

不同材质油套管钢的 CO₂ 腐蚀行为

谢涛, 林海, 许杰, 窦蓬, 陈毅, 刘海龙

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300451)

摘 要: 目的 不同管材的 CO₂ 腐蚀行为存在差异, 为优选经济型抗 CO₂ 腐蚀材质油套管, 探究不同腐蚀条件下常规管材的 CO₂ 腐蚀特征。方法 以实际油田的地层水样为腐蚀介质, 在高温高压的条件下, 对不同材质的油套管进行模拟实验。利用 X 射线衍射仪(XRD)分析腐蚀试样表面腐蚀产物的形貌特征, 研究 CO₂ 分压、温度、测试时间对油套管腐蚀速率的影响规律。结果 随着 CO₂ 分压的增加, 普通碳钢和低 Cr 钢的腐蚀速率显著变化, 当 CO₂ 分压为 0.3 MPa 时, 普通碳钢腐蚀速率为 2.2021 mm/a, 而 13Cr 的腐蚀速率很低, 仅为 0.1052 mm/a, 未表现出明显的规律; 腐蚀速率随着温度的升高呈先增加后降低的变化规律, N80, 1Cr 钢的腐蚀速率远高于 13Cr 钢; 在较短的测试周期内, N80, 1Cr, 3Cr 油套管钢的腐蚀速率略有增加, 随着测试周期持续增加, 油套管钢的腐蚀速率明显下降; 从腐蚀形貌来看, 普通碳钢试样的腐蚀程度严重, 以均匀腐蚀为主, 1Cr, 3Cr 钢表面存在少量的局部浅斑, 以局部腐蚀为主; 13Cr 材质钢的表面平整, 有光泽且无点蚀, 腐蚀程度轻微。结论 普通碳钢的腐蚀速率对 CO₂ 分压的影响比含 Cr 合金材质钢更敏感, 温度和测试周期均对金属表面的腐蚀产物产生影响, 随着温度和测试周期的持续增加, 金属表面形成 FeCO₃ 保护膜, 含 Cr 钢表面因铬的富集形成钝化膜, 抑制油套管的腐蚀速率, 研究成果对 CO₂ 腐蚀环境中的油套管选材具有理论指导意义。

关键词: CO₂ 腐蚀; 腐蚀速率; 腐蚀形貌; 影响因素; 耐腐蚀性; 油套管

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)01-0211-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.01.034

CO₂ Corrosion Behavior of Oil Casing Steel Made from Different Materials

XIE Tao, LIN Hai, XU Jie, DOU Peng, CHEN Yi, LIU Hai-long

(CNOOC China Limited Tianjin Branch, Tianjin 300451, China)

ABSTRACT: In light of difference in CO₂ corrosion behavior of different steel casings, the work aims to explore CO₂ corrosion characteristics of conventional steel materials under different corrosion conditions in order to optimize economical CO₂ corrosion resistant oil casings. With formation water of actual oilfield as corrosive medium, simulation experiment was performed to oil casings made from different materials. Morphology characteristics of corrosion products on the surface of corrosion samples were analyzed by X-ray diffractometer so as to study the influences of CO₂ partial pressure, temperature and test period on corrosion rate of oil casings. With the increase of CO₂ partial pressure, the corrosion rate of normal carbon steel and low Cr steel changed significantly; at the CO₂ partial pressure of 0.3 MPa, corrosion rate of normal carbon steel was 2.2021 mm/a and 13Cr as low as 0.1052 mm/a, showing no obvious law; as temperature increased, the corrosion rate firstly increased then decreased,

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-12-06

Received: 2016-06-05; Revised: 2016-12-06

基金项目: 总公司科技重大专项(YXKY-2015-TJ-04)

Fund: Supported by Science Fund for CNOOC Science and Technology Major Projects(YXKY-2015-TJ-04)

作者简介: 谢涛(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向为油套管腐蚀与防护。

Biography: XIE Tao(1981—), Male, Engineer, Research focus: casing corrosion and protection.

corrosion rate of steel N80 and 1Cr steel was far higher than that of 13Cr steel. Corrosion rate of steel N80, 1Cr and 3Cr oil casings increased slightly in shorter test period and decreased significantly as the test period increased continuously; as for corrosion morphology, normal carbon steel sample was subject to serious corrosion and mainly uniform corrosion. There was a small amount of local light spots with local corrosion on the surface of 1Cr and 3Cr steel; the surface of 13Cr steel was smooth, glossy, pitting-free and slightly corroded was. The influence of corrosion rate of normal steel on CO_2 partial pressure is more sensitive than that of Cr alloy steel. Temperature and test period have influences on corrosion products on the surface of metal. With the continuous increase of temperature and test cycle, FeCO_3 protection film takes shape on the surface of metal. A passivation film takes shape on the surface of steel containing Cr due to enrichment of Chromium, which has inhibited the corrosion rate of oil casings. The research has theoretical guiding significance on material selection of oil casings in CO_2 corrosion environment.

KEY WORDS: CO_2 corrosion; corrosion rate; corrosion morphology; influence factors; corrosion resistance; oil casings

CO_2 溶于水后对井下管柱有极强的腐蚀性, 在相同的 pH 值条件下, CO_2 水溶液的腐蚀性比盐酸还强^[1]。在油气的开采过程中, CO_2 腐蚀始终困扰着油气工业的发展^[2-4]。国内外的 CO_2 腐蚀已成为一个不容忽视的问题, 挪威的 Ekofisk 油田、美国的 Texas 油田、英国北海油田及中东油田均存在 CO_2 腐蚀问题, 我国的塔里木油田、四川油田、吉林油田及渤海油田都因 CO_2 腐蚀而造成了油套管的严重腐蚀情况^[5-9]。 CO_2 来源主要来自 2 个方面, 一方面, CO_2 作为原油或天然气的组分之一存在于油气中; 另一方面, 3 次采油中回注 CO_2 强化采油工艺也会导致 CO_2 回注进入原油的钻采集输系统中。最典型的 CO_2 腐蚀特征是呈现局部点蚀、轮癣状腐蚀和台地腐蚀^[10-11]。

针对 CO_2 的腐蚀问题, 目前的主要研究方向集中在环境及材料因素对腐蚀速率的影响, 研究的腐蚀类型主要是均匀腐蚀。对于 CO_2 腐蚀问题的研究, 已经从由流速与腐蚀产物膜决定腐蚀速率、腐蚀形态, 逐渐转移到腐蚀产物膜与多相流腐蚀方面^[12-16]。 CO_2 腐蚀是多因素的耦合, 其腐蚀现象具有多样性, 部分 CO_2 腐蚀的基本理论没有统一的表述, 由于受到客观

条件的限制, 很多试验仅能考虑有限的影响因素, 这导致研究结果存在一定局限性且大量的研究结果存在着许多矛盾^[17-20]。 CO_2 腐蚀研究的重要意义在于油套管材的合理选取和防护, 文中选取渤海油田中常见的 5 种材质的油套管, 模拟现场腐蚀环境进行试验研究, 探讨温度、 CO_2 分压、时间对油套管腐蚀行为及腐蚀速率的影响, 分析腐蚀产物的形貌和成分, 对比不同材质油套管的腐蚀特征, 为油田油套管选材提供数据和理论支撑。

1 材质和试验过程

1.1 试样成分检测与制备

试验材料选取 5 种不同材质的油套管钢, 分别为 N80, L80, 1Cr, 3Cr, 13Cr, 其化学成分见表 1。腐蚀试验的试样见图 1, 尺寸为 50 mm×10 mm×3 mm, 且一端有 6 mm 圆孔的片状金属块。将试样用砂纸逐级打磨至 1000[#], 再先后采用蒸馏水清洗, 丙酮除油, 冷风吹干等步骤处理试样表面, 并采用聚四氟乙烯材质的挂片架和螺栓固定试样。

表 1 不同油套管钢的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of different oil tube and casing steels

wt. %

Materials	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
N80	0.24	0.004	0.013	0.22	1.19	0.036	0.013	0.021	≤0.01	Balance
L80	0.29	0.003	0.01	0.21	1.35	0.24	—	≤0.01	0.088	Balance
1Cr	0.18	0.002	0.02	0.021	0.004	1.02	0.01	0.013	—	Balance
3Cr	0.16	0.002	0.009	0.22	0.52	3.1	0.05	0.35	—	Balance
13Cr	0.19	0.004	0.015	0.28	0.48	12.94	0.1	0.089	—	Balance

1.2 过程及条件

高温高压 CO_2 腐蚀试验选用 CWYF-1 高温高压釜, 其结构见图 2。利用油田地层水配置液体进行模拟实验, 该地层水中, K^+ 和 Na^+ 的质量浓度总共为

8949.99 mg/L, Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} 的质量浓度分别为 437.76, 176.35, 3783.24, 978.21, 11 122.32, 1228.52 mg/L, 地层水的 pH 值为 7.52。试验步骤如下所述。

1) 高温高压釜内加入模拟液体后, 将挂片试样

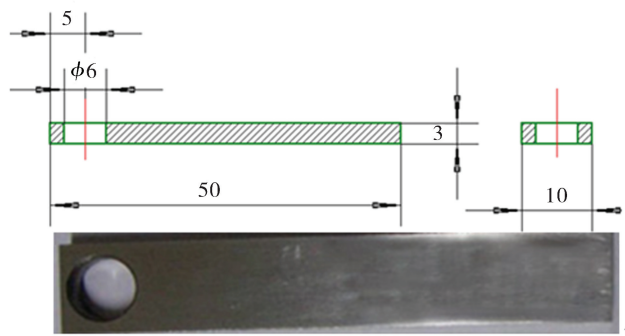


图 1 腐蚀试验的试样
Fig.1 The sample of corrosion experiment

安装在聚四氟乙烯环上并置入釜中。
2) 在高压釜内，先用高纯氮除氧，升温至 45 ℃ 排出氧气，通入高纯氮除氧大致 2~4 h，再通入 CO₂ 排除釜内氮气，最后升温至预定温度。

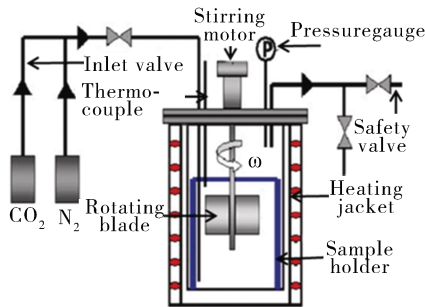


图 2 高温高压釜结构
Fig.2 The structure diagram of HTHP autoclave

3) 按设计流速设定电动机转速，打开电动机搅拌桨旋转，模拟流速。
4) 通入 CO₂ 至设计压力，开始计时，达到设定的实验时间。

5) 实验结束，将样品取出，根据试验目的，将腐蚀试样分类处理。一部分试样进行 XRD (X 射线衍射)、EDS (能谱分析)；一部分试样用体积比为 10:1 (水:浓盐酸) 的盐酸清洗腐蚀产物膜，再用清水、丙酮冲洗，然后用电吹风吹 5 min 充分干燥。拍摄微距照片，记录表面腐蚀情况，按照 NACE RP0775—2005 规定的方法计算出腐蚀速率。NACE RP0775-2005 给出金属均匀腐蚀速率 v_{CR} (Corrosion Rate)计算公式见式(1):

$$v_{CR} = \frac{3.65 \times 10^5 \Delta m}{\rho A t} \quad (1)$$

式中： v_{CR} 为均匀腐蚀速率 (mm/a)； Δm 为质量损失 (g)； A 为挂片的表面积 (mm²)； ρ 为钢材的密度 (g/cm³)； t 为试验测试时间 (d)。
文中主要考虑温度、CO₂ 分压、时间对油套管钢腐蚀特征的影响，试验参数见表 2。

表 2 高温高压腐蚀试验参数
Tab.2 Experimental parameters

Test	CO ₂ 分压 /MPa	温度/℃	含水率/%	流速 /(m·s ⁻¹)	试验时间/d
A1	0.1	80	80	2	7
A2	0.2	80	80	2	7
A3	0.3	80	80	2	7
B1	0.3	70	80	2	14
B2	0.3	80	80	2	14
B3	0.3	90	80	2	14
B4	0.3	110	80	2	14
C1	0.3	80	80	2	30

2 结果及分析

2.1 腐蚀速率

N80, L80, 1Cr, 3Cr, 13Cr 等 5 种材质油套管钢在不同 CO₂ 分压下 (A1, A2, A3) 的平均腐蚀速率见图 3。由图 3 可知，5 种材料的腐蚀速率随 CO₂ 分压的升高而增大，由于 13Cr 钢具有较好的耐蚀性，在 CO₂ 分压为 0.3 MPa 时，其腐蚀速率较低，仅为 0.1052 mm/a，没有表现出明显的规律。

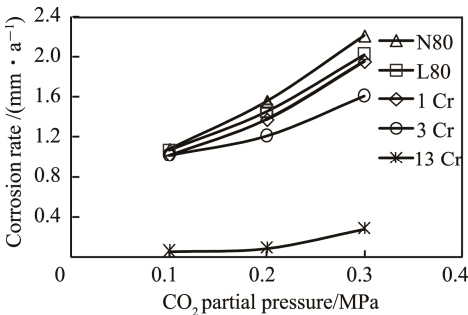


图 3 5 种材质钢不同 CO₂ 分压下腐蚀速率
Fig.3 Corrosion rates of five kinds of steels under different CO₂ partial pressure

N80, 1Cr, 13Cr 等 3 种材质油套管钢在不同温度下 (B1, B2, B3, B4) 的平均腐蚀速率见图 4。在 70~110 ℃ 范围内，腐蚀速率随着温度的升高呈先增加后降低的变化规律，存在一个临界温度。当温度低于临界温度时，腐蚀速率随温度的升高而增大，超过临界温度后，随温度的提高而腐蚀速率降低，临界温度处在 90~110 ℃ 之间。在 90 ℃ 时，N80, 1Cr 钢的腐蚀速率分别为 2.4727 和 2.4364 mm/a，而 13Cr 的腐蚀速率为 0.2909 mm/a。

在 80 ℃，CO₂ 分压 0.3 MPa，含水率 80% 的条件下，N80, 1Cr, 3Cr 等 3 种材质油套管钢在不同试验周期内 (A3, B2, C1) 的平均腐蚀速率见图 5。由图 5 可知，测试周期从 7 d 增加到 14 d，3 种材质的油套管钢的腐蚀速率略有增加，测试周期达到 30 d

时, 3 种材质钢的腐蚀速率明显下降。测试周期为 7 d 时, 3 种材质油套管钢的腐蚀速率分别为 2.2020, 1.9507, 1.6108 mm/a, 测试周期为 30 d 时, 3 种材质钢的腐蚀速率分别为 1.1367, 0.926, 0.785 mm/a, 这说明随着试验周期的增加, 金属表面生成具有保护作用的 FeCO_3 膜, 对油套管的腐蚀过程起到抑制作用, 腐蚀速率降低并趋于平缓。

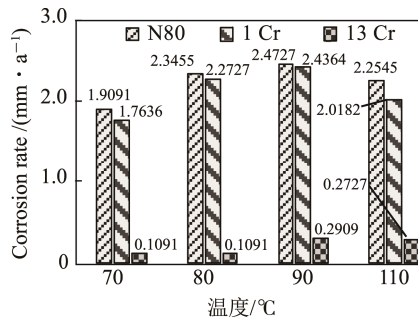


图 4 不同温度下的油套管腐蚀速率

Fig.4 Corrosion rates of different steels under different temperature conditions

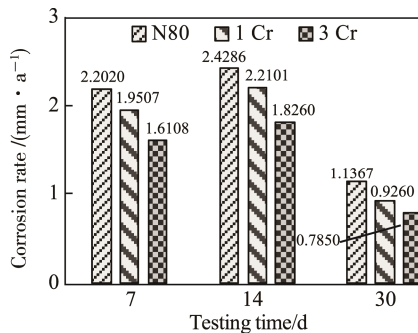


图 5 不同测试周期内的油套管腐蚀速率

Fig.5 Corrosion rates of different steels under different test periods

2.2 腐蚀形貌特征

取出部分挂片试样, 用蒸馏水冲去挂片表面的腐蚀介质, 取 50 mL 的 HCl , 500 mL 的 H_2O , 3 ~ 5 g 的六次甲基四胺配置清洗液, 用配好的清洗液处理试样表面, 再用棉签重复擦洗表面, 最后使用丙酮清洗并烘干, 观察油套管表面的腐蚀形貌。在含水率 80%, CO_2 分压 0.3 MPa, 试验周期 7 d 的腐蚀条件下, N80, L80, 1Cr, 3Cr, 13Cr 等 5 种材质油套管钢在温度 80 °C 和 90 °C 所对应的表面腐蚀形貌见表 3 和表 4。由表 3 和表 4 可知, 不含 Cr 合金的 N80, L80 试样腐蚀程度严重, 腐蚀形貌变化明显, 以均匀腐蚀为主; 1Cr, 3Cr 钢表面存在少量的局部浅斑, 以局部腐蚀为主; 13Cr 材质钢的表面平整, 有光泽且无点蚀, 以均匀腐蚀为主, 腐蚀程度轻微。

在含水率 80%, CO_2 分压 0.3 MPa, 80 °C, 试验周期为 7 d 的腐蚀条件下, 利用布鲁克 Quantax 400 能谱仪对 L80, 3Cr 试样表面的腐蚀产物膜进行 EDAX 能谱分析 (见图 6)。

由图 6 可知, L80, 3Cr 表面腐蚀产物主要由 Fe, C, O, S, Ca, Mn 组成, 以铁的氧化物为主, 而 3Cr 钢的腐蚀产物中铬含量高于基本中的铬含量。

利用 D/MAX2500 X 射线衍射仪(日本理学公司)对 L80, 3Cr 试样表面的腐蚀产物膜进行 XRD 分析 (见图 7)。L80 腐蚀产物主要成分为 FeCO_3 , 而 3Cr 表面腐蚀产物含有一定量的 Cr_7C_3 和 FeCO_3 晶体。

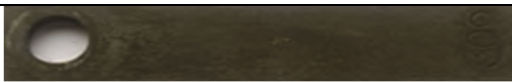
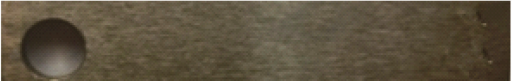
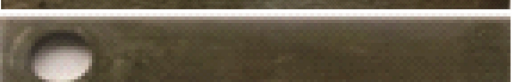

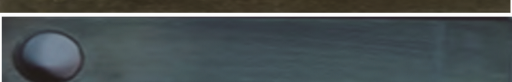
3Cr 腐蚀试样的截面 SEM 形貌见图 8, 可知 3Cr 钢腐蚀产物膜分布不均匀, 表面出现铬富集现象, 对金属基体有一定的保护作用, 从而抑制点蚀。

表 3 不同材质钢在 80 °C 环境中的宏观形貌

Tab.3 Macro-morphology of different steel samples after corrosion at 80 °C

材质	腐蚀后试样	腐蚀情况描述
N80	1	严重均匀腐蚀
L80	2	严重均匀腐蚀
1Cr	3	均匀腐蚀, 轻微点蚀
3Cr	4	均匀腐蚀
13Cr	5	表面平整, 无点蚀

表 4 不同材质钢在 90 ℃ 环境中的宏观形貌
Tab.4 Macro-morphology of different steel samples after corrosion at 90 ℃

材质		腐蚀后试样	腐蚀情况描述
N80	1		严重均匀腐蚀
L80	2		均匀腐蚀，有少量点蚀
1Cr	3		均匀腐蚀，轻微点蚀
3Cr	4		轻微局部腐蚀
13Cr	5		表面平整，无点蚀

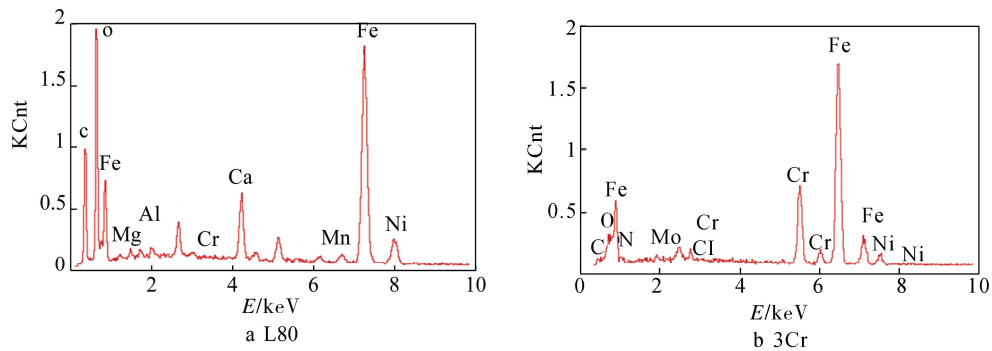


图 6 L80 和 3Cr 表面产物的截面能谱分析
Fig.6 Corrosion-sectional EDAX of L80 and 3Cr

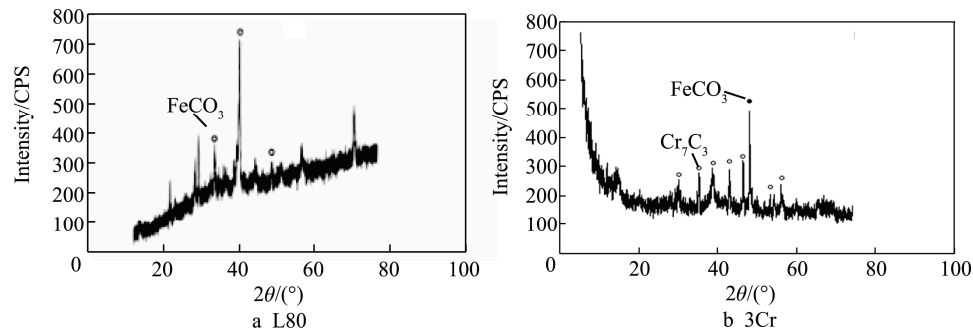


图 7 L80 和 3Cr 试样的 XRD 图谱
Fig.7 XRD pattern of corrosion products of L80 and 3Cr

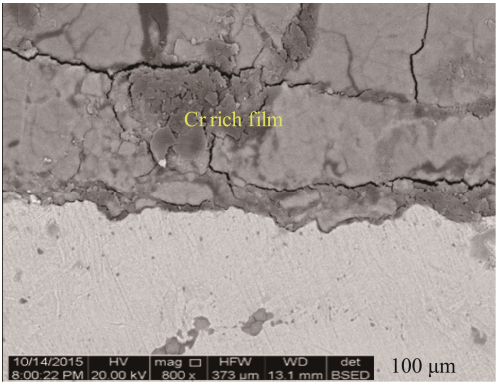
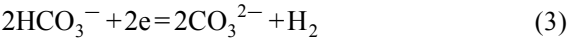
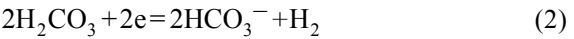


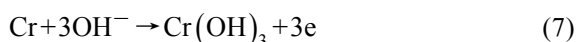
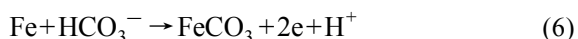
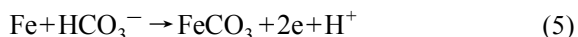
图 8 3Cr 试样腐蚀产物膜 SEM 分析
Fig.8 SEM analysis pattern of corrosion products of 3Cr

3 讨论

CO₂ 腐蚀是由于 CO₂ 溶于水产生 H₂CO₃ 而引起的电化学反应导致的油套管腐蚀，分为均匀腐蚀和局部腐蚀 2 大类，CO₂ 腐蚀常常表现为全面腐蚀与典型沉积物下方的局部腐蚀共存。腐蚀环境的 pH 值为 7.52，呈弱碱性，CO₂ 腐蚀过程的阴极反应以氢离子还原为主^[21]。



含 Cr 管材的 CO₂ 腐蚀过程存在以下阳极反应：



CO₂ 腐蚀的影响因素主要为环境因素和钢材材质 2 类^[18], 环境因素主要包括温度、CO₂ 分压、溶液介质的化学性质、流速、单相或多相流体、溶液的 pH 值、钢铁表面膜与结垢状况等; 钢材材质中的合金元素 Cr, Ni, Mo 等元素对其性能产生一定影响, 如 Cr 是提高油套管耐腐蚀性的常见合金元素。

普遍认为 CO₂ 分压是控制腐蚀的主要因素之一。当温度一定时, CO₂ 分压值越大, 金属的腐蚀就越快。随着 CO₂ 分压的增加, 材料表面膜增厚, 保护性增强, 又有降低腐蚀速率的趋势, 需结合温度具体分析。温度是影响 CO₂ 腐蚀的重要因素, 其主要影响 CO₂ 溶解度、化学反应速度和腐蚀产物的成膜机制。温度达到一定值后, 金属表面形成 FeCO₃ 和 Fe₃O₄ 产物膜, 对基体产生保护作用, 腐蚀速率降低, 不同温度下的油套管腐蚀速率见图 4。

Videm 和 Ikeda 等^[21—22] 人的研究指出, 钢材中加入铬、钼对 CO₂ 腐蚀有抵抗作用, 通过对不同含 Cr 量的钢进行腐蚀试验, 发现在碳钢和铬钢表面都有粗晶粒的碳酸亚铁生成, 对 CO₂ 腐蚀有抑制作用。Cr 钢的耐蚀性主要是因为 Cr 元素富集于腐蚀产物膜中, 形成了由 CrIII-O 或 CrIII-OH 组成的类似于不锈钢的钝化膜, 阻碍点蚀的发生, 使金属呈均匀腐蚀形态, 碳钢和含铬钢的 CO₂ 腐蚀在不同温度、金属材质条件下, 其腐蚀形态存在差异。

4 结论

1) 随着 CO₂ 分压的增加, N80, L80, 1Cr, 3Cr, 13Cr 等 5 种材质油套管钢腐蚀速率均增加, N80, L80, 1Cr 速率变化显著, 随着 Cr 含量的增加, 13Cr 钢的腐蚀速率较低, 对 CO₂ 分压没有表现出明显的规律。

2) 温度和测试周期对金属表面的腐蚀产物均有影响, 随着温度或测试周期的持续增加, 不同材质钢的腐蚀速率存在差异。

3) 合金元素 Cr 能提高普通碳钢的耐腐蚀性, N80, L80 发生了严重的均匀腐蚀, 低 Cr 出现点蚀, 以局部腐蚀为主, 13Cr 钢的腐蚀很轻微, 表面平整且无点蚀。避免点蚀是油套管选材的主要原则, 应根据实际情况选择管材。

参考文献:

[1] 杨光, 王亚刚, 金小春, 等. 油气井二氧化碳腐蚀研究

[J]. 全面腐蚀控制, 2008, 22(5): 24—26.

YANG Guang, WANG Ya-gang, JIN Xiao-chun, et al. The Study of CO₂ Corrosion in Oil-gas Well[J]. Total Corrosion Control, 2008, 22(5): 24—26.

[2] 李春福, 王斌, 张颖, 等. 油气田开发中 CO₂ 腐蚀研究进展[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(2): 42—46.

LI Chun-fu, WANG Bin, ZHANG Ying, et al. Research Progress of CO₂ Corrosion in Oil/Gas Field Exploitation[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(2): 42—46.

[3] 万里平, 孟英峰, 梁发书. 油气田开发中的二氧化碳腐蚀及影响[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(2): 14—17.

WANG Li-ping, MENG Ying-feng, LIANG Fa-shu. Carbon Dioxide Corrosion and Its Influence Factors in Oil/Gas Field Exploitation[J]. Total Corrosion Control, 2003, 17(2): 14—17.

[4] LIU Q Y, MAO L J, ZHOU S W, et al. Effects of Chloride Content on CO₂ Corrosion of Carbon Steel in Simulated Oil and Gas Well Environments[J]. Corrosion Science, 2014, 84: 165—171.

[5] 李春福. 油气开发过程中的 CO₂ 腐蚀机理及防护技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2005.

LI Chun-fu. Research on CO₂ Corrosion Mechanism and Protection Technology in the Process of Oil and Gas Development[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.

[6] LI Jian-ping, ZHAO Guo-xian, WANG Yu. Static Corrosion of Oil Thimble Used in TRIM Oil Field[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(4): 230—233.

[7] 黄天杰, 殷安会, 刘智勇, 等. 吉林油田矿场条件下 CO₂ 腐蚀模拟装置的建立及实验研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 69—73.

HUANG Tian-jie, YIN An-hui, LIU Zhi-yong, et al. Setup of CO₂ Corrosion Simulation Unit and Test Study under Field Site Conditions in Jilin Oilfield[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 69—73.

[8] 耿春雷, 顾军, 徐永模, 等. 油气田中 CO₂/H₂S 腐蚀与防护技术的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 119—122.

GENG Chun-lei, GU Jun, XU Yong-mo, et al. Research Progress on CO₂/H₂S Corrosion and Protection Technique in Oil and Gas Fields[J]. Material Review, 2011, 25(1): 119—122.

[9] 周波, 崔润炯. 浅谈二氧化碳对油井管的腐蚀及抗蚀套管的开发现状[J]. 钢管, 2003, 32(1): 21—24.

- ZHOU Bo, CUI Run-jiong. Discussion on CO₂ Corrosion of Oil Well Tubes and Current Development of Anticorrosion Casing[J]. Steel Pipe, 2003, 32(1): 21—24.
- [10] 张学元, 邸超, 雷良才. 二氧化碳腐蚀与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- ZHANG Xue-yuan, DI Chao, LEI Liang-cai. CO₂ Corrosion and Control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [11] 卢绮敏. 石油工业中的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学出版社, 2001.
- LU Qi-min. Corrosion and Protection in the Industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [12] SIDDQUI R A. Hydrogen Embrittlement in 0.31% Carbon Steel Used for Petrochemical Applications[J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 170(1/2): 430—435.
- [13] 孙建波, 柳伟, 路明旭. 成分和组织影响钢 CO₂ 腐蚀的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 246—249.
- SUN Jian-bo, LIU Wei, LU Ming-xu. Investigation Progress of Effect of Alloying Elements and Microstructure on CO₂ Corrosion Behavior of Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(4): 246—249.
- [14] 陈东, 柳伟, 路明旭. CO₂ 分压对 N80 钢腐蚀产物膜保护性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(3): 288—292.
- CHEN Dong, LIU Wei, LU Ming-xu. Influence of CO₂ Partial Pressure on the Protection Property of Corrosion Scale Formed on N80 Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(3): 288—292.
- [15] 李大朋, 马文海, 张雷, 等. 温度对油管钢 CO₂ 腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(2): 81—84.
- LI Da-peng, MA Wen-hai, ZHANG Lei, et al. Effect of Temperature on CO₂ Corrosion Behavior of Tubular Steel[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(2): 81—84.
- [16] 田光. 流速对 CO₂ 腐蚀速率的影响研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2010.
- TIAN Guang. Research on the Effects of Flow Velocity on CO₂ Corrosion Rate[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2010.
- [17] 王成达, 严密林, 赵新伟, 等. 油气田开发中 H₂S/CO₂ 腐蚀研究进展[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2005, 20(5): 66—70.
- WANG Cheng-da, YAN Mi-lin, ZHAO Xin-wei, et al. Research Progress of H₂S/CO₂ Corrosion in Oil and Gas Development[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition), 2005, 20(5): 66—70.
- [18] 闫伟. 油套管 CO₂ 腐蚀规律及材质优化设计技术[D]. 北京: 中国石油大学, 2012.
- YAN Wei. CO₂ Corrosion Law of OCTG and Material Optimal Design[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2012.
- [19] 陈长风. 油套管钢 CO₂ 腐蚀电化学行为与腐蚀产物膜特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- CHEN Chang-feng. Research on Electro-chemical Behavior and Corrosion Scale Characteristics of CO₂ Corrosion for Tubing and Casing Steel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [20] 闫伟, 邓金根, 董星亮. 油管钢在 CO₂/H₂S 环境中的腐蚀产物及腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(3): 193—196.
- YAN Wei, DENG Jin-gen, DONG Xing-liang, et al. Corrosion Products and Corrosion Behavior of Tubing Steel in CO₂/H₂S Environment[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(3): 193—196.
- [21] IKEDE A, MUKAI S, UEDA M. Corrosion Behavior of 9% to 25% Cr Steel in Wet CO₂ Environment[J]. Corrosion, 1985, 41(4): 185—192.
- [22] KEDE A, UEDA M. CO₂ Behavior of Carbon and Cr Steels[J]. Houston, Nace, 1985: 39—51.