

文章编号: 1001-1455(2004)01-0085-05

动能杆定向抛撒规律的数值模拟^{*}

蒋建伟¹, 门建兵¹, 卢永刚^{1,2}, 蒋道建²

(1. 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对反导动能杆的定向抛撒, 应用数值模拟软件 AUTODYN-2D 对动能杆的定向爆炸驱动和相互作用过程进行了数值仿真, 获得了杆条抛撒速度和飞散角等变化规律。即在杆条排布结构不变的情况下, 随装药弧度的减小, 杆条的飞散角增大, 而杆条飞散的平均速度则随装药弧度的减小而减小。与所进行的动能杆定向抛撒装置试验对比, 试验结果与数值模拟结果基本一致。

关键词: 爆炸力学; 定向抛撒; 数值模拟; 动能杆

中图分类号: O38; TJ414

国标学科代码: 130°3530

文献标志码: A

1 引 言

传统的由全预制或半预制壳体与装药组成的普通战斗部, 因起爆后形成的杀伤元素在周向均匀分布, 仅有很小一部分能对目标起作用, 能量利用率较低。因此, 各国都积极应用新原理、新结构和新材料等高新技术, 改进战斗部的类型、构造以提高综合杀伤效能。动能杆式战斗部正是在这样的背景下发展起来的一种新概念战斗部。其主导思想是在目标运动前方抛射出大量的金属杆条, 充分利用极高的弹目交会速度摧毁目标^[1]。美国军事研究发展中心(MICOM)对采用六角定向动能杆战斗部的不同定向装药起爆进行了试验研究^[2]; 圣地亚国家实验室(SNL)采用 X 光照相试验和光滑粒子动力学(SPH)数值模拟方法, 对轴对称抛撒和采用 180°偏心装药定向抛撒等两种装置模型进行了研究^[3], 两者只公布了部分试验和数值模拟结果。文献[4]采用修正格尼公式建立环向定向装药对杆条驱动的速度计算模型, 但仍缺乏对杆条驱动规律的深入研究。

定向动能杆式战斗部^[1]通常由动能杆束、定向抛撒装药、爆炸逻辑控制网络和测角引信等组件构成, 通过爆炸逻辑控制网络控制起爆点的位置和数量, 以此来控制杆条的飞散方向和散布密度。因此, 研究在圆周方向不同弧长的抛撒装药条件下杆条的抛撒规律对定向动能杆战斗部结构设计具有重要意义。由于动能杆的定向爆炸驱动过程相当复杂, 传统的理论研究很难适用, 而试验研究只能观察到抛撒最终结果, 不能观测到详细的作用过程。本文中采用非线性动力分析软件 AUTODYN-2D, 应用欧拉-拉格朗日混合算法, 对具有不同弧长抛撒装药的定向动能杆结构的爆炸驱动过程进行数值模拟, 获得了杆条抛撒速度和飞散角等特征参数, 以及典型位置杆条的速度变化过程, 分析了定向抛撒装药弧长对杆条抛撒特性的影响规律, 该规律与典型动能杆定向抛撒试验结果基本一致。本文的研究结果对定向动能杆战斗部结构设计具有一定的指导意义。

2 计算方案及模型

2.1 定向动能杆战斗部结构

定向动能杆战斗部外层由一圈多块环形定向起爆装药(每块对应圆心角 θ)及包围的动能杆条束组成(见图1), 实际应用时每块定向装药都有起爆器, 可独立起爆。通过定向起爆逻辑控制装置, 环形定

* 收稿日期: 2003-02-14; 修回日期: 2003-06-13

基金项目: 国家自然科学基金委/中国工程物理研究院联合基金(NSAF)项目(10176004)

作者简介: 蒋建伟(1963—), 男, 博士研究生, 教授。

向装药根据目标的方向而选择起爆位置和起爆装药数量^[1]。

定向动能杆战斗部属于典型的三维问题,为简化问题,暂不考虑两端轴向稀疏效应,将问题简化为二维问题。该模型外壳选用外径 160mm、厚 3mm 的 PVC 管,54 根直径 8mm 的钢条分三圈均匀安置在硬质聚氨酯泡沫支撑体内,排布圈直径分别为 40、70 和 100mm。抛撒装药选用 PETN,装药厚度 5mm,装药弧长分别取对应圆心角 $\theta=180^\circ$ 、 135° 和 90° 的三种典型方案。

2.2 数值计算方法和模型

本文中采用的计算软件为有限差分非线性动力学软件 (AUTODYN-2D)^[5],该软件具有拉格朗日、欧拉、任意拉格朗日和欧拉算法 (ALE)、SPH 处理方法,并可对各处理方法进行相互混合。

由于动能杆的抛撒过程涉及炸药的爆轰、固体(杆条、壳体、泡沫架)与气体(爆轰产物)以及物质间的相互作用,爆轰波系的流场相互作用相当复杂,在数值计算单独用拉格朗日或欧拉计算方法难以解决此类问题时,本文中采用 AUTODYN-2D 的欧拉-拉格朗日混合算法,能够较好地对比爆轰波驱动杆条进行模拟。

(1)离散化模型。按拉格朗日方法,将单个动能杆条划分成 7×7 个节点;抛撒炸药、塑料壳体和泡沫则选用欧拉方法,整个欧拉区域划分成 241×241 个节点。图 2 为计算模型的网格划分图(部分)。欧拉网格边界设为材料自由流出边界。

(2)材料模型。炸药按流体模型计算,爆炸产物的状态方程取为 JWL 形式;杆条、泡沫和塑料壳体材料按弹塑性强度模型 Von-Mises 准则,采用 Linear 状态方程。AUTODYN 提供了各种类型的材料参数库,为计算提供参考,同时也参考了劳伦斯实验室(LLNL)公布的炸药参数手册^[6]。表 1 为数值模拟的材料参数^[6],其中 PETN 的 JWL 参数^[6]为: $A = 348.62\text{GPa}$; $B = 11.288\text{GPa}$; $R_1 = 7$; $R_2 = 2$; $W = 0.24$; $v_{C-J} = 5.7\text{km/s}$; $p_{C-J} = 6.2\text{GPa}$; $E = 5.025\text{GJ/m}^3$ 。

表 1 数值模拟材料参数

Table 1 Input parameters of numerical simulation

材料	状态方程	密度/(Mg/m^3)	剪切模量/GPa	屈服应力/GPa
Plastic	Shock	1.14	3.68	0.05
Steel	Linear	7.85	81.8	79.2
PETN	JWL	0.88		
Foam	Linear	0.25	0.05	0.05

3 数值模拟结果及分析

3.1 动能杆定向抛撒过程描述

采用数值模拟方法,对各方案进行模拟计算,获得了各结构杆条在爆炸驱动下抛撒过程。图 3 展示了圆心角 $\theta=90^\circ$ 方案的抛撒初始阶段速度场的系列图像。图 4 为三根典型位置杆条(杆条 1 靠近炸药,杆条 2 位于中部,杆条 3 位于远离炸药端)的速度-时间历程曲线。

通过对仿真计算结果分析,将动能杆抛撒过程分为三个阶段:爆炸驱动加速阶段、相互碰撞阶段和稳定飞行阶段。

在第一个阶段,当装药起爆后,爆轰波迅速向外传播,在泡沫介质内产生冲击波,冲击波通过泡沫,

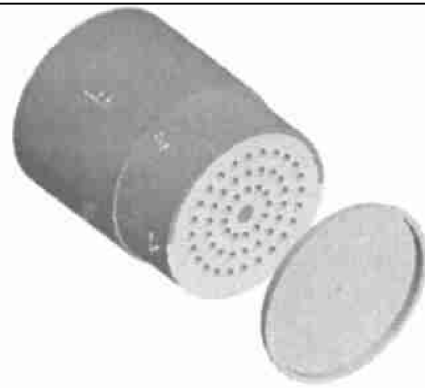


图 1 杆条定向抛撒装置三维结构图

Fig. 1 Device of KE-rod directional dispersal

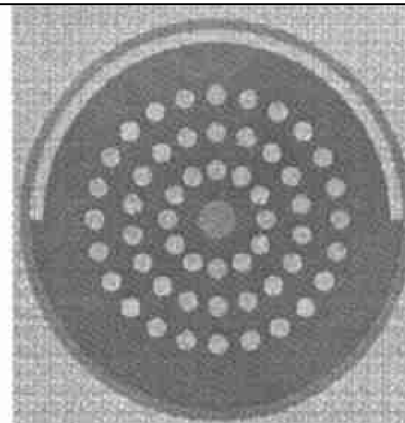


图 2 典型计算模型网格划分图

Fig. 2 Mesh model of numerical simulation

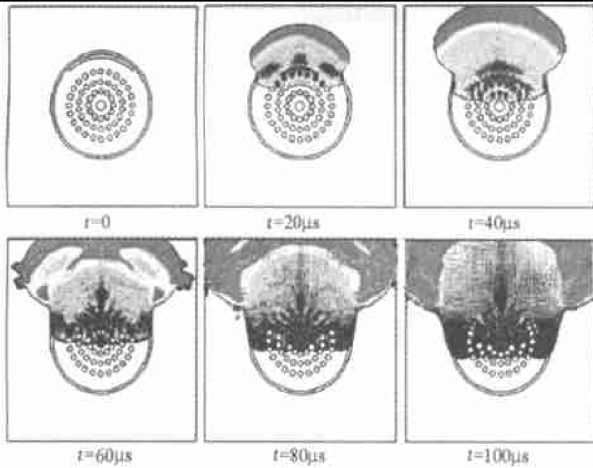


图 3 典型结构定向装药起爆初始阶段的速度场系列图

Fig. 3 The time history of velocity fields

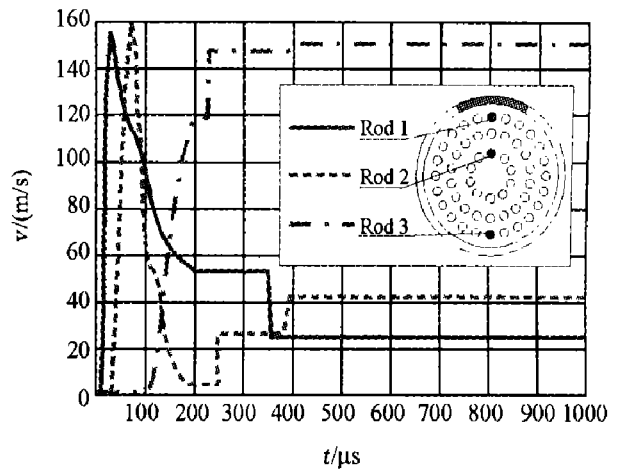


图 4 典型位置杆条的 $v-t$ 曲线

Fig. 4 $v-t$ curve of typical rods in directional dispersing

作用到杆条,使杆条开始加速,随后的爆轰产物将推动泡沫和杆条,使之进一步加速。这个过程中还同时伴随泡沫的飞散和爆轰产物的绕流,由于加速过程相当短,杆条的位移也相当小,因此此阶段未发生杆条相互碰撞的现象。

第一阶段完成后,泡沫介质被爆炸冲击波粉碎,由于密度大大低于杆条,因此被爆轰产物先抛撒出去,爆炸驱动过程基本完成,此时各杆条处于相对独立且速度和飞行方向初步稳定的状态。但从此时数值模拟的杆条速度分布可以看出,靠近定向抛撒炸药的杆条的速度较高,而远离的杆条速度较低,且杆条间排布又较紧密,因此导致相互碰撞。从图 4 的典型位置杆条的 $v-t$ 曲线看,速度较高的杆条和速度低的杆条发生相互碰撞使速度发生阶跃,能量二次分配,因杆条间速度差异大且排布密,有些杆条将发生两次甚至多次碰撞。杆条相互作用的最终结果是远离抛撒炸药的杆条获得较高的速度,而靠近炸药的杆条速度变得较低。相互作用完成后各杆条将以最终稳定速度和方向飞散。

3.2 计算结果与抛撒规律分析

杆条的抛撒速度和飞散角是表征动能杆抛撒特性的两个重要参数。不同装药弧长条件下爆炸驱动阶段使杆条获得的初速和飞行方向不同,因而相互作用后杆条的最终速度和飞散角有一定的差异。

图 5 为 180° 、 135° 、 90° 三种装药方案初始时刻和起爆后 1、2ms 时刻杆条位置仿真计算图像,表 2 列出了杆条抛速和飞散角等主要计算结果。

图 5 中的杆条抛撒未能完全对称,主要是由于模型计算网格的滑移面网格为人工选取,未能完全保证对称。从图中的计算结果可看出:

(1)不同装药弧长造成杆条最终散布形状不同,其中 180° 弧长装药对应的杆条抛撒形状近似圆形, 135° 装药近似椭圆形,而 90° 装药则近似月牙形。

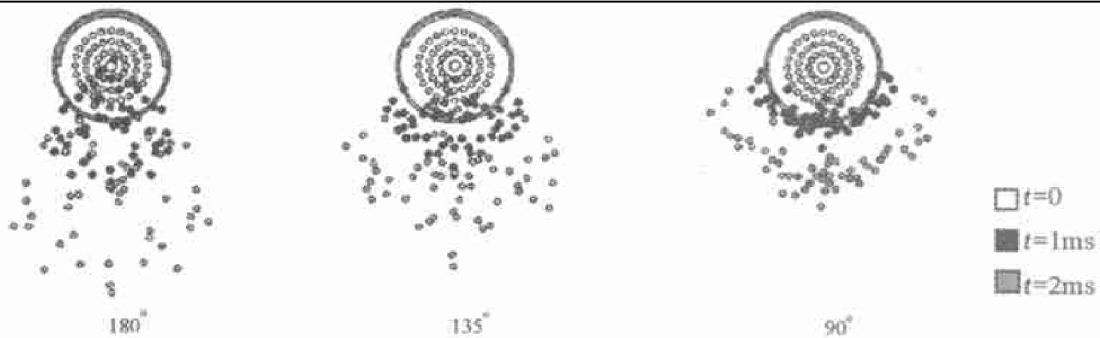


图 5 三种装药方案杆条在不同时刻位置图

Fig. 5 The dispersing rods' positions of different HE arc length

(2)不同弧长装药的杆条飞散角随装药弧长的减小而增大。

(3)杆条飞散的最大速度和平均速度亦随装药弧长的增大而增大;而杆条飞散的速度差则随装药弧长的减小而减小。换言之,随着装药弧长的减小,杆条的速度分布越来越集中。因此,通过调整装药的弧长可控制杆条的抛撒速度和飞散密度。

表2 实验测试与仿真计算结果对比

Table 2 Results of numerical simulation and experiment

$\theta/(\circ)$	方式	杆条速度/(m/s)			杆条飞散角/ (\circ)
		最大值	最小值	平均值	
180	计算	150.0	44.4	93.1	23.0
	试验	106.4	54.6	98.7	21.7
135	计算	130.3	42.9	88.4	34.0
	试验	93.2	51.4	90.5	31.5
90	计算	96.5	40.4	73.2	43.0
	试验	79.8	44.6	76.5	40.6

4 仿真结果与试验结果的对比

为验证数值仿真结果的可信性,进行试验验证。试验件结构见图1。图6为试验现场布置示意图。采用高速录像对动能杆抛撒过程进行观测,图7为某方案高速摄像记录下的杆条飞散系列图。采用图像处理软件,分析杆条飞散速度,由于定向杆条飞散角在近距离散布中为变化值,因此统一将试验件起爆后在距试验件中心2m远处的杆条飞散图像处理后的杆条散布角度统一确定为杆条飞散方向角。表2列出了对动能杆抛撒速度、飞散角测试与数值模拟计算结果的对比。

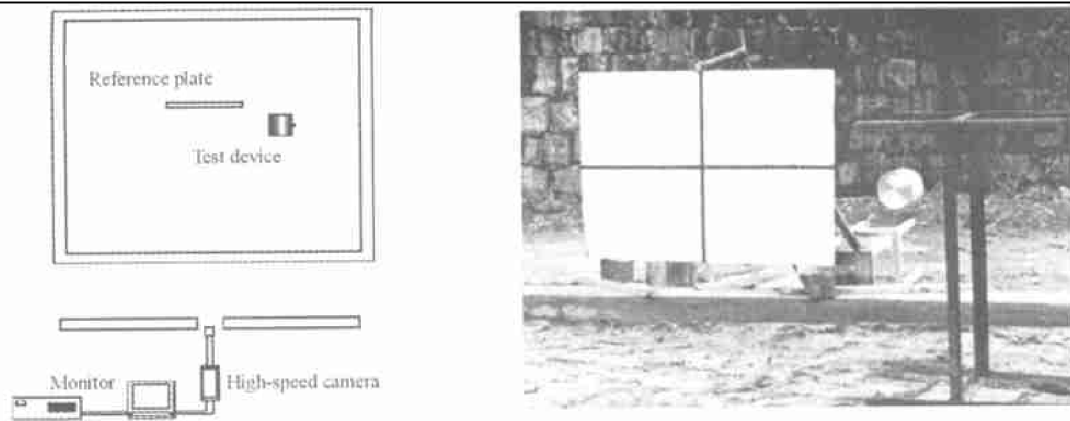


图6 试验的现场布置示意图和照片

Fig. 6 Experiment setup

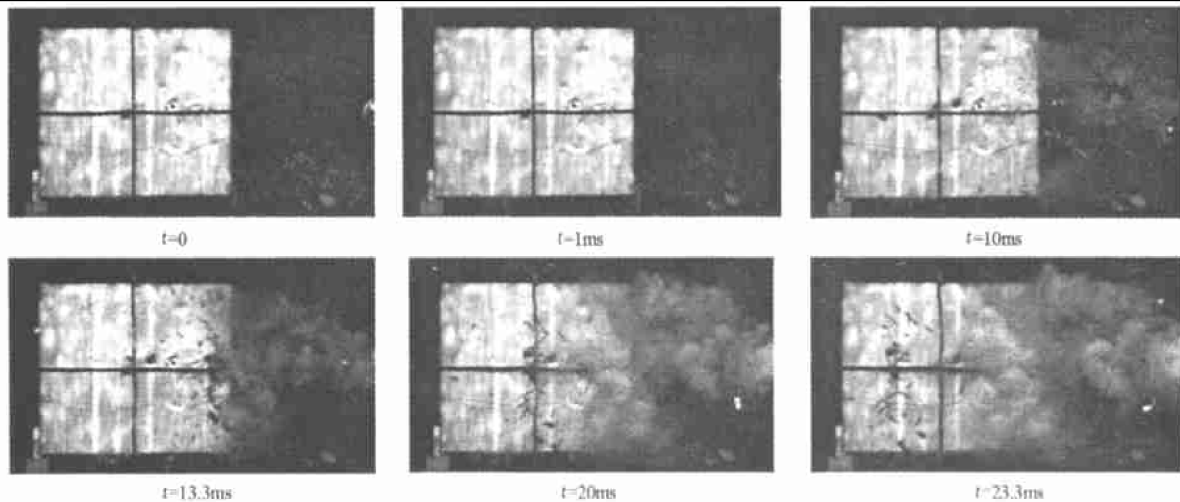


图7 高速摄像记录的杆条飞散连续图像

Fig. 7 Images of dispersing rods recorded by high-speed camera

对比数值模拟与试验测试结果, 动能杆的抛撒规律基本一致。杆条最大速度计算值比试验值大。其原因主要是二维计算模型忽略了轴向稀疏波效应以及端盖等结构件对能量的吸收。

同时发现, 计算结果杆条速度的平均值及最小值比试验值小, 这与文献[3]的规律不符。原因可能是由于: 试验采用高速摄像, 获得的视场有限, 加上爆轰烟气的干扰, 在高速摄像图像中所观测到的杆条数量很有限, 一般为二十多根(总数最多为 54 根), 多数低速杆条和侧向飞散杆条都未能观察到, 因此造成杆条飞散速度的最小值及平均值偏大, 而文献[3]采用脉冲 X 光照相, 观测到绝大部分杆条的散布情况。因此, 试验统计值与数值模拟的杆条速度对比, 最小值和平均值的参考意义较小, 最大值具有参考意义, 反映出数值模拟的结果高于试验值, 这与理论分析和文献结论一致。

5 结 论

通过对动能杆的定向抛撒过程进行数值模拟, 获得了不同弧长装药对杆条抛撒的驱动规律, 即在杆条排布结构不变的情况下, 随装药弧度的减小, 杆条的飞散角增大, 而杆条飞散的平均速度则随装药弧度的减小而减小。数值仿真计算结果与试验测试结果反应的规律基本一致。下一步工作将对不同杆条定向抛撒装置结构进行深入数值模拟, 分析对杆条抛撒的影响因素。

试验工作得到了中国工程物理研究院向永等同志的大力支持, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] Lloyd R M. Conventional Warhead System Physics and Engineering Design[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999: 179.
- [2] Gentilello J A, Cole M. Aimed rod warhead design and performance[A]. 45th Annual Bomb and Warhead America Defence Preparedness Association[C]. Alabama, USA, 1995: 7-10.
- [3] Schwalbe. Experiment and computational studies of rod-deployment mechanisms[A]. 16th International Symposium on Ballistics[C]. San Francisco, CA, 1998: 246-252.
- [4] 卢永刚, 蒋建伟, 蒋道建. 动能杆定向抛撒散布场仿真[J]. 弹道学报, 2002, 14(1): 27-31.
LU Yong-gang, JIANG Jian-wei, JIANG Dao-jian. Study and 3D simulation of KE-Rod directional disperse[J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(1): 27-31.
- [5] AUTODYN™ User Manual Revision 3.0[C]. Century Dynamics Inc, 1997.
- [6] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosives Handbook[Z]. 1985.

Numerical simulation of KE-rod directional disperse

JIANG Jian-wei¹, MEN Jin-bing¹, LU Yong-gang^{1,2*}, JIANG Dao-jian²

(1. National Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disaster, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, three models with different arc lengths of charge are designed to study the dispersing pattern. Using the numerical simulation software AUTODYN-2D, the driving processes of kinetic-rods in three constructions are simulated and analyzed. The fly-off velocity and angle of the rods can be obtained in the mean time. The rods' driving rules produced by different models has been deeply understood through analysis on the numerical results, which were validated by the test results.

Key words: mechanics of explosion; explosive directed dispersing; numerical simulation; kinetic-rod

* Corresponding author; LU Yong-gang; Telephone: 0816-2485474