

# 十六烷基二甲基乙基溴化铵与 $\text{NH}_4\text{SCN}$ 缓蚀协同效应

向云刚<sup>1</sup>, 崔益顺<sup>1</sup>, 谯康全<sup>2</sup>

(1. 四川理工学院 材料与化学工程学院, 四川 自贡 643000;

2. 四川理工学院 分析测试中心, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 目的 研究十六烷基二甲基乙基溴化铵(CDAB)与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  在硫酸介质中对 Q235 钢的缓蚀协同效应,并探讨其缓蚀机理和性能,以期为工业实际生产提供理论数据。方法 运用失重法研究 CDAB 质量浓度与缓蚀率的关系,通过失重法、动电位极化曲线法和交流阻抗法分析 CDAB 与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  复配后的缓蚀率和缓蚀机理。结果 仅添加 CDAB 时,缓蚀率随着 CDAB 质量浓度增大而增大,但缓蚀性能并不显著,当质量浓度为 10 mg/L 时缓蚀率仅为 85.07%;当 CDAB 与 30 mg/L 的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  复配后,缓蚀率显著提高至 96.73%,能有效抑制 Q235 钢在 0.5 mol/L 硫酸介质中的腐蚀。极化试验结果显示,该复配缓蚀剂是一种以控制阳极反应为主的混合型缓蚀剂,缓蚀率随 CDAB 质量浓度增大而增大,与交流阻抗法、失重法试验结果相一致。复配缓蚀剂在 Q235 钢表面的吸附服从 Langmuir 吸附等温模型,吸附吉布斯自由能  $\Delta G^0 = -48.33 \text{ kJ/mol}$ ,为自发吸附。结论 CDAB 与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  在 0.5 mol/L 硫酸介质中具有优异缓蚀协同效应,能有效抑制腐蚀介质对 Q235 钢的腐蚀,复配缓蚀剂具有较高的缓蚀率。

**关键词:** Q235 钢; 十六烷基二甲基乙基溴化铵;  $\text{NH}_4\text{SCN}$ ; 协同效应; 缓蚀性能

**中图分类号:** TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)10-0105-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.018

## Synergistic Corrosion Inhibition Effect of Cetyldimethylethylammonium Bromide and $\text{NH}_4\text{SCN}$

XIANG Yun-gang<sup>1</sup>, CUI Yi-shun<sup>1</sup>, QIAO Kang-quan<sup>2</sup>

(1. School of Material and Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Analysis and Testing, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**ABSTRACT:** **Objective** In order to provide theoretical data for industrial production, the synergistic corrosion inhibition effect of cetyldimethylethylammonium bromide (CDAB) and  $\text{NH}_4\text{SCN}$  for Q235 steel was investigated in 0.5 mol/L sulfuric acid solution, and the corrosion inhibition mechanism and performance were explored. **Methods** Firstly, the relationship between the corrosion inhibition efficiency and the concentration of CDAB was studied by the weight loss method. Then, the corrosion inhibition efficiency and mechanism of the compound inhibitor were analyzed by weight loss measurements, potentiodynamic polarization curves and electrical impedance spectroscopy (EIS). **Results** The results of weight loss method showed that CDAB had a low corrosion inhibition efficiency when acted alone, and the inhibition efficiency increased with the increasing CDAB concentration. The corrosion in-

收稿日期: 2015-05-22; 修订日期: 2015-06-17

Received: 2015-05-22; Revised: 2015-06-17

作者简介: 向云刚(1987—),男,四川人,硕士研究生,主要研究金属缓蚀剂。

**Biography:** XIANG Yun-gang (1987—), Male, from Sichuan, Master graduate student, Research focus: metal corrosion inhibitors.

通讯作者: 崔益顺(1969—),女,四川人,教授,主要从事无机精细化工方面的研究。

**Corresponding author:** CUI Yi-shun (1969—), Female, from Sichuan, Professor, Research focus: fine inorganic chemicals.

hibition efficiency was only 85.07% when the concentration of CDAB was 10 mg/L, while the inhibition efficiency increased to 96.73% when CDAB was compounded with 30 mg/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$ . The experimental results revealed that the corrosion of Q235 steel in 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  solution was strongly suppressed by the compound inhibitor. The polarization curve results showed that the compound inhibitor used in this paper was a mix-type inhibitor which mainly retarded anodic process, and the inhibition efficiency increased with the increasing CDAB concentration. The anti-corrosion performances determined by the potentiodynamic polarization curve, weight loss method and EIS were almost consistent. The adsorption of the compound inhibitor on Q235 steel surface abided the Langmuir's adsorption isotherm and the Gibbs free energy of adsorption  $\Delta G^0$  was  $-48.33$  kJ/mol. The adsorption was a spontaneous chemisorption process. **Conclusion** Composite of CDAB and  $\text{NH}_4\text{SCN}$  showed excellent synergistic effect in the presence of 0.5 mol/L sulfuric acid solution, and the corrosion of Q235 steel in 0.5 mol/L sulfuric acid solution was effectively suppressed by the compound inhibitor. The compound inhibitor had a high corrosion inhibition efficiency.

**KEY WORDS:** Q235 steel; cetyldimethylethylammonium bromide;  $\text{NH}_4\text{SCN}$ ; synergistic effect; corrosion inhibition performance

金属作为最重要的工程材料,应用范围十分广泛,使用历史悠久,然而金属的腐蚀也随之成为一个全球性的问题。金属腐蚀的危害十分严重,已成为生产发展和科学技术进步的障碍<sup>[1]</sup>。如今,金属的防腐已日益受到人们的关注,而在众多的防腐方法中,添加缓蚀剂是一种经济、高效和操作简单的金属防护方法<sup>[2-4]</sup>。然而,通常情况下单一缓蚀剂的腐蚀抑制效果具有一定的局限性,若利用不同缓蚀剂之间的缓蚀协同效应,通过适当复配,不仅能有效提高缓蚀剂的缓蚀率,还能够降低使用成本,扩大缓蚀剂的适用范围<sup>[5]</sup>。现今,许多具有高缓蚀率的商品缓蚀剂大多数是利用缓蚀剂之间的协同效应而制备的。季铵盐 CDAB 是一种阳离子表面活性剂,它被广泛用于乳化剂、消毒剂、杀菌基等。由于 CDAB 具有独特的分子结构,即它是由极性基(含孤对电子的 N 原子)和非极性的疏水基(烷基)两部分组成,因而具有用作金属缓蚀剂的可能。通常认为,其缓蚀机理是由于电子给予体的极性基吸附在金属表面,使金属表层形成双电层;非极性基则远离金属表面作定向排列,形成疏水层,阻止了溶液中的腐蚀介质与金属表面的接触,从而使金属的腐蚀反应受到抑制<sup>[6]</sup>。研究发现单一的 CDAB 缓蚀剂的缓蚀率并不是十分的理想,但当添加少量的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  时,CDAB 的缓蚀率却大幅提高,这使得研究 CDAB 与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  的协同效应变得有意义。为此,本文首先运用失重法研究 CDAB 在硫酸中的缓蚀性能,再运用失重法、动电位极化曲线法、交流阻抗法研究 CDAB 与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  在硫酸介质中对 Q235 钢的缓蚀协同效应,探讨其缓蚀机理,以期工业实际生产提供理论数据,实现实际应用价值。

## 1 实验

试样基材为 Q235 钢,所用十六烷基二甲基乙基

溴化铵和  $\text{NH}_4\text{SCN}$  均为分析纯,配制用水为实验室自制二次蒸馏水。

将两块尺寸为  $35.0\text{ mm} \times 20.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$  的 Q235 钢片用干湿两用型金相砂纸逐级打磨抛光,经蒸馏水冲洗、丙酮超声清洗、吹干后称量( $\pm 0.0001\text{ g}$ ),然后平行悬挂浸没于  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下含不同缓蚀剂的 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中,静置腐蚀 8 h 后取出,除去腐蚀产物,再次用蒸馏水冲洗,冷风吹干后称量。缓蚀率按式(1)计算:

$$\eta = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \quad (1)$$

式中: $v_0, v_1$  分别为空白溶液和添加缓蚀剂的溶液中钢片的腐蚀速率,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\eta$  为缓蚀率。

采用 chi660D 型电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)进行电化学测试,以饱和甘汞电极电极为参比电极,铂电极作为辅助电极,自制 Q235 钢试样为工作电极(工作表面为圆形截面,面积  $0.785\text{ cm}^2$ ,非工作表面用环氧树脂密封)。测试时,将打磨好的备用工作电极放置在含不同缓蚀剂的 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中,用电化学工作站测试工作电极在不同缓蚀剂的 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中的电化学图谱。其中测试动电位极化曲线的扫描速度为  $2\text{ mV/s}$ ,极化范围为  $\pm 150\text{ mV}$ (vs. OCP);测试交流阻抗的频率为  $10^5 \sim 10^{-2}\text{ Hz}$ ,扰动电位为  $\pm 5\text{ mV}$ ,利用 Zview 软件对测试数据进行拟合分析。按式(2)~(3)计算缓蚀率:

$$\eta = \frac{i_0 - i_1}{i_0} \quad (2)$$

式中: $i_0, i_1$  分别为未添加缓蚀剂和添加了缓蚀剂的腐蚀电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

$$\eta = \frac{R_1 - R_0}{R_1} \quad (3)$$

式中: $R_0, R_1$  分别为空白和加入不同浓度缓蚀剂

后的转移电阻,  $\Omega$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单一 CDAB 对 Q235 钢的缓蚀率

通过失重法研究了 CDAB 在  $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$  中对 Q235 钢的缓蚀作用。图 1 是  $25^\circ\text{C}$  下, 单一不同浓度 CDAB 对 Q235 钢的缓蚀率图。从图 1 可知, CDAB 在  $0.5 \text{ mol/L}$  硫酸中对 Q235 钢具有一定的缓蚀作用, 缓蚀率随 CDAB 质量浓度增大而增大, 当 CDAB 质量浓度为  $10 \text{ mg/L}$  时, 缓蚀率可达  $85.07\%$ 。

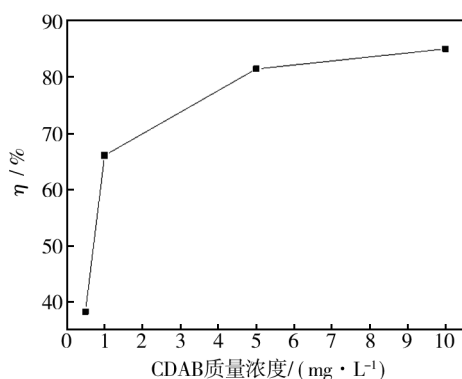


图 1 CDAB 浓度与缓蚀率的关系

Fig. 1 Relationship between corrosion inhibition efficiency and CDAB concentration

### 2.2 $\text{NH}_4\text{SCN}$ 浓度对 CDAB 缓蚀率的影响

在实验研究中, 发现单一较低质量浓度  $\text{NH}_4\text{SCN}$  对 Q235 钢几乎没有缓蚀作用, 甚至会加速 Q235 在腐蚀介质中的腐蚀, 而仅将少量的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  添加到含有 CDAB 的溶液中, 却能显著提高 CDAB 对 Q235 钢的缓蚀率。图 2 为  $25^\circ\text{C}$  下, 在  $0.5 \text{ mol/L}$  硫酸溶液中, 当

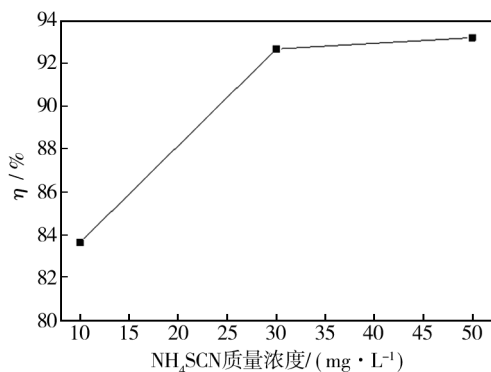


图 2  $\text{NH}_4\text{SCN}$  浓度与缓蚀率的关系

Fig. 2 Relationship between corrosion inhibition efficiency and  $\text{NH}_4\text{SCN}$  concentration

CDAB 为  $1 \text{ mg/L}$  时, 添加不同量的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  对 CDAB 缓蚀率的影响图。由图 2 可知, 添加  $\text{NH}_4\text{SCN}$  大幅度提高了 CDAB 对 Q235 钢的缓蚀率。当  $\text{NH}_4\text{SCN}$  质量浓度仅为  $10 \text{ mg/L}$  时, CDAB 对 Q235 钢的缓蚀率从  $66.09\%$  提高到了  $83.63\%$ ; 当  $\text{NH}_4\text{SCN}$  的质量浓度达  $30 \text{ mg/L}$  后, 缓蚀率基本保持不变, 维持在  $92\%$  左右。因此选用添加  $30 \text{ mg/L}$  的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  与 CDAB 进行复配研究。

### 2.3 CDAB 和 $\text{NH}_4\text{SCN}$ 复配对 Q235 钢的协同作用

#### 2.3.1 失重实验

图 3 是  $25^\circ\text{C}$  下, 当  $\text{NH}_4\text{SCN}$  为  $30 \text{ mg/L}$  时, Q235 钢片在添加不同质量浓度的 CDAB 溶液和空白硫酸溶液(不含  $\text{NH}_4\text{SCN}$  和 CDAB, 下同)中的失重实验结果图。从图 3 可知, 复配缓蚀剂能显著地抑制腐蚀介质对 Q235 钢的腐蚀, 且所添加的缓蚀剂质量浓度较低, 这体现出了该复配缓蚀剂优异的缓蚀性能; 此外, 随着 CDAB 的质量浓度增大, 腐蚀速率减小, 缓蚀率逐渐增加。当 CDAB 的质量浓度为  $10 \text{ mg/L}$  时缓蚀率为  $96.73\%$ , 明显高于同等浓度下单一 CDAB 的缓蚀率 ( $85.07\%$ ), 这表明 CDAB 和  $\text{NH}_4\text{SCN}$  之间具有较好的缓蚀协同效应。

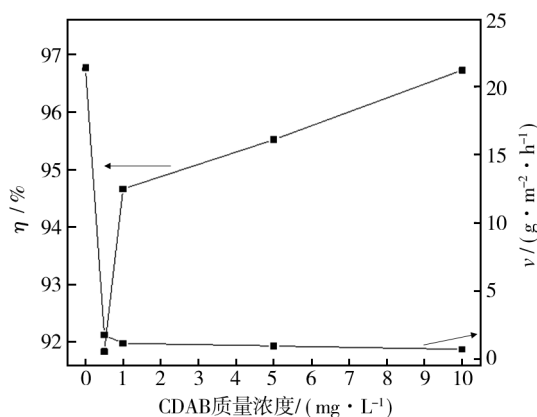


图 3 失重实验分析

Fig. 3 Weight loss experimental analysis

#### 2.3.2 极化曲线

图 4 是  $25^\circ\text{C}$  下, 当  $\text{NH}_4\text{SCN}$  为  $30 \text{ mg/L}$  时, Q235 钢在不同质量浓度 CDAB 溶液中的极化曲线, 用 chi660D 电化学工作站自带软件拟合得到的电化学参数见表 1。

从图 4 和表 1 可知, 当添加 CDAB 后, 腐蚀电位呈小幅正移趋势, 阴、阳极电流密度均得到降低, 这表明

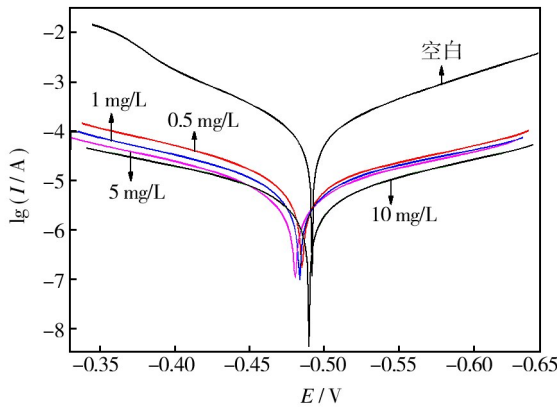


图 4 不同质量浓度 CDAB 的动电位极化曲线

Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves for various concentrations of CDAB

表 1 动电位测试主要电化学参数与缓蚀率

Tab.1 Polarization parameters and corresponding corrosion inhibition efficiencies

$\rho/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$E_{\text{corr}}/$ V	$\beta_c/$ ( $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ )	$\beta_a/$ ( $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ )	$J_{\text{corr}}/$ ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$\eta$ /%
blank	-0.494	98.48	73.58	118.20	
0.5	-0.485	149.05	108.04	10.82	90.85
1.0	-0.484	159.95	141.36	8.17	93.09
5.0	-0.481	152.25	143.23	6.46	94.53
10.0	-0.485	154.30	153.70	4.76	95.97

复配缓蚀剂对 Q235 钢电极的阳极溶解反应和阴极析氢反应都起到了抑制作用,是一种以控制阳极过程为主的混合型缓蚀剂<sup>[7]</sup>,具有优异的缓蚀效果。此外,通过  $\text{NH}_4\text{SCN}$  和 CDAB 的复配,腐蚀电流进一步减小,缓蚀率较大幅度提高,这体现出  $\text{NH}_4\text{SCN}$  与 CDAB 之间较好的缓蚀协同效应。同时,由表 1 可知,在 30 mg/L 的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  和 0.5 mol/L 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中,随着 CDAB 质量浓度的增加,缓蚀率升高,明显高于相同质量浓度下单一 CDAB 的缓蚀率,这表明  $\text{NH}_4\text{SCN}$  和 CDAB 复配后确实对钢产生了较好的缓蚀协同效应。两者之间产生缓蚀协同效应的原因可能是:在酸性溶液中,钢电极部分表面相对于溶液带正电,不利于 CDAB 分子在钢电极表面的吸附,而加入的  $\text{NH}_4\text{SCN}$  解离出来  $\text{SCN}^-$  带负电,可优先吸附在钢表面使其表面正电荷减少甚至变为负电,这就改变了钢电极表面的电荷状态,有利于 CDAB 缓蚀剂吸附层的形成,加强了隔离作用<sup>[1,8]</sup>,从而提高了缓蚀剂分子在钢表面的覆盖度,阻碍了电荷的转移,致使缓蚀剂的缓蚀率大幅度增加。因此复配后的缓蚀率比单一

CDAB 显著提高。

### 2.3.3 交流阻抗

图 5 是 25 ℃ 下,当  $\text{NH}_4\text{SCN}$  为 30 mg/L 时,Q235 钢在不同质量浓度 CDAB 溶液和空白硫酸溶液中的电化学阻抗谱图。从图 5 中的 Bode 图可知,空白硫酸溶液中的 Bode 图具有一个时间常数,而添加复配的缓蚀剂后,呈现两个时间常数。空白硫酸溶液与添加复配缓蚀剂后的阻抗谱可以分别用图 6a 和图 6b

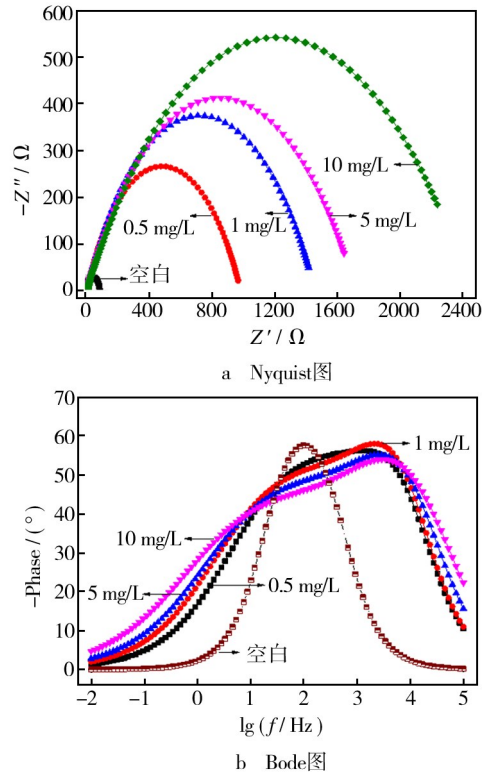


图 5  $\text{NH}_4\text{SCN}$  为 30 mg/L 时 Q235 钢在不同浓度 CDAB 溶液中的 Nyquist 图和 Bode 图

Fig. 5 Nyquist and Bode plots for Q235 steel in solutions with various concentrations of CDAB in the presence of 30 mg/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$

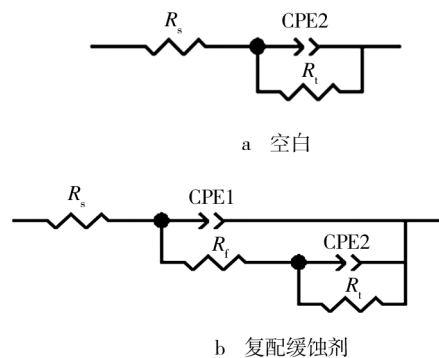


图 6 等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit models



所示等效电路图进行拟合,其中: $R_s$  为溶液电阻, $R_t$  为膜电阻, $R_i$  为电荷转移电阻,CPE1 为与界面电容有关的常相位角元件;CPE2 为与双电层电容有关的常相位角元件。电化学阻抗谱参数是用 Zview 软件拟合而得到,结果见表 2。

从图 5 和表 2 可知,随着缓蚀剂的加入及缓蚀剂质量浓度的增加,容抗弧半径逐渐增大,从而使得与电极界面相对应的电荷转移电阻  $R_i$  也随着缓蚀剂浓度的增加而增大。这表明随着缓蚀剂质量浓度增加,不导电的缓蚀剂分子与钢表面的相互作用逐渐增

强<sup>[9]</sup>,钢表面吸附层覆盖度增加,减少了电极表面活性点数目,导致钢电极表面与溶液界面电荷迁移阻力增大,使得金属腐蚀反应变得越来越困难。与空白硫酸溶液相比,添加 CDAB 和 NH<sub>4</sub>SCN 复配缓蚀剂后的 CPE2-T 值明显减小,产生这种现象的主要原因为:比水分子介电常数大得多的缓蚀剂分子取代了水分子吸附在钢表面上,使得钢表面界面层的电容值显著减小<sup>[10-11]</sup>。 $R_i$  值随缓蚀剂质量浓度增大而呈现出增大的趋势,这说明随缓蚀剂质量浓度增加缓蚀剂分子吸附膜的致密度和完整度有所增大<sup>[12-13]</sup>。

表 2 电化学阻抗谱主要参数与缓蚀率

Tab.2 EIS parameters and corresponding corrosion inhibition efficiencies

CDAB 质量浓度 /(mg · L <sup>-1</sup> )	$R_s/\Omega$	CPE1		$R_t/\Omega$	CPE2		$R_i/\Omega$	$\eta/\%$
		CPE1-T/ $\mu$ F	CPE1-P		CPE2-T/ $\mu$ F	CPE2-P		
blank	2.23				224.85	0.79509	79.6	
0.5	2.95	12.68	0.88550	29.98	147.32	0.59041	950.5	91.63
1.0	3.15	10.00	0.89552	44.96	157.86	0.57829	1410.3	94.36
5.0	3.12	11.41	0.83761	52.52	181.34	0.54528	1663.8	95.22
10.0	2.80	22.23	0.77359	80.14	209.14	0.50796	2362.3	96.63

此外,由图 3、表 1 和表 2 可知,在同一腐蚀介质溶液中,失重法、极化曲线法和交流阻抗谱法试验所得的缓蚀率基本一致,但也存在差异,这种差异主要源于 3 种测试方式的测试原理、腐蚀时间的不同。

2.3.4 NH<sub>4</sub>SCN 与 CDAB 复配在 Q235 钢表面的吸附模型研究

通常认为,有机分子是通过吸附在金属表面起到缓蚀作用的,而吸附规律的研究可用来描述和衡量缓蚀剂分子与钢表面的相互作用,吸附等温线能够提供相关有用的抑制腐蚀的机理信息。在酸性介质中,吸附型缓蚀剂在钢表面的覆盖率可以用缓蚀效率表示<sup>[14]</sup>,为获得缓蚀剂在钢表面的吸附规律,假定缓蚀作用是由于缓蚀剂分子被吸附于钢表面所致,且吸附规律服从 Langmuir 等温模型<sup>[15]</sup>,即有:

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{1}{K} + \rho$$
 (4)

式中: $\rho$  为缓蚀剂质量浓度,mg/L; $\theta$  为表面覆盖率; $K$  为吸附平衡常数,L/mol。

用表 2 的数据进行回归拟合,拟合结果如图 7 所示,直线的斜率为 1.03,线性相关系数  $R^2$  为 0.999,这表明复配后的缓蚀剂分子在钢表面的吸附服从 Langmuir 等温模型,假设成立。由直线的截距算出吸附平衡常数  $K=5\,296\,610.17\text{ L/mol}$ ,可用式(5)计算吸附吉布斯自由能  $\Delta G^0$ <sup>[16]</sup>:

$$K = \frac{1}{\rho} e^{-\Delta G^0/(RT)}$$
 (5)

式中: $R$  为摩尔气体常数,8.314 J/(mol · K); $T$  为热力学温度,K; $\rho$  为溶剂中水的质量浓度。由式(5)计算得到  $\Delta G^0 = -48.33\text{ kJ/mol}$ ,为一负值,这表明复配缓蚀剂在钢表面的吸附为自发过程,且其绝对值大于 40 kJ/mol,可认为该吸附过程是化学吸附<sup>[7]</sup>。

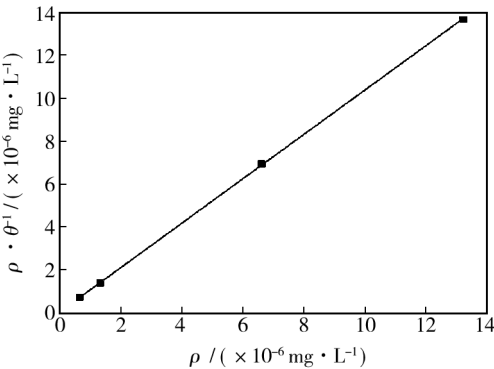


图 7 CDAB 在 Q235 钢表面的 Langmuir 吸附等温关系图  
Fig.7 Langmuir adsorption isotherm of CDAB on Q235 steel surface

3 结论

1) 单一添加 CDAB 时,对 Q235 钢的腐蚀具有一

定的抑制作用,但缓蚀率不是很理想,当其质量浓度为 10 mg/L 时缓蚀率达 85.07%。

2) CDAB 与  $\text{NH}_4\text{SCN}$  复配后,对 Q235 钢的缓蚀率大大提高,两者之间具有很好的协同作用,当 CDAB 和  $\text{NH}_4\text{SCN}$  分别为 10 mg/L, 30 mg/L 时,失重法所测得缓蚀率高达 96.73%。

3) 复配缓蚀剂是一种以控制阳极过程为主的混合型缓蚀剂。

4) 复配缓蚀剂是通过在钢表面发生吸附而起到缓蚀作用,该吸附过程为自发的化学吸附过程,且服从 Langmuir 等温模型。

## 参考文献

- [1] 张天胜. 缓蚀剂[M]. 北京:化学工业出版社,2002.  
ZHANG Tian-sheng. Corrosion Inhibitor [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [2] KHALED K F. Guanidine Derivative as a New Corrosion Inhibitor for Copper in 3% NaCl Solution [J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(1): 104—111.
- [3] SOLMAZ R, KARDAS G, YAZICI B, et al. Inhibition Effect of Rhodanine for Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution [J]. Protection of Metals, 2005, 41(6): 581—585.
- [4] ALI S A, SAEED M T, RAHMAN S U. The Isoxazolidines: a New Class of Corrosion Inhibitors of Mild Steel in Acidic Medium [J]. Corrosion Science, 2003, 45(2): 253—266.
- [5] MASAHICO Y, HIROSHI N, KUNITUGU A. The Inhibition of Passive Film Breakdown on Iron in a Borate Buffer Solution Containing Chloride Ions by Organic Anion Inhibitors [J]. Corrosion Science, 1994, 36(2): 241—258.
- [6] 张瑾, 朱忠其, 张海斌, 等. 盐酸介质中几种表面活性剂对钢的缓蚀作用 [J]. 功能材料, 2004, 35: 2069—2071.  
ZHANG Jin, ZHU Zhong-qi, ZHANG Hai-bin, et al. Inhibition of Mild Steel Corrosion by Surfactants in Hydrochloric Acid [J]. Functional Materials, 2004, 35: 2069—2071.
- [7] 曹毅, 芮玉兰, 黄开宏. HCl 溶液中氨基酸复合缓蚀剂对碳钢的缓蚀作用 [J]. 表面技术, 2011, 40(5): 13—17.  
CAO Yi, RUI Yu-lan, HUANG Kai-hong. Inhibition Performances of Compound of Amino Acid Inhibitors for Carbon Steel in HCl Solution [J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 13—17.
- [8] 谢发之, 宣寒. 多点位吸附型咪唑啉季铵盐缓蚀剂的合成及其缓蚀性能 [J]. 应用化学, 2011, 28(1): 94—99.  
XIE Fa-zhi, XUAN Han. Synthesis and Inhibiting Performance of an Imidazolyl-quaternary Ammonium Salts Inhibitor with Multi-activated Sites [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2011, 28(1): 94—99.
- [9] MCCAFFERTY E, NORMAN H. Closure to Discussion of Kinetics of Iron Corrosion in Concentrated Acidic Chloride Solutions [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1973, 120(6): 775—777.
- [10] 张太亮, 曹舒然, 戴姗姗, 等. 1-十四烷基-4-羟甲基-1,2,3-三唑盐酸缓蚀剂的性能及机理研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(4): 329—333.  
ZHANG Tai-liang, CAO Shu-ran, DAI Shan-shan, et al. Corrosion Inhibition Performance and Mechanism of (1-Tetradecyl-1H-[1,2,3] triazol-4-yl)-Methanol [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(4): 329—333.
- [11] WANG X, YANG H, WANG F. An Investigation of Benzimidazole Derivative as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1 M HCl Solution [J]. Corrosion Science, 2009, 51(5): 1836—1843.
- [12] 刘福国, 杜敏. 复合缓蚀剂在 31% NaCl 溶液中的缓蚀性能 [J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(10): 523—525.  
LIU Fu-guo, DU Min. Inhibition Performance of Compound Inhibitor in 31% NaCl Solution [J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(10): 523—525.
- [13] 卢燕, 郑兴文, 刘新露, 等. 硫酸介质中榕树叶提取液的缓蚀性能及其与 KI 的缓蚀协同效应 [J]. 表面技术, 2013, 42(3): 28—32.  
LU Yan, ZHENG Xing-wen, LIU Xin-lu, et al. Corrosion Inhibition of Ficus Microcarpa Leaves Extract and Its Synergistic Effect with KI in Sulfuric Acid [J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 28—32.
- [14] NEGM N A, GHUIBA F M, TAWFIK S M. Novel Isoxazolum Cationic Schiff Base Compounds as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Hydrochloric Acid [J]. Corrosion Science, 2011, 53(11): 3566—3575.
- [15] 张世红, 齐振伟, 王梦迪, 等. 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, WANG Meng-di, et al. Corrosion Inhibition of C38 by Pomelo Peel Extract [J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 50—54.
- [16] NOOR E A. Potential of Aqueous Extract of Hibiscus Sabdariffa Leaves for Inhibiting the Corrosion of Aluminum in Alkaline Solutions [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2009, 39(9): 1465—1475.