

材料动态屈服应力的实验测定

陈裕泽 乐国培 经二力

(1985年2月9日收到)

本文提出了用平头柱形弹丸撞击刚性靶后的残余总长度为实测特征量的一个测定的新方法,在碰撞速度大于或小于弹丸材料塑性波速的两种情况下,给出了推算公式,得到材料动态屈服应力的稳定数据。

一、前言

用柱形平头弹丸撞击刚性靶实验来测定材料动态屈服应力是一种简易的工程研究方法。对此,文献〔1〕作了详尽的总结。利用早期Taylor公式时,由于弹性变形段和塑性变形段过渡界面难以测准,得出的结果分散度很大,再则Taylor公式仅适用于低速碰撞,也受到一定的局限。如果利用Johnson〔2〕提到的公式,其分散性也很大,实际工作都无法应用。

本文利用Hawkyard〔1〕的能量法,考虑到初始碰撞速度大于或小于弹丸材料塑性波速的两种情况,给出柱形平头弹丸撞击靶面的改进公式,并采用弹丸的残余总长度为实测的特征量,以此推算出各变形量和材料参量,得出的端面变形量与实测一致。文中还对所作的实验结果分别按Taylor, Johnson以及本文的方法给出参量进行了比较。结果表明,用本文方法可得到动态屈服应力的稳定值。

二、基本理论

假定弹丸材料为理想塑性的。当碰撞速度 V 大于弹丸材料的塑性波速 C_p 时,塑性波实际停滞在弹丸与刚性面的撞击面上,并形成激波驻波,材料急剧变热,甚至出现闪光和侵融的现象。这时弹丸弹性段的运动方程为

$$-\sigma_t^p = \rho x \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

这里 σ_t^p 为材料的动态屈服应力, ρ 为材料的密度, x 为弹性段的瞬时长度, V 为弹性段的瞬时速度, t 为从碰撞时刻算起的时间。

由于 $dx = V dt$,利用初始条件 $x = L$ 时 $V = V_0$ 和终止条件 $x = L_1$ 时 $V = C_p$,得

$$\frac{L_1}{L} = \exp\left[\frac{\rho V_0^2}{2\sigma_t^p} \left(\frac{C_p^2}{V_0^2} - 1\right)\right] \quad (2)$$

这里 L 为弹丸初始长度, L_1 为本过程弹性段的残存长度。随着 V 的逐渐降低,弹丸按

Hawkyard 模型开始运动。

当 $V < C_p$ 时, 利用 Hawkyard 模型, 见图 1, 有运动学关系

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= C_p \\ \frac{ds}{dt} &= V \\ \frac{dx}{dt} &= -(V + C_p) \end{aligned} \right\} (3)$$

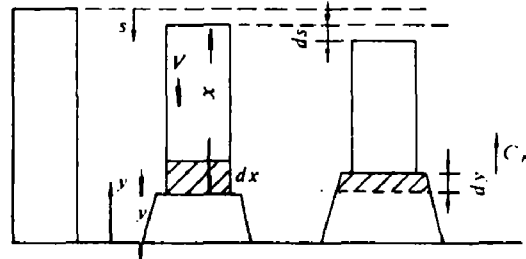


图 1 柱形平头弹丸的瞬态变形

连续性关系

$$A_0(V + C_p) = AC_p \quad (4)$$

A_0 , A 为塑性波前后的截面积, 利用能量关系有

$$\frac{\rho V^2}{2\sigma_p} = \ln \frac{A}{A_0} - \left(1 - \frac{A_0}{A}\right) \quad (5)$$

定义 \bar{V} 、 \bar{L} 、 λ 如右表所示。

其中 A_1 为变形初始时塑性面的截面积。考虑到初始条件 $x = \bar{L}$ 时, $V = \bar{V}$, $A = A_1$ 和终止条件 $x = X$ 时 $A = A_0$, $y = H$, 这里 X , H 分别为弹丸残存的弹性段长度和塑性残余变形段长度, 得出

表

定义符号	\bar{V}	\bar{L}	λ
定义条件			
$V < C_p$ 时	V	L	1
$V > C_p$ 时	C_p	L_1	$\left(\frac{1 - A_0/A_1}{A_0/A_1}\right)^2$

$$X = \frac{A_0}{A_1} \bar{L} \quad (6)$$

$$H = \frac{A_0}{A_1} \bar{L} - \frac{A_0}{A_1} \bar{L} \left(1 + \ln \frac{A_0}{A_1}\right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{V_0}{C_p}\right)^2 = \left(\frac{1 - A_0/A_1}{A_0/A_1}\right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\bar{L}}{L} = \exp \left\{ (\lambda - 1) \left[\ln \frac{A_0}{A_1} + \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$\frac{\rho V_0^2}{\sigma_p^2} = -2\lambda \left[\ln \frac{A_0}{A_1} + \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) \right] \quad (10)$$

$$\frac{X+H}{L} = \frac{A_0}{A_1} \left(1 - \frac{\bar{L}}{L} \ln \frac{A_0}{A_1}\right) \quad (11)$$

公式(6)~(11)为以 A_0/A_1 为参量的方程, 根据所测得的实验值 $(X+H)/L$ 就可计算出其它各量。对于 $V < C_p$ 的特殊情形可得出—组显式表达式

$$\frac{X}{L} = 1 - e_0 \quad (12)$$

$$\frac{H}{L} = (e_0 - 1) \ln(1 - e_0) \quad (13)$$

$$\frac{d_1}{d_0} = (1 - e_0)^{-1.2} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{1 - e_0}{e_0} V_0 \quad (15)$$

$$\frac{\rho V_0^2}{2\sigma_p} = -\ln(1 - e_0) - e_0 \quad (16)$$

这里

$$e_0 = \left[2 \left(1 - \frac{X + H}{L} \right) \right]^{1/2} \quad (17)$$

d_0 和 d_1 为弹丸撞击端变形前后的直径。若 V_0 为弹丸的飞行速度, Z 为弹靶的波阻比, 则

$$V_0 = \frac{V_0}{1 + Z} \quad (18)$$

三、实验装置

利用空气炮装置击发平头柱形弹丸, 使之获得高速运动。如图 2 所示的空气炮, 其贮气室的最高压力可达 200 kg/cm^2 , 炮管内径分 $\phi 22 \text{ mm}$ 和 $\phi 25 \text{ mm}$ 二种, 炮管末端的排气孔可用以激光测速。对于一定质量的弹丸, 调整贮气室的气压, 可以准确地控制弹丸的飞行速度。

由于 σ_p 与 V_0 的平方相关, 因此准确地测定弹丸碰靶前的飞行速度就很重要。我们采用二台氩-氦激光器, 通过弹道将激光射向光敏接收盒, 当光源被弹丸遮挡时, 通过放大电路给出 12 V 的直流电讯号, 而弹丸离开光源后, 直流电讯号回零, 利用二台 BC-II 瞬态波形存贮仪捕捉信号, 得到弹丸通过激光束的时间间隔, 从而得出弹丸的飞行速度来。实验表明, 这种方法测定速度重复

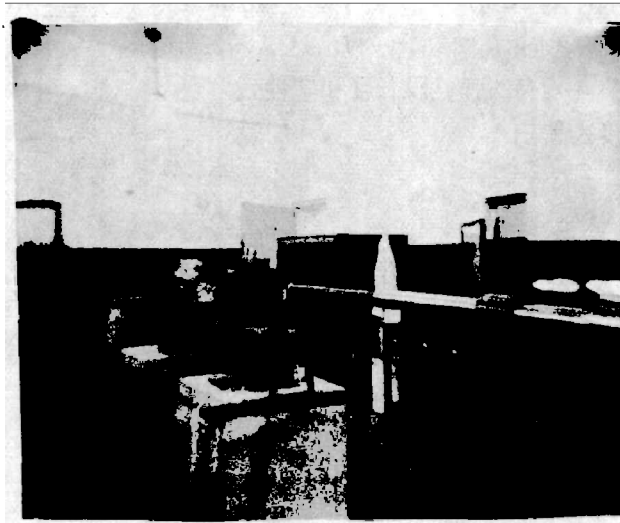


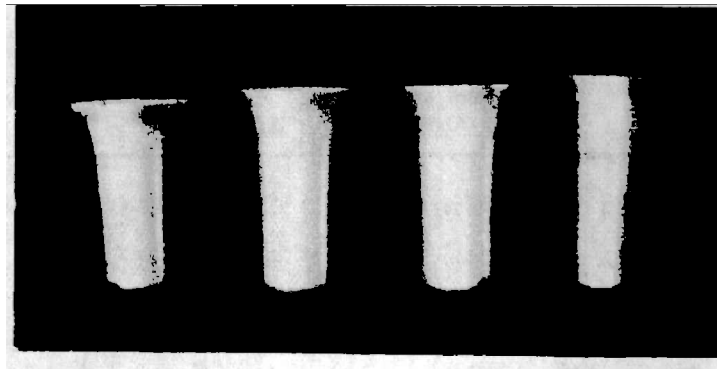
图 2 空气炮实验系统 (右侧亮点为激光测速光源)

性很好, 最大误差小于 5%。靶体采用 $30 \text{ CrMnSi } 250 \text{ mm}$ 的立方块状体。由于实验所选用的材料在碰靶后, 靶面并无明显凹痕, 因此在计算 Z 时, 靶体阻抗按弹性波阻抗。

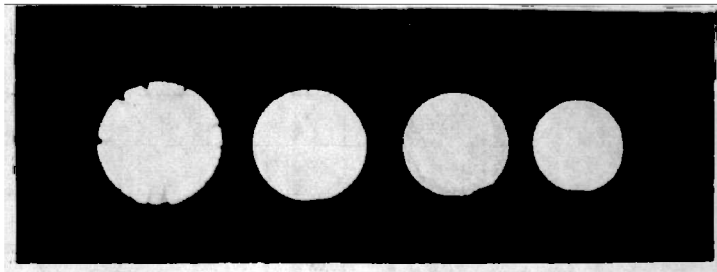
四、实验结果

图 3 和图 4 分别为 LF 6 和 20° 钢弹丸, 以不同速度碰靶后得到的试件变形状态。

由图看出, 不同的撞击速度给出弹丸的不同的变形状态。观察残骸发现, 撞击后的弹丸, 沿撞击面顺轴线向尾部方向明显地依次出现裂纹区、塑性变形区和弹性变形区, 并且随着撞

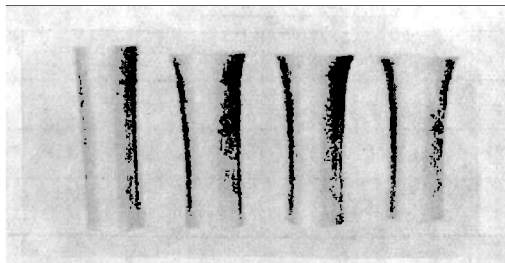


a) 侧面变形状态

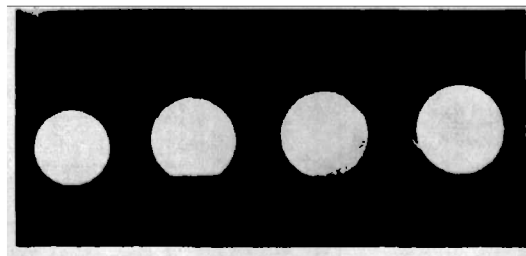


b) 碰撞端面变形状态

图3 LF6 铝弹丸变形状态 (从左到右, 对应的弹丸速度 $V_0 = 310, 281.7, 267.5, 215.9 \text{ m/s}$)



a) 侧面变形状态



b) 碰撞端面变形状态

图1 20# 钢弹丸变形状态 (从左到右, 对应的弹丸 $V_0 = 108.7, 166.6, 186.4, 204.5 \text{ m/s}$)

击速度的提高, 裂纹越来越明显, 裂纹区也相应扩大。测量发现, 残骸中并无明显的弹塑性分界面, 如果测量直径的误差是 0.1 mm , 那么轴向就可使界面向后误差达 10 mm 以上, 因此 Taylor^[1]方法测定弹塑性分界面得出的 σ_s^D 的结果分散性太大。

对试件的直接观察看出, 当 $V_0 > C_0$ 时, 可以清晰地用肉眼直接看到裂纹的存在, 此时回收试件残骸时, 有明显的手触烫感, 并且撞击速度越高, 烫感就越严重。如果试件比较短, 当撞击速度提高时, 试件碰撞端存在翻边现象。如果按 Johnson^[2]公式, 选择端面的最大残余直径作为实验中测定的值来推算 σ_s^D , 不可避免地在一维理论中带来了二维效应的测量数据, 得到的结果分散性也很大。

我们选择了四种材料进行实验: LC 4-CS, 静态屈服强度 $\sigma_{0.2} = 41.4 \text{ kg/mm}^2$; LF 6,

$\sigma_{0.2} = 19.3 \text{ kg/mm}^2$; 20*钢, $\sigma_{0.2} = 33.4 \text{ kg/mm}^2$; 45*钢, $\sigma_{0.2} = 37.2 \text{ kg/mm}^2$ 。弹丸碰撞后的残骸测量数据如表一所示。

表1 柱形弹丸碰靶残骸测量数据

弹丸材料	弹丸尺寸 (mm)	飞行速度 V_0 (m/s)	变形后总长度 $X+H$ (mm)	端面变形后直径 d_1 (mm)
LC 4—CS	$\phi 25 \times 80$	124.6	76.8	27.7
		177.4	74.7	29.4
		254.4	70.9	34.9
		282.9	69.0	37.6
LF 6	$\phi 25 \times 80$	215.9	70.4	33.8
		267.5	67.0	36.9
		281.7	66.1	38.9
		310.0	63.0	42.4
20*钢	$\phi 22 \times 70$	108.7	66.2	26.2
		166.6	62.5	28.6
		186.4	61.1	30.1
		204.5	59.9	31.6
45*钢	$\phi 22 \times 70$	98.4	67.6	23.9
		165.0	64.2	27.2
		195.4	62.4	29.2
		203.2	61.6	30.0

五、几种材料动态屈服应力的测定结果

根据几种材料的实验测定数据,选用弹丸碰撞后的残余长度 $X+H$ 作为计算的特征量,实践表明,它对裂纹、翻边以及靶面的安装条件等都不敏感,也便于测量。

利用(10)、(11)式进行数值计算得出 $\rho V_0^2 / \sigma_s^0 \sim (X+H)/L$ 的对应值,其中 L 的取值判别式为(8)式。按表1的实测数值计算如表2所示。其中 $Z_{*}^{LC4-CS} = 0.083$, $Z_{*}^{LF6} = 0.162$, $Z_{*}^{20} = 0.118$, $Z_{*}^{45} = 0.245$ 。

实验中,对这四种材料共做48发,弹丸直径均采用 $\phi 22 \text{ mm}$, $\phi 25 \text{ mm}$, 长度最小选用 25 mm , 最长用 80 mm , 看来结果并不受尺寸的影响。

利用 $X+H$ 作为测定特征量,可根据公式计算出端面变形后的直径 d_1 ,低速撞击时误差在 7.5% 以内,高速并且 L 较小时,由于二维效应,碰撞端的翻边和裂纹现象的影响,误差可过 25.9% 。

表2 以 $(X+H)$ 为特征量的计算值

弹丸材料	飞行速度 $V_0 (m/s)$	碰撞面速度 $V_c (m/s)$	$\rho V_c^2 / \sigma_s^D$	$\sigma_s^D (kg/mm^2)$
LC4-CS	124.6	113.1	0.089	41.0
	177.4	161.0	0.156	47.5
	254.4	230.9	0.272	56.0
	282.9	256.7	0.339	55.5
LF6	215.9	185.8	0.299	31.8
	267.5	230.2	0.431	33.9
	281.7	242.4	0.479	33.8
	310.0	266.8	0.647	29.6
20 钢	108.7	97.2	0.124	60.9
	166.6	149.0	0.264	67.2
	186.4	166.7	0.312	71.2
	204.5	182.9	0.384	73.6
45 钢	98.4	79.0	0.080	62.6
	165.0	132.5	0.196	71.7
	195.4	158.9	0.277	71.3
	203.2	163.2	0.295	72.3

图5 给出 Taylor, Johnson和本文公式对各发试件作出的 $\rho V_c^2 / \sigma_s^D$ 与 $(1 - \frac{X+H}{L})$ 关系曲线。通过对比, 看出 Taylor, Johnson描点的分散, 而本文给出稳定的变化值。

四种材料按本文方法的动态屈服应力的测定值如图6所示, 其应变率范围在 $10^2 \sim 10^4 sec^{-1}$ 之间, 并随应变率的提高, σ_s^D 略有提高。图中纵轴相应标出材料的静态屈服应力值。

结 束 语

利用平头弹丸垂直碰撞刚靶来测定材料的动态屈服应力, 是简单而直

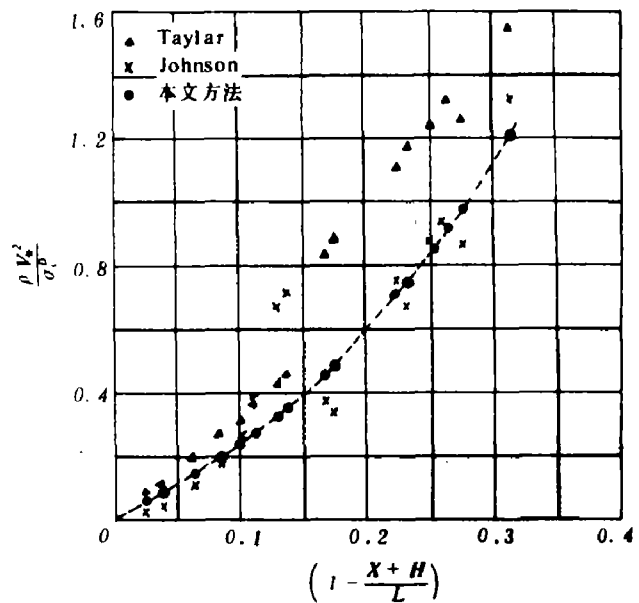


图5 三种方法的比较

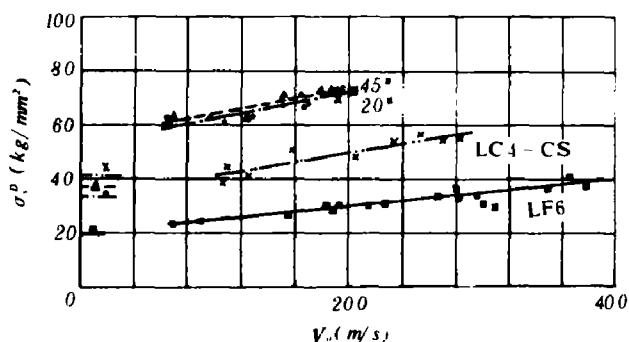


图6 四种材料的动态屈服应力值

接的方法,它仅需要测定: 1. 弹丸的飞行速度 V_0 ; 2. 弹丸碰靶后的残余长度 $X+H$ 。为不出现嵌入现象,靶面以无明显的弹坑为原则。利用本文公式绘制图表,可以在实验中快速获得 σ^d 值。因此,它是便于工程设计部门的应用的。

参 考 文 献

- (1) 钱伟长, 穿甲力学 (高速和超高速冲击力学), 华中工学院和应用数学和力学编委会讲义 (1981年).
 (2) Johnson, W., *Impact Strength of Materials*, Edward Arnold, London (1972).
 (3) Hawkyard, J. B., *Int. J. Mechanical Sciences*, 11 (1969), 313.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON DETERMINATION OF THE DYNAMIC YIELD STRESS OF METALS

Chen Yuze Le Guopei Jing Erli

Abstract

A simple and convenient method for determining the dynamic yield stress of metals in the experiment of launching a cylindrical projectile upon a steel target from a compressed air gas gun is developed in this paper. With consideration of the limitation of the previous applied formulas that the impact velocity must be lower than the speed of plastic waves of metals or the determination of elastic-plastic interface of projectiles deformed can't be measured accurately in experiment, the authors modified the Hawkyard's energy method by measuring the residue length of the impacting projectile as a characteristic value to determine its dynamic yield stress.