

# 长方体破片对金属薄板的极限穿透速度研究\*

王 超,安振涛,甄建伟

(解放军军械工程学院,石家庄 050003)

**摘 要:**分析了长方体破片穿透薄板的影响因素,对穿透薄板的极限穿透速度进行了理论推导;基于文中的理论模型,对典型破片穿透1.5mm薄铝合金板的极限穿透速度进行了理论计算,并在AUTODYN中进行了数值模拟。结果表明,数值模拟和理论计算误差较小,证明了结果的可行性。

**关键词:**破片;极限穿透速度;理论计算;数值模拟

中图分类号:O385 文献标志码:A

## The Research on the Limiting Penetration Velocity of Cuboids Fragment to Metallic Sheet

WANG Chao, AN Zhen tao, ZHEN Jianwei

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:**The factors that influence fragments penetrating sheet were analyzed, the limiting velocity of sheet penetration was deduced. Based on the theoretic model, the theoretic limiting velocity of penetration of the typical fragment impacting on the 1.5mm aluminum alloy sheet was calculated, and then numerical simulation was conducted in the AUTODYN software. The results show that the error between numerical simulation and theoretic calculation is very small, which proves the feasibility of the results.

**Keywords:**fragment; limiting velocity of penetration; theoretic calculation; numerical simulation

### 0 引言

极限穿透速度,是指在一定条件下穿透给定厚度靶板弹丸所需的最小速度。文献[1-3]对影响圆柱形破片穿透靶板时的影响因素进行了分析,给出了圆柱状破片穿透薄板时的极限穿透速度。由文献[4]可知,常规弹药爆炸后,在大多数情况下,产生的破片为长方体形状,而长方体破片对金属薄板的极限穿透速度尚未给出。

文中对长方体破片穿透薄板的极限穿透速度进行了研究。所考虑的破片为理想破片,即其宽:长:高=1:2:5的情况。首先对影响长方体破片穿透靶板时的影响因素进行分析,接着,对长方体破片穿透薄板时的极限穿透速度进行了理论推导。为了对该理论模型进行验证,给出了实例计算。并通过非线性动力学软件AUTODYN<sup>[5]</sup>对长方体破片穿透铝合金薄板的过程进行了数值模拟。仿真结果表明,数值模拟和理论模型的误差较小,证明了文中理论模型的正确性。

### 1 理论计算

钝头弹穿甲时,由冲塞过程的描述可见,穿透靶板所需要的动能为惯性压缩作用和剪切冲塞作用的能量之和。即<sup>[1,3]</sup>:

$$E_{50} = E_i + W_s \quad (1)$$

其中: $E_i$ 为惯性压缩作用消耗的能量, $W_s$ 为将塞块剪切掉并推出靶板所做的功。

根据动量守恒定律,弹丸和靶板作用后,其共同速度: $v_f = \frac{m}{m+m_s}v_c$ 。其中 $m$ 、 $m_s$ 、 $v_c$ 分别为弹丸质量、塞块质量、弹丸初速。

由于碰撞,消耗的能量为:

$$E_f = \frac{1}{2}mv_c^2 - \frac{1}{2}(m+m_s)v_f^2 = \frac{1}{2}mv_c^2[1 - m/(m+m_s)]$$

在碰撞初始阶段,碰撞接触面的压应力和弹丸初速的关系为 $p = \frac{v_c}{\frac{1}{\rho_t c_t} + \frac{1}{\rho_p c_p}}$ 。其中: $\rho_t$ 、 $\rho_p$ 分别为薄板和破片的密度; $c_t$ 、 $c_p$ 为薄板和破片中应力波传播速度。

\* 收稿日期:2011-06-08

作者简介:王超(1983-),男,陕西高陵人,博士研究生,研究方向:装备运用环境与防护技术。

在惯性压缩作用期间,由剪切抗力引起的弹靶间压应力增量  $p_s$  为: $p_s = 2(A + B) \cdot h_i \cdot \tau / (A \cdot B) = 3h_i\tau/A$ 。

$\tau$  为材料的动态剪切强度,通常取静态值的 2 ~ 3 倍<sup>[1]</sup>;  $h_i$  为薄板厚度;  $A$ 、 $B$  分别为破片的宽度和长度,且  $A : B = 1 : 2$ 。

将此压应力分量加到  $E_f = \frac{1}{2}mv_c^2[1 - m/(m + m_s)] = \frac{1}{2}m\psi^2 p^2 [1 - m/(m + m_s)]$  中的压应力上,即得到惯性压缩作用期间总的能量损失  $E_i = \frac{1}{2}m\psi^2 (p + p_s)^2 [1 - m/(m + m_s)]$ 。

在剪切冲塞作用期间,弹丸将塞块剪掉并推出靶板时所做的功  $W_s$  的平均值为: $W_s = \int Fdx = \int \tau \cdot Sdx$   
 $= \int_0^{h_i} \tau \cdot 2(A + B) \cdot xdx = (A + B)h_i^2\tau = 3Ah_i^2\tau$ 。

如果撞击速度正好足以穿透靶板,即弹丸以极限穿透速度  $v_{50}$  垂直打击靶板时,按式(1)有: $\frac{1}{2}mv_{50}^2 = \frac{1}{2}m\psi^2 \left[ 1 - \frac{m}{m + m_s} \right] \left( \frac{v_{50}}{\psi} + \frac{3h_i\tau}{A} \right)^2 + 3Ah_i^2\tau$ 。

将上式展开并化简可得: $v_{50}^2 - \frac{6h_i\tau m_s \psi}{mD} v_{50} - \left( \frac{9h_i^2\tau^2\psi^2}{A^2} \cdot \frac{m_s}{m} + 6A\tau h_i^2 \frac{m + m_s}{m^2} \right) = 0$

解之可得: $v_{50} = \frac{3h_i\tau\psi m_s}{mA} \left\{ 1 + \left[ \frac{m + m_s}{m_s} \left( 1 + \frac{2A^3}{3\tau\psi^2 m_s} \right) \right]^{1/2} \right\}$  (2)

### 2 实例计算

对于某破片,假设其尺寸为 8.4mm × 16.8mm × 42mm,对厚度为 1.5mm 的铝合金板进行冲击,由文中的推导可知: $c_p = 5172\text{m/s}$ ,  $c_t = 5091.8\text{m/s}$ ; 即  $n = \frac{c_t}{c_h} \cdot \frac{L}{h_i} = 27.6 > 5$ ,所以可以作为薄板进行处理。将  $h_i = 1.5\text{mm}$ ;  $\tau = 2.5 \times 100\text{MPa}$ ;  $\rho_t = 2.7 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_p = 7.85 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ;  $\psi = \frac{1}{\rho_t c_t} + \frac{1}{\rho_p c_p} = 9.7369 \times 10^{-8}$ ;  $m_s = 8.4 \times 16.8 \times 1.5 \times 10^{-9} \times 2.7 \times 10^3 = 0.57154 \times 10^{-3}\text{kg}$ ;  $m = 8.4 \times 16.8 \times 42 \times 7.85 \times 10^3 = 46.5 \times 10^{-3}\text{kg}$ ;  $A = 8.4 \times 10^{-3}\text{m}$ ;

各参数代入式(2),可得: $v_{50} = 22.62\text{m/s}$ 。

### 3 数值模拟

在 AUTODYN 中建立长方体破片模型,破片尺寸为 8.4mm × 16.8mm × 42mm,初速为 50m/s;向 50mm × 50mm × 1.5mm 的铝合金板撞击,破片和铝合金材料的参数<sup>[6]</sup>如表 1 和表 2 所示,仿真过程如图 1 ~ 图 3 所示,破片穿透铝合金板后,所得到的破片剩余速度与时间之间的曲线图如图 4 所示。

表 1 破片的材料模型参数

密度 / Gruneisen	参数 $c_1$ / 常数	参数 $s_1$ (cm/ $\mu$ s)	剪切模量 / Mbar	屈服应变 / Mbar
7.85	1.67	4.61e - 1	1.73	6.41e - 1
				4.69e - 3

表 2 铝合金的材料模型参数

密度 / Gruneisen	参数 $c_1$ / 常数	参数 $s_1$ (cm/ $\mu$ s)	剪切模量 / Mbar	屈服力 / MPa	抗拉失效应力 / MPa	失效应变
2.7	2.0	5.328	1.338	2.86e - 1	260	200
						0.25

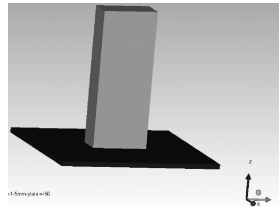


图 1 仿真初始状态

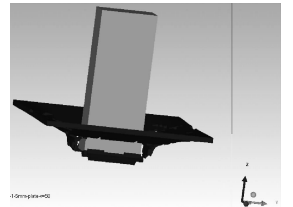


图 2 仿真进行过程中

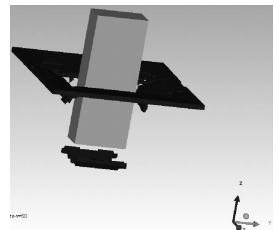


图 3 破片穿透铝合金板

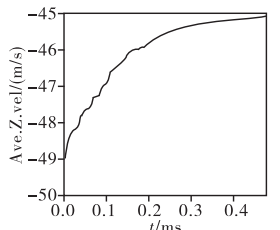


图 4 破片的剩余速度 - 时间曲线

### 4 结果分析和结论

由图 4 可以看出,破片撞击铝合金板之后 0 ~ 0.01ms 时,破片的剩余速度急剧衰减;随着破片和铝合金板的进一步作用,到 0.01 ~ 0.2ms 时,破片的余速进一步减小,但衰减逐渐减小;在 0.2 ~ 0.5ms 之间时,破片的速度衰减进一步减慢,直到其剩余速度为 45m/s 为止。由公式<sup>[1]</sup> $v_f = \frac{m}{m + m_s} (v_0^2 - v_{50}^2)^{1/2}$ 得:

$$v'_{50} = \sqrt{v_0^2 - \left( \frac{m + m_s}{m} v_f \right)^2} =$$

$$\sqrt{50^2 - (1.0123 \times 45)^2} = 20.6\text{m/s}$$

$$\text{比较 } v_{s0} \text{ 和 } v'_{s0}, \text{ 误差 } E = \frac{22.62 - 20.6}{22.62} = 8.9\% <$$

10%, 误差较小。因此,文中的模型比较可靠,仿真具有一定的可靠性。

参考文献:

[1] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.

[2] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.  
 [3] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.  
 [4] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用:下册[M]. 北京:国防工业出版社,1979.  
 [5] AUTODYN theory manual Revision 6.1, Century dynamics [M]. 2005.  
 [6] 甄建伟. 弹药作业场所抗爆复合材料研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2010.

(上接第85页)

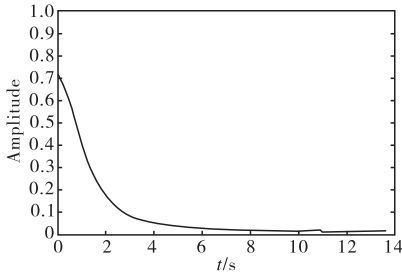


图1 在控制量作用下系统状态量  $\sigma_1$  的响应曲线

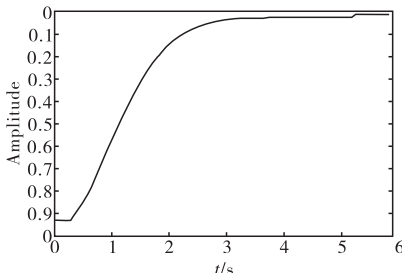


图2 在控制量作用下系统状态量  $\sigma_2$  的响应曲线

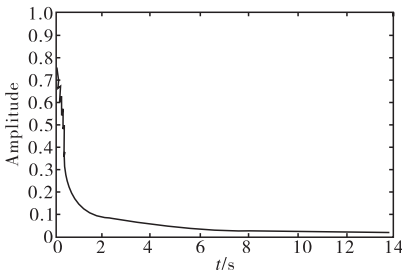


图3 在控制量作用下系统状态量  $\sigma_3$  的响应曲线

仿真实验表明,文中提出的设计方法,实现了卫星大姿态角机动的镇定控制,并且具有较快的响应速度和较小的误差。

### 4 结论

文中提出了一套利用平方和 SOS 优化技术对含有多项式参数矩阵  $P(x)$  的 Lyapunov 函数  $V = x^T P(x)x$  进行正定判定的方案和镇定控制器设计方法。首先采用修正的 Rodrigues 参数(MRP)建立

了飞行器姿态控制系统的数学模型,将非线性的飞行器姿态系统模型转化为线性参数可变模型(LPV模型);在此基础上,采用 SOS 平方和优化技术和 Lyapunov 理论进行控制器设计,仿真结果表明,文中提出的设计方法有效解决了一类含有多项式参数矩阵  $P(x)$  的 Lyapunov 函数  $V = x^T P(x)x$  系统控制器设计问题,并且控制器具有较快的响应速度和较小的误差,系统扩展了平方和优化技术在非线性控制系统控制器设计中的应用。

参考文献:

[1] Narendra Gollu. Switched control of satellites for global stabilization and local performance: A sum of squares approach [C]//2008 American Control Conference, 2008; 2987 - 2992.  
 [2] Narendra Gollu, Luis Rodrigues. Control of large angle attitude maneuvers for rigid bodies using sum of squares [C]// Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007; 3156 - 3161.  
 [3] Stephen Prajna. SOSTOOLS: Control applications and new developments [C]//Proceedings of IEEE Conf. on CACSD 2004; 901 - 907.  
 [4] Qian Zheng, Fen Wu. Lyapunov redesign of adaptive controllers for polynomial nonlinear systems [C]//2009 American Control Conference, 2009; 5144 - 5149.  
 [5] Stephen Prajna. Antonis Apachistodoulou, Peter Seiler. SOSTOOLS: Sum of squares optimization toolbox for Matlab User's guide [M/OL]. [http://www.optimization-online.org/DB\\_HTML/2002/05/483.html](http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2002/05/483.html).  
 [6] 王勇军,秦永元,舒东亮. Rodrigues 参数与四元数间的关系分析[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(3): 71 - 73.  
 [7] 陈记争,袁建平,方群. 双 Rodrigues 参数方法及其在姿态确定中的应用[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 534 - 540.  
 [8] 童长飞. 基于半定规划的多项式非线性系统镇定控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.