

起爆方式对复合战斗部毁伤输出的影响

周唯潇, 王雅君, 于佳鑫, 朱新元, 李伟兵

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了进一步提高复合战斗部的毁伤输出效率, 基于一种可形成聚能侵彻体、预制破片和自然破片3种毁伤元的破甲杀伤复合战斗部结构, 应用LS-DYNA数值仿真软件, 研究了起爆点位置、起爆直径和起爆点数量对复合战斗部各毁伤元成型和能量输出的影响, 讨论了实现战斗部毁伤威力可调的技术路径。结果表明: 起爆点距药型罩越远、数量越多、起爆直径越大, 由药型罩形成的聚能侵彻体的头部速度越高, 头尾速度差和长径比越大, 速度增益最高可达50%, 可以实现爆炸成型弹丸(EFP)到聚能杆式侵彻体(JPC)转换; 在装药内部轴线阵列多点起爆时, 聚能侵彻体的成型基本仅与离药型罩最近的起爆点有关。对于预制破片, 装药高度60 mm (P_2) 处起爆速度最快, 增加起爆点数量和增大起爆直径可以有效提高预制破片的最高速度, 但整体上最低速度仍在600 m/s上下波动, 变化并不显著。对于壳体形成的自然破片, 以平均速度来表征时, 整体变化并不明显, 速度增益不足10%, 但合理的起爆方式可使壳体断裂形成的自然破片更均匀, 有利于调整破片质量分布。通过控制起爆方式可在一定程度上实现复合战斗部毁伤威力可调, 但对于破片速度的调控仍需进一步研究。

关键词: 复合战斗部; 成型装药; 爆炸成型弹丸; 破片; 起爆方式

中图分类号: O389; TJ410

文献标识码: A

针对现代战场环境毁伤目标多样化的需求, 具备多毁伤元打击能力的复合战斗部(Composite warhead)应运而生。复合战斗部将多种不同的战斗部(如破片战斗部、爆炸成型弹丸和空心装药战斗部等)结合在一起, 可以同时多种目标进行有效打击, 战斗部利用效率高、通用化程度高、适应性强, 已成为目前战斗部技术发展的一个重要方向。

近年来, 针对复合毁伤战斗部的研究逐渐增多。王利侠等^[1]利用新型薄型波形控制器、半预制壳体和精密破甲战斗部技术, 设计了破甲/杀伤多用途战斗部, 使单兵战斗部在基本保持原有穿深威力的基础上, 增加了杀伤功能。李兴隆等^[2]则在此基础上, 进一步研究了战斗部装填系数(装药质量与壳体质量之比)对破片杀伤半径和成型射流破甲深度的影响。然而, 更多的复合战斗部还是通过在原有聚能战斗部上增设预制破片, 实现聚能侵彻和破片杀伤相结合。张俊等^[3]提出了一种轴向爆炸成型弹丸(Explosively formed projectile, EFP)、周向预制破片的新型破甲杀伤复合战斗部结构, 并仿真分析了该结构下EFP的成型性能与破片场的杀伤威力。龚柏林等^[4]提出了一种将预制破片周向分布在药型罩端面的复合战斗部结构, 使预制破片与EFP均沿轴线飞行。基于此类结构, 常江等^[5]对药型罩设计参数进行了针对性的优化; 董晓亮等^[6]分析了预制破片类型、直径、材料、间距等对复合毁伤元战斗部发散角的影响; Ji等^[7]分析了Ta-2.5W合金药型罩和钨铬合金预制破片的可行性及性能。此外, 陈闯等^[8]基于战斗部毁伤威力可控技术, 进一步提出了一种外围采用刻槽壳体且可展开不同角度的EFP战斗部,

* 收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(11972018); 装备预研兵器工业联合基金(6141B012858)

作者简介: 周唯潇(1999—), 男, 本科, 主要从事战斗部设计研究. E-mail: 214809166@qq.com

通信作者: 李伟兵(1982—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事高效毁伤技术研究.

E-mail: njustlwb@163.com

并对 EFP 和预控破片群相结合的复合破片场成型过程进行了数值模拟研究,分析了中心与外围装药量、外围装药起爆位置、展开角度对复合破片场成型特性的影响。总体而言,当前研究多集中于战斗部结构本身的影响及优化,较少从起爆能量的角度分析其毁伤效能。

为了进一步提高复合战斗部的能量输出效率,本研究利用 LS-DYNA 数值仿真软件,研究起爆点位置、起爆直径和起爆点数量对复合战斗部所形成的聚能侵彻体、自然破片和预制破片 3 种毁伤元成型及性能的影响,讨论实现战斗部毁伤威力可调的技术路径。

1 战斗部计算模型及研究方案

1.1 战斗部结构模型

本研究中的复合战斗部主要包括主装药、药型罩、预制破片、壳体等部分,可形成聚能侵彻体、预制破片和自然破片 3 种毁伤元。其装药口径 D_k 为 100 mm,装药高度为 90 mm。药型罩采用弧锥结合结构,锥角 155° ,曲率半径 55 mm,罩厚 4.3 mm;预制破片为方块,边长为 8 mm,共 9 排 324 枚;壳体厚度为 4 mm,具体结构如图 1 所示。

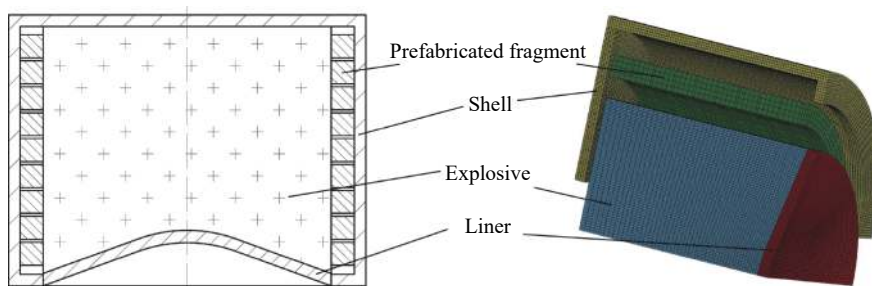


图 1 战斗部结构及仿真模型

Fig. 1 Schematic diagram and simulation model of warhead

主装药为 JH-2 炸药,采用 High_Explosive_Burn 模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程表示为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为输入参数, V 为相对体积, e_0 为炸药材料的初始比内能。炸药材料参数如表 1^[9] 所示,其中: ρ_e 为炸药密度, D 为爆速, p_{C-J} 为 C-J 爆轰压力。

表 1 炸药材料参数^[9]

Table 1 Material parameters of explosive^[9]

Material	$\rho_e/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{C-J}/GPa	A/GPa	B/GPa	V_0
JH-2	1.695	8425	29.66	854.5	20.5	1

空气选用 Null 材料模型和 Grüneisen 状态方程描述。对于压缩材料, Grüneisen 状态方程表示为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} \quad (2)$$

对于膨胀材料,则式(2)进一步表征为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (3)$$

式中: C 为材料的静态体积声速; S_1 、 S_2 、 S_3 为系数; γ_0 为 Grüneisen 常数; $\mu = \rho_a / \rho_0 - 1$, ρ_a 为空气密度, ρ_0 为空气初始密度; a 为 γ_0 的一阶体积修正, E 为空气的初始比内能。空气材料参数如表 2^[9] 所示。

表 2 空气材料参数^[9]
Table 2 Material parameters of air^[9]

Material	$\rho_a/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	γ_0	S_1	S_2	S_3
Air	1.205×10^{-3}	344	1.4	0	0	0

金属部件主要包括药型罩、预制破片和壳体,所用材料分别为紫铜、钨合金和 45 钢。毁伤元成型过程属于典型的高温、高应变过程,因此选择 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程描述。Johnson-Cook 本构方程式表示为

$$\sigma_y = (\sigma + b\bar{\epsilon}_p^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (4)$$

式中: σ_y 为材料的流动屈服强度, σ 为准静态下的屈服应力, b 为应变硬化系数, c 为应变率相关系数, m 为温度相关系数, n 为应变硬化指数, $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲化后的等效塑性应变率, T^* 为无量纲温度。金属材料参数见表 3^[10], 其中: ρ 为材料密度, G 为剪切模量。

表 3 金属材料参数^[10]
Table 3 Material parameters of metal^[10]

Part	Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	σ/MPa	b/MPa	n	c	m
Liner	Copper	8.96	47.7	90	292	0.31	0.025	1.09
Prefabricated fragment	Tungsten alloy	17.60	136.0	1 506	177	0.12	0.016	1.00
Case	45 steel	7.83	77.0	792	510	0.26	0.014	1.03

1.2 数值仿真方案

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对复合毁伤元战斗部的成型过程进行数值模拟。考虑到模型为轴对称结构,取 1/4 结构建立三维模型。数值模拟过程采用 ALE 算法,其中药型罩、炸药、空气选择 Euler 网格;预制破片及壳体采用 Lagrange 网格,置于 Euler 网格中。Euler 网格与 Lagrange 网格之间采用流体/结构耦合方式^[9]。具体的网格划分为:药型罩径向 60 等分,厚度划分为 6 份,共 16 200 个网格;装药径向同样 60 等分,轴线划分为 50 份,共 135 000 个网格;空气与装药、药型罩相接位置划分方式一致;其他位置网格大小沿 EFP 成型方向分别取 1.5、2.0 和 3.0 mm,共 1 035 600 个网格;预制破片网格大小为 0.2 mm,共 5 184 个网格;考虑自然破片的形成,壳体网格大小取 1.0 mm,共 62 928 个网格。

预制破片和壳体之间采用自动面-面接触方式,钨球定义为自动单面接触^[6]。为避免压力在边界面反射,在整个空气计算域的周围表面定义无反射边界。考虑到战斗部作用过程属于典型爆炸问题,时间步长取 $0.67 \mu\text{s}$ 。

本研究主要分析起爆点位置、起爆直径和起爆点数量对复合战斗部毁伤元成型及性能的影响,涉及到的起爆形式主要包括:端面单点起爆、端面多点起爆、轴线多点同步起爆、轴线阵列多点同步起爆等,起爆方式如图 2 所示。

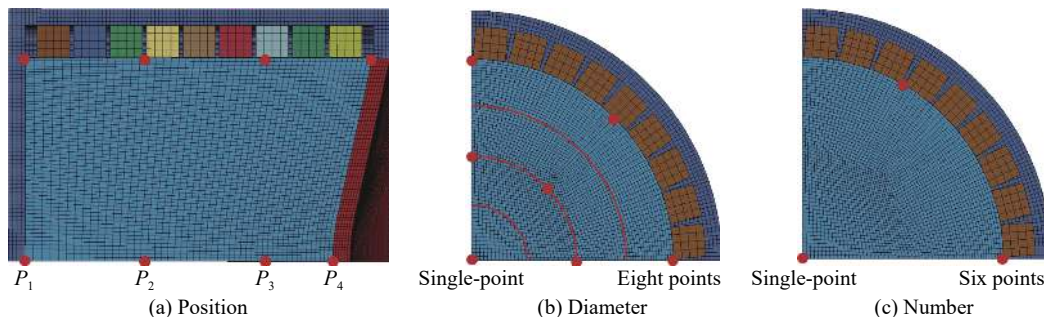


图 2 起爆方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of detonation mode

单点起爆指装药端面中心点处起爆,多点起爆除特别说明外默认为 8 点起爆。起爆位置如图 2(a) 所示,分别取装药顶点(P_1)、装药高度 60 mm 处(P_2)、装药高度 30 mm 处(P_3)和药型罩顶点(P_4)4 个位置;对于起爆直径,如图 2(b) 所示,分别取装药端面中心点、 $D_k/4$ 、 $D_k/2$ 、 $3D_k/4$ 和装药直径 D_k 处;对于起爆数量,如图 2(c) 所示,分别取端面单点、4 点、6 点、8 点和轴线 1×3 点、 4×3 点、 6×3 点、 8×3 点。

2 起爆方式对复合毁伤元的影响

对于该复合战斗部结构,其毁伤元主要包括聚能侵彻体、自然破片和预制破片 3 种形式。对于聚能侵彻体,主要成型参数为头部速度、头尾速度差和长径比,此处长径比为侵彻体总长与最大直径之比;对于破片,则主要分析其成型状态及速度分布,以探究起爆方式对毁伤元成型的影响。

2.1 起爆点位置的影响

为了研究起爆点位置对毁伤元成型的影响,分别研究起爆点位置为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 时中心单点起爆及端面多点起爆对复合战斗部毁伤元成型的影响。端面多点起爆采用 8 点同步起爆,且起爆直径为装药直径;轴线多点起爆为 P_1 、 P_2 、 P_3 处 3 点同步起爆,采用 P_{1-2-3} 来表示。通过数值模拟计算得到 150 μs 时刻各方案聚能侵彻体成型参数及形态,如图 3 所示,此时聚能侵彻体成型已基本稳定,形态不再发生明显变化。

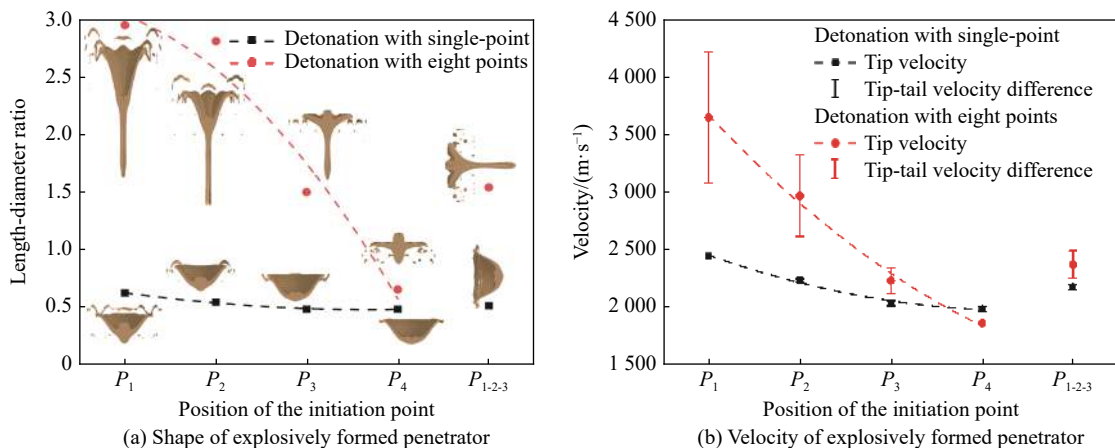


图 3 起爆点位置对聚能侵彻体的影响

Fig. 3 Effect of the initiation point position on explosively formed penetrator

由图 3 可知,随着起爆点位置逐渐向药型罩靠近,单点起爆形成的聚能侵彻体头部速度由 2 434 m/s 减小至 2 165 m/s,而多点起爆形成的聚能侵彻体头部速度则由 3 640 m/s 减小至不足 2 000 m/s。单点起爆时聚能侵彻体头尾速度差较小,始终保持在 50 m/s 以下,形成了典型的 EFP;多点起爆时形成的聚能侵彻体头尾速度差更大,甚至形成了头尾速度差约为 1 100 m/s 的聚能杆式侵彻体(Jetting projectile charge, JPC)。起爆点位置离药型罩越远,形成的聚能侵彻体头部长度越大,其头尾速度差也越大,越有利于 JPC 的成型。轴线多点起爆时,其聚能侵彻体成型状态与 P_3 处相近。这说明对于聚能侵彻体,轴线多点起爆时,距药型罩最近的起爆点受到的影响更大。在进行聚能毁伤元形态仿真研究的同时,对预制破片的飞散情况也进行了研究,150 μs 时刻预制破片的速度参数如图 4 所示。

由图 4 可知,不论中心单点起爆还是端面多点起爆,起爆点位置由装药端面向药型罩逼近的过程中,预制破片的最高速度均呈现出先增大后减小的规律。整体来看,虽然多点起爆与单点起爆的最低速度相近,但多点起爆的速度分布带更大,均在 200 m/s 以上,对预制破片最高速度的提升作用显著,速度最高可提升 100 m/s 以上。对于复合战斗部,壳体形成的自然破片也至关重要,150 μs 时刻自然破片成型参数及形态如图 5 所示。

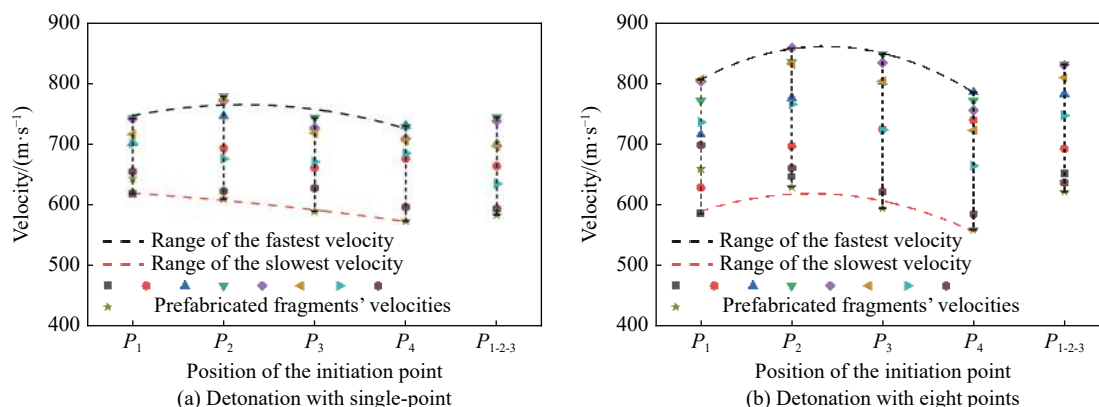


图 4 起爆点位置对预制破片的影响

Fig. 4 Effect of the initiation point position on prefabricated fragment

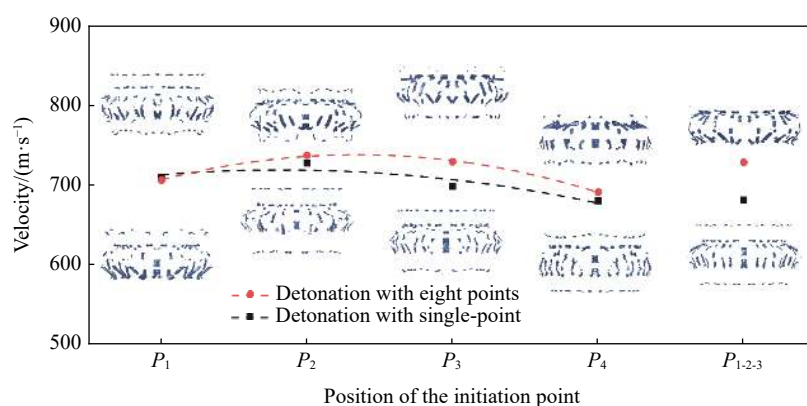


图 5 起爆点位置对自然破片的影响

Fig. 5 Effect of the initiation point position on natural fragment

由图 5 可知,与预制破片的规律相似,起爆点位置由装药端面向药型罩逼近的过程中,自然破片平均速度也呈现出先增大后减小的规律,且两种起爆模式下仍然是 P_2 处起爆时速度最高,分别达到 728 和 738 m/s。对于破片质量分布,相较于端面多点起爆,中心单点起爆时壳体破碎形成的自然破片分布更均匀;而端面起爆时破片质量更大,也更完整,有利于提高破片威力。

2.2 起爆直径的影响

为了研究起爆直径对毁伤元成型的影响,分别研究了不同起爆直径时端面 8 点起爆和轴线阵列多点起爆对复合战斗部毁伤元成型的影响,轴线阵列起爆时 P_1 、 P_2 、 P_3 同步 24 点 (3×8) 起爆。起爆直径分别取 0 mm (中心单点)、 $D_k/4$ 、 $D_k/2$ 、 $3D_k/4$ 和 D_k 。通过数值模拟计算得到 150 μ s 时刻各方案聚能侵彻体成型参数及形态,如图 6 所示。

由图 6 可知,端面起爆时形成的侵彻体头尾速度均大于轴向阵列起爆时所形成的侵彻体,相较于轴向阵列起爆形成的 EFP,其更易形成 JPC。随着起爆直径的增大,两种起爆模式下形成的聚能侵彻体头部速度和头尾速度差均增大,杆型头部逐渐增长,长径比大幅提高,毁伤元由 EFP 形态逐渐转变为 JPC 形态。而端面起爆增益效果更为明显,头部速度从 2 434 m/s 提高到 3 640 m/s 的同时,头尾速度差也从零增大至 570 m/s;侵彻体长径比达到 2.94,是中心点起爆时长径比的 4.8 倍。150 μ s 时刻预制破片速度参数如图 7 所示。

由图 7 可知,不论是装药端面起爆还是轴向阵列起爆,当起爆直径增大时,预制破片的最高速度均增大,分别提高 63 和 86 m/s;但端面起爆时预制破片的最小速度逐渐减小至 585 m/s,轴向阵列起爆时预制破片的最小速度却逐渐增大至 621 m/s,且轴向阵列起爆的速度分布带更大,对预制破片最

高速度的提升作用明显,最高提升速度达到 100 m/s 以上。150 μ s 时刻自然破片成型参数及形态如图 8 所示。

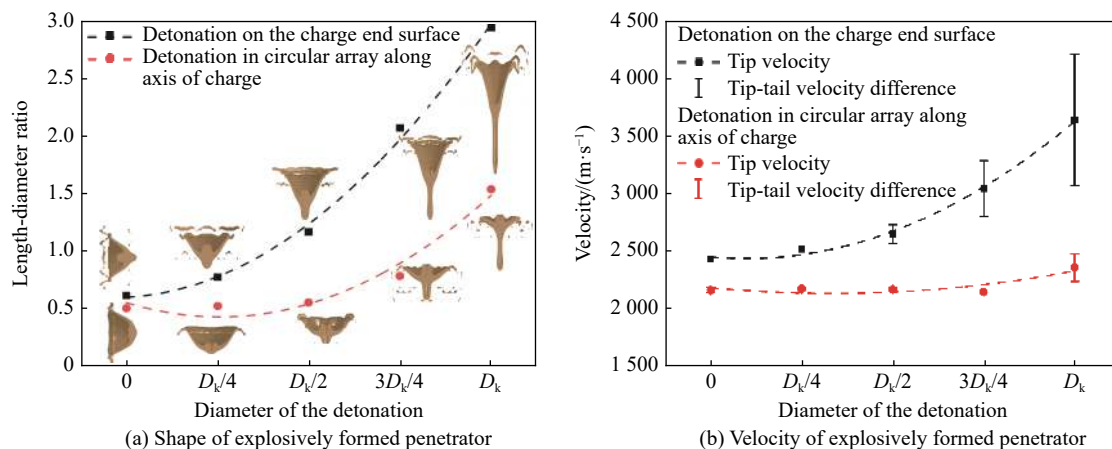


图 6 起爆直径对侵彻体的影响

Fig. 6 Effect of the detonation diameter on explosively formed penetrator

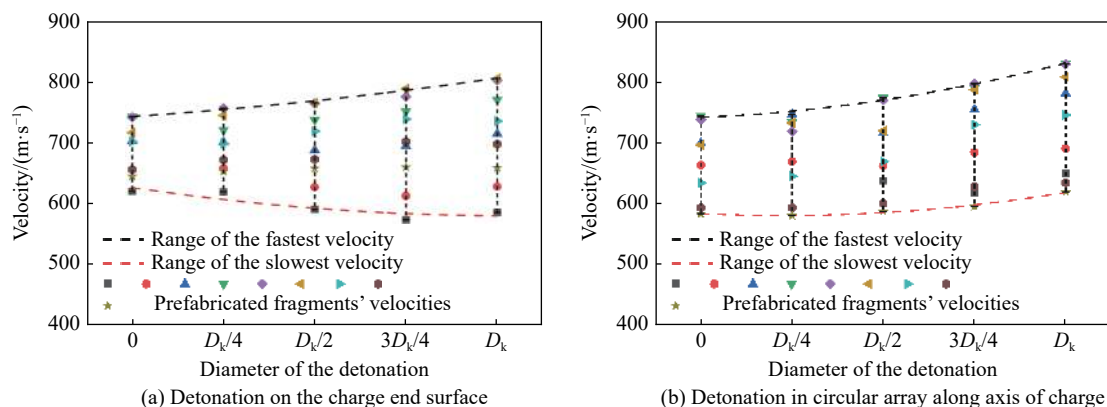


图 7 起爆直径对预制破片的影响

Fig. 7 Effect of the detonation diameter on prefabricated fragment

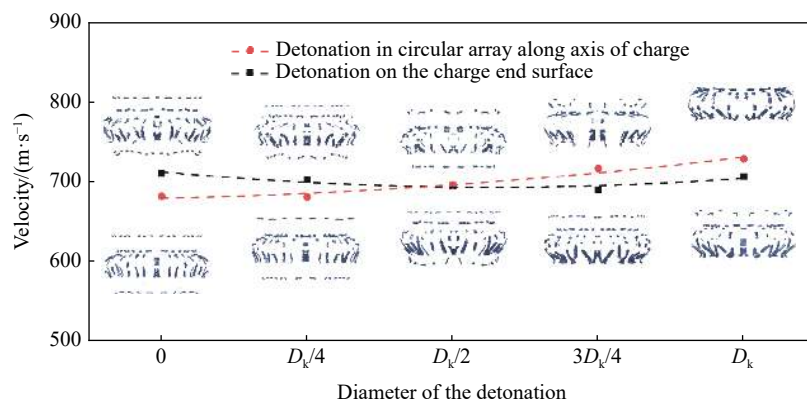


图 8 起爆直径对自然破片的影响

Fig. 8 Effect of the detonation diameter on natural fragment

由图 8 可知,与预制破片不同,随着起爆直径的增大,端面起爆自然破片速度先减小后增大, $3D_k/4$ 处速度最低约 690 m/s; 轴向 3 处圆形阵列起爆自然破片的速度逐渐增大,速度提高约 50 m/s, 达到 729 m/s。起爆直径为 $D_k/2$ 时,两种起爆方式下自然破片的速度近乎一致,均为 696 m/s。装药端面起爆直径存在一个最值,此时破片平均速度最低,且随着起爆直径的增大,大尺寸破片增加。

2.3 起爆点数量的影响

为了研究起爆点数量对毁伤元成型的影响,分别研究了不同起爆点数量时装药端面及轴向阵列起爆对复合战斗部毁伤元成型的影响。装药端面起爆时,起爆点数量分别取中心单点、端面 4 点、6 点和 8 点;轴向阵列起爆时,取 3 点(1×3)、12 点(4×3)、18 点(6×3)和 24 点(8×3)。通过数值模拟计算得到 150 μs 时刻各方案聚能侵彻体成型参数及形态,如图 9 所示。

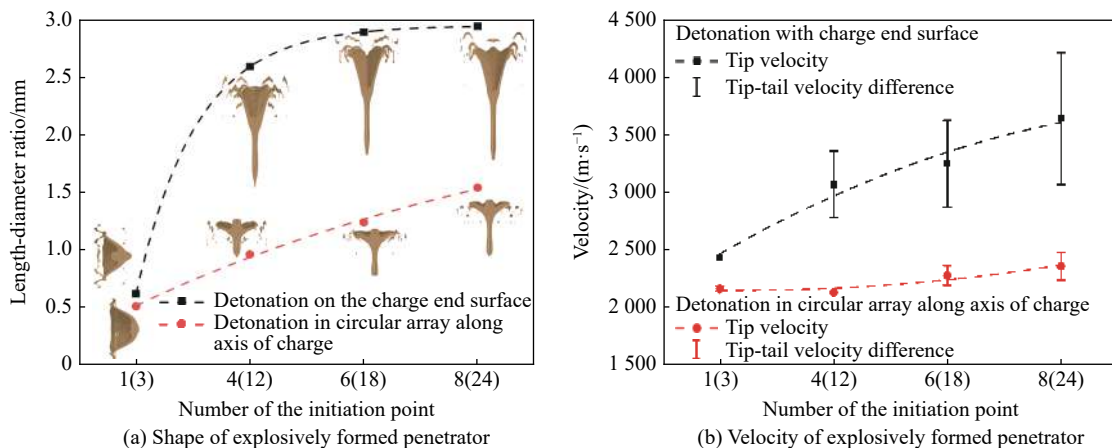


图 9 起爆点数量对侵彻体的影响

Fig. 9 Effect of the initiation point number on explosively formed penetrator

由图 9 可知,端面单点和轴向阵列起爆容易形成 EFP,而端面多点起爆更易形成 JPC。随着起爆点数量的增加,聚能侵彻体头部速度增大,端面起爆和轴向阵列起爆的速度增益分别达到 1 000 m/s 以上和 200 m/s;长径比也随之增大,分别由 0.62 和 0.51 增大至 2.58 和 0.96,但随着起爆点数量增加,长径比增大速度逐渐放缓,端面起爆点数量由 4 个增加到 8 个时,长径比仅提高约 10%;轴向阵列起爆形成的侵彻体头尾速度增长较为缓和,头尾速度和长度均远小于端面起爆形成的侵彻体,最大头尾速度差不超过 120 m/s,只能形成较典型的 EFP。150 μs 时刻预制破片的速度参数如图 10 所示。

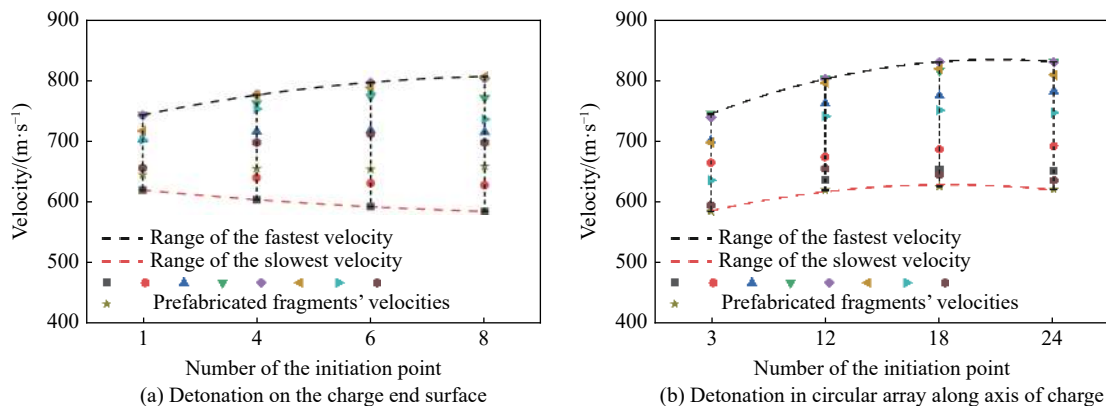


图 10 起爆点数量对预制破片的影响

Fig. 10 Effect of the initiation point number on prefabricated fragment

由图 10 可知,随着起爆点数量的增加,端面起爆时预制破片的最大速度由 743 m/s 逐渐提高到 803 m/s,而最小速度则由 620 m/s 减小到 585 m/s;轴向阵列起爆时预制破片的最大速度及最小速度均先增大后减小,最大时分别为 831 和 626 m/s。整体来看,端面起爆预制破片速度区间随着起爆点数量的增加而增大,速度区间由 123 m/s 增大至 211 m/s,增长 70% 以上;但轴向阵列起爆的最大速度更大,达到 831 m/s,对预制破片的最高速度提高了 10%,作用更加显著。壳体自然破片在 150 μs 时刻的成型参数及形态如图 11 所示。

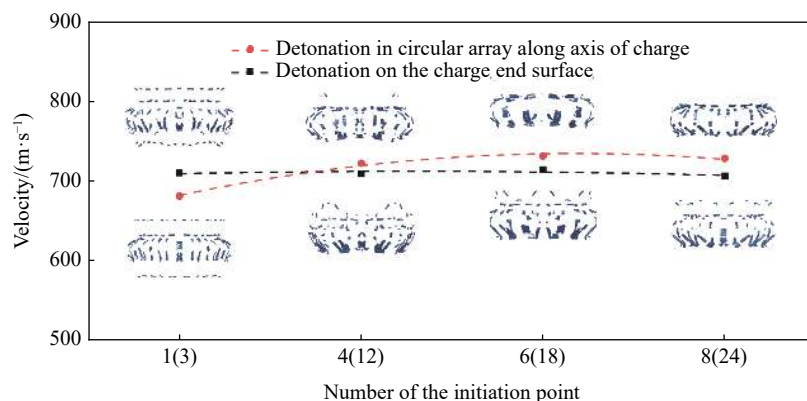


图 11 起爆点数量对自然破片的影响

Fig. 11 Effect of the initiation point number on natural fragment

由图 11 可知,与预制破片的规律相似,随着起爆点数量增加,轴向阵列起爆时破片速度先增大后缓慢减小。但端面起爆时形成的自然破片平均速度变化不大,始终为 710 m/s 左右,上下浮动在 10 m/s 以内。壳体质量分布方面,随着起爆点数量增加,壳体破片质量增大,且破片更完整,更有利于破片威力的提高。总体来看,端面起爆时起爆点数量的作用不明显,轴线阵列起爆时增加起爆点数量有利于破片速度的提高。

3 结 论

通过数值仿真研究了起爆点位置、直径和起爆点数量对复合战斗部所形成的聚能侵彻体、自然破片和预制破片 3 种毁伤元成型及性能的影响,得出以下主要结论。

(1)随着起爆点位置向药型罩靠近,聚能侵彻体长径比和头部速度均呈现减小趋势,端面 8 点起爆时尤为明显,且头尾速度差明显减小;单点起爆时位置的影响较小, P_{1-2-3} 同时起爆的效果并不明显,与 P_3 处起爆形成的 EFP 相近。预制破片均在 P_2 处起爆时达到最大破片速度,且端面 8 点起爆的速度增益更为明显。对于壳体形成的自然破片,其平均速度也在 P_2 处达到最大;多点起爆位置对应壳体处形成的破片最大; P_{1-2-3} 同时起爆虽不能提高破片速度,但有助于使自然破片的断裂更均匀。

(2)随着起爆直径的增大,端面起爆和轴线阵列起爆对聚能侵彻体的影响一致,其长径比、头部速度和头尾速度差均随之增大,速度增益最高可达 50%;端面起爆更有利于聚能侵彻体的拉伸,甚至可以形成 JPC。预制破片的最大速度均呈上升趋势,但最小速度呈相反的变化趋势。对于壳体形成的自然破片,装药端面起爆直径存在一个最值,此时破片平均速度最低,且随着起爆直径的增大,大尺寸破片增加;而轴线阵列起爆直径的增大有利于破片速度的提高。

(3)随着起爆点数量的增加,聚能侵彻体长径比、头部速度和头尾速度差同样随之增大,速度增益与起爆直径的影响一致,也形成了 JPC,但随着起爆点数量的增加,速度增大的趋势逐渐减缓。预制破片的速度变化与起爆直径的影响相近,但具有平台现象,整体来看,两种起爆方式对预制破片速度的增益相近。对于壳体形成的自然破片,端面起爆点数量的变化对破片平均速度的影响不大,仅对破片质量分布有一定影响,轴线阵列起爆点数量的增加有利于破片速度的提高。

参考文献:

- [1] 王利侠,袁宝慧,孙兴昀,等.破甲/杀伤多用途战斗部结构设计及试验研究[J].火炸药学报,2016,39(2):75-79.
WANG L X, YUAN B H, SUN X Y, et al. Structural design and experimental research on the anti-armor and anti-personnel multi-purpose warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(2): 75-79.

- [2] 李兴隆, 陈科全, 路中华, 等. 装填系数对破甲杀伤复合战斗部威力影响的数值模拟 [J]. *含能材料*, 2019, 27(6): 535–540.
LI X L, CHEN K Q, LU Z H, et al. Numerical simulation of the influence of charge-shell mass ratio on the damage power of anti-armor and anti-personnel composite warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(6): 535–540.
- [3] 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 破甲杀伤复合战斗部仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2012, 29(12): 34–37.
ZHANG J, LIU R Z, GUO R, et al. Simulation study on anti-armor and anti-personnel composite warhead [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(12): 34–37.
- [4] 龚柏林, 王可慧, 初哲, 等. EFP 战斗部破片场复合技术研究 [J]. *弹道学报*, 2015, 27(1): 76–79.
GONG B L, WANG K H, CHU Z, et al. Research on forming technology of composite fragments field of EFP [J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(1): 76–79.
- [5] 常江, 吴功平, 范宇, 等. 复合战斗部爆炸成型弹丸结构参数影响分析 [J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(3): 155–160.
CHANG J, WU G P, FAN Y, et al. Analysis for structural parameters of explosively formed projectile in multi-functional warhead [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(3): 155–160.
- [6] 董晓亮, 李文彬, 沈晓军. 预制破片对复合毁伤元战斗部发散角的影响 [J]. *爆破器材*, 2018, 47(6): 15–20, 26.
DONG X L, LI W B, SHEN X J. Influence of pre-fragment on divergence angle of warhead with combined damage elements [J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(6): 15–20, 26.
- [7] JI L Q, LI X D. Study on forming and penetration performance of multi-functional warhead [C]//31st International Symposium on Ballistics. Hyderabad, India: DEStech Publications, 2019, 2: 2318–2326.
- [8] 陈闯, 杨丽, 阮凌飞, 等. 展开式 EFP 战斗部复合破片场成型的数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2019, 42(3): 295–302.
WANG C, YANG L, RUAN L F, et al. Numerical simulation of compound fragment field forming of expanded EFP warhead [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(3): 295–302.
- [9] 王雅君, 李伟兵, 李文彬, 等. 基于爆炸成型弹丸 (EFP) 的大锥角喇叭罩成型规律 [J]. *火炸药学报*, 2019, 42(5): 490–496.
WANG Y J, LI W B, LI W B, et al. Formation characteristics of trumpet-shaped liner with large cone angle based on explosively formed penetrator (EFP) [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(5): 490–496.
- [10] WANG Y J, LI W B, LI W B, et al. Influence of structural characteristics on EFP formation under different liner materials [C]//31st International Symposium on Ballistics. Hyderabad, India: DEStech Publications, 2019.

Effect of Initial Detonation Method on Damage Power of Composite Warhead

ZHOU Weixiao, WANG Yajun, YU Jiaxin, ZHU Xinyuan, LI Weibing

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

Abstract: To improve the energy output efficiency of composite warhead, a HEAT-HE composite warhead is presented, which can release explosively formed penetrator, prefabricated fragments and natural fragments. With the numerical simulation software LS-DYNA, we analyzed how the initial detonation mode (including location, diameter and number of detonation points) affects the damage elements formation and energy output. Besides, a possible technical approach for the tunable damage-power warhead was also discussed. The results shows that: (1) When the donation points are wider and further away from the liner, the linear-formed damage element would get a higher tip velocity and a greater tip-tail velocity and length-diameter ratios. The greatest gain of velocity can reach up to 50% so as to lead the transformation from explosively formed projectile (EFP) to jetting projectile charge (JPC). (2) When the detonation points are located on the central axis of the charge, the damage element forming keeps only related to the point closest from the liner. (3) For the prefabricated fragment, the detonation velocity on the 60 mm charge height (P_2) is

the highest. Its maximum velocity can get increased with the increasing detonation points with wider diameter, while its minimum velocity always keeps about 600 m/s with little variation. For the natural fragment formed by the shell, there isn't an obvious variation of the average velocity, but a reasonable approach to detonate can make the fragments more homogeneous and benefit the adjustment of the fragments mass distribution. Therefore, it is feasible to make a tunable damage-power warhead by controlling the initiation detonation mode, but further research into the effects of the initiation mode on the fragment velocity is needed as well.

Keywords: composite warhead; shaped charge; explosively formed projectile; fragment; initiation mode