

# 杆式动能体侵彻多层靶板数值仿真\*

赵汝岩, 卢洪义, 朱敏

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

**摘要:**为研究高速杆式动能体对多层靶板的侵彻毁伤过程,运用 ABAQUS 软件对杆式动能体侵彻多层靶板过程进行数值模拟,仿真得到不同初速的杆式动能体侵彻多层靶板历程、杆式动能体在侵彻过程的破损情况以及剩余速度。结果表明:动能体的磨损导致动能体速度降低程度先小后大,且初速高的动能体穿透相同的多层靶板后侵蚀现象更加严重,这将降低动能体的侵彻后效。

**关键词:**杆式动能体;侵彻;靶板

**中图分类号:**TJ410.6 **文献标志码:**A

## Numerical Analysis of Rod Kinetic Energy Projectile Penetrating into Multilayer Spaced Metal Plates

ZHAO Ruyan, LU Hongyi, ZHU Min

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

**Abstract:** High velocity long-rod kinetic energy projectile penetrating into multilayer spaced metal plates was simulated, the residual length and the residual velocity of kinetic energy projectile with different velocity were analyzed. The result indicates the abrasion of the kinetic energy projectile result in the decrease of velocity, and the kinetic energy projectile with higher velocity is eroded more badly.

**Keywords:** rod kinetic energy projectile; penetration; multilayer plates

### 0 引言

杆式动能体对多层靶板的侵彻是侵彻力学中较为复杂的问题,普遍采用轻气炮、电磁炮和聚能射流三类方法对动能体进行加速,研究费用极高。随着科技的发展,有限元分析方法在侵彻力学的分析中得到了广泛的应用,龙源等人<sup>[1-3]</sup>对文献[4-5]的模型采用文献[6]的本构方程对其侵彻过程及机理进行了分析研究,纪霞等人<sup>[7]</sup>对弹丸侵彻三层均质靶板进行数值模拟,分析了不同弹速、不同弹重产生的弹丸速度及加速度的变化,找到其中的变化规律;刘洋<sup>[8]</sup>利用显示动力学有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 模拟着靶速度为 2.0Ma 和 2.5Ma 的战斗部对多层间隔靶板侵彻的过程。以上文献对侵彻初速小于 2000m/s,靶板的厚度较小的情况进行模拟。文中借助 ABAQUS 软件,采用 Lagrange 法对高速杆式动能体无攻角正侵彻多层靶板的过程进行数值模拟,研究不同初速的动能体侵彻各层靶板后的剩余长度以及剩余速度,为高速动能体侵彻多层靶板的工程应用提供参考。

### 1 数值计算

#### 1.1 物理模型

动能体和多层靶板看作是均匀连续介质,认为整个侵彻过程是绝热的,不计空气阻力,不考虑重力作用。由于杆式动能体和多层靶板在结构上的对称性,取 1/2 实体建立模型,并在对称面上施加对称约束,对各层靶板的侧边施加边界条件,模拟各层靶板四周被固定的情况。体靶的几何模型如图 1,图中序号 1-9 代表各层靶板,其中第 2 层、第 4~第 8 层靶板厚

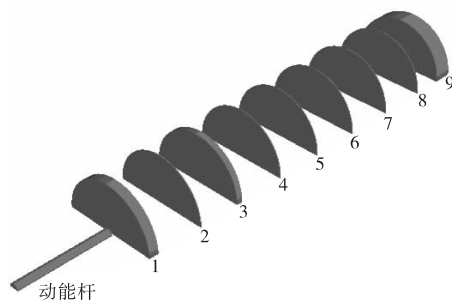


图 1 杆式动能体侵彻多层靶板物理模型

\* 收稿日期:2012-01-08

作者简介:赵汝岩(1980-),男,山东烟台人,讲师,博士,研究方向:武器系统毁伤能力评估。

度为  $L$ , 第 1 层靶板厚度为  $10L$ , 第 3 层靶板厚度为  $6L$ , 第 9 层靶板厚度为  $20L$ 。各层靶板之间的距离为  $40L$ 。动能体的尺寸为  $\Phi 5L \times 100L$ 。

### 1.2 材料模型

#### 1.2.1 材料属性

动能体和靶体采用相同的材料,为某型钨合金材料,其弹性模量  $E = 345\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.22$ ,密度  $\rho = 18000\text{kg/m}^3$ 。

#### 1.2.2 屈服准则

动能体和靶板仿真模型材料采用具有弹塑性属性的 Johnson-Cook 模型。其屈服函数为:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)[1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  为材料参数;其中  $A = 1.093\text{GPa}$ ,  $B = 1.278\text{GPa}$ ,  $n = 0.42$ ,  $C = 0.0188$ ,  $m = 0.78$ ;  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ ,  $\dot{\epsilon}_p$  为有效塑性应变率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考塑性应变率,一般取  $\dot{\epsilon}_0 = 1\text{s}^{-1}$ ;  $T^* = (1 - T_r) / (T_m - T_r)$ ,  $T_r$  为参考温度;  $T_m$  为熔点温度。

#### 1.2.3 损伤准则

考虑应力三轴度、应变率和温度效应,并通过累积损伤的概念考虑变形路径的影响,定义单元损伤:

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_f} \quad (2)$$

式中: $D$  为损伤参数,在  $0 \sim 1$  之间变化,初始时  $D = 0$ ,当  $D = 1.0$  时材料失效; $\Delta\epsilon_p$  为一个时间步的塑性应变增量; $\epsilon_f$  为当前时间步的应变状态、应变率和温度下的破坏应变,其表达式为:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] \times [1 + D_5 \ln T^*] \quad (3)$$

式中: $D_1 \sim D_5$  为材料参数,大小分别为  $0.07, 1.73, -0.54, -0.012, 0$ ;  $\sigma^* = p / \sigma_{\text{eff}}$  为应力状态参数,其中  $p$  为压力,  $\sigma_{\text{eff}}$  为等效应力。

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 杆式动能体侵彻多层靶板历程图

图 2 为动能体以  $2000\text{m/s}$  的速度无攻角正侵彻多层靶板的历程图。从图中可以看出当  $t = 72\mu\text{s}$  时处于杆式动能体侵彻第一层靶板的冲塞阶段,由于受压缩应力波作用,在第一层靶板背面出现鼓包(见图 2(a));当  $t = 240\mu\text{s}$  时,动能体已经穿透第一层  $10L$  的靶板且即将撞击第二层厚度为  $L$  的靶板,但是第一层靶板的碎片已经撞击到第二层靶板上,使靶板产生塑性应变;而当  $t = 600\mu\text{s}$  时,动能体已经穿透第二层靶

板,而靶板碎片已经作用于  $6L$  的第三层靶板(见图 2(c)); $t = 960\mu\text{s}$  时,动能体穿透第五层靶板; $t = 1460\mu\text{s}$  时,动能体穿透第八层靶板,而此时第三层靶板在被穿过程中具有的动能继续破坏靶板,使靶板产生更多的碎片(见图 2(e)); $t = 1730\mu\text{s}$  时,动能体穿透最后一层靶板。

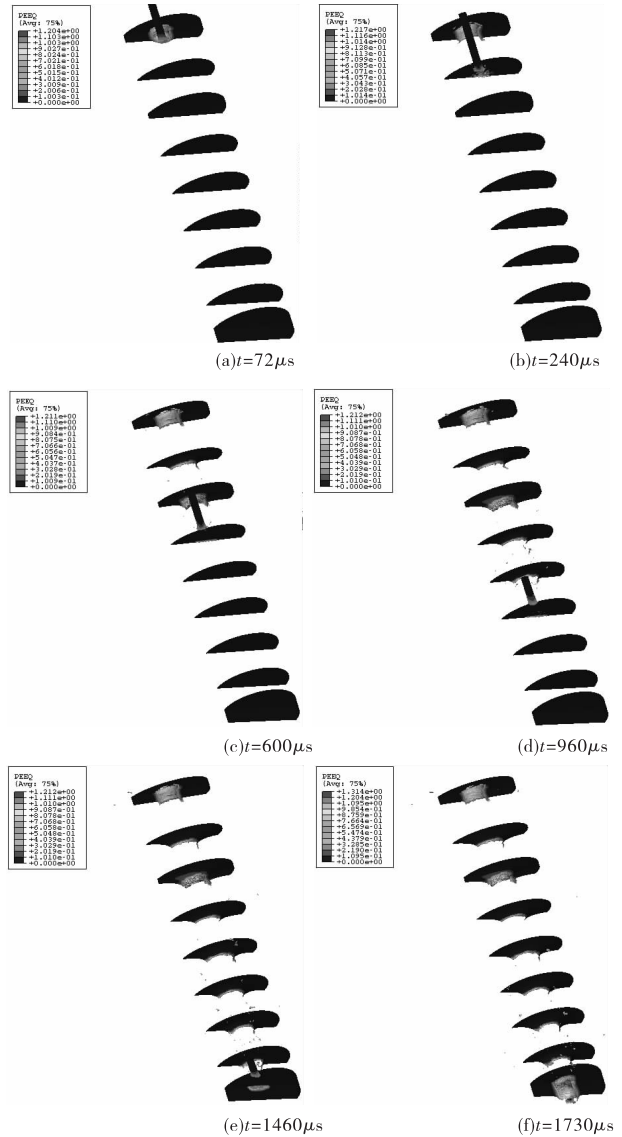


图 2 动能体 ( $\Phi 5L \times 100L$ ) 侵彻多层靶板历程图

### 2.2 动能体破损变形分析

图 3 为杆式动能体侵彻过程中的外形图。由于靶板的可变形性以及动能体与每层靶板撞击端面中心和边缘处的塑性变形不同步导致在动能体撞击端面出现一圆形凸台;随着侵彻过程的进行,动能体的撞击端墩粗面积也相应增加,呈现蘑菇头形状,并在一定速度下动能体撞击端边缘出现破坏失效。仿真结果与参考文献[9]中的残余动能体外形(见图 4)类似。

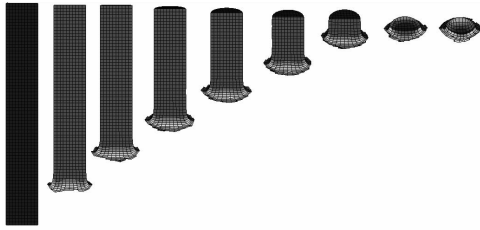


图 3 侵彻过程动能体外形图

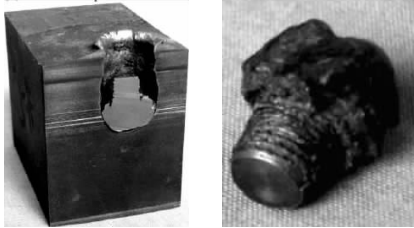


图 4 试验弹孔纵剖面和残余弹芯

图 5 为动能体以 4000m/s 的速度撞击第一层靶板时端面中心和边缘处两点的塑性变形历程。中心部位单元的塑性应变在撞击初期增长迅速,在 0.5 $\mu$ s 左右该单元失效,在此之后的应变均不再发展。而边缘部位单元的应变持续增长,直到在 1 $\mu$ s 左右,旁边单元失效卸载。由于端面中心和边缘处塑性变形的不同导致动能体撞击端呈现蘑菇头状。

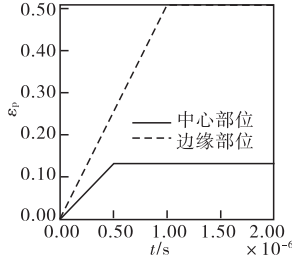
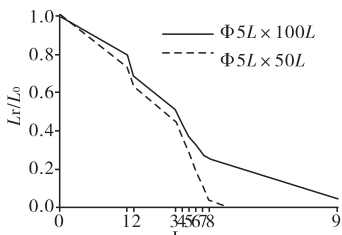
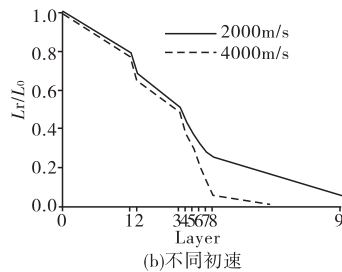


图 5 动能体撞击端面的塑性变形

图 6(a) 是不同长径比的动能体以 2000m/s 的速度侵彻各层靶板后的剩余长度变化图,而图 6(b) 是不同初速的动能体侵彻各层靶板后的剩余长度变化图,图中横坐标表示动能体所要侵彻的靶板的层数。在其他条件不变的情况下,通过图 6(a) 可以看出,长径比较大,动能杆侵彻靶板的层数也多;通过图 6(b) 可以看出随着初速的增加,穿透每层靶板后相对剩余长度(即弹丸剩余长度  $L_t$  与原始长度  $L_0$  的比值)却在



(a) 不同长径比



(b) 不同初速

图 6 动能体侵彻各层靶板的剩余长度变化图

减少,而当动能体以 4000m/s 的速度侵彻最后一层靶板的过程中,动能体已经完全破碎。这意味着初速更高的动能体穿透相同的间隔靶板侵蚀现象更加严重,这无疑降低动能体的侵彻后效。

### 2.3 动能体速度曲线分析

图 7 和图 8 为初速分别为 2000m/s 和 4000m/s 的动能体侵彻多层靶板过程中动能体的速度变化曲线图。通过图 7 和图 8 可以看出,不同初速的动能体在侵彻前八层靶板的过程中动能体的速度震荡变化,这是由于侵彻每层靶板都要经历开孔、侵彻、充塞 3 个阶段,这个过程中动能体动能急剧转化为形成塞块所作的功,速度迅速下降;塞块形成后,靶板抗力迅速减少,此时动能体内各种激波的复杂作用使动能体速度有所回升,随后动能体对靶板的扩孔破坏作用又使其动能转化为塞块的动能和破坏靶板所需的功,动能体速度又一次快速下降,动能体对每层靶板的侵彻结束,此时动能体内各种激波的作用再次使动能体速度有所回升,这个过程持续到动能体侵彻下一层靶板。

当动能体侵彻底层靶板前,动能体速度缓慢下降,在侵彻底层靶板过程中,动能体速度迅速降低。这是由于在动能体侵彻前几层靶板过程中,动能体破坏比较严重,动能体在侵彻最后一层靶板前相对剩余长度较小(见图 6),因此在侵彻同样材料的靶板时速度降低较快。

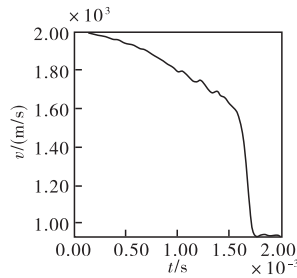


图 7 动能体速度变化曲线图(2000m/s)

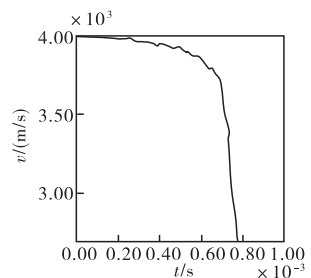


图 8 动能体速度变化曲线图(4000m/s)

## 3 结论

通过对动能体以不同速度无攻角正侵彻多层靶板的仿真结果可以分析得出:

1) 动能体侵彻多层靶板的过程中,由于动能体的磨损导致动能体速度降低的程度先小后大,直至停止;

2) 初速高的动能体穿透相同的间隔靶板后侵蚀现象更加严重,这将降低动能体的侵彻后效,因此选