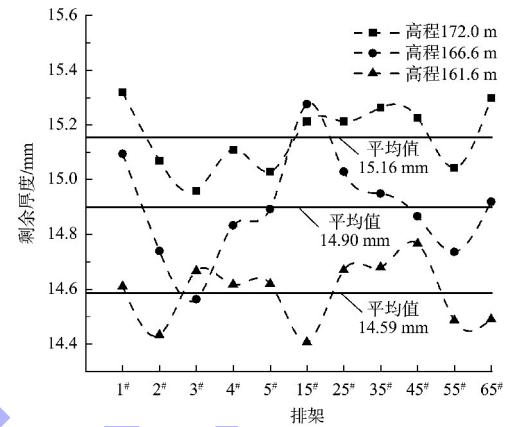


图7 沿水流方向钢护筒平均剩余厚度分布

### 3.1.3 锈蚀程度时变规律

2021 和 2023 年钢护筒剩余厚度分布见图 8。可以看出, 钢护筒 2023 年相较于 2021 年锈蚀更严重; 服役时间越长, 钢护筒锈蚀厚度增大。

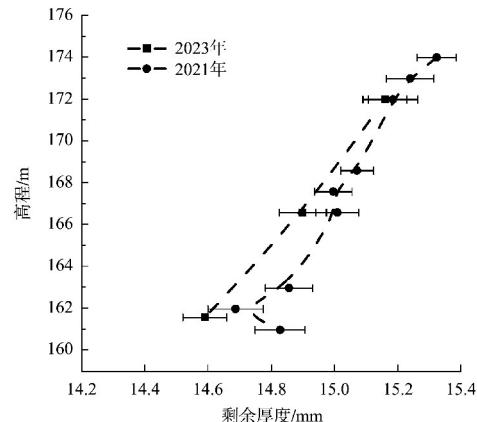


图8 钢护筒最大、最小、平均剩余厚度时间分布

### 3.1.4 锈蚀程度统计

对现场检测试验所获得的钢护筒锈蚀厚度数据(锈蚀厚度为初始厚度与剩余厚度之差)进行统计分析, 钢护筒不同排架数、不同高程、不同部位处的锈蚀程度见表 1。

表 1 钢护筒锈蚀程度

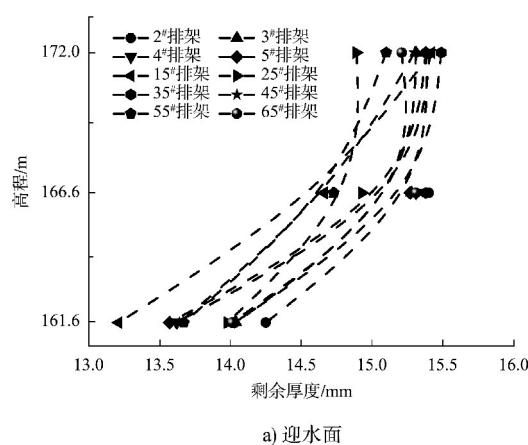
部位	统计值	锈蚀厚度/mm	位置
迎水面	最大值	1.68	15#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.64	65#排架、高程 172.0 m
	平均值	1.17	-
侧水面	最大值	1.70	15#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.68	1#排架、高程 162.0 m
	平均值	1.10	-
背水面	最大值	1.69	2#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.68	1#排架、高程 172.0 m
	平均值	1.10	-

由表 1 可知, 锈蚀情况最为严重的区域出现在 15#排架 161.6 m 高程的侧水面处, 相较于原始厚度 16 mm 减少了 1.70 mm, 占原始厚度的 10.63%。从平均锈蚀量来看, 钢护筒迎水面的平均锈蚀量高于侧水面以及背水面。综合考虑平均锈蚀量与最大锈蚀量可以得出迎水面和 161.6 m 高程的区域受水沙冲蚀作用更严重, 应该重点对钢护筒迎水面及 161.6 m 高程处采取保护措施。

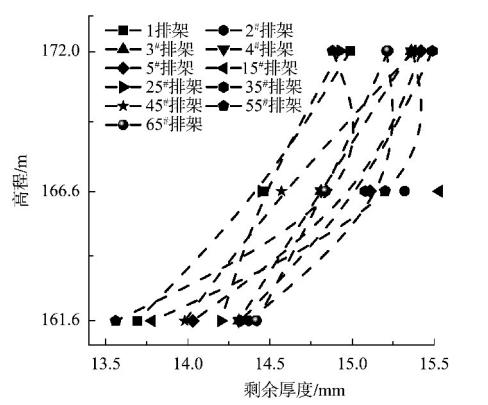
### 3.2 靠船构件锈蚀特征时空分布规律

#### 3.2.1 沿高程方向分布规律

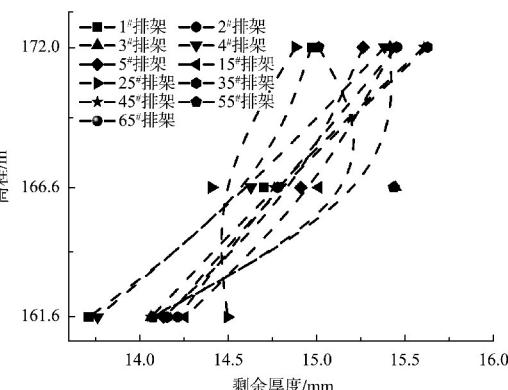
靠船构件迎水面、侧水面、背水面和平均剩余厚度见图 9。由图 9a) 可看出, 随着高程的增加, 靠船构件迎水面剩余厚度随之增大; 由图 9b) 可知, 随着高程的增加, 靠船构件侧水面剩余厚度随之增大; 由图 9c) 可知, 随着高程的增加, 靠船构件背水面剩余厚度随之增大; 由图 9d) 可知, 随着高程的增加, 靠船构件平均剩余厚度随之增大。



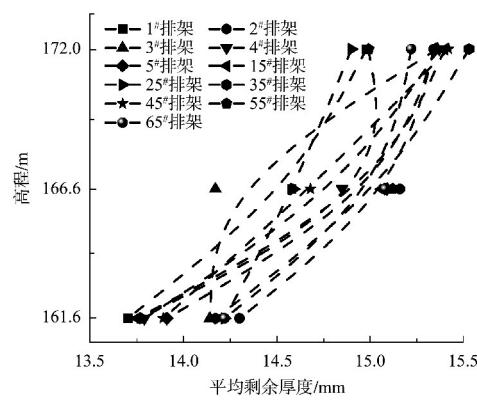
a) 迎水面



b) 侧水面



c) 背水面



d) 平均剩余厚度

图 9 靠船构件剩余厚度

综上, 靠船构件在竖直方向上随着高程的改变会发生明显的变化, 高程为 161.6 m 处的靠船构件锈蚀最严重, 高程为 172.0 m 处的靠船构件锈蚀剩余厚度最大, 综合表现为随着高程的增加, 靠船构件锈蚀情况随之减弱, 靠船构件剩余厚度越大。

### 3.2.2 沿水流方向分布规律

沿水流方向靠船构件平均剩余厚度分布见图10。可以看出, 靠船构件纵向分布情况与锈蚀厚度变化相关性不大, 但可明显看出高程对靠船构件锈蚀厚度的影响较大。

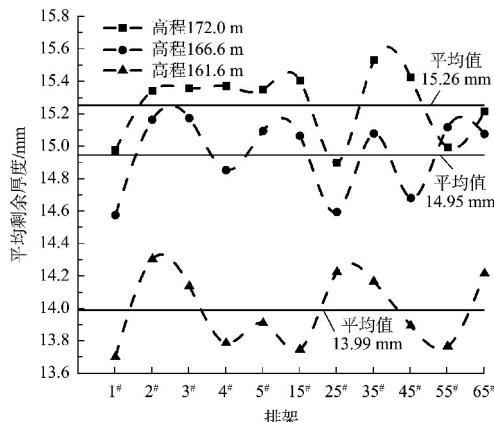


图10 沿水流方向靠船构件平均剩余厚度分布

### 3.2.3 锈蚀程度时变规律

2021和2023年靠船件剩余厚度分布见图11。可以看出, 靠船构件2023年相较于2021年锈蚀更严重; 服役时间越长, 靠船构件锈蚀厚度越大。

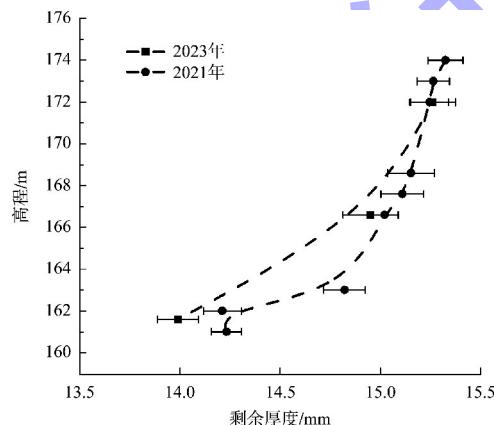


图11 靠船构件最大、最小、平均剩余厚度时间分布

### 3.2.4 锈蚀程度统计

对现场检测试验所获得的靠船构件锈蚀厚度数据进行统计分析, 靠船构件不同排架、高程、部位处的锈蚀程度见表2。

由表2可知, 锈蚀情况最为严重的区域出现在15#排架161.6 m高程的迎水面处, 相较于原始

厚度16 mm减少了2.79 mm, 占原始厚度的17.44%。从平均锈蚀量来看, 靠船构件迎水面的平均锈蚀量高于侧水面以及背水面。综合考虑平均锈蚀量与最大锈蚀量可以得出迎水面和161.6 m高程的区域受水沙冲蚀作用更严重, 应该重点对靠船构件迎水面及161.6 m高程处采取保护措施。

表2 靠船构件锈蚀程度

部位	统计值	锈蚀厚度/mm	位置
迎水面	最大值	2.79	15#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.51	35#排架、高程 172.0 m
	平均值	1.27	-
侧水面	最大值	2.44	55#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.47	15#排架、高程 166.6 m
	平均值	1.25	-
背水面	最大值	2.29	1#排架、高程 161.6 m
	最小值	0.39	35#排架、高程 172.0 m
	平均值	1.25	-

综合表1、2可知, 钢构件在迎水面、161.6 m高程锈蚀较为严重, 应在不同排架处针对该区域进行重点防锈处理。

### 3.3 钢纵、横撑锈蚀特征时空分布规律

#### 3.3.1 钢纵撑锈蚀程度时空分布规律

前5榀排架钢纵撑剩余厚度时空分布见图12。可以看出, 沿水流方向钢纵撑剩余厚度呈现递减趋势, 2023年相较于2021年锈蚀更严重; 服役时间越长, 钢纵撑锈蚀厚度越大。

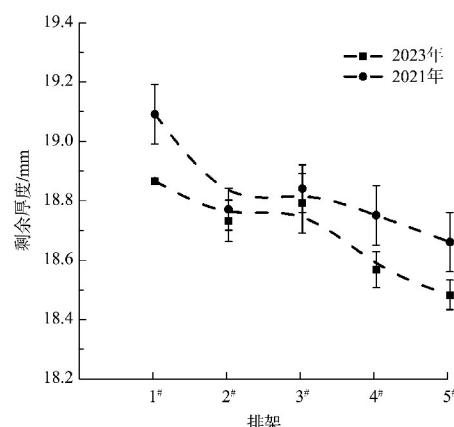


图12 前5榀排架钢纵撑最大、最小、平均剩余厚度时空分布

### 3.3.2 钢横撑锈蚀程度时空分布规律

前 5 榼排架钢横撑剩余厚度时空分布见图 13。可以看出, 沿水流方向钢横撑剩余厚度呈现递减趋势, 2023 年相较于 2021 年锈蚀更严重; 服役时间越长, 钢横撑锈蚀厚度越大。

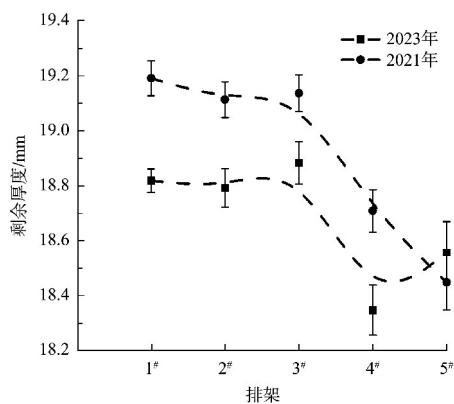


图 13 前 5 榼排架钢横撑最大、最小、平均剩余厚度时空分布

综合分析高程为 166.6 m 处前 5 榼钢纵、横撑锈蚀剩余厚度可知, 钢纵、横撑锈蚀剩余厚度沿水流方向逐渐减小, 服役时间越长, 钢纵、横撑锈蚀更严重。

### 3.3.3 钢纵、横撑锈蚀程度

对现场检测试验所获得的钢纵、横撑锈蚀厚度数据进行统计分析, 钢纵横撑不同排架数、不同部位处的锈蚀情况见表 3。

表 3 纵、横撑锈蚀情况

构件	统计值	锈蚀量/mm	位置
钢纵撑	最大值	1.83	1#排架、第 3 列纵撑
	最小值	0.69	1#排架、第 1 列纵撑
	平均值	1.31	-
钢横撑	最大值	1.86	4#排架、1#横撑
	最小值	1.03	3#排架、2#横撑
	平均值	1.32	-

由表 3 可知, 在 166.6 高程处, 锈蚀情况最为严重的区域出现在第 4 榼排架 1# 钢横撑处, 相较于原始厚度 20 mm 减少了 1.86 mm, 占原始厚度的 9.30%。由此可看出, 应该重点对 4# 排架钢横撑采取保护措施。

综上, 钢纵、横撑锈蚀厚度随着排架数的增加而增加, 综合分析图 12、13 可知, 沿水流方向

分布对钢纵、横撑锈蚀厚度有着较大的影响; 应重点对纵向靠后的钢纵、横撑采取保护措施。

### 3.4 钢构件锈蚀特征时间分布

结合 2019、2021、2023 年已有现场实测数据, 分析枢纽港各钢构件锈蚀特征时间分布规律。各钢构件锈蚀厚度时间分布见图 14。可以看出, 服役时间越长, 钢护筒、靠船构件以及钢纵横撑锈蚀厚度增大; 按锈蚀程度来看, 钢纵横撑锈蚀程度最严重, 靠船构件次之, 钢护筒锈蚀量相对较少; 钢纵横撑和靠船构件均为空心构件, 钢护筒内部有钢筋混凝土填充, 所以钢纵横撑和靠船构件相对于钢护筒更危险, 应重点对钢纵横撑和靠船构件采取保护措施。

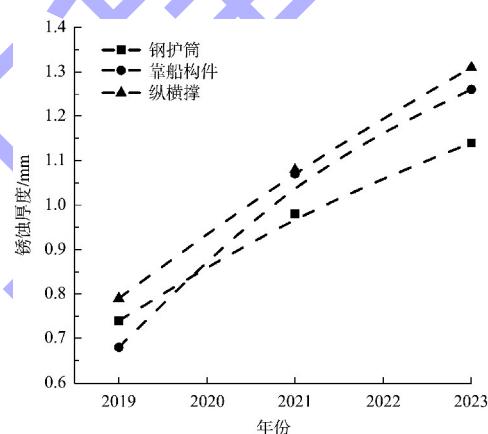


图 14 钢构件锈蚀厚度时间分布

### 3.5 钢构件寿命预测

广泛查阅相关文献资料并结合已有研究<sup>[13]</sup>, 本文借鉴海港及大气环境下钢构件寿命预测模型, 预测钢构件在内河环境下的服役寿命, 经常采用的预测模型为幂函数<sup>[14-16]</sup>。

幂函数预测模型为:

$$D = At^n \quad (1)$$

式中:  $D$  为腐蚀深度, mm;  $A$ 、 $n$  为常数, 可根据相关文献取值;  $t$  为腐蚀时间, a。

枢纽港 2021、2023 年实测钢构件锈蚀数据见表 4, 分别选取表 4 中 2021、2023 年对应的最大锈蚀量代入式(1), 反推公式中的  $A$ 、 $n$ ; 枢纽港服役开始时间为 2013 年, 考虑涂层使用年限 4 即设定钢构件开始锈蚀时间为 2017 年, 则 2021 年时  $t$  取 4 a、2023 年  $t$  取 6 a。

表 4 2021、2023 年实测锈蚀数据

钢构件	2013 年初始厚度/mm	年份	最大锈蚀深度/mm
钢护筒	16	2021	1.63
		2023	1.70
靠船构件	16	2021	1.76
		2023	2.79
纵、横撑	20	2021	1.73
		2023	1.86

将 2021 年最大锈蚀深度 1.76 mm 及 2023 年最大锈蚀深度 2.79 mm 代入式(1), 可求出参数  $A=0.36$ 、 $n=1.14$ 。绘制内河干湿交替环境下钢构件平均腐蚀深度随使用时间的变化过程, 见图 15。可以看出, 按照幂函数预测钢构件的使用寿命, 使用 28 a 钢护筒、靠船构件会被完全锈蚀; 使用 34 a 钢纵、横撑会被完全锈蚀, 远低于钢构件的设计使用寿命。

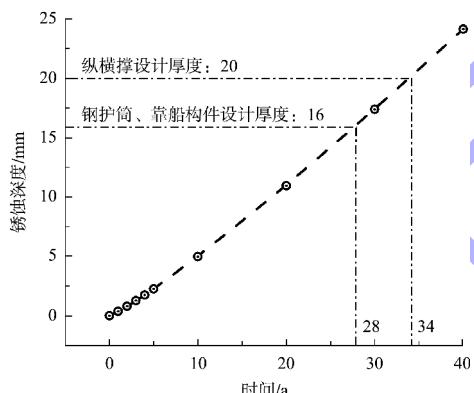


图 15 钢构件寿命预测曲线

#### 4 结论

1) 本文明确了枢纽港水工钢构件时空分布规律: 高程越高锈蚀厚度越小; 迎水面比侧水面、背水面锈蚀更严重; 服役时间越长, 钢构件锈蚀越严重。

2) 本文探明了水工钢构件重点防锈区域分别为各构件的迎水面区域、水位变动区的下部区域; 重点防锈构件为钢纵、横撑以及靠船构件。

3) 本文构建了内河水沙环境下依托工程的水工钢构件锈蚀模型, 根据钢构件锈蚀模型预测枢纽港钢构件服役寿命为 28 a。

4) 本文对最大的铁公水联运枢纽港水工钢构件锈蚀特征时空分布规律的研究成果, 可为其他未建设的内河枢纽港水工钢构件厚度选择、为已建设的内河枢纽港水工钢构件防护区域选择提供相关科学依据, 为进一步预测内河各枢纽港水工钢构件服役寿命提供参考标准, 为内河枢纽港码头结构长期服役性能研究奠定坚实基础。

#### 参考文献:

- [1] 陈刚, 刘明维, 张小龙, 等. 内河钢构件防腐现状及存在问题分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(1): 12-15.
- [2] 熊家志. Q345 钢材在多相射流中冲蚀行为的实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [3] 王煜成, 张逢伯, 许清风. 锈蚀对既有钢结构性能影响研究进展[J]. 施工技术, 2020, 49(9): 34-40.
- [4] 张风杰. 锈蚀后薄壁圆钢管混凝土柱承载性能退化机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [5] 刘明维, 吴林健, 阿比尔的, 等. 重庆果园港水工钢构件服役状态现场检测监测[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [6] 侯迪, 罗永峰. 钢结构腐蚀问题研究进展[C]//中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会. 绿色建筑与钢结构技术论坛暨中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会第五届全国学术研讨会论文集. 北京: 中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会, 2017: 141-144.
- [7] 潘金龙, 梁鸿宇, 张恩旺, 等. 海洋环境下腐蚀钢结构力学性能研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36 (8): 125-128.
- [8] 徐善华, 王友德, 王皓, 等. 腐蚀环境既有钢结构性能评估与提升关键技术[R]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [9] 姜军, 王军阳, 金武俊, 等. 带肋钢腐蚀及其防腐蚀技术研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41 (4): 439-449.
- [10] 程洋. 酸性大气环境下锈蚀钢框架结构抗震性能及地震易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [11] 朱锡昶, 朱雅仙, 葛燕, 等. 运行 10 年高桩码头腐蚀状况及特点[J]. 水运工程, 2003(9): 11-15.

(下转第 48 页)