

# 有攻角伸出式侵彻体侵彻有限厚 靶板数值模拟\*

李长顺,刘天生

(中北大学化工与环境学院,太原 030051)

**摘要:**为了能清楚地了解攻角对伸出式侵彻体侵彻靶板能力的影响,采用 LS-DYNA3D 动力有限元软件对有攻角条件下伸出式侵彻体侵彻靶板进行了数值模拟研究。从靶后动能的角度和同质量同外径的基准杆的侵彻能力做了比较,得出了侵彻体动能随时间的变化规律,分析了攻角和速度对侵彻体侵彻能力的影响。结果表明,在攻角小或速度大时,伸出式侵彻体相对基准杆有较大的穿深增益,而且这种穿深增益随着侵彻速度的增加或攻角的减小而逐渐增加。

**关键词:**侵彻;伸出式侵彻体;基准杆;攻角;数值模拟

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## The Numerical Simulation of Extended Penetrator with Attack Angle Penetrating into Finite Target

LI Changshun, LIU Tiansheng

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to understand the influence of attack angle, the expended penetrator penetrating into finite target with attack angle was simulated with LS-DYNA3D, which was contrasted to that of the baseline rod of the same mass and outer radius. The variation of kinetic energy with time was got for extended penetrator and baseline rod respectively. The study on this problem indicates that the attack angle and velocity influence on the ability of extended penetrator penetrating the finite target. The merit of extended penetrator are high velocity or little attack angle. The merits become more obvious with increase of velocity and the decrease of attack angle.

**Keywords:** penetration; extended penetrator; reference rod; attack angle; numerical simulation

### 0 引言

由于发射和弹托分离过程中的扰动和弹丸本身的质量偏差及弹丸自身空气动力稳定性的不足,在较多的情况下动能弹并非垂直侵彻板,而是具有一定的攻角,尽管攻角一般不大,但对于侵彻过程还是会产生一定的影响。目前对伸出式侵彻体的研究较少,只有韩永要<sup>[1-4]</sup>对其进行了一些试验研究和数值模拟,得出结论是在火炮速度范围内伸出式侵彻体相对于基准杆有较大的穿深增益,说明该伸出式侵彻体是一种很有前途的结构。林大金<sup>[5]</sup>等人建立了有攻角长管体垂直侵彻半无限厚靶的简化模型,为了探讨攻角对伸出式异型侵彻体侵彻能力的影响,文中利

用了 LS-DYNA3D 动力有限元程序,对有攻角条件下伸出式异型侵彻体和同材料、同质量、同外径的基准杆侵彻有限厚靶板的问题进行了数值模拟研究。

### 1 数值模拟模型的建立

#### 1.1 计算基本假设

根据穿甲工程力学的理论<sup>[6]</sup>,伸出体和靶板为均匀连续介质,忽略一切热效应,包括由摩擦所产生的热,由于变形或摩擦热对材料性能的影响,和它们引起的相变;不计空气阻力,不考虑重力的作用,不考虑靶板的侧边效应,忽略靶板的刚体运动,伸出体和靶板的初始应力为零。

\* 收稿日期:2008-06-14

作者简介:李长顺(1983-),男,辽宁人,硕士研究生,研究方向:弹药工程。

### 1.2 有限元模型及材料参数

文中为了说明弹体结构对侵彻性能的影响,不考虑材料的影响,所以弹体与靶板采用相同的材料,都采用 20 # 低碳钢。密度为  $7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。具体尺寸如图 1、图 2 所示。

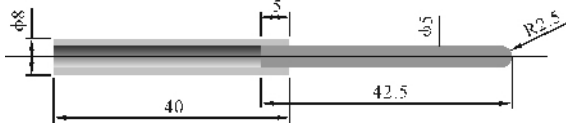


图 1 伸出式侵彻体

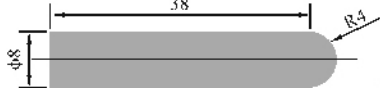


图 2 基准杆

计算模型的网格划分采用 Langrange 法。侵彻体和靶板单元类型均采用 SOLID164, 网格单元形状为八结点六面体,靶板与弹丸直接作用区域网格加密。在对称边界上施加对称约束,侵彻体和靶板均采用 JOHNSON\_COOK 材料模型和 Gruneisen 状态方程。

侵彻体和靶板之间的接触算法采用的是: ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE,在靶板边界处施加非反射边界,单位采用  $\text{cm} - \mu\text{s} - \text{g}$ 。计算时间为  $120\mu\text{s}$ 。每  $2\mu\text{s}$  输出一个结果数据文件。由于所研究问题具有对称性,在模拟计算过程中采用对称面的方法,侵彻体和靶板均取 1/2 原型。

Johnson-cook 模型的应力应变关系<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + c \ln \epsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中:  $A, B, C, n$  和  $m$  是材料常数,  $\bar{\epsilon}^p$  塑性应变效果,  $\epsilon^* = \bar{\epsilon}^p / \epsilon_0$  为有效塑性应变率,  $T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}$  为相当温度;  $m$  为常数。计算时采用 Gruneisen 状态方程,对于可压缩材料,压应力表达式如下:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S-1) \mu \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (2)$$

式中:  $\rho_0$  为初始密度;  $E$  为内能;  $\mu = (\rho / \rho_0 - 1)$ ,  $\rho$  为当前密度;  $c, \epsilon, \gamma_0$  和  $a$  为材料参数。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 攻角对伸出体侵彻性能的影响

为了探讨攻角对伸出体侵彻性能的影响,在

初始侵彻速度为  $1300\text{m/s}$  的条件下,改变侵彻体的侵彻攻角,分别对攻角为  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ$  的情况进行了数值模拟,通过后处理软件得出了侵彻结束时弹坑的正面图像(见图 3、图 4)。

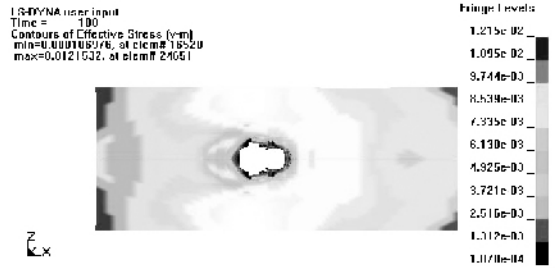


图 3 伸出体弹坑图像

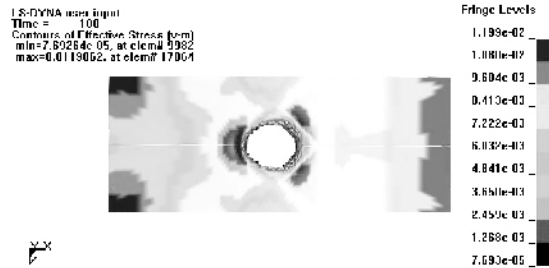


图 4 基准杆弹坑图像

6 种攻角情况下伸出体与基准杆的动能随着时间的变化的规律(见图 5)。从图 5 可以看出攻角对伸出体的侵彻性能是有一定影响的,随着攻角的增大剩余动能在减小,说明在侵彻过程中消耗了更多的能量,而基准杆的剩余动能也在减小,但是减小得较慢,说明小攻角对基准杆的侵彻性能影响不大,从模拟结果可以看出在攻角小于  $5^\circ$  时,伸出体的剩余动能还是大于基准杆的,说明在小攻角情况下,伸出体的侵彻性能要优于同材料、同质量、同外径的基准杆,但当攻角大于  $5^\circ$  时,伸出式侵彻体相对于基准杆的靶后动能优势不是很明显甚至在更大攻角时基准杆的剩余动能大于伸出体。

以上只是在速度为  $1300\text{m/s}$  时攻角的变化对伸出体的侵彻性能的影响,得出的结论是在速度为  $1300\text{m/s}$  时攻角对伸出体的侵彻性能影响较大,但在攻角小于  $5^\circ$  时,伸出体的性能还是优于基准杆的。而在攻角等于  $5^\circ$  时二者的剩余动能几乎相等。

### 2.2 初始速度的变化对伸出体的侵彻性能的影响

由 2.1 得出在攻角为  $5^\circ$  时两种侵彻体的侵彻性能几乎一样,下面就讨论攻角为  $5^\circ$  时速度的变化对两种弹体的影响,得到的变化规律(见图

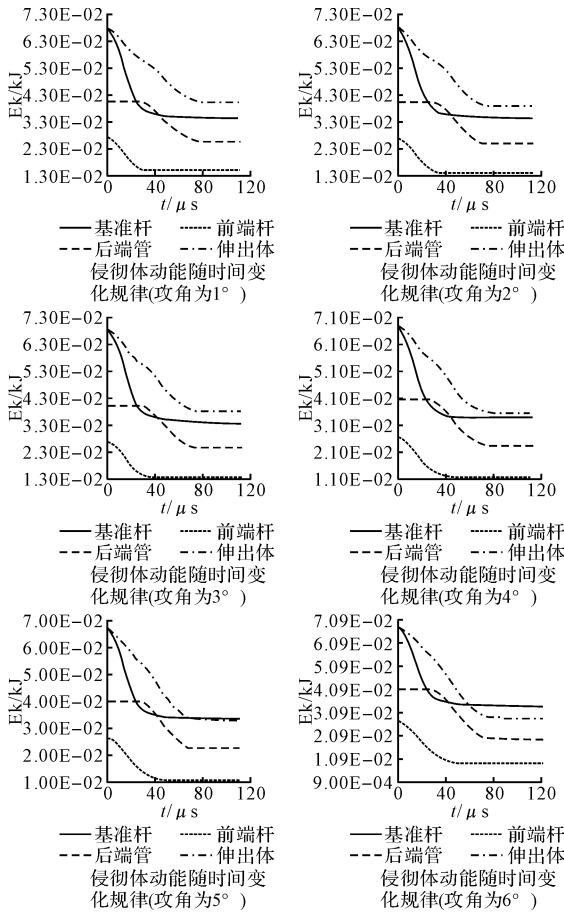


图 5 侵彻体动能随时间变化规律(1300m/s)

6)。从计算结果来看,侵彻过程中伸出式侵彻体的动能基本按线性下降,类似于基准杆的动能下降规律。在侵彻的开始阶段,伸出式侵彻体的动能下降率要小于基准杆,在低速段,伸出式侵彻体相对于基准杆的靶后动能优势不是很明显,其靶后剩余动能甚至还低于基准杆。但随着撞击速度的增高,伸出式侵彻体的优势越来越明显,例如在 1600m/s 时靶后剩余动能的增益为 5%,而在 2500m/s 时则可达到 21%,随着坦克穿甲弹炮口初速的不断提高伸出式侵彻体的应用前景将会非常广阔。

### 3 实验结果与计算结果比较

实验最主要的工作是如何使出膛后的弹丸产生所需要的攻角值,并且准确测量出弹体的初速度和穿过靶板的剩余速度。攻角控制采用锥尾翼法<sup>[8]</sup>。通过基准杆的实验结果与计算结果对比(见表 1)。说明模型的建立,参数的选择基本正确,应用 LS-DYNA 软件分析侵彻问题的计算结果是可以相信的。

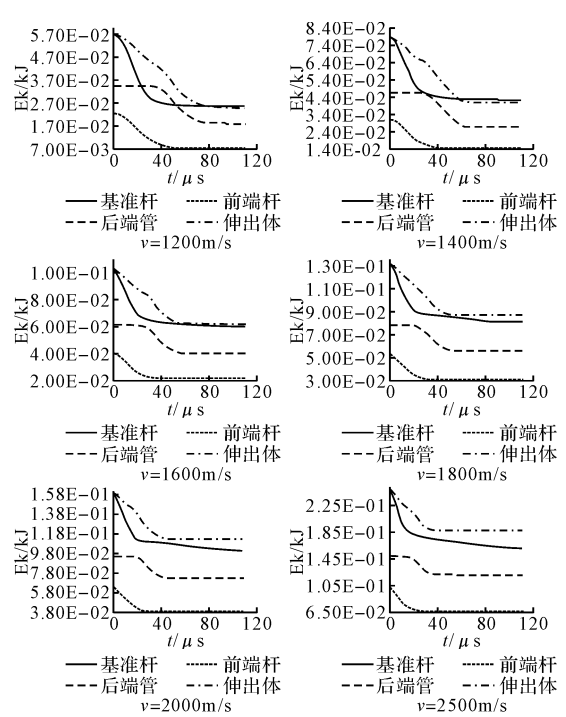


图 6 侵彻体动能随时间变化规律(攻角为 5°)

表 1 实验结果与计算结果比较

侵彻体		攻角	初速度	剩余速度	误差
		/ (°)	/ (m/s)	/ (m/s)	/ %
基准杆	实验值	1	1309	391	4.3
	计算值	1	1300	955 m/s	
基准杆	实验值	2	1415	1009	5.1
	计算值	2	1400	1064	
基准杆	实验值	5	1210	788	5.0
	计算值	5	1200	830	

### 4 结论

有攻角的侵彻体侵彻有限厚靶板的过程是一个较为复杂的过程,利用三维有限元程序 LS-DYNA 对这一侵彻过程进行了数值模拟,通过模拟对有攻角伸出式侵彻体侵彻有限靶板的物理过程有了一个清晰的描述,分析了侵彻过程中改变攻角和速度两个重要因素,侵彻体撞靶后剩余动能随时间的变化规律。并与同材料、同质量、同外径的基准杆的侵彻能力做了对比。结果表明,在攻角较小或速度较大时伸出式侵彻体相对于基准杆有较好的侵彻性能,说明伸出式侵彻体是一种很有前途的结构。文中的研究为新型穿甲弹的设计提出了有益的建议,有攻角伸出式

密度条件下的穿孔毁伤对天线的电性能影响开始增大,天线增益值下降很快。

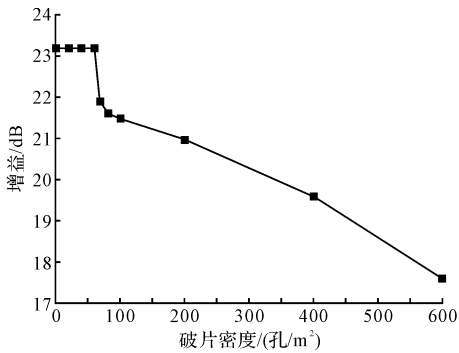


图 6 破片密度变化时天线增益变化图

## 4 结 论

根据物理光学法和矩量法,利用 FEKO 软件,对圆抛物面天线进行了建模仿真,对不同破片密度下天线穿孔毁伤工况进行了仿真计算,获得了破片穿孔密度变化下的天线远场辐射特性图,并对计算结果进行了对比分析,得到了圆抛物面天线反射面在大量破片穿孔毁伤后,它的电性能随破片穿孔密度变化的规律,得出结论:圆抛物面天线在遭受大量破片毁伤后,且仅对反射面造成穿孔毁伤的条件下,随着破片密度增大,天线电性能在破片密度为  $20\sim 60$  孔/ $m^2$  时不受影响,增益值不变;在破片密度为  $70\sim 100$  孔/ $m^2$  时,天线电性能开始受到影响且增益值出现缓慢下降趋势;在破片密度为  $200\sim 600$  孔/ $m^2$  时,天线电性能开始受到较大影响,且增益值下降很快。

由上述分析可知,单纯依靠破片对天线反射

面的穿孔毁伤致使天线电性能下降的策略很难达到战术目的,该结论与试验结果一致。另外,该结论对评价实战中雷达的生存能力及评价反辐射武器的设计、作战效能也提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 肖疆,徐晓文,董涛.单孔毁伤对赋形反射面天线辐射特性的影响[J].北京理工大学学报,2003,23(6):768-771.
- [2] 肖疆,徐晓文,董涛.多孔毁伤时赋形反射面天线辐射特性的研究[J].电波科学学报,2003,18(6):648-651.
- [3] 董涛,徐晓文,肖疆.赋形反射面天线毁伤效应研究[J].现代雷达,2003,25(10):54-56.
- [4] 肖疆.赋形反射面天线在穿孔毁伤条件下辐射特性的研究[D].北京:北京理工大学,2003.
- [5] 郑立志.FEKO在天线设计中应用[J].CAD/CAM与制造业信息化,2004(9):133-135.
- [6] Warren L Stutzman, Gary A Thiele.天线理论与设计[M].朱守正,安同一,译.北京:人民邮电出版社,2006.
- [7] Carberry T F. Analysis theory for the shaped-beam doubly curved reflector antenna[J]. IEEE Trans A P, 1969,17(2):131-138.
- [8] Winter C F. Dual vertical beam properties of doubly curved reflectors[J]. IEEE Trans A P, 1971, 19(2):174-180.
- [9] Duan D W, Yahya R S. A generalized diffracts ion synthesis technique for high performance reflector Antenna[J]. IEEE Trans A P, 1995,43(1):27-40.

(上接第 128 页)

侵彻体侵彻多层间隔靶板数值模拟将是下一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 韩永要,赵国志,方清.伸出式侵彻体斜侵彻有限厚靶板数值模拟[J].弹箭与制导学报,2006,26(4):169-172.
- [2] 韩永要,赵国志,方清,等.侵彻体垂直侵彻半无限靶数值模拟[J].弹道学报,2007,19(1):64-67.
- [3] 韩永要,赵国志,李向东,等.长管体与长杆体侵彻靶板对比研究[J].力学与实践,2004,26(4):56-58.
- [4] 韩永要,赵国志,李向东,等.固连接异形侵彻体垂

直侵彻半无限靶简化模型[J].弹道学报,2004,16(3):78-82.

- [5] 林大金,沈培辉,赵国志.有攻角长管体垂直侵彻半无限厚靶的简化模型[J].弹道学报,2007,19(2):55-57.
- [6] 赵国志.穿甲工程力学[M].北京:兵器工业出版社,1992:106-107.
- [7] Livermore Software Technology Corporation LS-DYNA Keyword User's Manual(970v)[Z].2003.
- [8] 张巨香.大攻角长杆体垂直侵彻半无限靶的研究[D].南京:南京理工大学,2002.