

文章编号:1000-4092(2022)01-179-07

交联聚合物微球在深部调驱中的应用*

刘東葳¹, 彭 勃²

(1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 2. 温室气体封存与石油开采利用北京市重点实验室, 北京 102249)

摘要:油藏非均质性是制约采收率提高的关键因素,交联聚合物微球调驱技术是解决这一问题的重要手段。低渗透油藏复杂的孔隙结构,深海、深井油藏中高盐、高温等恶劣油藏环境,对微球注入、封堵、深入、耐温、耐盐等性能提出了更高的要求。综述了交联聚合物微球的调驱机理、制备方法及矿场试验应用的研究进展与目前存在的问题,并提出交联聚合物微球未来研究的方向。

关键词:深部调驱;微球;交联聚合物微球;非均质油藏;综述

文献标识码:A

DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.01.030

中图分类号:TE357.46

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

油藏的非均质性是制约采收率提高的主要原因^[1-2]。而长期注水冲刷过程中形成的优势通道和次生孔隙又进一步加剧了这一问题^[3-4]。交联聚合物微球深部调驱技术是解决地层非均质性问题的一种重要技术手段。交联聚合物微球是一种微米级别的弹性球体,具有分散性好、粒径可控、机械强度高、化学稳定性好的优势,被广泛应用于非均质油藏开发。然而,随着越来越多低渗、深海、深井油藏的开发,低渗透油藏中复杂的孔隙结构,深海、深井油藏中高盐、高温等恶劣油藏环境,对交联聚合物微球的注入、封堵、深入、耐温、耐盐等性能的要求越来越高。本文介绍了交联聚合物微球的微观特征与驱油效果,综述了其调驱机理、制备方法、矿场应用等方面的研究成果,指出了目前存在的问

题,并对后续工作进行了展望。

1 交联聚合物微球的调驱机理

交联聚合物微球在油藏中的调驱机理可以简单总结为“运移-滞留-膨胀-封堵-变形-再运移-再封堵”(图1)。微球在刚注入地层中时为纳米尺度,能稳定分散在水中,并随着水的注入而运移到油藏深部;微球随着时间的推移而逐渐溶胀,当粒径溶胀到与孔喉相匹配时滞留在孔道中形成封堵,迫使后

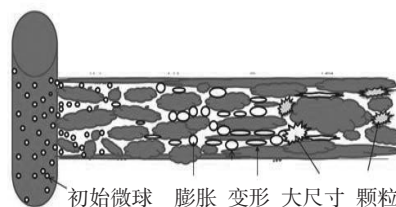


图1 交联聚合物微球的调驱过程示意图

* 收稿日期:2021-02-21;修回日期:2021-06-18。

基金项目:中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项(项目编号ZLZX2020-01-08-04)。

作者简介:刘東葳(1993—),男,中国石油大学(北京)化学工程与技术专业在读博士研究生(2018—),研究方向为油气田应用化学,通讯地址:102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京),E-mail:188864237@qq.com。彭勃(1969—),男,教授,大连理工大学精细化工专业博士(1996),研究方向主要为油气田化学与工程、碳捕获与封存等,通讯地址:102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京),电话:010-89734903,E-mail:pengeor_cup@163.com。

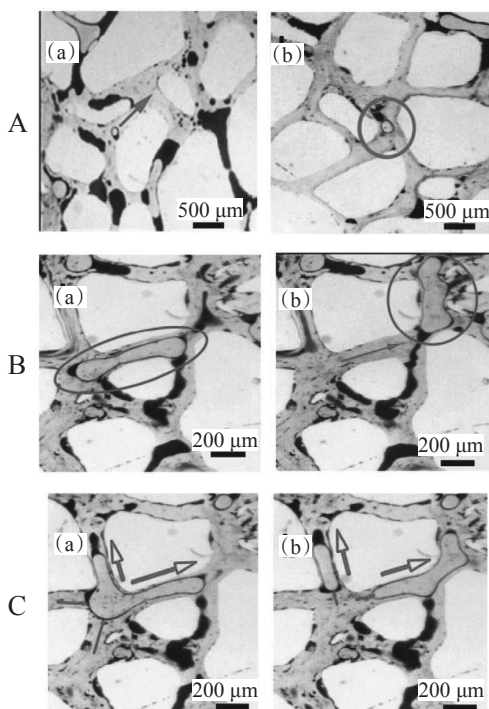
续液流改向;随着后续驱替液的注入,驱动压力增加,微球在驱动压力作用下变形通过孔道,再运移到地层更深部,从而实现对整个地层的调驱。

目前,科研人员对交联聚合物微球在地层中调驱机理的研究主要可以分为3部分:运移机理、封堵机理、驱油机理。研究人员通过微孔滤膜过滤^[5]、填充砂管实验^[6]、可视化岩心驱替^[7]、毛细管实验^[8]、核磁共振和数值模拟等研究方法,对微球在多孔介质中的运移、微球对孔喉的封堵、微球的驱油效果、交联聚合物微球与孔隙尺寸的匹配等进行系统研究。

交联聚合物微球在地层中的如何运移、封堵、驱油,主要受两方面因素影响:(1)微球尺寸与孔隙尺寸的匹配程度^[3]; (2)微球本身的性能,如其抗剪切性、弹性模量等^[9]。

1.1 运移机理

微球在地层中运移通过孔喉的方式可以分为3类:直接通过、变形通过和分割通过(图2)。当微球尺寸小于孔喉尺寸且驱动压力大于微球对多孔介质表面吸附力时,微球能够直接通过孔喉,通过前后微球粒径几乎不发生变化(图2A)。当微球尺寸



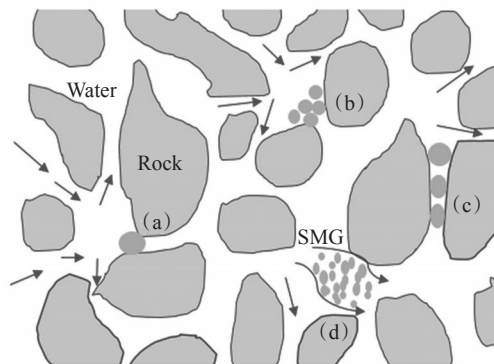
A, 直接通过: (a)微球直接通过孔喉; (b)微球在孔隙上吸附;
B, 变形通过: (a)变形中; (b)变形后;
C, 分割通过: (a)通过前; (b)通过后。

图2 交联聚合物微球通过孔道的模式^[9]

略微大于孔喉尺寸时,微球在驱动压力的作用下发生形变和脱水而通过孔喉,随后在水中继续溶胀,恢复到通过前的粒径(图2B)。当微球尺寸远大于孔喉尺寸时,在足够大的驱动压力下,微球被孔喉分割通过孔道,破碎为两个半球(图2C)。微球弹性越弱越易变形通过孔道;弹性越强越易发生分割通过。

1.2 封堵机理

交联聚合物微球在地层中封堵的方式可分为4类:直接封堵、架桥封堵、叠加封堵、滞留封堵(图3)。直接封堵是指在微球尺寸大于孔喉尺寸时,一个微球直接封堵一个孔喉,见图3(a)。当微球尺寸与孔道尺寸相同时,封堵强度最大。架桥封堵是指当微球尺寸略小于孔喉尺寸时,数个微球之间形成架桥,封堵一个孔喉,见图3(b)。架桥封堵存在最优匹配系数,当微球粒径与孔道尺寸之比为最优匹配因子时,封堵强度最大。Chen等^[10-11]、Zhao等^[12]、杨弘斌等^[13-14]通过微流控、岩心驱替、毛细管实验和数值模拟等方法对不同微球的最优匹配系数进行了研究,结果表明最优匹配系数在0.4~1.1之间,具体数值随微球弹性模量有所变化。叠加封堵是指在直接封堵的基础上,又有微球继续进入孔喉中,数个微球对同一个孔喉形成更强的封堵,见图3(c)。滞留封堵是指在微球尺寸远小于孔喉尺寸时,微球通过水动力学滞留的方式吸附在孔喉上,随着后续微球的滞留,增大孔道流动阻力形成对孔喉的封堵,见图3(d)。Cao等^[15]发现孔隙尺寸为聚合物微球尺寸的400~1600倍时,微球依然能够明显地扩大波及体积,提高采收率,并提出滞留封堵模型。孙哲等^[16]、卢祥国等^[17]认为存在渗透率



(a) 直接封堵; (b) 架桥封堵; (c) 叠加封堵; (d) 滞留封堵。

图3 交联聚合物微球封堵机理示意图^[12]

极限,当渗透率小于渗透率极限时,即使微球尺寸远小于孔隙尺寸依然能够形成有效封堵。随后Chen等^[10]通过可视化驱替观测到了滞留封堵现象。

1.3 驱油机理

交联聚合物微球在地层中驱油的方式主要分3类:盲端驱油、孔道驱油、负压驱油(图4)。微球进入盲端后能够发生弹性回缩,将吸附在盲端中的残余油驱出,见图4(a)和图4(b)。微球在驱动压力的作用下,弹性形变进入孔道封堵孔喉而增大驱动压力,当驱动压力大于残余油吸附力时,能将吸附在孔道中的残余油驱出,见图4(c)和图4(d)。微球发生突破时,孔喉和连接着它的孔道之间存在一个瞬时的负压梯度,能够吸出部分残余油,见图4(e)和图4(f)。

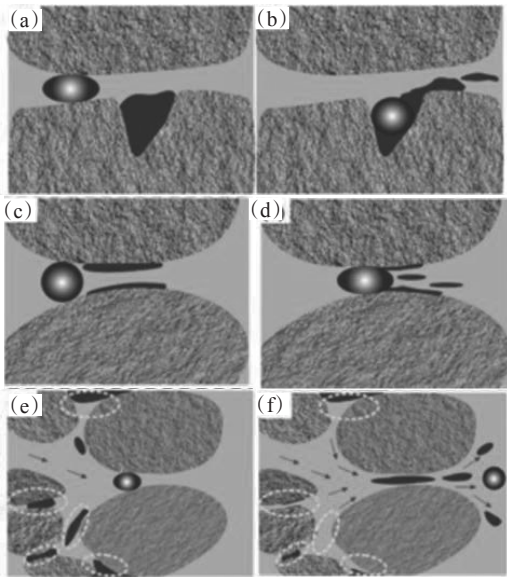


图4 交联聚合物微球的驱油原理示意图^[18]

目前,对交联聚合物微球宏观、微观调驱机理研究已经较为系统,构建了多种调驱模型,在实验室中能准确预测微球在孔道中的运移过程,但仍难以准确指导矿场实验。一方面是因为实验室条件下难以通过物模准确模拟地层中漫长的运移过程和庞大而复杂的孔隙结构;另一方面要想准确预测微球在孔道中的运移状况需要详细的孔道和微球的数据。然而,在矿场实验中,准确描绘整个区块地下庞大而复杂的孔隙结构是不现实的,多以渗透率、孔隙度、岩心孔径分布、矿化度等宏观数据作为参考。

2 交联聚合物微球的微观特征

交联聚合物微球是微纳米级别的弹性球体,在扫描电子显微镜下为形态规则,表面光滑,粒度均匀的球体,能够在水中溶胀为初始体积的数倍甚至数十倍,见图5和图6。

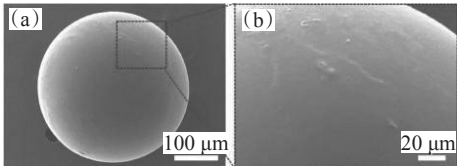


图5 交联聚合物微球SAP表面SEM电子显微照片^[19]

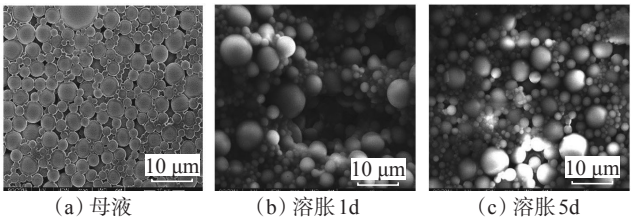


图6 交联聚合物微球SMG在水溶液中溶胀过程中的SEM电子显微照片^[11]

3 交联聚合物微球的制备方法

目前,交联聚合物微球的制备已经较为成熟,能够批量生产用于调驱的交联聚合物微球。交联聚合物微球的制备方法以乳液聚合法中的反相乳液聚合法为主^[20],此外,采用悬浮聚合法^[21]、分散聚合法^[22]等也能够制备聚合物微球。不同聚合方式下所得的交联聚合物微球的特点见表1。

表1 不同聚合方式下所得交联聚合物微球的特点

聚合方式	反应特征	微球粒径	优势	劣势
悬浮聚合	水溶性单体悬浮在油相中发生聚合反应。	0.1~1000 μm	后处理简单。	聚合过程中,包藏的单体与加入的分散剂难以除去。
乳液聚合	水溶性单体在乳化剂作用下,通过机械搅拌,在油相中形成油包水乳状液,在乳状液中发生聚合。	0.1~1000 μm	黏度低,助剂(破乳剂、凝体系稳定,易连续操作。	助剂(破乳剂、凝剂等)品种多、用量大,产品残留杂质多。
分散聚合	单体溶解在油相/水相中聚合成不溶性聚合物,在稳定剂存在下稳定分散在连续相中。	0.1~10 μm	安全环保无污染。	对分散剂的要求比较高,分散剂往往难以分离。

目前生产的交联聚合物微球难以满足矿场对微球耐温、耐盐等方面的需求。因此现阶段对微球合成方面的研究主要集中在功能微球的研发上。

3.1 耐温耐盐微球

为应对高温高矿化油藏,研究人员研发了一系列耐温耐盐的交联聚合物微球。通过引入功能性单体,能够有效增加微球耐温耐盐性能。林梅钦等^[23]以丙烯酰胺(AM)为主剂,引入耐温单体2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)与*N*-乙烯基吡咯烷酮(NVP)进行共聚,合成了AM/AMPS/NVP三元共聚微球,在以0.1%的硫脲-氯化钴复合稳定剂溶液和0.025%的LY稳定剂溶液为交联剂时分别可以在120℃下稳定42 d和120 d以上。Wang等^[6]以AM为主剂,引入疏水单体2-丙烯酰胺-十六烷磺酸(S)合成了疏水缔合微球P(AM-S)。微球粒径和随着NaCl浓度的增加先减小后增大,具有良好的耐盐性能。涂伟霞等利用2-甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷(KH-570)硅烷偶联剂,在二氧化硅上接枝AM、丙烯酸(AA),利用分散聚合法制备了无机-有机聚合物微球,能在80℃的10 g/L的NaCl溶液中保持稳定。Wang等^[24]制备了Zr-AM/NVP/AMPS微球,通过双交联结构增强耐温性能,该微球在140℃的水溶液中150 d内能保持长期稳定。

从微球整体结构出发,对微球的表面进行修饰或引入无机材料作为微球的“核”能有效增强耐温耐盐性能。Zhu等^[25]利用聚乙烯亚胺(PEI)对微球进行表面修饰,使得微球能在150℃保持3个月以上的长期稳定。Tang等^[26]在3-甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷(MPS)改性的二氧化硅上接枝了AM和AA,采用反相悬浮聚合的方法制备了聚合物/纳米二氧化硅复合微球(PNSCMs),该微球具有良好的耐温耐盐性。Liu等^[27]在二氧化硅微球上接枝了AM和AMPS,制备了核壳结构微球。相较于常规微球,核壳结构微球溶胀性能较差,但封堵性良好,能适应较宽的渗透率范围(核壳微球有效封堵范围为 $200 \times 10^{-3} \sim 3000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,传统微球为 $200 \times 10^{-3} \sim 1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

3.2 深入性能良好的改性微球

微球在低渗透油藏中的深入性能不佳,易被地层剪切破碎。微球尺寸与弹性是制约微球自身深入性能的关键,因此,减小尺寸与弹性能有效增强

深入性能。Zhao等^[28]从尺寸入手,利用AM、AA、甲基丙烯酸甲酯(MMA)为单体,*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)为交联剂,制备了纳米聚合物微球。该微球具有良好的注入性,能有效封堵渗透率为 $10 \mu\text{m}^2$ 的低渗透非均质岩心。杨宏斌等^[13-14]从弹性入手,制备了低弹聚合物微球,该微球具有良好的抗变形和抗剪切性能,深入性能良好。然而,过小的尺寸与弹性会影响微球的封堵性能,影响调驱效果,因此减小尺寸与弹性以增强深入性能的方式有其局限性。

为解决微球封堵性能与深入性能的矛盾,研究人员通过调整微球合成所使用的交联剂、控制交联时间,使得新体系以聚合物溶液的状态深入油藏深部,以微球的状态封堵油藏孔道。于小荣等^[30]利用不稳定交联剂聚乙二醇二丙烯酸酯(PEG-200)制备了可降解微球,防止微球堵死孔道制约后续微球的深入的情况发生。该微球能有效封堵孔道,并在14 d后降解成线性聚合物,不阻碍后续微球的深入。Zou等^[31]借鉴凝胶类深部调驱剂延迟交联的方法,将AM类单体、二乙烯基苯交联剂、脂肪酸聚氧乙烯醚、山梨醇油酸酯等组成的乳液注入地层深部,在地层深部交联生成原位聚合物微球(ISPM)。该乳液的注入性良好,地下生成的微球能有效封堵低渗透岩心,但体系中聚合物溶液与微球的转换是不可逆的,仍然难以满足微球调驱中“运移-封堵-再运移”的需求。

目前针对不同的油藏条件已经开发出了各种改性微球,然而超深井、特低渗透油田中对微球性能的要求不断提升。因此,需要针对油田需求进一步研发新的微球体系。此外,新开发的改性微球以及制备方法,合成方法复杂,成本高昂,难以满足生产需求。

4 交联聚合物微球的矿场应用

在我国,常规微球已经应用在多个矿场中,并取得了优异的效果。陈渊等^[32]制备的纳米微球在柴9井的现场试验中增大了注水井压力,提高了油井原油产量。廖新武等^[33]在SNM油田A9、B14、C5、C21井组进行微球调驱矿场实验,井组含水率平均下降了2.8%,实现了降水增油。在大港南部官15-2与枣1219区块的微球调驱矿场实验中见效明

显,平均单井组增产670 t,东辛采油厂永8-7、8-11、8-49三口井中见效明显,累计增产7127.4 t。

针对低渗、高温、高盐等油田状况的功能微球也在矿场实验中表现出了优异的效果。刘骛烜等^[34]合成的耐温耐盐微球在华北油田高温高盐油藏(赵86油藏断块)的矿场试验中,实现了降水增油,提高了原油采收率。Hou等^[29]在长庆油田低渗区域对两种不同粒径(300 nm、800 nm)的纳米聚合物微球进行了矿场实验,采出液含水量下降10.4%,单井产量增加0.9 t/d,深部调驱效果良好。房立文等^[35]在秦皇岛32-6河流相稠油油田B14与A9井组的微球调驱矿场试验中,3个月累计增油5948 m³。

随着现场试验的进行,单一的微球调驱体系越来越难满足复杂的油田状况。利用不同体系间协同作用的复合调驱体系展现出广阔的应用前景。现阶段石油工程方面开始将微球与其他调驱体系相结合以弥补微球的不足。

为弥补微球对大裂缝封堵能力的不足,将凝胶、凝胶颗粒与微球轮注,凝胶-颗粒-微球复合体系^[36]在欢西油田中采用该技术的22个井组,102口油井,共计注液11 000 t,累积增油20399 t,减水106586 t,降水增油效果明显,创经济效益4 487.48万元^[36-37]。微球-颗粒复合体系^[38]“先颗粒,后微球”能有效地增加封堵范围,扩大波及体积,对非均质油藏原油采收率提高在20%以上。

为弥补微球洗油效果的不足,将微球与表面活性剂进行复配^[39-40],2015年在西达里亚油田将耐温耐盐低界面张力表面活性剂体系SA与聚合物微球Z10复配,提高采收率在10%以上^[41]。

为弥补微球选择性差的不足,泡沫-微球体系^[42-46]利用微球与泡沫的协同作用,通过微球增强泡沫体系封堵性能的同时弥补了微球选择性差的问题。该体系在渤海a油田W1井组的中试中增油64461桶。

5 未来与展望

现阶段,交联聚合物微球已广泛应用于我国的油藏开发,但依然存在一些问题,如何解决这些问题将是未来研究的重点:

(1)虽然在实验室中能准确预测微球在孔道中的运移过程,但仍难以准确指导矿场实验。因此,

需要通过数值模拟等方式对微球在复杂情况下长时间运移进行细致研究。

(2)虽然针对不同的油藏条件开发出了各种改性微球,但是受限于交联聚合物微球自身性质,深入性等性能研究已濒临极限,然而油田对性能的要求依然在不断提升。因此,需要进一步研发深入性能更优秀的调驱体系。

(3)单一的微球调驱体系难以满足复杂的油藏环境,将微球与其他调驱体系复合使用的状况越来越多。因此,需要进一步研发能协同其他调驱体系的功能微球。

(4)微球本身具有良好的深部液流改向能力,深部调驱机理也要求微球流经整个油藏区块,因此,给微球附加更多调驱之外的功能性,如洗油性等也是未来的一个研究方向。

参考文献:

- [1] NADERI M, ROSTAMI B, KHOSRAVI M. Effect of heterogeneity on the productivity of vertical, deviated and horizontal wells in water drive gas reservoirs [J]. J Nat Gas Sci Eng, 2015, 23: 481-491.
- [2] BAI B J, LI L X, LIU Y Z, et al. Preformed particle gel for conformance control: factors affecting its properties and applications [J]. SPE Reser Eval Eng, 2007, 10(4): 415-422.
- [3] DAI C L, ZOU C W, LIU Y F, et al. Matching principle and in-depth profile control mechanism between elastic dispersed particle gel and pore throat [J]. Acta Petrol Sinica, 2018, 39(4): 427-434.
- [4] SUN X D, BAI B J. Comprehensive review of water shutoff methods for horizontal wells [J]. Petrol Explor Develop, 2017, 44(6): 1022-1029.
- [5] LI Y Q, GAO J X, YIN D D, et al. Study on the matching relationship between polymer hydrodynamic characteristic size and pore throat radius of target block s based on the microporous membrane filtration method [J]. J Chem, 2014, 2014: 1-7.
- [6] WANG H Y, LIN M Q, DONG Z X, et al. Study on the association behavior of synthesized hydrophobically associating polymer microspheres [J]. Colloid Surf A Physicochem Eng Asp, 2020, 598: 124829.
- [7] YANG Z J, JIA S G, ZHANG L H, et al. Deep profile adjustment and oil displacement sweep control technique for abnormally high temperature and high salinity reservoirs [J]. Petrol Explor Develop, 2016, 43(1): 97-105.
- [8] LIN M Q, ZHANG G Q, HUA Z, et al. Conformation and plugging properties of crosslinked polymer microspheres for profile control [J]. Colloid Surf A Physicochem Eng Asp, 2015,

- 477: 49–54.
- [9] YANG H B, KANG W L, YIN X, et al. Research on matching mechanism between polymer microspheres with different storage modulus and pore throats in the reservoir[J]. Powder Technol, 2017, 313: 191–200.
- [10] CHEN X, LI Y Q, LIU Z Y, et al. Core- and pore-scale investigation on the migration and plugging of polymer microspheres in a heterogeneous porous media[J]. J Petrol Sci Eng, 2020, 195: 107636.
- [11] CHEN X, LI Y Q, LIU Z Y, et al. Investigation on matching relationship and plugging mechanism of self-adaptive micro-gel (SMG) as a profile control and oil displacement agent[J]. Powder Technol, 2020, 364: 774–784.
- [12] HUA Z, LIN M Q, GUO J R, et al. Study on plugging performance of cross-linked polymer microspheres with reservoir pores[J]. J Petrol Sci Eng, 2013, 105: 70–75.
- [13] YANG H B, ZHOU B B, ZHU T Y, et al. Conformance control mechanism of low elastic polymer microspheres in porous medium[J]. J Petrol Sci Eng, 2020, 196: 107708.
- [14] YANG H B, SHAO S, ZHU T Y, et al. Shear resistance performance of low elastic polymer microspheres used for conformance control treatment[J]. J Ind Eng Chem, 2019, 79: 295–306.
- [15] CAO D Q, HAN M, WANG J X, et al. Polymeric microsphere injection in large pore-size porous media[J]. Petroleum, 2020, 6(3): 264–270.
- [16] 孙哲. 聚合物微球油藏适应性评价方法及调驱机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017: 97–117.
- [17] 卢祥国, 周彦霞, 孙哲, 等. 聚合物分子聚集体形态及其油藏适应性[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 88–94.
- [18] PU W F, ZHAO S, WANG S, et al. Investigation into the migration of polymer microspheres (PMs) in porous media: Implications for profile control and oil displacement[J]. Colloid Surf A Physicochem Eng Asp, 2018, 540: 265–275.
- [19] LEE K M, MIN J H, OH S, et al. Preparation and characterization of superabsorbent polymers (SAPs) surface-crosslinked with polycations[J]. React Funct Polym, 2020, 157: 104774.
- [20] 张常虎. 反相乳液法制备淀粉基微球及其表征[J]. 化学与黏合, 2017, 39(4): 248–250.
- [21] 郝春玲, 唐富刚, 修艳玲, 等. 纳米微球聚丙烯酰胺堵水剂的研究[C]//国际水溶性高分子研讨会(中国)暨全国功能高分子行业委员会年会论文集. 上海: 中国化工信息中心全国功能高分子行业委员会, 2012: 26–31.
- [22] 程艳玲, 邱俊英, 易昌凤, 等. 超声辐照分散聚合制备聚苯乙烯纳米微球[J]. 应用化学, 2008, 25(10): 1217–1220.
- [23] LIN M Q, ZHAO Q, DANG S M, et al. Temperature resistance of AM/AMPS/NVP copolymer microspheres[J]. Iran Polym J, 2020, 29: 445–453.
- [24] WANG Z Y, LIN M Q, XIANG Y Q, et al. Zr-Induced thermostable polymeric nanospheres with double-crosslinked architectures for oil recovery[J]. Energ Fuel, 2019, 33(10): 10356–10364.
- [25] ZHU D Y, HOU J R, CHEN Y G, et al. In situ surface decorated polymer microsphere technology for enhanced oil recovery in high-temperature petroleum reservoirs[J]. Energ Fuel, 2018, 32(3): 3312–3321.
- [26] TANG X C, YANG H B, GAO Y B, et al. Preparation of a micron-size silica-reinforced polymer microsphere and evaluation of its properties as a plugging agent[J]. Colloid Surf A Physicochem Eng Asp, 2018, 547: 8–18.
- [27] LIU J X, ZHANG Y B, LI X J, et al. Experimental study on injection and plugging effect of core-shell polymer microspheres: take Bohai oil reservoir as an example[J]. ACS Omega, 2020, 5(49): 32112–32122.
- [28] ZHAO F J, ZHANG H B, WU Y P, et al. Preparation and performance evaluation of polymeric microspheres used for profile control of low-permeability reservoirs[J]. J Chem, 2020, 2020(1): 1–11.
- [29] HOU G G, ZHAO W Y, JIA Y Q, et al. Field application of nanoscale polymer microspheres for in-depth profile control in the ultralow permeability oil reservoir[J]. Front Chem, 2020, 8: 1–13.
- [30] 于小荣, 蒲万芬, 李俊中, 等. 新型微溶胶的制备及性能表征[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 785–787.
- [31] ZOU J R, YUE X G, DONG J, et al. Novel in-depth profile control agent based on in-situ polymeric microspheres in low permeability reservoir[J]. J Disper Sci Technol, 2019: 1–11.
- [32] 陈渊, 孙玉青, 温栋良, 等. 聚合物纳米微球调驱性能室内评价及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 102–106.
- [33] 廖新武, 刘超, 张运来, 等. 新型纳米微球调驱技术在海上稠油油田的应用[J]. 特种油气藏, 2013, 20(5): 129–132.
- [34] 刘骞烜. 高温高盐油藏纳米微球的调驱[D]. 武汉: 长江大学, 2015: 29–37.
- [35] 房立文, 卢国军, 葛丽珍. 纳米微球深部调驱技术在河流相稠油油田中的应用及效果评价[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(3): 102–105.
- [36] 徐传奇, 付美龙, 敖明明. 国内复合新型深部调剖体系研究与应用现状[J]. 当代化工, 2019, 48(12): 2855–2860.
- [37] 王翔, 董玉华, 丛川波, 等. 无皂乳液聚合制备多孔聚苯乙烯纳米微球[J]. 应用化工, 2018, 47(6): 1100–1104.
- [38] 黄德胜, 齐宁, 姜慧, 等. 高温油藏深部复合调剖技术研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2014, 29(3): 68–72.
- [39] 曲文驰, 李还向, 但庆祝, 等. 低渗油藏用聚合物微球/表面活性剂复合调驱体系[J]. 油田化学, 2014, 31(2): 227–230.
- [40] 郭宇. 纳米微球与表面活性剂复合调驱体系研究与应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 95–98, .

- [41] 王崇阳, 蒲万芬, 赵田红, 等. 高温高盐油藏新型表面活性剂微球复配体系调驱实验[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 107-111.
- [42] 林日亿, 李兆敏. 泡沫微球封堵注入方式评价实验[J]. 化学工程与装备, 2018(2): 6-8.
- [43] 刘祖鹏, 李兆敏, 李宾飞, 等. 多相泡沫体系调驱提高原油采收率试验研究[J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(3): 242-245.
- [44] 李宾飞, 李兆敏, 刘祖鹏, 等. 多相泡沫体系调驱试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 93-98.
- [45] 李敬, 李兆敏, 刘伟. 多相泡沫体系调剖优化实验研究[J]. 油田化学, 2012, 29(4): 427-430.
- [46] 李兆敏, 刘伟, 李松岩, 等. 多相泡沫体系深部调剖实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 55-58.

Research Progress of Crosslinked Polymer Microspheres for Deep Control and Flooding

LIU Jianwei¹, PENG Bo²

(1. The Unconventional Petroleum Research Institute, Beijing 102249, P R of China; 2. Beijing Key Laboratory for Greenhouse Gas Storage and CO₂-EOR, China University of Petroleum, Beijing 102249, P R of China)

Abstract: The reservoir heterogeneity are the key factors restricting the improvement of oil recovery and are the important and difficult points in the development of oil and gas fields. The control and flooding of crosslinked polymer microspheres is an important technical means to solve this problem. However, with the development of more and more oil and gas fields with low permeability, deep sea, high temperature and deep well in recent years, the complex pore structure of low permeability reservoirs and the environment of deep sea, high temperature and deep well need higher requirements for the performance of microsphere injection, plugging, penetration, temperature and salt resistance. In this paper, the control and flooding mechanism of microspheres, preparation methods, research progress in indoor oil displacement effect and field tests, and the existing problems were mainly introduced. On this basis, the future research on microspheres were proposed.

Keywords: deep control and displacement; microspheres; crosslinked polymer microspheres; heterogeneous reservoir; review

(上接第 178 页。continued from p.178)

Research Progress of Fracturing Fluid with Chemical In-situ Heat Generation

LEI Ming^{1,2}, LUO Mingliang^{1,2}, ZHAN Yongping^{1,2}, MA Yuben^{1,2}, ZHANG Mian^{1,2}, SHI Bojing^{1,2}, HAN Yunlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development (China University of Petroleum (East China)), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266580, P R of China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P R of China)

Abstract: The thermochemical reaction of the chemical in-situ heat generation fracturing fluid (CISHGF) occurs at a low pH or high temperature to produce a salt solution and gas with low damage to the formation, and release a lot of heat. The CISHGF exhibits large heat generation, fast flowback and low reservoir damage, etc., and effectively solve the problems including fracturing fluid cooling damage to the formation and incomplete gel breaking at the lower temperature. The heat generation mechanisms of ammonium chloride and sodium nitrite were introduced, and the effects of pH, reactant concentration and initial temperature on the heat generation and heat generation reaction rate of fracturing fluid were analyzed; According to different crosslinking agents, the CISHGF were divided into boron cross-linked guanidine gum fracturing fluid, acidic cross-linking fracturing fluid and viscoelastic surfactant fracturing fluid, and the performance, advantages and disadvantages of different fracturing fluid systems were summarized, The fracturing process and field applications were introduced. In view of the problems existing in the current system, the prospect of CISHGF the fracturing fluid formulation and process was expected.

Keywords: in-situ heat generation; fracturing fluid; reaction mechanism; reaction control; review