

文章编号: 1006-9941(2012)06-0710-05

起爆点位置对网栅切割式 MEFP 成型的影响

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: 为了研究起爆点位置对圆环形网栅切割式 MEFP 成型的影响, 利用 LS-DYNA 动力有限元程序, 采用流固耦合方法, 对圆环形网栅切割式 MEFP 的形成过程进行了数值模拟。结果表明, 该装药结构能形成 5 个具有一定质量和方向性、速度达到 $1600 \sim 2400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的子 EFP。在网栅距离固定的前提下, 随着起爆点与药型罩顶点距离的增加, MEFP 的速度逐渐增大, 发散角逐渐减小。起爆点距离在 $0.56 D_k$ (D_k 为装药口径) 到 $0.89 D_k$ 范围内能形成理想的子 EFP, 且在 $0.78 D_k$ 时成型最好。

关键词: 爆炸力学; 多爆炸成型弹丸; 切割网栅; 起爆点; 数值模拟

中图分类号: TJ413. +2; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.011

1 引言

未来战场要求武器系统能适应信息化、精确化、多功能化趋势, 要求弹药能对付战场中出现的多种目标^[1], 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, 网栅切割式 MEFP 成为多功能战斗部技术研究的热点问题之一。对于防护能力较强的装甲目标, 网栅切割式 MEFP 战斗部形成单个 EFP 攻击目标; 对于防护能力较弱、需要通过面毁伤才能有效摧毁的目标, 如武装直升机、装甲车等, 则形成多个子 EFP, 实现一弹多用的目的, 从而有效地提高战斗部作战使用效能。郭美芳等^[1]初步分析了药形罩的材料与结构、炸药的类型与装药结构对多模式战斗部性能的影响, 说明了多模式战斗部技术的重要性。张洋溢等^[2]分析了一种在药型罩前适当位置安装一个可抛掷的十字形切割网栅的装药结构, 结果表明, 该装药结构产生的破片能够穿透 48 m 处的 6 mm 的 45# 钢板, 可以用来打击直升机等轻型装甲目标。李伟斌等^[3]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 两种模式的转换。这些研究集中于对十字形网栅切割式 MEFP 的数值模拟分析和起爆点位置对 EFP 模式转换的影响, 未能研究起爆点

位置对圆环形网栅切割式 MEFP 成型的影响。本文对在药型罩前适当位置安装一个圆环形切割网栅的战斗部结构做了数值模拟, 分析了起爆点与药型罩顶点的轴向距离对 MEFP 成型的影响, 实现了一弹多用的目的, 对进一步研究多模式战斗部具有一定的参考价值。

2 计算模型与参数选择

2.1 战斗部结构

网栅切割式 MEFP 战斗部结构设计见图 1, 主要由铜药型罩、切割网栅、壳体和炸药组成。图 2 为网栅切割式 MEFP 战斗部结构剖视图。

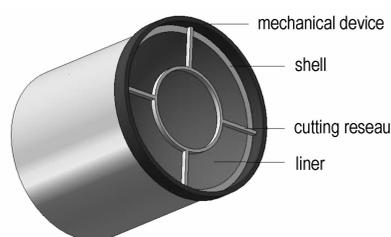


图 1 圆环形网栅切割式 MEFP 战斗部

Fig. 1 Circle-shaped MEFP warhead

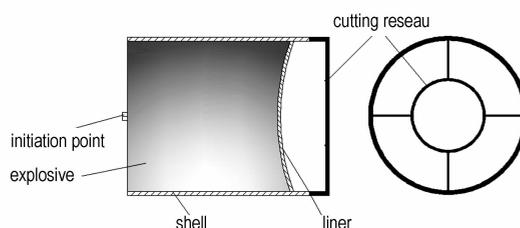


图 2 圆环形网栅切割式 MEFP 战斗部结构剖视图

Fig. 2 Sectional view of the Circle-shaped MEFP warhead

收稿日期: 2012-06-18; 修回日期: 2012-07-04

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

2.2 计算参数

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,炸药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药型罩的切割过程进行了模拟。其中炸药和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;药型罩、壳体 and 切割网栅采用拉格朗日六面体网格单元,并且耦合在空气网格中。

药型罩采用等壁厚设计,材料为紫铜,口径为 90 mm,壁厚为 4.0 mm,曲率半径 $R = 140$ mm,采用

MAT_JOHNSON_COOK 模型 GRUNEISEN 状态方程来描述其动态响应过程,基本参数见表 1;装药为 8701 炸药,装药高度 $h = 90$ mm,其本构模型选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程,基本参数见表 2;选用钢质壳体。网栅中心圆环的直径 $d_c = 40$ mm,材料为钨,相关参数见表 3;空气材料采用流体模型为: MAT_NULL,状态方程为线性多项式: EOS_LINER_POLY_NOMIAL 来描述,基本参数见表 4。起爆方式选择单点起爆,起爆点在装药底面圆心处。

表 1 装药材料参数^[4]

Table 1 Material parameters of the charge

materials	$D/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_0/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	p_{cj}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	e_0	ω
RHT-901	7.89	1.717	29.5	524.23	7.678	4.2	1.1	8.5	0.34

Note: D , detonation velocity; ρ_0 , mass density of RHT-901; p_{cj} , Hapman-Jouget pressure; A, B, R_1, R_2, ω , coefficient; e_0 , specific internal energy.

表 2 药型罩的状态方程计算参数^[5]

Table 2 Computational parameters of liner state equation

materials	$\rho_1/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	S_1	S_2	S_3	C_0	a	E_0/GPa
red copper	8.96	4750	3.8	2.74	0.125	1.346	0.34	0.0

Note: ρ_1 , mass density of red copper; C , sound velocity in the red copper; S_1, S_2, S_3, C_0 , grunaisen parameter; a , volume correction factor; E_0 , initial energy of unit volume.

表 3 钨丝的材料模型主要参数^[2]

Table 3 Material parameters of the tungsten

materials	$\rho_2/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	G/GPa	A	B	n	C	m	T_m/K	T_r/K	$c_v/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tungsten	19.3	160	0.0135	0.00177	0.61	0.023	1.0	1723	298	142

Note: ρ_2 , mass density of tungsten; 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; c_v , specific heat capacity.

表 4 空气模型计算参数^[3]

Table 4 Computational parameters of air model

$\rho_3/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_0/\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	V_0
1.25E-3	394	0	1

Note: ρ_3 , mass density; C , sound velocity; E_0 , initial internal energy; V_0 , initial relative volume.

3 网栅切割式 MEFP 成型过程数值模拟

炸药起爆后,在爆轰波作用下,药型罩发生极大的塑性变形而被压垮、翻转。翻转后的罩体除获得很高的质心速度外,罩微元还获得沿轴向近似呈线性分布的轴向及径向速度^[5]。处于流体状态的药型罩碰撞金属网栅,被切割成 5 个子 EFP,子 EFP 在爆轰产物的

作用下继续被加速、翻转,不同的子 EFP 具有不同的径向速度和轴向速度,使药型罩形成具有一定速度梯度的 5 个部分,进而形成具有一定形状的高速侵彻体。由于药型罩中心部分先于周边部分受到爆轰波的作用,所以中心子 EFP 的速度高于周边子 EFP,结果是速度最快的中心子 EFP 走在最前面,单独成为一个部分,而后面的则形成 4 个轴向速度,相差不大,但径向存在一定速度的子 EFP。药型罩最终形成 5 个子 EFP 的新的毁伤元,速度在 $1600 \sim 2400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。

图 3(a-f) 所示爆炸成型弹丸各个时刻成型结果及速度云图。圆环形网栅切割式 MEFP 的成型过程表明, $0 \sim 17 \mu\text{s}$ 在爆轰波的作用下,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。18 μs 时刻翻转的药型罩碰撞金属网栅,实施切割。27 μs 时刻药型罩被金属网栅切割成 5 个独立的部分,并继续向前飞行。45 μs 时刻由于子 EFP 头尾仍存在速度差,在运动过程中将产生拉长。46 ~ 116 μs 期间,子 EFP 处于轴向拉伸的状态,并且以递增的速度向前飞行。在 117 μs 时刻形成具有良好的气动外形和一定长径比的子 EFP,并且速度达到稳定。

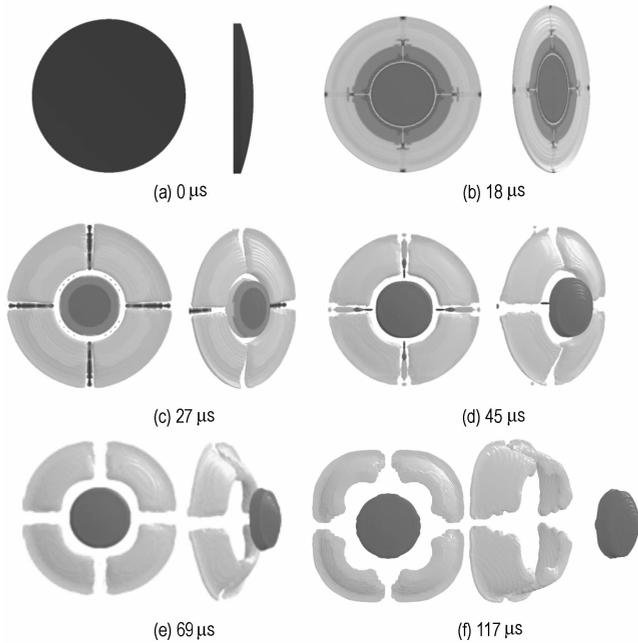


图 3 网栅切割式 MEFP 成型过程及速度云图(主视图及左视图)
Fig. 3 The forming processes and velocity distributions of MEFP (front view and left view)

4 起爆点位置对网栅切割式 MEFP 成型的影响

4.1 成型装药结构及起爆点分布

成型装药结构采用圆柱形装药如图 4 所示。起爆方式采用中心点起爆,通过设定起爆点 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J 的 10 种起爆方案来研究起爆点位置对子 EFP 成型的影响,每种方案起爆点之间相隔 10 mm。对起爆点距离药型罩轴向距离为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 mm 的 10 种情况分别进行数值模拟。其中网栅直径 $d=1$ mm,网栅间距 L 固定为 8 mm。

4.2 起爆点位置对子 EFP 速度的影响

表 5 为经网栅切割后的子 EFP 速度数值模拟结果,由表 5 可见,随着起爆点与药型罩顶点轴向距离的增加,MEFP 子弹丸径向平均速度 (V_1 为 $t=117$ μs 时刻子 EFP 的径向平均速度) 逐渐减小,当起爆点距离

药型罩的轴向距离从 $0 D_k$ (D_k 为装药口径) 增加到 $1 D_k$ 时,轴向平均速度 (V_2 为 $t=117$ μs 时刻子 EFP 轴向平均速度) 提高了 27%,原因是:主装药中心点 J 起爆药型罩受到的爆轰压力峰值远大于药型罩顶点 A 起爆受到的爆轰压力峰值^[6],使得 J 点起爆所形成的子 EFP 径向平均速度和轴向平均速度较 A 点起爆大。

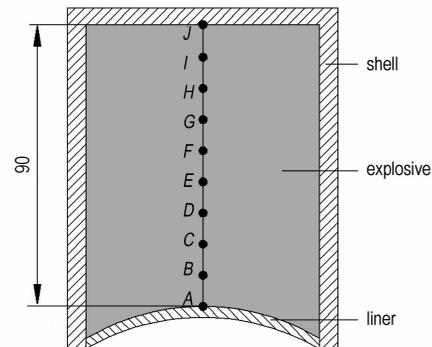


图 4 成型装药结构及起爆点分布
Fig. 4 Formed charge structure and initiation point layout

表 5 经网栅切割后的子 EFP 速度数值模拟结果

Table 5 Numerical result of the sub-explosively formed projectile velocity after being cutted

No.	L_1 / mm	V_1 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	V_2 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	0	326.6	1627
2	10	318.3	1644
3	20	307.1	1667
4	30	300.9	1703
5	40	285.9	1747
6	50	268.4	1802
7	60	258.7	1866
8	70	248.6	1931
9	80	243.7	1997
10	90	237.5	2058

Note: L_1 , the initiation point position; V_1 , radial velocity of sub-explosively formed projectile when $t=117$ μs ; V_2 , axial radial velocity of sub-explosively formed projectile when $t=117$ μs .

图 5 为碰撞网栅前药型罩的压垮过程,由图 5 可见,顶点 A 起爆爆轰波最大压力区较大,药型罩多个微元同时被压垮,因此罩体头尾速度差较小。中心点 J 起爆药型罩在 12 μs 时爆轰压力瞬间增大,而且球面波首先传到药型罩顶端,引起翻转后的罩体头尾速度差较大。这导致了中心点 J 起爆药型罩经网栅切割之后形成的中心子 EFP 较顶点 A 起爆走得远。

4.3 起爆点位置对子 EFP 发散角的影响

图 6 为子 EFP 发散角示意图,由图 6 可见,经网栅切割之后所形成的子 EFP 发散角为 $\theta = \arctan \frac{H}{S}$,式

中, S 为战斗部球缺形药型罩端口与子 EFP 飞行位置之间的水平距离, H 为子弹丸的发散半径。

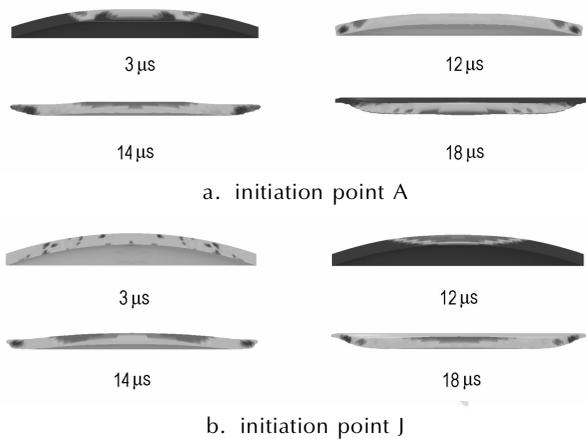


图 5 碰撞网栅前药型罩的压垮过程

Fig. 5 Collapse process of the charge liner before touching the cutting reseau

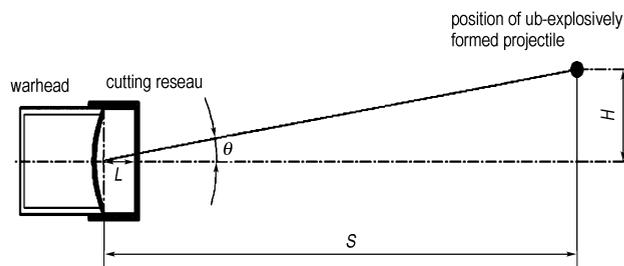


图 6 子 EFP 发散角示意图

Fig. 6 Sketch map of the radial dispersion angle of sub-explosively formed projectile (L the cutting reseau distance; θ , the radial dispersion angle of MEFP; H , the distribution radius of sub-explosively formed projectile; S , the horizontal distance between liner and flying position of sub-explosively formed projectile)

表 6 起爆点位置变化对子 EFP 发散角影响因素数值模拟结果
Table 6 Numerical results of the influence of initiation point position on radial dispersion angle

No.	L_1 /mm	$\theta / (^\circ)$
1	0 (0.00 D_k)	4.809
2	10 (0.11 D_k)	4.021
3	20 (0.22 D_k)	3.598
4	30 (0.33 D_k)	3.444
5	40 (0.44 D_k)	3.214
6	50 (0.56 D_k)	2.967
7	60 (0.67 D_k)	2.812
8	70 (0.78 D_k)	2.665
9	80 (0.89 D_k)	2.506
10	90 (1.00 D_k)	2.418

Note: L_1 , the initiation point position; θ , the radial dispersion angle.

表 6 为起爆点位置变化对子 EFP 发散角影响数值模拟结果,由表 6 可见,随着起爆点与药型罩顶点距离的增加,子 EFP 发散角逐渐减小。模拟表明:起爆点与药型罩顶点距离的变化影响 MEFP 子弹丸的速度和散布面积,是影响子 EFP 成型的因素之一。随着起爆点与药型罩顶点距离增加,子 EFP 径向平均速度逐渐减小,从而导致子 EFP 的飞行发散角减小。产生这一趋势的原因是:随着起爆点距离的增加,药型罩受到的爆轰压力峰值逐渐增大,造成翻转后的罩体头尾速度差增大,切割后所形成的子 EFP 头尾仍然存在速度梯度,所以继续产生轴向拉伸,子弹丸向罩轴线闭合而产生径向压缩。所以,药型罩在轴向拉伸、径向压缩的作用下产生发散角。可见,起爆点距离的减小有利于增大子 EFP 的发散角。

当起爆点距离很小时,虽然所形成的子 EFP 的发散角很大,但速度较低,毁伤目标的能力弱。起爆点距离过大虽然使得子 EFP 的速度有所提高,侵彻目标能力增强,但导致了 MEFP 子弹丸发散角减小,散布面积缩小。所以,起爆点距离的过大或过小都会使得药型罩错过了最佳的切割时机,从而影响子 EFP 的侵彻能力。因此,起爆点距离应在一个适当的范围内变动,并存在一个最佳值。模拟表明:起爆点距离在 $0.56 D_k$ (起爆点距药型罩顶点的轴向距离为 50 mm) 到 $0.89 D_k$ (起爆点距药型罩顶点的轴向距离为 80 mm) 范围内能形成理想的子 EFP,且在 $0.78 D_k$ (起爆点距药型罩顶点的轴向距离为 70 mm) 时子 EFP 具有良好的气动力外形和较高的侵彻速度。

5 结 论

(1) 在圆环形网栅切割式 MEFP 成型的数值模拟中,采用流固耦合算法可有效克服拉格朗日算法模拟炸药爆轰过程中所产生的网格畸变这一缺点,提高了数值模拟结果的准确性。利用圆环形切割网栅可以在原来的单个 EFP 装药结构的基础上产生 5 个具有一定威力和方向性的子 EFP,能够用于攻击轻型装甲目标。为多模战斗部的设计工作打下了基础。

(2) 通过数值模拟研究了单点起爆位置对子 EFP 成型的影响,得出当起爆点距离药型罩的轴向距离从 $0 D_k$ 增加到 $1 D_k$,子 EFP 轴向平均速度提高 27%。

(3) 分析了起爆点位置这一因素对子 EFP 发散角的影响,可以采用适当减小起爆点距离的方法来增大子 EFP 的散布面积,从而提高 MEFP 的命中概率。起爆点距离的增减对子 EFP 的速度变化有明显的影

起爆点距离在 $0.56 D_k$ 到 $0.89 D_k$ 范围内能形成理想的子 EFP,且在 $0.78 D_k$ 时子 EFP 具有良好的气动外形和较高的侵彻速度。

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, 2005,1(27): 31.
GUO Mei-fang, FAN Ning-jun. The study on a multi mode war-head and the in initiation technology[J]. *Journal of Detection & Control*, 2005,1(27): 31.
- [2] 张洋溢, 龙源, 余道强, 等. 切割网栅作用下 EFP 形成多破片的数值分析 [J]. 弹道学报, 2009,2(21): 92.
ZHANG Yang-yi, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Numerical analysis of EFP forming multi-fragments due to cutting reseau. [J]. *Journal of Ballistics*, 2009,2(21): 92.
- [3] 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, 2011,2(31): 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*, 2011,2(31): 205-207.
- [4] 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.
- [5] 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-jie. 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.
- [6] 周翔, 龙源, 余道强, 等. 弹头爆炸成形弹丸数值仿真及发散角影响因素[J]. 兵工学报, 2006,1(27): 27-30.
ZHOU Xiang, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Numerical simulation and effect analysis for radial dispersion of MEFP[J]. *Acta armamentarii*, 2006,1(27): 27-30.

Influence of Initiation Point Position on Formation of MEFP

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

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

Abstract: To study the influence of initiation point position on formation of circle-shaped multiple explosively formed projectile (MEFP), numerical simulation of the forming process of the circle-shaped MEFP was carried out with the ALE method using LS-DYNA, and the influence of the cutting reseau distance on radial dispersion angle was analyzed. Results indicate that such a charge structure can produce five pieces of sub-explosively formed projectile which has a definite mass, direction, and a velocity between $1600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Under fixed cutting reseau distance, with the increase of initiation point distance, the speed of MEFP increases, the radial dispersion angle of MEFP reduces gradually. The initiation point distance should be in a proper range from 0.56 to 0.89 times as long as D_k (D_k is the charge caliber) in order to form ideal sub-explosively formed projectile, and it has a best formation at $0.78 D_k$.

Key words: explosive mechanics; multiple explosively formed projectile (MEFP); cutting reseau; initiation point; numerical simulation

CLC number: TJ413. +2; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.011