

SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 对曼尼希碱酸化缓蚀剂 缓蚀性能的影响

王甜甜, 马士越, 吴坤坤, 王博, 李谦定

(西安石油大学 化学化工学院, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究废酸液中介质离子对曼尼希碱酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响,以解决碳钢在酸液中的腐蚀问题。**方法** 采用静态失重法、极化曲线、扫描电镜及能谱分析法,研究 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 对曼尼希碱型酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响,并探究其作用机理。**结果** 在 10% (质量分数) 盐酸、0.1% (质量分数) 曼尼希碱的缓蚀介质中,随 SO_4^{2-} 质量分数的增大,腐蚀电流密度由 $2.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 增加至 $7.32 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,腐蚀速率显著增大,缓蚀效果变弱;随 PO_4^{3-} 质量分数的增加,腐蚀电流密度由 $2.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 减小至 $2.41 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,腐蚀速率减小,缓蚀效果变强。**结论** SO_4^{2-} 会通过钢铁表面已经形成的吸附膜上的细孔和缺陷渗入膜内,使膜发生开裂,从而侵蚀和破坏已经形成的吸附膜,抑制缓蚀剂的缓蚀效果; PO_4^{3-} 与腐蚀产物 Fe^{3+} 络合并在钢材表面形成一层致密的保护层,使缓蚀剂形成的吸附膜更加致密,阻止腐蚀性介质与金属表面接触,同时增加对离子或溶解氧的扩散阻力,提高缓蚀剂的缓蚀效果。

关键词: 曼尼希碱; SO_4^{2-} ; PO_4^{3-} ; 极化曲线; 缓蚀性能

中图分类号: TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)09-0102-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.017

Influence of SO_4^{2-} and PO_4^{3-} on the Inhibition Performance of Compounded Mannich Base Hydrochloric Acid Corrosion Inhibitor

WANG Tian-tian, MA Shi-yue, WU Kun-kun, WANG Bo, LI Qian-ding

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

ABSTRACT: **Objective** To explore the effects of SO_4^{2-} and PO_4^{3-} on the performance of mannich base hydrochloric acid corrosion inhibitor. **Methods** Using static weight-loss method, polarization curve, scanning electron microscope and energy spectrum analysis, the effects of SO_4^{2-} and PO_4^{3-} on the performance of mannich base hydrochloric acid corrosion inhibitor were studied and its mechanism was explored. **Results** In corrosion medium with 10% HCl and 0.1% mannich base, with the increase of SO_4^{2-} mass

收稿日期: 2015-04-29; 修订日期: 2015-05-27

Received: 2015-04-29; Revised: 2015-05-27

基金项目: 西安石油大学全日制硕士研究生创新基金资助(2014cx130739)

Fund: Supported by the Xi'an Shiyou University Full-time Graduate Innovation Fund (2014cx130739)

作者简介: 王甜甜(1990—),女,陕西人,硕士研究生,主要研究方向为油气田化学品合成与应用。

Biography: WANG Tian-tian (1990—), Female, from Shaanxi, Master graduate student, Research focus: synthesis and application of oil and gas field chemicals

通讯作者: 李谦定(1959—),男,陕西人,教授,主要研究方向为从事油气田应用化学。

Corresponding author: LI Qian-ding (1959—), Male, from Shaanxi, Professor, Research focus: applied chemistry of oil and gas fields.

fraction, the corrosion current density increased from $2.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ to $7.32 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, the corrosion rate significantly increased and the corrosion inhibition effect was weakened; on the contrary, with the increase of PO_4^{3-} mass fraction, the corrosion current density decreased from $2.81 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ to $2.41 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, the corrosion rate decreased and the corrosion inhibition effect was strengthened.

Conclusion SO_4^{2-} penetrated into the steel surface adsorption film through the holes and defects, forming cracks in the film, leading to erosion and damage of the adsorption film, and the effect of mannich acid hydrochloric acid corrosion inhibitor was suppressed. The corrosion products of PO_4^{3-} and Fe^{3+} formed a layer of dense membrane on the steel surface, making the adsorption film formed by the corrosion inhibitor more dense, leading to difficulty in the contact of corrosive medium and metal surface, meanwhile, the diffusion resistance of ions or dissolved oxygen was increased, and the performance of mannich base hydrochloric acid corrosion inhibitor was promoted.

KEY WORDS: Mannich base; SO_4^{2-} ; PO_4^{3-} ; polarization curve; corrosion inhibition performance

酸化技术是油井增产的有效措施之一^[1],利用酸液和地层内的矿物发生化学反应,溶解堵塞在储层孔隙内的天然矿物和岩石,增加导流能力,从而使油气井增产或注水井增注^[2-4]。酸液的使用会对井下金属管线设备(如油、套管)等产生严重的腐蚀,而且会对地层产生潜在的危害^[5-7]。曼尼希碱型酸化缓蚀剂^[8]具有耐高温、环保及缓蚀性能良好等优点,在近年来的酸化作业中应用广泛^[9-10]。大量实验表明,在常用的酸液——工业盐酸中常含有一些 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 等杂质离子,这些离子可能对曼尼希碱盐酸缓蚀剂的缓蚀效果有一定影响^[11-12]。因此,研究 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 对曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀性能的影响具有较大的理论及应用价值。

1 实验

实验所用 N80 碳钢的成分(以质量分数计)如下: C 0.34%, Si 0.22%, Mn 1.20%, P 0.012%, S 0.004%, Cr 0.040%, Mo 0.048%, V 0.005%, Ni 0.030%, Fe 余量。曼尼希碱型盐酸缓蚀剂的结构式如图 1 所示,合成方法参见文献^[13]。

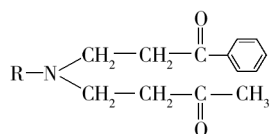


图1 曼尼希碱酸化缓蚀剂分子结构式

Fig. 1 Structure of mannich base hydrochloric acid corrosion inhibitor

根据 SY/T 5405—1996,采用静态失重法测定缓蚀性能。腐蚀时间为 4 h,实验介质为含有 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的 10% 盐酸溶液(分析纯盐酸,若无特殊说明实验所用盐酸均为分析纯),缓蚀剂加量 1.0% (质量分

数),腐蚀温度为 80 °C。N80 钢片的尺寸为 40 mm×20 mm×3 mm。实验结束后将 N80 钢片取出,用清水清洗除去残液后放入无水乙醇中浸泡,脱水后放入丙酮中,脱脂清洗,然后冷风吹干,滤纸包好放入干燥器中保持质量恒定后称量。腐蚀速率计算公式如下^[14]:

$$V_i = \frac{(m_0 - m) \times 10^6}{A_i \Delta t}$$

式中: m_0 , m 分别为 N80 钢片腐蚀实验前后的质量, g; A_i 为 N80 钢片的表面积, m^2 ; Δt 为腐蚀时间, h; V_i 为 N80 钢片的腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

电化学测试前,将 N80 碳钢用 400#, 800#, 1200# 的砂纸打磨、去离子水冲洗、无水乙醇和丙酮清洗干燥。用 CS350 型电化学工作站进行极化分析,测试温度为 80 °C,采用 N80 钢材作为工作电极,铂电极作为辅助电极,饱和甘汞电极作为参比电极,相对于开路电位扫描范围为 -0.2 ~ 0.2 V,扫描速率为 1.0 mV/s。在不同含量的 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的 10% 盐酸溶液的缓蚀剂介质中进行极化曲线测定,采用 Cview 软件对极化数据进行拟合分析^[15-16]。

2 结果与讨论

2.1 缓蚀剂添加量与腐蚀速率的关系

80 °C 下,在 10% 盐酸的腐蚀环境中加入不同含量的曼尼希碱酸化缓蚀剂,研究曼尼希碱酸化缓蚀剂加入量对 N80 钢片腐蚀速率的影响,如图 2 所示。

由图 2 可知,随曼尼希碱缓蚀剂质量分数的增加, N80 钢片的腐蚀速率迅速下降。当质量分数为 0.1% 时,钢片的腐蚀速率为 $1.6678 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,满足 SY/T 5405—1996 中对一级酸化缓蚀剂的腐蚀速率不大于 $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的要求,表明此曼尼希碱缓蚀

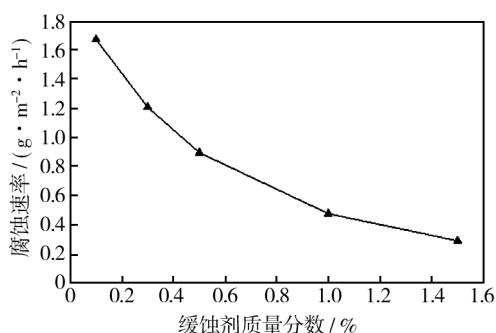


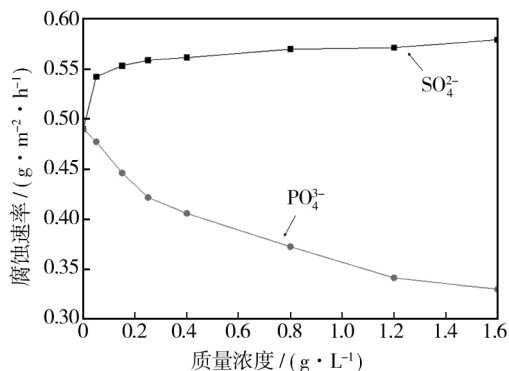
图2 缓蚀剂质量分数对腐蚀速率的影响

Fig. 2 Relationship between corrosion rate and mass fraction of corrosion inhibitor

剂的缓蚀效果良好。由此,实验选用缓蚀剂加量为0.1%的缓蚀介质进行影响评价。

2.2 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的加入量对曼尼希碱缓蚀性能的影响

在10%的盐酸溶液中加入不同质量浓度的 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} ,曼尼希碱酸化缓蚀剂质量分数为0.1%,腐蚀时间为4 h时,通过测试腐蚀速率来考察 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 的加入对曼尼希碱酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响,实验结果如图3所示。

图3 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 质量浓度与腐蚀速率的关系Fig. 3 Relationship between corrosion rate and mass concentration of SO_4^{2-} and PO_4^{3-}

由图3可知,在10%盐酸的腐蚀介质中,随着 SO_4^{2-} 质量浓度的增加,N80钢片的腐蚀速率逐渐增大,说明 SO_4^{2-} 的存在对曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀性能起到一定的“抑制”作用。然而随 PO_4^{3-} 质量浓度的增加,N80碳钢的腐蚀速率逐渐减小,说明 PO_4^{3-} 对曼尼希碱的缓蚀性能起到一定的促进作用。

可能的原因是,当曼尼希碱加入后会在N80碳钢表面形成一层吸附膜,阻止N80碳钢与HCl的接触,

使N80碳钢的腐蚀被抑制。但随着 SO_4^{2-} 加入会通过钢铁表面已经形成的吸附膜上的细孔和缺陷渗入其膜内,使膜发生开裂,侵蚀和破坏已经形成的吸附膜,抑制缓蚀剂的缓蚀效果。相反, PO_4^{3-} 与腐蚀产物 Fe^{3+} 络合并在钢材表面形成一层致密的保护层,沉积覆盖在阳极上,使缓蚀剂形成的吸附膜更加致密,使金属表面与腐蚀性介质溶液的接触困难,加强了隔离效果;同时,对离子或溶解氧的扩散阻力作用的增强,也促进了缓蚀剂的缓蚀效果。

2.3 缓蚀剂加入量对腐蚀速率的影响

为进一步考察 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 对曼尼希碱酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响,分别在含有8 g/L的 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 的10%盐酸溶液中,加入不同含量的曼尼希碱酸化缓蚀剂,腐蚀时间为4 h,通过测试腐蚀速率进一步考察 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的加入对曼尼希碱酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响,实验结果如图4所示。

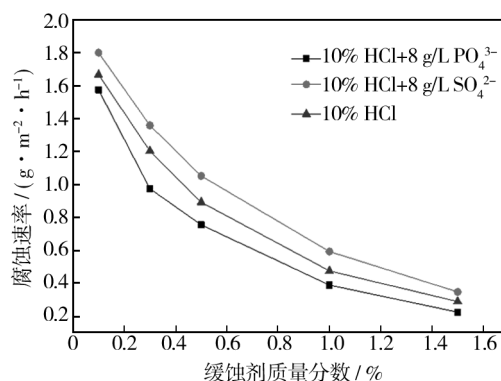


图4 缓蚀剂质量分数对腐蚀速率的影响

Fig. 4 Relationship between corrosion rate and mass fraction of corrosion inhibitor

由图4可知,N80钢片的腐蚀速率均随缓蚀剂质量分数的增大而减小。相比于空白溶液,钢片在含有 SO_4^{2-} 的缓蚀介质中的腐蚀速率大于未加 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的缓蚀介质中的腐蚀速率,在含有 PO_4^{3-} 的缓蚀介质中的腐蚀速率小于未加 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的缓蚀介质中的腐蚀速率。 SO_4^{2-} 会对缓蚀剂的缓蚀效果产生一定的抑制作用, PO_4^{3-} 会对缓蚀剂的缓蚀效果产生一定的促进作用。

2.4 极化曲线分析

用CS350型电化学工作站进行极化曲线测试,除测试表面外,钢片的剩余部分均用聚四氟乙烯进行密

封处理。80 ℃下在 10% 盐酸,0.1% 曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀介质中加入不同质量浓度的 SO₄²⁻ 和 PO₄³⁻,测定溶液的极化曲线,结果如图 5、图 6 所示。拟合极化参数,得出 Tafel 斜率(β_c,β_a)、腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr},拟合结果见表 1 和表 2。

从图 5 可知,随 SO₄²⁻ 质量浓度的增大,缓蚀介质的极化曲线向高电流方向移动,阴极和阳极极化曲线

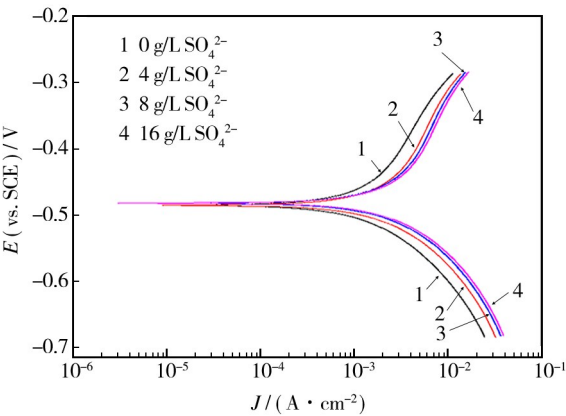


图 5 不同 SO₄²⁻ 质量浓度的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves at different contents of SO₄²⁻

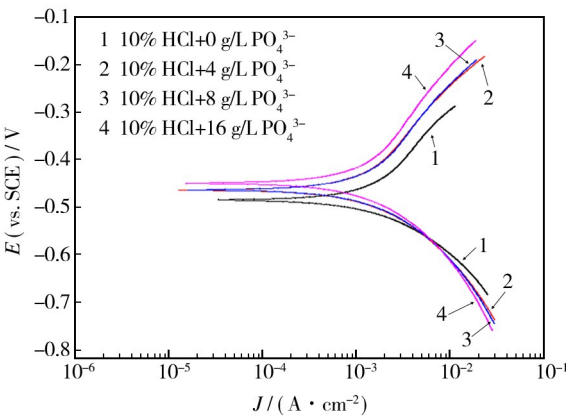


图 6 不同 PO₄³⁻ 质量浓度的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves at different contents of PO₄³⁻

表 1 不同 SO₄²⁻ 质量浓度的电化学参数
Tab. 1 Electrochemical parameters at different contents of SO₄²⁻

SO ₄ ²⁻ 质量 浓度/(g · L)	β _a /mV	β _c /mV	E _{corr} /mV	J _{corr} /(μA · cm ⁻²)
0	469. 61	186. 62	-485. 19	2. 81
4	785. 35	219. 08	-485. 16	5. 41
8	874. 58	224. 12	-482. 23	6. 51
16	933. 17	229. 04	-481. 90	7. 32

表 2 不同 PO₄³⁻ 质量浓度的电化学参数
Tab. 2 Electrochemical parameters at different contents of PO₄³⁻

PO ₄ ³⁻ 质量 浓度/(g · L ⁻¹)	β _a /mV	β _c /mV	E _{corr} /mV	J _{corr} /(μA · cm ⁻²)
0	469. 61	186. 62	-485. 19	2. 81
4	471. 08	190. 90	-470. 76	2. 60
8	523. 88	217. 78	-464. 08	2. 51
16	580. 38	233. 02	-449. 94	2. 40

的塔菲尔斜率均减小,阳极的溶解反应和阴极的还原反应在一定程度上均受到了促进。SO₄²⁻ 对曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀性能有一定破坏作用。可能的原因是,曼尼希碱酸化缓蚀剂是一种混合型缓蚀剂,作用方式是“几何覆盖效应”。其吸附膜在 N80 碳钢表面上发生“非定位吸附”,吸附与脱附不断处于动态平衡中,即在 N80 碳钢表面上各处吸附的几率大致是相同的。随 SO₄²⁻ 质量浓度的增大,电负性较大的 S 竞争吸附在金属表面,破坏了动态平衡,使缓蚀剂的脱附作用大于吸附作用,从而对缓蚀剂的缓蚀效果产生了一定抑制作用。

由法拉第定律可知,腐蚀电流密度与腐蚀速率成正比关系。由图 6 可知,随 PO₄³⁻ 含量的增加,缓蚀介质的腐蚀电流均有所减小,阴、阳极极化曲线的塔菲尔斜率均增大,且自腐蚀电位 E_{corr} 均向正向移动,表明,PO₄³⁻ 对曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀效果有一定促进作用。这可能的原因是,PO₄³⁻ 的加入在电极表面形成了更为完整的吸附膜使得阴、阳两级的腐蚀受到一定的抑制,但主要以抑制阳极为主。缓蚀介质中 PO₄³⁻ 可与金属腐蚀时产生的 Fe³⁺ 共沉淀形成一层致密的沉淀膜,吸附在阳极表面,抑制了阳极反应,从而抑制了电化学腐蚀的进行。另外,沉淀膜的形成也使电极表面吸附的缓蚀膜更加完整致密,更好地阻止了酸液与 N80 钢片的接触,从而更好地达到了缓蚀效果。

2.5 电镜及能谱分析

80 ℃下,在 10% 盐酸、10% 盐酸+8 g/L SO₄²⁻ 和 10% 盐酸+8 g/LPO₄³⁻ 的腐蚀环境中加入 0.1% 的曼尼希碱酸化缓蚀剂进行实验,将实验后所得的进行扫描电镜和能谱分析,实验结果见图 7 和表 3。

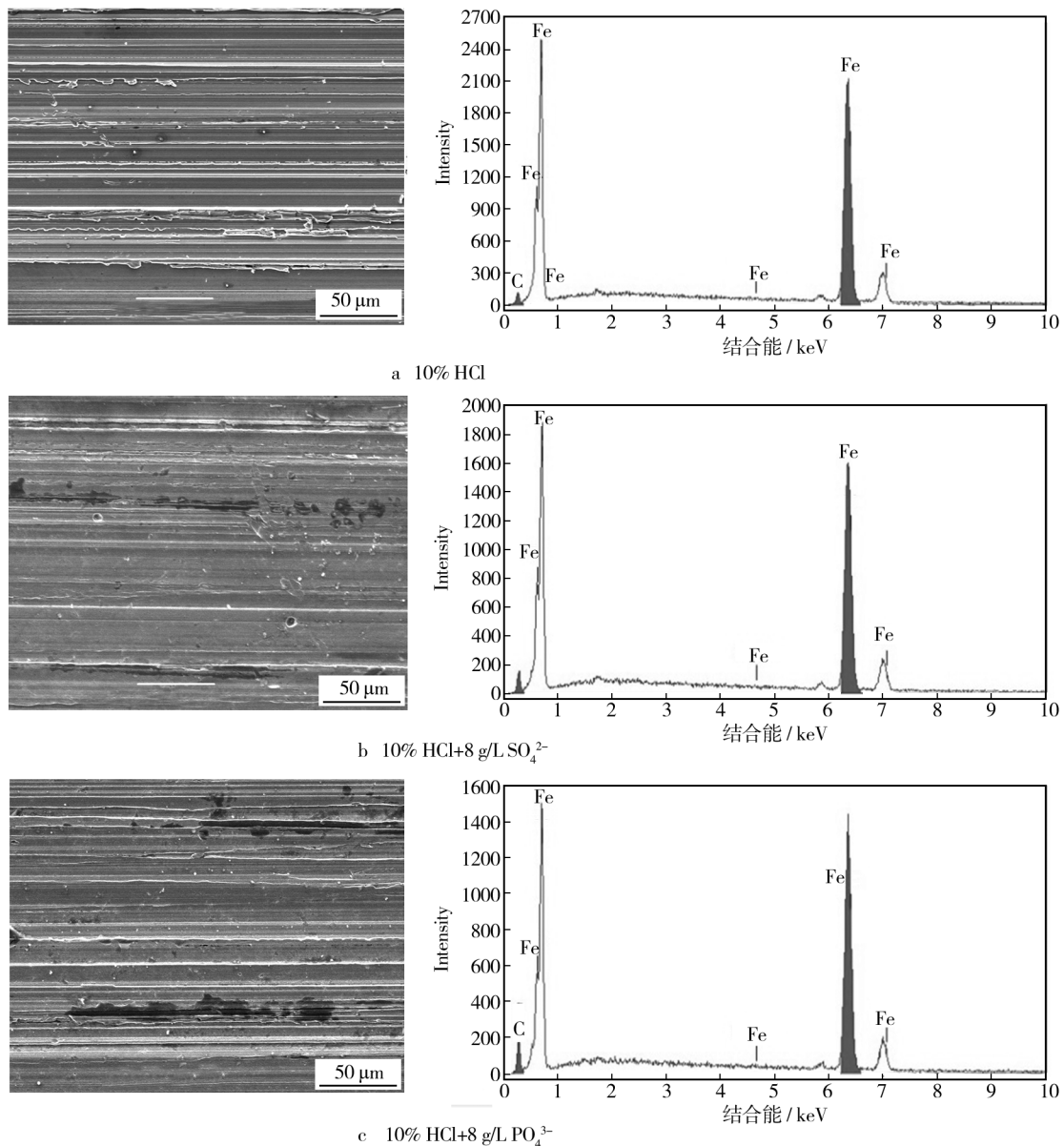


图7 不同缓蚀介质中 N80 钢片的电镜照片和能谱图

Fig.7 Electron micrographs and energy spectra of N80 slices in different corrosion inhibition media

表3 元素含量分析结果

Tab.3 The results of element content analysis

元素	元素的质量分数/%		
	10% HCl	10% HCl+8g/L SO_4^{2-}	10% HCl+8g/L PO_4^{3-}
C	6.85	9.68	3.63
Fe	93.15	90.32	96.37

图7a为在含有缓蚀剂的10%盐酸溶液腐蚀后N80碳钢的扫描电镜图,可清晰地观察到N80钢片打磨时留下的磨痕,腐蚀程度低,说明曼尼希碱酸化缓蚀剂能有效地抑制盐酸对碳钢的腐蚀;图7b为在

10% HCl+8 g/L SO_4^{2-} 的缓蚀介质中腐蚀后N80碳钢的扫描电镜图,可清晰地观察到N80碳钢表面的腐蚀情况较图7a腐蚀更严重,出现了较为明显的点蚀坑,说明 SO_4^{2-} 的加入对曼尼希碱缓蚀性能起到一定“抑制作用”;图7c为在10% HCl+8 g/L PO_4^{3-} 的缓蚀介质中腐蚀后的扫描电镜图,与图7a相比,N80碳钢表面的腐蚀并无较大差别。这表明, PO_4^{3-} 对缓蚀剂的缓蚀效果有一定的增强作用,其可在金属表面与Fe形成一层钝化膜,与缓蚀剂的吸附膜一并吸附在钢材表面,更好地阻止酸液与钢片的接触,从而达到缓蚀的效果;在含 SO_4^{2-} 的缓蚀介质中表面出现了明显的点蚀坑,钢片Fe含量稍有减小。 SO_4^{2-} 对缓蚀剂的缓蚀

效果有一定的破坏作用,其渗入缓蚀剂在钢材表面形成的吸附膜,破坏和侵蚀吸附膜,抑制了缓蚀剂的缓蚀效果,从而使金属局部表面出现点蚀坑。

3 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 对曼尼希碱酸化缓蚀剂的缓蚀机理

曼尼希碱缓蚀剂是一种吸附型缓蚀剂,利用缓蚀剂分子中电负性较大的 O, N 等元素的原子团以及含 π 键或大 π 键的原子团在金属表面的吸附作用,覆盖在金属表面使其与腐蚀介质隔离开来,达到缓蚀的效果。随 SO_4^{2-} 的加入,由于 S 电负性较大也会吸附在金属表面,削弱了缓蚀剂在金属表面形成的吸附膜的疏水性并且使吸附膜不再均匀致密;金属表面局部出现点蚀现象,破坏了缓蚀剂对 N80 钢片保护作用,使缓蚀剂的缓蚀性能在一定程度上变差。 PO_4^{3-} 的加入可与金属腐蚀时产生的 Fe^{3+} 共沉淀: $\text{PO}_4^{3-} + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{FePO}_4$, 形成一层致密的沉淀膜,吸附在阳极表面,抑制了阳极的溶解反应 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$, 由于沉淀膜电阻较大,能加大电阻极化,从而使腐蚀受到一定抑制。另外,沉淀膜的形成也使电极表面吸附的缓蚀膜更加致密,更好地阻止了酸液与 N80 钢片的接触,对缓蚀剂的缓蚀效果起到了一定的促进作用。

4 结论

工业盐酸中 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的存在,对曼尼希碱型盐酸酸化缓蚀剂的缓蚀性能产生一定的影响:

- 1) SO_4^{2-} 的加入抑制了曼尼希碱型盐酸酸化缓蚀剂的缓蚀效果,对缓蚀剂缓蚀性能有一定的抑制作用。
- 2) PO_4^{3-} 的加入促进了曼尼希碱型盐酸酸化缓蚀剂的缓蚀效果,对缓蚀剂缓蚀性能起一定的协同作用。

参考文献

- [1] 宋秦宁. 低渗透油藏酸化技术[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 95—97.
SONG Qin-ning. Acidizing Technique for Low Permeable Oilfield[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2013, 32(1): 95—97.
- [2] 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.
- [3] 吕宝强, 李向宁, 李建辉, 等. 我国重复酸化酸液体系的应用[J]. 油田化学, 2014, 31(1): 136—140.
LYU Bao-qiang, LI Xiang-ning, LI Jian-hui, et al. Application Situation of Reacidizing System in China[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(1): 136—140.
- [4] 张娟涛, 李谦定, 赵俊. 油气井酸化缓蚀剂研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(6): 593—597.
ZHANG Juan-tao, LI Qian-ding, ZHAO Jun. Research Progress of Acidizing Corrosion Inhibitors in Oil/Gas Well[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(6): 593—597.
- [5] 姜红金. 高温缓速酸解堵技术研究与应用[J]. 断块油气田, 2005, 12(4): 78—79.
JIANG Hong-jin. High Temperature Blockage Removal Technology of Reaction-postponed Rate and Its Field Application[J]. Fault-block Oil & Gasfield, 2005, 12(4): 78—79.
- [6] 王芷芳. 塔里木油田设备腐蚀状况[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2002, 19(1): 19—21.
WANG Zhi-fang. Corrosion of Equipment in Tarim Oil Field[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2002, 19(1): 19—21.
- [7] 谢飞, 吴明, 张越, 等. 辽宁油田注水管线结垢腐蚀原因分析及阻垢缓蚀剂应用试验[J]. 石油炼制与化工, 2011, 42(9): 92—95.
XIE Fei, WU Ming, ZHANG Yue, et al. Cause Analysis of Scaling-corrosion in Water Injection Line of Liaohe Oilfield and Inhibitor Application Trial[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(9): 92—95.
- [8] 李善建, 于洪江, 王京光. 一种曼尼希碱型盐酸酸化缓蚀剂的合成及缓蚀性能[J]. 油田化学, 2008, 25(2): 118—121.
LI Shan-jian, YU Hong-jiang, WANG Jing-guang. Synthesis and Performance Properties of Compounded Mannich Base Corrosion Inhibitor for Hydrochloric Acidizing Fluids[J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(2): 118—121.
- [9] 王京光, 于洪江, 李谦定. 一种曼尼希碱型盐酸酸化缓蚀剂的研制[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 77—79.
WANG Jing-guang, YU Hong-jiang, LI Qian-ding. Study and Development of a Mannich based Corrosion Inhibitor for Hydrochloric Acid Acidifying[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(3): 77—79.
- [10] 刘志辉, 王霞, 吴艺琛, 等. 曼尼希碱型酸化缓蚀剂研究进展[J]. 应用化工, 2014, 43(1): 148—155.

- 林师专学报(自然科学版),1998,19(3):62—64.
- HUANG Zhong-qiang. The Electrochemical Corrosion of Metals and Metal Electrochemical Protection[J]. Journal of Yulin Teachers College (Natural Science), 1998, 19(3): 62—64.
- [48] 刘海. 长输管道牺牲阳极保护的设计[J]. 石化技术, 1999, 6(2): 101—109.
- LIU Hai. Sacrificial Anode Protection of Long Distance Gas Transmission Pipeline Design[J]. Journal of Petrochemical Technology, 1999, 6(2): 101—109.
- [49] SCHMITT G, BOSCH C, PANKAKE U. Evaluation of Critical Flow Intersites for FILC in Sour Gas Production[J]. Corrosion, 1998, 46: 78—91.
- [50] 鲁亮, 李春福, 孙延安, 等. Ni-Fe-P 镀层在 H_2S/CO_2 腐蚀环境中的腐蚀电化学研究[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 42.
- LU Liang, LI Chun-fu, SUN Yan-an, et al. Study Corrosion Electrochemical of Ni-Fe-P Plating in H_2S/CO_2 Environment[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(1): 42.
- [51] 黄钰, 程西云, 彭美华. Zn-Al 伪合金涂层的耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 35—38.
- HUANG Jue, CHENG Xi-yun, PENG Mei-hua. Corrosion Resistance Properties of Arc Sprayed Zn-Al Pseudo-alloy Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 35—38.
- [52] 陈郁栋, 曾志翔, 彭叔森. 苯胺三聚体固化环氧树脂制备防腐涂层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 158—162.
- CHEN Yu-dong, ZENG Zhi-xiang, PENG Shu-sen. Preparation and Properties of Epoxy Resin Anticorrosive Coating Cured by Aniline Trimer[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 158—162.
- [53] 耿春雷, 顾军, 徐永模, 等. 油气田中 CO_2/H_2S 腐蚀与防护技术的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 121.
- GENG Chun-lei, GU Jun, XU Yong-mo, et al. Research Progress on CO_2/H_2S Corrosion and Protection Technique in Oil and Gas Fields[J]. Material Review, 2011, 25(1): 121.
- [54] 鞠虹, 章大海, 吴宝贵等. 含硫原油加工装备腐蚀防护措施研究[J]. 石油化工设备, 2010, 39(6): 52.
- JU Hong, ZHANG Da-hai, WU Bao-gui, et al. Protection Technology Research of Petroleum Processing Equipment Corrosion for Sulphur Crude Oil[J]. Petro-chemical Equipment, 2010, 39(6): 52.

(上接第 107 页)

- LIU Zhi-hui, WANG Xia, WU Yi-chen, et al. Research Progress of Mannich base Inhibitors for Acidification[J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(1): 148—155.
- [11] 唐囡, 孙成, 许进, 等. 硫酸根离子对混凝土中钢筋腐蚀影响研究[J]. 腐蚀研究, 2014, 28(6): 43—47.
- TANG Nan, SUN Cheng, XU Jin, et al. Effect of Sulfate Ions on Corrosion of Carbon Steel in Concretes[J]. Corrosion Research, 2014, 28(6): 43—47.
- [12] 安洋, 徐强, 吴子涛, 等. 模拟循环冷却水中几种离子对碳钢腐蚀的影响[J]. 电镀与精修, 2011, 33(4): 35—39.
- AN Yang, XU Qiang, WU Zi-tao, et al. The Influence of Several Important Ions in Circulating Cooling Water on Corrosion of Carbon Steel[J]. Plating & Finishing, 2011, 33(4): 35—39.
- [13] 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.
- [14] 李海娟, 刘志杰, 王家祥, 等. 铁离子对曼尼希碱型盐酸缓蚀剂(FHS-A)缓蚀性能的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(4): 103—106.
- LI Hai-juan, LIU Zhi-jie, WANG Jia-xiang, et al. Influence of Iron on the Inhibition Performance of Compounded Mannich base Hydrochloric Acid Corrosion Inhibitor FHS-A[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2013, 28(4): 103—106.
- [15] 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.
- [16] 王虎, 谢娟, 段明, 等. 酸化缓蚀剂曼尼希碱缓蚀机理的电化学研究[J]. 油田化学, 2010, 27(1): 19—22.
- WANG Hu, XIE Juan, DUAN Ming, et al. Electrochemical Investigation on Corrosion Inhibition Mechanism of Mechanism of Mannich Base in Hydrochloric Acid[J]. Oilfield Chemistry, 2010, 27(1): 19—22.