

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.014

# 一种球锥结合药型罩石油射孔弹研究\*

陈 兴 李如江 弯天琪 赵方宣

中北大学化工与环境学院(山西太原,030051)

[摘 要] 设计了一种球锥结合药型罩石油射孔弹,在半球形主药型罩基础上增加了锥形前驱罩结构,利用 ALE 方法,模拟了药型罩材料为铜,锥角角度分别为  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $50^\circ$  时对其射流的速度和形状、射流头部速度和杵体质量的影响,并与半球形药型罩模拟结果进行对比。结果表明前驱罩锥角  $40^\circ$  比锥角  $30^\circ$  射流速度降低了 26%,直径提高了 8.1%,锥角  $40^\circ$  比锥角  $50^\circ$  射流速度提高了 4.1%,直径降低了 3.4%。前驱罩锥角为  $40^\circ$  和  $50^\circ$  的球锥形药型罩的射流头部速度比半球形药型罩分别提高了 25% 和 20%,直径分别提高了 2.6% 和 6.1%。试验结果与模拟结果大致相符,为大孔径、深穿孔石油射孔弹的设计开发提供了一定的参考。

[关键词] 石油射孔弹;球锥结合药型罩;ALE 方法;药型罩锥角;大孔径;深穿孔

[分类号] TJ410.3+33;TE257+.1

## 引言

石油射孔弹利用聚能射流来打开油气井和产油层岩土介质之间的通道,该孔道的深度和半径决定了石油开采的产油量<sup>[1]</sup>。射孔弹按其穿孔的性能可分为大孔径和深穿孔两类。大孔径射孔弹以追求射孔孔径为目的,但是其射孔深度通常较浅<sup>[2]</sup>;深穿孔射孔弹则是以追求穿孔深度为主要目的,但受到射流成形基本规律的限制,形成的套管孔径较小。如何让单发射孔弹实现大孔径同时能够保证穿深就成为了很多研究者关注的问题。Lee<sup>[3]</sup>利用 Euler 方法设计了油井射孔弹并研究了不同类型射孔弹的性能。赵云涛等<sup>[4]</sup>以大孔径射孔弹为例,用试验的方法研究了药型罩各参数对射孔弹射孔性能的影响。李磊等<sup>[5]</sup>设计了一种双锥药型罩与双向装药结构相结合的聚能射孔弹模型,通过数值模拟方法研究其射流成型机理并进行侵彻实验,结果显示,该射孔弹侵彻性能优越。罗宏伟等<sup>[6]</sup>设计出一种多锥角形药型罩,应用该药型罩结构,研制出了 89 型、102 型、127 型射孔弹,在一定程度上实现了套管孔径大、穿孔深度深的设计目的。

由射流对金属靶板的侵彻可知,射流在对非金属材料靶板的侵彻时,将会使孔道周围的密度增加,形成压实带<sup>[7]</sup>,这对射孔弹作业是非常不利的。使用球锥结合药型罩结构,能够有效地把球形和锥形药型罩的优点很好地结合起来,更有利于射流的形成和侵彻。其形成射流的原理是:射孔弹爆炸时,锥形前

驱罩形成的环形初始射流喷射速度很快,为随后半球形主药型罩产生的主射流打开了一个通道,从而对孔道周围的岩土介质进行二次做功,减少射孔时流体带来的影响,达到穿孔深、孔径大的效果<sup>[8-9]</sup>。

本文主要从理论分析和数值计算上切入,采用 ALE(Arbitrary Lagrange-Eulerian)算法对球锥结合药型罩聚能射孔弹射流形成的过程进行数值模拟,对比了不同前驱药型罩锥角对射孔弹射流形成的影响,比较了球锥结合药型罩与半球形药型罩形成射流的特点,通过试验验证,分析这种新型球锥形药型罩石油射孔弹在进行深穿孔、大孔径射孔方面的可行性。

## 1 理论分析

### 1.1 侵彻理论

聚能射流侵彻钢、铝、混凝土等靶板的前期过程中,射流与靶板之间界面处产生的压力约高于靶板强度特性参数 1~2 个量级,所以此时射流和靶板的材料强度都可忽略不计。记单元长度为  $l$ ,其初始速度为  $v_j$ ,侵彻靶板的速度为  $u_x$ 。聚能射流侵彻靶板之前和侵彻过程中,在射流/靶板界面处高压力的作用下,聚能射流被“消蚀”,其材料朝着与射流运动速度相反的方向流出,靶板材料被射流从高压区“压挤”出来。

考察聚能射流和靶板材料都是理想不可压缩流体的情形,射流侵彻过程是定常的,可以适用 Bernoulli 方程:

\* 收稿日期:2014-08-07

作者简介:陈兴(1987~),男,硕士研究生,研究方向为石油射孔技术。E-mail:cx5862187@163.com

$$\frac{1}{2}\rho_j(v_j - u_x)^2 + p_j = \frac{1}{2}\rho_t u_x^2 + p_t = p_x \quad (1)$$

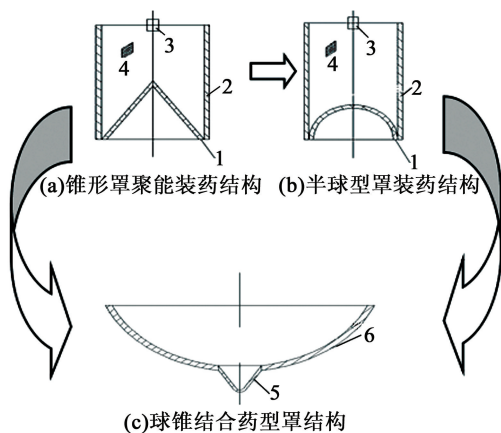
式中:  $p_j$ 、 $\rho_j$  分别是射流的初始压力和密度;  $p_t$ 、 $\rho_t$  分别是靶板的初始压力和密度;  $p_x$  是射流/靶板界面点  $x$  处的压力, 射流和靶板在该处的速度为零。

在射流侵彻过程的前期, 定常射流侵彻理论还是适用的, 在碰撞点产生的压力足够高, 可忽略射流和靶板的强度。但在后期, 射流速度变慢, 需考虑射流和靶板的强度; 由于此过程中金属射流已被加热到很高的温度, 其材料的强度比靶板低得多, 可以认为  $p_j \approx 0$ ,  $p_t = Y$ , 其中  $Y$  是综合考虑各种因素的一个特性参数, 此时修正的 Bernoulli 方程为:

$$\frac{1}{2}\rho_j(v_j - u_x)^2 = \frac{1}{2}\rho_t u_x^2 + Y \quad (2)$$

## 1.2 设计思路

当前, 小锥角圆锥形、大锥角圆锥形、半球形等形状的药型罩常被应用于石油射孔弹中, 因不同形状药型罩形成的射流特征各异, 圆锥形或半球形等单一结构的药型罩不能使射孔弹爆炸后同时实现套管孔径大、穿孔深度深的穿孔性能<sup>[10]</sup>, 根据能量相互利用原理, 结合射流的形成和侵彻过程, 设计了一种球锥结合药型罩结构(图1)。



1 - 药型罩; 2 - 外壳; 3 - 起爆点; 4 - 炸药;  
5 - 锥形药型罩; 6 - 半球型药型罩

图1 新型球锥结合药型罩设计思路

Fig. 1 Design idea of the new hemispheric-conical shaped charge

## 2 有限元模型和计算参数

### 2.1 模型的基本结构

在 LS-DYNA 中建模(图2)。该模型由炸药、药型罩、空气 3 部分组成, 采用 Euler 网格和 ALE 算法<sup>[11]</sup>。药型罩厚度为 1 mm, 锥角分别为 30°、35°、40°、45°和 50°。

### 2.2 材料模型及参数

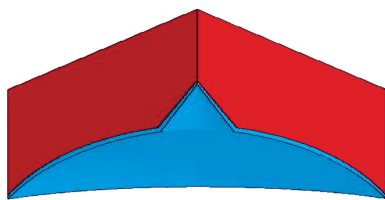


图2 聚能装药结构模型

Fig. 2 Structure model of shaped charge

炸药爆炸的控制方程采用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程<sup>[12]</sup>。

本研究选用 TNT 高能炸药, 相关计算参数为:  $\rho = 1.64 \text{ g/cm}^3$ ,  $D = 0.693 \text{ cm/}\mu\text{s}$ ,  $p = 27.0 \text{ GPa}$ ,  $A = 374.0 \text{ GPa}$ ,  $B = 3.23 \text{ GPa}$ ,  $R_1 = 4.150$ ,  $R_2 = 0.950$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $E = 0.07$ 。

铜药型罩的密度为  $8.96 \text{ g/cm}^3$ , 剪切模量为  $47.7 \text{ GPa}$ , 使用 Johnson-Cook 材料模型<sup>[13]</sup>。该模型采用 Gruneisen 状态方程来描述其动态响应过程<sup>[12]</sup>。相关计算参数为:  $A = 90 \text{ MPa}$ ,  $B = 292$ ,  $n = 0.31$ ,  $C = 0.025$ ,  $m = 1.09$ ,  $C_0 = 3940 \text{ m/s}$ ,  $S_1 = 1.49$ ,  $S_2 = S_3 = 0$ ,  $r_0 = 1.99$ ,  $a = 0$ 。

空气材料选用 Gruneisen 状态方程和 Null 本构模型进行计算, 相关参数为:  $C_0 = 0.034$ ,  $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ ,  $r_0 = 1.4$ ,  $a = 0$ 。

## 3 数值模拟射流形成过程及结果分析

### 3.1 过程分析

利用 LS-DYNA 模拟了药型罩材料为铜、锥角分别为 30°、35°、40°、45°、50°的射孔弹射流形成的过程。起爆后, 爆轰波首先到达上部锥型前驱罩, 在强爆轰压力的作用下, 锥型前驱罩的锥顶开始逐渐闭合, 而中间部分向轴线运动, 随着爆轰波继续传播, 锥型前驱罩的更多部分完成闭合过程, 形成高速前驱射流。当爆轰波到达半球形药型罩部分时, 这部分药型罩开始逐渐闭合, 且不断地向轴线处挤压, 形成速度较高的主射流。聚能射流在到达装药的焦点处时, 具有最大的密度和速度及最小的剖面, 而后射流膨胀, 速度和密度也会相对减小, 直到形成高速聚能射流。

图3和图4给出了锥角为 40°、50°,  $t = 8$ 、14、19、25  $\mu\text{s}$ 时刻  $y$  方向的速度等值线。

图5给出了聚能射流形成过程中  $t = 36$ 、69、97  $\mu\text{s}$ 时的压力等值线, 显示了从  $t = 36 \sim 97 \mu\text{s}$  射流的形态及金属射流流体中压力的变化情况。当  $t = 36 \mu\text{s}$  时, 炸药爆轰基本完成, 药型罩受爆炸产物作用以较大的速度向装药轴线处闭合, 此时射流头部刚刚形成;  $t = 69 \mu\text{s}$  时, 射流“两翼”中间附近压力值显示最大负值, 则说明这部分的流体受拉力作用, 如

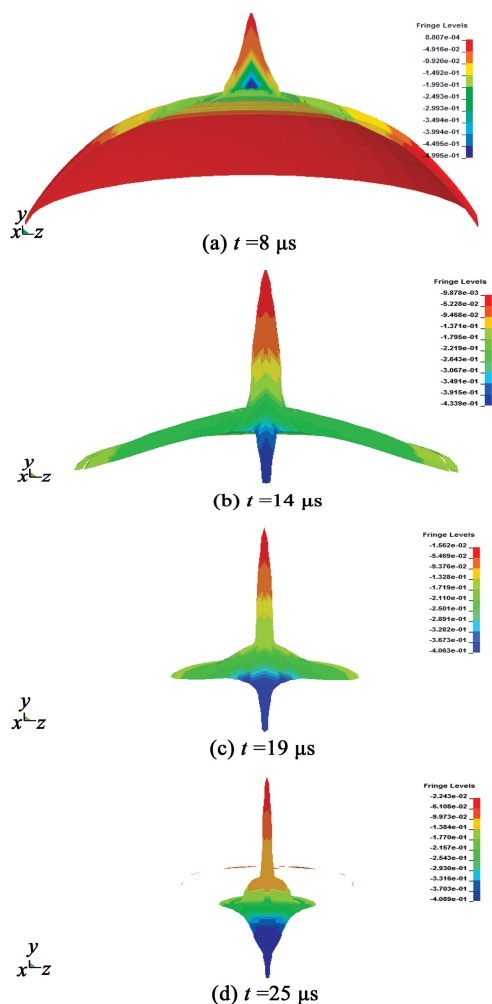


图 3 锥角 40°聚能射流形成的过程和  
y 方向的速度等值线

Fig. 3 Formation of jet and velocity contour  
at y direction at 40° cone angle

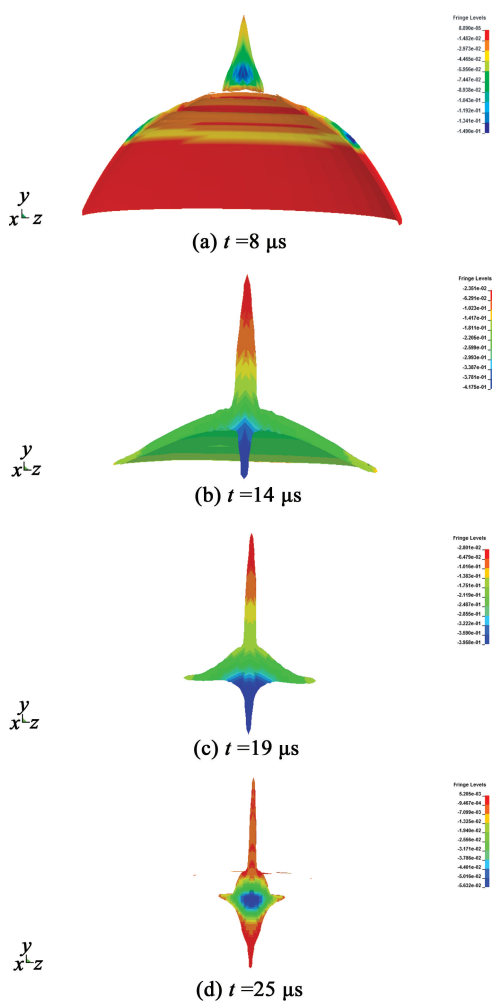


图 4 锥角 50°聚能射流形成的过程和  
y 方向的速度等值线

Fig. 4 Formation of jet and velocity contour  
at y direction at 50° cone angle

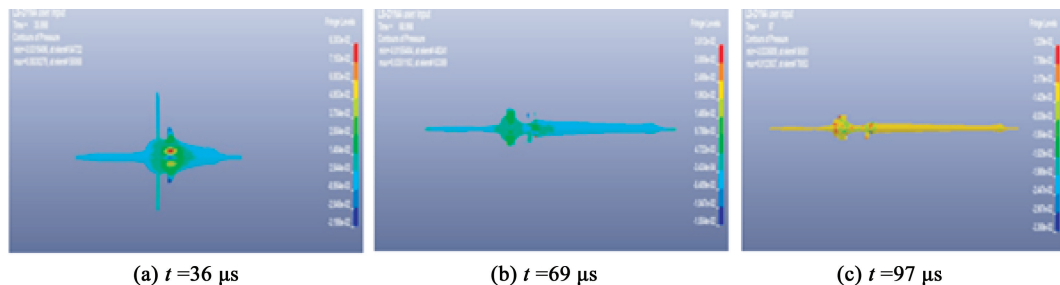


图 5 聚能射流形成过程的压力等值线

Fig. 5 Pressure contour of formation process of shaped charge jet

果持续射流的发展过程,射流“两翼”最后会在翼中间首先被拉断。由于装药中心部分炸药的威力较边缘处更大,所以金属罩“两翼”边缘处位移变化不大。杵体的质量在射流拉伸过程中不断增加,最后趋于稳定; $t = 97 \mu\text{s}$  时,射流正中央处的压力云图颜色最深,压应力最大,射流中间仍聚集了大量的能量,杵体及“两翼”的金属射流体继续向装药轴线处

汇集。比较图 5 中各时刻的射流压力变化,由图 5 中颜色深浅可知,作用于整个射流体的压力值不断减小,当射流最后拉伸破坏时,射流整体受力大部分表现为拉力。

当射流侵彻混凝土靶板时,前驱射流头部首先撞击靶板,在靶中建立高温、高压、高应变率(三高)区域,主射流对靶板的三高区域继续侵彻,进行进一

步扩孔,此时的靶板处于高温状态,强度下降。随着射流受到的阻力加大,其速度也大大减小,扩孔能力逐渐降低,靶板强度的作用逐渐变得明显起来。当射流推不开前方射流与靶板碰撞产生的残渣时,射流将作用在残渣上,致使侵彻过程停止。

3.2 锥角角度对射流形成的影响

表 1、表 2、图 6 是聚能射流头部射流和主射流的最大速度受不同药型罩锥角的影响情况。结合图 3 和图 4,可以很直观地观察到球锥结合新型药型罩形成射流的形状、前驱射流的速度和主射流的速度与前驱罩顶端锥角有着密不可分的关系。前驱罩锥角角度越小,形成的前驱射流形状越细长,前驱射流的头部速度和主射流的速度都越大;角度越大,形成

表 1 不同前驱罩锥角不同时刻头部射流速度

Tab. 1 Velocity of jet head with different precursory liner cone angles at different times

( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\theta/(^{\circ})$	8 $\mu\text{s}$	14 $\mu\text{s}$	19 $\mu\text{s}$	25 $\mu\text{s}$
30	6.3	6.2	6.0	5.8
35	6.1	6.0	5.9	5.7
40	5.0	4.7	4.6	4.5
45	4.9	4.6	4.5	4.4
50	4.8	4.5	4.5	4.4

表 2 不同前驱罩锥角不同时刻主射流速度

Tab. 2 Velocity of primary jet with different precursor liner cone angles at different times

( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\theta/(^{\circ})$	8 $\mu\text{s}$	14 $\mu\text{s}$	19 $\mu\text{s}$	25 $\mu\text{s}$
30	不明显	3.7	4.2	4.6
35	不明显	3.5	4.1	4.4
40	不明显	3.4	3.8	4.2
45	不明显	3.4	3.7	4.0
50	不明显	3.2	3.5	4.0

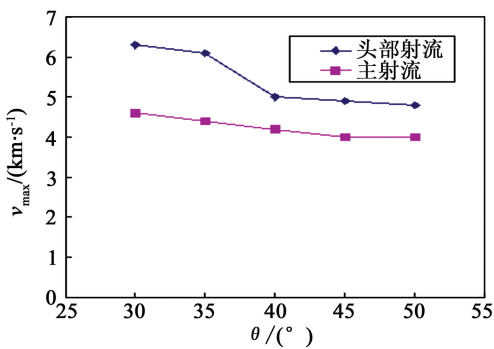


图 6 药型罩锥角对聚能射流头部射流和主射流最大速度的影响

Fig. 6 The maximum velocity of shaped charge jet with different cone angles

的前驱射流形状越短粗,前驱射流的头部速度和主射流的速度都越小。前驱罩锥角 $40^{\circ}$ 比锥角 $30^{\circ}$ 速度降低了 26%,直径提高了 8.1%,锥角 $40^{\circ}$ 比锥角 $50^{\circ}$ 速度提高了 4.1%,直径降低了 3.4%。

3.3 半球形药型罩与球锥结合药型罩的射流速度对比分析

由图 7 可知,在射流形成的初期阶段, $t = 16 \mu\text{s}$  时,半球形药型罩形成一个凸起并逐渐向药型罩轴线汇聚。随着射流的逐渐形成, $t = 24 \mu\text{s}$  时,药型罩逐渐翻转,通过观察压力变化,发现部分能量出现回流,从而形成两股射流,一股向前形成射流,另一股后退形成杵体。经过一段时间和距离, $t = 49 \mu\text{s}$  时,射流出现颈缩断裂。半球形药型罩头部速度的最大值为  $4.0 \text{ km/s}$ ,其速度随着射流的拉伸逐渐减小,规律与具有前驱罩的球锥结合药型罩一致。

$40^{\circ}$ 球锥形药型罩头部速度的最大值为  $5.0 \text{ km/s}$ ,比半球形药型罩提高了 25%; $50^{\circ}$ 球锥形药型罩头部速度的最大值为  $4.8 \text{ km/s}$ ,比半球形药型罩提高了 20%。半球形药型罩射流直径为  $2.107 \text{ mm}$ ;  $40^{\circ}$ 球锥形药型罩射流直径为  $2.161 \text{ mm}$ ,比半球形药型罩射流直径提高了 2.6%; $50^{\circ}$ 球锥形药型

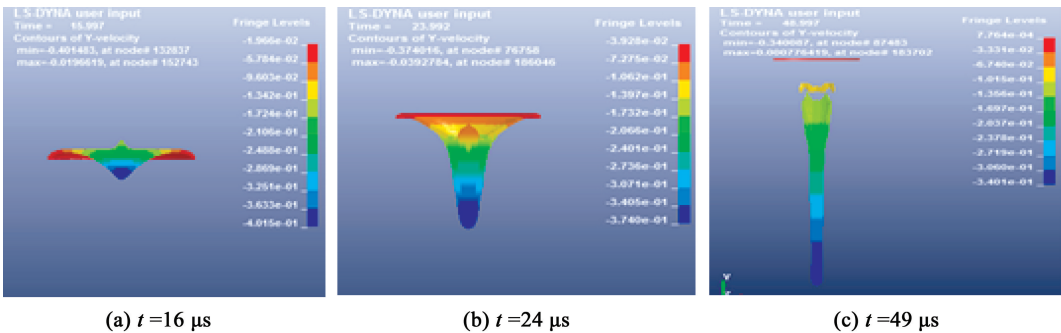


图 7 半球形药型罩射流形成过程的速度云图

Fig. 7 Jet formation velocity diagram of hemispheric liner



罩射流直径为 2.236 mm,比半球形药型罩提高了 6.1%。

4 试验验证

4.1 药型罩的制造

试验中采取的方法是先用铜制造完整的主药型罩,药型罩底边边缘的直径为 60 mm,在药型罩的顶端开一个直径为 15 mm 的开口,再制造锥形前驱罩,材料与主药型罩相同,底边边缘直径为 15 mm,该前驱罩的顶角角度分别为 40°和 50°,高度为 21 mm 和 16 mm,前驱罩和主药型罩的壁厚都为 1 mm。主药型罩和前驱罩之间用环氧树脂进行粘合。

4.2 试验方法

采用地面模拟井下射孔装置进行验证试验。在相同养护条件下制作同一批次的混凝土靶,试验中为了防止混凝土靶严重碎裂影响试验数据采集以及模拟的井下环境更加逼真,使用金属外构架对混凝土靶进行固定<sup>[14-15]</sup>。利用导爆索引爆射孔弹,产生的射流穿过枪身、套管,在混凝土靶上形成射孔孔眼,通过测量枪身的射孔孔径和混凝土靶的射孔深度,获取试验数据。

4.3 试验结果分析

为了试验数据的可靠、准确,对 40°球锥结合药型罩射孔弹、50°球锥结合药型罩射孔弹和半球形药型罩射孔弹分别进行了 6 次射孔弹侵彻混凝土靶试验,混凝土靶受到侵彻的效果如图 8 所示。

表 3 为试验结束后对每次射孔弹侵彻的孔径和深度进行测量的结果。

将表3中的数据进行对比可知,前驱罩锥角为 40°的新型球锥结合药型罩射孔弹平均射孔的深度为 535 mm,平均射孔孔径为 22.6 mm,平均射孔体积为 214.51 cm<sup>3</sup>;锥角为 50°时射孔的平均射孔深度为 485 mm,平均射孔孔径为 23.2 mm,平均射孔



(a)40°球锥结合药型罩



(b)50°球锥结合药型罩



(c)半球型药型罩

图 8 药型罩侵彻混凝土靶效果图

Fig. 8 Test effects of the concrete target penetrated by perforating charge

体积为 204.92 cm<sup>3</sup>;半球形药型罩射孔的平均射孔深度为 423 mm,平均射孔孔径为 22.0 mm,平均射孔体积为 160.71 cm<sup>3</sup>。40°球锥形药型罩射孔的孔深比半球形罩提高了 26.4%,射孔孔径提高了 2.72%,射孔体积提高了 33.5%。50°球锥形药型罩射孔的孔深比半球形罩提高了 14.6%,射孔孔径提高了 5.45%,射孔体积提高了 27.51%。40°球锥形药型罩射孔的孔深比 50°球锥形药型罩提高了 10.3%,孔径减小了 2.58%,射孔体积提高了 4.70%。

5 结论

1)前驱射流头部速度随锥角的增大而降低,前驱罩顶角的锥角由 35°至 40°时,速度大幅度降低;40°至 50°射流的头部速度平稳下降;30°至 40°射流断裂较快,不利于侵彻。前驱罩锥角从 30°增大到 50°的过程中,其射孔深度逐渐下降,射孔孔径逐渐

表 3 射孔弹验证试验结果

Tab. 3 Experiment results of perforating charge

		mm						
药型罩类型	参数	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	平均
40°球锥	射孔深度	527	538	544	518	547	536	535
	枪管孔径	12.8	12.8	12.7	12.9	13.0	12.6	12.8
	射孔孔径	21.8	22.4	23.1	22.7	23.0	22.8	22.6
50°球锥	射孔深度	487	493	476	479	501	473	485
	枪管孔径	13.0	12.7	12.9	12.7	12.9	12.7	12.8
	射孔孔径	23.6	22.8	23.1	22.3	23.8	23.8	23.2
半球形	射孔深度	416	432	419	414	433	423	423
	枪管孔径	12.8	12.7	12.9	12.8	13.0	12.8	12.8
	射孔孔径	21.2	21.8	22.1	23.3	21.9	21.8	22.0

增大。所以,前驱罩顶角的锥角最佳选择范围为 $40^{\circ}$ 至 $50^{\circ}$ 。

2)球锥结合药型罩射孔弹可以扩大孔径、提高穿深、增大射孔体积。随着前驱罩锥角不断增大,穿深和孔径此消彼长,但射孔体积在一定范围内变化不大,相对传统半球形药型罩有很大提高。试验中, $40^{\circ}$ 和 $50^{\circ}$ 球锥结合药型罩射孔弹在穿深、孔径、射孔体积大小等方面都优于传统的半球形药型罩射孔弹,具有较高的研究价值。

3)球锥结合药型罩石油射孔弹可以将半球形药型罩与圆锥形药型罩的良好品质很好地结合起来,能够通过套管结构,使射流利用流体的能量,在穿过流体空隙时进一步扩大射孔,达到大孔径、深穿孔的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 安丰春,杨玉玲.大庆油田复合射孔工艺技术的研究与应用[J].兵工学报,2005,26(1):82-85.  
An Fengchun, Yang Yuling. The investigation and application of combined perforating technology in Daqing oil field [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(1): 82-85.
- [2] 王艳萍,黄寅生,姜延东.大孔径石油射孔弹性能的实验研究[J].火炸药学报,2002(3):79-80.  
Wang Yanping, Huang Yinsheng, Jiang Yandong. Experimental study of big entry hole charge for petroleum [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002(3): 79-80.
- [3] Lee W H. Oil well perforator design using 2D Eulerian code[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(5): 535-559.
- [4] 赵云涛,徐文新,周翌,等.药型罩对射孔弹射孔性能的影响[J].测井技术,2005,29(增刊):37-39.  
Zhao Yuntao, Xu Wenxin, Zhou Zhao, et al. The effect of liner on performance of perforating charge [J]. Well Logging Technology, 2005, 29( supp. ): 37-39.
- [5] 李磊,沈兆武,马宏昊.大孔径双向聚能射孔弹的研究[J].高压物理学报,2011,25(6):539-548.  
Li Lei, Shen Zhaowu, Ma Honghao. Study on big entry hole bidirectional shaped charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(6): 539-548.
- [6] 罗宏伟,郭鹏,涂良.系列大孔径深穿透射孔弹研制[J].钻采工艺,2010,33(增刊):72-75.  
Luo Hongwei, Guo Peng, Tu Liang. Development for series of large diameter deep penetrating perforator [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33( supp. ): 72-75.
- [7] 李东传,唐国海,孙新波,等.射孔压实带研究[J].石油勘探与开发,2000,27(5):112-114.  
Li Dongchuan, Tang Guohai, Sun Xinbo, et al. A study on perforation crushed-zone [J]. Petroleum Exploration and

Development, 2000, 27(5): 112-114.

- [8] 张子敏,许碧英,阎峰,等.活性金属药型罩射孔弹破甲试验研究[J].爆破器材,2013,42(4):53-56.  
Zhang Zimin, Xu Biying, Yan Feng, et al. Penetrating test of active metal charge liner perforating bullet [J]. Explosive Materials, 2013, 42(4): 53-56.
- [9] 汪得功,李文彬,王晓鸣,等.单锥罩成型装药环起爆对侵彻体形成的影响研究[J].兵工学报,2009,30(8):1014-1018.  
Wang Degong, Li Wenbin, Wang Xiaoming, et al. Research on the influence of annular initiation on penetrator formation of shaped charge conical liners [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8): 1014-1018.
- [10] 李磊,马宏昊,沈兆武.基于正交设计方法的双锥罩结构优化设计[J].爆炸与冲击,2013,33(6):567-573.  
Li Lei, Ma Honghao, Shen Zhaowu. Optimal design of biconical liner structure based on orthogonal design method [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 567-573.
- [11] 吴焕龙,杜明章,杨超,等.射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析[J].爆破器材,2012,41(2):30-33.  
Wu Huanlong, Du Mingzhang, Yang Chao, et al. Numerical simulation and experimental analysis of shaped charge jet penetrating into steel target [J]. Explosive Materials, 2012, 41(2): 30-33.
- [12] 金玮玮,张昭,张洪武.药型罩锥角对射孔枪射流冲击过程的影响[J].计算力学学报,2011,28(增刊):43-48.  
Jin Weiwei, Zhang Zhao, Zhang Hongwu. Effect of liner cone angle on perforation and impact process of perforating gun [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28( supp. ): 43-48.
- [13] 吴焕龙.装药与药型罩分离对射孔弹穿深影响的规律研究[J].爆破器材,2014,43(1):38-42.  
Wu Huanlong. Law study on the influence of charging and liner separation to penetration depth of perforating charge [J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 38-42.
- [14] 徐伟芳,张方举,陈裕泽,等.混凝土薄板的侵彻破坏响应实验[J].爆炸与冲击,2013,33(2):169-174.  
Xu Weifang, Zhang Fangju, Chen Yuze, et al. Experimental study on penetration responses of thin concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 169-174.
- [15] 常一超,刘恩良.具有前驱罩石油射孔弹研究[J].工程爆破,2014,20(2):14-16.  
Chang Yichao, Liu Enliang. Experimental study of petroleum perforation bullet with precursor liner [J]. Engi-

neering Blasting, 2014, 20(2): 14-16.

## Research of a Petroleum Perforating Charge with Hemispheric-Conical Combined Liner

CHEN Xing, LI Rujiang, WAN Tianqi, ZHAO Fangxuan

School of Chemical Engineering and Environment, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] A petroleum perforating charge with hemispheric-conical combined liner was designed. The hemispheric liner was combined with a conical precursory shaped charge. ALE methods were used to numerical simulate the speed and shape of jet, velocity of jet head, and mass of slug of the petroleum perforating charge when the liner material was copper and the cone angle were  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $50^\circ$ . The simulation results were also compared with those of the hemispheric liner. Compared with the liner with  $30^\circ$  cone angle, the jet velocity of liner with  $40^\circ$  cone angle reduces 26% and the diameter improves 8.1%. Compared with the liner with  $50^\circ$  cone angle, the jet velocity of liner with  $40^\circ$  cone angle improves 4.1% and the diameter reduces 3.4%. When the cone angle was  $40^\circ$  and  $50^\circ$ , the velocities of the jet respectively improves 25% and 20% than hemispheric liner, and the diameter respectively improves 2.6% and 6.1%. The test results are similar to the simulation. Relevant fundamental data are provided here for the research and development of large and deep aperture perforating charge.

[KEY WORDS] petroleum perforating charge; hemispheric-conical combined liner; ALE method; cone angle of liner; large diameter; deep penetrating

## 组合膜包覆粒状铵油炸药 通过工信部组织的科技成果鉴定

湖南南岭民用爆破器材股份有限公司和长沙银芒化工科技有限公司合作研究开发的组合膜包覆粒状铵油炸药,于 2014 年 11 月 28 日在南岭民爆双牌分公司通过了由工业和信息化部组织的科技成果鉴定。

工业和信息化部安全生产司、湖南省国防科技工业局的有关领导,由南京理工大学、兵器工业 217 所、安徽江南化工、石家庄成功机电、国家民爆产品检测中心(南京)、淮北爆破技术研究院、中北大学等单位专家组成的鉴定委员会,以及南岭民爆和长沙银芒化工等单位的代表,共 24 人出席了会议。

鉴定委员会听取了研制单位的汇报,审查了相关资料及技术文件,考察了试验线生产现场,并且现场抽测了炸药性能。鉴定委员会肯定了该项科技成果的创新性和技术优势,认为该项目技术填补了国内空白,达到国际先进水平,同意“组合膜包覆粒状铵油炸药的研究与开发”项目通过科技成果鉴定。

组合膜包覆粒状铵油炸药无雷管感度,产品袋装(25 kg/袋),散装使用;爆炸性能较高(猛度 24~26 mm),贮存期较长(6 个月),适用的最小炮孔直径为 25 mm,防潮但不抗水;产品已系列化:1#产品主要适用于露天采矿和工程爆破,以及隧道与巷道掘进的小炮眼爆破;2#产品主要适用于地下开采中的上向中深孔爆破(压气装药);3#产品主要适用于地下开采中的大直径深孔爆破。

(李良科)

## 金奥博、江南化工、马钢罗河矿业 联合研制的“地下现场混装乳化 炸药车”通过科技成果鉴定

2015 年 1 月 27 日至 28 日,安徽江南化工股份有限公司等 3 个单位联合研发的 JWLD-DXRH-II 型地下现场混装乳化炸药车通过工业和信息化部组织的科技成果鉴定,总体技术居国际先进水平。这是近期自江南化工“无固定操作人员智能化粉状乳化炸药生产线”后的第二个国际水准的科技成果。鉴定会在安徽庐江县举行,鉴定委员会由来自南京理工大学、兵器安全技术研究所、国家民用爆破器材质量监督中心、石家庄成功机电有限公司、湖南金能科技有限公司、青岛拓极采矿服务有限公司、山西惠丰特种汽车有限公司、葛洲坝易普力股份有限公司的 8 位专家组成。1 月 28 日上午,与会专家在马钢集团罗河铁矿(庐江县)井下负 560 m 处对 JWLD-DXRH-II 型地下现场混装乳化炸药车和该车进行的地下爆破作业装药过程等进行实地考察,检测了现场混装乳化炸药产品质量;下午在鉴定会场听取了研制单位的项目研发工作和技术总结等报告,审查了相关鉴定文件。经认真质疑及讨论后,得出如下鉴定意见:金奥博、江南化工、马钢罗河矿业联合研发的 JWLD-DXRH-II 型地下现场混装乳化炸药车实现了机械化自动化装填炮孔,可装填直径大于 40 mm、孔深大于 40 m 的上向炮孔,其成果中机械臂遥控找孔、装药管末端混合喷射增黏、上向中深孔装药不返料和故障自诊断系统具有新颖性,总体技术达到国际先进水平,一致同意通过科技成果鉴定。

(汪新平)