

# 元素硫对 825 合金在高温高压含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 环境中腐蚀行为的影响

李科<sup>1,2</sup>, 李天雷<sup>1,2</sup>, 施岱艳<sup>1,2</sup>, 李九一<sup>3</sup>, 郑子奇<sup>3</sup>, 钟显康<sup>3,4</sup>

(1. 中国石油工程建设有限公司 西南分公司, 成都 610041; 2. 中国石油天然气集团公司 石油管力学和环境行为重点实验室四川分室, 成都 610041; 3. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500; 4. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

**摘要:** 目的 研究元素硫对 825 合金在高温高压含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 环境中腐蚀行为的影响, 为评价 825 合金在高温高压含 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 和元素硫环境中的适应性提供依据。方法 将 825 合金分别置于含元素硫和不含元素硫的模拟气田环境中, 进行高温高压含硫实验。采用失重法、高温高压电化学法、扫描电镜和能谱测试方法对 825 合金的均匀腐蚀、局部腐蚀、电化学腐蚀、微观形貌和化学组成进行表征, 揭示元素硫对 825 合金在高温高压含 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 环境中腐蚀行为的影响规律。结果 在不含元素硫的环境中, 825 合金的均匀腐蚀速率仅为 0.0217 mm/a, 无局部腐蚀现象产生, 也没有检测到明显的点蚀噪声信号; 在含元素硫的环境中, 825 合金的均匀腐蚀速率高达 0.469 mm/a, 具有明显的局部腐蚀特征, 且点蚀噪声信号显著, 与光学照片观察结果一致。结论 825 合金在高温高压含元素硫和氯离子环境中容易发生局部腐蚀, 这主要是由于元素硫在水溶液中发生水解反应, 在局部区域生成了 H<sub>2</sub>S 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 在高温和氯离子的耦合作用下, 显著地加剧了 825 合金的腐蚀, 腐蚀产物以氧化物和硫化物为主。

**关键词:** 元素硫; 825 合金; 电化学噪声; 局部腐蚀; 高温高压电化学; H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.002

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)11-0010-08

## Effect of Elemental Sulfur on the Corrosion of 825 Alloy in High Temperature and High Pressure Environment Containing CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S

LI Ke<sup>1,2</sup>, LI Tian-lei<sup>1,2</sup>, SHI Dai-yan<sup>1,2</sup>, LI Jiu-yi<sup>3</sup>, ZHENG Zi-qi<sup>3</sup>, ZHONG Xian-kang<sup>3,4</sup>

(1. Southwest Branch of China Petroleum Engineering construction Co., LTD, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Branch, Key Laboratory of Petroleum Tubing Mechanics and Environmental Behavior, China National Petroleum Corporation, Chengdu 610041, China; 3. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of elemental sulfur on the corrosion behavior of 825 alloy in high temperature and high pressure environment containing CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S and provide a basis for evaluating the adaptability of 825 alloy in high tem-

收稿日期: 2020-08-04; 修订日期: 2020-08-21

Received: 2020-08-04; Revised: 2020-08-21

作者简介: 李科(1984—), 男, 硕士, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

**Biography:** LI Ke (1984—), Male, Master, Research focus: materials corrosion and protection.

通讯作者: 钟显康(1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油气田腐蚀与防护。

**Corresponding author:** ZHONG Xian-kang (1984—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection in oil and gas.

perature and high pressure environment containing CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S and elemental sulfur. The 825 alloy was respectively placed in the simulated gas field environment with and without elemental sulfur for high temperature and high pressure sulfur-containing experiments. The uniform corrosion, local corrosion, electrochemical corrosion behavior, micro-morphology and chemical composition of 825 alloy were characterized by weight loss method, high temperature and high pressure electrochemical method, scanning electron microscope and energy spectrum test, and the influence of elemental sulfur on the corrosion behavior of 825 alloy in high temperature and high pressure environment containing H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> was revealed. In the environment without elemental sulfur, the uniform corrosion rate of 825 alloy was only 0.0217 mm/a, and there was no local corrosion phenomenon and no obvious pitting noise signal was detected. In the environment containing elemental sulfur, the uniform corrosion rate of 825 alloy was as high as 0.469 mm/a, and there were obvious local corrosion characteristics and significant pitting noise signal, which was consistent with the observation results of optical photos. 825 alloy is prone to local corrosion in high temperature and high pressure environment containing elemental sulfur and chloride ions, which is mainly due to the hydrolysis reaction of elemental sulfur in aqueous solution. During hydrolysis reaction, elemental sulfur produces H<sub>2</sub>S and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in local areas, which significantly aggravates the corrosion of 825 alloy under the coupling action of high temperature and chloride ions, and the corrosion products are mainly oxides and sulfides.

**KEY WORDS:** elemental sulfur; 825 alloy; electrochemical noise; local corrosion; high temperature and high pressure electrochemistry; H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>

全球油气需求的持续增长使得油气资源的开采和生产环境越来越严峻<sup>[1]</sup>。近年来,含 H<sub>2</sub>S 的酸性气田或油田的勘探开发成为了一个巨大难题,其中元素硫在管道系统中的沉积会导致严重腐蚀<sup>[2]</sup>,并造成大量灾难性的事故。此外,酸性气体中 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的存在使得油气田环境更具腐蚀性,也使得管道材质的腐蚀机理变得尤为复杂。在含有元素硫、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的恶劣环境中,绝大多数用于管道和设备的金属材料,都会遭受到严重的腐蚀。在高含硫油气开采过程中,元素硫通常以三种方式从气藏输送到地面集输系统<sup>[3]</sup>:与 H<sub>2</sub>S 的化学反应、在聚合物烷烃中的溶解以及以微滴形式被高速气流携带。由于温度和压力的变化,元素硫从天然气中析出并沉积,造成了管道堵塞、腐蚀穿孔和破裂等问题<sup>[4]</sup>。

在过去的几十年中,碳钢在 CO<sub>2</sub> 环境中的腐蚀已经被广泛研究<sup>[5-7]</sup>。结果表明,温度、CO<sub>2</sub> 压力、流速、氯化物浓度、化学成分和微观结构等诸多因素都会影响腐蚀速率和结垢性能。元素硫的出现会增大腐蚀速率,并促进点蚀,从而显著影响碳钢的腐蚀机理<sup>[8-9]</sup>。虽然 FeS 通常是元素硫腐蚀和 H<sub>2</sub>S 腐蚀的产物,但形成机理却大相径庭。对于 H<sub>2</sub>S 腐蚀,腐蚀过程通常涉及 H<sub>2</sub>S 在水中的溶解、解离以及 FeS 的形成。对于元素硫腐蚀,由于存在固体颗粒或沉积物的堆积导致腐蚀,使其腐蚀过程变得更为复杂。尽管元素硫腐蚀的机理尚不明确,但低于元素硫熔点的水溶液中,硫的酸化通常被认为是腐蚀的主要原因<sup>[10]</sup>。由于

气田地层水中往往含有元素硫、H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub>,现场的工况环境则更为复杂,因此腐蚀机理尚不明确。

825 合金是一种添加了钼、铜和钛的镍铁铬合金,可应对各种腐蚀环境,并因其优越的局部抗腐蚀性而取代了许多其他合金<sup>[11-15]</sup>。文中采用失重法、高温高压电化学法、扫描电镜 (SEM) 和能谱测试 (EDS) 方法对 825 合金的均匀腐蚀、局部腐蚀、电化学腐蚀、微观形貌和化学组成进行了表征,揭示了元素硫对 825 合金在高温高压含 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 环境中腐蚀行为的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 材料

实验材料为服役条件下镍基合金 825。实验前,用 200#、400#、600#、800#和 1000#的砂纸及 W5 金相砂纸依次打磨工作电极,用无水乙醇擦拭,最后通过冷风吹干。825 合金的化学成分见表 1。元素硫样品用带有细小孔洞的布袋包覆,每个布袋装有 10 g 单质硫。

### 1.2 高温高压实验

高温高压釜 (Cortest 公司) 用于腐蚀质量损失实验。实验前,为了除氧,预先将高纯度 N<sub>2</sub> 通入 180 g/L 的 NaCl 溶液中,然后把 2 个电化学试样 (φ6.6 mm × 19 mm) 连接在 2 个工作电极导电柱上,将 3 个质量

表 1 镍基合金 825 元素成分

Tab.1 Elemental composition of nickel-based alloy 825

| 元素     | Ni    | Cr    | Mo   | C    | Al   | Co   | Mn   | Si   | Ti   | Cu   | Fe   |
|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 质量分数/% | 41.94 | 21.75 | 3.25 | 0.02 | 0.18 | 0.32 | 0.51 | 0.10 | 2.07 | 1.75 | Bal. |

损失试样 (30 mm×10 mm×3 mm) 安装在釜内的夹具上。溶液除氧后, 将 3 L 配制的溶液通过导管引入真空的釜内, 真空度为-137.9 kPa。然后升温到 100 °C, 通入 H<sub>2</sub>S 使压力至 1.6 MPa, 再通入 CO<sub>2</sub> 至 0.5 MPa, 见表 2。实验后, 使用乙醇清洗试样, 吹干, 称量。通过式 (1) 计算试样的平均腐蚀速率, 并参照

NACEPR-0775—2005 对均匀腐蚀程度进行判定:

$$v_{\text{corr}} = \frac{8.76(m_0 - m_1)}{St\rho} \quad (1)$$

式中:  $m_1$  为腐蚀后的质量, g;  $m_0$  为腐蚀前的质量, g;  $\rho$  为材料的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $S$  为试样面积, mm<sup>2</sup>;  $t$  为实验时间, h;  $v_{\text{corr}}$  为平均腐蚀速率, mm/a;

表 2 实验条件  
Tab.2 Experimental conditions

| Environment | Sulfur | Solution          | Time/h | Temperature/°C | H <sub>2</sub> S pressure/MPa | CO <sub>2</sub> pressure/MPa |
|-------------|--------|-------------------|--------|----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Condition A | Yes    | 180 000 mg/L NaCl | 72     | 100            | 1.6                           | 0.5                          |
| Condition B | No     |                   |        |                |                               |                              |

### 1.3 电化学测试

使用电化学工作站 (CS350) 进行电化学测试, 包括电化学阻抗和极化曲线实验。工作电极为 825 镍基合金, 辅助电极为铂电极, 参比电极为耐高温高压的 Ag/AgCl 电极。本研究使用了威廉池 (Wilhelm Cell) 系统, 该系统利用了高压釜内压力和参比电极池内压力平衡的原理, 在常温下测定了釜内样品的电极电位, 因此, 不需要对电位进行温度校正。动电位极化曲线电位范围为-0.3~1.0 V (vs. OCP)。在 10 mHz~10 kHz 的范围内测试交流阻抗 (EIS), 交流扰动的振幅为±10 mV。

电化学噪声测量采用两支同材质 825 合金电极 (WE1、WE2) 以及参比电极 (Ag/AgCl) 构成, 测量采用 CST500 电化学噪声测试仪。

### 1.4 表观分析

采用 SEM 和 EDS 技术测试腐蚀产物的形貌及化学组成。测试时的真空度小于 8×10<sup>-3</sup> Pa。

## 2 结果与分析

### 2.1 质量损失

825 合金在 H<sub>2</sub>S 分压为 1.6 MPa、CO<sub>2</sub> 分压为 0.5 MPa、温度为 100 °C、含和不含元素硫条件下去除腐蚀产物膜前后的光学照片如图 1 所示。825 合金的均匀腐蚀速率见表 3。结果发现, 在不含元素硫条件下, 试样表面几乎未发生腐蚀, 仍然十分光亮, 平均腐蚀速率为 0.0217 mm/a。相比之下, 在含元素硫条件下, 825 合金发生了严重的局部腐蚀, 平均腐蚀速率为 0.469 mm/a, 约为前者的 21 倍。由此可见, 元素硫的存在极大地加剧了 825 合金的腐蚀。这主要是由于元素硫发生水解反应, 在局部区域生成了 H<sub>2</sub>S 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 在高温和氯离子的耦合作用下, 显著地加剧了 825 合金的腐蚀<sup>[16-21]</sup>。化学反应为:

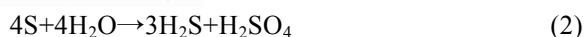


表 3 825 合金腐蚀速率  
Tab.3 Corrosion rate of 825 alloy

| Condition | $m_0/g$ | $m_1/g$ | $v_{\text{corr}}/(mm \cdot a^{-1})$ |
|-----------|---------|---------|-------------------------------------|
| A         | 7.2547  | 7.2540  | 0.0217                              |
|           | 7.3273  | 7.3247  |                                     |
|           | 7.2456  | 7.2454  |                                     |
|           | 7.7520  | 7.7369  |                                     |
| B         | 7.3578  | 7.3395  | 0.469                               |
|           | 7.2609  | 7.2287  |                                     |



a 含硫、去除腐蚀产物前 b 含硫、去除腐蚀产物后 c 不含硫、去除腐蚀产物前 d 不含硫、去除腐蚀产物后

图 1 825 合金在含 (a、b) 和不含元素硫 (c、d) 环境腐蚀 72 h 后去除腐蚀产物前、后 (b、d) 的光学照片  
Fig.1 Optical photos of 825 alloy before (a, c) and after (b, d) removal of corrosion products after 72 hours corrosion in environment containing elemental sulfur (a, b) and without elemental sulfur (c, d)

### 2.2 极化测试

825 合金在不含元素硫和元素硫全覆盖的条件下极化曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 在不含元素硫条件下, 自腐蚀电位为-0.299 V (vs. Ag/AgCl), 存在较宽的钝化区间, 且腐蚀电流密度较低。相比之下,

在元素硫全覆盖条件下，自腐蚀电位为-0.523 V (vs. Ag/AgCl)，钝化区间很窄，腐蚀电流密度较大。这说明 825 合金在元素硫全覆盖条件下比不含元素硫条件下的腐蚀速率高。

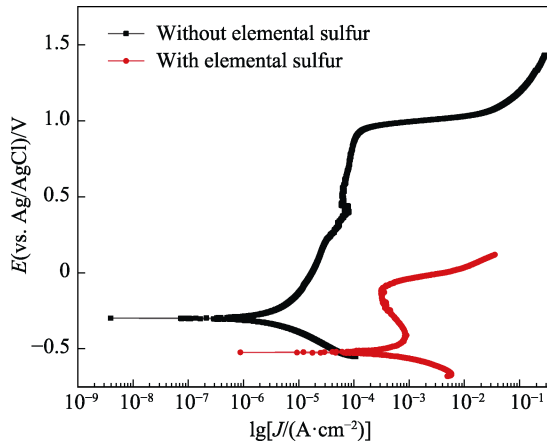


图 2 825 合金在硫化氢分压为 1.6 MPa、二氧化碳分压为 0.5 MPa、温度为 100 °C、含和不含元素硫条件下的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of 825 alloys in the environment with and without elemental sulfur at H<sub>2</sub>S partial pressure: 1.6 MPa, CO<sub>2</sub> partial pressure: 0.5 MPa and temperature: 100 °C

### 2.3 阻抗测试

72 h 后测得的 EIS 如图 3 和图 4 所示。其等效电路如图 5 所示，其中，R<sub>s</sub> 为溶液电阻，CPE<sub>dl</sub> 为双电

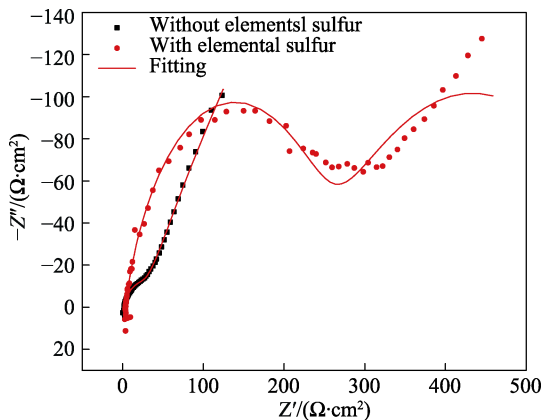


图 3 825 合金在硫化氢分压为 1.6 MPa、二氧化碳分压为 0.5 MPa、温度为 100 °C、含和不含元素硫条件下的奈奎斯特图

Fig.3 Nyquist plots of 825 alloys in the environment with and without elemental sulfur at H<sub>2</sub>S partial pressure: 1.6 MPa, CO<sub>2</sub> partial pressure: 0.5 MPa and temperature: 100 °C

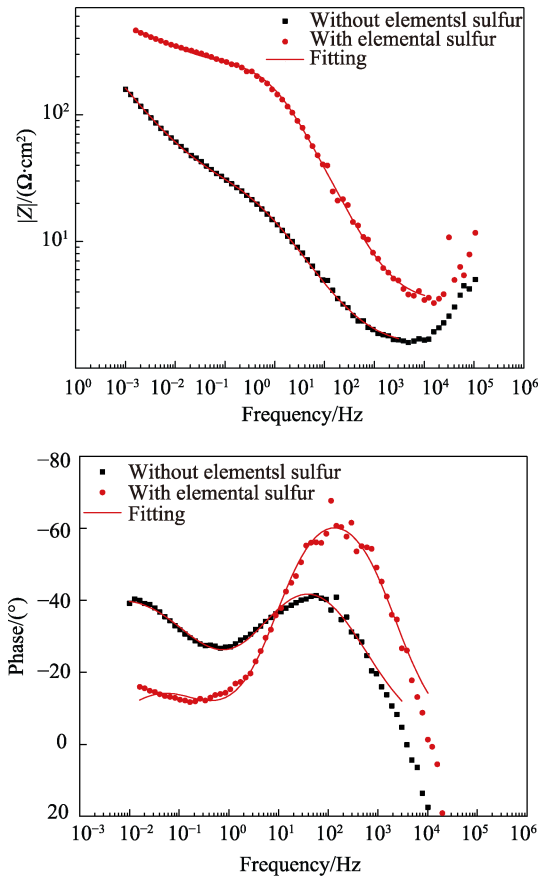


图 4 825 合金在硫化氢分压为 1.6 MPa、二氧化碳分压为 0.5 MPa、温度为 100 °C、含和不含元素硫条件下的波特图  
Fig.4 Bode plots of 825 alloys in the environment with and without elemental sulfur at H<sub>2</sub>S partial pressure: 1.6 MPa, CO<sub>2</sub> partial pressure: 0.5 MPa and temperature: 100 °C

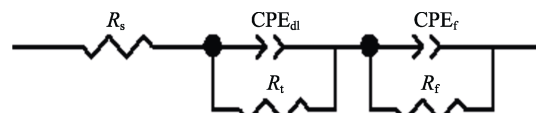


图 5 用于拟合电化学阻抗谱数据的等效电路  
Fig.5 Equivalent circuit for the EIS data fitting

层电容，R<sub>t</sub> 为电荷转移电阻，CPE<sub>f</sub> 为膜层电容，R<sub>f</sub> 为膜层电阻。EIS 拟合结果见表 4，由表 4 可知，含元素硫条件下，样品的膜层电阻和电荷转移电阻较大，可能是由于覆盖在样品表面的元素硫或者腐蚀产物膜引起的。需要指出的是，电化学阻抗谱仅反映的是样品表面的平均腐蚀信息，不能反映局部腐蚀信息。通过表面观察可知，825 合金在此环境中发生的是局部腐蚀，因此，电化学阻抗谱结果不适合用于判定 825 合金的局部腐蚀行为。

表 4 EIS 拟合结果  
Tab.4 EIS fitting results

| Condition | R <sub>s</sub> /(Ω·cm <sup>2</sup> ) | CPE <sub>dl</sub> /(F·cm <sup>-2</sup> ·Hz <sup>1-n<sub>1</sub></sup> ) | n <sub>1</sub> | R <sub>t</sub> /(Ω·cm <sup>2</sup> ) | CPE <sub>f</sub> /(F·cm <sup>-2</sup> ·Hz <sup>1-n<sub>2</sub></sup> ) | n <sub>2</sub> | R <sub>f</sub> /(Ω·cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------------------------------------|---|----------------|--------------------------------------|--|----------------|--------------------------------------|
| A         | 1.445                                | 4.26×10 <sup>-2</sup>   | 0.68           | 237.7                                | 3.075×10 <sup>-2</sup>   | 0.56           | 134                                  |
| B         | 3.31                                 | 1.54×10 <sup>-4</sup>   | 0.81           | 244.7                                | 9.07×10 <sup>-3</sup>  | 0.61           | 381.2                                |

### 2.4 电化学噪声测试

825合金在不含元素硫环境中的时域和频域噪声谱如图6和图7所示。可以看出,在不含元素硫的条件下,825合金电极电流波动较小,电流在频域上的分布较为平均,幅值较为稳定。电位变化为随机的长周期漂移,且电位波动的幅度大多约为微弱扰动。电化学噪声测试结果显示,无明显的点蚀信号。

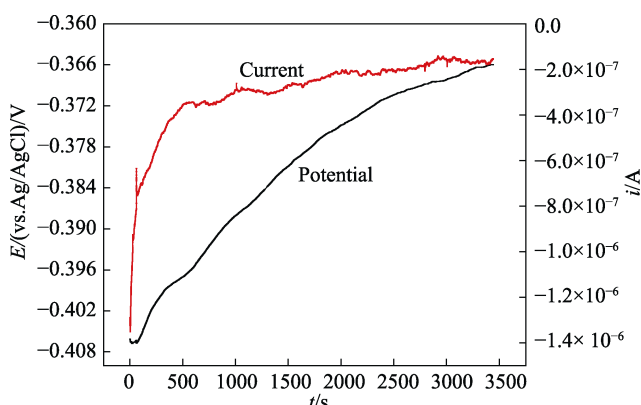


图6 不含元素硫条件下825合金的电位电流噪声曲线时域谱

Fig.6 Time-domain spectrum of the potential and current noise curve of 825 alloy in the absence of elemental sulfur

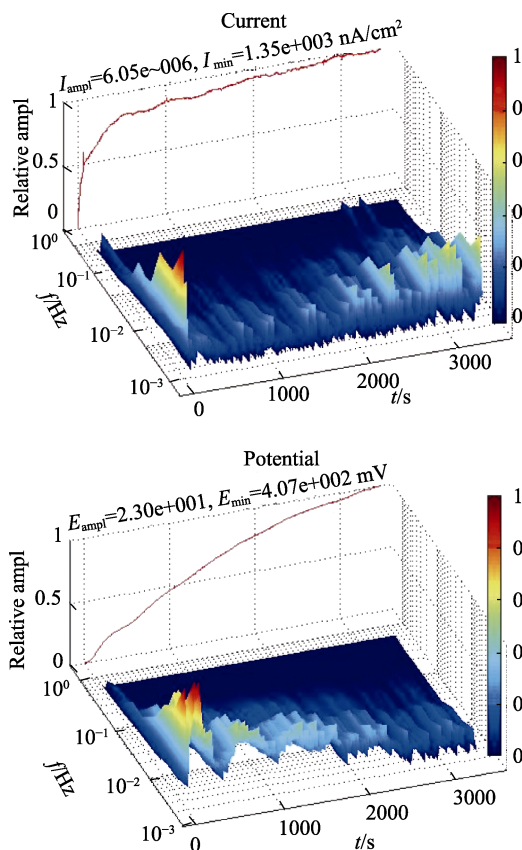


图7 不含元素硫条件下小波分析825合金的噪声曲线进行时频转换后谱图

Fig.7 Noise curve of 825 alloy after time-frequency conversion by wavelet transform in the absence of elemental sulfur

825合金在含元素硫条件下测得的噪声数据利用小波变换的分解情况如图8和图9所示。可以看出,在此种环境下,825合金存在明显的亚稳态点蚀期,样品在时域的特征是电流峰上升和下降的速度快,电位峰的下降迅速而恢复缓慢。在频域的变化是出现中高频电位峰<sup>[22-25]</sup>。

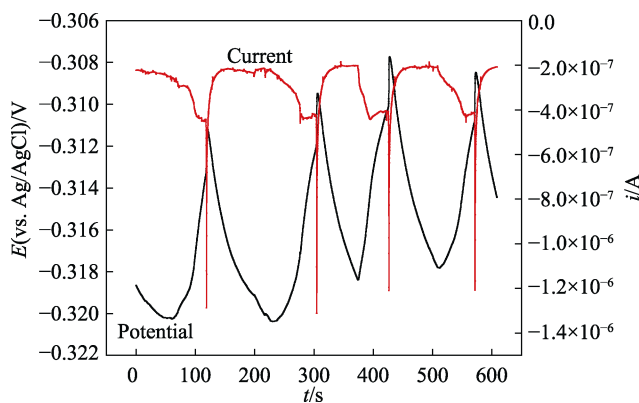


图8 含元素硫条件下亚稳态点蚀的电位电流噪声曲线时域谱图

Fig.8 Time-domain spectrum of the potential and current noise curve in the metastable pitting in the presence of elemental sulfur

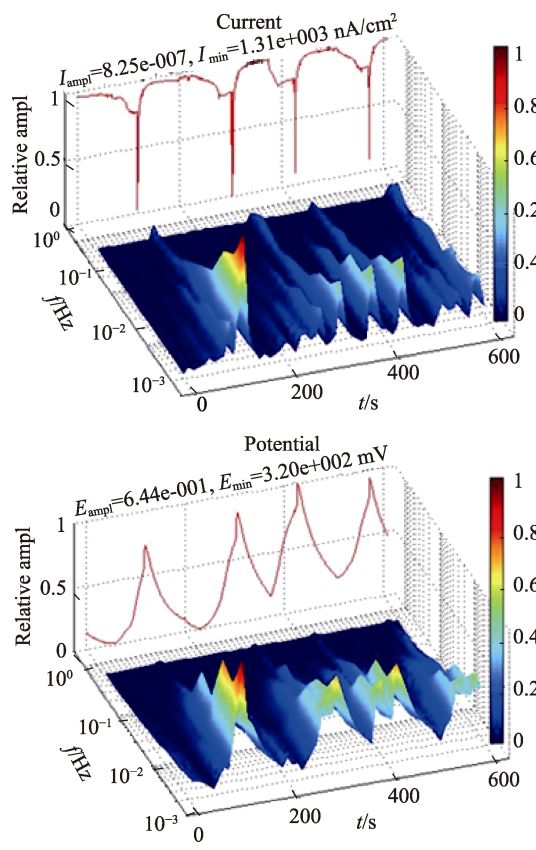


图9 含元素硫条件下小波变换对亚稳态点蚀噪声曲线进行时频转换后谱图

Fig.9 Spectrum of metastable pitting noise curve after time-frequency conversion by wavelet transform in the presence of elemental sulfur

825 合金的噪声电阻 ( $R_n$ ) 与形核速率 ( $\lambda$ ) 随时间 ( $t$ ) 变化趋势如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知, 在不含元素硫条件下, 噪声电阻基本保持不变趋势, 形核速率也相对稳定, 说明样品并未受到严重的腐蚀破坏。在元素硫全覆盖条件下, 噪声电阻和形核速率均呈现降低趋势, 其中形核速率要比在不含元素硫的情况下大, 说明样品受到点蚀破坏。

## 2.5 腐蚀产物形貌和成分

825 合金在无硫和含硫条件下的微观形貌如图 12 所示。由图 12 可见, 在无元素硫条件下, 825 合金表面较为光滑, 可以看见清晰的磨痕, 几乎没有受到腐蚀。相比之下, 加入了元素硫之后, 825 合金发生了严重的腐蚀。同时, 根据图 13 可以发现, 表面的 O 元素和 S 元素的成分大幅度增加, 说明腐蚀产物主要为氧化物和硫化物。

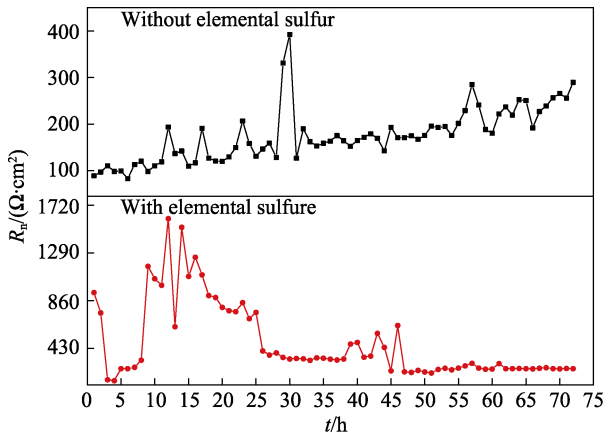


图 10 不含硫条件下 825 合金的噪声电阻随时间变化趋势  
Fig.10 Variation trend of noise resistance of 825 alloy with time in the absence of elemental sulfur

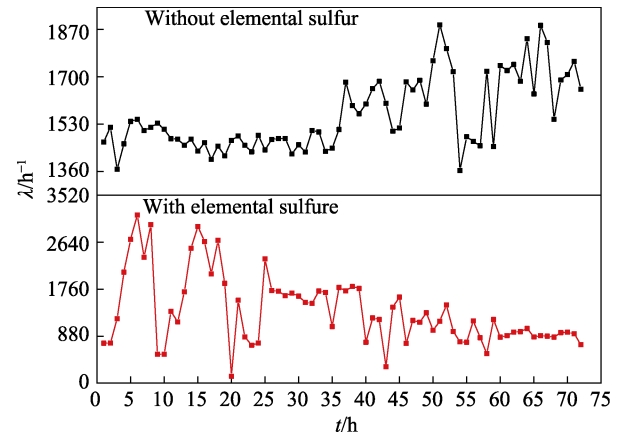
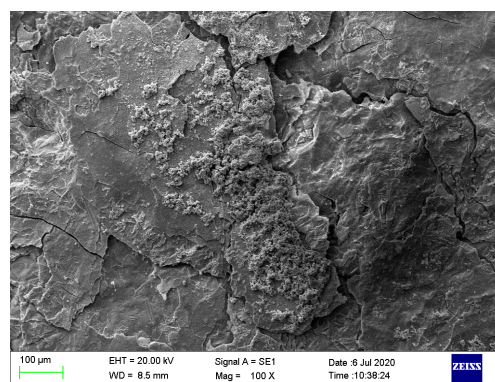
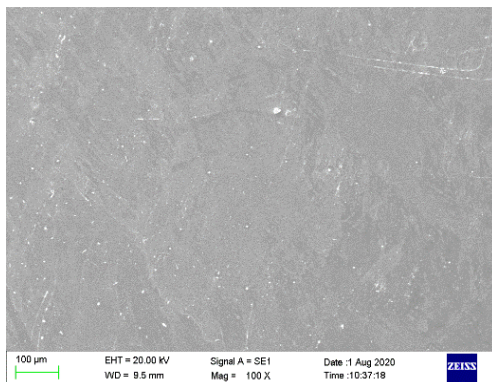
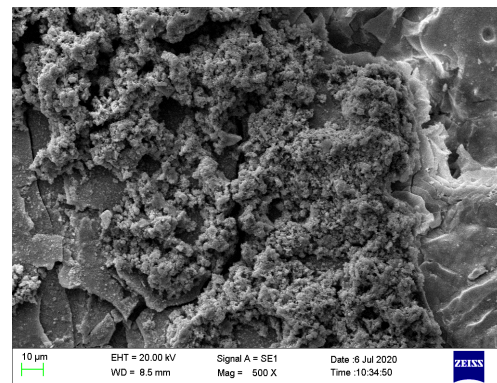
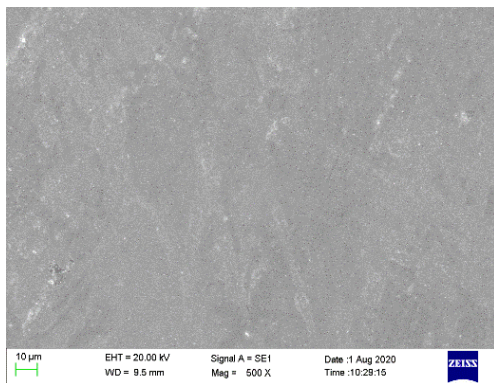


图 11 含硫条件下 825 合金的形核速率随时间变化趋势  
Fig.11 Variation trend of nucleation rate of 825 alloy with time in the presence of elemental sulfur



a 无硫元素

b 含硫元素

图 12 825 合金在无元素硫和含元素硫条件下的微观形貌  
Fig.12 Micro-morphology of 825 alloy without elemental sulfur (a) and with elemental sulfur (b)

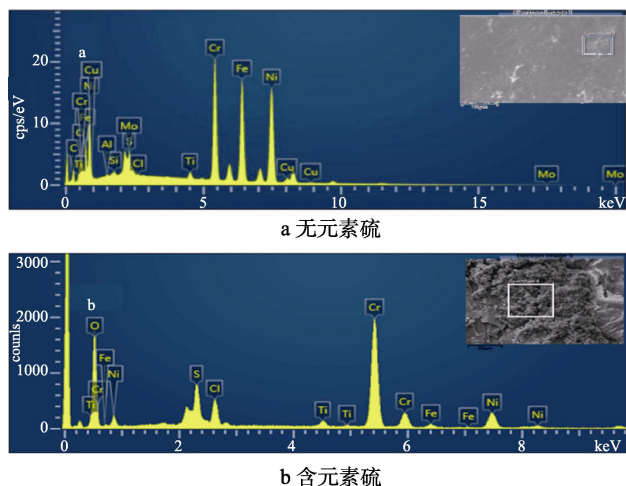


图 13 825 合金在无元素硫和含元素硫条件下的元素组成  
Fig.13 Elemental composition of 825 alloy without elemental sulfur (a) and with elemental sulfur (b)

### 3 结论

1) 在无元素硫的高温高压  $H_2S$  和  $CO_2$  环境中, 825 合金具有优异的抗腐蚀性能, 均匀腐蚀速率仅为  $0.0217 \text{ mm/a}$ , 几乎未发生腐蚀, 其表面的钝化膜十分稳定, 对基体有着良好的保护性。

2) 在含元素硫的高温高压  $H_2S$  和  $CO_2$  环境中, 825 合金发生了严重的局部腐蚀, 均匀腐蚀速率高达  $0.469 \text{ mm/a}$ 。这主要是由于元素硫在高温下容易发生水解, 产生  $H_2S$  和  $H_2SO_4$ , 在氯离子的耦合作用下, 局部区域发生严重腐蚀导致的。

3) 825 合金的局部腐蚀可以在高温高压环境中采用电化学噪声技术进行监测。

4) 825 合金在高温高压含元素硫环境的腐蚀产物以氧化物和硫化物为主。

#### 参考文献:

[1] FU A Q, FENG Y R, CAI R, et al. Downhole Corrosion Behavior of Ni-W Coated Carbon Steel in Spent Acid & Formation Water and Its Application in Full-scale Tubing[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 566-576.

[2] 李瑛, 林海潮, 吕明, 等. 元素硫对特高含  $H_2S$  气井用油管钢的腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1996, 8(3): 252-255.

LI Ying, LIN Hai-chao, LYU Ming, et al. Corrosion of Oil Pipe Steel for Ultra-high  $H_2S$  Gas Wells by Elemental Sulfur[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1996, 8 (3): 252-255.

[3] SANTOS J P, LOBATO A K, MORAES C, et al. Determination of Elemental Sulfur Deposition Rates for Different Natural Gas Compositions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015(15): 461-465.

[4] 刘志德, 路民旭, 谷坛, 等. 高酸性气田集输系统元素硫存在条件下腐蚀影响因素[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(S2): 85-91.

LIU Zhi-de, LU Min-xu, GU Tan, et al. Influencing Factors of Corrosion in the Presence of Elemental Sulfur in Gathering and Transmission System of Highly Acidic Gas Fields[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(S2): 85-91.

[5] LIU W, DOU J, LU S, et al. Effect of Silty Sand in Formation Water on  $CO_2$  Corrosion Behavior of Carbon Steel[J]. Applied Surface Science, 2016, 367: 438-448.

[6] LIU Z, ZHAO T, LIU R, et al. Influence Factors on Stress Corrosion Cracking of P110 Tubing Steel under  $CO_2$  Injection Well Annulus Environment[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(4): 757-764.

[7] OCHOA N, VEGA C, PEBERE N, et al.  $CO_2$  Corrosion Resistance of Carbon Steel in Relation with Microstructure Changes[J]. Materials Chemistry and Physics, 2015, 156: 198-205.

[8] LI W, POTS B F, BROWN B, et al. A Direct Measurement of Wall Shear Stress in Multiphase Flow—Is It an Important Parameter in  $CO_2$  Corrosion of Carbon Steel Pipelines?[J]. Corrosion Science, 2016, 110: 35-45.

[9] 蔡晓文, 戈磊, 陈长风, 等. 油套管用 P110 钢在元素硫环境中腐蚀规律的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 161-165.

CAI Xiao-wen, GE Lei, CHEN Chang-feng, et al. Study on Corrosion Law of p110 steel for Oil Casing in Elemental Sulfur Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2): 161-165.

[10] 蒋秀, 张艳玲, 屈定荣, 等. 3.5%NaCl 溶液中 L360 钢在 S 沉积条件下的腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(4): 312-316.

JIANG Xiu, ZHANG Yan-ling, QU Ding-rong, et al. Study on Corrosion Behavior of L360 Steel in 3.5% NaCl Solution under S Deposition Condition[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(4): 312-316.

[11] CONTRERAS E Q, HUANG J, POSUSTA R S, et al. Optical Measurement of Uniform and Localized Corrosion of C1018, SS 410, and Inconel 825 Alloys Using White Light Interferometry[J]. Corrosion Science, 2014, 87: 383-391.

[12] YIN Z F, ZHAO W, LAI W Y, et al. Electrochemical Behaviour of Ni-base Alloys Exposed under Oil/Gas Field Environments[J]. Corrosion Science, 2009, 51(8): 1702-1706.

[13] SAHU S K, JADAM T, DATTA S, et al. Performance of Dielectric media (Conventional EDM Oil and Distilled Water) during Machining of Inconel 825 Super Alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18(7): 2679-2687.

[14] RAO M N. Application of Superalloys in Petrochemical and Marine Sectors in India[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2008, 61: 87-91.

[15] 蔡晓文, 戈磊, 于浩波, 等. 镍基合金 825 在元素硫环境中的局部腐蚀特征[J]. 材料科学与工程学报, 2010,

- 28(2): 226-231.
- CAI Xiao-wen, GE Lei, YU Hao-bo, et al. Local Corrosion Characteristics of Nickel-based Alloy 825 in Elemental Sulfur Environment[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2010, 28(2): 226-231.
- [16] MALDONADO-ZAGAL S B, BODEN P J. Hydrolysis of Elemental Sulphur in Water and Its Effect on the Corrosion of Mild Steel[J]. *British Corrosion Journal*, 1982, 17(3): 116-120.
- [17] 陈建, 聂玲玲, 苗健, 等. 温度对 X65 钢元素硫腐蚀行为的影响[J]. *西安工业大学学报*, 2013, 33(4): 309-312.
- CHEN Jian, NIE Ling-ling, MIAO Jian, et al. Effect of Temperature on Elemental Sulfur Corrosion Behavior of X65 Steel[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2013, 33(4): 309-312.
- [18] 邓彤, 陈家壖. 相转移催化元素硫歧化反应的动力学[J]. *化工学报*, 1988, 39(5): 538-544.
- DENG Tong, CHEN Jia-hou. Kinetics of Disproportionation of Elemental Sulfur by Phase Transfer Catalysis[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1988, 39(5): 538-544.
- [19] GIGGENBACH W F. Kinetics of the Polysulfide-thiosulfate Disproportionation up to 240 Deg[J]. *Inorganic Chemistry*, 1974, 13(S): 1730-1733.
- [20] IKEDA A, IGARASHI M, UEDA M, et al. On the Evaluation Methods of Ni-base Corrosion Resistant Alloy for Sour Gas Exploration and Production[J]. *Corrosion*, 1989, 45(10): 838-847.
- [21] 李金灵, 朱世东, 屈撑圉, 等. 元素硫腐蚀研究进展[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(2): 20-24.
- LI Jin-ling, ZHU Shi-dong, QU Cheng-tun, et al. Research Progress of Elemental Sulfur Corrosion[J]. *Hot Processing Technology*, 2015, 44(2): 20-24.
- [22] 李季, 赵林, 李博文, 等. 304 不锈钢点蚀的电化学噪声特征[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2012, 32(3): 235-240.
- LI Ji, ZHAO Lin, LI Bo-wen, et al. 304 Electrochemical Noise Characteristics of Pitting Corrosion of Stainless Steel[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2012, 32(3): 235-240.
- [23] 石维, 董泽华, 郭兴蓬. 基于 Hilbert-Huang 变换的电化学噪声解析及其应用[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2014, 34(2): 138-146.
- SHI Wei, DONG Ze-hua, GUO Xing-peng. Electrochemical Noise Analysis Based on Hilbert-Huang Transform and Its Application[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2014, 34(2): 138-146.
- [24] 李志刚, 彭东辉, 浦静雯, 等. 电化学噪声技术在 2205 钢点蚀行为研究中的应用[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(1): 11-16.
- LI Zhi-gang, PENG Dong-hui, PU Jing-wen, et al. Application of Electrochemical Noise Technology in the Study of Pitting Behavior of 2205 Steel[J]. *Corrosion and Protection*, 2018, 39(1): 11-16.
- [25] 石维. 钢筋混凝土界面局部腐蚀发展与抑制机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- SHI Wei. Study on the Development and Inhibition Mechanism of Local Corrosion at Reinforced Concrete Interface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.