

咪唑类化合物自组装膜对 316 不锈钢的缓蚀作用

贾明子¹, 张哲^{1,2,3}, 阮乐¹, 吴凤美¹

(1. 桂林理工大学 化学与生物工程学院, 桂林 541004;

2. 广西建筑新能源与节能重点实验室, 桂林 541004;

3. 广西高校应用化学新技术重点实验室, 桂林 541004)

[摘 要] 通过电化学阻抗谱、极化曲线和量子化学方法,研究了在 0.5 mol/L 的硫酸溶液中,咪唑、十二烷基咪唑、苄基咪唑、苯并咪唑四种缓蚀剂自组装膜对 316 不锈钢的缓蚀性能。研究表明:四种缓蚀剂均为阴极型缓蚀剂,对不锈钢具有较好的缓蚀作用,在 1×10^{-3} mol/L 的浓度下,随着组装时间的延长,自组装膜对不锈钢的缓蚀效率也相应增强,它们的缓蚀能力主要由最高占据轨道能 E_{HOMO} 的大小决定,缓蚀能力由大到小依次为苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑。

[关键词] 咪唑类化合物; 自组装膜; 不锈钢; 交流阻抗谱; 极化曲线

[中图分类号] TG174.42

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)03-0023-05

Corrosion Inhibition Action of Imidazole Derivatives Self-assembled Films for 316 Stainless Steel

JIA Ming-zi¹, ZHANG Zhe^{1,2,3}, RUAN Le¹, WU Feng-mei¹

(1. College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory on New Building Energy and Energy Conservation of Guangxi, Guilin 541004, China;

3. Key Laboratory on New Technique of Applied Chemistry of Universities of Guangxi, Guilin 541004, China)

[Abstract] The corrosion inhibition action of imidazole, 1-dodecylimidazole, 1-benzylimidazole, benzimidazole self-assembled films for 316 stainless steel in 0.5 mol/L H_2SO_4 solution was investigated by electrochemical impedance spectroscopy, polarization curves and quantum chemical calculations. Results showed that four inhibitors were all cathodic inhibitors and performed pretty inhibiting efficiency for 316 stainless steel. As the concentration of inhibitors were 1×10^{-3} mol/L, the longer the assembled time, the better the effect of inhibition. The inhibition efficiency of the four inhibitors was up to the value of E_{HOMO} . The inhibition efficiency of the four inhibitors decreased as follows: benzimidazole>1-dodecylimidazole>1-benzylimidazole>imidazole.

[Key words] imidazole derivatives; self-assembled films; stainless steel; EIS; polarization curves

金属腐蚀会造成巨大的经济损失,传统的防腐蚀措施,如涂层保护、电镀等方法,对环境的污染较大^[1]。自组装技术作为一种新型的防腐蚀技术,因具有工艺简单、自组装膜堆积紧密且结构稳定等特点,受到越来越多的关注。自组装膜是指有机活性分子在溶液或气相环境中自发地吸附在固体基底表面,从而形成的有序、紧密且具有疏水性的单分子膜^[2]。日本 Aramaki 小组针对自组装膜进行了大量的研究工作,先后研究了其对铜、铁的保护^[3-4];国内的张哲等采用自组装技术,在铁电极表面制备了咪唑及其衍生物的自组装

膜^[5]。选择环境友好的自组装材料既可以对金属起到保护作用,又可以避免缓蚀剂大量使用对环境造成的破坏。咪唑及其衍生物是一类低毒性、高热稳定性的缓蚀剂,且能以较强的作用力吸附在金属表面,因而受到国内外众多研究者的青睐^[6-10]。咪唑分子为五元环,含有两个 N 原子,咪唑环的共轭 π 键可以与金属原子上的空轨道键合,使得咪唑分子吸附在金属表面形成自组装膜,从而对金属起到保护作用。

笔者分别将四种咪唑类有机物分子组装在 316 不锈钢上制备自组装膜,研究了咪唑及其衍生物自组装

[收稿日期] 2012-12-26; **[修回日期]** 2013-01-15

[基金项目] 桂林理工大学科研启动经费(002401003285);广西建筑新能源与节能重点实验室项目(桂科能 11031212)

[作者简介] 贾明子(1987—),女,满族,黑龙江人,硕士生,主攻自组装缓蚀技术。

[通信作者] 张哲(1978—),女,辽宁人,博士,副教授,主要研究方向为金属腐蚀与防护。

膜对 316 不锈钢的缓蚀性能,分析了缓蚀机理,并对咪唑类化合物分子进行优化和计算。

1 实验

1.1 电极的制备

实验中所用的工作电极均为 316 不锈钢电极,由东星不锈钢材料有限公司生产。电极直径为 3 mm,其成分(以质量分数计)如下:Fe 61.355% ~ 68.855%, Ni 10.0% ~ 14.0%, Cr 16.0% ~ 18.5%, Mo 2.0% ~ 3.0%, Mn \leq 2.00%, C \leq 0.08%, Si \leq 1.00%, P \leq 0.035%, S \leq 0.03%。

将不锈钢的一端放入玻璃管内,另一端用环氧树脂密封,只暴露出端面作为工作界面与电解质溶液接触^[11]。先依次用 600#, 1200#, 1400# 和 2500# 金相砂纸将暴露端面打磨至镜面光亮,迅速用蒸馏水清洗干净,再将电极放入超声清洗器中,用无水乙醇清洗 5 min,取出并吹干后,迅速浸入 1×10^{-3} mol/L 的咪唑类化合物(咪唑、十二烷基咪唑、苜基咪唑或苯并咪唑)的乙醇溶液中组装一定时间,即得咪唑类化合物自组装膜覆盖的不锈钢电极。

1.2 电化学测试

电极的电化学性能通过测定交流阻抗和极化曲线

进行表征。测试所用的电化学工作站为北京华科普天科技有限公司的 CHI860D 型工作站,采用三电极体系:覆盖自组装膜的不锈钢电极作为工作电极;1.8 mm \times 1.0 mm 的铂片对电极为辅助电极,两片铂电极用导线连接;饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。将组装后的电极放入 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液中,静置 15 min,确保开路电位达到一个比较稳定的值。交流阻抗谱测试的频率范围为 0.01 ~ 100 000 Hz,振幅为 0.005 V。极化曲线测试电位范围为 $E_{cor} \pm 300$ mV,扫描速率为 0.001 V/s,从负向往正向扫描。为作对比,依照相同方法测定了空白不锈钢电极(未组装)的交流阻抗图和极化曲线。

2 结果与讨论

2.1 交流阻抗谱分析

图 1 是分别组装 2, 6, 12, 14, 20 h 的不锈钢电极的交流阻抗图。从图 1 可以看出,组装了缓蚀剂分子的电极的容抗弧直径要远远大于空白试样的容抗弧直径,且随着组装时间的延长,容抗弧的直径增大,即电荷传递电阻越大。这表明组装时间越长,吸附在不锈钢电极表面的咪唑类化合物分子越多,从而对电极的保护效果越好。

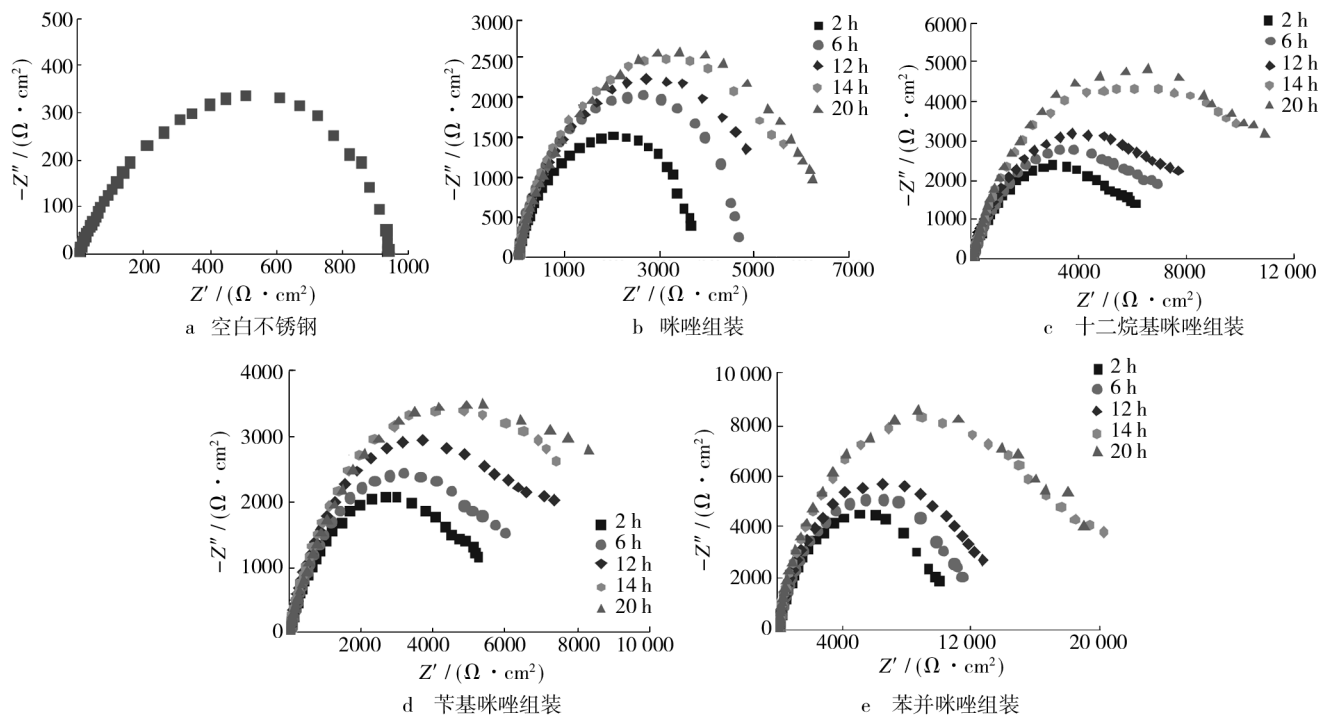


图 1 不锈钢电极的交流阻抗图

Fig. 1 Nyquist impedance spectra of stainless steel electrodes

为了使数据结果更准确,用 ZsimpWin 软件对测得的阻抗谱进行拟合,图 2 是空白不锈钢电极的拟合阻

抗图,图 3 是拟合所用的等效电路。等效电路中, R_s 为溶液电阻, R_{ct} 为电荷传递电阻。为了使拟合结果更

准确,通常用常相位角元件(Q)代替理想电容^[12], Q 与导纳 Y 、阻抗 Z 之间的关系可以分别表示为(1)式和(2)式,式中的 Y_0 为常相位角元件的一个参数, ω 为角频率, n 为无量纲指数^[13]。 n 值通常在 0~1 之间,电极表面处理得越平滑, n 越接近 1。

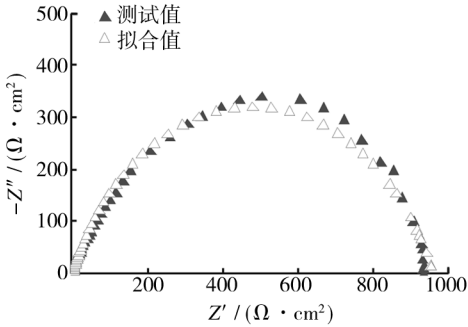


图 2 拟合后的空白不锈钢电极阻抗图
Fig. 2 Nyquist impedance spectra of bare stainless steel electrodes after fitted

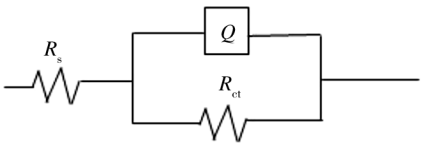


图 3 拟合所用的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit for fitting

$$Y_Q = Y_0(j\omega)^n \tag{1}$$

$$Z_Q = \frac{1}{Y_0}(j\omega)^{-n} \tag{2}$$

组装了缓蚀剂膜的电极的阻抗谱采用相同的方法进行拟合,缓蚀效率 η 则按(3)式算得,式中的 R_{ct}' 和 R_{ct} 分别表示空白不锈钢电极和表面覆盖缓蚀剂自组装膜的不锈钢电极的电荷传递电阻。拟合所得的参数及算得的缓蚀效率见表 1。

$$\eta = (R_{ct} - R_{ct}') / R_{ct} \times 100\% \tag{3}$$

由表 1 可知,覆盖有自组装膜的不锈钢电极的 R_{ct} 比空白不锈钢电极的 R_{ct}' 大得多,这表明咪唑类化合物自组装膜有效地抑制了不锈钢的腐蚀过程。组装时间越长,缓蚀效率越大,但当组装时间延长至 14 h 以后, R_{ct} 增加的趋势减缓。这可能是由于随着组装时间的延长,不锈钢表面自组装膜的致密性、稳定性逐渐增强,最后达到了吸附脱附的动态平衡^[14]。

在不同咪唑类化合物溶液中组装相同时间,所得自组装膜的缓蚀效率不同,最大缓蚀效率分别为:咪唑 85.9%,十二烷基咪唑 93.1%,苄基咪唑 90.5%,苯并咪唑 95.5%。相应地,缓蚀能力由大到依次为:苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑。咪唑分子可能是以五元环平面吸附的形式在不锈钢表面上形成自组装膜的。十二烷基咪唑的烷基链可以使分子在不锈钢

表 1 图 1 实验数据的拟合结果
Tab. 1 Fitting results of data

不锈钢电极	组装时间/h	Q		$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$
		$Y_0 \times 10^{-5}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	n		
空白	0	8.225	0.751	939	
	2	1.436	0.833	3839	75.5
	6	1.997	0.899	4762	80.3
	12	3.377	0.834	5799	83.8
	14	2.655	0.850	6400	85.3
咪唑	20	2.626	0.821	6643	85.9
	2	4.566	0.797	6642	85.9
	6	4.483	0.785	7995	88.3
	12	3.574	0.811	8835	89.4
	14	4.259	0.780	13 200	92.9
十二烷基咪唑	20	2.319	0.792	13 610	93.1
	2	4.698	0.783	5899	84.1
	6	4.389	0.797	6760	86.1
	12	4.656	0.793	8434	88.9
	14	4.060	0.809	9481	90.1
苄基咪唑	20	4.438	0.762	9892	90.5
	2	1.766	0.866	10 950	91.4
	6	1.571	0.881	12 290	92.4
	12	1.652	0.868	14 020	93.3
	14	1.268	0.872	20 570	95.4
苯并咪唑	20	1.433	0.879	20 840	95.5

表面的覆盖度增加,起到疏水作用,隔绝金属和腐蚀介质,增强对金属的保护作用。苯并咪唑和苄基咪唑的分子与咪唑分子相比,增加了一个苯环,苯环上的共轭 π 键可以使吸附增强。苯并咪唑是苯环和咪唑环共用一个 $C=C$ 双键,形成一个五元环与六元环并列的双环结构;苄基咪唑是苄基取代咪唑环上的一个 H ,形成一个苯甲基与咪唑环衔接的哑铃型结构。当组装时间为 20 h 时,苯并咪唑的缓蚀效率为 95.5%,而苄基咪唑的缓蚀效率为 90.5%,原因可能是苄基咪唑的空间位阻效应使金属表面吸附的分子数目减少,覆盖度减小。

2.2 极化曲线分析

为了进一步研究咪唑类化合物自组装膜对 316 不锈钢电极的缓蚀性能,进行了电化学极化曲线测试,图 4 为测试结果。

极化曲线的腐蚀电流密度由外推法获得,缓蚀效率按(4)式算得,其中的 J_{corr}' 和 J_{corr} 分别表示空白不锈钢电极和表面覆盖有自组装膜的不锈钢电极的腐蚀电流密度。相关参数以及缓蚀效率见表 2。

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

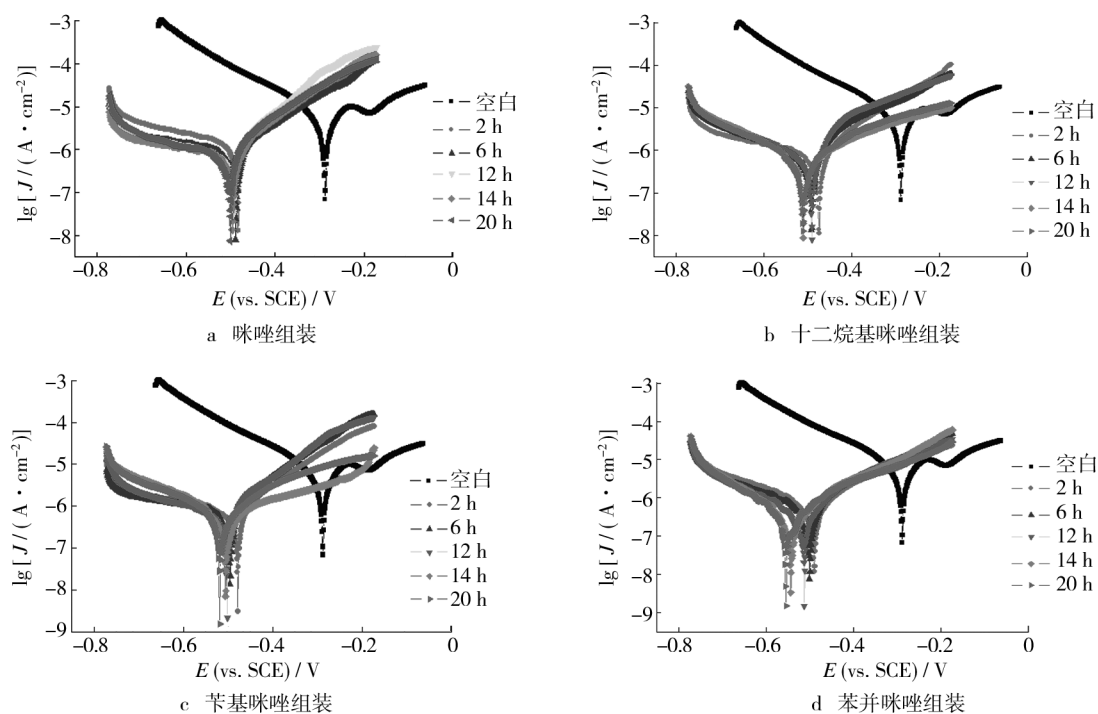


图4 不锈钢电极的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of stainless steel electrodes

表2 极化曲线参数及缓蚀效率的计算结果

Tab.2 Element values of polarization curves as well as values of inhibition efficiency calculated

不锈钢电极	组装时间/ h	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\eta/\%$
空白	0	-0.288	9.912	
咪唑组装	2	-0.483	2.407	75.7
	6	-0.488	1.775	82.1
	12	-0.494	1.519	84.7
	14	-0.496	1.382	86.1
	20	-0.501	1.343	86.5
十二烷基咪唑组装	2	-0.474	1.439	85.5
	6	-0.492	1.121	88.7
	12	-0.491	1.023	89.7
	14	-0.510	0.718	92.8
	20	-0.511	0.703	92.9
苄基咪唑组装	2	-0.478	1.484	85.0
	6	-0.496	1.382	86.1
	12	-0.502	1.221	87.7
	14	-0.506	0.972	90.2
	20	-0.519	0.926	90.7
苯并咪唑组装	2	-0.489	0.9021	90.9
	6	-0.500	0.7520	92.4
	12	-0.512	0.5071	94.9
	14	-0.543	0.3039	97.0
	20	-0.554	0.2831	97.1

由表2可知,随着组装时间的延长,腐蚀电流密度逐渐减小,表明自组装膜对不锈钢腐蚀反应的抑制作

用逐渐增强,即自组装膜的缓蚀效率逐渐增大。当组装时间超过14 h以后,缓蚀效率的增幅开始减缓。此外,相对于空白不锈钢电极,覆盖有自组装膜的不锈钢电极的腐蚀电位明显负移,表明咪唑类化合物对不锈钢阴极过程的抑制作用要强于对其阳极过程的抑制作用,说明这四种咪唑类化合物均为阴极型缓蚀剂。对比组装相同时间下的缓蚀效率可知,四种缓蚀剂的缓蚀能力由大到小依次为:苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑,这与阻抗谱的分析结果一致。

2.3 量子化学计算

根据前线轨道理论,分子提供电子和接受电子的能力分别与最高占据轨道能 E_{HOMO} 和最低非占据轨道能 E_{LUMO} 有关。 E_{HOMO} 越高,分子越容易提供电子; E_{LUMO} 越低,分子越容易接受电子^[15-16]。而分子与金属的配位能力与能量间隙 ΔE 有关, ΔE 越小,分子越容易与金属生成配位键^[17]。所以,缓蚀剂分子的缓蚀性能主要由 E_{HOMO} 和 ΔE 决定。为了研究缓蚀剂分子对不锈钢的缓蚀机理,利用量子化学中的密度泛函理论(DFT),在 B3LYP/6-31G* 基组水平下对四种咪唑类化合物分子进行优化和计算,得到了表3所示的前线轨道能量。

由表3可知,四种咪唑类化合物分子均具有较高的 E_{HOMO} 能量和较低的能量间隙 ΔE ,说明四种缓蚀剂都易于在金属表面通过成键反应形成自组装膜。四种咪唑类化合物的 E_{HOMO} 由大到小依次为苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑,表明四种缓蚀剂的缓蚀

表 3 咪唑类化合物的前线轨道能量

Tab.3 The frontier molecule orbital energies of inhibitors

缓蚀剂	$E_{\text{HOMO}} /$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$E_{\text{LUMO}} /$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$\Delta E /$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)
咪唑	-0.274 05	0.016 47	0.290 52
十二烷基咪唑	-0.224 09	0.018 50	0.242 59
苄基咪唑	-0.248 50	-0.006 01	0.242 49
苯并咪唑	-0.217 87	-0.022 39	0.195 48

能力由高到低依次为苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑,这与电化学研究结果一致。但 ΔE 的排列顺序与此结论有所出入,表明这四种缓蚀剂分子的缓蚀能力由 E_{HOMO} 起主导作用。

图 5 为四种咪唑类化合物在 B3LYP/6-31G* 基组水平下的前线轨道密度分布。通常认为,HOMO 轨道中的基团可以向空轨道提供电子,LUMO 轨道中的基团可以接受电子。由图 5 可以看出,咪唑、十二烷基咪唑和苄基咪唑的 HOMO 主要分布在咪唑环上,苯并咪唑的 HOMO 主要分布在咪唑环和苯环上;咪唑和十二烷基咪唑的 LUMO 主要分布在咪唑环上,苄基咪唑的 LUMO 主要集中在苯环上,苯并咪唑的 LUMO 主要分布在咪唑环和苯环上。这表明咪唑和十二烷基咪唑提供电子和接受电子的基团主要为咪唑环;苄基咪唑提供电子的基团主要为咪唑环,接受电子的基团为苯环;苯并咪唑提供电子和接受电子的基团为咪唑环、苯环。Fe 的最外层电子排布为 $3d^6 4s^2$,其空 d 轨道可与咪唑

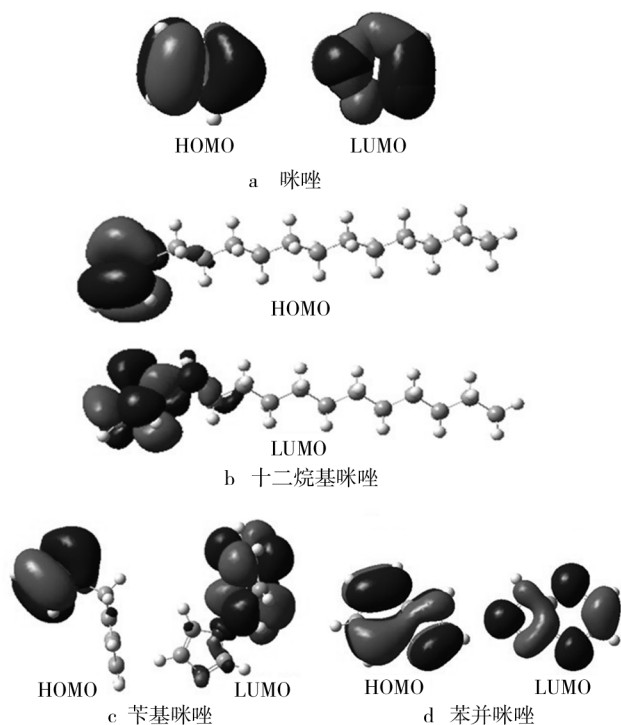


图 5 咪唑类化合物的前线轨道密度分布
Fig.5 The frontier molecule orbital density distributions of imidazole derivatives

类化合物分子的 HOMO 轨道形成配位键,从而使咪唑类化合物分子以化学吸附的方式在不锈钢表面形成自组装膜,进而阻止腐蚀介质对不锈钢的腐蚀。

3 结论

1) 在 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 溶液中,咪唑、十二烷基咪唑、苄基咪唑和苯并咪唑四种缓蚀剂分子的自组装膜对 316 不锈钢均有较好的缓蚀作用,且缓蚀能力随着组装时间的延长而增强,但当组装时间超过 14 h 后,缓蚀效率增长缓慢,逐渐趋于稳定。四种缓蚀剂的缓蚀能力由大到小依次为:苯并咪唑>十二烷基咪唑>苄基咪唑>咪唑。

2) 极化曲线研究结果表明,咪唑、十二烷基咪唑、苄基咪唑及苯并咪唑均为阴极型缓蚀剂。

3) 量子化学计算表明,四种缓蚀剂的缓蚀能力主要由 E_{HOMO} 决定,它们在不锈钢表面以供电子方式与 Fe 形成配位键,从而通过化学吸附的形式在不锈钢表面形成自组装膜,进而阻止不锈钢被腐蚀介质腐蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 周学杰,张三平,郑鹏华,等. 底涂层在水环境中防腐性能研究[J]. 装备环境工程,2008,5(4):1—6.
- [2] ULMAN A. Formation and Structure of Self-assembled Monolayers[J]. Chem Rev,1996,96(4):1533—1554.
- [3] ITOH M,NISHIHARA H,ARAMKI K. Preparation and Evaluation of Two-dimensional Polymer Films by Chemical Modification of an Alkanethiol Self-assembled Monolayer for Protection of Copper Against Corrosion[J]. J Electrochem Soc, 1995,142(11):3696—3704.
- [4] NOZAWA K,ARAMAKI K. One and Two-dimensional Polymer Films of Modified Alkanethiol Monolayer for Preventing Iron from Corrosion[J]. Corros Sci,1999,41(1):57—73.
- [5] ZHANG Z,CHEN S H. A Study of the Inhibition of Iron Corrosion by Imidazole and Its Derivatives Self-assembled Films [J]. Corros Sci,2009,51(2):291—300.
- [6] ZARGUIL A,BOUKHRIS S,EFRIT M L E,et al. Easy Access to Triazoles, Triazolopyrimidines, Benzimidazoles and Imidazoles from Imidates [J]. Tetrahedron Lett, 2008, 49 (41):5883—5886.
- [7] KHALED K F. The Inhibition of Benzimidazole Derivatives on Corrosion of Iron in 1M HCl Solution[J]. Electrochim Acta, 2003,48(17):2493—2503.
- [8] LEE W J. Inhibiting Effects of Imidazole on Copper Corrosion in 1M HNO_3 [J]. Mater Sci Eng A,2003,348(1/2):217—226.

(下转第 41 页)

- [7] 刘洪涛,邓长城. 钛合金电镀在航空航天工业中应用的可行性研究[J]. 功能材料,2010,41(2):249—252.
- [8] 陈长军,马红岩,张敏,等. 钛合金的表面渗氧强化研究进展[J]. 热加工工艺,2007,36(14):63—65.
- [9] BLOYEE A. Wear Protection of Titanium Alloy[C]//Surface Performance of Titanium. Cincinnati: The Minerals, Metals & Materials Society,1996:155—169.
- [10] ALONSO F, ARIZAGA A, QUANTON S, et al. Mechanical Properties and Structure of Ti-6Al-4V Alloy Implanted with Different Lightings [J]. Surface and Coatings Technology, 1995,75(2):986—992.
- [11] LOINAZ A, RINNER M, ALONSO F, et al. Effects of Plasma Immersion Implantation of Oxygen on Mechanical Properties and Microstructure of Ti6Al4V [J]. Surface and Coatings Technology, 1998,103(1):262—267.
- [12] 郑传林,徐重,谢锡善,等. 等离子渗氧研究[J]. 金属热处理,2002,27(3):35—37.
- [13] BELL T, DONG H. Surface Engineering of Titanium—the Metal for the 21st Century [C]//Proceedings of 12th IFHT-SE Congress. Australia: Melbourne, 2000:1—10.
- [14] 刘勇,杨德庄,何世禹,等. Ti6Al4V 合金表面的热氧化/真空扩散处理[J]. 中国有色金属学报,2003,13(1):177—180.
- [15] 刘勇,杨德庄,何世禹,等. 钛合金表面的热氧化层工艺及性能[J]. 机械工程材料,2003,27(9):27—29.
- [16] 张春艳,伍光凤,田中青. TC4 合金热氧化行为的研究[J]. 热加工工艺,2007,36(16):36—38.
- [17] 白书欣. 真空渗氮初探[J]. 金属热处理,1995(11):17—19.
- [18] DONG H, LI X Y. Oxygen Boost Diffusion for the Deep-case Hardening of Titanium Alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(1):303.
- [19] 尹振兴,罗兵辉. 提高 Ti6Al4V 耐磨性的热氧化工艺[J]. 中南大学学报,2004,35(2):186—190.

(上接第 15 页)

- [2] 李宇恒,胡社军,曾鹏,等. ZrN 系列薄膜的研究进展[J]. 工具技术,2007,41(7):7—11.
- [3] HUANG Jia-hong, HO Chi-hsin, YU Ge-ping. Effect of Nitrogen Flow Rate on the Structure and Mechanical Properties of ZrN Thin Films on Si(100) and Stainless Steel Substrates [J]. Materials Chemistry and Physics, 2007,102:31—38.
- [4] NIYOMSOAN S, GRANT W, OLSON D L, et al. Variation of Color in Titanium and Zirconium Nitride Decorative Thin Films [J]. Thin Solid Films, 2002,415:187—194.
- [5] 黄若轩,孙鹏,朱芳萍,等. 氮气流量对磁控溅射 ZrN 纳米涂层结构及硬度的影响[J]. 西安交通大学学报,2011,45(1):137—140.
- [6] 黄晓辉,左秀荣. 氮流量对采用独立钛靶制备的(Ti,Al)N 薄膜结构与性能的影响[J]. 真空科学与技术学报,2010,30(4):395—400.
- [7] BERN S Roy S. 颜色技术原理[M]. 李小梅译. 北京:化学工业出版社,2002:50—95.

(上接第 27 页)

- [9] LIU X F, HUANG S J, GU H C. Crack Growth Behaviour of High Strength Aluminium Alloy in 3.5% NaCl Solution with Corrosion Inhibiting Pigments [J]. Int J Fatigue, 2002, 24(7):803—809.
- [10] SUBRAMANIAN R, LAKSHMINARAYANAN V. Effect of Adsorption of Some Azoles on Copper Passivation in Alkaline Medium [J]. Corros Sci, 2002,44(3):535—554.
- [11] GUO W J, CHEN S H, FENG Y Y, et al. Investigations of Triphenyl Phosphate and Bis-(2-ethylhexyl) Phosphate Self-assembled Films on Iron Surface Using Electrochemical Methods, Fourier Transform Infrared Spectroscopy, and Molecular Simulations [J]. J Phys Chem C, 2007, 111(7):3109—3115.
- [12] KHALED K F, HACKERMAN N. Investigation of the Inhibitive Effect of Ortho-substituted Anilines on Corrosion of Iron in 0.5M H₂SO₄ Solution [J]. Electrochim Acta, 2003, 48(19):2715—2723.
- [13] WU X J, MA H Y, CHEN S H, et al. General Equivalent Circuits for Faradaic Electrode Processes under Electrochemical Reaction Control [J]. J Electrochem Soc, 1999, 146(5):1847—1853.
- [14] 冯媛媛,陈慎豪,周娟娟,等. 铁表面自组装缓蚀功能膜的电化学阻抗谱研究[J]. 电化学,2008,14(3):343—346.
- [15] 鞠虹,李焰. 热镀锌钢材在稀盐酸中的缓蚀和量子化学研究[J]. 中国有色金属学报,2007,17(12):2079—2088.
- [16] KHALIL N. Quantum Chemical Approach of Corrosion Inhibition [J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(18):2635—2640.
- [17] 胡松青,胡建春,石睿鑫,等. 1-(2-苯基-噻唑乙基)-2-十五烷基-咪唑啉对 Q235 钢的缓蚀吸附作用[J]. 石油学报(石油加工),2011,27(4):593—600.