

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.008

# Stimstream 等孔径深穿透射孔弹在页岩气井中的应用\*

汪长栓<sup>①</sup>  王海洲<sup>②</sup>  李  刚<sup>③</sup>  郭洪志<sup>①</sup>  刘海龙<sup>④</sup>  钮元元<sup>①</sup>

①北方斯伦贝谢油田技术(西安)有限公司(陕西西安,710065)

②大庆油田有限责任公司第二采油厂(黑龙江大庆,163453)

③大庆油田有限责任公司井下作业分公司(黑龙江大庆,163453)

④中国石油渤海钻探工程有限公司测井分公司(天津,300280)

[摘  要]  针对套管孔眼大小不一致造成页岩气井水力加砂压裂施工难度大的问题,从国外引进了一种 Stimstream 等孔径深穿透射孔弹,分析了其结构特点,并和国产射孔弹进行了地面环靶试验和现场应用效果比较。结果表明:该射孔弹套管孔眼受射孔枪和套管间隙大小影响不大,对降低水力加砂压裂破裂压力和施工压力具有明显的效果。

[关键词]  页岩气;射孔弹;等孔径;水力压裂;破裂压力

[分类号]  TE371

## Application of Stimstream Shaped Charge Providing Equal Aperture and Deep Penetration in Shale Gas Reservoir

WANG Changshuan<sup>①</sup>, WANG Haizhou<sup>②</sup>, LI Gang<sup>③</sup>, GUO Hongzhi<sup>①</sup>, LIU Hailong<sup>④</sup>, NIU Yuanyuan<sup>①</sup>

① North Schlumberger Oilfield Technology (Xi'an) Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710065)

② No. 2 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Co., Ltd. (Heilongjiang Daqing, 163453)

③ Downhole Operation Branch, Daqing Oilfield Co., Ltd. (Heilongjiang Daqing, 163453)

④ Bohai Drilling Engineering Co., Ltd, CNPC (Tianjin, 300280)

[ABSTRACT]  Regarding to the problems of hydraulic fracturing in shale gas wells caused by the inconsistent size of casing hole, Stimstream shaped charge providing equal aperture and deep penetration was imported from US. Its special structure was analyzed. Target test and oilfield application effect of this charge were compared with charges made in China. The results show that this charge can provide equal aperture on the casing regardless of different clearance between gun and casing, and it has remarkable effect on reducing the breakdown pressure and treated pressure of formations.

[KEYWORDS]  shale gas; shaped charge; equal aperture; hydraulic fracturing; breakdown pressure

### 引言

近几年,国内钻探的页岩气水平井普遍采用射孔完井和水力加砂多级压裂增产技术<sup>[1]</sup>,射孔是页岩气井压裂改造前的必要工序,是沟通地层和井筒、打开页岩气通道必不可少的措施之一,射孔孔眼不仅是油气流动的通道,也是水力压裂用压裂砂携带液的入口。文献[2]认为,对于水力加砂压裂,套管孔眼的摩擦阻力很重要,孔径越大,压降越小,通常要求孔眼为支撑剂颗粒直径的6~10倍,才能防止

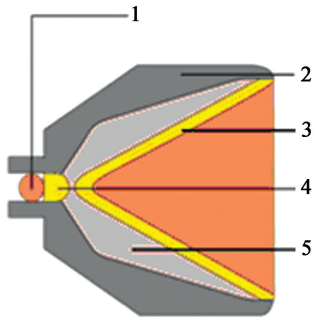
支撑剂搭桥堵塞。因此,保持套管周向射孔孔眼大小一致非常关键。但是,在页岩气水平井射孔完井工艺中,射孔枪靠近套管一侧不能居中,使得套管各向射孔孔眼大小不一致,靠近套管一侧孔眼较大,远离套管一侧则孔眼很小。因此,水力加砂压裂工艺中遇到地层致密、破裂压力高的地层,压裂加砂施工难度非常大,施工成本较高<sup>[2-3]</sup>。为了提高水力加砂压裂施工效果,解决射孔枪在套管不居中条件下射孔孔眼直径大小一致性问题,斯伦贝谢公司引进了 Stimstream 等孔径深穿透射孔弹,这种弹型在套管上的射孔孔眼直径不受射孔枪与井下套管间隙大小

\* 收稿日期:2016-12-09  
作者简介:汪长栓(1967-),男,高级工程师,主要从事油气井爆破器材研制。E-mail: wang.changshuan@xtc.slbcn.com

的影响,在北美页岩气井中进行了大量应用,对降低水力压裂破裂压力和加砂施工压力具有明显的效果。对其进行地面环靶测试和井下试验评价,获得了较好的应用效果,对提高我国页岩气勘探开发射孔完井技术水平具有重要的指导意义。

### 1 Stimstream 聚能射孔弹结构特点

国内外通用的聚能射孔弹主要由起爆药、主炸药、药型罩、金属弹壳等组成(见图 1)。



1 - 导爆索;2 - 弹壳;3 - 药型罩;  
4 - 起爆药;5 - 主炸药。

图 1 聚能射孔弹结构示意图

Fig. 1 Structure of the shaped charge

药型罩是聚能射孔弹的核心部件,对射流速度、射流密度影响较大。不同药型罩结构会产生不同的穿孔效果,如单锥变壁厚罩可实现深穿透效果,喇叭罩结构可实现大孔径效果。按照准定常不可压缩流体力学理论,射孔弹穿孔深度与射流速度的关系为<sup>[4-5]</sup>

$$L = (H - b) \left[ \left( \frac{v_{j0}}{v_j} \right)^{\sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}}} - 1 \right]. \quad (1)$$

式中: $L$  为穿孔深度; $v_{j0}$  为射流头部速度; $v_j$  为射流尾部速度; $\rho_t$  为靶密度; $\rho_j$  为射流密度; $H$  为炸高; $b$  为常数。

国产 25 g 装药聚能射孔弹药型罩一般采用锥面结构设计,装在 89 型射孔器上,用于垂直井时穿孔深度通常为 600 ~ 800 mm,孔径为 9.0 ~ 9.5 mm。该弹型设计时未考虑水平井射孔器与套管靠近会引起孔径变小的问题。采用锥面与曲面多段组合的变壁厚罩,能使药型罩沿轴线方向形成线性到非线性的壁厚变化结构,提高了射流的头部速度,并使得射流变粗<sup>[6]</sup>。Stimstream 聚能射孔弹正是通过射孔弹药型罩几何尺寸的特殊设计,改变了射流头部的速度和粗细,从而在一定范围内实现了射流穿透套管孔径不受枪套间隙的影响,既提高了孔径一致性,又

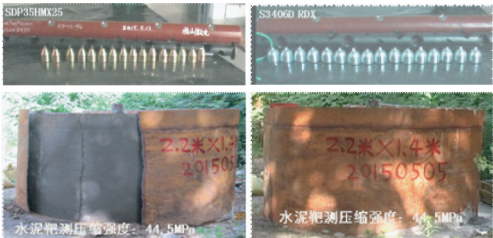
提高了穿深。

### 2 API RP19B 环靶见证试验

为了评价 Stimstream 射孔弹穿孔孔径和砂岩靶穿透效果,按照 API RP19B 的要求,同时制造了  $\varnothing 2\ 200\ \text{mm} \times 1\ 400\ \text{mm}$  标准水泥靶 2 个,凝固 28 d;均采用 1.5 m 高 5.5" (139.7 mm) 套管,壁厚 12.7 mm,内径 114.3 mm,套管材料 P110 钢。同期制作两个混凝土靶块,测试其抗压强度,均为 44.5 MPa。

试验采用的射孔枪外径 3.5" (88.9 mm),孔密度为 16 孔/m,90°相位,标称长度 1 m,数量为 2 根。射孔弹采用普通国产 SDP35HMX25 (口径 35 mm,装药 25 g) 和进口 S3406D 型 (口径 36 mm,装药 25 g) Stimstream 射孔弹,检验用射孔弹均从同一批中随机抽取,见图 2 所示。

为了便于对比,两种射孔器装配后 0°相位均紧贴套管内壁,射孔器与套管最小间隙为 0,最大间隙 25.3 mm,见图 3 所示。两种射孔弹装药均为 25 g,套管规格为 5.5" (139.7 mm),壁厚为 12.7 mm,内径为 114.3 mm,材质为 P110。



(a)SDP35HMX25 (b)S3406D

图 2 两种射孔弹环靶试验现场

Fig. 2 Target test for two kinds of charges



(a)SDP35HMX25 (b)S3406D



(c)试验后的 5.5" (139.7 mm) 套管 (d)试验后的 89 型射孔器

图 3 两种射孔枪(弹)环靶试验

Fig. 3 Two kinds of perforators after target test

本次试验中比较了两种不同射孔弹使用同一种 89 型射孔器、在同样孔密度、同一种套管、同强度水

泥靶条件下,枪套间隙变化对套管射孔孔径及水泥靶穿深的影响。

点火起爆后,混凝土环靶按照 4 相位的裂缝剖开,不同弹型的套管穿孔效果见图 4 和图 5。测量不同相位的套管孔径和混凝土靶穿深,可直观地比较国产与进口射孔弹的差别。图 6 统计了两种射孔弹分别在 0°、90°、180°和 270°相位的混凝土靶平均穿深,图 7 统计了两种射孔弹分别在 0°、90°、180°和 270°相位的套管平均射孔直径。从图 6 数据看,两种弹型的穿深数据差距不明显,但图 7 中两种弹型的平均射孔直径受枪套间隙的影响较大。

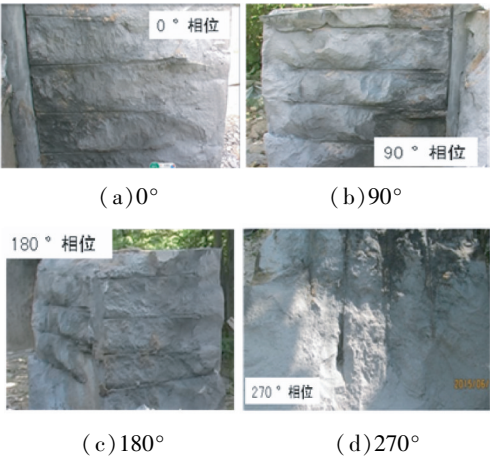


图 4 SDP35HMX25 射孔弹剖开环靶图  
Fig.4 SDP35HMX25 charges target

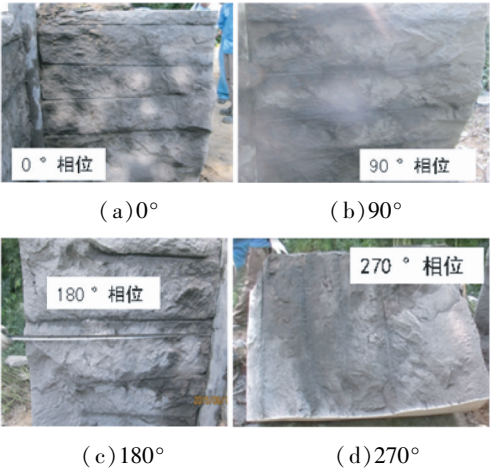


图 5 S3406D 射孔弹剖开环靶图  
Fig.5 S3406D charges target

图 8 ~ 图 11 分别是两种射孔弹在同一相位、同样枪套间隙的孔眼外观试验照片。通过比较可观测出,0°相位国产射孔弹与进口射孔弹枪套间隙一致,孔眼直径分别为 9.3 mm 和 9.4 mm,但 180°相位枪套间隙(25.3 mm)最大时的平均孔眼直径分别为 6.5 mm 和 9.3 mm,S3406D 进口射孔弹的孔眼直径一致性明显好于 SDP35HMX25。

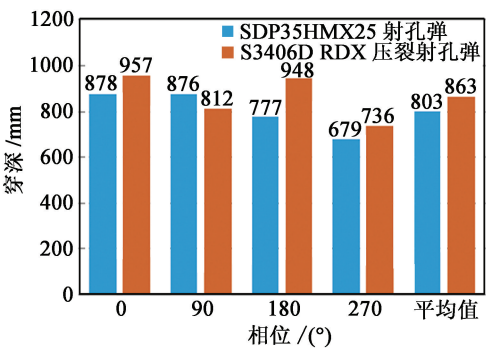


图 6 不同相位、不同弹型混凝土靶穿深  
Fig.6 Penetration depth of different charges at different phases

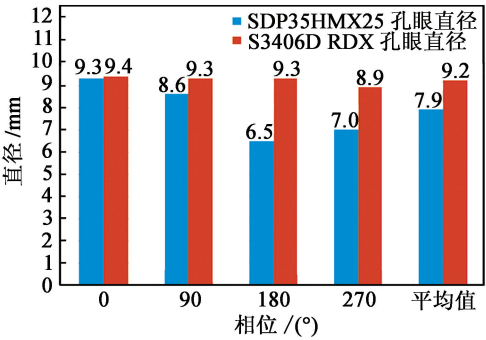


图 7 不同相位、不同弹型套管射孔直径  
Fig.7 Casing hole size of different charges at different phases

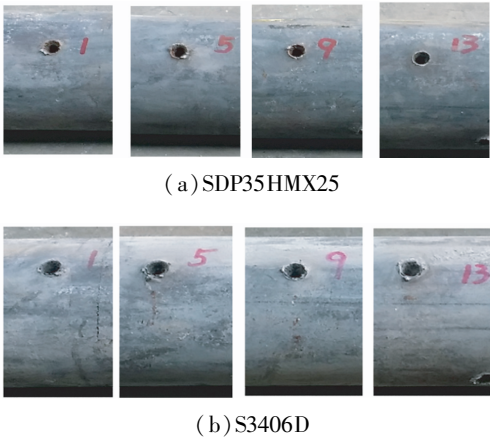


图 8 两种射孔弹 0°相位套管孔眼  
Fig.8 Casing entrance holes of two kinds of charges at 0°phases

3 现场应用效果及分析

珙县地处四川长宁-威远国家级页岩气示范区和滇黔北昭通国家级页岩气示范区的核心交汇地带,页岩气资源丰富,在前期勘探开发时,部分井遇到了破裂压力高、压裂施工难度大的问题。为了解



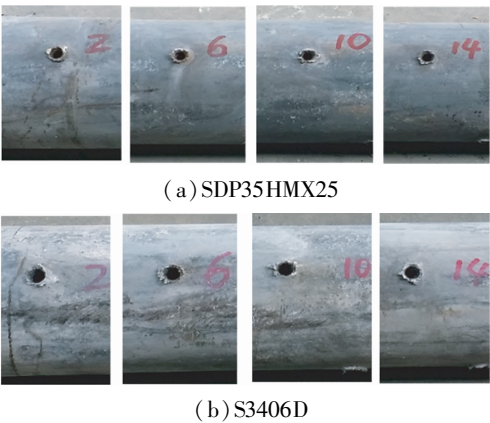


图 9 两种射孔弹 90°相位套管孔眼

Fig.9 Casing entrance holes of two kinds of charges at 90°phases

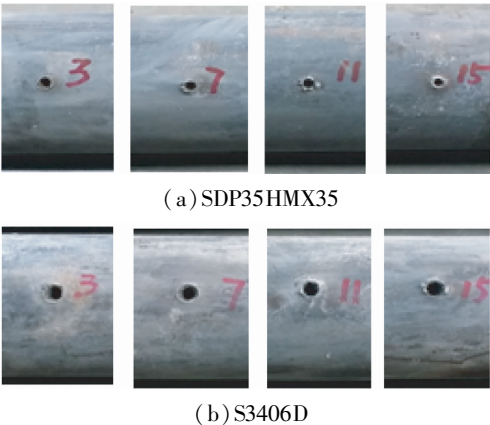


图 10 两种射孔弹 180°相位套管孔眼

Fig. 10 Casing entrance holes of two kinds of charges at 180°phases

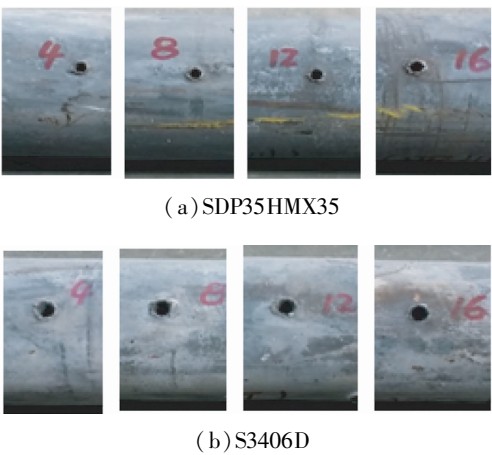


图 11 两种射孔弹 270°相位套管孔眼

Fig. 11 Casing entrance holes of two kinds of charges at 270°phases

决实际困难,选择了 H1、H6 平台进行了不同弹型的现场应用对比试验。表 1、表 2、表 3 分别统计了相同平台不同井号、或同一井号不同射孔段采用 SDP35HMX25 超深穿透射孔弹和 S3406D 型 Stimstream 射孔弹的破裂压力和施工压力数据。

试验数据说明, S3406D 等孔径弹和国产 SDP35HMX25 射孔弹比较,H1 平台可使水力加砂破裂压力平均下降 14.1 MPa,泵砂施工压力降低 14.8 MPa;H6 平台可使水力加砂破裂压力平均下降 8.2 MPa,泵砂平均施工压力降低 4.5 MPa;YSH6-7 井不同压裂级采用 S3406D 等孔径弹和国产 SDP35HMX25射孔弹比较,可使破裂压力平均降低8.7

表 1 某页岩气井 H1 平台泵送射孔压裂效果(相同平台,不同井,两种射孔弹)

Tab.1 Fracture pressure after pump-down perforation on shale gas H1 Pad (same pad, different wells, and two charges)						
序号	射孔弹类型	井号	破裂压力/ MPa	破裂压力平均值/ MPa	施工压力/ MPa	施工压力平均值/ MPa
1 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YH1-3 STAGE 3	84	84.6	77	77.6
2 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YH1-3 STAGE 6	83		78	
3 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YH1-3 STAGE 12	82		73	
4 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YH1-5 STAGE 5	86		80	
5 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YH1-5 STAGE 13	88	70.5	80	62.8
6 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-2 STAGE 1	64		60	
7 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-2 STAGE 9	75		65	
8 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-4 STAGE 2	75		70	
9 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-4 STAGE 8	73		57	
10 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-4 STAGE 19	63	70.5	54	
11 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-6 STAGE 2	73		65	
12 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-6 STAGE 7	64		58	
13 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-8 STAGE 1	78		72	
14 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-8 STAGE 7	73	67	66	
15 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YH1-8 STAGE 19	67		61	

表 2 某页岩气井 H6 平台泵送射孔压裂效果(相同平台,不同井,两种射孔弹)

Tab. 2 Fracture pressure after pump-down perforation on shale gas H6 Pad ( same pad , different wells , two charges )

序号	射孔弹类型	井号	破裂压力/ MPa	破裂压力平均值/ MPa	施工压力/ MPa	施工压力平均值/ MPa
1 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-1 STAGE 3	81		69	
2 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-1 STAGE 20	79		60	
3 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-3 STAGE 1	79	78.5	70	66.8
4 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-3 STAGE 14	76		70	
5 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-5 STAGE 5	78		65	
6 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-5 STAGE 12	78		67	
7 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 10	72		65	
8 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 14	67	70.3	62	62.3
9 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 20	72		60	

表 3 某页岩气井 H6 平台泵送射孔压裂效果(相同平台,同井不同压裂级,两种射孔弹)

Tab. 3 Fracture pressure after pump-down perforation on shale gas H6 Pad ( same pad , same well and different stages , two charges )

序号	射孔弹类型	井号	破裂压力/ MPa	破裂压力平均值/ MPa	施工压力/ MPa	施工压力平均值/ MPa
1 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-7 STAGE 1	85		75	
2 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-7 STAGE 2	70	79.0	70	73.0
3 <sup>#</sup>	SDP35HMX25	YSH6-7 STAGE 3	82		75	
4 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 10	72		65	
5 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 14	67	70.3	67	66.6
6 <sup>#</sup>	S3406D RDX	YSH6-7 STAGE 20	72		68	

MPa,泵砂施工压力平均降低 6.4 MPa。

尽管两种射孔弹地面混凝土环靶测试穿深差异不明显,但是本次射孔作业为页岩气水平井,由于重力作用,射孔枪在套管中无法居中,采用国产 SDP35HMX25 射孔弹,由于水介质的存在,射孔枪与套管间隙距离变化必然导致聚能射流撞击套管,速度产生差异,该速度差异会导致套管孔径大小不一致,现场施工数据证实地层破裂压力较高,施工加砂难度很大。而 S3406D 等孔径射孔弹采用了锥面与曲面多段组合的变壁厚药型罩,提高了射流的头部速度,并使得射流变粗;因此,孔径大小受射孔枪与套管间隙距离变化的影响较小。现场试验证实了降低破裂压力和泵砂施工压力效果较为明显。

4 结    论

1) 地面混凝土环靶试验测试表明:Stimstream 等孔径深穿透射孔弹在射孔枪不居中情况下能实现各相位孔眼直径保持一致,实现了等孔径与深穿透的完美结合。

2)页岩气水平井射孔效果证实:采用 Stimstream 等孔径深穿透射孔弹施工,破裂压力和泵注压力明显降低,压裂施工更顺利。

3)Stimstream 等孔径深穿透射孔弹对非常规页岩气、煤层气、致密油气水平井垂直深度大、地层应力高、施工压力高等复杂井况射孔施工作业降低破裂压力和施工压力具有显著的效果及应用前景。

参    考    文    献

[1] 马超群,黄磊,范虎,等. 页岩气井压裂技术及其效果评价[J]. 石油化工应用, 2011,30(5):1-3.  
MA C Q,HUANG L, FAN H, et al. Fracture in shale gas play and the evaluation of its effects[J]. Petrochemical Industry Application,2011, 30(5): 1-3.

[2] 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 M Z, CAO Y P, YE P, et al. Study on pressure loss of fracturing fluid at bullet hole[J]. Oil Field Equipment,2011,40(3): 1-4.

