

截锥形弹低中速贯穿薄靶板时的动力分析与计算

高世桥 王宝兴

(上海市应用数学和力学研究所) (北京工业学院力学工程系)

(钱伟长推荐, 1985年10月4日收到)

摘 要

本文根据引信设计的需要, 结合引信的结构特点, 对截锥形弹以低速(200~500米/秒)和中速(500~1000米/秒)贯穿薄靶板(包括金属铝板和非金属的木质胶合板)时的动态特性进行了分析和计算。

在建立模型过程中, 由于考虑了靶板强度效应的影响, 解决了原来一些模型^{[1][2][3]}对低速冲击不适用问题, 并通过惯性效应和强度效应的比较, 从理论上证明了Zaid和Paul^[3]的试验结论: 即当冲击速度高于500米/秒时, 可忽略强度的影响, 而当冲击速度低于500米/秒时, 不能忽略强度效应的影响。

一、前 言

为了分析引信的灵敏度和瞬发度, 对引信着靶时的动态特性进行研究是非常必要的。打靶试验表明^[7], 截锥形弹贯穿薄靶板时, 将产生两个破坏过程: 一个是引信前面对靶板的冲塞剪切过程; 一个是弹丸锥表面对靶板的扩孔撕裂过程。其具体的破坏机制还和靶板材料等有关。对于冲塞过程曾有许多人研究, 如Awerbuch和Bodner^[4], 及Woodward和Monton^[5]的研究等, 本文不做深入探讨。对于撕裂过程, Zaid和Paul^{[1][2][3]}等进行了一些研究, 但由于忽略了靶板强度效应的影响, 使其模型不能适用于低速冲击的情况。由于我们所涉及的速度范围既有低速的也有高速的, 所以必须重新建立有关的模型。

二、模型的建立

通过试验^[7]发现, 截锥形弹贯穿薄靶板时将产生两个破坏过程: 一个是冲塞过程; 一个是撕裂过程。这两个过程既是连续的又是独立的。为了便于研究, 本文将分别进行讨论。由于所涉及的速度有低速的情况, 此时不能忽略靶板强度效应的影响, 因而综合强度效应和惯性效应两个方面。在分析受力时, 认为靶板对弹丸的总抗力等于静抗力(强度效应引起的)和动抗力(惯性效应引起的)单独作用的叠加。同时, 试验又发现, 铝板和胶合板的破坏形

式并不相同, 因此必须区别对待。

1. 冲塞过程

a) 强度效应

铝板和胶合板的静抗力都可写成:

$$F_h = -\pi Dh\tau_s \quad (2.1)$$

其中 D 是引信前端面的直径, h 是靶板厚度, τ_s 是靶板的抗剪极限强度。

b) 惯性效应

根据铝板和胶合板破坏形式的不同, 其动抗力的形式也一定有所差别。对铝板射击时, 冲下的是一个圆片, 而对胶合板射击时, 冲下的却是一堆碎末, 所以本文认为铝板经受的是剪切破坏, 而胶合板经受的是挤压流动破坏。按[4], [6]的分析方法, 其动抗力可写成:

$$\left. \begin{aligned} F_{1a} &= -\pi Dh\mu v/e \quad (\text{对铝板}) \\ F_{1w} &= -A\rho_w v^2/2 \quad (\text{对胶合板}) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

其中 μ 是动力粘性系数, v 是冲击速度, e 是剪切带宽, A 是引信前端面面积, ρ_w 是胶合板的材料密度。

综合静抗力和动抗力, 得靶板对弹丸的总抗力为:

$$\left. \begin{aligned} F_{1a} &= -\pi Dh \left(\tau_{s1} + \mu \frac{v}{e} \right) \\ F_{1w} &= - \left(\pi Dh\tau_{s2} + \frac{1}{2} A\rho_w v^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

其中 F_{1a} , F_{1w} 分别为冲塞阶段, 铝板和胶合板对弹丸的总抗力。其中负号表示该力和弹丸速度 v 方向相反, 以下公式中不写负号, 只给出抗力的绝对值。

2. 撕裂过程

a) 惯性效应

对于金属板, 可认为变形部分非常柔软, 如图1示, 对于胶合板, 认为破坏部分为一堆碎渣, 如图2示, 则以动量守恒观点, 可把板对引信的惯性力统写成:

$$F_{i2} = 2\pi\rho hv^3 x \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha / v_s \quad (2.4)$$

其中 v_s 是冲击前的速度, v 是冲击瞬态速度, ρ 是靶材的密度。

b) 强度效应

在分析强度效应时, 应立足于铝板的变形情况如图3, 图4所示, 胶合板的变形情况如图5, 图6所示。

在分析静抗力时, 我们采用能量的方法来研究。本文认为靶板的变形能等于静抗力所做的功。并做下列几点假设: (1) 剪力的影响可以忽略, (2) 铝板是理想弹塑性材料, 胶合板对弯曲变形来讲呈各向同性的脆性特性, (3) 不考虑摩擦力和热效应的影响。在这些假设的基础上, 可以得到计算靶板变形能的公式。

对于铝板, 视花瓣为经受弹塑性弯曲的悬臂梁, 由图4可知靶板的变形能为:

$$dW_s = \int_v \left(\int_0^v \sigma d\varepsilon \right) dv \quad (2.5)$$

其中: $\varepsilon = \eta/R$; $\sigma = \begin{cases} \eta\sigma_s/h_e & (0 \leq \eta \leq h_e) \\ \sigma_s & (h_e \leq \eta \leq h/2) \end{cases}$

式中的 h_e 是弹性区厚度, R 是花瓣弯曲的曲率半径, η 是径向坐标, σ_s 是铝板的屈服应力, 把 σ , ε 的关系式代入(2.5)中得:

$$dW_p = 2ds \left[\frac{1}{2} \int_0^{h_e} \frac{\eta}{h_e} \sigma_s \cdot \frac{\eta}{R} \cdot 2\pi r_b d\eta + \int_{h_e}^h \sigma_s \cdot \frac{\eta}{R} \cdot 2\pi r_b d\eta \right] \\ = (2\pi r_b \sigma_s / R) \cdot ds \cdot (h^2/4 - 2h_e^2/3) \quad (2.6)$$

式中的 r_b 是扩孔半径, ds 是指沿半径方向的微长(也是花瓣弯曲中性线方向的微长)。由于 $h_e = (\sigma_s/E)R$

把它代入到(2.6)式中得:

$$dW_p = \frac{2\pi r_b \sigma_s}{R} \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_s}{E} R \right)^2 \right] ds \quad (2.7)$$

再注意到: $r_b = xt \operatorname{tg} \alpha$, $ds = dx \operatorname{tg} \alpha$, 把它们代入到(2.7)式中可得:

$$dW_p = \frac{2\pi \sigma_s}{R} \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_s}{E} R \right)^2 \right] x \operatorname{tg}^2 \alpha dx \quad (2.8)$$

由功能守恒原理知:

$$F_{ha2} dx = dW_p \quad (2.9)$$

式中 F_{ha2} 是撕裂过程中弹对靶的作用力, 从而由(2.8)式和(2.9)式解得:

$$F_{ha2} = \frac{2\pi \sigma_s}{R} \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_s}{E} R \right)^2 \right] x \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (2.10)$$

对于胶合板, 由图6知, 其变形能为:

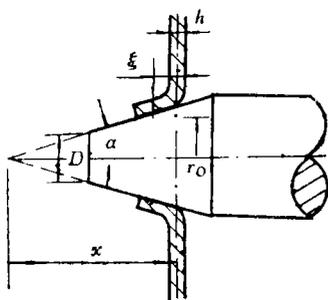


图 1

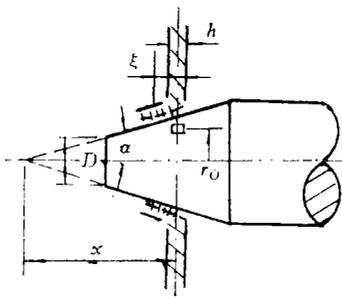


图 2

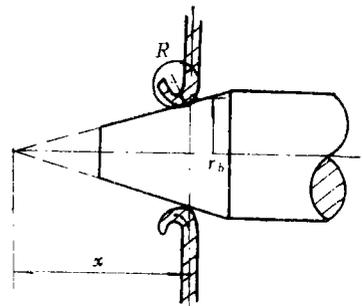


图 3

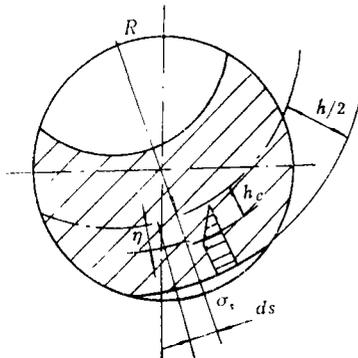


图4 图3的局部放大

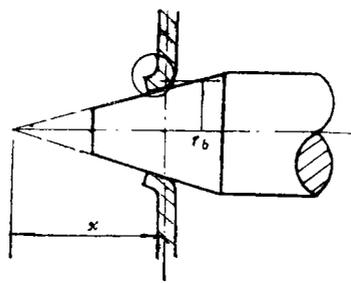


图 5

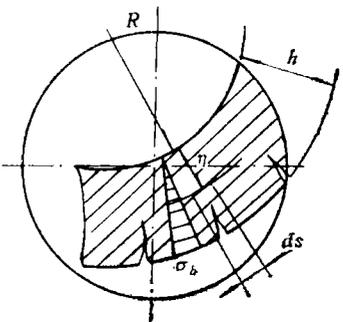


图6 图5的局部放大

$$dW_1 = \frac{1}{2} \int_0^h \sigma \varepsilon dv \quad (2.11)$$

式中的符号同前。根据胶合板的破坏形式，我们近似认为弯曲中性线在内边。在计算能量时，只考虑外侧边刚发生破坏时之前的变形能，而在此之后就属于断裂力学的裂纹扩展问题了。因此有：

$$\sigma = (\sigma_b/h)\eta, \quad \varepsilon = \eta/R$$

将其代入到(2.11)式中得：

$$\begin{aligned} dW_1 &= \frac{1}{2} ds \int_0^h \frac{\sigma_b}{h} \frac{\eta^2}{R} 2\pi r_b d\eta \\ &= (\pi r_b \sigma_b / R) h^2 ds / 3 \end{aligned} \quad (2.12)$$

其中 σ_b 是胶合板的强度极限。

利用(2.9)式，并把关系式：

$$1/R = \sigma_b / (Eh)$$

及关系式：

$$r_b = xt \operatorname{tg} \alpha, \quad ds = dx \operatorname{tg} \alpha$$

代入到(2.12)式中得：

$$F_{hw_2} = \frac{\pi r_b \sigma_b^2 h}{3E} x \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (2.13)$$

综合惯性力和静抗力可得撕裂阶段靶板对引信（弹丸）的总抗力为：

$$\left. \begin{aligned} F_{a_2} &= 2\pi x \operatorname{tg}^2 \alpha \left\{ \frac{\sigma_s}{R} \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_s}{E} R \right)^2 \right] + \frac{\rho h v_s^3}{v_s} \sin \alpha \right\} \\ F_{w_2} &= \pi h x \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{\sigma_b^2}{3E} + \frac{2\rho v_s^3}{v_s} \sin \alpha \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

其中 F_{a_2} 、 F_{w_2} 分别为撕裂阶段铝板和胶合板对弹丸的总抗力。

对于薄板，速度降较少，近似认为 $v_s = v$ ，则(2.14)式可重写成：

$$\left. \begin{aligned} F_{a_2} &= 2\pi x \operatorname{tg}^2 \alpha \left\{ \frac{\sigma_s}{R} \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_s}{E} R \right)^2 \right] + \rho h v^2 \sin \alpha \right\} \\ F_{w_2} &= \pi h x \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{1}{3} \frac{\sigma_b^2}{E} + 2\rho v^2 \sin \alpha \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

三、惯性效应和强度效应的比较

我们以撕裂过程为对象，分析一下惯性力和静抗力各自所占的比重，从而可以知道速度的不同会导致惯性效应的强烈程度也不同。令：

$$\chi = F_n / F_i \quad (3.1)$$

且 χ 为静动比，式中的 F_n 是静抗力， F_i 是动抗力（即惯性力）。

对于铝板，由(2.4)和(2.10)式知：

$$\chi = \frac{\sigma_s v_s \left[\frac{h^2}{4} - \frac{2}{3} (\sigma_s R / E)^2 \right]}{\rho h R v_s^3 \sin \alpha} \quad (3.2)$$

试验发现, $R \approx 5h$, 而 $\alpha = 15^\circ$, $\sigma_s = 30 \text{ kg/mm}^2$, $\rho = 2.73 \text{ g/cm}^3$, $E = 0.71 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. 则当 $v_s \geq 500 \text{ m/s}$ 时, 有 $\chi < 0.08$, 可以忽略强度效应. 但当 $v_s \approx 200 \text{ m/s}$ 时, $\chi \approx 0.4 = 40\%$, 不能忽略强度效应.

对于胶合板, 由(2.4)式和(2.13)式知:

$$\chi = (v_s \sigma_s^2) / (3E\rho v^3) \quad (3.3)$$

计算得: 当 $v_s > 500 \text{ m/s}$ 时, $\chi < 0.2\%$; 即使 $v_s \approx 200 \text{ m/s}$, 也有 $\chi < 1.2\%$, 完全可以忽略强度的作用.

四、试验与结论

为了论证本文的模型, 本文通过枪击试验和理论计算, 从能量的角度出发, 绘制出了理论和试验的速度降随靶板厚度变化的曲线, 如图7所示. 其中的理论曲线是由GSHGTI^[7]程序计算得到的. 从图可以看出, 试验的结果和理论计算的结果是很吻合的, 从而说明本文的模型用来解决穿靶问题还是行之有效的.

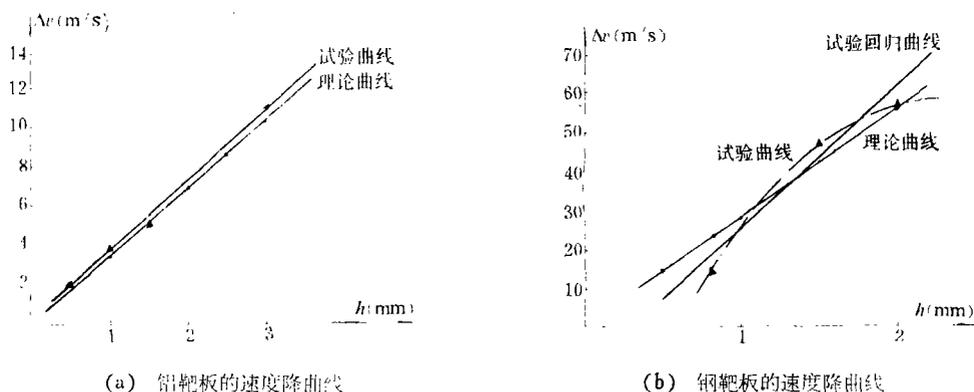


图7 理论和试验的速度降随靶板厚度变化曲线

参 考 文 献

- [1] Zaid, M. and B. Paul, Mechanics of high speed projectile perforation, *J. Franklin Institute*, 264 (1957), 117—125.
- [2] Zaid, M. and B. Paul, Oblique perforation of a thin plate by a truncated conical projectile, *J. Franklin Institute*, 268 (1959), 24—44.
- [3] Paul, B. and M. Zaid, Normal perforation of a thin plate by truncated projectile, *J. Franklin Institute*, 265 (1958), 317—336.
- [4] Awerbuch, J. and S. R. Bodner, Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates, *Int. J. Solids Structures*, 10 (1974), 671—684.
- [5] Woodward, R. L. and M. E. de Morton, Penetration of targets by flat-ended projectiles, *Int. J. Mech. Sci.* 18 (1976), 119—127.
- [6] 钱伟长, 《穿甲力学》, 国防工业出版社出版, 统一书号: 15034. 2753.
- [7] 高世桥, 试验报告及程序设计, 北京工业学院力学工程系报告, 1984年4月.

Dynamical Calculation and Analysis on Penetration of Target Plates by Truncated Conical Projectiles

Gao Shi-qiao

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai)

Wang Bao-xing

(Beijing Institute of Technology, Beijing)

Abstract

In this paper, dynamical calculation and analysis are made on penetration of thin plates by truncated conical projectiles in terms of the needs of fuze designing. The impact velocity ranges from 200m/s to 1000m/s (including both low and high velocities). The target plates include the thin aluminium plate (metal) and the plywood(non-metal).

Because a strength effect of target plates is considered in the establishment of dynamical models, we solve the problem that some previous models are not suitable to low-velocity impact, for example, M. Zaid and B. Paul's models.^{[1][2][3]} By comparison of inertial effect with strength effect, we theoretically prove Zaid and Paul's experimental conclusion^[3]. Only when the impact velocity is more than 500m/s can the strength effect be neglected. Otherwise this effect can not be neglected.