第 1 期　　兵 工 学 报　　№ 1
1983年 2 月　　ACTA ARMAMENTARII　　Feb. 1983

聚能射流临界侵彻速度的实验研究*

叶东英　孙庚辰　高举贤

〔摘要〕 聚能射流侵彻不同强度钢靶板的过程中，临界侵彻速度 u_j^* 是一个重要的特征量，它反映靶板材料抗侵彻方面的性能。本文提出一个近似确定 u_j^* 的模拟实验方案，并且由此方案得出五种强度钢靶板的临界侵彻速度值。

一、前　　言

聚能射流侵彻不同强度钢靶板的过程，一般可以用准定常的流体弹塑性模型进行描述。研究工作大多围绕如何从实验上或理论上给出射流速度 u_j 和侵彻速度 u 之间的关系。这个 u_j-u 关系，既反映射流的侵彻能力，也反映靶板材料抗侵彻的能力，在关系式中出现一个重要的特征量——临界侵彻速度 u_j^*。所谓临界侵彻速度，就是当靶板的侵彻速度等于零时，所对应的连续射流的速度。它反映靶板材料抗侵彻方面的性能。

精确地测量临界侵彻速度是比较困难的，由于聚能射流本身速度分布的局限性以及截割法测射流速度的条件限制，很难直接测得临界侵彻速度 u_j^*，只能从实验点外推而得。对强度比 45#钢高的几种靶材，它们的 u_j^* 都大于 1.5km/s，这速度显然太大。郑哲敏、谈庆明同志已分析了这一点，并估算出 45#钢的 u_j^* 应小于 1km/s。

我们对于不同强度的钢材，提出了一个近似确定临界侵彻速度的模拟实验方案，就是进行一组冷细长铜杆的穿甲模拟实验，利用实验测得的穿深和杆速关系（即 D-W 关系），再借用一些联系杆速和侵彻速度等关系的经验公式，通过简单的运算而确定临界侵彻速度 u_j^*。

二、确定临界侵彻速度 u_j^* 的实验方案

前面已对 u_j^* 作过定义，它是当侵彻速度 u 等于零时，射流所具有的速度，即射流能侵彻靶板的最小速度。如果将具有不同速度的细长铜杆撞击靶板，直接观察靶板表面开坑或不开坑情况，用表面不开坑的铜杆速度的高限确定为临界侵彻速度 u_j^* 是不准确的。因为杆以不同速度撞击靶板，靶板上就会有不同的开坑形状和穿深；由于有自由表面的影响，

* 1981年 5 月26日收到。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

即使杆速很低，靶板上也会有开坑痕迹，坑深既反映靶材的抗力也包括自由表面的影响，所以不能以有无开坑痕迹作标准来确定u_j^*的数值。我们采用的实验方案是：一方面，将具有一定长细比的铜针以不同速度直接撞击靶板，求出杆速和相应穿深之间的关系；另一方面，借用文献〔1〕中描述细长杆在靶板内侵彻时的经验关系式（有强度修正的Bernoulli方程），来确定此情况下所出现的反映靶板抗侵彻的阻力，从而求出临界侵彻速度u_j^*。

下面叙述杆侵彻半无限靶板过程的基本假设：

过程大致分为开坑阶段、准定常侵彻阶段和侵彻结束阶段。开坑阶段由于有撞击产生的激波效应和伴随产生的自由表面的稀疏波效应，情况较复杂，具有非定常性质。准定常侵彻阶段是一个相当长的杆的稳定推进阶段，在整个靶板侵彻过程中，这一阶段占主要部分，而表面撞击和最后停止阶段相对来说是不重要的。在杆和靶板碰撞初期，因为坑底附近的压力比材料的屈服强度大，材料的性质和不可压缩流体相近，而随着坑底压力的下降，材料强度越来越起作用，我们可以用不可压缩流体的Bernoulli方程作基础，再考虑靶板和杆的材料强度，把它们作为“阻力”引进来，这就是修正的流体动力学模型。为此，我们假设：

1．杆在靶板内侵彻是处在准定常侵彻的过程中，忽略了开坑和侵彻结束阶段的非定常效应。

2．杆和靶板材料在侵彻过程中皆为不可压缩。

3．弹杆分为两部分：当头部材料所受的压应力σ大于杆材强度Y_p时，杆材变粗，这一部分当作流体；杆的其余部分受的压应力σ小于Y_p时，当作不变形刚体。并且认为对给定材料Y_p为常数。如图1为杆侵彻靶板的示意图。

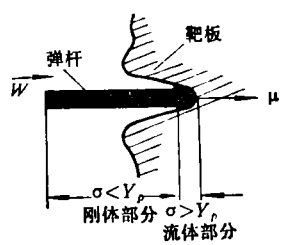


图1 杆侵彻靶板的示意图

4．杆在靶板内侵彻时，它所受的靶板阻力P由两部分组成：一部分是靶板材料的惯性力引起的；另一部分是靶板材料的强度特性R_t引起的，并认为R_t对一定靶板材料而言为常数。则

$$P=\frac{1}{2}\rho_t u^2+R_t$$

其中ρ_t为靶板材料的密度，u为侵彻速度。

实验方案中所采用的基本公式如下：

由假设中的3和4，再采用有强度修正的Bernoulli方程，来描写杆和靶板的相互作用

$$\frac{1}{2}\rho_p(v-u)^2+Y_p=\frac{1}{2}\rho_t u^2+R_t$$

其中ρ_p——杆材密度；

v——杆运动速度。

从而可推出

$$u=\frac{1}{1-\mu^2}\left(v-\mu\sqrt{v^2+A}\right)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中

$$\mu=\sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_p}},\qquad A=\frac{2(R_t-Y_p)(1-\mu^2)}{\rho_t}$$

杆刚体部分的动量方程

$$\frac{d(\rho_p l v)}{dt}+\rho_p v(v-u)=-Y_p$$

其中 l 为 t 时刻留在坑底上面的杆长度。

杆长在侵彻过程中的变化率

$$\frac{dl}{dt}=-(v-u)$$

杆侵彻靶板的穿深 D 的公式

$$D=\int_0^t u\,dt$$

从上面几个基本关系式，可以求出相对穿深的积分表达式

$$\frac{D}{L}=\int_{W^*}^{W}\frac{\rho_p}{Y_p}\frac{1}{1-\mu^2}(v-\mu\sqrt{v^2+A})\left\{\frac{v+\sqrt{v^2+A}}{W+\sqrt{W^2+A}}\right\}^{\frac{R_t-Y_p}{\mu Y_p}}$$

$$\times\exp\left\{\frac{\mu\rho_p}{2(1-\mu^2)Y_p}[(v\sqrt{v^2+A}-\mu v^2)-(W\sqrt{W^2+A}-\mu W^2)]\right\}dv$$

其中　L——杆原始长度；

W——杆初始碰撞速度；

$W^*=[2(R_t-Y_p)/\rho_p]^{1/2}$。

我们所需要的是方程中的 R_t，因为它反映靶板材料抗侵彻的特性。

在聚能连续射流侵彻靶板的准定常理论中，由于紫铜射流的强度可以忽略，所以无论什么形式的 u_j-u 关系，当侵彻速度 u 等于零时，都可化为下面的形式

$$\frac{1}{2}\rho_j u_j^{*2}=KY_0$$

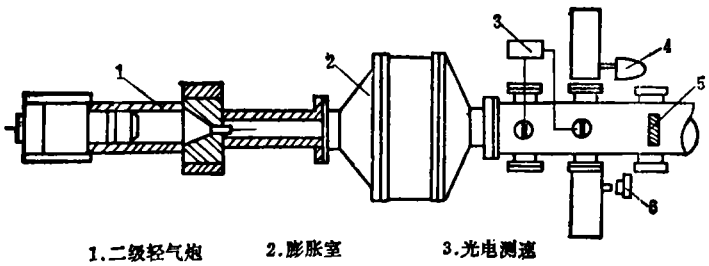
其中 KY_0 代表靶板抵抗静态冲孔的强度特性，如取 Y_0 为靶材的屈服强度，则 K 是取决于孔底形状的某一常数。在这里，KY_0 实际上就等于 R_t。我们的实验就是要确定 R_t 的大小，然后再求出聚能连续射流侵彻靶板的临界侵彻速度 u_j^*，即

$$u_j^*=\sqrt{2R_t/\rho_j}$$

三、实验装置简述

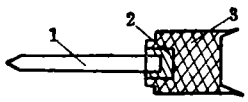
用的是一门 13 毫米口径的二级轻气炮，发射长细比在 $6.5<L/\phi<8$ 范围内的冷紫铜针，使用不同强度的 45*、103*、202*、203*、204*钢作靶板。实验装置见图 2（a）。实验采用光障法测速仪器，测出铜针不同着靶速度 W；用火花光源或红宝石激光光源通过阴影仪对铜针飞行姿态及靶板被撞击的情况进行照相，得出铜针在飞行中姿态的照片及铜针在不同时刻着靶的形态照片。所采用的长杆弹丸是带有弹托的紫铜针。铜针模型见图 2（b）。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

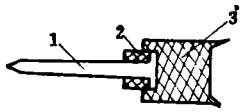


1.二级轻气炮 2.膨胀室 3.光电测速
4.闪光照象 5.靶板 6.照象机

(a)



1.钢针
2.铝垫
3.聚碳酸酯弹托



1.钢针
2.聚碳酸酯套管
3.聚碳酸酯弹托

(b)

图 2

四、五种钢靶板临界侵彻速度的确定

从穿深公式的积分表达式

$$D/L=\int_{W^*}^{W}\frac{\rho_p}{Y_p}\frac{1}{1-\mu^2}(v-\mu\sqrt{v^2+A})\left\{\frac{v+\sqrt{v^2+A}}{W+\sqrt{W^2+A}}\right\}^{\frac{R_t-Y_p}{\mu Y_p}}$$

$$\times\exp\left\{\frac{\mu\rho_p}{2(1-\mu^2)Y_p}[(v\sqrt{v^2+A}-\mu v^2)-(W\sqrt{W^2+A}-\mu W^2)]\right\}dv$$

可看出，其中有两个未知数 R_t、Y_p。一般说来，用实验中的两个总穿深数值便可求出 R_t 和 Y_p。但为了能得到更准确、可靠的 R_t 和 Y_p 值，我们改变铜针的初始撞击速度W，测出相应的总穿深D，从上述积分表达式中可得出比较满意的 R_t 和 Y_p 值。因为 Y_p 仅是反映铜针的强度特性，所以从一种靶材实验得出的 Y_p 值应能适应其它几种靶板材料，即五种靶材的 Y_p 都为同一值。

我们采用了上述的实验设备和实验方案，对 45#、103#、202#、203#、204#强度不同的钢靶材进行穿甲试验。实验结果如下：

1．靶板为 45#钢的实验数据（见表1）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　45*钢靶板

编号	模型长度 L(mm)	模型直径 ϕ(mm)	L/ϕ	发射速度 W(km/s)	穿深 D(mm)	D/L	模型形式
41	23.8	3.3	7.2	1.50	15	0.630	圆盘
51	26.6	3.4	7.8	1.07	9.2	0.346	圆盘
52	23.7	3.5	6.8	1.15	9.0	0.379	铝垫
62	25.9	3.5	7.4	1.01	6.3	0.243	圆盘
63	26.3	3.4	7.7	0.910	4.5	0.175	圆盘
64	21.5	3.0	7.2	1.03	6.1	0.284	铝垫
65	23.2	3.6	6.5	0.832	3.0	0.128	铝垫
66	23.0	3.6	6.4	0.425	/	/	铝垫
67	26.3	3.5	7.5	0.507	/	/	圆盘
68	26.5	3.5	7.6	0.545	/	/	圆盘
69	21.2	3.0	7.1	0.775	2.0	0.094	铝垫
70	23.0	3.5	7.1	0.840	3.0	0.130	铝垫
71	22.5	3.5	6.4	0.680	1.0	0.040	铝垫
74	22.7	3.5	6.5	1.46	13.1	0.577	圆盘
78	23.1	3.5	6.6	1.25	10.5	0.455	圆盘
79	23.2	3.5	6.6	1.23	10.0	0.430	铝垫

由实验结果得到，45*钢靶材的 R_t 和 Y_p 值分别等于

$$R_t=264\ \mathrm{kg/mm^2}、Y_p=22\ \mathrm{kg/mm^2}$$

因

$$u_j^*=\sqrt{2R_t/\rho_j},\ 其中\quad \rho_j=8.6\mathrm{g/cm^3}$$

所以求出

$$u_j^*=780\mathrm{m/s}$$

图 3 给出用上述数值算出的穿深曲线，它和实验点相对照，可看出拟合的程度。

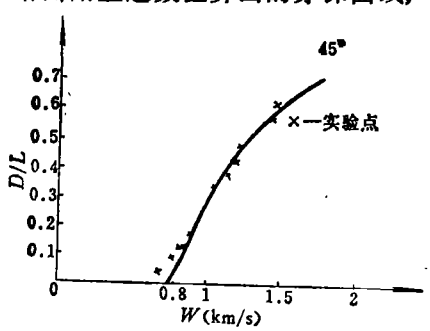


图　3

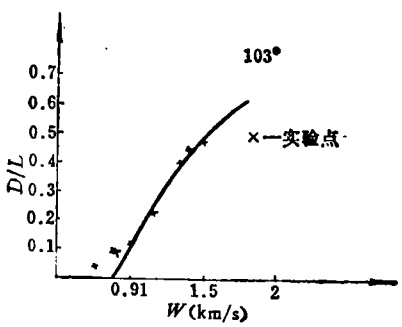


图　4

2. 靶板为 103*钢的实验数据（见表 2）

表 2　103*钢靶板

编号	模型长度 L(mm)	模型直径 ϕ(mm)	L/ϕ	发射速度 W(km/s)	穿深 D(mm)	D/L	模型形式
72	22.7	3.5	7.06	0.990	2.60	0.115	圆盘
73	23.0	3.5	6.57	1.150	5.10	0.222	铝垫
80	22.8	3.4	6.71	1.390	10.2	0.447	铝垫
82	22.9	3.5	6.54	0.530	0	/	铝垫
83	22.7	3.4	6.68	0.900	2.00	0.088	铝垫
88	23.5	3.7	6.36	1.34	9.20	0.391	铝垫
89	23.2	3.6	6.45	1.52	11.0	0.474	铝垫
90	23.7	3.7	6.41	0.744	0.80	0.033	铝垫
92	23.0	3.5	6.57	0.895	2.20	0.095	圆盘

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由实验结果得到，对 103*钢靶板而言

$$R_t=364\ \mathrm{kg/mm^2}、Y_p=22\ \mathrm{kg/mm^2}$$

并求出

$$u_j^*=912\mathrm{m/s}$$

图4给出用上述数值算出的穿深曲线，同时标出实验点。

3．靶板为202*钢的实验数据（见表3）

表3 202*钢靶板

编号	模型长度 L(mm)	模型直径 ϕ(mm)	L/ϕ	发射速度 W(km/s)	穿深 D(mm)	D/L	模型形式
70	22.0	3.4	6.3	1.19	4.5	0.204	铝垫
71	23.0	3.5	6.6	1.38	7.5	0.326	铝垫
72	27.5	3.5	7.8	0.94	1.0	0.036	圆盘
104	28.1	3.2	8.8	1.15	3.9	0.140	铝垫
108	22.0	3.4	6.5	1.62	12.0	0.545	铝垫
110	22.5	4.5	5.0	1.49	10.3	0.457	铝垫

由实验结果得到，对 202*钢靶板而言

$$R_t=440\mathrm{kg/mm^2}、Y_p=22\mathrm{kg/mm^2}$$

并求出

$$u_j^*=1000\mathrm{m/s}$$

图5给出用上述数值算出的穿深曲线，同时标出实验点。

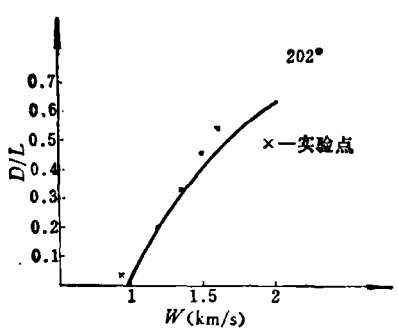


图 5

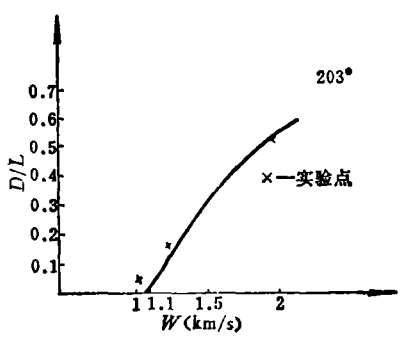


图 6

4．靶板为203*钢的实验数据（见表4）

表4 203*钢靶板

编号	模型长度 L(mm)	模型直径 ϕ(mm)	L/ϕ	发射速度 W(km/s)	穿深 D(mm)	D/L	模型形式
1	23.2	3.6	6.4	1.48	6.5	0.280	铝垫
2	23.1	3.6	6.4	1.24	3.8	0.164	铝垫
3	23.0	3.5	6.4	1.04	1.0	0.044	铝垫
45	23.1	3.6	6.4	1.97	12.2	0.530	铝垫

由实验结果得到，对 203*钢靶板而言

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R_t=550\text{kg/mm}^2、Y_p=22\text{kg/mm}^2$$

由此求出

$$u_j^*=1120\text{m/s}$$

图 6 给出用上述数值算出的穿深曲线，同时标出实验点。

5．靶板为 204*钢的实验数据（见表 5）

表 5　204*钢靶板

编号	模型长度 L(mm)	模型直径 ϕ(mm)	L/ϕ	发射速度 W(km/s)	穿深 D(mm)	D/L	模型形式
33	23	3.5	6.6	1.40	5	0.217	铝垫
34	23	3.6	6.4	1.53	7	0.304	铝垫
35	23.2	3.5	6.6	1.71	10	0.431	铝垫
40	24.6	3.7	6.6	0.74	0	0	圆盘
41	28.4	3.5	8.1	1.13	2	0.071	圆盘

由实验结果得到，对 204*钢靶板而言

$$R_t=561\text{kg/mm}^2、Y_p=22\text{kg/mm}^2$$

由此求出

$$u_j^*=1131\text{m/s}$$

图 7 给出用上述数值算出的穿深曲线，同时标出实验点。

从以上实验结果看出，当 $D/L\geqslant 0.15$ 左右时，实验点与计算曲线是吻合较好的；只是当 $D/L<0.15$ 时，实验点偏高，这是由于靶板开坑表面非定常效应的影响。这说明采用本实验方案确定的 R_t 这个常数，是可以反映开坑阶段以后（此时自由表面影响较小）靶板抗侵彻能力的。

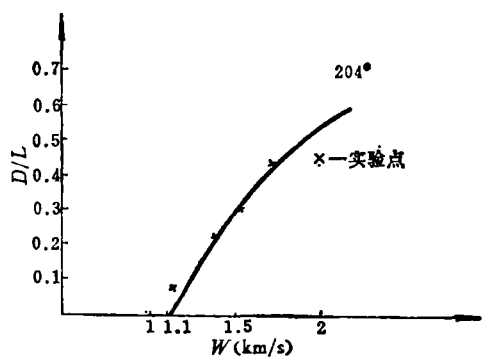


图　7

这里，我们对实验所得到的 u_j^* 值，从理论上作一粗略的核算。由于当侵彻速度 u 接近于零时，靶板的应变率很小，以致可以被忽略，靶板的阻力只与加载表面的几何形状（实际上就是孔形）有关，而连续射流侵彻靶板的作用面象一个半球形，所以不同强度靶板的抗侵彻阻力 R_t 的大小，应当和弹塑性无限介质中扩张一个球形孔或柱形孔所需要的压力 P_s^* 或 P_c^* 的数值接近。

下面用弹塑性理论计算 P_s^*、P_c^*。在假设靶板的塑性区为理想塑性情况下，扩张一个球形孔需要的压力 P_s^* 等于

$$P_s^*=\frac{2}{3}Y_0\left[1+\ln\frac{E}{(1+\nu)Y_0}\right]$$

扩张一个柱形孔，需要的压力 P_c^* 等于

$$P_c^*=\frac{Y_0}{\sqrt{3}}\left[1+\ln\frac{\sqrt{3}E}{(1+\nu)Y_0}\right]$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

两式中的 Y_0 用材料的抗拉强度代替，E、ν 为材料常数。

五种靶材的 R_t 与 P_s^*、P_c^* 比较见表6。

表 6

靶板种类	u_j^*(m/s)	R_t(GPa)	P_s^*(GPa)	P_c^*(GPa)
45#	780	2.64	2.6	2.3
103#	912	3.64	4.0	3.4
202#	1000	4.40	5.3	4.4
203#	1120	5.50	6.3	5.3
204#	1130	5.60	6.6	5.5

从表6中可看出，由本实验方案得到的五种不同强度材料的 R_t，基本上都在 $P_s^*>R_t>P_c^*$ 范围内，这正符合我们的估计（见图8）。由这些 R_t 值求得的聚能连续射流侵彻上述五种钢靶的临界侵彻速度 u_j^* 值（见表6），它与靶板强度 σ_b 的关系见图9。

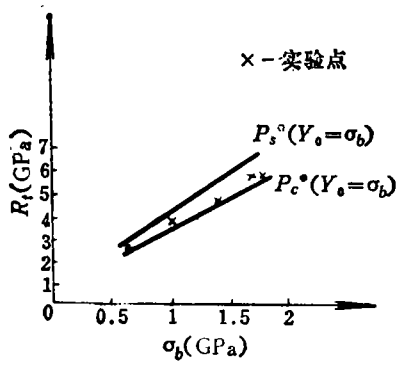


图 8

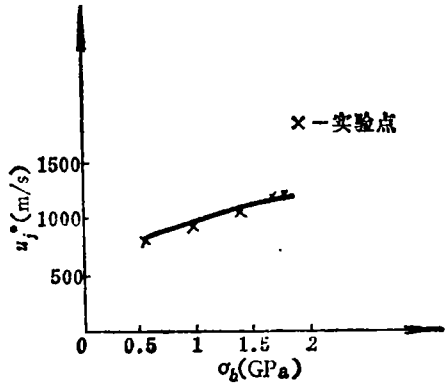


图 9

由图9可见，随 σ_b 增加，u_j^* 值也增加，当强度增加到1.8万巴时，u_j^* 值增加并不多，u_j^* 值约在1 km/s左右，而聚能射流侵彻强度 σ_b 为1.8万巴钢靶板的实验中，外推法得出的 u_j^* 却在2～3km/s中间，这显然太大，这说明如此大的临界侵彻速度值，是不能用靶板强度效应来解释的，而应该在侵彻过程中的其它方面去找原因。本实验方案确定出的 u_j^* 值都比聚能射流侵彻不同强度钢靶板实验直接测出的 u_j^* 值小得多，基本上符合郑哲敏、谈庆明同志分析的 u_j^* 值范围。所以说，采用本实验方案确定的五种钢靶板的连续射流临界侵彻速度值是合适的。

参加本项实验工作的还有郑之初、葛学真、马文驹等同志，郑哲敏同志在方案确定方面给予了具体指导。

参 考 文 献

〔1〕 A. Tate, A theory for the deceleration of long rods after impact, J. Mech. Phys. Solids, 1967, V15.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE CRITICAL PENETRATION SPEED OF THE SHAPED CHARGE JET

Ye Dongying, Sun Gengchen and Gao Juxian

Abstract

In the process of the penetration of the shaped charge jet into metal targets with different strength, the critical penetration speed u_j^* is an important characteristic quantity. This shows the property of the target material against the jet penetration. This paper presents a simulating experimental programme for approximate determination of u_j^* for metal target and gives the u_j^* value for five kinds of steel with different strength.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net