

三元复合驱采出水中油滴聚并特性与规律研究：综述

尹学松, 王志遥, 段晨曦, 周晓龙, 陈昊

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月19日; 录用日期: 2025年11月17日; 发布日期: 2025年12月4日

摘要

三元复合驱技术能够有效提升石油开采率, 但这一过程会伴随大量含油污水的产生。为了提高油水分离效率并降低污水处理的难度, 研究三元复合驱采出水中油滴聚并的机理和特性具有重要的现实意义。本文综述了油滴聚并的研究进展及其聚并机理, 旨在为高效处理三元复合驱采出水提供理论依据。

关键词

三元复合驱, 污水处理, 油滴聚并

Study on the Coalescence Characteristics and Mechanisms of Oil Droplets in ASP Flooding Produced Water: A Review

Xuesong Yin, Zhiyao Wang, Chenxi Duan, Xiaolong Zhou, Hao Chen

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

Received: September 19, 2025; accepted: November 17, 2025; published: December 4, 2025

Abstract

Alkali agent (A)/surfactant (S)/polymer (P) flooding technology can significantly enhance oil recovery rates; however, this process is accompanied by the generation of substantial amounts of oil-contaminated wastewater. To improve the efficiency of oil-water separation and reduce the complexity of wastewater treatment, it is of great practical importance to investigate the mechanisms and characteristics of oil droplet coalescence in alkali ASP flooding produced water. This paper provides a review of the advancements in oil droplet coalescence research and the associated coalescence

文章引用: 尹学松, 王志遥, 段晨曦, 周晓龙, 陈昊. 三元复合驱采出水中油滴聚并特性与规律研究: 综述[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 626-630. DOI: 10.12677/jogt.2025.474070

mechanisms, aiming to provide a theoretical foundation for the efficient treatment of ASP flooding produced water.

Keywords

ASP Flooding, Wastewater Treatment, Oil Droplet Coalescence

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

三元复合驱技术, 作为提升原油采收率的有效手段, 近年来在我国多个油田广泛应用, 并取得了显著成效。通过注入碱、表面活性剂和聚合物, 三元复合驱能够增强油水界面的亲和力, 降低油滴界面张力, 从而提升原油流动性和采收率。自 1998 年大庆油田首次开展工业试验以来, 胜利、克拉玛依、玉门等油田均取得了较好效果。与传统水驱相比, 三元复合驱技术能够提高采收率超过 20%, 成为延长老油田生产寿命的重要技术[1]-[4]。然而, 三元复合驱也带来了一个突出问题——大量含油污水的产生。这些污水的油滴粒径小、分散性强、稳定性高, 导致油水分离变得更加困难。传统的分离方法难以应对这些挑战, 尤其是在油滴稳定性较强的情况下。与传统水驱产生的污水相比, 三元复合驱的污水分离难度更大[5]-[7]。目前, 关于三元复合驱采出水中油滴聚并规律的研究仍处于初步阶段, 尚未形成完整的理论框架。现有的研究主要集中在油水分离技术的改进上, 如调整聚合物结构、改善表面活性剂种类等, 油滴的聚并机制仍不明确, 亟需进一步研究和探索。本文从研究油滴聚并特性及其规律的方式出发, 系统地探讨了油滴聚并过程中的各种影响因素, 包括温度、压力、液体成分、表面活性剂的作用等条件。通过对现有文献的总结与分析, 文章详细讨论了研究人员在不同实验条件下所取得的主要进展, 特别是在油滴聚并的动力学、聚并机制以及影响聚并效率的关键因素方面的最新发现。此外, 文章还评述了不同方法在提高油滴聚并效率、优化聚并过程方面的优势与不足。通过这些理论研究的积累, 为三元复合驱采出水的高效处理提供了更加科学的理论依据, 也为今后相关技术的创新与优化提供了有力的理论支撑。

2. 油滴聚并特性及其规律的实验研究

目前, 对油滴聚并的特性和机理已有一些理论和实验研究, Zhou Q 和 Dudek M 等人建立了微流控平台, 模拟纳米颗粒悬浮液中的油滴聚结过程, 观察到临界接近速度, 油滴速度高于该临界接近速度, 聚结不能发生[8] [9]。Bera B 建立了高温与粘度的变化联系, 发现当温度从 20℃升高到 70℃, 水和油的粘度几乎下降了 60%, 水相更容易在油 - 水界面处形成粘性指状物, 显著提高了水相的排液[10]。Yoon Y 等人通过在实验中改变分散相粘度来研究膜排水时间对粘度比的依赖性, 发现膜排水时间随着粘度比的增加而增加[11]。Sainath K 通过动态光散射法, 测定出盐的加入增强了表面活性剂在油 - 水界面上的吸附, 对比了盐的有效性顺序, $AlCl_3 > CaCl_2 > NaCl$ [12]。Dudek M 在标准和脱气条件下, 升高压力并通过直接测量来评估油滴聚结, 其中溶解气体的去除导致乳液稳定性的增强, 阻碍了油滴的聚并[13]。Narayan S 指出聚结速率随着表面活性剂浓度的增加而显著降低, 这是由于总体上较低的界面张力和较高的表面活性剂覆盖率[14]。Dong T 通过实验研究了油滴在有机 - 水界面的部分聚并过程及表面活性剂的影响。分别用阴影法和高速粒子图像测速仪研究了界面形状和油滴内部速度场的变化。当存在表面活性剂时, 油滴与界面之间的液膜破裂发生在离轴位置, 不会出现二次夹断现象[15]。Hu D 指出一些表面活

性剂降低了有利于油滴变形的界面张力,表面活性剂的另一个作用是增加界面粘度,从而增加流体阻力并降低速度,也就是说表面活性剂减缓了连续膜的排水,从而对碰撞聚结产生负面影响[16]。

3. 油滴聚并特性及其规律的数值模拟研究

随着科技的不断进步和计算能力的提升,越来越多的研究人员开始依赖数值模拟技术来研究油滴聚并的过程。数值模拟是一种通过计算机仿真进行问题解决的方法,它能够在理论上对复杂物理过程进行精确的描述,提供更加灵活、快速且低成本的解决方案。与传统的实验研究相比,数值模拟能够在无需依赖昂贵实验设备的情况下,深入探索油滴聚并的细节和微观机制,极大地提高了研究效率。

通过数值模拟,研究人员不仅可以在虚拟环境中进行各种实验,还能够根据不同的模拟条件,调整油滴的初始参数,如油滴的速度、粒径、距离及碰撞角度,从而研究它们对油滴聚并行为的影响。研究表明,油滴聚并时间受到多种因素的影响,其中包括初始速度、油滴粒径、油滴之间的距离以及碰撞的角度等。例如,当油滴做平行上浮运动时,油滴之间的距离逐渐减小,油滴聚并的过程可以分为三种不同的情况:一种是油滴无法聚并;另一种是油滴呈现出聚并的趋势,并最终聚并;还有一种是油滴彼此相互排斥,导致无法发生聚并[17]。此外,研究还发现,当两滴油滴沿同一方向运动时,若减小油滴之间的距离,下油滴会在上油滴的影响下,显著缩短聚并时间[18]。当两滴油滴以一定初速度相向碰撞时,碰撞的结果取决于碰撞参数。如果碰撞参数超过某一临界值 bc ,油滴会发生分离;而当碰撞参数低于该临界值时,油滴会发生永久聚并,这表明油滴的初速度对聚并过程有着重要的影响[19]-[21]。在这一背景下,吴波等人提出并建立了反映油滴粒子聚结规律的流体微团模型,深入研究了同方向运动油滴的聚并情况。在他们的研究中,发现当接近速率为 0.5 m/s 时,非均匀粒径的油滴发生正向碰撞聚结的概率要大于均匀粒径的油滴,当接近速率从 0.16 m/s 提高至 0.8 m/s 时,非均匀粒径油滴发生正向碰撞聚结的概率大约增加了 17% [22]。

4. 油滴聚并特性及其规律在分子层面的研究

传统实验方法通常侧重于从宏观层面研究油滴聚并的规律,而分子动力学模拟则能够提供更加精细的微观视角,从原子和分子层面揭示油滴间的相互作用。因此,越来越多的研究者倾向于采用分子动力学模拟来探索相关的科学问题。例如,Shi P 通过研究阴离子、非离子、两性和双子表面活性剂在油/水界面上的微观行为,发现双子表面活性剂在降低界面张力方面优于其他三类表面活性剂,而阴离子表面活性剂的表现最差[23]。Jing J 则进一步探讨了阴离子表面活性剂 NaOl 与两性表面活性剂 CAB-35 在重质 O/W 乳状液中复配后的降粘效果及其机制。研究结果表明,当这两者按 1:2 比例复配时,降粘率可达到 94.65% ,表现出最佳的降粘效果[24]。Soheil A 通过调节表面活性剂浓度,研究了液桥形成过程中的表面活性剂分布特征,发现当表面活性剂浓度超过临界聚集浓度(CAC)时,随着液桥增大,大多数表面活性剂优先聚集到油滴表面,导致该区域的表面活性剂浓度增加[25]。Yang Y 则从温度变化的角度研究了 SDBS 单层膜的稳定性,结果显示,随着温度升高至 343 K ,油水界面处表面活性剂密度的重叠区域增大,SDBS 分子在油水界面形成的单分子膜变厚,从而提高了界面的稳定性和界面能[26]。此外,Zhang L 的研究指出,碱性表面活性物质与界面活性剂分子相互作用,通过协同作用使得界面膜更加紧密,显著降低了界面张力至超低水平[27]。在不同浓度碱的条件下,界面张力随着碱浓度的增加逐渐下降,随后略有回升,但整体变化幅度较小[28]。关于 HPAM 的应用,其主要作用是通过增加溶液的粘度和形成空间位阻来提升乳液的稳定性,从而抑制油滴的聚并。然而,由于 HPAM 的界面活性较弱且其吸附作用有限,因此对界面张力的影响较为微小[29]。胡晓娜等人进一步指出,含有甲基和磺酸大侧基团的聚合物能够提高分子链的刚性和耐剪切性,特别是在高温条件下,聚合物链段能够维持较长的有效长度,从而表现出更高的

黏度[30]。

5. 总结

随着三元复合驱采油技术的广泛应用,油田采出水中油滴的浓度逐渐增高,导致处理难度加大。研究油滴聚并的机理及其物理化学特性,不仅是提高处理效率的关键,也是实现采出水资源化和再利用的基础。通过深入剖析油滴聚并过程中不同因素的作用机制,特别是驱油剂浓度、温度、盐度、pH 值等环境变量对油滴聚集行为的影响,可以为油田采出水处理技术提供精准的调控依据。进而,优化油滴聚并的过程参数,有助于提高油田废水的处理效果,减少二次污染的产生,推动油田环保技术的革新。长期来看,这一研究方向对提升油田的绿色可持续发展具有深远的战略意义,能够促进资源高效利用,同时降低生产成本和环境风险,为油田的长远运营提供有力保障。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目“驱油剂作用下水中油滴的微观聚结行为及聚并机理研究”, YKJCX2420143; 重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目“复杂化学剂作用下多尺度油滴破裂和聚并的动力学模型与模拟”, 2022NSCQ-LZX0205。

参考文献

- [1] 程杰成, 廖广志, 杨振宇, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J]. 大庆石油地质与开发, 2001(2): 46-49+137.
- [2] 韩晓瑜, 魏立新, 刘文杰, 等. 驱油剂对无碱三元复合驱采出液乳化稳定性影响[J]. 应用化工, 2024, 53(8): 1817-1822+1826.
- [3] 黄斌, 王晨, 傅程, 等. 三元复合驱采出水处理研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(10): 4238-4247.
- [4] 孙浩, 李晓庆, 刘丹丹, 等. 三元复合驱采出水油/水界面稳定性机理研究——沥青质的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4): 791-801.
- [5] 周勇, 郭靖, 梁家豪, 等. 三元复合驱含油污水处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(8): 7-10.
- [6] 张威, 黄斌, 王莹莹, 等. 三元复合驱采出水处理技术研究进展[J]. 化工环保, 2017, 37(2): 152-158.
- [7] 张大伟, 陈忠喜, 任璐, 等. 三元复合驱采出水性质及稳定性机理研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(1): 104-111.
- [8] Zhou, Q., Sun, Y., Yi, S., Wang, K. and Luo, G. (2016) Investigation of Droplet Coalescence in Nanoparticle Suspensions by a Microfluidic Collision Experiment. *Soft Matter*, **12**, 1674-1682. <https://doi.org/10.1039/c5sm02924d>
- [9] Dudek, M., Fernandes, D., Helno Herø, E. and Øye, G. (2020) Microfluidic Method for Determining Drop-Drop Coalescence and Contact Times in Flow. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **586**, Article ID: 124265. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124265>
- [10] Bera, B., Khazal, R. and Schroën, K. (2021) Coalescence Dynamics in Oil-in-Water Emulsions at Elevated Temperatures. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 10990. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89919-5>
- [11] Yoon, Y., Borrell, M., Park, C.C. and Leal, L.G. (2005) Viscosity Ratio Effects on the Coalescence of Two Equal-Sized Drops in a Two-Dimensional Linear Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **525**, 355-379. <https://doi.org/10.1017/s0022112004002824>
- [12] Sainath, K. and Ghosh, P. (2013) Stabilization of Silicone Oil-in-Water Emulsions by Ionic Surfactant and Electrolytes: The Role of Adsorption and Electric Charge at the Interface. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**, 15808-15816. <https://doi.org/10.1021/ie401490c>
- [13] Dudek, M., Bertheussen, A., Dumaire, T. and Øye, G. (2018) Microfluidic Tools for Studying Coalescence of Crude Oil Droplets in Produced Water. *Chemical Engineering Science*, **191**, 448-458. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.006>
- [14] Narayan, S., Metaxas, A.E., Bachnak, R., Neumiller, T. and Dutcher, C.S. (2020) Zooming in on the Role of Surfactants in Droplet Coalescence at the Macroscale and Microscale. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **50**, Article ID: 101385. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.08.010>
- [15] Dong, T., Weheliye, W.H., Chausset, P. and Angeli, P. (2017) An Experimental Study on the Drop/Interface Partial Coalescence with Surfactants. *Physics of Fluids*, **29**, Article ID: 102101. <https://doi.org/10.1063/1.4985997>

-
- [16] Hu, D., Zhang, Q., Yang, C., *et al.* (2018) Process Diagnosis of Coalescence Separation of Oil-in-Water Emulsions—Two Case Studies. *Journal of Dispersion Science & Technology*, **40**, 745-755.
- [17] 王宇岑, 国丽萍. 液-液两相流的共直线液滴运动聚结特性[J]. 油气储运, 2018, 37(8): 891-896.
- [18] 王智慧, 廖锐全, 程阳, 等. 重力场中油滴运动速度及聚合规律研究[J]. 中国测试, 2024, 50(6): 10-19.
- [19] Liu, Z., Liang, C., Ma, N., Wei, S., Li, T. and Sun, Q. (2025) Research on the Binary Droplet Collision of Coalescence, Separation and Breakup Processes of Water in Oil Emulsions Based on Fluid Dynamics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **164**, Article ID: 108891. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108891>
- [20] Orme, M. (1997) Experiments on Droplet Collisions, Bounce, Coalescence and Disruption. *Progress in Energy and Combustion Science*, **23**, 65-79. [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(97\)00005-1](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(97)00005-1)
- [21] 张静, 杨光, 菅爱博, 等. 基于水下凹壁面上双油滴撞壁-聚并过程分析[J]. 化工学报, 2025, 76(3): 1029-1039.
- [22] 吴波, 陈小元, 王委, 等. 基于流体微团的油滴碰撞聚结过程研究[J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(1): 95-103.
- [23] Shi, P., Zhang, H., Lin, L., Song, C., Chen, Q. and Li, Z. (2017) Molecular Dynamics Simulation of Four Typical Surfactants at Oil/Water Interface. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **39**, 1258-1265. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1392319>
- [24] Jing, J., Shan, Y., Wang, N., Sun, J., Jiang, C., Cao, L., *et al.* (2024) The Influencing Factors and Mechanism of Anionic and Zwitterionic Surfactant on Viscosity Reduction in Heavy O/W Emulsions. *ACS Omega*, **9**, 39259-39276. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07009>
- [25] Arbabi, S., Deuar, P., Denys, M., Bennacer, R., Che, Z. and Theodorakis, P.E. (2023) Molecular Dynamics Simulation of the Coalescence of Surfactant-Laden Droplets. *Soft Matter*, **19**, 8070-8080. <https://doi.org/10.1039/d3sm01046e>
- [26] Yang, Y., Ma, Z., Xia, F. and Li, X. (2020) Adsorption Behavior of Oil-Displacing Surfactant at Oil/Water Interface: Molecular Simulation and Experimental. *Journal of Water Process Engineering*, **36**, Article ID: 101292. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101292>
- [27] Li, G., Zhou, Z., Fan, J., Zhang, F., Zhao, J., Zhang, Z., *et al.* (2024) Study on Microscopic Oil Displacement Mechanism of Alkaline-Surfactant-Polymer Ternary Flooding. *Materials*, **17**, Article No. 4457. <https://doi.org/10.3390/ma17184457>
- [28] Nie, C., Han, G., Ni, J., Guan, S., Du, H., Zhang, Y., *et al.* (2021) Stability Dynamic Characteristic of Oil-in-Water Emulsion from Alkali-Surfactant-Polymer Flooding. *ACS Omega*, **6**, 19058-19066. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02367>
- [29] Sun, X., Wang, Q., Yang, X., Zhang, X., Chen, X. and Zhao, D. (2024) Effects of Polymer, Surfactant and Solid Particle on the Stability of Wastewater Produced from Surfactant/Polymer Flooding. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **698**, Article ID: 134419. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134419>
- [30] 胡晓娜, 伊卓, 刘希, 等. 基于分子模拟的丙烯酰胺/丙烯酸钠/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸钠共聚物耐温机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(1): 157-164.