

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.06.008

# 起爆方式对双模串联毁伤元成型及 侵彻性能影响的数值模拟\*

黄 松 尹建平 张 斐 王少宏 韩阳阳  
中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

[摘 要] 针对同一成型装药形成多模式毁伤元问题,设计了一种同轴放置的三层球缺药型罩战斗部。运用软件 ANSYS/LS-DYNA 对不同起爆方式下三层球缺药型罩形成不同模式的毁伤元进行数值仿真,对比分析了它们的成型及侵彻性能。结果表明:在该成型装药下,通过改变起爆方式,可以得到爆炸成型弹丸(EFP)和聚能杆式侵彻体(JPC)两种不同模式的毁伤元;其中,三层串联 JPC 的长径比是三层串联 EFP 长径比的 3.4 倍,且头部速度提高 40.9%。两种模式的毁伤元均可穿透 5 层 15 mm 厚的间隔钢板,但三层串联 JPC 穿透靶板后的剩余头部速度较三层串联 EFP 提高 53.5%,且它的剩余动能是三层串联 EFP 的 11.4 倍。与三层串联 EFP 相比,三层串联 JPC 的飞行速度更高、长径比更大、侵彻能力更强。可为不同模式的多层毁伤元研究提供基础。

[关键词] 爆炸成型弹丸;聚能杆式侵彻体;双模毁伤元;三层药型罩;起爆方式;聚能装药

[分类号] TJ410

## Numerical Simulation of Effect of Initiation Methods on Formation and Penetration Performance of Two Tandem Damage Elements

HUANG Song, YIN Jianping, ZHANG Fei, WANG Shaohong, HAN Yangyang  
School of Mechanical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] Aimed at multimode damage elements formed by the same shaped charge, a three-layer (coaxially placed) hemispherical liner was designed. Software ANSYS/LS-DYNA was used to simulate the formation of different damage elements when the three-layer hemispherical liner was detonated by different methods. Formation and penetration performance of damage elements were compared and analyzed. Results show that two tandem damage elements, explosively formed projectile (EFP) and jetting projectile charge (JPC), could be obtained by changing the initiation method. Length-diameter ratio of the three-layer tandem JPC is 3.4 times of that of the three-layer tandem EFP, and head velocity of the three-layer tandem JPC increases by 40.9%. Both of the two damage elements could penetrate the five-layer spaced steel target plate with a thickness of 15mm. But the residual head speed of the three-layer tandem JPC is 53.5% higher than that of the three-layer tandem EFP, and its residual kinetic energy is 11.4 times of that of the three-layer tandem EFP. Compared with the three-layer tandem EFP, flight speed of the three-layer tandem JPC is higher, length-diameter ratio is bigger, and penetration ability is stronger. This study provides research bases and solutions for different models of multi-layer damage elements.

[KEYWORDS] explosively formed projectile; jetting projectile charge; two modes of damage element; three-layer liner; initiation method; shaped charge

### 引言

未来战争要求弹药能够有效对付如坦克、步兵

战车、通信指挥车、装甲运输车以及低空飞行器等多种目标。为了达到这一目的,多模式战斗部成为当前成型装药技术研究的热点。

\* 收稿日期:2018-03-19  
基金项目:国家自然科学基金(11572291);山西省研究生联合培养基地人才培养项目(20160033,20170028);中北大学第十四届研究生科技立项项目(20171403)  
作者简介:黄松(1993-),男,硕士研究生,研究方向为弹药毁伤技术与仿真研究。E-mail:dreamhuangsong@163.com  
通信作者:尹建平(1975-),男,教授,研究方向为弹药毁伤技术。E-mail:yjp123@nuc.edu.cn

多模式战斗部能够实现智能灵巧弹药的一弹多用,可以及时摧毁战场上的各种目标,既提高了弹药的作战效能,又节省了作战时间。具有大长径比的聚能杆式侵彻体(JPC),可攻击重型装甲目标,尤其对砖墙、钢筋混凝土等坚固工事的侵彻具有优势,用于近距离作战;稳定飞行的爆炸成型弹丸(EFP),可对付轻型装甲目标,能够进行远距离作战<sup>[1-2]</sup>。在国外,Steinmann 等<sup>[3]</sup>研究了一种多模式 EFP 战斗部,可通过中心点起爆和环形起爆,分别形成稳定飞行的 EFP 和伸长式 EFP,也可通过环形起爆或中心点延迟  $4\ \mu\text{s}$  起爆,形成 EFP 破片;Baker 等<sup>[4]</sup>研究了可选择起爆成型装药,通过改变起爆技术达到对轻装甲、地质材料等的毁伤。在国内,李伟兵等<sup>[5]</sup>对单点起爆形成多模式 EFP 的可行性进行了研究,通过优化设计成型装药结构,实现了杆式 EFP 与 EFP 两种模式的转换;孙建等<sup>[6]</sup>研究了一种射流型多模式战斗部,在同一种聚能装药下可分别形成长径比差异较大的长射流或杆式射流;臧立伟等<sup>[7]</sup>在药型罩前加装一刻槽圆环,形成了带尾翼 EFP,通过可抛掷的刻槽圆环实现了带尾翼大长径比 EFP 和 EFP 两种模式的转换。

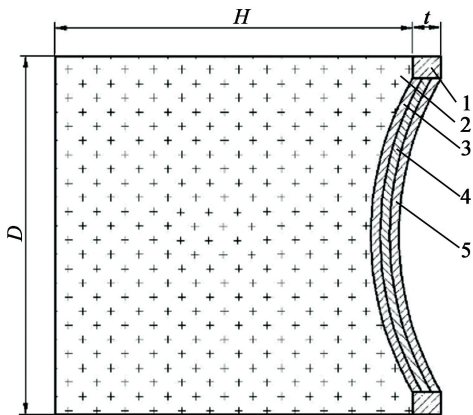
国内外对单层及双层药型罩型多模式战斗部的研究较多且技术成熟,但对三层药型罩型多模式战斗部研究很少。多层串联式战斗部是在复合装甲、爆炸反应装甲等新型装甲的基础上发展起来的新概念战斗部。它在一个主装药基础上,同轴放置多层药型罩,在炸药爆轰作用下形成多个同轴度很高的分离毁伤元或是单一大长径比毁伤元,能量转换与吸收机制更合理,化学能的利用率更充分,可以提高对装甲目标的侵彻能力。因此,在前人研究的基础上,设计了一种三层药型罩战斗部,通过不同起爆方式实现了串联毁伤元 EFP 与 JPC 两种模式的转换。

## 1 数值建模

### 1.1 模型建立及计算方法

装药模型的建立参考文献[8]的成型装药结构。成型装药由高能炸药、挡环和药型罩 3 部分组成。其中,装药直径为  $D$ ,装药高度为  $H$ ,挡环厚度为  $t$ 。共轴放置的内、中、外罩都为球缺型结构,曲率半径为  $R$ ,且厚度都为  $d$ 。内罩靠近炸药,外罩远离炸药。装药结构示意图见图 1。

三层相互接触的药型罩之间存在自由面,可以自由滑动和碰撞。起爆方式采用中心点起爆方式和



1 - 挡环;2 - 炸药;3 - 内罩;4 - 中罩;5 - 外罩。

图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Diagram of charge structure

周向多点同步起爆方式以达到两种模式的转换。采用 Lagrange 算法可以清楚地描述物质运动的整体变化,并能够真实地看到药型罩的变形过程<sup>[9]</sup>。起爆  $30\ \mu\text{s}$  后,炸药爆轰作用对毁伤元的成型影响已经很小,因此,在  $30\ \mu\text{s}$  时采用小型重启动技术删除炸药和挡环 PART。计算中采用的单位制为 mm-kg-ms-GPa。由于模型具有对称性,为减少计算时间,运用 TrueGrid 软件建立 1/4 有限元模型,见图 2。

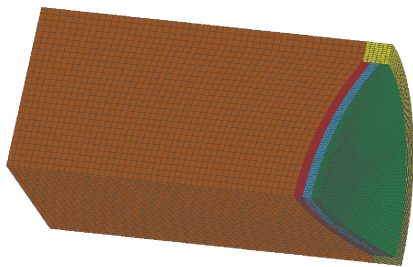


图 2 1/4 三维有限元模型

Fig. 2 1/4 3D finite element model

### 1.2 材料模型及参数选取

多层药型罩实现分离的必要条件是外层微元的加速度大于内层微元,即  $K > 1$  ( $K$  为外、内罩微元的加速度之比,与药型罩的厚度、材料密度以及声阻抗等有关),具体内容参考文献[10]。故药型罩内层材料选为 45# 钢,中、外层材料选为紫铜。挡环材料选用 45# 钢。分别采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程来描述药型罩及挡环在爆轰波作用下的动力响应行为。装药使用 8701 炸药。选用 High\_Explosive\_Burn 材料模型和 JWL 状态方程来描述在 8701 炸药爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性。材料参数见表 1 和表 2。

表 1 挡环及药型罩材料参数<sup>[11]</sup>  
Tab.1 Parameter of retaining ring and liner material

材料	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	剪切模量 $G/\text{GPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	$A$	$B$	$n$	$c$	$m$
45#钢	7.83	77.0	210	0.792	0.51	0.260	0.014	1.03
紫铜	8.96	47.7	137	0.090	0.29	0.310	0.020	1.09

表 2 8701 炸药材料参数<sup>[12-13]</sup>  
Tab.2 Material parameters of Explosive 8701

炸药	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆压 $p_{\text{CJ}}/\text{GPa}$	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
8701 炸药	1.82	8 480	34.2	746.8	13.38	4.5	1.2	0.38

表 1 中,  $A$  为初始屈服应力;  $B$  为材料应变硬化模量;  $c$  为材料应变率强化参数;  $n$  为硬化指数;  $m$  为温度软化参数。表 2 中,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为 EOS 方程拟合参数。

2 不同起爆方式下毁伤元成型过程

2.1 起爆方式的选择

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。不同的爆轰波形将导致药型罩上爆轰载荷分布不同,从而以不同的方式压垮药型罩,最终导致毁伤元模式产生差异<sup>[5]</sup>。

中心点起爆时,起爆点距离药型罩的轴向距离越大,所形成的 EFP 速度越高,长径比越大<sup>[5]</sup>。周向多点同步起爆时,8 点同步起爆效果优于 4 点同步起爆效果,且随着周向起爆环半径的增大,侵彻体长径比和头部速度都逐渐增大<sup>[13-14]</sup>。两种起爆方式的装药起爆点位置排布如图 3 所示。

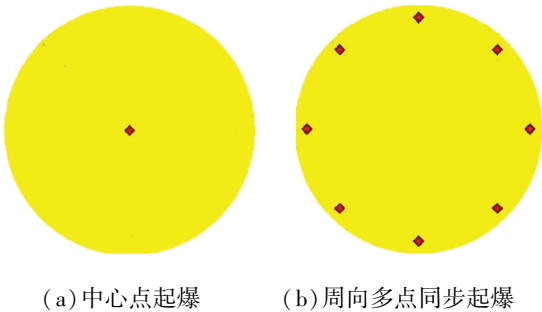


图 3 两种起爆方式中起爆点的位置

Fig.3 Detonation points location of the two initiation methods

2.2 中心点起爆下毁伤元的成型

中心点起爆下,三层串联 EFP 成型过程见图 4。爆轰波在起爆 30  $\mu\text{s}$  左右到达药型罩顶部,之后三层药型罩之间发生相互碰撞,轴线附近的微元由于获得了径向速度,产生了垂直于药型罩外表面法线

方向的速度差;起爆 50  $\mu\text{s}$  时,由于相互接触的三层药型罩之间存在自由面,在速度差的作用下开始发生分离,此时药型罩顶部轴向速度均大于底部轴向速度,各药型罩发生翻转;起爆 100  $\mu\text{s}$  时,药型罩底部由于径向速度低,相互接触暂未发生分离;随着时间的推移,在药型罩碰撞微元和翻转微元之间的相互牵连作用下,尾部速度提高,各接触的药型罩在翻转过程中逐渐分离;150  $\mu\text{s}$  后,EFP 不再互相接触,分离后的 EFP 成型与单层药型罩形成的 EFP 类似。

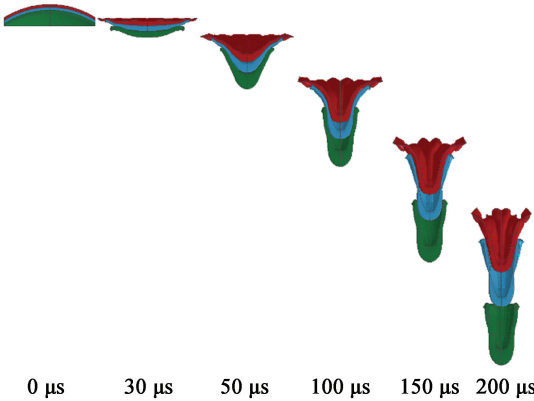


图 4 中心点起爆下三层串联 EFP 成型过程

Fig.4 Forming process of three-layer tandem EFP by central point initiation

2.3 周向多点同步起爆下毁伤元的成型

周向多点同步起爆下,三层串联 JPC 成型过程见图 5。该起爆方式下,三层串联 JPC 成型过程同中心点起爆时 EFP 的成型过程类似,只是形成的喇叭形爆轰波具有聚心效果,产生的轴对称爆轰波在装药轴线处发生碰撞,产生高压区,使得罩顶处的微元获得更大的压垮速度<sup>[15]</sup>。30  $\mu\text{s}$  时,药型罩顶部获得较大的轴向速度,开始发生翻转变形;50  $\mu\text{s}$  时,由于各罩之间存在自由面,在速度差的作用下,外罩和中罩开始发生分离;150  $\mu\text{s}$  时,三层药型罩均发生了分离,且由于各层药型罩的罩顶速度远大

于罩底速度,毁伤元拉伸变长,具有很大的长径比;200  $\mu\text{s}$  时,毁伤元继续拉伸变形,由于中层罩与内层罩的速度差相差不大,中层罩在翻转拉伸过程中尾翼部分将内层罩头部包裹住,导致中层罩和内层罩未发生较大分离。

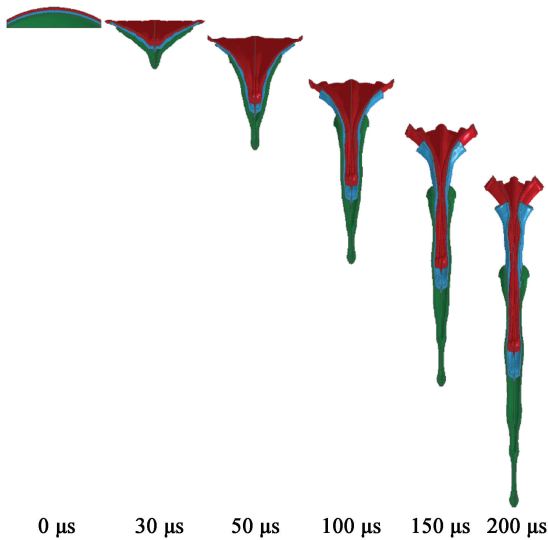


图 5 周向多点同步起爆下三层串联 JPC 成型过程  
Fig. 5 Forming process of three-layer tandem JPC by circumferential multipoint simultaneous initiation

3 结果与分析

3.1 毁伤元成型对比分析

两种起爆方式下,三层药型罩均能形成有效的毁伤元,且各模式成型特征明显。中心点起爆时,形成三层串联 EFP;周向多点同步起爆时,形成三层串联 JPC。在 200  $\mu\text{s}$  时,三层串联 EFP 速度达到稳定,三层串联 JPC 长径比达到最大,此刻对二者进行对比,见表 3。

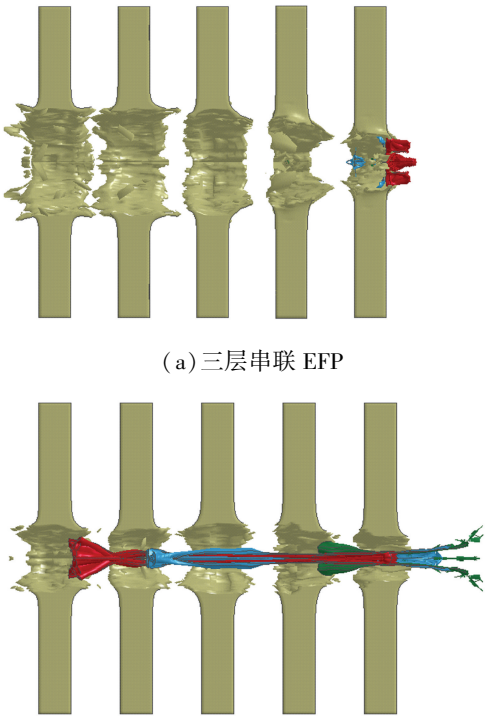
从表 3 可以看出,三层串联 JPC 各层毁伤元的头、尾速度均大于三层串联 EFP。以整体毁伤元来说,三层串联 JPC 的长径比是三层串联 EFP 长径比的 3.4 倍,且头部速度提高 40.9%,可大大提高侵

彻效果。与三层串联 EFP 相比,三层串联 JPC 飞行速度更高、长径比更大、侵彻能力更强。

3.2 毁伤元侵彻靶板对比分析

为进一步研究同一装药结构下两种模式毁伤元的成型性能和毁伤能力,采用毁伤元侵彻间隔钢靶的方式进行毁伤元侵彻性能研究。采用间隔靶板能够间接模拟装甲内部的多层防护结构<sup>[16]</sup>,也可以更好地体现各层侵彻体侵彻靶板的过程。靶板设计参考文献[17-18],5 层 45 $^\circ$  钢靶板间隔放置,各靶板间距 25 mm,各单层靶板的尺寸为 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  15 mm。两种模式毁伤元侵彻间隔钢靶结果和侵彻过程中动能变化如图 6、图 7 所示。

从图 6 中可以看出,两种模式的毁伤元均穿透了 5 层 45 $^\circ$  钢间隔靶。一般传统单层 EFP 侵彻间隔钢靶的第 1 层靶板时发生挤压侵彻和剪切冲塞过



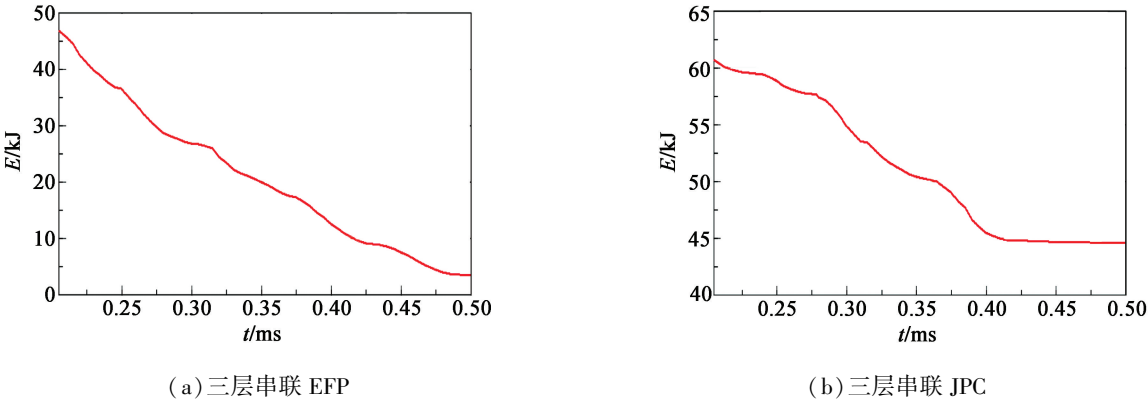
(a) 三层串联 EFP  
(b) 三层串联 JPC  
图 6 侵彻结果

Fig. 6 Penetration results

表 3 两种模式毁伤元基本参数对比

Tab. 3 Comparison of basic parameters of two damage elements

	外层毁伤元速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		中层毁伤元速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		内层毁伤元速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )		长度/ mm	直径/ mm	长径 比
	头部	尾部	头部	尾部	头部	尾部			
三层串联 EFP	1 556	1 550	1 308	1 305	1 197	1 136	107.2	39.6	2.7
三层串联 JPC	2 192	1 685	1 690	1 338	1 608	1 155	246.3	26.8	9.2



(a) 三层串联 EFP

(b) 三层串联 JPC

图 7 侵彻过程中的动能变化

Fig. 7 Kinetic energy changes curve in penetrating process

程,在侵彻第 2 层及之后的靶板时,由于 EFP 头部的变形而相当于一个平头弹丸对靶板的剪切冲塞破坏<sup>[19-20]</sup>。三层串联 EFP 具有多个同轴飞行的毁伤元,故对间隔钢靶侵彻时不仅在第 1 层靶板上发生挤压侵彻和剪切冲塞过程,在后续的靶板上也会发生此过程。三层串联 EFP 侵彻前两层靶板的孔径约 66 mm,为侵彻体直径的 1.67 倍。随后侵彻孔径逐渐减小,第 5 层靶板上出孔孔径约为 38 mm,为侵彻体直径的 0.96 倍。三层串联 JPC 侵彻靶板的孔径相对于三层串联 EFP 来说较小,最大孔径约 42.5 mm,为侵彻体直径的 1.58 倍。第 5 层靶板上出孔孔径约为 35 mm,为侵彻体直径的 1.30 倍。

由于装药结构相同,故炸药的內能相同。由图 7 可知,炸药起爆后,三层串联 EFP 获得的动能为 47.1 kJ,三层串联 JPC 获得的动能为 60.8 kJ,提高了 29%。三层串联 EFP 在 475 μs 时穿透靶板,此时头部速度为 1 075 m/s,剩余动能为 3.6 kJ,能量损失约 92.4%。三层串联 JPC 在 425 μs 时穿透靶板,此时头部速度为 1 650 m/s,动能为 44.6 kJ,能量损失约 26.6%,较三层串联 EFP 头部剩余速度提高 53.5%,剩余动能提高 11.4 倍。可见,三层串联 JPC 侵彻能力更强,可用来对付重型装甲目标。

4 结论

针对同一三层药型罩装药结构,通过改变起爆方式,实现了三层串联 EFP 和三层串联 JPC 两种模式毁伤元的转换,并对比分析了两种模式毁伤元的成型及侵彻靶板性能,得出以下结论:

1) 通过改变起爆方式可以实现两种模式毁伤元的转换。中心点起爆时,得到三层串联 EFP;周向多点同步起爆时,得到三层串联 JPC。

2) 三层串联 JPC 的长径比是三层串联 EFP 长径比的 3.4 倍,且头部速度提高 40.9%,具有更大的侵彻能力。

3) 三层串联 JPC 穿透靶板后的剩余头部速度比三层串联 EFP 提高 53.5%,且剩余动能是三层串联 EFP 的 11.4 倍。

参 考 文 献

[1] 李慧子. 多模成型装药的药型罩结构设计[D]. 南京: 南京理工大学,2011.

[2] 黄正祥,张先锋,陈惠武. 起爆方式对聚能杆式侵彻体成型的影响[J]. 兵工学报,2004,25(3):289-291. HUANG Z X, ZHANG X F, CHEN H W. Influence of modes of detonation on the mechanism of jetting projectile charge[J]. Acta Armamentarii, 2004,25(3):289-291.

[3] STEINMANN F, LOSCH C. Multimode warhead technology studies[C]// NOVBCRT B, JCRCM A, UCORGC R. Proceedings of the 21th International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia, 2004:728-735.

[4] BAKER E L, DANICLS A S, TURCI J P, et al. Selectable initiation shaped charges[C]// JOE C, DENNIS O. Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, Florida, 2002:589-596.

[5] 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 W B, WANG X M, LI W B, et al. Feasibility research on the formation of a multimode explosively formed penetrator with single-point initiation[J]. Explosion and Shock Waves,2011,31(2):204-209.

[6] 孙建,谷鸿平,王利侠. 多模式聚能破甲战斗部技术研究[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(5):67-70,74. SUN J, GU H P, WANG L X. The study on the technique of multimode shaped charge warhead[J]. Journal

- of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32 (5): 67-70, 74.
- [7] 臧立伟, 尹建平, 王志军. 一种双模态 EFP 战斗部的数值仿真[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 253-256.
- ZANG L W, YIN J P, WANG Z J. Numerical simulation of a dual-mode EFP warhead [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2): 253-256.
- [8] 窦成彪, 尹建平, 徐全振, 等. 次口径三层球缺药型罩形成串联 EFP 数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(4): 63-67.
- DOU C B, YIN J P, XU Q Z, et al. Numerical simulation of shaped charge with triple sub-caliber hemispherical liner into series EFP[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(4): 63-67.
- [9] 吴国东, 孙华, 王志军, 等. 算法转换在串联 EFP 成型以及侵彻过程中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 73-76.
- WU G D, SUN H, WANG Z J, et al. The application of algorithmic transformation to the process of tandem EFP forming and penetration[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 73-76.
- [10] 郑宇, 王晓鸣, 李文彬, 等. 材料对双层药型罩形成串联 EFP 的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(1): 38-41.
- ZHENG Y, WANG X M, LI W B, et al. Effects of materials on formation of double-layer shaped charges into tandem EFP[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(1): 38-41.
- [11] LI W B, WANG X M, LI W B. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(4): 414-424.
- [12] 伊建亚, 王志军, 尹建平, 等. 复合双药型罩结构冲击 ERA 及其后效作用研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(3): 45-51.
- YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Composite double liner impacting ERA and its aftermath[J]. Explosive Materials, 2017, 46(3): 45-51.
- [13] 王义鼎, 尹建平, 王志军, 等. 截锥型药型罩形成毁伤元特性仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(2): 23-26.
- WANG Y D, YIN J P, WANG Z J, et al. Simulation on characteristics of destroying elements formed by truncated cone liner[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 23-26.
- [14] 韩克华, 任西, 李慧, 等. 冲击片雷管多点同步起爆爆轰波压力的数值模拟和试验[J]. 含能材料, 2016, 24(1): 38-44.
- HAN K H, REN X, LI H, et al. Simulation and experimental studies on the multi-point synchronization detonation overpressure of slapper detonators [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(1): 38-44.
- [15] 孙加肖, 尹建平, 王志军, 等. 起爆方式对变壁厚药型罩形成毁伤元影响的数值仿真[J]. 爆破器材, 2017, 46(2): 16-20.
- SUN J X, YIN J P, WANG Z J, et al. Numerical simulation on the damage element formed by variable thickness liner under different ways of initiation[J]. Explosive Materials, 2017, 46(2): 16-20.
- [16] 龙源, 岳小兵, 周翔, 等. 高速钢弹对多层大间隔金属靶的侵彻特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004, 28(4): 369-374.
- LONG Y, YUE X B, ZHOU X, et al. Characteristics of high-speed steel projectiles penetrating into multi-layer spaced metal plates[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 28(4): 369-374.
- [17] 刘洋, 姚江涛, 李国林, 等. 用数值模拟法研究战斗部侵彻多层间隔靶[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(2): 144-148.
- LIU Y, YAO J T, LI G L, et al. Numerical simulation of warhead penetrating into multi-layer spaced target [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(2): 144-148.
- [18] 岳小兵, 龙源, 方向, 等. 高速模拟钢质弹丸侵彻多层靶仿真[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(4): 40-44.
- YUE X B, LONG Y, FANG X, et al. Numerical simulation of steel projectile penetrating into multi-layer spaced metal plates [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 4(4): 40-44.
- [19] 谢文, 龙源, 岳小兵, 等. 模拟爆炸成形弹丸对大间隔靶的侵彻实验研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 392-395.
- XIE W, LONG Y, YUE X B, et al. Experimental study on penetration against spaced targets with big spacing of explosively formed penetrator warhead[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 392-395.
- [20] 徐文龙, 相升海, 张健, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的刻槽式 MEFP 侵彻钢靶的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(3): 67-70, 74.
- XU W L, XIANG S H, ZHANG J, et al. The study of penetration of steel targets with grooved MEFP based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(3): 67-70, 74.