文章编号：1000-5773(2012)04-0442-07

偏心起爆战斗部随机破片数值仿真*

张　博，李伟兵，李文彬，王晓鸣，高旭东，郑　宇

（南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室，江苏南京　210094）

摘要：利用 AUTODYN-3D 软件和基于 Mott 破片分布理论的 Stochastic 随机破碎模型，对破碎型偏心起爆战斗部的破片形成进行了三维数值模拟，对比分析了 3 种起爆方式下自然破片的飞散特性以及偏心起爆时不同起爆半径随机破片的飞散特性。结果表明：偏心单点和偏心多点起爆在目标区域产生的破片数比中心点起爆分别提高了 37.12%和 62.86%，且破片质量小，破片的利用率可以提高 4.01%～6.08%；偏心单点和偏心多点起爆的平均速度增益为 25.95%和 28.37%；对于偏心起爆，随着起爆半径的减小，目标区域的随机破片数减小，轴向速度和径向速度也随之减小。

关键词：随机破片；偏心起爆；中心点起爆；飞散特性；起爆半径

中图分类号：O385；TJ410.33　　**文献标识码**：A

1　引　言

传统的杀爆战斗部一般采用中心起爆，产生的破片散布大，破片利用率低，对目标产生的毁伤作用小，因此定向战斗部成为研究的热点。偏心起爆是实现战斗部定向毁伤的途径之一。严翰新等人[1]通过仿真研究了预制破片战斗部在不同起爆方式下破片的飞散特性，得出偏心起爆能使破片速度增益 20.3%，不同起爆方式下的飞散角及方向角基本一致；王树山等人[2]通过实验研究了偏心多点起爆战斗部的破片径向飞散规律；叶小军等人[3]通过实验与仿真研究了偏心起爆战斗部的速度增益。关于偏心起爆战斗部的研究均是针对预制破片的偏心起爆[1-6]，尚未发现关于偏心起爆及起爆半径对随机破片影响的研究。

本研究利用 AUTODYN-3D 软件和基于 Mott 破片分布理论的 Stochastic 随机破碎模型，对随机破片战斗部进行仿真研究，分析起爆方式（中心点起爆、偏心单点起爆、偏心多点起爆）以及偏心起爆半径对随机破片的质量及数量分布、速度分布、飞散角的影响。

2　材料随机破碎模型

Stochastic 模型基于概率统计方法来表征物质的固有缺陷分布，描述产生的破坏和裂纹。在材料的离散化模型中随机添加一些弱化点，设定弱化点处网格应变不能承受负压力或剪应力，根据 Stochastic 模型，可以定性描述具有不同分布的离散几何体，进而模拟真实材料的破坏模式[7]。

自然破片战斗部的破片大小和质量分布通常采用 Motto 分布描述，即

$$\mu^{1/2} = 0.0726K\delta_0^{5/6}d_0^{1/3}(1+\delta_0/d_0) \tag{1}$$

式中：δ_0 为壳体厚度；d_0 为壳体内径；K 为常数，取决于炸药和弹体金属的物理特性，对于 Comp.B 炸药

* **收稿日期**：2010-11-29；**修回日期**：2011-02-14

基金项目：江苏省普通高校研究生科研创新计划项目（CX09B_087Z）；南京理工大学自主科研专项计划项目（ZDJH02）

作者简介：张　博（1987－），男，硕士研究生，主要从事弹丸终点效应与目标毁伤技术研究.

E-mail：edward-sun@163.com

K 取 1.18;μ 标志着弹体的破碎特性,取决于弹体材料、弹体结构以及炸药性质。

对于理想各向同性材料,应用 Stochastic 模型的材料弱化点破坏概率为

$$P = 1 - \exp\left[-\frac{C}{\gamma}\exp(r\varepsilon)\right] \tag{2}$$

式中:P 代表应变为 ε 时网格的破坏概率,C、γ 为与材料性质有关的常数[8]。对于钢材料,可取 $C=0.0467$。图 1 为材料的应变-破坏概率曲线,其中不同 γ 值对应不同的弱化点分布和破坏概率曲线。

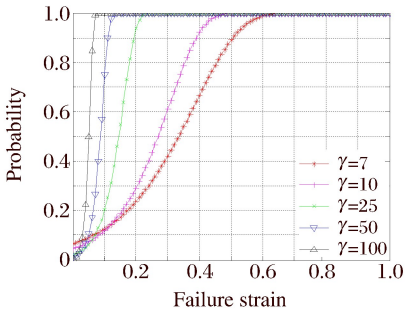


图 1　破坏概率-应变曲线

Fig. 1　Damage probability-strain curves

3　仿真计算模型及方案选取

仿真计算采用圆柱形战斗部:壳体为 4340 钢,密度为 7.83 g/cm^3,壳体外径为 70 mm,内径 $d_0=62$ mm,壳体厚度 $\delta_0=8$ mm,长度 $L=200$ mm;炸药采用 Comp. B 炸药,密度为 1.717 g/cm^3。图 2 为战斗部仿真模型。仿真时,各部分均采用 Lagrange 算法。壳体材料的本构模型采用 Johnson-Cook 模型,状态方程采用 Linear 方程。Comp. B 炸药选用 JWL 状态方程。

起爆方式有 3 种:传统的中心点起爆、偏心单点起爆和偏心多点起爆。3 种起爆方式均采用端面起爆,偏心起爆的起爆点设置如图 3 所示。

仿真方案为:仿真 1# 采用中心点起爆;仿真 2# ~仿真 4# 采用偏心单点起爆,起爆半径分别为 62、40、20 mm;仿真 5# ~仿真 7# 为偏心多点起爆,起爆半径分别为 62、40、20 mm。

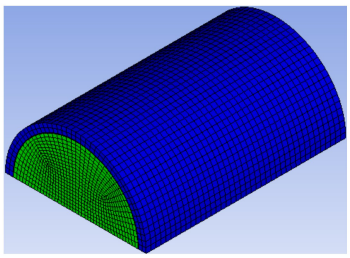


图 2　战斗部数值仿真模型

Fig. 2　Numerical model of the warhead

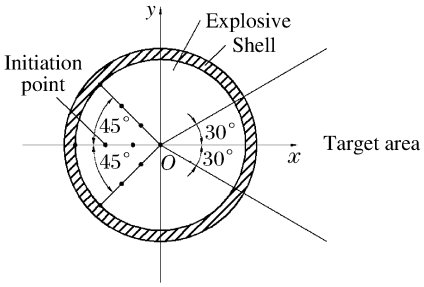


图 3　偏心起爆点及目标区域示意图(端面起爆)

Fig. 3　Schematic of the asymmetrical initiation points and target area (face initiate)

4　起爆方式对随机破片的影响

4.1　随机破片的数量及质量分布

采用第 3 节建立的数值模型,对随机破片进行仿真计算。战斗部破碎后破片四周飞散,如图 4 所示。在战斗部轴向横截面建立坐标系,取 x 轴正方向[−30°,30°]范围作为目标区域,如图 3 所示。对仿真 1#、仿真 2#、仿真 5# 目标区域内的破片进行统计,得到 3 种起爆方式下目标区域内的破片质量和数量分布,如图 5 所示。从图 5 中可以看出:3 种起爆方式下破片质量主要集中在 0.1~0.5 g 范围

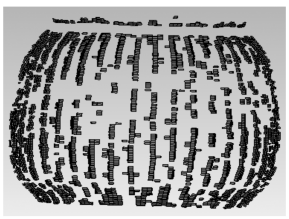


图 4　60 μs 时破片的飞散状态

Fig. 4　Dispersion of fragments at 60 μs

内;中心点起爆(仿真 1#)时,战斗部产生的破片总数为 518,目标区域内的破片数为 70,0.1～0.5 g 的破片数为 28,占目标区破片数的 40.00%;偏心单点起爆(仿真 2#)时,战斗部产生的破片总数为 548,目标区域内的破片数为 96, 0.1～0.5 g 的破片数为 46,占目标区破片数 47.92%;偏心多点起爆(仿真 5#)时,战斗部产生的破片总数为 582,目标区域内的破片数为 114, 0.1～0.5 g 的破片数为 70,占目标区破片数 61.40%。可见,偏心单点起爆在目标区域内产生的破片数比中心点起爆多 37.12%,偏心多点起爆在目标区域内产生的破片数比中心点起爆多 62.86%,即偏心起爆可以将随机破片的利用率(目标区破片数占总破片数的比例)提高 4.01%～6.08%,此外偏心起爆产生的质量为 0.1～0.5 g 的破片比重相对于中心点起爆显著提高。

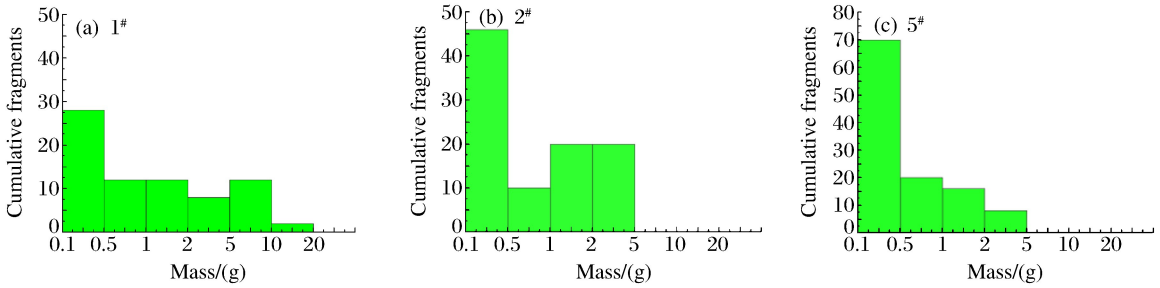


图 5 3 种起爆方式下目标区域破片的质量分布

Fig. 5 Mass distributions of fragments in the target area under three different ways of initiation

4.2 随机破片的速度分布

以起爆点所在端面为高度基准面,研究不同起爆方式(仿真 1#、仿真 2#、仿真 5#)下目标区域内 60 μs 时破片速度的轴向分布。从图 6 中可以看出:随着高度不断增加,破片速度先增大后减小,在高度为 120 mm 时速度达到最大值。不同起爆方式下随机破片的最大速度(v_{max})和平均速度(v_{ave})列于表 1。可以看出:相对于中心点起爆,偏心单点起爆的最大速度增益(G_m)为 21.75%,平均速度增益(G_a)为 25.95%;偏心多点起爆的最大速度增益为 21.35%,平均速度增益为 28.37%。

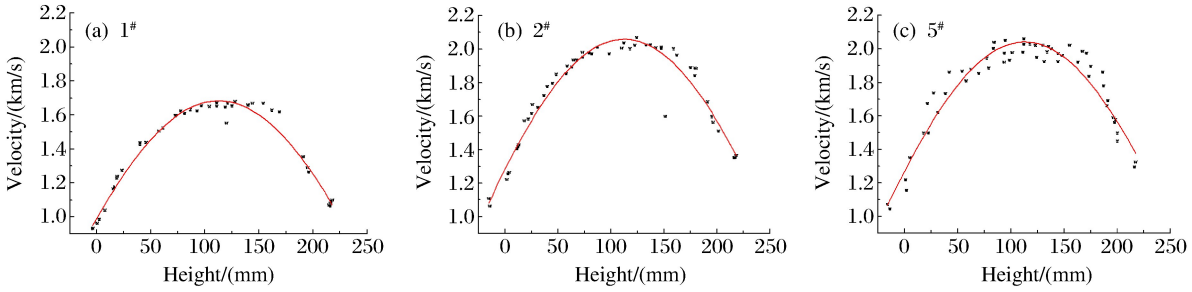


图 6 3 种起爆方式下破片速度的轴向分布

Fig. 6 Axial velocity distributions of fragments under three different ways of initiation

表 1 3 种起爆方式下破片的飞散特性

Table 1 The dispersion of fragments under three different ways of initiation

Initiation ways	v_{max}(m/s)	G_m/(%)	v_{ave}/(m/s)	G_a/(%)	θ/(°)
Center point initiation	1 697.23		1 380.31		[−74.12,85.36]
Asymmetrical single point initiation	2 066.37	21.75	1 738.46	25.95	[−79.25,86.28]
Asymmetrical multi-point initiation	2 059.57	21.35	1 771.93	28.37	[−88.44,88.17]

在轴向最大速度所在高度面(高度为 120 mm)上建立与图 3 类似的坐标系,统计破片速度的周向分

布,如图 7 所示。从图 7 中可以看出:中心点起爆(仿真 1#)时周向上的破片速度保持一致;偏心起爆(仿真 2# 、仿真 5#)时,速度在角度为 0°时(与起爆点相对的位置)最大,当角度增大或减小时速度逐渐减小,在角度为±180°时(起爆点所在位置)速度最小;偏心起爆时目标方向上的破片速度比中心点起爆时高,且高速破片(速度大于 1.9 km/s)主要分布在目标区域[−30°,30°]内。偏心起爆时由于起爆点位于目标区域相对的方向上,起爆后炸药的能量更多地向目标区域汇聚,目标区域的战斗部壳体获得了比中心点起爆时更多的能量,因而偏心起爆时目标区域产生的破片速度更高且质量较小。

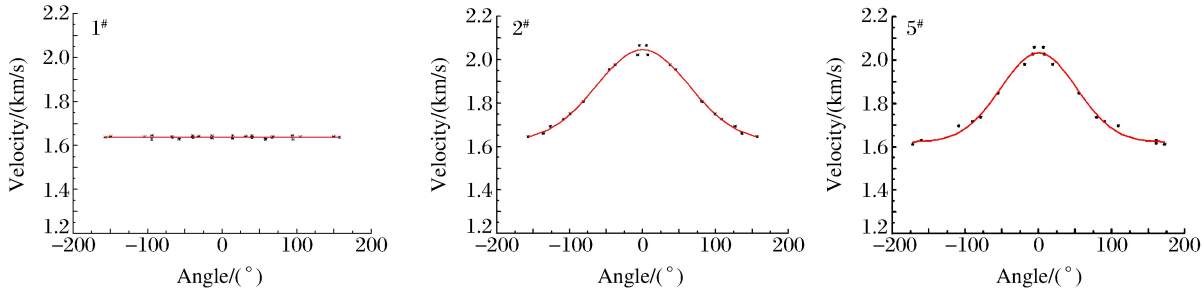


图 7　3 种起爆方式下破片速度的周向分布

Fig. 7　Circumferential velocity distributions of fragments under three different ways of initiation

3 种起爆方式下破片轴向飞散角(θ)也列于表 1。可以看出,3 种起爆方式下,偏心多点起爆时破片的飞散角最大,其次是偏心单点起爆,中心点起爆时飞散角最小。由于起爆采用的是端面起爆,偏心起爆时起爆点接近壳体,所以造成偏心起爆时的飞散角大于中心点起爆时的飞散角;偏心多点起爆时,由于产生的爆轰波之间相互作用,使得其飞散角大于偏心单点起爆的飞散角。

5　偏心起爆半径对随机破片的影响

5.1　随机破片的数量及质量分布

对仿真 2# ～仿真 7# 目标区域的破片进行统计,得到了偏心单点起爆和偏心多点起爆两种起爆方式下破片数量及质量分布随起爆半径 R 的变化规律,如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,偏心单点起爆时:R=62 mm 时目标区域内的破片总数为 122,0.1～0.5 g 的破片数为 70,占目标区域破片总数的 57.38%;R=40 mm 时目标区域内的破片总数为 96,0.1～0.5 g 的破片数为 46,占目标区域破片总数的 47.90%;R=20 mm 时目标区域内的破片总数为 66,0.1～0.5 g 的破片数为 22,占目标区域破片总数的 33.33%。由图 9 可知,偏心多点起爆时:R=62 mm 时目标区域内的破片总数为 144,0.1～0.5 g 的破片数为 70,占目标区域破片总数的 61.4%;R=40 mm 时目标区域内的破片总数为 122,0.1～0.5 g 的破片数为 74,占目标区域破片总数的 60.66%;R=20 mm 时目标区域内的破片总数为 116,0.1～0.5 g 的破片数为 82,占目标区域破片总数的 70.69%。

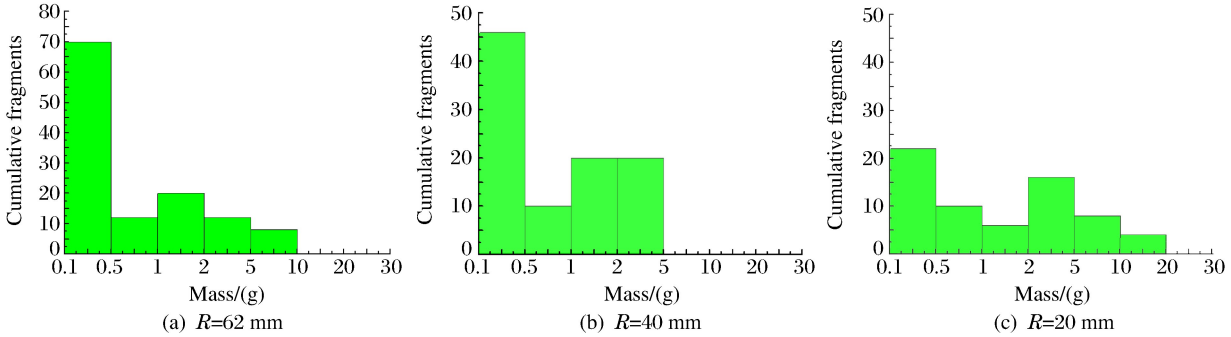


图 8　偏心单点起爆时不同起爆半径下目标区域破片的质量分布

Fig. 8　Mass distributions of fragments in the target area at different initiation radius under asymmetrical single point initiation

对比图 8、图 9 可以看出，偏心单点起爆和偏心多点起爆方式下，随着起爆半径减小，目标区域内的破片数随之降低，例如，相对于 $R=62$ mm 时：偏心单点起爆下 $R=40$ mm 时目标区域内的破片数下降 21.31%，$R=20$ mm 时下降 45.9%；偏心多点起爆下 $R=40$ mm 时目标区域内的破片数下降 15.28%，$R=20$ mm 时下降 19.44%。此外，两种起爆方式下破片质量主要集中于 0.1～0.5 g 范围内。

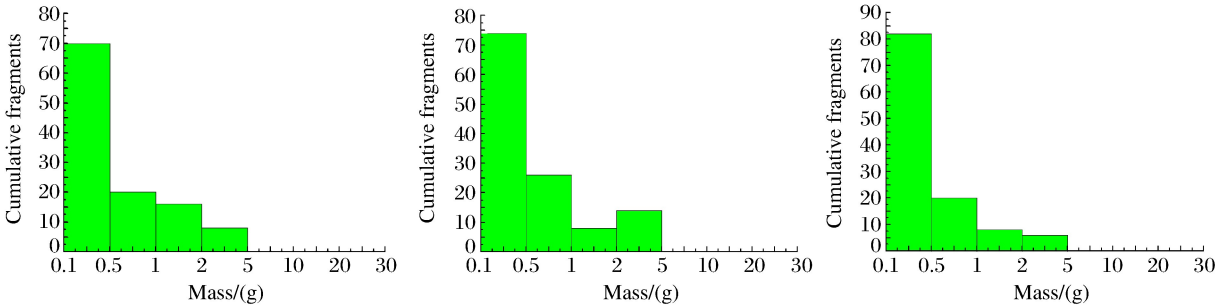


图 9 偏心多点起爆时不同起爆半径下目标区域破片的质量分布

Fig. 9 Mass distributions of fragments in the target area at different initiation radius under asymmetrical multi-point initiation

5.2 破片速度分布

统计仿真 2# ～仿真 7# 目标区域内 60 μs 时破片轴向速度分布随起爆半径的变化，如图 10、图 11 所示。可以看出，偏心单点起爆和偏心多点起爆两种起爆方式下，随着起爆半径减小，破片轴向速度随之降低。偏心单点起爆时，$R=40$ mm 和 $R=20$ mm 时目标区域内的最大速度相对于 $R=62$ mm 时降低 7.31%和 14.57%，平均速度降低 4.76%和 11.99%；偏心多点起爆时，$R=40$ mm 和 $R=20$ mm 时目标区域内的最大速度相对于 $R=62$ mm 时降低 6.89%和 12.39%，平均速度降低 7.50%和 10.81%。破片的最大速度 v_{max}、平均速度 v_{ave} 及其降幅 L_m、L_a 列于表 2。

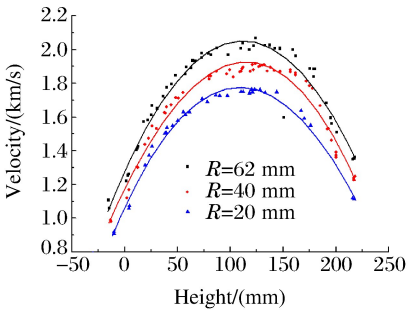


图 10 偏心单点起爆时破片的轴向速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution of fragments under asymmetrical single point initiation

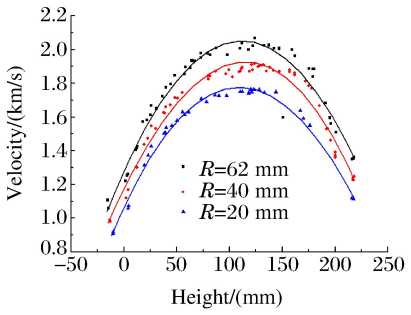


图 11 偏心多点起爆时破片的轴向速度分布

Fig. 11 Axial velocity distribution of fragments under asymmetrical multi-point initiation

表 2 不同起爆半径时破片的飞散特性

Table 2 The dispersion of fragments under different initiation radius

Initiation ways	R/(mm)	v_{max}/(m/s)	L_m/(%)	v_{ave}/(m/s)	L_a/(%)	θ/(°)
Asymmetrical single point initiation	62	2 066.37		1 738.46		[−79.25,86.28]
	40	1 915.35	7.31	1 655.74	4.76	[−82.84,84.91]
	20	1 765.40	14.57	1 529.90	11.99	[−77.87,83.68]
Asymmetrical multi-point initiation	62	2 059.57		1 771.93		[−88.44,88.17]
	40	1 917.65	6.89	1 639.04	7.50	[−80.48,86.03]
	20	1 804.44	12.39	1 580.32	10.81	[−78.20,85.04]

图 12、图 13 为偏心单点起爆和偏心多点起爆时破片轴向分布曲线。可见:偏心单点和偏心多点起爆时破片的径向速度在角度为 0°时最大,角度增大或减小时速度随之减小;起爆半径减小时,径向速度分布曲线逐渐变得平缓,破片的径向速度趋于一致。这是由于随着起爆半径减小,起爆点越来越接近中心起爆点,战斗部壳体所获得的炸药作用随之减小,因而破片的速度分布和飞散角趋近于中心点起爆,如表 2 所示。

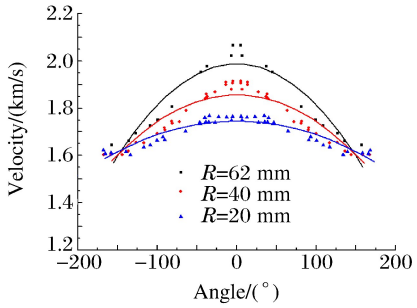


图 12　偏心单点起爆时破片的周向速度分布

Fig. 12　Circumferential velocity distribution of fragments under asymmetrical single point initiation

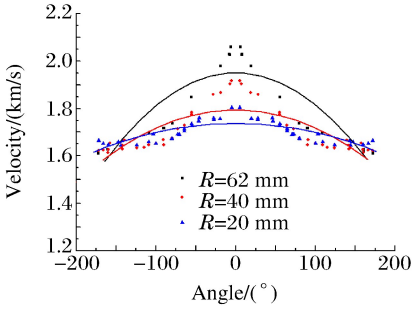


图 13　偏心多点起爆时破片的周向速度分布

Fig. 13　Circumferential velocity distribution of fragments under asymmetrical multi-point initiation

6　结　论

采用基于 Mott 破片分布理论的 Stochastic 随机破碎模型,能较全面地模拟战斗部随机破片的飞散特性。偏心起爆破片的质量主要集中在 0.1～0.5 g 范围内。偏心单点起爆及偏心多点起爆在目标区域内产生的破片数分别比中心点起爆增加 37.12%和 62.86%,最大速度增益和平均速度增益分别为 21.75%、25.95%和 21.35%、28.37%。随着起爆半径的减小,偏心起爆的破片特性趋于中心点起爆。对于偏心起爆战斗部,起爆半径大时,对目标的毁伤威力更强。

References:

[1] Yan H X, Jiang C L, Li M, et al. Numerical simulation of effect of different initiation positions on a certain focusing fragment warhead [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 143-146. (in Chinese)
严翰新,姜春兰,李　明,等. 不同起爆方式对聚焦战斗部性能影响的数值模拟 [J]. 含能材料,2009,17(2):143-146.

[2] Wang S S, Ma X F, Sui S Y, et al. Experimental research on fragments dispersion of the warhead under asymmetrical multi-spots initiation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(2): 177-179. (in Chinese)
王树山,马晓飞,隋树元,等. 偏心多点起爆战斗部破片飞散实验研究 [J]. 北京理工大学学报,2001,21(2):177-179.

[3] Ye X J, Han Y, Chen Q B. Numerical simulation and experiment of velocity gains on the non-central detonation warhead [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(3): 29-34. (in Chinese)
叶小军,韩　玉,陈庆宝. 偏心起爆战斗部速度增益的数值模拟及实验 [J]. 火炸药学报,2009,32(3):29-34.

[4] Interactive Non-Linear Synamic Analysis Software AUTODYNTM User Manual [M]. Houston, Texas, US: Century Dynamics Inc, 2003.

[5] Jonathan P G, Greg F, Colin H. Norman robertson numerical simulation of fragmentation using AUTODYN-2D & 3D in explosive ordnance safety assessment [A]//The 6th PARARI International Explosive Ordnance Symposium [C]. Canberra, Australia, 2003: 2-8.

[6] Kennedy D R. A historical review of aimable air defense warhead technology [A]//The 18th International Symposium on Ballistics [C]. San Antonio, Texas, US, 1999: 618-625.

[7] Jiang J W, Zhang M, Men J B, et al. Numerical simulation of penetration process for PELE projectile against target [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 568-572. (in Chinese)
蒋建伟, 张 谋, 门建兵, 等. PELE 弹侵彻过程壳体膨胀破裂的数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 568-572.

[8] Li X Y, Lu F Y. Numerical simulation on fragments dispersion of three type warheads [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(1): 44-48. (in Chinese)
李翔宇, 卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 44-48.

Numerical Simulation of the Dispersion of Random Fragments under Asymmetrical Initiation

ZHANG Bo, LI Wei-Bing, LI Wen-Bin,
WANG Xiao-Ming, GAO Xu-Dong, ZHENG Yu

(*ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: Using AUTODYN-3D and the Stochastic random fragmentation model which based on the Mott's fragment distribution law, the scattering properties of the warhead fragments are numerically simulated and analyzed under three different ways of initiation including center point initiation, asymmetrical single point initiation and asymmetrical multi-point initiation. The results show that compared with center point initiation, the numbers of random fragments in the target area produced under asymmetrical single point initiation and asymmetrical multi-point initiation are increased by 37.12% and 62.86%, the availabilities of the fragments are improved by 4.01%-6.08%, and the average velocity gains are 25.95% and 28.37% respectively. Furthermore, the effects of the initiation radius on the scattering properties of the random fragments are obtained under asymmetrical initiation. It is shown that the numbers of fragments in the target area, the axial velocity and radial velocity are all reduced with the initiation radius increasing.

Key words: random fragment; asymmetrical initiation; center point initiation; scattering property; initiation radius