

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0281

轴向增强战斗部端部惰性填充物 对端部破片飞散特性的影响*

李国杰¹, 王成龙¹, 郭志威², 李响², 黄广炎²

(1. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100074;

2. 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: 在当前破片战斗部动态毁伤场设计中, 中心盲区效应被视为影响战斗部毁伤效率提高的关键因素。轴向增强战斗部作为消除战斗部动态中心盲区的重要手段, 越来越受到相关研究人员的重视。本文中基于光滑粒子流体动力学计算方法, 建立了一系列轴向增强战斗部(端部分别含有惰性聚氨酯填充物、尼龙填充物和爆炸填充物)在爆炸载荷作用下的破碎和碎片散布过程的数值模型, 并用于研究战斗部前端填充物特性对壳体动态响应的影响。数值模拟结果表明, 填充物对战斗部前部破片的速度影响显著, 但对破片飞散角度影响较弱。通过比较特定碎片的速度历史曲线, 分析了惰性填料对碎片速度的影响机理。研究表明, 聚氨酯泡沫填充物可以显著延缓爆炸冲击波对前破片的加速过程, 并在一定程度上降低爆炸载荷, 尼龙填充物可以在一定程度上降低前向破片和侧向破片的加速度, 从而表明爆炸载荷被引导均匀分布在末端位置周围。结合战斗部自身的牵连速度, 使用低密度和低质量填料代替头部装药具有相同的动态毁伤效果, 可以提高轴向增强战斗部的能量利用效率。

关键词: 轴向增强战斗部; 动态盲区; 惰性填充物; 破片; 飞散角度

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Influence of end non-reactive fillers on the dispersion of the fragments in an axially-enhanced warhead

LI Guojie¹, WANG Chenglong¹, GUO Zhiwei², LI Xiang², HUANG Guangyan²

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100074, China;

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

Abstract: In the current design of the dynamic damage field of the fragment warheads, the central blind area effect is regarded as an essential factor affecting the warhead damage efficiency improvement. The axially-enhanced warhead has become an important design means to eliminate the dynamic central blind area of the warhead, which attracts more and more attention from relevant researchers. In the present paper, based on the smoothed particle hydrodynamics (SPH) computation method, a series of numerical models for the shell breaking and fragment dispersion processes of axially-reinforced warheads with non-filler, polyurethane filler nylon filler and explosive filler, respectively, at the end under the explosive loadings are established, and used to study the influence of the characteristics of the fillers in the front of the warhead on the dynamic response of the shell. It is found from the numerical simulations that the filler has a significant influence on the velocity of the fragments in the front of the warhead but a minor influence on the dispersion angle of the fragments. The mechanism of the influence of the non-reactive filler on the fragment velocity is analyzed by comparing the velocity history curves of the specific fragments. The results show that the polyurethane foam filling can significantly delay the acceleration process of the explosive shock wave to

* 收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2022-02-22

基金项目: 航天科技创新基金; 航天科技钱学森青年创新基金

第一作者: 李国杰(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, liguojie7788@126.com

通信作者: 王成龙(1989—), 男, 博士, 工程师, 350229858@qq.com

the forward fragment and reduce the explosive load to a certain extent. The nylon filler can reduce the acceleration of the forward fragment and the acceleration of the lateral fragment to a certain extent. Thus, the explosion loading is guided to be evenly distributed around the circumference of the end position. Considering the synthesis of the involved velocity of the warhead, using low-density and low-mass filler instead of head charge has the same dynamic damage effect of improving the energy utilization efficiency of the axially-enhanced warhead. The numerical models established in this paper and the research finding can provide some reference for the dynamic damage field design of conventional fragment warheads.

Keywords: axially-enhanced warhead; dynamic blind region; non-reactive filler; fragment; dispersion angle

破片杀伤战斗部利用战斗部在炸药爆炸载荷下形成的破片对人员、雷达、轻装甲等弱防护目标进行毁伤。传统的破片战斗部大多为轴对称结构,且其起爆点设置在其旋转对称轴上。当战斗部内部的装药爆炸后,战斗部的金属壳体或预制破片在炸药爆轰产物的膨胀推动下迅速加速,从而产生大量高速破片并冲击侵彻目标,以对目标造成毁伤效果。传统破片杀伤战斗部的破片毁伤场沿战斗部环向均匀分布,且破片具有几乎相同的初速,从而在空间构成一个破片能量周向均匀分布的环带区域,在动态条件下对地面形成环带杀伤覆盖,如图 1(a) 所示,其中心存在较大的盲区没有被破片覆盖。针对传统破片杀伤战斗部动态毁伤中心盲区问题,基于战斗部的应用需求,赵耘晨^[1]提出了轴向增强战斗部结构。轴向增强战斗部能够在装药起爆后形成一定规模的前向破片毁伤场,从而对战斗部前方的目标造成有效毁伤,在动态条件下可以有效弥补中心盲区,提高战斗部动态毁伤威力,如图 1(b) 所示。对战斗部端部壳体破碎及破片飞散的研究能够为杀伤战斗部的威力场设计和优化提供研究基础和数据参考。

在战斗部壳体破碎及破片飞散相关研究中,目前对于传统轴对称战斗部在偏心起爆作用下的破片速度分布已有较为丰富的研究,并有较为精确的经验公式或数值计算模型用于计算破片速度的周向分布^[2],对于一些非轴对称战斗部的破片速度分布及其受不同偏心起爆作用的影响也有较多的研究^[3-5],这些研究结果能够为轴向增强战斗部的研究提供丰富的参考。在轴向增强战斗部方面,研究人员基于工程应用背景,对不同类型的轴向增强战斗部的破片飞散情况已进行了丰富的数值与实验研究:李超等^[6]针对具有前向破片的榴弹开展了静爆实验,实验结果表明利用具有轴向增强杀伤结构的榴弹能够获得比普通的榴弹更大的杀伤面积,杀伤面积增益达到了 147.3%;石志彬等^[7]针对前向战斗部的破片飞散特征开展了静爆实验研究;崔俊杰等^[8]运用数值计算方法,探究了破片形状、端部装药形状、破片排列形式等因素对轴向预制破片飞散初速的影响;郭子云等^[9]针对杀伤战斗部端面预制破片的威力性能开展了数值研究,发现战斗部端部结构参数会对预制破片群的毁伤效能产生明显的影响;李明星等^[10]利用 AUTODYN 数值模拟软件,对不同形状下轴向预制破片的飞散特性开展了研究;谭振等^[11]对平板形和圆弧形头部的轴向增强战斗部的破片飞散情况进行了数值分析,发现圆弧形头部能够显著增大战斗部在轴向的毁伤范围,配合多层预制破片技术,能够明显提高防空战斗部的封锁区域。

根据工程应用中所面临的动态毁伤中心盲区问题,为探索实现消盲破片群更均匀、战斗部结构更轻便、工程应用更简便的轴向增强战斗部结

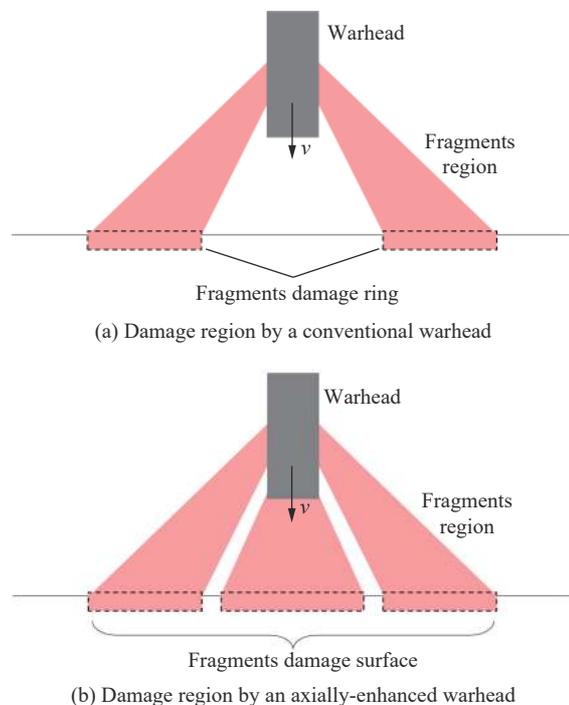


图 1 不同战斗部的毁伤区域

Fig. 1 Damage regions by different warheads

构设计方法, 本文中利用爆炸冲击波在惰性材料中及在炸药中传播特性的差异, 提出一种端部填有惰性材料的轴向增强战斗部结构, 并定义该种战斗部结构下的结构特征参数, 在此基础上建立二维轴对称数值计算模型, 对端部含有不同填充物的轴向增强战斗部的壳体破碎及破片飞散过程进行数值模拟分析。

1 端部填充惰性材料的轴向增强战斗部参数定义

本文中所研究的端部填充惰性材料的轴向增强战斗部的结构如图 2 所示, 其主要分为主装药部分和轴向增强部分。战斗部采用自然破片, 其中战斗部的各部分壳体厚度为 h , 主装药部分内部装填 B 炸药。该轴向增强战斗部为旋转对称结构, 战斗部后端为圆柱形主装药部分, 半径为 r , 前端为半球形轴向增强部分, 半径为 r 且与主装药部分相切。为更好地分析轴向增强部分壳体的破碎及其破片飞散情况, 将轴向增强部分的圆心设为坐标原点 O , 则增强部分壳体上的点 P 可由其相对于轴向增强部分的球心的方向角 θ 表示。战斗部的起爆点设置于点 D 处, 装药半径 r 为 20 mm, 主装药部分长度 L 为 40 mm, 壳体厚度 h 为 2 mm。

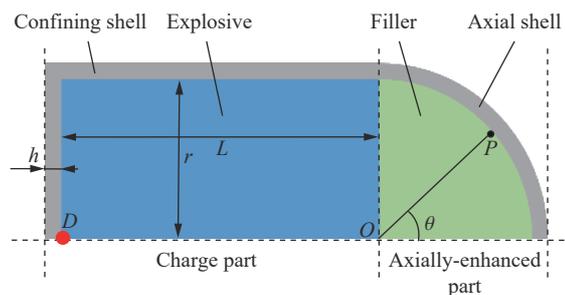


图 2 轴向增强战斗部
Fig. 2 An axially-enhanced warhead

2 数值计算

2.1 数值计算模型

采用 AUTODYN 对轴向增强战斗部的端部增强部分的破片速度分布进行数值分析, 为了研究不同惰性填充材料对端部破片速度的影响, 建立不同装填材料下的轴向增强战斗部数值计算模型, 从而研究轴向增强战斗部在不同端部填充物下的破片速度大小及方向的变化情况。

光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法是近 20 多年来逐渐发展起来的一种无网格计算方法, 该方法将材料用相互作用的粒子来描述, 各个粒子上记录着各种物理量, 如质量、压力和速度等, 通过求解粒子的动力学方程和追踪每个粒子的运动轨道, 可以求得整个系统的动力学行为。战斗部的壳体或预制破片在炸药内爆作用下的破碎与飞散行为常常与大应变率、大变形、断裂和碎片化相关, SPH 方法作为一种无网格方法, 能够避免传统基于网格的计算方法中因炸药爆炸产生的网格过度扭曲与畸变造成的现象对计算精度的影响, 从而具有较高的鲁棒性, 并且由于其为纯拉格朗日方法, 也避免了基于欧拉方法造成的材料界面捕捉困难的问题。综上所述, SPH 方法较适合于模拟战斗部壳体在炸药内爆作用下破碎及破片飞散的过程。

根据轴向增强战斗部的旋转对称特性, 建立轴对称数值计算模型, 如图 3 所示。在数值计算模型中, 为研究不同类型惰性填充物对端部增强战斗部前端破片的影响, 填充材料分别被设置为无填充、尼龙、聚氨酯泡沫和炸药, 其中填充炸药的数值模型作为对照组, 用于对比研究惰性填充材料对端部破片的总体影响。战斗部内部装填的炸药设置为 B 炸药。约束壳体及轴向破片壳体设置为 45 钢, 为提高轴向破片壳体的数据可读性, 在设置粒子材料时, 对轴向破片壳体的材料进行单独设置。根据已有研究结果^[12], 将 SPH 粒子半径设置为 0.4 mm。

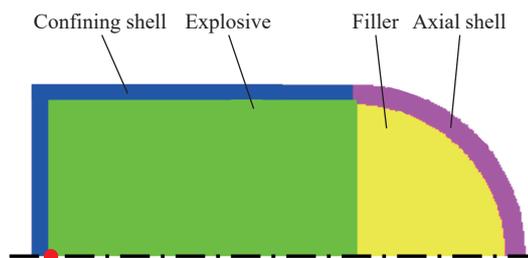


图 3 轴向增强战斗部数值计算模型
Fig. 3 The numerical model of an axially-enhanced warhead

针对战斗部壳体的材料 45 钢, 采用 Johnson-Cook (J-C) 模型^[12] 描述其在大应变率下的变形和损伤:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_{ep}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: A 为屈服强度, B 为应变强化系数, C 为应变率强化系数, m 和 n 分别为软化指数和应变强化指数, ε_{ep} 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.00 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, 其中 $T_r = 293 \text{ K}$ 为室温, T_m 为熔化温度。陈刚等^[13] 运用静态试验机和 SHPB 实验装置, 对 45 钢在不同温度和不同应变率下的力学行为进行了研究, 拟合得到了 J-C 本构模型参量, 并开展了火炮实验与数值模拟, 验证了本构模型参量的合理性。本文中战斗部壳体的材料 45 钢的 J-C 模型参数采用文献 [13] 中参数, 具体为: $A=507 \text{ MPa}$, $B=320 \text{ MPa}$, $n=0.28$, $C=0.064$, $m=1.06$, $T_m=1793 \text{ K}$ 。

针对战斗部中装填的 B 炸药, 采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程^[14] 描述其在起爆后的力学行为:

$$p_e = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中: p_e 为爆轰产物的压力, E 为体积内能, V 为初始相对体积, C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料特性参数。本文中 B 炸药的 JWL 状态方程参数来自文献 [15]: B 炸药的初始密度为 1717 kg/m^3 , 爆速为 7980 m/s , CJ 压力为 29.5 GPa ; 式 (2) 中 $C_1=542 \text{ GPa}$, $C_2=7.68 \text{ GPa}$, $R_1=4.2$, $R_2=1.1$, $\omega=0.24$ 。

针对战斗部轴向增强部分中的聚氨酯和尼龙 2 种惰性填充材料, 分别采用 Linear 状态方程^[16] 和 Shock 状态方程^[16] 描述其在爆轰产物冲击下的动态响应特点。

Linear 状态方程为:

$$p = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: K 为材料的体积模量。本文中聚氨酯填充材料的材料参数引用自文献 [17], 初始密度为 300 kg/m^3 , 体积模量为 37.3 MPa 。

Shock 状态方程为:

$$D = c_0 + \lambda u_p \quad (4)$$

式中: D 为冲击波速度, c_0 为材料声速, λ 为粒子速度 u_p 的系数。本文中尼龙填充材料的参数选自文献 [18]: 初始密度为 1140 kg/m^3 , 声速为 2290 m/s , 参数 λ 为 1.63 。

2.2 战斗部在内爆炸载荷下的动态响应过程分析

图 4~7 为端部填充不同材料以及无填充的轴向增强战斗部的壳体破碎过程, 图中分别列出了战斗部在 4 种填充材料下不同时刻的材料位置及压力云图。

从爆轰波传播情况看, 当爆轰波未传播出主装药部分时, 端部填充材料不会对爆轰波传播过程造成影响。而当爆轰波传入轴向增强部分后, 端部装填炸药的战斗部中爆轰波持续传播, 因而速度也最快。对于惰性填充材料, 主装药部分的爆轰波会在惰性材料中产生强冲击波, 并且向装药部分反射一个冲击波或稀疏波。从图中可以看出冲击波在尼龙中的传播速度略大于聚氨酯中的传播速度, 且由于聚氨酯对冲击波的吸收与耗散, 聚氨酯中冲击波强度远低于尼龙中冲击波强度。

从战斗部壳体的破碎情况看, 对于战斗部的主装药部分, 其壳体破碎情况在 3 种填充物下几乎相同, 因而认为战斗部主装药部分的壳体破碎受轴向增强部分影响较小。而对于轴向增强部分, 当轴向增强部分填充炸药时, 轴向破片壳体前端的飞散形态较为扁平, 代表其破片速度在前端分布较均匀。而当端部填充了尼龙后, 其轴向增强部分壳体的前端部分的飞散形态有明显的突出, 代表轴向增强部分壳体在前端的破片速度分布不均, 且距轴线越近破片速度越高。端部填充聚氨酯与无填充物轴向增强部分壳体的飞散形态相似, 轴向增强部分壳体与装药部分壳体具有明显的分界面, 整体形状呈现纺锤形, 距轴向较近的壳体飞散速度较快, 且破碎程度较高, 远离轴线位置壳体飞散速度较慢, 且有大块破片生成。

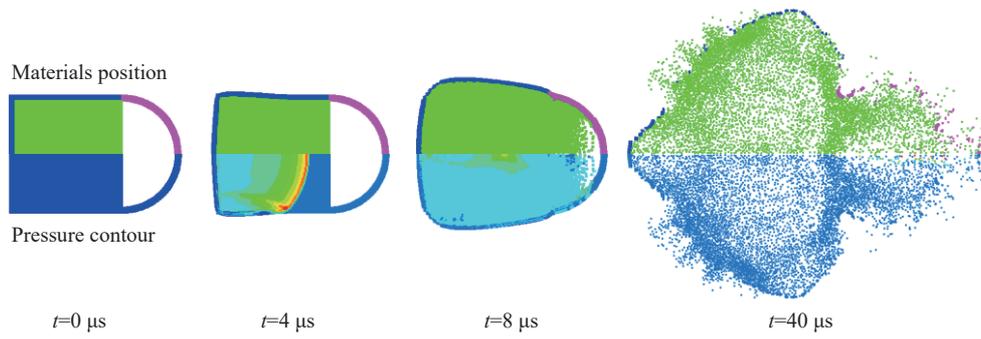


图 4 端部无填充战斗部壳体的破碎过程

Fig. 4 Fragmentation process of the shell of the warhead with a non-filled end

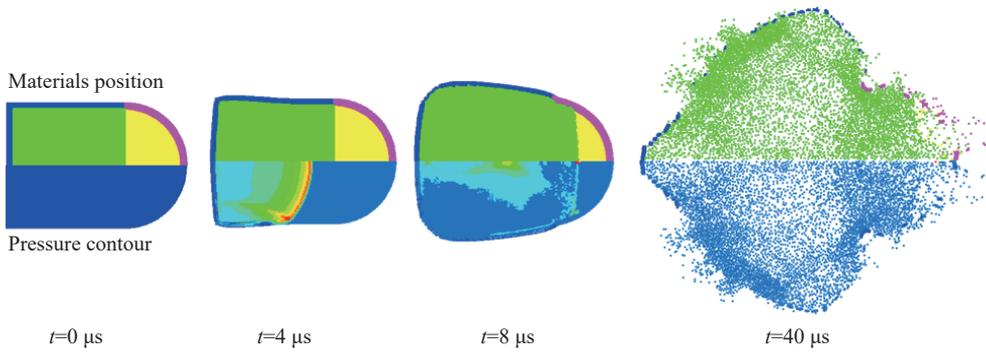


图 5 端部填充聚氨酯战斗部壳体破碎过程

Fig. 5 Fragmentation process of the warhead with an end filled with polyurethane

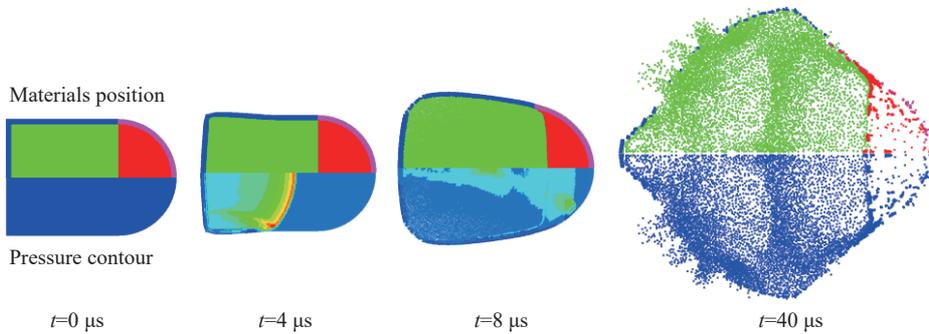


图 6 端部填充尼龙战斗部壳体破碎过程

Fig. 6 Fragmentation process of the warhead with an end filled with nylon

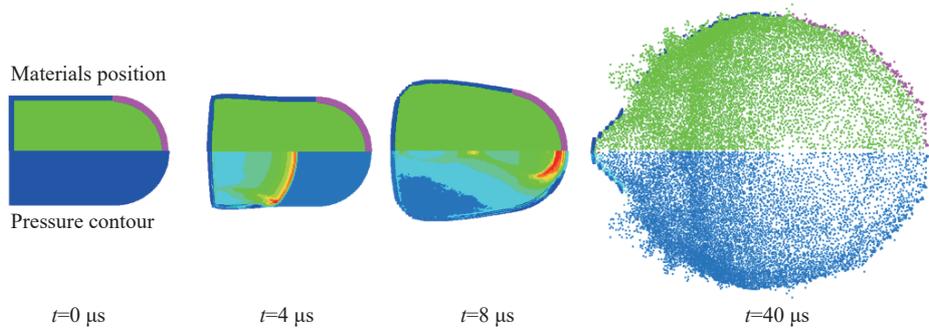


图 7 端部填充炸药战斗部壳体破碎过程

Fig. 7 Fragmentation process of the warhead with an end filled with explosive

2.3 轴向增强部分破片速度大小对比分析

轴向增强战斗部中轴向增强部分的破片飞散速度大小是轴向增强战斗部设计中的重要参数之一, 在战斗部设计时轴向增强破片应携带有足够多的动能从而击穿目标的防护结构, 因此本节基于数值计算结果, 针对本文中提出的轴向增强战斗部轴向增强部分的破片速度大小进行分析和讨论。图 8 为不同端部填充物下轴向增强战斗部的端部破片速度分布情况, 总体上可以看出, 无论轴向增强部分填充何种材料, 轴向增强部分的破片速度在方向角为 0° 时最高, 并且随着方向角的增大而逐渐降低。这是由于随着方向角的增大, 爆轰波的相对轴向增强部分壳体的入射角就越大, 从而降低了爆轰波对壳体的驱动效果。

从图 8 可以看出, 当轴向增强部分的填充材料为炸药时, 战斗部轴向增强部分的破片速度明显高于惰性材料填充时的破片速度, 含能材料与惰性填充材料下的破片速度差范围为 $500 \sim 1000 \text{ m/s}$, 这是由于炸药填充的轴向增强部分能够为壳体的破碎提供更多的能量, 并且炸药填充的轴向增强部分延长了爆轰波在炸药中的传播距离, 从而进一步提高了轴向增强部分壳体破片的飞散速度。

对于端部无填充的战斗部, 其在轴线附近部分的破片速度较大, 与填充炸药战斗部的破片速度相近, 最大速度约为 2500 m/s , 但其破片速度随着方向角的增大而快速下降, 在方向角为 $69^\circ \sim 85^\circ$ 范围内破片速度最低, 约为 500 m/s , 明显低于所有工况下的破片速度, 方向角接近 90° 时则由于周向壳体对轴向壳体的连片现象破片速度出现阶跃, 约为 1000 m/s 。对于端部填充聚氨酯材料的战斗部, 其轴向增强部分的破片速度大体呈现随方向角增大而减小的趋势, 由于靠近轴线部分壳体破碎程度较大, 破片速度连续性差, 波动较大, 最高速度出现在方向角 15° , 约为 1800 m/s , 方向角 $69^\circ \sim 85^\circ$ 之间破片速度最低, 约为 610 m/s , 方向角接近 90° 时壳体同样由于壳体连片出现破片速度明显升高的现象。对于端部填充尼龙材料的战斗部, 可以发现其轴向增强部分的破片速度分布由上文所述的存在明显分布梯度转变为整体大致相同的速度分布情况, 大部分破片的速度都在 $1300 \sim 1500 \text{ m/s}$, 方向角小于 20° 的前端破片速度稍高并随着方向角的减小而增大, 尼龙填充战斗部在方向角为 0° 时的破片速度最大, 约为 1963 m/s 。对于端部填充炸药的战斗部, 其方向角小于 20° 的破片速度大致相同, 约为 2500 m/s , 轴向增强部分的破片速度随着方向角的增大而降低, 当方向角达到 90° , 破片速度下降至约 1800 m/s , 从整体上看其破片速度分布较为均匀, 主要的影响因素为爆轰波入射角。

从该部分可以看出, 相比于端部填充炸药的战斗部, 端部填充低密度聚氨酯泡沫或无填充时, 轴向增强部分的破片速度分布的不均匀性将会明显增加, 且无填充时破片速度分布不均匀性最强。但当端部填充尼龙材料后, 战斗部轴向增强部分的破片速度均匀性逐渐增强, 但破片速度整体较低。

2.4 轴向增强部分破片速度方向对比分析

轴向增强部分的破片速度方向分布同样是轴向增强战斗部威力场分析中的重要参数之一, 它决定了轴向增强战斗部在战斗部前端形成的威力场的形态, 从而能够为战斗部的毁伤范围分析、综合毁伤效果分析及相应的优化提供参考。基于数值计算模型的结果, 可以计算得到不同端部填充物下不同周向角破片的速度方向与破片方向角的关系, 速度方向分布曲线如图 9 所示。图中虚线表示战斗部轴向增强部分壳体的外法线方向角, 通过对比数值计算得到的破片速度方向曲线与虚线的距离, 可以获得战斗部破片飞散方向与战斗部壳体外法向的差异, 从而判定破片速度方向受影响的程度。从图中可以看出,

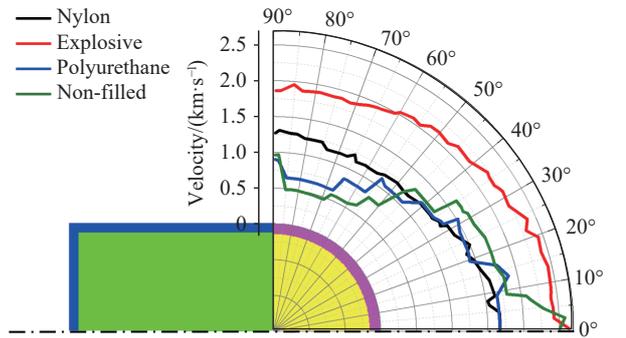


图 8 轴向增强战斗部在不同轴向填充材料下的端部破片速度分布

Fig. 8 The fragment velocity distributions of the axially-enhanced warheads filled with different materials

无论端部填充任何材料, 破片速度角度曲线大部分在虚线之下, 只有少数观测点位于虚线之上, 即战斗部壳体破碎后产生的破片倾向于向战斗部的前部飞散, 并且破片速度方向与战斗部壳体法向的差距随方向角的增大而增大。

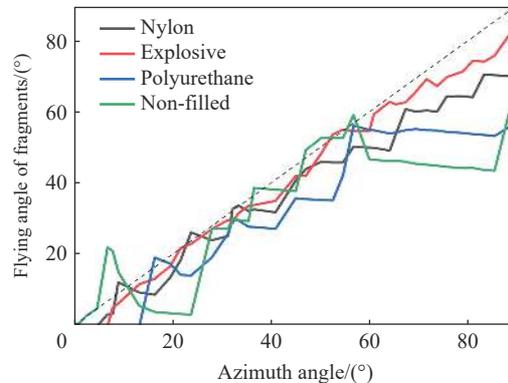


图 9 不同轴向填充物下战斗部轴向增强部分破片的飞散角度

Fig. 9 Projection angles of fragments from the axially-enhanced part of the warhead axially filled with different materials

从填充材料种类上看, 填充炸药与填充尼龙的战斗部轴向增强部分破片飞散方向曲线在方向角较小时差距较小, 近似于同一条曲线, 但当方向角达到约 60° 后, 填充炸药的战斗部破片飞散方向逐渐大于填充尼龙的战斗部, 考虑其原因为尼龙填充材料本身不携带能量, 从而为战斗部壳体在径向上的加速度贡献稍小于填充炸药的战斗部。聚氨酯填充与无填充战斗部曲线相似, 由于靠近轴线部分壳体破碎程度较高, 曲线在靠近零点时波动较大, 方向角大于 60° 后破片速度方向趋向于不变, 破片飞散方向角明显小于炸药填充与尼龙填充战斗部。总体而言, 更大密度的填充材料, 会使战斗部轴向增强部分的破片更加向侧向飞散, 从而与壳体外法线方向更加相似。

对比 4 种情况可以看出, 对于惰性填充轴向增强部分的战斗部而言, 惰性填充物密度越大, 则其轴向增强部分破片速度分布的均匀性越好, 但破片速度会有一定的下降。而对于低密度填充物或无填充物情况, 战斗部在轴线方向附近的破片速度明显较大, 其他方向的破片速度相对较低, 并且破片速度方向更强偏向前方。

2.5 轴向增强部分破片速度时程曲线分析

如 2.2~2.4 节所述, 对于端部为半球形的轴向增强战斗部, 端部填充惰性材料会改变其内部炸药的爆炸能量在端部不同位置的破片的分布情况。为进一步说明端部惰性填充物对战斗部端部破片飞散特性的影响机理, 提取了不同端部填充材料下典型位置上的破片速度时程曲线, 如图 10 所示。

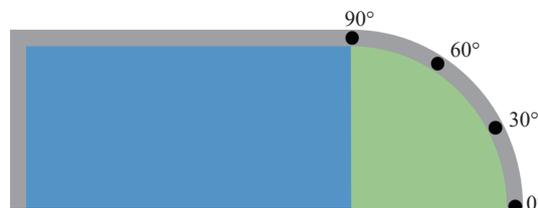


图 10 战斗部典型破片位置示意图

Fig. 10 The typical positions of the fragments from the warhead

图 11 为不同位置处的破片在不同端部填充材料下的速度时程曲线。从图 11 可以看出, 对于 0° 和 30° 位置处的破片, 尼龙填充和聚氨酯泡沫填充战斗部的破片速度相近, 且明显小于无填充战斗部。另外, 0° 与 30° 位置处的破片在初始加速阶段的加速度相近, 但随着时间推移, 聚氨酯泡沫填充战斗部的破

片加速度首先下降, 其次为尼龙填充战斗部和无填充物战斗部, 炸药填充战斗部由于装药量明显增大, 其加速度明显较高, 加速时间较长。然而, 惰性材料填充及无填充物战斗部的破片加速时间有明显的推迟, 这与惰性材料中冲击波传播速度低于爆轰波速的实际情况相符。对于 60° 处的破片, 尼龙填充战斗部破片在初始阶段的加速度明显大于无填充物和聚氨酯填充战斗部, 而无填充物战斗部中破片的加速度首先略大于聚氨酯填充结构, 而后逐渐衰减并明显小于聚氨酯填充结构。因此, 可以认为端部惰性填充材料能够一定程度上使得爆炸能量向侧向释放, 并且其程度随着填充材料密度的提高而提高, 这与上文所获得的破片速度分布情况相符。对于 90° 处的破片, 端部填充不同材料的战斗部的破片首先以几乎相同的加速度上升并随着时间推移而分离, 其中尼龙填充战斗部的破片加速度明显较大, 聚氨酯填充战斗部及无填充物战斗部的破片速度曲线相似且速度较低。可以认为, 相对于尼龙填充材料, 密度较低的聚氨酯填充材料对其填充的战斗部在 90° 位置处破片的加速过程的影响程度较低, 与无填充战斗部无明显差异。

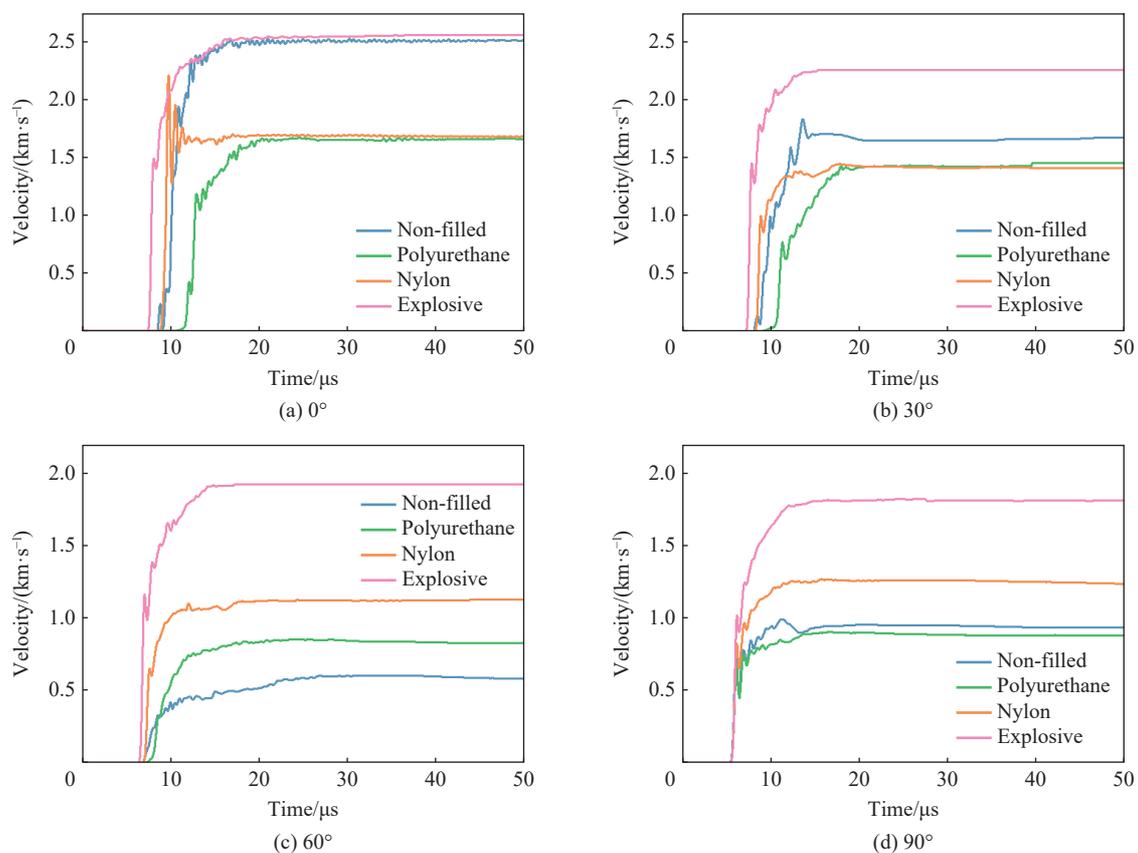


图 11 典型位置破片速度时间曲线

Fig. 11 Velocity-time curves of the fragments at typical positions

综上所述, 可总结获得不同端部结构对战斗部端部破片速度形成机理。对于无填充战斗部, 由于其端部无惰性材料阻碍爆轰产物飞散及冲击, 其爆轰产物向前膨胀, 并作用于前端破片, 从而使得主装药的爆炸能量主要向前释放。对于聚氨酯填充战斗部, 由于聚氨酯泡沫的低密度和变形吸能特性, 其无法通过高惯性提高侧向破片飞散速度, 同时又通过压缩吸能及压缩后的质量效应降低了前向破片获得的爆炸能量。对于尼龙填充战斗部, 其较高的密度和刚度能够使得侧向破片获得较高的爆炸能量, 从而引导主装药的爆炸能量向侧向分布。根据研究结果, 结合轴向增强战斗部的动态毁伤场特性, 认为在轴向增强战斗部的设计中, 为消除战斗部毁伤场中心区域盲区, 战斗部端部可填充具有一定密度的惰性材料, 其密度可略低于尼龙, 但需明显高于聚氨酯泡沫。

3 结 论

根据目前战斗部动态威力中心消盲设计对轴向增强战斗部日益增长的研究需求, 基于 AUTODYN 数值计算软件, 对端部填充不同材料的轴向增强战斗部壳体在炸药内爆作用下的动态响应过程进行了数值研究, 得到了底端起爆情况下的战斗部壳体破碎情况以及轴向增强部分破片速度分布情况, 揭示了轴向增强战斗部在不同端部填充物下的破片速度大小及飞散方向的周向分布情况, 获得了以下主要结论。

(1) 对于 4 种填充情况, 战斗部轴向增强部分的破片速度皆随破片的方向角的增大而降低, 其中无填充战斗部的破片速度随周向角的增大速度降低最快, 破片速度降低程度随惰性填充物密度的增加而减缓, 当端部填充炸药时破片速度分布差异最小。

(2) 通过对轴向增强战斗部轴向增强部分的壳体破片速度方向分布情况进行分析可知, 底端起爆下轴向增强部分壳体的破片倾向于向战斗部前方飞散, 且随着惰性填充材料密度的提高, 破片飞散方向与端部壳体法线方向差异逐渐降低。

(3) 通过对战斗部轴向增强部分典型位置破片的速度时程曲线对比分析可知, 聚氨酯泡沫填充物能够明显推迟爆炸冲击波对前向破片的加速过程, 并在一定程度上降低破片受到的爆炸载荷, 尼龙填充物能够在一定程度上降低前向破片的加速度并提高侧向破片的加速度, 从而引导爆炸载荷在端部位置圆周均匀分布。

本文的研究结果为战斗部动态威力消盲设计提供了一种轴向增强战斗部的数值计算数据, 可为战斗部破片驱动动态响应相关的研究及相应的破片战斗部设计提供研究依据及计算模型参考。

参考文献:

- [1] 赵耘晨. 前向增强杀爆弹前置破片初速及飞散方向研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 1-9.
ZHAO Y C. The study of fragment initial velocity and scattering direction of front fragment on forward enhanced lethal he projectile [D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 1-9.
- [2] HUANG G Y, LI W, FENG S S. Fragment velocity distribution of cylindrical rings under eccentric point initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(2): 215-220. DOI: 10.1002/prop.201400180.
- [3] NING J G, DUAN Y, XU X Z, et al. Velocity characteristics of fragments from prismatic casing under internal explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 29-38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.05.018.
- [4] DHOTE K D, MURTHY K P S, RAJAN K M, et al. Directional warhead design methodology for a tailored fragment beam [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(4): 637-649.
- [5] DING L L, LI Z D, LIANG M Z, et al. The dispersion rule of fragments about the asymmetric shell [J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 9810978. DOI: 10.1155/2017/9810978.
- [6] 李超, 李向东, 陈志斌, 等. 前向增强杀伤榴弹对人员目标杀伤威力分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(7): 1119-1123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.028.
LI C, LI X D, CHEN Z B, et al. Lethality of forward enhanced lethal he projectile against personnel targets [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(7): 1119-1123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.028.
- [7] 石志彬, 高敏, 米双山, 等. 前向战斗部破片散布均匀性研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(1): 95-97; 138. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.01.024.
SHI Z B, GAO M, MI S S, et al. Study on fragment dispersion uniformity of forward-firing warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(1): 95-97; 138. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.01.024.
- [8] 崔俊杰, 姜建东, 牛新立, 等. 轴向预制破片初速影响因素的研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(2): 84-86; 97. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.02.023.
CUI J J, JIANG J D, NIU X L, et al. The research on impacting factors of axial preformed fragment velocity [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(2): 84-86; 97. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2014.02.023.
- [9] 郭子云, 赵太勇, 陈智刚. 战斗部端面预制破片威力性能影响的数值仿真 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(3): 33-37. DOI:

- 10.3969/j.issn.1006-9348.2015.03.008.
- GUO Z Y, ZHAO T Y, CHEN Z G. Numerical simulation of lethality influence of warhead end premade fragment [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(3): 33–37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2015.03.008.
- [10] 李明星, 王志军, 黄阳洋, 等. 不同形状轴向预制破片的飞散特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(12): 65–69. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.016.
- LI M X, WANG Z J, HUANG Y Y, et al. Study on the scattering characteristics of different shape axial prefabricated fragment [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(12): 65–69. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.016.
- [11] 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.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983: 12–21.
- [13] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(5): 69–74. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0451-06.
- CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(5): 69–74. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)05-0451-06.
- [14] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook [M]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [15] DOBRATZ B M. LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants [R]. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1981.
- [16] 恽寿榕, 涂侯杰, 梁德寿, 等. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- YUN S R, TU H J, JIANG D S, et al. Explosion mechanics calculation method[M]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [17] ZHOU Y, WANG T, ZHU W, BIAN X, HUANG G. Evaluation of blast mitigation effects of hollow cylindrical barriers based on water and foam [J]. *Composite Structures*, 2022, 282: 115016. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.115016.
- [18] MATUSKA D A, NEEDHAM C E, DURRETT R E. The AFWL HULL code codes for large problems fluid dynamics[C]//Proceedings of the SIGNUM Meeting on Software for Partial Differential Equations. New York, USA: Association for Computing Machinery, 1975. DOI: 10.1145/800207.806410.

(责任编辑 张凌云)