

长径比对动能杆飞散特性影响的数值模拟

王迎春,王洁,王锟

空军工程大学防空反导学院,西安 710051

摘要 为研究长径比对定向式动能杆飞散特性的影响规律,以非线性动力分析软件 LS-DYNA 为工具,分别对 11 种不同长径比的动能杆进行数值模拟,得出动能杆飞散速度、空间分布与动能杆长径比的关系:当长径比大于 5 小于 11 时,动能杆的速度呈递增趋势,当长径比大于 11 时,动能杆的速度趋于平缓,有所降低;从空间分布看,长径比大于 5 小于 8 时,动能杆的空间分布较密集,长径比大于 8 时,动能杆的空间分布相对散开,分布也均匀,当长径比为 11 时,动能杆的飞散速度和空间分布最优。和文献中的数据进行对比,仿真与文献中数值计算结果基本吻合,和实验稍有差距,可能是由数值模拟采用的材料模型和试验所用的材料有一定误差所致。仿真结果可为此类战斗部的设计提供参考。

关键词 长径比;动能杆;LS-DYNA;数值模拟

中图分类号 TJ410.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.09.009

Numerical Simulation of the Relation Between Slenderness Ratio and Flight-characteristics of KE-rod

WANG Yingchun, WANG Jie, WANG Kun

Air Defense & Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract This paper studies the effect of the slenderness ratio on the dispersion characteristics of the aimed KE-rod warhead, with the nonlinear dynamic analysis software LS-DYNA, 11 different slenderness ratios of the KE-rod are considered, and the relationship among the KE-rod speed, the spatial distribution and the slenderness ratio is obtained. When the slenderness ratio is greater than 5 and less than 11, the speed of the KE-rod increases with the slenderness, and when the slenderness ratio is greater than 11, the speed decrease slowly; for the spatial distribution, when the slenderness ratio greater than 5 and less than 8, the spatial distribution of the KE-rod is more intensive, when the slenderness ratio is greater than 8, the distribution is relatively dispersed and uniform, when the slenderness ratio is 11, the velocity and spatial distribution of the KE-rod is optimal. The simulation results are basically consistent with those in the literature, and differ slightly with those obtained by experiments. The simulation results can provide a reference for the design of this type of warhead.

Keywords slenderness; kinetic energy rod; LS-DYNA; numerical simulation

0 引言

由于导弹制导技术的进一步发展,使直接碰撞击毁目标的动能拦截器的出现成为现实,但由于弹道导弹的机动和突防能力不断增强,雷达跟踪目标时在距离探测、跟踪精度等方面也存在一定的误差,动能拦截器不可能每次都直接击中目标,因此在较小的脱靶量下,抛撒一些金属构件来增大拦截器的杀伤范围也成为一种可能。动能杆战斗部的出现,就为反导拦截弹战斗部设计人员提供了一种新型的设计方案^[1-4];定向式动能杆战斗部能够在拦截导弹和目标的相对速度方向上

抛射出大量的动能杆,形成一个分布密度较大的侵彻杆“云”。当来袭导弹穿透该“云”区时,动能杆以巨大的相对速度侵彻来袭导弹,从而毁伤来袭导弹。动能杆战斗部所抛撒的动能杆条能够穿透导弹加固的蒙皮,同时继续穿透导弹内战斗部的外壳,利用其具有的动能,和主装药的摩擦以及在碰撞过程中所产生的冲击波引爆主装药^[1],或者在穿透导弹蒙皮之后继续穿透携带有化学物质的壳体,直接摧毁战术弹道导弹所携带的化学物质。

在美国战区导弹防御系统 (Theater Missile Defence,

收稿日期:2013-01-09;修回日期:2013-02-28

基金项目:航空科学基金项目(20120196006)

作者简介:王迎春,博士研究生,研究方向为防空反导武器发射系统总体与仿真,电子邮箱:wyc1986@163.com;王洁(通信作者),教授,研究方向为测控技术与仿真,电子邮箱:wjlc123@sina.com

TMD)、国家导弹防御系统(National Missile Defence,NMD)发展需求的带动下,美国的三大国家实验室对动能杆战斗部做了许多研究,特别是对定向动能杆杀伤元素的抛撒作了较多的实验和仿真。文献[2]对轴对称抛撒和采用180°偏心装药定向抛撒等进行实验和数值模拟研究,得到不同抛撒方式下动能杆的运动规律。Gentilello等^[5]对外层式装药动能杆战斗部的抛射过程进行实验研究,分析了外层装药对动能杆飞散的影响。蒋建伟等^[6]应用数值模拟软件 AutoDYN-2D 对动能杆定向爆炸驱动和相互作用过程进行了数值模拟,获得了杆条抛撒速度和飞散角等变化规律。李金河等^[7]采用 X 光闪光照相技术测试了定向式动能杆战斗部在不同装药厚度、不同装药宽度以及不同杆间距情况下动能杆的飞散情况,并给出了这些因素对动能杆飞散形状、飞散速度和飞散角度影响的规律性认识。

在战斗部的研究与设计中,通常采用理论分析、实验研究和数值模拟 3 种基本手段。能利用理论分析直接求解的问题是有限,实验研究需要耗费大量的人力、物力和财力,数值模拟在某种意义上比理论分析和实验研究对运动过程认识得更为深刻和细致。为了研究长径比对动能杆飞散特性的影响,本文采用数值模拟的方法,用非线性动力分析软件 LS-

DYNA 软件对 11 种不同长径比的动能杆飞散特性进行模拟。

1 定向式动能杆战斗部结构及仿真模型

定向动能杆战斗部外层由一圈多块环形定向起爆装药及多层动能杆束组成,如图 1 所示。仿真采用三维实体单元建模,为减少计算量,建立 1/2 模型,采用质量为 17.921g 的 11 种不同长径比的动能杆,其参数如表 1 所示,排布半径分别为 2,3,4,5cm,动能杆由里向外均匀排布的个数为 12,18,24 和 30,共 84 根;动能杆之间用聚亚安酯泡沫填充,最外层为装药。

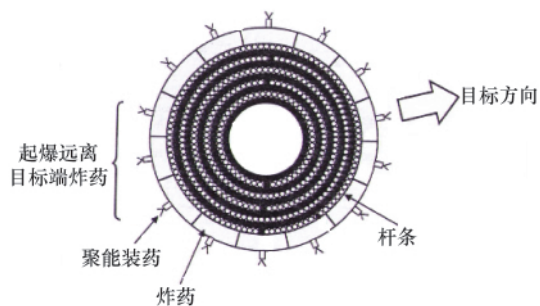


图 1 定向式装药动能杆战斗部结构
Fig. 1 Model of directed kinetic-rod warhead

表 1 不同长径比的动能杆结构参数

Table 1 Parameters of different slenderness KE-rod

长径比	长度/cm	直径/cm	长径比	长度/cm	直径/cm	长径比	长度/cm	直径/cm	长径比	长度/cm	直径/cm
5	4.174	0.835	8	5.710	0.714	11	7.100	0.640	14	8.291	0.592
6	4.713	0.786	9	6.176	0.686	12	7.482	0.623	15	8.682	0.579
7	5.223	0.746	10	6.625	0.663	13	7.892	0.607			

炸药网格采用单点 ALE 多材料体单元,周围用空气充填。空气网格同样采用单点 ALE 多材料体单元。动能杆采用 Lagrange 体单元网格划分,并耦合在由炸药和空气组成的欧拉场中。动能杆之间填充低密度泡沫,泡沫也采用单点 ALE 多材料体单元网格,空气的上下边界取为非反射边界,以保证计算的精度。有限元模型及网格的划分如图 2 所示。

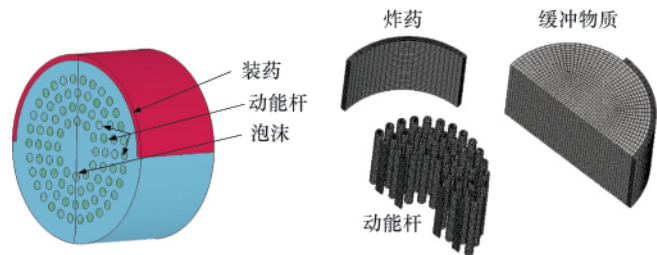


图 2 有限元结构及网格划分示意图

Fig. 2 FE computational model and mesh of numerical simulation

2 材料模型及参数

炸药采用高能炸药材料模型和 JWL(Jones-Wilkens-Lee)^[8] 状态方程描述。本文选用的炸药为底塔西特-C(Detaset-C),其参数为^[9]:密度 $\rho=1.486\text{g/cm}^3$,爆速 $D=0.70\text{cm}/\mu\text{s}$,爆压 $P_{CJ}=2.66\times 10^3\text{MPa}$,材料常数 A, B, R_1, R_2 和 ω 分别为 $3.49\times 10^5\text{MPa}$ 、 $4.524\times 10^3\text{MPa}$ 、6.07、1.78 和 0.3。

炸药周围的空气模型选用 LS-DYNA 材料库中的空材料模型,采用多项式状态方程模拟

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0 \quad (1)$$

式中, P 为压力; $C_0\sim C_6$ 为常数; $\mu=1/V-1$, V 为相对体积; E_0 为初始内能。其材料参数为

$$C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0, C_4=C_5=0.4, \rho=1.293\times 10^{-3}\text{g/cm}^3$$

在动能杆之间填充的低密度聚氨酯泡沫也选用 LS-DYNA 材料库中的空材料模型,采用 Grüneisen 状态方程进行模拟计算。动能杆材料选用圆钢柱,本构采用 Johnson-Cook 模型,状态方程采用 Grüneisen 方程。表 2 为数值模拟采用的钢和泡沫材料的参数^[9]。

表 2 钢和泡沫材料参数

Table 2 Input parameters of steel and foam

材料	密度/(g·cm ⁻³)	剪切模量/MPa	屈服应力/MPa
钢	7.85	8.18×10 ⁴	7.92×10 ³
泡沫	0.25	50	50

3 数值模拟

通过数值模型,可以得到每个计算方案的动能杆速度值,根据计算数据,做出不同长径比下的动能杆速度,如图3所示。从图中可以看出,随着长径比的增大,动能杆的速度也不断增大,当长径比等于11时达到最大,之后,速度有小幅变化。

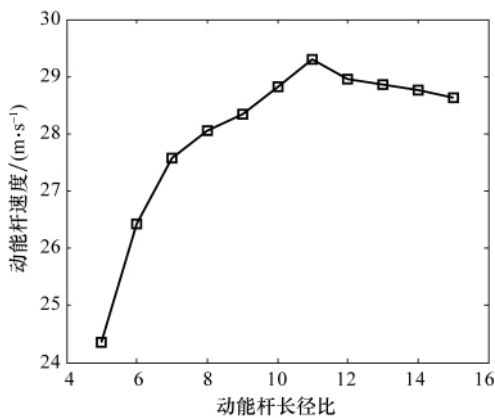


图 3 动能杆速度曲线

Fig. 3 Velocity curves of KE-rod

为进一步研究动能杆长径比对速度的影响,令 Δ_i 为长径比 i 的动能杆速度增长率, Δ_i 的表达式如下:

$$\Delta_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{v_i} \times 100\% \quad i=5, 6, \dots, 14 \quad (2)$$

式中, v_i 为长径比 i 的动能杆的速度。

根据式(2)可以求出动能杆速度增长率 Δ ,根据计算数据作出速度增长率曲线,如图4所示。由图可看出,随着长径比的增大,动能杆的速度增长率逐渐变小,长径比大于11后,其速度增长率为负值,也就是说速度变小。因此,从速度和速度增长率两个方面考虑,长径比为11时,动能杆的速度最大。

在动能杆飞散过程中,动能杆飞散角也是杀伤增强装置的一个重要因素。图5为不同长径比的动能杆在 $t=2000\mu\text{s}$ 时动能杆的空间分布情况,由图可看出,长径比从5到7变化时,动能的空间分布比较紧密,杆条相聚较近;长径比从8到15变化时,动能杆的空间分布越来越均匀,长径比达到11后,动能杆的空间分布基本类似,即长径比达到11后动能杆的空间分布变化不大。

由上述结果可知,在设计动能杆类杀伤增强装置时,应综合考虑动能杆的抛撒速度和飞散角度两个重要因素。根据实验结果可得,当长径比为11时,动能杆的抛撒速度和飞散

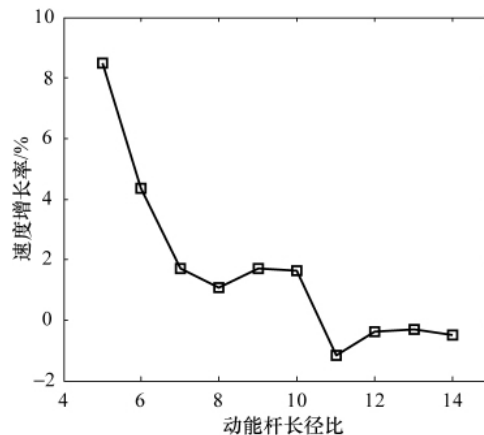


图 4 动能杆速度增长率曲线

Fig. 4 The ratio of velocity for KE-rod

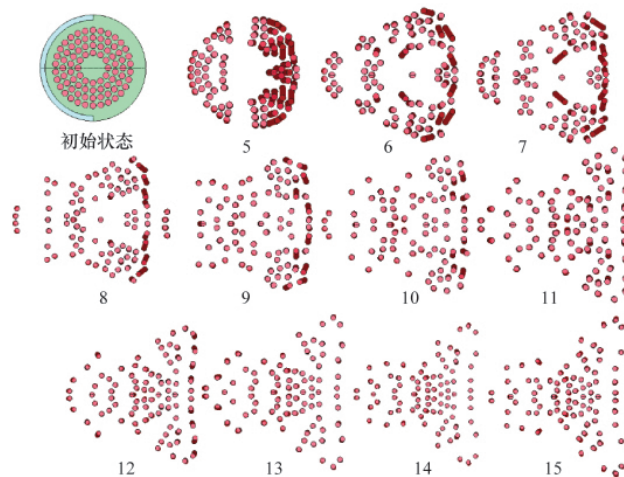


图 5 不同长径比动能杆的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of different slenderness ratios of KE-rod

角度(空间分布)均为最优。

4 结果验证

将本文仿真结果与Schwalbe等^[10]在洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)所做的实验和应用Sphinx数值计算的结果进行对比,文献[10]中实验结果为35m/s,Sphinx计算结果为30.6m/s(标准差为2.6)。Schwalbe等^[10]的动能杆实验抛撒结果如图6所示,该图为 $t=10\text{ms}$ 时X光线拍摄的图片。图7为本文模拟炸药起爆10ms后动能杆分散分布图,由图7可看出,动能杆分布比较平均,在目标方向分布均匀,且出现了一定的偏转,这和本实验所得分布图一致;动能杆稳定飞散后,平均速度为29.3m/s,与文献[10]中数值模拟的结果相差4.25%,与实验结果相差16.29%,本文仿真结果和文献中数值计算的结果基本吻合,和实验结果有一定差距,经过分析,其可能原因是数值模拟采用的材料模



图6 Schwalbe 实验的动能杆抛撒分布
 Fig. 6 KE-rod of experiment by Schwalbe

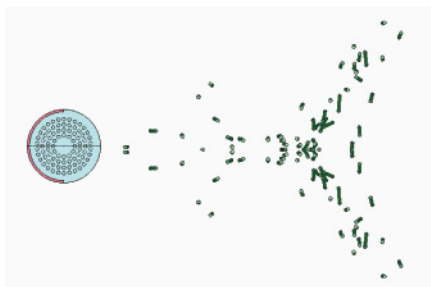


图7 数值模拟动能杆抛撒分布
 Fig. 7 KE-rod numerical simulation

型和实验所用材料有一定的误差,且数值计算是理想情况,但数值模拟结果可为战斗部的设计提供参考。

5 结论

通过对不同长径比的定向式动能杆战斗部的模拟,得出了动能杆飞散速度、空间分布与动能杆长径比的关系:当长径比大于5小于11时,动能杆的速度呈递增趋势,长径比为11时,速度到达最大值,当长径比大于11时,动能杆的速度趋于平缓,有所降低;从空间分布看,长径比大于5小于8时,动能杆的空间分布较密集,长径比大于8时,动能杆的空间分布相对散开,分布也均匀,当长径比为11时,动能杆的飞散速度和空间分布最优。针对不同结构的战斗部,需要综合

考虑动能杆飞散速度、空间分布及战斗部总体结构等多个因素来确定动能杆的长径比,文中数值模拟的方法可以为此类战斗部的设计优化提供一种思路。

参考文献 (References)

- [1] 余建斌,刘惠玲,张涛,等. 撞击杆式战斗部反导毁伤机理 [C]. 中国兵工学会弹道专业委员会弹道学术交流会,北京,1997.
 Yu Jianbin, Liu Huiling, Zhang Tao, et al. Antimissile damage mechanism of hitting rod warhead [C]. Proceedings of Ballistic Academic Conference on Ballistic Professional Committee of China Ordnance Society, Beijing, 1997.
- [2] Lloyd R M. Conventional warhead system and engineering design [M]. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998.
- [3] Lloyd R M. Physics of direct hit and near miss warhead technology [M]. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2001.
- [4] 陈兢. 美军直接碰撞杀伤增强装置前沿技术研究 [J]. 现代军事, 2007 (12): 57-60.
 Chen Jing. Modern Military, 2007(12): 57-60.
- [5] Gentilello J A, Cole M. Aimed rod warhead design and performance [C]. 45th Annual Bomb and Warhead America Defence Preparedness Association, Los Angeles, USA, May 17-18, 1995.
- [6] 蒋建伟, 门建兵, 卢永刚, 等. 动能杆定向抛撒规律的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(1): 85-89.
 Jiang Jianwei, Men Jianbing, Lu Yonggang, et al. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1): 85-89.
- [7] 李金河, 谭多望, 方青. 定向式动能杆战斗部飞散试验研究 [J]. 高能密度物理, 2008(4): 161-165.
 Li Jinhe, Tan Duowang, Fang Qing. High Energy Density Physics, 2008 (4): 161-165.
- [8] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [9] 万军. 动能杆类战斗部杀伤元素爆炸驱动的数值模拟研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
 Wan Jun. Numerical simulation study of explosion of KE-rod warhead [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [10] Schwalbe L A, Wingate C A, Stoffleth J H, et al. Experiment and computation studies of rod-deployment mechanisms [C]. 16th International Symposium on Ballistics, San Francisco, USA, September 23-28, 1996.

(责任编辑 王媛媛)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。