

文章编号: 1001-1455(2008)01-0010-07

防护板尺寸对 Whipple 防护结构撞击损伤影响的实验研究^{*}

哈 跃, 管公顺, 庞宝君, 张 伟

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 通过高速撞击实验, 探讨了采用小尺寸防护板的可行性。实验中采用的 Whipple 结构由尺寸变化的 1 mm 厚防护板(前板)和尺寸固定的 3 mm 厚舱壁板(后板)组成, 防护板与舱壁板间隔 10 cm。防护板为边长分别为 8、12、16 和 20 cm 的方形 2A12 铝合金板, 舱壁板为边长为 20 cm 的方形 5A06 铝合金板。实验过程中均采用直径为 4 mm 的铝合金球形弹丸, 撞击速度为 1.45~1.71 km/s。实验结果表明: Whipple 防护结构在舱壁板被击穿的概率大于 0.8 的条件下和击穿概率为 0 的条件下的极限速度以及舱壁板临界击穿条件下的速度都与防护板尺寸无关; 并且, 防护板前后表面击穿孔的直径及击穿孔侧壁的倾斜角也与防护板尺寸无关; 但是, 在速度相同的条件下随着板尺寸的增大, 防护板板面的最大挠度增大, 而且, 防护板挠曲面的凹凸方向也由单一的凹向变成凹凸方向交替出现; 随着速度的增加和板尺寸的增大, 防护板最大挠度的增量减小。

关键词: 爆炸力学; 尺寸效应; 高速撞击; Whipple 防护结构; 空间碎片

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

随着探索宇宙空间活动的增加, 航天器与空间碎片超高速撞击的风险随之增大。近地轨道上的航天器与空间碎片相撞会遭受损伤甚至造成灾难性破坏^[1]。航天器空间碎片防护结构的设计和开发研究受到普遍重视^[2-3]。利用防护板结构可以显著降低发生灾难性破坏的可能性^[4-5]。在航天器空间碎片防护结构设计和开发研究过程中, 超高速撞击地面模拟实验是观察、了解、分析防护结构超高速撞击损伤效应的重要环节。为了全面观察、了解超高速撞击现象获取更多的实验信息, 超高速撞击地面模拟实验时往往要同时采用多种观测手段, 如超高速摄影设备、X 光超高速摄影装置及数码成象超高速摄影装置等。以往的空间碎片防护结构超高速撞击地面模拟实验所采用的试件中防护板(也称为防护板或前板)的尺寸与舱壁板(及填充材料)尺寸往往都是相同的。防护板对邻近部件(如舱壁板或填充材料)的遮挡使得直接观察邻近部件的损伤过程变得十分困难。若采用较小尺寸的防护板, 就会减少防护板占用的空间并使得邻近部件的受撞击面较多地暴露出来, 从而有利于合理布置观测设备, 提高观测效果。另外, 在采用碳纤维增强树脂板及蜂窝夹层板等材料作为防护材料的防护结构实验中, 有的已经采用了较小尺寸的防护板^[6-7]。然而, 到目前为止, 有关防护板尺寸变化对防护结构的损伤及防护效果的影响方面的研究尚未见到较完整的报道。

本文中针对铝合金防护板尺寸的变化对 Whipple 防护结构的损伤及防护性能的影响进行了实验, 分析采用小尺寸防护板结构的可行性。根据 4 种不同尺寸防护板的 Whipple 防护结构的撞击实验结果, 以舱壁板损伤形态和防护板的损伤形态为依据, 分析在固定弹丸直径, 改变弹丸撞击速度的条件下, 防护板尺寸变化对防护结构防护效果产生的影响以及对防护板击穿孔孔径、孔口形态和板面塑性变形的影响规律。

^{*} 收稿日期: 2006-08-31; 修回日期: 2007-02-14

作者简介: 哈 跃(1956—), 男, 博士研究生, 副教授。

2 实验方法

采用二级轻气炮为发射装置^[8]。采用 Whipple 防护结构,如图 1 所示:防护板为正方形,厚度 $t_b=1\text{ mm}$,边长取为 80、120、160 及 200 mm 的 4 种尺寸;舱壁板也为正方形,厚度 $t_w=3\text{ mm}$,边长为 200 mm;防护间距 $l=10\text{ cm}$,弹丸直径 $d_p=4\text{ mm}$,弹丸质量 $m_p=0.09\text{ g}$,撞击速度 $v=1.45\sim 1.71\text{ km/s}$;弹丸为 2017 铝合金球、防护板为 2A12 铝合金板,舱壁板为 5A06 铝合金板。

2.1 舱壁板损伤描述

一般根据舱壁板的损伤程度来评价防护结构的性能,本文中对舱壁板损伤的表述按损伤程度由大到小排列分别为:“穿透”;“击穿,但弹片未穿出”;“未击穿,有鼓包并开裂”和“未击穿,有鼓包”4 种。从防护角度来说,前两种情况应视为防护失效;第三种为临界状态;第四种为有效防护。从穿甲角度来说,前一种情况应视为有效击穿;第二种为临界状态;第三、四种为未击穿。但作为损伤现象来说,第二和第三种情况下的弹丸均已接近靶板背表面,而且第三种情况下裂纹稍作扩展靶板孔口处的材料就会脱离,变成第二种情况,见图 2。因此,将第二和第三种情况视为相同损伤,视为临界状态。

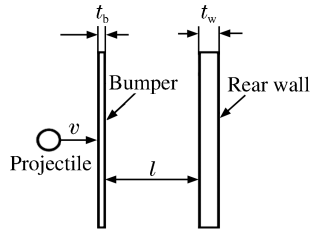


图 1 Whipple 防护结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Whipple shield configuration

(a) Penetration with projectile no piercing through

(b) No perforation with bulge and crack

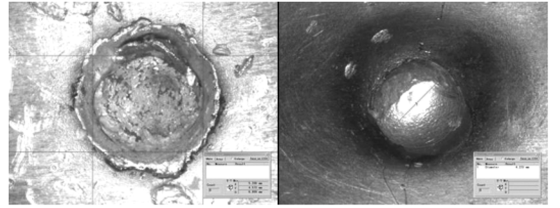
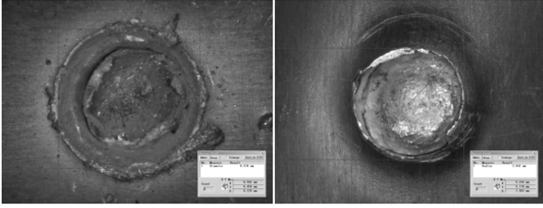


图 2 舱壁板损伤形态数码照片

Fig. 2 Digital photographs of the hole in bumper and damage of rear wall

2.2 防护板损伤描述

(1)穿孔孔径。穿孔孔径的度量是通过 VHX-100 数字显微镜完成的,图 3 所示为数码显微镜拍摄的防护板正、背面的孔口照片,图中各线为量取孔口直径时的定位线,正、背面孔径都取为孔边环状突起(翻边)内侧的尺寸。

(a) Front of bumper

(b) Back of bumper

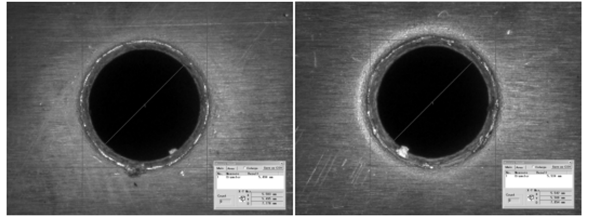


图 3 防护板穿孔形态数码照片

Fig. 3 Digital photographs of the perforation hole in bumper

(a) Front of bumper

(b) Back of bumper

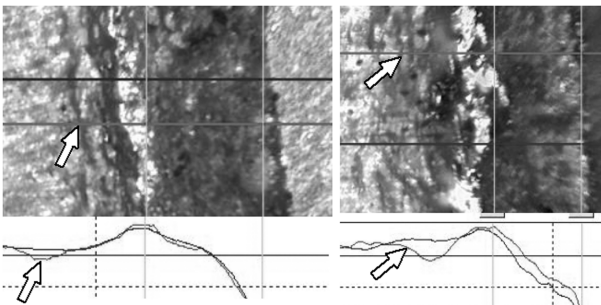


图 4 160 防护板击穿孔口形态的数码合成图像

Fig. 4 Digital photographs of the edge shapes of the perforation holes in the bumper 160

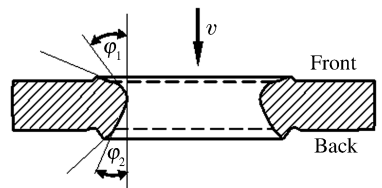


图 5 球形弹丸高速撞击薄板形成的穿孔模型

Fig. 5 Perforation hole model of plate impacted by a high-velocity spherical projectile

(2)击穿孔孔口形态。图4为160防护板击穿孔孔口形态的数码合成图像,图像下边的曲线为图像上定位线处板面及孔口边缘起伏形态特征曲线,可以作为定位线处板剖面线的参考线。由图4可以观察到在靶板正面孔口外边缘有堆积突起,由孔口外边缘突起的高点沿孔内壁向中心形成两段坡度不同的坡面,孔口内边坡面坡度角为 φ_1 。靶板背面孔口外边缘也有突起,由孔口外边缘突起的高点沿孔内壁向中心也形成两段坡度不同的坡面,孔口内边坡面坡度角为 φ_2 。靶板背面孔口外边缘的突起外侧有环状凹坑,环状凹坑区是球形弹丸高速及超高速撞击的典型孔口形态之一。孔口断面模型如图5所示,构成 φ_1 和 φ_2 的坡面会出现突起和下巴的情况。

(3)防护板板面相对挠度变形。将板边界处的点取为基准点(挠度零点),以连接两个基准点的直线为 x 坐标轴(沿平行于板边并通过弹孔直径的方向), x 坐标轴上的点与它在板面上的投影点之间的距离即为板面的相对挠度。

3 实验结果分析

3.1 防护板尺寸变化对防护结构防护效果的影响

3.1.1 实验结果

舱壁板在不同防护板尺寸,不同撞击速度条件下的损伤实验结果见表1,其中 b_b 为防护板边长, d_p 为弹丸直径, v 为弹丸速度。

表1 铝合金 Whipple 防护结构舱壁板损伤实验结果

Table 1 Experimental results of the wear walls in the aluminum alloy Whipple shields

No	$b_b \times b_b$	d_p / mm	$v / (\text{km/s})$	舱壁板损伤描述
1A207	80 mm × 80 mm	3.97	1.66	击穿
1A208			1.70	击穿
1A209			1.64	击穿
1A210			1.78	击穿
1A211			1.71	未击穿,鼓包
1A213			1.65	击穿
1A214			1.64	击穿
1A215			1.58	未击穿,鼓包,开裂
1A217			120 mm × 120 mm	3.97
1A219	1.51	未击穿,鼓包		
1A220	1.48	未击穿,鼓包		
1A221	1.62	未击穿,鼓包		
1A222	1.57	击穿,弹丸未穿出		
1A223	1.70	击穿		
1A224	160 mm × 160 mm	3.97	1.64	击穿
1A225			1.68	击穿,弹丸未穿出
1A226			1.62	击穿
1A228			1.51	未击穿,鼓包
1A229			1.65	未击穿,鼓包,开裂
1A230			1.64	击穿
1A231			200 mm × 200 mm	3.97
1A232	1.71	击穿		
1A233	1.58	未击穿,鼓包,开裂		

3.1.2 实验结果分析

(1) 概率击穿速度的比较。参照装甲板弹道侵彻六射弹弹道极限实验方法^[9], 80 mm 防护板防护结构(简称 80 板结构, 余下类推)在速度为 1.64~1.71 km/s 时, 舱壁击穿的概率为 0.83(5/6), 6 发射弹的平均速度 $v_{83} = 1.67$ km/s。速度区间段大小 $\Delta v = 0.07$ km/s。160 板结构在速度为 1.62~1.7 km/s 时, 舱壁击穿的概率为 0.83(5/6), $v_{83} = 1.66$ km/s, $\Delta v = 0.08$ km/s。2 种板结构在相同的击穿概率条件下的极限速度和速度区间十分接近, 说明 80 板结构和 160 板结构两种结构在较高的击穿概率条件下的防护效果是一致的。

(2) 临界击穿速度的比较。120 板结构速度为 1.57 km/s 时和 200 板结构速度为 1.58 km/s 时, 舱壁板损伤现象相同: 舱壁已击穿, 舱壁穿孔处的材料飞离舱壁; 弹丸没有穿出, 嵌在孔中, 弹丸头部与舱壁背表面齐平。另外, 80 防护板防护结构在速度为 1.58 km/s 时, 舱壁板虽未击穿, 但舱壁板背面鼓包与板面交界处开裂, 表明弹丸头部也已接近舱壁板背表面。这表明 80 板结构、120 板结构和 200 板结构 3 种结构在临界击穿条件下的极限速度十分接近, 可取为 1.58 km/s。三者 1.58 km/s 时均出现临界损伤, 说明三者 1.58 km/s 时防护性能也是一致的。

(3) 不被击穿条件下的防护性能比较。120 板在速度为 1.47~1.5 km/s 时, 舱壁穿透的概率为 0 (0/3), 此时的速度 $v_0 = 1.49$ km/s, 说明该结构在速度低于 1.49 km/s 时不会被击穿。而 120 板结构、160 板结构和 200 板结构在与 v_0 接近的 1.51 或 1.53 km/s 及以下速度均没有被击穿, 这表明 120 板结构、160 板结构和 200 板结构 3 种结构在不被击穿条件下的防护性能也是一致的。

由分析可知, 用这 4 种不同尺寸的防护板并以舱壁的损伤为依据来评价防护效果得到的结论一致。

3.2 防护板尺寸变化对防护板击穿孔直径的影响

3.2.1 同一速度下采用不同防护板时防护板和舱壁板的击穿孔直径的变化规律

同一速度下采用不同尺寸防护板时防护板和舱壁板的穿孔直径列于表 2, 其中 v 为弹丸速度, b_b 为防护板边长, $d_{b,f}$ 和 $d_{b,b}$ 为防护板前后表面穿孔直径, $d_{w,f}$ 和 $d_{w,b}$ 为舱壁板前后表面穿孔直径。

表 2 防护板和舱壁板的穿孔直径

Table 2 The diameters of perforation holes in the bumpers and the rear walls

No	v /(km/s)	$b_b \times b_b$	$d_{b,f}$ /mm	$d_{b,b}$ /mm	$d_{w,f}$ /mm	$d_{w,b}$ /mm	舱壁板损伤
1A0208	1.70	80 mm×80 mm	5.704	5.792	6.684	4.708	击穿
1A0223	1.70	160 mm×160 mm	5.756	5.892	7.045	4.504	击穿
1A0232	1.71	200 mm×200 mm	5.636	5.715	6.976	5.405	击穿
1A0209	1.64	80 mm×80 mm	5.708	5.840	6.850	5.140	击穿
1A0224	1.64	160 mm×160 mm	5.669	5.793	7.002	5.290	击穿
1A0230	1.64	160 mm×160 mm	5.644	5.681	6.825	5.062	击穿
1A0219	1.51	120 mm×120 mm	5.580	5.552	6.608(坑深 0.92)	鼓包高 1.75	未击穿
1A0228	1.51	160 mm×160 mm	5.467	5.535	6.374(坑深 1.0)	鼓包高 2.3	未击穿

由表 2 可知: 在 1.7 km/s 的速度条件下, 不同尺寸防护板的穿孔直径的最大差值与平均穿孔直径的比值仅为 2.1%; 在 1.64 km/s 的速度条件下, 不同尺寸防护板的穿孔直径并不比同一尺寸防护板之间的差别更大; 在 1.51 km/s 速度条件下, 不同防护板自身穿孔直径差别很小。各舱壁均未击穿, 且舱壁板的坑深及鼓包形态相同。在速度为 1.64~1.7 km/s 时, 80 板结构防护板平均孔径为 5.706 mm, 而 160 板结构防护板平均孔径为 5.69 mm, 两者十分接近。由分析可知, 相同实验条件下, 采用不同尺寸防护板所得到的防护板穿孔直径的统计结果是一致的。

3.2.2 防护板击穿孔形态分析

根据图 5 所示防护板击穿孔形态模型, 以图 4 所示防护板击穿孔孔口形态的数码合成图像下边的孔口边缘起伏形态特征曲线作为板剖面线的参考线, 在剖面线的参考线上量取 φ_1 、 φ_2 , 结果示于表 3 中, 其中 v 为弹丸速度, b_b 为防护板边长, φ_1 和 φ_2 为侵入角和喷出角。

表 3 表明, 在不同速度下不同防护板之间的孔口形态都表现为 $\varphi_1 > \varphi_2$ 。在速度为 1.51~1.64

km/s 时,各板的侵入角 φ_1 、喷出角 φ_2 及 φ_1 与 φ_2 两个角之间的角度差值具有一致性;在速度提高到约 1.70 km/s 时,80 板和 200 板的侵入角 φ_1 变化不明显,但喷出角 φ_2 的值相对提高, φ_1 与 φ_2 两个角之间的差值明显减少,喷出角 φ_2 更接近于侵入角 φ_1 。在同一速度下不同防护板之间的侵入角、喷出角及侵入角与喷出角的差值 $\varphi_1 - \varphi_2$ 都很接近,这说明防护板尺寸变化对穿孔形态的影响很小。

表 3 防护板孔边坡面角度

Table 3 Slope angle of perforation hole side in bumper

No	$v/(km/s)$	$b_b \times b_b$	$\varphi_1/(\circ)$	$\varphi_2/(\circ)$	$(\varphi_1 - \varphi_2)/(\circ)$
1A208	1.70	80 mm \times 80 mm	49	46	3
1A232	1.71	200 mm \times 200 mm	41	37	4
1A209	1.64	80 mm \times 80 mm	50	40	10
1A230	1.64	160 mm \times 160 mm	45	40	5
1A219	1.51	120 mm \times 120 mm	45	35	10
1A228	1.51	160 mm \times 160 mm	50	40	10
1A222	1.57	120 mm \times 120 mm	45	30	15

3.2.3 防护板塑性变形分析

为了分析防护板塑性挠度变形规律,测量了板面测点相对于基准点的位移。80 板、160 板和 200 板取不同间距的测量基准点,基准点处挠度为零。离原点最近的测点取在 5 cm 处,该点相对挠度最大。

在速度为 1.64 km/s 时,80 板和 160 板的最大相对挠度如图 6(a)所示,若以距孔中心 20 mm 处的挠度为基准,则两个板的相对位移如图 6(b)所示。而若以距孔中心 15 mm 处的挠度为基准,相对位移分别为 0.05 和 0.06 mm,两者几乎相等。

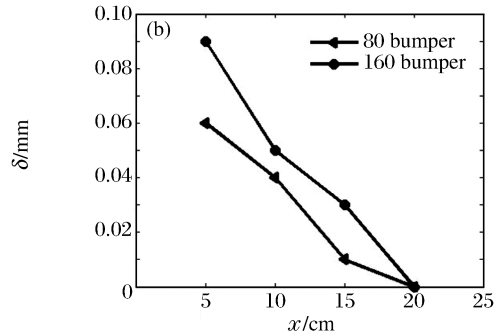
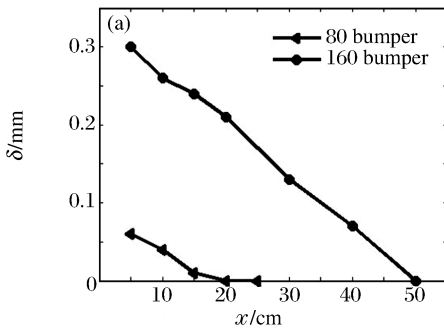
图 6 $v=1.64$ km/s 时防护板板面的相对挠度

Fig. 6 Relative deflection of bumper at 1.64 km/s

在速度约为 1.7 km/s 时,80 板、160 板和 200 板的最大相对挠度如图 7(a)所示。若以距孔中心 20 mm 处的挠度为基准,则 3 个板的相对位移为 0.06、0.07 和 0.08 mm,而位移曲线几乎重合,这表明同一速度下防护板尺寸的变化对孔边局部变形影响很小,见图 7(b)。

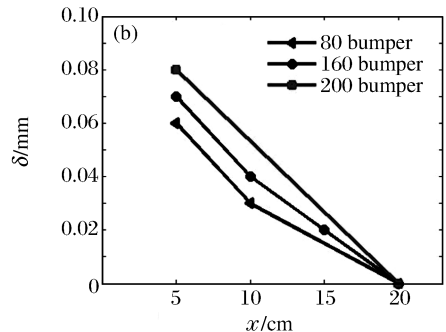
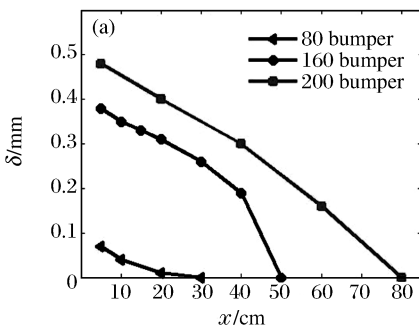
图 7 $v=1.70$ km/s 时防护板板面的相对挠度

Fig. 7 Relative deflection of bumper at 1.70 km/s

图 7(a)和图 6(a)中挠度曲线的凹向与防护板变形的凹向对应,曲线凹向上对应于板面凹向板背面,下文称为背凹,反之称为背凸。在速度为 1.7 km/s 时,80 板是背凹的;160 板和 200 板都是从背凹变成背凸,分界点分别在距孔中心 20 和 40 cm 处附近。在速度为 1.64 km/s 时,80 板是由背凸变为背凹的;160 板从背凹变成背凸又变成背凹。因此,同一速度时,不同板的板面变形凹向变化规律不同。

图 8 所示为各板在不同速度时的最大相对挠度值,实线为实验点的连线,虚线为根据现有的结果推测的实验点的分布趋势。对每一种板而言,最大相对挠度都随速度的提高而增大,板的尺寸越大挠度随速度增加的幅度也越大。在同一速度下,实验范围内各板最大相对挠度是随板尺寸的增加而增大的,但挠度增大的幅度随板尺寸的增加而减少。

由于弹丸高速撞击防护板产生的板面变形(挠度)是塑性变形,是滞后于弹丸击穿防护板过程的后续效应,因此,板面变形对弹丸的撞击损伤是没有影响的。

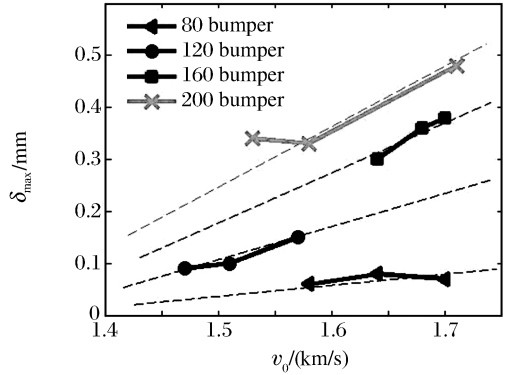


图 8 防护板在不同速度时的最大相对挠度
Fig. 8 Maximum relative deflection of bumper at different velocities

4 防护板的最小尺寸

弹丸撞击防护板时所产生的冲击波沿防护板厚度方向和板面方向传播。冲击波沿板面以弹性波的形式传播,根据在弹丸从接触防护板到完全离开的时间间隔内由撞击点发出的弹性波到达板边界并经反射回到撞击点的条件可以估算防护板的最小边长。设防护板边长的最小长度为 $b_{b,min}$,撞击孔位于板中心。则 $b_{b,min}$ 的限定条件为

$$b_{b,min} \geq (d_p + t_b)v_0/v \tag{1}$$

式中: v_0 为弹性波在防护板材料中的传播速度, E 、 ρ 为铝的弹性模量及密度, v 为弹丸速度, d_p 为弹丸直径, t_b 为防护板厚度。

对于本项实验,考虑纵波即压缩波的影响,取 $v_0 = \sqrt{E/\rho} = 5.02$ km/s,其中 E 、 ρ 分别为铝的弹性模量和密度; $v = 1.6$ km/s, $d_p = 4$ mm, $t_b = 1$ mm。则 $b_{b,min} > 16$ mm 时,就可以不考虑板边尺寸的影响。本项实验中最小板边长度 $b_{b,min} = 80$ mm,故可以忽略板尺寸的影响。

5 结 论

(1)在相同实验条件下,采用不同尺寸防护板所得到的防护板穿孔直径的统计结果是一致的。同一速度下,不同防护板之间的侵入角、喷出角及侵入角与喷出角的差值都很接近;防护板尺寸变化对防护板穿孔形态、孔边板面局部挠度变形的影响很小。以舱壁板的损伤为依据来评价防护结构高速撞击的防护效果时,采用边长尺寸满足公式(1)的不同的小防护板所得到的结论是一致的。

(2)防护板尺寸的变化对防护板板面总体挠度变形影响很大。同一速度时,不同尺寸防护板的板面变形凹向变化规律不同;各防护板的最大相对挠度随板尺寸的增加而增大,挠度增大的幅度随板尺寸的增加而减少。当考察弹丸高速撞击对防护板表面附着物的损伤时,不宜使用小尺寸防护板试件。

参考文献:

[1] Kiureghian A D, Geysekns P V, Khalessi M R. Probabilistic assessment of debris impact damage on orbital structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19:571-588.
 [2] Bernhard P P, Christiansen E L, Hyde J, et al. Hypervelocity impact damage into space shuttle surfaces[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,17:57-68.

- [3] Lambert M. Hypervelocity impacts and damage laws[J]. *Advancement in Space Research*, 1997,19:369-378.
- [4] Cour-Palais B G, Taylor E A, Crew J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990,10:134-140.
- [5] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics limit equations for spacecraft shielding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001,26:93-104.
- [6] Schaefer F, Destefanis R, Ryan S, et al. Hypervelocity impact testing of CFRP/AL honeycomb satellite structures [C]//*Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2005:407-412.
- [7] Nagao Y, Kibe S, Daigo K. Hyper velocity impact studies simulating debris collision on composites material[C]//*Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris*. Darmstadt, Germany, 2005:413-418.
- [8] 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.
GUAN Gong-shun, PANG Bao-jun, HA Yue, et al. Experimental investigation of high-velocity impact on aluminum alloy Whipple shield[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(5):461-466.
- [9] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 第一版, 北京: 国防工业出版社, 2000:121-125.

Effects of bumper lateral size on high-velocity impact damage to Whipple shield

HA Yue^{*}, GUAN Gong-shun, PANG Bao-jun, ZHANG Wei

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

Abstract: On the non-powder two-stage light gas gun facilities, high-velocity impact experiments were carried out to analyze the effects of bumper lateral size on the damage to Whipple shield and explore the feasibility of using bumper whose size is smaller than that of rear wall on Whipple shield in high-velocity impact tests. The configuration of Whipple shields consisted of 1-mm-thickness bumpers and 3-mm-thickness rear wall with 10-cm space between the bumper and the rear wall. The bumpers were 2A12 aluminum square plates with different side lines such as 8, 12, 16 and 20 cm. The rear wall was 5A06 Aluminum square plate with 20-cm side lines. All tests were performed by shooting aluminum projectile 4 mm in diameter at the velocity ranging from 1.45 to 1.71 km/s. Test results show that the mean velocity of 6 projectiles impacting on the Whipple shields is independent of bumper size when the perforation percentage of rear wall was over 80. It is found that the diameters of perforation holes both in front and in back of bumper are independent of bumper size too. However, the deflection on the bumper surface is dependent on bumper size obviously.

Key words: mechanics of explosion; size effect; high-velocity impact; Whipple shield; space debris

* Corresponding author: HA Yue

E-mail address: hayue09@163.com.cn

Telephone: 86-451-86417978