

香蕉叶提取物对铜合金在酸性介质中的缓蚀性能研究

刘 阳¹, 赵温庭²

¹中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京

²重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年9月14日; 录用日期: 2024年10月16日; 发布日期: 2024年10月25日

摘要

以纯水为溶剂, 采用煎煮法制备香蕉叶提取物。文章分别采用了电化学分析、表面形貌测试、量子化学计算和分子动力学模拟等方法探究了香蕉叶提取物对铜在酸溶液中的缓蚀性能。电化学测试结果表明当香蕉叶提取物浓度达到400 mg/L时, 其缓蚀性能能够达到92%以上。极化曲线表明香蕉叶提取物吸附在铜电极表面时, 能够同时抑制铜电极阴极和阳极的反应, 属于混合型缓蚀剂。吸附等温模型研究表明香蕉叶提取物在铜表面的吸附符合朗缪尔单层吸附模型, 并且同时存在物理和化学吸附。量子化学计算和分子动力学模拟均能表明香蕉叶提取物能够展现出高的缓蚀性能。

关键词

香蕉叶提取物, 缓蚀剂, 铜, 电化学分析

Study on Corrosion Inhibition of Banana Leaf Extract on Copper Alloy in Acidic Medium

Yang Liu¹, Wenting Zhao²

¹Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing

²School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Sep. 14th, 2024; accepted: Oct. 16th, 2024; published: Oct. 25th, 2024

Abstract

Banana leaf extract was prepared by decoction method using pure water as solvent. Electrochemical

文章引用: 刘阳, 赵温庭. 香蕉叶提取物对铜合金在酸性介质中的缓蚀性能研究[J]. 材料科学, 2024, 14(10): 1436-1445. DOI: 10.12677/ms.2024.1410157

analysis, surface morphology test, quantum chemical calculation and molecular dynamics simulation were used to investigate the corrosion inhibition performance of banana leaf extract on copper in acid solution. The electrochemical test results showed that when the concentration of banana leaf extract reached 400 mg/L, its corrosion inhibition performance could reach more than 92%. The polarization curve showed that when banana leaf extract was adsorbed on the surface of copper electrode, it could simultaneously inhibit the reaction of cathode and anode of copper electrode, and it was a mixed corrosion inhibitor. The adsorption isotherm model study showed that the adsorption of banana leaf extract on copper surface conformed to the Langmuir monolayer adsorption model, and physical and chemical adsorption existed at the same time. Both quantum chemical calculation and molecular dynamics simulation showed that banana leaf extract could exhibit high corrosion inhibition performance.

Keywords

Banana Leaf Extract, Corrosion Inhibitor, Copper, Electrochemical Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

塔河油田奥陶系油藏埋深 6000 m 左右, 主体区地破梯度 1.6~1.7 MPa/100 m±, 地层压力系数 1.1, 最高硫化氢含量高达 168,074 mg/L。目前裸眼酸压完井作业的封隔器正逐步使用铜合金/铝合金等比强度高、易钻除可溶解的材料替代碳钢材质。“下得去”、“扛得住”和“能处理”是对可溶封隔器的基本要求, 但铜合金/铝合金工具面临更严重的井底液体腐蚀问题。尤其是酸化压裂过程, 大排量泵注会将地层以及管柱降温至 80°C~100°C, 但压力和盐酸综合作用对本体以及涂层的腐蚀影响极大。

传统的钻井缓蚀剂, 如石灰、亚硫酸钠、碳酸锌以及各类有机胺类等, 虽能在一定程度上减轻腐蚀, 但其存在成本高、环境友好性差或缓蚀效果有限等不足。近年来, 随着环保意识的增强和绿色化学的发展, 人们越来越关注开发无毒、无污染且高效的缓蚀剂。其中, 植物提取物因其天然来源广泛、制备工艺简单及对环境友好等特点, 成为缓蚀剂研究的新热点。胡等人[1]研究了辣椒叶提取物对铜在硫酸介质中的缓蚀性能, 极化曲线测试结果表明当辣椒叶提取物的浓度为 500 mg/L 时, 其缓蚀效率能够达到 94% 左右, 并且能够同时抑制铜电极阴极和阳极的腐蚀。吴等人[2]研究了红薯叶提取物作为缓蚀剂对铜在硫酸溶液中的缓蚀性能研究, 实验和理论计算结果均表明红薯叶提取物能够展现出高的缓蚀性能, 当红薯叶提取物的浓度达到 800 mg/L 时, 其缓蚀效率能够达到 96% 以上, 并且吸附在铜表面符合朗缪尔单层吸附模型, 并同时存在物理和化学吸附。黄等人[3]研究了豆角叶提取物作为缓蚀剂, 对铜在硫酸溶液中的缓蚀性能, 作者分别采用了电化学阻抗测试、极化曲线测试、表面形貌测试和理论计算等方法深入探究了豆角叶提取物的缓蚀性能, 测试结果表明当豆角叶提取物的浓度达到为 800 mg/L 时, 其缓蚀效率为 96.8%。

在众多植物提取物中, 香蕉叶提取物因其含有丰富的多酚、黄酮等活性成分, 表现出良好的抗氧化和防腐蚀性能, 逐渐成为研究的重点。多酚类化合物具有多个羟基, 能够通过氢键、配位键等方式与金属表面紧密结合, 形成一层致密的保护膜, 有效隔绝腐蚀性介质与金属的直接接触, 从而抑制腐蚀的发生。因此, 探索香蕉叶提取物对铜在硫酸溶液中的缓蚀性能, 对于开发新型环保钻井缓蚀剂具有重要意义。本次研究中, 我们分别采用了电化学方法、扫描电镜、量子化学计算和分子动力学模拟等方法深入探究了香蕉叶提取物对铜在酸性介质中的缓蚀性能。

2. 实验方法

2.1. 电化学测试详情

使用上海辰华电化学工作站(CHI760E)进行对香蕉叶提取物缓蚀剂进行了相应的电化学测试。在整个电化学测试流程中，严格采用了一台高精度的水浴装置，以确保测试环境温度恒定维持在 298 K。测试体系遵循标准的三电极配置原则，其中，铜电极被选定为工作电极，一块面积为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的铂片作为对电极，饱和甘汞电极为参比电极，以提供稳定的电位基准。在进行电化学测试之前，铜电极需经历一系列精细的预处理步骤。首先，使用 400 目、800 目、1200 目直至 2000 目的砂纸逐级打磨铜电极，直至其表面达到所需的平整与光滑度。随后，将打磨好的铜电极置于无水乙醇中进行超声清洗，以彻底去除表面残留的微小颗粒与杂质。最后，在室温条件下，利用冷风迅速且均匀地将铜电极表面吹干，以备后续测试使用。150 mL 的烧杯作为体系瓶，每次电化学测试前使用新配制的待测液，并且每次待测液的体积保持在 100 mL，以确保实验良好的重现性。首先进行开路电位测试，开路测试的时间为一小时，以确保铜电极表面已经达到一个暂稳的状态。电化学阻抗谱(EIS)的测试。测试从设定初始电位开始，该电位值选取为系统达到稳定状态后的开路电压。测试的频率范围广泛，覆盖了从高频 100,000 Hz 到低频 0.01 Hz 的宽广区间，采用了一个振幅为 5 mV 的正弦波作为激励信号。为了解析所采集的 EIS 数据，我们采用了 Zsimpwin 软件，并精选了最符合实际情况的等效电路模型来进行数据的拟合处理，以期获得准确且有意义的电化学界面特性信息。

2.2. SEM 形貌测试

在探索铜在不同实验条件下的表面形貌变化时，采用了 JEOL-JSM-7800F 型电子显微镜(SEM)进行观测。为了准备 SEM 测试样品，铜样品首先经历了精细的打磨过程，使用从 180 目至 7000 目不同粒度的砂纸逐步进行，直至样品表面呈现出平整而光亮的状态。随后，样品在无水乙醇和超纯水中分别进行超声清洗，以彻底去除表面的残留物和杂质。清洗完毕后，样品在冷风环境下迅速吹干，以确保其表面干燥洁净，为后续的测试做好准备。接下来，设计了两组对比实验，以研究香蕉叶提取物对铜表面形貌的影响。在恒定 298 K 的温度条件下，使用水浴锅将铜样品分别浸泡于两种介质中：一种是未添加任何添加剂的 0.5 mol/L 酸溶液，另一种是添加了 400 mg/L 香蕉叶提取物的相同浓度酸溶液。两组样品均浸泡持续 20 小时。浸泡结束后，所有样品均用超纯水仔细冲洗，并在冷风条件下再次吹干，以备后续的 SEM 形貌观测与分析。

2.3. 红外光谱测试

香蕉叶提取物的成分采用的是傅里叶变换红外光谱进行测试，其型号为 Nicolet iS50 红外光谱仪。红外测试的波数范围为 $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 。

2.4. 理论计算详情

在运用 Materials Studio 软件对香蕉叶提取物中有效成分的研究中，聚焦于这些活性成分在铜材料(特别是以其最具代表性的 Cu (111)面为模型，因其具有紧密的原子排列和低 Miller 指数，能较好地代表铜的普遍表面特性)上的吸附行为。为了深入分析这一过程，借助 Materials Studio 中的 Forcefield 模块来构建并计算相关的吸附模型。构建一个三维的周期性模拟单元，其尺寸为 $30.5\text{ \AA} \times 26.5\text{ \AA} \times 50.5\text{ \AA}$ ，旨在模拟真实环境下的微观结构。在此单元内，精心布置了 300 个水分子，以模拟水溶液环境，并引入了一个作为研究对象的缓蚀剂分子(即香蕉叶提取物中的有效成分)，以探究其在铜表面的吸附机制。在模拟过程中，我们选用了广泛认可的 COMPASS 力场，该力场能够准确描述多种类型分子间的相互作用，从而保证了

计算结果的可靠性。模拟环境设定在 298 K 这一常温条件下, 采用正则系统(NVT)控制温度恒定, 以确保模拟结果与实际应用场景相符。此外, 设定了模拟的时间参数: 时间步长为 1 飞秒(fs), 总模拟时长达到 1000 皮秒(ps), 这样的设置既保证了模拟的充分性, 又兼顾了计算效率。在模拟过程中, 为了专注于研究缓蚀剂分子与铜表面的相互作用, 固定了所有铜原子的位置, 避免其移动对模拟结果造成不必要的干扰。

3. 结果与讨论

3.1. 傅里叶红外光谱分析

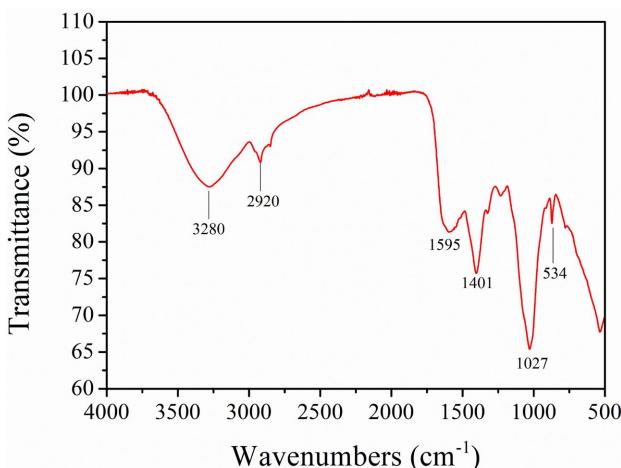


Figure 1. Infrared spectrum of banana leaf extract

图 1. 香蕉叶提取物的红外光谱图

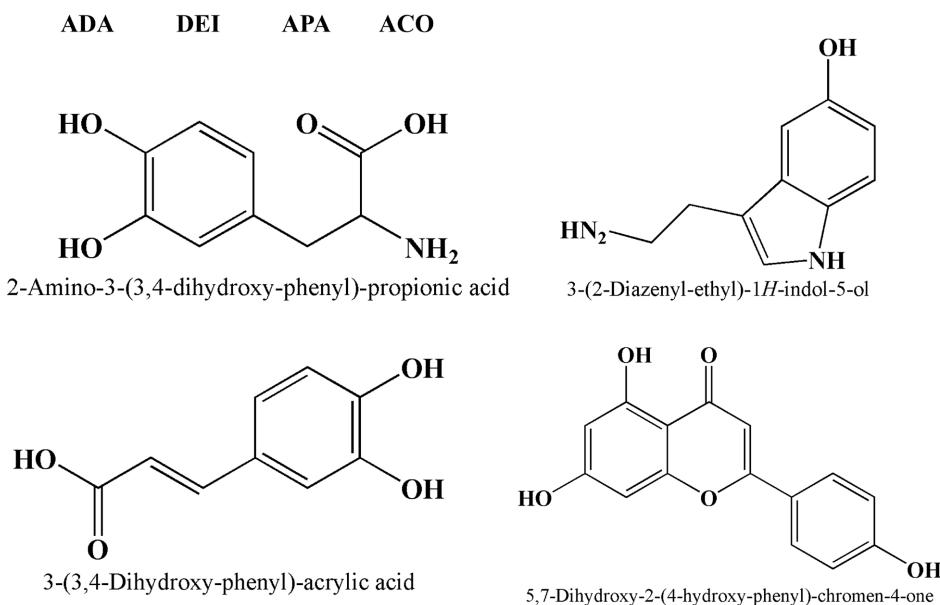


Figure 2. Molecular structures of the four active ingredients of banana leaf extract
图 2. 香蕉叶提取物的四种有效成分分子结构式

图 1 呈现了香蕉叶提取物的傅里叶红外光谱图, 如图 1 所示, 波数在 3280 cm^{-1} 处的吸收峰为-OH 的伸缩振动吸收峰; 2920 cm^{-1} 处的吸收峰属于-CH 的伸缩振动吸收峰; 1595 cm^{-1} 处是 C=C 的伸缩振动吸

收峰; 1401 cm^{-1} 处为-CH₃ 中的-CH 的弯曲振动峰; 1027 cm^{-1} 处为 C-O-C 的伸缩振动峰; 1000 cm^{-1} 以下的吸收峰为芳香族和脂肪族的 C-H 的吸收峰。结果表明, 香蕉叶提取物中含有 O、N 原子的官能团和芳香环, 符合一般缓蚀剂的特性。结合参考香蕉叶提取物成分的文献, 可以得到如图 2 所示的成分, 分别为 2-Amino-3-(3,4-dihydroxy-phenyl)-propionic acid (ADA), 3-(2-Diazenyl-ethyl)-1H-indol-5-ol (DEI), 3-(3,4-Dihydroxy-phenyl)-acrylic acid (APA), 5,7-Dihydroxy-2-(4-hydroxy-phenyl)-chromen-4-one (ACO)。

3.2. Tafel 极化曲线分析

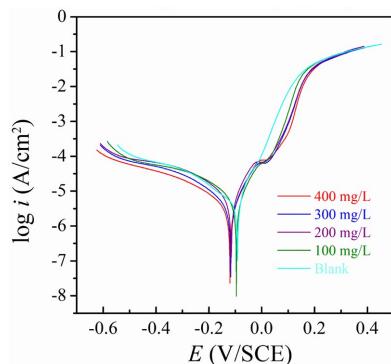


Figure 3. Tafel polarization curves of copper electrode in acidic medium with and without banana leaf extract
图 3. 铜电极在酸性介质中含有和缺乏香蕉叶提取物时的 Tafel 极化曲线图

Table 1. Polarization curve parameters of copper electrode immersed in acid solution containing different concentrations of banana leaf extract

表 1. 铜电极浸泡在酸溶液中含有不同浓度的香蕉叶提取物时的极化曲线参数

C (mg/L)	E_{corr} (mV/SCE)	i_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	β_c (mV dec $^{-1}$)	β_a (mV dec $^{-1}$)	η (%)
Blank	-91	20.45	-185.7	76.4	—
CALLE					
100	-96	3.51	-161.4	72.1	82.8
200	-116	2.57	-157.2	73.9	87.4
300	-117	1.81	-151.8	82.8	91.1
400	-120	1.26	-153.9	83.7	93.8

图 3 呈现了铜电极浸泡在 0.5 M 酸溶液中含有和缺乏香蕉叶提取物时的 Tafel 极化曲线图。如图 3 所示, 随着香蕉叶提取物浓度的增加, 可以明显发现腐蚀电流密度呈现出一个下降趋势。这表明香蕉叶提取物吸附在铜表面后能够有效抑制铜在酸介质中的腐蚀。另外, 值得一提的是, 随着香蕉叶提取物浓度的增加, 可以明显发现阴极分支和阳极分支的极化曲线呈现出了不同的特征。从阴极分支可以发现, 所有极化曲线呈现出一个平行的趋势, 这表明香蕉叶提取物在铜表面吸附后, 并未改变阴极的反应的作用机制。另外为了定量分析极化曲线数据, 采用了 Tafel 外推法去获得腐蚀电流密度和腐蚀电位等参数。拟合后的数据列在表 1 中, 其中, 缓蚀效率的被获得采用公式 1 进行获得[4] [5]:

$$\eta(\%) = \frac{i_{corr,0} - i_{corr}}{i_{corr,0}} \times 100 \quad (1)$$

其中, $i_{corr,0}$ 和 i_{corr} 分别表示未添加缓蚀剂和添加缓蚀剂后的腐蚀电流密度值。从表 1 中可以发现, 在未添加香蕉叶提取物时, 此时铜电极表面的腐蚀电流密度值为 $20.45\text{ }\mu\text{A cm}^{-2}$ 。当香蕉叶提取物的浓度达到 400 mg/L 时, 此时铜样品表面的腐蚀电流密度值下降至 $1.26\text{ }\mu\text{A cm}^{-2}$, 此时的缓蚀效率值为 93.8%。另

外, 值得一提是, 添加缓蚀剂后, 腐蚀电位的变化区间在 85 mV 之间, 这表明香蕉叶提取物属于混合型缓蚀剂, 能够同时抑制铜电极阴极和阳极的反应。

3.3. 电化学阻抗谱数据分析

图 4(a)和图 4(b)呈现了铜电极浸泡在 0.5 M 酸溶液中含有和缺乏不同浓度香蕉叶提取物的 Nyquist 图和 Bode 图。如图 4 所示, 随着香蕉叶提取物浓度的增加, 可以明显发现 Nyquist 图的容抗弧半径呈现出一个增大的趋势, 这表明香蕉叶提取物在铜样品表面吸附后能够有效抑制铜电极表面电荷的转移, 从而达到抑制铜腐蚀的目的, 另外, 值得一提的是, 在空白溶液中可以明显发现容抗弧由高频区的容抗弧和低频区的 Warburg 阻抗构成。低频区的容抗弧和电荷转移电阻有关。从图 4 中的 Bode 图可以发现, 随着香蕉叶提取物浓度的增加, 阻抗模值和相位角明显出现增加的趋势, 这表明香蕉叶提取物在铜表面吸附后能够有效抑制铜在硫酸介质中的腐蚀。

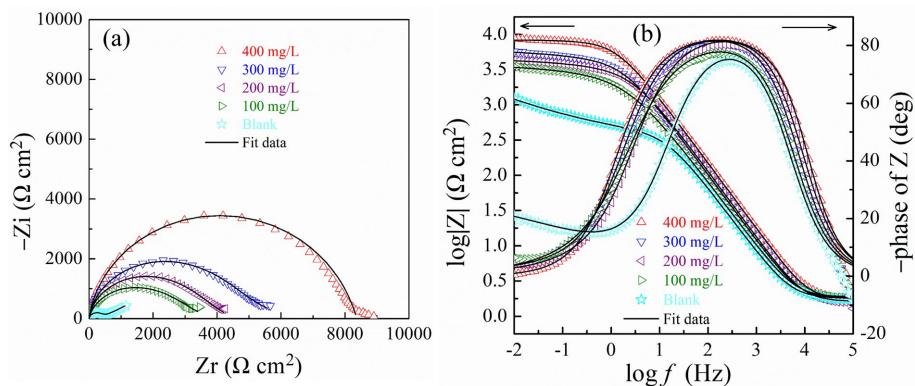


Figure 4. Electrochemical impedance spectroscopy of a copper electrode immersed in an acidic medium with and without banana leaf extract: (a) Nyquist plot; (b) Bode plot

图 4. 铜电极浸泡在酸性介质中含有和缺乏香蕉叶提取物时的电化学阻抗谱图: (a) Nyquist 图; (b) Bode 图

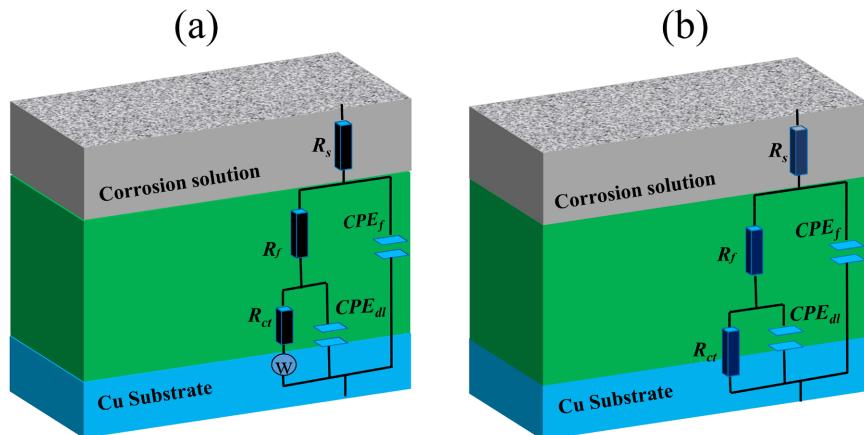


Figure 5. Electrochemical impedance spectroscopy of a copper electrode immersed in an acidic medium with and without banana leaf extract: (a) Nyquist plot; (b) Bode plot

图 5. 铜电极浸泡在酸性介质中含有和缺乏香蕉叶提取物时的电化学阻抗谱图: (a) Nyquist 图; (b) Bode 图

此外, 为了定量分析电化学阻抗谱数据, 采用了图 5 中的等效电路图去拟合图 4 中电化学阻抗谱参数, 拟合后数据列在表 2 中, 未添加香蕉叶提取物时, 此时铜电极表面的极化电阻为 $0.62 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$ 。当香蕉叶提取物浓度达到 400 mg/L 时, 此时铜电极表面的极化电阻为 $8.99 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$ 。为计算铜样品表面的缓

蚀效率, 采用了图 2 中的极化曲线公式进行求解[6]-[8]:

$$\eta(\%) = \frac{R_p - R_{p,0}}{R_p} \times 100 \quad (2)$$

其中, R_p 和 $R_{p,0}$ 分别表示添加缓蚀剂和未添加缓蚀剂后的极化电阻值。代入公式 2 可以求得当香蕉叶提取物浓度达到 400 mg/L 时, 其缓蚀效率能够达到 93.1%, 因此可以表明香蕉叶提取物能够有效抑制铜在酸性介质中的腐蚀。

Table 2. Electrochemical impedance spectroscopy parameters of copper electrodes immersed in acidic solutions containing different concentrations of banana leaf extract

表 2. 铜电极浸泡在酸性溶液中含有不同浓度的香蕉叶提取物时的电化学阻抗谱参数

C (mg/L)	R_f (k Ω cm 2)	R_{ct} (k Ω cm 2)	R_p (k Ω cm 2)	C_f (μ F cm $^{-2}$)	n_1	C_{dl} (μ F cm $^{-2}$)	n_2	W ($\times 10^{-2}$ Ω cm 2 s $^{1/2}$)	η (%)
Blank	0	0.62	0.62	168.8	0.82	167.3	0.63	7.2	—
CALLE									
100	0.21	3.23	3.44	88.6	0.96	133.7	0.73	—	81.9
200	0.42	4.15	4.57	79.3	0.93	98.1	0.86	—	86.4
300	0.67	5.75	6.42	66.4	0.99	67.4	0.99	—	90.3
400	0.82	8.17	8.99	49.9	0.96	41.5	0.77	—	93.1

3.4. 吸附等温模型分析

为了定量分析香蕉叶提取物在铜电极表面的吸附行为。采用了不同等温吸附模型进行分析, 分别采用了 Langmuir, Frumkin, El-Awady 和 Freundlich 等吸附模型进行拟合, 拟合后的结果表明, Langmuir 吸附模型的线性回归系数接近于 1, 这表明香蕉叶在铜表面的吸附符合 Langmuir 单层吸附模型, 其中 Langmuir 吸附模型的计算公式如下[9] [10]:

$$\text{Langmuir: } \frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (3)$$

此外, 为了判断香蕉叶提取物在铜表面的吸附类型, 我们才有了吉布斯自由能对其进行求解, 其计算公式如下所示[11]-[13]:

$$K_{ads} = \frac{1}{55.5} \exp\left(-\frac{\Delta G_{ads}^0}{RT}\right) \quad (4)$$

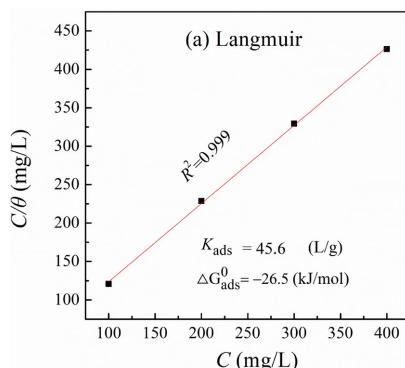


Figure 6. Adsorption isotherms of copper electrodes immersed in acidic medium with and without banana leaf extract

图 6. 铜电极浸泡在酸性介质中含有和缺乏香蕉叶提取物时的吸附等温曲线图

计算后的结果如图 6, 从吉布斯自由能的值可以判断, 香蕉叶提取物在铜表面的吸附同时存在物理和化学吸附。

3.5. SEM 形貌分析

图 7 呈现了香蕉叶提取物在铜样品表面的在不同实验条件下的表面形貌图。图 7(a)呈现了在未添加香蕉叶提取物时铜样品表面的形貌图, 可以发现在未添加香蕉叶提取物时, 这个铜样品表面遭到了极大的腐蚀, 整个铜样品表面出现明显了腐蚀凹坑。图 7(b)呈现了将铜样品浸泡在 0.5 M 酸性介质中含有 400 mg/L 香蕉叶提取物时的表面形貌图。可以明显发现添加香蕉叶提取物, 整铜样品表面明显趋于平整, 这表明香蕉叶提取能够有效抑制铜在酸性介质中的腐蚀。

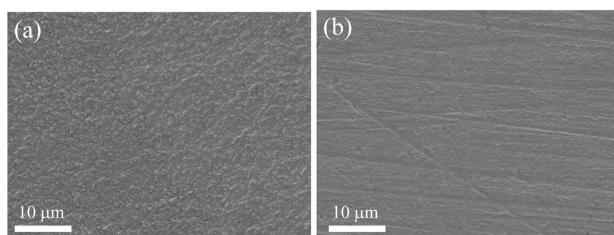


Figure 7. SEM images of copper electrodes immersed in sulfuric acid medium with and without banana leaf extract: (a) Surface morphology without corrosion inhibitor after immersion for 20 hours; (b) Surface morphology with 400 mg/L banana leaf extract

图 7. 铜电极浸泡在硫酸介质中含有和缺乏香蕉叶提取物时的扫描电镜图: (a) 未添加缓蚀剂时浸泡 20 小时的表面形貌图; (b) 添加 400 mg/L 时的香蕉叶提取物的表面形貌图

3.6. 量子化学计算分析

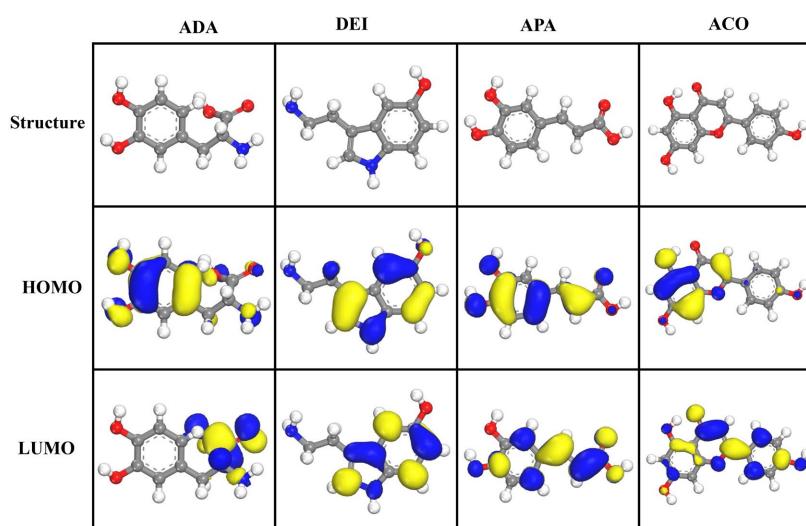


Figure 8. Optimized structures of ADA, DEI, APA and ACO in banana leaf extract and the electron cloud distribution of HOMO and LUMO orbitals

图 8. 香蕉叶提取物中 ADA, DEI, APA 和 ACO 优化的结构以及 HOMO 和 LUMO 轨道的电子云分布图

图 8 呈现了香蕉叶提取物中 ADA、DEI、APA 和 ACO 经过量子化学计算后优化的分子结构式、HOMO 和 LUMO 轨道。可以发现经过优化有 ADA、DEI、APA 和 ACO 分子结构几乎处于一个平面, 因此可以判断, 这有利于它们在金属表面的平行吸附。HOMO 轨道对应了分子的给电子能力, 可以发现 ADA、

DEI、APA 和 ACO 分子中, 电子云主要集中分布在氧原子、氮原子以及苯环上, 这表明这些活性位点更容易给出电子从而吸附在铜电极表面。LUMO 轨道对应一个分子的吸电子能力, ADA、DEI、APA 和 ACO 分子通过接收来自铜样品表面的孤对电子形成反馈键。

3.7. 分子动力学模拟

图 9 呈现了 ADA、DEI、APA 和 ACO 在 Cu (111)面吸附的稳定构型, 可以明显发现四种有效成分均能平行地吸附在 Cu (111)面上, 这种吸附构型由于缓蚀剂分子可以获得最大的覆盖面去抑制腐蚀介质对金属基地侵蚀, 为了判断四种分子在铜表面吸附后结合能的大小, 我们才有如下公式进行计算:

$$E_{\text{interact}} = E_{\text{tot}} - (E_{\text{subs}} + E_{\text{inh}}) \quad (5)$$

$$E_{\text{binding}} = -E_{\text{interact}} \quad (6)$$

代入公式求得 ADA、DEI、APA 和 ACO 在 Cu (111)面吸附能分别为-125.9 kcal/mol, -120.3 kcal/mol, -132.6 kcal/mol 和-141.2 kcal/mol。大的结合能表明这些有效成分能够在 Cu (111)面上形成稳定的化学吸附。

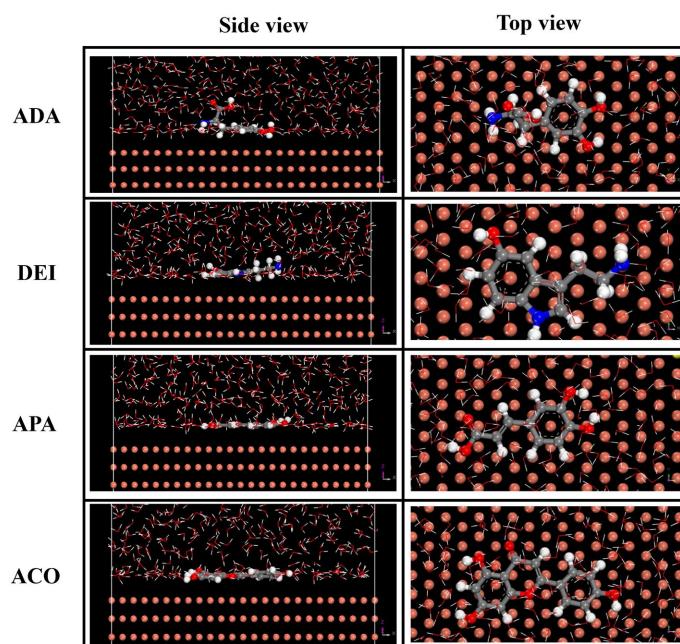


Figure 9. Optimized structures of ADA, DEI, APA and ACO in banana leaf extract and the electron cloud distribution of HOMO and LUMO orbitals

图 9. 香蕉叶提取物中 ADA, DEI, APA 和 ACO 优化的结构以及 HOMO 和 LUMO 轨道的电子云分布图

4. 结论

- 1) 香蕉叶提取物能够有效抑制铜在酸性介质中的腐蚀, 并且能够同时抑制铜电极阴极和阳极的腐蚀, 其缓蚀效率能够达到 93%以上。
- 2) 表面形貌测试表明, 添加香蕉叶提取物后, 铜表面的腐蚀程度明显下降, 这表明香蕉叶提取物有效地抑制铜样品的腐蚀。
- 3) 吸附等温模型研究表明香蕉叶提取物在铜的吸附符合朗缪尔单层吸附模型, 并且同时存在物理和化学吸附。

4) 量子化学计算和分子动力学模板表明香蕉叶提取物中有效成分能够展现出高的缓蚀性能。

项目基金

中国石化科技部攻关项目“超深井高压可溶裸眼酸压封隔器研制”(编号：P23217)资助。

参考文献

- [1] Hu, P., Cheng, P., Wu, Y., Guo, L. and AlObaid, A.A. (2024) Insight into the Corrosion Inhibition Performance of *Capsicum annuum* L. Leaf Extract as Corrosion Inhibitor for Copper in Sulfuric Acid Medium. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **161**, Article 105558. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105558>
- [2] Wu, Y., Gong, Z., Guo, L. and AlObaid, A.A. (2024) Batatas Lam Leaf Extract as a Biodegradable Corrosion Inhibitor for Copper in 0.5M H₂SO₄ Solution. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, **39**, Article 101601. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101601>
- [3] Huang, H., Xie, L., Chen, X., Li, W. and Marzouki, R. (2024) Insights into the Corrosion Inhibition Mechanism of *Canavalia gladiata* Leaf Extract for Copper in Sulfuric Acid Medium. *Langmuir*, **40**, 3515-3526. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03124>
- [4] Zhou, Y., Zhu, C., Xu, S., Xiang, B. and Marzouki, R. (2021) Combining Electrochemical, Surface Topography Analysis, and Theoretical Calculation Methods to Insight into the Anti-Corrosion Property of *Syzygium samarangense* Leaf Extract. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **102**, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.07.016>
- [5] Xiang, Q. and He, J. (2021) Combining Theoretical and Experimental Researches to Insight the Anti-Corrosion Nature of Citrus Reticulata Leaves Extract. *Journal of Molecular Liquids*, **325**, Article 115218. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115218>
- [6] He, J., Yu, D., Xu, Q., Li, G., Chen, G., An, J., et al. (2021) Combining Experimental and Theoretical Researches to Insight into the Anti-Corrosion Property of *Morinda citrifolia* Linn Leaves Extracts. *Journal of Molecular Liquids*, **325**, Article 115145. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115145>
- [7] He, J., Xu, Q., Li, G., Li, Q., Marzouki, R. and Li, W. (2021) Insight into the Corrosion Inhibition Property of *Artocarpus heterophyllus* Lam Leaves Extract. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **102**, 260-270. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.07.007>
- [8] Chen, S., Chen, S., Zhu, B., Huang, C. and Li, W. (2020) *Magnolia grandiflora* Leaves Extract as a Novel Environmentally Friendly Inhibitor for Q235 Steel Corrosion in 1M HCl: Combining Experimental and Theoretical Researches. *Journal of Molecular Liquids*, **311**, Article 113312. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113312>
- [9] Feng, Y., He, J., Zhan, Y., An, J. and Tan, B. (2021) Insight into the Anti-Corrosion Mechanism Veratrum Root Extract as a Green Corrosion Inhibitor. *Journal of Molecular Liquids*, **334**, Article 116110. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116110>
- [10] Chen, S., Zhao, H., Chen, S., Wen, P., Wang, H. and Li, W. (2020) Camphor Leaves Extract as a Neoteric and Environment Friendly Inhibitor for Q235 Steel in HCl Medium: Combining Experimental and Theoretical Researches. *Journal of Molecular Liquids*, **312**, Article 113433. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113433>
- [11] He, J., Li, Q., Li, X., An, J., Chen, G., Zhao, L., et al. (2020) Insight into the Anti-Corrosion Mechanism of 2-Aminobenzenethiol as the Inhibitor for Copper in Acid Environment. *Journal of Molecular Liquids*, **320**, Article 114494. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114494>
- [12] Guo, L., Tan, B., Zuo, X., Li, W., Leng, S. and Zheng, X. (2020) Eco-Friendly Food Spice 2-Furfurylthio-3-Methylpyrazine as an Excellent Inhibitor for Copper Corrosion in Sulfuric Acid Medium. *Journal of Molecular Liquids*, **317**, Article 113915. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113915>
- [13] Gao, L., Peng, S., Huang, X. and Gong, Z. (2020) A Combined Experimental and Theoretical Study of Papain as a Biological Eco-Friendly Inhibitor for Copper Corrosion in H₂SO₄ Medium. *Applied Surface Science*, **511**, Article 145446. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145446>