三种喹啉类衍生物的毒性预测及其对碳钢的缓蚀作用

周堃[1,2]，江露[3]，向斌[3]

（1.北京航空航天大学，北京 100191；2.西南技术工程研究所，重庆 400039；
3.重庆大学，重庆 400030）

摘 要：目的 探究喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉的健康毒性和生态毒性，以及这三种喹啉类衍生物对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的防腐性能。**方法** 采用毒性预测软件 T.E.S.T 对这三种物质进行毒性预测，筛选出环境友好型缓蚀剂。通过动电位极化曲线方法测定室温下喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉对碳钢的缓蚀性能并比较缓蚀效果。根据吸附等温模型对缓蚀机理进行初步探讨。**结果** 毒性计算表明，5-苯并喹啉没有致畸变性（Ames 试验）和发育毒性，小鼠经口毒性 LD_{50} 在第五级。8-羟基-5-苯并喹啉有致畸变性但无发育毒性，而喹啉存在致畸变性和发育毒性。通过动电位极化曲线测试发现，5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中具有优异的缓蚀性能（在 1 mmol/L 浓度下，η_p(5-苯并喹啉)=94.74%，η_p(8-羟基-5-苯并喹啉)=98.06%）。喹啉的缓蚀效果在 1 mmol/L 处接近饱和，缓蚀效率仅为 85%左右。从自腐蚀电位的移动判断，三种缓蚀剂均属于混合型缓蚀剂。吸附行为研究表明，喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉在碳钢表面的吸附均符合 Langmuir 吸附，且为物理化学混合吸附。**结论** 5-苯并喹啉是一种环境友好型缓蚀剂。5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的抗腐蚀性能明显优于喹啉，这是由于苄基和羟基使得缓蚀剂分子在金属表面的化学吸附更加稳定，形成了致密的保护膜，有效减小了碳钢的腐蚀。

关键词：腐蚀；碳钢；喹啉类衍生物；缓蚀性能；毒性研究；电化学测试

中图分类号：TG174.42 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)07-0219-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.032

Toxicity Estimation and Inhibition Performance Research on Mild Steel of Three Quinoline Derivatives in 1M Hydrochloric Acid

ZHOU Kun[1,2], *JIANG Lu*[3], *XIANG Bin*[3]

(1.Beihang University, Beijing 100191, China; 2.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 3.Chongqing University, Chongqing 400030, China)

ABSTRACT: The work aims to study health toxicity and ecotoxicity of quinoline, 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5-benzylquinoline, and their corrosion inhibition performance on mild steel in 1 mol/L HCl. The T.E.S.T software was utilized to estimate toxicity of the three quinoline derivatives and select environment-friendly inhibitors. Meanwhile, potentiodynamic polarization curve was used to investigate and further compare inhibition behavior of these inhibitors. In addition, corrosion inhibition

收稿日期：2018-02-11；修订日期：2018-03-21

Received：2018-02-11；**Revised**：2018-03-21

作者简介：周堃（1977—），男，硕士，研究员级高级工程师，主要从事环境腐蚀与老化研究。

Biography：ZHOU Kun (1977—), Male, Master, Professorate senior engineer, Research focus: environmental corrosion and aging research.

mechanism was preliminarily explained based upon adsorption isothermal model. Toxicity calculations showed that 5-benzylquinoline had no mutagenicity (Ames test) and developmental toxicity, oral rat LD50 was at level 5. 8-hydroxy-5-benzylquinoline; 8-hydroxy-5-benzylquinoline had mutagenicity but no developmental toxicity; and quinoline had both mutagenicity and developmental toxicity. According to potentiodynamic polarization curve, 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5- benzylquinoline exhibited excellent inhibition performance on mild steel in 1 mol/L HCl (η_p(5-benzylquinoline)= 94.74% and η_p(8-hydroxy-5-benzylquinoline)=98.06% at 1 mmol/L concentration). However, the inhibition performance of quinoline was nearly saturated at 1 mmol/L concentration since inhibition efficiency was nearly 85%. According to movement of self-corrosion potential, three inhibitors were all mixed-type inhibitors. Furthermore, adsorption of these inhibitors on mild steel could be fitted ideally by Langmuir adsorption model, which belonged to mixed physical chemical adsorption. 5-benzylquinoline is an environment-friendly inhibitor. Inhibition performance of 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5-benzylquinoline be obviously superior to that of quinoline, which can be explained that benzyl and hydroxy groups enhance stability of inhibitor molecule chemical adsorption on metal surface, a dense protective film takes shape and effectively reduces corrosion of mild steel.

KEY WORDS: corrosion; mild steel; quinoline derivatives; inhibition performance; toxicity research; electrochemical test

酸洗是除去钢铁表面氧化皮和锈蚀物的一种常见手段，但酸洗过程中容易腐蚀钢铁基底本身，导致其工作寿命大大缩短。加入有机缓蚀剂是减缓碳钢腐蚀的一种有效手段[1]。其中，喹啉类衍生物作为含氮杂环化合物，具有较优异的缓蚀性能，容易制备，因而在金属防腐中有着巨大的应用价值。近年来，不少学者对喹啉类缓蚀剂进行了研究。2008 年，Achary 等人[2]研究了 8-羟基喹啉和 3-甲酰 8-羟基喹啉对碳钢在盐酸中的缓蚀效果，发现 3-甲酰 8-羟基喹啉的缓蚀效果明显优于 8-羟基喹啉，酰基对缓蚀效果有显著的提升。Sara 等人[3]在 2016 年通过量子化学计算和分子动力学模拟研究了两种巯基-喹啉类希夫碱缓蚀剂，发现缓蚀效果与分子结构中电子的分布有关，并且通过电化学实验进行了证实。Zhang 等人[4]在 2017 年解释了喹啉唑类缓蚀剂对碳钢在酸性介质中的缓蚀作用机理。随着绿色化学的提出，无毒型缓蚀剂受到研究学者们的广泛关注。但是现今的研究中对缓蚀剂毒性仅仅停留在一个定性的阶段，定量研究十分缺乏。T.E.S.T 软件由美国环保局开发，预测苯系物毒性的准确度能达到 85%以上[5]。因此，本文利用 T.E.S.T 软件对喹啉和新制备的两种缓蚀剂 5-苯并喹啉、8-羟基-5-苯并喹啉的健康毒性和生态毒性进行了预测，并研究这三种缓蚀剂对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的缓蚀作用。

1 实验

1.1 设备与材料

主要实验仪器有数显恒温水浴锅、CHI 760 E 上海辰华电化学工作站、数控超声波清洗仪、电子天平、4 cm^2 铂片电极、饱和甘汞电极、超纯水仪等。

主要实验材料有无水乙醇、浓盐酸、苄氯、喹啉、8-羟基喹啉等，均为市场上购买的分析纯。缓蚀剂为喹啉及自制的喹啉类衍生物 5-苯并喹啉[6]、8-羟基-5-苯并喹啉。三种缓蚀剂的结构见图 1。

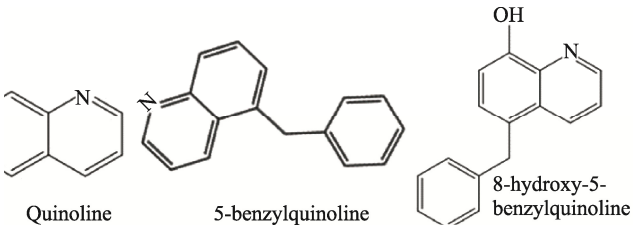


图 1 喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉结构式

Fig.1 Structural formula of three quinoline derivatives

1.2 电化学测试

电化学测试采用传统的三电极体系，饱和甘汞电极和铂片（4 cm^2）分别作为参比电极和对电极，测试体系为 1 mol/L HCl 溶液，工作温度为室温（298.15 K）。工作电极为面积 1 cm^2、用环氧树脂封装的碳钢，在使用前分别用 400#、800#、1200#、2000#砂纸水磨至光亮镜面，并用乙醇、蒸馏水超声清洗，室温下干燥备用。

动电位极化曲线测试通过 CHI 760E 完成。将三电极体系放入测试液后，先扫开路电位 30 min，待体系达到稳定后，设定开路电位为±250 mV，进行动电位极化扫描，扫速为 1 mV/s。得到动电位极化曲线后，通过极限外推法获得腐蚀电流密度。缓蚀效率 η_p 计算公式为[7]：

$$\eta_p = \frac{J^0_{corr} - J_{corr}}{J^0_{corr}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：J^0_{corr} 和 J_{corr} 分别为未加入缓蚀剂和加入缓

蚀剂的腐蚀电流密度（A/cm^2）。

1.3　T.E.S.T 毒性软件参数设置

健康毒性测试终点为 Ames 致畸变性、发育毒性、小鼠经口 LD_{50}，生态毒性测试终点为 48 h 大型蚤 LC_{50} 和 96 h 黑头呆鱼 LC_{50}。选择均一法作为计算方法。

2　结果与讨论

2.1　毒性结果

健康毒性的终点中，致畸变性和发育毒性属于二进制毒性终点，判别标准是根据软件自带系统设定的临界值 0.5 进行判断。高于 0.5，认为有毒性；低于 0.5，认为无毒性。而小鼠经口毒性（mg/kg）根据全球化学品统一分类和标签制度（GHS）进行判别，具体毒性标准见表 1。

根据以上判别标准，软件计算得到健康毒性数据见表 2。对比喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉可知，喹啉具有致畸变性和发育毒性；5-苯并喹啉不存在致畸变性和发育毒性，且小鼠经口毒性很低；8-羟基-5-苯并喹啉无发育毒性，但具有致畸变性。

进一步计算三种缓蚀剂的生态毒性终点——大型蚤 LC_{50} 和黑头呆鱼 LC_{50}，见表 3。根据全球化学品统一分类和标签制度（GHS），急性水生危害大型蚤 LC_{50}（48 h）和黑头呆鱼 LC_{50}（96 h）分为三类（mg/L）：急性 1 类为 $LC_{50}<1$，急性 2 类为 $1<LC_{50}<10$，急性 3 类为 $10<LC_{50}<100$。从表 3 可以看出，5-苯并喹啉和喹啉的水生毒性较低，而 8-羟基-5-苯并喹啉则有一定的毒性。

表 1　小鼠经口 LD_{50} 全球化学品统一分类和标签制度等级
Tab.1 GHS level of oral rat LD_{50}

GSH classification of oral rat LD_{50}	Range/($mg\cdot kg^{-1}$)	Signal words	Symbol	Hazard statement
1 level	0~5	Dangerous	Skull and crossbones	Dead if swallowed
2 level	5~50	Dangerous	Skull and crossbones	Dead if swallowed
3 level	50~300	Dangerous	Skull and crossbones	Poison if swallowed
4 level	300~2000	Warning	Exclamation point	Harmful if swallowed
5 level	>2000	Warning		May harmful if swallowed

表 2　喹啉类缓蚀剂健康毒性预测值
Tab.2 Estimated health toxicity value of quinoline derivatives

Inhibitors	Ames mutagenicity		Developmental toxicity		Oral rat LD_{50}	
	Value	Result	Value	Result	Value	Result
Quinoline	0.78	Yes	0.58	Yes	759.32	4 level
5-benzylquinoline	0.45	No	0.38	No	2514.56	5 level
8-hydroxy-5-benzylquinoline	0.52	Yes	0.49	No	3113.65	5 level

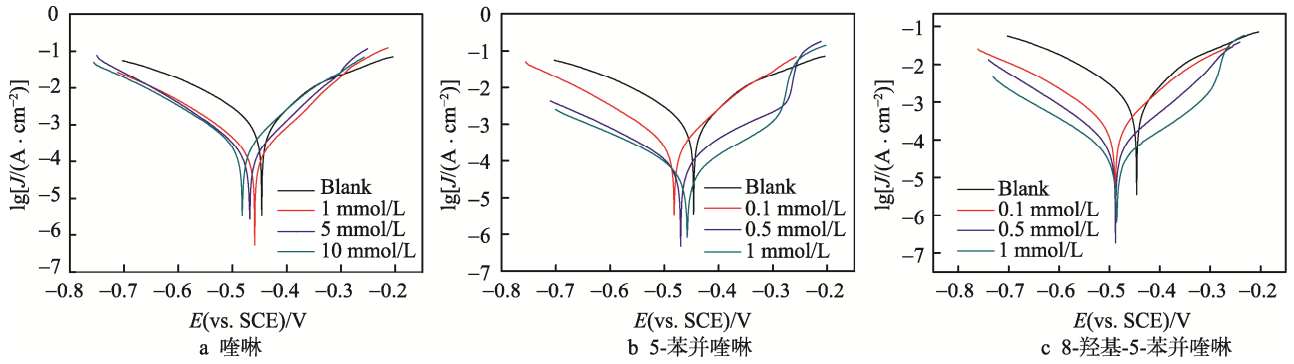
表 3　喹啉类缓蚀剂生态毒性预测值
Tab.3 Estimated ecotoxicity value of quinoline derivatives

Inhibitors	Daphnia magna LC_{50}(48 h)		Fathead minnow LC_{50}(96 h)	
	Value/($mg\cdot L^{-1}$)	GHS standard	Value/($mg\cdot L^{-1}$)	GHS standard
Quinoline	12.99	Ⅲ	3.80	Ⅱ
5-benzylquinoline	2.62	Ⅱ	1.79	Ⅱ
8-hydroxy-5-benzylquinoline	2.07	Ⅱ	0.88	Ⅰ

2.2　极化曲线测试

在 298.15 K 下，将碳钢电极分别放入含有不同浓度喹啉、5-苯并喹啉、8-羟基-5-苯并喹啉的 1 mol/L HCl 溶液中，按照 1.2 节所述方法进行动电位极化曲线测试，研究浓度对缓蚀剂缓蚀性能的影响，得到结果见图 2。

从图 2 可以看出，加入 5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉后，阴阳极极化曲线均明显向下移动，金属溶解和析氢还原过程均被明显抑制。这是由于缓蚀剂分子吸附在碳钢表面，形成了保护膜，覆盖了腐蚀反应的活性位点，从而减缓了碳钢的腐蚀[9]。加入 1~10 mmol/L 喹啉时，阴阳极极化曲线与空白相比下移不明显，说明 5-苯并喹啉和 8-羟基-5 苯并喹啉对



a 喹啉　b 5-苯并喹啉　c 8-羟基-5-苯并喹啉

图 2　298.15 K 下碳钢在空白和含有不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L HCl 中的动电位极化曲线

Fig.2 Potentiodynamic polarization curves for mild steel in 1 mol/L HCl solution without and with different concentration of quinoline (a) 5-benzylquinoline (b) and 8-hydroxy-5-benzylquinoline (c) at 298 K

碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的抗腐蚀效果明显优于喹啉。

通过 Tafel 外推法得到腐蚀电位 E_{corr}、阴极和阳极 Tafel 斜率（β_c 和 β_a）以及腐蚀电流密度（J_{corr}）等参数，见表 4。结果显示，加入缓蚀剂后，自腐蚀电位 E_{corr} 没有明显移动，说明这三种缓蚀剂均为混合型缓蚀剂[10]。计算三种缓蚀剂的缓蚀效率，发现喹啉在 1~10 mmol/L 浓度梯度范围内的缓蚀效率上升不明显，说明在 1 mmol/L 浓度下喹啉对碳钢的抗腐蚀效果基本趋于饱和。相比之下，随着浓度的升高，5-苯并喹啉缓蚀效率明显增大，在 1 mmol/L 浓度下达到了 98.06%，缓蚀效果明显好于喹啉。这是由于 5-苯并喹啉的上苯基是疏水性基团，与喹啉相比，疏水性更强，因此其缓蚀效果优于喹啉[10]。对比 8-羟基-5-苯并喹啉和 5-苯并喹啉，发现 8-羟基-5-苯并喹啉的缓蚀效果明显更优，说明羟基的加入增强了缓蚀效果。8-羟基-5-苯并喹啉上存在羟基，其氧原子具有孤对电子，能与金属表面的 d-空轨道形成共价键，使得缓蚀剂在金属表面形成的吸附膜更稳定，从而增强了缓蚀效果[11]。

表 4　298.15 K 下碳钢在空白和含有不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L HCl 中的动电位极化参数

Tab.4 Potentiodynamic polarization parameters for mild steel in 1 mol/L HCl solution without and with different concentration of quinoline, 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5-benzylquinoline at 298.15 K

Inhibitors	c/(mmol·L^{-1})	E_{corr}/mV	$-\beta_c$/(mV·dec^{-1})	β_a/(mV·dec^{-1})	J_{corr}/(μA·cm^{-2})	R_p/(Ω·cm^2)	η_p/%
Blank		−496	124.4	102.1	1076	22.7	
Quinoline	1	−459	101.6	64.5	183.3	106.1	82.96
	5	−468	99.7	77.7	163.3	113.5	84.82
	10	−482	108.8	76.72	153.6	121.7	85.72
5-benzylquinoline	0.1	−492	108.2	103.1	274.2	74.5	74.52
	0.5	−490	115.1	122.5	114.1	257.4	89.40
	1.0	−488	126.1	120.5	56.7	473.0	94.74
8-hydroxy-5-benzylquinoline	0.1	−489	113.1	93.9	230.7	96.7	78.56
	0.5	−488	94.3	93.2	71.0	287.2	93.41
	1.0	−486	118.3	79.5	20.9	616.3	98.06

2.3　吸附行为研究

有机缓蚀剂在金属表面的吸附行为可以通过等温吸附方程来进行描述（Langmuir、Frumkin、Temkin 等等温吸附方程）。本文研究发现，三种喹啉类缓蚀剂在碳钢上的吸附符合 Langmuir 吸附等温方程。Langmuir 吸附等温方程可由式(2)表示[12]：

$$\frac{c}{\theta}=\frac{1}{K_{ads}}+c \tag{2}$$

式中：c 为缓蚀剂浓度（mmol/L）；θ 为缓蚀剂在金属表面的覆盖度（本文以缓蚀效率代替）；K_{ads} 为吸附平衡常数。以 c/θ 对 c 进行直线拟合，得到拟合图见图 3。

吸附自由能 ΔG_{ads} 可以通过式（3）计算得到[12]：

$$K_{ads}=\frac{1}{55.5}\exp\left(\frac{-\Delta G_{ads}}{RT}\right) \tag{3}$$

式中：ΔG_{ads} 为吸附自由能；R 为气体常数（8.314 J/(mol·K)）；T 为热力学温度。

根据式（2）、（3）计算得到吸附平衡常数 K_{ads} 和吸附自由能 ΔG_{ads}，结果见表 5。吸附平衡常数越大，表示吸附剂的吸附性能越强。三种缓蚀剂的吸附平衡常数大小符合 K_{ads}（喹啉）< K_{ads}（5-苯并喹啉）< K_{ads}（8-羟基-5-苯并喹啉），说明 8-羟基-5-苯并喹啉在碳

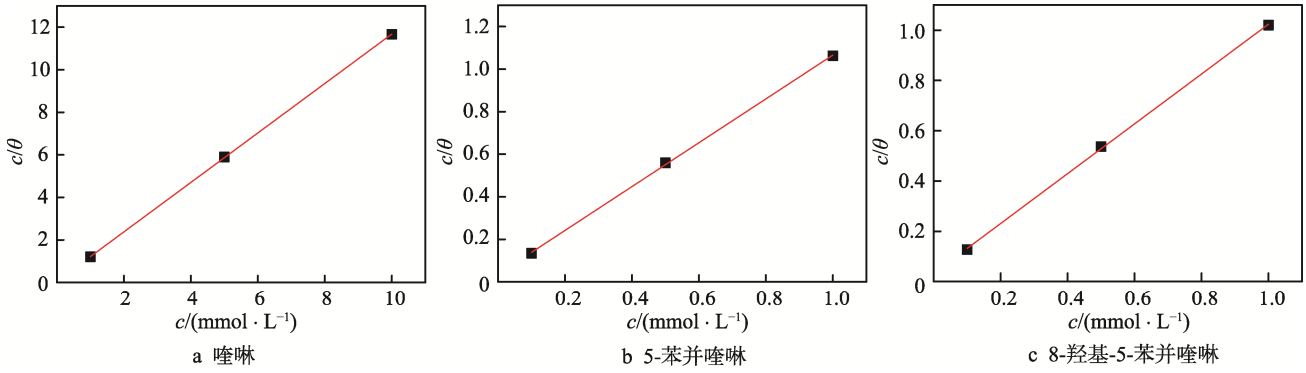


图 3　碳钢电极在含不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L HCl 溶液中的 Langmuir 吸附等温曲线

Fig.3 Langmuir isotherm plots for mild steel electrode in 1 mol/L HCl with and without quinoline, 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5-benzylquinoline

表 5　喹啉、5-苯并喹啉、8-羟基-5-苯并喹啉在碳钢电极表面的吸附平衡常数和吸附自由能

Tab.5 K_{ads} and ΔG_{ads} of quinoline, 5-benzylquinoline and 8-hydroxy-5-benzylquinoline on surface of mild steel electrode

Inhibitors	K_{ads}/(×10^3 L·mol^{-1})	ΔG_{ads}/(kJ·mol^{-1})
Quinoline	17.15	−34.12
5-benzylquinoline	27.93	−35.33
8-hydroxy-5-benzylquinoline	30.30	−35.53

钢上的吸附性能最强，这与前面动电位极化曲线得到的结果相符合。

有机缓蚀剂在金属表面的吸附通常可以分为物理吸附、化学吸附和物理化学混合吸附[14]。物理吸附是缓蚀剂分子与金属表面通过分子间作用力结合，没有电子转移；化学吸附则是有机分子的自由电子与金属表面的 d-空轨道结合形成共价键或者有机分子的空轨道接受金属表面的自由电子形成反馈键而发生的吸附。因此，化学吸附比物理吸附更强更稳定。一般说来，当吸附自由能 ΔG_{ads} >−20 kJ/mol 时，被认为是物理吸附；ΔG_{ads}<−40 kJ/mol 时，为化学吸附；在这两者之间认为是物理化学混合吸附[15]。从表 5 中看出，喹啉、5-苯并喹啉、8-羟基-5-苯并喹啉在碳钢上的吸附均属于物理化学混合吸附，且倾向于化学吸附。

3　结论

1）通过 T.E.S.T 毒性软件计算发现，5-苯并喹啉是一种环境友好型缓蚀剂，8-羟基-5-苯并喹啉的毒性相对喹啉来说较小。

2）通过动电位极化曲线测试发现，5-苯并喹啉对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中具有优异的缓蚀性能，而喹啉的缓蚀效果一般，说明苯基能明显提高缓蚀效果。8-羟基-5-苯并喹啉的缓蚀效果优于 5-苯并喹啉，可以证实羟基的接入增强了喹啉类缓蚀剂的缓蚀效果。三种缓蚀剂均属于混合型缓蚀剂，5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉在碳钢表面形成了致密的保护膜，抑制了碳钢的腐蚀。

3）喹啉、5-苯并喹啉和 8-羟基-5-苯并喹啉在碳钢上面的吸附均符合 Langmuir 吸附，且为物理化学混合吸附。

参考文献：

[1] 刘红. 基于盐酸酸洗的含氧有机缓蚀剂制备、缓蚀性能及机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
LIU Hong. Preparation, Corrosion Inhibition Performance and Mechanism of Oxygenated Organic Corrosion Inhibitor Based on Pickling with Hydrochloric Acid[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

[2] ACHARY G, SACHIN H P, NAIK Y, et al. The Corrosion Inhibition of Mild Steel by 3-formyl-8-hydroxy Quinoline in Hydrochloric Acid Medium[J]. Materials Chemistry & Physics, 2008, 107: 44-50.

[3] SALAH M. Ionic Liquids Based Gemini Cationic Surfactants as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 216: 624-635.

[4] ZHANG Wei-wei, MA Rui, LIU Huan-huan, et al. Electrochemical and Surface Analysis Studies of 2-(quinolin-2-yl)quinazolin-4(3H)-one as Corrosion Inhibitor for Q235 Steel in Hydrochloric Acid[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 222: 671-679.

[5] 史少泽, 王旗. 两毒性预测软件应用于中药成分毒性预测的验证分析[J]. 中国新药杂志, 2016(25): 2647-2652.
SHI Shao-ze, WANG Qi. Validation of Two Predictives of Twares for the Toxicity Prediction of Chemicaling Redients of Chemicaling Redients[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2016(25): 2647-2652.

[6] JIANG Lu, QIANG Yu-jie, LEI Zu-lei, et al. Excellent Corrosion Inhibition Performance of Novel Quinoline Derivatives on Mild Steel in HCl Media: Experimental and

Computational Investigations[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 255: 53-63.

[7] POURGHASEMI H A, NADERI R, KOWSARI E, et al. Corrosion Behavior of Mild Steel in H_2SO_4 Solution with 1,4-di[1′-methylene-3′-methyl imidazolium bromide]- benzene as an Ionic Liquid[J]. Corrosion Science, 2016, 107: 96-106.

[8] LIAO Liu-li , MO Shi, LUO Hong-qun, et al. Longan Seed and Peel as Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acid Solution: Experimental and Theoretical Studies[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 499: 110-119.

[9] OBOT I B, UMOREN S A, GASEM Z M, et al. Theoretical Prediction and Electrochemical Evaluation of Vinylimidazole and Allylimidazole as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 1 mol/L HCl[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2014(21): 1328-1339.

[10] YILMAZ N, FITOZ A, ERGUN Ü, et al. A Combined Electrochemical and Theoretical Study into the Effect of 2-((thiazole-2-ylimino)methyl)Phenol as a Corrosion Inhibitor for Mild Steel in a Highly Acidic Environment[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 110-120.

[11] 胡会利, 李宁. 电化学测量[M]. 北京: 国防工业大学出版社, 2007: 212-235.
HU Hui-li, LI Ning. Electrochemical Measurement[m]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 212-235.

[12] 郑兴文. 酸性介质中咪唑基离子液体对碳钢的缓蚀性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHENG Xing-wen. Corrosion Inhibition Performance of Imidazolium-based Ionic Liquids on Carbon Steel in Acidic Medium[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[13] YILDIZ R. An Electrochemical and Theoretical Evaluation of 4,6-diamino-2-pyrimidinethiol as a Corrosion Inhibitor for Mild Steel in HCl Solutions[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 544-553.

[14] DAOUD D, DOUADI T, HAMANI H, et al. Corrosion Inhibition of Mild Steel by Two New S-heterocyclic Compounds in 1 mol/L HCl: Experimental and Computational Study[J]. Corrosion Science, 2015, 94: 21-37.

[15] BEHPOUR M, GHOREISHI S M, SALAVATI M, et al. Evaluating Two New Synthesized S-N Schiff Bases on the Corrosion of Copper in 15% Hydrochloric Acid[J]. Materials Chemistry & Physics, 2008, 107: 153-157.