

DOI: 10.11973/jxgccl202010007

CO₂ 压力对 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质中 腐蚀行为的影响

张正海¹, 杨贵荣¹, 宋文明², 马 颖¹, 李亚敏¹

(1. 兰州理工大学, 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 兰州 730070)

摘 要: 利用失重法、扫描电镜、X 射线衍射等研究了 CO₂ 压力 (0.03~0.26 MPa) 对 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质中腐蚀行为的影响。结果表明: CO₂ 压力由 0.03 MPa 升高至 0.11 MPa 时, 20 钢的腐蚀速率快速增大, 而当 CO₂ 压力超过 0.11 MPa 后腐蚀速率缓慢增大; 不同试验条件下 20 钢的腐蚀速率均大于 1.193 mm·a⁻¹, 说明 20 钢发生严重腐蚀; 20 钢表面被均匀、疏松的絮状腐蚀产物覆盖而形成网絮状结构, 腐蚀产物主要由铁的氧化物和 FeCO₃ 组成; 随着 CO₂ 压力的增加, 腐蚀产物膜的致密程度增大, 产物膜的颗粒尺寸减小, 腐蚀产物形貌由絮状、针状、颗粒状向鳞片状转变。

关键词: 20 钢; 两相分层流; CO₂ 腐蚀; 腐蚀产物

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)10-0033-05

Effect of CO₂ Pressure on Corrosion Behavior of 20 Steel in CO₂/Aqueous Two-Phase Stratified Flow Liquid Phase Medium

ZHANG Zhenghai¹, YANG Guirong¹, SONG Wenming², MA Ying¹, LI Yamin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, China; 2. Lanpec Technologies Limited, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The effect of CO₂ pressure (0.03—0.26 MPa) on corrosion behavior of 20 steel in CO₂/aqueous two-phase stratified flow liquid phase medium was studied by weight loss method, scanning electron microscopy, and X-ray diffraction. The results show that the corrosion rate of 20 steel increased rapidly when the CO₂ pressure increased from 0.03 MPa to 0.11 MPa, and the corrosion rate increased slowly after the CO₂ pressure exceeded 0.11 MPa. The corrosion rates of 20 steel under different test conditions were greater than 1.193 mm·a⁻¹, indicating that 20 steel was severely corroded. 20 steel surface was covered with uniform and loose floc corrosion products, and a net floc structure was formed. The corrosion products mainly consisted of iron oxidation and FeCO₃. With the increase of CO₂ pressure, the compactness of the corrosion product film increased, the particle size of the corrosion products decreased, and the morphology of the corrosion product changed from flocculent, needle-like, and granular to scaly.

Key words: 20 steel; two-phase stratified flow; CO₂ corrosion; corrosion products

0 引 言

管道运输普遍应用于油气工业中, 而油管钢的

CO₂ 腐蚀是油气工业中不可避免的一个问题。虽然低碳钢易受湿 CO₂ 腐蚀, 但从经济效益考虑, 该材料仍是油气工业中使用最多的油管钢材料^[1-5]。由此可知, 因油管钢腐蚀而带来的经济损失与环境污染是无法估计的。因此, 对于石油或天然气基础设施的管线或装置, 降低与腐蚀相关运行成本的需求迫在眉睫^[6-9]; 而要降低该成本则需掌握油管钢的

收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51765035)

作者简介: 张正海 (1992—), 男, 陕西丹凤人, 硕士研究生

通信作者 (导师): 杨贵荣教授

腐蚀过程或机理。

目前,有关低碳钢的 CO₂ 腐蚀机理以及影响因素的研究报道较多。气相压力、pH、离子含量等环境因素以及微量元素对腐蚀产物组成的影响,腐蚀产物的形成机理等是研究低碳钢 CO₂ 腐蚀的几个重要方向。HUA 等^[10]研究发现,温度升高或 CO₂ 分压降低有利于 X65 碳钢表面保护性 Fe₃O₄ 膜层的形成,而 CO₂ 分压增加则会促进 FeCO₃ 的形成,Fe₃O₄ 膜层可有效降低表面对一般腐蚀和局部腐蚀的敏感性。腐蚀产物膜的存在会显著改变低碳钢的 CO₂ 腐蚀速率和腐蚀机理^[11-12]。CHEN 等^[13]研究表明,N80 钢的弹性模量越低,在湿润的 CO₂ 环境中其表面腐蚀产物膜的孔隙率越大,膜层对基体的防护性越差。赵国仙等^[14]通过模拟腐蚀环境研究了腐蚀介质的流速对 P110 钢 CO₂ 腐蚀行为的影响,发现腐蚀介质流速的增大有利于腐蚀性离子和电荷的传递,从而促进腐蚀,但同时也会引起腐蚀产物形貌和结构的变化,进而阻碍腐蚀性离子和电荷的传递。DE MOTTE 等^[15]研究发现,在 CO₂ 腐蚀早期 FeCO₃ 成膜过程是由复杂的晶体成核和生长组成的,且同时发生晶体成核与生长之间的竞争,从而导致不同区域析出膜结构的差异。OCHOA 等^[16]研究发现,在含 CO₂ 的 NaCl 溶液中碳素钢的腐蚀速率随着其显微组织的变化而变化,耐腐蚀性能取决于其热处理工艺。目前,有关低碳钢 CO₂ 腐蚀行为的试验大多是在静态条件下或在高压反应釜中通过模拟动态管路运行而进行的,有关低碳钢在气液两相分层流液相介质中的动态腐蚀行为研究较少,而有关 CO₂ 分压对其腐蚀行为影响的研究更少。因此,作者以 20 钢为研究对象,研究了不同 CO₂ 压力下钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀不同时间后的腐蚀速率、腐蚀产物形貌、腐蚀产物物相组成及腐蚀机理等。

1 试样制备与试验方法

试验材料为 20 钢无缝管,尺寸为 $\phi 18 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,显微组织为珠光体和铁素体,化学成分如表 1 所示。采用线切割方法截取长 10 mm 的环形试样,依次用 240#, 480#, 800#, 1000#, 1200#, 1500#, 2000# 砂纸打磨内表面,用 800# 砂纸在预磨机上打磨外表面,再放入丙酮溶液中超声清洗 30 min,然后用去离子水清洗,无水乙醇脱水,冷风吹干。用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测量试样的长度、内径、壁

厚,测 3 次取平均值,然后用丙酮和蒸馏水清洗试样。用精度为 0.1 mg 的分析天平称取试样的质量,测 3 次取平均值,然后将试样存放于干燥器中待用。

表 1 20 钢的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of 20 steel (mass) %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25	≤0.30	≤0.25

在水平管道中模拟动态分层流下 20 钢的 CO₂ 腐蚀行为,将试样内壁上表面,即处于 CO₂ 环境中的部分用丙烯酸酯密封以防止被腐蚀,腐蚀介质为室温 CO₂/水两相分层流液相介质,水为自来水(来自黄河地表水)。根据 Mandhane 流形图,CO₂、水的流速分别设定为 0.271,0.106 m·s⁻¹;通过调节阀门将管道内 CO₂ 压力设置为 0.03,0.06,0.11,0.16,0.21,0.26 MPa,试验时间为 0.5,1,2,3 h。在试验开始前,打开 CO₂ 气瓶阀门和自来水开关,将 CO₂ 和水泵入混合室,保持 2 h 除去管道中的氧气,然后调节阀门将 CO₂ 压力调至所需数值。腐蚀试验结束后,将试样用蒸馏水清洗,无水乙醇脱水,冷风吹干。采用 JEOL-JSM-6700 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样表面腐蚀产物形貌,采用能量色散 X 射线能谱仪 (EDS) 表征腐蚀产物的微区化学成分。采用 Bruker D8 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析,使用铜靶, K_α 射线,工作电压为 40 kV,工作电流为 150 mA,步长为 0.02°,测试范围为 10°~100°,采用 MDI Jade 软件与 PDF-2 数据库自动匹配峰值位置,判定腐蚀产物的物相。将腐蚀后的试样放置在超声波清洗器中清洗至腐蚀产物完全清除后,用精度为 0.1 mg 的分析天平称取试样质量,计算腐蚀速率,其计算公式为

$$R = \frac{8.76 \times 10^7 \times (m - m_1)}{St\rho} \quad (1)$$

式中: R 为腐蚀速率, mm·a⁻¹; m, m_1 分别为腐蚀前后试样的质量, g; S 为腐蚀部分的面积, cm²; ρ 为试样的密度, kg·m⁻³; t 为腐蚀时间, h。

2 试验结果与讨论

2.1 腐蚀速率

由图 1 可知: 20 钢在腐蚀介质中腐蚀不同时间时的腐蚀速率均随着 CO₂ 压力的增加而增大, 当 CO₂ 压力由 0.03 MPa 升高至 0.11 MPa 时腐蚀速率快速增大, 而当 CO₂ 压力超过 0.11 MPa 后腐蚀速率的变化趋于平缓, 但仍在缓慢增加; 在相同

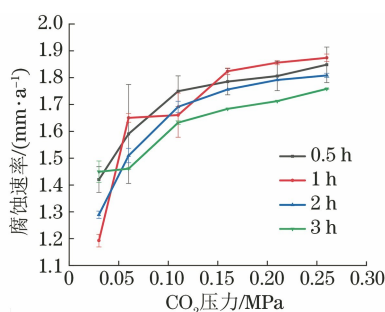


图 1 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀不同时间时腐蚀速率随 CO₂ 压力的变化曲线

Fig. 1 Curves of corrosion rate vs CO₂ pressure of 20 steel in CO₂/aqueous two-phase stratified flow liquid phase for different times

CO₂ 压力下随着腐蚀时间的延长, 20 钢的腐蚀速率整体呈减小趋势, 且腐蚀速率的误差范围明显缩小。不同试验条件下 20 钢的腐蚀速率均大于 $1.193 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 按照 NACE RP-0775-91 标准, 判定 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质的腐蚀程度均属于严重腐蚀。

2.2 腐蚀形貌

由图 2 可以看出: 在腐蚀时间为 1 h 时, 当 CO₂/水两相分层流液相中 CO₂ 压力为 0.03 MPa 时, 试样表面粗糙, 出现浅黑色区域(图中椭圆形区域所示)和深灰色区域(图中矩形区域所示); 浅黑色区域被均匀、疏松的絮状产物覆盖, 形成疏松的网絮状结构, 在絮状产物表面分布着白色的颗粒状物质(图中箭头位置所示), 该区域表面存在条带状划痕, 划痕的最大深度约为 $0.5 \mu\text{m}$; 深灰色区域表面也被少量絮状产物覆盖, 形成疏松的网絮状结构, 但是其划痕较浅。当 CO₂ 压力增加至 0.06 MPa 时, 试样表面同样呈现浅黑色与深灰色两种区域, 但二者的分布差异降低, 经放大后发现试样表面产物的致密程度提高, 絮状特征明显, 絮状产物表面的白色颗粒状物质的直径减小, 颗粒的致密程度增加。当 CO₂ 压力增加至 0.11 MPa 时, 试样表面仍由浅黑色与深灰色两种区域组成; 浅黑色区域面积明显增大, 且被一层密集而细小的颗粒状物质覆盖, 在浅黑色区域中心存在一个较深的黑色腐蚀坑, 可见腐蚀由缺陷处开始而后向周围蔓延, 而且细小颗粒状物质的分布密度由浅黑色区域的中心向边缘处逐渐降低; 放大后发现, 浅黑色区域中颗粒状腐蚀产物由针片状产物聚集而成, 针片状产物的间隙可见微裂纹; 深灰色区域存在非常稀疏的颗粒状物质, 放大后发现该区域表面均匀覆盖了一层疏松的絮状产物膜, 其表面仍残留有划痕痕迹, 且产物膜中出现微裂纹, 同

时膜层表面分布着非常稀疏的白色絮状产物, 产物膜的致密程度较浅黑色区域的低。当 CO₂ 压力进一步增加至 0.16 MPa 时, 试样表面形貌特征均匀一致, 腐蚀坑表面均匀且密集分布着白色针状点腐蚀坑, 腐蚀坑表面完全被颗粒状腐蚀产物覆盖, 腐蚀产物由针状物质团簇而成, 腐蚀产物更加致密, 产物膜上的裂纹更加明显, 裂纹的最大宽度约为 $0.9 \mu\text{m}$, 且裂纹处也被颗粒状腐蚀产物覆盖。在 CO₂ 压力为 0.21 MPa 时, 试样表面腐蚀产物分布均匀且无明显分区特征, 图中箭头处可见晶界形状特征, 说明腐蚀产物并不是绝对均匀沉积在基体表面, 而是可能优先沉积在晶界处; 较厚腐蚀产物膜之间是由相对较薄的膜层相连的, 从而形成厚薄相间网状形貌的腐蚀产物膜; 腐蚀产物膜较厚区域的细小颗粒状腐蚀产物密集分布在基体表面, 已观察不到划痕痕迹。当 CO₂ 压力增至 0.26 MPa 时, 试样表面呈现明显的分区特征; 图中圆形区域的中心部位存在腐蚀坑, 其边缘部位存在可剥离鳞片状腐蚀产物, 该区域存在剥离痕迹(图中箭头位置所示); 椭圆形区域具有形成鳞片状产物的趋势, 腐蚀坑附近产物膜呈双层结构特征, 经放大后发现该区域表面为致密程度高的鳞片状产物膜, 该膜层较薄且其中存在微裂纹, 而鳞片状致密膜下方为由密集颗粒状产物构成的内层产物膜, 密集颗粒由更为细小的针絮状产物聚集而成, 且内层产物膜中也存在微裂纹。由此可知, 腐蚀产物膜的致密程度随着 CO₂ 压力的增加而增大, 但组成产物膜的颗粒尺寸减小, 这与不同 CO₂ 压力下的腐蚀速率变化趋势相吻合。

由图 3 可知, CO₂ 压力为 0.11 MPa 下 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀不同时间后其表面腐蚀产物的物相组成基本相同, 均由 Fe、Fe₃C、FeCO₃、Fe₂O₃ 相组成。Fe、Fe₃C 是 20 钢固有的相, FeCO₃、Fe₂O₃ 是腐蚀产物膜的主要组成部分。随着腐蚀时间的延长, FeCO₃、Fe₂O₃ 两相对应的衍射峰强度与衍射峰所包围的积分面积都增加, 表明这两种产物的含量随着腐蚀时间的延长而增加。

由图 4 可以看出: 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀 2 h 后, 其表面存在絮状、颗粒状、鳞片状 3 种形貌的腐蚀产物, 絮状产物之间结合紧密, 并且密集地沉积在试样表面, 颗粒状产物由许多丝状物团簇而成, 散落分布在絮状产物表面, 可剥离鳞片状腐蚀产物沉积在颗粒状产物上方。由表 2 可知, 铁、碳与氧是组成腐蚀产物的主要元素, 腐蚀产物应

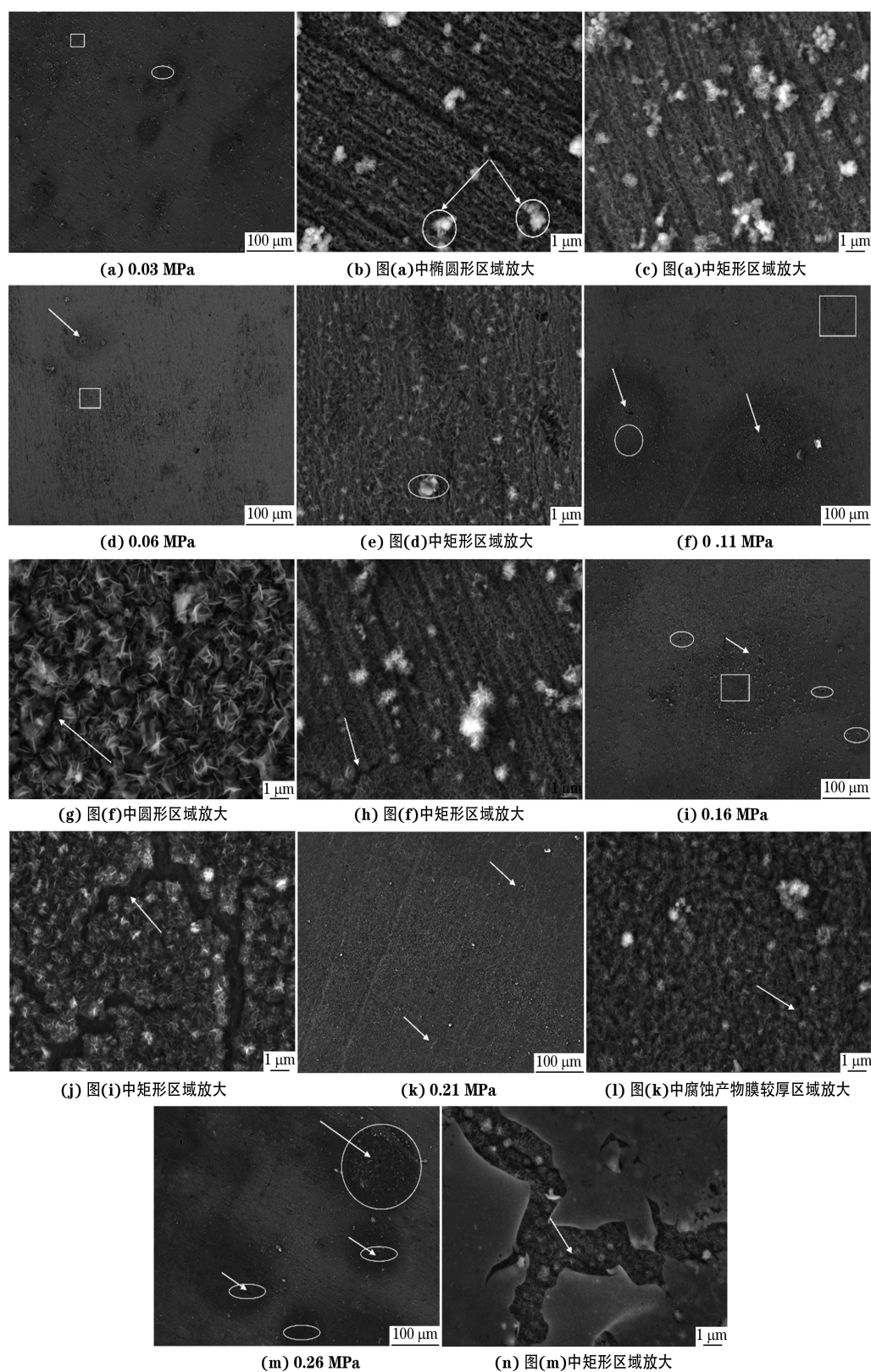
图 2 不同 CO₂ 压力下腐蚀 1 h 后 20 钢的腐蚀形貌

Fig.2 Corrosion morphology of 20 steel after corrosion for 1 h under different CO₂ pressures: (b) amplification of oval area in Fig. (a); (c) amplification of rectangle area in Fig. (a); (e) amplification of rectangle area in Fig. (d); (g) amplification of circle area in Fig. (f); (h) amplification of rectangle area in Fig. (f); (j) amplification of rectangle area in Fig. (i); (l) amplification of area with thick corrosion product film in Fig. (k) and (n) amplification of rectangle area in Fig. (m)

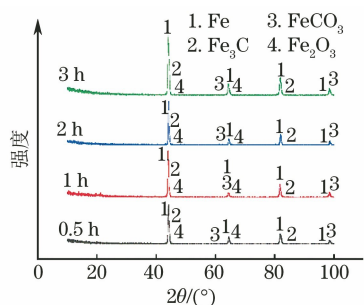


图 3 CO₂ 压力为 0.11 MPa 条件下腐蚀不同时间后 20 钢表面腐蚀产物的 XRD 谱

Fig. 3 XRD spectra of surface corrosion products of 20 steel corroded under CO₂ pressure of 0.11 MPa for different times

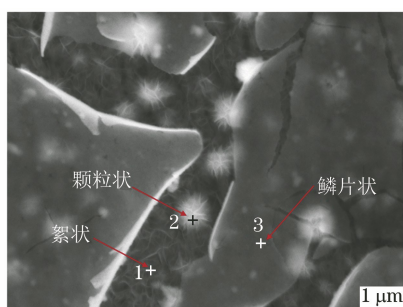


图 4 CO₂ 压力为 0.21 MPa 条件下腐蚀 2 h 后 20 钢表面腐蚀产物的微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of surface corrosion products of 20 steel after corrosion for 2 h under CO₂ pressure of 0.21 MPa

为铁的氧化物和 FeCO₃, 絮状、颗粒状、鳞片状腐蚀产物中元素的含量不同。

表 2 图 4 中不同位置的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of different positions in Fig. 4

测试位置	Fe		C		O	
	质量分数	原子分数	质量分数	原子分数	质量分数	原子分数
1	89.22	68.02	3.73	13.24	7.04	18.74
2	81.43	53.11	6.09	18.46	12.48	28.42
3	75.20	43.78	8.63	23.36	16.17	32.86

2.3 分析与讨论

随着 CO₂/水两相分层流液相中 CO₂ 压力从 0.03 MPa 增加到 0.11 MPa, 20 钢腐蚀速率增加得较明显, 而 CO₂ 压力大于 0.11 MPa 时腐蚀速率缓慢增大。在形成完整产物膜前, 试样表面直接与腐蚀介质接触, 表面被腐蚀成网状形貌。基体内部显露在外的渗碳体(Fe₃C)作为电化学反应的阴极, 其周围的铁基体作为阳极而在试样表面发生电化学反应; 并且随着腐蚀的进行, 构成原电池的数量增多。电化学反应以及由铁基体与腐蚀性离子形成的化学

反应共同存在于基体表面, 这可能就是前期腐蚀速率变化明显的原因。在气液两相分层流条件下, 气液流速较慢, 在基体表面形成浓度边界层。从基体表面产生的 Fe²⁺ 进入边界层内, 边界层内的离子浓度开始缓慢增大, 直至大于 Fe²⁺ 与 CO₃²⁻ 的浓度积之后便开始形成沉淀。此时残留的 Fe₃C 作为电化学反应的阴极, 为腐蚀产物提供了更好的附着骨架, 同时作为前驱体改变腐蚀产物的沉积成核方式^[17]。少量的 Fe²⁺ 进入腐蚀介质后, 形成腐蚀产物的晶体分子沿某一晶向优先生长而形成丝状物, 而后在丝状产物表面继续长大, 形成以丝状物为中心的絮状产物, 进而演变成颗粒状产物。随着 CO₂ 压力的增加, 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀后, 腐蚀产物逐渐沉积在 Fe₃C 表面, 将残留的 Fe₃C 完全包裹在腐蚀产物中, 致使基体表面形成晶粒粗大、疏松多孔的产物膜; 由于腐蚀介质中离子的浓度增加, 腐蚀产物继续沉积在基体表面, 致使基体表面腐蚀产物膜变得致密, 最终形成鳞片状腐蚀产物膜, 从而使传质过程受到抑制, 因此腐蚀速率增加缓慢。

3 结 论

(1) 当 CO₂ 压力由 0.03 MPa 升高至 0.11 MPa 时, 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质中的腐蚀速率快速增大, 而当 CO₂ 压力超过 0.11 MPa 后腐蚀速率缓慢增大; 不同试验条件下 20 钢的腐蚀速率均大于 1.193 mm·a⁻¹, 说明 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质中发生严重腐蚀。

(2) 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相中腐蚀后, 其表面被均匀、疏松的絮状产物覆盖而形成疏松的网絮状结构, 腐蚀产物以缺陷处 Fe₃C 为骨架成膜并向周围扩展。随着 CO₂ 压力的增加, 腐蚀产物膜的致密程度增大, 组成产物膜的颗粒尺寸减小, 腐蚀产物形貌由絮状、针状、颗粒状向鳞片状转变; 腐蚀产物主要由铁的氧化物和 FeCO₃ 组成。

(3) 20 钢在 CO₂/水两相分层流液相介质中腐蚀后其表面形成双层膜结构, 外层膜致密程度较高, 内层膜晶粒粗大、疏松多孔。

参考文献:

- [1] 林冠发, 白真权, 赵国仙, 等. CO₂ 压力对金属腐蚀产物膜形貌结构的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(5): 284-288.
- [2] 李建平, 赵国仙, 郝士明. 几种因素对油套管钢 CO₂ 腐蚀行为影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4): 241-244.

(下转第 42 页)

- acoustic emission source[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1990, 38(4):611-618.
- [3] LU Y L, WANG J, LI X C, et al. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 723: 204-211.
- [4] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 862-871.
- [5] IMMARIGEON J P, HOLT R T, KOUL A K, et al. Lightweight materials for aircraft applications[J]. *Materials Characterization*, 1995, 35(1):41-67.
- [6] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 280(1):102-107.
- [7] LU Y L, WANG J, LI X C, et al. Effect of pre-deformation on the microstructures and properties of 2219 aluminum alloy during aging treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 699:1140-1145.
- [8] YANG Y L, ZHAN L H, SHEN R L, et al. Effect of pre-deformation on creep age forming of 2219 aluminum alloy: Experimental and constitutive modeling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 683:227-235.
- [9] MONDOL S, KUMAR S, CHATTOPADHYAY K. Effect of thermo-mechanical treatment on microstructure and tensile properties of 2219ScMg alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759:583-593.
- [10] YANG Y L, ZHAN L H, MA Q Q, et al. Effect of pre-deformation on creep age forming of AA2219 plate: Springback, microstructures and mechanical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229:697-702.
- [11] AN L H, CAI Y, LIU W, et al. Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(S2):370-375.
- [12] 李小强, 李东升, 周贤宾, 等. 预变形对 LY12 铝合金板热处理后晶粒度的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2010, 18(2):238-241.
- [13] SACHTLEBER M, RAABE D, WEILAND H. Surface roughening and color changes of coated aluminum sheets during plastic straining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1):68-76.
- [14] 王喜琴, 张贵一, 乐斌, 等. 固溶处理工艺对 2219 铝合金力学性能的影响[J]. *上海航天*, 2019, 36(5):133-138.
- [15] 方杰, 易幼平, 黄始全, 等. 预拉伸变形对 HHFM 铝合金环件组织与力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33(9):3062-3066.
- [16] ZUEV L B, ZARIKOVSKAYA N V. Hall-petch relation and the localization of plastic deformation in aluminum [J]. *Russian Metallurgy*, 2011, 4:285-289.
- [17] 向剑波, 王博, 周蓉蓉, 等. 热处理对 8% 预变形 2219 铝合金组织与性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(2):75-81.
- (上接第 37 页)
- [3] 赵国仙, 严密林, 陈长风, 等. 影响碳钢 CO₂ 腐蚀速率因素的研究[J]. *石油矿场机械*, 2001, 30(增刊 1):72-73.
- [4] 赵雪会, 黄伟, 张华礼, 等. 模拟油田 CO₂ 驱采出环境下管柱腐蚀规律研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(5):13-20.
- [5] 刘瑞刚, 金玉刚, 夏静森, 等. P110 碳钢在 CO₂ 多相流介质中的腐蚀特征[J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2010, 27(5):13-16.
- [6] LIU A Q, BIAN C, WANG Z M, et al. Flow dependence of steel corrosion in supercritical CO₂ environments with different water concentrations[J]. *Corrosion Science*, 2018, 134:149-161.
- [7] LI W, POTS B F M, ZHONG X K, et al. Inhibition of CO₂ corrosion of mild steel study of mechanical effects of highly turbulent disturbed flow[J]. *Corrosion Science*, 2017, 126:208-226.
- [8] LI M Z, LIU Z Y, ZHAO Y, et al. Effects of corrosion defect and tensile load on injection pipe burst in CO₂ flooding[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 366:65-77.
- [9] SHAMSA A, BARKER R, HUA Y, et al. The role of Ca²⁺ ions on Ca/Fe carbonate products on X65 carbon steel in CO₂ corrosion environments at 80 and 150 °C [J]. *Corrosion Science*, 2019, 156:58-70.
- [10] HUA Y, XU S S, WANG Y, et al. The formation of FeCO₃ and Fe₃O₄ on carbon steel and their protective capabilities against CO₂ corrosion at elevated temperature and pressure [J]. *Corrosion Science*, 2019, 157:392-405.
- [11] HUA Y, BARKER R, CHARPENTIER T, et al. Relating iron carbonate morphology to corrosion characteristics for water-saturated supercritical CO₂ systems[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015, 98:183-193.
- [12] WEI L, PANG X L, LIU C, et al. Formation mechanism and protective property of corrosion product scale on X70 steel under supercritical CO₂ environment[J]. *Corrosion Science*, 2015, 100:404-420.
- [13] CHEN C F, LU M X, ZHAO G X, et al. Mechanical properties of CO₂ corrosion scale on N80 well tube steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(2):175-181.
- [14] 赵国仙, 吕祥鸿, 韩勇. 流速对 P110 钢腐蚀行为的影响[J]. *材料工程*, 2008(8):8-11.
- [15] DE MOTTE R A, BARKER R, BURKLE D, et al. The early stages of FeCO₃ scale formation kinetics in CO₂ corrosion [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 216:102-111.
- [16] OCHOA N, VEGA C, PÉBÈRE N, et al. CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, 156:198-205.
- [17] 赵国仙, 陈长风, 路民旭, 等. CO₂ 腐蚀的产物膜及膜中物质交换通道的形成[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2002, 22(6):363-366.