

文章编号:1009-9603(2022)03-0162-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202101049

压裂-驱油一体化工作液研究进展

曾慧勇^{1,2},陈立峰^{1,2},陈亚东^{1,2},李岗^{1,2},毛志强^{1,2},刘靛^{1,2}

(1.长江大学石油工程学院,湖北武汉430100;2.油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学),湖北武汉430100)

摘要:随着石油工业对降低成本、绿色环保问题的日益关注,对于兼具压裂、驱油双重功效的工作液的研究越来越受到重视。为了更好地研究压裂-驱油一体化工作液体系,综述了返排液驱油体系和驱油压裂液体系的组成、驱油性能研究现状及现场应用情况,并对其发展进行展望。返排液驱油体系的构建均基于清洁压裂液尤其是以阳离子表面活性剂为主要成分的清洁压裂液;驱油压裂液体系包括清洁驱油压裂液体系、聚合物驱油压裂液体系、滑溜水驱油压裂液体系及其他类型驱油压裂液体系,其中驱油增效性清洁压裂液是最具潜力的。降低成本、增强耐高温性能、加强微观结构和静、动态流变性能机理研究是压裂-驱油一体化工作液未来研究的关键。对现场应用与室内实验研究结果进行对比,进一步完善压裂液返排液驱油体系也是未来的重要工作方向。

关键词:工作液;返排液;驱油体系;压裂液;提高采收率

中图分类号:TE357.1²

文献标识码:A

Research progress on fracturing-oil displacement integrated working fluid

ZENG Huiyong^{1,2}, CHEN Lifeng^{1,2}, CHEN Yadong^{1,2}, LI Gang^{1,2}, MAO Zhiqiang^{1,2}, LIU Liang^{1,2}

(1.College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2.Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Hubei Province(Yangtze University), Wuhan City, Hubei Province, 430100, China)

Abstract: With the increasing concern of the oil industry about cost reduction and environmental protection, ever more attention has been paid to the research on the working fluid capable of both fracturing and oil displacement. For the further study on the fracturing-oil displacement integrated working fluid, the research on the composition, the oil displacement performance, and the field application of the oil displacement system of fracturing flowback fluid and the oil-displacement fracturing fluid system were reviewed, and future developments were forecasted. The construction of the oil displacement system of fracturing flowback fluid is based on clean fracturing fluid, especially the one with cationic surfactant as the main component; the oil-displacement fracturing fluid system includes the ones based on clean fracturing fluid, polymer, slickwater, etc., among which the clean oil-displacement fracturing fluid system with enhanced efficiency presents the greatest potential. Reducing cost, enhancing high temperature resistance, and strengthening the study on microstructure and static and dynamic rheological properties are the keys to the future research on the fracturing-oil displacement integrated working fluid. The comparison between the field application and laboratory test results demonstrates that further improving the oil displacement system of fracturing flowback fluid also represents an important direction for the future work.

Key words: working fluid; fracturing flowback fluid; oil displacement system; fracturing fluid; EOR

随着社会经济的快速发展,中国对石油资源的需求量不断增加,对外依存度也逐年攀升。2018年中国原油对外依存度高达70.5%,国家能源安全形

势日益严峻^[1-2]。而中国东部大部分油田已进入中高含水期,发展非常规油气已成为解决中国能源问题的重要手段,非常规油气主要有致密油、致密气、

收稿日期:2021-04-21。

作者简介:曾慧勇(1999—),男,江西吉安人,在读硕士研究生,从事油田化学和提高采收率技术研究。E-mail:zenghuoyong0@163.com。

通信作者:陈立峰(1987—),男,山东滨州人,副教授,博士。E-mail:LYJ505523522@126.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“热敏聚合物纳米流体高温触变机制研究”(52074038)。

页岩油、页岩气、煤层气、天然气水合物等^[3]。中国非常规油气资源潜力巨大,目前致密油和页岩油已探明地质储量为 7.37×10^8 t,剩余控制储量和预测储量为 18.3×10^8 t,建成产能 100×10^4 t/a以上^[4-5]。压裂和三次采油是非常规油藏提高采收率的重要工艺,常规工艺是先进行压裂作业,将压裂液进行返排后再进行三次采油施工^[6],但这样存在工艺复杂、时间跨度大、压裂液难以完全返排、残渣会伤害地层并影响后续采油、返排液处理困难等问题。目前,压裂-驱油一体化工作液主要可以分为压裂液返排液驱油体系和驱油压裂液体系两类。压裂液返排液驱油体系的种类较为单一,主要是将清洁压裂液返排液进行处理后通过室内实验进行体系的构建;而驱油压裂液体系的种类和应用则相对较多,根据其主剂的不同可以分为清洁驱油压裂液体系、聚合物驱油压裂液体系、滑溜水驱油压裂液体系以及其他类型驱油压裂液体系。压裂-驱油一体化工作液的研制能够简化工艺、缩减成本、降低环境污染风险,对非常规油气的开采具有重要意义。为此,笔者对压裂-驱油一体化工作液的研究和应用现状进行调研分析,进而对今后的发展方向提出建议,以期对相关研究提供参考。

1 压裂液返排液驱油体系研究进展

由于对石油工业降低成本、环境保护等问题越来越关注,对于压裂液返排液再次利用的研究也越来越重视。通过室内实验研究,基于压裂液返排液的驱油体系已经成为压裂液返排液二次利用的一个重要方向。

陈世军等以压裂液返排液为基液,经处理后添加枯草菌脂肽钠、月桂酰水解蚕丝钠、聚异丁烯丁二酰、烃基硫酸盐、多烯多胺羧酸盐等助剂制成性能良好的驱油剂^[7]。实验表明,该驱油剂具有良好的耐温抗盐性能,使用不同矿化度($5 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4$ mg/L)的地层水配制驱油剂,并将其放置在 95 °C恒温箱中观察 21 d,驱油剂的平均析水率为 7.9% ;且该驱油剂具有良好的降低油水界面张力的能力,在驱油剂质量分数为 0.5% 时即可将油水界面张力降至 10^{-4} mN/m。驱替实验表明,该驱油剂对于渗透率为 $4\ 000 \sim 16\ 000$ mD的储层,可提高采收率 $28\% \sim 32\%$ 。

王欢等以主要成分为十八烷基三甲基氯化铵的清洁压裂液返排液体系RSH-2为研究对象,构建

了一种基于清洁压裂液返排液的表面活性剂复配驱油体系:质量分数为 0.2% RSH-2+质量分数为 0.012% AOS(α -烯烃磺酸盐),并对其驱油效果进行了评价^[8]。该复配体系可降低油水界面张力至 10^{-3} mN/m超低数量级,且乳化性能优良,与脱水原油形成的乳状液 10 h析水率稳定在 30% ,具有较强的提高采收率能力,在水驱的基础上可进一步提高采收率达 11.8% 。

DAI等以长庆油田回收的主要成分为季铵盐表面活性剂的清洁压裂液返排液为研究对象,通过加入AOS构建表面活性剂驱油体系,并对其驱油性能进行评价^[9]。实验表明,黏弹性表面活性剂(VES)与AOS具有协同作用(强静电吸附),当VES的质量分数为 0.2% ,AOS的质量分数为 0.04% 时,VES和AOS对降低油水界面张力和乳化油的协同作用明显,可降低油水界面张力 2 个数量级,达到 10^{-3} mN/m。同时该体系具有良好的润湿反转性能,可以将油湿石英片表面(接触角为 145.6°)转化为弱水湿表面(接触角为 58.2°)。在最佳段塞尺寸($0.50 \sim 0.70$ PV),同时注入质量分数为 0.2% 的VES和质量分数为 0.04% 的AOS,可获得最高的增量采收率为 11.9% 。

由于上述压裂液返排液驱油体系存在体系构建时仍需加入助剂的缺点,周文胜等以主要成分为含硬脂酸疏水链节的季铵盐表面活性剂的清洁压裂液返排液为研究对象,通过室内实验构建了一种基于清洁压裂液返排液的表面活性剂驱油体系(FPLYL体系),其主要成分为具有硬脂酸疏水链节的季铵盐表面活性剂^[10]。实验表明,该体系具有优越的降低油水界面张力的能力,当体系中表面活性剂有效质量分数为 $0.05\% \sim 0.3\%$ 时,可降低油水界面张力至 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ mN/m超低数量级,且该体系可以使得油湿石英片表面发生润湿反转,在较低浓度(质量分数为 0.04%)下即可将接触角降低至 48.6° ,使其变为弱水湿。同时物理模拟驱油实验表明,该体系具有良好的提高采收率能力,注入 0.5 PV表面活性剂质量分数为 0.08% 的FPYLY体系,可以使原油采收率在水驱基础上提高 12.5% 。

王所良等以YY23-18h井稠化水清洁压裂液(G545)返排液为对象,研究了以阳离子季铵盐为稠化剂的清洁压裂液返排液的驱油效果^[11]。实验表明,该压裂液返排液具有良好的耐温抗盐性能及降低界面张力性能,在温度为 $60 \sim 90$ °C,质量分数为 0.006% 的破胶液即可将原油界面张力降低至 10^{-3}

mN/m, Na^+ 质量浓度小于100 000 mg/L, Ca^{2+} 质量浓度小于10 000 mg/L时,质量分数为0.006%的破胶液与原油之间的界面张力仍小于 10^{-3} mN/m。室内驱油实验显示,该压裂液返排液具有较好的驱油能力,注入0.3 PV质量分数为0.006%的破胶液驱油体系段塞,可以使原油采收率在水驱基础上提高10.04%。

吴新民等通过室内实验模拟压裂液返排液,对Gemini型阳离子表面活性剂为稠化剂的清洁压裂液返排液作为驱油剂的可行性进行了研究^[12]。结果表明,当返排液中表面活性剂质量分数为0.2%~0.65%时,可有效地将油水界面张力降低至 10^{-3} mN/m,且在油砂表面的吸附量较低,仅为0.12~0.18 mg/g,具有明显的降压增注效果和驱油能力,可将采收率提高10.69%~12.50%。

WANG等以长庆油田定边罗水库回收的实际返排液为对象,对其中回收的主要成分为硬脂酸为疏水链节的季铵盐表面活性剂的驱油性能进行了研究^[13]。实验表明,当VES的质量分数为0.06%~0.15%时,原油与压裂液返排液的界面张力可降至 10^{-4} mN/m,且该压裂液返排液具有良好的润湿反转性能,可轻松将油湿表面(接触角为 110.5°)转化为弱水湿表面(接触角为 56.5°)。其在80℃天然岩心中的最大动态吸附量为7.48 mg/g,动态保留量为2.11 mg/g,吸附能力与已经用于高温高压储层中的两性表面活性剂椰油酰胺丙基甜菜碱相似。在定边罗水库条件下进行的采油增量试验显示,在地层温度为80℃、地层水矿化度为37 125 mg/L条件下,注入0.5 PV质量分数为0.08%的返排液可提升采收率12.5(OOIP)%。

付文耀等针对以季铵盐阳离子双子表面活性剂WHA-1和纳米颗粒材料NGW为主要成分的新型纳米复合压裂液返排液体系进行驱油性能研究^[14]。实验表明,该体系具有良好的界面活性,在质量分数为0.08%时即可降低界面张力至 10^{-3} mN/m数量级,具有良好的降黏效果,可以使稠油黏度降低率超过95%。在注入0.5 PV现场返排液驱油体系后,低渗透油藏天然岩心采收率在水驱基础上平均提高了17.26%,且注入压力明显下降。针对陆上某稠油油田低孔低渗透砂岩储层,以粉砂岩和细砂岩为主的压裂储层段进行矿场试验,结果显示,试验井日产液量由措施前的 $97 \text{ m}^3/\text{d}$ 上升至 $186 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,而含水率由措施前的89.5%下降至68%左右,且生产3个月后日产液量和含水率变化较小。

秦文龙等针对以两性表面活性剂油酸丙基甜菜碱为主剂的清洁压裂液返排液进行驱油性能研究^[15]。实验表明,该压裂液返排液具有较好的界面活性。当表面活性剂质量分数为0.1%时,体系油水界面张力可降至 1.9×10^{-3} mN/m;同时提高温度和添加少量的醇溶液,可进一步改善体系的界面活性。且该类返排液具有良好的耐盐性和抗钙盐能力。注入0.3 PV表面活性剂,质量分数为0.10%的返排液,平均提高驱油效率8.37%。

于欣等基于渗吸驱油原理,以陆上某油田现场清洁压裂液返排液作为研究对象,研究了清洁压裂液返排液对致密油藏储层自发渗吸驱油效果的影响^[16]。实验表明,该清洁压裂液返排液可以显著降低油水界面张力,有效改变岩石表面润湿性。当渗吸液质量分数为50%时,渗吸采收率最大可达27.5%,是地层水渗吸采收率(13.2%)的两倍多,且随着渗透率和温度的升高,渗吸采收率也逐渐升高。使用现场致密砂岩天然岩心进行实验,渗吸采收率也可达26%左右。

刘晨等通过室内实验构建了一种基于清洁压裂液破胶液的驱油体系^[17]。实验表明,该体系破胶后在实验温度为80℃时,可将定边罗1井长8层原油界面张力降至 10^{-3} ~ 10^{-2} mN/m数量级。在质量分数为0.006%时具有较强的乳化性能,析水率小于40%,润湿性能优良,可将油湿表面转化为水湿表面,动态饱和吸附量为8.09 mg/g,且水驱后动态滞留量仅为动态饱和吸附量的1/4~1/3。室内岩心驱油实验表明,该体系在最优注入方案下可提高采收率10.04%。

总的来说,压裂液返排液驱油体系主要是将油田实际返排液进行处理或添加助剂后通过室内实验进行体系的构建,并对其降低界面张力、改变岩石润湿性及提高采收率等性能进行评价,现场应用较少。且目前压裂液返排液驱油体系的研究均基于清洁压裂液返排液,大多是以阳离子表面活性剂为主要成分的清洁压裂液,对其他类型清洁压裂液返排液及常用的聚合物稠化型压裂液返排液的研究则相对较少。

2 驱油压裂液体系研究进展

2.1 清洁驱油压裂液体系

1997年斯伦贝谢公司研制了清洁压裂液^[18-21],该压裂液具有低伤害、低摩阻、低滤失和破胶无残

渣等特点。因此,以清洁压裂液为主剂的驱油压裂液体系成为了研究热点。

张志升针对致密砂岩储层,以复合黏弹性表面活性剂CNT-3和多功能表面活性剂CZPJ-1为主要处理剂,添加一定量的有机盐助剂CYJ-3和调节剂CTJ-1,形成一套适用于致密砂岩储层的多功能表面活性剂驱油压裂液体系^[22]。实验表明,该体系具有良好的耐温抗剪切性能、携砂性能、破胶性能以及低伤害特性,破胶液能显著提高致密砂岩岩心渗吸驱油的效果。该驱油压裂液体系在鄂尔多斯盆地某油田现场试验成功,达到了良好的压裂增产效果。高燕等以质量分数为1.5%的XYZC-6稠化剂和质量分数为0.15%的XYTJ-3调节剂,研发出一种高效清洁驱油压裂液体系^[23]。实验表明,该压裂液体系耐温90℃,抗盐可达100 000 mg/L,具有良好的携砂、减阻性能,破胶彻底且破胶液界面张力可达0.001~0.01 mN/m。该驱油压裂液体系在长庆油田靖安区块现场使用效果良好,返排液有助于提高压裂后的返排效率,且具有驱油能力,经调节后返排可再配制成压裂液。范华波等基于驱油理论,设计合成了Gemini型阴非离子表面活性剂,配套优选了纳米油剥离剂,制备了驱油型表面活性剂压裂液体系^[24]。实验表明,该驱油型表面活性剂压裂液具有良好的分散性、润湿改变性能,渗吸效率可达38%,驱油效率超过20%。该驱油型表面活性剂压裂液在长庆油田致密油储层进行现场试验,试验井见油速度快,返排率低;投产初期试验井产量高、含水率低,驱油增产效果明显。

由于以上几种驱油压裂液具有需要返排作业的缺点,曹辉辉等通过筛选长链烷基氧化胺类和烷基两性乙酸盐类表面活性剂,研制了VES-BET35两性黏弹压裂液,并加入部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),制得兼有驱油作用的SET35-HPAM复合压裂液^[25]。实验表明,该复合压裂液具有较高的携砂性能,破胶后无残渣,表面活性剂BET35在破胶后具有较好的洗油能力。但是存在高渗透层滤失严重,需与降滤失剂配合使用,对于非注聚合物井及三元复合驱井需加入TS破胶剂来降解HPAM等缺点。

邱晓惠针对纳米和微纳米的超低渗透小孔喉致密砂岩油藏,通过渗吸作用机理研究,研发了可提高渗吸采收率的DL-15驱油剂,并形成具有采油和压裂双重功能的DL-15驱油压裂液体系^[26]。该压裂液体系耐温120℃,表现出亲水特性,有助于逆

向渗吸的发生,压裂后不进行破胶液返排,利用破胶液进行置换驱油,现场试验可提高采收率5%~8%。

李乐以甜菜碱型表面活性剂J201、羧酸盐磺酸盐型双子表面活性剂KL300、十二烷基苯磺酸钠和正辛醇为主剂,另加质量分数为0.3%的水杨酸钠、质量分数为1.25%的氯化钾和质量分数为0.01%的TF-28制得驱油压裂液体系VF-1^[27]。实验表明,该驱油压裂液体系较VES压裂液体系具有更好的耐温性能、黏度、滤失性能和低伤害性能,较好地保留了驱油剂的界面活性,破胶后能提高水驱效率12.25%,提高渗吸效率9.60%。

由庆等以质量分数为0.5%~10%的溴代1-甲基-4-十八烷基吡咯为主剂、质量分数为0.1%~2%的月桂酸钠为助剂,制得适用于致密砂岩储层的压裂排驱液,压裂后无需返排即可直接用于渗吸驱油^[28]。实验表明,该压裂排驱液具有较好的耐温抗剪切性,在地层温度为40~90℃、剪切速率为170 s⁻¹条件下,连续剪切2 h后,黏度仍大于50 mPa·s,具有良好的黏弹性、携砂性,破胶后黏度小于5 mPa·s,压裂性能较好。且其具有优越的降低油水界面张力的能力,可降低油水界面张力至10⁻³ mN/m超低数量级,在较宽浓度范围内可增强石英片表面亲水性,接触角最低为42°。驱油实验表明,岩心的渗吸效率超过15%,具有良好的驱油能力。

严娇以十六烷基三甲基氯化铵、水杨酸、XPQ-5表面活性剂和HT为主剂,另加质量分数为0.5%的DAA-64和质量分数为0.2%的氯化钾,制得FDHT系列压裂-驱油一体化工作液^[29]。实验表明,该系列工作液具有良好的耐温抗剪切性能,其中FDHT-6体系和FDHT-4体系在恒温90℃、剪切速率为170 s⁻¹条件下,连续剪切1 h,黏度稳定,分别保持在65.4和45.3 mPa·s左右。且其具有良好的储层保护性,对人造岩心的伤害率为11.7%~16.1%。质量分数为0.67%的FDHT-6压裂-驱油一体化工作液的化学驱油效率可达15.27%。

彭冲等将黏弹性表面活性剂、无机盐、有机溶剂复配形成了渗吸驱油型压裂液R60稠化剂,将该稠化剂溶于水制得渗吸驱油型清洁压裂液。该驱油压裂液在测试温度为50℃、剪切速率为170 s⁻¹条件下连续剪切100 min,体系黏度仍保持在35 mPa·s以上,可以满足地层温度为50℃以下储层改造的需求。R60稠化剂体积分数为0.05%时,可将油水界面张力降至3.4×10⁻³ mN/m,能改变亲油岩心

润湿性,岩心静态渗吸效率可达35.64%,具有良好的驱油能力^[30]。

目前对清洁驱油压裂液体系的实验研究和现场应用表明,该体系适用于地层温度低于120℃,且其耐温性能还有很大的提升空间。有研究结果^[31-33]表明,纳米粒子与表面活性剂具有协同增效作用,将纳米材料应用于清洁驱油压裂液体系或许可以提高其耐温性能。

2.2 聚合物驱油压裂液体系

合成聚合物体系具有增稠能力强、耐温性能好、耐盐性能好、破胶性能好、残渣少等特点^[34-36]。聚合物驱油压裂液体系主要是选用溶解性好的聚合物、强破胶剂和优良催化剂来进行配制。在驱油压裂液充分破胶后,继续注水跟进推动胶液向前流动,以起到聚合物驱油的作用。

张荣军等以质量分数为0.3%~0.8%的聚丙烯酰胺(相对分子质量为 $500 \times 10^4 \sim 1\,500 \times 10^4$)、质量分数为3%~10%的有机锆/有机铝盐或酚醛树脂、质量分数为1%~3%的钾盐、质量分数为0.05%~0.1%的过硫酸盐制得一种不需返排的驱油压裂液体系^[37]。该驱油压裂液在储层中可利用催化剂催化过硫酸盐的氧化来断开聚合物的分子链,降低胶体的黏度至1~10 mPa·s,适合地层聚合物驱油的范围,且破胶过程中不会产生不溶物,不会对地层造成新的伤害,同时驱油实验显示该体系可以在水驱的基础上提高采收率超过12%。

CUI等研究了一种主要成分为质量分数为0.2%的缔合聚合物和质量分数为0.7%的黏弹性表面活性剂超分子复合物的新型驱油压裂液体系^[38]。超分子聚合物和VES蠕虫状胶束具有协同作用,增大了驱油压裂液体系的耐温性能;该驱油压裂液体系对地层的损害比常规胍胶压裂液低50%,摩阻较常规胍胶压裂液低20%,破胶后量小于25 mL,可提高驱油效率为12%~20%。该驱油压裂液体系在西北致密气藏应用5井次,取得了较好的效果,压裂后日产气量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,较胍胶压裂液处理产量提升1倍。

王珂昕等以质量分数为0.2%~0.25%的WH924型聚合物、质量分数为0.1%的JXP-D助排剂、质量分数为0.05%~0.1%的复合交联剂、质量分数为0.1%的过硫酸铵与水配制,制得具有驱油作用的新型压裂液体系^[39]。该新型压裂液体系具有残渣含量小、对地层伤害小的特点,在测试温度为40℃、剪切速率为 170 s^{-1} 条件下,剪切30 min后黏

度为110.3 mPa·s,12 h破胶水化液黏度为2.74 mPa·s,性能优于胍胶压裂液。在实验温度为40℃,初始滤失量为 $30.7 \times 10^{-2} \text{ mL}$,有效洗油距离约达到0.8~1 m。现场试验显示,在同一区块该新型压裂液体系较普通压裂施工,可提高采收率5.3%,且试验井生产9个月仍有效,而对比井平均有效期为6.47个月。因此,该聚合物新型压裂液体系能够满足低温地层的压裂施工,低伤害,具有提高采收率的效果。

崔伟香等制备主要成分为质量分数为0.3%~10%的表面活性剂(氧化胺类表面活性剂或甜菜碱类表面活性剂)、质量分数为0~0.5%的疏水性聚丙烯酰胺(相对分子质量为5 000~5 000 000)、质量分数为0.1%~0.2%的乙二醇单丁醚和/或亚甲基二萘磺酸钠破胶剂的驱油压裂液体系^[40]。实验表明,该驱油压裂液体系在测试温度为90℃、剪切速率为 170 s^{-1} 条件下,剪切90 min,黏度仍保持在80 mPa·s以上,且100℃时的黏度保持率为95.8%,具有良好的耐温抗剪切性能。在与常规胍胶压裂液具有相同的增黏携砂效果的同时,该驱油压裂液体系的破胶液相比于常规压裂液破胶液、常规油田用的十六烷基磺酸钠驱油剂溶液和十二烷基苯磺酸钠驱油剂溶液,具有更显著的降低油水界面张力的作用。在岩心驱替实验中可提高驱油效率达48.86%,比水驱的采出程度高12.08%。该驱油压裂液体系在吐哈油田、新疆油田以及长庆油田致密油井储层改造现场应用6井次,均取得了较好的效果,增产倍数均超过2倍;其中应用于吐哈油田芦X井(致密油井)大规模水平井体积压裂改造,压前无产量,改造后日产油量为64.8 t/d,较常规压裂工艺及压裂液技术的邻井平均产量提升7~10倍。

聚合物驱油压裂液体系主要是由表面活性剂与改性聚合物复配或者交联剂与聚合物交联制得的。聚合物能增加驱油压裂液的黏度,提高其携砂能力,进而扩大波及体积。而表面活性剂可以有效降低油水界面张力,提高洗油效率,从而达到提高驱油效率的目的。

2.3 滑溜水驱油压裂液体系

滑溜水一般由降阻剂、杀菌剂、黏土稳定剂和助排剂等组成,具有低成本、低伤害、高效率等特点。滑溜水压裂是开发页岩等非常规油气资源的有效增产措施。

何小东等以体积分数为0.08%的DR800原液(主要成分为阴离子聚丙烯酰胺)与质量分数为

0.1%的纳米乳液复配形成了具有原位驱油功能的纳米排驱滑溜水体系^[41]。该体系在玛湖油田3种不同水型的现场水源中均有较短的溶解时间,且与玛湖油田配制水具有良好的配伍性。该体系减阻特性和抗剪切能力优良,在剪切速率为 $1.2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 条件下剪切20 min,体系减阻率仍保持在72%以上。同时体系中的纳米颗粒具有油水楔形膜分离压,可改变岩石的润湿性,具有显著的洗油效果,最终洗油效率达93.3%。

李婷等针对玉门油田低孔低渗透油藏,研究了以低流量KCl防膨剂为基液、以甜菜碱表面活性剂为主剂的具有渗吸驱油功能的滑溜水压裂液体系^[42]。通过复配确定具有高效渗吸作用的滑溜水压裂液体系为质量分数为0.3%甜菜碱+1%KCl+0.5%BA1-13+0.3%Na₂CO₃。实验表明,该体系对老君庙油田天然岩心的渗吸具有一定的促进作用,最高采收率达32.5%。同时该体系注入后对岩心的渗透率损害程度为27.8%,明显低于胍胶压裂液对基质的渗透率损害程度。

目前针对滑溜水压裂液体系的研究相对较少,其主要是通过滑溜水的减阻效应或提高渗吸作用来提高驱油效率。

2.4 其他类型驱油压裂液体系

赵静等以解淀粉芽孢杆菌CB-091的发酵菌液为破胶剂,以SITAR-II型超强延迟交联剂为交联剂,加入水型基液中形成压裂-降黏/驱油一体化的生物基压裂液前置液体系^[43]。实验表明,该体系制备的冻胶延迟交联时间为87 s,冻胶黏度为106 mPa·s,具有超强的耐挑挂能力,携砂性好。冻胶在测试温度为90℃、剪切速率为 170 s^{-1} 条件下,连续剪切120 min,黏度不低于140 mPa·s,耐温抗剪切能力强,可以满足压裂施工需要。该体系在低温(40℃)和高温(70℃)条件下破胶,均可实现1~4 h可控破胶,且破胶后黏度均小于2.23 mPa·s,残渣量分别为150~160 mg/L(40℃)和130~150 mg/L(70℃),具有良好的破胶能力且对储层伤害小。该体系破胶后表面张力降低至22.3 mN/m,界面张力降低至0.90 mN/m,且可使原油黏度降低97.35%,具有良好的降黏驱油作用,可以提高压裂的作业效果。

杜现飞等以酸酐、烷基醇酰胺聚氧乙烯醚、除垢中间体(甲苯+月桂酸+β异丙基乙二胺)、碳酸氢钠、亚硫酸钠和催化剂制得长效防垢驱油压裂剂^[44]。该长效防垢驱油压裂剂质量分数为1%时,

驱油效率均大于45%,最高可达58.9%;同时对CaCO₃, SrSO₄, BaSO₄的最高阻垢率分别可达65%, 36%, 53%;且驱油阻垢时间为6个月,较常规驱油剂和常规阻垢剂1个月的驱油阻垢时间有了较大的提升。

郭钢等公开了一种纳米磁流体驱油压裂液制备方法^[45]。该体系包括纳米磁性材料、分散剂及压裂液,其中纳米磁性材料包括纳米三氧化二铁或纳米四氧化三铁,利用磁流体特性,运用电磁吸引将微裂缝中的原油采出。渗吸测试结果显示,该纳米磁流体驱油压裂液的渗吸效率在35%以上。

戴彩丽等以质量分数为1%~15%的表面活性剂、0.1%~10%的助剂和10%~70%液态或(和)超临界CO₂制得一种适用于致密油储层开发的CO₂敏感的压裂-排驱体系^[46]。进行冷冻刻蚀电镜表征显示该体系内具有明显的空间网状结构,在低剪切条件下黏度与剪切速率无关,表现出牛顿流体的特征,在高剪切条件下出现明显的剪切变稀现象,说明体系内有蠕虫胶束形成。该体系在剪切速率为 170 s^{-1} ,测试温度为80℃条件下,剪切2 h后,黏度大于25 mPa·s,满足压裂施工要求。驱油实验显示,该体系可提高水驱效率在10%以上,且通入CO₂配制的压裂-排驱体系的提高采收率效果明显小于通入CO₂配制的压裂-驱油体系。

综上所述,目前对驱油压裂液体系的研究进展主要体现在对驱油压裂液的制备、流变性能、破胶性能、对储层的伤害性、摩阻性能、破胶性能、润湿性能、降低界面张力能力以及驱油能力等进行实验室研究,在现场应用方面进行了现场配制、部分实验井的压裂驱油实验,只有在个别区块进行了大规模的实际应用。目前驱油压裂液的制备仍停留在体系的复配上,对其作用机理的研究则较少,今后可加强对此方面的研究。同时降低驱油压裂液体系的滤失性能有利于造长缝、宽缝,可以增强其压裂效果,而增强驱油压裂液的滤失性能有利于将驱油压裂液输送至储层深处,使其与油气充分接触,提高驱油效果。因此,为了保证在可以得到具有较高导流能力的裂缝同时高效驱替出储层中的油气,驱油压裂液体系的滤失性能有必要进行优化并控制在合理的范围内。

3 认识与展望

随着非常规油气的勘探开发,压裂-驱油一体

化工作液将成为储层改造、油气增产的重要工作液。压裂-驱油一体化工作液的发展,突破了传统压裂、化学驱作业中多次添加化学试剂的束缚,简化了操作工艺、降低了经济成本,对非常规油气的开采意义重大。

虽然压裂-驱油一体化工作液的发展日渐成熟,但仍存在一些不足。建议今后在以下几个方面进一步深化研究:①加强对压裂-驱油一体化工作液的现场应用研究,尽可能结合现场应用与室内实验研究结果进行对比,进一步完善压裂液返排液驱油体系。②驱油增效型清洁压裂液是最具潜力的压裂-驱油一体化工作液,但其耐温性能还有待提高。建议相关学者从表面活性剂分子结构层面入手,研究高效耐温表面活性剂,从而开发出性能优异的耐温驱油压裂液。此外,纳米颗粒改性VSE清洁压裂液的应用也值得借鉴。③目前对驱油压裂液的性能评价仅考虑其作为压裂液时的耐温性能,缺乏对其破胶后起驱油作用时的耐温性能研究,后续驱油压裂液的研究不仅要求压裂组分要耐温、抗盐,其驱油组分也要耐温、抗盐。④目前的驱油压裂液大多是通过压裂液和驱油剂复配的方法得到的,缺乏对其微观结构和流变性能的机理研究,建议相关学者加强对分子结构设计、构效关系等微观机制的研究。

参考文献

- [1] 叶航,刘琦,彭勃,等.纳米颗粒抑制CO₂驱过程中沥青质沉积的研究进展[J].油气地质与采收率,2020,27(5):86-96.
YE Hang, LIU Qi, PENG Bo, et al. Inhibition of nanoparticles on asphaltene deposition during CO₂ flooding: A review [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(5): 86-96.
- [2] 汪贺,师永民,徐大卫,等.非常规储层孔隙结构表征技术及进展[J].油气地质与采收率,2019,26(5):21-30.
WANG He, SHI Yongmin, XU Dawei, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 21-30.
- [3] 邹才能,陶士振,白斌,等.论非常规油气与常规油气的区别和联系[J].中国石油勘探,2015,20(1):1-16.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, BAI Bin, et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 1-16.
- [4] 李国欣,朱如凯.中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J].中国石油勘探,2020,25(2):1-13.
LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.
- [5] 胡素云,李建忠,王铜山,等.中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J].石油实验地质,2020,42(5):813-823.
HU Suyun, LI Jianzhong, WANG Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 813-823.
- [6] 余维初,曾庆文,张颖,等.一种低渗透油藏压裂三采一体化施工方法:CN110685656A[P].2020-01-14.
YU Weichu, ZENG Qingwen, ZHANG Yin, et al. A low permeability reservoir fracturing three production integration construction method: CN110685656A [P]. 2020-01-14.
- [7] 陈世军,郭军,杨继刚,等.一种用压裂液返排液制备的驱油剂及其制备方法:CN107828399A[P].2018-03-23.
CHEN Shijun, GUO Jun, YANG Jigang, et al. An oil displacement agent prepared with fracturing fluid backflow and its preparation method: CN107828399A [P]. 2018-03-23.
- [8] 王欢,由庆,韩坤,等.清洁压裂返排液复配驱油体系的构建及性能评价[J].油田化学,2018,35(2):302-307.
WANG Huan, YOU Qing, HAN Kun, et al. Construction and performance evaluation of surfactant flooding system based on clean fracturing flowback [J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(2): 302-307.
- [9] DAI Caili, WANG Kai, LIU Yifei, et al. Study on the reutilization of clear fracturing flowback fluids in surfactant flooding with additives for Enhanced Oil Recovery (EOR) [J]. Plos One, 2017, 9(11): e113723.
- [10] 周文胜,王凯,刘晨,等.清洁压裂液返排液再利用驱油体系研究[J].岩性油气藏,2017,29(2):160-166.
ZHOU Wensheng, WANG Kai, LIU Chen, et al. Laboratory study on surfactant flooding system based on clean fracturing flowback fluid [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(2): 160-166.
- [11] 王所良,王玉功,李志航.稠化水清洁压裂液返排液驱油技术[J].油田化学,2016,33(4):623-628.
WANG Suoliang, WANG Yugong, LI Zhihang. Oil displacement technology based on clean fracturing fluid flowback water [J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33(4): 623-628.
- [12] 吴新民,陈亚楠.一种高性能清洁压裂液返排液驱油的可行性实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(32):245-250.
WU Xinmin, CHEN Yanan. Feasibility experimental investigation on the flowback liquid of a clear fracturing fluid with high performance for displacement of reservoir oil [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(32): 245-250.
- [13] WANG Kai, LIU Chen, ZHOU Wensheng. Investigation on the interfacial properties of a viscoelastic-based surfactant as an oil displacement agent recovered from fracturing flowback fluid [J]. Rsc Advances, 2016, 6(44): 38 437-38 446.
- [14] 付文耀,冯松林,韦文,等.清洁压裂液返排液驱油体系性能评价及矿场应用[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):114-119.
FU Wenyao, FENG Songlin, WEI Wen, et al. Performance evaluation and field application of the flowback-fluid oil displacing system of clean fracturing fluid [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 114-119.
- [15] 秦文龙,黄甫丽盼,乐雷,等.黏弹性表面活性剂压裂返排液的界面性能及驱油效果评价[J].西安石油大学学报:自然科学版,2016,31(3):81-85.

- QIN Wenlong, HUANGFU Lipan, YUE Lei, et al. Valuation of interfacial activity and oil displacing effect of viscoelastic surfactant gel-breaking fracturing fluids for enhanced oil recovery [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2016, 31(3): 81-85.
- [16] 于欣, 张猛, 贺连啟, 等. 清洁压裂液返排液对致密油藏自发渗吸驱油效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(1): 162-168.
- YU Xin, ZHANG Meng, HE Lianqi, et al. Influences of the clean fracturing flow-back fluid on the oil displaced effect of the spontaneous imbibition in dense reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(1): 162-168.
- [17] 刘晨, 王凯, 耿艳宏, 等. 清洁压裂液破胶液驱油体系实验研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 96-100.
- LIU Chen, WANG Kai, GENG Yanhong, et al. Laboratory study on surfactant flooding system based on clean fracturing gel-breaking fluid [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(1): 96-100.
- [18] CHASE B, CHMILOWSKI W, MARCINEW R, et al. Clear fracturing fluids for increased well productivity [J]. Oilfield Review, 1997, 9(3): 20-33.
- [19] LI Y M, YAO F, MAO H, et al. The modeling of slurry friction loss of hydraulic fracturing [C]//SHEN W S. International Conference on Computational and Information Sciences. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011: 606-610.
- [20] HUANG T P, CREWS J B. Nanotechnology applications in viscoelastic-surfactant stimulation fluids [J]. SPE Production and Operation, 2008, 23(4): 512-517.
- [21] MATHEW Samuel, DAN Polson, DON Graham. Viscoelastic surfactant fracturing fluids; applications in low permeability reservoirs [C]. Colorado: SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition, 2000.
- [22] 张志升. 适用于致密砂岩储层的多功能表面活性剂驱油压裂液体系[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(1): 169-174.
- ZHANG Zhisheng. Multifunction surfactant oil-displacing fracturing fluid system suitable for tight sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(1): 169-174.
- [23] 高燕, 张冕, 李泽锋. 高效驱油压裂液的开发与应用[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(6): 111-116.
- GAO Yan, ZHANG Mian, LI Zefeng. Development and application of a high efficiency oil displacing fracturing fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(6): 111-116.
- [24] 范华波, 薛小佳, 李楷, 等. 驱油型表面活性剂压裂液的研发与应用[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(1): 74-79.
- FAN Huabo, XUE Xiaojia, LI Kai, et al. Development and application of flooding surfactant fracturing fluid [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(1): 74-79.
- [25] 曹辉辉, 倪云峰. 新型聚驱并用复合压裂液的室内实验研究 [C]//中国石油油气藏改造重点实验室. 第四届全国低渗透油气藏压裂酸化技术研讨会论文集. 2010: 509-513.
- CAO Huihui, NI Yunfeng. Laboratory experimental study on a new type of compound fracturing fluid for polymer flooding wells [C]//China Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Reconstruction. Proceedings of the 4th National Symposium on Fracturing and Acidizing Technology for Low Permeability Oil and Gas Reservoirs. 2010: 509-513.
- [26] 邱晓惠. 驱油压裂液在长庆致密油藏中的应用 [C]//中国石油学会天然气专业委员会. 2018年全国天然气学术年会论文集 (03非常规气藏). 2018: 274-279.
- QIU Xiaohui. Application of oil displacement fracturing fluid in Changqing tight reservoir [C]//China Petroleum Institute Natural Gas Professional Committee. Papers of 2018 National Natural Gas Academic Annual Conference (03 Unconventional Gas Reservoirs). 2018: 274-279.
- [27] 李乐. 驱油压裂液的制备与性能评价 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2017.
- LI Le. Compound and evaluated a new type of oil-displacement fracturing fluid [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [28] 由庆, 戴彩丽, 何龙, 等. 适用于致密油储层的压裂排液及其制备方法: CN106893570A [P]. 2017-06-27.
- YOU Qing, DAI Caili, HE Long, et al. Fracturing displacement fluid suitable for tight oil reservoirs and its preparation method: CN106893570A [P]. 2017-06-27.
- [29] 严娇. 压裂-驱油一体化工作液研制与应用基础研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- YAN Jiao. Fundamental research on development and application of fracturing-oil displacement integrated working fluid [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [30] 彭冲, 王晓飞, 付卜丹, 等. 渗吸驱油型清洁压裂液技术研究 [J]. 石油化工应用, 2020, 39(3): 33-36.
- PENG Chong, WANG Xiaofei, FU Bodan, et al. Study of imbibition oil displacement model of clean fracturing fluid [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(3): 33-36.
- [31] CUI Xianjin, LIU Xianping, TATTON S Andrew, et al. Nanodiamond promotes surfactant-mediated triglyceride removal from a hydrophobic surface at or below room temperature [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(6): 3225-3232.
- [32] STEPHANIE Limage, JURGEN Kragel, MURIELLE Schmitt, et al. Rheology and structure formation in diluted mixed particle-surfactant systems [J]. Langmuir, 2010, 26(22): 16754-16761.
- [33] LUO D, WANG F, ZHU J, et al. Nanofluid of graphene-based amphiphilic Janus nanosheets for tertiary or enhanced oil recovery: High performance at low concentration [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(28): 7711-7716.
- [34] ZHANG Zhen, LI Jiachun, ZHOU Jifu. Microscopic roles of "viscoelasticity" in HPMA polymer flooding for EOR [J]. Transport in Porous Media, 2011, 86(1): 199-214.
- [35] DELAMAIDE E, CORLAY P. Polymer flooding increases production in giant oil field [J]. World Oil, 1994, 215(12): 6451-6467.
- [36] WANG G, YI X, FENG X, et al. Synthesis and study of a new copolymer for polymer flooding in high-temperature, high-salinity reservoirs [J]. Chemistry & Technology of Fuels & Oils, 2012, 48(2): 112-119.
- [37] 张荣军, 屈乐, 任大忠, 等. 一种油田用不返排可转化为驱油剂的压裂液及其制备方法: CN110791277A [P]. 2020-02-14.

- ZHANG Rongjun, QU Le, REN Dazhong, et al. A fracturing fluid which can be converted into oil displacement agent for oilfield and its preparation method: CN110791277A [P]. 2020-02-14.
- [38] CUI Weixiang, ZOU Honglan, WANG Chunpeng, et al. Supramolecular & oil displacement fluid for hydraulic fracturing [C]. Australia; SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2018.
- [39] 王珂昕, 张有才, 曹辉辉, 等. 提高石油采收率的新型压裂液: CN104327824A [P]. 2015-02-04.
- WANG Kexin, ZHANG Youcai, CAO Huihui, et al. New fracturing fluid for enhancing oil recovery: CN104327824A [P]. 2015-02-04.
- [40] 崔伟香, 邹才能, 卢拥军, 等. 一种驱油压裂液及其制备方法与应用: CN106905947A [P]. 2017-06-30.
- CUI Weixiang, ZOU Caineng, LU Yongjun, et al. An oil displacement fracturing fluid and its preparation method and application: CN106905947A [P]. 2017-06-30.
- [41] 何小东, 朱佳威, 石善志, 等. 玛湖致密砂砾岩油藏纳米排驱滑溜水体系 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 629-633.
- HE Xiaodong, ZHU Jiawei, SHI Shanzhi, et al. Development of nanofluid slickwater system for stimulating mahu tight glutenite reservoirs [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(5): 629-633.
- [42] 李婷, 李新发, 杨震, 等. 具有渗吸驱油效果的压裂液体系室内研究 [J]. 石化技术, 2018, 25(8): 307-308.
- LI Ting, LI Xinfu, YANG Zhen, et al. Laboratory study on fracturing fluid system with imbibition oil displacement effect [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(8): 307-308.
- [43] 赵静, 张宇, 孙秀鹏, 等. 一种生物基降粘/驱油压裂前置液体系及其制备方法和应用: CN109536156A [P]. 2019-03-29.
- ZHAO Jing, ZHANG Yu, SUN Xiupeng, et al. A bio-based viscosity reduction/oil displacement fracturing fluid system and its preparation method and application: CN109536156A [P]. 2019-03-29.
- [44] 杜现飞, 郭钢, 薛小佳, 等. 一种长效防垢驱油压裂剂及其制备和使用方法: CN109880608A [P]. 2019-06-14.
- DU Xianfei, GUO Gang, XUE Xiaojia, et al. A long-term scale-proof oil displacement fracturing agent and its preparation and application method: CN109880608A [P]. 2019-06-14.
- [45] 郭钢, 慕立俊, 赵振峰, 等. 一种纳米磁流体驱油压裂液及其制备和使用方法: CN111253926A [P]. 2020-06-09.
- GUO Gang, MU Lijun, ZHAO Zhenfeng, et al. A nano-magnetic fluid displacement fracturing fluid and its preparation and application method: CN111253926A [P]. 2020-06-09.
- [46] 戴彩丽, 高明伟, 赵明伟, 等. 一种适用于致密油储层的CO₂敏感的压裂-排驱体系及其制备与应用方法: CN108424760A [P]. 2018-08-21.
- DAI Caili, GAO Mingwei, ZHAO Mingwei, et al. A CO₂-sensitive fracturing-drainage system suitable for tight oil reservoirs and its preparation method and application method: CN108424760A [P]. 2018-08-21.

编辑 邹澍滢