文章编号:1000-5773(2012)03-0273-08

铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维布剩余速度分析*

哈 跃,管公顺,迟润强,庞宝君

(哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:采用高强纤维作为防护材料,是航天器空间碎片超高速撞击防护结构发展的趋势之一。超高速撞击损伤分析是空间碎片防护结构研究开发设计的重要环节,也是高压极端加载条件下材料动态响应分析的重要内容。玄武岩纤维是近年来受到人们关注的一种高强度、高模量陶瓷纤维。利用二级轻气炮进行了铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维编织布时的超高速撞击实验,根据弹丸碎片的闪光 X 射线阴影照片,分析了铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维编织布的撞击速度损失规律,根据实验结果拟合得到了铝合金弹丸的剩余速度方程,为分析玄武岩纤维材料对弹丸的撞击能量消耗提供了参考依据。

关键词:超高速撞击;玄武岩纤维;剩余速度方程

中图分类号:O347.3;V445 **文献标识码**:A

1 引 言

超高速撞击损伤分析是高压极端加载条件下材料动态响应分析的重要内容,也是航天器空间碎片防护结构研究开发设计的重要环节。在航天器空间碎片防护领域,在由美国、俄罗斯和欧空局等联合建设的国际空间站上已经采用了 Nextel 陶瓷纤维材料[1-3]和 Kevlar 纤维材料[2-5]等高强度纤维材料作为填充材料的空间碎片防护结构。由于我国目前尚不能从国际市场上获取 Nextel 陶瓷纤维材料产品,使得我国的航天器空间碎片防护结构的研制开发和应用受到严重制约,因此选择具有良好超高速撞击防护性能、可以作为填充防护材料使用的国产高强纤维材料,是我国现阶段航天器空间碎片防护材料及防护结构开发设计的迫切任务之一。

玄武岩纤维是近年来受到关注的一种高强度纤维。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,故可称其为玄武岩陶瓷纤维。玄武岩纤维在航天器空间碎片防护结构中的应用前景已经受到人们的关注。

超高速撞击损伤分析包括弹体(撞击物)损伤分析和靶板(被撞击物)损伤分析两个方面。从超高速撞击防护角度而言,对弹体的损伤分析主要侧重于弹体破碎分析和弹体冲击动能损耗分析,一般可以通过弹体的损伤特性分析进行靶板的破碎弹体性能和撞击能量消耗性能等撞击防护性能分析。通过比较弹体撞击不同材料靶板时的破碎性能和能量损耗性能的差异,可以了解、掌握和判别不同靶板材料的超高速撞击防护性能的优劣,可以为防护材料的选择及研制开发提供分析依据。弹体剩余速度是分析弹体击穿能力和靶板材料消耗弹体冲击动能能力的重要参数。本研究利用二级轻气炮进行了铝合金球形

* **收稿日期**:2010-10-19;**修回日期**:2010-12-28

基金项目:国防科工局空间碎片专项研究计划项目(KJSP0202110)

作者简介:哈 跃(1956—),男,博士,副教授,主要从事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

弹丸超高速撞击玄武岩纤维编织布的损伤实验研究，根据弹丸碎片的闪光 X 射线阴影照片，分析了铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维编织布的撞击速度变化规律，建立了铝合金弹丸超高速撞击击穿玄武岩纤维编织布后的剩余速度经验方程，为分析玄武岩纤维编织布的消耗弹体冲击动能的能力提供了计算依据，为将玄武岩纤维材料作为防护材料用于航天器空间碎片超高速撞击损伤防护结构的可能性研究提供了参考依据。

2 实验分析

2.1 实验方案

实验是在哈尔滨工业大学超高速撞击中心实验室的二级轻气炮实验系统上完成的，该实验系统如图 1 所示。采用闪光 X 射线高速摄影系统(也称为 X 光阴影高速摄影系统)记录高速撞击过程中弹丸在若干瞬时的飞行形态，根据连续曝光的 X 光底片的拍摄间隔和对应的弹丸碎片飞行距离，分析计算弹丸击穿靶板后的碎片飞行速度，以此作为分析剩余速度规律、建立剩余速度方程的依据。实验采用的二级轻气炮实验系统包括弹丸发射设备、测速装置、靶舱和 X 光高速摄影系统等部分的布置方案示于图 2。图 1 中所示为两门非火药驱动二级轻气炮，右侧二级轻气炮的近端为装有压力表的高压气室，远端为靶舱。靶舱的左、右两侧上方各设置有闪光 X 光射线发射器，左、右 X 光射线发射头的射线轴线相互正交，均与地面成 45°角。



图 1 哈尔滨工业大学超高速撞击研究中心的二级轻气炮

Fig. 1 Two-stage light gas guns at the Hypervelocity Impact Research Center of the Harbin Institute of Technology

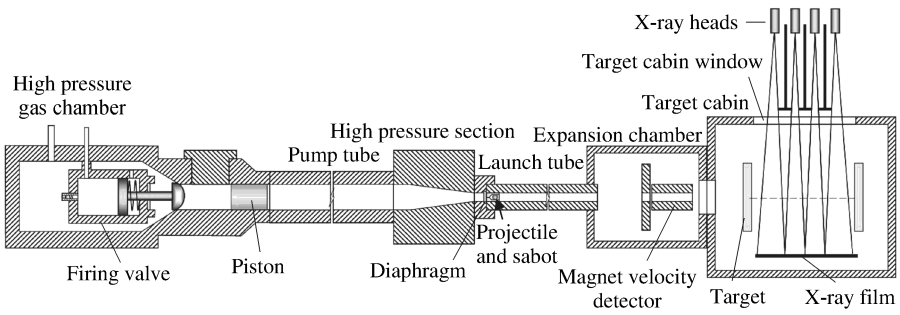


图 2 二级轻气炮实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-stage light gas gun experiment system

实验采用的结构构形由玄武岩纤维编织布试件(前板)和铝合金观察板(后板)及间距为 350 mm 的间隔组成。玄武岩纤维编织布试件为平纹玄武岩纤维编织布,有薄、厚两种规格:薄玄武岩纤维编织布(本文中称为 WBF_1)的面密度为(212±5)g/m^2;厚玄武岩纤维编织布(本文中称为 WBF_2) 的面密度为(401±5)g/m^2。观察板为 2 mm 厚的 5A06 铝合金板。弹丸为铝合金球形弹丸,弹丸直径为 3.97、4.76 和 6.35 mm。撞击速度为 2.34～4.50 km/s。为了避免裁剪时丝线脱落,沿玄武岩纤维布试件周线在两侧表面涂胶,经选择,确定采用柔性的氯丁胶。本文中将玄武岩纤维编织布简称为玄武岩纤维布或玄武岩纤维靶板。

2.2　剩余速度分析

一般将弹丸击穿靶板后仍然保持完整时弹丸质心的运动速度称为弹丸的剩余速度。正撞击时,剩余速度的方向通常与撞击速度的方向相同,即剩余速度方向与弹丸弹道平行。在超高速撞击条件下,弹丸与靶板的撞击会使弹丸发生破碎,当靶板被击穿时,弹丸碎片和靶板碎片会以不同的速度沿不同的方向运动,形成通常所说的“碎片云”。本研究取正撞击时碎片云质心沿轴向(弹丸弹道方向)的速度为剩余速度。图 3 为本研究相关实验中所拍摄的 4.76 mm 直径弹丸以 4.81 km/s 速度撞击涂氯丁胶厚玄武岩纤维布时的 X 光照片,s 为弹丸碎片云前端飞离靶板(玄武岩纤维布)的距离,X 光照片仅记录了铝合金弹丸碎片的影像,靶板(玄武岩纤维布)碎片的影像则没有记录或无法辨认。图 3(a)、图 3(c)为同一张底片,图 3(b)、图 3(d)同为另一张底片,图 3(a)、图 3(c)的拍摄方向与图 3(b)、图 3(d)的拍摄方向正交。

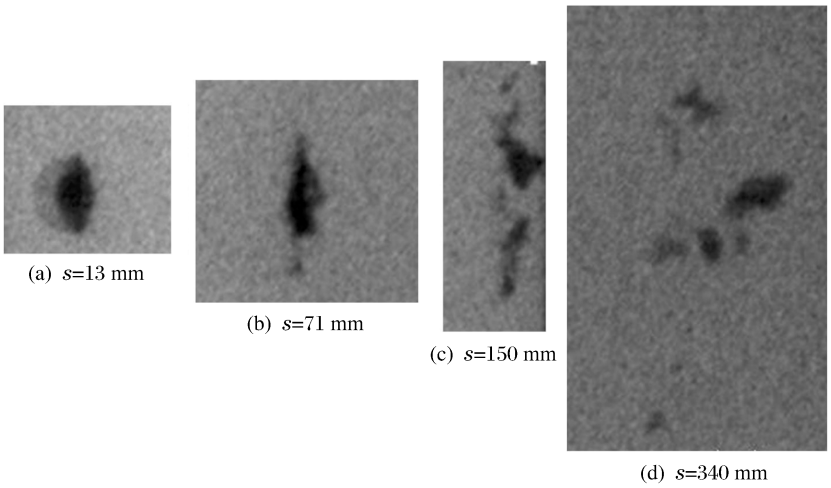


图 3　弹丸破碎的 X 光照片

Fig. 3　X-ray image of projectile fragments

由图 3 可知,弹丸碎片在靶板后飞行的 150 mm 范围内沿轴向(弹丸撞击靶板的方向)扩散的范围很小,最大碎片的质心与碎片云的质心基本重合,当弹丸碎片接近距离玄武岩纤维靶板为 350 mm 的观察板时,其轴向扩散的范围有较明显扩大。而一般填充式防护结构的总防护间距通常不超过 150 mm[6],因此,本研究测量分析时以最大碎片的轴向速度作为碎片云的质心速度,即剩余速度。

2.3　实验结果

铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布剩余速度实验结果列于表 1。表 1 中,d_p 为弹丸直径,ρ_p 为弹丸密度,v 为弹丸的撞击速度,v_r 为弹丸的剩余速度,D_h 为玄武岩纤维布击穿孔孔径。

3.97 mm 和 6.35 mm 直径弹丸的实测密度为 2.80 g/cm^3 左右,4.76 mm 直径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 剩余速度实验结果

Table 1 Experimental data of residual velocity

Test No.	Target material	d_p /(mm)	ρ_p /(g/cm^3)	v /(km/s)	v_r /(km/s)	D_h /(mm)
BW70049	BWF_1	3.97	2.80	2.55	2.37	4.09
BW70047	BWF_1	3.97	2.80	2.70	2.51	4.13
BW70011	BWF_1	3.97	2.80	3.08	2.85	4.28
BW70022	BWF_1	3.97	2.80	3.91	3.64	4.33
BW70048	BWF_1	4.76	2.76	2.34	2.16	5.02
BW70005	BWF_1	4.76	2.76	3.31	3.12	5.27
BW70030	BWF_1	4.76	2.76	4.38	4.12	5.38
BW70035	BWF_1	4.76	2.76	4.40	4.14	5.21
BW70041	BWF_1	6.35	2.80	2.34	2.22	6.58
BW70001	BWF_1	6.35	2.80	3.13	2.97	6.75
BW70046	BWF_2	3.97	2.80	2.43	2.22	4.32
BW70012	BWF_2	3.97	2.80	3.06	2.80	4.35
BW70020	BWF_2	3.97	2.80	3.96	3.58	4.32
BW70044	BWF_2	4.76	2.76	2.38	2.19	5.12
BW70006	BWF_2	4.76	2.76	3.21	2.99	5.29
BW70032	BWF_2	4.76	2.76	4.31	3.94	5.36
BW70042	BWF_2	6.35	2.76	2.43	2.29	6.64
BW70002	BWF_2	6.35	2.80	3.13	2.93	6.95
BW70036	BWF_2	6.35	2.80	4.50	4.21	7.25

3 弹丸剩余速度方程

3.1 剩余速度方程分析

决定弹丸剩余速度 v_r 的参数有几何量和物理量两类：即弹丸直径 d_p 和玄武岩纤维布的击穿孔孔径 D_h；弹丸撞击速度 v，铝合金弹丸密度 ρ_p 和玄武岩纤维密度 ρ_b，玄武岩纤维的强度极限 $\sigma_{b,b}$，弹丸材料声速 c_p，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。v_r 应与各量有确定的函数关系，即

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

根据量纲理论的 π 定理可得到如下无量纲函数关系

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

式中：v_r/c_p 为无量纲剩余速度，击穿孔直径与弹丸直径之比 D_h/d_p 为无量纲击穿孔直径。

由于玄武岩纤维属于脆性材料，其延伸率小于 5%，故在上述分析中，将代表靶板强度效应参数中的屈服极限用强度极限代替，取为$(\sigma_{b,b}/\rho_b)^{0.5}$的形式。

沿玄武岩纤维布厚度方向，纤维丝之间的横向联系是不均匀、不连续的，弹丸撞击时传入玄武岩纤维布的冲击波中的压缩波沿布厚度方向的传播，是通过纤维之间的横向接触点或接触线传递的，传播路

径是散乱、间断而无序的,使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与压缩波类似,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。于是有

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

将(3)式写成下列函数形式

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

式中:a、b、c、d 为待定常数。对(4)式两边进行对数运算,可有

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

根据表 1 的实验数据,对(5)式进行线性回归分析。求出各系数为:$a=0.206$,$b=0.9954$,$c=-0.1215$ 及 $d=-0.4948$。将各系数带入方程(4),有

$$\frac{v_r}{c_p}=0.206\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^{0.9954}\left(\frac{D_h}{d_p}\right)^{-0.1215}\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{-0.4948} \tag{6}$$

式中:v_r 为弹丸剩余速度,c_p 为弹丸材料声速,v 为弹丸撞击速度,D_h 为靶板(即玄武岩纤维布)的击穿孔直径,d_p 为弹丸直径,ρ_p 为弹丸的材料密度,ρ_b 为靶板的材料密度,$\sigma_{b,b}$ 为靶板材料的拉伸强度极限。

公式(6)适用的速度范围为 2.34～4.50 km/s。利用公式(6)可以在没有铝合金弹丸击穿靶板后的剩余速度测量装置的情况下,根据实际实验的铝合金弹丸直径 d_p 和速度 v,以及玄武岩纤维布靶件的击穿孔直径 D_h,计算出铝合金弹丸的剩余速度 v_r。

公式(6)的方程曲线与实验结果的比较示于图 4。由图 4 可以看到,公式(6)的方程曲线与实验结果较为吻合。由图 4 还可以看到,实验所用的两种不同密度的铝合金弹丸的剩余速度方程曲线十分接近,几乎重合,表明这两种铝合金弹丸密度的变化对无量纲剩余速度 v_r/c_p 与 $(D_h/d_p)^{-0.1215}$ 的比值影响很小。

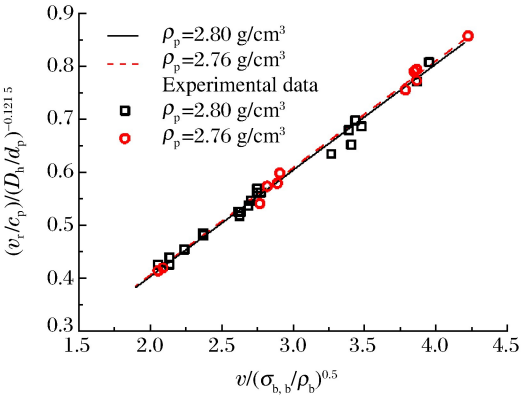


图 4　剩余速度方程(6)与实验结果比较

Fig. 4　Comparison of residual velocity Eq. (6) with experimental data

3.2　剩余速度方程的简化

采用公式(6)计算铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布的剩余速度 v_r 时,需要先进行铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维布实验,再根据玄武岩纤维布靶件的击穿孔直径 D_h 的实验结果确定弹丸的剩余速度 v_r,使用起来很不方便。

根据进行的相关实验数据回归分析,铝合金弹丸超高速撞击玄武岩纤维布时,玄武岩纤维布靶板的击穿孔直径 D_h 的计算公式为

$$\frac{D_h}{d_p}=1.0919\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^{0.0981}\left(\frac{\rho_{Ab}}{\rho_b d_p}\right)^{0.0206}\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{-0.8617} \tag{7}$$

公式(7)适用的撞击速度范围为 2.25～4.81 km/s,适用范围覆盖公式(6)的适用范围。

由于玄武岩纤维布为编织材料,在布的厚度 t_b 给定以后,采用不同的编织组织结构,可得到不同面密度的纤维布,因此不宜将布的厚度 t_b 作为表征玄武岩纤维布几何特征的参数。公式(7)中,将均质等厚靶板的靶板厚度与弹丸直径之比 t_b/d_p 相对应的参变量用 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 项代替。实际上对于连续均质

材料等厚靶板，因有 $\rho_{Ab}=\rho_b t_b$ 成立，$\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 即自然转换为 t_b/d_p。因此，对于纤维编织布而言，可将 ρ_{Ab}/ρ_b 取为等效厚度，替代布的实际厚度。

将(7)式代入(6)式，可得到不含玄武岩纤维靶板击穿孔直径 D_h 的铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布的剩余速度公式

$$\frac{v_r}{c_p}=0.2038\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^{0.9835}\left(\frac{\rho_{Ab}}{\rho_b d_p}\right)^{-0.0025}\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{-0.3901} \tag{8}$$

(8)式适用的撞击速度范围为 2.34～4.50 km/s。

(8)式的曲线与实验点的对比示于图 5。由图 5 可知，(8)式曲线与实验点吻合较好。利用(8)式不需要进行超高速撞击实验，就可以根据铝合金弹丸和玄武岩纤维靶板的材料参数，预测和计算与给定撞击速度 v 对应的剩余速度 v_r，故(8)式比较便于应用。

3.3 剩余速度方程的进一步简化

在本研究实验范围内，$\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 取值范围为 0.012 36～0.074 80，并满足条件

$$1>\frac{\rho_{Ab}}{\rho_b d_p}>0.01 \tag{9}$$

此条件可类比于金属薄板超高速撞击实验条件下的比值 t_b/d_p 范围：$1>t_b/d_p>0.01$。$1>t_b/d_p$ 对应于薄板的一般性定义，即靶厚与弹的特征尺寸之比小于 1。

在满足(9)式的条件下，(8)式中 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 对应项的取值范围为

$$1.011>\left(\frac{\rho_{Ab}}{\rho_b d_p}\right)^{-0.0025}>1.007 \tag{10}$$

由(8)式和(10)式可知，略去参数项 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 对剩余速度的影响，相当于取 $[\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)]^{-0.0025}=1$，所产生的最大误差小于 1.1%。由于该误差小于一般工程允许的 5%误差，故可以忽略参数项 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 对剩余速度的影响。因此，在满足(9)式的条件下，铝合金弹丸撞击玄武岩纤维靶板的剩余速度(8)式可进一步简化为

$$\frac{v_r}{c_p}=0.2038\left(\frac{v}{\sqrt{\sigma_{b,b}/\rho_b}}\right)^{0.9835}\left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{-0.3901} \tag{11}$$

进一步简化后的铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布靶板后的剩余速度公式(11)式的曲线与实验点的对比示于图 6。由图 6 可知，简化后的剩余速度公式(11)式的曲线与实验结果仍是吻合的。(11)式在 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 的取值范围为 0.012 36～0.074 80 时适用。

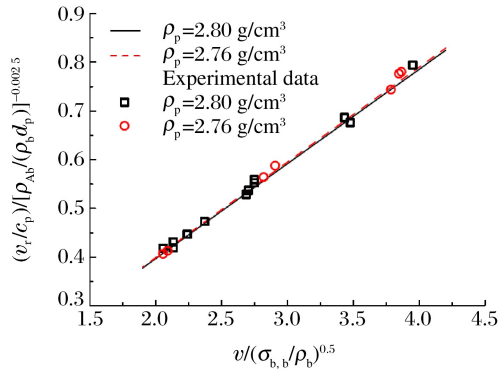


图 5 剩余速度方程(8)式与实验结果比较

Fig. 5 Comparison of residual velocity Eq. (8) with experimental data

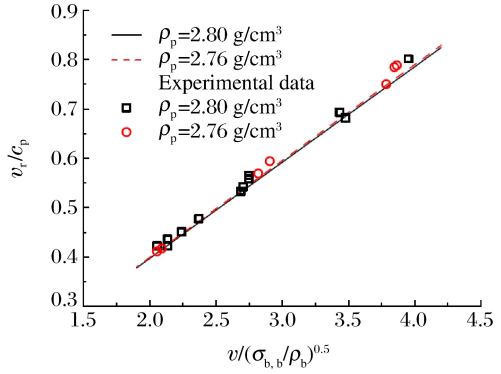


图 6 剩余速度方程(11)式与实验结果比较

Fig. 6 Comparison of residual velocity Eq. (11) with experimental data

3.4　影响剩余速度的相关因素分析

通常情况下,对于均质等厚靶板而言,靶板的质量损失是通过靶板厚度及靶板穿孔直径两个参数体现出来的,其它条件不变,靶板质量损失越大,则消耗的弹丸撞击动能越大,弹丸的速度损失也越大,靶板厚度和靶板穿孔直径两个参数与剩余速度的关联性较大。

实验所用的玄武岩纤维编织材料的抗拉强度远高于弹丸的材料强度,等效厚度远小于弹丸直径,玄武岩纤维靶板的等效厚度与弹丸直径之比 $\rho_{Ab}/(\rho_b d_p)$ 的取值范围仅为 0.012 36～0.074 80。目前通过实验观察已经确认,玄武岩纤维编织材料靶板对弹丸撞击动能的消耗具有多种形式:包括使弹丸前部局部破碎产生飞溅、使弹丸后部产生层裂,破碎、以及使弹丸整体破碎等。这些因素对弹丸撞击动能的消耗和弹丸剩余速度的影响远大于玄武岩纤维靶板质量损失的影响。根据进行的相关实验的玄武岩纤维编织布损伤显微照片分析,玄武岩纤维布孔边相邻纤维丝之间的损伤形态差别很大。由此可知,玄武岩纤维布与弹丸之间的损伤作用主要表现为玄武岩纤维丝单独与弹丸的相互作用,玄武岩纤维丝的强度和密度对损伤的影响较大。剩余速度方程公式的分析过程也表明,在实验范围内,弹丸速度、弹丸和玄武岩纤维靶板的材料密度,以及纤维靶板纤维丝的抗拉强度,是影响弹丸剩余速度的主要因素;靶板的击穿孔孔径及弹丸直径和玄武岩纤维靶板的等效厚度之比等因素是相对次要的因素。由此可以初步推断,在实验范围内,玄武岩纤维靶板的材料强度和密度的物理因素,对弹丸剩余速度的影响比玄武岩纤维靶板的等效厚度的几何因素的影响更显著。由于现有的多种面密度玄武岩纤维布中编织组织结构适合用于高速撞击防护的玄武岩纤维布的数量不多,因此实验中仅选用了两种面密度的玄武岩纤维布。玄武岩纤维靶板面密度增加或减少以后,玄武岩纤维靶板的等效厚度对铝合金弹丸剩余速度的影响,还需要进行进一步的实验考证分析。

4　结　论

铝合金弹丸撞击玄武岩纤维布时的剩余速度随铝合金弹撞击速度的增大而呈线性增大。

在实验范围内,铝合金弹丸密度的变化对剩余速度 v_r/c_p 与 $(D_h/d_p)^{-0.1215}$ 的比值影响很小,弹丸速度、弹丸和玄武岩纤维的材料密度以及纤维编织靶板材料的抗拉强度是决定弹丸剩余速度的主要因素。而与弹丸和靶板的几何参数相关的玄武岩纤维靶板的等效厚度和弹丸直径之比等因素是相对次要的因素,简化计算时可以略去。

References:

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

[2] Hortz F, Cintala M J, Bemhard R F, et al. Multi-mesh bumpers: A feasibility study [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 431-442.

[3] 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: 169-180.

[4] Christiansen E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14: 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: 217-228.

[6] Christiansen E L. Meteoroid/debris shielding, TP-2003-210788 [R]. Houston, Texas: NASA Johnson Space Center, 2003.

Investigation of Residual Velocity of Aluminum Projectiles at Hypervelocity Impact on Woven of Basalt Fiber

HA Yue, GUAN Gong-Shun, CHI Run-Qiang, PANG Bao-Jun

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

Abstract: In order to protect spacecraft against space debris impacts, it is a feasible direction to develop the shield with high strength fiber materials. The damage analysis of hypervelocity impact on high strength fiber woven is a key issue in the design of the space debris shielding, and the main content in the analysis of the dynamic behavior of materials in the hyper pressure condition. Woven of basalt fiber is one of the high strength ceramic materials concerned in recent years. The aim of this study was to study the residual velocity of aluminum projectiles at hypervelocity impact on woven of basalt-fibers. High velocity impact tests were carried out by the two-stage light gas gun facilities. The law of the velocity loss was researched according to the X-rays imaging of the projectile fragments. The residual velocity equations of aluminum projectiles were fitted from the hypervelocity impact experimental data. The study of the residual velocity equations is beneficial to the analysis of impact energy consumption of woven of basalt-fibers to aluminum projectiles.

Key words: hypervelocity impact; woven of basalt fiber; residual velocity equation