

Si对低合金钢耐海水腐蚀性能影响的电化学研究

田骏, 李国明, 陈珊

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: 目的 研究Si对低合金钢耐海水腐蚀性能的影响。方法 采用真空电弧炉冶炼了不同硅含量的低合金钢,通过极化试验研究钢在海水中的腐蚀特性。采用交流阻抗和线性极化研究锈层对钢的保护作用,并对夹杂物进行SEM及EDAX分析。结果 当硅的质量分数小于0.9%时,其在海水中的腐蚀速度随硅的质量分数增加而增加;当硅的质量分数大于0.9%时,其在海水中的腐蚀速度随硅含量的增加而减小。随浸泡时间延长,钢的耐蚀性降低。结论 Si的质量分数为0.9%时,钢耐蚀性的最好,锈层对钢的腐蚀不具有保护作用。

关键词: Si; 低合金钢; 电化学性能; 海水腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.020

中图分类号: TJ01; TG172.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0110-06

Electrochemical Study on Effects of Si Contents on the Corrosion Resistance of Low Alloy Steels to Sea Water

TIAN Jun, LI Guo-ming, CHEN Shan

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of Si on the resistance of low alloy steel to sea water corrosion by electrochemical methods. **Methods** Low alloy steels with different mass fractions of Si were smelted by vacuum arc furnace. The corrosion resistance of the steel in sea water was evaluated by polarization tests. The corrosion resistance of the rust layer after full immersion was studied by linear polarization test and EIS test. The composition of inclusions was studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive analysis of X-ray (EDAX). **Results** The experiment results indicated that when the Si content was less than 0.9%, the uniform corrosion rate increased with the increase of Si content; when the Si content was more than 0.9%, the corrosion rate decreased with increasing content of Si; the corrosion resistance of the steel decreased as the time of immersion prolonged. **Conclusion** When the Si content was 0.9%, the steel had the best corrosion resistance; the protection ability of rust layer was limited.

KEY WORDS: Si; low alloy steel; electrochemical properties; sea water corrosion

海洋是一种复杂的腐蚀环境^[1],海水腐蚀是海洋工程用钢及船舶用钢的主要失效形式,海水腐蚀不仅

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2015-10-18

Received: 2015-09-17; Revised: 2015-10-18

作者简介: 田骏(1990—),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Biography: TIAN Jun(1990—), Male, from Tianjin, Master graduate students, Research focus: corrosion and protection of metal materials.

通讯作者: 李国明(1972—),男,湖北武汉人,博士,主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: LI Guo-ming(1972—), Male, from Wuhan, Hubei, Ph.D., Research focus: corrosion and protection of metal materials.

会使金属结构物发生早期破坏,腐蚀严重者还会导致重大事故,造成巨大的经济损失,因此提高钢材耐腐蚀性能是当务之急^[2]。目前钢铁材料防腐蚀方法大致可分为4类^[3]:涂层法、长效法、阴极保护^[4-6]、采用本身具有抗腐蚀能力的不锈钢。大规模使用预防措施所产生的环境污染大、能耗大、投资大,而不锈钢强韧性、焊接性及抗疲劳性也难以满足工程的需要。

研究表明^[7-11],通过添加微量合金元素可以在钢材表面形成含有特定结构和具有离子选择特性的致密保护层,使钢材本身具有耐腐蚀性能。目前低合金耐海水腐蚀钢主要的添加元素为Ni, Cr, Cu, P等^[12],但是钢中含有大量贵金属元素Cr, Ni, 成本较高。长期以来Si作为对材料耐蚀性有益的元素在不锈钢、铸铁、镍基合金以及耐候钢中都有应用^[13],它在一定的合金成分中分别具有耐氯化物腐蚀破裂、耐点蚀、耐浓热硝酸、抗氧化、耐海水腐蚀等作用。梁成浩等研究表明^[14],不锈钢中添加Si可提高在含氯介质中的耐孔蚀性。进而从俄歇分析结果可以看出, Si富集在表面层中,且钝化膜中Si和Cr的分布几乎同步。这种协同作用增强了不锈钢表面膜的钝化能力。为节约贵重金属元素,降低耐海水腐蚀钢的生产成本,通过研究Si对耐海水钢电化学性能的影响,探究以廉价的Si代替Cr, Ni的可能性,对国家和社会可持续发展具有重要意义。低合金钢中合金元素和杂质元素含量较多,为了研究单一添加硅元素的耐蚀性,冶炼了不同Si含量的Fe-Si合金,通过极化及带锈层试样的电化学实验,分析研究了Si对耐海水腐蚀钢电化学性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 试样制备

将不同含量的Si粉与还原铁粉混合,用粉末压片机将其压制成生坯,压力为16 MPa。将生坯用真空电弧炉进行冶炼、吸铸后,得到直径为 $\phi 10$ mm的棒状样品。各样品的成分见表1。

表1 样品的化学成分

Table 1 Chemical composition of the specimens %

Sample	Si	Fe	Sample	Si	Fe
1	0.3	余量	1	0.3	余量
2	0.6	余量	2	0.6	余量
3	0.9	余量	3	0.9	余量
4	1.2	余量	4	1.2	余量
5	2.0	余量	5	2.0	余量

1.2 电化学试验

将试样用线切割切成长约10 mm的小段,除锈去油后,在背面焊上导线,再用环氧树脂镶封,只留出工作面,制成工作电极。试验前将试样用水砂纸逐级打磨到1000#,用丙酮去脂并迅速吹干,置于干燥皿中备用。

电化学试验仪器为CS350电化学工作站,试验装置采用普通的三电极体系。参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为Pt电极,实验溶液为3% NaCl溶液,试验温度通过恒温水浴槽控制在 $(25 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 。进行动电位扫描试验时,电位从-1.0 V开始向正电位方向扫描,扫描速率为1 mV/s;进行线性极化试验时,极化电位范围为自腐蚀电位 ± 10 mV,扫描速率为0.2 mV/s。

为考查试样腐蚀后锈层对耐蚀性的影响,进行了浸泡样品的电化学试验。近年来发现在金属/锈层复杂体系中,由于其复杂的电极过程而导致电化学方法测定的极化电阻也受到了锈层的影响^[15]。为减小测试时施加的扰动对电极电化学行为及反应机理产生的影响,采用扰动较小的线性极化和交流阻抗。

具体试验方法为:将环氧树脂封装的试样保留一个工作面,浸泡于3%NaCl溶液中,每隔7天换一次溶液,浸泡时间为30天,分别在浸泡的第1, 2, 5, 10, 15, 30天时,对带锈层试样进行线性极化实验和交流阻抗实验,其中交流阻抗实验在开路电位下进行,正弦波幅值为10 mV,频率范围为0.01 Hz~100 kHz。

2 试验结果及分析

2.1 夹杂物试验结果

对Si含量不同的试样中夹杂物进行SEM形貌观察及能谱分析,典型试验结果如图1所示。可以看到,钢种的夹杂物主要是硅酸盐夹杂,总体上来看,钢中的夹杂物数量均较多,且随钢中硅含量增加,硅酸盐夹杂有增加的趋势。1号试样中含有少量Mn元素,这可能是由于前一次冶炼时熔池的残留物未清洗干净造成的,试样中氧元素的来源主要原因是使用的原料为还原铁粉,其中含有一定量的氧。

2.2 极化试验结果

试样的动电位扫描曲线如图2所示。可以看出,随着试样中Si含量的增加,试样的自腐蚀电位呈现先升高后降低的特点,其中Si的质量分数为0.9%的3号试样自腐蚀电位最正,最高自腐蚀电位和最低电位之

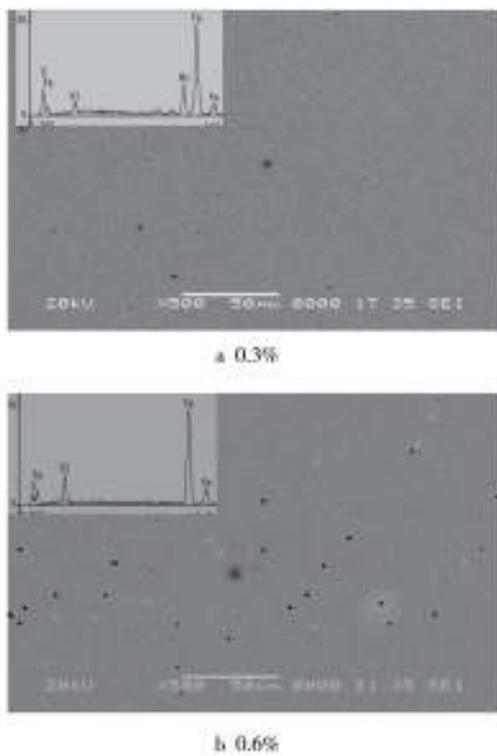


图1 不同Si含量的试样夹杂物形貌及能谱分析结果
Fig.1 Morphology and EDAX of the inclusions in the samples with different contents of Si

间相差约 100 mV。从阴极极化曲线部分来看,当Si的质量分数小于0.9%时,随Si含量的降低,阴极极化电流呈现减小的趋势,其中0.9%的试样阴极极化电流密度最大,而0.3%的试样阴极极化电流密度最小。在3% NaCl溶液中,在动电位扫描的阴极极化电位范围内,阴极反应主要是氧去极化反应,这说明钢中的Si有提高氧去极化反应速度的作用。从阳极极化曲线部分来看,加入0.3%的Si后,阳极电流密度增大。当钢中硅的质量分数小于0.9%时,阳极电流密度随着Si含量的增加而减小;当Si的质量分数大于0.9%时,阳极电流密度随Si的质量分数的增加而增大;Si的质量分数为0.9%时,阳极电流密度最小,即Si的质量分数为0.9%时试验钢的阳极溶解速度最小。可见,钢中的硅对阳极溶解起着一定的阻碍作用。有研究表明,在铁基合金中加入硅,达到一定的数量,能形成致密的SiO₂氧化膜(钝化膜)。随着硅加入量进一步的增加,这种氧化膜(钝化膜)更加致密和完整,合金的耐蚀性能进一步提高;当Si的质量分数达到14.93%时,Fe-Si表面生成钝态SiO₂膜^[16]。除了硅钢片以外,合金钢中Si的质量分数一般不超过2%,在此范围内,Si可能无法生成SiO₂钝化膜,因此极化曲线没有明显的钝化特征出现。

试样的线性极化试验结果如图3所示,从线性极

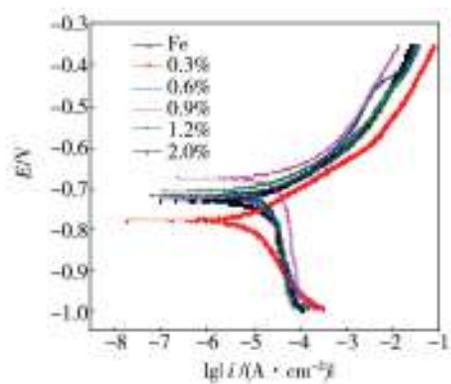


图2 试样的动电位扫描极化曲线
Fig.2 Potentiodynamic polarization curves of the samples

化曲线(图3a)可以看出,试样在3% NaCl溶液中自腐蚀电位也呈现先升高后降低的特点,对曲线进行线性拟合得到线性极化电阻R_p值,其随硅含量的变化如图3b所示。可以看出,随Si的质量分数增加,线性极化电阻值先增加后降低,当Si的质量分数为0.9%时的线性极化电阻R_p值最大。

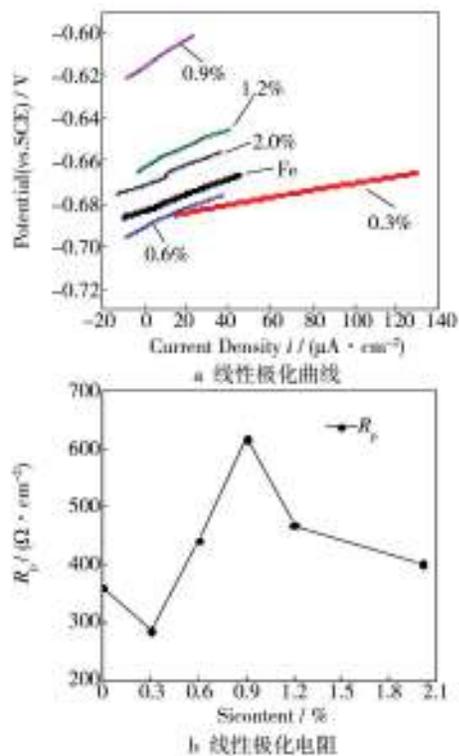


图3 不同Si含量试样的线性极化试验结果
Fig.3 Results of linear polarization experiments for samples with different Si contents

结合前面的动电位扫描极化曲线试验结果(图1),当钢中含有硅时,硅对钢的阳极行为和阴极行为都有影响,在中性3% NaCl溶液中,腐蚀过程的阴极反应主要为吸氧反应,即:



腐蚀过程的阳极反应主要为铁的阳极溶解,即:



从动电位扫描极化曲线可以看到,钢中的硅对腐蚀过程的阴极和阳极极化行为都有影响。总体的影响趋势为:随硅含量增加,其对阳极溶解的阻滞作用增大,而对阴极吸氧反应的阻滞作用减小,腐蚀速度的大小取决于钢表面这两个电极反应耦合速度的大小,当钢中的硅含量处于中间值(质量分数为0.9%)时,阳极反应和阴极反应的阻滞作用都比较大,因此此时的均匀腐蚀速度最小。

2.3 带锈层试样的电化学性能测试

低合金钢是海洋环境中使用的最主要的金属结构材料之一,锈层下合金钢的腐蚀是最主要的持续时间最长的腐蚀形态,生成的锈主要是与铁的腐蚀有关的氧化物和羟基氧化物^[17]。锈层一方面能有效地阻滞氧扩散至金属表面,另一方面也能加速金属的腐蚀^[18]。

图4a为含纯铁及0.6%Si的试样全浸后带锈层测得的线性极化曲线。随着浸泡时间的延长,自腐蚀电位会出现先负移后迅速正移的规律。García^[19]等认为碳钢全浸在海水中,在其表面生成的锈层可以分为两层:紧密附着的内锈层和附着不牢固的外锈层。外锈层中 γ -FeOOH的含量最多,而内锈层中尖晶石相(磁性 Fe_3O_4 和磁性 Fe_2O_3)的含量最多。 β -FeOOH主要在金属的表面形成并紧紧吸附在金属的表面,使锈层具有多孔性并且成分不均匀,因而不具有保护性。

据实验观察,试样在浸泡过程中首先生成褐色的、疏松多孔的外锈层,外锈层与基体粘附力差,较易脱落。浸泡5~10天后,剥去外锈层,可以看到有黑色的内锈层生成,且内锈层比较致密,不像外锈层一样非常容易脱落。浸泡期间,线性极化电阻 R_p 随浸泡时间的增加而减小,随后逐渐趋于稳定。这种规律可以解释为和浸泡过程中锈层的生成相关:在浸泡初期,先生成了疏松多孔的外锈层,而这种锈层并不能有效阻止Cl⁻扩散到基体表面,因此在锈层下腐蚀仍以较快的速度进行;后期由于外锈层变厚及致密的内锈层生成,Cl⁻及溶解氧越来越难扩散到金属基体表面, R_p 逐渐减小而趋于稳定。

带锈层试样的EIS结果如图4b所示,可以看到,随浸泡时间的延长,样品的阻抗值呈现减小的趋势;在短期浸泡时(2天内),阻抗谱具有典型的扩散特征,且浸泡2天时的阻抗值大于1天时的阻抗值;而长期浸泡时,阻抗谱均呈典型的电化学活化控制特征。

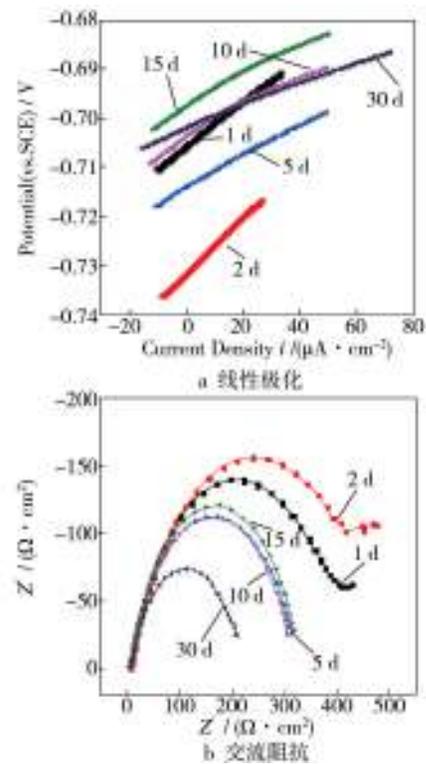


图4 硅含量为0.6%的试样浸泡过程中的电化学试验结果
Fig.4 Electrochemical test results of the samples with 0.6% Si during immersion

图5为试样浸泡2天和15天时的线性极化曲线。可以看出,浸泡后含Si试样的 R_p 总是小于纯Fe试样。这说明Si的加入不能使浸泡过程中生成的锈层阻碍腐蚀过程的进行,对基体没有保护作用,反而会恶化钢的耐蚀性。根据实验观察,随着Si含量的增加,锈层变得疏松多孔,更易脱落,所以Si的加入使实验钢耐蚀性降低的可能原因是Si使锈层变得疏松多孔,锈层厚度增加。

在整个浸泡腐蚀的过程中,锈层的生长可以分为三个阶段:在第一阶段(小于1天),腐蚀由夹杂物处诱发,并同时形成腐蚀产物,即锈层,主要成分为 γ -FeOH^[20],但此时锈层并不完整,不能覆盖整个样品表面,因此腐蚀速度较快;在第二阶段(2天内),腐蚀产物逐渐增多,锈层逐渐完整并覆盖整个样品表面,由于此时锈层能起到较好的阻挡作用,因此从阻抗谱上可以看到明显的扩散特征,阻抗值增大,腐蚀速度较1天时明显减慢;在第三阶段,随着浸泡时间的延长,后期锈层转化生成了较稳定的 α -FeOOH,结构致密,对基体有一定的保护作用^[20-21]锈层逐渐增厚,但致密性下降,保护性也下降,同时活化腐蚀点的局部酸化逐渐增加,两者的共同作用,导致阻抗值减小,因此腐蚀速度增加。

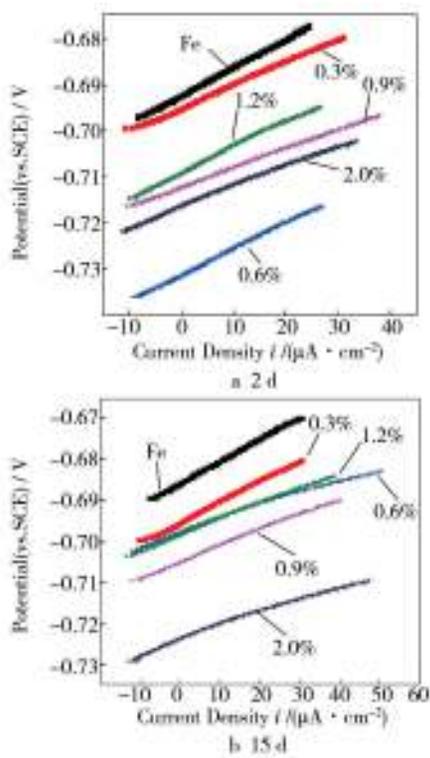


图5 试样浸泡后的线性极化曲线

Fig.5 Linear polarization curves of the samples after immersion

3 结论

1) Si含量对低合金钢的均匀腐蚀速度有影响,当Si的质量分数小于0.9%时,随钢中Si含量增加,腐蚀速度减小;当硅的质量分数大于0.9%时,随钢中Si的质量分数增加,腐蚀速度增加;Si的质量分数为0.9%时,钢的耐蚀性最好。这是由于Si有阻碍阳极反应过程而增加阴极反应速度这两种相反作用共同作用的结果。

2) 含Si低合金钢随浸泡时间的延长,耐蚀性降低,这主要是由于其锈层增厚,致密性下降,对基体的保护作用下降而导致的。

3) 含Si低合金钢在锈层下的腐蚀速率较未加Si的大,说明在该试验条件及Si含量范围内,Si的加入会恶化合金的耐蚀性能。

参考文献:

[1] 王秀民,王培,孙阳超,等. Q235 钢在模拟海洋大气环境中的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 104—111.
WANG Xiu-min, WANG Pei, SUN Yang-chao, et al. Corrosion Resistance of Q235 Steel in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(11):

104—111.
[2] 黄琳,徐想娥,汪万强. 钨酸钠及其复配缓蚀剂在模拟海水中对碳钢的缓蚀性能[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 25—29.
HUANG Lin, XU Xiang-e, WANG Wan-qiang. Corrosion Inhibition Performances of Sodium Tungstate and Its Composite for Carbon Steel in Simulated Seawater[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 25—29.
[3] 张国宏,成林,李钰,等. 海洋耐蚀钢的国内外进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 426—435.
ZHANG Guo-hong, CHENG Lin, LI Yu, et al. Progress on Marine Corrosion Resistant Steels[J]. Materials China, 2014, 33(7): 426—435.
[4] 查鑫堂,张建文,陈胜利,等. 杂散电流干扰和阴极保护作用下碳钢腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 12—18.
ZHA Xin-tang, ZHANG Jian-wen, CHEN Sheng-li, et al. Corrosion Behavior of Carbon Steel in Interference of Stray Current and Cathodic Protection[J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 12—18.
[5] 杜鹏,刘欣,郜友彬,等. 酸性土壤中接地网牺牲阳极阴极保护法研究[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 111—116.
DU Peng, LIU Xin, GAO You-bin, et al. Galvanic Anode Cathodic Protection of Grounding Grid in Acidic Soils[J]. Surface Technology, 2015, 44(10): 111—116.
[6] 徐兴龙,周好斌,袁森. 脉冲电流与直流电流的阴极保护效果比较研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 133—135.
XU Xing-long, ZHOU Hao-bin, YUAN Sen. Comparative Study on the Cathodic Protection Effect of Pulse Current and Direct Current[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 133—135.
[7] 黄桂桥. Cr对钢耐海水腐蚀性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(2): 86—89.
HUANG Gui-qiao. Effect of Chromium Element Corrosion Resistance of Steels in Seawater[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2000, 12(2): 86—89.
[8] 张起生,王向东,于永泗,等. Si对碳钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2007, 40(8): 21—23.
ZHANG Qi-sheng, WANG Xiang-dong, YU Yong-si, et al. Effect of Si on Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Materials Protection, 2007, 40(8): 21—23.
[9] 曹国良,李国明,陈珊,等. 典型耐海水腐蚀钢中Ni和Cr耐点蚀作用的比较[J]. 金属学报, 2010, 46(6): 748—754.
CAO Guo-liang, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Comparison on Pitting Corrosion Resistance of Nickel and Chromium in Typical Sea Water Resistance Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(6): 748—754.
[10] 曹国良,李国明,陈珊,等. Cu对低合金钢耐海水腐蚀的影响[J]. 材料工程, 2011(9): 62—67.

- CAO Guo-liang, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Effects of Cu on Sea Water Corrosion Resistance of Low Alloy Steels[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011(9):62—67.
- [11] 王小燕,曹国良. 几种典型耐海水钢耐点蚀性能的比较[J]. *全面腐蚀控制*, 2014, 28(2):63—67.
- WANG Xiao-yan, CAO Guo-liang. Comparative Studies on Resistance Against Pitting Corrosion of Several Seawater Resistance Steels[J]. *Total Corrosion Control*, 2014, 28(2):63—67.
- [12] 松岛岩. 低合金耐蚀钢—开发、发展及研究[M]. 靳裕康,译. 北京:冶金工业出版社,2004.
- MATSUSHIMA Iwa. Development and Research of Low Alloy Corrosion Resistant Steel[M]. JIN Yu-kang, Translate. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [13] 陈鸿海. 金属腐蚀学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- CHEN Hong-hai. Metal Corrosion[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [14] 梁成浩,张继德. 磷、硅、锰和铜对高纯18Cr-14Ni不锈钢在氯化物介质中抗孔蚀性能的影响[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1995, 10(4):336—340.
- LIANG Cheng-hao, ZHANG Ji-de. Effect of Phosphorus, Silicon, Manganese and Copper on Pitting Corrosion Resistance of High Purity 18Cr-14Ni Stainless Steel in Chloride Medium [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 1995, 10(4):336—340.
- [15] 邹妍,王佳,郑莹莹. 锈层下碳钢的腐蚀电化学行为特征[J]. *物理化学学报*, 2010, 26(9):2361—2368.
- ZOU Yan, WANG Jia, ZHENG Ying-ying. Electrochemical Corrosion Behaviors of Rusted Carbon Steel[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2010, 26(9):2361—2368.
- [16] 李具仓,赵爱民,王丽娜. 硅对铁基合金组织和耐蚀性能的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2006, 27(10):492—495.
- LI Ju-cang, ZHAO Ai-min, WANG Li-na. Effect of Silicon on Microstructure and Corrosion Resistance of Iron-base Alloys[J]. *Corrosion & Protection*, 2006, 27(10):492—495.
- [17] 田志强,王崇碧,孔小东,等. 锈层对船体钢耐蚀性能影响研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(3):66—70.
- TIAN Zhi-qiang, WANG Chong-bi, KONG Xiao-dong, et al. Effect of Rust Layer on Corrosion Resistance of Hull Steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(3):66—70.
- [18] PINEUA S, SABOT R, QUILLET L. Formation of the Fe(II—III) Hydroxysulphate Green Rust during Marine Corrosion of Steel Associated to Molecular Detection of Dissimilatory Sulphite-Reductase[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(4):1099—1111.
- [19] GARCIA KE, MORALES AL, BARRERO CA, et al. New Contributions to the Understanding of Rust Layer Formation in Steels Exposed to a Total Immersion Test[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(9):2813.
- [20] 张琳,王振尧,赵春英,等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1):1—6.
- ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(1):1—6.
- [21] 王振尧,于国才,韩薇. 钢的大气暴露腐蚀与室内模拟加速腐蚀的相关性[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2004, 16(2):70—73.
- WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, HAN Wei. Investigation on Interrelation of Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure Corrosion of Steels[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2004, 16(2):70—73.

(上接第23页)

- Nucleate Pool Boiling on Multiscale Modulated Porous Structures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011, 54:3146—3155.
- [18] YANG Yong-ping, JI Xian-bing, XU Jin-liang. Pool Boiling Heat Transfer on Copper Foam Covers with Water as Working Fluid[J]. *International Journal of Thermal Sciences* 2010, 49:1227—1237.
- [19] DAS A K, DAS P K, SAHA P. Performance of Different Structured Surfaces in Nucleate Pool Boiling[J]. *Applied Thermal Engineering* 2009(29):3643—3653.
- [27] 韩坤,刘阿龙,彭东辉,等. 内表面烧结型多孔管的流动沸腾换热[J]. *热能动力工程*, 2011, 26(1):48—52.
- HAN Kun, LIU A-long, PENG Dong-hui, et al. Flow Boiling-based Heat Exchange in an Inner Surface Sintering Type Perforated Tube[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2011, 26(1):48—52.