

# 碳捕集、利用与封存中 CO<sub>2</sub> 腐蚀与防护研究

张昆<sup>1a,1b,2</sup>, 孙悦<sup>1a,1b</sup>, 王池嘉<sup>1a,1b,2</sup>, 葛红江<sup>3</sup>, 朱艳吉<sup>1a,1b,2</sup>, 汪怀远<sup>1a,1b,2</sup>

(1.天津大学 a.化工学院 b.化学工程联合国家重点实验室, 天津 300350;  
2.天津大学浙江研究院, 浙江 宁波 315000; 3.中国石油大港油田采油工艺研究院, 天津 300280)

**摘要:** 国际上将碳捕集、利用与封存 (CCUS) 作为实现长期减碳减排的重要措施, CCUS 技术对于降低全球二氧化碳排放量至关重要。CCUS 也是实现我国长期绿色低碳发展的必然选择和重要举措, 然而 CCUS 技术高速发展必然会带来装备的腐蚀与防护难题。针对油气开采以及 CCUS 过程涉及到的碳捕集设备、运输管道和油井管等设备受到的 CO<sub>2</sub> 腐蚀问题展开研究, 分析其腐蚀机理, 包括 CO<sub>2</sub> 腐蚀过程, 以及不同因素 (包括水含量、离子耦合、温度、压力、流速以及混合相中的油相) 对 CO<sub>2</sub> 腐蚀速率的影响, 并进行了总结归纳, 特别是高温高压超临界 CO<sub>2</sub> 腐蚀机理。针对目前的 3 种 CO<sub>2</sub> 防护手段进行了介绍, 考虑到合金防护成本较高, 缓蚀剂防护存在二次污染, 防护涂层具备更好的发展前景。最后对 CO<sub>2</sub> 防护涂层未来研发重点与前景进行了分析和展望。

**关键词:** 碳捕集、利用与封存; 二氧化碳腐蚀; 二氧化碳腐蚀防护; 缓蚀剂防护; 涂层防护

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)09-0043-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.004

## Research on CO<sub>2</sub> Corrosion and Protection in Carbon Capture, Utilization and Storage

ZHANG Kun<sup>1a,1b,2</sup>, SUN Yue<sup>1a,1b</sup>, WANG Chi-jia<sup>1a,1b,2</sup>, GE Hong-jiang<sup>3</sup>,  
ZHU Yan-ji<sup>1a,1b,2</sup>, WANG Huai-yuan<sup>1a,1b,2</sup>

(1. a. School of Chemical Engineering and Technology, b. State Key Laboratory for Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Zhejiang Institute of Tianjin University, Zhejiang Ningbo 315000, China; 3. The Oil Production Technology Research Institute of Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China)

**ABSTRACT:** Carbon capture, utilization and storage is regarded as one of the important measures to achieve long-term absolute carbon emission reduction, which is crucial for reducing CO<sub>2</sub> emission in global. CCUS is also the only way and the most important measure to achieve long-term green and low-carbon development in our country. However, the high-speed growth of CCUS technology would definitely cause corrosion and protection problems of equipment. In this article, the CO<sub>2</sub>

收稿日期: 2022-05-06; 修订日期: 2022-08-25

Received: 2022-05-06; Revised: 2022-08-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51925403); 国家自然科学基金项目 (面上项目/重点项目/重大项目) (21676052, 21606042)

Fund: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51925403); the National Natural Science Foundation of China (General Program, Key Program, Major Research Plan) (21676052, 21606042)

作者简介: 张昆 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为苛刻环境下防腐涂层的制备及失效机理。

Biography: ZHANG Kun (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: preparation of anticorrosion coatings in harsh environments and its failure mechanism.

通讯作者: 汪怀远 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表界面设计、强化及化工新材料与功能涂层等。

Corresponding author: WANG Huai-yuan (1977-), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface interface design and enhancement, new chemical materials and functional coatings.

引文格式: 张昆, 孙悦, 王池嘉, 等. 碳捕集、利用与封存中 CO<sub>2</sub> 腐蚀与防护研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 43-52.

ZHANG Kun, SUN Yue, WANG Chi-jia, et al. Research on CO<sub>2</sub> Corrosion and Protection in Carbon Capture, Utilization and Storage[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 43-52.

corrosion of capture equipment, transport pipeline and oil well involved in oil and gas extraction and CCUS is focused on. The corrosion mechanism, which includes the process of  $\text{CO}_2$  corrosion and different factors (like water content, ions, temperature, pressure, flow rate and oil phase) that affect  $\text{CO}_2$  corrosion, has been expounded and replenished in detail, especially under high temperature and high pressure. Three methods against  $\text{CO}_2$  corrosion are introduced. Considering the high cost of alloy protection and the pollution of corrosion inhibitors created to environment, the lower-cost and non-pollution coating protection has a better prospect. The research focus and prospects of  $\text{CO}_2$  protection coating are analyzed in the end. This article is significant for  $\text{CO}_2$  corrosion process of the equipment and the selection, design and application of protection coating in CCUS industrial application.

**KEY WORDS:**  $\text{CO}_2$  capture, utilization and storage;  $\text{CO}_2$  corrosion;  $\text{CO}_2$  corrosion protection; corrosion inhibitor; coating protection

随着化石燃料的不断开采和使用,  $\text{CO}_2$  的排放量逐年上涨, 其引起的温室效应如果不加控制最终会导致冰川融化、海平面上升等, 进而造成严重的自然灾害<sup>[1-3]</sup>。在全球“节能减排”的背景下, 各个国家相继提出了应对二氧化碳过量排放的相应政策<sup>[4-7]</sup>。我国提出预计 2030 年达到“碳达峰”, 2060 年达到“碳中和”。为了实现这一目标, 我国采取了多种节能减排的措施, 包括采用风能、太阳能等可再生能源<sup>[8-10]</sup>, 使用核能、甲醇等清洁燃料<sup>[11-13]</sup>, 提高火力发电厂的发电效率<sup>[14]</sup>, 以及对  $\text{CO}_2$  进行最大程度的转化<sup>[15]</sup>。据国际能源署 (IEA) 数据, 预计到 2050 年  $\text{CO}_2$  的排放量将减少约 14%, 并同时实现  $\text{CO}_2$  的工业利用。

CCUS 技术主要涉及 5 个部分, 分别是  $\text{CO}_2$  的排

放、捕集、运输、利用和封存<sup>[16]</sup>, 如图 1 所示。目前  $\text{CO}_2$  的排放主要集中于火力发电、炼钢工业、石油化工等诸多领域。由于化石能源在使用和燃烧过程中释放出大量的  $\text{CO}_2$ , 因此必须对其进行捕集、消减处理, 以期实现“双碳”目标。 $\text{CO}_2$  捕集方法众多, 按照方式可以分为多孔材料<sup>[17]</sup>物理吸附, 高聚物气体分离膜, 醇胺、碳酸盐、碱性溶液化学吸收<sup>[18]</sup>等方法。经过捕集后浓缩的  $\text{CO}_2$  再运输, 直到  $\text{CO}_2$  被二次利用或者永久封存。捕集的  $\text{CO}_2$  可被用作化学合成原料<sup>[19]</sup>, 提升大棚  $\text{CO}_2$  浓度达到提高光合作用的目的; 还可向油井中注入  $\text{CO}_2$  气体, 驱动石油天然气开采<sup>[20-21]</sup>; 也可永久封存在枯竭的油气田中, 避免温室效应加剧。

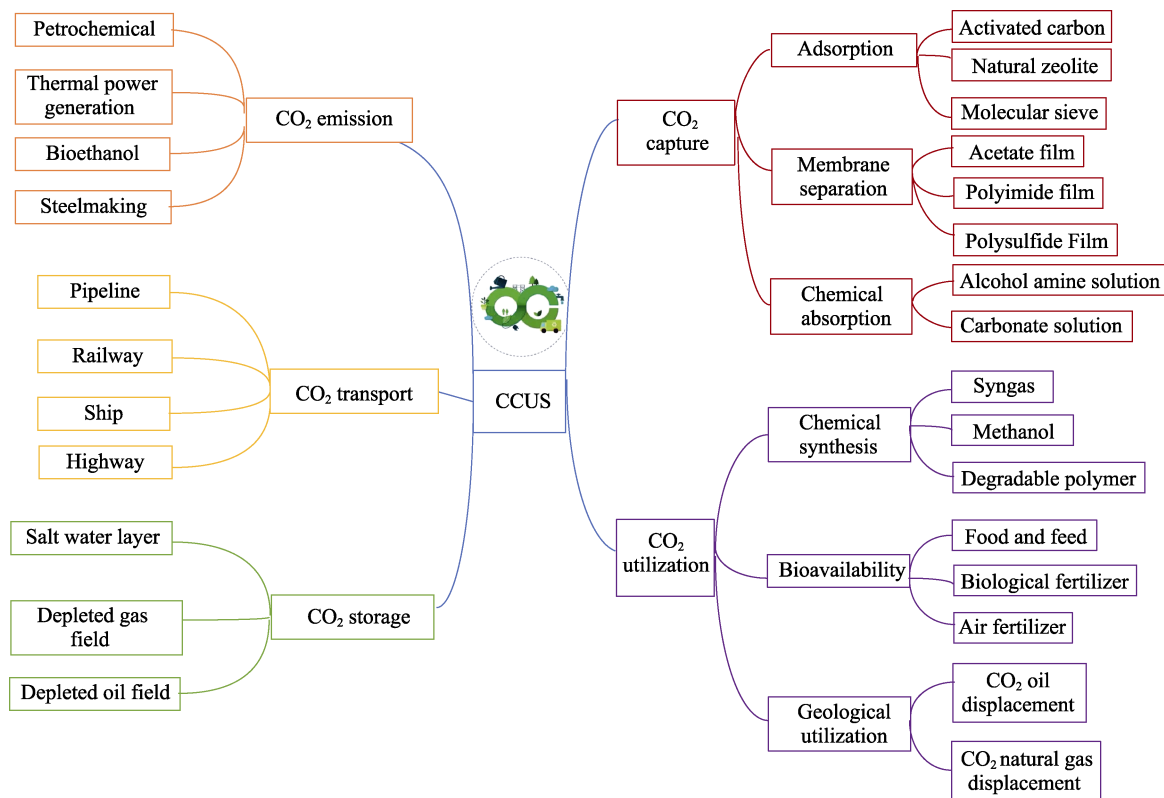


图 1 CCUS 技术的工艺图  
Fig.1 Flow chart of CCUS technology

# 1 CO<sub>2</sub> 腐蚀环境的分类

## 1.1 油气开采过程中 CO<sub>2</sub> 腐蚀

随着我国油田开采进入中后期, 为了提高采收率, 在考虑经济效益及储层合理开发等因素后, 空气驱油成为一种较理想的选择<sup>[20]</sup>。虽然空气驱油技术可有效提升原油的产量、提高采收率, 但是油井环境中的烷烃类物质与空气反应产生的 CO<sub>2</sub> 对管道的腐蚀严重影响行业发展<sup>[22]</sup>。此外, 蒸汽辅助重力泄油作业产生的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和氯化物对油管内壁也会产生严重的腐蚀<sup>[23]</sup>。油气开采过程中管道内部会出现 2 种腐蚀环境, 一种是超临界 CO<sub>2</sub> 为主体, 且含有少量的水、NO<sub>x</sub> 以及 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等杂质气体<sup>[24-25]</sup>; 另一种是水为主体, 且含有超临界或常压 CO<sub>2</sub> 以及无机盐等杂质<sup>[26]</sup>。目前通过在管道中加入缓蚀剂来增强对金属的防护作用, 但加入固体或者液体缓蚀剂的防护方法仅适用于 CO<sub>2</sub> 注入采油阶段, 即水相占主体的环境。在超临界 CO<sub>2</sub> 和采集水的环境中, 碳钢设备腐蚀行为与常规环境下显著不同, 缓蚀剂的缓蚀效果也会出现差异<sup>[27-29]</sup>。

## 1.2 CCUS 过程中 CO<sub>2</sub> 腐蚀

CCUS 能够为国家缓解能源压力及提升经济效益, 但在捕集、存储、运输和利用过程中均会出现腐蚀行为<sup>[24,30]</sup>, 如图 2 所示, CCUS 过程中的腐蚀环境及影响因素需要被分析和了解。CO<sub>2</sub> 的捕集就是通过化学物理方法将生成的 CO<sub>2</sub> 进行浓缩收集, 目前常用的物质有 CO<sub>2</sub> 存储材料和多元醇-乙二胺体系, 在这个过程中最严重的腐蚀物质就是酸性气体自身造成的腐蚀。使用醇胺进行化学吸收含有杂质的 CO<sub>2</sub> 时会出现多种腐蚀, 包括局部、全面腐蚀和硫化氢应力腐蚀开裂。腐蚀的主要原因是 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 等杂质溶于水后造成溶液偏酸性从而出现了腐蚀, 腐蚀情况与温度、压力、流体流速和杂质密切相关<sup>[31]</sup>。

CO<sub>2</sub> 的运输是指通过管道、公路、铁路和船舶运输等方式至目的地进行利用或者封存的过程。CO<sub>2</sub> 存

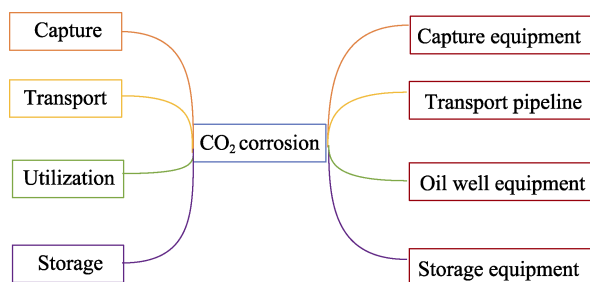


图 2 CCUS 过程中的 CO<sub>2</sub> 腐蚀

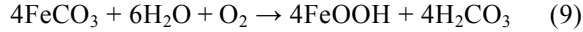
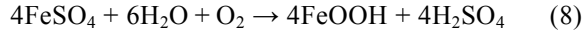
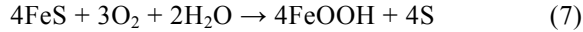
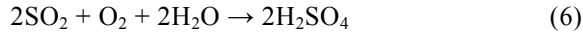
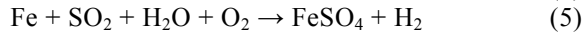
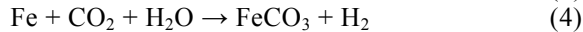
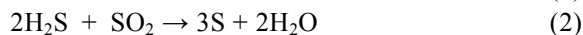
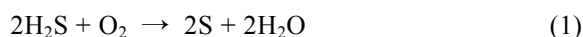
Fig.2 CO<sub>2</sub> corrosion in CCUS

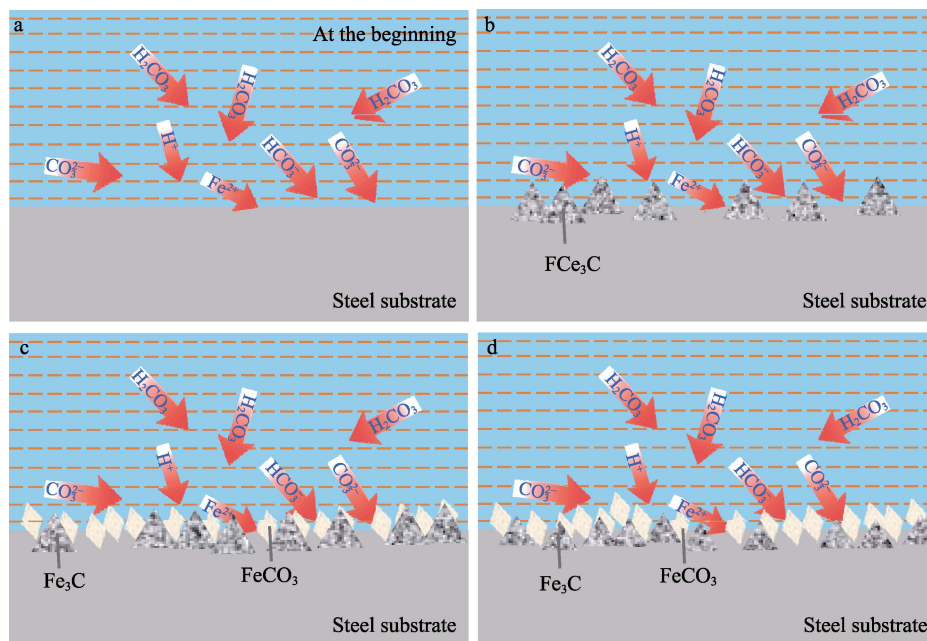
储运输过程中常以超临界的状态存在, 并且由于完全净化的成本较高, 因此存储运输气体中一般含有 H<sub>2</sub>S、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等杂质, 特殊的环境 (高压以及高温) 将加剧腐蚀, 且发生点蚀的速率加快。在存储运输过程中, 流体中的水会冷凝在壁面上, 在局部冷凝的水环境中, H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 溶于水出现较强的电化学腐蚀, 从而影响存储运输的设备安全, 需要采取合适的防护措施。CO<sub>2</sub> 利用过程中腐蚀主要发生在强化采油等环节中, 高压 CO<sub>2</sub> 被注入到油井中来进行驱油, 但是目前原油开采进入中后期, 原油含水量不断升高, 带来的腐蚀问题也愈发严重, 在管道内以及井下的 CO<sub>2</sub> 甚至可能达到超临界状态, 高温高压和水环境共同加剧了 CO<sub>2</sub> 腐蚀。CO<sub>2</sub> 封存过程就是将收集到的 CO<sub>2</sub> 通过注入咸水层或者枯竭油田、气田, 利用地质进行 CO<sub>2</sub> 封存<sup>[32]</sup>。由于地面土壤中存在溶解氧、细菌微生物等其他腐蚀物质与 CO<sub>2</sub> 耦合后, 高温高压运输管道、井下油套管及长期封存的储气罐极易发生腐蚀。

## 2 CO<sub>2</sub> 腐蚀机理和影响因素

### 2.1 CO<sub>2</sub> 的腐蚀机理

在常规水相环境中 CO<sub>2</sub> 电化学腐蚀是氢离子和金属之间的反应。Hu 等<sup>[33]</sup>报道 CO<sub>2</sub> 在富水环境中在金属表面的腐蚀过程为: 钢材基体在最初溶解阶段形成 Fe<sub>3</sub>C 架构 (图 3b), FeCO<sub>3</sub> 晶粒沉积在表面 (图 3c), 然后 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 向内扩散并与钢基体反应形成中间层和内层, 如图 3d 所示。CCUS 过程中主要是将在工业环节中产生的 CO<sub>2</sub> 捕集后转化为超临界状态, 可有效提高 CO<sub>2</sub> 的运输效率。但超临界 CO<sub>2</sub> 以及其含有 H<sub>2</sub>S、H<sub>2</sub>O 杂质的采出液所表现出的腐蚀行为与常规环境不同。在超临界 CO<sub>2</sub> 环境下, CCUS 采出液直接参与钢铁表面的腐蚀反应<sup>[24-25]</sup>。杂质中的 H<sub>2</sub>S、O<sub>2</sub> 反应生成的硫单质与铁反应生成 FeS。同时硫单质与 O<sub>2</sub> 反应生成的 SO<sub>2</sub> 会继续与 O<sub>2</sub> 和水反应生成腐蚀性介质硫酸。溶解在水中的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 与铁反应形成溶于水的亚铁化合物, 继续与氧气发生腐蚀反应生成松散的羟基氧化铁, 促进了腐蚀介质的渗透及腐蚀的进一步进行。铁的腐蚀形态也不断发生变化。反应过程见式 (1) — (9)。



图3 碳钢表面  $\text{CO}_2$  腐蚀过程的示意图Fig.3 Schematic diagram of  $\text{CO}_2$  corrosion process on carbon steel surface

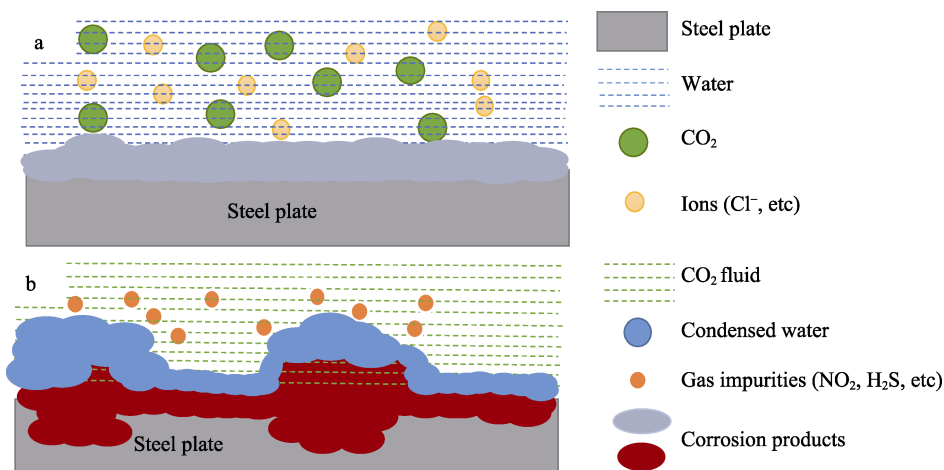
## 2.2 $\text{CO}_2$ 腐蚀的影响因素

### 2.2.1 水对 $\text{CO}_2$ 腐蚀的影响

水在金属腐蚀中起着至关重要的作用,主体相的不同导致腐蚀行为差异显著,主要表现在  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系统的汽液平衡对于金属腐蚀的影响,在富水的环境下可以形成导电通路,发生电化学腐蚀。此外,在高温高压环境下的无水环境中则主要发生氧化反应<sup>[34]</sup>。研究表明,在以  $\text{CO}_2$  为主体相的腐蚀主要以点蚀的方式呈现,其腐蚀速率也受多方面影响,包括杂质气体种类、分压、含水量等。杂质气体会影响腐蚀产物的构成,而含水量会影响酸性气体的溶解程度,并且溶解腐蚀介质的水在钢材表面附着从而影响腐蚀速率。Sun 等<sup>[24]</sup>对比在  $\text{O}_2\text{-H}_2\text{S-SO}_2$  环境下,富水相和富  $\text{CO}_2$  相对 X65 合金钢腐蚀行为的影响。研究表明,两者

的腐蚀速率相当、腐蚀产物相似,不同的是处于富水相环境的金属表面呈现均匀腐蚀的现象,而富  $\text{CO}_2$  相的腐蚀产物为蓬松状。大量的文献报道水含量与金属腐蚀速率的关系。Gao 等<sup>[35]</sup>发现含水量对均匀腐蚀的速率影响不大,但是在低含水量下的局部腐蚀比高含水量时更加严重。Sun 等<sup>[25]</sup>研究了富  $\text{CO}_2$  相含水量对金属腐蚀行为的影响,结果显示,在 10 MPa、50  $^{\circ}\text{C}$  以及  $\text{CO}_2\text{-O}_2\text{-H}_2\text{S-SO}_2$  环境下,  $\text{H}_2\text{O}$  含量超过 0.15% 阈值后,腐蚀速率会随着水含量的增大而加快。而含水量高于 0.15% 时,腐蚀介质中杂质单体会溶于水,促进钢材表面的腐蚀。Hua 等<sup>[36]</sup>也得出了相似的结论,在 35  $^{\circ}\text{C}$  的恒定温度下,水含量低于 0.16% 时没有观察到明显的金属腐蚀现象。

掺杂离子杂质的富水相碳钢截面腐蚀情况,如图 4a 所示,  $\text{Cl}^-$  存在于富水相环境中,钢材表面将产生

图4 水相为主体的腐蚀 (a) 和  $\text{CO}_2$  相为主体的腐蚀 (b)Fig.4 Water-based corrosion (a) and  $\text{CO}_2$ -based corrosion (b)



均匀厚度的腐蚀层。少量冷凝水、气体杂质 (NO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S) 存在于富 CO<sub>2</sub> 的碳钢截面腐蚀情况, 如图 4b 所示, 冷凝水紧密附着在碳钢表面, 且部分区域产生孔状锈蚀。此外, 以水相为主体的腐蚀环境中, 水流速度、温度、杂质、离子浓度以及 CO<sub>2</sub> 分压均会对钢材的腐蚀速率产生影响。

### 2.2.2 离子耦合对 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响

CO<sub>2</sub> 腐蚀工况环境中往往掺杂无机盐离子, 如 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 等阳离子以及 Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等阴离子。离子的存在, 一方面会增强溶液的电导率促进电子转移, 另一方面作为主体阴离子之一的 Cl<sup>-</sup> 对碳钢有侵蚀作用。同时, 离子会破坏腐蚀生成的 FeCO<sub>3</sub> 保护层, 造成金属腐蚀的加剧。Wu 等<sup>[26]</sup>研究发现在压力相同时, 无论是气态还是超临界 CO<sub>2</sub> 在含氯离子富水相的腐蚀速率都远高于富 CO<sub>2</sub> 相, 这是由于水溶液中的 Cl<sup>-</sup> 对 FeCO<sub>3</sub> 膜的破坏。

离子对腐蚀的影响不仅是提升电导率, 而且还提高了 CO<sub>2</sub> 腐蚀速率。Sun 等<sup>[37]</sup>研究了离子浓度与腐蚀速率之间的关系。结果显示, 随着离子浓度的升高, 腐蚀速率呈现先升高后下降的趋势。在溶液中的离子有两方面的作用, 一方面阳极的敏感度提高, 导致低浓度下的腐蚀加剧; 另一方面是当离子浓度高到一定程度时, 离子会与水分子相互作用进而降低 CO<sub>2</sub> 在溶液中的溶解度, 这也被称为“盐析作用”, 最终使腐蚀速率降低。

### 2.2.3 压力及温度对腐蚀的影响

CO<sub>2</sub> 分压和温度同时影响金属腐蚀, 且较为复杂。Lu 等<sup>[38]</sup>研究发现 25 °C、1 MPa CO<sub>2</sub> 是腐蚀分界点, 低于该分压时腐蚀速率会随 CO<sub>2</sub> 压力的增大而加快, 继续加压会降低腐蚀速率。高压 CO<sub>2</sub> 加速了阳极 Fe 的溶解, 同时提高了溶液中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的浓度, 有利于 FeCO<sub>3</sub> 保护膜的生成。在高分压下的 CO<sub>2</sub> 会与 Fe 形成更致密的 FeCO<sub>3</sub> 膜, 可减轻应力开裂, 减缓腐蚀效率。提升 CO<sub>2</sub> 分压在短时间内会形成致密的保护膜, 长时间高 CO<sub>2</sub> 分压对腐蚀的影响还需继续探究。Morland 等<sup>[39]</sup>也得出了相似的试验结果, CO<sub>2</sub> 继续加压达 2~10 MPa, 金属腐蚀速率不再继续增加, 且在金属表面无保护性的腐蚀产物膜存在。Chen 等<sup>[40]</sup>研究了在 60 °C 条件下不同 CO<sub>2</sub> 分压在初期、中期和后期对腐蚀速率的影响, 在浸泡初期压力的升高有利于 FeCO<sub>3</sub> 的形成, 减缓腐蚀速率, 但是在相对高温下, 随着腐蚀时间的延长, 防护膜被碳酸溶解, 此时高 CO<sub>2</sub> 分压会加剧腐蚀。FeCO<sub>3</sub> 保护膜在金属表面是不断生成和溶解的, 温度对致密的 FeCO<sub>3</sub> 保护膜的影响较大, 常温下, 高压会加速保护膜的生成, 而高温保护膜的溶解速率会高于生成速率, 此时高 CO<sub>2</sub> 分压金属的腐蚀更加严重。

### 2.2.4 流速对腐蚀的影响

液体流速对腐蚀产物的生成和剥落密切相关。Dong 等<sup>[41]</sup>研究了在 3 MPa CO<sub>2</sub> 工况下, 不同采出液流速对腐蚀速率的影响, 在低的流速下腐蚀会随流速的上升而缓慢提升; 当液体流速达到湍流状态, 液体流动的过程中带走 Fe<sup>2+</sup>, 离子浓度下降加剧腐蚀反应发生, 并且液体流动过程中伴随泥沙造成金属的冲击腐蚀。

### 2.2.5 油相环境对 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响

在集输管道中更常见的是油相-水相-溶解 CO<sub>2</sub>-离子的多相流体系, 由于环境复杂, 目前主要以计算机模拟为主<sup>[42]</sup>, 但是也有研究者通过构造相应的腐蚀环境来进行更为具体的研究。Cheng 等<sup>[43]</sup>研究了在多相流环境下原油含水量、温度、CO<sub>2</sub> 分压、流速 4 个因素对腐蚀速率的影响, 结果显示, 其中影响最大的为原油含水量, 原因是油相中含有的缓蚀物质可以吸附在金属表面, 当含水量升高后, 原油更难浸润金属表面, 从而给腐蚀创造了条件。因此, 结合以上研究发现运行环境对钢材表面的腐蚀具有重要影响, 在实际研究的过程中应该充分考虑运行环境的作用。

## 3 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护现状及存在问题

在油气开采和 CCUS 过程中, 均存在 CO<sub>2</sub> 对钢铁的腐蚀, 腐蚀环境较为严苛, 温度和压力会加速其对金属的腐蚀, 腐蚀速率相较于常规环境更快, 因此更加有必要采取手段进行防护。按其防护手段可以分为合金防护、缓蚀剂防护和涂层防护。

### 3.1 合金防护

合金防护是指通过元素调控、晶格控制以及与金属生产工艺相匹配的一种防护手段。合金防腐包括利用耐腐蚀合金通过高能熔融方式直接作用在金属表面或内部, 或通过以合金作为牺牲阳极材料保护基材。金属中的元素含量将影响在静态及动态饱和超临界 CO<sub>2</sub>-水环境中的腐蚀速率。Gao 等<sup>[44]</sup>研究了在静态环境下 3Cr 合金钢的腐蚀速率最高, 在动态环境下 X70 钢的腐蚀最为严重, 6.5Cr 合金钢在 2 种环境下的腐蚀速率均为最低。在分析腐蚀产物时发现 6.5Cr 在动态及静态下的腐蚀产物均为由非晶 FeCO<sub>3</sub> 和 Cr(OH)<sub>3</sub> 组成的单层富铬层, 因此表现出更好的抗腐蚀效果。3Cr 钢在静态水中表现出的高腐蚀现象归因于 Cr 含量不足而无法形成致密的 Cr(OH)<sub>3</sub> 保护层。因此, 对于与含盐含水层流体的直接接触, 只能使用高合金钢。

除了上述在金属内部加入合金的防护方法外, 金属表面的合金层也是抗二氧化碳腐蚀的重要防护方式。此方法主要是利用牺牲阳极的方法, 检测富水环

境对碳钢的防护作用。Fan 等<sup>[45]</sup>制备了含有 Ni、Sn 和 Ce 等多种元素的黄铜合金,且不同组分的黄铜合金都会表现出降低金属腐蚀速率的能力。这是由于在合金表面上存在的 Cu 和 Zn 材料形成原电池,同时也产生了大量的  $\text{OH}^-$ ,中和了金属材料表面的酸性。此方法可以有效地避免碳钢腐蚀,也降低了腐蚀产物  $\text{FeCO}_3$  的溶解度,从而在表面形成更加稳定的保护膜。

由于金属的需求量大,合金防护效果显著,但其加工成本高、加工难度大且含 Cr 合金防护对环境污染大,综上合金防护更适用于小规模  $\text{CO}_2$  腐蚀环境下使用,限制其在 CCUS 过程中的广泛应用。因此,需要开发低成本、便捷的防护方式进行  $\text{CO}_2$  防护。

### 3.2 缓蚀剂防护

缓蚀剂的防腐机理较为复杂,涉及到金属表面电荷的转换以及腐蚀产物的变化。缓蚀剂通过吸附在金属表面或与金属之间发生相互作用来实现对腐蚀介质的隔离。缓蚀剂由于其特性只能应用在以水相为主体的腐蚀环境中,特别需要注意的是,在不断升压使  $\text{CO}_2$  从气态变为超临界状态时,碳钢表面的过剩电荷会发生反转,从负电转变为正电<sup>[27]</sup>,因此可能会出现添加缓蚀剂后压力升高而腐蚀速率降低的现象。

与常规水环境相似,咪唑和嘧啶等类型的缓蚀剂在  $\text{CO}_2$  腐蚀环境也对金属有相似的防护作用。Desimon 等<sup>[46]</sup>研究了  $\text{CO}_2$  环境下两性的氨基与碳钢之间的吸附模式,通过活化能、热力学参数和电化学试验得出结论,缓蚀剂浓度的高低影响在碳钢上的吸附模式,低浓度的缓蚀剂以物理吸附为主,反之则倾向于化学吸附。在  $\text{CO}_2$  腐蚀环境下缓蚀剂的防护和金属与缓蚀层之间的结合力有关。Zhang 等<sup>[47]</sup>采用 4,6-二氨基-2-(苄硫基)嘧啶(DABTP)缓蚀剂,研究其在超临界  $\text{CO}_2$  油田采出水环境中的缓蚀性能以及腐蚀衍生物对 DABTP 缓蚀性能的影响。结果显示,DABTP 对 2 种腐蚀产物  $\text{Fe}_3\text{C}$  和  $\text{FeCO}_3$  的结合力要远强于碳钢,均造成防护效果的下降。在  $\text{CO}_2$  环境中除需要考

虑常规缓蚀剂的失效问题外,还需考虑碳钢表面电荷的问题。Chen 等<sup>[28]</sup>研究了不同  $\text{CO}_2$  压力下,月桂酸缓蚀剂在油田采出液中对金属表面的缓蚀情况。结果显示,浸泡初期腐蚀电流随着  $\text{CO}_2$  分压的增大而增大,而  $\text{CO}_2$  压力从 6 MPa 增加到 8 MPa,腐蚀产物更加致密。这是由于转变为超临界状态的  $\text{CO}_2$ ,碳钢表面发生了过剩电荷的转变,阴离子型月桂酸缓蚀剂与超临界  $\text{CO}_2$  环境下碳钢表面的过剩阳离子有更强的结合力,从而实现了腐蚀速率的降低。而在超临界状态时,咪唑啉缓蚀剂<sup>[29]</sup>的防腐效果明显下降,这同样是由于过剩电荷的转变不利于咪唑啉缓蚀剂吸附。此外,也应考虑缓蚀剂加入时间对  $\text{CO}_2$  环境下金属防护的影响。由于  $\text{FeCO}_3$  相较于  $\text{Fe}_3\text{C}$  更加致密,因此在腐蚀进行 48 h 后(腐蚀产物以  $\text{FeCO}_3$  为主)加入缓蚀剂的防护效果优于 24 h(腐蚀产物以  $\text{Fe}_3\text{C}$  和  $\text{FeCO}_3$  为主)和 8 h(腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_3\text{C}$ )<sup>[47]</sup>。

金属表面与缓蚀剂的结合能是抗腐蚀性的重要参数,因此影响结合力的因素将会成为未来研究的重点。此外,缓蚀剂在连续相中溶解、分散后对金属起到的防护作用,使其应用环境受到限制。缓蚀剂对水体环境易造成负面的影响,为达到工业废水的排放要求,对水体还需进行净化再处理。缓蚀剂在抗  $\text{CO}_2$  防护方面具有一定的优势,但其他防腐方式还需要被开发。

### 3.3 涂层防护

涂层防护按照涂层的化学结构可分为金属合金涂层与有机聚合物基涂层。合金涂层可提升  $\text{CO}_2$  环境下的防护性能。Sun 等<sup>[48]</sup>在含  $\text{H}_2\text{O}-\text{O}_2-\text{NO}_2$  杂质的超临界  $\text{CO}_2$  环境下对金属 Ni-P 涂层的防腐性能进行研究。结果显示,在不同的气体环境下其腐蚀抑制率均能达到 80%以上,涂层防护效果稳定。如图 5 所示,在金属表面形成 Ni-P 涂层可以从严重的点蚀转变为均匀腐蚀,降低了穿孔的可能性。且通过协同因子计算发现 Ni-P 涂层的存在可以降低  $\text{O}_2$  与  $\text{NO}_2$  协同作用,抑制电解质的渗透。

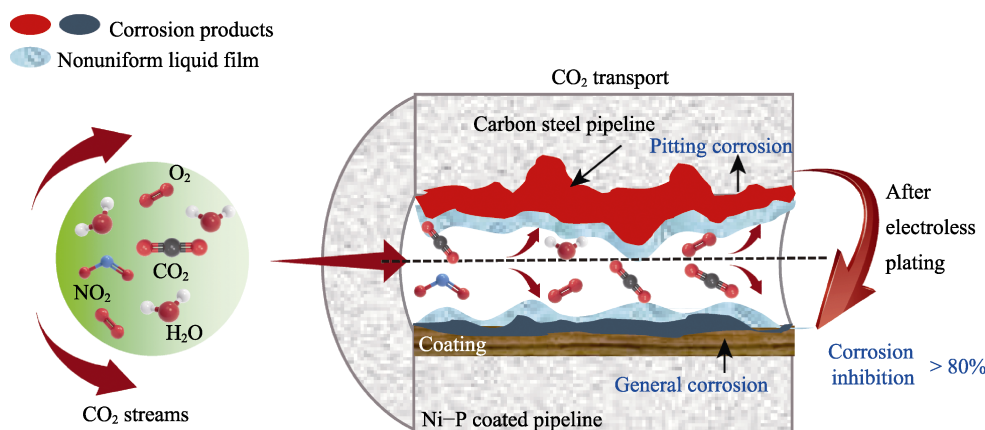


图 5 Ni-P 涂层在超临界  $\text{CO}_2$  环境下的防护机理<sup>[48]</sup>

Fig.5 The protection mechanism of Ni-P coating in supercritical  $\text{CO}_2$  environment<sup>[48]</sup>

有机复合涂层 also 具有良好的 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护性能。Wang 等<sup>[49]</sup>研究了具有 CO<sub>2</sub> 响应特性的防腐涂层, 乙基纤维素防腐涂料中加入含硫脲的介孔二氧化硅, 纳米容器中硫脲的累积释放量随溶液 pH 的变化而变化, 其释放速率可适应 3.5%NaCl 溶液在不同溶解 CO<sub>2</sub> 含量下的腐蚀性变化。这是由于纳米容器表面的聚合物外壳可以在 CO<sub>2</sub> 水溶液中由疏水状态变为亲水状态, 从而提高包封缓蚀剂硫脲的释放速率。该涂层可用于石油生产中存在 CO<sub>2</sub> 腐蚀风险的设施和管道的腐蚀防护。Wang 等<sup>[50]</sup>利用酚醛环氧树脂、石墨烯以及其他助剂和颜填料制备的防腐涂层, 研究了其在较高温度且富含 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 的采出水环境下的防腐效果。结果显示, 在 90 °C、总压 3.2 MPa 的 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 气体以及 20 429 mg/L Cl<sup>-</sup> 的水环境中可以长期保持稳定, 研究表明石墨烯的添加可改善涂层的耐腐蚀性能。综上, 有机涂层具有种类多、操作简便、性价比高及环保等诸多优势, 但传统有机涂层对抗 CO<sub>2</sub> 环境的稳定性欠佳, 苛刻环境下甚至存在明显的渗透行为, 因此分析揭示有机涂层失效过程与机制是极为有价值的。

首先, 中高压 CO<sub>2</sub> 环境有机涂层失效主要表现在涂层局部鼓泡、整体鼓泡以及非鼓泡失效等现象。这是由于在压力推动下溶解碳酸透过涂层, 并吸附在金属表面, 当涂层脱离高压腐蚀环境后迅速降至常压, 碳酸的溶解度下降, CO<sub>2</sub> 迅速汽化膨胀, 在基板与涂层之间造成鼓泡现象, 严重影响涂层的防腐效果。

其次, 有机涂层在超临界 CO<sub>2</sub> 环境下迅速失效, 这是由于超临界 CO<sub>2</sub> 具有对有机物溶解度大、扩散速度快的特性。超临界 CO<sub>2</sub> 与涂层接触后有机物被萃取出来造成涂层内部产生空缺<sup>[51]</sup>, 因此对超临界 CO<sub>2</sub> 环境的腐蚀耐受性是有机涂层的短板。为了解决上述

有机涂层在超临界条件下的防腐失效问题, 用耐蚀性良好的合金材料直接喷涂在需要被保护的金属表面, 金属基板与涂层的应力不匹配问题得到改善, 涂层不易造成致命缺陷。

此外, 温度是有机涂层的敏感特性。涂层随着温度的升高逐渐软化, 从玻璃体状态转换为高弹态, 甚至流体态。CO<sub>2</sub> 在高温、高压下会以多种形态存在, 如超临界状态、CO<sub>2</sub> 与水分子混合状态以及气态, 3 种状态会同时对软化的涂层状态产生溶解反应及穿透破坏。研究表明超过 90 °C 后, CO<sub>2</sub> 会迅速穿透多数有机涂层, 因此需要提升涂层的致密性、屏蔽性以及玻璃化温度才能抵抗 CO<sub>2</sub> 的穿透。

针对上述有机涂层失效行为, 天津大学先进复合材料与涂层 (AFCC) 课题组在抗气体渗透及 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护方面取得了良好进展<sup>[52-54]</sup>。为应对极端环境下的 CO<sub>2</sub> 腐蚀, 该团队将高质量二维填料引入到有机涂层中, 在致密涂层中所带来的“曲折作用”阻挡气体渗透, 提高气体阻隔性能。除了抗气体渗透外, CO<sub>2</sub> 防护涂层兼具较高的树脂交联度、优异的表界面相容性。与市面上抗酸商业涂层对比 (图 6a), 研发的纳米防护涂层 (202 产品) 在 110 °C 高压测试环境下具有极佳的平整度 (图 6b), 但涂层依然出现鼓泡的现象。通过对树脂与填料界面进行改性, 涂层的致密性能提升, 涂层对高温高压的耐受性增强。升级款纳米防护涂层 202-H, 在 150 °C、10 MPa CO<sub>2</sub> 分压、20 MPa 总压下依然具有优异的防腐性能 (图 6c)。此外, 考察了温度 (70~150 °C)、CO<sub>2</sub> 分压 (0.1~30 MPa)、矿化度 (0.1%~4%)、氯离子浓度 (0.1%~2%) 以及 pH (4~9) 等 5 种主要因素对涂层的影响。202-H 涂层可以在极端条件 (高温高 CO<sub>2</sub> 分压) 下保持稳定的防护效果。此工况条件可满足许多油田 CO<sub>2</sub> 驱油的极端 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护需求。

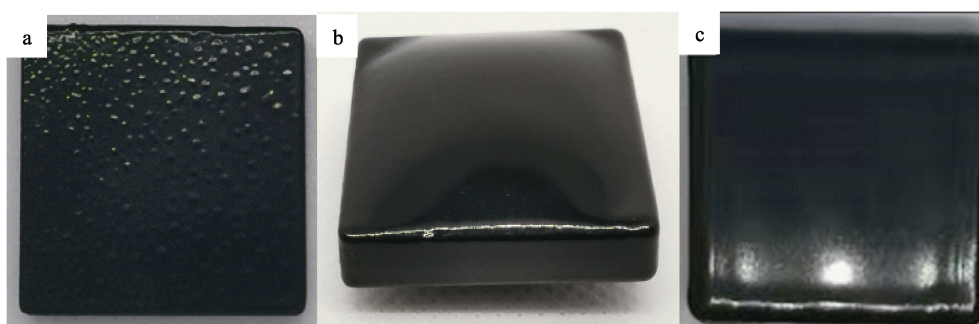


图 6 经过 110 °C 下 CO<sub>2</sub> 腐蚀的商业涂层 (a)、202 涂层 (b), 经过 150 °C 下 CO<sub>2</sub> 腐蚀的 202-H 涂层 (c)

Fig.6 Samples after 110 °C and CO<sub>2</sub> corrosion treatment: commercial coating (a), 202 coating (b) and after 150 °C and CO<sub>2</sub> corrosion treatment (c), nano protection coating 202-H

## 4 总结与展望

CCUS 是在未来碳达峰、碳中和过程中的重要举措之一, 其带来的装备腐蚀问题也会更加凸显。本文

综述了实际工况下 CO<sub>2</sub> 腐蚀过程、腐蚀机理及相应防护措施, 整理了腐蚀介质、压力温度、流速、油相等环境对 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响。此外, 对于目前 CO<sub>2</sub> 环境的防护方法及存在的问题进行了总结。缓蚀剂防护对



于 CO<sub>2</sub> 环境抗腐蚀效果显著, 具有明显的经济优势, 然而缓蚀剂的投放对水环境有负面影响, 制备环保、高效的缓蚀剂是未来的发展方向。合金涂层具有表面平整度好、腐蚀耐受性佳等优势, 但是对于降低合金加工成本、耐温度和 CO<sub>2</sub> 分压耦合环境的合金配比还需要进一步研究。有机涂层具有成本低、可调控强的特点, 然而目前 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护涂层还在起步阶段, 能够适应苛刻二氧化碳环境的有机涂层体系还需要进一步研究和完善。

未来苛刻工况 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护涂层研究应重点解决如下几点: (1) 通过对金属镀层内部元素的调控, 提升金属镀层内部晶格间的作用力及温度稳定性; (2) 加强树脂与固化剂的研发, 增加基础树脂的耐温及内部交联性能, 提升超临界 CO<sub>2</sub> 分子的阻隔性能; (3) 通过表界面调控, 提升相应树脂与填料的相容性, 降低涂膜内部缺陷位, 提升涂层的屏蔽性能; (4) 利用化学手段制备致密性、耐温性、耐酸性以及高压稳定性更强的有机涂层, 提升涂层内部的抗渗透性。相信随着材料科学、表面科学的高速发展, 借鉴多学科理论及方法, 以全新的视角探索 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护机理, CO<sub>2</sub> 腐蚀防护技术将取得更大进展, 为 CCUS 快速发展和应用提供技术保障。

#### 参考文献:

- [1] LOFT S. Air Quality and Climate Change[M]. Sydney: Clean Air Society of Australia & New Zealand, 2009.
- [2] FLEMING R J. An Updated Review about Carbon Dioxide and Climate Change[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(6): 262.
- [3] TAN C H, ONG M Y, NOMANBHAY S M, et al. The Influence of COVID-19 on Global CO<sub>2</sub> Emissions and Climate Change: A Perspective from Malaysia[J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8461.
- [4] ZHANG Ling-yun, SUN Nan-nan, WANG Min-quan, et al. The Integration of Hydrogenation and Carbon Capture Utilisation and Storage Technology: A Potential Low-Carbon Approach to Chemical Synthesis in China[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(14): 19789-19818.
- [5] KANG Jia-ning, WEI Yi-ming, LIU Lan-cui, et al. Observing Technology Reserves of Carbon Capture and Storage via Patent Data: Paving the Way for Carbon Neutral[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 171: 120933.
- [6] PEDREIRA V N, BRITO M L, SANTOS L C L D, et al. Modeling of Brazilian Carbon Dioxide Emissions: A Review[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2022, 65: 254.
- [7] SONG Cui-hong, GARDNER K H, KLEIN S J W, et al. Cradle-to-Grave Greenhouse Gas Emissions from Dams in the United States of America[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 945-956.
- [8] SAHU B K. Wind Energy Developments and Policies in China: A Short Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1393-1405.
- [9] ZHANG Su-fang, HE Yong-xiu. Analysis on the Development and Policy of Solar PV Power in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 393-401.
- [10] LI Can-bing, HE Li-na, CAO Yi-jia, et al. Carbon Emission Reduction Potential of Rural Energy in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 254-262.
- [11] 姜子英, 潘自强, 邢江, 等. 中国核电能源链的生命周期温室气体排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3502-3510.
- [12] JIANG Zi-ying, PAN Zi-qiang, XING Jiang, et al. Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power Chain Life Cycle in China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3502-3510.
- [13] QIN Zhen, ZHAI Guo-fu, WU Xiao-mei, et al. Carbon Footprint Evaluation of Coal-to-Methanol Chain with the Hierarchical Attribution Management and Life Cycle Assessment[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 168-179.
- [14] KENDALL M. Fuel Cell Development for New Energy Vehicles (NEVs) and Clean Air in China[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(2): 113-120.
- [15] MAHLIA T M I, LIM J Y, ADITYA L, et al. Methodology for Implementing Power Plant Efficiency Standards for Power Generation: Potential Emission Reduction[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2018, 20(2): 309-327.
- [16] OLAJIRE A A. Recent Progress on the Nanoparticles-Assisted Greenhouse Carbon Dioxide Conversion Processes[J]. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2018, 24: 522-547.
- [17] 魏宁, 刘胜男, 李桂菊, 等. CCUS 对中国粗钢生产的碳减排潜力评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5866-5874.
- [18] WEI Ning, LIU Sheng-nan, LI Gui-ju, et al. Mitigation Potential Evaluation of CO<sub>2</sub> Capture and Storage in Crude Steel Industries of China[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5866-5874.
- [19] 竹涛, 苑博, 郝伟翔, 等. 煤基固废合成沸石分子筛捕集 CO<sub>2</sub> 研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(1): 1-14.
- [20] ZHU Tao, YUAN Bo, HAO Wei-xiang, et al. Research Progress on CO<sub>2</sub> Capture by Synthesizing Zeolite from Coal-Based Solid Waste[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(1): 1-14.
- [21] 吕广忠, 李振泉, 李向良, 等. 燃煤电厂 CO<sub>2</sub> 捕集驱油封存技术及应用[J]. 科技导报, 2014, 32(1): 40-45.
- [22] LYU Guang-zhong, LI Zhen-quan, LI Xiang-liang, et al. Technology and Application of CO<sub>2</sub> Capture, Utilization



- and Storage for Coal Fired Power Plant[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(1): 40-45.
- [19] 薛靖文, 常宏岗, 何金龙, 等. CO<sub>2</sub> 利用在有机合成中的研究进展[J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(2): 36-45.
- XUE Jing-wen, CHANG Hong-gang, HE Jin-long, et al. Research Progress of CO<sub>2</sub> Utilization in Organic Synthesis[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2022, 51(2): 36-45.
- [20] 胡永乐, 郝明强, 陈国利, 等. 中国 CO<sub>2</sub> 驱油与封存技术及实践[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 716-727.
- HU Yong-le, HAO Ming-qiang, CHEN Guo-li, et al. Technologies and Practice of CO<sub>2</sub> Flooding and Sequestration in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 716-727.
- [21] 陈颖, 金吉能, 兰天庆. CO<sub>2</sub> 置换联合地热开采陆域可燃冰-地质封存一体化技术[J]. *现代化工*, 2021, 41(12): 69-73.
- CHEN Ying, JIN Ji-neng, LAN Tian-qing. CO<sub>2</sub> Replacement Combined with Geothermal-Mining Land Combustible Ice-Geological Storage Integrated Technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(12): 69-73.
- [22] MARBUN B T H, SANTOSO D, KADIR W G A, et al. Improvement of Borehole and Casing Assessment of CO<sub>2</sub>-EOR/CCUS Injection and Production Well Candidates in Sukowati Field, Indonesia in a Well-Based Scale[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1598-1615.
- [23] SUN Chong, ZENG Hong-bo, LUO Jing-li. Unraveling the Effects of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S on the Corrosion Behavior of Electroless Ni-P Coating in CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S/Cl<sup>-</sup> Environments at High Temperature and High Pressure[J]. *Corrosion Science*, 2019, 148: 317-330.
- [24] SUN Chong, LIU Jian-xin, SUN Jian-bo, et al. Probing the Initial Corrosion Behavior of X65 Steel in CCUS-EOR Environments with Impure Supercritical CO<sub>2</sub> Fluids[J]. *Corrosion Science*, 2021, 189: 109585.
- [25] SUN Chong, SUN Jian-bo, LIU Su-biao, et al. Effect of Water Content on the Corrosion Behavior of X65 Pipeline Steel in Supercritical CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S-SO<sub>2</sub> Environment as Relevant to CCS Application[J]. *Corrosion Science*, 2018, 137: 151-162.
- [26] 吴保玉, 宋振云, 陈平. N80/J55 油管钢在超临界 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 体系中腐蚀行为研究[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(2): 66-70.
- WU Bao-yu, SONG Zhen-yun, CHEN Ping. Corrosion Behavior of N80/J55 Tubing Steel in Supercritical CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O System[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(2): 66-70.
- [27] CEN Hong-yu, CAO Jiao-jiao, CHEN Zhen-yu, et al. 2-Mercaptobenzothiazole as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Supercritical CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Condition[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476: 422-434.
- [28] 张德平, 岑宏宇, 陈振宇. 月桂酸在超临界 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 环境下的缓蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(10): 57-62.
- ZHANG De-ping, CEN Hong-yu, CHEN Zhen-yu. Corrosion Inhibition of Lauric Acid in Supercritical CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O Condition[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(10): 57-62.
- [29] WEI Li-sha, CHEN Zhen-yu, GUO Xing-peng. Inhibition Behavior of an Imidazoline Inhibitor for Carbon Steel in a Supercritical CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O System[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(9): C602-C609.
- [30] 孙冲, 孙建波, 王勇, 等. 超临界 CO<sub>2</sub>/油/水系统中油气管材钢的腐蚀机制[J]. *金属学报*, 2014, 50(7): 811-820.
- SUN Chong, SUN Jian-bo, WANG Yong, et al. Corrosion Mechanism of OCTG Carbon Steel in Supercritical CO<sub>2</sub>/Oil/Water System[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(7): 811-820.
- [31] 范家僖, 李敏. 含 CO<sub>2</sub> 油气田腐蚀特点分析及防腐对策[J]. *油气田地面工程*, 2021, 40(9): 60-66.
- FAN Jia-xi, LI Min. Analysis of Corrosion Characteristics of an Oil and Gas Field Containing CO<sub>2</sub> and Anti-Corrosion Countermeasures[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2021, 40(9): 60-66.
- [32] RENDEL P M, WOLFF-BOENISCH D, GAVRIELI I, et al. A Novel Experimental System for the Exploration of CO<sub>2</sub>-Water-Rock Interactions under Conditions Relevant to CO<sub>2</sub> Geological Storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1206-1213.
- [33] 胡耀强, 何飞, 鲍文, 等. CO<sub>2</sub> 输送管道腐蚀研究进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(8): 14-21.
- HU Yao-qiang, HE Fei, BAO Wen, et al. Research Progress of Corrosion on CO<sub>2</sub> Pipeline Transportation[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(8): 14-21.
- [34] 刘珠, 郭相龙, 王鹏, 等. 310S 不锈钢在超临界二氧化碳中的腐蚀行为研究[J]. *核动力工程*, 2020, 41(S1): 183-187.
- LIU Zhu, GUO Xiang-long, WANG Peng, et al. Corrosion Behavior of 310S Stainless Steel in Supercritical Carbon Dioxide[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(S1): 183-187.
- [35] 高嘉喜, 刘栋, 由洋, 等. 多相流动状态下原油对 X70 钢 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响[J]. *北京石油化工学院学报*, 2016, 24(1): 31-35.
- GAO Jia-xi, LIU Dong, YOU Yang, et al. Research on the Effects of Crude Oil on CO<sub>2</sub> Corrosion of X70 Steel in Multiphase Flow State[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2016, 24(1): 31-35.
- [36] HUA Yong, BARKER R, NEVILLE A. The Influence of SO<sub>2</sub> on the Tolerable Water Content to Avoid Pipeline Corrosion during the Transportation of Supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 37: 412-423.
- [37] SUN Jian-bo, YANG Li-ying, LIU Wei, et al. Electrochemical Behavior and Localized Corrosion of X65 Steel in High Salt Concentration Brines with CO<sub>2</sub> Saturated[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(2): 026503.

- [38] 崔怀云, 梅鹏程, 刘智勇, 等. CO<sub>2</sub> 分压对 N80 油管钢在 CO<sub>2</sub> 驱注井环空环境中应力腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1182-1189.  
CUI Huai-yun, MEI Peng-cheng, LIU Zhi-yong, et al. Effect of CO<sub>2</sub> Partial Pressure on the Stress Corrosion Cracking Behavior of N80 Tubing Steel in the Annulus Environment of CO<sub>2</sub> Injection Well[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1182-1189.
- [39] MORLAND B H, DUGSTAD A. Corrosion of Carbon Steel in Water Equilibrated with Liquid and Supercritical CO<sub>2</sub>[J]. Corrosion & Protection, 2016, 25: 368.
- [40] 范东升, 何川, 陈旭, 等. CO<sub>2</sub> 分压力对 2205 双相不锈钢在酸性油气田中腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 50-55.  
FAN Dong-sheng, HE Chuan, CHEN Xu, et al. Effects of CO<sub>2</sub> Partial Pressure on Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in Acid Oil and Gas Field[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(24): 50-55.
- [41] 董逢寅. 高温高压 CO<sub>2</sub> 环境咪唑啉缓蚀剂缓蚀性能研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013.  
DONG Feng-yin. Study on Corrosion Inhibition of Imidazoline Inhibitor in High Temperature and High Pressure CO<sub>2</sub> Containing Environments[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2013.
- [42] 杨婧, 李盼, 田爱民, 等. 多相流管道 CO<sub>2</sub> 内腐蚀直接评价技术研究[J]. 石油工程建设, 2020, 46(3): 67-71.  
YANG Jing, LI Pan, TIAN Ai-min, et al. Direct Evaluation Technology of CO<sub>2</sub> Internal Corrosion in Multiphase Flow Pipeline[J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46(3): 67-71.
- [43] 白羽, 李自力, 程远鹏. 集输管线钢在 CO<sub>2</sub>/油/水多相流环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(3): 204-207, 213.  
BAI Yu, LI Zi-li, CHENG Yuan-peng. Corrosion Behavior of Gathering Pipeline Steel in the CO<sub>2</sub>/Oil/Water Corrosive Environment[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(3): 204-207, 213.
- [44] WEI Liang, GAO Ke-wei. Understanding the General and Localized Corrosion Mechanisms of Cr-Containing Steels in Supercritical CO<sub>2</sub>-Saturated Aqueous Environments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 792: 328-340.
- [45] 范舟, 王子瑜, 刘建仪, 等. 气田产出水介质中特殊黄铜合金对 N80 钢腐蚀性的影响[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 86-92.  
FAN Zhou, WANG Zi-yu, LIU Jian-yi, et al. Corrosion Inhibition Effect of Special Brass Alloy on N80 Steel Pipes in Gas-Field Produced Water[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 86-92.
- [46] DESIMONE M P, GORDILLO G, SIMISON S N. The Effect of Temperature and Concentration on the Corrosion Inhibition Mechanism of an Amphiphilic Amido-Amine in CO<sub>2</sub> Saturated Solution[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4033-4043.
- [47] HOU B S, ZHANG Q H, LI Y Y, et al. Influence of Corrosion Products on the Inhibition Effect of Pyrimidine Derivative for the Corrosion of Carbon Steel under Supercritical CO<sub>2</sub> Conditions[J]. Corrosion Science, 2020, 166: 108442.
- [48] SUN Chong, LIU Su-biao, LI Jian-kuan, et al. Insights into the Interfacial Process in Electroless Ni-P Coating on Supercritical CO<sub>2</sub> Transport Pipeline as Relevant to Carbon Capture and Storage[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(17): 16243-16251.
- [49] WANG Ji-xing, TANG Jun-lei, ZHANG Hai-long, et al. A CO<sub>2</sub>-Responsive Anti-Corrosion Ethyl Cellulose Coating Based on the pH-Response Mechanism[J]. Corrosion Science, 2021, 180: 109194.
- [50] 王磊, 丁超, 康绍炜, 等. 石墨烯改性抗 H<sub>2</sub>S 酸性介质高效防腐涂层技术的研究与应用[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(14): 1101-1109.  
WANG Lei, DING Chao, KANG Shao-wei, et al. Study and Application of Graphene-Enhanced Efficient Anticorrosion Coating Technology for H<sub>2</sub>S Acidic Medium[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(14): 1101-1109.
- [51] 严永博, 邓洪达, 肖雯雯, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 输送管材防腐技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(4): 436-442.  
YAN Yong-bo, DENG Hong-da, XIAO Wen-wen, et al. Research Progress on Anti-Corrosion Technologies for Supercritical CO<sub>2</sub> Pipeline[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(4): 436-442.
- [52] LUO Hong-xin, WANG Chi-jia, LIU Shu-yi, et al. A Novel Self-Cleaning Functional Composite Coating with Extraordinary Anti-Corrosion Performance in High Pressure CO<sub>2</sub> Conditions[J]. Composites Science and Technology, 2022, 228: 109638.
- [53] SUN Yue, FU Deng-yu, ZHU Yan-ji, et al. A Novel Anti-Oxygen Composite Coating and Its Corrosion Resistance Mechanism[J]. Corrosion Science, 2022, 201: 110298.
- [54] YUAN Si-cheng, SUN Yue, YANG Cheng-sheng, et al. A Novel Dual-Functional Epoxy-Based Composite Coating with Exceptional Anti-Corrosion and Enhanced Hydrogen Gas Barrier Properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 449: 137876.

责任编辑: 万长清