

低渗透油藏渗吸机理及研究现状综述



谭辉凡*, 臧梓涵, 余俊霖, 袁其科

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆 401331

摘要: 低渗透裂缝性油藏是未来油气开发的重要领域, 其开发效果在很大程度上依赖于渗吸作用对基质中原油的动用效率。本文旨在系统阐述低渗透裂缝性油藏中渗吸驱油的核心机理, 并全面综述其研究进展与应用前景。首先, 文章详细分析了以毛细管力与重力为驱动力的渗吸基本规律, 探讨了同向与逆向渗吸的判别准则 (如 Bond 倒数 NB^{-1}) 及其影响因素。进而, 通过梳理国内外相关研究, 总结了渗吸作用在理论模型、数值模拟及室内实验 (如利用纳米流体调控润湿性、优化渗吸液性能、分析裂缝与温度影响等) 方面的主要成果, 并评述了表面活性剂、改性盐水等化学剂在强化渗吸效果方面的作用机理。最后, 基于当前研究现状, 本文展望了该领域未来的重点发展方向, 包括深化裂缝-基质耦合系统的渗流规律研究、推动渗吸与其他提高采收率技术的协同应用、建立室内实验与矿场实践之间的定量关联模型、以及开发高效低伤害的新型渗吸工作液体系。本研究为深化理解渗吸机理及优化低渗透裂缝性油藏开发策略提供了有益参考。

关键词: 低渗透油藏; 润湿性; 毛细管力; 渗吸; 研究前景

DOI: 10.57237/j.jest.2025.03.001

A Review of the Percolation Mechanism in Low-Permeability Fractured Oil Reservoirs

Tan Huifan*, Zang Zihan, Yu Junlin, Yuan Qike

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: Low-permeability fractured reservoirs represent a critical frontier for future oil and gas development, whose production performance heavily relies on the efficiency of imbibition in displacing oil from the rock matrix. This review aims to provide a systematic elaboration of the fundamental mechanisms of imbibition-driven oil recovery in such reservoirs and a comprehensive overview of the associated research advances and application prospects. The paper begins with a detailed analysis of the basic principles of imbibition, driven primarily by capillary and gravitational forces, and discusses the criteria (e.g., the inverse Bond number, NB^{-1}) for distinguishing co-current and counter-current imbibition, along with their controlling factors. Subsequently, by synthesizing relevant domestic and international studies, it summarizes key findings from theoretical modeling, numerical simulation, and laboratory experiments (e.g., utilizing nanofluids for wettability alteration, optimizing imbibing fluid performance, and analyzing the impacts of fracture networks and temperature). The mechanisms by which chemical agents, such as surfactants and modified brine, enhance imbibition effects are also critically reviewed. Finally, based on the current state of research, this paper outlines promising future research directions. These include deepening the understanding of flow

基金项目: 哈法亚油田 Sadi 碳酸岩油藏压裂前置微乳液渗吸增油规律研究 (基金号: YKJCX2320126).

*通信作者: 谭辉凡, 2024201098@cqust.edu.cn

收稿日期: 2025-09-21; 接受日期: 2025-11-21; 在线出版日期: 2025-12-24

<http://www.energysci-tech.org>

mechanisms in coupled fracture-matrix systems, promoting the synergistic application of imbibition with other enhanced oil recovery (EOR) techniques, establishing quantitative models that bridge laboratory results and field-scale practices, and developing novel, efficient, and low-damage imbibition fluids. This study serves as a valuable reference for enhancing the understanding of imbibition mechanisms and optimizing development strategies for low-permeability fractured reservoirs.

Keywords: Low-Permeability Reservoir; Wettability; Capillary Force; Imbibition; Research Prospect

1 引言

低渗透油藏将是未来油田开发的主要目标[1]。此类储层通常发育良好的人工或天然裂缝系统,表现出典型的裂缝-基质双重孔隙介质特征。其中,低渗透基质中赋存大量残余油,是主要的储集空间;而高渗透裂缝则构成流体渗流优势通道,起主要导流作用。低渗透油藏中裂缝的发育,易引发严重的水窜与水淹问题,导致基质岩块中滞留的原油难以有效动用与采出。

这一特征显著增加了油藏的开发难度,并导致最终采收效果不理想。尤其在油层发生水淹后,裂缝系统间的基质岩块成为大量剩余油的核心富集区,因此,如何经济高效地开发低渗透裂缝性油藏,已成为当前油气田开发领域亟待解决的关键科学与工程问题。

多孔介质在毛细管力的作用下自发地将润湿相流体吸入到基质中,将基质中的非润湿相流体置换出来,置换出来的流体在黏性力的作用下沿着裂缝从入口到出口,这一过程称之为渗吸[2-4]。国内外学者对于渗吸驱油机理和渗吸规律都做了不少相关研究[5-8],渗吸作用被国内外学者普遍认为是开发低渗透裂缝性油藏的一项重要驱替机理[9-12]。利用渗吸作用促进注入水进入基质并置换原油,是提升低渗透裂缝性油藏注水开发效果的有效技术途径。为优化开发策略,必须

对渗吸机理及其渗流规律进行深入研究[13, 14]。本文对国内外渗吸驱油相关文献进行了系统综述,重点阐述了渗吸采油的机理及其在低渗透裂缝性油藏开发中的关键作用,总结了该领域国内外学者的研究成果与进展,并对未来渗吸研究的方向提出了展望与建议。

2 渗吸驱油机理

静态渗吸过程的主导机制为毛细管力驱动,该力的计算公式如下:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

式中: σ ——界面张力, mN/m;

θ ——润湿接触角, ($^\circ$);

r ——毛管半径, m。

由式(1)可知,孔隙通道的尺寸差异会引起毛细管压力差。细小孔道中产生的毛细管力大于粗大孔道,促使注入水优先进入小孔道,并将原油从大孔道中驱替而出。此外,油水之间的密度差所产生的重力也是渗吸动力的另一重要来源。在浮力作用下,油滴得以从基质岩块顶部排出[15]。由此,渗吸采油机理是重力和毛细管力共同合作的结果[16-19]。当毛管压力为主要驱动力量时,润湿相流体(如地层水、注入水)会在毛管力作用下自发进入孔隙喉道,而非润湿相流体(如原油)则被驱替并向相反方向排出,称为逆向渗吸;当重力作用占主导,孔隙中的润湿相流体与非润湿相流体将沿相同方向运动,为同向渗吸[20-24]。

Schechter [25]在1991年提出采用 Bond 倒数(记为 N_B^{-1})以区分同向渗吸与逆向渗吸对渗吸过程的贡献。其中, N_B^{-1} 的物理意义为毛管压力与重力势之比:

$$N_B^{-1} = C \frac{\sigma \sqrt{\frac{\phi}{k}}}{\Delta \rho g H} \quad (2)$$

式中: N_B^{-1} ——渗吸机理的判别参数;

σ ——不同介质间的界面张力, Mn/m;

ϕ ——岩石孔隙度;

K ——岩石渗透率, mD;

$\Delta \rho$ ——油水两相间的密度差, g/cm³

g ——重力加速度, cm/s²;

H ——岩石高度, cm;

C ——岩石的几何尺寸有关的常数,对于圆形毛管值越为0.4。

Schechter 基于对渗吸机理的研究,选用 Bond 的倒数(记为 N_B^{-1})对其进行定量解释,并提出明确判据:

具体而言, 当 $N_B^{-1} > 5$ 时, 渗吸过程的主导作用力为毛管力, 此时以逆向渗吸为主; 当 $N_B^{-1} < 0.2$ 时, 重力成为渗吸过程的主要控制因素, 渗吸方式则转变为同向渗吸; 若 N_B^{-1} 介于5与0.2之间, 毛管力与重力共同构成渗吸过程的主导作用力, 同向渗吸与逆向渗吸将在多孔介质内部同时发生并共同影响渗吸效率。

刘卫东[26], 姚同玉[27], 曾德尚[28]等人通过研究不同润湿条件下的渗吸特征, 发现润湿性对渗吸过程具有多维度影响: 不仅会改变毛管力对渗吸过程的主导作用强度, 甚至在部分情况下可制约渗吸过程的启动; 此外, 润湿性还能调控毛管力的大小与作用方向, 进而决定在渗吸作用驱动下水分能否有效进入岩石基质。因此, 在前人研究基础上对 N_B^{-1} 进行了修正,

进一步将润湿性影响纳入该判别参数的构建中, 旨在更精准地刻画润湿性对渗吸主导机制的调控作用, 其修正后的表达式如下:

$$N_B^{-1} = 2C \frac{\sigma \cos \theta \sqrt{\frac{\phi}{K}}}{\Delta \rho g H} \quad (3)$$

式中, θ ——接触角, ($^\circ$)。

由修正后的 N_B^{-1} 判别式可见, 其核心功能体现为递进式判断: 首要判据是渗吸现象的发生可能性, 即先明确渗吸过程能否启动; 在确认渗吸可发生的前提下, 进一步量化重力与毛管力对渗吸过程的贡献权重, 进而明确渗吸机理类型(如同向/逆向)与作用强度。这一优化使 N_B^{-1} 的物理意义更具明确性与完整性, 有效弥补了原参数在渗吸启动条件判断及作用强度表征上的不足。

针对外加压差条件下的渗吸行为, 众多学者亦开展了大量深入研究。朱维耀[29]等利用核磁共振技术, 系统研究了重水驱替模拟油过程中的渗吸行为。研究表明, 在注水开发早期, 驱替作用占主导地位; 随着注水过程的持续推进, 驱替作用的贡献度将随渗吸作用的逐步增强而逐渐减弱, 渗吸作用将占据主导地位。

这一现象的核心机理可解释为: 在注水开发早期, 作为驱替相的重水因大尺度孔喉流动阻力更低, 会优先进入储层大尺度孔喉; 随着注水过程的持续推进, 大尺度孔喉逐步被重水饱和, 其内部原油不断被驱替排出, 驱替作用的有效空间随之缩小。与此同时, 小尺度孔隙因毛管力效应更显著, 在大孔喉被水占据后, 其渗吸作用强度持续增强, 孔隙内残余原油通过毛管力驱动下的渗吸置换过程, 被重水持续置换并产出。王家禄[30]等人的室内研究表明, 在驱替条件下的渗吸效率并非随驱替速率单调变化, 而是存在特定的驱替

速率区间。

杨生来[31]等提出了层渗吸理论, 该理论消除了对于不同条件下同向、逆向渗吸难以辨别的问题。该理论明确指出, 致密油气储层多孔基质中的渗吸过程可划分为表层渗吸与深层渗吸两个核心阶段。在静态渗吸过程中, 油气首先在基质表层的孔隙喉道中富集。在毛细管力作用下, 水从喉道一端进入, 将赋存于表层中的油气驱替而出。表层渗吸结束后, 深层基质中的油气在毛细管力驱动下继续运移至表层孔隙喉道中, 但并不会完全充满表层喉道。该过程导致表层孔隙内油水界面张力失衡, 从而持续推动原油向前运移, 并最终通过渗吸作用被排出。该渗吸机理主要驱动力来源于毛管压力和驱动速度差。

3 国内外研究现状

3.1 国内研究现状

对于低渗、特低渗乃至致密油藏, 以毛管力与重力为主要驱动力的渗吸作用是原油开采的关键机理[32]。在这两种力的协同作用下, 渗吸介质能够克服黏滞阻力, 从而将储集于孔喉中的原油有效驱替出来。王敬[33]等基于渗吸采油机理与渗流理论, 在系统考虑重力及毛细管力作用的基础上, 建立了渗吸数学模型。该数学模型分析表明, 在上述理论框架下, 渗吸采收率随原油黏度的增加而呈现降低趋势。原油黏度越高, 初始渗吸强度越低, 这主要源于黏度对渗流阻力的控制作用: 原油黏度越大, 其在多孔介质内流动时所受阻力也相应增大, 从而抑制渗吸效率。袁帅[34]等人实验研究发现, 纳米乳液主要吸附在油湿岩心表面, 将亲水基部分朝外实现润湿翻转[35, 36], 使毛细管力由驱油阻力变为驱油动力, 从而改善渗吸效果。渗吸效果存在如下规律: 强水湿性岩心 > 中等水湿性岩心 > 弱水湿性岩心。因此, 纳米乳液在提升渗吸采收率方面具有显著的应用潜力。

渗吸过程中还受到一个重要因素的影响, 即温度。王牧邦[37]等指出, 温度并非渗吸过程的直接影响因素, 而是通过改变原油黏度间接作用于渗吸效率。石受热发生膨胀, 导致孔隙空间受到压缩、孔隙体积减小, 同时弹性驱油能力增强; 温度升高亦会改善岩石的润湿性, 并降低残余油饱和度。因此, 对于原油黏度较高的油藏, 热流体注入可显著强化渗吸作用, 从而提高最终采收率[38]。上述研究表明, 从理论模型到化学

剂应用, 调控渗吸效率的关键在于平衡驱动力(毛管力、重力)与流动阻力(原油黏度、界面张力)。王敬等人的模型从宏观动力学角度揭示了黏度的负面效应, 而袁帅等人的工作则从微观界面调控提供了克服此阻力的技术路径。这预示着, 未来研究需紧密结合宏观渗流规律与微观界面科学, 以设计更高效的渗吸方案。”

Wang [39]等通过润湿性实验与自发渗吸实验, 系统研究了影响自发渗吸效率的关键因素, 结果表明天然裂缝的存在可显著增强渗吸效果。其中, 底部裂缝的促进效果优于侧向裂缝, 全贯通型裂缝优于封闭型裂缝。

石立华[40]等人通过物理实验得到如下结论: 岩心长度对渗吸速度具有显著影响, 但对最终渗吸驱油效率的影响并不显著。在其余条件(包括岩心直径)保持一定时, 岩心长度越大, 渗吸驱油速度越高, 且系统趋于稳定的时间越短。

3.2 国外研究现状

对于低渗透油藏, 注水开发过程中的渗吸效应是提升原油采收率的一项重要驱油机制。Mason [41]等基于MS-P理论对三角形孔道中的毛细作用行为进行了研究, 结果表明, 在小尺度毛细管渗吸过程中, 重力对液体流动行为的影响可忽略不计。

Graue [42]采用跟踪实验技术, 研究了岩石裂缝与润湿性对渗吸采收率的影响, 并对不同润湿性条件下碳酸盐岩的采收率进行了对比分析。实验中, 将初始含水饱和度约为28%的岩心经原油处理后再造缝, 重新组合为含人工裂缝的岩心样本。结果表明, 裂缝的存在与润湿性的差异对水驱过程及原油驱替效果均具有显著影响。

Austad [43]等研究了表面活性剂对介质表面润湿性的调控作用, 并评估了其在提升泥灰岩与白云岩自发渗吸采收率方面的潜力。Chen [44]等针对表面活性剂对渗吸过程的作用机理进行了深入的研究。Prateek [45]等研究了润湿反转对低渗致密油藏渗吸作用的影响, 指出润湿反转诱导的毛细管压力梯度是提高渗吸采收率的主要驱动机制, 且采收率与原油-渗吸液间的界面张力呈正相关。Standnes [46]等通过室内实验进一步证实了渗吸机理受岩石润湿性的影响。

Sarsenbekuly [47]等采用易乳化表面活性剂SDBS与超低界面张力表面活性剂SOL, 开展了渗吸提高采

收率的机理研究。实验结果表明, SDBS的渗吸采收率为8%, 而SOL的渗吸采收率达到17%。两种表面活性剂均能够将油水界面张力降至超低水平, 但SOL在提高渗吸采收率方面表现出更优的效果。

Ahmadi [48]等系统研究了改性海水以及表面活性剂C12TAB、SDS和TritonX-100(TX-100)对碳酸盐岩润湿性的影响。研究指出, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子能够诱导碳酸盐岩润湿性由油湿向水湿转变, 且其在改性海水中的浓度越高, 对水湿润湿性的增强效果越显著。Mohammadi [49]等通过引入含 Mg^{2+} 的盐水可显著改善方解石的润湿性, 具体表现为接触角从 114° 减小至 42° , 界面张力从 34.2mN/m 降低至 13.9mN/m 。渗吸前后原油性质的测试结果表明, Mg^{2+} 在提高微观波及效率与最终采收率方面起主要作用。Kumar [50]等的研究表明, 盐度升高会促使表面活性剂吸附量增加。实验结果表明, 随着碱度升高, 表面活性剂吸附量降低; 然而当碱度超过1%时, 其吸附量反而呈现上升趋势。

Khan [51]等针对二次采油过程中渗吸现象的控制数学模型进行了分析, 提出了一种结合加权勒让德多项式构造的人工神经网络、全局优化器鲸鱼优化算法(WOA)以及局部优化器Nelder-Mead算法的新型混合算法(LeNN-WOA-NM), 用于对两相流数学模型进行精细解析。该研究通过绝对误差、平均绝对偏差、泰尔不等系数和纳什效率系数等多类误差指标综合评价求解质量, 并将实验结果与已有先进成果进行对比, 结果表明LeNN-WOA-NM算法在解决实际渗流问题中兼具高效性与精确性。该方法预示着数据驱动与机理模型融合将成为研究渗吸规律的新范式, 尤其适用于处理实际油藏中高度非均质性和多尺度效应带来的挑战。”

4 结束语

渗吸采油技术已在国内多个油田投入应用。实践表明, 该技术尤其在低渗透与致密油藏开发中, 对于有效动用基质剩余油、提高原油采收率展现出重要潜力[52]。尽管当前研究已取得一定进展, 为进一步提升该技术在低渗—致密油藏中的驱油效果, 未来需开展多学科交叉的综合性研究。其主要发展方向包括以下方面: 一是对裂缝内油水运移规律的研究是低渗透油藏开发中的关键课题。此类油藏普遍发育裂缝-基质双重孔隙介质, 其中裂缝系统构成了流体的主要渗流通

道。通过结合数值模拟技术,研究裂缝-基质耦合孔隙结构下的渗吸行为与速率,对优化压裂裂缝设计、改善低渗透裂缝性油藏的开发效果具有重要指导意义。二是渗吸作用与其他开发方式的协同应用。地层中的渗吸是一个动力学过程较为缓慢的现象,难以单独满足实际开发中对采油速度的要求。因此,将其与其他开发方式相结合,形成协同效应,才能更有效地提升致密油气藏的最终采收效果。三是当前室内实验研究尚难以准确预测渗吸作用在实际油藏开采中对采收率的贡献程度,因此需加强室内实验与现场实际采收率之间的定量表征研究,建立可靠的预测模型。四是对渗吸液性能的优化研究。随着油藏品质日趋复杂及地层非均质性的增强,为避免渗吸液对储层产生损害,对其性能提出了更高要求。因此,开发高效、低伤害的渗吸液体系已成为当前研究的重点。

参考文献

- [1] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 122-123.
- [2] Graham J W, Richardson J G. heory ang application of imbibition phenomena in recovery of oil [J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1959, 11(2): 377-381.
- [3] Leverett M C, Lewis W B, True M E. Dimensional-model studies of oil-field behavior [J]. Transactions of the Aime, 1942, 146(1): 175-193.
- [4] 李源, 钱钦, 彭鑫, 等. 砂岩油藏自发渗吸的影响因素及微观机制 [J/OL]. 大庆石油地质与开发, 1-9 [2025-09-20]. <https://doi.org/10.19597/J.ISSN.1000-3754.202503005>
- [5] Iffly R, Rousselet D C, Vermeulen J L. Fundamental study of imbibition in fissured oil fields [J]. SPE4102, 1972: 1 -15.
- [6] Blair P M. Calculation of oil displacement by countercurrent water imbibition [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1964, 4(3): 195-202.
- [7] Li K, Horne R N. Characterization of spontaneous water imbibition into gas-saturated rocks [J]. Spe Journal, 2000, 6(4): 375-384.
- [8] 田文博. 浅析低渗透油藏开发方法 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(11): 103-105.
- [9] 周义博, 刘卫东, 郑晓波, 等. 低渗透油藏渗吸机理及研究状况综述 [J]. 应用化工, 2018, 47(04): 825-829. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20180118.013>
- [10] 吕文雅, 曾联波, 陈双全, 等. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法 [J]. 地质论评, 2021, 67(02): 543-556. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2021.02.020>
- [11] 许建红, 马丽丽. 低渗透裂缝性油藏自发渗吸渗流作用 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(03): 111-114. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2015.03.020>
- [12] Mattax C C, Kyte J R. Imbibition oil recovery from fractured, water-drive reservoir [J]. Society.
- [13] 张星, 李侠清, 吕超, et al. 低渗透油藏渗吸中的渗吸模式和残余油形态特征研究 [J]., 2023: 641-651.
- [14] 黄兴, 窦亮彬, 左雄娣, 等. 致密油藏裂缝动态渗吸排驱规律 [J]. 石油学报, 2021, 42(07): 924-935.
- [15] 朱志强, 王永平, 孟智强, 等. 裂缝性油藏精细裂缝表征及渗流机理研究 [J]. 非常规油气, 2023, 10(05): 121-126. <https://doi.org/10.19901/j.fcgyq.2023.05.16>
- [16] 王友净, 宋新民, 田昌炳, 等. 动态裂缝是特低渗透油藏注水开发中出现的新的开发地质属性 [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(02): 222-228.
- [17] 柏松章. 对碳酸盐岩油藏驱替机理的初步探讨 [J]. 石油勘探与开发, 1982, (03): 43-52.
- [18] 周娟, 薛惠, 郑德温, 等. 裂缝油藏水驱油渗流机理 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2000, (S1): 65-67.
- [19] 陈辉. 特低渗透砂岩油藏自发渗吸-水驱原油动用规律研究 [J]. 油气地质与采收率, 2025, 32(02): 94-103. <https://doi.org/10.13673/j.pgre.202412016>
- [20] 李士奎, 刘卫东, 张海琴, 等. 低渗透油藏自发渗吸驱油实验研究 [J]. 石油学报, 2007, (02): 109-112.
- [21] 黎明, 廖晶, 王肃, 等. 鄂尔多斯盆地超低渗透油藏渗吸特征及其影响因素——以渭北油田三叠系延长组三段储层为例 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(06): 971-980.
- [22] Gautam P S, Mohanty K K. Matrix-fracture transfer through countercurrent imbibition in presence of fracture fluid flow [J]. Transport in Porous Media, 2015, 55(3): 309-337.
- [23] Zhou D, Jia L, Kamath J, et al. Scaling of counter-current imbibition processes in low-permeability porous media [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2002, 33(1 /2 /3): 61-74.
- [24] Cai J, Hu X, Standnes D C, et al. An analytical model for spontaneous imbibition in fractal porous media including gravity [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2012, 414(46): 228-233.
- [25] Schechter D S, Zhou D, Jr F M. Capillary imbibition and gravity segregation in low IFT systems [J]. Infection & Immunity, 1991, 71(12): 6734-6741.

- [26] 姚同玉, 李继山, 王建, 等. 裂缝性低渗透油藏的渗吸机理及有利条件 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2009, 39(04): 937-940. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb2009.04.001>
- [27] 姚同玉. 油层润湿性反转及其对渗流过程的影响 [D]. 中国科学院研究生院 (渗流流体力学研究所), 2005.
- [28] 曾德尚, 陈新阳, 裴向阳, 等. 致密砂岩裂缝油藏渗吸机理及规律研究进展 [J]. 辽宁化工, 2020, 49(11): 1433-1437. <https://doi.org/10.14029/j.cnki.issn1004-0935.2020.11.030>
- [29] 朱维耀, 鞠岩, 赵明, 等. 低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究 [J]. 石油学报, 2002, (06): 56-59+3.
- [30] 王家禄, 刘玉章, 陈茂谦, 等. 低渗透油藏裂缝动态渗吸机理实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(01): 86-90.
- [31] 吴润桐, 杨胜来, 谢建勇, 等. 致密油气储层基质岩心静态渗吸实验及机理 [J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(03): 98-104. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2017.03.015>
- [32] 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(01): 1-13.
- [33] 王敬, 刘慧卿, 夏静, 等. 裂缝性油藏渗吸采油机理数值模拟 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(05): 761-770.
- [34] 袁帅, 周福建, 李源, 等. 致密砂岩油藏纳米乳液渗吸增产作用机理 [J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(01): 126-136. <https://doi.org/10.13673/j.pgre.202308003>
- [35] Tor Austad, Dag C Standnes. Spontaneous imbibition of water into oil-wet carbonates [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(3-4): 363-376.
- [36] Hou B, Wang Y, Huang Y. Mechanistic study of wettability alteration of oil-wet sandstone surface using different surfactants [J]. Applied Surface Science, 2015, 330: 56-64.
- [37] 王敦邦, 杨胜来, 吴润桐, 等. 致密油藏渗吸采油影响因素及作用机理 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(06): 158-163. <https://doi.org/10.19597/j.issn.1000-3754.201712016>
- [38] 潘铎. 低渗透油藏地质特征与开发对策分析 [J]. 石化技术, 2023, 30(06): 194-196.
- [39] Jing W, Huiqing L, Genbao Q, et al. Investigations on spontaneous imbibition and the influencing factors in tight oil reservoirs [J]. Fuel, 2019, 236: 755-768.
- [40] 石立华, 薛颖, 崔鹏兴, 等. 致密油藏自发静态渗吸实验及影响因素 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12494-12503.
- [41] Mason G, Morrow N R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1991, 141 (1): 262-274.
- [42] Graue A, Viksund B G, Baldwin B A. Reproducible wettability alteration of low-permeable outcrop chalk [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1999, 2 (02): 134-140.
- [43] Austad T, Matre B, Milter J, et al. Chemical flooding of oil reservoirs 8. Spontaneous oil expulsion from oil-and water-wet low permeable chalk material by imbibition of aqueous surfactant solutions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1998, 137 (1-3): 117-129.
- [44] Chen P, Mohanty K K. Surfactant-enhanced oil recovery from fractured oil-wet carbonates: effects of low ift and wettability alteration [C] // SPE International Conference on Oilfield Chemistry? SPE, 2015: D011S003R004.
- [45] Kathel P, Mohanty K K. EOR in tight oil reservoirs through wettability alteration [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition?. SPE, 2013: D021S020R008.
- [46] Standnes D C, Austad T. Wettability alteration in carbonates: Low-cost ammonium surfactants based on bio-derivatives from the coconut palm as active chemicals to change the wettability from oil-wet to water-wet conditions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 218(1-3): 161-173.
- [47] SARSENBKULY B, AIDAROVA S B, IBRASHEV K. Imbibition enhancing oil recovery mechanism of the two surfactant [J]. Phys Fluids, 2020, 32: 047103.
- [48] Ahmadi S, Hosseini M, Tangestani E, et al. Wettability alteration and oil recovery by spontaneous imbibition of smart water and surfactants into carbonates [J]. Petroleum Science, 2020, 17(3): 712-721.
- [49] Mohammadi S, Kord S, Moghadasi J. An experimental investigation into the spontaneous imbibition of surfactant assisted low salinity water in carbonate rocks [J]. Fuel, 2019, 243: 142-154.
- [50] Kumar A, Mandal A. Critical investigation of zwitterionic surfactant for enhanced oil recovery from both sandstone and carbonate reservoirs: Adsorption, wettability alteration and imbibition studies [J]. Chemical Engineering Science, 2019, 209: 115222.
- [51] Khan Naveed Ahmad, Sulaiman Muhammad, Jeza Aljohani Abdulah, et al. Analysis of Multi-Phase Flow Through Porous Media for Imbibition Phenomena by Using the LeNN-WOA-NM Algorithm [J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 196425-196458.
- [52] 王岩. 渗吸采油技术在低渗透油藏采油中的应用研究 [J]. 石油石化物资采购, 2023(5): 88-90.