

深部气藏 CO₂ 泡沫压裂工艺技术*

刘通义¹ 陈光杰² 谭坤²

(1.西南石油大学 2.中国石化中原石油勘探局井下特种作业处)

刘通义等.深部气藏 CO₂ 泡沫压裂工艺技术.天然气工业,2007,27(8):88-90.

摘要 泡沫压裂工艺技术是低压、低渗、水敏性地层增产增注以及完井投产的重要保障,国外在泡沫压裂(特别是在 CO₂ 泡沫压裂)的室内研究、设计以及施工技术、返排技术和压裂效果的现场评价等方面均已比较成熟。由于 CO₂ 的特殊性质,其在压裂改造技术中所占的份额将越来越大,在深井压裂改造中亦是如此。我国有许多低压、低渗、水敏性地层以及投产多年的老井需要进行压裂改造。为此,系统地介绍了 CO₂ 的基本性质、CO₂ 泡沫压裂的增产机理及 CO₂ 泡沫压裂工艺技术,并对中原油田深部气藏的现场施工结果进行了详细地分析,所采用的 CO₂ 泡沫压裂较普通的压裂改造效果更好,可作为低渗透气藏开发的一种有效措施。

关键词 二氧化碳 低渗透油气藏 泡沫压裂 增产效果 增产措施

一、引言

对于低渗密闭砂岩气藏而言,深部气藏产量的增加依赖于大型压裂的规模^[1,2]。近年来,我国的压裂技术得到了快速发展,对油气生产做出了巨大的贡献。

CO₂ 泡沫压裂技术就是针对低渗透油气田开发的新压裂工艺,其技术关键是充分利用 CO₂ 的特性,采用以 CO₂ 为内相、胶液为外相的泡沫压裂液体进行压裂改造低渗透油气层,达到增产、增注的目的。

国外在上世纪 60 年代开始进行泡沫压裂,70~80 年代泡沫压裂技术逐渐成熟,目前在泡沫压裂的室内研究、设计、施工以及效果评价等方面已经比较成熟。国外大多数施工采用氮气泡沫压裂,CO₂ 泡沫压裂技术开始于 80 年代初,常用于常压中深井及高温井的压裂作业。采用恒定内相泡沫压裂技术可大大提高泡沫压裂的砂比,在 CO₂ 泡沫压裂液中添加胶联凝胶(如羟丙基胍胶)作为泡沫稳定剂,提高 CO₂ 泡沫的黏度和携砂能力,使用计算机数据采集、实时计算和显示系统提高泡沫压裂施工的检测等措施,提高了 CO₂ 泡沫压裂施工的成功率和增产效果。例如在 ARK-LA-TEX 地区 884~4267 m 的地层中进行了 CO₂ 泡沫压裂,油气藏最高温度 187 °C,油气藏压力 91 MPa;在 Anadarko 盆地 3800 m 深的地

层中进行的 CO₂ 泡沫压裂,井底压力 28.6 MPa,最大加砂浓度达 2400 kg/m³;在 Canger 气田 2292 m 的地层中进行的加甲醇的 CO₂ 泡沫压裂施工,井底压力 16.4 MPa,最大加砂浓度 719 kg/m³。

中原油田地质情况复杂,断块多、渗透性极差,许多油气层的渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。有一大批油气井的地层能量低,压裂后液体返排困难,特别是深层凝析气藏,尽管采取了多种排液措施,但没有从根本上解决压裂液返排问题,导致了压裂液对地层的严重伤害,影响压裂施工效果。

二、CO₂ 泡沫压裂的特点

由于 CO₂ 泡沫液具有特殊的物理和化学性质,使得 CO₂ 泡沫压裂与常规压裂相比具有特殊性。

(1)低液体组分(20%~50%)的 CO₂ 泡沫改进了油气井的返排效果,特别是在处理改造低压地层时更是如此。液体增压的释放允许更迅速地返排,可使返排问题最小化。

(2)泡沫液的低滤失特性提供了更好的液体效率,当基质渗透率较低时不必加降滤失剂。

(3)泡沫液形成的胶体滤饼比非泡沫液体稀,得到了更高的恢复导流能力值,使地层伤害的最低。

(4)泡沫液的屈服点特性有助于悬浮支撑剂颗粒,提高了施工期间泡沫液的携砂能力,使支撑剂更

* 本文受到国家自然科学基金项目(编号:90210022)资助。

作者简介:刘通义,1964 年生,高级工程师;现从事油气藏改造压裂液酸化液研究及技术服务。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83032379。E-mail:liuty601@163.com

好地分布。

(5)CO₂ 溶解在地层液体中,稀释了油,减少了地层水的界面张力,使液体更多、更容易地排出。

(6)泡沫的可压缩性有助于处理液从地层返排,这是由于气体膨胀使其返回到井眼中。

(7)CO₂ 是高密度液体,其泡沫稳定性好,有较低的泵注压力。因此,可以进行深井压裂施工。

(8)允许使用常规压裂设备进行施工。

三、设备配套

中原油田目前拥有先进的 CO₂ 施工设备。其中:1000 型 CO₂ 泵车 3 台;液体 CO₂ 运输罐车 8 台,一次储运 144 m³ 液态 CO₂;增压供液泵车 2 台,每台增压泵最高排量可达 4.8 m³/min,可以满足目前人力条件下的泡沫压裂施工;气控车 1 台,放空阀、气控阀等管线连接关键部件实现了远距离操作,提高了施工安全系数。对供液端实施液氮试压,保障了 CO₂ 单元的高压管线的可靠性。

四、CO₂ 泡沫压裂液

1. 泡沫压裂液的基本性能

泡沫压裂液实际上是用起泡剂稳定的一种液包气乳状液,是一个大量气体分散在少量液体中的均匀分散体。气体在整个泡沫中所占的分数称为气相体积分数(foam quality, 俗称泡沫质量或泡沫品质),定义为一定温度和压力条件下泡沫中气体所占的分数,即

$$\text{泡沫质量} = \frac{\text{气体体积}}{\text{泡沫总体积}} \times 100\%$$

CO₂ 泡沫压裂液由稠化剂、起泡剂、黏土稳定

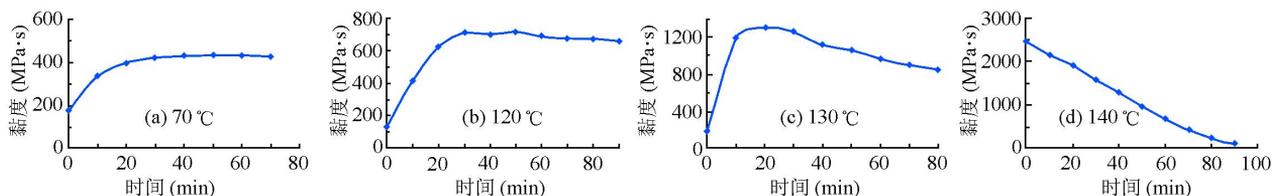


图1 不同温度下表观黏度、温度、剪切速率与时间的曲线图

五、CO₂ 泡沫压裂工艺技术

1. 设备组成及流程

CO₂ 泡沫压裂施工由高压管线并联压裂液和液体 CO₂ 两个单元组成。压裂液单元与常规水力压裂一样,由压裂液罐、压裂泵车、混砂车、储砂罐、高低压管汇等组成。其主管线连接由“T”形三通、节流短

剂、杀菌剂、pH 值控制剂、破胶剂等组成。

泡沫液的黏度是泡沫质量的函数。液体的黏度随两相液体内相百分比的增加而增加^[3]。

由于本压裂液体系对剪切敏感,高剪切将不可逆地降解压裂液,交联剂—聚合物之间的键一旦被破坏掉就不能重新恢复,不希望在高剪切区交联是因为可导致不可逆的黏度损失。通过使用专门的化学剂,交联可被延迟以避开高剪切区(通常是 500~1000 s⁻¹)油管,直到低剪切区(通常是 10~200 s⁻¹)裂缝才开始交联。这样既可避开高剪切区,又可降低压裂施工期间的摩阻。

CO₂ 泡沫压裂液的基本性能指标如表 1 所示。

表 1 CO₂ 泡沫压裂液的基本性能指标表

名称	指标
基液黏度 (mPa·s)	60~120
交联温度 (°C)	30~50
泡沫质量 (%)	40~75
破胶液黏度 (mPa·s)	1~3
抗温能力 (°C)	70~140

2. 压裂液的抗剪切性能

泡沫压裂液的稳定性受起泡剂性能、稠化剂(液相黏度)、温度等影响。在起泡剂不变的情况下,压裂液的携砂性能主要受液相黏度的影响。

室内评价液相黏度的方法是采用 RT-20 或 RS-300 高温流变仪,在加热、100 s⁻¹ 剪切速率下连续测定表观黏度,记录表观黏度、温度随时间变化的数据,得出表观黏度、温度、剪切速率与时间的曲线(见图 1)。

节、三向弯头、“Y”形三通、蝶片式单流阀、针式单流阀连接组成。

压裂液单元由泵头、三向弯头、二向弯头、用于连接泄压管线的“T”形三通、隔离阀(∅76.2 mm 旋塞阀)、泄压阀(∅50.8 mm 旋塞阀)连接组成。

液体 CO₂ 单元由液体 CO₂ 罐、增压泵等组成。其通过压力传感器、远程控制 ∅25.4 mm×50.8 mm

旋塞阀、截流短节、三向和二向弯头、“Y”型三通带一个死堵、“T”型三通、“Y”型三通、 $\varnothing 76.2 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$ 旋塞阀、针式单流阀连接而成。

2. 施工步骤

步骤为:设备检查→施工准备→施工开始→试压扫线→加砂压裂→施工结束→控制放喷。

六、现场应用情况

(1)白-41井有两套储层采用过常规水力压裂,但增产效果不理想。本次压裂井段为 3735.9~3750.8 m,厚度为 4.7 m,层数为 4 层,地层温度 145℃,压前间喷约 3000 m³/d。本次压裂注入方式为 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 油管注入,施工管串组合要求 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 、N80 外加厚压裂管柱,喇叭口深度 3700 m,对井口的要求为 1000 号采油树。2004 年 3 月 29 日压裂,加 0.45~0.90 mm 陶粒 18 m³。该井压后 24 h,排液达 80 m³,使用 $\varnothing 4 \text{ mm}$ 油嘴测试,套压 17.1 MPa、油压 24 MPa,产油 7.22 t/d,产水 13.2 t/d,产气 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,增产效果相当显著。

(2)桥-69井于 2002 年 10 月 13 日补孔常规水力压裂,泵注压裂注液 491 m³,加砂 70 m³,压后无增产效果。本次 CO₂ 泡沫压裂井段 3707.6~3789.6 m,使用压裂液胶液 145 m³,活性水 100 m³,液态 CO₂ 126 t,0.45~0.90 mm 陶粒 20.6 m³,0.224~0.45 mm 陶粒 2 m³。该井压后 24 h 排液达 80 m³,用 $\varnothing 4 \text{ mm}$ 油嘴测试,套压 22 MPa、油压 18 MPa,增油 19.63 t/d,天然气 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(3)白-50井的压裂井段为 3894.8~3995.4 m,厚度为 16.2 m,层数为 6 层。注入方式为 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 油管注入,合层压裂。井口采用 1000 号采油树。使用原胶液 127 m³,CO₂ 泡液 152 t,加砂 0.45~0.90 mm 陶粒 23.3 m³。施工结束后迅速放喷,压裂液黏度为 1.5 Pa·s(511 s⁻¹),说明压裂液破胶良好。该井压后产气 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,增产效果十分显著。

七、结论

(1)建立了适合深井大型 CO₂ 泡沫压裂施工的工艺技术。

(2)CO₂ 泡沫压裂施工中摩阻压力容易受排量、泡沫质量、砂比的影响。

(3)CO₂ 泡沫压裂摩阻压力的变化规律与常规水力压裂不同,影响了对施工状态的判断,因此,在卡封压裂施工中难度增大,容易误判而提前结束施工。

(4)施工证明,CO₂ 泡沫压裂液携砂性能好,滤失量小,对地层伤害小。

(5)CO₂ 泡沫压裂具有优良的破胶、返排性能,排液十分迅速,进一步减少了对地层的污染和排液时间。

(6)设计的放喷管线及控制方法,使用证明安全、可靠。

(7)现场施工的最大加砂规模达到 32 m³,地层最高砂比达 35%。

(8)进行了深度达 3789 m 的深井 CO₂ 泡沫压裂,为深井泡沫压裂奠定了良好的基础,取得了施工的成功和良好的增产效果。

(9)其他几个地区 CO₂ 泡沫压裂的成功施工,对中原油田的深层气、凝析气藏的开发具有重大意义。

参考文献

- [1]熊友明.国内外泡沫压裂技术发展现状[J].钻采工艺,1992,15(1).
- [2]GOWEN M MC, VITTHAL SANJAY, PARKER M A. Fluid selection fracturing high permeability formation [J].SPE 26559.
- [3]林英姬,杨贵兴,何建军.二氧化碳泡沫压裂技术[J].吉林石油科技,2000,19(1).

(修改回稿日期 2007-06-14 编辑 韩晓渝)