

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0202

波形控制器对杀伤战斗部破片飞散特性影响研究*

刘 伟, 梁争峰, 阮喜军, 屈可朋
(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为提升杀伤战斗部破片轴向飞散的集中度, 提高战斗部的轴向杀伤威力, 提出使用波形控制器控制破片的飞散方向。基于爆轰波在波形控制器界面发生反射的规律以及 Shapiro 公式, 设计了波形控制器的形状, 使用 LS-DYNA 有限元软件和 ALE (arbitrary Lagrange-Euler) 算法对破片的飞散过程进行数值计算, 结合战斗部原理样机静爆试验, 验证了使用波形控制器改善破片飞散特性方法的合理性。对比了有无波形控制器时破片飞散过程的差异, 对无波形控制器以及波形控制器材料分别为尼龙、聚氨酯和聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 时杀伤战斗部的破片飞散速度和破片飞散角规律进行了分析。结果表明: 波形控制器可以减小战斗部中心和两端位置的破片飞散速度大小差异, 使中心到两端位置的破片飞散方向角变化均匀, 破片在轴向的分布更加均匀; 不同材料的波形控制器对破片飞散特性影响不同, 波形控制器的使用减小了破片飞散角, 增大了破片分布密度, 提升了破片飞散的集中度。破片飞散角数值计算值与试验计算值误差在 6.53% 之内, 与无波形控制器的杀伤战斗部原理样机相比, 含波形控制器且材料为尼龙、聚氨酯和 PTFE 的战斗部原理样机破片飞散角分别减小了 40.00%、44.00% 和 46.67%。

关键词: 杀伤战斗部; 波形控制器; Shapiro 公式; 破片飞散特性; 破片飞散速度; 破片飞散角
中图分类号: O389 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

A study on the influence of wave shape controller on fragment scattering characteristics of fragmentation warhead

LIU Wei, LIANG Zhengfeng, RUAN Xijun, QU Kepeng
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of the fragments of the fragmentation warhead and enhance the axial lethality of the warhead, it was proposed to use a wave shape controller to control the scattering direction of the fragments. The shape of the wave shape controller was designed based on the law of detonation wave reflection at the wave shape controller interface and the Shapiro formula. The LS-DYNA software and ALE (arbitrary Lagrange-Euler) algorithm were used to numerically simulate the scattering process of fragments, and the static explosion test of the warhead prototype was carried out to verify the rationality of using the wave shape controller to improve the scattering characteristic of fragments. The difference in the fragment scattering processes with and without the wave shape controller were compared. The law of fragment scattering velocity and scattering angle of the warhead was analyzed and summarized when there was no wave shape controller and when the wave shape controller materials were nylon, polyurethane and PTFE (polytetrafluoroethylene), respectively. The results show that the wave shape controller can reduce the difference in the scattering velocities of the fragments between the center and both ends of the warhead, and evenly change the direction angles of the fragments scattering from the center to both ends, so that the fragments are distributed more uniformly along the axial direction. The wave shape controllers made of different materials have different effects on the scattering characteristics of the fragments, while the use of the wave shape controller

* 收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-07-21
基金项目: 国防重大基础研究专项(05020501)
第一作者: 刘 伟(1992—), 男, 硕士研究生, 1091205427@qq.com
通信作者: 梁争峰(1972—), 男, 博士, 研究员, 20421zf@sohu.com

reduces the fragment scattering velocity, reduces the fragment scattering angle, and increases the fragment distribution density. The error between the numerical calculation values and experimental values of fragment scattering angle is within 6.53%. Compared with that without a wave shape controller, the fragment scattering angles of the warhead prototypes with the wave shape controller and the material is nylon, polyurethane and PTFE reduced by 40.00%, 44.00% and 46.67%, respectively.

Keywords: fragmentation warhead; wave shape controller; Shapiro formula; fragment scattering characteristic; fragment scattering velocity; fragment scattering angle

杀伤战斗部利用炸药爆炸产生的能量驱动破片高速飞散,对飞机、导弹等空中目标进行毁伤^[1]。传统的圆筒形杀伤战斗部在起爆后,两端和中心位置的破片飞散速度差异较大,在动态弹目交汇条件下,两端的破片容易脱靶,并且战斗部破片飞散角较大,破片沿轴向分布范围较大,沿目标方向分布密度较小,达不到预期的毁伤效果^[2-4]。因此,改善杀伤战斗部破片的飞散特性十分重要^[5]。

控制战斗部破片飞散特性的主要方法是改变战斗部的起爆方式、装药曲线和长径比等^[6-7]。李松楠等^[8]通过数值计算方法研究了起爆点位置对杀伤战斗部破片飞散角的影响,结果表明,在中心起爆时,适当减小起爆点与装药底端的距离可以提高破片的初速,减小破片的飞散角;张绍兴等^[9]基于 Shapiro 公式设计了 3 种不同曲率半径的战斗部壳体曲线,通过数值计算方法研究了壳体形状对破片飞散特性的影响,得到了壳体曲率半径增大、破片初速提高、破片飞散角增大的结论; Dhote 等^[10]对长径比分别为 0.8、1.2 和 1.8 的 3 种杀伤战斗部进行了破片飞散试验,结果表明,起爆方式相同时,长径比越大,破片飞散角越大。近年来,有学者提出使用波形控制器改变爆轰波波形,从而控制杆条破片的飞散状态。张会锁等^[11]对有波形控制器作用下的杆条破片战斗部的杆条初始抛撒状态进行了数值计算,结果表明,波形控制器能改变爆轰波波形,使爆轰波能量均匀地作用于杆条上,使杆条在初始飞散时受力均匀,变形弯曲减小。但与杆条不同的是,破片杀伤战斗部需要更精确地对破片的飞散方向进行控制。

本文中拟通过在主装药与破片之间增加波形控制器的方法控制破片飞散方向,改善破片飞散特性,并基于爆轰波在惰性材料中的反射理论和 Shapiro 公式设计波形控制器形状;并通过数值计算和试验验证该方法的合理性,分析对比有无波形控制器以及波形控制器选择不同材料时对破片飞散速度和破片飞散角的影响规律。

1 波形控制器设计

1.1 破片飞散角概念

战斗部破片飞散特性主要包括破片飞散速度和破片空间分布,破片空间分布通过破片飞散角表示。如图 1 所示,破片飞散角是指战斗部爆炸后,在战斗部轴向平面内,以质心为顶点所做的包含 90% 有效破片的角度,即破片飞散图中包含 90% 有效破片的两线之间的夹角^[12]。破片飞散角越小,目标方向上的破片分布密度越大,对目标的毁伤效应越明显,因此战斗部破片飞散角是衡量杀伤战斗部威力的重要参数之一^[13]。

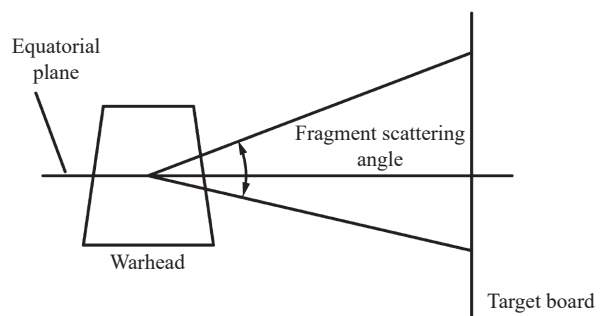


图 1 破片飞散角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fragment scattering angle

1.2 波形控制器曲线设计

波形控制器具有可压缩性, 当爆轰波在传播过程中遇到波形控制器边界时, 会使波形控制器材料发生变形, 而变形会显著地影响爆轰波的传播状态。爆轰波在界面处反射, 在爆轰产物中形成反射爆轰波, 并在波形控制器中形成斜冲击波。如图 2 所示, OA 为入射爆轰波, OR 为反射爆轰波, OB 为透射冲击波^[14]。

爆轰波阵面 OA 后的 CJ 面参数满足以下关系:

$$p_H = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2 \quad (1)$$

$$\rho_H = \frac{\gamma+1}{\gamma} \rho_0 \quad (2)$$

$$c_H = \frac{\gamma+1}{\gamma} D \quad (3)$$

$$u_H = \frac{1}{\gamma+1} D \quad (4)$$

式中: γ 为绝热指数, ρ_0 为炸药密度, D 为炸药爆速, p_H 为炸药爆轰流场压力, ρ_H 为炸药爆轰流场密度, c_H 为炸药爆轰流场声速, u_H 为炸药爆轰流场爆速。

(I) 区:

$$q_1 = c_H \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)^2 \cot^2 \varphi_0 + 1} \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \varphi_0}{\gamma \tan^2 \varphi_0 + (\gamma+1)} \quad (6)$$

式中: φ_0 为爆轰波入射角, q_1 为气体流动速度, θ 为气流偏转角。

(II) 区:

$$q_2 = \frac{\rho_H}{\rho_2} \frac{q_1 \sin \nu}{\sin[\nu - (\theta - \varepsilon)]} \quad (7)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_H} = \frac{(\gamma+1)M_1^2 \sin^2 \nu}{(\gamma-1)M_1^2 \sin^2 \nu + 2} \quad (8)$$

$$\frac{p_2}{p_H} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 \sin^2 \nu - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (9)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{\left(1 + \frac{\rho_H}{\rho_2} \tan \nu\right) \tan \theta - \left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_2}\right) \tan \nu}{\left(1 - \frac{\rho_H}{\rho_2} \tan \nu\right) \tan \theta + \left(1 + \frac{\rho_H}{\rho_2}\right) \tan \nu} \quad (10)$$

式中: $M_1 = \frac{q_1}{c_H}$, ε 为波形控制器材料变形角, q_2 为 (II) 区气体流动速度, ρ_2 为 (II) 区密度, p_2 为 (II) 区气体压力, ν 为 q_1 与 q_2 气流的夹角。

(III) 区:

$$q_m = \frac{\rho_{m0}}{\rho_m} \frac{D \sin \varphi_3}{\sin \varphi_0 \sin(\varphi_3 - \varepsilon)} \quad (11)$$

$$p_m = \rho_{m0} \frac{D^2}{\sin^2 \varphi_0} \sin^2 \varphi_3 \left(1 - \frac{\rho_{m0}}{\rho_m}\right) \quad (12)$$

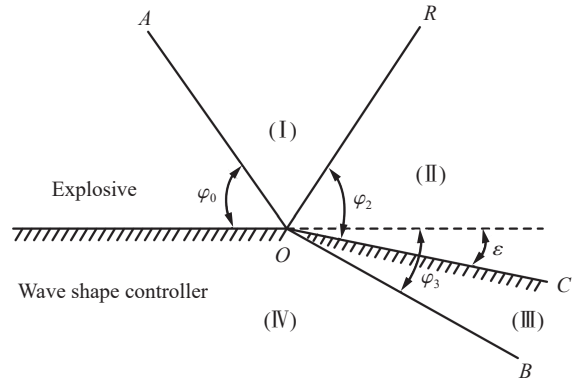


图 2 爆轰波在波形控制器界面上的反射与透射
Fig. 2 Reflection and projection of detonation wave on wave shape controller interface

$$\frac{\rho_{m0}}{\rho_m} = \frac{b-1}{b} + \frac{a}{b} \frac{\sin \varphi_0}{D \sin \varphi_3} \quad (13)$$

$$\tan \varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{\rho_{m0}}{\rho_m}\right) \tan \varphi_3}{1 + \frac{\rho_{m0}}{\rho_m} \tan^2 \varphi_3} \quad (14)$$

式中: ρ_{m0} 为波形控制器材料初始密度, q_m 为(III)区气体流动速度, ρ_m 为(III)区密度, p_m 为(III)区气体压力, φ_3 为透射冲击波与界面夹角, a 、 b 为与材料性质有关的常数, 可根据试验得到, 其 Hugoniot 关系为:

$$D_m = a + bu_m \quad (15)$$

最后根据界面处的压力连续条件可得:

$$p_2 = p_m \quad (16)$$

联立式(11)~(16)可求解出爆轰波在波形控制器中透射的斜冲击波与界面的夹角 φ_3 和冲击波在波形控制器中的传播速度。然后结合 Shapiro 公式, 由数值拟合的方法得到波形控制器曲线。

Shapiro 公式为:

$$\tan \theta_s = \frac{v_0}{2D_e} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 + \theta_2 \right) \quad (17)$$

式中: θ_1 为壳体法线方向与战斗部中心轴线的夹角, θ_2 为爆轰波阵面法线方向与中心轴线的夹角, θ_s 为破片速度矢量偏离壳体法线的夹角, 如图 3 所示。

波形控制器曲线设计思路如图 4 所示, 图中点 O 为起爆点, OA 为入射爆轰波, AB 为波形控制器中的透射冲击波, D 为 AB 的延长线与战斗部中心轴线的交点, BC 为破片飞散方向, n_1 为波形控制器曲线在点 A 处的法线方向, F 为 n_1 与战斗部中心轴线的交点, n_2 为破片法线方向, E 为 n_2 与战斗部中心轴线的交点。根据式(1)~(16)可以计算出透射冲击波的传播方向, 则根据几何关系可以计算出 θ_2 和 θ_3 , 而 $\theta_1 = 90^\circ$ 恒成立, 然后将炸药爆速和破片飞散速度代入式(17), 就能计算出每个破片速度方向偏离壳体法线的夹角 θ_s 。采用微元法, 以战斗部中心轴线为 y 轴, 以战斗部中心 O 为坐标原点建立平面直角坐标系, 设战斗部长度为 L , 直径为 D , 波形控制器微元长度为 l , 则波形控制器微元 1 上端点 M_1 的坐标为 $\left(\frac{D}{2}, \frac{L}{2}\right)$, θ_2 和 θ_3 已计算出, 由几何关系可得:

$$\theta_4 = \theta_2 + \theta_3 \quad (18)$$

则微元 1 的下端点 M_1 坐标 $\left(\frac{D}{2} + l \cos \theta_4, \frac{L}{2} - l \sin \theta_4\right)$ 。同理, 可以得到所有波形控制器微元 M 的坐标, 根据预先设计的战斗部的破片飞散角, 计算出每个破片的飞散方向, 与 θ_s 对比, 修正 M 点坐标, 最后由数值拟合的方法得到波形控制器曲线。

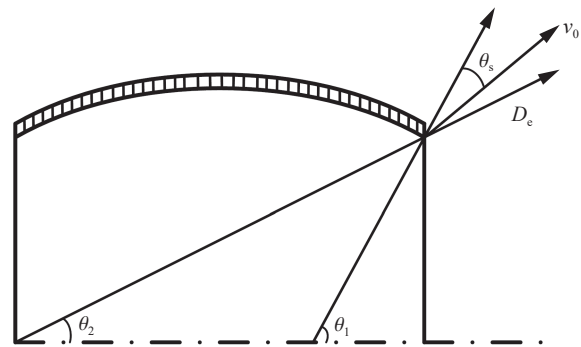


图 3 Shapiro 公式计算示意图

Fig. 3 Shapiro formula calculation diagram

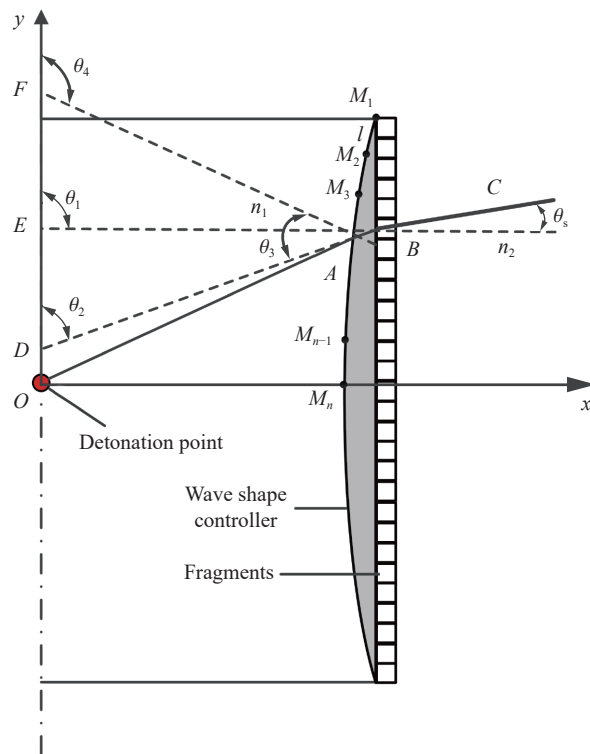


图 4 波形控制器曲线设计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wave shape controller curve design

所设计的杀伤战斗部长度为 200 mm、直径为 160 mm, 结合以上方法设计了波形控制器材料为尼龙、战斗部飞散角理论值为 10°的波形控制器模型, 如图 5 所示。

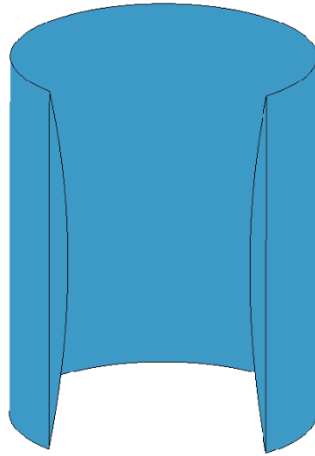


图 5 波形控制器模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wave shape controller model

2 数值模拟

2.1 数值计算模型

采用 SOLIDWORKS 软件建立杀伤战斗部有限元模型, 并使用 HyperMesh 软件划分网格。采用 LS-DYNA 软件计算杀伤战斗部的破片飞散过程, 并采用 LS-Prepost 后处理软件进行分析。建立的杀伤战斗部数值计算模型如图 6 所示, 该模型由不锈钢壳体、铝合金前后端盖、波形控制器、HMX 主装药, 800 枚立方体预制钢破片和空气组成, 外形尺寸与第 1 节中设计的杀伤战斗部原理样机相同, 破片尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm。使用 ALE (arbitrary Lagrange-Euler) 算法建模, 壳体、前后端盖、波形控制器和破片采用 Lagrange 网格, 主装药和空气采用 Euler 网格, 使用多物质流固耦合算法进行计算, 该方法可以降低 Lagrange 与 Euler 网格相互作用出现网格畸变的概率。空气网格边界施加压力外流边界条件, 以模拟无限大空气域, 防止压力在边界反射影响破片飞散特性的计算。

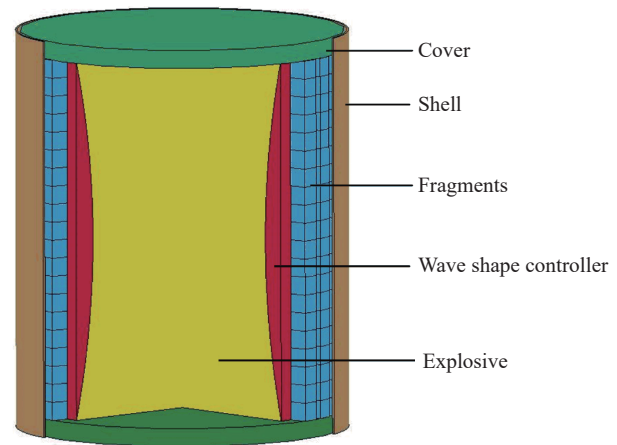


图 6 杀伤战斗部数值计算模型

Fig. 6 Numerical calculation model of fragmentation warhead

2.2 材料参数

主装药为 HMX 炸药, 采用高能炸药燃烧材料模型 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程来描述主装药的爆轰过程。JWL 状态方程可精确描述炸药在爆轰驱动过程中气体产物压力随体积和初始能量的变化关系, JWL 状态方程为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (19)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为输入参数, E 为初始内能。采用 m-kg-s 单位制建立数值计算模型, 模型具体参数如表 1 所示^[15-16]。

表 1 数值计算模型参数^[15-16]
 Table 1 Parameters of numerical calculation model^[15-16]

组件	材料	LS-DYNA材料类型、材料参数					
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC							
壳体	钢	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服应力/GPa	切线模量/GPa	参数 β
		7 850	210	0.3	0.885	1.95	1.0
*MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK							
端盖	铝合金	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比			
		2 760	73.0	0.33			
*MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO							
	尼龙	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	屈服应力/GPa			
		1 130	2.70	0.12			
*MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO							
波形控制器	聚氨酯	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	屈服应力/GPa			
		1 100	2.20	0.05			
*MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO							
	PTFE	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	屈服应力/GPa			
		2 160	2.33	0.05			
*MAT_ELASTIC							
破片	钢	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/GPa	泊松比			
		7 890	206.9	0.3			
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN							
主装药	HMX	密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(km·s ⁻¹)	爆压/GPa			
		1 891	9.11	42			

根据表 1 中的数值计算模型参数建立了 4 种杀伤战斗部数值计算模型, 其中不含波形控制器的模型记为 A₁, 含波形控制器且波形控制器材料为尼龙、聚氨酯、聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)的模型分别记为 A₂、A₃、A₄。除波形控制器参数不同外, 4 种模型的其余部分结构与材料参数都相同。

2.3 数值计算结果分析

对模型 A₁、A₂、A₃、A₄ 的破片飞散过程进行数值计算, 计算时长 300 μ s, 起爆方式都采用中心点起爆。其中模型 A₁ 破片的飞散过程如图 7 所示, 模型 A₂ 的破片飞散过程如图 8 所示。

2.3.1 破片飞散速度

对破片正视图最前列的 20 枚破片按 1~20 的顺序从下至上依次编号。根据数值计算结果, 得到模型 A₁ 和 A₂ 中编号 1~20 的破片速度与破片编号变化关系分别在 $t=20, 30, 50, 100 \mu$ s 时的图像, 如图 9 所示。

由破片飞散过程图可以看出, 不含波形控制器的模型 A₁ 与含波形控制器的模型 A₂ 的破片空间分布和破片速度差异较大: 对于 A₁, 刚起爆时两端和中心位置破片速度较小, 之后中心位置的破片速度不断增大, 在约 50 μ s 后, 破片速度呈现出中间大两端小的分布; 而对于 A₂, 刚起爆时中心位置破片速度较小, 两端破片速度较大, 之后中心位置的破片速度不断增大, 在约 50 μ s 后, 所有位置破片速度几乎相同。因此波形控制器减小了不同位置破片稳定后的飞散速度差异, 改善了破片飞散速度的一致性。

模型 A₁~A₄ 的破片速度随时间的变化关系如图 10 所示, 其中正视图最前列 20 枚破片飞散速度的平均值如表 2 所示。

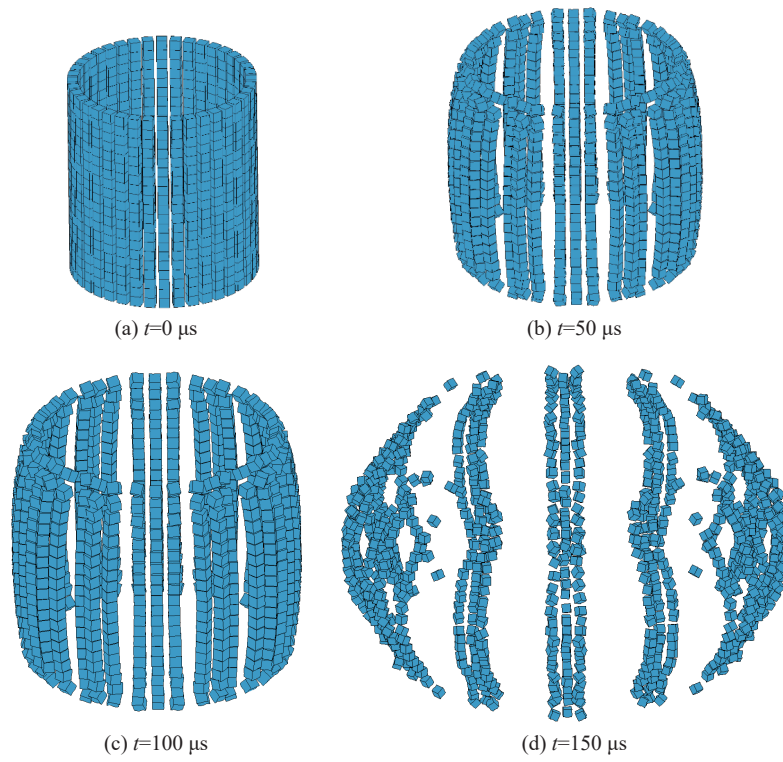


图 7 战斗部数值模型 A₁ 的破片飞散过程

Fig. 7 Fragment scattering process of warhead numerical model A₁

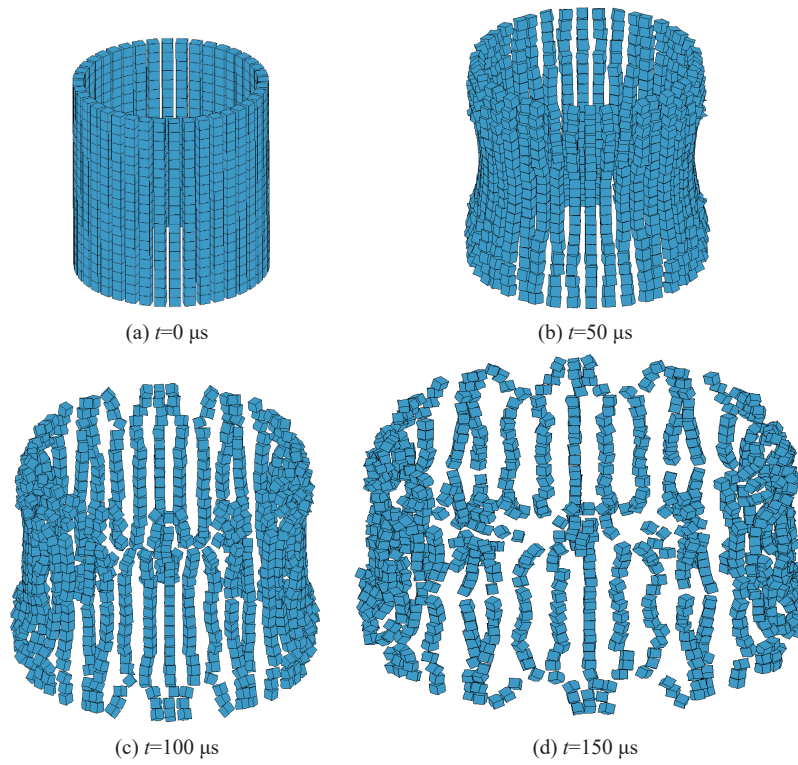


图 8 战斗部数值模型 A₂ 的破片飞散过程

Fig. 8 Fragment scattering process of warhead numerical model A₂

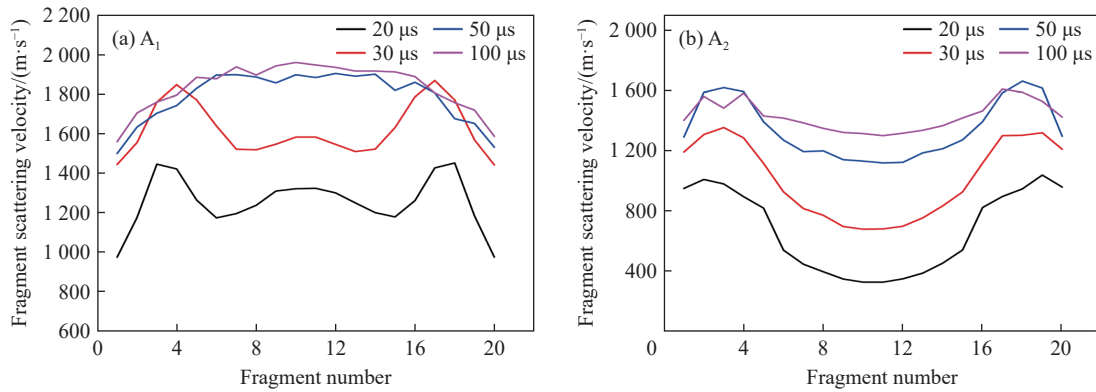


图 9 战斗部数值模型破片速度与破片的关系

Fig. 9 Relationship between fragment scattering velocity and fragment number of warhead numerical model

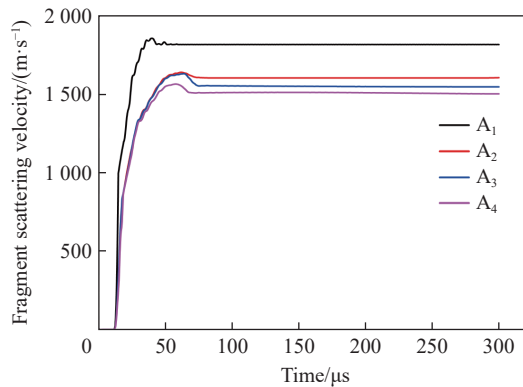


图 10 破片飞散速度与时间的关系

Fig. 10 Relationship between fragment scattering velocity and time

表 2 破片飞散速度数值计算结果

Table 2 Numeral calculation results of fragment scattering velocity

战斗部计算模型	波形控制器材料	破片飞散速度最大值/(m·s ⁻¹)	速度降低百分比/%
A ₁	无	1813.7	0
A ₂	尼龙	1602.3	11.66
A ₃	聚氨酯	1549.4	14.57
A ₄	PTFE	1510.5	16.72

由图 10 和表 2 可知: 波形控制器降低了破片飞散速度, 与无波形控制器的杀伤战斗部数值计算模型相比, 含波形控制器材料为尼龙、聚氨酯和 PTFE 的战斗部数值计算模型破片飞散速度分别降低了 11.66%、14.57% 和 16.72%。

2.3.2 破片飞散角

对模型 A₁~A₄ 的破片空间分布进行统计分析和计算, 得到破片飞散角结果。为研究波形控制器对战斗部不同位置破片的飞散方向角的影响, 统计了模型 A₁ 和 A₂ 中某一系列破片的飞散方向角与破片编号的关系, 如图 11 所示。统计所有列破片的飞散方向角, 计算得到破片飞散角, 破片飞散角与战斗部计算模型编号的关系如图 12 所示。

由以上分析可以得到如下结论: 通过数值计算分析, 波形控制器可以有效地控制破片飞散方向, 所设计的波形控制器减小了战斗部数值计算模型的破片飞散角; 不含波形控制器的战斗部破片轴向空间分布在中心位置密度大, 两端密度小, 而含波形控制器的战斗部破片在轴向分布更均匀; 与无波形控制器的杀伤战斗部数值计算模型相比, 含波形控制器材料为尼龙、聚氨酯和 PTFE 的战斗部数值计算模型破片破片飞散角分别减小了 34.66%、41.22% 和 43.51%。

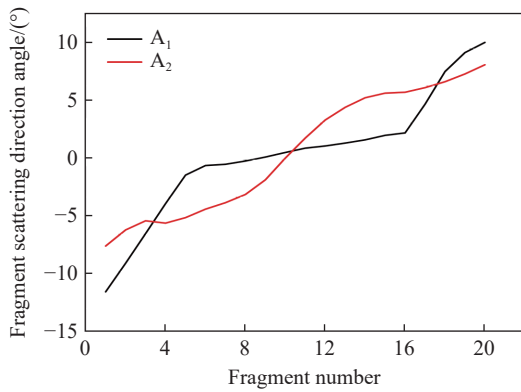


图 11 破片飞散方向角与破片的关系

Fig. 11 Relationship between fragment scattering direction angle and fragment number

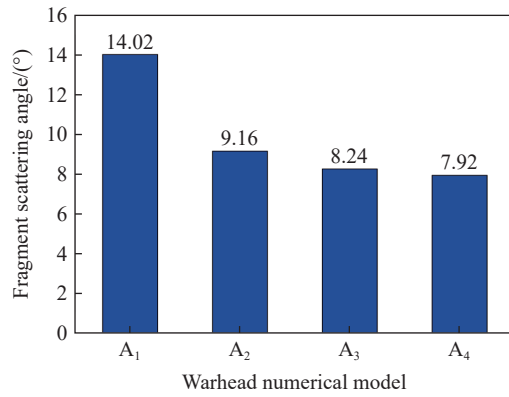


图 12 数值计算破片飞散角柱状图

Fig. 12 Histogram obtained from numeral calculation of fragment scattering angle

3 试验验证

为了验证波形控制器控制破片飞散特性的合理性和战斗部数值计算结果的准确性, 设计了相同参数的杀伤战斗部原理样机, 进行地面静爆试验来获得破片飞散特性参数。

3.1 试验设计

设计了 4 发战斗部原理样机, 战斗部原理样机照片如图 13 所示, 长度为 200 mm、外径 160 mm, 由钛合金壳体、800 枚全预制钢破片、主装药、波形控制器及前后端盖等组成。中心起爆预留的圆筒设计为两端对称且直径很小的形状, 对战斗部破片飞散角几乎无影响; 预留圆筒使装药量减少, 会使破片飞散速度降低, 但影响很小。

战斗部原理样机地面静爆试验靶场布局由战斗部、弹架、钢靶板、高速摄影相机、测速系统等组成, 如图 14 所示。主靶板采用弧长 10 m、半径 10 m、高 3 m、厚 10 mm 的 Q235A 钢板, 副靶板采用弧长 7.5 m、半径 6 m、高 2 m、厚 6 mm 的 Q235A 钢板, 两块靶板上分别分布有 4 路测速靶。



图 13 杀伤战斗部原理样机照片

Fig. 13 Photo of a prototype of the fragmentation warhead

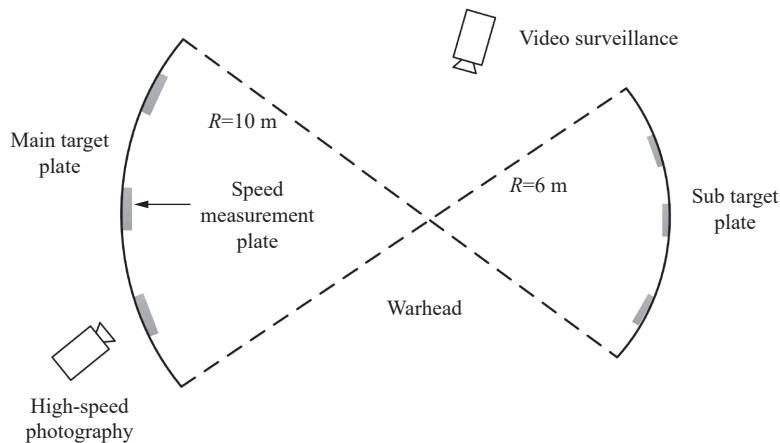


图 14 靶场布局示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the layout of the shooting range

3.2 试验结果

3.2.1 破片飞散速度

采用通断靶法测量破片飞散速度, 其中 A₂ 战斗部原理样机的高速摄影照片如图 15 所示。

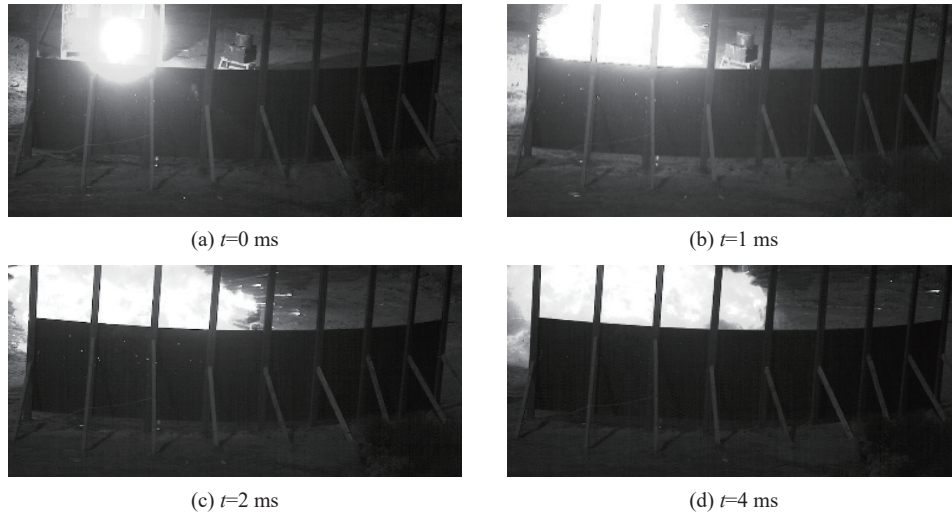


图 15 静爆试验高速摄影照片(战斗部 A₂)

Fig. 15 High-speed photography of static explosion test (warhead A₂)

由静爆试验得到的 A₁~A₄ 战斗部原理样机的破片飞散速度与数值计算得到的破片飞散速度对比如表 3 所示, 破片飞散速度试验值与战斗部编号的关系如图 16 所示。

表 3 静爆试验与数值计算破片飞散速度对比

Table 3 Comparison of fragment scattering velocity values between static explosion test and numerical calculation

战斗部样机	静爆试验破片飞散速度/(m·s ⁻¹)	数值模拟破片飞散速度/(m·s ⁻¹)	数值计算值与试验值误差/%
A ₁	1891.9	1813.7	4.13
A ₂	1695.1	1602.3	5.47
A ₃	1633.3	1549.4	5.14
A ₄	1591.3	1510.5	5.08

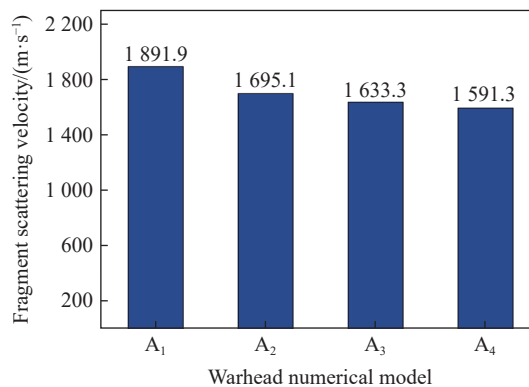


图 16 静爆试验破片飞散速度柱状图

Fig. 16 Histogram of fragment scattering velocity in static explosion test

由上述分析可以得到以下结论: 战斗部破片速度的数值计算值与试验值误差在 5.47% 之内, 在含有波形控制器的战斗部原理样机中, 波形控制器材料为尼龙时破片飞散速度最大, 为聚氨酯时破片飞散速

度次之, 为 PTFE 时破片飞散速度最小; 与无波形控制器相比, 含波形控制器的杀伤战斗部原理样机破片飞散速度均有所降低, 波形控制器材料为尼龙、聚氨酯和 PTFE 的破片飞散速度分别降低了 10.40%、13.67% 和 15.89%。

3.2.2 破片飞散角

统计了战斗部原理样机 $A_1 \sim A_4$ 的破片在威力半径 10 m 处钢靶板上的破片分布情况, 其中 A_2 破片在靶板上的分布如图 17 所示, 根据破片在靶板上的分布情况, 统计出破片的轴向分布情况, 如图 18 所示, 计算得到战斗部原理样机的破片飞散角结果, 如表 4 所示。



图 17 威力半径 10 m 处破片分布图(战斗部 A_2)

Fig. 17 Distribution map of fragments with a power radius of 10 m (warhead A_2)

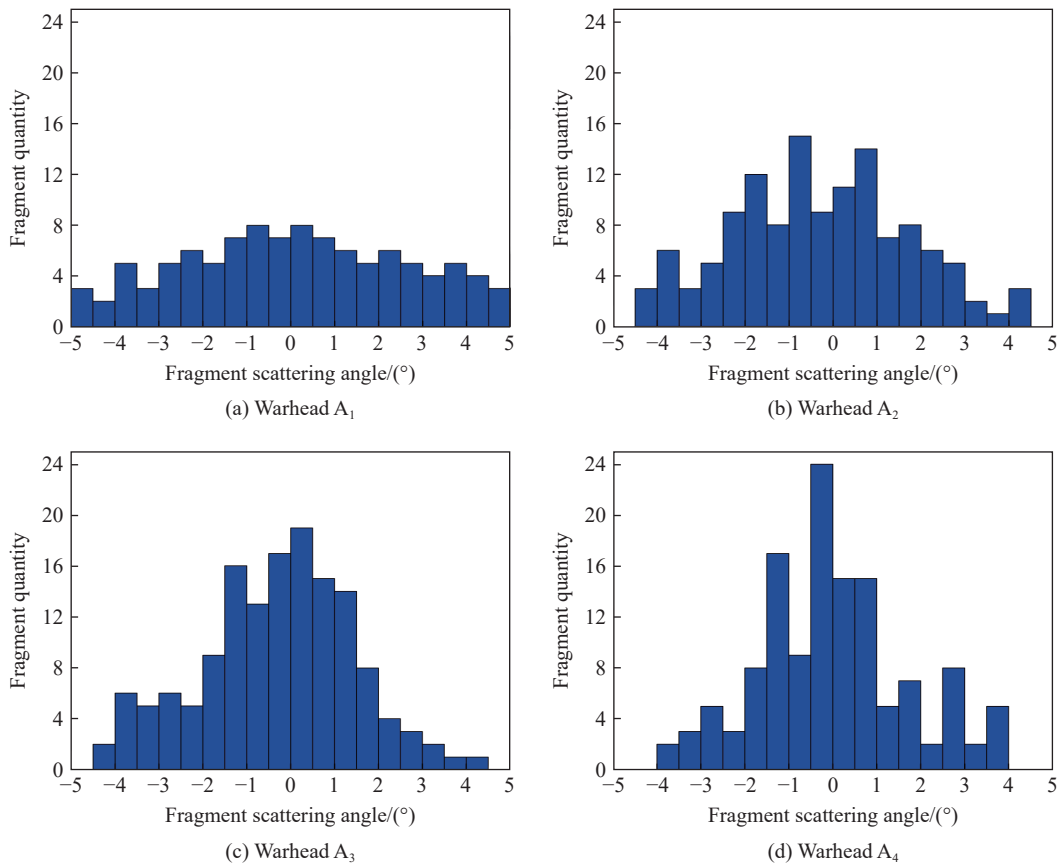


图 18 破片轴向分布柱状图

Fig. 18 Histogram of fragment axial distribution

由上述分析可以得到如下结论: 根据战斗部原理样机静爆试验结果, 所设计的波形控制器减小了战斗部原理样机的破片飞散角, 破片飞散角数值计算值与试验计算值误差在 6.53% 之内; 与无波形控制器

的杀伤战斗部原理样机相比,含波形控制器且材料为尼龙、聚氨酯和 PTFE 的战斗部原理样机破片破片飞散角分别减小了 40.00%、44.00% 和 46.67%。

表 4 静爆试验与数值计算破片飞散角值对比

Table 4 Comparison of fragment scattering angle values between static explosion test and numerical calculation

战斗部样机	破片飞散角试验计算值/(°)	破片飞散角数值计算值/(°)	试验计算值与数值计算值误差/%
A ₁	15.00	14.02	6.53
A ₂	9.00	9.16	-1.78
A ₃	8.50	8.24	3.06
A ₄	8.00	7.92	1.00

4 结 论

提出通过在主装药与破片之间增加波形控制器的方法改善杀伤战斗部破片飞散特性,并通过数值计算和试验验证了该方法的合理性,并得到以下结论。

(1) 验证了提出的波形控制器曲线设计方法的合理性,波形控制器材料为尼龙时,战斗部飞散角数值计算值与理论设计值误差为 8.40%,战斗部飞散角试验值与理论设计值的误差为 10.00%。

(2) 波形控制器可以减小杀伤战斗部破片飞散速度差异,使破片在轴向的空间分布更均匀,改善了破片轴向飞散一致性。

(3) 与无波形控制器相比,波形控制器材料分别为尼龙、聚氨酯和 PTFE 时,杀伤战斗部破片速度数值计算值分别减小了 11.66%、14.57% 和 16.72%,破片速度试验测量值分别减小了 10.40%、13.67% 和 15.89%,不同材料波形控制器的破片速度由大到小依次为:尼龙、聚氨酯、PTFE。

(4) 与无波形控制器相比,波形控制器材料分别为尼龙、聚氨酯和 PTFE 时,杀伤战斗部破片飞散角数值计算值分别减小了 34.66%、41.22% 和 43.51%,破片飞散角试验计算值分别减小了 40.00%、44.00% 和 46.67%,不同材料波形控制器的破片速度由大到小依次为:尼龙、聚氨酯、PTFE,波形控制器可以有效减小破片飞散角,增加破片分布密度。

参考文献:

- [1] 唐娇姣, 梁争峰, 陈元建. 防空反导毁伤技术现状与发展 [J]. *弹箭与制导学报*, 2020, 40(1): 35–39, 45. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2020.01.008.
TANG J J, LIANG Z F, CHEN Y J. Present situation and development of air defense and antimissile damage technology [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(1): 35–39, 45. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2020.01.008.
- [2] 王宝成, 袁宝慧. 防空反导破片杀伤战斗部现状与发展 [J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(9): 20–24. DOI: 10.11809/scbgxb2013.09.007.
WANG B C, YUAN B H. Research states and trend of fragment warhead for air-defense and anti-missile [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2013, 34(9): 20–24. DOI: 10.11809/scbgxb2013.09.007.
- [3] 李付刚, 梁民族, 李翔宇, 等. 杀伤爆破战斗部杀伤威力的多目标优化 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(S1): 11–21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.002.
LI F G, LIANG M Z, LI X Y, et al. Multi-objective optimization of lethal power of blast-fragmentation warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(S1): 11–21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.S1.002.
- [4] ZHU J J, ZHENG Y, LI W B, et al. Axial distribution of fragments from the dynamic explosion fragmentation of metal shells [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 123: 140–146. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.020.
- [5] 李茂, 高圣智, 侯海量, 等. 圆柱形装药驱动轴向预制破片飞散特性 [J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(2): 141–147. DOI: 10.11887/j.cn.202102019.
LI M, GAO S Z, HOU H L, et al. Projection characteristics of axial prefabricated fragments driven by cylindrical charge [J].

- Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(2): 141–147. DOI: 10.11887/j.cn.202102019.
- [6] PANOWICZ R, KONARZEWSKI M, TRYPOLIN M. Analysis of the detonation initiation point position influence on the cylindrical fragmentation warhead effectiveness [J]. *Journal of KONES*, 2016, 23(1): 263–270. DOI: 10.5604/12314005.1213585.
- [7] CHEN W K, LI X Y, LU F Y, et al. Parallel control to fragments of a cylindrical structure driven by explosive inside [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 723463. DOI: 10.1155/2015/723463.
- [8] 李松楠, 张国伟, 崔小杰, 等. 起爆点位置对破片飞散方向的影响研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(11): 49–53. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2018.11.011.
- LI S N, ZAHNG G W, CUI X J, et al. Influence of the location of the detonating point on the dispersion direction of fragments [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(11): 49–53. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2018.11.011.
- [9] 张绍兴, 李翔宇, 丁亮亮, 等. 聚焦式战斗部破片轴向飞散控制技术 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlb.20170512.
- ZHANG S X, LI X Y, DING L L, et al. Axial dispersion control of focusing fragment warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlb.20170512.
- [10] DHOTE K D, MURTHY K P S, RAJAN K M, et al. Statistics of fragment dispersion by explosion in a fragment generator warhead [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2016, 13(1): 183–197. DOI: 10.22211/cejem/64971.
- [11] 张会锁, 刘晓蕾, 罗旭. 波形控制器对杆条破片反导战斗部初始抛撒状态的影响 [J]. *战术导弹技术*, 2015(2): 106–112. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2015.02.19.
- ZHANG H S, LIU X L, LUO X. Research on the influence of the initial scattering state of the pole type anti-ballistic missile warhead by controlled shock wave [J]. *Tactical Missile Technology*, 2015(2): 106–112. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2015.02.19.
- [12] 王树山. 终点效应学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2019.
- WANG S S. Terminal effects [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019.
- [13] 谭振, 陈鹏万, 周强, 等. 战斗部轴向威力的增强 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 876–882. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0342.
- TAN Z, CHEN P W, ZHOU Q, et al. Enhancement of axial lethality of warhead [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 876–882. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0342.
- [14] MA Y, HE Y, WANG C T, et al. Influence of lining materials on the detonation driving of fragments [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(3): 1337–1350. DOI: 10.1007/s12206-022-0223-6.
- [15] 余庆波, 王海福, 金学科, 等. 缓冲材料对活性破片战斗部爆炸驱动影响分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(2): 121–126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.02.003.
- YU Q B, WANG H F, JIN K X, et al. Influence of buffer material on explosive driven of reactive fragment warhead [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(2): 121–126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.02.003.
- [16] 王爽, 陈放, 王磊. 考虑衬层/隔层的爆炸驱动金属颗粒飞散特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(3): 87–93. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.013.
- WANG S, CHEN F, WANG L. Dispersion characteristics of tungsten carbide particles driven by explosion considering interlayer/liner [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(3): 87–93. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.013.

(责任编辑 曾月蓉)