

桐油水解制备咪唑啉缓蚀剂及其量子化学研究

李循迹¹, 王福善¹, 陈庆国¹, 张娟涛², 崔小虎¹, 宋文文¹

(1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 中国石油集团石油管工程技术研究院, 西安 710077)

摘要: 目的 开发原料价廉易得、能实际应用的缓蚀剂。方法 以桐油为原料, 水解后得到桐油酸, 然后与二乙烯三胺经过酰胺化和环化反应, 生成桐油咪唑啉缓蚀剂。在模拟现场环境的条件下对所合成的桐油咪唑啉缓蚀剂进行电化学测试和高温高压性能评价。利用量子化学计算对桐油咪唑啉缓蚀剂的分子动力学进行模拟, 探讨其在 Fe 表面的吸附作用。结果 红外光谱显示, 桐油水解后可生成桐油酸, 最终合成物为桐油咪唑啉。电化学测试表明, 随着桐油咪唑啉缓蚀剂添加量的增大, 20#测试钢片的自腐蚀电位逐渐提高, 腐蚀电流降低。高温高压模拟实验显示, 加入油酸咪唑啉后, 腐蚀速率明显降低, 由 0.3181 mm/a 降到了 0.0392 mm/a。量子化学计算表明, 桐油咪唑啉分子中的咪唑啉环会平行吸附于铁表面, 形成一层缓蚀剂膜。结论 价廉易得的桐油经水解后可得桐油酸, 再与二乙烯三胺经过酰胺化和环化反应最终合成了桐油咪唑啉缓蚀剂。该缓蚀剂添加量越大, 对 20#钢片的缓蚀效果越好, 呈现出了较好的缓蚀效果, 其分子结构中的咪唑啉环能平行吸附于铁表面, 属于抑制阳极型缓蚀剂。

关键词: 桐油水解; 缓蚀剂; CO₂ 腐蚀; 量子化学

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.011

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0068-07

Preparation of Imidazoline and Its Quantum Chemistry by Hydrolysis of Tung Oil

LI Xun-ji¹, WANG Fu-shan¹, CHEN Qing-guo¹, ZHANG Juan-tao², CUI Xiao-hu¹, SONG Wen-wen¹

(1. Petro China Tarim Oilfield Co., Ltd, Korla 841000, China;

2. Institute of Petroleum Pipe Engineering Technology of CNPC, Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The work aims to develop corrosion inhibitors that can be made of cheap and available raw materials and applied in practice. Tung oil was hydrolyzed to obtain tung oleic acid, and then aminated and cyclized with diethylenetriamine to form tung oil imidazolin corrosion inhibitor. The electrochemical test and high temperature and high pressure performance evaluation were carried out to the synthesized tung oil imidazolin corrosion inhibitor under the simulated field environment. The molecular dynamics of tung oil imidazolin corrosion inhibitor was simulated by quantum chemical calculation, and its adsorption on Fe surface was discussed. Infrared spectra showed that tung oil could form tung oleic acid after hydrolysis, and the final compound was tung oil imidazolin. The electrochemical test showed that with the increase of the amount of tung oil imidazolin corrosion inhibitor, the self-corrosion potential of the 20# steel sheet increased gradually and the corrosion current decreased. The simula-

收稿日期: 2020-03-04; 修订日期: 2020-04-18

Received: 2020-03-04; Revised: 2020-04-18

基金项目: 中国石油天然气集团公司基础研究和战略储备技术研究基金项目(2018Z-01); 陕西省科技新星项目(2018KJXX-071)

Fund: Foundation Research and Strategic Reserve Technology Research Fund of China National Petroleum Corporation(2018Z-01); Shaanxi Science and Technology New Star Project(2018KJXX-071)

作者简介: 李循迹(1961—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为油气田开发。

Biography: LI Xun-ji(1961—), Male, Professor, Research focus: oil and gas field development.

tion results of high temperature and high pressure test showed that the corrosion rate decreased obviously after the addition of imidazolin oleate, from 0.3181 mm/a to 0.0392 mm/a. Quantum chemical calculation showed that the imidazolin ring in tung oil imidazolin molecule was adsorbed on the iron surface in parallel, forming a layer of corrosion inhibitor film. Tung oil acid can be obtained by hydrolysis of cheap and available tung oil, and then synthesized with diethylenetriamine by amidation and cyclization to form tung oil imidazolin corrosion inhibitor. The increase of the amount of the inhibitor improves the resistance of corrosion medium transfer and slows down the corrosion of 20# steel sheet, showing a good corrosion inhibition effect. The imidazole ring in the molecular structure can be adsorbed on the iron surface in parallel, so the inhibitor is anode-inhibiting corrosion inhibitor.

KEY WORDS: hydrolysis of tung oil, inhibitor, CO₂ corrosion, quantum chemistry calculations

CO₂ 腐蚀是石油工业中最为常见的腐蚀类型, CO₂ 溶于水后对金属有极强的腐蚀性。随着油田的大规模开发和建设, CO₂ 造成的腐蚀给油田的生产带来了极大的危害^[1-3]。加注缓蚀剂作为一种经济、有效且通用性强的金属腐蚀控制方法, 特别适合在油气井及集输系统中应用^[4]。桐油由于其能迅速干燥、耐高温和耐腐蚀的特点, 常用作木器件的防腐和防水、金属件的防腐和防锈。有文献报道, 用桐油酸作原料来改性合成咪唑啉缓蚀剂, 其展现出了优异的缓蚀效果^[5-6]。但是桐油酸这种原料不仅价格贵, 是桐油的 2~3 倍, 而且市场供应厂家少, 不易得, 实际应用困难。因此, 文中以价廉易得的桐油为原料, 先进行水解生成桐油酸, 然后再对其进行改性合成桐油咪唑啉缓蚀剂, 并在模拟现场工况条件下对其缓蚀性能进行了测试, 以期能满足实际应用要求。

1 试验

1.1 原料和仪器

实验原料为: 桐油 (西安天成化工有限公司, 工

业品)、二乙烯三胺 (天津市富于精细化工有限公司, 分析纯)、二甲苯 (天津市富于精细化工有限公司, 分析纯)。

实验仪器为 AVATAR-360 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)、EG&G 公司 Potential/Galvanostat M273A 型恒电位仪、美国热电监测分析技术公司高温高压釜。

1.2 桐油咪唑啉的合成

在装有电动搅拌器和回流装置的三口烧瓶中先加入桐油 57.4 g, 水 10 g, 升温至 60 °C, 加入 150 g 二甲苯作溶剂和携水剂, 水解 3 h。然后在二甲苯的回流温度下分离水分, 得到桐油酸, 取样, 送检红外光谱。待水分分离完后, 加热至 140~160 °C, 0.5 h 内边搅拌边加入 57.8 g (1.4 倍) 二乙烯三胺, 继续反应 3 h, 并脱出溶剂二甲苯, 完成桐油酸和二乙烯三胺的酰胺化反应。将溶液在 1.5 h 内缓慢加热至 210 °C, 继续环化反应 5 h。反应结束后, 冷却, 即得棕红色桐油咪唑啉缓蚀剂, 其合成路线如图 1 所示。

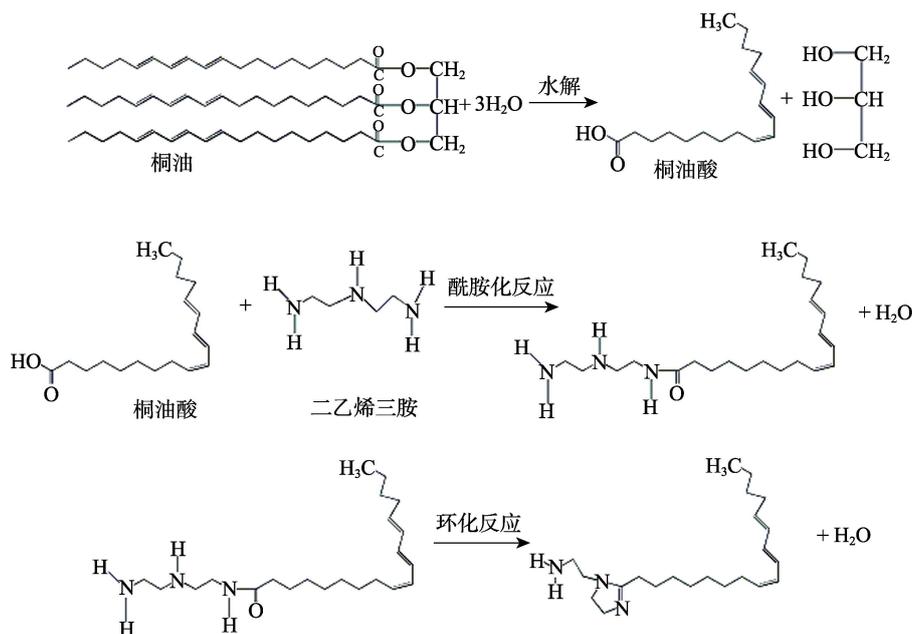


图 1 桐油咪唑啉的合成路线

Fig.1 Synthesis route of tung oil imidazolin

1.3 失重法

失重法测试所用试样为 50 mm×10 mm×3 mm 的 20#钢, 其化学成分见表 1。试验前将试样经 400#、600#、800#砂纸逐级打磨, 丙酮清洗后, 放入干燥器中干燥后称量(精确至±0.1 mg)。试验介质采用模拟现场水样, 组成为: Cl⁻ 160 000 mg/L、SO₄²⁻ 350 mg/L、HCO₃⁻ 150 mg/L、K⁺+Na⁺ 100 087 mg/L、Ca²⁺ 6200 mg/L、Mg²⁺ 545 mg/L。试验设备采用 5 L 镍金合金高温高压反应釜, 实验时先用 10%的磷酸钠溶液和去离子水逐级清洗高温高压内壁, 再用干净的棉纱擦干釜体内表面。试样经预处理称量后装于试样架上, 配置好模拟水注入釜中, 再将装好的试样连同试样架置于高压釜中。仔细清理釜盖, 用两个橡胶密封圈套入釜盖, 在螺钉上适当地抹上一些密封脂, 手动上螺钉至手紧程

度, 之后用扭矩扳手上紧螺钉。用高纯氮气进行气密性试验, 检查密封和管路是否泄漏, 关闭氮气阀门, 逐步升温到试验预设温度, 开启气体阀门到预设压力。试验总压为 5 MPa, CO₂分压为 0.5 MPa, 试验温度为 60 °C, 转速为 0.6 m/s, 试验周期为 168 h。试验结束后, 取出试样, 用去膜液除去表面腐蚀物, 分别用蒸馏水和无水乙醇清洗后, 吹干, 称量, 按式(1)和式(2)计算腐蚀速率和缓蚀率。

$$v = \frac{8.76 \times \Delta m}{7.8 \times S \times t} \quad (1)$$

$$\eta_1 = \frac{v_0 - v}{v_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: v_0 、 v 分别为加入缓蚀剂前后的腐蚀速率, mm/a; Δm 为试样质量损失, g; t 为测试时间, h; S 为试样表面积, m²。

表 1 试样的化学成分
Tab.1 Chemical composition of samples

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Fe	%
0.097	0.206	0.413	0.017	0.007	0.004	0.019	0.002	0.001	0.004	余量	

1.4 电化学测试

采用 EG & G 公司 Potential/Galvanostat M273A 型恒电位仪测量系统进行动电位极化曲线测定, 试验介质与失重法相同。工作电极为圆片状 20#钢电极, 试验面积为 1.0 cm²。试验前经砂纸逐级打磨至 800#, 用蒸馏水清洗后, 丙酮除油。辅助电极为大面积石墨电极, 参比电极为饱和甘汞电极。测试温度为 60 °C, 动电位极化曲线测量电位相对自腐蚀电位的扫描范围为 -150~200 mV, 扫描速率为 0.5 mV/s。动电位极化曲线测试中的缓蚀效率由式(3)计算得到:

$$\eta_2 = \frac{J_{\text{corr}} - J'_{\text{corr}}}{J_{\text{corr}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: J_{corr} 、 J'_{corr} 分别为加入缓蚀剂前后体系的自腐蚀电流密度, A/cm²。

1.5 分子动力学 (MD) 模拟

桐油咪唑啉在铁表面的 MD 模拟采用 Materia 1 Studio 软件实现。由于 COMPASS 力场是一个高精度的通用力场, 适用范围涵盖了绝大多数有机物、无机小分子和高聚物, 且可用来计算得到从孤立分子到聚集态的各种性质。因此结合所研究体系的特点, 在模拟中采用 COMPASS 力场。

如图 2 所示, 取金属铁(001)为吸附表面, 构建成 (11×11)的超晶胞。模拟体系大小为 2.29 nm×2.29 nm×2.20 nm, 同时由 Amorphous Cell 模块构建包含 1 个缓蚀剂分子及 1000 个水分子的中间层。上层为水层, 其水分子含量为 500 个。模拟过程中固定 Fe 层和最上面的水层。

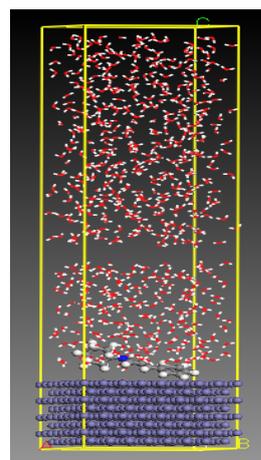


图 2 桐油咪唑啉在 Fe 表面的吸附构型
Fig.2 Adsorption configuration of tung oil imidazolin on Fe surface

动力学模拟及数据采集通过 NVT 系统实现: 采用 smart 方法对建好的三层超晶胞结构进行 5000 步的能量最小化处理, 以除去局部高势能点。进行 160 ps 的动力学平衡, 然后进行 80 ps 的数据采集, 每 800 fs 输出一个轨迹文件, 共输出 100 个轨迹文件。模拟过程中, 时间步长为 0.8 fs, 利用 Andersen 温度控制方法, 控制温度均为 363 K (45 °C)。

2 结果及分析

2.1 红外结果分析

2.1.1 桐油分解生成桐油酸

桐油水解前后的红外光谱如图 3 所示。图 3a、

b 中, 1689 cm^{-1} 处为羰基的吸收峰。图 3b 中, $1330\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 处为碳氧单键产生的中等强度的吸收峰, 920 cm^{-1} 处为羧基中 O—H 形成氢键的羧基向外弯曲振动的吸收, 可旁证羧基的存在。 1300 、 993 、 968 cm^{-1} 处强吸收表明反式碳-碳双键的共轭, 1410 cm^{-1} 和 685 cm^{-1} 处的吸收带为碳-碳双键的顺式取代。由此, 该红外分析结果表明水解产物即为桐油酸。

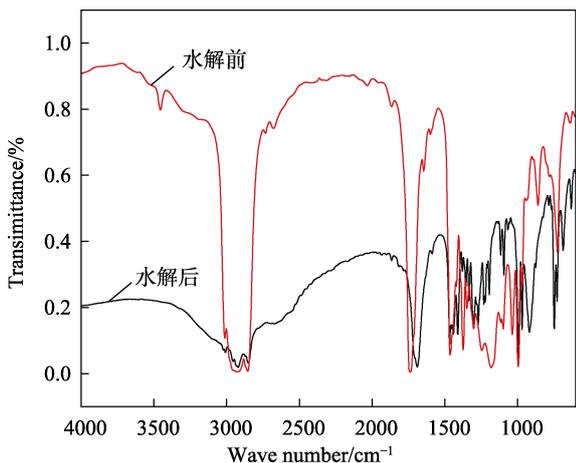


图 3 桐油水解前后的红外
Fig.3 Infrared spectra of tung oil before and after hydrolysis: a) Before hydrolysis; b) After hydrolysis

2.1.2 桐油咪唑啉

桐油水解后合成的桐油咪唑啉缓蚀剂的红外光谱如图 4 所示。图 4 中, 1645 cm^{-1} 处为 C=N 伸缩振动吸收峰, 为咪唑啉环的特征吸收峰, 1548 cm^{-1} 处为 N—H 弯曲振动特征吸收峰, 1463 cm^{-1} 处为—CH₂—剪式弯曲振动吸收峰, $2852\sim 2927\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为甲基和亚甲基的伸缩振动吸收峰。由此判断分子中有亚甲基(—CH₂—)或甲基(—CH₃)结构的存在。 3320 cm^{-1} 左右的峰为 N—H 弯曲振动吸收峰。综上所述, 该红外谱图为所合成的桐油咪唑啉。

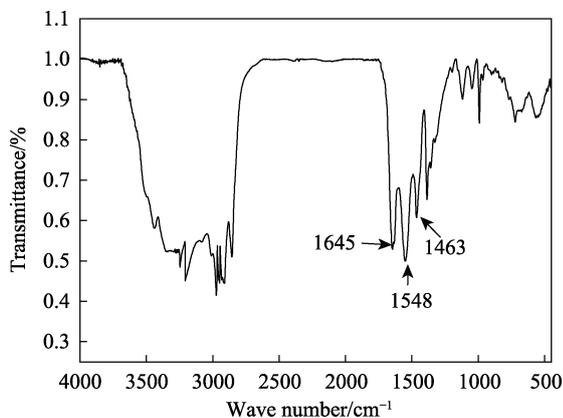


图 4 桐油咪唑啉的红外光谱
Fig.4 Infrared spectra of tung oil imidazolin

2.2 失重法结果

采用挂片失重法, 利用高温高压釜对桐油咪唑啉缓蚀性能进行了评价, 其结果见表 2。从表 2 可以看到, 未加缓蚀剂时, 溶液在测试温度范围内对 20# 钢有较严重的腐蚀。加入合成的桐油咪唑啉后, 20# 钢的腐蚀速率急剧减小, 缓蚀效果明显, 且随着缓蚀剂浓度的增大而增强。当添加量增加到 60 mg/L 以后, 防腐效果变化不大。

表 2 20# 钢片在加有不同浓度桐油咪唑啉缓蚀剂的模拟现场水样中的质量损失结果

Tab.2 Weight loss results of 20# steel sheets in simulated field water samples with different concentrations of tung oil imidazolin corrosion inhibitor

缓蚀剂加量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	腐蚀速率/($\text{mm}\cdot\text{L}^{-1}$)	缓蚀率/%
0	0.3181	—
20	0.0633	80.10
40	0.0487	84.69
60	0.0392	87.68
80	0.0387	87.83

2.3 动电位极化曲线

测试溶液为模拟现场水样, 试验模拟水组成见 2.2 小节。20# 钢片在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、模拟水样体系下加入不同浓度的桐油咪唑啉缓蚀剂后, 得到的动电位极化曲线如图 5 所示。对图 5 中的极化曲线进行拟合, 结果见表 3。

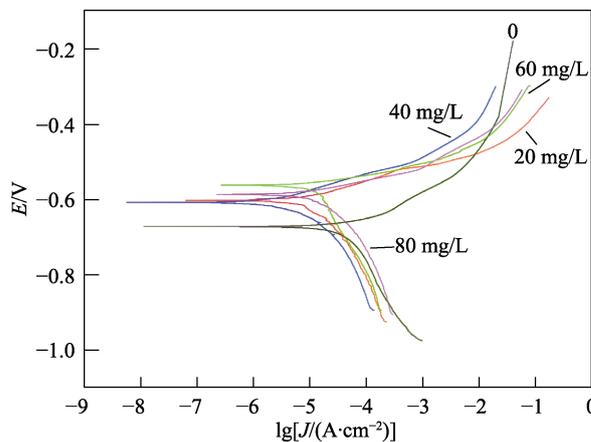


图 5 不同缓蚀剂浓度极化曲线
Fig.5 Concentration polarization curve of different corrosion inhibitors

从图 5 和表 3 可以看到, 加入少量的桐油咪唑啉缓蚀剂后, 能够提高试样在模拟环境体系下的自腐蚀电位, 但效果并不明显。随着缓蚀剂加入量的增大, 自腐蚀电位正移的程度越大, 因为缓蚀剂浓度越大, 在电极表面所形成的缓蚀膜越致密, 阻止了腐蚀介质与电极接触, 当加量达到 80 mg/L 时, 缓蚀效率达到了 90.4%, 缓蚀效果非常明显。缓蚀剂的加入对极化

曲线的阳极部分和阴极部分都有一定的影响,但从图5中可以看到,缓蚀剂加入使自腐蚀电位明显正移,缓蚀剂对阳极极化曲线的影响要明显大于阴极,所以该缓蚀剂主要为抑制阳极反应过程的吸附性缓蚀剂。此外,该桐油咪唑啉缓蚀剂浓度的改变并没有改变极化曲线的形状,说明桐油咪唑啉缓蚀剂已吸附在试样表面,同时浓度的改变并没有影响腐蚀过程中阴、阳极的反应机理^[7-9]。

表3 20#钢片在不同桐油咪唑啉模拟溶液中极化曲线参数

Tab.3 Parameters of polarization curve of 20# steel sheet in the simulated solution with different tung oil imidazolin

缓蚀剂加量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-4}\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	缓蚀效率/%
0	-707.0	7.62	0
20	-668.8	1.82	76.1
40	-637.5	1.34	82.4
60	-602.2	0.83	89.1
80	-600.0	73	90.4

2.4 量子化学计算

桐油咪唑啉分子主链结构及原子序数如图6所示

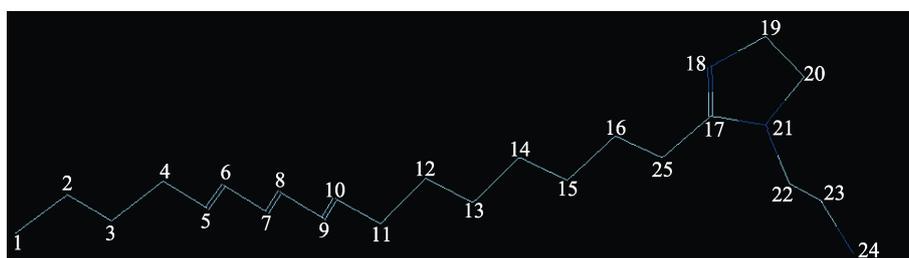
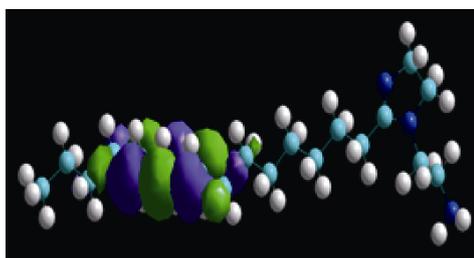
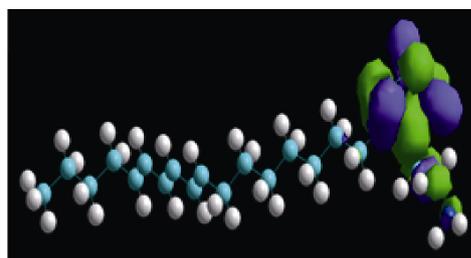


图6 桐油咪唑啉的分子结构及原子序数

Fig.6 Molecular structure and atomic number of the imidazolin



a LUMO



b HOMO

图7 桐油咪唑啉的前线轨道电荷密度分布

Fig.7 Frontier orbital charge density distribution of tung oil imidazolin

2.5 分子动力学模拟

桐油咪唑啉体系动力学平衡的能量和温度随时间的变化曲线如图8所示。从图8中可以看出,体系经过100 ps的动力学平衡后,能量和温度均趋于稳定,体系已达到平衡,说明桐油咪唑啉缓蚀剂吸附在

示,计算得到的相关的量子化学参数见表4,桐油咪唑啉的前线轨道电荷密度分布如图7所示。从表4中可以看到,咪唑啉环及侧链上的N原子具有较大的负电荷,其提供电子的能力很强,因此其HOMO轨道主要集中在咪唑啉环及其侧链的N原子上。这说明分子中的咪唑啉环及侧链N原子是分子的亲核中心,其很容易提供电子与 Fe^{2+} (或Fe原子)结合。而桐油咪唑啉的LUMO轨道电子密度主要分布在长链烷基上的共轭双键上,其能接受Fe原子的4s轨道上的电子形成反馈键,这些都从图7中得到了验证。

表4 桐油咪唑啉的量子化学参数

Tab.4 Quantum chemical parameters of tung oil imidazolin

序号	原子	电荷	序号	原子	电荷
5	C	-0.133	6	C	-0.119
7	C	-0.104	8	C	-0.105
9	C	-0.118	10	C	-0.134
17	C	-0.057	18	N	-0.173
21	N	-0.040	24	N	-0.024
$E_{\text{HOMO}}/\text{eV}$		-9.0587	$E_{\text{LUMO}}/\text{eV}$		-8.6174
$E_{\text{total}}/(\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1})$			-85228.92		

钢表面速度快。

桐油咪唑啉与Fe表面吸附达到平衡后,体系的动力学平衡构型如图9所示。从图9可以看到,吸附达到平衡后,分子会向铁基体表面靠近,整个咪唑啉分子均平行吸附于铁表面。

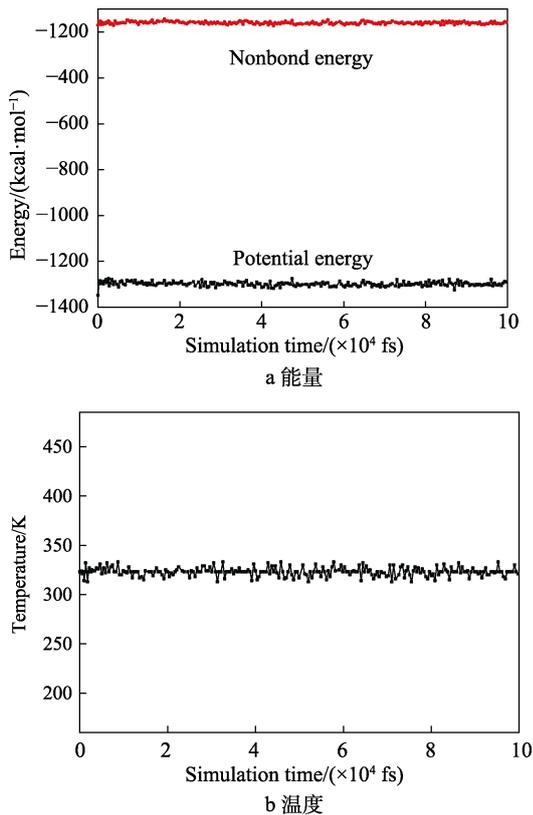


图 8 桐油咪唑啉体系动力学平衡阶段体系的能量和温度随时间的变化曲线

Fig.8 Change curve of energy and temperature of the system in the dynamic equilibrium stage of the tung oil imidazolin system with the time: a) energy; b) temperature

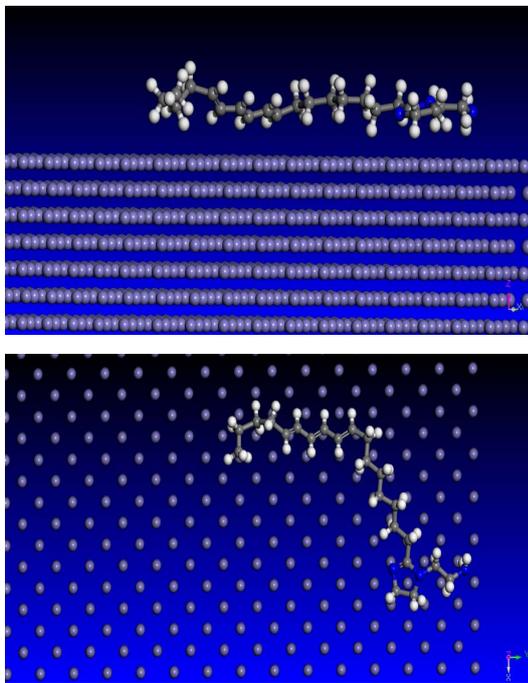


图 9 桐油咪唑啉在铁表面吸附的最终构型

Fig.9 Final configuration of the adsorption of the tung oil imidazolin on the surface of the iron

桐油咪唑啉与铁表面吸附的相互作用能如图 10 所示。可以看出, 吸附达到平衡后, 桐油咪唑啉会向

铁基体表面靠近, 分子中的咪唑啉环会平行吸附于铁表面, 形成一层缓蚀剂膜。胺基部分也由于非键相互作用而靠近 Fe 基体表面。与其初始构型相比, 分子在金属表面的覆盖度增大, 有利于缓蚀效率的提高。同时, 从吸附前后缓蚀剂分子的构型来看, 吸附平衡后缓蚀剂分子发生了较强的形变, 但由于分子在体系中的形变能远远小于其与 Fe 表面之间的非键作用能, 因此缓蚀剂分子能克服变形而与基体金属紧密结合^[10-20]。

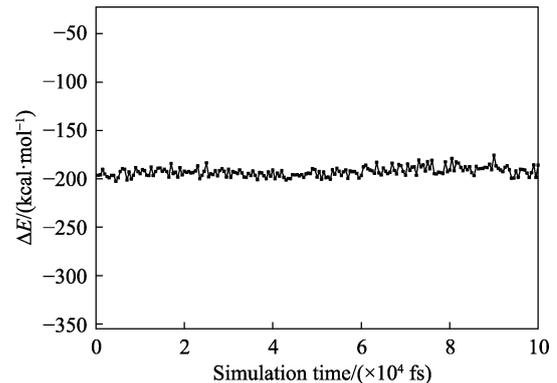


图 10 桐油咪唑啉与铁表面吸附的相互作用能
Fig.10 Interaction energy adsorbed on tung oil imidazolin and iron surface

3 结论

1) 桐油水解后可得到桐油酸, 然后与二乙烯三胺合成了桐油咪唑啉缓蚀剂。该缓蚀剂针对 20#钢具有一定的缓蚀作用, 其缓蚀效果随着缓蚀剂添加量的增大而增大, 当增加到 60 mg/L 时, 缓蚀效果趋于稳定。

2) 桐油咪唑啉在本体系中为混合抑制型缓蚀剂。

3) 量子化学分析显示, 桐油咪唑啉分子中的咪唑啉环会平行吸附于铁表面, 形成一层缓蚀剂膜。

参考文献:

- [1] 李国敏, 李爱魁, 郭兴蓬, 等. 油气田开发中的 CO₂ 腐蚀及防护技术[J]. 材料保护, 2003, 36(6): 1-5.
LI G M, LI A K, GUO X P, et al. CO₂ Corrosion and Protection Technology in Oil and Gas Field Development[J]. Material Protection, 2003, 36(6): 1-5.
- [2] 孙丽, 徐庆磊, 方炯, 等. CO₂ 腐蚀与防护研究[J]. 焊管, 2009, 32(3): 23-26.
SUN L, XU Q L, FANG J, et al. Study on Corrosion and Protection of CO₂[J]. Pipe Welding, 2009, 32(3): 23-26.
- [3] 张还抱. 油气田 CO₂ 腐蚀研究进展[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(4): 21-24.
ZHANG H B. Research Progress of CO₂ Corrosion in Oil and Gas Field[J]. Petroleum Mine Machinery, 2008, 37(4): 21-24.

- [4] 张燕芬, 刘鹤鸣. 国内外油气井抗 CO₂ 缓蚀剂的研究进展[J]. 当代石油石化, 2007, 15(9): 21-25.
ZHANG Y F, LIU H M. Research Progress of CO₂ Corrosion Inhibitor in Oil and Gas Wells at Home and Abroad[J]. Contemporary Petroleum and Petrochemical, 2007, 15(9): 21-25.
- [5] 樊治海, 张宏, 尹成先等. 桐油咪唑啉衍生物的合成及其缓蚀性能[J]. 材料保护, 2012, 45(5): 66-68.
FAN Z H, ZHANG H, YIN C X, et al. Synthesis and Corrosion Inhibition Properties of Jatropha Curcas Derivatives[J]. 2012, 45(5): 66-68.
- [6] 李军龙, 徐星, 邹莉菲. 咪唑啉缓蚀剂的合成及缓蚀性能研究[J]. 天然气与石油, 2016, 34(4): 70-73.
LI J L, XU X, ZHOU L F. Study on Synthesis and Corrosion Inhibition Performance of Imidazolin Corrosion Inhibitor[J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(4): 70-73.
- [7] 郭兴蓬, 俞敦义, 叶康民. 缓蚀剂研究中的电化学法-某些问题与新方法[J]. 材料保护, 1992, 23(10): 24-27.
GUO X P, YU D Y, YE K M. Electrochemical Method in Corrosion Inhibitor Research-some Problems and New Methods[J]. Material Protection, 1992, 23(10): 24-27.
- [8] BANDY R. The simultaneous determination of Tafel constants and corrosion rate-A new method[J]. Corrosion Science, 1980, 20(8-9): 1017-1028.
- [9] JANKOWSKI J, JUCHNIEWICZ R. A four-point method for corrosion rate determination[J]. Corrosion Science. 1980, 20(7): 841-851.
- [10] 李静, 路民旭, 严密林等. 模拟油田水介质中 P110 钢的 CO₂ 腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(5): 285-290.
LI J, LU M X, YAN M L, et al. CO₂ Corrosion Mechanism of P110 Steel in Simulated Oil Field Water Medium[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1999, 19(5): 285-290.
- [11] KORNHERR A, FRENCH S A, SOKOL A A, et al. Interaction of adsorbed organosilanes with polar zinc oxide surfaces: a molecular dynamics study comparing two models for the metal oxide surface[J]. Chemical Physics Letters, 2004, 393(1-3): 107-111.
- [12] HEMANN K, WITKO M. Binding schemes of adsorbates at metal surfaces: theoretical cluster studies[J]. Journal of Molecular Structure; THEOCHEM. 1999, 458(1-2): 81-92.
- [13] 籍国东, 赵元慧, 袁星. 量化参数及其在定量结构-活性-性质相关研究中的应用[J]. 东北师大学报(自然科学版), 1998(4): 47-53.
JI G D, ZHAO Y H, YUAN X. Quantitative Parameters and Their Application in Quantitative Structure-Activity-Property Related Research[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 1998(4): 47-53.
- [14] 于会华. 咪唑啉磷酸酯类缓蚀剂的制备及其缓蚀性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
YU H H. Preparation and Corrosion Inhibition Performance of Imidazolin Phosphate Corrosion Inhibitor[D]. Qingdao: Chinese Marine University, 2010.
- [15] 李静. 三唑类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2010.
LI J. Theoretical Study on Corrosion Inhibition Mechanism of Triazole Corrosion Inhibitors[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2010.
- [16] 俞敦义, 史铁京. 喹啉季铵盐(HQ)缓蚀剂的缓蚀性能及其吸附等温式[J]. 腐蚀与防护, 1996(4): 158-161.
YU Q Y, SHI T J. Corrosion Inhibition Performance and Adsorption Isotherm of Quinolin Seasonal Salt (HQ) Corrosion Inhibitor[J]. Corrosion and Protection, 1996(4): 158-161.
- [17] 王业飞, 由庆, 赵福麟. 一种新型咪唑啉复配缓蚀剂对 A3 钢在饱和 CO₂ 盐水溶液中的缓蚀性能[J]. 石油学报, 2006, 22(3): 74-78.
WANG Y F, YOU Q, ZHAO F L. Corrosion Inhibition Performance of a New Imidazolin Compound Corrosion Inhibitor on A3 Steel in Saturated CO₂ Brine Solution[J]. Journal of Petroleum, 2006, 22(3): 74-78.
- [18] 刘然克, 王立贤, 刘智勇. 咪唑啉类缓蚀剂对 P110 钢在 CO₂ 注入井环空环境中应力腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 25-29.
LIU R K, WANG L X, LIU Z Y. Effect of Imidazolin Corrosion Inhibitor on Stress Corrosion Behavior of P110 Steel in Annular Environment of CO₂ Injection Well[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 25-29.
- [19] 高延敏, 陈家坚, 雷良才等. 有机缓蚀剂分子在金属表面的化学吸附过程和分子设计分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(3): 142.
GAO Y M, CHEN J J, LEI L C, et al. Chemical Adsorption Process and Molecular Design Analysis of Organic Corrosion Inhibitor Molecules on Metal Surface[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2000, 20(3): 142.
- [20] 董莹, 刘瑞泉. 3 种双咪唑啉季铵盐对 Q235 钢在盐酸溶液中的缓蚀性能及吸附行为[J]. 材料保护, 2010, 43(6): 57-61.
DONG Y, LIU R Q. Corrosion Inhibition and Adsorption Behavior of Three Kinds of Double Imidazolin Quaternary Ammonium Salts on Q235 Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Material Protection, 2010, 43(6): 57-61.