

文章编号: 1000-4750(2016)01-0217-06

# 基于带隔板装药实现双模转换机理研究

周 欢<sup>1,2</sup>, 李伟兵<sup>1</sup>, 沈晓军<sup>1,3</sup>, 李文彬<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 凌云科技集团, 武汉 430040; 3. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

**摘 要:** 针对带隔板成型装药结构通过改变单点起爆位置实现双模转换的问题, 该文应用爆轰波形成理论分析不同起爆情况下药型罩表面压力变化规律, 建立药型罩顶端起爆形成 EFP(Explosively Formed Projectile)与装药顶端起爆形成 JPC(Jetting Projectile Charge)的爆轰压力理论计算模型, 正交优化设计结合 LS-DYNA 有限元仿真软件计算获得形成较佳双模毁伤元的等壁厚扁平偏心半球药型罩参数, 并进行了 X 光成像与侵彻试验研究, 其中在  $13D_k$  炸高条件下 EFP 对钢靶的侵深可达  $0.64D_k$ , JPC 可达  $2.42D_k$ 。

**关键词:** 成型装药; 双模; 爆轰波; 药型罩; 侵彻

中图分类号: O381 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0447

## STUDY ON THE TRANSFORMATION MECHANISM OF DUAL-MODE ABOUT THE SHAPED CHARGE WITH A WAVE SHAPER

ZHOU Huan<sup>1,2</sup>, LI Wei-bing<sup>1</sup>, SHEN Xiao-jun<sup>1,3</sup>, LI Wen-bin<sup>1</sup>

(1. Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China;

2. Ling Yun Science &amp; Technology Group, Wuhan, 430040, China;

3. 63961 Unit of the PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** A shaped charge was produced with a wave shaper that can transform dual-mode penetrators by changing the single-point detonation location. The theory of denotation wave formation was applied to analyze the changes of liner surface pressure in different initiation situations. An analytical model was established for the EFP(Explosively Formed Projectile)formed by denotation at the top of a liner, and for the JPC(Jetting Projectile Charge)formed by denotation at the center of a charge. The ways of orthogonal optimizing design and LS-DYNA finite element simulation software were used to obtain the suitable structural parameters of a uniform-thickness eccentric hemisphere liner, and X-ray imaging and penetration experiments were then conducted. The penetration depth of EFP in a steel target was  $0.64D_k$  (the charge diameter, while that of JPC was  $2.42D_k$  when the burst height was approximately  $13D_k$ ).

**Key words:** shaped charge; dual-mode; detonation wave; liner; penetration

近年来, 随着高新技术下的局部战争愈加频繁, 战场目标复杂程度不断加大, 多模式成型装药战斗部以其毁伤模式多、效费比高的突出优点越来越受到各国研究人员的重视。早在 20 世纪 90 年代, 国外的 Richard Fong<sup>[1]</sup>和 Lawther 等<sup>[2]</sup>就通过加装格

栅和改变起爆方式来实现毁伤元的转换, 但其研究缺乏理论和试验支撑, 实用性较差。后来, Bender<sup>[3]</sup>、Whelan 等<sup>[4]</sup>通过研究多点环起爆装置来实现毁伤元转化, 该方法较易实现毁伤元转换但同步性与可靠性较差。国内在多模式战斗部方面的研究起步较

收稿日期: 2014-05-28; 修改日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202103); 南理工紫金之星培养基金项目(2013ZJ\_0201)

通讯作者: 李伟兵(1982—), 男, 浙江宁波人, 副教授, 博士, 从事弹药战斗部设计与目标毁伤技术研究(E-mail: njstlwb@163.com).

作者简介: 周 欢(1988—), 男, 湖北当阳人, 硕士生, 从事聚能装药成型与侵彻力学研究(E-mail: 987624132@qq.com);

沈晓军(1959—), 男, 江苏海门人, 高工, 博士, 从事弹药工程与爆炸技术研究(E-mail: SXJ\_1959@126.com);

李文彬(1965—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 从事摧毁机理与终点效应研究(E-mail: lwb2000cn@yahoo.com).

晚但后期研究较多，其中蒋建伟<sup>[5]</sup>、李伟兵等<sup>[6]</sup>通过对传统船尾型装药结构下点与环起爆方式实现毁伤元转换的理论及仿真进行研究，得出该方法可较好的实现毁伤元间的转换，但该装药结构下炸药能量利用率低、毁伤元威力有限。因此，有必要对装药结构进行改进。目前，国内外针对在可提高炸药能量利用率的带隔板成型装药结构下，通过简单的改变单点起爆位置方法来实现双模毁伤元转换的可行性、装药参数匹配及毁伤元威力等问题还未见报道。

本文以带隔板成型装药结构为载体，通过简单的改变单点起爆位置的方法，应用爆轰波理论对各自起爆点位置下毁伤元形成机理进行分析，并利用 LS-DYNA 有限元仿真软件设计出一种能够形成双模毁伤元的成型装药结构，最后进行了 X 光成像与侵彻试验研究。

### 1 点起爆形成双模毁伤机理分析

一般对于结构确定的成型装药来说，药型罩表面上的爆轰载荷分布决定了药型罩的压垮变形趋势，而爆轰载荷又是通过不同起爆方式形成爆轰波来传递的。因此，不同起爆方式下形成的爆轰波阵面的结构形状便决定了爆轰载荷的分布，从而也决定了毁伤元的成型。本文研究的是在带隔板小长径比成型装药结构条件下，通过简单的改变单点起爆位置的方法来实现成型较好的 EFP 毁伤元与 JPC 毁伤元间转换的可行性问题。

#### 1.1 EFP 毁伤元形成机理分析

当在药型罩顶部中心位置起爆时，此时装药为单点起爆，根据相关研究<sup>[7]</sup>表明，炸药在单点起爆条件下仅能产生 C-J 球面爆轰波，而无法形成马赫波，其可简化为如图 1 所示的对应炸药块微元对罩微元的一维抛射运动。

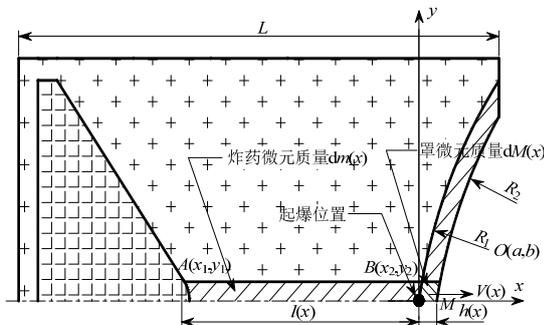


图 1 药型罩顶点起爆时罩微元的一维抛射运动  
Fig.1 One dimensional motion of liner element it formed at initiation top point of liner

如图 1 所示，药型罩微元  $M(x, y)$  被炸药块微元驱动向右运动的同时并伴随有向左传播的球面爆轰波，本文运用爆炸对物体的驱动加载理论<sup>[8]</sup>来分析爆轰产物对药型罩的作用，由牛顿第二定律可知：

$$P_b \cdot A_0 = -dM \frac{dv}{dt_1} \tag{1}$$

$$t_1 = t - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D} \tag{2}$$

式中： $P_b$  为炸药爆轰时作用在罩微元上的压力； $A_0$  为罩微元的横截面积； $v$  为罩微元速度； $dM$  为罩微元质量； $t_1$  为爆轰波传到对应微元时间； $D$  为炸药爆速。

然后通过相关关系及相关文献<sup>[9-10]</sup>中的分析过程，并考虑到装药及罩微元位置影响，得到作用在药型罩微元上的压力  $P_b$  的表达式为：

$$\frac{P_b}{P_H} = \frac{64}{27} \left( \frac{1}{\sqrt{4 + \frac{32dm}{27dM} \cdot \frac{D}{l} \cdot t_1}} + k \cdot \frac{l}{L} \right)^3 \tag{3}$$

式中： $P_H$  为 C-J 爆轰压力； $dm$  为炸药微元质量； $l$  为炸药微元长度； $L$  为装药高度； $k$  为修正因子。

通过上述分析可近似求解罩微元表面处的压力随时间的变化，由于在药型罩顶端单点起爆将形成向外传播的球面波，该爆轰波对罩微元表面处爆轰压力小于 C-J 爆轰压力  $P_H$  并呈指数衰减，最终使得药型罩在该爆轰载荷作用下翻转形成 EFP 毁伤元。

#### 1.2 JPC 毁伤元形成机理分析

参照图 1 装药结构示意图，当在主装药端面顶点中心起爆点位置起爆时，由于装药中带有隔板，隔板上部发散的爆轰波绕过隔板转变成具有环圈阵面形状的汇聚爆轰波并传至下方炸药区，此时装药中爆轰波的传播和反射过程可近似用图 2 来表示。

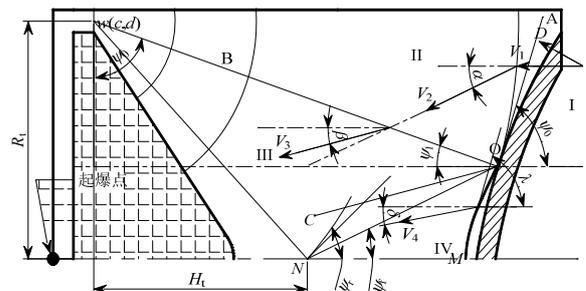


图 2 装药顶点起爆时爆轰波传播与反射  
Fig.2 The detonation wave propagation and reflection when it formed at initiation top point of charge

如图 2 所示的几何关系可知, 爆轰波阵面在装药对称轴上的入射角  $\psi_r$  为:

$$\tan \psi_r = \frac{H_t}{R_t} \quad (4)$$

式中:  $R_t$  为起爆点到装药对称轴距离;  $H_t$  为起爆点在装药对称轴上投影点到爆轰波阵面与装药对称轴交点距离。

当爆轰波阵面 OA 右端 I 区中未反应的炸药以爆速  $D$  向分界面以入射角  $\psi_0$  斜入射时, 此时站在 O 点处可看到平行于分界面的炸药流从 I 区以速度  $V_1$  穿过爆轰波阵面 OA。当爆轰气体产物以  $V_3$  速度流入 III 区, 此时由反射冲击波阵面 OB 两边流入与流出气体产物质量和动量守恒及冲击波的兰钦-雨古尼奥方程<sup>[11]</sup>得到 III 区爆轰压力  $P_3$ :

$$\frac{P_3}{P_H} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_2^2 \sin^2(\psi_1 + \alpha) - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为爆轰气体产物多方指数;  $P_H$  为 C-J 爆轰波面压力;  $M_2$  为 II 区马赫数;  $\psi_1$  为反射冲击波阵面夹角;  $\alpha$  为爆轰气体进入 II 区的偏转角。

当爆轰波阵面的入射角  $\psi_0$  增大到一定程度时, 爆轰产物以  $V_2$  的速度穿过反射冲击波阵面 OB 时的折转角  $(\alpha-\beta)$  将大于此处爆轰产物所能达到的最大折转角, 从而造成物质的堆积, 迫使反射冲击波被推离壁面一定距离, 形成非正规马赫反射, 形成马赫杆 OM。此时 III 区被滑移线 OC 划分成 III 区和 IV 区两部分, 通过相关关系可得到 IV 区的爆轰压力  $P_4$ :

$$\frac{P_4}{P_H} = \frac{\sin^2 \lambda}{\sin^2 \psi_0} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{\eta \sin^2 \psi_0}{\sin^2 \lambda}} \right) \quad (6)$$

式中:  $\eta$  为过渡压缩系数;  $\lambda$  为马赫杆与来流间夹角。

本文参照 Dunne 的文献<sup>[12]</sup>选取  $45.61^\circ$  作为爆轰波发生马赫反射的具体起点, 通过对上述式子计算得到爆轰波随入射角变化发生反射时的压力变化曲线图如图 3 所示。

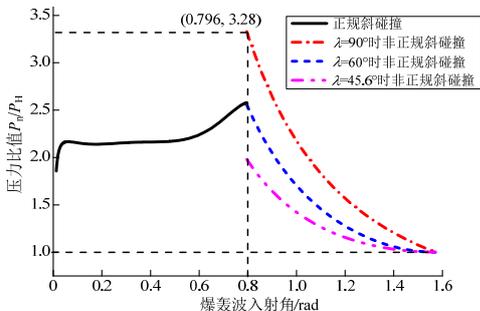


图 3 爆轰波随入射角变化的压力变化曲线

Fig.3 The pressure change curve of detonation wave changes with the angle of incidence

通过图 3 可知爆轰波发生正规和非正规下碰撞可以较显著的增加爆轰压力, 使得药型罩在该爆轰载荷作用下压垮形成头部速度高且均匀连续的杆式 JPC 毁伤元。

## 2 仿真模型的建立与结构优化

### 2.1 仿真模型的建立

本文所建立的装药结构模型如图 4 所示, 模型中装药口径  $D_k$  为 110 mm, 装药的其他参数参照已有关于带隔板装药射流成型研究文献<sup>[13]</sup>中的相关参数。另外, 模型中主装药选用 8701 炸药, 密度为  $1.69 \text{ g/cm}^3$ , 爆速为  $8425 \text{ m/s}$ , C-J 爆轰压力  $P_H$  为  $29.66 \text{ GPa}$ ; 药型罩的材料选用紫铜, 密度为  $8.96 \text{ g/cm}^3$ ; 隔板材料采用酚醛树脂, 密度为  $1.2 \text{ g/cm}^3$ 。

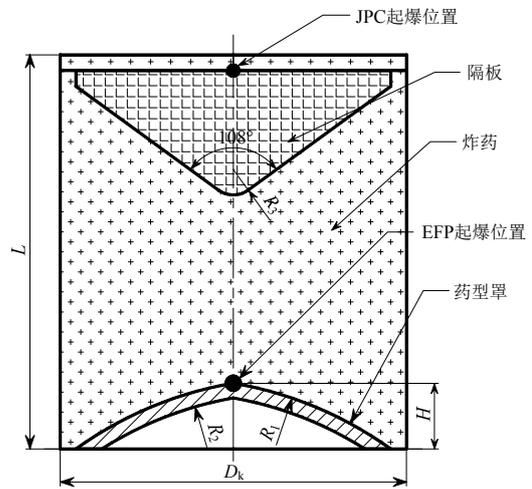


图 4 带隔板装药结构模型

Fig.4 The model of the charge with a wave shaper

### 2.2 装药结构优化

由于文中模型是在装药尺寸及隔板参数确定的条件下建立的, 因此下面关于装药结构的优化主要是针对本文研究的等壁厚扁平偏心亚半球罩, 其涉及到的主要参数为药型罩外半径  $R_1$ 、药型罩罩顶高  $H$ 、药型罩壁厚  $h$ 。

对于具体装药结构需要通过参数优化得到一组最优参数组合来形成形状较好的毁伤元, 本文选择常用的正交优化方法并结合仿真来确定其最优组合。文中药型罩参数的选取范围主要参照前文理论分析与相关文献<sup>[6]</sup>, 然后建立起如表 1 所示的各因数对应的水平数关系, 最后通过 LS-DYNA 有限元仿真软件对正交表确定的各组参数组合进行计算。

通常由于聚能侵彻体形成的过程中伴随有高的过载和高的应变率, 因此文中仿真采用 ALE 算法来计算侵彻体的形成过程。同时, 在对装药顶点

中心起爆形成 JPC 侵彻体仿真计算过程中还要求添加 \*CONTROL\_EXPLOSIVE\_SHADOW<sup>[14]</sup> 关键字来控制隔爆与绕爆。通过仿真得到 EFP 与 JPC 侵彻体头部速度  $V$ 、头尾速度差  $\Delta V$ ，然后利用极差分析法得到各因素对各指标影响的主次顺序如表 2 所示。

表 1 正交优化各因素与水平表

Table 1 The factors and levels of orthogonal potimization

项目	$R_1/D_k$	$H/D_k$	$h/D_k$
1	0.955	0.136	0.030
2	1.000	0.155	0.033
3	1.046	0.173	0.036
4	1.091	0.191	0.038
5	1.136	0.209	0.041

表 2 各因数对各指标影响的主次顺序

Table 2 Order of effects on differert targets

项目名称	$V/(m/s)$	$\Delta V/(m/s)$
EFP	$h>H>R_1$	$H>h>R_1$
JPC	$h>R_1>H$	$R_1>h>H$

通过表 2 各指标影响的主次顺序可以看出药型罩壁厚是影响 EFP 与 JPC 毁伤元头部速度  $V$  指标的最重要因数，而对于毁伤元头尾速度差  $\Delta V$  指标，药型罩参数对其的影响却不尽相同。因此，有必要对每个因数下的各个水平对各指标的影响情况进行分析，从而得出较为理想的优化水平组合。如图 5 所示，将各个因数对应的各个水平计算出的各个指标结果绘制成曲线，其中 A、B、C 分别代表药型罩 3 个不同因数  $R_1$ 、 $H$  和  $h$ ，1、2、3、4、5 分别代表各个因数下对应的 5 个水平。

由表 2 及图 5 分析可知，药型罩外半径  $R_1$  是影响 JPC 侵彻体头尾速度差  $\Delta V$  的主要因数， $R_1$  越大，形成的 JPC 毁伤元头部速度  $V$  越大，头尾速度差  $\Delta V$  越大。由于 JPC 毁伤元要求射流连续，因此头尾速度差  $\Delta V$  不能过大而使射流拉断，通常都是在保证合适的头尾速度差  $\Delta V$  的前提下适当调节其头部速度  $V$ 。另外，此时药型罩外半径  $R_1$  对 EFP 毁伤元成型指标的影响均较小，只要保证合适的头部速度  $V$  和头尾速度差  $\Delta V$  即可。因此综合上述各指标，外半径选择  $R_1=1.09D_k$ 。

同时，药型罩罩顶高度  $H$  作为影响 EFP 毁伤元头尾速度差  $\Delta V$  的主要因数，其值  $H$  越大则 EFP 毁伤元头尾速度差  $\Delta V$  越大，而 EFP 毁伤元要保证飞行稳定其头尾速度差  $\Delta V$  较小为宜。另外，此时其对 JPC 毁伤元成型指标影响均较小，只要保证合适的头部速度  $V$  即可。因此综合上述各指标选择  $H=0.173D_k$ 。

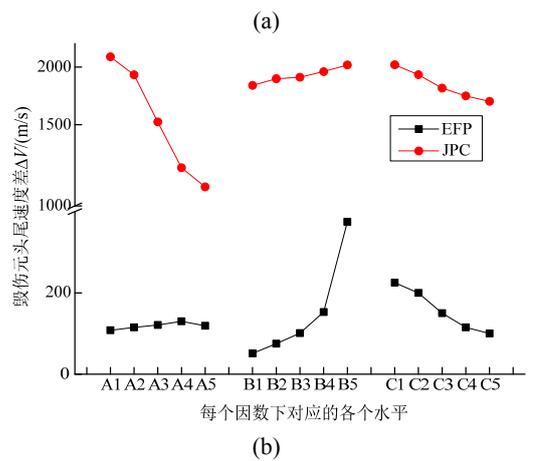
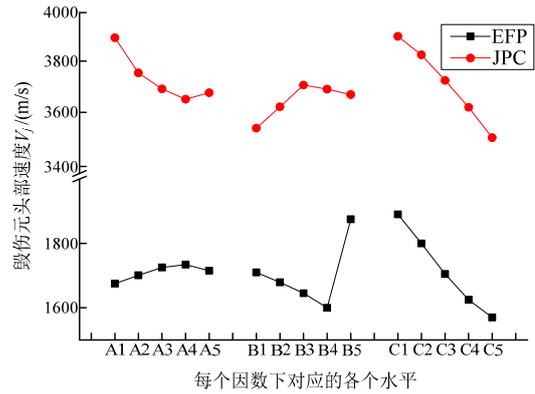


图 5 各因数下各个水平对应的毁伤元头部速度及头尾速度差影响曲线

Fig.5 The change curve of formation paramaters of penetrators with factors

另外，对于 EFP 和 JPC 毁伤元，药型罩壁厚  $h$  是影响头部速度  $V$  的主要因数，是影响头尾速度差  $\Delta V$  的第 2 影响因数， $h$  越小则侵彻体的头部速度  $V$  就越大，头尾速度差  $\Delta V$  越大。一般要求 EFP 毁伤元在保持较高的头部速度  $V$  的前提下，头尾速度差  $\Delta V$  较小，可保证其飞行稳定。同时，对于 JPC 毁伤元则要求在尽量高的头部速度前提下，头尾速度差  $\Delta V$  保持合适的值，这样便于使其充分拉长但又不至于过早断裂。因此综合各指标选择  $h=0.036D_k$ 。

最后，通过仿真得到上述结构形成的 EFP 与 JPC 毁伤元的形状与相关参数如表 3 所示。

表 3 带隔板成型装药结构下改变起爆点时毁伤元仿真结果  
Table 3 The results change of the charge with wave-shaper when it changed the initiation position

项目	毁伤元图形	$V/(m/s)$	$\Delta V/(m/s)$
EFP(200 $\mu s$ )		1692	13
JPC(250 $\mu s$ )		3625	930

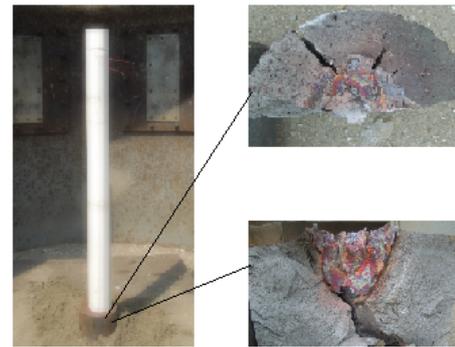
### 3 试验验证

为了验证上述得到的等壁厚球缺罩在带隔板装药结构条件下毁伤元的实际成型情况与侵彻能力,本文针对该结构进行了部分X光成型与侵彻试验。试验中为了实现在药型罩顶点处起爆形成EFP毁伤元,专门在药型罩顶点处开一个与雷管直径相当的通孔,雷管通过该开孔来起爆主装药。另外,试验中各毁伤元均在 $13D_k$ 炸高条件下侵彻一定厚度钢靶,其中EFP毁伤元采用一块 $\phi 200\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ 圆柱钢靶,JPC毁伤元采用一块 $\phi 120\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 和一块 $\phi 140\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的圆柱钢靶堆叠在一起。由于X光机捕捉毁伤元成型时刻不同,最终得到两种毁伤元在两种时刻下的实际成型与仿真成型情况对比如表4所示,其中毁伤元头部速度 $V$ 、尾部速度 $V_s$ 、长度 $l$ 、直径 $d$ 。同时,通过侵彻试验得到两种毁伤元在 $13D_k$ 炸高条件下的侵彻效果如图6所示。

结果分析:

通过表4可知, $120\text{ }\mu\text{s}$ 时刻EFP毁伤元和 $80\text{ }\mu\text{s}$ 时刻JPC毁伤元的实际成型与理论和仿真优化得到的成型基本一致。其中,EFP毁伤元头部速度 $V$ 误差为4.91%、尾部速度 $V_s$ 误差为5.35%、长度 $l$ 误差为8.46%、直径 $d$ 误差为8.67%;JPC毁伤元头部速度 $V$ 误差为3.65%、尾部速度 $V_s$ 误差为4.84%、长度 $l$ 误差为4.35%、直径 $d$ 误差为7.31%。因此,可知毁伤元与实际成型参数相差较小,但其实际成型头部出现部分断裂,主要是由于在药型罩顶点处开孔所致,但其对毁伤元整体成型影响较小。

同时,通过侵彻试验得到EFP毁伤元侵彻最大孔径为 $67.75\text{ mm}$ 、最大侵深为 $70.81\text{ mm}$ 达到 $0.64D_k$ ;JPC毁伤元将第1块靶穿透,侵彻孔径为 $35\text{ mm}$ 且较均匀,第2块靶侵深 $65.63\text{ mm}$ ,侵彻孔径为 $29.82\text{ mm}$ ,总侵深达到 $2.42D_k$ 。相比目前国外已报道<sup>[15]</sup>的EFP与JPC双模毁伤元最大侵彻深度仅为 $0.4D_k$ 和 $0.7D_k$ ,该结构下形成的双模毁伤元侵彻性能有大幅提升,侵彻性能较好。



(a) EFP 毁伤元侵彻效果



(b) JPC 毁伤元侵彻效果

图6 两种毁伤元在 $13D_k$ 炸高条件下侵彻钢靶试验

Fig.6 The penetration experiments of two damage element when the burst height is the  $13D_k$

表4 毁伤元在一定时刻下的实际成型与仿真成型情况对比

Table 4 Experimental and numerical comparison of the dual-mode penetrator formation

类型	方法	成型图	$V/(\text{m/s})$	$V_s/(\text{m/s})$	$l/\text{mm}$	$d/\text{mm}$
EFP( $120\text{ }\mu\text{s}$ )	仿真		1783	1538	70.5	54.8
	试验		1875	1625	65	60
JPC( $80\text{ }\mu\text{s}$ )	仿真		3854	2379	128.5	68
	试验		4000	2500	123.14	73.36

### 3 结论

(1) 本文设计了一种新型双模战斗部结构, 利用在带隔板装药结构下改变起爆点位置实现双模毁伤元转换, 获得成型较好的 EFP 与 JPC 两种毁伤元。

(2) 建立了药型罩顶端起爆形成 EFP 与装药顶端起爆形成 JPC 的爆轰压力理论计算模型, 理论分析了不同起爆情况下药型罩表面压力变化规律。

(3) 正交优化设计结合仿真计算获得形成较佳双模毁伤元的等壁厚扁平偏心亚半球药型罩参数即外半径  $R_1$  为  $1.09D_k$ 、罩顶高  $H$  为  $0.173D_k$ 、壁厚  $h$  为  $0.035D_k$ , 并进行了试验验证, 其中在  $13D_k$  炸高条件下侵彻钢靶, EFP 侵深可达  $0.64D_k$ , JPC 侵深达  $2.42D_k$ 。

#### 参考文献:

- [1] Richard Fong. New, selectable, explosively formed penetrator (EFP) warhead concept [C]. French: Proceedings of the 41st Annual Bomb & Warhead Technical Meeting, 1991(1): 172—197.
- [2] Lawther R L. Dual operating mode warhead [P]. US Patent: 5509357, 1996: 101—121.
- [3] Bender D, Fong R, Ng W, et al. Dual mode warhead technology for future smart munitions[C] Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001: 679—684.
- [4] Whelan A J. Multiple effect warheads for defeat of urban structures and armour [C]// Stephan B, James W. Proceedings of the 24th International Symposium on Ballistics. New Orleans, Louisiana, 2008: 1092—1098.
- [5] 蒋建伟, 帅俊峰, 李娜, 门建兵. 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 Jianwei, Shuai Junfeng, Li Na, Men Jianbing. 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. (in Chinese)
- [6] 李伟兵, 樊菲, 王晓鸣, 等. 杆式射流与射流转换的双模战斗部优化设计[J]. 兵工学报, 2013, 34(12): 1500—1505.  
Li Weibing, Fan Fei, Wang Xiaoming, et al. Optimization of dual-mode warhead for the conversion of jetting projectile charge and jet [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(12): 1500—1505. (in Chinese)
- [7] Beijing Institute of Technology. Explosion and action [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1979: 182—190.
- [8] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 300—312.  
Zhang Baoping, Zhang Qingming, Huang Fenglei. Detonation physics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2009: 300—312. (in Chinese)
- [9] 贾鑫, 黄正祥, 祖旭东, 等. 聚能装药垂直侵彻橡胶复合装甲的变形研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 451—457.  
Jia Xin, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Research on deformation of rubber composite armor against shaped charge vertical penetration [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 451—457. (in Chinese)
- [10] 刘杰, 杜忠华, 王锋, 董玉财. 基于爆轰波碰撞形成 LEFP 的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 235—242.  
Liu Jie, Du Zhonghua, Wang Feng, Dong Yucai. Linear explosively-formed penetrators based on detonation wave collision [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 235—242. (in Chinese)
- [11] 孙新利, 蔡星国, 姬国勋, 等. 内爆冲击动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 145—157.  
Sun Xinli, Cai Xinguo, Ji Guoxun, et al. Detonation shock dynamics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011: 145—157. (in Chinese)
- [12] Dunne B B. Mach reflection of detonation waves in condensed high explosive [J]. Physics of Fluids, 1961, 4(1): 899—918.
- [13] 陈闯, 李伟兵, 王晓鸣, 李文彬. 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 Weibing, Wang Xiaoming, Li Wenbin. The optimization design of precursor K charge structure of tandem warhead [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1): 73—78. (in Chinese)
- [14] Livermore. LS-DYNA keyword users manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 41.
- [15] Thomas Falter. Initiation controlled multimode warheads[C]. Spain: Proceeding of the 23th International Symposium on Ballistics, 2008: 1—22.