

# 不同 NaCl 浓度对油气集输管道用钢 冲刷腐蚀协同作用的影响

李恩田<sup>1a</sup>, 张建伟<sup>1a</sup>, 周昊<sup>1a</sup>, 杨足膺<sup>1b</sup>, 刘雯<sup>1a</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 贾勇<sup>2</sup>

(1.常州大学 a.江苏省油气储运技术重点实验室, b.商学院, 江苏 常州 213016;  
2.西南油气田公司 输气管理处, 成都 610000)

**摘 要:** **目的** 量化不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的冲刷腐蚀协同作用。**方法** 利用旋转圆柱电极实验装置, 在模拟油田采出液中, 通过腐蚀质量损失、形貌观测和电化学分析 (包括 Tafel 曲线测试和阻抗谱测试等方法) 得到 20 号钢在不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的冲刷腐蚀规律。基于纯冲刷、纯腐蚀和冲刷腐蚀在不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的质量损失速率和电化学拟合结果, 得到纯腐蚀、纯冲刷及其相互作用对冲刷腐蚀的贡献。**结果** 在模拟油田采出液中, 当 NaCl 溶液质量浓度小于 4.5% 时, 冲刷腐蚀质量损失率随  $\text{Cl}^-$  浓度的增大而增大, 最高增至  $0.44 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。由于在每种  $\text{Cl}^-$  浓度下施加相同的电位保护, 因此, 由纯冲刷导致的质量损失变化不大。从图像来看, 随着  $\text{Cl}^-$  浓度的增大, 材料表面逐渐出现明显的腐蚀坑。**结论**  $\text{Cl}^-$  浓度对材料腐蚀有明显的促进作用, 并且存在临界  $\text{Cl}^-$  浓度。冲刷腐蚀质量损失率与形貌观测有良好的一致性, 且不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的冲刷腐蚀均为电化学腐蚀-冲刷混合控制, 其中电化学腐蚀占据主导地位。对于协同作用方面, 随着  $\text{Cl}^-$  浓度的增加, 腐蚀对冲刷的促进作用逐渐增大, 而冲刷对腐蚀的促进作用先逐渐增大再减小。

**关键词:** 20 号钢; 冲刷腐蚀; 协同作用; 质量损失; 电化学实验; 形貌观察

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)05-0279-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.033

## Influences of NaCl Concentration on the Synergistic Action of Erosion-corrosion of Steel Used in Oil and Gas Gathering and Transportation Pipelines

LI En-tian<sup>1a</sup>, ZHANG Jian-wei<sup>1a</sup>, ZHOU Hao<sup>1a</sup>, YANG Zu-ying<sup>1b</sup>, LIU Wen<sup>1a</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, JIA Yong<sup>2</sup>

(1. a. Jiangsu Key Laboratory of Oil-Gas Storage and Transportation Technology, b. Business School,  
Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Gas Transportation Management Department of  
Petrochina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610000, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to quantify the synergistic effects of erosion-corrosion at different  $\text{Cl}^-$  concentrations. The

收稿日期: 2019-04-23; 修订日期: 2019-07-12

Received: 2019-04-23; Revised: 2019-07-12

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

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (41801194, 51706024) and Jiangsu Key Laboratory of Oil and Gas Storage and Transportation Open Project (SCZ1311700006/004)

**作者简介:** 李恩田 (1977—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为油气储运设备的腐蚀与防护。邮箱: let@cczu.edu.cn

**Biography:** LI En-tian (1977—), Male, Doctoral students, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of oil and gas storage and transportation equipment. E-mail: let@cczu.edu.cn

**引文格式:** 李恩田, 张建伟, 周昊, 等. 不同 NaCl 浓度对油气集输管道用钢冲刷腐蚀协同作用的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 279-284.  
LI En-tian, ZHANG Jian-wei, ZHOU Hao, et al. Influences of NaCl concentration on the synergistic action of erosion-corrosion of steel used in oil and gas gathering and transportation pipelines[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 279-284.

corrosion law of 20 # steel under different  $\text{Cl}^-$  concentrations was obtained by means of corrosion weightlessness, morphology observation, electrochemical analysis (including Tafel curve test and impedance spectrum test) in simulated oilfield produced fluid with rotating cylindrical electrode experimental device. Based on the mass loss rates and electrochemical fitting results of pure erosion, pure corrosion and erosion-corrosion at different  $\text{Cl}^-$  concentrations, the contributions of pure corrosion, pure erosion and their interactions to the total erosion-corrosion were obtained. In the simulated oilfield production fluid, when the NaCl concentration was less than 4.5%, the erosion and corrosion quality loss rate increased with the increase of  $\text{Cl}^-$  concentration, and the highest rate increased to  $0.44 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ . Since the same potential protection was applied at each  $\text{Cl}^-$  concentration, the mass loss due to erosion did not change much. It can be seen from the image that corrosion pits gradually appeared on the surface of the material with the increase of  $\text{Cl}^-$  concentration.  $\text{Cl}^-$  concentration has obvious promoting effect on material corrosion, and there is a critical  $\text{Cl}^-$  concentration. The erosion-corrosion mass loss rate is in good consistency with the observation of morphology, and the erosion-corrosion under different  $\text{Cl}^-$  concentrations is a mixed control of electrochemical corrosion-erosion, in which electrochemical corrosion dominates. As for the synergistic effect, with the increase of  $\text{Cl}^-$  concentration, the corrosion promoting effect on scour gradually increases, while the erosion promoting effect on corrosion first increases and then decreases.

**KEY WORDS:** 20 # steel; erosion-corrosion; synergy; quality loss; electrochemical experiment; morphology observation

冲刷腐蚀广泛存在于石油、化工、冶金等行业。上述行业生产过程中,输送的介质大多为含有固体颗粒的腐蚀性流体,冲刷腐蚀破坏尤为严重<sup>[1]</sup>。在油气集输过程中,介质的含砂量与矿化程度较高,集输管线受冲刷腐蚀的影响较为严重。20 号碳钢为油气集输管道常用钢材,因此研究 20 号钢的冲刷腐蚀规律及量化其协同效应显得极为重要。冲刷腐蚀过程包括电化学腐蚀、机械冲刷以及冲刷和腐蚀的相互促进,冲刷腐蚀过程对材料的影响显著大于单个过程对材料的影响<sup>[2]</sup>,所以冲刷与腐蚀之间的交互作用规律是冲刷腐蚀机理的核心内容<sup>[3]</sup>。Yang Y 等<sup>[4]</sup>利用冲击射流装置研究 X65 钢的冲刷腐蚀过程中发现,X65 钢的冲刷腐蚀速率随着流体流速、含砂量的增大而增大,并且纯冲刷和腐蚀促进冲刷占据主导地位。Javiera Aguirre 等<sup>[5]</sup>通过多因素方法,利用旋转圆柱电极实验装置,研究了速度、颗粒浓度、pH 值等对 X65 碳钢的影响,结果表明,腐蚀主要由速度、温度和氧浓度引起。徐哲<sup>[6]</sup>利用改装的旋转圆盘实验装置,研究了 P110 钢在不同  $\text{Cl}^-$  浓度、砂粒浓度、砂粒粒径下的冲刷腐蚀行为,但未对冲刷腐蚀的协同效应进行深入分析。陈虎等<sup>[7]</sup>通过旋转圆柱电极实验装置,研究了不同流速对 N80 钢冲刷腐蚀行为的影响,结果表明,随着流速的增大,腐蚀速率逐渐增大,并且整个过程受阴极氧化还原反应控制。

这些研究对不同金属材料在液固两相流溶液中的冲刷腐蚀行为有一定的指导作用,但并未量化冲刷与腐蚀之间的协同作用。因此,本文主要研究油田集输管线 20 号钢在模拟油田采出液环境下的冲刷腐蚀协同效应。采用旋转圆柱电极装置,并辅以成套的电化学工作站,量化纯腐蚀、纯冲刷以及协同作用,为油气集输管道用钢冲刷腐蚀的预防与控制提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 装置及材料

试验选用美国 PINE 旋转圆柱电极冲刷腐蚀试验装置(如图 1 所示),考虑到工作电极与参比电极之间的 IR 降,为参比电极配备 Luggin 毛细管。电化学测试选用 CHI920D 电化学工作站及三电极体系。实验材料选用油田集输管道用钢 20 号钢,其化学成分、物理性质及 API 标准见表 1。试样形貌如图 2 所示,试样内径为 9.53 mm,高度为 6.39 mm,外径为 15 mm,工作面积为  $3.01 \text{ cm}^2$ 。

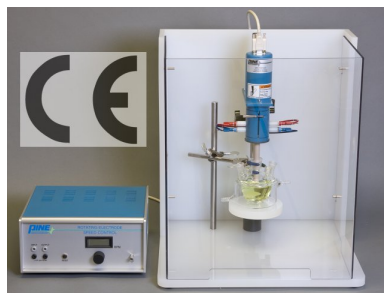


图 1 PINE 旋转圆柱电极试验装置  
Fig.1 PINE rotating cylinder electrode rig



图 2 试样形貌  
Fig.2 Specimen morphology

1.2 试验过程

试样表面经 200—800 号砂纸逐级打磨，2000 号砂纸抛光后，用丙酮、无水乙醇清洗，蒸馏水冲洗，恒温鼓风干燥箱干燥，然后称量。冲刷腐蚀实验时间为 10 h，为了确定结果的可重复性，每次实验重复 3 次。实验前后，试样的质量损失通过精度为 0.1 mg 的电子天平进行 5 次称量，去除读数中的最大值和最小值，剩余 3 次读数取平均值。每次实验后，用六次甲基四氨与盐酸配制的清洗液清洗腐蚀产物，风干后称量。用超景深三维数码显微镜观察腐蚀样品的表面

形貌。为了量化其相互作用，在不同 Cl<sup>-</sup>浓度下进行纯冲刷、纯腐蚀以及冲刷腐蚀实验，其中纯冲刷及纯腐蚀为子试验。对于冲刷腐蚀实验，实验介质为模拟油田采出液，溶液介质配比及实验条件见表 2—4。对于纯冲刷实验，流速、实验介质、砂粒浓度、粒径等与冲刷腐蚀一致。由于对试样进行了阴极保护，无法进行电化学测量，因此只进行质量损失测试来研究由于纯冲刷导致的质量损失。阴极保护时，控制其电位比自腐蚀电位负 250 mV 以上，其阴极保护度可达 98%以上<sup>[8]</sup>。

表 1 20 号钢化学成分、物理性质与 API 标准  
Tab.1 Composition, physical properties and API standards of No. 20 steel

Chemical component/wt%									Yield strength	Tensile strength
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa
0.18	0.18	0.39	0.014	0.005	0.01	0.01	0.01	99.201	275 (API:≥250)	492 (API:≥420)

表 2 试验介质配比  
Tab.2 Experimental medium ratio

Reagent	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaHCO <sub>3</sub>
Concentration/(g·L <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	0.4	0.6

表 3 纯腐蚀试验条件  
Tab.3 Experimental conditions of pure corrosion

Test parameters	Parameter value
Flow type	Single-phase: Simulation of produced water
Liquid velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	1.5
Cl <sup>-</sup> concentration/%	1.5, 2.5, 3.5, 4.5
Time/h	10

表 4 纯冲刷和冲刷腐蚀试验条件  
Tab.4 Experimental conditions of pure erosion and erosion-corrosion

Test parameters	Parameter value
Flow type	Two-phase: Simulation of produced water-sand
Liquid velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	1.5
Average sand size/μm	125~210
Sand concentration/%	3
Cl <sup>-</sup> concentration/%	1.5, 2.5, 3.5, 4.5
Time/h	10

在三电极系统中，Ag/AgCl 为参比电极，铂电极为辅助电极，实验试样为工作电极。待腐蚀 10 h 后，进行电化学测试（包括极化曲线测试和电化学阻抗谱测试）。电化学阻抗谱测试是以小振幅的正弦电位或电流作为扰动信号进行电化学测量，测量腐蚀电位下的频率范围为 0.01 Hz~100 kHz，扰动电压幅值为 10 mV。应用 Z Simp Win 分析软件对阻抗数据进行拟合，得到电荷传递电阻值。极化曲线测试由阴极向阳极方向扫描，扫描速率为 1 mV/s，扫描范围为腐蚀电位±250 mV。应用 Origin 软件对极化曲线数据进行拟合，得到阴阳极塔菲尔区斜率  $b_a$  和  $b_c$ 。根据 Stern-Geary

方程(式 1)得到的系数  $B$ ，结合电荷传递电阻值  $R_{ct}$ ，由公式(2)得到腐蚀电流密度<sup>[9]</sup>，由此判定腐蚀程度。

$$B = \frac{b_a \times b_c}{2.303(b_a + b_c)} \tag{1}$$

$$J_{\text{corr}} = \frac{B}{R_{\text{ct}}} \tag{2}$$

2 结果及分析

2.1 电化学测试

不同 Cl<sup>-</sup>浓度下的冲刷腐蚀极化曲线如图 3 所示，可以看出，腐蚀过程受阴极氧的扩散控制，并且随着 Cl<sup>-</sup>浓度的增加，阴极电流密度也随之增加。这表明阴极氧的扩散控制增强，介质中溶解氧到达材料表面更充分，材料的腐蚀量随 Cl<sup>-</sup>浓度的增加而增加，与文献[10]的结论一致。阳极电流密度有一定的增加，但变化不大，且没有观察到钝化现象。由式(1)、(2)得到不同 Cl<sup>-</sup>浓度下冲刷腐蚀的腐蚀电流密度值和腐蚀电位，见表 5。可以看出，随着 Cl<sup>-</sup>浓度的增大，

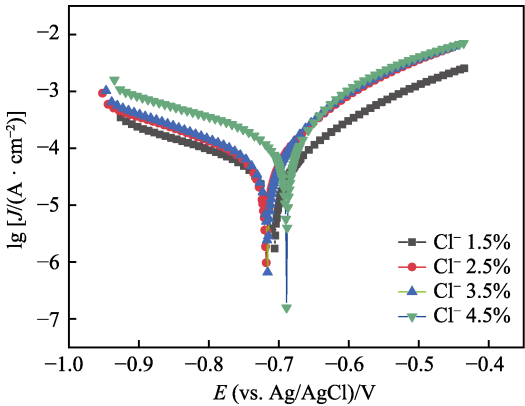


图 3 不同 Cl<sup>-</sup>浓度下的冲刷腐蚀极化曲线  
Fig.3 Polarization curves of erosion-corrosion at different Cl<sup>-</sup> concentrations

表 5 不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的冲刷腐蚀拟合数据Tab.5 Fitting data of erosion-corrosion under different  $\text{Cl}^-$  concentrations

$\text{Cl}^-$ concentrations/%	$J/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E/\text{mV}$
1.5	85.23	-706
2.5	93.83	-718
3.5	134.32	-716
4.5	156.16	-688

电流密度逐渐增大,并且与质量损失速率保持良好的 consistency。

20 号钢在不同  $\text{Cl}^-$  浓度纯腐蚀实验下的电化学阻抗谱如图 4 所示。在不同  $\text{Cl}^-$  浓度下,电化学阻抗谱均呈现不明显的双容抗弧特征,并且从腐蚀形貌图中可以观察到点蚀坑,说明材料表面有局部腐蚀发生。容抗弧半径的大小反映了电极表面反应电阻的大小,容抗弧半径越大,反应阻力越大,腐蚀速率越小。随着  $\text{Cl}^-$  浓度的增加,容抗弧半径逐渐变小,故腐蚀速率随  $\text{Cl}^-$  浓度的增加而增加。冲刷腐蚀过程的电化学阻抗谱如图 5 所示,相比于纯腐蚀过程,冲刷腐蚀过程的容抗弧半径更小,腐蚀更剧烈。由图 5 可见,所有  $\text{Cl}^-$  浓度下的电化学阻抗谱均呈现明显的双容抗弧,可见除了由电荷传递反应引起的高频区容抗弧外,还存在局部活化极化引起的低频区容抗弧。采用如图 6 所示的等效电路拟合阻抗谱数据,结果见表 6。其中  $Q$  为常相位角元件,  $R_s$  为鲁金毛细管到工作电极间的溶液电阻,  $R_p$  为极化电阻。由拟合数据与阻抗谱可得,当  $\text{Cl}^-$  质量分数为 1.5% 时,容抗弧半径最大,电荷传递电阻最大,腐蚀速率最低,且随着  $\text{Cl}^-$  浓度的增大,  $R_{p1}$  逐渐变小,腐蚀速率逐渐升高。这表明带电荷粒子更易穿越双电层,可能是由于高  $\text{Cl}^-$  浓度和砂粒的协同作用对电极表面形成的腐蚀产物膜的破坏作用增大<sup>[11]</sup>。

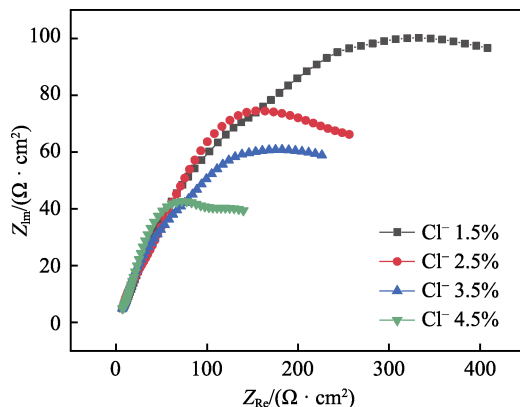


图 4 纯腐蚀电化学阻抗谱

Fig.4 Pure corrosion electrochemical impedance spectrum

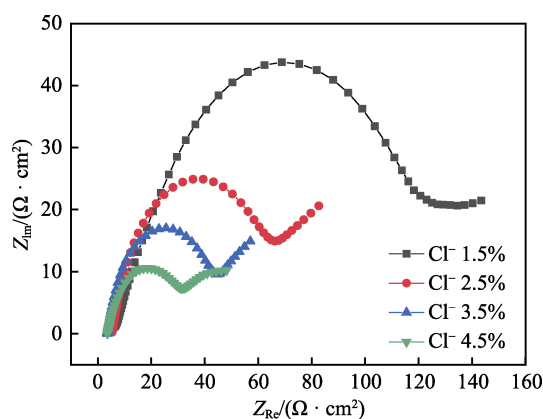


图 5 冲刷腐蚀电化学阻抗谱

Fig.5 Electrochemical impedance spectra of erosion-corrosion

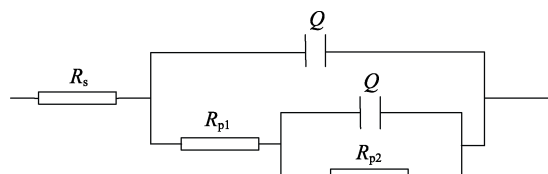


图 6 等效电路

Fig.6 Equivalent circuit diagram

表 6 冲刷腐蚀阻抗谱拟合数据

Tab.6 Fitting data of erosion impedance spectrum

$\text{Cl}^-$ concentrations/%	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_{p1}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_1\text{-Yo}/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$n_1$	$R_{p2}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$\text{CPE}_2\text{-Yo}/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$n_2$
1.5	4.15	913.5	0.000 511	0.6402	37.15	0.002 504	0.25
2.5	5.754	285.5	0.004 269	0.5229	42.61	0.001 762	0.60
3.5	7.36	159.7	0.015 350	0.57	147.5	0.003 084	0.54
4.5	12.6	65.08	0.184 800	0.80	122.1	0.008 037	0.70

## 2.2 质量变化数据

不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的质量损失速率如图 7 所示,分别量化了纯腐蚀与纯冲刷。可以看出,当  $\text{Cl}^-$  的质量分数为 1.5% 和 2.5% 时,纯腐蚀和冲刷腐蚀的质量损失速率增长较为缓慢;当  $\text{Cl}^-$  的质量分数达到 3.5% 时,质量损失速率急剧增加,表明 3.5% 为其临界浓度;

当  $\text{Cl}^-$  的质量分数为 4.5% 时,冲刷腐蚀的质量损失速率增长变缓,而由腐蚀导致的质量损失速率普遍高于冲刷,表明此时腐蚀对材料的破坏作用比冲刷大。此外,由纯冲刷导致的质量损失速率基本不变,这是由于每组试验除  $\text{Cl}^-$  浓度外,其他工况保持一致,并且实验中对材料施加了阴极保护,抑制了  $\text{Cl}^-$  及其他腐蚀性离子对材料的破坏。



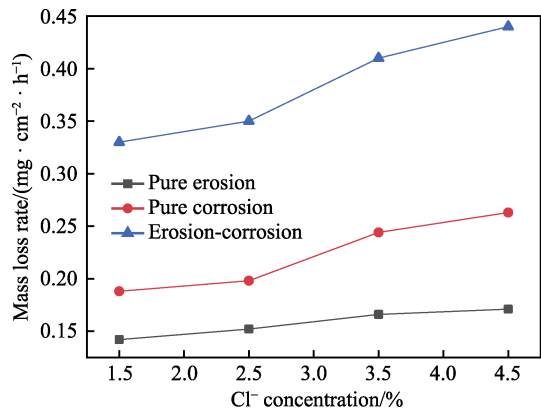


图 7 不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下质量损失速率  
Fig.7 Mass loss rate at different Cl<sup>-</sup> concentrations

为了更深入地分析 Cl<sup>-</sup> 对材料的影响和冲刷腐蚀机理，由式(3)—(5)对冲刷腐蚀各分量进行量化<sup>[12-13]</sup>，结果见表 7。

$$T = E + C \tag{3}$$

$$C = C_0 + C_e \tag{4}$$

$$E = E_0 + E_e \tag{5}$$

式中： $T$  为冲刷腐蚀总的质量损失，mg； $C$  为腐蚀导致的质量损失，通过式(6)从腐蚀电流密度转化为质量损失，mg； $C_0$  为纯腐蚀导致的质量损失，mg； $C_e$  为冲刷促进腐蚀导致的质量损失，mg； $E$  为冲刷导致的质量损失，mg； $E_0$  为纯冲刷导致的质量损失，mg； $E_e$  为腐蚀促进冲刷导致的质量损失，mg。

$$C = \frac{J \times W \times A \times t}{F \times n} \tag{6}$$

式中： $J$  为电流密度，A/cm<sup>2</sup>； $W$  为原子量，g/mol； $A$  为试样面积，cm<sup>2</sup>； $t$  为时间，s； $F$  为法拉第常数，取 96485 C/mol； $n$  为原子数，取 2。

由表 7 可知，随着 Cl<sup>-</sup> 浓度的增大，腐蚀对冲刷的促进作用逐渐增大。这是由于随着 Cl<sup>-</sup> 浓度的增大，材料表面逐渐粗化，导致微湍流的形成，溶解材料表面的加工硬化层<sup>[14-15]</sup>，降低其疲劳强度，从而促进冲刷进一步增加材料的腐蚀。冲刷对腐蚀的促进作用先

逐渐增大再减小，是由于随着 Cl<sup>-</sup> 浓度的增大，材料表面的腐蚀产物膜逐渐被破坏，因此冲刷对腐蚀的促进作用逐渐增大。当 Cl<sup>-</sup> 的质量分数为 4.5% 时，大量 Cl<sup>-</sup> 吸附在材料表面，导致其他阴离子不能参与阳极反应，从而致使腐蚀速率降低。根据 Stack 等<sup>[10]</sup> 确立的冲刷磨损和电化学腐蚀在整个冲刷腐蚀中的贡献程度（见表 8）可以看出，对于不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下的冲刷腐蚀，均以电化学腐蚀-冲刷磨损控制为主，其中电化学腐蚀对材料的破坏作用占据主导地位。

表 7 不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下的腐蚀数据分析  
Tab.7 Corrosion data analysis at different Cl<sup>-</sup> concentrations

Cl <sup>-</sup> concentration/%	$E$	$C$	$E_c$	$C_e$	$E/C$	$T$
1.5	0.142	0.188	0.046	0.071	0.75	0.33
2.5	0.152	0.198	0.056	0.076	0.77	0.35
3.5	0.166	0.244	0.070	0.097	0.68	0.41
4.5	0.171	0.263	0.075	0.049	0.65	0.44

表 8 冲刷及腐蚀对冲刷腐蚀的贡献  
Tab.8 Erosion and corrosion contribution to erosion-corrosion

E/C ratio	Contribution degree
$E/C < 0.1$	Mainly electrochemical corrosion
$1 > E/C > 0.1$	Electrochemical-erosion hybrid control
$10 > E/C > 1$	Erosion-electrochemical hybrid control
$E/C > 10$	Mainly erosion

2.3 腐蚀形貌

不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下的冲刷腐蚀形貌如图 8 所示，可以看出，在不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下，材料表面均有冲刷痕迹存在。随着 Cl<sup>-</sup> 浓度的升高，20 号钢表面逐渐出现腐蚀坑，且逐渐密集，腐蚀程度逐渐加剧。当 Cl<sup>-</sup> 的质量分数为 1.5% 时，表面经冲刷腐蚀后，腐蚀坑以大块聚集，且数量较少；当 Cl<sup>-</sup> 的质量分数为 4.5% 时，出现明显的腐蚀坑，且深度较深。

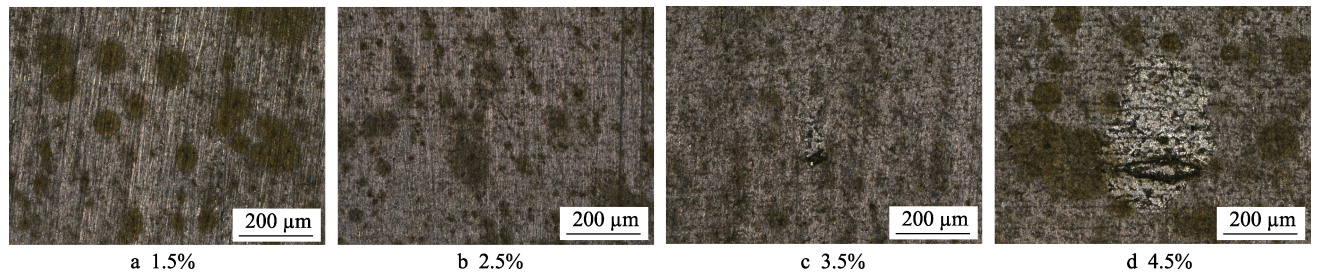


图 8 不同 Cl<sup>-</sup> 浓度下的冲刷腐蚀表面形貌  
Fig.8 Surface morphology of erosion-corrosion at different Cl<sup>-</sup> concentrations

3 结论

本次实验通过旋转圆柱电极实验装置，进行 20 号钢在模拟油田采出液条件下的冲刷腐蚀实验，通过

质量损失测试、电化学测试及形貌观测得出如下结论：

1) 20 号钢存在临界 Cl<sup>-</sup> 浓度，即 Cl<sup>-</sup> 质量分数为 3.5%。当 Cl<sup>-</sup> 的质量分数小于 3.5% 时，质量损失速率增长缓慢；当 Cl<sup>-</sup> 的质量分数大于 3.5% 时，质量损失

速率急剧增长。此外,随着  $\text{Cl}^-$  浓度的增加,腐蚀对冲刷的促进作用逐渐增大,而冲刷对腐蚀的促进作用先逐渐增大再减小。由于在纯冲刷实验中对试样施加了阴极保护,因此纯冲刷质量损失速率基本保持不变。

2) 在不同  $\text{Cl}^-$  浓度下,20 号碳钢的冲刷腐蚀均以电化学腐蚀-冲刷磨损混合控制为主,但以电化学腐蚀占据主要地位。

本次实验针对冲刷腐蚀协同效应,研究了油气集输管道用钢在不同  $\text{Cl}^-$  浓度下的质量损失速率及机理,可以通过改变介质中的矿化度、 $\text{Cl}^-$  浓度等,指导现场安全生产和控制管道冲刷腐蚀。

#### 参考文献:

- [1] MD AMINUL L, ZOHEIE F. Erosion-corrosion mechanism and comparison of erosion-corrosion performance of API steels[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 533-541.
- [2] ZHOU S, STACK M M, NEWMAN R C. Electrochemical studies of anodic dissolution of mild steel in a carbonate-bicarbonate buffer under erosion-corrosion[J]. *Corrosion science*, 1996, 38(7): 1071-1084.
- [3] 郑玉贵, 姚治铭, 龙康, 等. 液/固双相流冲刷腐蚀实验装置的研制及动态电化学测试[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1993, 5(4): 286-290.  
ZHENG Yu-gui, YAO Zhi-ming, LONG Kang, et al. Development of a liquid/solid two-phase flow erosion test apparatus and dynamic electrochemical testing[J]. *Corrosion science and protection technique*, 1993, 5(4): 286-290.
- [4] YANG Y, CHENG Y F. Parametric effects on the erosion-corrosion rate and mechanism of carbon steel pipes in oil sands slurry[J]. *Wear*, 2011, 262: 141-148.
- [5] JAVIERA A, MAGDALENA W. Multifactorial study of erosion-corrosion wear of a X65 steel by slurry of simulated copper tailing[J]. *Tribology international*, 2018, 126: 177-185.
- [6] 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.  
XU Zhe. Research on the erosion-corrosion behavior of P110 steel in liquid-solid two-phase flow[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [7] 陈虎, 周昊, 王树立, 等. 含砂 NaCl 水溶液中流速对 N80 钢冲刷腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(12): 936-940.
- CHEN Hu, ZHOU Hao, WANG Shuli, et al. Effects of flow velocity on erosion-corrosion behavior of N80 steel in NaCl aqueous solution containing sand[J]. *Corrosion protection*, 2018, 39(12): 936-940.
- [8] 林玉珍, 刘景军, 雍兴跃, 等. 数值算法在流体腐蚀研究中的应用-(I)层流条件下金属的腐蚀[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1999, 19(1): 1-7.  
LIN Yu-zhen, LIU Jing-jun, YONG Xing-yue, et al. Application of numerical method in the study of fluid corrosion-(I) laminar corrosion of metals[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 1999, 19(1): 1-7.
- [9] JOSHUA O, CALLUM R, RICHARD B, et al. Erosion-corrosion interactions of X65 carbon steel in aqueous  $\text{CO}_2$  environments[J]. *Wear*, 2018(9): 376-389.
- [10] HUANG Hua-liang, GUO Xing-peng, ZHANG Guo-an, et al. The effects of  $\text{Cl}^-$  ion concentration and relative humidity on atmospheric corrosion behavior of PCB-Cu under absorbed thin electrolyte layer[J]. *Corrosion science*, 2011, 53(4): 1230-1236.
- [11] STACK M M, ABD EI BADIA T M. Mapping erosion-corrosion of WC/Co-Cr based composite coatings: Particle velocity and applied potential effects[J]. *Surface and coatings technology*, 2006, 201(3-4): 1335-1347.
- [12] ZHANG G A, CHENG Y F. On the fundamentals of electrochemical corrosion of X65 steel in  $\text{CO}_2$ -containing formation water in the presence of acetic acid in petroleum production[J]. *Corrosion science*, 2009, 51(1): 87-94.
- [13] 李强. 管线钢油/水/砂多相流冲刷局部腐蚀研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2013.  
LI Qiang. Study of local erosion-corrosion of pipeline steel under multiphase flow of oil/water/sand[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2013.
- [14] ISLAM M A, FARHAT Z N, AHMED E M. Erosion enhanced corrosion and corrosion enhanced erosion of API X-70 pipeline steel[J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1952-1601.
- [15] POSTLETHWAITE J. Effect of chromate inhibitor on the mechanical and electrochemical components of erosion-corrosion in aqueous slurries of sand[J]. *Corrosion*, 1981, 37(1): 1-5.