

应用技术

# 羟丙基壳聚糖与表面活性剂的缓蚀协同效应

卢浩, 郭英

(中国民航大学 理学院, 天津 300300)

**摘要:** **目的** 研究羟丙基壳聚糖(HPCS)与 Tw-20、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)在 1 mol/L HCl 溶液中对 Q235 钢的协同缓蚀作用。**方法** 进行 Q235 钢试片在 1 mol/L HCl 溶液中的腐蚀试验,通过失重法、动电位极化和电化学交流阻抗技术,分析 HPCS 及其与 Tw-20, SDBS 复配的缓蚀效果与机理。**结果** 低浓度条件下, HPCS 的缓蚀性能并不显著, 100 mg/L 时的缓蚀效率仅为 63.03%, 添加 0.2 mg/L Tw-20 可使 50 mg/L HPCS 的缓蚀效率从 51.73% 提高到 90.75%。当 HPCS/Tw-20/SDBS 以 50, 0.2, 20 mg/L 复配时, 缓蚀效率高达 93.77%, 由于同时具备了非离子型和阴离子型表面活性剂的优点, 其在 60 ℃ 时缓蚀效率仍保持在 71.11%。**结论** Tw-20, SDBS 对 HPCS 具有良好的协同缓蚀作用, HPCS/Tw-20 和 HPCS/Tw-20/SDBS 复合缓蚀剂均为混合型缓蚀剂, 作用机理为“几何覆盖效应”。

**关键词:** 羟丙基壳聚糖; Tw-20; 十二烷基苯磺酸钠; 复配缓蚀剂; 协同效应

**中图分类号:** TG174.42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2014)06-0069-06

## Synergistic Inhibition Effect of Hydroxypropyl Chitosan and Surfactant for Carbon Steel

LU Hao, GUO Ying

(College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the synergistic inhibition effects of HPCS, Tw-20 and sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) on the corrosion of Q235 steel in 1 mol/L HCl solution. **Methods** The corrosion experiments of Q235 steel specimens immersed in 1 mol/L HCl solution were carried out. Using static weight loss method, polarization techniques and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the inhibition performance of HPCS and its composites were analyzed. **Results** HPCS had a low inhibition efficiency when acted alone at a relatively low concentration, and it reached the highest inhibition efficiency of only 63.03% when it acted alone with a concentration of 100 mg/L. The inhibition efficiency of HPCS and Tw-20 increased to 90.75% with a concentration ratio of 50 mg/L : 0.2 mg/L, while the inhibition efficiency was only 51.73% when HPCS acted alone with a concentration of 50 mg/L. The inhibition efficiency of HPCS/Tw-20/SDBS reached 93.77% with a concentration ratio of 50 mg/L :

收稿日期: 2014-06-26; 修订日期: 2014-09-12

Received : 2014-06-26; Revised : 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(21303261)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation (21303261)

作者简介: 卢浩(1988—), 男, 山东人, 在读研究生, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。

Biography: LU Hao (1988—), Male, from Shandong, Postgraduate student, Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 郭英(1958—), 女, 天津人, 硕士, 教授, 主要研究方向为材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: GUO Ying (1958—), Female, from Tianjin, Master, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

0.2 mg/L : 20 mg/L, with the advantages of both non-ionic surfactant and anionic surfactant, it could maintain a relatively high inhibition efficiency of 71.11% at 60 °C. **Conclusion** Tw-20 and SDBS had a strong synergistic effect on corrosion inhibition with HPSCS. And the compound inhibitors, HPSCS/Tw-20 and HPSCS/Tw-20/SDBS, were both mixed-type corrosion inhibitors, the inhibitor mechanism of which was coverage effect.

**KEY WORDS:** hydroxypropyl chitosan; Tw-20; sodium dodecyl benzene sulfonate; compound corrosion inhibitors; synergistic effect

近年来,壳聚糖(CTS)和改性 CTS 的缓蚀性能研究得到了人们越来越多的关注。吴茂涛等<sup>[1]</sup>研究了水溶性 CTS 及其磷酸酯在海水中对碳钢的缓蚀作用; M. Abdallah 等<sup>[2]</sup>研究了羧甲基壳聚糖(CMC)及其纤维素在盐酸中对铝合金的缓蚀作用;李言涛等<sup>[3]</sup>研究了 CMC 与铬酸钠、葡萄糖酸钙、硫酸锌等分别复配时,在海水中对碳钢的缓蚀作用。但是,关于羟丙基壳聚糖(HPSCS)及其与表面活性剂协同效应的研究甚少。文中选用非离子表面活性剂 Tw-20、阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS),研究其与 HPSCS 进行复配时在 1 mol/L HCl 溶液中对 Q235 碳钢的缓蚀性能及缓蚀机理。

## 1 缓蚀性能测试

### 1.1 失重法

所用 Q235 钢试件规格为 50 mm×25 mm×2 mm, 试验前用水磨砂纸逐级打磨至 1000<sup>#</sup>,直至表面光亮,无划痕,然后经蒸馏水洗净,无水乙醇(AR)脱脂,洗耳球吹干,待质量恒定后,用电子天平称量,置于干燥器中备用。

配制 1 mol/L HCl 腐蚀溶液,将试片静态浸泡 24 h,去除腐蚀产物后称量,计算质量损失、平均腐蚀速率和缓蚀效率。

平均腐蚀速率  $v$  计算公式为:

$$v = \frac{m_0 - m}{S \times t} \quad (1)$$

缓蚀效率  $\eta$  计算公式为:

$$\eta = \frac{v_0 - v}{v_0} \times 100\% \quad (2)$$

(1)式中, $m_0$  和  $m$  分别为 Q235 钢片浸泡前、后的质量,单位为 g; $S$  是钢片的表面积,单位为  $m^2$ ;  $t$  为腐蚀时间,单位为 h。(2)式中, $v_0$  和  $v$  分别为未添加、添加缓蚀剂时的 Q235 钢片平均腐蚀速率。试验中所用的 HPSCS 为实验室自制,SDBS 为 AR 级,Tw-20 为 CP 级。

### 1.2 电化学测试

电化学测试采用三电极体系。工作电极采用暴露面积为 1  $cm^2$  的 Q235 碳钢圆柱,非工作面用环氧胶泥涂封,暴露面用水磨砂纸逐级打磨至 1000<sup>#</sup>,再经蒸馏水冲洗和无水乙醇脱脂,吹干后置于干燥器内待用。辅助电极为铂电极,参比电极选用饱和甘汞电极。

测试前,先将电极置于待测溶液中浸泡 4 h,待腐蚀电位稳定后,测量电化学阻抗谱和极化曲线。交流阻抗扫描频率范围为 100 mHz ~ 100 kHz,幅值为 10 mV。动电位扫描范围为 -500 ~ 500 mV,扫描速度为 5 mV/s。测试都在德国 IM6ex 电化学工作站上进行,测试温度为 20 °C,数据利用 ZsimpWin 和 Origin8.0 软件进行拟合。缓蚀效率  $\eta$  按式(3)和(4)计算,式中的  $R_{ct}$ ,  $R'_{ct}$  和  $J_{corr}$ ,  $J'_{corr}$  分别为加入缓蚀剂前后的转移电阻和腐蚀电流密度。

$$\eta = \left(1 - \frac{R'_{ct}}{R_{ct}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{J'_{corr}}{J_{corr}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 HPSCS 和 Tw-20 对 Q235 钢的缓蚀作用

图 1 为单独添加不同浓度 HPSCS 或 Tw-20 时测得的 Nyquist 谱图。频谱特征都表现为单一时间常数的简单半圆容抗弧,因此使用图 2 所示的模拟等效电路。利用公式(3)算得缓蚀效率,图 3 为缓蚀效率与单一缓蚀剂浓度的关系曲线。可以看出,在一定浓度范围内,转移电阻随 HPSCS 或 Tw-20 浓度的增加而增大,表明腐蚀速率降低,缓蚀作用增强。

HPSCS 单独作用时,在 100 mg/L 时的  $R_{ct}$  值最大,缓蚀效率仅达到 63.03%,进一步提高浓度, $R_{ct}$  值减小,缓蚀效率降低。HPSCS 在 Q235 钢表面可能通过物理吸附或化学吸附形成吸附膜,阻滞腐蚀介质与碳

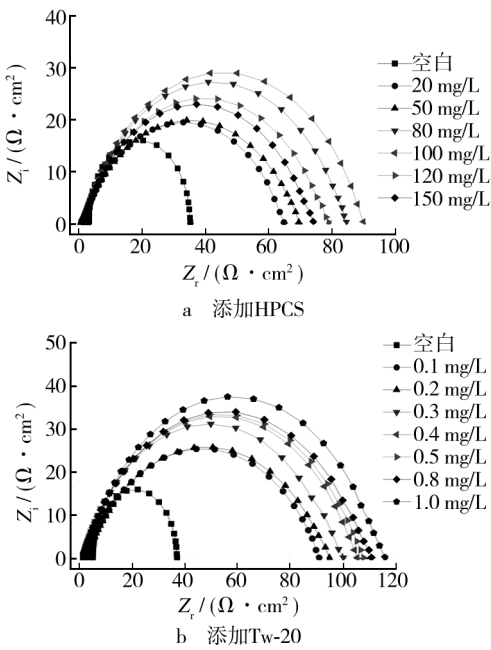


图 1 添加不同浓度单一缓蚀剂时的 Nyquist 图  
Fig.1 Nyquist plots in the presence of different single inhibitors

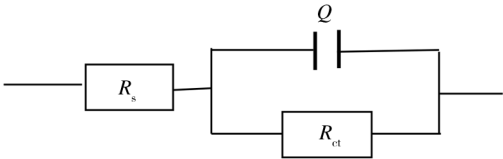


图 2 等效电路图  
Fig.2 Equivalent circuit model used to fit the EIS experiment data

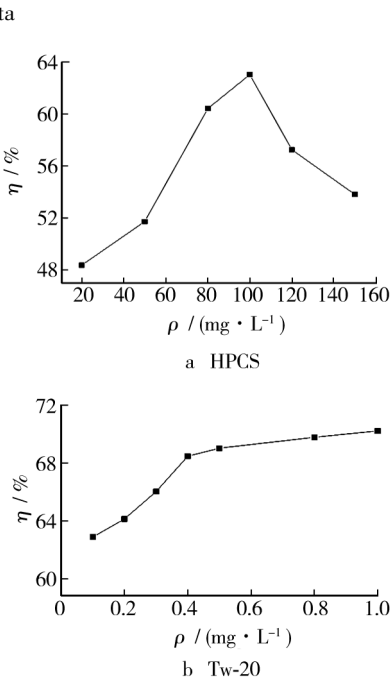


图 3 单一缓蚀剂浓度与缓蚀效率的关系  
Fig.3 Plot of inhibition efficiency  $\eta$  against inhibitor concentration of different single inhibitors

钢接触,起到一定的缓蚀作用<sup>[4]</sup>;HPCS 为大分子,可以通过 Vander Walls 力在 Q235 钢表面发生物理吸附;其活性基团—OH和—NH<sub>2</sub>中的氧原子、氮原子的孤对电子能与钢表面铁原子的空 d 轨道形成配位键,从而发生化学吸附。但是碳钢表面各处的吸附能力不同,HPCS 分子会优先吸附在吸附能力强的活性点,这导致生成的吸附膜不均匀,HPCS 单独作用时缓蚀效率较低。

Tw-20 单独作用时,在 0.8 mg/L 时缓蚀效率达到 69.78%,继续提高浓度,缓蚀效率没有明显提高。Tw-20 主要通过物理吸附在固液界面形成吸附层,随着浓度的增加,吸附量增大,缓蚀效率提高;当浓度大于一定值时将接近它的胶团浓度,会生成胶团,有效单体浓度不再改变,因此缓蚀效率不再明显改变<sup>[5]</sup>。Tw-20 相对分子量较大,分子间会发生相互作用,导致形成的吸附膜不够均匀,缓蚀效率不高。

2.2 HPCS/Tw-20 的协同效应

图 4 为未添加缓蚀剂,添加单一 HPCS 或 Tw-20,以及添加 HPCS/Tw-20 复合缓蚀剂时的 Nyquist 谱图,阻抗谱数据解析参数列于表 1。低浓度时,HPCS 和 Tw-20 的缓蚀性能并不明显,单独添加 50 mg/L HPCS 时的缓蚀效率为 51.73%,单独添加 0.2 mg/L Tw-20 时的缓蚀效率为 64.14%,而二者复配后,Tw-20

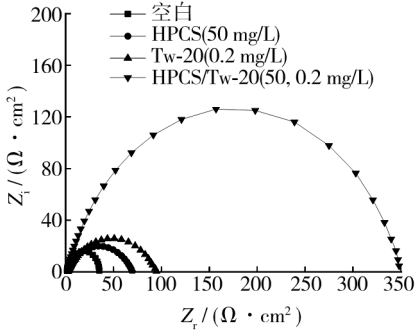


图 4 添加不同缓蚀剂时的 Nyquist 谱图  
Fig.4 Nyquist plots in the presence of different inhibitors

表 1 添加不同缓蚀剂时的 Nyquist 谱图拟合参数  
Tab.1 Electrochemical impedance parameters in the presence of different inhibitors

缓蚀剂	$C_d/(\times 10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$
未添加	1.132	32.21	
HPCS	0.937	66.73	51.73
Tw-20	0.804	89.81	64.14
HPCS/Tw-20	0.249	348.31	90.75

对 HPCS 缓蚀的协同作用十分显著,缓蚀效率提高到 90.75%。从表 1 还可以看出,同时添加 HPCS/Tw-20 后, $C_d$  值大幅减小, $R_{ct}$  值增大,表明该复合缓蚀剂能够很好地吸附在碳钢表面,覆盖率增加<sup>[6]</sup>。Tw-20 在固液界面形成吸附层,一方面 Tw-20 分子覆盖了水分子,溶液表面自由能降低,降低了溶液的表面张力和固液界面的界面张力,提高了碳钢表面的润湿性,增加了 HPCS 在盐酸溶液中的分散性,使 HPCS 分子能更好地吸附在碳钢表面<sup>[7-11]</sup>;另一方面, Tw-20 作为一种非离子表面活性剂,可以无选择地吸附在碳钢表面,填补 HPCS 吸附膜的空隙<sup>[8]</sup>。HPCS 与 Tw-20 的协同效应使吸附膜更加完整,缓蚀效率大幅提高。

若 HPCS/Tw-20 复合缓蚀体系的温度升高,可导致 Tw-20 溶解度降低,部分 Tw-20 分子析出,HPCS 在溶液中的分散性降低,碳钢表面的润湿度降低<sup>[10-11]</sup>。利用静态失重实验考察温度对 HPCS/Tw-20 复合缓蚀性能的影响,二者添加量分别为 50,0.2 mg/L,浸泡时间 24 h,缓蚀效率、腐蚀速率与温度的关系如图 5 所示。可以看出,在 20~30℃ 之间,缓蚀效率变化不大,随着温度继续升高,缓蚀效率急剧下降,60℃ 时缓蚀效率只有 37.11%。这一方面显示了 Tw-20 在常温下对提高 HPCS 缓蚀性能的协同作用;另一方面,说明非离子型表面活性剂 Tw-20 不适合在高温环境下使用。此外温度升高,分子热运动加剧,部分吸附的离子从金属基体表面脱落<sup>[2]</sup>,导致吸附膜不完整,这也导致了缓蚀效率大幅下降。

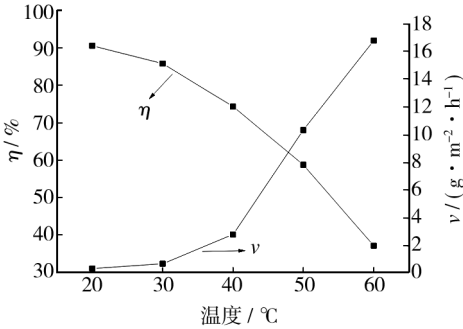


图 5 温度对 HPCS/Tw-20 缓蚀性能的影响  
Fig. 5 Effect of temperature on the corrosion rate and inhibition efficiency of HPCS/Tw-20

2.3 阴离子、非离子表面活性剂与 HPCS 复配的缓蚀协同作用

图 6 为未添加缓蚀剂,添加 HPCS/Tw-20(分别为 50,0.2 mg/L),以及添加 HPCS/Tw-20/SDBS(分别为 50,0.2,20 mg/L)时的 Nyquist 谱图,阻抗谱数据解析

参数列于表 2。可以看出,在阴离子、非离子表面活性剂复配体系的作用下,缓蚀效率进一步提高,当以质量浓度 50,0.2,20 mg/L 复配时,缓蚀效率高达 93.77%。此外根据静态失重实验结果(图 7),随着温度升高,缓蚀效率降低较为平缓,在 60℃ 时仍保持在 71.11%。阴离子表面活性剂 SDBS 与非离子表面活性剂 Tw-20 的加和增效性进一步降低了表面张力<sup>[11]</sup>,使缓蚀效率进一步提高。HPCS/Tw-20/SDBS 同时具备了非离子型和阴离子型表面活性剂的优点,具有良好的耐温耐盐能力、优良的抗分解能力和分散性能<sup>[12-14]</sup>,温度升高时,吸附膜仍较致密牢固,能够保持较高的缓蚀效率。

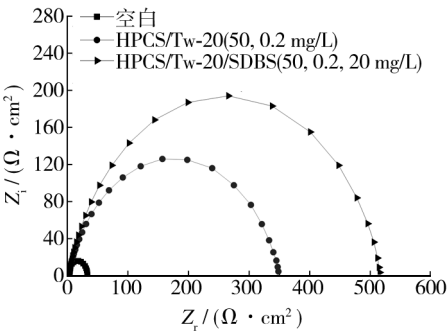


图 6 添加复合缓蚀剂时的 Nyquist 谱图  
Fig. 6 Nyquist plots in the presence of compound inhibitors

表 2 添加复合缓蚀剂时的 Nyquist 谱图拟合参数  
Tab. 2 Electrochemical impedance parameters in the presence of compound inhibitors

缓蚀剂	$C_d/(\times 10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$
未添加	1.132	32.21	
HPCS/Tw-20	0.249	348.31	90.75
HPCS/Tw-20/SDBS	0.152	516.95	93.77

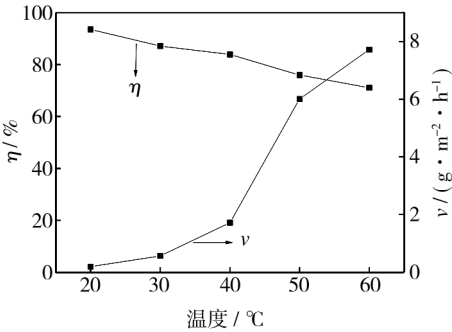


图 7 温度对 HPCS/Tw-20/SDBS 缓蚀性能的影响  
Fig. 7 Effect of temperature on the corrosion rate and inhibition efficiency of HPCS/Tw-20/SDBS



2.4 极化曲线分析

图 8 为添加 HPCS 及其与 Tw-20,SDBS 复配时测得的极化曲线,电化学参数列于表 3。由图 8 和表 3 可知,相对于空白体系,添加 50 mg/L HPCS 后, $E_{\text{corr}}$  没有明显变化,阴、阳极极化曲线均向低电流方向移动, $b_c$  的变化幅度大于  $b_a$ ,推断 HPCS 是以抑制阴极为主的混合型缓蚀剂<sup>[15]</sup>。添加 HPCS/Tw-20(50,0.2 mg/L)或 HPCS/Tw-20/SDBS(50,0.2,20 mg/L)后,腐蚀电流密度大幅减小,说明对碳钢腐蚀有很好的抑制作用。 $E_{\text{corr}}$  没有明显变化,阴、阳极极化曲线均向低电流方向移动,说明复合缓蚀剂对阳极和阴极过程均有一定的抑制作用<sup>[15]</sup>,且  $b_a$  和  $b_c$  变化幅度基本相

同,推断两种复合缓蚀剂均为混合型缓蚀剂,作用机理为“几何覆盖效应”<sup>[16]</sup>。

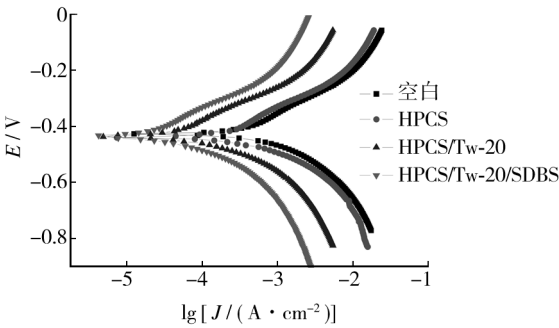


图 8 添加不同缓蚀剂时的极化曲线  
Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves in the presence of different inhibitors

表 3 Tafel 极化曲线参数  
Tab.3 Tafel polarization curve parameters

缓蚀剂	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$b_a/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$b_c/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\eta/\%$
未添加	-0.427	128.39	-68.95	258.60	
HPCS	-0.440	132.31	-54.04	133.37	48.43
HPCS/Tw-20	-0.437	110.77	-60.72	24.43	90.55
HPCS/Tw-20/SDBS	-0.436	118.01	-62.20	16.27	93.71

3 结论

1) HPCS 为以抑制阴极为主的混合型缓蚀剂。单独添加 HPCS 时,由于选择性吸附,其对 Q235 钢在 HCl 体系中的缓蚀作用并不显著,添加 100 mg/L 时的缓蚀效率仅为 63.03%。

2) Tw-20 与 HPCS 具有良好的协同缓蚀作用,添加 0.2 mg/L Tw-20 可使 50 mg/L HPCS 对 Q235 钢在 HCl 体系中的缓蚀效率从 51.73% 提高到 90.75%。温度升高会导致 Tw-20 溶解度降低,部分 Tw-20 分子析出,减弱其对 HPCS 的协同缓蚀作用,60 ℃ 时的缓蚀效率只有 37.11%。

3) Tw-20 与 SDBS 的加和增效性使缓蚀效率进一步提高,当 HPCS/Tw-20/SDBS 以 50,0.2,20 mg/L 复配时,缓蚀效率高达 93.77%。由于其同时具备了非离子型和阴离子型表面活性剂的优点,具有良好的耐温耐盐能力、优良的抗分解能力和分散性能,温度升高时吸附膜仍较致密牢固,因此 60 ℃ 时缓蚀效率保持在 71.11%。

4) HPCS/Tw-20 和 HPCS/Tw-20/SDBS 复合缓蚀剂均为混合型缓蚀剂,作用机理为“几何覆盖效应”。

参考文献

[1] 吴茂涛,李言涛,李再峰,等. 水溶性壳聚糖及其磷酸酯在海水中对碳钢的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010,30(3):192—197.  
WU Mao-tao,LI Yan-tao,LI Zai-feng,et al. Corrosion Inhibition Performance of Chitosan and Phosphonic Chitosan for Mild Steel in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2010,30(3):192—197.

[2] ABDALLAH M,ZAAFARANY I,FAWZY A,et al. Inhibition of Aluminum Corrosion in Hydrochloric Acid by Cellulose and Chitosan[J]. Journal of American Science,2013,9(4):580—586.

[3] 李言涛,吴茂涛,姜信德,等. 羧甲基壳聚糖与其他缓蚀剂的协同缓蚀效能[J]. 装备环境工程,2010,7(1):1—5.  
LI Yan-tao,WU Mao-tao,JIANG Xin-de,et al. Synergistic Inhibition Effect of Carboxymethyl Chitosan Compounds with other Inhibitive Components[J]. Equipment Environmental Engineering,2010,7(1):1—5.

[4] 杨宗海,杨小玲,施兵兵. 吸附型缓蚀剂的缓蚀率与吸附热及吸附分子间相互作用能的关系[J]. 中国腐蚀与防护学报,1990,10(4):346—354.  
YANG Zong-hai,YANG Xiao-ling,SHI Bing-bing. The Re-

- relationship of Inhibition Efficiency with Heat of Adsorption and Lateral Interaction Energy of Adsorbed Molecules for Adsorption Inhibitor[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1990, 10(4): 346—354.
- [5] 白玮,李向红,邓书端,等.吐温-40 对冷轧钢在盐酸溶液中的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 200—202.
- BAI Wei, LI Xiang-hong, DENG Shu-duan, et al. Corrosion Inhibition of Tween-40 for Cold Rolled Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(3): 200—202.
- [6] ABD EL REHIM S S, HASSAN H H, AMIN M A. The Corrosion Inhibition Study of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate to Aluminum and Its Alloys in 1.0M HCl Solution[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002(78): 337—348.
- [7] 万家瑰. 酸化缓蚀剂与表面活性剂的协同效应评价[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(13): 3752—3754.
- WAN Jia-gui. Evaluation on Synergistic Effect of Acidizing Corrosion Inhibitor and Surfactant[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(13): 3752—3754.
- [8] 郭英,宋诗哲. 盐酸介质中 Tw-20 与聚丙烯酸对铁腐蚀的协同缓蚀作用[J]. 化工学报, 2001, 52(3): 262—265.
- GUO Ying, SONG Shi-zhe. Synergistic Inhibition of Tw-20 and Polyacrylic Acid on Iron Corrosion in Hydrochloric Acid[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, 52(3): 262—265.
- [9] 颜肖慈,罗明道. 界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- YAN Xiao-ci, LUO Ming-dao. Interfacial Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [10] 董国君,苏玉,王桂香. 表面活性剂化学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- DONG Guo-jun, SU Yu, WANG Gui-xiang. Surfactant Chemistry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [11] 王世荣,李祥高,刘东志,等. 表面活性剂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WANG Shi-rong, LI Xiang-gao, LIU Dong-zhi, et al. Surfactant Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [12] 杨秀全,徐长卿,黄海. 一类新型多功能性表面活性剂: 烷基醚羧酸及其盐[J]. 日用化学工业, 1998(1): 26—33.
- YANG Xiu-quan, XU Chang-qing, HUANG Hai. A New Type of Multifunctional Surfactant Alkylether Carboxylic Acid and Its Salt[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 1998(1): 26—33.
- [13] BINANA-LIMBLE W, ZAZA R, PLATONE E. Micellar Properties of Ethoxylated Sodium Alkylcarboxylates [J]. J Colloid Inter Sci, 1988(124): 647.
- [14] 唐红娇,侯吉瑞,赵凤兰,等. 油田用非离子型及阴-非离子型表面活性剂的应用进展[J]. 油田化学, 2011, 28(1): 115—118.
- TANG Hong-jiao, HOU Ji-rui, ZHAO Feng-lan, et al. Application Progress of Nonionic and Anionic-Nonionic Surfactants Used in Oil Field[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(1): 115—118.
- [15] 王军,栾立辉,杨许召,等. 季铵盐双子表面活性剂的缓蚀性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 203—206.
- WANG Jun, LUAN Li-hui, YANG Xu-zhao, et al. Corrosion Inhibition Performance of a Cationic Gemini Surfactant HD-MB[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(3): 203—206.
- [16] CAO C N. On Electrochemical Techniques for Interface Inhibitor Research[J]. Corros Sci, 1996, 38(12): 2073—2082.
- [17] HE Y, ZHANG J Z, YAO W Q, et al. Effect of Temperature on Residual Stress and Mechanical Properties of Ti Films Prepared by Both Ion Implantation and Ion Beam Assisted Deposition[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(8): 4484—4490.
- [18] KAWWAM M, ALHARBI F H, KAYED T, et al. Characterization of CuO(111)/MgO(100) Films Grown under Two Different PLD Backgrounds[J]. Appl Surf Sci, 2013, 276: 7—12.
- [19] SCUDIERO L, FASASI A, GRIFFITHS P R, et al. Characterization of a Controlled Electroless Deposition of Copper Thin Film on Germanium and Silicon Surfaces[J]. Appl Surf Sci, 2011, 257(9): 4422—4427.
- [20] ISO 18115:2001. Surface Chemical Analysis-Vocabulary[S].

(上接第 47 页)

- [14] 鲁远曙,左卫,王玉龙. 海洋性气候电子设备铝合金结构腐蚀防护研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 71—75.
- LU Yuan-shu, ZUO Wei, WANG Yu-long. Research on the Corrosion and Protection of Electronic Equipment Aluminum Alloy Structure in Maritime Climate[J]. Materiel Environmental Engineering, 2008, 5(3): 71—75.
- [15] PECH-CANUL M A, CASTRO P. Corrosion Measurements of Steel Reinforcement in Concrete Exposed to a Tropical Marine Atmosphere[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 491—498.
- [16] RAN J, ZHANG J Z, YAO W Q, et al. Properties of Cu Film and Ti/Cu Film on Polyimide Prepared by Ion Beam Techniques[J]. Appl Surf Sci, 2010, 256(23): 7010—7017.