

五宝场构造裂缝性气藏加砂压裂工艺技术

叶登胜 王素兵 陆灯云

(四川石油管理局井下作业公司)

叶登胜等.五宝场构造裂缝性气藏加砂压裂工艺技术.天然气工业,2007,27(5):14-17.

摘要 对于砂岩裂缝性气藏而言,由于受到储层物性和气层污染等因素的影响,自然产能往往较低,不经改造难以达到工业开采价值。但是裂缝性气藏在压裂过程中由于天然裂缝的开启与扩展,增大了液体在地层中的滤失,较大的滤失量不仅增加了造缝难度,难以形成较宽的裂缝,另一方面还会造成携砂液在裂缝中提前脱砂形成砂堵。为此,针对川东北五宝场构造裂缝性气藏的特点,分析了加砂压裂改造的难点,实施了相应的工艺技术与配套措施,现场应用情况表明取得了良好效果。

主题词 五宝场构造 砂岩油气藏 裂缝性气藏 压裂 工艺 技术 应用

一、气藏压裂改造难点分析

对于五宝场构造致密低渗裂缝性气藏而言,由于微裂缝情况复杂,即不仅有张性天然裂缝,还有潜在的诱导裂缝。同时由于受到构造应力与岩性影响,裂缝分布规律性差,给压裂设计优化与现场的成功实施带来了巨大的挑战。其压裂改造主要难点分析如下:①储层微裂缝发育,在压裂过程中微裂缝张开后压裂液滤失呈数量级增加,加之微裂缝张开后吸液,促使压裂液分流,不利于主体裂缝的延伸与扩展,导致裂缝动态缝宽窄,极易发生早期脱砂砂堵;②对于致密裂缝性储层而言,由于储层的复杂性,在压裂施工中极易形成裂缝形态复杂得多的裂缝,引起严重的近井筒效应,导致施工压力异常升高;③压裂液残渣或其他固体微粒很容易对裂缝性气层的微裂缝造成堵塞伤害,严重时造成加砂压裂改造失效;④裂缝性气层在钻、完井过程中极易受到钻井液、完井液的漏失伤害,附加应力大,造成施工初期施工压力异常增高;⑤致密低渗裂缝性气藏由于孔隙喉道小,行细管压力高,极易形成水锁液堵伤害,对压裂液的综合性能尤其是返排能力要求极高;⑥目标层地层温度在45~58℃之间,属于中低温气藏,要求压裂液具有良好的低温破胶能力;⑦多数井为定向井,裂缝起裂、延伸复杂,近井筒效应明显;⑧压裂增产效果与储层裂缝发育与否密切相关。

二、气藏压裂改造针对性工艺技术

对于天然裂缝较为发育的储层,加砂压裂设计必须充分考虑到不同井区天然裂缝类型及分布特征,采用与裂缝性储层相适应的压裂工艺技术以提高压裂施工成功率与有效率。

1. 致密裂缝性储层加砂压裂的主要目标

对于五宝场构造低渗裂缝性气藏,压后产能除受到储层孔隙度影响以外,天然裂缝的发育程度是影响压后产能的主要控制因素。因此,裂缝性储层加砂压裂的主要目的是沟通并延伸天然裂缝发育系统,以使气井获得增产。

2. 致密裂缝性储层伤害因素分析

致密低渗气层中的天然裂缝是影响其产量的主要因素,当水力裂缝沟通天然裂缝后,可获得明显的增产效果。但是,由于致密裂缝性气藏的特殊性,在钻井、完井以及增产过程中很容易受到伤害,从而影响气层的发现与压裂增产效果。致密低渗裂缝性气层伤害的主要因素如下。①气层在钻井、完井过程中大量的钻井液、完井液很容易漏失于裂缝、微裂缝中,造成严重的储层污染。②加砂压裂作业过程中,在高压作用下,压裂液容易进入因扩大或压力敏感而具有较高导流能力的天然裂缝中,但是返排是在正常的压差下进行的。此时天然裂缝的导流能力已经下降,加之压裂液不完全水化、残渣滞留于天然裂缝中堵塞天然裂缝与孔隙喉道,形成新的伤害。

作者简介:叶登胜,1965年生,高级工程师,博士研究生;现任四川石油管理局井下作业公司副经理兼总工程师。地址:(610051)四川省成都市二环路北四段瑞丰巷6号。电话:(028)86019198。E-mail:yed@vip.sina.com

③压裂施工过程中降滤失材料(如粉砂或粉陶、油溶性降滤失剂)或其他固体颗粒对裂缝、微裂缝的堵塞伤害。④低渗裂缝性气层的水锁伤害。低渗砂岩气藏喉道半径小、中值压力、毛细管压力高。高毛细管压力作用致使压裂后返排困难和流体流动阻力增加。压后若不能及时将残液排出,则会形成严重和持久的水锁伤害。

3.加砂压裂针对性的工艺技术与配套措施

(1)裂缝性气藏压裂过程中裂缝延伸与扩展

1)裂缝性气藏压裂过程中裂缝的延伸方式^[1]

常规砂岩地层压裂裂缝面延伸一定垂直于最小主应力方向,但在裂缝性储层压裂裂缝方向并不总是垂直于最小主应力方向,也可能基本沿天然裂缝方向拓展,这取决于两个方向上的主应力差值与岩石抗张强度的相对关系。裂缝性地层的人工裂缝延伸示意图见图1。

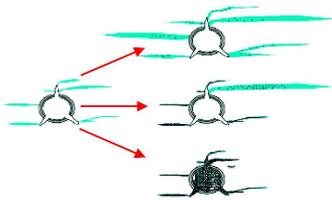


图1 裂缝性气层压裂裂缝延伸示意图

2)施工过程中天然裂缝开启或形成多裂缝

裂缝性储层发育有一定的微裂缝,施工过程中在一定压力条件下天然裂缝开启,吸液增加。加之裂缝发育的复杂性,在其延伸扩展过程中易形成多裂缝,促使液体分流,滤失增加,不利于主体裂缝的形成与扩展。当裂缝缝宽受限时,便造成过早脱砂(图2)。

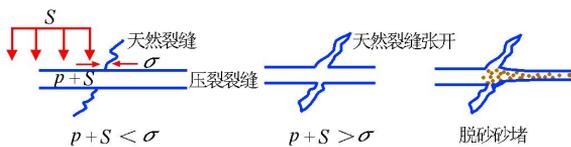


图2 天然裂缝张开示意图

(2)气藏针对性的压裂工艺技术

从以上分析表明:裂缝性气藏在压裂过程中天然裂缝的开启不仅不利于主体裂缝的形成与扩展,而且增加了形成裂缝的复杂性。因此,在压裂施工过程中任一裂缝位置都可发生脱砂形成砂堵,故加强裂缝性气藏压裂工艺技术的针对性研究对提高其改造的成功率与有效性十分重要。

1)低砂比线性加砂压裂技术

从室内支撑剂不同铺置浓度与导流能力变化关系曲线(图3)可以看出:铺置浓度小于 1 kg/m^2 ,导流能力与铺置浓度表现为非线性相关;在 $1 \sim 0.5 \text{ kg/m}^2$ 时随铺置浓度降低而急剧增大。裂缝性气层加砂压裂目的是沟通延伸并有效支撑天然裂缝,支撑剂的主要作用支撑天然裂缝与人工裂缝系统。因此,对于五宝场构造这种裂缝性气层而言,较低砂比即可达到理想的改造效果。

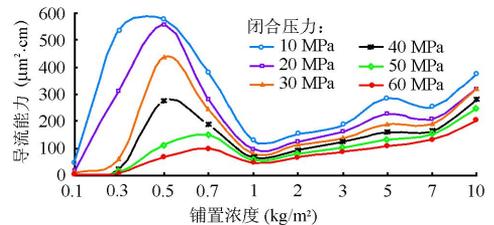


图3 支撑剂不同铺置浓度与导流能力关系曲线图

裂缝性气藏由于在压裂施工过程中,人工裂缝沟通天然裂缝后滤失加大,不利于形成裂缝宽度较宽的主体裂缝。若加砂压裂采用常规的台阶式加砂,一次性砂比变化大,容易造成缝口脱砂,发生施工砂堵。针对以上情况,采用线性加砂工艺技术,不仅有利于支撑剂在裂缝中的合理铺置,获得更好的支撑裂缝导流能力,还可以最大限度地降低裂缝性气层加砂压裂发生脱砂砂堵的风险。

2)适当加大前置液用量与泵注排量工艺

由于裂缝性气层在施工过程中沟通天然裂缝后,压裂液滤失呈数量级骤然增加。为降低压裂液的滤失,国内外通常的做法是加入粉砂(粉陶)或其他降滤失剂,封堵天然裂缝来降低压裂液的大量滤失。各种不同降滤失材料虽然可以起到降滤作用,增加液体效率,但是这种封堵对天然裂缝产生的伤害对裂缝性气层而言是致命的。因此,适当加大前置液用量与提高泵注排量来补偿液体的分流与滤失,可以避免使用固体降滤失材料对天然裂缝的堵塞伤害。

3)合理的支撑剂段塞冲刷、适当延长低砂比段泵注时间

针对致密裂缝性储层条件的复杂性,在压裂施工中极易形成裂缝形态复杂得多的裂缝,引起严重的近井筒效应,导致施工压力异常升高,在低砂比阶段易砂堵,造成施工失败。通过测试压裂分析来定量或定性判别近井筒效应,合理量化支撑剂段塞的大小;同时适当延长低砂比段泵注时间对近井筒效

应予以降低或消除。

4)低残渣、低伤害、易返排、快速破胶的压裂液体系

针对五宝场构造这种致密裂缝性储层易出现水锁、残渣对天然裂缝的伤害等情况,因此低残渣、低伤害、易返排、快速破胶的压裂液是该构造裂缝性气层压裂的核心技术。根据前期四川地区压裂液的应用现状,压裂液的优化调试以低残渣、有效控制水锁,有效助排、降低压裂液对储层的二次伤害为目标。压裂液主要性能如下:稠化剂浓度为0.36%,破胶液黏度为2~3 mPa·s,表面张力为23.8 mN/m,接触角为79.6°,残渣含量为0.019%,岩心伤害率为18.7%~23.6%。使得目前压裂液体系稠化剂浓度下降了24.0%,现场取得了良好的应用效果。

5)施工全过程混注液氮实现层内助排技术

致密低渗气藏喉道半径小、中值压力、毛细管压力高,残液返排困难,易发生水锁伤害。同时,五宝场构造沙溪庙组气藏为常压气藏,仅依靠地层的能量更难以快速彻底返排残液。因此,采用压裂施工全程液氮增能伴助的层内助排措施,同时适当提高液氮泵注排量,增加返排能量,使压后液体尽快返排。

(3)低渗透裂缝性气藏加砂压裂配套措施

1)测试压裂分析

对于裂缝性低渗透储层,由于其基质孔隙度小、

渗透率低,天然微裂隙成为决定压裂液滤失的主要因素。因此,在主压裂施工前加强对天然裂缝与其他复杂因素的诊断分析,为保证压裂成功尤为重要。应用停泵G函数压降曲线分析、降排量摩阻分析等手段判别依赖于压力变化的滤失特征,以及天然裂缝闭合特征、天然裂缝响应以及对滤失的影响,近井筒效应等特性参数,从而为裂缝性地层主压裂施工参数的调整提供依据。

2)加强施工过程中的实时监测分析与施工参数的调整

由于裂缝性储层天然裂缝发育的不确定性,因此必须加强施工过程中的实时监测分析,根据施工过程中其他参数的变化结合压力响应特征实时调整施工参数,从而确保施工的成功。

三、现场应用情况

在五宝场构造裂缝性气藏中进行了5口井8层次加砂压裂现场应用,施工取得了明显的效果,共增加井口天然气测试产能 $38.57 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.典型施工井基本情况

典型施工井基本情况见表1。

2.现场应用的工艺技术与配套措施

①天然裂缝识别——G函数分析;②低砂比线

表1 典型施工井基本情况表

井号	1 [#]	2 [#]		3 [#]
构造位置	构造近轴部	构造西南端轴部		构造西北翼
层位	沙溪庙组	沙溪庙组下	沙溪庙组上	沙溪庙组下
储层井段(m)	1612.0~1639.0(斜) 1451.68~1475.49(垂)	1554.3~1605.7	1494.4~1505.0	1579.9~1610.6(斜) 1476.4~1504.1(垂)
储层岩性	细砂岩	中、细砂岩	中、细砂岩	中砂岩
储层有效厚度(m)	23.81	51.4	10.6	27.77
孔隙度(%)	3~7	2.5~7.5	2.0~4.5	3.5~8.0
含水饱和度(%)	10~35	10~35	15~40	15~35
$\varphi H S_g$	0.9226	1.793	0.25	1.197
自然伽马(API)	83~100	105	75	58~85
补偿声波($\mu\text{s}/\text{ft}$)	60~66	57~61	58~60	55~64

性加砂;③适当增加前置液用量与增加低砂浓度泵注时间及泵注量,提高排量;④合理的支撑剂段塞冲刷;⑤施工全过程混注液氮,强化压裂液返排;⑥多产层不动管串分层加砂压裂。

3.现场典型井应用情况

典型井应用情况见图4~图7。

G函数分析结果见表2。

4.增产效果

在现场应用的5口井8层次施工中,有效率达87.5%,增产效果非常显著。1[#]井由压前的微气增至 $5.81 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;2[#]井由压前的 $0.53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $14.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;3[#]井由压前的 $0.72 \times$

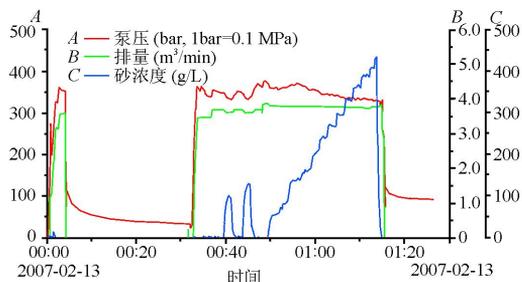


图4 1#井上加砂压裂施工曲线图

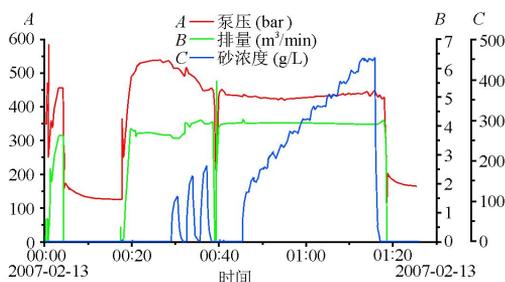


图6 2#井下段加砂压裂施工曲线图

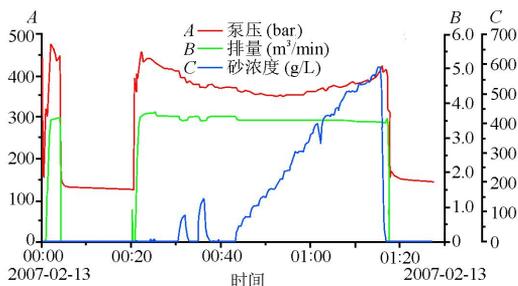


图5 2#井上段加砂压裂施工曲线图

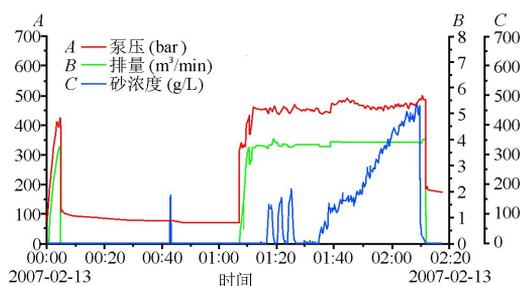


图7 3#井加砂压裂施工曲线图

表2 G函数分析结果与加砂压裂主要施工参数表

井号	1#	2#		3#
层位	沙溪庙组	沙溪庙组中	沙溪庙组上	沙溪庙组下
天然裂缝发育情况	较发育	发育	较发育	发育
液体综合效率(%)	45.3	50.1	47.4	48.6
闭合压力梯度(MPa/m)	0.0139	0.0181	0.0185	0.0161
前置液量/总液量(m³)	69.8/159.4	102.4/230.6	80.52/187.86	108.0/236.0
支撑剂量(m³/t)	14.7/23	23.7/37	21.8/34	22.4/35.0
最高/平均砂浓度(kg/m³)	411/271	454/298	592/350	473/273
泵注排量(m³/min)	3.77~3.78	4.20~4.24	3.47~3.52	3.91~3.94

10⁴ m³/d 增至 13.37×10⁴ m³/d。

四、基本认识

(1)受构造位置、应力及岩性影响,裂缝分布规律性差;裂缝具一定储集性能和高效导流能力,天然裂缝对低渗气藏压裂增产效果有举足轻重的作用。

(2)天然裂缝发育的低渗透气藏进行水力压裂并不需要很高的砂比,只需要有效地沟通储层的天然裂缝,就能达到增产的目的。

(3)要高度重视裂缝性气藏的伤害特征,对于粉砂的应用需要极为谨慎;此外,尽量减少压裂液中稠化剂的用量。

(4)对于天然诱导裂缝,在压裂施工的过程中,很难避免张性天然裂缝的开启,这时较小的施工排量会增大砂堵的概率。因此加砂压裂时应在施工安全限定压力下采用最大施工排量,同时适当增大前置液比

例,延长低砂比段泵注时间,尽可能扩展主裂缝。

(5)应用低残渣、低伤害、易返排的压裂液体系,结合全程混注液氮施工,能够加速排液,有效控制水锁伤害。

(6)裂缝性储层具有地层复杂、储层物性差和地层敏感性强的特点,压裂改造工艺难度大,需精心设计、精心施工,才能提高压裂施工成功率和增产效果^[2]。

参 考 文 献

[1]陶良军,胡永全,等.安棚裂缝性储层压裂技术与应用[J].天然气工业,2005,25(10):91-93.
 [2]高原,任茂,等.江汉油区低渗透裂缝性油藏压裂工艺技术研究[J].江汉石油职工大学学报,2005,3(2):35-37.

(收稿日期 2007-03-05 编辑 韩晓渝)