

专题——能源材料表面工程

一种新型的咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 对 N80 钢在 CO₂ 环境下的缓蚀性能评价

王锦昌^{1,2a}, 林元华^{2a,2b}, 孙志鹏^{2b}, 符伟兵¹, 曾德智^{2a}

(1. 中国石化华北油气分公司石油工程技术研究院, 郑州 450006;

2. 西南石油大学 a. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, b. 材料科学与工程学院, 成都 610500)

摘要: **目的** 考察一种新型的咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 对 N80 钢在 CO₂ 环境下的缓蚀性能。**方法** 通过失重法、电化学阻抗谱和极化曲线, 研究了在不同温度下缓蚀率和缓蚀剂浓度之间的关系, 利用扫描电子显微镜和扫描电化学显微镜对表面形貌进行了观察分析, 根据等温吸附模型研究了咪唑啉类缓蚀剂在 N80 钢表面的吸附类型。**结果** 失重结果表明, 缓蚀剂的缓蚀效率随浓度的增大而升高, 当温度为 40 °C、缓蚀剂质量浓度为 250 mg/L 时, 缓蚀率达到 95%; 温度升高至 80 °C 时, 缓蚀率下降至 87%。电化学试验表明, 咪唑啉类缓蚀剂对阴极和阳极反应均有抑制作用。表面形貌分析表明, 缓蚀剂能有效改善金属表面的腐蚀程度。**结论** 咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 属于混合型缓蚀剂, 对 N80 钢具有较好的缓蚀性能。缓蚀机理为通过吸附方式在金属表面形成一层吸附膜抑制金属腐蚀, 吸附方式遵循 Langmuir 吸附等温模型, 物理吸附和化学吸附均会在金属表面发生。

关键词: N80 钢; 咪唑啉类缓蚀剂; CO₂ 腐蚀; 扫描电化学; 缓蚀率

中图分类号: TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0001-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.001

Corrosion Inhibition Evaluation of a New Imidazole Inhibitor CPA-1 for N80 Steel in CO₂ Environment

WANG Jin-chang^{1,2a}, LIN Yuan-hua^{2a,2b}, SUN Zhi-peng^{2b}, FU Wei-bing¹, ZENG De-zhi^{2a}

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec North China E&P Company, Zhengzhou 450006, China;

2. a. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Project,

b. School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate corrosion inhibition effect of imidazole inhibitor CPA-1 on N80 steel in 3.5%NaCl solution saturated CO₂. The relationship between inhibition efficiency and inhibitor concentration at different temperature was studied in the method of weight-loss, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polari-

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-04-26

Received: 2018-01-25; Revised: 2018-04-26

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05048)

Fund: Supported by National Major Science and Technology (2016ZX05048).

作者简介: 王锦昌 (1984—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事钻井工程专业研究及管理工作。

Biography: WANG Jin-chang (1984—), Male, Master, Associate researcher, Research focus: drilling engineering professional research and management.

通讯作者: 林元华 (1971—), 男, 博士, 教授, 从事油气钻井工艺和油井管材料研究。

Corresponding author: LIN Yuan-hua (1971—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: oil and gas drilling technology, oil well pipe materials.

zation. Surface morphology was observed and analyzed with scanning electron spectroscopy (SEM) and scanning electrochemical spectroscopy (SECM). Adsorption type of imidazoline inhibitor on the surface of N80 steel was studied based upon isothermal adsorption model. Weight-loss results showed that inhibition efficiency of imidazoline inhibitor increased as inhibitor concentration increased, it reached 95% when the concentration was 250 mg/L at 40 °C, and inhibition efficiency decreased to 87% slowly at 80 °C. Electrochemical tests indicated that imidazoline inhibitor could inhibit both cathodic and anodic reaction. Surface morphology analysis showed that the corrosion inhibitor could improve corrosion degree of metal surface effectively. Imidazoline inhibitor CPA-1 acts as a mixed-type corrosion inhibitor and exhibits good corrosion inhibition for N80 steel. Inhibition mechanism of imidazoline inhibitor is to prevent metal corrosion by forming one layer of adsorption film on metal surface in the method of adsorption, and the absorption obeys Langmuir adsorption isotherm. Both physical adsorption and chemical adsorption are possible on metal surface.

KEY WORDS: N80 steel; imidazoline corrosion inhibitor; CO₂ corrosion; SECM; inhibition efficiency

CO₂ 腐蚀是石油和天然气行业急需解决的严重问题之一,随着深井和超深井油气田的不断开发,注 CO₂ 技术已成为一种提高油气采收率的常规手段。同时,作为油气田开采过程中的伴生气,某些油气田的天然气中,CO₂ 含量达到了 90% 左右。CO₂ 溶于水后形成的碳酸对碳钢有很强的腐蚀性,在相同 pH 条件下的腐蚀性甚至强于盐酸^[1]。到目前为止,多个高温高压油气田曾发生了油套管局部壁厚减薄严重、刺漏、穿孔等现象,严重影响了油气田的正常开发^[2-6]。因此,解决因 CO₂ 引起的腐蚀问题对油气田的开发具有重大意义。

添加缓蚀剂具有操作简单、成本低、作用效果较好等优点,是油气田领域最常用的防腐技术。当前常见的对抗 CO₂ 腐蚀的缓蚀剂有咪唑啉类、有机胺类、季铵盐类、吗啉类和含磷化合物类^[7]。其中咪唑啉类缓蚀剂由于其低毒、热稳定性好、可生物降解等特点,是油气田领域最常用的抗 CO₂ 缓蚀剂^[8-11]。万家瑰^[12]通过静态失重、配伍性测试、极化曲线等方法,评价了市售的 ZC-1 咪唑啉类缓蚀剂,结果表明缓蚀剂为阳极型缓蚀剂,且质量浓度为 200 mg/L 时,缓蚀效果最好。张光华等^[13-15]通过不同方法合成了不同类型的咪唑啉类缓蚀剂,结果表明咪唑啉类缓蚀剂对碳钢具有较好的缓蚀作用,缓蚀率随缓蚀剂浓度的增大而升高。张军、胡松青等^[16-17]通过量子化学方法研究了咪唑啉类缓蚀剂的缓蚀机理,结果表明咪唑啉类缓蚀剂通过吸附在金属表面成膜,阻碍腐蚀介质与金属表面接触,从而降低腐蚀速率。

本文选取的咪唑啉类缓蚀剂原料为油酸和二乙胺,对合成产物进行季胺化处理以提高其抗高温性能。通过静态失重、电化学阻抗谱、极化曲线、表面分析等方法,对咪唑啉类缓蚀剂进行了缓蚀性能评价,旨在为油气田选取抗 CO₂ 腐蚀的缓蚀剂提供依据。

1 试验

1.1 材料与试剂

试验材料选用套管用 N80 钢,化学组分(质量分数)为: C 0.31%, Si 0.19%, Mn 0.92%, P 0.010%, S 0.008%, Cr 0.2%, Fe 余量。将 N80 钢加工成不同尺寸试样,尺寸为 30 mm×10 mm×2 mm 的片状试样用于失重试验,尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体试样用于电化学试验,尺寸为 30 mm×3 mm×3 mm 的长方体试样用于扫描电化学显微镜试验。试样表面经不同粗糙度金相砂纸打磨后,用无水乙醇和丙酮清洗,风干后存于干燥皿中待用。

1.2 失重试验

通过高温高压反应釜对尺寸为 30 mm×10 mm×2 mm 的 N80 钢进行静态失重试验。采用不同粗糙度的砂纸(600[#]、800[#]、1000[#]、1200[#])打磨试样,经蒸馏水、丙酮清洗后干燥。试样经称量后,浸泡在添加不同浓度缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中放置 72 h,温度分别为 40、60、80 °C。样品取出后清洗并称量。腐蚀速率(C_R)和缓蚀率(η)可通过以下公式计算:

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

$$\eta = \frac{C_R^0 - C_R^{\text{inh}}}{C_R^0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_R 为腐蚀速率(mm/a); Δm 为试样质量的变化(g); S 为试样在腐蚀环境中的表面积(m²); t 为腐蚀时间(h); ρ 为铁的密度, $\rho=7.86$ g/cm³; C_R^0 和 C_R^{inh} 分别为空白和添加缓蚀剂后的腐蚀速率(mm/a)。

1.3 电化学阻抗测试

电化学试验采用传统三电极体系，工作电极为 N80 钢试样，测试面积为 10 mm×10 mm，参比电极为饱和甘汞电极，对电极为铂电极。其中电化学阻抗谱频率范围为 10 MHz~100 kHz。极化曲线扫描范围为开路电位±300 mV，扫描速率为 1 mV/s。采用电化学阻抗谱和极化曲线计算缓蚀效率的公式如下：

$$\eta = \frac{R_{ct} - R_{ct}^0}{R_{ct}} \times 100\%$$

(3)

$$\eta = \frac{J_{corr} - J_{corr}^0}{J_{corr}} \times 100\%$$

(4)

式中： R_{ct} 和 R_{ct}^0 分别为添加和不添加缓蚀剂的电荷转移电阻值（Ω/cm²）； J_{corr} 、 J_{corr}^0 分别为添加和不添加缓蚀剂的腐蚀电流密度（μA/cm²）。

1.4 表面形貌分析

对失重腐蚀后的试样表面形貌进行观察，试验仪器为 ZEISS EV0 MA15 扫描电子显微镜。通过沥青将尺寸为 30 mm×3 mm×3 mm 的 N80 钢封装成面积为 3 mm×3 mm 的试样，经不同粗糙度砂纸打磨后，浸泡在加有不同缓蚀剂浓度的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中放置 24 h，之后进行扫描电化学测试。测试采用反馈模式，设置探针电位为 0.44 V，灵敏度为 1.0×10⁻⁶

A/V，扫描范围为 100 μm×100 μm 的矩形区域。测试仪器为 CHI900C 型扫描电化学测试系统。

2 结果与讨论

2.1 失重试验

N80 钢在不同温度（40、60、80 ℃）和加入不同浓度缓蚀剂（150、200、250 mg/L）的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中的失重试验结果如表 1 所示。为了增加试验的准确性，每组实验均取 3 组平行试样，试验结果为 3 组试样的平均值。根据表 1 可知，在空白溶液（不添加缓蚀剂）中，N80 钢的腐蚀速率为 1.1793 mm/a，属于重度腐蚀。随着缓蚀剂浓度的升高，腐蚀速率逐渐下降，缓蚀剂质量浓度为 250 mg/L 时，腐蚀速率降低至 0.0590 mm/a，小于油田标准 0.076 mm/a，属于轻度腐蚀，此时缓蚀效率可以达到 95%。由此可知，缓蚀剂的加入能有效抑制金属的溶解，并且缓蚀效率随着浓度的增大而提高。图 1 为缓蚀效率随温度和缓蚀剂浓度的变化曲线。由图 1 可以看出，随着温度的增加，缓蚀效率呈现出下降的趋势。温度从 40 ℃升高至 80 ℃时，N80 钢在缓蚀剂质量浓度为 250 mg/L 溶液中的缓蚀效率从 95%降低至 87%，说明温度的升高会显著影响缓蚀剂分子在金属表面的物理吸附。

表 1 N80 钢在不同温度空白溶液和添加不同浓度缓蚀剂溶液中的失重试验结果
Tab.1 Weight-loss test results of N80 steel in blanks and different concentrations of corrosion inhibitor solutions at different temperature

$C_{inh}/(mg \cdot L^{-1})$	313 K		333 K		353 K	
	$C_R/(mm \cdot a^{-1})$	$\eta/\%$	$C_R/(mm \cdot a^{-1})$	$\eta/\%$	$C_R/(mm \cdot a^{-1})$	$\eta/\%$
Blank	1.1793		1.4239		1.6884	
150	0.3420	71	0.4556	68	0.6247	63
200	0.1769	86	0.2563	82	0.4052	76
250	0.0590	95	0.1339	92	0.2195	87

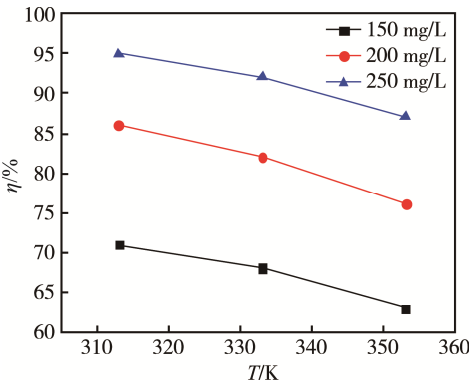


图 1 缓蚀率与温度和缓蚀剂浓度的关系
Fig.1 The relationship of inhibition efficiency, temperature and inhibitor concentrations

2.2 电化学试验

2.2.1 电化学阻抗谱

N80 钢在加入不同浓度缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中的电化学阻抗谱如图 2 所示。图 3 为与电化学阻抗谱相对应的等效电路图。从图 2 可以看出，各浓度下的电化学阻抗谱均为不规则半圆，表明缓蚀剂并未改变试样表面的腐蚀机制^[19-20]。表 2 为等效电路拟合后得到的电化学参数，其中 R_s 为溶液电阻， R_{ct} 为电荷转移电阻， R_L 为电感电阻， L 为电感， Q 为常相位角元件。从表 2 可知，随着缓蚀剂浓度的增加， R_{ct} 不断增大，表明缓蚀剂分子通过吸附方式在金属表面形成了一层吸附膜，阻碍了金属表面与腐蚀

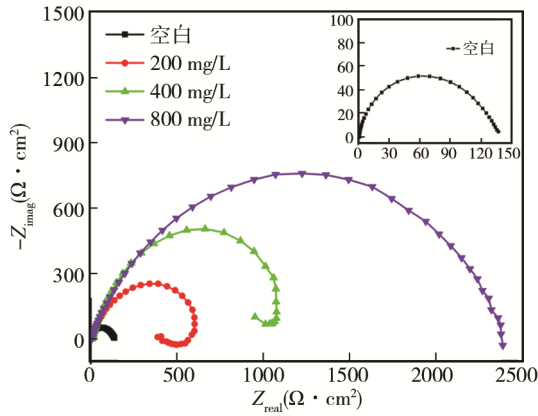


图 2 N80 钢在加入不同浓度咪唑啉类缓蚀剂的腐蚀介质中的 EIS 图谱

Fig.2 EIS diagram of N80 steel in corrosion medium with different concentrations of imidazole inhibitor

介质接触,从而有效降低了腐蚀速率^[11]。同时,随着缓蚀剂浓度的增加,缓蚀效率不断增大,在 250 mg/L 时达到 95.23%,表明增大缓蚀剂浓度能提高缓蚀剂分子在金属表面的覆盖率。

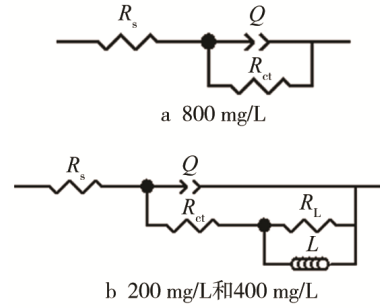


图 3 EIS 等效拟合电路

Fig.3 Equivalent fitting circuit of EIS: (a) 800 mg/L, (b) 200 mg/L and 400 mg/L

表 2 EIS 拟合得到的相关电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters from EIS fitting

$C_{inh}/(mg \cdot L^{-1})$	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	CPE		$R_{ct}/(\Omega \cdot cm^2)$	$R_L/(\Omega \cdot cm^2)$	$L/(H \cdot cm^2)$	$\eta/\%$
		$Q/(\mu S \cdot s^n \cdot cm^{-2})$	n				
Blank	6.023	0.000 745 1	0.7762	111.9			
150	7.788	0.000 291 5	0.7852	447.4	233.6	344.4	74.99
200	7.4	0.000 512 3	0.8737	1097	544	468.7	89.80
250	6.301	0.000	0.8984	2347			95.23

2.2.2 极化曲线

图 4 为 N80 钢在加入不同浓度缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中的极化曲线,拟合后的相关电化学参数如表 3 所示。从图 4 可以看出,加入缓蚀剂后,阳极极化曲线形状并未发生改变,表明缓蚀剂的加入并未改变金属的腐蚀机制,主要通过吸附方式覆盖在金属表面^[21-22]。随着缓蚀剂浓度的增加,阴阳极的腐蚀电流均向负方向移动,表明缓蚀剂的加入能同时抑制阴阳两极腐蚀的发生。由表 3 可知,自腐蚀电位差值在 5~32 mV 之间,小于 85 mV^[10],可判断咪唑啉类缓蚀剂为混合型缓蚀剂。由极化曲线得出了缓蚀剂质量浓度为 250 mg/L 时,缓蚀效率为 94.88%,与失重试验和电化学阻抗谱所得缓蚀效率基本一致。

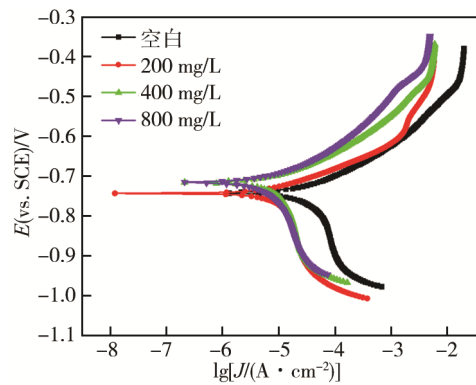


图 4 N80 钢在加入不同浓度咪唑啉类缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of N80 steel in 3.5%NaCl solution saturated with CO₂ and mixed with different concentrations of imidazole inhibitor

表 3 由极化曲线拟合得到的相关电化学参数
Tab.3 Electrochemical parameters from polarization curves

Concentration/(mg · L ⁻¹)	$E_{corr}(vs. SCE)/mV$	$J_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	$b_c/(mV \cdot dec^{-1})$	$b_a/(mV \cdot dec^{-1})$	$\eta/\%$	Surface coverage(θ)
空白	-743.74	112.51	189.658	59.233		
150	-743.84	32.753	176.059	42.622	70.89	0.7089
200	-711.55	16.25	185.56	50.936	85.56	0.8556
250	-716.35	6.21	181.51	42.109	94.48	0.9448

2.3 表面形貌分析

2.3.1 SEM 分析

图 5 为 N80 钢浸泡在空白溶液中和加入 250 mg/L 缓蚀剂的溶液中 24 h 后的表面形貌（腐蚀产物

已清洗）。从图 5 可以看出，未加入缓蚀剂时，金属表面破坏较严重，存在较多裂纹和孔洞。而加入 250 mg/L 缓蚀剂后，表面较光滑平整，未发现明显缺陷。由此可知缓蚀剂分子在金属表面形成了一层吸附膜，减少腐蚀介质与金属接触，从而有效抑制 N80 钢的腐蚀。

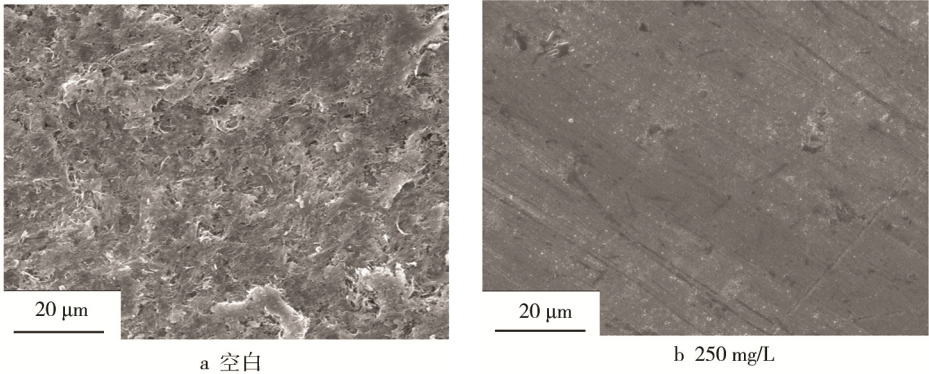


图 5 N80 钢在空白和添加 250 mg/L 咪唑啉类缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中浸泡后的表面形貌
Fig.5 Surface morphology of N80 steel being immersed in 3.5%NaCl solution saturated with CO₂(a) without and (b) with 250 mg/L imdidazoline inhibitor

2.3.2 SECM 分析

图 6 为 N80 钢浸泡在空白溶液中和加入 250 mg/L 缓蚀剂的溶液中放置 24 h 后的扫描电化学显微镜图。从图 6 可以发现，未加入缓蚀剂时，金属表面较粗糙，存在较多尖刺状腐蚀产物。加入缓蚀剂后，金属表面比空白溶液中的试样较光滑平整，表面无明显尖刺，表明缓蚀剂能有效抑制金属表面的腐蚀。同时，加入缓蚀剂后，金属试样的表面电流比在空白溶液中的电流明显降低，表明缓蚀剂分子在金属表面形成了一层吸附膜，该膜有效阻碍了金属表面与腐蚀介质接触，抑制了探针与金属表面接触时的氧化还原反应^[23]。

显尖刺，表明缓蚀剂能有效抑制金属表面的腐蚀。同时，加入缓蚀剂后，金属试样的表面电流比在空白溶液中的电流明显降低，表明缓蚀剂分子在金属表面形成了一层吸附膜，该膜有效阻碍了金属表面与腐蚀介质接触，抑制了探针与金属表面接触时的氧化还原反应^[23]。

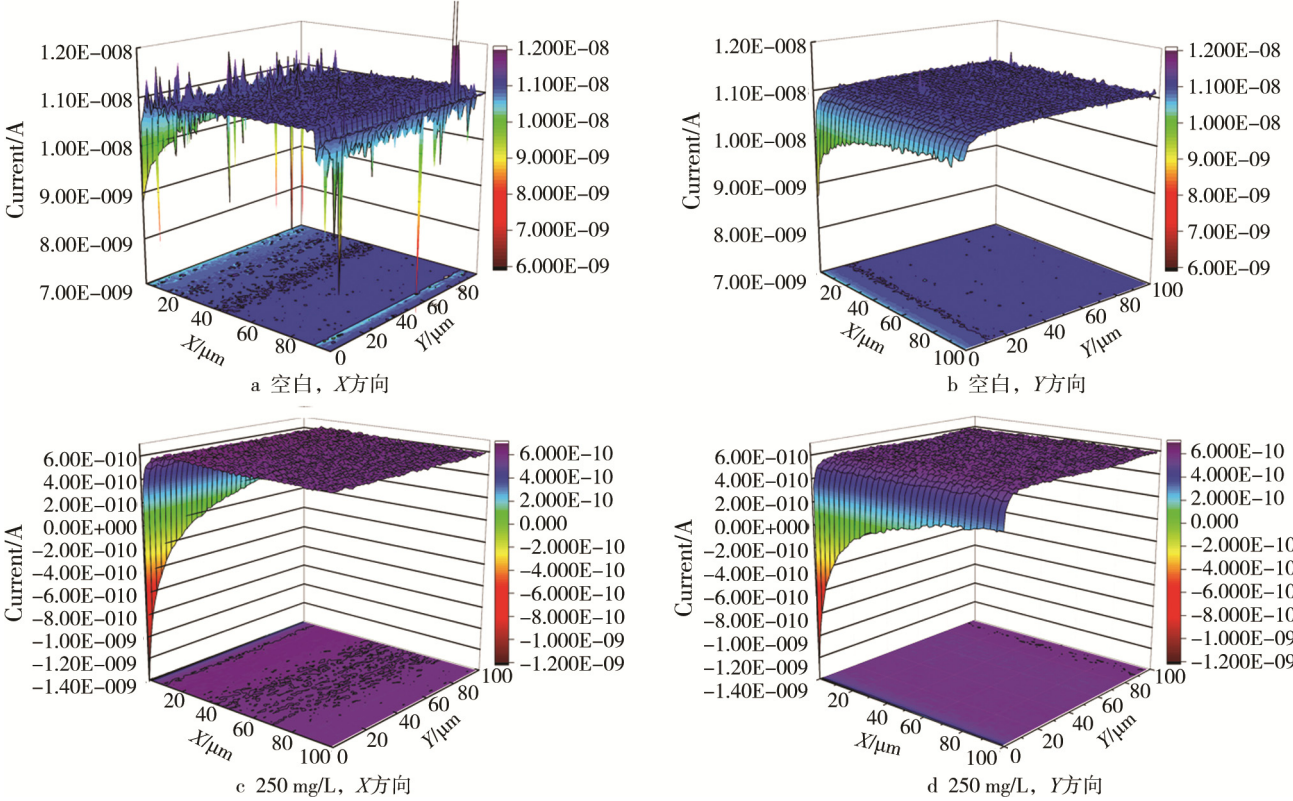


图 6 N80 钢在不添加和添加 250 mg/L 咪唑啉类缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO₂ 溶液中浸泡后的 3D 表面形貌
Fig.6 3-D surface morphology of N80 steel in 3.5%NaCl solution saturated with CO₂ without and with 250 mg/L imdidazoline inhibitor: (a) blank, X direction; (b) blank, Y direction; (c) 250 mg/L, X direction; (d) 250 mg/L, Y direction

2.4 吸附机理分析

通过验证不同类型的吸附模型,发现咪唑啉缓蚀剂符合 langmuir 吸附等温式,如式(5)所示。

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (5)$$

式中: C_{inh} 为缓蚀剂的浓度; θ 为表面覆盖率; K_{ads} 为吸附平衡常数。

图 7 为不同温度下 N80 钢在加入不同浓度缓蚀剂的 3.5%NaCl 饱和 CO_2 溶液中浸泡后的 Langmuir 等温吸附模型。从图 7 可以看出,所得斜率和线性相关系数 (R^2) 均接近于 1,表明咪唑啉缓蚀剂在 N80 钢表面遵循 Langmuir 等温吸附模型。根据 Langmuir 等温吸附式推导得出的吸附平衡常数 K_{ads} 可计算吸附自由能,如式(6)所示:

$$\Delta G_{ads}^{\ominus} = -RT \ln(55.5K_{ads}) \quad (6)$$

计算结果如表 4 所示,计算所得 ΔG_{ads}^{\ominus} 均为负值,表明缓蚀剂吸附反应为自发进行。通常,当吸附自由能 $|\Delta G_{ads}^{\ominus}| < 20 \text{ kJ/mol}$ 时,缓蚀剂在金属表面的吸附为物理吸附;当吸附自由能 $|\Delta G_{ads}^{\ominus}| > 40 \text{ kJ/mol}$ 时,缓蚀剂在金属表面的吸附可以认定为化学吸附^[24-25]。在不同温度下咪唑啉缓蚀剂吸附自由能分别为 36.13、38.48、40.90 kJ/mol,因此可以判定在 80 °C 以下时,咪唑啉缓蚀剂在金属表面的吸附方式为物理吸附与化学吸附共存,超过 80 °C 时主要为化学吸附。

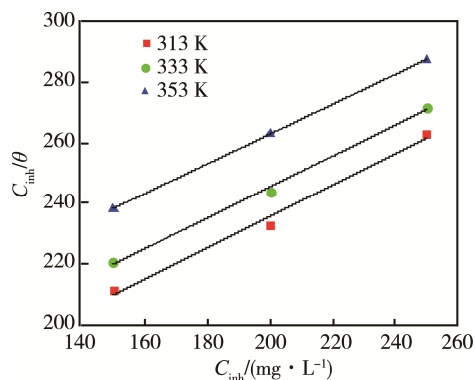


图 7 不同温度 3.5%NaCl 饱和 CO_2 溶液中咪唑啉类缓蚀剂在 N80 钢表面的 Langmuir 等温吸附图

Fig.7 Langmuir isotherm plots for adsorption of imidazoline inhibitor on N80 steel in 3.5%NaCl solution saturated with CO_2 at different temperature

表 4 由 Langmuir 等温吸附模型得到的相关参数
Tab.4 Related parameters obtained by Langmuir isothermal adsorption model

Temperature/K	R^2	Slope	$\Delta G_{ads}^{\ominus}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
313	0.989 39	0.5189	36.13
333	0.9948	0.5115	38.48
353	0.999 79	0.4926	40.90

3 结论

1) 在温度为 40 °C、缓蚀剂质量浓度为 250 mg/L 的条件下, N80 钢的腐蚀速率小于 0.076 mm/a, 达到了油田轻度腐蚀标准, 表明咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 对 N80 钢具有较好的缓蚀效果。

2) 咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 属于混合型缓蚀剂, 对阴阳极反应均有抑制效果。

3) 咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 通过吸附方式在 N80 钢表面形成了一层保护膜, 增加了电子转移的难度, 从而抑制了 N80 钢的腐蚀。

4) 咪唑啉类缓蚀剂 CPA-1 的吸附遵循 langmuir 吸附等温模型。在 80 °C 以下时, 咪唑啉缓蚀剂在金属表面的吸附方式为物理吸附与化学吸附共存, 超过 80 °C 时主要为化学吸附。

参考文献:

- [1] 陈国浩. 二氧化碳腐蚀体系缓蚀剂的缓蚀机理及缓蚀协同效应研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
CHEN Guo-hao. Study of the Inhibition Mechanism and Synergistic Effect of Corrosion Inhibitors in Sweet System[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [2] KERMANI M B, SMITH L M. CO_2 Corrosion Control in Oil and Gas Production Design Considerations[J]. The Institute of Materials, 1997, 235: 1-16.
- [3] 艾国生, 李悦钦, 刘萍萍. 含 CO_2 油气混输管道失效研究[J]. 石油机械, 2012(10): 107-110.
AI Guo-sheng, LI Yue-qin, LIU Ping-ping. Research on the Failure of CO_2 -contained Oil and Gas Mixed Transportation Pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2012(10): 107-110.
- [4] 郑家桑, 傅朝阳, 刘晓武, 等. 中原油田文 23 气田气井腐蚀原因分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 18(3): 227.
ZHENG Jia-shen, FU Chao-yang, LIU Xiao-wu, et al. Study on Corrosion of Wen-23 Gas Wells in Zhongyuan Oilfield[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1999, 18(3): 227.
- [5] 陈浩, 江胜飞, 古丽, 等. 高温高压含 CO_2 气田油气混输管道失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(2): 185-188.
CHEN Hao, JIANG Sheng-fei, GU Li, et al. Failure Analysis of Oil-Gas Transportation Pipelines in a High Temperature and High Pressure Gas Containing CO_2 [J]. Corrosion and Protection, 2013, 34(2): 185-188.
- [6] 何素娟, 陈圣乾, 赵大伟. L80 油管腐蚀失效原因分析[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(6): 21-25.
HE Su-juan, CHEN Sheng-qian, ZHAO Da-wei. Corrosion Failure Analysis of L80 Tubing[J]. Oil Filed Equipment, 2011, 40(6): 21-25.

- [7] 刘小波. 油气井抗 CO₂ 腐蚀缓蚀剂的研究进展[J]. 广州化工, 2011, 39(6): 25-26.
LIU Xiao-bo. Advances in Research of Inhibitor for CO₂ Corrosion in Oil and Gas Wells[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(6): 25-26.
- [8] FATEH A, ALIOFKHAZRAEI M, REZVANIAN A R. Review of Corrosive Environments for Copper and Its Corrosion Inhibitors[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 36: 689.
- [9] ZHANG L, HE Y, ZHOU Y. A Novel Imidazoline Derivative as Corrosion Inhibitor for P110 Carbon Steel in Hydrochloric Acid Environment[J]. Petroleum, 2015, 1(3): 237-243.
- [10] 宋绍富, 郭银银. 咪唑啉类缓蚀剂的研究现状及进展[J]. 广东化工, 2016, 43(22): 91-92.
SONG Shao-fu, GUO Yin-yin. The Research Status and Progress of Imidazoline Inhibitors[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(22): 91-92.
- [11] ZHANG C, DUAN H, ZHAO J. Synergistic Inhibition Effect of Imidazoline Derivative and L-cysteine on Carbon Steel Corrosion in a CO₂-saturated Brine Solution[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 160-169.
- [12] 万家琨. CO₂ 环境中咪唑啉缓蚀剂 ZC-1 对 N80 钢的缓蚀性能评价[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(6): 45.
WAN Jia-gui. Evaluation of Corrosion Inhibition Performance of Imidazoline Corrosion Inhibitor ZC-1 on N80 Steel in CO₂ Environment[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(6): 45.
- [13] 张光华, 王彬. 双咪唑啉季铵盐缓蚀剂的合成及性能研究[J]. 科学技术与工程, 2016(9): 1-6.
ZHANG Guang-hua, WANG Bin. Study on Synthesis and Properties of Gemini Imidazoline Corrosion Inhibitors[J]. Science Technology and Engineering, 2016(9): 1-6.
- [14] 苏克松, 廖刚. 新型咪唑啉缓蚀剂的合成及性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2008, 9(8): 5-8.
SU Ke-song, LIAO Gang. Synthesis and Evaluation of New Kind of Imidazoline Corrosion Inhibitor[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2008, 9(8): 5-8.
- [15] 尚洪帅. 油气田腐蚀环境中缓蚀剂的合成与复配性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
SHANG Hong-shuai. Synthesis of Corrosion Inhibitor Used For Oil and Gas Field and Study Their Compound Performance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [16] 张军. 咪唑啉类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
ZHANG Jun. Theoretical Investigation on Corrosion Inhibition Mechanism of Imidazoline Inhibitors[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.
- [17] 胡松青. 高含 H₂S、CO₂ 油气田缓蚀剂的设计与合成[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
HU Song-qing. Design and Synthesis of Corrosion Inhibitors in Oil and Gas Fields with High H₂S and CO₂ [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [18] ZHANG K, XU B, YANG W. Halogen-substituted Imidazoline Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 284-295.
- [19] MUTHUKRISHNAN P, JEYAPRABHA B, PRAKASH P. Adsorption and Corrosion Inhibiting Behavior of Lanneacoromandelic, Leaf Extract on Mild Steel Corrosion[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2013, 156: 568.
- [20] ZHANG H H, PANG X, ZHOU M. The Behavior of Pre-corrosion Effect on the Performance of Imidazoline-based Inhibitor in 3wt.% NaCl Solution Saturated with CO₂[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 63-72.
- [21] SALARVAND Z, AMIRNASR M, TALEBIAN M. Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel in 1 mol/L HCl Solution by Trace Amount of 2-phenyl-benzothiazole Derivatives: Experimental, Quantum Chemical Calculations and Molecular Dynamics (MD) Simulation Studies[J]. Corrosion Science, 2017, 114: 133-145.
- [22] ZHENG X, ZHANG S, LI W. Investigation of 1-butyl-3-methyl-1 H-benzimidazolium Iodide as Inhibitor for Mild Steel in Sulfuric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 80(3): 383-392.
- [23] CHEN S. Inhibition Effect of Ilexkudingcha C. J. Tseng (Kudingcha) Extract on J55 Steel in 3.5wt% NaCl Solution Saturated with CO₂[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 358: 782-796.
- [24] SINGH A, LIN Y, OBOT I B. Corrosion Mitigation of J55 Steel in 3.5% NaCl Solution by a Macrocyclic Inhibitor[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 341-347.
- [25] QIANG Y, ZHANG S, GUO L. Experimental and Theoretical Studies of Four Allyl Imidazolium-based Ionic Liquids as Green Inhibitors for Copper Corrosion in Sulfuric Acid[J]. Corrosion Science, 2017, 119: 68-78.