



## 沉管隧道钢壳在海水中的加速腐蚀

高倩钰 曹航 金文良 张晓虎 刘媛媛

### Accelerated corrosion of the steel shell of an immersed tube tunnel in seawater

GAO Qian-yu, CAO Hang, JIN Wen-liang, ZHANG Xiao-hu, LIU Yuan-yuan

引用本文:

高倩钰, 曹航, 金文良, 张晓虎, 刘媛媛. 沉管隧道钢壳在海水中的加速腐蚀[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(6): 941–948. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.09.001

GAO Qian-yu, CAO Hang, JIN Wen-liang, ZHANG Xiao-hu, LIU Yuan-yuan. Accelerated corrosion of the steel shell of an immersed tube tunnel in seawater[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(6): 941–948. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.09.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.09.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 6005A铝合金的表面损伤对其耐海水腐蚀性能的影响

Effect of surface damage on the corrosion resistance of 6005A aluminum alloy in simulated seawater  
*工程科学学报*. 2018, 40(1): 92 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.01.012>

#### 2507双相不锈钢在SO<sub>2</sub>污染模拟海水中的腐蚀行为

Corrosion behavior of 2507 duplex stainless steel in simulated SO<sub>2</sub>-Polluted seawater  
*工程科学学报*. 2018, 40(5): 587 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.05.009>

#### 夹杂物对Q235钢耐腐蚀行为的影响

Effect of inclusions on corrosion resistance of carbon steel  
*工程科学学报*. 2020, 42(S): 27 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.25.s05>

#### 经济型耐腐蚀钢中氧作用的研究

Effect of oxygen on economical corrosion resistant steel  
*工程科学学报*. 2021, 43(7): 960 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.29.001>

#### L80钢在高流速湿气环境中冲蚀–腐蚀行为的环路实验

Erosion–corrosion behavior of L80 steel under high velocity wet gas condition by flow loop method  
*工程科学学报*. 2018, 40(9): 1091 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.09.010>

#### γ预辐照对管流冲刷条件下铍在EDM–1中腐蚀性能的影响

Corrosion of beryllium in EDM–1 fluid after γ pre-irradiation  
*工程科学学报*. 2018, 40(12): 1518 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.12.010>

# 沉管隧道钢壳在海水中的加速腐蚀

高倩钰<sup>1)</sup>, 曹航<sup>1)</sup>, 金文良<sup>2)✉</sup>, 张晓虎<sup>1)</sup>, 刘媛媛<sup>1)</sup>

1) 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088 2) 深中通道管理中心, 中山 528400

✉通信作者, E-mail: [56194030@qq.com](mailto:56194030@qq.com)

**摘要** 沉管隧道置于不易检查和维护的海泥区域, 其钢壳结构受到海水的侵蚀, 会缩短其服役周期, 腐蚀严重则会影响沉管隧道的安全运行。深中通道(又称“深中大桥”)是国内首个钢壳式沉管隧道, 耐久性要求 100 年, 针对深中通道钢壳混凝土沉管的服役环境及超高的耐久性要求等诸多特征, 且目前国内外可以借鉴的工程和研究很少, 因此需要研究揭示钢壳外壁在海洋环境下的腐蚀机理和腐蚀发展规律。本文采用室内腐蚀模拟加速试验及电化学分析测试等, 对深中通道沉管隧道钢壳所用 Q390C 低合金高强度结构钢在模拟海水条件下的腐蚀发生发展规律进行研究。研究发现 Q390C 在海水中腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$  和  $\gamma\text{-FeOOH}$  及少量  $\text{CaCO}_3$ , 其均匀腐蚀和局部腐蚀速率都呈指数关系下降, 最终趋于稳定。

**关键词** 深中通道; 沉管钢壳; Q390C; 海水腐蚀; 加速腐蚀; 腐蚀研究

**分类号** TB304

## Accelerated corrosion of the steel shell of an immersed tube tunnel in seawater

GAO Qian-yu<sup>1)</sup>, CAO Hang<sup>1)</sup>, JIN Wen-liang<sup>2)✉</sup>, ZHANG Xiao-hu<sup>1)</sup>, LIU Yuan-yuan<sup>1)</sup>

1) Central Research Institute of Building and Construction Co. Ltd. MCC Group, Beijing 100088, China

2) Shenzhong Link Management Center, Zhongshan 528400, China

✉ Corresponding author, E-mail: [56194030@qq.com](mailto:56194030@qq.com)

**ABSTRACT** China is rich in marine resources, and with the development of its economy and the improvement of its transportation level, the use of immersed tunnel technology is increasingly more extensive. The Shenzhen–Zhongshan Bridge is the first steel shell immersed tunnel in China. The immersed tunnel is located in a sea mud area that is not easy to inspect and maintain, and its steel shell structure is eroded by seawater, which shortens its service cycle, and severe corrosion affects its safe operation. Its durability requirement is 100 years. For the service environment and ultrahigh durability requirements of the Shenzhen–Zhongshan Bridge steel shell concrete immersed pipe and many other characteristics, at present, few engineering and research references at home and abroad can be used. Thus, the corrosion development law of the outer wall of an immersed steel shell in a marine environment must be studied and revealed. In this work, dissolved oxygen ( $15.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) was artificially added to a simulated seawater solution as a depolarizing agent to realize the acceleration process of a corrosion simulation acceleration test in the laboratory. The test set cycle was 1, 7, 15, 30, 90, 180, and 365 d, and the test temperature was  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Through the electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the Tafel polarization curve, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), confocal laser scanning microscopy (CLSM), and other analytical and testing methods of samples with different test cycles, the corrosion occurrence and development law of Q390C low-alloy high-strength structural steel used in deep–medium channel immersed tunnel steel shells under simulated seawater conditions was studied. The corrosion products of Q390C steel in seawater are mainly found to be  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\alpha\text{-FeOOH}$ ,  $\gamma\text{-FeOOH}$ , and a small amount of  $\text{CaCO}_3$ , and their uniform corrosion and local corrosion rates decrease exponentially and eventually tend to stabilize. CLSM test shows that the surface of the specimen begins to corrode uniformly after a test cycle of 15 d, and the pitting corrosion pit

收稿日期: 2022–09–09

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B111105002)

depth of the specimen with a test cycle of 365 d can reach 99  $\mu\text{m}$ . The long-term accelerated corrosion test of the steel shell of an immersed tunnel in seawater in this paper is of great importance to ensure the long-life durability of immersed tunnels in marine engineering and similar construction projects.

**KEY WORDS** Shenzhen–Zhongshan Bridge; immersed steel shell; Q390C; seawater corrosion; accelerated corrosion; corrosion research

近年来,随着交通基础设施的全面发展,沉管隧道技术在国内外应用日益普遍。而我国许多大城市都位于河道两侧及支流河口一带,为了发展经济,开拓新的交通通道迫在眉睫。沉管隧道具有埋设深度浅、通行能力大、与两岸道路连接较好、增加隧道周边用地价值、防水效果好等优势,沉管隧道工程建设在国民经济活动和交通领域起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。目前,沉管隧道施工技术已应用于国内外工程,如港珠澳大桥海底沉管隧道、丹麦–瑞典阿勒海峡沉管隧道、丹麦–德国费尔曼湾沉管隧道和美国 FortMcHenry 隧道<sup>[3-5]</sup>。深中通道是全球第一条大面积使用钢壳混凝土复合结构的沉管隧道<sup>[6]</sup>,其耐久性防护体系由防腐涂层、牺牲阳极的阴极保护及腐蚀裕量 3 部分组成<sup>[7]</sup>,其设计使用寿命为 100 年。沉管隧道置于后期不易检查和维护的回填石和海底海泥区域,钢壳混凝土沉管隧道钢壳外壁处于复杂腐蚀环境中,在制造和安装过程中涂层缺陷、回填石块造成的冲击及海水对涂层的老化侵蚀等综合因素影响下,形成了“复杂体系”的电化学腐蚀过程<sup>[7-8]</sup>。目前国内外对沉管钢壳结构外壁在复杂海洋环境中多种因素作用下的电化学腐蚀机理及腐蚀发生发展规律研究较少,故针对深中通道钢壳混凝土沉管的严苛服役环境及超高的耐久性要求等诸多特征,开展研究揭示沉管钢壳外壁在海洋环境下的腐蚀机理及腐蚀发展规律,对保障沉管隧道钢壳长寿命耐久性具有重要意义。

海水侵蚀会降低海洋工程钢结构的强度,严重影响钢结构的安全性能和使用寿命。海洋环境腐蚀情况十分复杂,受水温、盐分和 pH 等因素的影响<sup>[9-12]</sup>。目前常用的海洋工程钢腐蚀环境评价方法为实海挂片试验法,但实海挂片试验方法时间长、成本高且存在试样丢失的风险,不能适应新型工程钢材料的推广应用,因此可以采用实验室模

拟加速试验方法在短时间内对海洋工程钢的耐腐蚀性进行研究和评价。国内外的海水模拟加速试验大多是采用搅拌和加热的方式,如实况海水冲刷腐蚀实验<sup>[13]</sup>、周浸和干湿交替复合循环和湿热交替等加速腐蚀实验<sup>[14-15]</sup>。综合多方面考虑,通过搅拌和加热的方式进行模拟加速效果均受到一定限制。本文通过加入去极化剂增加了阴极去极化作用,从而达到了加速腐蚀程度的目的。为减小试验误差,开展为期 1 年的室内腐蚀模拟加速试验及电化学分析测试,对深中通道沉管隧道钢壳所用 Q390C 钢在模拟海水条件下的腐蚀行为进行了分析和探讨。

## 1 试验方法

试验材料为低合金钢 Q390C,综合力学性能好,焊接性、冷加工性能和耐蚀性能好,并具有良好的低温韧性<sup>[16-17]</sup>,其主要化学成分见表 1,电解质为模拟海水。腐蚀试样尺寸 50 mm × 13 mm × 3 mm,电化学试样尺寸 10 mm × 10 mm × 3 mm,背面用铜导线连接并用环氧树脂密封,工作面积为 1 cm<sup>2</sup>。电化学测试设备为 PARSTAT P3000A 电化学工作站,使用三电极体系,参比电极为饱和甘汞(SCE),辅助电极为铂片。为了模拟 Q390C 钢的使用环境,使用基于 ASTM D11141-98 标准<sup>[18-19]</sup>的人工海水作为试验溶液。该溶液的化学成分包括 24.53 g·L<sup>-1</sup> NaCl、11.10 g·L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、4.09 g·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、0.20 g·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>、0.70 g·L<sup>-1</sup> KCl、1.16 g·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>、0.10 g·L<sup>-1</sup> KBr。试验采用人为添加溶解氧质量浓度为 15.2 mg·L<sup>-1</sup> 来加速试验的进程<sup>[20]</sup>,用溶解氧仪测定海水中的溶解 O<sub>2</sub> 浓度,模拟海水溶液 pH 值参考实际海水参数为 7.8 ~ 8.2。

依次采用 240#、400#、600#、800#和 1200#砂纸研磨试样表面,然后用蒸馏水和无水乙醇擦拭,用精度为 0.01 mg 的分析天平称量各试样的原始

表 1 Q390C 的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	V	Al	Fe
0.20	0.50	1.70	0.03	0.03	0.30	0.50	0.05	0.13	0.015	Bal.

质量<sup>[21]</sup>。试验过程中设定的时间周期为 1、7、15、30、90、180 和 365 d, 每个试验周期有 3 个平行试样, 试验温度为 25 °C。试验采用挂片法, 试验设备为自制试验箱。试验结束后依据 GB/T 16545—2015<sup>[22]</sup> 采用化学除锈法清除试样表面腐蚀产物, 除锈溶液的成分组成为 0.5 L H<sub>2</sub>O + 0.5 L HCl + 20 g 六次甲基四胺, 除锈后用水和无水乙醇清洗, 冷风吹干<sup>[22-23]</sup>, 干燥 1 d 后, 用分析天平称量每个试样的质量, 将数据代入式(1), 采用失重法计算腐蚀速率:

$$R_c = \frac{87600\Delta m}{\rho t S} \quad (1)$$

式中,  $R_c$  为腐蚀速率,  $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $\Delta m$  为腐蚀的质量损失, g;  $\rho$  为试验钢物理密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 取  $7.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $t$  为腐蚀周期, h;  $S$  为试样的暴露面积,  $\text{cm}^2$ 。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 Q390C 腐蚀产物宏观分析

腐蚀模拟加速试验周期 1、7、15、30、90、180 和 365 d 后的试样宏观形貌如图 1 所示。随着试验周期的延长, 试样表面形成的稀疏海泥状的黄褐色腐蚀产物逐渐增加。在试验周期为 90 和 180 d 的试样表面明显可见多层腐蚀产物的生成, 轻轻除去表面的黄褐色腐蚀产物后, 发现接近内层的腐蚀产物致密、发黑, 与低合金钢基体结合非常紧密<sup>[24]</sup>。由于试验溶液中人为加入了大量的溶解氧,

腐蚀产物会被一定程度氧化, 具有一定磁性的黑色腐蚀产物吸附在试样基体上, 表层为黄褐色的腐蚀产物。

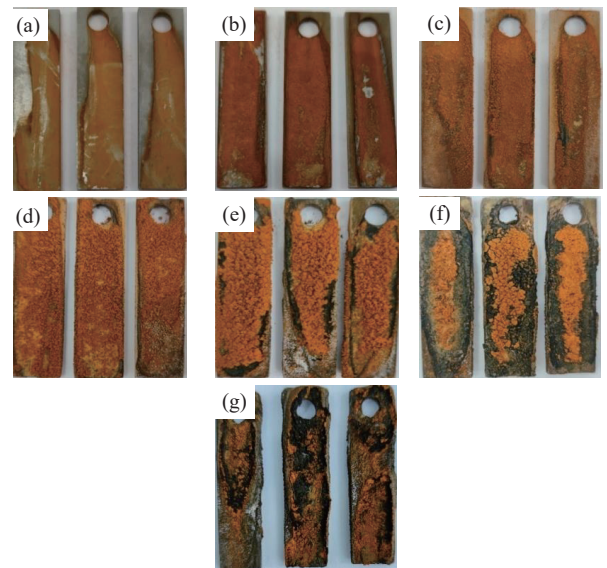


图 1 不同试验周期腐蚀模拟加速试验后试样宏观形貌。(a) 1 d; (b) 7 d; (c) 15 d; (d) 30 d; (e) 90 d; (f) 180 d; (g) 365 d

Fig.1 Photograph of the samples after corrosion simulation accelerated experiment at different test cycles: (a) 1 d; (b) 7 d; (c) 15 d; (d) 30 d; (e) 90 d; (f) 180 d; (g) 365 d

### 2.2 Q390C 腐蚀产物微观分析

图 2 是不同周期腐蚀加速试验后样品在扫描电子显微镜下的微观形态。从图中可以看出, 试验

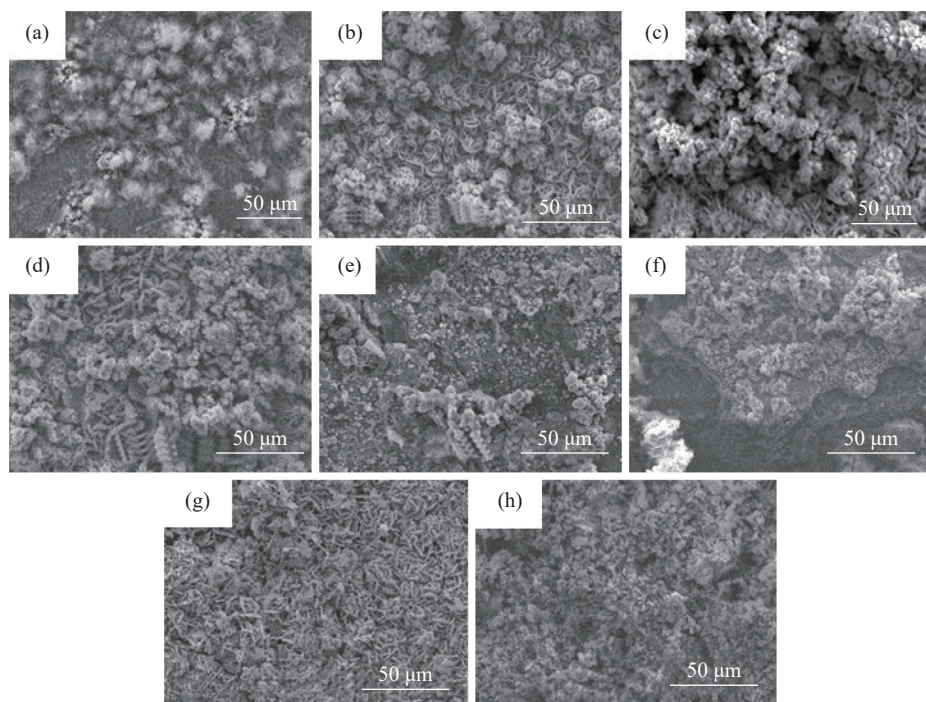


图 2 不同试验周期腐蚀模拟加速试验后试样微观形貌。(a) 1 d; (b) 7 d; (c) 15 d; (d) 30 d; (e) 90 d; (f) 180 d; (g~h) 365 d

Fig.2 SEM images of samples after corrosion simulation accelerated experiment at different test cycle: (a) 1 d; (b) 7 d; (c) 15 d; (d) 30 d; (e) 90 d; (f) 180 d; (g-h) 365 d

前期形成的锈层表面形态多为层片状和簇状, 锈层组成疏松, 具有较多的空隙<sup>[25]</sup>. 且随着试验周期的延长, 层片状减少, 簇状增多. 图 2(g)和(h)显示团簇状产物部分相连, 形成类似网状, 空隙依旧存在, 腐蚀速率虽有所降低, 但腐蚀依旧会发生. 进一步对试样进行 EDS 分析发现, 试样表面腐蚀产物主要由 Fe、O、Ca 和 Mg 等组成.

激光扫描共聚焦显微镜观察结果见图 3(只展示了部分区域的点蚀状态). 从图中可以看出, 经过 15 d 腐蚀试验的试样酸洗后在激光扫描共聚焦显微镜下观察到了点蚀坑, 且从试样整体来看, 点蚀坑随着试验周期的延长而逐渐增多, 深度也逐渐增加. 试验周期 15 d 后发现试样酸洗后表面有不均匀腐蚀, 试验周期 365 d 的试样点蚀坑深度可以达到 99 μm.

锈层形貌呈现球状结构、花瓣形式的薄层片状结构、燕窝或蜂窝状结构及蠕虫巢状的厚薄层,

这些都是  $\gamma$ -FeOOH 微观形态.  $\gamma$ -FeOOH 可以作为氧化剂被还原, 然后在  $\gamma$ -FeOOH 层与金属基板的界面上迅速生成  $Fe_3O_4$ , 对腐蚀有促进作用. 微观形貌中球状物周边出现大量针或针须状物, 该物质为  $\alpha$ -FeOOH 的典型特征, 其电化学稳定性较好, 对腐蚀有一定的抑制<sup>[26]</sup>.

使用 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射(XRD)对腐蚀产物进行物相分析, 结果如图 4 所示. 从 XRD 分析结果来看, 腐蚀产物主要包括  $Fe_3O_4$ 、 $CaCO_3$ 、 $\alpha$ -FeOOH 和  $\gamma$ -FeOOH. 对不同区域腐蚀产物进行了试验, 结果表明, 内部的黑色腐蚀产物为  $Fe_3O_4$ , 表层腐蚀产物为 FeOOH 和少量的  $CaCO_3$ , 这与之前的推测相一致, 并且与 SEM/EDS 结果相对应.

### 2.3 Q390C 腐蚀速率结果

对不同试验周期的试样按照标准进行腐蚀产物去除, 使用分析天平称量前后重量, 采用失重法进行均匀腐蚀速率的评价(表 2). 结合激光共聚焦

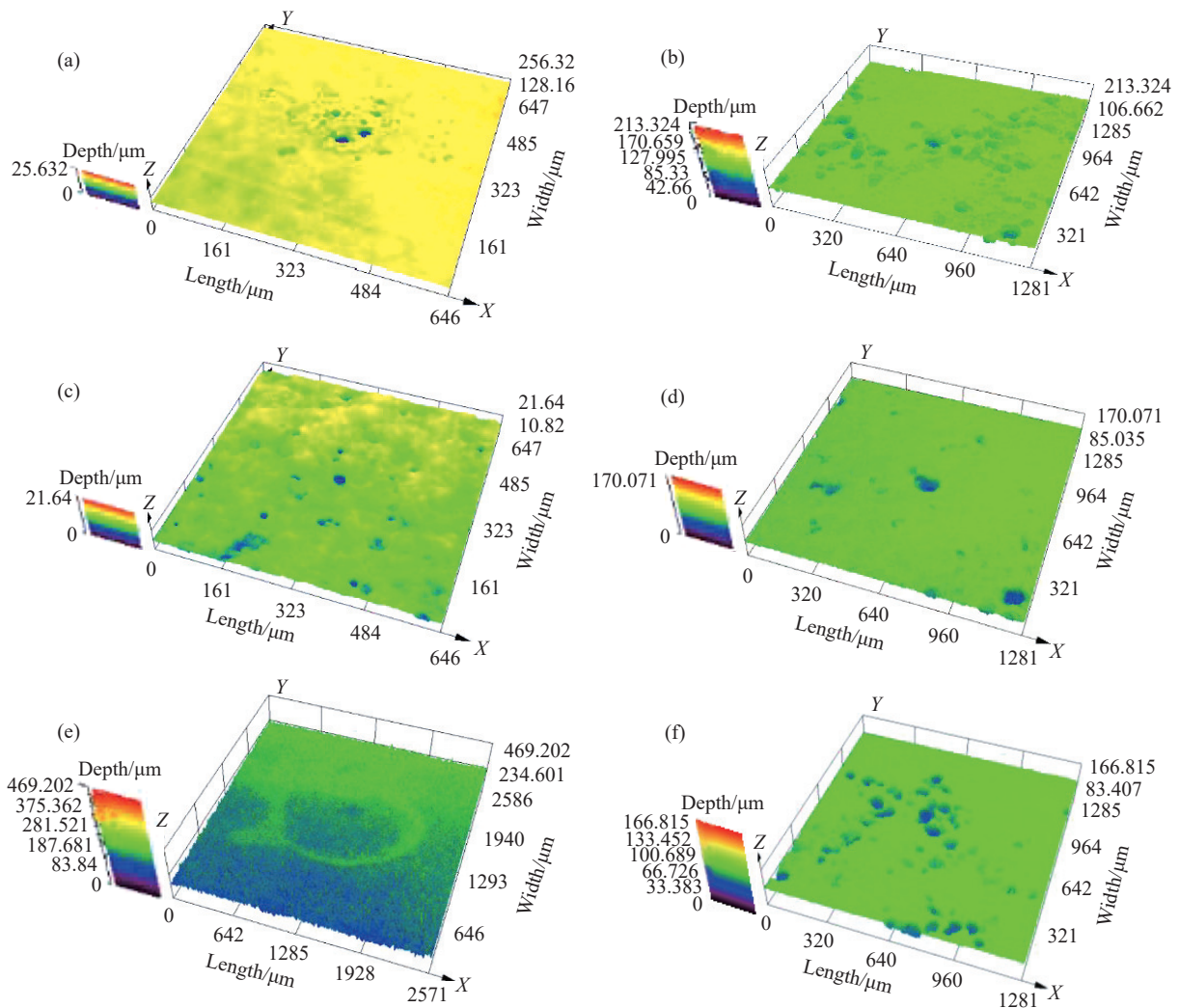


图 3 试样不同腐蚀周期的点蚀. (a) 15 d; (b) 30 d; (c) 90 d; (d) 180 d; (e~f) 365 d

Fig.3 Pitting corrosion of the sample at different test cycle: (a) 15 d; (b) 30 d; (c) 90 d; (d) 180 d; (e-f) 365 d

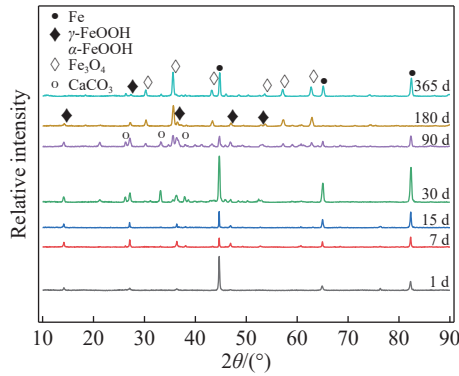


图4 不同周期试验后腐蚀产物 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of corrosion products after different cycles of experiments

显微镜下观察的试样点蚀坑深度计算局部腐蚀速率, 结果如图5所示. 随着试验周期的延长, 均匀腐蚀和局部腐蚀速率都呈指数关系下降, 且局部腐蚀速率高于均匀腐蚀速率. 试验周期1 d的试样平均腐蚀速率为  $0.3039 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ , 15 d的试样局部腐蚀速率为  $0.3731 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ , 试验周期365 d的试样平均腐蚀速率为  $0.0819 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ , 局部腐蚀速率为  $0.0990 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ . 根据美国腐蚀工程师协会 NACE 对其金属腐蚀程度分级, 试验周期365 d的试样均匀腐蚀速率属于中度腐蚀, 局部腐蚀速率为轻度腐蚀.

表2 裸钢试样在不同试验周期的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of bare steel specimens at different test cycles

Test cycle/d	Uniform corrosion rate/( $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ )	Local corrosion rate/( $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ )
1	0.3039	—
7	0.1609	—
15	0.1452	0.3731
30	0.1291	0.3569
90	0.1088	0.1663
180	0.1022	0.1136
365	0.0819	0.0990

## 2.4 Q390C 电化学测试分析

极化曲线是表示电极电位与极化电流或极化电流密度之间关系的曲线, 分析研究极化曲线, 是解释金属腐蚀的基本规律、揭示金属腐蚀机理和探讨控制腐蚀途径的基本方法之一. 通过对比极化曲线, 可以得出 Q390C 低合金高强度结构钢在不同周期加速腐蚀试验的腐蚀反应机理和腐蚀速率的变化. 图6为 Q390C 低合金高强度结构钢在模拟海水溶液中加速试验周期1、7、15、30、90、180

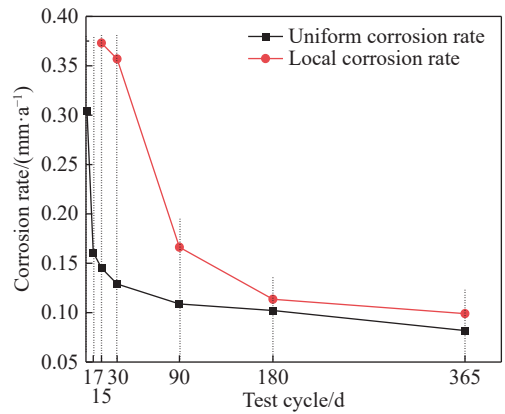


图5 不同试验周期腐蚀速率曲线

Fig.5 Corrosion rate curves of different test cycles

和365 d的 Tafel 极化曲线. 从图中可以看出, Q390C 试样在模拟海水溶液中呈现活性溶解, 未出现钝化现象, 开始时电位为正, 随着试验周期延长, 其腐蚀电位负移, 然后电位正移至  $-0.7 \text{ V vs SCE}$  左右. 在短时间内(30 d以内), 极化曲线阳极部分没有明显差异, 但是随着试验周期延长, 试样表面的腐蚀产物逐渐附着, 锈层面积逐渐增加而变厚, 阳极反应受到阻碍<sup>[27]</sup>, 极化曲线显示左移的倾向, 阳极电流减小, 自腐蚀电位正移且趋于稳定, 说明腐蚀产物的逐渐堆积, 一定程度上减缓了腐蚀的进行.

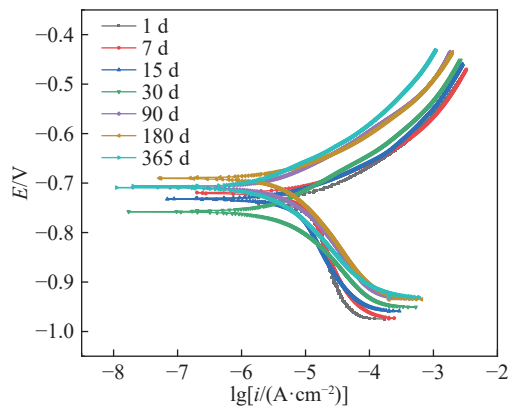


图6 不同试验周期试样的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of different experimental periods

电化学阻抗谱(EIS)也是腐蚀电化学领域常用的测量方法之一. 图7是 Q390C 低合金高强度结构钢在模拟海水溶液中加速试验1、7、15、30、90、180和365 d的电化学阻抗谱. 从图中可以看出, 试样阻抗值随腐蚀时间发生了明显的变化, 呈先减小后增大趋势. 分析这可能是由于加速试验初期, 试样由于刚刚接触富含  $\text{O}_2$  的模拟海水溶液, 腐蚀速率不断增大, 并且由于加速试验初期产生的腐蚀产物较少, 表面没有完全被铁锈覆盖, 不能

阻止  $O_2$  的扩散, 而且锈层促进电极的阴极过程, 抑制其阳极过程, 减少阻抗, 增加腐蚀速度. 随着试验周期的延长, 锈层逐渐变厚,  $O_2$  浓度减少, 因此扩散到金属基体上的  $O_2$  逐渐变少抑制氧去极化作用, 电极的阻抗变大, 腐蚀速度减慢<sup>[28]</sup>.

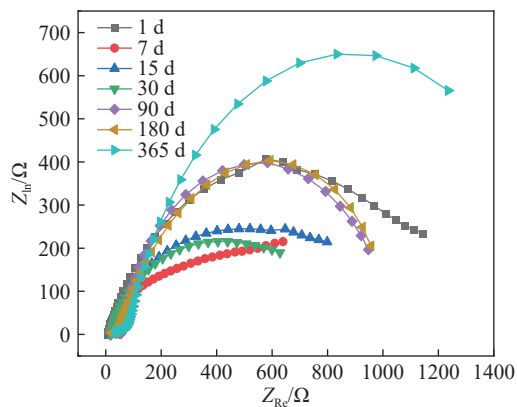


图 7 试样在不同试验周期的阻抗图

Fig.7 Impedance plot of the specimen at different test cycles

试验初期, 试样腐蚀程度较轻, 表面腐蚀产物为粗糙锈层, 随着试验周期的延长, 腐蚀产物层增厚, 引起钢在模拟海水环境中腐蚀电化学行为的变化, 最直接和最重要的变化是极化电阻  $R_p$  的变化. 为了进一步分析钢在海水中的腐蚀电化学过程, 使用 ZSimpWin 软件对 EIS 数据进行拟合分析, 所得等效电路见图 8 所示, 并求出其极化电阻  $R_p$  的值. 其中  $R_s$  代表溶液电阻,  $R_p$  代表金属基体和锈层界面的极化电阻,  $Q_r$  和  $R_r$  分别为锈层电容和电阻,  $Q_{dl}$  为双电层电容, 同时使用 ZSimpWin 软件分析 EIS 数据得到的电化学参数见表 3.

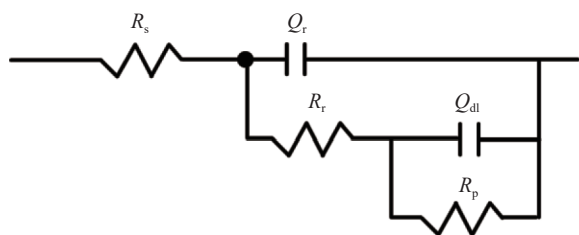


图 8 EIS 等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit diagram corresponding to EIS

根据拟合结果, 在 1~15 d 的短周期试验中, 试样被海水侵蚀, 极化电阻有降低的倾向. 随着试验周期的延长, 腐蚀产物逐渐沉积在样品表面, 形成相对稳定的产物层, 极化电阻逐渐升高. 极化电阻的大小直接影响腐蚀速率的结果, 极化电阻大的腐蚀速率小, 意味着腐蚀速率在后期会表现出减小的规律, 这与失重法所得结果相吻合.

表 3 EIS 拟合得到的电化学参数

Table 3 Electrochemical parameters obtained by EIS fitting

Test cycle/d	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1	1517
7	1235
15	831
30	723
90	1114
180	1223
365	2294

### 3 结论

(1) Q390C 在海水环境下会生成一层疏松海泥状的黄褐色腐蚀产物, 且逐渐增多, 同时有致密、发黑的腐蚀产物与低合金钢基体紧密结合. 通过分析测试表明, 内部黑色腐蚀产物为  $Fe_3O_4$ , 表层腐蚀产物主要为  $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$  和少量  $CaCO_3$ .

(2) 试验前期锈层多为层片状和团簇状, 锈层组成疏松, 拥有很多空隙和孔洞. 随着试验周期的延长, 支状、层片状腐蚀产物增多, 团簇状产物与层片状产物混合附着. 腐蚀产物附着在试样表面, 在一定程度上影响了钢的去极化反应过程, 但腐蚀依旧继续进行.

(3) 随着试验周期延长, Q390C 的均匀腐蚀速率和局部腐蚀速率都呈指数关系下降, 且局部腐蚀速率高于均匀腐蚀速率. 极化曲线呈现出左移的倾向, 阳极电流减小, 且极化电阻呈先降低后升高的趋势, 试验后期由于腐蚀产物的堆积, 一定程度上减缓了腐蚀的发生发展.

### 参 考 文 献

- [1] Jiang S P, Zhang E Q, Guo J, et al. Experimental research on fire protection for immersed tunnel joint. *Chin J Undergr Space Eng*, 2016, 12(3): 607  
(蒋树屏, 张恩情, 郭军, 等. 沉管隧道接头构件耐火试验研究. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(3): 607)
- [2] Chen Y. Application and developing trends of immersed tunnel. *Tunn Constr*, 2017, 37(4): 387  
(陈越. 沉管隧道技术应用及发展趋势. *隧道建设*, 2017, 37(4): 387)
- [3] Liu L F, Lin W, Yin H Q, et al. Construction of immersed tunnel engineering in the world and development status of immersed tunnel technology in China. *China Harbour Eng*, 2021, 41(8): 71

- (刘凌锋, 林巍, 尹海卿, 等. 世界交通沉管隧道工程建造情况与我国沉管科技发展现状. *中国港湾建设*, 2021, 41(8): 71)
- [4] Song H S, Chen X Y, Liang Z X, et al. Development and application of measurement software for steel shell of immersed tunnel based on Python. *Yangtze River*, 2020, 51(9): 223  
(宋华山, 陈向阳, 梁柱信, 等. 基于Python的沉管钢壳测量软件开发与应用. *人民长江*, 2020, 51(9): 223)
- [5] Lu M, Zhu Z X. Optimization and discussion of waterproofing and anti - corrosion design of immersed tunnel. *China Build Waterproofing*, 2010(2): 13  
(陆明, 朱祖熹. 沉管隧道防水防腐设计的优化及其探讨. *中国建筑防水*, 2010(2): 13)
- [6] Deep channel immersed tunnel-the world's first large-scale immersed tunnel with steel-shell concrete composite structure. *Tunn Rail Transit*, 2020(4): 64  
(深中通道沉管隧道—世界首条大规模采用钢壳混凝土组合结构的沉管隧道. *隧道与轨道交通*, 2020(4): 64)
- [7] Zhao Y T, Song S Y, Wang X C, et al. Subsea structure sacrificial anode protection mold experiment and simulation calculation // *Summary of the 10th National Corrosion Conference*. Nanchang, 2019: 237  
(赵永韬, 宋神友, 汪相辰, 等. 海底结构牺牲阳极保护物模实验和仿真计算. 第十届全国腐蚀大会摘要集. 南昌, 2019: 237)
- [8] Zhao Y T, Song S Y, Yin X T, et al. Submarine structure sacrificial anode protector mold experiment and simulation calculation // *Summary Collection of the 7th Marine Materials and Corrosion Protection Conference 2020 and the 1st Reinforced Concrete Durability and Facility Service Safety Conference 2020*. Wuxi, 2020: 1  
(赵永韬, 宋神友, 尹学涛, 等. 沉管钢壳牺牲阳极保护数值模拟验证和修正. 2020第七届海洋材料与腐蚀防护大会暨2020第一届钢筋混凝土耐久性与服务设施安全大会摘要集. 无锡, 2020: 1)
- [9] Niu X L, Chen C P. Research progress of corrosion protection of steel structure in marine engineering. *Ship Eng*, 2019, 41(4): 100  
(牛雪莲, 陈昌平. 海洋工程钢结构腐蚀防护的研究进展. *船舶工程*, 2019, 41(4): 100)
- [10] Cao C N. *Natural Environment Corrosion of Materials in China*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005  
(曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀. 北京: 化学工业出版社, 2005)
- [11] Zhu X R, Wang X R. *Corrosion and Protection of Metals in Marine Environment*. Beijing: National Defense Industry Press, 1999  
(朱相荣, 王相润. 金属材料的海洋腐蚀与防护. 北京: 国防工业出版社, 1999)
- [12] Hou B R. *Marine Corrosion and Protection*. Beijing: Science Press, 1997  
(侯保荣. 海洋腐蚀与防护. 北京: 科学出版社, 1997)
- [13] Jin W X, Luo Y N, Song S Z. Marine erosion-corrosion detections of metal materials. *J Chin Soc Corros Prot*, 2008, 28(6): 337  
(金威贤, 雒娅楠, 宋诗哲. 金属材料实海冲刷腐蚀检测. *中国腐蚀与防护学报*, 2008, 28(6): 337)
- [14] Chen H L, Wei Y. Corrosion mechanism of a carbon steel in simulated humid atmospheres. *Corros Sci Prot Technol*, 2006, 18(4): 255  
(陈惠玲, 魏雨. 一种碳钢在模拟潮湿环境中腐蚀机理的探讨. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(4): 255)
- [15] Xiao K, Dong C F, Li X G, et al. Study on accelerated corrosion tests for carbon steels and weathering steels. *Equip Environ Eng*, 2007, 4(3): 5  
(肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. 碳钢和耐候钢加速腐蚀实验研究. *装备环境工程*, 2007, 4(3): 5)
- [16] Zhong W B. Development of steel plate for bridge and tunnel for Shenzhen-Zhongshan Bridge in Baosteel. *Baosteel Technol*, 2022(2): 65  
(钟武波. 宝钢供深中通道桥隧用钢板的开发. *宝钢技术*, 2022(2): 65)
- [17] Zhao H, Li Q, Zhang J. Study on low temperature welding technology of steel structure Q390C. *J New Ind*, 2020, 10(1): 80  
(赵辉, 李强, 张佳. 钢结构Q390C低温焊接工艺研究. *新型工业化*, 2020, 10(1): 80)
- [18] Lu Q K, Wang L W, Xin J C, et al. Corrosion evolution and stress corrosion cracking of E690 steel for marine construction in artificial seawater under potentiostatic anodic polarization. *Constr Build Mater*, 2020, 238: 117763
- [19] ASTM International, ASTM D1141-98(2021) *Standard Practice for Preparation of Substitute Ocean Water*. United States: ASTM International, 2021
- [20] Zhang H X, Zeng H B, Qiu R. Main influencing factors to accelerate low alloy steel corrosion in seawater by adding H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Equip Environ Eng*, 2012, 9(6): 47  
(张慧霞, 曾华波, 邱日. 添加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>加速低合金钢海水腐蚀的主要影响因素研究. *装备环境工程*, 2012, 9(6): 47)
- [21] Liu Z G, Gao X H, Du L X, et al. Corrosion behavior of armor layer steel of flexible pipes exposed to seawater environment. *J Northeast Univ (Nat Sci)*, 2017, 38(8): 1088  
(刘珍光, 高秀华, 杜林秀, 等. 海洋软管铠装层钢的海水腐蚀行为. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(8): 1088)
- [22] Metal Standardization Internet. GB/T16545-2015 *Corrosion of Metals and Alloys-Removal of Corrosion Products from Corrosion Test Specimens*. Beijing: Standards Press of China, 2015  
(全国钢标准化技术委员会. GB/T16545-2015金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除. 北京: 中国标准出版社, 2015)



- [23] Wang X, Xiao K, Cheng X Q, et al. Corrosion prediction model of Q235 steel in polluted marine atmospheric environment. *J Mater Eng*, 2017, 45(4): 51  
(王旭, 肖葵, 程学群, 等. Q235钢的污染海洋大气环境腐蚀寿命预测模型. *材料工程*, 2017, 45(4): 51)
- [24] Gu M B. An Investigation in corrosion of low-alloy steel in marine environment. *Dev Appl Mater*, 2012, 27(1): 40  
(谷美邦. 海洋环境下低合金钢腐蚀行为研究. *材料开发与应用*, 2012, 27(1): 40)
- [25] Mao C L, Xiao K, Dong C F, et al. Corrosion behavior of extra deep drawing cold rolled sheet in stimulative ocean-atmosphere environment. *J Chin Soc Corros Prot*, 2017, 37(2): 101  
(毛成亮, 肖葵, 董超芳, 等. 超深冲压用冷轧板在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为. *中国腐蚀与防护学报*, 2017, 37(2): 101)
- [26] Xu J W. *Research on Key Corrosion Factors and Synergistic Mechanism of Q345 Steel in South China Sea* [Dissertation]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020  
(徐静雯. Q345钢南海环境关键腐蚀因子及其协同作用机理研究[学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020)
- [27] Ding G Q, Li X Y, Zhang B, et al. Variation of free corrosion potential of several metallic materials in natural seawater. *J Chin Soc Corros Prot*, 2019, 39(6): 543  
(丁国清, 李向阳, 张波, 等. 金属材料在天然海水中的腐蚀电位及其变化规律. *中国腐蚀与防护学报*, 2019, 39(6): 543)
- [28] Su L L. *Study on Corrosion Mechanism of Q235 Steel and Stainless Steel in Natural Seawater* [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2010  
(苏璐璐. Q235钢和不锈钢海水腐蚀机理研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2010)