

# 水平井射孔工艺技术及在罗家 11H 井实践<sup>\*</sup>

陈 锋<sup>1,2</sup> 姜德义<sup>1</sup> 唐 凯<sup>2</sup>

(1.重庆大学 2.四川石油管理局测井公司)

陈锋等.水平井射孔工艺技术及在罗家 11H 井实践.天然气工业,2005;25(10):52~54

**摘 要** 罗家 11H 井是高产天然气、高含硫化氢的罗家寨气田第一口射孔完井的水平井。文章介绍了水平井射孔常用施工管柱、深度定位方法、射孔地面监测技术、射孔参数优选方案、射孔弹定向原理和枪身特殊设计等工艺技术;分析了该工艺技术在罗家 11H 井的施工难点以及射孔参数优化结果,并成功地应用于该井的射孔施工作业,获得较好的产能效果,为优质、高效、安全开发罗家寨高含硫化氢气藏提供了有效的射孔完井方法。

**主题词** 水平井 射孔 罗家寨气田 定向 硫化氢 气藏 开发

水平井工程是“稀井高产”的重要手段,而水平井射孔技术则是水平井技术的重要组成部分。与直井射孔相比较,在施工管柱、深度定位、起爆方法、射孔施工参数以及射孔枪结构等方面都有显著区别。水平井射孔跨距一般都较长,有的长达 1000 m 以上,这就要求起爆和传爆必须可靠,以免造成起爆不成功和部分射孔枪不能发射的事故。水平井一般都要定向射孔,因而射孔枪体的偏心结构与直井用射孔枪的居中布弹有很大的不同,同时便于射孔枪串的顺利起下,枪身上设计了旋转扶正套、滚珠枪尾和防退扣装置,减少枪串摩擦阻力。

罗家 11H 井由于高含硫、高产、超长射孔井段等特殊施工条件的限制,使得射孔完井的难度和风险增大,主要表现在施工工艺的制定及射孔参数优化设计、射孔一次成功率、定向精度、射孔管柱安全取出,射孔器材既要能承受外挤高压和射孔弹爆炸的冲击,还要满足抗疏的要求等问题。通过现场应用成功,为开发罗家寨气田提供了一套新的射孔完井方案。

## 一、水平井射孔工艺技术

### 1. 常用施工管柱

(1)新井(井筒能憋压的井)射孔使用的管柱(如图 1 所示)。这类管柱在射孔枪被送到水平段以后,在地面加压于油套环空,使多段、大跨距射孔枪同时点火,延时射孔,射孔后直接起出管柱进行下步施

工。将全部射孔枪分成若干组,每组枪首、尾各配一个起爆器,做到起爆“双保险”,以保证每组枪的可靠起爆。在起爆器点火后延时的同时,在延时时间内从井口泄掉泵压,达到负压射孔的目的。它主要适合于水平段较长或夹层较多且固井质量较好的水平井首次射孔作业。

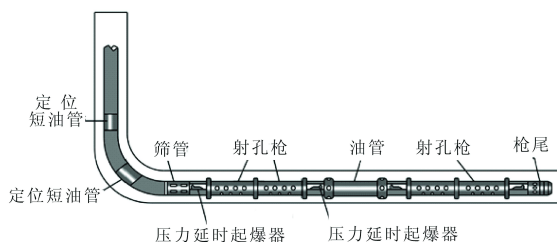


图 1 多段、大跨距油管输送式射孔管柱

(2)老井(筛管完井或已射孔的井)再射孔使用的管柱<sup>[1]</sup>。实施水平井再射孔的关键是采用可靠实用的起爆方法,通常采用压力开孔装置+压力(延时)起爆器的射孔管柱。采用这种办法最好将套管掏空到一定深度再下管柱,以保证一定的负压值。通过控制开孔装置和压力起爆器的剪销数目,实现压力起爆器先起爆,再继续加压使开孔装置开孔,建立生产通道。

### 2. 射孔深度定位

枪串探入人工井底后上提几米到预定射孔段,然后在直井段下自然伽马磁性定位组合仪,测定在直

<sup>\*</sup> 本文系中国石油天然气股份公司水平井射孔工艺技术研究项目。

**作者简介:**陈锋,1969 年生,高级工程师,重庆大学博士研究生;1991 年毕业于石油大学机械系矿机专业,长期从事射孔工艺技术研究工作;发表论文 10 余篇,获多项省部级科技创新一、二等奖。地址:(400021)重庆市江北区大庆村 400 号。电话:(023)67352033。E-mail:cf023@vip.sina.com

井段预置的短油管深度来验证枪串的深度。考虑电缆输送仪器可能到达的深度和测量的精度,在斜深 $30^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ 处各下一根深度定位短油管,保证至少能测出一根短油管的深度,完成射孔校深。

### 3. 地面监测技术

现场采用 TCP 射孔监测系统记录井场射孔的音频信号、井口压力变化及井口机械振动信号。观察射孔波和压力曲线,若射孔波产生在设计引爆压力处,以及耳机监听到明显的爆裂信号,表示井下已经射孔。

### 4. 射孔参数的选择

射孔完井的产能效果取决于射孔参数和射孔方式,射孔作业得当,可以在很大程度上减缓钻井液对储层的损害,根据射孔参数对油气产能影响敏感度的分析,对射孔器材、射孔负压、射孔方式等内容进行优化,可以确定一种最佳射孔方案来进行施工,最大限度地提高了产能,获得最好的完井效果和最佳的经济效益。

(1)射孔枪型选择。目前国内绝大多数油气田在 $\varnothing 139.7$  mm 套管的水平井射孔均采用 89 型(射孔枪外径 89 mm),四川测井公司 2001 年在塔里木轮南 1-H2 水平井使用 102 型(射孔枪外径 102 mm)水平井射孔枪,才打破了原来在 $\varnothing 139.7$  mm 套管中只能使用 89 枪的局限。国外在 $\varnothing 139.7$  mm 套管的水平井射孔一般采用 $\varnothing 85.7$  mm 型(射孔枪外径 86 mm)。

$\varnothing 139.7$  mm 套管的水平井采用 102 型射孔,比 89 型可装更大的射孔弹,有利于射孔穿深,但是射孔后枪体膨胀卡井的风险也较大,通常采用控制枪管材料的化学成分和热处理工艺来保证其机械性能满足射孔要求。

(2)优选射孔弹。射孔弹的穿深和孔径严重影响着油气井的产能效果,水平井射孔选用的射孔弹除了对其穿孔性能有严格的要求外,其外形结构也是重要的制约因素,它必须满足水平井射孔枪偏心结构的要求,这是与直井用射孔弹最大的区别。

(3)射孔相位。当水平井储层胶结性较差或厚度较薄而射孔后需压裂改造的情况下,在油层套管较低的两侧射孔比较合适(如图 2 所示),使射孔孔眼沿低平方向延伸,储层流体(油气水或杂物)必须上行流动,有效减缓油层吐砂及后期开采套管沉砂。另外,还为压裂提供了沿油层延伸的水平通道,避免垂直通道可能造成的油层顶、底层被压开的问题。

虽然水平井射孔枪带有扶正器,但是射孔枪仍然不可能完全在水平套管里居中,因此水平以下 $30^{\circ}$

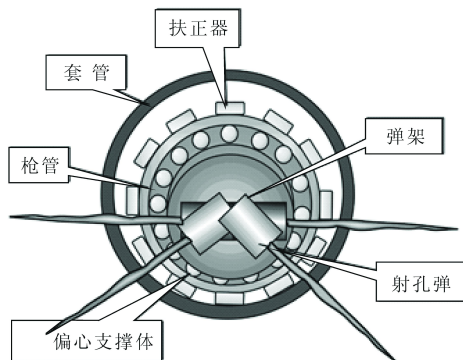


图 2 内定向射孔枪原理

射孔更接近套管的法线方向,有利于在套管上的孔眼轨迹。

(4)起爆方式。水平井射孔起爆不同于一般直井射孔,不能采用投棒起爆方式,也不同于一般斜井射孔,它属于超长井段射孔,不宜采用一个压力起爆器的起爆方式。在水平段各点压力值相等,它可以实现几个乃至几十个射孔段的同时起爆,完全满足水平井一次射孔多段的要求,将大大提高工效。

针对水平井射孔段长的特点,为了提高起爆可靠性,降低射孔弹爆轰波对套管、水泥环的伤害和降低爆炸对管柱的震动,我们一般将射孔段分为几段,各段长 150 m 左右,每段首尾各安装一个压力延时起爆器实现起爆双保险,全部射孔枪一次下井,起爆器剪销同时剪断但延时时间不同而实现各射孔段间隔射孔。

## 二、水平井射孔枪设计

### 1. 水平井定向射孔枪

射孔器采用重力偏心定向原理,射孔弹始终处于低平位置,从而达到定向射孔的目的。目前有两种结构的定向射孔枪,即内定向和外定向射孔枪。其原理如图 2、图 3 所示。

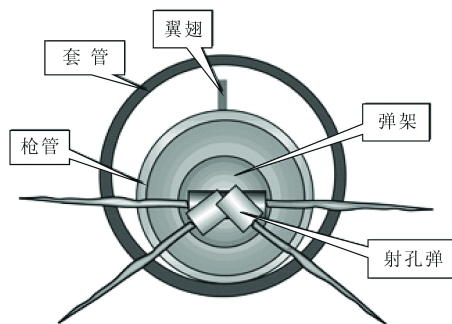


图 3 外定向射孔枪原理

两种定向方式的对比如下。

(1)在相同套管尺寸下内定向方式可选择更大外径的射孔枪。内定向射孔枪在套管中更居中,不仅有利于提高穿深,且孔眼轨迹好,有利于保护套管。

(2)内定向射孔的定向精度更高<sup>[2]</sup>。内定向精度误差可达 $\pm 5^\circ$ ,外定向精度误差最小范围为 $\pm 15^\circ$ 。

## 2. 便于管串起下的枪身结构

(1)牙嵌式防退扣装置。水平井射孔枪串入井和取出井筒时,枪串的摩擦阻力大,很容易在接头串联处退扣。为此,在接头与接头之间都采用了嵌入式联接防退扣装置,同时具备便于打捞的形状,作为安全应急手段。

(2)旋转扶正套和滚珠枪尾。枪串接头联接处采用旋转扶正套和带滚珠的枪尾为扶正器,减小摩阻,改善炸高,提高穿深,保护套管的内旋转定向方式。

## 3. 传爆装置

传爆装置采用隧道传爆、导爆索加传爆管逐级接力式传爆。枪身中有传爆管扶正定位装置,对传爆管三维固定,保证传爆管间隙在 $5\pm 1\text{ mm}$ 以内。

# 三、罗家11H井施工实例

罗家11H井位于重庆开县高桥镇,构造位置为罗家寨潜伏构造罗家寨高点,完钻层位下三叠统飞仙关组,垂直井深3400 m以上、斜井深3900 m以上、水平段长243 m。射孔酸化后,测试产量达 $302.14\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量达 $1026\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,位居四川盆地1000多口气井之首。

## 1. 施工难点

(1)射孔跨度长达432 m,且射孔层段多,不同射孔相位和孔密组合复杂。共有31个不同的射孔层段,9种不同孔密和相位组合。

(2)硫化氢含量高达 $130.425\text{ g/m}^3$ (9.12%),需解决射孔枪串和井下工具的抗腐蚀问题。

(3)该井由于井身结构的原因,井筒憋压达不到射孔所需压力,不能采用常规的分段液压延时双起爆射孔工艺,只能采用单个起爆器引爆超长射孔枪,起爆、传爆的风险都大大增加。

## 2. 施工设计

采用89型内定向水平井射孔枪,DP36RDX—42—89射孔弹。罗家寨气藏为高酸性气藏,所有下井器材(包括射孔器材、密封圈、下井工具和电缆)都在四川酸性气田材料腐蚀检测评价中心进行了耐腐蚀性能检测<sup>[3]</sup>,试验表明所有器材均达到使用要求。

(1)射孔起爆压力。根据井况和施工安全要求,通过油管加压,井口最大加压25 MPa。

(2)射孔相位和孔密。相位:对单个储层段的顶

部、中部、底部设计不同的射孔相位角度。从井眼轨迹与储层倾向的关系角度考虑,有利于储层打开,对单个储层段顶部2~3 m采用水平+水平向下 $30^\circ$ 射孔( $\leftarrow\rightarrow+\swarrow\searrow$ ),储层段底部2~3 m采用水平+水平向上 $30^\circ$ 射孔( $\leftarrow\rightarrow+\nwarrow\nearrow$ ),储层段中部采用水平+水平向上 $30^\circ$ 和水平向下 $30^\circ$ 射孔( $\leftarrow\rightarrow+\nwarrow\nearrow+\swarrow\searrow$ )。孔密:一是根据气藏工程研究成果,对储层上部、中部、下部采用由稀到密的射孔密度分布原则;二是由于储层层数多、单层厚度差别大、单层储层厚度愈大者物性愈好(厚度较大储层段主要分布于储层组中部)的特征,设计厚储层段射孔密度相对较大,以利充分发挥厚储层段的主要产量贡献能力。孔密分为:14孔/m、16孔/m和18孔/m。

(3)作业方式。受井筒承压的限制,该井采用钻杆传输射孔枪,压力起爆器配合油管多次循环阀分两次射完全部射孔井段,一次射孔厚度超过200 m。

## 3. 施工情况

两次射孔共发射射孔弹5442发,发射率、定向率和一次成功率均为100%。另外枪串入井和射孔后取出管柱的载荷均为92 t,附加摩擦力几乎没有增加。该井射孔后,经油管注入液氮诱喷排液,然后进行产能测试,测试时使用两套地面流程计量,在油压17.96 MPa下获测试气产量 $200.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

# 四、认识与结论

(1)罗家11H井的作业成功表明所选取的密封元件、枪管、接头材料等射孔器材能适应高酸性的罗家寨气藏水平井射孔作业。

(2)根据储层条件和井况特征,选取变孔密、变相位的射孔方式有利于提高酸化效果。

(3)该套水平井射孔工艺及射孔参数(包括起爆方法、射孔枪型、射孔弹型、孔密、定向相位等)优选合理,为开发罗家寨气田提供了一套有效的射孔完井方案。

## 参 考 文 献

- 1 陈锋,袁吉诚.水平井再射孔的起爆方法.测井技术,2000;24(1)
- 2 袁吉诚,陈锋.水平井重力定向射孔方法研究.测井技术,1999;23(1)
- 3 万仁溥.现代完井工程.第二版,北京:石油工业出版社,2000
- 4 何湘清等.温度扰动对井壁稳定和油田开发的影响.天然气工业,2003;23(1)
- 5 胡永全等.计算射孔井水力压裂破裂压力的有限元方法.天然气工业,2003;23(2)

(收稿日期 2005-02-29 编辑 钟水清)