

文章编号:1001-4888(2011)01-0032-05

# 双层多功能布的动静态力学性能及本构关系<sup>\*</sup>

高光发<sup>1,2</sup>, 李永池<sup>1</sup>, 王道荣<sup>3</sup>, 章杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027; 2. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽淮南 232001;  
3. 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 针对双层多功能布的物理特性, 利用材料试验机和分离式 Hopkinson 压杆装置, 展开了准静态和动态条件下材料的单轴抗压实验, 获得了材料在不同应变率下的应力应变曲线和材料的失效应力、应变。实验结果表明: 双层多功能布的动态失效率明显高于准静态失效率, 而且随着应变率的增加, 其动态失效率呈现增加的趋势, 即该材料具有明显的应变率硬化效应。对应力应变曲线进行拟合, 给出了材料的动静态粘弹性本构关系。并对双层多功能布在不同应变率下的失效应变及材料的损伤结果进行了初步的分析。

**关键词:** 双层多功能布; 功能材料; 应变率硬化效应; 本构方程

**中图分类号:** O345      **文献标识码:** A

## 0 引言

近年来, 有特殊功能的布在许多行业得到大量的使用, 其力学性能也得到了一定的关注<sup>[1,2]</sup>, 但对于布在厚度方向力学性能的研究至今未见报道。多功能布是一种由多层布和其他塑料类薄膜等材料缝合而成的一种新型复合功能性材料, 具有防震、阻尼和隔热等作用, 在航空中具有特殊的用途。单层多功能布本身就是一种多层薄膜状物质按照一定的次序叠加缝合而成的复合功能材料, 但在实际工程应用中, 由于其厚度过薄(1mm 左右), 一般使用两层或两层以上多功能布叠放来达到目的。但由于多功能布的特殊物理特性: 声阻抗低、变形大、多孔甚至各向异性, 其有关力学行为的研究, 尤其是动力学行为的研究, 尚未见有相关文献报道。为了较好地使用和研究该种特殊功能性材料, 研究其静态力学性能和动态力学行为是很有必要的。本文利用材料试验机(简写为 MTS)对该材料的静态力学性能进行研究, 利用分离式霍普金森压杆(简写为 SHPB), 采用波形整形技术实现试件均匀加载和恒应变率要求, 采用润滑剂消除测试中由二维效应带来的误差, 对双层多功能布的动态力学性能进行了研究。通过实验, 获得了材料的基本力学参数和应力应变曲线, 并对材料的变形行为、应变率效应和破坏特性作了初步的分析, 结合冲击动力学及本构关系的理论, 给出了材料的动静态粘弹性本构关系, 从而为该材料的工程应用和进一步改进提供了依据。

## 1 实验试件和装置

### 1.1 实验试件

多功能布是一种典型的复合材料。如图 1 所示, 我们定义与纤维垂直的方向为 X1 方向, 称为离面方向, 而将 X2、X3 方向称为面内方向。多功能布材料具有三个方向正交的弹性对称面, 属于正交各向

\* 收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(10572134); 国防科技重点实验室基金(51453030205ZK0101)

通讯作者: 李永池(1941—), 男, 教授, 博导。主要研究领域: 材料与结构的冲击动力学行为。E-mail: ycli@ustc.edu.cn

异性复合材料, 同时在面内的两个方向上材料结构是相同的, 所以在这两个方向上材料的力学性能是相同的, 在研究中主要考察离面方向 X1。每层试件平均直径为 12.5mm, 双层多功能布厚度 2.2mm, 密度为  $0.8183\text{g/cm}^3$ , 如图 2 所示。

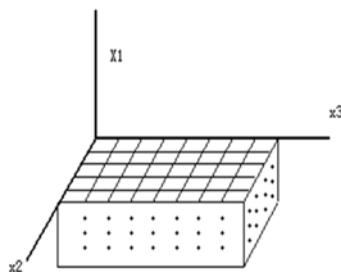


图 1 实验试件示意图

Fig. 1 Schematic illustration of specimen

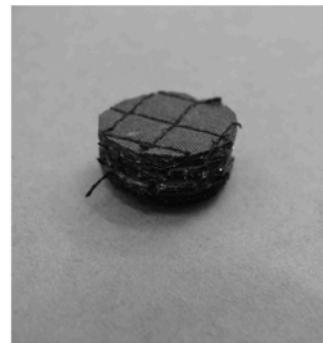


图 2 双层多功能布试件

Fig. 2 Specimen of bistratal multi-function cloth

## 1.2 实验装置与方法

为了研究材料在较低应变率下的本构关系, 我们在材料实验系统 MTS809 上进行准静态单轴压缩实验, 如图 3 所示, 测量材料应变率在  $10^{-1}\text{s}^{-1} \sim 10^{-4}\text{s}^{-1}$  范围内的力学特性。实验加载速率为  $0.5\text{cm/min}$ 。

动态实验装置为  $\Phi 14.5\text{SHPB}$  的实验装置, 由气枪、子弹、入射杆、透射杆、阻尼器和数据采集系统组成, 如图 4 所示。实验中子弹速度选取为  $11\text{m/s}$  和  $18\text{m/s}$ 。



图 3 材料试验机装置

Fig. 3 Material testing system setup

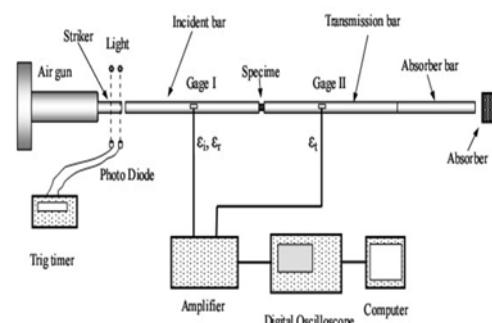


图 4 SHPB 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic illustration of split Hopkinson pressure bar setup

实验中的双层多功能布密度低、弹性波波速小、变形大甚至多孔, 采用常规 SHPB 技术测量其力学行为会遇到与金属材料完全不同的问题和困难<sup>[3]</sup>。本次实验中为了精确捕捉到弱的透射波信号, 采用具有较高灵敏度的半导体应变片, 并采取了一些降低试件端面摩擦的措施<sup>[4]</sup>, 另外, 为有利于达到试件中的应力均匀<sup>[5]</sup>, 实验中采用了波形整形技术<sup>[6]</sup>, 由此得到较理想的波形曲线, 如图 5 所示。由图可以看出, 第二次透射波的强度较第一次透射波的强度大, 这是因为: 在第一次入射波通过试件后, 试件被压实, 即此时试件的波阻抗得到提高, 根据应力波在不同介质界面的反射透射

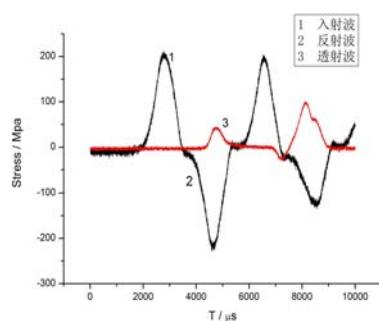


图 5 典型的试验波形曲线  
Fig. 5 Typical wave curves in experiment

原理可知,这种现象会减小第二次入射波在界面的反射波强度且同时会增加透射波强度。

## 2 实验结果及分析

本文对双层多功能布进行了MTS实验和SHPB实验。为保证实验结果的可信和准确性,本次研究进行了不同应变速率以及多次重复的实验,其中准静态实验主要进行了应变速率为 $1.0 \text{e}-2 \text{s}^{-1}$ 的MTS实验,动态实验的试件部分基本参数见表1。表中2L表示两层布,双层多功能布中两层之间采用胶水粘合。

表1 双层多功能布试件尺寸及加载条件

Tab. 1 Bistratal multifunction cloth specimen size and loading conditions

序号	试件编号	试件直径(mm)	试件厚度(mm)	子弹速度(m/s)
1	2L-6	12.5	2.2	10.74
2	2L-7	12.5	2.2	10.64
3	2L-8	12.5	2.2	11.07
4	2L-9	12.5	2.2	11.02
5	2L-10	12.5	2.2	10.11
16	2L-11	12.5	2.2	18.39
17	2L-12	12.5	2.2	18.28
18	2L-13	12.5	2.2	18.26
19	2L-14	12.5	2.2	18.47
20	2L-15	12.5	2.2	18.44

对双层多功能布进行了应变速率为 $1.0 \text{e}-2 \text{s}^{-1}$ 的准静态MTS单轴压缩实验,实验应力应变曲线如图6所示。由图可以看出,在加载初期随应变的增加,应力的变化并不明显,但当应变大于0.2以后,应力的变化随之趋于明显。这主要是因为在加载初期两层多功能布以及多功能布内部薄膜之间还存在许多孔隙,但应变继续增大时,孔隙逐渐被压缩从而使布更加紧密,此时测得的杨氏模量逐步向布的机体材料的杨氏模量接近。

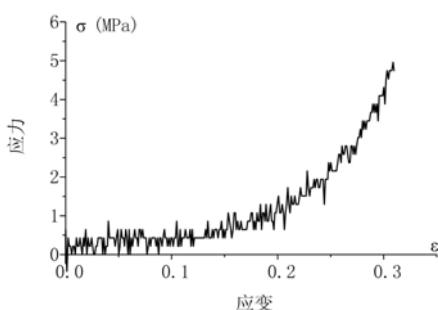


图6 准静态应力—应变曲线( $1.0 \text{e}-2$ )

Fig. 6 Quasi-static stress-strain curve ( $1.0 \text{e}-2$ )

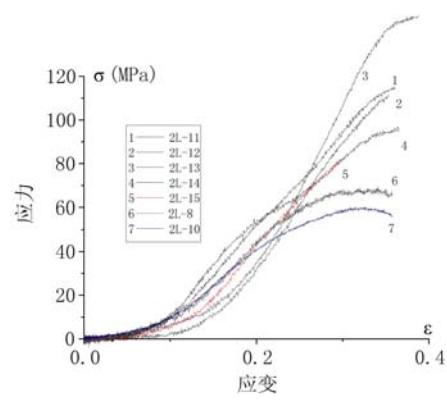


图7 动态应力—应变曲线

Fig. 7 Dynamic stress-strain curve

对于双层布,还进行了2组共10次SHPB实验,其子弹速度同样分别为11m/s和18m/s。经计算,其相应的应变速率分别为 $2500 \text{s}^{-1}$ 和 $3200 \text{s}^{-1}$ ,每组5次实验,如图7所示。从图中可以看出,双层布在动态压缩时其应力应变变化特点与准静态实验基本相似,但其屈服强度随应变速率的增大而增加,为更方便分析,对动态实验取平均值与准静态实验进行对比分析,如图8所示。

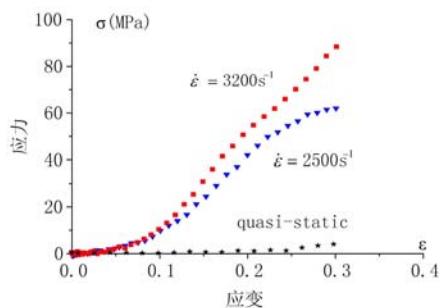


图 8 应力—应变平均曲线

Fig. 8 Stress-strain average curve

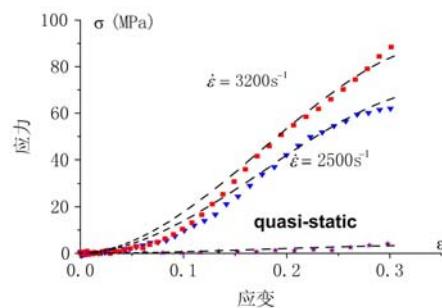


图 9 应力—应变拟合曲线

Fig. 9 Stress-strain fitting curve

从图 8 可知, 双层多功能布是一种应变率敏感材料, 其应力与应变和应变率皆相关, 因此其率相关本构关系可写为以下形式:

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon})$$

为简化其模型, 并结合实际特征, 本次拟合采用以下形式描述:

$$\sigma = (E_1 \epsilon^3 + E_2 \epsilon^2 + E_3 \epsilon)(1 + C \epsilon / \epsilon_0)$$

根据应力应变曲线进行拟合, 得出其拟合曲线, 如图 9 所示, 其参数值为:

$E_1 = -150 \text{ MPa}$ ,  $E_2 = 80 \text{ MPa}$ ,  $E_3 = 0.5 \text{ MPa}$ ,  $C = 0.0076$ ,  $\epsilon_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 。

从图 8 可以看出, 拟合曲线与实验曲线耦合较好, 这说明该本构方程能较好的表示双层多功能布的应力应变关系。

实验中发现在冲击加载下当应力和应变增加到一定值时, 应力突然下降, 此时双层多功能布出现较严重的破坏, 如图 10 所示, 此时的应力和应变分别定义为失效应力和失效应变。根据双层多功能布在不同应变率情况下的实验数据(如表 2 所示)对比发现: 双层多功能布的失效应变随应变率增加没有明显的改变, 而其失效应力随应变率的增加呈现较大幅度的增加, 失效应力可能受加载方式、应变率和多功能布材料内部结构等多种因素耦合影响。

表 2 双层多功能布失效应力、应变

Tab. 2 Failure stress and strain of bistratal multifunction cloth

弹速	失效应力(MPa)	失效应变	应变率( $\text{s}^{-1}$ )
11m/s	63	0.35	2500
18m/s	105	0.38	3200

### 3 结论

本次实验对双层多功能布的静动态力学行为进行了系统的研究, 并对其本构关系进行了拟合, 同时, 对此种材料的失效应力应变与单层多功能布进行了对比分析, 实验和分析结果表明:

(1) 无论是准静态加载, 还是动态加载, 双层多功能布在加载初期应力随应变的增加而缓慢增加, 当应变率达到一定的时候, 应力应变曲线的斜率增加相对较快。同时, 随着应变率的提高, 双层多功能布应力应变曲线斜率增加, 失效应力也相应提高, 材料具有明显的应变率效应。

(2) 从多次重复实验结果来看, 准静态和动态加载段应力应变曲线具有比较好的一致性, 并拟合出双层多功能布的本构关系。



图 10 多功能布损伤图

Fig. 9 Damage figure of multifunction cloth

(3) 本次实验所涉及的多功能布材料为具有特殊用途的新型功能性复合材料,有关其力学行为的研究,尤其是动力学行为的研究,尚未见有相关文献报道,因此本文所作的工作及所提出的一些实验方法对今后此类新型功能性材料的开发和研究具有参考价值和启发作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈先忠,邹传平.环氧玻璃布层压板在低温下的性能实验研究[J].低温技术,2010,38(1):25—28(Chen Xian-zhong, Zhou Chuan-ping. The research of epoxy glass cloth laminate at low temperature[J]. Cryogenics, 2010, 38 (1):25—28 (in Chinese))
- [2] 陈汝栋,赵悟魁.非织造布的过滤性能和力学性能分形特征研究[J].天津工业大学学报,2009,28(3):30—33 (Chen Ru-dong, Zhao Wu-kui. Research of fractal features of non-woven fabric's filter and mechanical properties [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2009, 28(3):30—33(in Chinese))
- [3] Chen W, Lu F, Frew D J, et al. Dynamic Compression Testing of Soft Materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002,(69): 214—223.
- [4] 王晓燕,卢芳云,林玉亮. SHPB 实验中端面摩擦效应研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(2):134—139 (Wang Xiao-yan, Lu Fang-yun, Lin Yu-liang. Study on interfacial friction effect in the SHPB tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):134—139(in Chinese))
- [5] 朱珏,胡时胜,王礼立.SHPB 试验中粘弹性材料的应力均匀性分析[J].爆炸与冲击,2002, 22(1):315—322(Zhu Jue, Hu Shi-sheng, Wang LI-li. Analysis on stress uniformity of viscoelastic materials in split Hopkinson bar tests [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1):315—322 (in Chinese))
- [6] 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J]. 爆炸与冲击,2002, 22(1):15—19(Lu Fang-yun, Chen W, Frew D J. A Design of SHPB Experiments for Soft Materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1):15 —19 (in Chinese))

## On the Static/Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relation of Bi-stratal Multifunction Cloth

GAO Guang-fa<sup>1,2</sup>, LI Yong-chi<sup>1</sup>, WANG Dao-rong<sup>3</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics and Numerical Mathematical, Beijing 100076, China)

**Abstract:** By means of material testing system and split Hopkinson pressure bar (SHPB) setup, quasi-static and dynamic uniaxial compressive tests were performed based on the physical properties of bi-stratal multi-function cloth. Stress-strain curves and failure stress, failure strain were obtained at different strain rates. Results show that the dynamic failure strength of bi-stratal multi-function cloth is distinctly higher than the quasi-static failure strength, and the value of the dynamic failure stress obviously increases as the strain rate increases, which indicates the material has a notable strain rate hardening effect. Quasi-static and dynamic viscoelastic constitutive equation was presented based on the fitted stress-strain curves under different strain rates. And failure strains at different strain rates and damage results of bi-stratal multi-function cloth were preliminarily analyzed.

**Keywords:** bi-stratal multifunction cloth; functional materials; strain rate hardening effect; constitutive relation