

液化石油气无水压裂技术综述

张 冲 周小林 (中石化东北油气分公司石油工程环保技术研究院, 吉林 长春 130062)

摘 要: 液化石油气 (LPG) 压裂一种高效的新型无水压裂技术, 能充分改造储层。介绍了 LPG 压裂技术的增产机理、施工工艺与改造效果, 总结了国内发展 LPG 压裂存在的问题。结果表明: LPG 具有对储层伤害小、增产效果好、对环境友好等特点, 施工成本、安全风险和专用设备是制约该技术发展的瓶颈。如能突破瓶颈, LPG 无水压裂则具有广阔的应用前景。

关键词: 液化石油气; 无水压裂; 页岩; 综述

0 引言

以页岩气为代表的非常规天然气在世界主要国家能源结构中发挥着重要作用。大量的页岩气开发实践表明, 水平井钻井与水力压裂是实现页岩气大规模工业化的关键技术。国内页岩气开发常采用低成本、小摩阻的滑溜水压裂液, 建产较快, 投资回收期短, 但同时也存在很多问题^[1]。发展无水压裂技术成为解决常规水力压裂问题、提高页岩气开发效果的有效途径^[2]。

1 LPG 无水压裂工艺

液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG) 压裂是一种无水压裂工艺, 压裂液主要为丙烷, 并包含少量的乙烷、丙烯、丁烷和化学添加剂。该技术最早由加拿大的 GasFrac 能源服务公司提出, 并在多口井中进行了使用, 现场施工过程的最大水平段长度达到 1188.72m, 最大垂深达 4008.12m, 在最大施工压力 90MPa, 泵注排量可达 7.0m³/min, 压后裂缝的有效率达 95% 以上, 平均每口压裂节约水资源 1.14~4.54 × 10⁴m³。^[3]

1.1 LPG 压裂液体系研究

LPG 压裂液是一种无水压裂液, 以低碳烃为基液, 主要为丙烷, 并含有少量的丁烷、丙烯、丁烯等, 基液由低碳烃组成。由于纯 LPG 的粘度与密度较小, 在储层条件下的耐温、耐剪切性能较弱, 需要加入一定的化学添加剂对 LPG 压裂液体系性能进行改进, 达到施工中携砂、控滤失、易返排等要求。

1974 年, Gogarty 等人^[4]考虑将 LPG 作为压裂液并进行相关的研究, 初始得出 LPG 压裂液的组成包括低碳氢 (正己烷)、水、表面活性剂等。为提升低碳烃类压裂液的携砂性能, David 等人开展了烃类胶凝剂的研究, 发现在相同剂量条件下, 增大烃类含量, 体系的粘度明显上升, 并在 200~250 °F 的温度下保持较高的粘度。

2007 年, Loree 等人^[5]在 LPG 压裂液体系中引入了惰性气体, 降低 LPG 与空气接触发生燃烧爆炸的风险。GasFrac 公司在加拿大 McCully 气田进行 LPG 交联冻胶压裂施工, 压后返排率达到 100%, 初始产量是常规压裂的两倍以上。

2013 年, 为提高交联速度, 侯向前等人^[6]通过分析

和优选研制出了适用于低碳烃的络合铁交联剂。相比于常规的交联剂, 络合铁交联剂交联时间短, 形成的凝胶粘度高, 表现出优越的性能。

2015 年, Mao 等人^[7]研制出一种新的低碳烃压裂液体系, 以单醇合成的磷酸酯作为胶凝剂并用铁离子交联剂来控制交联时间, 测试中表现出较强的耐温抗剪切性能, 最高温度可达 150℃。

2017 年, Zhao 等人^[8]基于铝交联剂与铁交联剂研制出新型的 LPG 压裂液体系, 最大耐温达到 134.1℃, 在温度 90℃、剪切速率 170s⁻¹ 下 30min 内粘度维持在 110 MPa·s 以上, 可在 90℃ 条件下完全破胶, 地层渗透率恢复达到 90% 以上。

目前 LPG 压裂液体系得到了充分的发展, 主要体现在交联体系的改进以提高压裂液体系的耐温耐剪切性能, 缩短交联时间, 在实验条件下取得了许多重要的成果, 但在现场进行大规模的推广使用仍需更进一步的研究与完善 LPG 压裂液体系。

1.2 LPG 压裂增产机理

LPG 压裂液不含有水, 化学添加剂加量少较少, 与储层岩石与储层流体的配伍性较好, 实际压裂施工中可以有效避免由于水基压裂液所带来的粘土膨胀、水锁、水相圈闭等储层损害, 能保证储层孔隙结构与人工裂缝良好的导流能力, 能实现较长时间的稳定生产, 特别是在物性较差的非常规储层中效果更为显著。

LPG 压裂液性质稳定, 少量交联剂能够实现高效增稠, 能有效降低支撑剂输送过程中的沉降, 达到均匀铺置的效果。压裂破胶阶段, LPG 压裂液破胶时间短且彻底, 在储层中只剩下高导流能力的填砂裂缝。常规压裂与 LPG 压裂后有效缝长比较可以发现由于压裂液滞留的影响, 导致储层流体的流动困难, 常规压裂形成的对生产有贡献的有效缝长较短, 由于 LPG 的高流动性以及和储层的高配伍性, 压裂产生的裂缝几乎均为有效裂缝, 大大提升了储层改造效率, 能获得较好的开发效果。

LPG 压裂液的密度约 0.51g/cm³, 破胶后粘度为 0.1MPa·s、表面张力为 7.6mN/m, 低粘度与低表面张力等特征减

弱了毛管力、润湿性是影响,使得 LPG 压裂液在储层中的流动时所需的流动压差大大减低。压裂施工结束后环境温度与压力发生变化, LPG 不再保持液态,同时甲烷会与 LPG 压裂液混合,使得 LPG 压裂液气化,能够完全返排^[9]。

1.3 LPG 压裂施工

LPG 压裂在施工工艺、压裂设计、施工设备等多个方面与常规压裂不同,现场常用的设备包括氮气罐车、LPG 压裂液罐车、化学添加剂、混砂车、压裂泵车组、高压管汇、加热单元、火灾消防车、压裂仪表车、分离器等。根据现场施工压力的不同,可将现场作用区域分为以下部分:

①压裂液配制区,作业压力 < 3MPa,管线主要连接 LPG 罐车、N₂ 罐车、化学添加剂罐车与支撑剂混合装置,主要完成 LPG 压裂液的配制,在整个过程汇总需控制好压力与温度使 LPG 以液态形式进行输送;

② LPG 压裂作业区,也是现场占地最大的区域,区域内压力高,一般不允许有作业人员在区域,通过压裂泵组将配置好的压裂液在高压管汇中由井口向地层泵注,在地层中形成水力裂缝,在持续泵注的条件下裂缝不断扩展延伸,直至达到压裂设计的泵注量;

③压后放喷返排区,通过高压管汇与压裂作业区相连通,返排液先后经过分离器、存储罐、点燃出口,针对返排的 LPG 压裂液,结合实际判断是否需要重复利用后进行 LPG 捕获存储或者点燃燃烧处理。

现场 LPG 压裂施工主要包括以下流程:

①施工前,首先对压裂设备与管线的密封性进行检测,可通过逐渐加压注入 N₂ 进行泄漏测试,并排空管道内的空气,并对相关压裂设备进行调试;

②装载液态 LPG 的罐车向密闭混砂容器中泵注 LPG,同时向其中泵入 N₂ 加压,同时达到隔绝空气、降低燃烧爆炸风险的目的,通过地面压力与温度控制使 LPG 保持液态,并加入稠化剂进行交联增稠,随后通过井口注入储层产生裂缝;

③进行支撑剂的输送,在支撑剂与交联的 LPG 进行均匀混合后注入地层进行裂缝的延伸铺砂,待注入量达到施工设计目标后停止加砂,停泵关井;

④关井一定时间后进行压裂液的返排,返排前先用氮气对地面管汇进行清理,返排过程中需进行油、气、水的分离以及 LPG 压裂液的回收,若需进行处理则点燃燃烧即可。

1.4 LPG 无水压裂技术增产效果评价

LPG 无水压裂技术由于绿色经济、储层友好、增产效果明显等优点得到了快速的发展与推广,特别是在水资源匮乏的国家与地区。加拿大在 McCully 气田增产改造作业中多次使用 LPG 压裂技术。

McCully 气田孔隙度与渗透率较小,初期通过水力压裂改造过程中发现压裂水返排率低,从储层水相圈闭损害较严重,拟采用 LPG 无水压裂技术。2009 年,在 McCully 气田的四口井进行了 LPG 压裂,通过压力瞬变分析与产量~时间曲线分析发现在相同的压裂规模下, LPG 压裂产生的水力裂缝缝长约为常规压裂裂缝缝长的两倍,压后气井累计产量也远大于常规压裂。在 McCully 气田其他区块也进行了大量的 LPG 压裂现场试验,实验结果均发现 LPG 压裂比常规具有更好的增产效果。

2 总结与展望

与常规水力压裂相比, LPG 压裂的优势体现在:

① LPG 压裂与储层的配伍性好,表面水力裂缝压裂张力小,可以克服由水基压裂液造成的水敏、盐敏、水相圈闭、润湿反转等储层损害,压裂后形成的对产能有贡献有效裂缝长度更大;

② LPG 压裂液的性能可控性较强,通过交联后能形成耐温耐剪切的高效携砂液,能使支撑剂在水力裂缝中均匀铺置,压裂后能实现完全破胶,在高温高压以及与甲烷混合的条件下会形成气态混合物,返排效率高,无残渣,不会造成储层的二次伤害;

③ LPG 压裂液中不含有水相,并可经过再处理后能实现重复使用,能有效解决水力压裂中水资源匮乏问题,同时减少了现场施工设备以及压裂返排液处理的成本,经济环保;

④相比于常规压裂, LPG 压裂后能形成比常规压裂更长的有效裂缝,最大限度改善储层,同时在油藏压裂中,压裂液中的低碳烃会与原油混合降低粘度,增大流动能力,提升产量。

受限于工艺的复杂性与现场施工条件, LPG 无水压裂技术的不足主要体现在如下几个方面:

① LPG 压裂液的基液为低碳烃,短期内成本较高,特别是在油价低迷时期难以推广该项技术,降本增效难以实现;

②安全性的问题是 LPG 压裂技术的一个重大挑战,由于 LPG 具有易燃易爆等特点,现场施工作业具有很高的风险,施工设计与作业难度大;

③ LPG 压裂技术与配套器械尚未完备,对现场的条件要求苛刻,需进行实时监控与监测,不能有明火,不能发生泄露,对设备的性能具有很高的要求;

④ LPG 压裂过程中作用机理尚未明确,不同的物理化学性质下的岩石破坏、裂缝扩展模式有明显差异,同时存在复杂的相态变化。

参考文献:

- [1] 乔林胜. 油层改造中的储层保护研究 [J]. 云南化工, 2018,45(02):57.
- [2] 李媛. 无水压裂技术评价 [J]. 石化技术, 2017,24(06):113.

- [3] 加拿大 GASFRAC 公司推出无水压裂技术 [J]. 石油勘探技术, 2014, 42(03): 75.
- [4] Gogarty, William B, Haws, Gerald W. LPG micellar solutions as fracturing fluids: US Patent, US3818993, 1974: 6-25.
- [5] Loree D N, Mesher S T. Liquified petroleum gas fracturing system. US Patent, US20070204991A1, 2007-9-6.
- [6] 侯向前, 卢拥军, 方波, 等. 非常规储集层低碳烃无水压裂液 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 601-605.
- [7] 12Mao J, Wang D, Yang X, et al. Application and Optimization: Non-aqueous Fracturing Fluid from Phosphate Ester Synthesized with Single Alcohol[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016: S0920410516303540.
- [8] Zhao J, Chen P, Liu Y, et al. Development of an LPG fracturing fluid with improved temperature stability[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2017: S0920410517308409.
- [9] 陈晓宇, 张志全, 燕明慧, 袁时雨, 张稷瑜. 页岩气开采中的液化石油气无水压裂技术 [J]. 当代化工, 2016, 45(2): 409-411.

作者简介:

张冲 (1983-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事储层改造相关科研及管理工作。

通信作者:

周小林 (1987-), 副研究员, 2010 年毕业于西安石油大学, 现从事试油气、储层改造设计和研究工作。

(上接第 44 页) 明确作业规程及安全责任, 监督落实安全措施。

2.7 建立反哺式安全培训文化

浙江项目牢固树立培训不到位是重大隐患的理念, 在传统建立 HSE 培训矩阵实施覆盖式安全培训的基础上, 通过分析差异化培训需求, 明确各工种培训要求, 让参建人员明确所需参加的培训和必须掌握的作业安全要求。参建人员在通过基础安全培训后岗前操作安全培训后, 项目定期组织差异化分工种安全培训, 并通过建立参建人员培训档案, 实施培训跟踪机制, 让现场安全培训服务于施工作业, 让参建人员分工种差异化培训反哺现场安全管理, 将提升所有参建安全意识和安全技能落到了实处。

2.8 实施可视化安全文化

LNG 设项目因作业区域众多, 作业范围大, 劳动力密集及设备众多等原因, 可视化安全文化建设在项目安全管理方面非常重要。浙江项目通过搭建数字化智慧工地平台, 实施人员与安全隐患动态管理; 设置区域安全管理公示牌, 对区域作业风险、隐患信息及应急流程进行公示; 设置职业危害因素告知牌、应急逃生路线图、事故警示牌、安全工时电子计时牌、安全文化长廊等; 实施设备月度检验色标管理、人员培训帽贴可视化管理等, 将安全管理内容、信息及应急管理流程等通过可视化的方式, 潜移默化中让所有参建人员更多的了解现场安全管理要求及信息, 逐步养成主动安全行为素养。

2.9 打造互动交流式安全文化

项目安全文化的养成是群策群力的结果, 因此打造互动交流式安全管理十分重要。浙江项目在充分发挥专业安全管理人员作用的同时, 想方设法打造互动交流式安全管理模式, 通过项目经理大讲堂、周管理人员安全交流会、参建人员现场安全会、周区域管理人员隐患分项交流会及安全咨询日活动, 让现场所有参建人员清晰的了解现场隐患动态及安全要求, 形成隐患闭环管理策

略。只有这样, 才能对现场的作业人员、设备状况, 给予静态控制、动态预防, 切断和制止有可能引发事故的根源, 实现作业人员之间的自保、互保和联保, 极大地降低安全事故的发生率。

3 结束语

安全是项目管理永恒的主题, 安全文化是项目安全运营的需要, 是项目可持续发展的重要基础。项目安全文化建设, 就是要逐步将安全文化理念渗透到每位参建人员思想中, 用安全文化的影响力潜移默化地转变参建人员的思想观念, 规范员工的操作行为, 提升员工的个人素养, 减少和降低人的不安全行为和物的不安全状态, 达到人、机、环境的和谐统一, 为保障项目安全高效运行奠定基础。浙江项目通过上述安全文化建设, 将现场安全管理与安全文化建设打造成了密不可分的有机体, 取得了一定成效, 为今后 LNG 建设项目安全文化建设提供了坚实的参考。在良好的安全文化的引领下, 浙江项目自 2018 年 6 月 27 日开工至今, 取得了连续六百多天累计 300 万安全工时无事故的良好 HSE 管理绩效, 更加印证了项目安全文化建设的重要性。

参考文献:

- [1] 田水承, 景国勋. 安全管理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 毛海峰, 贺定超, 刘德辉, 李强, 等. 企业安全文化建设导则 [S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2008.

作者简介:

魏雄标 (1981-), 男, 海洋石油工程股份有限公司, 液化天然气工程技术分公司副总经理兼安全总监、EPC 总承包项目经理, 高级工程师, 目前主要从事及项目管理工作及安全管理。

李天春 (1984-), 男, 海洋石油工程股份有限公司, EPC 总承包项目 HSE 经理。

李红霞 (1981-), 女, 海洋石油工程股份有限公司, EPC 总承包项目费控经理。