

文章编号:1009-9603(2020)04-0111-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.04.013

低渗透油藏渗透率对CO₂驱重力超覆的影响规律

宋黎光^{1,2},赵凤兰^{2,3},冯海如^{1,2},王强^{1,2},娄小康^{1,2}

(1.中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,北京102249;2.石油工程教育部重点实验室,北京102249;3.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京102249)

摘要:为明确低渗透油藏渗透率对CO₂驱重力超覆的影响规律及相关机理,采用气驱超覆物理模型开展不同渗透率岩心的CO₂非混相和混相驱室内实验,以岩心气体突破时的上层采收率所占比重及岩心最终采收率等参数评价重力超覆程度,从而得出重力超覆规律,并分析其影响机理。实验结果表明,在较小渗透率变化范围内,渗透率增加对黏性力及重力的增加幅度影响较小,尤其在混相驱中,油气黏度和密度差异较小,渗透率增大后重力超覆的程度增加不明显;渗透率增加将增大非混相驱中气驱前缘移动速度,降低混相驱中油气混相程度,加之重力超覆程度加剧,最终采收率较低;韵律油层开发中可利用渗透率对重力超覆的影响规律,避免或利用重力超覆,尤其在CO₂非混相驱中,正韵律油层的开发效果会更好。

关键词:低渗透油藏;渗透率;CO₂驱;重力超覆;影响规律

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

Influence of permeability on gravity segregation during CO₂ flooding in low-permeability reservoirs

SONG Liguang^{1,2}, ZHAO Fenglan^{2,3}, FENG Hairu^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, LOU Xiaokang^{1,2}

(1. *Unconventional Oil and Gas Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China*; 2. *Key Laboratory of Petroleum Engineering of the Ministry of Education, Beijing City, 102249, China*; 3. *College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China*)

Abstract: In order to clarify the effect of permeability on gravity segregation and related mechanisms during CO₂ flooding in low-permeability reservoirs, the CO₂ immiscible and miscible flooding experiments on cores with different permeability are carried out according to gas gravity segregation model, and the recovery of top layer at gas breakthrough and final recovery are used to evaluate gravity segregation level and to reveal its mechanism. The results indicate that within a small permeability variation range, the increase of permeability has little effect on the increase of the viscosity and gravity, especially in miscible flooding, the viscosity and density difference of oil and gas are small, the increase of gravity segregation is not obvious after the permeability increase; the increase of permeability also increases the moving velocity of gas front and decreases the miscibility of oil and gas in immiscible flooding test, which produces a low final recovery with the influence of gravity segregation. The variation of gravity segregation with permeability can be applied to the production of rhythmic reservoirs to avoid or use the gravity segregation, especially in immiscible flooding, CO₂ flooding performance in positive rhythm reservoirs could be better under the gravity segregation.

Key words: low-permeability reservoirs; permeability; CO₂ flooding; gravity segregation; influence law

CO₂驱包括溶解降黏、膨胀原油、降低界面张力等驱油机理^[1-3],并且将CO₂注入油藏实现地质埋存

收稿日期:2020-04-09。

作者简介:宋黎光(1995—),男,安徽亳州人,在读硕士研究生,从事提高采收率与采油化学相关的科研工作。E-mail:s18341329948@163.com。

通信作者:赵凤兰(1973—),女,山东商河人,副教授,博士。E-mail:zhfl@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项“低渗-致密油藏高效提高采收率技术”(2017ZX05009-004)和“海外重点油气田开发钻采关键技术”(2017ZX05032-004)。

具有缓解温室效应和提高原油采收率的双重效益,对诸多油田开发具有较好的适应性^[4-6]。对于油层厚度较大的低渗透油藏而言,CO₂与原油存在密度差,在重力作用下CO₂会超覆至油层上部,运移至生产井,降低油藏纵向波及效率,因而重力超覆造成的气窜问题也是CO₂驱技术矿场应用应该考虑的问题^[7]。目前在中国有关CO₂驱重力超覆的研究较少,更多的是有关蒸汽超覆规律的认识^[8-10],其虽与CO₂驱重力超覆具有相似性,但CO₂与原油之间的相互作用与蒸汽有所不同,蒸汽超覆规律不能反映CO₂驱重力超覆的真实性,而国外更多的是以数值模拟方式研究多种因素综合影响下的重力超覆,很少对单因素下的重力超覆变化规律进行室内物理模拟,并且室内模拟难以接近油藏条件^[11-14]。

渗透率作为油气渗流能力的衡量尺度,是重力超覆过程中不可忽略的因素,且不同低渗透油藏渗透率差异较大,重力超覆在不同渗透率油藏的情况可能存在差异,不利于认识和缓解重力超覆,因而需明确渗透率对重力超覆的影响规律。数值模拟研究发现渗透率的增加将加剧重力超覆程度^[15],但室内物理模拟实验结果可能与数值模拟存在差异。为此,笔者根据低渗透厚油层油藏特征设计了高温高压气驱超覆物理模型,并根据重力超覆产生时产出端的产出特征设计不同的产出层位,通过上、下层产出流体差异表征重力超覆程度,并以此来研究不同渗透率及不同CO₂驱替类型下的重力超覆变化规律,以便明确渗透率对CO₂驱重力超覆的影响规律及机理,为低渗透油藏CO₂驱避免重力超覆、改善波及效率提供理论依据。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器 实验仪器主要包括ISCO泵、1 000 mL活塞中间容器、六通阀、2 cm×8 cm×60 cm的岩心夹持器以及采出计量装置(包括误差极小的回压阀、气液分离收集装置、Bronkhorst气体流量计)、压力传感器及其配套的压力数据计量设备、手摇计量泵、自控恒温箱(图1)。

实验材料 实验岩心为人工压制的均质低渗透岩心,尺寸为2 cm×8 cm×60 cm。实验用油为SL脱气原油,黏度和密度分别为1.24 mPa·s和0.788 g/cm³(实验温度为60℃),与CO₂的最小混相压力经Winprop计算约为18 MPa,实验用水为模拟地层水,总矿化度为72 597 mg/L, CaCl₂水型。实验用气为纯

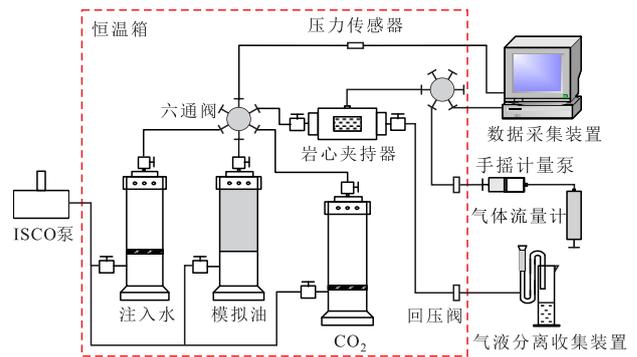


图1 实验装置

Fig.1 Illustration of experimental setup

度为99.9%的CO₂。实验流体性质如表1所示。

表1 实验流体性质
Table1 Experimental fluid properties

驱替类型	原油密度 (g/cm ³)	原油黏度 (mPa·s)	CO ₂ 密度 (g/cm ³)	CO ₂ 黏度 (mPa·s)	油气密度差 (g/cm ³)
非混相	0.788	1.24	0.285 8	0.025	0.502 2
混相	0.788	1.24	0.719 4	0.064	0.068 6

1.2 实验方法

实验步骤主要包括:①将采用露头砂压制的低渗透岩心在温度为80℃的空气浴中烘干12 h以上,并对岩心外观尺寸进行测量,确保岩心尺寸符合规格,岩心表面除注入端和产出端之外,均涂刷环氧树脂防腐层。②将岩心放置在岩心夹持器内,加环压至5 MPa,利用真空泵将岩心抽真空4 h以上,并将模拟地层水通过手摇计量泵注入抽真空后的岩心内填充孔隙体积,直到手摇计量泵上的压力示数不变为止,并通过饱和和地层水前后的手摇计量泵示数差值计算饱和和水体积,从而确定岩心孔隙体积。③使用ISCO-100DX高压恒压恒速泵,将地层水以0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mL/min的注入速度注入岩心,通过岩心两端驱替压差及注入速度,依据达西公式计算岩心平均渗透率。④将装有原油及CO₂的中间容器及岩心夹持器升温至实验温度为60℃,待压力传感器监测的岩心夹持器环压稳定后,转动岩心夹持器将岩心水平放置,以0.05 mL/min的注入速度将原油注入岩心,驱替地层水至无水产出为止,再将产出端与回压阀相连,固定回压阀压力为实验所需压力,继续饱和原油至上、下层出口产出原油相近,计算饱和油体积,得出含油饱和度。⑤关闭岩心所有出入口,将岩心老化24 h以上,转动岩心夹持器使岩心竖直放置,将CO₂以0.1 mL/min的注入速度驱替岩心内原油,同时打开上、下产出端出口,分别计量其产出油、气量,气驱至任意产出端气油比超过3 000 m³/m³后停止实验,对岩心上、下产出端产出

油、气量进行计算。⑥更换岩心,进行下一组实验(表2)。

表2 岩心基础数据及实验参数
Table2 Basic parameters of cores and experimental parameters

样品编号	驱替类型	渗透率(mD)	孔隙体积(mL)	含油饱和度(%)	实验压力(MPa)
1	非混相	3.5	110	57.3	10
2	非混相	10	145	56.6	10
3	非混相	17.6	160	60.3	10
4	混相	4.6	100	63.5	20
5	混相	12.5	120	63.3	20

2 实验结果与分析

2.1 非混相驱

2.1.1 流体产出状况

从图2可以看出,渗透率由3.5 mD增至17.6 mD

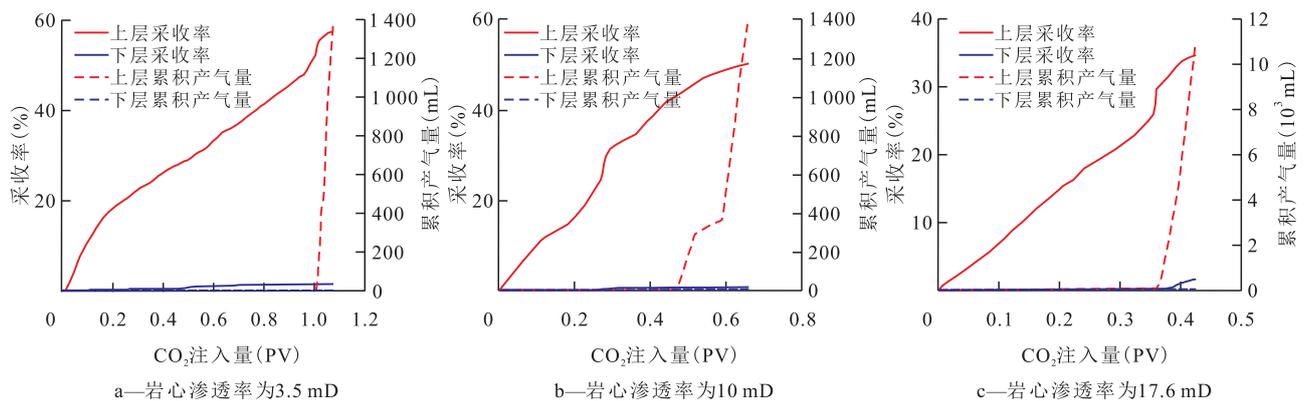


图2 非混相驱岩心上、下层驱替动态曲线

Fig.2 Dynamic displacement curves of top and bottom layers in immiscible flooding test

上层采收率比重随渗透率变化(图3)可以看出,随渗透率的变化,气体突破时岩心上层采收率比重有略微上升的趋势,说明渗透率由3.5 mD增至17.6 mD时,重力超覆有略微的加剧,但变化不明显,分

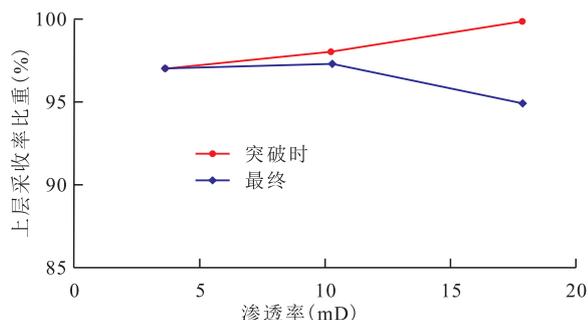


图3 非混相驱渗透率与上层采收率比重的变化

Fig.3 Variation of top layer oil recovery proportion with permeability in immiscible flooding test

时,岩心上、下层产出差异明显,岩心上层先产出油,下层产出油极少,上、下层采收率差异也较大,采收率主要由岩心上层贡献,因而当注气速度为0.1 mL/min时,不同渗透率岩心CO₂非混相驱均有严重的重力超覆产生,非混相驱实验压力为10 MPa,实验温度为60 ℃,油气密度差高达0.5 g/cm³,在较低注气速度下,油气密度差引起的重力作用明显,因而形成了明显的重力超覆。在CO₂重力超覆影响下原油由岩心上层产出,将进一步降低其对岩心下层的波及效率,见气后不同渗透率岩心下层采收率均缓慢增加,直至岩心上层形成气窜后,岩心下层仍缓慢产出油,可见重力超覆的形成使注入气过早突破,严重降低CO₂对岩心下层的波及效率,岩心下层较多原油滞留在岩心孔隙内无法产出。

2.1.2 重力超覆规律

为了直观反映重力超覆程度及分析其变化规律,气体突破时的岩心上层采收率所占总采收率比重表征重力超覆程度,从3组渗透率岩心非混相驱

析认为实验中岩心渗透率的变化范围较小,对黏性力和重力比值的影响效果不明显,黏性力与重力的综合作用效果变化幅度小,因而形成的重力舌进长度随渗透率的增大而缓慢增大,若进一步增大渗透率,可能会扩大重力的作用效果,使重力逐渐占据主导,重力超覆将加剧;最终上层采收率比重随渗透率增加略降低,原因是见气后岩心渗透率较大,CO₂沿上层的驱替阻力相对较低,降低了油气同产阶段岩心上层的采收率,从而降低了上层最终采收率比重。

将岩心上、下层驱替数据及整体情况进行对比,可进一步了解重力超覆随渗透率的变化规律(表3)。

随渗透率的增加,气体突破时间缩短,重力超

表3 非混相驱岩心上、下层驱替结果
Table3 Displacement results of top and bottom layers in immiscible flooding test

岩心 渗透率 (mD)	气体突 破时间 (PV)	突破时 采收率(%)			突破时上 层采收率 比重(%)	最终 采收率 (%)
		上层	下层	总体		
3.5	1.000	55.2	1.6	56.8	97.2	59.9
10	0.458	40.61	0.73	41.34	98.2	49.5
17.6	0.356	26	0	26	100	37

覆增加幅度小,结合气体突破时的上、下层采收率变化认为,渗透率增加,气驱阻力降低,气驱前缘移动速度增加,CO₂与原油的接触时间和驱油效率有所降低,因而随渗透率增加,岩心上、下层气体突破时的采收率均降低,分别由55.2%降至26%,1.6%降至0,总体采收率也因此由56.8%降至26%;CO₂突破时上层采收率所占总采收率比重则随渗透率的增大而缓慢增加,由97.2%增至100%,最终采收率也因重力超覆加剧而明显降低,说明渗透率的增加不但增大了CO₂非混相驱的重力超覆程度,同时还降低了驱油效率,使岩心整体采收率进一步降低,因而渗透率较高的岩心,最终采收率仅为37%,而重力超覆程度相对较弱的渗透率为3.5 mD岩心的最终采收率为59.9%。

重力超覆的形成和发展主要受制于黏性力和重力的综合作用效果,油、气密度差引起的重力是重力超覆形成的根本原因,而黏性力则影响重力超覆的发展状态,2种力的综合作用关系可用黏性力与重力的比值关系式^[16]表示为:

$$R_{v/g} = \frac{\mu\mu_o L}{Kg\Delta\rho H} \quad (1)$$

在仅改变渗透率的情况下,随渗透率的增大, $R_{v/g}$ 减小,意味着黏性力与重力的比值减小,黏性力对重力的限制程度减弱,重力超覆加强。对于渗透率分布变化的厚油层而言,若渗透率较高的层位位于油层上部,即反韵律油层,重力超覆将在渗透率的影响下快速形成并发展,而若渗透率较高的层位位于油层下部,即正韵律油层,渗透率差异将抵消重力作用,舌进趋于向渗透率较高的层位发展,重力超覆将减弱。

2.2 混相驱

2.2.1 流体产出状况

CO₂混相驱涉及到油气混相,与非混相驱明显不同,因而渗透率对重力超覆的影响规律存在差异。从CO₂混相驱2组实验不同渗透率岩心上、下

层驱油动态变化(图4)可以看出,渗透率为4.6和12.5 mD的岩心上、下层采收率差均较小且见气,表明混相驱时重力超覆程度较非混相驱时弱,原因是混相驱实验压力较高,为20 MPa,60℃下的油气密度差仅为0.069 g/cm³,油气密度差引起的重力作用微弱,相同注气速度0.1 mL/min下,黏性力作用效果相近,而重力作用减弱,重力受到黏性力的抑制程度增加,重力超覆减缓。此外,渗透率由4.6 mD增至12.5 mD后,岩心上、下层采收率差异相近,产气情况类似,重力超覆程度增加均不明显。

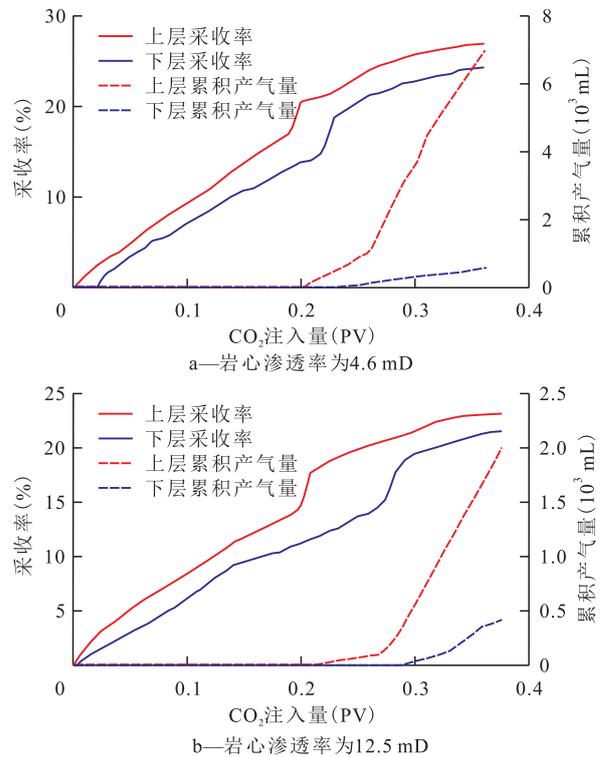


图4 混相驱岩心上、下层驱替动态曲线

Fig.4 Dynamic displacement curves of top and bottom layers in miscible flooding test

2.2.2 重力超覆规律

从混相驱时岩心上层采收率比重随渗透率变化(图5)可以看出,不论是气体突破时的上层采收

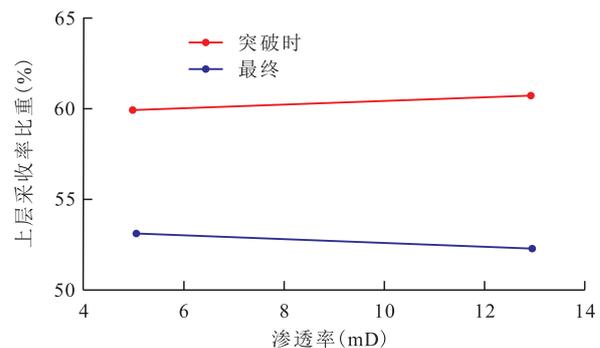


图5 混相驱渗透率与岩心上层采收率比重的变化

Fig.5 Variation of top layer oil recovery proportion with permeability in miscible flooding test

率比重还是最终上层采收率比重,随渗透率增加均未发生明显变化,渗透率对重力超覆的影响规律与非混相驱相似,但影响程度较小。因而分析认为,渗透率对CO₂混相驱重力超覆以及黏性力和重力比值的影响程度均较小,原因是混相驱存在油气混相且实验压力较高,油气黏度差和密度差均相对较小,在较小的渗透率变化范围内,黏性力与重力综合作用效果变化幅度也较小,因此随渗透率增加,重力超覆程度增加不明显。

将2组实验岩心上、下层驱替数据进行对比,由表4可知,当渗透率由4.6 mD增至12.5 mD后,气体突破时间基本未变,而渗透率的增加降低了CO₂与原油的混相程度,渗透率较大岩心的孔隙度和孔隙空间相对较大,不利于油气混相的快速进行,因而气体突破时上、下层采收率分别由20.47%降至17.63%和13.85%降至11.58%,突破时总采收率也由34.33%降至29.21%;气体突破时的上层采收率所占总采收率比重未因渗透率增加而明显增加,仅由59.6%增至60.3%,说明对于渗透率不同的2块岩心,在CO₂混相驱中形成的重力舌进大小相近,在相同的波及效率下,随着渗透率的增加,降低了油气混相程度,从而使驱油效率下降,并且导致渗透率相对较高的岩心最终采收率降低,由51.7%降至44.7%。

表4 混相驱实验岩心上、下层驱替结果
Table4 Displacement results of top and bottom layers in miscible flooding test

岩心 渗透率 (mD)	气体突 破时间 (PV)	突破时 采收率(%)			突破时上 层采收率 比重(%)	最终 采收率 (%)
		上层	下层	总体		
4.6	0.200	20.47	13.85	34.33	59.6	51.7
12.5	0.208	17.63	11.58	29.21	60.3	44.7

根据(1)式可知, $R_{v/g}$ 随渗透率的增大而增大,但由于混相驱CO₂与原油互溶使油气密度差异和黏度差异均较小,渗透率增加对两种力的作用程度较小, $R_{v/g}$ 的降低以及CO₂混相驱重力超覆程度变化均不明显,因而油藏非均质性或韵律分布对CO₂混相驱开发影响较小,但正韵律油层的渗透率分布有利于缓解重力超覆程度,能改善CO₂混相驱开发效果。

由于CO₂非混相及混相驱实验中所使用的的岩心渗透率变化范围较小,实验结果所呈现的重力超覆变化规律不明显,根据CO₂非混相驱和混相驱实验结果及理论分析可知,若增加渗透率变化范围,重力超覆随渗透率增加而增加的程度将更为明显。

3 结论

非混相驱中,由于油、气密度差较大而形成严重的重力超覆,渗透率增加对CO₂非混相驱的重力超覆加剧程度较小,渗透率影响下岩心整体波及效率因重力超覆略微加剧而降低,加之渗透率增加导致的气驱前缘移动速度的增加,岩心最终采收率下降;在混相驱中,油气密度差较小,形成的重力超覆微弱,而渗透率对CO₂驱重力超覆影响较非混相驱小,重力超覆随渗透率增加而增大的幅度更小,而渗透率增加将降低油气混相程度,波及区域的驱油效率下降导致岩心最终采收率降低;根据渗透率对CO₂驱重力超覆的影响规律,对于韵律油层而言,尤其是实施CO₂非混相驱的油层,正韵律油层渗透率分布将有助于缓解重力超覆程度,改善开发效果,反韵律油层将加剧重力超覆程度,严重降低CO₂驱波及效率。

由于所选渗透率范围较小,渗透率对CO₂驱重力超覆影响规律不明显,但分析其影响机理认为,渗透率对黏性力和重力均有影响,对重力超覆的影响幅度较小,而油、气密度差对重力超覆影响明显,因而应适当提高驱替压力,降低油、气密度差,缓解重力超覆程度。

符号解释

- g ——重力加速度, m/s²;
 H ——岩心厚度, cm;
 K ——岩心渗透率, cm²;
 L ——岩心长度, cm;
 $R_{v/g}$ ——黏性力与重力的比值;
 μ ——线速度, cm/s;
 μ_o ——原油黏度, mPa·s;
 $\Delta\rho$ ——油气密度差, g/cm³。

参考文献

- [1] 马涛, 汤达祯, 蒋平, 等. 注CO₂提高采收率技术现状[J]. 油田化学, 2007, 24(4): 379-383.
 MA Tao, TANG Dazhen, JIANG Ping, et al. The status of enhanced oil recovery by CO₂ injection [J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(4): 379-383.
- [2] 朱仲义, 李延军. CO₂驱提高原油采收率研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 16(7): 16-18.
 ZHU Zhongyi, LI Yanjun. Overview of enhancing oil recovery by carbon dioxide flooding [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 16(7): 16-18.

- [3] 高慧梅,何应付,周锡生.注二氧化碳提高原油采收率技术研究进展[J].特种油气藏,2009,16(1):6-12.
GAO Huimei, HE Yingfu, ZHOU Xisheng. Research progress on CO₂ EOR technology [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16 (1):6-12.
- [4] 吴忠宝,甘俊奇,曾倩.低渗透油藏二氧化碳混相驱油机理数值模拟[J].油气地质与采收率,2012,19(3):67-70.
WU Zhongbao, GAN Junqi, ZENG Qian. Numerical simulation of CO₂ miscible flooding in low-permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(3):67-70.
- [5] 蒲万芬,孙波帅,李一波,等.塔河缝洞型超稠油油藏二氧化碳驱实验研究[J].特种油气藏,2016,23(4):123-126.
PU Wanfen, SUN Boshuai, LI Yibo, et al. CO₂ flooding experiment of super-heavy oil reservoir in Tahe Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4):123-126.
- [6] 赵凤兰,宋黎光,侯吉瑞,等.浅层边水断块油藏氮气复合吞吐实验[J].油气地质与采收率,2019,26(3):85-91.
ZHAO Fenglan, SONG Liguang, HOU Jirui, et al. Experiment of nitrogen compound huff and puff for fault-block reservoirs with shallow edge water [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3):85-91.
- [7] 杨彪,唐汝众,栾传振,等.国外CO₂驱油防止粘性指进和重力超覆工艺[J].断块油气田,2003,10(2):64-66.
YANG Biao, TANG Ruzhong, LUAN Chuazhen, et al. The technology of preventing CO₂ breakthrough and gravity segregation abroad [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2003, 10(2):64-66.
- [8] 刘尚奇,王晓春,杨立强,等.蒸汽超覆对块状超稠油油藏剩余油分布影响研究[J].特种油气藏,2005,12(1):29-32.
LIU Shangqi, WANG Xiaochun, YANG Liqiang, et al. Influence of steam overlay on residual oil distribution in massive super heavy oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(1):29-32.
- [9] 高永荣,闫存章,刘尚奇,等.利用蒸汽超覆作用提高注蒸汽开发效果[J].石油学报,2007,28(4):91-94.
GAO Yongrong, YAN Cunzhang, LIU Shangqi, et al. Improving steam injection performance using steam overlap [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4):91-94.
- [10] 李岩.稠油油藏选择性射孔抑制蒸汽超覆三维物理模拟与优化[J].油气地质与采收率,2018,25(3):117-121.
LI Yan. Three-dimensional physical simulation and optimization of selective perforation to control steam overlap in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25 (3):117-121.
- [11] ROSSEN W R, SHEN C. Gravity segregation in gas-injection IOR [R]. SPE 107262, 2007.
- [12] JAMSHIDNEZHAD M, SHEN C, KOOL P H, et al. Well stimulation and gravity segregation in gas improved oil recovery [R]. SPE 112375, 2008.
- [13] NZEKWU B L, BENNION D W. Mobility control in dynamic gravity segregation flow systems [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1987, 26(4):80-85.
- [14] MOHIUDDIN, STOKES Y, HAGHIGHI M. Pore level simulation of miscible injection with gravity domination [J]. Energy Procedia, 2013, 37:6 685-6 900.
- [15] SPIVAK A. Gravity segregation in two-phase displacement processes [R]. SPE 4630, 1974.
- [16] HAN J, LEE M, LEE W. Effect of gravity segregation on CO₂ sequestration and oil production during CO₂ flooding [J]. Applied Energy, 2016, 161(1):85-91.

编辑 王星