

文章编号: 1006-9941(2013)02-0253-04

# 一种双模态 EFP 战斗部的数值仿真

臧立伟, 尹建平, 王志军

(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毁伤元问题, 利用 LS-DYNA 动力有限元程序, 采用流固耦合方法, 对在药型罩前加装一刻槽圆环形成带尾翼爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 的成型过程进行了数值模拟, 结果表明, 该装药结构能形成带有 8 个尾翼的 EFP, 带尾翼 EFP 的长径比是 EFP 长径比的 2.75 倍, 其头部速度比 EFP 增加了 15%, 实现了带尾翼大长径比 EFP 和 EFP 两种模态的转换。

**关键词:** 爆炸力学; 爆炸成型弹丸 (EFP); 刻槽圆环; 尾翼; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; TJ413. \*2; O38

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.020

## 1 引言

未来战场要求武器系统能适应信息化、精确化、多功能化的趋势, 要求弹药能对付战场中出现的多种目标<sup>[1]</sup>, 如坦克、步兵战车、通信指挥车、装甲运输车, 以及超低空飞行器等。为使同一弹药能对付战场中出现的多种目标, 多模式战斗部成为当前成型装药技术研究的热点问题。

Steinmann F 等<sup>[2]</sup>设计了一种多模式战斗部, 通过中心点起爆形成稳定飞行的爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP), 通过环形起爆形成伸长式 EFP, 通过环形起爆和中心点延迟  $4\mu\text{s}$  起爆形成破片。Baker L 等<sup>[3]</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。解文辉等<sup>[4]</sup>设计了一种点、环多模式起爆装置, 可使 EFP 战斗部实现不同的毁伤模式。李伟斌等<sup>[5]</sup>分析了主装药端面中心点起爆和药型罩顶点起爆爆轰波传播规律, 实现了杆式 EFP、EFP 两种模态的转换。上述对多模式战斗部研究都是以改变起爆方式来实现多模毁伤元的转换。环形起爆对装药结构对称性要求高, 而且要严格保证各起爆点的起爆时差足够小, 批量生产时起爆同步性很难保证<sup>[6]</sup>。

针对以上不足, 本研究设计了一种新型、有效的实现 EFP 不同毁伤模式的方法, 即在药型罩前加装一个带有刻槽铜环的机械装置, 从而实现带尾翼大长径比 EFP 和 EFP 两种模态的转换, 此方法在中心起爆装药的情况下就可以实现。

## 2 计算模型与参数选择

### 2.1 战斗部结构

EFP 战斗部由炸药、药型罩、壳体、刻槽圆环、机械装置构成, 其设计如图 1 所示, 图 2 为 EFP 战斗部结构剖视图。药型罩采用等壁厚球缺罩, 曲率半径  $R=80\text{ mm}$ , 口径为  $90\text{ mm}$ , 壁厚为  $4.0\text{ mm}$ ; 固定在机械装置上的圆环厚度为  $4.0\text{ mm}$ , 内圈直径为  $50\text{ mm}$ , 外圈直径为  $90\text{ mm}$ , 刻槽深度为  $2.0\text{ mm}$ , 刻槽角度为  $20^\circ$  (见图 3); 壳体厚度为  $3\text{ mm}$ ; 装药高度  $H=90\text{ mm}$ ; 起爆方式选择单点起爆, 起爆点在装药底面圆心处。

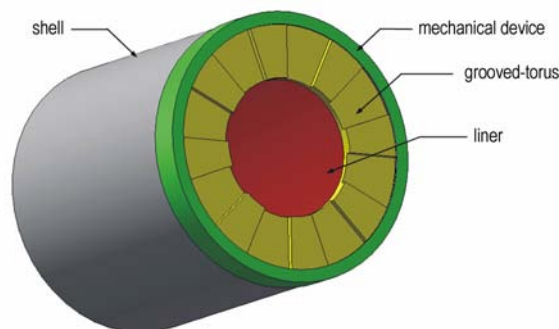


图 1 战斗部结构图

Fig. 1 Structural drawing of the warhead

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2013-01-21

基金项目: 国防基础科研项目 (批准号: k133040610090)

作者简介: 臧立伟 (1987 -), 男, 在读硕士, 主要从事高效毁伤战斗部设计及数值仿真研究。e-mail: 756698984@qq.com

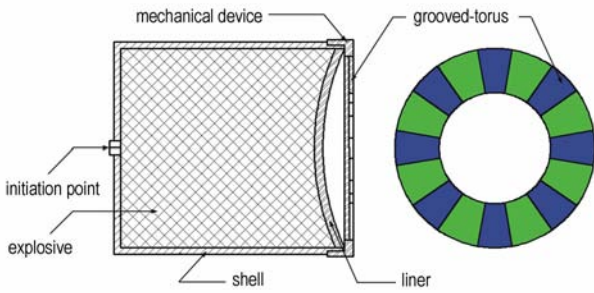


图2 战斗部剖视图(绿色为凸台,蓝色为刻槽)  
**Fig.2** Sectional view of the warhead (green is boss, blue is carving groove)

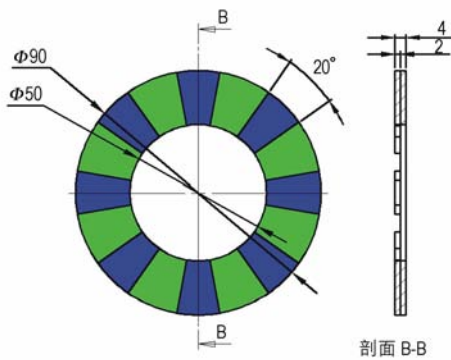


图3 刻槽圆环结构图(绿色为凸台,蓝色为刻槽)  
**Fig.3** Structural drawing of the grooved torus (green is boss, blue is carving groove)

表1 钽的材料模型主要参数

**Table 1** Material parameters of the tantalum

materials	$\rho_1 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$G / \text{GPa}$	$A$	$B$	$n$	$C$	$m$	$T_m / \text{K}$	$T_r / \text{K}$
tantalum	17.4	140	1.05	0.177	0.12	0.0275	1.0	1723	293

Note:  $\rho_1$ , mass density of tantalum;  $A$ , yield stress constant;  $B$ , strain-hardening constant;  $n$ , strain-hardening index;  $C$ , strain-rating correlation coefficient;  $m$ , temperature correlation coefficient;  $T_m$ , melting temperature;  $T_r$ , room temperature.

表2 圆环的状态方程计算参数<sup>[5]</sup>

**Table 2** Computational parameters of torus state equation

materials	$\rho_2 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$C_0$	$a$	$E_0 / \text{GPa}$
copper	8.96	4750	3.8	2.74	0.125	1.346	0.34	0.0

Note:  $\rho_2$ , mass density of copper;  $C$ , sound velocity in the copper;  $S_1, S_2, S_3, C_0$ , Grunisen parameter;  $a$ , volume correction factor;  $E_0$ , initial energy of unit volume.

表3 装药材料参数<sup>[6]</sup>

**Table 3** Material parameters of the charge

materials	$D / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_3 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$p_{cj} / \text{GPa}$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$e_0$	$\omega$
RHT-901	7.98	1.717	29.5	524.23	7.678	4.2	1.1	8.5	0.34

Note:  $D$ , detonation velocity;  $\rho_3$ , mass density of charge;  $p_{cj}$ , Chapman-Jouget pressure;  $A, B, R_1, R_2, \omega$ , coefficient;  $e_0$ , specific internal energy.

## 2.2 计算模型

应用 Truegrid 软件建立战斗部有限元计算模型,然后运用有限元软件 ANSYS/LS DYNA 对其成型过程进行数值模拟。考虑到若在数值模拟计算中采用传统的拉格朗日网格模拟炸药的爆轰过程和药型罩的压垮及成型过程,网格会出现严重的畸变现象,不利于计算的进行。为避免上述问题的出现,采用流固耦合方法对带尾翼 EFP 和 EFP 的成型过程进行了模拟。其中炸药、药型罩、空气网格均采用单点欧拉多材料体单元,炸药周围用空气网格填充;壳体、铜环、机械装置均采用拉格朗日六面体网格单元,并且耦合在空气网格中。网格单元选用 Solid164 八节点六面体单元,计算中采用的单位制为: mm-ms-kg-GPa。根据装药结构的对称性,建立 1/4 模型,以节省计算时间与周期。

计算时,药型罩材料选用钽,参数见表1。圆环材料为紫铜<sup>[7]</sup>,参数见表2。壳体材料为钢,采用 JOHNSON-COOK 材料模型和 GRUNEISEN 状态方程来描述药型罩、圆环和壳体在爆轰波作用下的动态响应过程和高应变条件下的材料变形问题。炸药选用 8701 炸药<sup>[8]</sup>,采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程,参数见表3。JWL 状态方程精确描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性。空气材料采用 MAT\_NULL 模型;状态方程为线性多项式,用 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 来描述,参数见表4。

表 4 空气模型计算参数

Table 4 Computational parameters of air model

$\rho_4 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_0 / \text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$V_0$
1.25E-3	344	0	1

Note:  $\rho_4$ , mass density of air;  $C$ , sound velocity;  $E_0$ , initial internal energy;  $V_0$ , initial relative volume.

### 3 EFP 和带尾翼大长径比 EFP 成型过程数值模拟

EFP 成型过程如图 4 所示。装药起爆后,球形爆轰波向药型罩运动,12  $\mu\text{s}$  时刻爆轰波首先碰击罩顶点,药型罩发生极大的塑性变形而被压垮、并翻转成平板(如图 4b 所示)。由于罩口部径向装药较少,导致在稀疏波作用下,压力降低较早,所以,药型罩轴线附近的微元获得的轴向速度大于罩边缘,在 49  $\mu\text{s}$  时刻产生了轴向拉伸现象。药型罩最终在拉伸和压垮的作用下形成稳定飞行的 EFP 弹丸(如图 4d 所示)。

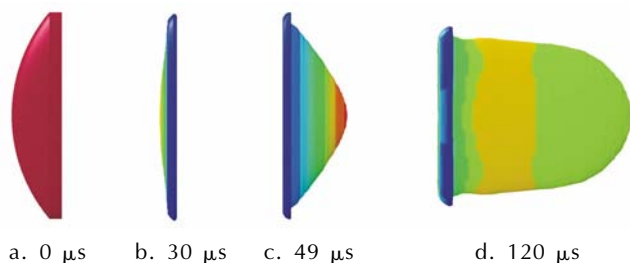


图 4 EFP 成型过程

Fig. 4 Forming processes of EFP

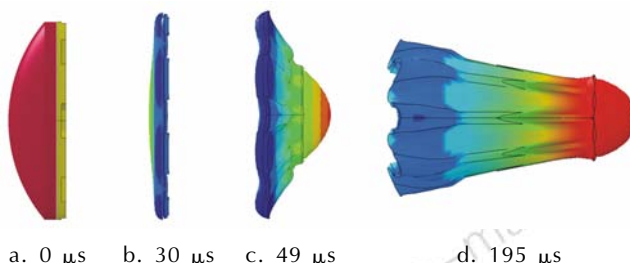


图 5 带尾翼 EFP 成型过程

Fig. 5 Forming processes of EFP with fins

带尾翼 EFP 成型过程如图 5 所示。0 ~ 30  $\mu\text{s}$  时,主装药爆炸后,产生的爆轰波首先作用于钽药型罩,药型罩微元存在轴向速度,各个部位在运动中存在挤压现象,药型罩中部会逐渐增厚,同时药型罩逐渐翻转。30  $\mu\text{s}$  时,翻转的钽药型罩碰撞铜环。最后,钽药型罩与铜环一起运动,钽药型罩形成 EFP 主体,铜环形成 EFP 的 8 个对称尾翼(如图 5d 所示)。带尾翼 EFP 形状类似于“羽毛球”。

### 4 两种模态的 EFP 对比分析

对战斗部加装铜环与否分别进行仿真,当药型罩前加装铜环时,由于药型罩与铜环之间摩擦阻力的作用,使得翻转后的罩体碰撞铜环之后不能分开,实现共同飞行,最终形成带尾翼 EFP。未加铜环在战斗部时,形成 EFP。由于在 240  $\mu\text{s}$  时刻带尾翼 EFP 长径比达到最大,故选择在此刻进行二者的对比分析。

两种模态的 EFP 对比分析见表 5。带尾翼 EFP 的长径比(2.64)是 EFP 长径比(0.96)的 2.75 倍,其头部速度比 EFP 增加了 15%。与 EFP 相比,带尾翼 EFP 飞行速度更大、长度更长、侵彻能力更强,可对付重型装甲目标。

表 5 240  $\mu\text{s}$  时 EFP 和带尾翼 EFP 的基本参数Table 5 Parameters of EFP and EFP with fins at 240  $\mu\text{s}$ 

MODE	$v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$L / \text{mm}$	$d_p / \text{mm}$
EFP	1289	54	56
EFP with fins	1479	111	42

Note:  $v$ , velocity of penetrator;  $d_p$ , diameter of penetrator;  $L$ , length of penetrator.

### 5 结论

(1) 采用有限元动力分析程序 LS-DYNA,对本文所述的战斗部成型过程进行了数值模拟,当药型罩前加装铜环时,战斗部形成带尾翼 EFP。当铜环在战斗部作用前被抛开时,形成 EFP。这实现了在同一成型装药战斗部的基础上,通过抛掷或加装刻槽圆环,获得 EFP 和带尾翼大长径比 EFP 两种模态之间的转换,为多模战斗部的设计工作打下了基础。

(2) 带尾翼 EFP 的长径比是 EFP 长径比的 2.75 倍,其头部速度比 EFP 增加了 15%。大大提高了战斗部的毁伤能力。

#### 参考文献:

- [1] 郭美芳,范宁军. 多模式战斗部与起爆技术分析研究[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(1): 31.  
GUO Mei-fang, FAN Ning-jun, The Study on a Multi mode Warhead and the In initiation Technology[J]. *Journal of Detection & Control*, 2005, 27(1): 31.
- [2] Steinmann F, Löscher C. Multimode warhead technology studies [C] // Novbert B, Jerem A, George R. Proceedings of the 21th International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia, 2004: 728-735.
- [3] Baker E L, Daniels 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, USA, 2002: 589–596.
- [4] 解文辉,刘保栓. 一种多模式起爆装置研究[J]. 火工品, 2010(4): 1–4.  
XIE Wen-hui, LIU Bao-shuan. Study on A Multimode Initiation Device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(4): 1–4.
- [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): 205–207.  
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]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 205–207.
- [6] 林加剑, 沈兆武, 任辉启, 等. 一种形成尾翼型聚能侵彻体新方法的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(5): 449–454.  
LIN Jia-jian, SHEN Zhao-wu, REN Hui-qi, et al. Experimental study on a new way to form shaped charge projectiles with fins [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(5): 449–454.
- [7] 顾文彬, 瞿洪荣, 朱铭颀. 柱锥结合罩压垮过程数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 548–552.  
GU Wen-bin, QU Hong-rong, ZHU Ming-qie. Numerical simulation of jet formation of cylinder-cone shaped charge[J]. *Journal of PLA University of science and Technology (Nature Science Edition)*, 2009, 10(6): 548–552.
- [8] 张会锁, 赵捍东, 黄延平, 等. 起爆方式对聚能射流影响的数值仿真研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 415–419.  
ZHANG Hui-suo, ZHAO Han-dong, HUANG Yan ping, et al. Numerical simulation of effect ignition ways on shaped charge jet [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 415–419.

## Numerical Simulation of a Dual-mode EFP Warhead

ZANG Li-wei, YIN Jian-ping, WANG Zhi-jun

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to study the multimode penetrators with the same shaped charge, the numerical simulation of the forming process of the explosively formed projectile (EFP) with fins which was formed by a grooved torus in front of the liner, was carried out by the Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) method using LS-DYNA. Results indicate that the charge structure can form EFP with eight fins, and the length-diameter ratio of EFP with fins is 2.75 times of that of EFP and its velocity increases by 15 percent.

**Key words:** explosive mechanics; explosively formed projectile (EFP); grooved torus; fin; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; TJ413. +2; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.020