

doi: 10.7690/bgzdh.2024.05.015

聚焦式钨球定向战斗部设计仿真研究

李惠明, 李超, 张有峰, 高萌, 吕向群
(陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075)

摘要: 为提高反卫星武器的毁伤能力, 提出聚焦式钨球定向战斗部的设计方案。结合理论分析、数值模拟方法, 分析单层、双层、三层钨球定向式杀伤战斗部的作用机理, 利用 Matlab 软件对模拟结果进行分析并计算破片群在 100 m 处的分布形状、密度和分布空间; 通过计算钨球毁伤概率, 综合分析得出双层排列定向战斗部毁伤效果最佳。结果表明, 该方案对空间武器战斗部设计有一定指导意义。

关键词: 钨球; 定向战斗部; 数值模拟; 毁伤概率

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Research on Design and Simulation of Tungsten Sphere Directional Warhead

Li Huiming, Li Chao, Zhang Youfeng, Gao Meng, LYU Xiangqun
(Ordnance Sergeant College, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: In order to improve the damage capability of anti-satellite weapons, the design scheme of focusing tungsten ball warhead was proposed. Combined with theoretical analysis and numerical simulation method, the action mechanism of single-layer, double-layer and three-layer tungsten sphere directed killing warhead was analyzed, and the simulation results were analyzed by Matlab software, and the distribution shape, density and distribution space of fragment group at 100 m were calculated. By calculating the damage probability of tungsten sphere, the comprehensive analysis showed that the damage effect of double-layer arrangement directional warhead was the best. The results show that the scheme has a certain guiding significance for the design of space weapon warhead.

Keywords: tungsten sphere; directional warhead; numerical simulation; damage probability

0 引言

随着国际形势的变化以及大国军事战略的改变, 军用卫星在局部战争中的作用日益增强, 促使各国更加重视航天系统的发展与军事应用。我国研究反卫星武器技术已经多年, 在关键功能模块与集成等技术都有所突破。国外在微小卫星方面的研究成果时有报导, 但反卫星武器研究报道很少。

目前的反卫星武器主要包括核能、动能和定向能杀伤武器。其中定向战斗部具有成本低、杀伤概率大、引战配合精度高等特点。现在, 很多反导反卫星战斗部采用定向战斗部技术^[1-2]。

定向杀伤战斗部是通过聚能装药结构或起爆点控制等方法^[3], 使破片向某一指定方向飞散或提高在某方向上飞散速度和数量, 从而提高战斗部在某方向上的威力。通常可以使破片的利用率由 10% 提高到 50% 以上, 炸药能量的利用率由原来的 17% 提高到 75% 左右^[1]。笔者提出一种聚焦式钨球定向战斗部的设计方案, 计算钨球毁伤概率。

1 数值模拟研究

1.1 定向战斗部结构

笔者设计的定向战斗部系统由预制破片、高能炸药、点火机构、壳体组成, 如图 1 所示。

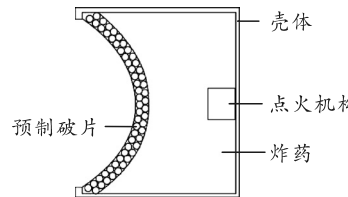


图 1 战斗部模型

根据数值模拟研究, 对于锥形装药结构锥角在 $145^\circ \sim 160^\circ$ 之间, 所形成的自锻破片头尾速度几乎相等^[4]。为进一步减小速度差, 采用过渡性更好的球缺型装药, 如图 2 所示, 取锥角内切圆, 曲率中心点 C 坐标为 $(0, y)$, 曲率半径为 R , 根据三角定理及等式变换得:

$$R = D_k / (2\cos a) \quad (1)$$

式中 D_k 是装药直径; 取半锥角 a 值 $72.5^\circ \sim 80^\circ$ 代入

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-02-15

第一作者: 李惠明(1985—), 男, 江苏人, 硕士。

式(1)，求得：

$$R=(1.67\sim 2.88)D_k \quad (2)$$

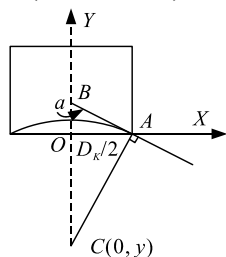


图 2 球缺型罩

1.2 材料及状态方程参数选择

预制破片选取钨合金，具有密实性高、抗碎性强、工艺性好的特性，由于钨球在爆轰载荷作用下变形小，所以采用弹性材料模型。该材料模型确保了破片在驱动和飞散过程不会发生损坏，模型参数如表 1 所示。

表 1 钨球材料模型参数

$P/(g/cm^3)$	E/GPa	μ
17.8	200	0.22

炸药选取 HMX，具有爆速高、密度大、良好的高低温安定性，且不易挥发。采用 JWL 状态方程来描述爆轰产物的压力、体积和能量特性，参数如表 2 所示，爆炸性能参数如表 3 所示。

表 2 JWL 状态方程参数

A/GPa	B/GPa	C/GPa	R_1	R_2	W
852.4	18.02	3.3621	4.6	1.3	0.38

表 3 HMX 炸药爆炸性能参数

$\rho/(g/cm^3)$	P_{CJ}/GPa	$D_{CJ}/(m/s)$	$Q_e/(KJ/cm^3)$	γ
1.85	37.0	8 900	10.132	3.02

壳体材料选取纯铝，具有密度低、工艺性能好和抗腐蚀能力强等特点。采用 Cowper and Symonds 塑性动态硬化模型，模型参数如表 4 所示。

表 4 铝板材料模型参数

$\rho/(g/cm^3)$	E/GPa	σ_y/GPa	μ
2.7	70.6	0.276	0.33

1.3 算法选取^[5]

选择 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件，采用流构耦合算法，炸药和四周的空气介质采用 Euler 网格，钨球、壳体采用 Lagrange 网格，置入 Euler 网格中。为消除边界效应，空气介质的外边界设置成压力输出边界以模拟无限 Euler 场，钨球与钨球之间定义为自动单面接触，采用中心起爆方式。

1.4 单层排列钨球

结合式(2)，考虑到尽量增加钨球排列数量^[6]，

取药型罩曲率半径上限为 $2.88D_k$ ， D_k 取 180 mm，破片总个数为 1 000 个，破片总质量 1 030 g，炸药质量为 2 026 g。装药结构及破片分布情况如图 3 所示。

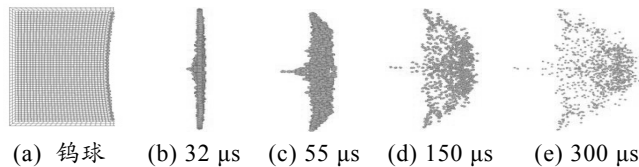


图 3 单层破片飞散分布

通过数据分析，破片速度在 $0\sim 50\ \mu s$ 不断增大，且变化较大，在 $50\ \mu s$ 以后变化缓慢，最小速度为 1 913.2 m/s，最大速度为 2 625.0 m/s，平均速度 2 250 m/s，速度差约为 712.2 m/s，钨球前后的速度差较小。通过式(3)计算的钨球破片平均速度为 2 213.3 m/s。数值仿真结果和格尼公式计算结果吻合较好。

$$V = \sqrt{2E} \left[\frac{(1+2M/C)^3 + 1}{6(1+M/C)} + \frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

上式是计算破片平均速度的格尼公式。式中： M 为金属质量； C 为炸药质量； E 为炸药的格尼能，HMX 炸药的格尼能为 2 800。

利用 Matlab 软件处理 LSDYNA-3D 软件 $300\ \mu s$ 生成的 nodout 文件，再推算至钨球飞行 100 m 时的破片径向分布，如图 4 所示，战斗部径向破坏半径集中在 $0\sim 5\ m$ ， $5\sim 14\ m$ 的范围钨球数稀少。如图 5 所示，沿轴向钨球主要分布在 $75\sim 100\ m$ 。

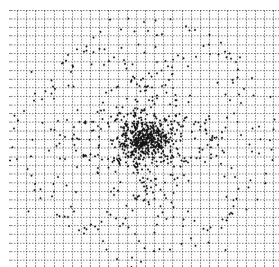


图 4 径向分布

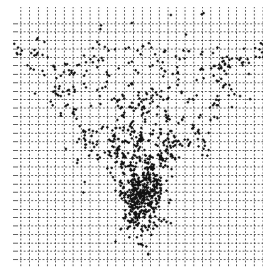


图 5 轴向分布

1.5 双层排列钨球

采用相同装药结构，2 层钨球，破片总个数为 1 990 个，破片总质量为 2 050 g，炸药质量为 2 026 g，数值模拟结果如图 6 所示。

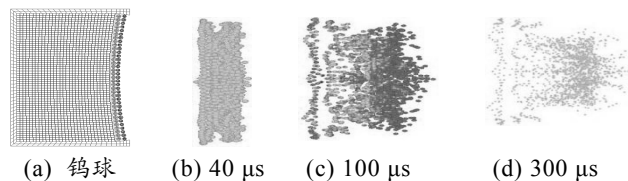


图 6 双层破片钨球飞散

通过数据分析,破片速度在 0~80 μs 不断增大,而且其值变化剧烈,在 80 μs 以后区域缓慢。最小速度为 1 600 m/s,最大速度为 2 400 m/s,平均速度 2 250 m/s,前后速度差约为 800 m/s,格尼公式计算钨球破片平均速度为 2 261.1 m/s,数值仿真结果和格尼公式计算结果吻合。

图 7 绘制出双层钨球飞行 100 m 时的破片径向分布图,破片分布相对单层破片中心集中区域更大,破片在径向主要分布在 7 m 区域内,每个方格内有 6 颗以上的杀伤破片。如图 8 所示,破片轴向分布长度在 60~110 m 范围内,且主要集中在 80~100 m 内。

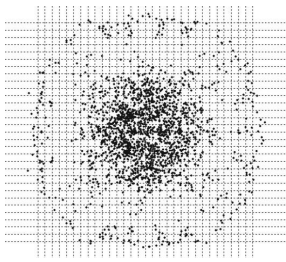


图 7 径向分布

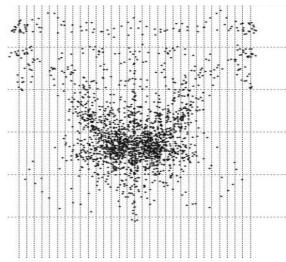


图 8 轴向分布

1.6 三层排列钨球

由于钨球的层数变成三层,钨球间的相互碰撞频率较高,对实验结果影响较大,所以此结构采用平板排列的钨球。壳体口部加厚,提高刚度,改变爆轰波波,有利于钨球顺利的沿壳体内壁飞出,有效提高了破片的汇聚能力。结果如图 9 所示。

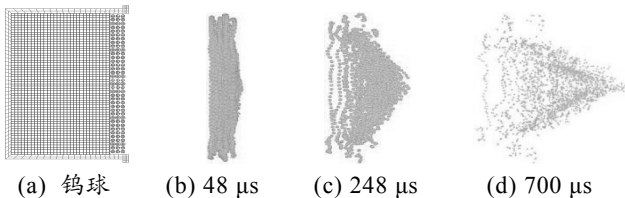


图 9 700 μs 钨球飞散

通过数据分析,破片速度在 0~50 μs 不断增大,而且其值变化剧烈;而在 50 μs 以后区域变化缓慢。在 700 μs 后,钨球速度趋向稳定,几乎没有碰撞。最小速度为 1 125 m/s,最大速度为 1 880 m/s,平均速度约为 1 500 m/s,前后速度差约为 755 m/s,格尼公式计算钨球破片平均速度为 1 875.1 m/s。数值仿真的结果和格尼公式计算的结果有一定误差,主要原因是该战斗部设计钨球数量多,速度梯度小,碰撞摩擦较频繁。

图 10 绘制出三层钨球飞行 100 m 时的破片径向分布图,破片的分布相对单、双层破片集中区域更大。破片在径向主要分布在 11 m 的区域内,每个

方格内有 1 颗以上的杀伤破片。如图 11 所示,轴向破片的分布长度在 65~105 m 范围内,且主要集中在 70~100 m 区间内。

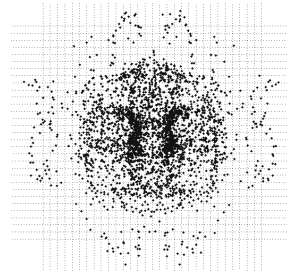


图 10 径向分布

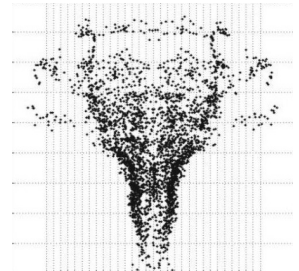


图 11 轴向分布直方图

2 毁伤概率计算与分析^[7]

杀伤面积是评定弹药杀伤效果的标准,设目标域内的目标密度为 σ,而预期杀伤目标数为 N_c,则杀伤面积 A_L可用数学形式表示为:

$$A_L = N_c / \sigma \tag{4}$$

一个目标在破片飞散角内某处的暴露面积为 A_e,目标所占的面积为 1/σ,则在此面积内目标被落入该面积的一个杀伤破片杀伤概率为:

$$A_e / (1/\sigma) = A_e \sigma \tag{5}$$

以 ρ(x, y)表示杀伤场内(x, y)点处的杀伤破片密度,面积内的杀伤破片为 1/σ, ρ(x, y)。至少有一个杀伤破片命中 1/σ 目标的概率为:

$$P_k = 1 - e^{-A_e \rho(x, y)} \tag{6}$$

根据计算破片对目标杀伤概率,可求出各微元面积的杀伤面积,其和为总的杀伤面积,显然杀伤面积大小与杀伤概率取值有关。

根据上式计算单层、双层、三层的杀伤概率,计算结果如表 5—7 所示。其中杀伤概率 > 0.9 是密集杀伤破片,杀伤概率为 0.5~0.9 之间是有效杀伤破片,杀伤概率 < 0.5 是弱杀伤破片。

从表 5—7 可直观地看出:三层密集杀伤半径最大杀伤半径为 12 m,双层为 8 m,单层为 4 m,如果算上有效杀伤情况,双层与三层杀伤半径、杀伤面积、杀伤概率都很接近。综合考虑导弹整体设计,双层战斗部质量轻,结构简单合理,方向性更好,杀伤效果和效费比更优,适合定向预制破片战斗部设计综合要求。

表 5 密集杀伤

层数	半径/m	面积/m ²	破片数	杀伤概率
单层	4.0	50.3	550	1.000 0
双层	8.0	201.1	1 410	0.999 1
三层	12.0	452.4	2 894	0.998 3