

文章编号:1000-4092(2023)04-750-07

微乳液驱油技术的研究进展*

张志超¹, 柏明星¹, 王 勇², 聂剑峰², 刘敬源¹, 邵 军³

(1. 东北石油大学提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第六采油厂, 陕西 西安 710018; 3. 大庆炼化公司, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对低渗特低渗等非常规油藏注水开发存在水注不进液采不出的难题,系统论述了微乳液驱对低渗油藏降压增注、调剖堵水、储层保护等提高采收率的驱油机理,注入油藏中微乳液黏度高于水,相比水驱能够改善油水流度比,减小驱替液的黏性指进,微乳液与油接触也会产生超低界面张力,降低毛管阻力,改变岩石润湿性,扩大油藏宏观波及体积。另外,微乳液在流经油藏的孔吼通道时,也会通过对原油增溶、黏弹性拖拽等协同作用,提高油藏洗油效率。同时,也对几种对低渗油藏驱油适用性较好的微乳液(超临界CO₂微乳液、纳米微乳液、原位乳化微乳液和微乳液泡沫)的类型和性质进行了论述。并论述了不同类型微乳液在实际现场低渗透油藏降压增注提高采收率中的应用效果,微乳液驱能普遍使低渗油藏中注水井注入压力降压35%以上,油井的增油效果也较好。通过该论述旨在为当前低渗透等非常规油藏应用微乳液驱油提高采收率技术提供一定的理论借鉴。

关键词:微乳液驱;驱油机理;非常规油藏;降压增注;提高采收率;综述

文献标识码:A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.04.028

中图分类号:TE357.46

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

微乳液是一种由水、油、表面活性剂及助剂复配而成的具有透明、光学各向同性、热力学稳定性的混合体系^[1-4]。与常规乳液相比,微乳液的液滴粒径小,通常在10~100 nm之间,具有超低的界面张力(<20 mN/m),并具有双向润湿性,对油增溶能力强^[5-7]。微乳液驱能对低渗油藏起到降压增注作用同时可改善渗吸驱油提高采收率效果,这为低渗油藏的高效开采提供了新思路^[8]。由于油藏岩石表面常带负电性,因此配制驱油用微乳液一般选择阴离子型表面活性剂,这可避免表面活性剂在地层的过度吸附损耗。微乳液配制时所选用的常用阴离子型表面活性剂主要是石油磺酸盐类^[9],此外,还加入了正丁醇、*t*-戊醇及氯化钠、碳酸钠等助剂,以保证

微乳液界面稳定性和更好发挥其降低油水界面张力能力^[10]。助剂的功能主要是吸附在油水界面上稳定和软化界面膜,促进表面活性剂的亲水亲油平衡作用。驱油用微乳液具有多种类型,Jeirani^[11]应用混合膜理论分析认为,在配制微乳液时会在油、水界面上形成表面活性剂及助剂吸附的混合膜,混合膜的两侧受到不均衡界面张力和表面压的影响而发生剪切弯曲,形成水包油型(O/W)、油包水型(W/O)和双连续型的微乳液。微乳液被注入油藏中与油或水接触后,微乳液也会由对油水的增溶和表面活性剂及助剂的损耗发生相行为转变,改变微乳液的性质^[12]。对于微乳液驱油时发生的相行为判断主要是应用微乳液体系的亲水亲油平衡值(HLB)值法、拟三元相图、鱼状相图和电导率分析等方法^[13-14]。HLB值法由Salager等^[15]最早提出,认

* 收稿日期:2022-12-13;修回日期:2023-03-20。

作者简介:张志超(1987—),男,工程师,东北石油大学石油与天然气工程专业博士研究生(2021—),从事CO₂地质埋存驱油研究工作,通讯地址:163318 黑龙江省大庆市高新区东北石油大学石油工程学院, E-mail: 1209712605@qq.com, zhang-zhichao@nepu.edu.cn。

为当评价体系的 $HLB>0$ 时,形成油包水(W/O)型微乳液;当 $HLB<0$ 时,形成水包油(O/W)型微乳液;当 $HLB=0$ 时,形成双连续型微乳液。刘倩等^[16]、蓝强等^[17]应用拟三元相图和鱼状相图的方法对微乳液的相变行为进行了论述,认为通过相图分析能够清楚地确定不同微乳液相区域的范围,获得优化参数,且能够预测微乳液驱时由于不同组分变化导致的相行为变化。微乳液驱对油藏采收率的提高效果与微乳液对其增溶油能力以及产生的超低界面张力相关,对油增溶能力越好、对油水界面张力降低越低,驱油效果越好。吴章辉等^[18]依据 HLB 方程,分析了微乳液对地层油增溶能力的影响因素,发现微乳液对油相的增溶能力与油的组成无关,而与油的等效烷基碳数和醇助剂的用量相关,等效烷基碳数越小、醇用量高时,微乳液对油的增溶能力越强,降低油水界面张力的能力也越好。因此,通过对微乳液驱油机理和当前的发展状况进行论述,对其在低渗透等非常规油藏提高采收率技术中的应用提供一定的理论借鉴。

1 微乳液的驱油机理

1.1 降低界面张力

水油相间界面张力较高,通常在 $20\sim 30\text{ mN/m}$ 数量级,导致水驱油藏存在较高的毛管驱替阻力,特别是在低渗特低渗油藏水驱时,这种现象更明显^[19]。而微乳液与油相间界面张力极低,一般在 $10^{-2}\sim 10^{-4}\text{ mN/m}$ 数量级^[20]。当将微乳液注入油藏后,形成超低的油水界面张力可降低驱替阻力,起到降压增注的作用。此外,在相同的驱替压差下,微乳液相比水能进入更小的油藏孔隙中驱油,扩大波及体积。另一方面,微乳液中表面活性剂在岩石上的吸附也会改善孔隙润湿性,降低微乳液剥离岩石壁面吸附油的黏附功,有利于黏附在岩石上的剩余油脱离岩石壁面,提高油藏采收率。对于微乳液降低油水界面张力的表征,崔乐雨等^[21]提出可由 $Chun-Huh$ 公式(1)进行表述,发现微乳液降低油水界面张力的能力随增溶参数(V_i/V_s)变大呈指数降低,在对油水增溶能力相同时,形成了驱油效果最好的中相微乳液。而微乳液注入油藏后,能够降低油水界面张力,使毛管数从 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 增至 $10^{-4}\sim 10^{-2}$,促进了油藏的吸液、排油能力,扩大了油藏波及体积,能够将

油藏中的残余油饱和度从100%降低至30%左右,提高油藏采收率^[20,22]。吕其超等^[23]也基于室内微乳液驱油实验证实,岩心驱替至含水95%后注入0.3 PV的微乳液驱替后可提高采收率22.4%。

$$IFT_{mi} = \frac{C}{(V_i/V_s)^2} \quad (1)$$

式中, IFT_{mi} —微乳液与油或水之间的界面张力, mN/m ; V_i —油或水相的增溶量, mL ; V_s —配制微乳液表面活性剂用量, mL ; C —特征常数。

1.2 调剖堵水

微乳液在注入油藏后仍能保持较高的流体黏度,减小油水流动度比,从而防止驱替剂的黏性指进。Davidson等^[24]通过室内微乳液微观驱油实验,发现被地层孔喉剪切后的微乳液黏度保留率是提高油藏驱油效果的重要参数。殷代印等^[25]通过室内光刻玻璃驱油实验证实,在地层温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,微乳液驱油被剪切后的剩余黏度为 $4.3\sim 8.2\text{ mPa}\cdot\text{s}$,而同等条件下水的黏度仅为 $0.65\text{ mPa}\cdot\text{s}$,在微乳液驱后的采收率相比水驱提高了26.38个百分点。因此,微乳液驱相比水驱能很好地调整流度比,扩大油藏波及体积。但对于非均质性极强油藏,如砾岩油藏,常规微乳液调整流度的能力有限,解决该问题关键是优化注入工艺和微乳液的性质。鲍博等^[26]针对强非均质性油藏研发了黏度保留率非常高的W/O/W复合型微乳液,驱油实验证实,该复合型微乳液被注入微流控芯片后,可极大地调整吸水剖面。在注入工艺方面,目前较常用的是聚合物前置段塞+微乳液段塞+聚合物保护段塞,可防止微乳液的突进,提高洗油效率^[27]。此外,除具有调剖能力外,微乳液还具有一定的类似聚合物驱的黏弹性驱油效果。Preziosi等^[28]论述了微乳液在岩石中黏弹性驱油的机理,认为微乳液流经收缩吼道时,液滴发生弹性收缩和拉长变形,经过吼道后微乳液在静电斥力和分子间斥力作用下发生弹性恢复会拖拽孔吼处富集的原油拉长、截断被采出,提高油藏驱油效率。

1.3 增溶驱油

微乳液具有增溶能力,可将流经孔隙壁面的油膜状剩余油、盲端状剩余油增溶采出,提高油藏洗油效率^[29]。微乳液被注入油层时,随着微乳液在油层中运移,会与油水接触增溶油水并引发相变。当

阴离子型表面活性剂作为乳化剂时,地层水矿化度增加会压缩表面活性剂的双电层,表面活性剂的亲油性变强,微乳液易发生向W/O型微乳液转变。而对于非离子型微乳液体系,矿化度会影响其相行为,体系矿化度增加时会破坏水和表面活性剂间氢键的稳定性,导致表面活性剂亲水能力下降,改变相行为^[12]。随着微乳液携带油滴聚并成油墙时,微乳液中的表面活性剂进入油相中的量多,这会改变油水界面膜的性质,促使微乳液向W/O型微乳液转变。W/O型微乳液具有黏度高、密度高、稳定性强的特点,对非均质油藏的深部调剖效果好。对于靠近后续水驱段塞的微乳液,由于微乳液中的盐和助剂向水相中扩散,导致微乳液自身稳定性变差,逐渐转变为O/W型微乳液,增加了后续水驱时的黏度,从而可防止水驱的过早突破。因此,在微乳液驱油过程中,微乳液在油藏中存在W/O型和O/W型多种相态,并且也会由于其对油水的增溶、助剂和表面活性剂的扩散诱发相行为转变,发挥不同的协同提高油藏采收率功能。

1.4 储层保护

油井结蜡和压裂液返排不充分,均会使低渗油藏采油井发生堵塞,影响开采效果。微乳液被注入油藏后对重质油也具有一定增溶作用,且微乳液中的表面活性剂分子也会在重质原油分子间吸附,阻止重质油桥接形成更大的沉淀。在油井压裂时,注入微乳液能够改变油藏近井地带的润湿性,降低油水界面张力,从而促进压裂液返排。陈曦等^[30]通过室内实验证实,油湿性的云母片被中相微乳液浸泡后,润湿角可增至65~90°,中性润湿程度增加,降低了压裂液与裂缝壁面的分离压,压裂液返排率相比注水压裂时增加了28%。此外,微乳液改变油藏润湿性向中性偏移时,也可降低强亲水地层对钻井液中自由水渗吸,抑制泥页岩的水化膨胀,保护井壁。张敬辉等^[31]进行了微乳液对页岩井壁稳定性的研究,发现页岩内部的钠离子进入微乳液中促使微乳液聚并形成几百纳米的微乳堵塞了页岩孔道,会阻止页岩继续吸水膨胀。

2 非常规油藏驱油用微乳液

2.1 超临界CO₂微乳液

超临界CO₂微乳液是一种性质特殊的微乳液,

是以非极性的CO₂为连续相、低分子多元醇和表面活性剂为助剂、原油为非连续相的分散体系。超临界CO₂在进入油藏萃取驱油时,仅能萃取一些低分子烃类,且与原油之间的混相压力高。而超临界CO₂微乳液注入油藏后可有效降低CO₂与油相间界面张力,从而可降低CO₂与原油间的最小混相压力^[32]。此外,超临界CO₂微乳液相比CO₂混相驱提高了驱替液的黏度,改善了流度比,可有效延缓CO₂在生产井的突破时间。郭爽等^[33]论述了CO₂也可作为微乳液形成的触发开关用于解决微乳液破乳问题。在CO₂与烷基咪唑交替注入油藏时,CO₂与烷基咪唑反应转化为碳酸氢盐表面活性物质,诱导微乳液形成并提高油藏采收率,而被驱替出的微乳液在地面降压,CO₂分离,快速促进破乳,分离油和水。张永民等^[34]论述将*N,N*-二甲基-*N*-十二烷基胺作为助表面活性剂加入三元复合体系中复配得到的CO₂刺激型微乳液的性质,发现在CO₂与N₂交替注入10次后,微乳液体系能够在乳化和破乳之间不断转换,且形成的微乳液对油砂中的残余油的洗油能力较好。但也指出CO₂刺激响应后溶液的pH值变化范围很窄,能够响应CO₂的分子也多为弱酸和碱,其实际应用尚不成熟。配制超临界CO₂微乳液的主要技术难点是合成既能溶解于非极性CO₂中又能溶解于油相中的表面活性剂,目前,研究较成熟的主要是含—F基的表面活性剂。Johnston等^[35]合成了一种全氟聚醚碳酸铵盐表面活性剂PFPE,并应用于超临界CO₂微乳液的配制,得到了性质良好的超临界CO₂微乳液。目前已知的氟化表面活性剂主要有8FG(EO)₂、8FS(EO)₂,氟-碳双结构的di-C5SS、di-CF1、di-CF2、di-CF4表面活性剂以及具有氟碳(FC)和碳氢(HC)双尾链结构的表面活性剂等^[36-37]。但氟化表面活性剂对于地层水等有较强的污染,限制了其工业推广。祁建磊等^[36]研究发现氟原子个数小于8的表面活性剂具有一定的安全环保性,并指出另一种可用于CO₂微乳液配制的不含硅、氟的非离子表面活性剂(LS-mn)系列、TMN系列及Dynol系列。超临界CO₂微乳液的驱油技术目前尚未得到矿场应用,主要处于室内实验阶段。美国UT Austin大学、荷兰TU Delft大学、法国TOTAL石油公司、美国Rice大学^[38-41]的研究者们对微乳液泡沫的驱油效果进行了评价,发现应用微乳液泡沫可

使油水界面张力降至 10^{-2} mN/m, 且能够较好地提高采收率。

2.2 纳米微乳液

低渗特低渗油藏的孔吼尺寸非常小, 注水驱油困难, 提高采收率的主要手段就是降压增注。纳米微乳液的液滴尺寸小, 多为纳米级, 小于多数非常规油藏岩心的孔喉直径, 能比较容易地进入大部分岩心孔隙中驱油^[42]。赵雅洁等^[43]通过对配制的纳米微乳液体系进行zeta电位和激光粒度分析, 发现表面活性剂质量分数为0.05%、0.1%、0.3%的纳米微乳液的液滴粒径均在10 nm左右, 远小于低渗特低渗油藏的孔吼半径, 可很好地进入岩石孔隙中驱油。吴宇航等^[44]也进行了纳米硅型微乳液降压增注实验, 发现在岩心渗透率为 $0.279 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心中注入5 PV的纳米硅微乳液, 比注水降压44%以上, 降压增注效果较好, 而微乳液中加入纳米材料后, 进入岩心孔隙驱油时会起到纳米材料和微乳液的协同作用, 提高洗油效率。此外, 纳米微乳液也通过将油相分散成极小液滴形式增加在油藏中的渗流能力, 提高对低渗特低渗油藏的采收率。

2.3 原位乳化微乳液

地面配制微乳液的胶束中已经增溶了一定量的原油, 注入油藏后对油相增溶窗口变窄, 这会影响微乳液的增溶驱油效果^[45]。向油藏中注入表面活性剂强化水发生原位乳化, 可提高微乳液的增溶窗口, 且表面活性剂强化水的黏度较微乳液的低, 因此, 在低渗透油藏中的注入性更好。微乳液原位乳化过程如图1所示。表面活性剂强化水注入油藏时与原油接触, 且在醇、盐助剂作用下发生原位乳化, 对流经区域油膜起到清洗作用, 改善油藏润湿性, 降低毛管压力^[46]。黎锡瑜等^[47]通过光刻玻璃原位乳化驱实验发现, 原位乳化驱油的注入压力比直接注入微乳液驱油压力小很多。李织宏等^[48]认为油藏中原位乳化驱油效果主要与表面活性剂浓度、注入速度相关。表面活性剂浓度低时, 油藏孔隙内形成的微乳液界面膜不稳定, 易发生液滴聚并向乳状液转化。注入速度则影响地层中原位乳化的程度, 高注入速度会导致地层中原位乳化未发生或乳化不完全即采出, 影响驱油效果; 低注入速度影响原油的采出速度。

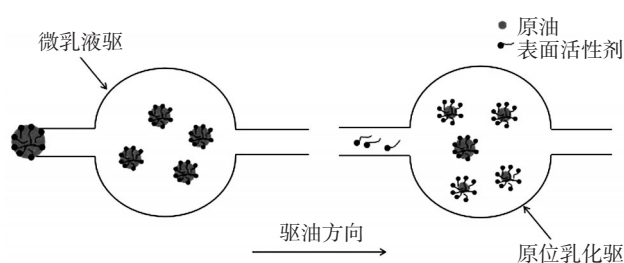


图1 微乳液原位乳化驱油机理

2.4 微乳液泡沫

虽然微乳液驱油的效果较好, 但对高温、高盐油藏的适应性较差。泡沫强化采油在非常规油藏中应用展现了非常好的低注入阻力和耐温、耐盐特性。泡沫驱强化采油是以同步或交替注入活性水和 N_2 或 CO_2 等在油藏中形成气泡体系, 驱油体系中的气泡膜上由于吸附了表面活性剂, 使气泡间产生静电斥力或分子间阻力, 防止气泡聚并和消灭^[49]。泡沫在流经孔吼时, 在毛管力、气泡间界面膜阻力、贾敏效应综合作用下起到调剖作用。微乳液泡沫驱油时结合了微乳液提高洗油效率和泡沫调整吸水剖面的两种特性, 泡沫调整油藏流度, 促使微乳液转向到油藏的更小孔隙中, 提高波及体积; 而微乳液通过降低流经孔道的含油饱和度, 在原油和气泡间产生隔离作用, 防止地层原油与气泡直接接触产生消泡作用, 促使微乳液和泡沫复合驱油产生了1+1>2的强化采油效果^[50]。

3 微乳液驱油技术现场应用状况

微乳液驱油技术当前在低渗非常规油藏应用主要是通过降压增注方式提高低渗油藏注水量, 从而提高驱油效果, 而应用微乳液驱油提高油藏采收率的矿场应用目前还相对较少, 尚处于探索性试验阶段。赵柏杨等^[6]通过正交实验方法优选出IOS(内烯烃磺酸盐)的微乳液体系在大庆榆林林低渗油田进行了驱油试验, 发现该微乳液与地层孔吼配伍性较好, 微乳液体系与油相能够形成超低界面张力, 达到 6×10^{-6} mN/m, 对油藏内的残余油挖潜效果较好。吴天江等^[10]以十二烷基苯磺酸钠、椰油脂肪酸脂聚氧乙烯甜菜碱、正丁醇和NaCl与水复配得到性能优异的中相微乳液, 并在长庆油田五里湾区块的6个井组进行了先导性试验, 注入2个月后, 井组中的油井平均日产油由58 t上升至62 t, 含水由69%

降至65.6%,增油效果明显。王伟琳等^[51]应用阴非离子表面活性剂和阳非离子表面活性剂复合方法配制了原位微乳液表面活性剂体系,并将其应用于冀东油田、胜利油田等低渗透油田注水井降压增注矿场试验,试验结果表明,对冀东油田渗透率为 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的特低渗透区块的4口水井,注入 $80 \sim 100 \text{ m}^3$ 的质量分数为0.5%的原位微乳液表面活性剂体系后,水井的注水压力下降了8 MPa,井组累积增注 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水,同时油井配合注入 3000 m^3 原位乳化剂渗吸吞吐,焖井10~15 d后开井生产,油井累积增油3000 t以上,微乳液驱措施有效率达95%以上。胜利油田的牛庄油田、博兴油田和胜利油田滨B区块也分别应用该原位乳化技术进行了水井增注和提高采收率实验,发现原位微乳液驱油后,水井普遍降压35%以上,油井累积增油在2500~3450 t之间,驱油效果明显。吕文斌等^[52]将纳米硅和阴离子型表面活性剂NBL-10、非离子型表面活性剂FLS-3复配的微乳液应用于平均渗透率低于 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 油藏的降压增注试验,将配方为1.5%阴离子型表面活性剂NBL-10+2.0%非离子型表面活性剂FLS-3+5.0%低碳醇+0.5%纳米硅材料+8.5%白油+82.5%水的复配体系注入DS油藏进行驱油时,可降低油水界面张力至 10^{-3} mN/m 数量级,驱替压力降低了35%以上。

4 结束语

微乳液驱是低渗透油藏等非常规油藏降压增注提高采收率的一项重要技术,注入油藏中的微乳液与油相接触会形成超低界面张力,能够降低驱替毛管数,提高油藏的采收率。在国内外矿场实验中微乳液驱均取得了良好驱油效果。但微乳液的黏度和密度较低,在油藏中注入驱油时由于缺少有效的流动控制手段,常常沿着高渗储层突窜,会导致对油藏的宏观波及系数过低,影响对油藏内小孔隙中油的驱替效率。因此,微乳液驱地下调驱技术的研究,对提高微乳液油藏驱油矿场应用效果具有重要的意义。此外,微乳液虽然能够与油相间形成超低界面张力,提高毛管数,有利于对油藏内残余油的挖潜,但微乳液在地层孔隙中渗流时,表面活性剂在地层岩石表面会大量吸附导致其驱油效果下降,且微乳液驱油井采出液乳化也更加严重,增加

了地面油水分离成本。因此,研制能够在储层孔隙中稳定存在且易于在地面破乳分离的对温压响应或 CO_2 响应型的微乳液,在油田现场的规模化应用具有重要的意义。

参考文献:

- [1] DANTAST N D, VIANA F F, SOUZA T T C, et al. Study of single-phase polymer-alkaline-microemulsion flooding for enhancing oil recovery in sandstone reservoirs[J]. Fuel, 2021, 121176.
- [2] 袁迎, 刘会娥, 徐明明, 等. 十二烷基苯磺酸钠微乳液体系中无机盐的作用规律[J]. 化工学报, 2014, 65(10): 4025-4031.
- [3] 牛红博, 燕永利, 豆龙龙, 等. 微纳米 SiO_2 颗粒的粒径调控技术研究进展[J]. 日用化学工业, 2022, 52(7): 770-777.
- [4] 梁玉凯, 于晓聪, 袁辉, 等. 低渗透油藏自发生成中相微乳液洗油体系[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 690-696.
- [5] 杨哲, 郭爽, 张永民. 微乳液的基本理论及应用[J]. 中国洗涤用品工业, 2020(8): 81-89.
- [6] 赵柏杨, 夏连晶. 低渗透油藏内烯烃磺酸盐微乳液体系配方优选及性能评价[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 102-108.
- [7] 耿向飞, 丁彬, 管保山, 等. 微乳液技术在储层改造中的应用研究进展[J]. 精细石油化工, 2022, 39(2): 74-77.
- [8] 殷代印, 贾江芬. 低渗透油藏微乳液驱配方优选及微观剩余油研究[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(7): 19-24.
- [9] 殷代印, 高楠. 低渗岩心实验参数在微乳液驱数值模拟中的应用[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 114-118.
- [10] 吴天江, 吕伟, 李丛妮, 等. 低渗透油藏中微乳液驱油体系筛选[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2551-2555.
- [11] JEIRANI Z, JAN B M, ALI B S, et al. In situ prepared micro-emulsion-polymer flooding in enhanced oil recovery: A review[J]. Pet Sci Technol, 2014, 32(2): 240-251.
- [12] 陈爽, 高盛嵩, 康耀明, 等. 正丁醇和油水体积比对馏分油微乳液体系的影响[J]. 精细化工, 2022, 39(12): 2474-2480.
- [13] 刘士伟, 顾学林, 陈爽, 等. 醇及无机盐对阴离子型微乳液相行为的影响[J]. 化学工程, 2022, 50(3): 47-52.
- [14] 王婉, 陈爽, 刘会娥, 等. 助表面活性剂及油水比对微乳液相行为的影响[J]. 精细化工, 2020, 37(8): 1645-1652.
- [15] SALAGER J L, MALDONADO L I, MINANA P M, et al. surfactant-oil-water systems near the affinity inversion (I): Relationship between equilibrium phase behavior and emulsion type and stability [J]. J Dispersion Sci Technol, 1982, 3(3): 279-292.
- [16] 蓝强. 非离子微乳液制备及其对钻井液堵塞的解除作用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 1-6.
- [17] 刘倩, 管保山, 刘玉婷, 等. 微乳液作为油气增产助剂的研究及应用进展[J]. 应用化工, 2020, 49(12): 3230-3236.
- [18] 吴章辉, 马雁冰, 刘会娥, 等. 微乳液最佳中相醇用量和增溶能力与油相等效烷基碳数的定量关系[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1399-1404.

- [19] 韩方,刘卫东,管保山,等.超低界面张力重烷基苯磺酸盐复配驱油剂研究[J].应用化工,2021,50(9):2338-2343.
- [20] 李应成,鲍新宁,张卫东,等.国内外强化采油用表面活性剂研究进展[J].精细化工,2020,37(4):649-656.
- [21] 崔乐雨,李应成,何秀娟,等.微乳液泡沫驱油技术原理、挑战和研究进展[J].精细化工,2022,39(1):56-64.
- [22] 赵学之,廖广志,刘卫东,等.表面活性剂驱油机理研究新进展:胶束增溶和原位乳化[J].中国科学:化学,2023,53(7):1088-1103.
- [23] 吕其超,张洪生,左博文,等.特高含水期微乳液驱油规律微观可视化实验研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2020,35(2):71-77.
- [24] DAVIDSON A, NIZAMIDIN N, ALEXIS D, et al. Three phase steady state flow experiments to estimate microemulsion viscosity [C]//SPE Improved Oil Recovery Conference. Tulsa, Oklahoma, USA, 2016:1-12.
- [25] 殷代印,项俊辉,房雨佳.低渗透油藏微乳液驱微观剩余油驱替机理研究[J].特种油气藏,2017,24(5):136-140.
- [26] 鲍博,史嘉威,冯嘉,等.基于微流控技术的表面活性剂强化驱油研究进展[J].石油学报,2022,43(3):432-442.
- [27] 赵觅,吴迪,王鉴.石油磺酸盐驱油体系微乳液的形成及增溶特性研究[J].科学技术与工程,2015,15(28):144-150.
- [28] PREZIOSI V, PERAZZO A, TOMAIUOLO G, et al. The effect of flow on viscoelastic emulsion microstructure [J]. Eur Phys J E, 2018,41-45.
- [29] NAZAR M, SHAH S S, KHOSA M A. Microemulsions in enhanced oil recovery: A review[J]. Pet Sci Technol, 2011, 29(13):1353-1365.
- [30] 陈曦,郭丽梅,高静.微乳助排剂的研制及性能评价[J].石油与天然气化工,2017,46(3):88-93.
- [31] 张敬辉.微乳液提高井壁稳定性实验研究[J].钻井液与完井液,2017,34(1):23-27.
- [32] 董朝霞,崔波,李翼,等.超临界CO₂微乳液与烷烃的最小混相压力研究[J].石油化工高等学校学报,2013,26(1):40-44.
- [33] 郭爽,陈志强,任笑菲,等.CO₂响应型乳液体系[J].化学进展,2017,29(7):695-705.
- [34] 张永民,穆蒙,周越,等.二氧化碳刺激响应型微乳液及应用[J].化学教育(中英文),2023,44(14):7-14.
- [35] JOHNSTON K P, HARRISON K L, CLARKE M J, et al. Water-in-carbon dioxide microemulsions: An environment for hydrophiles including proteins[J]. Science, 1996, 271(5249):624-626.
- [36] SAGISAKA M, ONO S, JAMES C, et al. Effect of fluorocarbon and hydrocarbon chain lengths in hybrid surfactants for supercritical CO₂[J]. Langmuir, 2015,31(27):7479-7487.
- [37] 祁建磊,周丹,任泓睿,等.超临界二氧化碳微乳液的性质与应用研究[J].应用科技,2021,48(2):100-109.
- [38] DAS A, NGUYEN N, FARAJZADEH R, et al. Laboratory study of injection strategy for low-tension-gas flooding in high salinity, tight carbonate reservoirs[C]//SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. Muscat, Oman, March 26-28, 2018.
- [39] DONG P, PUERTO M C, MA K, et al. Ultralow-interfacial-tension foam-injection strategy in high-temperature ultrahigh-salinity fractured oil-wet carbonate reservoirs[J]. SPE J, 2019, 24(6):2822-2840.
- [40] JANSSEN M T G, MUTAWA A S, PILUS R M, et al. Foam-assisted chemical flooding for enhanced oil recovery: Effects of slug salinity and drive foam strength[J]. Energ Fuel, 2019, 33(6):4951-4963.
- [41] COTTIN C, MOREL D C, LEVITT D, et al. Alkali surfactant gas injection: Attractive laboratory results under the harsh salinity and temperature conditions of Middle East carbonates [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi, UAE, November 11-14, 2012.
- [42] 侯吉瑞,闻宇晨,屈鸣,等.纳米材料提高油气采收率技术研究及应用[J].特种油气藏,2020,27(6):47-53.
- [43] 赵雅洁,侯吉瑞,屈鸣,等.致密油藏纳米微乳液性能评价与驱油机理分析[J].油田化学,2022,39(2):338-342.
- [44] 吴宇航,龚辉,夏康杰,等.一种纳米硅型微乳液对低渗透油藏降压增注适应性研究[J].钻采工艺,2020,43(2):111-114.
- [45] 李强,王业飞.微乳体系在高凝油开采的应用[C]//中国化学会第十六届胶体与界面化学会议论文摘要集——第六分会:应用胶体与界面化学.2017:109-111.
- [46] 王锐,伦增珉,吕成远,等.中外提高采收率新技术研究现状及发展趋势[J].油气地质与采收率,2021,28(5):81-86.
- [47] 黎锡瑜,刘艳华,安俊睿,等.原位微乳液驱微观驱油实验研究[J].油田化学,2017,34(1):137-142.
- [48] 李织宏,云庆庆,唐文洁,等.石油磺酸盐乳化相行为及乳化作用对提高采收率的影响[J].油田化学,2020,37(3):468-473.
- [49] SUN L, BAI B J, WEI B, et al. Recent advances of surfactant stabilized N₂/CO₂ foams in enhanced oil recovery [J]. Fuel, 2019, 241:83-93.
- [50] SUN S, ZHANG X, WANG P, et al. Emulsified oil phase induced internal instability of ionic and nonionic foams revealed by coarsegrained molecular dynamics simulation [J]. Comput Mater Sci, 2019, 169:109111.
- [51] 王伟琳,李应成,徐岩光,等.原位微乳液表面活性剂体系研制及在降压增注中的应用[J].大庆石油地质与开发,2021,40(2):116-122.
- [52] 吕文斌,王博,曹耀平,等.低渗透油藏注水井纳米微乳液降压增注体系研究[J].当代化工,2022,51(2):370-373.

Research Progress of Micro-emulsion Flooding Technology

ZHANG Zhichao¹, BAI Mingxing¹, WANG Yong², NIE Jianfeng², LIU Jingyuan¹, SHAO Jun³

(1. Key Laboratory of EOR, Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, P R of China; 2. No. 6 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, P R of China; 3. Daqing Refining and Chemical Company, Daqing, Heilongjiang 163318, P R of China)

Abstract: Because of the difficult problem of water injection and liquid production in unconventional reservoirs such as low-permeability and ultra-low permeability reservoirs, this paper systematically discussed the oil displacement mechanism of micro-emulsion flooding for improving oil recovery in low-permeability reservoirs, such as injection pressure reduction and injection ability increase, profile control and water plugging, and reservoir protection. Compared with water flooding, the viscosity of injected micro-emulsion into the reservoir is higher than that of water. Thus, it can improve the oil-water mobility ratio, reduce the viscous fingering of displacement fluids, and reduce interfacial tension (IFT) between the micro-emulsion system and oil phase, which reduces capillary resistance, changes wettability of reservoir rock, and expands the macroscopic sweep volume in the reservoir. In addition, when the micro-emulsion flows through the pore and throat channel of the reservoir, it will also improve the oil-washing efficiency of the reservoir through the synergistic effect of oil solubilization, viscoelastic drag, etc. At the same time, various types and properties of microemulsions (supercritical CO₂ micro-emulsion, nano micro-emulsion, in-situ micro-emulsion, and micro-emulsion foam) with good applicability of oil displacement for low permeability reservoirs were also discussed. The application effect of different types of micro-emulsion in actual low permeability fields was also discussed in this paper. It was found that micro-emulsion flooding can generally reduce the injection pressure of water injection wells in low permeability reservoirs by more than 35%, and the oil increase effect of oil wells was also good. The purpose of this review is to provide a certain theoretical reference for the application of micro-emulsion flooding to enhance oil recovery in low permeability and other unconventional reservoirs.

Keywords: *micro-emulsion flooding; oil displacement mechanism; unconventional reservoir; reduced injection pressure and enhanced water injection; enhanced oil recovery; review*

(上接第 728 页。continued from p. 728)

Research Status of Self-healing Materials in the Field of Oil and Gas Drilling and Production

SANG Yutong^{1,2}, ZHENG Jingxi^{1,2}, ZHANG Yixi^{1,2}, ZHANG Fengrunze^{1,2}, BAO Dan^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P R of China; 2. Chongqing Oil and Gas Field Chemical Engineering Technology Research Center, Chongqing 401331, P R of China)

Abstract: Self-healing material is a kind of material which can heal itself after being damaged by external action. It is of great significance to prolong the service life of materials, eliminate safety hazards and reduce maintenance costs. In recent years, it has been widely researched and applied in the field of oil and gas drilling and production. Self-healing materials were classified into external and intrinsic types based on different healing methods. The healing mechanisms and characteristics of external (microcapsules, oil and gas activated materials, differential pressure activated sealants) and intrinsic (physical self-healing, chemical self-healing) self-healing materials were systematically summarized in this paper. Physical self-healing mainly included hydrogen bonding, hydrophobic association, ionic bond actions, host-guest recognition. Chemical self-healing mainly included the combination and fracture of imine bond, acylhydrazone bond, disulfide bond, etc. The research status of different types of self-healing materials in the fields of well cementing, downhole pipe fittings repair, leak-proof plugging, wellbore strengthening, fluid loss reduction, and profile control and water shutoff was summarized, and the prospects for their development were prospected.

Keywords: *self-healing; external; intrinsic; - leak-proof plugging; research status; review*