

吐温-40与植酸复配对碳钢的缓蚀作用

王文峰, 丁芳君, 刘丹婷, 周晓荣, 李建芬

(武汉轻工大学 化学与环境工程学院, 武汉 430023)

摘要: 目的 提高 0.5 mol/L HCl 中植酸对热轧碳钢(HRCS)的缓蚀性能。方法 用失重法和电化学阻抗法测试植酸、吐温-40 以及复配缓蚀剂的缓蚀效率,从热力学和动力学方面分析复配缓蚀剂的作用机制。结果 失重法测试表明,植酸和吐温均对热轧碳钢有一定缓蚀作用。当 293 K,植酸质量浓度为 0.3 g/L 时,缓蚀效率达到 69.1%,在质量浓度为 0.8 g/L 时缓蚀效率下降为 9.6%;吐温-40 的缓蚀效率随着质量浓度的增大而增大,0.8 g/L 时达到 73.4%。在 0.5 mol/L 盐酸中加入 0.05 g/L 吐温-40 后,复配缓蚀剂的缓蚀效率随着质量浓度的增加而增大,且优于植酸和吐温-40 单独使用,表现出协同效应。电化学测试得到了相同的结论,表明复配缓蚀剂在碳钢表面产生自发的 Langmuir 吸附,使碳钢腐蚀反应的活化能增大,是熵减少的放热过程。结论 吐温-40 和植酸在盐酸中对热轧碳钢的腐蚀有缓蚀协同作用。

关键词: 碳钢; 缓蚀; 植酸; 吐温-40; 失重法; 电化学; 协同作用

中图分类号: TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0093-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.016

Inhibition Effect of the Composite of Tween-40 and Phytic Acid on Carbon Steel

WANG Wen-feng, DING Fang-jun, LIU Dan-ting, ZHOU Xiao-rong, LI Jian-fen

(Chemical and Environmental Engineer Department, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the corrosion inhibition performance of phytic acid for hot rolled carbon steel (HRCS) in 0.5 mol/L HCl solution. **Methods** The corrosion inhibition efficiency of phytic acid, Tween-40, and their compound on carbon steel was measured by weight-loss method and electrochemical impedance spectrometry tests. The inhibition mechanism of the compound inhibitor was analyzed using thermodynamics and kinetics. **Results** It was revealed by weight-loss measurement that either phytic acid or tween-40 alone had limited inhibitory effect on the corrosion of HRCS in hydrochloric acid. The inhibition efficiency of phytic acid reached the max value of 69.1% when the concentration was 0.3 g/L at 293 K, then decreased with further addition of inhibitor and was reduced to 9.6% when the concentration of phytic acid was 0.8 g/L. On the other hand, the inhibition efficiency increased with the increase of the tween-40's concentration, which reached the value of 73.4% at 0.8 g/L, 293 K. When Tween-40 (0.05 g/L) was added into the solution, the inhibition efficiency of the compound inhibitor increased even if the concentration of phytic acid exceeded 0.3 g/L. The corrosion inhibition efficiency of compound inhibitor was higher than the sum of phytic acid's and Tween-40's efficiency, which suggested synergistic effect. The same result could be concluded from electrochemical im-

收稿日期: 2015-05-29; 修订日期: 2015-07-22

Received: 2015-05-29; Revised: 2015-07-22

基金项目: 湖北省教育厅基金资助项目(Q20131703); 湖北省自然科学基金资助项目(2014CFB890); 大学生创新训练项目(CXXL2014008)

Fund: Supported by Foundation of Hubei Educational Committee(Q20131703), Natural Science Foundation of Hubei Province(2014CFB890) and Undergraduate Training Program for innovation (CXXL2014008)

通讯作者: 周晓荣(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电化学腐蚀与防护。

Corresponding author: ZHOU Xiao-rong(1977—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: electrochemical corrosion and protection.

dance spectrometry measurement. Further analysis revealed that the adsorption of the compound inhibitor on the surface of carbon steel obeyed Langmuir adsorption isotherm equation, which improved the activation energy (E_a) of the corrosion procession, leading to the decrease of entropy. **Conclusion** Tween-40 and phytic acid showed synergistic corrosion inhibition effect on the HRCS in hydrochloric acid.

KEY WORDS: carbon steel; corrosion inhibition; phytic acid; Tween-40; weight-loss method; electrochemistry; synergistic effect

热轧碳钢(hot rolled carbon steel, HRCS)是应用广泛的钢铁原材料,主要用于钢结构件、桥梁、船舶、车辆的生产。在钢材的使用过程中防腐非常重要,尤其在酸洗时,添加缓蚀剂是有效预防或减缓腐蚀的手段。目前,金属缓蚀剂的研究正逐步转向开发环保新型缓蚀剂^[1-6]。植酸的化学名为肌醇六磷酸,是从植物种子中提取的一种有机磷酸类化合物,多用于果蔬及水产的保鲜、护色,对人体和环境无害,已经有研究者^[7-10]发现可将其用于金属镀层无铬钝化、磷化和防腐。

在提高缓蚀剂性能的研究中,表面活性剂因为具有两亲分子结构,容易在金属与腐蚀介质界面形成吸附层而备受关注,尤其是在与其他缓蚀剂的协同作用方面^[11-16]。文中介绍非离子表面活性剂吐温-40与植酸两种缓蚀剂的复配对热轧碳钢缓蚀和表面吸附的影响,并计算热力学吸附参数和腐蚀动力学参数,分析其协同缓蚀机制。

1 实验

试样为尺寸40 mm×13 mm×2 mm的Q235A热轧碳钢板,由杭州冠洁工业清洗水处理科技有限公司提供,其组成(以质量分数计)为:C 0.14%~0.22%, Si≤0.30%, Mn 0.30%~0.65%, S≤0.05%, P≤0.045%, Fe余量。实验所用其它试剂均为分析纯。

将热轧碳钢板按文献[12]进行表面处理,精确称量后,悬于293 K且含有一定浓度缓蚀剂的250 mL 0.5 mol/L HCl溶液中,恒温6 h后取出试样,去除腐蚀产物,在干燥器中干燥1 h后,精确称量,并计算失重情况。本研究选取3块碳钢试片平行测试,计算平均失重值 Δm (单位:g)。缓蚀剂浓度误差范围为±1%,缓蚀效率的误差范围为±5%。

根据下式计算腐蚀速率 v :

$$v = \Delta m / (S \cdot t)$$

式中: S 为试样表面积, m^2 ; t 为腐蚀时间,h。

由腐蚀速率计算缓蚀率(η):

$$\eta = \frac{v_0 - v}{v_0} \times 100\%$$

式中: v_0 和 v 分别为热轧碳钢试样在不含和含有缓蚀剂的腐蚀介质中的腐蚀速率。

在CHI660C电化学工作站上测试电化学交流阻抗谱,测定频率范围为100 kHz~0.1 Hz,电极在溶液中浸泡至开路电位稳定后,进行阻抗测试,交流激励信号幅值为5 mV。测试系统由三电极电解池组成:辅助电极为铂片电极(1 cm×1 cm);参比电极为饱和甘汞电极(SCE);研究电极为热轧碳钢板(有效面积为0.5 cm×0.5 cm)。测试在室温下进行。

对阻抗谱进行拟合,可以得到等效电路及参数,根据下式计算相应的缓蚀效率 η' ^[17]:

$$\eta' = (R'_p - R_p) / R'_p \times 100\%$$

式中: R_p 和 R'_p 分别为未添加和添加缓蚀剂后的电化学反应极化电阻,反映碳钢腐蚀速率的大小。

2 结果与讨论

2.1 吐温-40和植酸对热轧碳钢的缓蚀作用

图1是非离子表面活性剂吐温-40和植酸单独在293 K,0.5 mol/L HCl溶液中对热轧碳钢试片的缓蚀作用曲线。可以看出,吐温-40和植酸均对热轧碳钢有一定的缓蚀作用。随着吐温-40质量浓度的增加,缓蚀效率逐渐增大,超过0.1 g/L后,缓蚀效率增加幅度减小;0.8 g/L时,缓蚀效率达到73.4%。植酸

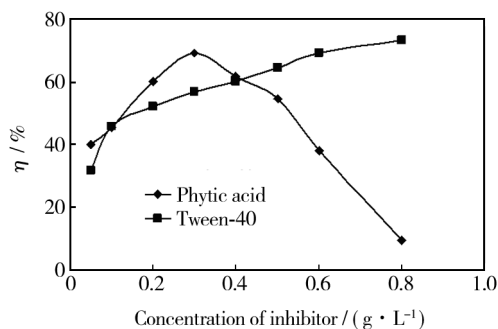


图1 吐温-40和植酸的缓蚀效率与浓度的关系(293 K)

Fig.1 Relationship of the corrosion inhibition effect of Tween-40 and phytic acid with concentration at 293 K

对热轧碳钢的缓蚀作用存在一个最佳质量浓度,0.3 g/L 时,最大缓蚀效率为 69.1%;低于 0.3 g/L 时,随着质量浓度的增加,缓蚀效率逐步增加;超过 0.3 g/L 时,随着植酸质量浓度增加缓蚀效率下降;0.8 g/L 时,植酸的缓蚀效率下降至 9.6%。这是因为植酸本身也能电离出氢离子,当质量浓度增大,溶液腐蚀性增强,碳钢腐蚀速率增幅大于缓蚀效率的增幅,导致缓蚀效率降低。由此推断,这是植酸主要应用在不锈钢、铜等较耐酸腐蚀的金属防护上的原因^[18-19]。

2.2 吐温-40 与植酸复配后对热轧碳钢的缓蚀作用

从图 1 可知植酸的最大缓蚀效率在 70% 左右,需要提高其缓蚀性能。吐温-40 的缓蚀效率随着质量浓度的增加而增大,缓蚀作用较稳定,但属于人工合成的表面活性剂,有一定毒性,应尽可能降低用量。因此,本研究中采取添加少量吐温-40 的复配方法来提高植酸对碳钢酸洗的缓蚀效率。图 2 是加入吐温-40 (质量浓度为 0.05 g/L) 的 293 K,0.5 mol/L HCl 中,在植酸质量浓度不同的条件下,测得对 Q235A 热轧碳钢的缓蚀作用曲线。图 2 显示,加入 0.05 g/L 吐温-40 后的复配缓蚀剂的缓蚀效率没有出现先增后降的变化,而是随着植酸质量浓度的增加,缓蚀效率增加。当植酸质量浓度增大到 0.2 g/L 时,缓蚀效率达到 90.5%,之后再随着植酸质量浓度的增加,基本保持不变。从图 2 中还可看出,植酸质量浓度达到 0.3 g/L 后,二者共存时的缓蚀效率超过了二者单独存在时的缓蚀效率之和,表明吐温-40 和植酸对碳钢在盐酸中的腐蚀存在着缓蚀协同作用^[11]。研究中也发现,当植酸质量浓度较小时,缓蚀协同作用体现不明显,这可能是吐温-40 分子和植酸分子在碳钢表面的吸附没有选择性的缘故。当植酸质量浓度增大到临

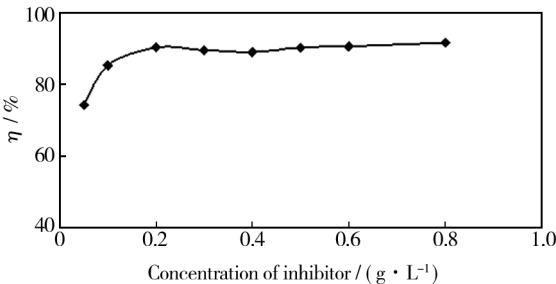


图 2 复配缓蚀剂缓蚀效率与植酸浓度的关系(293 K)
Fig. 2 Relationship of the corrosion inhibition effect of the composite inhibitor with concentration of phytic acid at 293 K

界质量浓度(0.3 g/L)之后,吐温-40 分子的吸附阻碍了氢离子和碳钢表面铁原子的反应,稳定了植酸分子的吸附,从而起到了增强抑制腐蚀的效果,表现出缓蚀协同作用。

2.3 吐温-40 与植酸复配缓蚀剂与热轧碳钢的吸附作用类型

温度是影响缓蚀效率的重要因素之一。图 3 是在不同温度下的复配缓蚀剂对碳钢的缓蚀效率图。复配缓蚀剂在热轧碳钢表面的覆盖度(θ)根据文献[20]中的公式进行计算。通过分析可知,本研究中的缓蚀剂在碳钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温方程式,计算结果和参数见表 1。表 1 中的数据显示所有的线性相关系数(r)非常接近于 1,斜率在 1 左右,表明热轧碳钢表面吐温-40 与植酸复配缓蚀剂的吸附行为服从 Langmuir 吸附等温模型,为单分子层吸附。表 1 也显示了吸附平衡常数(K)值随温度增加而下降,这是由于温度升高,缓蚀剂脱附净速率增加,平衡向脱附方向移动,也说明吸附是放热过程。

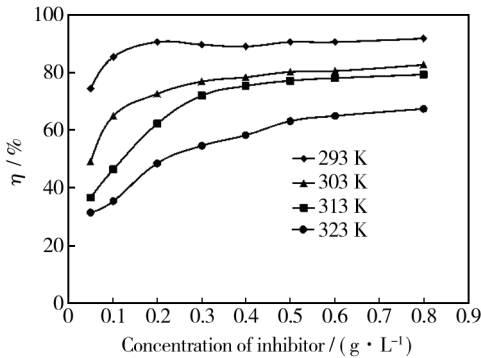


图 3 复配缓蚀剂植酸浓度对缓蚀效率的影响
Fig. 3 Influence of concentration of the composite inhibitor on the corrosion inhibition effect

表 1 Langmuir 吸附等温方程线性拟合参数
Tab. 1 Linear regression parameters of Langmuir adsorption isotherm equation

T/K	r	Slope	$K/(L \cdot g^{-1})$
293	0.9994	1.0038	5.75
303	0.9961	0.9277	4.33
313	0.9989	1.0051	2.32
323	0.9982	0.9232	1.69

2.4 热轧碳钢的腐蚀热力学分析

通过文献[12]中的公式对复配体系中的 $\ln K$ 和 $1/T$ 作线性回归,得到吸附热 ΔH^\ominus (本研究中的测试

在常压下进行,可视作标态,后文直接用 ΔH 表示),再通过计算得到吸附自由能(ΔG)和吸附熵(ΔS),将有关的热力学参数列于表2中。

表2 复配缓蚀剂在碳钢表面的吸附热力学函数

Tab. 2 Adsorption thermodynamic parameters of the composite corrosion inhibitor on the surface of carbon steel

T/K	$\Delta H/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta G/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta S/$ ($\text{J}\cdot\text{K}\cdot\text{mol}^{-1}$)
293	-33.32	-14.05	-65.77
303	-33.32	-13.82	-64.32
313	-33.32	-12.66	-65.99
323	-33.32	-12.21	-65.36

ΔH 为负值表明吸附是一个放热过程,这与不同温度下失重法测定结果相一致。 ΔG 为负值说明复配缓蚀剂在碳钢表面的吸附过程是自发的。 ΔS 为负值意味着复配缓蚀剂分子在金属表面的吸附是有序的,碳钢与腐蚀溶液界面处的混乱度降低。据文献报道^[17,21], ΔG 的绝对值低于 20 kJ/mol 表明缓蚀剂与碳钢表面产生的是物理吸附。

2.5 热轧碳钢的腐蚀动力学分析

用阿伦尼乌斯方程来研究吐温-40 与植酸复配缓蚀剂在酸性介质中对热轧碳钢的缓蚀作用^[12]。通过计算机对复配体系下的 $\ln v$ 和 $1/T$ 作线性回归并得到直线的斜率($-E_a/(RT)$)和截距($\ln A$),进而得到表观活化能(E_a)和指前因子(A),其值列于表3。由表3可知 $\ln v$ 和 $1/T$ 有较好的线性关系。 E_a 值随复

表3 在不同复配缓蚀剂质量浓度条件下碳钢在 0.5 mol/L HCl 中的动力学拟合结果

Tab. 3 Kinetic parameters for corrosion of carbon steel in 0.5 mol/L HCl with different concentrations of the composite inhibitor

Phytic acid /($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$E_a/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$A/$ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	r
0	36.06	1.57×10^7	0.9749
0.05	54.53	1.08×10^{10}	0.9631
0.2	71.17	4.12×10^{12}	0.9863
0.3	69.47	1.73×10^{12}	0.9887
0.6	68.41	8.85×10^{11}	0.9968
0.8	67.48	5.67×10^{11}	0.9972

注:溶液中 Tween-40 质量浓度为 0.05 g/L 。

配缓蚀剂质量浓度增大而变大,质量浓度为 0.2 g/L 时,活化能达到最大值,表明复配后的缓蚀剂分子在碳钢表面吸附达到饱和。之后随着缓蚀剂质量浓度的增大,活化能略有下降,可能是吸附在碳钢表面的缓蚀剂分子受到溶液中缓蚀剂分子的作用,使吸附减弱,碳钢腐蚀阻力减小。碳钢腐蚀的指前因子随缓蚀剂的加入的变化规律与活化能基本一致,这也是缓蚀效率在缓蚀剂达到一定质量浓度后不再明显变化的原因,这点也与图2相符合。

2.6 热轧碳钢的腐蚀电化学分析

图4为热轧碳钢在含有不同质量浓度复配缓蚀剂的 0.5 mol/L HCl 溶液中浸泡至开路电位稳定后的电化学交流阻抗谱(EIS)。从图4中可以看出,添加缓蚀剂前后,都只有容抗弧。加入植酸后阻抗谱的半圆弧直径增大,表示植酸的存在使碳钢与腐蚀溶液界面反应的极化电阻(R_p)增大,起到减缓碳钢腐蚀的作用^[22]。加入吐温-40(0.05 g/L)与植酸(0.6 g/L)复配后,表现出更加明显的缓蚀效果。使用 Zview 阻抗分析软件对阻抗谱进行拟合,得出等效电路(图5)及参数,计算缓蚀效率见表4中。表4显示,复配型植酸缓蚀的缓蚀效率比未添加吐温-40时提高了44.5%,这个值高于吐温-40单独使用时的缓蚀效率,也表明吐温-40和植酸产生一定的缓蚀协同作用。这可能是由于缓蚀剂在碳钢腐蚀的活性位点产生更稳

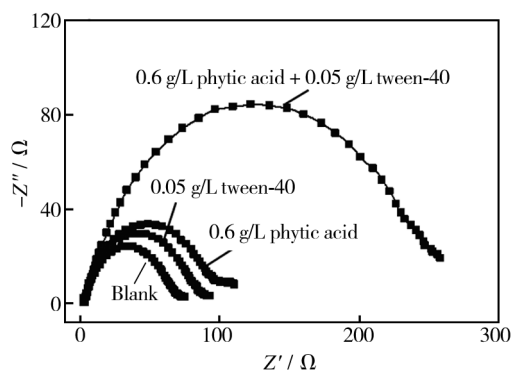


图4 热轧碳钢在 0.5 mol/L HCl 中的阻抗谱图(293 K)

Fig. 4 EIS of carbon steel in 0.5 mol/L HCl

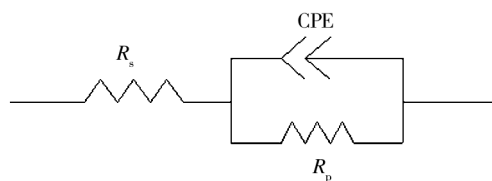


图5 等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit

表 4 Zview 阻抗分析软件拟合的结果
Tab.4 Electrochemical parameters of carbon steel in 0.5 mol/L HCl fitted by Zview analysis

缓蚀剂	$R_s/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$R_p/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	η' /%
未添加	13.56	252.48	
0.05 g/L 吐温-40	14.05	315.99	20.1
0.6 g/L 植酸	14.42	357.72	29.4
0.6 g/L 植酸+ 0.05 g/L 吐温-40	13.14	967.2	73.9

定的吸附,更有效地降低腐蚀速率。用阻抗谱分析得到的缓蚀效率比用失重法得到的值偏低,但都表明复配缓蚀剂存在协同作用。

3 结论

1) 失重法测试结果表明:在 293 K,吐温-40 与植酸单独作为缓蚀剂使用,均对碳钢在 0.5 mol/L 盐酸中的腐蚀起到一定的缓蚀作用。植酸的缓蚀效率在 0.3 g/L 时达到极大值后又减小。在 0.5 mol/L 盐酸中加入 0.05 g/L 吐温-40 后,植酸在高于 0.3 g/L 时表现出高的缓蚀效率,显示出二者的缓蚀协同作用。

2) 复配型植酸缓蚀剂在碳钢与盐酸界面上发生的是 Langmuir 吸附,吸附过程放热且熵减少,吸附使碳钢腐蚀反应活化能增大。

3) 电化学阻抗谱分析也表明,吐温-40 促进了植酸的缓蚀作用,与失重法测试的结果一致。

参考文献

[1] 朱元良. 碳钢垢下腐蚀行为与缓蚀机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2008.
ZHU Yuan-liang. Study on Corrosion Mechanism and Corrosion Behavior of Carbon Steel under the Scale[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2008.

[2] ANSARI K R. Bis-schiff Bases of Isation as New and Environmentally being Corrosion Inhibitor for Mild Steel[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2014,20: 2819—2829.

[3] SU W, TAND B, FU F L, et al. A New Insight into Resource Recovery of Excess Sewage Sludge :Feasibility of Extracting Mixed Amino Acids as an Environment-friendly Corrosion Inhibitor for Industrial Pickling [J]. Journal of Hazardous

Materials,2014,279:38—45.

[4] HADDAD M. Hydroxyethylcellulose Used as an Ecofriendly Inhibitor for 1018 C-steel Corrosion in 3.5% NaCl Solution [J]. Carbohydrate Polymers,2014,112:595—602.

[5] 张世红,齐振伟. 柚子皮提取物对 C38 的缓蚀作用[J]. 表面技术,2014,43(1):50—54.
ZHANG Shi-hong, QI Zhen-wei. Corrosion Inhibition of C38 by Pomelo Peel Extract [J]. Surface Technology, 2014, 43 (1):50—54.

[6] 周晓荣,田径,姚小虎,等. 薄荷叶缓蚀剂对热轧碳钢的缓蚀作用[J]. 材料保护,2014,47(3):16—19.
ZHOU Xiao-rong, TIAN Jing, YAO Xiao-hu, et al. Corrosion Inhibition of Mint Leaves Extract for Hot Rolled Carbon Steel[J]. Materials Protection,2014,47(3):16—19.

[7] 胡会利. 镀锌植酸钝化膜耐蚀性的研究[J]. 电镀与环保,2005,25(6):21—27.
HU Hui-li. A Research on the Corrosion Resistance of Phytic Acid Passivating Coatings for Galvanized Parts[J]. Electroplating & Pollution Control,2005,25(6):21—27.

[8] MENG Guo-zhe, SUN Fei-long, SHAO Ya-wei, et al. Effect of Phytic Acid on the Microstructure and Corrosion Resistance of Ni Coating [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55: 5990—5995.

[9] 樊明明,王建平,凌开成,等. 腐植酸钠的阻垢缓蚀性能研究[J]. 太原理工大学学报,2004,35(6):648—650.
FAN Ming-ming, WANG Jian-ping, LING Kai-cheng, et al. Scale and Corrosion Inhibition Performance of Humic Acid Sodium[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004,35(6):648—650.

[10] 郝玉兰,王振,张晗伟,等. 阳离子腐殖酸聚合物的制备及其缓蚀性能研究[J]. 化工机械,2013,40(5):597—560.
HAO Yu-lan, WANG Zhen, ZHANG Han-wei, et al. Preparation and Corrosion Inhibition Performance of Cationic Humic Acid Polymer[J]. Chemical Engineering Mechanics, 2013,40(5):597—560.

[11] 阚伟海,陈莉荣,姜庆宏,等. 复合缓蚀剂对碳钢腐蚀率的影响研究[J]. 表面技术,2015,44(4):127—131.
KAN Wei-hai, CHEN Li-rong, JIANG Qing-hong, et al. Study on Effects of Composite Corrosion Inhibitor on the Corrosion Rate of Carbon Steel [J]. Surface Technology, 2015,44(4):127—131.

[12] 刘智超. HCl 溶液中吐温-40 对热轧碳钢缓蚀作用的研究[J]. 电镀与精饰,2013,35(9):1—5.
LIU Zhi-chao. Corrosion Inhibition of Tween-40 on Hot Rolled Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Plating and Finishing,2013,35(9):1—5.

[13] 赵景茂. 新型双子表面活性剂在 H₂S 和 CO₂ 盐水溶液在

- 中对碳钢的缓蚀性能[J]. 物理化学学报, 2012, 28(3): 623—629.
- ZHAO Jing-mao. Corrosion Inhibition Performance of Carbon Steel in Brine Solution Containng H_2S and CO_2 by Novel Gemini Surfactants[J]. Acta Physico-chimica Sinica, 2012, 28(3): 623—629.
- [14] 曾华辉, 宋永卫, 王颖, 等. 盐酸介质中松香基季铵盐 Gemini 表面活性剂对碳钢的缓蚀性能[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 44—48.
- ZENG Hua-hui, SONG Yong-wei, WANG Ying, et al. Corrosion Inhibition Effect of Bisquaternary Ammonium Salt of Rosin Group to Mild Steel in Hydrochloric Acid[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2011, 47(1): 44—48.
- [15] 卢浩, 郭英. 羟丙基壳聚糖与表面活性剂的缓蚀协同效应[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 69—74.
- LU Hao, GUO Ying. Synergistic Inhibition Effect of Hydroxypropyl Chitosan and Surfactant for Carbon Steel[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 69—74.
- [16] 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.
- [17] YUCE A O, MERT B D, KARDAS G, et al. Electrochemical and Quantum Chemical Studies of 2-amino-4-methyl-thiazole as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in HCl Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 310—316.
- [18] 王海人, 周洋, 屈钧娥, 等. 植酸在 316L 不锈钢表面的自组装及缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 83—86.
- WANG Hai-ren, ZHOU Yang, QU Jun-e, et al. Research on Self-assembly Behavior and Corrosion Inhibition Performance of Phytic Acid on 316L Stainless Steel Surface[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 83—86.
- [19] 徐群杰, 齐航, 周小晶, 等. 新型绿色缓蚀剂植酸的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(2): 75—77.
- XU Qun-jie, QI Hang, ZHOU Xiao-jing, et al. Research Progress of Phytic Acid Green Water Treatment Corrosion Inhibitor[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(2): 75—77.
- [20] LI X H, XIE X. Two Phenylpyrimidine Derivatives as New Corrosion Inhibitors for Cold Rolled Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 87: 27—39.
- [21] LATEEF H M. Inhibition of Carbon Steel Corrosion in CO_2 -saturated Brine using Some Newly Surfactants Based Palm Oil; Experimental and Theoretical Investigations[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 142: 502—512.
- [22] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. Introduction to the Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.

(上接第 57 页)

- [21] XU Y, YAO Z, JIA F, et al. Preparation of PEO Ceramic Coating on Ti Alloy and Its High Temperature Oxidation Resistance[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2): 698—702.
- [22] YAO Zhong-ping, JIANG Yan-li, JIANG Zhao-hua, et al. Preparation and Structure of Ceramic Coatings Containing Zirconium Oxide on Ti Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Mater Process Tech, 2008, 205(1/2/3): 303—307.
- [23] 郝建民, 叶育德, 陈宏, 等. TiAl 合金微弧氧化陶瓷层高温特性的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(1): 24—26.
- HAO Jian-min, YE Yu-de, CHEN Hong, et al. Anti-oxidation Ability of Micro-arc Oxidation Coating on TiAl Alloy at Elevated Temperature[J]. Materials Protection, 2005, 38(1): 24—26.
- [24] 周慧, 刘正堂, 李争显, 等. 钛合金表面微弧氧化膜及抗氧化性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(11): 1835—1838.
- ZHOU Hui, LIU Zheng-tang, LI Zheng-xian, et al. Microarc Oxidation Coating and High-temperature Oxidation Resistant Property on Ti Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(11): 1835—1838.