

# 注多元热流体环境下流速对 N80 钢 腐蚀行为的影响研究

陈宇凡<sup>1</sup>, 林学强<sup>1\*</sup>, 孙建波<sup>1</sup>, 孙冲<sup>1</sup>, 徐学旭<sup>1</sup>, 逢波<sup>1</sup>, 陈慧<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** **目的** 研究不同流速条件下 N80 钢在注多元热流体环境中的腐蚀特征, 探究流速变化对 N80 钢腐蚀行为的影响规律及机理。**方法** 利用自制高温高压多相流冲刷腐蚀环路装置模拟不同流速 (0、0.5、1.0、2.0 m/s) 的注多元热流体环境, 采用失重法计算不同流速下 N80 钢的平均腐蚀速率, 并同时进行原位电化学测试。采用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对不同流速条件下 N80 钢腐蚀后的腐蚀产物物相组成和表面微观形貌进行分析。**结果** N80 钢在注多元热流体环境中的平均腐蚀速率随着流速增加而增大。流速增加影响 O<sub>2</sub> 的扩散传质过程、近表面离子分布和壁面剪切力的大小, 使腐蚀产物膜特征发生变化。0 m/s 时, 腐蚀产物主要由 FeCO<sub>3</sub> 和少量 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成, 为单层膜结构, 腐蚀形态为均匀腐蚀。0.5~2.0 m/s 范围内, 腐蚀产物种类增加, 主要由 FeCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和少量 FeO(OH) 组成, 呈双层膜结构, 同时 N80 钢表面腐蚀产物膜出现鼓泡, 且随流速增加鼓泡数量增加, 去除腐蚀产物膜后发现鼓泡下方存在局部腐蚀。原位电化学测试结果表明: 随着流速增加, 塔菲尔极化曲线的阳极斜率增大, 阴极斜率减小。电化学阻抗谱测试结果表明, N80 钢表面外层腐蚀产物膜电阻  $R_{fi}$ 、电荷转移电阻  $R_{ct}$  和扩散电阻  $W$  随流速增加而减小。**结论** 流速增大加快了 O<sub>2</sub> 的扩散传质过程, 使得腐蚀电化学控制步骤由阴极氧扩散过程转变为阳极溶解过程, 且试样表面保护性 FeCO<sub>3</sub> 膜厚度减小, 导致产物膜保护性降低。另外, Fe<sup>2+</sup> 更容易被氧化形成 Fe<sup>3+</sup>, 局部 FeCO<sub>3</sub> 被氧化成为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 破坏了内层膜的完整性, 导致局部腐蚀发生。

**关键词:** N80 钢; 流体流速; CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 共存; 多元热流体; 原位电化学测试; 腐蚀行为

**中图分类号:** TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)10-0124-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.10.009

## Effect of Flow Rate on Corrosion Behavior of N80 Steel in a Multivariate Thermal Fluid Environment

CHEN Yufan<sup>1</sup>, LIN Xueqiang<sup>1\*</sup>, SUN Jianbo<sup>1</sup>, SUN Chong<sup>1</sup>, XU Xuexu<sup>1</sup>, PANG Bo<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China;

2. Shenzhen Polytechnic University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

**ABSTRACT:** In order to study the corrosion characteristics of N80 steel under different flow rate conditions in the environment

收稿日期: 2023-07-12; 修订日期: 2023-11-14

**Received:** 2023-07-12; **Revised:** 2023-11-14

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目 (51701240); 中国石油大学(华东)校自主创新项目 (17CX02023A)

**Fund:** National Natural Science Foundation Youth Fund Project (51701240); China University of Petroleum (East China) Independent Innovation Project (17CX02023A)

**引文格式:** 陈宇凡, 林学强, 孙建波, 等. 注多元热流体环境下流速对 N80 钢腐蚀行为的影响研究[J]. 表面技术, 2024, 53(10): 124-133.  
CHEN Yufan, LIN Xueqiang, SUN Jianbo, et al. Effect of Flow Rate on Corrosion Behavior of N80 Steel in a Multivariate Thermal Fluid Environment[J]. Surface Technology, 2024, 53(10): 124-133.

\*通信作者 (Corresponding author)



of injecting multiple thermal fluids, and to explore the influence and mechanism of flow rate changes on the corrosion behavior of N80 steel, this article used a self-made high-temperature and high-pressure multiphase flow erosion corrosion loop device to simulate the environment of injecting multiple thermal fluids with different flow rates (0, 0.5, 1.0, 2.0 m/s). The corrosion simulation experiment was conducted in a corrosion testing section, and the average corrosion rate of N80 steel at different flow rates was measured by the weightlessness method. At the same time, in-situ electrochemical testing was conducted under the same conditions in the electrochemical testing section. Scanning electron microscope (SEM) and diffraction of X-rays (XRD) were used to analyze the phase composition and surface morphology of corrosion products of N80 steel after corrosion at different flow rates. The results indicated that the average corrosion rate of N80 steel in the multi element hot fluid environment increased with the increase of flow rate. The flow rate affected the diffusion and mass transfer of  $O_2$ , the distribution of near surface ions, and the magnitude of wall shear force, leading to changes in the characteristics of the corrosion product film and inducing varying degrees of corrosion of the substrate. At 0 m/s, the corrosion product was composed of  $FeCO_3$  and a small amount of  $Fe_2O_3$ , which was a single-layer film structure, and the bond between it and the steel substrate was relatively tight, and the corrosion was uniform. Within the range of 0.5-2.0 m/s, the types of corrosion products increased, which mainly composed of  $FeCO_3$ ,  $Fe_2O_3$ , and small amounts of  $FeO(OH)$ . The film layer showed a double-layer structure. The outer layer was an iron oxide film, which was reddish brown in color and had weak binding force with the inner layer film, making it easy to be detached. The inner layer was similar to the product film at 0 m/s. The macroscopic morphology showed that there were bubbles in the gaps between the inner and outer film layers, and the number of bubbles increased with the increase of the flow rate. After removing surface corrosion products, it was found that local corrosion occurred below the bubbles. In addition, the in-situ electrochemical results showed that as the flow rate increased, the anode slope increased, while the cathode slope decreased. The outer corrosion product film resistance  $R_{f1}$ , charge transfer resistance  $R_{ct}$ , and diffusion resistance  $W$  showed a decreasing trend. Therefore, the above experimental results indicate that the increase in flow velocity accelerates the diffusion and mass transfer process of  $O_2$ , causing the corrosion electrochemical control step to change from cathodic oxygen diffusion process to anodic dissolution process. Additionally, the protective  $FeCO_3$  film thickness on the sample surface decreases, leading to a decrease in the protective properties of the product film. Furthermore,  $Fe^{2+}$  is more easily oxidized to form  $Fe^{3+}$ , and local  $FeCO_3$  is oxidized to  $Fe_2O_3$ , thus damaging the integrity of the inner film and causing localized corrosion.

**KEY WORDS:** N80 steel; flow rate;  $CO_2$ - $O_2$  coexistence; multicomponent thermal fluid; in-situ electrochemistry; corrosion behavior

随着常规油气藏的减少,非常规油气资源的开发利用已成为当前油气开采的主要研究方向<sup>[1-2]</sup>。在全球已发现的非常规油气资源中,稠油储量占比超过 2/3。但稠油具有黏度高、流动性差等特征,开采难度大<sup>[3]</sup>。目前,注多元热流体吞吐技术已成为未来稠油开采的主要技术手段,然而该技术的应用易导致生产过程中 2 种腐蚀性气体  $CO_2$  与  $O_2$  同时出现,进而引发油井管的腐蚀失效<sup>[4-5]</sup>。

$CO_2$  腐蚀早已被众多学者研究。当  $CO_2$  溶于水会形成腐蚀性较强的  $H_2CO_3$ , 并通过多步水解产生  $H^+$  与  $CO_3^{2-}$ , 其中  $CO_3^{2-}$  易与金属表面阳极溶解形成  $Fe^{2+}$  结合,并形成  $FeCO_3$  沉积在金属表面,并且  $FeCO_3$  产物膜具有较好的保护性,可阻碍腐蚀进程<sup>[6-9]</sup>。目前,国内外学者在  $CO_2$ - $O_2$  环境中对不同金属材料的腐蚀行为进行了大量研究,结果表明  $CO_2$ - $O_2$  共存环境下腐蚀产物膜由  $FeCO_3$  与多种铁氧化物组成,并呈现多层结构<sup>[10-12]</sup>,金属腐蚀速率明显高于纯  $CO_2$  环境<sup>[13-14]</sup>。Lin 等<sup>[14]</sup>发现在注多元热流体环境中 60 °C 条件下时, $O_2$  与  $Cl^-$  的共同作用下会促进 N80 钢局部

腐蚀的发生。Hua 等<sup>[15]</sup>认为  $O_2$  的增加抑制了 X65 钢表面  $FeCO_3$  膜的生长,形成了主要由  $Fe_2O_3$  组成的腐蚀产物。同时,Xia 等<sup>[16]</sup>也发现  $O_2$  的加入会破坏 3Cr 钢表面  $FeCO_3$  膜的保护性以及 Cr 的富集,使其在阻碍腐蚀介质向基体扩散方面的能力较弱。这是由于  $O_2$  具有较强的氧化性,可将  $Fe^{2+}$  氧化为  $Fe^{3+}$ ,从而使  $FeO(OH)$  等中间产物转化形成疏松多孔的  $Fe_2O_3$  与  $Fe_3O_4$  外层膜,甚至在特定情况下可直接将  $FeCO_3$  转变为  $Fe_2O_3$ ,破坏内层腐蚀产物膜结构,加速腐蚀的发生<sup>[17-19]</sup>。

综上所述,国内外学者对  $CO_2$ - $O_2$  共存环境下材料的腐蚀行为已开展了较多研究,但就流速对材料在注多元热流体环境下腐蚀行为的影响研究较为匮乏。在实际多元热流体注入过程中,流体处于流动状态,将导致与静态条件不同的金属腐蚀行为。赵帅等<sup>[20]</sup>和庞洪晨等<sup>[21]</sup>发现在  $CO_2$ - $O_2$  共存环境下随着流速的增大,碳钢的均匀腐蚀速率逐渐增大。这是由于流速的出现会通过流体力加速去除或溶解表面膜,并加速钢表面和本体溶液之间反应物和生成物的传质过程,



进而改变金属-氧化物界面上的电化学反应, 诱发流动加速腐蚀 (FAC) [22]。此外,  $O_2$  在水溶液中的溶解度较低, 其对金属腐蚀行为的影响主要依靠溶解氧由溶液向金属表面传递来实现, 中间包含溶解氧在溶液对流作用下迁移至金属表面附近以及在浓度梯度作用下扩散到金属表面等步骤, 因而在溶液流速较低时,  $O_2$  难以穿过扩散层传输至金属表面, 此时影响材料腐蚀速率的决定步骤为稳定状态下  $O_2$  的扩散过程 [23]。但随着流速的增加, 溶液传质速度加快会促进  $O_2$  扩散 [24-25]。赵国仙等 [26] 发现, 在  $CO_2$  环境下 1.5 m/s 为临界流速, 小于该值时, P110 钢的平均腐蚀速率随流速增加而增大, 大于该值时腐蚀产物膜特征发生改变, 腐蚀速率降低。另外, Jiang 等 [27] 认为流速还可以加快阴极反应, 影响  $Fe^{2+}$  的析出, 导致阳极溶解加速。可见, 流动状态下  $CO_2$ - $O_2$  共存环境中的腐蚀机制较为复杂, 目前也鲜有研究能够对该环境下的腐蚀行为给出统一的解释。

本研究以 N80 钢为材料, 利用图 1 所示的自主设计的高温高压多相流冲刷腐蚀环路装置, 结合腐蚀模拟试验和原位电化学测试技术, 研究了  $CO_2$ - $O_2$  共存环境下流速对 N80 钢腐蚀行为的影响规律, 探讨了不同流速条件下  $CO_2$  腐蚀与  $O_2$  腐蚀之间的交互作用机理, 为稠油开采过程中的腐蚀控制提供了参考。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验材料为油套管所用 N80 钢, 其化学成分为 0.46%C、0.2%Si、1.16%Mn、0.004%S、0.025%P、0.019%Cr、0.03%Ni、0.006%Mo、Fe 余量 (质量分数)。将材料分别加工成用于腐蚀模拟试验的 1/8 圆弧形挂片试样和原位电化学测试的 20°圆弧形电化学试样, 具体尺寸如图 1b 所示。试验前试样表面用 SiC 水砂纸从 120#逐级打磨至 800#, 然后用去离子水冲

洗、酒精擦拭、丙酮除油, 冷风吹干后称量并记录试验前质量, 随后放入干燥器中备用。试验溶液为用去离子水和分析纯化学药品配制而成的模拟油田采出液, 其可溶性离子质量浓度为: 3 967.2 mg/L  $Na^+ + K^+$ 、76 mg/L  $Ca^{2+}$ 、29.2 mg/L  $Mg^{2+}$ 、2 mg/L  $Ba^{2+}$ 、4710 mg/L  $Cl^-$ 、16 mg/L  $SO_4^{2-}$ 、2 782 mg/L  $HCO_3^-$ 。

### 1.2 腐蚀模拟试验

采用图 1b 所示环路装置中的腐蚀测试管段进行腐蚀模拟试验。试验前, 将 1/8 圆弧形挂片试样嵌入聚四氟乙烯夹具中, 并将夹具放入测试管段进行固定。随后将用高纯  $N_2$  除氧 24 h 的 50 L 模拟油田采出液加入环路装置中, 继续除氧 2 h。除氧完成后, 加热装置至 60 °C, 然后通入 52% $CO_2$ -2.9% $O_2$ - $N_2$  (体积分数) 混合气至试验压力 1 MPa。压力稳定后溶液 pH 值为 5.74。打开离心泵使模拟液在装置中循环流动, 通过调节离心泵功率来控制溶液流速, 试验流速分别设置为 0、0.5、1.0、2.0 m/s。利用 JSM 7200F 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 D-max 2500/PC 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对不同流速条件下 N80 钢试样腐蚀 168 h 后表面形成的腐蚀产物的微观形貌和物相组成进行表征和分析。同时, 根据标准 ASTM Standard G1-03 配制酸洗液以去除试样表面腐蚀产物, 并利用式 (1) 计算 N80 钢的腐蚀速率 ( $C_R$ )。

$$C_R = \frac{87\,600\Delta W}{\rho S t} \quad (1)$$

式中:  $\Delta W$  为材料损失质量, g;  $\rho$  为 N80 钢的密度,  $g/cm^3$ ;  $S$  为所用试样工作面面积,  $cm^2$ ;  $t$  为腐蚀周期, h。

### 1.3 原位电化学测试

采用图 1b 所示环路装置中的电化学测试管段进行不同流速条件下的原位电化学阻抗谱和动电位极化测试。电化学测试采用 Gamary 1010E 电化学工作

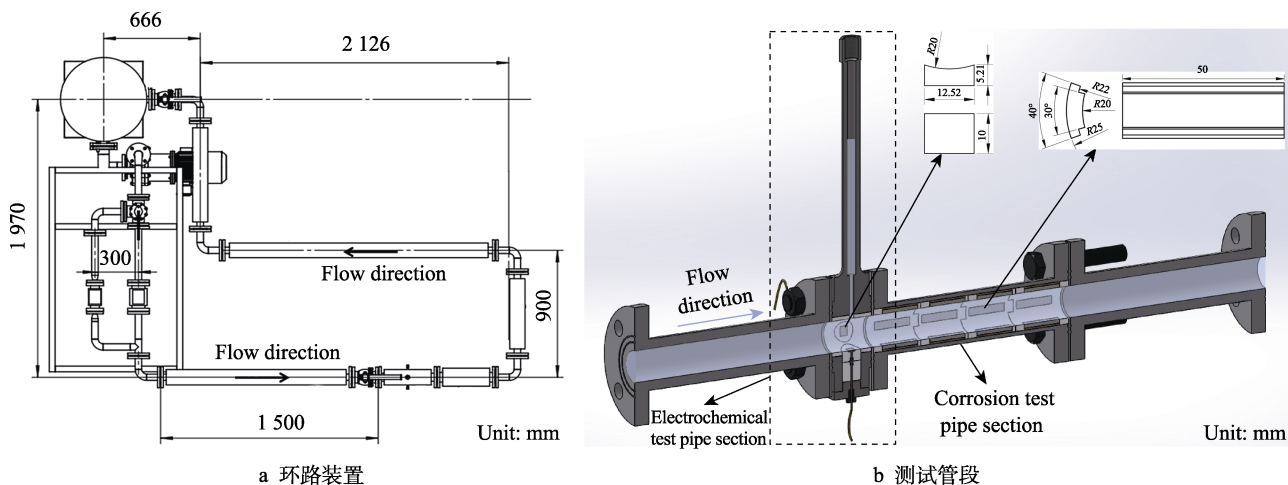


图 1 环路装置及试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of loop device and sample size: a) loop device; b) test pipe section



站在三电极体系中进行。电化学试样在溶液中暴露面积为  $1.6 \text{ cm}^2$ , Ag/AgCl 电极作为参比电极 (RE), 铂片为对电极 (CE), 试验温度为  $60^\circ\text{C}$ 。首先对腐蚀 168 h 后试样的开路电位 (OCP) 进行测量, 待开路电位稳定 30 min 后依次进行电化学阻抗谱 (EIS) 和动电位极化曲线的测量。电化学阻抗谱测量频率范围为  $10^{-2} \sim 10^6 \text{ Hz}$ ; 动电位极化曲线测试电位范围为  $-600 \sim 800 \text{ mV}$  (vs. OCP), 扫描速率为  $2 \text{ mV/s}$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 宏观形貌分析

不同流速条件下 N80 钢腐蚀后的表面宏观形貌

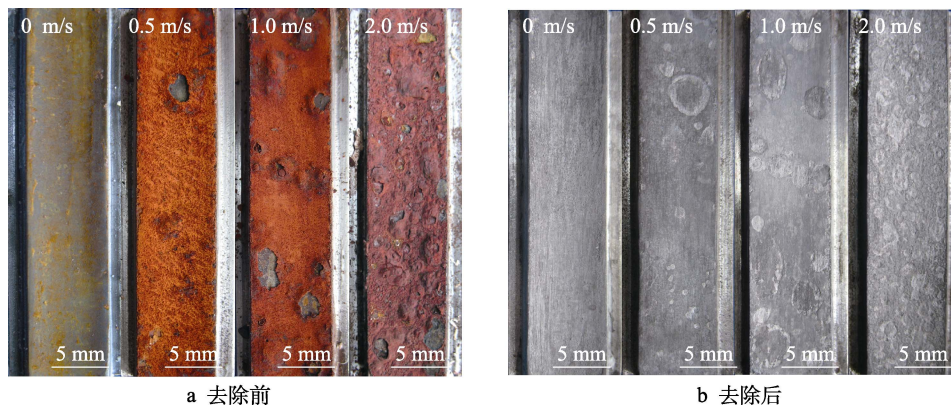


图 2 不同流速下 N80 钢腐蚀产物膜去除前后宏观形貌对比

Fig.2 Comparison of macro morphologies of N80 steel before and after corrosion product film removal at different flow rates: a) before removal; b) after removal

### 2.2 微观形貌及物相分析

用刀片将 N80 钢在不同流速条件下腐蚀 7 d 后表面形成的腐蚀产物刮下, 制成粉末后测得的 XRD 结果如图 3 所示。0 m/s 条件下腐蚀产物主要由  $\text{FeCO}_3$  和少量  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  构成, 其他流速条件下的腐蚀产物则主要由  $\text{FeCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  以及少量  $\text{FeO}(\text{OH})$  组成, 并伴随

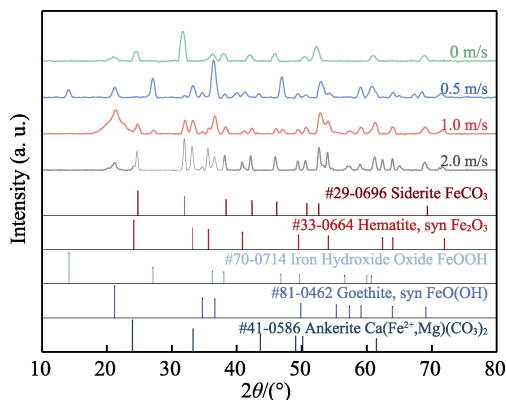


图 3 不同流速下 N80 钢腐蚀产物膜的 XRD 图谱  
Fig.3 XRD patterns of corrosion product film on N80 steel at different flow rates

如图 2 所示。图 2a 为酸洗前 N80 钢表面宏观形貌, 可见 0 m/s 条件下试样表面整体呈现灰黑色, 局部有淡黄色腐蚀产物附着, 而其他流速条件下试样表面均呈现红褐色, 并伴随有鼓泡现象发生。另外, 随着流速的增加, 试样表面颜色逐渐加深, 鼓泡数量增加。通过破损的鼓泡可以发现, 试样表面腐蚀产物膜为多层膜结构, 内层膜与 0 m/s 条件下的产物膜相类似, 均呈灰黑色。此外, 在 0.5~2.0 m/s 流速条件下, 腐蚀产物与基体间结合力较弱, 极易脱落, 且随着流速的增大, 表面腐蚀产物脱落更加严重。去除表面腐蚀产物后, 试样表面形貌如图 2b 所示, 均呈灰白色。但值得注意的是, 0 m/s 条件下试样表面发生均匀腐蚀, 而其他流速条件下鼓泡对应位置均有浅坑出现, 呈现出不同程度的局部腐蚀。

有少量  $\text{Ca}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$  夹杂<sup>[28]</sup>。

图 4 为不同流速条件下 N80 钢腐蚀后的表面微观形貌。由图 4a 可知, 0 m/s 条件下 N80 钢表面被晶粒紧密堆垛的  $\text{FeCO}_3$  层所覆盖, 局部有少量  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  附着, 而其他流速条件下, N80 钢表面腐蚀产物膜形貌发生较大变化, 有分层现象发生。0.5 m/s 时的腐蚀产物形貌如图 4b 所示, 外层由球状  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  晶粒堆积形成, 鼓泡破裂处内层膜微观形貌与 0 m/s 时类似, 但有大量细小的针状  $\text{FeO}(\text{OH})$  与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  晶粒在  $\text{FeCO}_3$  膜表面形核。流速增加至 1.0 m/s 时, 腐蚀产物膜形貌如图 4c 所示, 外层产物膜组成并未发生改变, 但有孔隙产生, 腐蚀介质更易穿过膜层到达内层, 此时内层膜由针状  $\text{FeO}(\text{OH})$  与  $\text{FeCO}_3$  晶粒形成。当流速进一步增大到 2.0 m/s 时, 外层腐蚀产物膜仍由  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  组成, 但结构更加疏松, 内层膜则由  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{FeCO}_3$  共同组成, 且  $\text{FeCO}_3$  晶粒尺寸减小见图 4d。由此可以说明随着流速的增大, 内层腐蚀产物膜组成随之发生改变, 同时外层膜的完整性降低, 对基体的保护作用逐渐丧失。

图 5 为不同流速条件下 N80 钢腐蚀后的截面微



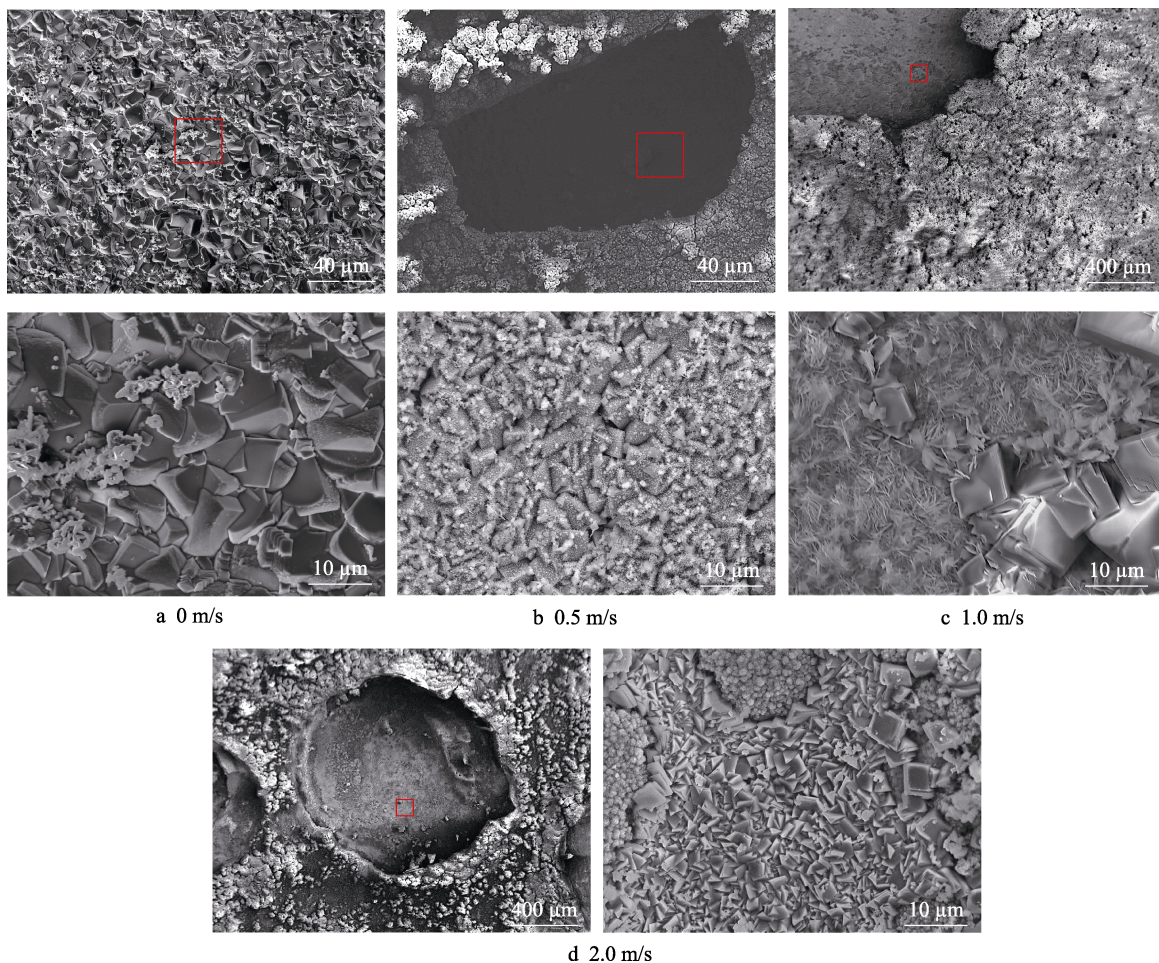


图 4 N80 钢不同流速下腐蚀产物膜的 SEM 微观形貌

Fig.4 SEM micro morphologies of corrosion product film on N80 steel at different flow rates

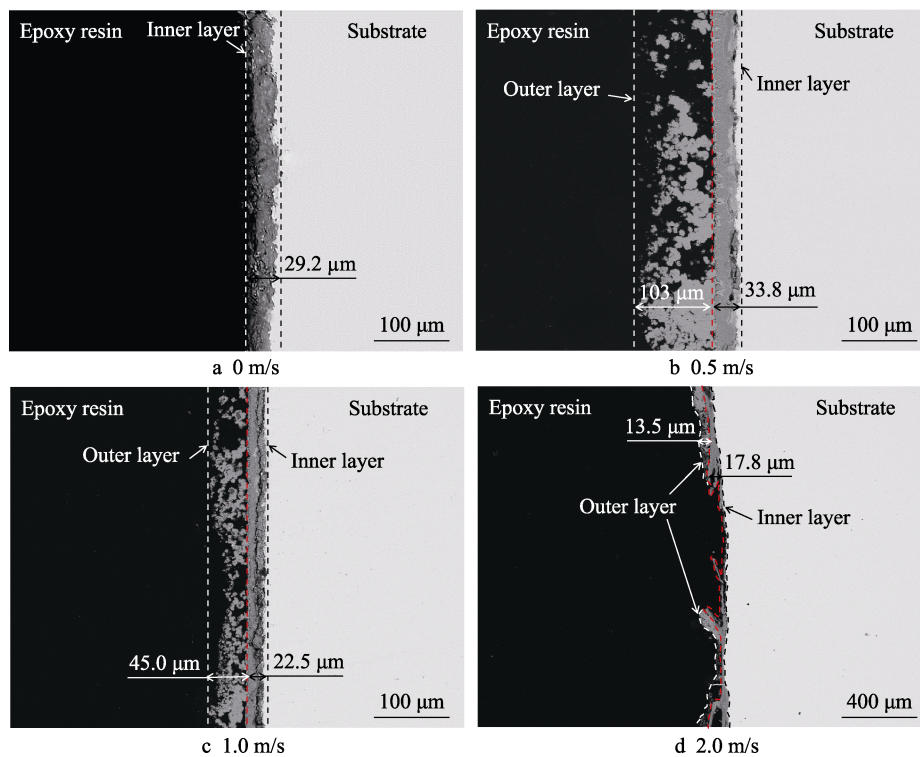


图 5 不同流速下 N80 钢腐蚀产物膜截面微观形貌

Fig.5 Cross-sectional morphologies of corrosion product film on N80 steel at different flow rates



观形貌。可见, 0 m/s 条件下截面仅观察到完整且连续的单层  $\text{FeCO}_3$  膜, 其他流速条件下则可以分辨出具有不同衬度的双层膜, 其中外层  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  膜疏松多孔, 膜间结合力弱, 极易脱落, 内层  $\text{FeCO}_3$  膜则较为致密, 与基体结合力较强。此外, 通过对膜层厚度进行测量发现, 0.5~2.0 m/s 范围内, 内层  $\text{FeCO}_3$  膜厚度依次为 33.8、22.5 和 17.8  $\mu\text{m}$ , 外层膜则相对较厚, 分别为 103、45 和 13.5  $\mu\text{m}$ 。内外层腐蚀产物膜厚度均随着流速的增大而减小, 甚至于 2.0 m/s 时部分基体直接暴露在腐蚀介质中, 腐蚀严重程度增加, 这与流速增大导致的对流传质过程加快以及流体冲刷作用加强有关。

2.3 腐蚀速率

在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中, N80 钢在不同流速条件下腐蚀 168 h 后的平均腐蚀速率如图 6 所示。由图 6 可知, 随着流速的增加, N80 钢腐蚀速率逐渐增大。根据 NACE ERP-0775 中对碳钢腐蚀严重程度的划分标准, 4 种流速条件下, N80 钢均发生极严重腐蚀。0 m/s 时 N80 钢腐蚀速率最低, 为 0.517 7 mm/a, 当流速增大至 0.5 m/s, 腐蚀速率急剧增加至 1.212 9 mm/a, 近似为 0 m/s 条件下的 2 倍。流速继续升高至 1.0 m/s, 腐蚀速率增速减慢, 此时腐蚀速率为 1.369 9 mm/a。而在 2.0 m/s 流速条件下, 腐蚀速率增速再次提升, 腐蚀速率达到了 1.88 mm/a, 其变化规律与试样宏观形貌中观察到的腐蚀严重程度相对应。这同样与部分学者<sup>[20-21,26]</sup>的研究结果一致。研究发现, 流速增大会改变腐蚀产物膜的形貌与结构, 破坏其完整性, 并有利于腐蚀性介质和电荷的传递, 促进腐蚀的发生。

2.4 原位电化学测试

在与腐蚀模拟试验相同环境下测得的 N80 钢腐蚀 168 h 后的原位电化学阻抗谱如图 7 所示。结合图 5 中不同流速条件下腐蚀产物膜的结构特征分析图 7 中反应阻抗谱的形状特征, 其可用图 8 所示 2 种等效电路图分别拟合流速低于 2.0、2.0 m/s 时的 Nyquist 图。由图 7 可知, 不同流速下测得的 Nyquist 图中均

呈现 3 个时间常数, 出现 3 个容抗弧, 分别为对应溶液电阻 ( $R_s$ )、外层腐蚀产物膜电容 ( $Q_{f1}$ ) 和电阻 ( $R_{f1}$ ) 的高频容抗弧, 与内层腐蚀产物膜电容 ( $Q_{f2}$ ) 和电阻 ( $R_{f2}$ ) 有关的中频容抗弧, 以及对应双电层电容 ( $Q_{dl}$ )、电荷转移电阻 ( $R_{ct}$ ) 和扩散电阻 ( $W$ ) 的低频容抗弧。同时还可以发现, 随着流速的增大, 低频容抗弧半径呈减小趋势。

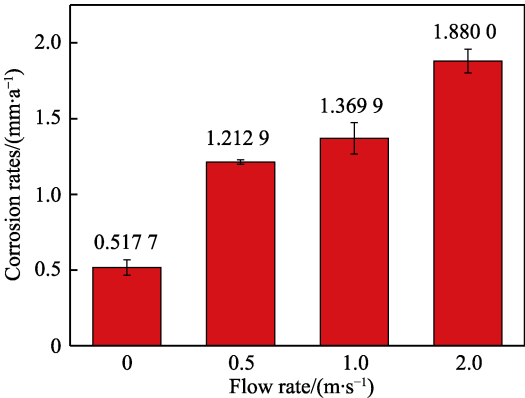


图 6 N80 钢在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中不同流速条件下的平均腐蚀速率

Fig.6 Average corrosion rate of N80 steel under different flow rate conditions in a  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  coexisting environment

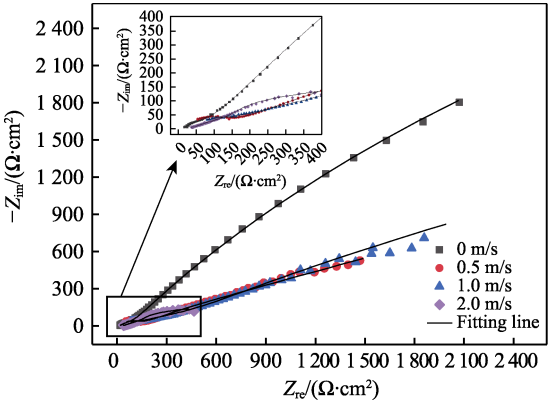


图 7 N80 钢在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中不同流速下腐蚀 168 h 后的电化学阻抗谱测试结果

Fig.7 Electrochemical impedance spectroscopy test results of N80 steel after 168 h of corrosion at different flow rates in a  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  coexistent environment

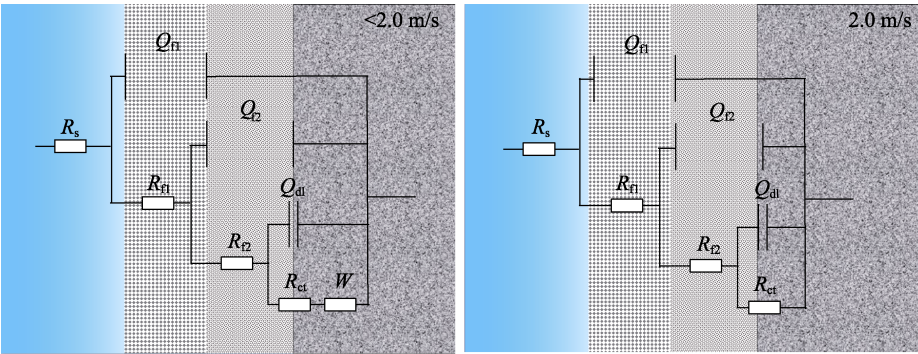


图 8 腐蚀产物膜 EIS 拟合等效电路

Fig.8 EIS spectra fitting equivalent circuit diagram of corrosion product film



表 1 为由 Zsimpwin 软件拟合得到的不同流速条件下 N80 钢表面形成的腐蚀产物膜的电化学阻抗数据。可知,当流速由 0 m/s 增加至 0.5 m/s 时,外层腐蚀产物膜电阻  $R_{f1}$  增大,而由 0.5 m/s 增加至 2.0 m/s 的过程中,  $R_{f1}$  值逐渐减小。此外,扩散电阻  $W$  和电荷转移电阻  $R_{ct}$  的大小均随流速增大呈单调递减的趋

势。由此表明随流速增大,溶解氧向材料表面扩散的阻力逐渐减小,导致外层产物膜的保护性先增大后减小,同时流速增加还导致了内层腐蚀产物膜的致密性下降,电荷更易越过基体与腐蚀产物截面双电层,这与图 5 所示截面形貌以及图 6 所示腐蚀速率结果一致。

表 1 不同流速下电化学阻抗谱拟合结果  
Tab.1 The fitting results of EIS spectra at different flow rates

Flow rate	0 m/s	0.5 m/s	1.0 m/s	2.0 m/s
$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	15.3	11.8	52.7	30.5
$Q_{f1}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$2.6 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-7}$
$n_1$	1	0.522 4	0.915 2	0.932 4
$R_{f1}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	6.0	215.5	56.1	6.6
$Q_{f2}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
$n_2$	0.601 7	0.365 4	0.267 7	0.375 8
$R_{f2}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	14 730.0	4 857.0	49.2	119.1
$Q_{dl}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$
$n_3$	0.581 1	0.892 7	0.255 1	0.523 7
$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	11 800.0	2 184.0	1 673.0	641.2
$W/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	109 800.0	0.019 98	0.000 259	—

图 9 为 N80 钢在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境下腐蚀 168 h 后测得的动电位极化曲线。由图 9 中可知,0 m/s 情况下 N80 钢的自腐蚀电位明显低于其他流速条件下,表明 0 m/s 时 N80 钢的电化学腐蚀倾向高于其他流速条件。此外,随着流速的增加,极化曲线向左上方移动,自腐蚀电位逐渐升高。

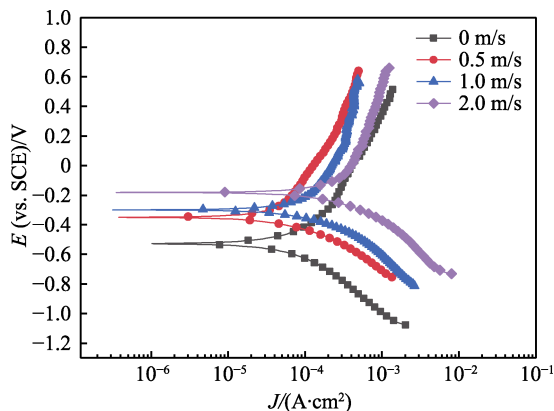


图 9 N80 钢在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中不同流速下腐蚀 168 h 后的极化曲线  
Fig.9 Polarization curves of different flow rates tested after N80 steel corroded in a  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  coexistence environment for 168 h

对图 9 所示极化曲线进行拟合,相应结果列于表 2。从表 2 可知,自腐蚀电流密度随流速的增加而增大,当试验条件分别由 0 m/s 转变为 0.5 m/s、1.0 m/s 转变为 2.0 m/s 时,自腐蚀电流密度骤增,分别由  $21.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  增加至  $42.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、由  $46.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  增加至  $69.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,与平均腐蚀速率变化规律相同。此外,对比 0 m/s 与其他流速条件下的极化曲线拟合结

表 2 N80 钢在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中不同流速下的极化曲线拟合结果

Tab.2 Fitting results of polarization curves of N80 steel under different flow rates in a  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  coexisting environment

Flow velocity	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$b_a/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$b_c/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$
0 m/s	-508.7	$2.16 \times 10^{-5}$	205.0	255.2
0.5 m/s	-337.2	$4.27 \times 10^{-5}$	492.0	202.0
1.0 m/s	-297.5	$4.64 \times 10^{-5}$	465.9	209.2
2.0 m/s	-179.8	$6.98 \times 10^{-5}$	433.4	209.6

果可以发现,0 m/s 时的阴极极化率大于阳极极化率,金属表面电化学反应主要受阴极氧扩散过程控制,而其他流速条件下则恰好相反,表面电化学反应转变为铁的阳极溶解过程控制。

## 2.5 讨论

在  $\text{CO}_2\text{-O}_2$  共存环境中,阳极反应主要为铁的阳极溶解,但阴极反应较为复杂,涉及二氧化碳的酸性去极化腐蚀和氧去极化腐蚀<sup>[29]</sup>。当溶液 pH 在 4~6 时,酸性条件下的吸氧反应与  $\text{CO}_2$  的水解反应分别如式 (2)~(4) 所示<sup>[30]</sup>。



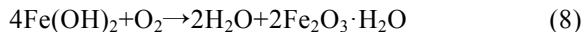
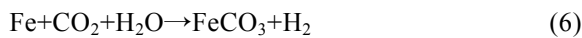
根据表 3 极化曲线拟合结果可知,0 m/s 条件下溶解氧穿过溶液及扩散层到达材料表面的能力有限,体系受阴极氧扩散过程控制,因而 N80 钢腐蚀后表面产生的  $\text{Fe}^{2+}$  优先与溶液中  $\text{CO}_3^{2-}$  进一步反应或与  $\text{HCO}_3^-$  两步反应形成  $\text{FeCO}_3$  晶粒,并沉积在试样表面,形成结构致密且覆盖较为完整的腐蚀产物膜。另外,



表面  $\text{FeCO}_3$  晶粒的沉积驱动力取决于过饱和度  $S^{[7]}$ :

$$S = \frac{\alpha_{\text{Fe}^{2+}} \alpha_{\text{CO}_3^{2-}}}{K_{\text{sp}}} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{\text{Fe}^{2+}}$ 、 $\alpha_{\text{CO}_3^{2-}}$  是离子活度, mol;  $K_{\text{sp}}$  为  $\text{FeCO}_3$  的溶解度常数。当  $S > 1$  时,  $\text{FeCO}_3$  将在表面形核, 但规模有限; 当  $S < 1$  时,  $\text{Fe}^{2+}$  活度较低, 体系处于欠饱和状态,  $\text{FeCO}_3$  不仅不会发生沉积, 更存在溶解的可能性。而在  $60^\circ\text{C}$  情况下,  $S$  恰好在 1 左右,  $\text{FeCO}_3$  可在基体表面沉积并长大<sup>[7]</sup>。待溶解氧分子穿过溶液与扩散层到达基体表面时, 完整且致密的  $\text{FeCO}_3$  膜对基体已有良好的保护作用, 此时溶解氧仅与表面中间产物  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  反应形成少量  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 并附着于  $\text{FeCO}_3$  膜表层, 有效避免了基体与溶解氧的接触。在该体系下, 腐蚀产物的形成反应如式 (6) ~ (8) 所示。



而在  $0.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$  范围内, 流速增加对 N80 钢腐蚀行为的影响主要表现为 2 个方面, 一是传质过程, 其中包含  $\text{O}_2$  的扩散传质和近表面  $\text{Fe}^{2+}$  的对流传质, 二是流体对表面产物膜的冲刷作用<sup>[31]</sup>。首先, 流速增加增大了溶液与  $\text{O}_2$  的接触面积, 使得溶液中溶解氧含量增加, 同时也加快了溶解氧在溶液中的扩散传质过程, 使其能够更快更多地到达基体表面, 但  $0.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$  条件下塔菲尔曲线阴极斜率变化较小, 表明此时流速对  $\text{O}_2$  扩散传质过程的影响不再显著。另一方面, 流体对表面产物膜的冲刷作用可借助壁面剪切力 ( $\tau$ ) 的大小进行表示, 其计算方法如式 (9) 所示<sup>[32]</sup>:

$$\tau = \frac{\rho f v^2}{2} \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为溶液密度, 近似取纯水密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $f$  为摩擦因数, 取 0.46;  $v$  为流速,  $\text{m/s}$ 。当壁面剪切力大小超过表面产物膜的结合强度时, 会降低产物膜保护性并加速腐蚀。但由图 10 不同流速条件下的壁面剪切力计算结果可知,  $0.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$  条件下壁面剪切力大小变化范围为  $0.115 \sim 1.84 \text{ Pa}$ ,  $2.0 \text{ m/s}$  时达到最大值。根据 Nesic 等<sup>[33]</sup>、Denpo 等<sup>[34]</sup>和 Elgaddafi 等<sup>[35]</sup>的研究结果, 在壁面剪切应力小于  $20.33 \text{ Pa}$  情况下, 腐蚀速率主要受传质过程控制。据此推断在  $0.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$  范围内材料近表面对流传质过程为主要控制步骤, 其导致基体近表面大量  $\text{Fe}^{2+}$  传输到主体溶液, 降低了试样表面  $\text{Fe}^{2+}$  浓度,  $\text{FeCO}_3$  量减少, 内层腐蚀产物膜厚度降低。

图 11 为在  $\text{CO}_2$ - $\text{O}_2$  共存环境中流速对 N80 钢腐

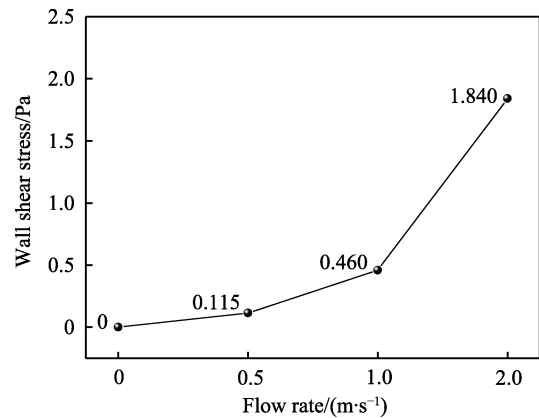


图 10 不同流速条件下的壁面剪切力  
Fig.10 Wall shear force under different flow rate conditions

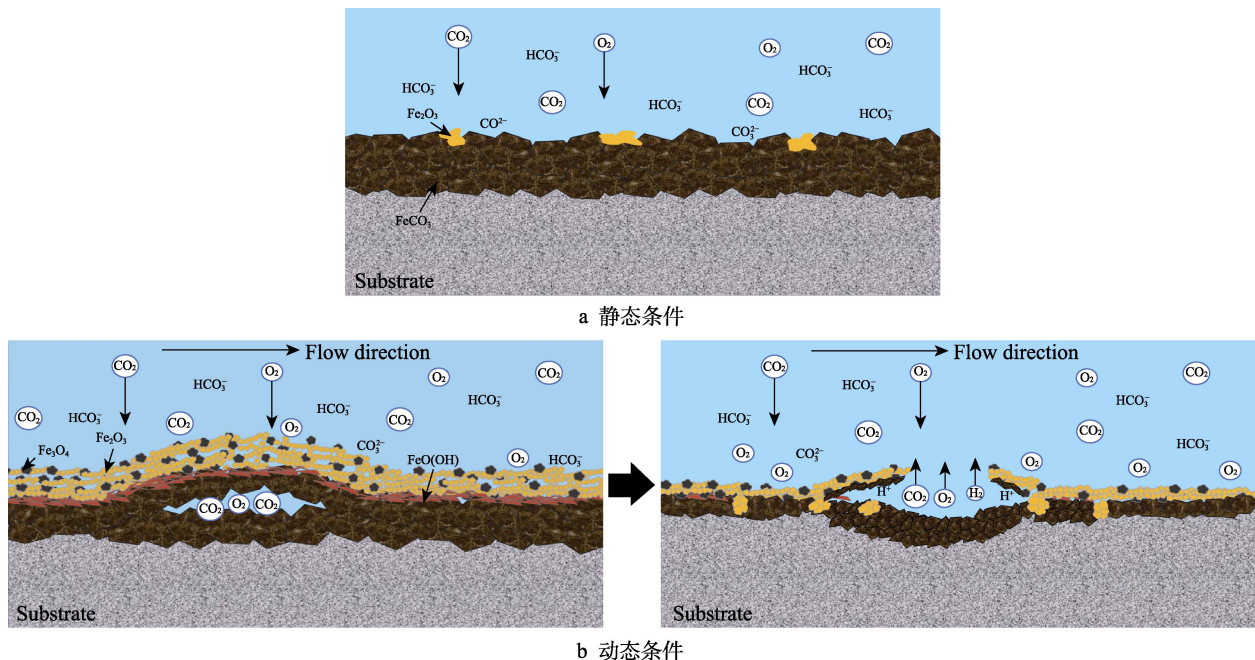
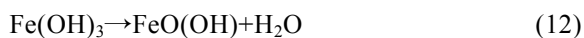
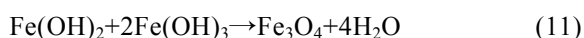
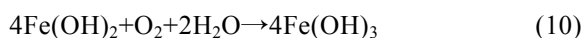


图 11 不同流速条件下腐蚀产物膜的形成机理

Fig.11 Formation mechanism of corrosion product film under different flow rate conditions:  
a) static conditions; b) dynamic conditions



蚀行为的影响机理模型。静态 (0 m/s) 条件下, 溶液中溶解氧含量较低, 仅将溶液中的部分  $\text{Fe}^{2+}$  氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ , 形成少量 Fe 的氧化物并附着在  $\text{FeCO}_3$  膜表面。流速增加导致溶液中溶解氧含量增加, 溶液中大量的  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成为  $\text{Fe}^{3+}$ , 使得外层铁氧化物膜在内层腐蚀产物膜表面形成, 形成反应如式 (10) ~ (13) 所示。同时, 由于内层  $\text{FeCO}_3$  膜不足以阻碍溶解氧向基体表面侵入, 导致部分溶解氧穿过内层  $\text{FeCO}_3$  膜时, 发生式 (14) 所示反应, 将局部还原性的  $\text{FeCO}_3$  逐渐氧化形成多孔状的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  产物和少量  $\text{CO}_2$  [30]。此外,  $\text{CO}_2$  水解产生的  $\text{H}^+$  相互结合形成  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$  气体在产物膜局部形成鼓泡, 且随着气体分子不断在鼓泡内部积聚膨胀, 最终鼓泡发生破裂, 破坏了内层  $\text{FeCO}_3$  膜的完整性, 导致腐蚀加剧。



综上所述, 多元热流体环境中流速的增加会导致 N80 钢近表面溶解氧含量增加、对流传质过程增强及壁面剪切力增大, 进而加剧腐蚀, 其影响规律及作用机制对油田生产过程中的流速控制和预防油管腐蚀失效等方面具有一定的指导作用。如根据管道直径结合现场工况合理调整热流体注入量及生产过程中的产量, 或根据油田产量合理选择油管直径, 使介质流速处于合适的范围内, 可有效延长材料服役寿命。

### 3 结论

1) 在  $\text{CO}_2$ - $\text{O}_2$  共存环境中随流速增大, N80 钢平均腐蚀速率增大。由于流速加快了溶解氧扩散过程, 腐蚀产物膜由 0 m/s 条件下均匀致密的单层结构转变为 0.5~2.0 m/s 条件下疏松多孔的双层结构, 同时腐蚀产物由  $\text{FeCO}_3$  加少量  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  转变为  $\text{FeCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和少量  $\text{FeO}(\text{OH})$ 。

2) 原位电化学测试分析表明,  $\text{CO}_2$ - $\text{O}_2$  共存环境中 N80 钢在 0 m/s 条件下体系受阴极氧扩散过程控制, 0.5~2.0 m/s 时变为阳极溶解过程控制, 并且在 0.5~2.0 m/s 范围内, 外层腐蚀产物膜电阻  $R_{\text{fi}}$ 、扩散电阻  $W$  和电荷转移电阻  $R_{\text{ct}}$  大小均随流速增大而减小, 说明氧扩散阻力降低, 腐蚀产物膜致密性下降, 腐蚀速率增加。

3) 流速增加使得 N80 钢近表面溶解氧含量增加, 溶液中大量  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化成为  $\text{Fe}^{3+}$ , 导致外层产物膜形成。但对流传质过程加强, 导致内外层腐蚀产物膜厚度降低, 保护性减弱; 同时, 溶解氧侵入内层产物膜, 将还原性  $\text{FeCO}_3$  氧化形成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 破坏了产物膜的完整性, 导致腐蚀加剧。

### 参考文献:

- [1] 方圆, 张万益, 曹佳文, 等. 我国能源资源现状与发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2018(4): 34-42.  
FANG Y, ZHANG W Y, CAO J W, et al. Analysis on the Current Situation and Development Trend of Energy Resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4): 34-42.
- [2] 童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 727-736.  
TONG X G, ZHANG G Y, WANG Z M, et al. Distribution and Potential of Global Oil and Gas Resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 727-736.
- [3] 蒋琪, 游红娟, 潘竞军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.  
JIANG Q, YOU H J, PAN J J, et al. Preliminary Discussion on Current Status and Development Direction of Heavy Oil Recovery Technologies[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 30-39.
- [4] DONG X H, LIU H Q, CHEN Z X, et al. Enhanced Oil Recovery Techniques for Heavy Oil and Oilsands Reservoirs after Steam Injection[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1190-1211.
- [5] ZHONG X K, LU W J, YANG H J, et al. Oxygen Corrosion of N80 Steel under Laboratory Conditions Simulating High Pressure Air Injection: Analysis of Corrosion Products[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172: 162-170.
- [6] 刘婉颖, 李金宇, 高科超, 等. 温度对 N80 钢在饱和  $\text{CO}_2$  模拟地层水下腐蚀行为的影响及机理[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 353-362.  
LIU W Y, LI J Y, GAO K C, et al. Effect and Mechanism of Temperature on the Corrosion Behavior of N80 Steel in Simulated Formation with Saturated  $\text{CO}_2$ [J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 353-362.
- [7] DE MOTTE R A, BARKER R, BURKLE D, et al. The Early Stages of  $\text{FeCO}_3$  Scale Formation Kinetics in  $\text{CO}_2$  Corrosion[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 216: 102-111.
- [8] YE Z R, QIU Z C, YI R, et al. Effect of Temperature on Corrosion Behaviour of N80 Steel in  $\text{CO}_2$ -Saturated Formation Water[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 504: 012040.
- [9] HUA Y, MOHAMMED S, BARKER R, et al. Comparisons of Corrosion Behaviour for X65 and Low Cr Steels in High Pressure  $\text{CO}_2$ -Saturated Brine[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 41: 21-32.
- [10] RAY R, LEE J S, LITTLE B, et al. The Anatomy of Tubercles: A Corrosion Study in a Fresh Water Estuary[J]. Materials and Corrosion, 2010, 61(12): 993-999.
- [11] ZHANG J, LIN X, LU S, et al. Corrosion Behavior and Mechanism of N80 Steel under High Temperature and High Pressure  $\text{CO}_2$ - $\text{O}_2$  Coexisting Condition[C]//Corrosion, Houston: NACE, 2013: 2479.



- [12] ROSLI N R, CHOI Y S, YOUNG D. Impact of Oxygen Ingress in CO<sub>2</sub> Corrosion of Mild Steel[C]//Corrosion/2014 Houston: NACE, 2014: 4299.
- [13] ZHANG Y N, ZHAO G X, CHENG F. Effect of O<sub>2</sub> on Down-Hole Corrosion during Air-Assisted Steam Injection for Heavy Oil Recovery[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2019, 54: 310-316.
- [14] LIN X Q, LUO X K, LIU W, et al. The Corrosion Behavior of N80 Steel in Multiple Thermal Fluid Environment Containing O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 400.
- [15] HUA Y, BARKER R, NEVILLE A. The Effect of O<sub>2</sub> Content on the Corrosion Behaviour of X65 and 5Cr in Water-Containing Supercritical CO<sub>2</sub> Environments[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 499-511.
- [16] XIA L, LI Y, MA L L, et al. Influence of O<sub>2</sub> on the Erosion-Corrosion Performance of 3Cr Steels in CO<sub>2</sub> Containing Environment[J]. Materials, 2020, 13(3): 791.
- [17] ROSLI N R. The Effect of Oxygen in Sweet Corrosion of Carbon Steel for Enhanced Oil Recovery Applications[D]. Ohio: Ohio University, 2015: 96-100.
- [18] LIN X Q, LIU W, WU F, et al. Effect of O<sub>2</sub> on Corrosion of 3Cr Steel in High Temperature and High Pressure CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Environment[J]. Applied Surface Science, 2015, 329: 104-115.
- [19] WANG X, WANG X Y, WANG J, et al. The Influence of O<sub>2</sub> on the Corrosion Behavior of the X80 Steel in CO<sub>2</sub> Environment[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(1): 889-898.
- [20] 庞洪晨, 孙奇北, 王培健, 等. 流速对 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 环境中 L485 钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(11): 7-12.
- PANG H C, SUN Q B, WANG P J, et al. Effect of Flow Rate on Corrosion of L485 Steel in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Environment[J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(11): 7-12.
- [21] 赵帅, 廖柯熹, 何国玺, 等. CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 环境下 L320 钢在不同流速下的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 95-101.
- ZHAO S, LIAO K X, HE G X, et al. Study on the Corrosion Behavior of L320 Steel at Different Flow Rates in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Environment[J]. Materials Protection, 2022, 55(1): 95-101.
- [22] LIU L, XU Y Z, ZHU Y S, et al. The Roles of Fluid Hydrodynamics, Mass Transfer, Rust Layer and Macro-Cell Current on Flow Accelerated Corrosion of Carbon Steel in Oxygen Containing Electrolyte[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(14): 141510.
- [23] FUJIWARA K, DOMAE M, YONEDA K, et al. Correlation of Flow Accelerated Corrosion Rate with Iron Solubility[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(11): 4482-4486.
- [24] XU Y Z, TAN M Y. Probing the Initiation and Propagation Processes of Flow Accelerated Corrosion and Erosion Corrosion under Simulated Turbulent Flow Conditions[J]. Corrosion Science, 2019, 151: 163-174.
- [25] DONG S, LIU W, ZHANG J, et al. Effect of Oxygen on CO<sub>2</sub> Corrosion and Erosion-Corrosion Behavior of N80 Steel under High Temperature and High Pressure[C]//Corrosion, Houston: NACE, 2014: 4198.
- [26] 赵国仙, 吕祥鸿, 韩勇. 流速对 P110 钢腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2008, 36(8): 5-8.
- ZHAO G X, LYU X H, HAN Y. Effect of Flow Rate on CO<sub>2</sub> Corrosion Behavior of P110 Steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2008, 36(8): 5-8.
- [27] JIANG S, CHAI F, SU H, et al. Influence of Chromium on the Flow-Accelerated Corrosion Behavior of Low Alloy Steels in 3.5wt.% NaCl Solution[J]. Corrosion Science, 2017, 123: 217-227.
- [28] REN X D, WANG H, WEI Q, et al. Electrochemical Behaviour of N80 Steel in CO<sub>2</sub> Environment at High Temperature and Pressure Conditions[J]. Corrosion Science, 2021, 189: 109619.
- [29] LIN X Q, LIU W, ZHANG J, et al. Characteristics of Corrosion Scale of 3Cr Steel at High Temperature and Pressure in an O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Environment[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2013, 29(11): 2405-2414.
- [30] DOU Y H, LI Z, CHENG J R, et al. Experimental Study on Corrosion Performance of Oil Tubing Steel in HPHT Flowing Media Containing O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>[J]. Materials, 2020, 13(22): 5214.
- [31] NESIC S. Effects of Multiphase Flow on Internal CO<sub>2</sub> Corrosion of Mild Steel Pipelines[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(7): 4098-4111.
- [32] VAGAPOV R K, TOMSKIY I S. Dependence of Corrosion Process Rate on Carbon Dioxide Medium Containing Flow Rate[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2021, 57(5): 507-512.
- [33] NESIC S, POSTLETHWAITE J, OLSEN S. An Electrochemical Model for Prediction of Corrosion of Mild Steel in Aqueous Carbon Dioxide Solutions[J]. CORROSION, 1996, 52(4): 280-294.
- [34] DENPO K, OGAWA H. Fluid Flow Effects on CO<sub>2</sub> Corrosion Resistance of Oil Well Materials[J]. CORROSION, 1993, 49(6): 442-449.
- [35] ELGADDAFI R, AHMED R, SHAH S. The Effect of Fluid Flow on CO<sub>2</sub> Corrosion of High-Strength API Carbon Steels[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 86: 103739.