

## 聚焦式战斗部破片轴向飞散控制技术\*

张绍兴, 李翔宇, 丁亮亮, 张震宇, 卢芳云

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为研究聚焦式战斗部在炸药驱动下破片的轴向飞散特性, 提高其轴向杀伤威力, 以 Shapiro 公式为理论指导, 对聚焦式战斗部壳体母线进行设计, 并对战斗部装药结构进行优化改进。利用 LS-DYNA 有限元程序及 ALE 算法对战斗部的爆炸过程进行模拟, 以破片轴向分布为指标, 对装药结构、壳体母线曲率与破片飞散特性的关系进行了分析。结果表明, “工”字形圆台装药和壳体母线曲率能够有效控制战斗部破片的轴向飞散, 并得到了圆台的合理高度。此结果对于深入开展战斗部的破片飞散方向控制及应用研究提供了重要参考。

**关键词:** 轴向聚焦战斗部; 壳体设计; 装药结构; 破片飞散特性

**中图分类号:** O383; TJ410

**文献标识码:** A

战斗部爆炸后, 破片的空间分布是确定破片杀伤作用场的一个重要指标。传统战斗部起爆后形成的破片场在弹轴方向上以一定的锥角向空中飞散, 在环向上则为均匀分布, 在一定弹目交汇条件下, 仅有 10% 的破片能够对目标产生有效破坏<sup>[1-2]</sup>。为了提升战斗部在轴向上对目标的毁伤能力和毁伤效率, 使破片在轴向上平行飞散甚至聚焦飞散成为一种技术途径, 研究破片轴向飞散控制及预测的方法显得十分重要<sup>[3]</sup>。

战斗部的装药结构、壳体和炸药材料、端部约束、引爆方式等均会对破片飞散特性产生影响, 国内外许多学者都对此类课题展开了相应研究。Taylor<sup>[4]</sup>最早提出了长柱壳装药结构下抛板速度和轴向飞散角之间的半经验公式, 得到了科学界和工程界的广泛应用。许多学者对 Taylor 公式进行修正和改进, 其中 Shapiro 提出的非柱壳结构装药的破片飞散角公式被广泛应用于工程实践中<sup>[5]</sup>。Held<sup>[6]</sup>运用 Taylor 公式给出了偏心起爆下战斗部弹体截面内破片径向速度的 Gurney 方程。国内众多学者也在相关领域展开了充分探索, 为破片战斗部破片飞散控制的工程应用提供了重要依据。在轴向聚焦战斗部的设计应用方面, 李晋庆等<sup>[7-8]</sup>讨论了聚焦型破片战斗部的聚焦曲线工程设计, 给出了可用于工程设计的计算方法和工程计算实例, 并通过靶场实验研究了不同起爆方式对战斗部聚焦性能的影响。黄广炎等<sup>[9]</sup>分析了一端起爆下破片微元的飞散机理, 结合破片初速的端部修正, 得到了一种基于微元柱的破片飞散方向沿轴线分布的计算方法。他们采用光学凹面镜反射原理对战斗部壳体进行设计, 得到轴向聚焦战斗部的一种设计方法, 并进行了实验验证<sup>[10]</sup>。Chen 等<sup>[11]</sup>通过对战斗部壳体进行设计, 运用大量仿真研究了不同结构的平行式战斗部的破片飞散特性, 为平行式破片战斗部设计提供了思路。

现有研究表明, 破片飞散控制可有效提高破片在目标区域的密度, 从而提高战斗部的杀伤威力和毁伤效率。轴向聚焦式战斗部作为其中的典型代表, 能够对目标进行“切割式”毁伤。本研究在前人工作的基础上, 以圆柱形轴向聚焦式战斗部为研究对象, 运用仿真程序对战斗部破片的飞散特性进行研究, 从而实现战斗部结构和性能的优化。

\* 收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(11202237, 11132012)

作者简介: 张绍兴(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高效毁伤战斗部技术研究. E-mail: sxzhang10@163.com

通信作者: 李翔宇(1980—), 男, 副教授, 主要从事高效毁伤战斗部技术研究. E-mail: xiangyulee@nudt.edu.cn

# 1 战斗部壳体设计

战斗部壳体受爆轰波驱动作用向空中飞散,为了对破片的空间分布进行预测和控制,达到优化战斗部毁伤性能的目的,常常需要预测破片的初始飞散速度和飞散角度。在工程实践中,Shapiro 公式被广泛应用于战斗部破片飞散角的计算。如图 1(a)所示,在过战斗部轴线的平面内,壳体由一定长度的微元组成,DBA 为其中一段,O 为起爆点,AA'、BB' 为爆轰波波阵面,波速为  $D_e$ ,在  $\Delta t$  时间内壳体微元 AB 运动到 CB 位置,壳体破片初始速度为  $v_0$ ,壳体初始法线方向为  $n$ 。爆轰波方向、初始法线方向、破片初始速度方向与弹轴的夹角分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  和  $\varphi_3$ ,破片初始速度方向与初始法线方向的夹角为  $\theta_s$ ,显然  $\theta_s = \varphi_1 - \varphi_3$ 。

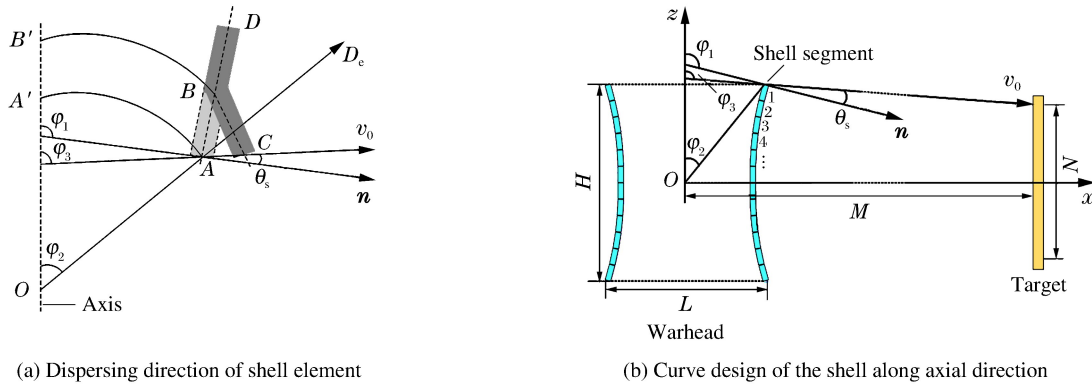


图 1 轴向聚焦战斗部壳体母线设计

Fig.1 Shell design of axial focusing warhead

计算破片飞散角的 Shapiro 公式<sup>[5]</sup>为

$$\tan \theta_s = \frac{v_0}{4D_e} \cos(\theta_s + \varphi_2) \tag{1}$$

破片初始速度  $v_0$  的计算公式<sup>[12]</sup>为

$$v_0 = \sqrt{\frac{2E}{m/m_c + 0.5}} \tag{2}$$

式中: $m$  为壳体和破片的总质量, $m_c$  为装药质量, $\sqrt{2E}$  为炸药的 Gurney 常数<sup>[5]</sup>。

基于 Shapiro 公式,采用微元法根据破片在靶板上的落点分布对战斗部壳体母线进行设计。设计思路如图 1(b)所示,在过战斗部轴线的二维平面内将战斗部壳体划分成固定长度的微元,其长度设为  $h$ ,取  $z$  轴方向为战斗部轴线方向, $x$  轴为过战斗部中心与  $z$  轴相垂直的方向。

设战斗部的直径为  $L$ ,高度为  $H$ ,弹靶距离为  $M$ ,靶板上破片分布区域的长度为  $N$ ,起爆点为  $O$ 。将壳体微元从上到下依次编号为 1、2、3...。对于 1 号壳体微元,其上端点的坐标为  $(L/2, H/2)$ ,记为  $(X_1, Z_1)$ ,在靶板上的落点坐标为  $(M, N/2)$ ,由几何三角关系可知

$$\varphi_2 = \arctan \frac{L}{H} \tag{3}$$

$$\varphi_3 = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{(H - N)/2}{M - N/2} = \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{H - N}{2M - L} \tag{4}$$

将(3)式和(4)式代入(1)式,并结合  $\varphi_1 = \varphi_3 + \theta_s$  可得

$$\tan\left(\varphi_1 - \arctan \frac{H - N}{2M - L}\right) = -\frac{v_0}{4D_e} \cos\left(\varphi_1 - \arctan \frac{L}{H}\right) \tag{5}$$

破片战斗部的壳体结构主要包括内、外壳体,称重壳,破片等。记内、外壳体厚度为  $h_1$ ,破片层厚度为  $h_2$ ,承重壳厚度为  $h_3$ ,则微元 1 处的爆炸载荷系数  $\beta_1$  的表达式为

$$\beta_1 = \frac{m_c}{m} = \frac{\rho_1 (X_1 - 2h_1 - h_2)^2}{2\rho_2 h_1 (2X_1 - h_1 - h_2) + \rho_2 h_3 (X_1 + d) + 0.524\rho_3 [2h_2 (X_1 - h_1) - h_2^2]} \quad (6)$$

式中:  $\rho_1$  为炸药密度;  $\rho_2$  为内、外壳体密度;  $\rho_3$  为破片密度;  $d$  为承重壳与外壳的间距,即辅药厚度。

获得以上参数后,通过对(5)式进行迭代计算得到角度  $\varphi_1$  的数值解。于是微元 1 的下端点坐标为  $(X_1 - h \sin\varphi_1, Z_1 + h \cos\varphi_1)$ ,此坐标也是微元 2 的上端点坐标,微元 2 的落点位置为  $(M, N/2 - N/H)$ 。按照上述方法进行递推计算,可得到所有壳体微元的端点坐标,对所有端点坐标进行曲线拟合便可得到战斗部壳体母线的解析表达式。

选择 RDX 为主装药,装药直径 130 mm,高 130 mm,Gurney 常数为 2 834 m/s,对战斗部壳体进行设计,得到聚焦式、平行式和发散式 3 种不同结构的战斗部,如表 1 所示。

表 1 3 种战斗部的壳体母线设计参数  
Table 1 Shell parameters of 3 kinds of warheads

No.	Warhead mode	Detonation mode	M/m	Fragment distribution	Fitting radius/mm
1 <sup>#</sup>	Focusing	Symmetrical point	3.5	Focusing	711
2 <sup>#</sup>	Parallel	Symmetrical point	3.5	Uniform distribution (130 mm in axis direction)	1 076
3 <sup>#</sup>	Emanative	Symmetrical point	3.5	Uniform distribution (300 mm in axis direction)	1 700

预制破片的直径为 8 mm,故取壳体微元长度为 8 mm,对微元端点坐标进行求解,结果如图 2 所示。为了方便建立战斗部模型以及后期实验加工设计,对微元端点进行二次圆弧拟合,即将壳体母线简化拟合成一段圆弧,得到的拟合圆弧与微元端点重合度较好,说明圆弧拟合能够较为真实地反映壳体母线的形状特征,可以使用圆弧建立战斗部模型。

## 2 数值计算模型

### 2.1 有限元模型

传统的轴向聚焦式战斗部模型如图 3(a)所示,记为 I 型战斗部。使用 ALE 方法建模,炸药、海绵、环氧树脂和空气采用 Euler 网格,内壳、外壳、承重壳、破片和端盖采用 Lagrange 网格。战斗部中心有一个海绵填充的中心孔,用于放置起爆的扩爆药柱,扩爆药柱简化为和主装药相同的炸药类型。主装药起爆后,其能量通过 ALE 耦合算法传递给壳体和破片,驱动破片向外飞散形成破片场。

在设计壳体母线的过程中忽略了战斗部端部效应的影响,但实际情况是爆轰波会在战斗部端部反射稀疏波,导致破片飞散角增大,从而影响破片轴向飞散控制的效率。为了消除端部效应的影响,设计了如图 3(b)和图 3(c)所示的装药结构,其中:II 型战斗部在 I 型战斗部的基础上添加了高 20 mm、无破片的圆台结构;III 型战斗部则对该圆台结构进行改进,将主装药填充到圆台结构中,高度仍然为 20 mm,形成了“工”字形的装药结构。

### 2.2 材料模型及状态方程

战斗部模型由炸药、空气、壳体、破片等组成,各部分材料参数如表 2 所示。为了有效实现对战斗部爆炸过程的仿真,对壳体和端盖材料使用了应变失效准则<sup>[13]</sup>:失效应变为 0.4,即当单元应变大于 0.4 时单元失效,材料发生断裂。

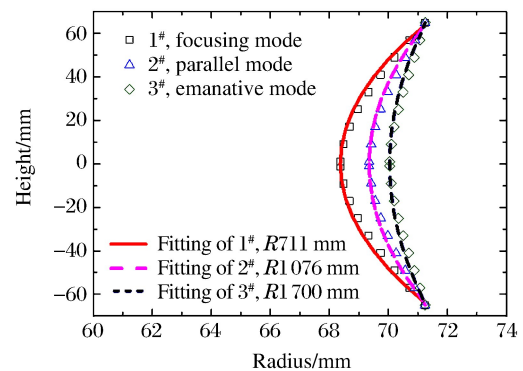


图 2 3 种战斗部壳体母线设计及拟合曲线  
Fig. 2 Design and fitting curves of 3 kinds of warhead shells

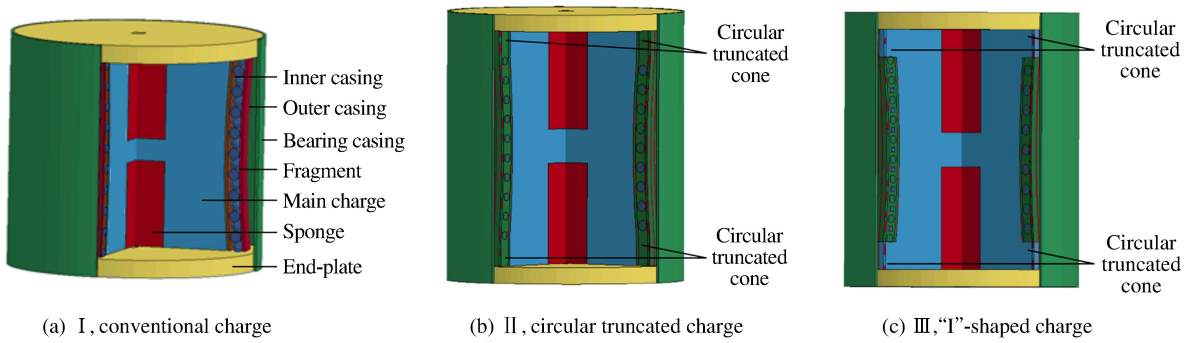


图 3 战斗部有限元模型

Fig. 3 Finite element models of warheads

表 2 各部分材料及材料参数

Table 2 Parameter of different materials

Component	Material	Density/(g · cm <sup>-3</sup> )	Material model	Equation of state
Explosive	RDX	1.75	High_Explosive_Burn	JWL
Null	Air	0.00129	Null	Linear_Polynomial
Epoxy	Epoxy	1.198	Null	Grüneisen
Sponge	Sponge	0.315	Null	Grüneisen
Casing	45 steel	7.85	Elastic_Plastic_Hydro_Spall	Grüneisen
End-plate	LY12	2.73	Elastic_Plastic_Hydro_Spall	Grüneisen
Fragment screw	45 steel	7.89	Plastic_Kinematic	

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 3 种装药结构战斗部的破片飞散特性

选择聚焦型壳体参数,对 3 种不同装药结构战斗部的破片飞散过程进行仿真计算,并利用破片搜索软件<sup>[14]</sup>对破片场进行搜索,得到破片在 3.5 m 远处靶板上的分布,如图 4 所示。观察破片在 z 轴(即战斗部轴向)上的分布发现,II 型战斗部破片在轴向上明显比 I 型战斗部集中。在 3.5 m 远的靶板上:I 型战斗部破片分布在(-100 cm,100 cm)区间上,并且仅在(-10 cm,10 cm)区间上分布较为集中,占总破片数的 26.41%;II 型战斗部破片集中分布在(-50 cm,50 cm)区间上,占总破片数的 99.01%,远大于 I 型在此区间内的 72.10%;III 型战斗部破片主要分布在(-10 cm,10 cm)区间上,占总破片数的 76.84%,远大于 I 型和 II 型战斗部的数据。这说明圆台结构,特别是 III 型战斗部结构能够最大限度地消除端部效应的影响,达到破片聚焦的目的。

图 5 给出了 I 型和 III 型装药结构在爆炸过程中的压力等值面变化。在 12 μs 时刻,两种装药结构中的炸药爆轰完毕,爆轰波作用在破片上并推动破片向外飞散。在 20 μs 时刻:由于端部稀疏波的作用,I 型装药结构的压力等值面在端部开始发生凹陷,端部破片附近逐渐形成低压力区域,内外压力差使破片获得向外的轴向速度;而 III 型装药结构的稀疏波只影响了圆台部分爆轰产物的压力等值面,破片端面仍然保持一个较高的压力值。在 24 和 30 μs 时刻:在稀疏波作用的持续影响下,I 型装药结构的压力等值面凹陷越来越大,端部低压区域越来越大,受端部低压区影响的破片越来越多,破片的轴向飞散速度也逐渐增大;而 III 型装药结构的压力等值面仍然包裹着破片,破片仍然处在较为均匀的压力驱动下,轴向飞散速度变化较小。在 40 μs 时刻:I 型装药结构的高压等值面的宽度变得很窄,导致破片在轴向上进一步发散,此时破片在轴向上呈圆弧状排布(破片发散的标志);而 III 型装药结构的高压等值面仍然较宽,破片排布和初始时刻相比没有太大变化,破片保持较好的轴向聚焦飞散。



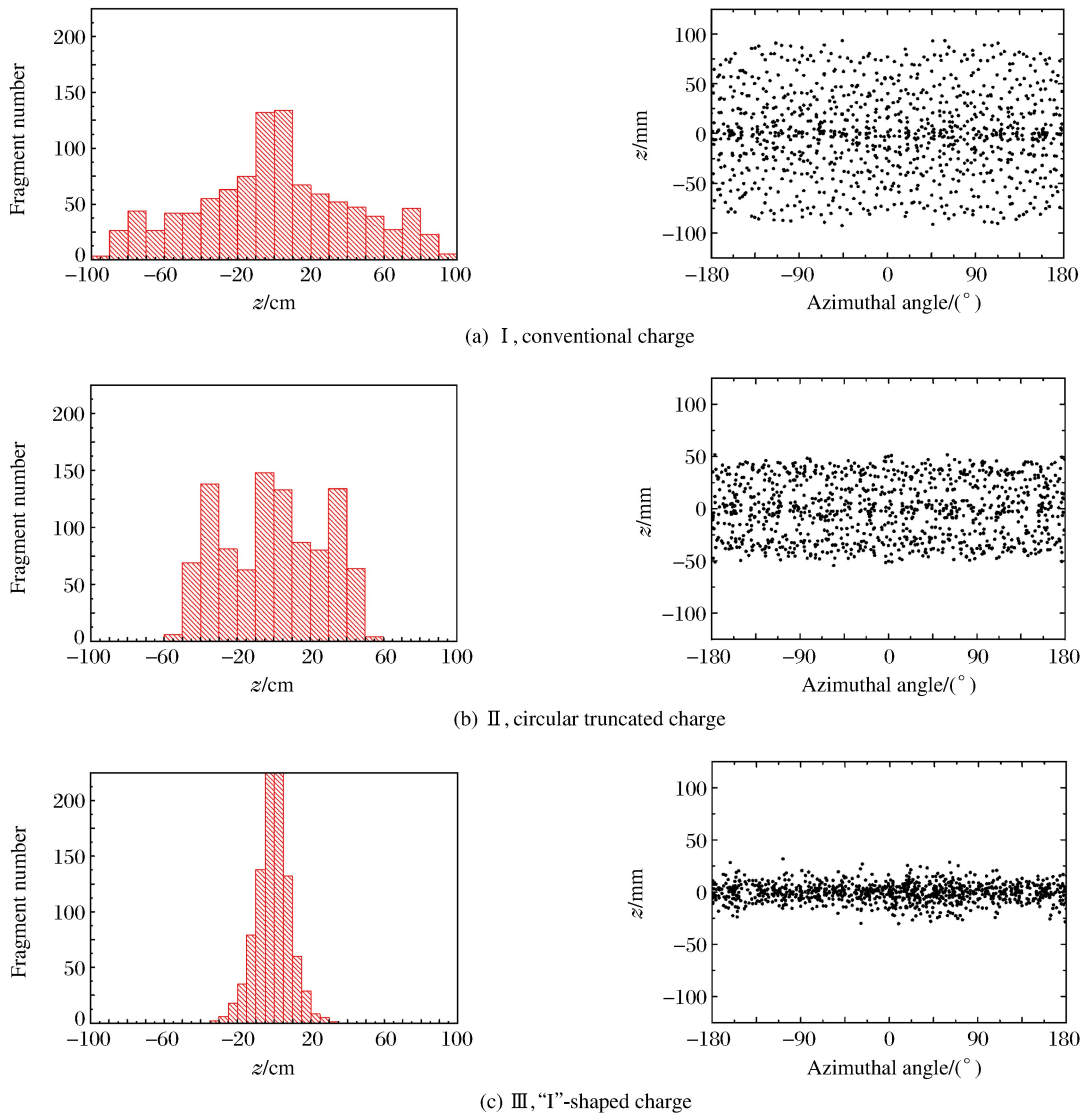


图 4 不同装药结构战斗部在 3.5 m 远处靶板上的破片分布

Fig. 4 Distribution of warhead fragments with different charge structures on the 3.5 m-away target

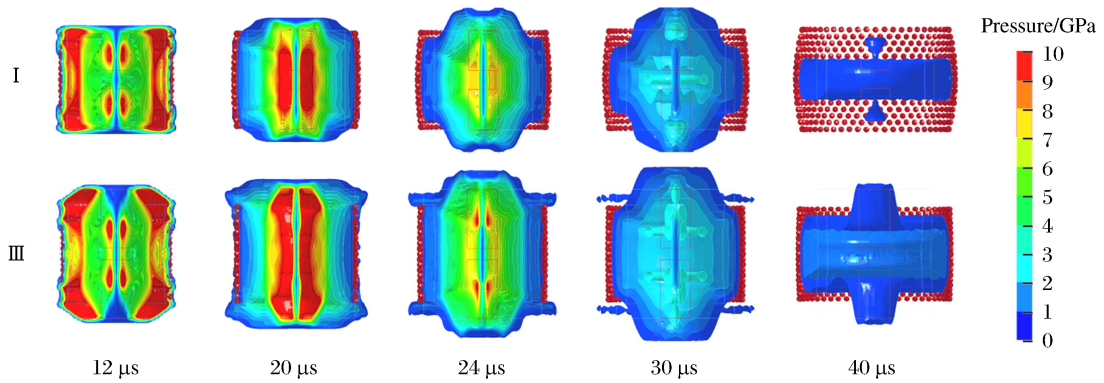


图 5 I 型和 III 型装药结构在爆炸过程中的压力等值面变化

Fig. 5 Isoface of pressure in type I and type III charges

### 3.2 不同圆台高度战斗部的破片飞散特性

为了研究Ⅲ型——“工”字形装药结构的圆台高度对破片飞散的影响,为聚焦型壳体选取 16、20、25 和 32 mm 4 种不同高度的圆台结构,对战斗部破片飞散特性进行仿真,得到破片在 3.5 m 远处靶板上的轴向分布,如图 6 所示。图 6 中每个点的数据表示以该点为中心、宽 5 cm 区间内的破片数,对破片数量进行高斯拟合,得到不同圆台高度下战斗部破片分布的拟合曲线。

由图 6 的拟合曲线可知,4 种圆台高度下,战斗部破片在轴向上的分布均较为集中,但具体分布不同。16 mm 圆台战斗部的破片分布相对分散,在 (-25 cm, 25 cm) 区间内有 85.19% 的破片;随着圆台高度的增加,破片分布越来越集中,20 和 25 mm 圆台战斗部在 (-15 cm, 15 cm) 区间内的破片数分别达到总数的 89.66% 和 87.01%;当圆台高度为 32 mm 时,破片分布的集中程度反而下降。观察高斯拟合曲线发现,20 和 25 mm 圆台战斗部的破片聚焦效果最好,其中 25 mm 圆台战斗部更好,但优势并不大。综合聚焦效果和战斗部有效长度两方面因素,确定Ⅲ型战斗部的合理圆台高度为 20 mm。

取 4 种战斗部壳体母线上的一系列破片,记录它们在 2 000  $\mu\text{s}$  内的飞散轨迹,如图 7 所示。图 7(a) 中,几乎所有破片在轴向上都呈发散状向外飞散,因此破片在靶板上的分布较为分散;图 7(b) 和图 7(c) 中,大部分破片平行向外飞散,另一部分则向内汇聚飞散,故破片在靶板上分布很集中;在图 7(d) 中,几乎所有破片都向内汇聚飞散,但由于汇聚点在靶板之前,破片汇聚后又呈发散状继续飞散,因此破片在靶板上的汇聚效果反而不如 20 和 25 mm 圆台战斗部。由此可见,即使再增加圆台高度,破片在靶板上的分布也不会更集中,反而会分散。

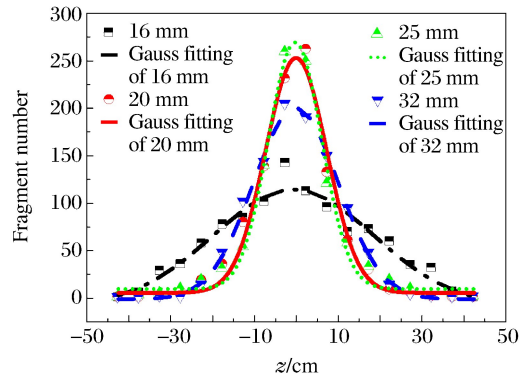


图 6 不同圆台高度战斗部在 3.5 m 远处靶板上的破片分布统计

Fig. 6 Distribution of fragments on the 3.5 m-away target with different platform heights

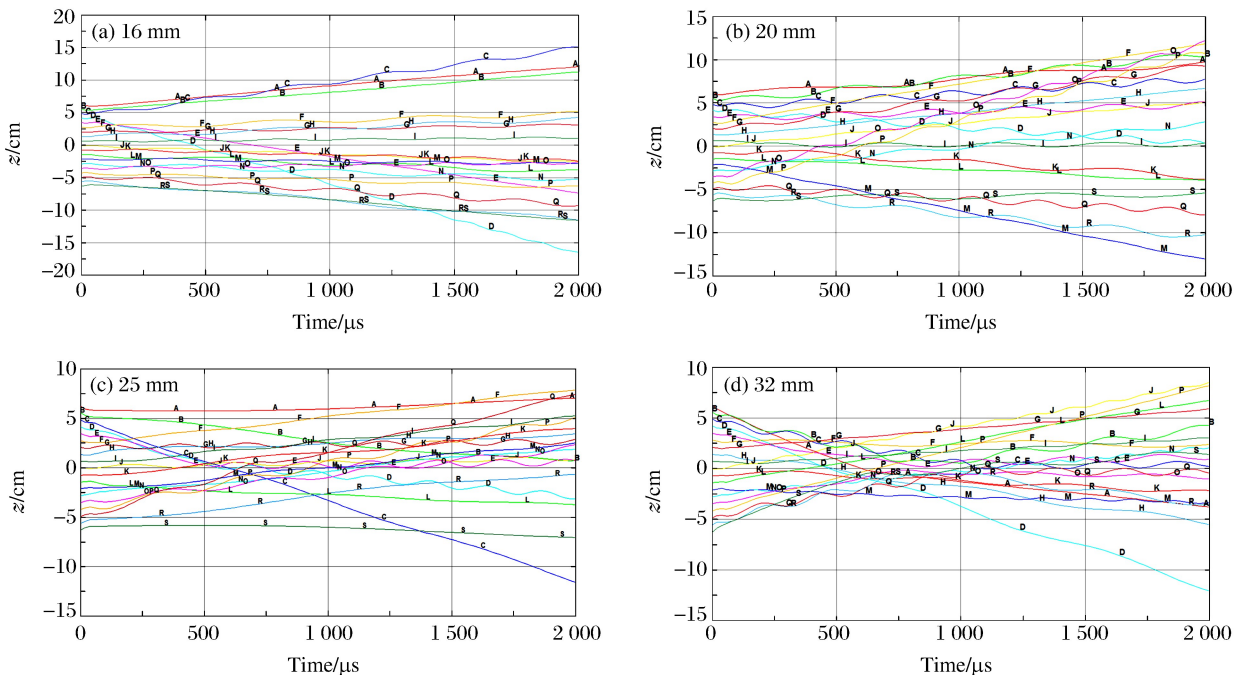


图 7 不同圆台高度战斗部的破片飞散轨迹(A~S 表示不同节点)

Fig. 7 Trace of fragments with different platform heights (Different nodes represented by A-S)

### 3.3 不同母线曲率战斗部的破片飞散特性

选取Ⅲ型战斗部装药结构,圆台高度定为 20 mm,对表 1 中不同曲率半径的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 壳体进行仿真,破片在 3.5 m 远处靶上的轴向分布如图 8 所示,其中每个数据点表示以该点为中心、宽 2.5 cm 区间内的破片数量。观察破片分布的高斯拟合曲线可知,聚焦式、平行式和发散式战斗部的破片集中程度依次减小,证明通过设计壳体曲线控制破片飞散是可行的。定义破片轴向分布的目标区域为该类型战斗部设计时要求破片落向的区域,不同战斗部在目标区域内的破片分布情况列于表 3。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 战斗部在目标区域内的破片数分别达到了总破片数的 25.64%、44.40% 和 59.22%,分布是普通圆柱形战斗部在相应区域内的破片数百分比的 2.44、2.23 和 1.48 倍,且破片在目标区域内分布较为均匀,说明通过 Shapiro 公式对壳体进行曲线设计从而控制破片飞散的方法切实有效。以上结果表明,在不改变战斗部大小的情况下,通过设计壳体母线曲率,可以实现战斗部在目标区域内的破片数增益,从而达到高效毁伤的目的。

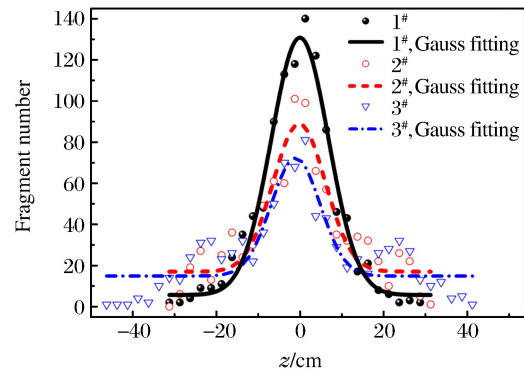


图 8 不同壳体母线的战斗部在 3.5 m 远靶板上的破片分布

Fig. 8 Distribution of fragments on the 3.5 m-away target with different generatrices

表 3 目标区域内破片统计

Table 3 Fragments in specific target area

No.	Area/cm	Fragment number	Percent/%	Gain
1 <sup>#</sup>	(-2.5, 2.5)	258	25.64	1.44
2 <sup>#</sup>	(-6.5, 6.5)	396	44.40	1.23
3 <sup>#</sup>	(-15.0, 15.0)	517	59.22	0.48

## 4 结 论

(1) 基于 Shapiro 公式设计了实现破片不同程度聚焦的战斗部壳体曲线,并利用 LS-DYNA 计算了破片飞散特性,验证了战斗部壳体曲线设计的合理性。

(2) 研究了战斗部装药结构对破片飞散结果的影响,提出“工”字形圆台装药结构,并对其进行仿真验证,确定了“工”字形圆台的合理高度为 20 mm。

(3) 当“工”字形圆台的高度为 20 mm 时,聚焦式、平行式和发散式 3 种不同聚焦程度的战斗部壳体型面均能使破片在各自目标区域内的破片数量实现较大增益,分别达到了 1.44、1.23 和 0.48。

## 参考文献:

- [1] 卢芳云,李翔宇,林玉亮. 战斗部结构与原理 [M]. 北京:科学出版社,2009:112-129.
- [2] ZUKAS J A, WALTERS W P. Explosive effects and applications [M]. Springer, 2002.
- [3] 孙学清,张国伟,杨陕平. 定向战斗部破片飞散方向控制技术研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 102-104.  
SUN X Q, ZHANG G W, YANG S P. Study on fragments dispersing direction control of directional warhead [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(1): 102-104.
- [4] TAYLOR G I. Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1963: 277-286.

- [5] 隋树元,王树山. 终点效应学 [M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [6] HELD M. Velocity enhanced warheads [J]. Journal of Explosives and Propellants,2001,17(2):1-12.
- [7] 李晋庆,胡焕性. 聚焦型破片杀伤战斗部聚焦曲线的工程设计 [J]. 兵工学报,2004,25(5):529-531.  
LI J Q, HU H X. Engineering design of the focus curve of a fragmentation damaging warhead [J]. Acta Armamentarii,2004,25(5):529-531.
- [8] 李晋庆,胡焕性. 不同起爆方式对聚焦型战斗部聚焦性能影响的试验研究 [J]. 弹箭与制导学报,2004,24(1):43-45.  
LI J Q, HU H X. Experimental investigation on focus warhead by different ignition methods [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2004,24(1):43-45.
- [9] 黄广炎,冯顺山,刘沛涛. 基于战斗部微圆柱分析的破片飞散特性研究 [J]. 兵工学报,2010(增1):215-218.  
HUANG G Y, FENG S S, LIU P T. Research on dispersion characteristic of fragment based on micro-column analysis for warhead [J]. Acta armamentarii,2010(Suppl 1):215-218.
- [10] HUANG G Y, FENG S S, WANG F, et al. An optical design theory for focused fragmentation warhead [J]. Defence Science Journal,2012,62(4):205-211.
- [11] CHEN W, LI X, LU F, et al. Parallel control to fragments of a cylindrical structure driven by explosive inside [J]. Mathematical Problems in Engineering,2015(2):1-13.
- [12] 龚柏林. 爆炸式可变形战斗部的关键技术研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [13] BUITRAGO L B, SANTIUSTS C, SÁNCHEZ-SÁEZ S, et al. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact [J]. Composite Structure,2010,9(2):2090-2096.
- [14] 胡玉涛. 典型常规战斗部毁伤评估快速算法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.

## Axial Dispersion Control of Focusing Fragment Warhead

ZHANG Shaoxing, LI Xiangyu, DING Liangliang,  
ZHANG Zhenyu, LU Fangyun

(College of Science, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China)

**Abstract:** To improve the axial lethality of focusing fragment warhead, we carried out a research on the axial dispersing characteristics of prefabricated fragments. Based on the Shapiro formula theory, we designed the shell and improved the charge structure of warhead, and simulated its explosion process using the LS-DYNA software and ALE algorithm. Considering the axial distribution of fragments on the target, we analyzed the relationship between the charge structure, the shell curvature and the dispersing characteristics of fragments. The results indicate that the scattering of the fragments can be controlled effectively by deferring the curvature of the shell and using the “I”-shaped charge structure. Our work has been proved to benefit researches on the control and application of the fragments scattering of warhead.

**Keywords:** axial focusing warhead; shell design; charge structure; fragments scattering