

# 渤海某油田混合注水系统 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀缓蚀剂的开发

陆原<sup>1,2</sup>, 赵景茂<sup>1</sup>, 张茂<sup>2</sup>, 陈胜利<sup>3</sup>, 胡廷<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup>

(1.北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029; 2.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300450; 3.中海油信息科技有限公司北京分公司, 北京 100027)

**摘 要:** **目的** 缓解渤海某油田混合注水出现严重的 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀、现场检测挂片的点腐蚀非常明显等问题。**方法** 首先合成一种适合该油田工况的咪唑啉季铵盐(LH-31), 再通过复配得到最优的缓蚀剂配方。**结果** 利用动态高温高压釜, 在 95 °C、0.15 MPa CO<sub>2</sub> (含 100 μg/g H<sub>2</sub>S)、总压 0.5 MPa N<sub>2</sub>、流速 1.5 m/s、试验时间 72 h 条件下, 测得空白平均腐蚀率为 2.01 01 mm/a, 点腐蚀速率 1.1106 mm/a。添加 40 mg/L 的 LH-31 后, 平均腐蚀率降至 0.1000 mm/a, 点腐蚀速率降至 0.5789 mm/a。LH-31 的红外谱图中, 在 879.31 cm<sup>-1</sup> 出现一个吸收峰, 可能是季氮原子与相邻碳之间的伸缩振动, 说明形成了环状季铵盐类化合物。LH-31 与硫脲和苯甲酸钠之间具有协同效应, 添加 4% 硫脲和 3% 苯甲酸钠组成的高效复合缓蚀剂 2E, 可将平均腐蚀速率降至 0.0200 mm/a, 点腐蚀速率降至 0.0751 mm/a。极化曲线测试表明缓蚀剂 2E 为阳极抑制型缓蚀剂。缓蚀剂 2E 在现场进行了试验, 通过旁路腐蚀试验测试 1 d 后, 前后加注 40 mg/L 的缓蚀剂 2E, 试片的平均坑深由 0.139 μm 降低至 0.0258 μm。**结论** 缓蚀剂 2E 能有效抑制该渤海油田混合注水的均匀腐蚀和点腐蚀。

**关键词:** 混合注水; CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀; 均匀腐蚀; 局部腐蚀; 缓蚀剂; 阳极抑制型

**中图分类号:** TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0059-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.008

## Development of CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S Corrosion Inhibitors in the Mixed Water Injection System of Offshore Oilfield in the Bohai Sea

LU Yuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing-mao<sup>1</sup>, ZHANG Mao<sup>2</sup>, CHEN Sheng-li<sup>3</sup>, HU Ting<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production Co., Tianjin 300450, China;

3. CNOOC Energy Technology & Services Limited, Beijing Branch, Beijing 100027, China)

**ABSTRACT:** The work aims to reduce the serious CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S corrosion problems of water injection on offshore oilfield in the Bohai sea and the serious pitting corrosion of the test coupons. An imidazoline quaternary ammonium salt LH-31 applicable to the oilfield conditions was synthesized and the optimum corrosion inhibitor was obtained through molecule compound. At 95 °C and 0.15 MPa CO<sub>2</sub> (including 100 μg/g H<sub>2</sub>S), the blank average corrosion measured at total pressure of 0.5 MPa N<sub>2</sub> and flow

收稿日期: 2018-01-07; 修订日期: 2018-03-10

Received: 2018-01-07; Revised: 2018-03-10

作者简介: 陆原 (1982—), 男, 在读博士, 高级工程师, 主要研究方向为油田化学、材料腐蚀与防护。

**Biography:** LU Yuan (1982—), Male, Ph. D. candidate, Senior engineer, Research focus: oilfield chemistry, material corrosion and protection.

通讯作者: 赵景茂 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。邮箱: jingmaozhao@126.com

**Corresponding author:** ZHAO Jing-mao (1965—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: material corrosion and protection. E-mail: jingmaozhao@126.com

velocity of 1.5 m/s for 72 hours was 2.0101 mm/a and pitting corrosion rate was 1.1106 mm/a. The average corrosion decreased to 0.1000 mm/a and pitting corrosion rate reduced to 0.5789 mm/a after 40 mg/L LH-31 was added. LH-31 had an absorption peak in  $879.31\text{ cm}^{-1}$ . A stretching vibration might occur between the nitrogen atoms and adjacent carbons and the quaternary ammonium salts might be formed. LH-31 had synergistic effect with thiourea and sodium benzoate. The efficient compound corrosion inhibitor 2E composed of 4% thiourea and 3% sodium benzoate could reduce the average corrosion to 0.0200 mm/a and the pitting corrosion rate to 0.0751 mm/a. The polarization curve test showed that the corrosion inhibitor 2E was the anode type of corrosion inhibitor. After the corrosion inhibitor passed the bypass corrosion test for 1 day, the average depth of the test coupon was reduced to  $0.0258\text{ }\mu\text{m}$  from  $0.139\text{ }\mu\text{m}$  after adding 40 mg/L of 2E. The corrosion inhibitor can effectively inhibit the uniform corrosion and pitting corrosion of mixed water injection in the Bohai Sea.

**KEY WORDS:** mixed water injection;  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  corrosion; general corrosion; local corrosion; corrosion Inhibitor; anode type

含  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  的油气田的腐蚀问题是目前腐蚀和防护领域中重要的研究课题之一,并且,随着油田的不断开采,含水量逐渐上升,腐蚀问题日益突出。添加缓蚀剂可经济简便且有效地实现腐蚀控制,因此加注缓蚀剂成为国内许多油气田内防腐的一项主要手段<sup>[1-4]</sup>。据统计,国内外各油田使用量最大的有机缓蚀剂是咪唑啉及其衍生物<sup>[5]</sup>。咪唑啉及其衍生物是一种含氮五元杂环化合物,对  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HCl}$  等酸性腐蚀介质有较好的抑制效果,广泛应用于石油、天然气生产领域。然而,由于油气田现场工况条件复杂,且经常会发生变化,因此单一组分的缓蚀剂常常不能适应实际工况中出现的新的腐蚀因素,所以缓蚀剂的研制趋向于开发一些复配型的缓蚀剂。许多专家学者对缓蚀剂的协同效应已经进行了大量的研究<sup>[6-10]</sup>,特别是对全面腐蚀的缓蚀剂的研究更为突出<sup>[11-13]</sup>。然而,生产设施的腐蚀形态不仅有全面腐蚀,还有局部腐蚀。全面腐蚀一般不会造成突然事故,而且容易测定,相对局部腐蚀来说容易控制<sup>[14]</sup>。与之对应,生产腐蚀事故通常是由局部腐蚀造成,因此,对局部腐蚀的控制是实际生产过程中必须解决的问题。但目前对抑制局部腐蚀的缓蚀剂研究报道较少。

在作业空间小、脱水要求快、酸值高且加注大量醋酸的渤海某油田(原油酸值高达  $6\text{ mg-KOH/g}$ ,处理过程中醋酸加注量为  $700\sim 2000\text{ mg/L}$ ),生产污水与海水混合作为回注水。生产污水中含有  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ,导致其注水腐蚀,尤其是局部腐蚀非常严重。经过多次现场旁路挂片试验发现,虽然有些缓蚀剂能很好地控制均匀腐蚀,但对点腐蚀的控制效果一直不明显。本文针对渤海某油田混合注水严重的  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  腐蚀,尤其是点腐蚀问题,研发了一种高效的复合缓蚀剂。

## 1 实验

### 1.1 材料处理

实验所采用 X65 钢材质按中国石油天然气行业标准 SY/T 5405—1996<sup>[15]</sup>的要求进行加工,试片尺寸为  $40\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,其化学成分见表 1。实验前,将试片浸泡于无水乙醇中清洗,冷风吹干后,用滤纸包好放入干燥器中干燥 4 h,再用 MS204S 型精密电子天平精确称取质量。

表 1 X65 碳钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of X65 carbon steel wt. %

C	Si	Mn	S	P	Nb	Mo	Fe
0.08	0.30	1.17	0.004	0.026	0.009	0.009	Bal.

### 1.2 复合缓蚀剂的制备

在四口烧瓶中加入有机酸、有机胺和携水剂二甲苯,然后升温到  $140\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ ,反应 3 h 后,再升温到  $180\sim 240\text{ }^\circ\text{C}$ ,反应 7 h,停止加热,冷却后,在  $50\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$  下,滴加季铵化试剂或加入改性试剂进行反应。最后将反应产物进行复配得到缓蚀剂产品。

### 1.3 分析检测

#### 1.3.1 腐蚀速率测试

腐蚀测试过程和腐蚀速率计算参照中国石油天然气行业标准 SY/T 5273—2014<sup>[16]</sup>。实验溶液为油田现场水样。现场水质分析结果如表 2 所示。

实验条件为:温度  $95\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.15\text{ MPa CO}_2$  含  $100\text{ }\mu\text{g/g}$

表 2 水质化学组成  
Tab.2 Chemical composition of water quality

$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
7649.96	186.01	419.45	182.10	11 817.41	750.19	2224.93	18.21

H<sub>2</sub>S), 总压 0.5 MPa N<sub>2</sub>, 流速 1.5 m/s, 周期 72 h, 加药 40 mg/L。

试验结束后, 用 MS204S 型电子分析天平称取质量, 计算腐蚀速率。利用 DCC-II 型电感式点腐蚀测深仪测定试样表面点蚀深度。均匀腐蚀速率  $V$  (mm/a) 以及点腐蚀速率  $V_p$  (mm/a) 计算公式如式(1)和(2)。

$$V = \frac{8.76 \times 10^4 \times \Delta W}{s \times t \times \rho} \tag{1}$$

$$V_p = \frac{8760 L_p}{t} \tag{2}$$

式中:  $\Delta W$  为腐蚀前后平行试样的平均失重 (g);  $s$  为试片的面积 (cm<sup>2</sup>);  $\rho$  为碳钢的密度 (g/cm<sup>3</sup>);  $t$  为试验时间 (h);  $L_p$  为坑深测定仪测得的最深点蚀深度 (mm)。

1.3.2 红外分析

利用 Nicolet 公司生产的 NEXUS 870 傅立叶变换红外光谱仪对合成的样品进行定性分析。

1.3.3 电化学分析

用 CS350 电化学测试系统进行动电位极化曲线测试。使用三电极体系, 饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极, Pt 为辅助电极, 工作电极为自制 X65 钢电极。实验前先将现场水用含 100 μg/g H<sub>2</sub>S 的二氧化碳通气 1 h, 除去水中氧气, 然后升温至 95 °C 后再进行测试。

1.3.4 表面观察

在开始试验前, 首先将进水口与现场主管线连接, 检查整套装置的密封性。然后控制出水速度与现场计算的水流速度一致, 将空气排尽后, 开启药剂泵注入药剂。再往左右两根管柱里嵌入挂片, 使用药剂泵定量将药剂注入右边的管柱。则左边管柱的挂片可测试未加药剂的腐蚀情况, 右边管柱的挂片可测试加药后的腐蚀情况。旁路测试装置示意图如图 1。测试 1 d 后, 取挂片, 使用 ST-400 型光学轮廓仪进行表面观察。

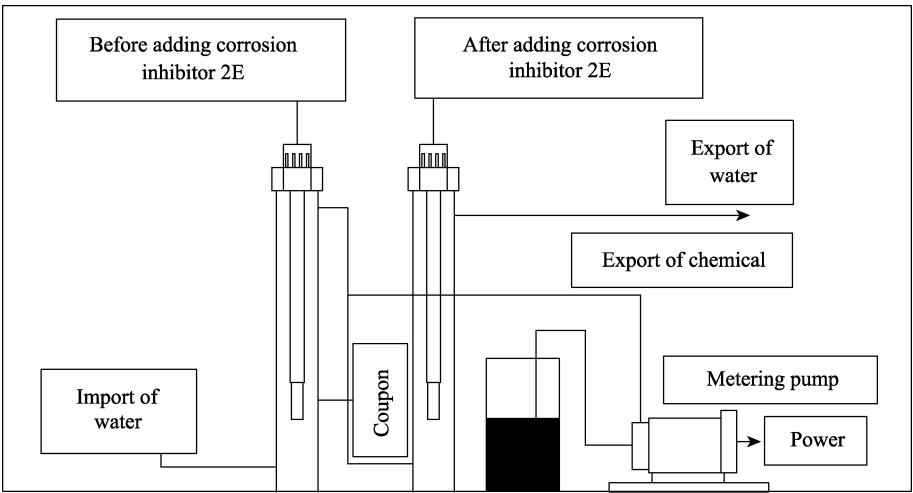


图 1 现场旁路测试装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of bypass test device in the oilfield

2 结果及分析

2.1 主剂合成

2.1.1 酸的种类和用量的确定

使用环烷酸、月桂酸、苯甲酸、油酸等有机酸和二乙烯三胺合成了五种苜基季铵盐, 并按一定比例复配得 LH-1 (环烷酸)、LH-2 (油酸)、LH-3 (油酸+环烷酸)、LH-4 (月桂酸)、LH-5 (环烷酸+苯甲酸), 随后进行了实验评价, 结果见表 3。评价结果表明, LH-3 对点腐蚀抑制效果最佳。故后续合成实验采用油酸和环烷酸 (LH-3) 混合进行合成。

2.1.2 混合酸的比例对缓蚀效果的影响

为确定混合酸的最佳比例, 按不同的油酸与环烷酸的比例重新合成 3 种药剂, 并对按一定比例复配得

表 3 不同有机酸基咪唑啉衍生物的测试结果  
Tab.3 Test results of different organic acids based imidazoline derivatives

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )				
	LH-1	LH-2	LH-3	LH-4	LH-5
Average corrosion	0.2012	0.1505	0.1000	0.0705	0.2498
Pitting corrosion	0.9998	0.8500	0.7866	1.0051	1.2508

到的 LH-31 (2 : 1)、LH-32 (1 : 1)、LH-33 (1 : 2)、LH-34 (1 : 3)、LH-35 (3 : 1) 进行了实验评价, 结果见表 4。评价结果表明, 酸的比例按照 LH-32, 即油酸与环烷酸为等摩尔比时, 所合成的咪唑啉衍生物的缓蚀效果最佳。

表 4 油酸和环烷酸不同比例下合成的咪唑啉衍生物的效果

Tab.4 Effect of imidazoline derivatives synthesized by different ratios of oleic acid and naphthenic acid

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )				
	LH-31	LH-32	LH-33	LH-34	LH-35
Average corrosion	0.1207	0.1000	0.1308	0.1239	0.1888
Pitting corrosion	0.8678	0.7866	0.9785	0.9908	1.2003

### 2.1.3 有机胺的选择

为确定胺的使用,通过不同比例重新合成 5 种药剂,并按一定比例复配得到 LH-321(羟乙基乙二胺)、LH-322(乙二胺)、LH-323(二乙烯三胺)、LH-324(三乙烯四胺)、LH-325(二乙烯三胺+三乙烯四胺)。其中,鉴于使用乙二胺合成的咪唑啉衍生物有明显沉淀,故仅对其他 4 种产品进行了实验评价,结果见表 5。评价结果表明, LH-323、LH-324、LH-325 效果相当,考虑到二乙烯三胺的价格通常明显低于其他胺,故以下实验暂选用二乙烯三胺。

表 5 不同有机胺合成的咪唑啉衍生物的缓蚀效果

Tab.5 Inhibition effect of imidazoline derivatives synthesized by different organic amines

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )				
	LH-321	LH-322	LH-323	LH-324	LH-325
Average corrosion	0.1577	—	0.1000	0.0979	0.0983
Pitting corrosion	0.9878	—	0.7866	0.7900	0.7907

### 2.1.4 季铵化和改性实验

对混合酸咪唑啉中间体进行季铵化或用其他试剂改性,反应得到各种缓蚀剂主剂: LH-3231(氯化苄季铵化产品)、LH-3232(氯乙酸季铵化)、LH-3233(硫酸二乙酯季铵化)、LH-3234(硫脲改性)、LH-3235(氨基磺酸改性)。根据表 6 的结果,拟选用 LH-3231(环烷酸油酸混合酸基苄基咪唑啉季铵盐)为主剂。

表 6 几种咪唑啉衍生物产品的缓蚀效果

Tab.6 Inhibition effect of several imidazoline derivatives

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )					
	Blank	LH-3231	LH-3232	LH-3233	LH-3234	LH-3235
Average corrosion	2.0101	0.1000	0.1799	0.1507	0.0729	0.1966
Pitting corrosion	1.1106	0.5789	0.8989	0.6578	1.3009	0.9002

### 2.1.5 咪唑啉主剂的红外分析

对合成的 LH-3231 进行红外分析,结果如图 2。

由图可知, LH-3231 在 1603.88、1662.37、3271.75 cm<sup>-1</sup> 处出现吸收峰,分别表示 N=C—N 双键拉伸振动峰、C=N 键拉伸振动吸收峰、N—H 拉伸振动吸收峰,这说明形成了咪唑啉的含氮杂环。在 879.31 cm<sup>-1</sup> 出现一个吸收峰,可能是由于季氮原子与相邻碳之间的伸缩振动,说明形成了环状季铵盐类化合物。

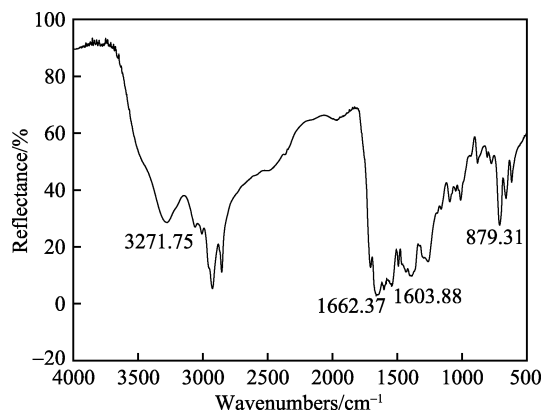


图 2 LH-3231 的红外谱图

Fig.2 Infrared spectrum of LH-3231

## 2.2 缓蚀剂复配及小分子添加剂的引入

### 2.2.1 复配缓蚀效果分析及配方确定

吸附型的缓蚀剂,由于吸脱附的平衡及空间位阻的原因,可能造成局部腐蚀,因此,考虑通过添加小分子缓蚀剂来填补吸附膜的空隙,以形成更为完整的保护膜。首先研究硫脲、苯甲酸钠、碘化钾、六次亚甲基四胺、丙炔醇的效果。LH-3231 分别加质量分数为 3% 的上述物质,形成产品 LH-32311、LH-32312、LH-32313、LH-32314、LH-32315。添加 40 mg/L 时的缓蚀效果见表 7,说明硫脲、苯甲酸钠与所合成的咪唑啉衍生物之间存在明显协同效应。进一步研究咪唑啉衍生物与硫脲苯甲酸钠的最佳配比,对比了添加 1%~6% 的硫脲后药剂的缓蚀效果,实验结果见表 8。表 8 的实验结果说明,添加 4% 的硫脲后,药剂的缓蚀效果最佳。

表 7 小分子引入后的缓蚀效果

Tab.7 Inhibition effect after adding small molecule

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )				
	LH-32311	LH-32312	LH-32313	LH-32314	LH-32315
Average corrosion	0.0500	0.0749	0.1007	0.0919	0.0866
Pitting corrosion	0.3536	0.3934	0.8580	0.7509	0.5008

在添加 4% 硫脲的基础上再添加不同比例的苯甲酸钠,实验结果见表 9。表 9 的实验结果说明添加 3% 的苯甲酸钠后,药剂缓蚀效果最佳。因此,确定配方为 LH-3231+4% 硫脲+3% 苯甲酸钠,定为缓蚀剂 2E。

表 8 加入硫脲后的缓蚀效果  
Tab.8 Inhibition effect after adding thiourea

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )					
	+1%	+2%	+3%	+4%	+5%	+6%
Average corrosion	0.0808	0.0799	0.0500	0.0368	0.0359	0.0366
Pitting corrosion	0.5506	0.4944	0.3536	0.2677	0.3609	0.3998

表 9 加入苯甲酸钠后的缓蚀效果  
Tab.9 Inhibition effect after adding sodium benzoate

	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )					
	+1%	+2%	+3%	+4%	+5%	+6%
Average corrosion	0.0288	0.0252	0.0200	0.0238	0.0388	0.0567
Pitting corrosion	0.1907	0.1442	0.0751	0.1077	0.1511	0.1700

2.2.2 协同效应研究

图 3 为实验前、空白以及添加 LH-3231 或缓蚀剂 2E 后的动态腐蚀试片的表面 SEM 形貌。图 3a 为打磨后的试片表面，由图可见，表面上条纹清晰可见。

图 3b 为空白腐蚀实验后的试片表面形貌图，可见腐蚀介质对碳钢表面造成了严重的破坏。加入 LH-3231 后（图 3c），试片表面腐蚀情况有所减轻。而在加入缓蚀剂 2E 后（图 3d），试片表面较光滑且打磨后的条纹仍清晰可见，说明其对碳钢的 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 腐蚀起到了很好的抑制作用，这进一步说明 LH-3231、硫脲和苯甲酸钠之间有明显的协同效应。这可能是因为，一方面，LH-3231 通过物理化学吸附方式吸附在金属表面；另一方面，小分子硫脲填补吸附空隙，同时苯甲酸钠会发生水解反应，形成 C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COO<sup>-</sup>，C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COO<sup>-</sup> 由于静电引力吸附到钢材表面，进一步填补了空隙，使得缓蚀剂的膜层更加致密均匀，从而起到更好的保护作用，并有效抑制腐蚀。

2.2.3 缓蚀剂作用机理研究

图 4 为加入 2E 的电化学测试曲线，利用弱极化区（三参数）拟合数据的结果见表 10。由图 4 和表 10 可知，随着缓蚀剂 2E 的浓度增大，自腐蚀电位正移，腐蚀速率降低，缓蚀率增大，当添加 40 mg/L 缓蚀剂 2E 后，缓蚀率已达到 97.49%。因此，缓蚀剂 2E 为阳极抑制型缓蚀剂，并具有非常优异的缓蚀效果。

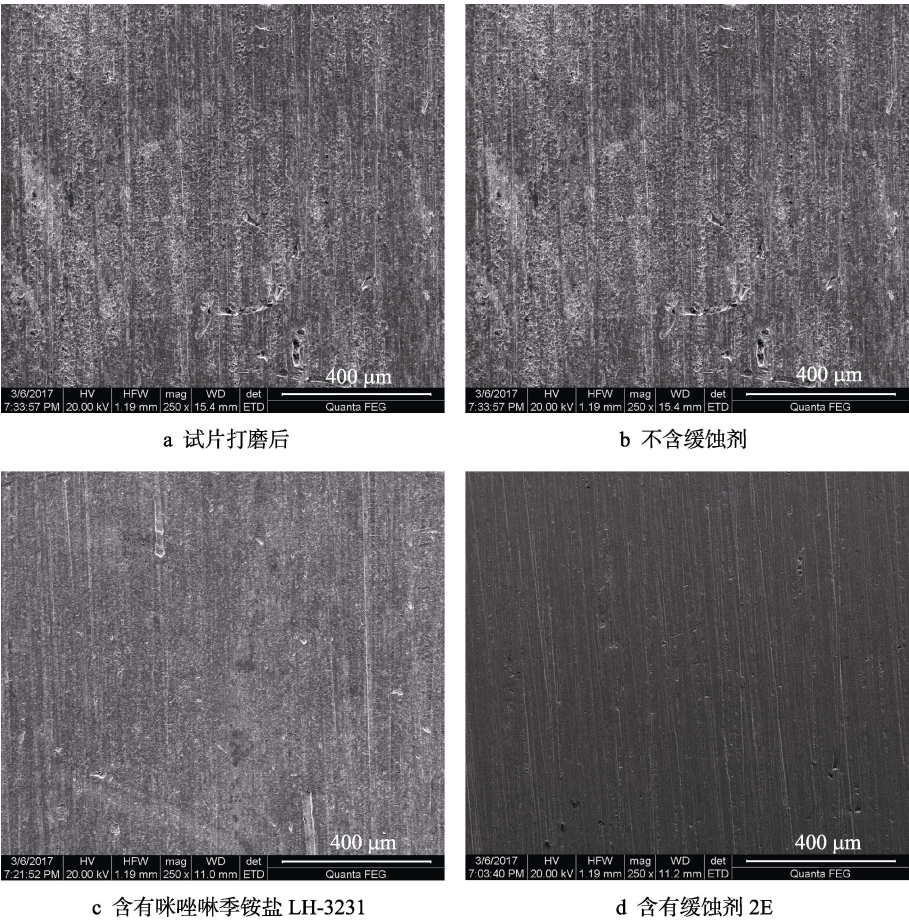


图 3 动态腐蚀后的扫描电镜图  
Fig.3 Scanning electron microscopy after dynamic corrosion: a) coupon after polishing, b) without corrosion inhibitor, c) containing imidazoline salt LH-3231, d) containing corrosion inhibitor (2E)



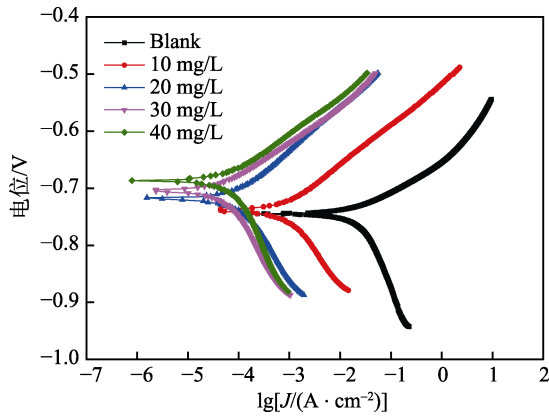


图 4 缓蚀剂 2E 极化曲线图

Fig.4 Polarization curve of the corrosion inhibitor 2E

表 10 极化曲线的拟合结果

Tab.10 Fitting results of polarization curves

	$E_{\text{corr}}(\text{vs. SCE})/\text{mV}$	$\beta_a/\text{mV}$	$\beta_c/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\eta/\%$
Blank	-748	55.12	218.83	87.2	
10 mg/L	-746	70.55	-117.11	13.68	84.31
20 mg/L	-718	73.12	-110.65	12	86.24
30 mg/L	-706	61.1	-157.55	5.55	93.98
40 mg/L	-688	63.58	-143.18	2.19	97.49

## 2.2.4 表面观察

图 5 为添加 40 mg/L 缓蚀剂 2E 前后, 现场旁路测试 1 d 的挂片表面直观扫描图。图 6 为对图 5 表面观察测试结果的分析, 其中蓝色区域为局部腐蚀的区域, 其面积百分比 (Project area) 和平均坑深 (Mean thickness) 的数值越大, 腐蚀越严重。由图 5 可以看出, 空白挂片局部腐蚀严重, 而添加了 2E 的挂片表

面较为均匀。对比表面直观扫描图, 说明药剂有效抑制了局部腐蚀。根据光学分析结果 (图 6) 可知, 加入缓蚀剂 2E 后, 挂片发生局部腐蚀区域面积百分比由 5.62% 降至 0.72%, 试片的平均坑深由 0.139  $\mu\text{m}$  降低至 0.0258  $\mu\text{m}$ , 这也说明缓蚀剂 2E 能有效抑制局部腐蚀。

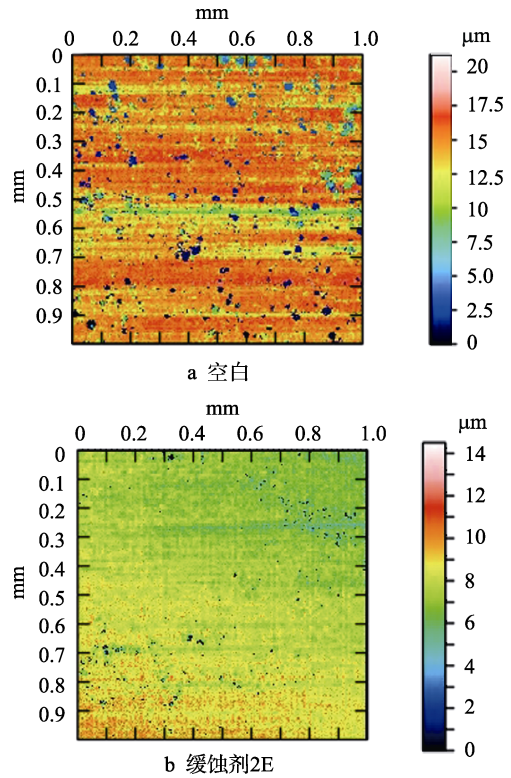


图 5 实验挂片表面直观扫描图

Fig.5 Scanning image of the coupon surface: a) blank; b) containing corrosion inhibitor 2E

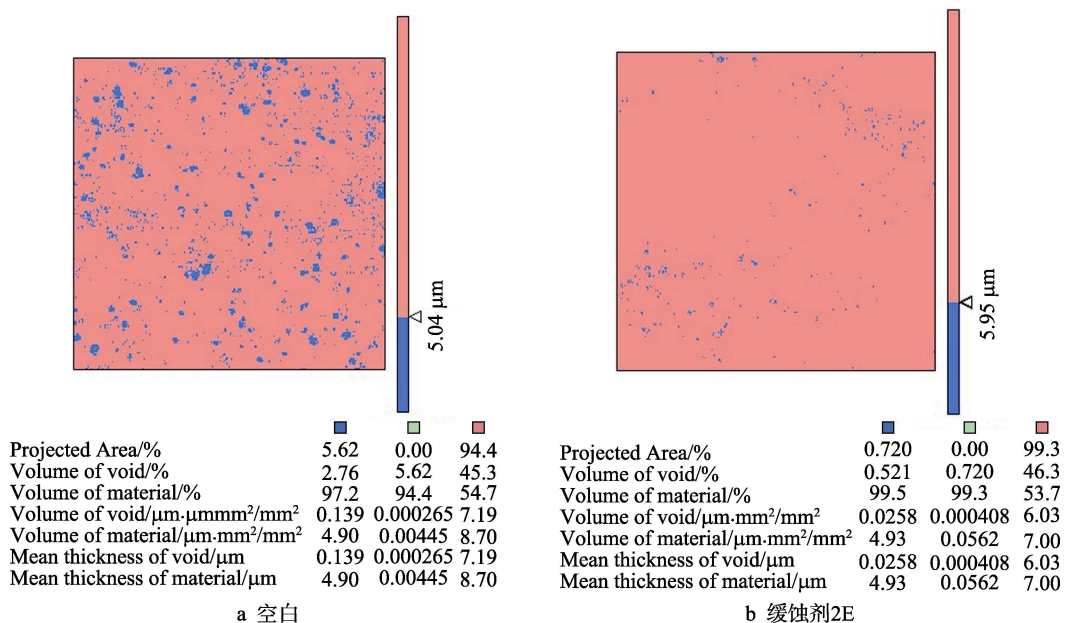


图 6 实验挂片表面分析结果

Fig.6 Surface analysis results of the coupon: a) blank; b) containing corrosion inhibitor 2E

### 3 结论

1) 合成 LH-3231 (混合酸基苄基咪唑啉季铵盐) 能有效降低海上油田混合注水腐蚀。LH-3231 与硫脲和苯甲酸钠具有协同效应。由 LH-3231 添加了 4% 硫脲和 3% 苯甲酸钠组成的缓蚀剂 2E, 对均匀腐蚀和点腐蚀的抑制效果优异。

2) 随着缓蚀剂 2E 的浓度增大, 自腐蚀电位正移, 腐蚀速率降低, 缓蚀率增大。因此, 2E 为阳极抑制为主的缓蚀剂。

3) 现场旁路小试显示, 加注 40 mg/L 的缓蚀剂 2E 后, 挂片发生局部腐蚀区域面积百分比由 5.62% 降至 0.72%, 平均坑深由 0.139  $\mu\text{m}$  降低至 0.0258  $\mu\text{m}$ , 说明缓蚀剂 2E 对现场的点腐蚀有明显抑制效果。

#### 参考文献:

- [1] 艾俊哲, 贾红霞, 舒福昌, 等. 油气田二氧化碳腐蚀及防护技术[J]. 湖北化工, 2002, 19(3): 3-5.  
AI Jun-zhe, JIA Hong-xia, SHU Fu-chang, et al. Carbon dioxide corrosion and protection technology in oil and gas field[J]. Hubei chemical, 2002, 19(3): 3-5.
- [2] 陈卓元, 张学元, 王凤平, 等. 二氧化碳腐蚀防护对策及发展趋势[J]. 材料开发与应用, 1998, 13(6): 40-44.  
CHEN Zhuo-yuan, ZHANG Xue-yuan, WANG Feng-ping, et al. Countermeasures and development trend of carbon dioxide corrosion protection[J]. Materials development and application, 1998, 13(6): 40-44.
- [3] 张学元, 王凤平, 于海燕, 等. 二氧化碳腐蚀防护对策研究[J]. 腐蚀与防护, 1997(3): 8-11.  
ZHANG Xue-yuan, WANG feng-ping, YU Hai-yan, et al. Study on the countermeasures of carbon dioxide corrosion and protection[J]. Corrosion and protection, 1997(3): 8-11.
- [4] 周琦, 王建刚, 周毅. 二氧化碳的腐蚀规律及研究进展[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(1): 37-40.  
ZHOU Qi, WANG Jian-gang, ZHOU Yi. Corrosion rules and research progress of carbon dioxide corrosion[J]. Journal of science in Gansu, 2005, 17(1): 37-40.
- [5] 顾明广. 油气田用气液两相缓蚀剂的开发[D]. 北京: 北京化工大学, 2005.  
GU Ming-guang. Development of two phase corrosion inhibitors in oil and gas fields[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005.
- [6] 陆原, 刘鹤霞, 赵景茂. 缓蚀剂对电偶腐蚀的抑制作用的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2006, 33(5): 50-52.  
LU Yuan, LIU He-xia, ZHAO Jing-mao. Research on the inhibitory effects of corrosion inhibitor on electrochemical corrosion[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural science edition), 2006, 33(5): 50-52.
- [7] ZHAO J, CHEN G. The synergistic inhibition effect of oleic-based imidazoline and sodium benzoate on mild steel corrosion in a CO<sub>2</sub>-saturated brine solution[J]. Electrochimica acta, 2012, 69: 247-255.
- [8] 胡松青, 张晓东, 胡建春, 等. 月桂基咪唑啉与 2-氨基噻唑对碳钢的协同缓蚀作用[J]. 石油学报(石油加工), 2011, 27(5): 766-772.  
HU Song-qing, ZHANG Xiao-dong, HU Jian-chun, et al. Synergistic inhibition effect of lauryl imidazoline and 2-aminothiazole on carbon steel [J]. Petroleum journal (petroleum processing), 2011, 27(5): 766-772.
- [9] 李明杰. CO<sub>2</sub> 体系中缓蚀剂对碳钢缓蚀机理和协同效应的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.  
LI Ming-jie. Research on corrosion mechanism and synergistic effect of corrosion inhibitor on carbon steel in CO<sub>2</sub> system[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [10] ZHANG C, ZHAO J M. Synergistic inhibition effect of imidazoline ammonium salt and sodium dodecyl sulfate in CO<sub>2</sub> system[J]. Acta physico-chimica sinica, 2014, 30(4): 677-685.
- [11] 郭稚弧. 缓蚀剂及其应用[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987: 74-82.  
GUO Zhi-hu. Corrosion inhibitor and its application[M]. Wuhan: Huazhong technology institute, 1987: 74-82.
- [12] 苏俊华, 张学元, 王凤平. 饱和 CO<sub>2</sub> 的高矿化度溶液中咪唑啉缓蚀机理的研究[J]. 材料保护, 2000, 32(5): 32-33.  
SU Jun-hua, ZHANG Xue-yuan, WANG Feng-ping. Research on the corrosion mechanism of imidazoline in high mineralization solution of saturated CO<sub>2</sub>[J]. Material protection, 2000, 32(5): 32-33.
- [13] 张学元, 马利昆. 咪唑啉酰胺在含 CO<sub>2</sub> 溶液中的缓蚀机理[J]. 应用化学, 1998, 15(6): 21-24.  
ZHANG Xue-yuan, MA Li-kun. Study on the mechanism of imidazoline amide corrosion inhibition [J]. Applied chemistry, 1998, 15(6): 21-24.
- [14] 李静. 油管钢 CO<sub>2</sub> 腐蚀行为与机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2000.  
LI Jing. Research on the corrosion behavior and mechanism of carbon dioxide corrosion of tubing steel[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2000.
- [15] SY/T 5405—1996, 酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标[S].  
SY/T 5405—1996, Test methods and evaluation indexes of corrosion inhibitors for acidification[S].
- [16] SY/T 5273—2014, 油田采出水处理用缓蚀剂性能指标及评价方法[S].  
SY/T 5273—2014, Technical specifications and evaluation methods of corrosion-inhibitors for oilfield produced water[S].