DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1039-07

圆柱壳体装药偏心多点起爆下破片速度的分布*

沈慧铭,李伟兵,王晓鸣,李文彬,董晓亮
(南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要:针对偏心起爆战斗部破片速度增益的问题,提出爆轰波碰撞形成马赫超压是引起破片速度增加的原因。利用 AUTODYN 软件,模拟偏心起爆战斗部从壳体径向膨胀、表面产生裂纹到最后形成破片的整个过程,并将模拟得到的破片速度与实验数据对比,两者吻合较好;简化 Whitham 方法并结合 Gurney 速度公式得到偏心起爆战斗部定向破片速度和定向区域的计算方法,同时在保证破片初速的前提下,研究偏心多点起爆下起爆点数的选择标准。研究结果表明:偏心多点起爆下定向破片初速增益约 34%,定向区域范围约 30°,起爆点数的选择与壳体长度和装药口径相关。

关键词:定向战斗部;马赫反射;偏心多点起爆;破片初速
中图分类号:O383 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

偏心起爆战斗部是一种定向战斗部,它利用爆炸逻辑网络实现偏心起爆,可以使破片在定向方向上的速度大大增加,从而达到高效毁伤的目的。定向战斗部是近年来杀伤爆破战斗部的研究重点,如王树山等[1]实验研究预制杆状破片战斗部、侧面四点偏心起爆下破片径向飞散规律,发现偏心起爆能显著增加定向方向的破片初速及破片数;黄静等[2]比较了三种不同夹角的偏心线起爆方式下,破片速度增益情况,研究结果表明夹角 45°双线起爆对破片初速提高最大,增益超过 30%;张博等[3]将偏心多点起爆、偏心单点起爆以及中心点起爆三种起爆方式下随机破片战斗部的初速、破片利用率和目标定向区域进行对比,发现偏心多点起爆方式较优。根据前人对于定向战斗部的研究,可以看出偏心多点起爆战斗部在破片初速等方面有一定的优势。

本文中针对偏心多点起爆战斗部,探索提高偏心战斗部破片速度的主要因素,利用 AUTODYN 软件[4],模拟偏心起爆战斗部破片形成的过程,分析破片速度分布规律,简化文献[5]中 Whitham 计算马赫流场的方法和 Gurney 速度公式[6],提出偏心多点战斗部定向破片的初速计算方法以及定向区域的大小。由于线起爆方案结构复杂且不易实现,所以工程实际中还是主要采用多点偏心起爆方案代替线起爆方案,通过起爆点数的选择来充分发挥炸药中马赫超压的作用提高破片初速,也是研究的重点。

1 模型验证

为验证数值模拟可靠性,采用 AUTODYN-3D 软件模拟单点、中心起爆方式下圆柱形壳体在炸药爆轰作用下破片初速轴向分布情况并与 G. Y. Huang 等[7]的实验结果对比。

1.1 数值模拟

对于自然破片战斗部,理论上大多采用 Mott 分布[6]来描述破片的质量分布,而数值模拟中运用 Stochastic 模型[4]模拟壳体材料随机破坏,该模型是一种基于概率统计方法来表征物质的固有缺陷分布来产生破坏和裂纹的模型,在材料离散化模型内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,这样可定性描述离散几何体模拟真实材料的破坏模式,根据不同分布的 Stochastic 模型得到不同数量和大小的破片。有限元模型如图 1 所示,整个计算模型简化为炸药、壳体两部分,模

* **收稿日期**:2016-05-20;**修回日期**:2016-09-18
基金项目:国家自然科学基金项目(11202103)
第一作者:沈慧铭(1988—),男,博士研究生,shenhuiming202@163.com。

型中壳体长度 $L=77.3$ mm,壳体的外径 $R_e=29.68$ mm,壳体的内径 $R_i=23.6$ mm(与 G. Y. Huang[7] 的实验尺寸相同)。模型关于两个对称面对称,故只需建立 1/4 模型,均采用 Lagrange 算法,因为壳体材料的破碎、破片的形成过程是一个大变形的弹塑性流体动力学过程,采用 Lagrange 算法虽然网格会发生较大的扭曲变形,但该方法对介质运动的整体和局部的变化都有更清晰的描述,能真实的呈现壳体膨胀、裂纹产生、破片形成的整个过程,也能更清楚的显示节点的速度、整体的动能等物理量。

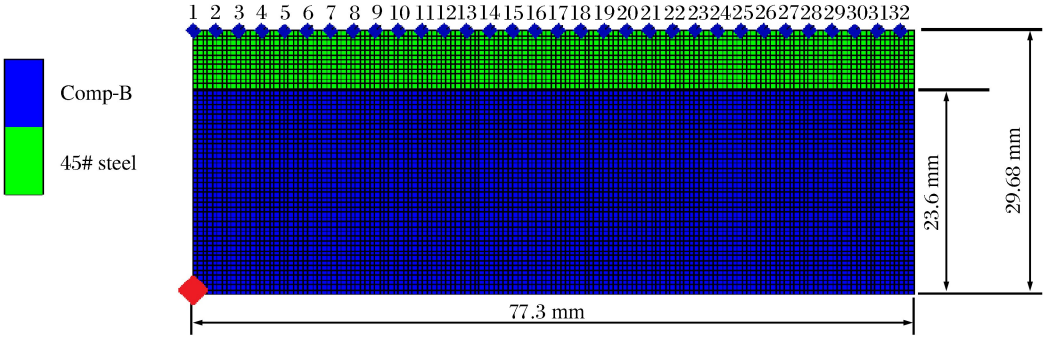

图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

炸药为 Comp-B,密度为 1.717 g/cm^3,采用高能炸药 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,Johns-Wilkins-Lee 状态方程[4]描述高能炸药及其爆轰产物的膨胀过程,JWL 状态方程形式为:

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

式中:A、B、R_1、R_2 和 ω 为实验室测定的常数,E 为比内能,具体参数见文献[8];壳体材料为 45 钢,采用 Johnson-Cook 材料模型[4]描述壳体在炸药载荷下的高应变率效应和热软化效应,Grüneisen 状态方程定义了压力和体积之间的关系,用于描述 45 钢在高压下的行为。Johnson-Cook 本构方程的形式为:

$$\sigma_y=(A+B\bar{\varepsilon}^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m}) \tag{2}$$

式中:σ_y 为 Von Mises 等效应力。材料参数 $A=0.335$ GPa,$B=0.30$ GPa,$C=0.014$,$n=0.26$,$m=1.03$;$\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变;$\dot{\varepsilon}^*=\dfrac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0}$ 为量纲一塑性应变率,其中 ε_0 为参考应变率,一般取 1 s^{-1};$T^*=\dfrac{T-T_r}{T_m-T_r}$ 为量纲一温度,其中 T_r 和 T_m 分别为室温和材料的熔化温度。

在爆炸内部载荷作用下壳体膨胀和破裂的过程如图 2 所示。接近起爆点处的壳体首先发生径向膨胀且逐渐传播至整个壳体,至 20 μs 时刻壳体随机产生裂纹,随着时间增加壳体最终破碎且形成破片。在轴线方向上,由于稀疏波的传入,壳体中心处破片初速比两个端部要高。实验和数值模拟得到的破片轴向速度列于表 1,破片速度分布见图 3 所示。

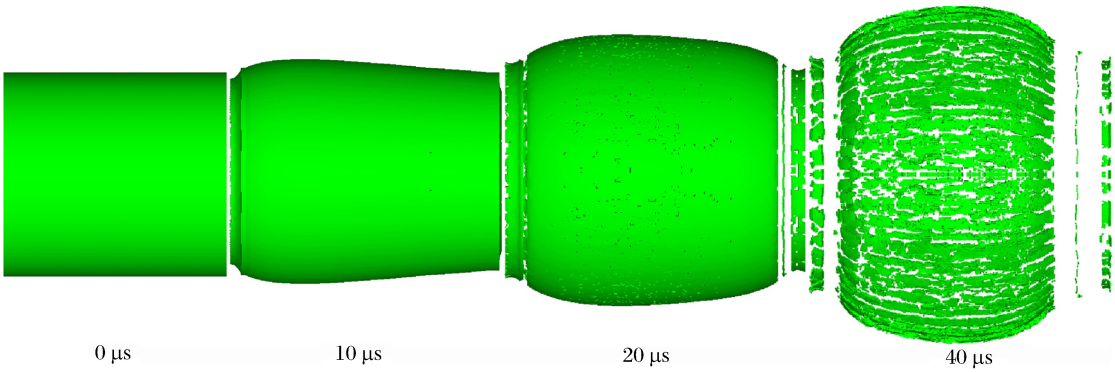

图 2 中心单点端面起爆破片形成示意图

Fig. 2 Process of the fragment formation under center detonation with single point

表 1 实验数据与理论模型结果对比

Table 1 Comparison between experimental and theoretical data

编号	v/(m·s^{-1})		编号	v/(m·s^{-1})		编号	v/(m·s^{-1})	编号	v/(m·s^{-1})
	实验	数值模拟		实验	数值模拟		数值模拟		数值模拟
1	954	650	9	1 432	1 150	17	1 329	25	1 436
2	1 129	845	10	1 445	1 183	18	1 340	26	1 430
3	1 182	901	11	1 469	1 198	19	1 349	27	1 410
4	1 222	1 000	12	1 493	1 232	20	1 372	28	1 363
5	1 270	1 013	13	1 463	1 249	21	1 365	29	1 323
6	1 309	1 032	14	1 398	1 274	22	1 405	30	1 326
7	1 354	1 079	15	1 347	1 290	23	1 430	31	1 240
8	1 396	1 145	16	1 208	1 298	24	1 436	32	1 095

从图 3 中可以看出壳体两个端部的破片速度要明显较低，中心处破片初速较高，且起爆端面破片初速要低于非起爆端面的初速；数值模拟得到破片速度最高值为 1 436 m/s，实验中最大值为 1 493 m/s，误差约为 3.8%。数值模拟和实验中破片速度分布吻合较好，主要偏差出现在两个端部：在 $x=0$ 和 $x=77.3$ mm 位置，数值模拟得到破片速度分别为 650 和 1 050 m/s；实验值为 954 和 1 208 m/s。差距较大的原因可能是因为在数值模拟中炸药的 JWL 状态方程是假定爆轰产物以常速率传播，而实际中炸药爆轰波前沿是一个加速的过程，导致模拟中稀疏波过早的传入，端部爆轰波阵面的压力降低，从而计算出的破片速度也随之减小。总体来看，破片速度分布规律的数值模拟结果和实验结果吻合较好，可以认为数值模拟方法能准确预测破片的速度分布。

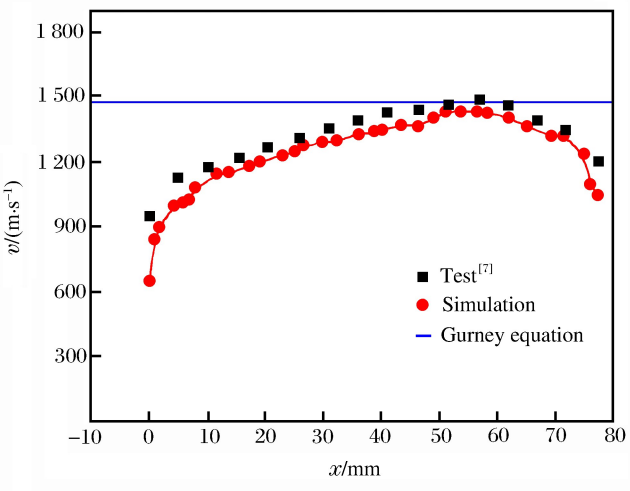

图 3 不同位置处破片初速的变化

Fig. 3 Variation of initial velocity of fragments at different positions

2 偏心多点起爆

2.1 理论模型

偏心多点起爆，当起爆点数足够多时，可以看作偏心线起爆。两线偏心起爆时，其截面结构和状态处处相等，可转化为任一截面两点对称起爆，从而简化为平面爆轰波的马赫反射问题。如图 4 所示，起爆点连线为两条直线，位于炸药的同一侧且关于水平轴对称，为了计算的方便，起爆点设置在和圆心的连线与 x 轴夹角为 45°的位置。

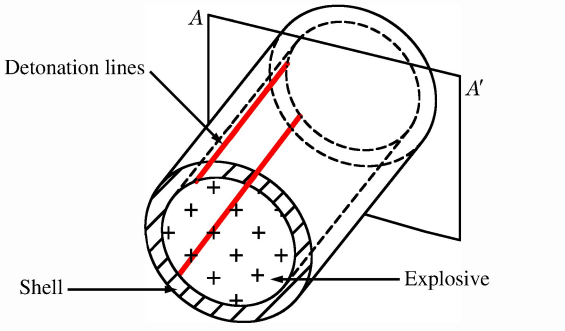

图 4 偏心起爆战斗部分析模型

Fig. 4 Analytic model of eccentric warhead

2.2 定向区域及定向破片初速的计算

对于马赫反射区流场的计算[5]本文中不在赘述。定向战斗部爆轰波碰撞示意如图 5 所示，为了得到定向区域的大小，需要进行两步工作：(1)马赫反射初始坐标计算；(2)三波点的运动轨迹。

根据 Whitham 方法，采用激波极曲线法，可以得到马赫反射的临界角 ψ_c，根据几何关系可得马赫反射初始位置的坐标：

$$x\big|_B = r\sin\alpha\tan\psi_c - r\cos\alpha, \qquad y\big|_B = 0 \tag{3}$$

当入射波的强度和入射角随时间变化时，马赫杆波的增长速度是变化的，相应的三波点的轨迹是一条曲线。由于马赫杆波是变强度的，所以这种情况的理论分析和计算相当复杂，不利于工程实际中应用。在不影响分析和结论的前提下，为了便于处理，将三波点的运动轨迹近似认为是直线。设三波点运动轨迹与固壁的夹角为 φ，可以得到较简单的三波点轨迹：

$$\varphi=\frac{\pi}{2}-\alpha_3 \tag{4}$$

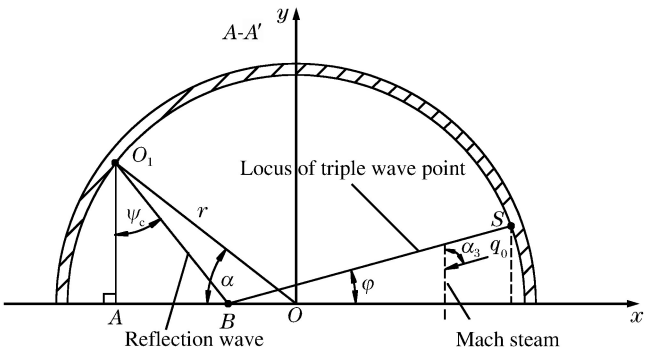

图 5 爆轰波碰撞示意图

Fig. 5 Diagram of detonation wave collision

式中：α_3 为马赫杆与介质流动速度的方向之间的夹角，$\alpha_3=\arcsin\left[\frac{1}{q_0}\sqrt{\frac{p_3-p_0}{\rho_0\left(1-\frac{\rho_0}{\rho_3}\right)}}\right]$[9]，其中 q_0、p_0、ρ_0 为未反应区介质的流动速度、压力和密度；p_3、ρ_3 为马赫反射区介质的压力和密度，将 α_3 的表达式代入式(4)即可求出定向区域大小。由于图 5 只给出了二分之一模型，故圆柱壳体装药偏心多点定向战斗部的定向区域为 2φ。

已知装药和壳体参数情况下，由 Gurney 速度公式易得定向破片的初速：

$$v=\frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{\beta+2}} \tag{5}$$

式中：β 为马赫区装填比(炸药质量与壳体质量的比值)，D 为马赫波到达壳体壁面时速度，计算中可直接简化为马赫波波速。

2.3 数值模拟及结果分析

建立偏心多点定向战斗部模型，在装药一侧设置两条起爆线，每条起爆线上设置 15 个起爆点，如图 6 所示。炸药起爆，壳体在爆轰产物的高压作用下膨胀破碎，参见图 7，γ 表示圆心角。图中可以看出定向区域破片突出明显，表明该区域破片速度较高。在战斗部横截面 360°范围内破片初速统计，得到偏心多点起爆下破片初速分布，见图 8。

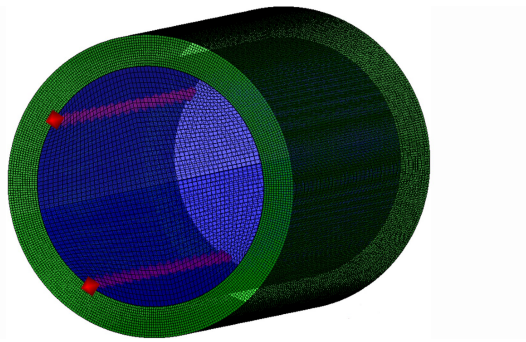

图 6 偏心多点定向战斗部有限元模型

Fig. 6 Simulation model of directed fragmentation warhead

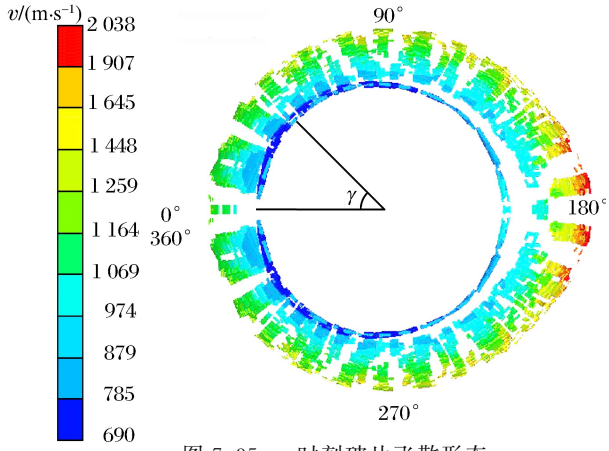

图 7 35 μs 时刻破片飞散形态

Fig. 7 Fragment dispersion at 35 μs

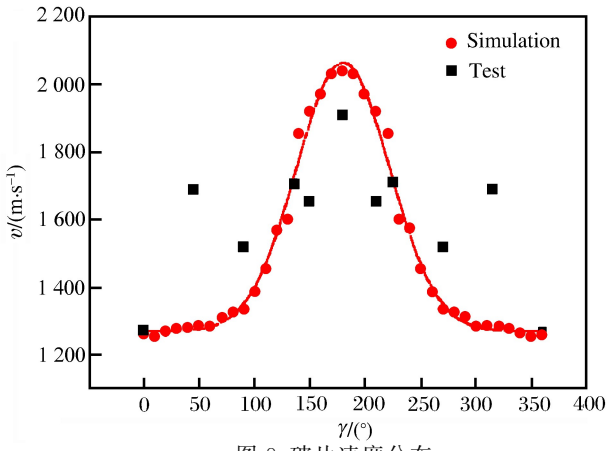

图 8 破片速度分布

Fig. 8 The fragment initial velocity distribution

定向破片初速在 1 900～2 050 m/s 的范围内，其中最大速度为 2 038 m/s，与理论模型计算得到的结果 2 073.4 m/s 相近。相对中心点起爆，定向破片初速提高了约 34%，由于动能是速度的平方项，所以破片的动能毁伤提高更大。

为了清晰准确的比较马赫超压作用区域，建立图 9 所示的二维有限元模型。因为采用 Lagrange 算法，炸药和钢之间必须留有少量空隙，模型尺寸和材料参数等与前文相同。

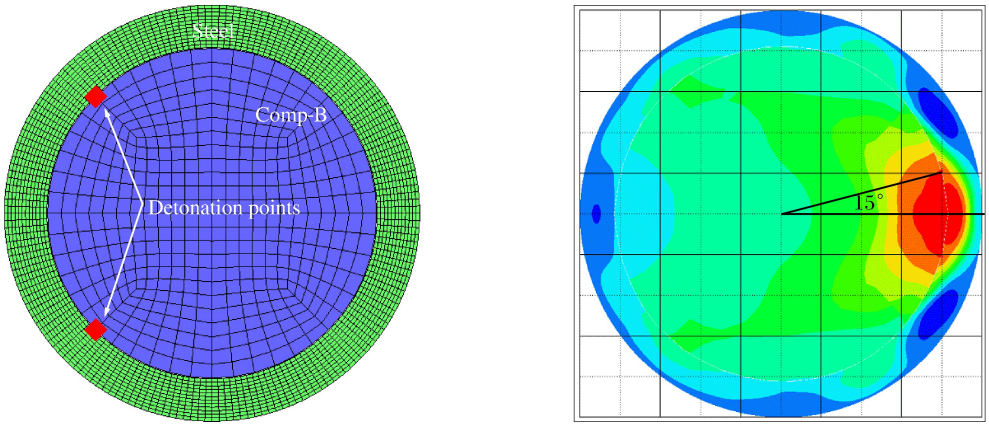

图 9　二维有限元图和压力云图

Fig. 9　Two-dimensional numerical model and stress nephogram

图 9 为装药爆轰后 7 μs 时刻爆轰压力作用于壳体的压力云图，可以清楚的看出定向区域的压力明显高于其他部分，测量该区域的夹角为 15°，与理论模型的计算值 15.2°非常接近。偏心多点起爆下定向战斗部的定向区域和定向区域的破片初速的理论计算与数值模拟吻合较好，相互佐证。

2.4　起爆点数选择

前面的模拟中选择足够多(15 个)的起爆点来代替线起爆，但是随着点数增加起爆的同步性越难保证，而点数太少则爆轰不完全，破片初速降低，所以选择合理的起爆点数值得进一步研究，即保证破片初速的前提下选择最少的起爆点。

为找出点代线的规律，在单轴起爆线上均布 1～5 个起爆点，计算得到不同起爆点数下，破片初速的分布情况与 15 个起爆点线起爆进行对比，如图 10 所示。

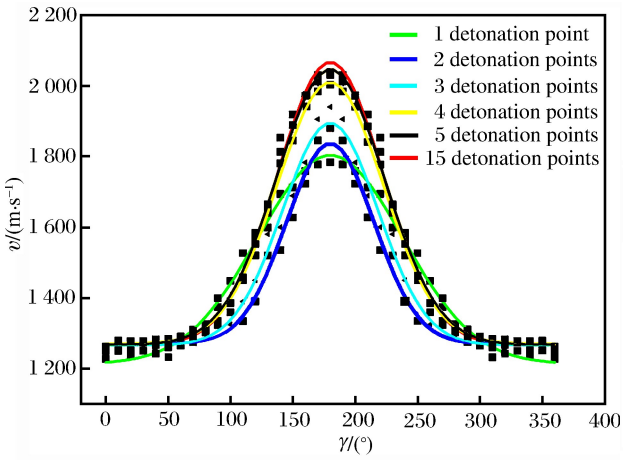

图 10　不同起爆点数下破片速度比较

Fig. 10　Comparison of fragment initial velocities under different number of detonation points

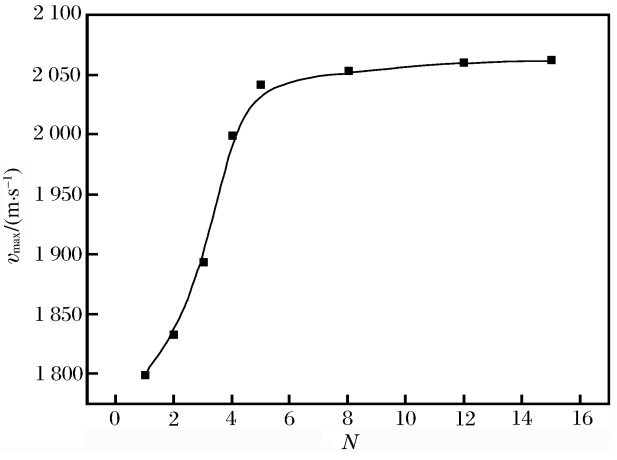

图 11　破片最大速度随爆点点数的变化

Fig. 11　Variation of fragment maximum velocity with detonation point number

分析图 10 发现，随着起爆点的增加，定向破片初速也逐渐增大，因为当起爆点较少时，马赫反射不充分，只有靠近起爆点的部分区域产生马赫超压，不能完全发挥出所有炸药的潜能。图 11 所示为定向

破片最大速度随起爆点数变化曲线，可以发现当单轴的点数从 1 增加到 5，破片最大速度提高了 242.2 m/s，提高约 13.5%；当点数继续增加，直至线起爆，破片最大初速仅提高了 20 m/s，速度提高不到 1%。所以对于本文的模型结构尺寸，5 点起爆可以代替线起爆。

对于任意尺寸的定向战斗部，壳体长度 L、装药口径 d、单轴点代线的点数为 N。假设存在一个参数 η 与壳体长度 L、装药口径 d 相关：

$$\eta=\frac{L}{d(N-1)} \tag{6}$$

式中：η 定义为相邻起爆点间距与装药口径的比值，是量纲一常数，是多点起爆代替线起爆的标准。由本文中的计算模型可计算出 $\eta\approx0.819$。则对任意尺寸定向战斗部，偏心多点起爆点代线的点数为：

$$N=\frac{L}{d\eta}+1 \tag{7}$$

3 实验验证

采用数值模拟相同的装药结构，见图 12，圆柱壳体两线偏心起爆，每条起爆线上均布 5 个起爆点来代替线起爆。

测速方法将测时仪法和高速摄像法两者相结合。在战斗部周围不同方向(0°、50°、90°、140°、160°和 180°)上布置锡箔靶纸，靶纸与多通道计时仪连接，破片击穿靶纸时计时仪收到一个“通信号”开始计时，破片击穿下一张靶纸时，计时仪收到下一个“通信号”计时结束，则计时仪记录到破片穿过两张靶纸所用的时间，从而计算出破片穿过两靶的平均速度，通过速度衰减公式易得出破片初速；同时在距爆炸中心 10 m 处架设高速摄影仪，并用高速摄像法进行测速，实验测得的破片速度与数值模拟结果在图 8 中表示。

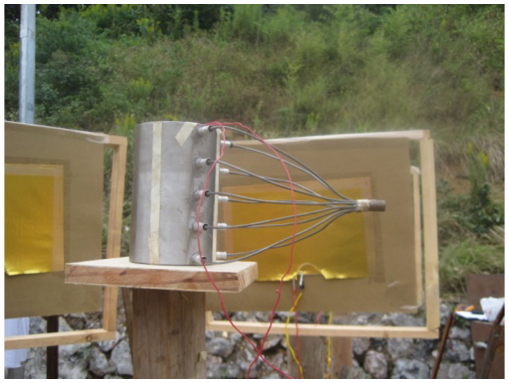

图 12 偏心起爆战斗部实验

Fig. 12 Test of eccentric initiation warhead

对比实验和数值模拟结果可以发现，实验测得的破片速度要比数值模拟得到的速度普遍偏小，主要因为实验中需要在壳体上开小孔来插入雷管，爆炸产物在小孔处泄压，所以破片速度偏小；在 50°方向上破片速度远高于数值模拟的速度，分析原因，该方向处于雷管飞散的方向，可能是雷管引爆后雷管壳碎片击穿锡箔靶触发计时仪计时，从而导致测得的速度远大于数值模拟结果。总体而言，实验和数值模拟结果吻合较好，误差在 10%以内。

4 结 论

本文中分别通过数值模拟和实验的方法研究中心起爆方式下破片轴向初速分布以及偏心多点起爆方式下定向战斗部破片初速分布规律和定向区域的范围；理论上简化了 Whitham 方法并结合 Gurney 速度公式分析偏心多点起爆下定向破片初速的计算方法和定向区域的计算方法；最后在保证破片初速的前提下，研究点代线的规律，得出如下结论：

(1)数值模拟的中心起爆方式下破片轴向初速分布与实验结果吻合较好，说明基于 Mott 破片分布理论的 Stochastic 随机破碎模型，以及采用的材料参数，能较全面较准确的模拟战斗部随机破片的飞散特性，可以为破片战斗部数值模拟方法提供一定的参考；

(2)定向战斗部相较周向均匀战斗部定向破片初速增益为 34%，定向区域约 30°；利用 Whitham 方法计算定向区域，结合 Gurney 速度公式得到定向破片初速的计算方法，其理论计算结果与数值模拟结果很接近，可为定向战斗部的研究提供理论上的支持；

(3)得到偏心战斗部点代线的点数选择的公式；对于任意尺寸战斗部都具有一定的工程应用价值。

参考文献：

[1] 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.
Wang Shushan，Ma Xiaofei，Sui Shuyuan，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.

[2] 黄静，孔凡勋，袁晋等. 多点偏心起爆对破片速度增益的影响[J]. 现代防御技术，2011，39(6)：37-42.
Huang Jing，Kong Fanxun，Yuan Jin，et al. Influence of multi-spots off-axis initiation on fragment velocity gain [J]. Modern Defence Technology，2011，39(6)：37-42.

[3] 张博，李伟兵，李文彬，等. 偏心起爆战斗部随机破片数值仿真[J]. 高压物理学报，2012，26(4)：442-448.
Zhang Bo，Li Weibing，Li Wenbin，et al. Numerical simulation of the dispersion of random fragments under asymmetrical initiation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2012，26(4)：442-448.

[4] Century Dynamics Inc. AUTODYN theory manual revision 4.2[M]. San Ramon：Century Dynamics Inc，2001.

[5] 糜仲春. 马赫反射研究进展[J]. 力学进展，1982，12(1)：41-50.
Mi Zhongchun. Recent advances in mach reflection[J]. Advances in mechanics，1982，12(1)：41-50.

[6] 黄正祥，祖旭东. 终点效应[M]. 北京：科学出版社，2014：83-102.

[7] Huang G Y，Li W，Feng S S. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading[J]. International Journal of Impact Engineering，2015，76(2)：20-27.

[8] 耿荻，马天宝，宁建国. 定向战斗部爆炸驱动规律研究[J]. 爆炸与冲击，2013，27(5)：685-690.
Geng Di，Ma Tianbao，Ning Jianguo. Study on laws of explosive driven behaviors of aimed warhead[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2013，27(5)：685-690.

[9] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 北京：科学出版社，1994：82-100.

Velocity distribution of fragments resulted by explosion of a cylindrical shell charge on multi-spots eccentric initiation

Shen Huiming，Li Weibing，Wang Xiaoming，Li Wenbin，Dong Xiaoliang

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

Abstract：To address the issue of the increase of the fragment velocity of an eccentric initiation warhead，we put forward the view that this increase was caused by the Mach overpressure formed by the detonation wave collision. We used the AUTODYN software to simulate the whole explosion process of the eccentric initiation warhead，from the radial expansion of the shell to the formation of the surface cracks，and eventually the formation of the fragments. We then compared the simulation result of the fragment velocity with the test data and found that they were in good agreement. Further we combined the simplified Whitham method with the Gurney equation to obtain the calculation method of the directional fragment velocity and directional area of the eccentric initiation warhead. We studied the selection criteria for the number of the initiation spot on the premise of maintaining the fragment velocity. The results show that through the multi-spot eccentric initiation，the velocity of the directional fragment increases by about 34%，and the directional area range is approximately 30°；the selection criteria of the number of initiation spot is associated with the shell length and the charge diameter. Our study can provide a reference for the engineering application of multi-spot initiation eccentric warhead.

Keywords：eccentric warhead；Mach reflection；multi-spots eccentric initiation；fragment velocity

（责任编辑　王易难）