

# CO<sub>2</sub> 驱地面采输系统缓蚀阻垢剂优选研究

张 洲<sup>1</sup> 易勇刚<sup>2</sup> 同 航<sup>3</sup> 张 新<sup>3</sup> 曾德智<sup>3</sup>

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油新疆油田分公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

**摘 要:** CO<sub>2</sub> 驱提采技术因其诸多优点得到了广泛应用,但同时也带来了严重的地面采输系统腐蚀结垢风险。为此,分别采用电化学测试方法和静态阻垢法对油田常用的缓蚀剂和阻垢剂进行筛选,对优选的缓蚀剂和阻垢剂进行配伍性和协同性测试后,复配出效果优异的复合缓蚀阻垢剂,最后采用失重法和模拟工况阻垢率测试评价复合缓蚀阻垢剂的综合防护性能。筛选出的缓蚀剂和阻垢剂在 55 ℃、常压下,饱和 CO<sub>2</sub> 的模拟地层水中对采输系统典型钢材 20 钢的缓蚀率达 93.06%,阻垢率达 95.18%;将筛选的缓蚀剂和阻垢剂复配后,在模拟工况下,复合缓蚀阻垢剂加量 500 mg/L 时 20 钢的腐蚀速率控制在 0.045 mm/a 以内,阻垢性能满足油田控制指标。研究结果表明,复配的复合缓蚀阻垢剂对 CO<sub>2</sub> 驱地面采输系统具有较好的防护作用,能保证其安全运行和生产。

**关键词:** 采输系统;CO<sub>2</sub>;腐蚀结垢;缓蚀阻垢剂

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.03.014

## Study on corrosion and scale inhibitor selection for surface production and transportation system of CO<sub>2</sub> flooding

ZHANG Zhou<sup>1</sup>, YI Yonggang<sup>2</sup>, TONG Hang<sup>3</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>, ZENG Dezhi<sup>3</sup>

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Engineering Research Institute of PetroChina Xinjiang Oilfield Branch, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

**Abstract:** The EOR technology of CO<sub>2</sub> flooding is increasingly used because of its advantages, but it is also accompanied by the high risk of corrosion and scaling in the surface production and transportation system. As a result, this study was carried out using the electrochemical test method and the static scale inhibition method to evaluate and select corrosion and scale inhibitors commonly found in oil field. After the compatibility and synergy test of the corrosion and scale inhibitor, the most effective compound inhibitor was prepared. Finally, the comprehensive protection performance of the compound inhibitor was evaluated

收稿日期:2020-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目“静载、振动与腐蚀作用下 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 气井完井管柱螺纹密封面的力化学损伤机制研究”(51774249)

作者简介:张 洲(1985-),女,四川华蓥人,工程师,学士,主要从事油气储运及项目管理工作。E-mail:zhangzhou\_sw@cnpc.com.cn

by weight loss method and scale inhibition rate test under simulated condition. The experimental results showed that: the corrosion inhibition rate of the selected corrosion inhibitor and scale inhibitor in the simulated formation water of saturated CO<sub>2</sub> at 55 °C and atmospheric pressure is 93.06% and scale inhibition rate is 95.18% for the typical 20 steel used in the production and transportation system. After mixing together the selected corrosion inhibitor and scale inhibitor, the corrosion rate of the 20 steel is controlled within 0.045 mm/a when the amount of the composite corrosion and scale inhibitor is injected at 500 mg/L under the simulated condition. The scale inhibition rate is 93.91% , which can meet the performance indicators of oil field. The results showed that the compound corrosion and scale inhibitor can play a good role in protecting the production and transportation system of CO<sub>2</sub> flooding facilities, and guarantee the safe operation and production activities.

**Keywords:** Production and transportation system; Carbon dioxide; Corrosion and scaling; Corrosion and scale inhibitor

0 前言

近年来,CO<sub>2</sub> 驱提采技术日益成熟,因其成本低、提采效率高、环保等优点而应用广泛<sup>[1-2]</sup>。但 CO<sub>2</sub> 驱在明显提高原油采收率的同时,也给地面采输系统带来了严重的腐蚀结垢问题<sup>[3-5]</sup>,造成管道设备穿孔刺漏、堵塞等安全隐患,影响正常运行和生产<sup>[6-14]</sup>。

化学药剂防护方法因用量小、防护效果好、适用性强等优点,成为解决腐蚀结垢问题的一种经济有效的防护措施<sup>[15-16]</sup>。李玲杰等人<sup>[17]</sup>开发出了一种环境友好的油田集输系统 CO<sub>2</sub> 缓蚀剂并测试了其性能,结果表明该缓蚀剂对 20 钢在高 Cl<sup>-</sup> 含量、高矿化度 CO<sub>2</sub> 腐蚀环境中有良好的缓蚀效果;李军龙等人<sup>[18]</sup>评价了合成的咪唑啉季铵盐对 A3 钢的缓蚀性能,结果表明咪唑啉季铵盐对 A3 钢具有很好的缓蚀作用;李晖等人<sup>[19]</sup>完成了高温酸化复合缓蚀剂 XAI-180 的配方设计,结果表明形成的缓蚀剂具有良好的配伍性和缓蚀性;方曦等人<sup>[20]</sup>制备出了阻垢剂 PTA-AA,结果表明 PTA-AA 对 CaCO<sub>3</sub> 和 MgCO<sub>3</sub>

具有较好的防垢性能;牟静等人<sup>[21]</sup>合成了 MA/AA/AM/AMPS 四元共聚物阻垢剂,结果表明合成产物对 CaCO<sub>3</sub> 和 CaSO<sub>4</sub> 具有优良的阻垢性能。国内外学者对缓蚀剂和阻垢剂进行了大量的研究,而现场往往是腐蚀和结垢同时发生,且缓蚀剂和阻垢剂都具有较强的环境适应性,在某一区块运用效果良好的缓蚀阻垢剂到另一区块的使用效果可能不尽人意。为此,文章针对西部某油田 CO<sub>2</sub> 驱地面采输系统腐蚀结垢问题,筛选并复配出了满足防腐、防垢要求的复合缓蚀阻垢剂。

1 实验部分

1.1 实验材料与设备

实验用金属材质为 20 钢和 825 耐蚀合金,其中电化学测试与模拟工况缓蚀性能评价均用集输管线常用材料 20 钢,而测试模拟工况阻垢性能时,为避免材质腐蚀对阻垢性能测试产生影响,选用 825 耐蚀合金进行测试,两种材质化学组分见表 1;实验用液相介质为模拟西部某油田 CO<sub>2</sub> 驱地层水溶液,主要离子含量见表 2。

表 1 20 钢和 825 耐蚀合金的化学组分表

Tab.1 Chemical composition of 20 steel and anti-corrosion alloy 825 materials

| 材质       | 化学组分  |       |       |        |       |       |        |        |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
|          | C     | Si    | Mn    | Cr     | Mo    | Cu    | Ni     | Fe     |
| 20 钢     | 0.20% | 0.35% | 0.50% | 0.21%  | —     | 0.24% | 0.24%  | 余量     |
| 825 耐蚀合金 | 0.05% | 0.50% | —     | 20.25% | 3.35% | 2.25% | 42.56% | 31.04% |

表 2 模拟地层水离子含量表

Tab.2 Ion content of simulated formation water

| 离子                              | 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|--------------------------|
| Cl <sup>-</sup>                 | 24 362.8                 |
| Ca <sup>2+</sup>                | 820.0                    |
| Mg <sup>2+</sup>                | 86.4                     |
| Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup> | 15 346.9                 |

实验用缓蚀剂为 CI-I、CI-II、CI-III、CI-IV、CI-V、CI-VI;阻垢剂为 SI-I、SI-II、SI-III、SI-IV、SI-V。

实验用仪器包括电化学工作站、电子天平、高温高压釜等。

1.2 实验方法

针对西部某油田 CO<sub>2</sub> 驱地面采输系统腐蚀结垢的具体工况,分别筛选出性能良好的缓蚀剂和阻垢剂,完

成配伍性试验后进行复配实验研究,形成最优配比的复合缓蚀阻垢剂并进行模拟工况下防护性能测试。

### 1.2.1 缓蚀剂和阻垢剂单剂筛选

#### 1.2.1.1 缓蚀剂单剂筛选

实验采用 Correst CS350 电化学工作站,按标准 SY/T 5273—2013《油田采出水用缓蚀剂性能评价方法》(以下简称 SY/T 5273—2013)对缓蚀剂进行评价,实验条件为饱和  $\text{CO}_2$  (约  $0.0056 \text{ mol/L}$ ) 的模拟地层水溶液、温度  $55^\circ\text{C}$ 、缓蚀剂浓度  $200 \text{ mg/L}$ 。其中工作电极为 20 钢(有效暴露面积  $0.7854 \text{ cm}^2$ ),辅助电极为 Pt 电极,参比电极为饱和甘汞电极。

工作电极的开路电位稳定后,极化曲线测试相对于开路电位  $\pm 500 \text{ mV}$  扫描,扫描速率  $0.50 \text{ mV/s}$ 。缓蚀率可由式(1)计算:

$$\eta_i = \frac{I_{0,\text{corr}} - I_{\text{corr}}}{I_{0,\text{corr}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta_i$  为缓蚀剂对 20 钢的缓蚀率; $I_{0,\text{corr}}$ 、 $I_{\text{corr}}$  分别为空白溶液和添加缓蚀剂溶液中 20 钢的自腐蚀电流密度,  $\text{A/cm}^2$ 。

#### 1.2.1.2 阻垢剂单剂筛选

实验采用静态阻垢法,参照标准 GB/T 7476—2009《水质、钙的测定、EDTA 滴定法》(以下简称 GB/T 7476—2009 标准)测试阻垢剂对  $\text{CaCO}_3$  的阻垢性能。阻垢剂对  $\text{CaCO}_3$  的阻垢率可由式(2)计算:

$$x_i = \frac{\text{Ca}_0^{2+} - \text{Ca}_1^{2+}}{\text{Ca}_2^{2+} - \text{Ca}_1^{2+}} \times 100\% = \frac{V_0 - V_1}{V_2 - V_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $x_i$  为阻垢剂对  $\text{CaCO}_3$  的阻垢率; $\text{Ca}_0^{2+}$ 、 $\text{Ca}_1^{2+}$ 、 $\text{Ca}_2^{2+}$  分别为添加阻垢剂后的溶液与空白 1、2 溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  分别为滴定加阻垢剂后的溶液和空白 1、2 溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  消耗 GB/T 7476—2009 标准溶液的体积,  $\text{mL}$ 。

### 1.2.2 缓蚀阻垢剂复配

#### 1.2.2.1 配伍性测试

实验参照标准 SY/T 5273—2013,将筛选出的缓蚀剂和阻垢剂按质量比 1:1 与模拟地层水混合均匀,在  $55^\circ\text{C}$ 、常压条件下测定两种药剂与模拟地层水的配伍性。

#### 1.2.2.2 协同性测试

两种或多种药剂同时使用与单独使用的防护效果有一定差异。为了研究加入其他药剂对该药剂性能的影响,采用电化学方法,在  $55^\circ\text{C}$ 、常压条件下测试不同配比缓蚀阻垢剂和单一缓蚀剂在饱和  $\text{CO}_2$  模拟地层水溶液中的缓蚀性能,明确阻垢剂对缓蚀剂缓蚀性能的影响;采用静态阻垢法,在  $55^\circ\text{C}$ 、常压条件下测试不同配比缓蚀阻垢剂和单一阻垢的阻垢性能,明确缓蚀剂对阻垢剂阻垢性能的影响。

### 1.2.2.3 复合缓蚀阻垢剂最优配比实验

采用电化学方法和静态阻垢法,在  $55^\circ\text{C}$ 、常压条件下测试不同配比的复合缓蚀阻垢剂的缓蚀阻垢性能。保持药剂总质量浓度  $210 \text{ mg/L}$  不变,具体配比设计方案见表 3。

表 3 缓蚀阻垢剂复配实验设计表

Tab. 3 Experimental design of compound corrosion and scale inhibitors

| 方案   | 缓蚀剂 : 阻垢剂 | 缓蚀剂加量 / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 阻垢剂加量 / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ |
|------|-----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 方案 1 | 4 : 1     | 168                                       | 42                                        |
| 方案 2 | 2 : 1     | 140                                       | 70                                        |
| 方案 3 | 4 : 3     | 120                                       | 90                                        |

### 1.2.3 模拟工况下防护效果测试

#### 1.2.3.1 挂片失重测试

实验采用  $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的长方体 20 钢试样,实验条件为温度  $55^\circ\text{C}$ 、 $\text{CO}_2$  分压  $1 \text{ MPa}$  (总压  $4 \text{ MPa}$ )、模拟地层水溶液。参照标准 JB/T 6073—2015《金属覆盖层实验室全浸腐蚀试验》在静态高温高压釜中实验 72 h,试样的均匀腐蚀速率可按式(3)进行计算:

$$V_{\text{corr}} = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m - m_1)}{S \times t \times \rho} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{corr}}$  为均匀腐蚀速率,  $\text{mm/a}$ ;  $m$ 、 $m_1$  分别为试样实验前、后的质量,  $\text{g}$ ;  $S$  为试样表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$  为实验时间,  $\text{h}$ ;  $\rho$  为试样材料的密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

#### 1.2.3.2 模拟工况阻垢率测试

为了使测试的阻垢率不受试样腐蚀的影响,实验采用  $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的长方体 825 耐蚀合金试样,实验条件为温度  $55^\circ\text{C}$ 、 $\text{CO}_2$  分压  $1 \text{ MPa}$  (总压  $4 \text{ MPa}$ )、模拟地层水溶液。在静态高温高压釜进行挂片实验 72 h,其阻垢率可由式(4)计算:

$$Y_i = \frac{\Delta m_0 - \Delta m_1}{\Delta m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $Y_i$  为阻垢剂的阻垢率; $\Delta m_0$ 、 $\Delta m_1$  分别为试样在空白溶液和添加药剂溶液中的质量增加值,  $\text{g}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缓蚀剂与阻垢剂单剂筛选结果与分析

#### 2.1.1 缓蚀剂单剂筛选结果与分析

在  $55^\circ\text{C}$ 、常压条件下测试添加六种不同缓蚀剂和空白组饱和  $\text{CO}_2$  模拟地层水溶液中 20 钢的极化曲线,采用 Tafel 外推法进行拟合,得到腐蚀电化学动力学参数,并通过式(1)计算缓蚀率,结果见表 4。

表 4 20 钢在含不同缓蚀剂的 CO<sub>2</sub> 饱和模拟地层水溶液中的极化曲线拟合参数表

Tab. 4 Polarization curve fitting results of steel 20 in CO<sub>2</sub> saturated simulated formation water with different corrosion inhibitors

| 缓蚀剂种类   | 腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 腐蚀电位 $E_{\text{corr}} / \text{V}$ | 缓蚀率     |
|---------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| 空白      | 4. 83E - 05                                                | -0. 735                           | —       |
| CI- I   | 9. 27E - 06                                                | -0. 692                           | 80. 83% |
| CI- II  | 7. 95E - 06                                                | -0. 703                           | 83. 55% |
| CI- III | 9. 86E - 06                                                | -0. 649                           | 79. 61% |
| CI- IV  | 4. 80E - 06                                                | -0. 651                           | 90. 08% |
| CI- V   | 4. 25E - 06                                                | -0. 675                           | 91. 22% |
| CI- VI  | 3. 36E - 06                                                | -0. 642                           | 93. 06% |

从表 4 可以看出,相对于空白组,加入缓蚀剂后自腐蚀电位正移,自腐蚀电流密度降低,说明加入缓蚀剂能很好地抑制 20 钢的腐蚀。其中缓蚀剂 CI-IV、CI-V、CI-VI 的缓蚀效果较好,缓蚀剂 CI-VI 效果最好(93. 06%),因此选用缓蚀剂 CI-VI 作为复合缓蚀阻垢剂的缓蚀剂单剂。

2. 1. 2 阻垢剂单剂筛选结果与分析

在 55 ℃、常压下测试五种不同阻垢剂对 CaCO<sub>3</sub> 的阻垢性能,测得未加阻垢剂的空白组与加注 30 mg/L 阻垢剂的实验结果,见表 5。

表 5 阻垢剂静态阻垢实验结果表

Tab. 5 Results of static scale inhibition test of scale inhibitors

| 阻垢剂种类   | Ca <sup>2+</sup> 浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 阻垢率     |
|---------|-----------------------------------------------|---------|
| 空白 1    | 16                                            | —       |
| 空白 2    | 99                                            | —       |
| SI- I   | 78                                            | 74. 70% |
| SI- II  | 82                                            | 79. 52% |
| SI- III | 80                                            | 77. 11% |
| SI- IV  | 88                                            | 86. 75% |
| SI- V   | 95                                            | 95. 18% |

从表 5 可以看出,SI-I、SI-II、SI-III 三种阻垢剂在加量 30 mg/L 时阻垢效率较差,均低于 80%,阻垢剂 SI-V 的阻垢率最大(95. 18%),因此选用 SI-V 作为阻垢剂单剂。

2. 2 缓蚀阻垢剂复配结果分析

2. 2. 1 配伍性测试结果

根据缓蚀剂和阻垢剂的性能评价结果,对筛选出的缓蚀剂 CI-VI 和阻垢剂 SI-V 进行配伍性实验,实验结果显示,恒温 30 min 及恒温 24 h 后混合溶液都呈均相,表明缓蚀剂 CI-VI 和阻垢剂 SI-V 与该区块地层水的配伍性良好。

2. 2. 2 协同性测试结果

2. 2. 2. 1 阻垢剂对缓蚀剂性能影响

在 55 ℃、常压条件下,测试添加不同配比药剂的饱

和 CO<sub>2</sub> 模拟地层水溶液中 20 钢的极化曲线并用 Tafel 外推法进行拟合,得到腐蚀动力学参数,通过式(1)计算得到缓蚀速率,结果见表 6。

表 6 20 钢在添加不同配比药剂的 CO<sub>2</sub> 饱和模拟地层水溶液中的极化曲线拟合参数表

Tab. 6 Polarization curve fitting results of steel 20 in CO<sub>2</sub> saturated simulated formation water with different ratio of agents

| 药剂组成           | 药剂加量 / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 腐蚀电位 $E_{\text{corr}} / \text{V}$ | 缓蚀率     |
|----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| —              | 0                              | 4. 83E - 05                                                | -0. 734 6                         | —       |
| CI- VI         | 200                            | 3. 36E - 06                                                | -0. 641 7                         | 93. 06% |
| CI- VI + SI- V | 180 + 20                       | 3. 33E - 06                                                | -0. 639 0                         | 93. 11% |
| CI- VI + SI- V | 150 + 50                       | 2. 57E - 06                                                | -0. 609 5                         | 94. 69% |
| CI- VI + SI- V | 120 + 80                       | 3. 26E - 06                                                | -0. 620 0                         | 93. 25% |

从表 6 可以看出,将阻垢剂 SI-V 与缓蚀剂 CI-VI 复配后,不同配比下的缓蚀率较单剂缓蚀剂的缓蚀率都有所提高,当加入 150 mg/L 缓蚀剂 CI-VI + 50 mg/L 阻垢剂 SI-V 后缓蚀率高达 94. 69%,说明阻垢剂的加入对缓蚀剂的缓蚀性能有协同作用,使缓蚀效果变好。

2. 2. 2. 2 缓蚀剂对阻垢剂性能影响

在 55 ℃、常压条件下测试得单剂阻垢剂 SI-V 与缓蚀剂 CI-VI 以不同比例复配后的静态阻垢性能,结果见图 1。

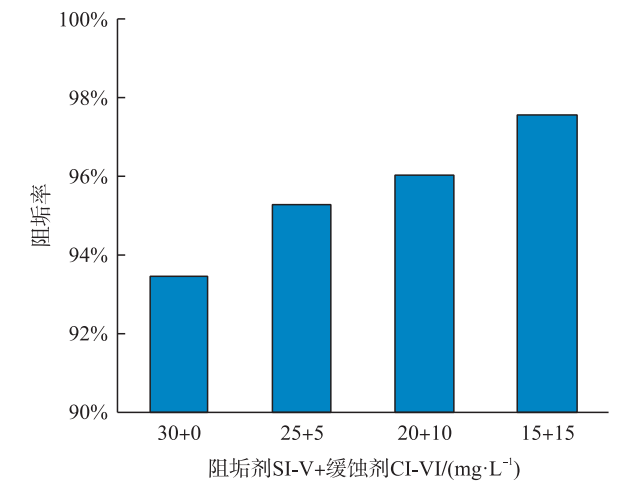


图 1 复合缓蚀阻垢剂的阻垢协同效应图

Fig. 1 Synergistic effect of compound corrosion and scale inhibitors on scale inhibition

从图 1 可以看出,将缓蚀剂 CI-VI 与阻垢剂 SI-V 复配后,其阻垢率较单剂阻垢剂均有增加,尤其是将 15 mg/L 阻垢剂 SI-V 和 15 mg/L 缓蚀剂 CI-VI 混合使用时,阻垢率高达 97. 56%,说明缓蚀剂与阻垢剂有较好的协同作用,当两种药剂混合使用时效率较高。

### 2.2.3 缓蚀阻垢剂配比实验结果

在 55 ℃、常压条件下,测试加注不同比例的缓蚀阻垢剂和空白组的饱和 CO<sub>2</sub> 模拟地层水溶液中 20 钢的极化曲线见图 2,拟合参数见表 7。

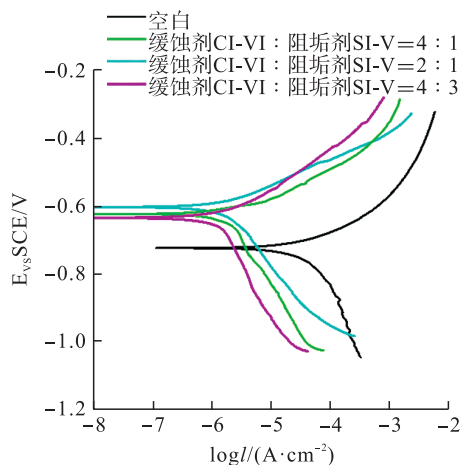


图 2 20 钢在含不同配比药剂的模拟地层水中的极化曲线图  
Fig. 2 Polarization curve of steel 20 in simulated formation water solution containing different proportion of chemicals

表 7 极化曲线拟合参数表

Tab. 7 Polarization curve fitting results

| 缓蚀剂 CI-VI :<br>阻垢剂 SI-V | 腐蚀电流密度<br>$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 腐蚀电位<br>$E_{\text{corr}} / \text{V}$ | 缓蚀率    |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| —                       | 4.83E-05                                                      | -0.734 6                             | —      |
| 4 : 1                   | 3.22E-06                                                      | -0.624 3                             | 93.35% |
| 2 : 1                   | 2.13E-06                                                      | -0.603 8                             | 95.59% |
| 4 : 3                   | 3.42E-06                                                      | -0.634 8                             | 92.93% |

从图 2 和表 7 可以看出,当缓蚀剂 CI-VI : 阻垢剂 SI-V = 2 : 1 时,自腐蚀电位正移最多,自腐蚀电流密度最小,缓蚀率最高(95.59%),因此初步选定复合缓蚀阻垢剂的配比为 CI-VI : SI-V = 2 : 1。



a) 未添加复合缓蚀阻垢剂

a) No compound corrosion and scale inhibitor added



b) 加注复合缓蚀阻垢剂

b) Compound corrosion and scale inhibitor is added

图 3 液相中 20 钢的腐蚀宏观形貌图

Fig. 3 Macroscopic corrosion morphology of steel 20 in liquid phase

在 55 ℃、常压条件下对不同比例的复合缓蚀阻垢剂进行静态阻垢性能测试,得到不同比例下复合缓蚀阻垢剂的缓蚀率和阻垢率见表 8。

表 8 不同配比药剂试验结果表

Tab. 8 Test results of agents with different ratios

| 缓蚀剂 CI-VI : 阻垢剂 SI-V | 缓蚀率    | 阻垢率    |
|----------------------|--------|--------|
| 4 : 1                | 93.35% | 78.43% |
| 2 : 1                | 95.59% | 93.56% |
| 4 : 3                | 92.93% | 94.49% |

从表 8 可以看出,当缓蚀剂 CI-VI : 阻垢剂 SI-V = 2 : 1 时,缓蚀效率最高为 95.59%,此时阻垢率为 93.56%;当缓蚀剂 CI-VI : 阻垢剂 SI-V = 4 : 3 时,阻垢率最高为 94.49%,但此时缓蚀率只有 92.93%。现场实际工况中,CO<sub>2</sub> 腐蚀失效的风险较结垢堵塞的风险更大,综合考虑下,选用复合缓蚀阻垢剂的配比为 CI-VI : SI-V = 2 : 1。

### 2.3 模拟工况下防护效果测试结果分析

#### 2.3.1 静态高温高压釜实验结果分析

##### 2.3.1.1 失重实验结果

用 20 钢在 55 ℃、CO<sub>2</sub> 分压 1 MPa(总压 4 MPa)条件下的模拟地层水中进行 72 h 失重腐蚀实验,测得 20 钢在模拟地层水中的腐蚀速率为 1.618 mm/a,添加 500 mg/L 复合缓蚀阻垢剂后腐蚀速率为 0.041 mm/a,缓蚀率达 97.45%。

实验结果表明:加入复合缓蚀阻垢剂后,20 钢的腐蚀速率有很大程度的降低(0.045 mm/a 以下),说明该复合缓蚀阻垢剂对 20 钢的腐蚀有良好的抑制作用,能够满足生产需求。

##### 2.3.1.2 腐蚀形貌分析

20 钢在 55 ℃、CO<sub>2</sub> 分压 1 MPa(总压 4 MPa)下进行 72 h 失重腐蚀实验后,去除腐蚀产物膜,宏观形貌见图 3。

从图3可以看出,模拟工况下未添加复合缓蚀阻垢剂时,20钢表面暗沉,腐蚀较严重,主要为均匀腐蚀;加注复合缓蚀阻垢剂后,表面有金属光泽,腐蚀程度明显减小。

### 2.3.2 模拟工况下阻垢试验结果分析

在55℃、CO<sub>2</sub>分压1 MPa(总压4 MPa)条件下的模拟地层水溶液中测试复合缓蚀阻垢剂的阻垢性能,采用825耐蚀合金挂片试验72 h后,测得挂片在模拟地层水中的增重量为0.039 4 g,添加50 mg/L复合缓蚀阻垢剂后的增重量为0.002 4 g,阻垢率为93.91%。实验结果表明,该复合缓蚀阻垢剂的阻垢性能较好,能很好地控制CO<sub>2</sub>采出井筒中的结垢问题。

## 3 结论

1)形成了一套复合缓蚀阻垢剂评价方法流程,首先采用电化学方法和静态阻垢法分别筛选出性能良好的缓蚀剂和阻垢剂;其次对筛选的两种药剂进行配伍性和协同性测试,然后进行最佳配比实验,得到性能优异的复合药剂配方;最后进行模拟工况下复合药剂的综合防护性能测试,进一步明确所得药剂的实用性能,为油田评价和筛选多功效复合药剂提供了参考和指导。

2)明确了缓蚀剂和阻垢剂混合使用时的相互影响规律,将阻垢剂与缓蚀剂按不同比例复配后,复合药剂的缓蚀率和阻垢率较单一药剂的性能有所提高,说明缓蚀剂和阻垢剂对相互的防护性能具有较大促进作用,将两种药剂混合使用能起到更好的效果,充分利用药剂间的协同效应可提升药剂性能,减少用量,节约成本。

3)形成了一套适用于CO<sub>2</sub>驱地面采输系统的防护药剂体系配方,在55℃、CO<sub>2</sub>分压1 MPa(总压4 MPa)的模拟工况下,可将20钢的腐蚀速率控制在0.045 mm/a以内,阻垢率达93.91%,综合防护性能满足油田控制指标,说明该药剂体系能对CO<sub>2</sub>腐蚀结垢起到较好的防护作用,为油田集输系统管道设备的防护提供了技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 陆诗建,曹伟,孙岳涛,等.油田CO<sub>2</sub>驱采出气中CO<sub>2</sub>循环回收技术进展[J].天然气化工,2016,41(6):105-109.  
LU Shijian, CAO Wei, SUN Yuetao, et al. Progress in CO<sub>2</sub> recycling technology for CO<sub>2</sub> flooding produced gas of oilfields [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2016, 41(6): 105-109.
- [2] 张绍辉,王凯,王玲,等.CO<sub>2</sub>驱注采工艺的应用与发展[J].石油钻采工艺,2016,38(6):869-875.
- [3] 石善志,董宝军,曾德智,等.CO<sub>2</sub>辅助蒸汽驱对四种钢的腐蚀性能影响模拟[J].西南石油大学学报(自然科学版),2018,40(4):162-168.
- [4] 田源,吴贵阳,曹军,等.材料在酸性气田服役中失效的分析评价技术[J].石油与天然气化工,2017,46(2):63-67.
- [5] 赵雪会,黄伟,张华礼,等.模拟油田CO<sub>2</sub>驱采出环境下管柱腐蚀规律研究[J].表面技术,2019,48(5):1-8.
- [6] 曾德智,同航,易勇刚,等.二氧化碳驱采油井缓蚀阻垢剂的复配实验研究[J].石油与天然气化工,2018,47(6):68-73.
- [7] 谷坛,唐德志,王竹,等.典型离子对碳钢CO<sub>2</sub>腐蚀的影响[J].天然气工业,2019,39(7):106-112.
- [8] LIU Hongwei, GU Tingyue, ZHANG Guoan, et al. Corrosion inhibition of carbon steel in CO<sub>2</sub>-containing oilfield produced water in the presence of iron-oxidizing bacteria and inhibitors [J]. Corrosion Science, 2016, 105(1): 149-160.
- [9] DONG Baojun, ZENG Dezhi, YU Zhiming, et al. Corrosion mechanism and applicability assessment of N80 and 9 Cr Steels in CO<sub>2</sub> Auxiliary Steam Drive [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2019, 28(1): 1030-1039.
- [10] YANG Xiaoxi, LI Wei, GUO Longjiang, et al. Prediction of CaCO<sub>3</sub> scaling in water injection wellbore [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98(1): 532-540.
- ZHANG Shaohui, WANG Kai, WANG Ling, et al. Development and application of CO<sub>2</sub> flooding [J]. Petroleum Drilling Production Technology, 2016, 38(6): 869-875.
- SHI Shanzhi, DONG Baojun, ZENG Dezhi, et al. Simulation of the effect of corrosion performance of four types under CO<sub>2</sub>-assisted steam flooding conditions [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(4): 162-168.
- TIAN Yuan, WU Guiyang, CAO Jun, et al. Evaluation techniques of material failure in sour gas field [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2017, 46(2): 63-67.
- ZHAO Xuehui, HUANG Wei, ZHANG Huali, et al. Corrosion behavior of tubing string in CO<sub>2</sub> flooding environment of simulated oil field [J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 1-8.
- ZENG Dezhi, TONG Hang, YI Yonggang, et al. Compounding experimental study on corrosion and scale inhibitor of CO<sub>2</sub> flooding well [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2018, 47(6): 68-73.
- GU Tan, TANG Dezhi, WANG Zhu, et al. Effect of typical ions on the corrosion behavior of carbon steel in CO<sub>2</sub> environment [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 106-112.

- [11] 姚彬,郭玉洁,曾文广,等.塔河油田某注采井生产油管腐蚀失效分析[J].石油与天然气化工,2019,48(4):69-73.  
YAO Bin, GUO Yujie, ZENG Wenguang, et al. Corrosion failure analysis of production tubing of an injection-production well in Tahe Oilfield [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48 (4): 69-73.
- [12] 毛汀,杨航,石磊.威远页岩气田地面管线腐蚀原因分析[J].石油与天然气化工,2019,48(5):83-86.  
MAO Ting, YANG Hang, SHI Lei. Analysis on corrosion of ground pipeline in Weiyuan shale gas field [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48 (5): 83-86.
- [13] 赵海洋,叶帆,汤晟,等.某油井P110油管腐蚀穿孔原因[J].机械工程材料,2020,44(2):82-86.  
ZHAO Haiyang, YE Fan, TANG Sheng, et al. Causes of corrosion and perforation of P110 tubing in an oil well [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44 (2): 82-86.
- [14] 赵海燕,丁艳艳,石善志,等.二氧化碳驱采出井缓蚀剂筛选与评价流程研究[J].石油与天然气化工,2018,47(1):83-88.  
ZHAO Haiyan, DING Yanyan, SHI Shanzhi, et al. Study on screening and evaluation process of inhibitors for carbon dioxide flooding wells [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2018, 47 (1): 83-88.
- [15] 袁青,刘音,毕研霞,等.油气田开发中CO<sub>2</sub>腐蚀机理及防腐方法研究进展[J].天然气与石油,2015,33(2):78-81.  
YUAN Qing, LIU Yin, BI Yanxia, et al. Research on CO<sub>2</sub> corrosion and corrosion control method in oil and gas field development [J]. Natural Gas and Petroleum, 2015, 33 (2): 78-81.
- [16] 王颖,黄启玉,邓心茹,等.阿尔油田集输系统结垢机理与防治措施研究[J].天然气与石油,2017,35(1):54-59.  
WANG Ying, HUANG Qiyu, DENG Xinru, et al. Study on mechanism and preventive measures of scaling for gathering and transporting system in Aer oilfield [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (1): 54-59.
- [17] 李玲杰,韩文礼,张彦军,等.一种油田集输系统CO<sub>2</sub>缓蚀剂的开发及其性能研究[C]//中国腐蚀与防护学会缓蚀剂专业委员会.第十九届全国缓蚀剂学术讨论会论文集.西安:中国腐蚀与防护学会缓蚀剂专业委员会,2016:4.  
LI Lingjie, HAN Wenli, ZHANG Yanjun, et al. Study on the development and performance of a CO<sub>2</sub> corrosion inhibitor for oil field gathering and transportation system [C]//Corrosion and Protection Society of China Corrosion Inhibitor Committee. Proceedings of the 19th National Symposium on Corrosion Inhibitors. Xi'an: Corrosion Inhibitors Professional Committee of China Corrosion and Protection Society, 2016: 4.
- [18] 李军龙,徐星,邹莉菲.咪唑啉缓蚀剂的合成及缓蚀性能研究[J].天然气与石油,2016,34(4):70-74.  
LI Junlong, XU Xing, ZOU Lifei. Research on synthesis of imidazoline corrosion inhibitor and inhibition performance [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (4): 70-74.
- [19] 李晖,罗斌,唐祖兵,等.新型耐高温酸化缓蚀剂XAI-180的研发与性能评价[J].天然气工业,2019,39(9):89-95.  
LI Hui, LUO Bin, TANG Zubing, et al. Research, development and performance evaluation of XAI-180, a new acid corrosion inhibitor with high temperature resistance [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (9): 89-95.
- [20] 方曦,杨文.防垢剂PTA-AA的合成及性能评价研究[J].天然气与石油,2014,32(4):58-61.  
FANG Xi, YANG Wen. Research on synthesizing scale inhibitor PTA-AA and its performance [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (4): 58-61.
- [21] 牟静,李小瑞,费贵强,等.MA/AA/AM/AMPS四元共聚物的合成及其对硫酸钙和碳酸钙的阻垢性能[J].功能材料,2013,44(2):182-186.  
MU Jing, LI Xiaorui, FEI Guiqiang, et al. MA/AA/AM/AMPS quadripolymer inhibitor for sulphate and carbonate scales [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44 (2): 182-186.