

高强低合金钢甲弧形弹 侵彻速度与深度的计算

李强 马常祥 赖祖涵 董丽娜

(东北大学 沈阳 110006)

摘要 给出了弧形弹头侵入30MnCrNiMoB高强低合金钢过程中弹头的侵彻速度与速度的关系式。阐明了弹头初速度只有超过某临界值才能侵入钢甲。指出弹头侵入钢甲一定深度后,空穴膨胀理论才能适用,此时弹头与钢甲之间的摩擦系数取0.02更符合实际。

关键词 空穴膨胀 侵彻深度 高强钢

中图分类号 O385

1 引言

弹头对装甲的冲击过程是一个复杂的力学作用过程,它涉及弹塑性力学和流体力学以及波动力学的知识。目前,穿甲力学正在发展之中,特别是近年来研究更加活跃。Backman等^[1]结合装甲材料系统地概括了多种穿甲机制。Forrestal等^[2~3]和Luk等^[4]发展了空穴膨胀理论。在铝合金的穿甲试验中,他们的理论分析结果与实验结果符合得非常好^[3]。

我们利用Forrestal和Luk所发展的球形态空穴膨胀理论计算模拟穿甲弹对高强低合金钢甲冲击的弹坑深度,并与实验结果进行比较,同时给出弧形弹尖侵入钢甲过程中的运动速度与侵入深度的关系。

2 空穴膨胀理论

空穴膨胀理论假设在无限介质中有一空穴,半径为 r_0 ,空穴内有正压力(或者说径向压力) σ_n 作用,使空穴以速度 v 长大。在空穴长大过程中其周围分为三个区域:塑性变形区、弹性变形区和无应力区。Forrestal和Luk在不可压缩弹塑性材料动态球形空穴膨胀理论^[5]的基础上,提出了可压缩弹塑性材料的空穴膨胀理论^[2]。用该理论可以方便地计算材料受弹头冲击过程中,不同变形区域的应力及弹头所受的阻力。文献[2]给出了空穴壁的正应力 σ_n 与膨胀速度 v 的计算公式

$$\frac{\sigma_n}{K} = S_2 - \frac{\beta^2(x^2 - U_2^2)}{2} + \frac{2(U_2\beta^2 + T)(1-x)}{x(1-\beta^2)} - 2T\ln x + T\ln\left(\frac{1-\beta^2x^2}{1-\beta^2}\right) + \frac{T}{\beta x} \ln\left[\frac{(1+\beta x)(1-\beta)}{(1-\beta x)(1+\beta)}\right] \quad (1)$$

• 国家八五重点科技攻关项目。

1995年6月19日收到原稿,1996年4月29日收到修改稿。

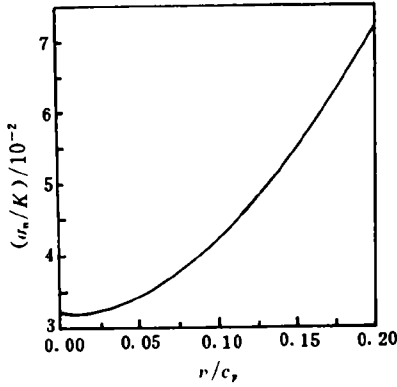


图 1 空穴壁的正压力与膨胀速度关系曲线
 ($\nu=0.3, Y=1.475 \times 10^9 \text{Pa},$
 $K=1.708 \times 10^{11} \text{Pa}, \rho=7810 \text{kg/m}^3$)
 Fig. 1 Radial stress at the cavity surface
 versus cavity-expansion velocity

式中:

$$S_2 = \frac{2T}{3} \left[1 + \frac{(1 + \nu)\alpha^2}{(1 - 2\nu)(1 + \alpha)} \right],$$

$$U_2 = \frac{T(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)},$$

$$\alpha = \left[\frac{1 + \nu}{3(1 - \nu)} \right]^{1/2} \beta,$$

$$T = \frac{Y}{K},$$

$$\beta = c \sqrt{\frac{\rho}{K}},$$

$$x = \frac{v}{c},$$

Y 为屈服强度, K 为体积弹性模量, ρ 为靶材的密度, ν 为泊松比, c 为弹-塑界面传播速度。由方程(1)可计算出 σ_n 与 v 的变化关系(见图 1)。 σ_n/K 随 v 变化可以用如下简单的

表达式描述

$$\frac{\sigma_n}{K} = A + B \left(\frac{v}{c_p} \right)^2 \tag{2}$$

式中: $c_p^2 = K/\rho$, 常数 A, B 可以通过图 1 的曲线拟合求得。

3 弹头侵入钢甲的速度与深度

弹头侵入装甲时, 弹坑附近材料所受应力的演变过程与弹头侵彻速度密切相关。弹头受阻力大小决定着侵彻速度。弹头所受的阻力与装甲的材质、弹头的几何形状和初速度有关。当上述条件一定的情况下, 弹头所受阻力只是侵入深度 z 的函数。对于图 2 所示的弧形穿甲弹, 其所受阻力为

$$dF_n = 2\pi [s^2 \sin\theta - s(s - a)] \sigma_n(v_z, \theta) d\theta \tag{3a}$$

$$dF_t = 2\pi [s^2 \sin\theta - s(s - a)] \mu \sigma_n(v_z, \theta) d\theta \tag{3b}$$

$$F_z = 2\pi \int_{\theta_0}^{\theta_z} [s^2 \sin\theta - s(s - a)] \cdot (\cos\theta + \mu \sin\theta) \sigma_n(v_z, \theta) d\theta \tag{3c}$$

式中: $\theta_z = \cos^{-1}[(1 - z)/s]$, $z \leq 1$, $\theta_0 = \cos^{-1}(1/s)$,

μ 为摩擦系数。

对式(3)积分可得

$$F_z = \alpha(\theta_z) + \beta(\theta_z)v_z^2 \tag{4}$$

式中:

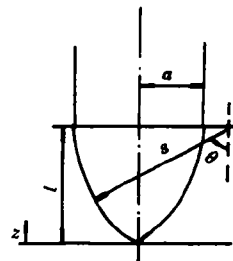


图 2 弧形弹几何参数示意图

($a=5.41 \text{mm}, l=18.63 \text{mm},$
 $s=34.78 \text{mm}$)

Fig. 2 Projectile geometries

$$\alpha(\theta_z) = \int_{\theta_0}^{\theta} 2\pi AK [s^2(\sin\theta\cos\theta + \mu\sin^2\theta) - s(s-a)(\cos\theta + \mu\sin\theta)] d\theta$$

$$\beta(\theta_z) = \int_{\theta_0}^{\theta} 2\pi\rho B [s^2(\sin\theta\cos^3\theta + \mu\sin^2\theta\cos^2\theta) - s(s-a)(\cos^3\theta + \mu\sin\theta\cos^2\theta)] d\theta$$

根据牛顿第二定律, v_z 满足下式

$$\frac{dv_z^2}{d\theta_z} + \frac{2s}{m}\alpha(\theta_z)\sin\theta_z + \frac{2s}{m}\beta(\theta_z)\sin\theta_z v_z^2 = 0 \quad (5)$$

式中: m 为弹头质量。式(5)的解析解为

$$v_z^2 = \exp\left[-\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{2s}{m}\beta(\theta)\sin\theta d\theta\right] \left\{v_0^2 - \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{2s}{m}\alpha(\theta)\sin\theta \exp\left[\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{2s}{m}\beta(\theta)\sin\theta d\theta\right] d\theta\right\} \quad (6)$$

式中: v_0 为弹头的初速度。当 $v_z=0$ 时, 由式(6)立即可得弹头的初速度 v_0 与弹头侵彻深度 p 的关系式

$$v_0^2 = \frac{2s}{m} \int_{\theta_0}^{\theta_p} \alpha(\theta)\sin\theta \exp\left[\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{2s}{m}\beta(\theta)\sin\theta d\theta\right] d\theta \quad \theta_p = \cos^{-1} \frac{L-p}{s} \quad (7)$$

式(7)只能借助数值积分求解 p 对 v_0 的依赖关系。

4 理论值与实验值的比较

穿甲机制的研究通常采用模拟实验的方法, 即在实验室内用缩小的模拟弹(一般为枪弹), 对穿甲过程进行实验研究, 这样不仅可以省弹、节材和省时, 而且还能够比较方便地测得穿甲过程的各种数据, 观察各种穿甲现象。本实验就是用 12.7mm 的枪弹对高强度低合金钢甲进行模拟穿甲试验。弹头为钢芯弧形弹(其几何参数见图 2), 射击角为 0° 。弹头的初速度 v_0 由置于靶前 2m 处、间隔 0.8m 的两个靶网和时间间隔仪测量。

弹头侵入钢甲的深度与初速度的关系可由式(7)确定。采用式(7)进行数值积分之前, 首先根据式(1)求得弹头所受法向阻力(应力)与膨胀速度的关系, 并利用式(2)进行拟合。对于 30MnCrNiMoB 高强低合金钢甲试验靶, 870°C 油淬, 200°C 回火, $Y=1.475\times 10^9\text{Pa}$, $E=2.05\times 10^{11}\text{Pa}$, $\text{HRC}=50$, 当 $A=0.031899$, $B=1.0884$ 时拟合效果最佳。再将 A , B 和钢甲有关的材料常数代入式(7)进行数值计算, 得到理论预测的弹尖侵彻深度与弹头初速度的关系, 见图 3。 v_0-p 的关系受弹甲之间的摩擦系数的影响较大。Backman 曾建议采用动摩擦系数 ($\mu=0.25$) 作为高速冲击时弹甲间的摩擦系数。Forrestal 根据 Montgomery^[6] 的实验认为 μ 取 0.02~0.10 更合适。由图 3 可知, 当速度较高时 ($v_0>300\text{m/s}$), μ 取 0.02 理论预测的弹坑深度与实验测量值符合得更好。当速度较低 ($v_0<300\text{m/s}$) 时, 弹坑深度预测值偏离实测值, 速度越低这种偏离越大。如果将其外推到 $p=0$ 的情况, 此时 v_0 并不为零。然而, 空穴膨胀理论计算却给出 $p=0$ 时 $v_0=0$ 的结果。换言之, 根据膨胀理论, 只要弹头初速度大于零, 在钢甲上就应产生一定深度的弹坑, 这一结论与实验事实不符。实验结果表明, 弹头初速度低于某临界值, 钢甲的表面不产生任何损伤, 即不出现弹坑。

另外, 实验得到的弹头动能 E_k 与弹坑容积 L 的线性关系(马梯尔直线^[7], 见图 4)存在正的截距, 表明弹头的动能只有大于某临界值 ($v_0>300\text{m/s}$) 才能侵入钢甲。至此, 实验事实充分地说明了弹头侵入高强低合金钢甲时, 只有飞行速度较高时 ($v_0>300\text{m/s}$), 空穴

膨胀理论才能较好地描述弹甲的作用过程。

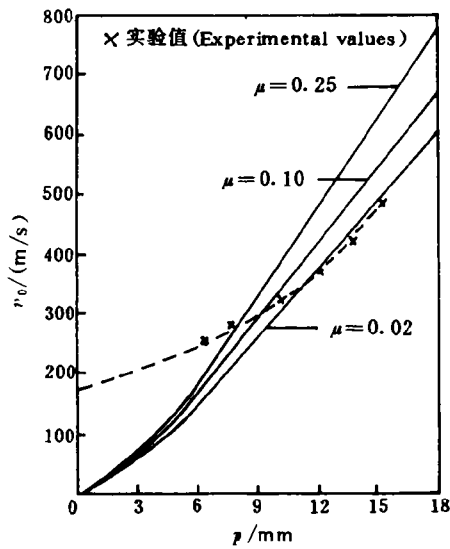


图3 弹头侵彻深度的理论值和实验值随初速度的变化关系曲线

Fig.3 Depth predicted and measured versus impact velocity

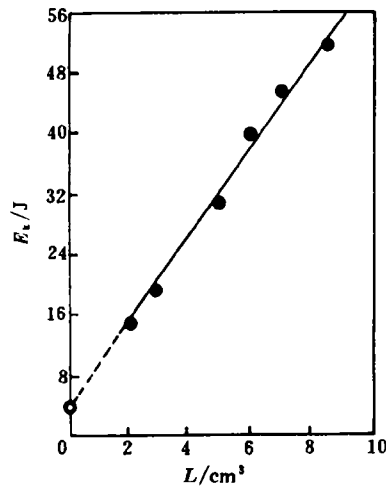


图4 弹头动能与弹坑容积的线性关系

Fig.4 Kinetic energy of the projectiles versus the volume of the craters

5 结论

(1) 弧形弹尖侵入高强低合金钢甲过程中不同深度与速度的关系可由式(6)计算。

(2) 弹头飞行的初速度只有大于某临界值时,弹头才能侵入钢甲。

(3) 弹头侵入钢甲超过一定深度后,空穴膨胀理论才能适用,此时弹甲间的摩擦系数取 0.02 更符合实验情况。

穿甲试验得到五机部五二所王步震等同志的帮助,数值计算得到周瑛伟硕士的帮助,作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Backman M E, Goldsmith W. The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets. *Int J Eng Sci*, 1978, 16(1): 1~99
- 2 Forrestal M J, Luk V K. Dynamics Spherical Cavity-Expansion in a Compressible Elastic-Plastic Solid. *J Appl Mech*, 1988, 55: 275~279
- 3 Forrestal M J, Okajing K, Luk V K. Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods. *J Appl Mech*, 1988, 55: 755~760
- 4 Luk V K, Forrestal M J, Amos D E. Dynamics Spherical Cavity Expansion of Strain-Hardening Materials. *J Appl Mech*, 1991, 58: 1~10
- 5 Hill R. Cavitation and the Interface of Headshape in Attack of Thick Targets by Non-Deforming Projectiles. *J Mech Phys Solids*, 1980, 28: 249~263
- 6 Montgomery R S. Surface Melting of Rotating Bands. *Wear*, 1976, 38: 235~243

7 赵国志. 穿甲工程力学. 北京: 兵器工业出版社, 1992. 18

PENETRATION OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL WITH OGIVAL PROJECTILE

Li Qiang, Ma Changxiang, Lai Zuhan, Dong Lina

(*Northeastern University, Shenyang, 110006*)

ABSTRACT In this paper, a closed-form of equations are presented, which can predict the speed of the ogival projectile and the penetration depth during the ogival nose penetrating into 30MnCrNiMoB High Strength Low Alloy Steel (HSLAS). It is shown that the penetration occurs as long as the velocity of the projectile is higher than some critical velocity. Finally, it is confirmed that the analytical model for elastic-plastic response of a compressible material developed by Forrestal could be suitable for HSLAS if the penetration depth is large.

KEY WORDS cavity-expansion, penetration speed, high strength steel