

石斛根提取物在盐酸中对 Q235 钢的缓蚀作用研究

陈思屹^{1*}, 舒加喜¹, 刘嘉奇¹, 李振彦², 陈书军¹

(1. 遵义师范学院化学化工学院, 贵州 遵义 563002; 2. 遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563002)

摘要:研究了石斛根提取物(DNL)在 1 mol/L 盐酸中对 Q235 钢的缓蚀性能。结果表明, DNL 作为一种阴极抑制更加突出的混合型缓蚀剂, 能有效减缓 Q235 钢在盐酸中的腐蚀; 缓蚀效率随 DNL 浓度增加而增大, 随温度升高而降低; 当 DNL 添加量为 2.0 g/L 时, 缓蚀效率可达 95.99%。等温吸附模型研究表明, DNL 能自发地在 Q235 钢表面吸附, 且符合 Langmuir 吸附等温式。

关键词:盐酸; 缓蚀; Q235 钢; 石斛根; 提取物

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)S2-0222-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.044

Corrosion inhibition of dendrobium root extracts for Q235 steel in HCl medium

CHEN Si-yi^{1*}, SHU Jia-xi¹, LIU Jia-qi¹, LI Zhen-yan², CHEN Shu-jun¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563002, China;

2. School of Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563002, China)

Abstract: The corrosion inhibition performance of dendrobium root extracts (DNL) for Q235 steel in 1 mol·L⁻¹ HCl medium is studied, and the results support that DNL as a mixed-type corrosion inhibitor with prominent cathodic inhibition can effectively slow down the corrosion of Q235 steel in HCl. The corrosion inhibition efficiency increases with the increase of DNL concentration, and decreases with the increase of solution temperature. The corrosion inhibition efficiency can reach 95.99% when DNL dosage is 2.0 g·L⁻¹. It is found through isothermal adsorption model study that DNL can spontaneously adsorb on the surface of Q235 steel, which conforms to Langmuir adsorption isotherm.

Key words: HCl; corrosion inhibition; Q235 steel; dendrobium root; extracts

金属在使用过程中由于周围环境的影响易发生腐蚀^[1]。金属腐蚀导致严重的资源浪费, 给国民经济造成巨大损失, 同时也给人们生活与生产带来了巨大的安全隐患^[2-3]。在众多的金属防腐蚀方法中, 缓蚀剂具有使用方便、成本低、效果好等特点, 已广泛应用于各个行业的防腐蚀领域^[4-5]。从植物体中提取天然产物作为缓蚀剂, 具有来源广、无毒无污染、易降解等特点, 符合环境保护与可持续发展理念, 目前已成为绿色缓蚀剂发展的重要方向之一^[6-8]。例如, Feng 等^[9]研究表明, 藜芦根提取物可作为金属的绿色缓蚀剂使用。Tan 等^[10]探究了木瓜叶提取物对铜在硫酸中的缓蚀性能。

石斛具有抗炎、抗肿瘤、免疫调节、调节血糖等功效, 作为我国传统名贵中草药在贵州、云南、广东、广西等地均有较大面积的种植^[11-12]。石斛根作为

石斛加工的副产物, 目前关于它的应用基础研究还相对较少。为此, 本文选用贵州赤水出产的石斛根为研究对象, 通过蒸馏水浸提法制备了石斛根提取物(DNL); 采用傅里叶红外光谱, 对 DNL 的成分进行了分析; 利用电化学测试, 研究了温度与浓度对 DNL 缓蚀性能的影响; 借助失重实验、等温吸附模型以及扫描电镜, 进一步探究了 DNL 在金属表面的吸附和缓蚀性能, 以便为 DNL 作为绿色植物缓蚀剂使用提供一些理论依据和技术参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验基材为 Q235 钢, 化学组成为 C 12%、Mn 35%、Si 14%、P 1.9%、S 1.0%、Fe 36.1%。石斛根采摘于贵州省赤水市长期镇, 将其清洗并自然晾干,

收稿日期: 2022-04-05; 修回日期: 2022-05-14

基金项目: 贵州省科技厅项目(黔科合基础-ZK[2022]569号); 贵州省教育厅项目(黔教合 KY 字[2020]102, 黔教合 KY 字[2012]017-16号); 遵义市科技局项目(遵市科合 HZ 字[2021]205号、213号)

作者简介: 陈思屹(1990-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向为腐蚀与防护, 通讯联系人, chensiyijiaoyou@163.com。

粉碎后储存于密封袋内,置于干燥器中备用。采用蒸馏水配制 1 mol/L 盐酸作为腐蚀介质。实验所用试剂均为分析纯。

1.2 DNL 的制备

DNL 的制备流程如下:取 20 g 石斛根干粉末于 300 mL 蒸馏水中,在 100℃ 下加热回流 4 h,真空抽滤得滤液,旋蒸浓缩后冷冻干燥,得到浅黄色粉末,即为 DNL。采用 IRPresti 型傅里叶变换红外光谱仪分析 DNL 的成分,波数范围为 400~4 000 cm^{-1} 。

1.3 电化学测试

采用 CHI660E 电化学工作站和标准三电极体系进行电化学测试。Q235 钢(割成 1.0 cm×1.0 cm×1.0 cm,由环氧树脂封装后裸露出 1.0 cm^2 的面积)作为工作电极,铂电极作为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极。开路电位(E_{OCP})测试时间为 1 200 s,使得 Q235 钢电极表面到达一个稳定状态。电化学阻抗测试扫描频率范围为 $10^5 \sim 10^{-2}$ Hz,使用 5 mV 的正弦电压作为激励信号。动电位极化曲线测试的电位扫描区间为 $E_{\text{OCP}} \pm 250$ mV,扫描速率设定为 1 mV/s。

1.4 失重实验

采用 2 cm×1.5 cm×0.5 cm 的 Q235 钢片试样,表面经砂纸打磨、丙酮超声清洗、蒸馏水冲洗后冷风吹干备用。将精确称量后的钢片试样平行挂于含有 2.0 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中,并以空白盐酸溶液作为对照。室温下浸泡 24 h 后取出,清洗表面腐蚀产物,吹干再次精确称重。以 3 组失重平行实验得到的平均值用式(1)计算 Q235 钢的腐蚀速率:

$$v = \Delta m / (s \times t) \quad (1)$$

式中: v 为腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; Δm 为腐蚀前后试样的质量差, g ; s 为试样的总表面积, m^2 ; t 为试样的腐蚀时间, h 。

对应的缓蚀效率 $\eta(\%)$ 计算公式如下:

$$\eta = [(v_0 - v) / v_0] \times 100\% \quad (2)$$

其中: v 和 v_0 分别为 Q235 钢片在含有 DNL 和空白盐酸溶液中的腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

1.5 扫描电镜测试

把尺寸为 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm 的 Q235 钢样品在 400#~2 000# 的砂纸上打磨光亮,浸泡在含有和不含 2.0 g/L DNL 的盐酸溶液中 3 h 后,分别采用无水乙醇与蒸馏水超声清洗并吹干试样,利用 KYKY-EM6900 型扫描电镜观察试样腐蚀后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 DNL 的红外光谱分析

图 1 为 DNL 的红外光谱图。图中 3 421 cm^{-1} 处的宽吸收峰归属于水或糖类羟基的伸缩振动; 2 921 与 2 862 cm^{-1} 处分别为 $-\text{CH}_2-$ 的碳氢反对称伸缩振动与对称伸缩振动吸收峰^[13], 这表明 DNL 中具有长链化合物; 1 628 cm^{-1} 处为芳香类或生物碱物质的芳环、共轭羰基的伸缩振动峰或 N—H 的弯曲振动吸收峰; 1 510 cm^{-1} 处为芳香类物质的芳香环骨架伸缩振动吸收峰; 1 454 与 1 420 cm^{-1} 为 C—H 的弯曲振动峰、芳香环骨架的伸缩振动或 C—N 的伸缩振动吸收峰^[14]; 1 250~1 000 cm^{-1} 归属于多糖物质的 C—O 伸缩振动峰; 950 cm^{-1} 以下为糖类物质糖环骨架的振动峰或 N—H 的面外弯曲振动吸收峰^[15]。综上所述, DNL 中含有大量的 N、O 杂原子以及不饱和基团的共轭结构, 这些杂原子上的孤对电子或共轭结构的 π 电子易与金属表面原子空间空轨道相互作用, 形成配位键而在金属表面吸附^[16]。由此可以判断, DNL 可以作为金属潜在的高效缓蚀剂。

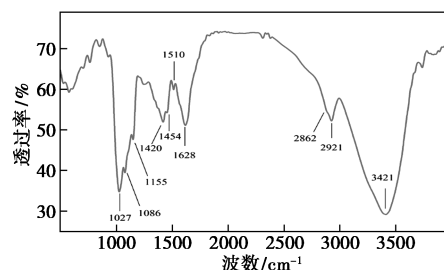
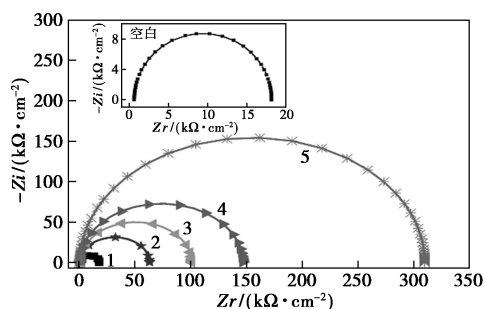


图 1 DNL 的红外光谱图

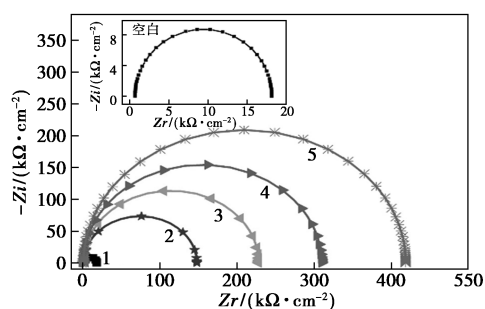
2.2 电化学阻抗谱分析

图 2 是 298~313 K 时, Q235 钢在含不同浓度 DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的电化学阻抗谱图。从图中可以看出, 随着 DNL 浓度增加或溶液温度升高, Nyquist 图的形状并没有发生显著变化, 说明添加 DNL 并未对 Q235 钢在盐酸中的腐蚀机制产生较大的影响。如图 2(a) 所示, 随着溶液中 DNL 浓度增加, 容抗弧半径明显增大, 表明增加 DNL 浓度利于更多的 DNL 分子在 Q235 钢表面吸附, 使得腐蚀反应的电阻不断增大, 从而抑制了 Q235 钢的腐蚀。从图 2(b) 可见, 容抗弧的半径随着溶液温度的升高而减小, 这是因为温度上升使得 DNL 分子的热运动加剧, 导致分子在 Q235 钢表面的脱附效应增强^[17]。

此外,温度上升也会加速腐蚀介质的热运动,进而加剧介质对 Q235 钢的腐蚀。



1—空白;2—0.1 g/L;3—0.5 g/L;4—1 g/L;5—2 g/L
(a) 298 K 时不同 DNL 浓度



1—空白;2—313 K;3—303 K;4—298 K;5—293 K
(b) 不同温度时 2.0 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液

图 2 Q235 钢的电化学阻抗谱图

采用图 3 所示等效电路图对阻抗谱数据进行拟合,拟合结果如表 1 与表 2 所示。其中, R_s 表示溶液电阻; R_{ct} 为腐蚀反应的电荷转移电阻; C_{dl} 为界面双电层电容。DNL 对 Q235 钢的缓蚀效率 η_{ct} 可通过式(3)计算得到,其中 R_{ct} 和 $R_{ct,0}$ 分别表示添加和未添加 DNL 时的电荷转移电阻。

$$\eta = [(R_{ct,0} - R_{ct}) / R_{ct,0}] \times 100\% \quad (3)$$

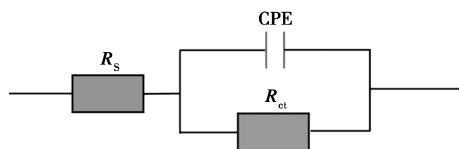


图 3 等效电路图

从表 1 可以看出,随着 DNL 浓度增大,电荷转移电阻 R_{ct} 增大,即腐蚀反应阻力增大,相应的缓蚀效率增高。另一方面,随着 DNL 浓度增大 C_{dl} 值逐渐降低,这是因为 DNL 浓度增大,使得更多的具有较小介电常数的有机分子在 Q235 钢表面吸附,从而导致双电层厚度增加和介电常数减小,因此增加 DNL 浓度有利于 DNL 分子在金属表面吸附形成致密的保护膜,从而减缓金属腐蚀。由表 2 可知,随着

表 1 298 K 时 Q235 钢在含不同浓度 DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的阻抗图谱拟合参数

$C(\text{DNL})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$
空白	0.6574	121.00	17.50	—
0.1	0.6009	53.73	62.47	71.99
0.5	0.7148	36.61	100.10	82.52
1.0	0.8323	27.57	145.80	88.00
2.0	0.6884	22.89	309.00	94.34

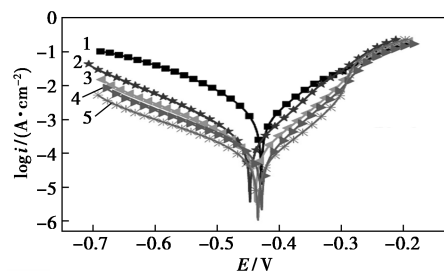
表 2 不同温度下 Q235 钢在含 2 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的阻抗图谱拟合参数

T/K	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\eta/\%$
空白	0.6574	121.00	17.5	—
293	0.6987	21.47	418.1	95.81
298	0.6884	22.89	309.0	94.34
303	0.6813	24.13	227.4	92.30
313	0.6797	24.79	147.1	88.10

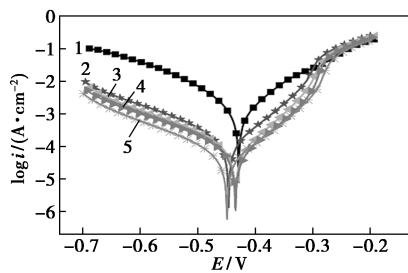
溶液温度升高, R_{ct} 逐渐减小,同时 C_{dl} 值增大,表明升高温度不利于 DNL 分子在盐酸中对 Q235 钢的缓蚀。但在 313 K 时, DNL 的缓蚀效率依旧接近 90%,表明在一定的温度范围内 DNL 能够展现出很好的缓蚀性能。

2.3 动电位极化曲线分析

图 4 为 298~313 K 时, Q235 钢在含不同浓度 DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的动电位极化曲线。从图中可以看出,随着 DNL 浓度增加或溶液温度降低,腐蚀电位发生负移,同时极化曲线阴、阳极腐蚀电流密度明显降低。这表明 DNL 在 Q235 钢表面吸附可以有效抑制金属阴、阳极的腐蚀反应。相比之下,图中阴极极化电流降低得更加明显,意味着在盐酸溶液中 DNL 对 Q235 钢属于一种阴极抑制更加突出的混合型缓蚀剂。



1—空白;2—0.1 g/L;3—0.5 g/L;4—1 g/L;5—2 g/L
(a) 298 K 时不同 DNL 浓度



1—空白;2—313 K;3—303 K;4—298 K;5—293 K
(b)不同温度时 2.0 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液

图 4 Q235 钢的动电位极化曲线

借助 Tafel 外推法对腐蚀电流密度、阳极与阴极的斜率进行拟合,结果列于表 3 和表 4。表中 E_{corr} 为腐蚀电位; I_{corr} 为腐蚀电流; β_c 与 β_a 分别为阴极和阳极 Tafel 斜率; η 为缓蚀效率,计算公式如下:

$$\eta = [(I_{\text{corr},0} - I_{\text{corr}})/I_{\text{corr},0}] \times 100\% \quad (4)$$

表 3 298 K 时 Q235 钢在含不同浓度 DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的极化曲线参数

$C(\text{DNL})/E_{\text{corr}}(\text{SCE})/$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\beta_c/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$\beta_a/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$I_{\text{corr}}/$ ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$\eta/$ %
空白	-429	53.77	0.723	—
0.1	-447	74.62	0.178	75.38
0.5	-438	77.05	0.107	85.20
1.0	-428	77.82	0.068	90.59
2.0	-434	79.06	0.038	94.74

表 4 不同温度下 Q235 钢在含 2 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中的极化曲线参数

T/K	$E_{\text{corr}}(\text{SCE})/$ mV	$\beta_c/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$\beta_a/$ ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$I_{\text{corr}}/$ ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$\eta/$ %
空白	-429	53.77	60.31	0.723	—
293	-449	80.57	63.30	0.029	95.99
298	-434	79.06	60.59	0.038	94.74
303	-435	74.02	60.24	0.057	92.12
313	-446	73.26	65.19	0.098	86.45

从表 3 和表 4 中可见,加入 DNL 后 Q235 钢在盐酸中的腐蚀电位最大改变值为 20 mV(SCE),小于 85 mV(SCE),由此可以判断出 DNL 为混合型缓蚀剂^[18]。此外,随 DNL 浓度升高,阳极 Tafel 斜率 β_a 变化并不十分明显,说明添加 DNL 并不会改变 Q235 钢在盐酸中腐蚀反应的阳极过程。同时,随 DNL 浓度升高, β_c 逐渐增大,表明阴极反应活性因缓蚀剂吸附而被显著抑制。表中数据也显示, I_{corr} 随

着 DNL 添加量的增加而减小,随着溶液温度升高而增大,表明适当增加 DNL 用量以及降低溶液温度,有利于提高 DNL 的缓蚀效果,当 DNL 浓度为 2 g/L 且溶液温度为 293 K 时,缓蚀效率可达 95.99%。

2.4 失重实验

表 5 给出了 Q235 钢在盐酸溶液中的失重数据。由表中数据可知,Q235 钢试样在含有 2 g/L DNL 盐酸溶液中浸泡后, Δm 值远远小于空白盐酸溶液中的 Δm 值,表明添加 DNL 能有效抑制 Q235 钢在盐酸溶液中的腐蚀。此外,从表中也可以看出,添加 DNL 后钢试样在盐酸溶液中的腐蚀速率明显降低,缓蚀效率可达 91.03%,与电化学实验的结果接近。

表 5 298 K 时 Q235 钢试样在不含和含有 2 g/L DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中浸泡 24 h 的失重数据

$C(\text{DNL})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Delta m/\text{g}$	$v/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$\eta/\%$
0	0.0625	0.02741	—
2	0.0056	0.00246	91.03

2.5 等温吸附模型研究

采用 Langmuir、Temkin、El-Awady、Flory-Huggins、Frumkin 和 Freundlich 等温吸附模型^[19-20],进一步研究 DNL 在 Q235 钢表面的吸附行为。式(5)~式(11)为吸附模型表达式:

$$\text{Langmuir: } C/\theta = 1/K_{\text{ads}} + C \quad (5)$$

$$\text{Temkin: } \exp^{-2\alpha\theta} = K_{\text{ads}}C \quad (6)$$

$$\text{El-Awady: } \ln[\theta/(1-\theta)] = y \ln C + \ln K_{\text{ads}} \quad (7)$$

$$\text{Flory-Huggins: } \ln(\theta/C) = x \ln(1-\theta) + \ln(xK_{\text{ads}}) \quad (8)$$

$$\text{Frumkin: } \ln[\theta/(1-\theta)C] = \ln K_{\text{ads}} + 2\alpha\theta \quad (9)$$

$$\text{Freundlich: } \log \theta = n \log C + \log K_{\text{ads}} \quad (10)$$

$$K_{\text{ads}} = (1/C_{\text{water}}) \times \exp(-\Delta G_{\text{ads}}^0/RT) \quad (11)$$

式中: θ 为 DNL 分子在 Q235 钢表面的覆盖率,用阻抗测试的缓蚀率 $\eta(\%)$ 表示; C 为吸附质浓度, g/L; K_{ads} 为吸附平衡常数, L/g; α 为相互作用系数; y 为在 Q235 表面活性位点上吸附的缓蚀剂分子数; x 为比例系数; n 为常数; ΔG_{ads}^0 为吸附自由能, kJ/mol; R 表示理想气体常数, 8.314 J/(mol·K); C_{water} 为水的质量浓度(1 000 g/L); T 表示热力学温度, K。

相关拟合结果如图 5 所示。从图中可以看出,Langmuir 等温吸附线的线性回归系数接近于 1,表明 DNL 在 Q235 钢与溶液界面的吸附符合 Langmuir 单层吸附。吸附线斜率稍大于 1,说明吸附分子之间可能存在作用力或金属表面吸附并非均匀,说明

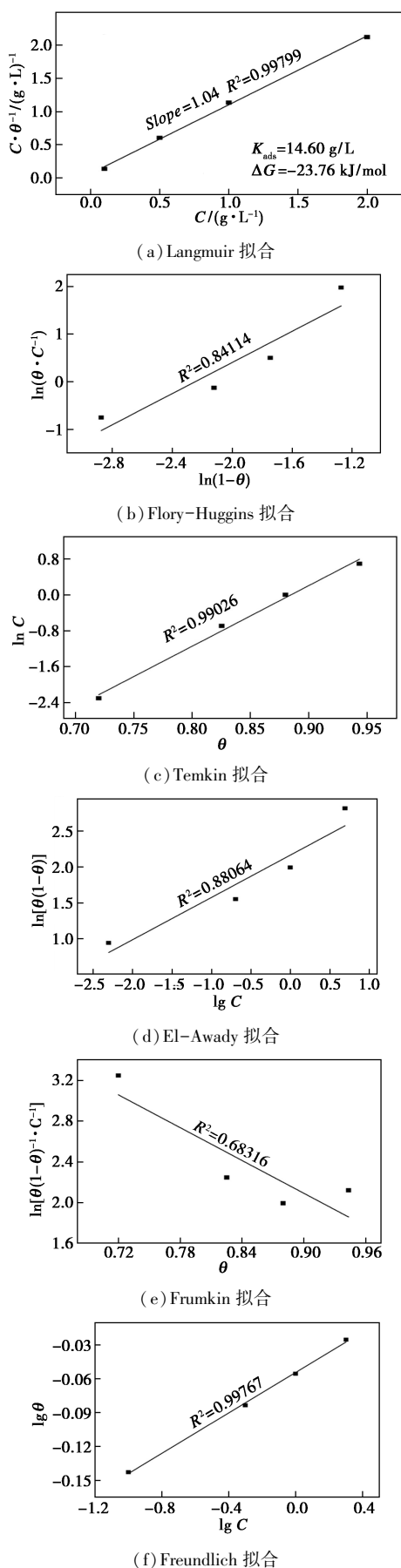
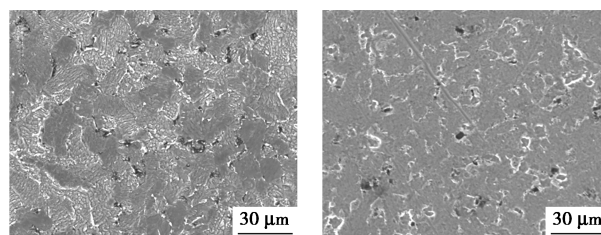


图 5 不同等温模型的拟合曲线

DNL 在 Q235 钢表面吸附并不稳定^[21]。通过式 (11) 计算可得 DNL 在 Q235 钢表面的吸附自由能 ΔG_{ads}^0 为 -23.76 kJ/mol , 其值小于 0, 说明 DNL 在盐酸溶液中能自发地在 Q235 钢表面吸附。此外, ΔG_{ads}^0 的大小与分子物理/化学吸附类型有关, 当 $\Delta G_{\text{ads}}^0 > -20 \text{ kJ/mol}$ 时为物理吸附, $\Delta G_{\text{ads}}^0 < -40 \text{ kJ/mol}$ 时为化学吸附, ΔG_{ads}^0 值介于两者之间时为物理和化学吸附^[22]。DNL 在 Q235 钢表面的吸附自由能接近 -20 kJ/mol , 表明 DNL 分子在 Q235 钢表面的吸附是以物理吸附为主的混合型吸附。

2.6 SEM 分析

图 6 是 Q235 钢试片在不含/含 DNL 的 1 mol/L 盐酸溶液中浸泡 3 h 后的 SEM 图。对比图 6(a) 与 6(b) 可以发现, 在空白盐酸溶液中浸泡 3 h 后的钢试片表面变得粗糙, 且出现了较为严重的腐蚀, 而在含有 2 g/L DNL 盐酸溶液中浸泡后的钢试片表面相对平整, 腐蚀程度较为轻微, 且打磨后的划痕依然清晰可见。表明 DNL 能有效抑制 Q235 钢在盐酸中的腐蚀, 这与电化学测试和失重实验结果相吻合。



(a) 不含 DNL (b) 含 2 g/L DNL

图 6 Q235 钢试片的 SEM 形貌图

3 结论

(1) 红外光谱研究表明, DNL 中主要含有多糖、芳香类、生物碱类等物质, 这些物质中含有大量的 N、O 杂原子以及不饱和基团的共轭结构, 这些杂原子上的孤对电子或共轭结构的 π 电子易与金属表面原子空间空轨道相互作用, 形成配位键而在金属表面吸附, 从而阻隔腐蚀性介质对金属的侵蚀。

(2) 电化学测试显示, 随着 DNL 浓度增大或溶液温度降低, 容抗弧半径明显增大, 腐蚀电流密度逐渐减小, 表明 Q235 钢的腐蚀得到有效抑制, 缓蚀效率不断升高。此外, 动电位极化曲线分析显示, 加入 DNL 后阴极极化电流降低得更加明显, 表明 DNL 属于一种阴极抑制更加突出的混合型缓蚀剂。

(3) DNL 在 Q235 钢表面的吸附满足 Langmuir 吸附等温式, 形成了单分子吸附层。吸附自由能为

-23.76 kJ/mol, 表明 DNL 分子在 Q235 钢表面的吸附是以物理吸附为主的混合型吸附。失重实验与 SEM 测试结果进一步证明了 DNL 在盐酸中能有效减缓 Q235 钢的腐蚀。

参考文献

- [1] 郭恒瑞,董笑程,杨敬一,等.双曼尼希碱酸化缓蚀剂的制备与缓蚀性能研究[J].现代化工,2020,40(9):180-184.
- [2] Chen S,Zhao H,Chen S,*et al.* Camphor leaves extract as a neoteric and environment friendly inhibitor for Q235 steel in HCl medium; Combining experimental and theoretical researches [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 312. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113433.
- [3] Marunkic D,Pejic J,Jegdic B,*et al.* Cerium citrate as ecologically friendly corrosion inhibitor for AA7075 alloy[J]. Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion, 2022. DOI: 10.1002/maco.202112900.
- [4] Shamsa A,Barker R,Hua Y,*et al.* Impact of corrosion products on performance of imidazoline corrosion inhibitor on X65 carbon steel in CO₂ environments [J]. Corrosion Science, 2021, 185. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109423.
- [5] Guo Y,Jin P,Shao M,*et al.* Effect of an environmentally friendly diisooctyl sebacate-based mixed corrosion inhibitor on reinforcing steel [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2022, 38(4). DOI: 10.3866/PKU.WHXB202003033.
- [6] Chen S,Chen S,Zhu B,*et al.* Magnolia grandiflora leaves extract as a novel environmentally friendly inhibitor for Q235 steel corrosion in 1 M HCl; Combining experimental and theoretical researches [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 311. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113312.
- [7] Kadapparambil S, Yadav K, Ramachandran M, *et al.* Tectona grandis leaf extract as environmental friendly corrosion inhibitor for SS304 stainless steel in hydrochloric acid [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2018, 77(6): 349-352.
- [8] 雷然,秦浩然,李向红.核桃青皮提取物对冷轧钢在一氯乙酸中的缓蚀性能研究[J].现代化工,2021,41(6):114-118.
- [9] Feng Y,He J,Zhan Y,*et al.* Insight into the anti-corrosion mechanism Veratrum root extract as a green corrosion inhibitor [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 334. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116110.
- [10] Tan B, Xiang B, Zhang S, *et al.* Papaya leaves extract as a novel eco-friendly corrosion inhibitor for Cu in H₂SO₄ medium [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 582: 918-931.
- [11] 赵菊润,王艺涵,金艳,等.石斛属植物化学成分及药理活性研究进展[J].中国中药杂志,2022,47(9):2358-2372.
- [12] Tang H,Zhao T,Sheng Y,*et al.* Dendrobium officinale Kimura et Migo; A review on its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, and industrialization [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2017, DOI: 10.1155/2017/7436259.
- [13] Portaccio M, Gravagnuolo A M, Longobardi S, *et al.* ATR FT-IR spectroscopy on Vmh2 hydrophobin self-assembled layers for Teflon membrane bio-functionalization [J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 673-680.
- [14] Ma Y,Fan B,Liu H,*et al.* Enhanced corrosion inhibition of aniline derivatives electropolymerized coatings on copper; Preparation, characterization and mechanism modeling [J]. Applied Surface Science, 2020, 514. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146086.
- [15] Lavudi H N, Kottapalli S, Goycoolea F M. Extraction and physico-chemical characterization of galactomannans from *Dichrostachys cinerea* seeds [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 451-456.
- [16] Fateh A, Aliofkhaezrai M, Rezvani A R. Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(1): 481-544.
- [17] 谭伯川,张胜涛,李文坡,等.食用香料 1,4-二硫-2,5-二醇环保型缓蚀剂对 X70 钢在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中的缓蚀性能研究[J].中国腐蚀与防护学报,2021,41(4):469-476.
- [18] Zhang J,Zhang L,Tao G. A novel and high-efficiency inhibitor of 5-(4-methoxyphenyl)-3H-1,2-dithiole-3-thione for copper corrosion inhibition in sulfuric acid at different temperatures [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 272: 369-379.
- [19] Pareek S,Jain D,Hussain S,*et al.* A new insight into corrosion inhibition mechanism of copper in aerated 3.5 wt.% NaCl solution by eco-friendly imidazopyrimidine dye: Experimental and theoretical approach [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 725-742.
- [20] Fouda A S, Ismail M A, Abou-Shahba R M, *et al.* Experimental and computational chemical studies on the cationic furanylnicotinamides as novel corrosion inhibitors in aqueous solutions [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(2): 477-491.
- [21] Tan B,Zhang S,Cao X,*et al.* Insight into the anti-corrosion performance of two food flavors as eco-friendly and ultra-high performance inhibitors for copper in sulfuric acid medium [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 609: 838-851.
- [22] Medeiros De Araujo Macedo R G, Marques N D N, Tonholo J, *et al.* Water-soluble carboxymethylchitosan used as corrosion inhibitor for carbon steel in saline medium [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 205: 371-376. ■
- [15] Li F, Thevenon A, Rosas-Hernández A, *et al.* Molecular tuning of CO₂-to-ethylene conversion [J]. Nature, 2020, 577: 509-513.
- [16] Xu S, Huang H, Guo X, *et al.* Highly selective gas transport channels in mixed matrix membranes fabricated by using water-stable Cu-BTC [J]. Separation Purification Technology, 2021, 257. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117979.
- [17] Wang Y, Pan Y, Zhu L, *et al.* Solvent-free assembly of Co/Fe-containing MOFs derived N-doped mesoporous carbon nanosheets for ORR and HER [J]. Carbon, 2019, 146: 671-679.
- [18] Zhu B, Song D, Jia T, *et al.* Effective visible light-driven photocatalytic degradation of ciprofloxacin over flower-like Fe₃O₄/Bi₂WO₆ composites [J]. ACS Omega, 2021, 6: 1647-1656.
- [19] Komatsu S, Yanagihara T, Hiraga Y, *et al.* Electrochemical reduction of CO₂ at Sb and Bi electrodes in KHCO₃ solution [J]. Denki Kagaku, 1995, 63(3): 217-224.
- [20] Yang Z, Wang H, Fei X, *et al.* MOF derived bimetallic CuBi catalysts with ultra-wide potential window for high-efficient electrochemical reduction of CO₂ to formate [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 298. DOI: 10.1016/j.apcatb.2021.120571.
- [21] Zhang Z, Liu W, Zhang W, *et al.* Interface interaction in CuBi catalysts with tunable product selectivity for electrochemical CO₂ reduction reaction [J]. Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2021, 631. DOI: 10.1016/j.colsurfa.127637. ■

(上接第 221 页)