

干湿交替环境状态对碳钢海洋腐蚀行为的影响

张庆普¹, 杨海洋^{2,3}, 王佳⁴, 杨朝晖^{2,3}, 杜翠薇¹

(1.北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 2.青岛钢研纳克检测防护技术有限公司, 山东 青岛 266071; 3.钢铁研究总院 青岛海洋腐蚀研究所有限公司, 山东 青岛 266071; 4.中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: **目的** 研究干湿交替海水环境对碳钢腐蚀速率的影响。**方法** 以青岛小麦岛海域海水为试验介质, 使用周期浸没设备, 以 60 min 为一个循环, 在浸没/干燥时间分别为 10 min/50 min、20 min/40 min、30 min/30 min 三种不同干湿比的干湿交替条件下, 对碳钢试片和电化学试样分别试验 3、7、14、21、28 d 后取出。通过失重法和电化学测试方法, 研究了腐蚀速率的变化情况, 使用 X 射线衍射仪 (XRD)、能量色散谱仪 (EDS) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分别研究了腐蚀产物成分、腐蚀产物形貌和除锈后的腐蚀形貌。**结果** 失重法和电化学方法表明, 碳钢在三种干湿比条件下的腐蚀速率为全浸条件下的 3~8 倍, 且碳钢的腐蚀速率随着干湿比的增大而增大, 但是增大的幅度越来越小。随着干湿比的增大, 碳钢表面生成的锈层变薄, 腐蚀产物中 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和氧的含量升高, Fe_3O_4 的含量降低。**结论** 干湿交替环境的干湿比越大, 对碳钢腐蚀的加速作用越显著, 且这一加速作用存在极大值。

关键词: 干湿交替; 干湿比; 碳钢; 海洋腐蚀; 电化学方法; 腐蚀行为

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)07-0222-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.028

Influence of Dry-Wet Cycles on the Marine Corrosion Behavior of Carbon Steel

ZHANG Qing-pu¹, YANG Hai-yang^{2,3}, WANG Jia⁴, YANG Zhao-hui^{2,3}, DU Cui-wei¹

(1. Institute of Advanced Material and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Qingdao NCS Testing & Protection Technology Co. Ltd, Qingdao 266071, China;

3. Qingdao Marine Corrosion Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Qingdao 266071, China;

4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of dry-wet alternating seawater on corrosion rate of carbon steel. Taking seawater from Xiaomai Island in Qingdao as the test medium, carbon steel specimens and electrochemical specimens were

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2020-05-21

Received: 2019-09-09; Revised: 2020-05-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51771057)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51771057)

作者简介: 张庆普 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Qing-pu (1991—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 杜翠薇 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。邮箱: dcw@ustb.edu.cn

Corresponding author: DU Cui-wei (1972—), Female, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials. E-mail: dcw@ustb.edu.cn

引文格式: 张庆普, 杨海洋, 王佳, 等. 干湿交替环境状态对碳钢海洋腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 222-229.

ZHANG Qing-pu, YANG Hai-yang, WANG Jia, et al. Influence of dry-wet cycles on the marine corrosion behavior of carbon steel[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 222-229.

tested for 3, 7, 14, 21 and 28 d respectively by alternating immersion equipment with 60 min as a cycle under the dry-wet alternating conditions of immersion/drying time for 10 min/50 min, 20 min/40 min and 30 min/30 min using weekly immersion equipment and then taken out. The change of corrosion rate was studied by weight loss method and electrochemical test method. The components and morphology of corrosion products and the corrosion morphology after removal of corrosion products were studied by X-ray diffraction (XRD), energy dispersion X-ray spectroscopy (EDS) and scanning electron microscopy (SEM). The corrosion rate of carbon steel under alternating dry-wet conditions with three dry-wet ratios was 3~8 times of that under whole immersion condition, and the corrosion rate increased with the increase of dry-wet ratio, but the increase gradually became smaller. With the increase of the dry-wet ratio, the thickness of the rust formed became thinner and the content of γ -FeOOH and oxygen in the rust layer increased while the content of Fe_3O_4 decreased. The corrosion rate of carbon steel increases with the increase of dry-wet ratio, and the acceleration effect has a maximum value.

KEY WORDS: dry-wet cycle; dry-wet ratio; carbon steel; marine corrosion; electrochemical method; corrosion behaviors

海洋潮差区是指处于平均低-高潮位之间的海水区域^[1]。海水的周期性涨落,使潮差区的金属始终处于干湿交替的环境状态。干燥阶段,在液膜的作用下,氧供应充分,并且侵蚀性离子发生富集^[2],再加上干湿交替环境下,碳钢的腐蚀产物起到了强烈的阴极去极化作用^[3],使得海洋潮差区成为海洋腐蚀较为严重的部位^[4-5]。我国典型港口的平均潮差高度为 0.68~4.08 m^[6],前期的腐蚀失重试验^[7-8]以及对长尺试样电偶电流的监控试验^[9]已经证实,金属构件在潮差区内不同位置的腐蚀程度不同。这是由于潮差区不同位置的腐蚀环境的差异造成的,其中较明显的差异就是干湿交替的干湿比不同,即一个干湿交替循环内,干燥时间和浸没时间的占比不同。

本文利用室内周期浸试验设备,主要运用失重法和电化学方法研究了干湿交替环境(不同干湿比条件)下,碳钢在海水中浸泡不同周期后的腐蚀行为。

1 试验

试验材料为同一批次的 Q235 碳钢,其成分为: C 0.18%, Si 0.30%, P 0.040%, S 0.040%, Mn 0.32%, Fe 余量。将其加工成尺寸为 100 mm×50 mm×3 mm 的试片和 $\phi 11.3$ mm×3 mm 的电化学试样。对试片打孔,用于区分试验周期和平行样。电化学试样用环氧树脂进行封样,仅暴露出面积为 1 cm² 的试样底面。以上所有试样用 SiC 水性砂纸打磨至 1200#,经丙酮除油、无水乙醇清洗后,冷风吹干,待用。对失重试样精确测量尺寸,并称取质量。

全浸试验采用在烧杯中浸泡,水浴控制温度为 25 °C。干湿交替腐蚀试验在周浸试验箱中进行,控制温度为(25±2) °C,相对湿度为 60%±5%。试验以 60 min 为一个循环,设置三种干湿比:浸没/干燥时间分别为 10 min/50 min、20 min/40 min、30 min/30 min。试验的周期分别为 3、7、14、21、28 d,试验介质为青岛小麦岛海域海水。

在全浸和干湿交替试验过程中,均使用多通道电

位自动采集系统实时测量电位,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。试验后的电化学测试采用三电极体系,工作电极为试验后的电化学试样,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极,介质与浸泡试验的相同,待电位稳定后,使用普林斯顿 PARSTAT2273 电化学工作站测量其线性极化曲线和极化曲线。线性极化曲线扫描范围为-10~+10 mV(vs. OCP),扫描速率为 0.1 mV/s。极化曲线扫描范围为-300~+300 mV(vs. OCP),扫描速率为 0.5 mV/s。

试验结束后,将试片冷风吹干,用数码相机记录试样表面宏观腐蚀形貌,并刮下腐蚀产物进行 XRD 分析(采用 Co 靶材,扫描角度范围为 5°~90°)。使用除锈液(500 mL 盐酸+500 mL 去离子水+3.5 g 六次甲基四胺)除去试样表面腐蚀产物,用扫描电镜观察试样表面的微观腐蚀形貌。

2 结果与讨论

2.1 开路电位

图 1 为碳钢浸水后,开路电位的变化情况。全浸条件下,随着时间的增加,碳钢电位表现为先快速降低,后缓慢升高的趋势。干湿交替条件下,碳钢每次浸水后,开路电位持续降低,这是由碳钢表面被海水活化后,腐蚀面积由小变大,阳极反应由弱变强造成的^[10]。在经历多次干湿交替腐蚀进程中,不同干湿比条件下,浸没初始电位的变化情况有所不同:在干湿比为 10 min/50 min 和 20 min/40 min 条件下,碳钢的浸没初始电位逐渐升高;而在干湿比为 30 min/30 min 条件下,碳钢的浸没初始电位先升高后降低。这与锈层的变化过程相对应^[11]。干湿交替环境下干湿比的不同,是导致锈层性质和干燥效果差异的主要原因。

2.2 腐蚀速率

图 2 为碳钢在各浸泡条件下试验不同周期后的腐蚀速率。由图可以看到,干湿交替环境对碳钢腐蚀起到了非常显著的加速作用。浸泡 3 d 后,各干湿比

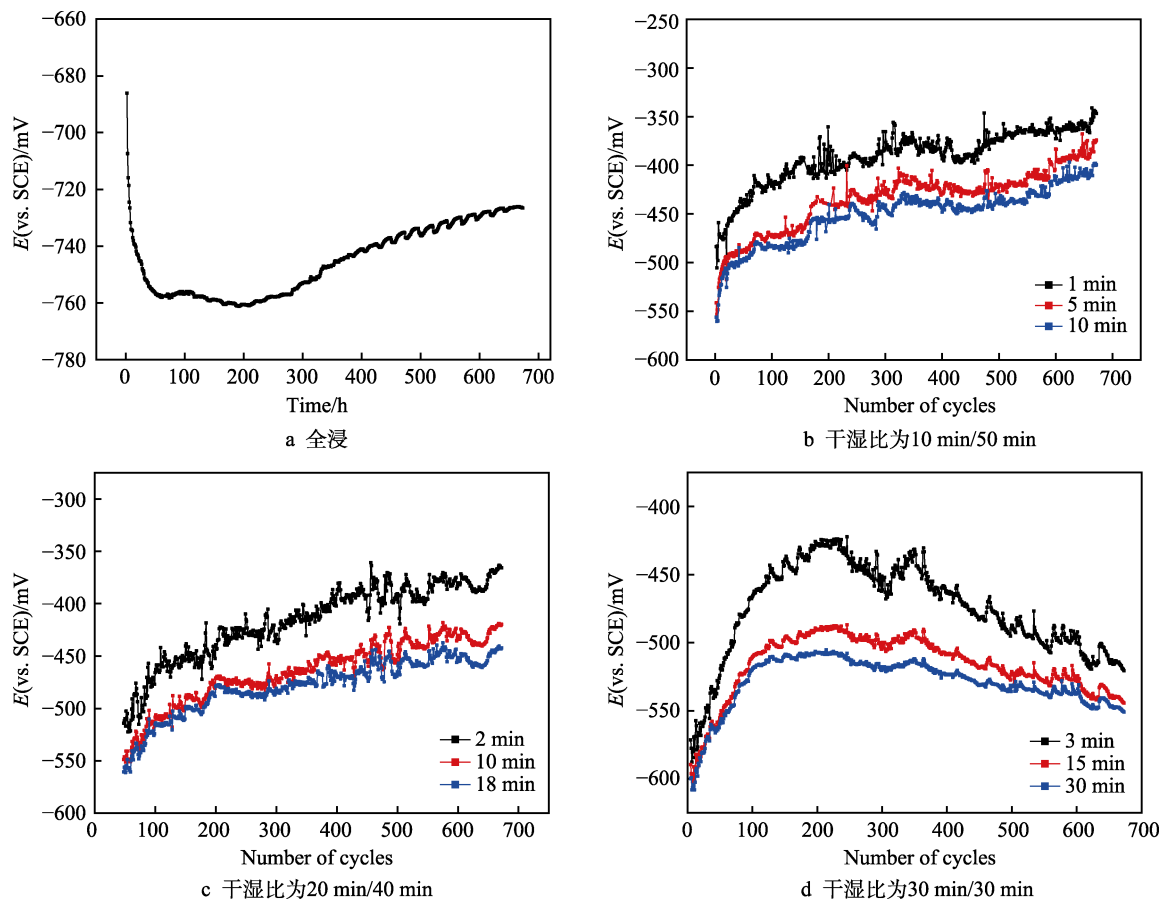


图1 浸水后碳钢开路电位的变化情况

Fig.1 Changes of open circuit potential in immersion stage: a) whole immersion; b) wet/dry=10 min/50 min; c) wet/dry=20 min/40 min; d) wet/dry=30 min/30 min

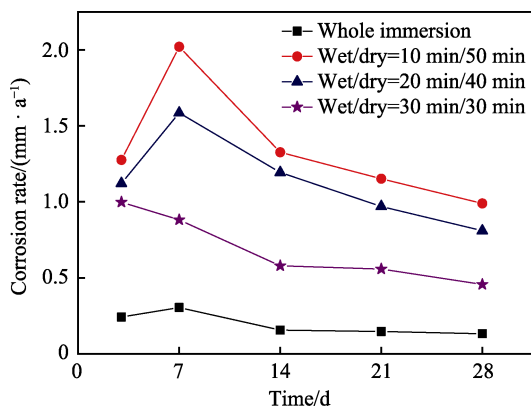


图2 各试验条件下碳钢的腐蚀速率

Fig.2 Corrosion rate of carbon steel under different conditions

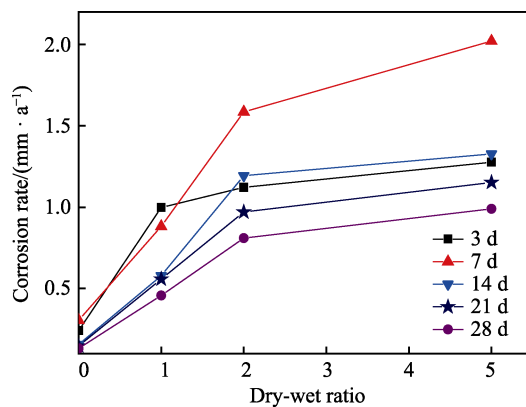


图3 碳钢的腐蚀速率随干湿比的变化

Fig.3 Changes of corrosion rate with dry-wet ratio

条件下的碳钢的腐蚀速率较为接近,约为全浸条件下腐蚀速率的5倍。之后,干湿比为10 min/50 min和20 min/40 min条件下的腐蚀速率先增大后减小,腐蚀速率约为全浸条件下的6~8倍,而干湿比为30 min/30 min条件下的腐蚀速率逐渐减小,约为全浸条件下的3~4倍。图3为碳钢腐蚀速率与干湿比的关系曲线,碳钢腐蚀速率随着干湿比的增大而增大,但是增大的幅度越来越小,存在极大值。

图4为碳钢的线性极化曲线。相比于全浸条件,

干湿交替条件下,浸泡碳钢的线性极化曲线略有弯曲,说明阴极过程和阳极过程不对称,符合水线区液相/液膜相/气相三相构成理论^[12]。干湿交替条件下暴露的碳钢零电流电位显著高于全浸条件下的值,且均随着试验时间的延长而逐渐升高。为了较准确地获得线性极化电阻 R_p 值,选取相对零电流电位 0~+5 mV 范围内的线性区作为拟合区,利用 Cview2 软件进行拟合分析,得到碳钢的线性极化电阻 R_p 的变化如图5所示。干湿交替环境下碳钢的线性极化电阻值约为全

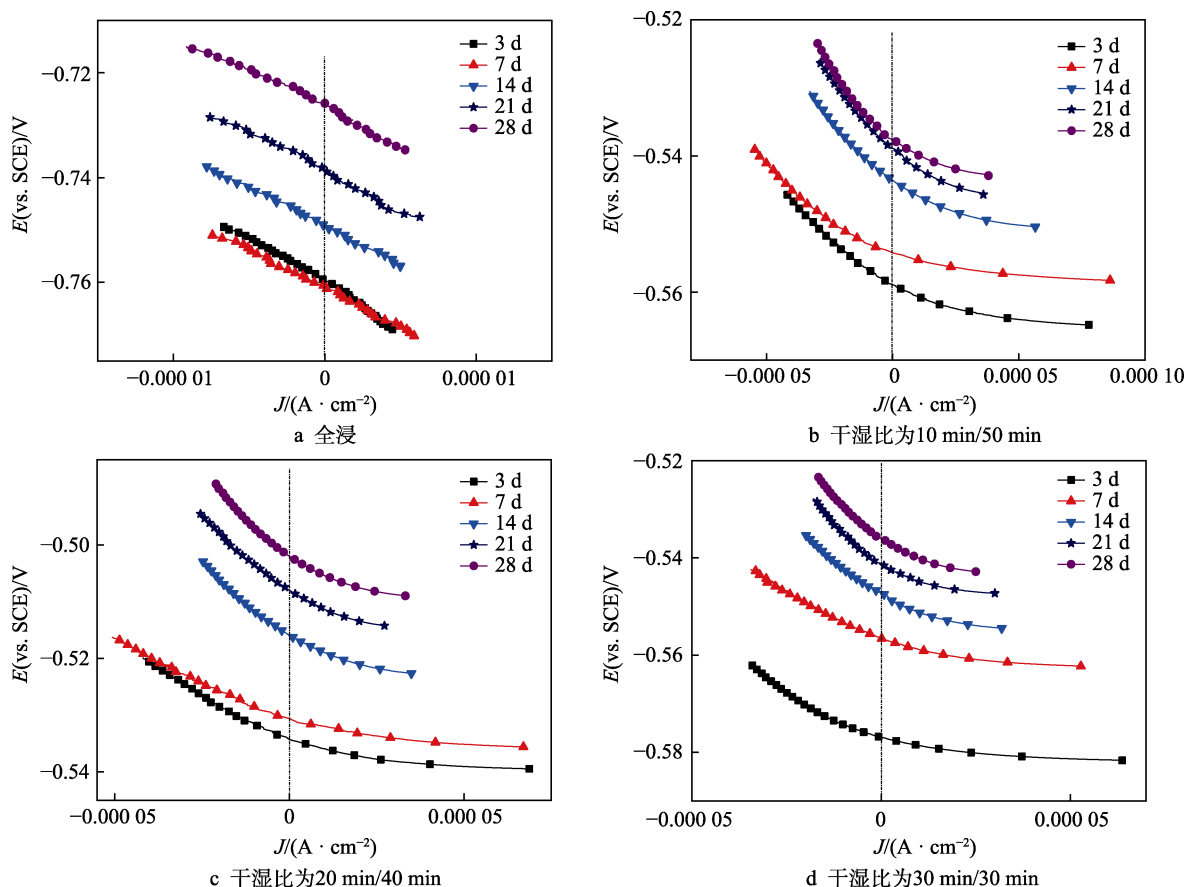


图 4 碳钢在不同浸泡条件下试验后的线性极化曲线

Fig.4 Linear-polarization curves of carbon steel after test under different immersion conditions: a) whole immersion; b) wet/dry=10 min/50 min; c) wet/dry=20 min/40 min; d) wet/dry=30 min/30 min

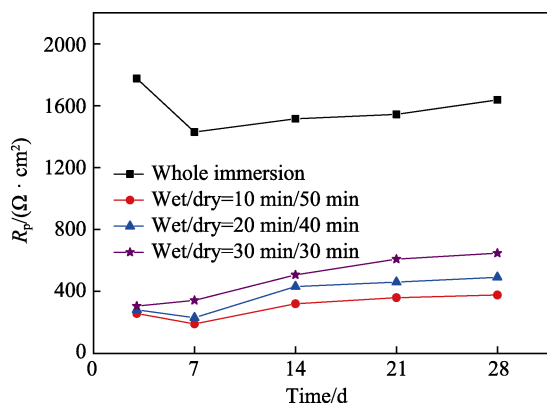
图 5 线性极化电阻 R_p 值的变化情况

Fig.5 Changes of linear polarization resistance R_p

浸条件下的 $1/7 \sim 1/3$, 说明干湿交替条件可以显著加速碳钢的腐蚀速率。对于不同的干湿比条件, 干湿比越大时, R_p 值越小, 说明较大的干湿比对碳钢腐蚀的加速作用较大。以上测试结果与失重法所得到的结果一致。

图 6 为碳钢的极化曲线。全浸初期, 阴极为吸氧反应, 受溶解氧的扩散控制, 14 d 后腐蚀电位明显下降, 阴极 Tafel 斜率变小, 阴极电流密度增大, 这与锈层参与还原反应的量明显增多有关^[13]。由图 6b—d 可知, 在每种干湿比条件下, 随着时间的延长, 阴极电

流密度变化不大, 而试验浸泡 7 d 后, 阳极电流密度显著减小。从图 6e、f 中可以看出, 干湿交替试验后, 碳钢的自腐蚀电位明显升高, 且试验时间越长, 升高越多。阴极电流密度较全浸条件下显著增大, 但是阴极 Tafel 斜率变化不大; 而阳极电流密度较全浸条件下明显降低, 且阳极 Tafel 斜率有所增大, 甚至出现了一定的钝化特征。这是由于经历多次干湿交替作用后, 碳钢表面腐蚀产物的累积, 减少了阳极活性。

2.3 腐蚀形貌

图 7 为碳钢在干湿交替海水环境中试验 28 天后的腐蚀产物形貌。可以看出, 试样锈层较薄, 表面存在着较多的裂纹, 在浸没/干燥时间为 10 min/50 min 条件下暴露时, 外层黄色锈层呈碎片状剥落, 随着干湿比的减小, 锈层逐渐变厚。图 8 为碳钢在干湿交替海水环境中试验 28 天除锈后的腐蚀形貌, 可以看到, 在浸没/干燥时间为 10 min/50 min 条件下暴露时, 基体表面存在较多腐蚀坑, 这是因为横向发展扩大的同时, 又在底部不断产生新的腐蚀坑。在浸没/干燥时间为 30 min/30 min 条件下暴露时, 蚀坑大而浅, 数量较少, 横向发展相互连接, 表现为均匀腐蚀特征。从腐蚀形貌上可以看出, 随着干湿比的增大, 腐蚀程度越来越严重。

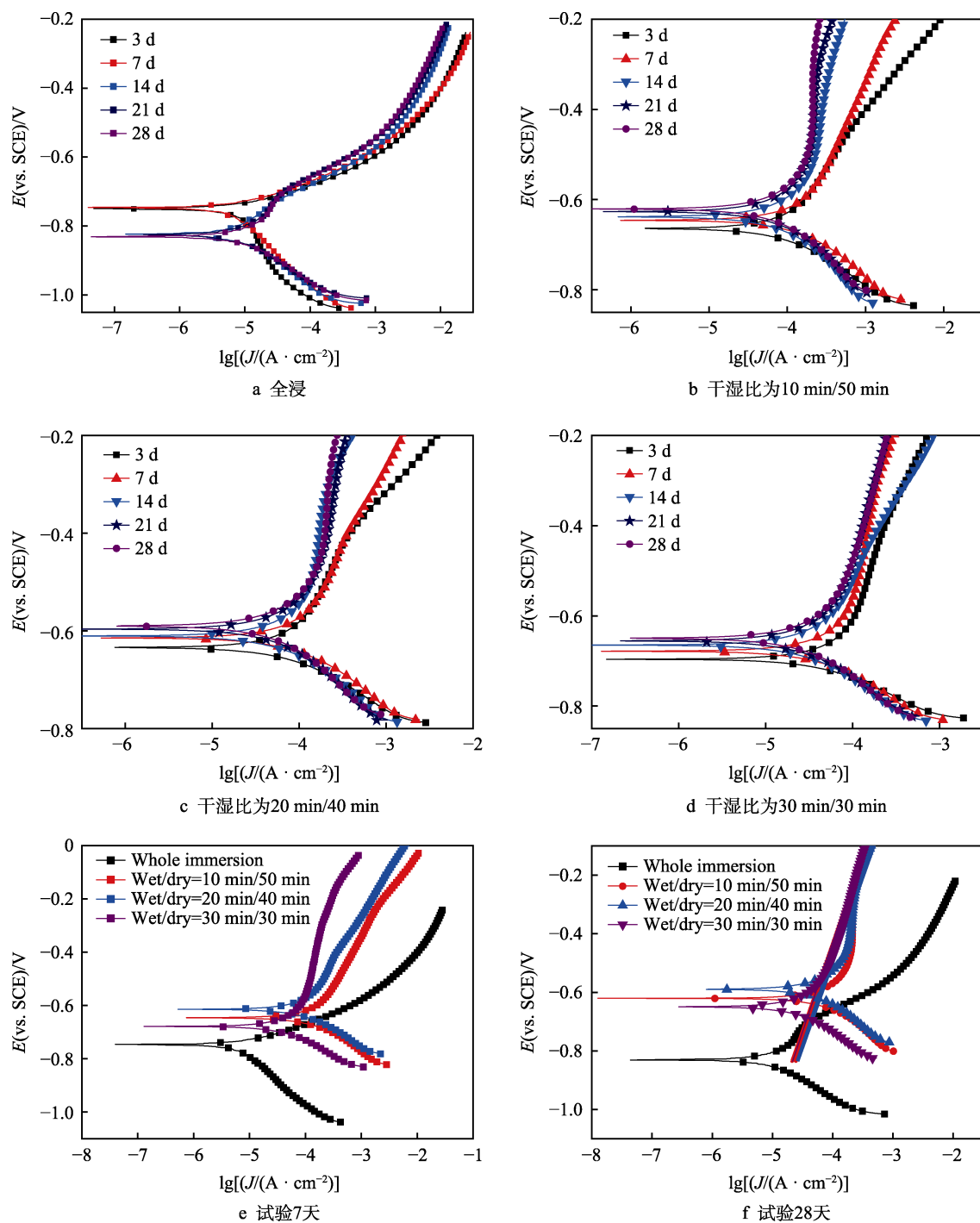


图6 碳钢在不同浸泡条件下试验后的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of carbon steel after test under different immersion conditions: a) whole immersion test; b) wet/dry=10 min/50 min; c) wet/dry=20 min/40 min; d) wet/dry=30 min/30 min; e) test for 7 d; f) test for 28 d

2.4 腐蚀产物分析

将试验 7 d 和 28 d 后的腐蚀产物经 EDS 分析得到的 Fe 和 O 的含量列于表 1。腐蚀产物的氧含量在浸没/干燥时间为 10 min/50 min 条件下最高,并随着干湿比的减少而降低,说明较大的干湿比环境下具有较高的溶解氧浓度,促进了氧的还原反应。各干湿交替条件下,28 d 腐蚀产物中的氧含量均小于 7 d 腐蚀产物,说明锈层中的活性成分参与了阴极反应^[14]。图

9 为碳钢在各条件下试验不同周期后的 XRD 谱。全浸条件下的腐蚀产物中存在较多的 γ -FeOOH 和少量 β -FeOOH,这是因为全浸条件下的电位更有利于 γ -FeOOH 的生成^[15]。干湿交替条件下还生成了 Fe_3O_4 , β -FeOOH 和 Fe_3O_4 主要存在于内锈层^[16]。在浸没/干燥时间为 10 min/50 min 条件下, γ -FeOOH 含量较高, Fe_3O_4 含量较低;随着干湿比的降低, Fe_3O_4 含量升高, γ -FeOOH 含量降低。

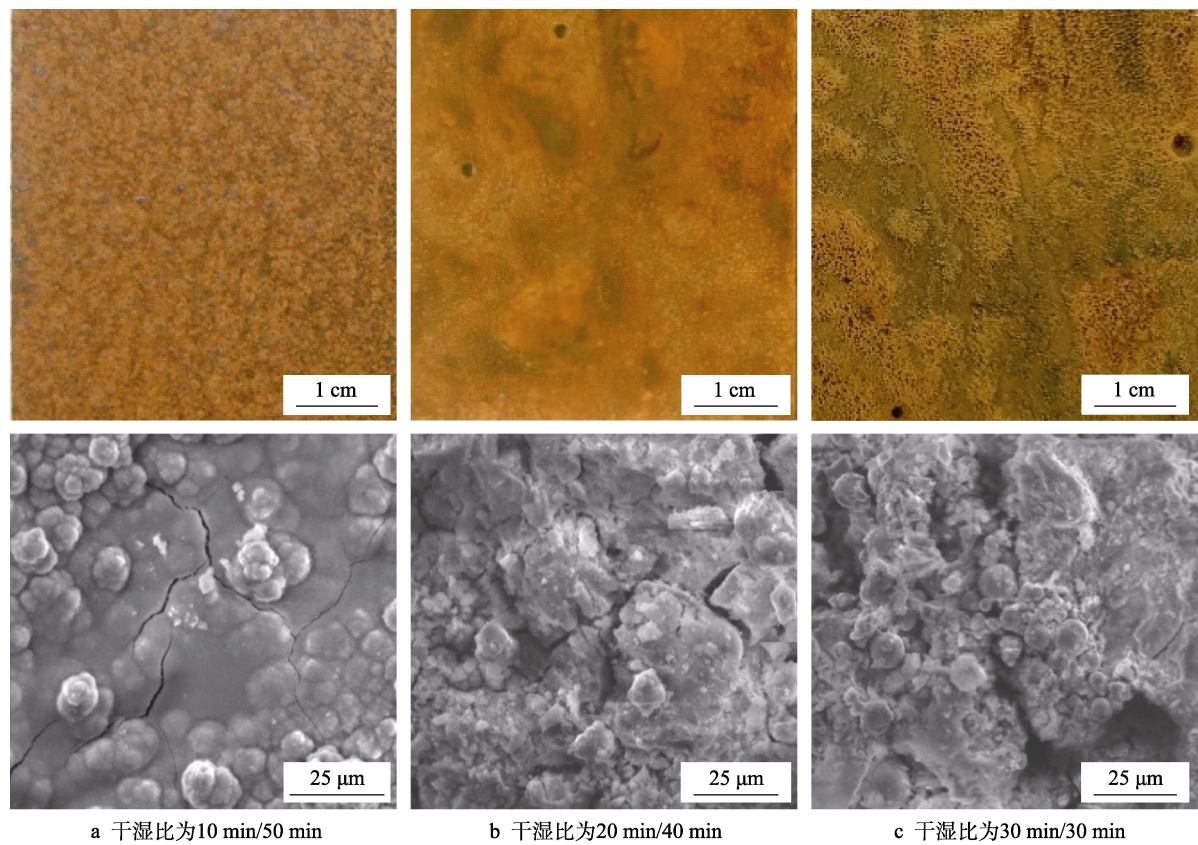


图 7 试验 28 d 后的腐蚀产物形貌

Fig.7 SEM image of corrosion products after test for 28 d: a) wet/dry=10 min/50 min; b) wet/dry=20 min/40 min; c) wet/dry=30 min/30 min

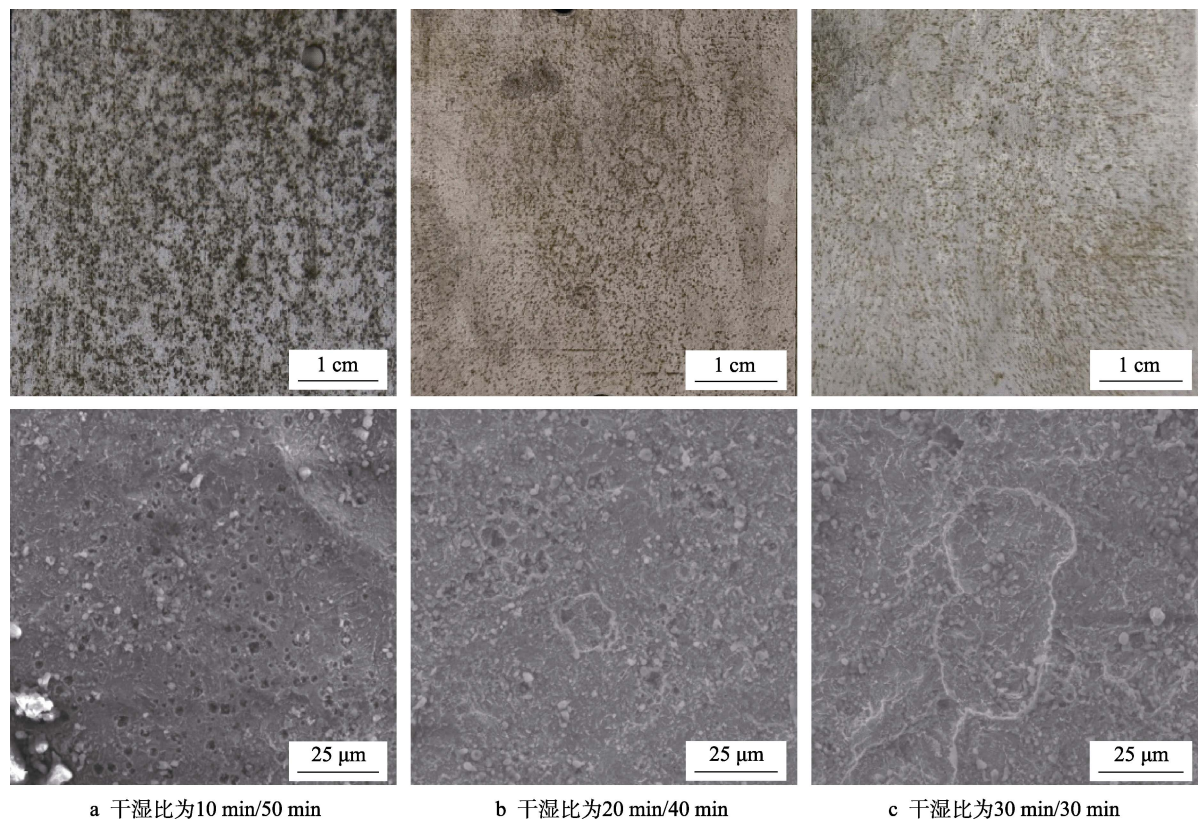


图 8 试验 28 d 除锈后的腐蚀形貌

Fig.8 SEM image of carbon steel after removal of corrosion products after test for 28 d: a) wet/dry=10 min/50 min; b) wet/dry=20 min/40 min; c) wet/dry=30 min/30 min

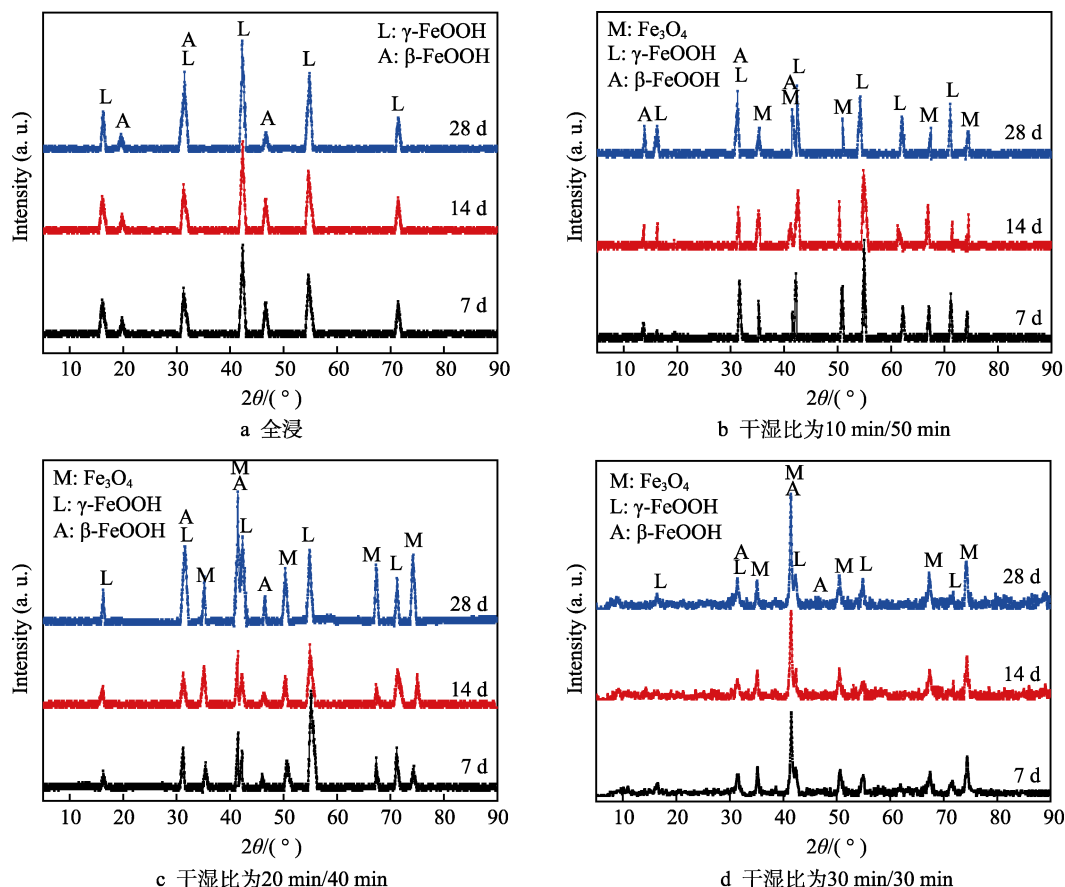


图9 腐蚀产物的XRD谱

Fig.9 XRD spectra of corrosion product: a) whole immersion; b) wet/dry=10 min/50 min; c) wet/dry=20 min/40 min; d) wet/dry=30 min/30 min

表1 试验7 d和28 d后腐蚀产物的EDS分析
Tab.1 EDS analysis of corrosion product after test for 7 d and 28 d

Conditions	wt. %			
	Fe		O	
	7 d	28 d	7 d	28 d
Whole immersion	57.5	51.8	27.1	31.9
Wet/dry=10 min/50 min	54	49.8	37	33.9
Wet/dry=20 min/40 min	51.9	39.6	33.1	30.6
Wet/dry=30 min/30 min	39.6	36.5	30.6	29.4

2.5 讨论

从失重结果、电化学测试结果以及腐蚀形貌来看,干湿交替的干湿比越大,对碳钢腐蚀的加速作用越显著,且这一加速作用存在极大值。碳钢在经历干湿交替变化时,干燥阶段受表面覆盖液膜的影响,即在液膜作用下,氧的供应充分,且扩散更加容易,使得阴极氧的还原反应增强,因此干湿交替作用下,碳钢的腐蚀速率明显大于全浸条件。随着干湿比的增大,液膜作用时间延长,腐蚀速率增大,但是在液膜厚度小于某一临界值^[17-18]后,因受到氧的盐效应及阴极电流不均匀分布的影响,基体的腐蚀过程就会变得

缓慢,甚至停滞,即使干燥时间再延长,也不会进一步增大腐蚀速率,这也是图3曲线会出现极大值的一个原因。

根据 Evans^[3]提出的大气腐蚀机制,带锈碳钢的腐蚀阴极过程包含氧的还原和铁锈的还原。王戈等^[19]研究表明,阴极过程由氧的还原过程为主转向铁锈的还原为主的电位约为-0.5 V (vs. SCE)。由图1可知,干燥阶段,在液膜作用下,氧的供应充分,且电位升高至-0.5 V以上,阴极过程以氧的还原为主。而转入浸没阶段后,电位不断降低,且氧在海水中全浸时的扩散速度较在液膜中慢,尤其是随着干湿比的减小,锈层变厚,使氧的扩散阻力变大,因此阴极过程以铁锈的还原为主,按照反应 $8\text{FeOOH} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = 3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$, 生成 Fe_3O_4 ^[20-21]。这就解释了图9在浸没/干燥时间为10 min/50 min条件下, $\gamma\text{-FeOOH}$ 含量较高, Fe_3O_4 含量较低,而随着干湿比的降低, Fe_3O_4 含量升高, $\gamma\text{-FeOOH}$ 降低这一现象。同样可以解释表1中的EDS结果:干湿比较大时,干燥阶段,在液膜作用下,阴极氧还原反应加强,且作用时间较长,腐蚀产物中的氧含量较高,随着干湿比的降低,液膜作用时间缩短,同时浸没后铁锈的还原反应作用时间延长,从而导致腐蚀产物中氧含量不断降低。

3 结论

1) 干湿交替环境的干湿比越大, 对碳钢腐蚀的加速作用越显著, 这一加速作用存在极大值。

2) 随着干湿交替环境干湿比的增大, 锈层厚度减小, 腐蚀产物中 γ -FeOOH 和氧的含量升高, Fe_3O_4 的含量降低。

3) 干湿交替环境中碳钢的自腐蚀电位高于全浸条件下的值, 且随暴露时间的延长而升高。

参考文献:

- [1] 李晓刚. 材料腐蚀与防护概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 145.
LI Xiao-gang. Introduction of corrosion and protection of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 145.
- [2] THEE C, HAO L, DONG J H, et al. Atmospheric corrosion monitoring of a weathering steel under an electrolyte film in cyclic wet-dry condition[J]. Corrosion science, 2014, 78: 130-137.
- [3] EVANS U R, TAYLOR C A J. Mechanism of atmospheric rusting[J]. Corrosion science, 1972, 12(3): 227-246.
- [4] JEFFREY R. Corrosion of vertical mild steel strips in seawater[J]. Corrosion science, 2009, 51(10): 2291-2297.
- [5] MELCHERS R E. Long-term immersion corrosion of steels in seawaters with elevated nutrient concentration[J]. Corrosion science, 2014, 81: 110.
- [6] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 225.
CAO Chu-nan. Natural environment corrosion of materials in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 225.
- [7] JEFFREY R, MELCHERS R E. Effect of vertical length on corrosion of steel in the tidal zone[J]. Corrosion, 2009, 65: 695.
- [8] 黄桂桥, 尤建涛. 海洋环境中长钢样与短钢样腐蚀差别的研究[J]. 材料保护, 2000(9): 4-5.
HUANG Gui-qiao, YOU Jian-tao. Corrosion of long and short steel samples exposed in marine environment[J]. Materials protection, 2000(9): 4-5.
- [9] 赵林, 穆鑫, 董俊华, 等. AH32 长尺试样在模拟海洋潮差区腐蚀行为的电偶电流研究[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1445-1452.
ZHAO Lin, MU Xin, DONG Jun-hua, et al. Study on the galvanic current of corrosion behavior for AH32 long-scale specimen in simulated tidal zone[J]. Acta metallurgica sinica, 2017, 53(11): 1445-1452.
- [10] 丁国清, 杨朝晖, 黄桂桥, 等. 黑色金属在天然海水中的腐蚀电位及其变化规律[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 99-102.
DING Guo-qing, YANG Zhao-hui, HUANG Gui-qiao, et al. Corrosion potentials and their change rules for ferrous metals in natural seawater[J]. Corrosion & protection, 2018, 39(2): 99-102.
- [11] 穆鑫, 魏洁, 董俊华, 等. 低碳钢在模拟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.
- [12] 王佳. 液膜形态在大气腐蚀过程中的作用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
WANG Jia. The role of liquid film pattern in atmospheric corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [13] 邹妍, 郑莹莹, 王燕华, 等. 低碳钢在海水中的阴极电化学反应行为[J]. 金属学报, 2010, 46(1): 123-128.
ZOU Yan, ZHENG Ying-ying, WANG Yan-hua, et al. Corrosion electrochemical behaviors of mild steel in seawater[J]. Acta metallurgica sinica, 2010, 46(1): 123-128.
- [14] 夏妍, 曹发和, 常林荣, 等. 锈层下碳钢和耐候钢的微区和宏观腐蚀电化学行为[J]. 高等学校化学学报, 2013, 34(5): 1251.
XIA Yan, CAO Fa-he, CHANG Lin-rong, et al. Corrosion micro- and macro-electrochemical behavior of rusted carbon steel and weathering steel[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2013, 34(5): 1251.
- [15] 邹妍. 海水中锈层覆盖碳钢的腐蚀电化学行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 76.
ZOU Yan. Research on electrochemical corrosion behavior of the rusted carbon steel in seawater[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 76.
- [16] 彭欣. 海水环境中带锈碳钢腐蚀电化学行为及相关参数的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 58.
PENG Xin. Research on electrochemical corrosion behaviors and parameters of rusted carbon steel in marine environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 58.
- [17] TOMASHOV N D. Development of the electrochemical theory of metallic corrosion[J]. Corrosion, 1964, 20: 7-14.
- [18] 王佳, 水流彻. 使用 Kelvin 探头参比电极技术进行薄液层下电化学测量[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1995, 15(3): 173-179.
WANG J, TSURU T. Electrochemical measurements under thin electrolyte layer using Kelvin probe reference electrode[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1995, 15(3): 173-179.
- [19] 王戈, 陈俊明. 铁锈的阴极行为及其对腐蚀与防护的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1985, 5(4): 258-263.
WANG Ge, CHEN Jun-ming. The cathodic behavior of iron rusts and its influence on corrosion and prevention[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1985, 5(4): 258-263.
- [20] 松岛岩著. 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: 230.
MATSUSHIMA R. Low-alloy corrosion resistant steel development and research[M]. JIN Y K translated. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 230.
- [21] HOERLÉ S, MAZAUDIER F, DILLMANN P. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron II. Mechanistic modeling of wet-dry cycles[J]. Corrosion science, 2004, 46(6): 1431-1465.