

金属材料在模拟地热水环境中的腐蚀与结垢特性

程子非¹, 金文倩², 马春红², 莫东平², 侯峰¹

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237;

2. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083)

摘要:目的 地热水的腐蚀和结垢是地热资源开发利用的核心问题,研究几种常见金属材料在地热水中的腐蚀和结垢规律,为地热资源开发利用提供理论依据。方法 通过扫描电子显微镜,X射线衍射仪、动态挂片试验、极化和交流阻抗测试等方法,对比研究紫铜、304 不锈钢和 20[#]碳钢在模拟地热水溶液中的腐蚀和结垢情况。结果 3 种金属材料表面的结垢产物均为 CaCO_3 ,20[#]碳钢表面的 CaCO_3 均为方解石相,304 不锈钢和紫铜表面的 CaCO_3 包含方解石相和少量文石相,304 不锈钢表面的 CaCO_3 分布较紫铜疏松,且含垢量较小。20[#]碳钢表面腐蚀产物的内层主要是黑色的 Fe_3O_4 ,外层主要是黄色的 Fe_2O_3 ;紫铜表面的腐蚀产物主要是铜的氧化物;304 不锈钢表面无腐蚀产物。浸泡期间,304 不锈钢未发生腐蚀且腐蚀电流密度最小;紫铜的整体耐蚀性能不及 304 不锈钢,但耐点蚀性能最佳;20[#]碳钢腐蚀严重,腐蚀电流密度较大。结论 在模拟地热水溶液中,304 不锈钢拥有比紫铜和 20[#]碳钢更好的耐腐蚀性能和阻垢性能。

关键词: 地热水; 紫铜; 不锈钢; 碳钢; 腐蚀; 结垢

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)08-0092-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.017

Corrosion and Scaling Characteristics of Metal Pipes in Simulated Geothermal Water Environment

CHENG Zi-fei¹, JIN Wen-qian², MA Chun-hong², MO Dong-ping², HOU Feng¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. SINOPEC Star Petroleum Co. Ltd, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective Corrosion and scaling are the main problems in the development and utilization of geothermal resources. The aim of this work was to study the scaling and corrosion rules of common metal materials in geothermal water, and to provide theoretical basis for the development and utilization of geothermal resources. Methods Scanning electron microscopy, X-ray diffrac-

收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-05-08

Received: 2015-04-02; Revised: 2015-05-08

基金项目: 中石化新星石油公司科技开发项目(10500000-13-ZC0607-0006)

Fund: Supported by the SINOPEC Star Petroleum Co. Ltd. Science and Technology Support Program(10500000-13-ZC0607-0006)

作者简介: 程子非(1991—),男,江西人,硕士研究生,主要研究金属材料腐蚀与防护。

Biography: CHENG Zi-fei(1991—), Male, from Jiangxi, Master graduate student, Research focus: corrosion control of metal materials.

通讯作者: 侯峰(1969—),男,安徽人,工学博士,副教授,主要从事换热器阻垢技术和石化装备腐蚀与防护技术研究。

Corresponding author: HOU Feng(1969—), Male, from Anhui, Doctor of engineering, Associate professor, Research focus: anti-scaling technology of heat exchangers, corrosion and protection technology of petrochemical equipments.

tion, immersion corrosion and electrochemistry test were used to study and compare the scaling and corrosion rules of copper pipes, 304 stainless steel pipes and 20# carbon steel pipes in a simulated geothermal water environment. **Results** The scaling product of three kinds of metal materials was CaCO_3 , but with different phases. The CaCO_3 on the surface of 20# carbon steel pipes showed only calcite phase, while the CaCO_3 on the surface of copper and 304 stainless steel pipes showed a small amount of aragonite phase besides calcite phase. And the 304 stainless carbon steel pipes had the minimum amount of scaling, and the distribution of CaCO_3 was not as dense as that on copper. A large amount of corrosion products were formed on the surface of 20# carbon steel pipes. The inner layer was mainly Fe_3O_4 , and the outer layer was Fe_2O_3 . The corrosion products of copper pipes were mainly copper oxides. While no corrosion product was formed on the surface of the 304 stainless steel pipes. During the soaking, 304 stainless steel was not corroded and had the lowest corrosion current density. The corrosion resistance of the copper pipes was not as good as that of 304 stainless steel, but its pitting resistance was the best. The 20# carbon steel pipes were severely corroded and had relatively high corrosion current density. **Conclusion** 304 stainless steel pipes showed better corrosion resistance and anti-scaling performance than copper pipes and 20# carbon steel pipes in a simulated geothermal water environment.

KEY WORDS: geothermal water; copper; stainless steel; carbon steel; corrosion; scaling

地热资源作为一种新能源,具有分布广、成本低、可直接利用、环境污染小等优点。近年来,常规能源紧缺、环境污染和气候变暖等问题使地热资源的优势显著增加,成为继太阳能、风能之后又一新的绿色低碳经济投资亮点^[1-3]。在地热资源开发和使用过程中存在的主要问题是金属管道的结垢和腐蚀^[4-6]。由于地热水的温度和矿化程度比较高,而且含有许多腐蚀和结垢性物质,使得金属管材在长期高温浸泡下发生腐蚀与结垢,从而导致管道破裂、水量减小、水质污染等问题,引起地热资源的浪费以及供暖能力的下降。因此,开展常见管道在地热水环境中腐蚀与结垢研究,对地热资源的开发和利用具有重要意义^[7-9]。赵金平等^[10]通过对河南省东部平原地热水的结垢与腐蚀趋势的评价,提出了相应的防护技术。卢予北^[11]采用静态浸泡法,研究了中深井地热水环境中的材料腐蚀与结垢问题。近几年,朱立群等^[5-6,12-14]通过腐蚀浸泡法和电化学测试法,研究了不锈钢管、镀锌钢管、碳钢管和涂层管等材料在模拟地热水环境中的腐蚀和结垢情况,对比了不同管材腐蚀和结垢产物的形貌、成分及其腐蚀电化学行为的差异。

实际上,不同金属管道在地热水中的腐蚀和结垢产物在形成过程中存在一定的相关性。本文选取了广东省某典型地热水为模拟溶液,以紫铜、304 不锈钢和 20# 碳钢金属管材为对象,探讨 3 种金属材料在模拟地热水溶液中的结垢和腐蚀规律。

1 实验

将实验材料切割成尺寸为 30 mm×15 mm×2.5 mm 的金属挂片,依次用 180#, 400#, 800#, 1000#, 1200#

砂纸进行打磨,用乙醇和丙酮除油,水洗,吹干。

模拟地热水溶液化学组成如下: NaHCO_3 4.196 g/L, KHCO_3 0.245 g/L, CaSO_4 1.857 g/L, MgSO_4 0.048 g/L, CaCl_2 0.069 g/L, NaF 0.421 g/L, Na_2SO_4 0.043 g/L。相关数据来自广东省中心实验室水质分析报告书,采用蒸馏水配置模拟地热水溶液,调节 pH=7.99,使用时溶液需加热至 75 ℃。

将紫铜、304 不锈钢和 20# 碳钢金属挂片垂直悬挂在 RCC III 型旋转挂片腐蚀试验仪中,每组 3 个平行试样,共 2 组。置于 2 L 的模拟地热水溶液中,每天对模拟地热水溶液进行更换,以保持离子浓度恒定。仪器转速设定为 50 r/min,水浴温度为 75 ℃,悬挂周期分别为 120, 240, 360, 480, 600 h,采用 HS 型超声清洗仪对其进行表面清理,干燥后称量,计算金属挂片的腐蚀速率 v ,见式(1):

$$v = \frac{8760(m_0 - m_1)}{\rho S t} \quad (1)$$

式中: m_0 为金属挂片初始质量, g; m_1 为金属挂片腐蚀清理后的质量, g; ρ 为金属挂片的密度, kg/m^3 ; S 为金属挂片的表面积, m^2 ; t 为金属挂片浸泡的时间, h。

采用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜观察金属挂片的表面腐蚀和结垢形貌,利用 D/MAX2550 型 X 射线衍射仪对金属挂片表面的腐蚀与结垢产物进行分析。

采用 PARSTAT2273 型电化学工作站对试片进行腐蚀电化学测试。采用三电极体系,工作电极分别由 3 种金属材料经环氧树脂封装制成,工作面积为 1 cm^2 ,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。腐蚀 600 h 后,对电极进行交流阻抗和极化曲线测试,极化曲线扫描速度为 5 mV/s,交流阻抗测试频率

为 100 kHz ~ 0.01 Hz, 激励信号幅值为 10 mV。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀速率分析

浸泡 600 h 后, 得到 3 种金属材料在模拟地热水溶液中的腐蚀速率, 如图 1 所示。304 不锈钢由于在浸泡周期内未发生宏观腐蚀, 也未发生点蚀, 因此腐蚀速率为零, 表现出了优良的耐蚀性能。紫铜和 20# 碳钢则发生了不同程度的腐蚀, 从图 1 可以看出 20# 碳钢的腐蚀速率几乎是紫铜的 30 倍。此外, 前 360 h, 两种材料的 $v-t$ 曲线斜率均较陡, 说明浸泡初期 Cl^- , SO_4^{2-} 等腐蚀性离子的渗透大大促进了金属材料的腐蚀; 360 h 后, 20# 碳钢的 $v-t$ 曲线的斜率变得平缓, 说明腐蚀速率增速减缓, 腐蚀性离子侵入金属材料基体难度增加, 这可能与腐蚀与结垢产物的保护作用有关^[15]。

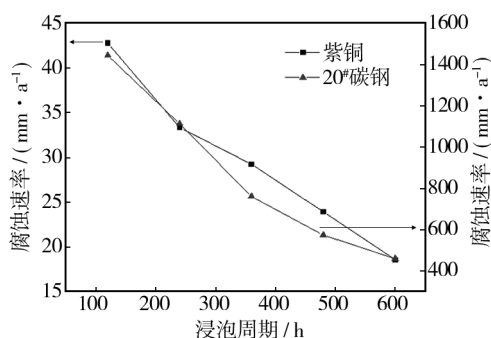


图1 模拟地热水溶液中紫铜和 20# 碳钢腐蚀速率与浸泡时间的关系

Fig. 1 The relationship between corrosion rate and immersion time of copper and 20# carbon steel in simulated geothermal water

2.2 表面产物形貌分析

图 2 是 3 种金属材料在 75 °C 地热水中浸泡 600 h 后, 表面的腐蚀和结垢产物形貌。图 3 是 3 种金属材料腐蚀和结垢产物的 XRD 图谱。由图 3 可知, 3 种金属材料表面产生的结垢产物均为 CaCO_3 , 但不同金属材料表面 CaCO_3 的晶系及含量不同。

综合分析图 2 和图 3 可以得出, 紫铜表面紧密地分布着大量块状的晶体, 这些晶体由腐蚀和结垢产物构成, 腐蚀产物主要是 Cu 的氧化物, 结垢产物主要是 CaCO_3 的方解石相, 块状晶体表面还分布着少量的条状晶体, 主要是 CaCO_3 的文石相。304 不锈钢表面被

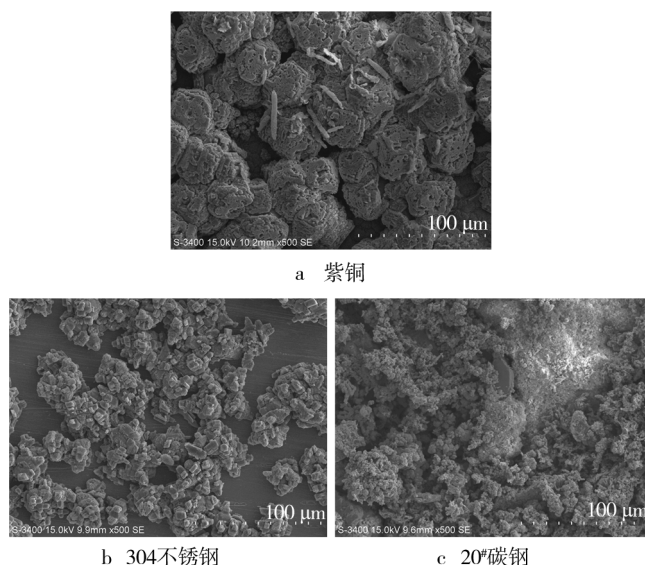


图2 模拟地热水溶液中 3 种金属材料表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of three kinds of metal materials in simulated geothermal water

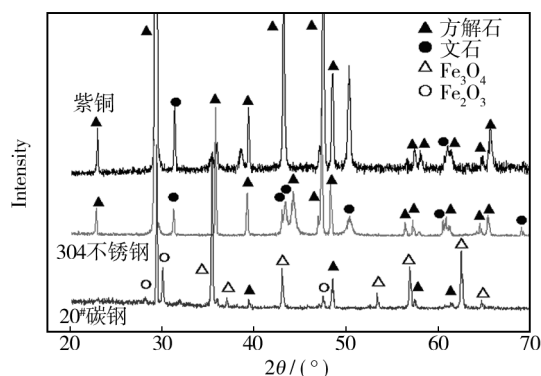


图3 3 种金属材料表面产物的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of products on the surface of three kinds of metal materials in simulated geothermal water

立方状的晶体覆盖, 晶体分布得较为分散, 结垢量相对较小; 块状晶体主要是方解石相, 细长状晶体主要是文石相, 这些结垢产物可能处在文石相向更稳定的方解石相转变的过程中^[16]。20# 碳钢表面发生了较为严重的腐蚀, 产生了大量的腐蚀与结垢产物, 结垢产物基本都以方解石的形式存在, 腐蚀产物为针叶状^[17]分为内外两层, 内层主要为黑色、较致密的 Fe_3O_4 , 外层主要为黄色、较疏松的 Fe_2O_3 , 这主要是外层隔离了氧气, 导致内层形成了未完全氧化的 Fe_3O_4 及其他铁的不稳定氧化物^[18-20]。

2.3 电化学分析

图 4 为 3 种金属材料在 75 °C 模拟地热水溶液中

浸泡 600 h 后的极化曲线,相应的腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 见表 2。3 种材料中紫铜最不容易发生点蚀,20#碳钢的腐蚀倾向最大。从表 1 可以看出,20#碳钢的腐蚀电流密度最大,约为 304 不锈钢的 15 倍,这说明 304 不锈钢的耐腐蚀性能最好,20#碳钢耐腐蚀性能最差。

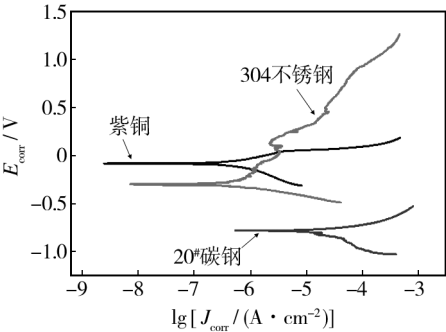


图 4 模拟地热水中 3 种金属材料的极化曲线
Fig.4 Polarization curves of three kinds of metal materials immersed in the simulated geothermal water

表 1 极化曲线相关的电化学参数
Tab.1 Electrochemical parameters of polarization curves

管材	腐蚀电位 (E_{corr})/V	腐蚀电流密度 (J_{corr})/($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
紫铜	-0.110	0.329
304 不锈钢	-0.295	0.252
20#碳钢	-0.780	14.700

图 5 为 3 种金属材料在 75 ℃ 模拟地热水溶液中的交流阻抗谱,可以看出紫铜和 20#碳钢的阻抗值远低于 304 不锈钢。

图 6 为对交流阻抗谱拟合后的等效电路,对电路进行解析可得主要电化学参数,见表 2。其中, R_s 是

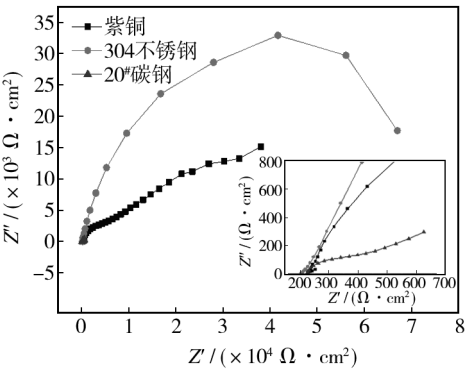


图 5 模拟地热水中 3 种金属材料的交流阻抗谱
Fig.5 Nyquist diagrams of three kinds of metal materials immersed in the simulated geothermal water

模拟地热水溶液的电阻, C_d 为材料表面膜的电容, R_a 为材料表面膜的电阻, R_b 为材料产生腐蚀的极化电阻, CPE 为等效电容原件, Z_d 为 Warburg 阻抗。可以看出,由于 304 不锈钢表面钝化膜生长完整, R_a 较高,有效保护了金属材料表面免受腐蚀性离子渗透。紫铜表面由于有氧化膜的保护^[21], R_a 也较高,但仅为不锈钢的一半。因为紫铜表面氧化膜已受到腐蚀性离子的侵蚀,紫铜基体已与腐蚀性离子发生接触,表现为 R_b 很低。20#碳钢表面氧化膜早已被破坏,由于表面存在大量腐蚀与结垢产物, R_b 比较稳定,但耐蚀性远低于前两种管材。另一方面,紫铜的表面膜电容值最小,说明其孔隙率低,不易发生点蚀;304 不锈钢的表面膜电容值也相对较低,但高于紫铜,说明 304 不锈钢耐点蚀的能力相对较弱;紫铜综合耐腐蚀能力虽然不如 304 不锈钢,但耐点蚀能力却优于前者。

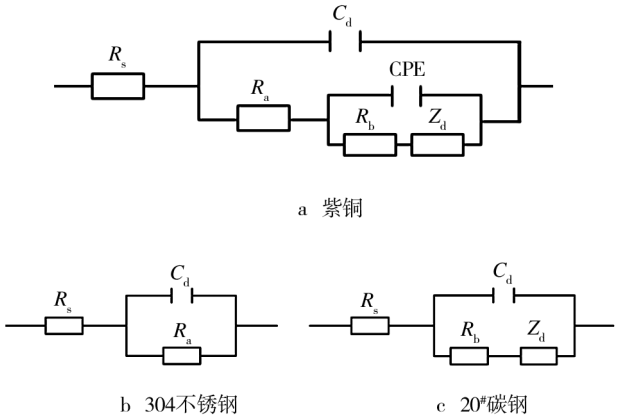


图 6 阻抗谱的等效电路
Fig.6 Equivalent circuit models of Nyquist diagrams

表 2 交流阻抗谱主要的电化学参数
Tab.2 Main electrochemical parameters of Nyquist diagrams

管材	R_s / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C_d / ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	R_a / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_b / ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
紫铜	242.5	6.20	3.835×10^5	157.8
304 不锈钢	229.6	29.11	6.386×10^5	
20#碳钢	222.6	2333		151.8

3 结论

1) 紫铜,304 不锈钢和 20#碳钢在地热水中的结垢产物均为 CaCO_3 ,但是晶系不同。20#碳钢只含方解石相,而紫铜和 304 不锈钢还有少量的文石相。

2) 304 不锈钢在地热水中的耐蚀性能最好,紫铜次之。20#碳钢在地热水中极易发生腐蚀,生成的腐蚀产物为铁的氧化物,内层主要为黑色 Fe_3O_4 ,外层主要为黄色 Fe_2O_3 。

3) 综合考虑,20#碳钢在模拟地热水环境中具有较好的耐磨蚀性能和阻垢性能。

参考文献

- [1] BIXLEY P F, CLOTWORTHY A W, MANNINGTON W I. Evolution of the Wairakei Geothermal Reservoir during 50 Years of Production[J]. *Geothermics*, 2009, 38(1): 145—154.
- [2] THAIN I A, CAREY B. Fifty Years of Geothermal Power Generation at Wairakei[J]. *Geothermics*, 2009, 38(1): 48—63.
- [3] 刘明言, 朱家玲. 地热能利用中的防腐防垢研究进展[J]. *化工进展*, 2011, 30(5): 1120—1123.
LIU Ming-yan, ZHU Jia-ling. Progress of Corrosion and Fouling Prevention in Utilization of Geothermal Energy[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(5): 1120—1123.
- [4] RICHTER S, HILBERT L R, THORARINSDOTTIR R I, et al. On-line Corrosion Monitoring in Geothermal District Heating Systems I: General Corrosion Rates[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(7): 1770—1778.
- [5] 朱立群, 吴坤湖, 李卫平, 等. 模拟地热水中 304 不锈钢管和镀锌钢管的腐蚀与结垢[J]. *物理化学学报*, 2010, 26(1): 39—46.
ZHU Li-qun, WU Kun-hu, LI Wei-ping, et al. Scaling and Corrosion of 304 Stainless Steel and Galvanized Steel Pipes in a Simulated Geothermal Water Environment[J]. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2010, 26(1): 39—46.
- [6] 吴坤湖, 李卫平, 刘慧丛, 等. 模拟地热水环境中 304 不锈钢管材的结垢与腐蚀电化学行为[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(10): 1263—1269.
WU Kun-hu, LI Wei-ping, LIU Hui-cong, et al. Scaling and Electrochemical Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel Pipes in a Simulated Geothermal Water Environment[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(10): 1263—1269.
- [7] KAYA T, HOSHAN P. Corrosion and Material Selection for Geothermal Systems[C]// *Proceedings World Geothermal Congress*, 2005.
- [8] POHJANNE P, CARPEN L, HAKKARAINEN T, et al. A Method to Predict Pitting Corrosion of Stainless Steels in Evaporative Conditions[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(11): 1325—1331.
- [9] DAVIS R B, MUNIR Z A. Corrosion Susceptibilities of Various Metals and Alloys in Synthetic Geothermal Brines[J]. *Journal of Materials Science*, 1977, 12(9): 1909—1913.
- [10] 赵金平, 王心义, 韩鹏飞, 等. 河南省东部平原地热水结垢与腐蚀评价及防护技术的研究[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 118—122.
ZHAO Jin-ping, WANG Xin-yi, HAN Peng-fei, et al. Evaluation on Geothermal Water of Scaling and Corrosion of Eastern Plain in Henan Province and Research on Protecting Technology[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2004, 32(1): 118—122.
- [11] 卢予北. 河南地热(中深)井金属井管腐蚀与结垢试验研究[J]. *探矿工程: 岩土钻掘工程*, 2004(8): 49—52.
LU Yu-bei. Trial Research on Erosion and Encrustation of Casings in Geothermal Well in Henan[J]. *Exploration Engineering Rock & Soil Drilling and Tunneling*, 2004(8): 49—52.
- [12] 朱立群, 陈伟, 李卫平, 等. 地热水管道不锈钢管材腐蚀与结垢试验[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(3): 292—295.
ZHU Li-qun, CHEN Wei, LI Wei-ping, et al. Experiment of Stainless Steel Corrosion and Scaling in Geothermal Water Supply Pipe Line[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2010, 31(3): 292—295.
- [13] 朱立群, 吴坤湖, 李卫平, 等. 循环模拟地热水环境中聚苯硫醚复合涂层的阻垢性能[J]. *功能材料*, 2010, 41(6): 1046—1049.
ZHU Li-qun, WU Kun-hu, LI Wei-ping, et al. Anti-scaling Performance of PPS Composite Coatings in a Circulated and Simulated Geothermal Water Environment[J]. *Journal of Functional Materials*, 2010, 41(6): 1046—1049.
- [14] 蔡培培, 李卫平, 陈贻焱, 等. 模拟地热水中碳钢和镀锌钢管的腐蚀结垢规律[J]. *腐蚀与防护*, 2009, 30(7): 454—458.
CAI Pei-pe, LI Wei-ping, CHEN Yi-chi, et al. Corrosion and Scaling on Carbon Steel and Galvanized Steel Pipe in Simulated Geothermal Water[J]. *Corrosion & Protection*, 2009, 30(7): 454—458.
- [15] 尹力, 曹顺安, 吴善宏, 等. Q235 钢在海水及海水淡化一级 RO 产水中的腐蚀特性研究[J]. *表面技术*, 2012, 41(3): 43—46.
YIN Li, CAO Shun-an, WU Shan-hong, et al. Research on Corrosion Properties of Q235 Carbon Steel in Seawater and One-stage RO Water of Seawater[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(3): 43—46.
- [16] 叶朝曦. Ni-P 化学镀改性换热表面阻垢特性试验研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.

(下转第 119 页)

- Conductors[J]. *Physica C*, 2002, 39: 372—376.
- [6] CLICKNER C C, EKIN J W, CHEGGOUR N, et al. Mechanical Properties of Pure Ni and Ni-alloy Substrate Materials for Y-Ba-Cu-O Coated Superconductors [J]. *Cryogenics*, 2006, 46: 432.
- [7] 张永军, 张平祥, 李成山, 等. 涂层导体用金属基带研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009(5): 935—940.
ZHANG Yong-jun, ZHANG Ping-xiang, LI Cheng-shan, et al. Research Progress of Metal Substrates for Coated Conductor [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009(5): 935—940.
- [8] GOYAL A, NORTON D P, BUDAI J D, et al. High Critical Current Density Superconducting Tapes by Epitaxial Deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ Thick Films on Biaxially Textured Metals [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69: 1795.
- [9] EICKEMEYER J, SELBMANN D, OPITZ R, et al. Highly Cube Textured Ni-W-RABiTS Tapes for YBCO Coated Conductors [J]. *Physica C Superconductivity & Its Applications*, 2002, 372(12): 814—817.
- [10] CHRISTEN D K, HE Q, BUDAI J D, et al. Deposition of Biaxially-oriented Metal and Oxide Buffer-layer Films on Textured Ni Tapes: New Substrates for High-current, High-temperature Superconductors [J]. *Physica C Superconductivity*, 1997, 275(1): 155—161.
- [11] DATTA M, UNDOLT D. Electrochemical Machining under Pulsed Current Conditions [J]. *Electrochimica Acta*, 1981, 26(7): 89—907.
- [12] 李青. 电抛光[J]. *表面技术*, 1994, 23(2): 53—55.
LI Qing. Electropolishing [J]. *Surface Technology*, 1994, 23(2): 53—55.
- [13] 杜炳志, 漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. *表面技术*, 2007, 32(6): 56—58.
DU Bing-zhi, QI Hong-lan. Development of Electrochemical Polishing Technology [J]. *Surface Technology*, 2007, 32(6): 56—58.
- [14] 张素银, 杜凯, 谌加军, 等. 电解抛光技术研究进展[J]. *电镀与涂饰*, 2007(2): 48—50.
ZHANG Su-yin, DU Kai, SHEN Jia-jun, et al. Research Progress of Electropolishing Technology [J]. *Electroplating and Finishing*, 2007(2): 48—50.
- [15] 李昇. 电化学抛光技术及应用[J]. *材料保护*, 2001(5): 54.
LI Yi. Electropolishing Technology and Its Application [J]. *Materials Protection*, 2001(5): 54.
- [16] 安军, 李洪友, 王晓明, 等. 脉冲电化学光整加工工艺的基础实验研究[J]. *表面技术*, 2003, 32(1): 22—24.
AN Jun, LI Hong-you, WANG Xiao-ming, et al. BaSiC Experiment Research of Pulse Electrochemical Finishing Process [J]. *Surface Technology*, 2003, 32(1): 22—24.
- [17] 杜炳志. 超导材料 NiW 合金基带电化学抛光工艺研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
DU Bing-zhi. Electrochemical Polishing Process Conditions for NiW Alloy Substrate in Superconductivity Materials [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2007.
- [18] 王雪, 李成山, 于泽铭, 等. NiW 合金基带电化学抛光过程研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(6): 1075—1079.
WANG Xue, LI Cheng-shan, YU Ze-ming, et al. Electropolishing Process Research of NiW Alloy Substrates [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(6): 1075—1079.

(上接第 96 页)

- YE Chao-xi. Experimental Fouling Investigation with Modified Surface of Electroless Ni-P Coating [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [17] 徐秀清, 魏丹, 俞莹滢, 等. Cl^- 浓度对含盐污水中 $10^\#$ 碳钢腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(4): 59—61.
XU Xiu-qing, WEI Dan, YU Ying-ying, et al. Influence of Cl^- Concentration on the Corrosion Behavior of $10^\#$ Carbon Steel in Saline Wastewater [J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4): 59—61.
- [18] HU J Y, CAO S A, YIN L, et al. Study on the Corrosion Behavior of Q235A Carbon Steel in RO Product Water of Seawater [J]. *Anti-corrosion Methods and Materials*, 2012, 59: 305—310.
- [19] 胡家元, 曹顺安, 谢建丽. 锈层对海水淡化一级反渗透产水中碳钢腐蚀行为的影响[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(5): 1153—1162.
- HU Jia-yuan, CAO Shun-an, XIE Jian-li. Effect of Rust Layer on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Reverse Osmosis Product Water [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(5): 1153—1162.
- [20] 谢建丽, 金凯峰, 蒋晓斌, 等. 带锈碳钢在稀 NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2014, 43(2): 55—59.
XIE Jian-li, JIN Kai-feng, JIANG Xiao-bin, et al. Corrosion Behavior of Rusted Carbon Steel in Diluted NaCl solution [J]. *Surface Technology*, 2014, 43(2): 55—59.
- [21] 陈海燕, 林振龙, 陈丕茂, 等. 紫铜在海洋微生物作用下的电化学腐蚀行为[J]. *材料工程*, 2014(7): 22—27.
CHEN Hai-yan, LIN Zhen-long, CHEN Pi-mao, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Copper in Marine Microbial Medium [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(7): 22—27.