

# 超正压射孔与加砂压裂联作技术研究<sup>\*</sup>

李航<sup>1</sup> 桑宇<sup>1</sup> 韩慧芬<sup>1</sup> 段国彬<sup>1</sup> 唐凯<sup>2</sup>

(1. 中国石油西南油气田分公司采气工程研究院 2. 四川石油管理局测井公司)

李航等. 超正压射孔与加砂压裂联作技术研究. 天然气工业, 2004; 24(12): 82~85

**摘要** 超正压射孔与加砂压裂联作是在射孔的同时向地层施加超过地层破裂压力的压力,使地层产生裂缝,随即加入前置液,充分利用射孔产生的裂缝,压开地层,使裂缝尽可能沿着射孔方向延展,降低加砂压裂难度,改善储层渗流状况。文章介绍了超正压射孔与加砂压裂联作的工艺技术原理、技术特点、工艺流程,以及该联作技术在白马庙气田的应用。并提出:①对于中、深井或老井采用油管施工井筒摩阻高,泵压高,可能超出油管套或井口安全承压值,对此类井可考虑采用环空进行联作施工,降低施工泵压及施工难度;②联作管柱可考虑采用筛管加73枪或89枪的组合,同时结合环空进行施工,不但可以满足正常加砂,并且不必进行丢枪作业,减少了施工工序,也避免了丢枪压力值可能超高的不利因素;③超正压射孔时可考虑采用60°相位角,使射孔裂缝分布比90°相位角的射孔裂缝更为合理,使加砂压裂更易进行压后评估和经济评价分析。

**主题词** 超正压射孔 加砂压裂 联作 增产措施

目前,在川渝气田油藏压力低、储层渗透率低、孔隙度低以及底、储、盖层就地应力差小的砂岩地层,采用常规射孔,很难获得工业气流,往往要进行增产改造。超正压射孔与加砂压裂联作是集射孔和水力压裂为一体的新型增产改造技术,在川西白马庙气田应用(白浅40、白浅110、白浅107井)并获得了成功。

## 一、工艺原理

超正压射孔技术与加砂压裂联作是在射孔形成裂缝的同时向地层施加超过地层破裂压力的压力,使射孔枪上部的液体高速挤进射孔孔眼,激发裂缝,使裂缝增大延长,同时结合加砂压裂,使支撑剂进入地层,裂缝得到长期有效的保持,解决了造缝、解堵、防止出砂等一系列的问题,改善初始完井效果,保持井筒附近较高导流能力。超正压射孔与加砂压裂联作是采用一次性管柱进行超正压射孔与加砂压裂连续作业,在射孔和加砂压裂前置液阶段,保持压力相对平稳,杜绝出现非地层因素造成的压力大幅下降,使射孔裂缝能够保持,且前置液和携砂液能够充分利用并沿着射孔裂缝进行造缝和铺砂。首先,把连接射孔枪的施工管串下到目标深度,接着在射孔枪

的上部替入前置液,替液完成后,井口加压引爆射孔枪,发射后增大井口泵压,大排量泵入前置液压开地层,前置液高速挤入射孔孔眼,像楔子一样激发裂缝,从而使裂缝的有效直径增加,高速流动的液体和支撑剂持续对地层产生冲刷,使裂缝更易沿着孔眼方向延展,造成稳定的裂缝,随着加砂压裂施工的进行,支撑剂在裂缝中形成有效的支撑裂缝,建立起良好的油气通道。

目前,超正压射孔与加砂压裂联作主要有以下两种一次性作业管柱(油管施工)。

### 1. 采用液压(自动)丢枪装置的管柱

该方案可用于长井段的超正压射孔,应用范围较广。

原理:射孔后将射孔枪串从丢枪接头以下全部丢入井底,使以上管串成为一个全通径的完井管柱,加砂压裂的前置液,携砂液就有了一个流通面积足够大的通道进入地层。

缺点:需要预留较长的口袋丢枪;受材质影响,丢枪压力控制存在一定难度,易造成超压。

### 2. 采用下移式开孔器的管柱

该方案主要用于射孔段不长(小于5 m)的井,它的特点是射孔后出砂孔能够下移至正对产层进行

<sup>\*</sup> 本文系川西浅层组浅层低渗透砂岩气藏开发研究项目创新成果(项目编号20020305-05)。

**作者简介** 李航,1976年生,助理工程师;1999年毕业于西南石油学院地质专业,从事油气增产工艺技术研究工作。地址:(618300)四川省广汉市中山大道南二段。电话:(0838)5151514。E-mail:li\_h01@petrochina.com.cn

加砂。

原理:射孔前出砂孔收缩在管柱内,射孔后投球憋压,下移式开孔装置动作,出砂孔在重力作用下随射孔枪串下行,正对射孔孔眼进行加砂。

缺点:由于油管存在拉伸,控制出砂孔下放后正对射孔孔眼难度较大;出砂孔下行距离有限(2~3 m);对出砂孔管件强度要求较高,否则支撑剂高速冲刷,易造成管串变形,甚至脱落。

## 二、联作技术特点

### 1. 评层选井

超正压射孔与加砂压裂联作技术主要针对油藏压力低、储层渗透率低、岩石强度低、破裂压力高、可动矿物成分含量高以及需要多层压裂的砂岩储层;钻井或录井显示较好,具有一定的储量基础,但由于钻、完井过程中,储层污染严重的砂岩储层;岩石破裂压力大的致密砂岩储层或储层较深的井,受井下管串或施工设备制约,施工难度大的井,均可考虑采用超正压射孔与加砂压裂联作技术进行增产改造。

### 2. 一次性管柱进行超正压射孔与加砂压裂连续作业

超正压射孔与加砂压裂在不停泵的情况下,实施连续作业,对目的井段一次性射孔完成,在射孔裂缝形成后随即进行加砂压裂,有效利用射孔裂缝,改善压裂效果。并且由于采用连续作业,减少了工序、压井次数及压井时间,缩短了试油周期,同时也降低了压井液对地层的伤害。

### 3. 降低储层伤害,减小施工压力,降低施工难度

对于常规加砂压裂,射孔形成的裂缝不能得到充分利用,在进行加砂压裂时射孔裂缝有的已经闭合,从而增加了施工难度。而超正压射孔技术的应用使裂缝沿射孔孔眼形成,而超正压射孔与加砂压裂联作则充分利用了这些裂缝,使裂缝得以向延伸,进而进行加砂作业,只需泵注保持裂缝延伸所需的延伸压力,降低了施工难度。采用超正压射孔与加砂压裂联作,可以使射孔弹产生的碎屑被高压液体冲刷并推进到所产生的裂缝深处,高压液体对射孔孔眼及裂缝的侵蚀和冲刷,更好地清洁了射孔孔眼,使射孔对地层的伤害降低到很小的程度。同时,由于采用超正压射孔,在射孔时地层即破裂形成裂缝,消除了井筒附近的应力集中,避免了过高的地层破裂压力对施工造成的影响,且由于高压液体的冲刷清除掉了近井地带射孔眼中的破碎岩屑及金属碎屑,更有利于水力压裂的进行。特别对于致密地层

和污染严重的储层以及中、深井降低施工难度效果更为明显。

### 4. 降低近井地带弯曲摩阻,降低多裂缝的影响

近井地带的弯曲摩阻是造成部分压裂井失败的主要原因。由于射孔时在近井地带产生的微细不规则裂缝形成的弯曲摩阻,致使常规加砂压裂时高速流动的前置液在流经近井地带时,造成额外的流动阻力,容易发生支撑剂从压裂液中析出,造成近井脱砂,发生砂堵。而采用联作技术前置液沿超正压射孔产生的裂缝延伸,从而降低裂缝弯曲摩阻的影响,降低了缝内流动阻力。

超正压射孔形成的裂缝是由于突变的压力爆发产生的对岩石的高压力冲击导致了一种与压力相关的裂缝机制。超正压射孔作业不像水力压裂那样逐渐地压开地层,而是瞬间压开地层,由于超正压远大于岩石破裂压力,超正压射孔打破了岩石应力场,并从井筒向周围地层直接延伸,裂缝会在射孔孔眼中形成,但只有那些方向同地层最小水平主应力方向相垂直的裂缝才能向外延伸,形成一种双翅裂缝。采用超正压射孔未见多个的平行裂缝,是由于突然的压力加载压实了水泥环与地层之间的微小空隙,从而堵住了产生次生裂缝的通道。

### 5. 有效利用射孔裂缝,增产、防砂

对于岩性较为疏松的储层,通过超正压射孔与加砂压裂联作,加砂时可以有效地利用超正压射孔产生的裂缝(一般可延长到4~5 m)进行作业,从而进一步改善流动条件,达到增加油气产量,防止地层出砂的效果。

### 6. 控制缝高

对于底、储、盖层就地应力差异小的储层,采用联作技术有利于进入地层的液体沿射孔裂缝惯性向纵深延展,一定程度上引导裂缝走向,控制缝高的增长。

## 三、现场应用及效果

目前,在川渝气田超正压射孔与加砂压裂联作技术已在川西白马庙气田蓬莱镇组气藏的白浅40井和白浅107井,沙溪庙组气藏的白浅110井得到成功应用,其中白浅40井获得了 $5.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的无阻流量,高于加砂压裂改造井平均单井无阻流量 $3.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,使白浅40井跃升为白马庙蓬莱镇组气藏中的高产井;白浅110井获得无阻流量 $12.738 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,该井目前为白马庙沙溪庙组气藏增产改造效果最为显著的一口井(该区块同层位

的白浅 67 井增产改造未见效和白浅 68 井增产改造效果差);白浅 107 井联作技术得以成功应用,但由于储层地质基础差,气源不足,增产改造未见效。

### 1. 白浅 40 井

白浅 40 井是位于大兴潜伏鼻状构造侏罗系蓬莱镇组顶界主体构造的一口评价井,经过认真研究,对白浅 40 井 690.0~707.0 m、732.3~735.3 m、747.0~760.5 m 进行加砂压裂改造。施工中采用了超正压射孔与加砂压裂联作技术,累计挤入地层 20/40 目宜兴陶粒 15.0 m<sup>3</sup> (23.3 t),压裂液 58.84 m<sup>3</sup>,其中基液 2.01 m<sup>3</sup>,前置液 17.01 m<sup>3</sup>,净携砂液 39.82 m<sup>3</sup>,施工取得了成功并获得了较好的增产效果。

拟合结果:利用软件 FRACPRO10.0 对井段 690.0~707.0 m、732.3~735.3 m、747.0~760.5 m 压裂施工实际数据进行了拟合分析,裂缝拟合结果见表 1。

表 1 白浅 40 井(690.0~760.5 m)施工数据拟合表

平均铺砂浓度(kg/m <sup>2</sup> )	11.60(上) 5.895(下)	液体效率(%)	77.7
裂缝中心深度(m)	698.3 753.6	无因次导流能力	144.0 64.92
动态缝高(m)	67.58 36.29	动态缝长(m)	96.94 57.6
支撑缝高(m)	53.04 29.9	支撑缝长(m)	75.94 47.36
最大缝宽(cm)	3.454 1.675	平均缝宽(cm)	2.220 1.039
裂缝顶界深度(m)	664.31 735.29	裂缝底界深度(m)	731.89 771.58

### 2. 白浅 110 井

白浅 110 井位于大兴潜伏鼻状构造沙溪庙组顶界构造的轴线上,裂缝及微裂缝发育。针对本井微裂缝发育,液体滤失较大;储层比较致密,破裂压力较高,本井应用了超正压射孔与加砂压裂联作工艺以降低储层破裂压力,降低施工难度,取得了良好的应用效果。施工采用环空注入,共加入 20/40 目宜兴陶粒 25.16 m<sup>3</sup> (39.0 t);挤入地层总液量 161.38 m<sup>3</sup>,其中前置液 82.03 m<sup>3</sup>、携砂液 79.53 m<sup>3</sup>;施工排量 4.4~4.5 m<sup>3</sup>/min;施工泵压 25.7~27.0 MPa;油压 23.3~23.7 MPa;最高砂浓度 789 kg/m<sup>3</sup>,平均砂浓度 492 kg/m<sup>3</sup>。拟合结果:通过白浅 110 井 1827.8~1834.3 m 的加砂压裂施工数据进行拟合,可以求

得重要的裂缝参数,结果见表 2。

表 2 白浅 110 井净压力拟合结果表

平均铺砂浓度(kg/m <sup>2</sup> )	1.44	液体效率(%)	42.83		
裂缝中心深度(m)	1831.00	无因次导流能力	68.00		
动态缝长(m)	61.43	支撑缝长(m)	55.69		
动态缝高(m)	上半缝	46.85	支撑缝高(m)	上半缝	39.70
	下半缝	41.64		下半缝	40.53
最大缝宽(cm)	0.31	平均缝宽(cm)	0.13		
裂缝顶界深度(m)	1784.15	裂缝底界深度(m)	1872.64		

## 四、压后评估与经济评价

### 1. 控制缝高

白马庙蓬莱镇组气藏由于产层杨氏模量大于底、盖层杨氏模量,产层与底、盖层应力差小,产层上下没有明显的遮挡层(见表 3),导致缝高控制困难(见表 4),普遍为缝高大于缝长,而采用超正压射孔与加砂压裂联作技术的白浅 40 井,缝高得到了一定程度的限制。

表 3 白马庙蓬莱镇组储层岩石力学数据表

井号	取心井段(m)	杨氏模量(MPa)	泊松比	抗压强度(MPa)	备注
白浅 25 井	744.85~744.94	5593	0.370	39.002	砂岩
	761.65~761.88	8474	0.370	58.936	砂岩
	751.07~751.14	4272	0.397	50.495	砂岩
	780.19~780.33	1291	0.210	42.886	泥岩
白浅 26 井	775.49~775.71	6608	0.287	71.7	泥岩
	780.61~780.85	8902	0.368	64.98	粉砂岩
	786.10~786.25	8361	0.328	54.69	砂岩
	792.82~793.20	6632	0.369	53.175	粉砂岩
	850.83~850.98	7548	0.32		砂岩

注:实验条件为:温度 40℃,围压 15 MPa,孔隙压力 12 MPa,上覆压力 18 MPa。

表 4 白浅 40 井邻井加砂压裂支撑缝长、缝高统计表

井号	白浅 23			白浅 40		白浅 104	白浅 105
	上层	中层	下层	上层	下层		
支撑缝半长(m)	42.98	47.04	47.01	75.94	47.36	58.7	42.73
支撑缝高(m)	71.05	67.29	83.97	80.72	60.9	79.52	82.83

净压力—时间双对数曲线是分析裂缝延伸情况的有力手段。以白浅 40 井上层(690.0~707.0 m)净压力与时间的双对数曲线为例,净压力双对数曲线具有以下特点:即整个加砂压裂过程主要体现为正斜率段,即裂缝正常延伸阶段和曲线上翘阶段,未表现出由于缝高过度增长而使曲线下降,即曲线未

见负斜率段,这说明白浅40井蓬莱镇组层的加砂压裂,缝高得到了一定程度的控制。缝高得到一定程度的控制,可能与其它技术的应用有关(例如变排量技术等),但结合白浅地区蓬莱镇组气藏加砂压裂缝高控制难的实际,我们认为采用超正压射孔与加砂压裂联作的技术,可以在一定程度上控制缝高的过度增长。

## 2. 降低施工难度

对于中深井而言,采用超正压射孔与加砂压裂联作,降低施工难度效果更为明显。由于白马庙地区沙溪庙组地层裂缝、微裂缝发育,液体滤失严重,加砂压裂容易发生砂堵;根据白浅68井测试压裂施工情况,地层滤失严重,施工过程中滤失控制难。根据白浅67、白浅68井测试压裂情况分析,井筒周围可能存在致密带,地层破裂压力较高,一般在0.026~0.03 MPa/m范围内,导致施工初期施工压力较高。白浅68井由于施工压力过高,导致测试压裂无法正常进行。白浅110井采用了超正压射孔与加砂压裂联作技术,在排量为4.0~4.5 m<sup>3</sup>/min的情况下,施工泵压为20~25 MPa,施工过程平稳、连续。

## 3. 短试油周期,节约试油费用

与常规射孔后再进行加砂压裂相比较,采用超正压射孔与加砂压裂联作技术施工采用一次管柱,射孔与加砂压裂连续作业,缩短了试油周期。与常规相比,白浅40井节约试油周期5天左右,至少节约试油费用20万元左右(节约费用构成主要为XJ50型修井机、无固相压井液以及相关作业费用,包括录井);白浅110井平均节约试油周期7天左右,至少节约试油费用30万元左右(节约费用构成主要为25型钻机、无固相压井液以及相关作业费用,包括录井)。

## 五、结论与建议

超正压射孔与加砂压裂联作技术对于四川盆地油藏压力低,储层渗透率低,岩石强度低以及破裂压力高的砂岩地层有十分广阔的应用前景,但由于该项技术是首次在川渝气田应用,因而还存在需要改进的地方,具体建议如下。

(1) 对于中、深井或老井采用油管施工井筒摩阻高,泵压高,可能超出油套管或井口安全承压值,

对此类井可考虑采用环空进行联作施工,降低施工泵压及施工难度。

(2) 联作管柱可考虑采用筛管加73枪或89枪的组合,同时结合环空进行施工,不但可以满足正常加砂,并且不必进行丢枪作业,减少了施工工序,也避免了丢枪压力值可能超高的不利因素。

(3) 超正压射孔时可考虑采用60°相位角,使射孔裂缝分布比90°相位角的射孔裂缝更为合理,使加砂压裂更易进行且能形成更为有效的填砂裂缝。

(4) 在射孔前替入前置液时可考虑替入部分压缩氮气,形成气体弹簧,以提高传递到岩石的能量,在施工时形成更大的裂缝。

(5) 超正压射孔与加砂压裂联作,在射孔后必须保持压力的相对平稳,不能出现大幅下降的情况,若采用液压(自动)丢枪装置的管柱进行施工,必须严格控制合理的丢枪压力,防止丢枪压力超高,造成压裂车停泵。

(6) 对于长井段作业,油藏上要求尽量多射开有效层段,而加砂压裂要求射孔相对集中,寻求两者的最佳搭配是超正压射孔与加砂压裂联作技术需要重点研究的问题。

目前,在川渝气田,已有不少超正压射孔与酸化联作技术成功的应用,而今超正压与加砂压裂也取得了成功的经验。但仍存在不足之处,通过不断的总结、认识、完善超正压射孔与增产改造联作技术,应用于生产实践,为加快川渝气田高效科学的开发做出贡献。

## 参 考 文 献

- 1 王鸿勋.水力压裂原理.北京:石油工业出版社,2002
- 2 万仁溥等.采油技术手册(修订本)第九分册:压裂酸化工艺技术.北京:石油工业出版社,1998
- 3 [美]米卡尔等.油藏增产措施(第三版).北京:石油工业出版社,2002
- 4 雷群等.长庆上古生界低压低渗砂岩气藏压裂工艺技术.天然气工业,2003;23(5)
- 5 廖新维等.对气井井筒压力温度分析的新认识.天然气工业,2003;23(6)

(收稿日期 2004-06-28 编辑 钟水清)