

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.024

曲率半径对聚焦战斗部影响的数值仿真

苗春壮, 梁增友, 邓德志, 梁福地, 王明广

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对侧表面曲率半径对破片聚焦战斗部飞散规律的影响, 对不同曲率半径的预制破片聚焦战斗部的形成及飞散过程进行数值模拟。应用数值模拟的方式, 构建聚焦战斗部有限元模型, 给出了不同曲率半径下预制破片形成聚焦带的过程, 通过破片飞散分布及速度分析, 找出曲率半径对破片速度、破片密集度的影响规律。仿真结果表明: 侧表面曲率半径越大则破片初速越大, 破片密集度降低; 随着曲率半径的增大, 破片速度的增长率逐渐减小。该计算结果可为预制式聚焦战斗部的设计提供参考。

关键词: 聚焦战斗部; 曲率半径; 预制破片; 数值计算

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Numerical Simulation Influence of Curvature Radius on Focusing Warhead

Miao Chunzhuang, Liang Zengyou, Deng Dezhi, Liang Fudi, Wang Mingguang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the influence of side surface radius of curvature on the dispersion rules of fragment focusing warhead, the formation and dispersion process of prefabricated fragment focusing warhead with different curvature radius were simulated. Use the method of numerical simulation, the finite element model of the focusing warhead is constructed, and the process of forming the focusing band by the prefabricated fragments under different curvature radius is given. Through the fragmentation dispersion and velocity analysis of the fragments, the influence of the radius of curvature on the fragmentation velocity and the intensity is found. The simulation results show that the larger the radius of curvature of the side surface, the larger the fragmentation speed, the less the concentration. With the increase of the radius of curvature, the growth rate of fragmentation speed decreases. This calculation can provide a reference for the design of the prefabricated focusing warhead.

Keywords: focusing warhead; curvature radius; prefabricated fragment; numerical calculation

0 引言

破片杀伤战斗部作为典型的反空中目标武器得到了广泛的应用。然而在特定的作战环境中, 普通的破片战斗部因其飞散角过大、密集度小, 能够击中目标的有效破片数量较少而达不到毁伤要求。聚焦战斗部是近年来出现的一种新型战斗部, 将装药设计成中间细、两头粗的腰鼓形, 能够产生密集分布的聚焦束破片, 可对目标进行“切割”式毁伤, 能够有效应对飞机、导弹等空中目标。

冯顺山等^[1]通过工程计算提出了一种聚焦战斗部的设计方法, 通过计算战斗部各微元的旋转角度, 提高了聚焦战斗部的威力; 王娟娟等^[2]通过偏心起爆的方式提高了聚焦战斗部在定向区的聚焦性, 且破片速度和破片密度均显著增加; 梁增友等^[3]对聚焦式杆条战斗部进行了数值模拟, 得出了各层杆条数量与杆条错位排布角度对聚焦式杆条战斗部的影响规律; 李晋庆等^[4]提出了针对聚焦战斗部破片初

速与飞散角的计算公式, 并用数值模拟证明了该公式的准确性; 李向荣等^[5]通过普通杀爆战斗部与聚焦战斗部侵彻靶板的对比实验, 得出后者的毁伤效果远大于前者; 宋浦等^[6]讨论了聚焦战斗部毁伤目标的特点, 给出了一种破片聚焦战斗部毁伤典型空中目标的杀伤概率计算模型, 具有一定的工程参考价值。

笔者针对圆弧曲线的聚焦破片战斗部, 通过数值模拟的方式研究不同曲率半径下预制破片形成聚焦带的过程, 找出曲率半径对破片速度、破片密集度的影响规律。计算结果可为预制式聚焦战斗部的设计提供参考。

1 模型建立

1.1 聚焦战斗部结构

聚焦战斗部的设计主要是通过特殊的装药曲线结构和起爆方式来控制破片的飞散方向, 使大部分破片向特定区域飞散, 从而对目标进行集中打击。

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-09-30

作者简介: 苗春壮(1992—), 男, 山西人, 硕士, 从事战斗部高效毁伤研究。

图 1 为传统的圆柱形破片战斗部与聚焦战斗部的破片飞散示意图。

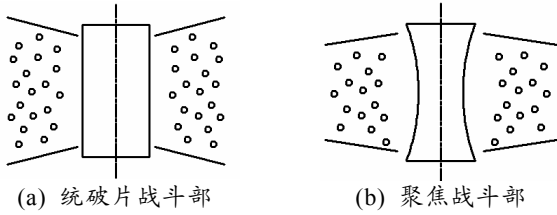


图 1 2 种战斗部飞散示意图

由图 1 可知：聚焦战斗部相对于普通圆柱破片战斗部飞散角更小，打击更集中。以圆弧曲线的聚焦战斗部为例进行研究，其示意图如图 2 所示。

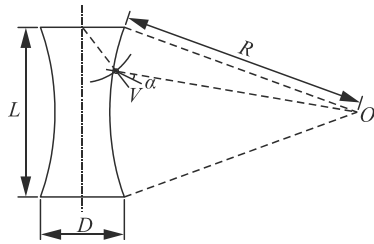


图 2 聚焦战斗部

对于端面中心点起爆的聚焦战斗部，爆轰波在传播到破片时，不能够完全贴合侧表面，导致破片实际的运动方向并不指向圆弧的圆心 O ，而是介于曲面法线与爆轰波法线之间，与曲面法线存在一个夹角 α ，且对于不同位置的破片， α 的大小不同。计算所有的 α 值较为困难，采用数值模拟的方式能够大量减少工作复杂度，节省计算时间。

1.2 有限元模型

实际工程中战斗部结构较为复杂，在转化为有限元模型时可在不影响计算精度的情况下进行适当简化^[7]。聚焦战斗部的有限元模型可简化为装药、空气、内衬、端盖和预制破片 5 部分，曲率半径 R 设置 350、400、450、500 和 550 mm 5 组。以 $R=350$ mm 为例，1/4 有限元模型如图 3 所示(略去空气)。

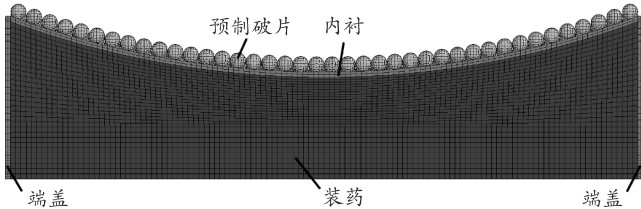


图 3 聚焦战斗部有限元模型

内部装药使用高能炸药 8701，装药直径 $D=120$ mm，装药长度 $L=240$ mm。端盖与内衬材料使用铝，且壁厚均为 2 mm。预制破片为钨球，直径为 6 mm，共 40 层，每层 11 个，共 440 个(全模型 1 760 个)。模型平均网格尺寸为 1 mm，共计 250 605 个节点和

210 600 个单元。

为节省计算时间，使用 1/4 模型并定义对称约束。单位制采用 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ ，起爆方式选择两端面中心点起爆，计算时间 300 μs ，采用 ALE 算法应对网格大变形问题。

1.3 材料模型

装药使用高能炸药 8701，采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程来描述爆炸中爆轰气体产物的压力、能量和体积膨胀特性。状态方程表达式为

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

式中： ρ 为炸药密度； D 为爆速； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药 JWM 常数。材料参数见表 1。

表 1 炸药状态方程参数

材料	密度/(g/cm ³)	爆速/(m/s)	p_{cj} /Mbar	β	σ_y /Mbar
8701	1.78	8 390	0.34	0	0

注： p_{cj} 为 C-J 压力， σ_y 为屈服应力。

内衬层与端盖材料均为铝，采用 Johnson cook 材料模型和 Griineisen 状态方程来描述材料特性，能够较好地描述材料的应变硬化和热软化效应。材料参数见表 2。

表 2 铝材料参数

材料	密度/(g/cm ³)	E /Mbar	A	B	T_m /K
铝	2.78	0.276	3.25	5.55	775

注： E 为杨氏模量， T_m 为熔点， A 、 B 为常数。

钨破片采用 PLASTIC_KINEMATIC 随动硬化模型，基本参数见表 3。

表 3 钨材料参数

材料	密度/(g/cm ³)	E /Mbar	PR	σ_y /Mbar	E_t	β
钨	17.3	3.57	0.303	0.02	0.079	1

注： E 为杨氏模量， PR 为泊松比， σ_y 为屈服应力， E_t 为切线模量， β 为硬化系数。

2 结果与讨论

2.1 破片飞散分布分析

图 4 为聚焦战斗部 ($R=350$ mm) 在 20、100、300 μs 3 个典型时间的破片飞散图。从图中可以看出：在 20 μs 时，爆轰波从 2 个端面传播至战斗部中部，所有预制破片在爆轰波的驱动下开始加速；在 100 μs 时，破片区中心产生了较为明显的“突刺”，这是由于爆轰波汇聚产生聚能效应进一步增加了破片速度；在 300 μs 时，95%的预制破片汇入破片聚焦带，形成稳定的杀伤环。

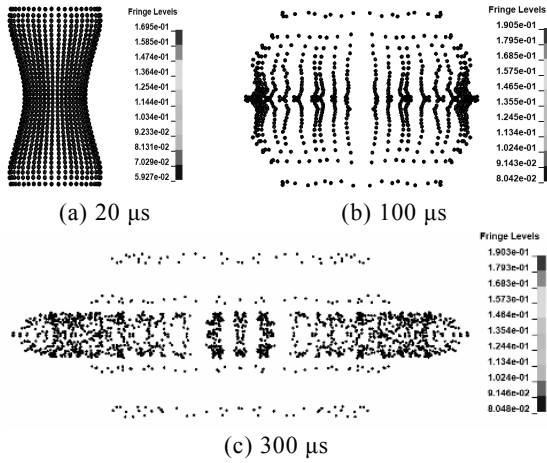


图 4 破片飞散图 ($R=350\text{ mm}$)

图 5 为 5 种战斗部在 $300\ \mu\text{s}$ 时的合速度云图。从图中可以看出： $R=350\text{ mm}$ 的聚焦战斗部形成的破片聚焦带效果最好，宽度也最窄，且绝大多数破片汇入“杀伤环”中；随着曲率半径的增大，破片聚焦带开始变宽，但聚焦带外侧破片密集度太低，这会降低对目标的毁伤效果。

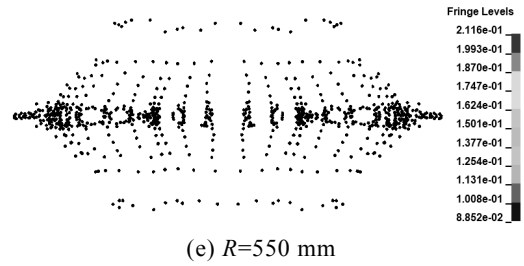


图 5 各组况 $t=300\ \mu\text{s}$ 时破片飞散图

与普通圆柱体杀爆战斗部不同，聚焦战斗部形成的预制破片并非以球面的形式分布，因此用飞散角和方位角来衡量破片的密集度并不准确，而是用聚焦带内的破片数 n 与聚焦带宽度 d 的比值来评估。其他组况的破片形成过程类似。表 4 给出了 $300\ \mu\text{s}$ 时各组况破片数据。

表 4 各组况破片数据

R/mm	n	d/mm	$(n/d)/\text{mm}$
350	1 672	169.7	9.852 7
400	1 656	197.3	8.393 3
450	1 628	210.4	7.737 6
500	1 612	220.9	7.297 4
550	1 584	228.1	6.944 3

由表可知：随着曲率半径的增大，汇入聚焦带的破片数量减少，聚焦带的宽度增大，破片密集度逐渐降低。

2.2 破片速度分析

图 6 为聚焦战斗部 ($R=350\text{ mm}$) 不同层破片速度关于时间的变化曲线。考虑到对称性和方便观察，只选取战斗部上半部分的破片。由中心向上端均匀选取 5 个参考节点。

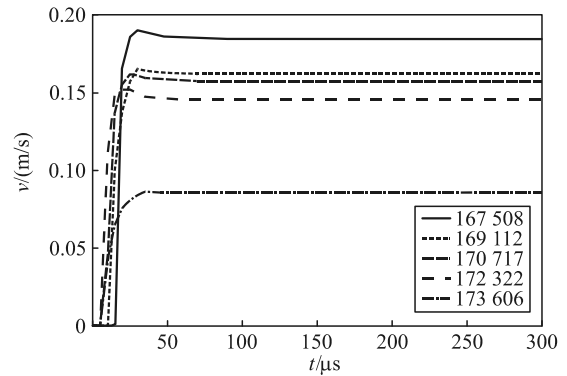
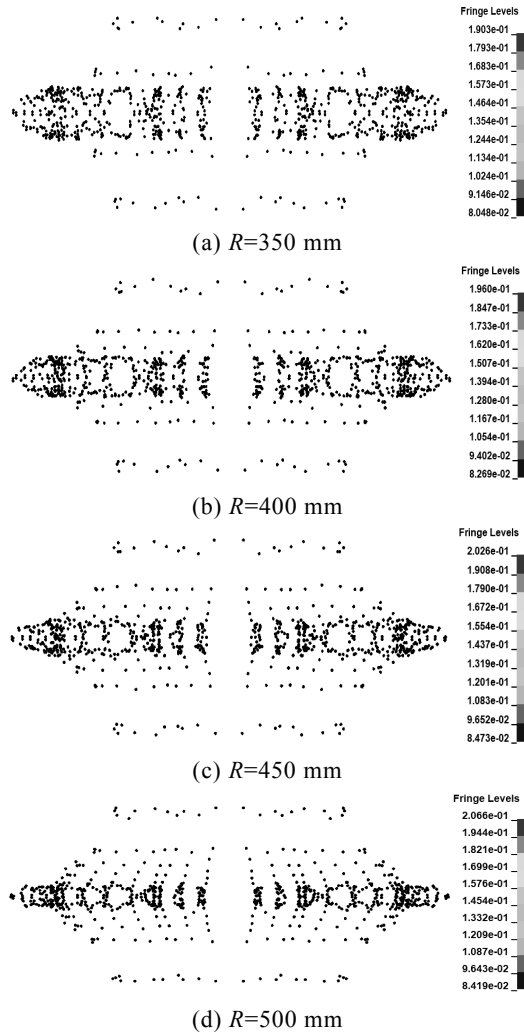


图 6 破片合速度-时间曲线 ($R=350\text{ mm}$)

由图可知：各层破片在 $100\ \mu\text{s}$ 时速度基本稳定，中心处破片速度最高，为 $1\ 850\text{ m/s}$ ；端部破片速度最低，为 850 m/s ；其他层破片速度相差较小，均处在 $1\ 500\sim 1\ 600\text{ m/s}$ 。

图 7 为破片平均速度与曲率半径的关系，平均速度为各层破片速度的算术平均值。



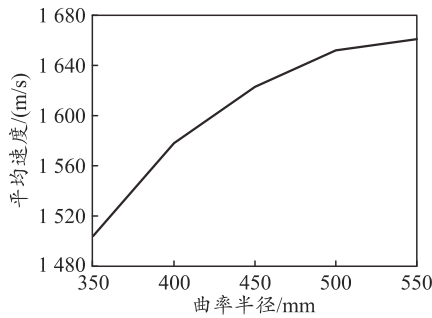


图 7 破片平均速度-曲率半径

据图分析可知：随着曲率半径的增大，预制破片的平均速度也随之增大，这是由于在装药直径不变的条件下，增大侧表面曲率半径会提高装药质量，根据 Gurney^[7]公式

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\beta / (1 + \beta)} \quad (2)$$

式中， $\beta=C/m$ ， C 为装药质量， m 为破片质量。装药质量增加使 β 增大，则破片速度增加。仿真结果与理论计算相符，但随着曲率半径的增大，破片平均速度增长率降低，说明增加半径对破片速度的影响越来越小。

3 结束语

笔者对 5 种不同曲率半径的预制破片聚焦战斗部的形成及飞散过程进行数值模拟，得出以下结论：

1) 聚焦战斗部在起爆后，爆轰波在中心处汇聚产生聚能效应，使中间破片获得更高速度产生“破

(上接第 92 页)

2) 分析表明：通过 C-N、N-N、C=N 和 N=N 键的引入，提高了含氮量，保持了较高的能量水平和做功能力，并脱离了爆炸性基团限制，以五元杂环为平面骨架形成了大 π 键和氢键，具有良好的稳定性，从而实现了高能量水平和低感度之间的平衡。

参考文献：

[1] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal penetration/perforation of concrete target by rigid projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(6): 617-637.

[2] 高金霞, 赵卫刚, 郑腾, 等. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. 火工品, 2008(4): 4-7.

[3] 李媛媛, 南海. 国外浇注 PBX 炸药在硬目标侵彻武器中的应用[J]. 飞航导弹, 2012(11): 88-91.

[4] FISCHER N, FISCHER D, KLAPOTKE T M, et al. Pushing the limits of energetic materials—the synthesis and characterization of dihydroxylammonium, 5'-bisterazole-1, 1'-diolate[J]. J Mater Chem, 2012, 22: 20418-20422.

[5] 赵廷兴, 田均均, 李磊, 等. 5, 5'-联四唑-1, 1'-二氧二

片突刺带”，随后各层破片向中心汇聚，形成密集的破片“杀伤环”。

2) 随着曲率半径增大，汇入聚焦带的破片数量减少，聚焦带的宽度增大，破片密集度逐渐降低；同时，破片速度随着曲率半径的增大而提高，但增长率越来越小。在设计聚焦战斗部时，应当根据具体的目标选取最佳的曲率半径，从而达到最大的毁伤效果。

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, 38.

[2] 王娟娟, 郭双锋, 袁宝慧, 等. 聚焦战斗部破片聚焦性能的数值计算和试验研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 87-90.

[3] 梁增友, 丁方超, 陈智刚, 等. 杆条参数对聚焦式杆条战斗部毁伤效能的影响[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 88-91.

[4] 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(5): 529-531.

[5] 李向荣, 刘宗伟, 周世海. 聚焦战斗部与普通杀爆战斗部毁伤效能比较[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5): 100-102.

[6] 宋浦, 肖川, 袁宝慧. 破片聚焦式战斗部毁伤直升机类目标的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2002(3): 50-51, 55.

[7] 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(12): 65-69.

[8] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 96-97.

[9] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702-705.

[10] 苗成才, 吉应旭, 钱露, 等. 新型联四唑类含能材料 TKX-50 的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(5): 7-11.

[11] BAKER P J. Impact-initiated detonative and nondetonative reactions in confined TRITONAL, COMPOSITION H-6, and PBXN-109[C]. Snowmass: 11th Symposium on Detonation, 1988.

[12] 朱周朔, 姜振明, 王鹏程, 等. 5,5'-联四唑-1,1'-二氧二羟胺的合成及其性能[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 332-336.

[13] THOMAS M, KLAPOTKE, PHILIPP C, et al. Thermal stabilization of energetic materials by the aromatic nitrogen-rich, 4', 5, 5'-tetraamino-3, 3'-bi-1, 2, 4-triazolium cation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015(3): 2658-2668.