

·油气采收率·

微生物与空气协同驱油的耗氧规律

雷光伦,程明明,袁勇君,姚传进

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:微生物与空气协同驱油是一种新的驱油方法,其主要机理为利用空气中的氧气提高微生物生长代谢速率,同时微生物耗氧使空气驱变得更为安全。通过实验研究不同初始溶氧浓度下实验菌种的生长规律和耗氧规律,及溶氧浓度对微生物脱油效率的影响。结果表明:在增氧与未增氧的条件下,实验菌种生长均存在停滞期、对数生长期、稳定期和衰退期,初始溶氧浓度为4.5和5.5 mg/L时,微生物生长的最大浓度是未增氧时的3倍以上;对数生长期溶氧浓度呈对数降低趋势,稳定期和衰退期溶氧浓度呈线性降低趋势,油藏内耗氧主要为补偿微生物衰退时数量减少的生长耗氧;微生物脱油效率随初始溶氧浓度的增大而增大。在微生物耗氧规律和油藏渗流规律的基础上,建立了仅考虑微生物耗氧时油藏内氧浓度计算数学模型,计算了不同注入参数下氧浓度分布。结果显示,耗氧后,油藏内氧浓度随油藏半径的增加指数下降,油藏内有足够的氧供微生物生长;微生物耗氧可将空气中的氧浓度降到安全浓度,微生物耗氧到氧安全浓度的最小油藏半径约为145 m。

关键词:微生物与空气驱 协同机理 微生物生长耗氧 脱油效率 氧浓度分布

中图分类号:TE357.9

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0067-05

Study on the law of oxygen consumption by microbe during air flooding

Lei Guanglun, Cheng Mingming, Yuan Yongjun, Yao Chuanjin

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: The microbe-assisted air flooding is a new oil displacement method. Its mechanism is that the rate of microbial growth and metabolism can be increased by the help of oxygen in the air, which makes air flooding safer. Experiments of microbe growing and oxygen consumption were conducted under different initial concentrations of dissolved oxygen, and experiment of oil removing efficiency of the microbe under different concentrations of dissolved oxygen as well. The results show that the growth of experimental strains experience lag phase, logarithmic phase, stable phase and degenerating phase under conditions of oxygenation and non-oxygenation. When the initial concentration of dissolved oxygen is 4.5 and 5.5 mg/L, the maximum concentration of the microbial growth is 3 times of that under non-oxygenation; the concentration of dissolved oxygen declines logarithmically at the logarithmic phase, and that declines linearly at the stable phase and degenerating phase. The decreased oxygen in the oil reservoir is due to the oxygen consumption caused by microbe degeneration, and oil removing efficiency of the microbe may increase along with the increase of the initial concentration of the dissolved oxygen. Base on the law of oxygen consumption of the microbe and reservoir flow, mathematical model was set up to calculate the oxygen concentration distribution in the oil reservoir under different injection parameters. The result shows that the oxygen concentration decreases exponentially with increased reservoir radius; the whole well area have sufficient oxygen concentration for microbe growing and the reservoir has become a favorable environment for microbe; and the oxygen concentration in the air is reduced to safe level for air flooding and the minimum oxygen consuming radius is about 145 meters.

Key words: microbe-assisted air flooding; coordinate mechanism; oxygen consumption during microbial growth; oil removing efficiency; oxygen concentration distribution

收稿日期:2016-01-04。

作者简介:雷光伦(1963—),男,重庆人,教授,博导,从事油气田开发的教学和科研工作。联系电话:13854637389, E-mail:leiglun@163.com。

基金项目:长江学者创新团队发展计划(IRT1294)。

微生物驱油是利用微生物生长时对原油的降解和代谢的生物气、有机酸、表面活性剂、多糖、醛酮醇等有机溶剂提高采收率的方法,对低温油田、高含水油田、特别是对枯竭油田提高采收率具有明显优势^[1-3]。微生物驱油技术虽然优势多、起步早,但目前现场应用成功较少,这是因为:①油藏的较高温度和无氧环境影响了微生物在油层内的生长,代谢效率低;②微生物菌液的粘度小,菌液在油藏中仅在较高渗透率通道中流动,未增大波及体积^[4-7]。空气驱也是目前提高采收率方法研究的热点之一,空气成本低、注入容易,对注水压力高的低渗透油田提高采收率具有明显优势^[8-13]。但对于某些适用微生物驱的低温高含水油田,应用空气驱提高采收率时,由于低温氧化耗氧较小,氧浓度较高,存在安全隐患^[14-15],影响了该技术在低温高含水油田的应用。微生物与空气协同驱油是将微生物与空气交替注入油层的一种提高采收率新方法,注入的空气可为微生物生长代谢提供氧气,加快生长代谢效率,提高微生物对原油的降解作用和代谢产物的驱油作用;空气的交替注入,会在油层高渗透通道处产生气泡形成气阻,增大微生物驱的波及体积;同时,微生物的生长代谢又消耗了空气中的部分氧气,使空气驱变得更安全。微生物与空气交替注入具有协同驱油优势和较好的发展潜力。笔者通过实验分析微生物的生长和耗氧规律及氧对微生物生长的增效作用,通过数学模型计算油藏中微生物耗氧后氧浓度分布,并确定不同注入参数下微生物耗氧到安全浓度的最小半径,以期研究微生物与空气协同驱油机理提供依据。

1 实验菌种生长和耗氧规律

为了适应油藏无氧环境,大部分驱油用微生物为兼性,即无氧时能够存活生长,有氧时生长代谢速度更快。不同溶氧浓度下的实验菌种生长及耗氧规律用生长实验来确定。

实验菌种为某油田提供的驱油用菌种。实验用水为总矿化度为 112 920 mg/L、pH 值为 6.8 的模拟地层水,其中 K^+Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 的质量浓度分别为 13 000, 21 000, 80, 650, 56 380, 80, 0 和 0 mg/L,水型为 $CaCl_2$ 型。

实验方法为:①用模拟地层水配制相同质量浓度的营养液,在营养液中分别连续通入空气以增加水中溶氧,并用溶氧仪测定溶氧浓度;②接种 3% 的菌种后,放置在温度为 45 °C(油藏温度)的培养箱中

培养,间隔 12 h 取样,在显微镜下用计数法测定微生物浓度,并同时测定溶液中的溶氧浓度。

测定结果(图 1)表明,实验菌种的生长分为停滞期、对数生长期、稳定期和衰退期,与典型的微生物生长规律一致。增氧条件下实验菌种的停滞期很短,为方便起见,将生长过程简化为对数生长期、稳定期和衰退期。在对数生长期,微生物进行细胞对数分裂,生长时间约为 1.5 d;稳定期,细胞正常代谢,菌体数量基本不变,稳定时间约为 2 d;营养耗尽后,进入衰退期,菌体开始死亡、溶解,数量开始减少,衰退期时间约为 2 d。

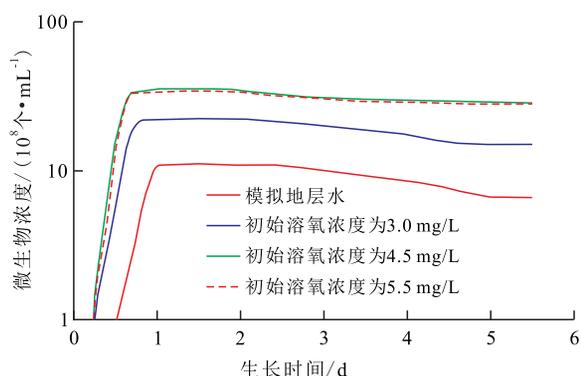


图1 不同初始溶氧浓度下实验菌种生长规律

Fig.1 Growth behavior of experimental strains under different initial concentrations of dissolved oxygen

分析图 1 可知:实验菌种在未增氧的模拟地层水中能够生长,生长最大浓度为 10.5×10^8 个/mL,但停滞时间较长;随着溶氧浓度的增大,实验菌种生长速度加快,停滞时间缩短,生长最大浓度也呈增大趋势,当初始溶氧浓度增至 4.5 和 5.5 mg/L 时,实验菌体生长最大浓度分别为 34.0×10^8 和 33.5×10^8 个/mL,说明当初始溶氧浓度增加到较高浓度后,实验菌种生长最大浓度不再随初始溶氧浓度的增加而增加。初始溶氧浓度为 4.5 和 5.5 mg/L 时微生物生长的最大浓度是未增氧时的 3 倍以上,表明氧能加速微生物的生长,提高微生物的代谢效率。

微生物不同初始溶氧浓度下的耗氧规律基本相同,即对数生长期溶氧浓度呈对数降低趋势,稳定期和衰退期溶氧浓度呈线性降低趋势。对数生长期的耗氧量为

$$C_m = C_s - C_o \quad (1)$$

式中: C_m 为对数生长期耗氧量, mg/L; C_s 为初始溶氧浓度, mg/L; C_o 为生长最大浓度时氧浓度, mg/L。

稳定期和衰退期耗氧为油藏内主要耗氧,稳定及衰退期代谢耗氧率 (γ_1) 为耗氧曲线直线段斜率。微生物驱时,由于注入水中连续添加了足够的

营养,衰退期减少的微生物数量会通过生长得以补充,稳定及衰退期微生物总耗氧率(γ)为代谢耗氧率与补充衰减的生长耗氧率之和,其中补充衰减的生长耗氧率计算式为

$$\gamma_2 = \frac{C_m}{C_{mmax}} \times \frac{C_{mmax} - C_{me}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: γ_2 为补充衰减的生长耗氧率, $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{d})$; C_{me} 为实验结束时微生物浓度, 10^8 个/mL; t_2 为实验

结束时间,d; t_1 为生长最大浓度时的时间,d。

由表1和图2可知,当初始溶氧浓度为3.0,4.5和5.5 mg/L时,对数生长期耗氧量分别为2.45,3.82和4.69 mg/L,稳定及衰退期代谢耗氧率分别为0.012,0.014和0.012 mg/(L·d),补充衰减的生长耗氧率分别为0.202 2,0.202 2和0.255 5 mg/(L·d),稳定及衰退期总耗氧率分别为0.214 2,0.216 4和0.267 5 mg/(L·d)。

表1 实验菌种耗氧率实验数据处理及结果
Table1 Data processing and results of microbial oxygen consumption experiment

$C_s /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$C_{mmax} /$ (10^8 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$)	$t_1 /$ d	$C_0 /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$C_{me} /$ (10^8 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$)	$t_2 /$ d	$C_m /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\gamma_1 /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	$\gamma_2 /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	$\gamma /$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
3.0	20.9	1.5	0.55	14	5.5	2.45	0.012	0.202 2	0.214 2
4.5	34.0	1.5	0.68	26.8	5.5	3.82	0.014	0.202 2	0.216 4
5.5	33.5	1.5	0.81	26.2	5.5	4.69	0.012	0.255 5	0.267 5

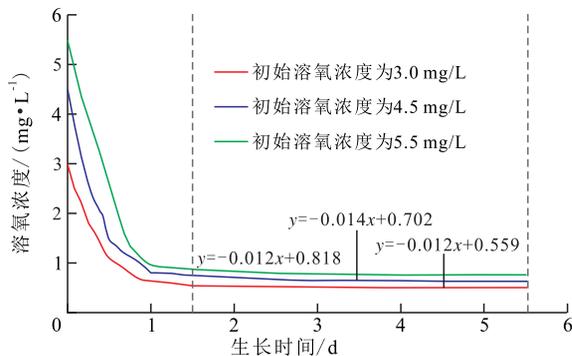


图2 不同初始溶氧浓度下微生物耗氧后溶氧浓度变化

Fig.2 Variations of oxygen concentration after microbial oxygen consumption under different initial concentrations of dissolved oxygen

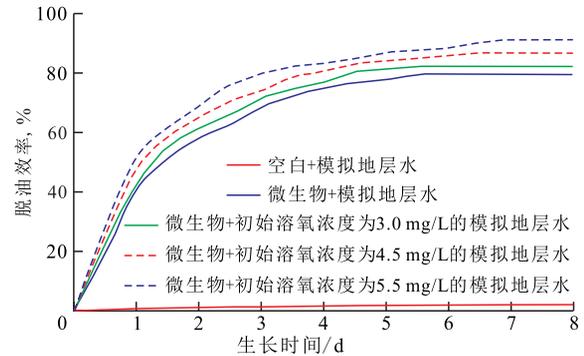


图3 不同初始溶氧浓度下微生物的脱油效率

Fig.3 Oil removing efficiency of the microbe under different initial concentrations of dissolved oxygen

2 溶氧浓度对微生物脱油效率的影响

通过微生物从油砂中脱出原油的效率来研究溶氧浓度对微生物脱油效率的影响。实验方法为:①将地层砂用200目筛子过筛后洗净烘干,按地层原油饱和度将地层砂与原油按照质量比为9:1的比例搅拌混合均匀,静置3 d,使原油均匀吸附在砂粒表面;②称取相同量的油砂分别装入李氏密度瓶中,分别接种相同质量和浓度的实验菌液,菌液的培养基浓度相同但溶氧浓度不同;③将密度瓶放置于45℃恒温箱中静置6 d,间隔12 h计量脱出油量。

实验结果(图3)表明:油砂在未接种微生物的模拟地层水中,脱出原油很少,脱油效率很低,8 d时脱油效率仅为2%左右。油砂在未增氧的微生物菌液中,很快有原油脱出,且初期脱油速度较快,4 d后脱油速度趋缓,8 d时脱油效率达79%,脱油效率远

高于未接种微生物的模拟地层水。说明微生物的生长和代谢产物改变了原油性质及油、水和地层砂的界面性质,使吸附在砂粒上的原油易从砂粒表面脱落,脱油效率大幅度提高。当初始溶氧浓度为3.0,4.5和5.5 mg/L时,最终脱油效率分别为82%,87%和91%,比未增氧时分别提高3%,8%和12%。初始溶氧浓度增加时,菌液从油砂中脱出原油规律与未增氧时变化规律相同,只是初始溶氧浓度越高,初期和最终脱油效率越高,说明增大溶氧浓度可加速微生物生长繁殖,微生物生长最大浓度增大,使微生物对原油的降解、改变油水界面张力及岩石表面润湿性等提高采收率作用增强,进而提高微生物的驱油能力。

3 微生物耗氧后油藏内氧浓度变化规律

3.1 数学模型建立

假设某低温高含水油藏,因原油低温氧化耗氧

较少,故暂不考虑这部分耗氧量,仅考虑微生物耗氧,且油藏内微生物生长和耗氧规律与室内实验结果基本相同。因油藏发育大量孔隙,比表面积较大,可认为交替注入的空气与微生物菌液在油藏孔隙内充分分散,加上油藏高压,空气体积很小,空气在菌液中的分散程度更好,空气中的氧气也均匀分散在菌液中,注入空气的最大氧浓度为

$$c_{max} = \frac{Q_g T_g \rho_g \sigma_g}{Q_w T_w} \quad (3)$$

式中: c_{max} 为微生物菌液中注入空气的最大氧浓度, g/m^3 ; Q_g 为空气注入强度, Sm^3/d ; T_g 为周期内注空气时间, d ; ρ_g 为空气密度, g/Sm^3 , 其值为 1 195; σ_g 为空气中氧气质量比, 其值为 20%; Q_w 为注水强度, m^3/d ; T_w 为周期内注含确定浓度的微生物和培养基的水(简称注水)时间, d 。

在氧环境和培养基充足的条件下,注入油层内的微生物在井底附近完成对数生长期,进入稳定期,微生物生长达到较高浓度,稳定期初始氧浓度为

$$c_0 = c_{max} - c_s \quad (4)$$

式中: c_0 为油藏内微生物生长进入稳定期时的氧浓度, g/m^3 ; c_s 为微生物对数生长期耗氧量, g/m^3 。

假设微生物驱时有不断注入的足够的培养基,进入稳定期和衰退期时油藏内减少的微生物数量被不断生长的微生物所补充,氧浓度变化为该阶段总耗氧率与变化时间之积,因为在高含水期的注水井附近,孔隙内可认为全部为水,故氧浓度计算式为

$$dc = \frac{2\pi\gamma h\phi r}{Q_w} dr \quad (5)$$

式中: c 为氧浓度, g/m^3 ; γ 为稳定及衰退期微生物总耗氧率, $g/(m^3 \cdot d)$; h 为油层厚度, m ; ϕ 为油层孔隙度; r 为油藏半径, m 。

由式(5)可得 r 处氧浓度计算式为

$$c(r) = c_0 - \frac{\pi\gamma h\phi r^2}{Q_w} \quad (6)$$

式中: $c(r)$ 为 r 处氧浓度, g/m^3 。

3.2 计算与分析

模拟参数包括:油层厚度为 20 m,孔隙度为 0.25,假设微生物与空气交替注入周期为 6 个月,其中注空气 1 个月,注水 5 个月,注水强度为 $50 m^3/d$,对数生长期耗氧量、稳定及衰退期耗氧率均取 3 组实验的平均值,分别为 $3.65 mg/L$ 和 $0.233 mg/(L \cdot d)$ 。

由不同注空气强度下氧浓度分布(图 4)可知:注入空气强度越大,油层内初始氧浓度越高;油藏内微生物耗氧后,氧浓度随油藏半径呈指数下降。

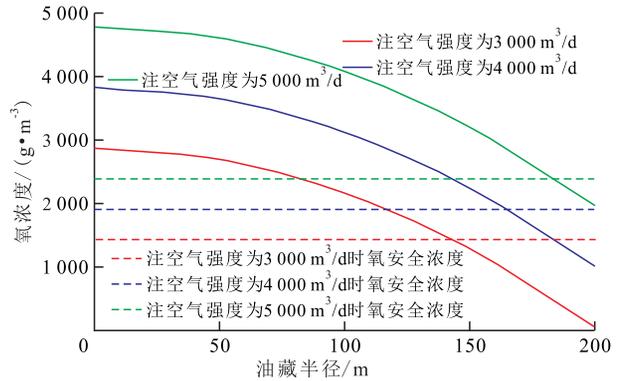


图 4 不同注空气强度下氧浓度分布

Fig.4 Oxygen concentration distribution with different air injection intensities

当注空气强度为 3 000, 4 000 和 5 000 m^3/d 时,经油藏内微生物耗氧,在半径 200 m 处,氧浓度分别为 60, 1 016 和 1 972 g/m^3 , 仍能满足微生物生长代谢对氧的需求,在油藏内形成了有利于微生物生长代谢的氧环境,提高了微生物生长代谢水平和驱油效率。同时微生物的生长代谢耗氧不断降低了氧浓度,进一步提高了空气驱的安全水平。

空气中氧气所占比例较小,微生物代谢时仅能将部分氧气变为二氧化碳,而其他组分不变,耗氧过程中空气质量基本不变。与甲烷等可燃气体混合后不发生爆炸的空气氧浓度为安全浓度,安全空气氧含量为 8%^[12]。3 种注空气强度下氧安全浓度分别为 1 400, 1 950 和 2 400 g/m^3 (图 4),与微生物耗氧后氧浓度分布曲线的交点对应的半径,为微生物耗氧到氧安全浓度的最小半径。大于该半径,氧浓度小于安全浓度,不会引起爆炸,空气驱安全。如再考虑原油的低温氧化耗氧,油藏内氧浓度更低,计算的安全半径更能保证安全。当注空气强度为 3 000, 4 000 和 5 000 m^3/d 时,微生物耗氧到氧安全浓度的最小油藏半径分别约为 145, 160 和 180 m。

不同注水强度下氧浓度分布(图 5)表明,在保持注空气强度为 4 000 m^3/d 不变的条件下,注水量

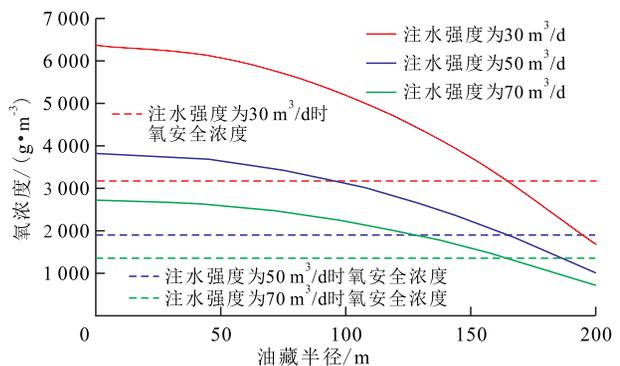


图 5 不同注水强度下氧浓度分布

Fig.5 Oxygen concentration distribution with different water injection intensities

越大,氧浓度越小;3种注水强度下微生物耗氧氧安全浓度的最小油藏半径相同,在165 m左右。

4 结论

增大溶氧浓度,驱油用兼性微生物生长代谢速率加快,初始溶氧浓度为4.5和5.5 mg/L时实验菌种生长最大浓度为未增氧时的3倍以上。

实验菌种耗氧规律为对数生长期溶氧浓度呈对数降低趋势,稳定期和衰退期溶氧浓度呈线性降低趋势;稳定及衰退期微生物总耗氧率为代谢耗氧率与补充衰减的生长耗氧率之和。实验菌种具有良好的脱油能力,脱油效率远高于模拟地层水;当初始溶氧浓度为3.0,4.5和5.5 mg/L时,菌液比未增氧时脱油效率分别提高3%,8%和12%,表明氧对微生物脱油能力有增效作用。

油藏内微生物耗氧后,氧浓度随油藏半径增大指数下降;注空气强度为3 000~5 000 m³/d时,微生物耗氧到氧安全浓度的最小油藏半径为145~180 m;200 m处,耗氧后剩余氧浓度为60~1 972 g/m³,可满足实验菌种生长对氧的需求,油藏内形成了有利的氧环境。

同一空气注入强度时,注水量越大,氧浓度越小;在注空气强度为4 000 m³/d、注水强度为30~70 m³/d的条件下,油藏内微生物耗氧到氧安全浓度的最小半径相同,约为165 m;再加上低温油藏原油低温氧化耗氧,耗氧到氧安全浓度的半径更小。

参考文献:

- [1] Lazar I. International MEOR application for marginal wells [J]. Pakistan Journal of Hydrocarbon Research, 1998, 10(6): 11-30.
- [2] Lazar I, Petrisor I G, Yen T F. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Petroleum Science and Technology, 2007, 25(14): 1 353-1 366.
- [3] Wahaibi Y A, Bemani A A, Bahry S A, et al. Microbial technology applications in wellbore stimulation and oil recovery enhancement: a review [J]. International Journal of Oil & Gas and Coal Technology, 2009, 2(4): 315-330.
- [4] 雷光伦. 微生物采油技术的研究与应用 [J]. 石油学报, 2001, 22(2): 56-61.
Lei Guanglun. The research and application of microbial enhance oil recovery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 56-61.
- [5] Gullapalli I L, Bae J H, Hejl K, et al. Laboratory design and field implementation of microbial profile modification process [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(1): 42-49.
- [6] 杨勇, 胡罡, 田选华. 水驱油藏剩余油再富集成藏机理 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 79-86.
Yang Yong, Hu Gang, Tian Xuanhua. Reservoir forming mechanism of remaining oil re-enrichment in water flooding reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 79-86.
- [7] 高配科, 马挺, 刘如林. 油藏微生物的代谢特征和生态结构调控 [J]. 微生物学报, 2011, 51(6): 711-717.
Gao Peike, Ma Ting, Liu Rulin. Microbial metabolic characteristics and ecological controlling in petroleum reservoir—a review [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(6): 711-717.
- [8] Moore R G, Meththa S A, Ursenbach M G. Air injection for oil recovery [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(8): 16-19.
- [9] Turat A T, Singhal A K. Reservoir engineering aspects of light-oil recovery by air injection [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001, 4(4): 336-344.
- [10] 任韶然, 杨昌华, 侯胜明, 等. 注气体积和轻质油藏空气驱机制的关系探讨 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3): 121-125.
Ren Shaoran, Yang Changhua, Hou Shengming, et al. Relationship between air volume and oil-recovery mechanism for light oil air injection process [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2012, 36(3): 121-125.
- [11] 杜玉山, 杨勇, 郭迎春, 等. 低渗透油藏地层压力保持水平对油水渗流特征的影响 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 72-76.
Du Yushan, Yang Yong, Guo Yingchun, et al. Impact of formation pressure maintenance on oil-water seepage characteristics in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 72-76.
- [12] Ren S R, Greaves M, Rathbone R R. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs [R]. SPE 57005, 2002.
- [13] 曹功泽, 巴燕, 刘涛, 等. 沾3区块内源微生物驱油现场试验 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(1): 145-147.
Cao Gongze, Ba Yan, Liu Tao, et al. Field pilot test of indigenous microbial flooding in Block Zhan-3 [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 145-147.
- [14] 袁志华, 冯永杰, 余家朝. 金昌油子洼地区微生物评价应用研究 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(6): 6-9.
Yuan Zhihua, Feng Yongjie, She Jiachao. Microbiology evaluation and application in Jinchang Youziwa area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 6-9.
- [15] 计秉玉, 赵宇, 宋考平, 等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.
Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.