

流速对 L360 管线钢在 H_2S/CO_2 环境中 腐蚀行为的影响

王霞, 唐佳, 陈玉祥, 任帅飞, 王辉

(西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500)

摘要: 目的 为选取合适的流速来输送油气, 降低流速对管线钢腐蚀造成的危害。方法 以 L360 管线钢为实验用钢, 流速 (0、3、5 m/s) 为变量, 利用高压釜研究 L360 钢在含 Cl^- 的 H_2S/CO_2 酸性环境中的腐蚀行为, 采用极化曲线及交流阻抗研究 L360 钢的腐蚀电化学行为, 利用 SEM、EDS 分析腐蚀后试样的微观形貌、结构特征以及腐蚀产物成分。结果 失重法测定 L360 钢的腐蚀速率时, 在实验条件完全相同的情况下, 流速为 5 m/s 时的腐蚀速率 (0.4824 mm/a) 大于 0 m/s 时的腐蚀速率 (0.3696 mm/a)。电化学测试中, 3 种状态对应的实验条件完全相同, 可以发现流速为 3 m/s 时钢被腐蚀的难易程度位于 0 m/s 和 5 m/s 之间。随着流速的增加, 试样表面腐蚀产物膜的破裂程度加剧。腐蚀产物以 Fe 的硫化物为主, 流速为 0 m/s 时, 有少量 $FeCO_3$ 和 FeC_3 生成, 流速为 3 m/s 时形成了四方硫铁矿和硫复铁矿晶体。随着流速从 0 m/s 增加到 5 m/s, 试样的腐蚀电位负移, 腐蚀电流密度增大, 在 5 m/s 时的腐蚀电位最负, 此时自腐蚀电流密度最大, 容抗弧半径最小, 最易被腐蚀。结论 结合腐蚀失重实验和电化学实验, 发现流速在 0~5 m/s 范围内, 流速越小, 对 L360 管线钢造成的腐蚀作用越小, 在不影响油气正常输送的情况下, 尽可能选取小的流速, 以保证管线钢的安全使用, 提高管线钢的使用寿命。

关键词: L360 钢; 流速; H_2S/CO_2 ; 腐蚀失重; 电化学; SEM/EDS 分析

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0157-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.025

Effect of Flow Velocity on Corrosion Behavior of L360 Pipeline Steel in H_2S/CO_2 Environment

WANG Xia, TANG Jia, CHEN Yu-xiang, REN Shuai-fei, WANG Hui

(School of Material Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: The work aims to select appropriate flow velocity for oil and gas transmission, and reduce harm of flow velocity to corrosion of pipeline steel. With L360 steel as experimental steel and flow velocity as variable, corrosion behavior of the L360 steel in H_2S/CO_2 acidic environment containing Cl^- was investigated with autoclave, corrosion electrochemical behavior of the L360 steel was studied based upon polarization curves and AC impedance, microstructure, structural characteristics and corrosion product constituents of the sample were analyzed with SEM and EDS. Corrosion rate of the L360 steel was determined in weight-loss method. Provided experiment conditions were identical, corrosion rate at flow velocity of 5 m/s (0.4824 mm/a) was higher than that at 0 m/s (0.3696 mm/a). In electrochemical tests, experimental conditions corresponding to 3 states

收稿日期: 2017-07-28; 修订日期: 2017-09-04

Received: 2017-07-28; Revised: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174171)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51174171)

作者简介: 王霞 (1966—), 女, 教授, 主要研究方向为油气田材料防腐与检测。

Biography: WANG Xia (1966—), Female, Professor, Research focus: corrosion prevention and inspection of oil and gas field materials.

were identical, the corrosion degree of steel ranged from 0 m/s to 5 m/s at the flow velocity of 3 m/s. As the flow velocity increased, the corrosion product film was increasingly fractured on the surface of the sample. The main corrosion product was FeS. At the flow velocity of 0 m/s, a small amount of FeCO_3 and FeC_3 was generated, and at the flow velocity of 3 m/s, tetragonal iron and greigite were generated. As the flow velocity increased from 0 m/s to 5 m/s, the corrosion potential shifted negatively and corrosion current density increased. At the flow velocity of 5 m/s, the corrosion potential was the most negative, self-corrosion current density was the maximum, radius of capacitive reactance arc was the minimum, and the steel was most susceptible to corrosion. According to corrosion weight loss experiment and electrochemical experiment, as flow rate ranges within 0~5 m/s, the lower the flow velocity is, the less corrosive effect on L360 pipeline steel will be. In order to ensure safe use of pipeline steel and improve its service life, low flow velocity should be selected as far as possible provided that normal transmission of oil and gas is not affected.

KEY WORDS: L360 steel; flow velocity; $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$; corrosion weight loss; electrochemistry; SEM/EDS analysis

在天然气输送过程中,因管壁与周围环境发生热交换,导致内部流体温度降低,析出凝析液。随着开采程度的加深,气田出水,产生水合物^[1-3],加速管道的腐蚀过程。凝析液的存在会降低气体的有效输送截面积,增大输送阻力,降低管线输送效率,导致局部堵塞事故^[4-7]发生,同时 Cl^- 、 CO_2 和硫化物等杂质易溶于水,溶解在水中会形成酸性环境,加速管道内部的腐蚀进程^[8-10]。

以 H_2S 体积分数超过 8% 的罗家寨气田为例,罗家寨气田^[11-15]处于地形复杂多样,山、丘、坝皆有的丘陵地带,地面集输系统的建设和运作面临诸多困难,管内腐蚀现象严重,而且流速不同对管道造成的腐蚀程度不同。为研究输气过程中流速对管道内部腐蚀行为的影响,本文利用高压釜来模拟输送过程,对比研究 L360 钢在不同流速下的腐蚀行为,以期对输气管道的腐蚀现象采取有效的预防措施,确保管道正常运行。L360 钢为油气输送常用普通碳钢,对

酸性环境下的腐蚀行为极其敏感,适用于研究对比不同状态的腐蚀介质对管道腐蚀行为的影响。

1 试样制备及实验方法

1.1 试样制备及腐蚀介质的选用

试验选用油气输送常用 L360 管线钢,化学成分如表 1 所示。试样加工尺寸为 30 mm×15 mm×3 mm,用于腐蚀失重试验和电化学试验。以罗家寨气田为研究背景,选取腐蚀介质为 20 000 mg/L Cl^- 的 NaCl 溶液,试验条件如表 2 所示。

表 1 L360 钢主要化学成分
Tab.1 Chemical composition of L360 steel

wt%						
C	Mn	Si	P	S	Ti、V、Nb	Fe
0.25	1.25	0.32	0.025	0.015	≤0.15	Bal.

表 2 试验条件
Tab.2 Test conditions

Process parameters	Total pressure/MPa	Partial pressure of CO_2 /MPa	Partial pressure of H_2S /MPa	Temperature/℃	Current velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Chloride ion concentration ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Experimental time/h
Condition 1	10	1	1.5	40	0	20000	168
Condition 2	10	1	1.5	40	3	20000	168
Condition 3	10	1	1.5	40	5	20000	168

注:(1)压强总共为 10 MPa, CO_2 和 H_2S 共 2.5 MPa, 剩余 7.5 MPa 的压强由甲烷气体补足, 利用空气压缩机向反应釜里注入甲烷气体, 反应釜外的压力表可监测反应釜内气压的变化;(2)流速的设置由釜内循环系统完成, 主要保证长宽面的流速达到设置要求, 且保证腐蚀介质与试样六个面均有接触。

1.2 实验方法

1.2.1 腐蚀失重实验

腐蚀失重实验在高压釜内进行, 先将空釜体用氮气除氧 30 min, 配制的地层水用氮气除氧 4~6 h, 再装入地层水和试样, 密封釜体后继续用氮气除氧 30 min, 然后升温到指定温度。先通入 H_2S 至预定分

压, 再通入 CO_2 至预定分压, 最后再注入甲烷气体补足压强。

实验前将试样用砂纸打磨, 去除划痕并抛光, 使用丙酮除油、乙醇脱水, 晾干后测量并记录尺寸和质量。实验结束后, 用酸性去膜液除去试样表面的腐蚀产物, 丙酮去油, 置于干燥皿中干燥 24 h 后取出试样, 进行称量并计算腐蚀失重速率。均匀腐蚀速率按

式 (1) 计算:

$$R_{\text{corr}} = 8.76 \times 10^4 \times (m - m_t) / (S_1 \times \rho \times t) \quad (1)$$

式中: R_{corr} 为均匀腐蚀速率 (mm/a); m 为试验前的试片质量 (g); m_t 为试验后的试片质量 (g); S_1 为试片的总面积 (cm²); ρ 为试片材料的密度 (g/cm³); t 为试验时间 (h)。

1.2.2 电化学测试

电化学实验于含饱和 H₂S、CO₂ 和 20 000 mg/L Cl⁻ 的 NaCl 溶液中, 在常压、40 ℃ 条件下进行。使用 CS310 型电化学工作站, 采用三电极体系: L360 钢为工作电极, Ag/AgCl 电极为参比电极, 213 型铂电极为辅助电极。动电位极化曲线测试电位为 -150 ~ 300 mV, 扫描速度为 0.5 mV/s。交流阻抗谱测试频率为 10 mHz~10 kHz, 正弦波交流激励信号幅值为 ±10 mV, 测试前先依次通入 H₂S、CO₂ 至饱和状态, 再开始测试, 测得数据用 Zview 软件拟合处理。

在制备工作电极时, 试样的工作面积为 0.7243 cm², 非工作面用环氧树脂封装, 并在室温下静置 24 h, 使其固化。测试前用砂纸将工作面打磨至镜面, 然后用无水乙醇擦拭, 冷风吹干后置入测试体系。

1.2.3 腐蚀试样表面分析

失重实验结束后, 取出用于表面分析的腐蚀试样, 用乙醇清洗, 干燥后置于干燥皿中。利用电子扫描显微镜 (J-SM25800) 观察腐蚀后的表面形貌, 采用能谱仪分析腐蚀产物膜的成分。

2 结果及分析

2.1 腐蚀试样宏观形貌分析

图 1 为 L360 钢在 3 种状态下腐蚀 168 h 后的表面形貌。可以看出, 试样表面均产生大量腐蚀产物膜, 呈深黑色, 质地松软。状态 1 中, 试样表面生成的腐蚀产物膜未出现脱落现象, 能对基体起到一定的保护作用; 状态 2 中, 试样表面腐蚀产物膜大面积脱落, 基体重新暴露于腐蚀介质中, 侵蚀性离子与基体再次接触, 造成再次腐蚀, 膜对基体的保护作用差; 状态 3 中, 试样表面腐蚀产物膜部分脱落, 但脱落程度小于状态 2, 膜对基体的保护作用弱。由图 1 可以看出, 流速的增加显著加速了 L360 钢的腐蚀进度。

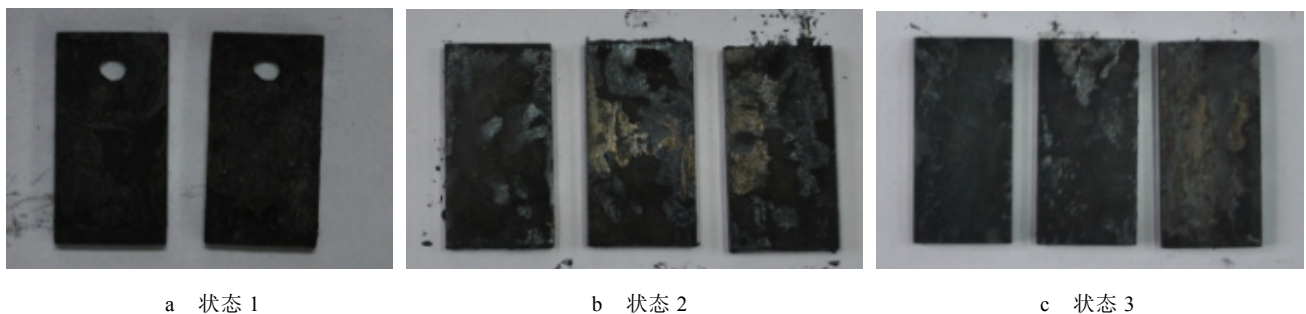


图 1 试样表面腐蚀形貌

Fig.1 Corrosion morphology of sample: (a) condition 1, (b) condition 2, (c) condition 3

2.2 腐蚀速率

图 2 为试样在不同流速下的腐蚀速率对比情况。可以发现, 在 0~5 m/s 范围内, 随着流速的增加, 腐蚀速率先增大后减少, 0 m/s 时的腐蚀速率为 0.3696 mm/a, 5 m/s 时的腐蚀速率增加到 0.4824 mm/a。腐蚀速率的增加是由于流速增加, 一方面加强了对产物膜的剪切作用和冲刷作用, 流动的溶液使外层腐蚀产物膜松动, 当内外两层腐蚀产物膜间的附着力小于流体的剪切力时, 就发生剥离、脱落现象, 加速腐蚀产物膜的更新, 使试样表面的腐蚀更严重^[16-17]; 另一方面加速了腐蚀介质的流动性和传质进程, 促进腐蚀介质均匀分布在溶液中, 同时加快腐蚀产物膜在溶液中的溶解, 使腐蚀加剧。

从图 2 可以发现, 在流速为 3 m/s 时, 腐蚀速率为 0.6383 mm/a, 大于流速为 5 m/s 时的腐蚀速率。这

一反常现象的发生, 是由于在该腐蚀失重实验操作过程中加入的溶液体积比其他状态中加入的体积多了三分之一, 导致试验条件变得更苛刻, 对管道的腐蚀也更严重, 这也解释说明了图 1 (腐蚀试样对照图) 中状态 2 试样表面腐蚀产物膜脱落情况比状态 3 更严重的原因。

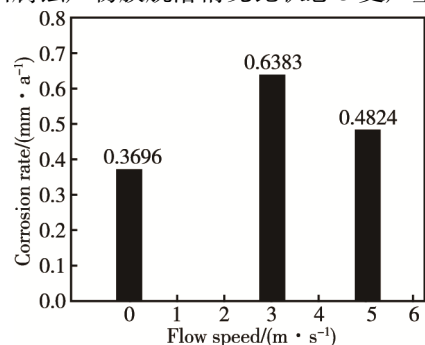


图 2 不同状态下 L360 钢的腐蚀速率

Fig.2 Corrosion rate of L360 steel in different states

2.3 表面微观形貌与成分分析

2.3.1 状态 1 中 L360 钢腐蚀产物分析

图 3 为 L360 钢在状态 1 中腐蚀后的微观形貌,可以看出试样表面形成了很厚的腐蚀产物层,并出现裂缝。这是由于溶液中存在强侵蚀性离子,能穿过腐蚀产物层,进入到基材表面进行反应生成产物膜,随着内部腐蚀产物不断地产生,对外层腐蚀产物的作用力不断增加,最终超过外部产物膜承受的最大应力,导致外部产物膜开裂,形成裂缝,裂缝的存在为下一步形成新的腐蚀产物提供扩散和运移通道,使腐蚀程度加深。裂缝间还出现腐蚀产物堆积现象,因产物膜自身结构差异及附着力大小不同等原因,局部区域还出现风化和剥落现象。

图 4 为试样腐蚀后的能谱图,分析结果如表 3,分析发现腐蚀后产物膜的组成元素为 Fe、S、C、O,腐蚀产物主要由 FeS 和少量 FeCO_3 、 FeC_3 构成。腐蚀产物层分为外部和内部,内部 S 含量最高,腐蚀产物以 FeS 为主,这说明腐蚀介质能穿过腐蚀产物膜继续腐蚀基体,产生新的腐蚀产物并逐步向外扩散运移。

2.3.2 状态 2 中 L360 钢腐蚀产物分析

图 5 为试样在状态 2 中腐蚀后的微观形貌。由图 5a 所示,试样表面有大量絮状物质堆积在一起,疏松且多空隙,厚度不均匀,膜上无裂痕,存在小的产物平台、平面。由图 5b 可知,表面存在不同晶型的腐蚀产物:片状、整体性好的大块晶体是四方硫铁 (Mackinawite),正方体、小颗粒状的晶体是硫复铁矿 (Greigite, 化学式 $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{S}_4$)。图 6 为试样腐蚀后的能谱图,分析结果如表 4,试样表面腐蚀产

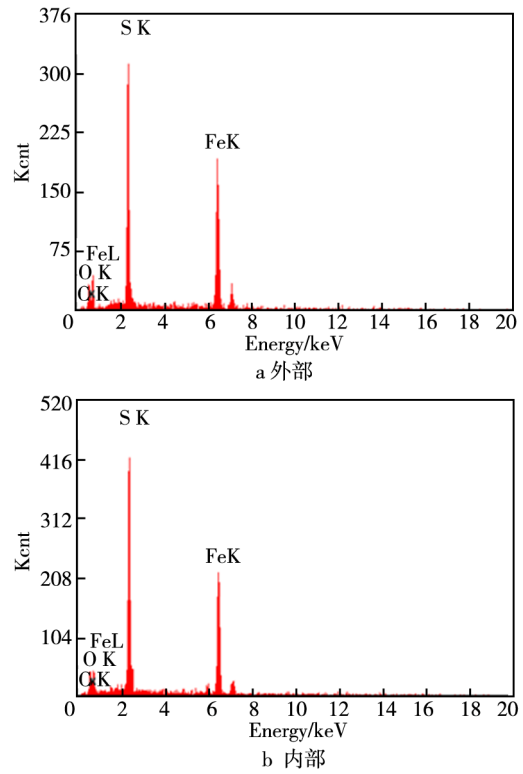


图 4 状态 1 中 L360 钢能谱图

Fig.4 Energy spectrum of L360 steel in state 1

表 3 状态 1 中 L360 钢 EDS 能谱分析结果
Tab.3 EDS energy spectrum analysis results of L360 steel in state 1

Selected area	wt%			
	C	O	S	Fe
External	0.30	0.56	08.6	90.54
Inside	0.31	0.62	10.75	88.32

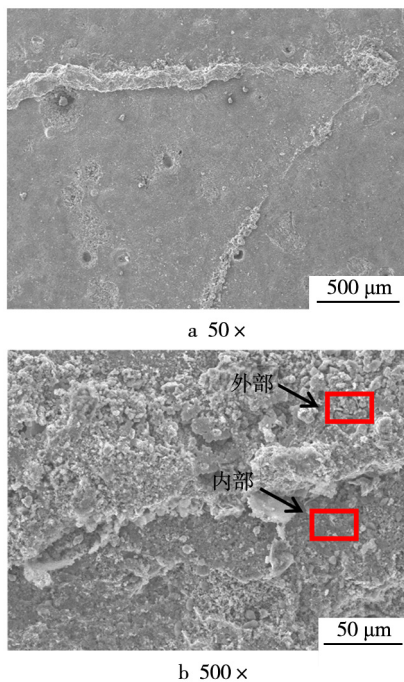


图 3 状态 1 中 L360 钢腐蚀微观形貌
Fig.3 Corrosion microstructure of L360 steel in state 1

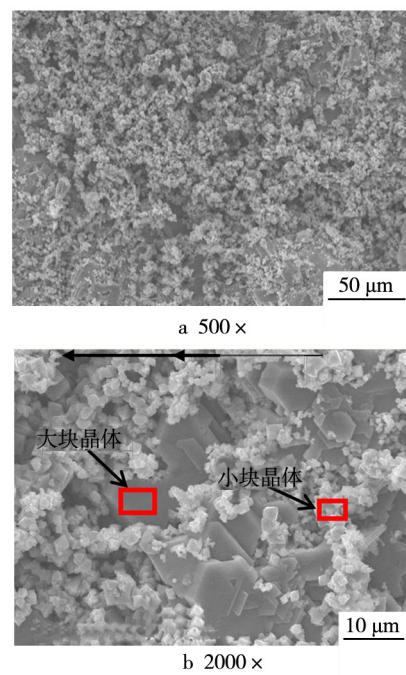


图 5 状态 2 中 L360 钢腐蚀微观形貌
Fig.5 Corrosion microstructure of L360 in state 2

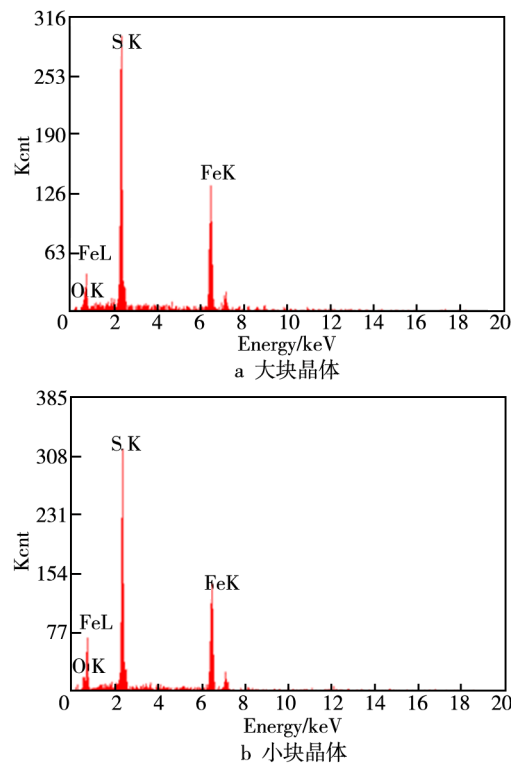


图 6 状态 2 中 L360 钢的腐蚀能谱图
Fig.6 Energy spectrum of L360 in state 2: (a) bulk crystal, (b) small crystal

表 4 状态 2 下 L360 的 EDS 能谱分析结果
Tab.4 EDS analysis results of L360 in state 2

Selected area	wt%		
	O	S	Fe
Bulk crystals	0.12	11.60	88.29
Small crystal	0.36	11.53	80.51

物中的大块晶体和小块晶体的化学成分基本一致，区别在于两者是不同晶型的 FeS 化合物。

2.3.3 状态 3 中 L360 腐蚀产物分析

图 7 为 L360 在状态 3 中腐蚀后的微观形貌。可以发现，试样表面腐蚀产物膜出现开裂、剥落现象，产物外层严重脱落，导致基体上形成高度不同的平台。图 8 是试样腐蚀后的能谱图，分析结果如表 5，发现腐蚀产物层外表面平台上方和内表面平台下方的 EDS 分析基本一致，但内表面 S 含量较多，说明内表面腐蚀产物 FeS 的含量要高于外表面 FeS 的含量。

2.4 腐蚀电化学测试

图 9 为试样在常压、40 ℃时测得的不同流速下的极化曲线，可以看出，流速为 0 m/s 和 3 m/s 时，阴极和阳极过程均是活化控制，流速的增加加大了流体对管材表面的剪切力，剪切力越大，腐蚀产物越易被破坏，同时增加了溶液中侵蚀性离子与工作电极表面接触的机会。在 0~5 m/s 范围内，随流速的增大，

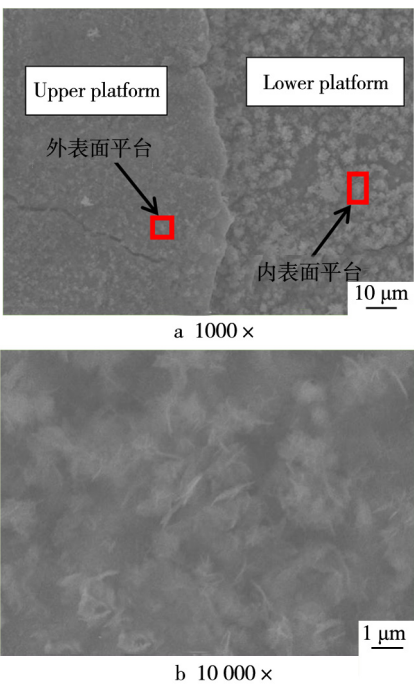


图 7 状态 3 中 L360 腐蚀微观形貌
Fig.7 Corrosion microstructure of L360 in state 3

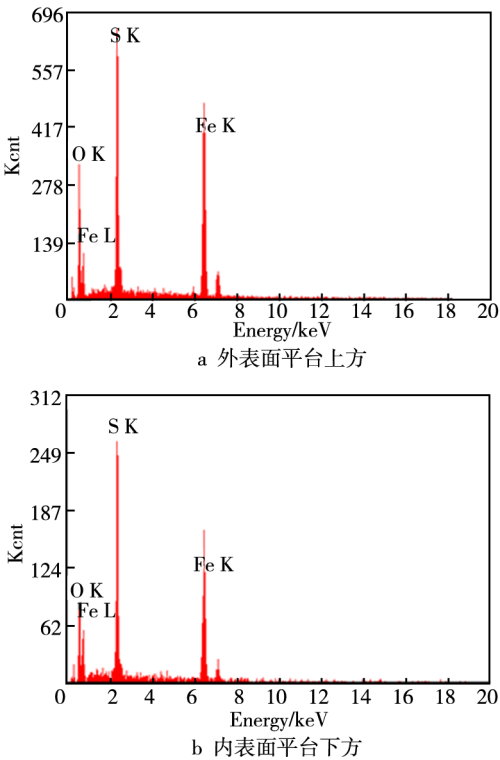


图 8 状态 3 中 L360 腐蚀能谱图
Fig.8 Energy spectrum of L360 in state 3

表 5 状态 3 中 L360 的 EDS 能谱分析结果
Tab.5 EDS analysis results of L360 in state 3

Selected area	wt%		
	O	S	Fe
Upper platform	21.14	21.53	57.33
Lower platform	20.17	26.23	53.60

腐蚀电位下降, 自腐蚀电流密度增大, 流速为 5 m/s 时的腐蚀电位最负, 此时自腐蚀电流密度最大, 最易受到腐蚀。

图 10 为试样在不同流速下的阻抗谱图, 拟合的等效电路如图 11 所示, 其中 R_s 是溶液电阻, Q_{ct} 代表双层电容的常相位角元件, R_{ct} 代表电荷传递电阻, Q_f 代表腐蚀产物膜的常相位角元件, R_f 代表膜电阻。流速为 0 m/s 时的等效电路图如图 11a 所示, 其阻抗谱由高频容抗弧、中频容抗弧与低频的直线段构成, 其中 W_s 代表 Warburg 阻抗, 是典型的由传质控制的阻抗谱特征, 高频容抗弧与双电层电容和传递电阻有关, 低频容抗弧与腐蚀产物的膜层电阻有关。流速为 3 m/s 和 5 m/s 时的等效电路图如图 11b 所示, 其阻抗谱仅由高频容抗弧与低频容抗弧构成, 与 3 m/s 相比, 流速为 5 m/s 时的容抗弧半径更小, 更易被腐蚀。

交流阻抗分析表明, 流速在 0~5 m/s 范围内, 初期腐蚀反应较快, 试样表面覆盖了一层保护性差且疏松多孔的腐蚀产物膜, 此膜在试样表面迅速累积, 呈现反应动力学控制特征, 随着反应的进行, 腐蚀产物堆积越来越厚, 呈现传质特征。随着流速的增大, 溶液在试样表面的传质过程加快, 疏松的腐蚀产物膜在流动液体的冲击下遭到破坏, 电极表面出现部分裸露区域, 阻抗谱中的容抗弧变小, 呈现虚部阻抗下降特征, 表明疏松的腐蚀产物对基体的保护性差。

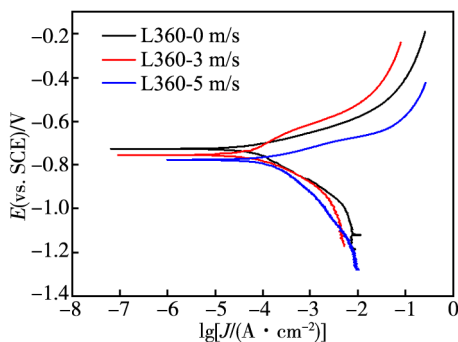


图 9 不同流速下 L360 钢的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of L360 at different flow velocity

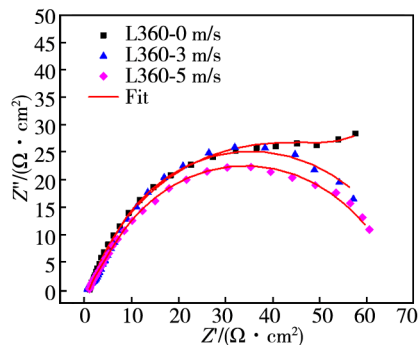


图 10 不同流速下 L360 钢的 EIS 拟合曲线

Fig.10 EIS fitting curves of L360 at different flow velocity

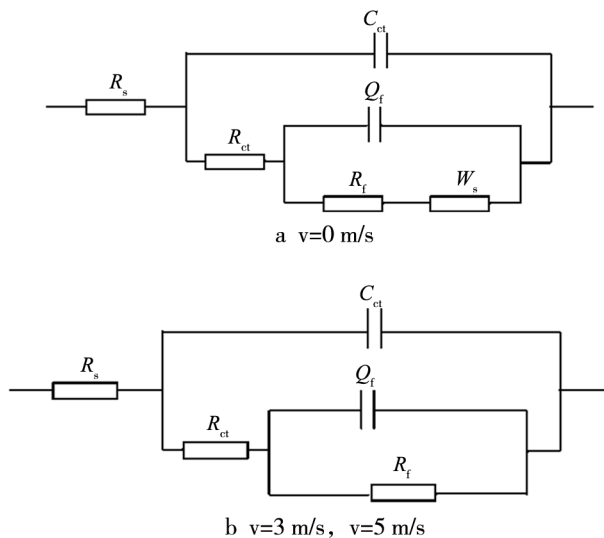


图 11 不同流速下 L360 钢的 EIS 拟合等效电路图

Fig.11 EIS equivalent circuit diagrams of L360 at different flow velocity

3 结论

1) 失重法测定 L360 钢腐蚀速率时, 在实验条件完全相同的情况下, 流速为 5 m/s 时的腐蚀速率 (0.4824 mm/a) 大于 0 m/s 的腐蚀速率 (0.3696 mm/a)。电化学测试中, 3 种状态对应的实验条件完全相同, 可以发现流速为 3 m/s 时钢被腐蚀的难易程度位于 0 m/s 和 5 m/s 之间。结合这两种实验结果得出, 在流速为 0~5 m/s 范围内, 随着流速的增加, L360 钢更易被腐蚀。

2) L360 在 3 种状态下的腐蚀产物均以 FeS 为主, 在状态 2 中, 表面形成了四方硫铁矿和硫复铁矿腐蚀产物。

3) 极化曲线表明, 流速在 0~5 m/s 范围内, 随流速的增大, 腐蚀电位下降, 自腐蚀电流密度增大, 在 5 m/s 时腐蚀电位最负, 自腐蚀电流密度最大, 最易受到腐蚀。同时随着流速的增大, 电极表面出现部分裸露区域, 阻抗谱中的容抗弧变小, 呈现虚部阻抗下降特征, 在 5 m/s 时的容抗弧半径最小, 最易被腐蚀。

4) 流速在 0~5 m/s 范围内, 流速越小, 对 L360 管线钢造成的腐蚀作用越小, 在不影响油气正常的输送情况下, 应尽可能选取小流速, 以保证管线钢的安全使用, 提高管线钢的使用寿命。

参考文献:

- [1] 陈赓良. 高含硫天然气集输工艺的技术经济分析[J]. 天然气经济, 2003, 2(4): 39-42.
CHEN G L. Analysis the Technique and Economic of High Sulphur Natural Gas Gathering and Transportation[J]. Gas Economy, 2003, 2(4): 39-42.

- [2] 孙媛媛. 复杂地表条件下天然气集输管线积液规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
SUN Y Y. Study of Liquid Loading in Natural Gas Gathering Line on Complex Ground Condition[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [3] 张鹏, 宫敬. 长输天然气管道水合物形成条件及预防措施[J]. 油气储运, 2000, 19(8): 10-13.
ZHANG P, GONG J. Preliminary Analysis on Hydrate Formation Conditions of Gas Transmission Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(8): 10-13.
- [4] 姜淑卿. 管线中的气液两相流动[J]. 国外油田工程, 1995(11): 42-46.
JIANG S Q. The Flowing of Gas-Liquid Two-phase in Pipelines[J]. Foreign Oil Field Project, 1995(11): 42-46.
- [5] 秦金. 输气管道内积液检测及安全分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
QI J. Detection of Gas Pipeline Effusion and Analysis of Safe Operation[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [6] 宋华军, 戴永寿, 杨涛, 等. 天然气管道积液红外成像检测方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 62-65.
SONG H J, DAI Y S, YANG T, et al. the Infrared Imaging Method for Measuring the Liquid Contents in Natural Gas Pipeline[J]. Gas Industries, 2012, 32(5): 62-65.
- [7] 张建, 唐建峰, 李玉星. 输气管道内凝析液对流动参数的影响分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 118-121.
ZHANG J, TANG J F, LI Y X. Influences of Condensate on Gas Transmission Lines Flow Parameter[J]. Gas Industries, 2006, 26(5): 118-121.
- [8] 姜永涛. 湿气输送技术分析[J]. 油气储运, 2007, 26(7): 57.
JIANG Y T. Analysis of Wet Transportation Technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(7): 57.
- [9] 王丹. 石油管线钢在 H_2S/CO_2 环境中腐蚀行为的研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2010.
WANG D. Study on the Corrosion Behavior of Oil Pipeline Steels in Carbon Dioxide and Hydrogen Sulfide Solution[D]. Fushun: Liaoning University of Petroleum and Chemical Industry, 2010.
- [10] DUNLOP A K. Stress Corrosion Cracking of Low-strength, Low-alloy Nickel Steels in Sulfide Environments[J]. Corrosion, 1978, 34(3): 88-95.
- [11] 冯星安, 黄柏宗, 高光第. 对四川罗家寨高含二氧化碳、硫化氢腐蚀分析及防腐设计初探[J]. 石油工程建设, 2004, 30(1): 10-14.
FENG X A, HUANG B Z, GAO G D. Analysis Corrosion and Primary Anti-corrosion Design for High Contents of CO_2 and H_2S in LuoJiazhai Gas Field in Sichuan[J]. Petroleum Engineering Construction, 2004, 30(1): 10-14.
- [12] 张俊良, 文绍牧, 邵勇, 等. 高含硫气井安全高效钻完井配套技术——以川东北罗家寨气田为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 69.
ZHANG J L, WEN S M, SHAO Y, et al. Safe and Efficient Drilling and Completion Technologies for High-sulfur Gas Wells: A Case History of the LuoJiazhai Gasfield in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Gas Industries, 2015, 35(4): 69.
- [13] 张数球. 罗家寨气田和普光气田开发设计优化方案[J]. 中外能源, 2009, 14(7): 34.
ZHANG S Q. Optimization Plans of Development Design for LuoJiazhai and Puguang Gas Fields[J]. China Foreign Energy, 2009, 14(7): 34.
- [14] 郭平. 油气藏流体相态理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 121-137.
GUO P. Theory and Application of Fluid Phase in Oil and Gas Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 121-137.
- [15] 陈京元, 刘义成, 郑伟. 罗家寨气田飞仙关组气藏高产井培育分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(4): 65-67.
CHEN J Y, LIU Y C, ZHENG W. Analysis of Drilling High Productivity Well in Feixianguan Gas Reservoir of LuoJiazhai Field[J]. Gas Industries, 2004, 24(4): 65-67.
- [16] COPSON H R. Effects of Velocity on Corrosion[J]. Corrosion, 1960, 16(2): 130-136.
- [17] HEITZ E, LOSS C. Investigation of Hydrodynamic Test Systems for the Selection of High Flow Rate Resistant Materials[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1979(9): 243-253.