酸性含硫工况下 IN625 合金的耐蚀性评价

李科¹, 李天雷¹, 李星², 施岱艳¹, 杨志³, 钟显康^{3*}

(1.中国石油工程建设有限公司西南分公司,成都 610041; 2.中国石油工程建设有限公司土库曼斯坦分公司,北京 100120; 3.西安交通大学 化学工程与技术学院,西安 710049)

摘要:目的 对 IN625 合金在 H₂S、CO₂、元素硫、温度等多因素耦合作用下的腐蚀适应性进行评价。方法 采用高温高压反应釜模拟 IN625 合金在酸性含硫工况下的腐蚀过程,并通过失重法、表面分析技术,深入探讨元素硫的不同形态、温度条件以及 H₂S 和 CO₂的分压对 IN625 合金腐蚀行为的影响规律。结果 IN625 形成的腐蚀产物膜结构均匀且致密,具备优异的耐蚀性能。在酸性气体存在的工况下,合金表面出现点蚀现象,其在液相或气相中的腐蚀速率相比无酸性气体存在的工况提高了 2~3 倍,最高可达 0.064 6 mm/a。全覆盖元素硫引发均匀腐蚀,悬浮元素硫导致局部腐蚀,腐蚀速率均随温度升高而增大。结论 在含有元素硫的酸性气田环境下,尽管 IN625 合金整体上具有较好的耐蚀性,但在多因素耦合的复杂工况下仍然面临腐蚀风险。因此,为确保气田设备的安全运行,需要根据具体的服役工况,合理选择材料,并采取适当的防护措施。

关键词: IN625 合金; 元素硫; 腐蚀产物膜; 酸性环境; 腐蚀评价; 多因素耦合

中图分类号: TG172 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)02-0133-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.015

Corrosion Resistance Evaluation of IN625 Alloys under Acidic Sulfur-containing Conditions

LI Ke¹, LI Tianlei ¹, LI Xing², SHI Daiyan¹, YANG Zhi³, ZHONG Xiankang^{3*}

- (1. Southwest Branch of China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Chengdu 610041, China;
- 2. Turkmenistan Branch of China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Beijing 100120, China;
 - 3. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the corrosion adaptability of IN625 alloy under the coupling effects of H₂S, CO₂, elemental sulfur, and temperature. A high-temperature and high-pressure reactor was used to simulate the corrosion process of IN625 alloy under acidic sulfur-containing conditions, and the effect of different forms of elemental sulfur, temperature conditions, and the partial pressures of H₂S and CO₂ on the corrosion behavior of IN625 alloy was deeply explored through weight loss method and surface analysis techniques. The corrosion product film deposited on IN625 surface was uniform and dense, with excellent corrosion resistance. However, in the presence of acidic gases, pitting corrosion occurred on the alloy surface, and its corrosion rate in the liquid or gas phase was 2 to 3 times higher than that in the absence of acidic gases, reaching a maximum of 0.064 6 mm/a. Full coverage of elemental sulfur caused uniform corrosion, while suspended elemental sulfur lead to localized

收稿日期: 2024-11-01; 修订日期: 2024-11-25 Received: 2024-11-01; Revised: 2024-11-25

引文格式:李科,李天雷,李星,等. 酸性含硫工况下 IN625 合金的耐蚀性评价[J]. 装备环境工程,2025,22(2):133-141.

LI Ke, LI Tianlei, LI Xing, et al. Corrosion Resistance Evaluation of IN625 Alloy sunder Acidic Sulfur-containing Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 133-141.

^{*}通信作者 (Corresponding author)

corrosion, with the corrosion rate increasing with temperature. In acidic gas fields containing elemental sulfur, although IN625 alloy generally has good corrosion resistance, it still faces corrosion risks under complex conditions with multiple factors coupled. Therefore, to ensure the safe operation of gas field equipment, it is necessary to reasonably select materials and take appropriate protective measures based on specific service conditions.

KEY WORDS: IN625 alloys; elemental sulfur; corrosion product film; acidic environment; corrosion evaluation; multi-factor coupling

高含硫天然气资源作为传统天然气资源的有力补充,对于满足国家能源需求,支持企业的低碳发展战略,推动地方经济繁荣以及确保国家能源安全具有重要意义。四川盆地蕴藏着丰富的天然气资源,其总资源量高达 66 万亿 m³。在已探明的 27 个含油气层系中,有 13 个含有高浓度硫化氢。在中国,硫化氢质量浓度超过 30 g/m³的高含硫气藏中,有 90%集中于此地[1]。单质硫腐蚀在石油天然气行业中是一种特殊且极具危害性的腐蚀形式,它不仅会导致设备和管道堵塞、腐蚀损坏,增加维修和更换的经济负担,还可能引发泄漏、火灾等严重安全事故,对环境和人类健康构成巨大威胁[2-3]。因此,对于高含硫天然气资源的开发和利用,必须采取有效的腐蚀控制措施,以确保能源开发的可持续性与安全性。

高含硫天然气资源含有大量的 H₂S、CO₂、Cl⁻,这些酸性气体分子或离子不仅影响单质硫的溶解度,而且能改变沉积硫的结构与反应活性^[4]。单质硫能与水反应生成硫化氢,这不仅导致了氢原子的渗透和聚集,同时触发了氢腐蚀现象,加速了裂纹的形成和扩展,导致金属材料发生应力腐蚀开裂^[5-7]。此外,在交变载荷的作用下,单质硫腐蚀还可能加剧金属材料的疲劳腐蚀,从而降低其疲劳寿命^[8]。面对日益严苛的工况,传统的腐蚀控制方法不再有效,需要开发新的材料和防护技术来应对单质硫腐蚀的挑战。

普碳钢、低合金钢,甚至低级不锈钢等材料已远 不能满足酸性油气井开采的要求,选材相继转向综合 性能更为优越的镍基合金,如 Inconel 625 (IN625) 合金[9-11]。镍基合金中高含量的镍和钼提高了合金对 非氧化环境的抵抗力,高钼含量还赋予合金优异的抗 点蚀和缝隙腐蚀能力。因此, IN625 合金在石油和天 然气工业中得到广泛应用,被用于制造高温高压下的 管道、阀门、储罐和换热器等设备[12]。然而,在实际 工况下,高温、高压、含氯离子酸性环境中,IN625 合金的腐蚀适应性到底如何,目前尚不清楚[13-16]。本 文基于含硫酸性天然气开采的实际工况,模拟了 IN625 合金在温度、压强、酸性气体等多因素耦合 作用下的腐蚀过程,结合失重法、腐蚀产物形貌及 成分分析,探讨了元素硫含量、温度、H₂S/CO₂对 IN625 合金均匀腐蚀、局部腐蚀、钝化膜保护性的 影响, 给予 IN625 合金在模拟工况下的腐蚀适应性 评价。

1 材料与模拟腐蚀工况

1.1 IN625 合金的元素成分

IN625 合金的组成元素分布见表 1。

表 1 IN625 合金的元素构成(质量分数,%) Tab.1 Elemental composition of IN625 alloys (mass fraction,%)

С	Cr	Nb	Mo	Fe	Mn
≤0.10	20.0~23.0	3.15~4.15	8.0~10.0	≤5.0	≤0.50
Si	S	A1	Ti	Co	Ni
51	Б	7.11	11	CO	1 11

1.2 IN625 合金腐蚀试样的准备

质量损失试验样品尺寸为 30 mm×10 mm×3 mm, 距上端 2 mm 处打孔, 孔径为 3 mm; XPS 样品尺寸 为 12 mm×10 mm×2 mm, 距上端 1 mm 处打孔, 孔径 为 3 mm。依次使用 200#、400#、600#、800#水砂纸 及 W5 金相砂纸将试样工作面打磨至镜面,再用无水 乙醇擦拭,冷风吹干。用 TT-300 重防腐漆封装非工 作面,室温静置 24 h, 待其固化。

1.3 腐蚀工况

腐蚀介质为 234 g/L NaCl、15.96 g/L KCl、23.67 g/L CaCl₂、2.84 g/L Na₂SO₄和 43.52 g/L MgCl₂·H₂O 组成的混合溶液,其中氯离子的总质量浓度为 180 g/L,实验前,通人高纯 N₂除氧 3 h。模拟腐蚀工况见表 2。

实验装置如图 1 所示,反应釜通过聚四氟乙烯分隔成液相室和气相室,所有实验样品均采用垂直挂件,气相室和液相室分别挂 2 组试样,每组平行实验 2 件,液相室完全淹没试样。元素硫的 2 种存在形式如图 2 所示。悬浮硫的量按照 10 g/L 的量加注。全覆盖是将单质硫装入尼龙袋中,插入试样并使其完全包埋在单质硫中。

2 研究方法

2.1 失重法

失重法是通过试样腐蚀前后质量的变化来评价 材料腐蚀的快慢,其腐蚀速率可表示为[17-18]:

140.2 Simulated Conditions								
编号	是否含元素硫	温度/℃	H ₂ S 分压/MPa	CO ₂ 分压/MPa	总压/MPa			
S1	含 S, 全覆盖	110	1.8	0	2.0			
S2	含 S, 全覆盖	110	0	1.8	2.0			
S3	含 S, 全覆盖	110	0	0	0.1			
S4	含 S, 全覆盖	120	0	0	0.1			
S5	含 S, 全覆盖	132	0	0	0.1			
S6	悬浮 S (10 g/L)	120	0	0	0.1			
S7	悬浮 S (10 g/L)	132	0	0	0.1			

表 2 模拟工况 Tab.2 Simulated conditions



图 1 高温高压反应釜 Fig.1 High-pressure reactor

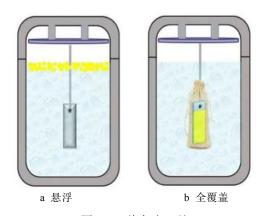


图 2 2 种含硫工况 Fig.2 Two sulfur-containing conditions: a) suspended sulfur; b) full coverage of sulfur

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St}$$

式中: ν 为腐蚀速率, $g/(m^2 \cdot h)$; m_0 为腐蚀前试样的质量,g; m_1 为清除腐蚀产物后试样的质量,g; S 为试样表面积, m^2 ; t 为腐蚀时间,h。此方法只适用于计算均匀腐蚀速率,无法用于局部腐蚀速率的计算。

2.2 表面分析

采用扫描电镜观察样品表面形貌,扫描电镜

(Quanta200 环境扫描电子显微镜,荷兰 FEI 公司)测试时的真空度为小于 8×10^{-3} Pa。采用 EDS 分析腐蚀产物元素组成,X 射线光电子能谱(VG Multilab 2000 X 射线光电子能谱仪,美国 Beckman 公司)研究元素化合价的变化,具体的实验参数如下:采用 Al Ka 靶(1486.6eV),整体能量分辨率为 0.45 eV,键能通过 C1s 主峰 284.6 eV 校正,样品室的真空度为 10^{-7} Pa。后续采用 Avantage 和 XPSPEAK41 软件对实验数据进一步分析处理[19-21]。

3 结果与讨论

3.1 质量损失分析

S1~S7工况下 625 合金的平均腐蚀速率如图 3 所示。在 S1、S2 工况下, 试样在气相环境中和液相环境中的平均腐蚀速率显著高于 0.025 mm/a, 中度腐蚀; 除 S5 外, S3、S4、S6、S7 工况下合金的平均腐蚀速率均低于 0.025 mm/a, 试样轻度腐蚀。数据表明, IN625 合金试样在酸性工况下更容易发生腐蚀, 且在液相中的腐蚀速率大于气相中的腐蚀速率。H₂S、CO₂等酸性气体易溶于水溶液并电离出氢离子,导致 IN625 合金发生酸腐蚀,酸性气体分压越高,腐蚀速

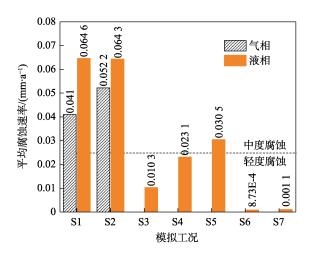


图 3 S1~S7 工况下 IN625 合金的平均腐蚀速率 Fig.3 Average corrosion rate of IN625 alloys under conditions S1 to S7

率越快。IN625 合金的腐蚀速率对温度敏感,常压下,IN625 合金的平均腐蚀速率随温度升高而增大。此外,试样在悬浮硫工况下的平均腐蚀速率明显低于被硫全覆盖工况下的平均腐蚀速率。元素硫对合金腐蚀的环境因素较为复杂,主要包括温度、压力、氯离子、硫的存在形式等[11,19]。一般而言,硫与合金表面接触越紧密,腐蚀速率越高。

S1~S7 工况下腐蚀试样除去腐蚀产物膜前后的

光学照片如图 4 所示。视场中, IN625 合金试样表面相对光滑,腐蚀迹象不明显。结果表明,在模拟工况下,IN625 合金具有好的耐蚀性能。IN625 试样具有较高的铬含量(质量分数为 20.0%~23.0%)和钼含量(质量分数为 8.0%~10.0%),铬和钼是提高合金耐腐蚀性的关键元素。此外,IN625 合金具有面心立方结构,这种结构能够承受多种恶劣环境,尤其是在氯化物介质中表现出良好的耐腐蚀性。

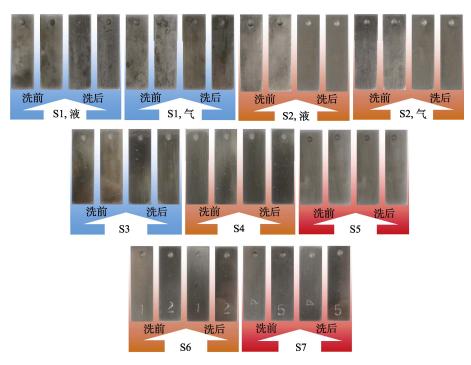


图 4 S1~S7 工况下腐蚀试样去除腐蚀产物膜前后光学照片

Fig. 4 Optical photographs of corrosion samples before and after removal of corrosion product film under conditions S1 to S7

3.2 腐蚀产物形貌及成分分析

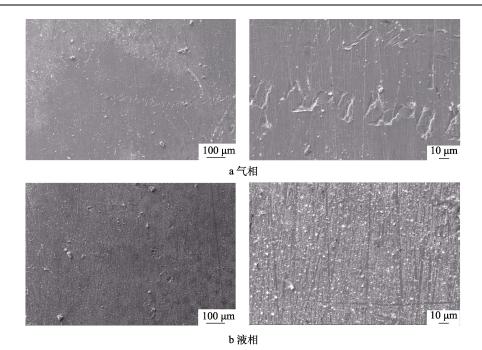
3.2.1 腐蚀产物的微观形貌

不同工况下的腐蚀试样的表面微观形貌如图 5~8 所示。S1 工况下,IN625 合金气相、液相腐蚀试样表面都相对光滑,但液相腐蚀试样表面出现较多颗粒附着物。S2 工况下,气相和液相腐蚀试样表面均比较光滑,液相腐蚀试样表面疑似存在点蚀小孔。可见,在两相工况下,由于液相中氢离子浓度相比气相更高,合金被酸腐蚀的程度更大。在全覆盖状态下,元素硫对合金的腐蚀表现为均匀腐蚀,因此 S3、S4 工况下腐蚀试样表面状态光滑,不存在显著的局部腐蚀现象。S5 工况下,腐蚀试样表面腐蚀产物疏松,凹凸不平,局部腐蚀明显。在悬浮硫存在的工况下(如 S6、S7),高温加速局部腐蚀,腐蚀试样表面出现点蚀现象。研究结果进一步证实,黏贴覆盖元素硫以均匀腐蚀为主,而悬浮硫以局部腐蚀为主[19]。

3.2.1 腐蚀产物的元素组成及成分分析

为明确腐蚀产物成分,采用 EDS 方法对腐蚀沉积物元素组成进行表征,结果如图 9 所示。由此可知,IN625 合金试样表面腐蚀产物的主要组成元素有 C、O、Al、Si、S、Cl、Ti、Cr、Fe、Ni、Cu、Nb、Mo等,其中 Cr、Fe、Ni 等金属元素占据主体。与腐蚀前的合金试样相比,腐蚀产物中存在微量的氧元素和硫元素,可能来自腐蚀膜,其中氧元素可能来自氧化物,硫元素可能来自单质硫或铁的硫化物^[22]。S1、S2 工况下,腐蚀产物中的硫元素含量显著高于其他腐蚀工况。S5 工况下,腐蚀产物中的氧元素、氯元素和铁元素显著高于其他腐蚀工况,其中氯元素可能来源于腐蚀溶液。

为进一步理清上述元素的来源及腐蚀产物的化学组成,采用 X 射线光电子能谱仪对 S1、S5 工况下腐蚀72 h 的试样表面腐蚀产物进行价态分析,对 Fe、Cr、Ni、S 元素的窄谱进行测定,并采用分峰软件对 XPS数据进行分峰拟合^[23-25],结果如图 10 和图 11 所示。



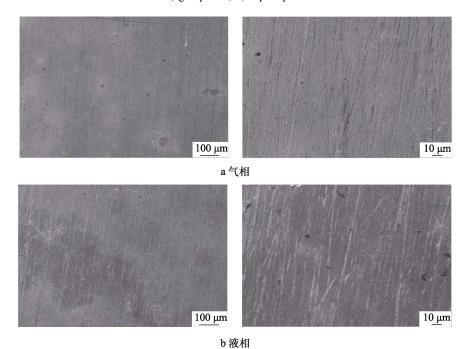
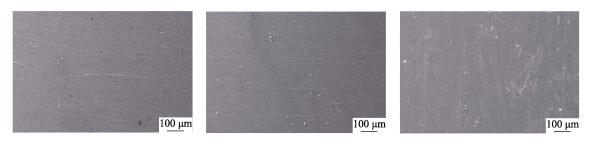


图 6 S2 工况下气相腐蚀试样和液相腐蚀试样的表面形貌 Fig.6 Surface morphology of gas-phase corrosion samples and liquid-phase corrosion samples under condition S2: a) gas-phase; b) liquid-phase



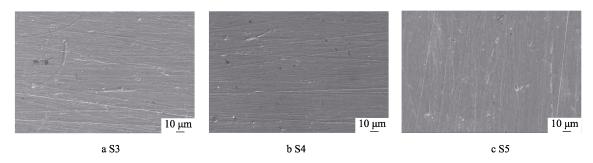


图 7 S3、S4 和 S5 工况下腐蚀试样的表面形貌 Fig.7 Surface morphology of corrosion samples under conditions S3, S4 and S5

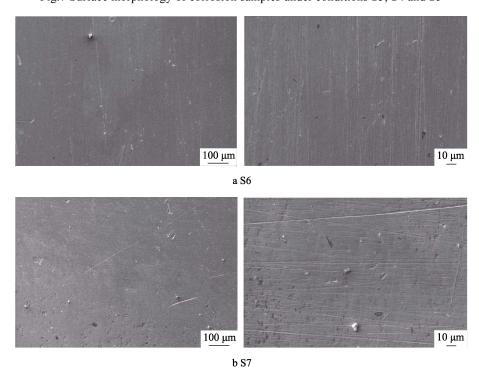


图 8 S6 和 S7 工况下腐蚀试样的表面形貌 Fig.8 Surface morphology of corrosion samples under conditions S6 and S7

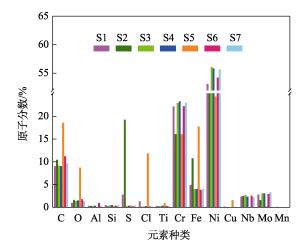


图 9 不同工况下 IN625 合金腐蚀试样表面产物的 元素分布

Fig.9 Element distribution of corrosion products on IN625 alloys surfaces under different conditions

由图 10 可知,S1 工况下,合金腐蚀试样表面腐蚀产物主要由 Fe、Cr、Ni 的氧化物和硫化物组成 $^{[19-20]}$ 。其中,Fe 的化合物主要有 Fe $_2$ O $_3$ (710.8eV,64.39%)、FeS(713.6 eV,14.27%)及少量的 Fe $_3$ O $_4$ (707.7 eV,1.961%);Cr 的化合物主要有 Cr $_2$ O $_3$ (576.9 eV,74.85%)、Cr(OH) $_3$ (578.2 eV,12.49%)等;Ni 的化合物主要有 NiO(855.6 eV,11.97%)、Ni(OH) $_2$ (856.6 eV,34.58%)等。非金属元素 S 的主要存在形式包括 FeS(163.5 eV,21.73%)、S8(164.2 eV,40.41%)、SO $_4$ ²⁻(165.5 eV,37.84%)等。

由图 11 可知, S5 工况下, 合金腐蚀试样表面腐蚀产物主要由 Fe、Cr、Ni 的氧化物和硫化物组成。其中, Fe 的化合物主要有 Fe₂O₃(710.8 eV, 53.21%)、FeS(713.6 eV, 37.77%)及少量的 Fe₃O₄(707.7 eV, 1.07%); Cr 的化合物主要有 Cr_2O_3 (576.9 eV, 79.91%)、 $Cr(OH)_3$ (578.2 eV, 10.33%)等; Ni 的化

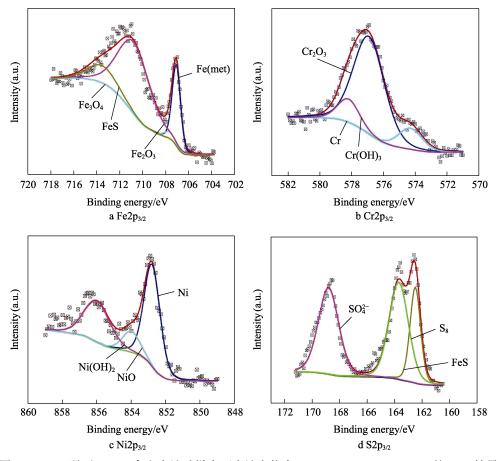


图 10 S1 工况下 IN625 合金腐蚀试样表面腐蚀产物中 Fe2p、Cr2p、Ni2p、S2p 的 XPS 结果 Fig.10 XPS results of Fe2p, Cr2p, Ni2p, and S2p in corrosion products on surface of IN625 alloys under S1 corrosion condition

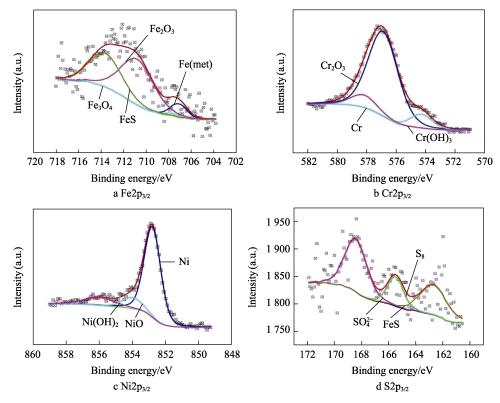


图 11 S5 工况下 IN625 合金腐蚀试样表面腐蚀产物中 Fe2p、Cr2p、Ni2p、S2p 的 XPS 结果 Fig.11 XPS results of Fe2p, Cr2p, Ni2p and S2p in corrosion products on surface of IN625 alloys under S5 corrosion condition

合物主要有 NiO (855.6 eV, 11.49%)、Ni(OH)₂ (856.6 eV, 11.98%)等。非金属元素 S 的主要存在形式包括 FeS (163.5 eV, 22.71%)、S₈ (164.2eV, 19.44%)、SO₄²⁻ (165.5 eV, 47.84%)等。

S5 工况与 S1 工况相比,温度高于硫的熔点 (112.8 $^{\circ}$ C),吸附于 IN625 合金试样表面的单质硫发生歧化反应,产生氧化态的 SO₄²⁻和还原态的 S²⁻,导致腐蚀产物中硫化物及硫酸盐的含量显著提高,主要金属的氢氧化物大幅减少。同时,由于单质硫向金属内部渗透,导致钝化膜被破坏,腐蚀膜表面变疏松,氧化铁的含量大幅度减少,最终导致合金表面局部发生腐蚀。

4 结论

- 1) IN625 合金试样在酸性工况下更容易发生腐蚀,且在液相中的腐蚀速率大于气相中的腐蚀速率。常压下, IN625 合金的平均腐蚀速率随温度升高而增大。
- 2)在全覆盖状态下,元素硫对合金的腐蚀多数 表现为均匀腐蚀,腐蚀试样表面状态光滑。在高温悬 浮硫工况下,局部腐蚀加速,腐蚀试样表面出现点蚀。 在悬浮硫工况下的平均腐蚀速率明显低于硫全覆盖 工况下的平均腐蚀速率。
- 3)从腐蚀形貌分析来看,S5(高于硫的熔点(112.8℃)的高温条件下)、S6和S7(悬浮S)腐蚀以局部腐蚀和点蚀为主,虽然从质量损失指标来看其远远低于酸性工况条件下,但其潜在的腐蚀危害性更大。

综上所述,在含元素硫的酸性气田环境下,IN625 合金虽然表现出较好的耐蚀性能,但一定工况下仍然 存在腐蚀风险。为确保油气田管线或设备的安全运 行,需要根据具体的工况条件,合理选择材料,并采 取有效的防护措施。

参考文献:

- [1] 刘化雨. 川渝加快建设天然气千亿产能基地打造中国 "气大庆"[EB/OL]. (2021-06-23). https://www.sc.gov.cn/ 10462/c102641/2021/6/23/6a4bce23daa2444e88151acf2d 98e6aa.shtml.
 - LIU H Y. Chuan-Yu Accelerates the Construction of a Natural Gas Production Base with a Capacity of Ten Billion Cubic Meters to Create China's "Gas Daqing" [EB/OL].(2021-06-23).https://www.sc.gov.cn/10462/c102641/2021/6/23/6a4bce23daa2444e88151acf2d98e6aa.shtml
- [2] 李鑫. 高含硫酸性气田集输管道地质灾害防治管理关键技术研究[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(4): 68-73. LI X. Research on Key Technologies for Geological Hazards Prevention and Management of High-Sulfur Gas Field Gathering Pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface

- Engineering, 2024, 43(4): 68-73.
- [3] 李想, 冯电稳, 杨中娜, 等. 海上某生产井油管腐蚀穿孔失效分析[J]. 化工装备技术, 2023, 44(5): 35-39. LI X, FENG D W, YANG Z N, et al. Failure Analysis of Corrosion and Perforation of Oil Pipes in a Production Well Offshore[J]. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(5): 35-39.
- [4] LV Y B, OU J Q, FU H R, et al. Unblocking Process of Complex Sulfur–Iron Scale Blockage in Sulfur-Bearing Gas Wells and Its Mechanism[J]. ACS Omega, 2023, 8(43): 40242-40250.
- [5] 黄攀, 洪永飞, 朱承飞,等. 高温硫环境中不锈钢材料的腐蚀与防护研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(2): 6-9. HUANG P, HONG Y F, ZHU C F, et al. Studies on Corrosion and Protection of Stainless Steel Materials in High-Temperature Sulfur Environment[J]. Plating & Finishing, 2016, 38(2): 6-9.
- [6] 张志宏, 高秋英, 杨祖国, 等.塔河轻烃站单质硫的腐蚀 机理及其来源[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(5): 100-106.
 - ZHANG Z H, GAO Q Y, YANG Z G, et al. Corrosion Mechanism of Elemental Sulfur and Its Source in a Light Hydrocarbon Station in Tahe[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(5): 100-106.
- [7] 姚彬, 周勇, 刘战祥. 单质硫对 X52 钢在 $H_2S/CO_2/S$ 环境中的腐蚀行为的影响[J]. 材料科学, 2019(7): 665-670.
 - YAO B, ZHOU Y, LIU Z X. Influence of Elemental Sulfur on Corrosion Behavior of X52 Steel in H₂S/CO₂/S Environment[J]. Material Sciences, 2019(7): 665-670.
- [8] 徐敏. 高含硫气井井筒溶硫剂研究及评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
 - XU M. Research and Evaluation of Sulfur Soluble Agent in High Sulfur Gas Well[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [9] 李金灵, 朱世东, 屈撑囤, 等. 超级 13Cr 马氏体不锈 钢在单质硫环境中的腐蚀行为[J]. 材料工程, 2016, 44(3): 84-91.
 - LI J L, ZHU S D, QU C, et al. Corrosion Behavior of Super 13Cr Martensitic Stainless Steel in Elemental Sulfur Environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(3): 84-91.
- [10] 王春光, 王东哲, 刘海定, 等. 铁镍基合金 925 在含硫、H₂S 和 CO₂ 盐溶液中的腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 85-88.
 - WANG C G, WANG D Z, LIU H D, et al. Corrosion Behavior of Iron-Nickel-Base Alloy 925 in Salt Solution Containing S, H₂S and CO₂[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(2): 85-88.
- [11] 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 X W, GE L, YU H B, et al. Localized Corrosion Characteristics of Nickel Based Alloy 825 in Sulfur

- Deposition Environments[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 28(2): 226-231.
- [12] 孙敏, 代朋超. 油气田用 Inconel 718 合金腐蚀性能研究综述[J]. 宝钢技术, 2017(2): 10-14.

 SUN M, DAI P C. Review on Corrosion Resistance Properties of Inconel 718 Alloy in Oil and Gas Industry[J]. Baosteel Technology, 2017(2): 10-14.
- [13] 蔡浩鹏. Inconel 625 合金在高温和热腐蚀环境下的性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
 CAI H P. Study on Properties of Inconel 625 Alloy under High Temperature and Hot Corrosion Environment[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [14] 薛洪迪. Inconel 625 合金在不同介质环境中的高温腐蚀机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.

 XUE H D. Study on High Temperature Corrosion Mechanism of Inconel 625 Alloy in Different Medium Environment[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [15] 陈思雨, 张弦, 李腾, 等. 多元氯化物熔盐中表面改性 Inconel 625 的腐蚀行为[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 87-99.

 CHEN S Y, ZHANG X, LI T, et al. Corrosion Behavior of Surface Modified Alloy Inconel 625 in Chloride Molten Salts[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 87-99.
- [16] 秦明军, 孙文磊, 管文虎, 等. 304 不锈钢表面激光熔覆 Inconel625 涂层组织与性能分析[J]. 表面技术, 2024, 53(15): 141-151.

 QIN M J, SUN W L, GUAN W H, et al. Analysis on Organization and Properties of Laser Clad Inconel625 Coating on 304 Stainless Steel Surface[J]. Surface Technology, 2024, 53(15): 141-151.
- [17] 李伟光, 肖盼, 刘溢, 等. Q235 钢在某地区土壤环境中的长期腐蚀行为[J]. 表面技术, 2024, 53(18): 67-77. LI W G, XIAO P, LIU Y, et al. Long-Term Corrosion Behavior of Q235 Steel in Some Soil Environment[J]. Surface Technology, 2024, 53(18): 67-77.
- [18] 李国平, 刘君林, 张福林, 等. 油气田酸化压裂环境下碳钢油套管材的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2024, 57(8): 65-71.LI G P, LIU J L, ZHANG F L, et al. Study on Corrosion
- Behavior of Carbon Steel Oil Casing Materials in Acidizing and Fracturing Environment of Oilfield[J]. Materials Protection, 2024, 57(8): 65-71.

 [19] 刘毅超, 钟显康, 扈俊颖. 湿气环境中抗硫钢的元素
- 硫腐蚀特征及腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 369-377. LIU Y C, ZHONG X K, HU J Y. Characteristics and Mechanisms of Elemental Sulfur Induced Corrosion of

- Sulfur-Resistant Steels in Wet Flow CO₂ Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 369-377.
- [20] 张明, 龚宁, 马英文, 等. 渤中 19-6 气田封隔器金属 材料的腐蚀适应性评价[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(2): 45-52.
 - ZHANG M, GONG N, MA Y W, et al. Corrosion Adaptability Evaluation of Metal Materials for Packers in Bozhong 19-6 Gas Field[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(2): 45-52.
- [21] 黄希. 含硫天然气集输过程颗粒沉积机理与控制[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(2): 50-53. HUANG X. The Mechanism and Control of Particle Deposition in the Gathering and Transportation Process of Sulfur-Containing Natural Gas[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2024, 50(2): 50-53.
- [22] 李科, 李天雷, 施岱艳, 等. 元素硫对 825 合金在高温高压含 CO₂/H₂S 环境中腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 10-17.

 LI K, LI T L, SHI D Y, et al. Effect of Elemental Sulfur on the Corrosion of 825 Alloy in High Temperature and High Pressure Environment Containing CO₂/H₂S[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 10-17.
- [23] 邓双九,李昌,余梦辉,等. IN625 激光熔覆层腐蚀致微裂纹扩展机理研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(3): 645-657.

 DENG S J, LI C, YU M H, et al. Prpogation Mechanism of Microcracks Caused by Corrosion of Laser Cladded In625 Coating on Nodular Cast Iron in 3.5%NaCl Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(3): 645-657.
- [24] PENG C, ZHONG F P, YUAN M, et al. Corrosion Behavior of HVOF Inconel 625 Coating in the Simulated Marine Environment[J]. China Welding, 2024, 33(1): 46-51.
- [25] 赵斌, 王琪霖, 任延杰, 等. 激光选区熔化 Inconel 625 合金的高温热腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(6): 2030-2042.

 ZHAO B, WANG Q L, REN Y J, et al. Hot Corrosion Behavior of Inconel 625 Alloys Fabricated by Selective Laser Melting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(6): 2030-2042.
- [26] 刘志德, 路民旭, 肖学兰, 等. 高含硫气田元素硫腐蚀机理及其评价方法[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(5): 495-498.

 LIU Z D, LU M X, XIAO X L, et al. Elemental Sulfur Corrosion Mechanism and Evaluation Methods for High Sour Gas Fields[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas,

2012, 41(5): 495-498.