

# 长杆弹高速斜穿甲工程计算公式\*

汪立人

(包头 内蒙第一机械制造厂, 1991年9月17日收到)

## 摘 要

本文提出了一个实用的高速斜穿甲公式, 它是根据本文提出的高速碰撞时应以应力冲量, 而不是以应力本身作为破坏参数而导出的。所得公式与大量已有试验数据相符得很好。

**关键词** 应力冲量 颤震侵彻 动载耦合系数

## 一、引 言

长杆尾翼稳定脱壳穿甲弹的发展, 使近代坦克和反坦克炮的穿甲速度多介于1000~2000 m/s高速范围内。对中厚装甲钢板侵彻时, 材料应变率高达 $10^4 \sim 10^5/s$ 。所受压力已接近材料强度极限, 发生一定的性态变化, 呈崩溅破碎型(含钨合金弹准流体型损耗)开坑破坏(图1)。侵彻过程理论上属弹塑性、粘塑性动力学和流体力学混合解问题。材料密度的地位上升, 强度仍不容忽视。在我国, 钱伟长<sup>[1]</sup>出版了我国唯一的一本有关穿甲的专著《穿甲力学》, 他改进了著名的 Taylor 理论<sup>[2]</sup>。国内外很多研究者面对穿甲难题做了大量有益的工

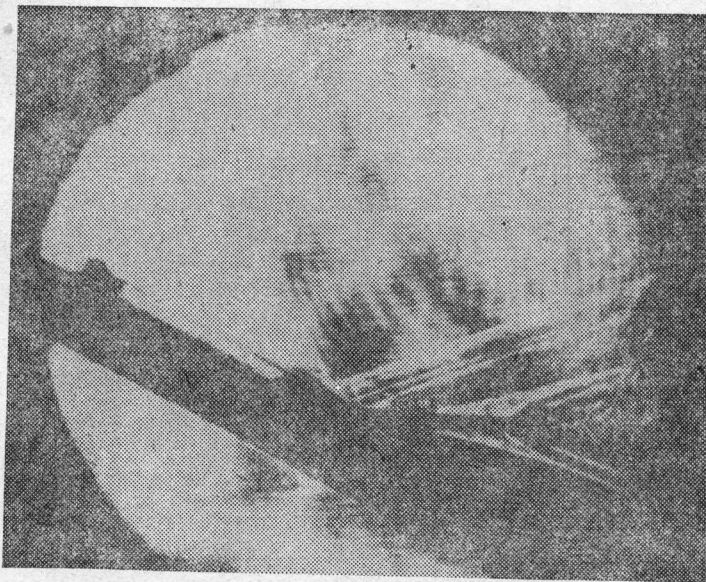


图 1a

\* 薛大为推荐。

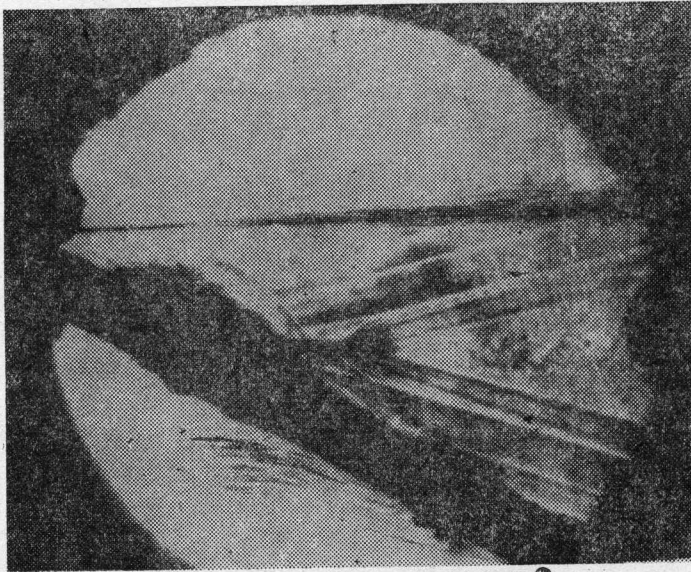


图 1b

作,但仍远满足不了工程应用的迫切需要。本文拟借助穿甲机理研究揭示的应力波效应和材料的动态力学响应,离开常规的准静态机械能守恒模型,从另一个角度重新认识高速穿甲本质。以应力冲量累积为基点,归纳大量试验数据,建立一个实用高速斜穿甲工程计算公式。

## 二、模型和公式

众所周知,要使物体破坏,不仅应力要达到一定的极限,而且要出现一定的永久变形。实际材料的弹性和惯性使破坏不可能在瞬间完成。因此本文提出,在加载时间极短,施力迅速变化的长杆弹侵彻条件下,对破坏起决定作用的不只是应力波波前应力峰值,而是应力波的冲量。当靶板临界穿透时,其背面冲塞的应力冲量累积值应达到靶板的破坏冲量。

实验观察到的弹、靶材料性态变化(如钢由韧变脆)及底层层裂等长杆弹高速度穿甲所独具的现象,正反映着碰撞塑性波尚未充分展开的破坏特征。说明可以避免弹丸侵彻靶板后期的塑性动力学非线性问题,将一定条件下的靶板临界穿透应力冲量常数化,重点研究侵彻前期的应力波作用,从而抓住长杆弹高速穿甲的本质。同时,靶板中的应力和破坏严格限制在弹靶直接碰撞的小范围内,与周围大面积靶板无关的现象,又显示了纵波在破坏中举足轻重的地位。因此假设:

- (1) 视靶板破坏应力冲量为定值。忽略塑性波的影响,按纯弹性波计算。
- (2) 仅考虑弹性纵波的作用,忽略横波、表面波的影响,按简单的一维问题处理。
- (3) 不计碰撞应力上升过程,认为每次碰撞时间内的应力值维持不变。

根据波尔兹曼叠加原理,固体的力学性质是它的全部过去历史的函数。长杆弹穿甲,是在弹、靶间多次颤震碰撞的离散打击下,一系列应力波在靶板内传播、累积作用的结果。而任何复杂的波形经频谱分析,都可以用多个谐波合成来表示。由于一个自由度的有阻尼谐波方程为二阶线性微分方程,其解为负指数函数,因此本文认为,靶板中各处的应力波强度,沿应力波传播方向,随传播距离成负指数规律衰减。即将靶板背面的应力 $\sigma_b$ 表示为板厚的

函数:

$$\sigma_{j,b} = \sigma_j \exp[-\tau b_j] \quad (2.1)$$

式中:  $\tau$  为具有  $L^{-1}$  量纲的常数, 可实验确定,  $j$  为颤震侵彻过程中, 碰撞次数的顺序号,  $b_j$  为  $j$  次碰撞前的板厚。

高速碰撞理论指出<sup>[1]</sup>, 某次碰撞应力为:

$$\sigma_j = \frac{\rho_t(j-1)C_{dt} \cdot \rho_p(j-1)C_{op}}{\rho_t(j-1)C_{dt} + \rho_p(j-1)C_{op}} v_{j-1} \quad (2.2)$$

式中:  $\rho_p, \rho_t, \sigma, v$  分别表示弹和靶的密度、碰撞应力及碰撞速度, 脚标  $(j-1)$ ,  $j$  表示碰撞接触的前、后值。由假设(1), 仅考虑纯弹性波作用。所以每次碰撞结束后, 未破坏部分弹性恢复, 使下次碰撞前材料密度均与初始密度相同, 即式中

$$\rho_p(j-1) = \rho_{p0}, \quad \rho_t(j-1) = \rho_{t0} \quad (2.3)$$

$C_{op}, C_{dt}$  分别表示长杆纵波波速和靶板膨胀波波速。

考虑到弹丸系碰撞主动体, 只有当弹丸中卸载波返回碰撞前端时, 弹、靶才真正分离。所以, 每次颤震碰撞时间  $t_j$  为:

$$t_j = 2l_{j-1}/C_{op} \quad (2.4)$$

其中:  $l_{j-1}$  为第  $j$  次碰撞前弹丸的长度。

据假设(3), 由(2.2)和(2.4)式, 第  $j$  次碰撞应力冲量为:

$$\begin{aligned} I_j &= \sigma_j t_j = \{2/[1 + \rho_p(j-1)C_{op}/\rho_t(j-1)C_{dt}]\} \rho_p(j-1)l_{j-1}v_{j-1} \\ &= Rm_{j-1}v_{j-1}/A_0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

式中:  $R$  为弹、靶材料的动载耦合系数, 可视为常数,  $R = 2/[1 + \rho_{p0}C_{op}/\rho_{t0}C_{dt}]$ , 由弹、靶材料的声阻抗比确定(几种弹丸材料对装甲钢靶板作用的动载耦合系数列于表 1);  $A_0$  为弹丸飞行部分(即碰撞部分)最大载面积, 当弹身弹托连接螺纹突出弹身时, 取螺纹中径截面积;  $m_{j-1}$  为弹丸碰撞部分质量。

表 1

参 数	单 位	弹丸材料	钨 合 金			
			镍 铬 钢	93W	90W	贫 铀 合 金
材料密度	$\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	7.85	17.3	17	18.5
长杆弹纵波速	$C_{op}$	m/s	5170	3600	4000	3700
靶板膨胀波速	$C_{dt}$	m/s	5920			
材料动载耦合系数	$R$		1.0676	0.7891	0.7475	0.7445

所以, 第  $j$  次碰撞下靶板背面的应力冲量为:

$$I_{j,b} = R \frac{m_{j-1} v_{j-1}}{A_0} \exp[-\tau b_j] \quad (2.6)$$

由冲量定理,  $d(m \cdot v) = d(F \cdot t)$ 。注意到(2.5)式对第  $(j-1)$  次碰撞有:

$$m_{j-1} v_{j-1} - m_{j-2} v_{j-2} = A_0 I_{j-1} = R m_{j-2} v_{j-2} \quad (2.7)$$

$$\therefore m_{j-1} v_{j-1} = (1+R) m_{j-2} v_{j-2} \quad (2.8)$$

$$\text{故 } I_{j,b} = R(1+R) \frac{m_{j-2} v_{j-2}}{A_0} \exp[-\tau b_j] = (1+R) I_{j-1} \exp[-\tau b_j] \quad (2.9)$$

由此可见, 颤震侵彻过程中, 每次碰撞传至靶板背面的应力冲量均可表示为前次碰撞应

力冲量和板厚的函数。当然也可以表示为首次碰撞应力冲量

$$I_1 = R \frac{m_0 v_0}{A_0} = R \frac{4m_0 v_0}{\pi g d^2}$$

(其中 $m_0$ 和 $d_0$ 分别为弹丸飞行部分的质量和直径)和原始靶板厚度的函数。

对于斜穿甲情况,由于弹丸侵彻前方各个方向板厚不一,因而阻抗大小不同,板中应力波反射卸载振荡次数及叠加位置、方向亦异,使弹丸朝向阻抗最小、预应力峰值最大方向偏转,发生向靶板法线方向的转正效应(图2)。使水平等厚的倾斜板更易穿透。

此外,弹径侧面与靶板穿孔周边的反射波影响,随弹径大小,特别是弹丸长径比的加大而加剧。将明显地干扰弹丸碰撞动量对穿透靶板的有效作用。甚至出现着靶失稳现象(折断等)。所以,对同一靶板,当弹丸长径比加大时,击穿应力冲量也将加大。还有靶板本身的强度也是决定临界击穿应力冲量的一个不可忽略的因素。资料[3]介绍,临界击穿速度与靶板强度的0.2次方成正比。

经对大量试验结果回归分析,可以得出:靶板临界穿透应力冲量为一常量。它与板厚成三次幂函数关系(图3),与靶板倾角成三角函数关系(图4),与弹丸长径比成三次幂函数关系(图5)。

故,靶板临界穿透速度 $v_0$ 为:



图 2

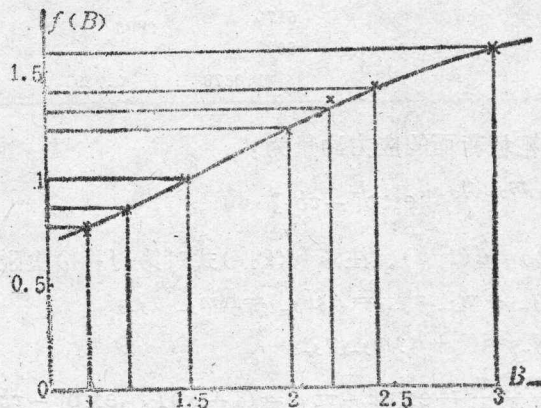


图 3

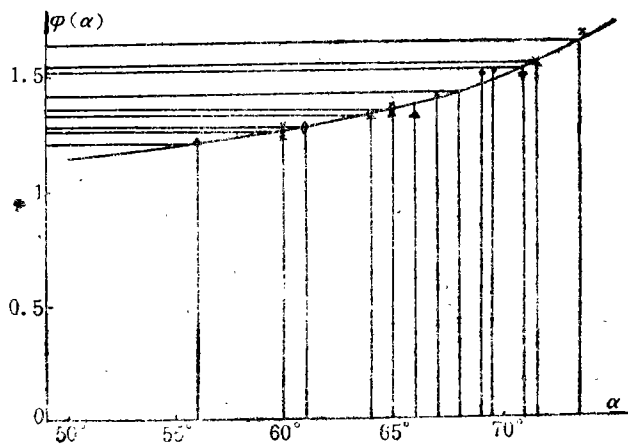


图 4

$$v_o = K \frac{f(B) \cdot \varphi(\alpha) \cdot \xi(\lambda) \cdot d_c^2 \cdot Y_b^{0.2}}{R \cdot m_c} \quad (2.10)$$

式中:

$$K = 32600 \text{ kgm/s} \cdot \text{dm}^2$$

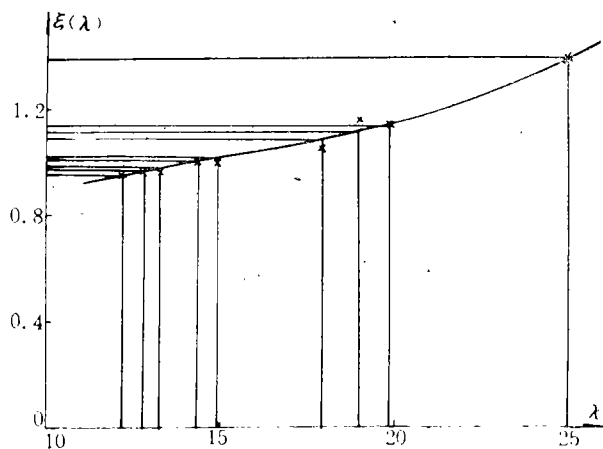


图 5

$B = b/b_0$  为相对板厚, 取  $b_0 = 1 \text{ dm}$ , 则

$$f(B) = -0.04266B^3 + 0.2075B^2 + 0.1311B + 0.4744$$

$\alpha$  为靶板法线与弹丸入射方向的夹角,  $\varphi(\alpha) = (1 + 3\cos \alpha) / 4\cos \alpha$ 。即弹丸侵彻行程可近似处理成: 沿入射方向运动  $1/4$  后, 朝靶板法线方向转正。

$\lambda = l_c/d_c$ , 为弹丸飞行部分的长径比。

$$\xi(\lambda) = 0.0001803\lambda^3 - 0.008416\lambda^2 + 0.1527\lambda + 0.007676$$

$Y_b$  为被试靶板与强度  $980 \text{ N/mm}^2$  的标准靶板的相对强度极限比值。

### 三、结果与讨论

1. 试验表明, 无论用铬镍钢, 还是钨或贫铀合金材料制成的, 具有不同弹径、弹重和弹长的长杆弹, 对不同厚度、强度和倾角的均质装甲钢靶板射击, (2.10) 式计算值与试验

值偏差均小于5%，可替代建立在准静态机械能守恒模型基础上的各种经验和半经验穿甲公式，用于工程估算长杆弹的穿甲威力。

2. 当获悉敌目标的基本结构和材料参数，并将之化为等效均质钢装甲数据后，可用本式确定我反坦克武器系统的主要目标函数，通过系统工程设计，优化火力系统诸参数，为战术技术论证和方案选型服务。

3. 本公式参数是基于国产长径比12~26的长杆弹和厚80~300mm、倾角55°~73.5°靶板条件下归纳的。只适应弹径基本均匀的全钢、全钨及全铀弹，对于其它结构和弹身材料为混合材料弹，需按实际情况作相当处理后才能应用。

### 参 考 文 献

- [1] 钱伟长, 《穿甲力学》, 国防工业出版社, 北京 (1984).
- [2] Taylor, G. I., *Proceedings of Royal Society*, (London), Sersis A, (194) (1948), 289.
- [3] 赵国志, 靶板强度对极限穿透速度的影响, 华东工程学院学报, (3) (1982).
- [4] Kolsry, H., 《固体中的应力波》, 王仁等译, 科学出版社, 北京 (1956).
- [5] Broberg, K. B., 《弹性及弹-塑介质中的冲击波》, 尹祥础译, 科学出版社 (1956).
- [6] Zukas, Jonas A., 《碰撞动力学》, 张志云等译, 兵器工业出版社 (1989).

## An Engineering Formula on the Calculation of Oblique Penetration by Long-Rod Projectile

Wang Li-ren

(Inner Mongol First Machinery Factory, Baotou)

### Abstract

Based on the concept supposed in this paper that damage of a target is determined by momentum rather than by stress, an engineering formula on the calculation of oblique penetration by long-rod projectile is established. The results calculated from this formula show good agreements with experimental data.

**Key words** momentum of stress, flutter penetration, dynamic couple coefficient