

离散杆战斗部杆条抛撒规律的有限元分析

李维¹, 刘颖¹, 蒋治海¹, 郑元枫², 胡榕希¹

1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川绵阳 621900
2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 采用理论分析与数值模拟相结合的方法,对离散杆战斗部的杆条排布及抛撒方式进行了较深入研究。在 AUTODYN-3D 平台上建立了离散杆战斗部三维有限元模型,采用 Lagrange 算法,对离散杆式战斗部的钢杆条和钨合金杆条在有、无填充材料时杆条抛撒进行了模拟。研究发现,杆条材料、缓冲材料对杆条抛撒行为有显著影响,装填合适的缓冲材料有利于减少爆轰产物的飞散,提高炸药的能量利用率。模拟结果为离散杆战斗部设计提供了有益参考。

关键词 离散杆战斗部;爆炸驱动;数值模拟

中图分类号 TJ55,O64

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.31.005

Finite-element Analysis on the Bar Scatters Regular Pattern of Discrete Rod Warheads

LI Wei¹, LIU Ying¹, JIANG Zhihai¹, ZHENG Yuanfeng², HU Rongxi¹

1. Institute of Chemical Materials, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China
2. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The rod arrangement and scatters way for the discrete rod warheads are in-depth studied in terms of theory, numerical simulation, and experiment. By using AUTODYN-3D software, the three-dimensional finite element model of the discrete rod warheads has been established. Through Lagrange algorithms, the steel rod and the tungsten carbide rod of the discrete rod warheads with or without filling materials are simulated. It is found that the rod material and the cushioning material have a significant effect on the rod scatters behavior. Loading appropriate buffer materials is in favour of reducing the fly of detonation products and improving the energy utilization ratio of explosives. The theoretical analysis might provide some useful reference for the design of the discrete rod warhead.

Keywords discrete rod warheads; explosively driven; numerical simulation

0 引言

离散杆式杀伤战斗部是一种特殊的反导导弹战斗部类型,对付的典型目标是弹道导弹(TBM),毁伤元素主要是大质量的杆式破片,它由制导指令在目标前起爆装药形成多个杆条杀伤环,并随导弹一起撞击并毁伤目标。它继承了连续杆战斗部杆条质量大、对目标切割能力强的优点,同时又兼顾了破片战斗部速度高、威力半径大的优点,对目标具有较大的毁伤能力。

近年来,国内外很多科研工作者从事这方面的研究。美国 Los Alamos 和 Sandia 国家实验室以及 Raytheon 公司曾在离散杆战斗部的实验研究和数值模拟研究方面做了大量的系统工作。研究内容包括离散杆战斗部的爆轰驱动机理、离散杆在目标方向上的抛散分布特性、离散杆对不同目标的毁伤效应等各个领域^[1-3]。中国工程物理研究院的卢永刚等考虑战斗部柱体的曲率和杆条表面的影响,利用修正的格林公式建立了离散杆条定向抛散速度及散布的工程预估模型,并运

收稿日期:2011-06-17;修回日期:2011-09-28

作者简介:李维,工程师,研究方向为战斗部设计,电子信箱:liwei1977@sina.com;刘颖(通信作者),研究实习员,研究方向为含能材料安全性能,电子信箱:cnthina@163.com

用该计算模型,采用射击迹线(shot-line)仿真方法,运用虚拟技术对杆条散步场进行了三维仿真^[4-6]。中国空空导弹研究院的张新伟、吕红超等^[7]提出了可控离散杆战斗部杆条飞散控制的算法;北京理工大学的胡景林和南京理工大学的张运法^[8]提出了分析杆条对 A3 钢板的极限穿透速度;北京理工大学的黄静、张庆明等^[9]提出了针对杆条的破坏机制进行了毁伤实验。

离散杆战斗部杆条的爆轰驱动和抛撒展开过程是一个非常复杂的物理、力学过程,它包括凝聚炸药的起爆、爆轰波的传播及其对动能杆的初始驱动、动能杆条间的复杂碰撞、动能杆条在缓冲物质和空气中的飞行过程等。针对离散杆战斗部杆条的驱动行为,本文主要对大质量重金属杆条爆炸驱动行为进行数值模拟研究,获得杆条材料、缓冲材料等因素对杆条抛撒行为的影响特性,为动能拦截杀伤增强器的设计、实验研究以及在防空弹药中的应用提供理论依据。

1 仿真计算模型

本文利用三维非线性动力学有限元程序 AUTODYN-3D, 对大质量金属杆条爆炸驱动行为进行了数值仿真。以 PAC-3 动能拦截弹为例,忽略壳体等因素对战斗部作用的影响,图 1 即为简化后的战斗部结构,该战斗部为中心核式离散杆战斗部,战斗部中心为高能炸药,内层装 8 根动能杆,外层为 16 根动能杆,动能杆直径为 35mm,长度 125mm,杀伤增强器的外径为 255mm。为观测杆条抛撒过程中的动力学参数变化,在杆条上设置观测点,如图 2 所示(为便于观测,图中略去 B 炸药)。

离散杆战斗部爆炸驱动数值计算中涉及的材料参数均取自 AUTODYN-3D 标准数据库,钢和钨合金杆条的状态方程及本构模型参数列于表 1 和表 2,其中, C_1 为声音在固体介质中的传播速度,炸药材料的参数见表 3,其中, A 、 B 为 B 炸

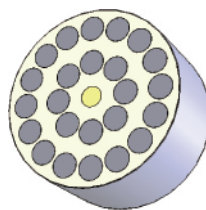


图 1 离散杆战斗部几何结构
Fig. 1 Geometric structure of the discrete rod warheads

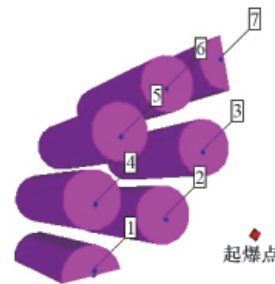


图 2 观察点设置
Fig. 2 Setting watch points of the discrete rod warheads

表 1 钢和钨合金材料状态参数

Table 1 Material state parameters of the steel and tungsten alloy

材料	Grüneisen 系数	$C_1/(m \cdot s^{-1})$	S_1	比热 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
钢	2.17	4569	1.49	452	7.896
钨合金	1.54	4029	1.237	134	17

表 2 钢和钨合金材料本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of the steel and tungsten alloy

材料	剪切模量/GPa	屈服应力/MPa	硬化常数/MPa	硬化指数	熔点/K
钢	81.8	350	275	0.36	1811
钨合金	160	1506	177	0.12	1723

药 JWL 状态方程材料参数。

在本文中,杆条爆炸驱动过程采用混合算法,其中炸药、缓冲材料均发生了大变形,空气为流体,故采用 Euler 算法,而杆条采用 Lagrange 方法。

表 3 炸药材料参数

Table 3 Material parameters of the explosive

炸药	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	爆压/GPa	爆速 $/(m \cdot s^{-1})$	A/GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2	能量密度 $/(GJ \cdot m^{-3})$
B 炸药	1.72	29.5	7980	524.2	7.68	0.34	4.2	1.1	8.5

2 数值模拟结果及分析

2.1 杆条抛撒过程数值模拟

图 3 为采用 AUTODYN-3D 对杆条材料为钢时离散杆战斗部在炸药起爆后典型阶段的杆条空间分布图。

从计算结果可以看出,当炸药起爆后,杆条由于受到中心装药爆轰产物的强烈冲击,会向战斗部的径向方向飞散。初始阶段,杆条在空间上基本保持互相平行的推移,即为杆条抛撒的平移阶段(图 3(a))。在平移阶段,可以认为内层杆条在“追赶”外层杆条。随着时间的推移,内层杆条“追上”了外层杆条,杆条的抛撒进入碰撞阶段。图 4 为杆条抛撒过程中杆 3 应力历程曲线图。由图可知,杆中应力在计算开始后

就有较大幅值的跳跃,这是杆条受到了前驱冲击波及爆轰产物的推动,之后杆中应力趋于平缓,这个阶段即为平移阶段;在 $t=0.2ms$ 附近,杆中应力幅值再次发生较大跳跃,这正是由于内外层杆相互碰撞的结果;之后杆中应力再次趋于平缓,杆条的抛撒将进入飞散阶段。

由以上分析可知,杆条从战斗部上开始抛射后,内层杆条“追上”外层杆条并相互碰撞,它们在一段时间内成束地粘在一起,内层杆条以爆炸压力产生的特定施力函数驱动外层杆条,杆条的相互碰击产生了循环弹跳效应,这个循环效应经很短的时间就被衰减掉了,但杆条经过复杂的相互碰撞后,速度将在杆条间重新分配,外层杆条将获得较高的速度,

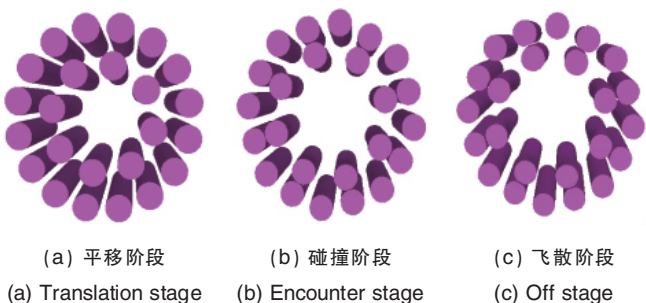


图3 炸药起爆后钢杆条空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of the steel pole after explosive detonating

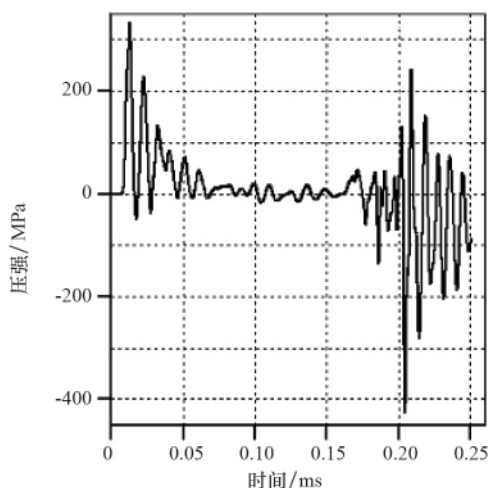


图4 抛撒过程中杆3应力历程曲线

Fig. 4 Stress process curve of the rod three in the scatters process

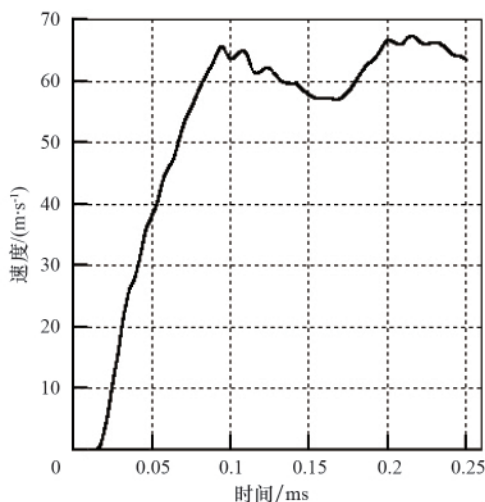
从此内外层杆条将各自向外飞散。

2.2 杆条材料对杆条抛撒影响

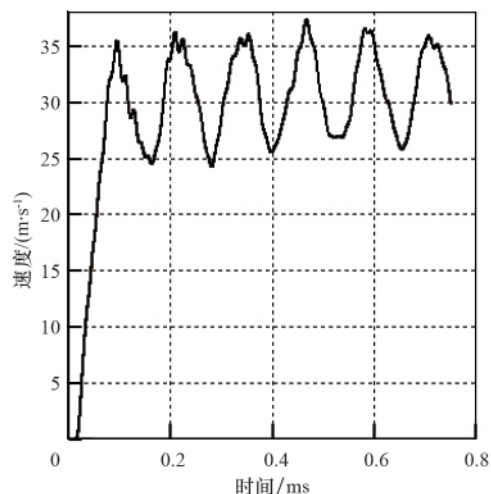
选取图1所示的计算模型,其中,a组杆条材料选取钢,b组材料选取钨合金,两组杆条长125mm,直径35mm;内层杆条8根,排布半径为65mm,外层杆条16根,排布半径为110mm,内外层杆条同心分布;炸药选取B炸药,炸药直径35mm;杆条与炸药间无缓冲材料;同样在杆条上设置相应的观测点,观测点顺序同图2。

为进一步分析杆条飞散过程中的动力学参数变化,图5分别给出了材料为钢及钨合金时杆1的速度历程曲线图(可忽略杆1的y向速度)。由图可见,杆条材料为钢时,杆条抛撒速度约为60m/s,而杆条材料为钨合金时,杆条抛撒速度约为30m/s,可见,由于钨杆质量较大,钨杆的抛撒速度明显不如钢杆,经计算,抛撒过程中钢杆的动能约为1688J,而钨杆动能约为920J。因此,从速度及动能上分析,在无缓冲泡沫的情况下,钨杆不如钢杆效果好。

图6为杆条材料为钢及钨合金时杆1内的应力历程曲线,可以看出,虽然钨合金杆内应力大于钢杆内应力,但其速



(a) 杆条材料为钢
(a) Rod material is steel



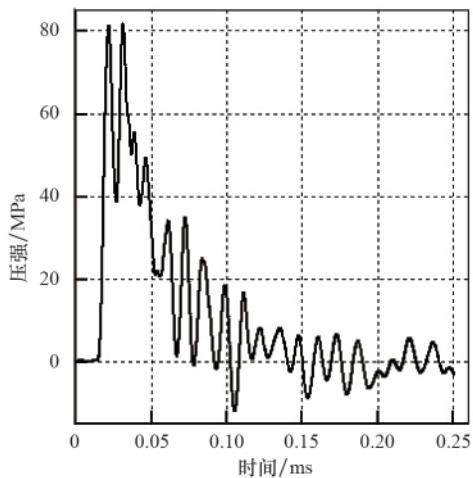
(b) 杆条材料为钨合金
(b) Rod material istungsten alloy

图5 钢及钨合金杆条杆1的速度历程曲线
Fig. 5 Speed process curve of the steel and tungsten alloy rod one

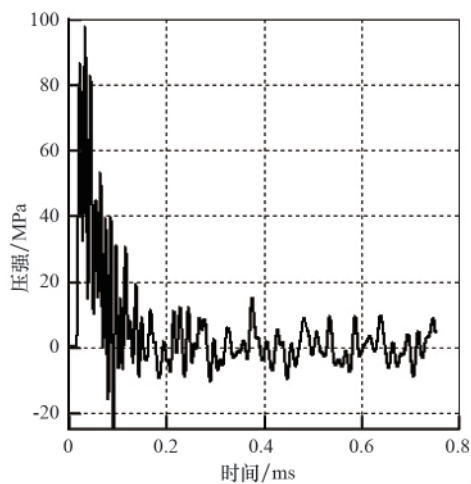
度明显不如钢杆,这说明在无缓冲材料的情况下,杆条质量对杆条的抛撒速度影响明显,杆条质量过大不利于杆条的抛撒。

2.3 缓冲材料对杆条抛撒影响

如果杆条与炸药之间没有装填缓冲材料,杆条将直接受到前驱冲击波及爆炸产物的作用。由图7可见,无泡沫填充中心装药式离散杆战斗部在爆轰驱动杆条过程中,内层杆条和外层杆条相互碰撞部位的接触面上出现了动态屈服现象。为了防止爆轰产物对内层杆条的破坏,及减少杆条飞散过程中由于相互碰撞产生的损伤,在杆条的周围一般都填充有缓冲物质。本文选用低密度缓冲材料进行数值模拟,并研究缓冲材料对杆条抛撒的影响特性。

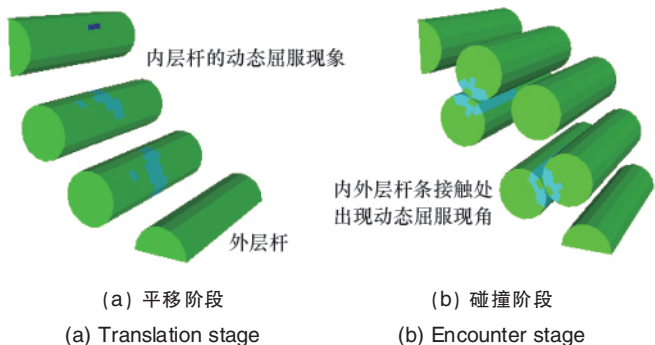


(a) 杆条材料为钢
(a) Rod material is steel



(b) 杆条材料为钨合金
(b) Rod material is tungsten alloy

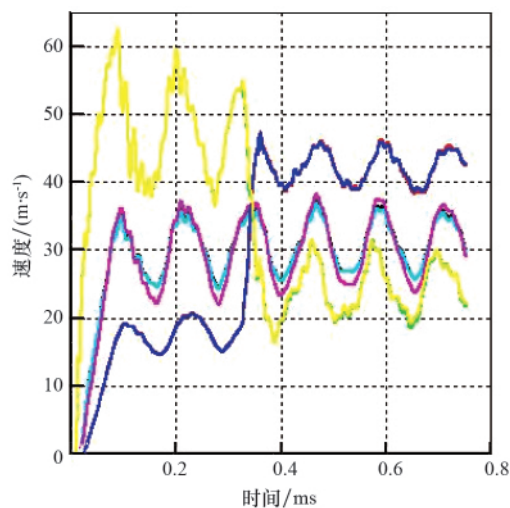
图 6 钢及钨合金杆条杆 1 的应力历程曲线
Fig. 6 Stress process curve of the steel and tungsten alloy rod one



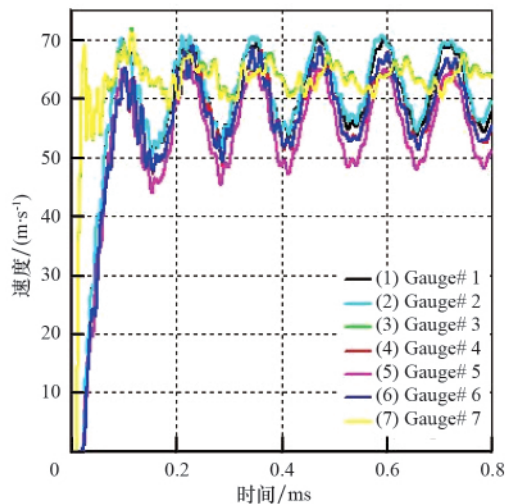
(a) 平移阶段
(a) Translation stage
(b) 碰撞阶段
(b) Encounter stage

图 7 无泡沫填充钨杆战斗部在炸药起爆后典型阶段杆条材料状态
Fig. 7 Typical state of the rod material for the tungsten alloy warhead without bubble filled after detonation

为进一步分析缓冲材料对杆条抛撒的动力学参数影响,继续选取图 1 所示的计算模型,杆条与炸药间分别装填空气(无缓冲材料)和缓冲材料聚氨酯;同样在杆条上设置相应的观测点,观测点顺序同图 2。图 8 分别给出了无缓冲材料和有缓冲材料的情况下,内外层杆条的抛撒速度。



(a) 无缓冲材料
(a) Without buffer material



(b) 有缓冲材料
(b) With buffer material

图 8 无缓冲材料和有缓冲材料时内外层杆条的抛撒速度
Fig. 8 Scatters speed of the inside and outside layer rod with or without buffer material

由图 8 可以发现,两种情况下,内外层杆条的抛撒速度差异明显,无缓冲材料时,杆条抛撒速度不仅较低,而且抛撒速度相对不够稳定,这是由于内外层杆条间复杂的相互碰撞造成的;在离散杆战斗部中填充有聚氨酯时,杆条速度有较大的提高,这是因为填充有聚氨酯时,减少了爆轰产物的飞散,提高了炸药能量利用率,从而提高了杆条的速度,减少了杆条之间的碰撞。

4 结论

本文在对离散杆战斗部爆炸驱动作用机理研究分析的基础上,利用三维有限元分析程序,建立了中心式装药离散杆战斗部爆炸驱动的三维有限元模型,计算了在爆炸载荷作用下动能杆的初始驱动过程和飞散分布特性。根据数值计算的结果,对离散杆的飞散分布特性进行分析,得出了初步的结论。

(1) 杆条材料对杆条抛撒速度影响明显,无缓冲材料的情况下,杆条质量过大,不利于杆条的抛撒;

(2) 缓冲材料能够有效阻止爆轰产物逃逸,使炸药利用率得到大幅提高,针对钨合金杆条,炸药利用率的提高使钨合金杆抛撒速度明显提高,且避免了钨合金杆的碰撞,使钨合金杆抛撒更加理想;

(3) 在离散杆战斗部中填充有聚氨酯时,会使杆条比较集中在一个环形区域内,减少了杆条与目标的碰撞几率,这对杆条对目标的毁伤概率是不利的,这也提示设计人员在设计过程中,如果要在杆条中填充缓冲物质,应该采取一定的措施,增大动能杆与目标的碰撞几率,例如可采用串联多段中心装药动能杆改善动能杆空间分布情况。

参考文献 (References)

- [1] Jeffrey A, Mike C. Aimed rod warhead design and performance [C]. 45th Annual Bomb and Warhead America Defense Preparedness Association, Los Angeles, May 17-18, 1995.
- [2] Lloyd R M. Conventional warhead system and engineering design [C].

- Progress in Astronautics and Aeronautics, vol 179, 1998: 133-137.
- [3] Lloyd R M. Near miss warhead technology with multiple effects against submunition payloads [C]. 9th Annual AIAA/BMDO Technology Conference, Osaka, July 17-20, 2000.
- [4] 卢永刚, 蒋建伟, 王云. 动能杆定向抛撒研究及散布场仿真[C]//中国兵工学会弹道专业委员会弹道学术交流会议论文集. 南京: 南京理工大学, 2007.
- Lu Yonggang, Jiang Jianwei, Wang Yun. The kinetic energy bar directional scatter research and scattered field simulation [C]//The Collected Papers of China Ordnance Society Ballistic professional committee Ballistic proceedings. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [5] 蒋建伟, 卢永刚. 动能杆战斗部杆条抛撒规律及散布场数值仿真[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 590-593.
- Jiang Jianwei, Lu Yonggang. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(5): 590-593.
- [6] 王志军, 尹建平. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- Wang Zhijun, Yin Jianping. The Ammunition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [7] 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.
- Zhang Xinwei, Lu Hongchao. Aero Weaponry, 2005(6): 35-37.
- [8] 胡景林, 张运法. 杆状破片对 A3 钢板的极限穿透速度研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(2): 18-22.
- Hu Jinglin, Zhang Yunfa. Journal of Ballistics, 2001, 13(2): 18-22.
- [9] 黄静, 张庆明, 李晋庆, 等. 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): 125-134.
- Huang Jing, Zhang Qingming, Li Jinqing, et al. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(1): 125-134.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“中华医学会第十四次全国心血管病学术会议”征文

由中华医学会、中华医学会心血管病学分会主办,2012年6月1日在武汉市召开“中华医学会第十四次全国心血管病学术会议”。

征文范围:冠心病及动脉粥样硬化的研究;高血压的研究;心律失常及心脏起搏电生理的研究;心肌病、心肌炎的研究;血管病流行病学研究;心力衰竭的研究;心血管病相关基础研究及新技术研究;肺血管病研究;心血管疾病影像学研究;女性健康有关研究;血脂有关研究及临床;介入心脏病学研究;病例讨论及其他。

论文截止日期:2012年3月1日。

联系电话:010-85158515。

通信地址:中国北京东四西大街42号中华医学会。

大会网站:<http://www.cma.org.cn>。