

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.02.004

# 起爆方式对变壁厚药型罩形成毁伤元影响的数值仿真<sup>\*</sup>

孙加肖<sup>①</sup>  尹建平<sup>①</sup>  王志军<sup>①</sup>  李建华<sup>②</sup>  唐  琦<sup>①</sup>

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②河北省农业广播电视学校承德市分校(河北承德,067000)

[摘  要]  为获得起爆方式对变壁厚药型罩形成毁伤元的影响规律,采用有限元分析软件 AUTODYN-2D 对变壁厚药型罩装药结构在中心点起爆、环起爆、点环起爆和面起爆 4 种起爆方式下形成毁伤元的过程进行数值仿真研究。结果表明:采用不同的起爆方式,装药会产生不同的爆轰波形,变壁厚药型罩会分别形成向前压拢型 EFP、向后翻转型 EFP、准球形 EFP 和倒锥形 EFP。4 种不同形态的毁伤元最终速度相差不大,但达到飞行稳定的时间不同,采用中心点起爆形成的向前压拢型 EFP 所需时间最短。

[关键词]  爆炸力学;爆炸成型弹丸;起爆方式;爆轰波;不同形态

[分类号]  TJ410.3

## Numerical Simulation on the Damage Element Formed by Variable Thickness Liner under Different Ways of Initiation

SUN Jiaxiao<sup>①</sup>, YIN Jianping<sup>①</sup>, WANG Zhijun<sup>①</sup>, LI Jianhua<sup>②</sup>, TANG Qi<sup>①</sup>

①School of Mechatronic Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Chengde Campus, Hebei Agriculture Broadcasting and Television School (Hebei Chengde, 067000)

[ABSTRACT]  In order to understand the effect of initiation ways on the damage element forming process produced by variable thickness liner, the numerical simulation of the process under four initiation ways, including point initiation, annular initiation, point-annular initiation and plane initiation, was carried out by using finite element analysis software AUTODYN-2D. Results show that different ways of initiation produce different shapes of detonation wave, and liner can form forward folding EFP, backward folding EFP, quasi-spherical EFP and inverted cone EFP. Velocities of the four different damage elements are similar, but time for EFP flying stability is different, and forward folding EFP needs the least time under point initiation.

[KEYWORDS]  explosion mechanics; explosively formed projectile; initiation ways; detonation wave; different shapes

## 引言

聚能装药装置爆炸后,在爆轰产物的高温、高压作用下,金属药型罩发生塑性变形,经挤压、翻转、汇聚后,可以形成具有较高速度和一定稳定结构和形状的弹丸,即爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)<sup>[1-4]</sup>。EFP 一般分为 3 种形式:向前压拢型 EFP、向后翻转型 EFP 以及压垮型 EFP。翻转型 EFP 具有较大的长径比和良好的气动外形及外

弹道性能,可攻击较远距离的目标。压拢型 EFP 虽然气动性差,但是动能较高,可在较近的距离内以高动能攻击多层或厚重钢靶类目标<sup>[5]</sup>;此外,压拢型 EFP 也可应用于包覆反应破片,形成爆炸成型复合反应破片。球形 EFP 几乎不受飞行姿态的影响,在工程实践中也具有很高的应用价值<sup>[6-9]</sup>。

为获得起爆方式对毁伤元成型的影响规律,利用有限元显示动力学分析程序 AUTODYN-2D,对不同起爆方式下变壁厚药型罩形成毁伤元的过程进行数值仿真,并对仿真结果进行分析,为变壁厚药型罩

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-08-12

基金项目:国家自然科学基金(11572291)

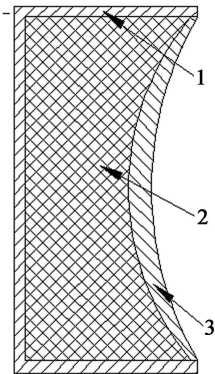
作者简介:孙加肖(1990 - ),男,硕士研究生,研究方向为战斗部设计与高效毁伤技术。E-mail:1275429491@qq.com

形成 EFP 的研究提供参考。

# 1 数值计算模型

## 1.1 几何和有限元模型

战斗部结构主要由壳体、炸药和药型罩 3 部分组成。战斗部几何结构模型如图 1 所示。战斗部壳体厚度  $T$  为 2 mm,装药直径  $D$  为 60 mm,装药长径比  $L/D$  为 0.5,药型罩外曲率半径  $R$  为  $D$ ,罩顶厚  $d_1$  为 4 mm,罩边缘厚度  $d_2$  为 1 mm。



1 - 壳体;2 - B 炸药;3 - 药型罩。

图 1 聚能装药几何模型

Fig. 1 Geometric model of shaped charge

利用 AUTODYN 软件自带程序建立有限元网格划分。因为该结构具有轴对称的特性,所以采用1/2二维结构建立有限元仿真模型。

为了将问题简化,初步仿真计算时,仅考虑药型罩、主装药、空气和壳体4部分,均采用多物质 Euler单元算法<sup>[10-11]</sup>。划分网格时,毁伤元经过的通道上的网格进行加密。同时,在空气边界上添加“Flow-out”边界条件,消除边界效应<sup>[11]</sup>。数值模

拟中单位制为 mm-g- $\mu$ s。  
战斗部的有限元模型如图 2 所示。

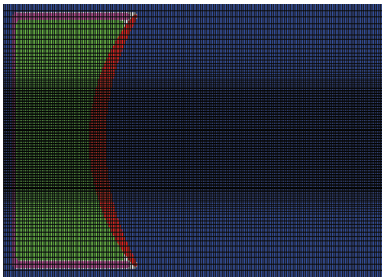


图 2 聚能装药有限元模型

Fig. 2 Finite element model of shaped charge

## 1.2 材料模型及参数选取

本文中,所用的材料模型均来自 AUTODYN 程序材料库<sup>[12]</sup>。空气采用理想气体状态方程来描述。炸药选用 JWL 状态方程的 B 炸药,该状态方程能够很好地反映爆轰产物的体积、压力和能量特性。药型罩材料为紫铜,选用 Shock 状态方程和 Piece-wise JC 的强度模型来描述爆轰作用下的动态响应过程。

模型材料参数如表 1 所示。

# 2 仿真结果与已有试验结果对比

于川等<sup>[5]</sup>曾做过小口径药型罩 EFP 侵彻多层钢靶的试验。该聚能装药结构采用曲面变壁厚药型罩的设计思路,药型罩口径为 60 mm,材料为碳钢。仿真所得压拢型 EFP 与试验所得 X 射线测试照片对比如图 3 所示。于川等<sup>[5]</sup>根据 3 台闪光 X 射线相机记录不同时刻的飞行位置,测量得到 EFP 速度为 1.51 ~ 1.54 km/s,而仿真所得 EFP 速度为 1.31 km/s。

王树有等<sup>[13]</sup>做过变壁厚球缺药型罩形成准球

表 1 材料模型参数  
Tab. 1 Material model parameters

B 炸药		空气		紫铜	
参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.717	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.001 23	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	8.93
$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	7.98	$\gamma$	1.4	Gruneisen 参数	1.99
$p_{CJ}/\text{kPa}$	$2.95 \times 10^7$	参考温度/K	288	$C_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.958
$A/\text{kPa}$	$5.242\ 3 \times 10^8$	$C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	717	$S_1$	1.497
$B/\text{kPa}$	$7.678 \times 10^6$				
$R_1$	4.2				
$R_2$	1.1				
$\omega$	0.34				

形 EFP 的试验。仿真所得准球形 EFP 与试验所得 X 射线测试照片对比如图 4 所示。

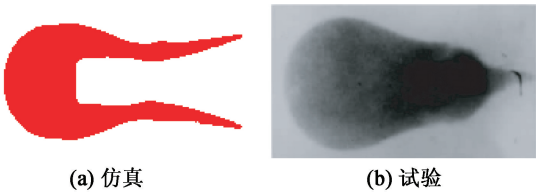


图 3 压拢型 EFP 数值模拟成型图与 X 光试验结果对比

Fig.3 Comparison of numerical simulation prediction with X-ray test result of folding EFP formation shape

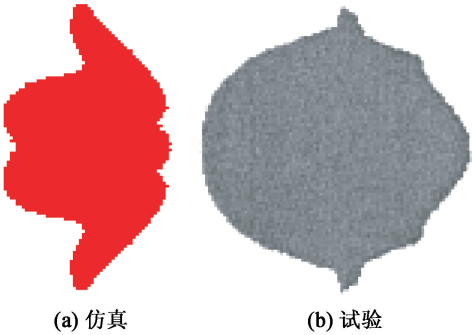


图 4 准球形 EFP 数值模拟成型图与 X 光试验结果对比

Fig.4 Comparison of numerical simulation prediction with X-ray test result of quasi-spherical EFP formation shape

变壁厚球缺药型罩可以形成压拢型 EFP 和准球形 EFP,由图 3 和图 4 的对比可知,本文中的数值模拟结果与参考文献的试验结果比较一致,数值模拟的可信度高。

3 起爆方式对毁伤元的影响

通过装药,不同起爆方式产生不同爆轰波形,以对 EFP 的成型产生影响。不同的爆轰波形将导致药型罩上不同的爆轰载荷分布,使得药型罩以不同的方式被压垮变形,最终导致 EFP 毁伤元模态产生差异<sup>[14]</sup>。选取 4 种起爆方式(即中心点起爆、环起爆、点环起爆和面起爆)来探究起爆方式对毁伤元成型的影响规律。

3.1 起爆方式对毁伤元成型的影响

图 5 为 4 种不同起爆方式下,在  $t = 3 \sim 5 \mu\text{s}$  时爆轰波形的传递过程;其中,红点或红线代表起爆点的位置。

由图 5 可知,当主装药在装药端面中心点被起爆后,爆轰波以经典的球型波面到达罩顶附近;当主装药经起爆环起爆后,爆轰波经相互碰撞后,以喇叭

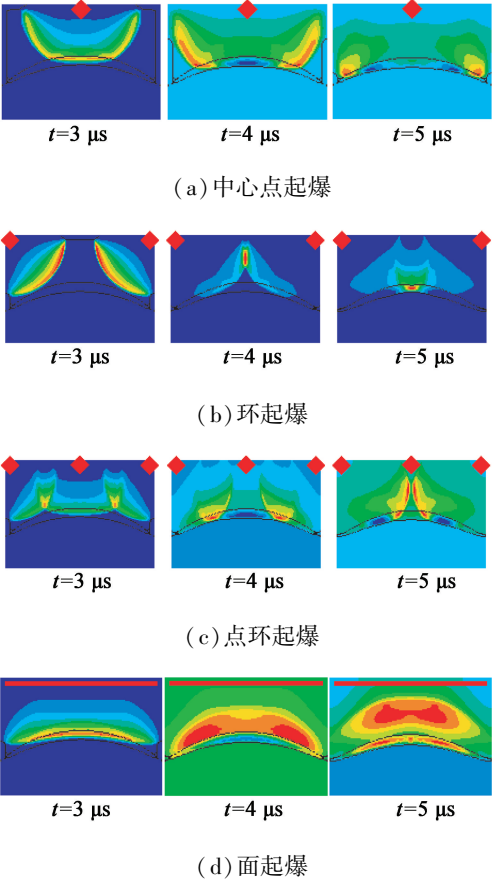


图 5 不同起爆方式下的爆轰波形

Fig.5 Detonation waves under different initiation ways

状的波面到达罩顶附近,对撞区域的压力因爆轰波的叠加明显高于其他区域而成为超压区;主装药经点环起爆后,先以球形和喇叭形各自存在,在未到达轴线时相互碰撞,使得爆轰波到达药型罩之前便已经存在超压区,且向轴向运动,继而产生第二次碰撞;采用面起爆时,爆轰波以平面波的形式在装药中传播。

当装药采用不同的起爆方式时,药型罩所形成毁伤元的模态是不同的。毁伤元的成型过程如图 6 所示。

综合图 5 和图 6 可以看出,不同的起爆方式所产生的爆轰波形与药型罩表面母线之间的夹角  $\alpha$  是不同的。

点起爆由于散心效应所形成的夹角  $\alpha$  最大,使得作用于罩内的爆轰载荷最小,且爆轰载荷最大处沿着药型罩母线向药型罩边缘运动;又因为药型罩边缘壁厚小于罩顶壁厚,从而使得罩微元获得的爆轰载荷高于罩顶处,从而药型罩边缘处的压垮速度高于罩顶,形成向前压拢型的 EFP。

环起爆所形成的喇叭形爆轰波具有聚心的效果,又由于环起爆所产生的轴对称爆轰波在装药轴

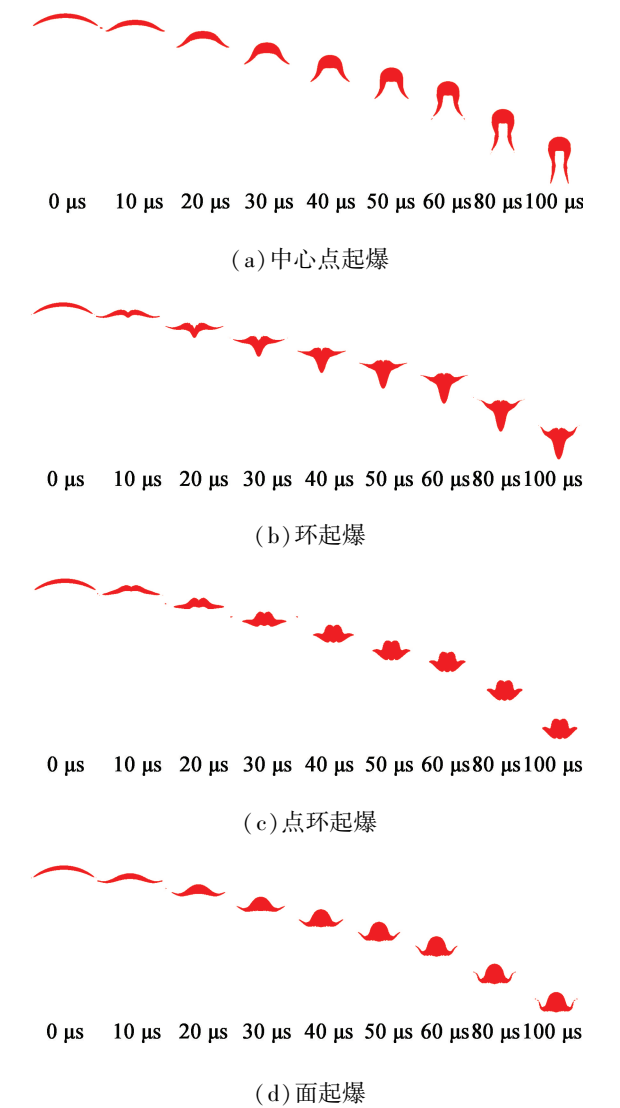


图 6 不同起爆方式下毁伤元的成型过程  
Fig. 6 Damage element forming process under different ways of initiation

线处发生碰撞,产生高压区,使得罩顶处的罩微元获得的压垮速度高于罩边缘,形成向后翻转型 EFP。

点环起爆结合点起爆和环起爆的特点,在爆轰波经过相互作用后,使得药型罩以压垮形式形成准球形 EFP,其长径比为 1.2 左右。

面起爆产生平面波形,在 4  $\mu\text{s}$  时,爆轰波的高压区域与药型罩形状基本吻合,使得药型罩顶微元的压垮速度与罩边缘处的压垮速度相差不大,从而形成外型类似于倒锥形的 EFP。

### 3.2 起爆方式对毁伤元速度的影响

不同起爆方式下,毁伤元最终稳定飞行的速度  $v$ 、急剧加速结束时刻  $t_1$ 、加速结束时刻  $t_2$  等特征参数如表 2 所示。

由表 2 可以看出,4 种起爆方式下,所得到毁伤元的稳定速度相差不大。采用面起爆时,毁伤元速

表 2 毁伤元部分特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of damage element

起爆方式	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$
中心点起爆	1 312.9	12.1	26.2
环起爆	1 327.1	8.7	43.8
点环起爆	1 325.7	12.4	44.3
面起爆	1 359.7	8.9	63.0

度最大,为 1 359.7  $\text{m/s}$ 。采用中心点起爆时,毁伤元速度最小,为 1 312.9  $\text{m/s}$ ,速度最大差距仅为 46.8  $\text{m/s}$ 。在相同的装药结构下,采用环起爆时,药型罩的急剧加速时间最短,为 8.7  $\mu\text{s}$ ,其次是面起爆、中心点起爆、点环起爆。采用中心点起爆时,药型罩的加速结束时间最短,为 26.2  $\mu\text{s}$ ,即最先达到稳定飞行的状态,其次是环起爆、点环起爆、面起爆。这是因为,面起爆所形成的爆轰波形与药型罩表面形状最为接近,从而使得罩微元获得的爆轰载荷最大,压垮速度最大。此外,根据 Dunne 所提出的爆轰波碰撞模型<sup>[15]</sup>,点环起爆所产生的轴对称爆轰波在装药轴线处发生碰撞,同时产生高压区,也有利于提高毁伤元的速度。

## 4 结论

针对研究模型,通过计算、仿真与验证,获得如下结论:

- 1) 改变起爆方式,可以控制聚能装药中的爆轰波形,从而改变药型罩上爆轰载荷的分布规律和药型罩的压垮变形趋势,得到不同模态的 EFP。变壁厚球缺药型罩在不同的起爆方式下可分别形成向前压拢型 EFP、向后翻转型 EFP、准球形 EFP 和倒锥形 EFP。
- 2) 不同形态的毁伤元最终速度相差不大,但达到飞行稳定的时间不同,采用中心点起爆形成的向前压拢型 EFP 所需时间最短。
- 3) 通过设计合理药型罩结构(如药型罩曲率半径等)和改变起爆方式来改变爆轰波形,可以实现对 EFP 模态的控制。

## 参 考 文 献

[1] 庞勇,于川,桂毓林. 球缺药型罩爆炸成型弹丸数值模拟[J]. 高压物理学报,2005,19(1):86-92.  
PANG Y , YU C, GUI Y L. Numerical simulation of EFP



- formation with hemispherical liner [J]. Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 86-92.
- [2] 周栋,王志军,吴国栋. 曲率半径和壁厚对 EFP 成形性能的影响[J]. 华北工学院学报, 2004, 25(1): 39-42.  
ZHOU D, WANG Z J, WU G D. Effect of curvature radius and thickness on the forming capability of EFP [J]. Journal of North China Institute of Technology, 2004, 25(1): 39-42.
- [3] 张毅,苟瑞君,陈亚红,等. 变壁厚药型罩对爆轰波对撞 EFP 成型影响的数值模拟研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(2): 40-43.  
ZHANG Y, GOU R J, CHEN Y H, et al. Numerical simulation on influence of variable thickness liner on EFP formation based on detonation wave collision [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(2): 40-43.
- [4] 刘建青,顾文彬,唐勇,等. 变壁厚药型罩爆炸成型弹丸成型性能的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2008, 9(2): 172-176.  
LIU J Q, GU W B, TANG Y, et al. Numerical investigation on EFP forming performance with variational-wall-thickness hemispherical liner[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 9(2): 172-176.
- [5] 于川,王伟,陈浩,等. 小口径药型罩爆炸成型弹丸设计与多层钢靶侵蚀实验[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 69-72.  
YU C, WANG W, CHEN H, et al. Design of explosively formed projectile liner with small radius and experiment of penetrating multi-layer steel target[J]. Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1): 69-72.
- [6] 王成,付晓磊,宁建国. 起爆方式对聚能射流性能影响的数值分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 401-404.  
WANG C, FU X L, NING J G. Numerical simulation of shaped charge jet formation under different ways of initiation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(5): 401-404.
- [7] 王树有,门建兵,蒋建伟. 包覆式爆炸成型复合侵彻体成型规律研究[J]. 高压物理学报, 2013, 27(1): 40-44.  
WANG S Y, MEN J B, JIANG J W. Research on formation process of wrapping explosively formed compound penetrator[J]. Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 40-44.
- [8] 尹建平,王志军. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014: 157-167.  
YIN J P, WANG Z J. Ammunition theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 157-167.
- [9] 李成兵,裴明敬,沈兆武,等. 起爆方式对杆式弹丸成型和穿甲的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 47-51.  
LI C B, PEI M J, SHEN Z W, et al. Influence of initiation way on the formation and armor-piercing performance of the rod projectile[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(3): 47-51.
- [10] 孙华. 低密度射流对带壳装药穿而不爆的数值研究 [D]. 太原:中北大学, 2013.  
SUN H. Numerical simulation of low-density jet penetrated into shelled explosive without denoted [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [11] 孙加肖,尹建平,王志军,等. 双层椭圆形药型罩装药射流成型时长短轴比、铝铜铁三种材料的声阻抗和罩间距三因素正交设计研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(6): 135-139.  
SUN J X, YIN J P, WANG Z J, et al. Study on orthogonal design of the axial ratio, the acoustic impedance of aluminum, bronze and iron and the space between covers forming double oval hollow linear jet stream[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(6): 135-139.
- [12] Century Dynamics Inc. Interactive non-liner dynamic analysis software: AUTODTN user's manual [M]. Houston, USA: Century Dynamics Inc, 2003: 124-180.
- [13] 王树有,蒋建伟,门建兵. 准球形 EFP 成型影响因素的数值模拟[J]. 含能材料, 2008, 16(16): 731-733.  
WANG S Y, JIANG J W, MEN J B. Numerical simulation of parameters on formation of quasi-spherical EFP [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(16): 731-733.
- [14] 杨亚东,陈智刚. 起爆方式对杆式射流形成影响的数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(5): 89-91, 98.  
YANG Y D, CHEN Z G. Numerical simulation of jetting penetrator charge formation under different initiation ways [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(5): 89-91, 98.
- [15] 张宝铨,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社, 2001: 147-197.