

不锈钢与船体钢在海水中的电偶腐蚀行为研究

徐强¹, 刘亚鹏², 胡鹏飞^{2,3}, 王培², 张宇², 张慧霞², 李相波²

(1.中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 2.中船重工第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101; 3.中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: **目的** 研究不锈钢与船体钢在天然海水中的电偶腐蚀行为, 为不锈钢的应用提供数据支撑。**方法** 利用电化学设备研究不锈钢与船体钢在天然海水中的自腐蚀和电偶腐蚀行为, 并结合质量损失和腐蚀形貌研究阴阳极面积比对电偶腐蚀敏感性的影响。**结果** 2种金属的自腐蚀电位相差 600 mV, 电偶腐蚀倾向严重。当二者发生电偶腐蚀时, 不锈钢作阴极, 船体钢作阳极。随着不锈钢与船体钢阴阳极面积比的减小, 船体钢的腐蚀速率和平均腐蚀深度减小, 不锈钢的腐蚀形貌则不受面积比的影响。**结论** 在实际工程中, 可通过增加阳极材料面积的方法来降低电偶腐蚀效应的影响。

关键词: 不锈钢; 船体钢; 电偶腐蚀; 腐蚀速率; 电化学; 阴阳极面积比

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)05-0126-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.05.016

Analysis of Galvanic Corrosion Behavior of Stainless Steel and Hull Steel in Seawater

XU Qiang¹, LIU Ya-peng², HU Peng-fei^{2,3}, WANG Pei², ZHANG Yu², ZHANG Hui-xia², LI Xiang-bo²

(1. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, China Shipbuilding Industry 725 Research Institute, Shandong Qingdao 266101, China; 3. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: In order to provide data support for the application of stainless steel, this paper carried out a study on the galvanic corrosion behavior of stainless steel and ship hull steel in natural seawater. Electrochemical equipment was used to study the self-corrosion and galvanic corrosion behaviors of stainless steel and ship hull steel in natural seawater, and combined with the weight loss and corrosion morphology, the influence of the area ratio of cathode and anode on the sensitivity of galvanic corrosion was studied. The results show that the self-corrosion potential of the two metals differs by 600 mV, and the galvanic corrosion tendency is serious. When galvanic corrosion occurs between the two metals, stainless steel serves as the cathode and the hull steel serves as the anode. As the area ratio between the anode and cathode decreases, the corrosion rate and average corrosion depth of the hull steel decrease; the corrosion morphology of stainless steel is not affected by the area ratio. Therefore, in

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-04-01

Received: 2021-03-30; Revised: 2021-04-01

作者简介: 徐强(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为船舶舾装。

Biography: XU Qiang (1982-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: ship outfitting.

通讯作者: 刘亚鹏(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Corresponding author: LIU Ya-peng (1989-), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and corrosion protection.

通讯作者: 王培(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Corresponding author: WANG Pei (1990-), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and corrosion protection.

引文格式: 徐强, 刘亚鹏, 胡鹏飞, 等. 不锈钢与船体钢在海水中的电偶腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 126-132.

XU Qiang, LIU Ya-peng, HU Peng-fei, et al. Analysis of Galvanic Corrosion Behavior of Stainless Steel and Hull Steel in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 126-132.

actual engineering, the effect of galvanic corrosion can be reduced by increasing the area of the anode material.

KEY WORDS: stainless steel; hull steel; galvanic corrosion; corrosion rate; electrochemical; area ratio of anode and cathode

船体钢是用于制造船体结构的优质低合金钢^[1]。这类钢种在服役时,不可避免地要面临海水环境的腐蚀问题,然而船体钢的耐蚀性有限^[2],在部分对耐蚀性要求较高的部位,需要使用性能优异的高强度奥氏体不锈钢^[3],随之会导致船体钢与不锈钢之间的电偶腐蚀^[4-5]。

目前已有大量文献针对海水中的电偶腐蚀体系开展研究。常见的电偶腐蚀影响因素主要有电位差、极化特征、面积比、温度等^[6-11];常见的研究对象有钛合金、铜合金、低合金钢、不锈钢等^[12-15]。然而对

于某新型奥氏体不锈钢,其在与船体钢构成的电偶腐蚀体系中的腐蚀行为尚不明确。本文选择了一种新型奥氏体不锈钢和 907A 船体钢作为研究对象,对其在海水环境中的电偶腐蚀体系进行研究,以探究不同面积比对电偶腐蚀特征产生的影响,从而为该新型奥氏体不锈钢的应用提供指导。

1 试验

试验用不锈钢和 907A 钢的化学成分见表 1。

表 1 试验材料的化学元素组成

Tab.1 Chemical composition of experimental materials

材料	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Nb	Cu	P	wt.%
不锈钢	—	21.08	13.88	4.70	2.48	0.32	0.17	0.13	0.020	
907A	0.12	0.64	0.67	1.01	—	0.79	—	—	0.016	

电化学测试样品用线切割加工,试样尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm。试样背面焊接导线,并用环氧树脂密封,仅暴露一个 10 mm×10 mm 面作为工作面。试验前,对工作面依次用 200#、400#、600#、800#、1000#的水磨砂纸进行打磨,然后使用无水乙醇对工作面进行清洗。

电偶腐蚀试验样品用线切割加工,不锈钢试样的尺寸为 30 mm×20 mm×5 mm,907A 的尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm、30 mm×20 mm×5 mm、60 mm×30 mm×5 mm。所有样品背面都焊接导线,并用环氧腻子密封,仅暴露一个最大面作为工作面。对工作面,依次用 200#、400#、600#、800#的水磨砂纸进行打磨,然后使用无水乙醇对样品进行超声清洗,干燥后称取其质量。

电化学测试使用三电极测试体系,参比电极选用饱和甘汞电极(SCE),辅助电极选用铂丝,腐蚀介质为青岛天然海水,试验仪器为 Ametek PMC1000。电偶腐蚀试验参考 GB/T 15748—2013^[16],使用 GD20-II 型多通道电偶腐蚀测量仪对电偶对进行监测,其中参比电极选用饱和甘汞电极。选择 2:1、1:1、1:3 这 3 种阴阳极面积比参数,每组 3 对平行试样。将电偶腐蚀试样根据面积比进行偶合,连同自腐蚀样品在海水中浸泡 14 d,电偶对在试验介质中静置 1 h 后开始测量^[17],得到电偶电位 E_g 和电偶电流 I_g 。试验结束后,进行腐蚀产物的清除和酸洗(907A 酸洗液:500 mL 浓盐酸+3.5 g 六次甲基四胺,加纯水至 1 000 mL;不锈钢酸洗液:100 mL 浓硝酸+20 mL 氢氟酸,加纯水至 1 000 mL),酸洗后用无水乙醇清洗,

干燥后称取其质量。最后,利用三维视频显微镜进行表面腐蚀形貌观察。

2 结果和讨论

2.1 自腐蚀电位

不锈钢与 907A 在天然海水中浸泡 1 个月的自腐蚀电位随时间的变化曲线如图 1 所示。观察可知,907A 的自腐蚀电位在 -700~-750 mV 内波动,最后基本稳定在 -700 mV 左右。不锈钢的自腐蚀电位在前 5 d 内先正移、后负移,在第 5 d 之后趋于稳定,最终稳定于 -120 mV 左右,远正于 907A。不锈钢与 907A 电位差大约为 600 mV,因此不锈钢与 907A 进行偶合时,907A 作为阳极被加速腐蚀,且因为较大的电

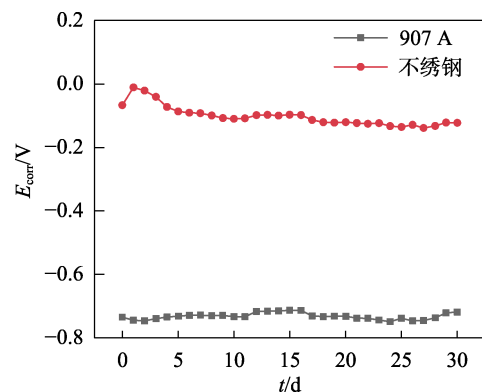


图 1 不锈钢与 907A 在天然海水中自腐蚀电位随时间的变化曲线

Fig.1 Change of self-corrosion potential of two metals in seawater

势差,从而使偶对间产生较高的驱动力。这表明该不锈钢与 907A 之间存在比较明显的电偶腐蚀倾向^[18],但是否会发生严重的电偶腐蚀,则与 2 种材料的极化性能有关^[19]。

2.2 极化曲线

不锈钢与 907A 在天然海水中的极化曲线如图 2 所示。观察可知,不锈钢在天然海水中的阳极极化曲线具有明显的钝化现象。这表明该不锈钢在海水中能够钝化,表面形成了一层具有保护作用的钝化膜^[20-21],因此具有较好的耐海水腐蚀性能。907A 在天然海水中的阳极极化曲线是典型的阳极溶解曲线,不发生钝化,阴极极化曲线主要由氧扩散控制,析氢电位负于 -900 mV,比不锈钢的析氢电位负了约 200 mV。由表 2 可知,不锈钢在海水中的自腐蚀电流密度比 907A 小 1 个数量级^[22]。综上所述,907A 在天然海水中的阳极行为是阳极溶解的活化行为,不锈钢则呈现明显的钝化特征。

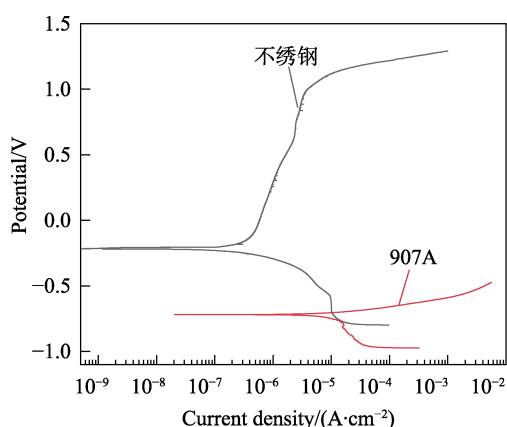


图 2 不锈钢与 907A 在天然海水中的动电位极化曲线
Fig.2 Dynamic potential polarization curves of two steels

表 2 不锈钢与 907A 在天然海水中极化曲线的拟合数据
Tab.2 Polarization curve fitting data of two steels

试样	$J_0/(A \cdot cm^{-2})$	E_0/V
907A	2.89×10^{-6}	-0.71
不锈钢	7.43×10^{-7}	-0.24

由图 2 可知,不锈钢的阴极极化曲线与 907A 的阳极极化曲线相交,利用 2 种金属极化曲线交点处的电位、电流,可推测出 2 种材料构成电偶体系后的电偶电位和电偶电流。当不锈钢与 907A 构成电偶体系时,电偶电位会更加接近 907A 的自腐蚀电位。由于电偶腐蚀体系中的驱动力是电偶对中阴、阳极的电位差,因此电偶腐蚀中的电偶电流大致服从欧姆定律,可以由式(1)表示^[23]。

$$I_g = \frac{E_c^0 - E_a^0}{R_c + R_m + P_c + P_a} \quad (1)$$

式中: E_c^0 、 E_a^0 分别为电偶对阴极和阳极的开路电位, V; R_c 为电解质电阻, Ω ; R_m 为金属导体电阻, Ω ; P_c 、 P_a 分别为电偶接通后阴极和阳极的极化率, V/A; I_g 为电偶腐蚀电流, A;

对于本项目中所涉及的电偶腐蚀体系而言,腐蚀环境为海水,电导率大,电解质电阻极小;腐蚀电极为金属,电导率大,金属电阻极小。故 R_c 和 R_m 可以忽略不计。因此,式(1)可以简化为:

$$I_g = \frac{E_c^0 - E_a^0}{P_c + P_a} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,阴阳极的自腐蚀电位差、阴极金属的阴极极化率和阳极金属的阳极极化率是影响电偶腐蚀电流的主要因素。2 种金属的自腐蚀电位差越大,电偶腐蚀电流越大,电偶腐蚀越严重;阴极极化率越大,电偶腐蚀越轻微。

2.3 电偶腐蚀

2.3.1 电偶电位与电偶电流

为了比较分析不锈钢与 907A 在海水中的电偶腐蚀规律,采用 GD20-II 型多通道电偶腐蚀测量仪,监测了不锈钢-907A 电偶对面积比分别为 2:1、1:1、1:3 时,在天然海水中的电偶电位和电偶电流随时间的变化曲线,如图 3 所示。观察图 3 可知,电偶对在天然海水中的电偶电位随着面积比的减小逐渐负移,变化趋势也随之不同。面积比为 2:1 时,在前 4 d,电偶电位先负移、后正移,之后逐渐正移,14 d 时基本稳定在 -695 mV 左右。面积比为 1:1 时,电偶电位同样先负移、后正移,最后稳定在 -695 mV 左右。面积比为 1:3 时,电偶电位最初从 -720 mV 左右逐渐正移,最终稳定在 -700 mV 左右。观察电偶电流密度-时间曲线可知,随着偶对面积比的减小,电偶电流没有明显变化。

综上所述,在不同的面积比条件下,电偶电位均表现为先负移、后正移的变化趋势,并在 14 d 内趋于稳定。随着阳极面积的增大,电偶电位趋于稳定所需的时间就越长。对电偶电流密度而言,不同面积比条件下的变化趋势基本相近,即随着时间的延长,电偶电流密度逐渐减小,并趋于稳定。电偶电位随着面积比的减小逐渐负移,电偶电流密度有小幅减小。这是因为不锈钢的自腐蚀电位比 907A 正 600 mV,在电偶对中作为阴极,随着面积比的减小,阴极不锈钢的面积相对于阳极 907A 明显减小,相当于大阳极小阴极,电力线在作为大阳极的 907A 表面分布减弱,电流密度将相对减小。

将所有面积比条件下电偶电位和电偶电流密度的稳定值进行整理,得到如图 4 所示的规律。随着 907A 面积的增加,即阳阴极面积比的增大,电偶电位逐渐负移。这是因为 907A 的暴露面积在偶合体系

中的占比逐渐增大, 电偶电位逐渐向 907A 的自腐蚀电位偏移, 阳极的电偶腐蚀驱动力也逐渐变小。随着

907A 面积的增加, 平均电偶电流密度也逐渐减小, 阳极腐蚀速率随之减小。

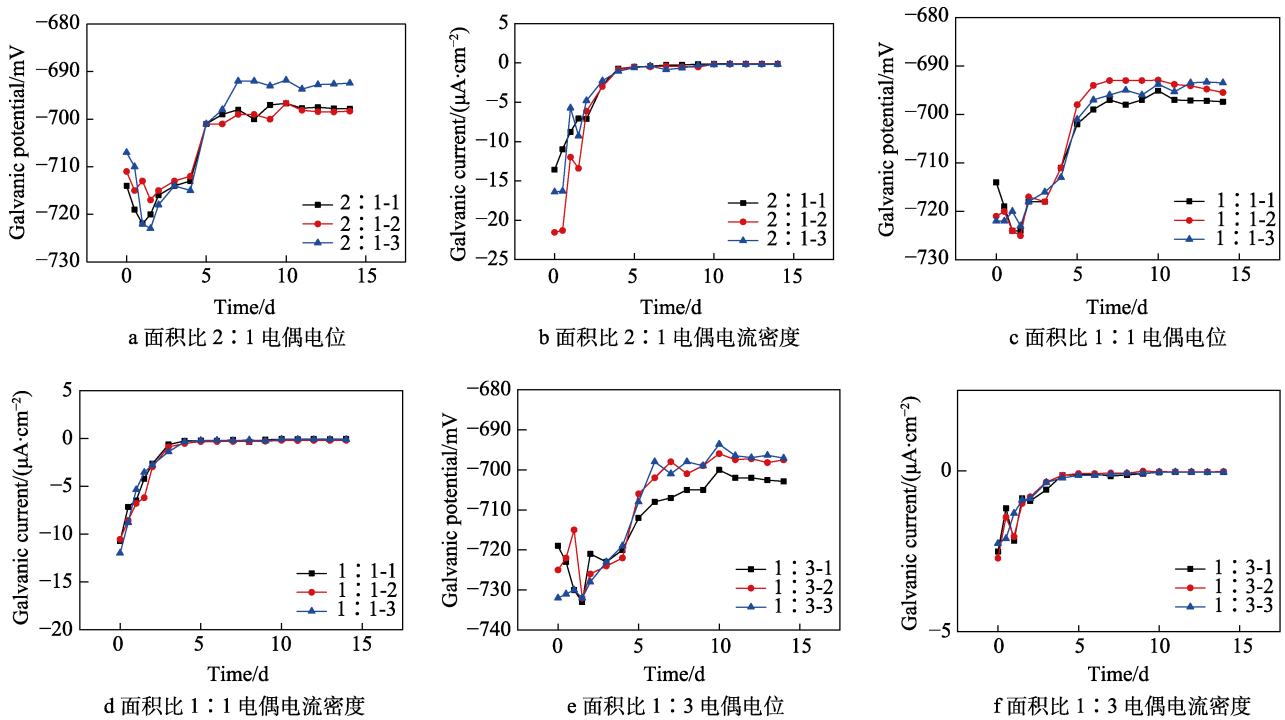


图 3 不同面积比不锈钢与 907A 的电偶电位和电偶电流密度随时间的变化曲线

Fig.3 Variation curve of galvanic potential and galvanic current density of different area ratio stainless steel and ship hull steel with time: a) Galvanic potential with area ratio of 2:1; b) Galvanic current density with area ratio of 2:1; c) Galvanic potential with area ratio of 1:1; d) Galvanic current density with area ratio of 1:1; e) Galvanic potential with area ratio of 1:3; f) Galvanic current density with area ratio of 1:3

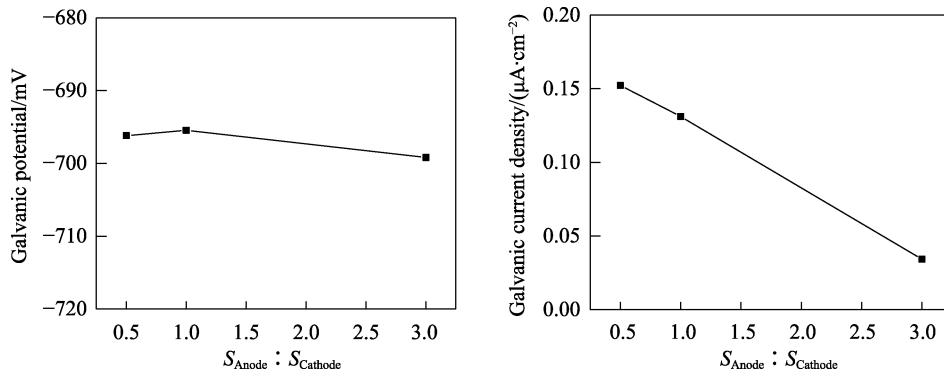


图 4 不同面积比条件的电偶电位和平均电偶电流密度

Fig.4 Galvanic potential and average galvanic current density under different area ratio conditions




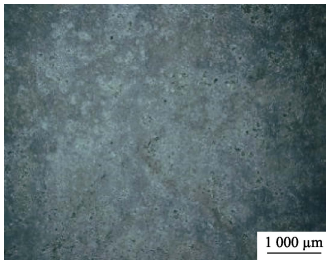


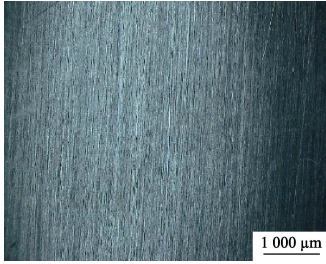
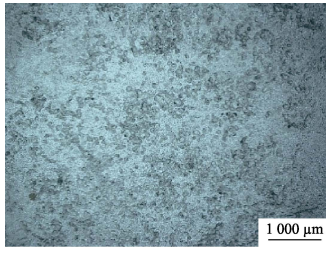


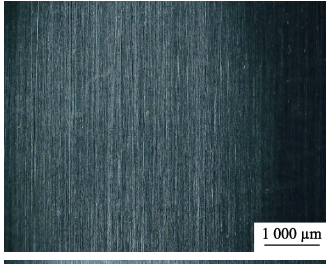
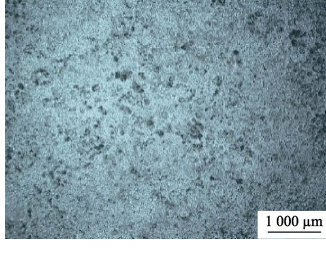


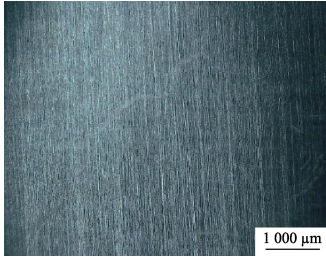
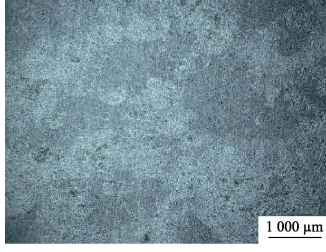
2.3.2 全浸质量损失及腐蚀形貌

使用三维视频显微镜分别观察不同面积比电偶腐蚀前后的表面微观形貌, 见表 3。观察发现, 与自腐蚀试样相比, 当 907A 与不锈钢电接触后, 907A 发生了更严重的腐蚀, 且随着阴阳极面积比的减小, 作为阳极的 907A 腐蚀坑减少, 而不锈钢一直没有明显的腐蚀现象。这是因为 907A 作为电偶腐蚀体系中的阳极, 发生了电偶腐蚀, 而电偶腐蚀体系中的不锈钢作为阴极得到了保护^[24]。此外, 不锈钢在自腐蚀条件下, 同样未出现明显的腐蚀特征, 出现此现象的原

因是不锈钢表面有一层致密的钝化膜^[25], 腐蚀受到了阻碍。

对 907A 腐蚀形貌中的腐蚀坑进行测量, 得到平均腐蚀坑深度随阴阳极面积比的变化规律, 如图 5 所示。观察发现, 与自腐蚀样品相比, 所有阳极试样的腐蚀坑深度均有不同程度增大。随着阳极面积的增大, 即 $S_{\text{Anode}} : S_{\text{Cathode}}$ 的增大, 907A 的腐蚀坑深度整体呈现减小的趋势。结合腐蚀形貌也可以发现, 随着阳/阴极面积比的增大, 腐蚀坑分布密度也略有减小。

表3 不同面积比的腐蚀形貌
Tab.3 Corrosion morphology with different area ratio

面积比	不锈钢 (宏观)	907A (宏观)	不锈钢	907A
对比试样				
2 : 1				
1 : 1				
1 : 3				

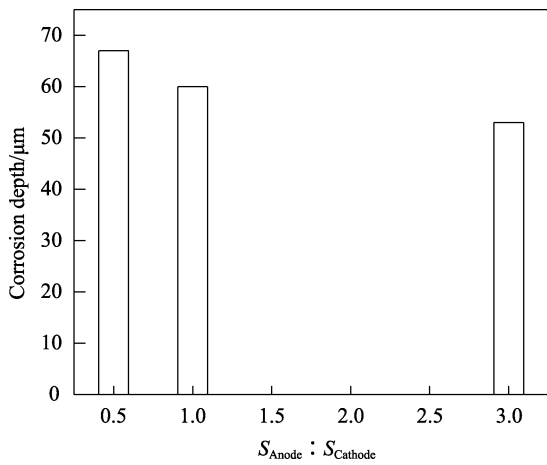


图5 阳极试样平均腐蚀坑深度随面积比的变化规律
Fig.5 The variation of the average corrosion pit depth of anode samples with area ratio

将电偶腐蚀后的试样除锈，然后称取其质量，使用式(3)计算平均电偶腐蚀速率。

$$K_c = \frac{(W_{c0} - W_{c1}) - (W_0 - W_1)}{St} \quad (3)$$

式中：\$K_c\$ 为平均电偶腐蚀速率，\$g/(m^2 \cdot h)\$；\$W_{c0}\$、\$W_{c1}\$ 分别为阳极组元偶联试样试验前后的质量，\$g\$；\$W_0\$、\$W_1\$ 分别为阳极组元对比试样试验前后的质量，\$g\$；\$S\$ 为阳极组元试样试验暴露面积，\$m^2\$；\$t\$ 为试验时间，\$h\$。然后使用式(4)计算电偶腐蚀系数。

$$P_c = \frac{K_c}{K} \times 100\% \quad (4)$$

式中：\$P_c\$ 为电偶腐蚀系数；\$K\$ 为阳极组元对比试样平均腐蚀速度，\$g/(m^2 \cdot h)\$，按式(5)计算。

$$K = \frac{W_0 - W_1}{St} \quad (5)$$

将计算得到的数据制成图6。综合二者可以看出，随着阳极面积的增大，阳极试样的电偶腐蚀速率与电偶腐蚀系数均减小，即当阴阳极面积比减小时，电偶腐蚀对阳极产生的电偶腐蚀效应不断减小，该规律与电偶电流密度的变化规律相近。

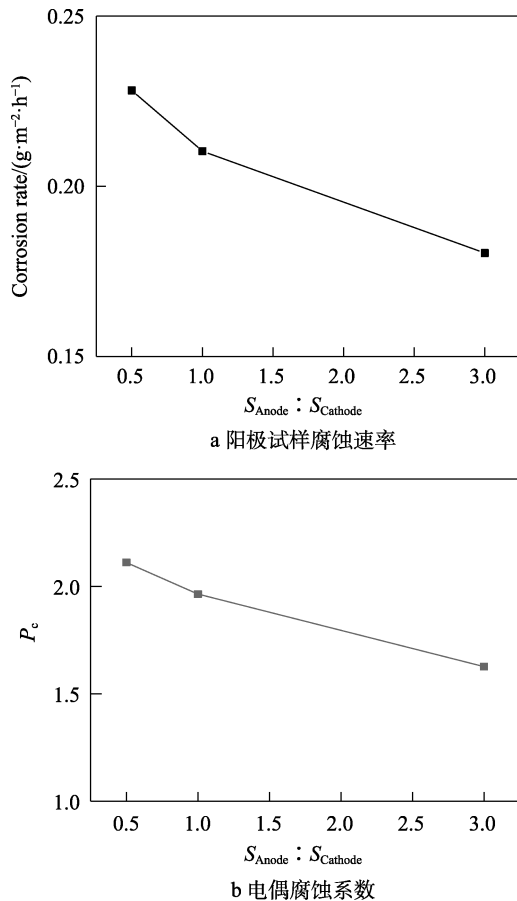


图 6 阳极试样腐蚀速率和电偶腐蚀系数随面积比的变化规律

Fig.6 Variation of the corrosion rate of anode samples (a) and galvanic corrosion coefficient (b) with area ratio

综上所述, 不锈钢的自腐蚀电位较正, 自腐蚀电流较小, 且极易钝化, 表现出了优良的耐蚀性能。它和 907A 的自腐蚀电位有较大的电位差, 电偶腐蚀驱动力很大。然而由于不锈钢阴极反应的极化率较大, 偶合后的电偶电位更接近 907A, 因此产生的电偶效应较小。在电偶腐蚀体系中, 907A 均为阳极, 腐蚀明显加速。不锈钢作为阴极, 因其自身优异的钝化性能, 阴阳极面积比的减小对不锈钢的腐蚀没有明显影响。

3 结论

1) 该新型奥氏体不锈钢的自腐蚀电位较正, 自腐蚀电流较低, 且易于发生钝化, 表现出了优异的耐蚀性能。

2) 在电偶腐蚀体系中, 随着阴阳极面积比的降低, 907A 的电偶腐蚀速率明显减小, 电偶腐蚀系数减小。面积比的变化对该新型奥氏体不锈钢未产生明显影响, 因此可通过增加阳极材料暴露面积的方法来降低电偶腐蚀效应的影响。

3) 在实际船舶等工程建造中, 部分结构对强度

和耐蚀性的要求较高时, 将出现该新型奥氏体不锈钢与其他结构钢等材料共同存在的情况, 难免出现该不锈钢与结构钢焊接或与其他材料法兰连接的工况。除采取涂层和阴极保护联合防护的方法外, 建议在法兰连接及紧固件等铆接工况下采取有效的绝缘防腐措施。同时, 结构设计应避免出现大阴极与小阳极直接电连接的情况。

参考文献:

- [1] 戴永佳, 王化明, 詹毅, 等. 船用钢发展历史与现状分析[J]. 中国水运, 2012, 12(6): 33-36.
DAI Yong-jia, WANG Hua-ming, ZHAN Yi, et al. Analysis of the Development History and Present Situation of Marine Steel[J]. China Water Transport, 2012, 12(6): 33-36.
- [2] 王东胜, 杨剔, 赵前进, 等. 10CrMn₂NiSiCuAl 船用钢板在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀性能[J]. 材料保护, 2018, 51(6): 23-27.
WANG Dong-sheng, YANG Ti, ZHAO Qian-jin, et al. Corrosion Behavior of 10CrMn₂NiSiCuAl Ship Steel in 3.5% NaCl Solution[J]. Materials Protection, 2018, 51(6): 23-27.
- [3] 周鑫磊, 王世安, 王大伟. 舰艇用低磁钢的开发及应用[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(2): 84-88.
ZHOU Xin-lei, WANG Shi-an, WANG Da-wei. Development and Application of Low-Magnetism Steel Used in Naval Ships[J]. Development and Application of Materials, 2012, 27(2): 84-88.
- [4] 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.
- [5] 刘华剑, 邓春龙, 王佳, 等. 海洋环境中电偶腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 58-61.
LIU Hua-jian, DENG Chun-long, WANG Jia, et al. Research Progress of Galvanic Corrosion in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 58-61.
- [6] LIU Yang, LIU Xiao, ZHANG Ze-chuan, et al. Comparative, Real-Time in Situ Monitoring of Galvanic Corrosion in Mg-Mg₂Ca and Mg-MgZn₂ Couples in Hank's Solution[J]. Corrosion Science, 2019, 161: 108185.
- [7] 杨飞. 碳钢与不锈钢在海洋环境中的电偶腐蚀问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YANG Fei. The Study of the Galvanic Corrosion Behavior between the Carbon Steel and Stainless Steel in Marine Environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [8] SHI Lin-jun, YANG Xiu-ying, SONG Ying-wei, et al. Effect of Corrosive Media on Galvanic Corrosion of

- Complicated Tri-Metallic Couples of 2024 Al Alloy/Q235 Mild Steel/304 Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(9): 1886-1893.
- [9] SNIHIROVA D, HÖCHE D, LAMAKA S, et al. Galvanic Corrosion of Ti6Al4V-AA2024 Joints in Aircraft Environment: Modelling and Experimental Validation[J]. *Corrosion Science*, 2019, 157: 70-78.
- [10] 陈子光. 腐蚀损伤模型研究进展[J]. *固体力学学报*, 2019, 40(2): 99-116.
CHEN Zi-guang. Advances in Corrosion Damage Modeling[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(2): 99-116.
- [11] 陈兴伟, 吴建华, 王佳, 等. 电偶腐蚀影响因素研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2010, 22(4): 363-366.
CHEN Xing-wei, WU Jian-hua, WANG Jia, et al. Progress in Research on Factors Influencing Galvanic Corrosion Behavior[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2010, 22(4): 363-366.
- [12] 胡玉婷, 董鹏飞, 蒋立, 等. 海洋大气环境下 TC4 钛合金与 316L 不锈钢铆接件腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2020, 40(2): 167-174.
HU Yu-ting, DONG Peng-fei, JIANG Li, et al. Corrosion Behavior of Riveted Joints of TC4 Ti-Alloy and 316L Stainless Steel in Simulated Marine Atmosphere[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2020, 40(2): 167-174.
- [13] 雷冰, 胡胜楠, 卢云飞, 等. 海水环境中 B10 合金与高强度钢的电偶腐蚀行为与电绝缘防护技术[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(7): 497-501.
LEI Bing, HU Sheng-nan, LU Yun-fei, et al. Galvanic Corrosion Behavior and Electric Insulation between B10 and a High Strength Steel in Seawater Environment for Warship[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(7): 497-501.
- [14] 潘大伟, 闫永贵, 高心心, 等. 高强度钢与典型管系材料 B10 和 TA2 之间的电偶腐蚀及其电绝缘[J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38(8): 589-592.
PAN Da-wei, YAN Yong-gui, GAO Xin-xin, et al. Galvanic Corrosion and Electrical Insulation between High Strength Steel and Typical Piping Materials B10 and TA2[J]. *Corrosion & Protection*, 2017, 38(8): 589-592.
- [15] 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.
- [16] GB/T 15748—2013, 船用金属材料电偶腐蚀试验方法[S].
GB/T 15748—2013, The Method of Galvanic Corrosion Test for Metallic Ship Materials[S].
- [17] 任科, 巨熔冰. Q245R/316L 与 Q345R/316L 电偶对在 3.5%NaCl 溶液中的电偶腐蚀[J]. *石油化工应用*, 2017, 36(9): 101-104.
REN Ke, JU Rong-bing. Galvanic Corrosion of Q245R/316L and Q345R/316L Galvanic Couples in 3.5% NaCl Solution[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2017, 36(9): 101-104.
- [18] 张天宇, 何宇廷, 张腾, 等. 异种结构材料电偶腐蚀及防护技术的研究现状及发展方向[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(5): 40-46.
ZHANG Tian-yu, HE Yu-ting, ZHANG Teng, et al. Research Status and Development Direction of Galvanic Corrosion and Protection Technology for Heterogeneous Structural Materials[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(5): 40-46.
- [19] 任科洋, 石毛毛, 戴亚洲. 09MnNiDR 与不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电偶腐蚀行为研究[J]. *化工技术与开发*, 2018, 47(9): 66-69.
REN Ke-yang, SHI Mao-mao, DAI Ya-zhou. Galvanic Corrosion Behavior of 09MnNiDR and Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2018, 47(9): 66-69.
- [20] FELBA J, FRIEDEL K P, KRULL P, et al. Electron Beam Activated Brazing of Cubic Boron Nitride to Tungsten Carbide Cutting Tools[J]. *Vacuum*, 2001, 62(2-3): 171-180.
- [21] 张宇, 刘亚鹏, 李开伟, 等. 南海大气环境下 304 不锈钢的点蚀特性研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(12): 44-50.
ZHANG Yu, LIU Ya-peng, LI Kai-wei, et al. Pitting Characteristics of 304 Stainless Steel in the Atmospheric Environment of the South China Sea[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(12): 44-50.
- [22] NICOLAS A, MELLO A W, SANGID M D. Relationships between Microstructure and Micromechanical Stresses on Local Pitting during Galvanic Corrosion in AA7050[J]. *Corrosion Science*, 2019, 154: 208-225.
- [23] 王曰义. 海水冷却系统的腐蚀及其控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
WANG Yue-yi. Corrosion and Control of Seawater Cooling Systems[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [24] 赵国仙, 胡晓彤. 925 镍基合金和 110SS 钢在高温高酸性环境中的电偶腐蚀行为[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(10): 32-39.
ZHAO Guo-xian, HU Xiao-tong. Galvanic Corrosion Behavior of Nickel-Based Alloy 925 for Downhole Tools Coupled with 110SS Steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(10): 32-39.
- [25] 刘亚鹏, 张慧霞, 王洪伦, 等. 2507 双相不锈钢南海大气腐蚀行为研究[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(S1): 106-113.
LIU Ya-peng, ZHANG Hui-xia, WANG Hong-lun, et al. Corrosion Behavior of 2507DSS in the Atmospheric Environment of the South China Sea[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(S1): 106-113.

责任编辑: 刘世忠