

表面失效及防护

三聚氰胺对碳钢在 HCl 介质中的缓蚀作用

曾宪光^{1,3}, 郑兴文^{2,3}, 龚敏^{1,3}, 段海兵²

(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 化学与制药工程学院, 四川 自贡 643000;

3. 材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 目的 了解在 HCl 介质中, 三聚氰胺对碳钢的缓蚀作用和缓蚀机理。方法 在 1 mol/L HCl 溶液中添加不同浓度的三聚氰胺, 测试碳钢在溶液中的动电位极化曲线和电化学阻抗谱, 获得电化学参数和缓蚀效率。再结合量子化学计算结果, 分析其缓蚀机理。结果 针对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的腐蚀, 三聚氰胺是一种混合抑制型缓蚀剂, 随其浓度的增加, 缓蚀效率增大。三聚氰胺通过分子中 Mulliken 电荷相对较负的氮原子吸附在碳钢表面起到缓蚀作用, 吸附过程为自发过程, 以物理吸附为主, 且符合 Langmuir 吸附等温方程。结论 在 HCl 介质中, 三聚氰胺对碳钢具有一定的缓蚀作用。

关键词: 三聚氰胺; 碳钢; 缓蚀剂; 吸附; 量化计算

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)01-0127-06

Corrosion Inhibition of Carbon Steel in HCl Solution by Melamine

ZENG Xian-guang^{1,3}, ZHENG Xing-wen^{2,3}, GONG Min^{1,3}, DUAN Hai-bing²

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

2. School of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

3. Key Laboratory of Material Corrosion and Protection of Sichuan Province, Zigong 643000, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the corrosion inhibition of carbon steel in HCl medium by melamine and the mechanism. **Methods** The electrochemical parameters and inhibitive efficiencies were obtained by measuring the potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for carbon steel in the solution containing different concentrations of melamine, and then combined with the result of quantum chemical calculations, the inhibition mechanism of melamine was discussed and analyzed. **Results** Melamine was a mixed-type inhibitor for the corrosion of carbon steel in 1 mol/L HCl solution, and its inhibitive efficiency increased with increasing inhibitor concentration. The inhibition effect of melamine was produced by the adsorption of melamine molecules onto the carbon steel surface through nitrogen atoms, the Mulliken charges of which were relatively more negative. The adsorption process was a spontaneous process, mainly physical adsorption, and obeyed the Langmuir isotherm

收稿日期: 2014-09-03; 修订日期: 2014-10-10

Received: 2014-09-03; Revised: 2014-10-10

基金项目: 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金项目(2012CL05)

Fund: Supported by the Open Fund Project of Key Laboratory of Material Corrosion and Protection of Sichuan Province (2012CL05)

作者简介: 曾宪光(1979—), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 主要研究方向为应用电化学。

Biography: ZENG Xian-guang(1979—), Male, from Hunan, Ph. D., Lecturer, Research focus: applied electrochemistry.

equation. **Conclusion** Melamine could inhibit the corrosion of carbon steel in HCl medium.

KEY WORDS: melamine; carbon steel; corrosion inhibitor; adsorption; quantum chemistry calculation

缓蚀剂是一种抑制金属在使用环境中腐蚀的添加剂,由于其良好的效果和高的经济效益,被广泛应用于石油开采和加工、酸洗、工业循环水系统等领域^[1]。有研究表明,大多数有机缓蚀剂是含有杂原子(如氧、氮、硫、磷)、不饱和键或平面共轭体系的有机化合物^[2-6],主要通过金属表面的吸附起到减缓金属腐蚀的作用^[2,7-8]。

三嗪类含氮有机杂环化合物 1,3,5-三氨基-2,4,6-三嗪俗称三聚氰胺,由于氮含量高,常被不法商人用作食品添加剂,以提升食品检测中蛋白质的含量指标,因此也被称为“蛋白精”,曾因“毒奶粉”事件而被人所熟知。不过已有的研究显示,三聚氰胺毒性轻微或实际无毒,在动物体内不经过生化代谢,可直接通过泌尿系统排出体外,但长期摄入会造成泌尿系统损害,引起膀胱及肾结石,并可能进一步诱发膀胱癌^[9-10]。三聚氰胺是一种用途极为广泛的有机化工中间体,主要用作生产三聚氰胺甲醛树脂的原料,也可以用作阻燃剂、减水剂、甲醛清洁剂等^[9]。三聚氰胺分子中含有氮原子和不饱和键,具有潜在的缓蚀性,但关于三聚氰胺作为缓蚀剂的研究报道很少。文中将三聚氰胺作为碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的缓蚀剂,通过电化学方法和量子化学计算对其缓蚀性能和缓蚀机理进行了研究。

1 实验

1.1 电化学测试

所用三聚氰胺和盐酸均为分析纯,购于成都科龙化工试剂厂。碳钢板材购于自贡市场,将其线切割成直径为 1 cm 的圆柱作为工作电极,底面为工作面,工作面积为 0.785 cm²,其余部分用环氧树脂密封。实验前,工作电极的工作面依次用 200#, 400#, 600#, 800#, 1000# 砂纸打磨,然后用去离子水、乙醇和丙酮依次清洗,滤纸吸干,备用。

电化学测试在 CHI660E 电化学工作站上进行,采用传统三电极体系,铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。首先测开路电位(OCP),测量时间为 1800 s;然后测电化学阻抗,测量频率范围为 10⁻¹ ~ 10⁵ Hz,振幅为 0.005 V;最后测极化曲线,扫描速率 0.5 mV/s,极化范围±0.15 V(vs. OCP)。

用 1 mol/L HCl 溶液作为空白对照(blank),三聚氰胺的添加浓度分别为 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05 mol/L,测试温度为 25 °C(恒温水浴锅控制)。

1.2 量子化学计算方法

采用 Gaussia 03W 软件包中的 DFT/B3LYP 方法,在 6-311G++(d,p)基组水平上对三聚氰胺分子进行几何构型优化,并进行频率分析,确保所得的结构为势能面上的极小点(无虚频)^[11]。在同一基组水平上计算三聚氰胺分子的最高占有轨道能(E_{HOMO})、最低空轨道能(E_{LUMO})和原子电荷分布等,用于分析缓蚀剂分子的缓蚀作用机理,确定其活性吸附位点。

2 结果与分析讨论

2.1 极化曲线

碳钢电极在不同介质中的极化曲线见图 1。利用仪器自带的数据分析工具,通过 Tafel 外推法获得腐蚀动力学参数,包括腐蚀电位(E_{corr})、腐蚀电流密度(J_{corr})和阳/阴极塔菲尔斜率(b_a, b_c),进而算得不同浓度下三聚氰胺的缓蚀效率(η)和覆盖度(θ),见表 1。其中 η 和 θ 的计算公式如下^[11-12]:

$$\eta = \left(1 - \frac{J_{\text{corr}}}{J_{\text{corr},0}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\theta = 1 - \frac{J_{\text{corr}}}{J_{\text{corr},0}} \quad (2)$$

式中: $J_{\text{corr},0}$ 和 J_{corr} 分别为未添加和添加三聚氰胺时的腐蚀电流密度。

从图 1 可见,极化曲线的阳极电流密度和阴极电

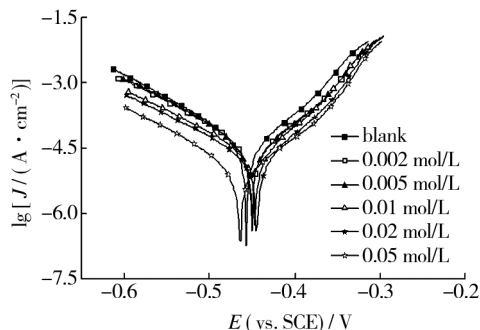


图 1 不同三聚氰胺浓度下的碳钢极化曲线

Fig. 1 Polarization curves for carbon steel in solutions with different concentrations of melamine

表 1 不同三聚氰胺浓度下的碳钢电化学参数

Tab.1 Electrochemical parameters for carbon steel in solutions with different concentrations of melamine

$c/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	b_a/mV	b_c/mV	$\eta_r/\%$	θ
blank	-0.4467	31.26	11.0	17.0		
0.002	-0.4441	26.18	10.5	15.7	16.2	0.162
0.005	-0.4424	23.66	10.8	15.8	24.3	0.243
0.01	-0.4456	16.94	10.0	17.8	45.8	0.458
0.02	-0.4424	13.12	9.8	17.3	58.0	0.580
0.05	-0.4571	7.93	10.0	13.9	74.6	0.746

流密度均在添加缓蚀剂后减小,且随缓蚀剂浓度的增加而减小,这意味着缓蚀剂的加入抑制了碳钢阳极的溶解,也阻碍了氢离子的还原。添加缓蚀剂后,极化曲线的形状没有发生明显的变化,近似平行的阳极极化曲线和阴极极化曲线表明,三聚氰胺的添加并不改变阳极铁溶解和阴极氢离子还原的机理,说明腐蚀电化学反应是活化控制的^[2,13-15]。表 1 的数据显示,添加缓蚀剂后,腐蚀电位变化很小,小于 15 mV,这表明三聚氰胺是一种混合抑制型缓蚀剂,其对低碳钢表面的缓蚀作用机理为几何覆盖效应^[2,11-12];三聚氰胺首先吸附到碳钢电极表面,阻断电极表面的活性位点,使碳钢表面实际发生腐蚀电化学反应的面积减小,而实际的反应机理并不受影响^[2,14]。表 1 的数据还表明,随着三聚氰胺浓度的增加,腐蚀电流密度减小,而缓蚀效率和表面覆盖度增大,说明缓蚀剂在电极表面的吸附层趋于完整。当三聚氰胺浓度为 0.05 mol/L 时,其缓蚀效率达 74%,说明三聚氰胺对碳钢在盐酸溶液中具有一定的缓蚀作用。

2.2 电化学阻抗

碳钢电极在不同介质中的电化学阻抗谱见图 2。Nyquist 图中只有 1 个容抗弧,随着三聚氰胺浓度的增加,仅容抗弧的直径增加,没有其他显著变化,这表明三聚氰胺的添加没有改变电极的反应机制,只是通过吸附在金属表面起到缓蚀作用,作用机理为几何覆盖效应,这与极化曲线的测试结果吻合。高频的容抗弧呈不完美的半圆,这是由于工作电极表面较为粗糙和存在不均匀性所导致的^[16]。该容抗弧通常被认为是电荷传递电阻和双电层电容的时间常数^[2],对应的 Bode 图也说明实验体系只有 1 个时间常数。因此,图 2 所示的电化学阻抗可用图 3 所示的等效电路进行拟合。图 3 中: R_s 为溶液电阻;CPE 为常相位角原件,根据弥散指数 n 值的不同,CPE 可以看作是电阻($n=0$)、电容($n=1$)、Warburg 阻抗($n=1/2$)和感抗

($n=-1$)^[17]; R_{ct} 为电荷传递电阻。通过 ZsimpWin 软件拟合所得的数据见表 2,其中 Y_0 为 CPE 的拟合值,缓蚀效率(η)和表面覆盖度(θ)的计算公式如下:

$$\eta = \frac{R_{ct} - R_{ct,0}}{R_{ct}} \times 100\%$$
 (3)

$$\theta = \frac{R_{ct} - R_{ct,0}}{R_{ct}}$$
 (4)

式中: $R_{ct,0}$ 和 R_{ct} 分别为未添加和添加三聚氰胺时的电荷传递电阻。

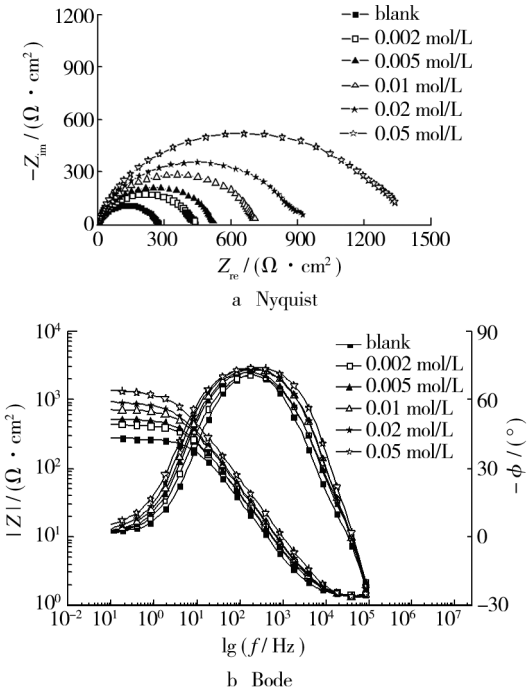


图 2 不同三聚氰胺浓度下的碳钢电化学阻抗谱
Fig.2 EIS for carbon steel in solutions with different concentrations of melamine

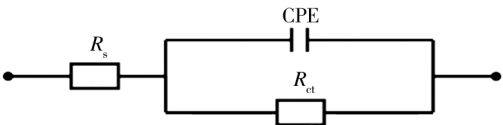


图 3 电化学阻抗谱拟合的等效电路
Fig.3 Equivalent circuits used to fit the EIS

表 2 不同三聚氰胺浓度下的碳钢电化学阻抗参数

Tab.2 The EIS parameters for carbon steel in solutions with different concentrations of melamine

$c/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_0/(\times 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2})$	n	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$	θ
blank	1.5	104.9	0.8787	278		
0.002	1.4	94.34	0.8582	442	37.1	0.371
0.005	1.4	91.15	0.8685	533	47.8	0.478
0.01	1.4	70.94	0.8753	712	61.0	0.610
0.02	1.4	69.16	0.8728	955	70.9	0.709
0.05	1.4	55.94	0.8676	1444	80.7	0.807

表 2 数据显示,随着三聚氰胺浓度的增加, R_{ct} 值增加, Y_0 值降低,缓蚀效率和表面覆盖度增大。 R_{ct} 值增加说明腐蚀电化学反应的阻力增大,腐蚀反应变得困难。 Y_0 值降低说明介电常数减小或双电层厚度增加,这反映缓蚀剂分子在电极表面发生了吸附^[2,12]。 n 值接近于 1,说明电极和溶液的界面行为接近电容^[18]。

2.3 吸附等温方程

一般认为,有机分子通过吸附在金属表面起到缓蚀作用,为了解实验条件下三聚氰胺在碳钢表面的吸附机理,对三聚氰胺在碳钢表面的吸附等温方程进行了研究。分别根据表 1 和表 2 中的数据,将 c/θ 对 c 作图,结果呈直线(见图 4),说明三聚氰胺在碳钢表面的吸附满足 Langmuir 吸附等温方程式^[2,4]:

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K_{\text{ads}}} + c$$

(5)

式中: c 为缓蚀剂浓度, θ 为表面覆盖度, K_{ads} 为吸附平衡常数。

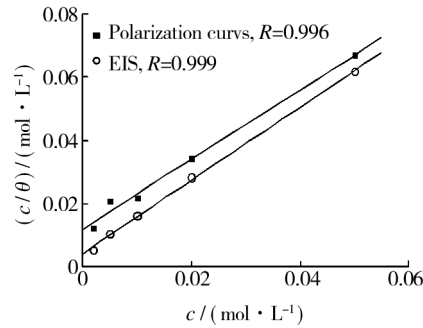


图 4 拟合的 Langmuir 等温吸附线
Fig.4 Langmuir adsorption isotherm

通过线性回归算得表 1、表 2 数据对应的 K_{ads} 值分别为 83 和 233,较大的 K_{ads} 值说明三聚氰胺与碳钢表面之间存在较强的吸附作用。通过 K_{ads} 值算得表征缓蚀剂分子与金属表面相互作用的标准吉布斯自由能($\Delta G_{\text{ads}}^\ominus$)分别为 -20.89, -23.46 kJ/mol^[2,11-12]。

通常认为 $\Delta G_{\text{ads}}^\ominus$ 大于 -20 kJ/mol 时为物理吸附,小于 -40 kJ/mol 时为化学吸附,介于 -20 ~ -40 kJ/mol 之间时同时存在物理吸附和化学吸附^[12]。因此认为,三聚氰胺在碳钢表面的吸附可能同时存在物理吸附和化学吸附,由于其值更接近于 -20 kJ/mol,所以以物理吸附为主。

2.4 量化计算

为了进一步理解三聚氰胺的缓蚀作用,采用量子化学计算优化三聚氰胺分子的结构,并计算相关量化参数。前线轨道理论认为,反应物间的相互作用仅发生在分子的最高占有轨道(HOMO)和最低空轨道(LUMO)之间^[19]。其中 E_{HOMO} 是分子给电子能力的量度, E_{HOMO} 越小,该轨道中的电子越稳定,分子给电子的能力越小;反之 E_{HOMO} 越大,分子给电子的能力越大。 E_{LUMO} 与分子接受电子的能力相关, E_{LUMO} 越小,则电子进入轨道后体系能量降低得越多,分子接受电子的能力越强^[20-21]。

图 5 为三聚氰胺分子的优化结构、Mulliken 电荷、HOMO 和 LUMO 分布图,从中可见,三聚氰胺分子中 6 个 N 原子所带的电荷并不等同,这与文献的研究结果一致^[22-23]。三聚氰胺分子的 HOMO 和 LUMO 均主要分布在 N 原子上,表明 N 原子是三聚氰胺分子的活性吸附位点。表 3 给出了三聚氰胺分子的前线分子轨道能量、能级差(ΔE)、偶极矩(μ)和电子转移系数(ΔN)。从中可见,三聚氰胺的 E_{HOMO} 较小,说明其给出电子的能力较弱; E_{LUMO} 值接近 0,较大,说明三聚氰胺接受电子的能力也较弱; ΔE 值较高, μ 值低,说明三聚氰胺分子稳定,难于极化。因此,三聚氰胺分子给出和接受电子的能力均较弱,其与碳钢表面的相互作用以静电引力为主,即物理吸附为主。三聚氰胺分子中所有 N 原子的 Mulliken 电荷均为负值,而电子转移系数 ΔN 值显示,三聚氰胺是电子给予体^[21],结合三聚氰胺的 HOMO 的电荷分布可以发现,

在同类氮原子中,Mulliken 电荷负的 N 原子(N5,N6,N10 和 N13)是三聚氰胺吸附的活性位点。

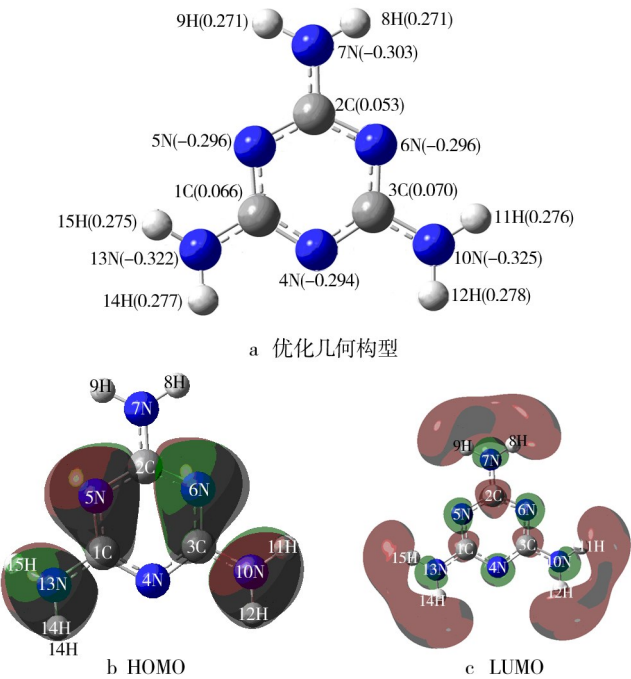


图 5 三聚氰胺的优化几何构型、HOMO 和 LUMO 分布图
Fig.5 Optimized structure and the distributions for HOMO and LUMO of melamine

表 3 三聚氰胺的量子化学参数

Tab.3 Quantum chemical parameters of melamine				
E_{HOMO}/eV	E_{LUMO}/eV	$\Delta E/\text{eV}$	μ/D	ΔN
-6.713	-0.267	6.446	0.3244	0.545

3 结论

- 1) 针对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的腐蚀,三聚氰胺是一种混合抑制型缓蚀剂,具有一定的缓蚀作用,且随三聚氰胺浓度的增加,缓蚀效率增大。
- 2) 三聚氰胺通过在碳钢表面发生吸附起到缓蚀作用,吸附过程为自发过程,以物理吸附为主,且符合 Langmuir 吸附等温方程。
- 3) 三聚氰胺分子中 Mulliken 电荷相对较负的氮原子是活性吸附位点,其通过静电吸附或作为电子给予体吸附在碳钢表面。

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] ZHENG Xing-wen,ZHANG Sheng-tao,LI Wen-po,et al. Investigation of 1-butyl-3-methyl-1H-benzimidazolium Iodide as Inhibitor for Mild Steel in Sulfuric Acid Solution[J]. Corrosion Science,2014,80:383—392.

[3] 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.

[4] 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.

[5] HEGAZY M A, EL-TABEI A S, BEDAIR A H, et al. An Investigation of Three Novel Nonionic Surfactants as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in 0.5 M H₂SO₄ [J]. Corrosion Science, 2012, 54:219—230.

[6] SOLMAZ R, ALTUNBAŞ E, KARDAŞ G. Adsorption and Corrosion Inhibition Effect of 2-((5-mercapto-1,3,4-thiadiazol-2-ylimino) methyl) phenol Schiff Base on Mild Steel [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 125:796—801.

[7] LIU Bao-yu, LIU Zheng, HAN Guo-cheng, et al. Corrosion Inhibition and Adsorption Behavior of 2-((dehydroabietylamine) methyl)-6-methoxyphenol on Mild Steel Surface in Seawater[J]. Thin Solid Films, 2011, 519:7836—7844.

[8] NEGMA N A, ELKHOLY Y M, ZAHARAN M K, et al. Corrosion Inhibition Efficiency and Surface Activity of Benzothiazol-3-ium Cationic Schiff Base Derivatives in Hydrochloric Acid[J]. Corrosion Science, 2010, 52:3523—3536.

[9] 王世忠,陆荣柱,高坚瑞,等. 三聚氰胺的毒性研究概况[J]. 国外医学(卫生学分册),2009,36(1):14—18.
WANG Shi-zhong, LU Rong-zhu, GAO Jian-rui, et al. Research Overview on the Toxicity of Melamine [J]. Foreign Medical Science (Section Hygiene), 2009, 36(1):14—18.

[10] 杨盛林,黄思玲. 三聚氰胺的性质、检测方法 & 毒理学[J]. 食品与药品,2008,10(11):66—68.
YANG Sheng-lin, HUANG Si-ling. Introduction to Character, Detection and Toxicology of Melamine [J]. Food and Drug, 2008, 10(11):66—68.

[11] 郑兴文,龚敏,王莹,等. 甲硫氨酸对碳钢在硫酸介质中的缓蚀作用[J]. 化学研究与应用,2011,23(12):1589—1594.
ZHENG Xing-wen, GONG Min, WANG Yin, et al. Corrosion Inhibition of Methionine for Carbon Steel in Sulfuric Acid Solution[J]. Chemical Research and Application, 2011, 23

- (12):1589—1594.
- [12] 郑兴文,龚敏,曾宪光,等. L-苯丙氨酸对 Q235 钢在硫酸中的缓蚀作用[J]. 表面技术,2012,41(3):33—36.
ZHENG Xing-wen, GONG Min, ZENG Xian-guang, et al. Corrosion Inhibition of L-phenylalanine for Q235 Steel in Sulfuric Acid Solutions[J]. Surface Technology, 2012, 41(3):33—36.
- [13] MUSA A Y, KADHUM A A H, MOHAMAD A B, et al. Experimental and Theoretical Study on the Inhibition Performance of Triazole Compounds for Mild Steel Corrosion[J]. Corrosion Science, 2010, 52:3331—3340.
- [14] DÖNER A, SOLMAZ R, ÖZCAN M, et al. Experimental and Theoretical Studies of Thiazoles as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Sulphuric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2011, 53:2902—2913.
- [15] ZHANG Sheng-tao, TAO Zhi-hua, LI Wei-hua, et al. The Effect of Some Triazole Derivatives as Inhibitors for the Corrosion of Mild Steel in 1 M Hydrochloric Acid[J]. Applied Surface Science, 2009, 255:6757—6763.
- [16] RAJA P B, QURESHI A K, RAHIM A A, et al. Neolamarckia Cadamba Alkaloids as eco-friendly Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 1 M HCl Media[J]. Corrosion Science, 2013, 69:292—301.
- [17] LIAO Q Q, YUE Z W, YANG D, et al. Inhibition of Copper Corrosion in Sodium Chloride Solution by the Self-assembled Monolayer of Sodium Diethyldithiocarbamate[J]. Corrosion Science, 2011, 53:1999—2005.
- [18] JACOB K S, PARAMESWARAN G. Corrosion Inhibition of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution by Schiff Base Furin Thiosemicarbazone[J]. Corrosion Science, 2010, 52:224—228.
- [19] BEREKET G, HUR E, OGRETIR C. Quantum Chemical Studies on Some Imidazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Iron in Acidic Medium[J]. Journal of Molecular Structure: Theochem, 2002, 578:79—88.
- [20] 赵维,夏明珠,雷武,等. 有机磷缓蚀剂分子结构与缓蚀性能的量子化学研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2002,22(4):217—220.
ZHAO Wei, XIA Ming-zhu, LEI Wu, et al. Quantum Chemistry Studies of Organophosphorus Corrosion Inhibitors[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(4):217—220.
- [21] HMAMOU D B, SALGHI R, ZARROUK A, et al. Weight Loss, Electrochemical, Quantum Chemical Calculation, and Molecular Dynamics Simulation Studies on 2-(benzylthio)-1,4,5-triphenyl-1h-imidazole as an Inhibitor for Carbon Steel Corrosion in Hydrochloric Acid[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52:14315—14327.
- [22] 柏琳琳. 水合三聚氰胺质子迁移机理的理论研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2011.
BO Lin-lin. Theory Research on the Proton Transfer Mechanism of Hydrated Melamine[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2011.
- [23] PRABHAHARAN M, PRABAKARAN A R, GUNASEKARAN S, et al. Molecular Structure and Vibrational Spectroscopic Investigation of Melamine Using DFT Theory Calculations[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 123:392—401.

(上接第 91 页)

- [10] 车德良,钟彬,苟伟,等. 多弧离子镀沉积过程中等离子体参数对薄膜沉积的影响[J]. 真空,2006,43(2):5—8.
CHE De-liang, ZHONG Bin, GOU Wei, et al. Effect of Plasma Parameters on Deposition of Thin Film in Multi Arc Ion Plating[J]. Vacuum, 2006, 43(2):5—8.
- [11] PELLEGGI J, ZEVI L Z, LUNGO S, et al. Reactive-sputter-Deposition TiN Films on Glass Substrates[J]. Thin Solid Films, 1991, 197:117—128.
- [12] 刘天伟,鲜晓斌,武胜,等. 不同偏压下铀表面多弧离子镀 TiN 薄膜性能研究[J]. 稀有金属材料工程,2006,35(9):1437—1440.
LIU Tian-wei, XIAN Xiao-bin, WU Sheng, et al. Properties of TiN Films on Uranium Surface by Arc Ion Plating under Different Bias Voltage[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(9):1437—1440.
- [13] 王福贞,马文存. 气相沉积应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
WANG Fu-zhen, MA Wen-cun. Vapor Deposition application Technology[M]. Beijing:China Machine Press, 2007.
- [14] 华敏奇,袁振海. 划痕实验对特殊薄膜系结合力的检测与评价[J]. 分析测试技术与仪器,2002,8(4):218—225.
HUA Min-qi, YUAN Zhen-hai. Testing and Evaluation of the Scratch Test on the Binding Force of Special Film System[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2002, 8(4):218—225.
- [15] 师昌绪,李恒德,周廉. 材料科学与工程手册[M]. 北京,化学工业出版社,2004.
SHI Chang-xu, LI Heng-de, ZHOU Lian. Materials Science and Engineering Handbook[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.