

硫酸介质中桂花果提取液对 Q235 钢的缓蚀作用

文家新^{1,2}, 何建新², 刘云霞¹, 周永福¹

(1.重庆工业职业技术学院 化学与制药工程学院, 重庆 401120;

2.重庆大学 化学化工学院, 重庆 400044)

摘要: **目的** 研究在 0.5 mol/L 硫酸溶液介质中, 桂花果提取液 (OFFE) 对 Q235 钢的缓蚀作用及机理。

方法 通过失重法和极化曲线、电化学阻抗谱等电化学方法研究了桂花果提取液对 Q235 钢在 0.5 mol/L 硫酸溶液介质中的缓蚀性能, 考察了 25 °C 下桂花果提取液浓度对缓蚀效率的影响, 并对缓蚀机理进行了探讨。

结果 以 95% 的乙醇为溶剂浸提制备的桂花果提取液在 0.5 mol/L 硫酸介质中对 Q235 钢具有良好的缓蚀性能, 缓蚀效率随其质量浓度的增加而增大, 当其浓度达到 10 g/L 时, 其缓蚀效率可达 91.48%。电化学测试结果表明, 桂花果提取液为混合型缓蚀剂, 主要通过抑制阴极析氢过程来减缓 Q235 钢的腐蚀, 缓蚀机理为“几何覆盖效应”, 其有效缓蚀成分在 Q235 钢表面的吸附符合 Langmuir 等温式, 吸附平衡常数为 1.09 L/g。

结论 在 0.5 mol/L 的硫酸介质中, 桂花果提取液对 Q235 钢具有明显的缓蚀作用, 是一种有广泛应用前景的天然绿色缓蚀剂。

关键词: 桂花果提取液; 硫酸; Q235 钢; 缓蚀作用; 极化曲线; 电化学阻抗谱

中图分类号: TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0246-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.040

Corrosion Inhibition Effect of Osmanthus Fragrans Fruit Extract in 0.5M H₂SO₄ Medium on Q235 Steel

WEN Jia-xin^{1,2}, HE Jian-xin², LIU Yun-xia¹, ZHOU Yong-fu¹

(1.School of Chemical & Pharmaceutical Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;

2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: The work aims to study corrosion inhibition effect and mechanism of osmanthus fragrans fruit extract on Q235 steel in 0.5 mol/L sulphuric acid solution medium. The inhibition performance of osmanthus fragrans fruit extract to Q235 steel in 0.5 mol/L sulphuric acid solution medium was studied in electrochemical methods including weight loss method, polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Effects of osmanthus fragrans fruit extract concentration on inhibition efficiency at 25 °C were investigated extract. The inhibition mechanism extract was discussed as well. The osmanthus fragrans fruit extract prepared with 95% alcohol as extractive solvent exhibited excellent corrosion inhibition effect on Q235 steel in 0.5 mol/L sulphuric acid solution medium. The inhibition efficiency increased as the concentration of osmanthus fragrans fruits extract increased, and the inhibition efficiency was up to 92.90% when the concentration of osmanthus fragrans fruit extract was 10 g/L. Electrochemical test results showed that the osmanthus fragrans fruits extract was a mixed-type inhibitor which

收稿日期: 2016-10-15; 修订日期: 2016-11-21

Received: 2016-10-15; Revised: 2016-11-21

基金项目: 重庆市教委资助项目 (KJ122103)

Fund: Supported by the Education Commission of Chongqing(KJ122103)

作者简介: 文家新 (1983—), 男, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: WEN Jia-xin (1983—), Male, Doctor candidate, Lecturer, Research focus: material corrosion and protection.

inhibited corrosion of Q235 steel mainly by inhibiting hydrogen evolution process on the cathode, and the inhibition mechanism belonged to geometric blocking effect. The adsorption of effective inhibition part on the Q235 steel surface accorded with the Langmuir isothermal equation, and the adsorption equilibrium constant was 1.09 L/g. The osmanthus fragrans fruits extract is a natural and green corrosion inhibitor having wide application prospect, which has significant corrosion inhibition effect on Q235 steel in 0.5 mol/L sulphuric acid solution medium.

KEY WORDS: osmanthus fragrans fruit; hydrochloric acid; Q235 steel; corrosion inhibition; polarization curve; electrochemical impedance spectroscopy

腐蚀是现代工业和日常生活中一种常见的破坏因素^[1]，而添加缓蚀剂因具有工艺简便、成本低廉和实用性强等优点而被广泛用于金属的腐蚀控制^[2]。酸性条件下性能优异的缓蚀剂多为含 N、S、O、P 等极性原子的杂环化合物，一般表现为吸附膜型作用机理^[3]。随着生态环境保护意识的逐步增强，一些传统的有机缓蚀剂虽性能优良，但其毒性大、难降解和成本高等不足限制了其应用和发展^[4]。从某些天然植物中提取有效成分作为缓蚀剂，具有来源广、低毒和可降解等优越性，已成为当前缓蚀剂研究开发的热点之一^[5,6]。如利用黄酸枣叶提取物作缓蚀剂抑制了硫酸介质中铝的腐蚀^[7]，再如从银杏叶、苦瓜叶、鳄梨树、柑橘皮等天然植物中提取到对钢具有缓蚀作用的有效成分^[8-11]。桂花是珍贵的观赏性芳香植物，主要分布于广西、湖南、贵州及福建等地，桂花果实（osmanthus fragrans fruits）为椭圆形核果，成熟时为紫黑色^[12]。目前，国内外对桂花果提取液（OFFE）的研究还主要集中在其化学成分及抗氧化活性分析上，而对其缓蚀性能的研究还不多见^[13,14]。

本文通过失重法和电化学方法研究了 OFFE 对 Q235 钢在 0.5 mol/L 硫酸介质中的缓蚀作用，考察了缓蚀效率随 OFFE 浓度变化的影响，并探讨了缓蚀机理及其在 Q235 钢表面的吸附行为。

1 试验

1.1 原料、试剂及仪器

原料和试剂：浓硫酸、95%乙醇、丙酮均为分析纯，购于重庆川东化工厂；所用水为去离子水；桂花果实采摘自重庆工业职业技术学院校园；Q235 钢片（30 mm×20 mm×1 mm）的化学成分如表 1 所示。

仪器：电子天平（CP153），奥豪斯仪器（上海）有限公司生产；傅立叶红外光谱仪（Tensor27），Bruker

公司生产；电化学工作站（CHI660B），上海辰华仪器有限公司生产。

1.2 桂花果提取液（OFFE）的制备

取 20 g 经仔细干燥和粉碎的桂花果粉末于 250 mL 的圆底烧瓶中，加入 95%的乙醇 150 mL，加热回流，浸提 4 h，抽滤，滤液旋蒸除去溶剂，真空干燥得到棕红色的粘稠液。

1.3 红外光谱测试

取 1.2 节制备的样品少许，采用 KBr 压片法进行红外表征测试，测量范围为 400 ~ 4000 cm⁻¹。

1.4 失重法试验

25 ℃下，用砂纸将 Q235 钢片打磨光亮，丙酮超声清洗脱脂，去离子水冲洗，吹干，用电子天平精确称重后分别置于含有 2 g/L、4 g/L、6 g/L、8 g/L 和 10 g/L OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸溶液介质中浸泡 24 h。取出，先用去离子水，再用丙酮清洗，干燥，精确称重，平行试验 3 块钢片求失重平均值，分别按式（1）和式（2）计算腐蚀速率 v 和缓蚀效率 η_w ^[15]。

$$v = \frac{m_0 - m}{St}$$

(1)

式中， m_0 、 m 分别为 Q235 钢片腐蚀前后的质量，g； S 为 Q235 钢片的表面积，m²； t 为腐蚀时间，h。

$$\eta_w = \frac{v_0 - v}{v_0}$$

(2)

式中 v_0 、 v 分别代表 Q235 钢片在含和不含 OFFE 的硫酸溶液中的腐蚀速率，g/(m²·h)。

1.5 电化学测试试验

工作电极为用 Q235 钢制成的直径为 1 cm 的圆柱，工作面积为 0.785 cm²，非工作面用环氧树脂封装。测试前工作面经 200[#]、400[#]、600[#]和 800[#]砂纸逐级打磨至表面平整光亮，经丙酮超声清洗除油 3 min，取出后用去离子水冲洗、冷风吹干。

极化曲线和交流阻抗谱均使用电化学工作站测得。实验采用三电极体系，研究电极为 Q235 钢圆柱电极，参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为大片铂

表 1 Q235 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Q235 steel wt%

Fe	C	S	Mn	Si	P	Cr	Cu
其余	0.17	0.017	0.46	0.46	0.05	0.08	0.19

电极, 实验之前 Q235 钢电极于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的待测溶液中稳定 1 h。先进行自腐蚀电位扫描, 待体系稳定后, 再分别测量极化曲线 (扫描范围: $E_{\text{corr}} \pm 300 \text{ mV}$, 扫描速率: 0.5 mV/s) 和电化学阻抗谱 (开路电位下、频率范围 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$ 、交流信号幅值 $\pm 5 \text{ mV}$), 阻抗谱的解析使用 Solartron 公司的 Zview 软件。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

OFFE 的红外光谱如图 1 所示, 依据文献[13]的研究结论, 3473 cm^{-1} 处的强吸收宽散峰可能为羧基 ($-\text{COOH}$)、羟基 ($-\text{OH}$) 和 $-\text{NH}_2$ 官能团中 $\text{N}-\text{H}$ 的伸缩振动; 饱和 $-\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动峰出现在 2927 cm^{-1} 处; $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{C}=\text{C}$ 的伸缩振动峰分别在 1730 cm^{-1} 和 1633 cm^{-1} 处; $\text{C}-\text{N}$ 键和 $\text{C}-\text{O}$ 键的伸缩振动峰分别在 1201 cm^{-1} 处和 1024 cm^{-1} 处, 1465 cm^{-1} 处可能为饱和 $\text{C}-\text{H}$ 键的变形振动峰, $1000 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 区间的吸收峰也可能为苯环或芳杂环的骨架振动峰, 808 cm^{-1} 、 736 cm^{-1} 和 669 cm^{-1} 处的吸收峰为苯环或芳杂环的取代指纹区。因此, OFFE 为含有极性基团 (氨基、羧基、羟基、羰基、杂环) 的不饱和有机化合物, 故有成为酸性缓蚀剂的可能。

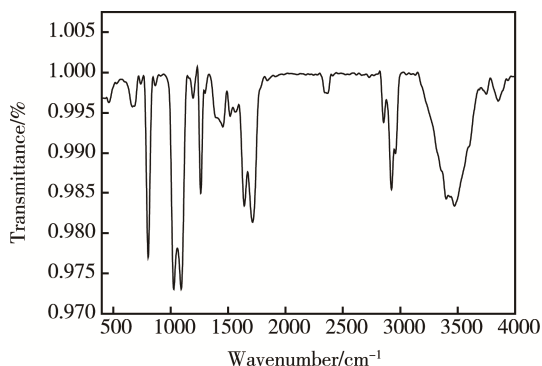


图 1 OFFE 的红外光谱图

Fig.1 IR spectra of OFFE

2.2 失重法试验结果分析

图 2 为 25°C 下, 不同浓度的 OFFE 对 Q235 钢在 0.5 mol/L 硫酸介质中的缓蚀效率的影响情况。图中, OFFE 对 Q235 钢的缓蚀效率随其浓度的增加而增大, 且缓蚀效率先增加较快, 当 OFFE 浓度高于 4 g/L 时, 增速放缓, 当 OFFE 浓度为 10 g/L 时, 缓蚀效率达到 91.48% , 缓蚀作用明显。其缓蚀机理可解释为: 一方面 OFFE 含有大量含 O、N 极性基团 (氨基、羧基、羟基、羰基、芳杂环) 的不饱和有机化合物[13], 在酸性溶液中极易质子化, 而硫酸溶液中的 Q235 钢表面可能会因为吸附 SO_4^{2-} 而带负电, 使得质子化的 OFFE 会与钢表面发生静电吸附, 从而大量富集于 Q235 钢

表面, 产生缓蚀协同效应[16,17]。另一方面 OFFE 中的 O、N 原子具有大量的孤对电子, 可与铁原子未占据的空 d 轨道形成配位键发生化学吸附, 在钢表面形成吸附膜而抑制腐蚀。此外, OFFE 缓蚀剂也可能与溶液中的 Fe^{2+} 形成螯合物而吸附在 Q235 钢表面, 使得 Q235 钢铁面的吸附层更加完整致密, 从而显著加强了缓蚀作用[18]。因此, OFFE 的浓度越大, 其分子吸附到 Q235 钢表面的量越多, 覆盖越完整, 缓蚀效率越大。

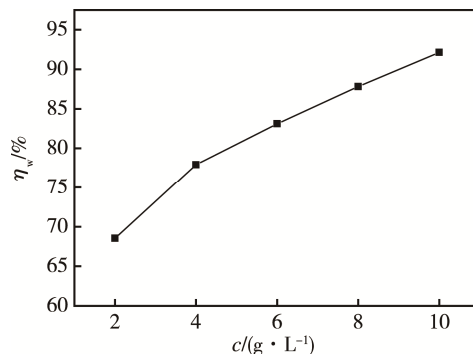


图 2 0.5 mol/L 硫酸介质中 OFFE 对 Q235 钢的缓蚀效率与其浓度关系图

Fig.2 Relationship between inhibition efficiency obtained from weight loss method and concentration of OFFE in $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ for Q235 steel

为研究 OFFE 在 Q235 钢表面的吸附行为, 假设 OFFE 在 Q235 钢表面的吸附符合 Langmuir 等温吸附方程[19], 则有:

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K} + c \quad (3)$$

式中, c 为缓蚀剂浓度, K 为吸附平衡常数, θ 为表面覆盖度, 其值可取缓蚀效率 η_w 。

以 c/θ 对 c 作图得到图 3, 图中显示在 $2 \sim 10 \text{ g/L}$ 的浓度范围内 c/θ 与 c 具有良好的线性关系, 其线性相关系数为 0.9969 , 斜率为 0.9924 , 两者均十分接近 1, 说明 OFFE 在 Q235 钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温式, 由 c/θ - c 直线的截距求得吸附平衡常数为 1.09 L/g 。此外, 其斜率有所偏离 1, 说明 Q235

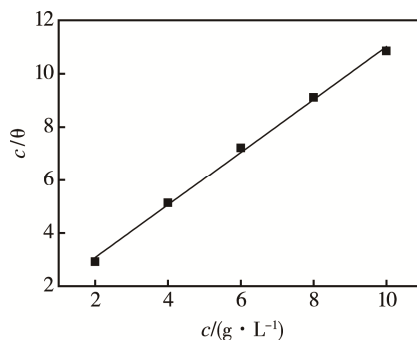


图 3 0.5 mol/L 硫酸介质中的 c/θ - c 图
Fig.3 Plot of c/θ - c $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ solution

钢表面的 OFFE 分子间存在相互作用力^[20]。

2.3 Tafel 极化曲线

图 4 所示为 25 ℃下, Q235 钢在添加不同浓度 OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸介质中的 Tafel 极化曲线, 利用 CHI 软件拟合不同浓度 OFFE 下的 Tafel 曲线阴极支, 拟合结果示于表 2 中, 其中, b_c 、 b_a 分别为阴极分支和阳极分支的斜率, E_{corr} 为腐蚀电位, J_{corr} 为腐蚀电流密度, 缓蚀效率 η_p 由式 (4) 计算。

$$\eta_p = \frac{J_{\text{corr}} - J'_{\text{corr}}}{J_{\text{corr}}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 J_{corr} 和 J'_{corr} 分别为 Q235 钢在加入 OFFE 前、后的腐蚀电流密度。

由图 4 及表 2 可知, 添加 OFFE 后 Q235 钢的自腐蚀电位正移, 且阴阳支极化曲线均明显下移, 腐蚀电流密度降低, 说明在含 OFFE 的硫酸介质中, Q235 钢的阳极溶解和阴极析氢过程均受到抑制, 且随着 OFFE 质量浓度增加, 抑制程度增加, 腐蚀电流密度减小, 当 OFFE 的质量浓度为 10 g/L 时, 其缓蚀效率为 92.9%。添加 OFFE 后 Q235 钢的自腐蚀电位(E_{corr}) 变化在 50 mV 以内, 且对阴阳极腐蚀反应均有明显抑制, 这说明 OFFE 在硫酸介质中为混合抑制型缓蚀

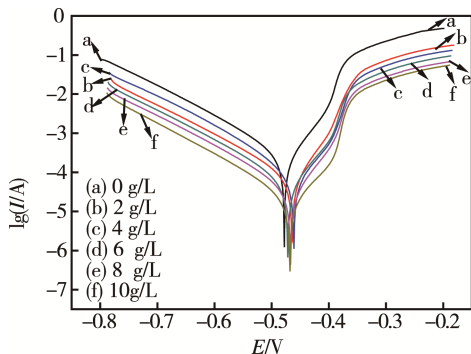


图 4 Q235 钢在含不同浓度 OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸介质中的 Tafel 极化曲线

Fig.4 Tafel polarizations of Q235 steel in 0.5 mol/L H₂SO₄ with different OFFE concentrations

表 2 极化曲线拟合结果
Tab.2 Fitting results of polarization curves

$c/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$E_{\text{corr}}(\text{vs. SCE})/\text{V}$	b_c/V^{-1}	b_a/V^{-1}	$\lg J_c$	$J_c/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\eta/\%$
0	-0.460	9.479	16.228	-3.850	1.412×10^{-4}	—
2	-0.464	8.300	24.480	-4.269	5.388×10^{-5}	61.84
4	-0.461	9.297	33.090	-4.376	4.205×10^{-5}	70.22
6	-0.472	8.521	32.461	-4.522	3.007×10^{-5}	78.70
8	-0.467	8.643	32.646	-4.697	2.011×10^{-5}	85.76
10	-0.468	8.717	39.630	-4.999	1.002×10^{-5}	92.90

剂^[3], 推断其缓蚀作用机理为“几何覆盖效应”^[21]。

此外, 图 4 中阴极曲线斜率变化不大, 且负移程度明显, 这说明 OFFE 主要通过抑制析氢过程来减缓 Q235 钢的腐蚀, 即 OFFE 分子主要被吸附在 Q235 钢电极表面阴极反应活性点, 从而导致腐蚀速率降低。

2.4 电化学阻抗谱

图 5 示出 25℃下, Q235 钢在不同浓度 OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸介质中的电化学阻抗谱, 图中, 在未添加及添加 OFFE 时阻抗谱均为单一半圆容抗弧, 这说明该体系中 Q235 钢的腐蚀主要由电荷传递控制, 但随着 OFFE 浓度的增加, 容抗弧半径逐渐变大, 这说明腐蚀反应电荷传递阻力增大, 腐蚀速率减慢, 缓蚀效率增加。

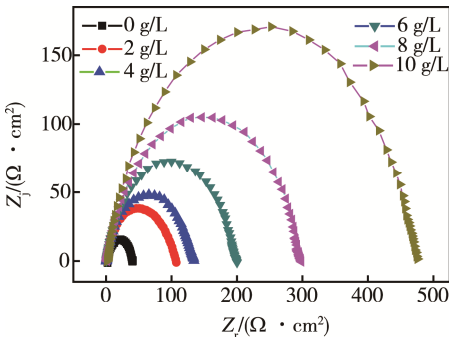


图 5 Q235 钢在含不同浓度 OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸介质中的电化学阻抗谱

Fig.5 EIS of Q235 steel in 0.5mol/L H₂SO₄ with different OFFE concentrations

根据上述阻抗谱的特征, 设计图 6 所示的等效电路对容抗弧进行拟合, 其中 R_s 为溶液电阻, R_t 为电荷传递电阻, 考虑“弥散效应”^[22], 常相位角元件用 CPE 表示, 拟合结果列于表 3 中。利用下式 (5) 可以计算缓蚀效率^[23]:

$$\eta_R = \frac{R_t - R_t^0}{R_t} \times 100\% \tag{5}$$

式中, R_t^0 、 R_t 分别代表未添加及添加 OFFE 后体系的电荷传递电阻。



图 6 Q235 钢在添加 OFFE 的 0.5 mol/L 硫酸介质中的等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of Q235 steel in 0.5 mol/L H₂SO₄ with the addition of inhibitors

从表 3 拟合所得参数值可知,随着 OFFE 浓度的增加,电荷传递电阻 R_t 逐渐增大,说明 OFFE 在 Q235 钢表面吸附后抑制了电荷传递,减缓了腐蚀。加入 OFFE 后,双电层电容逐渐变小,意味着 OFFE 分子在 Q235 钢表面的吸附量增加,挤走了介电常数较大的水分子^[24]。当 OFFE 质量浓度为 10 g/L 时,缓蚀效率达 91.65%,这与失重法和极化曲线法研究结果基本一致。

表 3 拟合所得各参数值
Tab.3 Parameters obtained from fitting

$c/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{dl}/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	n	$R_t/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\eta_R/\%$
0	0.724	363.36	0.9147	39.7	
2	1.442	200.44	0.8356	106.8	62.83
4	1.235	110.84	0.8307	134.5	70.48
6	1.405	96.21	0.8218	199.2	80.07
8	1.674	91.51	0.8020	297.9	86.67
10	1.297	94.54	0.7030	475.3	91.65

3 结论

以 95%乙醇为溶剂浸提制备的 OFFE 是一种性能优良的天然绿色植物缓蚀剂,其对 Q235 钢在 0.5 mol/L 硫酸介质中的缓蚀效率随其浓度的增加而增大,当其质量浓度为 10 g/L 时,缓蚀效率可达 91% 以上,有广泛的应用前景。OFFE 在 Q235 钢表面的吸附满足 Langmuir 吸附模型,求得其吸附平衡常数为 1.09 L/g。OFFE 为可抑制阴阳极反应的混合型缓蚀剂,缓蚀机理为“几何覆盖效应”,但其主要通过吸附在 Q235 钢表面的阴极反应活性点来抑制析氢过程,降低反应速率。

参考文献:

- [1] 蒋伟, 龚敏, 赵金平. 天然植物绿色缓蚀剂的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 278—281.
JIANG Wei, GONG Min, ZHAO Jin-ping. Progress of Research on Green Corrosion Inhibitors Extracted From Natural Plants[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(4): 278—281.
- [2] FINSGAR M, JACKSON J. Application of Corrosion Inhibitors for Steels in Acidic Media for the Oil and Gas Industry: A review[J]. Corrosion Science, 2014, 86(3): 17—41.
- [3] 陈文, 陶永元, 管春平, 等. 电化学法研究芭蕉叶提取物在盐酸中对碳钢的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 124—130.
CHEN Wen, TAO Yong-yuan, GUAN Chun-ping, et al. Electrochemical Investigation of Extracts of Musa Basjoo Leaves as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 124—130.
- [4] BASTIDAS D M, IGLESIA V M L. Organic Acid Vapours and Their Effect on Corrosion of Copper: a review[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2007, 42(3): 272—280.
- [5] MOURYA P, BANERJEE S, SINGH M M. Corrosion Inhibition of Mild Steel in Acidic Solution by Tagetes Erecta (Marigold Flower) Extract as a Green Inhibitor[J]. Corrosion Science, 2014, 85(8): 352—363.
- [6] RAJA P B, SETHURAMAN M G. Natural Products as Corrosion Inhibitor for Metals in Corrosive Media—A review[J]. Materials Letters, 2008, 62(1): 113—116.
- [7] OBI-EGBEDI N O, OBOT I B, UMOREN S A. Spondias Mombin L. as a Green Corrosion Inhibitor for Aluminium in Sulphuric Acid: Correlation between Inhibitive Effect and Electronic Properties of Extracts Major Constituents Using Density Functional Theory[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2012, 5(3): 361—373.
- [8] LOTO C A, JOSEPH O O, LOTO R T, et al. Inhibition Effect of Vernonia Amygdalina Extract on the Corrosion of Mild Steel Reinforcement in Concrete in 3.5M NaCl Environment[J]. Int J Electrochem Sci, 2013, 8(9): 11087—11100.
- [9] SINGH A, LIN Y H, LIU W Y, et al. A Study on the Inhibition of N80 Steel in 3.5% NaCl Solution Saturated with CO₂ by Fruit Extract of Gingko Biloba[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014, 45(4): 1918—1926.
- [10] BELKHAOUA M, BAMMOU L, SALGHI R, et al. Inedible Avocado Extract: An Efficient Inhibitor of Carbon Steel Corrosion in Hydrochloric Acid[J]. Int J Electrochem Sci, 2013, 8(9): 10987—10999.
- [11] FIORI-BIMBI M V, ALVAREZ P E, VACA H, et al. Corrosion Inhibition of Mild Steel in HCL Solution by Pectin[J]. Corrosion Science, 2015, 92(1): 192—199.
- [12] 雷明. 桂花果类黄酮分离纯化工艺及其抗氧化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 77—82.
LEI Ming. Purification Techniques of Flavonoids from the Fruit of Osmanthus Fragrans and Evaluation of Their Antioxidant Effects[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(4): 77—82.
- [13] 尹伟, 刘金旗, 张国升. 桂花果实的化学成分研究[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(24): 4329—4334.
YIN Wei, LIU Jin-qi, ZHANG Guo-sheng. Chemical Constituents of Osmanthus Fragrans Fruits[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(24): 4329—4334.
- [14] 田成. 桂花果实多酚的超声波提取及抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 106—110.

- TIAN Cheng. Ultrasonic Extraction and Antioxidant Activity of Polyphenols from *Osmanthus fragrans* Fruits[J]. Food Science, 2011, 32(24): 106—110.
- [15] SOLTANI N, TAVAKKOLI N, KASHANI M K, et al. Silybum Marianum Extract as a Natural Source Inhibitor for 304 Stainless Steel Corrosion in 1.0M HCl[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(5): 3217—3227.
- [16] 付惠, 李向红, 肖旭萍. 麻竹竹叶提取物在酸性介质中对冷轧钢的缓蚀作用[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(8): 548—550.
- FU Hui, LI Xiang-hong, XIAO Xu-ping. Corrosion Inhibition of Extractive from *Dendrocalamus Latiflorus* Munro Leaves for Cold Rolled Steel in Acid Solutions[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(8): 548—550.
- [17] ABDEL-GABER A M, KHALIL N, ABOUEL-FETOUE A. The Dissolution Mechanism of Steel in Inorganic Acids[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2003, 50(6): 442—447.
- [18] 黄艳仙, 蔡洁, 周建敏. 白玉兰叶提取物对 A3 钢在酸性介质中缓蚀性能的研究[J]. 应用化工, 2010, 39(4): 538—540.
- HUANG Yan-xian, CAI Jie, ZHOU Jian-min. Corrosion Inhibition of Magnolia Leaf Extracts in Acid Medium for A3 Steel[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(4): 538—540.
- [19] LI Ling-jie, ZHANG Xue-ping, LEI Jing-lei, et al. Adsorption and Corrosion Inhibition of *Osmanthus Fragrans* Leaves Extract on Carbon Steel[J]. Corrosion Science, 2012, 63(9): 82—90.
- [20] ZHAO Tian-pei, MU Guan-nan. The Adsorption and Corrosion Inhibition of Anion Surfactants on Aluminium Surface in Hydrochloric Acid[J]. Corrosion Science, 1999, 41(10): 1937—1944.
- [21] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 235—237.
- CAO Chu-nan. Corrosion Electrochemistry Principles [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 235—237.
- [22] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 185—187.
- CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002: 185—187.
- [23] MISHRA A K, BALASUBRAMANIAM R. Corrosion Inhibition of Aluminum Alloy AA 2014 by Rare Earth Chlorides[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1027—1044.
- [24] 李向红, 付惠, 邓书端. 云南甜龙竹竹叶提取物在盐酸中对钢的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(2): 149—154.
- LI Xiang-hong, FU Hui, DENG Shu-duan. Inhibition Effect of *Dendrocalamus Brandisii* Leaves Extract on Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. J Chin Soc Corr Pro, 2011, 31(2): 149—154.