

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0129

镁合金弹丸 10 km/s 撞击铝靶成坑特性实验*

王马法, 周智炫, 黄洁, 罗庆, 龙耀, 焦德志, 柳森

(中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为获得 10 km/s 超高速撞击成坑特性, 采用内爆发射器开展了长径比 l/d_p 为 1/2、直径 d_p 为 0.8 cm 的镁合金弹丸撞击厚 5 cm 铝靶的超高速撞击实验, 获得了铝靶的撞击成坑尺寸和形貌特性, 结合文献数据, 分析了成坑形貌与 8 km/s 以下速度撞击坑的差异和弹丸长径比、速度、动能对成坑尺寸的影响。结果表明: 典型的撞击坑不仅包含中心成坑区, 还包含了破坏区, 成坑区近似半球形弹坑, 破坏区为自由表面剥落形成的浅坑; 坑深 P_c/d_p 为 1.5~2.0, 坑径 d_c/d_p 为 3~3.5, 坑形系数 P_c/d_c 为 0.50, 成坑效率 E/V_c 均值为 3.74 kJ/cm³; 对于 $l/d_p \leq 1$ 的弹丸, 采用等效直径对坑深进行归一化, 归一化后坑深与长径比无关, 与速度的 2/3 次幂成线性关系。

关键词: 成坑特性; 碰撞实验; 镁合金弹丸; 铝靶

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

Experiment on crater characteristics of aluminium targets impacted by magnesium projectiles at velocities of about 10 km/s

WANG Mafa, ZHOU Zhixuan, HUANG Jie, LUO Qing, LONG Yao, JIAO Dezhi, LIU Sen

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Crater characteristics formed by the impact of the 5 cm thick Al 6061 targets with magnesium projectiles with length-diameter ratio $l/d_p=1/2$ and diameter $d_p=0.8$ cm at velocity of 10 km/s were investigated. The implosion-driven launcher designed by McGill University was manufactured by China Aerodynamics Research and Development Center. Eight experiments were carried out and the obtained maximal projectile velocities were in the range of 9.36–11.43 km/s. The profiles and flight attitude of projectile were snapped by use of the sequence laser shadowgraph imaging instrument. The results show that the projectiles deform obviously during the launching period in some experiments, but more than half projectiles could hold the initial shape well. Craters on targets were recovered and analyzed. A shallow damage area appeared around the semi-spherical crater. Such crater feature was compared with those craters impacted at velocity lower than 8 km/s in literatures and from other experiments with different projectile materials and aluminum types of targets. Typical dimensions of craters were measured. The crater depths P_c/d_p was 1.5–2.0, crater diameters d_c/d_p was 3.0–3.5, crater-shape coefficient P_c/d_c was about 0.50 and cratering efficiency E/V_c was about 3.74 kJ/cm³. Finally, the influences of l/d_p , impact velocity and energy of projectiles on crater dimensions were analyzed along with the experimental data from literatures. An effective diameter of cylindrical projectile was proposed to reduce the effect of l/d_p on the crater depth. And a crater depth formula of aluminum targets impacted by projectiles with different materials and velocities were fitted. Results show that the typical impact crater should not only be the central semi-sphere crater, but also contain shallow damage area formed by surface spallation. The type of target material influences the crater feature significantly. However, the projectile material and flight attitude have little

* 收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(11802330)

第一作者: 王马法(1986—), 男, 博士, 助理研究员, fujianwmf@163.com

通信作者: 柳森(1967—), 男, 博士, 研究员, hvi@cardc.cn

influence on the crater feature. As for projectiles with $l/d_p \leq 1$, the crater depth normalized by effective diameter would not vary with l/d_p , but correlate with the impact velocity in form of 2/3 power law.

Keywords: crater characteristics; impact experiment; magnesium alloy projectile; thick aluminium target

超高速撞击成坑现象是超高速碰撞领域的一项重要研究内容,在天体碰撞、深空探测以及航天器防护等领域具有重要应用价值。对超高速撞击成坑问题,已开展了大量实验和模拟研究^[1]。但 8 km/s 以上的撞击成坑研究以数值模拟研究为主^[2-3],尤其缺乏 10 km/s 以上的实验数据。虽然有一些发射技术能够实现 10 km/s 以上速度的发射,如阻抗梯度飞片技术^[4-6]、磁驱动飞片技术^[7]、激光驱动飞片装置^[8]等,这些技术发射的弹丸飞片质量较小,且大都用于开展极端高压条件下材料的动力学特性研究,只在有少量用于撞击厚靶开展成坑问题的研究。如 Denardo^[9]利用轻气炮开展了聚乙烯弹丸对 2024 铝合金靶的成坑特性研究,分析了长径比对成坑尺寸的影响,长径比 1/3 的弹丸最高撞击速度达到了 11.3 km/s。目前,尚未见金属弹丸 10 km/s 速度撞击金属靶材成坑特性实验的相关报道。

在超高速气动物理靶上,采用口径 8 mm 内爆式超高速发射器^[10-11],以约 10 km/s 速度发射 $\varnothing 0.8 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 镁合金弹丸,撞击厚 5 cm 铝靶,获得金属弹丸 10 km/s 速度撞击下铝靶的成坑形貌和尺寸。通过与 8 km/s 速度撞击下典型成坑形貌对比,分析成坑形貌的特性,结合文献^[9]的实验数据,分析坑深、坑径、成坑体积等与弹丸长径比、撞击速度、动能、密度的关系,拟为超高速撞击成坑现象及机理研究提供参考。

1 实验设计

1.1 实验布局

图 1 为实验总体布局^[11],弹丸为 $\varnothing 0.8 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 的镁合金,靶材为厚 5 cm 的 6061 铝合金,弹丸从左往右发射,撞击面尺寸为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$,且均为正撞击。发射器置于厚壁防护筒内,防护筒和靶材置于真空罐,通过真空罐上的窗口对弹丸速度和飞行姿态进行测量。采用 5 组激光系统对弹丸经过的时刻进行记录,并利用间距与时间差获得弹丸经过相邻激光系统的平均速度。弹丸姿态和形貌采用 10 ns 级超高速序列激光阴影成像仪^[12-13]拍摄。

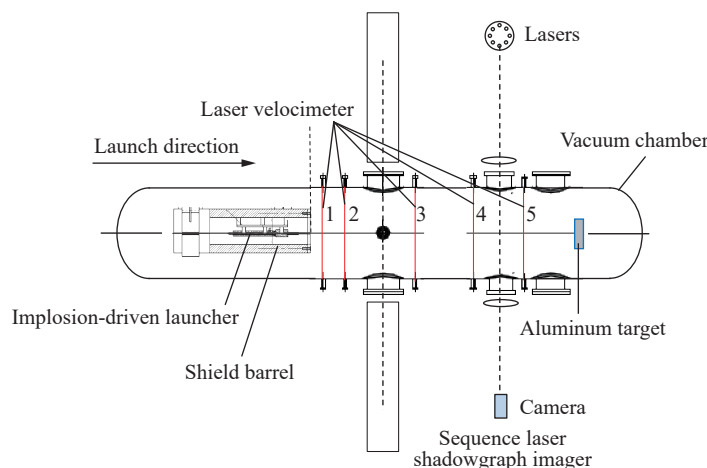


图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental setup

1.2 发射装置

采用口径 8 mm 的内爆发射器作发射装置^[10-11],如图 2 所示,主要包括发射管、发射管护套、高压

段、外壳、压缩管、弹丸以及装药等。发射管长度为 30.4 cm, 压缩管内径为 1.6 cm、长度为 49.5 cm, 压缩管外由厚 0.5 cm 的装药层包裹, 装药采用 7.1 km/s 爆速的炸药, 用于向内挤压压缩管, 形成虚拟活塞。装药外用厚 3.2 cm 的外壳约束炸药爆炸产物, 提高向内挤压能力。高压段长度为 14.5 cm、外径为 8.14 cm。以上所有结构的材料均为钢。弹丸材料为镁合金 ZK60, 密度约为 1.8 g/cm³, 结构如图 2 所示, 由剪切体和柱形发射体组成, 发射体与剪切体间通过剪切作用实现分离, 发射体质量约为 0.37 g。

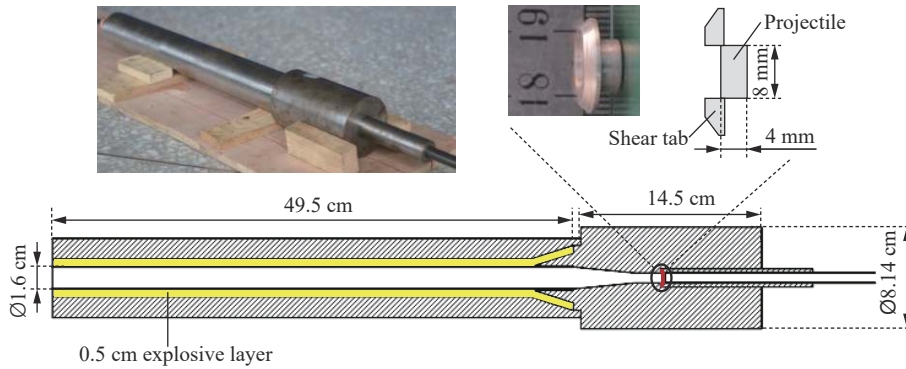


图 2 发射器结构

Fig. 2 Structure of implosion-driven launcher

2 实验结果与分析

采用氦气作为驱动气体, 驱动气体的初始压力为 5 MPa, 真空罐内抽真空, 真空压力约为 100 Pa, 共开展 8 次实验。

2.1 测试结果

8 次实验获得的速度结果见表 1, 表中 $v_{1,2}$ 为激光测速系统 1、2 之间的速度, 其中有些信号未测到, v 为测得的最大发射速度。可以看到, 各次实验测得的速度偏差较小, 与最大速度 v 的最大偏差为 1.7%。8 次实验测得的最大速度为 9.36~11.43 km/s。

表 1 激光测速系统测得的弹丸速度

Table 1 Projectile velocities by laser velocimeters

实验	$v_{1,2}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{2,3}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{3,4}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{4,5}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/%
ILT08		9.56	9.73	9.60	9.73	1.7
ILT09		10.28	10.27	10.28	10.28	0.1
ILT11		9.36	9.26		9.36	1.1
ILT12	9.77	9.74	9.75	9.77	9.77	0.3
ILT22	9.76	9.68	9.67		9.76	0.9
ILT24	10.18	10.14	10.13		10.18	0.5
ILT25	10.20	10.14	10.14		10.20	0.6
ILT28	11.43	11.39	11.38		11.43	0.4

拍摄到了表 1 中后 6 次实验弹丸形状, 如图 3 所示, 弹丸飞行方向为从左往右。可以看到, 弹丸均为一个整体弹丸。实验 ILT11 和 ILT12 的弹丸有一定程度变形, 如图中弹丸最大长度为弹丸直径 d_p , 垂直最大长度方向的最大厚度为弹丸长度 l , 则判读得到实验 ILT11 的弹丸长径比 l/d_p 为 0.605、翻转角度为 70°, 实验 ILT12 的 l/d_p 为 0.337(近似于 1/3)、翻转角度为 27°。实验 ILT22、ILT24、ILT25 和 ILT28 的弹丸均保持较完整的柱形, 长径比为 1/2。实验 ILT22 弹丸姿态与预设姿态相同, 实验 ILT24 弹丸姿态翻

转约 50° , 实验 ILT25 弹丸与预设姿态相比翻转了近 90° , 实验 ILT28 弹丸姿态翻转约 40° 。其中实验 ILT25 弹丸沿垂直于弹道方向翻转了近 90° , 因此在阴影照片中显示近似为圆形。

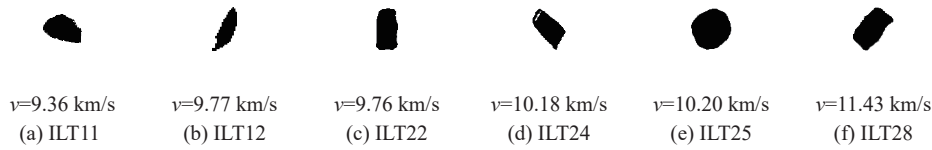


图 3 弹丸的激光阴影成像照片

Fig. 3 Photos of projectiles by laser shadowgraph imaging instrument

2.2 成坑形貌结果及分析

8 次实验靶材上的撞击坑如图 4 所示, 实验 ILT08 弹丸撞击靠近靶材边缘, 形成了一个缺口, 但仍可以清晰看到典型的半球形坑。从撞击实验结果可以看到, 撞击点中央形成了典型的半球形坑, 在半球形坑周围有一圈自由表面剥落形成的浅坑。因此, 镁合金弹丸以约 10 km/s 撞击铝靶的撞击坑应包括撞击中心的成坑区和周边材料破坏区, 以实验 ILT09 为例, 如图 5 所示, 成坑区近似为半球形, 破坏区为自由表面剥落形成的浅坑, 其边界近似为圆形或椭圆形。

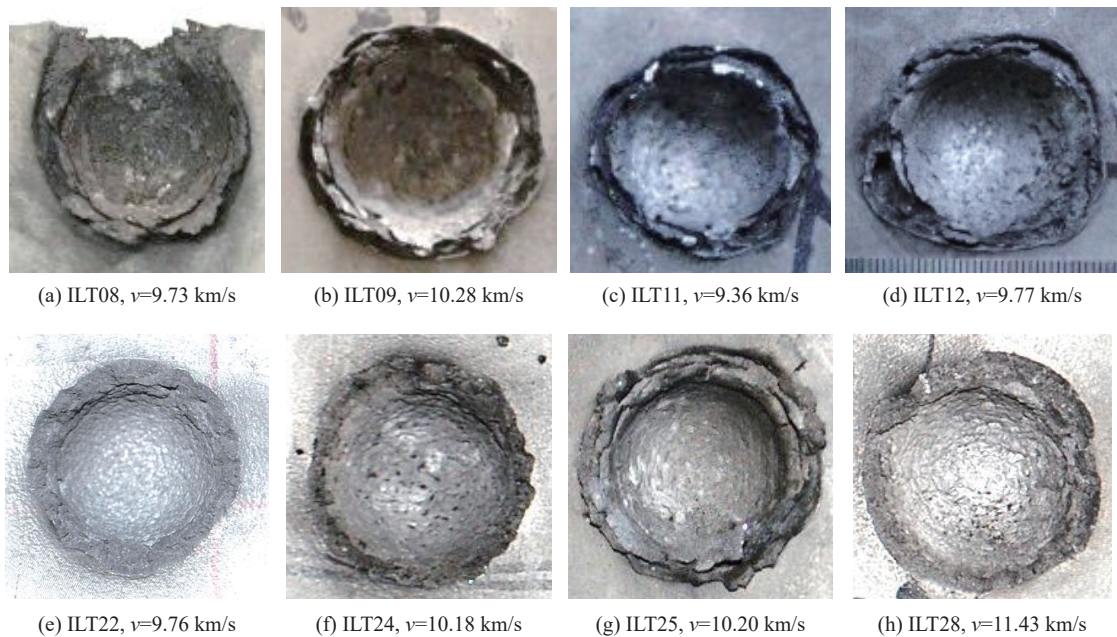


图 4 成坑形貌

Fig. 4 Crater shapes after experiments

文献 [3, 14-17] 中, 研究金属靶材成坑形貌时, 仅考虑了中心成坑区, 未见对破坏区进行描述。为分析破坏区形成的原因, 图 6 给出了不同材料铝靶在不同速度下的撞击坑形貌。对比图 6(a)~(c) 可以看到, 撞击速度约 6 km/s 时, 1100 靶在半球形坑周边形成卷边破坏, LY12 靶边缘有不规则的凸起但不卷边, 6061 靶则有表面剥落形成浅坑, 且在球形坑周边有凸起的片状材料。对比图 6(c)~(e) 可以看到, 在不同速度和不同弹丸材料撞击下, 6061 靶的成坑形貌较相似, 球形坑周边均有破坏区, 只是破坏区与约 10 km/s 速度撞击结果相比较小(见图 6(e)), 在研究成坑问题时容易被忽略。由此可见, 破坏区的形貌主要与靶材的材料相关。然而, 即使同为 6061 靶破坏区的形貌也不尽相同, 如图 4(e)~(f)、(h) 所示, 破坏区被全部剥离, 没有片状材料残留, 而图 4 中其他情形中则有凸起的片状材料。实验 ILT22、ILT24 和

ILT28 的弹丸翻转角度分别为 0°、50° 和 40°, 其他情形中弹丸翻转角度有 27°、70° 和近 90° 的, 两种剥落形貌的弹丸翻转角有交叉, 因此这个现象与弹丸的翻转角度没有必然联系。形成这个差异的原因, 还有待进一步深入研究。

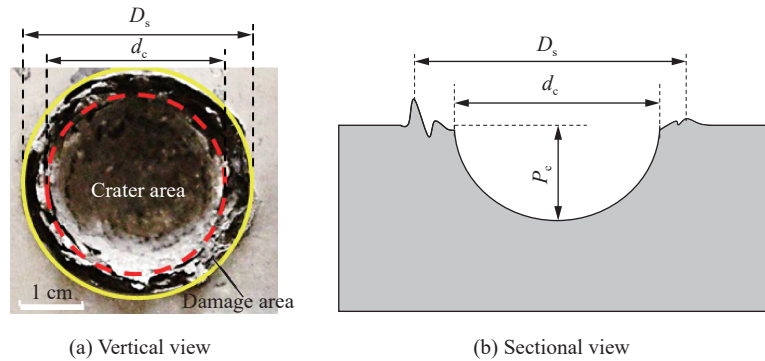


图 5 成坑区和破坏区划分
Fig. 5 Crater area and damage area

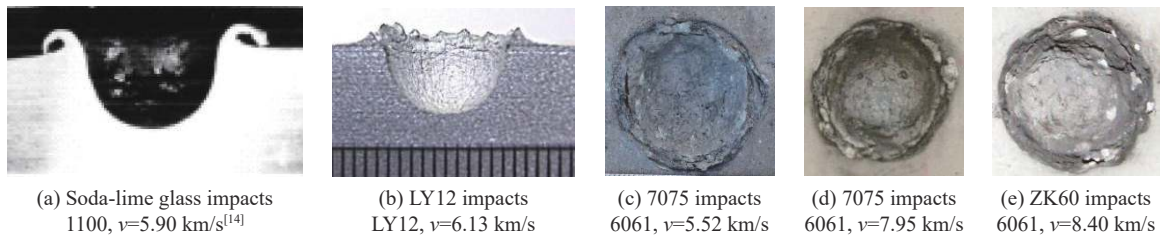


图 6 铝靶的典型成坑形貌
Fig. 6 Crater layouts of aluminum targets

2.3 成坑尺寸与分析

2.3.1 实验结果

将实验 ILT09 和 ILT12 靶材进行切割, 得到成坑剖面如图 7 所示。其中实验 ILT12 的剖面坑形并非球对称, 这主要是因为弹丸发生了严重变形, 在撞击面上质量偏心较大(见图 3(b))造成的。采用实物测量和 3D 模型测量相结合的方式, 对 8 次实验靶材的成坑区坑径 d_c 、坑深 P_c 和破坏区直径 D_s 进行测量, 结果见表 2。实验 ILT11 和 ILT12 的破坏区近似为椭圆, 直径取最大直径。实验的破坏区直径为 3.3~3.7 cm, 坑径为 2.4~2.8 cm, 坑深为 1.2~1.6 cm, 坑形系数 P_c/d_c 为 0.48~0.57。对比数据可以看到, 弹丸的变形和撞击姿态对成坑的对称性有一定影响, 但对成坑的尺寸影响不大, 撞击速度对坑深影响较大(如实验 ILT28 在 11.43 km/s 撞击下坑深为 1.6 cm)。因此, 在后续分析中, 本文实验数据的长径比均标为 1/2。另外, 实验 ILT08 的撞击点靠近靶材边缘, 成坑结果可能受到自由界面的影响, 因此在后续分析中剔除实验 ILT08。

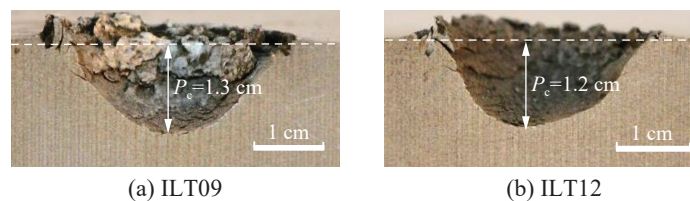


图 7 撞击坑切面形貌
Fig. 7 Cross-sections of impact craters

表 2 成坑尺寸测量结果

Table 2 Results of crater sizes

实验	D_s/cm	d_c/cm	P_c/cm	P_c/d_c
ILT08	3.5	2.5	1.4	0.56
ILT09	3.7	2.6	1.3	0.50
ILT11	3.4	2.5	1.2	0.48
ILT12	3.6	2.4	1.2	0.50
ILT22	3.3	2.5	1.3	0.52
ILT24	3.5	2.6	1.4	0.54
ILT25	3.7	2.8	1.4	0.50
ILT28	3.7	2.8	1.6	0.57

2.3.2 成坑尺寸与文献 [9] 结果对比分析

为了分析弹丸形状对成坑的影响, Denardo^[9] 对不同长径比 (弹丸长度 l 与弹丸直径 d_p 之比 l/d_p) 聚乙烯弹丸撞击铝靶开展了大量实验, 长径比 $l/d_p=1/6\sim 1$, 撞击速度最高 11.3 km/s, 获得了坑深 P_c/d_p 、坑径 d_c/d_p 、坑形系数 (坑深与坑径之比) P_c/d_c 和成坑效率 E/V_c (撞击能量与成坑体积之比) 与弹丸不同长径比 l/d_p 和撞击速度 v 的关系。将本文中实验结果与文献 [9] 中 $l/d_p \leq 1$ 的实验结果进行对比, 如图 8 所示。

由图 8(a) 可以看出, 在文献 [9] 中, 成坑深度 P_c/d_p 随撞击速度 v 、长径比 l/d_p 的增大而增大, 但增大的幅度并不算大。本文的坑深 P_c/d_p 也随撞击速度的增加而增加, 数值和增加的趋势均接近文献 [9] 中 l/d_p 为 1 的坑深 P_c/d_p 。本文中的镁合金弹丸材料密度近似于聚乙烯材料的 2 倍, 在相同速度下, 长径比 1 的聚乙烯弹丸与长径比 1/2 的镁合金弹丸在撞击面上具有相近的能量面密度, 因此虽然本文中长径比 1/2 的坑深接近于文献 [9] 中 l/d_p 为 1 的坑深。

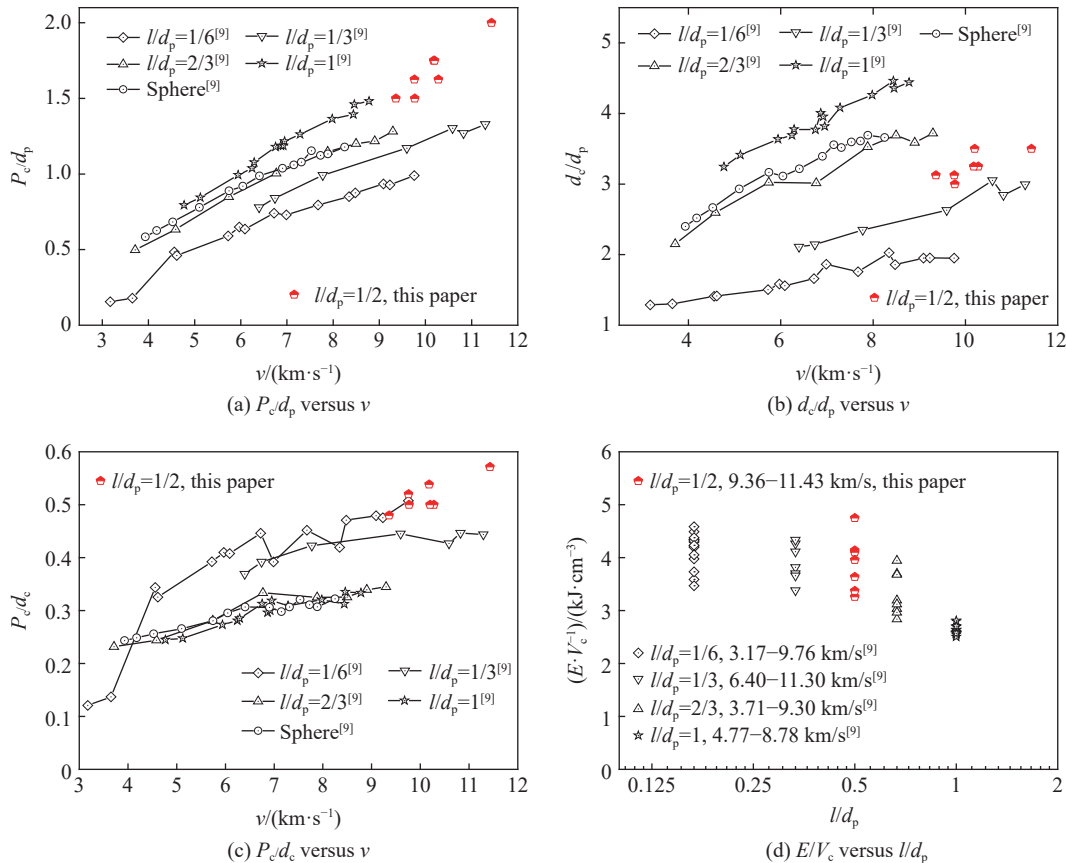


图 8 坑深、坑径、坑形系数和成坑效率

Fig. 8 Crater depth, crater diameter, crater-shape coefficient and cratering efficiency

由图 8(b) 可以看出, 坑径 d_c/d_p 随撞击速度和 l/d_p 的增大而增大。本文中坑径 d_c/d_p 约为 3.4, 处于 l/d_p 为 1/3~2/3 之间。

由图 8(c) 可以看出, 当 $l/d_p \leq 1$ 时, 坑形系数 P_c/d_c 随 l/d_p 的增大而减小, 随撞击速度的增大而增大并趋近于 0.5, 符合超高速碰撞成坑的半球说。本文中实验的坑形系数 P_c/d_c 约为 0.5, 亦符合半球说。撞击

速度为 11.43 km/s 时, 坑形系数为 0.57, 与半球说有偏差, 由于只有一次实验结果, 是否有偶然因素尚不清楚, 有待后续开展深入研究。

通常认为, 块状弹丸的超高速撞击成坑体积 V_c 与撞击能量 E 成正比。由图 8(d) 可以看出: 在文献 [9] 的实验中, 弹丸 $l/d_p \leq 1$ 时, E/V_c 随 l/d_p 的增大而减小。本文中, E/V_c 随长径比 l/d_p 的变化趋势和文献 [9] 的结果吻合。本文中成坑效率为 3.3~4.7 kJ/cm³, 数据最大的是实验 ILT12, 由于受弹丸变形的影响, 可能有较大的质量损失, 而计算中仍采用原质量(发射后弹丸质量无法精确测量), 所以成坑效率偏大。若排除实验 ILT12, 其他实验的成坑效率均值为 3.74 kJ/cm³。

2.3.3 坑深进一步讨论

文献 [18] 中, 给出了考虑靶屈服强度 Y_t 、弹丸材料密度 ρ_p 、靶材料密度 ρ_t 影响的球形弹丸坑深与速度 2/3 次幂的关系:

$$\frac{P_c}{d_p} = 0.27 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{2/3} \left(\sqrt{\frac{\rho_t}{Y_t}} v \right)^{2/3} \quad (1)$$

式中: d_p 为弹丸直径, Y_t 为靶屈服强度, ρ_p 和 ρ_t 分别为弹丸和靶的密度。本文和文献 [9] 中实验数据与式(1)的对比如图 9 所示, 其中本文的靶屈服强度取 470 MPa。可以看到, 本文数据和文献 [9] 长径比 1/6、1/3 和 1 的柱弹丸实验结果与式(1)吻合较差, 文献 [9] 长径比 2/3 的柱弹丸结果与式(1)较吻合。同等质量下球形弹丸直径和柱形弹丸直径的关系有:

$$\frac{d_{s,ph}}{d_p} = \left(\frac{3}{2} \frac{l}{d_p} \right)^{1/3} \quad (2)$$

当 $l/d_p=2/3$ 时, 球形弹丸直径与柱形弹丸直径相等, 因此采用弹丸直径直接对坑深归一化能够与式(1)吻合; l/d_p 偏离 2/3 越大, 球形弹丸直径与柱形弹丸直径偏离越大, 此时再采用弹丸直径直接对坑深进行归一化, 将不再与式(1)吻合。

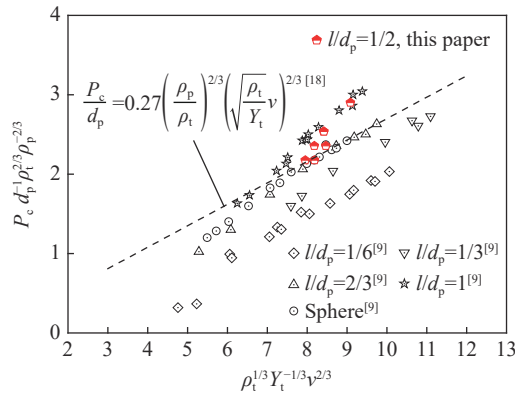


图 9 坑深与速度 2/3 次幂的关系

Fig. 9 Relationships between crater depths and 2/3 powers of impact velocity

为了将柱形弹丸结果与球形弹丸结果进行对比, 对不同长径比的弹丸采用等效直径 $d_{p,eff}$ 对坑深进行归一化, 等效直径 $d_{p,eff}$ 是指等质量的球形弹丸直径。归一化后的结果如图 10(a) 所示, 可以看到, $l/d_p \leq 1$ 和球形弹丸撞击下的坑深曲线几乎重叠在一起, 说明采用等效直径对坑深进行归一化能够有效消除弹丸长径比的影响。对弹丸速度归一化后的结果如图 10(b) 所示。通过线性拟合得到坑深与撞击速度的关系式为:

$$\frac{P_c}{d_{p,eff}} = 0.43 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{2/3} \left(\sqrt{\frac{\rho_t}{Y_t}} v \right)^{2/3} - 1.26 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{2/3} \quad (3)$$

可以看到, 本文的实验数据与式(3)吻合。

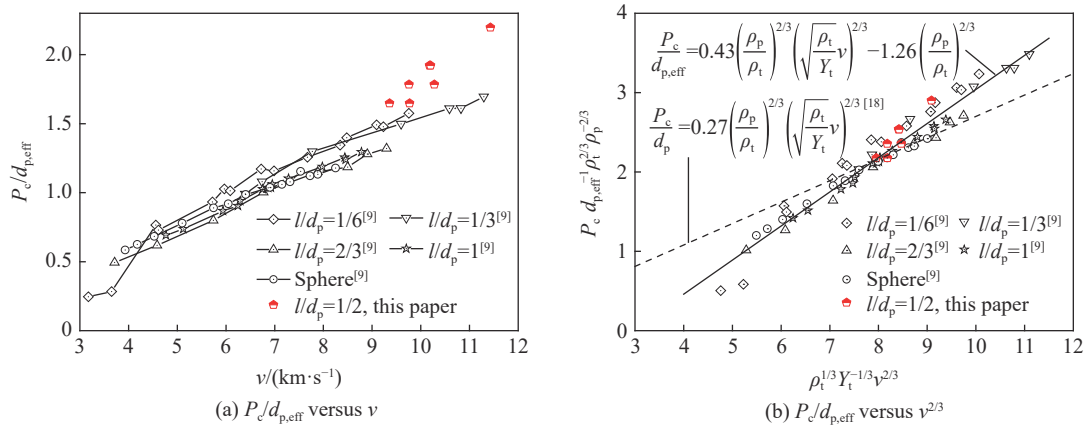


图 10 等效直径归一化坑深与撞击速度的关系

Fig. 10 Relationships between normalized crater depths by effective diameter and impact velocities

3 结 论

采用内爆发射装置开展了 $\varnothing 0.8 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ 镁合金弹丸以约 10 km/s 速度撞击 5 cm 厚铝靶的实验, 对撞击成坑的形貌进行了分析, 测量成坑尺寸并与文献 [9] 中实验结果进行了对比, 得到以下结论。

(1) 典型的撞击坑包含中心成坑区和中心坑周边材料的破坏区, 成坑区近似于半球形弹坑, 破坏区为自由表面剥落形成的浅坑, 形状近似为圆形或椭圆形, 破坏区的形貌主要与靶体材料相关。

(2) 在镁合金弹丸约 10 km/s 速度撞击下, 6061 铝合金靶的成坑直径为 $2.4 \sim 2.8 \text{ cm}$ (p_c/d_c 约为 0.50), 坑深为 $1.2 \sim 1.4 \text{ cm}$, 破坏区直径为 $3.3 \sim 3.7 \text{ cm}$ 。

(3) 对于长径比不大于 1 的弹丸, 坑径随长径比的变化规律与弹丸材料相关性不大, 坑深随长径比的变化规律受弹丸密度影响较大, 相同速度下, 密度越大坑深越大; 采用等效直径进行归一化后, 坑深与长径比无关, 且与速度的 $2/3$ 次幂成线性关系。

加拿大麦吉尔大学 Andrew Higgins 教授指导设计了内爆发射器结构, 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所李毅研究员、兰胜威副研究员等对实验结果分析和论文写作提供了大量建议。在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 杨益, 李晓军, 朱大明, 等. 超高速碰撞材料毁伤效应研究进展 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(5): 133–140. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2014.05.088.
YANG Y, LI X J, ZHU D M, et al. Research development of materials damage effect under hypervelocity impact [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(5): 133–140. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2014.05.088.
- [2] 汪庆桃, 张庆明, 翟喆, 等. 钨球高速侵彻中厚钢板成坑特性 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(23): 121–125. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.23.022.
WANG Q T, ZHANG Q M, ZHAI Z, et al. Character of crater for tungsten spheres with a high-velocity penetrating into a medium-thick steel plate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(23): 121–125. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.23.022.
- [3] 张伟, 马文来, 马志涛, 等. 弹丸超高速撞击铝靶成坑数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2006, 20(1): 1–5. DOI: 10.11858/gywlx.2006.01.001.
ZHANG W, MA W L, MA Z T, et al. Numerical simulation of craters produced by projectile hypervelocity impact on aluminum targets [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(1): 1–5. DOI: 10.11858/gywlx.2006.01.001.
- [4] THORNHILL T F, CHHABILDAS L C, REINHART W D, et al. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation

- using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1–12): 799–811. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.015.
- [5] 沈强, 张联盟, 王传彬, 等. 梯度飞片材料的波阻抗分布设计与优化 [J]. *物理学报*, 2003, 52(7): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3290.2003.07.020.
- SHEN Q, ZHANG L M, WANG C B, et al. Design and optimization of wave impedance distribution for flyer materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(7): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3290.2003.07.020.
- [6] 王青松, 王翔, 郝龙, 等. 三级炮超高速发射技术研究进展 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(3): 339–345. DOI: 10.11858/gywlb.2014.03.012.
- WANG Q S, WANG X, HAO L, et al. Progress on hypervelocity launcher techniques using a three-stage gun [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(3): 339–345. DOI: 10.11858/gywlb.2014.03.012.
- [7] 张旭平, 谭福利, 王桂吉, 等. 基于 CQ4 的磁驱动 10 km/s 以上超高速飞片发射 [C] // 第八届全国空间碎片学术交流会. 北京, 2015: 385–390.
- [8] 曹燕, 牛锦超, 牟永强, 等. CAST 激光驱动微小飞片及其超高速撞击效应研究进展 [J]. *航天器环境工程*, 2015, 32(2): 162–175. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.02.005.
- CAO Y, NIU J C, MU Y Q, et al. Recent progresses of laser-driven flyer technique and micro-space debris hypervelocity impact tests in China Academy of Space Technology [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(2): 162–175. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.02.005.
- [9] DENARDO B P. Projectile shape effects on hypervelocity impact craters in aluminum: TND-4953 [R]. USA: NASA, 1968.
- [10] HUNEAULT J. Development of an implosion-driven hypervelocity launcher for orbital debris impact simulation [D]. Montreal: McGill University, 2013.
- [11] 王马法, HIGGINS A J, 焦德志, 等. 内爆驱动式超高速发射技术的初步研究 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(3): 033301. DOI: 10.11858/gywlb.20190870.
- WANG M F, HIGGINS A J, JIAO D Z, et al. Preliminary simulation and experimental study on implosion-driven hypervelocity launching technology [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(3): 033301. DOI: 10.11858/gywlb.20190870.
- [12] 谢爱民, 黄洁, 宋强, 等. 多序列激光阴影成像技术研究及应用 [J]. *实验流体力学*, 2014, 28(4): 84–88. DOI: 10.11729/syltlxpz04.
- XIE A M, HUANG J, SONG Q, et al. Research and application of multi sequences laser shadowgraph technique [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(4): 84–88. DOI: 10.11729/syltlxpz04.
- [13] 宋强, 黄洁, 文雪忠, 等. 10 ns 级序列激光阴影成像仪在超高速瞬态测量中的应用 [C] // 中国力学大会-2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集. 北京: 中国力学学会, 2017: 718–723.
- [14] CHRISTIANSEN E L, ARNOLD J, DAVIS A, et al. Handbook for designing MMOD protection: NASA/TM-2009-214785 [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 2009.
- [15] CHRISTIANSEN E L, CYKOWSKI E, ORTEGA J. Highy oblique impacts into thick and thin targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1–4): 157–168. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90017-2.
- [16] HARRISON W, LOUPIAS C, OUTREBON P, et al. Experimental data and hydrocode calculations for hypervelocity impacts of stainless steel into aluminium in the 2–8 km/s range [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 17(1–3): 363–374. DOI: 10.1016/0734-743X(95)99862-L.
- [17] HAYHURST C J, RANSON H J, GARDNER D J, et al. Modelling of microparticle hypervelocity oblique impacts on thick targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 17(1–3): 375–386. DOI: 10.1016/0734-743X(95)99863-M.
- [18] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 87–103.

(责任编辑 丁峰)