

文章编号: 1006-9941(2014)03-0300-06

# 多层球形预制破片战斗部破片初速场的计算模型

印立魁, 蒋建伟

(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:** 为描述多层球形预制破片战斗部破片的初速分布, 针对典型的柱形装药的多层球形破片结构, 用 AUTODYN 软件对其爆炸驱动过程进行数值模拟, 发现每层破片的初速周向规律性波动; 每层破片的平均初速外层大于内层, 其差异随破片层数的增多和周向破片数的减少而增大; 基于 Gurney 假设和冲量定理进行理论推导, 结合数值模拟结果, 建立了破片初速场的计算模型。该模型通过给出各层破片的平均初速及初速场的速度极值来表征初速场, 其计算值与实验结果吻合较好。

**关键词:** 爆炸力学; 战斗部; 多层球形预制破片; 初速计算; 数值模拟

**中图分类号:** TJ760.2; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.006

## 1 引言

杀伤战斗部常采用多层预制破片提高打击密度。而球形预制破片因在战斗部中组装简单且速度衰减系数小, 在多层预制破片战斗部中应用较广。破片初速是衡量杀伤战斗部威力的重要指标之一, 也是影响引战配合效率的主要因素, 准确计算破片初速是进行战斗部设计和威力评估的基础。美国有学者<sup>[1]</sup>对多层球形破片战斗部的破片初速分布进行过系统研究, 结果显示外层破片的初速一般大于内层破片的初速, 整体破片的初速形成梯度较大的初速场, 但其理论研究较少。国内对此尚缺乏研究: 在文献方面仅见张志春等<sup>[2]</sup>和时党勇等<sup>[3]</sup>对特定的多层预制破片战斗部结构基于数值模拟做过一些工作, 其结论不具普适性; 在工程计算方面通常假设所有破片的初速相同, 把多层破片按质量等效为整体壳体, 按 Gurney 公式或斯坦诺维奇模型乘以修正系数计算, 这种方法得到的仅是最外层破片的较大初速, 以此作为整体破片的速度必然高估战斗部威力。为量化多层球形破片战斗部破

片的初速, 本研究针对典型的柱形装药的多层破片结构, 基于 Gurney 假设和冲量定理推导了各层破片平均速度的计算公式, 结合数值模拟得到的破片层数和周向破片数对破片初速的影响规律, 建立了破片初速场的计算模型, 其对文献[1]中的多层球形破片战斗部的破片初速分布计算结果与实验结果吻合较好。

## 2 各层破片速度的计算公式推导

圆柱形装药是最主要的战斗部装药形式; 球形破片一般装在药柱外的衬套间并用环氧树脂等粘结剂固化成型<sup>[4]</sup>。为建立各层破片初速的计算公式, 针对图 1 所示的柱形装药的多层球形破片结构建立如图 2 所示的多层破片模型, 并作如下假设:

- (1) 相同的球形破片按图 2 的方式(径向分层排列, 轴向交错排列)紧密排在柱形装药上, 有破片粘结剂, 无破片层内外衬套;
- (2) 装药瞬时爆轰, 释放的能量全部用于破片和爆轰产物的飞散;
- (3) 爆轰产物均匀膨胀, 密度均一, 其速度由中心到壳体线性分布, 且与破片接触的爆轰产物的速度与破片速度相同;
- (4) 爆轰产物不通过预制破片的间隙向外飞散;
- (5) 爆轰驱动过程中, 预制破片不变形, 每层破片以相同的径向速度飞散, 并认为各层破片与最内层破片的速度比为不小于 1 的定值; 以  $m_i, v_i (i=1, 2, \dots, n-1, n)$  分别表示从里到外计数的第  $i$  层破片的质量和径向速度, 则  $v_i/v_1 = k_i = Const, k_{i+1} \geq k_i \geq 1$ ;

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助(11032002); 国家重点基础研究发展计划(2010CB832706); 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室基金(ZDKT-1102)

作者简介: 印立魁(1984-), 男, 博士生, 主要从事战斗部建模和数值模拟研究。e-mail: 303644814@bit.edu.cn

通信联系人: 蒋建伟(1962-), 男, 教授, 博导, 主要从事弹药和战斗部系统和数值模拟研究。e-mail: bitjw@bit.edu.cn

(6) 粘结剂有相同的径向飞散速度,且其速度为最内层破片速度的  $k(k>1)$  倍。(未特别说明,文中各量的单位皆为 kg、m、s 构成的国际单位。)

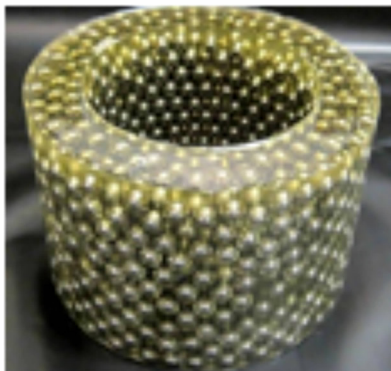


图1 粘结剂固化的多层球形破片<sup>[5]</sup>

Fig.1 Multilayered spherical fragments cured by binder<sup>[5]</sup>

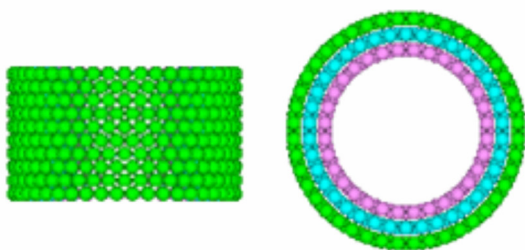


图2 多层球形破片模型

Fig.2 Model of multilayered spherical fragments

由冲量定理得到预制破片与爆轰产物的运动公式:

$$\left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + \frac{1}{2} C + k m_r\right) dv_1 = p S \cdot dt \quad (1)$$

式中,  $C/2$  为装药质量, 为由假设 3 得到的装药等效质量;  $m_r$  为粘结剂质量;  $p$  为爆轰产物作用于破片的压强;  $S$  为爆轰产物作用于预制破片的有效面积。再令  $r_0$  为柱形装药半径,  $\rho_0$  为装药密度;  $r$  为爆轰产物膨胀的半径;  $S_0$  为柱形装药侧面表面积。

将爆轰初始阶段膨胀规律  $p = \rho_0 D^2 r_0^6 r^{-6} / 8$ <sup>[4]</sup> 和  $S = \eta S_0$  代入式(1), 整理可得:

$$\left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + \frac{1}{2} C + k m_r\right) v_1 dv_1 = \frac{1}{4} D^2 C r_0^5 \eta r^{-6} dr \quad (2)$$

式中,  $\eta$  是破片周向排列数量及爆轰产物膨胀半径  $r$  的因变量,  $D$  为装药爆速。

当破片的尺寸和破片层的结构确定时必有常值  $k_C \in (0, 1)$  使  $\int_0^{+\infty} \eta r^{-6} dr = k_C \eta_{\max} \int_0^{+\infty} r^{-6} dr$ , 则对式(2)积分, 整理可得:

$$v_1 = \frac{D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{0.8 k_C \eta_{\max}}{0.5 + \left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + k m_r\right) / C} \left(1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^5\right)} \quad (r \geq r_0) \quad (3)$$

依据惯例取最内层破片的初速为:

$$v_1^0 = v_{1r \rightarrow \infty} = \frac{D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{0.8 k_C \eta_{\max}}{0.5 + \left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + k m_r\right) / C}} \quad (r \geq r_0) \quad (4)$$

多层破片结构使爆轰产物作用于破片层的有效面积  $S$  较单层破片结构变大, 其  $\sqrt{0.8 k_C \eta_{\max}}$  的值较单层破片结构也相应变大, 但难以量化; 而  $\left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + k m_r\right) / C$  的值因  $k_i$  和  $k$  未知也不能确定。此处对  $\sqrt{0.8 k_C \eta_{\max}}$  取为有破片粘结剂的多层球形破片结构的值  $0.85(1 - \exp(-0.4895 n^{0.2594}))$ <sup>[6]</sup>, 对  $\left(\sum_{i=1}^n k_i m_i + k m_r\right) / C$  取为  $k_i = k = 1$  时的值  $M/C = \beta^{-1}$  ( $M$  为破片和粘结剂的质量和), 把这两个比实际值小的定值代入式(4)可得最内层破片初速的近似值:

$$v_1^0' = 0.85(1 - \exp(-0.4895 n_f^{0.2594})) \times \frac{D}{2\sqrt{2}} (0.5 + \beta^{-1})^{-1/2} \quad (5)$$

式中,  $n_f$  为最内层破片的数量;  $v_0 = \frac{D}{2\sqrt{2}} (0.5 + \beta^{-1})^{-1/2}$

即是计算自然破片初速的斯坦诺维奇模型<sup>[7]</sup>。

将式(5)写为  $v_1^0' = k(n_f) v_0$ , 再由假设(5), 则各层破片的初速计算公式为:

$$v_i^0 = k_i v_1^0 = k_i(n_f, n) v_1^0' = k_i(n_f, n) k(n_f) v_0 \quad (6)$$

式中,  $k_i(n_f, n)$  与战斗部径向的破片层数  $n$ 、最内层破片数  $n_f$  和所求速度的层数  $i$  有关。

破片场中破片的最大初速  $v_{\max}^0$  和最小初速  $v_{\min}^0$  的计算公式为:

$$\begin{aligned} [v_{\max}^0, v_{\min}^0] &= [k_{\max}(n_f, n), k_{\min}(n_f, n)] v_1^0' \\ &= [k_{\max}(n_f, n), k_{\min}(n_f, n)] k(n_f) v_0 \end{aligned} \quad (7)$$

文中  $k(n_f)$ 、 $k_i(n_f, n)$ 、 $k_{\max}(n_f, n)$  和  $k_{\min}(n_f, n)$  通称为速度分布因子。因爆轰产物对破片层的驱动和内外层破片的碰撞两个过程同时进行, 对此过程理论建模比较困难, 速度分布因子的形式通过分析下节的数值模拟结果确定。

### 3 爆轰驱动球形破片的数值模拟

#### 3.1 数值模拟模型

采用 AUTODYN 仿真软件对多层球形预制破片的爆炸驱动过程开展数值模拟。考虑药柱无限长的情况, 如图 3 所示, 把对多层球形破片战斗部的仿真简化为不考虑内外衬的交错排列的破片层特征段的仿真(以 4 层, 内层破片数为 12 的破片结构为例); 经全模

型仿真结果验证,根据破片周向排列轴对称的特征,确立四分之一仿真模型如图4。

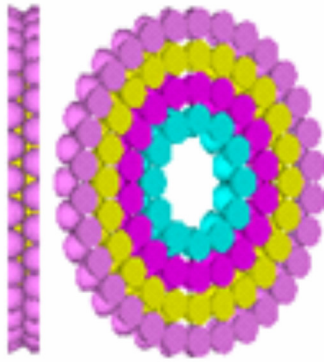
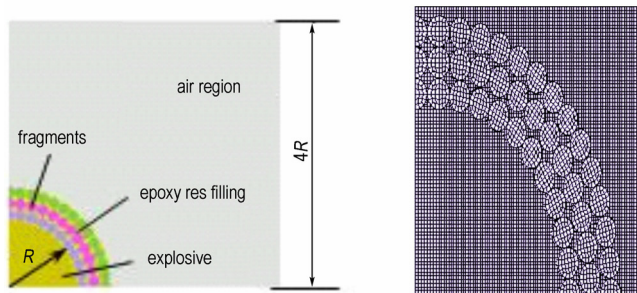


图3 数值模拟中采用的球形破片层的特征段  
Fig.3 Spherical fragments segment in simulations



a. Illustration of simulation model      b. Mesh (partial)

图4 仿真模型  
Fig.4 Simulation model

仿真模型中装药半径固定为50mm,在药柱轴线的中心起爆。破片层结构由最内层周向破片数  $n_r$  (12、20、40、60、80、120) 和径向层数  $n$  (1层、2层、3层、4层) 组合成24种工况,破片周向紧密均匀地排列,破片间隙填充环氧树脂(epoxy resin)。装药为Comp. B炸药(爆速  $7980 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),破片材料为钨合金。材料模型参数见表1,均取自AUTODYN的材料库<sup>[8]</sup>。破片用Lagrange网格,其余均用Euler网格,对两种网格运用耦合算法模拟爆轰产物对破片的作用。

表1 数值模拟中的材料模型<sup>[8]</sup>

Table 1 Material models in simulation<sup>[8]</sup>

material	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	EOS	strength
air	0.001225	Ideal Gas	None
Comp. B	1.717	JWL	None
tugsten alloy	17	Shock	Johnson Cook
epoxy resin	1.186	Shock	None

Note: EOS is equation of state.

### 3.2 数值模拟结果分析与数据处理

数值模拟显示,爆轰产物最先作用于内层破片,然后经破片间隙溢出依次作用于外层破片;内层破片被加速后通过碰撞将动能传递给外层破片;对相同层数不同  $n_r$  的破片层爆轰驱动数值模拟结果相似,以  $n_r=40$  为例图5给出其数值模拟结果。如图5所示,对比单层破片呈规则的圆周分布(径向速度相同),多层破片中各层破片大致呈六边形分布,内外层破片的位置径向分离,说明同层破片的速度周向周期性地波动,不同层破片的速度存在梯度;其原因主要有两点:(1)内外层破片数目相差不多,周向内外层球相对位置的规律变化使其碰撞条件周期性变化;(2)碰撞条件的差异导致内外层球碰撞时弹塑性波加载的方向不同而影响内外层球速度的分配,如图6所示,内外层破片的速度梯度在对心正碰时最大,在最大角度的斜碰撞时最小,其余的碰撞结果介于这两者之间。

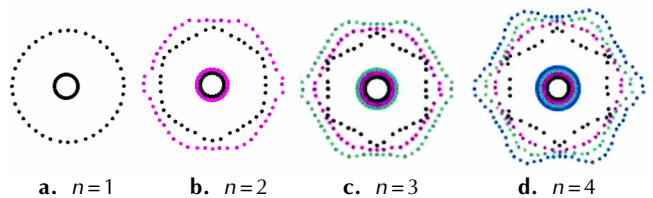


图5 破片飞散的数值模拟结果( $n_r=40$ )

Fig.5 Fragments' distribution in simulations ( $n_r=40$ )

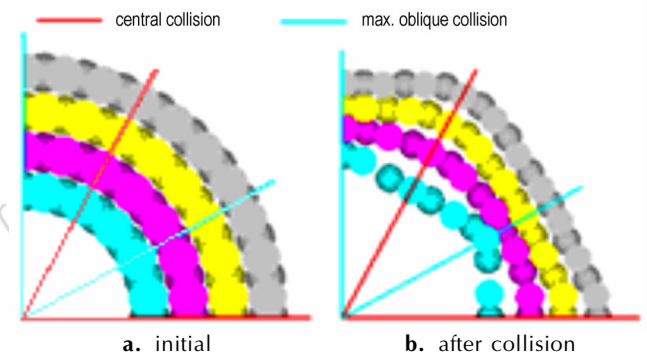


图6 碰撞条件对破片速度的影响

Fig.6 Effect of collision condition on velocity of fragments

整理数值模拟结果,获取各层破片质量  $m_i$ 、最大动能  $E_{ki}$ 、破片的最大初速  $v_{\max}^0$  和最小初速  $v_{\min}^0$ ,依次计算装填比  $\beta$ ,最内层破片近似初速  $v_1^0$ 、每层破片的平均初速  $v_i^0 = \sqrt{2E_{ki}/m_i}$ ,最终得到  $k_i(n_r, n) = v_i^0/v_1^0$ 、 $k_{\min}(n_r, n) = v_{\min}^0/v_1^0$  和  $k_{\max}(n_r, n) = v_{\max}^0/v_1^0$  并列于表2。从  $k_i(n_r, n)$  的变化趋势发现外层破片的初速比内层破片初速大,内外层破片平均初速的差异随周向

破片数  $n_f$  的减少和破片层数  $n$  的增多而变大; 由式 (7) 和  $k(n_f) \cdot k_{\max}(n_f, n)$  的值发现破片的最高初速

为相同装填比( $\beta$ )的自然破片初速的 0.7 ~ 0.9 倍, 它随破片层数的增多而变大。

表 2 各数值模拟工况下速度分布因子  $k(n_f), k_i(n_f, n), k_{\min}(n_f, n)$  和  $k_{\max}(n_f, n)$

Table 2 Values of  $k(n_f), k_i(n_f, n), k_{\min}(n_f, n)$  and  $k_{\max}(n_f, n)$  based on simulations

n	k(n <sub>f</sub> )	k <sub>i</sub> (n <sub>f</sub> , n)								k <sub>min</sub> (n <sub>f</sub> , n)			k <sub>max</sub> (n <sub>f</sub> , n)			
		2		3			4			2	3	4	2	3	4	
i	-	1	2	1	2	3	1	2	3	4	-	-	-	-	-	-
12	0.52	0.99	1.2	0.98	1.12	1.32	0.93	1.11	1.24	1.35	0.88	0.82	0.83	1.32	1.55	1.58
20	0.56	0.97	1.19	0.97	1.11	1.28	0.96	1.10	1.18	1.32	0.93	0.85	0.82	1.28	1.41	1.52
40	0.61	1.00	1.15	1.01	1.09	1.22	1.07	1.15	1.19	1.31	0.96	0.92	0.92	1.21	1.26	1.35
60	0.64	1.03	1.15	1.04	1.10	1.21	1.03	1.09	1.14	1.25	1.00	0.97	0.94	1.18	1.30	1.35
80	0.67	1.03	1.13	1.05	1.10	1.17	1.03	1.09	1.14	1.23	1.00	0.96	0.90	1.16	1.23	1.31
120	0.69	1.03	1.07	1.07	1.10	1.12	1.08	1.10	1.15	1.16	1.01	1.03	1.04	1.11	1.18	1.26

### 4 速度分布因子具体形式的确定

选用式(8)表征速度分布因子, 借助 MATLAB 的遗传算法优化工具箱拟合表 2 的数据, 确定如表 3 所示的对应各工况的各层破片平均初速、最小破片初速和最大破片初速的速度分布因子的各参数取值。

$$k_i(n_f, n), k_{\min, i=n}(n_f, n), k_{\max, i=n}(n_f, n) = \frac{a+bn_f+ci}{1+dn_f+ei} \quad (8)$$

式中,  $n_f = \pi / \arcsin(1+R/r)^{-1}$ ,  $r$  为球破片的半径,  $R$  为装药半径, 计算时将  $n_f$  舍弃小数部分代入式(8)。

$$v_i^0 = k_i(n_f, n) v_1^0 = \frac{a+bn_f+ci}{1+dn_f+ei} \times \frac{0.3(1-\exp(-0.4895n_f^{0.2594}))D}{\sqrt{0.5+\beta^{-1}}} \quad (i=1, 2, \dots, n-1, n) \quad (9)$$

$$[v_{\min}, v_{\max}] = [k_{\min}(n_f, n), k_{\max}(n_f, n)] v_1^0 = \frac{a+bn_f+cn}{1+dn_f+en} \times \frac{0.3(1-\exp(-0.4895n_f^{0.2594}))D}{\sqrt{0.5+\beta^{-1}}} \quad (10)$$

求取初速时按表 3 选取相应的  $a, b, c, d, e$  值代入两式计算。式(10)中向量的除法表示向量的相应元素相除。此式适于对破片层数  $n \in [2, 4]$ , 最内层破片数  $n_f \in [12, 120]$  的低强度薄壳体的多层球形破片战斗部评估初速场的分布。

### 5 实验验证

用文献[1]公布的实验数据对式(9)和式(10)进行验证, 图 7 为与本研究结构基本相同的实验弹结构: 实验弹尺寸  $\Phi 77 \text{ mm} \times 89 \text{ mm}$ , C-4 药柱  $\Phi 19 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$ , 铝壳厚 0.3 mm, 周围排列 4 层  $\Phi 6.3 \text{ mm}$  的钢珠(一侧周向连续的  $90^\circ$  区域装填有层标识的钢

表 3 式(8)中各参数的取值

Table 3 Parameters in Equ. 8

velocity distribution factor	n	a	b	c	d	e
	2	-2.077	0.214	8.064	0.204	5.202
k <sub>i</sub> (n <sub>f</sub> , n)	3	-0.015	0.146	0.929	0.134	0.275
	4	0.448	0.058	0.635	0.053	0.273
k <sub>min</sub> (n <sub>f</sub> , n)	-	1.459	0.713	0.960	0.691	2.142
k <sub>max</sub> (n <sub>f</sub> , n)	-	-3.152	0.380	8.297	0.358	4.143

结合式(5) ~ 式(8)得到多层球形破片战斗部各层破片平均初速、最小破片初速和最大破片初速的计算公式:

珠), 钢珠间隙用聚酯树脂填充, 外围有纸壳, 两端有厚 12.7 mm 的钢端盖; 实验弹(原文中的 2 号弹)的参数为: 装填比  $\beta=0.0215$ , 最内层破片数  $n_f=12$ , C-4 炸药装药密度  $1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 爆速  $8250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1[9]}$ 。

用式(9)和式(10)计算实验弹每层破片的平均初速、最小初速和最大初速(为方便与文献数据对比, 此处速度单位取为  $\text{ft} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$ )列于表 5, 将其与文献[1]给出的实验值和初速极坐标图(该图径向表示速度, 周向表示破片飞散方向角)在表 5 和图 8 中作对比, 可见本文建立的计算模型对破片初速场各项速度的预测值与实验结果基本吻合, 所预测的初速范围能涵盖绝大部分的破片初速场, 说明该计算模型能基本反映多层破片初速的分布特征; 两者也存在一

定差距,分析其原因可能为:(1)数值模拟中球形破片理想化的排列方式与实际难以相同;(2)钨和钢的材料参数差别较大,数值模拟中钨球的动态响应与实际的钢球的动态响应有差异。

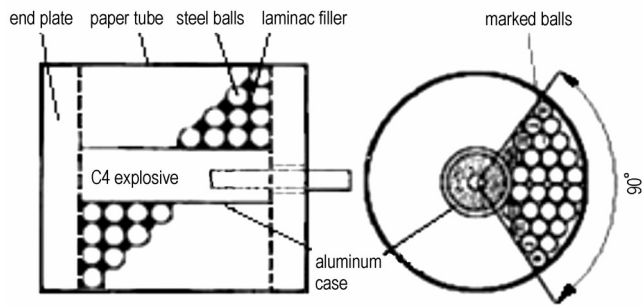


图7 实验弹结构图<sup>[1]</sup>

Fig.7 Sketch drawings of test round<sup>[1]</sup>

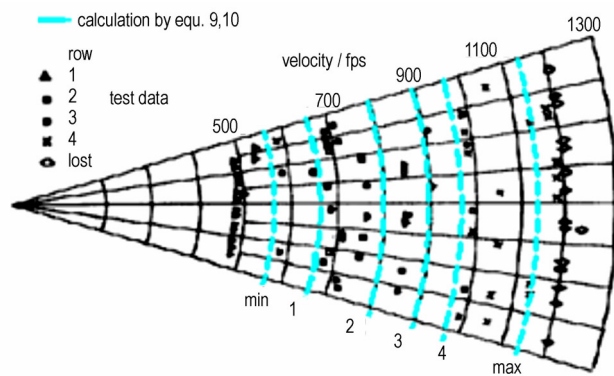


图8 本研究计算值与实验所得的初速极坐标图的<sup>[1]</sup>对比

Fig.8 Comparison between the calculated initial velocity and experimental polar plot<sup>[1]</sup>

表5 本研究初速计算值与实验结果的对比

Table 5 Calculated and experimental initial velocity

type of initial velocity	fragment layer No.	initial velocity/ft · s <sup>-1</sup>		
		test data <sup>[1]</sup>	calculated by Equ. (9), (10)	error/%
avg. velocity of each layer	1	682	671	-1.6
	2	736	796	8.2
	3	835	893	7.0
	4	1082	971	-10.3
min. velocity	-	490	557	13.7
max. velocity	-	1230	1136	-9.2

## 6 结论

采用 AUTODYN 软件对周向紧密排列的多层球形破片结构的爆炸驱动过程进行了数值模拟,结果表明:

(1) 同层破片的速度因内外层破片的交错排列在周向周期性地波动。

(2) 平均速度外层破片大于内层破片,其速度差随破片层数的增多和周向破片数的减少而变大。

(3) 破片的最大初速为相同装填比的整体破片初速的 0.7~0.9 倍,其值随破片层数的增多而变大。

基于 Gurney 假设和冲量定理,结合数值模拟结果建立的多层球形破片战斗部破片初速场的计算模型能给出各层破片的平均初速及破片初速极值,其计算值与实验结果吻合较好,对预制破片战斗部的设计和威力评估具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] Poter W R. Radially expanding fragmentation warhead study [R]. AD348620, 1963.
- [2] 张志春, 强洪夫, 孙新利. 杀伤战斗部破片飞散特性的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(6): 671-675. ZHANG Zhi-chun, QIANG Hong-fu, SUN Xin-li. Numerical simulation for fragments flight characteristics of high explosive projectile[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(6): 671-675.
- [3] 时党勇, 张庆明, 夏长富. 多层预制破片战斗部数值模拟方法及起爆方式影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 553-558. SHI Dang-yong, ZHANG Qing-ming, XIA Chang-fu. Numerical simulation and different initiation modes for prefabricated multilayer fragment warhead[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 10(6): 553-558.
- [4] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 19. Eighth partment of Beijing industrial institute. Explosive and its Effect II [M]. Beijing: Academic Press, 1979: 19.
- [5] Jeffrey F Widener. Reactive material candidates for low collateral damage-part 1: arena testing[OL]. [2013-7-23]. <http://www.dtic.mil/ndia/2012IMEM/13825widener7A.pdf>
- [6] 印立魁, 蒋建伟. 预制破片战斗部破片初速计算公式[OL]. [2013-07-30]. 中国科技论文在线 <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201307-400>.
- [7] YIN Li-kui, JIANG Jian-wei. A predictive formula of initial velocity on explosively driving pre-formed fragments[OL]. [2013-07-30] Sciencepaper Online, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201307-400>.
- [7] 尹峰, 张亚栋, 方秦. 常规武器爆炸产生的破片及其破坏效应[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(1): 50-53. YIN Feng, ZHANG Ya-dong, FANG Qin. Fragment and its destroy effect produced by conventional weapon[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2005, 6(1): 50-53.
- [8] Century Dynamics Inc.. AUTODYN theory manual [M]. Revision 11. Century Dynamics Inc, 2007.
- [9] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL explosives handbook properties of chemical explosives and explosive simulants[M]. Revision 2. Lawrence: Livermore national laboratory, 1985: 8-2.

## Calculation Model of Initial Velocity Field on Multilayered Spherical Fragments Warhead

YIN Li-kui, JIANG Jian-wei

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

**Abstract:** In order to predict the initial velocity of multilayered spherical fragments warhead in detail, AUTODYN was utilized to simulate the process of explosively drive aimed at the typical warheads, filled with cylindrical charge and multilayered spherical fragments. It's found that velocities of fragments varied regularly in circumference on each layer and the mean velocity of inner fragments is bigger than that of outer fragments, especially in the case of more layers and less circumferential fragments. Then, a model was established by theoretical derivation based on momentum theorem and Gurney's hypothesis as well as the data from simulation. The model gives three types of velocity to characterize the initial velocity field. The three types of velocity is as follows: average initial velocity of fragment in any layer, maximum and minimum initial velocity of fragments. The results predicted by the model go well with test results.

**Key words:** explosion mechanics; warhead; multilayered preformed fragment; initial velocity; simulation

**CLC number:** TJ760.2; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.006