理论与实验研究

铜合金在模拟深海低温条件下的电偶腐蚀行为研究

邢青^{1,2}, 郭为民², 陈祥曦^{2,3}, 范林², 龚利华¹, 杨超⁴

(1.江苏科技大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212000;
2.中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室,山东 青岛 266101;
3.青岛科技大学 机电学院,山东 青岛 266061;
4.中国海洋大学 材料科学与工程研究院,山东 青岛 266100)

摘要:目的研究管路铜合金在模拟深海低温条件下的电偶腐蚀行为。方法 对舰船常用的管路材料B10合金与管路泵阀材料镍铝青铜偶接后的电偶电位和电偶电流进行监测,对其电偶腐蚀速率和系数进行计算,评价电偶腐蚀敏感性。最后,结合动电位极化曲线的测量探讨温度对偶对阴阳极铜合金腐蚀行为的影响。结果 B10合金为偶合阴极,受到保护,而镍铝青铜为偶合阳极,加速腐蚀。 在深海低温条件下,偶对的电偶腐蚀效应和腐蚀速率均较低,表现出轻度电偶腐蚀敏感性。结论 温度的降低一方面会减缓B10合金 Cu₂O 钝化膜中 Ni 的占位,降低膜层电位,同时减缓镍铝青铜的脱 AI腐蚀,从而缩小了两者自腐蚀电位的差异,降低电偶腐蚀效应;另一方面,温度的降低会减缓阳离子向溶液本体中的迁移,造成腐蚀产物在电极表面的积累,抑制阳极溶解过程,也会大幅降低氧的扩散速率,造成阴极反应阻力的增大,降低电偶腐蚀速率。

关键词: B10合金; 镍铝青铜; 深海环境; 电偶腐蚀; 电化学行为

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.001

中图分类号: TJ04; TG172.2 文献标识码: A

文章编号:1672-9242(2015)02-0001-05

Study on Galvanic Corrosion Behavior of Copper Alloys in Simulated Deep Sea Low-temperature Environment

XING Qing^{1,2}, GUO Wei-min², CHEN Xiang-xi^{2,3}, FAN Lin², GONG Li-hua², YANG Chao⁴

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China; 3. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 4. Institute of Materials Science and Engineering Research, Ocean University of China, Qingdao 266100, China) • 1 •

收稿日期: 2014-11-28; 修订日期: 2014-12-26

Received: 2014-11-28; Revised: 2014-12-26

基金项目:"十二五"国防科技支撑计划项目(JSJC2013207BH03)

Fund: Supported by the "12th Five-Year" National Defense Science and Technology Support Program (JSJC2013207BH03)

作者简介: 邢青(1988—),女,河南人,硕士,主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Biography: XING Qing(1988—), Female, from Henan, Master, Research focus: corrosion and protection of metallic materials.

通讯作者:范林(1982—),男,山东人,博士,主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: FAN Lin(1982—), Male, from Shandong, P.D., Research focus: corrosion and protection of metallic materials.

ABSTRACT: Objective To study the behavior of galvanic corrosion in simulated deep sea low-temperature environment of the copper alloys. Methods The galvanic potential and galvanic current of the seawater pipe material B10 alloy commonly used in the ships and the pump valve material nickel-aluminum bronze were monitored, and their galvanic corrosion rate and coefficient were calculated, to evaluate their sensitivity to galvanic corrosion. Finally, the influence of temperature on the galvanic corrosion behavior of the copper alloys was discussed in combination with potentiodynamic polarization measurements. Results As the result of coupling, B10 alloy acting as the coupled cathode was prevented from corrosion, while nickel aluminum bronze became the sacrificial anode with accelerated corrosion. Meanwhile, both the galvanic corrosion effect and the galvanic corrosion rate of the coupled copper alloys were low at the low temperature of the simulated deep sea environment, showing insignificant galvanic corrosion sensitivity. **Conclusion** On one hand, the decrease of seawater temperature could resist the occupation of cation vacancies or the replacement of Cu ions of Cu₂O film formed on B10 alloy by Ni ions, and reduce the film potential, meanwhile, it could slow down the Al-removing corrosion of nickel-aluminum bronze, and subsequently reduce the difference of null-circuit potentials of the pair, leading to the attenuation of galvanic corrosion effect. On the other hand, lower temperature could also slow down the migration of cations to the solution matrix, resulting in accumulation of corrosion products on the surface of the electrodes and inhibition of anodic dissolution, besides, it could greatly decrease the diffusion rate of oxygen, resulting in increased reaction resistance and decreased galvanic corrosion rate. KEY WORDS: B10 alloy; Ni-Al bronze; deep sea environment; galvanic corrosion; electrochemical behavior

深海输油管道、舰艇和石油钻井平台等使用了大量不同种类的金属材料,异种金属材料之间的搭接难免会引发电偶腐蚀,加速低电位金属的腐蚀。国内外的现有研究表明,B10合金与紫铜、锡青铜等金属材料搭接使用时会发生严重的电偶腐蚀,不能满足深海环境对材料高可靠性的要求¹¹⁻⁴¹。E. Balsco等¹⁵¹研究温度对合金及其焊缝电偶腐蚀的影响时发现,偶合电流随温度的升高而增大。李淑英等¹⁶¹研究碳钢和紫铜在含氯介质中的电偶腐蚀行为时发现,电偶腐蚀对温度存在依赖性,并认为温度通过影响离子的传质过程而引起表面膜或腐蚀产物的状态变化,从而导致阴阳极的电化学行为发生明显改变。

随着B10合金和镍铝青铜在舰船管路材料中应用量的日益增多,其电偶腐蚀行为将成为海水管路使用安全性的严重威胁,尤其是深海管路系统,如果发生泄露,后果将不堪设想。目前对于B10合金与镍铝青铜的电偶腐蚀行为研究的相关报道仍较少,而且,相关研究所涉及的温度范围多集中在中、高温段(20~100℃),而对于深海低温条件(4~20℃)下的研究未见报道。因此,有必要对舰船管路铜合金在模拟深海条件下的电偶腐蚀规律进行研究,为管路系统在深海环境下的选材和应用提供指导。文中通过对材料偶合

电位、偶合电流的监测,对偶对电偶腐蚀速率、电偶腐 蚀系数及敏感性的分析,结合电化学测量,研究了B10 合金与镍铝青铜在深海低温条件下的电偶腐蚀行为。

1 实验方法

选用舰船常用海水管路材料 B10 合金为实验材料,以镍铝青铜为偶接材料,其化学成分列于表1。电化学试样尺寸为10 mm×10 mm×3 mm,背面点焊引出铜导线,并用环氧树脂包封。电偶腐蚀速率测量采用圆形片状试样,尺寸为50 mm²×3 mm,质量测量精度为0.1 mg。实验前用氧化铝砂纸逐级打磨至1000*,依次用去离子水和无水乙醇清洗,吹干待用。

试验在密闭的五口烧瓶中进行,以青岛小麦岛的 天然海水为实验溶液,通过向溶液中通入N₂来控制溶 解氧的质量分数为5%,通过DC-2020低温恒温槽控 制实验温度分别为4,12,20℃。电化学实验在PAR PARSTAT 2273电化学工作站上进行。采用三电极体 系,工作电极为B10铜合金或镍铝青铜,辅助电极为铂 铌丝,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。测试前将工 作电极在溶液中静置30 min,待开路电位稳定后开始 测量。极化曲线的扫描电位范围为-0.6~0.6 V(vs.

表1 B10铜合金和镍铝青铜的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of B10 alloy and nickel-aluminum bronze

%

 Alloys	Chemical composition									
	Ni	Fe	Mn	Pb	S	С	Zn	Al	Si	Cu
B10	10.13	1.71	0.834	< 0.01	< 0.005	0.0059	0.06	—	_	Bal.
Ni-Al bronze	$4.0\sim5.0$	$4.0\sim5.0$	$1.0 \sim 2.5$		< 1	_		8.5 ~ 10		Bal.

SCE),扫描速率为1 mV/s。使用C-View 拟合软件对 实验结果进行分析。电偶腐蚀实验依据 GB/T 15748—1995《船用金属材料电偶腐蚀试验方法》进行 测试,阴阳极偶对间距为80 mm。采用DL-1型多通道 电偶腐蚀测量仪监测偶合电位(*E*_g)和偶合电流密度 (*i*_g),数据采集频率为30 min,实验时间为200 h。电偶 腐蚀速率测量试样按照 GB/T 16545—1996 腐蚀产物 化学清除方法去除腐蚀产物,依次用去离子水和无水 乙醇清洗,吹干后在干燥器中放置48 h 后称量,由式 (1)和式(2)分别计算腐蚀速率和电偶腐蚀系数 γ。

$$v = \frac{\Delta m}{Sto} \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{v_{\rm c} - v_0}{v_0} \times 100 \tag{2}$$

式中:v 为腐蚀速率, mm/a; v_c 和 v_0 分别对应于偶接后和未偶接的腐蚀速率; Δm 为试验前后的质量损失,g;S 为试样总面积, mm²;t 为试验周期, a; ρ 为材料密度,g/mm³。

2 结果与讨论

2.1 偶合电位和偶合电流的测试结果

B10合金/镍铝青铜偶对在不同温度下浸泡200h 的偶合电位和偶合电流的监测结果如图1所示。从 E。的变化来看,B10合金与镍铝青铜在4℃偶接后,E。 稳定在约-185 mV,较12 ℃和20 ℃时为正。表明偶 对在较低温度下的热力学稳定性更高,电偶腐蚀倾 向更低。12 ℃和20 ℃时 E 初始值相当, 而随浸泡时 间的延长,12 ℃时*E*_g逐渐升高,热力学稳定性提高, 电偶腐蚀倾向减弱。20℃时E。约为-200 mV,并基本 保持稳定,表现出较高的电偶腐蚀效应。从i的变化 来看,在不同温度下i,始终为负,表明B10合金为偶 对阴极,受到保护:镍铝青铜为偶对阳极,腐蚀被加 速^[7-8]。浸泡最初阶段, $i_{s}(4 \, \mathbb{C}) < i_{s}(12 \, \mathbb{C}) < i_{s}(20 \, \mathbb{C})$, 说明低温下的电偶腐蚀速率更低。随试验时间的延 长,*i*_a逐渐减小,且温度越高时*i*_a降幅越大,特别是 20 ℃时,i_i趋于0,也就是说B10合金与镍铝青铜的电 偶腐蚀效应减弱并消失。这是由于高温下的高电偶 腐蚀速率加快了阳极表面腐蚀产物的形成和积累.大 幅缩小了镍铝青铜与B10合金间的极性差异[9-11]。

2.2 电偶腐蚀速率及敏感性分析

不同温度下未偶接和偶接后的B10合金与镍铝青



- 图 1 B10 合金/镍铝青铜偶对在不同温度下浸泡 200 h 的偶合 电位和偶合电流
- Fig.1 The curves of galvanic corrosion potential and current density of B10 alloy/Ni–Al bronze pair after immersion at different temperature for 200 h

铜的腐蚀速率的对比如图2所示。经比较可见,不同 温度下未偶接B10合金的腐蚀速率大于其电偶腐蚀速 率,而未偶接镍铝青铜的腐蚀速率均小于其电偶腐蚀 速率。这表明偶接后B10合金作为偶合阴极得到保 护,镍铝青铜作为偶合阳极被加速腐蚀。同时还能看 到,随着温度的降低,两种铜合金的腐蚀速率均减小, 这与偶合电流的监测结果一致,表明电偶腐蚀效应和 腐蚀速率均随着温度的降低呈减小的趋势。阳极组



图 2 未偶接及偶接 B10 合金与镍铝青铜在不同温度条件下的 腐蚀速率

Fig.2 Corrosion rates of coupled and non-coupled B10 alloy/nickel-aluminum bronze in seawater at different temperature 元镍铝青铜的电偶腐蚀系数 γ 在4,12,20 ℃时分别为 8.696,14.815,41.935, γ 随温度的降低呈减小的趋势, 表明电偶腐蚀敏感性的减弱。此外,偶合阳极镍铝青 铜表面电流密度处于0.3~1 μ A/cm²,按照 HB 5374— 87 规定的评级方法,A,B,C,D,E级对应的表面电流 密度范围分别为: ≤ 0.3 μ A/cm²,0.3~1.0 μ A/cm², 1.0~3.0 μ A/cm²,3.0~10.0 μ A/cm², ≥10.0 μ A/cm²。 B10 合金和镍铝青铜的电偶腐蚀敏感性应为B级,具 有轻度敏感性。

2.3 单电极的腐蚀电化学行为

B10合金和镍铝青铜在不同温度下的极化曲线如 图3所示,其阴阳极塔菲尔斜率(B_e和B_a)、自腐蚀电位 (E_{cor})和自腐蚀电流(i_{cor})的拟合结果见表2。由E_{cor}和 i_{cor}的结果可见,在相同温度下,B10合金的E_{cor}均高于 镍铝青铜,而其 i_{cor}则相对较低,表明B10合金在该温 度范围内的耐蚀性高于镍铝青铜。同时还可以看到, 随温度的降低,B10合金和镍铝青铜的E_{cor}的差值逐渐 减小,这应当归因于两种铜合金成分不同所引起的电 化学特征上的差异。



图 3 单电极材料在不同温度下的极化曲线 Fig.3 Polarization curves of B10 alloy and Ni–Al bronze at different temperature

铜合金具有一定的钝化能力,其钝化膜通常以 Cu₂O的形式存在。Cu₂O为缺少阳离子的半导体,而Ni 具有极强的自钝化性能,是常用的耐蚀性合金元素。 表2 B10合金和镍铝青铜在不同温度下的极化曲线的拟合结果

Table 2 Fitting parameters of polarization curves of B10 alloy and Ni–Al bronze at different temperature

M . 1	0.190	Fitting parameters						
Materials	θ /°C	B _a /mV	$B_{\rm c}/{ m mV}$	$i_{\rm corr}/({ m A} \cdot { m cm}^{-2})$	$E_{ m corr}/{ m V}$			
	4	131.92	146.26	2.76E-07	-0.45764			
B10	12	66.803	148.48	3.00E-06	-0.32213			
	20	44.086	93.563	2.21E-06	-0.32111			
Ni-Al	4	111.30	515.47	6.97E-05	-0.46400			
bronze	12	101.47	167.66	5.83E-06	-0.43190			
	20	102.39	108.39	5.15E-06	-0.55907			

Ni可以通过占据Cu₂O 膜层的阳离子空位或取代Cu离子,掺杂到有缺陷的Cu₂O 点阵当中,改变钝化膜的缺陷结构,增大膜层电阻,提高合金的耐蚀性。由于B10合金中含有高含量的Ni和低含量的杂质元素,使得钝化膜中的缺陷得到有效改善,并且温度的升高会促进Ni由B10合金基体向钝化膜中的迁移,加速钝化过程,因此B10合金的*E*_{corr}表现出随温度升高而正移的趋势。

对于镍铝青铜来说,Ni含量的降低造成了合金钝 化膜耐蚀性的降低,提高了腐蚀介质通过钝化膜缺陷 的扩散。同时,Al的添加提高了合金脱Al腐蚀的风 险,温度的升高又会推动腐蚀电化学反应的进行,因 此镍铝青铜的*E*cor随温度的升高而负移。

以上因素共同导致了高温下铜合金*E*_{cor}差值的增大,这与*E*_e具有一致的变化趋势,因此,两种铜合金的电偶腐蚀效应随温度的降低而减弱。由电偶腐蚀电流的监测结果已知,B10合金为偶合阴极,镍铝青铜为偶合阳极,因此根据混合电位理论,B10合金的阴极极化过程和镍铝青铜的阳极极化过程将决定两者偶合后电偶腐蚀电流的大小。

镍铝青铜在不同温度下的阳极极化曲线变化不大,随温度的降低,B。值仅略微增大,表明金属电化学反应阻力升高,腐蚀较慢。相对而言,B10合金的阴极极化曲线B。值随温度的降低则大幅增长,表明氧的去极化作用显著降低。因此,在阳极塔菲尔区斜率变化轻微的前提下,阴极塔菲尔区斜率的增大将造成平衡电位的降低和偶合电流的减小。这就为B10合金和镍铝青铜低温时具有较低的i。值和电偶腐蚀速率提供了电化学动力学上的解释^[12-15]。

此外,极化曲线及其电化学参数的拟合结果还表明,在溶氧量不变的情况下,低温时阴阳极传质过程的减缓造成了反应阻力的增大,表现为高B。和B。值。 温度的降低会减慢溶解下来的阳离子向溶液本体中 的迁移,造成腐蚀产物在电极表面的积累。鉴于Al的 氧化产物的保护性较强,这一过程对镍铝青铜的影响 较B10合金更为显著,因此镍铝青铜在4℃时的*E*_{cor}相 对较高。另一方面,温度对电极阴极过程的影响要远 高于对铜合金阳极溶解过程的影响。由于低温下氧 在溶液中的扩散显著落后于其在电极表面的还原,偶 对电极的整个电化学反应受氧的扩散控制,因而造成 电偶腐蚀速率随温度的降低而减小^[16-17]。

3 结论

1) B10 合金为偶合阴极,受到保护,镍铝青铜为 偶合阳极,加速腐蚀。随温度降低,两者偶接时的电 偶效应减弱,电偶腐蚀速率降低。在低温下具有轻度 电偶腐蚀敏感性,为B级。

2) 高温有利于Ni在B10合金Cu₂O钝化膜中的占 位、膜层缺陷的改善和耐蚀性的提高,但也会推动镍 铝青铜的脱Al腐蚀。因此降低温度会缩小两者自腐 蚀电位的差异,降低电偶腐蚀效应。

3)温度的降低会减缓阳离子向溶液本体中的迁移,造成腐蚀产物在电极表面的积累,抑制阳极溶解过程,也会大幅降低氧的扩散速率,造成阴极反应阻力的增大,降低电偶腐蚀速率。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 穆鑫,魏洁,董俊华,等.低碳钢在模拟海洋潮差区的腐蚀 行为的电化学研究[J].金属学报,2012,48(4):420—426.
 MU Xin, WEI Jie, DONG Jun-hua, et al. Electrochemical Study on Corrosion Behaviors of Mild Steel in a Simulated Tidal Zone[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(4): 420— 426.
- [3] 周建龙,李晓刚,程学群,等. 深海环境下金属及合金材料
 腐蚀研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2010,22(1):47—
 51.

ZHOU Jian-long, LI Xiao-gang, CHENG Xue-qun, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1):47-51.

[4] 胡建朋,刘智勇,胡山山,等. 304不锈钢在模拟深海和浅海
 环境中的应力腐蚀行为[J]. 表面技术,2015,44(3):9—14.
 HU Jian-peng, LIU Zhi-yong, HU Shan-shan, et al. Stress

Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in Simulated Deep and Shallow Seawater Environment[J]. Surface Technology, 2015,44(3):9-14.

- [5] BLASCO-TAMARIT E, IGUAL-MUNOZ A, ANTON J G, et al. Comparison between Open Circuit and Imposed Potential Measurements to Evaluate the Effect of Temperature on Galvanic Corrosion of the Pair Alloy 31–Welded Alloy 31 in LiBr Solutions[J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3590–3598.
- [6] 李淑英,陈玮.碳钢/紫铜在 NaCl 介质中的电偶行为[J]. 腐 蚀科学与防护技术,2000,12(5):300—302.
 LI Shu-ying, CHEN Wei. Galvanic Corrosion Behavior of Carbon Steel/Copper in NaCl Media[J]. Corrosion Science and Protection Technology,2000,12(5):300—302.
- [7] 肖葵,董超芳,李久青,等.镁合金在大气环境中电偶腐蚀
 行为及规律的研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(2):
 201-207.

XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Jiu-qing, et al. Research on Atmospheric Galvanic Corrosion Evaluation of Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 201-207.

[8] 杜敏,郭庆锟,周传静.碳钢/Ti和碳钢/Ti/海军黄铜在海水 中电偶腐蚀的研究[J].中国腐蚀与防护学报,2006,26(5): 263-266.

DU Min, GUO Qing-kun, ZHOU Chuan-jing. Galvanic Corrosion of Carbon Steel/Titanium and Carbon Steel/Titanium/Navel Brass in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(5):263—266.

- [9] SOUTO R M, GONZALEZ-GARCIA Y, BSATOS A C, et al. Investigating Corrosion Processes in the Micrometric Range: A SVET Study of The Galvanic Corrosion of Zinc Coupled with Iron [J]. Corrosion Science, 2007, 49(12):4568-4580.
- [10] 郭晓伟.碳纤维增强塑料/结构钢复合结构的电偶腐蚀试验研究[J].材料开发与应用,1998,13(2):16—19.
 GUO Xiao-wei. Galvanic Corrosion of Composite Structure of Steel/CFRP[J]. Development and Application of Materials, 1998,13(2):16—19.
- [11] ABREU C M, CRISTOBAL M J, MONTEMOR M F, et al. Galvanic Coupling between Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel in Alkaline Media [J]. Electrochimica Acta, 2002,47(1):2271-2279.
- [12] 吴恒,候晓薇,李超,等. 316L不锈钢在淡化海水中的耐腐 蚀性能研究[J]. 装备环境工程,2013,10(6):14—18.
 WU Heng, HOU Xiao-wei, LI Chao, et al. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Desalinate Seawater [J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(6):14—18.
- [13] 郭娟,侯文涛,许立坤,等.海洋干湿交替环境下电偶腐蚀
 及其研究方法进展[J].装备环境工程,2012,9(5):67—70.
 (下转第24页)

包装箱进行50%气体置换,保留50%空气,氢氧传感器监测数据正常。故得出:贮存环境需要一定量的氧气,有利于固态电化学传感器正常工作2年以上。

5 结论

1)密封容器内如果进行干燥纯氮气气体置换,置 换气体压力超过220 kPa,并进行保压10 min以上,氢 气监测数据有效时间最多为3个月,此间监测数据误 差小于±5%FS;

2)密封容器内如果进行干燥纯氮气气体置换,置换压力不得超过150 kPa,并进行保压5 min以内,氢气监测数据有效时间可保持6个月以上,误差计算小于±5%FS;

3)密封容器内如果不进行气体置换,以空气状态 贮存,或进行一部分气体置换,保留一部分空气状态 贮存,氢监测数据有效时间均可为2年以上,计算监测 数据误差均小于±3%FS;

密封容器内的压力和温度的变化对固态电化
 学氢氧传感器的影响较大,误差大于±3%FS,而湿度
 对其影响较小;

5) 通过GB 12358—2006注气检定合格的氢传感器。在密封容器内扩散式检定,约1/3为不合格,检定数据误差大于±5%FS,故需要解决标定环境与使用环境不一致的问题。

参考文献:

[1] GB 12358—2006,作业场所环境气体检测报警仪通用技术 要求[S].

GB 12358—2006, Gas Monitors Alarms for Workplace-general Technical Requirements[S].

- [2] JJG 365—2008,电化学氧测定仪检定规程[S].
 JJG 365—2008, Verification Regulation of Electrochemical Oxygen Meter[S].
- [3] 刘俊峰,陈侃松,王爱敏,等. 氢气传感器的研究进展[J]. 传感器与微系统,2009,28(8):8—11.
 LIU Jun-feng, CHEN Kan-song, WANG Ai-min, et al. Research Progress of Hydrogen Sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2009,28(8):8—11.
- [4] 冯良东,李东,周仲柏. 稳态法联合检测 CO₂和O₂的全固态 电化学传感器研究[J]. 淮阴工学学报,2002,11(5):26—29.
 FENG Liang-dong, LI Dong, ZHOU Zhong-bai. Studies on the Solid-state Electrochemical Sensor for Stated Detection of Gases CO₂ and O₂[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology,2002,11(5):26—29.
- [5] 肖定全,余萍,朱建国,等. 新型高性能氢气传感器[J]. 功能 材料,1998,29(3):268—270.
 XIAO Ding-quan, YU Ping, ZHU Jian-guo, et al. Advanced and New Type Hydrogen Gas Sensors[J]. Journal of Functional Materials,1998,29(3):268—270.
- [6] 郑晓明,杨帮华,张永怀,等. 电化学传感器批量测试系统 设计[J]. 仪表技术与传感器,2010(7):92—95.
 ZHENG Xiao-ming, YANG Bang-hua, ZHANG Yong-huai, et al. Design of Batch-testing System for Electrochemical Sensors[J]. Instrument Technique and Sensor,2010(7):92—95.
- [7] 王紫婷,乔爱工.现代电子测量[M].北京:中国铁道出版 社,2008.

WANG Zi-ting, QIAO Ai-gong. Modern Electron Measurement[M]. Beijing: China Railway Press, 2008.

[8] 张永超,马文生,张青云,等. 电化学传感器的测试系统设计[J]. 计测技术,2010,30(增刊):126—128.
ZHANG Yong-chao, MA Wen-sheng, ZHANG Qing-yun, et al. Test System Design of Electrochemistry Solid-state Sensor
[J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(supplement):126—128.

(上接第5页)

GUO Juan, HOU Wen-tao, XU Li-kun, et al. Research Progress of Galvanic Corrosion in Dry and Wet Alternative Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5):67-70.

- [14] SONG Guang-Ling. Potential and Current Distributions of One-dimensional Galvanic Corrosion Systems[J]. Corrosion Science, 2010(52):455-480.
- [15] 王奎,张慧霞,郭为民,等. 浸水率对低合金钢海水腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程,2013,10(6):14—18.
 WANG Kui, ZHANG Hui-xia, GUO Wei-min, et al. Re-

search on Corrosion Behavior of Low Alloy Steel under the Natural Seawater Wet–Dry Alternate Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):14—18.

- [16] MELCHERS R E. Temperature Effect on Seawater Immersion Corrosion of 90:10 Copper-nickel Alloy[J]. Corrosion, 2001, 57(5):440-451.
- [17] KEAR G, BARKER B D, STOKES K, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of 90–10 Cu–Ni Alloy in Chloride–based Electrolytes[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2004, 34 (1):658–659.