

文章编号: 1006-9941(2016)08-0735-07

# 装药爆轰控制结构参数对双模毁伤元的影响

樊雪飞<sup>1</sup>, 李伟兵<sup>1</sup>, 王晓鸣<sup>1</sup>, 李文彬<sup>1</sup>, 于良<sup>2</sup>

(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. 山东特种工业集团有限公司, 山东 淄博 255201)

**摘要:** 成型装药中装药爆轰控制结构参数对爆轰波的传播和双模毁伤元的成形有着重要影响,应用 LS-DYNA 仿真软件,研究了装药口径 110 mm、JH-2 炸药条件下隔板参数(隔板直径、隔板厚度、隔板锥角)、装药结构参数(装药高度、小药片高度)对于 EFP 和 JPC 双模毁伤元成型的影响规律,确定了各参数的最佳取值范围,其中隔板直径、厚度分别取为 0.8~0.87 和 0.08~0.12 倍装药口径,隔板半锥角取 52°~60°,装药高度、小药片高度分别取 1.1~1.2 和 0.06~0.12 倍装药口径。结合正交设计方法确定了最佳装药爆轰控制结构参数组合:隔板直径、厚度和半锥角分别取 0.91、0.07 倍装药口径和 52°,装药和小药片高度分别取 1.14 和 0.1 倍装药口径,壳体厚度取 0.09 倍装药口径。进行了 X 光摄影试验验证,数值模拟和试验结果吻合较好。

**关键词:** 结构参数; 双模毁伤元; 数值模拟; 正交设计**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.002

## 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的毁伤元,如爆炸成型弹丸(EFP)和聚能杆式侵彻体(JPC)<sup>[1]</sup>。国内外专家学者进行了大量研究,如 David Bender 等<sup>[2]</sup>应用 DYNA2D 软件模拟改变 EFP 装药结构环起爆位置获得不同形状的侵彻体,蒋建伟<sup>[3]</sup>等运用 AUTODYN 软件模拟研究了结构参数对多模毁伤元成型及侵彻的影响,李伟兵<sup>[4-5]</sup>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,Funston 等人<sup>[6]</sup>在其专利中设计了一种新型成型装药,即 K 装药,通过隔板将点起爆形成的发散型爆轰波变为具有环圈阵面的汇聚爆轰波,从而提高了爆轰载荷<sup>[7]</sup>。上述研究多侧重于药型罩结构参数或者单一参数对双模毁伤元的影响规律,但是针对特定双模战斗部的装药爆轰控制结构参数对双模毁伤元成型的影响以及如何在同一装药结构下考虑多个因素的影响见诸报道较少。

本研究应用 LS-DYNA 仿真软件研究装药爆轰控

制结构参数对 EFP 和 JPC 毁伤元成型的影响,获得隔板及装药参数对双模毁伤元的影响规律,找出了最佳装药爆轰控制结构参数的取值范围,结合正交设计方法优化选取各结构参数的最佳组合,并进行了 X 光试验验证。

## 2 结构设计及方案选取

### 2.1 双模战斗部结构设计

由于起爆方式对聚能侵彻体的影响主要体现在对主装药爆轰波形的控制上以及起爆改变引起的主装药爆轰波对药型罩的不同作用过程,单点起爆主装药中爆轰波波阵面呈球面。装药中心点起爆要经过一段时间才开始对药型罩作用,药型罩顶点起爆,则一起爆就开始对药型罩作用,而且每一时刻爆轰波最大压力区不一样。中心点起爆形成的爆轰波压力峰值比药型罩顶点起爆形成的爆轰波压力峰值来得晚,主要是由于起爆爆轰波需要在主装药中传播一段时间才对药型罩作用,李伟兵<sup>[8]</sup>等研究了药型罩结构参数对多模毁伤元成型的影响,结合单点起爆位置对 EFP 成型的影响规律,优化设计了成型装药。为实现单点起爆形成双模毁伤元,本文采取装药中心点起爆形成 JPC 毁伤元,药型罩顶点起爆形成 EFP 毁伤元,具体装药结构如图 1 所示,其中装药口径为  $D_k$ ,涉及到的装药爆轰控制结构参数有隔板直径  $D_g$ ,锥角  $\beta$ ,厚度  $d$ ,装药高度  $h$ ,小药片高度  $l$ ,壳体厚度  $s$ 。

**收稿日期:** 2016-01-10; **修回日期:** 2016-03-22**基金项目:** 国家自然科学基金资助(11202103); 江苏高校“青蓝工程”资助**作者简介:** 樊雪飞(1990-),男,硕士研究生,主要从事聚能装药战斗部技术研究。e-mail: njfanxuefei@126.com**通信联系人:** 李伟兵(1982-),男,副研究员,博士生导师,主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究。e-mail: njstlwb@163.com

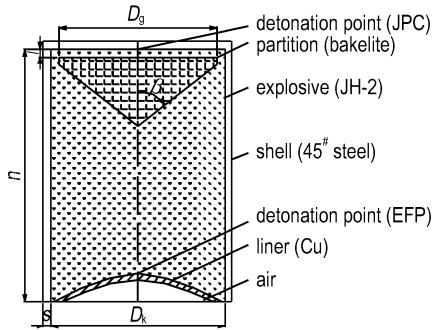


图1 双模毁伤元结构图

Fig.1 Structure of dual mode warhead

## 2.2 仿真模型及研究方案

本研究采用的仿真模型如图1所示,由于成型装药毁伤元的形成涉及高应变率、高过载过程,因此仿真中采用ALE算法来计算涉及网格大变形、材料流动问题的聚能侵彻体形成过程,炸药、隔板、药型罩、空气选用多物质流欧拉算法,炸药、隔板、药型罩、空气与壳体的相互作用采用流固耦合算法。其中,药型罩和壳体材料分别为紫铜和45钢,本构方程选用Johnson-Cook模型,状态方程为Grüneisen方程;Johnson-Cook<sup>[9]</sup>本构方程式为:

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^{p^n}) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^*{}^m)$$

式中, $\sigma_y$ 为材料流动屈服强度、 $A$ 为屈服应力、 $B$ 为应变硬化系数、 $n$ 为应变硬化指数、 $C$ 为应变率相关系数、 $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变、 $\dot{\epsilon}^*$ 为等效塑性应变率、 $m$ 为温度相关系数、 $T^*$ 为无量纲温度。

Grüneisen<sup>[9]</sup>状态方程表达的压力表达式为:

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

式中, $\rho_0$ 为材料初始密度、 $E$ 为内能、 $\rho$ 为当前时间步对应的材料密度、 $C, S_1, S_2, S_3, \gamma_0, \alpha$ 为材料特性参数、 $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。

主装药为JH-2炸药,状态方程选为JWL(Jones-Wilkins-Lee)<sup>[9]</sup>状态方程;其表达式为:

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

式中, $A, B, R_1, R_2, \omega$ 是常数, $E$ 是炸药单位体积中的内能。其中 $R_1 = 4.6, R_2 = 1.35, \omega = 0.25$ ,其余参数见表1。

隔板采用酚醛树脂材料,状态方程同样选用

Grüneisen状态方程,其中 $C = 0.1933, S_1 = 3.49, S_2 = -8.2, S_3 = 9.6$ 。装药中各材料的具体参数如表1所示。

表1 药型罩、隔板及炸药材料参数

Table 1 The material parameter of liner, partition and explosive

liner (Cu)	A /MPa	B /MPa	C	n	m	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>
	89.9	292	0.025	0.31	1.09	8.96
shell (45#Steel)	A /MPa	B /MPa	C	n	m	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>
	496	434	0.014	0.26	1.03	7.83
partition (phenolic resin)	G	SIGY	EH	PC	FS	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>
	2.4	0.05	0	-9	-	1.196
explosive (JH-2)	D /m · s <sup>-1</sup>	$\rho_{C1}$ /GPa	A /GPa	B /GPa	G	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>
	8425	29.66	854.5	2.05	-	1.845

模型中装药口径 $D_k$ 为110 mm、药型罩口部最大外半径 $R$ 为50 mm,外壁曲率半径 $r_1$ 为110 mm,壁厚 $t$ 为4 mm;初步确定模型中各参数的原始取值为 $D_g = 100$  mm,  $d = 4$  mm,  $\beta = 54^\circ$ ,  $h = 125$  mm,  $l = 5$  mm。考察单一变量对双模毁伤元影响规律时,保持其余参数取值不变。其中:隔板直径 $D_g$ 变化范围为76 ~ 104 mm(每次增加4 mm)、隔板厚度 $d$ 变化范围为2 ~ 16 mm(每次增加2 mm)、隔板半锥角 $\beta$ 变化范围为 $42^\circ \sim 70^\circ$ (每次增加 $2^\circ$ )、装药高度 $h$ 变化范围为110 ~ 145 mm(每次增加5 mm)、小药片高度 $l$ 变化范围为3 ~ 17 mm(每次增加2 mm)。下文进行曲线规律描述时,为得到通用性的适合不同尺寸装药的参数取值范围,以装药口径 $D_k$ 为量化标准,以各参数与 $D_k$ 的比值为横轴,得出各参数的变化规律图。

## 3 隔板结构参数的影响规律

### 3.1 隔板直径的影响

计算隔板直径各取值下双模毁伤元的成型指标,得出头部速度 $v_{ip}$ 和长径比 $L/D$ 变化曲线图2。由于EFP毁伤元的头部速度和长径比随隔板直径的增加无明显变化,JPC毁伤元头部速度和长径比则随之增加,因此选择JPC毁伤元头部速度和长径比较大时的取值作为最佳取值范围,考虑到隔板直径过大会影响爆轰波的传播,因此选取隔板直径 $D_g$ 为 $0.8D_k \sim 0.87D_k$ 。

### 3.2 隔板厚度的影响

计算隔板厚度各取值下双模毁伤元的成型指标,得出头部速度 $v_{ip}$ 和长径比 $L/D$ 变化曲线图3。由于

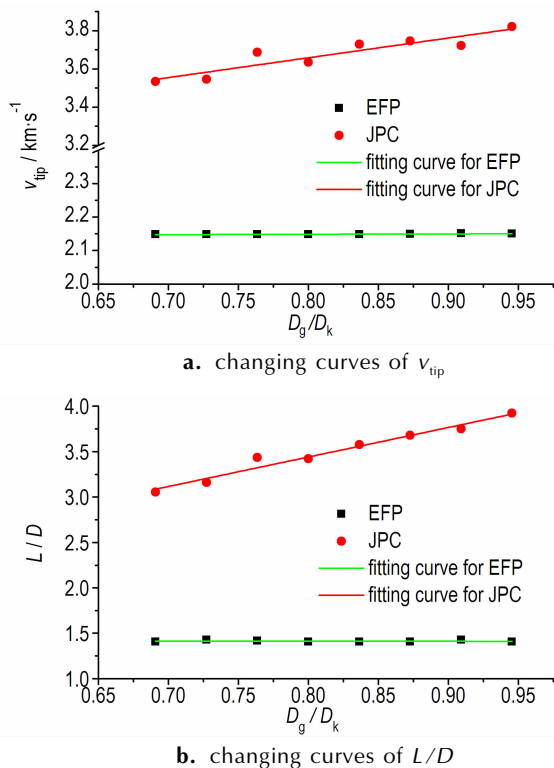


图2 侵彻体成型参数随隔板直径的变化曲线

Fig. 2 The change of the forming parameters with the diameter of the partition

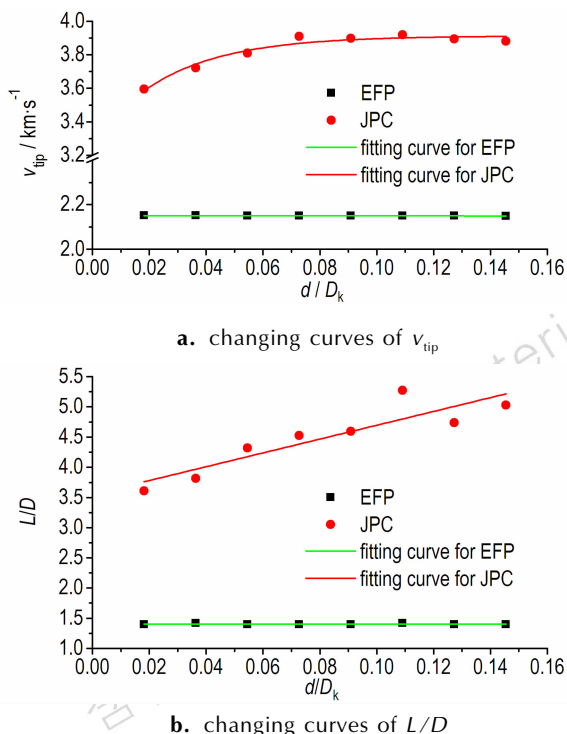


图3 侵彻体成型参数随隔板厚度的变化曲线

Fig. 3 The change of the forming parameters with the thickness of the partition

EFP 毁伤元的头部速度和长径比随隔板厚度的增加无明显变化, JPC 毁伤元的头部速度呈现逐渐增加后趋于平稳的趋势, 长径比则呈现逐渐增加的趋势。因此, 当 JPC 毁伤元头部速度趋于稳定后, 选择长径比较大时所对应的取值作为最佳取值范围, 选取隔板厚度  $d$  为  $0.08D_k \sim 0.12D_k$ 。

### 3.3 隔板锥角的影响

计算隔板半锥角各取值下双模毁伤元的成型指标, 得出头部速度  $v_{tip}$  和长径比  $L/D$  变化曲线图 4。由于 EFP 毁伤元的头部速度和长径比随隔板半锥角的增加无明显变化, 但 JPC 毁伤元的头部速度和长径比则呈现减小趋势, 因此选择 JPC 毁伤元头部速度和长径比较大时所对应取值作为最佳取值范围, 考虑到隔板半锥角过小会导致隔板体积过大影响装药量, 故选取隔板半锥角  $\beta$  为  $52^\circ \sim 60^\circ$ 。

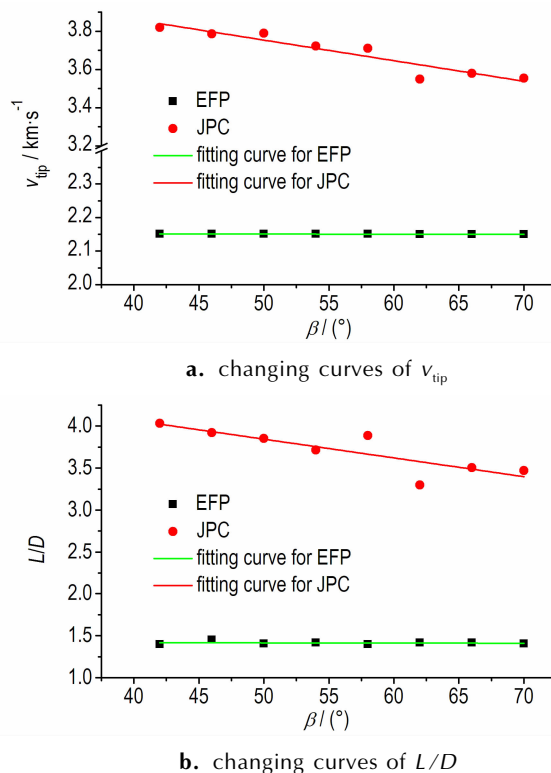


图4 侵彻体成型参数随隔板锥角的变化曲线

Fig. 4 The change of the forming parameters with the cone angle of the partition

## 4 装药结构参数的影响规律

### 4.1 装药高度的影响

计算装药高度各取值下双模毁伤元的成型指标, 得出头部速度  $v_{tip}$  和长径比  $L/D$  变化曲线图 5。由于 EFP 毁伤元头部速度和长径比随装药高度增加无明显

变化, JPC 毁伤元头部速度呈递增趋势, 长径比则呈缓慢递减趋势。因此, 为使 JPC 毁伤元头部速度和长径比均能取值较大, 选择曲线中间部分作为取值范围, 选取装药高度  $h$  为  $1.1D_k \sim 1.2D_k$ 。

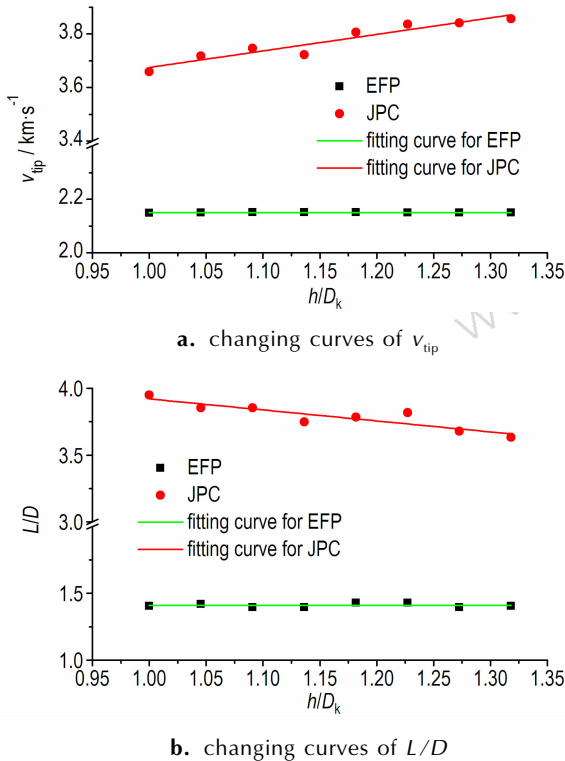


图5 侵彻体成型参数随装药高度的变化曲线

Fig. 5 The change of the forming parameters with the height of the charge

#### 4.2 小药片高度的影响

计算小药片高度各取值下双模毁伤元的成型指标, 得出头部速度  $v_{tip}$  和长径比  $L/D$  变化曲线图 6。由于 EFP 毁伤元头部速度和长径比随小药片高度的增加无明显变化, JPC 毁伤元头部速度和头尾速度差整体呈现缓慢递减趋势。考虑到小药片高度过大浪费装药量, 过小则影响装药顶点起爆, 因此小药片高度取值不能过大过小且对应的 JPC 毁伤元头部速度和长径比尽量取较大值, 故选取小药片高度  $l$  为  $0.06D_k \sim 0.12D_k$ 。

### 5 装药爆轰控制结构参数正交设计及试验验证

#### 5.1 正交设计方案

将隔板结构参数(隔板直径  $D_g$ 、隔板厚度  $d$ 、隔板锥角  $\beta$ )、装药高度  $h$ 、小药片高度  $l$  以及壳体厚度  $s$  作为正交优化的六个参数, 每个因素选取 5 个水平参与正交设计<sup>[10]</sup>。各因素及其对应的水平见表 2。

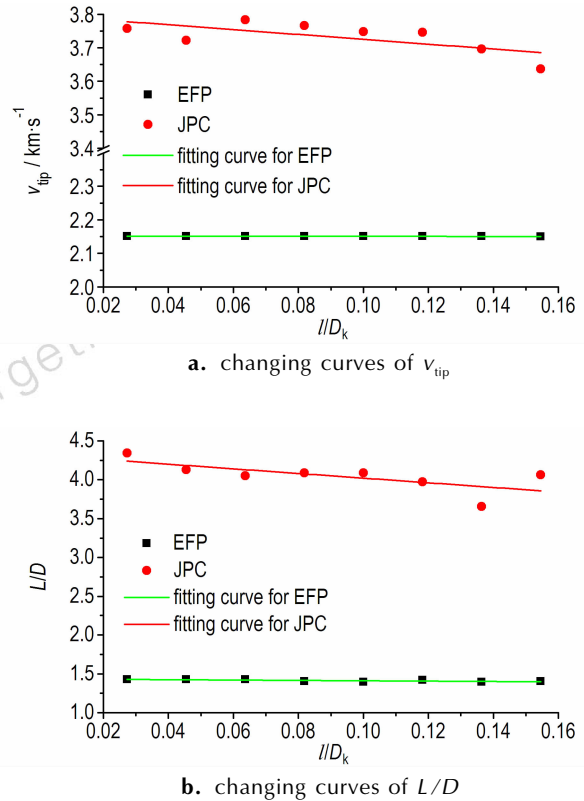


图6 侵彻体成型参数随小药片高度的变化曲线

Fig. 6 The change of the forming parameters with the height of the small charge

表2 正交设计各因素水平表

Table 2 Factor levels in orthogonal design

level	factor					
	$D_g/D_k$	$d/D_k$	$\beta$	$h/D_k$	$s/D_k$	$l/D_k$
1	0.8	0.02	50	1.05	0.02	0.03
2	0.84	0.04	52	1.09	0.04	0.05
3	0.87	0.06	54	1.14	0.05	0.06
4	0.91	0.07	56	1.18	0.07	0.08
5	0.95	0.09	58	1.23	0.09	0.10

#### 5.2 计算结果及分析

正交表的构造以及 EFP 和 JPC 的成型参数见表 3, 由于该结构装药为匹配双模毁伤元成型, 故选取同一时刻的 EFP 与 JPC 成型参数进行比较, 而此时 EFP 计算时间较短仍存在一定的头尾速度差。利用极差分析法<sup>[11]</sup>对 25 次仿真计算结果进行分析, 计算各列水平下的极差  $S$ , 通过极差  $S$  的大小可以得到各因素对各个指标影响的主次顺序。分析可得壳体厚度和隔板直径分别是影响 EFP 和 JPC 毁伤元头部速度的最主要因素, 对 EFP 毁伤元头部速度的影响主次顺序为:  $s$ 、 $D_g$ 、 $d$ 、 $\beta$ 、 $h$ 、 $l$ ; 对 JPC 毁伤元头部速度的影响主次顺序

为： $D_g$ 、 $s$ 、 $d$ 、 $\beta$ 、 $l$ 、 $h$ 。按照同样的极差分析方法，计算各因素对于双模毁伤元头尾速度差和长径比的影响规律。结果表明，隔板厚度是影响 EFP 和 JPC 毁伤元头尾速度差的主要因素，对 EFP 毁伤元头尾速度差的影响主次顺序为： $d$ 、 $h$ 、 $\beta$ 、 $s$ 、 $l$ 、 $D_g$ ；对 JPC 毁伤元头尾速

度差的影响主次顺序为： $d$ 、 $D_g$ 、 $h$ 、 $s$ 、 $l$ 、 $\beta$ ；壳体厚度和隔板直径分别是影响 EFP 和 JPC 毁伤元长径比的最主要因素，对 EFP 毁伤元长径比影响的主次顺序为： $s$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $D_g$ 、 $\beta$ 、 $l$ ；而对 JPC 毁伤元长径比影响的主次顺序为： $d$ 、 $D_g$ 、 $s$ 、 $h$ 、 $l$ 、 $\beta$ 。

表 3 正交表的构造 ( $L_{25}$ ) 及计算结果 ( $150 \mu s$ )

Table 3 Orthogonal table and calculated results

projects	A	B	C	D	E	F	EFP			JPC		
	1	2	3	4	5	6	$v_{tip}/m \cdot s^{-1}$	$\Delta v /m \cdot s^{-1}$	$L/D$	$v_{tip}/m \cdot s^{-1}$	$\Delta v /m \cdot s^{-1}$	$L/D$
1	1	1	1	1	1	1	2023	52	1.27	3379	1010	4.00
2	1	2	2	2	2	2	2121	44	1.43	3663	1031	3.88
3	1	3	3	3	3	3	2169	38	1.40	3409	878	3.24
4	1	4	4	4	4	4	2205	45	1.40	3852	1170	4.05
5	1	5	5	5	5	5	2223	43	1.41	3881	1139	4.42
6	2	1	2	3	4	5	2205	43	1.42	3641	1140	4.38
7	2	2	3	4	5	1	2224	35	1.40	3454	676	2.72
8	2	3	4	5	1	2	2012	46	1.21	3205	1167	3.68
9	2	4	5	1	2	3	2122	55	1.43	3759	1202	4.26
10	2	5	1	2	3	4	2166	48	1.40	3746	1275	4.76
11	3	1	3	5	2	4	2122	59	1.33	3633	1136	3.98
12	3	2	4	1	3	5	2167	54	1.46	3558	1194	4.37
13	3	3	5	2	4	1	2142	37	1.84	3835	1222	4.54
14	3	4	1	3	5	2	2209	38	1.97	3881	1262	4.47
15	3	5	2	4	1	3	1906	21	1.03	3817	1376	5.87
16	4	1	4	2	5	3	2229	38	1.42	3733	1081	4.02
17	4	2	5	3	1	4	2024	55	1.24	3678	1197	4.68
18	4	3	1	4	2	5	2123	54	1.41	3767	1115	3.96
19	4	4	2	5	3	1	2174	40	1.43	3884	1122	3.93
20	4	5	3	1	4	2	2201	35	1.42	3852	1424	5.22
21	5	1	5	4	3	2	2172	41	1.42	3661	950	3.87
22	5	2	1	5	4	3	2209	38	1.46	3905	1199	4.12
23	5	3	2	1	5	4	2220	34	1.44	3849	1381	5.18
24	5	4	3	2	1	5	2023	43	1.25	3783	1448	6.02
25	5	5	4	3	2	1	2123	42	1.40	3940	1382	5.24

为了分析每个因素中各个水平对三个评价指标的影响情况，现将各指标随因素水平变化的情况用图形表示出来。其中 A、B、C、D、E、F 分别代表隔板直径  $D_g$ 、隔板厚度  $d$ 、隔板锥角  $\beta$ 、装药高度  $h$ 、壳体厚度  $s$  以及小药片高度  $l$  共 6 个不同参数，1、2、3、4、5 分别代表各个参数下对应的 5 个水平，这样可以清楚的知道各个因数对每个评价指标的影响规律，并可以得到不同因数之间对同一指标的影响差异。

将毁伤元的头部速度  $v_{tip}$ ，头尾速度差  $\Delta v$ ，长径比  $L/D$  作为评价指标，根据相关资料文献可知，毁伤元头部速度越大，对侵彻越有利。针对 EFP 毁伤元头尾速度差不能过大，否则容易导致毁伤元因较大的头尾速度差而发生断裂。其次将大长径比的毁伤元作为评

价标准。

分析图 7：壳体厚度和隔板参数是影响评价指标最重要的因素，取壳体厚度  $s$  为  $0.09 D_k$ ；隔板参数中隔板直径和厚度对三个评价指标影响较大，锥角影响较小，因此选择隔板直径  $D_g$  为  $0.91 D_k$ ，隔板厚度  $d$  为  $0.07 D_k$ ，隔板半锥角  $\beta$  为  $52^\circ$ ；装药高度和小药片高度对双模毁伤元成形影响小于其他结构参数，取装药高度  $h$  为  $1.14 D_k$ ，小药片高度  $l$  为  $0.1 D_k$ 。考虑爆轰控制结构参数对 EFP 和 JPC 双模毁伤元的整体影响，最终确定设计方案为“ $A_4 B_4 C_2 D_3 E_5 F_5$ ”。由于此方案并不在正交设计表中，因此需要按照优化设计后的方案重新进行计算和仿真，得出  $200 \mu s$  时刻该方案的三个评价指标值以及双模毁伤元侵彻体的成型情况如

表 4 所示。

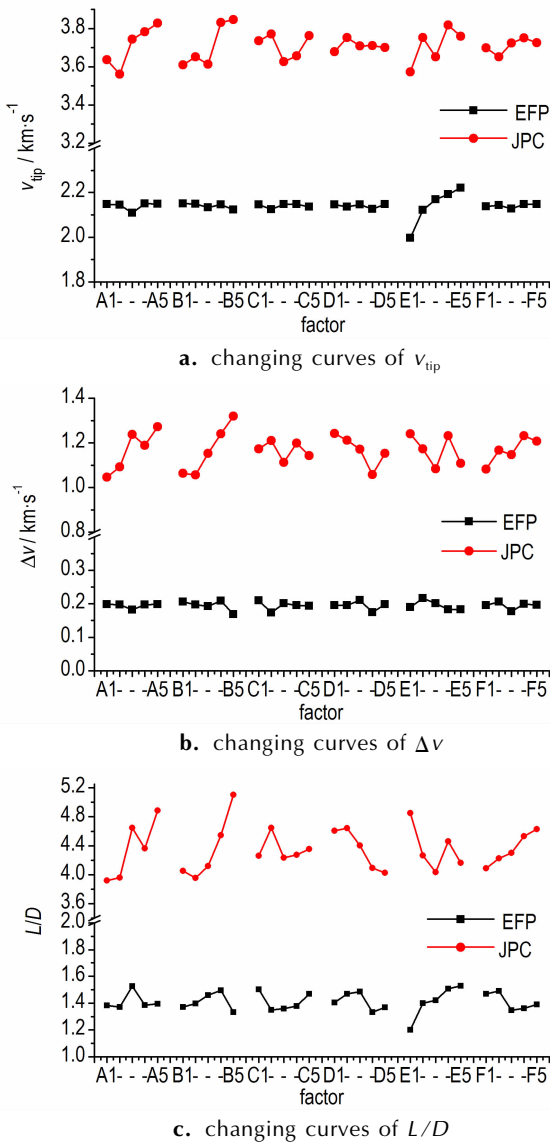


图 7 双模毁伤元各指标随因数的变化曲线

Fig.7 The curve of change in different index for the Dual Mode damage element

表 4 正交设计方案下 EFP 和 JPC 的成型形态和成型参数

Table 4 The forming shape and forming parameters of EFP and JPC under orthogonal design

simulation results	formulation picture	$v_{tip}$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta v$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$L/D$
EFP (200 $\mu\text{s}$ )		2188	8	1.698
JPC (200 $\mu\text{s}$ )		3928	1147	4.970

5.3 试验验证

试验装置主要包括成型装药、目标靶块、炸高筒、

两个呈 45° 交汇的 X 光射线管以及 300 kV 的脉冲 X 光机、两个底片和底片保护盒等。试验与仿真成型图如表 5 所示。

表 5 仿真结果与试验结果对比

Table 5 Comparison of the experiment results and simulation ones

type	EFP		JPC	
	80 $\mu\text{s}$	120 $\mu\text{s}$	80 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
experiment results				
simulation results				

毁伤元成型参数方面,如表 6 所示,仿真与试验结果吻合较好。该设计方案下,EFP 和 JPC 双模毁伤元头部速度均达到最大值,满足头部速度大,侵彻能力强的指标;此外,EFP 毁伤元的头尾速度差较小,满足头尾速度差小,防止断裂的原则;与此同时双模毁伤元的长径比均达到较高值。因此对于双模毁伤元的成型该方案均可达到较好的成型形态和成型参数。

表 6 不同时刻毁伤元试验数据与仿真数据对比

Table 6 Comparison of the experiment data with simulated ones for damage element at different time

type	method	$v_{tip}$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_{tail}$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$L$ / $\text{mm}$	$D$ / $\text{mm}$
EFP (120 $\mu\text{s}$ )	simulation	2222	2007	64.5	51.1
	experiment	2025	1954	65.0	54.0
JPC (80 $\mu\text{s}$ )	simulation	4054	2533	113.9	50.4
	experiment	4000	2500	123.14	53.36

6 结论

(1) 研究发现, JH-2 装药条件下,装药爆轰控制结构参数对 JPC 毁伤元的影响大于 EFP 毁伤元。最终确定装药口径 110 mm 的成型装药最佳爆轰控制结构参数取值范围为: 隔板直径  $D_g$  为  $0.8D_k \sim 0.87D_k$ , 隔板厚度  $d$  为  $0.08D_k \sim 0.12D_k$ , 隔板半锥角  $\beta$  为  $52^\circ \sim 60^\circ$ , 装药高度  $h$  为  $1.1D_k \sim 1.2D_k$ , 小药片高度  $l$  为  $0.06D_k \sim 0.12D_k$ 。

(2) 通过正交设计和极差分析得出此成型装药中装药爆轰控制结构参数对于双模毁伤元影响的主次顺序。对于 EFP 和 JPC 毁伤元头部速度影响的主次顺序

分别为:  $s, D_g, d, \beta, h, l$  和  $s, h, d, D_g, l, \beta$ 。对于 EFP 和 JPC 毁伤元头尾速度差影响的主次顺序为:  $d, h, \beta, s, l, D_g$  和  $D_g, s, h, l, \beta, d$ 。对于 EFP 和 JPC 毁伤元长径比影响的主次顺序为:  $s, d, h, D_g, \beta, l$  和  $s, D_g, d, h, \beta, l$ 。

(3) 该 110 mm 装药口径的成型装药, 其形成双模毁伤元时, 装药爆轰控制结构参数的最优组合为  $D_g = 0.91 D_k, d = 0.07 D_k, \beta = 52^\circ, h = 1.14 D_k, s = 0.09 D_k, l = 0.1 D_k$ 。并进行了 X 光摄影试验验证了双模毁伤元成型较好

#### 参考文献:

- [1] 陈奎, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 双模战斗部结构正交优化设计[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 80-83.  
CHEN Kui, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Orthogonal design configuration parameters of dual mode warheads[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 80-83.
- [2] David B, Richard F, William N, et al. Dual mode warhead technology for future smart munitions[C] // 19th International Symposium on Ballistics, 2001.
- [3] 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.  
JANG Jian-wei, SHUAI Jun-feng, LI Na, et al. Numerical simulation of formation of multimode EFP and its penetration effect to RHA[J]. *Transaction of Beijing Institute Technology*, 2008, 28(9): 756-758, 805.
- [4] 李伟兵, 李文彬, 王晓鸣, 等. 药型罩结构对多模毁伤元形成的影响[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 19-23.

- LI Wei-bing, LI Wen-bin, WANG Xiao-ming, et al. Effect of liner configuration parameter on formation of multimode penetrator[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 19-23.
- [5] 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.
- [6] Funston R J, Mattsson K V, Ouye N. K-charge-A multipurpose shaped charge warhead: USA, US6393991 B1[P]. 2002-05-28.
- [7] 陈闯, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 串联战斗部前级 K 装药结构的优化设计[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 73-78.  
CHEN Chuang, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Optimization design of precursor K-Charge structure of tandem warhead[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(1): 73-78.
- [8] 李伟兵, 王晓鸣, 李文彬, 等. 单点起爆形成多模式 EFP 的可行性研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 204-209.  
LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Feasibility research on the formation of a multimode explosively formed penetrator with single-point initiation[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2011, 31(2): 204-209.
- [9] Livermore. LS-DYNA Keyword Users Manual[CP]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [10] 正交设计试验法编写组. 正交试验设计方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.  
Composer group on design method for orthogonal test. Design method for orthogonal test[M]. Shanghai: Shanghai Publishing House of Science and Technology, 1979.
- [11] 袁志发, 周静芋. 实验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.  
YUAN Zhi-fa, ZHOU Jing-yu. Design and analysis of experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

## Effects of Charge Detonation Control Structure Parameters on Dual Mode Damage Element

FAN Xue-fei<sup>1</sup>, LI Wei-bing<sup>1</sup>, WANG Xiao-ming<sup>1</sup>, LI Wen-bin<sup>1</sup>, YU Liang<sup>2</sup>

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Shandong Special Industrial Group Co., Ltd, Zibo 255201, China)

**Abstract:** In shaped charge, the detonation control structure parameters of the charge has important influences on the propagation of detonation wave and the formation of dual mode damage element, the influences and regulars of partition's structure parameters (partition's diameter, partition's thickness, partition's cone angle) and charge's structure parameters (charge's height and small explosive column's height) on the formation of explosive formed projectile (EFP) and jetting projectile charge (JPC) dual mode damage element under the condition of 110 mm charge caliber and JH-2 explosive were researched using LS-DYNA simulation software. The optimal range of the parameters was determined, among them, partition's diameter and thickness are taken for 0.8-0.87 and 0.05-0.09 times of charge caliber, respectively, partition's cone angle is taken for  $52^\circ-60^\circ$ , the charge's height and small explosive column's height are taken for 1.1-1.2 and 0.06-0.12 times of charge caliber, respectively. Combining with the orthogonal optimizing design method, the best parameter's group of the charge detonation structure was determined; the diameter, thickness and cone angle of partition were taken for 0.91, 0.07 times of charge caliber and  $52^\circ$ , respectively. Charge's height and small explosive column's height were taken for 1.14 and 0.1 times of charge caliber, respectively, the thickness of shell was taken for 0.09 times of charge caliber. X light photographic test was carried out, revealing that the simulation results are in good agreement with the experimental ones.

**Key words:** structure parameter; dual mode warhead; numerical simulation; orthogonal design

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.002