

海洋工程装备

碳纤维复合材料-钢电偶腐蚀研究

孙巍¹, 胡裕龙², 王智峤³(1.海装驻上海地区第二军事代表室, 上海 200129; 2.海军工程大学基础部, 武汉 430033;
3.海军研究院特种勤务研究所, 北京 100073)

摘要: **目的** 研究碳纤维复合材料与船体钢的电偶腐蚀行为。**方法** 采用 T700 碳纤维复合材料-10CrNiCu 钢电偶对在 3.5%NaCl 溶液中的浸泡实验、电化学试验及实验后的腐蚀形貌分析, 对比测定了电偶对中 10CrNiCu 钢的腐蚀速度, 分析了电偶对的腐蚀行为。**结果** 碳纤维与 10CrNiCu 钢的开路电位差高达 850 mV 以上, 当它们连接形成电偶对时, 碳纤维对 10CrNiCu 钢有很强的电偶效应。当碳纤维的面积与钢的面积比为 1:1 时, 可使 10CrNiCu 钢的腐蚀速度至少增大约 1.5 倍。**结论** 碳纤维单独在 3.5%NaCl 溶液中的电位基本是氧去极化的平衡电位, 当碳纤维复合板与钢连接形成腐蚀电池时, 显著促进了氧去极化反应, 从而显著促进了钢的腐蚀。

关键词: 钢; 碳纤维; 电偶腐蚀; 氧去极化反应; 电化学试验; 开路电位

中图分类号: TG172.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)11-0106-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.015

Study of Galvanic Corrosion between Steel and Carbon Fiber Composite

SUN Wei¹, HU Yu-long², WANG Zhi-qiao³

(1. No.2 Naval Military Representative Office in Shanghai Region, Shanghai 200129, China;

2. Department of Foundation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3. Institute of Special Services, Naval Research Academy, Beijing 100073, China)

ABSTRACT: To investigate the galvanic corrosion behavior of galvanic couple between steel and carbon fiber composite, 10CrNiCu steel and T700 carbon fiber composite were used. The immersion test and electrochemical test in 3.5%NaCl solution of the galvanic couple samples were carried out, and the corrosion morphology of the samples after test were analyzed. The corrosion rates of 10CrNiCu steel in galvanic couple together with its self-corrosion were measured, and the corrosion behavior of galvanic couple was analyzed. The open-circuit potential difference between carbon fiber and 10CrNiCu steel is higher than 850 mV. While the couple between steel and carbon fiber was formed, the strong galvanic action arose from carbon fiber. While the area ratio of steel and carbon fiber was 1:1, the corrosion rate of 10CrNiCu steel increased to over 1.5 times. The potential of carbon fiber alone in 3.5%NaCl solution is about the equilibrium potential of the oxygen reduction reaction. While the galvanic element between steel and carbon fiber composite is formed, the corrosion of steel can be accelerated significantly because the

收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-05-27

Received: 2021-03-22; Revised: 2021-05-27

作者简介: 孙巍 (1973—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为船舶监造。

Biography: SUN Wei (1973—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: manufacture supervision of ship.

通讯作者: 胡裕龙 (1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为船舶腐蚀与防护。

Corresponding author: HU Yu-long (1973—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of ship.

引文格式: 孙巍, 胡裕龙, 王智峤. 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.

oxygen reduction reaction is promoted significantly.

KEY WORDS: steel; carbon fiber; galvanic corrosion; oxygen reduction reaction; electrochemical test; open-circuit potential

碳纤维复合材料通常由不同结构的碳纤维织物和树脂组成, 具有强度高、质轻、热膨胀系数小、耐高温等优点, 综合性能优异, 用作结构材料可减重 30% 左右^[1]。碳纤维复合材料保留了碳本身的电化特性, 具有良好的导电性。现阶段碳纤维复合材料在航空航天领域和民用领域使用较多, 如火箭发动机、飞机机身结构、卫星结构外壳、卫星的支撑筒、喇叭天线、波纹承力筒等^[2,3]。碳纤维复合材料在舰船等海洋工程装备中的应用较少, 但具有良好的应用前景^[4]。目前, 已有学者对碳纤维复合材料在舰船相关装备中的应用进行了研究。碳纤维复合材料在海水中长时间浸泡后, 表面树脂会由于溶胀作用遭到剥离而露出碳纤维^[5]。海洋工程装备的主体材料主要是钢, 当碳纤维复合材料与钢连接并与碳纤维导通时, 可能会发生严重的电偶腐蚀^[5-11]。

文中通过将碳纤维环氧复合材料与 10CrNiCu 钢连接成电偶对, 通过浸泡试验、电化学试验和 3D 显微分析等, 研究了碳纤维复合板/10CrNiCu 钢电偶对在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为。

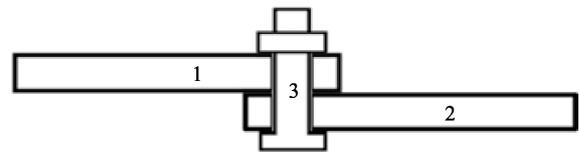
1 实验

实验用碳纤维环氧复合板 (简称 CF 板) 为 T700 单向碳纤维布增强环氧板, 树脂为 350 环氧树脂, 采用真空辅助成型 (VARI)。将 CF 板切割成 40 mm×30 mm×12 mm 尺寸, 使用 400# 砂纸打磨两面, 将表面玻璃布打磨掉, 至露出碳纤维基体 (测量表面 2 点的电阻为 0)。依次用丙酮、无水乙醇清洗, 吹风机吹干, 置于干燥皿中。

选用低合金高强度船体钢 10CrNiCu 为实验用钢, 其化学成分 (质量分数) 为: C ≤ 0.11%, Ni 0.5%~0.8%, Cr 0.6%~0.9%, Cu 0.4%~0.6%, Mn 0.6%~1.2%, Si 0.5~0.8%, S ≤ 0.015%, P ≤ 0.025%, Fe 余量。用线切割、磨床将 10CrNiCu 钢板加工成 40 mm×30 mm×5 mm 尺寸, 再将试样依次用 400#、600#、800# 金相砂纸磨平各个面, 再依次用丙酮、无水乙醇清洗, 吹风机吹干, 置于干燥皿中。干燥 48 h 后, 用精度为 0.0001 g 的分析天平称取质量。

将 CF 板与 10CrNiCu 钢试样用 M6 的 A66 尼龙螺栓连接组合成电偶对试样 (标记为 CF-S), 装配图如图 1 所示, CF 板与钢的暴露面积比为 1.47 : 1。将 CF-S 试样浸泡于盛有 3.5%NaCl 溶液的实验槽 (溶液深度为 13 cm, 钢位于下端, CF 板位于上端) 中, 每组设置 3 个平行试样, 实验时确保试样上端低于液面 5 cm 以上, 实验时每半月更换一次溶液。实验时, 进行了单独的 10CrNiCu 钢挂片试验作为对比。实验

完成后将试样拍照、拆解、清洗。拆解后, 用毛刷刷洗 10CrNiCu 钢表面的腐蚀产物, 然后用 (80±1) °C 的柠檬酸铵溶液 (200 g 柠檬酸铵溶于 1000 mL 蒸馏水) 清洗 20 min, 用自来水冲洗干净后, 再依次用蒸馏水、无水乙醇清洗, 干燥后置于干燥皿中。干燥 48 h 后, 用精度为 0.0001 g 的分析天平称取质量, 计算试样的平均腐蚀速率。采用 Keyence VHX-S550E 型 3D 数码显微镜对腐蚀试验后的钢试样进行形貌分析。



1—10CrNiCu 钢; 2—碳纤维复合板; 3—A66 尼龙紧固件

图 1 CF-S 电偶对试样装配图

Fig.1 Schematic diagram of CF-S galvanic couple sample

测定 10CrNiCu 钢、CF 板试样在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位。测定 CF 板试样与 10CrNiCu 钢短路连接电偶对后的电偶电位 E_g 和电偶电流 I_g , 电偶对连接如图 2 所示, CF 板与钢的暴露面积比为 5 : 1。测定 CF 板试样与 10CrNiCu 钢短路连接后的电化学阻抗谱 (EIS), 试验仪器为 CorrTest CS350 电化学工作站, 辅助电极为铂电极, 测试时的频率为 100 kHz~0.01 Hz, 激励信号为 10 mV, 其中 CF 板测量时设定电位为 -0.6 V (SCE)。电化学试验的参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 试验温度均为 (30±1) °C。

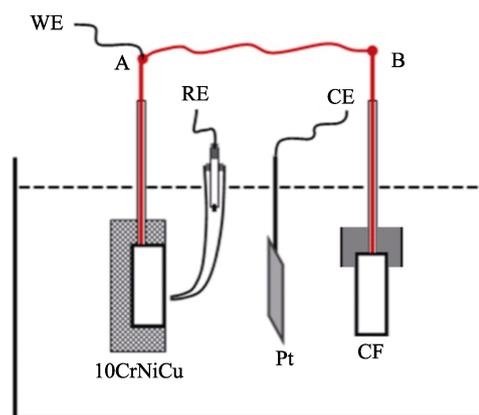


图 2 电偶腐蚀电化学试验示意

Fig.2 Schematic diagram of electrochemical test of galvanic corrosion

2 结果及分析

2.1 腐蚀失重结果及分析

CF-S 电偶对试样在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 3203.5 h

后得到的平均腐蚀速率见表1。由表1可知,CF-S电偶对中10CrNiCu钢的平均腐蚀速率为0.14931 mm/a,10CrNiCu钢的自腐蚀速度为0.06865 mm/a,电偶对中10CrNiCu钢的腐蚀速率是其自腐蚀时的2.175倍,这表明与碳纤维板的连接显著地加速了10CrNiCu钢的腐蚀。

表1 浸泡实验中10CrNiCu钢的腐蚀速率

Tab.1 Corrosion rates of 10CrNiCu steel in immersion test

| 试样编号 | 质量减少/g | 试样暴露面积/cm ² | 腐蚀速率/(mm·a ⁻¹) | 平均腐蚀速率/(mm·a ⁻¹) |
|------------|--------|------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1# | 1.1148 | 25.6950 | 0.15094 | |
| CF-S 2# | 1.1094 | 25.9987 | 0.14845 | 0.14931 |
| 3# | 1.0879 | 25.4817 | 0.14853 | |
| S 0-1# | 0.5993 | 30.1575 | 0.06914 | |
| (10Cr 0-2# | 0.5986 | 29.8754 | 0.06971 | 0.06865 |
| NiCu) 0-3# | 0.6008 | 31.1526 | 0.06710 | |

CF-S电偶对试样浸泡实验后的形貌如图3所示,10CrNiCu钢试样表面附着大量的腐蚀产物,表层为红棕色的产物,底下为较均匀的黑色腐蚀产物。采用柠檬酸三铵清洗10CrNiCu钢试样,清洗后的形貌如

图4所示。图5为10CrNiCu钢试样清洗后的3D显微形貌。从图5可看出,与CF板接触边缘的钢表面部位有明显的腐蚀坑,与CF板连接部位的高度明显高于直接暴露在3.5%NaCl溶液的部位。由于CF板的电偶作用,暴露的钢基体快速腐蚀,CF板附近钢的高度显著低于CF板下的钢基体。与CF板接触的边缘部位的腐蚀坑可能与腐蚀产物的沉积有关,也可能是由于局部发生了轻微的缝隙腐蚀。

2.2 电化学试验结果及分析

测量了CF板试样在3.5%NaCl溶液中的开路电位和10CrNiCu钢的自腐蚀电位,电位变化如图6所示。在前2h内,1#CF板试样的开路电位从250 mV迅速下降到150 mV,然后电位基本维持稳定,随着时间缓慢上升,在24h时电位为165 mV。2#、3#CF板试样的开路电位变化曲线基本一致,在前8h内,电位分别从275、305 mV逐渐下降;在8h以后,开路电位基本稳定,电位随着时间增加稍有上升,在24h时稳定电位为225 mV。CF板试样的开路电位结果与文献[6,11]的结果基本一致,电位随时间延长下降可能与复合材料的吸湿有关^[12],也可能与溶液pH



图3 CF-S电偶对试样2个表面的腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphologies of two surfaces of CF-S galvanic couple sample: a) side A; b) side B

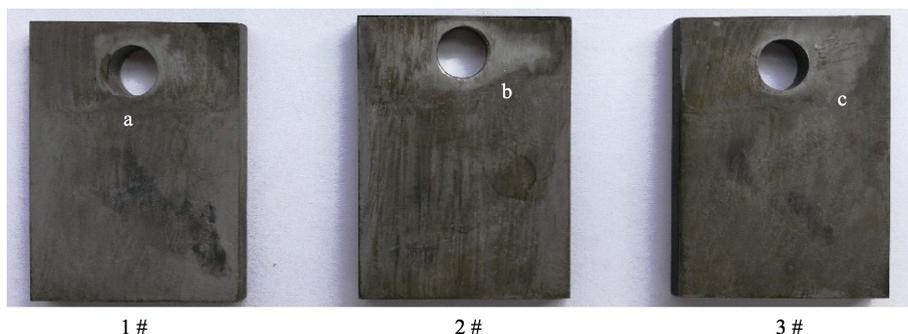


图4 CF-S电偶对中的10CrNiCu钢清洗后的形貌(与CF连接的面)

Fig.4 Morphologies of 10CrNiCu in CF-S galvanic couple samples after cleaning (the surface connected to CF)

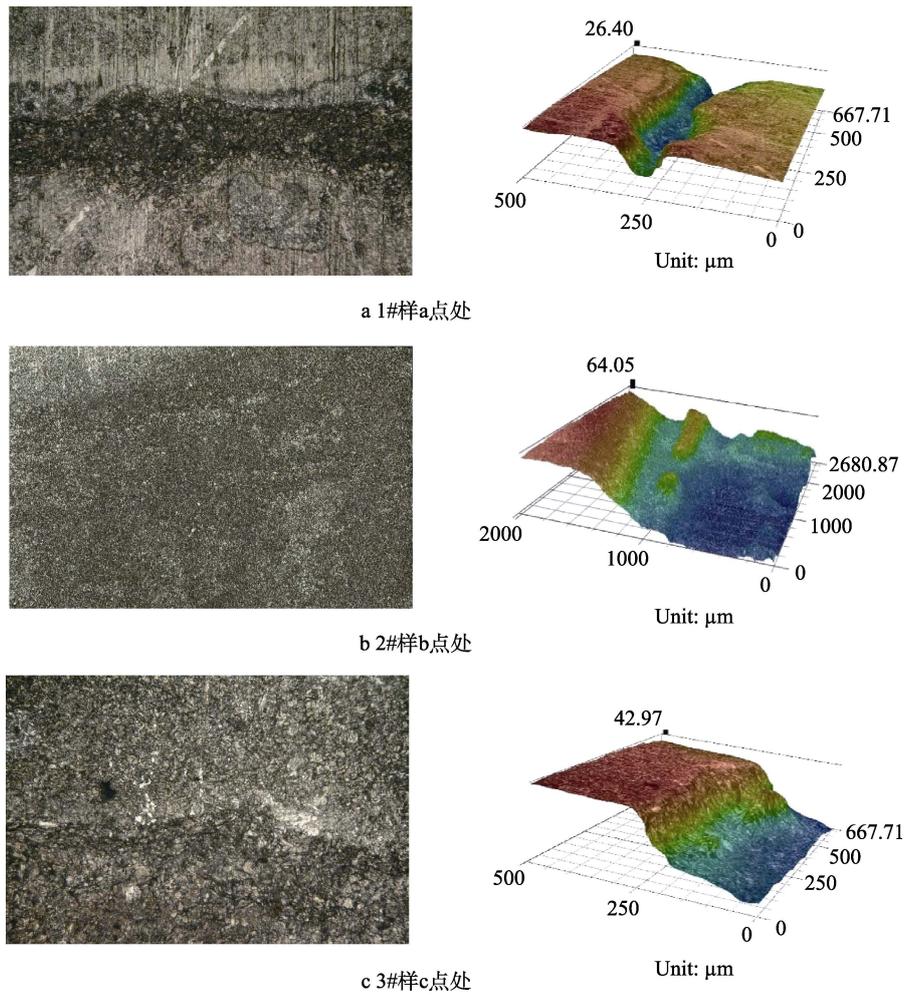


图 5 CF-S 电偶对中钢清洗后的 3D 显微形貌 (左图放大倍数均为 420×)

Fig.5 3D micrographs of 10CrNiCu in CF-S galvanic couple samples after cleaning (the magnifications of left photos all are 420 times): a) the position of point a of 1# sample; b) the position of point b of 2# sample; c) the position of point c of 3# sample

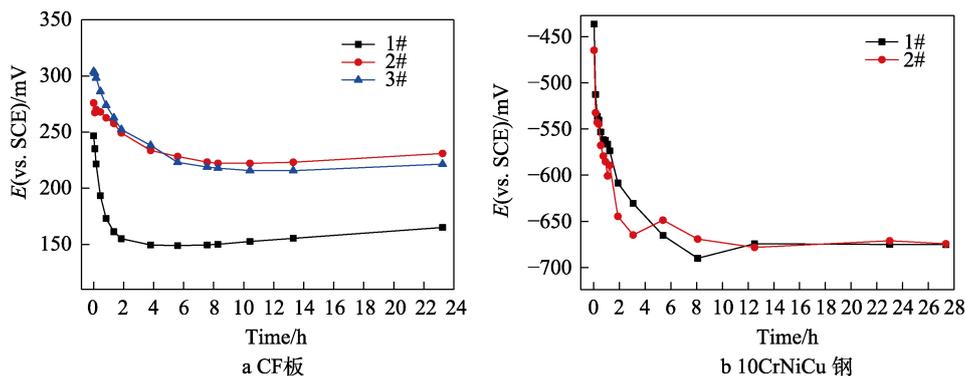


图 6 开路电位变化

Fig.6 The change of open-circuit potential: a) CF plate; b) 10CrNiCu steel

值的变化有关。CF 试样的电化学性能与表面状态有关。CF 板中碳纤维都是经过表面处理的^[13]，由于试样表面可能存在打磨程度不同或碳纤维表面处理时可能存在差异，CF 板试样表面的电化学活性存在差异，使 1#CF 板试样与 2#、3#CF 板试样的开路电位存在明显差异。24 h 时，10CrNiCu 钢的自腐蚀电位约为 -680 mV。CF 板与 10CrNiCu 钢的初始电位差高

达 850 mV 以上，当它们连接形成电偶对时，将产生严重的电偶腐蚀。

进行了 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对的电化学试验，CF 板与钢的暴露面积比为 5 : 1。电偶对电偶电位 E_g 变化如图 7a 所示，3 组试样平行性良好，变化趋势基本一致。前 2 h 内电偶电位快速变负，2~8 h 内电位下降速率变缓，8~48 h 内电位缓慢变负，电偶

电位趋于稳定。在 48 h 时, 3 组试样的平均电偶电位约为 -630 mV, 比钢的自腐蚀电位约正 50 mV。图 7b 为电偶对的电偶电流 I_g 变化曲线, 电偶对的电偶电流在 200~450 μA 内变化, 电偶电流大, 说明 CF 板产生的电偶腐蚀效应显著加速了 10CrNiCu 钢的腐蚀。

为了分析电偶作用对 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对中 10CrNiCu 钢电化学阻抗谱 (EIS) 测量的影响, 进行了电偶对的 EIS 谱和电偶电位下 10CrNiCu 钢的 EIS 谱的对比测量。测量时, 先测量电偶对的 EIS 谱 (如图 2 所示), 稳定 30 min 后, 将电偶对断开 (将图 2 的 B 连接点断开), 将 10CrNiCu 钢的电位极化到电偶电位, 稳定后再测 10CrNiCu 钢的 EIS 谱。测

得的电偶对试验 5 h 和 19 h 时的 EIS 谱如图 8 所示, 5 h 和 19 h 时的电偶电位分别为 -0.5952 V 和 -0.6049 V。从图 8 可看出, 电偶对在试验 5 h 和 19 h 时的 EIS 谱与相同电位下 10CrNiCu 钢的 EIS 谱基本相同。

测量了 CF 板试样极化到 -600 mV 时的 EIS 谱, EIS 谱及其拟合如图 9 所示。采用 ZSimpWin 对 EIS 谱进行拟合, 等效电路为 $R_s(QR_p)(Q_1R_1)$, 其中 R_s 为溶液电阻, R_p 为极化电阻, (Q_1R_1) 部分是辅助电极引起的阻抗。拟合所得 CF 板的极化电阻 R_p 为 56 520 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。由于 CF 板不腐蚀, 其极化电阻远大于 10CrNiCu 钢, 因此, CF 板对电偶对中 10CrNiCu 钢的 EIS 谱的测量影响不大, 即 CF 板和 10CrNiCu

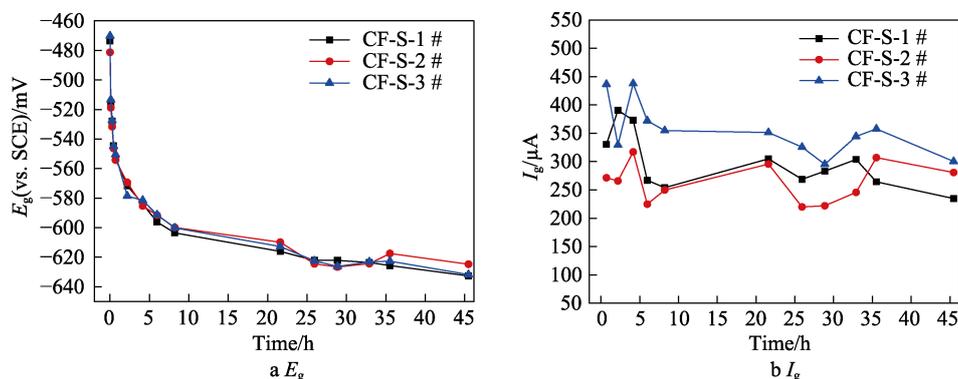


图 7 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对的电偶电位 E_g 和电偶电流 I_g 变化曲线

Fig.7 Changes curves of galvanic potential (E_g) and current (I_g) of couple between CF and 10CrNiCu steel

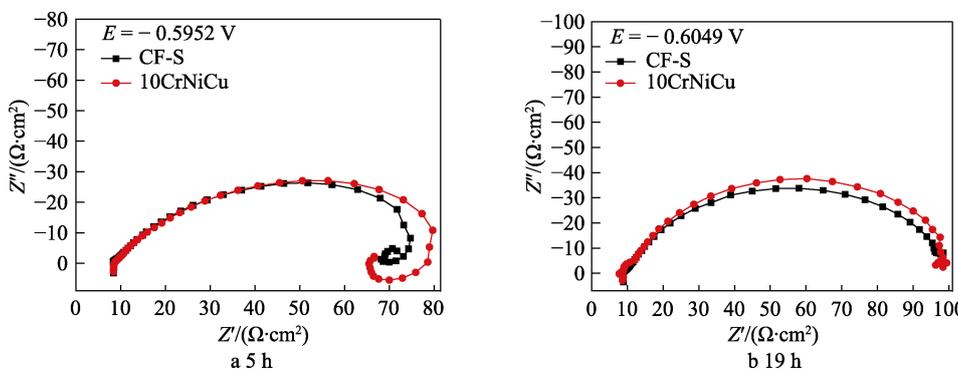


图 8 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对的 EIS 谱 Nyquist 图

Fig.8 Nyquist diagrams of EIS for galvanic couple between CF and 10CrNiCu steel

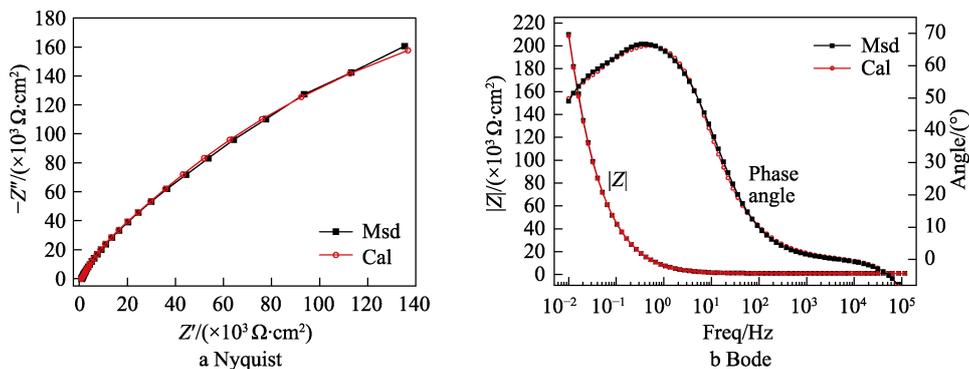


图 9 CF 板试样在 -600 mV (vs.SCE) 下的 EIS 谱图

Fig.9 Simulated diagram of EIS for CF plate at -600 mV (vs.SCE)

钢电偶对的极化电阻可直接视为 10CrNiCu 钢的极化电阻。

测定了 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 9、22、48 h 的 EIS 谱，同时测定了 10CrNiCu 钢自腐蚀时的 EIS 谱，EIS 谱的 Nyquist 图

如图 10 所示。采用等效电路为 $R_s(QR_p)(Q_1R_1)$ 对 EIS 谱进行拟合，拟合结果见表 2，图 11 为其中一个样品的 EIS 实验曲线与拟合曲线的对比图。从图 11 可知，采用等效电路 $R_s(QR_p)(Q_1R_1)$ 可良好地反映电偶对的腐蚀行为。

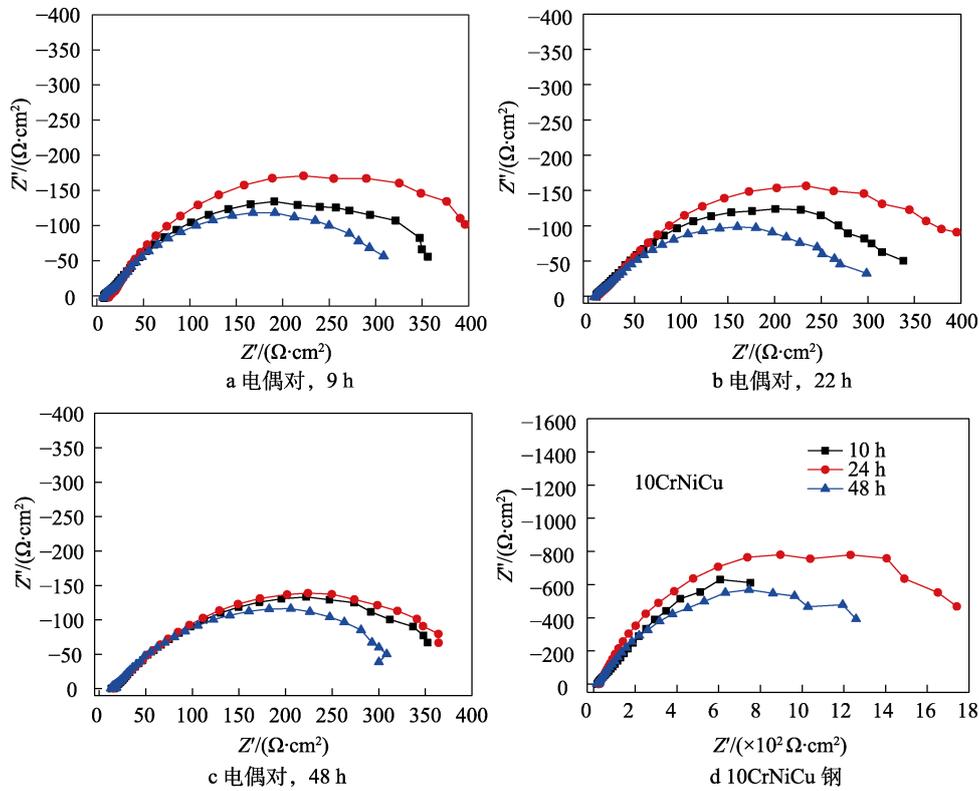


图 10 EIS 谱的 Nyquist 图

Fig.10 Nyquist diagrams of EIS: a) galvanic couple between CF and 10CrNiCu together, 9 h; b) galvanic couple between CF and 10CrNiCu together, 22 h; c) galvanic couple between CF and 10CrNiCu together, 48 h; d) self-corrosion of 10CrNiCu steel

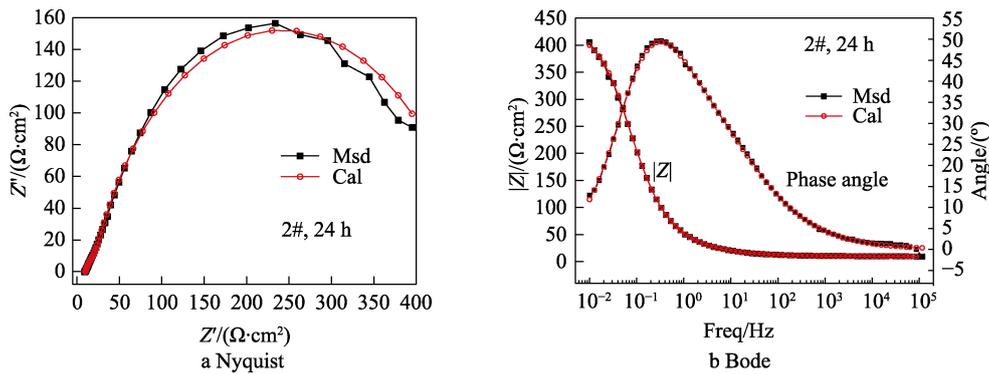


图 11 CF 板和 10CrNiCu 钢电偶对的 EIS 谱拟合图

Fig.11 Simulated of EIS for galvanic couple between CF and 10CrNiCu

由表 2 和图 10 可知，电偶对 3 个平行试样的 EIS 谱的平行性良好，10CrNiCu 钢在 9、22、48 h 时的极化电阻分别为 385.4、338.7、357.7 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，在试验时间内，10CrNiCu 钢的腐蚀速率基本保持不变。10CrNiCu 钢在 10、24、48 h 时的极化电阻分别为 2366、2229、1611 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，10CrNiCu 钢的自腐蚀速率随着时间的延长而下降，电偶对中 10CrNiCu 钢的腐蚀速

率是其自腐蚀的 4.5~6.6 倍。综合考虑面积比的影响，电化学阻抗谱的测试结果与浸泡失重的结果是一致的。另外，需指出的是，CF 板试样的面积包括暴露的碳纤维面积和没有暴露碳纤维的树脂面积。实验前对试样表面进行了打磨，部分露出了碳纤维，而且试样截面部分只是暴露碳纤维织物的截面，截面面积实际上主要为树脂的面积。因此，浸泡实验和电化学试验

表2 CF板和10CrNiCu钢电偶对的EIS谱的拟合结果
Tab.2 Simulated results of EIS of galvanic couple between CF and 10CrNiCu

| 试样及测试时间 | $R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | $R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | $R_1/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 电偶对, 9 h | 1# | 7.017 | 379.3 |
| | 2# | 11.93 | 449.5 |
| | 3# | 6.325 | 327.3 |
| 电偶对, 22 h | 1# | 9.015 | 343.2 |
| | 2# | 9.581 | 391 |
| | 3# | 7.071 | 281.8 |
| 电偶对, 48 h | 1# | 13.63 | 363.6 |
| | 2# | 15.12 | 391.4 |
| | 3# | 12.26 | 318.0 |
| 10CrNiCu 钢 | 10 h | 16.92 | 2366 |
| | 24 h | 20.54 | 2229 |
| | 48 h | 16.86 | 1611 |

时碳纤维的实际面积应显著小于CF板的面积,实际的阴、阳极面积比也分别显著小于1.47:1和5:1。

碳纤维在海水中是惰性电极,其本身不直接参与电化学反应。氧的溶解度小,一般最高浓度约为 10^{-4} mol/L ^[14],计算可得,氧去极化反应在3.5%NaCl溶液中的平衡电位约为0.68 V(NHE),即约为0.435 V(SCE)。Pt在海水中也是惰性电极,测量了Pt在30℃、3.5%NaCl溶液中的开路电位,Pt电极放入溶液5 min后的电位约为0.2 V(SCE)。以上对比表明,当碳纤维单独在3.5%NaCl溶液中时,其开路电位相当于氧去极化的平衡电位,CF板与钢连接形成腐蚀电池,显著促进了氧去极化反应,从而显著加速了钢的腐蚀。

以上结果表明,碳纤维对10CrNiCu钢有很强的电偶效应,当碳纤维的面积与钢的面积比为1:1时,可使10CrNiCu钢的腐蚀速度至少增大约1.5倍。因此,在海洋工程结构中,应用碳纤维复合材料存在很大的电偶腐蚀风险,必须采用相应的保护措施,使钢与碳纤维绝缘或保证碳纤维在海水中不发生暴露。

3 结论

1) 碳纤维复合板与10CrNiCu钢连接形成电偶对,当碳纤维露出并直接与海水接触时,可产生严重的电偶腐蚀,显著加速10CrNiCu钢的腐蚀。浸泡实验和电化学试验的综合分析表明,当碳纤维的面积与钢的面积比为1:1时,至少可使10CrNiCu钢的腐蚀速度增大约1.5倍。

2) 单独的碳纤维与Pt在3.5%NaCl溶液中的电位基本相同,该电位基本是氧去极化的平衡电位;当CF板与钢连接形成腐蚀电池时,显著促进了氧去极化反应,从而加速了10CrNiCu钢的腐蚀。

参考文献:

- [1] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-212.
LI Wei, GUO Quan-feng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese journal of optics, 2011, 4(3): 201-212.
- [2] 张菡英,刘明.碳纤维复合材料的发展及应用[J].工程塑料应用,2015,43(11):132-135.
ZHANG Han-ying, LIU Ming. Development and applications of carbon fiber reinforced polymer[J]. Engineering plastics application, 2015, 43(11): 132-135.
- [3] 舒碧光,秦凤平,王纪霞,等.碳纤维复合壳体用基体环氧树脂研究进展[J].宇航材料工艺,2011,41(3):8-11.
SHU Bi-guang, QIN Feng-ping, WANG Ji-xia, et al. Research progress of basic epoxy resin applied in carbon fiber composite case[J]. Aerospace materials & technology, 2011, 41(3): 8-11.
- [4] 于礼玮,曹维宇.碳纤维复合材料在海洋中的应用[J].化工新型材料,2016,44(8):4-5.
YU Li-wei, CAO Wei-yu. Application of carbon fiber composite in marine area[J]. New chemical materials, 2016, 44(8): 4-5.
- [5] 苏培博,吴晓宏,姜兆华,等.T700碳纤维复合材料与30CrMnSiA高强度钢在NaCl溶液中的电偶腐蚀行为[J].材料保护,2013,46(10):30-32.
SU Pei-bo, WU Xiao-hong, JIANG Zhao-hua, et al. Galvanic corrosion behavior of carbon fiber epoxy resin composite and high strength steel in sodium chloride solution[J]. Materials protection, 2013, 46(10): 30-32.
- [6] 陆峰,钟群鹏,曹春晓.碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀的研究进展[J].材料工程,2003,31(4):39-43.
LU Feng, ZHONG Qun-peng, CAO Chun-xiao. Progress of galvanic corrosion between the graphite epoxy composite materials and metals[J]. Journal of materials engineering, 2003, 31(4): 39-43.
- [7] 陈龙,吴晓宏,姜兆华.防锈铝与碳纤维复合材料电偶腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2008,29(2):59-61.
CHEN Long, WU Xiao-hong, JIANG Zhao-hua. Galvanic corrosion behavior between corrosion-resisting aluminum alloy and carbon fiber composite[J]. Corrosion & protection, 2008, 29(2): 59-61.
- [8] 马宗耀,谢发勤.人工海水中铝合金与复合材料T700电偶的腐蚀性能[J].材料保护,2009,42(3):27-29.
MA Zong-yao, XIE Fa-qin. Study of the galvanic corrosion behavior of aluminum alloy 6061 and carbon fiber composite in artificial seawater[J]. Materials protection, 2009, 42(3): 27-29.
- [9] 陈跃良,王冬冬,张勇,等.T700碳纤维环氧树脂复合材料与2A12铝合金电偶腐蚀研究[J].装备环境工程,

- 2014, 11(6): 40-44.
- CHEN Yue-liang, WANG Dong-dong, ZHANG Yong, et al. Research for galvanic corrosion between T700 CFRP and 2A12 aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(6): 40-44.
- [10] 胡艳玲, 李荻, 郭宝兰. 碳纤维/环氧树脂复合材料与金属的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(2): 93-97.
- HU Yan-ling, LI Di, GUO Bao-lan. Galvanic corrosion behavior between graphite/epoxy composite material (GECM) and metal[J]. Corrosion science and technology protection, 1998, 10(2): 93-97.
- [11] MILLER B A, LEE S G. The effect of graphite-epoxy composites on the galvanic corrosion of aerospace alloys [EB/OL].[1976-4-1].
- [12] 杨专钊, 刘道新, 唐长斌, 等. 碳纤维环氧树脂复合材料电化学腐蚀行为[J]. 全面腐蚀控制, 2008, 22(5): 19-20.
- YANG Zhuan-zhao, LIU Dao-xin, TANG Chang-bin, et al. Electrochemical corrosion behaviors of graphite epoxy composite materials[J]. Total corrosion control, 2008, 22(5): 19-20.
- [13] 林玩君, 易爱华, 赵侠. 碳纤维改性环氧树脂复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2012, 40(5): 4-6, 10.
- LIN Wan-jun, YI Ai-hua, ZHAO Xia. The progress in carbon fibre modified epoxy resin composite materials[J]. New chemical materials, 2012, 40(5): 4-6.
- [14] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.
- WEI Bao-ming. Corrosion theory of metals and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984.