DOI: 10.11883/bzycj-2016-0342 文章编号: 1001-1455(2018)04-0876-07

战斗部轴向威力的增强*

谭 振,陈鹏万,周 强,祝 奎,刘文斌
(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: 基于预制破片技术的杀伤战斗部周向破片场威力得到了很好的改善,但战斗部头部轴向破片较少,难以实现对空间域的完全封锁。为了改善杀伤战斗部轴向破片场分布,探索影响轴向预制破片飞散角和速度的影响因素,设计了一种轴向威力增强战斗部,通过改变战斗部头部形状、曲率半径并加装球形预制破片实现轴向威力增强。运用 LS-DYNA 软件对战斗部爆炸驱动全过程进行数值模拟,通过设置不同的起爆条件得到战斗部结构参数对轴向预制破片初速和飞散角的影响规律。仿真结果表明:预制破片的飞散角及速度与战斗部头部结构参数关系密切,采用圆弧形头部结构可显著提高预制破片的飞散速度和飞散角,使预制破片轴向封锁区域显著增大,大大增强战斗部轴向威力。

关键词: 预制破片;LS-DYNA;战斗部;战斗部;飞散角
中图分类号: O389;TJ413 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

杀伤战斗部是打击人员及具有轻型防护能力目标的常用战斗部。杀伤弹爆炸后,弹体内部装药爆炸驱动壳体向外快速膨胀,膨胀到一定限度后,壳体表面开始出现裂纹,裂纹相互贯通使壳体全部破裂形成破片并以一定初速向四周飞散以杀伤目标。

弹体爆炸形成的破片可分为自然破片、可控破片、预制破片。由于自然破片战斗部爆炸后形成的破片数量少、形状不规则、质量分布不均匀、飞行阻力大、速度衰减快,所以常规杀伤战斗部大都采用轴向或周向均布预制破片结构,以改善杀伤战斗部的杀伤威力。近年来,研究者对预制破片战斗部进行了大量工作。由于战斗部起爆后破片沿径向均匀向外飞散,破片利用率低,为提高破片利用率,增强毁伤效果,聚焦战斗部、定向战斗部、轴向增强战斗部[1-3]技术应运而生。冯顺山等[1]提出了一种新的聚焦战斗部设计方法;严翰新等[4]数值模拟了不同起爆方式对聚焦战斗部性能的影响;邢恩锋等[5]研究了装药结构参数对轴向预制破片速度的影响;郭子云等[6]和刘洪峰等[7]进行了战斗部端面预制破片威力性能影响的数值仿真;张世林等[8]研究了轴向预制破片战斗部破片飞散特性的影响因素。

目前,基于预制破片及定向战斗部技术的战斗部径向破片场威力已经得到了很大的改善,但由于战斗部头部壳体较薄弱,所以常规战斗部仍存在轴向破片数量少、轴向杀伤威力不足的问题。为改善常规战斗部,尤其是防空战斗部轴向威力不足的缺点,本文中提出一种轴向威力增强战斗部结构。为充分利用爆轰波的能量,避免战斗部头部壳体因应力集中现象而过早破裂,设计一种圆弧形头部战斗部。通过在圆弧形头部战斗部外围均布球形预制破片以增加轴向破片数,提高爆轰波能量利用率,并有效控制预制破片的飞散角,保证弹丸头部一定角度空间域内都有破片存在。

1 数值模拟方法

战斗部结构如图 1(a)所示,主要由壳体、炸药装药、预制破片、头壳组成。预制破片直径为 5 mm,弹丸头部弧半径为 R,弹丸壳体厚度为 5 mm,装药直径为 90 mm,装药高度为 200 mm。为了与本文中提出的圆弧形头部轴向增强战斗部进行比较,设计了结构如图 1(b)所示的战斗部结构。装药直径、壳体厚度、球形预制破片直径等参数保持不变。

* **收稿日期**: 2016-11-15; **修回日期**: 2017-02-22
基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(11521062)
第一作者: 谭 振(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 陈鹏万,pwchen@bit.edu.cn。

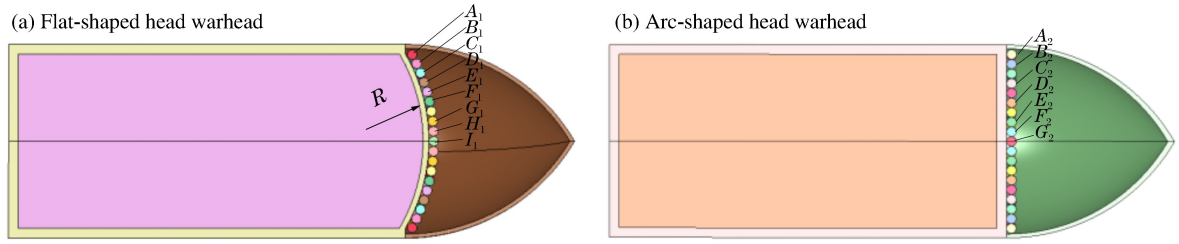


图 1　战斗部数值计算模型

Fig. 1　Simulation models of the warheads

利用显式有限元动力分析软件 LS-DYNA 对轴向预制破片战斗部爆炸驱动全过程进行数值模拟。炸药、预制破片及壳体均采用拉格朗日算法，网格单元采用六面体 SOLID164 单元。预制破片材料选用 45 钢，采用刚体材料模型，其密度为 7.83 g/cm^3，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3；炸药使用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述；壳体材料选用 45 钢，采用 PLASTIC_KINEMATIC 材料模型。由于战斗部具有几何对称性，为了节省计算资源，建立 1/4 模型，并在对称面施加对称边界条件，材料模型及状态方程参数见表 1 和表 2[9]，采用 cm-g-μs-K 单位制，其中 ρ 为密度，D 为爆速，p_{CJ} 为爆压，A、B、R_1、R_2、ω 为炸药参数，E_0 为初始内能，E 为弹性模量，ν 为泊松比，σ_y 为屈服强度，E_{tan} 为切线模量，β 为硬化参数，ε_f 为失效应变。为了提高网格质量，网格划分前分别在平面及柱面坐标系下对预制破片、装药及壳体进行几何分割，使模型中每个部件均能满足映射法网格划分对几何实体形状的要求。此外，综合考虑计算精度与计算时长两个因素，预制破片、壳体及头壳、装药单元长度分别设置为 0.062 5、0.10、0.09 cm，平板形头部、R=45，90 mm 弧形头部 3 种战斗部模型分别划分为 137 822、119 106 和 138 730 个单元。由于炸药爆轰过程属于材料大变形过程，通常会导致炸药单元网格严重畸变，甚至导致程序无法正常运行。因此，为了使程序能够完全运行，在炸药爆轰结束后，及时将炸药单元删除[9]。

表 1　8701 炸药的材料参数和状态方程参数

Table 1　Parameters of material and equation of state for 8701 explosive

ρ/(g·cm^{-3})	D/(km·s^{-1})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/MJ
1.787	8.39	34	581.4	6.801	4.10	1.00	0.35	0.009

表 2　壳体材料参数

Table 2　Material parameters of shell

ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa	ν	σ_y/GPa	E_{tan}/GPa	β	ε_f
7.83	210	0.30	0.5	4.0	0.6	0.3

2　数值模拟结果及分析

为验证所提出的战斗部结构能有效控制轴向预制破片的飞散角和飞散速度，在相同装药条件下分别对弧形和平板形头部预制破片战斗部进行了数值计算。同时，选取 R=45，90 mm 两种尺寸弧形头部战斗部，以研究头弧半径对预制破片飞散角的影响。图 2～4 给出了采用 LS-DYNA 程序计算所得不同工况下战斗部壳体膨胀变形、破裂贯穿、预置破片抛出、破片场形成的过程。

由图 2～4 可知：从起爆瞬时到 t=12 μs，爆轰波呈理想的球面波；此后，由于装药长径比及弹丸壳体的约束，爆轰波曲率半径逐渐减小，当爆轰波到达弹丸壳体端部瞬时已近似呈平面波；在爆炸载荷驱动下，弹丸壳体破裂产生裂纹并逐渐贯穿，最终形成自然破片。图 2 中自然破片主要分布在弹丸周向，头部及底部只有少量大块自然破片，这是由于战斗部头部和尾部壳体较薄弱，同时由于应力集中效应，

在弹丸头部和尾部与圆柱部连接处过早形成裂纹，致使炸药爆轰产生的能量过早外泄，未能充分作用于战斗部头部和尾部壳体。球形预制破片在爆炸载荷驱动下向弹丸头部所在方位飞散，预制破片较集中的分布于弹丸轴线附近，破片近似沿弹丸轴线直线运动。图 3 显示，随着爆轰波的传播，爆轰波曲率半径逐渐减小，并在 40 μs 左右趋于平直状态。大部分自然破片均匀分布在弹丸周向，少量大块自然破片分布在轴向，与图 2 相比，弹丸头部自然破片场有所改善，这是由于弧形头部战斗部头弧部过渡平滑，减小了应力集中效应，炸药爆轰能量充分作用于头部壳体。图 3 中预制破片在弹丸头部所在区域内以一定角度向外飞散，通过合理控制起爆时间及战斗部轴向预制破片数目可有效增大战斗部轴向预制破片及自然破片场的封锁区域。与平板形头部战斗部相比，弧形头部战斗部结构可以有效改善杀伤战斗部轴向破片数量不足及封锁区域小的缺点。图 4 中爆轰波传播规律和图 3 相似，破片分布无明显差异。综合对比图 2～4 可知，平板形头部战斗部预制破片较集中分布在弹丸轴线附近，破片近似沿弹丸轴线直线运动，弧形头部战斗部预制破片相对较发散的分布在弹丸头部所在区域，使得弹丸头部所在区域一定角度内均有破片飞散，大大增强了战斗部的轴向威力。

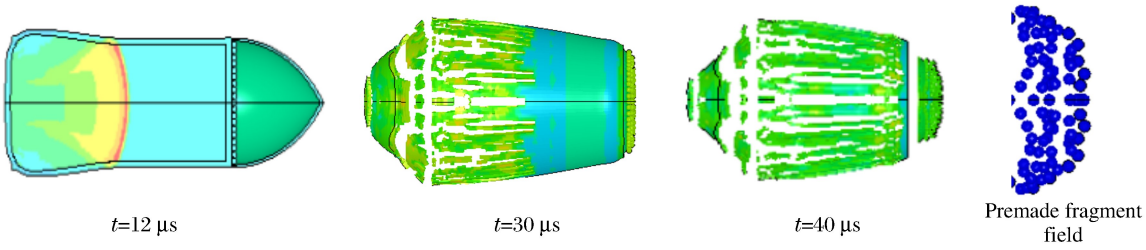


图 2 平板形头部战斗部破片场形成过程

Fig. 2 Formation process of fragment field for flat-shaped head warhead

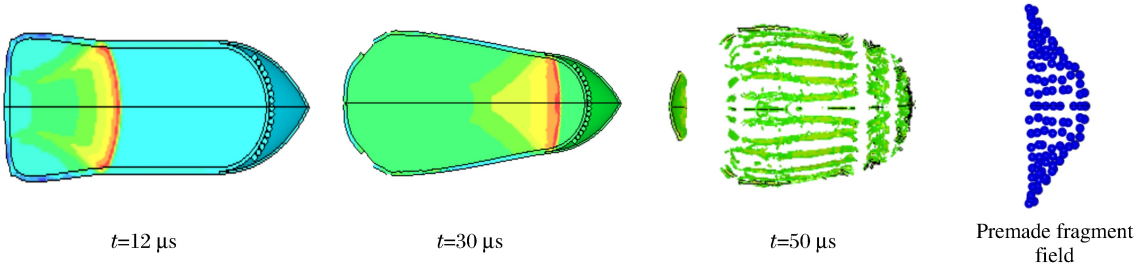


图 3 弧形头部战斗部 $R=45$ mm 破片场形成过程

Fig. 3 Formation process of fragment field for arc-shaped head warhead with $R=45$ mm

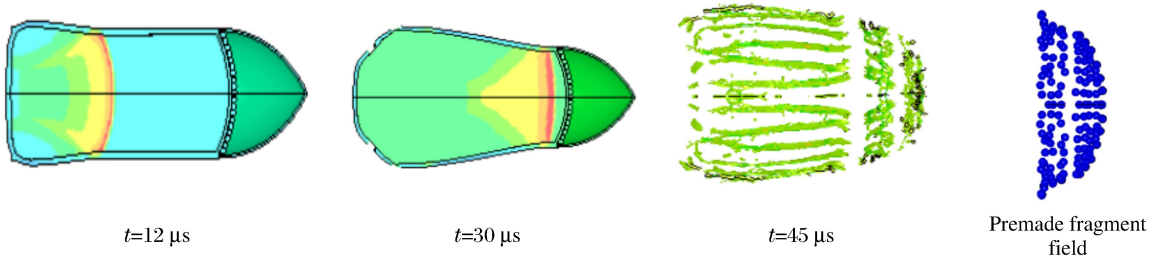


图 4 弧形头部战斗部 $R=90$ mm 破片场形成过程

Fig. 4 Formation process of fragment field for arc-shaped head warhead with $R=90$ mm

为了验证提出的战斗部结构能使轴向预制破片飞散角增大，运用 LS-PREPOST 后处理软件获取预制破片沿各个方向分速度，并由此计算出预制破片的飞散角 θ（预制破片速度与弹轴夹角）为：

$$\theta=\arccos(v_z/v) \tag{1}$$

式中：v 为预制破片速度，v_z 为破片沿弹丸轴线方向的分速度。表 3 和表 4 分别给出了平板形头部以及

R=90，45 mm 弧形头部 3 种结构战斗部端点起爆时典型位置预制破片速度参数及运用式(1)计算得到的预制破片飞散角。图 5～6 分别为相应条件下典型位置预制破片飞散参数拟合曲线。

表 3 平板形头部战斗部端点起爆典型位置预制破片飞散参数

Table 3 Flying parameters of premade fragment for flat head warhead

破片编号	v_z/(m·s^{-1})	v/(m·s^{-1})	θ/(°)	破片编号	v_z/(m·s^{-1})	v/(m·s^{-1})	θ/(°)
A_2	1 430	1 530	20.82	E_2	1 980	1 990	5.70
B_2	1 710	1 750	12.27	F_2	2 080	2 090	5.61
C_2	1 830	1 880	13.24	G_2	2 220	2 220	0
D_2	1 890	1 530	20.82				

表 4 弧形头部战斗部端点起爆典型位置预制破片飞散参数

Table 4 Flying parameters of premade fragment for arc-shaped head warhead

破片编号	R=90 mm			R=45 mm		
	v_z/(m·s^{-1})	v/(m·s^{-1})	θ/(°)	v_z/(m·s^{-1})	v/(m·s^{-1})	θ/(°)
A_1	1 383	1 502	22.96	1 160	1 836	50.81
B_1	1 760	1 975	26.98	1 197	1 473	35.65
C_1	2 176	2 356	22.54	1 576	1 946	35.92
D_1	2 355	2 448	15.08	1 728	2 062	33.07
E_1	2 395	2 478	14.87	2 104	2 229	19.28
F_1	2 426	2 480	11.98	2 192	2 353	21.32
G_1	2 608	2 645	9.59	2 492	2 513	7.41
H_1	2 595	2 608	5.72	2 572	2 583	5.29
I_1	2 710	2 711	0	2 664	2 664	0

由表 3 可知，平板形头部战斗部在端点起爆条件下的最大飞散角可达 20.82°，从位置 A_2～G_2，预制破片飞散角呈递减趋势，弹丸头部顶点处的预制破片基本沿弹轴方向飞散。预制破片的速度为 1 530～2 220 m/s。由表 4 可知，R=45 mm 圆弧形头部战斗部在端点起爆条件下的最大飞散角可达 50.81°，从位置 A_1～I_1，预制破片飞散角逐渐减小，弧形头部顶点位置处破片基本上沿着弹轴方向直线运动，预制破片速度为 1 470～2 660 m/s。R=90 mm 圆弧形头部战斗部的最大飞散角达到 26.98°，预制破片速度为 1 500～2 710 m/s。分析以上数据可知，当弧半径 R=90 mm 时，预制破片最大飞散角比平板形头部战斗部预制破片最大飞散角大 6°左右，速度增益约为 500 m/s；当弧半径 R=45 mm 时，预制破片最大飞散角比平板形头部战斗部预制破片最大飞散角大 30°左右，速度最大增益约为 440 m/s。对比弧半径 R=45 mm 和 R=90 mm 两种情况可知：弧半径 R 对预制破片最大飞散角影响很大，对最大速度的影响不明显；当弧半径 R=45 mm 时，预制破片最大飞散角约为 R=90 mm 时的两倍左右。

图 5～7 给出了平板形和 R=90，45 mm 弧形头部战斗部预制破片飞散角及飞散速度随位置的变化情况。由图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)可知，预制破片飞散角随位置近似呈线性变化，且图 7(a)中曲线的斜率最大，图 5(a)中曲线最平坦。图 5(b)为平板形头部战斗部典型位置预制破片飞散速度的拟合曲线，可以看出，从位置 A_2～G_2，破片速度近似线性递增，且 A_2 与 G_2 处破片速度相差较大，这是由于 A_2 处稀疏效应比 G_2 处大，且 G_2 处有效装药量明显比 A_2 处多。图 6(b)和图 7(b)分别为 R=90 和 45 mm 两种弧形头部战斗部典型位置处预制破片飞散速度的拟合曲线，可以看出，两种情况下，破片速度均随位置近似呈抛物线形变化，从位置 A_1～I_1，曲线斜率逐渐减小，破片速度的增长越来越缓慢，且破片最大速度差比图 5(b)中大很多，这是由于 I_1 位于战斗部头弧顶部，此位置破片对应的有效装药量比 A_1 处大很多。

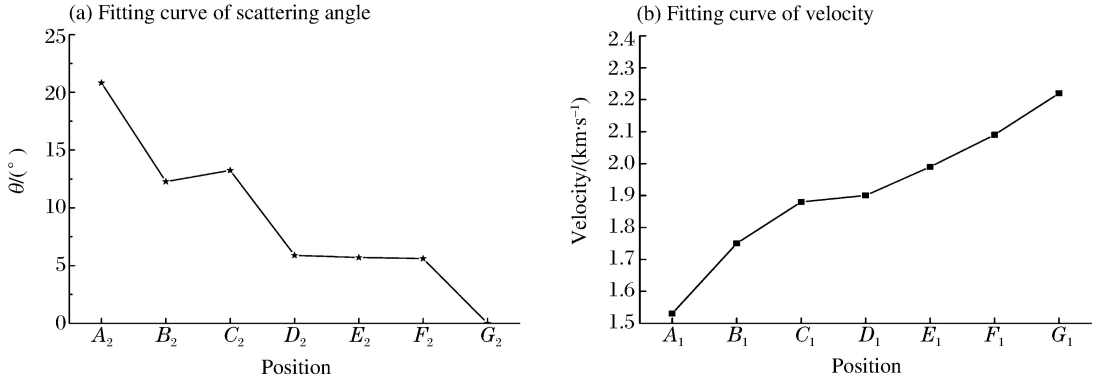


图 5 平板形头部战斗部端点起爆典型位置预制破片飞散参数拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of flying parameters for flat-shaped head warhead

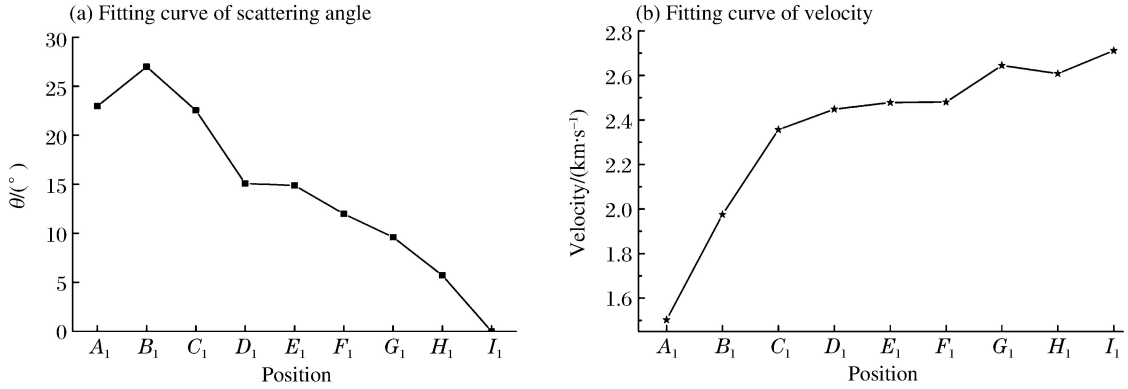


图 6 R=90 mm 弧形头部战斗部端点起爆时典型位置预制破片飞散参数拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of flying parameters for arc-shaped head warhead with R=90 mm

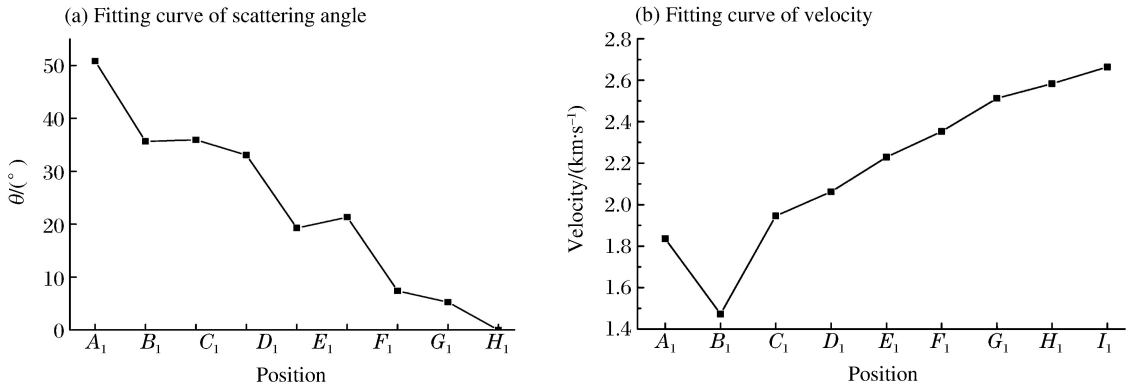


图 7 R=45 mm 弧形头部战斗部端点起爆时典型位置预制破片飞散参数拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of flying parameters for arc-shaped head warhead with R=45 mm

图 8 给出了平板形和弧形头部战斗部(R=45 和 90 mm)预制破片打击迹线。由图 8 可知:弧形头部战斗部预制破片最大飞散角明显比平板形战斗部大;平板形头部战斗部轴向预制破片在±20.82°范围内均匀分布;R=45,90 mm 弧形头部战斗部轴向预制破片分别在±50.81°和±26.98°范围内均匀分布。通过合理控制起爆时间,弧形头部战斗部的封锁区域将明显比平板形头部战斗部封锁区域大。表 5 为根据数值模拟结果计算出的预制破片分布参数,其中 L 为与起爆点的距离,S 为封锁区域面积,N 为破片密度。由表 5 可知,对于同种战斗部结构,随着距起爆点距离的增大,预制破片封锁区域逐渐增

大，相应单位面积破片数量也急剧下降。在距离起爆点相同位置处，不同战斗部结构封锁区域及破片密度相差也很大，其中 $R=45$ mm 弧形头部结构战斗部封锁区域最大，虽然对应单位面积破片数量相对较少，但在距离起爆点 7 m 处单位面积依然有 1 个以上预制破片分布，满足对空间域的封锁条件。由此可知，采用弧形头部结构能够显著增大战斗部轴向封锁区域，大大增强战斗部的轴向杀伤威力。

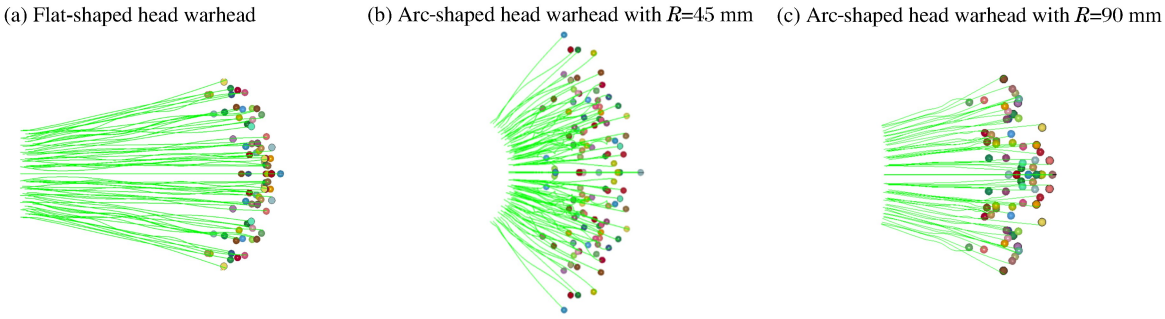


图 8　不同头部结构战斗部预制破片的打击迹线

Fig. 8　Shot-trace of preformed fragment for warhead with different head structures

表 5　距起爆点不同距离处不同结构战斗部的预制破片分布

Table 5　Distribution of premade fragments at different positions for warhead with different head structures

战斗部类型	$L=3$ m		$L=5$ m		$L=7$ m	
	S/m^2	N/m^{-2}	S/m^2	N/m^{-2}	S/m^2	N/m^{-2}
平板形	4.08	64	11.35	23	22.25	12
弧形，$R=90$ mm	7.35	24	20.35	9	39.87	4
弧形，$R=45$ mm	42.39	7	118.09	3	231.47	2

3　结　论

（1）平板形和圆弧形头部战斗部头部均布的预制破片均能在弹丸头部所在空域中均匀飞散。不同的是，圆弧形头部结构战斗部预制破片飞散角最大可达到 50.81°，而平板形头部战斗部预制破片飞散角最大只能达到 20.82°。由此可知，采用圆弧形头部战斗部结构可以增大战斗部的封锁区域。

（2）采用圆弧形头部能够有效增大轴向预制破片飞散速度，随着弧半径 R 的减小，速度增益有所减小，但可以增大预制破片的飞散角，当头弧半径取为 0.5 倍装药直径时，预制破片最大飞散角约为 1 倍装药直径时的 2 倍左右。在战斗部设计过程中，要综合考虑速度及飞散角两个因素，以确定合理的战斗部头部曲率半径。

（3）通过对数值模拟结果的分析可以推测，当战斗部采用圆弧形头部，并在弹丸头部加装多层预制破片，可实现预制破片飞散角的连续控制，并显著增大防空战斗部的封锁区域。

参考文献：

[1]　冯顺山，黄广炎，董永香. 一种聚焦式杀伤战斗部的设计方法[J]. 弹道学报，2009，21(1)：24-26.
FENG Shunshan, HUANG Guangyan, DONG Yongxiang. A new design method of fragment focusing warhead [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(1): 24-26.

[2]　刘彤，钱立新，余春祥. 破片聚焦战斗部的动态杀伤威力设计[J]. 爆炸与冲击，2005，25(6)：536-540.
LIU Tong, QIAN Lixin, YU Chunxiang. A conception of the dynamic lethality for focused fragmentation warhead [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 536-540.

[3]　魏继锋，焦清介，吴成. 预制破片战斗部试验数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报，2004，24(3)：39-41.
WEI Jifeng, JIAO Qingjie, WU Cheng. Experiment and simulation on premade fragment warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(3): 39-41.

[4] 严翰新,姜春兰,李明.不同起爆方式对聚焦战斗部性能影响的数值模拟[J].含能材料,2009,17(2):143-146.
YAN Hanxin, JIANG Chunlan, LI Ming. Numerical simulation of effect of different initiation positions on a certain focusing fragment warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(2):143-146.

[5] 邢恩峰,钱建平,赵国志,等.炸药驱动预制破片轴向抛掷速度规律研究[J].火炸药学报,2007,30(3):30-33.
XING Enfeng, QIAN Jianping, ZHAO Guozhi, et al. Study on rule of the axial speeds of projection fragments drived by explosive[J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants, 2007,30(3):30-33.

[6] 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.
GUO Ziyun, ZHAO Taiyong, CHEN Zhigang. Numerical simulation of lethality influence of warhead end premade fragment[J]. Chinese Journal of Computer Simulation, 2015,32(3):33-37.

[7] 刘洪峰,郭光全,卢士伟,等.战斗部轴向预制破片威力性能仿真与试验研究[J].中北大学学报,2015,36(增刊 1):11-14.
LIU Hongfeng, GUO Guangquan, LU Shiwei, et al. Numerical simulation and test research of the warhead axial premade fragment power performance[J]. Journal of North University of China, 2015,36(Suppl 1):11-14.

[8] 张世林.轴向预破片战斗部破片飞散特性影响因素分析[D].太原:中北大学,2012.

[9] 时党勇,李裕春,张胜民.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.

Enhancement of axial lethality of warhead

TAN Zhen, CHEN Pengwan, ZHOU Qiang, ZHU Kui, LIU Wenbin

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

Abstract: The lethality of the circumferential direction fragment field of the warhead has improved greatly due to the premade fragment technique, but the axial fragments are still too few to block the battle space completely. Aiming to improve the distribution of the axial fragment field of the warhead and explore the factors influencing the velocity and scattering angle of the axial premade fragments, we designed an axial forward enhanced warhead by changing the shape and curvature of its head, and displacing the premade fragment to the head of the warhead to improve its lethality in the axial direction. We simulated the whole explosive driven process using LS-DYNA, the influence of the warhead structure on the velocity, and obtained the scattering angle of the axial premade fragments by setting different initial conditions. The results show that the velocity and the scattering angle of the axial premade fragments were closely related with the warhead structure. In addition, when the arc-shaped head warhead was adopted, the velocity, scattering angle, blocking area, and the lethality of the premade fragments were all significantly ameliorated.

Keywords: premade fragment; LS-DYNA; warhead; scattering angle

(责任编辑 王玉锋)