

纳米颗粒强化泡沫驱油研究进展

任雨婷*, 龚欣浩

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年8月25日; 录用日期: 2026年9月17日; 发布日期: 2026年9月23日

摘要

泡沫驱油作为一种极具应用潜力的三次采油技术, 因其能够显著提高采收率而备受关注, 然而泡沫稳定性一直是制约着泡沫驱油技术发展的重要因素。针对普通泡沫稳定性差的缺点, 纳米颗粒作为增强泡沫稳定性的重要手段被引入泡沫驱油。本文分析了纳米颗粒强化泡沫的机理: 纳米颗粒的界面吸附作用、纳米颗粒提高界面黏弹性, 以及与表面活性剂的协同作用, 介绍了纳米颗粒强化泡沫驱油技术进展与应用现状, 并总结了目前纳米颗粒强化泡沫驱油存在的问题, 对未来研究的方向进行了展望。

关键词

纳米二氧化硅, 泡沫驱, 提高采收率, 泡沫稳定性

Research Advances on Nanoparticle-Enhanced Foam Flooding

Yuting Ren*, Xinhao Gong

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

Received: August 25, 2026; accepted: September 17, 2026; published: September 23, 2026

Abstract

Foam flooding, as a promising tertiary oil recovery technology, has attracted much attention due to its ability to significantly improve oil recovery. However, foam stability has always been a major factor restricting the development of foam flooding technology. To address the poor stability of ordinary foam, nanoparticles have been introduced as an important means to enhance foam stability in foam flooding. This paper analyzes the mechanism of nanoparticle-enhanced foam: the interfacial adsorption effect of nanoparticles, the improvement of interfacial viscoelasticity by nanoparticles, and the synergistic effect with surfactants. The progress and current application status of nanoparticle-

*通讯作者。

enhanced foam flooding technology are introduced, and the existing problems are summarized. Future research directions are also discussed.

Keywords

Nano-Silica, Foam Flooding, Enhanced Oil Recovery, Foam Stability

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

石油是现代工业的血液,更是全球经济稳定发展的战略资源,然而传统的一次和二次采油只能开采出约 30%~40%的地层原油,大量剩余油被困于地下无法动用[1] [2]。为提高油田的开发效率以及延长油田的寿命,包括气体混相驱、化学驱、热力驱等在内的三次采油技术应运而生,这也是目前应用最广、种类最多的采油技术[3] [4]。泡沫驱作为化学驱的一种,依靠泡沫在孔隙介质中的贾敏效应,增大流动阻力,具有良好的封堵性和油水选择性[5] [6],拥有广阔的发展前景。泡沫是由气体在液体中分散形成的气泡体系[7],具有堵高不堵低、堵大不堵小、堵水不堵油等特点,兼具扩大波及体积和提高洗油效率的双重作用[8]-[10]。当泡沫进入高温高盐的实际地层后,尤其是在孔隙结构复杂、比表面积大的低渗透油藏或页岩油藏中,泡沫极易发生界面吸附损失,导致泡沫失稳、液体排出加快,泡沫稳定性降低,难以形成有效的调剖和驱油作用[11] [12],提高泡沫体系的稳定性成为亟待解决的问题。

为形成稳定的泡沫通常加入一定量的聚合物,虽然泡沫稳定性有所提高,但其起泡能力相对低,并且聚合物热降解后的残留物会对地层造成较大损伤[13] [14]。近年来,纳米颗粒由于小尺度效应和高比表面积的特性在食品工业、生物医学、矿物浮选等领域具有广泛应用[15]-[17]。同时,因为已有研究证明固体颗粒可以提高泡沫性能[18] [19],纳米颗粒也作为增强泡沫稳定性的重要手段被引入泡沫驱油,常用的纳米颗粒有 SiO_2 、 Fe_3O_4 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、粉煤灰等[20] [21]。王腾飞[22]等将纳米 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 作为稳泡剂与 SDS 进行复配,测定混合泡沫体系的起泡能力、稳泡能力和封堵性能,相比纳米 SiO_2 来看效果不理想。Bayat 等人[23]通过使用四种类型的纳米颗粒在去离子水(DI)中生成 CO_2 泡沫: SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 CuO ,通过测量半衰期表明 SiO_2 产生的泡沫最稳定。因此,纳米颗粒在提高泡沫稳定性和改善泡沫驱油效果方面具有较大的优势。本文分析了纳米颗粒强化泡沫机理,介绍了纳米颗粒强化泡沫驱油技术进展与应用现状,并总结了目前纳米颗粒强化泡沫驱油存在的问题,对未来研究的方向进行了展望。

2. 纳米颗粒强化泡沫机理

2.1. 界面吸附作用

SiO_2 纳米颗粒通过不可逆吸附于泡沫的气/液界面上,在泡沫壁上交错分布,形成致密的壳状结构,堵塞水流通通道,同时纳米颗粒还可以存在于气泡间和 Plateau 边界内,增加水分流动阻力,减缓泡沫液膜排液速度,大幅提高泡沫的稳定性[24] [25]。孙乾等人[26]观察到, SiO_2 纳米颗粒的加入尽管使起泡体积有所降低,但可以明显提高泡沫的稳定性。纳米 SiO_2 颗粒与 SDS 表面活性剂的协同作用可以形成致密稳定的泡沫结构,纳米 SiO_2 颗粒吸附在泡沫表面,形成一层致密的“壳状”结构,增强了泡沫的强度和稳定性,降低了泡沫的聚并和破裂速度,并且显著提高了泡沫的界面扩张模量,增强了泡沫液膜的强度,

使其在外界扰动下更难变形和破裂。孙宠等人[27]对比分析了 SDS 泡沫体系和 SDS/SiO₂ 复合泡沫体系的性质特点, 发现相较于单一的 SDS 稳定泡沫体系, 温度对 SDS/SiO₂ 复合稳定泡沫体系的起泡体积影响较小。这一发现归因于 SiO₂ 纳米颗粒在泡沫液膜表面的吸附, 它们与液膜共同构建了一个气液固三相的稳定骨架结构。此结构有效阻断了外部热量向内传递的路径, 并大幅度降低了泡沫液膜的析液速率, 从而显著提升了泡沫体系的稳定性。

2.2. 提高界面黏弹性

纳米颗粒能够通过气-液界面上的吸附形成致密的颗粒层, 从而显著提升界面的黏弹性。这种黏弹性表现为界面在受到扰动时, 能够通过弹性储能和黏性耗散来抵抗薄膜破裂和泡沫合并[28]。纳米颗粒稳定泡沫的液膜黏弹性优于表面活性剂稳定泡沫, 因此在通过孔隙介质时, 受到挤压变形后还能保持和恢复原来的圆球状[29], 在气泡恢复形状的过程中会对孔壁上的油滴形成一个侧向的压力, 使油滴发生变形而流动。Huanrong Wang [30]等人为了探讨纳米二氧化硅对 CTAB 溶液在液/气界面上的膨胀粘弹性的影响, 测量了不同纳米粒子浓度下的界面膨胀粘弹性, 研究了纳米粒子与表面活性剂之间的相互作用及其对界面性质的影响。实验过程中, CTAB 分子吸附在纳米二氧化硅表面, 导致其表面性质从亲水性变为疏水性。这种吸附行为显著影响了界面的膨胀粘弹性, 表现为膨胀模量、弹性和粘度的复杂变化。这种增强的界面黏弹性不仅延缓了液膜的排液和破裂过程, 也提高了泡沫在外部扰动下的结构完整性。

2.3. 与表面活性剂的协同效应

普通的泡沫体系依赖于表面活性剂稳定泡膜, 加入纳米颗粒后表面活性剂则与纳米颗粒进行协同作用。Guo F 等人[31]将纳米二氧化硅与表面活性剂混合, 研究 CO₂ 泡沫的生成和稳定性。结果显示 Si-LAPB-AOS 组合在较低物料投入下也能取得良好效果, 其生成的泡沫在泡沫稳定性方面具有显著优势, 从而提高采收率。何宗礼[32]等对包含纳米颗粒复配表面活性剂体系在内的三种泡沫体系进行了表面张力和表面扩张模量测试, 实验结果证明了双面神纳米颗粒在界面的吸附可以降低体系表面张力, 增加表面扩张模量, 在气液性质界面解释了纳米颗粒与表面活性剂之间的协同稳泡机制。Wenxi Zhu [33]等通过加入表面改性纳米 SiO₂ 颗粒, 显著提升了聚合物泡沫在超高温环境下的稳定性, 并进行了 zeta 电位测试、粘度测试、透射电子显微镜分析等, 揭示了纳米 SiO₂ 颗粒通过降低表面张力、增加流体粘度来加强与聚合物的协同稳定机制。Junchi Lu [34]将胶体 SiO₂ 纳米粒子与多种表面活性剂复配, 制备了纳米粒子-表面活性剂稳定氮气泡沫, 其泡沫体积和半衰期在高温高盐下分别比传统泡沫提高了 20%和 36%, 证明了 SiO₂ 的加入可以提升泡沫性能。纳米粒子提高了泡沫的液膜强度和表观粘度, 从而拥有更好的封堵效果和驱油效率。

3. 纳米颗粒强化泡沫驱油技术进展与应用分析

3.1. 纳米材料改性与优化

泡沫驱是一种重要的化学驱提高采收率技术, 其通过多孔介质中形成具有较高表观黏度的泡沫体系, 能够有效降低气体流量、封堵优势渗流通道并扩大驱替波及范围, 因此在非均质油藏、稠油油藏及 CO₂ 驱开发中具有良好的应用前景。纳米材料的表面改性与配方优化是提升泡沫体系在复杂油藏条件下稳定性的关键。Monjezi [35]等研究了 APTES 表面改性二氧化硅纳米颗粒(MS)稳定 CO₂ 泡沫的机理及驱油性能。结果表明 APTES 改性增强了纳米颗粒在气/水界面的吸附能力, 使泡沫最大半衰期较未改性体系提升 33.3%。微模型实验揭示了孔隙尺度运移机制: 裂缝中流动的大气泡将小气泡推入基质形成“泡沫桥”, 随后泡沫前沿解离为含表面活性剂和纳米颗粒的气泡与水相, 渗透至死端孔隙并通过 W/O 乳液驱

替原油。最终增油潜力排序为 SDS-MS > SDS-Silica > SDS，证明 APTES 改性纳米颗粒是更有效的泡沫强化剂。

3.2. 多孔介质中的传输与封堵

泡沫在多孔介质中的运移、封堵与洗油机制是实现高效驱油的核心。王鹏等[36]研究发现 SiO₂ 的加入提高了液膜黏弹性模量和机械强度，使泡沫对岩壁原油产生“擦除”作用，结合泡沫在多孔介质中的快速往复运动进一步提高了洗油效率。当 SDS 质量分数为 0.25%、SiO₂ 纳米颗粒质量分数为 1.5%时协同稳定作用最强，效果显著优于单一体系。该复合体系可使采收率提高 30.3%，且在 22℃~80℃温度范围内采收率增幅均超过 20%，证明了纳米颗粒在提高泡沫驱油效果方面的应用潜力。

3.3. 现场应用案例分析

当前纳米颗粒强化泡沫驱油技术在商业化应用方面已取得一定进展，但仍处于探索和优化阶段。由于胜利油田低渗透油藏具有埋藏深、温度高、非均质性强等特点，李伟涛[37]针对低渗透油藏 CO₂ 驱波及效率低、常规泡沫高温调驱性能变差等问题，构建了由两性离子表面活性剂 HSD 和改性 SiO₂ 纳米颗粒为起泡剂的高稳定性超临界 CO₂ 泡沫体系，实验结果证明了加入改性 SiO₂ 纳米颗粒能够显著提升泡沫在高温下的稳定性，使其析液半衰期由 17 分钟提升至 40 分钟；同时，纳米颗粒增强了泡沫的流变特性，使体系表观黏度随浓度增加显著上升，泡沫在多孔介质中呈现致密“颗粒状”结构，有效封堵高渗通道，迫使 CO₂ 进入低渗区，提高原油采收率。该研究明确了表面活性剂与纳米颗粒协同作用提升泡沫界面稳定性的机理，为高温油藏 CO₂ 驱油提供了新型、高效的调驱手段。

针对高含水储层，曹晓莉[38]采用纳米聚合物微球 JHQ-1 进行化学调剖堵水，其在 90℃条件下仍能保持较好的膨胀性能和驱油效果，现场应用效果良好。刘翰林[39]等人针对渤海 KL 油田 A20 井组的注水突进和纵向吸水不均问题，开展了层内自生低界面张力泡沫体系的筛选与驱油实验，通过优化泡沫体系组分，在物理模拟实验中验证了其在可视化填砂管中能稳定生泡并在孔喉中剪切成泡沫，最终驱油效率比水驱提高了 19.1%，并显著改善了非均质填砂管的注采剖面 and 波及体积，其中低渗管分液率从 0 增至 34%。表 1 为不同纳米颗粒体系性能对比表。除此之外，纳米颗粒在微乳液中的应用仍处于探索阶段，需进一步理论分析与实验研究[40]。

Table 1. Performance comparison of different nanoparticle systems
表 1. 不同纳米颗粒体系性能对比表

纳米颗粒体系	目标应用场景	提高采收率效果
SiO ₂ /SDS 复合体系[36]	常规泡沫驱(22℃~80℃)	采收率提高 30.3%，各温度下采收率增幅均超过 20%
APTES 改性二氧化硅[35]	裂缝性多孔介质 CO ₂ 驱	增油潜力排序：SDS-MS > SDS-Silica > SDS
改性 SiO ₂ /HSD 两性表面活性剂[37]	低渗透油藏超临界 CO ₂ 驱	迫使 CO ₂ 进入低渗区，有效提高原油采收率
纳米聚合物微球 JHQ-1 [38]	高含水储层化学调剖堵水	现场应用效果良好
层内自生低界面张力泡沫[39]	注水突进及纵向吸水不均油田	最终驱油效率比水驱提高 19.1%

4. 存在问题与展望

纳米颗粒强化泡沫驱油技术适用范围广、封堵性能强、提高采收率效果优良,是最具发展前景的强泡沫驱油方向。然而,要将其从实验室成功推向油田现场,仍需在经济性、环境影响以及工程放大效应等方面进行深入考量与攻关。

(1) 经济性、环境影响:目前纳米颗粒成本较高,这在一定程度上限制了其大规模应用。并且现有文献暂未详细阐述纳米材料注入油藏后的长期地质归宿及其在地下水系中的潜在微观生态风险,因此未来在现场应用前,需针对纳米颗粒的地质长效安全性开展针对性评估。

(2) 现场应用分析:在高温高盐等复杂地质条件下易发生团聚和沉降,导致泡沫结构破坏、稳定性下降,从而影响驱油效率,且大部分研究仅限于实验室内。因此,提高纳米颗粒在复杂环境中的分散性和稳定性,是增强泡沫体系可靠性和推动现场应用的关键。

5. 结论

综上所述,纳米颗粒作为泡沫稳定剂在强化泡沫稳定性及提升泡沫驱油效果方面表现出显著潜力。纳米颗粒强化泡沫的机理主要有:进行界面吸附、提高界面黏弹性,以及与表面活性剂的协同效应。未来研究应重点关注低成本、高分散性和高稳泡性能纳米颗粒稳泡剂的开发,并进一步加强其在复杂油藏条件下的作用机制及应用规律研究。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目,项目批准号:YKJCX2520157。

参考文献

- [1] 李士伦, 汤勇, 侯承希. 注 CO₂ 提高采收率技术现状及发展趋势[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 1-8.
- [2] 王贵文, 张雁, 齐怀彦, 等. 适合特低渗透储层的纳米泡沫驱油体系研究[J]. 化学工程师, 2023, 37(11): 53-57+113.
- [3] 李兆敏, 徐正晓, 李宾飞, 等. 泡沫驱技术研究与应用进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(5): 118-127.
- [4] 蔡丽媛. 耐温纳米泡沫复合体系制备及驱油实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [5] 张更, 陈雨飞, 郑浩, 等. 泡沫驱油机理研究综述[J]. 当代化工, 2017(11): 6-7.
- [6] 张作安. 泡沫驱油提高采收率技术研究[J]. 科技风, 2017(15): 2.
- [7] 王维波, 洪玲, 田宗武, 等. CO₂ 泡沫体系性能改善方法的研究进展[J]. 油田化学, 2017, 34(4): 749-755.
- [8] 葛嵩. 三相泡沫体系优选及封堵效果实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [9] 张云宝, 徐国瑞, 王楠, 等. 底水油藏三相纳米泡沫堵水效果实验[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 109-115.
- [10] Singh, R. and Mohanty, K.K. (2015) Synergy between Nanoparticles and Surfactants in Stabilizing Foams for Oil Recovery. *Energy & Fuels*, **29**, 467-479. <https://doi.org/10.1021/ef5015007>
- [11] AlYousef, Z., Almobarky, M. and Schechter, D. (2017) Enhancing the Stability of Foam by the Use of Nanoparticles. *Energy & Fuels*, **31**, 10620-10627. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01697>
- [12] 王磊, 张学鹏, 薛蓉, 等. 纳米材料复合泡沫缓速酸协同增效作用的研究[J]. 应用化工, 2019, 48(2): 276-280.
- [13] 王增林, 王其伟. 强化泡沫驱油体系性能研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004(3): 49-51+55-139.
- [14] 金永辉, 袁凯涛, 畅瑛. 致密气藏用纳米泡沫压裂液研究[J]. 能源化工, 2022, 43(5): 54-59.
- [15] Kheiriabad, S., Jafari, A., Namvar Aghdash, S., Ezzati Nazhad Dolatabadi, J., Andishmand, H. and Jafari, S.M. (2024) Applications of Advanced Nanomaterials in Biomedicine, Pharmaceuticals, Agriculture, and Food Industry. *BioNanoScience*, **14**, 4298-4321. <https://doi.org/10.1007/s12668-024-01506-w>
- [16] Al-Ansari, S., Arif, M., Wang, S., Barifcani, A., Lebedev, M. and Iglaue, S. (2018) Wettability of Nanofluid-Modified Oil-Wet Calcite at Reservoir Conditions. *Fuel*, **211**, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.111>

- [17] Binks, B.P. and Horozov, T.S. (2005) Aqueous Foams Stabilized Solely by Silica Nanoparticles. *Angewandte Chemie International Edition*, **44**, 3722-3725. <https://doi.org/10.1002/anie.200462470>
- [18] Gowida, A., Shah, J.P. and Elkatatny, S. (2025) Foam Systems for Underbalanced and Geothermal Drilling: A Critical Review of Stability Challenges and Research Frontiers. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **16**, 10. <https://doi.org/10.1007/s13202-025-02114-4>
- [19] Sigauke, T., Johnson, O.T., Ndeshimona, V.L. and Mashingaidze, M.M. (2025) Advancements in Nanotechnology for the Enhanced Flotation of Fine Mineral Particles: A Review. *Discover Applied Sciences*, **7**, Article No. 317. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06835-3>
- [20] 石士考. 纳米材料的特性及其应用[J]. 大学化学, 2001, 16(2): 39-42.
- [21] 马登军. 纳米材料的表面和界面效应[J]. 河北建筑工程学院学报, 1996(4): 37-42.
- [22] 王腾飞, 王杰祥, 韩蕾, 等. 纳米氢氧化铝稳定泡沫性能研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 27(5): 78-81+11.
- [23] Bayat, A.E., Rajaei, K. and Junin, R. (2016) Assessing the Effects of Nanoparticle Type and Concentration on the Stability of CO₂ Foams and the Performance in Enhanced Oil Recovery. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **511**, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.09.083>
- [24] 刘珑, 范洪富, 孙江河, 等. 纳米颗粒稳定泡沫驱油研究进展[J]. 油田化学, 2019, 36(4): 748-754.
- [25] Li, S., Li, Z. and Wang, P. (2016) Experimental Study of the Stabilization of CO₂ Foam by Sodium Dodecyl Sulfate and Hydrophobic Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **55**, 1243-1253. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04443>
- [26] 孙乾, 李兆敏, 李松岩, 等. 纳米 SiO₂ 颗粒与 SDS 的协同稳泡性及驱油实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2014, 27(6): 36-41.
- [27] 孙宠, 范振中, 刘浪, 等. SiO₂-SDS 复合泡沫体系配制与评价[J]. 化学工程师, 2017, 31(7): 68-71.
- [28] Vatanparast, H., Samiee, A., Bahramian, A. and Javadi, A. (2017) Surface Behavior of Hydrophilic Silica Nanoparticle-SDs Surfactant Solutions: I. Effect of Nanoparticle Concentration on Foamability and Foam Stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **513**, 430-441. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.11.012>
- [29] Yekken, N., Manan, M.A., Idris, A.K., Padmanabhan, E., Junin, R., Samin, A.M., et al. (2018) A Comprehensive Review of Experimental Studies of Nanoparticles-Stabilized Foam for Enhanced Oil Recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **164**, 43-74. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.035>
- [30] Wang, H., Gong, Y., Lu, W. and Chen, B. (2008) Influence of Nano-SiO₂ on Dilational Viscoelasticity of Liquid/Air Interface of Cetyltrimethyl Ammonium Bromide. *Applied Surface Science*, **254**, 3380-3384. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.11.020>
- [31] Guo, F. and Aryana, S. (2016) An Experimental Investigation of Nanoparticle-Stabilized CO₂ Foam Used in Enhanced Oil Recovery. *Fuel*, **186**, 430-442. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.058>
- [32] 何宗礼, 马国庆, 吉凯, 等. 改性纳米颗粒对孔隙介质中泡沫稳定机理研究[J]. 辽宁化工, 2023, 52(12): 1790-1794.
- [33] Zhu, W., Wang, B. and Zheng, X. (2023) Preparation and Foam Stabilization Mechanism of an Ultrahigh-Temperature Colloidal Gas Aphron (CGA) System Based on Nano-SiO₂. *ACS Omega*, **8**, 46091-46100. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07131>
- [34] Lu, J. (2024) Flow Behavior and Mechanism Insights into Nanoparticle-Surfactant-Stabilized Nitrogen Foam for Enhanced Oil Recovery in the Mature Waterflooding Reservoir. *ACS Omega*, **9**, 36825-36834. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06023>
- [35] Monjezi, K., Mohammadi, M. and Khaz'ali, A.R. (2020) Stabilizing CO₂ Foams Using APTES Surface-Modified Nanosilica: Foamability, Foaminess, Foam Stability, and Transport in Oil-Wet Fractured Porous Media. *Journal of Molecular Liquids*, **311**, Article 113043. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113043>
- [36] 王鹏, 李兆敏, 李杨, 等. SiO₂/SDS 复合体系 CO₂ 泡沫驱油性能实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(6): 72-79.
- [37] 李伟涛, 李宗阳, 张东, 等. 两性离子表面活性剂和纳米颗粒为起泡剂的高稳定性超临界二氧化碳泡沫封窜体系[J]. 油田化学, 2024, 41(1): 101-107.
- [38] 曹晓莉. 高含水储层化学调剖堵水用纳米聚合物微球的研制与应用[J]. 化学工程师, 2024, 38(10): 53-56+19.
- [39] 刘翰林, 郑继龙, 吴彬彬, 等. 层内自生低界面张力泡沫调驱技术研究与应用——以渤海 KL 油田 A20 井组为例[J]. 精细石油化工进展, 2024, 25(5): 8-14.
- [40] 吕凯, 张彪, 刘卫东, 等. 纳米颗粒在提高采收率微乳液中运用的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(7): 1647-1651.