

# 等孔径射孔工艺技术

杨坤<sup>1</sup>,王九州<sup>2</sup>,于秋来<sup>1</sup>

- 1. 中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412
- 2. 中国石油国际勘探开发有限公司 北京 100000

通讯作者:Email:kun11240@163.com

项目支持:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”的课题10“难采储量有效动用技术研究与试验”(2016E-10)

引用:杨坤,王九州,于秋来. 等孔径射孔工艺技术[J]. 油气井测试,2021,30(3):25-31.

Cite: YANG Kun, WANG Jiuzhou, YU Qiulai. Perforating technology with equal aperture [J]. Well Testing, 2021,30(3):25-31.

**摘要** 常规射孔及特殊井射孔施工时,由于射孔器在套管内偏靠一侧,枪管壁与套管壁之间间隙不同,导致套管壁上射孔孔径与地层射孔孔道不均匀,降低了射孔孔道导流能力,影响后续水力压裂施工效果,甚至影响后续开发改造效果。通过理论分析以及对常规四相位90°射孔器、水平井三相120°射孔器地面检测试验,设计了直井居中扶正装置和大斜度井旋转扶正装置,开发了等孔径射孔弹,在工艺及器材上实现均匀孔径射孔。射孔后,水力压裂施工压力较常规射孔施工压力降低了11.2%。该技术可应用于致密油(气)水平井大规模压裂及常规射孔压裂投产井,满足油田水力压裂开发改造的需求。

**关键词** 扶正装置;射孔弹;孔径;孔道;差异度;水力压裂;导流能力

中图分类号:TE353 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.005

## Perforating technology with equal aperture

YANG Kun<sup>1</sup>, WANG Jiuzhou<sup>2</sup>, YU Qiulai<sup>1</sup>

- 1. Testing Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China
- 2. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation (CNODC), Beijing 100000, China

**Abstract:** In the conventional perforation and special well perforation construction, because the perforator is on one side of the casing and the gap between the barrel wall and the casing wall is different, the perforation hole diameter on the casing wall is not uniform with the formation perforation channel, which reduces the conductivity of the perforation channel, affects the subsequent hydraulic fracturing construction effect, and even affects the subsequent development and transformation effect. Through theoretical analysis and ground test of conventional four-phase perforator with the degree of 90 and three-phase perforator with degree of 120 in horizontal well, the centering device in vertical well and rotary centering device in highly deviated well are designed, and the equal aperture perforating charge is developed to realize uniform perforation in technology and equipment. After perforating, the hydraulic fracturing pressure is reduced by 11.2% compared with conventional perforating. The technology can be applied to large-scale fracturing of tight oil and gas horizontal wells and conventional perforating fracturing wells to meet the needs of oilfield hydraulic fracturing development and transformation.

**Keywords:** centralizing device; perforating charge; aperture; channel; difference degree; hydraulic fracturing; diversion capacity

射孔作为打开油气层的最主要方法,在勘探开发过程中被誉为足球场上的“临门一脚”。伴随着大庆油田的勘探开发历程,射孔完井技术从最初的简单打开油气层,发展到目前的准确高效打开油气层及个性化射孔服务,取得了长足的进步,满足了大庆油田勘探开发的需要<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着页岩油气井大规模压裂开发,原有的射孔技术已不能很好的满足油田精细高效开发的需求。生产过程中

发现,由于重力作用,射孔器在套管内不处于居中位置,而是靠在套管壁一侧,使枪管壁与套管壁之间间隙不同,导致了套管壁上射孔孔径与地层射孔孔道的不均匀。孔径与孔道的不均匀降低了射孔孔道导流能力,甚至影响了后续水力压裂施工效果<sup>[5-7]</sup>。本文将针对孔径及穿深的不均匀进行理论分析及地面检测试验,并在工艺上实现均匀孔径与穿深的射孔,满足油田水力压裂开发改造的需求。

## 1 理论分析

在射孔施工时,射孔器在套管内不处于居中位置,而是靠在套管壁一侧,使枪管壁与套管壁之间间隙不同,导致了射孔孔道的不均匀<sup>[8-9]</sup>(图1)。

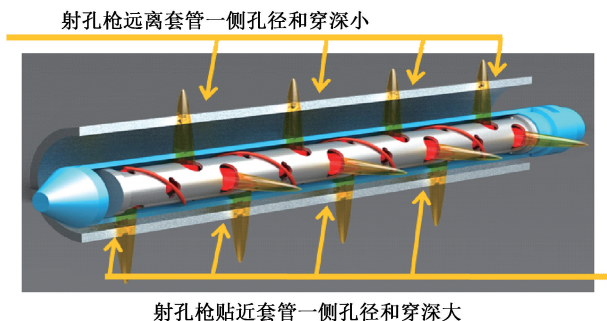


图1 射孔器偏心孔道非均匀示意图

Fig.1 Schematic diagram of non-uniformity of eccentric channel of perforator

孔眼孔径的大小决定了压裂液与孔道接触面积<sup>[10]</sup>。在压裂施工过程中,不同孔径的射孔孔道进液量不同,这种情况直接影响了油气井的产能<sup>[11]</sup>。孔眼直径的不均匀,导致射孔后压裂裂缝整体的非均匀延伸,主要表现在两方面:一是由于水平段射孔器上部孔径小,大小孔径压差在2 MPa左右,达到破裂压力后,不同孔径方向压开程度不一,导致上下孔道进液不均匀,形成上下延伸不等的非对称裂缝,影响压裂效果<sup>[12-13]</sup>;二是由于上部孔道端部应力相对较大,裂缝口狭窄,易在缝口产生砂堵,阻止裂缝向上部延伸,加剧了裂缝的非对称性。通过理论分析,为保证压裂效果,需实现均匀孔径射孔。

## 2 地面模拟检测试验

通过理论分析,孔径的不均匀会对后续的压裂改造产生影响,差异越大,影响越明显<sup>[14]</sup>。因此,为验证射孔器偏心对射孔孔径的影响,进行了射孔器在套管中不同偏靠位置的穿套管检测试验<sup>[15]</sup>。针对不同施工方式及枪型进行了大量地面模拟试验,通过数据分析,确定孔径的差异程度。

### 2.1 常规四相位90°射孔器地面检测试验分析

将未安装扶正枪头枪尾的射孔器与安装扶正枪头枪尾的射孔器分别下入套管中,并使射孔器在套管内分别保持完全居中和完全贴壁<sup>[16]</sup>(图2),套管内灌入清水,并起爆射孔器。完毕后起出套管,分别测量居中及偏靠情况下的套管孔径。

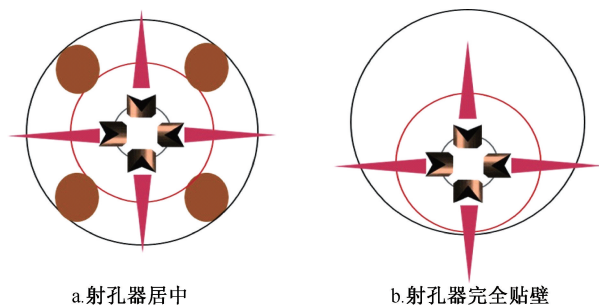


图2 模拟打靶示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulated shooting

#### 2.1.1 $\Phi 73$ mm 射孔器(四相位90°,10孔/m)

(1) $\Phi 73$  mm 射孔器居中打靶检测试验数据:居中(各个相位射孔弹与套管壁间隙均为25.5 mm)孔径分别为8.37 mm,7.65 mm,8.24 mm,8.13 mm,8.25 mm,8.24 mm,8.26 mm,7.93 mm,8.13 mm,8.45 mm,平均孔径8.17 mm。

(2) $\Phi 73$  mm 射孔器贴壁打靶检测试验数据:

①完全贴壁(射孔弹与套管壁间隙0 mm)孔径分别为9.54 mm、9.30 mm、9.29 mm,平均孔径9.40 mm;  
②最大间隙(射孔弹与套管壁间隙51 mm)孔径分别为6.93 mm、6.74 mm、7.28 mm,平均孔径6.90 mm;  
③小间隙(两个相位射孔弹与套管壁间隙均为20 mm)孔径分别为9.01 mm、9.13 mm、8.81 mm和9.25 mm,平均孔径9.05 mm。

通过试验数据结果得出(图3), $\Phi 73$  mm 射孔器在居中和偏靠情况下,孔径随着间隙的增加而逐渐减小。通过计算,在贴壁(0.0 mm)间距的情况下较居中情况下孔径增大14.7%;在大间隙(51.0 mm)间距的情况下较居中情况下孔径减小14.6%;在小间隙(20.0 mm)间距的情况下较居中情况下孔径增大9.9%。

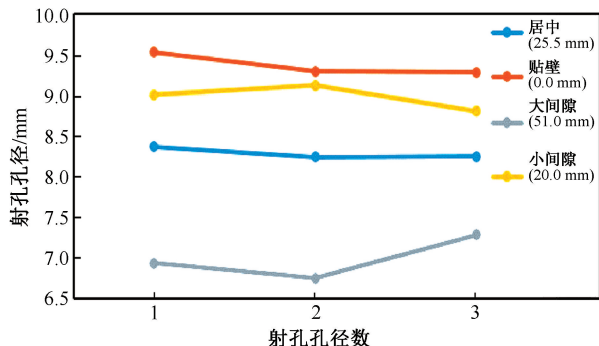


图3  $\Phi 73$  mm 射孔器不同间隙孔径数值

Fig.3 Aperture values of different gaps of perforator with diameter of 73 mm

#### 2.1.2 $\Phi 89$ mm 射孔器(四相位90°,16孔/m)

图4给出了 $\Phi 89$  mm 射孔器(四相位90°,

16 孔/m)打靶检测数据。可以看出,Φ89 mm 射孔器在居中和偏靠情况下,孔径随着间隙的增加而逐渐减小。通过计算,在贴壁(0 mm)间距的情况下较居中情况下孔径增大 22.2%;在大间隙(35 mm)间距的情况下较居中情况下孔径减小 14.1%;在小间隙(15 mm)间距的情况较居中情况下孔径减小 1%。孔径平均数值与居中基本一致。

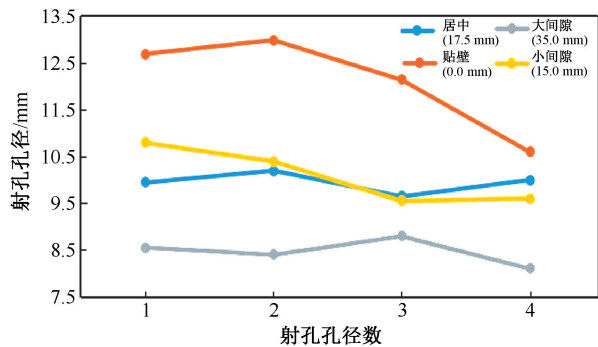


图 4 Φ89 mm 射孔器不同间隙孔径数值  
Fig. 4 Aperture values of different gaps of perforator with diameter of 89 mm

2.1.3 Φ102 mm 射孔器(四相位 90°,16 孔/m)

图 5 给出了 Φ102 mm 射孔器(四相位 90°,16 孔/m)打靶检测数据。可以看出,Φ102 mm 射孔器在居中和偏靠情况下,孔径随着间隙的增加而逐渐减小。通过计算,在贴壁(0 mm)间距的情况下较居中情况下孔径增大 9.6%;在大间隙(22 mm)间距的情况下较居中情况下孔径减小 6.1%;在小间隙(10 mm)间距的情况下较居中情况下孔径增大 2.6%。孔径平均数值与居中基本一致。

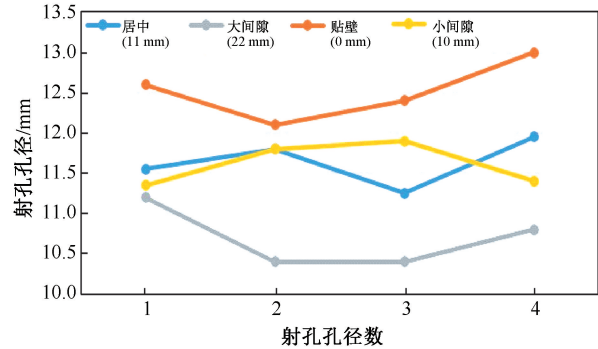


图 5 Φ102 mm 射孔器不同间隙孔径数值  
Fig. 5 Aperture values of different gaps of perforator with diameter of 102 mm

通过以上打靶数据分析,常规四相位 90°射孔器在井筒内处于贴壁位置时,射孔孔径会产生差异,孔径最大相差了 22%,将会影响射孔施工效果;而在居中时,孔径的差异情况较小,孔径基本均匀一致。因此,在常规射孔施工中,可采取措施使射

孔器在井筒内处于居中位置,实现均匀孔径射孔。

2.2 水平井三相位 120°射孔器地面试验分析

目前,大庆油田常用的水平井电缆泵送射孔器为三相位 120°相位角射孔器,在水平井电缆泵送施工中,射孔器尾部连接桥塞释放装置,该装置外径大于 89 型射孔器,使射孔器在井内与套管的上下间距不相同,可能导致孔径、穿深的变化。因此,需进行模拟试验。将 Φ89 mm 型射孔器安装好特制的扶正枪头及枪尾,下入混凝土靶内的套管中,并保证射孔器在井筒内斜靠。最小间隙分别为 5.5 mm 及 10.0 mm(图 6),灌入清水,并起爆射孔器。完毕后起出套管,测量这种射孔器最前端与最后端距离井壁间隙不同情况下孔径的差异程度。

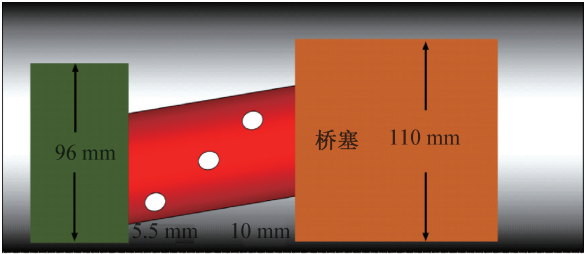


图 6 射孔器在水平井水平段状态模拟图  
Fig. 6 Simulation diagram of perforator in horizontal section of horizontal well

(1)Φ89 mm 水平井射孔器居中(三相位 120°,20 孔/m)打靶检测数据曲线如图 7 所示。

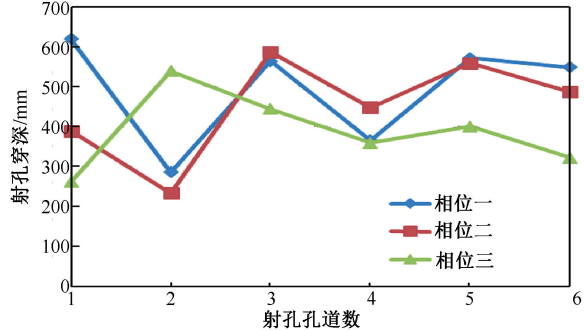


图 7 射孔器居中时穿深数据曲线  
Fig. 7 Perforation depth data curve when the perforator is in the middle

穿深差异度可由以下公式求出,即

$$S = [(y_{\max} - y_{\min}) / 2] / \bar{y} \times 100 \tag{1}$$

式中: $S$  为穿深差异度,%; $y_{\max}$  为穿深最大值,mm; $y_{\min}$  为穿深最小值,mm; $\bar{y}$  为平均穿深,mm。

在居中情况下,穿深数据理论分析上应差距不大。但本次打靶数据显示,穿深极不稳定,过低穿深较多,初步分析,存在弹间干扰问题<sup>[17]</sup>。由(1)式计算的穿深差异度为 44%。

(2)为进一步确定穿深差异度,再次进行了两

次打靶检测试验。 $\Phi 89$  mm 水平井射孔器居中(三相位  $120^\circ$ , 20 孔/m)打靶检测数据曲线如图 8 所示。由(1)式计算,可得穿深差异度分别为 33% 和 37%。

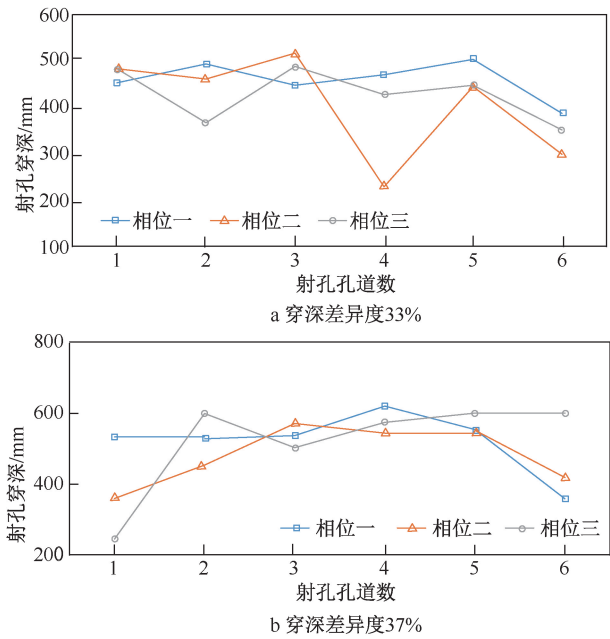


图 8 射孔器居中时穿深数据曲线  
Fig. 8 Perforation depth data curve when the perforator is in the middle

以上试验数据说明,20 孔/m 三相位 89 型射孔器混凝土靶检测三次,均采用 DP44RDX25-1 射孔弹(该射孔弹为目前生产常用弹型),穿深差异度分别为 44%、33%、37%,而后两次试验为排除射孔弹不稳定的因素,均选用同一批次射孔弹。从数据分析可以判定,采用 20 孔/m 三相位 89 型射孔器(DP44RDX25-1 射孔弹)存在弹间干扰问题。因此,对于水平井电缆泵送孔径差异情况采用低孔密射孔器进行,选用 15 孔/m 射孔器(表 1)。

表 1 射孔器居中时各相位穿深数据表(15 孔/m)  
Table 1 Perforation depth data of each phase when the perforator is in the middle (15 holes/m) 单位:mm

组别	相位一	相位二	相位三
1	651	576	566
2	533	522	603
3	604	563	615
4	594	611	539
5	587	573	702

(3) $\Phi 89$  mm 水平井射孔器居中(三相位  $120^\circ$ , 15 孔/m)穿深打靶检测数据见表 1,曲线如图 9 所示。由(1)式计算,得穿深差异度为 15%,穿深较为平均。

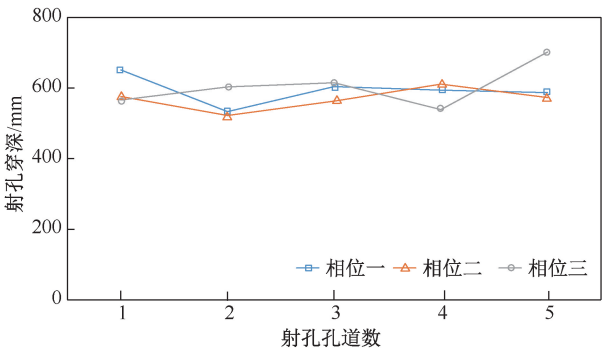


图 9 射孔器居中时穿深数据曲线  
Fig. 9 Perforation depth data curve when the perforator is in the middle

(4) $\Phi 89$  mm 水平井射孔器居中(三相位  $120^\circ$ , 15 孔/m)打靶检测孔径数据见表 2。

表 2  $\Phi 89$  mm 水平井射孔器居中试验孔径数据  
Table 2 Centering test aperture data of perforator with diameter of 89 mm in horizontal well

检测项目 (居中 17.5 mm 间隙)	孔径尺寸/mm				
	一相位	二相位	三相位	一相位	二相位
一相位	8.90	9.30	8.35	9.45	9.40
二相位	9.05	8.75	8.55	9.05	8.70
三相位	8.90	9.95	9.15	9.05	8.55

孔径差异度可由以下公式求出,即  
$$R = (w_{\max} - w_{\min}) / 2\bar{w} \times 100 \quad (2)$$

式中: $R$  为孔径差异度,%; $w_{\max}$  为孔径最大值,mm; $w_{\min}$  为孔径最小值,mm; $\bar{w}$  为平均孔径,mm。

$\Phi 89$  mm 水平井射孔器在居中情况下,依据(2)式计算,可得孔径差异度为 17.7%。孔径较为均匀。

(5) $\Phi 89$  mm 水平井射孔器偏靠(5.5 mm, 10.0 mm)时各相位孔径数据同线如图 10 所示。

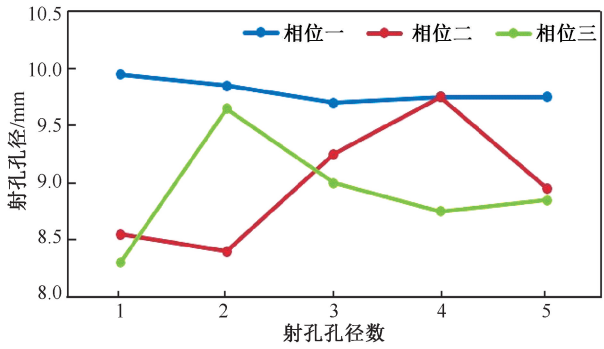


图 10 射孔器偏靠时孔径数据曲线  
Fig. 10 Data curve of hole diameter when perforator deviates

从以上试验数据可以看出,距离套管壁较近一侧产生的孔径较大;另外,两相位孔径较小,且平均值相近。孔径相差 10.1%。

(6) $\Phi 89$  mm 水平井射孔器居中(三相位  $120^\circ$ , 15 孔/m)打靶检测,射孔器偏靠(29.5 mm, 25.0 mm)时各相位孔径数据曲线如图 11 所示。



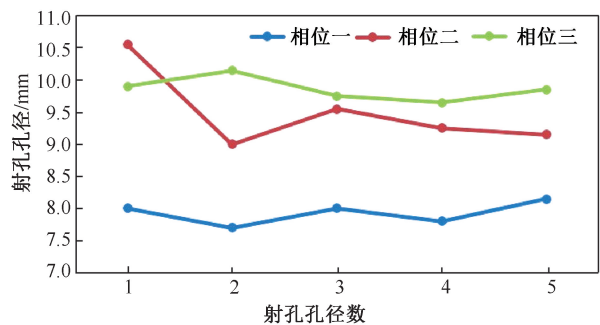


图 11 射孔器偏靠时孔径数据曲线  
Fig. 11 Data curve of hole diameter when perforator deviates

从以上试验数据可以看出,距离套管壁较远一侧产生的孔径较小;另外两相位孔径较大且平均值相近。孔径相差 18.1%。

从以上模拟射孔枪与套管壁不同间隙施工情况的试验数据分析结果表明,随着间隙的变大,孔径越来越小;在常规压裂射孔以及水平井射孔施工中,会存在孔眼不均匀、进液量不均等情况,甚至有小孔眼无法压开情况。因此,需开发研究等孔径射孔工艺技术,以满足油田压裂井改造的需要。

3 解决方案

上述实验数据可以说明,射孔器在井下偏靠时会造成孔径的不均匀。因此,需要实现等孔径射孔。从两方面实现:一种是使射孔器扎起,井筒内处在居中位置;另一种是研制特殊的等孔径射孔弹,在偏靠射孔时也能实现孔径均匀。

3.1 直井居中扶正装置

研制了射孔器扶正装置(图 12),具有抗爆炸冲击能力强、居中程度高的特点。

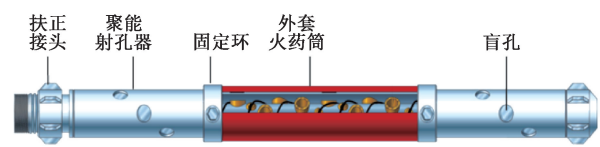


图 12 居中扶正装置结构示意图  
Fig. 12 Structure diagram of centering centralizer

在工艺上实现了等孔径射孔。该装置设计了对称式“双耳”滑块结构,并采用高强度弹簧支撑,受力时可压缩,避免起下管柱过程中卡井,适用于井斜角 20°以内的井。该装置最小外径 Φ102 mm,最大外径 Φ124 mm,最大支撑力 680 N。已进行了 1 025 口井现场应用。

3.2 大斜度井旋转扶正装置

大斜度井旋转扶正装置可在水平井分段射孔施工中,确保 89 型射孔枪在内径 121.36 mm 的套管内不发生偏靠,同时将滑动摩擦变成滚动摩擦,减小下井工具串下井过程的摩擦阻力。该装置最

大外径 Φ121 mm,耐温 230 ℃,耐压 170 MPa,已完成现场试验 4 口井,最大井斜 71°,且采用电缆传输施工,顺利完成射孔施工,枪身无磨损痕迹。

3.3 等孔径射孔弹

普通深穿透射孔弹形成的金属射流拉伸较快,射流形成细锥体结构(图 13a)。根据理论分析,射流前半部分在套管扩孔作用中起关键作用,后半部分经过孔眼时基本不会再进行扩孔。根据这个原理,设计思想是使射流前半部分在套管不同间隙区间形成较为一致的“杆状”圆柱体结构(图 13b),研制了适用于 Φ89 mm 型射孔枪的等孔径射孔弹。通过设计大“R”型变锥角药型罩(图 14),将射流形态由“锥形”变为“杆状”,并优选了药型罩配方,加入一些高塑性、高密度、高延展性金属来延长射流断裂时间,如钼、钽、铜包铅等金属粉材,同时加入高密度、高声速的金属粉材,从器材方面实现等孔径射孔。

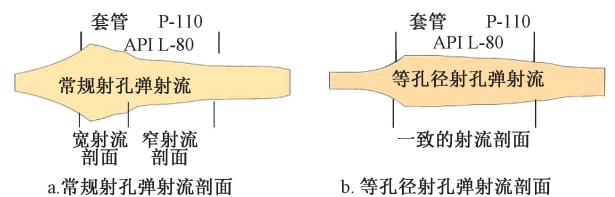


图 13 常规射流与等孔径射流示意图  
Fig. 13 Schematic diagram of conventional jet and constant aperture jet

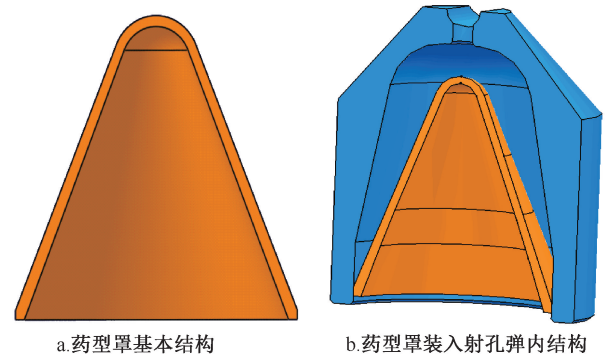


图 14 大“R”型变锥角药型罩  
Fig. 14 Large “R” shaped liner with variable cone angle

等孔径射孔器在完全偏靠情况下,等孔径射孔器孔径差异程度达到 3.7%(斯伦贝谢公司孔径差异度为 7.8%),实现了均匀孔径射孔。该射孔弹平均穿深达到 650 mm,平均孔径达到 11.0 mm(原 Φ89 mm 型射孔枪常用的深穿透型射孔弹平均穿深 475 mm,平均孔径 9.9 mm,孔径差异程度达到 22.7%)。该射孔弹适用于射孔后压裂投产井及大规模压裂水平井,可有效降低压裂施工压力,提高射孔后压裂效果。大庆油田常用型号的射孔器地面打靶孔径直径参数见表 3、表 4。

表 3 89 型常规四相位射孔器等孔径射孔弹地面  
混凝土靶孔径检测数据 单位:mm

Table 3 Testing data of ground concrete target aperture  
of equal aperture perforating charge of 89 type  
conventional four phase perforator

	零间隙	小间隙	大间隙	小间隙
地面混凝土	10.150	9.850 0	8.700 0	9.450
靶孔径检测	10.000	9.500 0	9.300 0	9.350
数据/mm	10.100	8.850 0	9.350 0	9.550
	9.650	9.550 0	8.600 0	9.750
平均孔径/mm	9.975	9.437 5	8.987 5	9.525

表 4 89 型水平井三相位射孔器等孔径射孔弹  
混凝土靶孔径检测数据 单位:mm

Table 4 Testing data of concrete target aperture  
of equal aperture perforating charge of 89 type  
horizontal well three phase perforator

组别	相位一	相位二	相位三
1	9.65	9.55	9.23
2	9.95	9.65	9.47
3	9.70	9.15	9.51
4	9.81	9.75	9.70
5	9.75	9.35	9.45
平均	9.77	9.49	9.47

4 现场应用情况

上述两方面的解决方案,实现了等孔径射孔。下面,以实际应用情况验证其效果。

4.1 应用规模

该技术目前现场应用了 1 025 口井,其中部分井为常规射孔后压裂井,井斜小于 15°。采用直井居中扶正装置;部分井为水平井,采用等孔径射孔弹,工艺成功率 100%,保证了所有射孔孔径差异度较小。

4.2 应用效果

针对常规射孔后压裂井,采用将射孔器在井筒内居中的方式实现等孔径射孔,需要采用居中扶正装置来实现;针对水平井分段压裂,由于施工较为复杂,采用射孔器内装配等孔径射孔弹的方式。

4.2.1 直井居中扶正装置

通过等孔径射孔工艺施工井与常规射孔施工井对比,有效降低了水力压裂地面施工压力,见到了一定的应用效果(表 5)。

表 5 A、B 区块水力压裂平均泵压数据对比  
Table 5 Comparison of average pump pressure data of  
hydraulic fracturing in blocks A and B 单位:MPa

施工方式	井数	第一层	第二层	第三层	第四层
等孔径射孔	13	29.2	27.7	24.4	20.4
常规射孔	13	30.2	30.1	31.5	32.0
压裂施工压力降低/%		3.3	8.0	22.5	36.2

通过后期的效果追踪对比,与常规射孔注入井相比,平均单井日注入量增加 9.4 m<sup>3</sup>,平均比吸水指数提高 10%;与常规采出井相比,平均采液强度提高 33.33%。

4.2.2 等孔径射孔弹应用效果

等孔径射孔弹在某区块进行 3 口井现场试验,试验井均为套管多段多簇体积压裂水平井。首段采用油管输送方式施工,射孔器采用三相位 120°相位角射孔器。顺利完成现场施工,工艺成功率 100%。

为验证等孔径射孔弹试验效果,对采用等孔径射孔弹施工段的水力压裂破裂压力,以及后段采用常规射孔弹(不居中,完全贴靠在套管壁)情况下施工段的水力压裂破裂压力,进行压力对比分析,以验证等孔径射孔弹的实际应用效果(表 6)。

表 6 89 型水平井三相位射孔器等孔径射孔弹效果对比  
Table 6 Effect comparison of perforating charges of  
equal aperture perforating charge of 89 type  
horizontal well three phase perforator

施工方式	破裂 压力/MPa	平均 降低/%	平均施工 压力/MPa	平均 降低/%
等孔径射孔	30.4	25.6	25.2	19.2
常规射孔	40.9		31.2	

通过试验结果可以看出,等孔径射孔技术有效降低了水力压裂地面施工压力,见到了一定的应用效果。在其他区块现场应用 15 口井,与常规射孔压裂井相比,平均最大施工泵压由 57 MPa 降至 52 MPa,平均单井日增油 1.36 t,平均采液强度提高 25.8%,见到了良好的投产效果。

5 结论

(1) 通过地面检测试验,水平井电缆泵送 20 孔/m 三相位 89 型射孔器,采用 DP44RDX25-1 射孔弹时,穿深差异度分别为 44%、33%和 37%。

(2) 通过地面检测试验,模拟射孔枪与套管壁不同间隙施工情况。结果表明,随着间隙的变大(由 0 间隙至 55 mm),孔径及穿深越来越小(由平均孔径 12.1 mm 降低至 8.5 mm)。

(3) 现场试验说明,等孔径射孔工艺可有效降低水力压裂地面施工压力。通过后期的效果追踪对比得知,等孔径射孔工艺提高了注入井及采出井的应用效果。

(4) 等孔径射孔技术成功研发,对促进个性化射孔技术发展、提高施工效果起到了重要作用。目前,已成为页岩油气水平井大规模压裂开发的主导

技术,将为大庆油田原油稳产提供强有力技术支持。

**致谢:**感谢大庆油田试油试采分公司同意本论文公开发表;感谢中油股份公司重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”的资助,以及项目组成员在本文撰写过程中提供的帮助。

## 参考文献

- [1] 于书新,吴丹丹,程晓刚,等. 大庆油田浅层气井扩容式射孔技术[J]. 油气井测试,2020,29(5):21-26.  
YU Shuxin, WU Dandan, CHENG Xiaogang, et al. Expandable perforating technology for shallow gas wells in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2020,29(5):21-26.
- [2] 代景新. 连续油管传输射孔技术在大庆地区的应用[J]. 油气井测试,2016,25(4):58-60.  
DAI Jingxin. Application of coiled tubing conveyed perforating in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2016,25(4):58-60.
- [3] 于开勋. 孔道内子弹增效射孔技术研究[J]. 油气井测试,2016,25(1):52-53,57.  
YU Kaixun. Research on increase-effect perforating technology by bullet within the tunnel [J]. Well Testing, 2016,25(1):52-53,57.
- [4] 赵金龙. 油管输送射孔井下封井技术研究[J]. 油气井测试,2018,27(3):46-51.  
ZHAO Jinlong. Research on well sealing technology of tubing conveyed perforating [J]. Well Testing, 2018,27(3):46-51.
- [5] 杨登波,李妍僊,张良,等. 不同射孔完井方式对水平井油气产能比的影响比较[J]. 长江大学学报(自然科学版),2020,17(2):64-70,91.  
YANG Dengbo, LI Yanxi, ZHANG Liang, et al. Comparison of effects of different perforation completion methods on hydrocarbon productivity ratio of horizontal wells [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020,17(2):64-70,91.
- [6] 郭鹏,罗宏伟,贾曦雨,等. 等孔径射孔弹技术研究[J]. 测井技术,2017,41(4):495-500.  
GUO Peng, LUO Hongwei, JIA Xiyu, et al. Technology of equal diameter hole shaped charges [J]. Well Logging Technology, 2017,41(4):495-500.
- [7] 鲁坤,李必红,赵云涛,等. 等孔径射孔弹数值模拟与试验研究[J]. 测井技术,2017,41(3):378-382.  
LU Kun, LI Bihong, ZHAO Yuntao, et al. Numerical simulation and experimental research on equal hole shaped charge [J]. Well Logging Technology, 2017,41(3):378-382.
- [8] 李东传,金成福,孙成艳,等. 等孔径射孔器穿孔性能评价方法探讨[J]. 测井技术,2019,43(1):101-104,110.  
LI Dongchuan, JIN Chengfu, SUN Chengyan, et al. Evaluation method for perforation performance of consistent hole perforators [J]. Well Logging Technology, 2019,43(1):101-104,110.
- [9] 李东传,金成福. 等孔径射孔器评价方法探讨[J]. 石油工业技术监督,2017,33(7):24-28.  
LI Dongchuan, JIN Chengfu. Discussion on evaluation

- method of equal aperture perforator [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2017,33(7):24-28.
- [10] 郭红军,王宝兴,汪长栓,等. 油气井等孔径射孔弹性能影响因素探讨[J]. 测井技术,2016,40(6):769-772.  
GUO Hongjun, WANG Baoxing, WANG Changshuan, et al. On main influence factors on charge performance of consistent size hole [J]. Well Logging Technology, 2016,40(6):769-772.
- [11] 谢荣华,王文军. 偏心射孔对水平井压裂的影响[J]. 测井技术,2015,39(5):660-664.  
XIE Ronghua, WANG Wenjun. Effect of eccentric perforation on the horizontal well fracturing [J]. Well Logging Technology, 2015,39(5):660-664.
- [12] 姜民政,曹彦鹏,叶鹏,等. 压裂液在射孔眼处压力损失规律研究[J]. 石油矿场机械,2011,40(3):1-4.  
JIANG Minzheng, CAO Yanpeng, YE Peng, et al. Study on pressure loss of fracturing fluid at bullet hole [J]. Oil Field Equipment, 2011,40(3):1-4.
- [13] 周生田. 射孔水平井孔眼密度优化分析[J]. 石油钻探技术,2007,35(5):55-57.  
ZHOU Shengtian. Analysis of perforation density optimization in perforated horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(5):55-57.
- [14] 汪长栓,王海洲,李刚,等. Stimstream 等孔径深穿透射孔弹在页岩气井中的应用[J]. 爆破器材,2017,46(5):38-42,47.  
WANG Changshuan, WANG Haizhou, LI Gang, et al. Application of Stimstream shaped charge providing equal aperture and deep penetration in shale gas reservoir [J]. Explosive Materials, 2017,46(5):38-42,47.
- [15] 袁吉诚. 射孔为压裂酸化服务是射孔技术发展的必由之路[J]. 测井技术,2015,39(2):131-136.  
YUAN Jicheng. Advances of perforating technology: The only way for acid fracturing service [J]. Well Logging Technology, 2015,39(2):131-136.
- [16] 王颖杰. 射孔完井孔眼周围流场研究[D]. 大庆:东北石油大学,2012.  
WANG Yingjie. The research around eyeholes flow field of perforating completion [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [17] 杨建雷. 水平井射孔完井工艺优化设计[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.  
YANG Jianlei. The optimization of perforated completion technology of horizontal well [D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2010.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**杨坤,男,1984年出生,工程师,2006年毕业于大庆石油学院电气工程及其自动化专业,现主要从事射孔新技术研发、推广等工作。电话:0459-5685094,15045966767;Email:sk\_yangkun@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街试油试采分公司,邮政编码:163412。