

文章编号: 1006-9941(2013)01-0080-05

双模战斗部结构正交优化设计

陈奎¹, 李伟兵¹, 王晓鸣¹, 韩玉², 彭正午¹

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094; 2. 总装备部沈阳军事代表局, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 应用 LS-DYNA 仿真软件, 结合正交优化设计方法, 对弧锥结合形药型罩双模战斗部进行了正交优化设计研究。分析了结构参数(圆弧曲率半径、锥角、药型罩壁厚及装药高度)对双模毁伤元成型性能的影响规律, 同时讨论了弧锥结合罩的弧度部分与锥度部分比例的大小对双模成型的影响。数值模拟结果表明: 两次优化结果均说明药型罩壁厚是确定头部速度的主要因素, 锥角是确定长径比和头尾速度差的主要因素; 当第二次优化的各因素水平分别为圆弧曲率半径是 0.45 倍装药口径, 锥角是 145°, 壁厚是 0.04 倍装药口径, 装药高度是 1.0 倍装药口径, 即弧度部分所占的比例较小时, 得到的爆炸成型弹丸(EFP)和聚能杆式侵彻体(JPC)成型效果都较好。

关键词: 爆炸力学; 弧锥结合罩; 参数优化; 正交设计; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.018

1 引言

双模战斗部是指在同一成型装药结构下, 通过不同的起爆方式而形成的两种不同毁伤元, 如爆炸成型弹丸(EFP)和聚能杆式侵彻体(JPC)。国内外许多学者对 EFP 和 JPC 单一毁伤元战斗部进行了大量研究, 并取得了一定的成果。对双模战斗部国内外也有相关报道, 如 David Bender 等^[1]用 DYNA 2D 软件模拟改变 EFP 装药结构环起爆位置, 得到了不同形状的侵彻体, 蒋建伟^[2]等运用 AUTODYN 软件模拟研究了结构参数对多模毁伤元形成及侵彻的影响, 李伟兵等^[3-4]研究了弧锥结合罩的结构参数和起爆位置等对多模毁伤元成型的影响, 李成兵等^[5]应用 LS-DYNA 软件对设计的变球缺罩装药结构进行数值模拟, 得到装药结构下高速杆式弹丸的成型过程和成型机理。但是上述研究只考虑了单一影响因素, 如何在同一装药结构下综合考虑多个因素对 EFP 和 JPC 成型的影响, 国内外却很少有研究报道。

本工作应用 LS-DYNA 仿真软件, 结合正交优化设计方法, 研究圆弧曲率半径、锥角、药型罩壁厚及装药高度等结构参数对弧锥结合罩在同一装药结构下形

成双模毁伤元 EFP 和 JPC 的影响, 同时研究弧锥结合罩的弧度部分占整个罩的比例大小对双模毁伤元成型的影响, 探索双模战斗部的最佳结构参数匹配组合。

2 双模战斗部结构参数的正交优化设计

2.1 药型罩结构与仿真模型

采用弧锥结合形药型罩, 成型装药结构如图 1 所示, 其中装药直径 D_k 为 100 mm, 药型罩结构参数根据不同方案分别确定。为了便于成型装药 X 光成像试验研究, 本研究的成型装药结构不带壳体。通过装药中心点起爆形成 EFP 及船尾斜面中点处的环形多点起爆形成 JPC, 对不同药型罩结构参数的装药结构进行数值模拟, 研究药型罩锥角 (2α)、弧度曲率半径 (R)、药型罩壁厚 (l) 及装药高度 (H) 对毁伤元成型的影响规律, 此处讨论的是各结构参数在多个因素影响中的规律, 即同时改变圆弧曲率半径、锥角、壁厚及装药高度 4 个因素, 得出其对毁伤元成型的影响规律。

成型装药毁伤元的形成涉及高应变率、高过载过程, 因此本文采用 ALE 算法来计算多模毁伤元的形成过程。主装药为 8701 炸药, 密度为 $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 爆速为 $8425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其本构关系的描述选用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 形式, 选用 JWL 状态方程; 药型罩材料为紫铜, 密度为 $8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 本构方程选用 Johnson-Cook 模型, 状态方程为 Gruneisen 方程。Johnson-Cook 模型采用极限压力模型、最大主应

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11202103)

作者简介: 陈奎(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事战斗部设计及目标毁伤技术研究。e-mail: chenkuai_1987@126.com

力断裂模型和静水压力断裂模型三种断裂模型来表示金属材料的分裂、破碎和失效,本文主要用最大主应力失效准则^[6]。

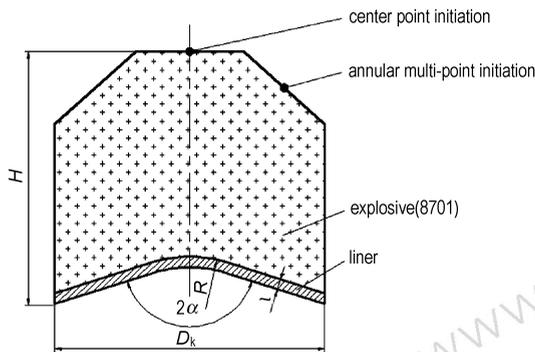


图1 装药结构及起爆位置示意图
Fig.1 Configuration of shaped charge and initiation position

表1 试验结果与仿真结果对比

Table 1 Comparison between experiment results and simulation results

	S1 annulus multi-point initiation (260 μs)				S2 center initiation (220 μs)			
	formation pictures	$v/m \cdot s^{-1}$	L/D	$\Delta v/m \cdot s^{-1}$	formation pictures	$v/m \cdot s^{-1}$	L/D	$\Delta v/m \cdot s^{-1}$
experiment results		2835	9.0	/		2089	3.32	136
simulation results		2794	8.92	721		2175	3.26	187

2.3 优化设计因素、水平和评定指标的确定

在装药类型和药型罩材料一定的条件下,将弧锥结合罩结构尺寸和装药长径比作为优化设计的对象。因此, R 、 2α 、 l 和 H 确定为正交优化设计的4个因素。为了找出弧锥结合罩的弧度部分所占整个罩的比例大小对双模战斗部成型的影响,先取圆弧曲率半径较大(此时弧形部分所占的比例较大)的一组数值进行优化。对于4因素4水平的实验,若按照常规的实验方法,则需要进行 $4^4 = 256$ 次试验,不仅试验的次数多、费时费事,而且无法区分各因素对相应指标(头部速度 v 、长径比 L/D 以及头尾速度差 Δv)的影响的主次顺序。正交优化设计是解决这个问题的有效方法。正交表能够在因素变化范围内均衡抽样,使每次试验都具有较强的代表性,由于正交表具备均衡分散的特点,保证了全面实验的某些要求,这些试验能够较好或更好地达到实验的目的。采用正交表 $L_{16}(4^4)$ 来安排所对应的16个水平,只需要16个数值计算方案,大大

2.2 数值模拟方法的实验验证

在进行优化设计之前,先对上述的弧锥结合型药型罩的两组结构参数结构进行试验验证,以确定仿真结果的可信性。试验采用的结构参数为:(S1) $R = 0.7D_k$, $2\alpha = 130^\circ$, $l = 0.038D_k$, $H = 0.9D_k$, 环形多点起爆;(S2) $R = 0.9D_k$, $2\alpha = 138^\circ$, $l = 0.038D_k$, $H = 0.9D_k$, 中心点起爆。试验结果和数值仿真结果对比如表1所示,其中 v 、 L/D 、 Δv 分别为毁伤元的头部速度、长径比及头尾速度差。表1中“/”是由于试验中有一幅X光照片没有拍到侵彻体的尾部,所以无法计算出其头尾速度差。

通过比较X光试验和仿真结果得到的双模战斗部成型形状和成型参数,可得知数值模拟结果与实验结果吻合较好,说明仿真计算能反映EFP和JPC的成型过程,因此可以采用数值仿真的方法来进行双模战斗部结构参数的优化。

缩减了计算次数,而且还可以区分各因素对相应指标的影响的主次顺序。

由于篇幅所限以及研究方便,现选取了大部分EFP不存在速度梯度的时刻 $260\mu s$ 进行研究,各因素的水平取值见表2。正交表的构造以及EFP和JPC的成型参数见表3。

计算各列水平下的 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 及极差值 S ,见表4。其中 K_i 为所在行对应的第一个数表示因素1在水平1时对应的各值指标之和,记为 K_{11} ,下标中的第一个数为水平数,第二个数代表因素,依次类推;极差 S 为同一列 $K/4$ 中最大数减去最小数的值^[7],即 $S_i = (K_i/4)_{\max} - (K_i/4)_{\min}$

从表4中极差 S 的大小,可以看出各因素对EFP头部速度的影响主次顺序为: l 、 2α 、 R 、 H ;对JPC头部速度的影响主次顺序为: l 、 H 、 R 、 2α 。因此壁厚 l 是影响双模战斗部头部速度的主要因素。

表 2 正交设计各因素水平取值表

Table 2 Factors and levels

factors	R/D_k	$2\alpha/(\circ)$	l/D_k	H/D_k
level 1	0.7	140	0.038	0.9
level 2	0.8	145°	0.040	1.0
level 3	0.9	150°	0.042	1.1
level 4	1.0	155°	0.044	1.2

表 3 正交表的构造 $L_{16}(4^4)$ 及计算结果 (260 μs)

Table 3 Orthogonal table and calculated results

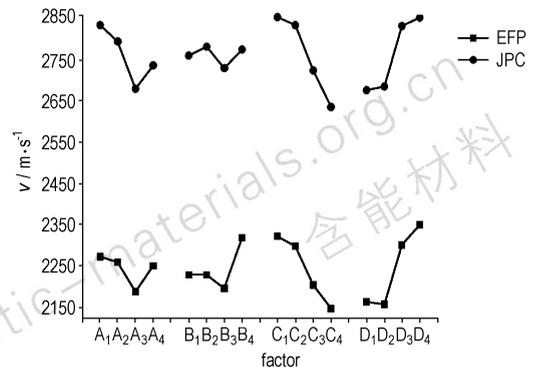
projects	R				EFP			JPC		
	1	2	3	4	v	L/D	Δv	v	L/D	Δv
1	1	1	1	1	2290	3.30	388	2857	7.60	675
2	1	2	2	2	2238	2.83	86	2886	7.43	478
3	1	3	3	3	2254	2.35	0	2852	5.24	389
4	1	4	4	4	2309	1.40	334	2741	2.93	90
5	2	1	2	3	2308	3.21	128	2866	8.29	378
6	2	2	1	4	2441	2.73	0	3015	10.00	407
7	2	3	4	1	2046	1.55	0	2584	5.57	271
8	2	4	3	2	2243	1.26	255	2712	3.25	153
9	3	1	3	4	2251	2.92	0	2765	6.75	433
10	3	2	4	3	2167	2.23	0	2662	5.52	423
11	3	3	1	2	2083	1.93	0	2594	5.71	387
12	3	4	2	1	2248	1.28	221	2697	3.43	106
13	4	1	4	2	2063	2.55	0	2550	5.71	357
14	4	2	3	1	2066	2.15	0	2563	5.43	253
15	4	3	2	4	2399	1.65	0	2886	3.67	126
16	4	4	1	3	2475	1.14	0	2946	3.42	0

表 4 计算结果 (头部速度 v)

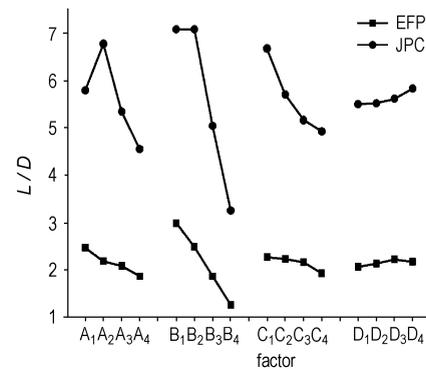
Table 4 Calculated results (tip velocity)

	EFP				JPC			
	R	2α	l	H	R	2α	l	H
K_1	9091	8912	9289	8650	11336	11038	11412	10701
K_2	9038	8912	9193	8627	11177	11126	11335	10742
K_3	8749	8782	8814	9204	10718	10916	10892	11326
K_4	9003	9275	8585	9400	10945	11096	10537	11407
$K_{1/4}$	2272.75	2228	2322.25	2162.5	2834	2759.5	2853	2675.25
$K_{2/4}$	2259.5	2228	2298.25	2156.75	2794.25	2781.5	2833.75	2685.5
$K_{3/4}$	2187.25	2195.5	2203.5	2301	2679.5	2729	2723	2831.5
$K_{4/4}$	2250.75	2318.75	2146.25	2350	2736.25	2774	2634.25	2851.75
S	85.5	123.25	176	49	155	52.5	218.75	176.5

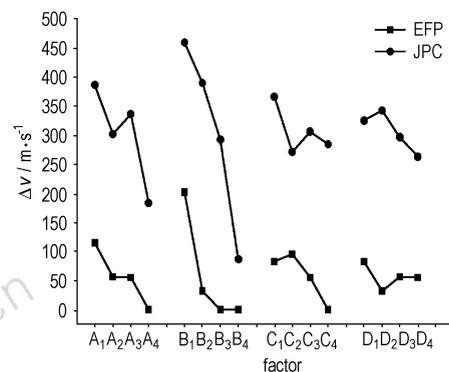
采用同样的方法, 计算各因素对双模毁伤元的长径比和头尾速度差影响的结果, 可以得到影响双模的长径比和头尾速度差的主次顺序都是: 2α 、 R 、 l 、 H 。为了便于综合分析, 现将各指标随因素水平变化的情况用图形表示出来, 如图 2 所示, 其中 A、B、C、D 分别代表 R 、 2α 、 l 和 H 。



a. The change of tip velocity with each factor



b. The change of length-diameter ratio with each factor



c. The change of velocity gradient with each factor

图 2 双模毁伤元各指标随因素的变化曲线

Fig. 2 The change curves of formation parameters of penetrators with factors

从极差 S 以及图 2 中的曲线可以得出: (1) 壁厚 l 对双模毁伤元的头部速度 v 影响最大, 是主要影响因素, 且 l 越小 v 越大; l 对双模战斗部的另外两个指标影响都较小, 是次要因素。因此选取壁厚 $l = 0.038D_k$;

(2) 锥角 2α 对长径比 L/D 和头尾速度差 Δv 的影响都最大, 是主要影响因素, 随着锥角 2α 的增大, L/D 和 Δv 都是减小, 由于要求的指标 L/D 较大而 Δv 较小, 综合考虑选取 $2\alpha = 145^\circ$;

(3) 装药高度 H 对 JPC 成型的头部速度 v 是第二影响因素,随着 H 的增大, v 逐渐增大,而 H 对双模的 L/D 、 Δv 和 EFP 的头部速度 v 却是最小影响因素,因此可以取 $H=1.2D_k$;

(4) 圆弧曲率半径 R 对双模战斗部的 L/D 和 Δv 都为第二影响因素,对 v 是第三影响因素,随着 R 的增大,三个指标都呈现上下波动的现象,权衡考虑,选取 $R=0.80D_k$ 。

综上所述, $\Phi 100\text{ mm}$ 弧锥结合型双模战斗部优化方案是: $R=0.80D_k$, $2\alpha=145^\circ$, $l=0.038D_k$, $H=1.2D_k$ 。

2.4 优化方案仿真计算分析

根据上述分析结果,双模战斗部优化方案为表 2 中的方案 6,按正交优化方法得到的双模战斗部在 $260\mu\text{s}$ 时刻的数值模拟成型形状,如图 3 所示。

但优化出来的 EFP 和 JPC 头部比较钝,这会使得它们的侵彻深度降低而侵彻孔径和后效增大,而且 JPC 的空腔部分所占的比例较大,在飞行过程中很容易由于头尾速度差被拉成多段,会进一步降低飞行的稳定性,如图 4 所示。出现这种现象的原因可能是药型罩圆弧部分曲率半径大时,药型罩顶部平缓,爆轰波对药型罩的顶部压垮面积大,药型罩圆弧部分成型速度很快一致,从而使双模毁伤元 EFP 和 JPC 的头部质量比

较集中;而当药型罩顶部较尖时,最顶端被首先压垮形成速度较高的密实长杆,因此有必要研究弧度部分所占比例较小时对双模战斗部成型的影响。

再选取弧度部分所占比例小的几组数据进行正交优化,圆弧曲率半径依次为 $R=0.40D_k$ 、 $0.45D_k$ 、 $0.50D_k$ 和 $0.55D_k$,而其他参数不变。同理,经过数值计算和比较各因素对双模毁伤元头部速度、长径比以及头尾速度差三个指标的影响,可以得出优化方案是:各因素水平分别为 2,2,2,2,即 $R=0.45D_k$, $2\alpha=145^\circ$, $l=0.04D_k$, $H=1.0D_k$ 。但此次优化得到的结果却不在正交表中,因此需要再次计算。表 5 为再次优化后 $200\mu\text{s}$ 时 EFP 和 JPC 的成型形态图以及成型参数。



图 3 260 μs 时 EFP 和 JPC 的成型形态

Fig. 3 The formation shape of penetrators at 260 μs



图 4 400 μs 时 JPC 的成型形态

Fig. 4 The formation shape of JPC at 400 μs

表 5 200 μs 时 EFP 和 JPC 的成型形态以及成型参数

Table 5 The formation shape of penetrators and formation parameters (200 μs)

	explosively formed penetrator (EFP)				jetting projectile charge (JPC)			
	formation pictures	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	L/D	$\Delta v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	formation pictures	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	L/D	$\Delta v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
simulation results		2185	3.33	0		2963	6.91	349

通过比较两组优化后得到的双模战斗部成型形态图和各成型参数,易发现第二次优化后的效果更好,说明弧锥结合罩的弧度和锥度所占的比例对双模战斗部的成型有较大影响,即当弧度所占的比例较大时,形成的 EFP 和 JPC 头部比较钝,不利于它们对目标进行侵彻;而当锥度所占的比例较大时,得到的双模的头部就比较尖,而且 JPC 在杆体部分也没有空腔,有利于对目标的侵彻、飞行也比较稳定。图 5a、5b 分别为第一、二次优化出来的 JPC 在相同的炸高下对 45# 钢靶板的数值侵彻图,从图中也可以得出第二次优化出来的 JPC 侵彻能力高。因此对于弧锥结合罩,准确选取弧度部分和锥度部分所占的比例对双模战斗部的成型

好及侵彻能力强至关重要。

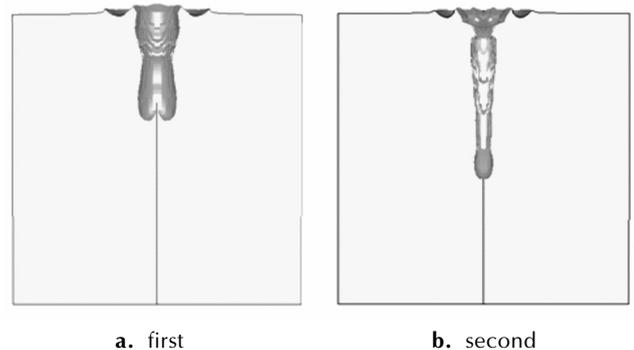


图 5 两次优化的 JPC 的侵彻效果图

Fig. 5 The penetration of JPCs after twice optimization

3 结 论

(1) 利用正交设计和数值仿真相结合的方法对 $\Phi 100$ mm 弧锥结合罩双模战斗部结构参数进行了优化, 通过极差分析, 得到了药型罩曲率半径、锥角、药型罩壁厚、装药高度 4 种因素对 EFP 和 JPC 的头部速度、长径比和头尾速度差的影响主次关系, 两次优化结果都表明药型罩壁厚是确定头部速度的主要因素, 而锥角是确定长径比和头尾速度差的主要因素。

(2) 依次研究了弧锥结合罩弧度部分占整个药型罩比例较大和较小两组数据对双模战斗部成型性能的影响: 当弧度部分较大时, 数值模拟得到的双模毁伤元头部较钝而且空腔部分也较大, 会降低其侵彻能力和飞行稳定性; 对于弧度部分较小时, 正交优化得到了各结构参数分别为 $R = 0.45D_k$, $2\alpha = 145^\circ$, $l = 0.04D_k$, $H = 1.0D_k$, 在此装药结构下, EFP 和 JPC 的成型效果都较好, 有利于对目标进行侵彻。

参考文献:

[1] David Bender, Richard Fong, William Ng, et al. Dual mode war-

head technology for future smart munitions[C] // 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland; Casino Kursaal Congress Center, 2001: 679-684.

[2] 蒋建伟, 帅俊峰, 李娜, 等. 多模毁伤元形成与侵彻效应的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 756-758, 805.

JIANG Jian-wei, SHUAI Jun-feng, LI Na, et al. Numerical simulation of the formation of multimode EFP and its penetration effect to RHA [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(9): 756-758, 805.

[3] 李伟兵, 王晓鸣, 李文彬, 等. 药型罩结构参数对多模毁伤元形成的影响[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 19-23.

LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Effect of liner configuration parameter on formation of multimode penetrator [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 19-23.

[4] LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011: 414-424.

[5] 李成兵, 沈兆武, 裴明敬. 高速杆式弹丸初步研究[J]. 含能材料, 2007, 15(3): 248-252.

LI Cheng-bing, SHEN Zhao-wu, PEI Ming-jing. Preliminary study of high velocity rod-shaped projectile [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(3): 248-252.

[6] Livermore. LS-DYNA Keyword User' Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[7] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

Orthogonal Design Configuration Parameters of Dual Mode Warheads

CHEN Kui¹, LI Wei-bing¹, WANG Xiao-ming¹, HAN Yu², PENG Zheng-wu¹

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. The Military Representative Bureau of Shenyang, Shenyang 110015, China)

Abstract: Using LS-DYNA numerical simulation and orthogonal optimizing design method, dual mode warhead with arc-cone liner was optimized. The effects of dual mode warhead structure parameters (curvature radius, cone angle, thickness of arc-cone liner and the height of the explosive charge) were analyzed, and the arc part-cone part-ratio on the formation of explosively formed penetrator (EFP) and jetting projectile charge (JPC) were discussed. The numerical simulation results show that thickness is the main factor to affect tip velocity while cone angle is to determine length-diameter ratio and velocity gradient; both the performances and formation of EFP and JPC are better in the second optimization when the optimum combination, as curvature radius, cone angle, thickness and the height of the explosive charge is $0.45D_k$, 145° , $0.04D_k$ and $1.0D_k$ respectively, where D_k is shaped charge diameter, that is the arc takes up smaller part.

Key words: explosion mechanics; arc-cone liner; parameters optimization; orthogonal design; numerical simulation

CLC number: TJ410.3; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.018