文章编号：1000-5773(2013)01-0105-08

超高速撞击 Kevlar 纤维布填充防护结构研究*

张宝玺，哈　跃，邓云飞，庞宝君

（哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨　150001）

摘要：利用二级轻气炮，对 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构进行了超高速撞击实验研究。基于 Nextel/Kevlar 撞击极限曲线，分析了单层及双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能以及填充材料、舱壁的损伤情况。实验表明，Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构在低速区具有优良的防护性能。分层布局可改善 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构在低速区的防护性能。在低速区，Kevlar 纤维丝主要依靠大量的塑性变形及断裂吸收弹丸的动能；在高速区，Kevlar 纤维丝存在高温熔化及碳化现象，使弹丸破碎或熔化为更小的碎片或熔球，从而减轻对舱壁的损伤。

关键词：超高速撞击；填充 Whipple 防护结构；Kevlar 纤维布；防护结构

中图分类号：O347.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

运载工具产生的喷射物和抛弃物、失效的有效载荷、空间物体碰撞产生的碎片、航天器外部脱落的碎片和排出的垃圾都被称为空间碎片。随着航天器发射数目的逐年增加，在轨运行航天器报废后生成的碎片数目急速增长，在航天器运行轨道上形成了包裹层。大空间碎片的撞击会改变航天器的姿态和轨道，导致航天器破损甚至解体。小空间碎片的撞击会改变航天器表面性能，导致部分器件损伤或失效，最终使航天器丧失功能。深入研究各种防护材料的超高速撞击特性，对于航天器防护结构的优化设计至关重要。

大量研究[1-6]表明，填充 Whipple 防护结构的防护性能与填充材料特性、防护屏的材料及厚度、弹体的材料及形状、填充材料分层数、叠层顺序、叠层间隙等有关。尽管人们进行了大量的 Kevlar 纤维布超高速撞击实验[6-9]，但是由于实验中大多包含其它填充材料，并且实验条件各不相同，因此得到的结论存在一定差异，无法系统地研究 Kevlar 纤维布对超高速撞击的防护性能。目前，关于含有 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构的防护性能、舱壁及 Kevlar 纤维布损伤的研究报道较多，但是对单一 Kevlar 纤维布填充的结构布局对超高速撞击防护性能、舱壁及填充材料损伤影响的研究很缺乏。

本研究针对 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构（单层和双层两种结构），进行超高速撞击实验，将撞击实验结果与 Nextel/Kevlar 填充 Whipple 防护结构的撞击极限曲线进行对比，分析 Kevlar 纤维布代替 Nextel 纤维布对防护结构性能的影响，为航天器防护结构的材料选择和结构设计提供技术支持。

* **收稿日期**：2011-07-13；**修回日期**：2011-08-15

作者简介：张宝玺（1988－），男，博士研究生，主要从事超高速撞击动力学研究. E-mail:15244610859@163.com

通讯作者：哈　跃（1956－），男，博士，副教授，主要从事超高速撞击动力学研究. E-mail:hayue@hit.edu.cn

2 实验系统与方法

实验是在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的二级轻气炮实验装置上进行的。实验设备主要包括二级轻气炮发射装置、靶舱、激光测速系统等。实验装置示意图见图 1。

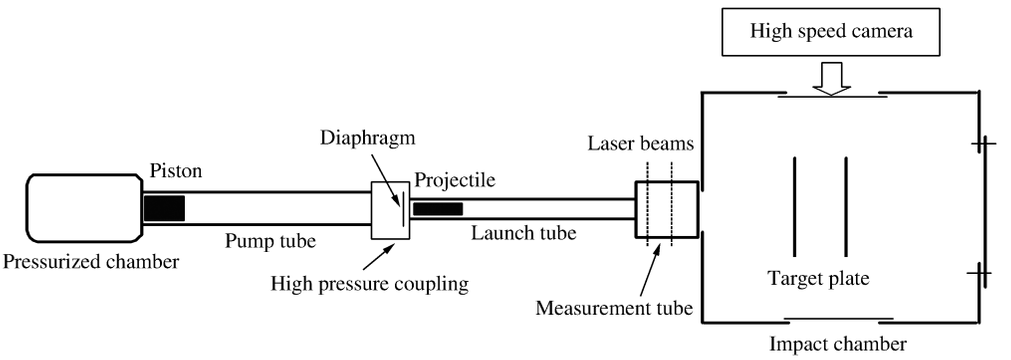


图 1 超高速撞击实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of impact experimental set-up

Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构由防护板、填充结构(Kevlar 纤维布)、舱壁及校验板组成,其中填充结构采用单层和双层两种结构。单层填充结构由 11 层 Kevlar 纤维布叠加而成;双层填充结构分为两层,第 1 层由 5 层 Kevlar 纤维布叠加而成,第 2 层由 6 层 Kevlar 纤维布叠加而成,两层的间距为 20 mm,如图 2 所示。Kevlar 纤维布的面密度为 0.023 g/cm^2,编织方法为平纹编织。防护板为 1 mm 厚的 2A12 铝合金板,舱壁为 3 mm 厚的 5A06 铝合金板。防护板前表面到舱壁后表面的距离为 100 mm。两种填充结构的前表面到防护板前表面的间距均为 54 mm。舱壁后面布置 3 层 0.5 mm 厚的 2A12 铝合金校验板。

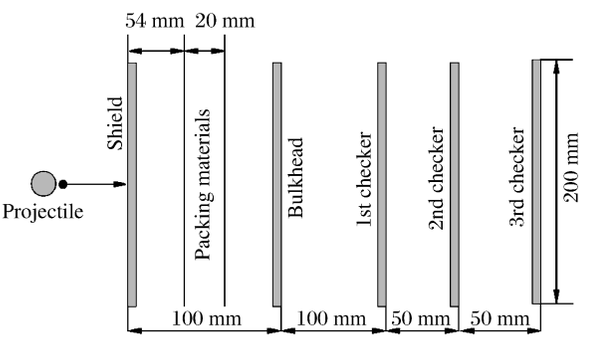


图 2 超高速撞击实验防护结构示意图

Fig. 2 Schematic of target in hypervelocity impact experiment

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构撞击实验结果如表 1 所示,其中:1# ~10# 为双层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构撞击实验,11# ~22# 为单层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构撞击实验;v 为弹丸撞击速度,d_p 为弹丸直径,m 为弹丸质量,m_b 为铝防护板和 Nextel/Kevlar 填充材料的总面密度;所有实验中,m_b 均为 0.531 g/cm^2。

3.2 撞击极限曲线

撞击极限曲线是进行航天器空间碎片高速撞击风险评估以及防护结构和防护材料优化设计的重要依据。目前,美国航天器 Whipple 填充防护结构所用的填充防护材料由 Nextel 和 Kevlar 组成,本研究以 Nextel/Kevlar 填充防护结构的撞击极限曲线为参照,利用撞击极限分析方法,分析 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能,其中击穿区位于撞击极限曲线上方,未击穿区位于曲线下方。Nextel/Kevlar

填充防护结构的撞击极限方程为[10-11]

$$d_c=\begin{cases}\dfrac{2[t_w(6.895\sigma/40)^{1/2}+0.37m_b]}{\rho_p^{1/2}v^{2/3}\cos^{5/3}\theta} & v_n\leqslant\dfrac{2.7}{\cos^{1/2}\theta}\\[2ex] \dfrac{1.031[t_w(6.895\sigma/40)^{1/2}+0.37m_b](6.5\cos^{-1/3}\theta-v)}{\rho_p^{1/2}(6.5\cos^{-1/3}\theta-2.7\cos^{-1/2}\theta)\cos^{4/3}\theta}+ & \dfrac{2.7}{\cos^{1/2}\theta}<v_n<\dfrac{6.5}{\cos^{1/3}\theta}\\ \dfrac{0.32t_w^{1/3}\rho_w^{1/3}S^{2/3}(6.895\sigma/40)^{1/6}(v-2.7\cos^{-1/2}\theta)}{\rho_p^{1/3}(6.5\cos^{-1/3}\theta-2.7\cos^{-1/2}\theta)\cos^{7/18}\theta} & \\[2ex] \dfrac{0.6t_w^{1/3}S^{2/3}(6.895\sigma/40)^{1/6}}{\rho_p^{1/3}v^{1/3}\cos^{1/2}\theta} & v_n\geqslant\dfrac{6.5}{\cos^{1/3}\theta}\end{cases}\tag{1}$$

式中:d_c 为临界弹丸直径(cm),t_w 为舱壁厚度(cm),ρ_w 为舱壁密度(g/cm^3),ρ_p 为弹丸密度(g/cm^3),θ 为弹丸撞击角度(°),S 为防护板与舱壁之间的总间距(cm),v_n 为弹丸法向撞击速度(km/s),σ 为舱壁的极限应力(MPa),v 为弹丸撞击速度(km/s),m_b 为铝防护板和 Nextel/Kevlar 填充材料的总面密度(g/cm^2)。(1)式所确定的舱壁失效准则为:舱壁背面无裂纹、无剥落、无击穿。本研究中,单层和双层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构的撞击极限方程参数为:$t_w=0.3$ cm,$S=10$ cm,$\theta=0°$,$\rho_w=\rho_p=2.78$ g/cm^3,$\sigma=345$ MPa,$m_b=0.531$ g/cm^2。

表 1 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构撞击实验结果

Table 1 Experimental results of stuffed Whipple shields with Kevlar fiber clothes

No.	d_p/(mm)	m/(g)	v/(km/s)	Filling material damage	Bulkhead damage	Checker damage
1#	7.94	0.730	0.60	The second layer is imperforated	—	—
2#	7.94	0.733	0.80	Completely perforated	Imperforated and bumped	—
3#	6.35	0.375	1.12	Completely perforated	Imperforated and the projectile is embedded	—
4#	6.35	0.375	1.16	Completely perforated	Perforated	The second layer has two bumps
5#	6.35	0.375	1.40	Completely perforated	Perforated	The third layer is perforated
6#	7.94	0.732	1.81	Completely perforated	Perforated	The third layer is perforated
7#	6.35	0.374	4.06	Completely perforated	Microcracks	The first layer is undamaged
8#	6.35	0.375	4.24	Completely perforated	Perforated	The third layer is imperforated
9#	6.35	0.375	4.34	Completely perforated	Perforated	The first layer is imperforated
10#	6.35	0.375	4.42	Completely perforated	Imperforated and bumped	—
11#	6.35	0.375	0.87	Imperforated	—	—
12#	6.35	0.375	0.80	Imperforated	—	—
13#	6.35	0.375	1.06	Perforated	Imperforated and bumped	—
14#	6.35	0.375	1.31	Perforated	Perforated	The third layer is perforated
15#	6.35	0.375	3.97	Perforated	Micropores	The first layer is imperforated
16#	6.35	0.376	2.20	Perforated	Perforated	The third layer is perforated
17#	6.35	0.375	2.20	Perforated	Perforated	The third layer is perforated
18#	6.35	0.375	2.97	Perforated	Perforated	The third layer is perforated
19#	6.35	0.375	3.87	Perforated	Imperforated	—
20#	6.35	0.375	3.92	Perforated	Perforated	The third layer is imperforated
21#	6.35	0.375	4.39	Perforated	Perforated	The first layer is imperforated
22#	6.35	0.375	4.46	Perforated	Perforated	The first layer is imperforated

Note: (1) $m_b=0.531$ g/cm^2 in all impact experiments;

(2) The stuffed Whipple shields with Kevlar fiber clothes employ the double-layer packing structure in 1#-10# and single-layer packing structure in 11#-22#.

3.3 单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限性能分析

单层 Kevlar 纤维布填充防护结构超高速撞击实验点与相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构撞击极限曲线的对比如图 3 所示。根据撞击速度的大小，撞击极限曲线可分为 3 段：低速区、高速区和超高速区。图 3 中的空心圆点和十字符号分别代表舱壁被击穿和未被击穿时的实验点。

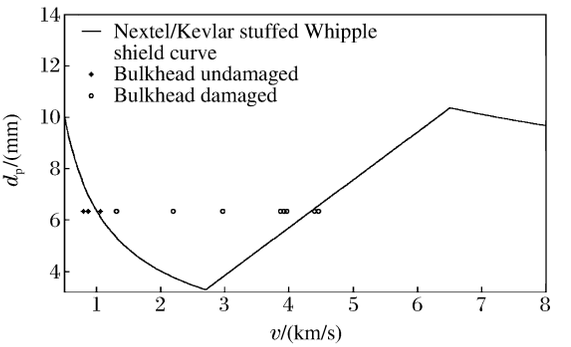


图 3 单层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构的撞击实验结果

Fig. 3 Experimental results of stuffed Whipple shields with monolayer Kevlar fiber clothes

由表 1 和图 3 可知：11# 和 12# 实验点位于 Nextel/Kevlar 填充防护结构极限曲线下方的未击穿区，此时舱壁未被击穿；13# 实验点位于极限曲线上方的击穿区，但是舱壁未被击穿，说明在舱壁无击穿、无剥落和无裂纹出现的极限状态条件下，单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的性能略优于相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构。同时，与相同面密度的Nextel/Kevlar填充防护结构相比，弹丸直径为 6.35 mm 时，低速区的有效防护速度由 1.01 km/s 增加到 1.062 km/s，提升了 5.15%；当低速区撞击速度为 1.062 km/s 时，有效防护弹丸直径由 6.13 mm 增加到 6.35 mm，增加了 3.59%。14# ～21# 实验点位于击穿区，此时舱壁被击穿。在高速区，21#、22# 实验点位于极限曲线下方，但是舱壁被击穿，表明在舱壁无击穿、无剥落和无裂纹出现的极限状态条件下，单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能劣于相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构。

综合考虑 13#、21# 和 22# 这 3 个实验点，可以得到：在低速区，单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能略优于 Nextel/Kevlar 填充防护结构；在高速区，单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能差于 Nextel/Kevlar 填充防护结构。

3.4 单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的舱壁损伤研究

舱壁不击穿、无剥落和无裂纹的失效准则是评价防护性能的重要条件，也就是说，可以根据舱壁损伤评价防护结构的防护性能。

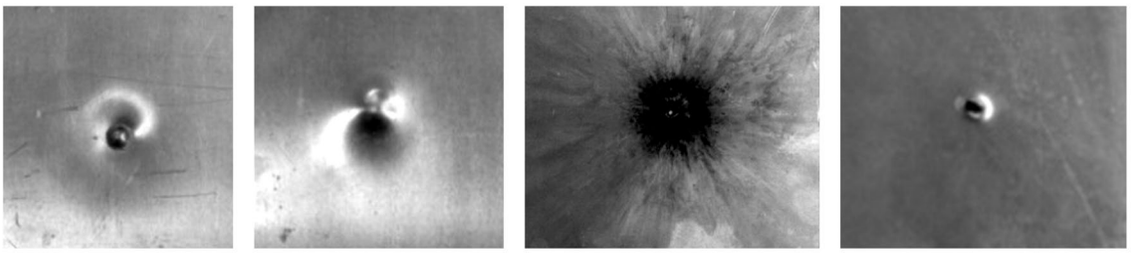
单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的舱壁损伤情况如图 4 所示。在图 4(a)中，弹丸未击穿舱壁，此时舱壁后部出现圆形鼓包。而在图 4(b)中，弹丸击穿舱壁，可以观察到舱壁损伤区从中心向外由 3 个区域组成：中心区域为击穿区；中间区域由密集的小弹坑覆盖；外围区域为喷溅区，由散落的小弹坑和铝弹丸熔化物及碳化物组成。舱壁的损伤特点由弹丸动能密度分布特性决定，即随着撞击速度和弹丸直径的增大，损伤区域面积增加，弹坑分布更加向外分散。实验分析表明，弹丸处于低速区时，弹丸前部受到挤压发生塑性变形，而弹丸后部基本保持球形；在高速区，由于防护板和 Kevlar 纤维布的作用，弹丸发生破碎和高温熔化，产生大量的熔化铝球和碎片，导致弹丸损失大部分质量和速度，从而减轻了对舱壁的损伤，达到防护结构的防护要求。

3.5 单层 Kevlar 纤维布填充防护结构的损伤机理分析

铝弹丸超高速撞击单层 Kevlar 纤维布填充防护结构时，Kevlar 纤维布在不同的撞击速度区表现出不同的损伤形态和机理。单层 Kevlar 纤维布的损伤情况如图 5 所示。图 5(a)表明，在低速区，Kevlar 纤维布被击穿。13# 实验点的单层 Kevlar 纤维布水平方向(纬纱)的损伤孔口直径为 10 mm，竖直方向(经纱)的损伤孔口直径为 10 mm，断裂的纤维丝呈散开状；因为纤维丝断裂时具有高应变，所以在靠近穿孔前侧大量断裂的纤维丝向前伸出，而靠近穿孔后侧大量断裂的纤维丝向后伸出，损伤区域大致呈椭圆形。图 5(b)表明，在高速区，Kevlar 纤维布被击穿。22# 实验点的单层 Kevlar 纤维布水平方向(纬纱)的损伤孔口直径为 73 mm，竖直方向(经纱)的损伤孔口直径为 71 mm；靠近穿孔前侧大量断裂的纤维丝向前伸出，而靠近穿孔后侧大量断裂的纤维丝向后伸出；同时，由于拉伸塑性变形，Kevlar 纤维布

前侧部分整体向前凸出,后侧部分整体向后凸出,且凸出变形量明显大于低速区的 Kevlar 纤维布;大量的纤维丝断裂为微小的纤维丝,且一部分纤维丝由于超高速撞击产生的高温出现熔化及碳化现象。

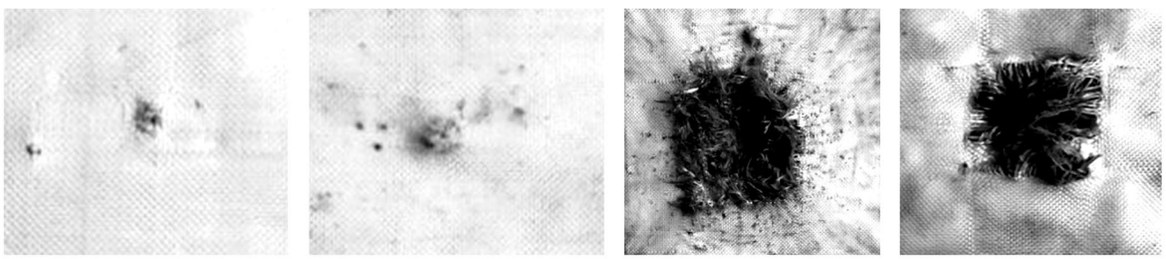
综合以上实验结果可知:在低速区和高速区,Kevlar 纤维布的击穿损伤区域均接近于椭圆形,断裂的纤维丝向前、后两侧凸出,凸出高度随着撞击速度的增加而增高,并且纤维丝断裂形成的短小纤维丝数目也随着撞击速度的增加而增多;在高速区,因超高速撞击时产生的冲击温度累积效应,形成了大量的 Kevlar 纤维丝碳化物。



(a) v=1.062 km/s, d_p=6.35 mm　　(b) v=4.46 km/s, d_p=6.35 mm

图 4　单层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构中舱壁的损伤形貌

Fig. 4　Damage morphologies of cabin walls in stuffed Whipple shields with monolayer Kevlar fiber clothes



(a) v=1.062 km/s, d_p=6.35 mm　　(b) v=4.46 km/s, d_p=6.35 mm

图 5　单层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构中 Kevlar 纤维布的穿孔形态

Fig. 5　Perforation morphologies of Kevlar fiber clothes in stuffed Whipple shields with monolayer Kevlar fiber clothes

3.6　双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的撞击极限性能分析

双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的超高速撞击实验点与相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构撞击极限曲线的对比如图 6 所示,其中空心圆点和十字符号分别代表舱壁被击穿和未被击穿时的实验点。

由表 1 和图 6 可知:1# 实验点位于 Nextel/Kevlar 填充防护结构极限曲线下方的未击穿区,此时舱壁未被击穿;2# 和 3# 实验点位于击穿区,但是舱壁未被击穿,表明在舱壁无击穿、无剥落和无裂纹出现的极限状态条件下,双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能略优于相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构。与相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构相比,弹丸直径为 7.94 mm 时,低速区的有效防护速度由 0.721 km/s 增加到

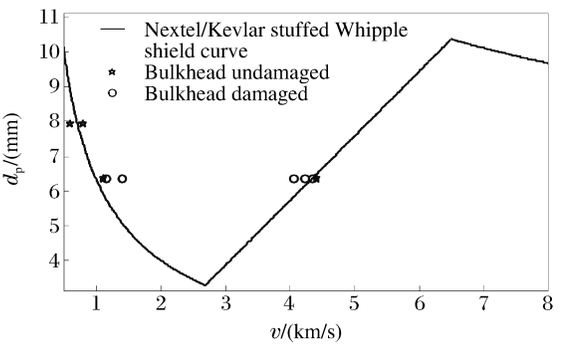


图 6　双层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构的撞击实验结果

Fig. 6　Experimental results of stuffed Whipple shields with double-layer Kevlar fiber clothes

0.801 km/s,提升了 11.1%;当弹丸直径为 6.35 mm 时,低速区有效防护速度由 1.01 km/s 增加到 1.12 km/s,提升了 10.9%;当低速区撞击速度为 0.801 km/s 时,有效防护弹丸直径由 7.39 mm 增加到 7.94 mm,增加了 7.4%;当低速区撞击速度为1.12 km/s 时,有效防护弹丸直径由 5.92 mm 增加到 6.35 mm,增加了 7.3%。4#～8# 实验点位于击穿区,舱壁被击穿。在高速区,9# 实验点位于极限曲线上方,舱壁被击穿。10# 实验点位于极限曲线下方的未击穿区,舱壁未被击穿,表明弹丸直径为 6.35 mm、速度为 4.425 和4.345 km/s 时,双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能与相同面密度的 Nextel/Kevlar 填充防护结构的防护性能相当。

综合考虑 2#、3#、9# 和 10# 这 4 个实验点,可以得到:在低速区,双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能略优于 Nextel/Kevlar 填充防护结构;在高速区,双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能与 Nextel/Kevlar 填充防护结构相当。

3.7 双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的舱壁损伤研究

双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的舱壁损伤情况如图 7 所示。从图 7 可以看出:铝弹丸超高速撞击双层 Kevlar 纤维布填充防护结构时,舱壁损伤区从中心向外由 3 个区域组成,类似于单层 Kevlar 纤维布填充防护结构。当舱壁未被击穿时,随着弹丸直径及撞击速度的增加,撞击区域半径及坑深增大,舱壁背面的鼓包区域半径也增大。当舱壁被击穿时,弹坑分布区域及坑深随着撞击速度的增加具有类似于低速区的特性。

综合以上实验结果:在低速区,弹丸未被撞击一侧仍保持球形;随着撞击速度和弹丸直径的增加,损伤区域面积增加;在高速区,由于防护板及 Kevlar 纤维布对弹丸的破碎、熔化等作用,弹丸破碎或熔化为更小的碎片或熔球,减轻了对舱壁的损伤。

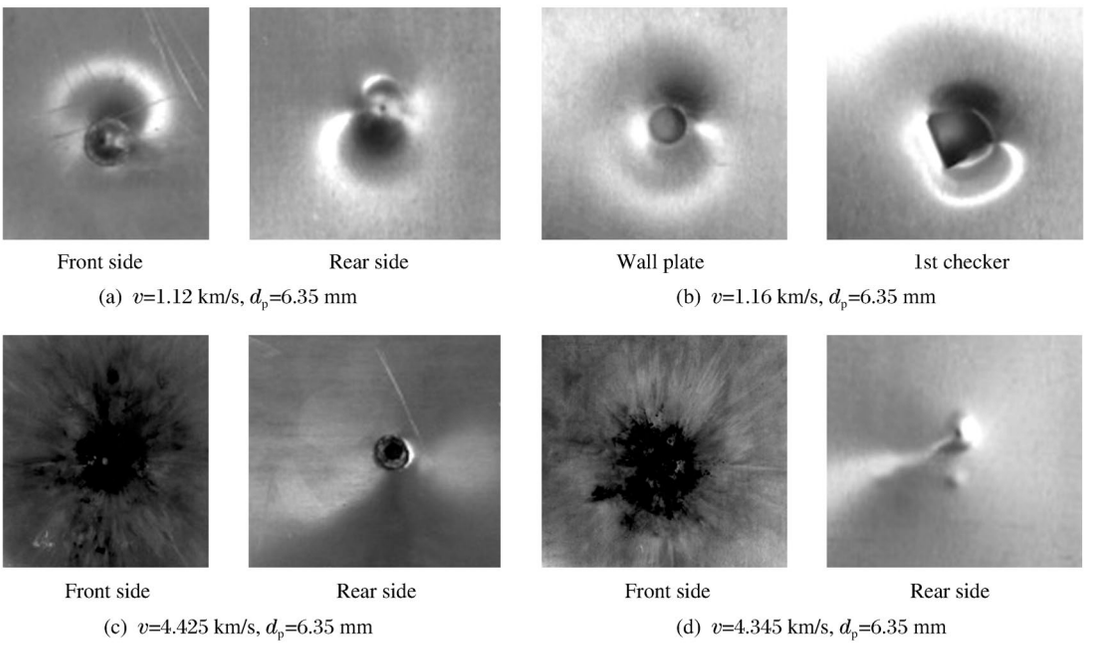


图 7 双层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构中舱壁的损伤形貌

Fig. 7 Damage morphologies of cabin walls in stuffed Whipple shields with double-layer Kevlar fiber clothes

3.8 双层 Kevlar 纤维布填充防护结构的损伤机理分析

在低速区,Kevlar 纤维布未被击穿。3# 实验的双层 Kevlar 纤维布损伤情况如图 8(a)所示。可见:第 1 层 Kevlar 纤维布水平方向(纬纱)的损伤孔口直径为 10 mm,竖直方向(经纱)的损伤孔口直径为 9 mm;第 2 层 Kevlar 纤维布水平方向的损伤孔口直径为 11 mm,竖直方向的损伤孔口直径为 10 mm,断裂的纤维丝呈散开状。由于纤维丝断裂时具有高应变,在靠近穿孔前侧每层 Kevlar 纤维布的断裂纤

维丝向前伸出,靠近穿孔后侧大量断裂的纤维丝向后伸出,损伤区域大致呈椭圆形,与单层 Kevlar 纤维布填充防护结构在低速区时的损伤特征十分相似。在高速区,Kevlar 纤维布被击穿。10# 实验的双层 Kevlar 纤维布损伤情况如图 8(b)所示。可以看出:第 1 层 Kevlar 纤维布前侧水平方向的损伤孔口直径为 66 mm,竖直方向的损伤孔口直径为 67 mm;第 2 层 Kevlar 纤维布后侧水平方向的损伤孔口直径为 43 mm,竖直方向的损伤孔口直径为 44 mm;大量的纤维丝断裂,同时由于高温熔化及碳化作用,大量碳化物分布于损伤区域附近。断裂的 Kevlar 纤维丝的显微照片如图 9 所示。

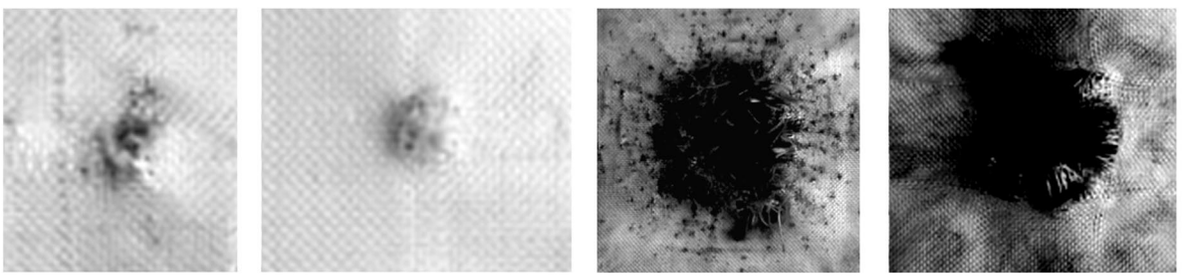


图 8　双层 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构中 Kevlar 纤维布的穿孔形态

Fig. 8　Perforation morphologies of Kevlar fiber clothes in stuffed Whipple shields with double-layer Kevlar fiber clothes

综合实验结果可知,对于双层 Kevlar 纤维布填充防护结构中的每层 Kevlar 纤维布材料,靠近穿孔前侧大量断裂的纤维丝向前伸出,靠近穿孔后侧大量断裂的纤维丝向后凸出。在低速区,双层 Kevlar 纤维布填充防护结构中两层 Kevlar 纤维布的损伤半径以及第 2 层 Kevlar 纤维布凸出变形尺寸与单层 Kevlar 纤维布填充防护结构几乎相同。在高速区(v=2.97 km/s),与单层 Kevlar 纤维布防护结构相比,双层防护结构中的第 1 层 Kevlar 纤维布损伤区域半径略微变小,减小约 8.22%,第 2 层损伤区域半径大幅减小,减小达 39.73%;损伤区域附近的纤维丝由于拉伸变形,两层纤维布的前侧均整体向前凸出,后侧均整体向后凸出,并且凸出的变形尺寸明显增大;第 1 层 Kevlar 纤维布中大量的纤维丝断裂为微小的纤维丝,且一部分纤维丝由于超高速撞击产生的高温出现熔化及碳化现象,类似于单层 Kevlar 纤维布填充防护结构在高速区的损伤特性。



图 9　Kevlar 纤维丝的微观损伤形态

Fig. 9　Microstructure of damaged Kevlar fiber clothes

4　结　论

实验研究了 Kevlar 纤维布填充 Whipple 防护结构(单层及双层两种结构)的超高速撞击性能,分析了舱壁和填充材料的损伤特性,得到了撞击极限点区间,基于 Nextel/Kevlar 填充防护结构的撞击极限曲线,评价了其超高速撞击防护性能。研究表明:与 Nextel/Kevlar 填充防护结构相比,具有单层结构的 Kevlar 纤维布填充防护结构在低速区的防护性能略优,而在高速区的防护性能要略差些。通过分层布局,改善了 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能。在低速区,具有双层结构的 Kevlar 纤维布填充防护结构的防护性能略优于 Nextel/Kevlar 填充防护结构;在高速区,其防护性能与 Nextel/Kevlar 填充防护结构相当。Kevlar 纤维布作为填充材料明显减少了传统金属材料作为防护材料在超高速撞击时形成的二次碎片,纤维丝在高速区出现熔化及碳化现象,减轻了对舱壁的损伤。分析表明,采用双层 Kevlar 纤维填充防护结构可以达到与国际先进的 Nextel/Kevlar 填充防护结构相当的防护效果。

References:

[1] Whipple F L. Meteorites and space travel [J]. Astron J,1947,52:131.

[2] Schonberg W P,Tullos R P. Spacecraft wall design for increased protection against penetration by orbital debris impacts [J]. AIAA J,1991,29(12):2207-2214.

[3] Christiansen E L,Crews J L,Williamsen J E,et al. Enhanced meteoroid and orbital debris shielding [J]. Int J Impact Eng,1995,17(1/2/3):217-228.

[4] Christiansen E L. Advanced meteoroid and debris shielding concepts,AIAA PAPER 90-1336 [R]. USA:National Aeronautics and Space Administration,1990.

[5] Christiansen E L,Crews J L,Kerr J H,et al. Hypervelocity impact testing above 10 km/s of advanced orbital debris shields [J]. AIP Conf Proc,1996,370(1):1183-1186.

[6] DiCarlo J A,Yun H M. Modeling the thermostructural capability of continuous fiber-reinforced ceramic composites [J]. J Eng Gas Turbines Power,2002,124(3):465-471.

[7] Zhu D,Mobasher B,Subramaniam D R. Dynamic tensile testing of Kevlar 49 fabrics [J]. J Mater Civ Eng,2011,23(3):230-239.

[8] Pereira J M,Revilock D M. Ballistic impact response of Kevlar 49 and Zylon under conditions representing jet engine fan containment [J]. J Aerosp Eng,2009,22(3):240-248.

[9] Cheng M,Chen W,Weerasooriya T. Mechanical properties of Kevlar KM2 single fiber [J]. J Eng Mater Technol,2005,127(2):197-203.

[10] Piekutowski A J. Formation and Description of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact [M]. Huntsville,USA:National Aeronautics and Space Administration,Marshall Space Flight Center,1996:223-238.

[11] Piekutowski A J. Fragmentation-initiation threshold for spheres impacting at hypervelocity [J]. Int J Impact Eng,2003,29:563-574.

Optimal Structural Design of Stuffed Shields with Kevlar Fiber Clothes against Hypervelocity Impact

ZHANG Bao-Xi,HA Yue,DENG Yun-Fei,PANG Bao-Jun

(*School of Astronautics,Harbin Institute of Technology,Harbin* 150001,*China*)

Abstract: A series of impact experiments are conducted to investigate the ballistic performances of stuffed Whipple shields with Kevlar fiber clothes using a two-stage light gas gun facilities. Based on the impact limit curve of Nextel/Kevlar stuffed Whipple shields,the protective performances of Kevlar stuffed Whipple shields,the damage morphology and mechanism of stuffed material and bulkhead are obtained and compared. The main results show as following:the stuffed Whipple shields with Kevlar fiber clothes have excellent protection performance at the low impact velocity;the double-layer packing structure can improve the protective performance. Kevlar fibers sufficiently absorb energy by plastic deformation and fracture when the impact velocity is low. In addition,high temperature melting and carbonization phenomenon appear in the hypervelocity region,which help break up and melt the projectiles that minimize the damage to cabin wall. This exploratory method provides us a useful way to make the ballistic performances of stuffed Whipple shields more perfect in space debris protection field.

Key words: hypervelocity impact;stuffed Whipple shields;Kevlar fiber clothes;protect structure