

# 含氟高温酸化缓蚀剂的制备及性能研究

侯雯雯<sup>1,2</sup>, 陈晓东<sup>1,2</sup>, 陈君<sup>1,2</sup>, 黄瑾<sup>1,2</sup>

(1.陕西省石油化工研究设计院, 西安 710054; 2.陕西省石油精细化学品重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** **目的** 制备并评测一种能耐高温的油田用酸化缓蚀剂。**方法** 用氟碳咪唑啉季铵盐为主剂制备高温酸化缓蚀剂。在模拟高温酸化条件下, 通过失重法、电化学法评测缓蚀剂对 N80 钢的缓蚀性能。通过热重差热法和表面张力法评测主剂氟碳咪唑啉季铵盐的热稳定性和化学稳定性。**结果** 通过失重法评测, 在添加缓蚀剂后, N80 钢试片的腐蚀速率远低于行业标准 SYT 5405—1996 中对缓蚀剂评价的一级指标。通过电化学法评测, 添加缓蚀剂后, 极化曲线中电极腐蚀电位正移, 腐蚀电流减小趋势明显; 阻抗图谱中容抗弧的半圆直径显著增大, 对应的膜电阻  $R_p$  显著增大, 抑制了腐蚀反应的电荷传递过程。两者均显示缓蚀剂在盐酸溶液中有良好的缓蚀性能, 与失重法试验结果一致。热重差热显示, 氟碳咪唑啉季铵盐在 220 °C 开始分解, 至 400 °C 基本分解完毕。表面张力评测显示, 氟碳咪唑啉季铵盐在 10%~25% (质量分数) 盐酸溶液中 10 h 之内的表面活性稳定。**结论** 该含氟高温酸化缓蚀剂在 90~140 °C 下, 可使酸化过程中盐酸对 N80 钢的腐蚀速率明显降低。

**关键词:** 酸化缓蚀剂; 耐高温; 氟碳咪唑啉季铵盐; 缓蚀机理

**中图分类号:** TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)08-0028-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.08.005

## Preparation and Performance of Fluorine-containing Corrosion Inhibitor of High Temperature Acidification

HOU Wen-wen<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-dong<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>, HUANG Jin<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Provincial Research and Design Institute of Petroleum and Chemical Engineering, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Petroleum Fine Chemicals, Xi'an 710054, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To prepare and evaluate a fluorine-containing corrosion inhibitor of high temperature acidification. **Methods** Corrosion inhibitor of high temperature acidification was prepared with fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt as main component. The corrosion inhibitor performance of N80 steel was evaluated by weight loss method and electrochemical method in high temperature acidification condition. Thermostability and chemical stability of fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt were evaluated by TG/DTA and surface tension method. **Results** The result of weight loss evaluation showed that the corrosion rate was far below the level one standard of SYT 5405—1996 after corrosion inhibitor was added to N80 steel. In electrochemical test, polarization curve showed corrosion potential of electrode shifted positively, and the corrosion current was significantly lowered. EIS spectras showed the semicircle diameter of capacitance loop increased signifi-

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-06-03

Received: 2016-03-05; Revised: 2016-06-03

基金项目: 陕西省石油精细化学品重点实验室开放基金 (syzdsys2014-01)

Fund: Supported by Shaanxi Provincial Research and Design Institute of Petroleum and Chemical Engineering Open Fund (syzdsys2014-01)

作者简介: 侯雯雯 (1983—), 女, 硕士, 工程师, 从事炼厂、油田领域相关缓蚀剂研究。

Biography: HOU Wen-wen (1983—), Female, Master, Engineer, Research focus: corrosion inhibitor of refinery and oilfield.

cantly, corresponding film resistance  $R_p$  was obviously magnified and suppressed the charge transfer of corrosion. Both electrochemical test and weight loss method proved the sound performance of the corrosion inhibitor in HCl solution, which was consistent with the result of weight loss method. The result of TG/DTA test showed fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt started to be decomposed at 220 °C, and completely decomposed at 400 °C. The result of surface tension test showed the surface activity of fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt was stable in 10%~25% HCl solution within 10 h.

**Conclusion** The fluorine-containing corrosion inhibitor of high temperature acidification can effectively lower the corrosion of N80 steel in HCl at 90~140 °C.

**KEY WORDS:** acidizing corrosion inhibitor; high temperature resistance; fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt; inhibition mechanism

随着我国油气开发的不断深入,大量油气田的开采过程中都需要依靠酸化处理地层,实现油气井的稳产与增产<sup>[1]</sup>。而高浓度的酸化用酸对金属管线、设备等具有较强的腐蚀性,会造成设备受损、管路腐蚀,严重影响油气正常生产<sup>[2]</sup>。同时,随着地层钻采深度的不断提高,高温、特高温油气田不断出现,常规缓蚀剂(如炔醇类、醛类及烷苯吡啶类)不能满足高温酸化缓蚀要求,且具有毒性大、价格昂贵、加入量过大等缺点<sup>[3-7]</sup>。一般的碳氢类咪唑啉组分缓蚀剂在高温(90 °C以上)、高浓度酸液中会分解失效,从而限制了其在高温油井开采中的使用<sup>[8]</sup>。氟碳类咪唑啉化合物由于分子结构中含有较强电负性及疏水性的碳氟键<sup>[9]</sup>,在实际应用中具有较高的耐温性能、良好的金属缓蚀率及配伍性。本文介绍了一种具有良好热稳定性、金属缓蚀性的含氟高温酸化缓蚀剂。

## 1 实验

### 1.1 试样与仪器

腐蚀标准试片材质为 N80 (GB/T 8163), N80 试片化学成分(熔炼分析)为: C 0.32%, Si 0.28%, Mn 1.52%, P 0.018%, S 0.012%, V 0.118%, Als 0.014%。试片尺寸 50 mm×0.1 mm×10 mm。

实验试剂和仪器包括: MS204S 分析天平、水磨砂纸(400<sup>#</sup>、600<sup>#</sup>)、盐酸、高压反应釜(带搅拌)、Reference 3000 电化学工作站、梅特勒 TG/SDTA851e 差热热重分析仪、德国 KRUSS 张力仪 K100。

### 1.2 缓蚀剂的制备

将 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐、碳氢

咪唑啉季铵盐、钼酸钠、硫脲和溶剂按不同质量比加入容器内,升温至 60 °C,搅拌 30 min,得到含氟高温酸化缓蚀剂 SD-820。

### 1.3 缓蚀剂的性能评测

#### 1.3.1 失重法

参照行业标准 SY/T 5405—1996《酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标》,将试片用不同规格的砂纸进行打磨,用无水乙醇除去表面油脂,再用蒸馏水洗净后干燥。

90 °C下采用常压法评测,即在一定浓度(文中均指 HCl 的质量分数)的盐酸溶液中加入缓蚀剂(按盐酸量计),将处理好的 N80 钢试片挂入,升温至 90 °C,保温 4 h。

100~140 °C下采用高压釜进行评测,在均匀的盐酸溶液中加入缓蚀剂(按盐酸量计),混合均匀后,加热到 90 °C,再置于高压反应釜中。将处理好的 N80 钢试片用四氟带绑在釜盖四氟圆盘的挂孔上,盖好釜盖。调节转速到 60 r/min,升至试验温度保温 4 h,再用冷却水迅速冷却,降温至 90 °C 时,卸去压力。

实验完毕后,用去离子水冲洗试片表面,观察外观,并对试片表面现象作详细记录。再用软橡皮擦去表面附着物,并依次用去离子水、石油醚或丙酮、乙醇洗净,冷风吹干,放入玻璃干燥器中,30 min 后,取出称量,记录试片质量。金属腐蚀速率  $v_{\text{corr}}$  的计算公式为:

$$v_{\text{corr}} = \frac{m - m_1}{S \times t} \quad (1)$$

式中:  $v_{\text{corr}}$  为平均腐蚀速度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $m$  为试片实验前质量( $\text{g}$ );  $m_1$  为试片实验后质量( $\text{g}$ );  $S$  为试片表面积 ( $\text{m}^2$ );  $t$  为试验时间。

### 1.3.2 电化学法

电化学测试在 Reference 3000 电化学工作站上, 采用传统的三电极体系进行。工作电极为 N80 钢, 辅助电极为铂片电极, 参考电极为饱和甘汞电极。动电极扫描速率为 1 mV/s, 电位扫描范围为 $\pm 0.6$  V, 电化学阻抗谱扫描范围是 100 kHz ~ 10 MHz, 交流激励信号幅值为 10 mV。

### 1.3.3 主要缓蚀成分稳定性能测试

称取定量 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐, 精确到 0.1 mg, 进行 TG/DTA (热重/差热) 分析, 评价其热稳定性。

在室温下配制不同浓度的盐酸各 50 g, 分别加

入 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐 5 g, 在 0、5、10 h 分别测试其质量分数为 0.2% 时的水溶液的表面张力, 评价其在盐酸中的稳定性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀速率

参照行业标准 SY/T 5405—1996《酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标》, 测定在酸液中不加与添加含氟高温酸化缓蚀剂对 N80 钢的腐蚀速率, 结果见表 1。

表 1 含氟高温酸化缓蚀剂缓蚀效率的测定

Table 1 Determination of efficiency of fluorine-containing corrosion inhibitor in high temperature acidification

试验温度 /℃	酸液浓度 /%	缓蚀剂	酸化缓蚀剂 质量分数/%	腐蚀速率 /( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	标准指标 (一级) /( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )
90	15	空白	0	16.09	3 ~ 4
		SD-820	1	1.26	
	20	空白	0	38.98	3 ~ 5
		SD-820	1	1.54	
100	15	空白	0	27.99	3 ~ 5
		SD-820	2	1.74	
	20	空白	0	40.58	5 ~ 10
		SD-820	2	2.42	
120	15	空白	0	55.12	10 ~ 20
		SD-820	2	3.97	
	20	空白	0	89.46	20 ~ 30
		SD-820	2	7.11	
140	15	空白	0	108.9	30 ~ 40
		SD-820	3	6.15	
	20	空白	0	247.5	40 ~ 50
		SD-820	3	15.62	

由表 1 可以看出, 含氟高温酸化缓蚀剂 SD-820 在高温下对 N80 钢有较好的缓蚀效果, 酸液对金属的腐蚀能力大大减少, 明显低于行业标准 SY/T 5405—1996 缓蚀剂评价指标 (一级)。

### 2.2 电化学性能测试

N80 钢在 90 ℃ 的 20% 酸液中, 不加缓蚀剂与加 1% 缓蚀剂时的 Tafel 极化曲线见图 1。

由图 1 和表 2 可知, 在含有缓蚀剂的盐酸溶液中, N80 钢的电极腐蚀电位正移, 腐蚀电流减小趋势明显, 说明 SD-820 在 20% 盐酸溶液中表现出良

好的缓蚀性能, 与失重法试验结果一致。

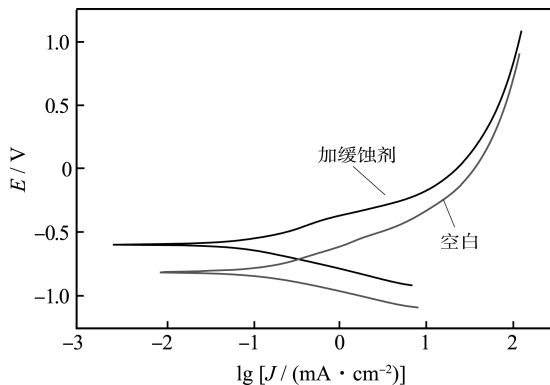


图 1 极化曲线

Fig.1 Tafel polarization curves

表 2 Tafel 极化曲线参数及计算结果 Table 2 Parameters of Tafel polarization curves and calculation result			
缓蚀剂	腐蚀电位 /mV	极化电阻 /( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	腐蚀电流密度 /( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
空白	-807	256	$4.16 \times 10^{-2}$
SD-820	-581	957	$1.96 \times 10^{-2}$

N80 钢在 90 ℃ 的 20% HCl 水溶液中, 不加缓蚀剂与加 1%缓蚀剂时的电化学阻抗谱 (EIS) 见图 2。用电化学工作站自带软件拟合等效电路, 如图 3 所示, 其中  $R_p$  为膜电阻,  $C_d$  为膜电容。

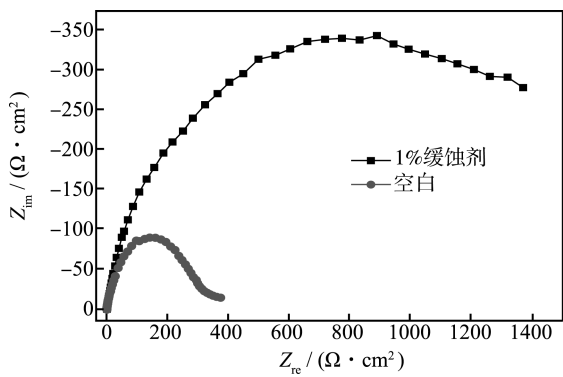


图 2 电化学阻抗谱  
Fig.2 EIS spectras

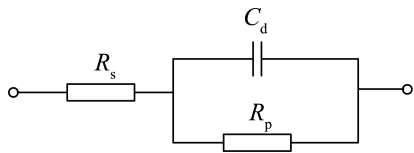


图 3 等效电路图  
Fig.3 Equivalent circuit diagram

结合图 2 和图 3 可以看出, 缓蚀剂在盐酸溶液体系中的阻抗谱为容抗弧。 $R_p$  在 Nyquist 图中对应的是容抗弧半圆直径,  $R_p$  越大, 腐蚀越难进行, 腐蚀速率就越小, 即缓蚀剂的效果越好。空白溶液的 Nyquist 图在高频端容抗弧半圆直径很小, 即  $R_p$  很小, 电极表面几乎没有保护膜层形成膜电阻, 因此腐蚀速率很大。加入 SD-820 后容抗弧的半圆直径显著增大, 对应的膜电阻  $R_p$  显著增大, 说明抑制了腐蚀反应的电荷传递过程, 表明该缓蚀剂在 N80 钢表面的吸附能够有效地抑制酸液的腐蚀。

表 3 为 N80 钢在 90 ℃ 的 20% 盐酸溶液中, 不加缓蚀剂与加 1%缓蚀剂时的交流阻抗拟合参数。由表 3 数据可知, 添加缓蚀剂 SD-820 后, 膜电阻  $R_p$  增大, 表明该缓蚀剂有明显的缓蚀作用。

表 3 交流阻抗拟合参数 Table 3 EIS fitting parameters				
条件	$R_s$ /( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$C_d$ /( $\text{nF} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$R_p$ /( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	IE /%
空白	0.72	1.63	0.35	
SD-820	0.66	0.12	2.47	85.83

2.3 热重差热分析

由图 4 可以得出, N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐在 220 ℃ 开始分解, 至 400 ℃ 基本分解完毕。当温度在 220 ℃ 和 360 ℃ 时, 差热图中有较强的吸热峰, 说明 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐迅速吸热分解, 故 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐有很好的热稳定性。以该物质作为含氟高温酸化缓蚀剂配方中的主剂, 可在高温下有效发挥其缓蚀作用。

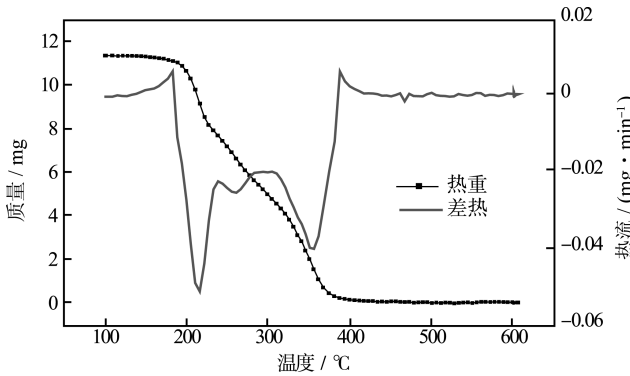


图 4 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐的 TG/DTA 分析  
Fig.4 TG/DTA of 4 N - alkane amidogen - 2- fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt

2.4 在盐酸中稳定性分析

表 4 的表面张力数据显示, N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐在 10%、15%、20%、25% 盐酸中 10 h 之内的表面活性稳定。该物质表面活性在酸中的稳定性可以间接反映出该物质在酸中缓蚀性的稳定性, 因此以 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐作为含氟高温酸化缓蚀剂配方中的主剂, 能够在酸中有效地发挥其缓蚀作用。

2.5 缓蚀剂缓蚀机理分析

咪唑啉季铵盐是一种吸附缓蚀剂, 其分子结构具有较低的能量和稳定的构象, 广泛用于抑制酸性介质对金属的腐蚀。其吸附原理遵循 Langmuir 等

表 4 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐在不同浓度盐酸中的表面张力

Table 4 Surface tension of 4 N-alkane amidogen-2-fluorocarbon imidazoline quaternary ammonium salt in different concentrations HCl

盐酸浓度 /%	表面张力/(mN · m <sup>-1</sup> )			
	空白	0 h	5 h	10 h
10	57.3	25.2	25.0	25.1
15	57.5	25.4	25.3	25.0
20	57.4	25.1	25.0	25.0
25	57.4	25.2	25.2	25.1

注：测试温度 25 ℃，稀释浓度 0.2%（质量分数）。

温吸附理论，以分子形式吸附在金属表面。咪唑啉分子中含有 N=C 双键和 N 原子上的孤电子，可同金属外围空轨道共价结合，使咪唑啉环平行于金属表面发生共价作用。其亲水键的自然卷曲利于氨基基团上氮原子或其他活性基团中的孤电子对在金属表面吸附<sup>[10]</sup>。但是在高温条件下，碳氢咪唑啉季铵盐缺乏热稳定性<sup>[11]</sup>，故在配方中加入了 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐。氟碳烷基咪唑啉化合物可在高温、强酸等特殊环境中稳定有效地发挥其表面活性剂作用，具有高表面活性、高热力学和化学稳定性，即“三高”特性<sup>[12-14]</sup>。钼酸钠的缓蚀机理是与碳钢发生反应生成钝化膜，其膜的主要成分为 Fe-MoO<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。硫脲分子含有极性基团和非极性基团，极性基团吸附在金属表面，非极性基团在金属表面定向排列形成憎水层，阻隔酸性介质的腐蚀<sup>[15]</sup>。因此综合各方面，配方中氟碳咪唑啉季铵盐在高温下起主要缓蚀作用，碳氢咪唑啉季铵盐、钼酸钠、硫脲起缓蚀增效作用<sup>[16]</sup>。

### 3 结论

含氟高温酸化缓蚀剂 SD-820 在 90 ~ 140 ℃条件下加入，可以有效抑制酸化过程中 HCl 对 N80 钢的腐蚀，使 N80 钢的腐蚀速率远低于行业标准 SYT 5405—1996 中对缓蚀剂评价的一级指标。含氟高温酸化缓蚀剂的主要缓蚀成分 N-烷氨基-2-全氟烷基咪唑啉季铵盐，可在高温、强酸等特殊环境中稳定有效地发挥其表面活性剂作用。所以，含氟高温酸化缓蚀剂 SD-820，可以在 90 ~ 140 ℃下使酸化对

N80 钢的腐蚀速率明显降低。

### 参考文献

- [1] 郑家桑. 油井酸化缓蚀剂的研究现状及其应用概况[J]. 腐蚀与防护, 1997, 18(3): 36—40.  
ZHENG Jia-shen. Research and Application of Oil Well Acidizing Inhibitors[J]. Corrosion & Protection, 1997, 18(3): 36—40.
- [2] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
WEI Bao-ming. Metal Corrosion Theory and Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 杨永飞, 赵修太, 邱广敏, 等. YSH-05 高温酸化缓蚀剂缓蚀性能研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007, 24(1): 8—11.  
YANG Yong-fei, ZHAO Xiu-tai, QIU Guang-min, et al. Study on Anticorrosion Performance of Corrosion Inhibitor YSH-05 for High-temperature Acidification[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2007, 24(1): 8—11.
- [4] 蒋文学, 李楷, 李勇, 等. 一种高温缓蚀剂的合成工艺探讨[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(3): 237—240.  
JIANG Wen-xue, LI Kai, LI Yong, et al. Synthesis and Technology of the High-temperature Corrosion Inhibitor[J]. Journal of Yangtze University(Nat Sci Edit), 2010, 7(3): 237—240.
- [5] 邱海燕, 李建波. 酸化缓蚀剂的发展现状及展望[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(4): 255—258.  
QIU Hai-yan, LI Jian-bo. The Present Situation and Expectation of Acidizing Corrosion Inhibitors[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(4): 255—258.
- [6] RAICHEAV S N, ALEKSIEV B V, SOKOLOVA E I. The Effect of the Chemical Structure of Some Nitrogen and Sulphur-containing Organic Compounds on Their Corrosion Inhibiting Action[J]. Corros Sci, 1993, 34(2): 345—350.
- [7] NECLMP B V. Organophonic Sphonic Acid as Complexones[J]. Indian Journal of Chemistry, 1997(4): 689—694.
- [8] 李谦定, 李恒娟, 卢永斌. 咪唑啉季铵盐缓蚀剂的合成及应用性能评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(2): 76—79.  
LI Qian-ding, LI Heng-juan, LU Yong-bin. Synthesis and Performance Evaluation of the Corrosion Inhibitor of Imidazoline Quaternary[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2011, 26(2): 76—79.
- [9] 陈延林, 张永峰, 郝振文. 氟碳表面活性剂工业应用研究进展[J]. 有机氟工业, 2007, 136(2): 38—41.

- CHEN Yan-lin, ZHANG Yong-feng, HAO Zhen-wen. Progress on the Industry Application of Fluorocarbon Surfactants[J]. Organo-Fluorine Industry, 2007, 136(2): 38—41.
- [10] 杨怀玉, 陈家坚, 曹楚南, 等.  $\text{H}_2\text{S}$  水溶液中的腐蚀与缓蚀作用机理的研究Ⅷ 咪唑啉衍生物在  $\text{H}_2\text{S}$  溶液中的吸附作用行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(4): 75—78.
- YANG Huai-yu, CHEN Jia-jian, CAO Chu-nan, et al. Study on Corrosion and Inhibition Mechanism in  $\text{H}_2\text{S}$  Aqueous Solutions Ⅷ. The Adsorption Behavior of Imidazoline Derivates on the Mild Steel Electrodes in  $\text{H}_2\text{S}$  Solutions[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(4): 75—78.
- [11] 王霞, 吴红梅, 杜大委. 饱和  $\text{CO}_2$  油田水中咪唑啉季铵盐在 N80 钢表面的吸附与其缓蚀性能关系[J]. 材料保护, 2014, 47(2): 35—38.
- WANG Xia, WU Hong-mei, DU Da-wei. Absorption Behavior and Inhibition Performance of Imidazoline Quaternary Ammonium Salt on N80 Steel in Simulated Oilfield Water with Saturated Carbon Dioxide[J]. Materials Protection, 2014, 47(2): 35—38.
- [12] 陈晓东, 杨悦, 焦伟杰, 等. 新型氟碳油井缓蚀剂在高含水油田应用研究[J]. 应用化工, 2010, 39(8): 1159—1163.
- CHEN Xiao-dong, YANG Yue, JIAO Wei-jie, et al. Applied Research of Fluorocarbon Corrosion Inhibitor in High Water Oil Field[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(8): 1159—1163.
- [13] 张可桂, 杨文忠, 徐斌, 等. 含氟咪唑啉季铵盐缓蚀剂的合成及缓蚀性能[J]. 材料保护, 2014, 47(8): 31—35.
- ZHANG Ke-gui, YANG Wen-zhong, XU Bin, et al. Synthesis of Fluorine-containing Imidazoline Quaternary Ammonium Salt Inhibitor and Evaluation of Its Inhibitory Performance[J]. Materials Protection, 2014, 47(8): 31—35.
- [14] 周杰华, 黄焰根. 新型季铵盐氟碳表面活性剂的合成及其表面活性[J]. 合成化学, 2014, 22(5): 608—611.
- ZHOU Jie-hua, HUANG Yan-gen. Synthesis and Surface Activities of Novel Fluorinated Quaternary Ammonium Surfactants[J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2014, 22(5): 608—611.
- [15] 田永奎. 金属腐蚀与防护[M]. 太原: 机械工业出版社, 1995.
- TIAN Yong-kui. Metal Corrosion and Protection[M]. Taiyuan: China Machine Press, 1995.
- [16] 孟凡宁, 李谦定, 李善建. 曼尼希碱与硫脲在气井采出水腐蚀体系中的缓蚀协同作用[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 90—94.
- MENG Fan-ning, LI Qian-ding, LI Shan-jian. Synergistic Inhibition Mechanism of Mannich Bases and Thiourea in Corrosion System of Gas-field Wastewater[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 90—94.