

文章编号: 1001-1455(2005)05-0461-06

铝合金 Whipple 防护结构高速撞击实验研究^{*}

管公顺, 庞宝君, 哈 跃, 张 伟

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了掌握航天器防护结构受空间碎片高速撞击的损伤破坏模式及其防护性能, 采用二级轻气炮发射球形弹丸, 对铝合金 Whipple 防护结构进行高速撞击实验研究。根据实验结果分析了铝合金 Whipple 防护结构的防护屏和舱壁在不同速度区间的损伤模式特征, 以及薄铝板防护屏高速撞击穿孔和舱壁弹坑分布随弹丸直径、弹丸撞击速度变化的规律。通过固定弹丸直径, 改变弹丸撞击速度, 寻找临界撞击速度的方法获得了铝合金 Whipple 防护结构在 0.5~5.5 km/s 撞击速度区间内的撞击极限曲线, 并与由 Christiansen 撞击极限方程得到的撞击极限曲线进行了比较, 结果表明, 实验最小临界弹丸直径略大于预测值。

关键词: 爆炸力学; 损伤模式; 高速撞击; Whipple 防护结构; 撞击极限曲线

中图分类号: O381; V423.41

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

随着航天工业的发展, 空间碎片环境日益恶化, 空间碎片撞击航天器的平均速度高达 10 km/s, 严重威胁着在轨航天器的安全运行。此外, 还存在微流星体对航天器的高速撞击威胁。有关空间碎片或微流星体与航天器超高速撞击效应及航天器空间碎片防护的研究受到了国内外学者的高度重视^[1~2]。1947年, F. Whipple 发明了为抵御微流星体高速撞击的 Whipple 防护方案。Whipple 防护方案是将防护屏放置在被防护舱壁外侧一定距离处以减小微流星体的高速撞击损害。微流星体粒子高速撞击防护屏后产生二次碎片云团, 二次碎片云团向外膨胀撞击在被防护舱壁上, 由于二次碎片云团面积增大, 导致撞击能量分散, 降低了对舱壁的损伤破坏程度。舱壁受高速撞击后的损伤形式为鼓包、剥落、撕裂和穿孔^[3]。由于碎片云的形成和运动规律极其复杂, 因此, 撞击极限方程或撞击极限曲线成为评价防护结构防护性能的有效方法^[4]。Whipple 防护结构是一种典型的空间碎片防护方案, 对其防护特性的研究备受关注^[5~7]。目前, 国内外用于模拟空间碎片超高速撞击航天器效应研究的设备主要是二级轻气炮, 它可以模拟空间碎片的弹丸发射至指定速度。

本文中首先进行铝合金 Whipple 防护结构的高速撞击实验, 得到该铝合金 Whipple 防护结构的防护屏和舱壁在不同速度区间的损伤模式, 以及薄铝板防护屏高速撞击穿孔和舱壁弹坑分布随弹丸直径、弹丸撞击速度变化的规律, 然后, 将用实验数据拟合的 Whipple 防护结构的撞击极限曲线与用 Christiansen 方程得到的撞击极限曲线进行比较。

2 实验研究方法

高速撞击实验是利用哈尔滨工业大学的非火药驱动二级轻气炮进行的, 该二级轻气炮包括发射装置、测控系统、配气系统、真空靶舱系统等 4 个部分。二级轻气炮一级泵管口径 57 mm, 二级发射管口径分别为 5.4、7.6、12.7、14.5 mm, 其中发射管为 12.7 mm 时, 最高发射速度可达 7 km/s。一级驱动气体为氮气, 二级驱动气体为氢气。利用磁测速和激光测速两种方式测量弹丸速度。配气系统用于高压气室的加压充气以及为泵管内充填轻质气体。真空系统用于在靶舱内形成真空环境。实验用弹丸为 2A12 铝合金球。防护屏为 2A12 铝合金板, 厚度为 1 mm。舱壁为 5A06 铝合金板, 厚度为 3 mm。防护

^{*} 收稿日期: 2004-11-16; 修回日期: 2005-06-28

作者简介: 管公顺(1969—), 男, 博士研究生。

屏和舱壁的尺寸均为 200 mm×200 mm。防护屏与舱壁之间的间距为 100 mm,如图 1 所示。弹丸撞击速度范围在 0.5~5.5 km/s 之间,撞击角度为 0°。撞击时靶舱内抽真空,环境温度为室温。本实验选取 10 种直径尺寸的铝质球形弹丸,对于每一种尺寸的弹丸,通过改变撞击速度确定临界失效点,以确定相应弹丸直径下的临界撞击速度。

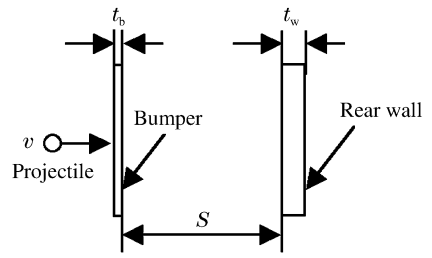


图 1 实验所用的 Whipple 防护结构示意图

Fig.1 Whipple shield configuration in the experiment

3 实验结果及损伤模式分析

表 1 为铝质球形弹丸高速撞击铝合金 Whipple 防护结构的实验结果,包括弹丸的撞击速度和防护屏与舱壁的损伤情况。其中,弹丸直径 $D_p=3\sim 6$ mm,撞击速度 $v=0.5\sim 5.5$ km/s。实验结果表明,在高速撞击情况下,防护屏与舱壁的损伤模式与撞击参数有关。表中 D_h 、 D_c 、 D_r 、 D_{max} 分别为防护屏穿孔尺寸、中心弹坑分布区直径、外环弹坑分布区直径、弹坑最大分布区直径。

表 1 铝合金 Whipple 防护屏实验结果

Table 1 Experimental results of aluminum alloy Whipple shield

| No. | D_p /mm | v /(km/s) | D_h /mm | 舱壁弹坑分布 | | | No. | D_p /mm | v /(km/s) | D_h /mm | 舱壁弹坑分布 | | |
|-------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | | | | D_c /mm | D_r /mm | D_{max} /mm | | | | | D_c /mm | D_r /mm | D_{max} /mm |
| 1A167 | 2.74 | 3.09 | 4.44 | 14 | 39 | 139 | 1A104 | 4.98 | 3.29 | 7.20 | 23 | 50 | 149 |
| 1A153 | 3.02 | 1.06 | 3.42 | 无此区 | 无此区 | 29 | 1A137 | 4.98 | 3.52 | 7.44 | 23 | 51 | 155 |
| 1A161 | 3.02 | 2.10 | 4.08 | 无此区 | 无此区 | 95 | 1A140 | 4.98 | 3.79 | 7.66 | 26 | 52 | 141 |
| 1A163 | 3.02 | 2.58 | 4.68 | 无此区 | 无此区 | 117 | 1A121 | 4.98 | 4.00 | 7.33 | 无此区 | 无此区 | 160 |
| 1A165 | 3.02 | 2.86 | 4.82 | 无此区 | 无此区 | 125 | 1A052 | 4.98 | 4.13 | 7.76 | 38 | 63 | 177 |
| 1A164 | 3.02 | 3.33 | 5.30 | 无此区 | 49 | 131 | 1A054 | 4.98 | 4.27 | 7.78 | 35 | 57 | 163 |
| 1A162 | 3.02 | 3.68 | 5.08 | 15 | 45 | 135 | 1A053 | 4.98 | 4.46 | 7.96 | 35 | 63 | 170 |
| 1A143 | 3.96 | 1.25 | 5.00 | 无此区 | 无此区 | 41 | 1A046 | 4.98 | 4.46 | 8.00 | 37 | 62 | 177 |
| 1A145 | 3.96 | 1.75 | 5.28 | 无此区 | 无此区 | 102 | 1A026 | 4.98 | 4.55 | 8.18 | 34 | 63 | 167 |
| 1A040 | 3.96 | 4.24 | 6.92 | 37 | 62 | 170 | 1A103 | 4.98 | 5.00 | 8.18 | 36 | 68 | 166 |
| 1A067 | 3.96 | 4.81 | 7.38 | 35 | 55 | 160 | 1A102 | 4.98 | 5.00 | 8.20 | 31 | 63 | 180 |
| 1A070 | 4.10 | 3.42 | 6.78 | 26 | 52 | 155 | 1A147 | 5.07 | 1.47 | 5.72 | 无此区 | 无此区 | 103 |
| 1A122 | 4.23 | 4.39 | 6.46 | 10 | 45 | 136 | 1A023 | 5.07 | 3.45 | 7.40 | 16 | 44 | 147 |
| 1A062 | 4.23 | 4.46 | 7.76 | 36 | 68 | 163 | 1A123 | 5.07 | 3.73 | 7.48 | 无此区 | 无此区 | 165 |
| 1A159 | 4.89 | 0.912 | 穿孔非圆形 | 无此区 | 无此区 | 68 | 1A031 | 5.07 | 4.31 | 8.58 | 30 | 无此区 | 177 |
| 1A160 | 4.89 | 0.929 | 穿孔非圆形 | 无此区 | 无此区 | 61 | 1A150 | 5.16 | 0.896 | 5.22 | 无此区 | 无此区 | 55 |
| 1A156 | 4.89 | 1.17 | 5.40 | 无此区 | 无此区 | 99 | 1A154 | 5.16 | 1.09 | 5.48 | 无此区 | 无此区 | 75 |
| 1A144 | 4.89 | 1.92 | 6.22 | 无此区 | 无此区 | 117 | 1A063 | 5.16 | 4.46 | 8.12 | 34 | 65 | 170 |
| 1A142 | 4.89 | 2.02 | 6.16 | 无此区 | 无此区 | 101 | 1A155 | 5.28 | 1.02 | 5.54 | 无此区 | 无此区 | 62 |
| 1A051 | 4.89 | 4.27 | 7.80 | 31 | 63 | 170 | 1A038 | 5.56 | 4.10 | 8.72 | 37 | 70 | 165 |
| 1A030 | 4.89 | 4.39 | 7.86 | 31 | 61 | 175 | 1A151 | 5.84 | 0.962 | 5.96 | 无此区 | 无此区 | 85 |
| 1A139 | 4.89 | 4.55 | 7.88 | 32 | 63 | 170 | 1A134 | 5.84 | 3.43 | 8.16 | 24 | 49 | 150 |
| 1A158 | 4.98 | 0.909 | 5.14 | 无此区 | 无此区 | 72 | 1A133 | 5.84 | 3.52 | 8.28 | 25 | 48 | 160 |
| 1A157 | 4.98 | 1.00 | 5.26 | 无此区 | 无此区 | 57 | 1A024 | 5.84 | 3.68 | 8.38 | 26 | 53 | 170 |
| 1A148 | 4.98 | 1.49 | 5.70 | 无此区 | 无此区 | 106 | 1A025 | 5.84 | 4.31 | 9.00 | 29 | 59 | 177 |
| 1A149 | 4.98 | 1.70 | 5.90 | 无此区 | 无此区 | 112 | 1A152 | 5.97 | 0.687 | 6.16 | 无此区 | 无此区 | 34 |
| 1A146 | 4.98 | 1.85 | 6.02 | 无此区 | 无此区 | 117 | 1A044 | 5.97 | 4.39 | 8.80 | 37 | 64 | 175 |

3.1 防护屏穿孔特性

受铝质球形弹丸高速撞击后,防护屏发生圆形穿孔,其穿孔尺寸显著依赖于弹丸直径和撞击速度。穿孔形貌与撞击速度有关,当撞击速度低于 1 km/s 时,防护屏穿孔背面有明显的后翘拉伸变形,且穿孔边缘出现小裂纹;当撞击速度高于 3 km/s 时,防护屏穿孔前后边缘整齐光滑、无裂纹。当撞击速度在 1~3 km/s 之间时,穿孔形貌在两者之间不确定。

撞击速度和弹丸直径是影响薄铝板受球形弹丸高速撞击穿孔尺寸的两个重要因素,图 2(a)给出了球形弹丸直径分别为 3.96、4.98、5.84 mm 时,薄铝板防护屏高速撞击穿孔直径随弹丸撞击速度变化的规律。当撞击弹丸直径和防护屏厚度不变时,薄铝板防护屏高速撞击穿孔直径随弹丸撞击速度的增加而增大,二者接近于正比关系。图 2(b)给出了弹丸撞击速度分别为 3.47(±0.05) km/s 和 4.27(±0.04) km/s 时,薄铝板防护屏高速撞击穿孔直径随撞击弹丸直径变化的规律,当弹丸撞击速度和防护屏厚度不变时,薄铝板防护屏高速撞击穿孔直径随撞击弹丸直径的增大而增大,二者接近于正比关系。

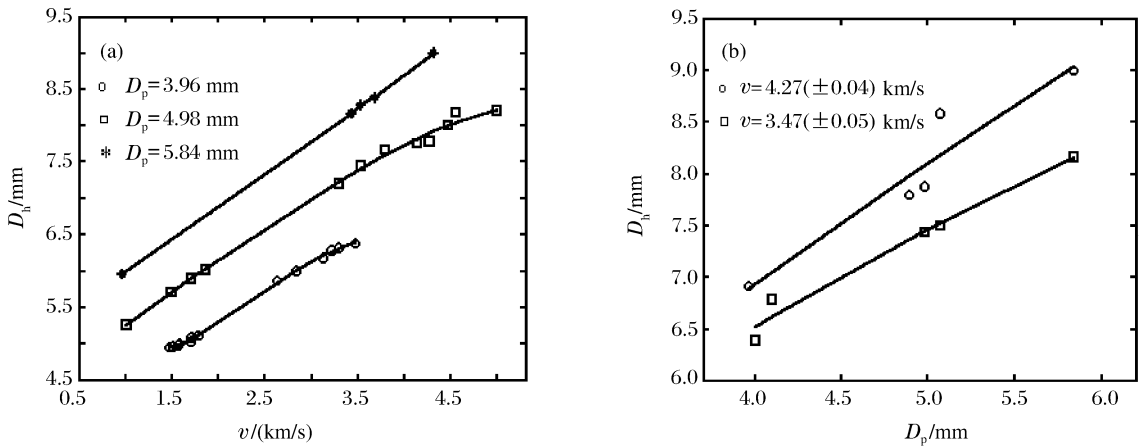


图 2 防护屏撞击穿孔直径随撞击速度和弹丸直径的变化

Fig. 2 Impact velocity and projectile diameter dependence on the hole diameter in bumper

3.2 舱壁成坑特性

弹丸击穿防护屏后,在防护屏的后面会产生由弹丸和防护屏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及弹丸和防护屏的材料性质。当弹丸撞击速度小于使弹丸材料破碎的门槛值时,弹丸穿过防护屏后仍以一个较大的弹体撞击舱壁,在舱壁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,而防护屏破片则在周围形成一些分散的小弹坑。当弹丸撞击速度大于该门槛值时,弹丸穿过防护屏后将破碎为许多碎片,并与防护屏破片在防护屏后面形成碎片云团,碎片云团撞击到舱壁上,在一定范围内使舱壁成坑、剥落和穿孔。对于正撞击,舱壁损伤一般发生在一个圆形区域内,最大的弹坑或穿孔位于弹丸弹道与舱壁相交处。由表 1 中的数据可以发现,在本次实验中,使舱壁呈现不同损伤现象的撞击速度的门槛值约为 3 km/s,当撞击速度低于 3 km/s 时,舱壁撞击中心处的损伤最显著,发生成坑甚至穿孔现象,其他区域弹坑分散且数目少、尺寸小,弹坑无分区现象,如图 3(a)、(b)所示;当撞击速度高于 3 km/s 时,舱壁上除撞击中心发生较深弹坑甚至穿孔外,弹坑集中、弹坑数目多、尺寸大,并且在舱壁上可以明显地区分为中心弹坑分布区和外环弹坑分布区两个不同的弹坑密集区。在中心弹坑分布区,如舱壁撞击中心出现穿孔现象,则其穿孔形状不规则,穿孔边缘撕裂、剥落。在外环弹坑分布区,呈现显著的环形损伤带,其损伤程度高于除撞击中心外的其他区域,如图 3(c)、(d)所示。

如果保持弹丸直径、防护屏厚度及防护间距不变,舱壁中心弹坑分布直径、外环弹坑分布直径以及最大弹坑分布直径将随着弹丸撞击速度的增加而增大,如图 4 所示。

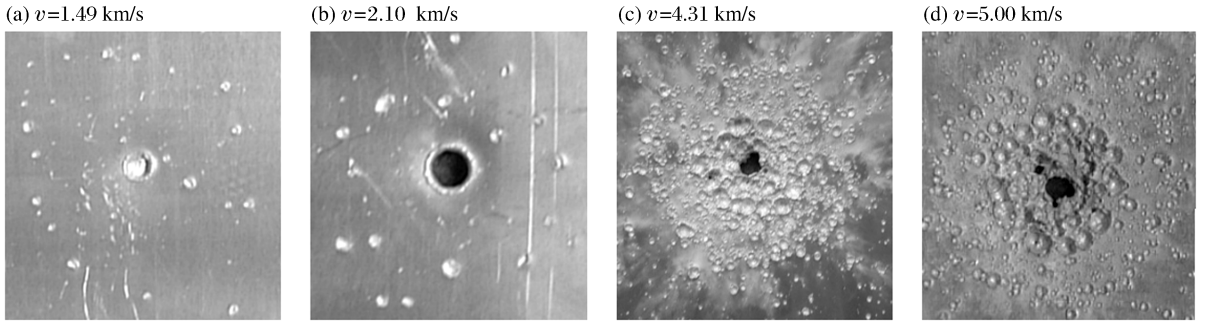


图 3 舱壁高速撞击损伤结果

Fig. 3 Results of damage in rear wall by hypervelocity impact

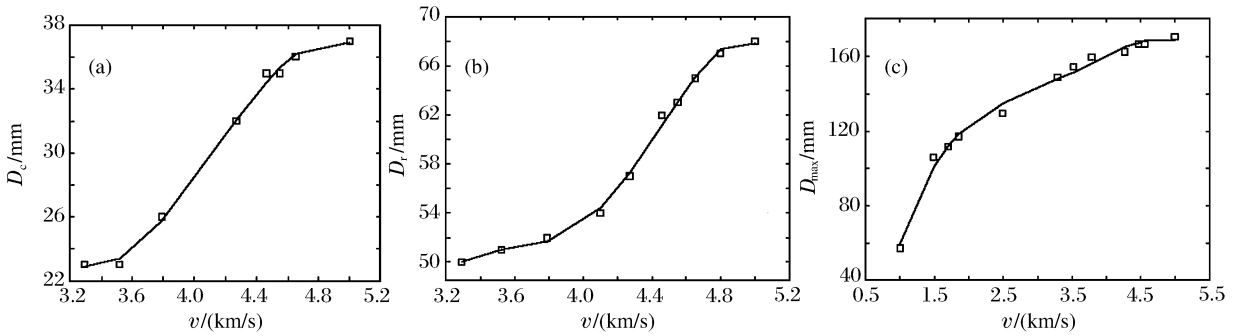


图 4 舱壁弹坑分布随撞击速度的变化

Fig. 4 Impact velocity influence on the crater distributing in rear wall

4 防护结构防护性能分析

4.1 撞击极限曲线

撞击极限曲线是表征给定材料与尺寸的防护结构防护性能的重要参数。在某撞击速度和撞击角度条件下,弹丸直径越大防护结构的损伤破坏程度越大,当弹丸直径大于某临界值时,舱壁损伤程度将满足失效准则条件,被认为失效,该临界弹丸直径被称作撞击极限。舱壁失效准则常被定义为击穿或舱壁背面发生剥落,譬如可定义为当撞击弹丸直径接近于临界弹丸直径 D_{cr} 时,舱壁将出现剥落或刚好透光。在以撞击速度为横坐标、弹丸直径为纵坐标的坐标系下,连接撞击极限所形成的曲线称为撞击极限曲线。对于指定撞击速度,当弹丸直径高于撞击极限曲线时,防护结构失效,否则防护结构被认为有效地屏蔽了高速碎片的撞击。

根据实验数据绘制的撞击极限曲线如图 5 中实线所示,实验的击穿点和未击穿点分别位于曲线的上下两侧,以撞击极限曲线为界限分为击穿区域和未击穿区域。在本实验速度范围内,撞击极限曲线在 3 km/s 处出现了折点,当撞击速度低于 3 km/s 时临界弹丸直径随撞击速度的增加单调下降,反之则单调增加。撞击极限曲

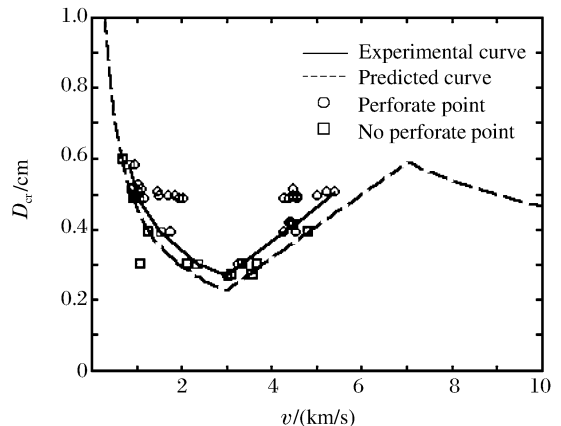


图 5 实验结果与预测结果的比较

Fig. 5 Comparison of the experimental and the predicted results

线的折点即为高速弹丸开始充分破碎的门槛值,表明在门槛值前后存在不同的损伤破坏机理。撞击极限曲线变化趋势的分区特性与防护屏及舱壁的损伤模式依赖于撞击速度的变化规律相吻合。分析舱壁的损伤模式可见,当弹丸撞击速度低于 3 km/s 时,弹丸撞击防护屏后未充分破碎,处于相对完整状态,造成舱壁破坏的撞击动能随速度的增加而增大,因而临界弹丸直径减小;当弹丸撞击速度高于 3 km/s 时,弹丸破碎逐渐充分,甚至可能开始液化,作用于舱壁的二次碎片云团的面积增大,单位面积所接受的能量减小,使击穿舱壁的临界弹丸直径随速度的增高而增大。

4.2 撞击极限方程

临界弹丸直径与防护结构尺寸参数、材料性能参数以及撞击参数之间存在函数关系,即所谓撞击极限方程。Christiansen 通过对大量实验数据进行回归建立了 Whipple 防护方案的撞击极限方程^[8],撞击极限方程分 3 个速度区间进行描述,主要原因是在不同的速度区间内,伴随着不同的物理过程。对于铝 Whipple 防护结构,在第一区间,撞击材料未充分破碎,且未发生物态的变化;而在第二区间,撞击材料充分破碎,并开始液化;到了第三区间,撞击材料甚至出现汽化。方程如下

第一区间($v_n \leq 3$ km/s):

$$D_{cr} = [(t_w(\sigma/40)^{0.5} + t_b)/(0.6(\cos\theta)^{5/3}\rho_p^{0.5}v^{2/3})]^{18/19} \quad (1)$$

第二区间($3 \text{ km/s} < v_n < 7 \text{ km/s}$):

$$D_{cr} = \{[(t_w(\sigma/40)^{0.5} + t_b)/(1.248\rho_p^{0.5}\cos\theta)]^{18/19}(1.75 - v\cos\theta/4)\} + \{[1.071D_w^{2/3}\rho_p^{-1/3}\rho_b^{-1/9}S^{1/3}(\sigma/70)^{1/3}][v\cos\theta/4 - 0.75]\} \quad (2)$$

第三区间($v_n \geq 7$ km/s):

$$D_{cr} = 3.919t_w^{2/3}\rho_p^{-1/3}\rho_b^{-1/9}(v\cos\theta)^{-2/3}S^{1/3}(\sigma/70)^{1/3} \quad (3)$$

式中: θ 为弹丸入射角, ($^\circ$); v_n 为弹丸的法向撞击速度, km/s; ρ_p 为弹丸密度, g/cm^3 ; ρ_b 为防护屏密度, g/cm^3 ; σ 为舱壁材料的屈服强度, ksi (1 ksi = 6.9 MPa); t_w 为舱壁厚度, t_b 为防护屏厚度, S 为防护屏与舱壁之间的距离。式中长度的单位均为 cm。

4.3 实验结果与预测结果对比

根据上述 Christiansen 给出的 Whipple 防护结构的撞击极限方程,得到了该 Whipple 防护结构的预测撞击极限曲线,如图 5 虚线所示。舱壁材料 5A06 铝合金的屈服强度是通过实验获得的,其值为 $\sigma = 350$ MPa。由图可见,实验撞击极限曲线略高于预测撞击极限曲线,但二者的变化趋势基本一致。

由于此次实验弹丸的最高发射速度只有 5.21 km/s,所以无法获得利用 Christiansen 撞击极限方程得到的撞击极限曲线中的第二个拐点的预测值与实验值的符合情况,但在发射速度为 5.21 km/s 时的舱壁损伤状态与利用 Christiansen 方程得到的预测撞击极限曲线表示的状态是吻合的。

5 结束语

通过铝合金 Whipple 防护结构的高速撞击实验以及对防护屏和舱壁在不同撞击速度区间内的损伤分析得到了以下初步结论:

(1) 存在影响铝合金 Whipple 防护结构损伤特征的撞击速度门槛值,撞击速度低于该门槛值,舱壁弹坑分布不规则,反之舱壁弹坑分布出现规律性分区。

(2) 当保持其他条件不变时,薄铝合金板防护屏高速撞击穿孔直径随弹丸直径和撞击速度的增加而增大,舱壁最大弹坑分布直径随弹丸撞击速度的增加而增大;当撞击速度高于门槛值时,舱壁中心弹坑分布直径和环形弹坑分布直径随弹丸撞击速度的增大而增大。

(3) 实验得到了铝合金 Whipple 防护结构在 0.5~5.5 km/s 速度范围内的撞击极限曲线,并与利用 Christiansen 撞击极限方程得到的预测撞击极限曲线进行了比较,二者的规律是一致的。对于撞击速度大于 5.5 km/s 时的撞击极限曲线还需进一步的实验验证。

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 Gui-rong, XIAO Ming-xin. Reliability design spacecraft module wall against meteoroid perforation[J]. Chinese Space Science and Technology, 1986,7(6):45-48.
- [2] Palmieri D, Schafer F, Hiermaier S, et al. Numerical simulation of non-perforation impacts on shielded gas-filled pressure vessels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:591-602.
- [3] 柳森,李毅. Whipple 防护屏弹道极限参数试验[J]. 宇航学报,2004,25(2):205-207.
LIU Sen, LI Yi. Ballistic limit parameter test of the Whipple shield[J]. Journal of Astronautics, 2004,25(2):205-207.
- [4] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics limit equations for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:93-104.
- [5] Schonberg W P, Williamsen J E. Empirical hole size and crack length models for dual-wall systems under hypervelocity projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,20:711-722.
- [6] 张伟,管公顺,庞宝君,等. 航天器空间碎片单护屏防护结构参数优化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(2):119-221.
ZHANG Wei, GUAN Gong-sun, PANG Bao-jun, et al. Optimization of parameter for spacecraft single-bumper shielding structure against space debris[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003,35(2):119-221.
- [7] Palmieri D, Faraut M, Destefanis R. Whipple shield ballistic at impact velocity higher than 7 km/s[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:579-590.
- [8] Christiansen E, Lambert M, Stokes H, et al. IADC Protection Manual[Z]. 3rd ed. Germany: Inter Agency Debris Committee, 2002.

Experimental investigation of high-velocity impact on aluminum alloy Whipple shield

GUAN Gong-shun^{*}, PANG Bao-jun, HA Yue, ZHANG Wei
(Research Institute of Composites, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, Helongjiang, China)

Abstract: In order to get the damage mode and resist character of spacecraft shield structure by the high-velocity impact of space debris, a two-stage light gas gun with non-powder projection was used to launch Al-sphere projectiles impacting on aluminum alloy Whipple shield. By analyzing damage mode in different impact velocity ranges, the laws of penetration hole diameter and cratered area diameter depending on projectile diameter and impact velocity were observed. At the same time, the ballistic limit curves of the Whipple shield in a velocity range from 0.5 km/s to 5.5 km/s was obtained. Comparing to the predicted curve from Christiansen ballistic limit equation, the experimental minimum critical projectile diameter is slightly greater than the prediction.

Key words: mechanics of explosion; damage mode; high-velocity impact; whipple shield; ballistic limit curve

* Corresponding author: GUAN Gong-shun
E-mail address: ggsh@hit.edu.cn
Telephone: 0451-86417978