

不同粘度条件下聚合物驱油微观数值模拟研究

唐丹妮¹, 李成勇^{1*}, 李瑶², 何兴³

¹成都理工大学能源学院, 四川 成都

²中石化西南油气分公司采气二厂, 四川 南充

³中国石油西南油气田分公司开发事业部, 四川 成都

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

为探讨聚合物粘度对非均质油藏中采收率的影响, 本文构建了二维VOF-Navier-Stokes剪切变稀聚合物驱油模型, 并结合Carreau流变模型进行了数值模拟。研究通过在具有高、低渗通道的微观物理模型中分析不同聚合物粘度下的界面演化与稳定性, 揭示了粘度对驱油过程中的波前稳定性及采收率的影响。结果表明, 低粘度聚合物易导致“粘性指进”现象, 影响低渗通道采收率; 适当提高粘度有助于稳定界面, 减少不稳定现象, 提高低渗通道的采收率, 但过高粘度则可能增加粘滞阻力, 影响高渗通道的驱替效率。研究揭示了聚合物粘度对采收率的不同影响规律, 为聚合物驱油技术的粘度调控提供了微观理论依据。

关键词

聚合物驱, 非均质性, 微观模拟, 粘性指进, Carreau模型

Microscale Numerical Simulation of Polymer Flooding under Varying Viscosity Conditions

Danni Tang¹, Chengyong Li^{1*}, Yao Li², Xing He³

¹College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²The Second Gas Production Plant, Sinopec Southwest China Oil & Gas Company, Nanchong Sichuan

³Development Division, Petro China Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 2nd, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 唐丹妮, 李成勇, 李瑶, 何兴. 不同粘度条件下聚合物驱油微观数值模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 365-374. DOI: 10.12677/jogt.2025.473041

Abstract

To investigate the effect of polymer viscosity on oil recovery in heterogeneous reservoirs, a two-dimensional VOF-Navier-Stokes model incorporating shear-thinning polymer flooding was developed. Numerical simulations were conducted using the Carreau rheological model. The study analyzed interfacial evolution and stability under different polymer viscosities within a micromodel featuring high- and low-permeability channels. The results reveal that viscosity plays a critical role in stabilizing the displacement front and enhancing oil recovery. Low-viscosity polymers tend to induce viscous fingering, thereby reducing recovery in low-permeability zones. Conversely, a moderate increase in viscosity enhances front stability, mitigates instabilities, and improves sweep efficiency in low-permeability channels. However, excessively high viscosity may lead to increased viscous resistance, negatively affecting displacement efficiency in high-permeability zones. This study elucidates the varying impacts of polymer viscosity on oil recovery and provides a pore-scale theoretical basis for optimizing viscosity in polymer flooding applications.

Keywords

Polymer Flooding, Heterogeneity, Pore-Scale Simulation, Viscous Fingering, Carreau Model

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

随着油田开发进入中后期，常规水驱面临波及体积小、驱替效率低等问题，聚合物驱作为有效的提高采收率技术，因其可改善驱替液流度比、抑制水窜、扩大波及体积，已在多类油藏中广泛应用[1]-[3]。然而，在非均质复杂油藏中，聚合物流动行为复杂，残余油动用效率仍有待提升。

近年来，研究者从微观尺度深入探索聚合物驱的作用机制。周萍[4]等指出，聚合物粘弹性有助于稳定驱替界面，增强微观驱油效果。高硕[5]与 Yan [6]通过微观可视化和数值模拟发现，聚合物弹性能促进油滴脱附，提高驱替效率。Sun [7]等揭示了局部残余油在聚合物驱过程中的动用机制，为建立更真实的微观流动模型提供依据。

为提高聚合物适应性，材料性能优化受到广泛关注。李美杰[8]总结了耐温抗盐聚合物在高温高盐油藏中的应用进展，强调其热稳定性和粘度保持能力。陈玉娇[9]通过对不同类型聚合物性能对比，发现 ZP 聚合物表现优异。阚亮[10]指出，提高聚合物分子量可提升驱油半径与效率；曹绪龙[11]则从共聚物结构设计角度提出材料创新对应复杂地层至关重要。

在体系构建方面，伍晓林[12]提出聚合物与表面活性剂协同体系发展方向，强调绿色与智能化趋势；唐恩高[13]结合绥中 36-1 油田实践，提出“井网加密 + 聚合物驱”联合方式并通过模拟验证其有效性。材料技术创新方面，季岩峰[14]与徐辉[15]开发的微胶囊聚合物具备缓释增粘特性；雷天猛[16]引入纳米 SiO₂ 提升高温高盐适应性；周俊平[17]则通过微生物合成聚合物，实现环保与低成本驱油目标。此外，H.A. Akhlaghi Amiri 等[18]基于相场法构建了二维非等温模型，考虑润湿性与热传导等因素，有效模拟了聚合物驱中的界面演化行为。

目前聚合物驱油在材料和工艺方面取得显著进展，但其粘度变化与微观界面稳定性及采收率的影响

机制仍需深入探究。本文基于 VOF-Navier-Stokes 控制方程, 结合 Carreau 模型构建微观驱油模型, 探讨不同粘度条件下的界面行为与驱替效率变化规律, 为优化聚合物驱提供微观理论支持。

2. 数值模型及模拟方法

2.1. 数学模型建立

为研究聚合物粘度对二维微观孔隙结构中驱油过程的影响, 本文采用耦合 Navier-Stokes 方程和体积分数法 (Volume of Fluid, VOF) 对聚合物驱油中的两相流动行为进行数值模拟。VOF 方法是一种基于欧拉网格的界面追踪技术, 能够有效捕捉两相界面在复杂孔隙结构中的演化过程, 特别适用于处理界面变形剧烈、拓扑结构发生变化的流动问题。在模拟中, 考虑聚物流体的剪切变稀特性, 通过调控其表观粘度范围, 以探讨不同粘度条件下界面推进速度、形态变化及稳定性等关键特征, 为微观尺度下提高采收率的聚合物驱油技术提供理论参考。

在此基础上, 建立了适用于聚合物驱油过程中两相不可压缩流动的数学模型。控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程以及 VOF 方程, 具体如下:

(1) 质量守恒方程

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

其中, \mathbf{u} 为流体速度矢量。该方程用于保证不可压缩流体在整个流场中体积守恒。

(2) 动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma \quad (2)$$

其中, p 为压力; ρ 为混合密度, 基于体积分数加权; μ 为混合粘度, 考虑剪切变稀特性并加权平均; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; \mathbf{F}_σ 为表面张力源项, 采用连续表面力 (CSF) 模型处理。该方程反映流体单元在惯性力、压力梯度力、粘性力、重力以及界面表面张力共同作用下的流动行为。密度与粘度均采用 VOF 方法进行加权平均, 具体为:

$$\rho = \alpha \rho_o + (1 - \alpha) \rho_p \quad (3)$$

$$\mu = \alpha \mu_o + (1 - \alpha) \mu_p \quad (4)$$

其中, ρ_p 和 μ_p 分别为聚物流体的密度与表观粘度, ρ_o 和 μ_o 为油相的密度与粘度。油相视为牛顿流体, 其粘度为常数, 而聚合物相的粘度具有显著的剪切变稀特性, 为准确描述聚物流体在不同剪切条件下的流变行为, 本文采用 Carreau 模型对其表观粘度进行建模。Carreau 模型表达式如下:

$$\mu_p = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (5)$$

其中, μ_0 为零剪切粘度; μ_∞ 为无限剪切粘度; λ 为松弛时间; n 为流变指数 ($n < 1$ 表示剪切变稀); $\dot{\gamma}(\cdot)$ 为剪切速率, 定义如下:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2D:D} \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \quad (7)$$

其中, D 为应变率张量。该模型能够有效反映聚合物溶液在微观孔隙结构中因局部速度梯度变化所引起的粘度变化, 从而提高界面形态和驱油效率模拟的物理准确性。

(3) VOF 方程

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (8)$$

该方程用于追踪两相界面的动态演化过程，其中 α 为油相的体积分数， $\alpha=1$ 表示计算单元中全为油相， $\alpha=0$ 表示全为聚合物， $0 < \alpha < 1$ 为两相混合区域。

2.2. 数值模型建立

在聚合物驱油过程中，注入聚合物的主要作用是提高低渗通道中的原油采收率。为了深入研究聚合物在不同渗透性通道中的流动行为差异，以及聚合物粘度对驱油效率的影响，本文建立了具有高、低渗通道结构的微观物理模型。几何模型通过 CAD 软件设计，包括两条高度不同的平行通道，以模拟高渗与低渗通道的流动差异性。图 1 展示了该模型的结构示意图。

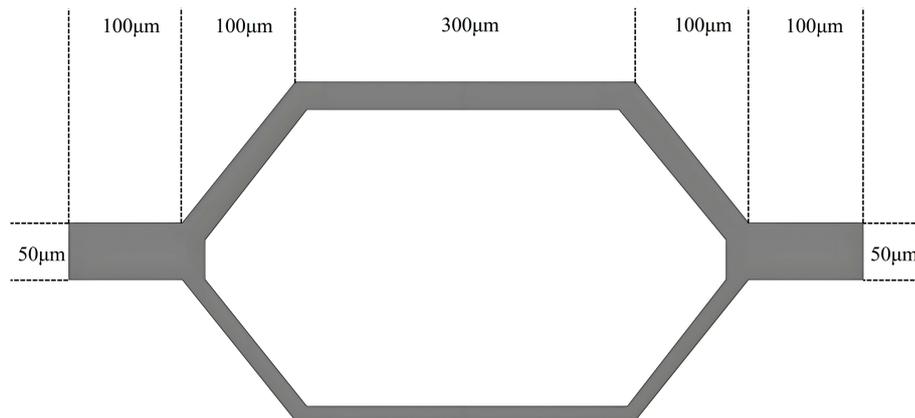


Figure 1. Schematic diagram of the micromodel geometry used for polymer flooding simulation

图 1. 几何模型示意图

流体物性参数设置如表 1，聚合物粘度为 0.001~0.1、0.002~0.2、0.003~0.3、0.004~0.4、0.005~0.5 Pa·s (无限剪切粘度 - 零剪切粘度)，密度为 960 kg/m³，松弛时间 10 s，流变指数 0.35，油相粘度为 0.005 Pa·s，密度为 860 kg/m³，聚合物 - 油界面张力为 0.072 N/m。

Table 1. Physical properties of the fluids used in the simulation

表 1. 流体物性参数

流体类型	粘度(Pa·s)		密度 (kg/m ³)	松弛时间 (s)	流变指数	两相界面张力 (N/m)
	零剪切粘度	无限剪切粘度				
聚合物	0.1	0.001	960	10	0.35	0.072
	0.2	0.002				
	0.3	0.003				
	0.4	0.004				
	0.5	0.005				
油	0.005	860	/	/		

边界条件设置方面,模型左侧设置为速度入口,注入速度为 0.1 m/s;右侧为压力出口,出口压力设定为 0 Pa;其余边界设为壁面条件。聚合物-原油两相的壁面接触角设为 60° ,整体为油湿条件。

2.3. 网格无关性验证

为验证数值模型的计算精度与稳定性,本文采用高渗通道采收率与低渗通道采收率作为评价指标,进行了网格无关性验证。模型采用三角形网格进行离散化,分别生成三组不同密度的网格方案(细、中、粗),对应的网格单元数量分别为 80,651、20,292、9134,网格节点数分布为 41,803、10,886、5063,结构如图 2(a)~(c)所示。在相同物理边界条件与参数设定下,最终时刻两相分布如图 2(d)~(f)所示,统计各网格方案下采收率结果,如图 3 所示。

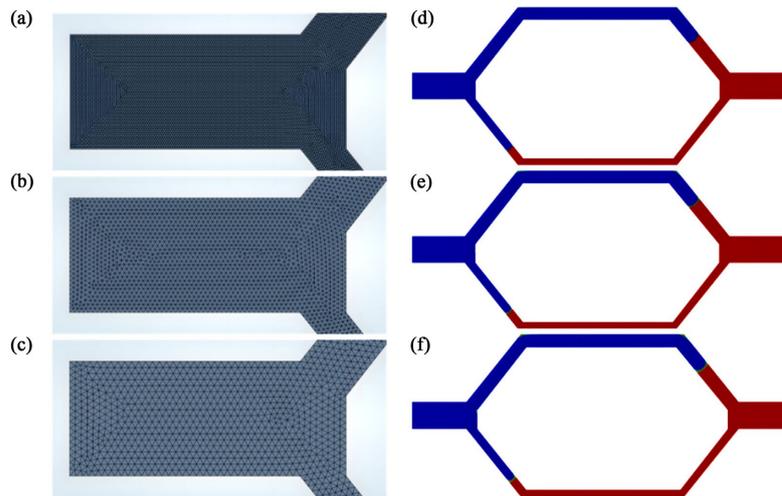


Figure 2. Comparison of simulations under different mesh densities. (a) Fine mesh generation; (b) Medium mesh generation; (c) Coarse mesh generation; (d) Two-phase distribution with fine mesh; (e) Two-phase distribution with medium mesh; (f) Two-phase distribution with coarse mesh

图 2. 同网格密度模拟对比。(a) 细网格密度划分; (b) 中等网格密度划分; (c) 粗网格密度划分; (d) 细网格两相分布; (e) 中等网格两相分布; (f) 粗网格两相分布

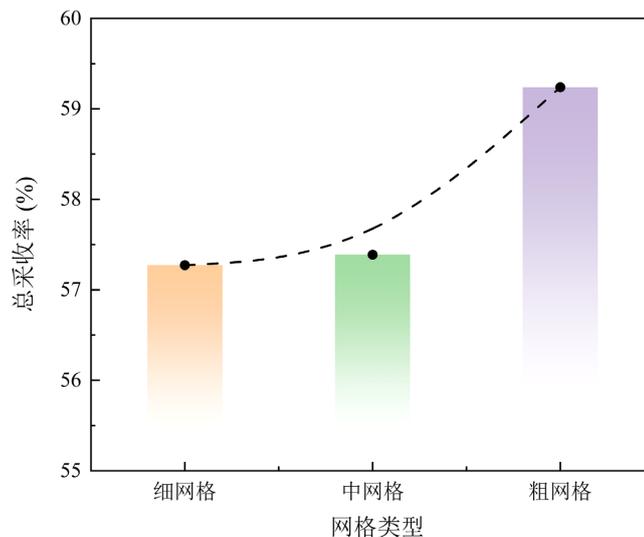


Figure 3. Total oil recovery under different mesh resolutions

图 3. 不同网格数总采收率

随着网格密度的提高,采收率变化逐渐减小。由粗网格加密至中等网格时,总采收率减小 1.9%,由中等网格加密至细网格时,总采收率减小 0.1%,表明模拟结果已基本与网格划分无关,同时两相界面的清晰程度与网格大小有关,网格数太小会加剧界面的模糊程度。因此,综合考虑计算精度与效率,后续模拟中选用中等密度网格方案作为标准配置。

3. 聚合物驱油界面演化与稳定性分析

3.1. 网格无关性验证

在聚合物驱油过程中,驱替界面形态的演化对整体驱油效率具有重要影响。界面的不稳定性,如“指进”现象,会导致驱替前沿变形,形成包裹油区,降低采收率。因此,有必要对界面形态的时间演化特征进行系统分析,以揭示不稳定性形成和发展的动力学机制。

在无限剪切粘度为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 零剪切粘度为 $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的聚合物驱油模拟中,驱替前缘不光滑,两相界面存在明显的界面不稳定性现象,相分布变化如图 4 所示。通道采收率变化如图 5 所示,当 $t = 0.001 \text{ s}$ 时,

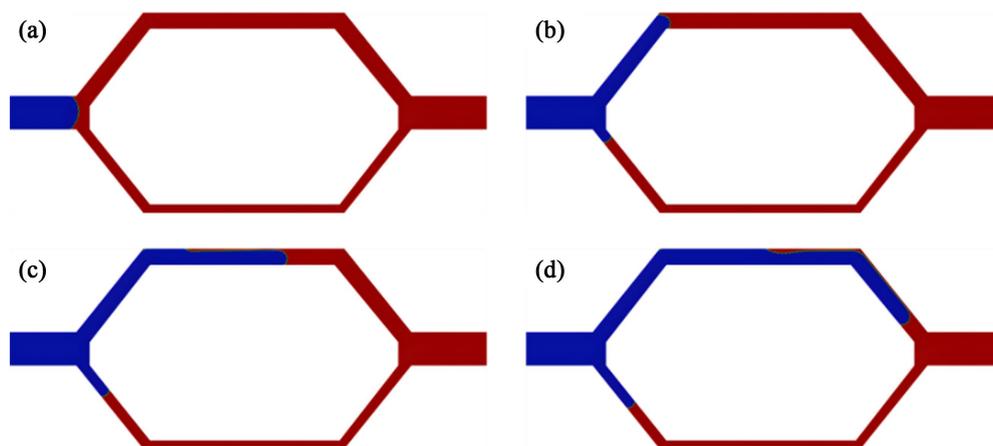


Figure 4. Phase distribution during polymer flooding with viscosity ranging from 0.001 to $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. (a) $t = 0.001 \text{ s}$; (b) $t = 0.002 \text{ s}$; (c) $t = 0.003 \text{ s}$; (d) $t = 0.004 \text{ s}$

图 4. 粘度为 $0.001\sim 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的聚合物驱油相分布。(a) $t = 0.001 \text{ s}$; (b) $t = 0.002 \text{ s}$; (c) $t = 0.003 \text{ s}$; (d) $t = 0.004 \text{ s}$

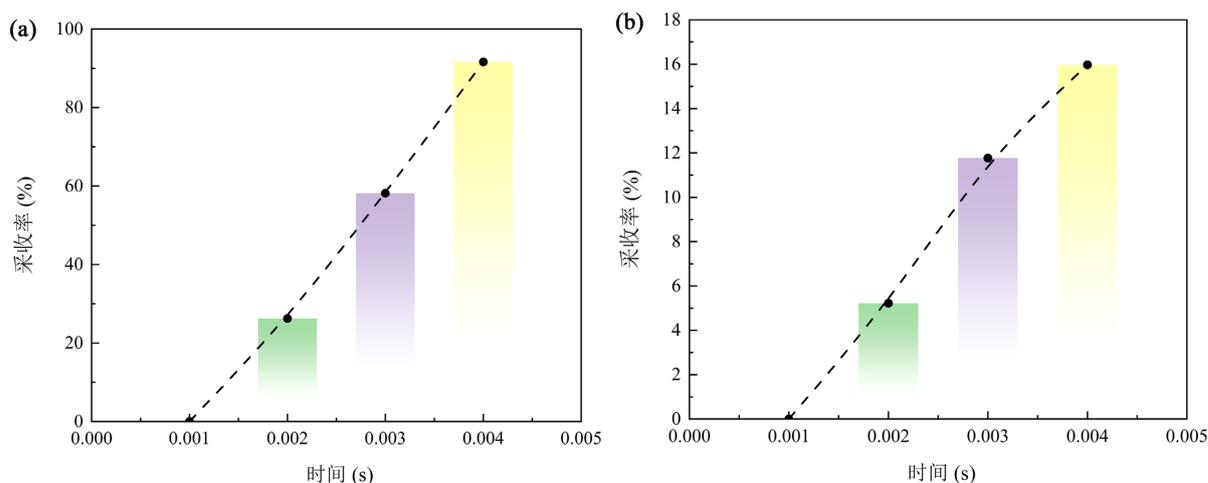


Figure 5. Variation in oil recovery across channels. (a) Recovery in high-permeability channel; (b) Recovery in low-permeability channel

图 5. 通道采收率变化。(a) 高渗通道采收率; (b) 低渗通道采收率

驱替前缘还未进入上低渗通道；当 $t = 0.002$ s 时，高渗通道中的两相界面移动到通道转角，开始出现“粘性指进”，靠近下壁面处的聚合物流动更快，高渗通道采收率为 26.2%，低渗通道采收率为 5.2%；当 $t = 0.003$ s 时，“粘性指进”现象更加明显，靠近下壁面的流体驱替速度远远超过上壁面，高渗通道采收率为 58.2%，低渗通道采收率为 11.8%；当 $t = 0.004$ s 时，高渗通道两相界面通过第二个通道转角，“粘性指进”程度持续加剧导致高渗通道聚合物即将突破，而低渗通道中的两相界面还未到达通道转角，暂未出现“粘性指进”现象，高渗通道采收率为 91.6%，低渗通道采收率为 16%。低渗通道采收率增长幅度远远低于高渗通道，随着驱替进行，后续可能会形成聚合物优势通道，高渗和低渗通道剩余油难以动用。

3.2. 聚合物粘度对界面稳定性的影响

聚合物溶液的粘度是影响驱油界面稳定性的重要参数。粘度较低时，界面前沿易受扰动，形成显著的“指进”现象；而高粘度聚合物则有助于形成较平整的界面，提升驱替效率。因此，研究不同聚合物粘度条件下的界面形态差异，对于理解和调控驱油过程中的流体动力学行为具有实际意义。

结合 3.1 中的结果，加入聚合物粘度范围为 $0.002\sim 0.2$ Pa·s、 $0.003\sim 0.3$ Pa·s 的驱油模拟， $t = 0.004$ s 时的相分布如图 6 所示。对比图 6(a)和图 6(b)可以看到，当聚合物粘度增长到 $0.002\sim 0.2$ Pa·s 后，高渗通道和低渗通道的两相界面没有出现不稳定现象，驱替前缘较为光滑，高渗通道处也存在“粘性指进”现象，但仅在两相界面通过第二个通道转角后出现，且“指进”程度远小于聚合物粘度为 $0.001\sim 0.1$ Pa·s 的情况；再通过对图 6(b)和图 6(c)可以看到，当聚合物粘度增长到 $0.003\sim 0.3$ Pa·s 后，两相界面更加光滑，整个驱替过程中都没有发生“粘性指进”现象，说明改善驱替相和非驱替相的粘度比能有效缓解两相界面不稳定现象，阻止“粘性指进”现象的发生，使高渗和低渗通道的驱替更加均匀，提高驱油效率。

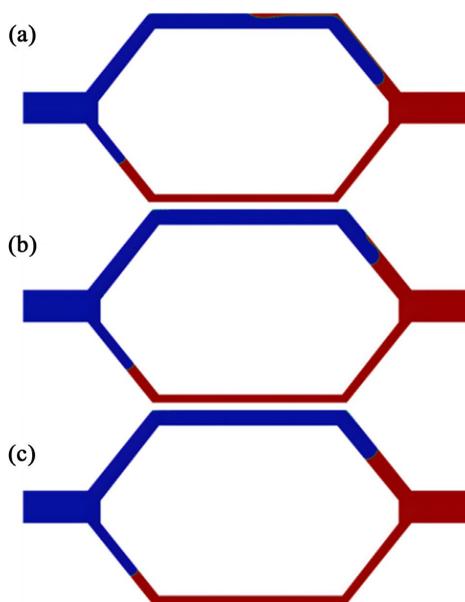


Figure 6. Phase distribution at $t = 0.004$ s under different polymer viscosity ranges. (a) Viscosity: $0.001\sim 0.1$ Pa·s; (b) Viscosity: $0.002\sim 0.2$ Pa·s; (c) Viscosity: $0.003\sim 0.3$ Pa·s

图 6. $t = 0.004$ s 时刻的相分布。(a) 粘度为 $0.001\sim 0.1$ Pa·s；(b) 粘度为 $0.002\sim 0.2$ Pa·s；(c) 粘度为 $0.003\sim 0.3$ Pa·s

3.3. 聚合物粘度对驱油界面推进的影响

除了界面稳定性外，聚合物粘度还直接影响其在多孔介质中的推进能力，进而控制油的驱替效率。高粘度有利于抑制界面不稳定性，但也可能因粘滞阻力升高导致推进速度降低。因此，需要综合评估在

两相界面稳定的状态下, 不同粘度聚合物在高渗和低渗通道中的速度分布以及通道采收率, 以揭示其在驱油过程中的作用。

选取聚合物粘度为 0.003~0.3 Pa·s、0.004~0.4 Pa·s、0.005~0.5 Pa·s 的三组模拟进行对比分析, 三组模拟整个驱替过程均没有出现两相界面不稳定和“粘性指进”现象, $t = 0.004$ s 时刻的相分布如图 7 所示, 高、低渗通道采收率如图 8 所示, $x = 0.35$ mm 处 y 方向速度剖面如图 9 所示。同时对比三种情况下的相分布图和通道采收率可以发现, 高渗通道的原油采收率和聚合物粘度成反比, 而低渗通道的原油采收率和聚合物粘度成正比, 结合图 9 的速度剖面分布, 说明随着聚合物粘度增大, 相同时刻下, 聚合物在低渗通道的推进速度更快, 在高渗通道的突破速度变化不大, 整体的驱替前缘更加均匀, 能有效提高非均质储层中的原油驱替效率。

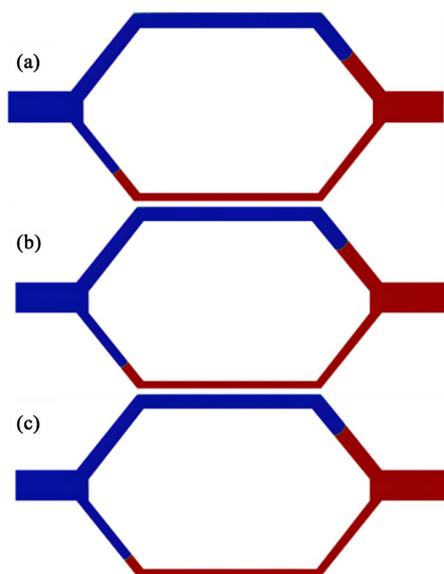


Figure 7. Phase distribution at $t = 0.004$ s under higher polymer viscosity ranges. (a) Viscosity: 0.003~0.3 Pa·s; (b) Viscosity: 0.004~0.4 Pa·s; (c) Viscosity: 0.005~0.5 Pa·s

图 7. $t = 0.004$ s 时刻的相分布。(a) 粘度为 0.003~0.3 Pa·s; (b) 粘度为 0.004~0.4 Pa·s; (c) 粘度为 0.005~0.5 Pa·s

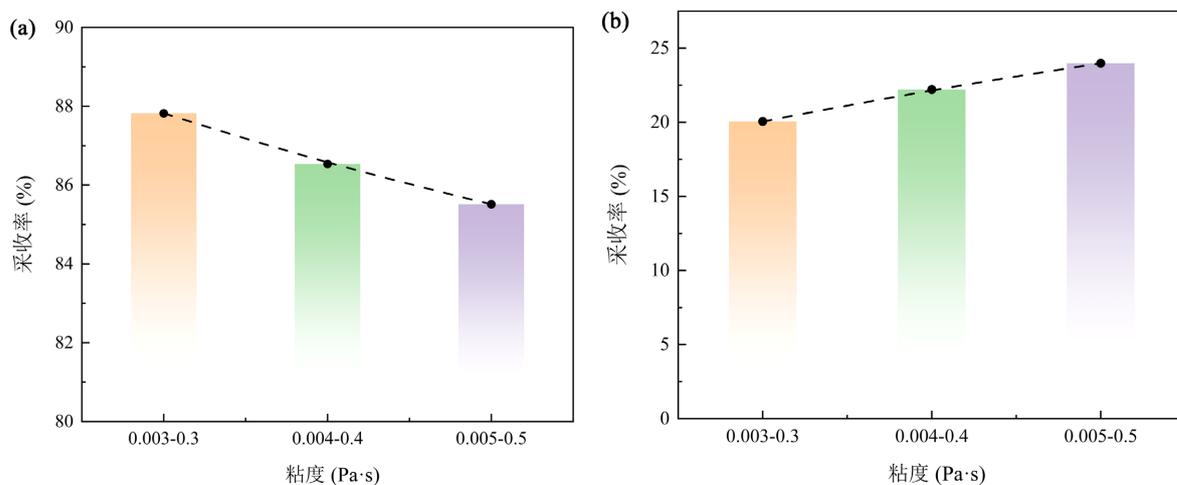


Figure 8. Channel-specific oil recovery under varying polymer viscosities. (a) Recovery in high-permeability channel; (b) Recovery in low-permeability channel

图 8. 通道采收率变化。(a) 高渗通道采收率; (b) 低渗通道采收率

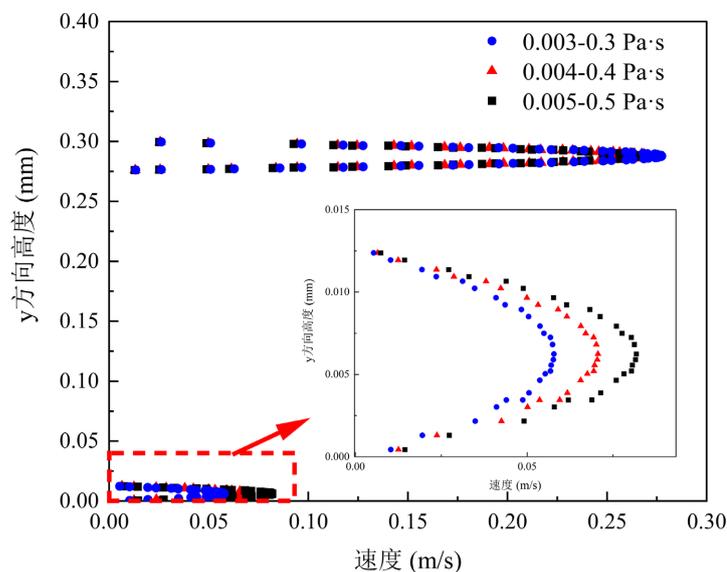


Figure 9. Y-direction velocity profile at $X = 0.35$ mm
图 9. $X = 0.35$ mm 处 Y 方向速度分布剖面

4. 结论

本文基于 VOF 方法耦合 Navier-Stokes 方程, 建立了考虑剪切变稀特性的二维微观物理模型, 系统分析了聚合物粘度对非均质多孔介质中驱油界面演化、稳定性及通道采收率的影响, 主要结论如下:

(1) 聚合物粘度对驱油界面形态具有显著影响。低粘度聚合物在高渗通道内易诱发“粘性指进”现象, 界面不稳定性明显, 导致驱替前沿变形, 最终形成优势通道, 加剧了低渗通道的剩余油富集。

(2) 适当提高聚合物粘度可有效抑制界面不稳定性。当聚合物粘度范围提高至 $0.003\sim 0.3$ Pa·s 以上, 整个驱替过程中未出现明显“指进”现象, 界面形态平整, 驱替前沿稳定性显著增强, 促进了高、低渗通道的协同驱油效果。

(3) 聚合物粘度的增加对不同渗透性通道的驱油效率存在差异性。随着粘度增大, 高渗通道中的原油采收率逐步下降, 低渗通道的原油采收率明显提升, 整体驱替前缘趋于均匀, 有利于改善非均质储层的采收率分布, 提高总体驱油效率。

综上所述, 合理调控聚合物的流变性能, 优化其粘度参数, 可在微观尺度上有效改善两相界面稳定性, 抑制不均匀突破, 实现对非均质油藏的高效开发, 研究结果可为聚合物驱油技术参数设计与优化提供理论参考。

参考文献

- [1] 韦雨柔. 油田驱油聚合物溶液粘度的影响因素研究[J]. 化学工程与装备, 2024(7): 20-22.
- [2] 李艳春, 隋明园. 化学驱提高采收率技术发展现状与展望[J]. 特种油气藏, 2025, 32(1): 12-21.
- [3] 梁小天, 张景楠, 李斌, 等. 驱油用纳米颗粒稳定泡沫体系研究进展[J]. 油田化学, 2025, 42(1): 174-181+190.
- [4] 周萍. 聚合物驱油机理及增效途径[J]. 化学工程与装备, 2023(11): 41-43.
- [5] 高硕, 柏明星. 聚合物驱油微观渗流机理数值模拟研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(4): 42-45.
- [6] Yan, Y., Wang, L., Sang, G. and Han, X. (2022) Influence of Polymer Viscoelasticity on Microscopic Remaining Oil Production. *Polymers*, **14**, Article No. 940. <https://doi.org/10.3390/polym14050940>
- [7] Sun, X., Zhao, M., Fan, X., Zhang, Y., Xu, C., Wang, L., et al. (2022) Study on Micro Production Mechanism of Corner Residual Oil after Polymer Flooding. *Polymers*, **14**, Article No. 878. <https://doi.org/10.3390/polym14050878>

-
- [8] 李美杰, 闫成双, 薛宪波, 等. 耐温抗盐类聚合物驱研究现状及展望[J]. 北京石油化工学院学报, 2024, 32(2): 11-16.
- [9] 陈玉娇. 聚合物驱油剂性能评估与采收率优化工艺探讨[J]. 化学工程与装备, 2024(10): 77-79+124.
- [10] 阚亮, 方月月, 敖文君, 等. 聚合物分子量对海上油田聚合物驱提高采收率影响研究[J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(4): 41-45.
- [11] 曹绪龙, 季岩峰, 祝仰文, 等. 聚合物驱研究进展及技术展望[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(6): 8-16.
- [12] 伍晓林, 侯兆伟, 王海峰, 等. 大庆油田化学驱油体系研究现状及发展方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 137-144.
- [13] 唐恩高, 张增华, 苏彦春, 等. 海上油田聚合物驱与加密协同开发模式下微观渗流特征[J]. 东北石油大学学报, 2025, 49(2): 107-116+138.
- [14] 季岩峰, 杨勇, 曹绪龙, 等. 微胶囊乳液型聚合物驱油剂研制与评价[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 975-982.
- [15] 徐辉, 宋倩, 巩锦程, 等. 微胶囊聚合物在多孔介质中的渗流与驱油特征[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(2): 79-84.
- [16] 雷天猛, 王秀军, 王姗姗, 等. 纳米二氧化硅改性聚合物的油藏适用性评价与微观驱油效果研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 107-112.
- [17] 周俊平, 潘琪露, 黄良刚, 等. 生物制造技术在聚合物驱油应用中的研究进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(1): 148-172.
- [18] Akhlaghi Amiri, H.A. and Hamouda, A.A. (2014) Pore-Scale Modeling of Non-Isothermal Two Phase Flow in 2D Porous Media: Influences of Viscosity, Capillarity, Wettability and Heterogeneity. *International Journal of Multiphase Flow*, **61**, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.01.001>