

[Note]

www.whxb.pku.edu.cn

碱性介质中 POTAS 和 PDTAS 对铜的缓蚀作用

张秀娟 刘瑞泉^{*} 王献群

(新疆大学化学化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 合成了两种吡唑啉酮衍生物 POTAS 和 PDTAS, 并采用失重法和电化学方法研究了这两种吡唑啉酮衍生物对铜在 5%(*w*)NaHCO₃ 水溶液中的缓蚀性能和吸附行为。结果表明, 在 5%NaHCO₃ 水溶液中这两种化合物对铜均有较好的缓蚀作用, 缓蚀效率大小顺序为 POTAS>PDTAS。并且 POTAS 与 PDTAS 均为混合型缓蚀剂。两种化合物在铜表面的吸附均为单层吸附, 属于物理吸附。

关键词: 缓蚀剂; 铜; 吡唑啉酮; NaHCO₃; 吸附行为

中图分类号: O646.6

Inhibition Action and Adsorption Behavior of POTAS and PDTAS on Copper in Alkaline Medium

ZHANG Xiu-Juan LIU Rui-Quan^{*} WANG Xian-Qun

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, P. R. China)

Abstract: Two pyrazolone compounds, POTAS and PDTAS, were synthesized and their inhibition action and adsorption behavior on copper in aqueous NaHCO₃ (mass fraction 5%) solution were investigated by means of mass loss and electrochemical techniques. It was showed that the two compounds had good corrosion inhibition for copper in NaHCO₃ solution. The inhibition efficiency of the two compounds was found to decrease as follows: POTAS>PDTAS. Both POTAS and PDTAS were mixed-type inhibitors. The results of experiment revealed that the adsorption on copper surface was monolayer adsorption. The adsorption processes were exothermic reaction and belong to physical absorption.

Key Words: Inhibitor; Copper; Pyrazolone; NaHCO₃; Adsorption behavior

金属铜由于物理性质比较稳定, 导电、导热性能好, 耐腐蚀能力强, 在各方面得到了广泛应用, 但其仍存在着腐蚀问题。目前, 解决铜的腐蚀有多种方法, 其中使用缓蚀剂抑制铜及其合金的腐蚀是十分经济有效的办法。铜的缓蚀剂主要是有机化合物硫脲、醛等的衍生物及唑类等杂环化合物^[1-4]。朱丽琴等人研究了多种酸性介质中的铜缓蚀剂^[5-8], 但目前对弱碱性介质中铜缓蚀剂的研究很少, 而吡唑啉酮类衍生物作为铜的缓蚀剂尚未见报道。本文合成了两种吡唑啉酮衍生物 POTAS 和 PDTAS, 用失重法和电化学方法研究了其对铜在 5%NaHCO₃ 水溶液

中的缓蚀性能, 并探讨了其在铜表面的吸附特性。

1 实验方法

1.1 吡唑啉酮衍生物的合成

试剂: 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(工业级), 乙酰氯(分析纯, 天津市百世化工有限公司), 二氨基硫脲^[9](自制)。

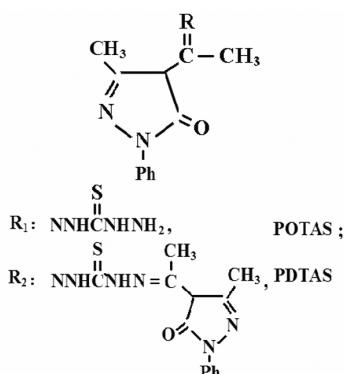
POTAS 和 PDTAS 两种吡唑啉酮类化合物参照文献^[10,11]合成, 其结构如 Scheme 1 所示。

1.2 缓蚀性能的测试

失重法采用的试验材质为紫铜(江苏高邮市新

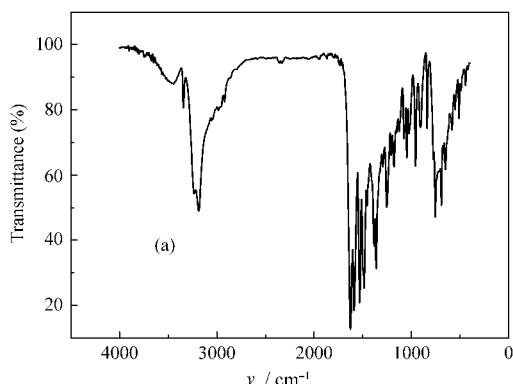
Received: August 9, 2007; Revised: November 8, 2007; Published on Web: December 18, 2007.

*Corresponding author. Email: liu.rq@163.com; Tel: +86991-8582887

**Scheme 1** Structures of POTAS and PDTAS

邮仪器厂, 50 mm×25 mm×2 mm). 试片使用前用1500 目耐水砂纸打磨后用蒸馏水冲洗, 经丙酮、无水乙醇清洗后, 室温下干燥备用. 实验介质为质量分数为 5%NaHCO₃ 的水溶液, 实验温度为(25±1) °C. 铜片静态悬挂于实验介质中浸泡 72 h 后, 将试片取出用硬橡皮擦除腐蚀产物并用蒸馏水冲洗, 再经丙酮、无水乙醇清洗, 室温下干燥后称重, 由试片的失重来计算缓蚀效率.

电化学测试使用 CHI660A 电化学工作站(上海辰华仪器公司), 采用三电极体系. 大面积铂片为辅助电极, Hg/HgO 电极为参比电极, 紫铜片为工作电极, 测试面积为 0.5 cm², 其余部分用环氧树脂胶密封. 实验温度为(25±1) °C. 实验前研究电极均用耐水砂纸打磨呈镜面光亮并用丙酮清洗后, 再用蒸馏水冲洗并擦干. 所有的测试均在质量分数为 5% NaHCO₃ 的水溶液中进行. 极化曲线测试电位扫描幅度为自腐蚀电位, 即 $E_{cor} \pm 150$ mV, 扫描速率为 5 mV·s⁻¹; 交流阻抗测试频率范围为 0.1 Hz–100 kHz, 交流激励信号幅值为 5 mV. 阻抗数据处理采用 EQUTVCRT 拟合软件拟合.



2 结果与讨论

2.1 产物的表征

化合物的 IR 谱见图 1. IR 数据(ν/cm^{-1})及熔点为, POTAS: 3446, 3342, 3248(m, $\nu_{\text{N-H}}$), 3186(m, $\nu_{\text{O-H}}$), 1626(s, $\nu_{\text{C=N}}$), 1486(s, $\nu_{\text{pyrazolone-ring}}$), 1363(s, $\nu_{\text{C=O}}$), 1077(m, $\nu_{\text{C=S}}$), 755, 839(m, $\nu_{\text{C}_6\text{H}_5}$); T_m : 192–195 °C; PDTAS: 3271 (m, $\nu_{\text{N-H}}$), 2961(m, $\nu_{\text{O-H}}$), 1629(s, $\nu_{\text{C=N}}$), 1488(s, $\nu_{\text{pyrazolone-ring}}$), 1363(s, $\nu_{\text{C=O}}$), 1013(m, $\nu_{\text{C=S}}$), 760, 840(m, $\nu_{\text{C}_6\text{H}_5}$); T_m : 172–175 °C.

2.2 缓蚀性能的评价

2.2.1 失重法

失重法测定缓蚀效率的计算公式为

$$\eta = 1 - \Delta W / \Delta W_0 \quad (1)$$

其中 ΔW_0 和 ΔW 分别是指铜片在 5%NaHCO₃ 水溶液中未加和加有 POTAS 或 PDTAS 两种化合物时的失重质量. 在(25±1) °C 条件下, 用失重法测试了不同浓度条件下 POTAS 和 PDTAS 两种化合物在 5% NaHCO₃ 水溶液中的缓蚀性能. 从外观上看, POTAS 浸泡过的铜片表面光滑, 无局部腐蚀现象, 而 PDTAS 浸泡过的铜片表面中心有局部腐蚀现象. 失重法所得数据如表 1 所示.

由表 1 可知, 在所研究的浓度范围内, 随着 POTAS 或 PDTAS 浓度的增加, 两种物质的缓蚀效率均增加, 但当达到一定浓度时, 再增加它们的浓度, POTAS 和 PDTAS 的缓蚀效率反而下降. 因此, 分别取 2.6316×10^{-4} mol·L⁻¹ 和 2.9880×10^{-4} mol·L⁻¹ 为两种物质的最佳浓度. 同时表 1 显示, 两种化合物在最佳浓度时的缓蚀效率大小顺序为 POTAS>PDTAS.

2.2.2 极化曲线法

采用 Tafel 极化技术测得紫铜在 5%NaHCO₃ 溶

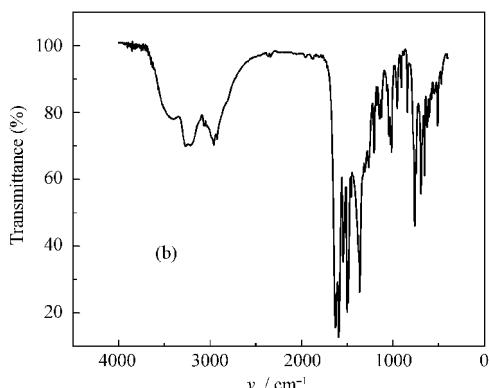


图 1 化合物的红外谱图
Fig.1 IR spectra of compounds
(a) POTAS; (b) PDTAS

表 1 (25±1) °C时在 5%NaHCO₃ 溶液中加有不同浓度化合物的失重法测试结果Table 1 Result of mass loss for copper in 5% NaHCO₃ with addition of various concentrations of compounds at (25±1) °C

POTAS			PDTAS		
10 ⁴ c/(mol·L ⁻¹)	mass loss(mg)	η(%)	10 ⁴ c/(mol·L ⁻¹)	mass loss(mg)	η(%)
blank	26.2	—	blank	26.6	—
0.3289	9.1	65.3	1.1952	13.3	50.0
0.6579	7.7	70.6	1.5936	11.1	58.3
1.3158	5.7	78.2	1.9920	8.4	68.4
1.9737	5.4	79.4	2.3904	7.7	71.0
2.6316	3.9	85.1	2.9880	4.7	82.3
3.2895	4.7	82.1	3.9841	5.7	78.6

液中未加和分别加有 POTAS 或 PDTAS 两种化合物的极化曲线，并用外推法求得相应的电化学参数和缓蚀效率。腐蚀电流 I_{corr} 与缓蚀效率有以下关系^[12]:

$$\eta = (I_{\text{corr}}^0 - I_{\text{corr}})/I_{\text{corr}}^0 \times 100\% \quad (2)$$

式中， I_{corr}^0 和 I_{corr} 分别为铜在 5%NaHCO₃ 溶液中未加和加有 POTAS 或 PDTAS 两种化合物时测得的腐蚀电流。结果见图 2 及表 2。

由图 2 和表 2 可知，与空白溶液的极化曲线相比，POTAS 和 PDTAS 加入后， $\Delta E < 0$ ，阴极和阳极的腐蚀电流均随缓蚀剂浓度的增加而减小，其对铜腐蚀的阳极溶解过程和阴极去极化过程均有一定抑制作用，但对阴极的作用略大于阳极，POTAS 和 PDTAS 是以阴极为主的混合型缓蚀剂^[13]。两种化合

物在最佳浓度时缓蚀效率大小顺序为 POTAS > PDTAS，与失重法测试结果一致。

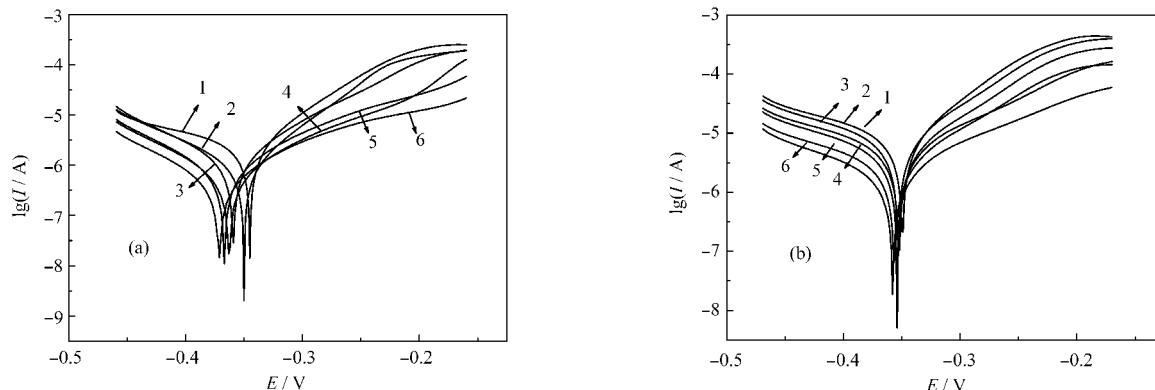
2.2.3 交流阻抗法

采用交流阻抗技术研究了紫铜在 5%NaHCO₃ 水溶液中未加和加有最佳浓度 POTAS 或 PDTAS 时的腐蚀行为(见图 3)，其等效电路可简化为图 4。

交流阻抗法测定缓蚀效率的计算式^[14]为：

$$\eta = (R_t^0 - R_t)/R_t^0 \quad (3)$$

其中 R_t^0 和 R_t 分别是铜在 5%NaHCO₃ 水溶液中未加和加有 POTAS 或 PDTAS 两种化合物时的传递电阻。交流阻抗测试结果用 EQUTVCRT 拟合软件拟合，拟合所得传递电阻和界面电容列于表 3。从图 3 中可以看出，POTAS 或 PDTAS 加入后的容抗弧均

图 2 不同浓度的化合物对铜在 5%NaHCO₃ 溶液中的极化曲线Fig.2 Polarization curves for copper in 5%NaHCO₃ with various concentrations of compounds

(a) POTAS; (b) PDTAS. 1–6 corresponding the concentration (c) in Table 2.

表 2 (25±1) °C时不同浓度的两种化合物对铜在 5%NaHCO₃ 溶液中的极化曲线参数Table 2 Polarization parameters for copper in 5%NaHCO₃ with various concentrations of compounds at (25±1) °C

No.	POTAS				PDTAS			
	10 ⁴ c/(mol·L ⁻¹)	-E _{corr} /V	I _{corr} /μA	η(%)	10 ⁴ c/(mol·L ⁻¹)	-E _{corr} /V	I _{corr} /μA	η(%)
1	blank	0.3440	20.23	—	blank	0.3494	20.91	—
2	0.3289	0.3262	6.872	66.0	1.1952	0.3532	11.375	45.6
3	0.6579	0.3230	5.032	75.1	1.5936	0.3521	8.385	59.9
4	1.3158	0.3138	2.974	85.3	1.9920	0.3564	6.127	70.7
5	1.9737	0.2998	2.110	89.6	2.3904	0.3542	4.017	80.8
6	2.6316	0.2890	1.761	91.2	2.9880	0.3580	3.115	85.1

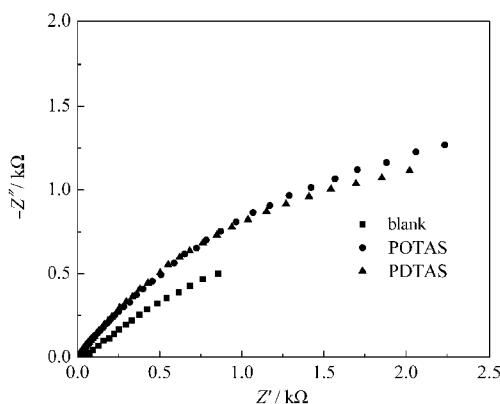


图 3 两种化合物最佳浓度的 Nyquist 曲线

Fig.3 Nyquist curves with optimum concentration of compounds

增大,说明铜在 5%NaHCO₃ 水溶液中的传递电阻 R_t 均增大。这表明两种化合物加入腐蚀介质后,缓蚀性粒子排除掉原来吸附在铜表面的 H₂O 分子而覆盖在铜表面,产生了屏蔽效应,从而起到了缓蚀作用。同时,也可以看出随着两种化合物的加入,界面电容减小。这是由于有机化合物的介电常数小于水的介电常数,有机化合物取代吸附在铜表面的水分子而吸附在铜表面造成界面电容的减小^[15]。

2.2.4 温度对两种化合物缓蚀性能的影响

为了研究温度对 POTAS 或 PDTAS 在 5% NaHCO₃ 水溶液中对铜的缓蚀性能的影响,测试了 30~60 ℃条件下,铜在 5%NaHCO₃ 水溶液中未加和加有最佳浓度的 POTAS 或 PDTAS 时的失重质量。从外观上看,不同温度条件下 POTAS 浸泡过的铜片表面光滑,均无局部腐蚀现象;而 PDTAS 浸泡过的铜片表面中心均出现局部腐蚀现象。失重法所得数据如表 4 所示。从表 4 数据可以看出,未加与分别加有 POTAS 或 PDTAS 时,铜片的失重均随温度的升高而增大,但加入 POTAS 或 PDTAS 时比未加这两种化合物的失重增大得慢。这说明两种化合物在所研究的温度范围内对铜有较好的缓蚀效果。

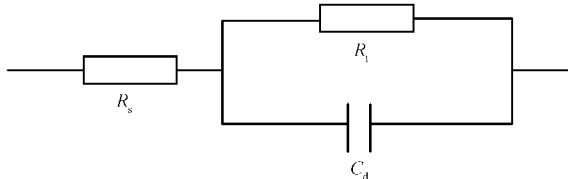


图 4 金属溶液界面等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit for the metal alkaline interface

R_t : charge-transfer resistance; R_s : solution resistance; C_d : capacitance of the electrical double layers

表 3 两种化合物最佳浓度的交流阻抗参数

Table 3 AC impedance parameters with optimum concentration of compounds

Compound	R/Ω	$C/\mu\text{F}$	$\eta(\%)$
blank	4724.6	693.29	-
POTAS	29344	65.78	83.9
PDTAS	21526	70.92	78.0

腐蚀过程可以认为是一种 Arrhenius 反应过程[16],其反应速率公式如下:

$$v_{\text{corr}} = A \exp(-E_a/RT) \quad (4)$$

式中 E_a 为腐蚀反应活化能, v_{corr} 为腐蚀速率, A 为指前因子。将等式两边同时取对数,并以 $1/T$ 为横坐标,以 $\ln v_{\text{corr}}$ 为纵坐标作图(见图 5)。由图 5 中直线的斜率可以得出铜在 5%NaHCO₃ 水溶液中腐蚀反应的活化能 $E_a=14.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。加入 POTAS 或 PDTAS 后铜的腐蚀反应活化能 E_a 分别为 25.0 和 20.0 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。由活化能可以看出,在 5%NaHCO₃ 水溶液中加入 POTAS 或 PDTAS 后,铜的腐蚀反应活化能比未加这两种化合物时显著增加,此时铜的腐蚀反应需要克服较高的能量障碍,从而有效地抑制了铜的腐蚀反应的进行,起到了较好的缓蚀效果。从表 4 也可以看出,随着温度的升高,两种化合物对铜的缓蚀效率均降低。

2.2.5 两种化合物在铜表面的吸附行为

利用下式可以计算 POTAS 和 PDTAS 两种化合物的相对覆盖度:

$$\theta = 1 - C/C^0 \quad (5)$$

C^0 和 C 分别为铜在 5%NaHCO₃ 溶液中未加和加有 POTAS 或 PDTAS 时的界面电容。以缓蚀效率 η 对相对覆盖度 θ 作图(见图 6),可得一直线,说明 POTAS 和 PDTAS 的缓蚀机理为覆盖效应。

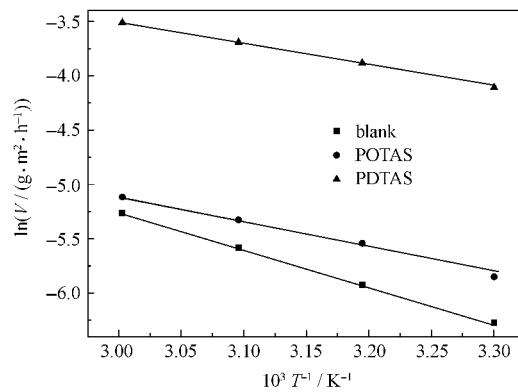


图 5 最佳浓度两种化合物的 Arrhenius 曲线

Fig.5 Arrhenius diagrams with optimum concentration of compounds

表 4 不同温度下铜在 5%NaHCO₃ 溶液和分别加入最佳浓度两种化合物时的失重Table 4 Result of mass loss for copper in 5%NaHCO₃ solution without and with the optimum concentration of compounds obtained at different temperatures

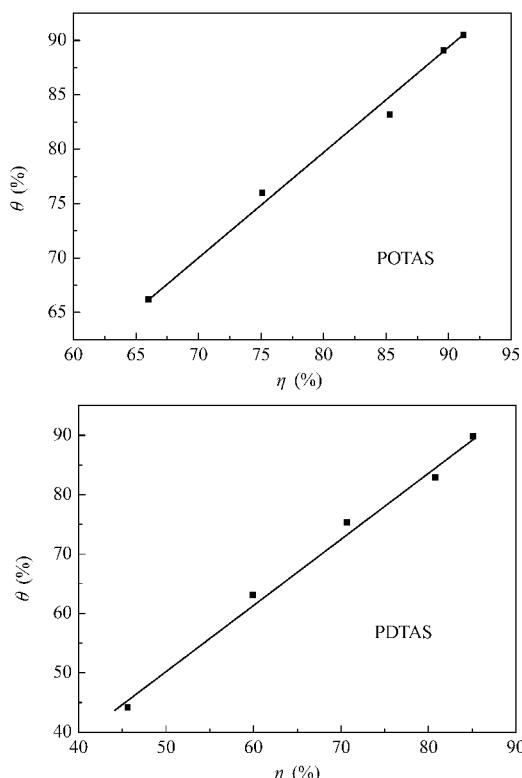
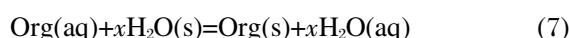
T/°C		mass loss(mg)	$\eta(\%)$	T/°C		mass loss(mg)	$\eta(\%)$
30	blank	33.1	-	40	blank	37.5	-
	POTAS	4.6	86.1		POTAS	6.5	82.7
	PDTAS	5.8	82.5		PDTAS	7.9	78.9
50	blank	44.3	-	60	blank	55.2	-
	POTAS	9.0	79.7		POTAS	11.5	78.1
	PDTAS	9.8	77.9		PDTAS	12.1	76.8

缓蚀剂在金属表面的吸附可以是单层吸附, 也可以是多层吸附。如果是单层吸附, 则覆盖度 θ 可用下式^[17]表示:

$$\theta = \eta = (I_{\text{corr}}^0 - I_{\text{corr}})/I_{\text{corr}}^0 \times 100\% \quad (6)$$

将实验所测的 POTAS 和 PDTAS 的缓蚀效率 η 分别对浓度 c 作图(见图 7)。由图 7 可见, 随着缓蚀剂浓度的增大, 缓蚀效率也随之增大, 覆盖度也增大, 最后趋近于 1。由图 6 和图 7 说明两种化合物在铜表面的吸附为单层吸附。

有机化合物在金属表面的吸附作用一般被认为是水中的有机物分子与吸附在金属表面的水分子 H₂O(s)之间通过取代吸附 Org(aq)方式进行的^[18], 可假定为:

图 6 η - θ 关系图Fig.6 Relationship between η and θ 

若正逆吸附速率常数分别为 k_1 和 k_{-1} , 当达到吸附平衡时, 吸附动力学方程式可表示为

$$k_1 c (1-\theta)^x = k_{-1} \theta, \quad \frac{k_1}{k_{-1}} = K_a = \frac{\theta}{c (1-\theta)^x} \quad (8)$$

式中 x 是一个有机物分子取代吸附金属表面水分子的个数, K_a 为吸附平衡常数。

如果铜表面是均匀的, 缓蚀剂 POTAS 或 PDTAS 在铜表面的吸附为理想单层吸附, 即相邻的被吸附缓蚀剂分子之间没有相互作用力, 则缓蚀剂在铜表面的吸附平衡常数 K_a 与理想摩尔吸附自由能 ΔG_m 之间应满足下面的关系:

$$K_a = \frac{1}{55.5} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{RT}\right)$$

$$\text{即 } \frac{\theta}{c (1-\theta)^x} = \frac{1}{55.5} \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{RT}\right) \quad (9)$$

式中 55.5 为 1 L 溶液中水的物质的量。

假设 $x=1$, 将 POTAS 和 PDTAS 不同浓度时对应的 θ 值代入式(9)求 K_a 。计算结果表明, K_a 值并非常数, 而是随覆盖度 θ 改变而改变, 说明碱性溶液中, 缓蚀剂在铜表面吸附时可能 $x \neq 1$, 或者摩尔吸附自由能 ΔG_m 也是吸附覆盖度 θ 的函数, 即

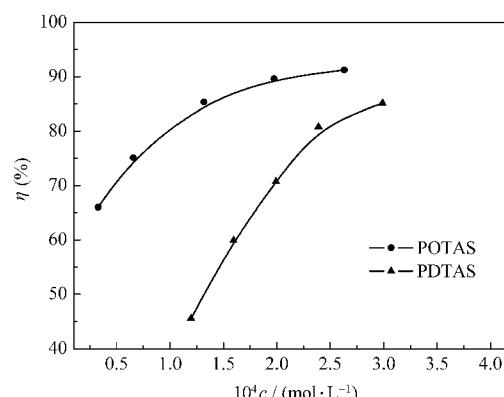


图 7 缓蚀效率随浓度的变化曲线

Fig.7 Curves of η vs c

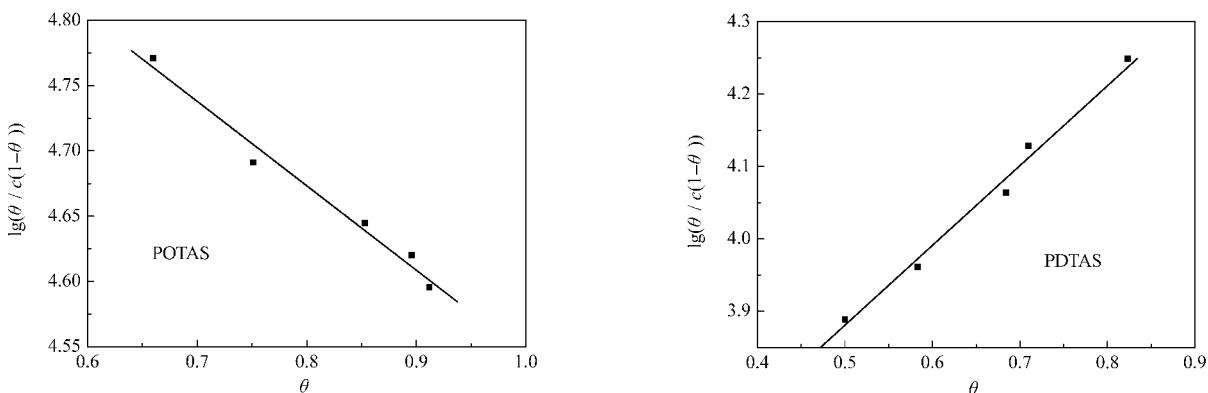


图 8 $\lg(\theta/(1-\theta))$ - θ 曲线
Fig.8 Curves of $\lg(\theta/(1-\theta))$ vs θ

$$\Delta G_m(\theta) = f(\theta)$$

假设吸附自由能与吸附覆盖度 θ 之间的关系满足下式:

$$\Delta G_m(\theta) = \Delta G_m(0) + \alpha\theta \quad (10)$$

式中 α 是常量, 表征吸附在铜表面的缓蚀剂分子之间相互作用力对吸附自由能的影响, $\Delta G_m(0)$ 为吸附在铜表面的缓蚀剂分子之间没有相互作用力条件下的摩尔吸附吉布斯函数.

用式(10)中的 $\Delta G_m(\theta)$ 代替式(9)中的 ΔG_m 得:

$$\frac{\theta}{c(1-\theta)^x} = \frac{1}{55.5} \exp\left(-\frac{\Delta G_m(0) - \alpha\theta}{RT}\right) \quad (11)$$

将(11)式两边取对数得:

$$\lg\left[\frac{\theta}{c(1-\theta)^x}\right] = \lg\left(\frac{1}{55.5}\right) - \frac{\Delta G_m(0)}{2.303RT} - \frac{\alpha\theta}{2.303RT} \quad (12)$$

若缓蚀剂 POTAS 或 PDTAS 在铜表面吸附时是一个缓蚀剂分子取代一个水分子, 既 $x=1$, 则以 $\lg(\theta/c(1-\theta))$ 对 θ 作图应为一直线. 实验表明, 以 $\lg(\theta/c(1-\theta))$ 对 θ 作图(见图 8)确实为一直线, 说明缓蚀剂 POTAS 或 PDTAS 在铜表面吸附是一个缓蚀剂分子取代一个水分子, 直线的斜率分别为 -0.64354 和 1.13389, 截距分别为 5.1885, 3.30981, 由此可求出 $\Delta G_m(0)$ (POTAS)=-39.557 kJ·mol⁻¹, $\Delta G_m(0)$ (PDTAS)=-28.838 kJ·mol⁻¹, α (POTAS)=3671 J·mol⁻¹, α (PDTAS)=-6469 J·mol⁻¹. 从计算结果可知, 两种化合物 ΔG_m 值的大小顺序为 $0 > \Delta G_m(0)$ (PDTAS) > $\Delta G_m(0)$ (POTAS), 说明等温等压下, 两种化合物可以自发地吸附在铜表面, 并且 POTAS 在铜表面吸附的自发性优于 PDTAS, 这与失重法结果一致. 两种物质的 $|\Delta G_m(0)|$ 均小于 40 kJ·mol⁻¹, 说明两种物质在铜表面的吸附均为物理吸附^[17,19]. α (POTAS)>0, 说明吸附时 POTAS 存在着分子间斥力, 而 α (PDTAS)<0, 说明吸附时 PDTAS 存在着分子间引力.

由此可得 25 °C 时两种缓蚀剂在铜表面吸附等温式为

$$\text{POTAS: } \frac{\theta}{c(1-\theta)} = \frac{1}{55.5} \exp\left(\frac{39557 - 3671\theta}{RT}\right) \quad (13)$$

$$\text{PDTAS: } \frac{\theta}{c(1-\theta)} = \frac{1}{55.5} \exp\left(\frac{28838 + 6469\theta}{RT}\right) \quad (14)$$

化合物的缓蚀性能是多种因素共同作用的结果. 当其它条件相同时, 化合物的结构和性质对其缓蚀性能有重要影响. 由于吡唑啉酮类的化合物中有多个 N 原子, 这些 N 原子的电子对可以与铜原子形成配位键而强烈地吸附在铜表面, 从而表现出较好的缓蚀性能^[20]. 两种物质结构相似, 但 PDTAS 比 POTAS 空间位阻大, 阻碍了其在铜表面的吸附, 因此缓蚀性能比 POTAS 略差.

3 结 论

(1) POTAS 和 PDTAS 两种化合物对铜在 5% NaHCO₃ 水溶液中均有较好的缓蚀性能, 等温等压下能自发地吸附在铜表面.

(2) 缓蚀效率大小顺序为 POTAS>PDTAS. 在所研究的温度范围内为 30–60 °C, 两种化合物的缓蚀效率随温度的升高而降低, POTAS 和 PDTAS 属于混合型缓蚀剂.

(3) 两种化合物在 5% NaHCO₃ 水溶液中与铜表面的吸附均为单层吸附, 属于物理吸附.

References

- He, J.; Yu, P.; Luo, Y. B. *Mater. Prot.*, 2006, 39(4): 42 [何俊, 于萍, 罗运柏. 材料保护, 2006, 39(4): 42]
- Li, Z. T.; Dong, Q. Y.; Yang, C. G. *Industrial Water Treatment*, 2005, 25(1): 18 [李自托, 董泉玉, 杨从贵. 工业水处理, 2005, 25(1): 18]
- Huvnh, N.; Bottle, S. E.; Notoya, T.; Schweinsberg, D. P.

- Corrosion Science*, **2000**, *42*(6): 259
- 4 Huvnh, N.; Bottle, S. E.; Notoya, T.; Trueman, A.; Hinton, B.; Schweinsberg, D. P. *Corrosion Science*, **2002**, *44*(11): 1257
- 5 Zhu, L. Q.; Liu, R. Q.; Wang, J. D.; Wang, Y. P. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, **2006**, *26*(6): 336 [朱丽琴, 刘瑞泉, 王吉德, 王亚平. 中国腐蚀与防护学报, **2006**, *26*(6): 336]
- 6 Zhang, D. Q. *Journal of Applied Electrochemistry*, **2003**, *33*(5): 361
- 7 Zhang, D. Q.; Gao, L. X.; Zhou, G. D.; Gong, Q.; Lu, Z. *Applied Chem.*, **2002**, *19*(6): 536 [张大全, 高立新, 周国定, 龚琼, 陆柱. 应用化学, **2002**, *19*(6): 536]
- 8 Shi, Z. L.; Pang, Z. Z. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, **2002**, *29*(2): 51 [史志龙, 庞正智. 北京化工大学学报, **2002**, *29*(2): 51]
- 9 Liu, C. Y.; Zhao, Q. Q.; Li, J. *Chemical Reagents*, **2001**, *23*(6): 344 [柳翠英, 赵全芹, 李娟. 化学试剂, **2001**, *23*(6): 344]
- 10 Liang, K.; Jia, D. Z.; Pu, W. M.; Tang, X. C. *Acta Chim. Sin.*, **2001**, *59*(1): 70 [梁凯, 贾殿增, 卜为名, 唐新村. 化学学报, **2001**, *59*(1): 70]
- 11 Zhou, L.; Wang, L. S.; Wang, H. X.; Yang, C. *Chemistry Online*, **2006**, (5): 356 [周琳, 王麟生, 王海霞, 杨翠. 化学通报, **2006**, (5): 356]
- 12 Du, H. Y.; Lu, M. X.; Wu, Y. S.; Wu, W. M. *Acta Metal Sin.*, **2006**, *42*(5): 533 [杜海燕, 路民旭, 吴荫顺, 吴伟明. 金属学报, **2006**, *42*(5): 533]
- 13 Zhang, T. S. *Inhibitor*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 190 [张天生. 缓蚀剂. 北京: 化学工业出版社, 2001: 190]
- 14 Zhao, Y.; Xiong, R. C.; Wei, G. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, **2007**, *34*(2): 156 [赵昀, 熊蓉春, 魏刚. 北京化工大学学报, **2007**, *34*(2): 156]
- 15 Liu, R. Q.; Liu, H. Y.; Xiang, L.; Zhang, X. G. *Chemical Research and Application*, **2002**, *14*(5): 575 [刘瑞泉, 刘红英, 向龙, 张校刚. 化学研究与应用, **2002**, *14*(5): 575]
- 16 Wang, H. L.; Fan, H. B.; Zheng, J. S. *Materials Chemistry and Physics*, **2003**, *78*: 425
- 17 Li, Y.; Cao, C. N.; Song, G. L.; Lin, H. C. *Corros. Sci. Pro. Tech.*, **1994**, *6*(3): 240 [李瑛, 曹楚南, 宋光铃, 林海潮. 腐蚀科学与防护技术, **1994**, *6*(3): 240]
- 18 Zhang, J.; Chen, D. H.; Du, G. J.; Tang, G. H. *Chemical Research and Application*, **2000**, *12*(1): 51 [张健, 陈栋华, 杜光军, 唐耿辉. 化学研究与应用, **2000**, *12*(1): 51]
- 19 Fu, X. C.; Shen, W. X.; Yao, T. Y. *Physical chemistry*, Beijing: Higher Education Press, 1990: 949–957 [傅献彩, 沈文霞, 姚天扬. 物理化学. 北京: 高等教育出版社, 1990: 949–957]
- 20 Wang, X. Q.; Liu, R. Q.; Zhu, L. Q.; Gong, J. W. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **2007**, *23*(1): 21 [王献群, 刘瑞泉, 朱丽琴, 宫建伟. 物理化学学报, **2007**, *23*(1): 21]