文章编号：1000-5773(2012)05-0557-07

玄武岩纤维布超高速撞击损伤分析*

哈　跃[1]，刘志勇[2,3]，管公顺[1]，庞宝君[1]

（1.哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨　150080；
2.西北工业大学，陕西西安　710072；
3.中国空间技术研究院，北京　100094）

摘要：在航天器空间碎片超高速撞击防护领域中，采用高技术纤维作为防护材料是当今防护结构发展的趋势之一，玄武岩纤维(Basalt Fiber)是近年来受到关注的一种高强度纤维。对玄武岩纤维织物受铝合金弹丸超高速撞击时的宏观穿孔损伤特性和细观纤维丝断裂损伤特性进行了分析研究，观察到了冲击高压造成的材料熔化现象，根据实验结果拟合得到了玄武岩纤维布撞击孔的孔径方程，根据纤维丝断口形貌分析了纤维丝的断裂原因。研究结果可为玄武岩纤维材料在空间碎片防护结构中的应用提供有益参考。

关键词：超高速撞击；玄武岩纤维；孔径方程；细观损伤
中图分类号：O347；V423.41　　**文献标识码**：A

1　引　言

航天器空间碎片高速撞击防护研究是载人航天器和在轨长寿命航天器设计中至关重要的环节。在美国和俄罗斯各自建造的空间站，以及由美国、俄罗斯和欧空局等联合建造的国际空间站都采用了空间碎片防护结构。在空间碎片防护领域，已经开发并投入使用的防护结构方案普遍采用 Nextel 陶瓷纤维复合材料[1-2]和 Kevlar 纤维复合材料[2-5]等轻质高强的高技术纤维材料。采用高技术纤维作为防护材料是防护结构发展的趋势之一。

玄武岩纤维(Basalt Fiber)是近年来受到人们关注的一种高科技纤维材料，被誉为“21 世纪的新材料”。相对于其它化学物质和矿物材料，玄武岩纤维具有更高的化学稳定性和热稳定性。在耐高温、耐腐蚀、隔热保温以及电绝缘等方面，玄武岩纤维具有优良的性能，可以在－260～820 ℃的大范围温度条件下使用。玄武岩纤维中的硅氧化物和铝氧化物通过氧原子连接而形成连续线性晶格，使纤维具有较高的强度和弹性模量，其抗拉强度可达 4 GPa，弹性模量可达 110 GPa。玄武岩纤维的主要成分与多数型号的 Nextel 陶瓷纤维的主要成分相同，均为 SiO_2 和 Al_2O_3 等氧化物，故可将玄武岩纤维称为玄武岩陶瓷纤维。

目前关于玄武岩纤维材料在高速撞击条件下冲击动力学特性的研究较少，缺少比较成熟的理论分析方法，需要依据实验数据建立与撞击损伤特性相关的经验方程。本研究利用二级轻气炮开展玄武岩纤维布(Basalt Fiber Woven Fabric，BFWF)在铝合金球形弹丸高速撞击下的损伤实验，分析玄武岩纤维布的宏观穿孔损伤和玄武岩纤维丝的细观断裂损伤规律，建立玄武岩纤维布的击穿孔孔径经验方程，分析玄武岩纤维丝的断口形貌和断裂原因，为将国产玄武岩纤维材料作为防护材料用于航天器空间碎

* **收稿日期**：2010-12-20；**修回日期**：2011-08-01
基金项目：国防科工局空间碎片专项研究计划项目(K0202110)
作者简介：哈　跃(1956—)，男，博士，副教授，主要从事固体力学、超高速撞击损伤及航天器空间碎片防护研究.
E-mail：hayue@hit.edu.cn

片超高速撞击损伤防护结构的可能性提供参考依据。

2 实验方法

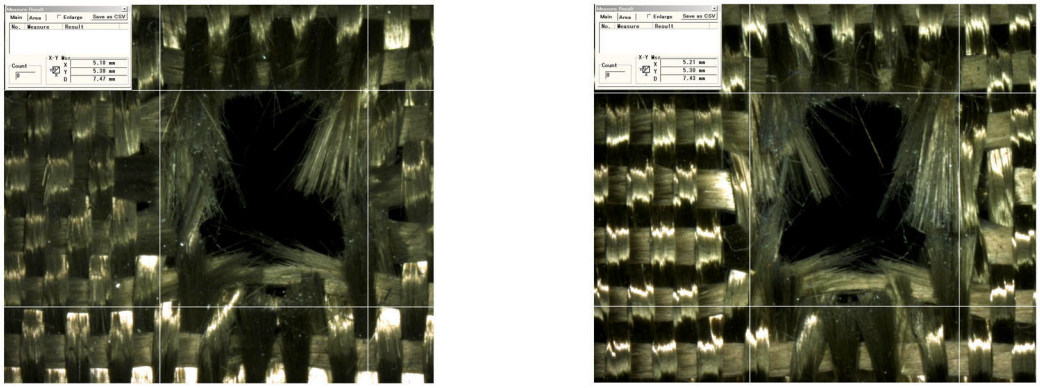
2.1 实验方案

实验采用哈尔滨工业大学超高速撞击中心实验室的二级轻气炮作为发射装置，采用的结构构形由玄武岩纤维布试件(前板)和 2 mm 铝合金观察板(后板)及 350 mm 的间隔组成。选用球形铝合金弹丸，直径分别为 3.97、4.76 和 6.35 mm，撞击速度为 3～4.6 km/s。观察板为 5A06 铝合金板。玄武岩纤维布试件采用四川拓鑫航天玄武岩实业有限公司生产的平纹玄武岩纤维布制作而成，玄武岩纤维布有薄、厚两种规格：薄玄武岩纤维布($BFWF_1$)的面密度为(212±5)g/m^2；厚玄武岩纤维布($BFWF_2$)的面密度为(401±5)g/m^2。为了避免裁剪时丝线脱落，沿玄武岩纤维布试件周线在纤维布两侧表面涂胶，经选择，确定采用柔性的氯丁胶。

2.2 孔径测量方案

利用数码显微镜观察分析玄武岩纤维布的宏观损伤穿孔形态及尺寸，图 1 为厚布($BFWF_2$)试件在 4.76 mm 直径的弹丸以 3.21 km/s 的速度撞击下产生的撞击孔的数码显微照片。从图 1 可以看出，在玄武岩纤维布穿孔的纱线断口处，纤维丝断裂后呈散开状态；沿孔边切线方向，纱线的横向滑移导致孔口边界散乱；垂直于孔口方向的纱线断口较为规则，构成的边界近似为圆形或椭圆形。

图 1 中给出了拍照时初步确定的孔边纱线断口定位参考线及其间距。测量孔径时需根据显微照片，在仔细辨认后分别沿经线和纬线方向量取同向的各根断纱中间距最大的断口之间的距离，作为孔口沿经向和纬向的孔径。根据图 1 测量得到：沿纬纱方向(图中的水平方向)孔口直径为 5.21 mm，沿经纱方向(图中的竖直方向)孔口直径为 5.38 mm；孔口整体近似呈圆形，略呈椭圆形，长轴沿经纱方向。取击穿孔直径为 $D_{h0}=(5.21\ \text{mm}\times 5.38\ \text{mm})^{1/2}=5.29\ \text{mm}$。



(a) Front surface (b) Back surface

图 1 玄武岩纤维织物的穿孔形态

Fig. 1 Perforation of basalt fiber woven fabric

3 实验结果

玄武岩纤维布高速撞击孔孔径分析的实验结果见表 1。表 1 中d_p为弹丸直径，v 为弹丸速度，D_h 为玄武岩纤维布击穿孔孔径。

直径为 3.97 mm 和 6.35 mm 两种弹丸的实测密度为 2.8 g/cm^3 左右，直径为 4.76 mm 的弹丸材料参数按实测结果取值，其密度取为 2.76 g/cm^3。

表 1 铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布损伤孔直径实验结果

Table 1 Diameter test results of damage hole for impacting on BFWF

Exp. No.	Target material	d_p /(mm)	v /(km/s)	D_h /(mm)	Exp. No.	Target material	d_p /(mm)	v /(km/s)	D_h /(mm)
BW70049	$BFWF_1$	3.97	2.55	4.09	BW70012	$BFWF_2$	3.97	3.06	4.35
BW70047	$BFWF_1$	3.97	2.70	4.13	BW80007	$BFWF_2$	3.97	3.50	4.40
BW70011	$BFWF_1$	3.97	3.08	4.28	BW70020	$BFWF_2$	3.97	3.96	4.32
BW70022	$BFWF_1$	3.97	3.91	4.33	BW80008	$BFWF_2$	3.97	4.55	4.53
BW80001	$BFWF_1$	3.97	4.63	4.48	BW70044	$BFWF_2$	4.76	2.38	5.12
BW70048	$BFWF_1$	4.76	2.34	5.02	BW70006	$BFWF_2$	4.76	3.21	5.29
BW70005	$BFWF_1$	4.76	3.31	5.27	BW80009	$BFWF_2$	4.76	3.78	5.25
BW70030	$BFWF_1$	4.76	4.40	5.38	BW70032	$BFWF_2$	4.76	4.31	5.36
BW70041	$BFWF_1$	6.35	2.34	6.58	BW70042	$BFWF_2$	6.35	2.43	6.64
BW70001	$BFWF_1$	6.35	3.13	6.75	BW70002	$BFWF_2$	6.35	3.13	6.95
BW80004	$BFWF_1$	6.35	3.47	6.84	BW80010	$BFWF_2$	6.35	3.29	6.98
BW70045	$BFWF_2$	3.97	2.38	4.20	BW80011	$BFWF_2$	6.35	3.86	6.92
BW70046	$BFWF_2$	3.97	2.43	4.32	BW70036	$BFWF_2$	6.35	4.50	7.25

4 宏观损伤分析

4.1 玄武岩纤维布的击穿孔直径方程

决定玄武岩纤维布击穿孔直径 D_h 的参数有几何量和物理量两类,即铝合金弹丸直径 d_p;铝合金弹丸撞击速度 v,铝合金弹丸密度 ρ_p、玄武岩纤维材料的密度 ρ_b 和玄武岩纤维布的面密度 $\rho_{A,b}$,玄武岩纤维布的强度极限 $\sigma_{b,b}$,声速 c_p 和 c_b,熔化温度 $T_{m,p}$ 和 $T_{m,b}$ 以及熔化热 Q_p 和 Q_b。上述各量的下标 p 和 b 分别表示弹丸和靶板。D_h 与各量有确定的函数关系,即

$$D_h = F(v, d_p, \rho_p, c_p, T_{m,p}, Q_p, \rho_b, \rho_{A,b}, \sigma_{b,b}, c_b, T_{m,b}, Q_b) \tag{1}$$

根据量纲理论中的 π 定理可得到如下无量纲函数关系

$$\frac{D_h}{d_p} = f\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}, \frac{\rho_{A,b}}{\rho_b d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_b}, \frac{c_p}{c_b}, \frac{T_{m,p}}{T_{m,b}}, \frac{Q_p}{Q_b}\right) \tag{2}$$

式中:击穿孔直径与弹丸直径之比 D_h/d_p 称为无量纲击穿孔直径,$v/(\sigma_{b,b}/\rho_b)^{1/2}$ 称为无量纲撞击速度。

由于玄武岩纤维延伸率小于 5%,属于脆性材料,因此在分析中,将代表强度效应的应力参数取为强度极限 $\sigma_{b,b}$。玄武岩纤维布为编织材料,在布的厚度 δ_b 给定以后,采用不同的编织结构,可得到不同面密度的纤维布,因此分析中没有将布的厚度 δ_b 作为表征玄武岩纤维布几何特征的参数。(2)式中,$\rho_{A,b}/(\rho_b d_p)$ 项对应均质等厚靶板的厚度与弹丸直径之比 δ_b/d_p,实际上对于连续均质材料的等厚靶板,有 $\rho_{A,b}=\rho_b\delta_b$,因此 $\rho_{A,b}/(\rho_b d_p)$ 可转换为 δ_b/d_p。

玄武岩纤维布沿厚度方向的横向联系是不均匀、不连续的。弹丸撞击时沿布厚度方向传播的冲击压缩波的传播路径是散乱且间断的,使得压缩波的整体压缩效应弱化甚至消失,冲击温度的传播途径也是散乱、间断的,故就整体而言,可不计压缩效应和声速的影响,不计温度和熔化的影响。于是得到

$$\frac{D_h}{d_p} = f\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}, \frac{\rho_{A,b}}{\rho_b d_p}, \frac{\rho_p}{\rho_b}\right) \tag{3}$$

将(3)式写成如下函数形式

$$\frac{D_h}{d_p} = a\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^b \left(\frac{\rho_{A,b}}{\rho_b d_p}\right)^c \left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^d \tag{4}$$

式中:a、b、c、d 为待定常数。对(4)式两边取对数,得到

$$\ln\left(\frac{D_h}{d_p}\right)=\ln a+b\ln\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)+c\ln\left(\frac{\rho_{A,b}}{\rho_b d_p}\right)+d\ln\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right) \tag{5}$$

根据表 1 实验数据，对(5)式进行多变量线性回归运算，得到铝合金球形弹丸撞击玄武岩纤维布的击穿孔经验公式

$$\frac{D_h}{d_p}=1.0919\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^{0.0981}\left(\frac{\rho_{A,b}}{\rho_b d_p}\right)^{0.0206}\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{-0.8617} \tag{6}$$

(6)式适用的速度范围为 2.25～4.81 km/s。

由(6)式得到的两种纤维材料无量纲击穿孔直径 D_h/d_p 随无量纲撞击速度 $v/(\sigma_{b,b}/\rho_b)^{1/2}$ 变化的关系曲线与实验结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 可以看出，回归值与实验值误差的正负分布较为均衡，总体上误差大致呈正负交替变化，回归方程曲线与实验结果吻合较好，回归方程曲线近似于直线。

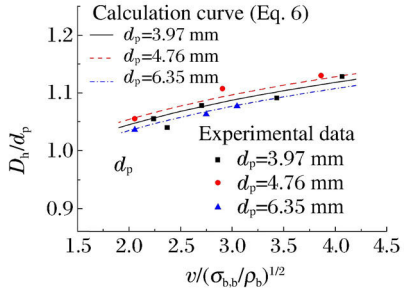


图 2 穿孔直径公式与 $BFWF_1$ 实验结果对比

Fig. 2 Perforation diameter equation compared with experimental data for $BFWF_1$

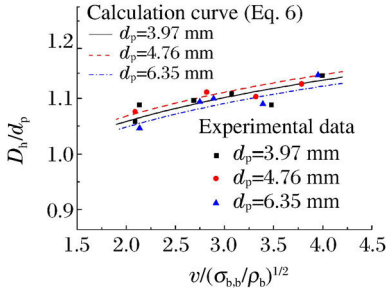


图 3 穿孔直径公式与 $BFWF_2$ 实验结果对比

Fig. 3 Perforation diameter equation compared with experimental data for $BFWF_2$

4.2 不同因素对击穿孔直径的影响

4.2.1 撞击速度的影响

由图 2 和图 3 可知，面密度 $\rho_{A,b}$ 不同的薄厚 2 种玄武岩纤维布试件的无量纲击穿孔直径均随无量纲撞击速度的增大而近似呈线性增大。

4.2.2 弹丸直径的影响

由图 2 和图 3 可知，6.35 mm 直径铝合金弹丸对应的无量纲击穿孔直径方程曲线均位于 3.97 mm 直径铝合金弹丸对应曲线的下方，表明在铝合金弹丸材料密度相同时，玄武岩纤维布试件的无量纲击穿孔直径随铝合金弹丸直径的增大而减小。

4.2.3 玄武岩纤维布面密度的影响

图 4 所示为 6.35 mm 直径铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布试件时的无量纲击穿孔直径随撞击速度 v 变化的关系曲线与实验结果的比较。由图 4 可知，厚玄武岩纤维布对应的曲线位于薄玄武岩纤维布对应曲线的上方，表明在 6.35 mm 直径铝合金弹丸相同撞击速度下，玄武岩纤维布的无量纲击穿孔直径随着面密度的增大而增大。

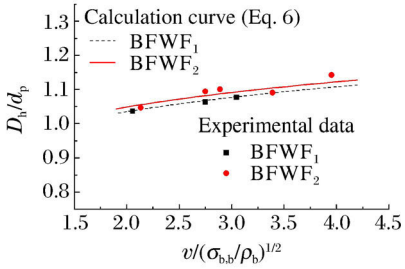


图 4 穿孔直径公式与 6.35 mm 弹丸实验结果对比

Fig. 4 Perforation diameter equation compared with experimental data for 6.35 mm-diameter projectile

5 细观损伤分析

实验所用玄武岩纤维布的纤维丝直径为 10 μm 左右，纤维丝断口损伤尺度在微米级细观尺度范围，属于细观损伤。玄武岩纤维布击穿孔处纤维丝断口

形貌的数码显微照片见图 5。由图 5 可以观察到,纤维丝的断口形貌有横截面、斜截面、不规则截面断口以及纤维丝熔化后凝结形成的熔球等。在照片画面右侧有一个熔球,其直径明显大于纤维丝直径,因此可以确认其为铝合金弹丸材料熔化飞溅凝结而形成的铝合金熔球。

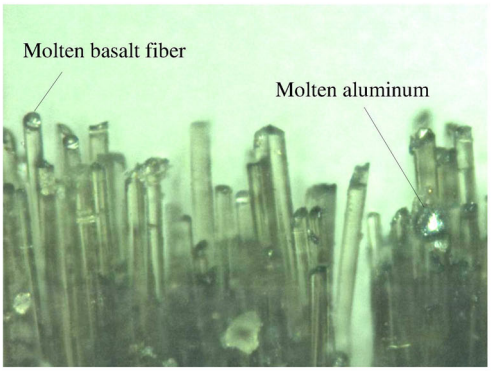


图 5　玄武岩纤维不撞击孔正面边的纤维丝断口数字显微照片

Fig. 5　Digital micrograph of cross section of the fiber near the perforation hole on the front face of the fabric

对发生破坏的单根纤维丝而言,其破坏范围随着弹丸侵入玄武岩纤维布区域的增大而增大,因而纤维丝的断口位置沿其轴线不断变化,并最终停止在玄武岩纤维布的击穿孔孔边处。单根纤维丝的断口形貌具有多样性,在玄武岩纤维布击穿孔的中心区域,弹丸与纤维布表面纤维丝的相对撞击速度最大,当撞击速度达到一定值时,该区域中与弹丸直接接触的纤维丝会产生熔化,形成熔化断裂的断口形貌。随着弹丸侵入玄武岩纤维布区域的扩大,弹丸与纤维布表面纤维丝的相对撞击速度会下降,当相对撞击速度降低到一定值时,与弹丸直接接触的纤维丝不会由于产生熔化而形成熔化断裂的断口形貌,而是生成其它形式的断口形貌。对于同一根纤维,位于纤维布后表面位置的断口形貌,与位于击穿孔中心区域和弹丸直接接触的纤维布前表面位置的断口形貌不同。

纤维丝断口形貌的多样性反映了导致纤维丝最终破坏原因的多样性。可以将单根玄武岩纤维丝视为细观尺度的圆截面杆件,则纤维丝横截面断口形貌应为拉伸破坏或剪切破坏,斜截面断口应为剪切破坏,不规则截面断口应为扭转或弯扭组合破坏。实际上单根纤维丝在弹丸和周围其它纤维丝的冲击作用下将产生多道冲击波,冲击波的交互作用产生包括类似于层裂破坏在内的破坏作用,这是影响断口形貌的重要因素。当撞击速度达到一定值时,由冲击压力产生的高温使纤维丝产生熔断,同时使铝合金弹丸产生局部熔化。

对于纤维丝产生拉伸破坏和剪切破坏的现象,一般来说比较容易理解,但对于纤维丝产生扭转或弯扭组合破坏的现象难于解释。通过分析玄武岩纤维布的细观构造,可以对这一现象作出较为合理的解释。实验采用的玄武岩纤维布为平纹织物,由经纱和纬纱相互交叉、上下穿越编织而成,每根经纱或纬纱由多股纱线拧在一起组成,其中每股纱线又是由几十根纤维丝拧成一股组成的,经纱和纬纱均为低捻纱。因此,当玄武岩纤维布处于自然状态时,部分玄武岩纤维丝已经处于比较复杂的空间螺旋状态,既有绕单股纱线的螺旋状态,又有随单股纱线绕经、纬纱的螺旋状态。如果将单根玄武岩纤维丝视为细观尺度的圆截面杆件,则在玄武岩纤维布整体未受力时,部分玄武岩纤维丝已经处于十分复杂的弯扭组合变形状态,部分区域存在较大的与弯扭组合变形状态相对应的初应力,当这类区域在冲击荷载作用下发生破坏时,将产生扭转或弯扭组合破坏。因此,在弹丸撞击玄武岩纤维布之前,部分纤维丝存在的、与复杂的空间螺旋状态相对应的初应力,是纤维丝产生扭转或弯扭组合破坏现象的主要原因。

在超高速冲击作用下,纤维丝会产生软化。图 6 为在 3.06 km/s 撞击速度下纤维丝软化形态的照片。由图 6 可以观察到:画面左侧的软化纤维丝像塑性材料金属丝一样变弯扭曲,而画面中部和右侧的软化纤维丝则被挤压成条带状并弯曲扭转,右侧的软化纤维丝还出现了分叉并与附近未软化的纤维丝产生缠绕。玄武岩纤维丝的软化呈现单丝软化的特征,与软化纤维丝邻近接触的纤维丝没有产生软化。显然,纤维丝的软化是由弹丸对玄武岩纤维丝的冲击高压作用所产生的高温造成的。而纤维丝的单丝软化特征表明,冲击高压所产生的高温热作用主要是沿单根纤维丝传导的,纤维丝之间的热传导作用不显著,否则,使一根纤维丝软化的高温作用也会造成其它相邻纤维丝的软化,出现多根软化纤维丝集中在一起的情况。因此可以推断,软化纤维丝是因直接受到弹丸的冲击作用,也就是高温的作用而产生软化,不是因受到其它纤维丝的热传导作用而产生软化。

图 5 所示的相邻纤维丝在几十微米的范围内，纤维丝的受力方式和破坏原因有明显差异。相邻纤维丝之间损伤形貌的显著差异表明，在一定范围内，虽然弹丸同时与多根纤维丝相互作用，但是经纱和纬纱中纤维丝的螺旋状低捻构造方式，导致弹丸与每根纤维丝的作用方式存在显著差异，即弹丸与各根纤维丝的接触范围、冲击力的大小以及冲击角度等方面存在显著差异，各纤维丝的损伤具有局部单丝破坏的特征。纤维丝熔化后凝结成的球状微粒能保留在纤维丝端部，表明此纤维丝在熔球凝结过程中没有受到强烈扰动，否则熔化的纤维丝材料会产生飞溅而脱离纤维丝。在同一断口位置，与熔球状断面纤维丝相邻的纤维丝出现了由其它作用力产生的多种形状断面，表明纤维丝的熔球凝结过程是在周围纤维丝发生断裂之前或之后结束的，各纤维丝的破坏在时间上是有差异的，或者说各纤维丝的破坏在时间上是有先后次序的。在一定区域内，玄武岩纤维丝受到弹丸冲击作用相继发生单丝单独损伤破坏的现象需要进一步分析研究。



图 6 玄武岩纤维丝软化形态数字纤维照片

Fig. 6 Digital graph of intenerated form of basalt fibers

细观分析表明，玄武岩纤维布在穿孔损伤过程中，冲击高压作用所产生的高温造成了纤维丝的软化及熔化，从变量关系来讲，击穿孔径、冲击压力及冲击温度都属于冲击效果范畴，即都属于因变量，因此，本研究在以击穿孔孔径为因变量的拟合方程中，只考虑了弹丸及玄武岩纤维材料的物理参数、几何参数和发射条件等自变量的影响。

6 结 论

(1) 玄武岩纤维布的无量纲击穿孔直径随铝合金弹丸撞击速度的增大而近似呈线性增大。

(2) 在铝合金弹丸材料相同时，玄武岩纤维布的无量纲击穿孔直径随铝合金弹丸直径的增大而减小。

(3) 在相同直径铝合金弹丸以相同速度撞击下，玄武岩纤维布的无量纲击穿孔直径随着玄武岩纤维布的面密度的增大而增大。

(4) 玄武岩纤维布击穿孔处纤维丝断口形貌有横截面、斜截面和不规则截面断口，以及纤维丝熔化后在断口处凝结形成熔球等；纤维丝的破坏形式有拉伸破坏、剪切破坏、扭转或弯扭组合破坏及熔断破坏等。

(5) 在一定范围内，铝合金弹丸以超高速撞击玄武岩纤维布时，玄武岩纤维丝的软化、熔化及断裂是由弹丸与玄武岩纤维丝的单独作用引起的。

本研究建立的玄武岩纤维布击穿孔直径方程，为进一步进行玄武岩纤维材料的破碎弹丸性能、撞击能量消耗性能，以及对弹丸撞击速度的减缓性能等直接影响玄武岩纤维超高速撞击防护特性的相关计算分析，提供了参考依据。

References:

[1] Cour-Palais B G, Crews J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10(1-4): 135-146.

[2] 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.

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

[4] Christiansen E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields [J]. Int J Impact Eng,1993,14(1-4):145-156.

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

Damage Investigation of Hypervelocity Impact on Woven Fabric of Basalt Fiber

HA Yue[1],LIU Zhi-Yong[2,3],GUAN Gong-Shun[1],PANG Bao-Jun[1]

(1. *School of Astronautics*,*Harbin Institute of Technology*,*Harbin* 150080,*China*;
2. *Northwestern Polytechnical University*,*Xi'an* 710072,*China*;
3. *China Academy of Space Technology*,*Beijing* 100094,*China*)

Abstract:It is feasible to develop a shield with high strength fiber materials in order to protect spacecraft against space debris's impacts. Basalt fiber is one of the high strength materials being noticed in recent years. The aim of this study was to probe into the macro-damage property on perforation and mecro-damage of fibers in basalt fiber woven fabric. The molten materials caused by high temperature under impact were observed. The perforation equation of the fabric was developed based on the hypervelocity impact data. The mecro-damage reasons of the basalt fiber were researched according to the damage form of the cross section on the fiber. This study is beneficial to the application of basalt fiber woven fabric to the space debris shielding.

Key words:hypervelocity impact;woven fabric of basalt fiber;perforation equation;mecro-damage