

葫芦藓提取物在 HCl 中对 X70 钢的缓蚀作用研究

陆美, 陈书军*, 唐加有, 罗景敏, 吴词
(遵义师范学院化学化工学院, 贵州 遵义 563006)

摘要:研究了葫芦藓提取物(HLX)在 1 mol/L 盐酸中对 X70 钢的缓蚀能力。结果表明, HLX 作为一种混合型植物缓蚀剂, 能有效减缓 X70 钢在盐酸中阴阳极的腐蚀速率; 缓蚀效率随 HLX 质量浓度提高而增加, 随溶液温度上升而降低; 当温度为 293 K、HLX 质量浓度为 0.8 g/L 时, 缓蚀效率可达 93.12%。等温吸附研究表明, HLX 分子可以自发地吸附在 X70 钢表面, 且符合 Langmuir 吸附等温式。此外量子化学研究结果表明, HLX 分子上的杂原子能与金属表面形成配位键而产生稳定的吸附。

关键词: 盐酸; 缓蚀; X70 钢; 葫芦藓; 接触角

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)04-0218-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.04.037

Corrosion inhibition action of funaria hygrometrica extracts for X70 steel in hydrochloric acid medium

LU Mei, CHEN Shu-jun*, TANG Jia-you, LUO Jing-min, WU Ci

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China)

Abstract: The corrosion inhibition ability of funaria hygrometrica extracts (HLX) for X70 steel in 1 mol·L⁻¹ hydrochloric acid medium is evaluated, and the results validate that HLX as a mixed-type corrosion inhibitor can effectively suppress both cathodic and anodic reactions of X70 steel in hydrochloric acid. The corrosion inhibition efficiency of HLX for X70 steel improves with the higher HLX concentration, and depresses with the higher solution temperature. The corrosion inhibition rate can reach 93.12% at 293 K and a HLX mass concentration of 0.8 g·L⁻¹. It is indicated by isothermal adsorption study that HLX can be spontaneously adsorbed on X70 steel surface, which obeys Langmuir adsorption isotherm. In addition, it is shown from quantum chemical calculation that a coordination bond is built between hetero-atoms of HLX molecular and X70 steel surface, resulting in a stable adsorption.

Key words: hydrochloric acid; corrosion inhibition; X70 steel; funaria hygrometrica; contact angle

酸洗是工业上去除金属表面污垢或锈蚀的常用手段, 为了阻止或减缓酸洗过程中酸液对金属基底的腐蚀, 常在酸洗液中加入缓蚀剂^[1]。如铬酸盐和亚硝酸盐等无机型缓蚀剂是使用最早的缓蚀剂^[2-3], 对金属具有很好的缓蚀效果, 然而这些缓蚀剂对人体或环境存在危害。胺类^[4]、咪唑类^[5]以及有机硫类^[6]等是常用的有机型缓蚀剂, 通常具有更加高效的缓蚀性能, 然而这类缓蚀剂生产成本较高、价格比较昂贵。而植物体中常含有多种有机化学成份, 具有成本低、来源广、可降解等特点, 近年来科研工作者利用紫檀叶^[7]、披碱草^[8]、石斛根^[9]、石楠叶^[10]、薇甘菊^[11]等植物制备出多种高效的缓蚀剂。然而自然界中植物种类繁多, 植物缓蚀剂的缓蚀性能与缓蚀机制有待进一步研究。

葫芦藓是一种特殊的苔藓植物, 因长柄顶端长有一个葫芦状的结构而得名, 在我国分布较为广泛。

葫芦藓中含有多种天然有机化学成份, 据《全国中草药汇编》记载, 葫芦藓具有祛风除湿、止痛止血的功效。截止当前葫芦藓主要用于医药研究, 尚未见到将葫芦藓用于金属的缓蚀。为此笔者通过蒸馏水加热回流的手段制备了 HLX, 并研究了 HLX 在 X70 钢表面的吸附行为与缓蚀性能, 为葫芦藓提取物作为绿色缓蚀剂提供理论基础与技术借鉴。

1 实验部分

1.1 实验材料

X70 钢的组成(质量分数, %)为: C 0.06, Mn 1.44, Si 0.31, S 0.001, P 0.009, Ni 0.034, Cr 0.16, Mo 0.25, V 0.005, Cu 0.015, Ti 0.01, Fe 余量。葫芦藓采摘于贵州省遵义师范学院, 洗净烘干后打磨成粉, 备用。在 250 mL 蒸馏水中加入 20 g 粉末, 并在 100℃ 下加热回流 5 h, 抽滤得滤液, 将滤液旋转蒸

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2025-01-30

基金项目: 贵州省自然科学基金资助项目(黔科合基础-ZK[2022]569号); 服务地方产业革命项目(CXY[2024]01号); 遵义师范学院项目(遵师 BS[2019]11号); 贵州省大学生创新创业训练计划项目(202310664054号)

作者简介: 陆美(2001-), 女, 本科生, 研究方向为金属腐蚀与防护, 2641940180@qq.com; 陈书军(1990-), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料使役行为研究, 通讯联系人, shujunchen_znu@163.com。

发浓缩后冷冻干燥,获得土黄色粉末,即为(HLX)。采用蒸馏水与浓盐酸配制 1 mol/L 盐酸溶液作为腐蚀介质。

1.2 电化学测试

利用标准三电极体系进行电化学测试,参比电极选用饱和甘汞电极、辅助电极用铂电极、工作电极为 X70 钢(用已打磨清洁后的 1.0 cm³ 钢材进行制备,按一定比例添加环氧树脂 AB 胶进行封装,使其裸露面积为 1.0 cm²)。首先,采用 CHI660E 电化学工作站进行 15 min 的开路电位(E_{OCF})测试,使其达到稳定状态。随后进行电化学阻抗(EIS)测试,其扫描频率为 10⁵ ~ 10⁻² Hz,扰动信号设为 0.005 V。最后进行动电位极化曲线测试,其扫描范围为 ($E_{\text{OCF}} \pm 250$) mV,扫描频率为 1 mV/s。

1.3 表面分析

将打磨处理后的 X70 钢样片于 25℃ 下浸泡在含和不含 0.8 g/L HLX 的 1 mol/L HCl 溶液中 5 h,洗涤干燥后备用。分别用接触角测量仪(SDC-200SH)测量表面水的接触角,利用 KYKY-EM6900 型扫描电子显微镜观察样片的表面形貌。

1.4 量子化学计算

根据文献[12-13],HLX 中有代表性的 3 种主要成份如图 1 所示。利用 Gaussian 09 软件并通过密度泛函理论(DFT)中的 B3LYP 方法在 6-31G(d,p) 机组下计算 HLX 中分子的量子化学参数。

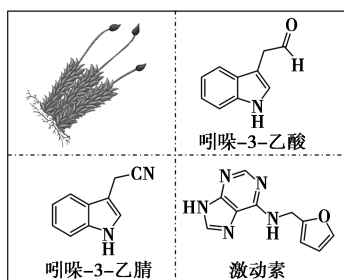


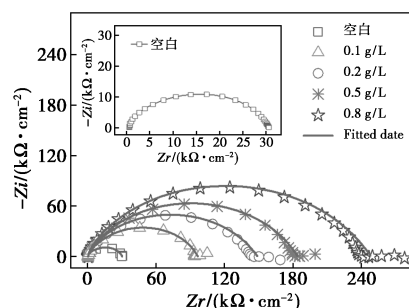
图 1 HLX 的 3 种主要成份化学式

2 结果与讨论

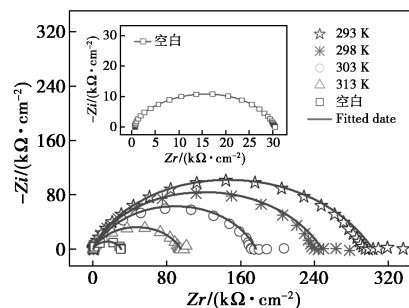
2.1 电化学阻抗谱分析

不同温度下 X70 钢在不含/含有不同 HLX 浓度的 1 mol/L 盐酸溶液中的 Nyquist 图如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出,随着 HLX 质量浓度的增加,Nyquist 图中的容抗弧直径逐渐增大,表明增加 HLX 质量浓度有利于增大金属表面的电荷传递电阻,从而减缓金属的腐蚀。从图 2(b)中可以看出,当 HLX 质量浓度一定时,容抗弧直径随温度的升高而降低,

表明升高温度不利于 HLX 对金属的缓蚀。这是由于溶液温度的升高,使得吸附在 X70 金属表面 HLX 分子热运动加剧,吸附效应减弱,从而降低了防腐效果^[14]。



(a) 298 K 不同质量浓度 HLX



(b) 不同温度 0.8 g/L HLX

图 2 X70 钢在 1 mol/L HCl 溶液中不同情况下的电化学阻抗谱图

用于拟合电化学阻抗谱数据的等效电路如图 3 所示,通过等效电路图对阻抗数据进行拟合,结果如表 1 与表 2 所示。其中 R_s 表示溶液电阻, R_{ct} 为电荷传递电阻, R_{sam} 表示在 X70 钢表面吸附缓蚀剂层的膜电阻, CPE 为常相位角元件,其计算式为^[15]:

$$Z_{CPE} = 1/[Y_0(j\omega)^n] \quad (1)$$

式中: j 为虚数单位; ω 为角频率; Y_0 为 CPE 的大小; n 为弥散指数,变化范围为 -1 ~ 1,可衡量电极表面的不均匀性。 C_{dl} 的计算式为^[16]:

$$C_{dl} = Y_0(\omega)^{n-1} = Y_0(2\pi f_{z_{im-\text{Max}}})^{n-1} \quad (2)$$

其中: $f_{z_{im-\text{Max}}}$ 为阻抗谱虚部绝对值最大时对应的频率。缓蚀效率(η)的计算式为:

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

其中: R_{ct} 、 $R_{ct,0}$ 分别为添加 HLX 前后的电荷传递电阻。

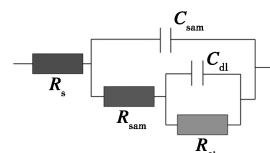


图 3 用于拟合电化学阻抗谱数据的等效电路

表 1 298 K 时 X70 钢在含不同质量浓度葫芦藓提取物的 1 mol/L 盐酸中的阻抗拟合参数

$\rho(\text{HLX})/$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$R_s/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	CPE_{sam}		$R_{\text{sam}}/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	CPE_{dl}		$C_{\text{dl}}/$ ($\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$R_{\text{ct}}/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	$\eta/\%$
		$Y_0/(\mu\text{s}^n\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_1		$Y_0/(\mu\text{s}^n\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_2			
Blank	0.7129	78.75	1.0000	10.54	822.1	0.7390	196.54	19.30	—
0.1	0.7223	37.05	1.0000	17.21	315.2	0.7176	78.88	78.83	75.52
0.2	0.8292	27.01	1.0000	16.74	296.7	0.6633	64.66	131.60	85.33
0.5	0.8367	20.35	1.0000	18.51	202.2	0.6914	50.04	165.00	88.30
0.8	0.8568	16.85	1.0000	28.31	174.7	0.6674	38.78	219.50	91.21

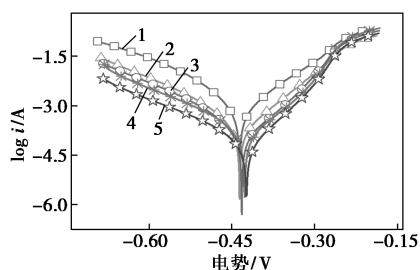
表 2 不同温度下 X70 钢在含 0.8 g/L 葫芦藓提取物的 1 mol/L 盐酸中的阻抗拟合参数

T/K	$R_s/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	CPE_{sam}		$R_{\text{sam}}/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	CPE_{dl}		$C_{\text{dl}}/$ ($\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$R_{\text{ct}}/$ ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	$\eta/\%$
		$Y_0/(\mu\text{s}^n\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_1		$Y_0/(\mu\text{s}^n\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	n_2			
Blank	0.7129	78.75	1.0000	10.54	822.1	0.7390	196.54	19.30	—
293	0.8795	20.33	1.0000	21.84	167.1	0.6139	33.79	280.70	93.12
298	0.8568	16.85	1.0000	28.31	174.7	0.6674	38.78	219.50	91.21
303	0.7766	22.74	1.0000	21.08	186.4	0.7325	55.56	155.00	87.55
313	0.8021	21.55	1.0000	14.06	270.1	0.7963	91.94	80.39	75.99

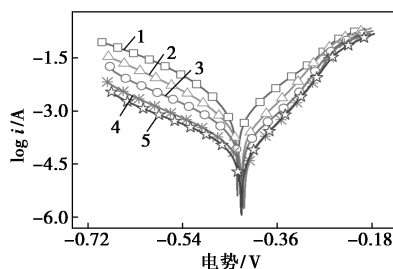
由表 1 中可以看出,随着溶液中 HLX 质量浓度的增加, C_{dl} 逐渐减小, R_{ct} 逐渐增大,缓蚀效率也呈上升趋势,说明 HLX 分子在金属表面形成了致密的保护膜,增强了 X70 钢表面在盐酸溶液中的防腐蚀效果。从表 2 可知,随着溶液温度的上升,电荷转移电阻从 280.7 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降至 80.39 $\Omega\cdot\text{cm}^2$,表明升温会降低 HLX 对 X70 钢的防腐蚀效果。但在 303 K 时,HLX 对金属的缓蚀效率可达 80% 以上,说明在一定的温度范围内仍可以保持良好的缓蚀性能。

2.2 动电位极化曲线分析

X70 钢在含有不同 HLX 质量浓度的 1 mol/L 盐酸溶液中于不同温度下的动电位极化曲线如图 4 所示。由图 4(a) 中可以看出,与空白组的极化曲线相比,加入 HLX 后极化曲线的腐蚀电位均发生正移,腐蚀电流密度发生负移,表明 HLX 可有效地降低 X70 钢在盐酸溶液中的腐蚀速率^[17]。此外,随着



1—空白;2—0.1 g/L;3—0.2 g/L;4—0.5 g/L;5—0.8 g/L
(a) 298 K 不同质量浓度的 HLX



1—空白;2—313 K;3—303 K;4—298 K;5—293 K
(b) 不同温度 0.8 g/L HLX

图 4 X70 钢在 1 mol/L HCl 溶液中不同情况下的动电位极化曲线

HLX 质量浓度的增加,腐蚀电流密度变得更负,表明提高 HLX 的质量浓度能有效增强其对 X70 钢的缓蚀性能。从图 4(b) 中可以看出,降低温度极化曲线的腐蚀电流密度降低,表明适当的低温有利于 HLX 发挥更加出色的缓蚀能力。

利用 Tafel 外推法对动电位极化曲线进行拟合,结果如表 3 和表 4 所示。 E_{corr} 、 I_{corr} 、 β_a 、 β_c 、 η 分别为腐蚀电位、腐蚀电流、阳极斜率、阴极斜率和缓蚀效率。 η 的计算式为:

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

从表 3 和表 4 中可以看出,与未添加 HLX 的极化曲线参数相比,加入 HLX 后腐蚀电位均发生小于 85 mV 的正移,由此可以推断 HLX 是混合型缓蚀剂^[18]。同时,HLX 对 X70 钢的缓蚀效率随 HLX 质

表 3 298 K 时 X70 钢在含不同质量浓度葫芦藓提取物的 1 mol/L 盐酸中的极化曲线参数

质量浓度/ (g·L ⁻¹)	<i>E</i> _{corr} (SCE)/ mV	β_c / (mV· dec ⁻¹)	β_a / (mV· dec ⁻¹)	<i>I</i> _{corr} / (mA· cm ⁻²)	η /%
Blank	-436	74.48	83.58	0.6197	—
0.1	-436	60.41	68.51	0.1523	75.42
0.2	-432	56.62	64.18	0.0927	85.04
0.5	-427	47.87	50.82	0.0733	88.17
0.8	-424	62.35	62.94	0.0545	91.20

表 4 不同温度下 X70 钢在含 0.8 g/L 葫芦藓提取物的 1 mol/L 盐酸中的极化曲线参数

质量浓度/ (g·L ⁻¹)	<i>E</i> _{corr} (SCE)/ mV	β_c / (mV· dec ⁻¹)	β_a / (mV· dec ⁻¹)	<i>I</i> _{corr} / (mA· cm ⁻²)	η /%
Blank	-436	74.48	83.58	0.6197	—
293	-428	73.99	59.32	0.0427	93.10
298	-424	76.35	62.94	0.0545	91.20
303	-428	42.61	45.54	0.0792	87.22
313	-429	47.64	50.03	0.1502	75.76

量浓度增加而增大,表明适当的增加 HLX 在腐蚀介质中的质量浓度,有助于 HLX 分子在金属表面吸附形成更为致密的保护膜,从而增强 X70 钢表面在盐

酸溶液中的耐腐蚀性能。

2.3 等温吸附模型分析

为了进一步研究 HLX 在 X70 钢表面的吸附类型,采用等温吸附模型[式(5)~式(10)]对阻抗谱数据进行拟合分析^[19]。所得的拟合结果如图 5 所示。此外,采用式(11)计算 HLX 在 X70 钢表面的吸附自由能(ΔG_{ads}^0)^[20]。

Langmuir:

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

Temkin:

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

El-Awady:

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

Flory-Huggins:

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

Frumkin:

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

Freundlich:

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

式中: θ 为阻抗测试的缓蚀率值,表示 HLX 分子在 X70 钢表面的覆盖率; C 为 HLX 的质量浓度,g/L; K_{ads} 为吸附平衡常数,L/g; α 为相互作用系数; y 为在 X70 钢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。

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

式中: R 为理想气体常数,J/(mol·K); C_{water} 为水的质量浓度(1 000 g/L); T 为热力学温度,K。

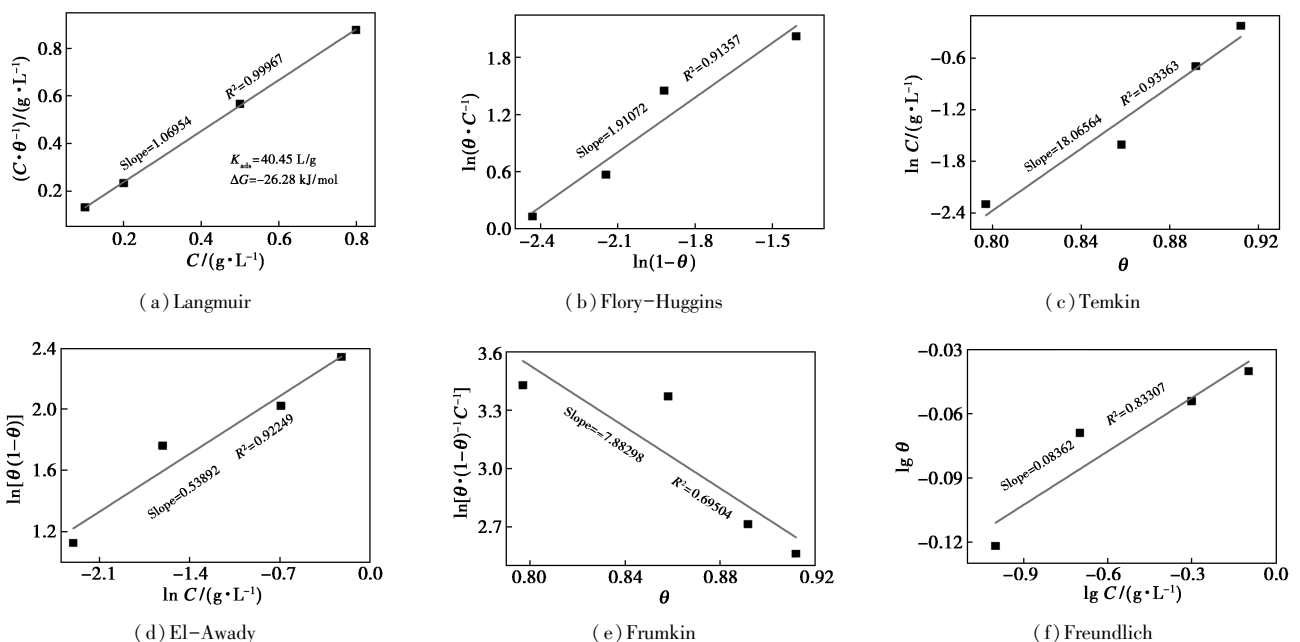


图 5 不同等温模型的拟合曲线

从图 5 中可以看出, Langmuir 等温吸附模型的线性回归系数(R^2)接近于 1, 说明 HLX 在 X70 钢表面的吸附符合 Langmuir 单分子层吸附。此外, ΔG_{ads}^0 小于 0, 表明 HLX 分子能自发地在 X70 钢/溶液界面吸附。值得注意的是, 当 ΔG_{ads}^0 值大于 -20 kJ/mol 时为物理吸附; ΔG_{ads}^0 值小于 -40 kJ/mol 时为化学吸附; 当 ΔG_{ads}^0 介于两者之间时为物理化学吸附^[21]。由计算结果可得, ΔG_{ads}^0 为 -26.28 kJ/mol , 说明 HLX 分子是以物理化学吸附方式自发的在 X70 钢表面吸附。

2.4 表面分析

采用扫描电镜与接触角测试仪分析 HLX 对 X70 钢的缓蚀性能, 结果如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, X70 钢经打磨清洗后的表面呈光滑平整的状态, 同时还有较浅的划痕存在。从图 6(b) 中可以看出, X70 钢在 1 mol/L 盐酸溶液中浸泡 5 h 后的表面遭到严重腐蚀, 呈现出非常粗糙不平的形状。从图 6(c) 中可以看出, X70 钢在含有 0.8 g/L HLX 的盐酸溶液中浸泡 5 h 后的表面相对平整, 同时可以明显看见打磨留下的少量划痕, 说明 HLX 有效地抑制了盐酸对 X70 钢表面的腐蚀, 这与电化学测试结果一致。此外, 从接触角测试结果可以发现, X70 钢在盐酸中浸泡 5 h 后, 相对于浸泡前其表面亲水性能增强, 这是由于 X70 钢表面被严重腐蚀, 导致表面粗糙, 致使接触角降低。添加 HLX 浸泡后, X70 钢表面接触角下降值相对较小, 这主要是由于 HLX 有效减缓了 X70 钢表面的腐蚀。

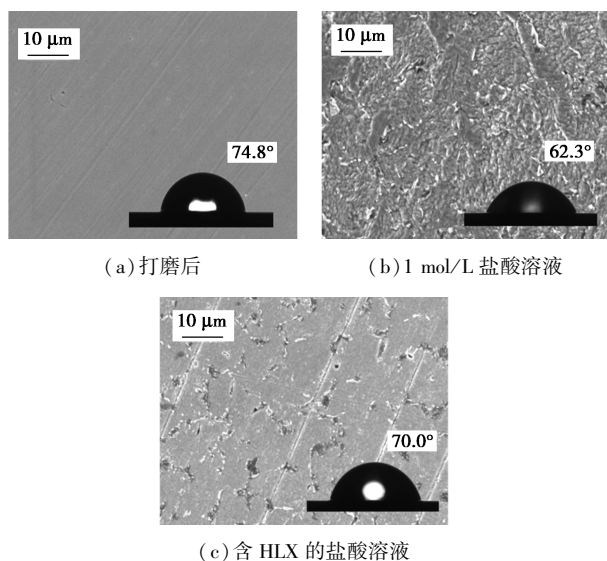


图 6 X70 钢试片的 SEM 形貌图及对应的接触角

2.5 量子化学计算

分子的量子化学参数在一定程度上能预测该分

子的缓蚀性能, 运用 Gauss 09 软件对 HLX 中有代表性的 3 种主要成份(动力精、吡啶-3-乙酸、3-吡啶乙腈)进行了结构优化, 计算了其前线轨道分布(HOMO 与 LUMO)以及静电势图(ESP), 结果如图 7 所示。ESP 图中, 分子浅色与深色部分分别表示具有亲核性质和亲电性质的区域。从图 7 中可以看出, 这些分子的亲电区域主要分布在苯环、O 原子和 N 原子上, 这些活性区域容易提供电子与金属表面空轨道形成配位键, 从而产生稳定的化学吸附。另外, 前线轨道的电子云主要分布在分子的共轭结构上, 说明这些大的共轭结构更容易吸附在金属表面。此外, HLX 中 3 种主要成份分子的 HOMO 与 LUMO 轨道间的能隙值(ΔE)如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 3 种物质的 ΔE 相差不大, 表明 3 种物质的化学反应活性基本相当, 因此可以推断 HLX 对 X70 钢的缓蚀性能由 3 种物质共同承担。

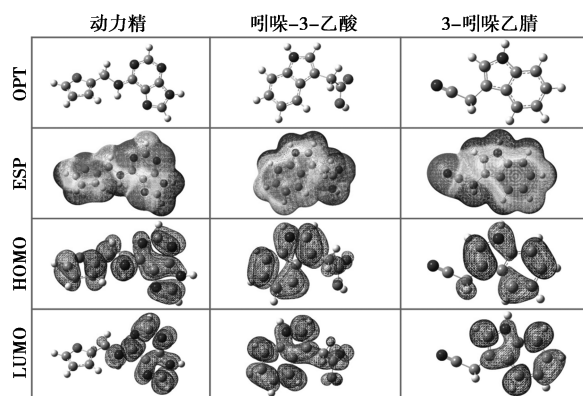


图 7 动力精、吡啶-3-乙酸、3-吡啶乙腈分子优化后的构型、静电势图以及 HOMO 与 LUMO 的电子云分布

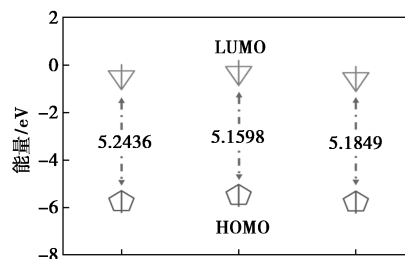


图 8 动力精、吡啶-3-乙酸和 3-吡啶乙腈的能隙值

3 结论

(1) 电化学测试结果表明, HLX 属于混合型缓蚀剂, 能有效减缓 X70 钢的腐蚀, 缓蚀效率随 HLX 质量浓度的增加或溶液温度的降低而增大。SEM

与接触角测试结果进一步证明了 HLX 对 X70 钢具有高效的缓蚀性能。

(2) 等温吸附模型研究结果表明, HLX 能通过物理与化学作用自发地在 X70 钢表面吸附, 且符合 Langmuir 等温吸附模型。

(3) 量子化学计算结果表明, HLX 分子上的杂原子或不饱和基团能与金属表面空轨道形成配位键, 产生稳定的吸附, 从而有效阻挡侵蚀性离子对金属基底的腐蚀。

参考文献

- [1] Qiang Y, Li H, Lan X. Self-assembling anchored film basing on two tetrazole derivatives for application to protect copper in sulfuric acid environment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 52:63-71.
- [2] Zabula A V, Dey S, Robinson J R, *et al.* Screening of molecular lanthanide corrosion inhibitors by a high-throughput method[J]. *Corrosion Science*, 2020, 165:108377.
- [3] Bolzoni F, Brenna A, Ormellese M. Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 154:106719.
- [4] Yang T, Li K, Yan T, *et al.* Corrosion inhibition of two kinds of corrosion inhibitors based on amine methylation reaction for carbon steel[J]. *Materials Protection*, 2019, 52(10):26-30, 103.
- [5] Chen S, Zhang H, Qiang Y, *et al.* Self-assembled monolayers of Ginkgo biloba exocarp extract for corrosion protection of copper[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 382:121941.
- [6] Bu C, Gao X, Feng K, *et al.* Effect of Sn on the micro-structure, composition and anti-corrosion performance of reduced glutathione film on copper[J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 692:133954.
- [7] Tan B, Fu A, Guo L, *et al.* Insight into anti-corrosion mechanism of Dalbergia odorifera leaves extract as a biodegradable inhibitor for X70 steel in sulfuric acid medium[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194:116106.
- [8] Jebali Z, Ferkous H, Zerroug M, *et al.* Unveiling the potent corrosion-inhibiting power of Ammophila arenaria aqueous extract for mild steel in acidic environments: An integrated experimental and computational study[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2):112374.
- [9] 陈思屹, 舒加喜, 刘嘉奇, 等. 石斛根提取物在盐酸中对 Q235 钢的缓蚀作用研究[J]. *现代化工*, 2022, 42(S2):222-227.
- [10] 陈书军, 陶爱宁, 张海, 等. 石楠叶提取物在盐酸中对 Q235 钢的缓蚀行为研究[J]. *材料保护*, 2024, 57(2):51-57, 97.
- [11] Du P, Deng S, Li X. Mikania micrantha extract as a novel inhibitor for the corrosion of cold rolled steel in Cl₂HCCOOH solution[J]. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, 2022, 19:2526-2545.
- [12] Horn A, Pascal A, Loncarevic I. Natural products from bryophytes: From basic biology to biotechnological applications[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2021, 40(3):191-217.
- [13] Novakovic M, Ludwiczuk A, Bukvicki D, *et al.* Phytochemicals from bryophytes: Structures and biological activity[J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2021, 86(12):1139-1175.
- [14] 谭伯川, 张胜涛, 李文坡, 等. 食用香料 1,4-二硫-2,5-二乙醇环保型缓蚀剂对 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.
- [15] Tang H, Zhou C, Li J, *et al.* In-depth insight into corrosion inhibition performance of sweet potato leaf extract as a green and efficient inhibitor for 6N01 Al alloy in the seawater: Experimental and theoretical perspectives[J]. *Langmuir*, 2024, 40(18):9543-9555.
- [16] Song Z, Liu L, Guo M Z, *et al.* Inhibition performance of extract reinforcement corrosion inhibitor from waste Platanus acerifolia leaves in simulated concrete pore solution[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20:e02992.
- [17] Kumar P, Soni I, Jayaprakash G K, *et al.* Experimental and theoretical studies of hexylmethylimidazolium tetrafluoroborate ionic liquid as cathodic corrosion inhibitor for mild steel[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2022, 146:110110.
- [18] Kozlica D K, Kokalj A, Milosev I. Synergistic effect of 2-mercaptobenzimidazole and octylphosphonic acid as corrosion inhibitors for copper and aluminium-An electrochemical, XPS, FT-IR and DFT study[J]. *Corrosion Science*, 2021, 182:109082.
- [19] 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, 311:113312.
- [20] 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.
- [21] 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, 312:113433. ■