

龙女寺构造须家河组低效气藏压裂改造技术

白雪静¹ 春 兰² 杨兆中¹ 李小刚¹ 曾 珠³

1.西南石油大学石油工程学院,四川 成都 610500

2.中国石油西南油气田低效油气开发事业部,四川 成都 610017

3.中国石油西南油气田公司川中油气矿,四川 遂宁 629000

摘要:

龙女寺构造须家河组气藏具有低孔低渗和特低孔特低渗特征,加砂压裂是主要投产或增产方法。但该气藏储层物性差、储量丰度低、非均质性强,增产改造效果难以保证。在分析储层的岩性和物性特征基础上,总结该区块加砂压裂的难点,进而提出测试压裂、支撑剂段塞、拟线性加砂、快速返排等一系列提高压裂效果的技术对策。实施6口井(7井次)的加砂压裂现场试验,施工成功率70%,获得测试产量 $16.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为该气藏今后压裂改造效果的提高奠定了基础。

关键词:

低效气藏;压裂;龙女寺构造;须家河组

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2011)04-0050-04

0 前言

目前,国内关于低效气藏的规范定义还没有统一的标准。田昌炳等人^[1]将其定义为储量规模小、储量级别低、储量丰度低、气井产能低的“一小三低”气藏,并进一步给出了两个界定低效气藏的定量指标:储量丰度小于 $3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 或者千米气井产能低于 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{d}$ 。古莉等人^[2]在此基础上,对低效气藏特征增加了一个量化指标,即储层渗透率 $\leq 100 \text{ mD}$ 。

川渝地区的天然气资源大部分蕴藏于低效气藏中,此类气藏自然产能低,往往需要经过增产改造措施才能投产或增产。并且低效气藏一般在开采初期能达到工业气流标准,但产量下降快,难以稳产,经济效益往往比较差。龙女寺构造须家河组部分气藏具备低效气藏“低丰度、低产能”的特点,由于气藏本身决定

的复杂性和低效气藏开发所追求的经济性,使得在实施增产改造时面临着诸多困难。因此,如何合理地选择施工材料、工艺及施工参数是需要解决的重要问题。

1 储层岩性及物性特征

龙女寺须家河组岩石类型较多,纵向上分布具有差异性。其中须二、四、六以砂岩为主,夹少量黑色页岩及薄煤线,须一、三、五为黑色页岩夹细砂岩、粉砂岩及灰质粉砂岩及钙质页岩,川中东南部缺失须一段。须五段和须三段中泥页岩及多个含煤层为应脆性特点,易剥落掉块、坍塌。须家河组须四、须二段是区域性重要的裂缝型含气层段,主要以细—中粒岩屑长石砂岩或长石岩屑砂岩为主,其次为岩屑、石英。须二

收稿日期:

2011-05-07

基金项目:

教育部“高等学校博士学科点专项科研基金”联合资助课题(20095121110001)

作者简介:

白雪静(1986-),女,山东聊城人,在读硕士研究生,研究方向为油气增产理论与改造技术。

段、须四段这二个层段的砂岩具有以中粒砂岩、细—中粒砂岩、中—粗粒砂岩为主,其次为细砂岩、粗砂岩及少量粉砂岩的粒度分布特征。龙女寺地区粒度中偏细,粗砂及粉砂很少。

根据文献^[3]的报道,须家河须六段储层主要以孔隙型为主,须二、须四段储层主要是裂缝—孔隙型。须家河组地层平均孔隙度 6.52%,最大为 18.9%,最小为 0.83%。储层平均渗透率为 0.297 mD,最高为 26.500 mD,最低小于 0.000 4 mD,总体看,该地区物性差,属于低孔低渗和特低孔低渗储层。须家河组储层排驱压力较高,平均 1.326 65 MPa,饱和中值压力高 10.664 MPa,中值孔喉半径小,一般为 0.037~0.194 μm ,反映油气难于进入储层之中。总体上须家河组储层具有孔喉半径小、有效孔喉少、孔喉分选差的特点。

2 储层改造难点

须家河组砂岩储层属低孔低渗和特低孔低渗储层,局部地方孔渗条件较好,但在平面上和纵向上具有较强的非均质性。地应力较复杂,井与井的改造经验可比性差;再加之裂缝及微裂缝发育,导致加砂压裂作业针对性差,难以保证增产效果。须家河组加砂压裂的主要难点可以概括为以下几方面^[4]:

a) 储层物性和岩石力学性质非均匀分布,天然裂缝发育,携砂液效率低、支撑剂缝内运移铺置困难,致使动态缝尺寸与支撑缝尺寸差距较大。须二、须四段储层均为裂缝—孔隙型,须二段储层更是表现出低孔高渗的特点;

b) 对于多段射孔井,由于射孔段之间存在一定的间距,施工中裂缝一般从各射孔段同时起裂,但施工过程中裂缝的发育较为复杂,施工结果与设计裂缝参数有一定出入;

c) 天然裂缝发育及近井地带的多裂缝起裂,压裂液在近井筒流动摩阻大;

d) 孔隙度和渗透率很低,压裂时的储层伤害对压裂效果的影响更突出,对压裂液的低伤害性要求更高。平均孔隙度为 6.52%,最小孔隙度只有 0.83%;平均渗透率为 0.297 mD,最低小于 0.000 4 mD^[3]。

3 储层改造技术对策

3.1 测试压裂

由于龙女寺构造须家河组储层非均质强,不同井层的闭合压力、液体效率等均有差异。对于低效气藏而言,压裂施工的针对性对于提高施工的技术经济效益尤其重要。因此,为增强压裂设计和施工的针对性,前期有选择地在主压裂施工前采用小型测试压裂(图 1 为女深 002-2 井测试压裂曲线),从而为后期主压裂提供所需的参数如闭合压力、液体效率及裂缝情况等,有利于及时修改压裂设计、降低施工风险及成本。但需要指出的是,为了节约操作成本,测试压裂作为一种资料获取的手段可以在新区块新层位适当使用,为相应区块和层位后续的压裂施工提供参数的借鉴。

3.2 低砂比支撑剂段塞

发育有微裂缝的低渗透储层在压裂施工过程中

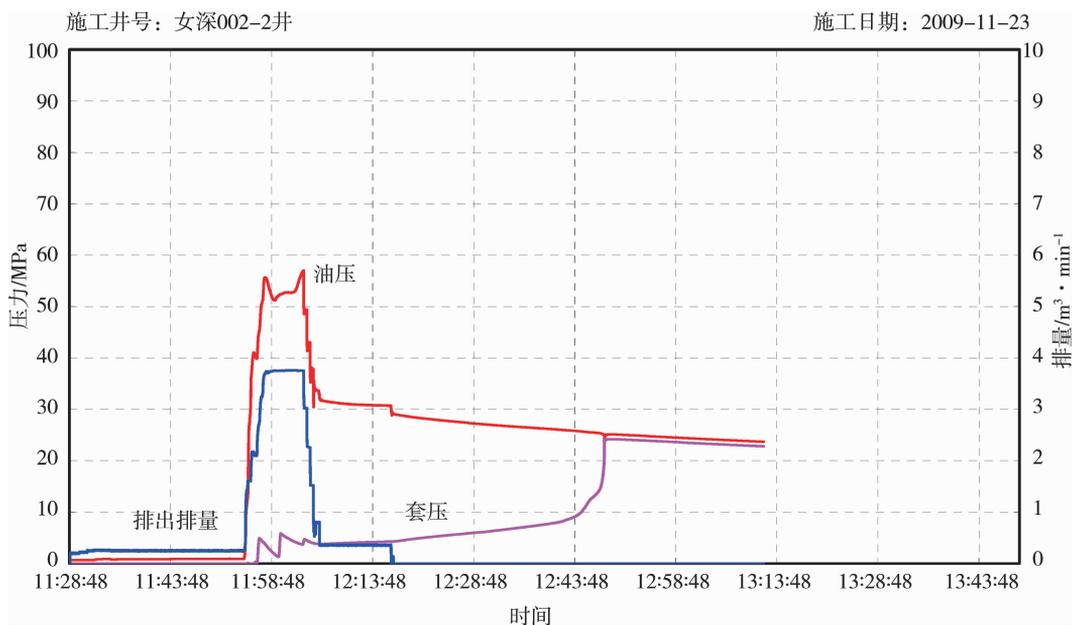


图 1 女深 002-2 井测试压裂施工曲线

常常遭遇近井筒问题,而使得裂缝延伸困难、支撑剂铺设不到位。压裂施工过程中,阻碍压裂施工的近井筒问题很多情况下是可以修复的,它们大多是由于以下三种流体流动限制因素所引起:射孔孔眼入口;射孔孔眼通道;由水力压裂诱发最初的几十厘米到几米裂缝。这三类近井筒问题可以进一步归类为“射孔孔道摩阻问题”和“压裂裂缝摩阻问题”^[5]。

为了解决近井筒问题,在主压裂施工的前置液阶

段增加低砂比段塞,在一定程度上一方面可降低了摩阻和施工压力,另一方面可降低压裂液滤失^[6-7]。如图2女深002-4井压裂施工曲线所示,该井在上提排量到近 $4\text{ m}^3/\text{min}$ 时,先后以 $75.8\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $79.1\text{ kg}/\text{m}^3$ 的砂浓度高挤支撑剂段塞。经过段塞对近井筒地带的打磨,最高油压从泵入段塞前的 67.58 MPa 降低到 62.27 MPa ,下降了 5.31 MPa ,为后期快速上提砂浓度提供了更大的压力空间。

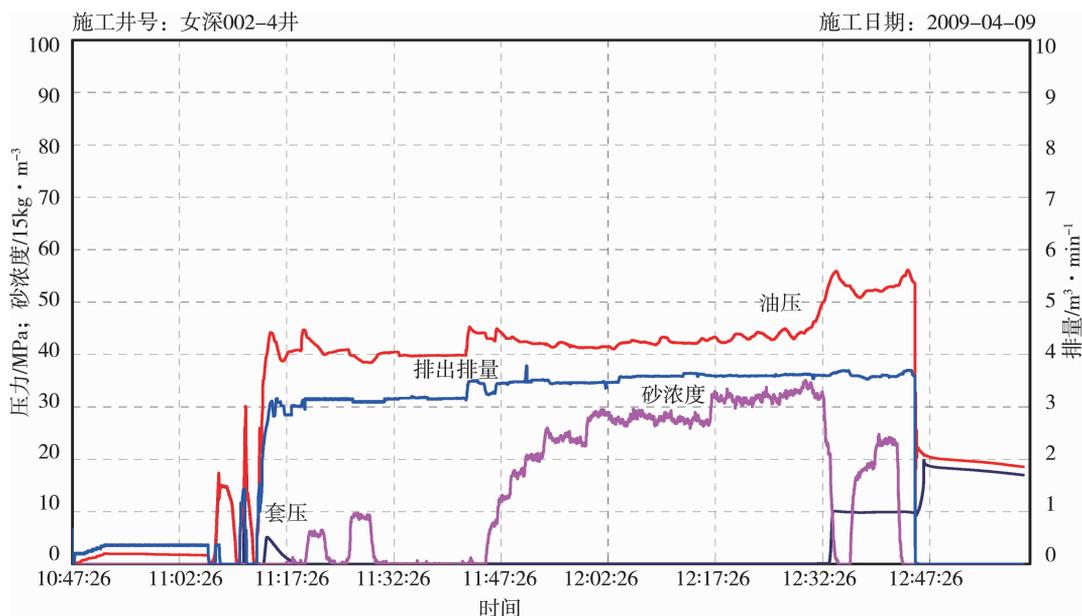


图2 女深002-4井压裂施工曲线

3.3 规模与缝高协调优化

根据水力压裂裂缝延伸的基本原理,在储层岩石力学参数和压裂液、支撑剂性能参数一定的情况下,随着施工规模的增加,裂缝长度和高度将随之增加。图3为根据女111井基本参数模拟计算得到的不同施工规模下的支撑缝长、支撑缝高和平均导流能力的关系曲线。

根据著名的 McGuire & Sikora 图版可知,对于低渗透储层而言,提高支撑裂缝的长度是获取更高增产倍比的主要途径^[8]。因此,在低渗透储层的水力加砂压裂施工中,人们常追求大排量、高砂比的大规模作业。

但是,当储层在纵向上呈多段发育、且上下遮挡层与储层应力差较小时,大规模施工可能导致缝高难以控制、实际缝长增长受限的问题。因此,在确定施工规模时,若储层层间距较大、非均质性明显且上下存在水层、油层发育时,一般采用降低规模、分层改造的方式进行水力加砂压裂;若储层层间距不大、上下无水层、油层时,可以适当提高压裂规模,例如女111井的测井曲线显示目的层须二段不具有明显的高含水

层,并且缝高易向下延伸,有利于纵向沟通多个储层段,因此选择 50 m^3 的加砂压裂规模。

3.4 多段拟线性加砂

在以往的压裂施工中,往往采取台阶式加砂程序,其优点是现场工艺成熟,易操作。但也存在明显的缺点,即砂液比的上提速度较慢,平均砂液比较低,可能难以形成有效的支撑裂缝。为此,现在人们越来越青睐线性加砂程序。但是对于龙女寺须家河组这样的储层,在考虑技术经济效益和缝高控制的前提下,施工规模一般不会很大,因此线性加砂所需要的排量液体效率难以达到;另外,基于 Nottle 理论真正的线性加砂程序要求砂浓度是实时变化的,这就需要实现混砂车搅笼的无级变速,这在实际施工过程中是很难实现的,于是以往常采取的线性加砂方式是在很短的时间内迅速将砂浓度提高到最大值。这样的做法虽然可以实现支撑剂浓度的快速提高,但是存在砂堵风险。对于裂缝孔隙性的储层而言,发生砂堵的可能性更大。

为此,在龙女寺构造须家河组的加砂压裂施工中,普遍采用了分段式的拟线性加砂程序(图4为龙

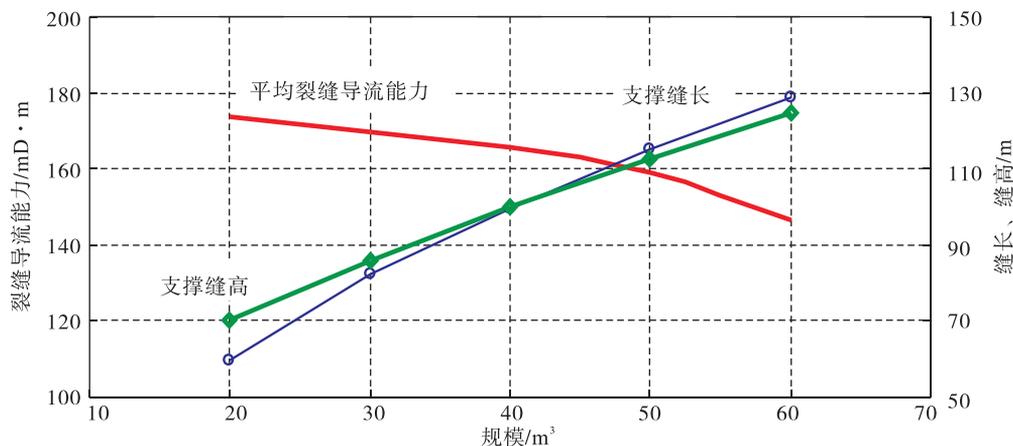


图 3 女 111 井不同施工规模的模拟结果对比曲线

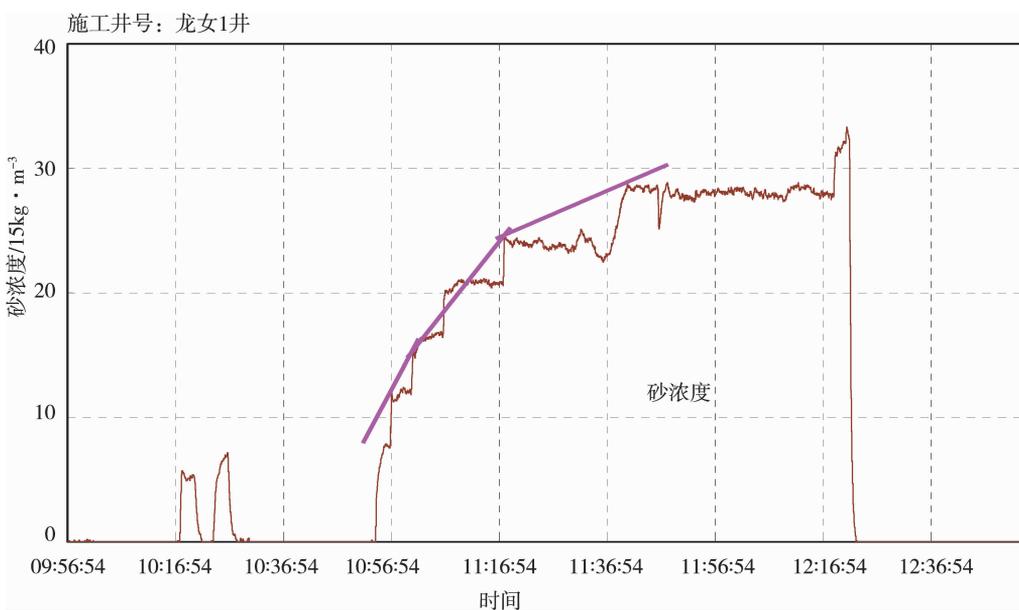


图 4 龙女 1 井砂浓度变化曲线

女 1 井砂浓度变化曲线), 这样的程序既有利于较短时间内提高砂浓度, 也有利于加砂浓度变化平稳、防止砂堵。从而有利于在不大的施工规模下, 安全地获取较高的支撑裂缝导流能力。

3.5 强制闭合快速返排

目前普遍采用的水基冻胶压裂液滤失在储层中会引起储层渗透率的下降, 在裂缝发育的储层压裂液滤失所带来的储层伤害尤其突出, 因此在施工完毕后, 一般都要求尽快进行压裂液返排。强制闭合压裂技术特别适合压裂井段以下无有效遮拦层的施工井, 也适用于低渗透层的压裂改造, 因低渗透层压裂后的裂缝闭合时间相当长, 支撑剂最易沉积在产层下段。对于须家河低效气井而言, 如果地层压力正常, 从技术经济角度考虑, 常常采用裂缝强制闭合的办法, 利用地层的弹性能实现压裂液的返排。

强制闭合排液的主要优点在于: 使更多的压裂液

在较短时间内被排出井筒, 缩短关井周期; 残液从地层中较快排出, 减少地层凝胶残渣和遗留在地层中压裂液诱发的地层伤害, 减少近井地带裂缝中的滤饼量; 实施裂缝强制闭合措施, 在施工作业停止后不使裂缝继续扩展, 将悬浮在压裂液中的支撑剂夹在其中, 阻止沉入裂缝底部, 从而不会降低有效层的导流能力。

4 试验井压裂效果分析

在龙女寺构造须家河组进行了多口试验井的加砂压裂改造, 情况见表 1。

6 口井 (7 井次) 的加砂压裂试验, 成功率达 70%, 获得测试产量 $16.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其中有两口井虽然采用了相应的配套技术, 但是没有获得测试产量, 可能的原因是在压裂过程中压裂液对储层造成伤害或者是井层选择不合理, 选取的目的层没有油气或者是储层

(下转第 80 页)

(上接第53页)

表1 龙女寺构造须家河组压裂试验井施工情况

井号	配套技术	测试产量 / $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
龙女1井	支撑剂段塞 + 拟线性加砂	4.39
女111井	支撑剂段塞 + 拟线性加砂	0
女7-1井	拟线性加砂	0
女深002-4井	支撑剂段塞 + 拟线性加砂	9.57
女深002-2井	测试压裂	0.118 2
女深002-3井	上段 支撑剂段塞 + 拟线性加砂 下段 支撑剂段塞	2.702

物性差,难以取得好的效果。

5 结论与建议

a)龙女寺构造须家河组是典型的低效气藏,储层改造难度大。

b)储层非均质性强,天然裂缝发育,以及近井地带的多裂缝起裂是造成龙女寺构造须家河组加砂压裂改造的主要难点。

c)支撑剂段塞、分段拟线性、强制闭合快速返排

等技术的应用是龙女寺构造龙女寺构造须家河组水力压裂取得成功的重要原因。

参考文献:

- [1] 田昌炳,于兴河,徐安娜,等.我国低效气藏的地质特征及其成因特点[J].石油实验地质,2003,25(3):235-238.
- [2] 古莉,于兴河,李胜利,等.低效气藏地质特点和成因探讨[J].石油与天然气地质,2004,25(5):577-580.
- [3] 康仁东.川中安岳地区须家河组二段沉积相及储层特征研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [4] 李小刚,何晓,杨兆中,等.川西低效砂岩气藏水力压裂难点及对策探讨[J].钻井工艺,2010,33(6):49-51.
- [5] 王立东,杨兆中,易祖坤.近井筒问题诊断与段塞技术的应用研究[J].内蒙古石化,2008,(6):14-15.
- [6] McDaniel B W. How Proppant Slugs and Viscous Gel Slugs Have Influenced the Success of Hydraulic Fracturing Applications[C]. SPE 71072, 2001
- [7] 杨蕾,刘宁,刘辉,等.气井井筒携液模型研究与应用[J].天然气与石油,2011,29(2):48-49.
- [8] 李颖川.采油工程第二版[M].北京:石油工业出版社,2009, 236-237.