文章编号：1000-5773(2012)01-0001-06

铝球弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时后板的损伤特性*

管公顺，哈　跃，庞宝君

（哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨　150080）

摘要：为了研究空间碎片对航天器防护结构的高速斜撞击损伤特性，采用二级轻气炮发射铝球弹丸，对铝 Whipple 防护结构进行高速斜撞击实验。弹丸直径为 3.97 mm，撞击速度为 1.14～5.35 km/s，撞击角度为 0°～70°。实验得到了铝 Whipple 防护结构在不同撞击速度区间的后板损伤模式，分析了后板撞击损伤及弹坑分布特性，建立了预测铝球弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时后板弹坑分布的经验公式。结果表明：在大角度斜撞击条件下，对于一定的撞击速度，铝 Whipple 防护结构的后板弹坑分布会出现两个区域；弹丸的撞击破碎临界速度将影响后板损伤随撞击角的变化关系；对于铝 Whipple 防护结构，存在使后板撞击损伤最严重的临界撞击角。

关键词：高速斜撞击；Whipple 防护；空间碎片；损伤

中图分类号：O347.1；V423.4　　**文献标识码**：A

1　引　言

空间碎片高速斜撞击航天器是一种普遍存在的现象[1-2]。与高速正撞击相比，由于斜撞击存在一定的撞击角度，撞击损伤情况更加复杂。对于铝 Whipple 防护结构，球形弹丸斜撞击会造成前板椭圆穿孔[3]，在前板后面形成不同于正撞击的非对称分布的碎片云。斜撞击所产生的碎片云覆盖范围更大，同时，斜撞击产生的滑弹返溅碎片对航天器外部仪器设备也构成了严重威胁。近年来，防护结构的高速斜撞击特性受到了航天器防护结构设计者的广泛关注[4-9]，例如：Orphal[7] 分析了钢球弹丸高速斜撞击铝板后透射碎片云中弹丸碎片的质量和速度分布，指出当撞击角达到 65°时，只有一半的弹丸材料穿过铝板，且其前缘速度随撞击角的增大而减小；Burchell 等人[8] 对厚玻璃靶高速斜撞击坑的尺寸进行了研究，分析了脆性靶撞击坑的尺寸形状与撞击角的关系；Schonberg[9] 给出了铝球弹丸高速斜撞击铝板时椭圆穿孔直径的经验方程。最近，管公顺等人[10] 通过实验总结了铝球弹丸高速正撞击铝 Whipple 防护结构的后板弹坑分布特性，然而针对 Whipple 防护结构遭受高速斜撞击的后板损伤及弹坑分布特性研究在国内的公开报道相对较少。

本研究利用二级轻气炮发射铝球弹丸，在不同角度下对铝 Whipple 防护结构进行高速斜撞击实验，获取铝 Whipple 防护结构后板在不同撞击速度区间内的损伤模式，分析铝 Whipple 防护结构后板的损伤及弹坑分布与弹丸撞击参数的关系，通过对实验数据进行回归分析，建立预测铝球弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时后板弹坑分布的经验公式。

---

* **收稿日期**：2010-07-20；**修回日期**：2010-10-17

基金项目：国防科工局空间碎片专题研究项目(KJSP06211)

作者简介：管公顺(1969－)，男，博士，副教授，主要从事超高速撞击动力学及航天器空间碎片防护技术研究.
E-mail：hitggsh@163.com

2 撞击实验研究方法

实验采用二级轻气炮加速球形弹丸。轻气炮的一级驱动气体为氮气,充气压力为 2～20 MPa;二级驱动气体为氢气,充气压力为 0.10～0.15 MPa;采用分体式弹托气动分离技术。速度测量采用磁感应测速法,测量精度高于 2%。靶舱内压力小于 200 Pa,环境温度为室温。

铝Whipple 防护结构试件的前板为铝合金 2A12,厚度 δ_b 为 1 mm。后板为铝合金 5A06,厚度 δ_w 为 3 mm。前板与后板之间的距离 s 为 100 mm。实验采用铝合金 2017-T4 球形弹丸,直径 d_p 为 3.97 mm,撞击速度 v 为 1.14～5.35 km/s,撞击角度 θ 为 0°～70°。分别对撞击角为 10°、20°、40°、50°、60°、70°的情况进行不少于两种速度的撞击实验,实验结构如图 1 所示。实验模拟时,未考虑空间轨道上的失重情况。

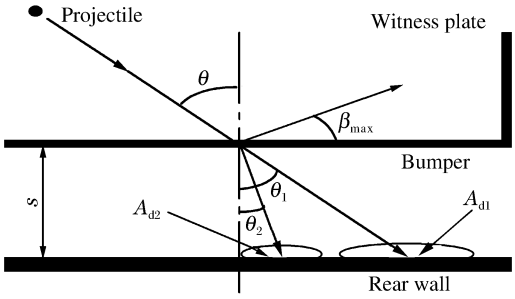


图 1 实验中使用的 Whipple 防护结构

Fig. 1 Whipple shield configuration in the experiments

3 损伤结果与讨论

3.1 宏观损伤模式

图 2～图 7 给出了弹丸直径为 3.97 mm,撞击角为 10°、20°、40°、50°、60°和 70°时,3 种撞击速度下后板的撞击损伤情况。

对于撞击角为 10°的情况(见图 2):当撞击速度为 2.29 km/s 时,后板出现了一个较大穿孔,穿孔周围的非圆形区域内散布着一些小弹坑;当撞击速度为 3.63 km/s 时,后板出现了一个小穿孔,穿孔周围出现许多密集的小弹坑,有一个类似正撞击时的弹坑环,只是该环不是圆形;当撞击速度为 4.29 km/s 时,后板只有一个相对较大的弹坑,后板未被击穿,弹坑周围出现了更密集的小弹坑,并且有非圆形弹坑环。

对于撞击角为 20°的情况(见图 3):3 种撞击速度下后板均出现穿孔,并且随撞击速度增加,穿孔尺寸逐渐减小,后板弹坑数量逐渐增多,无弹坑环出现;当撞击速度为 2.60 km/s 时,后板上形成了两个撞击损伤区,可以区分为沿弹丸撞击方向和后板法线方向,并且穿孔出现在沿弹丸撞击方向的损伤区内。

对于撞击角为 40°的情况(见图 4):3 种撞击速度下后板上也都出现了穿孔,但与小撞击角情况(10°和 20°)不同的是,随撞击速度增加,穿孔尺寸有所增大,弹坑数量比小撞击角时有所减少;当撞击速度为 3.76 km/s 时,后板上形成了沿弹丸撞击方向和后板法线方向的两个撞击损伤区,且穿孔出现在沿弹丸撞击方向的损伤区内。

对于撞击角为 50°的情况(见图 5):当撞击速度为 2.53 km/s 时,后板未出现穿孔,只是出现了一个较大弹坑;当撞击速度分别为 3.42 km/s 和 4.31 km/s 时,后板均出现一个小穿孔,且在后板上形成了沿弹丸撞击方向和后板法线方向的两个撞击损伤区,穿孔出现在沿弹丸撞击方向的损伤区内;弹坑数量比小撞击角时进一步减少。

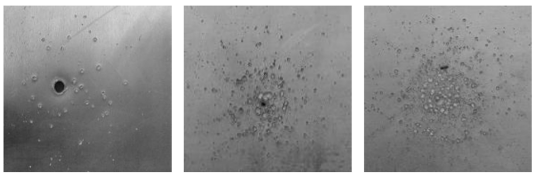
对于撞击角为 60°的情况(见图 6):3 种撞击速度下,后板均未出现穿孔;当撞击速度为 4.31 km/s 时,在后板上形成了沿弹丸撞击方向和后板法线方向的两个撞击损伤区,后板上仍能发现一个较大弹坑,且该弹坑在沿弹丸撞击方向的损伤区内;当撞击速度为 3.42 km/s 时,后板上无较大弹坑。

对于撞击角为 70°的情况,3 种撞击速度下的后板上只有非常少的撞击痕迹,如图 7 所示。

对比上述实验现象发现:铝合金球形弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时,碎片云按不同膨胀方向分为两部分:一部分碎片云主要由弹丸材料组成,沿弹丸撞击方向运动,称为主碎片云;另一部分碎片云主要由前板材料组成,沿着与前板几乎垂直的方向运动,称为次碎片云。后板上的弹坑分布不再是

圆形区域,而是沿弹丸撞击方向和近似前板法线方向在后板上形成两个具有不同特征的撞击损伤区 A_{d1} 和 A_{d2}。由于撞击角度和撞击速度不同,这两个撞击损伤区有时无法区分,在大部分弹丸材料不发生滑弹返溅而穿过前板形成碎片云的情况下,较大的撞击角度和较大的撞击速度易于区分 A_{d1} 和 A_{d2}。

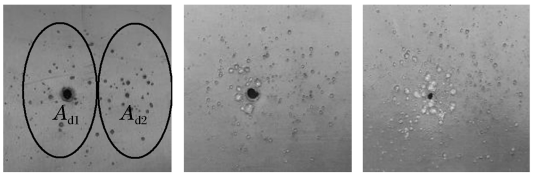
同时还可以发现:当撞击速度为(2.45±0.16)km/s 时,后板穿孔尺寸随撞击角的增加而减小,直至未发生穿孔;当撞击速度分别为(3.60±0.19)km/s 和(4.30±0.01)km/s 时,随着撞击角增大,后板穿孔尺寸先增大后逐渐减小,直至未穿孔。这说明:当撞击速度小于弹丸撞击破碎临界速度时,后板撞击损伤程度随撞击角的增大而减轻;当撞击速度大于弹丸撞击破碎临界速度时,在小撞击角情况下,后板撞击损伤程度随撞击角的增大而加重,当撞击角大于某个临界值后,后板撞击损伤程度将随撞击角的增大而减轻。也就是说,在撞击速度大于弹丸撞击破碎临界速度的情况下,对于铝 Whipple 防护结构,存在使后板撞击损伤最严重的临界撞击角。这是因为当弹丸高速斜撞击前板时:弹丸撞击方向与前板法线存在一定夹角,这使弹丸在撞击方向上对应的前板厚度增加,且随着撞击角增大,该方向上的厚度不断加大,靶板的防护能力也不断增强;另外,撞击角增大时,弹丸材料发生滑弹返溅,也使后板的损伤减轻。因此,当弹丸速度小于其撞击破碎临界速度时,随着撞击角增大,相应的靶板厚度增大,更多的弹丸材料发生滑弹返溅,后板损伤减轻。当弹丸速度大于其撞击破碎临界速度时,弹丸动能增大,其撞击破坏能力进一步增强:对于较小的撞击角,增加的前板厚度较小,返溅的弹丸材料也相对较少,弹丸碎片仍有足够的质量和速度对后板造成损伤,弹丸碎片对后板的撞击损伤能力受撞击角的影响较小;但对于较大的撞击角,此时增加的前板厚度较大,返溅的弹丸材料显著增多,弹丸碎片对后板的撞击破坏能力下降,且受撞击角的影响较大。本实验结构中,撞击造成后板损伤最严重的临界撞击角在 40°附近。



(a) v=2.29 km/s (b) v=3.63 km/s (c) v=4.29 km/s

图 2 撞击角为 10°时的后板撞击损伤

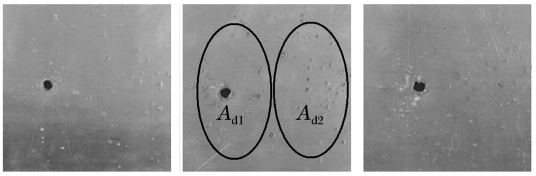
Fig. 2 Impact damage of the rear wall at impact angle of 10°



(a) v=2.60 km/s (b) v=3.79 km/s (c) v=4.31 km/s

图 3 撞击角为 20°时的后板撞击损伤

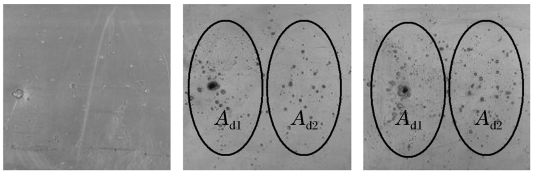
Fig. 3 Impact damage of the rear wall at impact angle of 20°



(a) v=2.60 km/s (b) v=3.76 km/s (c) v=4.31 km/s

图 4 撞击角为 40°时的后板撞击损伤

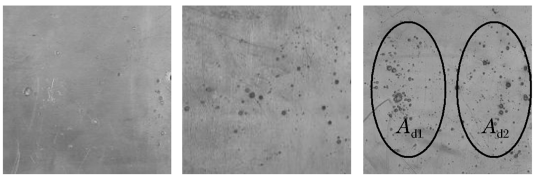
Fig. 4 Impact damage of the rear wall at impact angle of 40°



(a) v=2.53 km/s (b) v=3.42 km/s (c) v=4.31 km/s

图 5 撞击角为 50°时的后板撞击损伤

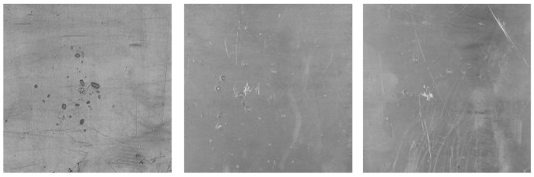
Fig. 5 Impact damage of the rear wall at impact angle of 50°



(a) v=2.60 km/s (b) v=3.42 km/s (c) v=4.31 km/s

图 6 撞击角为 60°时的后板撞击损伤

Fig. 6 Impact damage of the rear wall at impact angle of 60°



(a) v=2.63 km/s (b) v=3.57 km/s (c) v=4.31 km/s

图 7 撞击角为 70°时的后板撞击损伤

Fig. 7 Impact damage of the rear wall at impact angle of 70°

图 8 给出了铝合金球形弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时典型的后板损伤模式和弹坑分布情况。图 8(a)表现的损伤特征为:后板在沿弹丸运动方向撞击点处出现一个较大穿孔,穿孔周围的非圆形区域内散布着一些小弹坑。图 8(a)是在撞击速度较低、撞击角较小的情况下形成,此时撞击弹丸未破碎。图 8(b)表现为:后板在沿弹丸运动方向撞击点处出现一个较大弹坑,周围出现许多密集的小弹坑,有一个椭圆形弹坑环。图 8(b)对应的形成条件是:撞击速度较高、撞击角较小,此时撞击弹丸破碎。图 8(c)的损伤特征为:有主穿孔或主弹坑,在后板上形成了两个撞击损伤区,可以区分为沿弹丸撞击方向和后板法线方向。图 8(c)对应的形成条件为撞击速度较高、撞击角较大,此时撞击弹丸破碎。图 8(d)表现的损伤特征为:无主穿孔或主弹坑,只有一些小的分散弹坑,后板上无法区分沿弹丸撞击方向和前板法线方向的撞击损伤区。图 8(d)是在撞击速度较高、撞击角非常大时形成的,此时撞击弹丸破碎,弹丸的大部分发生滑弹返溅。

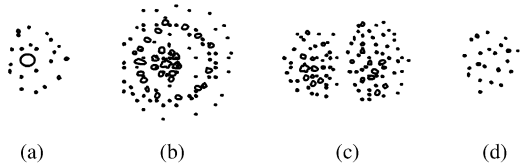


图 8 高速斜撞击铝 Whipple 防护时后板的损伤形态

Fig. 8 Typical damage patterns of the rear wall of aluminum Whipple shield under oblique hypervelocity impact

3.2 后板弹坑分布特性

铝合金球形弹丸以一定速度斜撞击铝 Whipple 防护结构时,若撞击角度不同,则后板上形成的弹坑分布区域尺寸不同。对于斜撞击,后板弹坑不是分布在一个圆形的区域内,该区域可用沿弹丸撞击方向的弹坑最大散布长度 D_x 和垂直 D_x 方向上的弹坑最大散布长度 D_y 来表示,分别称为主方向弹坑最大散布长度和次方向弹坑最大散布长度,见图 9。

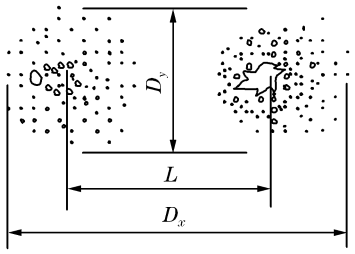
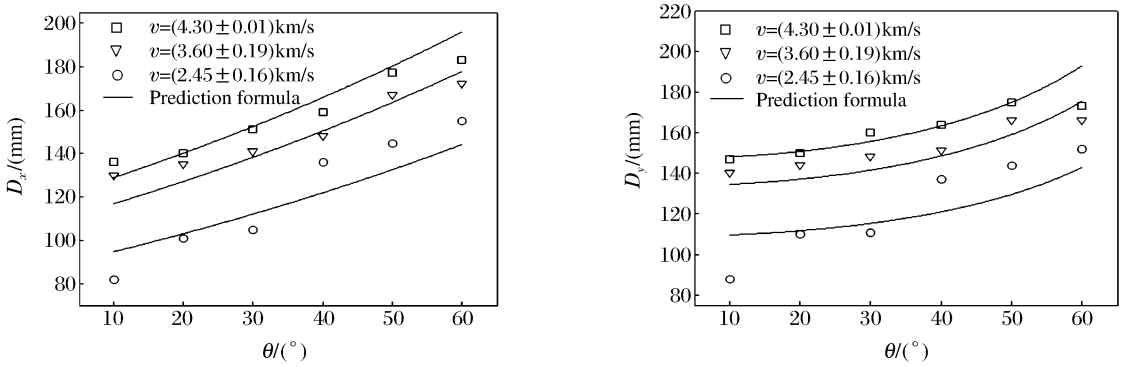


图 9 高速斜撞击铝 Whipple 防护时后板的损伤模式

Fig. 9 Damage patterns of the rear wall of aluminum Whipple shield under oblique hypervelocity impact

图 10 给出了主方向弹坑最大散布长度 D_x 和次方向弹坑最大散布长度 D_y 随撞击角 θ 的变化规律。可以看出:主方向弹坑最大散布长度 D_x 和次方向弹坑最大散布长度 D_y 均随撞击角度和撞击速度的增加而增大。

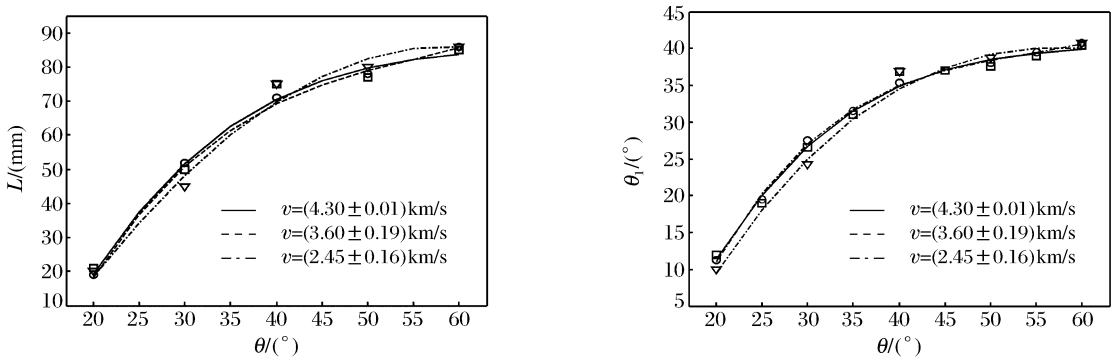


(a) D_x-θ curves (b) D_y-θ curves

图 10 弹坑分布范围与撞击角的关系

Fig. 10 Relationship between crater distribution area and impact angle

图 11 给出了高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时后板两个撞击损伤区中心距 L 和主碎片云膨胀角 θ_1 随撞击角 θ 的变化规律。从图 11 中可以看出,两个撞击损伤区的中心距 L 和主碎片云膨胀角 θ_1 均随撞击角的增加而增大,并且撞击速度对 L 和 θ_1 几乎没有影响。



(a) L-θ curves　　(b) θ_1-θ curves

图 11　碎片云膨胀与撞击角的关系

Fig. 11　Relationship between debris cloud expansion and impact angle

3.3　预测后板弹坑分布公式

高速斜撞击 Whipple 防护结构时后板的弹坑分布特性是撞击参数、结构参数以及材料参数共同作用的结果,因此,可以将球形弹丸高速斜撞击 Whipple 防护结构的后板弹坑分布特征参量 D_x 和 D_y 表示为撞击参数、结构参数和材料参数的函数。根据量纲理论,将各参数表示为相互独立的无量纲量,再用这些无量纲量组成用于描述后板弹坑分布特征量的关系式。由于在研究过程中弹丸材料和前板材料均未改变,因此可以不考虑材料参数的影响,则各特征参量的幂级数形式为

$$\frac{D_x}{s}=x_1\left(\frac{v}{c}\right)^{x_2}\mathrm{e}^{x_3\theta}\left(\frac{\delta_\mathrm{b}}{s}\right)^{x_4}\left(\frac{d_\mathrm{p}}{\delta_\mathrm{b}}\right)^{x_5} \tag{1}$$

$$\frac{D_y}{s}=x_6\left(\frac{v}{c}\right)^{x_7}\cos^{x_8}\theta\left(\frac{\delta_\mathrm{b}}{s}\right)^{x_9}\left(\frac{d_\mathrm{p}}{\delta_\mathrm{b}}\right)^{x_{10}} \tag{2}$$

式中:v、θ、d_p、δ_b、s、c 分别为弹丸撞击速度、撞击角度、弹丸直径、前板厚度、前后板间距、前板材料中的声速,x_1～x_{10} 为待定系数。通过对数及多变量线性最小二乘法运算,得到了预测铝球弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构的后板弹坑分布特征量的经验公式

$$\frac{D_x}{s}=2.552\left(\frac{v}{c}\right)^{0.565}\mathrm{e}^{0.481\theta}\left(\frac{\delta_\mathrm{b}}{s}\right)^{0.301}\left(\frac{d_\mathrm{p}}{\delta_\mathrm{b}}\right)^{0.531} \tag{3}$$

$$\frac{D_y}{s}=0.602\left(\frac{v}{c}\right)^{0.552}\cos^{-0.391}\theta\left(\frac{\delta_\mathrm{b}}{s}\right)^{-0.149}\left(\frac{d_\mathrm{p}}{\delta_\mathrm{b}}\right)^{0.231} \tag{4}$$

(3)式和(4)式是针对前板为 2A12 铝合金板的 Whipple 防护结构,在撞击速度为 1.14～5.35 km/s、撞击角度为 0°～60°的条件下得到的。

利用预测公式(3)式和(4)式,对不同撞击速度下的 D_x 和 D_y 随撞击角变化的关系进行了预测,并与实验结果进行比较,如图 10 所示。可以看出,预测公式得到的曲线与实验结果总体上符合较好,但仍存在一些差异,特别是在撞击速度较低时,预测结果与实验结果相差较大。其主要原因是,对于较小的撞击速度,弹丸撞击前板后产生的碎片粒子数量较少,且分布不均匀,因此后板撞击坑分布存在较大的随机性。另外,用于回归分析的实验数据还不够充分,因此需利用更多的实验数据对公式进行修正。

4　结　论

利用二级轻气炮发射铝球弹丸,对铝 Whipple 防护结构进行了高速斜撞击实验。当撞击速度大于弹丸撞击破碎临界速度时,铝 Whipple 防护结构存在使后板撞击损伤最严重的临界撞击角,并且当前板厚度为 1 mm、前后板间距为 100 mm 时,此临界撞击角在 40°附近。后板弹坑分布范围随撞击角的增大总体呈现增大的趋势,撞击速度对主碎片云中心膨胀角无显著影响。通过对实验数据进行回归分析,得到了预测铝球弹丸高速斜撞击铝 Whipple 防护结构时后板弹坑分布特征量的经验公式。

References:

[1] Christiansen E L, Cykowskia E, Ortegaa J. Highly oblique impacts into thick and thin targets [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 157-168.

[2] Higashide M, Koura T, Akahoshi Y, et al. Debris cloud distributions at oblique impacts [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(12): 1573-1577.

[3] Guan G S, Ha Y, Pang B J. Investigation on damage characteristics of thin Al-plates by oblique hypervelocity impact of Al-sphere [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(4): 347-353. (in Chinese)
管公顺, 哈 跃, 庞宝君. 铝球弹丸超高速斜撞击薄铝板特性研究 [J]. 高压物理学报, 2007, 21(4): 347-353.

[4] Nasit A, Wilbeck J S. Debris fragment characterization in oblique hypervelocity impacts [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 37-48.

[5] Rabb R J, Fahrenthold E P. Numerical simulation of oblique impact on orbital debris shielding [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23(1): 735-744.

[6] Lee M. Hypervelocity impact into oblique ceramic/metal composite system [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29(1-10): 417-424.

[7] Orphal D L. Highly oblique impact and penetration of thin targets by steel spheres [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23(1): 687-698.

[8] Burchell M J, Grey I D S. Oblique hypervelocity impact on thick glass targets [J]. Mater Sci Eng A, 2001, 303(1-2): 134-141.

[9] Schonberg W P. Hypervelocity impact penetration phenomena in aluminum space structures [J]. J Aerosp Eng, 1990, 3(3): 173-185.

[10] Guan G S, Ha Y, Pang B J, et al. Crater distribution on the rear wall of aluminum dual-sheet structure under hypervelocity normal impact [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 246-251. (in Chinese)
管公顺, 哈 跃, 庞宝君, 等. 铝双层板结构超高速正撞击后板弹坑分布 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 246-251.

Damage Characteristics of Rear Walls of Aluminum Whipple Shields by Oblique Hypervelocity Impact of Aluminum Spheres

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

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: In order to simulate and study the oblique hypervelocity impacts of space debris on bumper of spacecrafts, a series of oblique hypervelocity impact experiments of aluminum Whipple shields are carried out by a two-stage light gas gun. The aluminum alloy projectile diameter is 3.97 mm, the impact velocities range from 1.14 to 5.35 km/s, and the impact angles range from 0° to 70°. The crater distributions on the rear wall of aluminum Whipple shield obliquely impacted by aluminum spheres are obtained and analyzed. In addition, the forecast equations for crater distribution on the rear wall of aluminum Whipple shield by oblique hypervelocity impact are derived. The results indicate that there are two crater distribution areas on the rear wall under hypervelocity oblique impact. The critical fragmentation velocity of projectile will bring effect on the relationship between the impact damage law of rear wall and impact angle. For aluminum alloy Whipple shield, there exists a critical initial collision angle at which the impact damage on the rear wall is the most severe.

Key words: oblique hypervelocity impact; Whipple shield; space debris; damage