

# 高速动能体对飞机毁伤数值仿真

赵汝岩<sup>a</sup>, 卢洪义<sup>b</sup>, 朱敏<sup>a</sup>

(海军航空工程学院 a.7系; b.飞行器工程系, 山东烟台 264001)

**摘要:**为研究高速动能体对飞机的毁伤状况,分析了飞机的毁伤模式和等级,并运用 ABAQUS 软件对高速动能体对飞机重要部件的毁伤过程进行数值模拟,仿真得到对飞机造成不同等级毁伤的动能体的直径与速度,为高速动能体对飞机的毁伤工程应用提供参考。

**关键词:**毁伤;动能体;飞机

中图分类号:TP241

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)01-0028-04

## Numerical Analysis of High-Speed Kinetic Energy Projectile Mutilating to the Aircraft

ZHAO Ru-yan<sup>a</sup>, LU Hong-yi<sup>b</sup>, ZHU Min<sup>a</sup>

(a. 7th Department; b. Department of Airborne Vehicle Engineer,  
Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To study the damage status of the high-speed kinetic energy projectile penetrating into the plane, this paper analyzed the damage mode and level, and simulated the damage process of penetrating into the aircraft with the software of ABAQUS. The different damage statuses of the aircraft penetrated by different diameter and velocity of kinetic energy projectile were got, providing the reference for the high-speed kinetic energy projectile mutilating application to the aircraft.

**Key words:** mutilating; kinetic energy projectile; aircraft

高速动能体为惰性破片,不含引燃成分,与目标作用后不会释放化学能。对飞机的毁伤包括穿孔、切割、引燃和引爆几种,对飞机作战性能会产生影响。被高速动能体冲击的对象,可抽象为靶板,此类问题属于非线性的瞬态侵入响应问题,目前广泛的采用数值仿真的方式进行研究。纪霞等<sup>[1]</sup>对弹丸侵入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;刘洋<sup>[2]</sup>利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟着靶速度为 2.0 Ma 和 2.5 Ma 的战斗部对多层间隔靶板侵入的过程。对于飞机、导弹之类武器装备的毁伤研究多集中于毁伤概率的研究<sup>[3-6]</sup>。本文借助 ABAQUS 软件,采用 Lagrange 法对高速动能体对飞机不同部件的毁伤过程进行数值仿真研究,分析对飞机造成毁伤的动能体的直径与速度,为高速动能体对飞机的毁伤工程应用提供参考。

### 1 飞机的毁伤级别

- 1) KK 级杀伤。飞机遭到打击后受到的损伤会引起飞机立即解体,有时也称之为灾难性杀伤;
- 2) K 级杀伤。飞机遭到打击后,30 s 之内其损伤将引起飞机失控;
- 3) A 级杀伤。飞机遭到打击后,5 min 内其损伤将引起飞机失控;
- 4) B 级杀伤。飞机遭到打击后,30 min 内其损伤将引起飞机失控;
- 5) C 级杀伤。飞机的损伤程度使它无法完成规定任务,但尚不足以将它从编制中去掉,也叫任务放弃杀伤。

收稿日期:2012-10-12

作者简介:赵汝岩(1980—),男,博士,讲师,主要从事动能毁伤仿真研究。

## 2 高速动能体对飞机的毁伤模式

### 2.1 高速动能体对驾驶舱的毁伤模式

高速动能体撞击驾驶舱时,如果驾驶员头部和躯干被击中,认为驾驶员死亡,飞机无人控制,必然毁坏;驾驶员的左右上臂或左右下臂同时受伤,飞机无法控制,导致机毁人亡;如果大腿或小腿不管是单独受伤或同时受伤,短时间内可以支撑,时间长了,流血过多,驾驶员昏迷导致机毁人亡,所以大小腿4个部分同时受伤,会导致K级杀伤。

### 2.2 高速动能体对发动机舱的毁伤模式

发动机舱内装有发动机、进气道、飞行控制机构、弹上电源等。发动机的任何一部分遭到破坏,都会使发动机损坏。压机壳体大约为15 mm硬铝,如穿孔会使尾部喷管温度升高、推力下降;燃烧室壳体大约为20 mm硬铝,如穿孔会使燃烧室损伤;发动机油管损坏,会使发动机油压不足而失且且点燃燃油;燃油调节装置(油泵或滤油器)损伤可能使发动机失灵;尾喷管是投影面积最大最易损坏的部件;进气道、飞行控制机构、弹上电源等受损也会导致KK级杀伤。

### 2.3 高速动能体对飞机油箱的毁伤模式

油箱被穿孔,可使油箱结构强度降低,在飞机振动和大过载飞行中,使油箱断裂成几部分或导致飞机漏油,从而使飞机全部或部分失去燃油或使燃油燃烧,对战机能造成C级以上的毁伤或KK级毁伤。

油箱被切割,可使油箱被切割成几部分,致使飞机漏油,从而使飞机全部或部分失去燃油、燃油燃烧,对战机能造成C级以上的毁伤或KK级毁伤。

油箱被引燃,可使油箱的燃油燃烧,致使飞机燃油减少、燃烧环境处的飞机零部件和电气元件等被烧毁,从而使飞机全部失去燃油、失去控制、飞机发生爆炸,对战机能造成C级以上的毁伤或KK级毁伤。

油箱被引爆,使飞机的油箱内部压力急剧升高,超过油箱所能承受的压力而发生爆炸,可立即对战机能造成KK级毁伤。

对于高速动能体对飞机的毁伤级别,一种毁伤可能导致其他几种毁伤。当穿孔或切割分布密度较高时,孔与孔之间可以产生开裂和应力集中,使毁伤面扩大,进而导致更高级别的毁伤。

## 3 高速动能体对飞机毁伤数值仿真研究

根据高速动能体对飞机的毁伤模式分析可知,只要高速动能体对飞机的重要部件(发动机、油箱等)进行打击,就可能对飞机造成不同级别的毁伤。

### 3.1 高速动能体对飞机发动机部位的毁伤仿真

#### 3.1.1 有限元仿真模型

进行高速动能体对飞机发动机部位的毁伤仿真研究时,将发动机部位中壳体最厚的燃烧室部位作为研究对象,将其

等效为20 mm的硬铝板。对不同直径( $\Phi 3$  mm、 $\Phi 5$  mm、 $\Phi 10$  mm、 $\Phi 15$  mm)的动能体以不同的速度(2 000 m/s、3 000 m/s、4 000 m/s)进行毁伤仿真。

建立几何模型时,把高速动能体和等效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。靶板的侧边施加边界条件,用以模拟各层靶板四周被固定的情况。体靶有限元计算模型如图1。

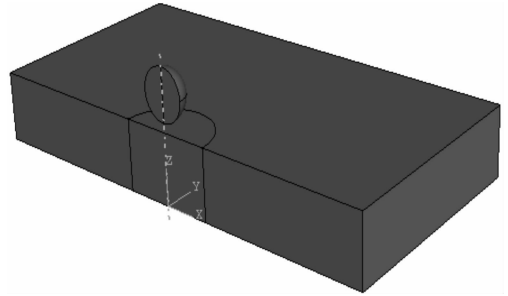


图1 有限元模型

#### 3.1.2 材料模型

1) 屈服准则。计算中,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:

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

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

2) 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0~1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; $\epsilon_f$ 为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变,其表达式:

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

式中: $D_1 - D_5$ 为材料参数; $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$ 为应力状态参数,其中 $p$ 为压力, $\sigma_{eff}$ 为等效应力。

3) 材料属性。动能体采用钨合金材料,等效靶板为硬铝合金。其属性参照参考文献<sup>[7]</sup>。

#### 3.1.3 仿真结果及分析

图2为不同直径的动能体分别以不同的速度侵彻等效靶板的速度变化图。通过图2可以看出,直径为 $\Phi 5$  mm、 $\Phi 10$  mm、 $\Phi 15$  mm侵彻等效靶板过程中,动能体的速度震荡下降,这是由于侵彻靶板过程中靶板与动能体之间复杂的相互作用的结果。通过速度变化图可以看出,直径为 $\Phi 5$  mm的动能体侵彻靶板过程中速度急剧下降,而随着直径的增大,动能体侵彻过程速度损耗不明显,穿透靶板后仍具有较高的速度,即动能体具有较高的比动能,仍能继续侵彻靶板。

而对于直径为  $\Phi 5$  mm 的动能体以 2 000 m/s 的速度侵彻 20 mm 等效靶板, 穿透后剩余速度为 750 m/s, 不足以继续侵彻更厚的靶板。

因此要对发动机部位进行毁伤必须采用直径为  $\Phi 5$  mm 的动能体以速度 2 000 m/s 以上进行毁伤。一旦动能体穿透等效靶板, 则意味着发动机被击穿, 则会对飞机造成 A 级以上的杀伤。

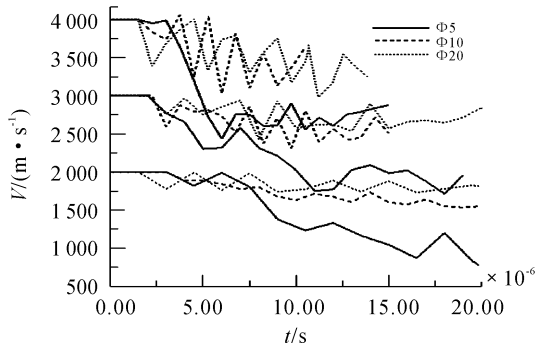


图2 不同直径的高速动能体速度变化

### 3.2 高速动能体对飞机燃油箱的毁伤仿真

参考文献[8,9]中指出燃油箱在动能体的高速冲击条件下的毁伤模式主要包括: 机械穿透、壳体鼓包、惯性爆裂、燃油冒烟及燃油的冲击引燃。

图3为直径  $\Phi 15$  mm 的动能体以速度为 1 850 m/s 在燃油箱内形成冲击波的历程图。高速动能体在箱内所形成的强冲击波不但加强了雾化的油滴发生汽化、蒸发及热解、裂化的程度, 还使混合气体的压力和温度急剧升高。评价投射物对目标毁伤效应的判据主要采用两种准则, 即比动能准则和比冲量准则。对于燃油的冲击引燃问题, 普遍采用比冲量准则<sup>[10]</sup>。当高速动能体的比冲量大于临界值时则会引燃燃油。一旦发生冲击引燃必定对飞机造成 KK 级杀伤。

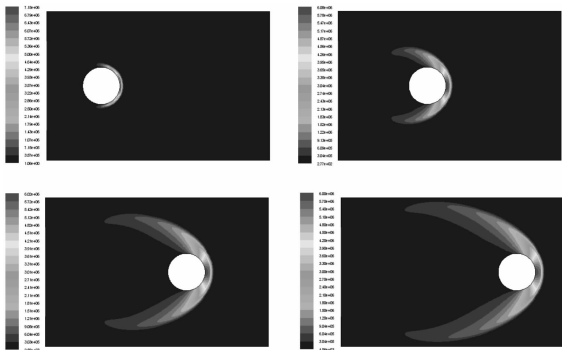


图3 冲击波变化

图4为直径为  $\Phi 5$  mm,  $\Phi 10$  mm,  $\Phi 15$  mm 的动能体以不同的速度产生的比冲量与速度关系曲线图。

通过图4可以看出, 直径为  $\Phi 5$  mm 动能体在 4 000 m/s 以下的速度范围内都不可能达到临界比冲量, 即不可能引燃模拟油箱的燃油, 直径为  $\Phi 10$  mm 的动能体当速度高于 2 300 m/s 时, 其比冲量高于临界比冲量, 可以引燃燃油; 直径

为  $\Phi 15$  mm 的动能体当速度高于 2 000 m/s 时即引燃燃油, 这与参考文献[10]的试验数据相一致。即直径为  $\Phi 5$  mm 的动能体以 2 000 ~ 4 000 m/s 的速度撞击油箱后即可以穿透油箱, 但不能将燃油引燃; 直径为  $\Phi 10$  mm 的动能体以 2 000 ~ 2 300 m/s 以下的速度撞击油箱可以穿透油箱, 但仍不能将燃油引燃; 当速度高于 2 300 m/s 时即可将燃油冲击引燃, 进而导致油箱爆炸, 对飞机造成 KK 级毁伤; 直径为  $\Phi 15$  mm 的动能体以 2 000 m/s 以上的速度撞击油箱即可导致飞机 KK 级毁伤。

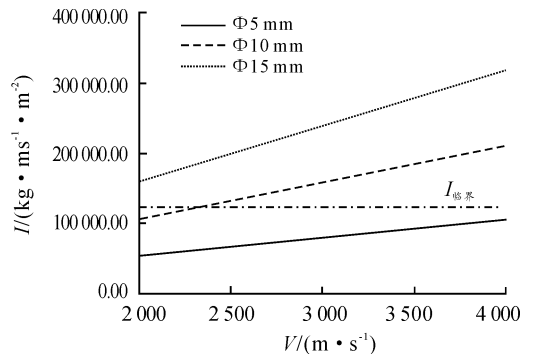


图4 比冲量与速度的关系曲线

### 3.3 高速动能体对飞机蒙皮的毁伤仿真

通过 3.1 的分析可以看出, 直径为  $\Phi 5$  mm,  $\Phi 10$  mm,  $\Phi 15$  mm 的动能体以速度 2 000 m/s 可以穿透厚度为 20 mm 的动能体, 因此对于厚度一般为 2 ~ 3 mm 厚的飞机蒙皮来说, 其能量足以穿透。以此本部分只考虑高速动能体以不同的角度撞击时是否会产生跳弹。

#### 3.3.1 入射角度为 $45^\circ$

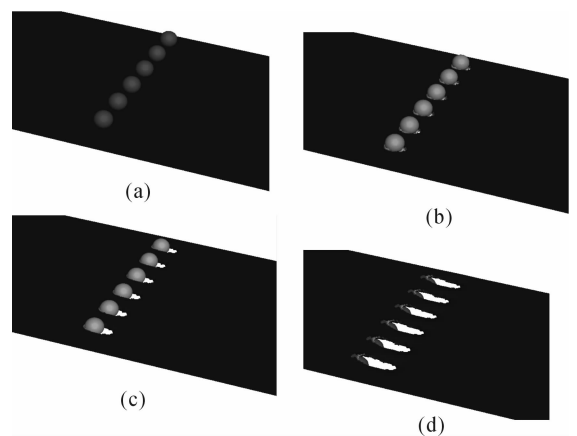
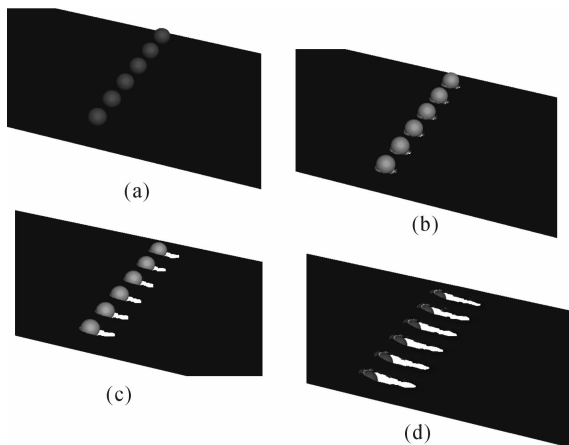


图5  $\Phi 5$  mm  $v = 2 000$  m/s

#### 3.3.2 入射角度为 $75^\circ$

通过图5和图6可以看出, 直径为  $\Phi 5$  mm 的动能体以 2 000 m/s 的速度分别以  $45^\circ$  及  $75^\circ$  的角度可以穿透飞机蒙皮, 不会产生跳弹现象发生。同时随着入射角度的增大, 动能体对飞机蒙皮的切口长度增加, 对飞机的飞行状态产生一定的影响, 有可能导致飞机产生 C 级以上毁伤。

图6  $\Phi 5\text{ mm}$   $v=2\ 000\text{ m/s}$ 

## 4 结论

本文通过对飞机毁伤模式及等级进行了分析,通过不同直径的动能体以不同的速度对飞机的重要部位进行毁伤数值仿真研究,得到如下结论:

1) 要对发动机部位进行毁伤必须采用直径为  $\Phi 5\text{ mm}$  的动能体以速度  $2\ 000\text{ m/s}$  以上进行毁伤,飞机导致 A 级以上毁伤。

2) 要对飞机油箱进行毁伤必须以直径为  $\Phi 10\text{ mm}$  的动能体以高于  $2\ 300\text{ m/s}$  速度撞击或者采用直径为  $\Phi 15\text{ mm}$  的动能体以  $2\ 000\text{ m/s}$  以上的速度撞击油箱可导致飞机 KK 级毁伤。

3) 直径为  $\Phi 5\text{ mm}$  以上,速度在  $2\ 000\text{ m/s}$  以上的动能体撞击飞机蒙皮不会产生跳弹现象,同时飞机蒙皮的切口长度

随撞击角度的增大而加大,有可能导致飞机产生 C 级以上毁伤。

## 参考文献:

- [1] 纪霞,王利. 弹丸侵彻多层靶板数值分析[J]. 探测与控制学报,2006,28(2):42-45.
- [2] 刘洋,姚江涛,李国林,等. 用数值模拟法研究战斗部侵彻多层间隔靶[J]. 海军航空工程学院学报,2009,24(2):144-151.
- [3] 卢湘江,李向荣,张庆明. 破片战斗部打击下导弹毁伤评估仿真[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(6):83-85.
- [4] 高士英,魏志毅. 杀爆战斗部对地面飞机的毁伤仿真研究[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(1):109-114.
- [5] 卢军民,李向东,毛东方. 破片式战斗部作用下固定翼飞机的易损性评估[J]. 南京理工大学学报,2008,32(6):695-700.
- [6] 王涛,唐宴虎. 脱壳穿甲弹对巡航导弹的毁伤模型及仿真[J]. 火力与指挥控制,2010,35(10):110-113.
- [7] ABAQUS Inc. ABAQUS Manual. 2006.
- [8] 曹兵. 破片对巡航导弹燃油舱冲击引燃的实验研究[J]. 火炸药学报,2008,31(6):45-49.
- [9] 陈文,王绍慧,杨华楠. 不同破片杀伤元对飞机油箱的毁伤试验[J]. 四川兵工学报,2010,31(12):32-34.
- [10] 曹兵. 不同破片对模拟巡航导弹油箱毁伤实验研究[J]. 火工品,2008(5):10-13.

(责任编辑 周江川)