文章编号:1000-5773(2007)04-0347-07

铝球弹丸超高速斜撞击薄铝板特性研究*

管公顺,哈 跃,庞宝君

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:利用 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板,模拟空间碎片对航天器防护屏的超高速撞击作用。分析了铝合金薄板超高速斜撞击穿孔特性与弹丸滑弹返溅特性,建立了铝合金球形弹丸超高速斜撞击铝合金薄板的穿孔经验公式。弹丸撞击速度分别为 2.58、3.56 和 4.31 km/s,撞击角度为 10°~80°。实验结果表明:铝合金薄板超高速斜撞击椭圆穿孔尺寸与撞击速度和撞击角度有关,直径为 3.97 mm 的铝合金球形弹丸超高速斜撞击厚度为 1 mm 的铝合金薄板时,发生滑弹返溅的临界撞击角在 30°~40°之间。最大滑弹返溅角随着撞击角的增大而逐渐减小,此时滑弹返溅碎片云的影响范围缩小,但破坏能力增强。弹丸撞击速度对铝合金薄板超高速斜撞击穿孔的椭圆度影响较小。

关键词:爆炸力学;超高速斜撞击;薄铝板;穿孔尺寸;空间碎片

中图分类号:V423.41;O347.3 **文献标识码**:A

1 引 言

空间碎片对航天器的撞击绝大多数是超高速斜撞击[1],在研究航天器空间碎片防护结构高速撞击特性时,必须把斜撞击作为一种普遍存在的现象。研究表明,空间碎片高速撞击在轨航天器表面时,其中 90%以上的撞击角要大于 10°。斜撞击所产生的二次碎片云覆盖范围更大,同时,斜撞击所产生的滑弹碎片云对航天器外部仪器设备也造成了严重威胁。因此,研究防护结构超高速斜撞击特性对于航天器空间碎片风险评估和防护结构设计具有重要的工程意义。国内外研究者在这方面已经进行了许多有益的探索:Burchell[2]分析了撞击角对厚玻璃靶斜撞击坑尺寸的影响;Lamontage[3]对碳纤维复合材料的高速斜撞击损伤效应进行了研究;Swale、Maiden 和 Nysmith[4]分别给出了铝球弹丸高速正撞击铝板穿孔直径的经验方程;最近,我国研究者[5-7]对国产铝合金板的超高速撞击损伤规律进行了实验和数值模拟研究,目的是为了进一步研究国产铝合金薄板材料的超高速斜撞击穿孔特性。

本研究利用二级轻气炮发射 2017 铝合金球形弹丸,在不同角度下对 2A12 铝合金薄板进行了超高速斜撞击实验,得到了铝合金薄板在不同撞击速度区间内的斜撞击损伤模式,分析了 2A12 铝合金薄板撞击穿孔尺寸与弹丸直径、撞击速度及撞击角度等撞击参数的关系。通过对实验数据的回归分析,得到了预测 2A12 铝合金薄板超高速斜撞击穿孔尺寸的经验公式。

实验是在哈尔滨工业大学空间碎片超高速撞击研究中心的二级轻气炮上进行的。二级轻气炮发射系统一级泵管口径为 57 mm,二级发射管口径分别为 7.6 mm 和 10 mm。一级驱动气体为氮气,二级驱动气体为氢气。速度测量采用磁感应方法,测量精度高于 2%。实验使用了 2017 铝合金球形弹丸,直径分别为 3.18、3.97、5.00 和 6.35 mm,撞击速度分别为 2.58、3.56 和 4.31 km/s,撞击角度为 10°~80°。铝合金靶板材料为 2A12,厚度为 1.0 mm。靶舱内部压力小于 200 Pa,环境温度为室温。本研究未对空间轨道上的失重情况进行实验模拟。

* **收稿日期**:2006-11-17;**修回日期**:2007-01-10

作者简介:管公顺(1969—),男,博士后,主要从事超高速撞击动力学理论、实验及航天器空间碎片防护等研究. E-mail:hitggsh@163.com

2 宏观损伤模式

金属球形弹丸超高速斜撞击金属薄板时，通常会在靶板上产生椭圆形的穿孔，如果撞击角较大，还会出现弹丸材料的滑弹返溅现象。

图 1 是 2A12 铝合金薄板在不同撞击角时的撞击穿孔模式。2017 铝合金球形弹丸以 4.31 km/s 的速度撞击厚度为 1 mm 的 2A12 铝合金板，当撞击角分别为 10°、20°、30°、40°和 50°时，靶板撞击穿孔边缘光滑，且无明显翻边现象，如图 1(a)和图 1(b)所示。

当弹丸撞击角度分别为 60°、70°和 80°时，靶板撞击穿孔边缘则出现了小裂纹和翻边现象，同时，穿孔处出现了弹丸材料滑弹撞击的痕迹，且撞击角度越大，滑弹撞击痕迹越严重，如图 1(c)、图 1(d)和图 1(e)所示。

在实验中，当撞击角为 80°时，在撞击速度分别为 4.31 km/s 和 3.56 km/s 两种情况下，弹丸材料均发生了完全滑弹，如图 1(e)和图 1(f)所示。虽然此时靶板也被击穿，但已无弹丸材料穿过靶板，靶板后面只有少量崩落的靶板碎片。

由上述实验结果可以发现，2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板后，在靶板上产生的宏观可见破坏是：在靶板撞击点处形成一个椭圆形的穿孔，对于厚度为 1 mm 的 2A12 铝合金靶板，当撞击角小于 50°时，穿孔边缘整齐，无裂纹、撕裂及明显的翻边现象。当撞击角大于 50°时，穿孔边缘开始出现裂纹和翻边现象，且撞击速度较高时，穿孔边缘开始出现撞击弹丸材料滑弹的痕迹。

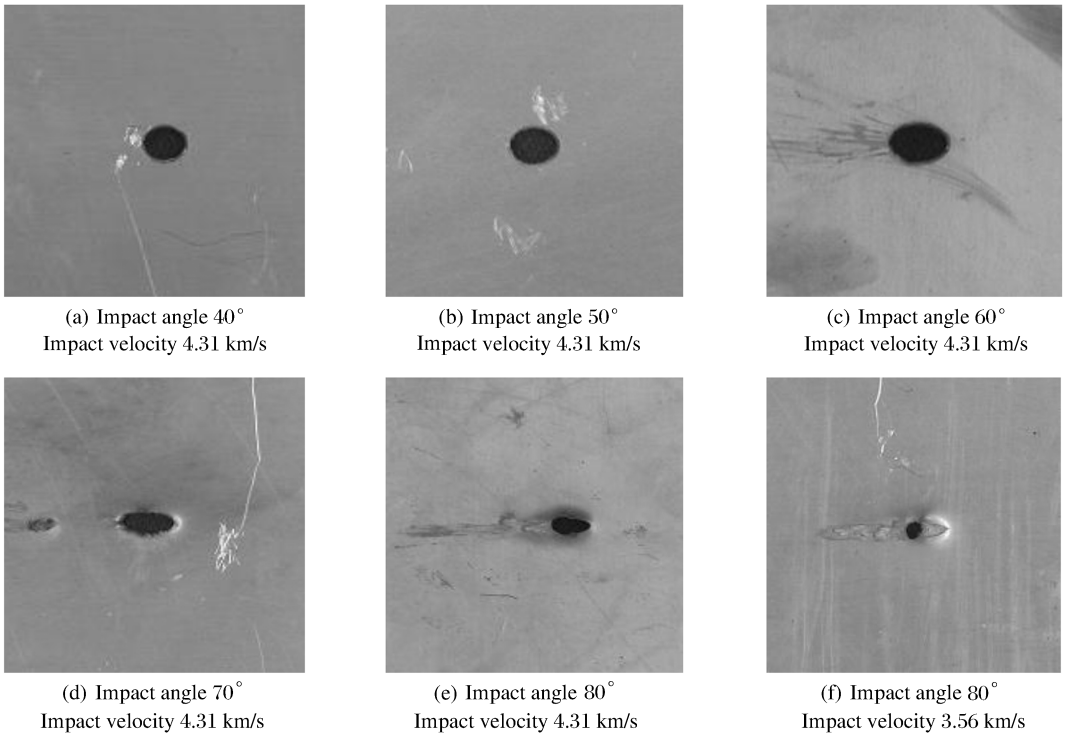


图 1 1 mm 厚 2A12 铝合金板上的典型损伤形式

Fig. 1 Typical damage patterns in the 1 mm thick 2A12 alloy plate

3 撞击损伤特性

3.1 撞击角对椭圆穿孔尺寸的影响

铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板穿孔特性参数主要为椭圆形穿孔尺寸 D_x、D_y 以及穿孔的椭圆度 D_x/D_y。D_x 为弹丸入射线在靶板撞击面上投影方向的椭圆穿孔长度，称为椭圆穿孔长轴。D_y 为垂直于 D_x 方向上的椭圆穿孔长度，称为椭圆穿孔短轴。

撞击参数主要为弹丸直径 d_p、撞击速度 v 和撞击角 θ。滑弹特性参数主要为滑弹碎片云的最大滑弹返溅角 β_{max}。撞击角 θ 是指弹丸撞击飞行方向与靶板撞击面法线方向的夹角。最大滑弹返溅角 β_{max} 是指滑弹返溅碎片运动方向与靶板撞击面的最大夹角,如图 2 所示。

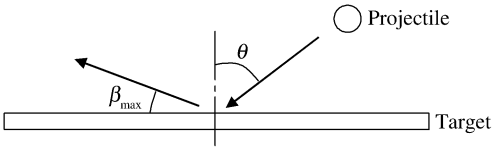


图 2　弹丸高速斜撞击 2A12 铝合金板示意图

Fig. 2　Schematic diagram showing the inclined impact of a hypervelocity projectile on 2A12 aluminum alloy plate

弹丸材料发生滑弹返溅现象的临界撞击角 θ_c 是指弹丸超高速斜撞击靶板时弹丸材料发生滑弹返溅现象的最小撞击角。当 θ 小于 θ_c 时,弹丸材料不会发生滑弹返溅现象,此时弹丸全部穿过靶板。当 θ 大于 θ_c 时,弹丸材料开始发生滑弹返溅,此时只有部分弹丸材料穿孔靶板,与靶板材料形成透射碎片云,而其余弹丸材料则发生滑弹,形成滑弹返溅碎片云。

铝合金球形弹丸超高速斜撞击铝合金薄板时,在撞击速度相同的情况下,撞击角不同,在靶板上形成了不同尺寸的椭圆形穿孔。铝合金靶板厚度为 1 mm,弹丸直径为 3.97 mm,实验选取了 3 种撞击速度,分别为 2.58、3.56 和 4.31 km/s,撞击角度分别为 10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°和 80°。由于撞击角为 80°时弹丸材料发生了完全滑弹,因此下面只分析了撞击角在 10°～70°范围内 2A12 铝合金薄板超高速斜撞击的穿孔特性。图 3 和图 4 分别给出了椭圆形穿孔长轴 D_x 和短轴 D_y 在三种撞击速度下随撞击角 θ 的变化规律。

由图 3 中的实验点可以看出,对于相同的铝合金板,在其它撞击条件不变的情况下,椭圆穿孔长轴尺寸 D_x 随着撞击角 θ 的增大而增大,二者接近于正比关系,且在撞击角相同的情况下,椭圆穿孔长轴尺寸 D_x 随着撞击速度 v 的增加而增大。

与椭圆穿孔长轴相比,短轴尺寸 D_y 受撞击角的影响较小,从图 4 中的实验点可以看出,当撞击角小于 50°时,对于三种撞击速度,随着撞击角的增加,其椭圆穿孔短轴尺寸略有增大,但增加的幅度很小。当撞击角大于 50°后,椭圆穿孔短轴尺寸开始显著减小,其主要原因是,当撞击角大于 50°后,撞击弹丸的滑弹体积已超过弹丸的透射体积,从而使超高速斜撞击弹丸的穿透能力下降。从图中还可以看出,与超高速正撞击相同,在撞击角相同的情况下,椭圆穿孔短轴尺寸 D_y 随撞击速度的增加而增大。

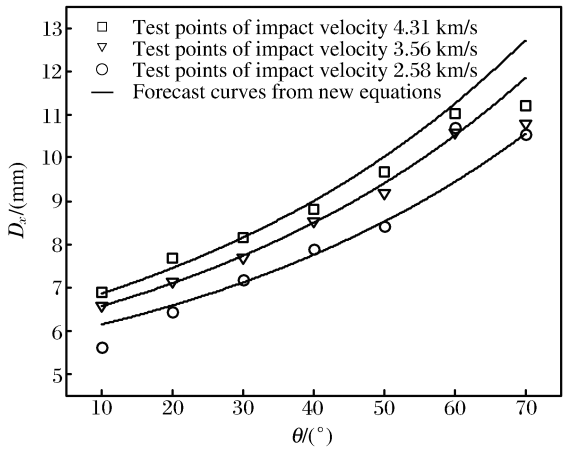


图 3　椭圆穿孔长轴(D_x)与撞击角(θ)的关系

Fig. 3　Relationship between major axis of ellipse (D_x) and impact angle (θ)

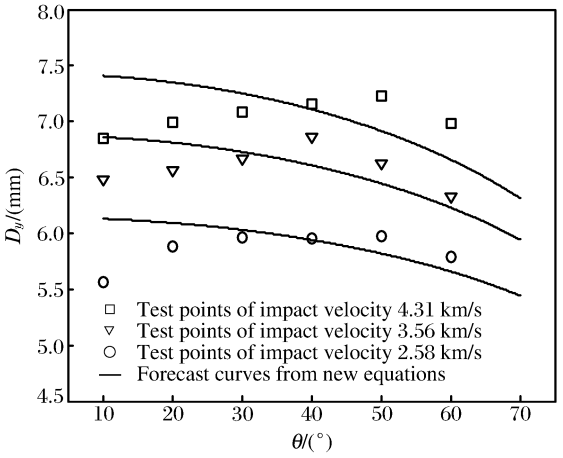


图 4　椭圆穿孔短轴(D_y)与撞击角(θ)的关系

Fig. 4　Relationship between minor axis of ellipse (D_y) and impact angle (θ)

3.2　撞击角对椭圆穿孔椭圆度的影响

穿孔椭圆度为椭圆穿孔长轴长度与短轴长度之比 D_x/D_y,它反映了椭圆穿孔的几何形状。图 5 给出了 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金靶板椭圆穿孔的椭圆度随弹丸撞击角的变化规律。

从图中可以看出,穿孔的椭圆度 D_x/D_y 随撞击角 θ 的增大而增大。其主要原因是,在弹丸材料不发生完全滑弹的情况下,当弹丸撞击角增加时,椭圆穿孔的长轴尺寸增加速度较快,而短轴尺寸几乎不

增加，甚至当撞击角大于 50°后，短轴尺寸又开始显著下降。图 5 中比较了 3 种撞击速度下的穿孔椭圆度随弹丸撞击角变化的规律，可以发现，弹丸撞击速度对铝合金薄板斜撞击穿孔的椭圆度影响较小。

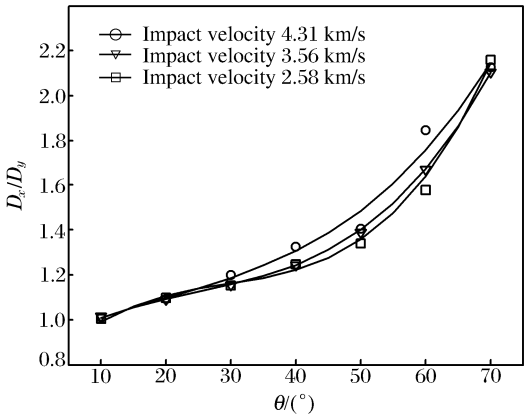


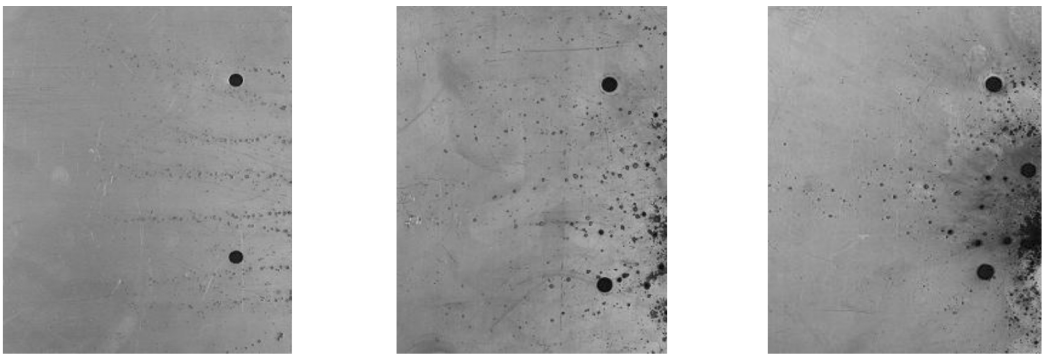
图 5 穿孔椭圆度(D_x/D_y)与撞击角(θ)的关系

Fig. 5 Relationship between perforation ellipticity (D_x/D_y) and impact angle (θ)

3.3 滑弹返溅特性

最大滑弹返溅角反映了弹丸滑弹返溅碎片云所能影响的最大范围。在 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板的实验中，当撞击角分别为 10°和 20°时，滑弹返溅观察板上未发现弹丸滑弹碎片撞击的痕迹。当撞击角增大到 30°时，观察板上可以发现微小的撞击坑和材料喷射的痕迹，但撞击坑不明显。当撞击角分别为 40°、50°、60°、70°和 80°时，滑弹返溅观察板上出现了明显的弹丸滑弹返溅碎片的撞击坑，如图 6 所示。

图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别给出了撞击角为 50°、60°和 70°时观察板受到滑弹返溅碎片云撞击的损伤情况。图中上下对称的两个圆孔为螺栓固定孔，而非实验撞击所致。从图中可以看出，在相同的斜撞击速度下，随着弹丸撞击角度的增加，滑弹返溅碎片云的影响范围将逐渐减小，而观察板的撞击损伤程度却逐渐加重。这说明随着弹丸撞击角的增加，观察板受到的撞击动能更大，而且更集中。



(a) Impact angle 50° (b) Impact angle 60° (c) Impact angle 70°

图 6 滑弹返溅损伤情况

Fig. 6 Damage pattern of projectile leaping away

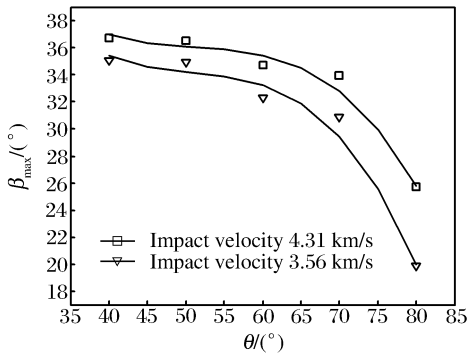


图 7 最大滑弹返溅角(β_{max})与撞击角(θ)的关系

Fig. 7 Relationship between maximal ricochet angle(β_{max}) and impact angle (θ)

根据实验中滑弹返溅观察板上出现撞击坑时所对应的弹丸撞击角，对于 1 mm 厚的 2A12 铝合金板，采用直径为 3.97 mm 的 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击时，出现滑弹返溅的临界撞击角 θ_c 应在 30°～40°之间。

图 7 给出了 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板时的最大滑弹返溅角 β_{max} 随弹丸撞击角 θ 的变化规律，此时撞击速度分别为 3.56 和 4.31 km/s。从图中可以看出，最大滑弹返溅角随着弹丸撞击角的增大而逐渐减小，当撞击角小于 60°时，最大滑弹返溅角减小的速度较慢，当撞击角大于 60°后，最大滑弹返溅角减小的速度较快。

4　预测斜撞击穿孔公式

薄靶板超高速斜撞击穿孔特征是各撞击参数、材料性能参数与结构参数的综合效应,包括弹丸材料性能、弹丸直径、撞击速度、撞击角度、靶板材料性能和靶板厚度等。因此,可以将球形弹丸超高速斜撞击薄靶板所产生的穿孔直径表示为弹丸参数和靶板参数的函数。然后再根据量纲理论 π 定理,将各参数表示为相互独立的无量纲的量,最后用这些无量纲的量组成一个用于描述薄板超高速斜撞击穿孔尺寸的关系式。由于主要研究的是铝合金球形弹丸超高速斜撞击铝合金薄板的穿孔尺寸,因此,可以将与弹丸和靶板材料性能有关的参数去掉,则椭圆穿孔的长轴尺寸 D_x 和短轴尺寸 D_y 可分别表示为如下形式

$$\frac{D_x-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=f\left(\frac{v}{c},\mathrm{e}^{\theta},\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right) \tag{1}$$

$$\frac{D_y-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=f\left(\frac{v}{c},\cos\theta,\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right) \tag{2}$$

式中:d_p 为弹丸直径,v 为撞击速度,θ 为撞击角度,c 为铝合金板材料的声速,t 为铝合金板厚度。

将(1)式和(2)式分别写成幂级数的形式,方程形式如下

$$\frac{D_x-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=X_1\left(\frac{v}{c}\right)^{X_2}\mathrm{e}^{X_3\theta}\left(\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right)^{X_4} \tag{3}$$

$$\frac{D_y-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=X_5\left(\frac{v}{c}\right)^{X_6}\cos^{X_7}\theta\left(\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right)^{X_8} \tag{4}$$

式中:$X_1\sim X_8$ 为待定系数。

分别对(3)式和(4)式两边进行对数运算,利用高速撞击实验数据,应用多变量线性最小二乘法确定待定系数 $X_1\sim X_8$,并代入原式,得到了预报 2017 铝合金球形弹丸超高速斜撞击 2A12 铝合金薄板的椭圆穿孔尺寸参数经验公式

$$\frac{D_x-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=1.051\left(\frac{v}{c}\right)^{0.556}\mathrm{e}^{1.060\theta}\left(\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right)^{0.324} \tag{5}$$

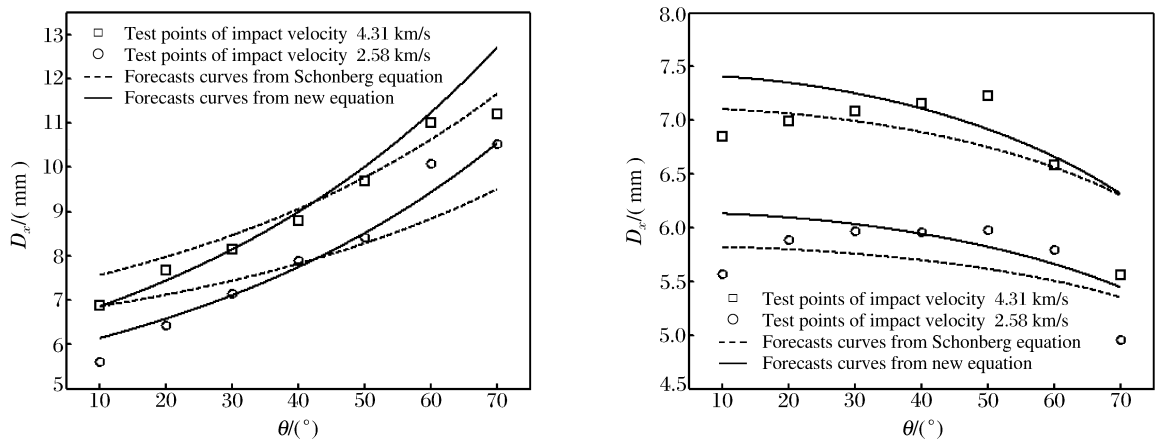
$$\frac{D_y-d_\mathrm{p}}{d_\mathrm{p}}=2.821\left(\frac{v}{c}\right)^{0.906}\cos^{0.360}\theta\left(\frac{t}{d_\mathrm{p}}\right)^{0.723} \tag{6}$$

公式(5)和公式(6)适用的速度范围是 1.50～4.50 km/s。

利用预测公式(5)和公式(6)得到了 2A12 铝合金板超高速斜撞击椭圆穿孔特性参数 D_x 和 D_y 随撞击角度 θ 变化的关系曲线,如图 3 和图 4 所示。

可以看出,预测曲线与实验结果总体上符合得较好,但仍存在一些差距,特别是在撞击角较大时,预测结果与实验结果相差较大。其主要原因是,对于较大的撞击角,弹丸撞击靶板后的滑弹返溅较为严重,且存在较大的随机性。另外,用于回归分析的实验数据还不够充分,因此在取得更多的实验数据后,还需对其进行修正。

图 8(a)和图 8(b)分别给出了针对不同撞击速度,利用 Schonberg 方程[8]、预测公式(5)和公式(6)所得到的椭圆穿孔尺寸 D_x 和 D_y 随撞击角变化的关系曲线,此时弹丸直径为 3.97 mm。从图中可以看出,由预测经验公式得到的曲线与实验结果符合得相对较好,而由 Schonberg 方程得到的曲线与实验结果存在一些差距,这说明在不同条件下所获得的经验公式均有其适用对象,预测公式(5)和公式(6)的适用对象为 2A12 铝合金材料。



(a) Relationship between major axis of ellipse (D_x) and impact angle (θ)

(b) Relationship between minor axis of ellipse (D_y) and impact angle (θ)

图 8 实验结果与 Schonberg 方程、预测公式结果的比较

Fig. 8 Comparison of results obtained from equations provided by Schonberg, new equations and experimental data

5 结 论

(1) 利用二级轻气炮发射铝合金球形弹丸对 2A12 铝合金薄板进行了超高速斜撞击实验。当弹丸直径为 3.97 mm,靶板厚度为 1 mm 时,发生滑弹返溅的临界撞击角在 30°～40°之间。最大滑弹返溅角随着撞击角的增大而逐渐减小,同时滑弹返溅碎片云的影响范围缩小,但破坏能力增强。

(2) 在不同撞击速度区间内,铝合金薄板斜撞击损伤模式不同,弹丸撞击速度对铝合金薄板超高速斜撞击穿孔的椭圆度影响较小。

(3) 通过对实验数据的回归分析,得到了预测 2A12 铝合金薄板超高速斜撞击穿孔尺寸的经验公式。

References:

[1] Christiansen E L. Highly Oblique Impacts into Thick and Thin Targets [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14: 157-168.

[2] Burchell M J, Gey I D S. Oblique Hypervelocity Impact on Thick Glass Targets [J]. Mater Sci Eng, 2001, A303: 134-141.

[3] Lamontage C G, Manuelpillai G N, Taylor E A, et al. Normal and Oblique Hypervelocity Impact on Carbon Fibre/Peek Composites [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23: 519-532.

[4] Scott A H. Determination of an Empirical Model for the Prediction of Penetration Hole Diameter in Thin Plates from Hypervelocity Impact [J]. Int J Impact Eng, 2004, 30: 303-321.

[5] Guan G S, Zhang W, Pang B J, et al. A Study of Penetration Hole Diameter in Thin Al-Plate by Hypervelocity Impact of Al-Spheres [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 132-138. (in Chinese)
管公顺,张 伟,庞宝君,等. 铝球弹丸高速正撞击薄铝板穿孔研究 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(2): 132-138.

[6] Guan G S, Pang B J, Ha Y, et al. Experimental Investigation of High-Velocity Impact on Aluminum Alloy Whipple Shield [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 461-466. (in Chinese)
管公顺,庞宝君,哈 跃,等. 铝合金 Whipple 防护结构高速撞击实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 461-466.

[7] Guan G S, Pang B J, Chi R Q, et al. A Study of Damage in Aluminum Dual-Wall Structure by Hypervelocity Impact of Al-Spheres [J]. Key Engineering Materials, 2006, 324-325: 197-200.

[8] Schonberg W P. Hypervelocity Impact Penetration Phenomena in Aluminum Space Structure [J]. J Aerospace Eng, 1990, 3(3): 173-185.

Investigation on Damage Characteristics of Thin Al-Plates by Oblique Hypervelocity Impact of Al-Sphere

GUAN Gong-Shun, HA Yue, PANG Bao-Jun

(*Research Institute of Composites, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: The oblique hypervelocity impacts of space debris on bumper of spacecrafts were studied through 2017 aluminum spheres impacting on thin 2A12 aluminum alloy sheets at different angles. The penetration hole characteristics of single-wall shields and the ricochet characteristics of projectiles were analyzed. The equations for the hole size of oblique hypervelocity impact penetration into thin aluminum alloy sheets were derived. Impact velocities were 2.58 km/s, 3.56 km/s and 4.31 km/s respectively. Impact angles ranged from 0° to 80°. The results indicated that the penetration hole size in thin aluminum alloy sheets depended on the impact velocity and impact angle. When an aluminum alloy sphere of 3.97 mm diameter impacted at hypervelocity on the thin aluminum alloy sheet of 1 mm thickness at different angles, the critical impact angle was between 30° and 40° in which projectile leaped away from the target partially. As impact angle increased, the maximum ricochet angle decreased, and the distributing area of ricochet debris cloud reduced. Impact velocity has little effect on the penetration hole ellipticity of thin aluminum alloy sheets under oblique hypervelocity impact.

Key words: mechanics of explosion; hypervelocity oblique impact; thin aluminum sheet; penetration hole size; space debris