

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.06.010

## 油套管钢两相流冲刷腐蚀行为及协同效应研究

周 昊<sup>1</sup>, 陈 虎<sup>1</sup>, 刘 雯<sup>1</sup>, 马鸿雁<sup>2</sup>, 王树立<sup>1</sup>, 杨足膺<sup>3</sup>, 王 磊<sup>4</sup>

(1.常州大学 石油工程学院,江苏 常州 213164;2.建东职业技术学院,江苏 常州 213032;3.常州大学 商学院,江苏 常州 213164;4.中国石油西南油气田公司 输气管理处,四川 成都 610000)

**摘要:**针对油套管材料存在的多相流冲刷腐蚀问题,采用旋转圆柱电极冲刷腐蚀实验装置并结合电化学工作站,通过电化学测试方法和失重法,研究了 N80 钢在不同 pH 条件下的含砂、含 NaCl 液固两相流流体中的冲刷腐蚀行为及流速、Cl<sup>-</sup> 质量浓度对协同效应的影响规律。结果表明:随着 pH 的增大,N80 钢的极化电阻变大,容抗弧半径增大,腐蚀电流密度呈下降趋势,腐蚀速率变小;N80 钢在不同 pH 的液固两相流流体中均呈活化溶解特性,整个腐蚀过程受阴极氧的去极化反应控制;流速、Cl<sup>-</sup> 质量浓度分别变化时,协同效应为材料损失的主要原因,协同效应随各个影响因素的变化趋势和总冲刷腐蚀速率变化趋势一致。

**关键词:**N80 钢;冲刷腐蚀;失重法;电化学法;协同效应

中图分类号:TG 172.8

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)06-0060-09

## Research on Erosion-Corrosion Behavior and Synergistic Effect of Oil Casing Steel in Two-Phase Flow

ZHOU Hao<sup>1</sup>, CHEN Hu<sup>1</sup>, LIU Wen<sup>1</sup>, MA Hongyan<sup>2</sup>, WANG Shuli<sup>1</sup>, YANG Zuying<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>4</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiandong College of Vocation & Technology, Changzhou 213032, China; 3. School of Business, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 4. Department of Gas Transportation Management, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** Aiming at erosion-corrosion of oil casing material in multi-phase flow, the erosion-corrosion behavior of N80 steel in liquid-solid two phase flow fluid which containing silica sand and sodium chloride at different pH values and the influence of flow velocity and concentration of chloride ion on the synergistic effect were investigated by using a rotating cylindrical electrode device and an electrochemical workstation combined with electrochemical testing method and weight loss method. The results

收稿日期:2020-08-04。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41801194,51706024);江苏省油气储运重点实验室开放课题项目(SCZ1311700006/004)。

作者简介:周昊(1979—),男,四川自贡人,硕士,讲师。E-mail:zhouhao@cczu.edu.cn

引用本文:周昊,陈虎,刘雯,等.油套管钢两相流冲刷腐蚀行为及协同效应研究[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(6):60-68.

show that with the increase of pH value, the polarization resistance of N80 steel increases, and the radius of capacitive reactance arc on EIS increases, the corrosion current density and the corrosion rate decreases simultaneously. N80 steel exhibits activation dissolution characteristics in liquid-solid two-phase flow fluids with different pH values. The whole corrosion process is controlled by cathodic reduction reaction. Synergism is the main cause of material mass loss when the flow rate and concentration of chloride ion change respectively. The variation trend of synergism with each influencing factor is consistent with that of total erosion-corrosion rate.

**Key words:** N80 steel; erosion-corrosion; weight loss method; electrochemical tests; synergism

在存在含颗粒流体和浆液输送的能源、石化等关键行业,冲刷腐蚀问题由于其严重性和难预测性,越来越受到广泛关注<sup>[1]</sup>,尤其在石油天然气工业中,随着开采条件的恶化,油气管道输送介质的固体杂质含量增大,造成严重的冲刷腐蚀破坏<sup>[2]</sup>。冲刷腐蚀过程包括电化学腐蚀和机械冲刷及其相互作用的协同效应<sup>[3]</sup>,协同效应机制是影响冲刷腐蚀行为的核心要素<sup>[4]</sup>。冲刷腐蚀是受多因素影响的复杂过程<sup>[5]</sup>,因此明确主要因素对冲刷腐蚀行为及协同效应的影响机制对油气管道冲刷腐蚀的预测和防治具有重要的理论作用。

孙丽丽<sup>[6]</sup>以水力喷砂压裂液为介质,借助自制管道冲刷腐蚀模拟测试实验台,研究了 N80, P110 等常用套管钢在水力喷砂压裂液中的冲刷腐蚀行为,分析了冲刷时间、含砂量、流速、冲击角度和 KCl 含量对其冲刷腐蚀行为的影响规律。李桂芝<sup>[7]</sup>采用循环冲刷腐蚀试验装置,研究了温度、流速等参数对 N80 钢在不含砂粒的单相模拟油田采出液介质中的流动腐蚀影响规律,研究结果表明介质流速对 N80 钢腐蚀行为的影响规律会随介质温度的变化而发生变化。李涌泉等<sup>[8]</sup>研究了 NaCl 浓度对 N80 钢液固两相冲刷腐蚀行为的影响,通过失重法计算了腐蚀速率,研究结果表明随 NaCl 浓度的增加, N80 钢的腐蚀速率加快,当 NaCl 质量分数超过 7% 时,出现明显的点蚀。李金波等<sup>[9]</sup>对比研究了 N80 油套管钢在长庆油田采出液/砂粒两相介质中的腐蚀磨损行为,试验分为静态腐蚀、纯动态腐蚀和动态腐蚀+含砂粒磨损。徐哲<sup>[10]</sup>利用改装的旋转圆盘实验装置,研究了 P110 钢在不同 NaCl 含量、砂粒浓度、砂粒粒径、流速及冲刷时间下的冲刷腐蚀行为,但未对冲刷腐蚀的协同效应进行量化研究。AGUIRRE J 等<sup>[11]</sup>利用旋转圆柱电极实验装置,采用多因素实验方案结合失重法,研究了流速、颗粒浓度、温度、氧浓度等多因素对 X65 碳钢冲刷腐蚀行为的影响,结果表明,冲刷腐蚀主要影响因素是流速、温度和氧浓度。上述研究成果对揭示 N80 钢等油气田常用管道材料在液固两相流中的冲刷腐蚀行为机理有一定的理论指导作用,但上述研究成果测试方法较为单一,大多只采用了失重法进行腐蚀量的测定,并未利用电化学测试方法进行腐蚀机理的深入研究,也未对冲刷腐蚀的协同效应进行分析探讨。同时根据前期的研究工作发现,在含砂、含 Cl<sup>-</sup> 的液固两相流溶液中, Cl<sup>-</sup> 在 N80 钢的冲刷腐蚀过程中发挥了至关重要的作用<sup>[12]</sup>,而流速是影响冲刷腐蚀的流体动力学因素中的一个极其重要参数,并直接影响冲刷腐蚀的机制<sup>[13]</sup>,流体 pH 也是一个重要的环境介质参数,流体 pH 的变化会使冲刷腐蚀行为发生变化。因此本文利用美国 PINE 旋转圆柱电极冲刷腐蚀实验装置,结合失重法和电化学测量研究流速、Cl<sup>-</sup> 质量浓度对液固两相冲刷腐蚀协同效应的影响规律及流体 pH 对其冲刷腐蚀行为的影响,有利于深入理解油气田常用管道材料冲刷腐蚀机理。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

旋转圆柱电极冲刷腐蚀实验装置如图 1 所示,具有流速可精确调节,便于电化学测量,安装操作简便等优点。通过由 Ag/AgCl 参比电极、铂辅助电极和腐蚀试样工作电极组成的电化学测试系统进行原位电化学测量。采用测量精度为 0.1 mg 的电子天平测量腐蚀试样的失重量。

### 1.2 试样与实验介质

研究中使用的腐蚀试样由油气田常用的 N80 套管钢制成,其形状和尺寸同文献[9]采用的试样一致(图 2),N80 钢化学成分见表 1。

表 1 N80 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of N80

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Cu	Fe
质量分数/%	0.26	0.21	1.36	0.019	0.007	0.049	0.005	0.027	0.032	0.01	余量

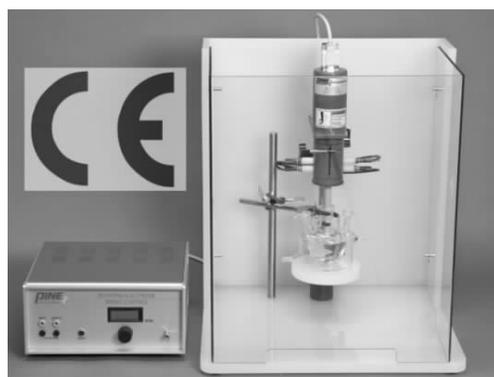


图 1 PINE 旋转圆柱电极冲刷腐蚀试验装置

Fig.1 PINE rotating cylinder electrode rig



图 2 试样形貌

Fig.2 Specimen morphology

研究 pH 对试样冲刷腐蚀行为的影响规律时,实验条件包括:介质采用蒸馏水配置质量浓度为  $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 溶液,砂粒粒径为  $0.125 \sim 0.210 \text{ mm}$ ,砂粒质量浓度为  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,冲刷腐蚀时间为 10 h,流速为  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,实验温度为常温,实验时保持  $\text{Cl}^{-}$  质量浓度、流速等上述参数不变,用冰乙酸和 NaOH 溶液将已配置好的 NaCl 溶液 pH 分别调至 3,5,7,9,11,用 pH 计进行酸碱度测定,随后进行相应实验。

为了量化流速、 $\text{Cl}^{-}$  质量浓度对协同效应的影响,分别改变流速和  $\text{Cl}^{-}$  质量浓度进行纯冲刷、纯腐蚀以及冲刷腐蚀实验,其中纯冲刷及纯腐蚀为冲刷腐蚀子试验。纯腐蚀实验,实验流动介质为不含砂粒的 NaCl 溶液,纯冲刷实验,采用不含腐蚀介质的蒸馏水+砂粒作为实验流动介质,其具体实验条件见表 2、表 3。研究流速对协同效应影响规律时,流速在  $1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间变化取值,保持其他参数不变,进行相应实验。研究  $\text{Cl}^{-}$  质量浓度对协同效应影响规律时, $\text{Cl}^{-}$  质量浓度在  $5 \sim 45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  之间变化取值,保持其他参数不变,进行相应实验。

表 2 研究流速对协同效应影响规律实验条件

Table 2 Experimental conditions for the effect of flow rate on synergism

实验项目	冲刷腐蚀实验	纯腐蚀实验	纯冲刷实验
流动介质	含砂 NaCl 溶液	NaCl 溶液	含砂蒸馏水
流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	1.0,1.5,2.0,2.5,3.0	1.0,1.5,2.0,2.5,3.0	1.0,1.5,2.0,2.5,3.0
$\text{Cl}^-$ 质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	25	25	0
砂粒质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	10	0	10
砂粒粒径/mm	0.125~0.210		0.125~0.210
冲刷腐蚀时间/h	10	10	10
实验温度	常温	常温	常温

表 3 研究 $\text{Cl}^-$  质量浓度对协同效应影响规律实验条件

Table 3 Experimental conditions for the effect of chloride ion concentration on synergism

实验项目	冲刷腐蚀实验	纯腐蚀实验	纯冲刷实验
流动介质	含砂 NaCl 溶液	NaCl 溶液	含砂蒸馏水
流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2	2	2
$\text{Cl}^-$ 质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	5,15,25,35,45	5,15,25,35,45	0
砂粒质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	10	0	10
砂粒粒径/mm	0.125~0.210		0.125~0.210
冲刷腐蚀时间/h	10	10	10
实验温度	常温	常温	常温

### 1.3 实验过程

实验前试样表面用磨料粒径为 0.074~0.019 mm 的砂纸打磨,以提供均匀的表面。最终经磨料粒径为 0.006 5 mm 的砂纸抛光后,用去离子水和无水乙醇冲洗试样,并用丙酮脱脂,干燥后测量实验前试样质量。实验过程中的电化学测试都在试样腐蚀电位稳定以后进行,每 2 h 测试其线性极化电阻,扫描速率为  $0.33 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ ,扫描范围为相对于自腐蚀电位下  $\pm 10 \text{ mV}$ 。在冲刷腐蚀 10 h 后进行动电位极化曲线和电化学阻抗测试,动电位极化曲线测试的扫描速率为  $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ ,扫描范围为相对于自腐蚀电位下  $\pm 250 \text{ mV}$ 。电化学阻抗测试参数为:在自腐蚀电位下从 100 kHz 高频到 0.01 Hz 低频扫描,正弦波扰动振幅为 10 mV。实验结束后用去离子水清洗试样表面,并用制备的含 100 mL 盐酸、0.7 g 六亚甲基四胺和 100 mL 去离子水的酸溶液去除腐蚀产物,冷空气干燥后再次测量试样质量,采用失重法计算(式(1))纯腐蚀速率( $v_c$ )、纯冲刷速率( $v_e$ )和冲刷腐蚀速率( $v_t$ )。

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (1)$$

式中: $m_0$  为试样实验前的质量,mg; $m_1$  为试样实验后的质量,mg; $S$  为试样表面积, $\text{cm}^2$ ; $t$  为腐蚀时间,h。

冲刷腐蚀协同效应速率  $v_s$  和协同效应率  $\eta$  分别按式(2)、式(3)计算<sup>[14]</sup>:

$$v_s = v_t - v_c - v_e \quad (2)$$

$$\eta = \frac{v_s}{v_t} \quad (3)$$

## 2 实验结果及分析

### 2.1 pH 对试样冲刷腐蚀的影响

#### 2.1.1 质量损失测试结果

N80 钢在不同 pH 下冲刷腐蚀实验结果如图 3 所示,图中曲线显示冲刷腐蚀速率和腐蚀质量损失量的总体变化趋势都是随 pH 的增大而减少,但当 pH 从 3 增大到 7 时,冲刷腐蚀速率和腐蚀质量损失量曲线斜率较大,数值急剧减少,而当 pH 从 7 增大到 11 时,两者曲线斜率较小,数值减少较平缓。pH=3 时的腐蚀质量损失量是 pH=7 时的 5.69 倍,是 pH=11 时的 10 倍,pH=7 时的腐蚀质量损失量是 pH=11 时的 1.78 倍。可见酸性溶液大大增加了 N80 钢的冲刷腐蚀速率,碱性溶液一定程度上抑制了腐蚀过程。

#### 2.1.2 电化学测试结果

根据 Stern 公式<sup>[15]</sup>可知线性极化电阻的倒数与腐蚀电流密度成线性关系,因此线性极化电阻  $R_p$  是腐蚀电学的一个重要动力学参数,通过对线性极化电阻的分析可以监测金属腐蚀状况随时间的变化情况。N80 钢冲刷腐蚀线性极化电阻随 pH 和冲刷时间的变化情况,如图 4 所示。相同 pH 下  $R_p$  随时间的增加缓慢变小,腐蚀电流密度增加,腐蚀过程加剧;随着 pH 的增大,线性极化电阻明显增大,腐蚀过程随着 pH 的增加而减弱,碱性溶液一定程度上抑制了腐蚀,增强了材料的耐腐蚀性。

图 5 为不同 pH 下 N80 钢冲刷腐蚀极化曲线,其拟合数据如表 4 所示。由拟合结果可知,阳极极化曲线极化率  $\beta_a$  相对于阴极极化曲线极化率  $\beta_c$  小的多,腐蚀反应受阴极氧的去极化反应控制<sup>[16]</sup>,随着 pH 升高,腐蚀电流密度呈下降趋势,N80 钢冲刷腐蚀速度减小。在 pH 3~11 范围内,极化曲线均较平滑,没有出现活化钝化转变区,金属始终处于活化溶解状态。由于本文进行冲刷腐蚀实验的装置没有完全密闭和除氧,因此参与反应的离子主要包括  $H^+$ ,  $Cl^-$  和  $O^{2-}$ ,发生如下反应<sup>[17]</sup>。

阳极反应



阴极反应

1)在中性和碱性溶液中



2)在酸性溶液中



活性阴离子  $Cl^-$  半径较小,具有较强的吸附性和穿透力,在冲刷腐蚀初期, $Cl^-$  吸附在金属表面并穿透氧化膜,协同砂粒机械冲刷使氧化膜失去保护作用。在中性或弱碱性介质条件下,含  $Cl^-$  溶液破坏氧

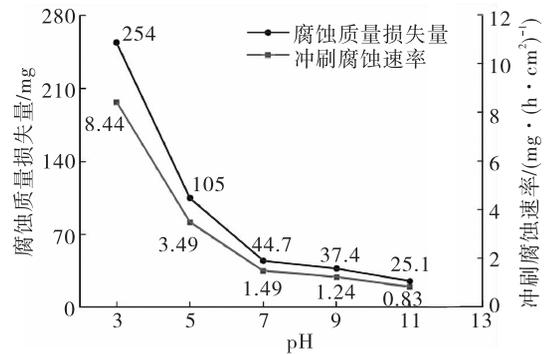


图 3 不同 pH 下 N80 钢冲刷腐蚀实验结果

Fig.3 Experimental results of erosion-corrosion of N80 steel under different pH values

化膜后形成活性溶解点及  $\text{FeCl}_2$  水解的闭塞电池效应<sup>[8]</sup>,从而形成点蚀,腐蚀量和腐蚀速率相对较小。但在低 pH 强酸性介质条件下,由于溶液中  $\text{H}^+$  浓度较高,在活性溶解点区域形成了酸性较强的溶液区,抑制了  $\text{FeCl}_2$  的水解过程和点蚀倾向<sup>[18]</sup>,阴极主要发生  $\text{H}^+$  在富氧条件下的去极化反应,金属基体加速发生阳极溶解,并且在酸性体系中,氧化膜溶解加强以及砂粒的切削撞击作用,使金属基体表面很难形成均匀一致的保护性膜层<sup>[19]</sup>,逐渐形成全面腐蚀,腐蚀量和腐蚀速率增大。而在高 pH 强碱性介质条件下, $\text{OH}^-$  含量增加,在阳极极化时  $\text{OH}^-$  离子和  $\text{Cl}^-$  会产生竞争吸附,使电极表面  $\text{Cl}^-$  的浓度降低,减小了对氧化膜的破坏作用,同时  $\text{OH}^-$  还中和  $\text{FeCl}_2$  水解之后产生的  $\text{H}^+$ <sup>[18]</sup>,进一步促进  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  保护性产物膜的形成,材料表面会形成一层致密稳定的保护膜,阻碍了腐蚀性离子向阳极表面扩散,腐蚀量和腐蚀速率下降。

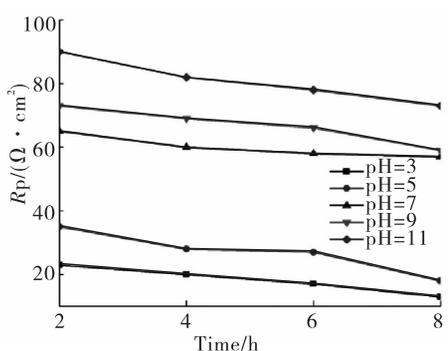


图 4 不同 pH 下 N80 钢冲刷腐蚀极化电阻

Fig.4 Polarization resistance of erosion-corrosion of N80 steel under different pH values

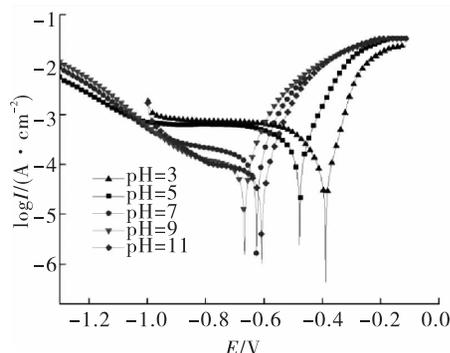


图 5 不同 pH 下 N80 钢冲刷腐蚀的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of erosion-corrosion of N80 steel under different pH values

表 4 N80 钢在不同 pH 下的极化曲线拟合参数

Table 4 Polarization curve fitting parameters of N80 steel under different pH values

pH	3	5	7	9	11
$\beta_a/\text{mV}$	2.940	1.547	1.593	1.496	1.327
$\beta_c/\text{mV}$	10.991	11.629	12.613	13.270	13.336
$E_{\text{corr}}^1/\text{V}$	-0.398	-0.477	-0.666	-0.648	-0.611
$I_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$7.132\times 10^{-4}$	$4.261\times 10^{-4}$	$3.263\times 10^{-4}$	$3.21\times 10^{-4}$	$2.735\times 10^{-4}$

说明:1)  $E_{\text{corr}}$  为相对于  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  参比电极测量的电位值。

图 6 所示 N80 钢冲刷腐蚀的电化学阻抗谱随 pH 的变化情况,不同 pH 下 N80 钢的电化学阻抗谱均呈单一容抗弧特征,电极过程处于电化学步骤控制。容抗弧的半径大小与电荷传递电阻即电极表面反应阻力大小成正比,与腐蚀速率成反比<sup>[20]</sup>。随着 pH 的增大容抗弧半径逐渐变大,液固两相溶液中电极表面的电化学反应阻力变大,腐蚀速率变小,与失重速率测试结果一致。

利用 ZSimpWin 软件按如图 7 所示的等效电路图对各 pH 下的电化学阻抗谱进行拟合,拟合参数见表 5,其中  $R_s$  是溶液电阻, $Q$  是常相位角元件, $R_t$  是

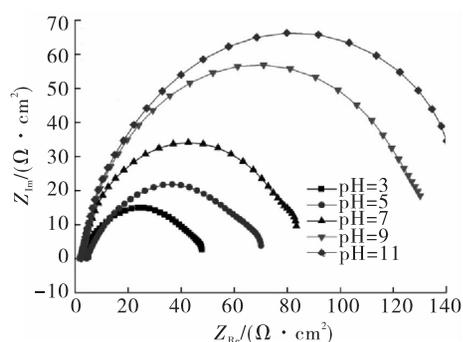


图 6 不同 pH 下 N80 钢冲刷腐蚀的电化学阻抗谱

Fig.6 Electrochemical impedance spectroscopy of N80 steel under different pH values

电荷传递电阻。从表 5 中的拟合的各元件数据得出:pH 为 7 时,溶液电阻最大,随着 pH 的增大或减小,离子浓度增大,溶液导电性增强,溶液电阻变小。随着 pH 的增大传递电阻有增大趋势,说明腐蚀过程主要受电荷转移过程控制,pH 越大,传递电阻越大,电荷转移阻力增大,带电荷粒子更难穿越双电层,金属离子化过程中受到的阻力增大,电极上的电化学反应受到阻碍,腐蚀速率减小,与上述失重速率测试和极化曲线测试结果一致。

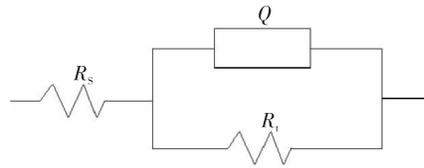


图 7 拟合电化学阻抗谱的等效电路图  
Fig.7 Equivalent circuit diagram of fitting electrochemical impedance spectroscopy

## 2.2 流速、Cl<sup>-</sup> 质量浓度对协同效应的影响

### 2.2.1 流速对协同效应的影响

N80 钢冲刷腐蚀的协同效应在不同流速下的实验数据见表 6。

由表 6 分析可知:冲刷作用和腐蚀作用相互促进,协同效应速率都为正值,增大了材料的损失速率,冲刷与腐蚀起正协同作用,且协同效应率都在 50% 以上。纯冲刷速率和纯腐蚀速率随着速度的增大都逐渐增大,但增加不是很明显,且纯冲刷速率相对于纯腐蚀速率和冲刷腐蚀速率要小的多,可见协同效应是此实验条件下材料失重的最主要原因。协同效应速率随流速的变化趋势和冲刷腐蚀速率相似,都随流速增大而增大,但以流速 2 m · s<sup>-1</sup> 为临界点,临界点前后协同效应速率随流速增加的幅度发生了明显变化。

表 5 不同 pH 下 N80 钢电化学阻抗谱拟合数据  
Table 5 Fitting data of electrochemical impedance spectroscopy of N80 steel under different pH values

pH	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_0 / (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$	$R_t / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
3	5.241	$7.545 \times 10^{-3}$	0.642 8	127.3
5	6.299	$3.876 \times 10^{-4}$	0.793 3	213.5
7	7.132	$2.676 \times 10^{-3}$	0.872 2	249.5
9	6.593	$5.347 \times 10^{-3}$	0.893 1	288.6
11	6.047	$3.438 \times 10^{-3}$	0.913 9	320.2

表 6 N80 钢在流速变化条件下的质量损失速率  
Table 6 Mass loss rate of N80 steel under flow rate variation

流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	$v / (\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1})$				$\eta / \%$
	$v_t$	$v_c$	$v_c$	$v_s$	
1.0	0.96	0.018	0.41	0.532	55.4
1.5	1.21	0.023	0.49	0.697	57.6
2.0	1.49	0.026	0.65	0.814	54.6
2.5	2.47	0.037	0.69	1.743	70.5
3.0	3.41	0.052	0.71	2.648	77.6

流速对冲刷腐蚀及协同效应的影响,存在着一定的双重作用:一方面流速增加加速氧化剂扩散促进氧化膜的形成,另一方面流速增加,剪切应力增大,破坏金属表面氧化膜或使其表面发生塑性变形、表面粗糙。流速较低时(1~2 m · s<sup>-1</sup>)流速的提高加快了去极化剂氧的扩散程度,一定程度上促进氧化膜形成,而此时固体颗粒物对金属的力学作用不是很强,对氧化膜的破坏作用相对较弱,冲刷腐蚀协同效应相对也较弱,协同效应速率增加较缓慢。而当流速较高时(2~3 m · s<sup>-1</sup>),剪切应力增大,固体颗粒对金属表面的切削撞击足以破坏氧化膜,使新的金属基体暴露出来,从而促进腐蚀;随着流速增大,流体力学因素增强,传质过程加强,腐蚀造成金属局部微湍流、强度降低,冲刷腐蚀相互促进的协同效应得到强化,协同效应速率随流速增加迅速增大。

### 2.2.2 Cl<sup>-</sup> 质量浓度对协同效应的影响

N80 钢冲刷腐蚀的协同效应在不同 Cl<sup>-</sup> 质量浓度下的实验数据见表 7。

表7 N80钢在Cl<sup>-</sup>质量浓度变化条件下的质量损失速率  
Table 7 Mass loss rate of N80 steel under chloride ion concentration variation

Cl <sup>-</sup> 质量浓度/ (g · L <sup>-1</sup> )	$v / (\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1})$				$\eta / \%$
	$v_i$	$v_c$	$v_e$	$v_s$	
5	0.41	0.026	0.25	0.134	32.7
15	1.00	0.026	0.47	0.504	50.4
25	1.49	0.026	0.65	0.814	54.6
35	2.43	0.026	0.72	1.684	69.3
45	2.08	0.026	0.75	1.404	62.7

由表7分析可知:协同效应速率都为正值,冲刷与腐蚀起正协同作用,且协同效应率都在30%以上,可见协同效应是此实验条件下材料失重的主要原因。协同效应速率随Cl<sup>-</sup>质量浓度变化的规律同总冲刷腐蚀速率变化规律相似。当Cl<sup>-</sup>质量浓度小于3.5%时,随Cl<sup>-</sup>质量浓度的增大协同效应速率增大,当Cl<sup>-</sup>质量浓度达到4.5%时协同效应速率突然下降。由于本文进行冲刷腐蚀实验的装置没有完全密闭和除氧,在冲刷腐蚀过程中,腐蚀试样旋转搅拌溶液有利于氧气扩散到金属表面,氧气传质阻力变小,传质过程不再是电极反应主要控制步骤,腐蚀速率由阴极电化学反应速率控制,参与阴极反应的氧气和Cl<sup>-</sup>质量浓度对腐蚀速率的快慢起到了关键的影响作用。随着溶液中Cl<sup>-</sup>质量浓度的增加,大量Cl<sup>-</sup>吸附在金属表面,在冲刷腐蚀协同作用下,增大了对保护性氧化膜的破坏作用,并逐渐粗化金属表面,形成局部微湍流,从而使得冲刷腐蚀速度和协同效应速率增加;但另一方面随着Cl<sup>-</sup>质量浓度增加,氧在溶液中的溶解度降低,且大量Cl<sup>-</sup>的竞争吸附作用,使到达试样表面参与阴极反应的氧气浓度降低,腐蚀速度降低。在本试验中Cl<sup>-</sup>的这种双重作用导致金属冲刷腐蚀速率及协同效应速率出现极大值的临界Cl<sup>-</sup>质量浓度为3.5%。

### 3 结 论

1)在含砂、含NaCl的液固两相流体中,随着pH的增大,N80钢冲刷腐蚀极化电阻变大,容抗弧半径增大,腐蚀电流密度呈下降趋势,腐蚀速率变小。N80钢在5种pH液固两相流体中均表现为活化溶解特性,整个反应过程受阴极氧的去极化反应控制。

2)在含砂、含NaCl的液固两相流体中流速、Cl<sup>-</sup>质量浓度分别变化时,协同效应为材料损失的主要原因,协同效应随各个影响因素的变化趋势和冲刷腐蚀速率变化趋势基本一致。

3)在油气输送过程中,应加强输送流体介质的净化处理及控制流体流速,尽量避免多相流流体介质在酸性、高矿化度及高输送流速条件下对管壁的冲刷腐蚀,延长管道使用寿命,保障油气管道输送安全。

### 参考文献:

- [1] ISLAM M A, FARHAT Z. Erosion-corrosion mechanism and comparison of erosion-corrosion performance of API steels[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 533-541.
- [2] AGUIRRE J, WALCZAK M, ROHWERDER M. The mechanism of erosion-corrosion of API X65 steel under turbulent slurry flow: effect of nominal flow velocity and oxygen content[J]. *Wear*, 2019, 438/439: 1-14.
- [3] OWEN J, RAMSEY C, BARKER R, et al. Erosion-corrosion interactions of X65 carbon steel in aqueous CO<sub>2</sub> environments[J]. *Wear*, 2018, 414/415: 376-389.
- [4] KHAYATAN N, GHASEMI H M, ABEDINI M. Synergistic erosion-corrosion behavior of commercially pure titani-

- um at various impingement angles[J]. *Wear*, 2017, 380/381: 154-162.
- [5] KHAYATAN N, GHASEMI H M, ABEDINI M. Comparison of critical flow velocity for erosion-corrosion of six stainless steels in 3.5wt% NaCl solution containing 2wt% silica sand particles[J]. *Wear*, 2018, 416/417: 62-71.
- [6] 孙丽丽, 王尊策, 孙振旭, 等. 套管钢在水力喷砂压裂液中的冲刷腐蚀行为研究[J]. *化工机械*, 2015, 42(2): 176-179.
- [7] 李桂芝, 孙冬柏, 俞宏英. 采油管材 N80 钢在流动介质中的腐蚀行为研究[J]. *腐蚀与防护*, 2001, 22(12): 544-545.
- [8] 李涌泉, 余斌高, 刘建强, 等. N80 钢抗液固两相冲刷腐蚀行为的研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(6): 29-31.
- [9] 李金波, 舒欣欣, 全明信, 等. N80 油套管钢在长庆油田采出液/砂粒两相介质中的腐蚀磨损[J]. *焊管*, 2006, 29(6): 22-24.
- [10] 徐哲. 液固两相流条件下 P110 钢的冲刷腐蚀研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [11] AGUIRRE J, WALCZAK M. Multifactorial study of erosion-corrosion wear of a X65 steel by slurry of simulated copper tailing[J]. *Tribology International*, 2018, 126: 177-185.
- [12] 陈虎, 周昊, 王树立, 等. N80 钢在含沙和含  $\text{Cl}^-$  溶液中的冲刷腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(9): 668-672.
- [13] 曾莉. 管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 林冠发, 全明信, 白真权, 等. 两种油套管钢在两相流中的腐蚀磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(1): 88-91.
- [15] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 125-129.
- [16] YANG Y, CHENNG Y F. Parametric effects on the erosion-corrosion rate and mechanism of carbon steel pipes in oil sands slurry[J]. *Wear*, 2012, 276/277: 141-148.
- [17] 张雅妮, 罗金恒, 冯贝贝. 不同 pH 氯化钠溶液对 P110S 油套管钢腐蚀磨损交互作用的影响[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(8): 81-85.
- [18] 刘丽霞, 乔岩欣. pH 对高氮钢在 NaCl 溶液中腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2014, 26(2): 132-136.
- [19] 张红, 杜翠薇, 齐慧滨, 等. pH 对热镀锌汽车板和 IF 钢基板在 NaCl 溶液中电化学行为的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2009, 30(7): 45-48.
- [20] 李丰博, 肖桂枝. 喷丸对 X70 管线钢焊接接头组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(9): 178-182.

(责任编辑:殷丽莉)