



# 三峡船闸输水廊道反弧门涂层失效及 腐蚀原因分析<sup>\*</sup>

秦永坤<sup>1</sup>, 李伟雄<sup>2</sup>, 李 岩<sup>1</sup>, 朱锡昶<sup>1</sup>, 韩亦森<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024; 2. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北宜昌 443133)

**摘要:** 为保障三峡船闸输水廊道反弧门的运行安全, 在 2021 和 2022 年三峡船闸计划性停航检修期间, 对南北两线船闸反弧门的腐蚀状况进行检测和评估, 分析其防腐蚀涂层起泡破坏及门体腐蚀的原因。结果表明, 反弧门涂层存在大面积起泡、剥落, 门体及构件的局部腐蚀问题凸显, 涂层损伤及锈蚀面积约占反弧门检测面积的 20%。反弧门原有涂装材料和热喷锌层仍能发挥防腐蚀作用, 尚不需要进行大面积维修, 但对于局部腐蚀和涂层破坏明显的区域, 应及时修复, 并加强检测、维护, 避免发生腐蚀失效威胁门体安全。同时, 针对反弧门遭受的高速水流冲蚀、空蚀以及电偶腐蚀耦合破坏问题, 提出进行反弧门表面高弹、抗冲耐磨防护材料修复以及施加牺牲阳极阴极保护防护试验研究的建议。

**关键词:** 三峡船闸; 反弧门; 涂层失效; 腐蚀

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0106-06

## Reasons for coating failure and corrosion of reversed radial gate in water conveyance gallery of Three Gorges ship lock

QIN Yongkun<sup>1</sup>, LI Weixiong<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZHU Xichang<sup>1</sup>, HAN Yimiao<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;  
2. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

**Abstract:** To guarantee the service safety of reversed radial gate in water conveyance gallery of Three Gorges ship lock, the planning maintenance is conducted in the suspended shipping periods of 2021 and 2022, respectively. The coating failure and corrosion situations of reversed radial gate in water conveyance gallery are detected and evaluated during these periods. The reasons for anti-corrosion coating blistering and steel gate corrosion are analyzed in detail. The results show that the blistering and flaking of anti-corrosion coatings are presented widely on these reversed radial gates of Three Gorges ship lock. In special, local corrosion occurs on the steel gates as well as their components. The total area of coating damage and corrosion is in a proportion of about 20 percent of the detected region for each reversed radial gate. The retained organic coating and thermal-sprayed zinc layer can still play a role in preventing the reversed radial gate against corrosion, giving rise to a fact that the large area maintenance is not an urgent requirement. However, the local corrosion and coating failure areas need to be repaired in time followed by the strengthened detection and maintenance so as to avoid the threat to the safety of reversed radial gate. Meanwhile, the research in terms of high elastic, impact-resistant materials repairment and the sacrificial anode cathodic protection application is suggested to conduct on the reversed radial gate of Three Gorges ship lock, which is expected to suppress the coupling damage from erosion, cavitation erosion and galvanic corrosion.

**Keywords:** Three Gorges ship lock; reversed radial gate; coating failure; corrosion

收稿日期: 2022-12-28

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

作者简介: 秦永坤 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水利水电工程金属结构腐蚀与防护研究。

通讯作者: 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。E-mail: liy@nhri.cn

反弧门是船闸输水廊道供水常见的阀门形式, 其操作条件通常为动水开门、静水闭门。由于反弧门长期服役于苛刻的水下动水工况, 持续遭受高水头、高流速、泥沙冲蚀、空泡腐蚀等复杂因素的影响, 容易发生振动破坏、腐蚀、变形等门体破坏问题, 严重时会威胁到船闸的运行安全。尤其是反弧门的腐蚀破坏具有持续性, 在空蚀、冲蚀、锈蚀等耦合作用下, 阀门的腐蚀速度将会明显加速。

三峡船闸输水廊道反弧门采用横梁全包式结构, 阀门面板采用0Cr22Ni5Mo3N不锈钢复合钢板, 与支臂焊接形成整体框架结构。顶止水和侧止水为橡塑复合止水橡皮, 底止水为0Cr18Ni9N不锈钢材料的刚性止水, 与门叶顶紧拼焊。反弧门加工制造时采用热喷锌加涂料封闭的防腐蚀涂层体系, 涂层设计自基体向外依次为热喷锌层(厚度大于160 μm)、磷化底漆封闭层(干膜厚度20 μm)和氯化橡胶面漆(干膜厚度100 μm)。在船闸计划性停航检修期间, 发现反弧门表面防腐蚀涂装材料存在大量起泡、剥落失效的问题, 局部发生钢基体腐蚀。因此, 及时分析反弧门涂层失效及腐蚀发生的原因, 对指导船闸反弧门后期防腐检修、避免因腐蚀影响反弧门安全运行具有积极的意义。

## 1 测试方法

涂层破坏及腐蚀区域一般为不规则形状, 用尺无法量出精确尺寸。通常, 参照规范中的标准图片, 对涂层起泡、剥落以及腐蚀面积等参数进行评定, 确定损伤区域占检查区域总面积的百分比, 进而估算出相应面积值<sup>[1-2]</sup>。蚀坑平均深度、最大深度等是影响材料应用的重要参数。采用带有金属探针的百分表, 测量蚀坑底部与基准面的高度差, 以主要检查面上测量点平均值作为局部腐蚀深度指标<sup>[3]</sup>。

## 2 反弧门涂层失效及腐蚀状况

三峡船闸反弧门在闸首左右两侧对称设置, 北线反弧门分为北侧(N)和中北侧(MN), 南线反弧门分为南侧(S)和中南侧(MS), 反弧门按1#~6#闸首顺序依次编号1~6。反弧门检测区域包括

门叶上游框架面、支臂上圆弧包板、支臂侧面板、支臂下圆弧包板和支铰梁, 其中1#、6#闸首反弧门检测面积约为355 m<sup>2</sup>/扇, 2#~5#闸首反弧门检测面积约为270 m<sup>2</sup>/扇。北线和南线船闸反弧门防腐蚀涂层厚度检测结果见图1。可以看出, 反弧门门叶和支臂涂层干膜厚度平均检测值均超过400 μm, 其中MN-4反弧门的涂层厚度相对较低, 但最小值大于300 μm。船闸反弧门涂层起泡、剥落及门体腐蚀面积见图2。可以看出, 北、南线三峡船闸反弧门门体表面涂层起泡、剥落总面积均在30 m<sup>2</sup>以上, 最大涂层损坏面积达73 m<sup>2</sup>, 其中北线船闸反弧门涂层损坏比例在10%~16%, 南线反弧门涂层损坏比例略高于北线, 在15%~24%。反弧门门体腐蚀面积总体上小于10 m<sup>2</sup>, 约占反弧门检测面积的1%~4%。整体上, 门叶上游框架面及框架内存在涂层大面积起泡现象, 起泡面积处于20~35 m<sup>2</sup>, 门叶起泡大小等级均为S5级(直径大于5 mm), 起泡密度等级在2~5级。局部起泡区破损后发生涂层剥落现象, 剥落大小等级为S5(a)级, 以涂层间剥落为主, 部分起泡层破坏后出现腐蚀产物, 见图3a)、b)。反弧门支臂起泡面积基本达到10 m<sup>2</sup>以上, 部分支臂的起泡面积接近35 m<sup>2</sup>, 支臂侧面板存在大片面漆剥落现象。支铰梁表面涂层以起泡为主, 局部表面出现面漆剥落, 无明显腐蚀发生, 见图3c)。

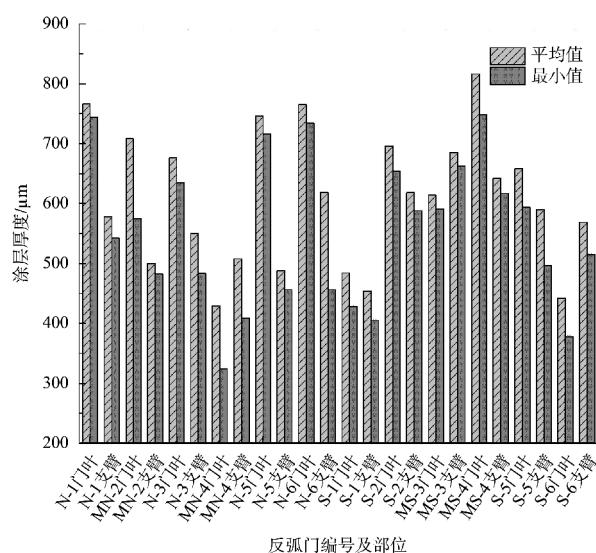


图1 船闸反弧门门叶和支臂防腐蚀涂层厚度检测结果

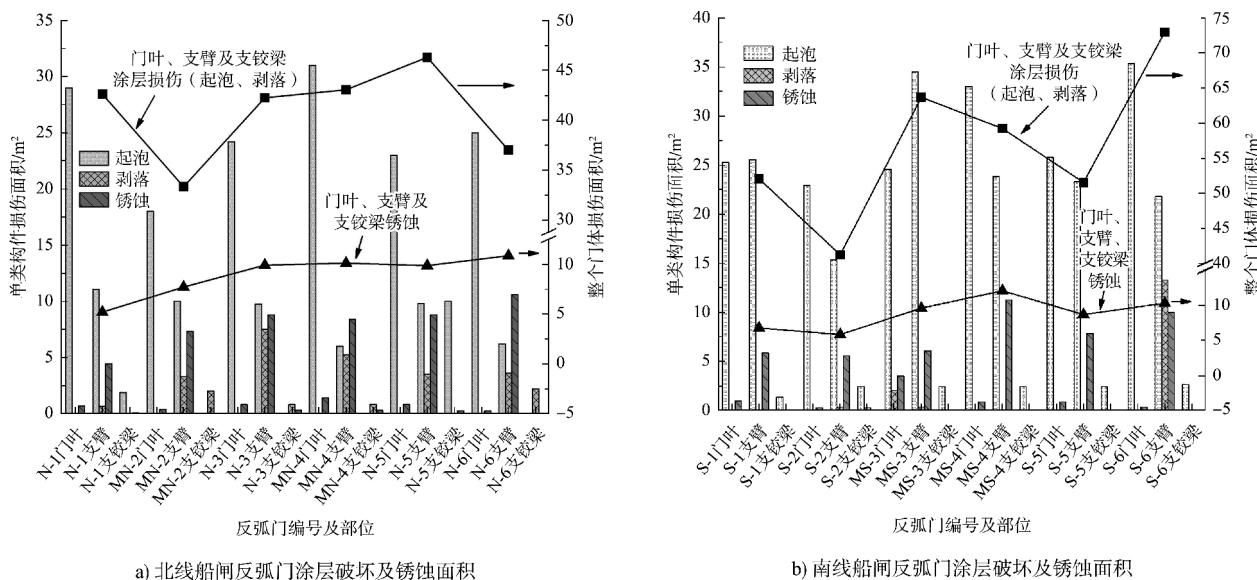


图 2 船闸输水廊道反弧门涂层破坏及锈蚀面积



图 3 门叶上游框架面及框架内涂层起泡状况

### 3 原因分析与讨论

#### 3.1 反弧门防腐蚀涂层破坏原因

由于三峡船闸输水廊道反弧门常处于水下环境, 不易检修, 停航检修期内, 输水廊道内空气湿度大, 难以保证防腐蚀涂层维修的质量和效果, 导致原有防腐蚀涂装材料接近甚至达到设计保护年限(20 a 以上)的情况下<sup>[4]</sup>, 反弧门各部件表面普遍存在涂层损伤、失效问题。

涂层起泡过程是一个多种原因影响的复杂过程, 涉及渗透压起泡、阳极起泡、阴极起泡等,

其中阴极反应诱发的渗透压起泡是研究人员最为关注的涂层起泡形式<sup>[5-6]</sup>。反弧门涂层起泡的破坏过程主要分为 2 个阶段: I-涂料层/喷锌层起泡、II-钢基体腐蚀, 见图 4。第 1 阶段如图 5a) 所示, 在水流持续冲刷作用下, 反弧门表面涂料层容易产生大量微缺陷, 水介质和溶解氧穿过微缺陷渗透到涂料/喷锌层界面。由于热喷锌过程中存在锌的氧化现象, 部分氧化物夹杂成为阴极区与高纯度锌构成腐蚀微电池, 锌层发生阳极溶解, 在阴极区生成腐蚀产物。如图 4 的白色标记区所示,

将表面起泡层清除后, 裸露出未完全消耗的喷锌层及白色腐蚀产物, 通常为锌的氧化物或碳酸化合物, 疏松的腐蚀产物会导致涂层体积膨胀、起泡<sup>[7-9]</sup>。另一方面, 在开始阶段阴极和阳极区域基本在同一个位置, 但随着  $O_2$  在阴极区的还原消耗和腐蚀产物的附着, 原阴极区反应停止, 而其他区域  $O_2$  充足, 形成分离的阴极区和阳极区。阴极区  $OH^-$  不断积累,  $pH$  值升高, 使得起泡内部与涂层外表面形成渗透压梯度, 加速外部水分的渗透, 加上  $OH^-$  对涂料层附着力的削弱作用, 发生涂层阴极起泡长大。第 2 阶段如图 5b)、c) 所示, 由于锌层的消耗, 喷锌层微孔隙增多, 水和溶解氧渗透到喷锌层/钢基体界面, 锌层作为牺牲阳极区, 与底部钢基体形成宏观腐蚀电池, 在双重极化作用下, 锌层加速阳极溶解。随着锌层腐蚀殆尽, 难以对裸露钢基体形成连续阴极保护, 局部钢基体开始发生阳极溶解, 生成腐蚀产物(图 4 的 II 标记区), 加剧涂层起泡、剥落。

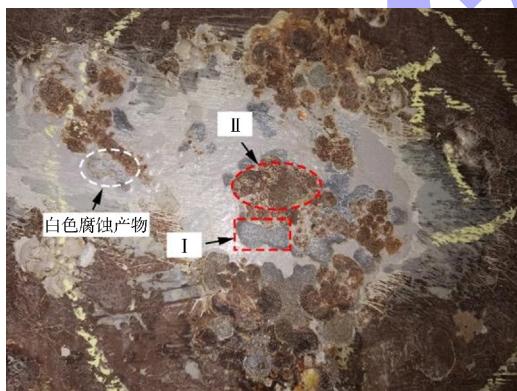
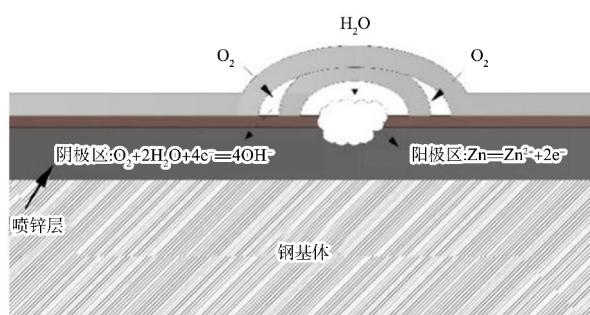
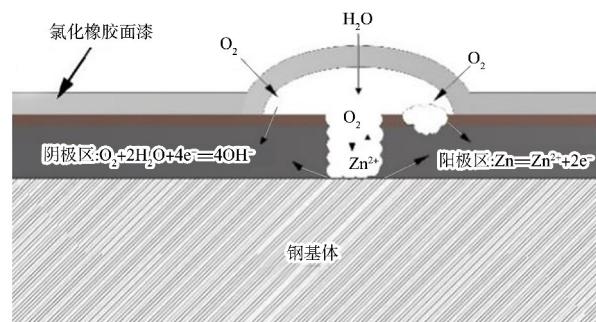


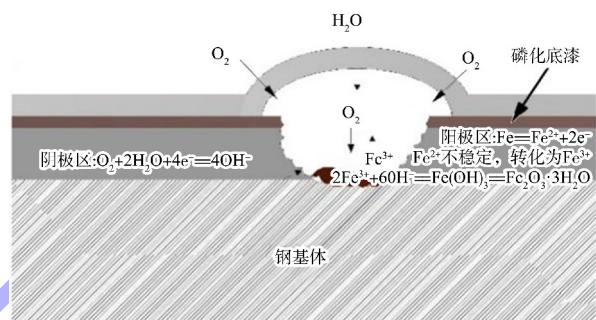
图 4 反弧门涂层起泡破坏状况



a) 涂料层/喷锌层起泡



b) 锌层消耗, 裸露出喷锌层/钢基体界面



c) 钢基体腐蚀, 形成腐蚀产物

图 5 反弧门涂层起泡、锈蚀过程

### 3.2 反弧门腐蚀原因

反弧门腐蚀主要发生在支臂和门叶框架面, 腐蚀总面积普遍在 5~12 m<sup>2</sup>(图 1)。反弧门支臂各构件涂层起泡及锈蚀状况见图 6。可以看出, 支臂上圆弧包板涂层起泡密度相对较低, 部分破裂后裸露出喷金属层和钢基体, 蚀斑零星分布; 支臂下圆弧包板, 涂层起泡区密集成片, 表面存在大量蚀斑、蚀坑, 部分蚀坑深度大于 2 mm, 局部最大坑深达 4 mm 以上, 见图 7。该船闸每级闸首输水廊道反弧门尺寸、最大工作水头等特征参数存在差异, 部分反弧门的最大工作水头超过 45 m。反弧门启闭过程中产生高速水流, 与支臂下圆弧包板形成冲角, 长期冲刷会造成涂层疲劳损伤和微裂纹萌生, 进而腐蚀介质通过损伤缺陷渗透到防腐涂层, 引发腐蚀反应, 导致涂层起泡、剥落。此外, 高速水流的持续冲刷会加速去极化剂  $O_2$  和腐蚀产物的传质过程, 在反弧门表面难以形成腐蚀产物堆积和有效的钝化膜, 加速钢基体的腐蚀<sup>[10-11]</sup>。另一方面, 伴随反弧门的启闭动作, 反弧门段水流流速、形态变化复杂, 尤其当涡流和

漩涡产生紊流剪切时, 易诱发水流空化, 空泡溃灭形成的微射流和热效应会进一步加剧涂层的损伤<sup>[12-13]</sup>。



a) MS-4 反弧门上圆弧包板



b) N-5 反弧门下圆弧包板



c) N-1 反弧门下圆弧包板与门叶连接处



d) N-6 反弧门下圆弧包板与门叶连接处

图 6 反弧门支臂各构件涂层起泡及锈蚀状况

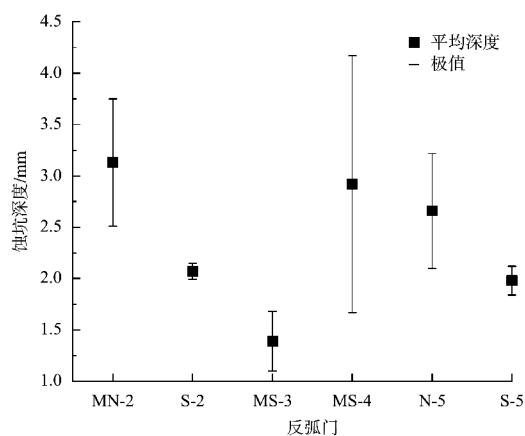


图 7 反弧门支臂下圆弧包板局部蚀坑深度

反弧门门叶上游框架面的腐蚀状况见图 8。可以看出, 在距门叶底缘 25 cm 处存在一条横向延伸的腐蚀带, 宽约 15 cm, 该区域涂层破损, 钢基体腐蚀明显, 出现大量的腐蚀产物。结合反弧门选材设计资料发现, 反弧门采用 0Cr18Ni9N 不锈钢材料的刚性底止水, 与门叶顶紧拼焊, 底止水板上边缘与反弧门底缘间距为 25 cm。在高速水流冲刷、空化等复杂因素作用下, 反弧门表面防腐蚀涂层的损伤很难避免, 导致喷锌层或钢基体层局部裸露。由于不锈钢板与钢基体以及表面的热喷涂锌层存在较大的电位差, 形成电偶腐蚀电池, 使得不锈钢止水的腐蚀受到抑制, 喷锌层或钢基体腐蚀加速<sup>[14]</sup>。此外, 高速水流和腐蚀的持续耦合作用, 会造成钢表面钝化膜的破裂和腐蚀产物的剥落, 使钢处于活性溶解状态, 大量的金属材料不断以离子形式脱离表面, 导致阳极反应速率加快<sup>[15]</sup>。



a) N-1 反弧门门叶



图8 反弧门门叶上游框架面距底缘 25 cm 处腐蚀状况

#### 4 结语

1) 三峡船闸输水廊道反弧门防腐蚀涂装材料起泡、剥落及闸门腐蚀问题普遍存在, 单扇反弧门涂层损伤和锈蚀的总面积在 47~83 m<sup>2</sup>, 约占反弧门检测面积的 20%。

2) 反弧门防腐涂层起泡破坏分为 2 个阶段: 第 1 阶段, 涂料层产生微缺陷, 热喷锌层开始反应溶解, 在涂料层/喷锌层界面起泡; 第 2 阶段, 热喷锌层消耗殆尽, 局部钢基体腐蚀加速。高速水流、空化及电偶腐蚀等因素的耦合作用, 会加剧反弧门上游侧防腐蚀涂层的失效和钢基体的腐蚀。

3) 反弧门支臂下圆弧包板与门叶以及门叶底止水与门叶拼焊区域, 局部腐蚀问题凸显, 应及时维修恢复, 建议通过试验探讨高弹或抗冲耐磨

类材料的修复效果。

4) 建议开展反弧门表面牺牲阳极阴极保护试验研究, 探讨高速水流冲蚀、空化环境下三峡船闸反弧门实施阴极保护的作用效果。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 武汉材料保护研究所. 金属基体上金属和其他无机覆盖层经腐蚀试验后的试样和试件的评级: GB/T 6461—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [3] 中国船舶重工集团公司第七二五研究所. 船舶及海洋工程用金属材料在天然环境中的海水腐蚀试验方法: GB/T 6384—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [4] 田连治. 三峡二期工程金属结构防腐蚀涂装体系设计 [J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 40-45.
- [5] 付东兴, 徐滨士, 张伟, 等. 有机涂层起泡微观机制研究进展 [J]. 材料保护, 2007, 40(2): 42-45, 1.
- [6] 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.
- [7] 张青松, 高杰维, 王超群, 等. 热喷锌、冷喷锌与富锌涂料三种涂层的耐蚀性对比 [J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(12): 903-908, 913.
- [8] 林学亮, 王友彬, 辛延琛, 等. 热浸镀锌层界面的微区电化学腐蚀行为表面技术 [J]. 表面技术, 2022, 51(9): 217-225.
- [9] 杨军华, 王伟, 陈旭, 等. 某电子装备平台热喷锌涂层体系腐蚀失效分析及对策 [J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(24): 1817-1822.
- [10] 代真, 沈士明, 丁国铨. 金属在固液两相流体中的冲刷腐蚀及其防护 [J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(2): 86-89.
- [11] 刘明维, 曾丽琴, 余杰, 等. 内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 115-122.
- [12] 葛晗, 杜川, 陈皓生. 空蚀坑周围彩虹区的形成机理 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 328-332.
- [13] 胡亚安, 张瑞凯, 郑楚珮. 反弧形输水阀门底缘空化减免措施研究 [J]. 水利水运科学研究, 1994(Z1): 71-79.
- [14] 张泽群, 陈质彬, 董其娟, 等. 低合金钢、不锈钢和铝镁合金在模拟深海环境中的电偶腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 417-424.
- [15] 乔岩欣, 王硕, 刘彬, 等. 新型高氮钢的腐蚀和空蚀交互作用研究 [J]. 金属学报, 2016, 52(2): 233-240.

(本文编辑 王璁)