

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.003

双层药型罩内罩开槽对 EFP 形成尾翼的影响*

郭 帅^① 李小军^② 于小洁^③ 陈智刚^① 裴思行^① 付建平^①

①中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

②中国人民解放军防化研究院(北京,102205)

③总装北京军代局(北京,100042)

[摘 要] 为了研究内层药型罩周向对称开槽对爆炸成型弹丸(EFP)形成尾翼的影响,利用 LS-DYNA 显示动力分析有限元程序,采用 Lagrange 算法,对双层药型罩聚能装药的成型过程进行数值模拟。对不同开槽参数的数值模拟结果进行对比分析,选择数值模拟最佳结果进行试验验证。数值模拟与试验研究所得结论基本吻合。结果表明:内层药型罩周向对称开槽结构能够形成带尾翼的串联 EFP。当 $L/D_a = 0.20$ 、 $W/D_a = 0.05$ 时(D_a 为装药直径, L 为开槽长度, W 为开槽宽度),前后 EFP 长径比最大,带尾翼的串联 EFP 的成型效果最佳。

[关键词] 聚能装药;双层药型罩;爆炸成型弹丸;尾翼;数值模拟

[分类号] TJ410.3+3

引言

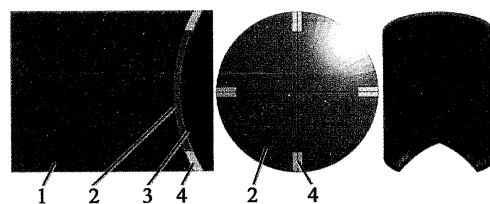
随着现代科学技术的发展,尤其是军事科技的发展,使得军事目标的抗打击能力都在加强。新型串联爆炸成型弹丸(EFP)装药结构可提高 EFP 的侵彻能力,而要提高 EFP 的稳定飞行能力,行之有效的方法就是使用带有尾翼的 EFP。文献[1-6]以药型罩的材料和结构、装药结构等为影响因素,对双层药型罩进行了数值模拟和试验研究,得出在一定的装药结构下,采用不同材料的双层药型罩能够形成串联 EFP 的结论。赵慧英等^[7-8]和桂毓林等^[9-10]分别以药型罩表面贴附隔板结构和三点起爆方式等为影响因素,对带尾翼 EFP 进行数值模拟和试验研究,得出采用特殊的结构和多点起爆方式能够使单层药型罩形成带尾翼的 EFP 的结论。目前研究主要是单层药型罩形成带尾翼的 EFP 或者双层药型罩形成串联 EFP,对双层药型罩形成尾翼的问题的研究较少。

本文提出一种在双层药型罩的内层药型罩周向对称开槽,并用密度较大的钨作为填充材料的方法,以此新型结构来影响药型罩的塑性变形过程,从而形成带尾翼的串联 EFP。通过对该结构的数值仿真计算,获得了开槽参数对带尾翼串联 EFP 成型效果的影响规律,从而为今后的研究工作提供一定的借鉴和参考。

1 有限元模型及材料参数

1.1 建立有限元模型

为提高串联 EFP 飞行稳定性,本文提出一种在双层药型罩内层药型罩周向对称开槽,并用钨作为填充材料的聚能装药战斗部。因聚能装药为轴对称结构,同时本文以药型罩内罩开 4 个槽为例进行研究,所以建立 1/4 模型即可,如图 1 所示。模型中装药直径 $D_a = 50$ mm,药柱球面半径 $R = 85$ mm,外层药型罩壁厚 $\delta_1 = 3$ mm,内层药型罩壁厚 $\delta_2 = 3$ mm,装药长径比 1.2。利用 LS-DYNA 软件中的拉格朗日算法对双层药型罩战斗部形成尾翼的过程进行模拟计算,单位制为:cm-g- μ s。



1-炸药;2-内罩;3-外罩;4-填充物

图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.2 材料参数

炸药选用 High_Explosive_Burn 高能炸药爆轰模型,其主要材料参数为: $\rho = 1.717$ g/cm³, $D = 7980$

* 收稿日期:2014-04-09

基金项目:2014 年山西省研究生优秀创新项目资助

作者简介:郭帅(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向:弹箭控制与高效毁伤技术。E-mail:309351855@qq.com

通信作者:陈智刚(1963~),男,教授,主要研究方向:弹药高效毁伤。E-mail:tj85tj@163.com

$m/s, p_{CJ} = 29.5 \text{ GPa}$ 。状态方程为 JWL 方程^[11], 方程参数见表 1。

表 1 B 炸药 JWL 状态方程参数

Tab. 1 Parameters of JWL equation for composition B

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
524.23	7.678	4.2	4.0	0.34	8.5

填充物选用 Plastic_Kinematic 材料模型, 参数见表 2。其中 ρ 为材料密度; E 为杨氏模量; v 为泊松比; σ 为屈服应力。

表 2 填充物材料模型参数

Tab. 2 Parameters of filler material model

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	v	σ/GPa
钨	18.3	357	0.303	2.07

药型罩内外罩采用 Johnson_Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程^[12], 材料模型参数见表 3。 ρ 为材料密度; G 为剪切模量; A 、 B 、 n 、 c 、 m 为材料常数; T_m 为材料融化温度。

表 3 药型罩外罩和内罩材料模型参数

Tab. 3 Parameters of material model of outer liner and inner liner

药型罩	材料	$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$G/$ GPa	$A/$ GPa
内罩	铝	2.70	77	0.175
外罩	铜	8.96	46	0.090
B/GPa	n	c	m	T_{m}/K
0.380	0.34	0.015	1.00	933
0.292	0.31	0.025	1.09	1 356

2 数值模拟

2.1 尾翼成型过程分析

由爆轰理论可知, 一定形状的药柱爆炸时, 必将产生高温、高压的爆轰产物, 在瞬时爆轰条件下, 这些产物将沿炸药表面的法线方向向外飞散。当有球缺型凹槽的圆柱形药柱爆炸后, 一方面, 爆轰产物以一定速度沿垂直于球缺型凹槽表面的方向朝中心轴线汇聚, 形成一股速度和密度都很高的气流, 即为聚能效应; 另一方面, 由于稀疏波的作用, 汇聚到中心轴线处的爆轰产物又会迅速地向周围低压区膨胀, 使能量分散开。在成型装药的球缺型凹槽表面加上一个金属罩, 则爆炸后的爆轰产物将推动罩壁向中心轴线运动, 将能量传递给金属罩, 避免气体的高压膨胀引起能量的再度分散。而在这个过程中, 填充

材料钨起到闭气的作用。由于钨的可压缩性比铝的可压缩性小得多, 在受到相等爆轰载荷作用时, 冲击波压力在钨中衰减比铝快。当经过衰减后的冲击波作用于外层药型罩时, 在没有开槽处的外罩微元获得的压力比其他位置处大, 产生的塑性变形也大, 将形成串联 EFP 的尾翼。

在内层药型罩开槽数目确定为 4 的情形下, 串联 EFP 成型结果则主要受槽长和槽宽的影响。

下文将在不同开槽长度和开槽宽度的情形下, 对带尾翼的串联 EFP 的形成过程进行数值模拟, 计算中均采用中心点起爆方式。

2.2 开槽宽度对串联 EFP 形成尾翼的影响

当开槽长度 $L = 1.0 \text{ cm}$ 时, 仅改变开槽宽度 W , 依次取值为 0.15、0.20、0.25、0.30 cm 进行计算, 得到的串联 EFP 形态见表 4, 计算结果见表 5, 串联 EFP 速度、长径比随开槽宽度的变化曲线分别如图 2、图 3 所示。

从仿真结果可以看出, 随着开槽宽度 W 的增大, 串联 EFP 的速度和长径比都呈现先增大后减小的趋势, 尾翼成型效果越来越明显。当开槽宽度 $W = 0.25 \text{ cm}$, 形成串联 EFP 的尾翼和头部形状都比

表 4 不同开槽宽度时的串联 EFP 形态

Tab. 4 Shapes of series EFP as different widths of groove

W/cm	$t/\mu\text{s}$	前 EFP 形态	后 EFP 形态
0.15	130		
0.20	130		
0.25	130		
0.30	130		

表 5 不同开槽宽度时的串联 EFP 速度和长径比

Tab. 5 Velocities and length-diameter ratios of series EFP as different widths of groove

W/cm	$t/\mu\text{s}$	前 EFP 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	后 EFP 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前 EFP 长径比	后 EFP 长径比
0.15	130	1 695	1 579	1.17	0.91
0.20	130	1 705	1 624	1.28	0.96
0.25	130	1 752	1 653	1.36	1.05
0.30	130	1 648	1 576	1.26	0.99

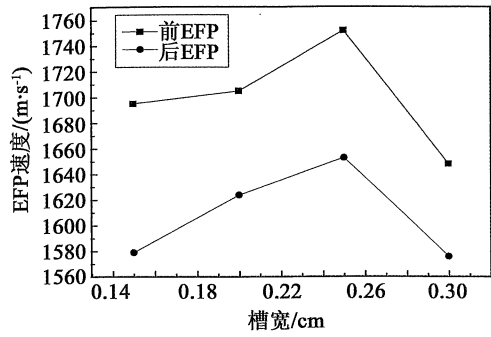


图2 串联 EFP 速度随开槽宽度的变化曲线

Fig.2 Changing curves of tandem EFP speed as different widths of groove

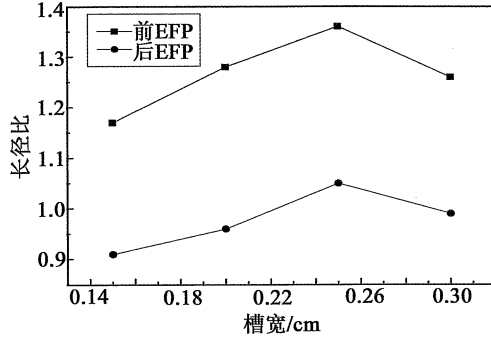


图3 串联 EFP 长径比随开槽宽度的变化曲线

Fig.3 Changing curves of length - diameter ratio of tandem EFP as different widths of groove

较好,速度及长径比达到最大值,此串联 EFP 的综合性能最佳。

2.3 槽长对串联 EFP 形成尾翼的影响

当开槽宽度 $W = 0.25 \text{ cm}$ 时,仅改变开槽长度 L ,依次取值为 $0.6、0.8、1.0、1.2 \text{ cm}$ 进行计算,得到串联 EFP 形态见表 6,计算结果见表 7,串联 EFP 速度和长径比随开槽长度的变化曲线分别如图 4、图 5 所示。

表 6 不同开槽长度时的串联 EFP 形态

Tab.6 Shapes of series EFP as different lengths of groove

L/cm	$t/\mu\text{s}$	前 EFP 形态	后 EFP 形态
0.6	130		
0.8	130		
1.0	130		
1.2	100		

表 7 不同开槽长度时的串联 EFP 速度和长径比

Tab.7 Velocities and length-diameter ratios of series EFP as different lengths of groove

L/cm	$t/\mu\text{s}$	前 EFP 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	后 EFP 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	前 EFP 长径比	后 EFP 长径比
0.6	130	1 672	1 539	1.06	0.93
0.8	130	1 729	1 635	1.27	0.97
1.0	130	1 752	1 653	1.36	1.05
1.2	100	1 650	1 563	1.24	0.98

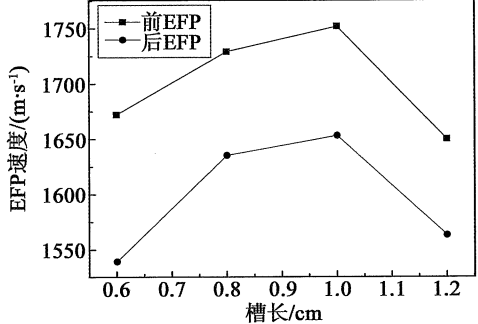


图4 串联 EFP 速度随开槽长度的变化曲线

Fig.4 Changing curves of tandem EFP speed as different lengths of groove

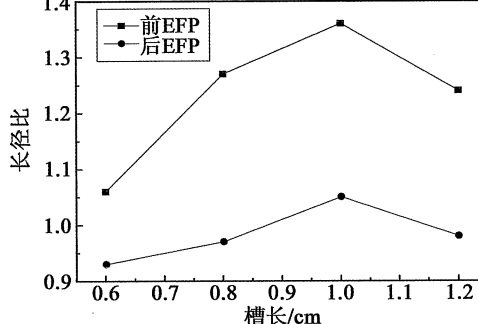


图5 串联 EFP 长径比随开槽长度的变化曲线

Fig.5 Changing curves of length - diameter ratio of tandem EFP as different lengths of groove

从仿真结果可以看出,串联EFP的速度和长径比都呈现先增大后减小的趋势。但是,当开槽长度 L 取值较大或者较小时,尾翼的成型效果均较差。当开槽长度 $L = 1.0 \text{ cm}$,形成串联 EFP 的尾翼形状比较好,速度及长径比达到最大值,此时串联 EFP 的综合性能最佳。

3 双层 EFP 内罩开槽战斗部试验研究

3.1 试验布置

为进一步验证双层 EFP 内罩开槽战斗部的侵彻性能,开展了该装药侵彻目标的试验研究。试验中使用的药型罩材料、结构和尺寸与数值模拟中使用的结构和尺寸相同,开槽长度 $L = 1.0 \text{ cm}$,开槽宽

度 $W = 0.25$ cm。药柱采用 B 炸药铸装,装药密度为 1.69 g/cm³。采用电雷管中心点起爆。药柱球面半径为 85 mm,采用铜板和铝板冲压而成。铝罩开槽使用铣床加工而成,先将内罩与外罩黏接起来,然后将钨黏贴在开槽位置。靶板材料为 45 号钢,靶板厚度为 30 mm,试验时炸高条件为 $40D_a$ 。采用通靶断开获取信号对 EFP 进行速度测试,通断靶间距为 180 mm。试验布置图如图 6 所示,药型罩采用试验装置如图 7 所示。

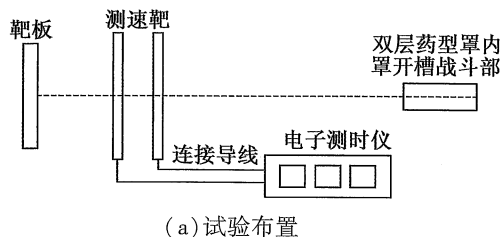


图 6 试验布置与现场

Fig. 6 Testing arrangement and experimental site

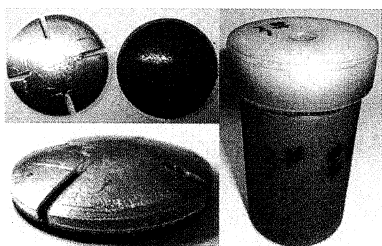


图 7 药型罩结构及 EFP 战斗部

Fig. 7 Structure of shaped charge and EFP warhead

3.2 试验结果及分析

双层 EFP 侵彻 30 mm 钢靶数值模拟结果与试验结果对比如图 8 和图 9 所示。

测时仪测得 EFP 通过两网靶间的时间为 104 μ s, 计算后速度为 1730 m/s, 由于测速靶离钢靶很

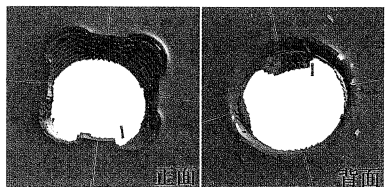


图 8 数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results

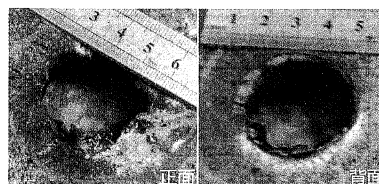


图 9 试验结果

Fig. 9 Experimental results

近,可近似作为前级 EFP 侵彻靶板前的着靶速度。试验时靶板侵彻孔洞直径为 35.70 mm,模拟时侵彻孔洞直径为 33.24 mm,忽略试验与模拟时装药、装配等因素带来的误差,试验与模拟结果之间的误差为 6.9% ,可以满足工程设计需要。

从图 9 可以看出,串联 EFP 在靶板上侵彻结果为一个穿孔,孔形与模拟结果相似。通常 EFP 有效作用距离可达 $1000D_a$,但本文炸高仅为 $40D_a$,气动特性差异对前后 EFP 飞行弹道的影响较小。同时计算结果表明:串联 EFP 在一定距离后分离, 1140 μ s 时,前 EFP 着靶,此时前后 EFP 距离仅为 110 mm 左右。综合这两方面的因素,在经过 2 m 的近距离飞行后,侵彻结果仅为一个穿孔是合理的。可以推测,继续加大飞行距离后,侵彻结果为两个孔的可能性很大。

由于试验条件有限,未对 EFP 成型过程进行 X 光分析,但从靶板正面的人孔形状来看,与常规无尾翼 EFP 侵彻孔形为圆形的结果明显不同,在人孔处存在 4 个尾翼穿靶时留下的痕迹,且基本对称,可以推测在试验时形成了形态较好的带尾翼串联 EFP。

4 结论

1) 在双层药型罩的内层药型罩周向对称开槽,并用密度较大的钨作为填充材料,此新型结构可以形成带尾翼的串联 EFP。

2) 当开槽长度 $L = 1.0$ cm、开槽宽度 $W = 0.25$ cm 时,即 $L/D_a = 0.20$ 、 $W/D_a = 0.05$ 时,形成的串联 EFP 有良好的头部形状和尾翼,速度和长径比最大,效果最佳。

3) 下一步将继续对串联 EFP 形成尾翼进行研究,尤其是研究药型罩内外罩材料、开槽个数和槽体中填充材料对串联 EFP 形成尾翼的影响。

参 考 文 献

- [1] Liang Zengyou, Lu Xiuguo, Hou Xiucheng. Numerical simulation of jets formation of double-layered conical liners[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32 (suppl. 2): 85-89.
- [2] Zheng Yu, Wang Xiaoming, Li Wenbin, et al. Experimental and numerical studies on the formation mechanism of shaped charge with double layer liners into tandem

- explosively formed projectiles [C]//25th International Symposium on Ballistics, ISB 2010. Beijing, 2010:829-836.
- [3] Zhang Xianfeng, Qiao Liang. Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011, 47(2): 241-248.
- [4] 郑宇, 王晓鸣, 李文彬, 等. 基于双层药型罩成型装药的串联 EFP[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 29-33.
Zheng Yu, Wang Xiaoming, Li Wenbin, et al. Formation of shaped charge with double layer liners into tandem EFP[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 29-33.
- [5] 李惠明, 张怀智, 赵东华, 等. 内外层材料特性对双层 EFP 的影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 81-83, 86.
Li Huiming, Zhang Huaizhi, Zhao Donghua. The Study on the effect of inner and outer layer of material properties of double-layer EFP[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(6): 81-83, 86.
- [6] 贺晶, 王志军, 孙华, 等. 双层药型罩形成串联 EFP 数值模拟与分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(5): 103-106.
He Jing, Wang Zhijun, Sun Hua, et al. Numerical simulation and analysis on formation of series EFP with double liners[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(5): 103-106.
- [7] 赵慧英, 沈兆武, 李成兵. 带尾翼爆炸成型弹丸的新技术[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 102-104.
Zhao Huiying, Shen Zhaowu, Li Chengbing. A new way of explosively formed projectile with stabilizing fins[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(2): 102-104.
- [8] 左振英, 李伟录. 贴片球缺药型罩成型斜置尾翼 EFP 的数值模拟[J]. 弹道学报, 2010, 22(3): 73-77.
Zuo Zhenying, Li Weilu. Numerical simulation on EFP with canted fins formed from spherical segment charge liner with flake[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(3): 73-77.
- [9] 桂毓林, 于川, 刘仓理, 等. 带尾翼的翻转型爆炸成型弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 313-318.
Gui Yulin, Yu Chuan, Liu Cangli, et al. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile(EFP) with star-shaped fins[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 313-318.
- [10] 刘建青, 郭涛, 顾文彬, 等. 三点起爆形成尾翼 EFP 的数值模拟和实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(1): 38-46.
Liu Jianqing, Guo Tao, Gu Wenbin, et al. Numerical simulation and experimental investigation of EFP with fins formed by threepoint initiation[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(1): 38-46.
- [11] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 爆炸冲击波空中传播特征参量的优化拟合[J]. 爆破器材, 2014, 43(1): 13-18.
Yang Yadong, Li Xiangdong, Wang Xiaoming. Optimum fitting for characteristic parameters of blast shockwaves traveling in air[J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 13-18.
- [12] 张奇, 覃彬, 孙庆云, 等. 战斗部壳体厚度对爆炸空气冲击波的影响[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 17-19, 23.
Zhang Qi, Qin Bin, Sun Qingyun, et al. Influence of thickness of warhead shell upon explosive shock wave[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 17-19, 23.

Influence of Inner Liner with Grooves of Double-layer Liners on the Formation of EFP with Fins

GUO Shuai^①, LI Xiaojun^②, YU Xiaojie^③, CHEN Zhigang^①, PEI Sixing^①, FU Jianping^①

^①National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology,

North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

^②Research Institute of Chemical Defense, PLA (Beijing, 102205)

^③The assembly of Beijing Army Generation Bureau (Beijing, 100042)

[ABSTRACT] In order to study the influence of inner liner with grooves in circumferential symmetry on double-layer shaped charge forming explosively formed projectile(EFP) with fins, the formation process of shaped charge assembled with double-layer liners was simulated by using finite element software LS-DYNA and Lagrange algorithm. Numerical results of grooves in different sizes on inner liner were analyzed, and the optimized result was selected for experimental studies. Simulated results are in good agreement with experiments. It is shown that the double-layer liners with grooves on inner liner can form EFP with fins. When $L/D_a = 0.2$ and $W/D_a = 0.05$ (D_a is the charge diameter, L is the length of groove, and W is the width of groove), the length-diameter ratios of the front and the back EFP are the largest, and the formation of tandem EFP with fins is the best.

[KEY WORDS] shaped charge; double-layer liners; explosively formed projectile (EFP); fins; numerical simulation