DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0433-08

玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构撞击极限及损伤特性*

贾古寨[1,2],哈 跃[1],庞宝君[1],管公顺[1],祖士明[1]
(1.哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2.中国兵器工业第五二研究所烟台分所,山东 烟台 264003)

摘要:为了研究玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限和损伤特性,采用非火药驱动二级轻气炮进行超高速撞击实验,拟合撞击极限曲线,并与 Nextel/Kevlar 填充防护结构及三层铝防护结构进行比较。结果表明:玄武岩/Kevlar 填充防护结构具有和 Nextel/Kevlar 填充防护结构类似的防护效果,防护性能优于三层铝防护结构。进一步研究填充防护结构铝合金防护屏、纤维布填充层及铝合金舱壁的损伤形式,分析了造成防护屏、填充层与舱壁不同损伤形貌的原因,探索了玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护机理,得出玄武岩纤维布填充层使弹丸碎化,而 Kevlar 填充层消耗、吸收和分散弹丸或碎片云的能量。

关键词:爆炸力学;撞击极限;超高速撞击;填充防护结构;玄武岩纤维布;损伤特性
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着航天事业的发展,将会有越来越多的卫星等航天器在轨运行,这些卫星的运行区域大都在空间碎片密集区域,受空间碎片撞击损伤的威胁很高。载人航天器的运行轨道也处于空间碎片密集区域,而空间碎片撞击将直接影响到航天员的安全,决定载人航天任务的成败。为了保障在轨的安全,航天器必须具备一定的防护能力。目前,在航天器空间碎片防护结构上采用了 Whipple 防护结构、多层冲击防护结构、网格双防护屏结构及填充防护结构等[1-4],这些防护结构普遍采用了高性能纤维材料,如 Nextel、Kevlar,且 Nextel/Kevlar 填充防护结构几乎覆盖了国际空间站的全部高风险区域。尽管对玄武岩及 Kevlar 纤维布填充防护结构超高速撞击损伤和防护性能已进行了大量研究,但是由于实验中填充材料及填充层的面密度各不相同,且实验条件不统一,因此所得结论也大相径庭[5-7]。同时,实验中所采用的弹丸直径过于单一,没有准确地给出玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构相对于 Nextel/Kevlar 填充防护结构及三层铝防护结构的防护性能的优劣。此外,现有文献中仅对玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的损伤有一些零星的报道,并没有给出造成其不同损伤形貌的具体原因[6]。

本文中,针对玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构进行不同直径弹丸的超高速撞击实验,拟合撞击极限曲线,并与 Nextel/Kevlar 填充防护结构及三层铝防护结构的撞击极限曲线进行对比,分析玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能;研究防护屏、填充层及舱壁的损伤形式,分析造成防护屏、填充层与舱壁不同损伤形貌的原因,探索玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护机理。

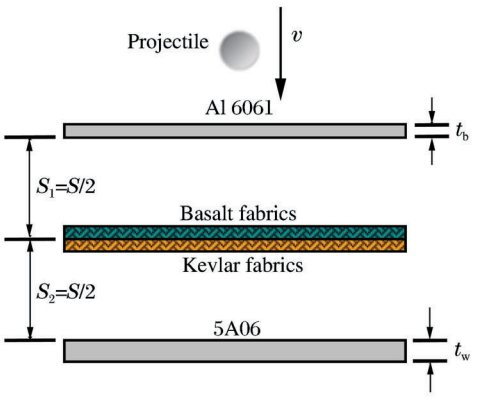
1 实验方案及结果

超高速撞击实验采用二级轻气炮发射装置,其中二级轻气炮一级高压泵管口径为 57 mm,二级发射管口径为 10 mm。一级驱动气体为氮气,二级驱动气体为氢气。速度测量采用磁感应方法,测量精度高于 2%。

玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构形式如图 1 所示,第 1 层防护屏为 1 mm 厚的 6061-T6 铝合金

* **收稿日期**:2014-12-08;**修回日期**:2015-05-14
基金项目:国家自然科学基金项目(11172083)
第一作者:贾古寨(1989—),男,硕士,实习研究员;**通信作者**:哈 跃,hayue@hit.edu.cn。

板，填充层由 3 层玄武岩纤维布和 3 层 Kevlar 纤维布组成，相对于弹丸撞击方向而言，玄武岩纤维布在前，Kevlar 纤维布在后，填充层的面密度为 0.168 g/cm^2，舱壁为 2.5 mm 厚的 5A06 铝合金板，防护结构总的面密度为 1.106 g/cm^2。防护结构总防护间距（即舱壁前表面到最外层防护屏背面的距离）为 100 mm，填充层位于最外层铝合金防护屏和舱壁中间，即处于总防护间距一半的位置。实验中使用 3.97、4.76、6.35 和 7.94 mm 等 4 种不同直径的 2017 铝合金弹丸撞击玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构，撞击速度为 0.6～5.0 km/s，撞击角为 0°。



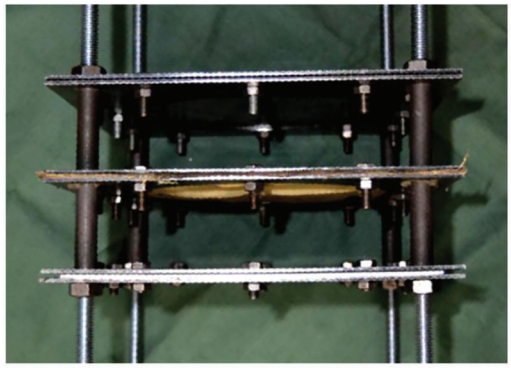


图 1 玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构示意图

Fig. 1 Experimental configuration of basalt/Kevlar stuffed Whipple shield

玄武岩/Kevlar 布填充防护结构超高速撞击实验结果见表 1，表中 d_p、v 和 D_h 分别为弹丸直径、撞击速度和防护屏穿孔直径。实验过程中，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构防护效果的判定以铝合金舱壁是否穿孔、剥落为评价依据：舱壁无穿孔、无剥落，防护有效；有穿孔、剥落，防护失效。如果舱壁出现微裂纹损伤形式，则认为防护失效。

表 1 玄武岩/Kevlar 纤维填充防护结构超高速撞击实验结果

Table 1 Results of hypervelocity impact tests for basalt/Kevlar stuffed shields

实验编号	d_p/mm	v/(km·s^{-1})	D_h/mm	舱壁损伤	防护效果	实验编号	d_p/mm	v/(km·s^{-1})	D_h/mm	舱壁损伤	防护效果
SW-33	7.94	0.650	8.15	鼓包	有效	SW-06	3.97	2.242	6.05	穿孔	失效
SW-22	7.94	0.680	8.26	鼓包	有效	SW-10	6.35	4.438	10.51	穿孔	失效
SW-32	7.94	0.750	8.42	穿孔	失效	SW-47	6.35	4.443	10.34	穿孔	失效
SW-34	7.94	0.868	8.61	穿孔	失效	SW-49	6.35	4.450	10.55	微裂	失效
SW-26	7.94	0.977	8.73	穿孔	失效	SW-48	6.35	4.700	10.63	鼓包	有效
SW-24	7.94	1.076	8.41	穿孔	失效	SW-18	4.76	3.205	7.76	穿孔	失效
SW-23	7.94	1.097	8.65	穿孔	失效	SW-40	4.76	3.550	7.56	穿孔	失效
SW-01	6.35	0.818	6.81	鼓包	有效	SW-19	4.76	3.572	7.51	穿孔	失效
SW-02	6.35	0.940	7.74	微裂纹	失效	SW-20	4.76	3.572	7.92	双鼓包	有效
SW-04	6.35	0.974	7.01	微裂纹	失效	SW-45	4.76	3.660	8.05	微鼓包	有效
SW-05	6.35	1.112	7.30	微裂纹	失效	SW-36	4.76	3.910	8.31	微鼓包	有效
SW-03	6.35	1.149	7.09	穿孔	失效	SW-42	3.97	2.660	6.32	穿孔	失效
SW-25	6.35	1.259	7.66	穿孔	失效	SW-43	3.97	2.660	6.55	微裂纹	失效
SW-13	4.76	1.374	6.04	鼓包	有效	SW-16	3.97	2.809	6.44	穿孔	失效
SW-12	4.76	1.525	6.06	开裂	失效	SW-46	3.97	2.860	6.71	微裂纹	失效
SW-11	4.76	1.595	6.06	穿孔	失效	SW-17	3.97	2.907	6.60	微裂纹	失效
SW-08	3.97	1.211	5.58	鼓包	有效	SW-15	3.97	3.379	6.90	微鼓包	有效
SW-09	3.97	1.776	5.62	开裂	失效	SW-14	3.97	3.572	7.09	鼓包	有效
SW-07	3.97	1.972	5.74	穿孔	失效						

2　分　析

2.1　撞击极限特性

撞击极限曲线是基于撞击极限方程得到的描述防护结构的临界弹丸直径 d_{cr} 与撞击参数、结构参数之间关系的曲线，其是评价防护结构防护性能的重要手段，同样也是航天器防护结构设计的重要依据。由于弹丸超高速撞击填充防护结构，在不同速度区段呈现不同的动力学特性，因此撞击极限方程分为 3 段函数来表达。填充防护结构撞击极限方程可表示为：

弹道区（$v \leqslant v_L$）：

$$d_{cr} = C_L F^{*} \rho_p^{k_1} v^{k_2} \cos^{k_3}\theta$$

对于 Nextel/Kevlar 填充防护结构而言，几何模型函数：

$$F^{*} = t_w(\sigma/275.8)^{0.5} + c_b m_b$$

液化/气化区（$v \geqslant v_H$）：

$$d_{cr} = C_H(t_w\rho_w)^{k_4} S^{k_5} (\sigma/\sigma_0)^{k_6} \rho_b^{k_7} \rho_p^{k_8} v^{k_9} \cos^{k_{10}}\theta$$

破碎区（$v_L < v < v_H$）：

$$d_{cr} = d_{cr,v_H} \frac{v_H - v}{v_H - v_L} + d_{cr,v_L} \frac{v - v_L}{v_H - v_L}$$

上述方程中：C_L、C_H、c_b、α、$k_1 \sim k_{10}$ 为撞击极限方程参数；v_L、v_H 为弹道区、破碎区、熔化/气化区 3 区的临界速度（km/s），分别称为第 1 速度阈值和第 2 速度阈值；ρ_p、ρ_b、ρ_w 分别为弹丸、防护屏和舱壁密度（g/cm^3）；S 为防护屏间距（cm）；σ 为舱壁材料极限屈服强度（MPa）；t_w 为舱壁厚度（cm）；θ 为撞击角（°）。

对于特定材料弹丸超高速撞击某一填充防护结构，当撞击角为 0°时，几何模型函数、弹丸密度、防护屏密度、舱壁密度、舱壁厚度及防护间距等参数均为常数，因此，撞击极限方程简化为：弹道区，$d_{cr} = C'_L v^{k_2}$；液化/汽化区，$d_{cr} = C'_H v^{k_2}$；破碎区，$d_{cr} = C_M v^{k_2}$；其中 C'_L、C'_H、C_M 为待定系数。

对于本文玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构，根据表 1 实验结果，拟合得到预测撞击极限方程为：弹道区（$v \leqslant 2.528$ km/s），$d_{cr} = 0.605v^{-0.735}$；破碎区，$d_{cr} = 0.16v - 0.105$。

图 2 给出了玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的预测撞击极限曲线和同等面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构的撞击极限曲线[8-9]及三层铝防护屏的撞击极限曲线[10]。由图 2 可知，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限曲线与 Nextel/Kevlar 填充防护结构和三层铝防护结构的撞击极限曲线整体趋势基本相同。弹道区时，3 种防护结构的撞击极限曲线几乎重合，表明在该碰撞速度范围内，在防护结构面密度相等的条件下，3 种防护构型的防护性能相当。破碎区时，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限曲线始终处于最上端，Nextel/Kevlar 填充防护结构的撞击极限曲线位于中间，三层铝防护屏的撞击极限曲线则处于最下端。这表明，在防护结构面密度相等的条件下，三层铝防护屏的防护性能最差，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能最好。总体而言，纤维织物填充防护结构的防护性能优于三层铝防护屏的防护性能，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能已经达到了 Nextel/Kevlar 填充防护结构的防护水平，可以作为一种新的用于空间碎片防护的填充防护结构。

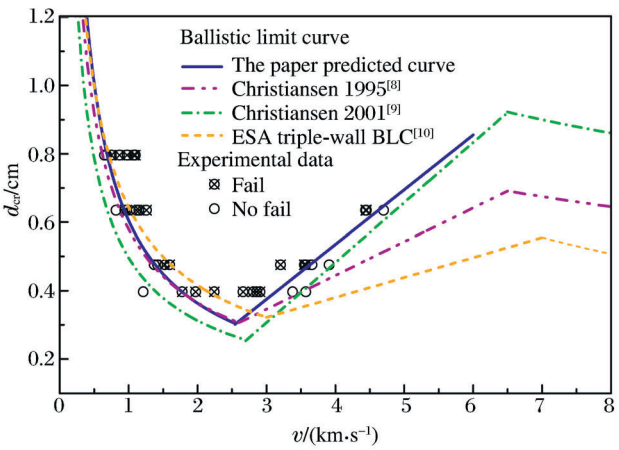


图 2　玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构撞击极限曲线

Fig. 2　Ballistic limit curves of basalt/Kevlar stuffed shield

2.2 损伤特性

2.2.1 防护屏穿孔特性

最外层防护屏穿孔损伤形貌如图 3 所示，其均为圆形穿孔损伤。当撞击速度较低时，防护屏正面孔口边缘有瓣形突缘(堆积突起)；防护屏背面也存在突缘，并有明显的后翘拉伸变形，其为充塞边缘端口。随着撞击速度的升高，处于破碎区段时，防护屏正面瓣形突起产生飞散，并减少；背面孔边缘也产生同正面一样的堆积飞散。其主要原因是弹丸撞击铝合金防护屏，在撞击界面产生巨大的冲击压力，防护屏材料在冲击压缩波的扰动下产生大量能量(热量)，发生熔化，体积迅速增大，并在剪切流动的作用下，以很高的速度飞溅出去，未飞溅出去的材料粘附于圆孔周边，形成了防护屏正面的瓣形突缘。撞击速度愈高，剪切流动力愈大，防护屏熔化材料飞溅速度也愈高，使得残留粘附于孔周边的材料减少。撞击速度较低时，防护屏在拉伸波的扰动下产生整体变形，形成鼓包，并由高速弹丸充塞出一块防护屏材料，形成拉伸形突缘断口；随着撞击速度的增加，弹丸贯穿防护屏的速度大于拉伸波扰动防护屏产生整体变形的速度，使得防护屏未产生整体变形(鼓包)前便被充塞出一块，由于应力做功产生大量能量，防护屏材料熔化，熔化材料在剪切力的作用下沿弹丸飞行方向飞溅。

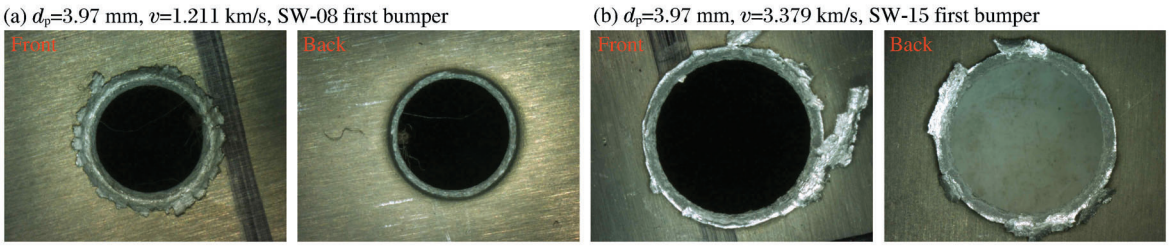


图 3 防护屏超高速撞击穿孔损伤

Fig. 3 Perforation damage in the first bumper by hypervelocity impact

图 4 给出了防护屏穿孔直径随撞击速度的变化曲线。弹丸直径一定时，穿孔直径随撞击速度的升高而增大，呈非线性变化。目前，预测穿孔直径的经验公式主要有 Maiden[11]、Nysmith[12]、Sawle[13]、Guan[14]等经验公式。由图 4 可知，对于直径为 3.97 mm 的铝球撞击铝合金防护屏，上述穿孔直径方程并不适用于本文实验结果。其中，Swale[13]公式高估了防护屏穿孔直径，Maiden[11]、Nysmith[12]与 Guan[14]3 个公式则低估了防护屏穿孔直径，且 4 个方程预测结果与本文实验结果之间误差均大于 20%，最大误差超过 50%。综上所述，由于实验和预测公式间选用的材料在性能方面存在差异，预测结果也会带来较大的误差，因此，有必要针对本文材料进行超高速撞击特性研究。

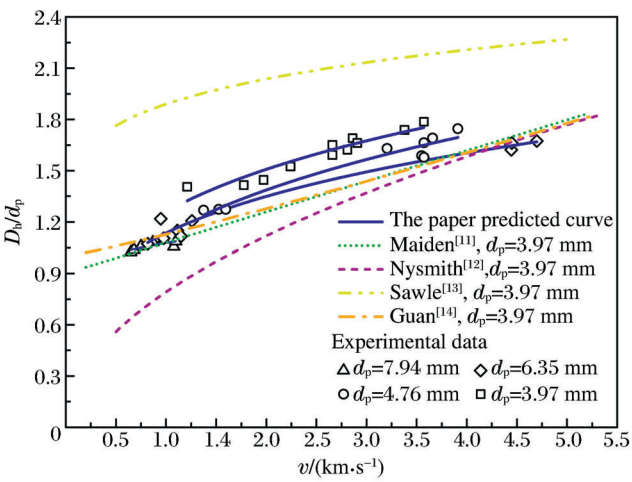


图 4 防护屏穿孔直径随撞击速度的变化

Fig. 4 Hole diameter in the first bumper via impact velocity

2.2.2 填充层损伤特性

弹丸击穿防护屏后，会产生飞散碎片，飞散碎片会对填充层造成不同形式的损伤。图 5(a)表明，当撞击速度处于低速区时，填充层前面的玄武岩纤维面层上有较规则的方孔，方孔四边分别平行于玄武岩纤维布的经纱和纬纱，且纤维断裂面平滑，纱线断口附近没有出现明显的弯曲变形；背面 Kevlar 面层也产生了穿孔，但其断裂纱线产生了较大的拉伸变形，形成球冠状突起，遮住贯穿孔，孔周边纱线被弹丸推

开，形成倒圆锥式凹陷，并伴有少量抽纱。随着撞击速度接近第 1 速度阈值时，玄武岩纤维面层上出现许多孔，如图 5(b)和(c)所示，其中弹丸主体在填充层上形成一个方形大孔，而小碎片则在周围形成一些小孔，大小沿径向向外逐渐减小。大孔断面纤维整齐光滑，周围小孔断面不一。Kevlar 填充层背面为一个方孔，四边也平行于 Kevlar 面层的经、纬纱，但断口不是很平滑，纱线拉伸变形较大，且有些纱线明显被拉长但没有断裂，产生推移变形，形成倒圆锥式突起，并伴有少量抽纱。

当撞击速度为破碎区时，填充层正面损伤为圆形大孔，周围有许多小孔呈散射分布；玄武岩和 Kevlar 断裂的纱线向弹丸飞行的反向翻转，断口不整齐，有毛边。填充层背面为近似方形孔，伴有撕裂，断口不整齐，Kevlar 纤维布有明显抽纱现象，如图 5(d)所示。

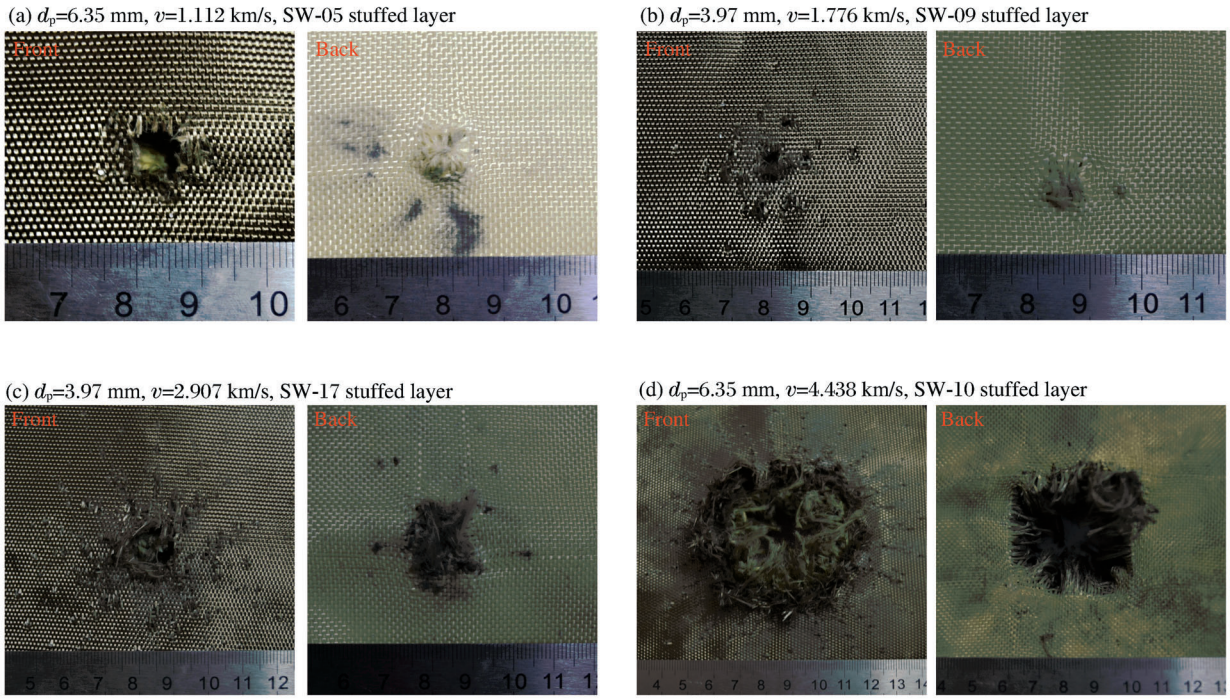


图 5　填充层超高速撞击损伤

Fig. 5　Hypervelocity impact damage of stuffed layer

玄武岩布和 Kevlar 布的细观损伤形态如图 6 所示。玄武岩纤维作为一种陶瓷纤维材料，脆性很强，破坏时发生脆性断裂，随着撞击速度的增高，其纤维断裂截面趋于规整；而 Kevlar 作为一个高分子聚合物，具有较大韧性，随着撞击速度的提高，应变率升高，Kevlar 纤维丝强度增高，韧性减小，侧向劈裂和原纤化加剧。此外，Kevlar 纤维材料具有较低的玻璃化温度，撞击过程中 Kevlar 纤维发生明显的热塑性变形。

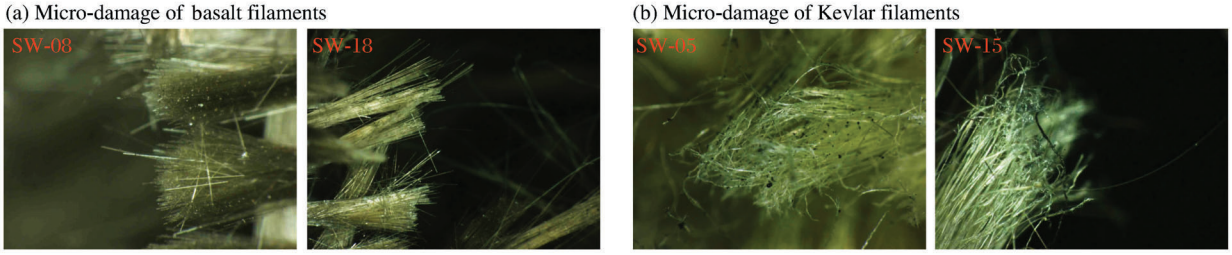


图 6　填充层纤维丝微损伤形态

Fig. 6　Micro-damage of filaments in stuffed layer

以上分析表明，玄武岩/Kevlar 纤维布填充层通过纤维丝的断裂和拉伸变形吸收弹丸撞击能量。另外，根据文献[5]可知，玄武岩纤维布具有切割、破碎弹丸的能力，使大碎片或弹丸进一步破碎，且不产生新的大碎片，这也正是玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构防护性能优于 Nextel/Kevlar 填充防护结构和三层铝防护屏的重要原因。

2.2.3 舱壁损伤特性

图 7 给出了不同速度区段舱壁的超高速撞击损伤形貌。弹丸撞击速度低于第 1 速度阈值时，弹丸仅产生塑性变形，以完整的形态撞击舱壁，造成舱壁穿孔或撞击坑损伤；随着撞击速度的提高，弹丸发生少量破碎，造成舱壁贯穿孔或大撞击坑周围形成小撞击坑。随着弹丸撞击速度的继续提高，当其超过第 1 速度阈值后，舱壁中心区域损伤最严重，并沿着径向向外损伤程度逐渐减轻。

此外，击穿防护屏后，弹丸形成碎片云，并发生熔化或气化，熔化/气化的碎片云具有较高的温度和速度，当撞击到面层纤维丝时，产生较高的冲击压力，并伴有多种冲击现象，包括弹性波、塑性波和流动波。而纤维丝在横波和纵波的作用下发生解体，以短纤维、纤维团或纤维束的形式喷向舱壁，使舱壁损伤区有黑色喷溅物和丝状物，如图 7(c)所示，其中黑色喷溅物为金属铝液化或气化喷射物和填充层纤维丝烧蚀后的喷射物；丝状物为 Kevlar 纤维丝，其都以束状或团状出现，一般位于黑色喷溅区边界处。随着撞击速度的提高，这些丝状物逐渐被烧蚀碳化，由于碳化粉末仍有较高的温度，其可以造成舱壁正面烧蚀损伤，如图 7(d)所示。

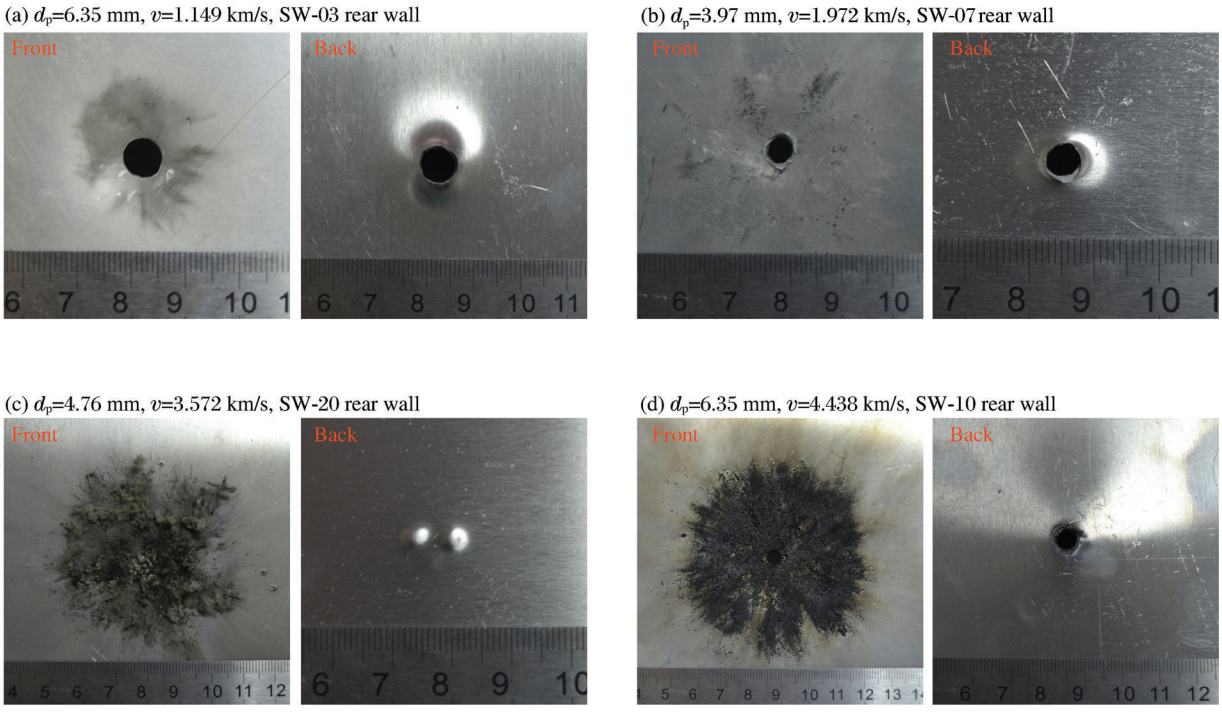


图 7 舱壁的超高速撞击损伤

Fig. 7 Hypervelocity impact damage of rear wall

2.3 防护机理

玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护机理如图 8 所示，弹丸撞击铝合金防护屏，在撞击界面产生巨大的冲击压力。

如撞击速度较低时，冲击压力不足以使弹丸破碎，弹丸贯穿防护屏，头部产生塑性变形，飞行速度降低，其继续撞击纤维布填充层，纤维面层主要通过玄武岩纤维丝的剪切断裂和 Kevlar 纤维丝拉伸变形消耗弹丸动能，使弹丸剩余能量造成的舱壁损伤减轻。

如果撞击速度较高，弹丸和防护屏在冲击压缩波扰动下破碎，并使弹丸和防护屏材料产生液化或者

气化，形成高温碎片云，高温碎片云撞击纤维布填充层，根据 2.2.2 和 2.2.3 节可知，玄武岩纤维丝切割碎片，使碎片进一步细化，Kevlar 纤维丝对细化碎片进行拦截。

此外，高温高速碎片云使纤维丝体解，烧蚀并粉末化，在舱壁正面形成较大喷溅区，喷溅区面积较大，使得作用在舱壁单位面积上的能量较小，从而减小了对舱壁的损伤。

综上所述，玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构通过填充层消耗、吸收和分散弹丸或碎片云的能量，以起到更好的防护效果。

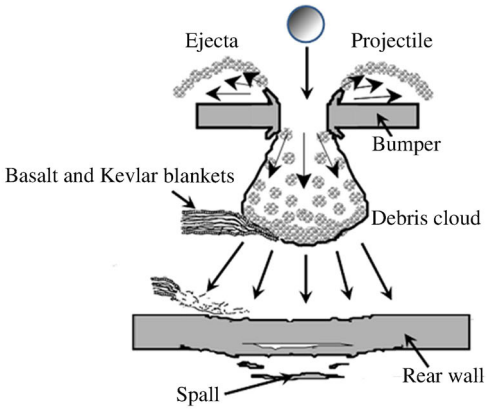


图 8　玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构防护机理

Fig. 8　Protection mechanism of basalt/Kevlar stuffed shields

3　结　论

(1)通过超高速撞击实验研究了玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限，与同等面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构和三层铝防护屏进行比较，得出玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能优于三层铝防护屏的防护性能，且也已经达到 Nextel/Kevlar 填充防护结构的防护水平，完全可以作为一种新的用于空间碎片防护的填充防护结构。

(2)研究了防护屏、填充层和舱壁的超高速撞击损伤特性，分析了造成防护屏、填充层与舱壁不同损伤形貌的原因，初步探索了玄武岩/Kevlar 填充防护结构的防护机理。玄武岩纤维布破碎弹丸，使弹丸或碎片破碎，同时连同 Kevlar 纤维布一起消耗、吸收弹丸的撞击能量，使玄武岩/Kevlar 纤维布填充防护结构具有和 Nextel/Kevlar 填充防护结构类似的防护效果，优于三层铝防护屏的防护性能。

下一步工作重点是，进一步扩大超高速撞击实验的速度范围，深入分析撞击极限的弹丸形状效应。

参考文献：

[1]　Christiansen E L. Advanced meteoroid and debris shielding concepts[C]// AIAA/NASA/DOD Orbital Debris Conference: Technical Issues and Future Directions. Baltimore, MD, 1990.

[2]　Christiansen E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993,14(1):145-156.

[3]　Cour-Palais B G, Crews J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,10(1):135-146.

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

[5]　哈跃，庞宝君，管公顺，等. 玄武岩纤维布 Whipple 防护结构超高速撞击损伤分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2007，39(5):779-782.

Ha Yue, Pang Baojun, Guan Gongshun, et al. Damage of high velocity impact on basalt fiber hybrid woven-Al Whipple shield[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,39(5):779-782.

[6]　张宝玺，邓云飞，哈跃，等. 超高速撞击玄武岩及 Kevlar 纤维布填充防护结构研究[J]. 固体力学学报，2012，33(5)：533-540.

Zhang Baoxi, Deng Yunfei, Ha Yue, et al. The optimal structural design of stuffed shield with basalt and Kevlar fiber clothes against hypervelocity impacting[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012,33(5):533-540.

[7]　苟海涛，王应德，闫军，等. 一种高性能复合织物填充防护结构撞击极限研究和防护机理分析[C]// 中国空间科学学

会空间材料专业委员会学术交流会议. 2012.

[8] Christiansen E L, Crews J L, Williamsen J E, et al. Enhanced meteoroid and orbital debris shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,17(1):217-228.

[9] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26(1):93-104.

[10] Christiansen E L, Arnold J, Corsaro B, et al. Handbook for designing MMOD protection[R]. NASA Johnson Space Center, NASA/TM-2009-214785, 2009.

[11] Maiden C J, McMillan A R. An investigation of the protection afforded a spacecraft by a thin shield[J]. AIAA Journal, 1964,2(11):1992-1998.

[12] Nysmith C R. Experimental investigation of the momentum transfer associated with impact into thin aluminum targets[R]. NASA TND-5492, 1969.

[13] Sawle D R. Hypervelocity impact in thin sheets, semi-infinite targets at 15 km/s[J]. AIAA Journal, 1970,8(7):1240-1244.

[14] 管公顺,庞宝君,崔乃刚,等. 铝球弹丸超高速正撞击薄铝板穿孔尺寸研究[J]. 工程力学,2007,24(12):181-185.
Guan Gongshun, Pang Baojun, Cui Naigang, et al. Size investigation of hole due to hypervelocity impact aluminum spheres on thin aluminum sheet[J]. Engineering Mechanics, 2007,24(12):181-185.

Ballistic limit and damage properties of basalt/Kevlar stuffed shield

Jia Guzhai[1,2], Ha Yue[1], Pang Baojun[1], Guan Gongshun[1], Zu Shiming[1]

(1. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*;
2. *Yantai Branch, No.* 52 *Institute of China Ordnance Industries, Yantai* 264003, *Shandong, China*)

Abstract: In order to study the ballistic limits and damage properties of the basalt/Kevlar stuffed shields, hypervelocity impact tests were carried out by non-power two-stage light-gas gun facilities. The ballistic limit curves were fitted with the test data, and compared with those of the Nextel/Kevlar stuffed shields and the all-aluminum triple-wall shields with the same areal density. The results indicate that the protection property of the basalt/Kevlar stuffed shields is the same as that of the Nextel/Kevlar stuffed shields, and better than that of the all-aluminum triple-wall shields. Further, the hypervelocity impact damage properties of the first bumper, the stuffed layer, and the rear wall were investigated. The reasons were analyzed which caused the damage types of the bumpers different, and the protection mechanisms of the basalt/Kevlar stuffed shields were explored. The results show that the basalt fabrics broke the aluminum projectiles into pieces, and the Kevlar fabrics absorbed and dissipated the energy of the aluminum projectiles or debris clouds.

Key words: mechanics of explosion; ballistic limit; hypervelocity impact; stuffed shield; basalt fabric; damage properties

(责任编辑 张凌云)