

炼油加工过程中氯离子与硫离子对 316L 不锈钢和 Monel 合金腐蚀的影响

孙亮¹, 侯艳宏¹, 杨席², 张志恒², 朱元强², 王虎³, 唐鋈磊²

(1. 中海油惠州炼油分公司, 广东 惠州 516086; 2. 西南石油大学 化学化工学院, 成都 610500;
3. 西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500)

摘要: 目的 研究常减压装置高温原油馏分及塔顶水相中氯离子、硫离子含量对 316L 不锈钢和 Monel 合金(镍基合金)腐蚀的影响。方法 通过腐蚀挂片实验, 获得 316L 不锈钢和 Monel 合金在含不同浓度氯离子和硫离子的水相、油相中的腐蚀速率变化规律。利用扫描电子显微镜, 研究 316L 和 Monel 合金表面腐蚀后的微观形貌, 探讨两种离子对 316L 不锈钢和 Monel 合金腐蚀的影响规律。结果 在酸值较高的脱后原油中, 316L 不锈钢和 Monel 合金的腐蚀速率分别为 0.0091, 0.0248 mm/a; 在酸值较低的常二段馏分中, 316L 不锈钢和 Monel 合金的腐蚀速率分别为 0.0078, 0.0031 mm/a。在常二段馏分中, 加入 600 mg/L 氯离子和 30 mg/L 硫化钠时, 316L 不锈钢和 Monel 合金的腐蚀速率分别为 0.1755, 0.1707 mm/a。在相同条件的脱后原油中, 316L 不锈钢的腐蚀速率为 0.0545 mm/a, Monel 合金的腐蚀速率为 0.1281 mm/a。结论 油相中氯离子含量较低时, 环烷酸腐蚀占主导因素; 而氯离子含量达到较高水平后, 氯离子对腐蚀的影响占主导作用。316L 不锈钢和 Monel 合金的腐蚀速率都随氯离子含量的增加而增加, 并且硫离子的存在对腐蚀也有一定的促进作用。在塔顶水相中, 氯离子和硫离子均对 Monel 合金腐蚀的影响不大。

关键词: 炼油; 316L 不锈钢; Monel 合金; 腐蚀; 氯离子; 硫离子

中图分类号: TG172; TE986 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)12-0041-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.007

Effect of Chlorine Ion and Sulfur Ion on Corrosion of 316L Stainless Steel and Monel Alloy in Oil Refining Process

SUN Liang¹, HOU Yan-hong¹, YANG Xi², ZHANG Zhi-heng²,
ZHU Yuan-qiang², WANG Hu³, TANG Jun-lei²

(1. CNOOC Huizhou Refinery, Huizhou 516086, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2015-11-07

Received: 2015-10-13; Revised: 2015-11-07

作者简介: 孙亮(1963—), 男, 江苏人, 高级工程师, 主要研究方向为防腐。

Biography: SUN Liang(1963—), Male, from Jiangsu, Senior engineer, Research focus: anti-corrosion.

通讯作者: 唐鋈磊(1983—), 男, 北京人, 博士, 副教授, 从事石油化工腐蚀与防护的科研与教学工作。

Corresponding author: TANG Jun-lei(1983—), Male, from Beijing, Ph. D., Associate professor, Research focus: petrochemical corrosion and protection.

ABSTRACT: **Objective** To investigate the influences of contents of chloride and sulfur ions on corrosion rates of 316L stainless steel and nickel-based alloy Monel in crude oil fractions and overhead aqueous phase of crude oil unit. **Methods** The corrosion rates of 316L stainless steel and Monel alloy in aqueous phase and oil phase containing different concentrations of chloride ions and sulfur ions were obtained by corrosion coupon experiment. SEM (scanning electron microscope) was used to observe the surface microstructure of corroded 316L and Monel alloys. The influence of two kinds of ions on the corrosion of 316L stainless steel and Monel alloy was discussed. **Results** The corrosion rates of 316L stainless steel and Monel alloy in highly acidic desalted crude oil were 0.0091 mm/a and 0.0248 mm/a, respectively. And in weak acidic second fraction, the corrosion rates were 0.0078 mm/a and 0.0031 mm/a, respectively. In second fraction, after addition of 600 mg/L of chlorine ion and 30 mg/L of sodium sulfide, the corrosion rates of 316L stainless steel and Monel alloy were 0.1755mm/a and 0.1707 mm/a, respectively. Meanwhile, in the de-salted crude oil with the same concentrations of chloride ions and sulfide ions, the corrosion rate of 316L stainless steel was 0.0545 mm/a and that of Monel alloy was 0.1281 mm/a. **Conclusion** The results indicated that the naphthenic acid corrosion was the dominant factor when there was little chloride in oil phase and the chloride corrosion turned into the major factor if the content of chloride in oil was at high levels. The corrosion rates of the 316L stainless and Monel alloy raised with the increase of chloride ion concentration in oil phase. Furthermore, the existence of sulfur ions could accelerate corrosion in oil phase. In contrast, chloride and sulfur ions did not have apparent impact on the corrosion of Monel alloy in aqueous phase.

KEY WORDS: oil refining; 316L stainless steel; Monel alloy; corrosion; chloride ions; sulfur ions

近年来,原油劣质化日益严重,突出的问题是原油酸值增高,密度变大,硫含量、重金属含量和残炭增多等,长期加工这些原油使得炼厂生产装置的腐蚀问题日益严重。常减压装置是炼油的龙头装置,直接承受着原油品质劣化带来的腐蚀压力。笔者经过调研后发现^[1-2],2000年后投入使用的炼化常压塔装置在高温区大量使用了316L不锈钢,对于塔顶系统则部分选用了Monel合金。在原油品质劣化的影响下,初期使用良好的316L不锈钢的腐蚀问题逐渐严重,例如,惠州炼化常压塔的减三线段燕尾槽集油箱盖板和挡板在2014年发生了严重的腐蚀穿孔,这很难用传统的高温环烷酸腐蚀机理解释。

316L不锈钢因为其良好的耐蚀能力,被广泛运用到炼油、化工、造纸、食品加工等领域,在不同的环境中,316L不锈钢主要的腐蚀类型包括晶间腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、点蚀等^[3-4]。Monel合金也称为Ni-Cu合金,在海水、盐酸、硫酸、磷酸等介质中有良好的耐蚀性^[5],是少数可耐氢氟酸和氟气腐蚀的金属,且在水相环境中很少发现孔蚀和应力腐蚀^[6]。在炼油工艺中,Monel合金多应用在塔顶冷凝区强HCl环境中,而高温油相中未见应用。研究其在高温油相环境中是否还能保持优异的耐蚀性,对于某些高温重腐蚀区的不锈钢材质升级具有较大的意义。

炼油过程中,影响钢材腐蚀的主要因素包括环烷酸含量、氯含量、硫含量等。一般认为,环烷酸腐蚀是最主要的因素,跟其化学结构组成、温度及原油总酸值有关^[7];Cl⁻离子对金属有较强的侵蚀作用,可破坏金属表面的钝化膜,进而造成局部腐蚀,最终导致点

蚀穿孔^[8-10];S本身带有较强的腐蚀性,含S物质的腐蚀作用由强到弱依次为单质硫>硫醇类>硫化氢>硫醚类>二硫化物或多硫化物>噻吩类^[11],在原油蒸馏过程中,高温S腐蚀往往伴随着环烷酸腐蚀同时出现^[12]。针对炼油加工过程中的腐蚀,现阶段的研究主要集中在环烷酸腐蚀或原油单一馏分腐蚀的规律上,多是在不同酸值条件下的模拟馏分中研究各种材料的腐蚀行为^[13-15],实际上仅仅考虑了环烷酸这一单一因素。笔者在研究中已经发现,油田化学剂会在炼油加工过程中分解并释放出无机氯离子。这充分表明在上游油田化学剂使用量越来越大的背景下,热分解所产生的氯离子、硫离子等无机离子对设备腐蚀的影响越来越不可忽略,然而还未见针对炼油过程中无机离子对腐蚀影响开展的研究。鉴于此,文中深入研究了氯离子、硫离子在常压塔高温油相以及塔顶水相中对316L不锈钢和Monel合金的腐蚀影响规律,揭示了油田化学剂在原油加工过程中的热分解可能导致的腐蚀问题,以及这两种典型钝化材料在该环境中的腐蚀行为。

1 实验

采用塔顶水相模拟液和惠炼现场油样,分别加入氯离子、硫离子进行模拟腐蚀实验,以研究这两种离子对材料腐蚀的影响。腐蚀试样为316L不锈钢与Monel合金,规格为40 mm×13 mm×2 mm,其主要化学成分见表1。每次腐蚀实验取3片试样,挂片时间为24 h。测量试样的表面积,称取腐蚀前后的质量,

表 1 316L 和 Monel 的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 316L and Monel

材料	质量分数/%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
316L	0.01	0.52	1.71	0.040	0.006	10.28	16.13	2.04	0.25	余量
Monel	0.13	0.14	0.78	0.009	0.010	64.3	0.02	0.02	32.5	1.96

利用公式(1)计算金属年腐蚀速率 v_t (mm/a) :

$$v_t = \frac{8.76}{\rho} \cdot \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中: ρ 为金属的密度, g/cm³; m_0 为金属腐蚀前的质量, g; m_1 为金属腐蚀后的质量, g; S 为金属暴露在腐蚀环境中的表面积, m²; t 为腐蚀时间, h。

水相模拟溶液为 1% (质量分数, 后同) HCl, 根据惠州炼化的检测数据^[16], Na₂S 的加入量定为 30 mg/L。分别测量在 1% HCl 模拟液中有、无 Na₂S 时的腐蚀速率; 在 1% HCl+30 mg/L Na₂S 模拟液中测定 Cl⁻ 质量浓度分别为 300, 600, 900 mg/L 时的试样腐蚀速率。

油相腐蚀介质为炼厂提供的脱后原油、常压塔二段馏分、常压塔一段馏分, 根据标准 GB/T 18609—2011 测得其酸值分别为 1.74, 0.94, 0.65 mg KOH/g。在各馏分中加入 30 mg/L Na₂S, 进行腐蚀测试; 在含有 Na₂S 的各馏分中测定 Cl⁻ 质量浓度分别为 200, 400, 600 mg/L 时的试样腐蚀速率。

2 结果与讨论

2.1 氯离子与硫离子在油相中对腐蚀的影响

2.1.1 油相中的氯离子腐蚀

如图 1 所示, 在各馏分中, 两种材料的腐蚀速率

大体上随着氯离子浓度增加而增加, 腐蚀速率由大至小依次为: 常二>常一>脱后原油。常二段馏分空白组中 316L 不锈钢试样的腐蚀速率非常低, 为 0.0078 mm/a, 加入氯离子和硫离子后的腐蚀速率陡增至 0.2289 mm/a, 氯离子浓度为 400 mg/L 时腐蚀速率达到最大值 0.3716 mm/a。常一段馏分中环烷酸浓度低, 并且温度低于 200 ℃, 因此环烷酸没有强烈的腐蚀作用, 此条件下氯离子浓度增大时, 两种钢材的腐蚀速率呈线性增长。

316L 和 Monel 在脱后原油中的腐蚀规律如图 1a 所示, Monel 的腐蚀速率始终大于 316L。一般认为, Monel 合金对氯离子的抵抗力大大强于 316L 不锈钢^[17-18]。脱后原油中的腐蚀数据一方面说明环烷酸腐蚀是原油在高温下的主要腐蚀形式, 氯离子浓度增加后可以和环烷酸产生协同腐蚀; 另一方面也说明 Monel 耐环烷酸腐蚀的性能不高, 在该环境中, 316L 的耐蚀性能好于 Monel, 这是本研究的重要发现。

各流程段的酸值滴定结果表明, 脱后原油、常二及常一馏分的酸值都大于 0.5 mg KOH/g。当酸值大于 0.5 mg KOH/g 且温度在 220 ℃ 以上时, 环烷酸开始具有强烈的腐蚀性^[13], 特别是在高温区, 氯腐蚀与硫腐蚀、环烷酸腐蚀产生协同作用, 形成复杂的腐蚀环境。在超过一定浓度的 H₂S-Cl⁻ 环境中, 金属钝化膜稳定性下降, 厚度减薄, 耐腐蚀性变差^[19]。结合油相中两种材料的腐蚀行为可以看出, 高温下, 环烷酸

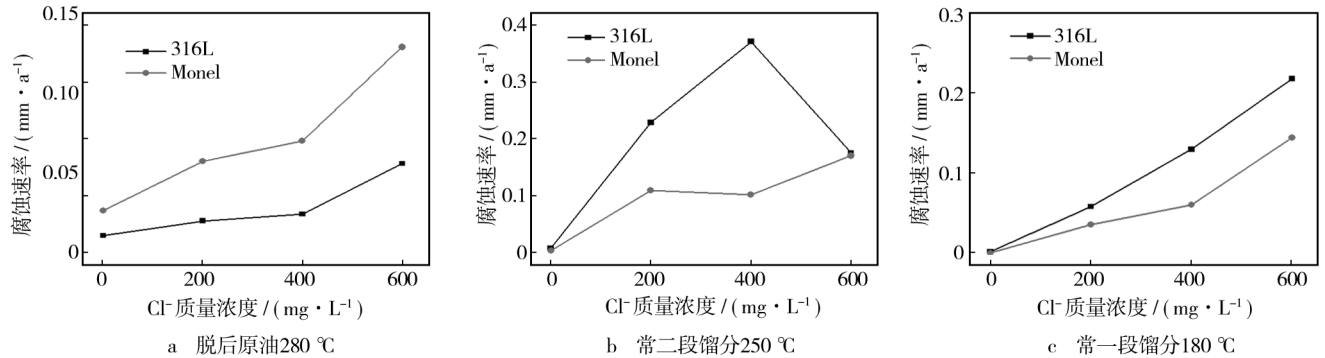


图 1 油相馏分中氯离子浓度对 316L 和 Monel 的腐蚀速率影响

Fig.1 Effect of chloride ion concentration in the oil phase fraction on the corrosion rates of Monel and 316L:
a) desalted crude oil 280 °C, b) second atmospheric fraction 250 °C, c) first atmospheric fraction 180 °C

腐蚀占主导地位,氯离子浓度变化对腐蚀速率的影响相对温度较低时要小很多,而随着温度的逐渐降低,氯离子对腐蚀的影响急剧增大。从整体来看,氯离子含量的增加会显著增大两种材料在各流程中的腐蚀速率,因此控制原油中氯的混入对后续防腐工作意义重大。

2.1.2 油相中的硫离子腐蚀

分别以脱后原油、常二段馏分、常一段馏分为基液,研究了各馏分中有无硫离子时 316L 和 Monel 的腐蚀情况。如图 2—4 所示,随着 Na_2S 的加入,316L 和 Monel 腐蚀速率都有所增加。脱后原油的硫含量本来就较高,因此加入 Na_2S 后,对硫含量的影响不大,在轻质组分蒸发过程中,留在轻质组分中的硫含量下降,这时外加硫离子就会对腐蚀速率产生更为显著的影响。从图 2—4 中也可以看出,在脱后原油中加入硫离子对 316L 和 Monel 的腐蚀加速作用没有在常二、常一中明显。除了馏分变化引起的差异,在三种馏分中,Monel 受 Na_2S 的影响均小于 316L。在脱后原油、常二馏分、常一馏分中加入硫离子后,316L 不

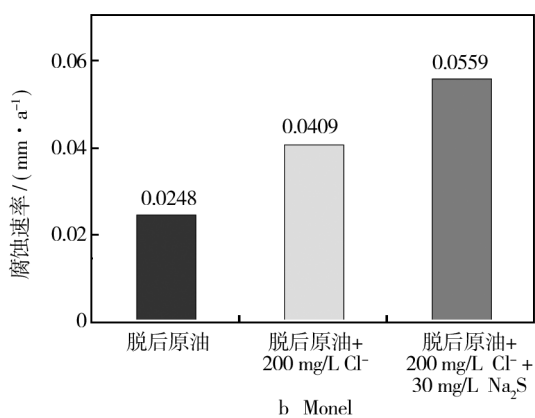
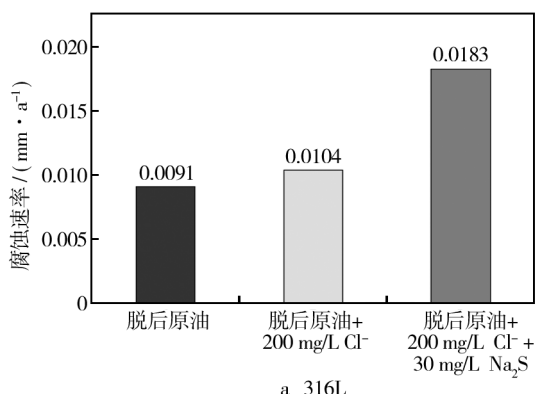


图 2 脱后原油(280 °C)中硫离子对 316L 和 Monel 的腐蚀速率影响

Fig. 2 Effects of sulfur ions in desalted crude oil (280 °C) on the corrosion of Monel and 316L

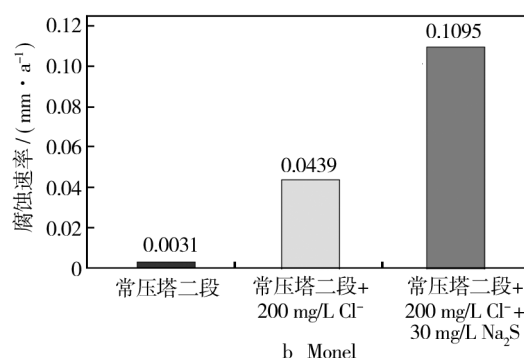
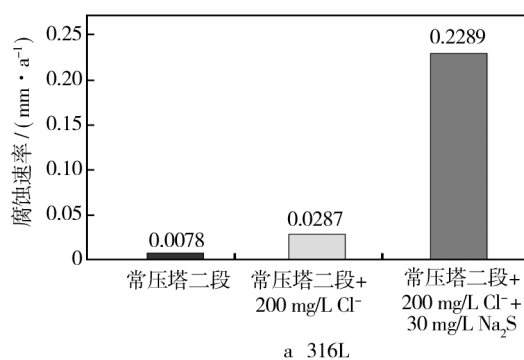


图 3 常二馏分(250 °C)中硫离子对 316L 和 Monel 的腐蚀速率影响

Fig. 3 Effects of sulfur ions in second atmospheric fraction (250 °C) on the corrosion of Monel and 316L

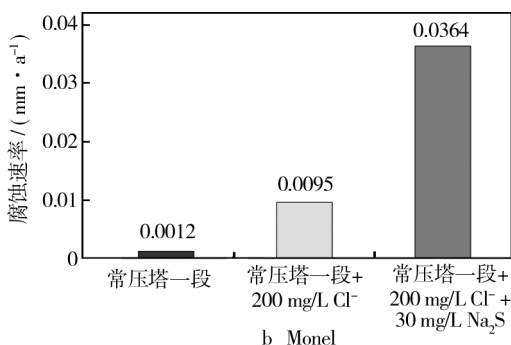
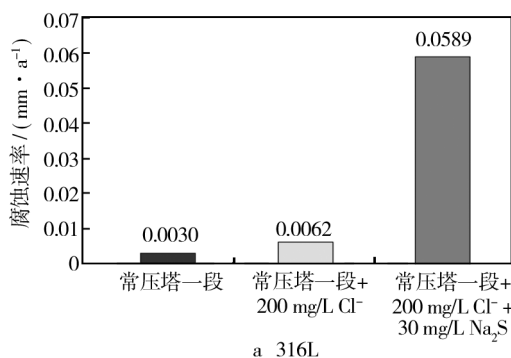


图 4 常一馏分(180 °C)中硫离子对 316L 和 Monel 的腐蚀速率影响

Fig. 4 Effects of sulfur ions in first atmospheric fraction (180 °C) on the corrosion of Monel and 316L

锈钢腐蚀速率分别增加 75.96% , 697.56% , 859.68% , 而 Monel 合金腐蚀速率仅分别增加 36.67% , 149.43% , 283.16% 。

在温度较高的脱后原油和常二段中时,由于温度达到了环烷酸的腐蚀温度^[20],因此环烷酸可直接腐蚀金属,也可破坏如 FeS 的保护膜而生成油溶性的环烷酸铁,引起二次腐蚀^[21]。前人的研究表明,硫化物对环烷酸腐蚀有着极为重要的影响^[22],环烷酸腐蚀和硫腐蚀同时进行时,二者之间的相互作用又十分复杂,在很多情况下产生剧烈的增强作用^[23]。在温度较低的常一段中时,由于温度降低为 180℃ 左右,在此温度下,环烷酸参与腐蚀的程度较小,总的腐蚀速率发生了下降,此时控制腐蚀的主要因素是氯离子浓度和硫离子浓度。

2.1.3 腐蚀形貌观测

从图 5 和图 6 可以看出,在所有的腐蚀介质中,Monel 均表面光洁、腐蚀均匀,而 316L 不锈钢则普遍表现出坑蚀、点蚀形貌。316L 奥氏体不锈钢易发生点蚀,特别是在高氯环境中^[24]。从图 5 可以看出,316L 表面有明显的点蚀坑存在,在常一馏分中出现了腐蚀膜剥落的现象(图 5c)。这种腐蚀膜剥落现象

往往与局部腐蚀相联系,因为不致密腐蚀膜的内部往往是点蚀高发区域^[25]。Monel 的腐蚀表面普遍存在很多小颗粒腐蚀产物,很显然,Monel 在油相中也发生了一定程度的腐蚀,但 Monel 抵御氯离子局部腐蚀的能力更强,大多数情况下钝化能力也更优异。

2.2 氯离子与硫离子在塔顶水相中对腐蚀的影响

常压塔塔顶腐蚀属于典型的 $\text{HCl} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$ 腐蚀体系,氯离子在塔顶露点温度附近的区域大量聚集,局部盐酸质量分数可高达 1% ~ 3%^[26],并含有 H_2S 。如果只考虑 H_2S 腐蚀,当其在水溶液中的浓度超过一定量时,可能与金属反应生成 FeS 保护膜,抑制腐蚀^[27]。但在含氯离子的酸性环境中,HCl 会溶解 FeS 保护膜,产生新的 H_2S ,从而加剧腐蚀。腐蚀反应式为^[28]:



在 90℃ 的 1% HCl 溶液中加入 Na_2S ,研究了塔顶水相中硫离子对腐蚀的加速作用,腐蚀测试结果如

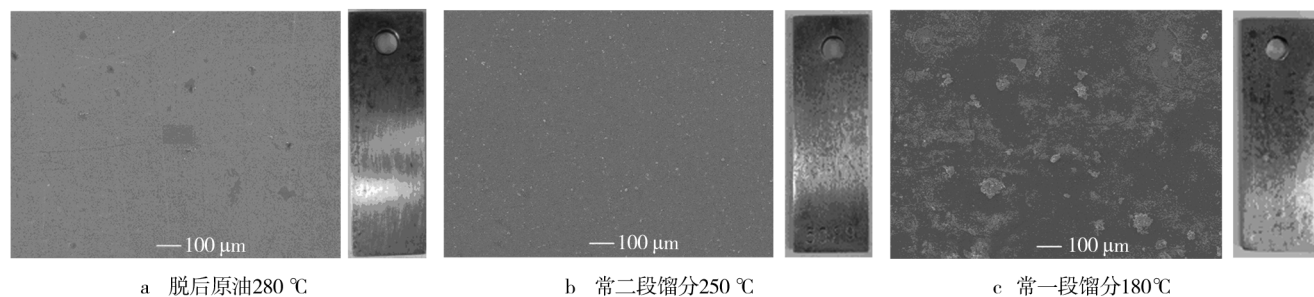


图 5 316L 在各油相馏分(400 mg/L Cl^- + 30 mg/L Na_2S)中的腐蚀微观和宏观形貌

Fig. 5 Corrosion morphologies of 316L in different oil phase fractions (400 mg/L Cl^- + 30 mg/L Na_2S):

a) desalted crude oil 280℃, b) second atmospheric fraction 250℃, c) first atmospheric fraction 180℃

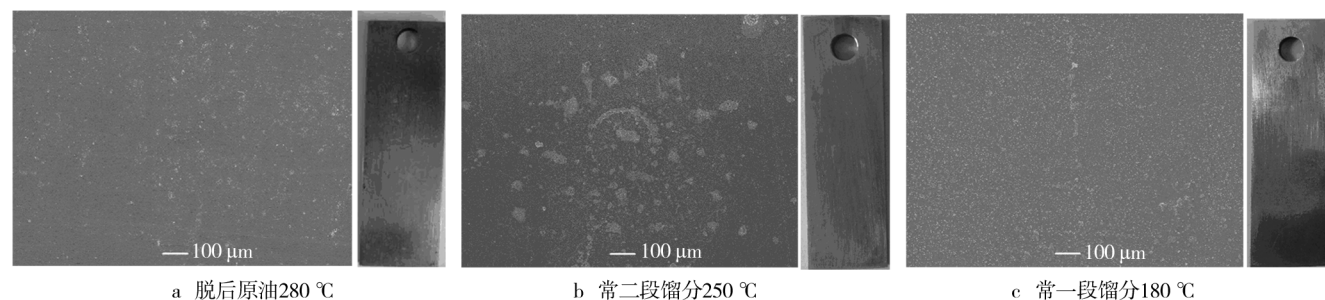


图 6 Monel 在各油相馏分(400 mg/L Cl^- + 30 mg/L Na_2S)中的腐蚀微观和宏观形貌

Fig. 6 Corrosion morphologies of Monel in different oil phase fractions (400 mg/L Cl^- + 30 mg/L Na_2S):

a) desalted crude oil 280℃, b) second atmospheric fraction 250℃, c) first atmospheric fraction 180℃

图7所示。在1% HCl 环境下,316L 的腐蚀速率较大,Monel 腐蚀速率较小;在同样的盐酸浓度下,加入 Na_2S (盐酸环境下水解产生 H_2S) 后,316L 腐蚀速率增加了 111.80%,Monel 腐蚀速率增加了 11.88%,说明在塔顶, $\text{HCl} + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$ 协同腐蚀对 316L 作用显著。图8显示了氯离子浓度变化的影响,当氯离子质量浓度为 300 mg/L 时,316L 腐蚀速率在 20 mm/a 左右;当氯离子质量浓度逐渐增加到 900 mg/L,腐蚀速率呈线性增长。从腐蚀形貌图(图9)可以发现,腐蚀

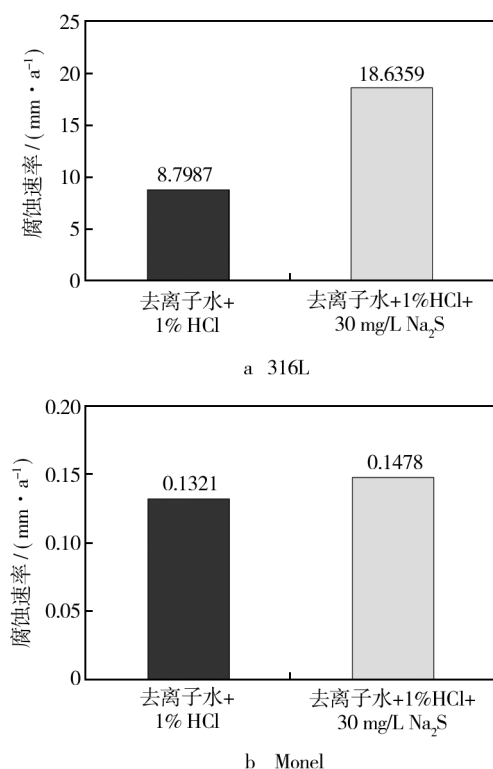


图7 水相中硫离子对 316L 和 Monel 腐蚀的影响

Fig. 7 Effects of sulfur ions in aqueous phase on the corrosion of Monel and 316L

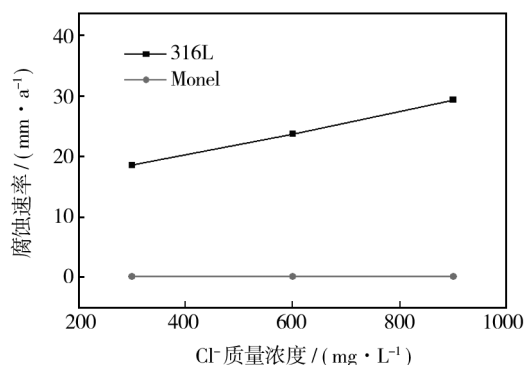


图8 水相中氯离子浓度对 316L 和 Monel 腐蚀速率的影响

Fig. 8 Effect of chloride ion concentration in the aqueous phase on the corrosion rates of Monel and 316L

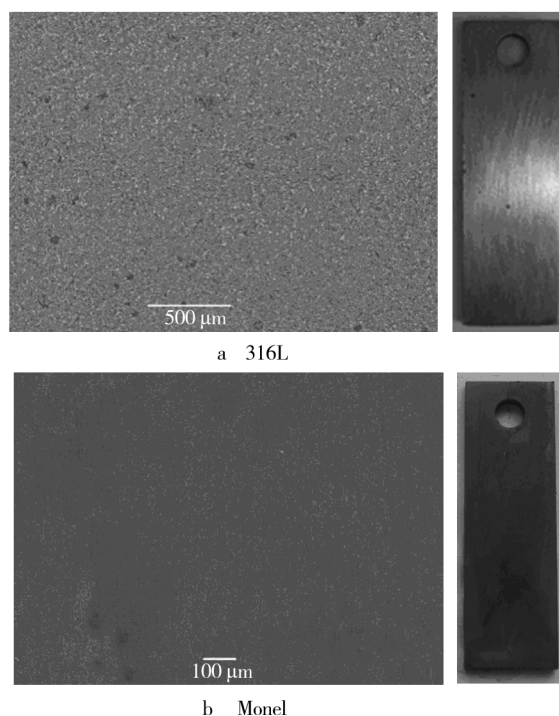


图9 两种金属在水相中的腐蚀形貌

Fig. 9 The corrosion morphologies of the two metals in the aqueous phase

产物均匀覆盖在 316L 表面,腐蚀产物膜局部有小孔,宏观照片也显示了明显的点蚀。Monel 腐蚀速率在氯离子质量浓度为 300 mg/L 时仅为 0.1478 mm/a,并且基本不随氯离子浓度增加而增加,SEM 图也显示 Monel 表面均匀平整,说明 Monel 耐氯离子和盐酸腐蚀的能力优异。

3 结论

1) 高温脱后原油中,316L 不锈钢的耐蚀性略好于 Monel 合金;高温常一、常二段馏分中,外加氯离子和硫离子对两种材料的腐蚀影响均非常显著。

2) 硫离子腐蚀对 316L 不锈钢的影响比对 Monel 更显著。在脱后原油、常二馏分、常一馏分、模拟塔顶水相中加入硫离子后,316L 不锈钢腐蚀速率分别增加 75.96%, 697.56%, 859.68%, 111.80%, 而 Monel 合金腐蚀速率仅增加 36.67%, 149.43%, 283.16%, 11.88%。

3) 在油相环境中,氯离子浓度变化对两种材料的腐蚀影响相差不大。在 1% HCl 溶液中,316L 不锈钢腐蚀受氯离子影响大于 Monel 合金,随着氯离子浓度增加,其腐蚀速率呈线性增长,而 Monel 合金腐蚀

速率基本不变。总体而言,在高氯环境中,316L更易发生局部腐蚀和点蚀。

参考文献

- [1] 麒麟,赵红,吴庆华. 炼制高硫、高酸值原油常压塔的设计[J]. 现代化工,2008,28(1):48—49.
QI Lin,ZHAO Hong,WU Qing-hua. Design of Atmospheric Tower for Refining Crude Oil with High Sulfur and High Acid Value[J]. Modern Chemical Industry,2008,28(1):48—49.
- [2] 陈洋. 常减压装置塔顶系统腐蚀与控制技术现状[J]. 全面腐蚀控制,2011,25(8):10—13.
CHEN Yang. Overview on Corrosion and Prevention of Distillation Units Overhead[J]. Total Corrosion Control,2011,25(8):10—13.
- [3] 邵惕洋,王斌,周冬梅. 316L 不锈钢在高含氯离子乙二醇中的腐蚀行为[J]. 表面技术,2011,40(4):45—47.
SHAO Ti-yang,WANG Bin,ZHOU Dong-mei. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steels in High Chloride Ion Ethylene Glycol[J]. Surface Technology,2011,40(4):45—47.
- [4] 张春瑞,吕宝军,于建华. 浅谈蒙乃尔合金(MONEL)焊接技术在海洋平台上的应用[C]//2012 中国钢结构行业大会论文集. 昆明:中国钢结构协会,2012:171—173.
ZHANG Chun-rui,LYU Bao-jun,YU Jian-hua. Discussion the Apply of Welding Technique of MONEL in Ocean Platform[C]//2012 China Steel Industry Conference Proceedings. Kunming:China Steel Construction Society,2012:171—173.
- [5] 范强强. 316L 奥氏体不锈钢的腐蚀行为[J]. 全面腐蚀控制,2013,27(11):39—43.
FAN Qiang-qiang. Corrosion Behaviors of 316L Austenitic Stainless Steel [J]. Overall Corrosion Control,2013,27(11):39—43.
- [6] 陈永刚,逢培榕,黄仁贵,等. Monel 不锈钢在海洋石油钢结构中的应用浅谈[C]//2012 中国钢结构行业大会论文集. 昆明:中国钢结构协会,2012:560—563.
CHEN Yong-gang,PANG Pei-rong,HUANG Ren-gui,et al. Discussion the Apply of Welding Technique of Monel in Offshore Oil Steel[C]//2012 China Steel Industry Conference Proceedings. Kunming:China Steel Construction Society,2012:560—563.
- [7] QU D R,ZHENG Y G,JING H M,et al. High Temperature Naphthenic Acid Corrosion and Sulphidic Corrosion of Q235 and 5Cr1/2Mo Steels in Synthetic Refining Media[J]. Corrosion Science,2006,48(8):1960—1985.
- [8] REFAEY S A M,TAHA F,EL-MALAK A M A. Corrosion and Inhibition of Stainless Steel Pitting Corrosion in Alkaline Medium and the Effect of Cl^- and Br^- Anions[J]. Applied Surface Science,2005,242(1/2):114—120.
- [9] YANG S,MACDONALD D D. Theoretical and Experimental Studies of the Pitting of Type 316L Stainless Steel in Borate Buffer Solution Containing Nitrate Ion[J]. Electrochimica Acta,2007,52(5):1871—1879.
- [10] 贾静焕,刘智勇,杜翠薇,等. 316L 不锈钢在高 pH 碱性硫化物环境中的应力腐蚀行为[J]. 表面技术,2015,44(3):36—40.
JIA Jing-huan,LIU Zhi-yong,DU Cui-wei. Stress Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in High-pH Alkaline Sulphide Solution[J]. Surface Technology,2015,44(3):36—40.
- [11] 张其耀. 原油脱盐蒸馏防腐[M]. 北京:中国石化出版社,1992.
ZHANG Qi-yao. Anticorrosion of Distillation of Crude Oil [M]. Beijing:China Petrochemical Press,1992.
- [12] 黄本生,桑东恒,江仲英,等. 高温下环烷酸与硫耦合腐蚀实验研究[J]. 材料工程,2011,9(9):39—44.
HUANG Ben-sheng,SANG Dong-heng,JIANG Zhong-ying,et al. Coupled Erosive Behavior of Naphthenic Acid and Sulfur at High Temperature[J]. Materials Engineering,2011,9(9):39—44.
- [13] 周建龙,李晓刚,程学群,等. 高温环烷酸腐蚀机理与控制方法研究进展[J]. 腐蚀与防护,2009,30(1):1—6.
ZHOU Jian-long,LI Xiao-gang,CHENG Xue-qun,et al. Progress in Research on Mechanisms and Controlling of Naphthenic Acid Corrosion at High Temperatures[J]. Corrosion and Protection,2009,30(1):1—6.
- [14] 李建宽,刘智勇,毛建英,等. 2 种钢在高温高浓度环烷酸中的腐蚀行为与规律[J]. 材料保护,2014,47(5):30—33.
LI Jian-kuan,LIU Zhi-yong,MAO Jian-ying,et al. 2 Kinds of Steel Corrosion Behavior and the Rule at High Temperature and High Concentration of Naphthenic Acid[J]. Materials Protection,2014,47(5):30—33.
- [15] 董晓焕,姜毅,赵国仙. 四种常用钢材耐环烷酸腐蚀性能研究[J]. 石油化工腐蚀与防护,2004,21(2):1—4.
DONG Xiao-huan,JIANG Yi,ZHANG Guo-xian. Study on Naphthenic Acid Corrosion Resistance of Four Steel Materials[J]. Petrochemical Corrosion and Protection,2004,21(2):1—4.
- [16] 侯艳宏,郑明光,孙亮. 加工海洋高酸原油常压蒸馏塔顶系统的腐蚀防护[J]. 石油化工腐蚀与防护,2012,29(6):26—30.
HOU Yan-hong,ZHENG Ming-guang,SUN Liang. Corrosion Protection of the Top System of the Atmospheric Distillation

- Tower on High Acid Crude Oil Processing[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2012, 29(6): 26—30.
- [17] 孙飞龙, 卢琳, 李晓刚, 等. N6 和 Monel400 镍合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 32(2): 165—170.
- SUN Fei-long, LU Lin, LI Xiao-gang, et al. Corrosion Behavior of N6 and Monel400 Nickel Alloy in Deep Sea Environment of South China Sea[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 32(2): 165—170.
- [18] 马云霖. 不同浓度 NaCl、NaS · 9H₂O 溶液对 316L 不锈钢电化学性能影响[J]. 石油化工设备, 2014, 42(2): 5—9.
- MA Yun-lin. Effect of Different Concentration of NaCl, NaS · 9H₂O Solution on the Electrochemical Performance of 316L [J]. Petro-chemical Equipment, 2014, 42(2): 5—9.
- [19] 丁金慧, 路民旭, 杨萍, 等. 316L 奥氏体不锈钢在高浓度 H₂S-Cl⁻ 环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(2): 96—99.
- DING Jin-hui, LU Min-xu, YANG Ping, et al. Corrosion Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel in High Concentration H₂S-Cl⁻ Environment [J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(2): 96—99.
- [20] 曹玉亭, 申海平. 石油加工中的环烷酸腐蚀及其控制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(1): 45—48.
- CAO Yu-ting, SHEN Hai-ping. Corrosion of Naphthenic Acid and Its Control in Petrochemical Processing[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(1): 45—48.
- [21] 雷良才. 石油加工中的环烷酸腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(7): 287—289.
- LEI Liang-cai. Naphthenic Acid Corrosion in Petroleum Processing[J]. Corrosion and Protection, 2001, 22(7): 287—289.
- [22] 向长军, 张浩, 邓乃文, 等. 316L 复合板减压塔腐蚀穿孔原因分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2014, 31(3): 60—64.
- XIANG Chang-jun, ZHANG Hao, DENG Nai-wen, et al. Cause Analysis of Corrosion Perforation of 316L Composite Plate in Vacuum Tower [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2014, 31(3): 60—64.
- [23] 刘娜娜. 高酸高硫原油的腐蚀性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.
- LIU Na-na. Study on the Corrosivity of Crude Oil with High Acid Number and High-sulfur Crude oil [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [24] 张金钟, 谢俊峰, 宋文文, 等. Cl⁻ 浓度对 316L 不锈钢点蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 30(1): 71—73.
- ZHANG Jin-zhong, XIE Jun-feng, SONG Wen-wen, et al. Effect of Cl⁻ Concentration on Pitting Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel [J]. Corrosion and Corrosion Protection, 2012, 30(1): 71—73.
- [25] 马李洋, 丁毅, 马立群, 等. 316L 不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 39—41.
- MA Li-yang, DING Yi, MA Li-qun, et al. Study on the Citric Acid Pssivation and the Pitting Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2007, 36(2): 39—41.
- [26] 王琨, 翟成钢, 倪岩, 等. 低温缓蚀剂在常减压装置的应用[J]. 化工科技, 2008, 16(4): 44—47.
- WANG Kun, ZHAI Cheng-gang, NI Yan, et al. Application of Low Temperature Corrosion Inhibitor in Constant Pressure Relief Device [J]. Chemical Technology, 2008, 16(4): 44—47.
- [27] OMAR Yépez. Influence of Different Sulfur Compounds on Corrosion due to Naphthenic Acid [J]. Fuel, 2005, 84(1): 97—104.
- [28] 唐怀清, 党海平, 余成武, 等. 常压塔顶的腐蚀情况及防护措施[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2001, 18(3): 12—13.
- TANG Huai-qing, DANG Hai-ping, YU Cheng-wu, et al. Corrosion and Protection Measures of Atmospheric Tower [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2001, 18(3): 12—13.