

无水压裂液技术研究进展及前景展望

毛金成*, 张照阳, 赵家辉, 王鼎立, 赵金洲

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500

*联系人, E-mail: jcmao@swpu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-22; 接受日期: 2017-03-31; 网络出版日期: 2017-08-10

国家自然科学基金(编号: 51490653)、四川省科技厅杰出青年基金项目(编号: 2017JQ0010)和四川省教育厅重点培育项目(编号: 16CZ0008)资助

摘要 目前, 国内外的油田主要采用水力压裂技术进行增产改造, 但常规水力压裂技术始终面临水资源大量消耗和压裂后相关污染的难题, 而且不利于水敏性等非常规油气藏的开发, 因此常规水力压裂技术的应用受到极大的限制。无水压裂液技术可以有效地解决上述问题, 但国内无水压裂液技术应用较少, 理论研究相对缺乏, 再加上我国非常规油气资源储量丰富, 但水资源相对缺乏, 若能够突破无水压裂液的技术难关, 则使用无水压裂液技术将为我国非常规油气资源的开发带来极大的经济和环境效益。本文通过调研国内外资料, 介绍了目前国内外无水压裂液技术的研究现状, 分析了国内外常用的几种压裂液技术, 主要介绍了二氧化碳类、醇基类以及烃类无水压裂液技术特点, 总结分析了各自的优势及问题, 深入研究了液态CO₂压裂液、超临界CO₂压裂液、醇基压裂液、油基压裂液以及低碳烃压裂液, 并对其工作机理做了介绍。最后, 本文总结了目前无水压裂液研究的重点及应用时的关键问题, 为无水压裂的理论研究及应用提供了一定的参考价值。

关键词 非常规油气藏, 无水压裂液, 低碳烃, LPG, 液态CO₂, 超临界CO₂

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

随着石油工程技术的不断发展, 现有的常规油气藏几乎都已进入开采后期, 非常规油气藏的开采已经成为了油气行业当前的生产重点。目前国内油田的压裂施工主要采用的是水力压裂技术, 但由于非常规油气藏通常表现出较差的物性, 其孔隙度小、渗透率低, 且通常呈水敏性, 若用水力压裂极易造成水相圈闭伤害, 对油气开采极为不利。采用水力压裂技术压裂出的裂缝中有效裂缝长度只占裂缝总长度的20%–50%, 且水基压裂液的返排率较低, 大量的压裂液残留在地

层中, 会对地层和地层水造成污染。而采用无水压裂液技术压裂出的裂缝几乎都为有效裂缝, 可将最终采收率在水力压裂的基础上提高20%–30%。无水压裂液几乎不含水, 因此不会造成水相圈闭伤害, 且由于与储层的配伍性好, 其返排率可达100%, 对地层和地层水几乎无伤害。无水压裂液技术在压裂前期的成本比水力压裂高, 但由于无水压裂液返排率几乎为100%, 且无需进行无害化处理便可循环再利用, 从长远角度看, 其施工成本和环境成本是远低于水力压裂技术的。

引用格式: 毛金成, 张照阳, 赵家辉, 等. 无水压裂液技术研究进展及前景展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 114605
Mao J C, Zhang Z Y, Zhao J H, et al. Research progress and prospect of the waterless hydraulic fracturing technology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 114605, doi: [10.1360/SSPMA2016-00537](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00537)

目前国内外研究和应用最广泛的无水压裂液主要是CO₂压裂液和烃类压裂液, CO₂压裂液分为液态CO₂压裂液和超临界CO₂压裂液, 而烃类压裂液又分为油基压裂液和低碳烃压裂液(如图1).

1 二氧化碳压裂液

1.1 液态CO₂压裂液

用液态CO₂作为携砂液, 与支撑剂混合后, 进行地下储层压裂. 北美早在1981年就已开始使用液态CO₂压裂液体系进行压裂施工, 在1994年就已开始使用液态CO₂/N₂压裂液体系进行压裂. 目前为止, 液态CO₂压裂技术已经过了多次测试和改性^[1-4].

液态CO₂压裂液的优点在于: (1) 对储层伤害极小. 由于使用的是纯CO₂, 纯液态CO₂几乎不需要添加其他试剂, 因此与地层的配伍性好, 不会产生水基压裂液对地层造成的水相圈闭伤害、黏土膨胀效应等影响; (2) 增产效果好. 在储层条件下, CO₂会汽化并溶于地下原油中, 使原油黏度降低, 利于开采; (3) 反排迅速、彻底, 可循环利用. CO₂在地下由于温度、压力的升高从液态变为气态, 可随着地下流体的采出而被返排回地面, 不会残留在地下, 通过简单的分离后可再次用于地下储层压裂.

其缺点在于: (1) 黏度小, 携砂能力不强. 液态CO₂的黏度约为5mPa s, 可以携带支撑剂, 但由于其黏度较小, 携砂能力有限, 不适用于深井压裂; (2) 容易滤失, 不适用于高渗透性地层; (3) 造缝能力不强. 采用液态CO₂压裂液压裂出的裂缝宽度较窄, 但由于CO₂溶于原

油中可降低原油黏度, 且压裂裂缝宽度对天然气流动的影响不大, 因此在一定程度上可以得到弥补; (4) 可能对管线造成损害. 若井口压力下降速度过快, CO₂易导致采油树和管线结冰, 可能限制地下流体的采出.

1.2 超临界CO₂压裂液

CO₂的临界点约为温度31.04°C、压力7.38MPa, 在该条件下CO₂能够达到超临界状态, 成为超临界CO₂. 超临界流体具有独特的性质, 与气体、液体都有所不同. 超临界CO₂的黏度接近于气体, 而密度又接近于液体; 无表面张力; 在临界点附近具有突变性和可调性; 在被压缩过程中, 不会形成液相, 仅表现为密度的增加. 这些特殊的性质都有利于非常规气藏的压裂改造. 2011年, 王海柱等人^[5]提出了使用超临界CO₂流体进行储层压裂的方法, 同时提出了集钻完井、采气和CO₂封存为一体的非常规气藏开采技术体系.

超临界CO₂压裂液的优点在于: (1) 超临界CO₂具有黏度低、扩散系数大、无表面张力等特点, 更容易进入微小裂缝, 与水基压裂液相比能产生更多微小裂缝, 从而更加有效地改善渗透率; (2) CO₂分子比CH₄分子更容易被页岩吸附, 能将页岩中呈吸附态的CH₄分子置换出来, 使CH₄分子从吸附态转变为游离态(如图2); (3) 超临界CO₂中没有水, 不会引起储层的黏土膨胀效应和水相圈闭伤害; (4) 压裂后, CO₂由于较强的页岩吸附力而被封存在页岩中, 可实现CO₂的永久埋存, 缓解温室效应^[6,7].

其缺点在于: (1) 超临界CO₂易滤失, 不适用于高渗透性储层压裂; (2) 超临界CO₂黏度低, 携砂能力较弱, 需要添加增黏剂提高其黏度; (3) 运输成本较高.

2 醇基压裂液

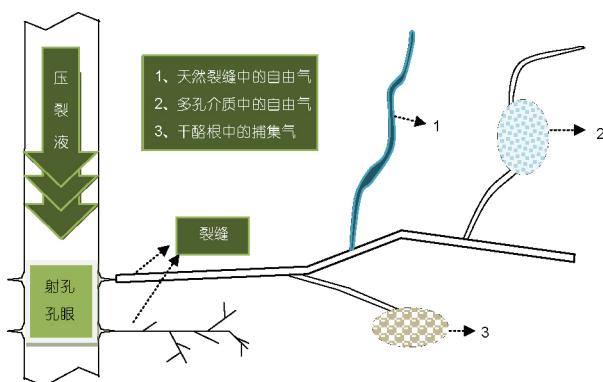
醇基压裂液^[8-10]是将甲醇、乙醇等醇类作为基液形成的具有良好携砂性能的压裂液. 从20世纪60年代开始, 国外的专家和学者就提出了醇基压裂液的概念并进行了一系列的研究.

醇基压裂液的优点在于: (1) 醇类不仅不会对水敏性储层造成水相圈闭伤害和黏土膨胀效应等影响, 而且还具有恢复储层渗透率、解除水锁的能力, 适用于已经形成水锁的储层, 这是醇基压裂液独一无二的优势; (2) 由于CO₂气体能与烃类混相, 可防止多相流的



图1 (网络版彩图)无水压裂液的分类

Figure 1 (Color online) Classification of non-aqueous fracturing fluid.

图 2 (网络版彩图) CO_2 压裂优势示意图Figure 2 (Color online) Schematic of the advantages of CO_2 fracturing.

阻塞, 所以 CO_2 压裂液可以更有效地从天然裂缝中及多孔介质中的自由气中提取出天然气, 而且由于 CO_2 能将页岩中呈吸附态的 CH_4 分子置换出来, 使 CH_4 分子从吸附态转变为游离态, 因此 CO_2 压裂液可以更有效的从干酪根中的捕集气中提取天然气(如图2); (3) 醇基压裂液可长期存在于储层中且对储层无伤害, 因此适用于分层压裂, 等所有层段都压裂完成后再一起返排, 有利于致密砂岩储层的开发和利用; (4) 使用醇基压裂液进行压裂施工的设备和技术与水基压裂液基本一致, 且醇基压裂液中无需使用助排剂、黏土稳定剂、液氮等, 可节约部分成本.

其缺点在于: (1) 醇类易燃、易挥发, 甲醇有剧毒, 对施工安全的要求较高; (2) 压裂液的残渣和稠化剂会对储层造成一定的伤害; (3) 目前醇类的价格较高.

3 烃类压裂液

3.1 油基压裂液

油基压裂液是以原油、柴油、煤油等作为基液制备而成的一种无水压裂液, 其基液的组成比较复杂, 含有烷烃、烯烃等多种烃类物质和少量其他物质.

1980年, Burnham^[11]通过加入磷酸酯铝盐制备出了一种油基凝胶, 并将其用于地下储层压裂; 1982年, Burnham^[12]又通过加入氧杂烷基磷酸酯制备出了油基凝胶, 并对其在地下储层中就地交联的情况进行了研究; 1993年, Gross^[13]对以柴油和原油作为基液的有机凝胶流体在地下储层的压裂方法进行了一系列研究.

2000年, 王满学等人^[14]对磷酸酯与储层流体的配伍性、磷酸酯浓度、磷酸酯/ Al^{3+} 比值、温度、初胶

液黏度、pH和原油含水时对油基压裂液成胶效果的影响等因素进行了研究. 结果表明, 磷酸酯与原油相溶有利于提高油基压裂液的性能.

2012年, 孔羽等人^[15]以五氧化二磷(P_2O_5)和磷酸三乙酯(TEP)为原料, 合成了聚磷酸酯中间体, 再与混合醇(由三种醇混合制得)反应, 合成了烷基磷酸酯.

2013年, 王满学等人^[16]针对由磷酸酯/ Al^{3+} 交联得到的油基压裂液交联速率迟缓, 交联剂溶解性差、稳定性弱和成本高等缺陷, 首次对磷酸酯/ Fe^{3+} 交联得到的油基压裂液体系进行了分析. 结果表明: 压裂液的成胶效果好; 10 min左右便能够达到最大黏度, 与以往的铝交联剂相比, 压裂液的成胶时间缩短了20倍; 压裂液的耐温能力由原本的100°C提高到了135°C, 而且压裂液的滤失性和破胶性等基本性能都可以达到现场施工的要求.

油基压裂液的优点在于: (1) 压裂液的基本性能不会受到放置时间长短的影响; (2) 压裂液的耐温耐剪切性强; (3) 压裂液成胶时间短.

其缺点在于: (1) 对压裂设备的要求较高, 常规压裂设备无法满足其要求; (2) 基液易燃易爆, 安全性不能得到有效的保障; (3) 成本较高.

3.2 低碳烃压裂液

低碳烃压裂液是以LNG (Liquefied Natural Gas)、LPG (Liquefied Petroleum Gas)、纯丙烷、丁烷等低碳链烷烃作为基液制备而成的一种无水压裂液, 其基液的组成简单, 只含有一种或两种烷烃.

早在20世纪70年代, 美国的研究者就已开始了对烃基压裂液的探索研究. 1974年, Gogarty等人^[17]制备出了LPG胶束溶液, 并对其作为压裂液的用途进行了研究; 1978年, Gay等人^[18]对烃基压裂液的胶凝剂进行了研究和制备.

1988年, Thorne等人^[19]确定了以液态烃、酸、磷酸酯和铝盐活化剂为组分制备的烃基压裂液, 并对其磷酸酯组分进行了研究; 1989年, Huddleston^[20]提出了制备烃类胶凝剂的新原料和新方法.

1995年, Smith等人^[21]用铁盐代替了铝盐来制备压裂液胶凝剂; 1997年, Smith等人^[22]又进一步将胶凝剂的组成优化为了铁盐、多羧酸组分、可选择性胺及磷酸酯; 同年, Jones等人^[23]提出了利用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末对由磷酸酯胶凝剂凝聚的烃类压裂液进行破胶的方法;

1998年, Smith等人^[24]提出了利用氧化镁对烃类压裂液进行破胶的方法.

2000年, Geib^[25]向烃类压裂液中加入了一种含有烷氧基化胺、非含氮组分和醚磷酸酯的强化剂, 使其交联时间与黏度得到了优化和提高; 2001年, Acker等人^[26]发明了一种蜡质颗粒状固体破胶剂, 这种蜡质颗粒在地表温度下呈固态, 但在地层温度下会溶于压裂液中并与胶凝剂反应; 2004年, Dawson等人^[27]发明了一种延迟破胶系统, 该系统能在储层中缓慢释放出破胶剂进行破胶; 2006年, Smith^[28]利用液化天然气作为压裂液的基液, 并对其性能进行了一系列研究; 2007年, Loree^[29]发明了一种LPG压裂系统, 引入惰性气体用于LPG的净化系统部件, 有助于预防爆炸的风险, 将低碳烃压裂技术工业化向前推进了一大步.

2009年, 加拿大GasFrac公司研制出LPG交联冻胶压裂液, 并将其运用在加拿大的McCully气田^[30], 图3为其现场压裂施工图. 结果表明, 使用LPG压裂液取得的有效裂缝长度是水力压裂的2倍以上, 图4表示LPG压裂裂缝与常规压裂裂缝对比情况, 压裂后两周内丙烷的回收率可达100%, 初始产量是水力压裂的2倍以上, 预测增产效果能够持续10年.

2012年, Gatlin等人^[31]发明了一种可在-20°C条件下正常工作的烃类压裂液, 其交联成分中含有一定量的硫酸铁和柠檬酸铁铵; 同年, Wilson等人^[32]发明了一种含有延迟交联成分的烃类凝胶, 可延缓压裂液的交联.

2012年, 美国ECORP Stimulation Technologies公司最先在美国Eagle Ford页岩区块进行利用纯液态丙烷进行压裂的试验, 最终宣布在1813.56m的安全压裂改造施工中取得成功^[6].

2013年, 侯向前等人^[33]针对油基压裂液交联速度迟缓而水基压裂液不利于非常规储层压裂施工的问题, 配制出了可使压裂液具有良好效果的交联剂, 并获得了适合于非常规储层压裂增产的低碳烃无水压裂液. 结果表明, 配制出的交联剂的成胶效果比目前国内普遍使用的硫酸铝、硫酸铁交联剂更好; 获得的低碳烃无水压裂液适合于非常规油气储层且交联效果好.

2014年, Gatlin等人^[34]发明了一种在极低温度条件下依然能有效运用的LNG压裂液的交联组分. 同年, 侯向前等人^[35]用五氧化二磷、磷酸三乙酯和混合醇



图3 (网络版彩图)LPG压裂现场施工图. 1 LPG压裂泵组; 2 液氮; 3 LPG储罐

Figure 3 (Color online) Construction site of LPG fracturing. 1 fracturing pump group of LPG; 2 liquid nitrogen; 3 storage tank of LPG.

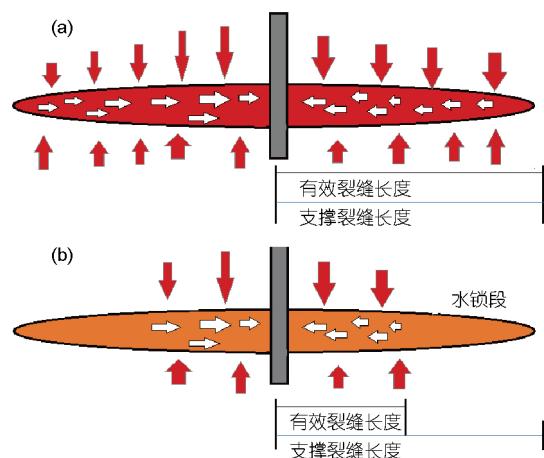


图4 (网络版彩图)LPG压裂与常规水力压裂产生的有效裂缝长度对比图. (a) LPG压裂有效裂缝示意图; (b) 常规水力压裂有效裂缝示意图

Figure 4 (Color online) Contrast between effective fracture lengths produced by LPG fracturing and conventional hydraulic fracturing. (a) Schematic diagram of effective fracture of LPG fracturing; (b) schematic diagram of effective fracture of conventional hydraulic fracturing.

反应制得烷基磷酸酯. 结果表明, 随着基液碳链长度的增加, 压裂液的耐温耐剪切性变强.

2015年, Mao等人^[36]首次以单一醇为原料合成了磷酸酯胶凝剂, 并制备了可以调控交联时间的铁离子交联剂; 使用环境扫描电子显微镜, 首次从微观角度对己烷基压裂液凝胶的内部结构进行了观察与研究; 大幅提高了压裂液的黏度和耐温耐剪切性, 使压裂液耐温达到150°C以上.

低碳烃压裂液的优点在于: (1) 表面张力低, 与储

层流体的配伍性好, 不会造成水相圈闭伤害和黏土膨胀效应, 对储层几乎无伤害; (2) 压裂液在压裂施工后由于高温、高压而汽化, 因此在形成的缝隙中只留下支撑剂, 无压裂液残留, 这样就会使裂缝长期具有良好的导流能力^[37]; (3) 压裂后可与天然气一同被抽回地面, 其返排率、回收率可达100%, 且经过简单的分离处理后即可循环再利用; (4) 低碳烃压裂液几乎不需要用水, 能尽可能地缓解对环境和水资源造成压力, 同时也省去了压裂液废液处理的成本。

其缺点在于: (1) 其短期成本比水基压裂液高; (2) 目前低碳烃压裂技术还不够成熟, 存在一定的安全隐患; (3) 对压裂设备的要求较高。

4 结论及建议

(1) 目前国内油田的压裂施工几乎都采用的是水力压裂技术, 但随着对水资源和环境保护的关注日益增长, 更加清洁环保的新型压裂技术如无水压裂液技术也将对我国的油气开采做出重要的贡献, 尤其是在偏远缺水的地区, 无水压裂液技术将为当地带来较高的经济和环境效益。

(2) 无水压裂液技术具有与储层流体配伍性好、对储层几乎无伤害、造缝能力强、增产效果好、返

排迅速彻底、可循环利用、节能环保等特点, 在不久的未来将成为新型压裂技术的主力军。

(3) 目前北美已经对无水压裂液进行了非常系统的研究, 并已进行了多次现场压裂施工, 均取得了很好的效果。但国内对无水压裂液的研究目前仍处于起步阶段, 还有大量工作需要相关的研究人员来进行。

(4) 无水压裂液主要的技术难题在于: 对压裂设备的要求高, 急需对相关的配套压裂设备进行研发, 从而进行现场压裂测试, 最终形成无水压裂液技术体系。若能自主研发出适用于无水压裂液的配套设备并保证其安全性, 则将大大减少对国外设备进口的依赖, 从而显著降低压裂成本, 将为我国非常规油气资源的开发带来极大的经济和环境效益。

(5) 随着科技和理念的不断进步, 在不久的将来, 对压裂技术的研究和应用将不再是单一化的。由于多层次压裂、体积压裂、重复压裂等压裂方式的不断提出, 未来将针对压裂液体系、压裂方式和压裂设备工艺的相互适应性进行研究, 形成压裂技术的最优化模式, 甚至是探索将多种压裂液体系、多种压裂方式与尽可能统一的压裂设备工艺相结合的复合压裂技术, 进而对地层实施有效造缝、有效压裂, 最终目的是实现油气储层的最有效开采。

参考文献

- 1 Sun Z T, Wu X S. Review on hydraulic fracturing and non-aqueous fracturing in shale gas development (in Chinese). Land Res Inf, 2014, 5: 51–55 [孙张涛, 吴西顺. 页岩气开采中的水力压裂与无水压裂液技术. 土资源情报, 2014, 5: 51–55]
- 2 Zhang Q D, Wang P Y, Yang D L. Fracturing technology with no damage to formation: Fluid CO₂ fracture (in Chinese). Oil Drill Prod Tech, 2002, 24: 47–50 [张强德, 王培义, 杨东兰. 储层无伤害压裂技术——液态CO₂压裂. 石油钻采工艺, 2002, 24: 47–50]
- 3 Zhang J, Xu B, Cui M M. Review of fracturing technology of pure liquid carbon dioxide (in Chinese). J Green Sci Tech, 2014, 4: 200–203, 206 [张健, 徐冰, 崔明月. 纯液态二氧化碳压裂技术研究综述. 绿色科技, 2014, 4: 200–203, 206]
- 4 Wu J Q, Gao Z L, Sun X, et al. Research status and prospect of liquid CO₂ fracturing technology (in Chinese). J Yangtze Univ (Nat Sci Edit), 2014, 11: 104–107 [吴金桥, 高志亮, 孙晓, 等. 液态CO₂压裂技术研究现状与展望. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11: 104–107]
- 5 Wang H Z, Shen Z H, Li G S. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO₂ (in Chinese). Pet Drill Tech, 2011, 39: 30–35 [王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界CO₂开发页岩气技术. 石油钻探技术, 2011, 39: 30–35]
- 6 Li Y L, Yang G S, Zhu C F, et al. Development of the fracturing fluid applied in shale gas extraction (in Chinese). Explor Eng (Rock Soil Drill Tunnel), 2014, 41: 13–16 [李元灵, 杨甘生, 朱朝发, 等. 页岩气开采压裂液技术进展. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41: 13–16]
- 7 Middleton R S, Carey J W, Currier R P, et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂. Appl Energ, 2015, 147: 500–509
- 8 Li X K, Sima L Q, Song H Q, et al. Application prospects of alcohol-base acid and alcohol-base fracturing fluid in Xujiache group of southern Sichuan area (in Chinese). Drill Prod Tech, 2006, 29: 70–72 [李学康, 司马力强, 宋华清, 等. 醇基酸醇基压裂液在蜀南地区须家河组的应用前景. 钻采工艺, 2006, 29: 70–72]
- 9 Li K D. Research and application of alcohol fracturing fluid (in Chinese). Chem Eng Oil Gas, 2015, 44: 83–85 [李奎东. 醇基压裂液的研究与应用. 石油与天然气化工, 2015, 44: 83–85]

- 10 Xu C B, He C M. Status quo and prospect of unconventional fracturing fluids development (in Chinese). *Adv Fine Petrochem*, 2012, 13: 1–5 [许春宝, 何春明. 非常规压裂液发展现状及展望. 精细石油化工进展, 2012, 13: 1–5]
- 11 Burnham J W. Method for fracturing subterranean formations. US Patent, US04200540, 1980-4-29
- 12 Burnham J W. Gelled oil base compositions and methods of preparation and use of same. US Patent, US04316810, 1982-2-23
- 13 Gross J M. Gelling organic liquids. US Patent, US05190675, 1993-3-2
- 14 Wang M X, Chen M T, Guo X L. The influencing factors for phosphate/Aluminum (III) oil base gelling hydrofracturing fluids (in Chinese). *Oilfield Chem*, 2000, 17: 218–221 [王满学, 陈茂涛, 郭小莉. 磷酸酯/Al³⁺油基冻胶成胶行为影响因素的研究. 油田化学, 2000, 17: 218–221]
- 15 Kong Y, Jing J Z, Feng H, et al. Indoor synthesis of phosphate gellant in oil base fracturing fluid (in Chinese). *Petrochem Ind Appl*, 2012, 31: 81–83, 87 [孔羽, 井继哲, 冯涵, 等. 油基压裂液用磷酸酯胶凝剂的室内合成. 石油化工应用, 2012, 31: 81–83, 87]
- 16 Wang M X, He J, Zhang W S. Performance research of oil-based gelled fracture fluid based on the phosphoric acid ester and ferric iron (in Chinese). *J Southwest Pet Univ (Sci Tech Edition)*, 2013, 35: 150–153 [王满学, 何静, 张文生. 磷酸酯/Fe³⁺型油基冻胶压裂液性能研究. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35: 150–153]
- 17 Gogarty W, Haws G. LPG micellar solutions as fracturing fluids. US Patent, US3818993, 1974-6-25
- 18 Gay R L, Schlott R J. Gelling agents for hydrocarbon compounds. US Patent, US04104173, 1978-8-1
- 19 Thorne M A, Scherubel G A. Method for preparation of hydrocarbon fracturing fluids, fluids prepared thereby, and methods related thereto. US Patent, US04787994, 1988-11-29
- 20 Huddleston D A. Hydrocarbon geller and method for making the same. US Patent, US4877894, 1989-10-31
- 21 Smith K W, Persinski L J. Hydrocarbon gels useful in formation fracturing. US Patent, US05417287, 1995-5-23
- 22 Smith K W, Persinski L J. Hydrocarbon gels useful in formation fracturing. US Patent, US05614010, 1997-5-25
- 23 Jones C K, Lundberg R D, Malekahmadi F. Use of breaking chemicals in gelled hydrocarbons. US Patent, US5649596, 1997-7-22
- 24 Smith K W, Thomas T R. Delayed breaking of gelled hydrocarbon fracturing fluid. US Patent, US5846915, 1998-12-8
- 25 Geib G G. Hydrocarbon gels useful in formation fracturing. US Patent, US06149693, 2000-11-21
- 26 Acker D B, Malekahmadi F. Delayed release breakers in gelled hydrocarbons. US Patent, US6187720, 2001-2-13
- 27 Dawson J, Kesavan S, Van Le H. Breaker system for fracturing fluids used in fracturing oil bearing formations. US Patent, US6767868B2, 2004-7-27
- 28 Smith D. Method and apparatus for stimulating a subterranean formation using liquefied natural gas. US Patent, US20060065400A1, 2006-3-30
- 29 Loree D N. Liquefied petroleum gas fracturing system. US Patent, US20070204991A1, 2007-9-6
- 30 Leblanc D P, Martel T, Graves D G, et al. Application of propane (LPG) based hydraulic fracturing in the McCully gas field. In: Proceedings of SPE North American Unconventional Gas Conference and Exhibition. Texas: SPE, 2011
- 31 Gatlin L W, Walden G E, McMillan E, et al. Low temperature hydrocarbon gel. US Patent, US20120000660A1, 2012-1-5
- 32 Wilson T P, Wanner M J. Delayed hydrocarbon gel crosslinkers and methods for making and using same. US Patent, US8158562B2, 2012-4-17
- 33 Hou X Q, Lu Y J, Fang B, et al. Waterless fracturing fluid with low carbon hydrocarbon as base fluid for unconventional reservoirs (in Chinese). *Pet Exp Dev (Pet Eng)*, 2013, 40: 601–605 [侯向前, 卢拥军, 方波, 等. 非常规储集层低碳烃无水压裂液. 石油勘探与开发(石油工程), 2013, 40: 601–605]
- 34 Gatlin L W, Walden G E, McMillan E. Crosslinking composition for hydrocarbon gels. US Patent, US20140051611A1, 2014-2-20
- 35 Hou X Q, Lu Y J, Fang B, et al. Low carbon hydrocarbon-based fracturing fluid systems and their rheological properties (in Chinese). *Oilfield Chem*, 2014, 31: 348–352 [侯向前, 卢拥军, 方波, 等. 低碳烃无水压裂液体系及流变特性研究. 油田化学, 2014, 31: 348–352]
- 36 Mao J, Wang D, Yang X, et al. Application and optimization: Non-aqueous fracturing fluid from phosphate ester synthesized with single alcohol. *J Pet Sci Eng*, 2016, 147: 356–360
- 37 Han L X, Zhu L H, Sun H F, et al. LPG waterless fracturing technology (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2014, 34: 48–54 [韩烈祥, 朱丽华, 孙海芳, 等. LPG无水压裂液技术. 天然气工业(开发工程), 2014, 34: 48–54]

Research progress and prospect of the waterless hydraulic fracturing technology

MAO JinCheng*, ZHANG ZhaoYang, ZHAO JiaHui, WANG DingLi & ZHAO JinZhou

State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Presently, international oilfields mainly adopt hydraulic fracturing technology to stimulate the oil and gas production. However, the conventional hydraulic fracturing technology is always faced with the problem of large amount of water consumption and related pollution after fracturing, and it is not conducive to the development of unconventional oil and gas reservoirs. So the application of conventional hydraulic fracturing technology is greatly limited. The waterless hydraulic fracturing technology can effectively solve the above problems. But the application of waterless hydraulic fracturing technology is less, and the theoretical research is relatively short in China where the reserve of unconventional oil and gas resources is abundant with the relative lack of water resources. If the technological difficulties of non-aqueous fracturing fluids can be broken through, then non-aqueous fracturing fluid technology will bring significant economic and environmental benefits to the development of unconventional oil and gas resources in China. Based on the investigation of the domestic and foreign data, this paper introduces the research status on non-aqueous fracturing fluid technology and analyzes several commonly used fracturing fluid technologies. This article mainly introduced the characteristics of several kinds of waterless fracturing fluids technical, such as carbon dioxide fracturing fluid, alcohol based fracturing fluid and hydrocarbon fracturing fluid, including their strengths and weaknesses. The working mechanism of liquid CO₂ fracturing fluid, supercritical CO₂ fracturing fluid, alcohol based fracturing fluid, oil based fracturing fluid and low carbon hydrocarbon fracturing fluid is also studied in the paper. Finally, this paper summarizes the key points in research direction and the key problems in the application of the waterless fracturing fluid. The paper can provide some reference value for the theoretical research and practical application of the waterless hydraulic fracturing.

unconventional reservoir, non-aqueous fracturing fluid, low-carbon hydrocarbon, LPG, liquefied CO₂, supercritical CO₂

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2016-00537](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00537)