文章编号：1000-5773(2012)02-0127-08

# 不锈钢网/铝板多冲击防护屏高速撞击防护性能实验研究*

管公顺，陈礼文，王少恒，庞宝君

（哈尔滨工业大学航天学院航天工程系，黑龙江哈尔滨 150080）

**摘要**：通过对铝 Whipple 防护结构进行扩展变形，设计出不锈钢网/铝板组合多冲击防护屏，并利用二级轻气炮对其进行高速撞击实验，撞击速度为 3.93～4.25 km/s，弹丸直径为 6.35 mm。分析了不同规格不锈钢网、不同间距组合以及网格间结膜对不锈钢网/铝板多冲击防护屏高速撞击防护性能的影响。结果表明：不锈钢网位于防护屏的最后层有利于碎片云的扩散；不锈钢网位于防护屏最前层不利于撞击粒子的初次破碎；丝网几何参数、防护层间距组合是提高不锈钢网/铝板多冲击防护屏高速撞击防护性能的重要参数；网格间结膜有助于弹丸撞击动能的吸收。

**关键词**：多冲击防护；高速撞击；不锈钢网；空间碎片

**中图分类号**：O347；V423.41　　**文献标识码**：A

## 1 引　言

空间碎片环境的日益恶化，严重地威胁着在轨航天器的安全运行。有关空间碎片与航天器超高速撞击效应及航天器空间碎片防护的研究得到了国内外的高度重视[1-3]。航天器空间碎片防护结构设计主要包括防护结构构型设计、防护材料选择和弹道极限分析 3 个方面的内容[4-5]。金属丝网作为一种有效的防护材料，其高速撞击损伤及对撞击粒子的破碎效应是空间碎片防护结构设计者尤为关心的问题。Higashide 等人[6]研究了柱状聚碳酸酯弹丸撞击钢网和铜网后碎片云质心速度与撞击速度的关系。Christiansen等人[7]提出了铝网双防护屏的概念，将铝网固定在第一层防护屏的后面，以提高防护屏对撞击粒子的破碎能力。Horz 等人[8]进一步分析了多层铝网防护屏的可行性，在不同速度区间对多层铝网防护屏进行了高速撞击实验，指出了铝网与均质铝板防护屏具有同样的防护能力，且面密度更小。然而针对不锈钢网防护屏高速撞击防护特性的研究尚未见公开报道。本研究在铝板 Whipple 防护的基础上，设计出具有多冲击防护屏特点的不锈钢网/铝板组合防护屏，利用二级轻气炮发射 2017 铝球弹丸，对其进行高速正撞击实验，得到了不锈钢网/铝板组合防护屏的高速撞击损伤模式，分析了不锈钢网/铝板组合防护屏的高速撞击防护特性与丝网位置、网格尺寸、组合间距等结构参数的关系。

## 2 撞击实验研究方法

实验选用 4 种规格的 304 不锈钢网和厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝合金板作为防护屏材料，不锈钢网分别为 20、40、80 和 160 目，具体参数见表 1，其中 $D$ 为不锈钢丝直径，$s$ 为丝间距。分别用 3 层 20 目不

* **收稿日期**：2010-08-11；**修回日期**：2010-09-04

**基金项目**：国家自然科学基金(11172083)

**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

锈钢网、3 层 40 目不锈钢网、5 层 80 目不锈钢网和 6 层 160 目不锈钢网与厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝合金板的面密度相等效，面密度分别为 0.146、0.139、0.149、0.147 g/cm$^2$。

**表 1 不锈钢网参数**

**Table 1 Parameters of stainless steel mesh**

| Mesh | $D$ /(mm) | $s$ /(mm) | Areal density /(g/cm$^2$) |
|---|---|---|---|
| 20 | 0.20 | 1.07 | 0.048 8 |
| 40 | 0.14 | 0.50 | 0.046 4 |
| 80 | 0.07 | 0. 25 | 0.029 8 |
| 160 | 0.04 | 0. 12 | 0.024 5 |

实验采用 4 组防护结构，防护屏均由 4 层防护层组成，包括 1 层面密度与厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝合金板相当的不锈钢网和 3 层厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝合金板，后板舱壁是厚度为 3 mm 的 5A06 铝合金板，总防护间距为 100 mm。

在第 1 组防护结构中，将 4 层防护层及后板舱壁均匀排列，不锈钢网分别置于不同防护层，层间距为 25 mm-25 mm-25 mm-25 mm，如图 1 所示。

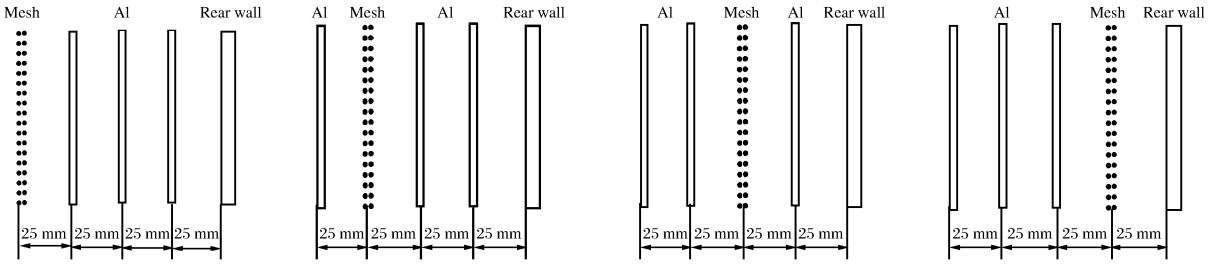
在第 2 组防护结构中，将不锈钢网置于第 1 层，并与第 2 层铝合金板紧贴在一起，层间距取 3 种组合：50 mm-25 mm-25 mm、25 mm-50 mm-25 mm 和 25 mm-25 mm-50 mm，如图 2 所示。

在第 3 组防护结构中，将不锈钢网置于第 2 层，并与第 1 层铝合金板紧贴在一起，层间距取 3 种组合：50 mm-25 mm-25 mm、25 mm-50 mm-25 mm 和 25 mm-25 mm-50 mm，如图 3 所示。

在第 4 组防护结构中，将不锈钢网置于第 2 层，并与第 1 层和第 3 层铝合金板紧贴在一起，层间距取 3 种组合：75 mm-25 mm、50 mm-50 mm 和 25 mm-75 mm，如图 4 所示。

为研究网格间结膜对其高速撞击防护性能的影响，在第 4 组防护结构中，选取 20 目不锈钢网用环氧树脂溶液进行网格间结膜处理。

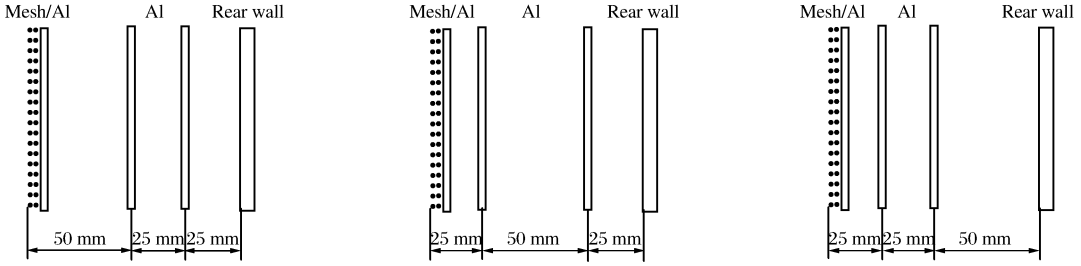
实验采用二级轻气炮加速球形弹丸，轻气炮一级驱动气体为氮气，充气压力 7～12 MPa，二级驱动气体为氢气，充气压力 0.10～0.12 MPa，弹丸发射采用分体式弹托气动分离技术。弹丸为 2017 铝球，弹丸直径为 6.35 mm，弹丸撞击速度为 3.93～4.25 km/s，撞击角为 0°，速度测量采用磁感应方法，测量精度高于 2%。靶舱内压力小于 200 Pa，环境温度为室温。




(a) The first wall (b) The second wall (c) The third wall (d) The last wall

图 1 第 1 组防护结构示意图

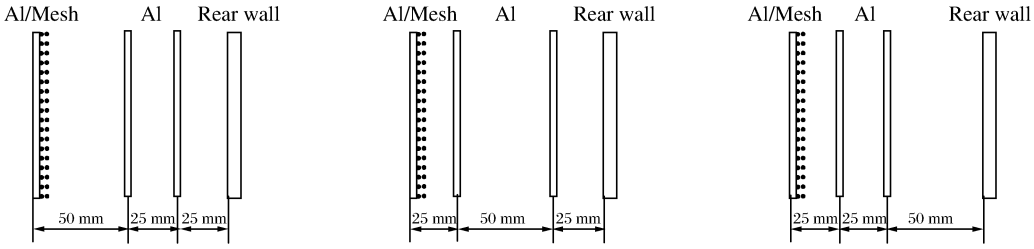
Fig. 1 Shield configuration of Group 1




(a) Space 50 mm-25 mm-25 mm (b) Space 25 mm-50 mm-25 mm (c) Space 25 mm-25 mm-50 mm

图 2 第 2 组防护结构示意图

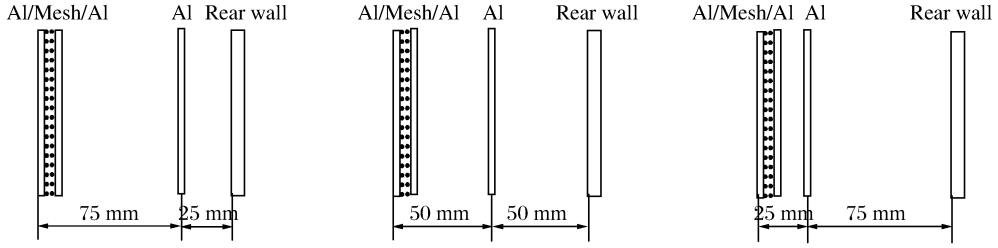
Fig. 2 Shield configuration of Group 2




(a) Space 50 mm-25 mm-25 mm (b) Space 25 mm-50 mm-25 mm (c) Space 25 mm-25 mm-50 mm

图 3 第 3 组防护结构示意图

Fig. 3 Shield configuration of Group 3




(a) Space 75 mm-25 mm (b) Space 50 mm-50 mm (c) Space 25 mm-75 mm

图 4 第 4 组防护结构示意图

Fig. 4 Shield configuration of Group 4

## 3 损伤结果与讨论

### 3.1 损伤结果

铝合金球形弹丸高速正撞击不锈钢网/铝板多冲击防护结构后,不锈钢网与铝板的损伤情况因组合形式不同而有所区别,防护屏各防护层损伤形式包括圆形穿孔、不规则穿孔、翻边、撕裂等,同时出现弹坑和穿孔的分布密集区域。后板舱壁损伤形式包括弹坑、不规则穿孔、背面剥落等,同时出现弹坑的分布密集区及液体喷溅痕迹,并发生了不同程度的向后鼓包,如图 5~图 9 所示。

表 2 给出了弹丸撞击参数及后板损伤主要数据,其中 $d_p$、$v$、$D_h$、$D_{99}$、$D_s$和 $H_b$ 分别为弹丸直径、撞击速度、后板最大穿孔直径、后板弹坑最大散布区直径、后板前面凹陷深度和后板背面整体鼓包高度。

### 3.2 讨论

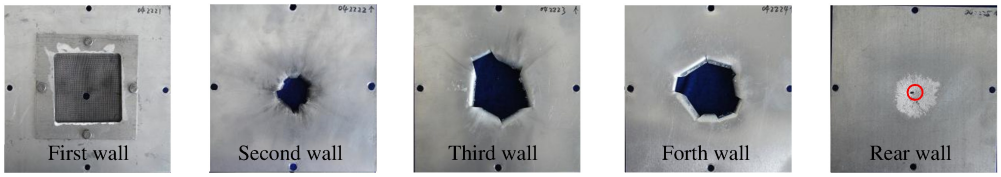
#### 3.2.1 不锈钢网位置对防护性能的影响

在第 1 组防护结构中,将不锈钢网置于不同位置,在相同的撞击条件下进行高速撞击实验。结果发现,只有不锈钢网位于最前端的防护结构的后板舱壁发生了穿孔失效,并且其第 2 层铝板出现了大的撕裂损伤;而不锈钢网位于其它位置时其防护结构均未失效,只是后板舱壁出现了不同程度的整体鼓包变形,其中不锈钢网位于第 2 层的防护结构其后板舱壁鼓包变形最小;不锈钢网位于防护屏最后层的防护结构其后板舱壁弹坑分布范围最大,如图 5 所示。说明不锈钢网的放置位置不同对其高速撞击防护效果产生的影响有显著不同。

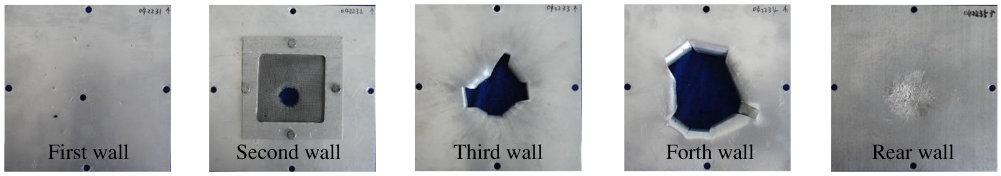
在第 2、第 3 组防护结构中,不锈钢网分别位于第 1、第 2 防护层位置,并分别与第 2 层和第 1 层铝合金板紧贴在一起,在相同的撞击条件下进行高速撞击实验。结果发现,第 2 组防护结构的后板舱壁均发生穿孔失效,而第 3 组防护结构的后板舱壁均未失效,如图 6 和图 7 所示。

实验结果表明:在本研究条件下,厚度为 0.5mm 的 2A12 铝板对铝球弹丸的初次破碎能力高于相同面密度的不锈钢网,即铝板可以使高速撞击弹丸破碎成更小、更均匀的粒子。不锈钢网的防护性能主

要体现在当其受到弹丸的高速撞击时，由于其具有一定的可拉伸性，对弹丸起到一定的缓冲作用。当不锈钢网位于铝板后面时，弹丸首先撞击铝板，不锈钢网剪切破坏减弱，拉伸破坏效应增强，消耗的能量较大。同时铝板和弹丸撞击所产生的碎片也会被后面的不锈钢网进一步破碎，成为更小的碎片；当不锈钢网位于铝板前面时，弹丸直接侵彻不锈钢网，不锈钢网的破坏主要是剪切破坏，易于断裂。因此不锈钢网在受到弹丸撞击的一瞬间即发生断裂，从而造成这两种防护结构在高速撞击防护性能上的差异。因此，不锈钢网不宜放置在防护屏的最前端。此外，由于不锈钢网存在网格孔，更易于弹丸经铝板撞击所产生的碎片云粒子的膨胀扩散。因此，不锈钢网位于防护屏的最后层有助于增大碎片云对后板舱壁的作用面积，提高多冲击防护屏的高速撞击防护性能。




(a) 1a-40




(b) 1b-40




(c) 1c-40




(d) 1d-40

图 5 第 1 组防护结构损伤

Fig. 5 Damage results of shield Group 1

### 3.2.2 间距组合对防护性能的影响

在第 2、第 3 组防护结构中，分别选取 3 种间距组合，即 50 mm-25 mm-25 mm、25 mm-50 mm-25 mm 和 25 mm-25 mm-50 mm。实验结果发现，尽管第 2 组防护结构的后板舱壁均穿孔失效，但其穿孔尺寸和弹坑分布范围却因间距组合不同而不同，当间距组合为 50 mm-25 mm-25 mm 时，后板舱壁穿孔尺寸最大，弹坑分布范围最小，如图 6(a)所示；当间距组合为 25 mm-25 mm-50 mm 时，后板舱壁穿孔尺寸最小，弹坑分布范围最大，如图 6(c)所示。同时发现，尽管第 3 组防护结构的后板舱壁均未失效，但其凹陷深度、鼓包高度和弹坑分布范围同样因间距组合不同而不同，当间距组合为 50 mm-25 mm-

25 mm 时,后板舱壁凹陷深度、鼓包高度最大,弹坑分布范围最小,如图 7(a)所示;当间距组合为25 mm-25 mm-50 mm时,后板舱壁凹陷深度、鼓包高度最小,弹坑分布范围最大,如图 7(c)所示。因为与间距组合50 mm-25 mm-25 mm 的第一个间距 50 mm 相比,间距组合 25 mm-25 mm-50 mm 的第一个间距只有25 mm,因而使得弹丸的初始撞击更具连续性,防护结构对弹丸的初次碎化作用更显著,减小了碎片云粒子的尺寸。此外,两种间距组合的最后一层防护层与后板舱壁的间距不同,使弹丸穿过防护屏后所形成的碎片云飞行距离不同。在撞击条件相同的情况下,由于碎片云存在横向膨胀速度,防护屏最后层与后板舱壁间距越大,后板舱壁弹坑分布范围越大。因此,防护层间距组合是影响防护屏高速撞击防护性能的重要因素。



(a) 2a-40　(b) 2b-40　(c) 2c-40

图 6　第 2 组防护结构后板损伤

Fig. 6　Damage on the rear wall of shield Group 2



(a) 3a-40　(b) 3b-40　(c) 3c-40

图 7　第 3 组防护结构后板损伤

Fig. 7　Damage on the rear wall of shield Group 3

**表 2　不锈钢网/铝板多冲击防护结构的后板损伤结果**

**Table 2　Damage on the rear wall of the stainless steel mesh/Al multi-shock shields**

| No. | $v$ /(km/s) | $d_p$ /(mm) | $D_h$ /(mm) | $D_{99}$ /(mm) | $D_s$ /(mm) | $H_b$ /(mm) | Rear wall damage |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1a-40 | 4.08 | 6.35 | 4.30 | 61 | 5.33 | 3.82 | Perforation |
| 1b-40 | 4.25 | 6.35 | — | 68 | 6.32 | 4.06 | No perforation |
| 1c-40 | 4.08 | 6.35 | — | 58 | 6.87 | 5.40 | No perforation |
| 1d-40 | 4.01 | 6.35 | — | 75 | 7.02 | 4.78 | No perforation |
| 2a-40 | 4.08 | 6.35 | 10.08 | 62 | 5.01 | 4.90 | Perforation |
| 2b-40 | 3.95 | 6.35 | 3.98 | 75 | 4.73 | 3.68 | Perforation |
| 2c-40 | 3.93 | 6.35 | 1.00 | 86 | 5.60 | 3.02 | Perforation |
| 3a-40 | 4.17 | 6.35 | — | 65 | 5.89 | 4.20 | No perforation |
| 3b-40 | 4.03 | 6.35 | — | 73 | 4.20 | 2.38 | No perforation |
| 3c-40 | 4.01 | 6.35 | — | 90 | 3.23 | 2.16 | No perforation |
| 4a-20 | 4.06 | 6.35 | 4.45 | 122 | 5.61 | 4.94 | Perforation |
| 4b-20 | 4.10 | 6.35 | — | 129 | 4.27 | 2.84 | No perforation |
| 4c-20 | 3.97 | 6.35 | 5.39 | 150 | 5.02 | 4.80 | Perforation |
| 4a-80 | 4.01 | 6.35 | 1.00 | 108 | 7.28 | 6.04 | Perforation |
| 4b-80 | 4.03 | 6.35 | — | 130 | 6.21 | 5.44 | No perforation |
| 4c-80 | 4.14 | 6.35 | 1.00 | 157 | 6.19 | 4.18 | Perforation |
| 4a-160 | 4.06 | 6.35 | — | 115 | 6.15 | 5.22 | No perforation |
| 4b-160 | 4.10 | 6.35 | 4.59 | 130 | 7.65 | 4.98 | Perforation |
| 4c-160 | 4.14 | 6.35 | 1.00 | 163 | 6.99 | 4.78 | Perforation |
| 4a-20f | 4.10 | 6.35 | — | 153 | 5.53 | 3.06 | No perforation |
| 4b-20f | 4.08 | 6.35 | — | 136 | 4.27 | 2.90 | No perforation |

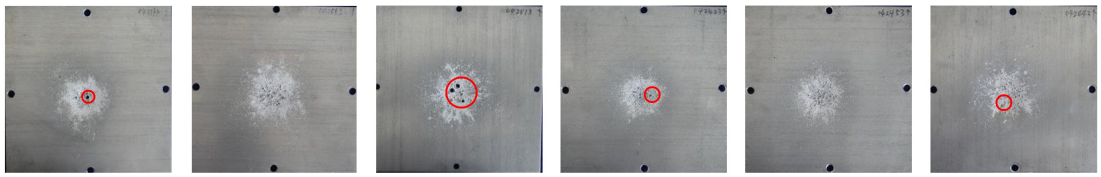
### 3.2.3 丝网规格对防护性能的影响

在第 4 组防护结构中，选用了 3 种规格的不锈钢网，分别为 20、80 和 160 目，规格参数见表 1。针对每种规格不锈钢网，选取 3 种间距组合，即 75 mm-25 mm、50 mm-50 mm 和 25 mm-75 mm，在撞击条件相同的情况下进行高速撞击实验。

对于 20 目不锈钢网，当间距组合为 50 mm-50 mm 时，后板舱壁未失效，如图 8(b)所示。而在其它两种间距组合情况下，后板舱壁均发生穿孔，如图 8(a)和图 8(c)所示，穿孔直径分别为 4.45 和 5.39 mm。同时发现，与后板舱壁相邻的最后层铝板发生较大的撕裂，且在撕裂周围有很少的小碎片撞击孔。说明弹丸的初次撞击破碎并不充分，在撞击产生的碎片云中仍存在尺寸较大的碎片粒子。

对于 80 目不锈钢网，当间距组合为 50 mm-50 mm 时，后板舱壁未失效，如图 8(e)所示。而在其它两种间距组合情况下，后板舱壁均发生穿孔，如图 8(d)和图 8(f)所示。但对于穿孔尺寸均小于 20 目不锈钢网时的情况，与后板舱壁相邻的最后层铝板未发生较大的撕裂，只是在中心穿孔周围出现了许多小碎片撞击孔。说明弹丸的初次撞击破碎较充分，撞击产生的碎片云粒子尺寸较小。

对于 160 目不锈钢网，当间距组合为 75 mm-25 mm 时，后板舱壁未失效，而在其它两种间距组合情况下，后板舱壁均发生了穿孔，但其穿孔尺寸均大于 80 目的情况。



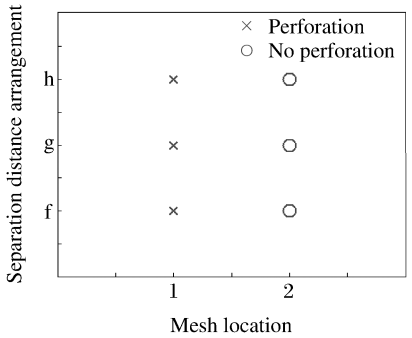
(a) 4a-20 (b) 4b-20 (c) 4c-20 (d) 4a-80 (e) 4b-80 (f) 4c-80

图 8 第 4 组防护结构后板损伤

Fig. 8 Damage on the rear wall of shield Group 4

实验结果表明：在面密度相同的情况下，丝网规格不同，其对高速撞击的防护能力不同。选取适当规格的不锈钢网，有助于撞击粒子的破碎和撞击能量的扩散，进而有效防护高速粒子对后板舱壁的损伤。对于本文中的撞击条件和防护结构，80 目不锈钢网的高速撞击防护能力要高于 20 目和 160 目不锈钢网，然而如何优化不锈钢网的几何参数尺寸还需做进一步的系统研究。

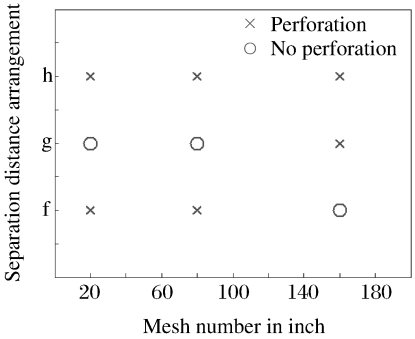
图 9 和图 10 分别对具有不同丝网位置、丝网规格和间距组合的防护结构高速撞击防护性能进行了比较，其中图 9 中横坐标“1”、“2”分别表示第 2 组、第 3 组防护结构中不锈钢网所在的位置。纵坐标“f”、“g”和“h”分别表示间距组合 50 mm-25 mm-25 mm、25 mm-50 mm-25 mm 和 25 mm-25 mm-50 mm；图 10 中纵坐标“f”、“g”和“h”分别表示间距组合 75 mm-25 mm、50 mm-50 mm 和 25 mm-75 mm。




f：50 mm-25 mm-25 mm；g：25 mm-50 mm-25 mm；
h：25 mm-25 mm-50 mm

图 9 具有不同丝网位置的防护结构防护性能比较

Fig. 9 Comparison of the resist capability of the shield with different mesh location




f：75 mm-25 mm；g：50 mm-50 mm；
h：25 mm-75 mm

图 10 具有不同丝网规格的防护结构防护性能比较

Fig. 10 Comparison of the resist capability of the shield with different mesh size

### 3.2.4　环氧树脂膜对防护性能的影响

在第 4 组防护结构中,选取 20 目不锈钢网,在其网格间用环氧树脂与固化剂的混合液进行填充结膜,环氧树脂与固化剂的配比为 7∶1,防护结构间距组合分别为 75 mm-25 mm 和 50 mm-50 mm,在相同条件下进行高速撞击实验,撞击损伤结果如图 11 所示。可以发现,在两种间距组合的防护结构中,其后板舱壁均未发生穿孔失效。与未进行不锈钢网格间结膜的相同防护结构相比,弹丸的高速撞击对紧贴着不锈钢网的前后两层铝板的撞击损伤更加严重,此时,紧贴不锈钢网的前后两层铝板均出现严重的翻瓣式撕裂,说明网格间结膜的不锈钢网消耗了弹丸更多的动能。在不锈钢网格间填充环氧树脂膜,一方面增加了防护屏的面密度,有助于弹丸的破碎;另一方面,当弹丸撞击铝板产生的碎片撞击不锈钢网时,由于不锈钢网格间存在环氧树脂材料,在碎片云的膨胀运动过程中,环氧树脂材料将与碎片云粒子发生相互作用,使碎片云中的弹丸碎片动能进一步消耗,而环氧树脂材料在撞击过程中由于高温将产生液化和汽化,从而不会对后板造成严重损伤。因此,网格间结膜有助于提高不锈钢网防护屏高速撞击防护性能。

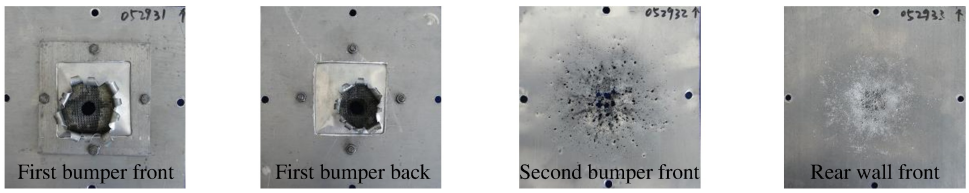



图 11　结膜防护结构损伤结果

Fig. 11　Damage results of shield configurations with epoxy resin film

## 4　结　论

通过对不锈钢网/铝板多冲击防护屏进行高速正撞击实验研究,分析了影响其高速撞击防护性能的主要因素。研究结果表明:不锈钢网在防护屏中的位置对不锈钢网/铝板多冲击防护屏高速撞击防护性能产生较大影响,不锈钢网位于防护屏的最后层有利于碎片云的扩散,增大碎片云粒子对后板舱壁的撞击作用范围,有助于防护能力的提高;不锈钢网位于防护屏最前层不利于撞击粒子的初次破碎;网格间结膜可有效吸收弹丸撞击动能,促进碎片云粒子扩散;丝网规格与各防护层的间距组合是影响多冲击防护屏高速撞击防护性能的重要参数,如何进行参数优化还需做进一步的系统研究。

## References:

[1] Min G R, Xiao M X. Reliability design spacecraft module wall against meteoroid perforation [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986, (6): 45-48. (in Chinese)
闵桂荣, 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, (6): 45-48.

[2] Lambert M. Hypervelocity impacts and damage laws [J]. Adv Space Res, 1997, 19(2): 369-378.

[3] Bernhard P P, Christiansen E L, Hyde J, et al. Hypervelocity impact damage into space shuttle surfaces [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1-3): 57-68.

[4] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistics limit equations for spacecraft shielding [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26(1-10): 93-104.

[5] Guan G S, Pang B J, Zhang W, et al. Crater distribution on the rear wall of Al-Whipple shield by hypervelocity impacts of Al-spheres [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(1-12): 1541-1546.

[6] Higashide M, Tanakab M, Akahoshi Y, et al. Hypervelocity impact tests against metallic meshes [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33(1-12): 335-342.

[7] Christiansen E L, Kerr J H. Mesh double-bumper shield: A low weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 169-180.

[8] Horz F, Cintala M J, Bernhard R P, et al. Multiple-mesh bumpers: A feasibility study [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1-3): 431-442.

# Experimental Investigation on Resist Capability of Stainless Steel Mesh/Al Multi-Shock Shield by High-Velocity Impact

GUAN Gong-Shun, CHEN Li-Wen, WANG Shao-Heng, PANG Bao-Jun

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

**Abstract**: Stainless steel mesh/Al multi-shock shield was designed by improving Al Whipple shield, and a series of high-velocity impact experiments were conducted by a two-stage light gas gun facility. Impact velocities of Al-spheres varied between 3.93 km/s and 4.25 km/s. The diameter of projectiles was 6.35 mm. For the different shield configurations with the same stainless steel mesh, the same shield configurations with different stainless steel mesh and the filmed stainless steel mesh shield configurations, the structure and material factors affecting on performance of shield were analyzed. The results indicated that when the stainless steel mesh wall was located in the last wall site of the bumper, it could help dispersing debris clouds, reducing the damage of the rear wall. At the same time, when the stainless steel mesh wall was located in the first wall site of the bumper, it did not help comminuting and decelerating projectile. The mesh opening size, wire diameter and separation distance arrangement were the important factors to enhance the protection performance of shields. The filmed stainless steel mesh helped in weakening the kinetic energy of debris cloud.

**Key words**: multi-shock shield; high-velocity impact; stainless steel mesh; space debris