

# 新型双层离散杆战斗部杆条飞散的数值研究

鲁修国,陈英萍,李玉生

(重庆长安工业有限责任公司,重庆401120)

**摘要:**针对多段离散杆战斗部各段杆环间隙大的问题,提出了一种新型双层离散杆战斗部结构,利用非线性有限元软件进行了爆炸载荷下双层离散杆战斗部杆条飞散过程的数值模拟分析。研究表明,新型双层离散杆战斗部能够形成两个相互交叉且独立的杀伤环,可对目标产生网状切割作用及二次毁伤,有效提高对目标关键部位的杀伤密度及毁伤概率。

**关键词:**战斗部;双层离散杆;数值模拟

**本文引用格式:**鲁修国,陈英萍,李玉生.新型双层离散杆战斗部杆条飞散的数值研究[J].兵器装备工程学报,2017(10):21-24.

**Citation format:**LU Xiuguo, CHEN Yingping, LI Yusheng. Numerical Simulation on the Ejection Process of Double-Deck Discrete Rod Warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(10):21-24.

**中图分类号:**TJ410 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-2304(2017)10-0021-04

## Numerical Simulation on the Ejection Process of Double-Deck Discrete Rod Warhead

LU Xiuguo, CHEN Yingping, LI Yusheng

(Chongqing Changan Industrial (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** A new double-deck discrete rod warhead was proposed for the problem of the multi-stage discrete rod warheads. A nonlinear finite element software was used to complete the numerical simulation of the double-deck discrete rod deploying under explosion load, and the simulation results were analyzed. The results show that the new double-deck discrete rod warhead can form two inter-digitated and independent killer rings, which can produce mesh cutting and secondary damage to the target, so the killing density and the probability of damage on key parts of targets can effectively be improved.

**Key words:** warhead; double-deck discrete rod; numerical simulation

离散杆战斗部是一种特殊的预制破片战斗部,采用金属杆条作为杀伤元素。当战斗部装药爆炸后,驱动金属杆条向外高速飞行。由于杆体具有较大的质量和速度,因而具有较高的侵彻能力,可对武装直升机、导弹等目标实现“线切割”毁伤<sup>[1]</sup>。近年来,可控旋转离散杆战斗部已经成为防空战斗部的重要类型之一,由于兼顾了连续杆战斗部(连续切割)和离散杆战斗部(初速高)的优点备受国内外的关注<sup>[2-5]</sup>,更有人提出了针对细长杆状目标的双束旋转式<sup>[6-7]</sup>与三段可控离散杆战斗部<sup>[8]</sup>,以增加杆条密度,保证离散杆毁伤效果,但

该类战斗部离散杆环间的轴向间距较大,与单层可控离散杆战斗部相比,轴向单位距离的杆条数量与对目标的毁伤效果无明显优势。为此,本文提出一种新型双层离散杆战斗部结构,并应用有限元软件对其杆条飞散过程进行了数值模拟,可为离散杆战斗部设计提供一种新的选择。

### 1 新型双层离散杆战斗部结构描述

新型双层离散杆结构简图如图1,其几何结构参数主要

有7个,即战斗部直径 $D_d$ ,主装药直径 $D$ ,药柱高 $H$ ,杆条直径 $D_r$ ,杆条长度 $L$ ,杆条斜置角 $\theta$ ,内衬壁厚 $h_n$ 。它是在可控旋转离散杆战斗部原有杆环外侧再添加一层具有与内层杆环倾斜方向相反而角度相等的斜置角的杆环。在炸药装药起爆后,爆轰作用使与战斗部轴线具有一定斜置角的杆条的两端形成不同的速度矢量,使其在径向飞散的同时,也伴随侧向旋转运动。随着杆条不断旋转调整姿态,杆条在特定杀伤半径处形成一个准连续的“杀伤环”,产生类似于连续杆的切割作用。由于该结构具有两层斜置角方向相反的离散杆,故而会形成两个相互交叉的“杀伤环”,进而对目标产生网状切割作用。

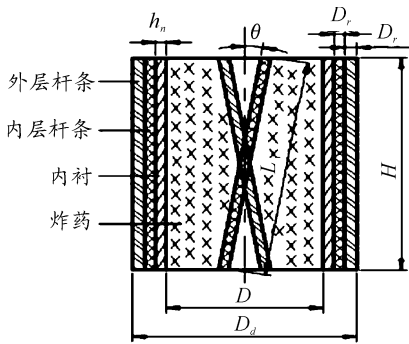


图1 新型双层离散杆结构简图

本文讨论的模型结构参数为:战斗部直径为100 mm;主装药采用B炸药,装药直径为74 mm,药柱高140 mm;离散杆材料为10号钢,采用圆柱形杆条结构,尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ;内、外层杆条与战斗部轴线的斜置角为 $6^\circ$ 和 $-6^\circ$ ,错位排放(即各杆对应另一层相邻杆的中间位置),每层排布52根;内层杆条与装药之间放置铝内衬,壁厚3 mm。起爆方式为中心轴线起爆。

## 2 算法和计算模型的建立

为了更好的模拟炸药爆轰和离散杆飞散的过程,本文采用LS-DYNA中的多物质ALE算法,其中,主装药和空气采用Euler单元,用六面体实体单元进行网格划分;两层杆环及内衬均采用单点积分Lagrange体单元进行网格划分,并置入主装药和空气域的Euler场中,采用流固耦合方式求解Lagrange网格和Euler网格之间的相互作用,而Lagrange介质之间则采用程序自带的自动面接触算法(CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE)。在模型的边界节点上采用压力流出边界条件,避免压力在边界上的反射。

由于结构模型的非对称性,计算中采用全模型。战斗部的有限元几何模型如图2所示,共6个Part。其中Part1~Part2为内层杆条,Part3为内衬,Part4~Part5为外层杆条,Part6为主装药。内、外层杆条Part的划分示意图如图3所示。离散杆采用ELASTIC材料模型,铝内衬采用PLASTIC\_

KINEMATIC材料模型,炸药采用HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN材料模型和JWL状态方程来描述,离散杆、铝内衬和炸药材料计算中所用参数参见文献[9];空气域采用NULL材料模型和LINEAR\_POLYNOMIAL状态方程来描述,空气的具体参数值参见文献[10]。计算时间500  $\mu\text{s}$ 。计算中所采用的单位为cm-g- $\mu\text{s}$ 。

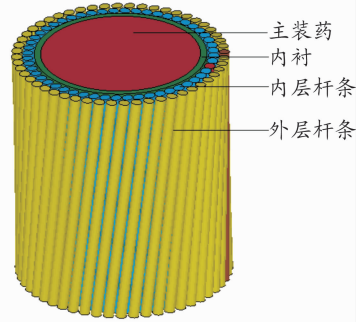


图2 有限元模型

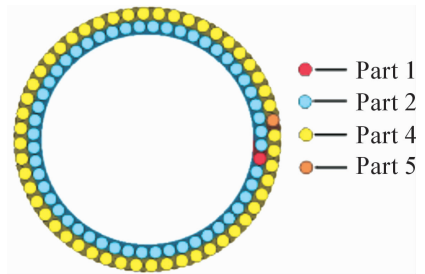


图3 杆条Part划分示意图

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 离散杆杆条分布情况

如图4所示为爆炸载荷下,在 $t$ 为30  $\mu\text{s}$ 、100  $\mu\text{s}$ 、230  $\mu\text{s}$ 、260  $\mu\text{s}$ 、300  $\mu\text{s}$ 、360  $\mu\text{s}$ 、410  $\mu\text{s}$ 、460  $\mu\text{s}$ 时刻双层离散杆战斗部杆条飞散分布图像。

由图4~图5可以看出,炸药起爆后,双层离散杆由于受到主装药爆轰产物的强烈冲击和铝内衬的推动力开始径向膨胀变形,获得一定的加速度,两层离散杆的杆条径向方向飞散,且产生了弯曲变形。由于主装药和杆条之间有铝内衬的作用,内层杆条受力均匀,保证了爆轰波不至于过早的通过内层杆条间的间隙渗漏,而外层杆条则受内衬与内层杆条综合推力向外扩散,并在12  $\mu\text{s}$ 时与内层杆条脱离接触,形成两个相对独立的离散杆环。在进行到50  $\mu\text{s}$ 时,主装药的爆轰能量趋于0,如图6所示,此时,铝内衬完全失效,丧失对杆条的推动力,内、外层杆条因惯性作用继续沿战斗部的径向方向向外扩张,因此在其后的计算过程中删除内衬与主装药继续求解。

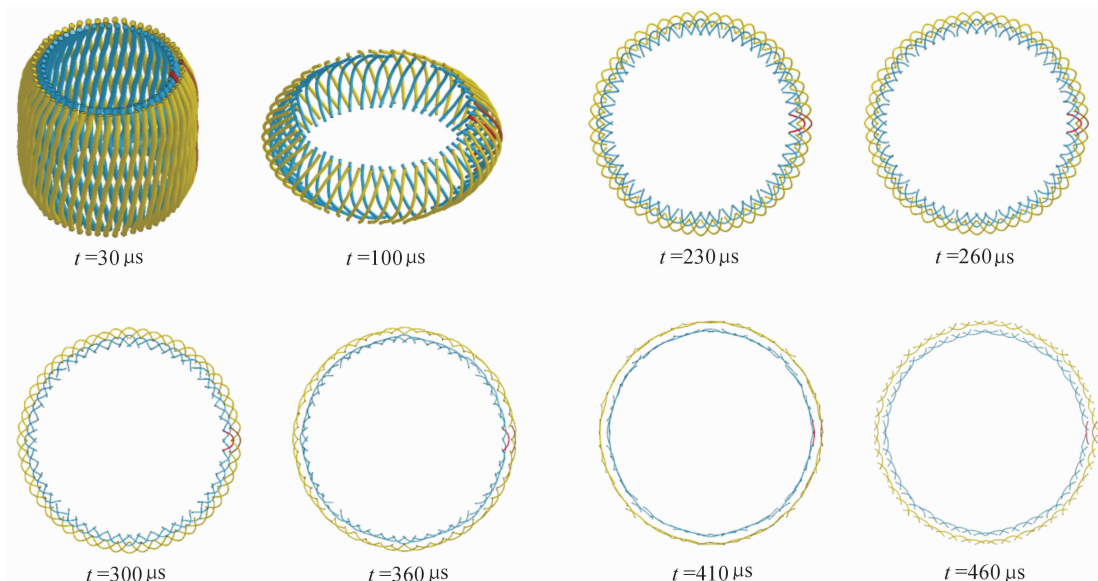


图4 双层离散杆飞散过程典型时刻状态

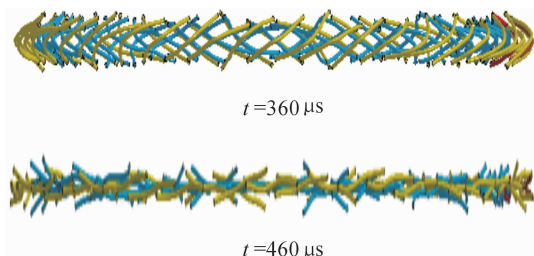


图5 双层离散杆飞散过程典型时刻侧视图

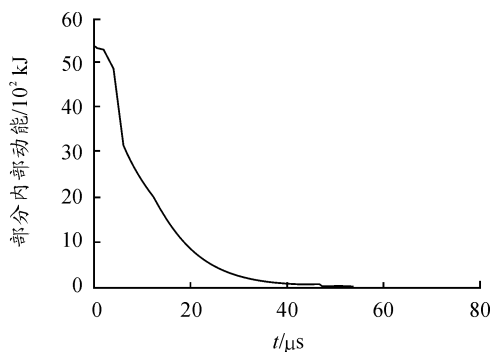


图6 炸药能量随时间变化

当  $t$  为  $100 \mu\text{s}$ 、 $230 \mu\text{s}$ 、 $260 \mu\text{s}$  时,两层斜置角方向相反的杆条由于惯性继续向外飞散,并在飞散过程中同时在垂直于径向运动方向的平面内做旋转运动,各根杆条与战斗部轴线的夹角逐渐增大,内、外各层的杆条之间的距离也明显被拉开,各自形成带小间隙的“杀伤环”。从图5可以看出,在内、外两层离散杆形成杀伤环的过程中,同时形成网状布局,在  $410 \mu\text{s}$  时,两层离散杆各个独立的杆条首尾相连,形成两个封闭的圆,达到各自封闭状态时的最大圆,且两圆组成“×”形网状结构,形成2个准连续杀伤环,对周围目标进行毁伤。随着时间的推移,两个杆环将被进一步拉开,但内层

杆和外层杆周向重叠,增加了作用于目标的杆条密度,避免了单层离散杆向外飞散造成相邻杆条间距大而产生的不利因素,有效地增强了杀伤威力。表1为双层离散杆战斗部在  $410 \mu\text{s}$  时形成“杀伤环”的环参数。

表1 杀伤环参数

结构名称	杀伤环直径/cm	速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	动能/ kJ
内层离散杆	101.5	1 194.1	15.31
外层离散杆	110.7	1 321.5	18.69

从表1中可以看出,在炸药爆轰驱动下,双层离散杆杆条的飞散会形成两个准连续“杀伤环”,两个“杀伤环”的间距为  $4.6 \text{ cm}$ 。与单层单束离散杆相比,无论是从杆条数目还是杆条的空间位置分布,双层离散杆都能更有效的打击目标的关键部位。

### 3.2 爆轰驱动下杆条的时间历程曲线分析

由于双层离散杆战斗部的杆条是在铝内衬外侧呈内、外圆周排布,且杆条合速度不是一个简单的衰减或增加的算术过程,而是  $x, y, z$  三个方向的速度矢量的叠加。分别选取内、外层的特征杆条 Part1 和 Part5 为研究对象,绘制了杆条飞散全过程的速度与动能随时间变化曲线如图7所示。

从图7可以看出,炸药起爆  $4 \mu\text{s}$  后,内层杆条获得加速度开始加速,在  $6 \mu\text{s}$  时,外层杆条受内层杆条的驱动也开始加速运动,内层杆条速度略有降低。在  $8 \mu\text{s}$  时,内层杆条在爆轰驱动下与外层杆紧密贴合,以相同的加速度开始加速飞散。在  $10 \mu\text{s}$  时刻外层杆条速度增加到  $1 122.1 \text{ m/s}$ ,此刻内层杆条的速度较低,约  $764.9 \text{ m/s}$ 。随着时间的推移,爆轰能量持续作用,驱动杆条加速,且内层杆条加速度大于外层杆条,在  $23 \mu\text{s}$

时内,外层杆条达到相同的飞散速度  $1\ 146.2\ \text{m/s}$ 。由于战斗部两端稀疏波的作用,内、外层各杆条的两端径向方向运动较慢,并伴有一定的变形,在第  $45\ \mu\text{s}$  左右,内、外层杆条发生短暂的局部碰撞,造成内层杆条速度降低。随着内、外层杆条的间距增大,杆条的速度增幅因稀疏波的进入而变慢,并在  $225\ \mu\text{s}$  后趋于稳定。此后,内、外层杆条不再加速,而是以稳定的速度飞散,且外层离散杆的杆条速度大于内层离散杆的杆条速度,这就保证了双层离散杆对目标进行毁伤时,外层离散杆先到达目标,与目标作用,内层杆随后跟进,对目标进行二次毁伤。上述结果说明,在本文计算参数条件下,双层离散杆结构可以形成两个独立的杀伤环,能够对目标进行先后两次切割毁伤,同时,两个杀伤环可以组合成网状结构,对目标起到网状切割作用。

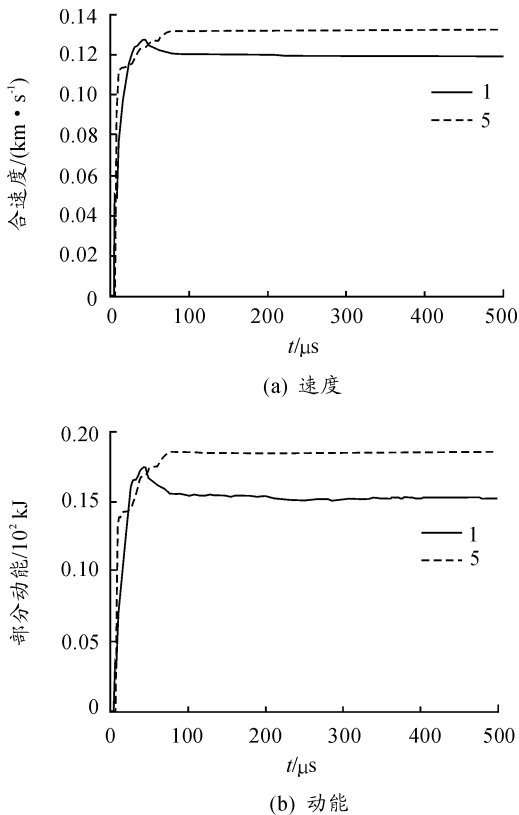


图7 特征杆条速度、动能随时间变化曲线

## 4 结论

1) 数值模拟表明,双层离散杆战斗部在爆炸载荷下能够形成两个相互交叉的“杀伤环”,对目标可产生网状切割

作用。

2) 与普通单层可控离散杆战斗部形成“杀伤环”对目标进行毁伤的过程相比,双层离散杆战斗部形成两个独立的“杀伤环”,且在外层环切割目标后,内层环能够随进对目标进行二次毁伤。

3) 双层离散杆战斗部融入双层错位技术,与单层单束旋转式离散杆战斗部相比,轴向单位距离上杆条密度增加,杆条对目标的侵彻面积增大,增加了对目标关键部位的杀伤密度及杀伤概率,提高了战斗部的毁伤威力。

## 参考文献:

- [1] 栗保华,余建斌,尹俊亭. 离散杆战斗部杆条旋转姿态的控制理论研究[C]//第十届战斗部与毁伤效率专业学术年会论文集. 绵阳,中国宇航学会无人机飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会,2007:177-181.
- [2] 张新伟,吕红超. 飞散姿态可控离散杆战斗部算法研究[J]. 航空兵器,2005(6):35-37.
- [3] 吕红超,张新伟. 可控离散杆式战斗部设计技术[J]. 航空兵器,2011(3):36-38,51.
- [4] 黄静,张庆明,李晋庆. 可控离散杆式破片的破坏效应研究[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(1):125-127,134.
- [5] 高淑萍,王志军,孙华. 结构参数对离散杆战斗部效能的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2013,36(3):80-82.
- [6] 桂毓林,黄文斌,李维. 双束旋转式离散杆战斗部对反舰导弹的毁伤研究[C]//第十届战斗部与毁伤效率专业学术年会论文集. 绵阳,中国宇航学会无人机飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会,2007:70-75.
- [7] 周迪锋,陈智刚,王文甲. 不同结构下双束旋转式离散杆战斗部的数值仿真研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(5):93-96.
- [8] 阮喜军,梁争峰,程淑杰. 几种结构的三段离散杆战斗部数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2015,35(1):68-72.
- [9] 李龙俊,董素荣,陈秀文. 不同起爆方式下离散杆战斗部爆炸驱动杆条的数值研究[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(4):103-105.
- [10] 时尚勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

(责任编辑 周江川)