

压裂液多功能性研究进展

高晨豪¹, 郭继香^{1*}, 许振芳¹, 张世岭^{1,2}

(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. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘要:概述了压裂前与压裂后不同时期的压裂液实现降黏、渗吸、酸化、调剖和驱油功能的原理与方法, 综述了压裂液多功能性的研发现状, 为开发低成本多功能压裂液提供思路。

关键词:压裂液; 降黏; 驱油; 渗吸; 酸化; 调剖

中图分类号: TE357

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)02-0102-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.021

Advances in multifunctional performance of fracturing fluid

GAO Chen-hao¹, GUO Ji-xiang^{1*}, XU Zhen-fang¹, ZHANG Shi-ling^{1,2}

(1. The Unconventional Oil and Gas Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;

2. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper summarizes the principles and methods for fracturing fluid in different periods before and after fracturing to achieve the functions of viscosity reduction, imbibition, acidizing, profile control and oil displacement, and reviews the research and development status in multi-functional fracturing fluid, so as to provide ideas for the development of low-cost multi-functional fracturing fluid.

Key words: fracturing fluid; viscosity reduction; oil displacement; imbibition; acidizing; profile control

压裂技术始于 1947 年, 在 20 世纪 70 年代该项技术得到全面的应用, 目前是开发页岩油气重要的手段。针对页岩油气藏渗透率低、渗流阻力大、流通性差等特点, 水力压裂能够降低井底附近地层渗流阻力, 增加渗流面积, 改变流动状态。目前压裂技术大量使用的压裂液有很多种, 主要有水基压裂液、泡沫压裂液、二氧化碳无水压裂液以及油基压裂液^[1]。压裂液是一个总称, 在压裂过程中不同阶段压裂液有着不同的功能, 按照注入顺序分为前置液、携砂液和顶替液。压裂后压裂液会变为返排液随原油排回地面。故携砂造缝是压裂液的基本功能。

泡沫压裂液和二氧化碳无水压裂由于成本较高, 只应用于特定储层, 应用范围较小。由于水基压裂液原料来源广、施工成本低、安全及易回收的特点被广泛应用于压裂施工。但单纯的水基压裂液存在储层伤害较高和单井收率低的问题, 加之国际油价波动, 亟需增强压裂效果降低成本。

在压裂施工过程中, 油田采用“大段多簇压裂”、“石英砂代替陶粒”等手段, 从压裂工艺上降低成本、提高压裂的采收率。除此之外, 研究人员还从

压裂液的研发入手, 开发压裂液的更多功能, 降低压裂施工过程中液体成本并且增强压裂效果。通常是将压裂液与提高采收率技术结合, 使压裂液拥有如驱油^[2]、渗吸^[3]等新功能。压裂后, 压裂液经过破胶或者其他反应变成低黏的返排液。利用返排液实现其他功能, 如驱油功能和调剖功能^[4]等, 可减少污水处理成本实现废物利用, 实现绿色开采。本文中介绍压裂前与压裂后不同时期的压裂液, 实现不同功能的原理与方法, 为开发高效低成本多功能压裂液提供思路。

1 压裂液多功能性

压裂前, 以携砂造缝为目的的液体称为压裂液, 通过与提高采收率技术结合, 增加更多增产功能, 增强压裂效果。难点为药剂的选择与药剂的注入方式。

1.1 压裂液降黏

向压裂液中添加降黏剂, 压裂液可增加降黏功能。从降黏原理, 降黏剂可分为化学降黏法与物理降黏法。其中, 化学降黏法分为水溶性乳化降黏法

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-12-13

基金项目: 中石油战略合作科技专项(ZLZX2020-02-07-03)

作者简介: 高晨豪(1995-), 男, 博士生, 研究方向为油气田化学及提高采收率技术, 654391614@qq.com; 郭继香(1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为油气田化学及提高采收率技术, 通讯联系人, guojx002@163.com。

和油溶性化学降黏法。

水溶性乳化降黏法的原理通过在稠油中加入一定量的水溶性表面活性剂水溶液或者活性水,在适当的温度和搅拌条件下,使稠油以微小的油珠分散在活性水中,形成水包油型(O/W)乳状液。文强^[5]针对大庆龙西地区稠油油藏条件,开发出了同时满足降黏和压裂工艺要求的降黏压裂液体系。该压裂液体系以胍胶为稠化剂,优选出的PP-2型降黏剂随前置液滤失进地层降低稠油黏度。与破胶剂、助排剂等添加剂配伍性良好,且降黏率可达52.4%。油溶性的降黏剂是利用原油降凝剂的开采技术,根据胶质以及沥青质分子的堆积状态,在高温或者溶剂的作用下具有层隙疏松的特性,能使降黏剂的分子渗入至胶质或者沥青质分子的中间层,可有效降低稠油的黏度^[6]。江苏油田选择柴油作为油溶性降黏剂,加入前置液中,压裂时使用羟丙基胍胶。试验的7口井中,1口井效果明显,4口井有所增产^[7]。

近年来逐渐在页岩油压裂现场应用的微纳米乳液结合了油溶性和水溶性降黏剂的降黏特点,是一种复合型降黏剂。乳液颗粒粒径为纳米级别,能够随水相进入页岩的微纳米孔隙。颗粒由油溶性物质作为内核,表面活性剂作为颗粒的表面。与原油在地层中接触,纳米颗粒破裂,油溶性物质进入原油分散胶质沥青质,表面活性剂起到乳化作用。Ding等^[8]研究人员以二苯基醚水溶性 Gemini 表面活性剂为壳,C₁₀~C₁₄直链烃溶性原油解离剂为核,开发出的纳米乳液实验室降黏率大于80%。

在压裂过程中,降黏剂的注入方式十分重要,较多研究把降黏剂加入前置液。实现方法是利用高排量压开地层,并把降黏剂挤入地层中较远的地方,让其滤失入地层,使降黏剂在地层深部与油藏充分接触达到降黏目的。针对原油易于与水基压裂液乳化形成高黏度乳液的特征,吐哈油田^[9]为了阻止稠油与水基压裂液发生乳化,阻止黏度继续上升,采用苯类有机溶剂作为前置液对压裂层预处理,将水基压裂液与稠油隔离。此外,由于CO₂可以溶解在油中以降低压裂后原油黏度,Liu等^[10]研究人员提出,CO₂既是降黏剂又是携砂液。冷家稠油油藏开展压裂技术研究,为了同时降黏与压裂,研究人员采用注CO₂压裂,在前置液中注入羟丙基胍胶和80℃的热水,并以一定速度注入液态CO₂,压裂施工完成后,压裂效果明显。

储层中使用压裂降黏技术优势明显,在地层温

度和降黏剂的作用下,在地层深部改变页岩油的流动性,降低流动摩阻,可为压后开采提供良好的流动条件。随着页岩油气的大规模开发,复合型降黏剂除了降黏效果优秀,表面活性剂还提高渗吸效率,大大增强压裂效果,是页岩油气开发热点。

1.2 压裂液渗吸驱油

在压裂的过程中,常常发现返排率与油井产能之间存在巨大矛盾。在某些情况下,随着压裂液的高回流回收率,石油产量下降,而在我国长庆油田统计发现存地液量越大,1年累计产量越高^[11]。产生这种现象的原因可能与压裂液在地层中的渗吸驱油有关。这种现象使压裂液的渗吸功能显得尤为重要。

在砂岩和碳酸盐岩的渗吸过程中,毛细作用通常被认为是引起驱替的唯一机制。实验发现,渗吸效果与岩心润湿性有关,岩心采收率从大到小依次为弱水湿状态、中性润湿状态和油湿状态。加入表面活性剂等润湿反转剂后,亲油岩心要比亲水岩心有更好的提高采收率效果。表面活性剂不仅是润湿反转剂,还能降低界面张力。但界面张力不能盲目降低,实验发现存在最佳界面张力,并且随着渗透率的增加最佳界面张力趋向于降低^[12]。因此,将表面活性剂加入压裂液,可为压裂液增加渗吸功能。

目前,压裂液增强渗吸效果有2种方法。一种是使用清洁型压裂液,本身就是由表面活性剂组成,在破胶后留存于地层中增强渗吸效果。范华波等^[13]开发了一种双子型阴非离子表面活性剂,亲水基团含有磺酸根和环氧基,疏水基团为8~12个碳链的支链烷基。通过调节环氧基链节的大小调节亲水亲油平衡值,同时加入炔醇纳米二氧化硅增强原油剥离能力,该压裂液在长庆现场试验效果优于胍胶压裂液。张志升^[14]以一种双子黏弹性表面活性剂与有机溶液复配而成了复合黏弹性表面活性剂CNT-3作为压裂液,为了增强渗吸效果,在压裂液加入了由阴离子和非离子表面活性剂复配而成的多功能表面活性剂CZPJ-1。该压裂液在实验室中渗吸效果较好,在致密砂岩油田环境中试验,压后产油量是使用常规胍胶压裂液的邻井的4倍左右。另一种是在非清洁型压裂液中添加表面活性剂,使表面活性剂存于前置液或者破胶液中,增强渗吸效果。李婷等^[15]研究人员研发出了一种压裂液体系,将甜菜碱加入滑溜水中,增强滑溜水的渗吸效果且不影响滑溜水基本性能。张学鹏^[16]开发出了一种表面

活性剂 ANF, 作为前置液注入地层, 再注入滑溜水压裂液和高黏度携砂液, 多段注入不同压裂液。现场试验中使用复合体系的油井较对比井含水率下降快, 产油时间更长。肖程释^[17]探究了滑溜水体系复配不同表面活性剂的渗吸采收率, 并对比加入同样表面活性剂的胍胶体系, 滑溜水体系的渗吸采收率可到 4%, 而胍胶体系不发生渗吸。

目前, 渗吸驱油型压裂液都是为致密油藏和页岩储层研发, 从文献数量上看, 渗吸驱油是压裂液提高采收率的研究热点之一。渗吸驱油型压裂液在现场试验中, 比常规胍胶压裂液见油快, 投产初期产量高, 含水低。在实验室中渗吸效率也远大于胍胶压裂液。虽然渗吸驱油型压裂液见油快初期产量高, 但是在开采现场, 由于表面活性剂在岩石吸附以及部分表面活性剂返排回地面, 导致表面活性剂损失较大, 稳产效果差。表面活性剂增加的成本要与提高的收益匹配, 成本问题也是限制其推广的重要因素。因此, 研发低成本表面活性剂, 结合 CO₂ 前置压裂等增能手段, 是渗吸驱油型压裂液较好的发展方向。

1.3 压裂液酸化

压裂酸化技术中使用了酸化压裂液。压裂酸化技术与酸压有着本质区别。酸压过程复杂, 其中包括裂缝扩展、酸岩反应和酸液泄漏, 并且几个过程同时发生。而压裂酸化属于水力压裂, 该技术首先通过水力压裂诱发了复杂的裂缝网络, 然后通过酸蚀扩大了每个诱发的裂缝。大多数酸的作用是沿着诱发的水力裂缝流动以腐蚀它们的表面。该方法的增产作用来源于天然裂缝和水力裂缝之间相互作用产生的复杂裂缝网络, 而不是酸蚀裂缝。因此酸压与压裂酸化技术对压裂液有着不同的要求。在酸压过程中使用的压裂液无需携带支撑剂, 而压裂酸化要求压裂液不仅能携砂造缝还要含有酸性液体起到酸化腐蚀功能。

由于常规压裂液大多数适用于中性环境, 所以找到一种在酸性环境下可以增稠的携砂液是酸化压裂液的研发方向之一。该技术的原理是在酸性环境通过高聚物植物胶交联, 建立三维网状结构链, 起到携砂功能。李斌^[18]研制出一种交联酸, 交联酸耐温流变性和携砂性能好, 酸岩反应过程中能保持较高的黏度和携砂能力。塔里木油田^[19]在现场同样应用交联酸压裂技术 8 井次, 施工成功率 100%, 有效 6 井次。李婵等^[20]研制出一种新型酸化清洁压裂

液, 以能在酸性条件下携砂的超支化聚合物活性剂 CP-1 作为稠化剂, 体系中盐酸质量分数可达 8%。刘合等^[21]设计了一种阴离子表面活性剂, 可在强酸或弱酸中交联获得携砂能力。另一种研发方向在前置液中加入酸液, 需要加入一定隔离液使前置酸与携砂聚合物有效隔离。此技术可发挥酸溶矿物解除地层污染的作用。赵立强等^[22]研发出一种有机酯加砂压裂隔离液, 防止酸液与压裂液接触后造成压裂液提前破胶。

在油气开发中, 压裂酸化技术适用于碳酸盐岩占比高的储层, 其优点: ①解除近井地带的污染, 增强压裂效果。②压裂液残渣浓度低, 降低压裂液对微纳米孔隙的伤害。③腐蚀裂缝表面, 增加裂缝中的流动性。但酸性的环境加速了油井设备的腐蚀老化, 在使用该技术之前, 需要综合考虑设备防腐增加的成本与增产的利润是否匹配。

2 返排液多功能性

压裂液常常使用聚合物或者表面活性剂作为基液。压裂作业后的返排液是良好的油田化学品。以往为了处理返排液油田花费了大量的人力物力, 大量的研究都集中于原始化学品的清洁化处理^[23], 开发返排液的更多功能, 将其有效利用将逐渐被重视。

2.1 返排液调剖

压裂液中的携砂液主要是高分子聚合物, 如胍胶、聚丙烯酰胺等, 通过暂时性的交联反应, 生成具有携砂功能的交联液。当压裂结束后, 高黏度的携砂液经过破胶变成低黏的返排液。其中的高分子聚合物和添加剂没有质变, 仍可在回收处理后再次交联用于调剖堵水。由于压裂液直接接触地层, 地层中的离子大量被压裂液带走, 最终导致返排液的高矿化度。

王长俊等^[4]通过改性胍胶使其在压裂返排后可被利用于调剖。在胜利油田水井调剖累计利用回收压裂液 139 井次, 累计用量达到 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 节约大量油田用水和调剖药剂用量。孙建新等^[24]将胍胶返排液当作配制调剖剂的溶剂, 针对返排液中的较高的固体悬浮物和矿化度, 经过实验优选出耐盐的聚丙烯酰胺聚合物为主剂, 辅以黏度稳定剂形成了符合强度要求的凝胶。

由于同一油田既压裂作业又需要调剖的情况较少, 在页岩油气的压裂施工中, 逐渐用低浓度的滑溜水代替交联的聚合物, 返排后聚合物往往浓度低, 不

足以交联成高强度凝胶。因此,这些限制使返排液不适合作为调剖剂大规模推广。

2.2 返排液驱油

返排液重复再利用作为驱油剂在国内仅有数篇文献报道,而国外还未有关于压裂液返排液的驱油效果的文献。目前已报道返排液可用作驱油剂的压裂液体系,大多是清洁型压裂液(VES)。清洁压裂液由黏弹性表面活性剂组成。在水溶液中,当表面活性剂浓度大于临界胶束浓度时,这些分子非极性基团向内,极性基团朝外,形成棒状胶束。随着表面活性剂浓度增加,胶束互相纠缠缠绕使整个体系具有黏弹性,具有良好的携砂能力。在遇到其他有机物或者油气等憎水物质后,体系中的棒状胶束会分散成更小的球状胶束,体系黏度随之降低。在破胶过程中没有添加破胶剂,因此破胶过程对表面活性剂分子无任何损害,这为返排液作为驱油剂再次利用提供了可能。

目前,相关研究大多使用双子型阳离子表面活性剂作为压裂液,其中大部分为季铵盐类表面活性剂。王所良等^[25]研究人员模拟了阳离子季铵盐型清洁压裂液的返排液,通过润湿性评价、提高采收率实验等,得出该型压裂液的返排液在经过地面沉降-过滤-杀菌后可作为驱油剂使用的结论。周文胜等^[26]研究人员模拟了一种阳离子型表面活性剂压裂液的返排液,经过测定返排液不同浓度下的界面张力和驱油效率,得出返排液的驱油效率并不是随着浓度增加而增大的规律,因此返排液作为驱油剂存在一种最优注入方案。王欢等^[27]模拟了十八烷基三甲基氯化铵压裂液的返排液,对比了纯返排液与返排液复配 α -烯烴磺酸钠的驱油效率,发现复配后的返排液驱油效率更高。秦文龙等^[28]测试了油酸酰胺丙基甜菜碱压裂液的返排液,吴新民等^[29]测试了一种新型两性表面活性剂压裂液的返排液,吕乃欣等^[30]测试了一种近肽链结构的黏弹性表面活性剂的返排液,这些返排液都得到了较好的驱油效果。

未来会拓展更多类型压裂返排液的驱油功能,重新利用返排液。开发出驱油功能的返排液,将大幅度降低废液处理成本,同时节约驱油费用,实现油田液体的内循环,是绿色开采的重要步骤。

3 总结与讨论

多功能压裂液在压裂过程中相比于常规压裂液

有明显的优势。通过一剂多用,将压裂与多种提采措施结合,增强压裂效果,提高采收率。在压裂液中增加新功能,药剂选择和注入方式是难点。为了增加降黏功能,大多选择表面活性剂作为降黏剂,复合降黏剂将成为研究重点。压裂液的渗吸功能只能通过添加表面活性剂实现,而表面活性剂增加的成本要与提高的收益匹配。酸化功能较为特殊,只适用于碳酸岩储层,通过开发交联酸或者隔离液实现酸化功能。

开发返排液的多功能性,目的为降低废液处理成本,实现液体的循环利用。目前,返排液可用作调剖剂和驱油剂。将返排液中聚合物重新交联形成高强度凝胶可用于调剖。返排液的驱油功能,主要研究集中于清洁型压裂液的返排液。

未来压裂液开发中,研究人员将开发出同时拥有多种功能的压裂液,既可以渗吸驱出大量原油、降低原油黏度又可以将返排液重新利用。增强压裂效果,实现压裂提采一体化和绿色开采的目的。

参考文献

- [1] Chapter 17-fracturing fluids [A]. In: Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids (Second Edition) [M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2015: 567-651.
- [2] 王满学,何静,王永炜,等.多功能清洁压裂液 F-VES 性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(4): 72-74.
- [3] 张晴.鄂尔多斯盆地 W 区致密砂岩油藏压裂液渗吸机理研究[D]. 西安:西安石油大学, 2017.
- [4] 王长俊,黄宏惠,管新.压裂液综合回收利用技术[J].石油石化节能, 2019, 9(2): 27-29, 33.
- [5] 文强.稠油储层化学降粘压裂技术研究与应用[J].西部探矿工程, 2019, 31(8): 82-84.
- [6] Guo J W H C. Synthesis and evaluation of an oil-soluble viscosity reducer for heavy oil [J]. Petroleum Science, 2010, 7(4): 536-540.
- [7] 何成德.鲁克沁稠油油藏压裂技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2014.
- [8] Ding B, Xiong C, Geng X, et al. Characteristics and EOR mechanisms of nanofluids permeation flooding for tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 810-819.
- [9] 张坚平,牛瑞云.深层稠油难动用储量压裂增产技术研究与试验[J].石油勘探与开发, 2004, 31(6): 112-114.
- [10] Liu H, Wang F, Zhang J, et al. Fracturing with carbon dioxide: Application status and development trend [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 513-519.
- [11] 郭钢,薛小佳,李楷,等.压裂液存留液对致密油储层渗吸替油效果的影响[J].钻井液与完井液, 2016, 33(6): 121-126.

(下转第 111 页)

- rived from bacterial-cellulose [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 822: 81–88.
- [7] Oren Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment—past, present and future (a review) [J]. *Desalination*, 2008, 228(1/2/3): 10–29.
- [8] Lee J B, Park K K, Eum H M, *et al.* Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization [J]. *Desalination*, 2006, 196(1): 125–134.
- [9] 张旭, 提芸, 赵波. 电吸附技术处理电厂反渗透浓水试验研究 [J]. *给水排水*, 2013, 49(S1): 366–368.
- [10] 刘江, 谢凤龙, 张鹏. 电吸附技术在电厂废水处理中的试验研究 [J]. *工业水处理*, 2015, 35(4): 68–71.
- [11] 朱广东, 郭洪飞, 孙晓慰, 等. 电吸附技术在电厂水处理系统中的应用 [C] // 中国脱盐协会: 2010 中国电力脱盐技术论坛论文集, 2010: 117–121.
- [12] 沈叔云, 冯向东, 施国忠. 电吸附技术在火电厂循环冷却水处理中的应用可行性研究 [J]. *浙江电力*, 2015, 34(11): 89–91, 99.
- [13] 李永辉. 电吸附技术在循环冷却水系统排污水处理中的应用 [J]. *工业用水与废水*, 2012, 43(5): 71–73.
- [14] 黄忠源, 李进, 祁誉, 等. 再生水作为发电厂水源的预处理技术经济性评估 [J]. *华北电力技术*, 2016, (12): 38–42.
- [15] Zhao R, Biesheuvel P, Van der Wal, *et al.* Energy consumption and constant current operation in membrane capacitive deionization [J]. *Energy Environ Sci*, 2012, 5(11): 9520–9527.
- [16] Hemmatifar A, Palko J W, Stadermann M, *et al.* Energy breakdown in capacitive deionization [J]. *Water Res*, 104: 303–311.
- [17] Tong T, Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: Drivers, technologies, and future directions [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(13): 6846–6855.
- [18] Choi J, Dorji P, Shon H K, *et al.* Applications of capacitive deionization: Desalination, softening, selective removal, and energy efficiency [J]. *Desalination*, 2019, 449: 118–130.
- [19] Jiang S, Li Y, Ladewig B P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 595: 567–583.
- [20] Lado J J, Perez-Roa R E, Wouters J J, *et al.* Evaluation of operational parameters for a capacitive deionization reactor employing asymmetric electrodes [J]. *Separ Purif Technol*, 2014, 133: 236–245.
- [21] Kołodynska D, Krukowska J, Thomas P. Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon [J]. *Chem Eng J*, 2017, 307: 353–363.
- [22] Inyang M I, Gao B, Yao Y, *et al.* A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal [J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 2016, 46(4): 406–433.
- [23] Xu J, Cao Z, Zhang Y, *et al.* A review of functionalized carbon nanotubes and graphene for heavy metal adsorption from water: preparation, application, and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 351–364.
- [24] Wang J, Wang L, Miao R, *et al.* Enhanced gypsum scaling by organic fouling layer on nanofiltration membrane: Characteristics and mechanisms [J]. *Water Res*, 2016, 91: 203–213. ■

(上接第 105 页)

- [12] Jing W, Huiqing L, Genbao Q, *et al.* Investigations on spontaneous imbibition and the influencing factors in tight oil reservoirs [J]. *Fuel*, 2019, 236: 755–768.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张学鹏. 压裂用渗吸表面活性剂的制备与应用 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [17] 肖程释. 复合压裂液体系提高致密油藏渗吸采收率实验研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [18] 李斌. 交联酸化压裂在低渗透气田的应用 [J]. *石油化工应用*, 2010, 29(11): 15–19.
- [19] 车明光, 王永辉, 袁学芳, 等. 交联酸化压裂技术的研究和应用 [J]. *石油与天然气化工*, 2014, 43(4): 413–415.
- [20] 李婷, 丁观世, 曹耐. 一种新型酸化清洁压裂液的研究与应用 [J]. *钻采工艺*, 2016, 39(3): 103–105.
- [21] 刘合, 张劲, 张士诚. 多功能清洁酸性压裂液的设计 [J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 427–429.
- [22] 赵立强, 杜娟, 刘平礼, 等. 一种高性能有机酯前置酸加砂压裂隔离液体系 [J]. *天然气工业*, 2012, 32(6): 43–45.
- [23] Thomas L, Tang H, Kalyon D M, *et al.* Toward better hydraulic fracturing fluids and their application in energy production: A review of sustainable technologies and reduction of potential environmental impacts [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 793–803.
- [24] 孙建新, 浦三龙, 魏江伟, 等. 姬塬油田压裂返排液配制调剖剂的探索研究 [J]. *石油化工应用*, 2016, 35(10): 50–54.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 王欢, 由庆, 韩坤, 等. 清洁压裂液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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 吕乃欣, 刘开平, 高燕. 驱油型可回收清洁压裂液的研制与应用 [J]. *油田化学*, 2018, 35(3): 395–400. ■