二氧化碳腐蚀机理及防腐蚀措施进展

房 昆[1],杨 蒙[1],薄勇浩[2],张 琦[2],张志兵[3,4],陆诗建[3,4*]
(1.中国石油工程建设有限公司北京设计分公司,北京 100085;
2.中国石油国际勘探开发有限公司,北京 100032;
3.中国矿业大学江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室,江苏 徐州 221008;
4.中国矿业大学碳中和研究院,江苏 徐州 221116)

摘要:为解决二氧化碳腐蚀对CCUS技术发展的制约问题,首先探讨碳捕获、利用与封存的各个环节中的腐蚀问题,随后阐述其基本机理,重点分析了含水率、pH、流速等因素对腐蚀行为的影响,并总结目前常用的腐蚀防护方法。最后,展望了材料防腐措施的发展前景,指出未来应重点开发新型高性能环保缓蚀剂。

关键词:二氧化碳;腐蚀;防腐;环保;缓蚀剂
中图分类号:TE983 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)10-0069-05
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.013

Review of carbon dioxide corrosion mechanisms and anti-corrosion measures

FANG Kun[1], *YANG Meng*[1], *BO Yong-hao*[2], *ZHANG Qi*[2], *ZHANG Zhi-bing*[3,4], *LU Shi-jian*[3,4*]
(1.Beijing Design Branch of China Petroleum Engineering & Construction Corporation, Beijing 100085, China;
2.China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100032, China;
3.Jiangsu Key Laboratory of Coal-Based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4.of Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:To address the carbon dioxide corrosion issue, this paper first examines corrosion problems across all stages of carbon capture, utilization, and storage (CCUS), then elucidates its fundamental mechanisms. It focuses on analyzing the impact of factors such as water content, pH, and flow velocity on corrosion behavior, while summarizing currently prevalent corrosion protection methods. Finally, it outlines the development prospects for existing material corrosion prevention measures and proposes that developing novel, high-performance, environmentally friendly corrosion inhibitors represent a crucial future research direction.

Key words:carbon dioxide; corrosion; anti-corrosion; environmental protection; corrosion inhibitor

随着化石燃料的持续使用,CO_2 排放量显著增加。尽管太阳能、风能等可再生能源技术发展迅速,但在未来至少30年内,化石燃料仍将在能源消费中占据主导地位[1],与能源相关的 CO_2 排放量预计将持续增长。这一趋势将加剧温室效应,成为全球变暖的主要诱因,对地球生态健康构成严重威胁。因此,减少 CO_2 排放对于缓解气候变化和保护脆弱生态系统至关重要。

为应对日益严峻的气候变化挑战,全球范围内正积极推动各类节能减排措施,其中碳捕集、利用与封存(CCUS)技术备受关注。作为实现碳中和目标的关键技术之一,CCUS被众多研究者视为降低二氧化碳排放的有效手段,并具备减缓全球变暖的潜力。目前,CCUS技术已在油田现场得到应用,有助于提高原油采收率。将其与化石燃料发电相结合,可助力构建清洁、可靠且可持续的能源供应体系[2]。

在中国,二氧化碳输送管道已在胜利油田、延长油田以及鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等油田投入运行。胜利油田因多种采油技术的应用,导致氧气进入油水体系,引发严重腐蚀,部分管道腐蚀速率高达0.15 mm/a,并曾发生管道穿孔事故。因此,研究钢材在CCUS环境中的腐蚀行为,对降低由 CO_2 引发腐蚀所带来的安全风险至关重要[3]。

收稿日期:2025-12-22;**修回日期**:2026-08-18
基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2023852);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022613);国家重点研发计划项目(2025YFE0117000);新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目“新型低能耗碳捕集溶剂研制与工业化验证”;中央高校基本科研业务费专项(2023KYJD1004)
作者简介:房昆(1986-),男,本科,教授级高工,研究方向为油气田地面工程和二氧化碳捕集,fangkun@cnpc.com.cn;陆诗建(1984-),男,博士,研究员,研究方向为 CO_2 捕集与资源化利用,通讯联系人,lushijian@cumt.edu.cn。

以往的研究多集中于腐蚀机理、耐蚀材料选择、杂质影响以及超临界 CO_2 环境中的腐蚀行为。例如,Mubarak 等[4]关注油气井套管与油管的腐蚀及缓蚀剂技术;Obot 等[5]研究了极端条件下缓蚀剂测试的挑战与进展;Zhang 等[6]探讨了金属材料的超疏水防腐涂层;Li 等[7]系统阐述了合金在超临界 CO_2 环境中的腐蚀行为。

在整个 CCUS 链中,二氧化碳从高碳排放源被捕集、压缩和净化,然后以超临界状态运输到适当的地点进行封存和永久储存,或运送到特定地点用于提高石油开采效率,以及将捕集的二氧化碳转化为有价值的产品。腐蚀问题往往出现在碳捕获、利用与封存的各个环节。因此,腐蚀在整个 CCUS 流程中的安全方面是一个严重的挑战。

现有研究与综述多聚焦于油气工业领域的腐蚀问题、防护措施及相关行为机制,但缺乏系统性整合。本文中首先概述 CCUS 中的 CO_2 腐蚀问题,随后阐述目前广为接受的腐蚀机理及新近提出的机制,并结合近年研究成果总结 CO_2 腐蚀的影响因素。接着,讨论并论证 CCUS 中的腐蚀防护技术,期望能够为后续 CO_2 腐蚀机理与防护研究提供有益视角,从而促进 CCUS 技术的改进与工业应用推广。

1 二氧化碳腐蚀机理研究

深入理解 CO_2 腐蚀机制是制定有效缓蚀策略的基础,CO_2 通过促进阴极析氢反应而加速金属腐蚀。碳酸溶液与金属之间的电化学反应如下。

总反应为:

$$Fe(s) + CO_2(aq) + H_2O(l) \longrightarrow Fe^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq) + H_2(g) \quad (1)$$

阳极反应是:

$$Fe - 2e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq) \quad (2)$$

阴极反应是:

$$2H^+(aq) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) \quad (3)$$

$$2H_2CO_3(aq) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2HCO_3^-(aq) \quad (4)$$

$$2HCO_3^-(aq) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2CO_3^{2-}(aq) \quad (5)$$

$$2H_2O(l) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq) \quad (6)$$

2 二氧化碳腐蚀的影响因素

CO_2 腐蚀本质上是一个复杂的电化学过程,涉及阳极溶解与阴极析氢等反应,并受温度、压力、pH、氯离子浓度、流速、含水率及油相环境等一系列关键参数的综合影响。各影响因素及其作用归纳如表 1 所示。

表 1 CO_2 腐蚀的影响因素及其作用

影响因素	作用
水分含量	当 CO_2 中的水含量增加时,碳钢材料的腐蚀速率趋于加快
pH	pH 越高,氢离子含量越低,碳钢的腐蚀速率也会降低
流速	高流速可以加快腐蚀介质到达金属管道表面的速度,这有可能产生压力,从而破坏最初稳定且致密的腐蚀产物膜,从而提高腐蚀速率
温度	高温环境可以促进电化学反应速率并加速 CO_2 腐蚀
压力	在一定的压力范围内,由 CO_2 形成的碳酸水的腐蚀能力随着压力的增加而逐渐增强
氯离子浓度	氯离子对均匀腐蚀影响最小,主要影响局部腐蚀,如点蚀
油相环境	油可以改变腐蚀产物膜的结构和化学成分,从而起到抑制腐蚀的作用

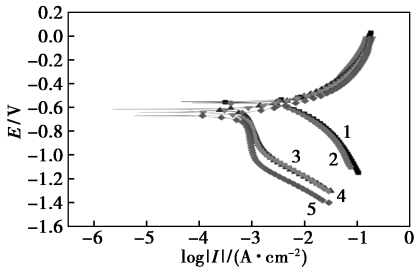
2.1 水分含量

含水量是调控金属腐蚀的核心因素。腐蚀始于水分的出现,并随其含量增加而加剧。该过程本质为电化学反应。高含水率不仅直接引发腐蚀,更会与温度、压力、CO_2 分压及多种离子(如 Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+})产生协同效应,共同促进 20#钢等管道材料表面腐蚀产物的生成与沉积,进而加剧设备腐蚀。

因此,所形成的腐蚀产物膜往往不致密,无法有效阻隔腐蚀。需注意的是,在低温与较低压力下输送 CO_2 时,应严格控制含水量。因此,对含水率进行细致监测与控制,并实施适宜的腐蚀防护措施,对保障设备与管道的长期可靠性至关重要。

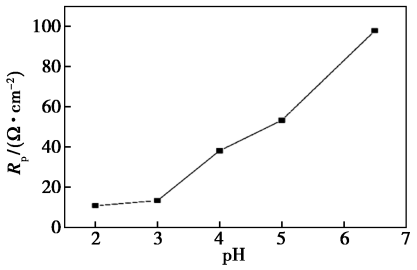
2.2 pH

随着石油与天然气需求的增长,许多高矿化度油气田被勘探与开发。目前研究多集中于高矿化度生产水对 CO_2 环境中钢材腐蚀的影响。Dong 等[8]研究了水盐度对 X60 钢腐蚀行为的影响,结果表明,随矿化度升高,X60 钢腐蚀速率逐渐加快;当盐度达 8.172 g/L 时,均匀腐蚀逐渐转变为点蚀。Georg 等[9]研究了盐度对 X65 钢腐蚀的影响,发现随盐度降低,N80 钢的腐蚀速率亦降低。pH 是调控腐蚀过程的关键参数,既影响腐蚀产物的化学组成,也决定其保护膜的结构与稳定性。Wang 等[10]发现,pH 从 6 降至 2 时,碳钢腐蚀速率增加近 10 倍。Deng 等[11]采用电化学方法研究了 X80 钢在不同 pH 条件下的腐蚀行为,发现随 pH 升高,X80 钢的自腐蚀电位负移,总极化电阻增加,表明其耐腐蚀性增强(图 1)。



1—pH=2;2—pH=3;3—pH=4;4—pH=5;5—pH=6.5

(a)



(b)

图 1　pH 对 X80 钢腐蚀行为的影响

上述研究表明,盐度与 pH 对钢材 CO_2 腐蚀的影响均呈现单一模式。在单相条件下,钢材腐蚀速率随盐度增加而升高,随 pH 增加而降低。

2.3　流量流速

流速是影响 CO_2 腐蚀速率的重要因素,可使主要腐蚀类型由均匀腐蚀转变为局部腐蚀。通常,腐蚀速率随流速增大而升高,主要原因在于高速流动加速离子传输,阻碍腐蚀产物膜形成。流速增大还会导致电双层电容的恒相位元件值增加,电荷转移电阻降低,最终加速钢材腐蚀。然而,亦有研究表明腐蚀速率随流速增大而减小。因为随流速增大,腐蚀电流密度增加,阻抗值减小,腐蚀介质在金属表面的迁移加速,降低钢表面附近溶液中 Fe^{3+}浓度,阻碍 $FeCO_3$ 沉积,进而提高腐蚀膜中 $Cr(OH)_3$ 含量,降低腐蚀速率。

2.4　温度

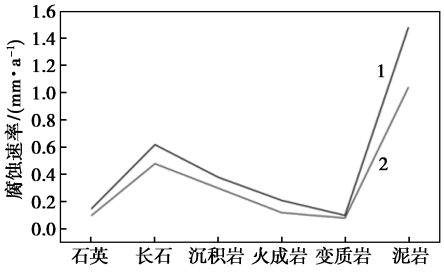
在一定温度范围内,钢材在 CO_2 水溶液中的腐蚀速率随温度升高而加快,主要源于高温对腐蚀产物膜结构及保护性能的削弱。在 CCUS 作业中,井下套管埋深多超过 800 m,环境温度可从地表常温升至约 100℃。因此,研究该温度区间内钢材的 CO_2 腐蚀行为,对保障系统关键部件的长期服役安全具有重要意义。

Dong 等[12]研究了温度对气相与液相环境中 N80 钢腐蚀速率的影响,发现在气、液两相中,N80 钢腐蚀速率均随温度升高呈先增后减趋势,于 90℃达到最大值。Ren 等[13]采用交流阻抗技术研究了温度对模拟地层水中钢材 CO_2 腐蚀的影响,发现 EIS 图谱呈现 3 个时间常数:高频区容抗弧对应电极双层电容与电荷转移过程;中频区容抗弧反映腐蚀产物膜的活性溶解;低频区容抗弧则与保护性腐蚀产物膜形成相关。随温度升高,中频容抗弧逐渐收缩直至消失,而低频容抗弧持续扩大,表明升温促进了更稳定、更具保护性的腐蚀产物膜生成。

2.5　压力

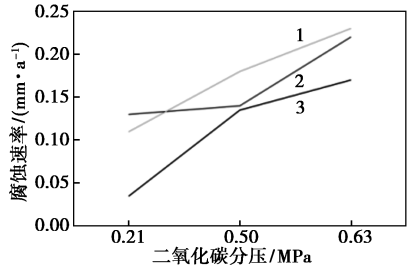
压力是影响 CO_2 腐蚀的关键因素之一,与温度、CO_2 浓度及金属类型等其他参数相互作用。通常,高压条件下 CO_2 更易溶解于液相,从而提高腐蚀介质中 CO_2 浓度,加速腐蚀反应。如图 2(a)~(d)所示,多项研究得出类似结论[14-15]。在恒定温度下,压力影响更为显著。此外,局部压差可引起气液界面移动,导致局部腐蚀或点蚀。

图 2(e)显示,H_2O 在超临界 CO_2 中的溶解度呈现 2 种明显趋势,以相变点为界。在气态 CO_2 中,H_2O 溶解度随压力增加呈对数下降;一旦压力超过临界值,CO_2 进入液态/超临界状态,H_2O 溶解度随压力迅速升高,并稳定在较高水平。Ren 等[13]认为压力变化显著影响钢表面腐蚀产物膜的形成,进而影响腐蚀过程。实验中观察到,在高压、无自由水的水蒸气-气态 CO_2 环境中,温度与压力的轻微波动会导致部分水蒸气凝结为液态水,附着于钢表面并吸附 CO_2 至饱和,由此产生的溶液腐蚀钢表面。Wei 等[16]研究了 X70 钢在 9.5、1.0 MPa 压力下腐蚀产物的形成机制,发现与 1.0 MPa 下形成的



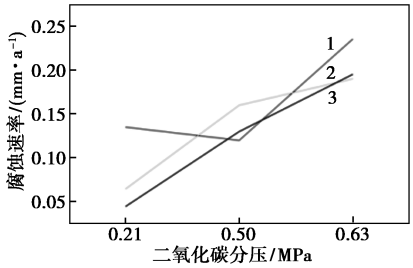
1—6 MPa;2—12 MPa

(a)腐蚀速率比较



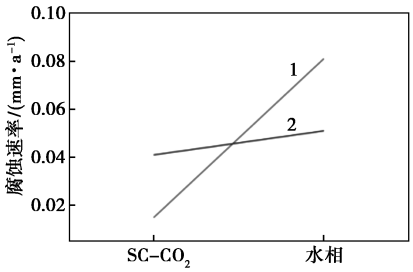
1—20℃,0.5 kPa H_2S;2—20℃,1.5 kPa H_2S;3—20℃,5 kPa H_2S

(b)J55 钢管的腐蚀速率



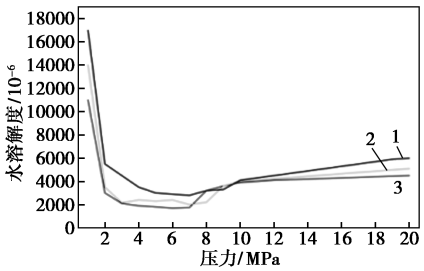
1—20℃,0.5 kPa H_2S;2—20℃,1.5 kPa H_2S;3—20℃,5 kPa H_2S

(c) L80 钢管的腐蚀速率



1—1.33 kPa;2—7.24 kPa

(d) 耐硫钢的一般和局部腐蚀速率



1—45℃;2—40℃;3—35℃

(e) H_2O 在 CO_2 中的溶解度(摩尔 ppm)

图 2 压力对 CO_2 腐蚀的影响

$FeCO_3$ 相比,9.5 MPa 下形成的 $FeCO_3$ 更完整、致密,表现出更优的保护性能。

3 二氧化碳腐蚀的预防和控制方法

腐蚀问题出现在碳捕获、利用与封存的各个环节。目前,常用的腐蚀防护方法包括使用缓蚀剂、涂层与合金材料。其中,缓蚀剂因高效性与成本效益成为当前研究重点。

3.1 缓蚀剂

缓蚀剂是最常用的腐蚀抑制方法,其机理可分为电化学机理与物理化学机理。例如,Zheng 等[17]高效合成了 2 种咪唑啉衍生物——油基咪唑啉(OI)与巯基油基咪唑啉(MOI),证实在 20×10^{-6} 浓度下 MOI 的缓蚀效率高达 95.58%。2 种抑制剂均通过化学吸附附着于金属表面,而 MOI 因巯基作为强吸附位点,吸附能力更优,缓蚀效率高于 OI。类似地,Li 等[18]通过合成 Mannich 碱获得含噻唑环的双曼尼希碱 TZBM,该化合物能有效抑制含 Cl^-、H_2S 与 CO_2 环境的腐蚀。

Wei 等[16]采用咪唑基离子液体 1-十二烷基-3-甲基咪唑硫酸氢盐(DMIMHS)作为缓蚀剂并测试其性能,发现 DMIMHS 的加入显著提升预腐蚀碳钢的缓蚀性能。

研究表明,将不同类型缓蚀剂复配使用,即构建复合缓蚀剂,可增强抑制效果。此外,电化学方法有助于深入理解 CO_2 腐蚀机制,从而促进开发更高效的缓蚀剂。Zhang 等[19]研究了 S-苄基-L-半胱氨酸(SBLC)与硫脲(TU)的协同抑制效应。在相同浓度下,复合缓蚀剂的抑制效果明显优于单一 SBLC 或 TU,归因于 SBLC 与 TU 之间的分子间作用在碳钢表面形成更致密吸附膜,表现出显著协同抑制效果。

近年来,出于环境考虑,绿色 CO_2 缓蚀剂成为研究热点。如 Berdimurodov 等[20]提出,碳点(CDs)因具备良好水溶性、生物相容性、高热稳定性及不可燃性,是一种生态友好且高效的防腐材料,因在低浓度下即显效且易于合成,预计在不久的将来,CDs 将在缓蚀剂领域发挥重要作用。

3.2 涂层保护

涂层技术具有优异的耐腐蚀性、长期保护能力及适应性等优点,在保护结构与设备免受腐蚀方面发挥关键作用。例如,Peng 等[21]采用水性改性环氧树脂提升油井水泥的耐腐蚀性能。与未改性环氧树脂的水泥石相比,改性环氧树脂通过填充孔隙提高水泥浆体密实度,并形成三维网状聚合物膜隔离酸性介质,从而增强耐腐蚀性。

Chang 等[22]开发了用于钢基体的聚苯胺/石墨烯复合涂层,研究表明,与纯聚苯胺及聚苯胺/黏土复合涂层相比,聚苯胺/石墨烯复合涂层对 O_2 与 H_2O 表现出更优的阻隔性能。Barros 等[23]开发了热喷涂 Al-Zn-Si 合金涂层,该涂层提供阴极保护并延缓涂层金属粉末消耗,从而降低牺牲阳极的腐蚀速率。Zohdi 等[24]利用电化学技术研究了铁基非晶涂层的耐腐蚀性能,并与多种金属对比,发现铁基非晶涂层因本征阴极保护作用,耐腐蚀性优于 316L 等耐蚀金属。

3.3 合金保护

合金保护是通过成分设计、晶格调控并结合金属生产工艺实现的防护手段。选择合适的耐腐蚀材料可有效降低 CO_2 腐蚀风险,提高设备稳定性。Kai 等[25]研究了表面处理对 Fe-21Cr-32Ni 合金在超临界 CO_2 中氧化行为的影响,发现高 Cr 扩散有利于形成薄而保护性富 Cr 氧化层,实现由内部氧化向外部

氧化的转变,并降低碳对氧化物的渗透性,从而提升合金的抗氧化与抗渗碳能力。

与传统碳钢相比,钢中添加 Cr 可显著提高耐腐蚀性且具成本效益。Xu 等[26] 研究了 1% Cr、3% Cr、4% Cr、5% Cr、6.5% Cr、10% Cr 与 13% Cr 钢在模拟油田环境中的腐蚀行为,发现随 Cr 含量增加,钢样腐蚀速率逐渐降低。大多数耐蚀合金均含 Cr,不同合金中 Cr 含量及其与其他元素的比例各异,如钛合金、316 不锈钢、镍基合金等。当暴露于 CO_2 腐蚀环境时,这些合金表面亦会形成含 Cr 腐蚀产物层,表现出优异抗 CO_2 腐蚀能力。

4　结语与展望

CCUS 是减少碳排放的有效途径,但全流程中的 CO_2 腐蚀问题不容忽视。本文中综述了 CO_2 腐蚀问题,包括机理与影响因素,并总结了防护方法。

目前,耐腐蚀材料领域仍面临成本高、加工难度大等挑战。尽管其可有效缓解腐蚀,但仍需进一步研究与改进以确保经济可行性。涂层保护成本相对较低,但在长期耐久性、适用性与可持续性方面仍有提升空间。开发新型绿色缓蚀剂是另一具有前景的方向。

尽管全球范围内缓蚀剂研究取得显著进展,但整体进展仍相对有限。开发绿色缓蚀剂对未来研究至关重要,当前研究的重点应放在制备环境友好、高效缓蚀剂上面,并且阐明其符合绿色标准的作用机制。

参考文献

[1] Godin J,Liu W,Ren S,*et al*.Advances in recovery and utilization of carbon dioxide:A brief review[J].Journal of Environmental Chemical Engineering,2021,9(4):105644.

[2] Yang Y,Xu W,Wang Y,*et al*.Progress of CCUS technology in the iron and steel industry and the suggestion of the integrated application schemes for China[J].Chemical Engineering Journal,2022,450(P4):138438.

[3] Che X,Yi X,Dai Z,*et al*.Application and development countermeasures of CCUS technology in China's Petroleum Industry[J].Atmosphere,2022,13(11):1757.

[4] Mubarak G,Verma C,Barsoum I,*et al*.Internal corrosion in oil and gas wells during casings and tubing:Challenges and opportunities of corrosion inhibitors[J].Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2023,150:105027.

[5] Obot I B,Sorour A A,Malede Y C,*et al*.A review study on the challenges and progress of corrosion inhibitor testing under extreme conditions in the oil and gas industries[J].Geoenergy Science and Engineering,2023,226:211762.

[6] Zhang D,Xiao L,Xiong G,*et al*.Recent progress of zeolitic imidazolate frameworks(ZIFs) in superhydrophobic and anticorrosive coatings for metals and their alloys[J].Journal of Coatings Technology and Research,2023,20(4):1157-1177.

[7] Li K,Zhu Z,Xiao B,*et al*.State of the art overview material degradation in high-temperature supercritical CO_2 environments[J].Progress in Materials Science,2023,136:101107.

[8] Dong B,Liu W,Wu F,*et al*.Determination of critical salinity of pitting and uniform corrosion of X60 under CO_2-O_2 coexistence environment[J].Anti-Corrosion Methods and Materials,2020,67(2):166-177.

[9] Georg B K R,Feijó L N,Santos B G D,*et al*.Electrochemical,mechanical,and tribological properties of corrosion product scales formed on X65 steel under CO_2 supercritical pressure environments[J].Surface & Coatings Technology,2022,446:128789.

[10] Wang H,Yu J,Lu C.Investigation of the corrosion behavior of mild steel in the NH_4Cl/CO_2 corrosive medium[J].Transactions of the Indian Institute of Metals,2021,74(11):1-8.

[11] Deng S,Ling D,Zhou B,*et al*.pH effect of natural gas hydrate on X80 steel solid—liquid phase scouring corrosion[J].ACS Omega,2021,6(4):3017-3023.

[12] Dong B,Zeng D,Yu Z,*et al*.Major corrosion influence factors analysis in the production well of CO_2 flooding and the optimization of relative anti-corrosion measures[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2021,200:108052.

[13] Ren X,Wang H,Wei Q,*et al*.Electrochemical behaviour of N80 steel in CO_2 environment at high temperature and pressure conditions[J].Corrosion Science,2021,189:109619.

[14] Tian C,Pang Z,Liu D,*et al*.Micro-action mechanism and macro-prediction analysis in the process of CO_2 huff-n-puff in ultra-heavy oil reservoirs[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2022,211:110171.

[15] Ma W.Corrosion behavior of gas storage well pipe strings in corrosive H_2S-CO_2 environment[J].Journal of Failure Analysis and Prevention,2022,22:368-376.

[16] Wei L,Pang X,Liu C,Gao K.Formation mechanism and protective property of corrosion product scale on X70 steel under supercritical CO_2 environment[J].Corrosion Science,2015,100:404-420.

[17] Zheng Z,Hu J,Eliaz N,*et al*.Mercaptopropionic acid-modified oleic imidazoline as a highly efficient corrosion inhibitor for carbon steel in CO_2-saturated formation water[J].Corrosion Science,2021,194:109930.

[18] Li Z K,Cao J,Mao T,*et al*.Synthesis of bimannich base with thiazole and its corrosion inhibition effect on H_2S and CO_2 at high temperature[J].BMC Chemistry,2021,15:59.

[19] Zhang Q H,Li Y Y,Zhu G Y,*et al*.In-depth insight into the synergistic inhibition mechanism of S-benzyl-L-cysteine and thiourea on the corrosion of carbon steel in the CO_2-saturated oilfield produced water[J].Corrosion Science,2021,192:109807.

[20] Berdimurodov E,Verma D K,Kholikov A,*et al*.The recent development of carbon dots as powerful green corrosion inhibitors:A prospective review[J].Journal of Molecular Liquids,2021,349:118124.

[21] Peng Z,Lv F,Feng Q,*et al*.Enhancing the CO_2-H_2S corrosion resistance of oil well cement with a modified epoxy resin[J].Construction and Building Materials,2022,326:126854.

[22] Chang C H,Huang T C,Peng C W,*et al*.Novel anticorrosion coatings prepared from polyaniline/graphene composites[J].Carbon,2012,5:5044-5051.

[23] Barros A,Cruz C,Garcia A,*et al*.Corrosion behavior of an Al-Sn-Zn alloy:Effects of solidification microstructure characteristics[J].Journal of Materials Research and Technology,2021,12:257-263.

[24] Zohdi H,Shahverdi H R,Hadavi S M M.Effect of Nb addition on corrosion behavior of Fe-based metallic glasses in Ringer's solution for biomedical applications[J].Electrochemistry Communications,2011,13:840-843.

[25] Kai C,Zhu L,Xianglong G,*et al*.Effect of surface finishing on the oxidation characteristics of a Fe-21Cr-32Ni alloy in supercritical carbon dioxide[J].Corrosion Science,2021,195:110019.

[26] Xu L,Xu X,Yin C,*et al*.CO_2 corrosion behavior of 1% Cr-13% Cr steel in relation to Cr content changes[J].Materials Research Express,2019,6(9):096512.■