

注空气驱油过程中 N80 钢的腐蚀规律研究

连宇博，翁华涛，刘贵宾，魏亚军，黄晨，蒋伟

(西安长庆化工集团有限公司，西安 710018)

摘要：目的 探明空气驱工艺条件下套管钢的腐蚀规律，为空气驱工况条件下套管钢的腐蚀防护提供数据支撑。**方法** 采用高温高压失重挂片法评价 N80 碳钢的腐蚀速度，利用扫描电镜、能谱分析等手段考察金属表面腐蚀产物膜的形态与组成，研究氧分压、温度以及腐蚀时间对注空气驱油过程中 N80 钢的腐蚀影响。**结果** 随着氧分压的增加，N80 钢的腐蚀速率总体上增大。随着温度的升高，N80 钢的腐蚀速率明显增大，温度为 100 ℃时，腐蚀速度达到 13.65 mm/a。随腐蚀时间的延长，N80 钢的腐蚀速率呈现先增大、后减小的规律，且 24 h 时的腐蚀速率最大，为 17.41 mm/a。**结论** 空气驱工艺条件下，N80 钢遭受严重的腐蚀，腐蚀产物主要为铁的氧化物。

关键词：腐蚀；注空气；N80 碳钢

中图分类号：TG172 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2022)03-0112-06

DOI：10.7643/issn.1672-9242.2022.03.017

Corrosion Rule of N80 Carbon Steel during Air Injection Enhanced Oil Recovery

LIAN Yu-bo, WENG Hua-tao, LIU Gui-bin, WEI Ya-jun, HUANG Chen, JIANG Wei

(Xi'an Changqing Chemical Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

ABSTRACT: This study was carried out to investigate the corrosion rule of carbon steel during air injection Enhanced Oil Recovery (EOR) process and provide data support for the corrosion protection of carbon steel under the condition of air injection EOR. Corrosion rate of N80 carbon steel was evaluated by weight-loss coupon method under high temperature and high pressure. The morphology and composition of corrosion product film on metal surface were investigated by means of SEM, EDS. The effects of oxygen partial pressure, temperature and corrosion time on the corrosion of N80 carbon steel during air injection EOR. The results indicated that the corrosion rate of N80 carbon steel generally increased along with increasing the oxygen partial pressure. With the increase of temperature, the corrosion rate of N80 carbon steel increases obviously. When the temperature is 100 ℃, the corrosion rate reaches 13.65 mm/a; With the extension of corrosion time, the corrosion rate of N80 carbon steel increases first and then decreases, and the corrosion rate is the highest at 24 h, which is 17.41 mm/a. N80 carbon steel suffered severe corrosion during air injection EOR process and the corrosion products were mainly iron oxide.

KEY WORDS: corrosion; air injection; N80 carbon steel

低渗透油气的开采一直是油气田开采中的难题，往往面临投入大但是收益小的困境^[1]。尽管注二氧化

收稿日期：2021-09-30；修订日期：2021-11-07

Received: 2021-09-30; **Revised:** 2021-11-07

作者简介：连宇博（1991—），男，工程师，主要研究方向为油田化学品的开发。

Biography: LIAN Yu-bo (1991—), Male, Engineer, Research focus: development of oilfield chemicals.

引文格式：连宇博，翁华涛，刘贵宾，等. 注空气驱油过程中 N80 钢的腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 112-117.

LIAN Yu-bo, WENG Hua-tao, LIU Gui-bin, et al. Corrosion Rule of N80 Carbon Steel during Air Injection Enhanced Oil Recovery[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 112-117.

碳可以显著提高油气采收率^[2-4], 但由于该技术存在气源不足且成本高等缺点, 使得其应用受到限制。由于空气来源广, 成本廉价, 目前国内外油气田开始尝试采用注空气的方式对低渗油气田进行开采^[5-8]。从实施结果来看, 注空气驱可以大幅提高油气采收率, 特别是对低渗透油气藏具有非常显著的效果。同时, 该方法既可以用作二次采油, 也可以用作三次采油^[9-11]。空气注入地层后, 其和有机物反应, 一方面放出热量, 促进了油气的流动; 另一方面产生二氧化碳, 产生了CO₂驱油效果。因此, 注空气驱油技术不但可以作为二次采油手段, 解决我国储量丰富的低渗透油藏所面临的开发难题^[12-15], 而且可以作为三次采油技术, 用以提高聚合物驱后油藏的采收率。

当空气注入到井下后, 由于高压氧及井下高温的共同作用, 导致套管遭受了严重的腐蚀, 成为了制约注空气驱油工艺推广实施的一个重要原因^[16-18]。然而, 国内外鲜有关于空气驱工艺条件下的腐蚀研究, 空气驱对应的腐蚀机制也不清楚。因此, 有必要开展注空气驱油过程中高压氧腐蚀规律的研究。

1 实验

失重实验在高温高压釜中进行。实验前, 先将N80钢片用丙酮除油, 再用无水乙醇清洗, 冷风吹干, 分析天平称量。然后将N80钢片全浸入装有1.5 L油

田模拟地层水(组成为9.42 g/L NaCl, 0.15 g/L KCl, 0.14 g/L CaCl₂, 0.1 g/L Na₂SO₄, 0.12 g/L MgCl₂·6H₂O, 1.88 g/L NaHCO₃)的高温高压反应釜中, 实验前地层水先用氧气饱和。未特殊说明时, 实验温度及挂片时间分别为100 °C及24 h。实验结束后, 取出试样, 处理后进行表面分析及质量损失计算。

2 结果与讨论

2.1 氧分压的影响

控制介质温度为100 °C, 腐蚀实验时间为24 h, 评价N80钢在模拟地层水中不同氧分压下的腐蚀速率, 见表1。由表1可以看出, 当氧分压不超过2 MPa时, N80钢的腐蚀速度随着氧分压的增大而迅速增加。当氧分压超过2 MPa后, 随着氧分压的增加, 腐蚀速度的增大不再如氧分压小于2 MPa时剧烈。

N80钢在不同氧分压下的腐蚀形貌如图1所示。由图1可以看出, 在饱和氧情况下, N80钢片腐蚀相

表1 不同氧分压下N80钢的腐蚀速率

Tab.1 Corrosion rate of N80 carbon steel at different oxygen partial pressure

氧分压/MPa	0.1	1	1.5	2	2.5	3	3.5
腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	1.186	7.085	12.65	17.61	16.47	18.84	21.57

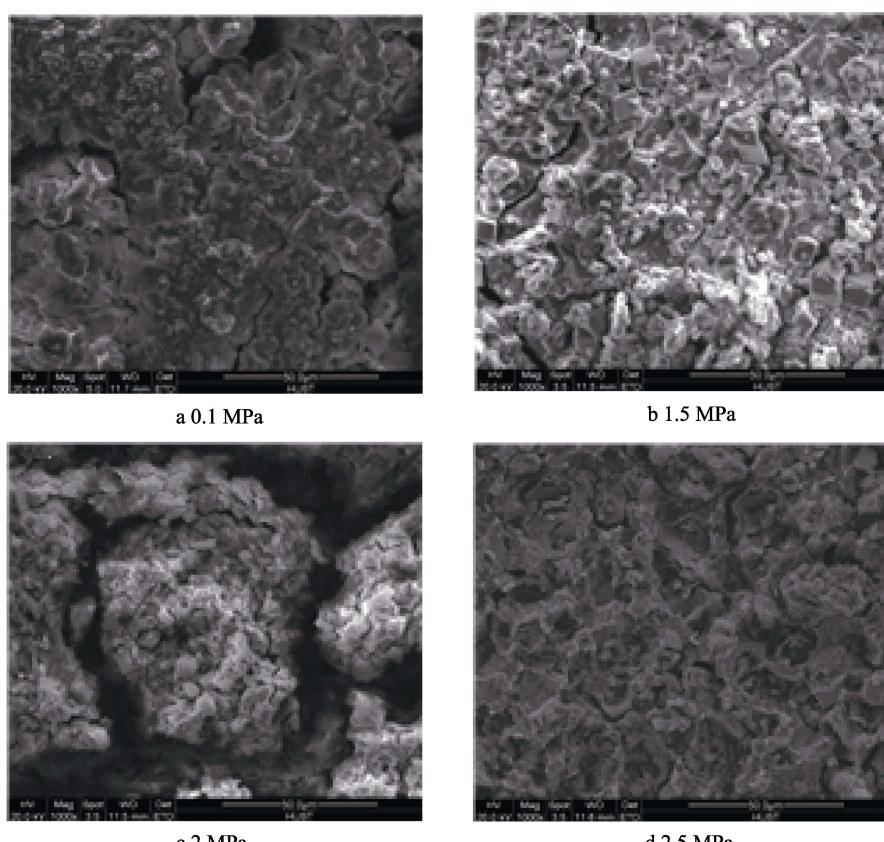


图1 不同氧分压下N80钢表面的SEM形貌

Fig.1 SEM images of N80 carbon steel surface at different oxygen partial pressure

对较轻，产物膜整体比完整。在 1.5 MPa 氧压力下，钢片表面的腐蚀产物为颗粒状分布，且裂纹较大。在 2 MPa 氧压力下，表面出现大量蓬松、松散的腐蚀产物层。总体来看，氧存在条件下形成的腐蚀产物均不具备有效的防护性能，这使得空气驱条件下，N80 套管钢容易遭受严重的腐蚀。

2.2 温度的影响

控制氧气分压为 1.5 MPa，失重挂片时间为 24 h，考察 N80 钢在模拟地层水中不同温度下的腐蚀速率，见表 2。由表 2 可以得知，N80 钢的腐蚀速率随温度的升高而显著增加。

N80 钢在不同温度下的腐蚀形貌如图 2 所示。从图 2 可以看出，当介质温度为 20 ℃ 时，金属表面仅部分存在腐蚀产物，腐蚀产物呈现为尺寸相对较大的

谷粒状，而未覆盖腐蚀产物的表面相对较完整。当介质温度为 60 ℃ 时，金属表面存在疏松、颗粒状的腐蚀产物，金属表面绝大部分被腐蚀产物覆盖。当介质温度为 80 ℃ 时，腐蚀产物呈现粒状结构，而金属表面完全被腐蚀产物覆盖，整个覆盖层比较均匀，但是覆盖层多孔、不致密。当介质温度上升到 100 ℃ 时，金属表面出现大量腐蚀产物，腐蚀产物完全覆盖在金属表面，同时腐蚀产物层凹凸不平，存在较多裂纹。

表 2 不同温度下 N80 钢的腐蚀速率

Tab.2 Corrosion rate of N80 carbon steel at different temperature

温度/℃	20	40	60	80	100
腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	1.13	3.11	4.59	9.37	12.65

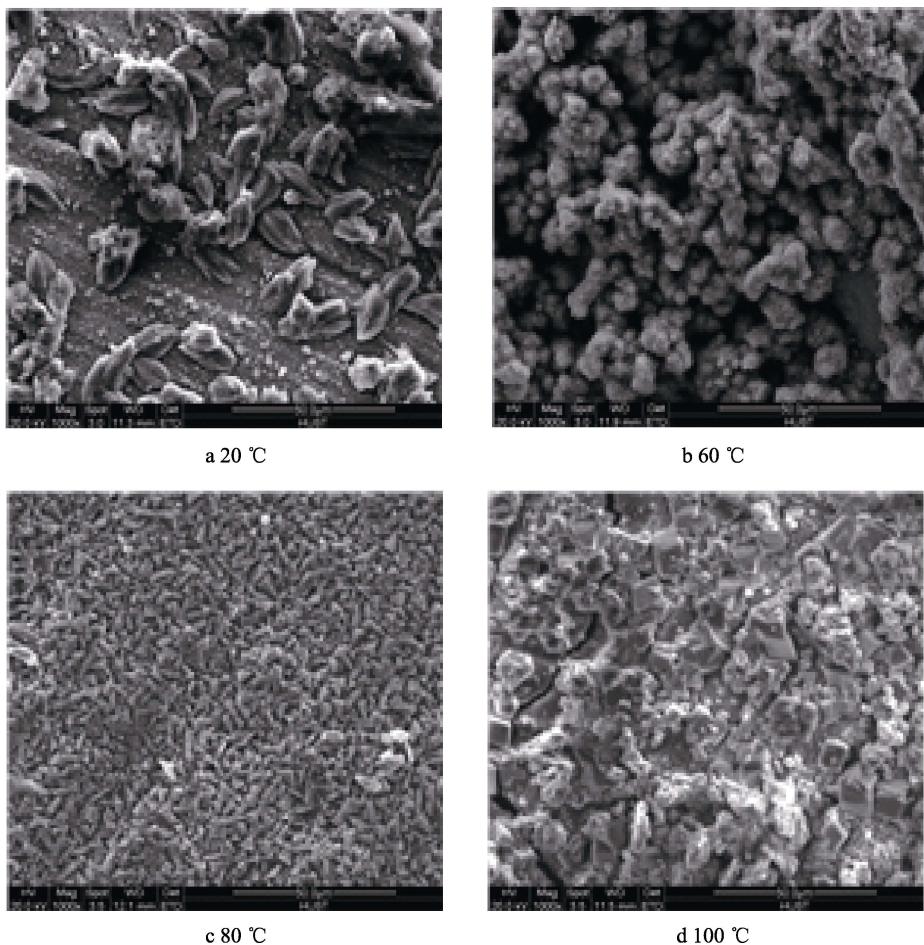


图 2 不同温度下 N80 钢表面 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of N80 carbon steel surface at different temperature

将腐蚀速度取自然对数及进行实验的开尔文温度取倒数作图，发现两者有较好的线性关系，通过线性拟合得到拟合方程：

$$\ln v = 11.3 - 3270.5 \times \frac{1}{T} \quad (1)$$

式中：v 为腐蚀速度；T 为腐蚀实验的热力学温

度。通过腐蚀速度与温度的关系（如图 3 所示）可以得知，空气驱工艺条件下，N80 钢的腐蚀行为服从阿伦尼乌斯方程，进一步通过拟合结果得出腐蚀反应活化能为 27.2 kJ/mol。这一较低的活化能表明，空气驱环境下，腐蚀反应会很快地进行，并且随着温度的升高，腐蚀逐渐加剧。

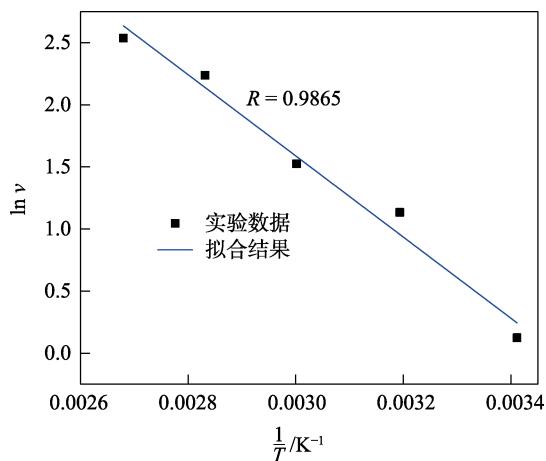


图 3 腐蚀速率与温度的关系

Fig.3 Relationship between corrosion rate and temperature

2.3 腐蚀时间的影响

控制介质温度为 100 ℃, 氧分压为 1.5 MPa, 采用失重挂片评价 N80 钢在模拟地层水中不同腐蚀时间下的腐蚀速率, 见表 3。由表 3 可以看出, 在腐蚀刚开始的 24 h 之内, 腐蚀速率随时间的增加而增大。

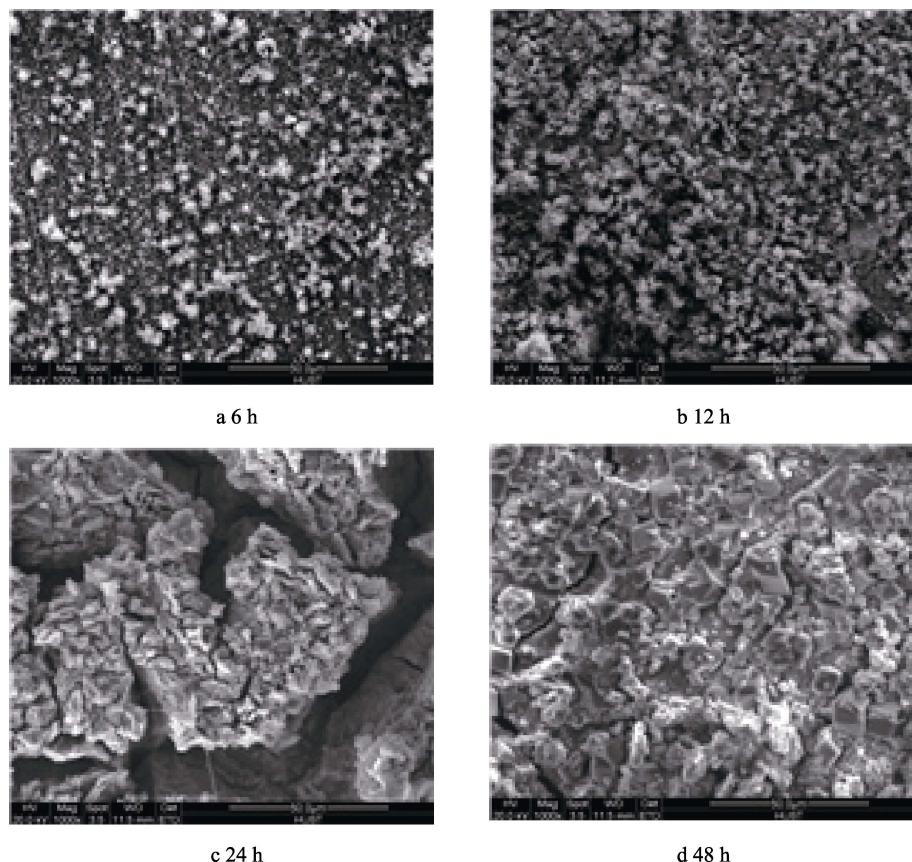


图 4 N80 钢浸泡不同时间后表面的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of N80 carbon steel surface after exposure of different times

N80 钢在 1.5 MPa 氧分压、100 ℃的地层水中浸泡 48 h 后的表面能谱图见图 5。由图 5 可以看出,

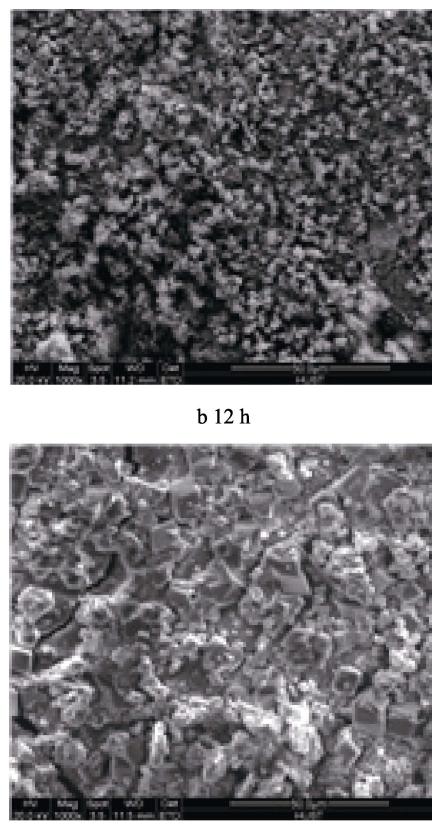
24 h 之后, 腐蚀速率开始下降。在模拟地层水环境下, 碳钢的腐蚀主要是由氧去极化引起的, 而介质中的氯离子参与了阳极铁溶解过程。在腐蚀起始阶段, 由于没有或者仅较少腐蚀产物生成, 因此具有很高的腐蚀速度。随着腐蚀的进行, 金属表面开始出现越来越多的腐蚀产物, 这些腐蚀产物的大量存在一方面对腐蚀介质的渗透起到一定的阻挡作用, 同时还抑制阳极溶解物的传质过程, 因此对腐蚀有一定的减缓作用。

表 3 不同腐蚀时间下 N80 钢的腐蚀速率

Tab.3 Corrosion rate of N80 carbon steel after exposure of different time

时间/h	6	12	24	48
腐蚀速率/(mm·a⁻¹)	13.61	17.05	17.41	12.65

N80 钢在不同时间下的腐蚀形貌如图 4 所示。由图 4 可以看出, 随时间的延长, N80 钢片表面的腐蚀产物层逐渐变厚。24 h 后, 表面腐蚀产品呈现大的裂纹, 此时的腐蚀最为严重。48 h 后, 腐蚀产物的裂纹较小, 腐蚀有所减轻。



N80 钢片在高温高压氧条件下的腐蚀产物主要是铁的氧化物。

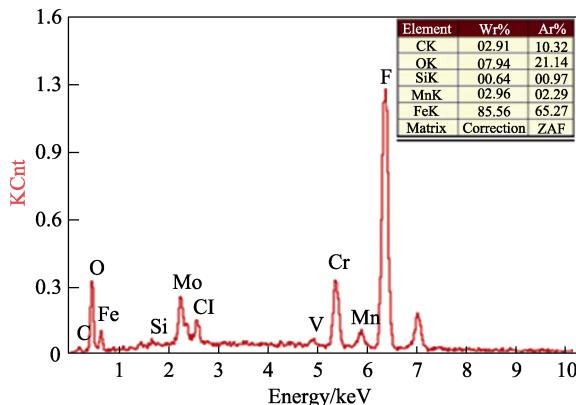
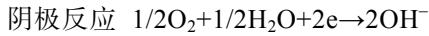
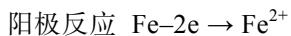


图5 N80钢在1.5 MPa氧分压、100 °C、48 h条件下的能谱图

Fig.5 EDS diagram of N80 carbon steel surface after exposure of 48 h at 100 °C and 1.5 MPa oxygen partial pressure

由于在注空气驱油环境中,溶解氧是极强阴极去极化剂,N80碳钢在腐蚀介质中发生电化学腐蚀,其腐蚀机理为^[19-20]:



在溶液中生成的 Fe^{2+} 不稳定,在氧气与水的共同作用下,会被氧化为氢氧化铁。由于空气驱工艺条件下,高压氧及高温会迅速将亚铁离子氧化,这一氧化反应速度往往超过铁离子的消耗速度,因而会加速腐蚀进程。

3 结论

本文以高压氧腐蚀为研究重点,利用高温高压反应釜及表面分析手段对普通油套管N80钢在模拟注空气驱油环境中的腐蚀行为进行研究,发现氧分压是影响N80钢腐蚀行为的重要因素,而腐蚀时间对N80钢腐蚀行为的影响相对较小。

1) 氧分压不超过2 MPa时,N80钢的腐蚀速率随着氧分压的增加而迅速增大;当氧分压超过2 MPa后,随着氧分压的增加,N80钢腐蚀速率增加的剧烈程度趋缓。

2) 在高压氧环境下,N80钢的腐蚀速率随温度的升高而增大;在常压饱和氧环境下时,60 °C的瞬时腐蚀速率最大,100 °C的瞬时腐蚀速率最小。

3) 随腐蚀时间的延长,N80钢腐蚀速率均呈现先增大、后减小的趋势,在24 h附近的腐蚀速率最大。

参考文献:

- [1] 尚洪帅,赵景茂.注空气驱油环境中缓蚀剂的合成及性能评价[J].腐蚀与防护,2012,33(3): 202-205.
SHANG Hong-shuai, ZHAO Jing-mao. Synthesis of Corrosion Inhibitor and Its Performance under Air Injection Corrosive Environment[J]. Corrosion & Protection,
- [2] 2012, 33(3): 202-205.
WANG Xiu-yu, ALVARADO V, SWOBODA-COLBERG N, et al. Reactivity of Dolomite in Water-Saturated Supercritical Carbon Dioxide: Significance for Carbon Capture and Storage and for Enhanced Oil and Gas Recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65: 564-573.
- [3] JAHANGIRI H R, ZHANG Dong-xiao. Ensemble Based Co-Optimization of Carbon Dioxide Sequestration and Enhanced Oil Recovery[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 8: 22-33.
- [4] QAZVINI FIROUZ A, TORABI F. Utilization of Carbon Dioxide and Methane in Huff-and-Puff Injection Scheme to Improve Heavy Oil Recovery[J]. Fuel, 2014, 117: 966-973.
- [5] NIU Bao-lun, REN Shao-ran, LIU Yin-hua, et al. Low-Temperature Oxidation of Oil Components in an Air Injection Process for Improved Oil Recovery[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(10): 4299-4304.
- [6] 任韶然,于洪敏,左景栾,等.中原油田空气泡沫调驱提高采收率技术[J].石油学报,2009,30(3): 413-416.
REN Shao-ran, YU Hong-min, ZUO Jing-luan, et al. EOR Technology of Profile Control and Displacement Process by Air Foam Injection in Zhongyuan Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 413-416.
- [7] GREAVES M, YOUNG T J, EL-USTA S, et al. Air Injection into Light and Medium Heavy Oil Reservoirs: Combustion Tube Studies on West of Shetlands Clair Oil and Light Australian Oil[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(5): 721-730.
- [8] 罗景琪,陈学周.继注水后向轻质油油藏注空气的探索[J].石油钻采工艺,1996,18(4): 68-74.
LUO Jing-qi, CHEN Xue-zhou. Feasibility Study on Air Injection for Enhancing Oil Recovery of Light Oil Reservoir after Water Injection[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(4): 68-74.
- [9] 张晓宜.油藏注气开采力学[M].北京:石油工业出版社,1987.
ZHANG Xiao-yi. Dynamics of Petroleum Reservoirs under Gas Injection[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987.
- [10] FASSLHL M R, MEYERS K O, BASLLE P F. Low-Temperature Oxidation of Viscous Crude Oils[J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(4): 609-616.
- [11] FASSIHI M R, YANNIMARAS D V, KUMAR V K. Estimation of Recovery Factor in Light-Oil Air-Injection Projects[J]. SPE Reservoir Engineering, 1997, 12(3): 173-178.
- [12] 王杰祥,来轩昂,王庆,等.中原油田注空气驱油试验研究[J].石油钻探技术,2007,35(2): 5-7.
WANG Jie-xiang, LAI Xuan-ang, WANG Qing, et al. Experimental Studies of Displacement Using Air Injection in Zhongyuan Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(2): 5-7.
- [13] 庞岁社,李花花,段文标,等.靖安低渗透裂缝性油藏

- 泡沫辅助空气驱油试验效果分析[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(3): 60-63.
- PANG Sui-she, LI Hua-hua, DUAN Wen-biao, et al. Results Analysis of Foam-Assisted Air Flooding Pilot Project in the Low Permeability Fractured Reservoir of Jing'an Oilfield[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(3): 60-63.
- [14] 王成俊, 郑黎明, 高瑞民, 等. 鄂尔多斯浅层特低渗油藏水驱后空气驱实验研究[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(6): 135-137.
- WANG Cheng-jun, ZHENG Li-ming, GAO Rui-min, et al. Experimental Study on Air Flooding after Water Flooding in Shallow Ultra-Low Permeability Reservoir in Ordos[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(6): 135-137.
- [15] 张连壁. 滨 425 空气驱试验及效果分析[J]. 内江科技, 2011, 32(4): 145.
- ZHANG Lian-bi. Bin 425 Air Drive Test and Effect Analysis[J]. Neijiang Science & Technology, 2011, 32(4): 145.
- [16] 林伟民, 李雪峰, 陈秀玲, 等. 注空气泡沫驱油过程中的腐蚀与防护研究[J]. 油田化学, 2010, 27(3): 342-345.
- LIN Wei-min, LI Xue-feng, CHEN Xiu-ling, et al. Corrosion and Protection in Air-Foam Injection Process[J]. Oil-field Chemistry, 2010, 27(3): 342-345.
- [17] 韩霞. 郑 408 块火烧驱油注气井腐蚀原因分析及对策[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(3): 247-250.
- HAN Xia. Corrosion Case Analysis and Anti-Corrosion Countermeasures for Facilities of a Combustion Gas Injection Well for Oil Displacement in Zheng-408 Block[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(3): 247-250.
- [18] 周权, 任韶然, 于洪敏, 等. 注空气驱油中的腐蚀及缓蚀剂加注工艺[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(10): 745-746.
- ZHOU Quan, REN Shao-ran, YU Hong-min, et al. Implantation Technique of Corrosion Inhibitors for Air Injection Enhanced Oil Recovery[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(10): 745-746.
- [19] 王磊, 胡锐, 王新虎, 等. S135 钻杆钢在钻井液中的氧腐蚀行为[J]. 石油机械, 2006, 34(10): 1-4.
- WANG Lei, HU Rui, WANG Xin-hu, et al. The Oxygen Corrosion Behavior of S135 Drill Pipe Steel in Drill Fluid[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(10): 1-4.
- [20] 赵鹏, 于杰, 郭金宝. 钻杆溶解氧腐蚀影响因素分析[J]. 钢管, 2010, 39(2): 29-33.
- ZHAO Peng, YU Jie, GUO Jin-bao. Analysis of Influencing Factors on Dissolved Oxygen Corrosion of Drill Pipe[J]. Steel Pipe, 2010, 39(2): 29-33.