

动能拦截毁伤效果的数值仿真研究

王小军¹ 刘新建¹ 刘飞² 刘洪亮³

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)(2. 国防科技大学指挥军官基础教育学院,长沙 410073)

(3. 防化指挥工程学院,北京 102205)

摘要 根据质量守恒、动量守恒和能量守恒方程的基本理论,建立了针对动能拦截器高速直接碰撞毁伤模型.借助 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真软件,进行了数值模拟仿真.分析了拦截器在不同着角以及偏心打击条件下对弹道目标的毁伤效果,并用相关试验数据验证了方法的可行性.仿真结果表明可以进一步利用高性能计算机对拦截器和目标进行全尺寸建模、仿真开发动能拦截器对典型弹道目标的毁伤数据库.

关键词 动能拦截器, 高速碰撞毁伤, 毁伤效果, 毁伤数据库

引言

动能拦截技术是当今反导系统的重要组成部分,其杀伤机理为直接碰撞毁伤^[1].目前世界上许多国家特别是美国正在积极开展这一技术的研究^[2].国外诸如 International Journal of Impact Engineering, AIAA 等期刊已有大量关于高速、超高速碰撞数值仿真及少量实验研究报道,国内哈尔滨空间碎片研究中心、南京理工大学、北京理工大学等单位也开展了相关的研究,但基本上以空间防护为背景基于小尺寸弹丸或碎片(一般为毫米级)对靶板侵彻毁伤及基于杆弹性撞击问题研究^[3],而对动能拦截毁伤效果的研究工作相对较少.

实验研究是发现、解决问题的最直接和最有效的方法,但由于受到反导试验各种因素诸如政治、成本和技术条件的限制,完全依赖实验研究是不现实的.此时计算机数值仿真便成为一种必要而且非常有意义的研究手段^[4].本文借助 ANSYS/LS-DYNA 数值仿真软件,完成了对动能拦截直接碰撞毁伤的理论分析和数值模拟建模、仿真.重点分析了拦截器在不同着角以及偏心打击条件下对目标的毁伤效果,并用相关试验数据验证了方法的可行性.

1 数学模型

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 程序的算法 ALE

法,划分网格时采用映射网格法划为 8 节点六面体实体单元(可退化为 6 节点、4 节点实体单元),算法的理论基础是利用动量、能量、质量守恒等基本定律建立碰撞过程方程,一般为偏微分方程,基本内容见参考文献[5][6][7].这里只给出文中所采用的特定的数学模型:

1.1 Johnson - Cook 本构模型

Johnson - Cook 材料模型^[6]是描述材料在大变形、高应变率和高温条件下行为的本构模型,这种模型能较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应和温度效应本构关系,故本文也采用该模型.

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*M})$$

式中 A, B, C, n 和 M 为材料常数, A 是屈服应力, B 和 n 代表应变硬化的影响, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变.

1.2 状态方程

本文仿真中采用 Gruneisen 状态方程定义压缩材料压力^[6]:

$$\rho = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\alpha}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2}] + (\gamma_0 + \alpha\mu)E}$$

定义膨胀材料的压力为: $p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)E$ 式中, $\mu = 1/V - 1$, V 为当前相对体积, c 是 $\mu_s - \mu_p$

曲线的截距, S_1 、 S_2 和 S_3 是 $\mu_s - \mu_p$ 曲线的斜率, γ_0 是 Gruneisen 常数, α 是对 γ_0 的一阶体积修正, E 为材料的内能。

1.3 时间积分和时间步长控制

采用 LS-DYNA3D 程序中变时步长增量求解法以满足显式中心差分法的稳定条件. 其算法如下: 先计算每一个单元的极限时步长 $\Delta t_{ei}, i=1, 2, \dots$, 则下一时步长 Δt 取其极小值, 各种类型单元的极限时步长 Δt_e 可统一表述为, $\Delta t_e = a(L/c)$, 式中, a 为时步因子, 缺省值为 0.9, 本文仿真中取 0.3, L 为单元特征尺度。

2 数值模拟方案

数值模拟拦截器高速碰撞目标时, 两者材料模型均采用 Gruneisen 状态方程、Johnson-Cook 本构模型、最大拉应力失效模型. 拦截器和目标材料均假设为 4340#钢, 目标外壳假设厚 3mm, 外形假设为常见的图 1 所示锥形弹头^[8]. 由于动能拦截毁伤的全尺寸数值模拟建模, 需要划分几百万以上个网格, 对计算机的性能如 CPU 和内存等有很高的要求, 目前本实验室的双 CPU 的 PC 机无法满足, 特采用 10:1 缩比模型. 其它参数参见缩比模型图形标注。

表 1 4340#钢材料模型

Table 1 Material model of 4340# steel

| Static yield stress | Strain hardening modulus | Strain hardening exponential | Strain rate exponential | Heat softening exponential |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 792 | 510 | 0.26 | 0.014 | 1.03 |

2.1 建模模型及模型外形参数

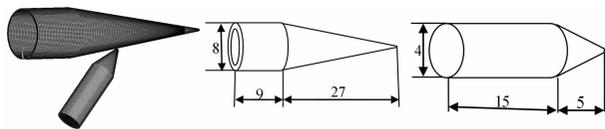


图 1 有限元建模模型及模型外形图

Fig. 1 Model of FEM and contour shape

3 数值模拟算例及其结果分析

据表 2 参数对基于缩比模型生成的 K 文件进行修改, 带入 LS - DYNA Solver 求解, 用后处理器处理上述结果可得拦截过程中各时刻应力云图及拦截器在拦截过程中动能变化曲线如下图示:

表 2 拦截参数

Table 2 Parameters of interception

| Condition | Major System V_x (10km/s) | Major System V_y (10km/s) | Attack Angle (degree) | Thickness of Target (mm) | Eccentricity (cm) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
| KKV | 0.27046 | 0.07247 | 75 | 0 | 0 |
| | 0.27046 | 0.07247 | 75 | 3 | 3 |
| | 0.27893 | 0.02440 | 85 | 3 | 3 |
| Target | 0.25 | 0 | | 3 | |
| | 0.25 | 0 | | 3 | |
| | 0.25 | 0 | | 3 | |

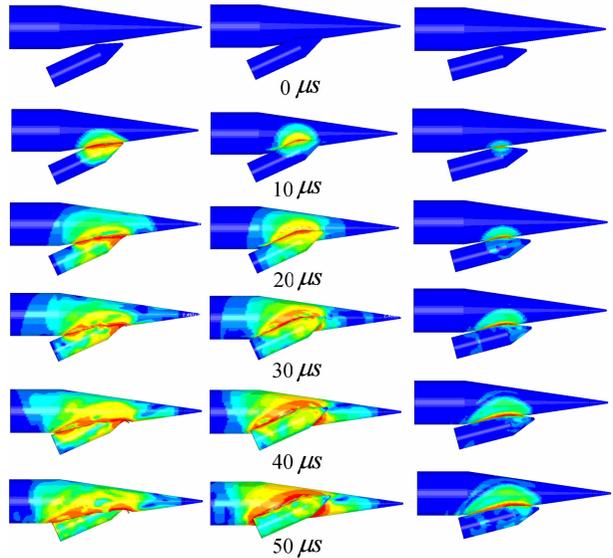


图 2 三种拦截条件下拦截过程中各时刻应力云图

Fig. 2 Stress diagram of three different intercept condition

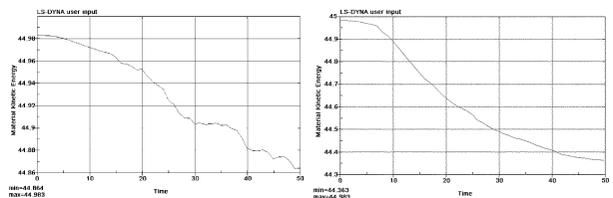


图 3 75 度非偏心与偏心打击过程中拦截器动能变化曲线

Fig. 3 KKV's kinetic energy curve in condition of

None eccentric attack and eccentric attack of 75 degree

比较上述三种不同打击条件下所得仿真结果可得: 在初始动能相同的情况下, 偏心打击条件下拦截器的剩余动能增大, 在其它打击条件不变的情况下, 随偏心距的增大拦截器对目标的毁伤减弱, 当偏心距继续增大到某一临界值时拦截器将对目标构不成有效毁伤; 在其它打击条件不变的情况下, 随着角的增大拦截器对目标的毁伤减弱, 在初

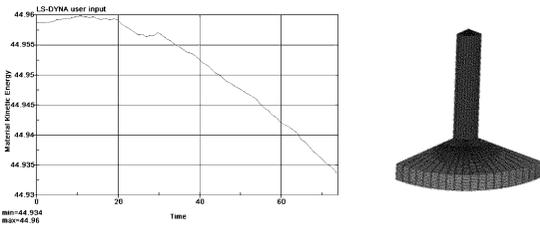


图 4 (1)85 度非偏心打击过程中拦截器动能变化曲线;
(2)验证模型有限元建模

计算结果如图 5 所示.

比较上述结果表明:计算值与实验值基本相符,说明此算法所得仿真结果较为可信.

5 结语

从不利的打击条件出发(即拦截器尽可能小速度、大着角、偏心打击目标),基于缩比模型分析动能拦截器对 3mm 厚 4340#钢制外壳导弹的直接碰撞毁伤,对不同着角、偏心打击进行仿真,并通过实验数据验证了方法的可行性.得出如下结论:

1) 在拦截器与目标速度不变情况下,随打击着角的增大拦截器对目标毁伤减弱,拦截过程中拦截器动能变化量较小,当着角增大到一定值时拦截器将对目标构不成有效毁伤.

2) 在打击速度、着角不变的条件下,随拦截器相对于目标的偏心距的增大拦截器对目标毁伤减弱.当偏心距增大到一定值时拦截器将对目标构不成有效毁伤.

3) 传统拦截器末制导与控制一般以最小能量、最小脱靶量等为优化指标,本文结论表明末制导与控制中交会条件的控制对提高拦截器杀伤概率更具有重要意义.

本文的数值仿真还表明可以利用高性能计算机对拦截器及目标进行全尺寸建模并进行全尺寸实际参数条件下仿真,开发拦截器对典型弹道目标的毁伤数据库.

参 考 文 献

- 刘庆鸿,陈德源.直接碰撞动能拦截器技术的发展与应用.现代防御技术,1997,5:10~17(Liu qinghong, Chen deyuan. Development and application of KKV's impact damage technology. *Modern Defence Technology*, 1997, 5: 10~17(in Chinese))
- 刘庆鸿,陈德源.动能拦截器的动力学建模与轨道控制.现代防御技术,1997,2:38~45(Liu qinghong, Chen deyuan. Dynamic modeling and orbit control of KKV. *Mod-*

Fig.4 (1)KKV's kinetic energy curve in condition of None eccentric attack of 85 degree;(2)The FEM model of validation
始动能相同的情况下,大着角打击条件下拦截器的剩余动能增大.以 75 度非偏心打击条件下拦截器动能变化曲线为例,拦截器初始动能为 $44.983 \times 10^5 \text{J}$ 对目标形成有效毁伤后剩余动能为 $44.363 \times 10^5 \text{J}$,即拦截器具有足够大的动能毁伤目标,毁伤效果受拦截交会条件影响很大,因此,如果能在拦截器末制导与控制中控制拦截交会条件,将比提高拦截器动能更具有意义.

4 仿真结果可靠性验证

由于做实弹拦截实验较为困难,国内外很少有关于尺寸相当的高速碰撞毁伤的实验报告,本文采用参考文献[9]中给出的相关实验结果,验证文中所用 ALE 算法所得仿真结果的可靠性,实验模型有限元建模如图 4(2)所示.(其它参数参见文献[9]).

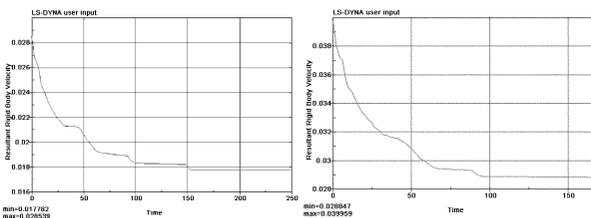


图 5 弹丸打击速度 285.4m/s 和 399.6m/s 时的速度曲线

Fig.5 Velocity curve in condition of 285.4m/s and 399.6m/s attack velocity

表 3 实验值与计算值比较

Table 3 Comparison of experimental value and calculational value

| Spare Velocity | experimental value | calculational value |
|------------------|--------------------|---------------------|
| Initial Velocity | | |
| 285.4 m/s | 181.1 m/s | 177.82m/s |
| 399.6 m/s | 291.3 m/s | 288.47m/s |

- ern Defence Technology*, 1997, 2; 38 ~ 45 (in Chinese))
- 3 鲍四元, 邓子辰. 基于杆弹性撞击问题的级数和. 动力学与控制学报, 2007, 5(3): 233 ~ 235 (Bao siyuan, Deng zicheng. Sum of series based on elastic impact problems of rods. *Journal of Dynamics and Control*, 2007, 5(3): 233 ~ 235 (in Chinese))
 - 4 阎晓军. 超高速碰撞、复合冲蚀、盘/叶耦合振动的数值模拟与分析. 北京航空航天大学博士后学位论文, 2002 (Yan xiaojun. Numerical simulation and analyse of hypervelocity impact, blade - disk system erosion and vibration. Postdoctoral Thesis of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002 (in Chinese))
 - 5 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学. 北京: 国防工业出版社, 1998 (Ma xiaoqing, Han feng. Dynamics of hypervelocity impact. Beijing: National Defence Industry Press, 1998 (in Chinese))
 - 6 尚小江, 苏建宇等. ANSYS/LS - DYNA 动力学分析方法与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2005 (Shang xiaojiang, Su jianyu. Dynamic analyse and engineering instance by using ANSYS/LS - DYNA. Beijing: China Water-Power Press, 2005 (in Chinese))
 - 7 杜庆华, 郑百哲. 应用连续介质力学. 清华大学出版社, 1986 (Du qinghua, Zheng baizhe. Applied mechanics of continuous material. Beijing: Tsinghua University Press, 1986 (in Chinese))
 - 8 刘新建. 导弹总体分析与设计. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006 (Liu xinjian. Overall design and analyse of missile. Changsha: Science and Defence Technology University Press, 2006 (in Chinese))
 - 9 S. Dey, T. Borvik, O. S. Hopperstad, M. Langseth. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34: 464 ~ 486

KKV'S DAMAGE EFFECT STUDY BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Wang Xiaojun¹ Liu Xinjian¹ Liu fei² Liu Hongliang³

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

(2. College of Basic education for commanders, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

(3. Command and Engineering College of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract The theoretical analysis, modeling and numerical simulation of the KKV's hypervelocity impact damage to typical target were presented by means of basic conservation law of mass, momentum and energy, and software ANSYS/LS - DYNA. The KKV's impact damage effect to ballistic missile in condition of different attack angle and different distance of eccentric were analyzed, and the feasibility of the method were proven by simulation test. The result indicates that the KKV's impact damage database could be explored based on full - size modeling and simulation by using high - speed computer.

Key words kinetic kill vehicle, hypervelocity impact damage, damage effect, damage database