文章编号：1000-5773(2013)05-0685-06

定向战斗部爆炸驱动规律研究*

耿　荻，马天宝，宁建国

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

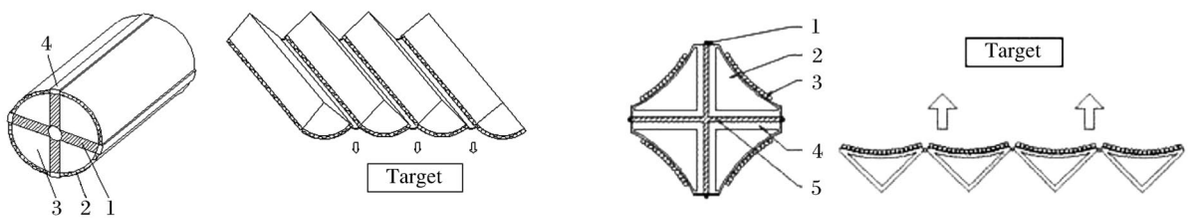
摘要：针对展开型定向战斗部主装药设计了一种聚焦结构，采用数值模拟方法，对比分析了不同起爆方式对破片飞散速度及飞散区域的影响特性，并对三维模型的爆轰波传播方式及破片飞散情况进行了分析。数值模拟结果表明，距轴线端点1/8处对偶起爆方式的聚焦效果最好；三维模型在球形爆轰波的作用下，可以很好地控制破片的轴向定向集中飞散。通过静爆实验验证了数值模拟结果的合理性。

关键词：定向战斗部；破片；起爆方式；爆炸驱动；数值模拟

中图分类号：TJ410.3；TJ43　　**文献标志码**：A

1　引　言

展开型定向战斗部作为一种新型的定向战斗部，能根据引信给出的起爆信号自动选择起爆方位，将有效载荷全部投掷到目标方向，大大提高了对目标的杀伤概率。展开型定向战斗部的结构示意图如图1所示。传统的典型展开型定向战斗部[1-3]分为4个由铰链相互连接的扇型体，预置破片排列在各扇型体的圆弧面上，当确定目标方位后远离目标一侧的传爆药起爆，切开相应的铰链，使4个扇型体以剩下的3对铰链为轴展开，达到最佳起爆角度后，主装药起爆，驱动破片全部飞向目标。



1. Assisted charge；2. Metal case；3. Main charge；4. Hinge

(a) Traditional evolvable aimed warhead

1. Hinge；2. Main charge；3. Fragment；4. Metal case；5. Assisted charge

(b) New type evolvable aimed warhead

图1　展开型定向战斗部结构示意图

Fig. 1　Structure view of evolvable aimed warhead

展开型定向战斗部的主装药结构[4]，在粘结破片处，金属壳体为内凹弧形设计，利用聚焦技术[5]完成爆轰波驱动破片的飞散过程，即通过爆轰波与内凹形壳体间的相互作用，使爆轰波推动破片在朝向目标的一定区域内汇聚，形成一条一定宽度的破片聚焦带，从而使打击能量集中，增强战斗部对目标的毁伤效果。本研究针对具有聚焦效应的展开型定向战斗部主装药结构，采用数值模拟方法分析起爆点位置对破片的影响以及三维战斗部模型的爆轰波和破片的飞散特性。

* **收稿日期**：2012-08-20；**修回日期**：2012-10-26

基金项目：国家重点基础研究发展计划(2010CB832706)；国家自然科学基金(11032002)

作者简介：耿　荻(1987—)，女，博士研究生，主要从事结构动力响应研究. E-mail：gengdi@bit.edu.cn

通讯作者：马天宝(1981—)，男，博士，副教授，主要从事计算爆炸力学和冲击动力学研究. E-mail：madabal@bit.edu.cn

2 数值模拟方法

在数值模拟过程中，所采用的展开型定向战斗部的长度为 20 cm，最大直径为 16 cm，主装药扇形体表面为内凹弧形。由于战斗部结构具有轴对称的特点，因此取 1/4 结构即单个扇形体进行建模和求解，这样不仅可以在很大程度上缩短计算机的建模及求解时间，而且也不会影响对破片运动规律的分析。

主装药结构如图 2 所示，由金属壳体、主装药、内衬层及毁伤破片构成。在内衬层的外表面粘贴一层钢球，该钢球即构成战斗部的主要杀伤元素。球形破片的直径为 0.5 cm。本研究在 LS-DYNA 非线性动力学仿真软件平台上，采用 Lagrange 算法对主装药爆炸驱动破片的飞散过程进行数值模拟研究。

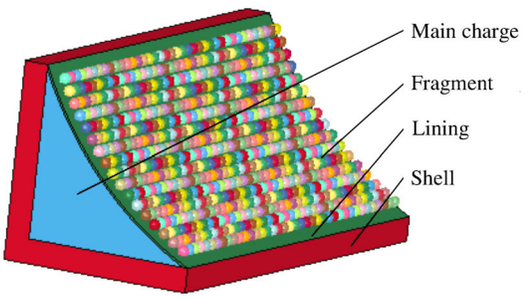


图 2 战斗部主装药数值模型

Fig. 2 Numerical model of main charge of the warhed

模型中炸药材料采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程，状态方程给出了爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性，采用的 JWL 状态方程为

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\exp(-R_1V)+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\exp(-R_2V)+\frac{\omega e}{V} \tag{1}$$

式中：A、B、R_1、R_2 和 ω 为实验测定的常数，e 为比内能。

战斗部主装药采用 B 炸药，部分爆炸性能参数见表 1。壳体及内衬层材料选用铝合金，采用 Johnson-Cook材料模型和 Grüneisen 状态方程，基本材料参数见表 2。球形破片材料选用 45 钢，采用 Mat-Rigid 材料模型，基本材料参数见表 3。

表 1 B 炸药的爆炸性能参数及状态方程参数

Table 1 Material properties of COMP B and parameters of EOS

$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	$p_{\mathrm{CJ}}/(\mathrm{GPa})$	$D/(\mathrm{km\cdot s^{-1}})$	A	B	R_1	R_2	ω
1.717	29.5	7.980	5.242	0.076 78	4.2	1.10	0.34

表 2 壳体及内衬层金属材料参数

Table 2 Material parameters of shell and lining

$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	$E/(\mathrm{GPa})$	ν	$\sigma_s/(\mathrm{GPa})$	$G/(\mathrm{GPa})$
2.70	70.3	0.33	0.276	25.9

表 3 破片的材料参数

Table 3 Material parameters of fragment

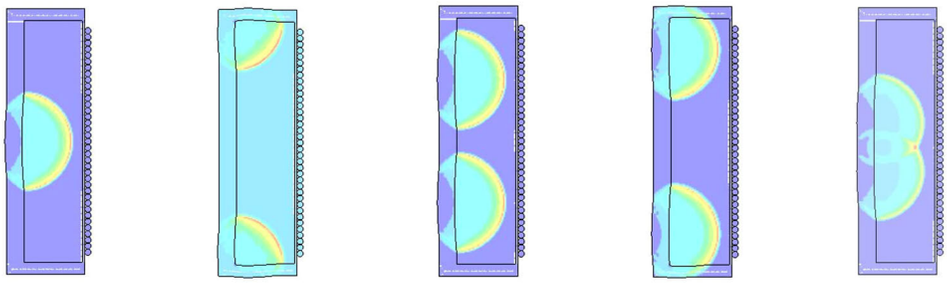
$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	$E/(\mathrm{GPa})$	ν	$\sigma_s/(\mathrm{GPa})$	$G/(\mathrm{GPa})$
7.8	210	0.27	0.231	76.3

3 数值模拟结果及分析

3.1 不同起爆方式对破片飞散的影响

轴向的破片飞散宽度范围主要取决于起爆点的数量及其在战斗部长度方向的位置。因而，在采用 LS-DYNA 有限元动力分析软件对主装药结构轴向破片飞散情况进行数值模拟时，主要是根据起爆点的不同数目与位置来获取破片轴向飞散的数值结果，从而确定展开式定向战斗部破片轴向飞散的最佳起爆方式。

本研究针对同一主装药结构的轴向模型，通过改变起爆方式进行对比研究，几种起爆方式分别为：(1) 轴线中点单点起爆(图 3(a))，(2) 轴线端点对偶起爆(图 3(b))，(3) 距轴线端点 1/4 处对偶起爆(图 3(c))，(4) 距轴线端点 1/8 处对偶起爆(图 3(d))，(5) 距轴线端点 3/8 处对偶起爆(图 3(e))。



(a)　(b)　(c)　(d)　(e)

图 3　不同起爆方式示意图

Fig. 3　Diagram of the different initiation position

不同起爆方式下的破片初速分布曲线如图 4 所示。采用轴线中点单点起爆(图 3(a))时,战斗部破片的整体初速都较低,这是由于爆轰波阵面对于大部分破片的入射角过大,减弱了对破片的作用,从而破片初速较小。采用两点对偶起爆(图 3(b)～图 3(e)),两起爆点之间的距离越近,破片的初速差就越小,但是破片整体初速也越低,其原因应该是,两起爆点之间的距离越近,起爆点中间部分的爆轰波叠加作用[6]越弱,产生了类似于单点起爆的马赫反射或普朗特-迈耶尔膨胀流动现象;同时,当起爆点逐渐靠近端面时(如图 3(b)所示的起爆方式),爆轰波对中间部分的破片的加速作用更加明显,使得中间部分破片的速度较高,但是靠近端面处的破片速度却较低,因而整体速度不高。

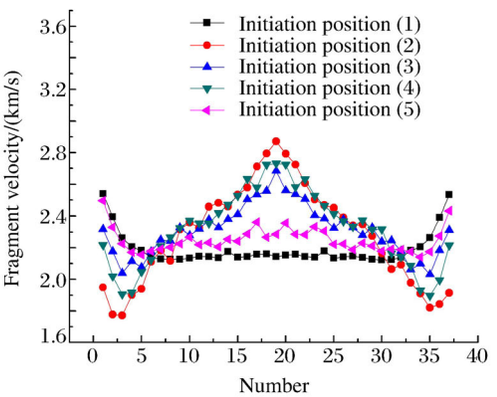


图 4　不同起爆方式下破片初速分布曲线

Fig. 4　Curves of the fragment velocity under different initiation position

$t=200\ \mu s$ 时不同起爆方式破片分布效果如图 5 所示。单点起爆方式(图 3(a))产生的破片在轴向的飞散宽度明显比两点对偶起爆的要大得多,因而聚焦效果不好(见图 5(a))。对于两点对偶起爆,采用图 3(b)～图 3(d)的起爆方式,虽然破片的速度差比较大,但破片的聚焦性十分明显(见图 5(b)～图 5(d))。尤其是图 3(d)的起爆方式,破片在轴向的分布宽度最窄,破片的聚集效果最好(图 5(d))。而对于图 3(e)的起爆方式,破片分布效果(见图 5(e))与单点起爆方式相近,说明当两对偶起爆点之间的距离较小时,与单点起爆相比,两点起爆对破片飞散角的影响较小,因而聚集效果近似等效为单点起爆方式。



(a) Position (1)　(b) Position (2)　(c) Position (3)　(d) Position (4)　(e) Position (5)

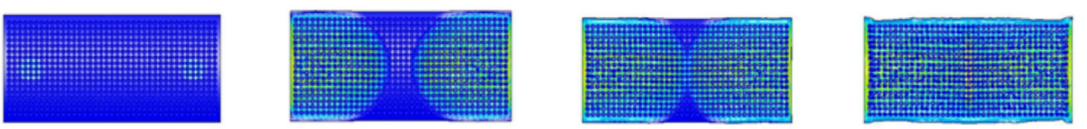
图 5　$t=200\ \mu s$ 时不同起爆方式破片分布效果图

Fig. 5　Rendering of the fragment velocity under different initiation position when $t=200\ \mu s$

3.2 三维整体模型数值模拟分析

建立主装药结构的三维整体有限元模型进行模拟计算。采用两点对偶起爆方式，起爆点在距端面距离为轴向长度的 1/8 处(即起爆方式(4))，不同时刻爆轰波的传播情况如图 6 所示，不同时刻破片的径向与轴向飞散情况如图 7 所示。

综合图 6 和图 7 可以看出，爆轰波基本上以球面波的形式传播。在 $t=5$ μs 时，爆轰波首先到达顶部的钢球，驱动中心钢球，而在距起爆点较远部分的破片其驱动的时间较晚，不利于钢球的整体飞行。壳体在起爆点处首先发生变形，随着爆轰波的传播，壳体各个部分发生变形，并在两端造成炸药气体泄露，使得靠近两端的钢球速度较低。在膨胀极限条件下，壳体发生破裂。此后炸药不再对钢球产生作用，钢球按既得的速度飞散。



(a) $t=5$ μs (b) $t=10$ μs (c) $t=12$ μs (d) $t=15$ μs

图 6 主装药爆轰过程的压力图

Fig. 6 Pressure diagram of detonation process



(a) $t=15$ μs (b) $t=30$ μs (c) $t=45$ μs (d) $t=60$ μs

图 7 破片的径向与轴向飞散情况

Fig. 7 Radial and axial dispersion of fragments

从破片径向飞散情况来看，靠近两端的破片速度偏低，这主要是由于在径向截面的两端，即壳体与内衬层的夹角处，装药厚度较小，难以使破片获得足够的加速度，导致速度较低。但是从总体而言，大部分破片的速度较高，且有汇聚的趋势，因而，主装药结构的毁伤威力是有保证的。

从破片轴向飞散情况来看，破片总体呈现向中间聚拢的趋势，仅有两端各一层的破片出现发散的迹象。说明这种起爆方式可以很好地控制破片的轴向定向集中飞散。

4 实验验证

结合数值模拟的最优化主装药结构，设计了实验结构模型，并进行了地面静爆实验研究。目标靶板毁伤图如图 8 所示。通过统计静爆实验后靶板上破片毁伤孔洞，将实验结果与数值模拟结果进行对比，以验证战斗部主装药结构的合理性和算法的可靠性。



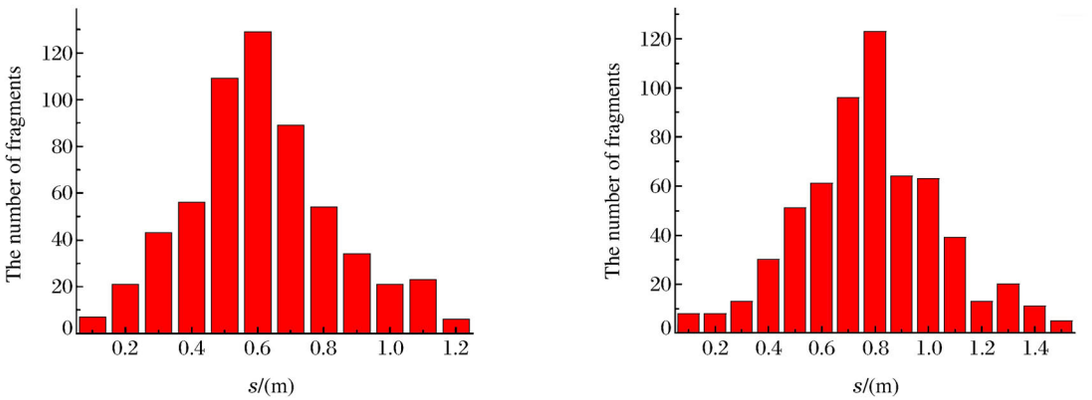
图 8 目标靶板毁伤图

Fig. 8 Damage picture of the target plate

图 9 为根据实验结果统计得到的目标靶板上破片分布直方图，横坐标表示距离靶板左下角的距离，

纵坐标表示在此距离范围内破片的分布数量。由实验统计结果可知,80%的钢球的分布范围为:在径向上集中于 0.3～0.9 m 的区域内,在周向上集中在 0.4～1.2 m 的区域内。

比较实验统计结果和表 4 可知,数值模拟计算结果与实验结果吻合良好,验证了数值模拟的可靠性。在研究战斗部破片的飞散过程时,利用数值模拟方法,可以有效地预测真实情况,对实地实验的设计及展开可起到指导作用。



(a) Radial statistical results　　(b) Axial statistical results

图 9　目标靶板上破片分布直方图

Fig. 9　Fragment distribution histogram of the target plate

表 4　破片分布的实验和数值模拟结果

Table 4　The experimental and calculational results of the fragment distribution

Direction	80% fragment distribution range/(m)		90% fragment distribution range/(m)		100% fragment distribution range/(m)	
	Experiment	Calculation	Experiment	Calculation	Experiment	Calculation
Radial	0.63	0.613	0.8	0.75	1.1	0.91
Axial	0.82	0.792	1.05	0.98	1.3	1.22

5　结　论

针对展开型定向战斗部主装药部分的应用问题,通过主装药地面静爆实验,对数值模拟的有效性进行了验证。在此基础上,采用数值模拟方法,对比分析了不同起爆方式对破片飞散速度飞散区域的影响特性,并对三维模型的爆轰波传播方式及破片飞散情况进行了模拟,获得以下主要结论。

(1) 对比轴线中点单点起爆、轴线端点对偶起爆、距轴线端点 1/4 处对偶起爆、距轴线端点 1/8 处对偶起爆和距轴线端点 3/8 处对偶起爆这 5 种起爆方式,越靠近中点,速度差越小,则破片整体速度越小,聚焦效果越差;对偶起爆越靠近两侧,速度差越大,则可有效提高破片的速度,聚焦效果较好。其中,距轴线端点 1/8 处对偶起爆方式可获得最佳的破片初速和聚焦效果。

(2) 展开型定向战斗部三维模型在距轴线端点 1/8 处对偶起爆后,爆轰波呈球面波形式传播。对于径向飞散情况,靠近两端的破片速度偏低,但大部分破片速度较高,有较好的汇聚趋势;轴向飞散呈现向中间聚拢的局势。该起爆方式可以很好地控制三维模型的定向集中飞散。

References:

[1]　Zhang Z H, Zhou S S. Air-Defence Missile Fuze with Warhead Efficiency and Warhead Design [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1994. (in Chinese)

张志鸿,周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计 [M]. 北京:宇航出版社,1994.

[2] Talley J C. Aimable warhead:USA,US5182418 A [P]. 1993-01-26.

[3] Fong R. Warhead technology advancements [C]//NDIA Armaments for the Army Transformation Conference. New Jersey,USA:Army Armament Research,Development and Engineering Center,2000:5-27.

[4] Geng D,Ma T B,Zhao H. Study on calculation method for fuze delay of a evolvable aimed warhead [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology,2011,31(s1):137-141. (in Chinese)
耿 荻,马天宝,赵 慧. 展开型定向战斗部引信延迟时间计算方法研究 [J]. 北京理工大学学报,2011,31(s1):137-141.

[5] Ma T B,Sun Y X,Ning J G,et al. Numerical simulation of double-beam fragment focusing warhead [J]. Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance,2003,23(4):146-149. (in Chinese)
马天宝,孙远翔,宁建国,等. 双束聚焦式破片杀伤战斗部的数值模拟研究 [J]. 弹箭与制导学报,2003,23(4):146-149.

[6] Zukas J A,Walters W P. Explosive Effects and Applications [M]. New York:Springer-Verlag,1998.

Study on Laws of Explosive Driven Behaviors of Aimed Warhead

GENG Di,MA Tian-Bao,NING Jian-Guo

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*,
Beijing Institute of Technology,*Beijing* 100081,*China*)

Abstract:The present numerical study is to investigate the explosive driven behaviors to the flight velocity and flight area of all the fragments of evolvable aimed warhead,and the propagating style of the detonation wave of the three-dimensional model. The results of numerical simulation demonstrate that the dual initiation that one eighth to the end of the axis has the best effect of the five initiation positions. Under the effect of the spherical explosive wave,the directional dispersion of the fragment of the three-dimensional model can be controlled well. The rationality of the numerical simulation was verified by the explosion experiments.

Key words:aimed warhead;fragment;initiate position;explosive driven;numerical simulation