

柠檬烯纳米乳液驱油剂在油藏中的增产机制

李建阁^{a,b,c}

(中国石油大庆油田有限责任公司 a. 采油工艺研究院; b. 黑龙江省油气藏增产增注重点实验室; c. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163453)

摘要: 结合实验与理论计算, 分析纳米乳液的组装结构和稳定性, 通过能量最小化结构优化和分子动力学模拟, 考察柠檬烯纳米乳液在油藏沥青质和胶质中的行为, 探讨柠檬烯纳米乳液驱油剂的作用机制。结果表明: 柠檬烯分子的强疏水性和非平面结构在驱油过程中发挥关键作用, 其疏水特性促进表面活性剂组装成高度稳定且尺寸较小的纳米胶束, 从而有效减少地层对纳米乳液的吸附损失, 扩大波及体积。此外, 柠檬烯的非平面结构使其在分子间不规则碰撞中灵活旋转, 能够深入渗透至稠油中的沥青质和胶质, 并通过 $\pi-\pi$ 相互作用解离这些组分的缔合作用, 降低稠油黏度, 增强流动性和剥离性能, 从而显著提高原油采收率。这些发现为深入理解纳米乳液驱油剂的增产机制提供了新视角, 并为开发更高效的纳米驱油剂提供了重要参考。

关键词: 分子动力学; 纳米乳液; 柠檬烯; 驱油剂; 沥青质; 降黏; 油藏; 采收率

中图分类号: TE 357.46 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24141



Enhanced Oil Recovery Mechanism of Limonene Nanoemulsion-based Oil Recovery Agent in Reservoirs

LI Jiange^{a,b,c}

(a. Production Technology Institute; b. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Stimulation; c. National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Daqing Oilfield Co., Ltd, Daqing 163453, China)

Abstract: Combined with experiment and theoretical calculation, the assembly structure and stability of nanoemulsion were analyzed. Through structural optimization of energy minimization and molecular dynamics simulation, the behavior of limonene nanoemulsion in asphaltene and resin of reservoir was investigated, and the stimulation mechanism of limonene nanoemulsion oil displacement agent was discussed. The results indicate that the strong hydrophobicity and non-planar structure of limonene molecules play a crucial role in the oil recovery process. Its hydrophobic properties promote the surfactant to assemble into highly stable and small-sized nano-micelles, thus effectively reducing the adsorption loss of the stratum to the nanoemulsion in the reservoir and expanding the sweep volume. Additionally, the non-planar structure of limonene allows it to rotate flexibly during irregular molecular collisions, enabling deep penetration into the asphaltene and resin within heavy oil. Through $\pi-\pi$ interactions, limonene disrupts the aggregation of these components, reducing the viscosity of heavy oil, enhancing fluidity and detachment properties, and thereby significantly improving oil recovery rates. These findings offer new insights into the enhanced oil recovery mechanisms of nanoemulsion-based agents and provide important references for the

收稿日期: 2024-08-03

作者简介: 李建阁(1968—), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为油田化学剂研发、采油工程产品质量检测评价等。

引文格式: 李建阁. 柠檬烯纳米乳液驱油剂在油藏中的增产机制[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):483-489.

development of more efficient nanoemulsion-based oil recovery agents.

Keywords: molecular dynamics; nanoemulsion; limonene; oil recovery agent; asphaltene; viscosity reduction; reservoir; recovery ratio

石油作为重要的战略资源,对经济和军事发展至关重要。然而,我国石油消费长期高度依赖进口,进口量高达70%,严重威胁国家的能源安全^[1]。为了应对这一问题,需加大油气田的高效勘探与开发力度^[2]。而我国大部分油田属于渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗或特低渗油田^[3]。这些油田储量巨大,是常规油气开发的重要接替资源^[4]。由于地层压力迅速下降,在二次开采阶段,低渗油田面临的主要问题是注水压力持续上升和吸水能力持续下降,进而导致生产能力急剧下滑,注水量、产油量、开采速度与采收率均处于较低水平^[5]。目前采收率无法进一步提高的根本原因在于石油储层中的缝隙和孔道尺寸小,导致毛细管力大,注水难度增加,常规化学驱技术难以波及这些缝隙和孔道,大量剩余油残留其中,影响油田的整体采收率^[6]。此外,由于储层中含有胶质、沥青质以及蜡质等分子量大、高黏度物质,这些物质在遇到极小的喉道时易造成堵塞,进一步增加注水难度,进一步降低采收率^[7-8]。面对因微小孔道结构导致的低采油效率问题,常规的三次采油技术已显示出局限性,难以达到预期效果。近年,研究人员利用纳米技术替代传统的聚合物与表面活性剂驱油剂,借助纳米驱油剂高比表面积和高表面能的独特物理化学特性^[9-11],降低油水界面张力,增强原油的流动性,从而提高采收效率^[12]。尽管通常认为纳米胶束的小尺寸是提高采收率的关键,但其深层次作用机制仍不明确。因此,深入研究纳米乳液的增产机制,对进一步优化纳米驱油剂配方并提升低渗油藏的采收率有重要意义。

纳米乳液不仅在降低界面张力和改变润湿性方面表现出色,还能更有效地回收剩余油,从而显著提高采收率。研究表明:使用纳米乳液驱油可将总采收率提高70%,相比于水驱,纳米乳液驱油能将剩余油饱和度降低30%^[13]。2018—2020年,长庆油田研发并应用1种基于纳米二氧化硅的新型纳米驱油剂 iNanoW1.0^[14-15],该驱油剂通过改变水分子之间的氢键相互作用,减小水分子的键角,形成“纳米水”,从而提高水的渗透性;此外,美国哈里伯顿公司推出了1款基于柠檬烯的纳米乳液驱油剂,该产品具有“渗析、解堵、驱油”的效果,并与压裂液联用,可显著提高采收率^[16]。由于两亲性表活剂的尺寸更小,

也无法有效进入储层中的微纳孔道,传统观点认为,纳米乳液的小尺寸效应并非是其提高采收率的唯一机制。柠檬烯纳米乳液驱油剂是1种高效、环保的新型驱油剂,具有优良的界面性能、润湿性能、耐温抗盐性能,以及显著的驱油效果。鉴于此,配制柠檬烯纳米乳液,结合实验与理论计算的方法,探讨柠檬烯纳米乳液驱油剂的作用机理,以期改进纳米乳液驱油剂的设计和开发提供科学依据。

1 实验与动力学模拟

1.1 试剂

柠檬烯,质量分数为95%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;烷基聚氧乙烯表面活性剂,质量分数为98%,济宁三石生物科技有限公司;月桂醇醚硫酸钠(AES),质量分数为70%,山东优索化工科技有限公司;原油,大庆油田某区块;水,去离子水,实验室自制。

1.2 实验方法

1.2.1 柠檬烯纳米驱油剂的配制

将6.0 g柠檬烯与24.0 g烷基聚氧乙烯表面活性剂混合均匀,再将其缓慢倒入70.0 g水中搅拌,搅拌0.5~1.0 h,得到均一稳定的透明纳米驱油剂。

1.2.2 柠檬烯纳米驱油剂粒径的测试

将配制的纳米驱油剂稀释100倍,进一步配制成固含量为0.3%(质量分数,下同)的纳米驱油剂。使用红色激光束照射纳米乳液驱油剂,观察“丁达尔效应”。利用高精度粒径与ZETA电位测定仪(NanoBrook 90Plus PALS,美国Brookhaven公司)的动态光散射(dynamic light scattering, DLS)测定0.3%纳米驱油剂的粒径分布。

1.2.3 纳米胶束自组装的动力学模拟

将13个烷基聚氧乙烯表面活性剂分子粗粒化模型和987个水分子粗粒化模型,置于尺寸为 $10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA}$ 的无定形单元(amorphous cell),通过Mesocite模块对其进行能量最小化结构优化;在恒定的粒子数、压强和温度(constant number of particles, pressure, and temperature, NPT)条件下,进行1 000 ps的动力学模拟,模拟软件为Materials Studio 2020。设置模拟参数:截断半径 20.0 \AA ,模拟步长10 fs,模拟步数100 000步,气压 $1 \times 10^{-4} \text{ GPa}$ (即

1 atm), 温度控制选择 Berendsen 算法。模拟结束, 分析表面活性剂分子和水分子在 (0, 1, 1) 方向的相对空间密度分布。

将 10 个烷基聚氧乙烯醚类表面活性剂分子粗粒化模型、14 个柠檬烯有机分子粗粒化模型和 987 个水分子粗粒化模型, 置于尺寸为 $10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA}$ 的无定形单元, 模拟及分析方法同上。

1.2.4 纳米乳液吸附损失测试

将质量分数均为 0.3% 的纳米驱油剂和 AES 表面活性剂分别与大庆油田岩心块粉碎颗粒按照固液质量比为 1:15 加入到 100 mL 锥形瓶中。将瓶口套上封口膜后, 再将锥形瓶置于摇床上恒速震荡 24 h。震荡结束, 取出锥形瓶, 倒出上层液, 并在离心机中以 3 000 r/min 离心 3 min, 收集上层清液。使用表面张力仪 (Tensiometer K9, 德国 Kruss 公司), 通过铂金板法测量表面张力的变化。将铂金板垂直放置, 下边缘轻微浸入液体形成稳定的液膜, 测量铂金板离开液面的最大拉力, 即为液体的表面张力。

1.2.5 小分子降黏实验

取大庆油田某区块在 22 °C 时不可流动的原油, 称取 3.0 g 原油, 向其中加入 0.45 g 甲苯或柠檬烯, 充分搅拌均匀后加入至 5 mL 的针筒, 以滴下第一滴油的时间为起点, 计算 2 min 内流出原油的质量, 以此表示稠油降黏效果。

1.2.6 稠油解缔合分子动力学模拟

构建 1 个由胶质和沥青质组成的稠油体系, 并进一步构建分别加入甲苯或柠檬烯分子的解缔合体系, 对上述 3 种体系进行分子动力学模拟。每种体系的分子组成如表 1。

表 1 稠油解缔合体系中分子的种类及数量

Tab. 1 Types and numbers of molecules in the heavy oil disassociation system

体系	沥青质分子	胶质分子	解缔合分子
稠油	3×5	6×10	0
稠油+甲苯	3×5	6×10	甲苯 20
稠油+柠檬烯	3×5	6×10	柠檬烯 20

采用 Materials Studio 2020 软件对“稠油”、“稠油+甲苯”以及“稠油+柠檬烯”体系分别进行分子动力学模拟, 使用的模块为 Forcite 分子动力学模块, 采用的力场为 COMPASS II 力场。首先, 通过 Amorphous cell 模块构建尺寸为 $37 \text{ \AA} \times 37 \text{ \AA} \times 37 \text{ \AA}$ 的盒子, 向其中放入 3 种沥青质分子 (每种放入 5 个) 和 6 种胶质分子 (每种放入 10 个) 以及 20 个解缔合分子。所有分子结构如图 1。

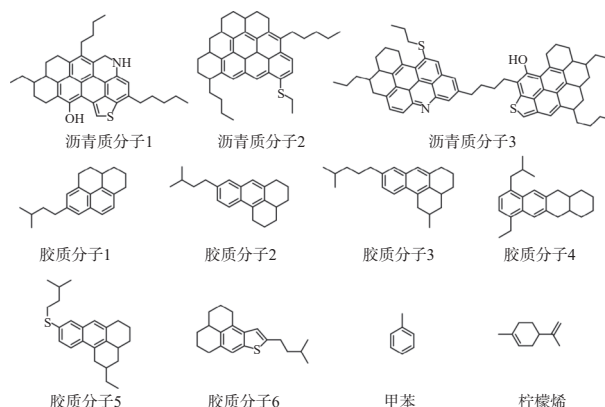


图1 动力学模拟体系中沥青质、胶质、甲苯及柠檬烯分子的结构

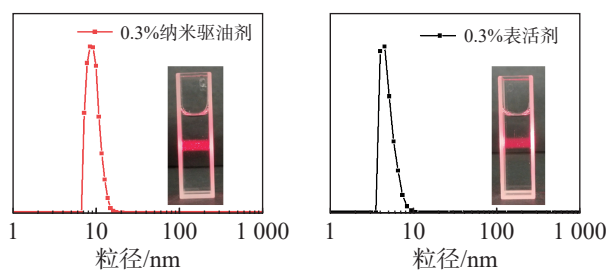
Fig. 1 Molecular structure of asphaltene, resin, toluene and limonene in the molecular dynamics simulation system

使用 Forcite calculation 模块对体系进行最小能量优化后, 运行 500 ps 的 NPT 分子动力学模拟, 并采用 Berendsen 温控算法, 直至体系达到平衡状态。设置模拟参数为: 截断半径 15.5 \AA , 模拟步长 1 fs, 气压 $1 \times 10^{-4} \text{ GPa}$ (即 1 atm)。用 Forcite analyze 模块分析体系的黏度、自扩散系数以及分子之间的径向分布函数 $g(r)$ 。

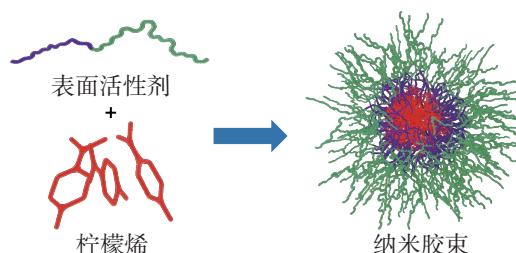
2 结果与讨论

2.1 纳米乳液驱油剂自组装结构

配制的纳米乳液驱油剂粒径表征结果及纳米胶束组装结构如图 2。



(a) “丁达尔效应”及粒径分布



(b) 纳米胶束组装结构示意图

图2 自组装结构粒径表征及其示意图

Fig. 2 Characterization of self-assembled structure particle size and its schematic diagram

由图2(a)可见,使用红色激光束照射纳米乳液驱油剂,出现明显的“丁达尔效应”,表明其中存在微小颗粒。通过DLS测定纳米乳液驱油剂的粒径小于20 nm,这与通常胶束的粒径结果相似^[17];相反,当体系没有添加柠檬烯时,DLS测得的粒径为4 nm,体系的“丁达尔效应”较弱。以上结果表明,仅使用表面活性剂难以形成稳定的纳米胶束结构,而添加柠檬烯分子,强疏水的柠檬烯能够与表面活性剂的疏水尾部形成疏水-疏水相互作用,促进其与表面活性剂的组装,共同形成稳定的复合纳米胶束(图2(b))。

为进一步验证上述假设,使用分子动力学模拟比较2种体系在水中的自组装行为,并将模拟方法在文献^[18]的基础上进行改进,其分子动力学模拟结果如图3,4。

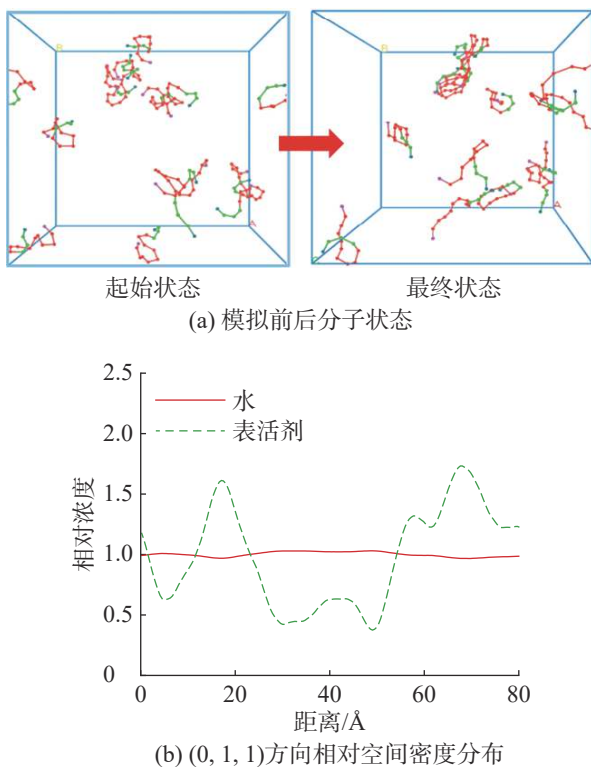


图3 表面活性剂在水中自组装的分子模拟结果(水分子未显示)
Fig. 3 Molecular simulation results of surfactant self-assembly in water (water molecules not shown)

由图3可看出:表面活性剂在水中的自组装处于动态平衡状态,分子在单分子分散和多分子聚集胶束之间不断动态转变,较难形成稳定的胶束,且平均粒径小于30 Å(3 nm)。这可能是由于该结构与分子尺寸相当,未能形成稳定的胶束,大部分表面活性剂分子为游离状态。由图4可看出:当体系添加强疏水分子柠檬烯后,通过疏水-疏水相互作用,柠檬

烯与表面活性剂发生疏水诱导自组装^[19],体系能够形成稳定的纳米胶束,尺寸大于50 Å(5 nm)。此外,表面活性剂和柠檬烯的相对空间密度分布曲线几乎完全重合,且最低空间密度接近0,符合形成纳米胶束的特征,表明表面活性剂与柠檬烯共同复合形成了稳定的纳米乳液。分子动力学模拟的结果与粒径结果一致,进一步证实了纳米驱油剂增产剂是由表面活性剂和柠檬烯自组装形成的稳定的纳米乳液。

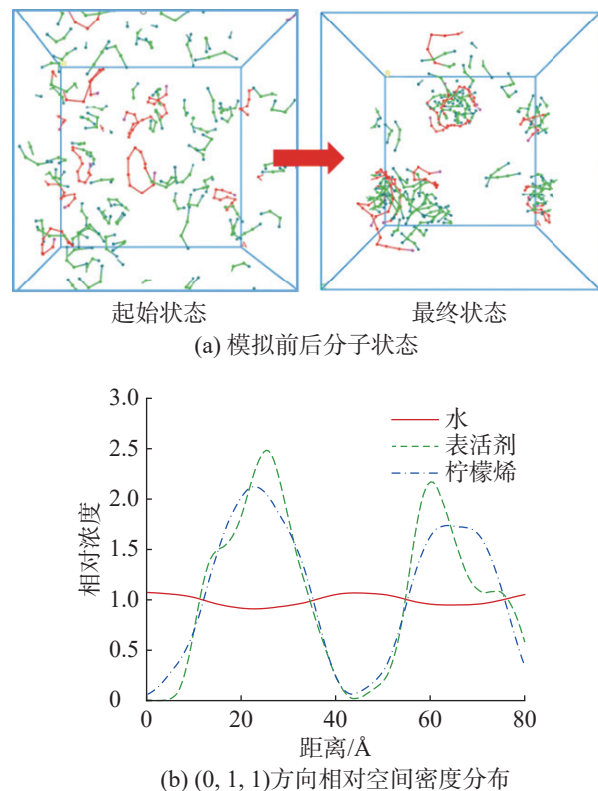


图4 纳米胶束在水中自组装的分子模拟结果(水分子未显示)

Fig. 4 Molecular simulation results of nanomicelle self-assembly in water (water molecules not shown)

2.2 纳米驱油剂的稳定性

由于引入强疏水性的小分子柠檬烯,纳米乳液的稳定性显著增强。尽管两性表面活性剂的分子尺寸更小,在水中的自组装过程处于动态平衡状态,即在单分子分散和多分子聚集形成的胶束之间不断转变,但仍难以形成稳定的胶束结构。当这些非稳态胶束渗透到储层时,储层环境会破坏这种平衡,导致表面活性剂分子吸附到储层岩石表面,从而降低其有效进入储层微纳孔道的能力^[20]。相比之下,柠檬烯与表面活性剂疏水尾部之间的强相互作用显著增强了纳米乳液的稳定性。当渗透扩散至储层时,储层难以破坏这种稳定的纳米乳液结构,因而减少了岩层中的吸附损失,使纳米乳液能够渗透到更深

更细的孔道。为比较纳米乳液与表面活性剂形成的胶束在储层条件下的粒径及稳定性,使用 DLS 测定常用驱油表面活性剂 AES 和纳米乳液在清水及大庆油田葡 48 区 06 返排液(矿化度 13 798 mg/L, 硬度 7 740.7 mg/L)中的胶束粒径,结果如图 5。

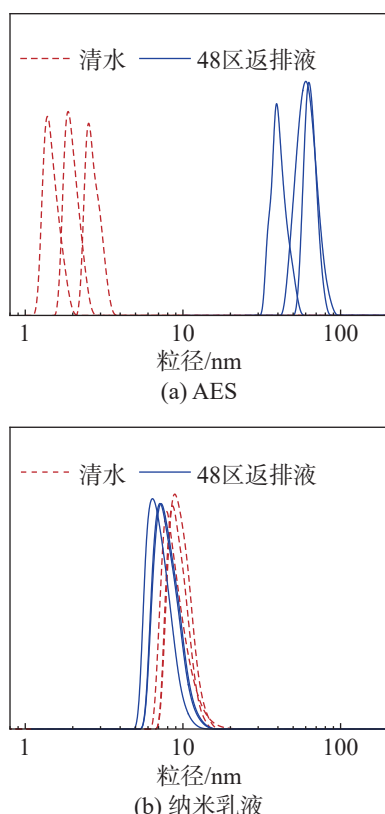
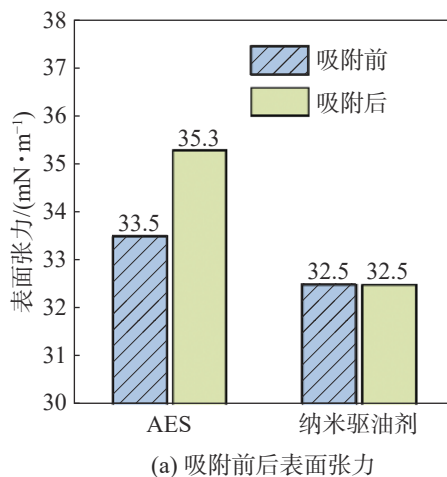


图5 清水与返排液中粒径尺寸变化

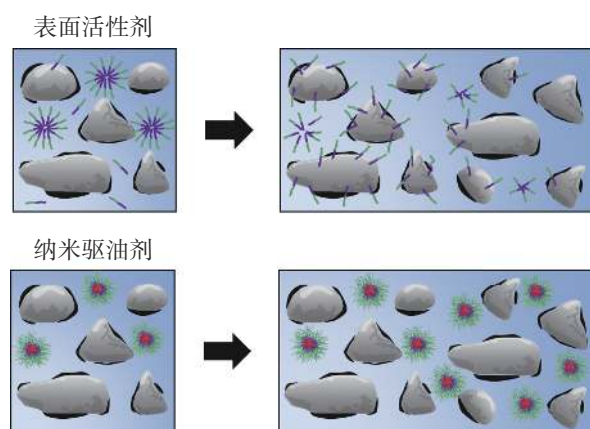
Fig. 5 Particle size variation in pure water and flowback fluid

由图 5 可见: 清水中, AES 的粒径小于 3 nm; 储层条件下(如压裂返排液中), 无机盐的存在会影响 AES 的亲疏水性, 导致其形成大于 50 nm 的聚集体。相比之下, 纳米乳液的粒径几乎没有变化, 验证了其高度稳定。

进一步通过油砂吸附实验验证纳米乳液的稳定性, 实验结果如图 6。由图 6 可看出: AES 与油砂接触后, 其表面张力从初始的 33.5 mN/m 上升至 35.3 mN/m, 表明表面活性剂在通过油砂层时存在吸附损失; 纳米乳液的表面张力保持不变, 表明其具有更高的稳定性, 经过油砂层时几乎没有吸附损失。上述结果表明, 强疏水性的柠檬烯分子可显著增强纳米乳液的组装稳定性, 这种稳定性的增强不仅减少了纳米乳液与储层岩石的相互作用, 还降低了吸附损失, 使纳米乳液能够渗透到更深、更细的孔道, 从而扩大波及体积。



(a) 吸附前后表面张力



(b) 扩大波及效率示意图

图6 吸附损失实验结果与扩大波及效率示意图

Fig. 6 Experiment results of adsorption loss and schematic diagram of expanded sweep efficiency

2.3 柠檬烯降黏机制

纳米乳液的另一个重要功能是解堵降黏, 其中疏水小分子的降黏作用通过原油流动性实验进行评估, 小分子降黏实验结果如表 2。由表 2 可看出: 添加甲苯作为降黏剂后, 原本难以流动的稠油流动性得到增强, 在 2 min 内能够从针管中流出 0.93 g; 使用柠檬烯作为降黏剂时, 降黏效果显著提高, 在同样时间内流出量达到 1.26 g, 比使用甲苯提高了 36%; 柠檬烯的增强降黏效果源自其独特的分子结构, 但其深层次的降黏机制目前仍不清楚。

表 2 小分子降黏实验结果

Tab. 2 Experiment results of small molecule viscosity reduction

降黏分子(15%)	2 min流出的质量/g
无	0
甲苯	0.93
柠檬烯	1.26

原油主要由 4 种组分构成: 饱和质、芳香质、胶质和沥青质。其中, 胶质和沥青质是稠油重油的主

要组成部分, 沥青质是导致稠油重油黏度高的主要因素。为探究原有组分, 尤其是沥青质和胶质之间的相互作用, 以及纳米乳液驱油剂组分对原油的解缠结和剥离作用机理, 使用3种沥青质和6种胶质分子的平均模型构建稠油模型; 通过分别添加额外的甲苯分子和柠檬烯分子, 构建“稠油+甲苯”模型与“稠油+柠檬烯”模型(图7), 且对其进行动力学模拟, 模拟结果如图8。

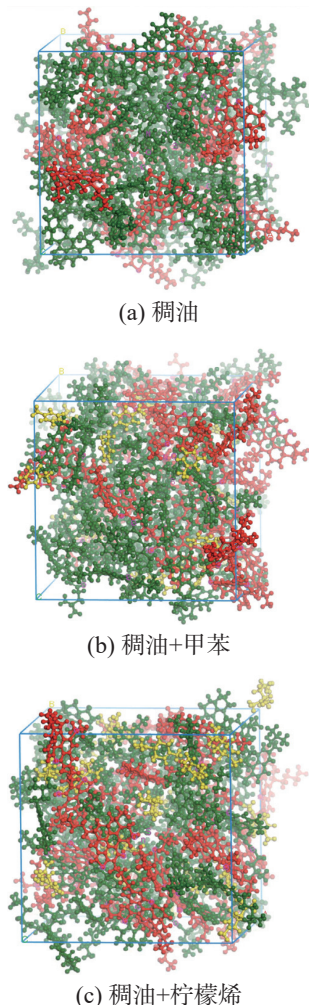


图7 稠油及降黏分子的分子动力学模拟无定形单元图

Fig. 7 Amorphous cell diagram of molecular dynamics simulation of heavy oil and viscosity-reducing molecules

自扩散系数(D)可表征体系的流动性^[21], 自扩散系数越大, 体系流动性越好。由图8(a)可看出: 稠油体系的自扩散系数为 $1.15 \times 10^{-3} \text{ \AA}^2/\text{ps}$, 添加甲苯和柠檬烯后, 自扩散系数分别提高至 2.5×10^{-3} , $3.47 \times 10^{-3} \text{ \AA}^2/\text{ps}$, 分别为原始稠油体系的2.1, 3.0倍; 由于自扩散系数的提高, 添加甲苯和柠檬烯后, 体系的黏度从 $1278 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 分别降低至 588 , $423 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 表明添加柠檬烯可显著提高稠油体系的流动性。

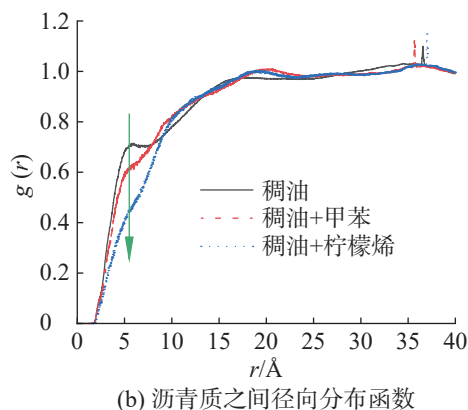
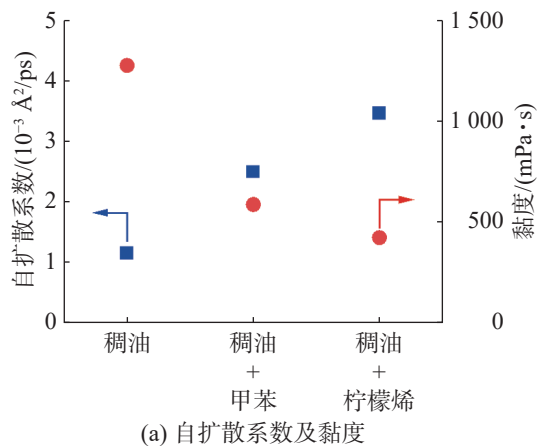


图8 稠油、稠油+甲苯以及稠油+柠檬烯的动力学模拟结果
Fig. 8 Molecular dynamics simulation results of heavy oil, heavy oil with toluene, and heavy oil with limonene

为探究甲苯与柠檬烯如何降低稠油的黏度, 通过径向分布函数 $g(r)$ 分析3种体系中沥青质分子之间的相互作用。由图8(b)可看出: 稠油体系中, 沥青质分子之间存在明显的缔合作用(沥青质-沥青质径向分布函数曲线在 5.5 \AA 处有明显的峰值), 这种缔合作用可能源自于沥青质分子之间的 $\pi-\pi$ 相互作用, 形成类似交联的结构, 进而降低稠油流动性^[22-23]; 在稠油中添加甲苯后, 沥青质-沥青质径向分布函数曲线在 5.5 \AA 峰的信号减弱, 表明甲苯的加入能够一定程度上减弱沥青质-沥青质之间的相互作用; 添加柠檬烯后, 径向分布函数中沥青质-沥青质之间在 5.5 \AA 处的峰几乎消失, 表明沥青质-沥青质之间的堆积几乎完全被破坏, 这可能是由于柠檬烯的非平面结构通过不规则运动帮助其进入缔合区域, 同时柠檬烯能够与沥青质分子形成强的 $\pi-\pi$ 相互作用, 解离原本稳定的沥青质分子间的 $\pi-\pi$ 相互作用, 从而破坏了沥青质间的缔合结构(图9)。这种缔合作用提高了稠油中各类分子的扩散系数, 降低黏度, 增强了原油的流动性, 结合纳米驱油剂扩大的波及体积, 进一步协同提升了原油的采收率。

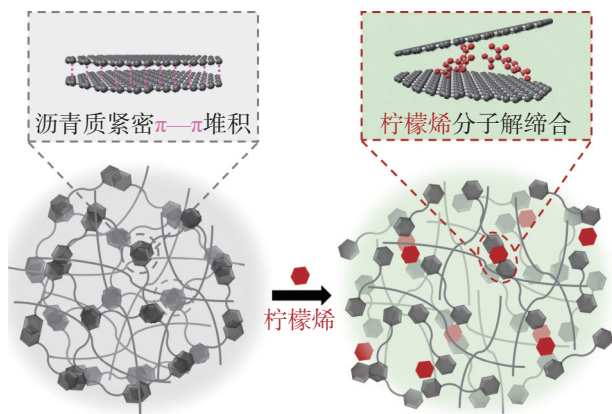


图9 柠檬烯插入稠油 π - π 堆积结构, 解开稠油缔合结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of limonene inserting into the π - π stacking structure and separating the association structure of heavy oil

3 结论

通过实验与理论计算相结合的方法, 研究纳米驱油剂的组装结构及其增产机制, 得到以下主要结论:

1) 强疏水性小分子能够促进表面活性剂组装成高度稳定且小尺寸的纳米乳液, 减少其与油藏中岩石的相互作用, 有效降低吸附损失并扩大波及体积, 小尺寸特性使其能够渗透进入微孔道, 进一步扩大影响范围。

2) 当纳米乳液遇到深层稠油时, 内部的有机小分子释放出来, 这些小分子的强疏水性和非平面结构有助于其渗透到稠油中, 并与沥青质和胶质组分形成新的 π - π 相互作用, 解离由 π - π 相互作用引起的缠结, 从而降低稠油的黏度; 进入油层后, 纳米乳液还能够促进稠油从岩层上的剥离和运移, 显著提高采收率。

非平面结构与强疏水性的小分子在提升纳米乳液驱油剂效果中发挥关键作用, 改进和发展具有非平面结构的疏水性小分子有利于进一步提高原油采收率。

参考文献:

- [1] 张垒垒. 特低渗透裂缝油藏表面活性剂增效驱油方法研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [2] 孙楠. 双碳政策驱动下油气高效、绿色、智慧勘探开发理论与技术: 2023 油气田勘探与开发国际会议 [J]. 断块油气田, 2023, 30(4):571.
- [3] 韩岷. 低渗透油田开发的难点与挖潜对策分析 [J]. 石化技术, 2019, 26(5):145-146.
- [4] 刘凯, 高振东, 王成俊, 等. 低渗透油藏渗吸采油技术研究进展 [J]. 油田化学, 2021, 38(4):747-753.
- [5] 张鑫, 李瑞明, 张永平. 超低渗透油藏注水采油技术探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(14):164-165.
- [6] 孙龙德, 伍晓林, 周万富, 等. 大庆油田化学驱提高采收

- 率技术 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):636-645.
- [7] 崔传智, 刘力军, 武改红, 等. 考虑沥青质沉积的储层压力场数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35):40-45.
- [8] 李永太, 范登洲, 史玮平, 等. 稠油胶质沥青质分散解堵剂性能评价与现场应用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2010, 25(2):51-53.
- [9] CHERAGHIAN G, HENDRANINGRAT L. A review on applications of nanotechnology in the enhanced oil recovery part B: effects of nanoparticles on flooding [J]. *International Nano Letters*, 2016, 6(1):1-10.
- [10] 袁俊秀, 王康. 纳米乳液驱油体系性能评价及驱油机理分析 [J]. 能源化工, 2016, 37(3):47-49.
- [11] 尚丹森, 伊卓, 刘希, 等. 低渗透油藏驱油用纳米流体的研究进展 [J]. 石油化工, 2023, 52(1):131-137.
- [12] NEGIN C, ALI S, XIE Q. Application of nanotechnology for enhancing oil recovery: a review [J]. *Petroleum*, 2016, 2(4):324-333.
- [13] MARIYATE J, BERA A. A critical review on selection of microemulsions or nanoemulsions for enhanced oil recovery [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 353:118791.
- [14] 罗健辉, 杨海恩, 肖沛文, 等. 纳米驱油技术理论与实践 [J]. 油田化学, 2020, 37(4):669-674.
- [15] 王小聪, 雷群, 肖沛文, 等. 现场水配制纳米驱油剂及其驱油机理 [J]. 石油学报, 2021, 42(3):350-357.
- [16] ESPINOSA M G, ZAVALA-ARRIAGA M, RAMIREZ-GONZÁLEZ P V. Enhanced oil recovery with D-limonene diluted in brine [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210:110110.
- [17] DENG Y, WANG H, FAN M, et al. Nanomicellar electrolyte to control release ions and reconstruct hydrogen bonding network for ultrastable high-energy-density Zn-Mn battery [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(36):20109-20120.
- [18] GOKHALE D, CHEN I, DOYLE P S. Coarse-grained molecular dynamics simulations of immobilized micelle systems and their interactions with hydrophobic molecules [J]. *Soft Matter*, 2022, 18(24):4625-4637.
- [19] JORDAN J H, GIBB B C. Molecular containers assembled through the hydrophobic effect [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(2):547-585.
- [20] BELHAJ A F, ELRAIES K A, MAHMOOD S M, et al. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, 10:125-137.
- [21] SZCZĘSNA-CHRZAN A, VOGLER M, YAN P, et al. Ionic conductivity, viscosity, and self-diffusion coefficients of novel imidazole salts for lithium-ion battery electrolytes [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(25):13483-13492.
- [22] MOUSAVI M, FINI E H. Non-covalent π -stacking interactions between asphaltene and porphyrin in bitumen [J]. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2020, 60(10):4856-4866.
- [23] ELKHATIB O, ZHANG B, GOUAL L. New insights into asphaltene structure and aggregation by high-resolution microscopy [J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(16):8692-8700.

责任编辑: 何莉