文章编号：1000-5773(2013)04-0535-07

铝网防护结构高速正撞击防护性能的实验研究*

管公顺，牛瑞涛，毕 强，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：利用二级轻气炮发射 2017-T4 铝球弹丸，高速正撞击 5052 铝网防护结构，模拟空间碎片对航天器防护结构的高速撞击作用，研究了铝网防护结构的高速撞击防护特性。在面密度相同的情况下，分析了影响铝网填充防护结构高速撞击防护性能的铝网尺寸效应及组合效应。实验撞击速度为 2.90～4.95 km/s，弹丸直径分别为 3.97 和 6.35 mm，撞击角为 0°。实验结果表明：厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板对高速撞击铝球的初次破碎能力优于相同面密度的 5052 铝网层，但作为填充介质，5052 铝网层比 2A12 铝板具有更好的保护后板作用；在一定的丝径范围内，丝径越小，撞击防护效果越好；前网后板填充层比前板后网填充层具有更好的均匀破碎效果。

关键词：铝网；高速撞击；防护性能；空间碎片

中图分类号：O347.1；V423.4 **文献标识码**：A

1 引 言

空间碎片的超高速撞击对在轨航天器构成了潜在威胁，有关空间碎片对航天器的超高速撞击及航天器空间碎片防护的研究受到普遍重视[1-4]。目前，对于毫米级空间碎片，航天器主要采取加装防护屏的被动防护措施，通过空间碎片与防护屏撞击产生的破碎膨胀效应形成碎片云，分散撞击动能，减轻对航天器舱壁的撞击损伤。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[5-6]。基于航天器有效发射载荷的要求，空间碎片防护结构的轻质性是设计者必须考虑的重要指标之一。金属丝网具有面密度低、结构简单、可设计的特点，是一种有效的防护撞击材料，与相同材料的板状防护屏相比，在具有相同防护能力的情况下，可大大减轻防护屏质量[7-8]。Higashide等人[9]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。Horz 等人[10]研究了铝网与铝板防护屏被粒子撞击时的不同损伤形态，分析了将铝网应用于防护结构的可行性。Myagkov 等人[11]建立了弹丸撞击丝网防护屏的弹塑性模型，分析了侵彻过程中弹丸与网丝的相互作用。然而，针对铝网防护屏破碎高速撞击粒子的位置效应以及与铝板的组合防护效应的研究相对较少。本研究在双层铝板防护屏的基础上，设计铝网层填充防护结构，利用二级轻气炮发射 2017-T4 铝球弹丸，对其进行高速撞击实验，分析铝网层填充防护结构的高速撞击防护特性与铝网层位置、网格尺寸、组合方式等结构参数的关系。

* **收稿日期**：2011-10-09；**修回日期**：2012-01-20

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

2 高速撞击实验

2.1 实验方案

实验选用 5 种规格的 5052 铝网以及厚度分别为 0.5、1.0 mm 的 2A12 铝板作为防护屏材料，铝网参数见表 1，其中 D 为网丝直径，$\delta_{0.5\ \mathrm{mm}}$、$\delta_{1.0\ \mathrm{mm}}$分别表示铝网面密度与 0.5 和 1.0 mm 厚 2A12 铝板面密度的相对偏差。分别用 5 种铝网组成铝网防护屏，使其与厚度为 0.5 和 1.0 mm 的 2A12 铝板面密度相近，面密度最大相对偏差为 11.45%。

表 1 铝网参数

Table 1 Details of aluminum mesh

No.	Mesh number	D/(mm)	Areal density/(g/cm^2)	$\delta_{0.5\ \mathrm{mm}}$/(%)	$\delta_{1.0\ \mathrm{mm}}$/(%)
1	14	0.42	0.0386	−11.45	4.25
2	17	0.20	0.0109	0	1.16
3	17	0.25	0.0181	−3.05	2.32
4	14	0.20	0.0090	3.05	0.77
5	19	0.20	0.0133	1.53	2.70

实验防护结构以双层铝板防护屏为基础，用铝网层或铝板-铝网组合层替换不同位置的铝板，总防护间距为 100 mm，各防护层等间距(50 mm)放置，如图 1 所示。后板舱壁是厚度为 3 mm 的 5A06 铝板。选取两种防护屏面密度：第 1 种面密度的防护屏等效两层厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板，第 2 种面密度的防护屏等效两层厚度为 1.0 mm 的 2A12 铝板。在第 1 种面密度情况下，选用直径为 3.97 mm 的 2017-T4 铝球弹丸；在第 2 种面密度情况下，选用直径为 6.35 mm 的 2017-T4 铝球弹丸。

实验采用二级轻气炮加速铝球弹丸。轻气炮一级驱动气体为氮气，充气压力为 7～12 MPa，二级驱动气体为氢气，充气压力为 0.10～0.12 MPa，弹丸发射采用分体式弹托气动分离技术。弹丸撞击速度为 2.90～4.95 km/s，撞击角为 0°。采用磁感应方法测量弹丸速度，测量精度高于 2%。靶舱内压力小于 200 Pa，环境温度为室温。

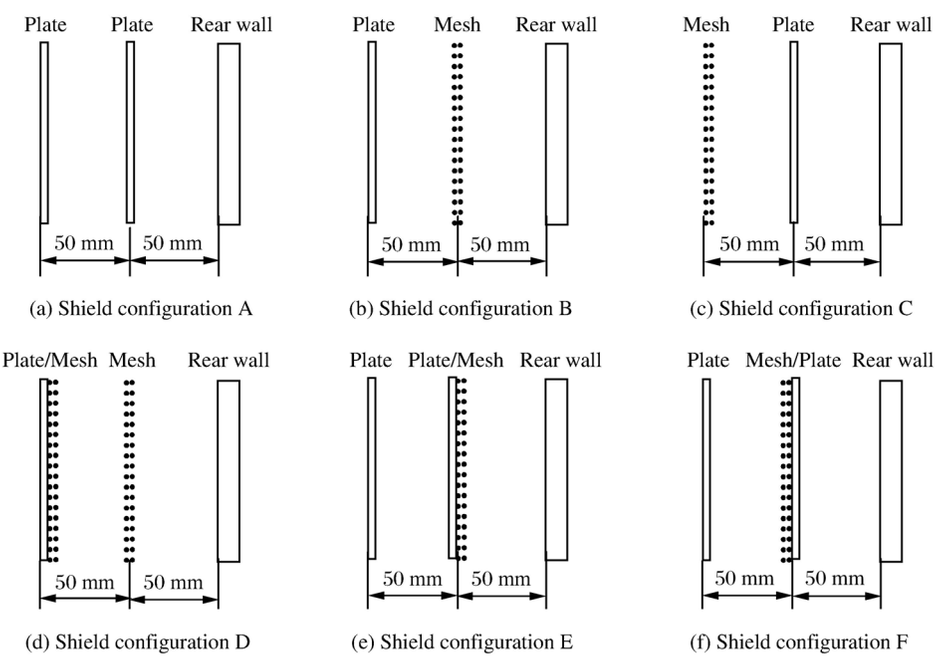


图 1 实验中采用的防护结构

Fig. 1 Shield configurations in the experiment

2.2　实验结果

铝球弹丸高速撞击防护屏所造成的弹丸破碎及舱壁损伤效应,取决于弹丸撞击速度以及被撞击防护屏的材料特性。铝板防护屏为密实材料,当撞击速度较低时,弹丸击穿铝板,在板后形成不断膨胀的椭球形碎片云团,其中在撞击轴线上的碎片尺寸较大,更具破坏力,后板的破坏表现为撞击中心穿孔或形成大的撞击坑;随着撞击速度的增加,弹丸破碎更均匀,板后碎片尺寸更小,撞击轴线上不再有尺寸较大的碎片,后板的破坏表现为非击穿情况下的局部后表面材料剥落或后表面鼓包;随着撞击速度进一步增加,将会造成后板整体塑性后凸,乃至撕裂失效。

单层铝网防护屏为非密实材料,撞击时,网丝的切割作用使弹丸破碎,弹丸击穿铝网,在铝网后形成的碎片云团形状随撞击点位置的不同而不同,后板的破坏表现为:最严重的损伤点不再局限于撞击中心,而是出现放射状分布的小穿孔带或小弹坑带。与单层铝网防护屏相比,多层铝网防护屏更趋于密实材料,撞击时,网丝对弹丸多次冲击加载,使弹丸均匀破碎,弹丸击穿多层铝网后,碎片云团形状受撞击位置的影响不明显。图 2 为部分实验的损伤结果。

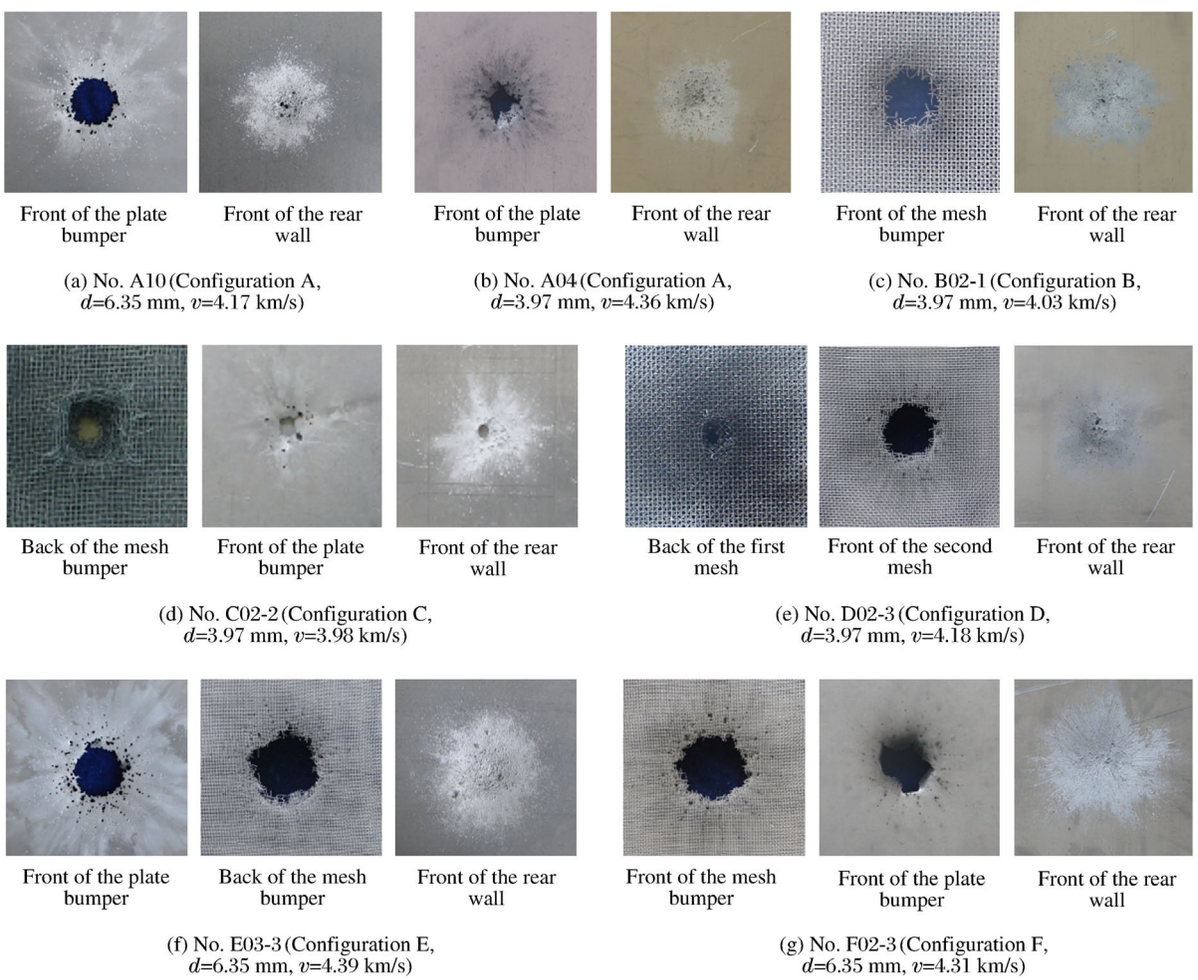


图 2　损伤结果

Fig. 2　The impact damage results

表 2 给出了弹丸撞击参数及后板损伤的主要数据,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、后板最大弹坑深度和后板背面最大鼓包高度。表 2 中,实验编号含义如下:字母代表防护结构类型(见图 1),紧随字母后的数字代表实验序号,"-"后面的数字代表铝网编号(见表 1)。

表 2 铝网防护结构后板的损伤结果

Table 2 Damage on the rear wall of the aluminum mesh shields

No.	v /(km/s)	d_p /(mm)	D_h /(mm)	D_{99} /(mm)	D_s /(mm)	H_b /(mm)	No.	v /(km/s)	d_p /(mm)	D_h /(mm)	D_{99} /(mm)	D_s /(mm)	H_b /(mm)
A01	2.90	3.97	7.58	90		Perforation	B13-3	3.70	3.97	No perforation	125	3.10	1.31
A02	3.80	3.97	0.50	95		Limit perforation	B14-3	4.10	3.97	No perforation	135	3.10	0.88
A03	4.30	3.97	No perforation	102	2.01	0.78	B15-3	4.27	3.97	No perforation	136	1.81	0.40
A04	4.36	3.97	No perforation	110	2.11	0.98	B16-3	4.36	3.97	No perforation	140	1.48	0.31
A05	4.40	3.97	No perforation	108	1.82	0.57	B17-3	4.80	3.97	No perforation	148	0.20	No bulge
A06	4.55	3.97	No perforation	118	0.55	No bulge	B18-4	3.55	3.97	3.00	120		Perforation
A07	4.75	3.97	No perforation	127	1.35	0.58	B19-4	3.58	3.97	2.80	117		Perforation
A08	3.57	6.35	7.20	100		Perforation	B20-4	3.66	3.97	No perforation	125	2.52	1.05
A09	4.00	6.35	6.50	110		Perforation	B21-4	4.00	3.97	No perforation	130	2.90	0.76
A10	4.17	6.35	6.40	105		Perforation	B22-4	4.24	3.97	No perforation	132	1.28	0.48
B01-1	4.00	3.97	2.87	131		Perforation	B23-4	4.95	3.97	No perforation	147	0.30	No bulge
B02-1	4.03	3.97	2.79	138		Perforation	C01-1	4.20	3.97	2.90	115		Perforation
B03-1	4.10	3.97	No perforation	135	1.92	0.85	C02-2	3.98	3.97	7.00	105		Perforation
B04-1	4.50	3.97	No perforation	141	2.13	0.91	C03-5	4.10	3.97	1.00	112		Perforation
B05-2	3.10	3.97	5.39	105		Perforation	D01-3	4.00	3.97	3.00	130		Perforation
B06-2	3.20	3.97	3.02	108		Perforation	D02-3	4.18	3.97	2.87	132		Perforation
B07-2	3.35	3.97	No perforation	115	2.30	1.22	E01-3	3.80	6.35	5.50	120		Perforation
B08-2	3.68	3.97	No perforation	121	1.97	0.91	E02-3	4.00	6.35	No perforation	130	1.40	0.50
B09-2	3.85	3.97	No perforation	127	1.86	0.71	E03-3	4.39	6.35	No perforation	135	1.35	0.30
B10-2	4.70	3.97	No perforation	143	1.25	0.35	F01-3	3.73	6.35	0.50	115		Limit perforation
B11-3	3.50	3.97	1.00	115		Perforation	F02-3	4.31	6.35	No perforation	130	1.30	0.28
B12-3	3.56	3.97	No perforation	120	3.15	2.11							

3 分析与讨论

3.1 防护性能

防护结构 A 是等间距的双层铝板防护结构，如图 1(a)所示。防护结构 B 和 C 分别用铝网层代替第 2 层和第 1 层铝板，是铝板-铝网组合防护结构，如图 1(b)、图 1(c)所示。从表 2 中的实验结果可以看出，对于直径为 3.97 mm 的 2017-T4 铝球弹丸，防护结构 A 的撞击极限速度在 3.80 km/s 附近。

防护结构 B 的撞击极限速度因所选用的铝网规格不同而有所区别：当选取表 1 中的 1、2、3、4 号铝网时，实验得到的撞击极限速度分别近似为 4.07、3.28、3.53 和 3.62 km/s。其中由 1 号铝网组成的防护结构 B 的撞击极限速度高于相同面密度的铝板防护结构 A，而由其余 3 种铝网组成的防护结构 B 的撞击极限速度均低于相应的铝板防护结构 A，说明由于铝网层的加入，双层铝板防护结构的高速撞击防护性能发生了变化，且因铝网规格的不同而不同。由于受到铝网规格的限制，在用铝网层等效铝板面密度时，会存在一定的差异，如表 1 所示。对于厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板面密度，1、2、3、4 号铝网层等效面密度的相对偏差分别为－11.45%、0、－3.05%和 3.05%。如果以撞击极限速度为参考量，则由 1、2、3、4 号铝网组成的防护结构 B 的防护能力相对提高－7.11%、13.68%、7.11%和 4.74%，且 2、3 号铝网层对防护结构 B 的高速撞击防护性能提高更显著。由此可知，对于加入铝网层的防护结构 B，其高速撞击防护性能均有所提高，只是由于铝网目数、丝径尺寸的不同，造成了防护性能提高的程度不同。

防护结构 C 将铝网层置于第 1 层，与弹丸发生首次撞击。由表 2 可以看出，当直径为 3.97 mm 的 2017-T4 铝球弹丸以 4.00 km/s 左右的速度撞击防护结构 C 时，后板均发生穿孔失效，如图 2(d)所示。可见，防护结构 C 的撞击极限速度应大于 4.00 km/s，高于铝板防护结构 A 的撞击极限速度，说明防护

结构 C 的高速撞击防护性能低于相应的铝板防护结构 A,即铝网层位置对防护结构的高速撞击防护效果产生了显著影响。

以上实验结果表明,在本研究条件下,厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板对铝球弹丸的初次破碎能力高于相同面密度的铝网层。由于铝板材料具有密实性,撞击过程中对弹丸的作用是连续而均匀的,在弹丸中产生的冲击波效应更显著,易使高速撞击的弹丸破碎成更小、更均匀的粒子。而铝网层具有非密实性,撞击过程中对弹丸的作用是间歇、非均匀的,对弹丸的破碎是单网丝切割弹丸的结果,具有方向性,破碎效果取决于撞击点位置,因此不宜于高速撞击的较大尺寸粒子的均匀破碎。对于经过撞击破碎的碎片云团,由于其中的粒子分布较均匀,粒子尺寸较小,单个粒子的动能较小,更适于铝网丝的冲击切割破碎,因此防护结构 B 的高速撞击防护效果优于防护结构 A 和防护结构 C。

对于防护结构 B,在本实验速度范围内,随着弹丸撞击速度的提高,4 种丝网组成的防护结构中后板舱壁均出现由失效到不失效的撞击速度极限点,分别定义为 v_{limit1}、v_{limit2}、v_{limit3}、v_{limit4}。由表 1 可知,丝网 1 与丝网 4 的目数相同,丝网 2 与丝网 3 的目数相同,但丝网 4 的丝径小于丝网 1,丝网 2 的丝径小于丝网 3,根据图 3 可知,$v_{limit4}<v_{limit1}$,$v_{limit2}<v_{limit3}$,因此对于相同面密度的铝网防护结构 B,在一定的丝径范围内,丝径越小,撞击防护效果越好。此外,丝网 2 与丝网 4 的丝径相同,但丝网 2 的目数大于丝网 4,丝网 2 更密,结合实验结果 $v_{limit2}<v_{limit4}$,可以发现,对于相同面密度的铝网防护结构 B,在一定的目数范围内,网格越密,撞击防护效果越好。这是由于在面密度相同的情况下,丝网目数越大意味着瞬时的碎片着弹点越多,丝径越小意味着铝网层数越多,碎片被冲击加载次数越多,更易使弹丸穿过第 1 层铝板所产生的小碎片进一步破碎和扩散。

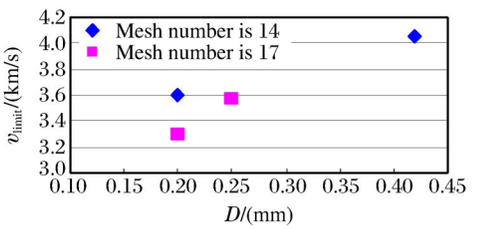


图 3　极限速度与丝径的关系

Fig. 3　Relationship between limit velocity and wire diameter

3.2　反溅特性

对于双层铝板防护结构 A,弹丸击穿第 1 层铝板所形成的碎片云团撞击第 2 层铝板时,有部分微小反溅碎片撞击并附着在第 1 层铝板背面,从而增加了第 1 层铝板的质量。第 1 层铝板撞击穿孔后损失的质量 Δm 越少,说明背面附着的反溅碎片越多。对于防护结构 B,弹丸击穿第 1 层铝板所形成的碎片云团撞击第 2 层铝网时,同样会产生反溅碎片。实验后,对撞击速度相近的防护结构 A 和防护结构 B 的第 1 层铝板的质量变化进行统计,见图 4。

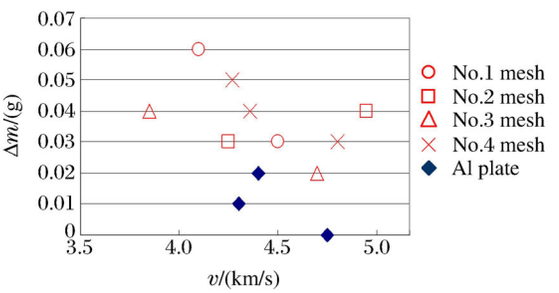


图 4　第 1 层铝板质量变化与撞击速度的关系

Fig. 4　Relationship between the mass change of the first aluminum plate and impact velocity

由图 4 可知,在弹丸撞击速度相近的情况下,防护结构 A 的第 1 层铝板质量变化比防护结构 B 的第 1 层铝板质量变化小很多。同时,观察两种防护结构第 1 层铝板背面时发现,防护结构 B 的第 1 层铝板背面无明显的反溅痕迹,而防护结构 A 的第 1 层铝板背面有明显的反溅痕迹,如图 5 所示。由此可见,铝网防护屏有利于减少反溅碎片的产生。

3.3　组合效应

在防护结构 B 的基础上,保持防护结构总面密度不变,将第 2 层铝网层的一部分铝网放置在第 1 层铝板后面,组成防护结构 D,如图 1(d)所示。此时,第 1 层面密度增大,第 2 层面密度减小。实验结果表明,若选用直径为 3.97 mm 的 2017-T4 铝球弹丸,当撞击速度为 4.00 km/s 时,后板舱壁仍出现穿孔失效,且穿孔直径达到 3 mm。而对于相同材料、相同面密度的防护结构 B,选用相同的弹丸时,其撞击极

限速度均小于 4.00 km/s，说明防护结构 D 的高速撞击防护能力低于防护结构 B，其原因可能是第 2 层铝网面密度减少过多，不具备再次充分破碎粒子的能力。



(a) Configuration A (b) Configuration B

图 5 前板背面的反溅

Fig. 5 The ejecta on the back of the front wall

为了进一步研究铝网在防护结构中的作用，用面密度与 1.0 mm 厚 2A12 铝板等效的铝板-铝网组合层代替防护结构 B 中的铝网层，并将 0.5 mm 厚的 2A12 铝板分别放在铝网的前面和后面，第 1 层 2A12 铝板的厚度为 1.0 mm，组成防护结构 E 和防护结构 F，如图 1(e)、图 1(f)所示。选用直径为 6.35 mm 的2017-T4 铝球弹丸进行撞击实验。从实验结果可以发现：当撞击速度为 4.00 km/s 时，防护结构 E 的后板舱壁发生大面积整体后凸鼓包，但未失效，且大鼓包上未出现小鼓包；而相同面密度的防护结构 A 的后板舱壁出现一个微透光穿孔；相同面密度的防护结构 B 的后板舱壁发生大面积整体后凸鼓包，且大鼓包上有一些小鼓包。这说明，防护结构 E 的高速撞击防护能力高于防护结构 B 和防护结构 A。当撞击速度为 3.80 km/s 时，防护结构 E 的后板舱壁出现较大穿孔；当撞击速度为 3.73 km/s 时，防护结构 F 的后板舱壁只出现微透光穿孔，接近此弹丸条件下的撞击极限速度，说明防护结构 F 的高速撞击防护能力高于防护结构 E。

以上实验结果表明：在面密度相同的情况下，铝网填充防护结构抵御高速撞击的能力高于双层铝板防护结构；对铝板-铝网填充层的优化组合，可使防护能力进一步提高，即在填充层中，铝网位于铝板前面时，更易于提高防护结构的高速撞击防护能力。铝网层的防护作用主要体现在对撞击粒子的多次冲击加载。当填充层的铝网位于铝板后面时，弹丸首先撞击第 1 层铝板，产生的粒子再撞击填充层铝板，破碎为更小的粒子，由于网丝间存在一定空隙，小的粒子通过空隙直接撞击后板舱壁，因此，铝网的破碎作用未得到充分发挥；当铝网位于填充层铝板前面时，弹丸撞击第 1 层铝板所产生的较大粒子能被铝网层连续冲击加载破碎，使撞击后面铝板的粒子尺寸更小，由于铝板具有密实性，可对穿过铝网层的小尺寸粒子进一步均匀碎化，从而更有效地减轻对后板舱壁的撞击损伤。

4 结 论

(1) 厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板对高速撞击铝球的初次破碎能力优于相同面密度的 5052 铝网层，但作为填充介质，5052 铝网层比 2A12 铝板具有更好的保护后板舱壁的作用。

(2) 对于相同面密度的铝网填充防护结构：在一定的丝径范围内，丝径越小，撞击防护效果越好；在一定的丝网目数范围内，网格越密，撞击防护效果越好。

(3) 填充层中，铝网层有助于次生大碎片的二次破碎，铝板有助于次生小碎片的均匀碎化，前网后板组合填充层具有更好的均匀破碎效果。

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

[4] Gai F F,Pang B J,Guan G S. Quasi-static bursting analysis of gas-filled pressure vessels on the front side under hypervelocity impact [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2011,25(1):48-54. (in Chinese)
盖芳芳,庞宝君,管公顺. 空间碎片超高速撞击充气压力容器前壁准静态破坏分析 [J]. 高压物理学报,2011,25(1):48-54.

[5] Christiansen E L,Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding [J]. Int J Impact Eng,2001,26:93-104.

[6] 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(12):1541-1546.

[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(1/2/3/4):169-180.

[8] Ha Y,Guan G S,Chi R Q,et al. Investigation of residual velocity of aluminum projectiles at hypervelocity impact on woven of basalt fiber [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2012,26(3):273-280. (in Chinese)
哈　跃,管公顺,迟润强,等. 铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维布剩余速度分析 [J]. 高压物理学报,2012,26(3):273-280.

[9] Higashide M,Tanaka M,Akahoshi Y,et al. Hypervelocity impact tests against metallic meshes [J]. Int J Impact Eng,2006,33:335-342.

[10] Horz F,Cintala M J,Bernhard R P,et al. Multiple-mesh bumpers:A feasibility study [J]. Int J Impact Eng,1995,17(1/2/3):431-442.

[11] Myagkov N N,Goloveshkin V A,Shumikhin T A,et al. On hypervelocity penetration of the mesh-bumper strings into a projectile [J]. Int J Impact Eng,2009,36(3):468-475.

Experimental Investigation of Protection Performance about Aluminum Mesh Bumper by High-Velocity Normal Impact

GUAN Gong-Shun,NIU Rui-Tao,BI Qiang,PANG Bao-Jun

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

Abstract:The high-velocity normal impacts of space debris on bumper of spacecrafts were studied through a two-stage light gas gun launching 2017-T4 aluminum spheres to impact on 5052 aluminum mesh shield structure. The resist capability of aluminum mesh shield against high-velocity impact was discussed. For the same areal density,the size effect and arrangement effect on the protection performance of the filled layer were analyzed. Impact velocities of Al-spheres were varied between 2.90 and 4.95 km/s in this study. The diameters of projectiles were 3.97 and 6.35 mm respectively. The impact angle was 0°. The results indicated that the primary capability of the 2A12 aluminum plate comminuting projectile is better than that of 5052 aluminum mesh when the areal density is constant,but as the filled medium,the 5052 aluminum mesh layer provides better protection for the rear wall than 2A12 aluminum plate. In a certain wire diameter range,the 5052 aluminum mesh with smaller wire diameter has better protection performance. Al mesh-Al plate filled layer can break up the projectile to a more uniform size than Al plate-Al mesh filled layer.

Key words:aluminum mesh;high velocity impact;protection performance;space debris