

鄂尔多斯盆地长 7 致密油储层岩心渗吸试验

屈雪峰^{1,2}, 雷启鸿^{1,2}, 高武彬^{1,2}, 张 龙³, 何右安^{1,2}, 王 博^{1,2}

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 3. 中国石油长庆油田分公司, 陕西西安 710018)

摘要:根据对水渗吸理论和渗吸试验的研究, 渗吸作用力主要为重力和毛细力, 两种作用力在不同渗吸条件和渗流阶段占不同的主导地位。采用核磁共振技术, 结合长 7 致密油岩心渗吸试验, 在核磁分析岩心内部孔喉结构和精确度量油水饱和度变化的前提下对渗吸结果进行分析。结果表明: 静态渗吸采收率与 Bond 数的倒数密切相关, 鄂尔多斯盆地长 7 致密岩心渗吸采收率为 30% ~ 35%, 最佳渗吸采收率时的 Bond 数倒数值约为 1。对比动态渗吸驱替与静态渗吸试验结果发现, 驱替速率越小, 大孔喉内原油采收率越低, 而小孔喉内的油水饱和度基本相同。鄂尔多斯盆地致密油长 7 储层渗吸规律的研究, 为致密油注水吞吐开发、提高裂缝性水湿油藏的采收率提供理论基础。

关键词:致密油; 核磁共振; 自发渗吸; 注水吞吐; 渗流机制

中图分类号:TE 135 **文献标志码:**A

引用格式:屈雪峰, 雷启鸿, 高武彬, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油储层岩心渗吸试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 102-109.

QU Xuefeng, LEI Qihong, GAO Wubin, et al. Experimental study on imbibition of Chang7 tight oil cores in Erdos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(2): 102-109.

Experimental study on imbibition of Chang7 tight oil cores in Erdos Basin

QU Xuefeng^{1,2}, LEI Qihong^{1,2}, GAO Wubin^{1,2}, ZHANG Long³, HE Youan^{1,2}, WANG Bo^{1,2}

(1. Exploration & Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China;
2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China;
3. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: The spontaneous imbibition in porous media, as one of frontier subjects in percolation studies of fractured reservoirs, has been investigated in the development of tight oil reservoirs via water-flood huff and puff process. It has indicated that, based on the current research, water imbibition mainly depends on the relative contribution of capillary and gravity forces, which are dominated by different regimes in different fluid systems. In this study, based on the NMR analysis method, the imbibition experiments of Chang7 tight oil cores were carried out, and the experimental data were analyzed with fully understanding the pore-throat structures and accurate oil/water saturation from the NMR analysis. The experimental results show that the final oil recovery is closely related to the inverse Bond number in static imbibition experiments. The ultimate oil recovery of Chang7 tight oil cores is 30% ~ 35%, and the critical inverse Bond number required to achieve the maximum oil recovery is about 1. In comparison of the static imbibition and dynamic displacement experiments, the results show that the smaller of the dynamic displacement rate, the lower of the oil recovery in the large pore-throat regions, while the distribution of oil and water saturation is basically the same in small pore-throat regions. The experimental study on the water imbibition of Chang7 tight oil cores in Erdos Basin can provide useful guidelines for improved oil recovery via applying the water-flood

huff and puff technique in tight and fractured oil reservoirs.

Keywords: tight oil reservoir; NMR analysis; spontaneous imbibition; water-flood huff and puff; percolation mechanism

渗吸是一种水湿裂缝性油藏在受到水驱时重要的提高采收率的因素,是注水吞吐过程中重要的采油机制之一^[1-5]。在多孔介质中,水渗吸依靠毛细管力和重力等共同作用于流体,使流体发生流动,这些力使水从裂缝渗吸流入到水湿的、含油的基质岩石中,引起原油从基质向裂缝渗流,通过大量研究发现利用水渗吸获得的油藏采收率通常较低。关于渗吸理论的研究,最早起源于对裂缝油藏采收率的研究中^[6-8],而在注水吞吐采油过程中的研究甚少^[9-10]。目前对渗吸的研究已从传统的理论模型、数值模拟及试验研究基础上,已发展到对储层孔隙结构和裂缝分布的分形理论研究阶段^[11-22]。Lucas^[23]和 Washburn^[24]通过分析单一毛细管和多孔介质中水的自吸现象,最先研究建立了 Lucas-Washburn (LW) 自吸模型,该模型为后续相关研究提供了理论基础,此后 Terzaghi^[25]、Handy^[26]、Li 和 Horne 等^[27-28]都在结合试验研究分析的基础上,通过不同的条件假设推导出了不同的渗吸流动模型。其中,Al-Lawati 等^[29]较为完善地总结分析了试验中水渗吸的基本渗流规律,论证分析了自发渗吸试验过程中 3 种不同的渗吸阶段,同时通过对不同渗透率 (大于 $2.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、不同界面张力下的岩心渗吸试验分析,获得了发挥最佳毛细管力作用时的岩心渗吸条件。笔者在前人研究的基础上,针对鄂尔多斯盆地长 7 致密油岩心 (空气渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 开展渗吸试验研究。

1 静态渗吸试验

静态渗吸试验主要分析在没有外界压差作用情况下静止致密油岩心在不同渗吸溶液中的渗吸采收率。试验通过改变渗吸溶液中的油水界面张力,获得不同毛细管力作用下岩心渗吸结果。试验中静态渗吸仪结构与 Allawati 等^[39]所采用仪器结构相同,仪器示意图如图 1 所示。试验借助于核磁共振仪对不同时间的岩心开展分析,精确计算岩心中含油水饱和度变化,继而有效减少静态渗吸仪中直观的刻度观察给渗吸结果带来的试验误差,了解不同孔喉中油水饱和度动态变化和分布规律。

岩样核磁共振分析是利用氢原子核在外加磁场的作用下形成核磁共振现象的这一特性,测量样品

在不同处理阶段的核磁共振信号以及该样品的横向弛豫时间 (T_2) 截止值,从而可以准确地求取储层的可动流体饱和度^[30-33]。

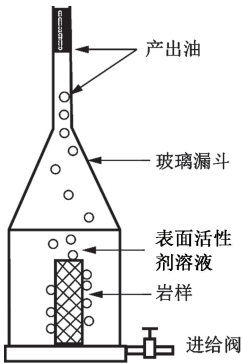


图 1 渗吸仪示意图

Fig. 1 Sketch map imbibition apparatus

1.1 试验条件

试验岩心取自鄂尔多斯盆地 3 口长 7 储层取心井,在渗吸试验前首先测量岩心的孔隙度和渗透率,同时将全直径岩心切割为直径和长度均约为 2.5 cm 的柱状体 (表 1)。

表 1 静态渗吸试验岩心基础数据

Table 1 Properties of experimental cores for static imbibition

岩心 编号	长度 L/cm	直径 D/cm	孔隙度 $\varphi/\%$	空气渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$
L2 1-2	2.306	2.508	8.49	0.139
A2 5-2	2.606	2.510	8.89	0.081
M2 1-2	2.360	2.508	9.81	0.150

试验设备包括恒温箱、恒压恒速泵、静态渗吸仪以及纽迈科技生产的 MicroMR23-025 VII 23 MHz 核磁共振分析仪。核磁测试基础参数为等待时间 3 s、回波间隔 0.251 ms、扫描次数 16 次、回波个数 2000 个。整个静态渗吸试验温度为地层温度 60 ℃。试验流体包括地层水 (水型 CaCl_2 、矿化度 53.9 g/L、60 ℃下密度 1020.5 kg/m^3 、60 ℃下黏度 $0.523 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)、去氢核模拟油 (氟氯平衡液、60 ℃下密度 1738.8 kg/m^3 、60 ℃下黏度 $1.533 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 与地层原油黏度相当,详细信息参照文献^[33])。去氢核模拟油在核磁中起屏蔽原油信号的作用。

试验用表面活性剂为长庆油田压裂用 TOF-1,实测的 TOF-1 质量分数分别为 5%、0.5%、0.05% 和 0.005%,对应的不同地层水溶液下水界面张

力分别为 0.290、1.183、3.750 和 10.436 mN/m。

1.2 试验步骤

- (1)将切割好的岩心洗油,烘干,测其干重及尺寸。
- (2)气测孔隙度、渗透率。
- (3)将岩心抽真空 24 h 至 9.4 mPa,加压至 30 MPa 下饱和地层水 3 d,并称其湿重,计算水测孔隙度。
- (4)将 100% 饱和模拟地层水的岩心置于核磁共振岩心分析仪中,进行核磁共振测量,并反演计算出 T_2 弛豫时间谱。
- (5)将岩心放入岩心夹持器中(试验仪器及流程如图 2 所示),加环压,先以小流速用去氢模拟油驱替至出水量不再增加,然后加大排量至某一最大注入压力驱至地层条件下的束缚水饱和度,停泵卸压,恒温老化 24 h。取出岩心进行束缚水饱和度下岩心的核磁共振测试,得到束缚水状态下的 T_2 弛豫时间谱。

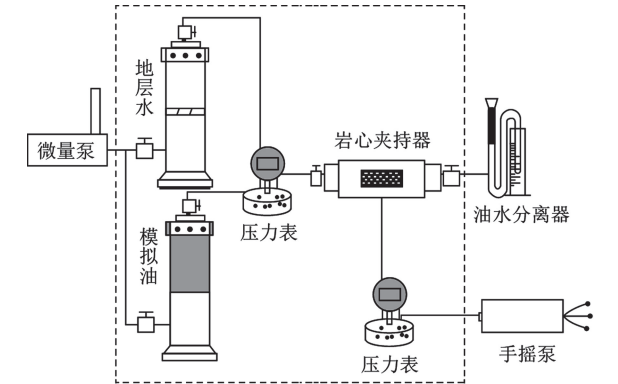


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of imbibition experiment

- (6)将取出的岩心放入静态渗吸仪中,加入待测水溶液(为了增加试验的准确性,将配制好的溶液及吸水仪都先放到恒温箱中恒温 0.5 h),每隔一定的时间取出岩心,测其质量及 T_2 弛豫时间谱(核磁测试总时间约 5 min),直至质量不发生变化为止(根据测试结果统一试验时间为 10 d)。
- (7)渗吸结束后,岩心重新洗油,抽真空饱和水,油驱水造束缚水(重复步骤(2)~(5)),然后换用不同的渗吸液,重复试验步骤(6)。

2 动态渗吸试验

为了更加详细分析对比出动态渗吸驱替与静态渗吸之间的区别,此次研究采用恒速水驱的办法对渗吸试验进行研究,主要目的是模拟地层原油在压差作用产生流动条件下的渗吸过程。

2.1 试验准备

动态渗吸驱替试验岩心与静态渗吸试验中的

M2 1-2 岩心来自同一口井和同一个长 7 层段,如表 2 所示。动态驱替试验与静态渗吸试验所用试验设备基本相同,且试验中均采用相同的地层水和模拟油。试验条件均一致,试验中驱替流程与静态试验中造束缚水流程一致(图 2)。

试验改变进入端的压差,以某个恒定速度(0.05、0.01 和 0.1 mL/min)进行驱替,通过核磁共振分析其驱替结束时(时间 10 h)的油水饱和度分布。

表 2 动态渗吸驱替试验岩心基础数据

Table 2 Properties of experimental cores for dynamic displacement

岩心 编号	长度 <i>L</i> /cm	直径 <i>D</i> /cm	孔隙度 φ /%	空气渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	驱替速度 $v/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$
M2 1-3	2.872	2.510	9.10	0.200	0.10
M2 2-1	2.738	2.504	9.93	0.181	0.05
M2 2-2	2.590	2.502	9.93	0.181	0.01

2.2 试验步骤

在动态渗吸驱替试验中,其前(1)~(5)步与静态渗吸试验相同,步骤(6)更改为以试验设计的某个恒定速度(0.01、0.05 以及 0.1 mL/min)驱替 10 h 至稳定,停泵取出岩心进行核磁共振测试,得到最终驱替状态下的 T_2 弛豫时间谱。

3 试验结果分析

3.1 静态渗吸试验结果

通过静态渗吸仪与核磁共振分析,对不同时刻的饱和度变化进行测量,在 60 ℃ 试验温度下,渗吸结束(10 h)时的驱油效率见表 3。

表 3 不同岩心、不同渗吸水溶液中驱油效率

Table 3 Experimental results of displacement efficiency under different imbibition water system with different experimental cores

岩心 编号	最终驱油效率 R /%			
	5% TOF-1	0.5% TOF-1	0.05% TOF-1	0.005% TOF-1
M2 1-2	29.977	34.941	28.068	25.003
L2 1-2	30.351	31.313	29.750	22.918
A2 5-2	29.263	30.885	25.956	24.720

从表 3 中可以看出,在 0.5% TOF-1 溶液中,即油水界面张力为 1.183 mN/m 条件下的最终渗吸驱油效率最高(大于 30%)。

在静态渗吸过程中,Duprey^[34]提出渗吸采出程度与 Bond 数的倒数相关,即用 N_{B-1} 表征毛管力和重力的比值:

$$N_{B-1}=C\frac{\sigma\sqrt{\varphi/k}}{\Delta\rho gH}.$$

(1)

式中, C 为常数(毛管束模型中 $C=0.4$); σ 为界面张力, mN/m ; φ 为孔隙度; k 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ρ 为密度差, kg/m^3 ; g 为自由落体加速度, m/s^2 ; H 为岩心高度, m 。

从式(1)定义可以看出,当 N_{B-1} 很大时,毛管力在流动中占主导;同时当 N_{B-1} 为 0 时,重力占主导。本次试验也主要采用该研究方法对试验结果进行分析,其基本思路与 Allawati 等的分析思路相同。Allawati 等采用试验方法,对不同渗透率 (2.6×10^{-3} 、 293.5×10^{-3} 、 1190×10^{-3} 和 $1910 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 岩心开展静态渗吸试验,得出界面张力具有一个临界值,使渗吸出的原油采出程度大幅度增加,这个临界条件值 N_{B-1} 约等于 1。为更清晰地分析静态渗吸 N_{B-1} 与采出程度之间的关系,将本次岩心静态试验结果和 Allawati 等的试验结果进行对比,如图 3 所示。

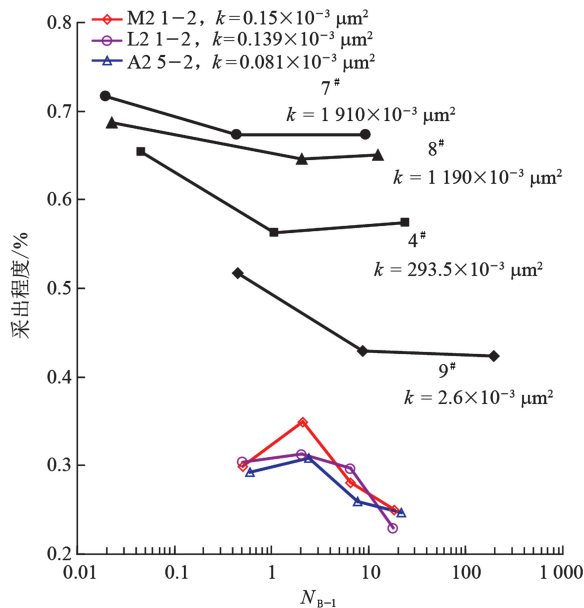


图3 静态渗吸试验结果与 Allawati 试验结果

Fig.3 Results of static imbibition with Allawati's experimental results in same plot

根据图 3 中此次试验的结果和 Allawati 等试验结果曲线对比,可以看出:较低油水界面张力的流体会减小毛管力,明显增加最终采收率;岩心渗透率越低,渗吸采收率越低,这与 Allawati 等的研究结果相一致。

受核磁分析对试验流体要求的影响,在重力对油水分离较弱的情况下,即 $N_{B-1} < 1$ 时,原油的渗吸采收率并未像 Allawati 等的试验结果一样持续大幅度增加,而相对较低。分析其主要原因是此次试验受流体密度和岩心长度的影响。试验中去氢核油密度为 1738.8 kg/m^3 (大于地层水溶液密

度 1020.5 kg/m^3 ,受当前技术条件限制该模拟油仅能配制为该密度),而 Allawati 等采用的是正癸烷,其密度接近于地层原油密度。同时试验岩心的垂向高度受此次核磁共振分析设备的要求,约为 2.5 cm (小于 Allawati 的试验岩心高度 13 cm)。这些因素共同使此次岩心静态渗吸过程中重力作用力相对较弱。

静态渗吸试验过程中不同渗吸溶液下的采出程度与时间之间关系曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出:当 $N_{B-1} = 0.5$ 时(图 4(a)),重力作用在渗吸流动中占主导,渗透率越低、孔隙越细小,在相同的界面张力条件下,毛管力越大,初期采出程度越高;当 $N_{B-1} = 2.1$ 时(图 4(b)),岩心渗吸采收率最高(3 块不同渗透率岩心的最终渗吸驱替采收率均大于 30%);在较大的界面张力下 ($0.005\% \text{ TOF-1}$, 油水界面张力 $F_{\text{IFT}} = 10.436 \text{ mN/m}$),毛管力占主导作用,渗透率越低,初期渗吸采出程度相对较低,但曲线上斜率增大、渗吸速率越高,最终的采出程度相对于较低毛管力作用下的原油采出程度更低。

试验采用核磁共振饱和度分析技术,根据基质岩心动态渗吸核磁 T_2 谱曲线,以最终驱替曲线两峰凹点为界(称为 T_2 凹点), T_2 凹点左边为小孔喉, T_2 凹点右侧为大孔喉^[35-36]。根据试验岩心 A2 5-2 核磁共振分析的结果,绘制孔隙度分量图,如图 5 所示。

根据图 5 中核磁共振分析结果得出:相同的岩心(A2 5-2)在不同的油水界面张力渗吸地层水中,小孔喉内的去氢核油均快速被水所置换,当 $N_{B-1} = 0.5$ 时(图 5(a)),在相同的时间内(1 d),大孔喉中充满渗吸流体程度较大,重力作用占主导;而当 N_{B-1} 较大时(图 5(b)),界面张力较大,毛管力占主导作用,随着静态渗吸时间的增加,地层水不断渗入到大孔喉中,大孔喉的充满程度与时间呈比例关系。对于中间值的 N_{B-1} ,在重力和毛管力综合作用下渗吸作用力最强,此时重力引起较大的油水分离,而毛管力也足够促使流体发生反向渗流,渗吸速率比毛管力占主导或重力占主导时的流动速率更高。

3.2 动态渗吸试验结果

动态渗吸驱替试验主要是通过加压以恒定的流速将地层水注入束缚水条件下饱和去氢核油的岩心内,实现动态注水驱替与静态水渗吸相结合的水驱油过程。真实反映储层中油水在压差作用下流入井底的过程与基质中渗吸作用下的含油饱和度变化。

此次试验采用与 M2 1-2 同井、同一层位的 3 块岩心,分别开展不同的注入速度进行动态渗吸驱

替的试验。岩心动态渗吸驱替试验时间为 10 h, 分别在驱替前束缚水饱和度、驱替后剩余油饱和度条件下进行核磁共振分析。动态渗吸最终采收率如表

4 所示。由试验结果可知, 随着驱替速度的降低, 采收率降低。

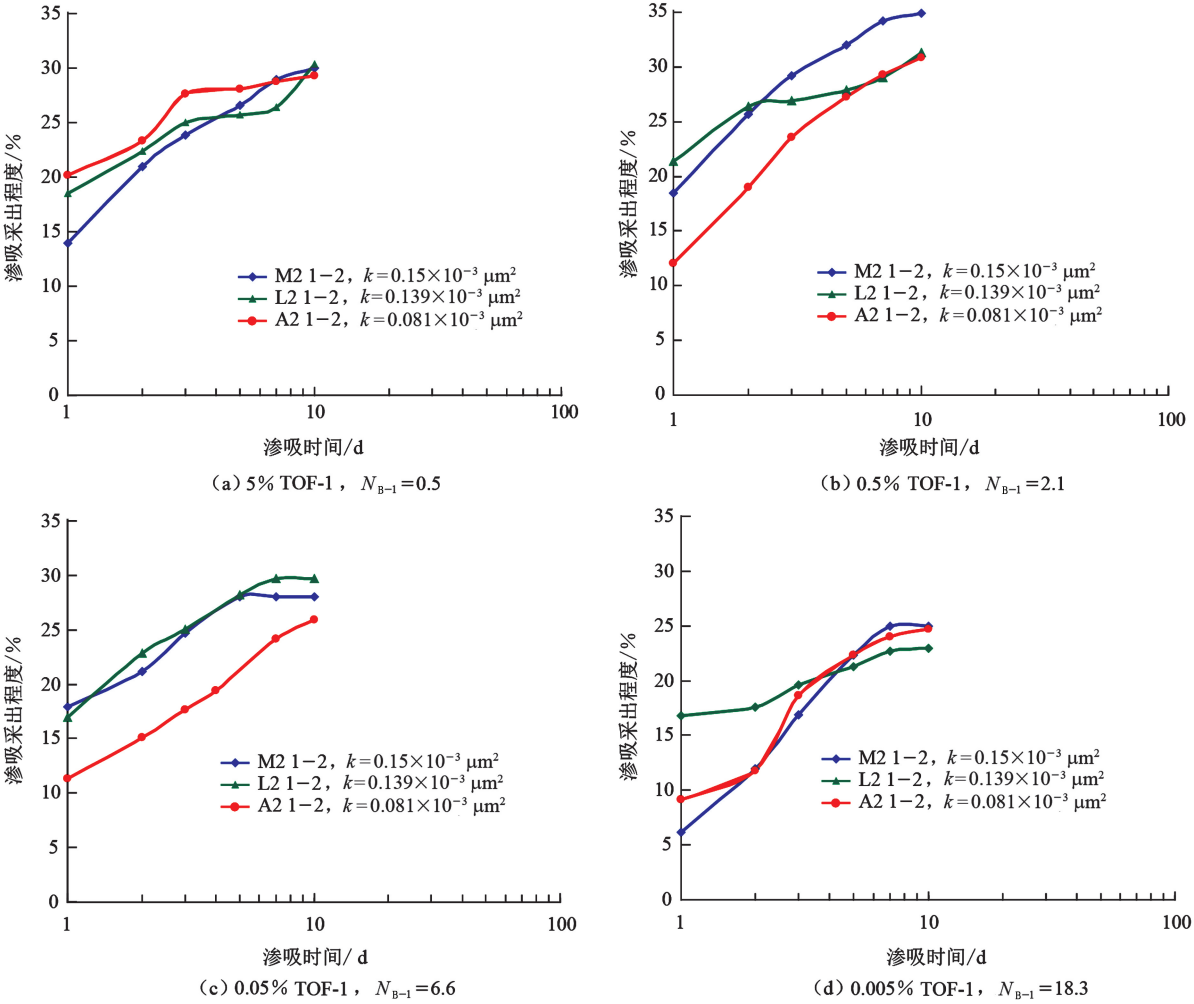


图 4 静态渗吸时间与渗吸采收率间的关系

Fig. 4 Relationship of imbibition time and recovery in static imbibition expremets

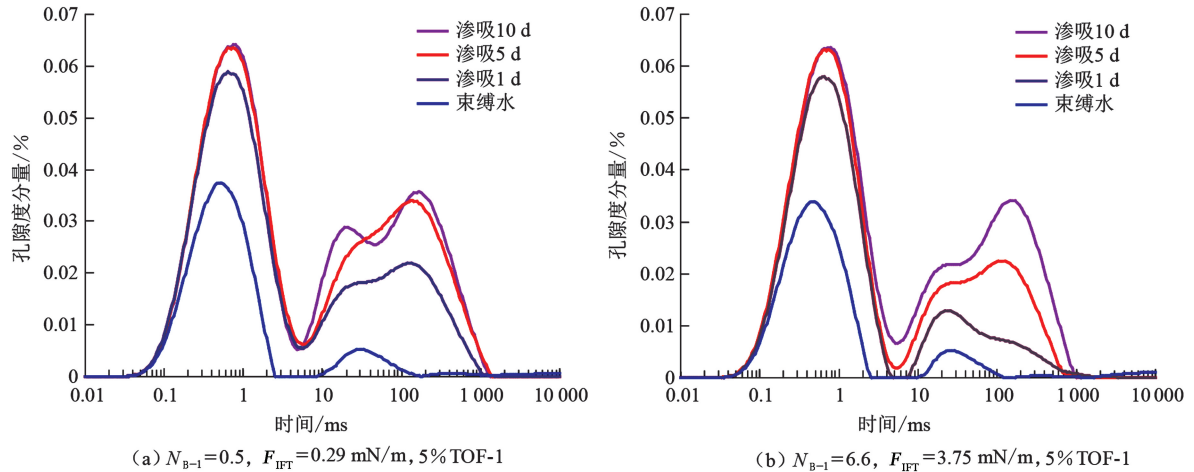


图 5 A2 5-2 不同 TOF-1 含量下的静态渗吸核磁共振结果

Fig. 5 NMR results of A2 5-2 core with different TOF-1 concentration

表 4 动态渗吸驱替最终采收率

Table 4 Recovery of dynamic displacement and imbibition

岩心 编号	气测渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	驱替速度 $v/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	采收率 $R/\%$
M2 1-3	0.200	0.10	70.750
M2 2-1	0.181	0.05	69.012
M2 2-2	0.181	0.01	49.637

为更加清晰地了解驱替结束时孔喉中含水饱和度分布的区别,3 块岩心驱替结束时核磁共振 NMR 曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,大孔喉(T_2 凹点右峰)中的含水饱和度(即含水孔隙度分量)随着驱替速度的增大而增大,小孔喉中的含水饱和度基本一致。说明驱替使大孔喉中的原油大量被置换,最终采收率的区别主要由大孔喉中含水饱和度决定。

此外,针对静态渗吸与动态驱替结束时的核磁共振分析结果,将 M2 1-2 和 M2 2-1 两块岩心的 T_2 谱进行对比分析,结果如图 7 所示。对比分析得:同井、同层位的两块岩心物性相当、孔隙结构空间一致的情况下(束缚水特征相同),M2 1-2 岩心静态渗吸

结束时左峰较高(图 7(a)),说明小孔隙是主要的储集空间,渗吸置换主要发生在小孔隙中;M2 2-1 岩心动态渗吸驱替结束时右峰较高(图 7(b)),分析其原因是可能在受外力下,驱替增强了大孔喉中油水饱和度的变化,而小孔喉中油水饱和度与静态渗吸小孔吼中饱和度分布基本一致。

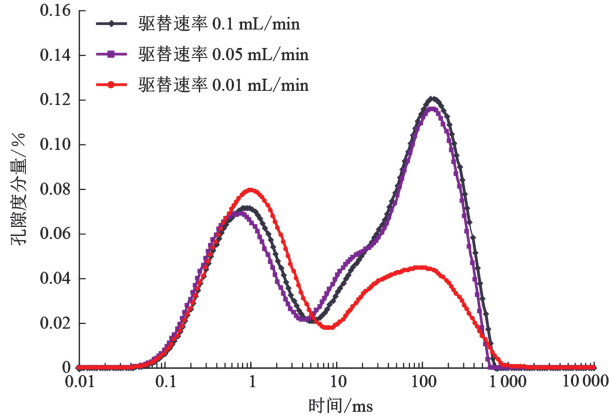


图 6 动态渗吸驱替结束时核磁共振 NMR 结果

Fig.6 NMR results in dynamic displacement

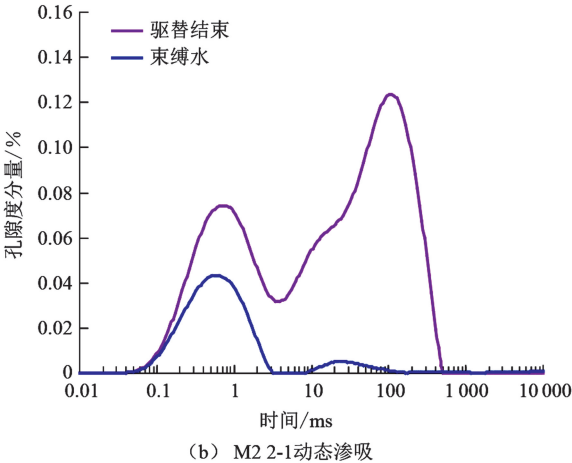
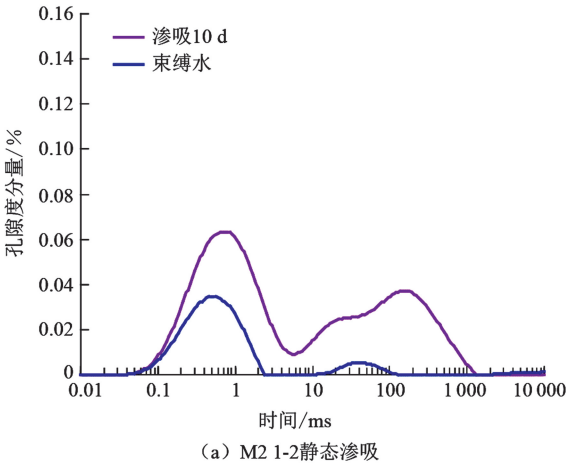


图 7 静态渗吸与动态渗吸驱替核磁共振 T_2 谱

Fig.7 T_2 spectrum in static imbibition and dynamic displacement

4 结 论

- (1)鄂尔多斯盆地长 7 致密储层依靠渗吸获得的采收率较低,一般为 30% ~ 35%。
- (2)长 7 致密油岩心静态渗吸获得最大渗吸采收率时的最佳 N_{B-1} 临界值约为 1。油水界面张力越大、毛细力越大,渗吸采收率越低;在较大的界面张力条件下,岩心渗透率越低、渗吸采收率越低。
- (3)在较小的油水界面张力条件下 ($N_{B-1} < 1$),渗吸初期大孔喉中流体受重力作用充满渗吸流体程度较大;在较大的油水界面张力条件下 (N_{B-1} 较大

- 时),毛细力占主导作用,大孔喉的充满程度随着渗吸时间的增加而成比例增大。
- (4)原油最终驱替效率随驱替速度的降低而降低。动态渗吸驱替受外力作用,增强了大孔喉中的原油置换程度,最终原油采收率主要由大孔喉中含水饱和度变化决定。
- (5)静态渗吸至结束时小孔喉是主要的储集空间,渗吸置换主要发生在小孔喉中;动态渗吸驱替结束时 T_2 谱右峰值较大,可能外压驱替作用增强了大孔喉中油水饱和度的变化。

参考文献:

- [1] 张红玲. 裂缝性油藏中的渗吸作用及其影响因素研究[J]. 油气采收率技术, 1999, 6(2): 44-48.
ZHANG Hongling. Research on the imbibition and its effect factors of fractured reservoir [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 1999, 6(2): 44-48.
- [2] ARONOFSKY J S, MASSE L, NATANSON S G. A model for the mechanism of oil recovery from the porous matrix due to water invasion in fractured reservoirs [J]. Trans AIME, 1958, 213: 17-19.
- [3] 陈俊宇, 唐海, 徐学成, 等. 裂缝性低渗砂岩油藏渗吸驱油效果的影响因素分析[J]. 内蒙古石油化工, 2007, 33(4): 85-88.
CHEN Junyu, TANG Hai, XU Xuecheng, et al. The analysis of the factors that influence the effect of imbibition displacement in low permeability fracturing sandstone reservoir [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007, 33(4): 85-88.
- [4] KAZEMI H, MERRILL L S. Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs [J]. SPEJ, 1976, 16(6): 317-326.
- [5] GUO B, SCHECHTER D S, BAKER R O, et al. An integrated study of imbibition water flooding in the naturally fractured spraberry [R]. SPE 39801-MS, 1998.
- [6] MATTAX C C, KYTE J R. Imbibition oil recovery from fractured, water-drive reservoir [J]. SPEJ, 1962, 2(2): 177-184.
- [7] ALHUTHALI A, DATTA-GUPTA A. Streamline simulation of counter-current imbibition in naturally fractured reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2004, 43(3/4): 271-300.
- [8] BABADAGLI T. Selection of proper EOR method for efficient matrix recovery in naturally fractured reservoirs [R]. SPE 69546-MS, 2001.
- [9] 李晓辉. 致密油注水吞吐采油技术在吐哈油田的探索[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 144-146.
LI Xiaohui. Application of cyclic water injection for tight oil production in the Tuha Oilfield [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 144-146.
- [10] 吴应川, 张惠芳, 代华. 利用渗吸法提高低渗油藏采收率技术[J]. 断块油气田, 2009, 16(2): 80-82.
WU Yingchuan, ZHANG Huifang, DAI Hua. Using imbibition method to improve recovery efficiency of low permeability reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(2): 80-82.
- [11] CIVAN F, RASMUSSEN M L. Asymptotic analytical solutions for imbibition waterfloods in fractured reservoirs [J]. SPEJ, 2001, 6(2): 171-181.
- [12] BABADAGLI T. Analysis of oil recovery by spontaneous imbibition of surfactant solution [J]. Oil & Gas Science & Technology, 2003, 60(4): 697-710.
- [13] ELAMIN M F, SALAMA A, SUN S. Effects of gravity and inlet location on a two-phase countercurrent imbibition in porous media [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2012, 210128: 1-7.
- [14] ELAMIN M F, SUN S. Effects of gravity and inlet/outlet location on a two-phase cocurrent imbibition in porous media [J]. Journal of Applied Mathematics, 2011, 673523: 1-21.
- [15] ALATTAR H H. Experimental study of spontaneous capillary imbibition in selected carbonate core samples [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 70(3/4): 320-326.
- [16] LI K W, HORNE R N. Generalized scaling approach for spontaneous imbibition: an analytical model [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2006, 9(3): 251-258.
- [17] ELAMIN M F, SALAMA A, SUN S. Numerical and dimensional investigation of two-phase countercurrent imbibition in porous media [J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2013, 242(1): 285-296.
- [18] BEHBAHANI H S, DONATO G D, BLUNT M J. Simulation of counter-current imbibition in water-wet fractured reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2006, 50(1): 21-39.
- [19] 齐银, 张宁生, 任晓娟, 等. 裂缝性储层岩石自吸水性实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 34-36.
QI Yin, ZHANG Ningsheng, REN Xiaojuan, et al. Experimental study on the hydroscopicity of fracture reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(1): 34-36.
- [20] 蔡建超, 郁伯铭. 多孔介质自发渗吸研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(6): 735-754.
CAI Jianchao, YU Boming. Advances in studies of spontaneous imbibition in porous media [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(6): 735-754.
- [21] FAZELI H, FATHI R, ATASHDEHGHAN A. Application of homotopy perturbation method to nonlinear equations describing cocurrent and countercurrent imbibition in fractured porous media [J]. Journal of Chemical & Petroleum Engineering, 2012, 46(1): 13-29.
- [22] 郁伯铭. 多孔介质输运性质的分形分析研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(3): 333-346.
YU Boming. Advances of fractal analysis of transport

- properties for porous media[J]. *Advances in Mechanics*, 2003,33(3):333-346.
- [23] LUCAS R. Rate of capillary ascension of liquids[J]. *Kolloid-Zeitschrift*, 1918,23(7):15-22.
- [24] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow[J]. *Phys Rev*, 1921,17(3):273-283.
- [25] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [26] HANDY L L. Determination of effective capillary pressures for porous media from imbibition data[J]. *Pet Trans AIME*, 1960,219:75-80.
- [27] LI K W, HORNE R N. Characterization of spontaneous water imbibition into gas-saturated rocks [J]. *SPEJ*, 2001,6(4):375-384.
- [28] LI K W, HORNE R N. An analytical scaling method for spontaneous imbibition in gas-water-rock system [J]. *SPEJ*, 2004,9(3):322-329.
- [29] ALLAWATI S, SALEH S. Oil recovery in fractured oil reservoirs by low IFT imbibition process [R]. *SPE* 36688, 1996.
- [30] 肖秋生,朱巨义. 岩样核磁共振分析方法及其在油田勘探中的应用[J]. *石油实验地质*, 2009,31(1):97-100.
- XIAO Qiusheng, ZHU Juyi. Analysis method of rock NMR and its application in oilfield exploration[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009,31(1):97-100.
- [31] 赵蕾. 核磁共振在储层物性测定中的研究及应用[D]. 青岛:中国石油大学,2010.
- ZHAO Lei. Research and application of NMR in measurement of reservoir physical [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [32] 郎东江,伦增珉,吕成远,等. 致密砂岩储层流体参数核磁共振实验研究[J]. *CT理论与应用研究*, 2015, 24(2):251-259.
- LANG Dongjiang, LUN Zengmin, LÜ Chengyuan, et al. Study of tight sandstone reservoir core fluid parameters by NMR[J]. *CT Theory and Applications*, 2015, 24(2):251-259.
- [33] 李爱芬,任晓霞,王桂娟,等. 核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015,39(6):92-98.
- LI Aifen, REN Xiaoxia, WANG Guijuan, et al. Characterization of pore structure of low permeability reservoirs using a nuclear magnetic resonance method[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015,39(6):92-98.
- [34] DUPREY L. Gravity and capillary effects during imbibition [J]. *SPEJ*, 1978,18(6):927-935.
- [35] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998.
- [36] 王学武,杨正明,时宇,等. 核磁共振研究低渗透砂岩油水两相渗流规律[J]. *科技导报*, 2009,27(15):56-58.
- WANG Xuewu, YANG Zhengming, SHI Yu, et al. Experimental study of water-oil two-phase fluid flow in low permeability reservoir by nuclear magnetic resonance [J]. *Review of Science & Technology*, 2009,27(15):56-58.

(编辑 李志芬)