

文章编号: 1001-1455(2013)06-0567-07

基于正交设计方法的双锥罩结构优化设计*

李 磊, 马宏昊, 沈兆武

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 设计了一种双锥药型罩, 借助数值模拟和实验手段研究其成形及侵彻机理, 利用正交设计方法研究不同结构的射流成形性能。结果显示: 该双锥罩在爆轰波作用下形成高速射流、翻转弹丸和杵体; 小锥角 2α 显著影响射流头部速度; 罩厚 t' 及大锥角 2β 高度显著性影响弹丸速度; 最佳设计参数为: $t'=0.14$ cm、 $2\alpha=50^\circ$ 、 $2\beta=135^\circ$ 、小锥角与大锥角罩口直径比 $N=0.4$ 或 0.5 , 其射流速度分别为 $6\ 613$ 、 $6\ 839$ m/s, 弹丸速度分别为 $2\ 247$ 、 $2\ 095$ m/s, 侵彻钢靶深度分别为 8.24 、 8.31 cm, 开口孔径分别为 2.12 、 2.08 cm。最终优化的双锥罩结构合理, 既保证了射流速度, 又大大提高了弹丸速度, 射流和弹丸先后侵彻目标, 达到双重毁伤的目的; 在低密度装药和小炸高条件下侵彻效果较理想。

关键词: 流体力学; 射流; 正交设计; 双锥药型罩; 翻转弹丸

中图分类号: O358

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

聚能装药结构能够充分利用炸药的聚能效应, 而且方向性好、毁伤能力强, 常用于装备聚能战斗部以提高其毁伤能力。药型罩是聚能装药结构的重要组成部分, 是炸药爆轰能量传递的载体。在炸药爆轰波的作用下, 小锥角药型罩被压合形成高速聚能射流和速度相对较低的杵体, 随着药型罩锥角不断增大, 聚能射流的速度将减小, 而杵体速度则相对增加。M. Herd^[1]发现, 当半锥角接近 75° 时, 射流和杵体的速度接近, 将形成爆炸成形弹丸(EFP)。

对于小锥角药型罩的射流成形理论研究已经十分成熟^[2]。研究发现, 小锥角罩只有不到 $1/3$ 的质量形成了聚能射流, 而其余大部分质量形成速度较低的杵体, 极少部分则在稀疏波作用下飞散掉, 杵体的速度通常只有几百米每秒, 基本不具备侵彻能力。因此, 若是能够充分利用药型罩的其余 $2/3$ 质量, 使这部分药型罩形成具有侵彻能力的弹丸, 同时不降低射流速度, 则能极大提高聚能装药的毁伤能力。

本文中结合聚能射流与 EFP 的特点将药型罩设计成一种小锥角与大锥角相结合的双锥结构, 并借助数值模拟和实验方法研究双锥药型罩在爆轰压力作用下的成形和侵彻机理。其次, 采用正交优化设计方法研究具有不同结构参数的双锥罩对其成形性能的影响, 最终获得最优化的双锥罩设计参数。最后, 对该双锥罩的侵彻性能进行数值模拟与实验研究, 并对本文中数值模拟方法的可行性及模拟结果的精确性进行实验验证。

1 双锥药型罩结构的正交优化设计

1.1 优化设计因子、水平的设计

药型罩及装药结构如图 1 所示, 装药直径 $D=5$ cm, 药型罩材料为紫铜。共研究以下 5 个因子对双锥罩成形性能的影响: 罩厚 t' 、小锥角 2α 、大锥角 2β 、小锥角与大锥角罩口直径比 $N=d/D$ 、装药高度 H 。各因子水平设计值见表 1。

根据常规实验方法, 对于表 1 中的 5 因子 4 水平, 则需要进行 $4^5=1\ 024$ 次实验, 如此庞大的实验次数不仅耗费大量的时间、人力、物力和财力, 而且很难确定各因子对于射流成形性能的影响。因此本文中采用正交设计方法, 利用 LS-DYNA 软件设计 16 个数值计算方案, 进而大大减少了计算次数, 达到多

* 收稿日期: 2012-05-29; 修回日期: 2012-08-27

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。

快好省的目的。正交表 L16(4⁵) 的设计见表 2, 表中 v_k 、 v_j 、 v_t 、 L 分别表示射流尾部速度、射流头部速度、弹丸速度、弹丸长径比。

根据文献[3-5], 只有合理的结构设计, 小锥角罩锥底才能与大锥角罩进行有效复合, 而不在稀疏波作用下飞散。经验算, 表 2 中的双锥药型罩参数设计是合理的^[4]。

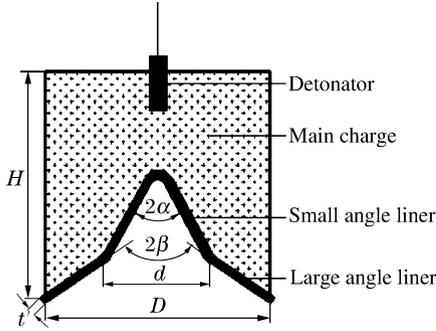


图 1 双锥罩聚能装药

Fig. 1 The sketch of the shaped charge structure

表 1 正交设计各因子水平值

Table 1 Orthogonal table

水平	t' (因子 1)	$2\alpha/(\circ)$ (因子 2)	$2\beta/(\circ)$ (因子 3)	N (因子 4)	H (因子 5)
1	0.024D	45	90	0.3	0.9D
2	0.028D	50	105	0.4	1.0D
3	0.032D	55	120	0.5	1.1D
4	0.036D	60	135	0.6	1.2D

表 2 正交表 L16(4⁵) 设计与计算结果

Table 2 Orthogonal design and calculated results

方案	t'	$2\alpha/(\circ)$	$2\beta/(\circ)$	N	H	$v_k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	L
1	0.024D	45	90	0.3	0.9D	2 166	6 186	1 484	3.59
2	0.024D	50	105	0.4	1.0D	2 233	6 479	1 837	3.73
3	0.024D	55	120	0.5	1.1D	2 398	6 407	2 071	3.14
4	0.024D	60	135	0.6	1.2D	2 461	6 527	2 250	4.03
5	0.028D	45	105	0.5	1.2D	1 910	7 019	1 640	4.37
6	0.028D	50	90	0.6	1.1D	1 446	6 546	1 292	1.37
7	0.028D	55	135	0.3	1.0D	2 526	5 909	2 179	5.31
8	0.028D	60	120	0.4	0.9D	2 026	5 584	1 914	2.57
9	0.032D	45	120	0.6	1.0D	1 855	6 608	1 468	2.14
10	0.032D	50	135	0.5	0.9D	1 946	6 310	1 859	1.10
11	0.032D	55	90	0.4	1.2D	1 492	6 024	1 260	3.11
12	0.032D	60	105	0.3	1.1D	1 770	5 432	1 537	3.38
13	0.036D	45	135	0.4	1.1D	2 168	6 552	1 856	2.42
14	0.036D	50	120	0.3	1.2D	1 920	6 013	1 747	3.41
15	0.036D	55	105	0.6	0.9D	1 551	5 676	1 238	2.51
16	0.036D	60	90	0.5	1.0D	1 330	5 372	1 100	2.68

1.2 数值模拟计算模型

采用 LS-DYNA 程序中 Lagrange 算法, 对表 2 中的 16 个设计方案进行数值模拟, 计算模型包含 2 种材料: 炸药和药型罩。炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 EOS_JWL 状态方程^[6]

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

式中: p 为爆轰压力, E 为炸药比内能, v 为相对比容, 参数 $A=581.4 \text{ GPa}$, $B=6.8 \text{ GPa}$, $R_1=4.1$, $R_2=1.0$, $\omega=0.35$ 。

药型罩采用 MAT_STEINBERG 材料模型和 EOS_Grüneisen 状态方程^[6]

$$p' = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\varphi}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (\bar{S}_1 - 1) \mu - \bar{S}_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - \bar{S}_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \varphi \mu) E' \quad (2)$$

式中^[6-8]： p' 为药型罩压力， v_s-v_p 曲线截距 $C=0.394$ ， v_s-v_p 曲线斜率系数 $\bar{S}_1=1.49$ 、 $\bar{S}_2=0$ 、 $\bar{S}_3=0$ ， v_s 为冲击波速度， v_p 为质点速度，Grüneisen 因数 $\gamma_0=2.02$ ，Grüneisen 因数的一阶体积修正因子 $\varphi=0.47$ ， E' 为药型罩体积内能，体积变化率 $\mu=(\rho-\rho_0)/\rho_0$ ， ρ 为药型罩瞬时密度。

1.3 数值模拟结果与分析

1.3.1 双锥药型罩的成形机理

数值模拟结果显示，表 2 中设计的 16 组双锥药型罩在炸药的爆轰压力作用下形成射流、翻转弹丸和杵体 3 个部分，其典型的成形过程如图 2 所示。

以主装药顶部中心为起爆点(见图 1)，炸药爆轰后将产生球形爆轰波。如图 2(a)所示，球形爆轰波首先到达药型罩顶部(即小锥角罩部分)，在强爆轰压力下，小锥角罩逐渐开始向轴线方向闭合，罩的内外层发生能量重分配，进而导致内层微元形成高速射流，而外层微元形成低速杵体。当爆轰波到达大锥角药型罩部分，这部分药型罩开始翻转(图 2(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 2 部分，而是翻转压合成一个高速弹丸^[4](图 2(b)~(d))。在 $23 \mu s$ 时刻射流已经完全形成，由于射流的头部速度高达数千米每秒，而且与尾部之间存在较大的速度梯度，因此射流不断延伸拉长并出现颈缩现象(图 2(b))。由于射流速度远高于杵体速度，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(图 2(b)~(d))。下部大锥角罩在爆轰波和惯性的作用下进一步做翻转和向轴线压合运动，并跟随射流向前运动(此时弹丸与射流尚未分开，见图 2(c))，当 $t=133 \mu s$ 时刻弹丸完全成形，由于翻转弹丸速度低于射流速度，导致射流与弹丸逐渐开始分离(图 2(d))，之后弹丸不再发生变形，而以一定的速度稳定飞行^[4]。

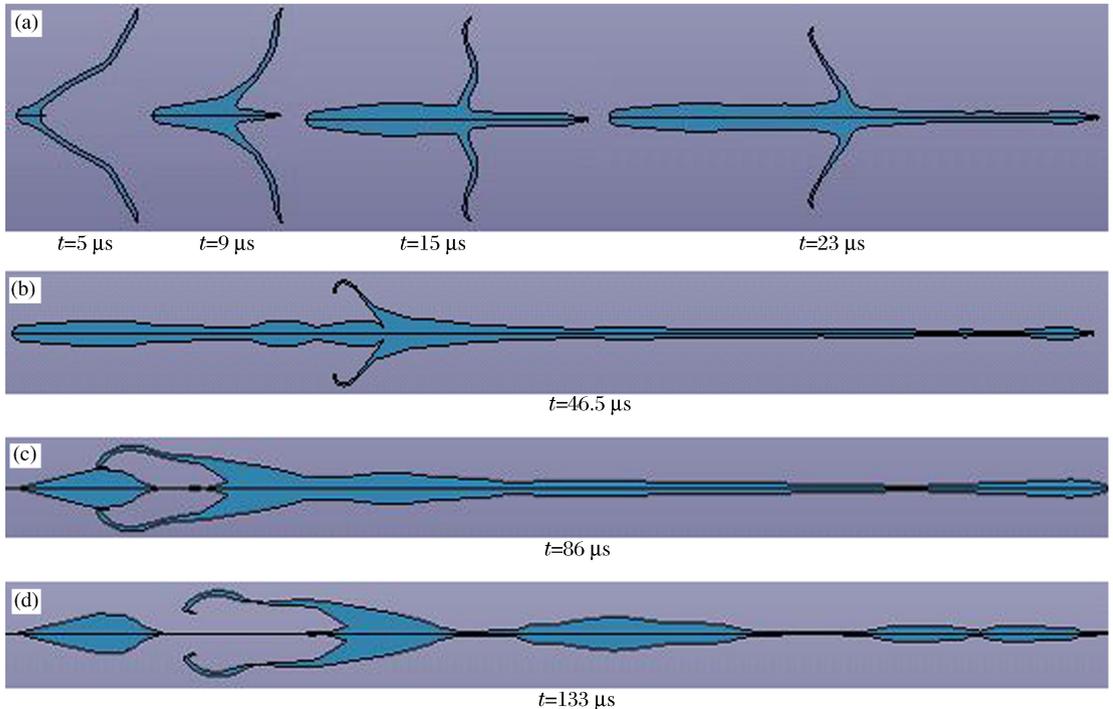


图 2 双锥药型罩成形过程数值模拟结果

Fig. 2 Numerical simulation for biconical liner formation

1.3.2 不同双锥罩结构参数对射流成形性能影响

射流速度、弹丸速度和长径比在各列水平下的 K_{ij} 及极差值 R 如图 3~5 所示。 K_{ij} 表示因子 j 在水平 i 时的计算结果之和^[9]， R 为同一因子的 K_{ij} 的最大值与最小值差值的四分之一。

对射流头部速度 v_j 直观分析：从图 3 可以看出，因子 1、2 取水平 1 时 v_j 最大，因子 3、4、5 取水平 4 时 v_j 最大，即 $t'=0.12 \text{ cm}$ 、 $2\alpha=45^\circ$ 、 $2\beta=135^\circ$ 、 $N=0.6$ 、 $H=6 \text{ cm}$ 。

从图3可以看出,因子 2α 的极差最大,随着 t' 以及 2α 的增加, v_j 近似直线下降,随着 2β 、 N 和 H 的增加, v_j 逐渐增大。各因子对 v_j 的影响顺序为 $2\alpha > t' > H > N > 2\beta$,可见 2α 对 v_j 影响最大,是主要因子,而 2β 对 v_j 影响最小,是次要因子。

以上仅是从直观表面分析,为了进一步分析误差影响及各因子水平间有无显著差异,需对 v_j 进行方差分析,根据表2、图3数据计算全部计算数据之和(T)、不变项(T_c)、离均差平方和(S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5):

$$T = 98\ 644, \quad T_c = \frac{T^2}{16} = \frac{98\ 644^2}{16} = 608\ 164\ 921,$$

$$S_1 = \frac{K_{11}^2 + K_{21}^2 + K_{31}^2 + K_{41}^2}{4} - T_c = 554\ 531.5,$$

$$S_2 = \frac{K_{12}^2 + K_{22}^2 + K_{32}^2 + K_{42}^2}{4} - T_c = 1\ 710\ 031.5,$$

$$S_4 = \frac{K_{14}^2 + K_{24}^2 + K_{34}^2 + K_{44}^2}{4} - T_c = 485\ 337.5,$$

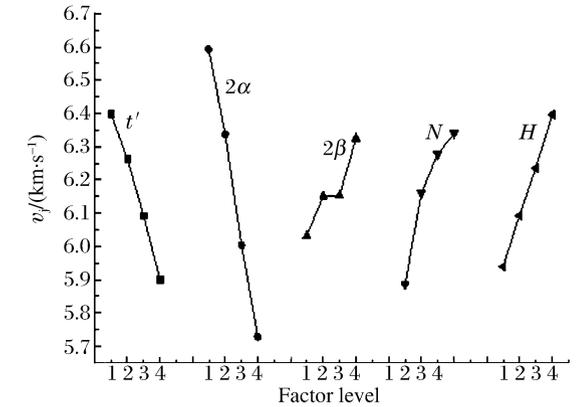


图3 不同因子水平对射流头部速度的影响

Fig. 3 Effect of different factor levels on the jet tip's velocity

$$S_3 = \frac{K_{13}^2 + K_{23}^2 + K_{33}^2 + K_{43}^2}{4} - T_c = 173\ 821.0,$$

$$S_5 = \frac{K_{15}^2 + K_{25}^2 + K_{35}^2 + K_{45}^2}{4} - T_c = 457\ 783.5$$

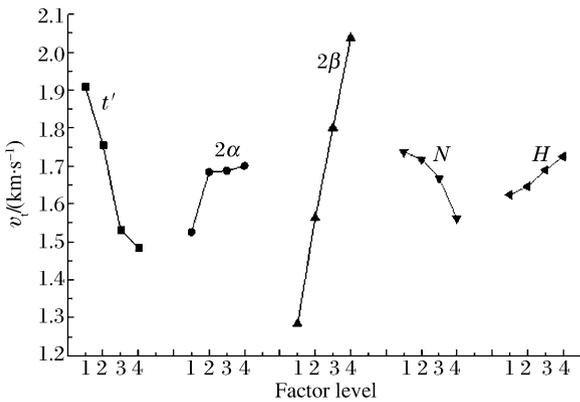


图4 不同因子水平对弹丸速度的影响

Fig. 4 Effect of different factor levels on the projectile's velocity

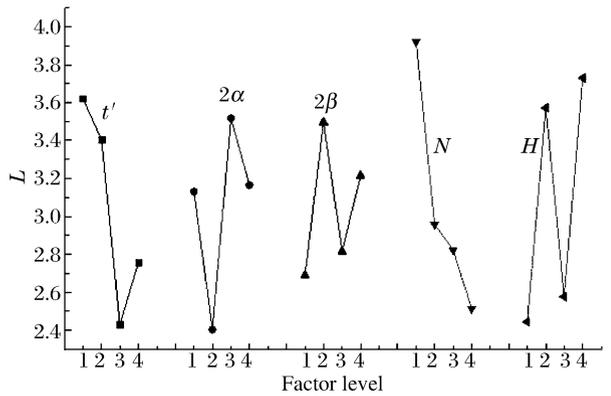


图5 不同因子水平对弹丸长径比的影响

Fig. 5 Effect of different factor levels on the projectile's draw ratio

因为离均差平方和 S_3 远小于其他离均差平方和,因此可以将 S_3 作为误差来检验各因子显著性。各因子自由度(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5)均为3,其中 $f_3=3$ 作为误差自由度^[9]。

$$F_1 = \frac{S_1/f_1}{S_3/f_3} = 3.19, \quad F_2 = \frac{S_2/f_2}{S_3/f_3} = 9.84, \quad F_4 = \frac{S_4/f_4}{S_3/f_3} = 2.79, \quad F_5 = \frac{S_5/f_5}{S_3/f_3} = 2.63$$

根据各因子和误差的自由度,查 F 表,当 $\alpha'=0.05$ (分析的可靠性有95%)、 $f_3=3$ 、 $f_{因}(f_1、f_2、f_4$ 或 $f_5)$ 等于3时,因子均方应大于误差均方9.28倍,现在 $F_2=9.84$ 大于9.28,因此,因子2即 2α 对 v_j 具有显著性影响,是关键因子,所以 2α 应取 45° 。当 $\alpha'=0.25$ 时(分析的可靠性有75%),因子均方应大于误差均方2.36倍,现在 $F_1=3.19$ 、 $F_4=2.79$ 、 $F_5=2.63$ 均大于2.36,因此,以25%为水准衡量,因子1、4、5有差异,所以 t' 、 N 、 H 取值分别为0.12 cm、0.6、6 cm,而 2β 作为误差,其水平可以任意取。

弹丸速度 v_i 直观分析:从表4知因子1、4取水平1时 v_i 最大,因子2、3、5取水平4时 v_i 最大,即 $t'=0.12$ cm、 $2\alpha=60^\circ$ 、 $2\beta=135^\circ$ 、 $N=0.3$ 、 $H=6$ cm时弹丸获得最大速度。

从图4可以看出,因子 2β 的极差最大,而且随着 2β 增加 v_i 近似直线上升;其次是 t' 极差较大,随着 t' 增加, v_i 不断减小;因子 2α 、 N 和 H 的极差较小,随着 2α 的增加 v_i 虽有增大趋势,但增大的幅度很小,

特别是 2α 的第 2、3、4 水平的 v_i 没有大的变化,随着 N 的增加, v_i 近似呈指数规律下降,下降幅度也很小;对 v_i 影响最小的因子是装药高度 H ,虽然 H 越大 v_i 也越大,但是 4 个水平的 v_i 最大值与最小值之间仅相差 100 m/s 左右。各因子对 v_i 的影响顺序为 $2\beta > t' > 2\alpha > N > H$, 2β 是影响 v_i 的关键因子, H 是次要因子。

为了进一步分析误差影响及各因子水平间有无显著差异,需对 v_i 进行方差分析,根据表 2、图 4 数据计算:

$$T = 26\ 732, \quad T_c = 44\ 662\ 489, \quad S_1 = 474\ 922.5, \\ S_2 = 19\ 019.5, \quad S_3 = 1\ 245\ 195, \quad S_4 = 73\ 236.5, \quad S_5 = 24\ 067.5$$

从图 4 知因子 5 的极差值最小,且 S_2 、 S_5 与 S_1 、 S_4 、 S_3 相比相差好几倍甚至 10 倍以上,因此可以将 S_2 和 S_5 作为误差来检验各因子显著性。那么新的误差 $S_6 = S_2 + S_5 = 43\ 087$ 。各因子自由度(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5)均为 3。误差自由度 $f_6 = f_2 + f_5 = 6$ 。

$$F_1 = \frac{S_1/f_1}{S_6/f_6} = 22.04, \quad F_3 = \frac{S_3/f_3}{S_6/f_6} = 57.8, \quad F_4 = \frac{S_4/f_4}{S_6/f_6} = 3.4$$

查 F 表,当 $\alpha' = 0.01$ (分析的可靠性有 99%) 时,因子均方应大于误差均方 9.78 倍,现在 $F_1 = 22.04$, $F_3 = 57.8$, 均大于 9.78, 因此,因子 t' 以及 2β 对于 v_i 具有高度显著性影响,是关键因子,所以 t' 应取 0.12 cm, 2β 应取 135° 。当 $\alpha' = 0.1$ (分析的可靠性有 90%) 时,因子均方应大于误差均方 3.29 倍时,现在 $F_4 = 3.4 > 3.29$, 因此,以 10% 为水准衡量,因子 4 有差异,所以 N 取 0.3 为佳。

从图 4 知,因子 1 取水平 1 时弹丸长径比 L 最大,因子 2 取水平 3 时 L 最大,因子 3 取水平 2 时 L 最大,因子 4 取水平 1 时 L 最大,因子 5 取水平 4 时 L 最大,即 $t' = 0.12$ cm、 $2\alpha = 55^\circ$ 、 $2\beta = 105^\circ$ 、 $N = 0.3$ 、 $H = 6$ cm。从极差值 R 的大小来看,影响 L 的因子顺序为 $N > H > t' > 2\alpha > 2\beta$ 。

从图 5 可以看出,只有因子 N 对 L 具有明显规律性影响,即随着 N 增加 L 逐渐减小。随着 t' 增加 L 在水平 3 以前是逐渐减小的,但是随着 t' 进一步增加 L 反而增大。而其他 3 个因子取不同水平时, L 虽然有变化但无明显规律性。为进一步验证这一结论,对 L 进行方差分析,根据表 2 和图 5 数据计算:

$$T = 48.855, \quad T_c = 149.18, \quad S_1 = 3.69, \quad S_2 = 2.62, \quad S_3 = 1.65, \quad S_4 = 4.43, \quad S_5 = 4.91$$

考虑到因子 3 的极差以及离均差平方和均最小,而且对于 L 的影响无明显规律,将 S_3 作为误差来检验各因子显著性,各因子自由度(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5)均为 3。误差自由度 $f_3 = 3$ 。

$$F_1 = \frac{S_1/f_1}{S_3/f_3} = 2.24, \quad F_2 = \frac{S_2/f_2}{S_3/f_3} = 1.59, \quad F_4 = \frac{S_4/f_4}{S_3/f_3} = 2.68, \quad F_5 = \frac{S_5/f_5}{S_3/f_3} = 2.98$$

根据各因子和误差的自由度,查 F 表,当 $\alpha' = 0.25$ (分析的可靠性有 75%) 时,因子均方应大于误差均方 2.36 倍,现在 $F_4 = 2.68$, $F_5 = 2.98$, 均大于 2.36, 因此,以 25% 为水准衡量,因子 4 (N) 和因子 5 (H) 的各水平间有差异,而因子 1 (t') 和因子 2 (2α) 各水平间无差异,因子 3 (2β) 作为误差其各水平间更无差异。因子 N 应取 0.3、 H 应取 6 cm, 而其他 3 个因子可以任意取。

根据以上分析,药型罩壁厚 $t' = 0.12$ cm 时射流头部速度 v_j 和弹丸速度 v_i 最大,弹丸长径比 L 也最大,但是 t' 减小形成的射流质量必定减小,而且从图 6 可以看出, $t' = 0.14$ 、 0.16 cm 时,射流头尾速度差 Δv ($\Delta v = v_j - v_k$) 最大,这有利于射流充分拉伸,对增加射流侵彻深度十分有利,综合以上分析优化出 2 组药型罩参数: $t' = 0.14$ cm、 $2\alpha = 50^\circ$ 、 $2\beta = 135^\circ$ 、 $N = 0.4$ 或 0.5 , 装药高度 H 可以根据实际情况确定。根据以上参数进行数值模拟 (装药高度均取 $H = 5$ cm), 第 1 组数据计算结果为: $v_j = 6\ 613$ m/s, $v_i = 2\ 247$ m/s, $L = 1.955$; 第 2 组数据计算结果为: $v_j = 6\ 839$ m/s, $v_i = 2\ 095$ m/s, $L = 1.295$ 。

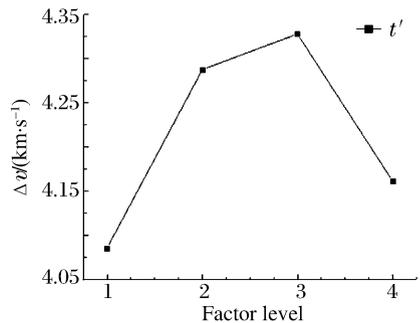


图 6 射流头尾速度差

Fig. 6 Speed difference between the jet's tip and tail

2 实验验证

对如图1所示的聚能装药结构进行侵彻钢靶实验,因加工条件限制,且考虑到加工工艺、加工精度等问题,实际加工的药型罩(图7)尺寸为: $t'=0.17\text{ cm}$ 、 $2\alpha=50^\circ$ 、 $2\beta=120^\circ$ 、 $N=0.5$ 。采用黑索今与梯恩梯混合炸药,药量约36 g,装药密度约 1.58 g/cm^3 ,靶板为45钢,炸高5 cm。

实验回收的弹丸(见图8(b))平均直径0.88 cm、长2.81 cm,而数值模拟得到的弹丸(见图8(a))平均直径和长度分别为0.86、2.61 cm,计算误差分别为2.27%、7.12%。如图9所示,实验侵彻钢靶深度和开口孔径分别为7.0、1.7 cm,而数值模拟结果分别为7.25、1.82 cm,与实验结果的误差分别为3.57%、7.06%,从图9可以看出,采用双锥罩侵彻钢靶几乎达到了同孔径的目的,而普通单锥罩射流侵彻钢靶通常是开口孔径大、尾部孔径小,造成同孔径的原因主要是由于侵彻靶板时,射流头部首先撞击靶板,在靶中建立三高区域,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,受到后续大直径的高速弹丸的作用进一步扩孔,本次实验回收的弹丸正是在孔的底部取出的。



图7 双锥药型罩

Fig. 7 The biconical liner

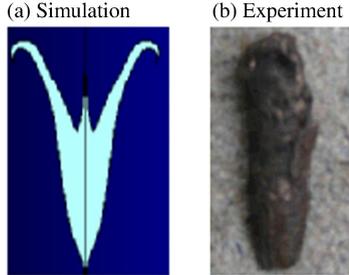


图8 翻转弹丸

Fig. 8 The projectile

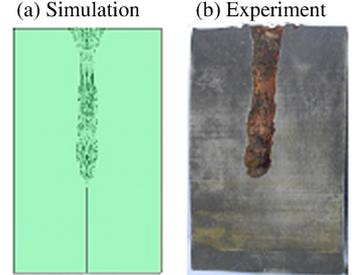


图9 侵彻结果

Fig. 9 Penetration results

数值计算显示本次加工的双锥罩,射流头部速度和弹丸速度分别为6 250、1 620.9 m/s,而第1.3节最终优化的2例药型罩形成的射流头部速度分别为6 613、6 839 m/s,弹丸速度分别为2 247、2 095 m/s,在同等装药条件下,计算的侵彻钢靶深度分别为8.24、8.31 cm,开口孔径分别为2.12、2.08 cm,因此最终优化的药型罩结构设计参数是合理的。

3 结论

本文中设计的双锥药型罩在爆轰波作用下,上部小锥角罩形成高速射流和杵体,下部大锥角罩形成翻转弹丸; 2α 对于射流头部速度具有显著性影响,其速度大小与 2α 呈反比关系,若以25%为水准衡量,射流头部速度与 t' 为反比关系,而 N 和 H 越大射流头部速度越大; t' 以及 2β 对于翻转弹丸速度具有高度显著性影响, t' 越小弹丸速度越大, 2β 越大弹丸速度越大,若以10%为水准衡量, N 越小越好;各参数大小对于弹丸长径比均无显著性影响,仅以25%为水准衡量时, N 及 H 对于长径比有一定影响, N 越小长径比越大, H 对长径比的影响无明显规律性。

本文中采用的数值模拟方法是可行的,与实验相比误差小于10%;数值模拟与实验研究结果表明:最终优化的药型罩结构设计合理,在保证聚能射流速度的同时,大大提高了翻转弹丸的速度;射流和弹丸先后侵彻目标,达到了双重毁伤的目的,进而也提高了炸药能量利用效率;在低密度装药和1倍罩口径炸高条件下能够达到侵彻钢靶深度大于8 cm及侵彻孔径不低于2 cm的理想效果。

参考文献:

- [1] Herd M. Truncated saped charges[C]//Proceeding of the 15th International Symposium on Ballistics. Israel: Jerusalem, 1995:21-30.
- [2] Chou P C, Flis W J. Recent development in shaped charge technology[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,

1986,11(4):99-114.

- [3] 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.
An Er-feng, Yang Jun. Study on a new shaped charge warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6): 546-552.
- [4] 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 Zhao-wu, Ma Hong-hao. Study on big entry hole bidirectional shaped charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(6): 539-548.
- [5] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 205-220.
- [6] 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.
- [7] Cooper S R, Benson D J, Nesterenko V F. Numerical exploration of the role of void geometry on void collapse and hot spot formation in ductile materials[J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16: 525-540.
- [8] Azami A R, Khoei A R. 3D computational modeling of powder compaction processes using a three-invariant hardening cap plasticity model[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 792-807.
- [9] 姬振豫. 正交设计[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1979: 10-75.

Optimal design of biconical liner structure based on orthogonal design method*

Li Lei, Ma Hong-hao, Shen Zhao-wu

*(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,
Hefei 230027, Anhui, China)*

Abstract: A kind of double cone liner was designed, its formation and penetration mechanisms were studied by means of numerical simulations and experiments, the jet parameters of the liners with different structures were analyzed to acquire the optimized result through the orthogonal design method, and the penetration capabilities of the optimized liners were explored by numerical simulation and experimental methods. Results display that the liner can form a shaped charge jet, an explosively formed projectile and a slug. The small cone angle 2α can exercise a significant influence on the head velocity of the jet, and the liner thickness t' and the large cone angle 2β can obviously affect the projectile velocity. For the optimized parameters of $t'=0.14$ cm, $2\alpha=50^\circ$, $2\beta=135^\circ$ and $N=0.4$ or 0.5 , the head velocities of the jets can reach 661.3 and 683.9 m/s, respectively; the velocities of the projectiles can reach 224.7 and 209.5 m/s, respectively; the penetration depths can reach 8.24 and 8.31 cm, respectively; and the hole sizes can reach 2.12 and 2.08 cm, respectively. So the designed biconical liner structure is reasonable, by which can ensure the velocity of the shaped charge jet and greatly improve the velocity of the explosively formed projectile. The jet and the projectile can penetrate into the target successively, by which achieves the double damage. And for a low-density charge and a small standoff, the penetration effect is ideal.

Key words: fluid mechanics; shaped charge jet; orthogonal design; biconical liner; explosively formed projectile

* Received 29 May 2012; Revised 27 August 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51134012, 51174183)

Corresponding author: Li Lei, lilei46@mail.ustc.edu.cn