

稠油油藏注超临界多元热流体研究

高宇*, 肖岸峰, 陈潇

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年11月4日; 录用日期: 2024年12月5日; 发布日期: 2025年1月3日

摘要

我国稠油资源潜力巨大, 随着开采条件的逐渐复杂, 常规的热采技术不断受到限制, 导致采收率逐渐降低。为了解决这一难题, 开展了超临界多元热流体热采稠油提高采收率的研究。根据前人的结果, 超临界多元热流体作为一种新型热介质, 相比于蒸汽, 超临界多元热流体能与稠油发生热裂解反应, 形成混相驱替等, 显著地提高了稠油油藏的采收率。因此, 超临界多元热流体开采稠油具有极大的潜力。

关键词

稠油开采, 超临界多元热流体, 采收率

Study on Injection of Supercritical Multi-Thermal Fluid into Heavy Oil Reservoirs

Yu Gao*, Anfeng Xiao, Xiao Chen

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

Received: Nov. 4th, 2024; accepted: Dec. 5th, 2024; published: Jan. 3rd, 2025

Abstract

China has significant potential in heavy oil resources; however, as exploitation conditions grow increasingly complex, conventional thermal recovery techniques face mounting limitations, resulting in declining recovery rates. To address this issue, research on enhancing heavy oil recovery using supercritical multi-thermal fluid thermal recovery has been initiated. According to previous findings, supercritical multi-thermal fluid, as a novel thermal medium, can induce thermal cracking reactions with heavy oil, form miscible displacement, and significantly enhance the recovery rate of heavy oil

*第一作者。

文章引用: 高宇, 肖岸峰, 陈潇. 稠油油藏注超临界多元热流体研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(1): 13-17.
DOI: 10.12677/me.2025.131003

reservoirs compared to steam. Thus, supercritical multi-thermal fluid exploitation of heavy oil holds great promise.

Keywords

Heavy Oil Recovery, Supercritical Multi-Thermal Fluid, Recovery Efficiency

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

我国稠油资源非常丰富, 约为 200×10^8 t, 主要分布在陆上的辽河油田、河南油田、胜利油田和新疆油田, 以及海上的渤海油田[1]。按照粘度和密度的大小可以将稠油分为普通稠油、特稠油、超稠油等, 如表 1 所示。稠油开采技术主要包括冷采、热采和化学驱等方式。目前稠油总产量大于 2500×10^4 t, 其中有 1500×10^4 t 以上是通过热采方式获得的[2], 由此可见热采技术是提高稠油油藏采收率最主要的方式。稠油热采主要包括蒸汽吞吐、蒸汽辅助重力泄油、蒸汽驱、火烧油层等方式[3]。后来随着开发条件的逐渐复杂, 造成常规开采方法面临诸多挑战, 多元复合热采成为又一提高稠油油藏采收率的关键技术。多元复合热采技术主要为非凝析气(化学剂) + 蒸汽, 包括蒸汽 + N_2 、蒸汽 + CO_2 、蒸汽 + 降粘剂以及蒸汽 + CO_2 + N_2 (多元热流体)等, 其中多元热流体在提高采收率方面更加突出。但是, 由于多元热流体开采技术存在生产成本高、过度依赖高品质燃料和碳排放量高等问题, 造成油田经济效益差。为了实现稠油油藏高效和绿色的开采, 近年来, 随着超临界水的高溶解、高扩散和高反应等独有特性在稠油热采中的优势被逐渐展现出来, 将超临界水与稠油热采技术相结合, 即超临界多元热流体成为一种高效和环保的增产手段, 在提高采收率方面表现出良好的应用潜力。超临界多元热流体作为一种混合物, 主要由超临界水、超临界 CO_2 和超临界 N_2 组成。超临界多元热流体的产生机理也较为简单, 以油田排出的有机废液作为原料, 通过超临界水气化和温和氢氧化原理产生超临界多元热流体。这种热介质的使用不仅降低了油田生产蒸汽的成本, 还减少了对环境造成的污染。超临界水不同于液态和蒸汽, 它是水的一种特殊相态(温度在 374°C 以上, 压力在 22.1 MPa 以上的水), 其极性更低, 是一种很好的有机溶剂。超临界 CO_2 能加强对稠油的溶解, 促使稠油粘度进一步降低。同时, 超临界 CO_2 在驱替过程中, 能与稠油在驱替前缘形成类似的混相反应, 减小了油水之间的界面张力和毛细管力, 从而提高了注入介质的驱油效率。超临界 N_2 的压缩性小, 注入储层后有利于维持热流体腔的体积和地层压力, 促使热流体腔沿着横向扩展。此外, N_2 的导热率低, 能减小超临界多元热流体在顶底盖层的热损失。因此, 从上面的叙述中可以看出, 超临界多元热流体在稠油热采中兼顾了多种作用, 在这些因素的综合作用下, 促使其能显著提高稠油油藏的采出程度。

邹遂丰等人[4]通过超临界多元热流体在井筒内的数值模拟研究发现, 井底参数受注入流量、井口温度和压力等的影响, 且主要表现为单调关系。这为评价超临界多元热流体在井筒内的热特性提供了重要的参考。此外, 他们还对比了超临界多元热流体与超临界水在井筒内的传热特性。发现超临界多元热流体的热力学性质虽然比超临界水弱, 但由于超临界多元热流体的生产机理更为简单, 且资源利用率更高, 对于海上平台这类相对狭小的生产基地, 超临界多元热流体显得更为优越。黄祖杰等人[5]开展了超临界多元热流体、超临界水和热水等不同热介质的驱替实验研究, 详细分析了岩心温度、岩心压差、驱油效

率和热效率等参数的变化。根据他们的研究成果，超临界多元热流体在驱替过程中具有多种作用，包括热驱、气驱和混相驱替，超临界多元热流体的驱油效率达到了 95%。相比于同种温度和压力条件下的超临界水，其热效率提高了 16%左右。同时，超临界多元热流体提高了传热速度和传播范围，并减小了注入介质的热损失，从而提高了热利用率等。为了进一步掌握超临界多元热流体的驱油特征，蔡佳明[6]分别开展了一维及二维超临界多元热流体驱替实验和超临界多元热流体数值模拟研究，证明了超临界多元热流体开发稠油油藏的可行性。他们发现超临界多元热流体驱替中超临界水占据着最主要的作用，其中超临界水和超临界 CO₂ 与超临界 N₂ 组成的混合物对超临界多元热流体驱油的贡献程度分别为 54%和 46%。此外，超临界 CO₂ 与超临界 N₂ 能有效地抑制超临界水的超覆，并减少焦炭的生成。同时，他们提出的热补偿计算方法能获得更高的热利用率，残余油饱和度更小。他们将超临界多元热流体的驱替过程划分为早期、中期和后期 3 个阶段，如图 1 所示。其中，中期阶段由于压差迅速降低促使采收率急剧增加。后期由于超临界多元热流体突破了驱替前缘，造成模型两端压差变化不大，因此采收率缓慢上升并趋于平衡。在自主设计的超临界多元热流体驱替实验的基础上，他们通过超临界多元热流体数值模拟研究来弥补实验的不足。在他们的数值模型中，还考虑了裂解反应和 CO₂ 在稠油中的溶解能力，使得建立的数值模拟模型能更为准确地模拟超临界多元热流体的驱替过程。之后，他们分别对孔隙度、渗透率、原油粘度、超临界气水比、温度和压力等对采收率的影响开展了较为全面的数值模拟研究，为超临界多元热流体开采稠油油藏提供了重要的参考。

Table 1. China’s heavy oil classification standards
表 1. 中国稠油分类标准

主要指标	辅助指标	稠油类型
粘度/(mPa·s)	相对密度(20℃)	
100~10000	>0.9200	普通稠油
10000~50000	>0.9500	特稠油
>50000	>0.9800	超稠油

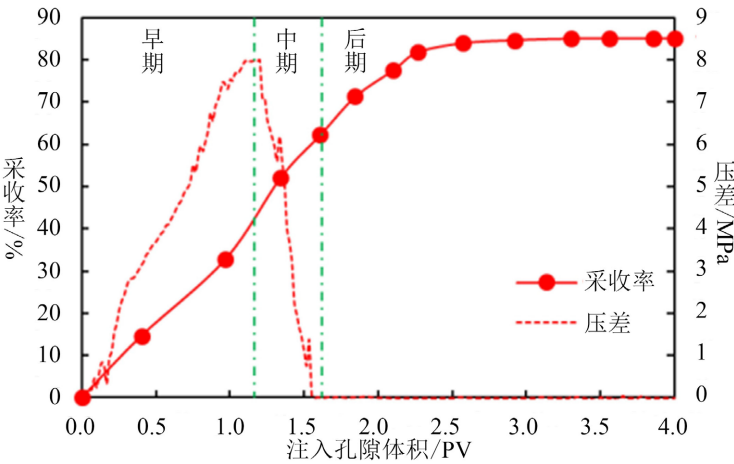


Figure 1. Supercritical multi-thermal fluid flooding recovery efficiency and pressure difference curve [6]
图 1. 超临界多元热流体驱采收率及压差曲线[6]

此外，李晓宇等人也利用自主研发的超临界多元热流体驱替实验装置，开展了超临界多元热流体的驱油过程研究[7]。他们详细对比了超临界多元热流体与蒸汽，以及超临界多元热流体不同的注入温度和

注入压力对采收率的影响。从他们的研究结果中可以发现，如图 2 所示。超临界多元热流体的最终采收率最高达到了 54.60%，比蒸汽的采收率提高了 18.24%。由此可见，超临界多元热流体的采出程度显著增加。同时，他们还发现超临界多元热流体的超覆现象得到了明显的抑制，提高了注入介质的波及范围。同时，根据他们的结果，超临界多元热流体还具有与稠油形成混相驱替和裂解稠油的作用。最后，根据不同注入温度和注入压力对采收率的影响研究，他们指出增大注入温度能提高采收率，但太高的温度会造成地层中形成焦炭，增大地层被堵塞的可能性。增大注入压力有利于加强混相驱替，同时还能抑制焦炭的产生。赵秋阳等人[8]设计的超临界多元热流体原位转化开采技术，实现了稠油等重质资源的高效、环保开发。在他们的研究中，利用气化和氢氧反应器将油田产生的有机废液生成超临界多元热流体，注入地层后，将大分子的芳香烃转化为轻质油、甲烷和氢等资源。其中，他们的有机废液气化率高达 98%，有利于实现通过低成本、高效率、洁净与低碳来开采稠油等重质资源。Tan 等人[9]基于填砂管驱替实验结果建立了超临界多元热流体数值模拟模型，结果表明，超临界多元热流体驱产油量比蒸汽驱提高 27,122 m³，驱油效果显著提高。Tian 等人[10]利用三维物理模拟实验对超临界多元热流体吞吐展开研究，结果表明，超临界多元热流体吞吐中热损失先增大后稳定，最高为 7%左右，再次证明了超临界多元热流体有效地减少了热损失，提高了热利用率。

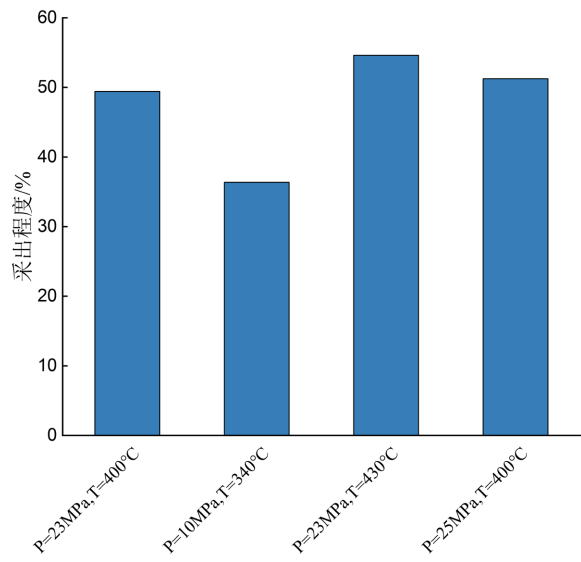


Figure 2. Recovery degree for different conditions
图 2. 不同条件的采出程度

2. 结论

超临界多元热流体技术在稠油开采中展现出广阔的应用前景，但其长期稳定性和经济性仍存在不确定性。未来的研究将继续聚焦于优化注采参数、改进数值模拟模型以及开发耐高温耐腐蚀的设备材料。随着技术的进步，超临界多元热流体开采有望成为稠油油藏开发的重要方法。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目(YKJCX2320106)。

参考文献

- [1] 张庆茹. 中国陆上稠油资源潜力及分布特征[J]. 中外科技情报, 2007(1): 2.

-
- [2] 蒋琪, 游红娟, 潘竞军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.
- [3] 胡海光. 稠油热采方法研究进展及应用效果评价[J]. 中外能源, 2024, 29(10): 62-68.
- [4] 邹遂丰, 郭正斌, 王珏, 等. 井筒内超临界多元热流体注入过程的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7663-7670.
- [5] 黄祖杰, 赵秋阳, 陈磊, 等. 超临界多元热流体提高稠油采收率机理研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 974-981.
- [6] 蔡佳明. 海上稠油油藏超临界多元热流体驱油特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(华东), 2022.
- [7] 李晓宇, 孙晓飞, 蔡佳明, 等. 海上稠油超临界多元热流体驱油特征物理模拟[J]. 断块油气田, 2023, 30(4): 545-551.
- [8] 赵秋阳, 金辉, 徐加陵, 等. 超临界多元热流体发生及地下原位转化开采重质油理论与技术[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(11): 31-45.
- [9] Tan, X., Zheng, W., Wang, T., Zhu, G., Sun, X. and Li, X. (2021) The Supercritical Multithermal Fluid Flooding Investigation: Experiments and Numerical Simulation for Deep Offshore Heavy Oil Reservoirs. *Geofluids*, **2021**, Article ID: 5589543. <https://doi.org/10.1155/2021/5589543>
- [10] Tian, J., Yan, W., Qi, Z., Huang, S., Yuan, Y. and Dong, M. (2022) Cyclic Supercritical Multi-Thermal Fluid Stimulation Process: A Novel Improved-Oil-Recovery Technique for Offshore Heavy Oil Reservoir. *Energies*, **15**, Article 9189. <https://doi.org/10.3390/en15239189>