

文章编号:1006-9941(2005)04-0222-03

## 截锥型战斗部斜穿靶数值模拟研究

张青平, 陈刚, 屈明

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用动力有限元程序 LS-DYNA 对截锥型战斗部的斜穿靶过程进行了数值模拟, 分析了穿靶速度、角度、材料性能以及导弹前舱段对战斗部斜穿靶性能的影响。由此提出, 可以从增加战斗部材料的强度、韧性和改善战斗部过靶时的姿态等方面来提高截锥型战斗部的穿靶性能, 同时还指出设计中应考虑导弹前舱段给战斗部穿靶带来的有利影响。

**关键词:** 爆炸力学; 战斗部; 斜穿靶; 数值模拟

**中图分类号:** TJ91<sup>+</sup>0.3; O383.3

**文献标识码:** A

### 1 引言

在现代高性能常规战斗部的工程研制中, 由于受到战斗部装填比、效费比等诸多因素的限制, 对战斗部的设计提出了较高的要求, 这需要对战斗部穿甲能力、弹靶作用机制、破坏方式以及弹体响应等有较详细的了解。然而, 由于战斗部结构变得越来越复杂, 理论方法已不能对其内部的结构动力学响应等做出较好的预测。复杂结构的穿靶试验往往是认识其穿甲性能最直接的方法, 但限于测试条件、试验成本以及试件加工周期等, 穿靶试验也很难获得战斗部穿甲性能较全面的认识。而数值模拟以其成本低、周期短, 已成为了研究战斗部穿靶过程的一种有效手段。目前在战斗部的研制过程中, 经常要对设计的战斗部的穿靶过程进行大量数值模拟, 同时进行少量的穿靶试验以验证数值模拟的计算结果, 从而获得较全面的战斗部穿甲能力的认识。

本工作就是为研究战斗部穿甲性能而开展的一系列数值模拟工作。战斗部的穿靶能力与撞击速度、角度、弹头的形状、尺寸、材料性能、以及靶板的厚度和材料等多种因素有关, 本文针对截锥型战斗部, 采用动力有限元程序 LS-DYNA 对战斗部穿靶过程进行数值模拟, 研究了穿靶速度、穿靶角度、以及壳体材料性能等对战斗部穿甲性能的影响。战斗部正侵彻靶板的穿甲性能研究, 前人已经做了大量工作, 本文重点讨论战斗部的斜侵彻过程。

### 2 计算模型

战斗部尺寸为  $\Phi 85 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ , 壳体材料为钛合金, 其本构关系采用弹塑性等向强化模型描述, 材料的应变率效应采用 Cowper-Symonds<sup>[1]</sup> 模型描述:

$$\sigma_d = (\sigma_y + E_h \varepsilon_p) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/p} \right) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_d$ 、 $\sigma_y$  为材料的动、静态屈服应力;  $E_h$  为材料的强化模量;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变;  $\dot{\varepsilon}$  为材料应变率;  $D$ 、 $P$  为反映应变率效应的材料参数。材料的动态力学性能参数<sup>[2,3]</sup> 见表 1。靶板尺寸  $1400 \text{ mm} \times 880 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 材料为 45# 钢, 采用 Johnson-Cook 本构模型<sup>[2]</sup> 来描述材料的动态屈服行为:

$$\sigma_y = (A + B \bar{\varepsilon}^n) \left( 1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中,  $\bar{\varepsilon}^p$  为等效塑性应变;  $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ ;  $T_r$ 、 $T_m$  为分别为室温和熔化温度;  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $c$ 、 $m$  均为材料参数, 其中  $A = 507 \text{ MPa}$ ,  $B = 320 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.28$ ,  $c = 0.064$ ,  $m = 1.06$ 。

采用最大等效塑性应变作为弹体及靶体材料动态破坏的判别准则, 即当  $\varepsilon^p > (\varepsilon^p)_{\max}$  时, 就认为该单元材料破坏, 从而删除相应单元。

根据结构和载荷的对称性, 本文对战斗部和靶板结构建立整体的二分之一有限元模型, 在模型的对称面施加对称位移约束, 靶体四周固支。结构采用拉格朗日固体单元离散, 时间积分采用显式中心差分法。载荷为弹体的初始速度。在弹靶撞击界面和弹体自身的各材料界面间, 采用侵蚀接触动力算法实现弹靶相互作用。

收稿日期: 2004-11-02; 修回日期: 2005-04-08

作者简介: 张青平 (1977 -), 女, 工程师, 从事瞬态力学效应数值模拟。  
e-mail: zh\_qp516@sina.com

表1 材料性能参数

Table 1 Property parameters of materials

material	$\rho$ /kg · mm <sup>-3</sup>	$E$ /GPa	$\nu$	$\sigma_y$ /MPa	$E_h$ /MPa	$D$ /s <sup>-1</sup>	$P$	$\epsilon_p$
Ti alloy	4.5 10 <sup>-6</sup>	110	0.3	845	1100	7058.9	4.47	0.3
steel 45#	7.8 10 <sup>-6</sup>	201	0.3	-	-	-	-	0.6

Note:  $E$ , Young's modulus;  $\nu$ , Poisson's ratio;  $\sigma_y$ , initial yield stress;  $E_h$ , tangent modulus;  $D$ , strain rate parameter;  $P$ , strain rate parameter;  $\epsilon_p$ , effective plastic strain at failure.

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 截锥型战斗部的穿甲性能

由计算过程获得的穿靶图像见图1~4。

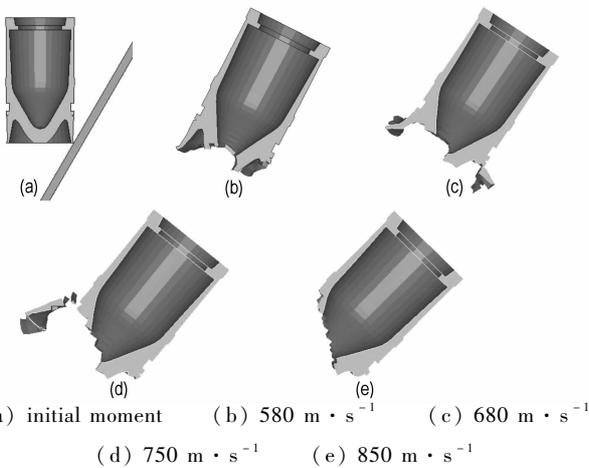


图1 着靶速度变化时穿靶后战斗部壳体图像(着角60°)  
Fig.1 Deformation and failure of warhead shell after penetration at various impacting velocity (impacting angle 60°)

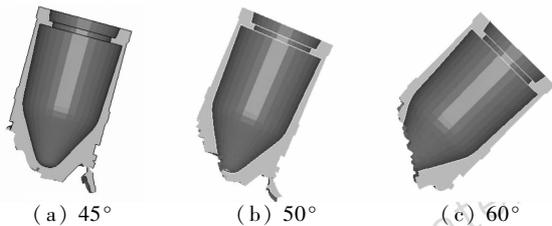


图2 着靶角度变换时穿靶后战斗部壳体图像(速度850 m · s<sup>-1</sup>)  
Fig.2 Deformation and failure of warhead shell at various impacting angle (impacting velocity 850 m · s<sup>-1</sup>)

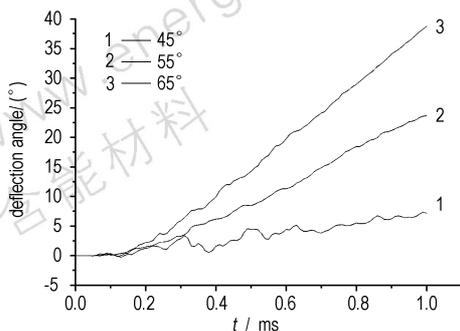
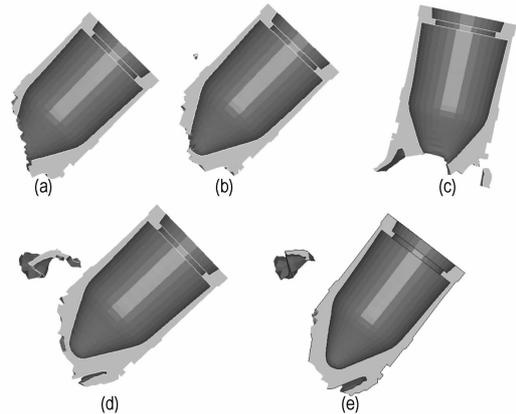


图3 速度850 m · s<sup>-1</sup>斜穿靶时的偏转角度-时间曲线  
Fig.3 Deflection angle history for warhead shell at 850 m · s<sup>-1</sup>



(a) invariable material property ; (b)  $\sigma_y = 2700$  MPa;  
(c)  $E_h = 2000$  MPa; (d)  $\epsilon_p = 0.8$ ; (e)  $\sigma_y = 2700$  MPa,  $\epsilon_p = 0.8$   
图4 材料力学参量调整时穿靶后战斗部壳体图像  
(速度850 m · s<sup>-1</sup>, 着角60°)

Fig.4 Deformation and failure of warhead shell after penetration at various material property (at 850 m · s<sup>-1</sup>, 60°)

图1为截锥型战斗部以不同速度,60°着角斜穿靶后战斗部壳体的变形破坏图像,图2为战斗部以850 m · s<sup>-1</sup>速度,不同的角度过靶后的图像。从图1可以看出,在60°着角斜穿靶过程中,即使穿靶速度降低,战斗部也很难完整过靶(壳体没有完全贯穿,内装药不外漏),而当穿靶角度由60°逐渐减小时,战斗部壳体的破坏程度逐渐减轻,直到着角为45°时,战斗部完整过靶。从穿靶图像还可以看出,战斗部壳体的轴线相对于初始状态都发生了偏转,而对于不同着角,偏转的角度各不相同。图3给出了战斗部在850 m · s<sup>-1</sup>速度,不同撞靶角度下穿甲过程中战斗部偏转角度随时间的变化曲线。可以看出随着撞靶角度的增加,战斗部穿甲时的偏转增大,而壳体的破坏程度也更严重。

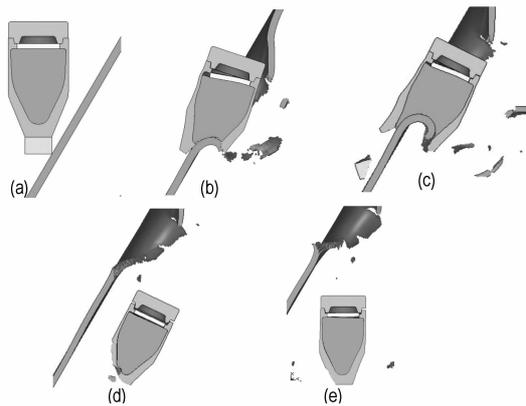
图4为调整战斗部壳体材料力学性能获得的60°着角850 m · s<sup>-1</sup>速度时战斗部壳体的过靶后图像,表明增加壳体材料的静态屈服应力和破坏应变,即提高材料的强度和韧性,有助于保持弹体过靶后的完整性,而提高材料的强化模量,对减轻战斗部的破坏程度作用不明显。

### 3.2 前舱段对战斗部穿甲的影响

实际导弹结构由前舱段、战斗部和后舱段组成,战斗部是导弹的主要承力部件,前、后舱段包括外壳部件和内部的装填物。前舱段有一定的强度和重量,在战斗部与靶板接触前,前舱段已经对靶板进行了预撞击,与单纯战斗部穿靶相比,带导弹前舱段会给单纯战斗部穿靶带来一些有利的影响。

下面通过数值模拟来分析前舱段对战斗部穿靶性能的影响。由于前舱段壳体和装填物的承载能力较弱,本文主要考虑前舱段的总动能在侵彻靶体中的作用。数值模拟中将前舱段简化为一定质量的块体,强度仅相当于软铝,置于战斗部前端,如图5(a)所示,图5(b)~5(e)分别给出了无质量块(无前舱段),质量块密度分别为 $2.7, 7.8, 18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时的战斗部过靶图像,计算中假设质量块体积、强度相同,仅密度变化。

计算结果表明在强度相同的情况下,战斗部前端的质量块密度越大,即质量越重,而总动能也越多,对



(a) initial moment; (b) without mass; (c) mass density  $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$   
(d) mass density  $7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; (e) mass density  $18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

图5 速度  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $60^\circ$ 斜穿靶时的弹靶变形图像

Fig. 5 Deformation and failure of warhead after penetration  
(at  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $60^\circ$ )

靶板的预破坏能力越强,战斗部完整过靶就越容易。计算中即使密度为  $18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的块体质量,也比战斗部的总质量要小很多,而一般来说前舱段的质量与战斗部总质量相当,因此进行导弹战斗部设计与试验时,应考虑导弹舱段的存在,这可避免导弹战斗部面临高速穿靶过程中巨大过载的严重设计条件和试验条件。

## 4 结论与讨论

通过战斗部穿靶过程的数值模拟,研究了变角度、变速度以及变材料性能(材料强度和韧性)对过靶后战斗部壳体破坏程度的影响,获得了对截锥型战斗部斜穿甲能力的认识。结果表明要保证战斗部在大角度高速穿靶过程中完整性,除了提高壳体材料的强度和韧性,还可以通过减小战斗部过靶时的偏转角度,改善穿靶姿态来获得。导弹前舱段对战斗部穿甲性能的影响说明,前舱段对靶板的预破坏作用不可忽视,设计中应充分考虑,以获得综合性能更优的战斗部。

在数值模拟中材料失效采用最大塑性失效判据准则,单元一旦破坏就被删除,而实际情况中,材料即使破坏也不会完全失去作用,这是本数值模拟难以描述的。尽管如此,只要在数值模拟中注意计算模型采用相同的材料模型、参数、网格划分及计算方法,得到的数值模拟结果仍能反映战斗部斜穿靶的相对情况。

### 参考文献:

- [1] LS-DYNA 用户手册. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, California.
- [2] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics[C], The Hague, Netherlands, 1983.
- [3] 陈刚,陶俊林,牛伟. 45#钢动态塑性本构模型参量实验研究与验证. 中物院 GF 报告. (ZW-D-2004042), 2004.
- [4] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

## Numerical Simulation of Warhead Oblique Penetrating Target

ZHANG Qing-ping, CHEN Gang, QU Ming

(Institute of Structural Mechanics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** By using nonlinear finite element analysis software LS-DYND, the process of warhead oblique penetrating the target with various impacting velocity, impacting angle, and material property is calculated and analyzed. It was found that the penetration property of warhead can be improved by increasing the material plastic flow stress and material ductility and adjusting flight position when warhead penetrates the target. The numerical simulation results show that the deformation of warhead reduces while the front parts of the missile pre-impact the target.

**Key words:** explosion mechanics; warhead; oblique penetration; numerical simulation