

引用格式:周旭,马超,刘超,等.页岩油含油饱和度对渗吸采收率的影响规律研究[J].油气藏评价与开发,2025,15(1):73-78.

ZHOU Xu, MA Chao, LIU Chao, et al. Study on the influence of shale oil saturation on imbibition recovery rate[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 73-78.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.009

## 页岩油含油饱和度对渗吸采收率的影响规律研究

周旭<sup>1</sup>,马超<sup>1,2,3</sup>,刘超<sup>1</sup>,唐嘉婧<sup>1</sup>,刘怡麟<sup>1</sup>

(1.长江大学石油工程学院,湖北武汉 430100;2.长江大学油气钻采工程湖北省重点实验室,湖北武汉 430100;  
3.长江大学石油工程学院油气钻完井技术国家工程研究中心,湖北武汉 430100)

**摘要:**为了明确不同含油饱和度页岩油对渗吸采收率的影响规律,以江汉盆地江陵凹陷的页岩样品为研究对象,采用渗吸实验研究了渗透率相近和逐渐增大条件下,含油饱和度分别为20%、30%、40%、50%时,岩心渗吸曲线的变化规律,并利用核磁共振技术分析了渗吸前后岩心孔隙内油相信号的变化,最后对渗吸过程中的渗吸量和换油量进行了对比。结果表明:渗透率相近时,含油饱和度越高的岩心渗吸采收率越高;相比较而言,含油饱和度较高的岩心在渗吸初期的渗吸速率较慢,达到渗吸平衡所用的时间也较长;渗透率逐渐增大时,含油饱和度越高的岩心渗吸采收率越高,但此时较高含油饱和度岩心在前期的渗吸速率大于较低含油饱和度岩心。由于页岩的水化膨胀作用导致其在渗吸过程中的渗吸量并不等于换油量,而是大于换油量,且含油饱和度越高,两者的差值越大。研究结论可以为提高页岩油采收率提供理论参考。

**关键词:**页岩油;含油饱和度;渗吸采收率;渗吸速率;核磁共振

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Study on the influence of shale oil saturation on imbibition recovery rate

ZHOU Xu<sup>1</sup>, MA Chao<sup>1,2,3</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, TANG Jiajing<sup>1</sup>, LIU Yilin<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas of Hubei Province, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. National Engineering Research Center for Oil and Gas Drilling and Completion Technology, School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

**Abstract:** To investigate the influence of shale oil with different oil saturation on imbibition recovery rate, shale samples from the Jiangling sag in the Jiangnan Basin were taken as the research object. Imbibition experiments were conducted to examine the variation of core imbibition curves at oil saturation of 20%, 30%, 40%, and 50% under conditions of similar and increasing permeability. Nuclear magnetic resonance (NMR) technology was used to analyze the changes in oil-phase signals within the core pores before and after imbibition. Additionally, the imbibition volume and oil displacement volume during the imbibition process were compared. The results showed that under similar permeability conditions, cores with higher oil saturation exhibited higher imbibition recovery rates. In contrast, cores with higher oil saturation had slower imbibition rates at the initial stage of imbibition and required a longer time to reach imbibition equilibrium. When permeability gradually increased, cores with higher oil saturation achieved higher imbibition recovery rates. In this case, cores with higher oil saturation also exhibited faster imbibition rates in the early stages compared to those with lower oil saturation. The hydration and expansion of shale resulted in the imbibition volume exceeding the oil displacement volume during the imbibition process. Moreover, the difference between these two volumes increased with higher oil saturation. The findings of this study provide a theoretical basis for improving shale oil recovery.

**Keywords:** shale oil; oil saturation; imbibition recovery rate; imbibition rate; nuclear magnetic resonance

中国页岩油资源丰富,具有广阔的开采前景<sup>[1]</sup>。页岩油藏储层发育微纳米孔喉,渗透率和孔隙度较低<sup>[2]</sup>,在开发过程中,常采用体积压裂与焖井渗吸结合的方

法<sup>[3-8]</sup>。在对页岩储层进行体积压裂改造后,井筒附近会形成复杂的裂缝网络系统,油水接触面积大大增加,裂缝中的流体在毛管力的作用下进入基质驱动原油,以此来

收稿日期:2024-07-19。

第一作者简介:周旭(2001—),男,在读硕士研究生,主要从事致密油渗吸特征及影响因素相关研究。地址:湖北省武汉市蔡甸区大学路111号,邮政编码:430100。E-mail:2022710342@yangtzeu.edu.cn

通信作者简介:马超(1979—),男,博士,教授,主要从事油田用高分子材料方面的研究。地址:湖北省武汉市蔡甸区大学路111号,邮政编码:430100。E-mail:500526@yangtzeu.edu.cn

基金项目:科技部外国专家局外国专家重点支撑计划项目“表面修饰纳米二氧化硅/温敏聚合物复合材料开发及在非常规油气增产液中的应用”(wgxz2022057)。

达到渗吸采油的目的<sup>[9-12]</sup>。但在压裂后的焖井过程中,大量的压裂液由于渗吸作用会进入并滞留在页岩储层中,导致裂缝面近端的含水饱和度短时间内大大提高,含油饱和度也会受到影响,进而阻碍两相流体流动,抑制页岩油的生产<sup>[13-17]</sup>。因此,明确页岩油含油饱和度对渗吸采收率的影响规律,并在开发中合理利用该规律使采收率达到最大显得至关重要。

彭中樱等<sup>[18]</sup>认为原始含油饱和度较大时,其中的可动油也较多,能有效提高渗吸效率。谢坤等<sup>[19]</sup>、张华丽等<sup>[20]</sup>通过对不同含油饱和度的岩心进行渗吸实验发现岩心的含油饱和度增加后,渗吸采收率升高,但含油饱和度为23%的岩心在整个实验过程中采收率始终接近于0,表明存在渗吸置换失效的最低含油饱和度界限。虽然前人对于含油饱和度的研究取得了显著进展,但大多是采用人造岩心实验,而页岩储层由于其物性差、孔喉结构复杂,与常规储层的渗流规律并不完全一致,因此有必要对其进行研究。对于页岩油的渗吸规律,国内外学者基于室内渗吸实验,对渗吸机理、渗吸置换规律以及提高页岩油采收率的影响因素等做了大量研究,并取得了诸多认识。王琛等<sup>[21]</sup>发现页岩储层较小孔喉的渗吸速率及渗吸采收率显著高于较大孔喉;周小航等<sup>[22]</sup>认为页岩储层渗吸能力主要由润湿性、储层品质因子及孔喉比控制。国外学者对于润湿性变化所产生的影响研究较多,TU等<sup>[23]</sup>研究表明岩心的水湿性更强对于提高页岩油采收率至关重要;GAO等<sup>[24]</sup>发现页岩中水和油湿孔隙的发育程度决定了其润湿性和渗吸行为。然而,现有文献针对含油饱和度变化所引起的页岩油渗吸采收率变化的研究目前还不足。基于此,选用了江汉盆地江陵凹陷的页岩样品,采用了质量法渗吸实验来研究页岩油含油饱和度对渗吸采收率的影响规律,由于页岩的水化膨胀作用以及渗吸实验对岩心渗透率的影响,导致无法使用同一块岩心进行重复实验,因此选用孔隙度和渗透率相近的岩心进行不同含油饱和度的渗吸实验,并在此基础上选用了孔隙度和渗透率逐渐增大的岩心样品进行对照实验。通过渗吸曲线分析了采收率与渗吸速率的变化,并结合核磁共振技术分析了渗吸过程中孔隙内油相信号的变化,通过对比质量法与核磁共振法计算的采收率分析了渗吸量和换油量的大小关系。该研究得出的结论可以为提高页岩油采收率提供理论参考。

## 1 实验和方法

### 1.1 岩心样品和流体

岩心样品取自江汉盆地江陵凹陷页岩储层。在洗油、烘干岩心样品后,测量其直径、长度、孔隙度及渗透率,具体参数如表1所示。其中A组(A-1~A-4)为孔渗

相近的岩心,B组(B-1~B-4)为孔渗逐渐增大的岩心。

模拟地层水属于CaCl<sub>2</sub>类型,矿化度为107 239.98 mg/L,密度为1.03 g/cm<sup>3</sup>。在模拟水中添加MnCl<sub>2</sub>,从而屏蔽核磁共振测试过程中的H信号,以达到区分油水信号的目的,但是Mn<sup>2+</sup>会与岩心中的一些黏土矿物发生反应,质量浓度过高会影响孔隙结构,所以选择适当的Mn<sup>2+</sup>质量浓度对实验结果非常重要,通过核磁共振测试确定MnCl<sub>2</sub>的质量浓度为10 g/L。此外,在模拟水中添加了5% KCl以抑制页岩吸水膨胀。模拟油为使用煤油稀释的地层原油,密度为0.82 g/cm<sup>3</sup>,在温度25 °C和压力0.1 MPa条件下黏度为2.83 mPa·s。渗吸液取自现场的配方和质量分数,密度为1.06 g/cm<sup>3</sup>。

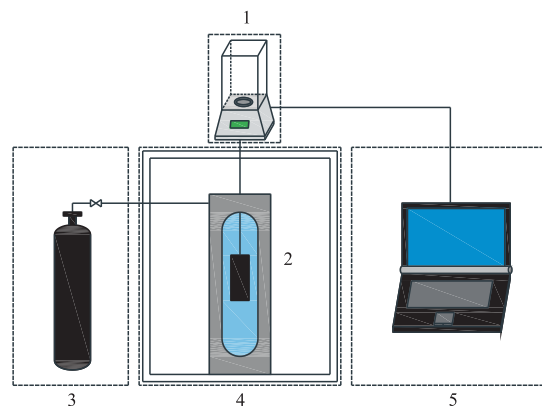
### 1.2 实验设备

图1为质量法渗吸实验设备示意图,质量变化由电子天平自动测量并输出到计算机。该设备还具有调节温度和控制压力的功能。

核磁共振分析仪器型号为MicroMR12-150H-I。T<sub>2</sub>谱测试过程中采用CPMG序列、25 mm探针,测试参数为:采样频率200 kHz,等待时间2 500 ms,回波时间0.1 ms,射频延时0.002 ms,累加次数为16次,回波个数为8 192个。核磁成像测试过程中采用HSE序列,选择了最小的

表1 岩心参数  
Table 1 Core parameters

岩心编号	直径/mm	长度/mm	孔隙度/%	渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )
A-1	24.75	54.16	9.57	0.035
A-2	24.62	55.84	9.19	0.027
A-3	24.80	55.50	8.85	0.011
A-4	24.74	54.40	9.35	0.088
B-1	24.60	55.34	7.49	0.580
B-2	24.68	56.30	8.97	0.630
B-3	24.10	54.82	11.20	0.700
B-4	24.72	54.04	9.55	0.930
C-1	24.75	56.57	11.94	0.220



注:1为称量系统;2为岩心;3为压力系统;4为恒温系统;5为计量系统。

图1 渗吸实验设备

Fig. 1 Imbibition experiment equipment

TE(回波时间)参数:4.32 ms,并选择了最大的 Averages (平均次数)参数:16。

### 1.3 实验步骤

实验中通过测量岩心的质量来计算采收率,具体的实验过程如下:

1)首先使用DY-5型岩心快速洗油仪洗去岩心中的油,然后将岩心放入温度为80℃的恒温箱中。在岩心质量不变的情况下,取出岩心测量其基本物性参数。

2)利用真空泵加压饱和装置使岩心完全饱和和模拟地层水(含MnCl<sub>2</sub>)。

3)根据岩心饱和和地层水前后的质量差算出其饱和和地层水的体积( $V_0$ ),之后通过含油饱和度计算需要驱替出来的地层水体积( $V_1$ )。利用驱替装置进行油驱水建立含油饱和度,当出口端水量的出水体积达到 $V_1$ 时,停止驱替过程,取出岩心放入模拟油中老化48h以上。

4)老化完成后取出岩心进行核磁共振分析测试,得到岩心饱和油的 $T_2$ 谱和成像图。

5)测试完成后将岩心放入装有渗吸液(含MnCl<sub>2</sub>)的渗吸设备中,随后开始渗吸实验,实验结束后再次进行上一步过程中的核磁共振测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同含油饱和度岩心的渗吸规律

图2是A组不同含油饱和度岩心渗吸曲线。含油饱和度越高的岩心其渗吸采收率越高,采收率由低到高分别为11.87%、14.96%、20.74%、22.92%。这是因为在一般情况下,与低含油饱和度岩心相比,拥有较高含油饱和度的岩心孔隙内油相所占据的毛细管孔道数较多,在渗吸过程中能够产生渗吸作用的毛细管数较多,毛细管压力也更大,岩心内部的油水交渗能力更强,渗吸采收率更高。此外,较高含油饱和度条件下,油相的连续性增强了流体流动的连续性,降低了流动阻力,使得水相能够更加

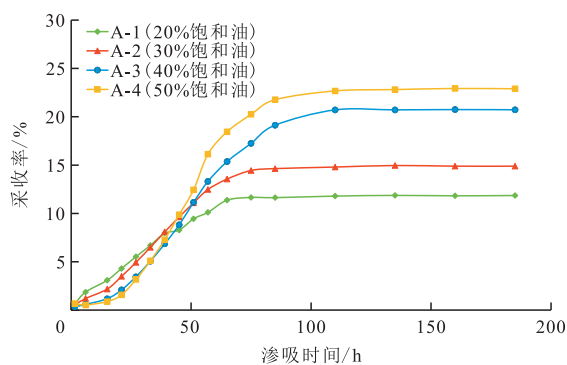


图2 A组不同含油饱和度岩心渗吸曲线  
Fig. 2 Imbibition curves of core samples with different oil saturations in Group A

有效地将油相从孔隙中置换出来,从而提高了渗吸采收率。在渗吸前期,采收率迅速上升,含油饱和度较低的岩心渗吸速率较快;在渗吸后期,采收率逐渐稳定,含油饱和度较高的岩心达到渗吸平衡所用时间较长,其中含油饱和度为20%、30%的岩心在85h就基本达到渗吸平衡,而含油饱和度为40%、50%的岩心达到渗吸平衡所用的时间为120h。一方面,含油饱和度较高的岩心意味着其对应的含水饱和度较低,在前期的渗吸过程中能够参与的水量较少,导致渗吸速率较慢;另一方面,渗吸置换最初所需要的毛管力较低,含油饱和度较低的岩心由于产生渗吸作用的毛细管孔道数较少而表现出更快的初始渗吸速率,含油饱和度较高的岩心也因为毛细管力作用范围更广,而需要较长时间来达到渗吸平衡。

图3是B组及C-1号不同含油饱和度岩心渗吸曲线。B组是在A组建立不同含油饱和度的基础上选用了渗透率逐渐增大的岩心进行渗吸实验,可以研究不同渗透率条件下含油饱和度对采收率的影响规律以及渗透率变化可能产生的影响。与A组岩心相似,B组岩心也表现出含油饱和度越高其渗吸采收率越高的规律,采收率由低到高分别为12.59%、17.83%、25.15%、29.19%。但与A组岩心不同的是,B组岩心并未表现出含油饱和度越高其初始渗吸速率越慢的趋势;相反,B组较高含油饱和度岩心在前期的渗吸速率大于较低含油饱和度岩心。渗透率的增大造成了B组这一实验现象,因为渗透率越高的岩心其孔隙连通性越好,孔隙半径也更大,油滴在流动过程中的阻力更小,使得水相能够更有效地进入岩心内部<sup>[25]</sup>,从而在一定程度上提高渗吸速率。

图4显示了A、B两组岩心渗吸采收率的增长幅度。B组相较于A组整体的采收率更高,而且采收率的增长幅度也更大。但含油饱和度由40%升高至50%,采收率的增长幅度都有所减缓,由此推测后续含油饱和度继续升高到某一上限时,采收率可能不再会增加甚至会降低,为此选用一块岩心在抽真空加压完全饱和油后进行渗吸实验,其渗吸曲线见图3。

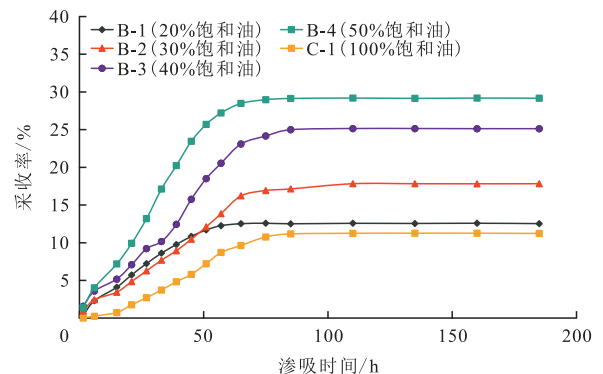


图3 B组及C-1号不同含油饱和度岩心渗吸曲线  
Fig. 3 Imbibition curves of core samples with different oil saturations in Group B and Sample C-1

图3中的C-1渗吸曲线显示:岩心在完全饱和油条件下进行渗吸,不仅前期的渗吸速率较低,而且渗吸采收率低于含油饱和度为20%的岩心,只达到11.26%,因为完全饱和油的岩心其孔隙内部充满油,几乎没有水相,导致所形成的油水界面较少,而渗吸的主要动力毛管力只有在油水界面处才会产生,这就造成了C-1号岩心虽然含油饱和度高,但渗吸动力不足,最终导致渗吸采收率较低的结果。由此也可得出,岩心的含油饱和度并非越高越好,存在含油饱和度上限使岩心渗吸采收率达到最高。

## 2.2 不同含油饱和度岩心的 $T_2$ 谱曲线及成像图变化

低场核磁共振是一种无损、快速、准确的岩心测量方法。岩心孔隙的大小与  $T_2$  谱成正比,利用核磁共振  $T_2$  谱图可以反映出岩心内部的孔隙结构。氢信号的测量可以用来计算流体在不同孔径内的分布,也就是说  $T_2$  值越大,对应孔隙的孔径越大<sup>[26]</sup>,还可以由  $T_2$  谱信号峰面积的变化来计算渗吸采收率<sup>[27]</sup>。此外,通过核磁成像图也可以看出岩心渗吸采收率的大小。

图5是岩心渗吸前后测得的  $T_2$  谱。从饱和油的  $T_2$  谱曲线可以看出,实验所用岩心都是典型的双峰结构,说明这些岩心具有2种孔隙类型。根据 LOUCKS 等<sup>[28]</sup>提出的孔隙尺寸划分方法和  $T_2$  谱的形态特征及弛豫时间,将岩心的孔隙类型分为小孔和大孔两类。根据弛豫时间的不同,把弛豫时间低于 5 ms 的定义为小孔隙,弛豫时间不低于 5 ms 的看作大孔隙。

含油饱和度越高的岩心其  $T_2$  谱面积减少的越多,面积的减少是岩心中油量的减少,也就是岩心渗吸采收率越高。饱和油曲线峰值逐渐降低,但相比较而言,左峰下降幅度整体大于右峰,主要是因为小孔的毛管力更大,渗吸作用也更强,而且小孔中的油会先渗出到大孔中,再从大孔排出。A-4号岩心渗吸结束时左侧的信号振幅比饱和油状态下的高,这是因为大孔内的油在渗吸过程中被排出,导致剩余油在核磁共振测试过程中的弛豫时间减小,残余油的信号被识别为较小孔隙中的油,最终导致  $T_2$

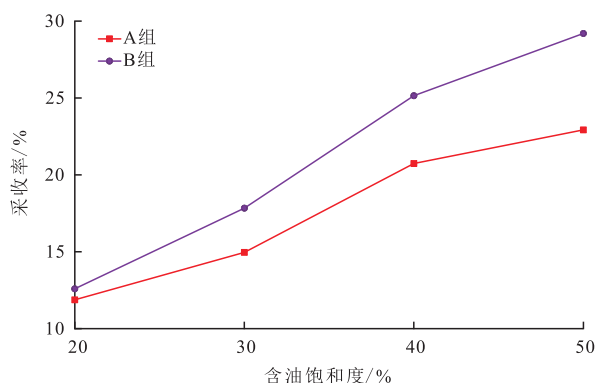


图4 渗吸采收率的增长幅度

Fig. 4 Increase in imbibition recovery rate

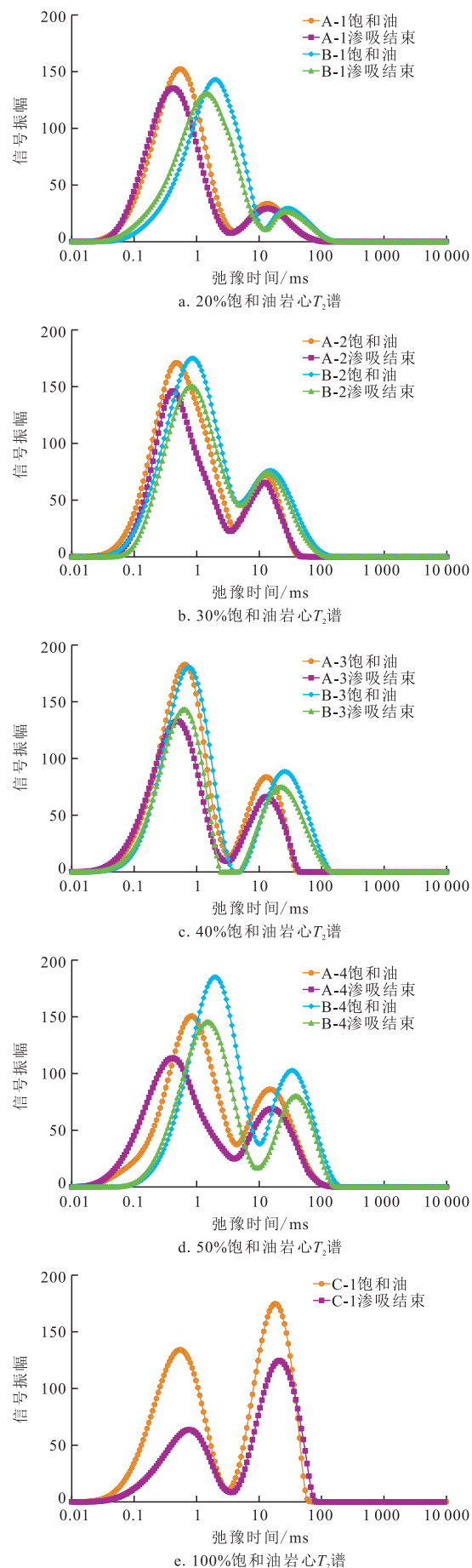


图5 岩心渗吸前后  $T_2$  谱

Fig. 5  $T_2$  spectra of core samples before and after imbibition

谱中的小孔信号振幅上升<sup>[29]</sup>。

C-1号岩心在渗吸结束时曲线整体是往右偏移的,而且在最右侧渗吸结束的信号振幅是高于饱和油的,这表明C-1号岩心在渗吸过程中产生了一些微裂缝,核磁测试过程中识别到的孔径变大了,导致测得的曲线整体向右偏移。但即使是在产生微裂缝的情况下完全饱和油岩心的渗吸采收率也只有11.26%,这更加说明了含油饱和度为100%的岩心渗吸采收率低,含油饱和度并非越高越好。

图6是岩心渗吸前后核磁成像图,红色和黄色表示含油量,红色表示含油量高,黄色次之。从图6中可以看出油相在岩心孔隙内的分布状况,含油量较高的区域也表示该区域孔隙结构较好。图6a、图6c与图6e显示A-1含油量较少,A-4含油量较多,C-1整个岩心内部几乎充满了油。相较于饱和油,A-1在渗吸结束后油量有所减少,但油的动用量不多,整体采出程度较低;A-4渗吸结束后油量明显减少,油的动用量较多,整体采出程度较高;C-1由于含油量过多,在渗吸结束后只能看出岩心上端的油量减少了一点,其余几乎看不出油量的变化,整体采出程度较低。从图6可以看出,岩心的含油饱和度越高,其渗吸采收率越高,但完全饱和油的岩心渗吸采收率较低。

### 2.3 不同含油饱和度岩心渗吸量与换油量对比

页岩中黏土矿物含量高,在渗吸过程中会发生水化膨胀<sup>[30]</sup>,可能导致岩心在渗吸过程中发生只吸水不排油的现象。质量法渗吸实验是通过岩心的质量变化与密度差换算得出体积再计算采收率,但换算出的体积实际上是岩心的渗吸量,而不是渗吸液置换出的油量。对于岩心在渗吸过程中的换油量,由于该实验屏蔽了水的信号,核磁测试中只测得岩心中油的信号,因此可以通过计算 $T_2$ 谱中曲线面积的变化并结合核磁共振信号标定法换算得出换油量<sup>[31]</sup>。但核磁共振信号标定法的换算公式中存在大量的参数,可能会造成一些不必要的误差。因此,直接通过由渗吸量和核磁面积计算得出的采收率来对比二者的大小关系。表2是A组岩心通过2种方法计算得出的采收率大小。

同一块岩心的质量法采收率大于核磁面积法采收率,这表明岩心在渗吸过程中的渗吸量不等于换油量,而是大于换油量,页岩在渗吸过程中的水化膨胀造成了这一现象。从两种方法计算的采收率之间的差值来看,含油饱和度越高,差值越大。因为含油饱和度越高,毛细管压力就越大,油水交渗能力越强,而越多的毛细管渗吸作用就可能导致越多的渗吸量大于换油量,造成二者的差值越来越大,而且含油饱和度较高的岩心达到渗吸平衡的时间较长,也可能会导致页岩的水化膨胀更加严重,渗吸量增加的更多。

虽然页岩的水化膨胀造成了实验过程中岩心的渗吸量与换油量不一致,且二者的差值会随含油饱和度的升高而增大,但从核磁面积法的采收率结果来看,差值的增大并没有较大影响该实验中采收率的变化趋势,依然可以得出岩心的含油饱和度越高,其渗吸采收率越高。

## 3 结论

1) 渗透率相近时,含油饱和度越高(20%~50%)的岩心其渗吸采收率越高(11.87%~22.92%)。含油饱和度较高的岩心孔隙内油相所占据的毛细管孔道数较多,毛细管压力更大,岩心内部的油水交渗能力更强,渗吸采收率更高。而且较高含油饱和度条件下,油相的连续性会增强流体流动的连续性,降低流动阻力,从而提高渗吸采收率。但含油饱和度较高的岩心由于其对应的含水饱和度较低,在前期的渗吸过程中能够参与的水量较少,导致渗吸速率较慢。而且渗吸置换最初所需要的毛管力较

表2 A组岩心渗吸采收率

Table 2 Imbibition recovery rates of core samples in Group A

岩心 编号	质量法		核磁面积法	
	渗吸量/mL	采收率/%	$T_2$ 谱信号峰面积差	采收率/%
A-1	0.06	11.86	133.32	10.60
A-2	0.11	14.96	214.69	12.73
A-3	0.20	20.74	361.83	18.35
A-4	0.29	22.92	713.09	19.24

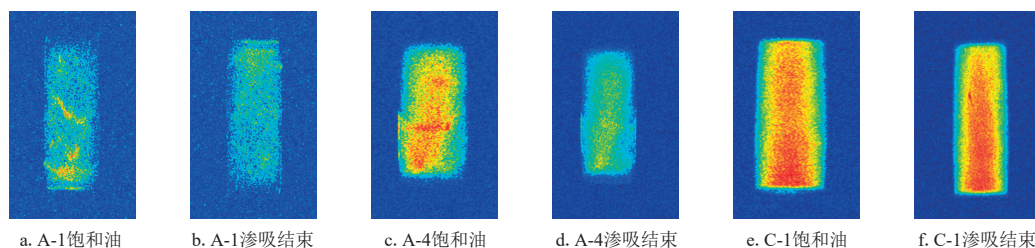


图6 岩心渗吸前后核磁成像

Fig. 6 Nuclear magnetic resonance imaging of core samples before and after imbibition

低,含油饱和度较低的岩心由于毛细管渗吸作用较少而表现出更快的初始渗吸速率,含油饱和度较高的岩心因为毛细管力作用范围更广,而需要较长时间来达到渗吸平衡。含油饱和度并非越高越好,完全饱和油的岩心渗吸采收率只有11.26%,因为其孔隙内部水相较少,形成的油水界面较少,导致渗吸作用较弱,渗吸采收率较低。

2) 渗透率逐渐增大时( $0.58 \times 10^{-3} \sim 0.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),含油饱和度越高(20%~50%)的岩心其渗吸采收率越高(12.59%~29.19%)。渗透率越高的岩心其孔隙连通性越好,孔隙半径也更大,油滴在流动过程中的阻力更小,使得水相能够更有效地进入岩心内部,从而在一定程度上提高渗吸采收率和渗吸速率,导致较高含油饱和度岩心在前期的渗吸速率大于较低含油饱和度岩心。

3) 由于页岩的水化膨胀作用导致其在渗吸过程中的渗吸量并不等于换油量,而是大于换油量。含油饱和度越高,毛细管压力就越大,油水交渗能力越强,越多的油水交渗导致越多的渗吸量大于换油量,造成二者的差值也越大。但差值的增大并没有较大影响实验中采收率的变化趋势,从换油量计算的采收率结果中依然可以得出岩心的含油饱和度越高,其渗吸采收率越高。

#### 参考文献

- [1] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821-835.  
JIN Zhijun, WANG Guoping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [2] 彭君,孙宁亮,鹿坤,等.东濮凹陷古近系沙河街组页岩油储层岩石学及微观孔隙结构特征[J].地学前缘,2023,30(4):128-141.  
PENG Jun, SUN Ningliang, LU Kun, et al. Shale oil reservoir of the Palaeogene Shahejie Formation in the Dongpu Sag: Petrology and pore microstructural characteristics[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 128-141.
- [3] ZHOU Z, ABASS H, LI X, et al. Mechanisms of imbibition during hydraulic fracturing in shale formations[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016, 141: 125-132.
- [4] ROSHAN H, EHSANI S, MARJO C E, et al. Mechanisms of water adsorption into partially saturated fractured shales: An experimental study[J]. Fuel, 2015, 159(1): 628-637.
- [5] YANG K, WANG F Y, ZHAO J Y. Experimental study of surfactant-enhanced spontaneous imbibition in fractured tight sandstone reservoirs: The effect of fracture distribution[J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 370-381.
- [6] 张国友.页岩油全电动压裂装备配置与作业技术研究[J].石油机械,2024,52(3):102-107.  
ZHANG Guoyou. Configuration and operation technology of fully electric fracturing equipment for shale oil[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(3): 102-107.
- [7] 刘爱,颜廷俊,魏辽,等.济阳页岩油水平井套管变形影响规律研究[J].石油机械,2023,51(8):93-99.  
LIU Ai, YAN Tingjun, WEI Liao, et al. Influence of casing deformation in shale oil horizontal wells in Jiyang depression[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(8): 93-99.
- [8] 张皎生,杨焕英,王晶,等.基于复杂缝网精细刻画的致密油气藏水平井多段压裂数值模拟技术[J].中国海上油气,2023,35(4):103-111.  
ZHANG Jiaosheng, YANG Huanying, WANG Jing, et al. A method for numerical simulation of multi-stage fracturing of horizontal well in tight oil and gas reservoirs based on fine characterization of complex fracture network[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(4): 103-111.
- [9] 黄涛.核磁及密度测井耦合的致密砂岩低阻气层饱和度评价方法:以鄂尔多斯盆地临兴神府致密砂岩储层为例[J].中国海上油气,2023,35(2):78-84.  
HUANG Tao. Saturation evaluation method of tight sandstone low resistivity gas reservoir based on the coupling of NMR and density logging: Taking Linxing-Shenfu tight sandstone reservoir in Ordos basin as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 78-84.
- [10] YAO L L, YANG Z M, LI H B, et al. Study on mechanism of spontaneous imbibition and pressurized imbibition in shale oil reservoirs[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(2): 703-710.
- [11] 马明伟,祝健,李嘉成,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储集层渗吸规律[J].新疆石油地质,2021,42(6):702-708.  
MA Mingwei, ZHU Jian, LI Jiacheng, et al. Imbibition law of shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in Jimsar sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 702-708.
- [12] 王天昊,王秀坤,盛家平.页岩油藏滞留压裂液损益效应的数值模拟研究[J].非常规油气,2022,9(3):103-110.  
WANG Tianhao, WANG Xiukun, SHENG Jiaping. Numerical simulation study on the advantages and disadvantages of the fracturing fluid detained in shale reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(3): 103-110.
- [13] GE H K, YANG L, SHEN Y H, et al. Experimental investigation of shale imbibition capacity and the factors influencing loss of hydraulic fracturing fluids[J]. Petroleum Science, 2015, 12(4): 636-650.
- [14] TAN Y L, ZHANG S H, TANG S H, et al. Impact of water saturation on gas permeability in shale: Experimental and modelling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 1-11.
- [15] GAO Z Y, HU Q H. Initial water saturation and imbibition fluid affect spontaneous imbibition into Barnett shale samples[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 541-551.
- [16] 韦世明,金衍,夏阳,等.自发渗吸对页岩油储层压裂后闷井的影响[J].石油钻采工艺,2023,45(6):756-765.  
WEI Shiming, JIN Yan, XIA Yang, et al. Influence of spontaneous imbibition on post-fracturing well soaking in shale oil reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(6): 756-765.
- [17] 张伟强.渤海坳陷沙河街组页岩油藏水力裂缝穿层扩展规律研究[J].非常规油气,2024,11(2):140-146.  
ZHANG Weiqiang. Layer-crossing propagation law of hydraulic fracture in Shahejie Formation shale reservoir in Bonan Depression [J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(2): 140-146.
- [18] 彭中樱,郭继香,张小军,等.页岩油渗吸机理及影响因素研究进展[J].应用化工,2024,53(3):661-666.  
PENG Zhongying, GUO Jixiang, ZHANG Xiaojun, et al. Research progress on imbibition mechanism and influencing factors of shale oil [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(3): 661-666.
- [19] 谢坤,韩大伟,卢祥国,等.高温低渗油藏表面活性剂裂缝动态渗吸研究[J].油气藏评价与开发,2017,7(3):39-43.  
XIE Kun, HAN Dawei, LU Xiangguo, et al. Study on dynamic imbibition of surfactant in low permeability fractured reservoir with high temperature[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(3): 39-43.

- 法[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1150-1156.
- WANG Bencheng, JIA Yonglu, LI Youquan, et al. A new solution of well test model for multistage fractured horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1150-1156.
- [19] 黄灿. 考虑邻井干扰的页岩气多段压裂水平井数值试井方法[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 92-96.
- HUANG Can. Numerical test of multi-stage fractured horizontal shale gas well with inter-well interference[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(3): 92-96.
- [20] 褚洪杨. 致密油藏多段压裂水平井存在井间干扰下试井分析方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- CHU Hongyang. Well test analysis for multiple multi-fractured horizontal wells in tight oil reservoirs with well interference[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2021.
- [21] 张卓, 袁晓俊, 饶大骞, 等. 页岩气多尺度渗流数值模拟技术: 以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(增刊1): 145-151.
- ZHANG Zhuo, YUAN Xiaojun, RAO Daqian, et al. A numerical simulation technology for the multi-scale flow of shale gas and its application in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(Suppl. 1): 145-151.
- [22] 李跃纲, 宋毅, 黎俊峰, 等. 北美页岩气水平井压裂井间干扰研究现状与启示[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 34-46.
- LI Yuegang, SONG Yi, LI Junfeng, et al. Research status and implications of well interference in shale gas horizontal well fracturing in North America[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(5): 34-46.
- [23] HE Y W, GUO J C, TANG Y. Interwell fracturing interference evaluation of multi-well pads in shale gas reservoirs: A case study in WY Basin[C]// Paper SPE-201694-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Virtual, October 2020.
- [24] CINCO L, SAMANIEGO V, DOMINGUEZ A. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1978, 18(4): 253-264.
- [25] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems: Part 1—analytical considerations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(3): 359-368.
- [26] SUN H D. Advanced production decline analysis and application[M]. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2015.

(编辑 尹淑容)

(下转第78页)

- [20] 张华丽, 金智荣, 包敏新, 等. 特低渗裂缝性油藏渗吸采油主控因素影响规律实验研究[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(2): 101-104.
- ZHANG Huali, JIN Zhirong, BAO Minxin, et al. Experimental study on influence law of main controlling factors of imbibition oil recovery in ultra-low permeability fractured reservoir[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2022, 15(2): 101-104.
- [21] 王琛, 高辉, 费二战, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩储层压裂液渗吸规律及原油微观动用特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 95-103.
- WANG Chen, GAO Hui, FEI Erzhan, et al. Imbibition of fracturing fluid and microscopic oil production characteristics in Chang 7 shale reservoir in Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(6): 95-103.
- [22] 周小航, 陈冬霞, 夏宇轩, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油储层自发渗吸特征及影响因素[J]. 地球科学, 2022, 47(8): 3045-3055.
- ZHOU Xiaohang, CHEN Dongxia, XIA Yuxuan, et al. Spontaneous imbibition characteristics and influencing factors of Chang 7 shale oil reservoirs in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2022, 47(8): 3045-3055.
- [23] TU J W, SHENG J J. Effect of pressure on imbibition in shale oil reservoirs with wettability considered[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(4): 4260-4272.
- [24] GAO Z Y, FAN Y P, HU Q H, et al. A review of shale wettability characterization using spontaneous imbibition experiments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 330-338.
- [25] REN W D, MA C, HUANG X Y, et al. Dynamic and static imbibition characteristics of tight sandstone based on NMR[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 229.
- [26] 程毅翀. 基于低场核磁共振成像技术的岩心内流体分布可视化研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- CHENG Yichong. Visualization study on fluid distribution in core based on low-field MRI method[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
- [27] 王彪, 李太伟, 虞建业, 等. 页岩储层表面活性剂渗吸驱油机理及影响因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(6): 92-103.
- WANG Biao, LI Taiwei, YU Jianye, et al. Analysis of imbibition mechanism and influencing factors of surfactant displacement in shale oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(6): 92-103.
- [28] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [29] 杨雪, 廖锐全, 袁旭. 基于核磁共振技术的致密岩心高温高压自发渗吸实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(3): 58-65.
- YANG Xue, LIAO Ruiquan, YUAN Xu. Spontaneous imbibition experiment in high-temperature and high-pressure for tight cores based on NMR technology[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(3): 58-65.
- [30] 朱秀川, 胡钦红, 蒙冕模, 等. 页岩储层渗吸过程中水的微观分布及其气测渗透率动态响应特征[J]. 石油学报, 2022, 43(4): 533-547.
- ZHU XiuChuan, HU QinHong, MENG Mianmo, et al. Microscopic distribution of water in the imbibition process of shale reservoir and dynamic response characteristics of its gas logging permeability[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(4): 533-547.
- [31] 唐慧莹, 第凯翔, 张烈辉, 等. 基于核磁共振信号标定法的致密油藏渗吸实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 402-413.
- TANG Huiying, DI Kaixiang, ZHANG Liehui, et al. Tight oil imbibition based on nuclear magnetic resonance signal calibration method[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(3): 402-413.

(编辑 常燕)