

致密砂岩油藏CO₂驱微观剩余油赋存特征研究综述

陈俊铭, 李文睿, 曲文颖, 罗杰

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月10日; 发布日期: 2026年5月22日

摘要

针对致密砂岩油藏CO₂驱后微观剩余油赋存规律不明、驱替效率提升受限问题, 本文系统综述了致密砂岩油藏CO₂驱微观剩余油的形成机理、赋存特征与演化规律, 对比分析了聚焦离子束扫描电镜、CT扫描、核磁共振等核心表征技术的原理、优势与局限性, 并探讨了当前研究瓶颈与未来发展方向。研究明确了微观剩余油的5类核心成因、3种孔喉尺度赋存类型及5种典型微观形态; CO₂驱不同阶段剩余油呈动态演化, 初期优先动用大、中孔连续状剩余油, 后期向微小孔喉及纳米孔富集, 混相驱可有效降低储层动用下限。证实多技术联合的多尺度表征是突破单一方法局限的有效方法。本文的综述成果, 可为致密砂岩油藏CO₂驱高效开发及剩余油挖潜提供一定的理论支撑。

关键词

致密砂岩油藏, CO₂驱, 微观剩余油, 赋存特征, 表征技术

A Review of Microscopic Remaining Oil Occurrence and Characterization in CO₂-Flooded Tight Sandstone Reservoirs

Junming Chen, Wenrui Li, Wenyong Qu, Jie Luo

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

Received: April 7, 2026; accepted: May 10, 2026; published: May 22, 2026

Abstract

Given the unclear occurrence patterns of microscopic remaining oil and limited improvement of

displacement efficiency in tight sandstone oil reservoirs after CO₂ flooding, systematically reviewed are the formation mechanisms, occurrence characteristics, and dynamic evolution of microscopic remaining oil during CO₂ flooding. Compared and analyzed are the principles, merits, and limitations of key characterization techniques, including focused ion beam-scanning electron microscopy (FIB-SEM), X-ray computed tomography (CT), and nuclear magnetic resonance (NMR), while current research bottlenecks and future development directions are discussed. Identified are five core formation mechanisms, three occurrence types by pore-throat scale, and five typical microscopic morphologies of remaining oil. Demonstrated is the dynamic evolution of remaining oil at different CO₂ flooding stages: the continuous oil phase in large and medium pores is preferentially displaced in the early stage, whereas remaining oil accumulates in micro-nano pore-throats in the late stage, and miscible flooding effectively lowers the minimum recoverable pore-throat size and improves displacement efficiency. Confirmed is that multi-technique integrated multi-scale characterization provides an effective approach for overcoming the limitations of single methods. The reviewed findings offer reliable theoretical support for the efficient development of CO₂ flooding, enhanced oil recovery, and remaining oil recovery in tight sandstone oil reservoirs.

Keywords

Tight Sandstone Oil Reservoirs, CO₂ Flooding, Microscopic Remaining Oil, Occurrence Characteristics, Characterization Techniques

Copyright © 2026 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

致密砂岩油藏作为我国重要的非常规油气资源之一，在保障国家油气能源安全中发挥着重要作用。但该类油藏普遍具有孔隙结构复杂、渗透率极低以及平面与垂向非均质性强的地质特征，在开发过程中面临“注不进”与“采不出”的双重挑战[1]。数据显示，全球致密油藏的平均采收率仅为 5%~10%，远低于常规砂岩油藏的采收率。我国致密砂岩油藏地质特征更为复杂，核心开发技术仍处于攻关突破阶段[2]。在此背景下，CO₂ 驱油技术凭借其在致密储层中兼具地层能量补充与高效驱油的双重优势，近年来已成为提高致密油藏采收率的重要研究方向[3]。

CO₂ 驱被视作提升致密油采收率最具潜力的技术之一，其作用机理主要涵盖降低原油黏度、促使原油体积膨胀形成混相效应以及改善岩石润湿性等多个层面[4]。国内多个油田的现场先导试验已证实该技术的可行性与应用潜力，如刘炳官等[5]在江苏油田富 14 断块开展的 CO₂ 混相驱现场试验使采收率提高 4%以上；张涛等[6]在靖边油田开展的 CO₂ 水气交替驱使最终采收率达到 77.3%。然而，致密砂岩油藏经过 CO₂ 驱后，储层中仍存在大量微观剩余油，其赋存状态复杂、分布规律不明，成为限制采收率进一步提升的关键瓶颈。

精准表征 CO₂ 驱后微观剩余油的赋存特征，是揭示驱替机理、优化注入参数、指导剩余油后续挖潜的基础。近年来，聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)、微纳米 CT 成像、核磁共振等(NMR)先进表征技术的快速发展，为在微纳米尺度上观察和分析剩余油提供了技术支撑[7]-[9]。

本文聚焦于致密砂岩油藏 CO₂ 驱后微观剩余油的赋存特征，系统综述剩余油的形成机理、赋存类型、微观形态以及各类表征技术的原理、应用与局限性，并深入探讨当前研究现存的问题以及未来的发展方

向, 为致密砂岩油藏 CO₂ 驱高效开发提供理论参考。

2. CO₂ 驱微观剩余油形成机理

2.1. CO₂ 驱替过程中原油的微观运移行为

在致密砂岩微纳米孔喉中, CO₂ 与原油的相互作用受到孔喉尺寸的强烈约束 Cao 和 Gu [10] 针对致密砂岩储层岩心开展了系统的非混相与混相 CO₂ 驱替实验, 证实 CO₂ 溶解于原油后, 可通过提升 CO₂ 在原油中的溶解度、降低原油黏度以及减小油 - CO₂ 体系的平衡界面张力, 直接增强原油在致密孔喉中的流动能力, 从而提高采收率。

杨胜来等[11]的实验研究表明, CO₂ 对原油的抽提作用显著, 能够有效降低原油黏度, 且抽提程度与压力、温度和原油组分密切相关。在混相驱条件下, CO₂ 与原油界面消失, 理论上微观驱油效率可接近 100%; 而在非混相驱条件下, CO₂ 与原油之间存在明显界面, 受毛细管力控制, 部分原油被绕流或滞留于盲端、角隅和狭窄喉道中。储层物性是影响 CO₂ 驱油效果的基础因素。韩文成[9]通过不同渗透率岩心实验发现, 岩心渗透率与 CO₂ 驱油效率呈显著正相关, 渗透率越高, 原油动用程度越好。杨红等[12]通过均质和非均质人造岩心实验发现, 渗透率级差对非均质性气窜影响明显, 当渗透率级差小于 15 时为气窜敏感区, 气窜系数和驱油效率降低幅度, 会随渗透率级差的增大快速增大。

综上所述, CO₂ 驱替过程中原油的微观运移行为, 本质上是 CO₂ 与原油间多维度物化作用(降黏、膨胀、降界面张力、萃取轻烃)驱动的结果, 其运移效率直接受制于混相/非混相状态: 混相时驱油效率接近 100%, 非混相时毛细管力主导导致原油绕流与滞留。同时, 储层渗透率越高、非均质性越弱, 运移越顺畅; 反之, 渗透率级差过大会诱发气窜, 显著削弱微观动用程度。上述因素共同决定了 CO₂ 驱替过程中原油的微观运移行为。

2.2. 微观剩余油的成因类型

结合致密砂岩储层孔喉结构特征与 CO₂ 驱替作用特点, 可将驱后微观剩余油的形成机理归纳为以下 5 类:

1) 簇状/团块状剩余油: 由于储层孔隙结构的非均质性, CO₂ 驱替前缘沿高渗通道优先推进, 低渗区域中的原油被绕流而形成剩余油。这类剩余油通常呈连续或不连续团块状分布于低渗区, 是致密非均质储层中最主要的剩余油类型。

2) 角隅剩余油: 在孔隙角隅和粗糙壁面处, 由于毛细管力和壁面吸附作用, CO₂ 难以完全驱替这些区域的原油。尤其是在非混相条件下, 油气界面张力较高, 角隅剩余油更为普遍, 通常呈薄膜状或孤岛状附着于矿物颗粒表面。

3) 卡断型剩余油: 致密砂岩储层中孔喉尺寸分布范围广, 狭窄喉道对 CO₂ 流动产生毛细管阻力, 当驱替压力不足以克服阻力时, 喉道下游的孔隙中的原油成为剩余油。

4) 吸附剩余油: 储层中的有机质和黏土矿物表面对原油具有吸附作用, 会在矿物表面形成难以剥离的吸附油膜。该类剩余油启动压力极高, 是致密砂岩油藏 CO₂ 驱后剩余油挖潜的核心目标。

5) 非混相残余油: 当地层压力低于最小混相压力条件下驱替, CO₂ 与原油两相共存, 驱替结束后孔隙中残留的原油呈不连续液滴或液膜形态。

在水驱过程中, 受油水黏度比大、界面张力高等因素影响, 注入水往往沿高渗通道呈不稳定推进, 极易形成优势渗流通道, 导致水驱波及系数较低, 剩余油主要滞留在低渗区的小孔微喉处。而 CO₂ 驱条件下, CO₂ 分子尺寸小、可扩散性强, 在达到近混相或混相状态时, 气油界面张力大幅降低甚至消失, CO₂ 可渗透进入水驱难以波及的微孔隙和狭窄喉道, 有效扩大微观波及体积。

2.3. 影响微观剩余油分布的关键因素

CO₂ 驱后微观剩余油的空间分布, 受储层地质条件与开发工程参数的共同控制。储层物性是剩余油分布的基础控制因素。孔喉尺寸分布特征直接决定了 CO₂ 的可进入性和驱替效率, 孔径小于 50 nm 的微孔中, 毛细管阻力极大, 原油难以被有效驱替, 是剩余油最主要的赋存空间。驱替压力是影响剩余油分布的关键操作参数, 梁萌等[13]系统梳理了气体混相驱与最小混相压力测定研究进展, 明确了最小混相压力受地层温度、气体组成、原油组分等条件的综合影响, 驱替压力与最小混相压力的匹配关系, 直接决定了驱替状态与剩余油的形成类型。注入方式也会对剩余油分布产生显著影响。曲德利[14]通过实验对比, 确定水气交替驱为最佳开采方式; 陈祖华[15]认为前期注入可提高混相压力, 大尺寸段塞可加大波及区域, 高部位注气可抑制重力超覆; 张涛等[6]在靖边油田的现场应用也证实, CO₂ 水气交替驱可有效抑制气窜, 最终驱油效率可达 77.3%。

3. CO₂ 驱后微观剩余油赋存特征

3.1. 基于孔喉尺度的剩余油赋存分类

结合致密砂岩储层孔喉多尺度分布特征与行业通用分类标准, 根据赋存空间的尺度差异, 可将 CO₂ 驱后微观剩余油划分为 3 类, 不同类型的剩余油在成因、形态与动用潜力上具有显著差异:

1) 纳米孔喉中的剩余油: 致密砂岩中大量发育孔径小于 100 nm 的纳米孔, CO₂ 分子虽能进入, 但由于孔隙尺寸极小, 毛细管压力巨大, 驱替阻力极高。纳米孔中的剩余油通常以孤立液滴或吸附膜形式存在, 连通性极差, 难以被进一步驱替。白斌等[8]通过纳米 CT 成像发现, 纳米级球状微孔连通性较差, 在三维空间中呈多孤立状, 仅能作为储集空间而无法形成有效渗流通道, 这类孔隙中的剩余油基本无法动用。

2) 微米孔喉中的剩余油: 1~50 μm 的微米级孔隙, 是致密砂岩中相对优质的储集空间, CO₂ 可有效进入并驱替其中的原油。但这类孔隙的孔喉形态复杂、喉道狭窄, 仍有部分原油会滞留于孔隙角隅, 或被主流通道绕流形成剩余油。微米孔喉中的剩余油多呈团块状、条带状或网络状分布, 具备一定的可动潜力, 是 CO₂ 驱后续剩余油挖潜的核心目标。

3) 微裂缝中的剩余油: 微裂缝是致密砂岩储层重要的储集空间与渗流通道。CO₂ 驱过程中, 微裂缝中的原油优先被驱替, 但裂缝壁面的粗糙结构、分支裂缝的发育, 仍会导致部分原油滞留。微裂缝中的剩余油多以薄膜状、丝带状分布, 若裂缝发育程度高、连通性好, 剩余油也可能形成连续分布。

3.2. 剩余油的微观形态特征

基于室内微观可视化实验与高精度图像分析结果, 可将致密砂岩 CO₂ 驱后剩余油的典型微观形态分为 5 类, 不同形态的剩余油对应不同的形成机理与动用潜力:

1) 孤立液滴状: 这是 CO₂ 驱后最常见的剩余油形态, 剩余油以近球形的孤立液滴形式, 悬浮于孔隙中央或附着于孔壁。这种形态通常出现在孔喉比较高的区域, 液滴尺寸受孔喉直径控制。

2) 薄膜状: 剩余油以连续或不连续的油膜形式, 附着于矿物颗粒表面或孔壁。这类剩余油的发育主要受储层润湿性控制, 亲油矿物表面更易形成连续油膜。薄膜状剩余油的厚度多为纳米级, 常规表征手段难以有效分辨, 需借助高分辨率电镜观测。

3) 簇状/团块状: 多个孔隙中的剩余油通过狭窄喉道相互连接, 形成不规则的原油团块。这类剩余油多发育于孔喉相对发育的区域, 对应剩余油饱和度较高的部位。簇状/团块状剩余油具备一定的连通性, 但狭窄喉道导致其流动性极差, 仅在储层压力发生较大扰动时, 才可能发生二次运移。

4) 角隅状: 剩余油充填于孔隙的角隅、凹陷处, 呈楔形或弯月形分布。这是毛细管力作用下最典型的残余油形态, 在非混相驱、非均质孔隙结构中尤为常见。

5) 喉道堵塞状: 剩余油占据整个喉道或喉道的大部分空间, 形成“液塞”阻断孔隙的上下游连通。这类剩余油对储层渗流能力的影响最大, 会直接导致喉道下游孔隙中的原油完全无法被波及动用。喉道堵塞状剩余油多发育于孔喉比大、喉道尺寸与原油分子尺寸相近的区域, CO_2 驱过程中产生的沥青质沉淀, 会进一步加剧这类剩余油的形成。

这些形态并非孤立存在, 常在同一孔隙系统中共存并相互转化。伊吉庆等[16]研究表明, 驱替过程中不同形态的剩余油会发生相互转化, 残余油状态下多形成以簇状/团块状剩余油为主、多种形态并存的复杂赋存体系, 这也为后续针对不同形态剩余油制定复合动用机制、提高采收率提供了理论参考。

3.3. CO_2 驱不同阶段的剩余油演化规律

CO_2 驱替过程中, 剩余油的赋存状态与空间分布, 会随注入阶段的推进发生动态演化。驱替初期, CO_2 优先进入大孔喉, 小孔中的原油基本保持原始状态, 剩余油主要分布于小孔和盲端。随着注入量增加, CO_2 波及范围扩大, 大孔喉中的原油被逐渐驱替, 剩余油逐渐向更小的孔隙和角隅处集中。在水气交替驱过程中, 水的注入可改变储层的润湿性和流动通道。

陈超等[17]研究系统揭示, 低渗透砾岩油藏 CO_2 驱不同阶段剩余油演化规律为: 驱替初期优先动用大、中孔内连续状与簇状/团块状剩余油; 注入量达 2.0 PV 后, 气窜通道形成, 大、中孔剩余油基本采出, 剩余油向微小孔喉及纳米孔富集, 呈现难动用形态; 混相驱较近混相驱可降低储层动用下限, 进一步挖潜低孔区域分散剩余油。

4. 微观剩余油表征技术

4.1. 基于扫描电镜的图像分析技术

扫描电子显微镜(SEM)是用于表征致密储层微观孔隙结构与剩余油分布的技术。常规 SEM 可通过观测岩石抛光断面, 识别孔隙空间与残留原油, 通过背散射电子图像可区分矿物相和有机质, 但分辨率有限, 且二维图像难以反映三维空间分布特征。

聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)双束系统, 是近年来快速发展的高精度表征技术, 其集成了高分辨率电子束成像系统, 与高强度离子束微纳米精密加工系统。付琴琴等[18]系统性介绍了 FIB-SEM 的基本原理和典型应用, 包括透射电镜样品制备、微纳尺度力学测试以及材料三维成像及分析。王晓琦等[7]重点阐述了 FIB-SEM 在石油地质研究中的综合应用, 指出 FIB-SEM 的二维大面积成像与三维切片-成像分析可有效解决岩石样品非均质性强的表征难题, 并可对岩石内部的孔隙、微裂缝、矿物、有机质和残留油等五大要素进行全面的成像分析。基于 FIB-SEM 进行剩余油表征的基本流程包括首先选定观测的目标区域, 通过离子束对样品表面进行逐层切割, 单层切割厚度可控制在 5~20 nm; 每完成一次切割, 同步采集该断面的高分辨率电子图像; 最终将连续的图像序列, 重构为三维体数据。通过图像分割与阈值处理, 可有效区分孔隙空间、矿物骨架与剩余油, 实现剩余油饱和度、连通性、形态参数的定量计算。

FIB-SEM 技术在剩余油表征技术核心优势在于: 其一, 空间分辨率极高, 可清晰地分辨纳米级的孔隙与剩余油细节; 其二, 具备三维重构能力, 可精准获取剩余油的三维空间形态与连通性特征; 其三, 结合能谱分析(EDS)的方法, 可以识别矿物组成和有机质类型。但该技术存在一定的局限性: 比如观测视场有限, 通常仅有几十微米, 难以反映储层的宏观非均质性; 样品制备流程复杂, 而且测试需要在高真空环境下进行, 可能导致轻组分挥发; 单样品分析耗时较长, 无法实现多样品批量统计分析。利用 FIB-SEM 技术对研究区致密砂岩储层的微观孔隙结构与黏土矿物赋存特征进行观测, 典型分析结果如图 1 所示。

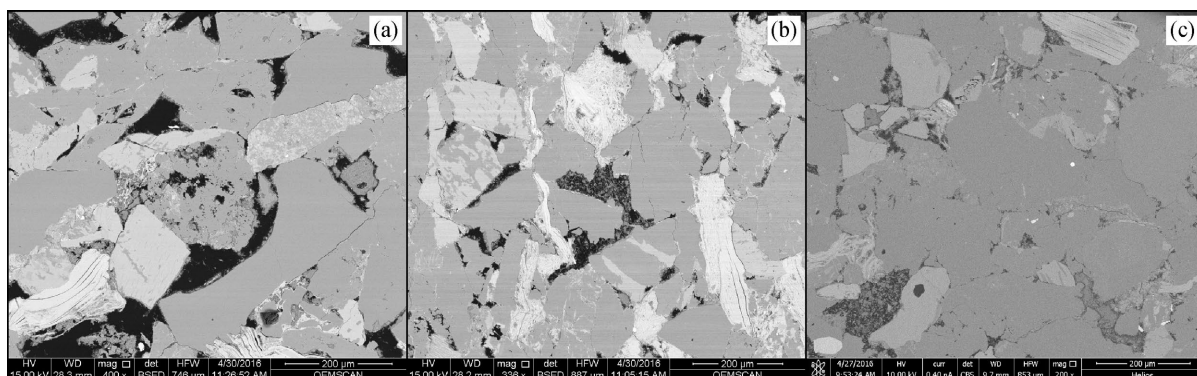


Figure 1. Focused ion beam scanning electron microscope analysis results [19], (a) Sample A, 2113.55 m. The corrosion pore is well developed with micro-cracks and chlorite cladding in the pore; (b) Sample Y, 1916.30 m. Micropore is filled by chlorite, and feldspar dissolved pore is developed, and the pore is connected by intergranular cracks; (c) Sample C, 2306.57 m. The pore is filled with chlorite and kaolinite, and the compaction is strong

图 1. 聚焦离子束扫描电镜分析图[19], (a) 样品 A, 2113.55 m。溶蚀孔发育, 见微裂缝, 孔隙中可见微量绿泥石包壳; (b) 样品 Y, 1916.30 m。微孔隙被绿泥石填充, 发育长石溶孔, 孔隙间以粒间缝连通; (c) 样品 C, 2306.57 m。孔隙被绿泥石、高岭石填充, 压实作用强烈

4.2. CT 扫描与三维重构技术

微米/纳米 CT 成像是一种无损三维成像技术, 能够在不破坏样品的情况下获取内部孔隙结构和流体分布信息。CO₂ 驱微米级 CT 成像。王瑞飞等[19]利用多尺度 CT 成像技术, 结合聚焦离子束扫描电镜技术, 对鄂尔多斯盆地 X 地区长 6 超低渗透砂岩储层进行不同尺度孔喉分维数重构, 建立了三维纳米级孔隙结构模型, 揭示了微米 CT 与纳米 CT 的跨尺度融合表征策略在识别致密储层纳米级孔喉方面的有效性。该方法同样适用于 CO₂ 驱后剩余油的表征, 通过对比驱替前后的 CT 图像, 可识别剩余油的分布位置和体积。

CT 成像表征剩余油的关键在于区分 CO₂、油和水三相。由于 CO₂ 和油的密度相近, 常规 CT 难以区分。采用能谱 CT 或同步辐射 CT, 利用不同能量下吸收系数的差异, 可实现多相流体的区分。此外, 向 CO₂ 中添加碘化物等示踪剂也可增强成像对比度。对于致密砂岩储层, 由于孔隙尺寸小, 需要纳米 CT 才能分辨, 但纳米 CT 的视场小, 必须采用多尺度表征策略, 才能兼顾表征精度与代表性。

CT 扫描技术的核心优势在于: 样品无损、可实现三维可视化、可重复扫描, 能够开展岩心尺度的原位驱替实验, 实现驱替过程的实时扫描观测。其技术局限性包括: 分辨率与视场相互制约, 高分辨率纳米 CT 的视场仅几十微米; CO₂、油、水三相流体的区分难度大; 图像分割过程中, 阈值的选择存在较强的主观性, 会影响表征结果的准确性。总体而言, 多尺度 CT 成像策略是表征致密砂岩中微观剩余油的有效途径。利用多尺度 CT 成像技术获取的砂岩样本二维切片结构及重建的三维数据体示例, 分别如图 2 和图 3 所示。

4.3. 核磁共振技术

核磁共振(NMR)技术通过检测流体中氢质子的弛豫信号来表征孔隙流体分布。横向弛豫时间 T₂ 与孔隙半径成正比, 通过 T₂ 谱可以区分不同尺寸孔隙中的流体。CO₂ 驱前后 T₂ 谱的变化可反映剩余油的孔径分布特征。NMR 技术能够定量计算可动流体饱和度和束缚流体饱和度, 实现剩余油可动用潜力的定量评价。

在 CO₂ 驱相关研究中, 韩文成[9]通过核磁共振实验, 分析了低渗透油藏 CO₂ 驱的开发规律, 建立了对应的采收率预测模型。王敬等[21]基于核磁共振与分子模拟相结合的方法, 系统研究了低渗-致密油藏注气吞吐过程中不同注排方式下 CO₂ 与原油的相互作用规律及其对开发的影响特性, 分析了不同孔隙尺度中原油的动用特征。此外, NMR 技术还可用于 CO₂ 驱过程中流体饱和度的动态监测, 通过连续测量岩心的 T₂ 谱, 实时追踪不同孔径孔隙中油相的驱替进程。

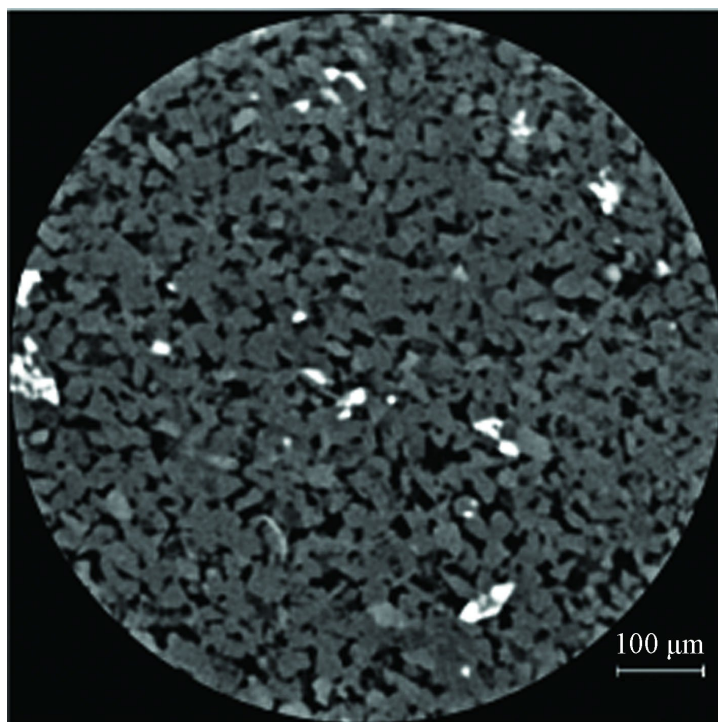


Figure 2. Two dimensional slice of sandstone sample [20]
图 2. 砂岩样本二维切片图[20]

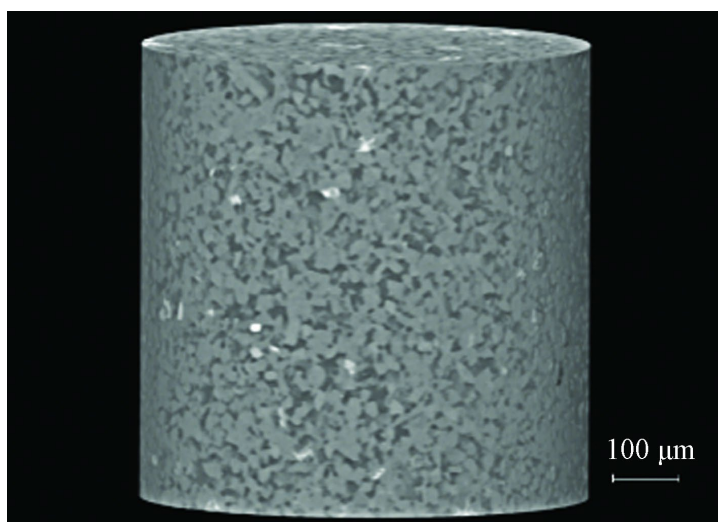


Figure 3. Three dimensional data volume of sandstone sample [20]
图 3. 砂岩样本三维数据体[20]

NMR 技术的核心优势在于：测试快速、对样品无损伤；对孔隙中的流体高度敏感，可有效区分可动流体与束缚流体；可实现孔隙度、流体饱和度的定量计算。其技术局限性主要包括：无法获取剩余油的空间形态与分布信息；储层中的顺磁性物质(如含铁矿物)会对弛豫信号产生严重干扰；CO₂ 不含氢质子，无法通过 NMR 信号与原油进行区分。因此，在实际应用中，NMR 技术通常需要与 CT、SEM 技术结合使用，实现剩余油的定性定量联合表征。通过核磁共振实验可定量表征不同驱替阶段的流体饱和度变化，CO₂ 驱替过程中岩心的 T₂ 谱变化特征及实验前后的岩心成像结果分别如图 4 和图 5 所示。

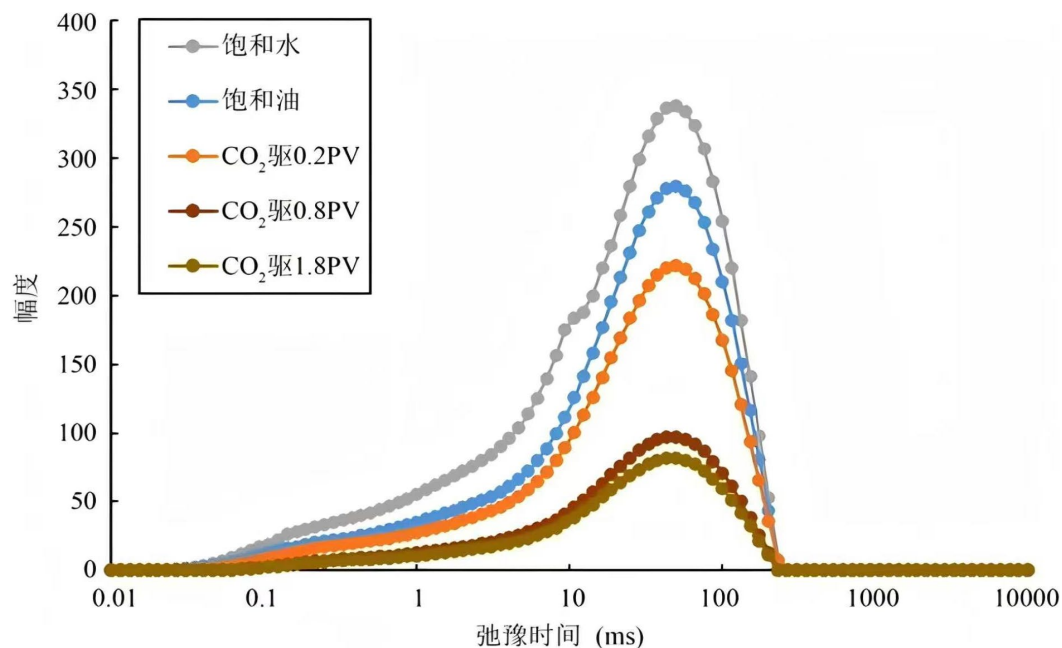


Figure 4. T2 spectrum variation during CO₂ flooding [22]

图 4. CO₂ 驱过程中 T2 谱变化[22]

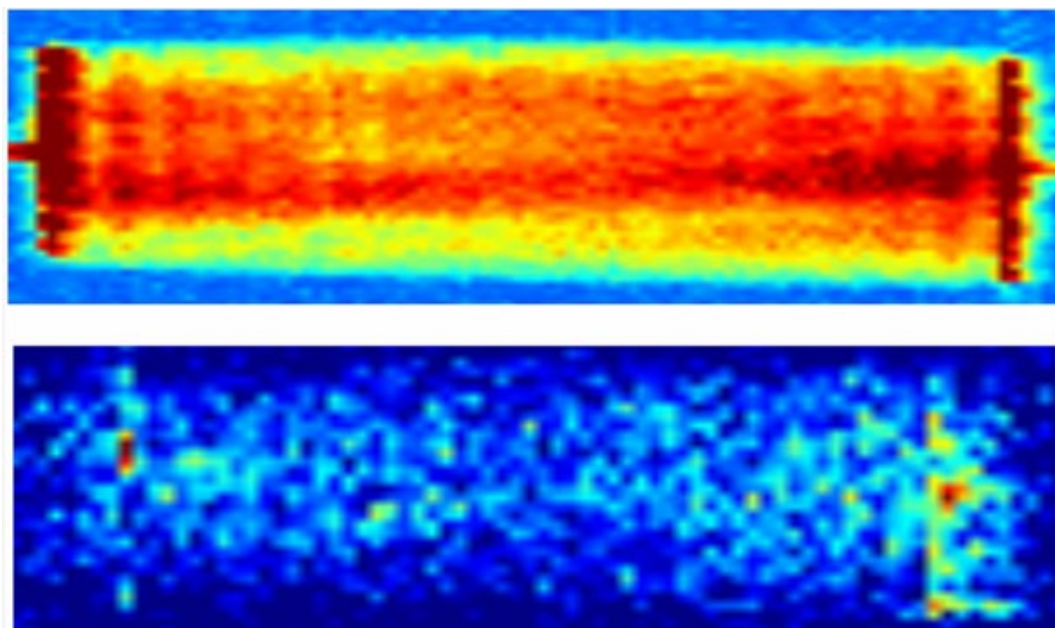


Figure 5. Core imaging before and after experiment [22]

图 5. 实验前后岩心成像[22]

4.4. 多尺度联合表征策略

单一表征技术难以全面描述致密砂岩中 CO₂ 驱后微观剩余油的多尺度分布特征。非常规储层地质学在研究方法技术、多尺度数据融合等方面已取得重大进展，多方法、多尺度的储层整体表征，已成为当前非常规油气领域的研究热点。

针对致密砂岩 CO₂ 驱剩余油的多尺度联合表征，王琛等[23]通过微观可视化实验结合高分辨率图像分

析技术, 采用微米 CT 扫描厘米级岩心识别宏观剩余油分布区域, 再选取剩余油富集区钻取毫米级样品进行纳米 CT 扫描, 成功分辨出微米级剩余油形态, 系统揭示了 CO₂ 驱原油在基质孔喉单一介质与基质 - 裂缝双重介质中的动态运移规律及赋存特征。鲍磊等[24]综合运用铸体薄片观察、微米 CT、纳米 CT 及核磁共振等多尺度表征技术, 以鄂尔多斯盆地北部锦 58 井区下石盒子组致密砂岩储层为例, 将孔喉划分为大孔(0.1~1 μm)、中孔(0.01~0.1 μm)和小孔(0.001~0.01 μm)三个级别, 系统评价了不同储层因素对各尺寸孔喉内可动流体分布的影响, 发现脆性矿物含量主要影响大孔中的可动流体数量, 而黏土矿物含量对所有孔喉尺寸的可动流体含量均有负面影响, 前者侧重于动态可视化, 后者侧重于静态孔喉结构对可动流体的控制。

4.5. 当前面临的表征问题

尽管致密砂岩 CO₂ 驱微观剩余油表征技术已取得显著进展, 但在实际应用与理论研究中, 仍面临诸多亟待解决的核心问题:

1) 表征分辨率与观测视场的固有矛盾。高分辨率的 FIB-SEM、纳米 CT 技术, 观测视场通常小于 100 μm, 表征结果难以反映储层的宏观非均质性; 而大视场的微米 CT、常规 SEM 技术, 又无法分辨纳米级的剩余油细节。如何实现从纳米级到岩心尺度的跨尺度数据融合与精准表征, 仍是亟待解决的关键问题。

2) 多相流体的有效区分难度大。CO₂ 驱过程中存在 CO₂、油、水三相流体, 常规成像手段难以实现三者的同步区分。尤其是超临界 CO₂ 与原油的密度相近, X 射线吸收系数差异极小, 导致 CT 成像的对比度严重不足; 而 FIB-SEM 测试需要高真空环境, CO₂ 会发生逸散, 无法实现 CO₂ 与原油的有效区分。

3) 原位动态表征手段匮乏。现有表征技术多为驱替结束后的静态取样观测, 无法实时追踪 CO₂ 驱替过程中, 剩余油的动态演化过程与运移规律。尽管环境 SEM、微流控芯片等原位显微实验技术已有所发展, 但实验条件与油藏实际的高温高压条件仍存在较大差距, 难以完全还原地下真实的驱替过程。

4) 样品制备过程对剩余油原始状态的干扰。FIB-SEM、SEM 测试需要高真空环境, 样品干燥、镀膜的过程中, 可能导致剩余油的原始形态发生改变, 或造成原油轻组分的挥发。针对该问题, 可采用低温 FIB-SEM 技术, 将样品台冷却至液氮温度(-196℃)以大幅降低原油轻组分蒸气压, 同时配合低加速电压(1~5 kV)和低束流减少电子束热损伤; 也可使用环境扫描电镜(ESEM)在 1~10 Torr 低真空环境下观测, 无需干燥镀膜, 最大程度保留剩余油原始状态。

5. CO₂ 驱剩余油机理 - 特征 - 表征技术对应关系

为清晰梳理致密砂岩油藏 CO₂ 驱后不同类型剩余油的形成机理、赋存特征、适用表征技术及核心技术挑战的对应关系见表 1。

Table 1. Correspondence between mechanisms, occurrence characteristics, and characterization technologies for different types of remaining oil in tight sandstone reservoirs after CO₂ flooding

表 1. 致密砂岩油藏 CO₂ 驱不同类型剩余油的机理 - 特征 - 表征技术对应关系

剩余油类型	主要形成机理	典型赋存位置	最有效表征技术	技术核心挑战
角隅剩余油	毛细管力束缚, 壁面吸附, CO ₂ 无法扫及孔壁粗糙处。	孔隙角隅、凹陷处、矿物颗粒表面粗糙部位。	微米 CT FIB-SEM	微米 CT 分辨率有限, 难以区分纳米级角隅连通性; 高真空测试环境导致原油轻组分挥发。
卡断型剩余油	狭窄喉道的毛细管阻力过大, 驱替压力不足, 导致喉道下游原油被隔离。	狭窄喉道下游的连通孔隙中。	FIB-SEM 能谱分析 EDS	高真空导致轻组分挥发, 改变原始堵塞形态; 视场极小, 宏观代表性差。

续表

吸附剩余油	有机质或黏土矿物表面原油的强吸附作用，形成纳米级吸附膜。	黏土矿物表面、干酪根表面。	低温 FIB-SEM 原子力显微镜	油膜极薄(2~5 nm)，常规电镜无法分辨；电子束照射产生的碳污染会覆盖油膜，干扰观测。
簇状/团块状剩余油	储层非均质性导致 CO ₂ 沿高渗通道绕流，低渗区原油被圈闭。	低渗孔隙团、高渗通道包围的死油区。	微米 CT 核磁共振技术	CT 图像分割阈值选择主观性强；NMR 无法提供剩余油的空间位置信息。
非混相残余油	地层压力小于最小混相压力，存在气液界面，驱替不彻底。	孔喉中央(液滴)、孔壁(液膜)。	核磁共振 T ₂ 谱分析	CO ₂ 无氢信号，无法直接测含气饱和度；顺磁矿物干扰；无法可视化形态。

6. 结论

1) 本文系统梳理了致密砂岩油藏 CO₂ 驱后微观剩余油的形成机理、赋存特征与微观形态。明确了剩余油的形成机理可归纳为簇状/团块状、角隅状、卡断型、吸附型及非混相残余油这 5 类；按照孔喉尺度，可划分为纳米孔喉、微米孔喉及微裂缝这 3 类赋存空间；典型的微观形态包含孤立液滴状、薄膜状、簇状/团块状、角隅状及喉道堵塞状这 5 种。这套完整的分类研究，可为致密油藏 CO₂ 驱剩余油精准挖潜和提高采收率提供关键的微观理论依据。

2) 单一表征技术在分辨率、观测视场、多相流体区分以及原位观测等方面，都难以突破的局限。而采用多技术联合的多尺度表征策略，已成为破解上述难题的可行路径。其中，聚焦离子束扫描电镜能够完成纳米级三维重构，微纳米 CT 能够实现岩心样品的无损原位成像，核磁共振则可对储层可动流体饱和度开展定量评价，三类技术应用场景各有侧重，互为补充。现有实验室与矿场应用均证实，跨尺度联合表征可实现从纳米级孔喉到岩心尺度的全覆盖，系统完整地描述剩余油的空间分布特征。

3) 目前致密砂岩 CO₂ 驱替微观剩余油表征研究，仍面临诸多核心挑战。主要表现为分辨率与视场矛盾、多相流体的精准区分困难、原位动态表征手段不足等方面。未来可重点发展多技术融合的跨尺度表征平台、高温高压原位动态观测技术，以及数字岩心与数值模拟的深度融合：基于 FIB-SEM 和纳米 CT 扫描数据重构高精度三维孔隙网络模型，将其与多组分流体相态计算模块耦合，可在数字岩心尺度上更精确地模拟混相驱过程中的剩余油分布与动态演化，为致密砂岩油藏 CO₂ 驱高效开发提供一定的科学支撑。

基金项目

校级大学生科技创新训练计划项目，项目号：2025001。

参考文献

- [1] 刘月亮, 刘辰, 刘鑫磊. 致密油注 CO₂ 提高采收率机理及技术研究现状与展望[J]. 石油学报, 2026, 47(1): 198-216.
- [2] 康毅力, 田键, 罗平亚, 等. 致密油藏提高采收率技术瓶颈与发展策略[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 467-477.
- [3] 杨铁军, 张英芝, 杨正明, 等. 致密砂岩油藏 CO₂ 驱油提高采收率机理[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 113-118.
- [4] Pu, W., Kuang, J., Yang, F., Li, B., Li, J. and Wang, A. (2026) CO₂ Flooding Technology for Enhanced Oil Recovery in Tight Oil Reservoirs: A Review. *Energy Geoscience*, 7, Article ID: 100545. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2026.100545>
- [5] 刘炳官, 朱平, 雍志强, 等. 江苏油田 CO₂ 混相驱现场试验研究[J]. 石油学报, 2002(4): 56-60+3.
- [6] 张涛, 刘海峰, 肖江. CO₂ 驱油技术在靖边油田乔家洼油区的应用[J]. 石油化工应用, 2016, 35(1): 44-46+65.

- [7] 王晓琦, 金旭, 李建明, 等. 聚焦离子束扫描电镜在石油地质研究中的综合应用[J]. 电子显微学报, 2019, 38(3): 303-319.
- [8] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329-333.
- [9] 韩文成. 低渗透油藏 CO₂ 驱开发规律及采收率预测研究[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 281-282+93.
- [10] Cao, M. and Gu, Y. (2013) Oil Recovery Mechanisms and Asphaltene Precipitation Phenomenon in Immiscible and Miscible CO₂ Flooding Processes. *Fuel*, **109**, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.018>
- [11] 杨胜来, 杭达震, 孙蓉, 等. CO₂ 对原油的抽提及其对原油黏度的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 85-88.
- [12] 杨红, 余华贵, 江绍静, 等. 非均质性气窜对 CO₂ 驱油影响量化实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(5): 55-59.
- [13] 梁萌, 袁海云, 杨英, 等. 气体混相驱与最小混相压力测定研究进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 101-112.
- [14] 曲德利. 松辽盆地北部低渗透油田 CO₂ 注入方式研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [15] 陈祖华. 低渗透油藏 CO₂ 驱油开发方式与应用[J]. 现代地质, 2015, 29(4): 950-957.
- [16] 伊吉庆, 冯其红, 崔传智. 基于 CT 扫描技术的低渗透油藏微观剩余油赋存状态[J/OL]. 深圳大学学报(理工版), 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/44.1401.N.20251223.1105.002>, 2026-04-05.
- [17] 陈超, 张晶晨, 董海海, 等. 低渗透砾岩油藏 CO₂ 驱孔隙和剩余油动用机理及驱替效率[J]. 石油学报, 2025, 46(7): 1434-1446.
- [18] 付琴琴, 单智伟. FIB-SEM 双束技术简介及其部分应用介绍[J]. 电子显微学报, 2016, 35(1): 81-89.
- [19] 王瑞飞, 张祺, 邵晓岩, 等. 多尺度 CT 成像技术识别超低渗透砂岩储层纳米级孔喉[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 188-196.
- [20] 焦语婷, 胡望水, 石桓山, 等. 砂岩 CT 扫描图像分割及孔渗关系[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(8): 3248-3256.
- [21] 王敬, 张洪权, 姬泽敏, 等. 低渗-致密油藏注气吞吐 CO₂—原油相互作用与传质规律[J]. 石油学报, 2025, 46(1): 265-278.
- [22] 金炜翔, 龚跃, 夏楚翔, 等. 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.
- [23] 王琛, 高辉, 罗开庆, 等. 致密砂岩油藏 CO₂ 驱原油动态运移可视化研究[J]. 中国海上油气, 2025, 37(3): 132-141.
- [24] 鲍磊, 侯加根, 刘钰铭, 等. 致密砂岩储层多尺寸孔喉结构对可动流体分布的影响——以鄂尔多斯盆地北部锦 58 井区下石盒子组为例[J]. 石油科学通报, 2025, 10(2): 342-360.