

27-31 金属厚靶的超高速碰撞开坑实验

孙庚辰 谈庆明 赵成修 葛学真

(中国科学院力学研究所)

TJ011.2

摘 要 介绍了对高速球形弹丸撞击金属厚靶的开坑现象所进行的实验研究。最高弹速为 7.5km/s；弹靶材料有 7 种组合：硬铝打硬铝，钢打钢，黄铜打黄铜，钢打硬铝，硬铝打钢，钢打纯铜和硬铝打铅。用量纲分析归纳前 6 种（即铅靶除外）情况，得到坑深 P 和弹径 D_p 之比值的经验关系是

$$\frac{P}{D_p} = 0.274 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.725} \left(\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right)^{2/3}$$

其中 v 是弹速， ρ_p 和 ρ_t 是弹和靶的材料密度， Y_t 是靶板材料的动态屈服强度。铅靶因为容易产生熔化和气化，且可压缩性好，故坑深实验值比上式的计算值高得多。对于一定的弹靶材料的组合，增加弹速则坑形趋向于半球形。

关键词 高速碰撞 侵彻 开坑

研究超高速弹丸对金属厚靶的碰撞开坑是一项具有实际和理论意义的课题。国外已有许多学者在开坑规律性方面做了大量的研究工作。本文采用二级轻气炮作为实验手段，主要观察高速球形金属弹丸撞击各种不同金属厚靶的开坑现象，整理坑深随物理参量变化的经验公式，从中考察密度、强度和相变等因素所起的作用。

1 实验装置

1.1 轻气炮

弹丸的发射手段是口径为 14mm 的二级轻气炮，它可将 1g 质量的铝或钢球加速到 8km/s。

1.2 弹和靶

球形金属弹丸置于塑料弹托上，弹托分为两瓣，出炮口后自动分开，弹丸射向靶块。金属靶是直径为 100mm，厚度不同的圆柱。用 LY12cz 铝合金，45 号钢，纯铜，H62 黄铜和铅作为弹、靶材料。材料的密度和动态屈服强度值列于表 1.1。

表 1.1 弹靶材料参数

Tab. 1.1 Parameters of materials used for projectiles and targets

材料	LY12cz 铝	45 号钢	纯铜	H62 黄铜	铅
材料符号	Al	St	Cu	Cu*	Pb
密度 ρ/gcm^{-3}	2.7	7.8	8.9	8.5	11.3
动态屈服强度/MPa	300	800	150	300	18

注：数据取自力学所动态性能实验结果

1.3 弹速和弹坑深度的测量

1992 年 4 月收稿，1993 年 4 月定稿。

弹丸撞靶前的速度和弹、托的分离状态用闪光纹影照像记录测量,测量精度为(3~4)%。弹丸在靶板上碰撞形成的弹坑的几何尺寸用游标尺测量,测量精度为0.01mm。

2 实验结果

安排了3类实验,前两类是估计不会出现熔化现象的金属(硬铝、钢、纯铜和黄铜),目的是考虑惯性(速度和密度)和强度对坑形的影响。第一类实验中弹、靶采用同样材料,具有相同的物理和力学性质,着重考察由 v 所体现的惯性的影响;第二类实验中弹、靶采用不同的材料,着重考察由弹靶密度比 ρ_p/ρ_t 所体现的惯性的影响,这里下标 p 和 t 各表示弹和靶的属性。第三类实验用铅作靶,实验次数不多,只是想初步观察熔化对坑形的影响。

2.1 第一类:弹靶材料相同的厚靶成坑实验

球形弹丸直径 D_0 为5mm, v 从0.72km/s到7.35km/s之间变化。系统地做了硬铝弹打硬铝靶(Al/Al)、钢打钢靶(St/St)、黄铜打黄铜靶(Cu*/Cu*)3组试验。无量纲参数 $v/(\sqrt{Y_t/\rho_t})$ 的变化范围是4.0~28。坑深 P 和坑径 D 随 v 的变化曲线见图2.1,实线表示坑深,虚线表示坑径。

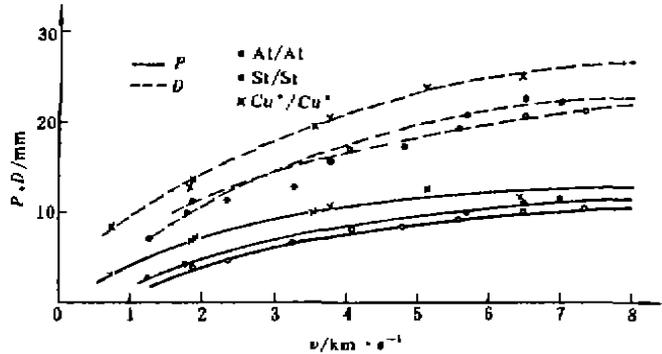


图2.1 弹靶材料相同的坑深和坑径与弹速的关系
Fig. 2.1 Penetration depth and crater diameter vs. impact velocity, materials for projectile and target remaining unchanged

2.2 第二类:弹靶材料不同的成坑实验

弹丸仍是直径为5mm的球, v 从1.08km/s到7.7km/s之间变化。系统地做了钢弹打硬铝靶(St/Al)、硬铝打钢靶(Al/St)、钢打纯铜靶(St/Cu)3组实验。无量纲参数 $v/(\sqrt{Y_t/\rho_t})$ 的变化范围是3.8~4.0。 P 和 D 随 v 的变化曲线见图2.2。

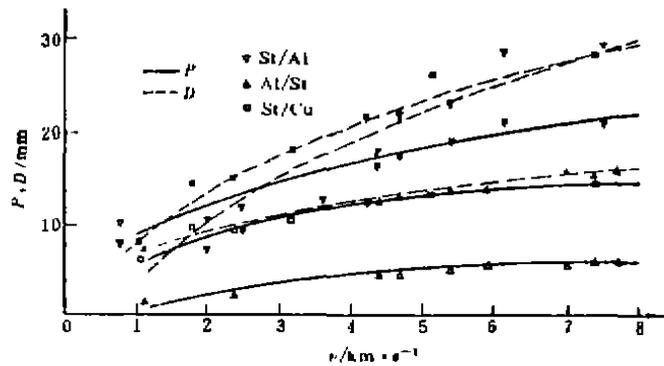


图2.2 弹靶材料不同的坑深和坑径与弹速的关系
Fig. 2.2 Penetration depth and crater diameter vs. impact velocity, with different materials for the projectiles and targets

2.3 第三类:铅靶的成坑实验

用直径为5mm的硬铝球打击铅靶(Al/Pb)。只做了4.4km/s和5.2km/s两个速度的实验。相应的无量纲参数 $v/(\sqrt{Y_t/\rho_t})$ 各为111和132,结果见表2.1。

表2.1 Al/Pb的成坑参数

Tab. 2.1 Parameters of cratering for Al/Pb

$v/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	P/mm	D/mm
4.45	18.5	17.0
5.25	30.0	59.0

3 成坑分析

决定坑形的参量有几何量和物理量两类。即 D_p, v 代表惯性效应的 ρ_p 和 ρ_t ；代表强度效应的 Y_p 和 Y_t ；代表可压缩效应的声速 C_p 和 C_t ；升温至熔点的热效应 $(cT_m)_p$ 和 $(cT_m)_t$ (c 是比热, T_m 是熔点) 以及熔化热 n_p 和 n_t 。 P 和 D 应与诸量存在确定的函数关系, 即

$$P = f(D_p, v, \rho_p, Y_p, C_p, (cT_m)_p, n_p, \rho_t, Y_t, C_t, (cT_m)_t, n_t)$$

$$D = g(D_p, v, \rho_p, Y_p, C_p, (cT_m)_p, n_p, \rho_t, Y_t, C_t, (cT_m)_t, n_t)$$

用 π 定理可得到相应的无量纲函数关系, 即

$$\frac{P}{D_p} = f \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{Y_p}{Y_t}, \frac{C_p}{C_t}, \frac{(cT_m)_p}{(cT_m)_t}, \frac{n_p}{n_t}, \frac{C_t}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{n_t}{C_t^2} \right]$$

$$\frac{D}{D_p} = g \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{Y_p}{Y_t}, \frac{C_p}{C_t}, \frac{(cT_m)_p}{(cT_m)_t}, \frac{n_p}{n_t}, \frac{C_t}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{n_t}{C_t^2} \right]$$

对于碰撞速度不超过 7km/s 的一般金属碰撞 (低熔点金属铅和镉除外), 惯性和强度效应十分重要, 历来把 $v/(\sqrt{Y_t/\rho_t})$ 和 ρ_p/ρ_t 当作重要参量。因弹丸体积远比靶内发生强烈变形和热效应区域的体积小, 一般可忽略 Y_p/Y_t 的影响。在细长金属聚能射流定常侵彻钢靶的实验中已知: 如用射流微元速度 v 来组成无量纲量 $v/(\sqrt{Y_t/\rho_t})$, 那么当该值处于 14~23 之间时钢靶可当作不可压缩流体。若低于 14, 一般要考虑塑性强度的作用; 高于 23, 要考虑可压缩性的作用。然而这里弹丸是球形, 只在碰撞早期碰撞点附近击波很强, 材料的压力较高, 不久压力下降, 密度变化就不明显了。总体看, 弹丸超速碰撞情况下材料可压缩性所起的作用比起射流定常侵彻的情况要弱。Westine and Muller^[1]指出, 很多金属的无量纲参数 $(C_p T_m)/n$ 和 C^2/n 的变化不大, 可近似当作常数 (c_p 是比热)。

在第一、二类实验中, 估计硬铝等材料的熔化并不重要。例如 Zukas 等人^[2]所指出的, 这几种材料中铝的熔点最低, 当冲击速度为 (5.1~7.0)km/s 时发生熔化; 而钢要在 7.9km/s 以上, 铜要 6.6km/s 以上才能发生熔化; 打击铅靶使之熔化的速度只要 2.1 km/s。因此, 我们暂时忽略熔化的影响, 也不考虑可压缩性的影响, 于是有

$$\frac{P}{D_p} = f \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{Y_p}{Y_t} \right], \quad \frac{D}{D_p} = g \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}}, \frac{\rho_p}{\rho_t}, \frac{Y_p}{Y_t} \right]$$

在第一类实验中, ρ_p/ρ_t 和 Y_p/Y_t 都等于 1, 所以自变量只有 $v/\sqrt{Y_t/\rho_t}$ 一个。而对于第二类实验, 忽略 Y_p/Y_t 的影响, 考察 $v/\sqrt{Y_t/\rho_t}$ 和 ρ_p/ρ_t 所起的作用。第三类实验的数据不多, 只能初步看一看熔化现象所起的作用。

第一类实验数据点见图 3.1。硬铝, 钢, 黄铜 3 种材料的数据点比较密集地落在一个狭带上, 在 $4 < \frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}} < 35$ 的范围内可用一条曲线近似表示, 其表达式为

$$\frac{P}{D_p} = 0.274 \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

它与实验数据的平均绝对误差是 7.6%, 均方根误差是 11%。坑深随速度的 2/3 次幂变

化的趋势与 Charters and Summers^[3], Herrmann and Jones^[4] 和 Christman and Gehring^[5] 等人所得的结果是一致的。

图 3.1 中还点上了第二类的 3 组实验数据。将 St/Al 和 Al/St 的数据连成的曲线会明显地和第一类的曲线远离, 所以必须要考虑弹、靶材料的不同性质。这里试图拟合了 ρ_b/ρ 的影响, 在 $4 < \frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho}} < 40$,

$0.34 < \frac{\rho_b}{\rho} < 2.9$ 的范围内, 所得的经验关系是

$$\frac{P}{D_p} = 0.274 \left(\frac{\rho_b}{\rho} \right)^{0.725} \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho}} \right]^{2/3} \quad (3.2)$$

将第一、二类的 6 组实验数据画在图 3.2 中。实验数据与经验曲线 (3.2) 式之间的均方根误差是 12%。应该指出, 密度比的方幂值 0.725 比文献 3~5 中所给出的值 2/3 要大, 比文献 1 中用数值模拟给出的 0.537 也大。如果能量律成立, 那么密度比的方幂应是 1/3, 而 $v/\sqrt{Y_t/\rho}$ 的方幂则是 2/3, 所以在密度比的影响方面各研究者的结果之间存在较大的不一致。

第三类的两个实验所得的无量纲坑深 P/D_p 值是 3.7 和 6.0, 如果用前两类实验拟合的经验关系 (3.2) 式估算应为 2.2 和 2.5, 实验值与之相比高出许多。表现在图 3.2 上, 实验点将落在经验曲线下面。至少有一点是肯定的, 如文献 2 中所指出的, 使铅靶发生熔化的冲击速度只要 2.1km/s, 发生气化的冲击速度是 4.8km/s, 另外, 铅的可压缩性也强, 即声速低, 易被压缩, 应该表现出 $C_1/\sqrt{Y_t/\rho}$ 和 n_1/C_1^2 的作用。

最后考察弹坑几何形状与 v 之间的关系。将三类实验数据都画在

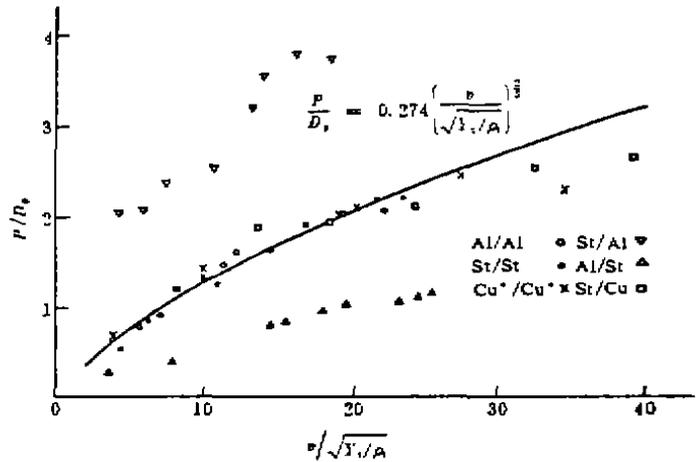


图 3.1 无量纲的弹坑深度和弹速的关系

Fig. 3.1 Non-dimensional penetration depth vs. impact velocity

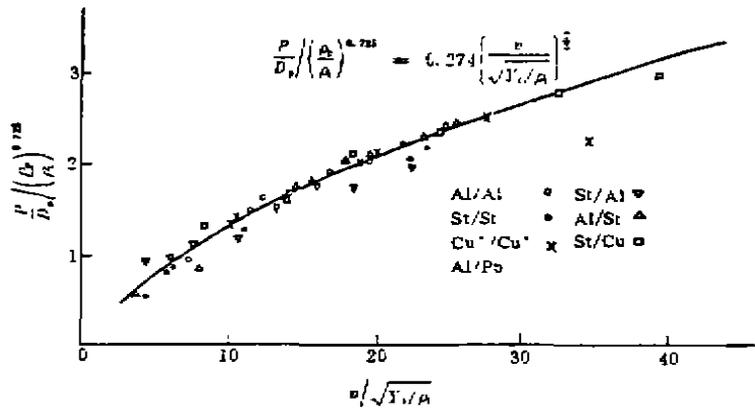


图 3.2 $\frac{P}{D_p} / \left(\frac{\rho_b}{\rho} \right)^{0.725} \sim \frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho}}$ 关系

Fig. 3.2 Relationship of $\frac{P}{D_p} / \left(\frac{\rho_b}{\rho} \right)^{0.725}$ vs. $\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho}}$

图 3.3 中, 很明显, 随着 v 提高, P/D 趋于 $1/2$, 即坑形趋于半球状。如弹材的惯性和强度比靶材高, 则半球形深, 反之则浅。第一类和 St/Cu 的实验向半球形演变的趋势特别明显, 而 St/Al 和 Al/St 这两组实验略差一些。

4 结束语

在轻气炮上进行了弹靶材料相同和不同、最高弹速达

7.5 km/s 的碰撞成坑实验。硬铝、钢、纯铜和黄铜为靶材时, 实验结果表明材料的惯性和强度起控制作用。整理得到经验关系式 (3.2)。铅靶成坑实验初步表明熔化、气化和可压缩性也起重要作用, 这几个因素的影响需要进一步研究。

致谢 参加本项工作的还有张正信、张振松、王岫云、赵秀兰、刘建军等同志。

参考文献

- 1 Westine P S, Mullin S A. Scale modelling of hypervelocity impact. *Int. J. Impact Engng.*, 1987 (5): 693
- 2 Zukas J A. et al. *Impact Dynamics*. John Wiley & Sons, 1982; 226
- 3 Charters A C, Summers J L. Some comments on the phenomena of high speed impact. *Dicennial Symp.*, U.S. NOL, Maryland; 1959
- 4 Herrmann W, Jones A H. Correlation of hypervelocity impact data. *5th Symp. On Hypervelocity Impact*, Denver, CO, 1961
- 5 Christman D R, Gehring J W. Analysis of highvelocity projectile penetration mechanics. *J. Appl. phys.*, 1960 (37): 1570~1580
- 6 Sedgwick R T, Hageman L J, Herrmann R G, et al. Numerical investigations in penetration mechanics. *Int. J. Engng. Sci.*, 1978, 16 (11): 859

CRATERING EXPERIMENTS WITH HYPERVELOCITY IMPACT UPON THICK METALLIC TARGETS

Sun Guangchen Tan Qingming Zao Chengxiou Ge Xuechen
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

Abstract The phenomenon of cratering during a hypervelocity impact of a spherical projectile upon a thick metallic target has been investigated experimentally, the highest velocity of projectile experiment with being 7.5 km/s. Seven sets of projectile-target material combinations were used. An empirical relationship

$$\frac{P}{D_p} = 0.274 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.725} \left[\frac{v}{\sqrt{Y_t/\rho_t}} \right]^{2/3}$$

is deduced from the experimental data, where P represents the penetration depth, D_p the crater diameter, ρ_p and ρ_t the density of projectile and target material respectively, and Y_t the dynamical yield strength of target material. The shape of the crater changed rapidly as the velocity increased, toward a roughly hemi-spherical shape for certain projectile-target material combinations.

Key words hypervelocity impact, penetration, cratering

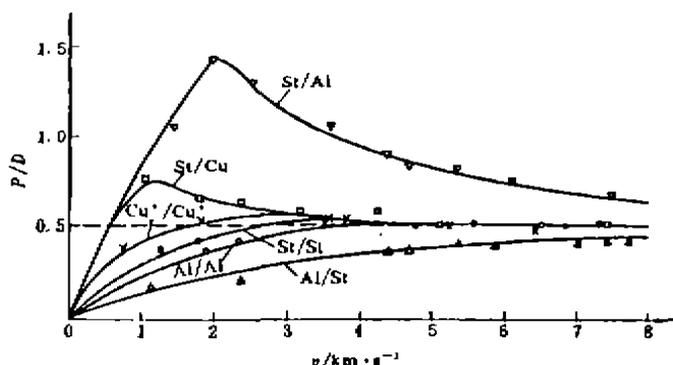


图 3.3 对于各种弹靶材料坑的深径比与弹速的关系
Fig. 3.3 Crater shape factor vs. impact velocity for several projectile-target material combinations