

低渗透砂岩储层不同驱替方式开发规律研究

金炜翔*, 龚跃, 夏楚翔, 陈洪建, 徐雨桐, 李鑫, 孙奥林

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年6月13日; 录用日期: 2025年7月8日; 发布日期: 2025年7月17日

摘要

本文通过启动压力梯度实验和高温高压在线核磁共振驱替实验, 系统研究了低渗透砂岩储层中不同介质(水驱、N₂驱、CO₂驱)的渗流特性及驱油效率。启动压力梯度实验基于压差-流量关系, 揭示了驱替介质从液相到气相启动压力梯度逐渐降低的规律, 并发现启动压力梯度与岩心孔隙渗透率呈负相关。高温高压在线核磁共振技术在模拟真实储层温压条件下, 动态监测不同驱替介质在岩心内部的形态分布及渗流规律, 揭示了驱替过程的微观作用机理。实验结果表明, 三种驱替介质的驱油效率排序为: CO₂驱 > 水驱 > N₂驱, CO₂驱得益于其溶解性及降黏特性, 表现出更优的驱油效果。

关键词

驱替效率, 提高油藏采收率, CO₂驱替, 水驱, 低渗透油藏

Study on Development Patterns of Different Displacement Methods in Low-Permeability Sandstone Reservoirs

Weixiang Jin*, Yue Gong, Chuxiang Xia, Hongjian Chen, Yutong Xu, Xin Li, Aolin Sun

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 13th, 2025; accepted: Jul. 8th, 2025; published: Jul. 17th, 2025

Abstract

This study systematically investigates the seepage characteristics and oil displacement efficiency of different displacement media (water, N₂, and CO₂) in low-permeability sandstone reservoirs through threshold pressure gradient experiments and high-temperature high-pressure online nuclear magnetic resonance (NMR) experiments. The threshold pressure gradient test, based on the pressure

*通讯作者。

文章引用: 金炜翔, 龚跃, 夏楚翔, 陈洪建, 徐雨桐, 李鑫, 孙奥林. 低渗透砂岩储层不同驱替方式开发规律研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 746-754. DOI: 10.12677/me.2025.134085

difference-flow rate relationship, reveals a trend of decreasing start-up pressure from liquid to gas displacement media, and a negative correlation between threshold pressure and reservoir permeability. High-temperature high-pressure NMR under simulated reservoir conditions captures the dynamic morphology and seepage behavior of displacement media in porous cores, elucidating the micro-scale mechanisms of oil recovery. The results indicate that the displacement efficiency follows the order: $\text{CO}_2 > \text{water} > \text{N}_2$, with CO_2 showing superior efficiency due to its solubility and viscosity reduction characteristics.

Keywords

Displacement Efficiency, Enhanced Oil Recovery, CO_2 Flooding, Waterflooding, Low-Permeability Reservoir

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”战略目标推动下，低碳高效开发油气资源成为我国能源产业转型升级的重要方向。低渗透砂岩油藏广泛分布于我国多个主要含油气盆地，具有储层非均质性强、孔喉结构复杂、渗透率低等特点，开发过程中易出现注采矛盾突出、采收率低等问题[1]。传统开发方式难以满足其高效动用需求，提高采收率亟需注入新型开发理念与技术路径[2]。

驱替采油技术作为提高采收率的核心手段之一，在低渗透砂岩油藏的后期开发中发挥着关键作用。近年来，伴随碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展，二氧化碳驱(CO_2 -EOR)不仅展现出良好的提高采收率潜力，也兼具碳封存减排功能，成为绿色石油开发的重要手段[3]。同时，氮气驱、水驱以及水-气交替驱(WAG-EOR)等技术路线也在不同类型油藏中获得广泛研究与应用[4]-[8]。各类驱替介质在渗流特征、油气推动机理、界面行为及与岩石作用机制等方面存在显著差异，其适用性受制于油藏类型、开发阶段及注采参数。

当前，针对低渗透砂岩油藏的多介质驱替开发规律仍缺乏系统性认识，驱替效果的影响因素尚未形成统一评价框架，相关实验研究、数值模拟及现场应用结果分散，难以支撑大规模推广与优化部署[9]。鉴于此，本文围绕低渗透砂岩储层的多种驱替方式，梳理不同介质(CO_2 、水、氮气)在提高采收率中的作用机制、适用条件与研究进展，分析存在的技术瓶颈与发展趋势[10]。在全球气候变化压力持续加剧的背景下，碳达峰与碳中和目标已成为各国应对气候危机的重要战略方向。中国承诺将于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和，这一“双碳”目标对能源结构转型和高碳行业减排提出了更高要求。作为典型的高碳排放行业，石油与天然气开采领域亟需创新减排路径，以实现绿色低碳转型[11]。

2. 不同介质启动压力梯度实验

为深入理解储层物性对流体流动能力及渗流规律的影响，本文在不同渗透率岩心上开展了多介质驱替实验，揭示了低渗透砂岩中流体启动特性的复杂性与多样性。

实验目的

在低渗透油藏中，流体在渗流过程中需克服岩石表面的吸附膜、水化膜等阻力，表现出一定的启动压力梯度。通过该类实验，可有效测定储层的启动压力梯度，从而评估其渗流能力与驱替开发效果。

通过在不同渗透率的岩心上进行实验，可以更全面地理解储层物性对流体流动能力和渗流规律的影响。这有助于揭示不同类型储层中流体行为的复杂性和多样性。

实验原理

利用“压差-流量”关系,通过改变岩心两端流体压差并测量其通过岩心的流量来求得“压差-流量”曲线,从而延长曲线线性段与压力梯度坐标轴上得到的截距值即为岩心的启动压力梯度。实验设计流程图如图1所示。

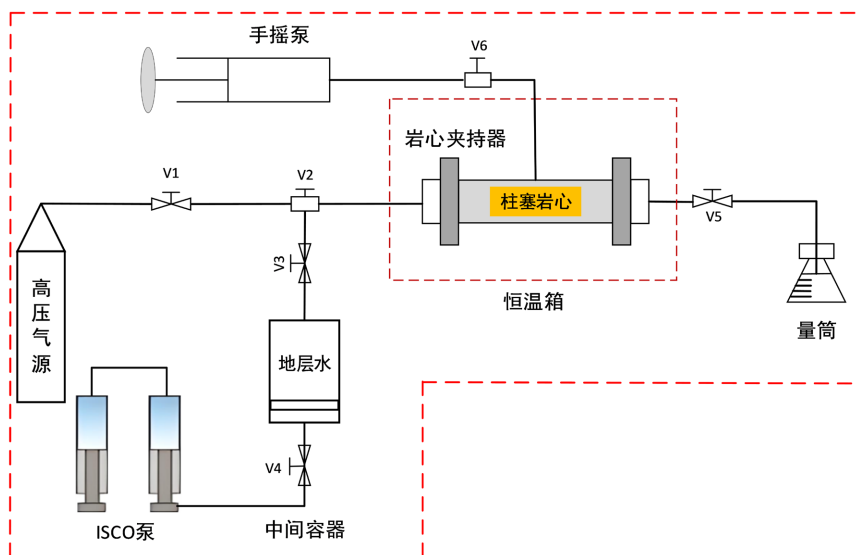


Figure 1. Experimental flowchart of threshold pressure gradient test.

图 1. 启动压力梯度实验流程图

如图 2, 目前测定低渗砂岩启动压力梯度的方法主要采用压差—流量法, 即通过测定不同驱替压差下岩心驱替流速的变化, 通过建立驱替压力梯度和流速的关系, 利用数学方法。通过延长线性段直线与压力轴相交, 最终获得启动压力梯度值。也称为“拟启动压力梯度”该方法的缺点在于无法准确测定真实启动压力梯度。下式为压力梯度与渗流速度的关系表达式, 同时可得到以下渗流曲线示意图。

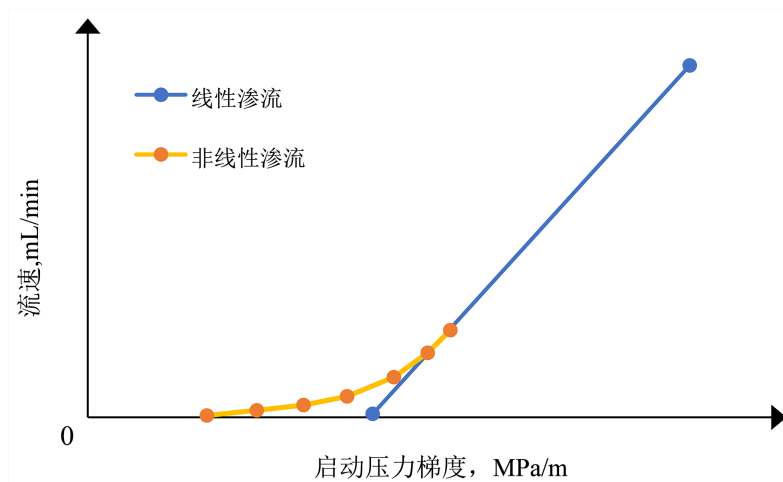


Figure 2. Typical non-darcy flow curve

图 2. 典型非达西渗流曲线示意图

$$\begin{cases} v = -\frac{k}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{\lambda}{\nabla p}\right) & \lambda > \nabla p \\ v = 0 & \lambda \leq \nabla p \end{cases}$$

式中： v ——渗流速度，m/s； k ——渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ ——粘度，mPa·s； P ——油藏压力，MPa； λ ——拟启动压力，MPa/m。

目前，低渗砂岩的启动压力梯度常采用压差 - 流量法进行测定。通过记录不同驱替压差下岩心出液流速的变化，并建立压力梯度与流速的对应关系，如图 3，可用数学方法回归拟合，确定其拟启动压力梯度值。

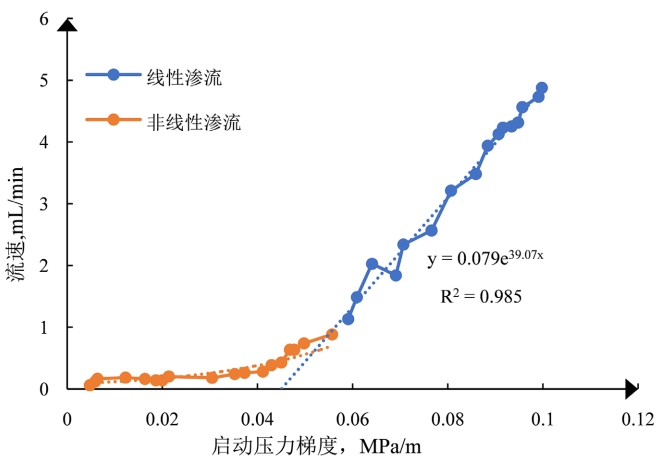


Figure 3. Relationship curve between pressure gradient and flow rate
图 3. 压力梯度与流量关系曲线

实验步骤如下：

- 1、将完成饱和处理的岩心置于岩心夹持器中，加压至模拟上覆地层压力，并放入保温箱中，确保系统无泄漏；
- 2、使用地层原油驱替，建立束缚水饱和度；
- 3、分别注入不同驱替介质(单相水、氮气、二氧化碳)，以不同压力级别驱替，观察出液情况；
- 4、采用逐级升压方式，每一级压力稳定 30 分钟，记录对应流量，测量三次取平均，误差小于 5%为有效数据。

如表 1，实验结果表明，三种介质的启动压力梯度依次降低，表现为：水驱 > N₂ 驱 > CO₂ 驱。这说明气相介质具有更强的启动能力，特别是 CO₂ 由于其较强的可溶性和较小的界面张力，可更有效地克服毛细管束缚，从而降低启动阻力。

Table 1. Threshold pressure gradient experimental data

表 1. 启动压力梯度实验数据

启动压力梯度, MPa/m	渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$	实验
1.44	1.22	水驱启动压力梯度
0.097	1.55	水驱启动压力梯度
0.37	2.41	氮气驱启动压力梯度
0.303	2.87	氮气驱启动压力梯度
0.256	1.63	注 CO ₂ 驱启动压力梯度
0.208	2.42	注 CO ₂ 驱启动压力梯度

此外，启动压力梯度与岩心的孔隙度和渗透率呈负相关关系，即孔渗条件越差，所需启动压力梯度越高。

3. 不同介质在线核磁驱油效率实验

标准核磁共振实验基于 CPMG 脉冲序列，测量并采集岩心回波串衰减曲线，通过反演软件处理得到 T_2 分布进而计算得到 T_2 截止值等核磁参数。如图 4~6，通过标样刻度后，可以计算出岩心总孔隙度、可动流体饱和度、束缚流体饱和度等信息，可用于储层解释评价及井下核磁测井数据的刻度。

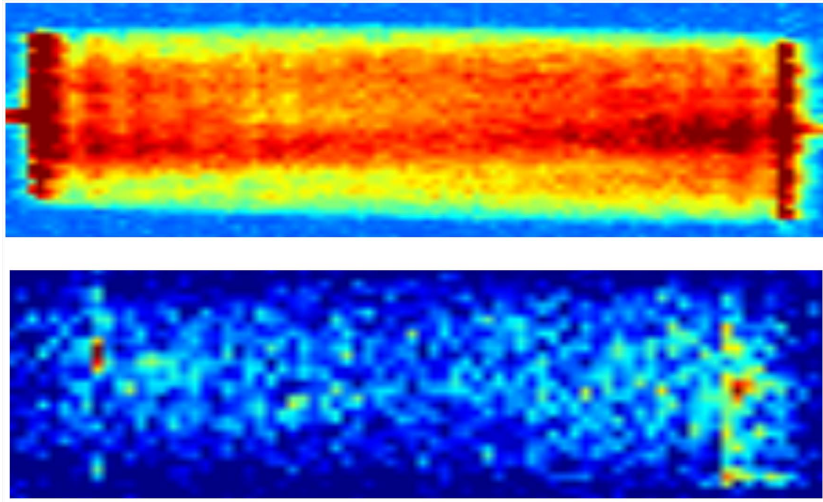


Figure 4. Core imaging before and after experiment
图 4. 实验前后岩心成像

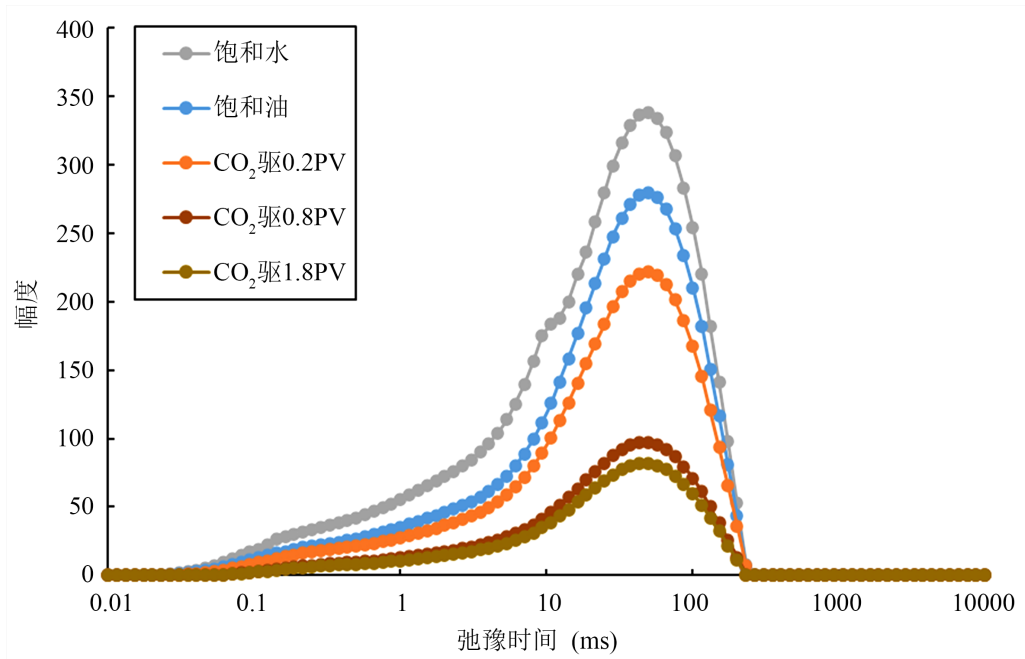


Figure 5. T_2 spectrum variation during CO_2 flooding
图 5. CO_2 驱过程中 T_2 谱变化

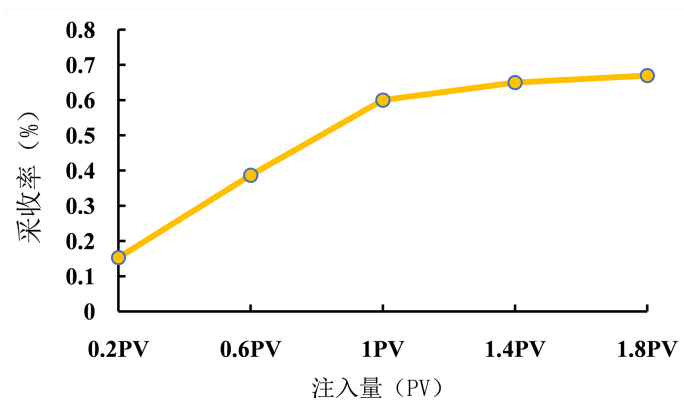


Figure 6. Oil recovery at different stages of CO₂ flooding
图 6. CO₂驱不同阶段采收率

高温高压在线核磁可以在模拟真实储层条件下，在不损害样品的基础上，获取驱替介质在岩心内部不同驱替阶段的形态分布特征和渗流规律，直观观察驱替介质在多孔介质中的运移性质，对不同驱替剂组合方式下的驱油特征进行可视化实验研究，探明驱替介质驱油微观作用机理，并优化提高原油采收率技术参数。

实验目的

高温高压在线核磁可以在模拟真实储层条件下，在不损害样品的基础上，获取驱替介质在岩心内部不同驱替阶段的形态分布特征和渗流规律，直观观察驱替介质在多孔介质中的运移性质，对不同驱替剂组合方式下的驱油特征进行可视化实验研究，探明驱替介质驱油微观作用机理。

测试依据

SY/T 6490-2014 岩样核磁共振参数实验测量规范，实验设计流程图如图 7 所示。

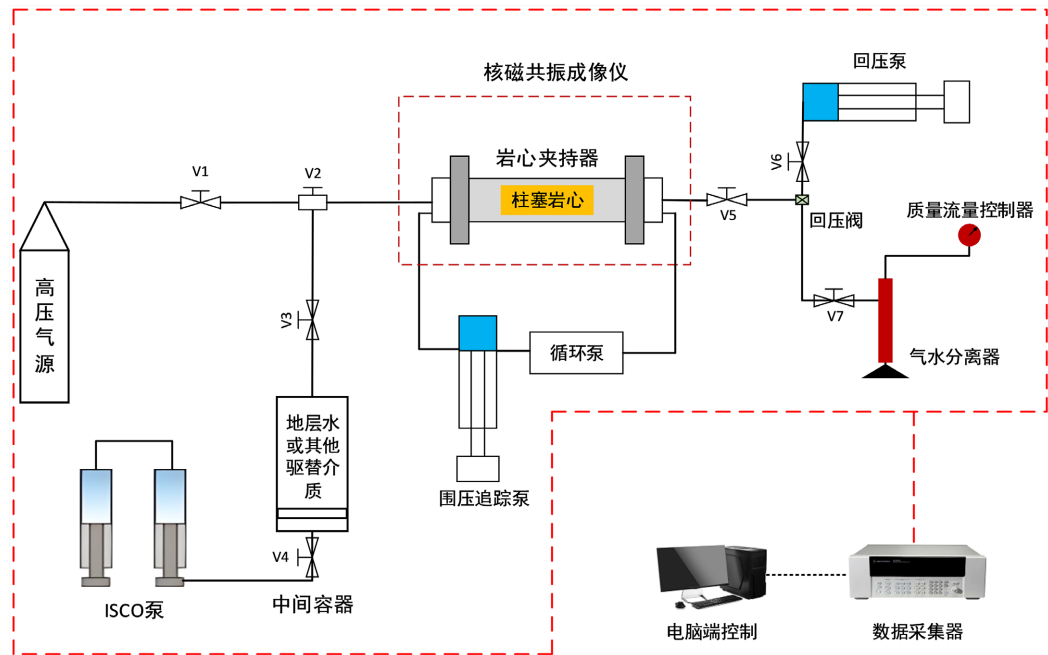


Figure 7. Displayment experiment flowchart
图 7. 驱替实验流程图

如图 8 所示,简单来说,核磁共振测试的原理在于:氢核在不同分子环境中,其恢复至平衡状态所需的横向弛豫时间(T_2)会产生差异。该参数对不同孔隙结构中的流体有良好的敏感性,是判断流体分布和孔隙结构的关键指标。

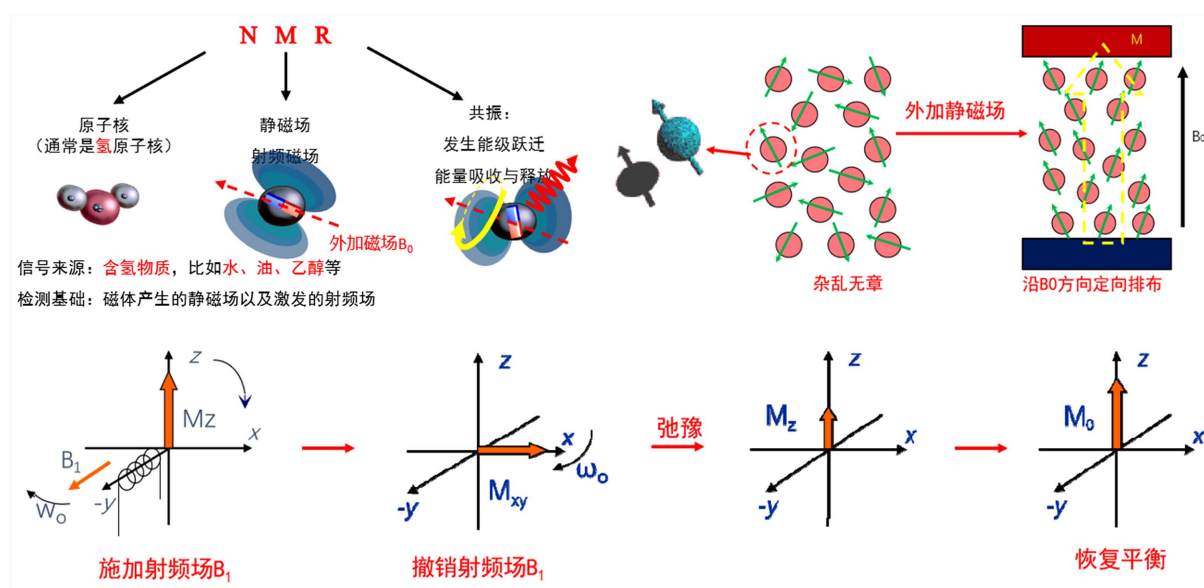


Figure 8. NMR principle schematic

图 8. 核磁原理示意图

实验步骤

1、岩心前处理: 选用储层代表性强的天然岩心样品, 依次进行机械切割、溶剂洗油(采用石油醚 80℃ 清洗)、干燥处理。随后采用气体压差法测定干岩心的初始孔隙度与渗透率, 优选孔渗匹配性良好、均质性较高的样品作为实验对象;

2、岩心饱和水处理: 将处理后的岩心在真空状态(<0.1 kPa)下抽真空 6 小时, 随后施加 30 MPa 压力注入脱气饱和水, 持续 24 小时, 确保岩心充分饱和。饱和度通过质量法及核磁共振初始 T_2 分布进行校验;

3、核磁共振参数校准: 将饱水岩心置于核磁共振高温高压夹持装置中, 进行中心频率校准、90°与 180°脉宽优化, 确保核磁响应稳定可靠。所用序列为标准 CPMG 脉冲序列, 回波间距 0.2 ms, 总回波数为 2048, 采集参数在实验前统一设定;

4、驱替介质准备: 按实验设计分别配置 CO_2 、 N_2 和模拟地层水作为驱替介质。 CO_2 与 N_2 采用高纯标准气体(纯度 $\geq 99.99\%$), 在驱替前进行充分预充压与恒温处理, 确保介质稳定注入;

5、驱替实验执行: 将岩心安装至高温高压核磁夹持器内, 逐步增压至 8 MPa 围压稳定状态, 利用恒速注入泵以 0.05 mL/min 的速率实施驱替, 维持恒定注入压力与流速控制;

6、在线监测与数据采集: 驱替全过程中, 实时获取核磁 T_2 谱与伪彩图像, 动态观察岩心内部流体分布、饱和度变化及驱替前沿推进过程。同步采集温度、压力、注入体积、产出液体体积及含水率等关键参数;

7、实验参数记录与质量控制: 所有实验均按统一编号执行, 每种驱替方式均进行不少于两次重复实验, 以控制误差。实验期间数据由数据采集系统自动记录并定时备份, 确保数据完整性与溯源性;

8、图像与谱图处理: 基于核磁 T_2 谱图变化分析驱替前后孔隙中流体赋存状态, 结合伪彩图像判断

不同介质渗流路径与动用区域，辅助识别残余油分布特征及其演变规律；

9、渗流行为与微观机制分析：综合分析注采动态曲线、核磁图像与 T₂ 谱演化过程，揭示不同驱替介质在低渗透岩心中形成的微观流动机制、动用模式与效率差异，进一步阐明 CO₂ 驱在低渗体系中的优势作用机制。

实验结果与结论

根据核磁共振驱油效率测试结果，不同介质驱替后的驱油效率排序如下：

CO₂ 驱 > 水驱 > N₂ 驱

Table 2. Oil recovery efficiency experimental data
表 2. 驱油效率实验数据

岩心编号	孔隙度，%	渗透率，10 ⁻³ μm ²	驱替方式	采收率，%
1	1.614	0.111	注水驱	43
2	2.634	0.117	注水驱	48.08
3	5.244	0.097	注水驱	49.36
4	6.17	0.137	注 N ₂ 驱	31.6
5	3.328	0.157	注 N ₂ 驱	32.8
6	4.488	0.16	注 N ₂ 驱	38.4
1	1.614	0.111	注 CO ₂ 驱	61
2	2.634	0.117	注 CO ₂ 驱	66.9
3	5.244	0.097	注 CO ₂ 驱	70

实验结果表明(表 2)：CO₂ 驱替实验表现出最高的采油效率，这一现象不仅源于其较强的油溶解能力和黏度降低效应，更与其在微观尺度上所展现的一系列物理与化学作用机制密切相关。首先，CO₂ 在高压条件下可与原油发生部分混相甚至临近混相的相行为，从而导致原油体积膨胀、黏度显著下降，增强了原油的流动性。其次，CO₂ 的注入显著降低了油-水界面张力，减弱了毛管力控制效应，使得原油在微小孔喉中更易被动用。此外，CO₂ 的溶解还可导致岩石表面润湿性发生转变，改变原油在孔隙结构中的赋存状态，进一步提高驱替效率。更为关键的是，CO₂ 具备较低的启动压力梯度，能够在低渗透岩心中实现更有效的前缘推进和深部渗流，尤其在裂缝-孔隙双重介质体系中表现出优越的动用能力。相比之下，单一 N₂ 或水驱缺乏与原油的有效相互作用，不具备显著的降黏、界面调控或润湿性改变等作用，导致其在低渗透孔隙体系中表现出有限的驱替效率。

4. 结论

本文通过启动压力梯度实验与高温高压在线核磁共振驱替实验，系统研究了低渗透砂岩储层中 CO₂、水、N₂ 三种驱替介质的启动能力、渗流特征与驱油效率。实验结果表明：

- (1) 三种介质的启动压力梯度呈现出显著差异，表现为水 > N₂ > CO₂，气体驱尤其是 CO₂ 更易克服毛细束缚启动渗流；
- (2) CO₂ 驱替表现出最高的采收率，不仅因其具有良好的降黏与油溶解能力，还与其降低界面张力、改变润湿性、促进深部流动等微观作用机制密切相关；
- (3) 水驱和 N₂ 驱在低渗透孔隙体系中存在一定局限性，驱替过程中易出现前缘窜流、动用区域受限等问题；
- (4) 驱油效率受孔渗条件、驱替介质物性、注入压力等多因素影响，需在实际应用中综合考量以优化

驱替效果。

本文通过实验定量分析了多种驱替介质在低渗透砂岩储层中的启动行为与微观驱油机制，增强了对各类驱替方式适应性的认识。通过引入在线核磁共振成像技术，实现了驱替过程中流体运移行为的可视化监测，有助于揭示驱油前沿推进、残余油分布及渗流路径演化等关键过程。研究成果可为后续驱替工艺优化、注采参数调整及提高采收率技术的设计提供实验支持和理论依据。

基金项目

“重庆科技大学研究生创新计划项目”：项目批准号：YKJCX2420137。

参考文献

- [1] 邹才能, 王玉满, 王岚, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
- [2] 濮孟蕾. 浅析低渗透油藏开发状况及前景[J]. 化工管理, 2019(20): 221-222.
- [3] 潘晨. 油田低渗透油藏开发技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(7): 193-194.
- [4] 谭文斌. 油田注水开发的决策部署研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [5] 钱坤, 杨胜来, 马轩, 等. 超低渗透油藏 CO₂ 吞吐利用率实验研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 77-81.
- [6] 肖洪海. 二氧化碳吞吐增油技术机理与应用[J]. 化学工程与装备, 2015(8): 96-97.
- [7] 刘琼. 中原油田 CO₂ 吞吐技术及增产应用[J]. 精细石油化工进展, 2024, 25(5): 32-35.
- [8] 张传宝, 李宗阳, 张东, 等. CO₂ 驱油藏工程研究进展及展望[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(5): 142-152.
- [9] 程杰成, 白军辉, 李玉春, 等. 大庆油田 CO₂ 驱油技术研究试验进展与展望[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 6-14.
- [10] 王立, 孙晓东, 汪泳吉, 等. CO₂ 驱油技术的机理与展望[J]. 山东化工, 2024, 53(14): 140-143.
- [11] 王哲, 曹广胜, 白玉杰, 等. 低渗透油藏提高采收率技术现状及展望[J]. 特种油气藏, 2023, 30(1): 1-13.