

船舶及海洋工程装备

Q345 钢在不同 pH 值人工海水中的电偶腐蚀行为研究

胡杰珍^a, 刘文娟^a, 邓培昌^b, 黄欢^a, 林国栋^a

(广东海洋大学 a.机械工程学院 b.化学与环境学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 目的 研究不同 pH 值的人工海水环境中电偶腐蚀对金属的影响。方法 利用自行设计的可拆卸电极, 采用浸泡法和电化学方法, 结合宏观和微观腐蚀形貌, 对 Q345 钢在不同 pH 人工海水中的电偶腐蚀行为进行分析。结果 在浸泡初期, 不同 pH 值海水环境中电连接电极间的电位差相差较小, 不易发生电偶腐蚀; 浸泡至 14 d, 电极间的电位差相差较大, 这表明不同电连接电极之间发生明显的电偶腐蚀。与自腐蚀相比, pH 为 7.50 和 8.40 的电偶腐蚀的腐蚀电位较大, 腐蚀电流密度较小, 腐蚀产物膜电阻 R_p 较大, 说明在 pH 值为 7.50 和 8.40 时, 电连接电极间的腐蚀以自腐蚀为主。在 pH 值为 7.80 和 8.70 时, 电连接电极间发生明显的电偶腐蚀。自腐蚀电极表面的腐蚀产物较少, 锈层结构疏松。电偶腐蚀中, 在 pH 为 7.50 和 8.40 的电极表面的腐蚀产物较少, 锈层结构致密; pH 为 7.80 和 8.70 的电极表面的腐蚀产物较多, 锈层结构比较疏松。**结论** 通过研究 2 种腐蚀行为的差异, 分析 pH 值的不同对电偶腐蚀的影响, 为海洋环境金属材料的腐蚀防护提供数据支持。

关键词: Q345 钢; pH 值; 海水; 自腐蚀; 电偶腐蚀; 腐蚀防护

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)06-0056-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.06.008

Galvanic Corrosion Behavior of Q345 Steel in Artificial Seawater with Different pH Values

HU Jie-zhen^a, LIU Wen-juan^a, DENG Pei-chang^b, HUANG Huan^a, LIN Guo-dong^a

(a. School of Mechanical Engineering, b. School of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Guangdong Zhanjiang 524088, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of galvanic corrosion on metals in artificial seawater environment with different pH values. Combined with macroscopic and microscopic corrosion morphology observation, the self-designed detachable

收稿日期: 2022-10-04; 修订日期: 2022-11-18

Received: 2022-10-04; **Revised:** 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学青年基金 (51801033); 广东省自然科学基金 (2021A1515012129)

Fund: The National Natural Science Youth Fund (51801033); Guangdong Natural Science Foundation Project (2021A1515012129)

作者简介: 胡杰珍 (1978—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋工程及装备的腐蚀与防护。

Biography: HU Jie-zhen (1978-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of marine engineering and equipment.

通讯作者: 邓培昌 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋工程及装备的腐蚀与防护。

Corresponding author: DENG Pei-chang (1975-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of marine engineering and equipment.

引文格式: 胡杰珍, 刘文娟, 邓培昌, 等. Q345 钢在不同 pH 值人工海水中的电偶腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 056-063.

HU Jie-zhen, LIU Wen-juan, DENG Pei-chang, et al. Galvanic Corrosion Behavior of Q345 Steel in Artificial Seawater with Different pH Values[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 056-063.

electrode was used to analyze the galvanic corrosion behavior of Q345 steel in artificial seawater with different pH values by immersion method and electrochemical method. In the initial stage of immersion, the difference of potential difference between electrically connected electrodes in seawater with different pH values was small and galvanic corrosion was not easy to occur. After soaking for 14 days, the potential difference between the electrodes was quite different, indicating that obvious galvanic corrosion occurred between the different electrically connected electrodes. Compared with self-corrosion, the galvanic corrosion at pH 7.50 and 8.40 had higher corrosion potential, lower corrosion current density and higher corrosion film resistance (R_p), indicating that the corrosion between the electrically connected electrodes was mainly self-corrosion at pH 7.50 and 8.40, and obvious galvanic corrosion occurred between the electrically connected electrodes at pH 7.80 and 8.70. The corrosion products on the surface of the self-corrosion electrode were less, and the rust layer structure was loose. In galvanic corrosion, there were less corrosion products on the electrode surface at pH 7.50 and 8.40, and the rust layer structure was compact. The corrosion products on the electrode surface at pH 7.80 and 8.70 were more, and the rust layer structure was loose. By studying the difference between the two corrosion behaviors, the effect of different pH values on galvanic corrosion is analyzed, which provides data support for corrosion prevention of metallic materials in marine environment.

KEY WORDS: Q345 steel; pH value; seawater; self-corrosion; galvanic corrosion; corrosion prevention

电偶腐蚀通常指相互接触的异种金属在同一介质中由于腐蚀电位不同,造成电位较低的金属发生腐蚀的现象^[1]。在海洋中这类电偶腐蚀比较常见,广泛存在于船舶、油气、航空和建筑工业等各种工程领域^[2-6],是一种危害极为广泛和产生严重损失的腐蚀类型^[7-9]。

电偶腐蚀的影响因素有许多,除电偶本身材料性质及几何特性(包括阴阳极面积比、偶对间距等)以外^[10-13],环境因素如电导率,溶解氧、温度、流速、pH、微生物等均影响着电偶腐蚀行为^[14-19]。此外,海水中的生物及腐败有机物也会影响电偶腐蚀行为^[20-21]。同一种金属不同位置由于所处的环境不同,产生腐蚀电位差,电偶腐蚀也会发生。Chen 等^[22]研究了铜和铜合金在不同温度下的电偶腐蚀行为,结果表明,电偶电流随温度的升高明显增大,温度改变,阴阳极电流会出现突然转变的现象。陈兴伟等^[23]利用充氮气和空气的方式来控制电解质中的含氧量,得出充空气时自腐蚀速度和电偶电流均明显增加,电偶腐蚀效应也有所增加。孙保库等^[24]通过研究不同流速海水对电偶腐蚀的影响得出,不同流速海水中不同金属之间存在明显的电偶腐蚀倾向,作阴极

的金属受到保护。

海洋环境中环境因素的变化较为复杂,随着海水深度的增加,温度、溶解氧、营养盐和 pH 值等的变化显著,特别是在海水温跃层^[25],环境因素变化更加显著。随着海水深度的增加, pH 值的变化范围为 7.50~8.70。本文通过电化学法和金属浸泡法研究了 Q345 钢在不同 pH 值的人工海水中的电偶腐蚀行为,分别采用电连接浸泡法进行电偶腐蚀试验,非电连接浸泡法进行自腐蚀试验,研究了两者腐蚀行为的差异,分析了对于 Q345 钢在海水中的自腐蚀而言,pH 值的不同对电偶腐蚀的影响,为海洋环境金属材料的腐蚀防护提供数据支持。

1 试验

1.1 材料及电极的制备

试验材料为 Q345 钢,化学成分见表 1。用于室内浸泡试验的试样尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,经水磨砂纸打磨至 1000#。试样一端用环氧树脂密封,另一端用橡胶圈密封,具体结构如图 1 所示。

表 1 碳钢 Q345 的化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of Q345 carbon steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Cu	Al	V	Fe
0.017	0.500	1.550	0.030	0.025	0.1	0.3	0.4	0.220	0.015	0.110	余量

1.2 室内浸泡腐蚀试验

配制 3.5% 的 NaCl 溶液,用 1 mol/L 的 HCl 和 NaOH 溶液调节溶液的 pH 值分别为 7.50、7.80、8.10、8.40、8.70。利用实验室自制的可拆卸电连接金属试验测试装置,进行室内电偶腐蚀浸泡试验。将电极放

置在不同 pH 值的容器内浸泡,容器之间通过盐桥连接,整个电连接装置处于闭合回路的状态,同时进行非电连接时金属的自腐蚀浸泡试验。以 7 d 为 1 周期,试验周期分别为 7、14、21 d。在试验过程中,利用雷磁 pHS-3C pH 计测量溶液的 pH,使得 pH 值保持稳定,每一周期对试样进行电化学测试和腐蚀形貌分析。

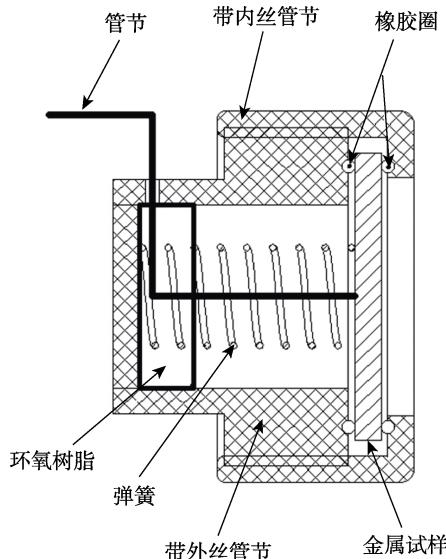


图 1 试验电极结构
Fig.1 Structure of experimental electrode

1.3 电化学测试和腐蚀形貌分析

将可拆卸电连接电极中的 1 个电极作为工作电极 1, 其他连接在一起的电极为工作电极 2, 与科斯特 CS350 电化学工作站相连, 进行电化学噪声测试(如图 2 所示), 获得电连接电极的电偶电流。在电化学噪声测量功能中, 将会显示电偶电流, 电流读数为正表示研究电极引线所接的工作电极 1 为阳极, 接地线连接的工作电极 2 为阴极, 电流由电极 1 流向电极 2, 负电流则与此相反。

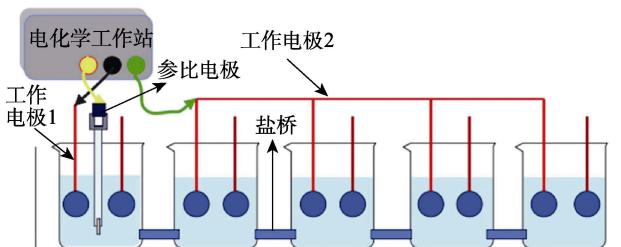


图 2 电化学噪声测试示意图
Fig.2 Schematic diagram of electrochemical noise test

采用科斯特 CS350 电化学工作站和三电极体系分别进行开路电位、极化曲线和电化学阻抗测试。饱和 KCl 甘汞电极 (SCE) 为参比电极, Pt 电极为对电极, 电解质为不同 pH 值的 3.5% NaCl 溶液。监测 Q345 钢在不同 pH 值海水中的开路电位变化, 极化曲线测试的扫描速度为 0.5 mV/s, 扫描范围为 -100~+100 mV (相对于开路电位)。电化学阻抗测试频率范围为 100~1000 Hz, 电压幅值为 5 mV。电极表面宏观腐蚀形貌用 Nikon D800E 型高清数码相机拍摄, 微观形貌采用 TM4000 型扫描电镜进行观测。

2 结果与讨论

2.1 开路电位分析

Q345 钢试样在不同 pH 值人工海水中的开路电位如图 3 所示。由图 3 可知, Q345 钢在不同 pH 值海水中浸泡 7 d 时, 开路电位相差较小, 在 -0.56~ -0.69 V 内变化。随着浸泡时间的延长, 浸泡 14 d 时, 不同 pH 值海水中 Q345 钢的开路电位差增大, 最大差值为 0.26 V, 不同电连接电极之间存在较大的电位差, 电位差是发生电偶腐蚀反应的驱动力。这表明在浸泡 14 d 时, 不同 pH 值电连接电极之间存在比较明显的电偶腐蚀倾向^[18]。

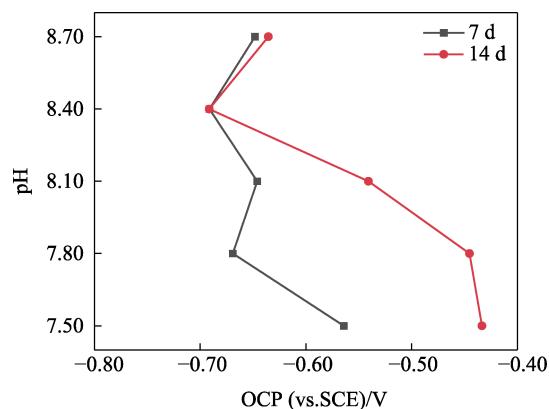


图 3 Q345 钢试样在不同 pH 值人工海水中的开路电位
Fig.3 Open circuit potential of Q345 steel sample in artificial seawater with different pH values

2.2 极化曲线分析

Q345 钢浸泡在不同 pH 值人工海水中的动电位极化曲线如图 4 所示。Q345 钢浸泡在不同 pH 值的海水中, 阴极过程均为氧在碱性环境中的去极化过程, 阳极过程为电化学活化控制, 未出现明显的阳极钝化区。浸泡 7 d 时, 随着 pH 值的升高, Q345 钢的自腐蚀电位在 -0.641~ -0.694 V 内变化, 腐蚀电位相差较小, 电连接时不易发生电偶腐蚀。随着浸泡时间的延长, 浸泡 14 d 时, 腐蚀电位差增大, 最大差值为 0.27 V, 电连接时发生强烈的电偶腐蚀。

2.3 电偶腐蚀分析

试验过程中, 测得的不同 pH 值海水中电极间的电偶电流如图 5 所示。从图 5 和图 6 可以看出, 在试验初期, 浸泡 7 d 后, 不同 pH 海水中电极间电偶电流相差较小, 电偶电流“正”(阳极)、“负”(阴极)分布较为均匀, 说明链式电极以宏观电池均匀腐蚀为主。随着浸泡时间的延长, 浸泡至 14 d, 电极间的电偶电流发生较大变化, 浸泡在 pH 为 8.70 的海水中电极为阳极, 其他电极为阴极, 发生小阳极大阴极的宏观电偶腐蚀, 阳极腐蚀速率较大。试验后期, 浸泡至

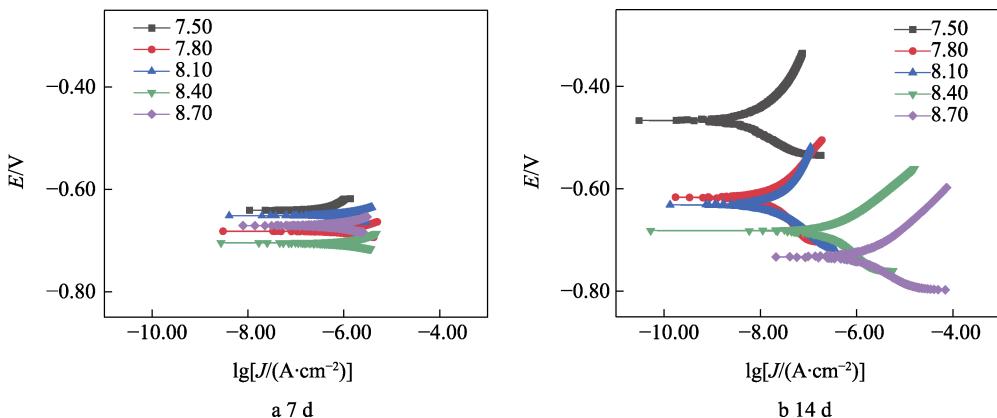


图 4 Q345 钢试样浸泡在不同 pH 值人工海水中的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of Q345 steel sample immersed in artificial seawater with different pH values

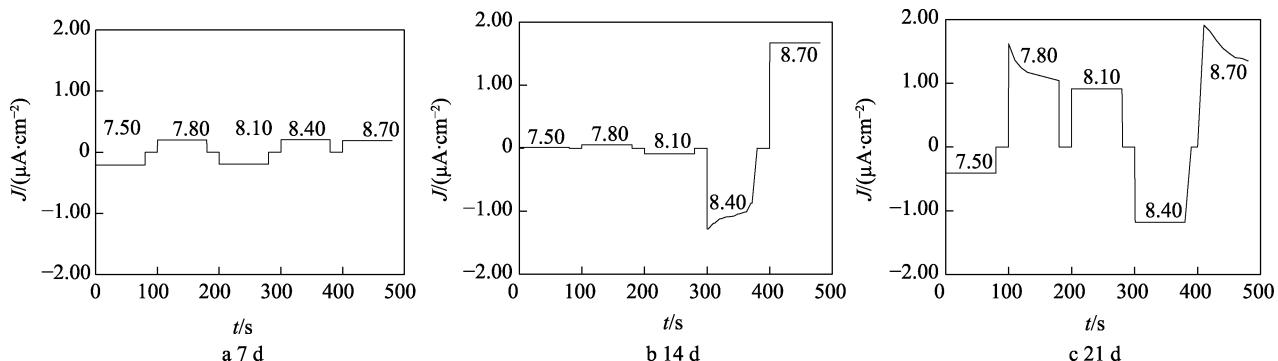


图 5 Q345 钢在不同 pH 值人工海水中的电偶电流

Fig.5 Galvanic current of Q345 steel in artificial seawater with different pH values

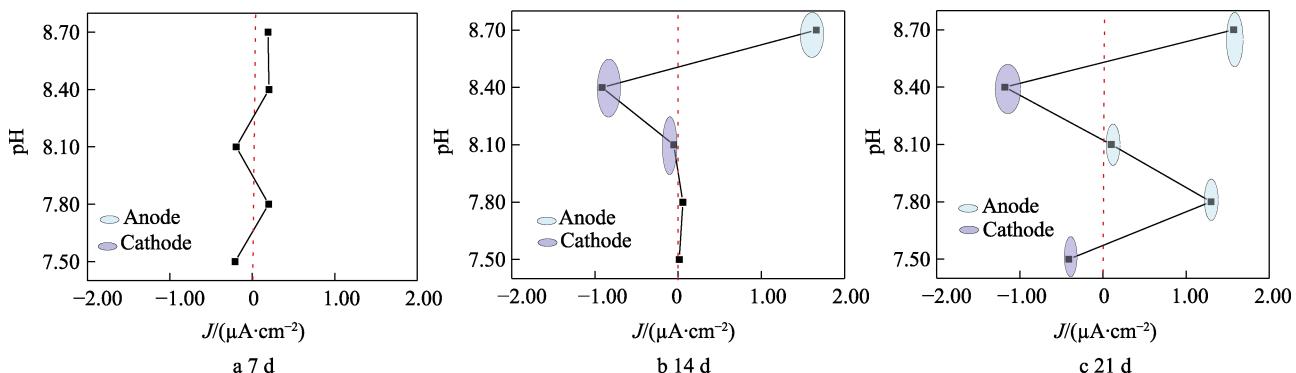


图 6 Q345 钢在不同人工海水中的电偶电流与 pH 值关系分析

Fig.6 Analysis of the relationship between galvanic current and pH value of Q345 steel in different artificial seawater

21 d, 浸泡在 pH 为 7.80、8.70 的海水中的电极作阳极, 在 pH 为 7.50、8.40 的海水中的电极作阴极, 部分电极极性发生反转, 形成了多个局部微观电偶腐蚀电池, 发生明显的电偶腐蚀。

Q345 钢在不同 pH 值海水中浸泡 21 d 后的极化曲线如图 7 所示, 极化曲线拟合后腐蚀电位和腐蚀电流密度的变化如图 8 所示。从拟合结果可以看出, 在自腐蚀中, pH 值为 7.50 时, Q345 钢在人工海水中具有较正的腐蚀电位与较小的腐蚀电流密度。这表明在 pH 为 7.50 时, Q345 钢的腐蚀速率较小; pH 值为 8.70 时, Q345 钢在人工海水中的腐蚀电位最

负, 腐蚀电流密度最大。说明在 pH 为 8.70 时, Q345 钢的腐蚀速率最大。与自腐蚀相比, pH 值为 7.50、8.40 时, 电偶腐蚀的腐蚀电位比自腐蚀电位高, 电偶腐蚀的腐蚀电流密度与自腐蚀电流密度接近。说明在 pH 值为 7.50、8.40 时, Q345 钢在不同 pH 值海水中的腐蚀以自腐蚀为主。pH 为 7.80、8.70 时, 电偶腐蚀的腐蚀电位比自腐蚀电位低, 电偶腐蚀的腐蚀电流密度比自腐蚀电流密度较大。说明在 pH 值为 7.80、8.70 时, Q345 钢在不同 pH 值海水中的电偶腐蚀较为剧烈。

Q345 钢在不同 pH 值海水中浸泡 21 d 的电化学

阻抗谱图如图9所示,利用图10所示的等效电路模型对电化学阻抗图谱数据进行拟合分析。其中, R_s 为溶液电阻, R_{ct} 为电荷转移电阻, C_{dl} 为双层电容,

R_p 为腐蚀产物膜电阻, C_p 为腐蚀产物膜层电容^[26]。采用等效电路模型对电化学阻抗进行拟合后的数据如图11所示。

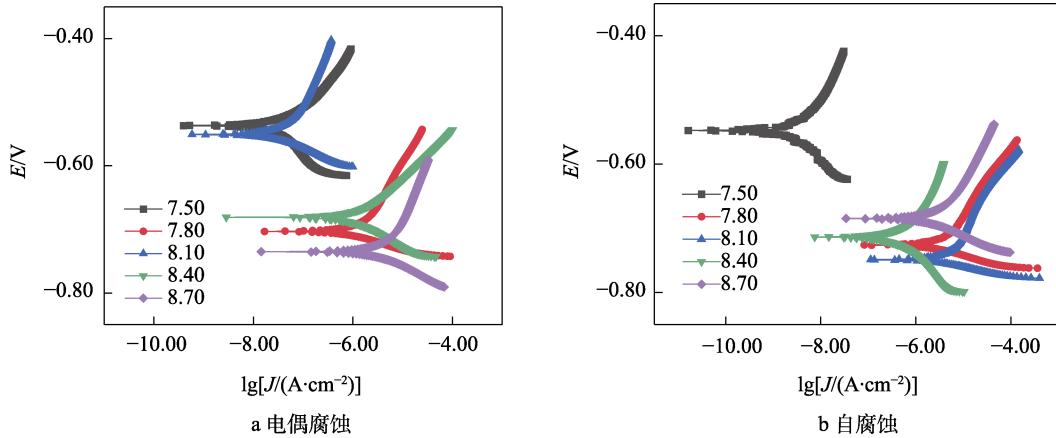


图7 Q345钢在不同pH值人工海水中浸泡21 d的动电位极化曲线

Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days: a) galvanic corrosion; b) self-corrosion

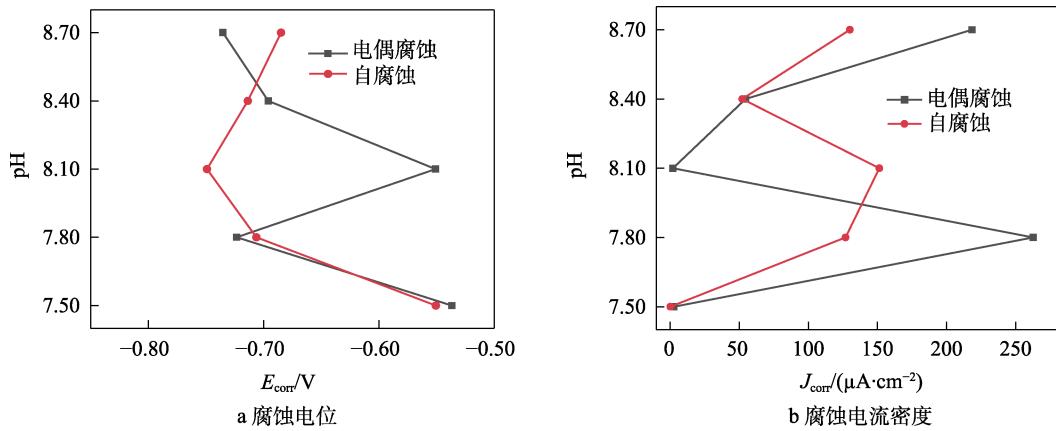


图8 Q345钢在不同pH值人工海水中浸泡21 d的动电位极化曲线拟合结果

Fig.8 Potentiodynamic polarization curves fitting results of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days: a) corrosion potential E_{corr} ; b) corrosion current density J_{corr}

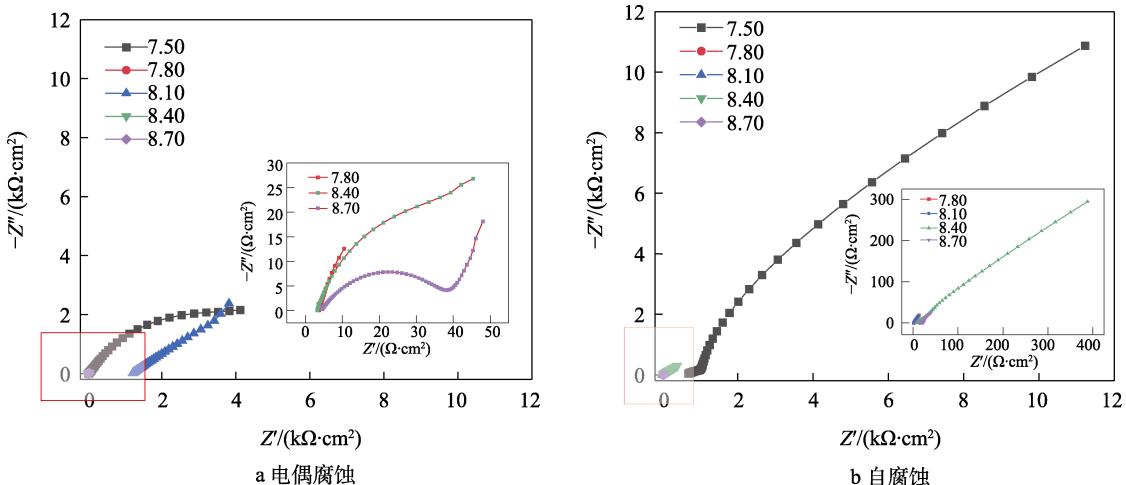


图9 Q345钢在不同pH值人工海水中浸泡21 d的电化学阻抗谱图

Fig.9 Electrochemical impedance spectroscopy of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days: a) galvanic corrosion; b) self-corrosion

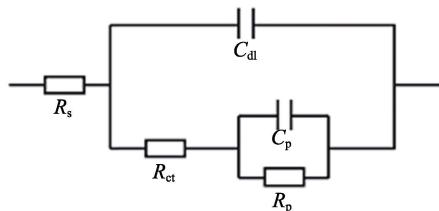


图 10 Q345 钢在不同 pH 值人工海水中浸泡 21 d 的电化学阻抗谱拟合电路

Fig.10 Fitting circuit of electrochemical impedance spectroscopy of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days

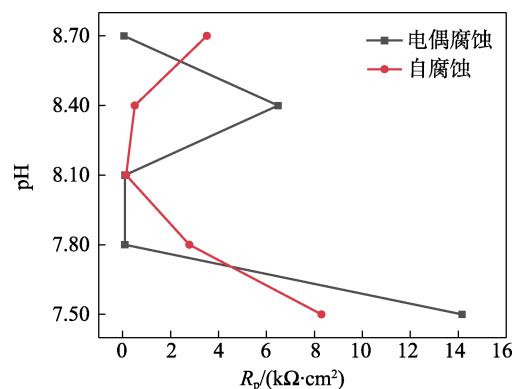


图 11 Q345 钢在不同 pH 人工海水中浸泡 21 d 电化学阻抗谱拟合结果

Fig.11 Fitting results of electrochemical impedance spectroscopy of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days

表 2 Q345 钢在不同 pH 值人工海水中浸泡 21 d 的腐蚀形貌
Tab.2 Corrosion morphology of Q345 steel immersed in artificial seawater with different pH values for 21 days

pH	电偶腐蚀	自腐蚀	电偶腐蚀 (×50/×500)	自腐蚀 (×50/×500)
7.50			 	
7.80			 	
8.10			 	
8.40			 	
8.70			 	

在电偶腐蚀反应中, 金属之间的电位差影响腐蚀速率, 同时也受极化电阻的影响。一般认为, R_p 的数值与腐蚀产物层厚度成正比^[27]。从图 11 可知, 与自腐蚀相比, 电偶腐蚀反应中, Q345 钢在 pH 为 7.50、8.40 的阻抗拟合值 R_p 均大于 pH 为 7.80、8.70 的阻抗拟合值 R_p 。这表明 Q345 钢在 pH 为 7.50、8.40 的海水环境中比在 pH 为 7.80、8.70 的海水环境腐蚀缓慢。在电偶腐蚀中, 作为阳极的电极发生加速腐蚀, 表面腐蚀产物的形成受到影响, 失去了腐蚀产物膜层的保护作用, R_p 值降低, 腐蚀加剧。

2.4 腐蚀形貌分析

Q345 钢在不同 pH 值海水中浸泡 21 d 后, 电偶腐蚀和自腐蚀电极的表面腐蚀形貌见表 2。从宏观形貌可以看出, 电偶腐蚀在 pH 为 7.50、8.40 时, 电极表面的腐蚀产物较少, 锈层颜色为红棕色, 而自腐蚀电极表面的腐蚀产物较多, 锈层颜色为棕褐色。从微观形貌可以看出, 电偶腐蚀电极表面在放大 500 倍时, 浸泡在 pH 为 7.50、8.40 的电极表面的腐蚀产物层比较致密, 腐蚀产物较少, pH 为 7.80、8.70 的电极表面的腐蚀产物较多, 锈层结构变得比较疏松, 同时产生了大量腐蚀坑。这与电偶腐蚀分析中 pH 为 7.50、8.40 的电极作为阴极, pH 为 7.80、8.70 的电极作为阳极的结果相一致。

3 结论

1) 根据开路电位和自腐蚀电位分析, 在浸泡初期, 受溶解氧的扩散作用, 不同 pH 值海水环境中, 电极之间的电位差和自腐蚀电位差较小, 电连接电极之间不易发生电偶腐蚀。在 14 d 时, 浸泡在不同 pH 值海水环境中的电极的开路电位差最大值为 0.26 V, 自腐蚀电位差最大为 0.27 V, 电连接电极之间发生明显的电偶腐蚀。

2) 从电偶电流分析来看, 浸泡初期, 链式电极阴阳极分布均匀, 受溶解氧的扩散作用, 以宏观电池腐蚀为主。浸泡至 14 d, 随着 pH 值的增加, 腐蚀电位逐渐负移, 腐蚀电流密度增大。其中, pH 为 8.70 的海水中电极做阳极, 其他电极做阴极, 形成了小阳极大阴极的宏观腐蚀电池。浸泡后期, 电极极性发生反转, 并形成了多个局部腐蚀电池, 发生明显的电偶腐蚀。

3) 与自腐蚀相比, pH 为 7.80、8.40 的电偶腐蚀的腐蚀电位较大, 腐蚀电流密度较小, 极化电阻 R_p 较大。说明在 pH 值为 7.50、8.40 时, Q345 钢在不同 pH 海水中的腐蚀以自腐蚀为主。pH 为 7.80、8.70 时, 电偶腐蚀的腐蚀电位比自腐蚀电位低, 电偶腐蚀的腐蚀电流密度比自腐蚀电流密度较大。说明在 pH 值为 7.8、8.7 时, Q345 钢在海水中的电偶腐蚀较为剧烈。

4) 不同 pH 值海水中电偶腐蚀的电极表面的腐蚀产物较多, 锈层颜色为红棕色, 而自腐蚀电极表面的腐蚀产物较少, 锈层颜色为棕褐色。与自腐蚀相比, 电偶腐蚀中, 浸泡在 pH 为 7.50、8.40 海水环境中的电极表面的腐蚀产物层比较致密, 腐蚀产物较少, 在 pH 为 7.80、8.70 海水环境中的电极表面的腐蚀产物增多, 锈层结构比较疏松。

参考文献:

- [1] 胡鹏飞, 张慧霞, 李相波, 等. 电偶腐蚀研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 110-117.
HU Peng-fei, ZHANG Hui-xia, LI Xiang-bo, et al. Summary of Research Methods for Galvanic Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 110-117.
- [2] 李冬冬. 某船舶传动系统构件材料耐海水腐蚀性能研究[D]. 北京: 机械科学研究院, 2015.
LI Dong-dong. Seawater Corrosion Resistance Research of Ship Driving System Components[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2015.
- [3] RAMÍREZ-LEDESMA A L, JUÁREZ-ISLAS J A. Modification of the Remaining Useful Life Equation for Pipes and Plate Processing of Offshore Oil Platforms[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 157: 429-442.
- [4] REN Ke-liang, GAO Shi-wu, LIU Ping-ping, et al. Influence of Environmental Factors on Corrosion Damage of Aircraft Structure[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011, 1(6): 061004.
- [5] MOSHREFI R, MAHJANI M G, EHSANI A, et al. A Study of the Galvanic Corrosion of Titanium/L 316 Stainless Steel in Artificial Seawater Using Electrochemical Noise (EN) Measurements and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2011, 58: 250-257.
- [6] 武兴伟, 黄璐琼, 孙启. 舰船用金属材料的电偶腐蚀特性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(4): 36-40.
WU Xing-wei, HUANG Lu-qiong, SUN Qi. Study on Galvanic Corrosion Characteristics of Metallic Materials Used in Surface Ships[J]. Materials Protection, 2021, 54(4): 36-40.
- [7] THIERRY D, LEBALLEUR C, LARCHÉ N. Galvanic Series in Seawater as a Function of Temperature, Oxygen Content, and Chlorination[J]. Corrosion, 2018, 74(2): 147-152.
- [8] 张文毓. 电偶腐蚀与防护的研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(12): 51-56.
ZHANG Wen-yu. Progress in Research on Galvanic Corrosion Behavior and Protection[J]. Total Corrosion Control, 2018, 32(12): 51-56.
- [9] CUI T F, LIU D X, SHI P A, et al. Effect of NaCl Concentration, pH Value and Tensile Stress on the Galvanic Corrosion Behavior of 5050 Aluminum Alloy[J]. Materials and Corrosion, 2016, 67(1): 72-83.
- [10] 孙巍, 胡裕龙, 王智桥. 碳纤维复合材料-钢电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 106-113.
SUN Wei, HU Yu-long, WANG Zhi-qiao. Study of Galvanic Corrosion between Steel and Carbon Fiber Composite[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 106-113.
- [11] 解辉, 武兴伟, 刘斌, 等. 钛合金/其他金属在海洋环境中的电偶腐蚀行为的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(4): 155-166.
XIE Hui, WU Xing-wei, LIU Bin, et al. Research Progress in the Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Alloy/other Metals in Marine Environment[J]. Materials Protection, 2022, 55(4): 155-166.
- [12] OKONKWO B O, MING Hong-liang, WANG Jian-qiu, et al. A New Method to Determine the Synergistic Effects of Area Ratio and Microstructure on the Galvanic Corrosion of LAS A508/309 L/308 L SS Dissimilar Metals Weld[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 78: 38-50.
- [13] CHEN Chuan, XU Yun-xiang, ZHONG Qing-dong, et al. Correlation of Temperature with Galvanic Corrosion Behaviour of Copper Alloys Based on Wire Beam Electrode[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2018, 53(5): 331-339.
- [14] XING S H, LI Y, WHARTON J A, et al. Effect of Dis-

- solved Oxygen and Coupled Resistance on the Galvanic Corrosion of Cr-Ni Low-Alloy Steel/90-10 Cupronickel under Simulated Deep Sea Condition[J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(10): 1123-1128.
- [15] PAN Hui, PANG Kun, CUI Feng-zhen, et al. Effect of Alloyed Sr on the Microstructure and Corrosion Behavior of Biodegradable Mg-Zn-Mn Alloy in Hanks' Solution[J]. Corrosion Science, 2019, 157: 420-437.
- [16] HU Sheng-bo, LIU Rui, LIU Li, et al. Influence of Temperature and Hydrostatic Pressure on the Galvanic Corrosion between 90/10 Cu-Ni and AISI 316L Stainless Steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 1402-1415.
- [17] 陈兴伟. 船舶典型结构材料电偶腐蚀行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- CHEN Xing-wei. Research on Galvanic Corrosion Behavior of Ship Typical Materials[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [18] 孙宝库, 李宁, 杜敏. B10/H62 电偶在不同流速水中的腐蚀规律[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 20-22.
- SUN Bao-ku, LI Ning, DU Min. Corrosion Law of B10/H62 Galvanic Couple in Seawater with Different Flow Rates[J]. Material Protection, 2011, 44(7): 20-22.
- [19] SHI Lin-jun, SONG Ying-wei, DONG Kai-hui, et al. The Change of Cathode/Anode Roles and Corrosion Forms in 2024/Q235/304 Tri-Metallic Couple with the Variation of Oxygen Concentrations and Area Ratios[J]. Corrosion Science, 2021, 184: 109400.
- [20] ARUN D, VIMALA R, DEVENDRANATH RAMKUMAR K. Investigating the Microbial-Influenced Corrosion of UNS S32750 Stainless-Steel Base Alloy and Weld Seams by Biofilm-Forming Marine Bacterium *Macrococcus Equipericus*[J]. Bioelectrochemistry, 2020, 135: 107546.
- [21] 侯明宇. 海水环境下 Q235 碳钢的腐蚀行为研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- HOU Ming-yu. Study on Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel in Seawater Environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [22] 陈云飞, 李争显, 刘林涛, 等. T2/TC4 在静态人造海水中的电偶腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1161-1167.
- CHEN Yun-fei, LI Zheng-xian, LIU Lin-tao, et al. Galvanic Corrosion Behavior of T2/TC4 Galvanic Couple in Static Artificial Seawater[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1161-1167.
- [23] CAMPBELL S A, RADFORD G J W, TUCK C D S, et al. Corrosion and Galvanic Compatibility Studies of a High-Strength Copper-Nickel Alloy[J]. CORROSION, 2002, 58(1): 57-71.
- [24] SHI Lin-jun, SONG Ying-wei, ZHAO Ping-ping, et al. Variations of Galvanic Currents and Corrosion Forms of 2024/Q235/304 Tri-Metallic Couple with Multivariable Cathode/Anode Area Ratios: Experiments and Modeling[J]. Electrochimica Acta, 2020, 359: 136947.
- [25] TALLEY L D, PICKARD G L, EMERY W J, et al. Introduction to Descriptive Physical Oceanography[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011: 1-6.
- [26] NADY H, EL-RABIEI M M, SAMY M. Corrosion Behavior and Electrochemical Properties of Carbon Steel, Commercial Pure Titanium, Copper and Copper-Aluminum-Nickel Alloy in 3.5% Sodium Chloride Containing Sulfide Ions[J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 26(1): 79-94.
- [27] 刘婉颖, 李金宇, 高科超, 等. 温度对 N80 钢在饱和 CO₂ 模拟地层水下腐蚀行为的影响及机理[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 353-362.
- LIU Wan-ying, LI Jin-yu, GAO Ke-chao, et al. Effect and Mechanism of Temperature on the Corrosion Behavior of N80 Steel in Simulated Formation with Saturated CO₂[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 353-362.

责任编辑: 刘世忠