

IAA 在硫酸溶液中对碳钢的缓蚀性能研究

刘启承¹, 吕堂满², 冯利军³

(1. 重庆一三六地质队, 重庆 401147; 2. 重庆大学 化学化工学院, 重庆 400000;
3. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究吲哚-3-乙酸(IAA)在 H_2SO_4 (0.1 mol/L) 溶液中对碳钢(Q235)的缓蚀性能,降低碳钢生产过程对环境的影响。**方法** 采用动电位极化曲线测试、交流阻抗实验、失重实验和扫描电镜实验分析缓蚀剂的缓蚀性能及作用机理。**结果** IAA 的缓蚀效率随着缓蚀剂浓度的增加而逐渐增大,当 IAA 浓度增加到 4×10^{-3} mol/L 时,缓蚀效率最高达到 88.85%。温度升高,缓蚀效率降低,说明 IAA 不宜于高温下使用。IAA 是一种混合型缓蚀剂,对阴极反应和阳极反应均有抑制作用,且在缓蚀剂分子吸附过程中,吸附在碳钢表面的水分子和缓蚀剂分子发生竞争吸附作用,能有效阻止 H^+ 的穿越,从而抑制腐蚀 H^+ 的放电。IAA 在碳钢表面的吸附遵循 Langmuir 吸附等温模型,该吸附自发进行且是物理吸附和化学吸附共同作用。缓蚀剂通过抑制腐蚀反应的活性点,提高活化能垒,防止碳钢溶解腐蚀。IAA 在碳钢表面形成保护膜,减轻了腐蚀。**结论** IAA 是一种以抑制阳极反应为主的混合型缓蚀剂,在 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中能够对 Q235 碳钢起到优异的保护作用。

关键词: 缓蚀剂; IAA; EIS; SEM; 吸附; 碳钢

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)11-0097-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.016

IAA as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in H_2SO_4 Solution

LIU Qi-cheng¹, LYU Tang-man², FENG Li-jun³

(1. The Geology Team 136 of Chongqing, Chongqing 401147, China;

2. Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China;

3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the inhibiting effect of indole-3-acetic acid (IAA) for mild steel in H_2SO_4 (0.1 mol/L) solution so as to reduce the influence of carbon steel production process on the environment. **Methods** The weight loss experiment, the potentiodynamic polarization test, the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and the scanning electron microscopy (SEM) were conducted to investigate the inhibition efficiency and the mechanism. **Results** The inhibition efficiency was enhanced with the increasing inhibitor concentration, and the highest inhibition efficiency reached 88.85% at the inhibitor concentration of 4×10^{-3} mol/L. The inhibition efficiency of IAA was lower when the temperature increased, which indicated that IAA was not suitable for high temperature. IAA acted as a mixed-type inhibitor and had a suppressing effect on anodic and cathodic reactions. And there was a competitive adsorption emerged between the adsorbed water molecules and the inhibitor molecules in the process of adsorption.

收稿日期: 2015-07-22; 修订日期: 2015-08-27

Received: 2015-07-22; Revised: 2015-08-27

作者简介: 刘启承(1982—),男,湖北人,硕士,高级工程师,主要从事环境保护研究。

Biography: LIU Qi-cheng (1982—), Male, from Hubei, Master, Senior engineer, Research focus: environmental protection.

effect, which effectively prevented the H^+ from crossing, thereby inhibiting the discharge process of the corrosion H^+ . The adsorption of IAA on carbon steel surface followed the Langmuir adsorption isotherm model, which was spontaneous and was a combination of physical and chemical adsorption. Inhibition of corrosion by inhibiting the active point of the corrosion reaction can improve the activation energy barrier and prevent corrosion of carbon steel. The inhibitor molecules reduced the metal corrosion significantly.

Conclusion IAA is a mixed-type corrosion inhibitor, which can inhibit the anodic reaction. It can protect the Q235 carbon steel in 0.1 mol/L H_2SO_4 solution.

KEY WORDS: inhibitor; IAA; EIS; SEM; adsorption; carbon steel

Q235 碳钢由于塑性高、含碳量适中、易于拉伸和焊接等特点在工程上广泛应用,然而由于性质活泼,使用环境复杂,导致容易腐蚀^[1],不仅造成经济损失,也造成环境污染^[2-3]。从源头控制碳钢后续生产中的腐蚀对环境的影响成为迫切解决的问题。添加缓蚀剂法由于设备简单、操作方便、用量小、效率高而被广泛使用^[4-8]。有机缓蚀剂中通常含有电负性较大的 O, S, N, P 等活性吸附中心,以及可以提供 π 电子的不饱和键或者大共轭体系,因此缓蚀剂分子与金属表面之间可以发生吸附作用,而形成保护膜,抑制金属的溶解反应。随着环保要求的提高,寻找和开发无污染、无毒的绿色型缓蚀剂成为新的研究课题^[9-10]。文中选用吡啶-3-乙酸 (IAA) 作为缓蚀剂,研究其在 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中对碳钢的缓蚀性能和作用机理,为新型缓蚀剂的开发与应用提供理论基础。

1 实验

1.1 失重测试

失重实验在 25 °C 下进行,所用的 Q235 碳钢尺寸为 3 cm×2 cm×1 cm,在 400#, 800#, 1200# 水砂纸上逐级打磨抛光,经过蒸馏水、无水乙醇清洗和脱脂后,冷风干燥备用。失重测试前准确称量,将试样置于配置好的含有不同 IAA 浓度的 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中浸泡 24 h。浸泡后,将碳钢取出,蒸馏水反复冲洗,乙醇超声清洗充分脱去腐蚀产物后,精确称量。并按下列公式计算相关参数。

$$v = \frac{\Delta W}{St} \quad (1)$$

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

$$\theta = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (3)$$

式中: ΔW 为试样腐蚀前后质量变化量,mg; S 为试样的总表面积,cm²; t 为浸泡时间,h; v_0 和 v 分别为

碳钢试样在添加缓蚀剂前后硫酸溶液中的腐蚀速率,mg/(cm²·h); η 为缓蚀剂缓蚀效率,%; θ 为表面覆盖率。

1.2 电化学测试

电化学测试在 25 °C 下进行,实验采用三电极体系,工作电极用环氧树脂封装并外露 1 cm² 的碳钢电极,铂电极 (15 mm×20 mm) 为对电极,饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极。测试前,将工作电极浸泡在腐蚀液中,直到测得的开路电位变化在 5 min 内小于 2 mV,此时体系认为达到稳定状态^[11]。动电位极化曲线扫描电位范围为 -250 ~ +250 mV (vs. OCP),扫描速度为 2 mV/s。缓蚀效率按式(4)计算,其中 $J_{\text{corr},0}$ 和 J_{corr} 分别为添加 IAA 前后碳钢的腐蚀电流密度。

$$\eta = \frac{J_{\text{corr},0} - J_{\text{corr}}}{J_{\text{corr},0}} \times 100\% \quad (4)$$

交流阻抗谱测试的干扰电位为 5 mV,频率范围设定为 0.01 ~ 105 Hz。结合阻抗谱特征,选择合适的拟合电路,由 ZSimpWin 软件拟合得到阻抗谱参数。缓蚀效率由式(5)计算, $R_{\text{ct},0}$ 和 R_{ct} 为在空白溶液和添加缓蚀剂的溶液中的电荷转移电阻。

$$\eta = \frac{R_{\text{ct}} - R_{\text{ct},0}}{R_{\text{ct}}} \times 100\% \quad (5)$$

1.3 扫描电镜实验

试样的前处理步骤和程序与失重实验一致,将尺寸为 1 cm×1 cm×1 cm 的碳钢试样在腐蚀液中浸泡 6 h 后,蒸馏水冲洗干燥,进行 SEM 测试。

2 结果与讨论

2.1 失重分析

表 1 中列出了由失重试验计算得到的参数。在一定温度下,腐蚀速率随着添加 IAA 浓度增大而逐渐减小,缓蚀效率则逐渐升高,这可能是由于在添加缓

蚀剂浓度较高的腐蚀体系中,缓蚀剂分子在碳钢表面的覆盖率更高,形成了更加完整、致密的保护膜。在浓度一定时,环境温度升高明显加剧了碳钢的腐蚀速率,这是由于温度升高,加速了分子的热运动, Fe^{2+} 加速脱离碳钢表面而向溶液中扩散。同时,由表 1 可以看到,缓蚀剂的最高效率随着温度的变化由 88.85% 增加到 89.24%,再减小至 86.78%,说明缓蚀剂适宜在低于 35℃ 时使用,再升高温度缓蚀效率下降。

表 1 不同温度下的失重实验数据
Tab.1 Weight loss data at various temperatures

$c/(\times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L})$	$v/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$\eta/\%$	θ
0	0.6860		
1	0.7108	42.15	0.4215
2	0.2167	68.41	0.6841
3	0.1173	82.29	0.8289
4	0.0764	88.85	0.8885

2.2 Tafel 极化曲线分析

图 1 为 Q235 碳钢在未添加和添加不同浓度 IAA 的 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中的极化曲线,相应的极化曲线参数如腐蚀电位(E_{corr})、腐蚀电流密度(J_{corr})、阴极极化曲线斜率(β_c)、阳极极化曲线斜率(β_a)和缓蚀效率 η 分别列于表 2。从图 1 中可以看出,缓蚀剂加入后,阴极和阳极极化曲线均向电流密度减小的方向移动,证明缓蚀剂对阴极析氢和阳极金属溶解反应均有抑制作用,且这种抑制作用在 IAA 浓度高时更加显著。阴极极化曲线基本保持平行,表 2 中 β_c 变化很小,这说明缓蚀剂的加入并未改变析氢反应的机理,并且该过程是活化能控制的^[12]。在阳极区,可以看

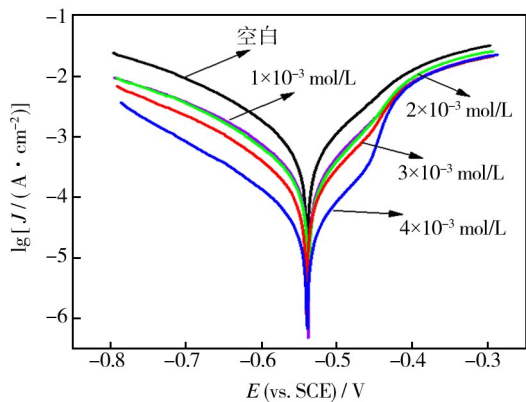


图 1 动电位极化曲线
Fig.1 Potentiodynamic polarization curves

出,在缓蚀剂浓度较高时,当极化电位接近-0.44 V 时腐蚀电流密度急剧增大,这可能是由于增加极化电位加速了金属离子进入溶液的速度,从而使得缓蚀剂的吸附速率小于其从碳钢表面的脱附速率^[13],导致碳钢进一步溶解。表 2 中腐蚀电位的变化小于 85 mV,说明 IAA 是一种混合型缓蚀剂^[14]。当 IAA 浓度增加到 $4\times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 时,缓蚀效率为 89.56%,与 25℃ 下的失重实验数据具有较好的一致性。

表 2 动电位极化曲线参数
Tab.2 Potentiodynamic polarization parameters

$c/(\times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_c/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\beta_a/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\eta/\%$
0	535	659.3	121.2	98.5	
1	534	342.7	128.5	70.6	48.02
2	533	267.3	120.4	66.7	59.46
3	535	122.8	122.3	61.6	81.37
4	537	68.81	117.1	54.5	89.56

2.3 交流阻抗谱分析

图 2 为 Q235 碳钢在未添加和添加不同浓度 IAA 的 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中的 Nyquist 图。可以看出,在不同缓蚀剂浓度下的 Nyquist 曲线均表现为单一的容抗弧,该容抗弧以半椭圆形式存在,而不是理想的半圆结构,这可能与缓蚀剂分子在界面的吸附行为及碳钢电极的物理化学性质有关^[14]。容抗弧的大小反映了腐蚀反应受到阻力的大小,弧的半径随着添加 IAA 浓度的增大而增大,说明腐蚀反应受到的阻力增大。根据阻抗谱特征,采用图 3 所示的等效电路图对阻抗谱进行拟合,得到拟合参数列于表 2,其中 R_s 为溶液电阻,CPE 为长相位角元件, R_a 为电荷转移电阻,

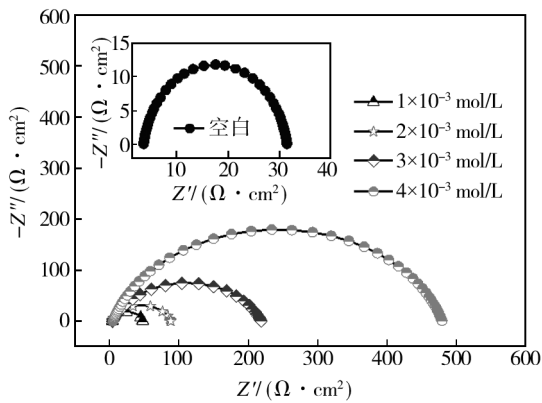


图 2 电化学阻抗谱
Fig.2 Electrochemical impedance spectroscopy

Y_0 为指数因子, n 为弥散系数, C_{dl} 为界面双电层电容。

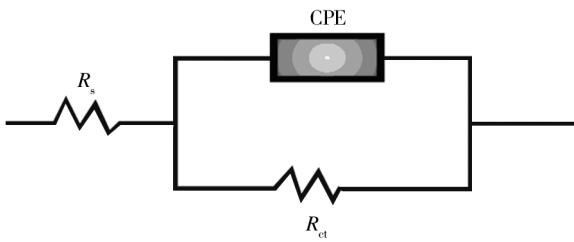


图 3 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit model

C_{dl} 根据式(6)计算:

$$C_{dl} = (Y_0 R_{ct}^{1-n})^{1/n} \tag{6}$$

从表 3 可以发现, R_{ct} 随着添加缓蚀剂浓度的升高而逐渐增大, 缓蚀效率也逐渐增大, 最高缓蚀效率达到 92.21%。 C_{dl} 值逐渐减小, 这是因为缓蚀剂分子吸附到碳钢表面的过程中, 需要排挤掉已经吸附在碳钢表面的水分子, 而与水分子相比, 缓蚀剂分子的介电常数更小, 体积更大, 所以双电层电容值 C_{dl} 呈现逐渐减小趋势。弥散系数 n 逐渐减小, 可能是吸附作用使碳钢电极表面粗糙程度增加的结果^[15-18]。

表 3 电化学阻抗参数

Tab. 3 Electrochemical impedance parameters

$c /$ ($\times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$R_s /$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE		$R_{ct} /$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$C_{dl} /$ ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	η
		$Y_0 /$ ($\times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2}$)	n			
0	3.637	24.87	0.91	32.71	48.25	
1	4.14	16.52	0.89	53.68	38.22	38.95
2	3.899	14.49	0.89	90.12	35.17	63.63
3	4.242	11.43	0.87	212.9	36.64	84.60
4	4.668	5.324	0.83	418.7	25.99	92.21

2.4 吸附等温式及吸附热力学分析

根据在 25, 35, 45 °C 下进行失重实验计算得到的 θ 值, 以 c/θ 对 c 作图并进行线性拟合, 得到如图 4 所示的直线。3 种温度下拟合得到的 3 条直线线性回归系数和斜率接近 1 (见表 4), 说明 IAA 在碳钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温模型。

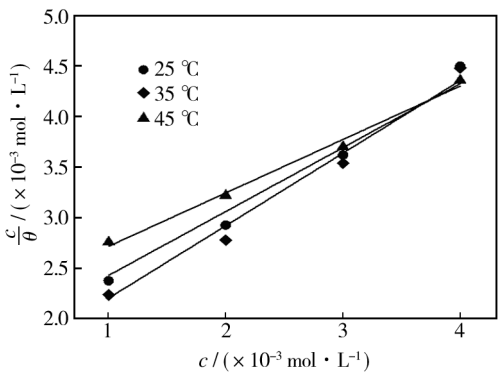


图 4 Langmuir 吸附等温模型

Fig. 4 Langmuir adsorption model

由图 4 中拟合直线的斜率可以计算得到吸附平衡常数 K_{ads} , 根据范霍夫方程(式(7)), 以 $\ln K_{ads}$ 对 $1/T$ 作图, 根据拟合直线的斜率可以计算吸附焓变

值 ΔH_{ads} 。再根据式(8)和式(9)分别计算标准吉布斯自由能变 ΔG_{ads} 和熵变 ΔS_{ads} 。热力学参数见表 4。

$$\ln K_{ads} = -\frac{\Delta H_{ads}^0}{RT} + \text{constant} \tag{7}$$

$$K_{ads} = \frac{1}{55.5} \exp\left(-\frac{\Delta G_{ads}}{RT}\right) \tag{8}$$

$$\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \tag{9}$$

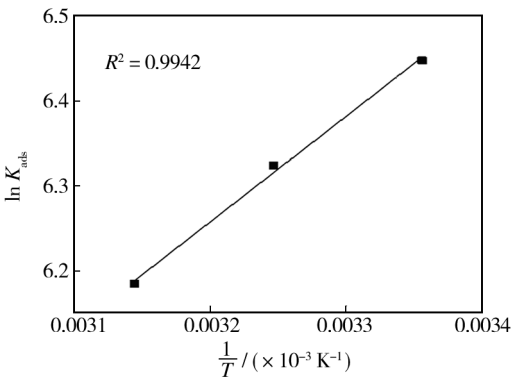


图 5 $\ln K_{ads}$ 与 $1/T$ 拟合直线图

Fig. 5 Fitting straight line chart of $\ln K_{ads}$ and $1/T$

在表 4 中, K_{ads} 值随着温度升高逐渐减小, 意味着缓蚀剂分子与界面的双电层电容之间的相互作用力逐渐减弱, 高温减小了缓蚀剂分子在碳钢表面吸附的

表 4 不同温度下的吸附热力学参数
Tab.4 Thermodynamic parameters at various temperatures

T /K	R^2	$K_{\text{ads}}/$ ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta G_{\text{ads}}/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta H_{\text{ads}}/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta S_{\text{ads}}/$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
298	0.9536	631.60	25.93	10.38	52.18
308	0.9475	557.76	26.48	10.38	52.27
318	0.9341	485.18	26.97	10.38	52.17

稳定性。计算得到的 ΔG_{ads} 值均为负值,且绝对值均在 20 ~ 40 kJ/mol 之间,说明 IAA 在碳钢表面的吸附是自发进行的,且是物理吸附和化学吸附共同作用的结果。 ΔH_{ads} 为负值,说明 IAA 的吸附过程中会放出热量,升高温度不利于缓蚀剂的吸附。 ΔS_{ads} 值是缓蚀剂吸附和水分子解吸引起的熵变代数和,缓蚀剂分子吸附使有序度增加,而水分子解析则导致混乱度增加,一个缓蚀剂分子的吸附会导致多个水分子从电极表面脱去,所以 ΔS_{ads} 减小可能是由于缓蚀剂分子与水分子发生竞争吸附导致的。

2.5 吸附动力学分析

吸附动力学进一步讨论了 IAA 对 Q235 碳钢在 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中的缓蚀作用。式 (10) 和式 (11) 分别为阿伦尼乌斯公式及其变化形式,其中 E_a 为表观活化能, A 为指前常数, h 为普朗克常量, N 为阿佛加德罗常数, ΔH_a 为活化焓, ΔS_a 为活化熵。

$$\ln v = -\frac{E_a}{RT} + \ln A \tag{10}$$

$$\ln \frac{v}{T} = \ln \frac{R}{Nh} + \frac{\Delta S_a}{R} - \frac{\Delta H_a}{RT} \tag{11}$$

图 6a 和图 6b 分别为 $\ln v, \ln(v/T)$ 对 $1/T$ 作图,并进行线性拟合得到的直线。由图 6a 中拟合直线的斜率可以计算 E_a 值,由图 6b 中直线的斜率和直线在 $\ln(v/T)$ 轴上的截距计算出 ΔH_a 和 ΔS_a 。腐蚀动力学参数列于表 5。从表 5 可以看到,缓蚀剂加入后 E_a 值增大,这可能是由于吸附在碳钢表面的 IAA 分子抑制了腐蚀反应的活性位点,增大了碳钢溶解反应的活化能垒,导致腐蚀反应很难进行,从而起到缓蚀作用。 ΔH_a 为正值说明碳钢的溶解是一个吸热过程,升高温度会加剧碳钢的腐蚀, ΔS_a 值大小一般认为与腐蚀体系中的缓蚀剂分子在碳钢表面的碰撞次数有关。

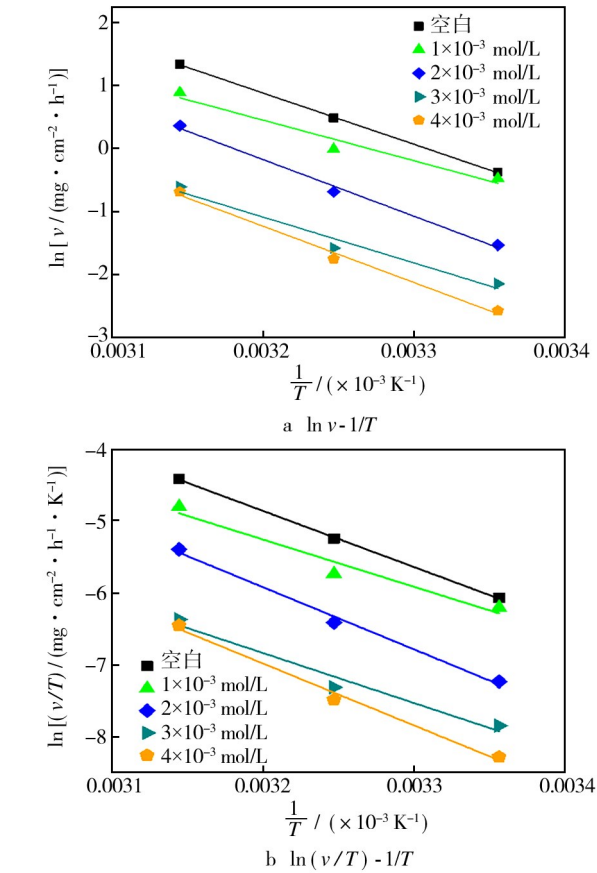


图 6 根据阿伦尼乌斯以及变化公式得到的线性拟合图
Fig.6 Arrhenius plots and transition state plots

表 5 腐蚀动力学参数
Tab.5 Corrosion kinetic parameters

$c / (\times 10^{-3}$ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$E_a /$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta H_a /$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\Delta S_a /$ ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)
0	58.57	57.70	70.25
1×10^{-3}	53.34	54.56	66.59
2×10^{-3}	69.86	68.67	16.79
3×10^{-3}	64.91	64.83	31.18
4×10^{-3}	68.41	69.33	26.39

2.6 腐蚀形貌分析

试样抛光后的表面形貌非常平整、光滑,可以看到打磨留下来的划痕。图 7b 显示,碳钢在未添加缓蚀剂的硫酸溶液中浸泡后,基材严重腐蚀,形貌全失。在图 7c 中,碳钢表面较为干净和平整,说明碳钢的腐蚀被明显抑制,可能是溶液中加入缓蚀剂后,缓蚀剂分子在碳钢表面形成了一层保护膜,起到了良好的保护作用。可以看出,IAA 是一种有效的缓蚀剂。

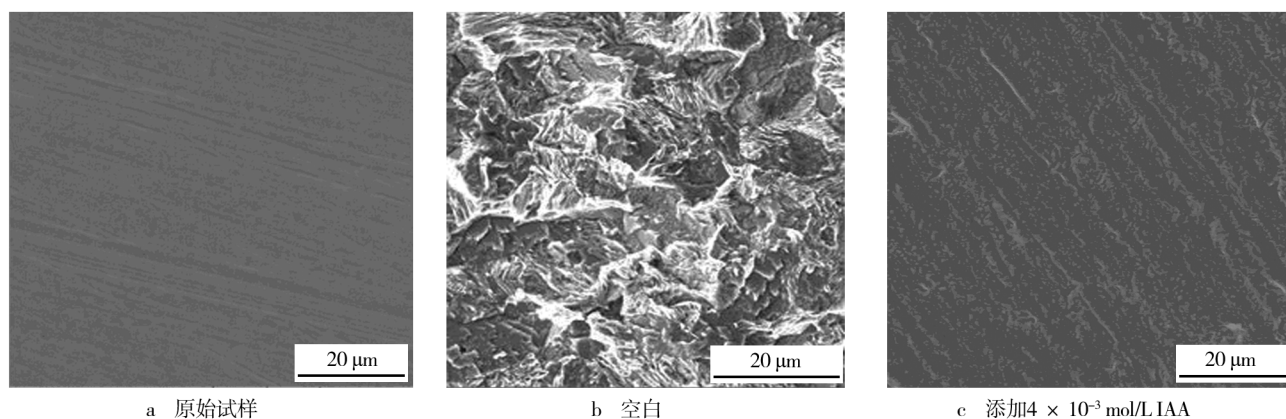


图7 碳钢表面腐蚀形貌对比

Fig.7 Comparison of corrosion micrographs of carbon steel

3 结论

IAA 是一种以抑制阳极反应为主的混合型缓蚀剂,在温度一定时,IAA 的缓蚀效率随着浓度增大而增大,最高缓蚀效率达 88.85%。在 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液中能够对 Q235 碳钢起到优异的保护作用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 白培万. 碳钢的防腐与缓蚀性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
BAI Pei-wan. The Investigation of the Steel Corrosion and Inhibition[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.
- [3] 汤兵,陈欣义. 酸洗过程中的缓蚀剂[J]. 清洗世界, 2006, 22(2): 22—28.
TANG Bing, CHEN Xin-yi. Inhibitors in Acid Cleaning Process[J]. Cleaning World, 2006, 22(2): 22—28.
- [4] PONGSAK L, DUSIT U, PAKAWADEE S. Tryptamine as a Corrosion Inhibitor of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 30—36.
- [5] GULSEN A. Corrosion Inhibition of Indole-3-acetic Acid on Mild Steel in 0.5 M HCl[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 317(1): 730—736.
- [6] OGUZIE E E, UNAEGBU C, OGUKWE N, et al. Inhibition of Mild Steel Corrosion in Sulphuric Acid Using Indigo Dye and Synergistic Additives[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 84(2): 363—368.
- [7] 万红敬,黄红军,胡建伟,等. 三种铜缓蚀剂抗 H_2S 腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 47—51.
WAN Hong-jing, HUANG Hong-jun, HU Jian-wei, et al. Anti- H_2S Corrosion Properties of Three Copper Corrosion Inhibitors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 47—51.
- [8] 王楷,孔小东,汤丹华,等. 两种缓蚀剂对 10CrSiNiCu 钢的缓蚀效果研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 77—80.
WANG Kai, KONG Xiao-dong, TANG Dan-hua, et al. Corrosion Inhibition Effect of Two Inhibitors on 10CrSiNiCu[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 77—80.
- [9] 张胜涛,陶志华,李伟华,等. 新型三氮唑类化合物在 1 mol/L HCl 中对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 中国腐蚀与科学学报, 2009, 29(6): 487—492.
ZHANG Sheng-tao, TAO Zhi-hua, LI Wei-hua, et al. A Corrosion Inhibition of Mild Steel by Novel Triazole Compound in 1 mol/L HCl Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(6): 487—492.
- [10] 张斌,韩晓兰,曹文全,等. 高效环境友好型缓蚀剂的最新研究进展[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25(6): 1—4.
ZHANG Bin, HAN Xiao-lan, CAO Wen-quan, et al. Latest Development of Research on High-efficiency Environment-friendly Corrosion Inhibitors[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2008, 25(6): 1—4.
- [11] 陶志华. 酸性介质中苯基-三唑类化合物对碳钢的缓蚀行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

- TAO Zhi-hua. Adsorption Properties and Inhibition of Mild Steel Corrosion in Acid Solution by Some Phenyl-triazol Derivatives[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] KHALED K F, HAMMOUTI B. Some Benzotriazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Copper in Acidic Medium; Experimental and Quantum Chemical Molecular Dynamics Approach[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117(1): 148—155.
- [13] CAVALLARO L, FELLONI L F, TRABANELLI G, et al. The Anodic Dissolution of Iron and the Behavior of Some Corrosion Inhibitors Investigated by the Potentiodynamic Method[J]. Electrochimica Acta, 1964, 9(5): 485—494.
- [14] FERREIRA E S, GIACOMELLI C, GIACOMELLI F C. Evaluation of the Inhibitor Effect of Lascorbic Acid on the Corrosion of Mild Steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 83(1): 129—134.
- [15] LI X, DENG S, FU H. Benzyl Trimethyl Ammonium Iodide as a Corrosion Inhibitor for Steel in Phosphoric Acid Produced by Dihydrate Wet Method Process[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2): 664—670.
- [16] BENTISS F, LEBRINI M, LAGRENEE M. Thermodynamic Characterization of Metal Dissolution and Inhibitor Adsorption Processes in Mild Steel/2,5-bis (n-thienyl)-1,3,4-thiadiazoles/Hydrochloric Acid System[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 2915—2931.
- [17] 李敏娅, 王海人, 屈钧娥. 430 不锈钢表面 PFDS 硅烷膜的自组装及缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 66—69.
- LI Min-ya, WANG Hai-ren, QU Jun-e. Self-assembling of PFDS on the Surface of 430 Stainless Steel and Its Corrosion Inhibition Performance[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 66—69.
- [18] SINAPI F, FORGET L, DELHALLE J, et al. Self-assembly of (3-mercaptopropyl) Trimethoxysilane on Polycrystalline Zinc Substrates towards Corrosion Protection[J]. Thin Solid Films, 2002, 405(112): 186—193.

(上接第 90 页)

- [11] 袁森, 周好斌, 徐伟东. 智能化油井套管脉冲电源系统设计[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(1): 8—12.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Wei-dong. The Design of Intelligent Power Supply System for Oil Well Casing Cathodic Protection with Pulse Current[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2015, 32(1): 8—12.
- [12] 袁森, 周好斌, 徐兴龙. 油井套管脉冲电流阴极保护监控系统设计[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 133—137.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Xing-long. Design of Pulse Current Cathodic Protection Monitoring System for Oil Well Casing[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 133—137.
- [13] 夏泽中, 刘婷. 阴极保护电源远程监控系统设计与实现[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(1): 4—8.
- XIA Ze-zhong, LIU Ting. Design and Realization of Remote Monitoring of Cathodic Power Supply System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(1): 4—8.
- [14] 增敏, 陈小红, 曹彪, 等. 一种微弧氧化逆变焊接电源控制制系统[J]. 华南理工大学学报, 2012, 34(1): 4—7.
- ZENG Min, CHEN Xiao-hong, CAO Biao, et al. Control System of Micro-arc Oxidation Inverter Power Supply[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(2): 40—43.
- [15] 杨骏. 基于中颖双核芯片 SH99F100 在无卡旋切机变频器中的应用[J]. 变频器世界, 2012: 85—87.
- YANG Jun. Application of SH99F100 Dual-core Chips with Sinowalth in Non-center Rotary Cutter Inverter[J]. The World of Inverters, 2012: 85—87.
- [16] 马菊莲, 马军鹏, 周好斌. 具有自学习功能的智能抽油机变频控制系统研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 77—79.
- MA Ju-lian, MA Jun-peng, ZHOU Hao-bin. Study on Variable Frequency Control System of Smart Pumping Unit With The Function of Self-learning[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 77—79.

(上接第 96 页)

- [19] JACKSON R D, TOYLOR M P, EVANS H E, et al. Oxidation Study of an EB-PVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System[J]. Oxidation of Metals, 2011, 76(3/4): 259—271.
- [20] HILLE T S, TURTELTAUB S, SUIKER A S J. Oxide Growth and Damage Evolution in Thermal Barrier Coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(10): 2139—2152.
- [21] KORB L J, OLSON D L. Metals Handbook[M]. USA: ASM International, 1987.
- [22] 韩志勇, 王晓梅, 王志平. 热障涂层高温 TGO 生长变化[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 5—8.
- HAN Zhi-yong, WANG Xiao-mei, WANG Zhi-ping. Change of TGO Growth in Thermal Barrier Coatings at High Temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 5—8.