

低密度支撑剂可改善二叠纪盆地水力压裂的效果

编译：任怀丰 揣丽梅 刘景基 张子忠（大庆油田有限责任公司第七采油厂）

审校：马颖洁（大庆油田工程有限公司）

摘要 一种新型支撑剂在水基压裂液中几乎呈悬浮状态，因而能更有效地填充形成的裂缝，这种支撑剂由填塞或涂包树脂的研磨颗粒制成。总结了低密度支撑剂在水力压裂中的发展，讨论了在提高携砂液运移距离以及更完全地填充形成的裂缝中这种新型支撑剂的作用。图例给出两种裂缝横剖面图的对比：一种是采用常规支撑剂来填充裂缝，只是在井筒周围形成一个支撑剂堤；而采用轻质新型支撑剂填充的裂缝总长度与高度均较高。迄今为止，在 Texas 西部二叠纪盆地，利用一种被称为 LiteProp 的人造低密度物质实施了 130 井次压裂处理。

主题词 二叠纪盆地 水力压裂 低密度支撑剂 应用

一、前言

水力压裂从 40 年代末开始经历了无数次的技术改进。在成熟盆地以及边际产量经济的其他地域，石油与天然气工业仍然依赖压裂技术开发油气资源。在 Texas 西部二叠纪盆地，采用压裂作为增产措施由来已久。

简言之，水力压裂提供了一种利用流体压力将地层压开的方法，该方法可以从井筒横向延伸形成一条具有高度导流能力的通道，以此提高油井产量。通常将支撑剂置于裂缝处，确保压裂后即使压力下降流动通道仍然开通。

在过去的 20 年里，技术发展主要集中于压裂液的开发，力求做到污染小、效果好，比较典型的有交联聚合物（胶化的）方法，而支撑剂技术并未得益于相同水平的研究和革新（树脂涂层和陶粒技术可能除外），原因在于某一裂缝的实际尺寸限制了支撑剂的用量，这给最终支撑剂填充传导性加了个上限。从历史发展来看，石油和天然气工业一直在寻求一种理想的压裂液，这种压裂液既能最大限度地提高携带支撑剂的能力，又能将对地层的伤害及最终支撑剂填充传导性降为最低。由于这两种设计标准从本质上说恰恰相反，所以研发工作极具挑战性。

二、水力压裂的利弊

长期以来，我们一直认为非胶化的水是一种最干净、最经济的压裂液。如果在地层配伍性问题以及压裂液的滤失问题极小的情况下，将非稠化的水作为一种基本压裂液会有重大的意义。这些增产措施通常是指水力压裂、减水阻压裂或多枝压裂（偶尔），它们通常需要高速泵入大量含有降阻剂和少量支撑剂的水。在应用方面，与采用传统的稠化液相比，这种方法一方面可以减少资金的投入，另一方面使水力压裂比其他采用稠化液的压裂方法更加经济可行。

与其他增产技术措施一样，水力压裂有它的优势，也有其不足。这种特定方法关键是其筛选原则，将其应用于适合这种独特优势的区域或地层。潜在的水力压裂优势包括：

- ◇ 操作简单，采用的化学制剂单一；
- ◇ 可产生相当长的液压长度；
- ◇ 初期产量可与普通的增产措施相比拟；
- ◇ 费用低于普通增产措施。

正如所预料的那样，水力压裂也有不足之处，例如：

- ◇ 仅局限于含砂量低的地层；
- ◇ 滤砂速度快；
- ◇ 有效缝长较短；
- ◇ 与类似规模的普通压裂作业相比，最终产量下降的幅度较大；
- ◇ 含水层以下压裂具有一定的风险性。

从本质上来说，水力压裂的各种不利因素都表明压裂液携带支撑剂的能力较差。如果支撑剂可以有效地被水携带到位，那么潜在的不利后果将会大大减少，甚至完全消失。

简言之，流体携带颗粒的能力与相对于周围流体颗粒的沉降速度成正比。因为讨论的流体是水（牛顿流体），所以任意颗粒（支撑剂）的最终沉降速度（ V_t ）可通过 Stokes 定律估算出来：

$$V_t = (\rho_p - \rho_f) g_c d_p^2 / 18 \mu_f$$

式中 V_t ——最终沉降速度；

ρ_p ——支撑剂的密度；

ρ_f ——压裂液的密度;
 g_c ——地球引力常数;
 d_p ——筛眼大小;
 μ_f ——流体黏度。

在许多边际油藏,由于基液压裂已经被证实是一种普遍而经济有效的增产措施,如果它的主要缺点是压裂液携带支撑剂的能力差,那么有理由问:“会有一种方法改进水基液携带支撑剂特性吗?”对于这个问题,通过对 Stokes 定律进行研究找到减少携砂液中(本例中携砂液为水)支撑剂的最终沉降速度的途径。

三、提高水力压裂中压裂液携带支撑剂的能力

降低沉降速度最常用的方法是减小支撑剂的直径。在 Stokes 定律中直径是二次方形式,因而这种方法尤为有效;如果直径减少一半,沉降速度就变为原来的四分之一。但是,支撑剂的传导性与直径成正比,而且其幂大于 2,所以这种方法也有一定的局限性,即通过减少直径得到的沉降速度的下降值完全被裂缝导流能力的减少而抵消。

同样,对 Stokes 公式中的其他变量也进行检验。分析检验结果认为,增加流体黏度可降低支撑剂最终沉降速度。但是将流体稠化又违背了水力压裂的目标,而改变压裂液的密度被认为是不切实际的,因为要实现压裂液与支撑剂(砂)具有相同的密度,必须找到一种经济有效的、对地层没有伤害的流体(22.1ppg),而这是不可能的。

最实用的提高支撑剂运移能力的方法是减少支撑剂的密度,直到其接近携砂液的密度。显然,本文所讨论的流体是水,因而要求支撑剂具有一定的相对密度,尽可能接近 1,另外,它还应具有适当的传导性,从而可通过大范围的闭合应力和温度的流体。

四、寻求有效的低密度支撑剂

在寻找低相对密度、有效传导范围的化合物过程中,对许多不同种类的化合物进行了研究。针对以前提到的设计局限性进行了大范围的实验室筛选,选定一种纤维素基质,渗封在预固化的树脂涂层内。这种有机化合物本身具有大量的孔隙,孔隙中可以充满低密度树脂,从而具有一定的强度及低比重。整个颗粒被树脂薄膜包围、固化,以防止该基质发生降解并增加闭合阻力,如图 1 所示。

这一过程得到的支撑剂的导流能力与 Ottawa

砂基本相同,但平均相对密度为 1.25g/cm^3 。砂的相对密度为 2.65g/cm^3 ,优质的人造支撑剂的相对密度可以高达 3.55g/cm^3 。这种密度的差异说明,低密度支撑剂颗粒比淡水中类似大小的砂粒沉降速度慢 6.6 倍,最终沉降速度的降低使支撑剂运移的距离大大增加。另外,当低密度颗粒被放置在 10ppg 的饱和盐水中时(相对密度为 1.2),得到的沉降速度非常低,以至于颗粒几乎呈悬浮状态。

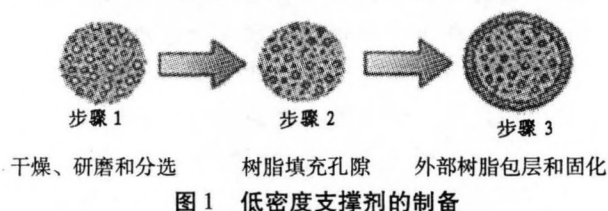


图 1 低密度支撑剂的制备



图 2 9.5ppg 盐水溶液中两种普通支撑剂的沉降速度

图 2 说明沉降速度的明显不同(9.5ppg 的静态盐水溶液中两种普通压裂支撑剂与两种超轻支撑剂比较)。从左到右,20/40 目的支撑剂是:铝矿、Ottawa 砂、Lite Prop175 和 Lite Prop125。在可控制的环境下,就在照片拍摄前 2s 将充满盐水的管子倒置。

五、模拟低密度支撑剂的动态

在水力压裂中,沉降速度下降体现于低密度支撑剂产生的缝长大于上面提到的普通砂产生的有效裂缝。图 3 是压裂后支撑剂分布图,从图中可以看出,在井筒附近,砂粒形成一个支撑带或沙丘。由于支撑剂分布形态的影响,区域砂浓度较高,因而砂充填的导流能力很强。然而,从图中还可以看出,在给定裂缝长度的情况下,整个生产层段并没有完全被支撑剂填充,而且,有效支撑长度也不理想。在低渗透带实施压裂会导致采出液流量递减

快、油层动用不完全的后果。

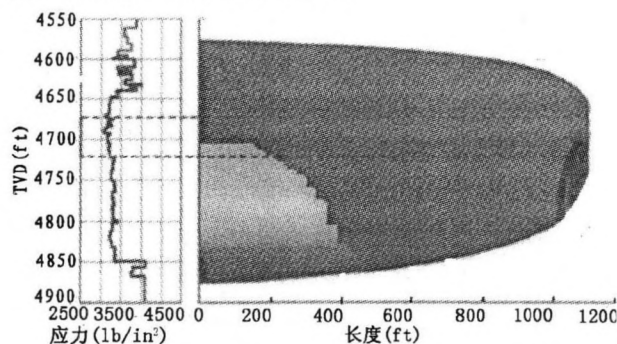


图3 常规水力压裂、压裂后支撑剂分布剖面图

为了改善图3中的完井特性状况,决定在10ppg的盐水携砂液中利用沉降速度几乎为零的低密度支撑剂的优势。图4是在常规水力压裂情况下、相同现场实例中得到的裂缝剖面。然而,在模拟中,虽然泵入流体的体积与前面的实例相同,但所放低密度支撑剂的质量仅是它的五分之一。

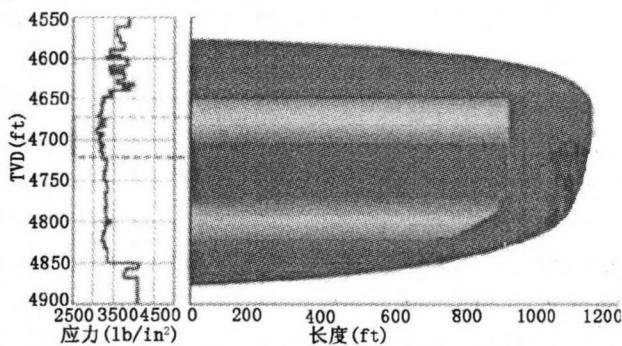


图4 采用低密度支撑剂的10ppg 盐水携砂液裂缝剖面图

另外,小部分的支撑剂泵入10ppg的过滤盐水中。

由于是典型的水力压裂,低密度颗粒并未大量沉降。这种情况也使整个油层完全被支撑剂撑开,形成的有效支撑长度是使用砂子作为支撑剂的4倍,但得到的导流能力却低于砂子作为支撑剂的情况。如果选定的油井渗透率较低,则形成裂缝长度控制着整个完井结果。

六、该方法在重复压裂和水驱中的实用性

实践证实该方法对油层渗透率较低的老油井重复压裂以及由于经济原因一直忽视的边际产油层的压裂尤为有效。通常压裂后产自低密度支撑剂裂缝的流体注入量是压裂前产量的7倍。在采用普通支撑剂的压裂中这种结果也出现过。

这种新型的低密度支撑剂也适用于水驱油藏中已压裂过、但目前关井的井。通常,即使压裂前油井停泵,压裂后仍然可以生产一段时间。测压结果表明:①裂缝长大于原始泄油半径;②连通的注水

井通过注水保持其压力。两种情况均需要较长的有效缝长,但究竟是哪一种情况还不确定。

七、寻求评价整个压裂潜力的数据

迄今为止,应用这种专利的、新型的、低密度、超轻支撑剂在二叠纪盆地已实施了130井次压裂。这种低密度支撑剂材料的不断改进意味着油井方案设计优化过程仍在进行。在现场已经提出并尝试多种不同的材料。

这些技术主要是利用支撑剂具有的低沉降速度这一优势。当然也包括通过提高裂缝中支撑面积使裂缝的有效长度达到最大的能力等利益。另外,低黏度的携砂液可以与低密度支撑剂一起使用,会产生更大的缝长与缝高,以此来提高波及范围。

支撑剂单层结构:一些经营者正在努力找到二叠纪盆地处理数据的临界量,使之成为评价这些潜力更有力的证据。主要是研究生成支撑剂的单层结构。关于这方面的情况在60年代的裂缝研究文献中已有记载。

产生局部单层支撑剂结构背后涉及的概念是将支撑剂放入宽度为一个颗粒直径的裂缝中。研究者们一直在探求最佳的支撑剂浓度,即在一完全单层之下,以最少量的支撑剂得到最大的导流能力。由于今天技术条件的限制,源于实验室条件下的这一概念很难应用到油田实践。

对近期压裂后结果的分析,结合对区域支撑剂浓度的预测研究提出:一个支撑剂单层结构可能是与低密度支撑剂一起形成的。

支撑剂单层成因分析:有以下三种原因,①稠化流体用于横向运移支撑剂,对于低密度支撑剂,不必考虑流体的黏度;②当使用非稠化流体时(水力压裂或减水阻压裂),普通支撑剂沉降速度较快,最后支撑剂分布形态变化较大,不能形成支撑剂单层。这不适用于新的低密度支撑剂;③支撑剂进入裂缝面而使支撑剂的浓度变低。使用这些新型低密度支撑剂达到最佳效果的是高模量白云岩。

八、结论

在二叠纪盆地,低密度支撑剂的出现为水力压裂井开创了新的机遇。这些低相对密度物质在进行压裂处理时连同对地层无伤害的流体一起将支撑剂放置到距井筒较远的区域,这比采用稠化系统装置所达到的位置更远。产生的较长的有效裂缝长度证明其性能优于常规处理边界井的措施。

资料来源于美国《World Oil》2004年6月

(收稿日期 2004-08-03)