文章编号:1000-4092(2021)01-184-06

纳米流体强化驱油机理研究进展*

张景楠[1,2],田　磊[3],张红卫[1]

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院,陕西 西安 710000;2. 陕西省油气田特种增产技术重点实验室,西安石油大学,陕西 西安 710000;3. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要:纳米流体强化驱油技术对于降低石油开采成本和提高石油采收率具有十分重要的意义。关于纳米流体强化驱油机理的研究,近年来取得了一系列重要成果。本文重点阐述了关于纳米流体驱油机理的相关基础研究工作,在综合不同学术观点和研究成果的基础上归纳了纳米流体强化驱油的四种机理,据此指出在结构分离压力、岩石润湿性改变和油水界面张力降低的共同作用下使得纳米流体在驱油过程中表现出"卷起"与"扩散"的双重特征,从而具有强化驱油作用。最后指出纳米流体在提高石油采收率领域内将具有非常广阔的应用前景,但是对纳米流体的驱油效果以及影响因素还需进行大量的研究。此外,将纳米流体驱油与泡沫驱油有效结合是一种值得探索的提高石油采收率途径。图19参49

关键词:纳米流体;强化驱油;结构分离压力;润湿性;界面张力;综述

中图分类号:TB381:TE357　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.01.034

0　前言

纳米流体(nanofluid)的概念由Choi等提出,是指将由纳米尺度的金属或非金属颗粒分散到水、醇、油等介质中制备的均匀、稳定的新型流体[1]。纳米流体被广泛应用于热能工程[2]、质量输运[3]、辐射吸收与转换[4—8]等领域。近年来,在石油开采过程中,较低的采收率一直是制约油田发展的瓶颈[9];同时由于当前世界能源消费增速放缓,国际原油价格大幅下跌[10],降低石油开采成本已经迫在眉睫。正是在此双重背景下,从事提高石油采收率研究的学者们试图利用纳米流体作为驱油介质,将其注入油层中,通过纳米流体的强化驱油作用将更多的石油从油层中驱出[11—12]。关于纳米流体的强化驱油机理的基础研究已持续了较长时间。随着研究手段日趋先进和多样化,对纳米流体强化驱油机理的认识不断深入并取得了一系列的研究成果。郭东红[13]、秦文龙[14]、宫军[11]、Kazemzadeh[15]、Afeez[16]和詹迎青[17]等对纳米技术在石油开采领域的应用进行了综述,但没有完整阐述纳米流体的驱油机理。本文侧重于综述纳米流体驱油机理的基础研究,重点包含了不同学者对纳米流体强化驱油机理的学术观点及研究成果,同时为下一步研究方向做出展望。

1　"卷起(Rolling-up)"与"扩散(diffusional)"的双重驱油机理

早期用于驱油的纳米流体主要是具有纳米尺度胶束的表面活性剂溶液[18—19]。1988年,Kao等[20]首次揭示了表面活性剂胶束溶液的驱油机理。他们使用反射光微分干涉显微镜详细观测了在表面活性剂胶束溶液作用下油滴从固相表面分离的过程,首次发现在油滴分离过程中油滴–表面活性剂

* 收稿日期:2019-11-28;修回日期:2020-03-16。

基金项目:国家自然科学基金"二维材料摩擦中变形和边界的影响研究"(项目编号11602139),陕西省油气田特种增产技术重点实验室开放基金"纳米颗粒稳定型泡沫提高采收率机理研究"(项目编号KFJJ-TZ-2020-5),西安工程大学博士科研启动基金"多孔型混凝土渗流特征实验研究"(项目编号201933)。

作者简介:张景楠(1988—),男,讲师,上海大学上海市应用数学和力学研究所力学专业博士(2018),从事多孔介质渗流理论和基于纳米材料的提高石油采收率方面的研究,通讯地址:710000 陕西省西安市金花南路19号,E-mail:zjn305@163.com。

胶束溶液–固相表面之间形成的三相接触区域内呈现出两条明显的接触线。其中一条为常规的接触线，称为外接触线（outer line）；另一条为水和表面活性剂分子在油相和固相之间扩散形成的接触线，位于常规接触线前方，称为内接触线（inner line），如图 1 所示。他们认为，表面活性剂抑制表面张力使油滴卷起以及水与表面活性剂胶束溶液在接触线前方的油-固两相之间扩散，共同形成了“卷起（Rolling-up）”与“扩散（diffusional）”的双重驱油机理。

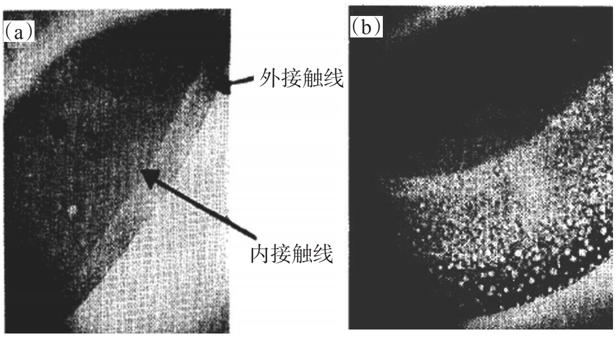

图 1　油滴在胶束溶液中从固相表面分离的过程[20]

此后，Kondiparty 等[21]分别使用不同浓度的 SiO_2 纳米颗粒分散液对固着在玻璃表面的油滴进行驱替，借助先进的光学技术对液滴的顶部和侧部同时进行观测，发现在油滴和固相表面之间形成了一层很薄的纳米流体膜，可以明显区分出两条不同的接触线（见图 2），而在没有纳米颗粒的流体中无法观察到内接触线。Zhang 等[22]在使用纳米流体驱替玻璃表面的油滴时也同样观察到两条接触线。上述实验结果进一步验证了 Kao 等提出的“卷起”与“扩散”的双重驱油机理。

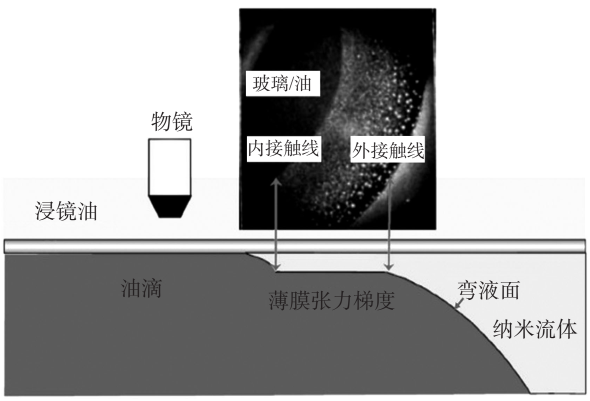

图 2　纳米流体驱油过程中的两条不同接触线[21]

2　结构分离压力驱油机理

关于润湿现象的研究一般都基于著名的 Young 方程[23]及其适用于粗糙表面的修正模型[24]，然而，Young 方程基于以下假设：液滴形状为球形，液滴与固相接触线处液体厚度为 0，液滴的球状轮廓始终不发生变形。但实验表明，纳米流体在固相表面的润湿现象与这一假设相矛盾，使得 Young 方程不再适用于描述纳米流体在固相表面的润湿现象[25]。

分离压力（disjoining pressure）的概念最早由 Derjaguin 于 1936 年提出[26]，后来，Starov 于 2010 年指出分离压力的命名是一种误导[27]，因为这种压力既包含分离也包含结合的作用。Starov 建议用“Derjaguin’s pressure”代替，因为 Derjaguin 作为分离压力的提出者，一方面是对 Derjaguin 的贡献给予肯定，另一方面也避免了使用分离压力造成的误导。但是由于历史原因，分离压力的概念一直被沿用，本文为了和大多数文献的概念保持一致性，仍然使用分离压力这一名称。

分离压力由分子力、静电力、结构力、空间力及其他力构成，结构分离压力即为分离压力的结构力部分，在纳米流体润湿扩散过程中起着主导作用[27]。Trokhymchuk 等[28]基于 Ornstein-Zernike 方程[29]推导出了结构分离压力的解析表达式：

$$\begin{cases} \Pi_{st}(h) = \Pi_0 \cos(\omega h + \varphi_2) e^{-\kappa h} + \Pi_1 e^{-\delta(h-d)} & h \geqslant d \\ \Pi_{st}(h) = -p_s & 0 \leqslant h \leqslant d \end{cases} \tag{1}$$

式中，h 为薄膜的厚度；Π_0、Π_1、ω、φ_2、κ 是与纳米颗粒体积分数有关的系数；δ 为短程衰减系数；d 为纳米颗粒的直径；p_s 为体积渗透压。

Wasan 等[30]使用反射光数字视频显微镜观察到了纳米颗粒在纳米流体–气泡–固相表面之间形成的三相接触楔形区域内的自组装现象（structuring phenomenon），如图 3 和图 4 所示。在此基础上进一步研究了纳米流体驱替玻璃表面固着油滴的动态过程，如图 5 所示。在驱替过程中同样形成了两条接触线，一条为油滴、固相表面和胶束溶液之间形成的接触线（outer line），另一条为油滴、固相表面和液体薄膜之间形成的接触线（inner line），液体薄膜的厚度随着扩散时间的延长而增加，内接触线的收

缩速率大于外接触线的收缩速率。最终油滴在涟漪状的水基薄膜作用下与玻璃表面完全脱离。

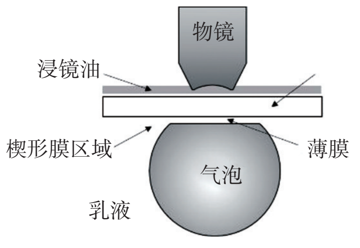

图3 Wasan等使用的实验装置示意图[30]

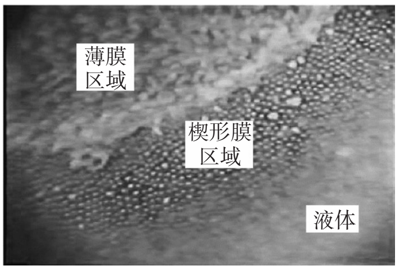

图4 三相接触区域纳米颗粒的自组装现象[30]

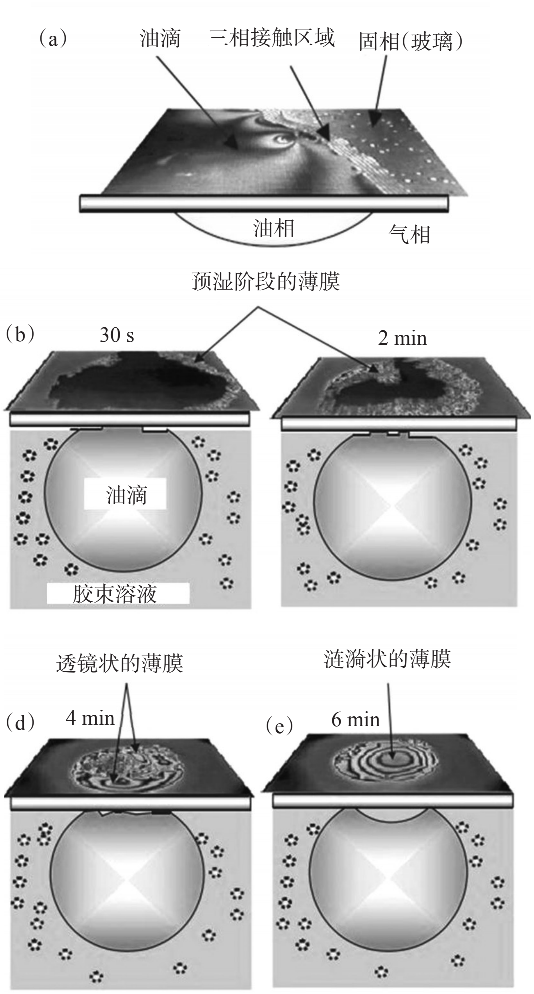

图5 固着在玻璃表面的油滴被驱替的动态过程[30]

Wasan等[22]据此提出了一种新的纳米流体驱油机理，即纳米颗粒在三相接触楔形区域内自发有序排列，产生结构分离压力，在结构分离压力作用下纳米流体薄膜不断向油滴与固相表面接触区域的中心扩散，最终使油滴被驱离（见图6）。

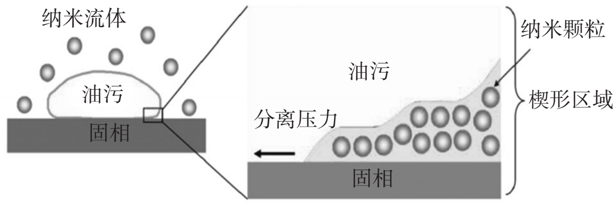

图6 结构分离压力驱油作用示意图[22]

Chengara等[31]从理论上分析了结构分离压力的驱油作用，讨论了纳米颗粒尺寸、浓度、分散性等参数对驱油效果的影响。结果表明，由于纳米颗粒有序排列形成的结构分离压力长期存在且具有较大的量级，其作用远大于范德华力和静电力的作用，原油–固相–纳米流体三相接触线能够在结构分离压力作用下移动。

Nikolov等[32]使用SiO_2纳米流体驱替亲水型玻璃表面的油滴，直观观察到油滴和固相表面之间形成的纳米流体薄膜楔形区域内的分布以及自发分层现象（self-ordering/layering），如图7所示。该实验结果对纳米流体在结构分离压力作用下增强驱油效果的机理提供了更直观的认识。

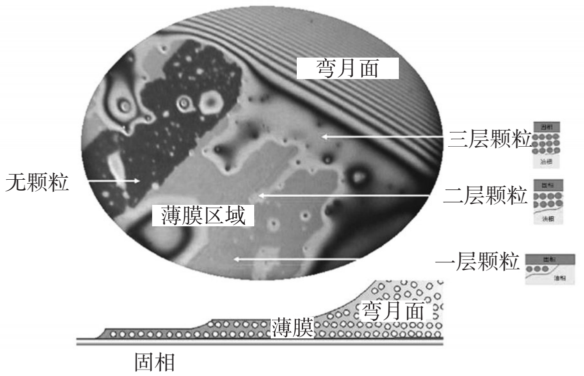

图7 SiO_2纳米颗粒分散液在固相表面的分层排列现象[32]

Zhang和Nikolov等[22]分别使用盐水和纳米流体驱替玻璃表面固着的油滴，驱替过程中使用反射光干涉显微镜监控三相接触线的移动。实验发现，在盐水中，接触线始终没有发生收缩，最终油滴没有被驱离，如图8所示。而在纳米流体中，圆形的接

触线快速收缩,收缩到一定程度时形成两条接触线,此时表明楔形膜形成,纳米流体薄膜在结构分离压力作用下开始扩散,如图9所示。该实验通过研究油滴被纳米流体从玻璃表面的驱离过程,再次验证了Wasan等提出的结构分离压力驱油机理。

此外,Sefiane等[33]采用氧化铝纳米颗粒分散在乙醇溶液中配制成不同浓度的纳米流体,将其注到涂有聚四氟乙烯的固相表面,研究纳米流体在疏水表面的动态扩散。实验发现当纳米流体质量分数由0增至1%时,接触线的移动速率随之增加;当质量分数大于1%时,接触线的移动速率略有减小或保持恒定(见图10)。他们认为,当纳米流体质量分数小于1%时,纳米流体的扩散作用是在结构分离压力的作用下发生的,当纳米流体质量分数大于1%时,黏性力起到了主导作用,导致接触线的移动速率略有减小或保持恒定。可见,结构分离压力在扩散过程中作用与否与纳米流体质量分数密切相关。

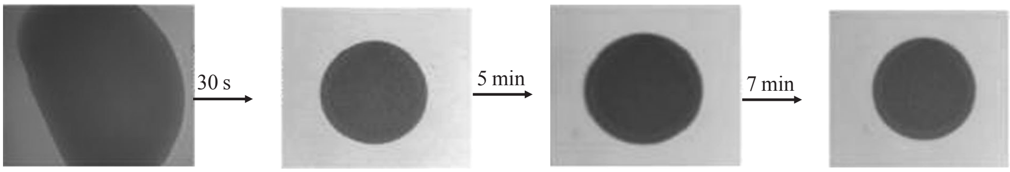

图8　玻璃表面的原油被盐水驱替的过程[22]

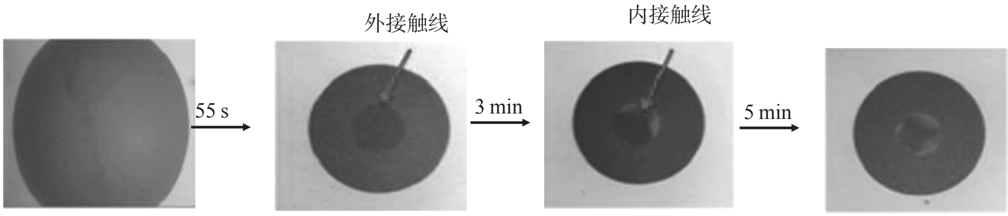

图9　玻璃表面的原油被纳米流体驱替的过程[22]

3　改变岩石润湿性与降低界面张力的驱油机理

纳米流体在多孔介质中不仅可以使岩石表面润湿性发生改变,还可以降低流体的界面张力。岩石润湿性的改变可以将油滴通过狭窄喉道的毛管阻力变为驱动力,降低界面张力可以使油滴更容易发生形变,从而有利于油滴通过较狭窄的喉道[34]。

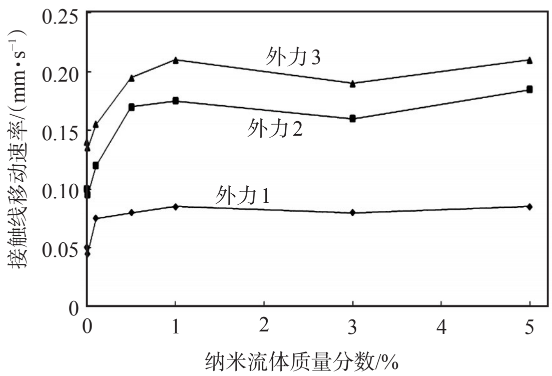

图10　3种外力作用下接触线移动速度随纳米流体质量分数的变化规律[33]

岩石润湿性的改变是纳米流体提高采收率的主要机理,纳米流体处理前后岩石润湿性明显发生改变,采收率也随之变化[35—37]。Moradi等[38]和Moslan等[39]均通过实验发现,纳米颗粒吸附在岩石表面,改变了岩石润湿性。Karimi等[40]使用ZrO_2纳米流体改变碳酸盐岩的润湿性,从而提高了石油采收率。ZrO_2纳米流体为碳酸盐岩的润湿反转剂,可以将碳酸盐岩从强亲油性改为强亲水性;ZrO_2纳米颗粒在岩心表面吸附,形成纳米尺度的带状物,纳米颗粒吸附后的表面润湿性发生明显改变;ZrO_2纳米流体对于碳酸盐岩油层的提高采收率效果明显。Onyekonwu等[41]分别使用疏油亲水型纳米颗粒(LHPN)、疏水亲油型纳米颗粒(HLPN)和中性润湿型纳米颗粒(NWPN),以C_2H_6O稀释液为分散剂,配制成不同的纳米流体。LHPN能将亲油性岩石表面变为亲水性,或者将亲水性表面变得更加亲水。HLPN能将亲水性岩石表面变为亲油性,或者将亲油性表面变得更加亲油。NWPN能将亲油性或亲水性表面变为中性润湿。NWPN和HLPN的驱油效果较好,因为这两种流体能改变岩石润湿性,从而

提高采收率。

宫军等[11]认为纳米颗粒具有很大的比表面积和表面能，能够降低油水界面张力。姚文鸿等[12]对纳米流体降低表/界面张力及改变岩石润湿性机理进行了实验验证。王瑶等[42]认为SiO_2纳米颗粒的加入可以很大程度降低油水界面张力，使黏附在孔道壁面的石油更容易被驱替，提高了驱替剂的洗油效率。纳米颗粒可以突破水化层及孔道表面附着的油层，在孔道壁面选择性吸附，形成微-纳米疏水结构，不仅能驱替原油，而且在后期的注水过程中也起到降压增注的效果。冯晓羽等[43]通过利用以TiO_2纳米颗粒为主的驱油体系进行了岩心驱油实验，认识到改性纳米TiO_2驱油剂的提高采收率机理主要在于改变岩石润湿性和降低油水界面张力两方面。Zargartalebi等[44]通过实验研究发现，表面活性剂溶液中添加纳米颗粒后可出现独特的界面行为，当表面活性剂浓度较低时（$<$1000 mg/L），界面张力明显下降，表面活性剂浓度较高时（$>$3000 mg/L），界面张力略有上升。但是，没有添加纳米颗粒的表面活性剂溶液则不会出现这种特征，如图11所示。添加纳米颗粒后，表面活性剂在岩石表面的吸附量明显不同（见图12），石油采收率明显提高（见图13）。

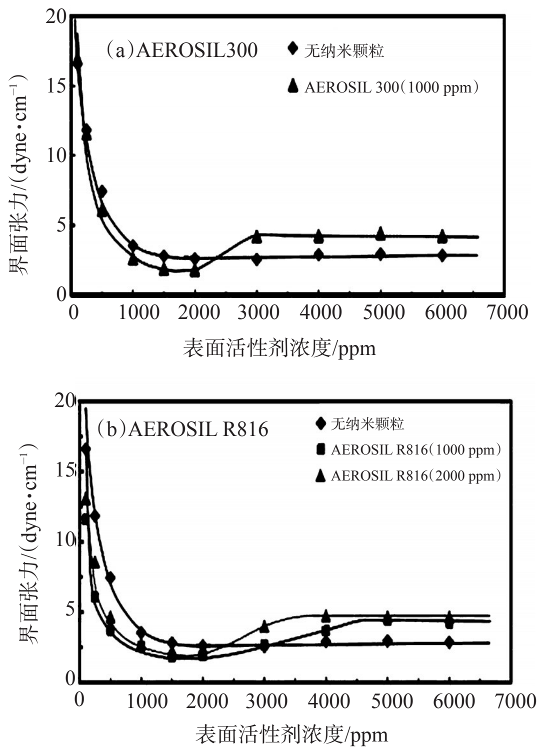

图11 油水界面张力随表面活性剂浓度的变化特征[44]

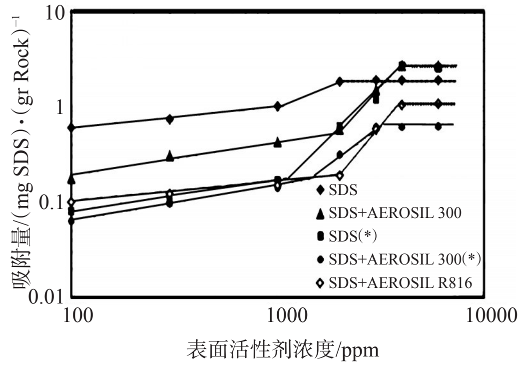

图12 表面活性剂在岩石表面的吸附量[44]

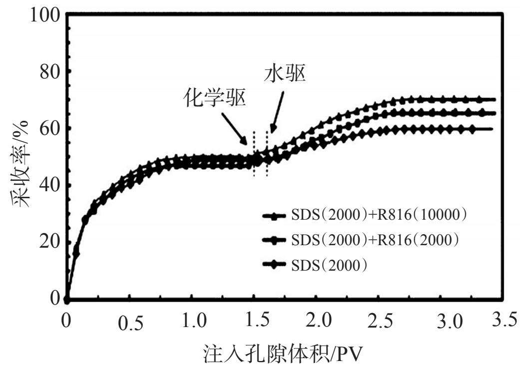

图13 纳米颗粒增强表面活性剂的驱油效果[44]

Dahkaee等[45]分别利用NiO、SiO_2和NiO/SiO_2（两种纳米颗粒复合）配制的3种纳米流体进行驱油实验，结果发现，当采收率提高时，油水界面张力减小的同时岩石润湿性也发生了改变。Hendraningrat、Amrae、Li Yuyang、贺丽鹏等学者在研究中也得出相似的结果[46—49]。可见，岩石润湿性改变和油水界面张力减小的共同作用使纳米流体表现出强化驱油作用。

4 结语

综上所述，目前主要形成了"卷起"与"扩散"的双重作用、结构分离压力作用、改变岩石润湿性和降低油水界面张力等四种纳米流体驱油机理。上述机理中，Wasan和Nikolov等提出的结构分离压力作用机理从力学角度解释了纳米流体的驱油作用，受到了较高的关注度。改变岩石润湿性和降低油水界面张力是客观存在的事实。"卷起"与"扩散"是纳米流体驱油过程中表现出的直观现象。因此，纳米流体强化驱油机理可归因于结构分离压力、岩石润湿性改变和油水界面张力降低等三者的共同作

用。在这三种作用下,纳米流体驱油过程中表现出"卷起"与"扩散"的双重特征。

尽管目前对纳米流体的驱油机理已取得初步认识,但是还存在许多难点和疑问,例如结构分离压力与岩石润湿性改变和油水界面张力降低的内在关系尚不清楚,不同类型和不同浓度的纳米流体的驱油效果差异较大。因此对纳米流体的驱油效果以及影响因素还需进行大量的研究,一方面使得对纳米流体驱油机理的认识更加深入和完善,另一方面也为纳米流体驱油技术的规模化现场应用奠定基础。由于纳米流体相对低廉的成本和绿色无污染的特性,纳米流体在提高石油采收率领域内将具有非常广阔的应用前景。此外,将纳米流体驱油与泡沫驱油有效结合是一种值得探索的提高石油采收率途径。

参考文献:

[1] CHOI U S, EASTMAN J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. ASME-Publications-Fed, 1995, 23(1):99—106.

[2] 张俊, 李苏巧, 彭林明, 等. 纳米流体强化气液传质研究进展[J].化工进展, 2013, 32(4):732—739.

[3] VEILLEUX J, COULOMBE S. A dispersion model of enhanced mass diffusion in nanofluids[J]. Chem Eng Sci, 2011, 66(11): 2377—2384.

[4] OTANICAR T P, PHELAN P E, TAYLOR R A, et al. Spatially varying extinction coefficient for direct absorption solar thermal collector optimization[J]. J Solar Energy Eng, 2011, 133(2): 024501.

[5] ROQUES-CARMES T, ALDEEK F, BALAN L, et al. Aqueous dispersions of core/shell CdSe/CdS quantum dots as nanofluids for electrowetting[J]. Colloid Surf A Physicochem Eng Asp, 2011, 377(1): 269—277.

[6] SOLANKI JN, MURTHY Z. Preparation of silver nanofluids with high electrical conductivity[J]. J Disper Sci Technol, 2011, 32(5):724—730.

[7] LEE J C, SEO H S, KIM Y J. Experimental study on the dielectric breakdown performance with magnetic field and concentrations of magnetic nanofluids [J]. Physics Procedia, 2012, 32(4): 327—334.

[8] KONAKANCHI H, VAJJHA R, MISRA D, et al. Electrical conductivity measurements of nanofluids and development of new correlations[J]. J Nanosci Nanotechnol, 2011, 11(8): 6788—6795.

[9] 计秉玉. 国内外油田提高采收率技术进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2012,33(1):111—117.

[10] 刘朝全, 姜学峰. 2018年国内外油气行业发展概述与2019年展望[J]. 国际石油经济, 2019,27(1):27—33.

[11] 宫军, 徐文波, 陶洪辉. 纳米液驱油技术研究现状[J]. 天然气工业, 2006, 26(5): 105—107.

[12] 姚文鸿, 俞力. 江苏油田纳米溶液驱油实验研究[J]. 石油化工应用, 2011, 30(1): 8—12.

[13] 郭东红. 纳米技术在提高原油采收率方面的应用[J]. 精细石油化工进展, 2004, 5(7):1—5.

[14] 秦文龙, 张志强, 侯宝东, 等. 纳米技术在提高原油采收率方面的应用新进展[J]. 断块油气田, 2013(1):10—13.

[15] KAZEMZADEH Y, SHOJAEI S, RIAZI M, et al. Review on application of nanoparticles for EOR purposes: a critical of the opportunities and challenges[J]. Chin J Chem Eng, 2019, 27(2):237—246.

[16] GBADAMOSI A O, JUNIN R, MANAN M A, et al. Recent advances and prospects in polymeric nanofluids application for enhanced oil recovery[J]. J Ind Eng Chem, 2018, 66(1):1—19.

[17] 詹迎青, 万昕艺, 王雅洁, 等. 纳米粒子在油田驱油中的研究进展[J]. 现代化工, 2016(8): 37—40.

[18] FENDLER J H. Atomic and molecular clusters in membrane mimetic chemistry[J]. Chem Rev, 1987,87(5):877—899.

[19] CAI B, KONG Q, LU L, et al. Low temperature creep of nanocrystalline pure copper[J]. Mater Sci Eng: A, 2000, 286(1): 188—192.

[20] KAO R L, WASAN D T, NIKOLOV A D, et al. Mechanisms of oil removal from a solid surface in the presence of anionic micellar solutions[J]. Colloid Surf, 1988,34(4):389—398.

[21] KONDIPARTY K, NIKOLOV AD, WASAN D, et al. Dynamic spreading of nanofluids on solids. Part I: experimental [J]. Langmuir, 2012,28(41):14618—14623.

[22] ZHANG H, NIKOLOV A, WASAN D. Enhanced oil recovery (EOR) using nanoparticle dispersions: Underlying mechanism and imbibition experiments [J].Energy Fuels, 2014, 28(5): 3002—3009.

[23] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Philos T Roy Soc, 1805,95:65—87.

[24] CASSIE A, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans Faraday Soc,1944,40:546—551.

[25] STAROV V, ZHDANOV S, KOSVINTSEV S, et al. Spreading of liquid drops over porous substrates[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2003, 104(1):123—158.

[26] DERJAGUIN B. Range of action of surface forces[J]. Nature, 1936,138:330—331.

[27] STAROV V M. Surface forces action in a vicinity of three phase contact line and other current problems in kinetics of wetting and spreading[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2010, 161(1): 139—152.

[28] TROKHYMCHUK A, HENDERSON D, NIKOLOV A, et al. A simple calculation of structural and depletion forces for fluids/suspensions confined in a film[J]. Langmuir, 2001, 17(16): 4940—4947.

[29] HENDERSON D. An explicit expression for the solvent contribution to the force between colloidal particles using a hard sphere model[J]. J Colloid Interface Sci, 1988, 121(2): 486—490.

[30] WASAN D T, NIKOLOV A D. Spreading of nanofluids on solids [J]. Nature, 2003, 423(6936): 156—159.

[31] CHENGARA A, NIKOLOV AD, WASAN DT, et al. Spreading of nanofluids driven by the structural disjoining pressure gradient [J]. J Colloid Interface Sci, 2004, 280(1):192—201.

[32] NIKOLOV A, KONDIPARTY K, WASAN D. Nanoparticle self-structuring in a nanofluid film spreading on a solid surface [J]. Langmuir, 2010, 26(11):7665—7670.

[33] SEFIANE K, SKILLING J, MACGILLIVRAY J. Contact line motion and dynamic wetting of nanofluid solutions [J]. Adv Colloid Interface Sci, 2008, 138(2):101—120.

[34] ROUSTAEI A, SAFFARZADEH S, MOHAMMADI M. An evaluation of modified silica nanoparticles' efficiency in enhancing oil recovery of light and intermediate oil reservoirs [J]. Egy J Pet, 2013, 22(3): 427—433.

[35] LI S, TORSAETER O. The impact of nanoparticles adsorption and transport on wettability alteration of intermediate wet Berea sandstone [C]//SPE Middle East Unconventional Resources Conference and Exhibition. Muscat, Oman, Jan 26, 2015.

[36] LI Rong, JIANG Peixue, GAO Cheng, et al. Experimental investigation of silica-based nanofluid enhanced oil recovery: the effect of wettability alteration[J]. Energy Fuel, 2017, 31 (1): 188—197.

[37] JANG H, LEE W, LEE J. Nanoparticle dispersion with surface-modified silica nanoparticles and its effect on the wettability alteration of carbonate rocks [J]. Colloid Surf A: Physicochem Eng Asp, 2018, 554(10):261—271.

[38] MORADI B, POURAFSHARY P, JALALI F, et al. Experimental study of water-based nanofluid alternating gas injection as a novel enhanced oil-recovery method in oil-wet carbonate reservoirs[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2015, 27:64—73.

[39] MOSLAN M S, SULAIMAN W R W, ISMAIL A R, et al. Wettability alteration of dolomite rock using nanofluids for enhanced oil recovery[J]. Mater Sci Forum, 2016, 864:194—198.

[40] KARIMI A, FAKHROUEIAN Z, BAHRAMIAN A, et al. Wettability alteration in carbonates using zirconium oxide nanofluids: EOR implications[J]. Energy Fuel, 2012, 26(2): 1028—1036.

[41] ONYEKONWU M O, OGOLO N A. Investigating the use of nanoparticles in enhancing oil recovery[C]//The Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Tinapa-Calabar, Nigeria, July 31,2010.

[42] 王瑶. 纳米流体在储层岩心表面的铺展及其驱油机理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.

[43] 冯晓羽, 侯吉瑞, 程婷婷, 等. 油酸改性纳米TiO_2的制备及其驱油性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(2):280—285.

[44] ZARGARTALEBI M, KHARRAT R, BARATI N. Enhancement of surfactant flooding performance by the use of silica nanoparticles[J]. Fuel, 2015, 143: 21—27.

[45] DAHKAEE K P, SADEGHI M T, FAKHROUEIAN Z, et al. Effect of NiO/SiO_2 nanofluids on the ultra interfacial tension reduction between heavy oil and aqueous solution and their use for wettability alteration of carbonate rocks[J]. J Pet Sci Eng, 2019,176:11—26.

[46] HENDRANINGRAT L, LI S, TORSÆTER O. A core flood investigation of nanofluid enhanced oil recovery[J]. J Pet Sci Eng, 2013, 111(21): 128—138.

[47] AMRAEI A, FAKHROUEIAN Z, BAHRAMIAN A. Influence of new sio_2 nanofluids on surface wettability and interfacial tension behaviour between oil-water interface in EOR processes[J]. J Nano Res, 2014, 26(1):1—8.

[48] LI Yuyang, DAI Caili, ZHOU Hongda, et al. Investigation of spontaneous imbibition by using a surfactant-free active silica water-based nanofluid for enhanced oil recovery [J]. Energy Fuel, 2017, 32(1):287—293.

[49] 贺丽鹏, 罗健辉, 丁彬, 等. 特低/超低渗油藏纳米驱油剂的制备与性能[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 81—90.

Research Progress of Enhancing Oil Recovery Mechanism by Using Nanofluids

ZHANG Jingnan[1,2], TIAN Lei[3], ZHANG Hongwei[1]

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710000, P R of China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710000, P R of China; 3. Northwest Oilfield Branch Company, Sinopec, Urumqi, Xinjiang 830001, P R of China)

Abstract: Nanofluid flooding is of great significance to reduce the cost of oil development and enhance oil recovery. A series of important results have been achieved about the research on the mechanism of nano-fluid flooding. This paper focuses on the basic research related to the nanofluid flooding mechanism. And the four mechanisms of nanofluid enhanced flooding are summarized based on the different academic opinions and research results. According to this, it is pointed out that under the combined effects of structural separation pressure, rock wetting change and reduced oil-water interfacial tension, the nanofluid exhibits the dual characteristics of "roll-up" and "diffusion" in the process of oil displacement, thus having enhanced oil displacement. Finally, it is pointed out that nanofluids will have a very broad application prospect in the field of enhancing oil recovery, but a lot of research is needed on the effect and influencing factors of nanofluid flooding. In addition, the effective combination of nanofluid flooding and foam flooding is a way to enhance oil recovery.

Keywords: *nanofluid; enhanced oil recovery; structural disjoining pressure; wettability; interfacial tension; review*