

文章编号:1000-4092(2022)04-745-08

化学驱原油原位乳化及提高采收率机理研究进展*

周亚洲^{1,2}, 杨文斌^{1,2}, 殷代印^{1,2}

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 提高油气采收率教育部重点实验室(东北石油大学), 黑龙江 大庆 163318)

摘要:化学驱开采常伴随乳化现象的发生,原油原位乳化对于提高采收率有积极的作用。由于油藏孔喉结构以及剩余油分布的复杂性,原油原位乳化独具特点。基于化学驱原油原位乳化近年来的研究成果,从化学驱原油原位乳化机制、乳状液流变性及稳定性、原油原位乳化渗流特征和提高采收率机理等方面阐述了国内外研究现状及发展趋势,分析了化学驱矿场试验中原油原位乳化规律及开采特征方面取得的经验与认识,并指出考虑乳化形成机制、乳化程度以及乳化原油流变特性的非连续多相渗流数值模拟以及基于乳化调控机制的化学驱注入方案优化设计是今后化学驱的重点攻关方向,以期期为化学驱化学剂的选择及注入参数的优化提供理论指导。

关键词:化学驱;原位乳化;乳液;渗流特征;表面活性剂;采收率;综述

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.04.028

中图分类号:TE357

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



近年来,我国对外原油的依赖程度不断提高,2018—2020年我国石油对外依存度均突破70%^[1],2020年我国石油对外依存度达到73%。我国高含水老油田占全国石油储量和产量的70%左右,是我国石油产量的主体。化学驱是我国老油田提高采收率的重要方法。化学驱常伴随有乳化现象,化学驱室内实验和矿场试验发现原油原位乳化能进一步提高采收率^[2],乳化严重的油井(或岩心)采收率比没有乳化的油井(或岩心)高5%~6%^[3]。近些年,国内外学者研究发现,在化学驱表面活性剂的选择上,不能仅仅将油水界面张力能否降至超低作为表面活性剂选择的关键标准^[4],也应该重点关注其对原油的乳化性能。如果注入的化学剂与储层中的原油形成原位乳化,可以降低原油流动的毛细

管阻力,大大增加其变形能力及流动性能,起到提高驱油效率的作用^[5]。同时,原油原位乳化后黏度进一步提高,可以起到控制流度、扩大波及体积的作用^[6]。特别是对于高温高矿化度油藏,由于聚合物在高温高盐下降解严重,限制了高温高盐油藏化学驱的实施。随着耐高温高盐表面活性剂的发展^[7-8],利用原油原位乳化可能成为高温高盐油层化学驱提高采收率的一个新的方向,重点是提高表面活性剂的乳化性能。本文基于国内外对化学驱原油原位乳化的研究成果,阐述了化学驱中原油原位乳化机理、乳状液流变性及稳定性、原油原位乳化提高采收率机理方面的研究现状,分析了化学驱矿场试验中原油原位乳化规律及开采特征方面取得的经验与认识,并对化学驱化学剂选择及注入方案

* 收稿日期:2021-08-30;修回日期:2021-11-02。

基金项目:国家自然科学基金“黏弹性乳状液滴微观渗流机理及耦合模型”(项目编号12002083),黑龙江省博士后资助项目“乳状液界面流变特性对其微观驱油影响机制研究”(项目编号LBH-Z21124)。

作者简介:周亚洲(1986—),男,副教授,东北石油大学石油与天然气工程专业博士(2016),从事多相流渗流理论以及提高采收率原理与技术的研究,通讯地址:163318 黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街99号东北石油大学石油工程学院, E-mail: zhouyazhou720@163.com。

优化设计中的重点攻关方向提出了建议。

1 化学驱原油原位乳化机理

油藏原油原位乳化是复杂的物理化学过程,其乳化机理和室内搅拌的乳化机理有很大不同。1998年,Janssen等^[9]认为残余油滞留或者运移取决于作用于残余油上的黏滞力与毛管力。当黏滞力增大到一定程度时,非润湿相的饱和度降低,并变得不连续,分散于连续的润湿相中,以油珠的形式参与流动。残余油运移由毛细管准数、流速、黏度比和孔喉比决定。化学驱中注入表面活性剂溶液等活性物质后,表面活性剂分子会自发迁移到原油界面形成定向吸附,增加了原油的运移变形能力^[10]。2001年,Kang等^[11]发现乳化剂和含水率是影响三元复合驱乳状液类型的主要因素。当含水率小于50%时,易形成W/O型乳状液。随着含水率和乳化剂浓度的增加,易形成O/W型或者O/W/O型乳状液,在高含水期易形成O/W型乳状液。2007年,通过化学驱微观可视化驱替实验,杨承志^[12]发现注入三元复合体系后,孔壁上的残余油随着三元复合体系的运移而逐渐被拉成细丝,在运移过程中断裂成无数微小的油珠随液流运移走,成为细粒的O/W型乳状液。乳状液在运移过程中聚并,变成尺寸相对较大的乳状液滴。2014年,夏惠芬等^[13]发现油水界面扩张黏弹性和界面张力协同影响残余油的乳化,界面张力降低到 10^{-2} mN/m后,降低三元复合体系的黏弹性能显著增强其对残余油的乳化能力;界面张力和界面扩张模量越低,三元复合体系的乳化能力越强,残余油从乳化油滴向乳化油丝转变。2017年,周亚洲等^[14]发现化学驱中原油原位乳化机理主要有原油卡断作用和化学剂流体的剪切作用。岩石孔隙结构越复杂、孔喉比越大、配位数越大、化学剂的乳化性能越好,卡断形成的乳状液越多。孔壁上的残余油膜及盲端处的残余油常常靠注入化学剂的剪切作用被其携带走。化学驱中的原油原位乳化难易受孔喉结构、岩石润湿性、原油性质、剩余油分布、剩余油类型、注入化学剂类型和流变性质等多种因素的影响。随着微流控技术的发展,其在油藏渗流领域的应用也在不断拓宽。微流控芯片可以精确表征储层多孔介质的复杂孔隙结构,可以更加直观地观测化学驱流体的运移过程以及乳化

过程,便于研究复杂物理化学作用下原油原位乳化机理和多相流流体流动机制^[15]。

2 化学驱原油原位乳化的流变特性及稳定性

2.1 原油原位乳化的流变特性

互不相溶的油相和水相之间的相界面也称为界面层,化学驱中的界面活性物质会富集于该界面层^[16],界面层厚度一般小于100 nm,此界面层也称为界面膜。化学驱原油原位乳化后形成乳状液的流变特性受乳化程度、乳状液滴粒径、含水率和剪切速率等因素影响,呈现出从牛顿流体到非牛顿流体到黏弹流体等一系列复杂的流变特征^[17]。于大森等^[18]发现当剪切速率较低时,乳状液分散相多聚集成大片团块状,具有较高的表观黏度值,剪切速率增大时分散相聚集成的团块被解聚,表观黏度减小,属于剪切稀化型流体。Clark等^[19]发现随着乳状液滴粒径的减小,O/W型乳状液的表观黏度增加,逐渐从牛顿流体变为剪切变稀流体。大多数O/W型乳状液在较低的剪切速率(小于 20 s^{-1})下呈现剪切变稀流体行为,在较高的剪切速率(大于 500 s^{-1})下呈现牛顿流体的特性。幂律模型可以描述乳状液超出剪切界限的流体行为。江延明等^[20]发现油井采出的乳状液在低含水率时为牛顿流体,当含水率增加到一定值时,乳状液呈现非牛顿流体特性,且含水率越高,非牛顿性越强。W/O型乳状液的黏温关系与原油类似,但W/O型乳状液的非牛顿性强于原油。随着时间的增加,W/O型乳状液出现老化,表观黏度增大,并且含水率越高,老化现象越明显。闫建文等^[21]发现油包水乳状液具有较好的黏弹性和变形能力,其变形能力有利于减少乳状液在地层中的机械捕集。丛娟等^[22]发现乳状液滴粒径和分散度随石油磺酸盐质量分数的增加而增大,随油水体积比的增大先增大后减小。振荡次数对乳状液滴粒径的影响较小,对分散度有影响。吴奇霖等^[23]发现对于粒径较大的粗乳状液,在含油率为60%时出现转相。当含油率小于60%时,乳状液呈现膨胀性流体性质,表观黏度随含油率的增加而增大;当含油率大于60%时,呈现假塑性流体性质,表观黏度随含油率的增大而减小。随着温度的升高,乳状液的非牛顿性逐渐减弱。

2.2 乳状液的稳定性

1869年,帕拉图观察到两种互不相溶液体之间有一分界面,在分界面处的黏度比相邻两体相的黏度都要大,由此首次提出了“界面黏度”的概念。界面黏度及界面屈服值是表征乳状液界面膜微观结构及界面膜强度的重要参数,其取决于表面活性剂的分子结构、排列方式、相对分子质量和原油性质等^[24]。界面黏度和界面弹性很大程度上决定了乳状液的稳定性。液滴间聚并速率和界面黏度、界面弹性之间有很好的关联性^[25]。界面黏度和界面弹性越高,界面膜排液速度越低,乳状液越稳定^[26-27]。徐明进等^[28-29]发现原油中的沥青质、胶质、蜡组分等均具有一定的界面活性,可以在油水界面上吸附,形成强度较大的界面膜,且形成的界面膜具有明显的屈服值、假塑性和较大的界面剪切黏度,进而增强乳状液的稳定性。聚合物分子在油水界面上的吸附也可明显增加界面膜的剪切黏度。对于稠油和重油,由于含有大量的沥青质、胶质,极易形成稳定的W/O型乳状液。对于胶质、沥青质、蜡含量较低的原油,形成的大部分乳状液的稳定性较低或者不能形成乳状液。徐超^[30]认为提高乳化剂浓度可以提高乳状液的稳定性,油水体积比是影响乳状液稳定性和转相特性的最重要因素;油水体积比太大,乳状液容易聚集造成油水分离;在最佳盐浓度下,乳状液的稳定性最好;温度低时,乳状液的稳定性相对较差,随着温度的升高,乳状液稳定性变好,温度过高时,乳化失效。对于静态稳定性,剪切速度越大,乳滴越小,乳状液越稳定;对于动态稳定性,剪切速度越大,乳状液转相越快。随着碱浓度的增大,乳状液的静态稳定性和动态稳定性均先增大后减小。孙春柳等^[31]发现转速对乳状液稳定性的影响较大。转速越大,乳化时间越长,粒径越小,形成的原油乳状液越稳定。含水率 $\leq 50\%$ 时,乳状液稳定性随含水率的增加而降低。温度越高,乳状液越容易聚并。乳状液的聚并过程主要分为3个阶段。首先,液滴间的界面膜接触使界面产生变形和波动;然后,波动的界面受到连续相的黏滞阻碍作用形成连续的液膜;最后,液膜排液而逐渐变薄,最终液膜破裂,液滴发生聚并^[32]。近年来,研究发现化学驱中的沥青质、黏土颗粒和聚合物等在原油表面吸附形成固体颗粒稳定的乳状液,即Pickering乳

状液^[33-34]。在高温高压条件下,和表面活性剂-聚合物稳定的传统O/W型乳状液相比,Pickering乳状液具有相对稳定的黏弹特性^[35-36]。

3 化学驱原油原位乳化渗流特征

3.1 物理模拟

根据原油和水在油藏中流动的不同形态,王德民院士提出了化学驱中几种重要的流动性,分别为连续流、段塞流、膜流、油丝流和乳液流。其中,乳液流是化学驱中经常出现的流动形态。1995年,Abou-Kassem等^[37]发现如果乳状液的大小与多孔介质的孔喉直径相比非常小时,可以忽略乳状液微观结果的影响,将其视作均质流体,可用连续相模型描述乳状液的渗流特征。1998年,Khambharatana^[38]发现当乳状液的平均液滴尺寸比孔隙尺寸大很多时,大部分乳状液滴被捕集在喉道中,采出端仅含有很小的乳滴,在较大压力梯度下,这些小乳滴能够运移,且小粒径的乳滴通过多孔介质后流变性没有发生根本性改变。对于粒径和孔隙尺寸接近的乳状液,在相同剪切速率范围内,乳状液在多孔介质中的流变性和其在黏度计中的变化趋势相似。

原油原位乳化后,由于形成的乳状液具有高度的分散性和黏弹变形特征,其在多孔介质中的渗流特性比聚合物等连续黏弹流体更加复杂。王凤琴等^[39]发现乳状液在渗流中会引起孔隙、喉道的堵塞,其堵塞主要有3种形式,分别为单个液滴引起的堵塞、分散液滴无序拥挤引起的堵塞和细小液滴在管壁吸附引起的堵塞。赵清民等^[40]发现当乳状液粒径与岩心孔隙直径匹配关系较好时,其在岩石孔隙中的运移阻力较高,并能大幅降低驱油剂流度。注入与高渗透层孔隙直径相匹配的乳状液时,可以对高渗透层实现有效封堵,提高波及效率。王德民等^[41]认为原油原位乳化后的黏度较高(尤其是W/O型),流度比会下降,能提高宏观和微观(相邻孔隙和岩芯级)波及体积。粒径大的乳状液可以起到暂堵喉道的作用,粒径小的乳状液可以增加残余油的有效驱替力。W/O型乳状液的渗透率曲线与油相渗透率相似;O/W型乳状液的渗透率曲线与水相渗透率相似^[42]。他认为如果能研制出在地层条件下乳化性能好的表面活性剂体系,可进一步提高油藏的驱替效率,而且可以代替或部分代替聚合物,这

对于解决高温高矿化度油藏的流度问题是一个新的途径。Guillen等^[43]发现乳状液流度是毛细管数的函数,随着界面张力增加,乳状液流度降低,在较高的毛细管数条件下,乳状液中分散相对流度的影响较小。微观驱油实验研究表明^[44],乳状液的堵塞作用可以使注入液运移路径发生改变,当乳状液注入到非均质岩心后,一定量的乳状液先进入高渗透层封堵,后续的乳状液进入低渗透层。康万利等^[45]发现两亲聚合物乳状液在渗流过程中具有较强的黏弹效应,其在渗流过程中的渗流阻力较大,并有明显的“爬坡式”波动现象。随着乳状液粒径的增大,渗流阻力增加且波动剧烈^[46]。Xu等^[47]通过自制的可视微流体装置更加直观地观察到了乳状液在渗流过程中的运移、滞留和封堵特征。

3.2 数值模拟

原油原位乳化后的渗流规律极其复杂。首先,乳状液渗流过程中往往伴随着变形、聚并、破裂等复杂的物理过程,如何准确描述这些复杂的界面现象是个极具挑战性的问题;其次,乳状液渗流过程中受到流体内部及多孔介质的综合作用,包括界面张力、驱替压力、变形产生的弹性力以及周围流体的剪切力等,影响其渗流的因素极其复杂;第三,对于多孔介质中多相流的模拟,由于多孔介质内部结构的复杂性,多相流运动的控制方程呈现高度的非线性特征,很难用理论解析方法对其进行精确的描述。目前,国内外主要从宏观尺度、表征体元尺度和孔隙尺度3个尺度研究多孔介质中流体的流动规律^[48]。在宏观尺度和表征体元尺度方面,国内外对乳状液渗流数学模型进行了大量研究,其中代表性的渗流数学模型有3个,分别为“本体黏度模型”、“乳滴阻滞模型”和“过滤模型”^[49]。后期的乳状液渗流模型大多是在以上模型基础上进行的修正及改进,如Mandal^[50]、Demikhova^[51]建立的模型。在孔隙尺度方面,Renardy^[52]建立了单个乳状液在黏弹性剪切流场中的数学模型,计算了乳状液的受力及变形情况。Aggarwal等^[53]建立了单个黏弹性乳状液在剪切流场中的数学模型,研究了乳状液在变形过程中弹性应力的变化。Sman等^[54]应用界面扩散模型描述乳状液的变形和破裂,采用格子 Boltzmann方法进行了乳状液在剪切流场中的数值模拟,研究了乳状液的变形及破裂过程。安红妍等^[55]应用格

子 Boltzmann方法进行了液液不混溶两相流动数值模拟研究,验证了 Laplace 定律,研究了单液滴松弛过程和两个液滴的融合过程。Fu等^[56]建立了新的三维 Boltzmann模型,模拟了乳状液在流动聚焦微流装置中的形成过程,模拟结果和实验结果符合度较高。臧晨强等^[57]采用改进的伪势格子 Boltzmann方法研究了复杂微孔道内的非混相驱替过程,研究了壁面粗糙度、润湿性及黏度比对驱替过程的影响。

4 化学驱原油原位乳化提高采收率机理

化学驱原油原位乳化后,原油流动形态和流动模式发生改变,原油流动能力大大增强,原油采收率提高。Demikhova等^[58]的研究表明注入乳状液可以在水驱基础上提高采收率15%以上。Karambeigi等^[59]进行了乳状液微观可视驱替实验,发现乳状液可以提高波及体积,降低残余油饱和度。匡佩琼等^[60]发现 W/O 型乳状液的指进现象较弱,O/W 型乳状液有指进现象,W/O 型乳状液的无水采收率比 O/W 型乳状液高,但从驱替压差方面考虑,建议采用 O/W 型乳状液进行驱油。对于复杂油藏,原油原位乳化后也能大幅提高采收率。Abdul等^[61]发现,对于底水油藏,交替注入10% O/W 乳状液和聚合物的效果较好,可比水驱提高采收率10%以上。刘鹏等^[62]发现对于高温高盐油藏,注入乳化能力强的表面活性剂比注入乳化能力弱的表面活性剂提高采收率约4%。Lee^[63]和 Pang^[64]等研究发现乳状液能显著改善稠油油藏的驱替流度比,提高稠油油藏采收率。

化学驱原油原位乳化提高采收率是化学剂溶液、不同粒径乳状液滴以及原油协同耦合作用的结果。不同粒径的乳状液发挥不同的作用,孔喉级别乳状液滴的贾敏效应可以起到堵塞喉道的作用,粒径较小的乳状液可提高驱替压力。Mandal等^[65]发现 O/W 型乳状液的驱替机理主要是降低驱替相流度和油水界面张力。Lei等^[66]认为乳化驱替残余油的主要机理是乳化启动、乳化携带和乳状液的流度控制。微观驱油和驱油实验表明提高采收率的主要因素是毛管数的增加。乳状液在岩石多孔介质中的捕集是乳状液驱扩大波及体积的重要机理,而乳状液在多孔介质中捕集的主要原因是贾敏效应^[67]。由于原油原位乳化后黏度增加以及乳状液的贾敏

效应,原油原位乳化后使平面上高渗透区域、垂向上高渗透层的渗流阻力增加,后续注入的化学剂溶液更多地进入剩余油较多的中低渗透区域。形成的不同粒径的乳状液能起到交替封堵、交替驱替的作用。王凤琴等^[68]发现乳状液提高采收率的机理主要有两点:第一,乳状液堵塞大喉道产生的分流作用驱替绕流形成的残余油;第二,利用乳状液进入孔隙喉道中产生的挤压、拉和拽的作用,能有效地驱替边缘和角隅处的残余油。天然岩心驱油实验表明乳状液能在水驱的基础上提高驱油效率约6%。康万利等^[69]的研究表明残余油自发乳化后减小了毛管力,通过界面扰动“拉油”,弹性变形“挤油”和降低界面张力提高驱油效率,通过乳滴的堵塞提高波及体积。孙盈盈等^[70]发现界面张力不是影响油水乳化能力的唯一决定性因素,其他因素如表面活性剂加量、油水比、界面膜强度等影响着驱油剂与原油的乳化能力,驱油剂乳化能力决定驱替效率。同时,乳状液在孔隙喉道中运移接触到残余油后,会发生界面形变,由于其具有界面黏弹性,有恢复形变的趋势,对残余油有弹性微观力的作用^[71]。和水驱、聚合物驱相比,孔喉级别的乳状液还具有变形活塞驱替作用,其在孔隙喉道中流动时,形状会随着孔隙喉道的形状和残余油形态的变化而变化,会紧贴喉道向前运移,进入喉道时受压收缩,通过喉道时再次膨胀,像一个紧贴岩石壁面的可胀可缩的活塞。孔喉级别的乳状液在孔隙和喉道中的运移速度较慢,能携带并驱替部分残余油。

5 化学驱原油乳化矿场试验经验认识

在矿场试验方面,大庆油田杏五中、杏二西、中区西部、杏二区西部、北一区断西、萨北小井距等试验区都开展了三元复合驱矿场试验^[72-73],所有试验区均发生了原油原位乳化现象。骆小虎等^[74]认为水溶性表面活性剂与大庆原油乳化后易形成O/W型乳状液;三元复合驱中加入碱后,NaOH与大庆原油反应生成油溶性表面活性剂,原油乳化后易形成W/O型乳状液,乳状液稳定性随时间延长逐渐增强,说明碱的存在对于原油乳化以及降低乳化原油流度具有一定的积极作用。矿场试验中发现油层越均质、注采井距越大,采出液乳化越严重;使用强碱体系的乳化程度高于弱碱体系。原油乳化后,采

出液黏度较高,产液量大幅下降,降幅为14.2%~69.9%,油井含水率较低,乳化期含水率为20%~60%,采油速度较高,三元复合驱的采油速度为4.4%~17.3%^[75]。试验区中乳化严重的采油井含水降幅较大,采出液黏度(117 mPa·s)大,驱替效果较好,说明原油原位乳化后能起到调整驱替液流度比的作用,出现乳化的采收率比未出现乳化的高5%~6%^[76]。在大庆油田的应用结果表明^[77],注入三元复合体系初期,含水饱和度高,容易形成O/W型乳状液。随着O/W型乳状液向采油井流动,由于超低界面张力、乳化携带以及O/W乳状液的驱替作用,剩余油向前聚集,驱替前缘油水比增大,逐渐形成W/O型乳状液,剩余油继续向前运移,在驱替前缘逐渐形成油墙。随着注入时间的延长,储层中大部分原油都被采出,油水比降低,形成的大多为O/W型乳状液。矿场试验还发现虽然表面活性剂的界面张力较低,如果没有或者只有很少的乳状液产生,采收率也不高。因此,对于表面活性剂研究的重点是增加其乳化性能。廖广志等^[78]认为化学驱理想的乳化效果是高渗透储层形成较强的原油乳化,进而提高渗流阻力,在低渗透储层不乳化或轻微乳化。但矿场实际往往是低渗透储层更易乳化,因此基于乳化的化学剂优化选择和注入方式优化设计是化学驱矿场高效开发需要解决的问题。

6 结语与展望

随着化学驱油理论认识不断成熟,传统基于注入液的黏度、黏弹性、阻力系数、残余阻力系数、驱油效率等指标评价化学剂驱替特性的方法具有一定的局限性,应该充分考虑注入流体与储层原油复杂界面的物理化学反应,评价注入流体的乳化性能及原油原位乳化后的流体流动特征。在化学驱油理论及矿场试验方面仍然有以下问题值得关注和深入研究。

化学驱中高效乳化剂体系的研发仍是重点。原油原位乳化的难易主要取决于乳化剂类型和浓度,能应用于矿场化学驱的乳化剂体系要求吸附较少、成本低,在低浓度下具有较好的乳化性能。对于高温高盐油藏,要求乳化剂体系具有良好的耐温耐盐性能。对于乳化剂体系的研发应该根据原油性质、储层孔喉大小、孔喉结构、非均质性、含水率

等因素综合评价原油乳化后的乳化程度、乳状液粒径、流变性、稳定性、流度以及驱油效率等指标。

由于原油原位乳化现象的发生,化学驱渗流呈现非连续多相流动、多流动模式、多场耦合等特点,以连续性介质假设和达西定律为基础的传统渗流力学无法准确描述化学驱非连续多相流体渗流特征。对于化学驱渗流数学模型的研究,应考虑乳化形成机制、乳化程度以及乳化原油流变特性等因素,能定量表征乳化对于原油流动及提高采收率的影响,科学指导矿场化学驱化学剂的选择和注入参数的优化设计。

化学驱注入方案设计中,应该加强对储层乳化调控机制的研究,针对油田储层发育情况及开发现状,优化化学剂类型、浓度、注入速度、段塞组合等注入参数,使原油原位乳化后进一步增加高渗透油层的渗流阻力。对于中低渗透储层,可以在乳化剂体系进入储层之前,改变其分子结构,降低其乳化性能,实现封堵高渗透油层、驱替中低渗透油层的目的。

参考文献:

- [1] 陆家亮,唐红君,孙玉平.抑制我国天然气对外依存度过快增长的对策与建议[J].天然气工业,2019,39(8):1-9.
- [2] 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.
- [3] 李世军,杨振宇,宋考平,等.三元复合驱中乳化作用对提高采收率的影响[J].石油学报,2003,24(5):74-76.
- [4] 尚丹森,侯吉瑞.ASP三元复合体系在非超低界面张力下的乳化性能及其对提高采收率的影响[J].油田化学,2018,35(2):322-327.
- [5] KUMAR N, PAL N, MANDAL A. Nanoemulsion flooding for enhanced oil recovery: Theoretical concepts, numerical simulation and history match [J]. J Pet Sci Eng, 2021, 202: 108579.
- [6] PEI H H, SHU Z, ZHANG G C, et al. Experimental study of nanoparticle and surfactant stabilized emulsion flooding to enhance heavy oil recovery [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 163: 476-483.
- [7] CHEN Z, LI Y L, LIU X M, et al. Dialkyl sulfobetaine surfactants derived from guerbet alcohol polyoxypropylene-polyoxyethylene ethers for SP flooding of high temperature and high salinity reservoirs [J]. J Surfact Deterg, 2021, 24(3): 421-432.
- [8] BELHAJ A F, SHUHLI J A B M, ELRAIES K A, et al. Partitioning behaviour of novel surfactant mixture for high reservoir temperature and high salinity conditions [J]. Energy, 2020, 198: 117319.
- [9] JANSSEN P H, HARRIS C K. Emulsion characteristics of high water-cut oil wells [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, USA, 1998: 405-414.
- [10] ZHOU Y Z, YIN D Y, CHEN W L, et al. A comprehensive review of emulsion and its field application for enhanced oil recovery [J]. Energ Sci Eng, 2019, 7(72): 1046-1058.
- [11] KANG W L, WANG D M. Emulsification characteristic and de-emulsifiers action for alkaline/surfactant/polymer flooding [C]//SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 2001: 1-6.
- [12] 杨承志.化学驱提高石油采收率[M].北京:石油工业出版社,2007:13-14.
- [13] 夏惠芬,冯海潮,丁玉敬,等.三元复合体系界面黏弹性对残余油乳化作用研究[J].实验技术与管理,2014,31(3):27-30.
- [14] 周亚洲,王德民,王志鹏,等.多孔介质中孔喉级别乳状液的形成条件及粘弹性[J].石油勘探与开发,2017,44(1):110-116.
- [15] LIU Y F, KASZUBA J, OAKLEY J. Microfluidic investigations of crude oil-brine interface elasticity modifications via brine chemistry to enhance oil recovery [J]. Fuel, 2019, 239: 338-346.
- [16] LIAN P, JIA H, WEI X, et al. Effects of zwitterionic surfactant adsorption on the component distribution in the crude oil droplet: A molecular simulation study [J]. Fuel, 2021, 283: 119252.
- [17] FENG H S, KANG W L, ZHANG L M, et al. Experimental study on a fine emulsion flooding system to enhance oil recovery for low permeability reservoirs [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 171: 974-981.
- [18] 于大森,黄延章,陈权.原油/水乳状液流变形态与机理研究[J].油田化学,1992,9(4):348-351.
- [19] CLARK P E, PILEHVARI A. Characterization of crude oil-in-water emulsions [J]. J Pet Sci Eng, 1993, 9(3): 165-181.
- [20] 江延明,李传宪.W/O乳状液的流变性研究[J].油气储运,2000,19(1):10-12.
- [21] 闫建文,张玉荣,才程.适用于高矿化度地层调剖剂实验研究[J].油气地质与采收率,2009,16(6):70-72.
- [22] 丛娟,岳湘安,尤源,等.石油磺酸盐与原油乳化影响因素研究[J].油气地质与采收率,2010,17(5):46-49.
- [23] 吴奇霖,张健,许晶禹.粗油水乳状液的流变特性[J].油气储运,2014,33(5):531-537.
- [24] GUO L P, HAN X, LEI Y, et al. Study on the thixotropy and structural recovery characteristics of waxy crude oil emulsion [J]. Pet Sci, 2021, 18(4): 1195-1202.
- [25] WEI Y, XIE Y P, CAI Z X, et al. Interfacial and emulsion characterisation of chemically modified polysaccharides through

- a multiscale approach [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2020, 580: 480–492.
- [26] 李明远, 吴肇亮. 石油乳状液[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 65–68.
- [27] PENG B, LI M Y, ZHAO S Q, et al. Study of oil/water interfacial tension of vacuum residual fractions from iranian light crude oil [J]. *Chin J Chem Eng*, 2003, 11(6): 681–685.
- [28] 徐明进, 李明远, 彭勃, 等. 油包水乳状液中胶质和沥青质的界面剪切黏度和乳状液稳定性的关系[J]. *石油学报(石油加工)*, 2007, 23(3): 107–110.
- [29] 徐明进, 李明远, 彭勃, 等. Zeta电位和界面膜强度对水包油乳状液稳定性影响[J]. *应用化学*, 2007, 24(6): 623–626.
- [30] 徐超. 原油乳状液转相特性研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2010: 16–34.
- [31] 孙春柳, 康万利, 刘卫东, 等. 影响原油乳状液稳定性的因素研究[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 134–137.
- [32] ASKE N, KALLEVIK H, SJÖBLOM J. Water-in-crude oil emulsion stability studied by critical electric field measurements. Correlation to physico-chemical parameters and near-infrared spectroscopy [J]. *J Pet Sci Eng*, 2002, 36(1/2): 1–17.
- [33] SHARMA T, KUMAR G S, CHON B H, et al. Viscosity of the oil-in-water Pickering emulsion stabilized by surfactant-polymer and nanoparticle-surfactant-polymer system [J]. *Korea-Aust Rheol J*, 2014, 26(4): 377–387.
- [34] ZHANG T, DAVIDSON A, BRYANT S L, et al. Nanoparticle-stabilized emulsions for applications in enhanced oil recovery [C]//SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA, 2010: 1–18.
- [35] SHARMA T, KUMAR G S, SANGWAI J S. Viscoelastic properties of oil-in-water (O/W) pickering emulsion stabilized by surfactant-polymer and nanoparticle-surfactant-polymer systems [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2015, 54(5): 1576–1584.
- [36] KUMAR N, GAUR T, MANDAL A. Characterization of SPN Pickering emulsions for application in enhanced oil recovery [J]. *J Ind Eng Chem*, 2017, 54: 304–315.
- [37] ABOU-KASSEM J H, ALI S. Modeling of emulsion flow in porous media [J]. *J Can Pet Technol*, 1995, 34(6): 30–38.
- [38] KHAMBHARATANA F, THOMAS S, ALI S M. Macroemulsion rheology and drop capture mechanism during flow in porous media [C]//SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition. Beijing, China, 1998: 1–9.
- [39] 王凤琴, 曲志浩, 薛中天. 乳状液在多孔介质中的微观渗流特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(5): 603–607.
- [40] 赵清民, 吕静, 李先杰, 等. 非均质条件下乳状液调剖机理[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(1): 41–43.
- [41] WANG D M, WANG G. New insights on the mechanism of displacement efficiency of natural cores by chemical flooding and its influence on the development and selection of chemicals for EOR [C]//SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA, 2012: 1–12.
- [42] 王德民, 王刚, 夏惠芬, 等. 天然岩心化学驱采收率机理的一些认识[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(2): 1–11.
- [43] GUILLEN V R, MAO I R, CARVALHO M D S, et al. Capillary-driven mobility control in macro emulsion flow in porous media [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2012, 43: 62–65.
- [44] GUILLEN V R, CARVALHO M S, ALVARADO V. Pore scale and macroscopic displacement mechanisms in emulsion flooding [J]. *Transport Porous Med*, 2012, 94(1): 197–206.
- [45] 康万利, 魏绍龙, 季岩峰, 等. 两亲聚合物乳状液的渗流特性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(8): 76–80.
- [46] 康万利, 魏绍龙, 胡雷雷, 等. 两亲聚合物对O/W乳状液体系渗流的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(1): 140–145.
- [47] XU K, ZHU P, COLON T, et al. A microfluidic investigation of the synergistic effect of nanoparticles and surfactants in macro-emulsion-based enhanced oil recovery [J]. *SPE J*, 2017, 22(2): 459–469.
- [48] SUN Y, ZHAI C, XU J Z, et al. Experimental study on pore structure evolution of coal in macroscopic, mesoscopic, and microscopic scales during liquid nitrogen cyclic cold-shock fracturing [J]. *Fuel*, 2021, 291: 120150.
- [49] 李小波, 刘日武, 盛宏至, 等. 考虑介质微观非均质特征的乳状液渗流模型[J]. *力学学报*, 2009, 41(3): 313–317.
- [50] MANDAL A, BERA A. Modeling of flow of oil-in-water emulsions through porous media [J]. *Pet Sci*, 2015, 12(2): 273–281.
- [51] DEMIKHOVA I I, LIKHANOVA N V, PEREZ J R H, et al. Emulsion flooding for enhanced oil recovery: Filtration model and numerical simulation [J]. *J Pet Sci Eng*, 2016, 143: 235–244.
- [52] RENARDY Y. Drop oscillations under simple shear in a highly viscoelastic matrix [J]. *Rheol Acta*, 2008, 47(1): 89–96.
- [53] AGGARWAL N, SARKAR K. Effects of matrix viscoelasticity on viscous and viscoelastic drop deformation in a shear flow [J]. *J Fluid Mech*, 2008, 601: 63–84.
- [54] SMAN R G M V D, GRAAF S V D. Emulsion droplet deformation and breakup with Lattice Boltzmann model [J]. *Comput Phys Commun*, 2008, 178(7): 492–504.
- [55] 安红妍, 张楚华, 王宁宁. 基于格子 Boltzmann 方法的液液不混溶两相流动数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(1): 78–81.
- [56] FU Y H, ZHAO S F, BAI L, et al. Numerical study of double emulsion formation in microchannels by a ternary Lattice

- Boltzmann method [J]. Chem Eng Sci, 2016, 146: 126–134.
- [57] 臧晨强, 娄钦. 复杂微通道内非混相驱替过程的格子 Boltzmann 方法[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 154–162.
- [58] DEMIKHOVA I I, LIKHANOVA N V, MOCTEZUMA A E, et al. Improved oil recovery potential by using emulsion flooding [C]//SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 2014: 1–13.
- [59] KARAMBEIGI M S, ABBASSI R, ROAYAEI E, et al. Emulsion flooding for enhanced oil recovery: Interactive optimization of phase behavior, microvisual and core-flood experiments [J]. J Ind Eng Chem, 2015, 29: 382–391.
- [60] 匡佩琼, 尉立岗, 黄延章. 乳状液驱油实验研究[J]. 石油勘探与开发, 1988, 3: 64–67.
- [61] ABDUL H J, ALI S M. Combined polymer and emulsion flooding methods for oil reservoirs with a water leg [J]. J Can Pet Technol, 2003, 42(2): 35–40.
- [62] 刘鹏, 王业飞, 张国萍, 等. 表面活性剂驱乳化作用对提高采收率的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 99–102.
- [63] LEE J, HUANG J, BABADAGLI T. Dynamics of emulsion generation and stability during heavy oil displacement with chemicals and nanoparticles: Qualitative analysis using visual 2D data [J]. Fuel, 2020, 270: 117502.
- [64] PANG S S, PU W F, XIE J Y, et al. Investigation into the properties of water-in-heavy oil emulsion and its role in enhanced oil recovery during water flooding [J]. J Pet Sci Eng, 2019, 177: 798–807.
- [65] MANDAL A, SAMANTA A, BERA A, et al. Characterization of oil-water emulsion and its use in enhanced oil recovery [J]. Ind Eng Chem Res, 2010, 49(24): 12756–12761.
- [66] LEI Z D, YUAN S Y, SONG J, et al. A mathematical model for emulsion mobilization and its effect on EOR during ASP Flooding [C]//SPE Symposium on Improved Oil Recovery. Tulsa, Oklahoma, USA, 2008: 1–9.
- [67] DING B X, SANG Q, NIE Z Q, et al. An improved study of emulsion flooding for conformance control in a heterogeneous 2D model with lean zones[J]. SPE J, 2021, 26(5): 1–15.
- [68] 王凤琴, 曲志浩, 孔令荣. 利用微观模型研究乳状液驱油机理[J]. 石油勘探与开发, 2006, 4(2): 221–224.
- [69] 康万利, 刘述忍, 孟令伟, 等. 自发乳化微观驱油机理研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 99–102.
- [70] 孙盈盈, 岳湘安, 张立娟, 等. 乳化作用对水驱后残余油膜效果的实验与评价[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(1): 73–76.
- [71] ZHOU Y Z, YIN D Y, CAO R, et al. The mechanism for pore-throat scale emulsion displacing residual oil after water flooding [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 163: 519–525.
- [72] SUN C, GUO H, LI Y Q, et al. Recent advances of surfactant-polymer (SP) flooding enhanced oil recovery field tests in China [J]. Geofluids, 2020: 1–16.
- [73] WU D, XIA F J, LIN S, et al. Effects of secondary emulsification of ASP flooding produced fluid during surface processes on its oil/water separation performances [J]. J Pet Sci Eng, 2021, 202: 108426.
- [74] 骆小虎, 林梅钦, 吴肇亮, 等. 三元复合驱原油乳化作用研究[J]. 精细化工, 2003, 20(12): 731–733.
- [75] 程杰成, 王德民, 李群, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 37–40.
- [76] 程杰成, 李群, 廖广志, 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, 20(2): 46–49.
- [77] 邓鲁强. 复合体系/原油在油层内运移过程中乳化影响因素研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008: 65–80.
- [78] 廖广志, 王强, 王红庄, 等. 化学驱开发现状与前景展望[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 196–207.

Progress of In-situ Emulsification and Enhanced Oil Recovery Mechanism of Chemical Flooding

ZHOU Yazhou^{1,2}, YANG Wenbin^{1,2}, YIN Daiyin^{1,2}

(1. Department of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, P R of China; 2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Ministry of Education), Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, P R of China)

Abstract: In-situ crude oil emulsification often occurs in chemical flooding. Emulsification plays a positive role in enhancing oil recovery. Due to the complexity of pore-throat structure and remaining oil distribution, in-situ crude oil emulsification has its own characteristic. Based on the research results of crude oil in-situ emulsification in chemical flooding in recent years, the status and development trend were investigated from the in-situ emulsification mechanism of chemical flooding, rheology and stability of emulsion, emulsion seepage characteristic and improving oil recovery mechanism. The in-situ emulsification mechanism of crude oil and exploiting experience were analyzed from the field test of chemical flooding. The numerical simulation considering emulsification formation mechanism, emulsification degree and rheological property of emulsified crude oil, and the optimization design of chemical flooding injection scheme based on emulsification mobility control were the key research direction of chemical flooding in the future. It could provide theoretical guidance for the optimization of chemical agent and injection parameter of chemical flooding.

Keywords: chemical flooding; in-situ emulsification; emulsion; seepage characteristic; surfactant; recovery factor; review