

玉门油田某区块地面集输流程腐蚀因素与机理研究

孙铭辰¹, 李艳琦¹, 张恒^{2*}, 潘彬¹, 薛新茹¹, 熊金山¹, 信延彬^{3*}

(1. 中国石油玉门油田分公司采油工艺研究院, 甘肃 酒泉 735019;

2. 大连理工大学精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:玉门油田某区块地面集输管道腐蚀失效问题突出, 威胁安全生产并造成环境风险。以该区块联合站三相分离器水样为介质, 采用电化学测试、扫描电镜、X射线衍射等表征手段, 针对温度、H₂S含量、含水量、含蜡量及胶质含量开展腐蚀定量分析。结果表明, 20#钢腐蚀主控因素为含水量, 影响权重依次为H₂S含量、含蜡量、胶质含量、温度。管道存在CO₂、H₂S复合腐蚀, 腐蚀产物结构疏松。区块集输系统腐蚀类型涵盖CO₂腐蚀、H₂S/CO₂共存腐蚀及垢下腐蚀, 同时存在硫酸盐还原菌、铁细菌引发的微生物腐蚀。

关键词:地面集输工艺; 腐蚀失效; 正交实验; 腐蚀因素; 腐蚀机理

中图分类号: TQ151.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0259-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.042

Corrosion factors and mechanisms in the surface gathering and transportation system of Yumen oilfield

SUN Ming-chen¹, LI Yan-qi¹, ZHANG Heng^{2*}, PAN Bin¹, XUE Xin-ru¹,

XIONG Jin-shan¹, XIN Yan-bin^{3*}

(1. Institute of Oil Production Technology Research, CNPC Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735019, China;

2. State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Severe corrosion failure issues occur in the surface gathering and transportation pipelines of a block in Yumen Oilfield, posing threats to safe production and triggering environmental risks. Using water samples taken from the three-phase separator at the combined station of this block as the test medium, quantitative corrosion analyses were conducted with respect to temperature, H₂S content, water cut, wax content and resin content via electrochemical measurements, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and other characterization methods. The results reveal that water cut serves as the dominant controlling factor for the corrosion of 20# carbon steel, followed by H₂S content, wax content, resin content and temperature in descending order of influence weight. The pipelines suffer from combined CO₂-H₂S corrosion with loose-structured corrosion products. The corrosion modes prevailing in the block's gathering and transportation system include CO₂ corrosion, synergistic H₂S/CO₂ corrosion and under-deposit corrosion, accompanied by microbiologically influenced corrosion induced by sulfate-reducing bacteria and iron bacteria.

Key words: surface gathering and transportation system; corrosion failure; orthogonal experiments; corrosion factors; corrosion mechanisms

玉门油田建设和生产中, 无论是老的采油区块还是新开发的区块, 都存在着比较严重的地面工艺管道腐蚀失效的问题。近年来管道和设备的腐蚀失效情况频繁发生, 失效率远超完整性管理标准, 维修费用居高不下, 不仅造成了比较严重的环境污染, 还给安全生产带来严重的影响^[1-3]。因此, 为减少

腐蚀失效造成的经济损失和保障地面工艺流程安全运行, 对地面集输工艺流程开展防腐蚀研究非常有必要。

油田开发过程中, 伴随着原油开采出来的流体中除了石油, 还有含大量侵蚀性离子Cl⁻和结垢离子Ca²⁺的高矿化度的地层水, 以及含有腐蚀性气体

收稿日期: 2026-04-20; 修回日期: 2026-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(12575265); 中国石油天然气股份公司科研项目(YM2024-009)

作者简介: 孙铭辰(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为采油工艺, ymsunmc@petrochina.com.cn; 张恒(2000-), 男, 硕士, 研究方向为油田化学, 通讯联系人, hengzhang0217@163.com; 信延彬(1991-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为油田化学, 通讯联系人, xinyb33@dlmu.edu.cn。

H_2S 、 CO_2 的伴生气,甚至还可能含有微生物等^[4-6]。地面工艺流程是密闭压力系统,主要用金属材质,腐蚀贯穿金属设施^[7]。原油含水量增加,腐蚀问题加剧^[8-9]。油田采出水高矿化度,增强水导电性,使金属表面阴阳离子远距离作用,阻碍致密附着物形成,保护膜质量变差,腐蚀速率增加^[10-11];另一方面,溶液在系统的管壁上容易形成不均匀的腐蚀产物层,形成了氧浓差电池,加快了局部腐蚀^[12-13]。氯离子在金属表面会优先被吸附,尤其是在金属表面保护膜存在缺陷或结垢的部位,破坏金属表面上的氧化膜^[14-15]。同时,氯离子具有较小的体积和较强的穿透性,会破坏金属表面已经形成的腐蚀产物膜,促进膜下坑蚀的继续进行,形成腐蚀穿孔^[10]。

研究表明,在 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 环境中, Cl^- 与 CO_2 或 H_2S 协同作用会破坏金属表面腐蚀产物膜,促进膜下坑蚀,形成腐蚀穿孔^[16-18]。 H_2S 与 CO_2 共存时,腐蚀存在竞争与协同效应, H_2S 腐蚀控制能力较强^[19-20]。溶解氧在水中具双重作用,含量高时可形成氧化膜减弱腐蚀,含量低时难形成保护膜,会促进腐蚀^[21-23]。

玉门某油田地面集输工艺的工况极为复杂,存在诸多影响实际腐蚀结垢的因素。通常来讲,矿化度、温度、 CO_2 含量、 H_2S 含量、pH 以及硫酸盐还原菌含量等较为关键^[24]。本次研究通过正交实验研究实际环境里各个因素对腐蚀结垢进程的影响程度,并确定其中的主控因素。

1 实验仪器及试剂

CS310 电化学工作站,武汉科斯特实验仪器厂生产;S-3700N 扫描电镜,苏州佐藤精密仪器有限公司生产;DX-2700X 射线衍射系统(XRD),丹东浩元仪器有限公司生产;能谱仪(EDS),北京意力博通技术发展有限公司生产。

丙酮、无水乙醇、环氧树脂、15% CO_2 +3% O_2 + N_2 (余量)的混合气体、采出水(三相分离器水样)。

2 实验方法

2.1 电化学实验法

采用武汉科斯特 CS310 电化学工作站三电极腐蚀电池,工作电极为 20[#] 腐蚀试片制成,镶嵌后工作表面积 1 cm²,参比电极为 Ag/AgCl,对比电极为铂丝电极。工作电极经多级砂纸打磨,丙酮、无水乙醇和去离子水清洗后备用。实验用溶液为现场分离器水样,用 15% CO_2 +3% O_2 + N_2 混合气体。

实验时,先向水样通入 1 h 实验气体除氧,再接入工作电极,导入饱和实验混合气体的水溶液,全程通气。按正交实验表条件进行实验。安装好后,先测自然腐蚀电位,稳定后以 0.5 mV/s 扫速在 -250~+250 mV 范围内极化扫描。

2.2 扫描电子显微镜法

将腐蚀产物样品放入容器,用去离子水或有机溶剂(如乙醇、丙酮)冲洗,去除杂质。清洗后样品室温自然干燥或 50℃ 烘干。打开扫描电子显微镜电源预热,将样品放入样品台,调整位置和角度,使样品表面与电子束垂直,进行观察。

2.3 X 射线衍射法

将粉末样品放入样品架凹槽,用刮刀压实,使表面平整。打开 XRD 仪器电源预热,按操作手册要求使其稳定。将样品放入样品台,调整位置,确保样品中心与 X 射线入射方向重合且表面与 X 射线束垂直。点击操作软件“开始扫描”按钮,仪器按设定参数扫描记录衍射信号,测试时保持环境稳定,避免震动和干扰。

3 结果与分析

通过分析现场生产数据,梳理地面工艺流程输送介质的腐蚀影响因素后,采用正交实验设计法,按因素分布范围分级,结合电化学腐蚀极化曲线测试探究各因素重要性。为贴合实际,实验以玉门某油田三相分离器水样为溶液。

分析表明,该集输流程处于严重 CO_2 腐蚀环境, O_2 影响明确且 pH 恒定。因此,在现场水样、 CO_2 、 O_2 含量及 pH 固定的条件下,对温度、 H_2S 含量、含水量、含蜡量、胶质含量 5 个影响腐蚀产物膜性质的关键因素,开展正交实验与极化曲线测试,经极差分析明确各因素相对重要性,最终确定主要腐蚀影响因素。

3.1 正交实验

根据工艺流程运行情况数据分析数据,将选择的 5 个影响因素设置 4 个变化水平,采用 5 因素 4 水平正交实验设计。设置实验水样的 CO_2 为 15%, O_2 为 3%,pH 为 6,均为定值。运行温度变化范围在 30~60℃、原油胶质含量的变化范围在 5%~15%,原油含蜡变化范围设为 0~15%, H_2S 含量变化范围为 50~200 mg/L,原油水含量的变化范围为 20%~80%。将原油含蜡量(A)、胶质(B)、温度(C)、 H_2S 含量(D)和含水量(E)分别划分 4 个水平,如表 1 所示。

表 1 正交实验设计因素水平表

因素 水平	含蜡量/ %	胶质/ %	温度/ ℃	H ₂ S 含量/ (mol·L ⁻¹)	含水量/ %
1	0	5.00	30	0.015	20
2	5	8.33	40	0.030	40
3	10	11.66	50	0.045	60
4	15	15.00	60	0.060	80

根据正交实验表,开展 16 组实验,正交实验结果见表 2。

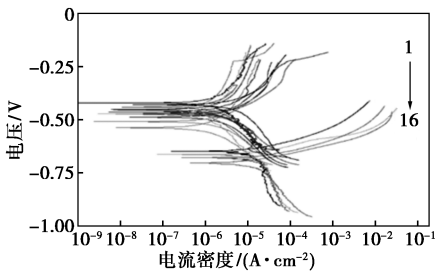
表 2 正交实验结果分析结果

因素	A 含蜡量/ %	B 胶质/ %	C 温度/ ℃	D H ₂ S 含量/ (mol·L ⁻¹)	E 含水量/ %	腐蚀速率/ (mm·a ⁻¹)
实验 1	0	5.00	30	0.015	20	0.033
实验 2	0	8.33	40	0.030	40	0.028
实验 3	0	11.66	50	0.045	60	0.016
实验 4	0	15.00	60	0.060	80	0.119
实验 5	5	5.00	40	0.045	80	0.092
实验 6	5	8.33	30	0.060	60	0.013
实验 7	5	11.66	60	0.015	40	0.029
实验 8	5	15.00	50	0.030	20	0.009
实验 9	10	5.00	50	0.060	40	0.006
实验 10	10	8.33	60	0.045	20	0.012
实验 11	10	11.66	30	0.030	80	0.081
实验 12	10	15.00	40	0.015	60	0.011
实验 13	15	5.00	60	0.030	60	0.016
实验 14	15	8.33	50	0.015	80	0.154
实验 15	15	11.66	40	0.060	20	0.007
实验 16	15	15.00	30	0.045	40	0.008
K1	0.049	0.037	0.034	0.057	0.015	
K2	0.036	0.052	0.035	0.034	0.018	
K3	0.028	0.033	0.046	0.032	0.014	
K4	0.046	0.037	0.044	0.036	0.111	
极差	0.021	0.019	0.012	0.025	0.097	
主次顺序	E>D>A>B>C					

3.2 电化学分析

图 1 是 20#钢在正交实验设计的 16 组玉门油田某区块三相分离器水样中的极化曲线。

曲线 4、5、11、14 与其他 12 条极化曲线差异显著。这 4 条曲线自然腐蚀电位比-0.65 V 更负,腐蚀趋势强,腐蚀电流密度大,腐蚀性强,且阴极极化



1—第 1 组;2—第 2 组;3—第 3 组;4—第 4 组;5—第 5 组;
6—第 6 组;7—第 7 组;8—第 8 组;9—第 9 组;10—第 10 组;
11—第 11 组;12—第 12 组;13—第 13 组;14—第 14 组;
15—第 15 组;16—第 16 组

图 1 20#钢在 16 组玉门油田某区块
三相分离器水样中的极化曲线

率远大于阳极极化率,属阴极极化控制。其他 12 组曲线电极电位较正,腐蚀趋势小,阳极极化率远大于阴极极化率,属阳极极化控制。

3.3 试验后工作电极的腐蚀形貌

图 2 为正交实验设计中 16 组实验结束后,将腐蚀产物用石油醚、去离子水冲洗、冷风吹干后在金相显微镜下放大 20 倍的腐蚀形貌。

从图 2 分析,第 4、5、11 和 14 组腐蚀后的工作电极表面腐蚀比较严重,4 和 5 组主要为不均匀的全面腐蚀,11 和 14 组为局部腐蚀,而且腐蚀产物很难冲洗掉。

3.4 正交实验结果分析

由正交实验分析发现,现有工艺流程压力、水质不变的条件下,油水混输工艺流程在 5 种腐蚀影响因素的综合作用下,含水量的变化对 20#腐蚀的影响最大,其次是 H₂S 含量的变化,再次是蜡含量,胶质含量和温度的影响次之。当油水混输时含水量达到 80%时,各种条件下金属的腐蚀速率都比较大,如实验设计中的 4、5、11 和 14 组。尤其是 14 组,含蜡量(15%)、胶质(8.33%)、温度(50℃)、H₂S(0.015 mol/L)和含水量(80%)构成的最强腐蚀性环境,腐蚀速率达到最大值 0.154 mm/a,说明在高含 CO₂,含有少量 O₂ 的条件下,少量的 H₂S 可能促进局部腐蚀,而蜡和胶质的局部附着也是导致腐蚀产物形貌出现局泊的原因。

3.5 腐蚀产物分析

通过 S-3700N 扫描电镜(SEM)观察现场严重腐蚀区块的腐蚀产物微观形貌,再用 DX-2700X 射线衍射系统(XRD)扫描,推断腐蚀产物组成,推测腐蚀机理。

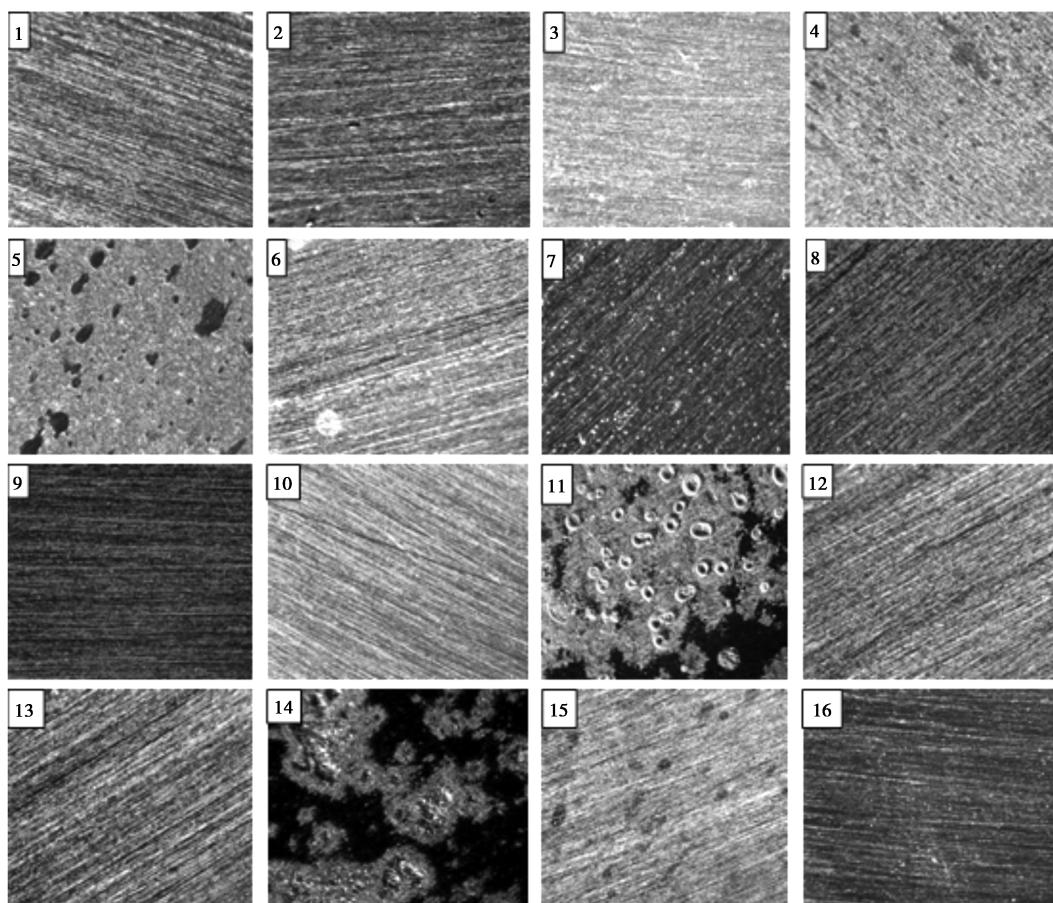
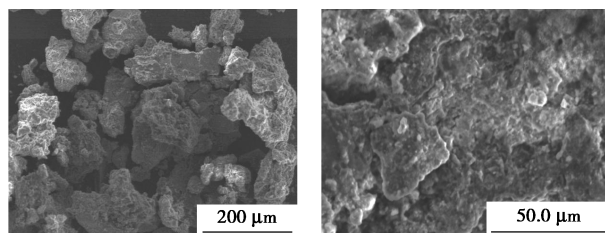


图 2 16 组正交实验工作电极腐蚀产物清洗后的腐蚀形貌

在扫描电镜下区块 1 腐蚀产物样放大 200 倍和 1 000 倍的微观形貌如图 3 所示。



(a) 放大 200 倍

(b) 放大 1 000 倍

图 3 区块 1 腐蚀产物样品在扫描电镜下放大图像

从图 3 腐蚀产物样的 SEM 微观形貌图可见,腐蚀产物样结构松散,聚结成块;呈片状结构,有细小孔洞和缝隙,不致密,无法形成良好防护层,腐蚀性介质能穿过腐蚀产物层接触基体金属表面,引发腐蚀产物下腐蚀。

图 4 是对腐蚀产物样 X 射线衍射图谱图,可以看出腐蚀产物样由 CaCO_3 和 Fe_3S_4 组成,表明有 CO_2 和 H_2S 腐蚀。 CaCO_3 由碳酸根与钙离子结合生成, Fe_3S_4 为金属管道内壁腐蚀产物。二者组成疏松不致密,腐蚀性介质可穿透腐蚀产物层接触金属表

面,引发腐蚀产物下腐蚀。

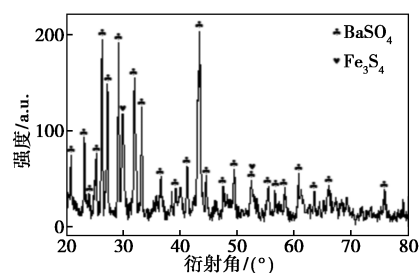
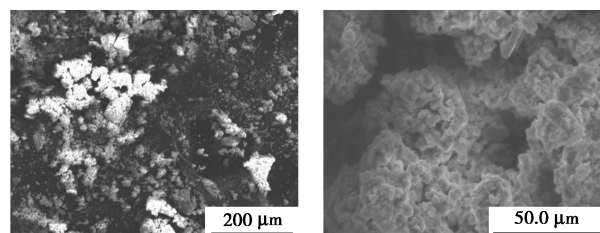


图 4 区块 1 腐蚀产物样的 XRD 图

在扫描电镜下区块 2 腐蚀产物样放大 200 倍和 1 000 倍的微观形貌如图 5 所示。



(a) 放大 200 倍

(b) 放大 1 000 倍

图 5 区块 2 的腐蚀产物样的微观形貌

图 5 腐蚀产物样 SEM 图显示,腐蚀产物结构松

散,颗粒聚结松散、团块孔隙大且不连续。故其无法在区块 2 集输管线和井筒形成有效保护层,不能减缓金属腐蚀。

图 6 区块 2 混合腐蚀产物 XRD 图显示,产物含 Fe_2O_3 、 FeCO_3 、 FeSO_4 及少量 FeS ,表明采出水有 O_2 、 CO_2 及少量 H_2S ,区块 2 可能发生 O_2 、 H_2S (或 SRB)、 CO_2 腐蚀。

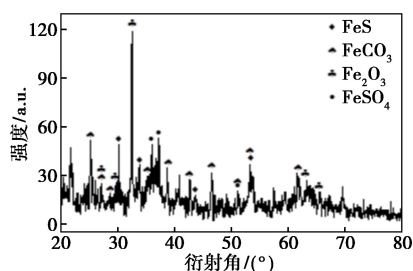


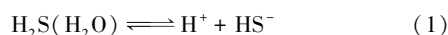
图 6 区块 2 腐蚀产物样的 XRD 图

3.6 工艺流程金属材质的腐蚀机理

分析玉门某油田工艺流程及参数,初步判断腐蚀为 CO_2 腐蚀、 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 共存腐蚀,且 O_2 有催化作用。结合 SEM、XRD 分析,进一步明确上述腐蚀,还存在腐蚀产物下腐蚀。

3.6.1 H_2S 腐蚀机理

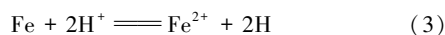
H_2S 的一级电离反应:



H_2S 的二级电离反应:



金属 Fe 与酸的反应:



腐蚀产物生成反应:



H_2S 腐蚀产物主要为 FeS ,组成结构受其浓度和 pH 影响,硫化铁膜含 Fe_9S_8 、 Fe_3S_4 等。 Fe_9S_8 疏松无保护作用, FeS 、 FeS_2 致密可降腐蚀速率。 H_2S 分压超 1×10^{-4} MPa 时,会引发氢脆和应力腐蚀。

3.6.2 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 共存条件下的腐蚀机理

H_2S 和 CO_2 共存时, H_2S 腐蚀控制能力强。少量 H_2S 可使 CO_2 腐蚀速率降低,因 H_2S 腐蚀产生的硫化物膜对钢铁基体有保护作用。但在高浓度 H_2S 下,腐蚀速率比 CO_2 腐蚀预测模型快。在 CO_2 和 H_2S 共存体系中, H_2S 作用表现为 3 种形式: H_2S 含量小于 70 Pa 时, CO_2 是主要腐蚀介质; H_2S 含量增加至 $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}} > 200$ 时,材料表面形成较致密的 FeCO_3 膜,腐蚀速率降低;在 $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}} < 200$ 时, H_2S 主导腐蚀,腐蚀性取决于 FeS 和 FeCO_3 膜的稳定性。一般认为,60~240℃ 时, FeS 能保护金属,但温

度低于 60℃ 或高于 240℃ 时, FeS 膜不稳定且多孔,加速钢材腐蚀。

4 结论

(1)实验表明,在玉门某油田集输工艺复杂工况下,含水量对 20# 钢腐蚀影响最为显著,其次为 H_2S 含量、含蜡量、胶质含量和温度。当含水量达 80% 时,金属腐蚀速率显著增大。

(2)严重腐蚀区块的腐蚀产物结构松散、存在孔洞缝隙,无法形成有效防护层,导致腐蚀的进一步加剧。

(3)玉门某油田集输流程主要发生 CO_2 腐蚀、 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 共存腐蚀,并伴随腐蚀产物下局部腐蚀。

参考文献

- [1] Alamri A H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines-An overview[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104735.
- [2] Xie M, Tian Z. Risk-based pipeline re-assessment optimization considering corrosion defects[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 38: 746-757.
- [3] 张博,段乃成,赵鹏,等.浅析石油管道工程的防腐技术[J].现代化工,2016,36(3):195.
- [4] 夏诗杨,马文鑫,杜胜男,等.油田采油废水处理技术的研究进展[J].现代化工,2022,42(1):61.
- [5] 张钧,董博星,赵国仙,等.低 Cr 钢在油气田环境中的腐蚀行为研究进展[J].热加工工艺,2025,(4):21-25.
- [6] 刘合,曹刚.新时期采油采气工程科技创新发展的挑战与机遇[J].石油钻采工艺,2022,44(5):529-539.
- [7] 邢世佳.高含硫油气田地面集输管道腐蚀机理与防护体系优化研究[J].化工技术与应用,2025,2(4):54-56.
- [8] Ye Z R, Ding T C, Zhou X, et al. Corrosion behavior of carbon steel in crude oil-water-gas multiphase environments with CO_2 and H_2S [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31: 7673-7685.
- [9] 孙晓光.注水开发集输管道腐蚀因素分析及预测模型建立[J].石油工程建设,2026,52(1):65-69,75.
- [10] 刘伟,黄宪华,赵家宏,等.油井的腐蚀原因与防护措施[J].腐蚀科学与防护技术,2006,(6):448-450.
- [11] Joag S, Kiesewetter J, Chellam S. Ohmic losses dominated electrode fouling during long-term aluminum electrocoagulation of hypersaline and divalent cation-rich oilfield-produced water[J]. ACS ES&T Engineering Journal, 2025, 5(12):3519-3532.
- [12] Lu H, Zhang L. Study on mechanism of differential concentration corrosion[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 19236.
- [13] 黄雪松,安思彤,陈长风.普光气田集输管材腐蚀评价及缓蚀剂加药工艺优化[J].天然气工业,2011,31(9):120-123,145.
- [14] Wang M, Wu S, Wang P, et al. Nano-deterioration of steel passivation film; Chloride attack in material defects [J]. Materials and Structures, 2023, 56: 35.

(下转第 270 页)

- lic Ni-Fe hydroxide decorated in Nickel sulfides array as bifunctional electrocatalyst for efficient water splitting[J]. Applied Materials Today, 2025, 47: 102945.
- [5] Zheng X, Zhang B, Luna P D, *et al.* Theory-driven design of high-valence metal sites for water oxidation confirmed using in situ soft X-ray absorption[J]. Nature Chemistry, 2018, 10: 149–154.
- [6] Zhu Y, Zhao Y, Xi C, *et al.* Cationic defect engineering induces LOM-enhanced electrocatalysts derived from in situ semi-transformed NiFe-LDH/MOF heterostructure for efficient overall water-splitting[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 298: 112356.
- [7] Hu J, Zhang C, Jiang L, *et al.* Nanohybridization of MoS₂ with layered double hydroxides efficiently synergizes the hydrogen evolution in alkaline media[J]. Joule, 2017, 1: 383–393.
- [8] Zhou J, Huang C, Zhou Q, *et al.* Electronic structure regulation of nickel phosphide for efficient overall water splitting[J]. Inorganic Chemistry, 2022, 61: 9318–9327.
- [9] Hui B, Li J, Lu Y, *et al.* Boosting electrocatalytic hydrogen generation by a renewable porous wood membrane decorated with Fe-doped NiP alloys[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 56: 23–33.
- [10] Wang K, Sun K, Yu T, *et al.* Facile synthesis of nanoporous Ni-Fe-P bifunctional catalysts with high performance for overall water splitting[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7: 2513–2518.
- [11] Bernasconi R, Khalil M I, Cakmakci D S, *et al.* Electrocatalytic layers for hydrogen evolution reaction based on nickel phosphides: Cost-effective fabrication and XPS characterization[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57: 9370–9388.
- [12] Yao S, Forstner V, Menezes P W, *et al.* From an Fe₂P₃ complex to FeP nanoparticles as efficient electrocatalysts for water-splitting[J]. Chemical Science, 2018, 9: 8590–8597.
- [13] Zhang T, Wu M, Yan D, *et al.* Engineering oxygen vacancy on NiO nanorod arrays for alkaline hydrogen evolution[J]. Nano Energy, 2018, 43: 103–109.
- [14] Zhang H, Li X, Hähnel A, *et al.* Bifunctional heterostructure assembly of NiFe LDH nanosheets on NiCoP nanowires for highly efficient and stable overall water splitting[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28: 1706847.
- [15] Yu X, Feng Y, Guan B, *et al.* Carbon coated porous nickel phosphides nanoplates for highly efficient oxygen evolution reaction[J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9: 1246–1250.
- [16] Lou Y, Ba Z, Yuan Z, *et al.* Corn-cob-inspired synthesis of carbon fiber/PO₄³⁻ intercalated NiFe-LDH hybrid for simultaneously improving flame retardancy and mechanical properties of epoxy resin composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 522: 168051.
- [17] Feng Y, Xu C, Hu E, *et al.* Construction of hierarchical FeP/Ni₂P hollow nanospindles for efficient oxygen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 14103.
- [18] Hu R, Fan C, Wang K, *et al.* Synergistic effect of Ce doping and heterointerface engineering of NiCoP/Ce-NiCo LDH for durable and corrosion-resistant electrocatalysis in alkaline freshwater and seawater oxidation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 700: 138590.
- [19] Rajasekar S, Chetty R, Neelakantan L. Low-nickel austenitic stainless steel as an alternative to 316L bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 4: 12413–12423.
- [20] Chen J, Zhao G, Matsuda K, *et al.* Microstructure evolution and corrosion resistance of Ni-Cu-P amorphous coating during crystallization process[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 835–844.
- [21] Chen B, Hu P, Yang F, *et al.* In situ porousized MoS₂ nano islands enhance HER/OER bifunctional electrocatalysis[J]. Small, 2023, 19: 2207177.
- [22] Zhang J, Cui R, Li X, *et al.* A nanohybrids coupling of NiPS₃ canoparticles and defective graphene as a pH-universal electrocatalysts for efficient hydrogen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5: 23536–23542.
- [23] Ipadeola A K, Sliem M H, Mwonga P, *et al.* Rational construction of N-containing carbon sheets atomically doped NiP-CoP nanohybrid electrocatalysts for enhanced green hydrogen and oxygen production[J]. Electrochimica Acta, 2024, 508: 145236. ■

(上接第263页)

- [15] 赵明, 李艳荣. 循环水结垢和腐蚀的机理及其控制[J]. 油气储运, 1998, (2): 25–28, 61.
- [16] Choi Y S, Farelis F, Paolinelli L, *et al.* Effect of H₂S on CO₂ corrosion of mild steel in high-temperature supercritical CO₂ conditions[J]. Corrosion, 2023, 79(9): 1052–1063.
- [17] Ding T C, Sun C, Sun J B, *et al.* A mechanistic model for the corrosion prediction of bare carbon steel in supercritical CO₂-H₂S-Cl⁻ environments[J]. Corrosion Science, 2025, 256: 113161.
- [18] 刘政宇, 曹学乾, 王少龙, 等. 油气开采环境下管道的协同腐蚀及防护研究进展[J]. 中国表面工程, 2023, 36(6): 36–48.
- [19] Karimi S, Tajji I, Hajilou T, *et al.* Role of cementite morphology on corrosion layer formation of high-strength carbon steels in sweet and sour environments[J]. Corrosion Science, 2023, 214: 111031.
- [20] 杨涛, 张丽华, 王建国, 等. CO₂ 驱采及输送防腐研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(5): 23–28.
- [21] 陈堃, 李东昊, 刘春辉, 等. 油田注水系统管路腐蚀及主控因素研究[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(1): 63–67, 74.
- [22] 曹攀, 周婷婷, 白秀琴, 等. 深海环境中的材料腐蚀与防护研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1): 12–20.
- [23] 梁金强, 王延臻, 贾远远, 等. 高酸原油的加工及防腐工艺的探讨[J]. 现代化工, 2011, 31: 35.
- [24] Sun H Y, Zhong L G, Zhu Y, *et al.* Assessing sulfate-reducing bacteria influence on oilfield safety: Hydrogen sulfide emission and pipeline corrosion failure[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 164: 108646. ■