

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

孟凡宁, 李谦定, 李善建

(西安石油大学 化学化工学院, 西安 710065)

摘要: 目的 寻找新型缓蚀剂, 以解决碳钢在气井采出水中的腐蚀问题。方法 以 N80 钢在 80 °C 气井采出水中的腐蚀为研究对象, 通过极化曲线和电化学阻抗谱, 研究曼尼希碱与硫脲进行复配的缓蚀效果, 并探讨缓蚀协同作用机理。结果 硫脲是一种混合型缓蚀剂, 对 N80 钢的阴极过程和阳极过程都有强烈的抑制作用; 曼尼希碱是一种以抑制阴极为主的混合型缓蚀剂。二者复配后, 对 N80 钢在气井采出水中的腐蚀表现出优异的缓蚀协同效应, 当曼尼希碱添加量为 0.75%, 硫脲的质量浓度为 2.5 mg/L 时, 缓蚀效果最好。结论 曼尼希碱与硫脲二者复配使用时, 在 N80 钢表面可能形成一种双层结构的吸附膜, 内层以硫脲为主, 外层以曼尼希碱为主。

关键词: 缓蚀剂; 协同作用; 曼尼希碱; 硫脲

中图分类号: TG174.42 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2014)03-0090-05

Synergistic Inhibition Mechanism of Mannich Bases and Thiourea in Corrosion System of Gas-field Wastewater

MENG Fan-ning, LI Qian-ding, LI Shan-jian

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To find new inhibitors of carbon steel corrosion in gas-field wastewater. **Methods** The synergistic inhibition effect of mannich (MABS) and thiourea (TU) on N80 carbon steel in corrosion system of gas-field wastewater was investigated by using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). **Results** The results showed that TU had strong inhibition effect on the anodic and cathodic processes of N80 steel corrosion, while MABS acted as mixed-type inhibitor preferentially restraining the cathodic process of metal. The combination of MABS and TU showed excellent synergistic inhibition effect in gas-field wastewater. When the Mannich and thiourea concentration was 0.75% and 2.5 mg/L, respectively, the inhibition effect was the best. **Conclusion** When using the combination of MABS and TU, a bi-layer inhibitor film with the inner layer of TU molecules and the outer layer of mannich molecules was formed on the N80 steel surface.

KEY WORDS: corrosion inhibitor; synergistic effect; mannich base; thiourea

收稿日期: 2014-03-11; 修订日期: 2014-04-27

Received: 2014-03-11; Revised: 2014-04-27

基金项目: 西安石油大学全日制硕士研究生创新基金资助(2013cx120734)

Fund: Supported by the Xi'an Shiyou University Full-time Graduate Innovation Fund (2013cx120734)

作者简介: 孟凡宁(1990—), 男, 南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为油气田化学品合成与应用。

Biography: MENG Fan-ning(1990—), Male, from Nanyang, Master graduate student, Research focus: synthesis and application of oilfield chemicals.

天然气开发过程中采出的高矿化度地层水会对天然气处理设备造成一定的腐蚀^[1-3],为此,国内外学者开展了大量研究工作,开发出了一系列缓蚀剂,如咪唑啉类、曼尼希碱类等。曼尼希碱(MABS)缓蚀剂是一种高效、低毒、环保型的缓蚀剂^[4],可有效抑制油气田采出水对设备的腐蚀,已在油气田大规模应用。硫脲(TU)是一种广泛使用的催化型缓蚀剂,国内已有相关研究^[5-10]。据报道,咪唑啉类衍生物与硫脲在油气井采出水中具有良好的缓蚀协同作用^[11-13],但有关曼尼希碱与硫脲复合型缓蚀剂在气井采出水腐蚀体系中的协同缓蚀机理研究较为薄弱,深入研究该反应机理具有重要的理论和现实意义,可为二者复配后在油气井采出水中的应用提供依据。

1 实验

研究曼尼希碱与硫脲复配前后,N80钢片极化曲线及Nyquist图的变化情况。腐蚀介质为长庆油田采气二厂气井采出水,pH=6.44,总矿化度为9380.85 mg/L,水型为CaCl₂型。其组成如下:Ca²⁺ 1824.00 mg/L,Mg²⁺ 169.59 mg/L,Fe³⁺ 0.5492 mg/L,Na⁺+K⁺ 1419.28 mg/L,Fe²⁺ 0.1727 mg/L,HCO₃²⁻ 116.48 mg/L,Cl⁻ 5843.22 mg/L,SO₄²⁻ 7.56 mg/L。曼尼希碱缓蚀剂的结构式如图1所示,合成方法详见参考文献[14]。实验中以曼尼希碱为主剂,在分散剂PPJ中分散后使用,分散剂中曼尼希碱的质量分数为5%。硫脲为分析纯试剂。

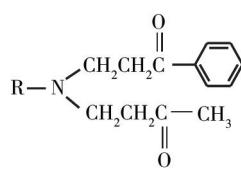


图1 曼尼希碱缓蚀剂结构式

Fig. 1 Structure of Mannich bases inhibitor

采用CS350型电化学测试系统测试极化曲线和交流阻抗谱(EIS),测试温度为(80±1)℃。工作电极为N80钢,辅助电极为Pt电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。测试前先向腐蚀介质中通1 h N₂(除氧过程),然后将电极浸入到腐蚀介质中,待测试系统电位稳定后(约为15~30 min)进行测试。极化曲线的电位扫描范围为-0.2~0.2 V(相对于开路电位),扫描速率为0.5 mV/s。采用Cview软件对极化曲线进行分析拟合。EIS图谱的测试频率范围为100 kHz

~10 mHz,交流激励信号幅值为10 mV(相对于开路电位)。采用Zview软件对EIS图谱进行定量分析。

2 结果与讨论

2.1 极化曲线

在气井采出水中分别添加不同量的曼尼希碱缓蚀剂后(文中曼尼希碱添加量以分散剂占气井采出水质量的百分比计),进行动电位极化测试,结果如图2所示。可以看出,添加曼尼希碱缓蚀剂后,N80的腐蚀电位负移,极化曲线向低电流密度方向移动,阴极反应和阳极反应都受到了强烈的抑制,但对阴极的抑制作用较强。这说明曼尼希碱缓蚀剂是一种以抑制阴极过程为主的混合型缓蚀剂,作用方式是“负催化效应”,即曼尼希碱的缓蚀效应主要是使阴极反应的活化能垒升高,从而降低腐蚀速率^[15-16]。

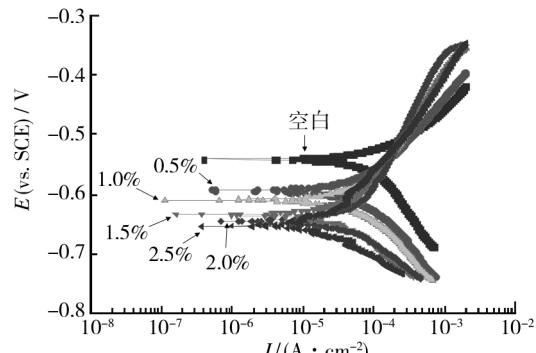


图2 MABS 添加量不同时的极化曲线

Fig. 2 Polarization curves at different concentrations of MABS

对极化曲线进行拟合,得到阴极Tafel斜率(β_c)、阳极Tafel斜率(β_a)、腐蚀电位(E_{corr})、腐蚀电流密度(J_{corr})以及缓蚀率(η),见表1。可见加入曼尼希碱缓

表1 MABS 添加量不同时的电化学参数

Tab. 1 Electrochemical parameters at different concentrations of MABS

MABS 添加量/%	$\beta_a/$ mV	$\beta_c/$ mV	$E_{corr}/$ mV	$J_{corr}/$ $(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	缓蚀率 $\eta/\%$
0	106.38	281.16	-541.22	189.24	
0.5	152.47	164.84	-592.57	93.96	50.35
1.0	206.94	155.48	-609.75	91.10	51.86
1.5	164.76	121.88	-615.71	73.37	61.23
2.0	170.66	123.44	-633.91	47.68	74.80
2.5	103.85	78.94	-645.62	29.14	84.60

蚀剂后, E_{corr} 和 J_{corr} 都迅速减小, 表明曼尼希碱能有效抑制 N80 钢在气井采出水中的腐蚀。随曼尼希碱添加量的增大, 腐蚀速率减小, 缓蚀率增大, 但增幅不大, 当曼尼希碱添加量达 2.5% 时, 缓蚀率为 84.60%。可见曼尼希碱缓蚀剂具有较好的缓蚀效果。

图 3 为 N80 钢在添加不同浓度硫脲的气井采出水中的极化曲线, 拟合得出的电化学参数及缓蚀率见表 2。可以看出, 添加硫脲后, N80 钢的腐蚀电位小幅度负移, 阴极和阳极溶解过程都受到了抑制, 说明硫脲是一种混合型缓蚀剂, 其作用方式是“几何覆盖效应”^[15], 缓蚀效率等于硫脲粒子在 N80 钢表面的覆盖率。由表 2 数据可知, 硫脲在气井采出水中对 N80 钢具有较好的缓蚀效果。当硫脲质量浓度为 10 mg/L 时, 缓蚀率即可达到 80.41%, 但再增大硫脲的质量浓度, 缓蚀率增大不明显, 50 mg/L 时仅增至 83.32%。这可能是由于硫脲缓蚀剂的作用方式是几何覆盖效应, 硫脲粒子在 N80 钢表面吸附的同时, 脱附过程也在不断地进行, 随着硫脲浓度的增大, 硫脲粒子在 N80 钢表面的覆盖率达到临界值后便不再增大, 因此缓蚀率变化不大。

在气井采出水中添加不同比例的曼尼希碱和硫脲缓蚀剂, 图 4 为测得的极化曲线, 拟合得出的电化学参数及缓蚀率见表 3。可以看出, 添加曼尼希碱和硫脲后, N80 钢的腐蚀电位负移, 阴极和阳极溶解过程都受到了强烈的抑制, 因此曼尼希碱/硫脲复合后为混合型缓蚀剂。同时, 阳极极化曲线可以分为 2 部分: 第 1 部分, 极化过电位约小于 150 mV (-550 ~ -400 mV), 极化曲线的斜率比空白溶液中的斜率大得多, 表明缓蚀剂吸附在 N80 钢电极表面, 腐蚀过程受到了强烈抑制; 第 2 部分, 极化曲线出现“平台”, 斜率小于空白溶液中的斜率, 这是缓蚀剂的脱附过程。随着极化电位的增大, 曼尼希碱和硫脲缓蚀剂粒子从 N80 钢表面脱附, 从图中可以看出曼尼希碱与硫脲的脱附现象不严重, 说明该吸附膜较为稳定^[17]。

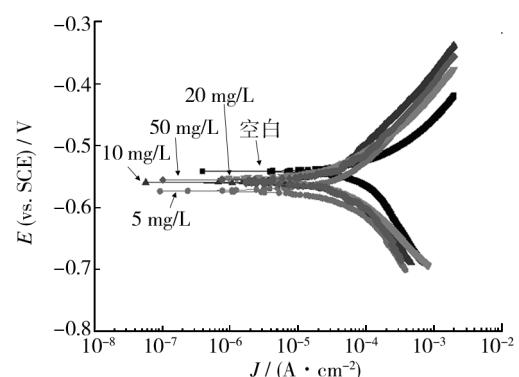


图 3 TU 质量浓度不同时的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves at different concentrations of TU

表 2 TU 质量浓度不同的电化学参数

Tab. 2 Electrochemical parameters at different concentrations of TU

$\rho_{TU}/(mg \cdot L^{-1})$	β_a/mV	β_c/mV	E_{corr}/mV	$J_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	缓蚀率 $\eta/\%$
0	106.38	281.16	-541.22	189.24	
5	127.05	128.29	-573.30	45.99	75.70
10	116.31	101.14	-559.19	37.08	80.41
20	90.83	100.90	-552.89	35.24	81.38
50	98.21	96.10	-555.61	31.64	83.32

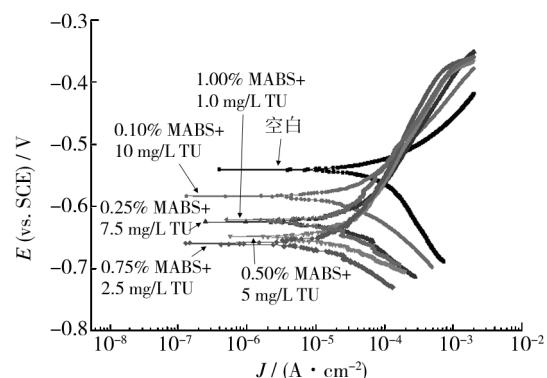


图 4 MABS/TU 配比不同时的极化曲线

Fig. 4 Polarization curves at different concentrations of MABS/TU

表 3 MABS/TU 配比不同时的电化学参数

Tab. 3 Electrochemical parameters at different concentrations of MABS/TU

$\rho_{TU}/(mg \cdot L^{-1})$	MABS 添加量 /%	β_a/mV	β_c/mV	E_{corr}/mV	$J_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	缓蚀率 $\eta/\%$
0	0	106.38	281.16	-541.22	189.24	
10.0	0.10	121.57	107.80	-583.78	45.06	76.19
7.5	0.25	181.22	121.11	-625.43	38.53	79.64
5.0	0.50	183.80	80.86	-649.03	33.81	82.13
2.5	0.75	134.48	76.95	-659.70	15.27	91.93
1.0	0.10	178.83	122.90	-622.07	35.89	81.04

对比表1—3中的数据可知,单独使用2.5%的曼尼希碱缓蚀剂时,缓蚀率为84.60%;单独使用50 mg/L硫脲时,缓蚀率为83.32%;当0.75%曼尼希碱与7.5 mg/L硫脲复配使用时,缓蚀率达到91.93%。可见曼尼希碱和硫脲具有良好的协同作用,能够有效抑制N80钢在气井采出水中的腐蚀。

2.2 EIS 测试结果

图5是单独使用不同添加量曼尼希碱、单独使用不同浓度硫脲、复配使用不同配比曼尼希碱/硫脲三种条件下测得的Nyquist图。由图5a可以看出,仅加入曼尼希碱时,Nyquist曲线在低频区出现了典型的Warburg阻抗特征^[18]。这表明腐蚀介质中加入曼尼希碱后,N80钢的电化学过程主要受扩散控制。由图5b可以看出,仅加入硫脲时,Nyquist图只有1个时间常数,图谱是一个被压缩的容抗弧,弧的半径随硫脲

浓度的增加而增大。这表明腐蚀介质中加入硫脲后,N80钢的电化学反应过程受活化控制^[19]。由图5c可以看出,同时加入曼尼希碱和硫脲时,Nyquist图与单独加入曼尼希碱相比,明显发生了变化。该Nyquist图是一个半圆形的容抗弧,随着曼尼希碱和硫脲比例的不同,容抗弧的半径也有所变化。当曼尼希碱添加量为0.75%,硫脲质量浓度为2.5 mg/L时,缓蚀效果最好,与极化曲线的测定结果一致。这表明腐蚀介质中同时加入曼尼希碱和硫脲后,N80钢的电化学过程主要受活化控制^[15]。

2.3 曼尼希碱和硫脲缓蚀协同作用机理探讨

根据前述分析,曼尼希碱与硫脲复合型缓蚀剂的作用方式是“负催化效应”,可能在N80钢表面形成了一种双层结构的吸附膜,内层以硫脲为主,外层以曼尼希碱为主^[5]。曼尼希碱缓蚀剂分子中未共用电子对的N,O原子以及含有π键的苯环具有较强的供电子能力,容易与N80钢表面Fe原子的空d轨道通过配位键相互作用形成吸附膜;同时据文献报道^[6],由于硫脲能与某些具有一定几何形状的分子形成结晶化合物,该化合物可形成沉淀,沉淀则是螺旋状排列的硫脲分子构成的圆柱体,曼尼希碱分子中含有苯环和长链烷基,可以进入到圆柱体通道中,增加吸附膜的厚度,增强吸附膜的稳定性;此外,由于曼尼希碱缓蚀剂分子中的苯环及烷基存在空间位阻效应以及疏水性,使吸附膜的致密程度得以提高。因此,曼尼希碱与硫脲具有良好的缓蚀协同效应,能较好地抑制N80钢在气井采出水中的腐蚀。

3 结论

1) 在气井采出水腐蚀体系中,曼尼希碱是一种以抑制阴极为为主的混合型缓蚀剂,其作用机理是“负催化效应”;硫脲是一种对阳极和阴极均有明显抑制作用的混合型缓蚀剂,其作用机理是“几何覆盖效应”。

2) 曼尼希碱与硫脲具有良好的缓蚀协同作用,使得气井采出水中的阴极和阳极溶解过程都受到了强烈的抑制,是以抑制阴极为为主的复合型缓蚀剂。当曼尼希碱的添加量为0.75%,硫脲的质量浓度为2.5 mg/L时,缓蚀效果最好。

参考文献

- [1] 尚万宁,乔玉龙,闫昭,等.鄂尔多斯盆地靖边气田气井

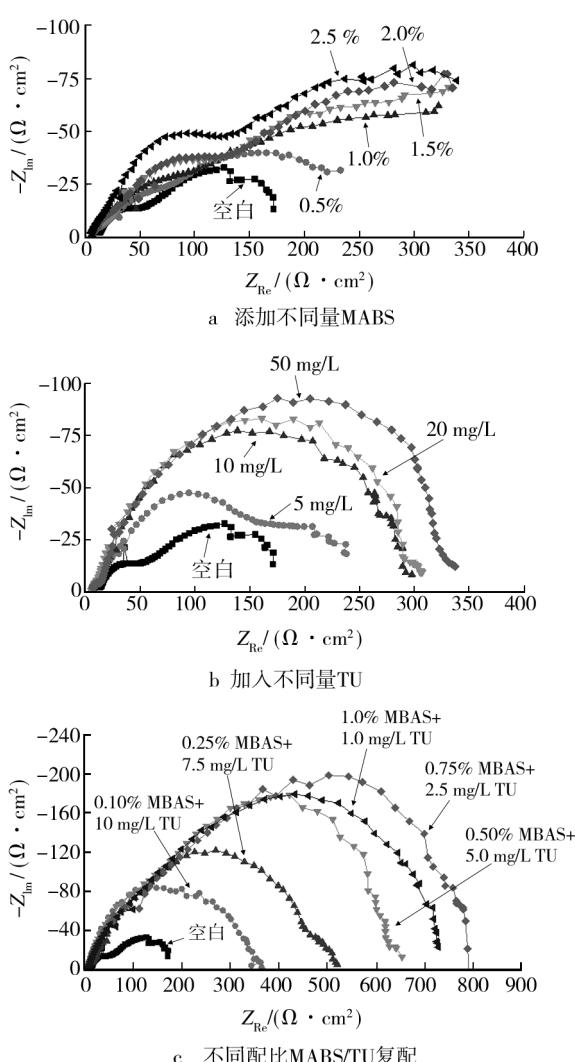


图5 N80钢在气井采出水中的Nyquist图

Fig. 5 Nyquist plots of N80 steel in gas-field wastewater

- 油管腐蚀规律与防腐对策 [J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 115—120.
- SHANG Wan-ning, QIAO Yu-long, YAN Zhao, et al. Corrosion Law of Oil Tubings and Prevention Countermeasures in Gas Wells of the Jingbian Gas Field, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 115—120.
- [2] 刘建国, 李言涛, 郑凤. 紫外分光度法咪唑啉残余质量浓度分析 [J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 115—117, 124.
- LIU Jian-guo, LI Yan-tao, ZHENG Feng. Residual Mass Concentration Analysis of Imidazoline by Ultraviolet Spectrophotometry [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 115—117, 124.
- [3] 杨志国, 胡传顺, 梁平, 等. X80 钢在库尔勒和高 pH 值土壤模拟溶液中的腐蚀行为 [J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 41—45.
- YANG Zhi-guo, HU Chuan-shun, LIANG Ping, et al. Corrosion Behaviors of X80 Steel in Ku'erle and High pH Soil Simulated Solutions [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 41—45.
- [4] 彭雪飞, 冯浦涌, 王贵, 等. 一种曼尼希碱季铵盐缓蚀剂的合成与性能研究 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(5): 345—348.
- PENG Xue-fei, FENG Pu-yong, WANG Gui, et al. Synthesis and Properties of a Mannich Base Quaternary Ammonium Salt [J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(5): 345—348.
- [5] 贾明子, 张哲, 阮乐, 等. 咪唑类化合物自组装膜对 316 不锈钢的缓蚀作用 [J]. 表面技术, 2013, 42(3): 23—27, 41.
- JIA Ming-zi, ZHANG Zhe, RUAN Le, et al. Corrosion Inhibition Action of Imidazole Derivatives Self-assembled Films for 316 Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 23—27, 41.
- [6] 佟欣佳, 柳鑫华, 丁云飞, 等. 环境友好型聚天冬氨酸衍生物的合成及其阻垢性能 [J]. 表面技术, 2013, 42(5): 62—65, 80.
- TONG Xin-jia, LIU Xin-hua, DING Yun-fei, et al. Synthesis of Friendly-to-environment Polyaspartic Acid Derivative and Its Characteristics in Scale Inhibition [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 62—65, 80.
- [7] 董俊华, 宋光玲, 林海潮, 等. 酸性介质中硫脲及衍生物在纯铁上的吸附作用 [J]. 物理化学学报, 1996, 12(1): 34—38.
- DONG Jun-hua, SONG Guan-ling, LIN Hai-chao, et al. The Adsorption of Thiourea and Its Derivatives on Iron Electrode in Acidic Solution [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 1996, 12(1): 34—38.
- [8] 李广超, 路长青, 杨文忠, 等. 硫脲及其衍生物的缓蚀行为研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(3): 169—172.
- LI Guang-chao, LU Chang-qing, YANG Wen-zhong, et al. Progress on Research of Thiourea and Derivatives as Corrosion Inhibitors [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(3): 169—172.
- [9] 聂金艳, 司云森, 余强, 等. 酸性介质中 N,N-二苯基硫脲和硫脲对 A3 钢的缓蚀作用对比研究 [J]. 表面技术, 2010, 39(1): 51—55.
- NIE Jin-yan, SI Yun-sen, YU Qiang, et al. Contrast Study on the Inhibitive Effect of N,N-diphenyl Thiourea and Thiourea on the Corrosion of A3 Steel in Acid Medium [J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 51—55.
- [10] 韩倩倩. 硫脲在 0.5 mol/L 硫酸溶液中对 A3 钢缓蚀作用的电化学研究 [J]. 表面技术, 2009, 38(4): 36—38.
- HAN Qian-qian. Study on the Effect of Thiourea on the Inhibition of A3 Carbon Steel in 0.5 mol/L H₂SO₄ Solution with Electrochemical Methods [J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 36—38.
- [11] 王彬, 张静, 杜敏. 咪唑啉类缓蚀剂对含饱和 CO₂ 的模拟油田采出液中 Q235-A 钢的缓蚀作用 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 20(1): 16—20.
- WANG Bin, ZHANG Jing, DU Min. Inhibition Performance of Imidazoline Inhibitors for Q235-A Steel in the Simulated Producing Well Water Saturated with CO₂ [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 20(1): 16—20.
- [12] 赵景茂, 陈国浩. 咪唑啉与硫脲在 CO₂ 腐蚀体系中的缓蚀协同作用机理 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(3): 226—230.
- ZHAO Jing-mao, CHEN Guo-hao. Synergistic Inhibition Mechanism of Imidazoline and Thiourea in CO₂ Corrosive System [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(3): 226—230.
- [13] 赵景茂, 刘鹤霞, 狄伟, 等. 咪唑啉衍生物与硫脲之间的缓蚀协同效应研究 [J]. 电化学, 2004, 10(4): 440—445.
- ZHAO Jing-mao, LIU He-xia, DI Wei, et al. The Inhibition Synergistic Effect between Imidazoline Derivative and Thiourea [J]. Electro Chemistry, 2004, 10(4): 440—445.
- [14] 李谦定, 王京光, 于洪江, 等. 一种新型高效油气井酸化缓蚀剂的研制 [J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 96—98.
- LI Qian-ding, WANG Jing-guang, YU Hong-jiang, et al. A Novel Highly-efficient Acidizing Corrosion Inhibitor Used for Oil and Gas Wells [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 96—98.
- [15] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 235—236.

(下转第 110 页)

- gy [J]. Jiangxi Metallurgy , 2002, 22(2) : 23—24.
- [13] 付伟. 外循环减压蒸发工艺回收废酸技术与应用 [J]. 环境污染与防治 , 2004, 26(3) : 227—228.
- FU Wei. Reclaiming Waste Pickling Liquor with the Process of Decompression Evaporation of Outside Circulation [J]. Environmental Pollution and Control , 2004, 26(3) : 227—228.
- [14] 马志军, 桂祥友. 废酸液中回收氟化氢的实验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2003, 22(z1) : 136—137.
- MA Zhi-jun, GUI Xiang-you. Experimental and Research on Fluorine Hydride Recycled from Waste Acid [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2003, 22(z1) : 136—137.
- [15] 戴洪斌, 张勇, 王泉, 等. 紧衬聚四氟乙烯钢管和管件的研制 [J]. 腐蚀与防护 , 2002, 23(6) : 267—269.
- DAI Hong-bin, ZHANG Yong, WANG Quan. Research and Manufacturing of PtFe Plastic Tightly Lined Steel Pipes and Fittings [J]. Corrosion and Protection , 2002, 23(6) : 267—269.
- [16] 任夫健. 钢衬聚四氟乙烯设备的加工、设计与应用 [J]. 工程塑料应用 , 2001, 29(5) : 19—20.
- REN Fu-jian. Manufacture, Design and Application of Multiplex Equipment of Carbon Steel with PtFe Liner [J]. Engineering Plastics Application , 2001, 29(5) : 19—20.
- [17] 刘建州, 刘玉英. 聚四氟乙烯 (F4) 衬里成型技术及其应用 [J]. 化工设备与管道 , 2010, 47(3) : 23—24.
- LIU Jian-zhou, LIU Yu-ying. PTFE Lining Technique and Its Application [J]. Process Equipment & Piping , 2010, 47(3) : 23—24.
- [18] 李小平, 汪凯, 张春恒, 等. 钽及钽合金在废酸回收设备中的应用 [J]. 材料开发与应用 , 2012(6) : 19—21.
- LI Xiao-ping, WANG Kai, ZHAGN Chun-heng, et al. Technical Study of the Tantalum-made Waste Acid Recovery Equipment [J]. Development and Application of Materials , 2012(6) : 19—21.
- [19] 杜春林, 许忠旭, 刘春, 等. 热阴极电离真空规在卫星热试验中的使用与失效分析 [J]. 装备环境工程 , 2012, 9(3) : 19—22, 40.
- DU Chun-lin, XU Zhong-xu, LIU Chun, et al. Analysis of Hot Cathode Ionization Vacuum Gauge Usage and Failure in the Satellite Thermal Test [J]. Equipment Environmental Engineering , 2012, 9(3) : 19—22, 40.
- [20] 刘振生, 郝爱云, 王蕊, 等. 携玻璃聚四氟乙烯组合盘管冷凝器 [J]. 应用化工 , 2004, 33(1) : 62—64.
- LIU Zhen-sheng, HAO Ai-yun, WANG Rui. Build-up Spiral Pipe Condenser Made of Glass Lining and Teflon [J]. Applied Chemical Industry , 2004, 33(1) : 62—64.
- [21] 陶安发, 王铁军, 陈志文, 等. HG-45b 宽温区环控装置研发 [J]. 装备环境工程 , 2013, 10(2) : 116—119.
- TAO An-fa, WANG Tie-jun, CHEN Zhi-wen. Research and Development of HG-45b Environmental Control Equipment for Wide Temperature Range [J]. Equipment Environmental Engineering , 2013, 10(2) : 116—119.

(上接第 94 页)

- CAO Chu-nan. The Principle of the Corrosion Electrochemistry [M]. Third Edition. Beijing: Chemistry Industry Press , 2008 : 235—236.
- [16] 任呈强, 刘道新, 白真权, 等. 咪唑啉衍生物在含 H_2S/CO_2 油气井环境中的缓蚀行为研究 [J]. 天然气工业 , 2004, 24(8) : 53—55.
- REN Cheng-qiang, LIU Dao-xin, BAI Zhen-quan, et al. Research on the Inhibition Behavior of Imidazoline Derivate in the Oil/Gas Well Containing H_2S/CO_2 [J]. Natural Gas Industry , 2004, 24(8) : 53—55.
- [17] 常春芳, 曾为民, 马玉录, 等. ATA 及其与 PASP 复配在 3.5% NaCl 溶液中对碳钢的缓蚀作用 [J]. 表面技术 , 2010, 39(6) : 46—50.

- CHANG Chun-fang, ZENG Wei-min, MA Yu-lu, et al. The Corrosion Inhibition Effects of ATA and Its Complex with PASP on Carbon Steel in 3.5% NaCl Solution [J]. Surface Technology , 2010, 39(6) : 46—50.
- [18] TAYLOR S R, GILEADI E. Physical Interpretation of the Warburg Impedance [J]. Corrosion , 1995, 51(9) : 664—671.
- [19] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. N80 油套管钢 CO_2 腐蚀阴极过程电化学阻抗谱分析 [J]. 金属学报 , 2003, 39(1) : 94—98.
- CHEN Chang-feng, LU Min-xu, ZHAO Guo-xian, et al. The EIS Analysis of Electrode Reactions of CO_2 Corrosion of N80 Steel [J]. Acta Metallurgica Sinica , 2003, 39(1) : 94—98.