

文章编号:1001-4888(2006)03-0299-08

铝双层板结构的前板厚度对撞击损伤影响的实验研究*

管公顺, 迟润强, 朱 耀, 哈 跃, 庞宝君

(哈尔滨工业大学 复合材料研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 低地球轨道上的航天器易受到微流星体和空间碎片的超高速撞击, 导致其严重损伤甚至灾难性的失效。撞击损伤特性研究是航天器防护设计的重要问题。本文采用非火药驱动二级轻气炮发射球形弹丸, 对铝双层板结构进行超高速撞击实验研究, 从而模拟空间碎片对航天器防护结构的超高速撞击作用。实验得到了铝双层板结构在弹丸撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 和 $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ 两种情况时, 其前板和后板的撞击损伤随前板厚度变化的规律, 随着前板厚度的增加, 前板穿孔直径增大, 后板撞击中心的损伤减轻, 后板上大弹坑由撞击中心移至外围。当撞击速度超过弹丸破碎速度时, 后板上将出现弹坑密集分布区。实验结果表明, 前板厚度的选取对双层板结构的撞击损伤区域会产生影响。

关键词: 超高速撞击; 双层板; 厚度; 损伤; 实验

中图分类号: O381; V423.41 **文献标识码:** A

0 引言

航天器在轨运行的安全一直受到微流星体和空间碎片的严重威胁, 许多航天器失效的事例都与空间碎片的撞击有关, 因此, 航天器防护微流星体及空间碎片超高速撞击的研究得到了国内外的高度重视^[1-2]。1947 年天体物理学家 Whipple 提出了由前板、后板和一定间隙组成的双层板防护结构, 由于具有良好的防护性能, 使其被广泛应用于航天器的防护方案中。在此之后, 尽管又发展了多种防护结构^[3-4], 但双层板结构仍然是航天器防护研究的基础。

双层板结构的超高速撞击损伤一直是宇航工作者非常关心的问题, Schonberg^[5]提出了双层板结构超高速撞击穿孔尺寸和裂纹长度随弹丸质量变化的经验模型。Christiansen^[6]给出了双层板结构的撞击极限方程, 确定了双层板结构的后板不被击穿的最小弹丸直径随弹丸速度的变化规律。张庆明^[7]对超高速撞击铝双层板的熔化效应进行了研究, 指出碎片云冲击后板的颗粒所具有的比内能和速度满足一定关系时, 自身发生熔化。此外, 徐宝龙^[8]对低速撞击下正交型纤维增强复合材料层板的脱层进行了研究。我们的目的是为了进一步了解双层板结构撞击损伤的前板厚度效应。

超高速撞击地面模拟实验是研究撞击特性的有效方法之一, 目前用于空间碎片超高速撞击地面模拟实验研究的设备主要是二级轻气炮。本文对不同前板厚度的铝双层板结构进行了地面超高速撞击实验, 得到了在铝合金球形弹丸破碎和未破碎两种情况下的后板损伤形式, 以及前板、后板的撞击损伤与

* 收稿日期: 2005-06-18; 修订日期: 2006-01-08

基金项目: 国家空间碎片专题研究项目资助

通讯作者: 管公顺(1969-), 男, 博士研究生, 研究方向为超高速撞击动力学理论、实验及数值仿真, 超高速撞击防护技术, 材料动态力学行为理论。E-mail: ggsh@hit.edu.cn

前板厚度的关系。

1 实验研究方法

1.1 实验装置

实验使用了哈尔滨工业大学空间碎片超高速撞击研究中心的非火药驱动二级轻气炮系统,该轻气炮包括发射系统、测速系统、配气系统和靶舱/真空系统等四个部分。发射系统用于将模拟空间碎片的弹丸发射至实验所需的速度。该轻气炮发射系统的一级泵管口径为57mm,二级发射管口径分别为5.4mm、7.6mm、10mm、12.7mm和14.5mm五种,最高发射速度可达7km/s,该发射系统一级驱动气体为氮气,二级驱动气体为氢气。图1给出了该二级轻气炮的外形照片。测速系统包括磁感应和激光两种方式。配气系统用于高压气室的加压充气以及泵管内充填轻质气体。



图1 二级轻气炮

Fig. 1 Two-stage light gas gun

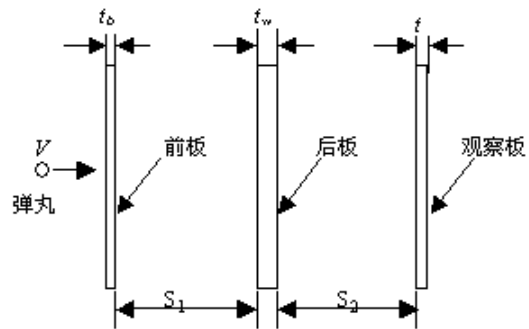


图2 双层板防护结构示意图

Fig. 2 Dual-wall structure in the experiment

1.2 实验条件

实验中使用的弹丸材料为2A12铝合金,弹丸形状为球形,直径为4.98mm。前板材料为2A12铝合金,厚度分别为0.24mm、0.5mm、1mm、1.5mm、2mm、3mm、5mm。后板材料为5A06铝合金,厚度为3mm。观察板材料为2A12铝合金,厚度为1.7mm。前板、后板和观察板的尺寸均为200mm×200mm。前板与后板以及后板与观察板之间的距离均为100mm。实验结构如图2所示。弹丸撞击速度分别为 2.33 ± 0.12 km/s和 4.36 ± 0.10 km/s,撞击角度为 0° 。撞击时,靶舱内抽真空,靶舱内压力小于100Pa,环境温度为室温。

2 实验结果

铝球弹丸超高速撞击铝双层板结构后,前板上出现了圆形穿孔,后板和观察板上则出现了不同程度的弹坑、鼓包、剥落和穿孔等损伤现象,从图3和图4以及表1和表2中的统计数据可以发现,铝双层板结构的超高速撞击损伤与前板厚度有关。

当撞击速度为 2.33 ± 0.12 km/s时,随着前板厚度的增加,前板背面穿孔边缘未发生剥落。在该撞击速度下,后板上除撞击中心穿孔和弹坑外,弹坑数量少,弹坑分散,弹坑尺寸小,撞击中心损伤区域以外的损伤小,且随着前板厚度的增加,后板穿孔由圆形变为不规则形状,如图3所示。

当撞击速度为 4.36 ± 0.10 km/s时,随着前板厚度的增加,前板穿孔边缘发生剥落。在该撞击速度下,后板上除撞击中心穿孔和弹坑外,弹坑数量多,弹坑集中,弹坑尺寸大,在后板上形成了不同的弹坑密集区,撞击中心损伤区域以外损伤增大,且后板穿孔形状不规则,穿孔边缘撕裂、剥落,如图4所示。

表1和表2给出了铝球弹丸超高速撞击铝合金双层板结构的实验数据结果,包括弹丸的撞击速度、前板厚度以及前板、后板和观察板的损伤情况。

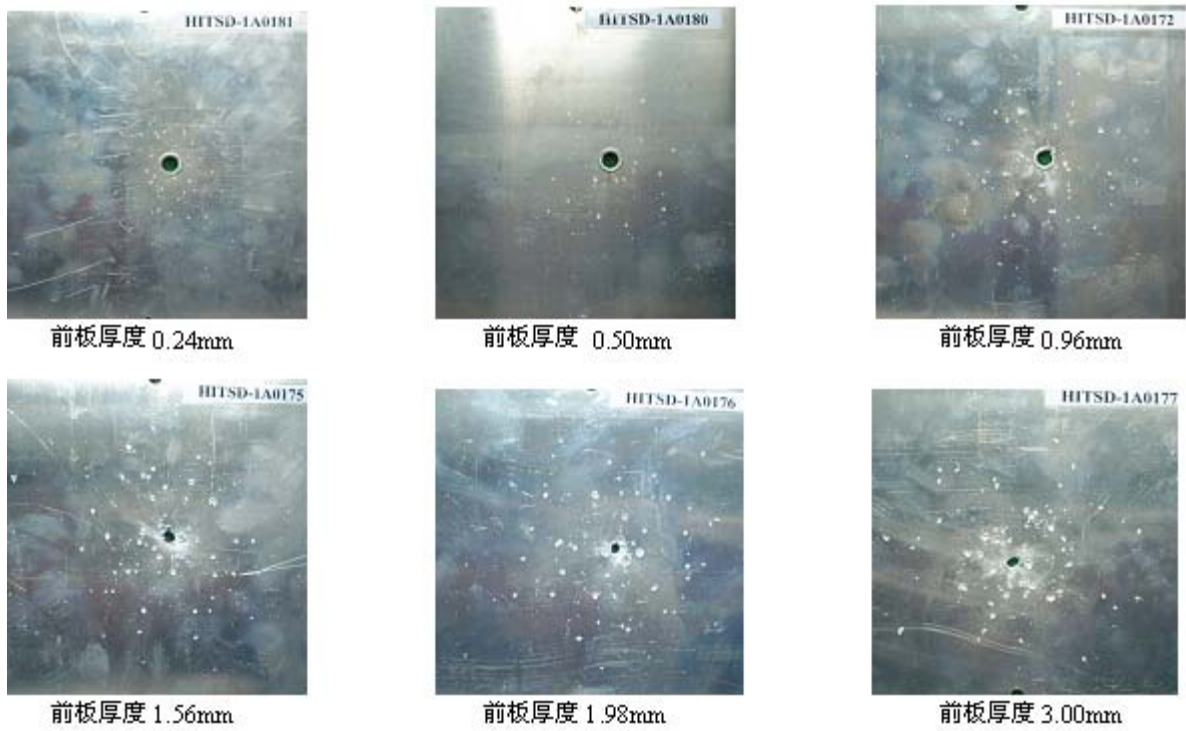


图 3 弹丸撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 时的后板损伤结果

Fig. 3 Results of impact damage in rear wall at impact velocity $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$

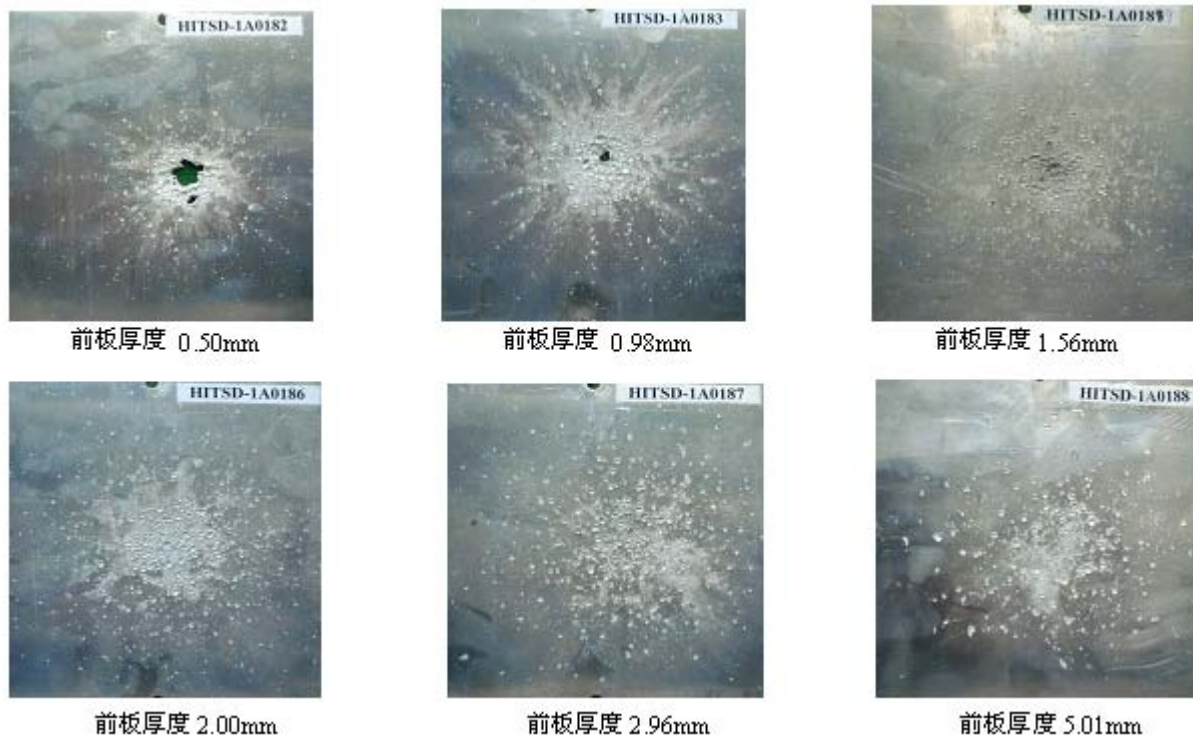


图 4 弹丸撞击速度为 $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ 时的后板损伤结果

Fig. 4 Results of impact damage in rear wall at impact velocity $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$

表1 撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 时铝双层板结构的损伤情况Tab. 1 Damage of aluminum dual-wall structure at $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ of impact velocity

实验号	撞击速度 (km/s)	前板厚度 (mm)	前板穿孔 直径 (mm)	后板损伤			观察板损伤	
				弹坑分布 直径(mm)	弹坑个数	最大弹坑 直径(mm)	弹坑分布 直径(mm)	弹坑个数
1A181	2.45	0.24	5.24	102	70	1.72	135	53
1A180	2.31	0.50	5.58	111	76	2.16	133	65
1A172	2.36	0.96	6.45	125	88	2.81	127	52
1A175	2.27	1.56	7.50	165	93	3.14	64	21
1A176	2.27	1.98	7.66	175	89	4.90	56	7
1A177	2.38	3.00	9.00	135	90	4.44	55	4
1A178	2.21	5.04	8.66	86	21	6.50	无弹坑	无弹坑

表2 撞击速度为 $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ 时铝双层板结构的损伤情况Tab. 2 Damage of aluminum dual-wall structure at $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ of impact velocity

实验号	撞击速度 (km/s)	前板厚度 (mm)	前板穿孔 直径(mm)	后板中心弹坑 分布直径(mm)	后板环形弹坑 分布直径(mm)	后板弹坑分布 直径(mm)
1A182	4.31	0.50	6.38	19	41	137
1A183	4.31	0.98	7.86	30	60	160
1A189	4.31	1.56	9.82	33	58	190
1A186	4.39	2.00	10.50	27	52	205
1A187	4.46	2.96	12.68	21	43	195
1A188	4.39	5.01	13.86	无此区	无此区	168

3 实验结果分析

3.1 前板穿孔特征

弹丸超高速撞击前板瞬间,在弹丸和铝板中均有冲击波产生。当铝板中的冲击波传播到铝板的背面时,将向受撞击的铝板中反射一个稀疏波,铝板中的压缩波与其背面反射的稀疏波将会相互作用,同时撞击所造成的铝板材料的层裂使弹丸前的铝板材料被抛出,从而在铝板上形成穿孔,而弹丸材料在速度惯性的作用下从铝板穿孔飞出,同时,穿孔孔径向外膨胀至大于弹径为止。

Maiden 和 Schonberg 分别给出了铝球弹丸高速撞击薄铝合金板的穿孔直径公式^[9]:

Maiden 的薄板高速撞击穿孔直径公式为:

$$\frac{d_h}{d_p} = 2.4 \frac{v}{c} \left(\frac{t_l}{d_p} \right)^{2/3} + 0.9 \quad (1)$$

Schonberg 的薄板高速撞击穿孔直径公式:

$$\frac{d_h}{d_p} = 2.825 \left(\frac{v}{c} \right)^{1.043} \left(\frac{t_l}{d_p} \right)^{0.782} + 1.01 \quad (2)$$

其中 d_h 为穿孔直径; d_p 为球形弹丸直径; v 为撞击速度; c 为铝板材料声速; t_l 为铝板厚度。

公式(2)的预测值与实验结果比较一致,误差不超过 8.75%,铝板厚度为 1mm 时,二者吻合得最好,两种速度下的误差分别为 0.23% 和 1.24%。

当板厚小于 1mm 时,公式(1)的预测值与实验结果符合较好,误差不超过 7%,最小误差 1.30%。

当板厚大于 1mm 时,公式(1)的预测值与实验结果相差较大,最大误差为 16.17%。如果将公式(1)进行适当的修改即:

$$\frac{d_h}{d_p} = 2.4 \frac{v}{c} \left(\frac{t_i}{d_p} \right)^{2/3} + 1.15 \quad (3)$$

则当板厚为 $1\text{mm} < t_i < 5\text{mm}$ 时,公式(3)的预测结果与实验结果符合较好,误差不超过 6.5%,最小误差为 0.41%。

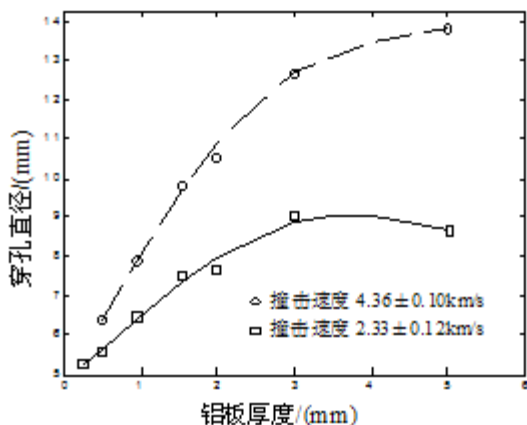


图5 铝板撞击穿孔直径随铝板厚度的变化

Fig.5 Thickness of bumper dependence of penetration hole diameters in bumper

图5是由实验数据获得的铝板超高速撞击穿孔直径与铝板厚度的关系曲线,从图中可以看出,在弹丸撞击速度为 $2.33 \pm 0.12\text{km/s}$ 的情况下,当铝板厚度小于 3mm 时,铝板厚度对超高速撞击穿孔直径影响较大,随着铝板厚度的增加,穿孔直径增大,而当铝板厚度为 5mm 时,与铝板厚度为 3mm 时相比穿孔直径却有所减小,这说明,在该速度下,对于铝板厚度,穿孔直径存在最大值;在弹丸撞击速度为 $4.36 \pm 0.10\text{km/s}$ 的情况下,当铝板厚度小于 5mm 时,厚度对超高速撞击穿孔直径影响较大,随着铝板厚度的增加,穿孔直径增大,但增大的幅度随着铝板厚度的增加而减小,如果继续增加铝板的厚度,有可能出现最大穿孔,但还需进一步的实验证明。同时,在图5中也可以得到铝板超高速

撞击穿孔直径随弹丸撞击速度变化的规律,当弹丸直径和铝板厚度不变时,铝板超高速撞击穿孔直径随着弹丸撞击速度的增加而增大,且增大的幅度随着铝板厚度的增加而增大。

3.2 后板弹坑分布特征

弹丸击穿前板后,在前板的后面会产生由弹丸和前板破片所形成的碎片飞散区,碎片飞散区中破片尺寸的大小和破片的物态将取决于弹丸的撞击速度以及弹丸和前板的材料特性。

当弹丸撞击速度小于使弹丸、前板材料破碎的撞击速度时,弹丸穿过前板后仍以一个较大的弹体撞击后板,在后板撞击中心形成一个边缘较规则的穿孔或形成一个大的弹坑,而前板破片则在周围形成一些分散的小弹坑,如图6a所示。当弹丸撞击速度大于使弹丸、前板材料破碎的撞击速度时,弹丸穿过前板后将破碎为许多碎片,并与前板破片在前板后面形成碎片云团,碎片云团撞击到后板上,在一定范围内使后板成坑、剥落或穿孔,且弹坑的分布开始出现分区,中心弹坑区和环形弹坑区。弹坑区分布如图6b所示。

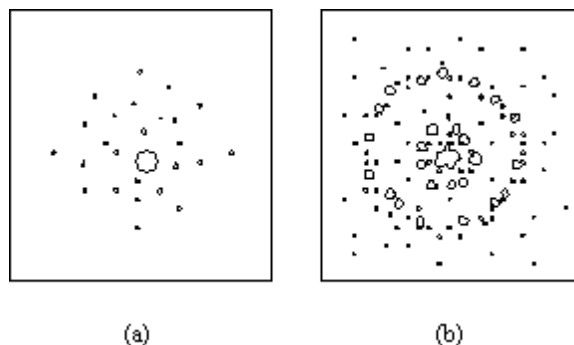


图6 后板弹坑分布

Fig.6 Crater distributing in rear wall

图7a给出了铝球弹丸超高速撞击铝双层板结构后,后板弹坑分布随前板厚度变化的规律,在弹丸直径、撞击速度以及前后板间距不变的情况下,开始时,后板上弹坑分布范围直径随着前板厚度的增加而增大,之后,又随着前板厚度的增加而减小,因此,存在影响后板弹坑分布范围直径的临界前板厚度。从表1和表2可以得到,在弹丸撞击速度分别为 $2.33 \pm 0.12\text{km/s}$ 和 $4.36 \pm 0.10\text{km/s}$ 的情况下,当前板厚度为 2mm 时,后板上弹坑分布范围直径最大。

铝合金材料撞击破碎的撞击速度通常为 3km/s ^[6]左右,本次实验中,当弹丸撞击速度为 $4.36 \pm 0.10\text{km/s}$ 时,撞击后弹丸和前板材料破碎,并以碎片云团的形式撞击到后板上,除在后板的撞击中心处

产生穿孔和弹坑外,在穿孔周围又形成了两个密集的弹坑分布区。一个是中心弹坑密集区,该区弹坑集中在撞击中心,有时与中心穿孔部分重合,该区域的弹坑尺寸通常较大;另一个是环形弹坑密集区,该区弹坑成环形分布,弹坑尺寸通常也较大。在环形弹坑密集区与中心弹坑密集区之间还分布着一些稀疏的小弹坑。图 7b 给出了中心弹坑密集区直径随前板厚度变化的规律,在弹丸直径、撞击速度及前后板间距不变的情况下,开始时,后板中心弹坑密集区直径随着前板厚度的增加而增大,之后,又随着前板厚度的增加而减小。从表 2 可以得到,在弹丸撞击速度为 $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ 的情况下,当前板厚度为 1.5 mm 时,后板中心弹坑密集区直径最大。环形弹坑密集区直径随前板厚度变化的规律如图 7c 所示,在弹丸直径、撞击速度及前后板间距不变的情况下,开始时,该环形弹坑区域的直径随着前板厚度的增加而增大,之后,又随着前板厚度的增加而减小,在弹丸撞击速度为 $4.36 \pm 0.10 \text{ km/s}$ 的情况下,当前板厚度为 1.5 mm 时,该环形弹坑密集区的直径最大。

而当弹丸撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 时,弹丸击穿前板后,弹丸和前板都未充分破碎,弹体仍然较大,前板后面未形成碎片云团,后壁的损伤主要来自弹丸的撞击,在后壁撞击中心区域产生穿孔。同时撞击造成前壁破碎的程度较轻,破片数量较少,在后壁上只产生少量的散落弹坑。开始时,后板上弹坑的数量随着前板厚度的增加而增多,之后,又随着前板厚度的增加而减少。同时,弹坑直径随着前板厚度的增加而增大,这说明增加前板厚度后,前板破片尺寸增大。在撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 的情况下,当前板厚度为 1.5~2 mm 时,弹坑数最多,其变化规律如图 7d 所示。

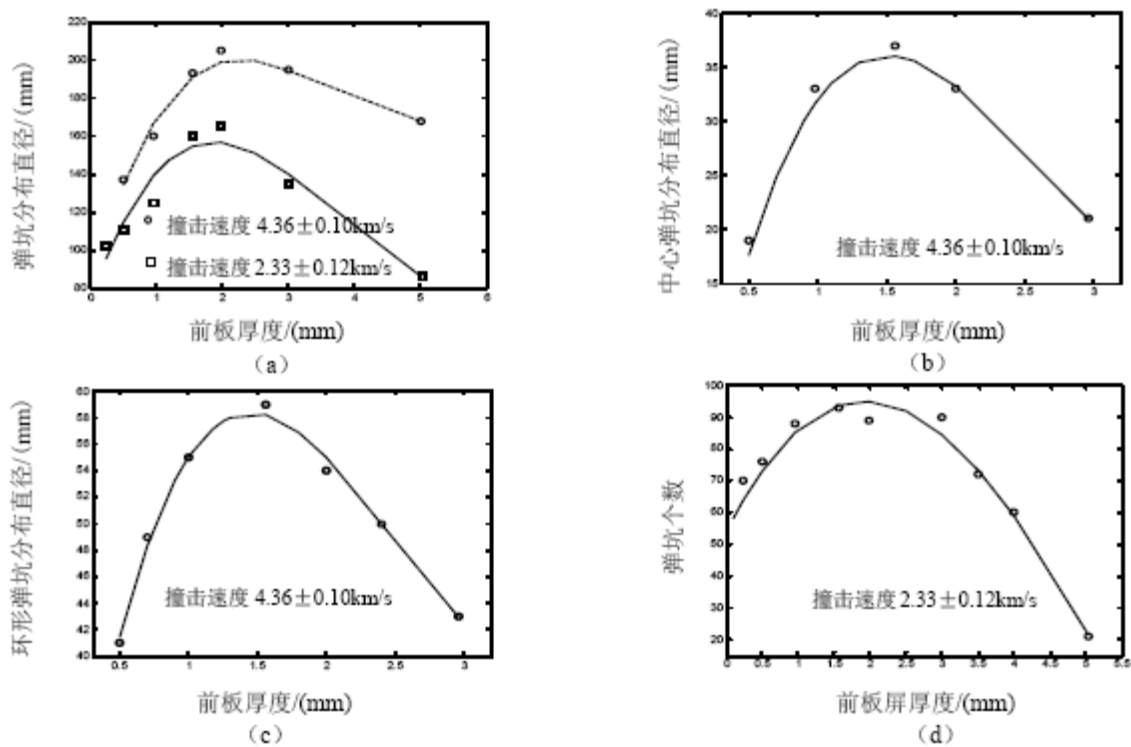


图 7 后板弹坑分布随前板厚度的变化

Fig. 7 The thickness of bumper dependence of crater distributing in rear wall

从表 1 和表 2 的实验统计数据可以发现,随着前板厚度的增加,后板撞击中心的损伤将会减小,而后板撞击中心外围的坑深和坑径增大,也就是说,随着前板厚度的增加,后板相对严重损伤区由撞击中心移至外围,这说明,在一定范围内增加前板厚度,虽然可以减弱后板撞击中心处的损伤程度,却相对加大了后板外围的损伤,因此,在一定范围内增加前板厚度并不是提高防护能力的有效方法,应结合航天器的结构设计合理优化前板厚度。

3.3 观察板损伤特征

弹丸和前板材料所形成的碎片云击穿后板之后,在后板的后面也产生了由弹丸、前板和后板破片所

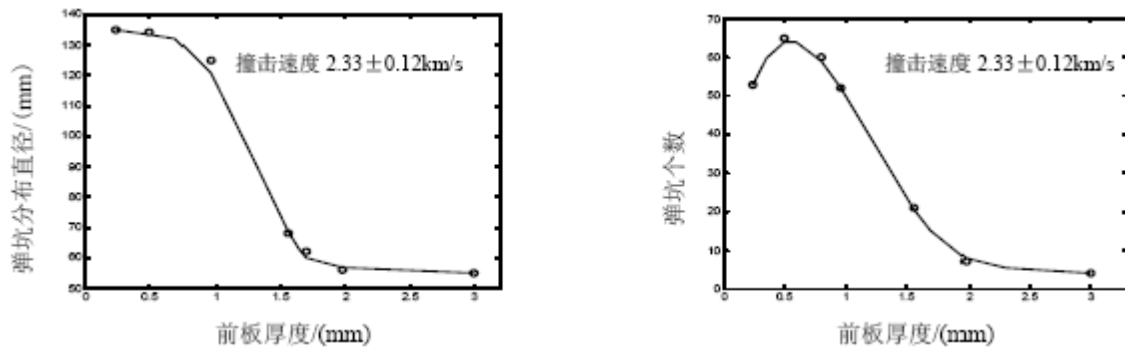


图8 观察板弹坑分布随前板厚度的变化

Fig. 8 The thickness of bumper dependence of crater distributing in witness plate

形成的破片飞散区,此时,破片的速度较低,对观察板的撞击损伤减弱。通过观察板的损伤情况分析后板后面空间内破片的大小和分布情况,以此来判断,一旦后板被击穿,将会给后板背面空间内的设备和环境带来怎样的危害。这里给出弹坑分布范围直径和弹坑数量两个参数,图8给出了弹丸撞击速度为 $2.33 \pm 0.12 \text{ km/s}$ 时观察板撞击损伤随前板厚度变化的规律,实验结果发现,观察板上弹坑分布范围直径和弹坑数量均随着前板厚度的增加而减小,当前板厚度达到某一值时,后板未被击穿或发生剥落,观察板上将不会有撞击坑产生。

4 结论

通过铝合金双层板结构的超高速撞击实验以及对前板、后板和观察板的撞击损伤特征随前板厚度变化规律的分析,可以得到以下初步结论:

- (1) 薄铝板超高速撞击穿孔直径随薄板厚度的增加而增大,但增加的幅度随薄板厚度的增加而减小,在撞击速度一定的情况下,存在最大穿孔直径。
- (2) 对于前板厚度,铝双层板结构的后板上弹坑分布范围直径存在最大值。
- (3) 撞击速度超过弹丸破碎撞击速度时,铝双层板结构的后板上将出现两个弹坑密集区,且对于前板厚度,弹坑密集区直径存在最大值。
- (4) 撞击速度低于弹丸破碎撞击速度时,铝双层板结构的后板上弹坑直径随前板厚度的增加而增大,且对于前板厚度,后板上弹坑数量存在最大值。
- (5) 随着前板厚度的增加,后板上大弹坑的位置由撞击中心移至中心外围。

参考文献:

- [1] 闽桂荣,肖名鑫.防止微流星体击穿航天器舱壁的可靠性设计[J].中国空间科学技术,1986,7(6):45~48 (Min G R, Xiao M X. Reliability Design Spacecraft Module Wall against Meteoroid Perforation. Chinese Space Science and Technology, 1986, 7(6): 45~48(in Chinese))
- [2] Cour-Palais B G, Crew J L. A Multi-Shock Concept for Spacecraft Shielding [J]. Int. J. Impact Engineering, 1990, 10: 134~140.
- [3] Christiansen E L, Crews J I. Enhanced Meteoroid and orbital debris Shielding [J]. Int. J. Impact Engineering, 1995, 17: 217~228.
- [4] Lambert M, Schafer F, Geyer T. Impact Damage on Sandwich Panels and Multi-layer Insulation [J]. Int. J. Impact Engineering, 2001, 26: 369~380.
- [5] Schonberg W P, Williamsen J E. Empirical Hole Size and Crack Length Models for Dual-Wall Systems under Hypervelocity Projectile Impact [J]. Int. J. Impact Engineering, 1997, 20: 711~722.
- [6] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics Limit Equations for Spacecraft Shielding [J]. Int. J. Impact Engineering, 2001, 26: 93~104.
- [7] 张庆明,谈庆明,张德良等.超高速冲击铝双层板的熔化效应[J].力学学报,1995,27(3):257~266(Zhang Q

- M, Tan Q M, Zhang L D, et al. Melting Effects of Aluminum Dual-Sheet Structure in Hypervelocity Impact. *Acta Mechanica Sinica*, 1995, 27(3): 257~266(in Chinese))
- [8] 徐宝龙, 虞吉林. 低速撞击下正交型纤维增强复合材料层板的脱层研究[J]. *实验力学*, 2004, 19(2): 163~169 (Xu B L, Yu J L. A Study on the Delamination of Glass/Epoxy Laminates under Low Velocity Impact. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(2): 163~169(in Chinese))
- [9] 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 Engineering*, 2004, 30: 303~321.

Experimental Investigation of Bumper Thickness Effect on Damage of Aluminum Dual-Wall Structure by Hypervelocity Impact

GUAN Gong-shun, CHI Run-qiang, ZHU Yao, HA Yue, PANG Bao-jun

(Research institute of composites, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: All spacecraft in low orbit are subject to hypervelocity impact by meteoroids and space debris, which can in turn lead to significant damage and catastrophic failure. Investigation into the impact damage characteristics has become an important problem for spacecraft protection designing. In this paper, in order to simulate and study the hypervelocity impact of space debris on Aluminum dual-wall structure of spacecrafts, a non-powder two-stage light gas gun was used to launch Al-sphere projectiles. The law of damage in bumper and rear wall of Aluminum dual-wall structure depend on bumper thickness were proposed at 2.33 ± 0.12 km/s and 4.36 ± 0.10 km/s of impact velocity respectively. As the thickness of bumper increasing, the penetration hole diameter of bumper increased, the impact damage at center of the rear wall mitigated, and the large crater moved from center to circumference. When projectile impact velocity exceeds the velocity of projectile fragmentation, two crater dense areas will be brought in rear wall of Aluminum dual-wall structure. Therefore, the bumper thickness can effect on damage distributing area of Aluminum dual-wall structure.

Key words: hypervelocity impact; dual-wall structure; thickness; damage; experiment