文章编号:1000-5773(2011)06-0539-10

大孔径双向聚能射孔弹的研究*

李　磊,沈兆武,马宏昊

(中国科学技术大学近代力学系,安徽合肥　230026)

摘要: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,并计算其射流参数。结果显示:双锥药型罩的小锥角部分形成聚能射流,大锥角部分形成翻转弹丸,射流头部和弹丸的速度分别为 6 250 m/s 和 1 620.9 m/s,弹丸长度和平均直径分别为 26.1 mm 和 8.6 mm。结合数值模拟结果,对射流侵彻公式进行了修正,并利用修正公式预测该射孔弹侵彻钢靶的深度,计算结果为 69.6 mm。最后,按照该模型进行侵彻实验,实验回收弹丸的长度和平均直径分别为 28.1 mm 和 8.8 mm,侵彻钢靶的深度和孔径分别为 70 mm 和 17 mm。实验表明:数值模拟与理论计算方法相结合是可行的,能够有效地计算射孔弹的射流参数并预测其侵彻深度;该射孔弹侵彻性能优越。

关键词:双锥药型罩;双向装药;数值模拟;聚能射流;翻转弹丸;侵彻性能

中图分类号:O358　　**文献标识码**:A

1　引　言

随着陆地及海上油气田的进一步勘探开发,各石油强国对高性能射孔弹的需求日益增加。近十几年来,射孔技术发展很快,并逐渐走向成熟,射孔弹产品的种类及数量不断增加。例如:YD-89 型射孔弹钢靶穿深为 100～140 mm,孔径为 9～11.5 mm,孔密为 13～20 发/米;YD-102 型射孔弹钢靶穿深为 130～140 mm,孔径为 10～12.5 mm,孔密为 13～40 发/米;YD-127 型射孔弹穿深为 160～204 mm,孔径为 10～13 mm,孔密为 10～20 发/米[1]。但这些射孔弹产品在保证穿深的同时不能满足大孔径的要求,射孔密度也较小。所以国内外学者热衷于研究同时具备高穿深、大孔径、高孔密优点的射孔弹。根据能量守恒原理,提高射孔深度必然以牺牲射孔孔径为代价,反之亦然。因此,如何优化射孔弹的装药结构和药型罩形状,对于提高射孔弹装药的能量利用效率尤其重要。

在炸药的爆轰波作用下,板材冲压成型的小锥角药型罩被压合,形成速度较高的射流和速度较低的杵体;而大锥角药型罩向内压合部分显著减少,相应地射流和杵体之间的速度差随之减少[2]。Herd 发现,当半锥角接近 75°时,射流和杵体速度接近,将形成爆炸成型弹丸(EFP)[3]。本研究结合聚能射流与 EFP 的特点,将药型罩设计为小锥角与大锥角相结合的双锥结构。根据能量相互利用原理,将射孔弹弹壳设计为双向装药结构,使得两个弹药孔之间的炸药相互利用,导爆孔位于两个弹药孔的正中间,确保了两个弹药孔内的炸药同时起爆。药型罩结构如图 1 所示,双向聚能射孔弹的装药结构模型如图 2 所示。

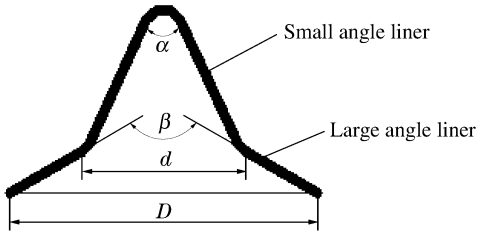


图 1　药型罩结构图

Fig. 1　The sketch of the liner structure

*　**收稿日期**:2010-09-29;**修回日期**:2011-01-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51134012);国家自然科学基金面上项目(51174183)

作者简介:李　磊(1986—),男,博士研究生,主要从事现代爆破技术与安全工程研究. E-mail:lilei46@mail.ustc.edu.cn

自从 1948 年 Birkhoff 等人首次提出射流形成定常理论，到 Pugh 等人基于定常理论提出的非定常理论(PER 理论)[4]，再到目前适用于任意药型罩形状和任意起爆方式的一般射流理论[5]，对于小锥角药型罩的射流理论研究已经十分成熟，然而国内外对于本研究提出的小锥角与大锥角相结合的双锥药型罩的射流成型机理鲜有介绍。本研究利用数值模拟方法研究该双锥药型罩的射流成型机理，并计算其射流参数。然后对不可压缩流体力学理论中的射流侵彻公式稍作修正，结合数值模拟结果，计算该射孔弹的侵彻钢靶深度。最后，通过实验验证数值模拟、理论计算方法的可行性，以及检验该双向聚能射孔弹的侵彻性能。

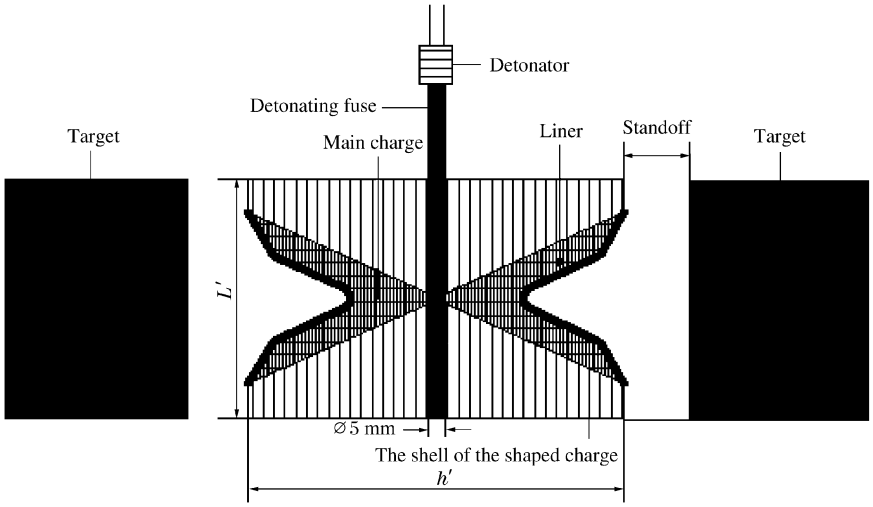


图 2 射孔弹装药结构示意图

Fig. 2 The sketch of the shaped charge structure

2 模型设计

射孔弹主要由弹壳、主装药、药型罩和起爆装置组成。模型中药型罩材料为紫铜，弹壳设计为圆柱形，在圆柱的两个端面分别布置一个圆锥形的弹药孔，两个弹药孔之间通过一个导爆孔连接，导爆孔内安装一个导爆索，用来起爆主装药。每个弹药孔的底部分布一个双锥药型罩。图 2 为模型结构设计示意图。其具体结构尺寸设计值见表 1，表中 β 为大锥角药型罩的锥角，D 为大锥角药型罩底面直径，α 为小锥角药型罩锥角，d 为小锥角药型罩底面直径，δ 为药型罩厚度，ρ_0 为药型罩密度，h' 为总装药高度，L' 为弹壳直径，Φ 为导爆孔直径。

表 1 射孔弹结构尺寸

Table 1 Sizes of the shaped charge structure

β/(°)	D/(mm)	α/(°)	d/(mm)	δ/(mm)	ρ_0/(g/cm^3)	h'/(mm)	L'/(mm)	Φ/(mm)
120	50	50	25	1.7	8.93	110	70	5

3 数值模拟

利用 LS-DYNA 软件，对如图 2 所示的射孔弹模型的射流形成过程进行二维数值模拟。采用二维轴对称与二维自适应算法，采用单面自动接触。利用模型的对称性，只模拟单向射流过程，并忽略弹壳的影响。

数值模拟中，射孔弹主装药为 RDX/TNT(4∶1)混合炸药，密度为 ρ=1.59 g/cm^3。

3.1 混合炸药的爆速与爆压计算

将混合炸药各组分的 φ 值代入公式(1),计算出混合炸药的 φ_m 值,再由 Kamlet 公式(2)、公式(3)分别计算混合炸药的爆速与爆压[6]。

$$\varphi_m = \sum \varphi_i \omega_i \tag{1}$$

$$D_0 = 1.01 \varphi_m^{1/2}(1 + 1.30\rho) \tag{2}$$

$$p_0 = 1.558 \rho^2 \varphi_m \tag{3}$$

式中:φ_m 为混合炸药的特性值,φ_i 为混合炸药中组分 i 的特性值,RDX 特性值为 6.784[6],TNT 特性值为 4.838[6],ω_i 为混合炸药中组分的质量分数,D_0 为混合炸药的爆速,ρ 为混合炸药的密度,p_0 为混合炸药 Chapman-Jouget 爆压。

将各参数值代入公式(1)~公式(3),计算得:$\varphi_m = 6.3948$,$D_0 = 7.82$ km/s,$p_0 \approx 25$ GPa。

3.2 炸药和药型罩的模型与状态方程

炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 EOS_JWL 状态方程。药型罩采用 MAT_STEINBERG 模型和 EOS_Grüneisen 状态方程。具体参数见表 2、表 3 和表 4。

炸药状态方程(JWL)[7-8]

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \mathrm{e}^{-R_1 v} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \mathrm{e}^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \tag{4}$$

式中:p 为爆轰压力,e 为炸药单位质量内能,v 为比容,A、B、R_1、R_2、ω 为状态方程参数。

药型罩状态方程(Grüneisen)[9-11]

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}\right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \tag{5}$$

式中:C 为 v_s-v_p 曲线的截距,S_1、S_2、S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率系数,v_s 为冲击波速度,v_p 为质点速度,γ_0 为 Grüneisen 系数,a 为对 Grüneisen 因数的一阶体积修正因子,E 为药型罩单位体积内能,体积变化率 $\mu = (\rho - \rho_0)/\rho_0$。

表 2 炸药材料模型和状态方程参数

Table 2 Parameters of MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN and JWL_EOS

ρ/(g/cm^3)	D_0/(km/s)	p_0/(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	e_0/(kJ/g)
1.59	7.82	25	581.4	6.801	4.1	1.0	0.35	5.6

Note: ρ—Mass density, D_0—Detonation velocity, p_0—Chapman-Jouget pressure, e_0—Initial internal energy per unit mass.

表 3 药型罩材料参数

Table 3 Parameters of MAT_STEINBERG

ρ_0 /(g/cm^3)	G_0 /(GPa)	B /(s^2 · kg$^{-2/3}$)	b' /(s^2 · kg$^{-2/3}$)	h	f	A /(g/mol)	T_{mo} /(K)	γ_0	σ_0 /(GPa)
8.93	47.7	2.83	2.83	3.77×10^{-4}	0.001	63.5	1.356	2.02	0.12

Note: ρ_0—Mass density, G_0—Basic shear modulus, b, b', h, f—The parameters of the basic shear modulus and yield strength equations, A—Atomic weight, T_{m0}—Melting temperature, γ_0—The parameter of the cold compression energy equation, σ_0—Initial yield stress.

表 4 药型罩状态方程参数

Table 4 Parameters of Grüneisen_EOS

C	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	E_0	V_0
0.394	1.49	0	0	2.02	0.47	0	1

Note: E_0—Initial internal energy per unit volume, V_0—Initial relative volume.

3.3 药型罩小锥角底面半径理论验算

采用有效装药绝热压缩法[12]，假设：(1) 炸药瞬时全部爆轰，且稀疏波沿装药表面内法线向爆炸产物内部传播；(2) 爆炸产物以稀疏波的初始交界面为刚性边界做定向膨胀，并由此确定有效装药量；(3) 药型罩的闭合运动是有效装药部分向内绝热膨胀做功的结果。

按上述假设一般可用装药剖面围的各个角平分线划定有效装药，该射孔弹装药的局部有效装药如图 3 所示。以罩微元 i 为对象进行计算，由文献[12]

$$v_{0i}=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{\rho_{ei}b_{ei}}{2\rho_{0i}b_i}\left[1-\left(\frac{b_{ei}}{b_{ei}+h_i}\right)^2\right]} \tag{6}$$

式中：b_i 为 i 微元的药型罩厚度；ρ_{0i} 为药型罩密度，即 ρ_0；v_{0i} 为罩微元所能达到的最大速度；ρ_{ei} 为装药密度，即 ρ；b_{ei} 为 i 微元的有效装药厚度；h_i 为罩微元闭合到轴线的运动距离。

由图 3 中的几何关系，得

$$b_{ei}=\frac{(R-r)\tan(\alpha/2)}{\sin\alpha} \tag{7}$$

$$h_i=\frac{r}{\cos\alpha} \tag{8}$$

式中：R 为大锥角药型罩的底面半径，r 为小锥角药型罩的底面半径，α 为小锥角药型罩的半锥角。

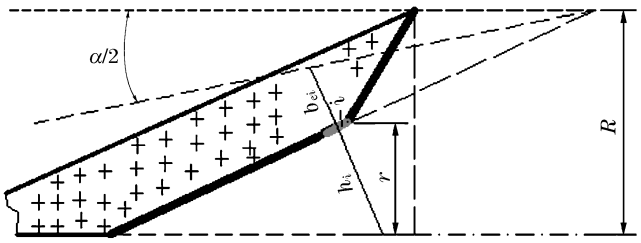


图 3 聚能射孔弹的局部有效装药图

Fig. 3 Equivalent charge of the shaped charge

只有一小部分罩微元的有效装药厚度小于实际装药厚度(见图 3)，故计算中取 b_{ei} 为实际平均装药厚度(7.93 mm)。

只有当 v_{0i} 大于某一 v_0 时，小锥角聚能罩锥底才能与大锥角聚能罩进行有效复合，而不在稀疏波作用下飞散[12-13]。已知：$\alpha=25°$，$r=12.5$ mm，$b_{ei}=7.93$ mm，$\rho_{0i}=8.93$ g/cm^3，$D_0=7.82$ km/s，$\rho_{ei}=1.59$ g/cm^3，根据参考文献[12]，$v_0=1.3$ km/s。联立方程(6)～方程(8)，计算得 $v_{0i}=2.342$ km/s，可知 $v_{0i}>1.3$ km/s。因此小锥角药型罩的底面半径设计值符合理论要求。

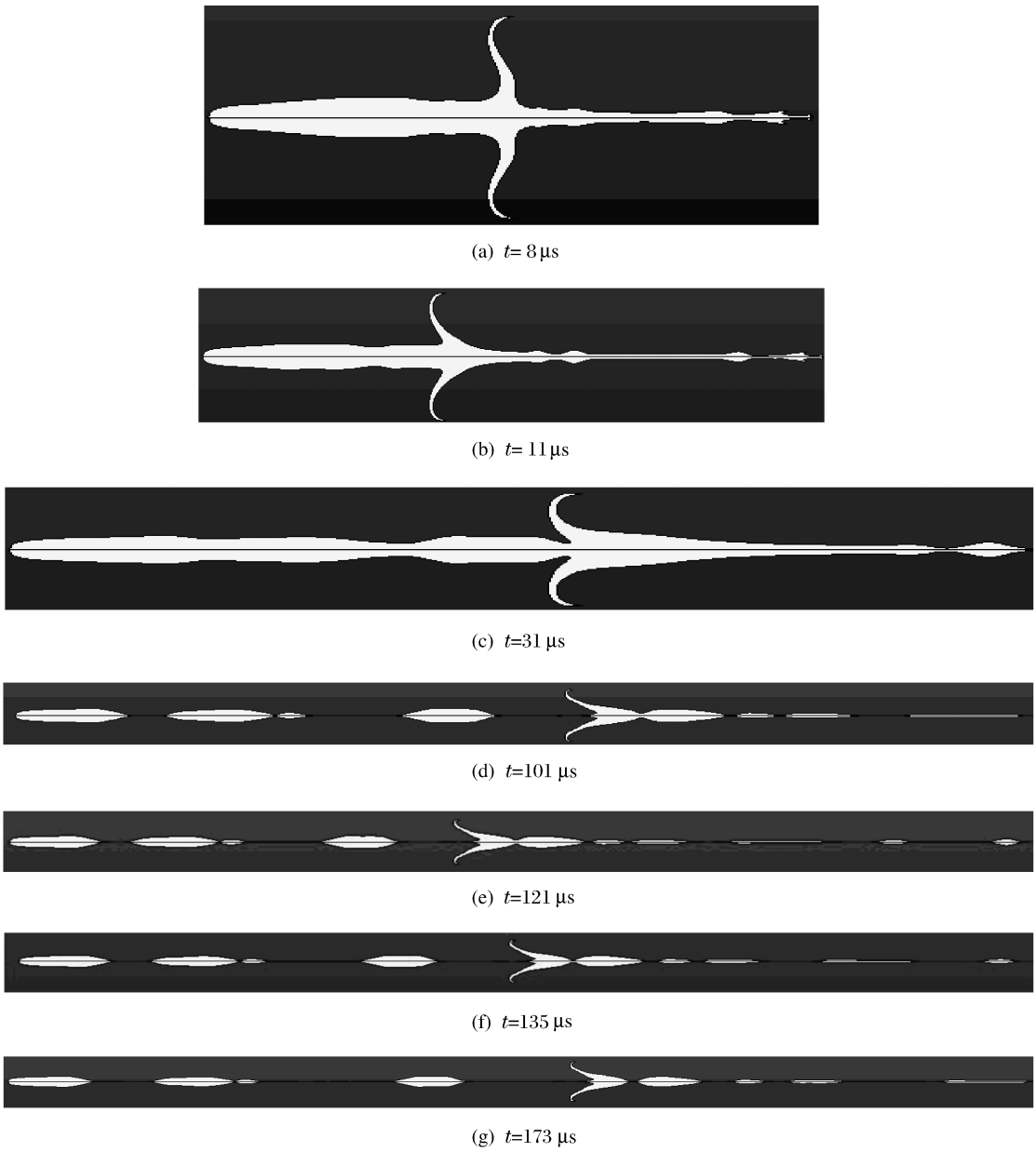
3.4 药型罩小锥角底面半径理论验算

以射流头部到达药型罩底部端口为零时刻，截取不同时刻的数值模拟结果如图 4 所示，对应各个时刻射流速度如表 5 所示。图 5 为翻转弹丸，其稳定飞行速度为 1620.9 m/s，长度为 26.1 mm，平均直径为 8.6 mm。

表 5 射流头部及尾部单元速度

Table 5 Velocities of the jet tip and tail unit

Time/(μs)	Jet tip speed/(m/s)	Jet tail speed/(m/s)	Time/(μs)	Jet tip speed/(m/s)	Jet tail speed/(m/s)
8	6250	2383	121	6177	1652
11	6214	2348	135	6170	1660
31	6196	1980	173	6161	1621
101	6183	1671			



(a) t= 8 μs

(b) t= 11 μs

(c) t=31 μs

(d) t=101 μs

(e) t=121 μs

(f) t=135 μs

(g) t=173 μs

图 4　数值模拟结果(以射流头部到达药型罩底部端口为零时刻)

Fig. 4　The results from numerical simulations(Time is zero when the jet tip arrives at the liner's bottom port)

3.5　数值模拟射流形成过程分析

在数值模拟中以主装药中心为起爆点,所以球形爆轰波从主装药中心同时向射孔弹两边传播。爆轰波首先到达上部小锥角药型罩,在强爆轰压力的作用下,小锥角药型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,小锥角药型罩的更多部分完成闭合过程,形成高速射流。在射流形成的初期,因为药型罩顶部微元的压合距离小,导致该部分微元射流速度小于后续的射流微元速度,进而后续射流微元赶上前面的射流微元,导致射流头部形成"蘑菇形"。当爆轰波到达大锥角药型罩部分时,这部分药型罩开始翻转(见图 4(a)),不再发生罩内外壁的能量重分配,也不区分为射流和杵体两部分,而是翻转压合成一个高速弹丸(见图 4(g))。由数值模拟结果可以看出,在 8 μs 时刻射流已经完全形成,射流的头部单元速度达到 6 250 m/s,而尾部射流单元速度仅为 2 383 m/s,由于射流速度梯度较大,射流不断延伸拉长,射流出现颈缩现象,如图 4(b)、图 4(c)所示。射流头部在空气中产生强烈的弹道波,并伴随着激烈的摩擦和燃烧。随后射流头部速度稍有下降,杵体速度略有增加,由于射流速

度仍远高于杵体速度，所以射流在运动中不断延伸、断裂和分散，并且与杵体渐渐开始分离（见图 4(d)、图 4(e)），随后射流头部速度进一步下降，同时下部大锥角药型罩在爆轰波以及惯性的作用下进一步做翻转以及向轴线压合运动。在 101 μs 时刻翻转弹丸已初具模型（见图 4(d)），弹丸跟随射流向前运动，此时弹丸与射流尚未分开，在 121 μs 时刻弹丸完全成型，因为翻转弹丸的速度低于射流速度，所以射流与弹丸开始逐渐分离（见图 4(e)、图 4(f)、图 4(g)），在 173 μs 时刻射流与弹丸完全分离，此时弹丸不再发生变形，而以一定的速度稳定飞行（见图 5）。

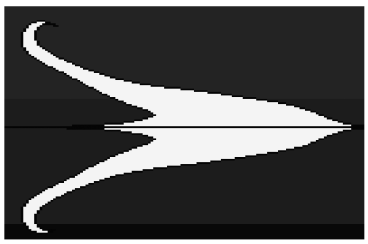


图 5 翻转弹丸

Fig. 5 The sketch of the projectile

当侵彻靶板时，射流头部首先撞击靶板，产生高压，从碰撞点向靶内和射流中分别传入冲击波，射流在靶中建立高压、高温、高应变率（三高）区域。后续射流对三高区域状态的靶板继续进行侵彻，此阶段射流的能量分布变化较为缓慢，侵彻参数变化不大，此时的靶板处于高温状态，强度下降，受到后续大直径高速弹丸的作用进一步扩孔。随着射流和弹丸受到的阻力增加，速度也大大降低，扩孔能力逐渐下降，靶板强度的作用开始变得明显。当后续射流及弹丸推不开前方射流与靶板碰撞产生的残渣时，射流与弹丸将作用在残渣上，从而导致侵彻过程停止。

4 射孔弹穿深计算

根据参考文献[14]中不可压缩流体力学理论，对原射流侵彻公式稍作修正，利用修正后的公式计算射流侵彻钢靶的深度。计算中假设靶板材料为 45 钢，炸高为 5 cm。因此射流在侵彻钢靶前来不及颈缩与断裂，射流大都处于连续状态，所以本计算忽略射流断裂对侵彻能力的影响，仅考虑靶板强度对侵彻的影响。计算公式如下[14]

$$L=\frac{1}{2}\left(t_0-t_a+\frac{H-b_j}{v_{j0}}\right)v_j\frac{T_0}{T}\left[\frac{T_0+\sqrt{T_0{}^2-(1-c)^2v_{jc}^2}}{T+\sqrt{T^2-(1-c)^2v_{jc}^2}}\right]^{\frac{1}{\sqrt{c}}}-H+b_j \tag{9}$$

$$T=-cv+\sqrt{cv^2+(1-c)v_{jc}^2} \tag{10}$$

$$T_0=-cv_{j0}+\sqrt{cv_{j0}^2+(1-c)v_{jc}^2} \tag{11}$$

$$c=\frac{\rho_t}{\rho_j} \tag{12}$$

式中：L 为侵彻深度，H 为炸高（Standoff），t_a、b_j 为虚拟点源的位置坐标，ρ_t 为靶板密度，ρ_j 为射流密度，v_j 为射流速度，v_{j0} 为射流头部速度，v_{jc} 为射流临界速度。

虚拟点源坐标 b 的计算：建立如图 6 所示的坐标系，在 t-O-y 坐标中，以射流头部到达药型罩端口时为原点。根据数值模拟结果，当 $t=8$ μs 时，射流头部运动的距离为 $y=5$ cm，此时射流开始触靶。将 $t=8$ μs 之前的射流速度分布分作两段直线考虑，第一段从 $v_{j0}=6250$ m/s 到 $v_{j1}=6000$ m/s，第二段从 $v_{j1}=6000$ m/s 到 $v_{j2}=2383$ m/s。P_1、P_2 为两个虚拟点源，各射流微元可看作是从这两个虚拟点源出发的。由图 6 中几何关系可得

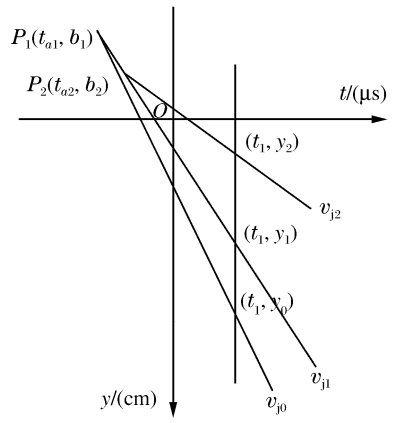


图 6 坐标系

Fig. 6 The coordinate system

$$b_1 = \frac{y_0 v_{j1} - y_1 v_{j0}}{v_{j1} - v_{j0}} \tag{13}$$

$$t_{a1} = t_1 - \frac{y_0 - y_1}{v_{j0} - v_{j1}} \tag{14}$$

$$b_2 = \frac{y_1 v_{j2} - y_2 v_{j1}}{v_{j2} - v_{j1}} \tag{15}$$

$$t_{a2} = t_1 - \frac{y_1 - y_2}{v_{j1} - v_{j2}} \tag{16}$$

根据数值模拟结果,求得

$$v_{j0}=6\,250\ \text{m/s},\ y_0=5.13\ \text{cm},\ t_1=8\ \mu\text{s}$$
$$v_{j1}=6\,000\ \text{m/s},\ y_1=4.17\ \text{cm},\ t_1=8\ \mu\text{s}$$
$$v_{j2}=2\,383\ \text{m/s},\ y_2=1.43\ \text{cm},\ t_1=8\ \mu\text{s}$$

将以上数据代入(13)式～(16)式得:$b_1=-18.87$ cm,$t_{a1}=-30.4\ \mu$s,$b_2=-0.38$ cm,$t_{a2}=0.42\ \mu$s。

根据公式(9)计算第一段射流侵彻深度

$$L_1 = \frac{1}{2}\left(t_0 - t_{a1} + \frac{H-b_1}{v_{j0}}\right)v_{j1}\ \frac{T_0}{T_1}\left[\frac{T_0+\sqrt{T_0^2-(1-c)^2v_{jc}^2}}{T_1+\sqrt{T_1^2-(1-c)^2v_{jc}^2}}\right]^{\frac{1}{\sqrt{c}}} - H + b_1 \tag{17}$$

第二段射流侵彻深度

$$L_2 = \frac{1}{2}\left(t_0 - t_{a2} + \frac{H-b_2}{v_{j1}}\right)v_{j2}\ \frac{T_1}{T_2}\left[\frac{T_1+\sqrt{T_1^{\,2}-(1-c)^2v_{jc}^2}}{T_2+\sqrt{T_2^2-(1-c)^2v_{jc}^2}}\right]^{\frac{1}{\sqrt{c}}} - H + b_2 \tag{18}$$

$$T_1 = -cv_{j1} + \sqrt{cv_{j1}^2 + (1-c)v_{jm}^2} \tag{19}$$

$$T_2 = -cv_{j2} + \sqrt{cv_{j2}^2 + (1-c)v_{jm}^2} \tag{20}$$

钢靶密度 $\rho_t=7.806$ g/cm^3,射流密度 ρ_j 取 8.93 g/cm^3,根据参考文献[14],取射流临界速度 $v_{jc}=1.05$ km/s。将各值代入(11)式～(20)式得:$L_1=1.065$ cm,$L_2=5.895$ cm。由

$$v_{j1} = \frac{H - b_1 + L_1}{t_0 - t_{a1} + t_c} \tag{21}$$

计算得第一段射流的侵彻时间为 $t_c=3.16\ \mu$s。由

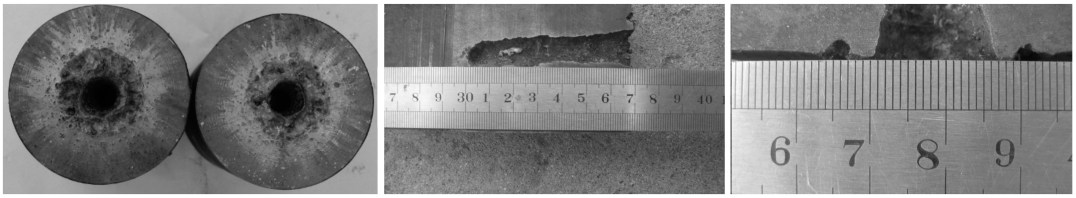
$$v_{j2} = \frac{H - b_2 + L_1 + L_2}{t_0 - t_{a2} + t_c + t_{c2}} \tag{22}$$

计算得第二段射流侵彻时间为 $t_{c2}=41.04\ \mu$s。总的侵彻深度 $L=L_1+L_2=6.96$ cm。

5　实　验

根据图 2 所示的设计模型,按照表 1 中的尺寸加工一套双向聚能射孔弹设备。弹壳、靶板材料为 45 钢,靶板为直径 70 mm、高 100 mm 圆柱。药型罩材料为紫铜,采用板材冲压工艺。为了确保实验与数值模拟、理论计算的装药条件相同,实验中采用与数值模拟相同的混合炸药(RDX/TNT=4∶1),实际装药量为 73 g,实际装药密度约为 1.585 g/cm^3,炸高与理论计算中炸高相同(5 cm)。采用装有黑索金炸药的铝纤维导爆索作为起爆元件。

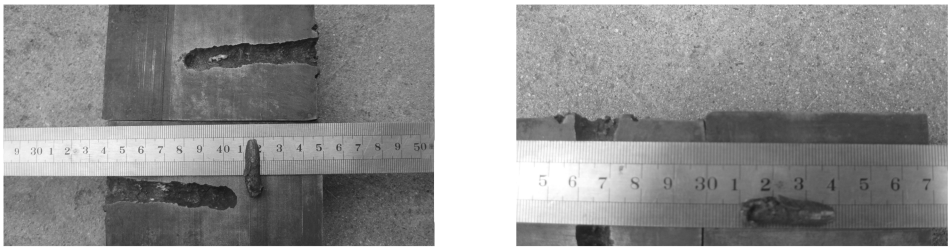
实验结果显示:该双向聚能射孔弹起爆后形成双向聚能射流,双靶的穿深与孔径几乎相同。侵彻钢靶的深度为 70 mm,孔径为 17 mm。回收的翻转弹丸的平均直径为 8.8 mm,长度为 28.1 mm。实验结果见图 7 和图 8。



(a) (b) (c)

图 7 实验侵彻结果照片

Fig. 7 Photos of the experimental results



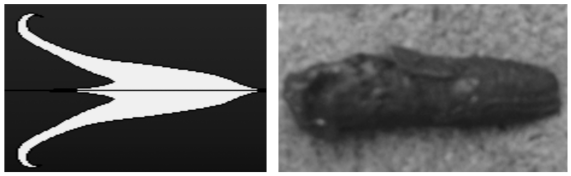
(a) (b)

图 8 实验回收弹丸

Fig. 8 Recovered projectiles in the experiments

6 数值模拟、理论计算与实验结果的分析与比较

二维数值模拟结果显示:上部小锥角药型罩形成了聚能射流,下部大锥角药型罩形成了翻转弹丸,射流头部单元速度为 6 250 m/s,弹丸最终以 1 620.9 m/s的速度稳定飞行。模拟得到的弹丸与实验回收弹丸的长度、直径误差分别为 7.1%、2.3%,误差范围小于行业内普遍接受的±10%。图 9为数值模拟弹丸与实验回收弹丸的比较图。



(a) Numerical simulation (b) Experiment

图 9 模拟弹丸与实验回收弹丸

Fig. 9 The projectiles obtained by the numerical simulation and experiment

根据数值模拟计算结果,将射流速度分布分作 2 段直线考虑:第 1 段从 6 250 m/s 至 6 000 m/s,第 2 段从 6 000 m/s 至 2 383 m/s。由修正后的射流侵彻公式计算得:第 1 段射流侵彻时间为 3.16 μs,侵彻深度为 1.065 cm;第 2 段射流侵彻时间为 41.04 μs,侵彻深度为 5.895 cm;总的侵彻深度为 6.96 cm,与实际侵彻深度误差小于 0.6%。

第 2 段射流侵彻深度为总侵彻深度的 84.7%,这是由于在一定范围内,射流速度分布梯度越大,射流侵彻深度越大[2]。因此适当提高射流速度分布梯度有利于提高侵彻深度。

实验中采用普通的混合炸药,装药密度较低(小于 1.6 g/cm^3),而油气井射孔弹采用 HMX、HNS、PYX 等高能炸药,装药密度达到 1.7 g/cm^3 以上,并且油气井射孔弹使用粉末药型罩,与使用紫铜药型罩的射孔弹相比,其侵彻性能十分优越,同时也避免了杵堵现象。尽管如此,与常用的 YD 系列射孔弹的侵彻性能相比(穿深为 100～204 mm,孔径为 9～13 mm),本研究设计的双向聚能射孔弹在射孔孔径方面具有明显的优势,同时保证了一定的穿深。该射孔弹如果使用 HMX、HNS、PYX 等高能炸药,并且使用粉末材料的双锥药型罩,其射孔性能将会进一步提高。

采用对称装药结构使两个弹药室内的炸药相互利用,同时避免了两个弹药室内爆轰波的相互干扰现象。

7　结　论

(1) 利用二维数值模拟方法研究双锥药型罩在炸药的爆轰压力下的成型机理与变形过程是十分可取的,并且可以有效地计算其射流参数。

(2) 利用修正后的射流侵彻公式,结合数值模拟结果可以有效地预测射孔弹的穿深。

(3) 本研究设计的射孔弹在低密度装药条件下其能量利用效率高,侵彻性能比较理想,具备了大孔径的优点,同时保证了一定的穿深,提高了射孔密度。

References:

[1] Wang X G, Zheng B X, Zhang Z Z, et al. Handbook of Blasting [Z]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 111-139. (in Chinese)
汪旭光,郑炳旭,张正忠,等. 爆破手册 [Z]. 北京:冶金工业出版社,2010:111-139.

[2] Bai X Z, Chang X. Shaped Charge for Gas/Oil Wells and Its Applications [M]. Beijing: Oil Industry Press, 1992: 1-65. (in Chinese)
白锡忠,常　熹. 油气井射孔弹及其作用 [M]. 北京:石油工业出版社,1992:1-65.

[3] Herd M. Truncated Shaped Charges [A]//15th International Symposium on Ballistics [C]. Israel: Jerusalem, 1995: 21-30.

[4] Pugh E M, Eichelberger R J, Rostoker N. Theory of Jet Formation by Charges with Lined Conical Cavities [J]. J Appl Phys, 1952, 23(5): 532-537.

[5] Chou P C, Flis W J. Recent Development in Shaped Charge Technology [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1986, 11(4): 99-114.

[6] Ou Y X. Explosives [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 232-240. (in Chinese)
欧育湘. 炸药学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:232-240.

[7] Lin J J, Ren H Q, Shen Z W. Numerical and Experimental Study on Explosively Formed Projectile with Fins [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3): 215-222. (in Chinese)
林加剑,任辉启,沈兆武. 尾翼型爆炸成型弹丸的数值模拟及实验研究 [J]. 高压物理学报,2009,23(3):215-222.

[8] Tian J. The Shock Wave Attenuation and Anti-Detonation Property of Aluminum [D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2006: 74-77. (in Chinese)
田　杰. 泡沫铝的冲击波衰减和抗爆震特性研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学,2006:74-77.

[9] Shi D Y, Li Y C, Zhang S M. Explicit Dynamic Analysis on Ansys/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 250-326. (in Chinese)
时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2005:250-326.

[10] Cooper S R, Benson D J, Nesterenko V F. A Numerical Exploration of the Role of Void Geometry on Void Collapse and Hot Spot Formation in Ductile Materials [J]. Int J Plasticity, 2000, 16: 525-540.

[11] Azami A R, Khoei A R. 3D Computational Modeling of Powder Compaction Processes Using a Three-Invariant Hardening Cap Plasticity Model [J]. Finite Elem Anal Des, 2006, 42: 792-807.

[12] An E F, Yang J. Study on a New Shaped Charge Warhead [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6): 546-552. (in Chinese)
安二峰,杨　军. 一种新型聚能战斗部 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(6):546-552.

[13] Lin J J, Shen Z W, Ren H Q. Experimental Study on Explosively Formed Projectiles with Fins and Numerical Simulation [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 17(5): 588-593. (in Chinese)
林加剑,沈兆武,任辉启. 贴隔板法在 EFP 尾翼成型中的应用研究 [J]. 含能材料,2009,17(5):588-593.

[14] Beijing Institute of Technology Eight Department. Explosion and Its Role(Volume Ⅱ) [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1979: 84-143. (in Chinese)
北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下) [M]. 北京:国防工业出版社,1979:84-143.

Study on Big Entry Hole Bidirectional Shaped Charge

LI Lei, SHEN Zhao-Wu, MA Hong-Hao

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*)

Abstract: A shaped charge model, in which the biconical liner with the two-way charging structure was combined, was designed. Its jet formation mechanism was studied by means of numerical simulations, and the jet parameters were calculated. The obtained results were shown as follows: First, the small cone angle of the liner formed shaped charge jet, and the large cone angle formed explosively overturned projectile. Second, the velocity of the jet tip and the projectile were respectively 6 250 m/s and 1 620.9 m/s. Third, the length and average diameter of the projectile were 26.1 mm and 8.6 mm. Based on the numerical results the jet penetrate formula was amended and then used to calculate the penetration depth of the shaped charge, and the calculated value was 69.6 mm. Finally, an experiment was carried out according to the model, the length and average diameter of the projectile were 28.1 mm and 8.8 mm. Furthermore, the penetration depth and hole size were 70 mm and 17 mm. Good agreement is among the numerical, theoretical calculation and the experimental results. In addition, the superior penetration performance is proved by the experimental results.

Key words: biconical liner; two-way charging; numerical simulation; shaped charge jet; explosively formed projectile; penetration performance

向 审 稿 者 致 谢

2010 年 10 月到 2011 年 10 月，本刊承蒙高压物理及其相关学科领域的许多专家帮助，审阅了大量稿件，使本刊得以顺利出版发行。为此，编辑部特向下列各位审稿者致谢！

丁 宁 于 川 马永昆 马明臻 马桂存 马琰铭 王少龙 王玄玉 王宁飞 王永刚 王 成 王多君
王志军 王秀喜 王国栋 王金相 王育维 王建涛 王绍青 王 春 王彦平 王艳辉 王晓川 王晓明
王海福 王 翔 云国宏 方棋洪 尹协远 石 磊 龙 源 卢文壮 卢永刚 卢芳云 田永君 宁建国
冯楚德 吕海波 朱万成 朱建士 朱 俊 朱梓忠 庄 茁 刘天生 刘伍明 刘凯欣 刘宜华 刘建军
刘荣厚 刘庭成 刘 彦 刘晓旸 刘铁钢 刘海风 刘 景 江少恩 汤文辉 安 健 许 斌 孙金华
严传俊 苏文辉 杜志明 杜建国 巫绪涛 杨小林 杨世源 杨 平 杨永印 杨 扬 杨英姿 杨基明
杨 敏 杨 森 杨瑞金 李木森 李 文 李 平 李生才 李永祥 李庆民 李杰权 李学如 李治源
李晓杰 李海涛 李疏松 束小建 吴长春 吴 成 吴兴龙 何长江 何正浩 余永强 宋茂双 宋盛义
张丰收 张可敏 张永康 张 伟 张 奇 张政军 张程祥 张静武 张德良 陈大年 陈 刚 陈向荣
陈良辰 陈栋泉 陈鹏万 范宝春 茅德康 罗喜胜 周永胜 周听清 周金平 周 霖 郑 广 郑海飞
宗 智 房玉军 赵国志 赵衡阳 郝胜智 荣吉利 胡八一 胡小松 胡永乐 胡时胜 胡季帆 柏劲松
钟 伟 段卓平 段 俊 施行觉 施尚春 施惠基 姜宗林 洪时明 洪 滔 姚振汉 贺红亮 贺端威
骆仲泱 秦承森 袁文俊 袁金颖 袁建生 耿华运 贾宪振 贾晓鹏 顾晓辉 倪红坚 徐力方 徐世平
徐永君 徐松林 徐 卓 徐新生 翁继东 高尔新 高旭东 高春晓 高 涛 郭长铭 郭保桥 郭常新
唐志平 涂宗财 姬广富 黄西成 曹俊成 龚自正 梁乃刚 梁为民 梁龙河 彭其先 彭金华 董 刚
董 奇 董春迎 蒋军成 蒋建伟 韩永斌 韩增尧 傅秀军 傅智敏 焦清介 曾庆轩 曾庆梅 谢鸿森
靳常青 楼建锋 虞吉林 解立峰 管公顺 谭大成 谭多望 谭柱华 薛胜雄 戴诚达

《高压物理学报》编辑部