

# 高应变率下玄武岩纤维和芳纶纤维拉伸断裂机理的研究

竺铝涛, 孙宝忠

(东华大学纺织学院, 上海 201620)

摘要: 利用分离式 Hopkinson 拉杆实验装置, 测试玄武岩纤维和芳纶纤维在高应变率下的拉伸性质。实验表明两种纤维都是应变率敏感性材料, 在扫描电子显微镜下, 玄武岩纤维的断裂模式为脆性断裂, 断裂横截面随着应变率的提高而趋于规整; 而芳纶纤维的断裂模式为韧性断裂, 随着应变率的提高, 纤维产生明显的原纤化效应。

关键词: 纺织材料; 玄武岩纤维; 芳纶纤维; SHTB 装置; 拉伸性能; 应变率

中图分类号: TB302.3

## A Study on the Fracture Mechanism of Basalt Filament and Twaron Fiber Tows under High Strain Rate Tensile

Zhu Lvtao, Sun Baozhong

(College of Textile, Donghua University, Shanghai 201620)

**Abstract:** The tensile experiments of basalt filament and Twaron fiber tows at high strain rates were carried out with split Hopkinson tension bar (SHTB). Experimental results showed that the mechanical properties of the basalt Filament tows were rather sensitive to strain rate. From scanning electronic microscope (SEM) photographs of the fracture surface, it is indicated that the basalt filament tows failed in a more brittle mode and the fracture surface got more regular as the strain rate increases. While the Twaron fiber tows failed in a more tough mode and the axial split will become more severe as the strain rate increases.

**Key words:** Textile materials; Basalt Filament Tows; Twaron fiber tows; Tensile Properties; Strain Rates; SHTB

## 0 引言

连续玄武岩纤维(CBF)是以纯天然火山岩为原料, 将其在 1450~1500 度高温下熔化后, 经高速拉制而成的连续纤维<sup>[1]</sup>。它具有抗拉强度高、杨氏模量大、耐腐蚀、耐高温和化学稳定性好等优良特点<sup>[2,3]</sup>。芳纶纤维是有机高性能纤维, 它具有优良的拉伸性能和能量吸收特性, 被广泛应用于纺织复合材料的增强结构<sup>[4]</sup>。以 CBF 或芳纶纤维为增强体可制成各种性能优异的复合材料, 纤维作为复合材料结构的主要承载部分, 它的拉伸性能是复合材料结构设计的基本参数, 理解纤维束在高应变率下的破坏失效模式是优化复合材料结构设计的关键。因此, 研究高应变率下纤维及纤维束的力学性能显得十分重要。

本文利用分离式 Hopkinson 拉杆测试玄武岩纤维和芳纶纤维在应变率为 800~3000/s 范围内的拉伸性质, 研究了不同应变率对纤维材料力学性能的影响, 同时利用扫描电子显微镜观察了两种纤维在不同应变率下的断裂形态, 并分析了相关的断裂机理。

基金项目: 博士点基金 (新教师基金: 200802551003)

作者简介: 竺铝涛(1983), 男, 博士生, 主要研究方向: 纤维增强复合材料

通信联系人: 孙宝忠 (1978), 男, 副教授, 主要研究纤维集合体和纺织结构复合材料力学. E-mail: sunbz@dhu.edu.cn

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

40 试验用玄武岩纤维为横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司提供, 纤维的细度为 2400tex/21800f, 单纤维直径为 7 $\mu$ m, 体积密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>。芳纶纤维为苏州东华纤维材料制品有限公司提供, 纤维的细度为 1680dtex 体积密度为 1.45g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 冲击拉伸装置与测试原理

45 本拉伸试验在分离式 Hopkinson 拉杆装置(SHTB)<sup>[5]</sup>上进行, 图 1 为分离式 SHTB 装置的测试原理图。SHTB 测试系统主要由撞击杆、输入杆和输出杆、应变片以及数据采集与分析系统组成, 当气枪中的撞击杆(子弹)发射时, 与输出杆相撞, 在输出杆中产生一个两倍于撞击杆长度的压缩波, 压缩波通过承压块传至输入杆, 在输入杆的自由端反射后形成拉伸脉冲, 它作为入射波全部作用于试样上(因承压块不能承受拉伸脉冲), 试样在脉冲载荷作用下发生变形和断裂, 拉伸脉冲经过试样透射到输出杆上, 其入射波和透射波分别被两个应变片采集。  
50 依据一维应力波理论及试件中应力、应变均匀性假设, 可导出试样应变率、应变和应力<sup>[6]</sup>方程:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \varepsilon_R(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{E_b A_b}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (3)$$

55 其中:  $C_0 = \sqrt{E_b/\rho_b}$  是弹性波在杆子中的波速;  $L_s$  为试件试验段的原长(即两夹持口纤维长度);  $\varepsilon_R(t)$ 、 $\varepsilon_T(t)$  分别为作用在试件上的入射波和透射波的应变值;  $A_b$  和  $A_s$  分别为杆子和试样的初始横截面积;  $E_b$  为杆子的模量。

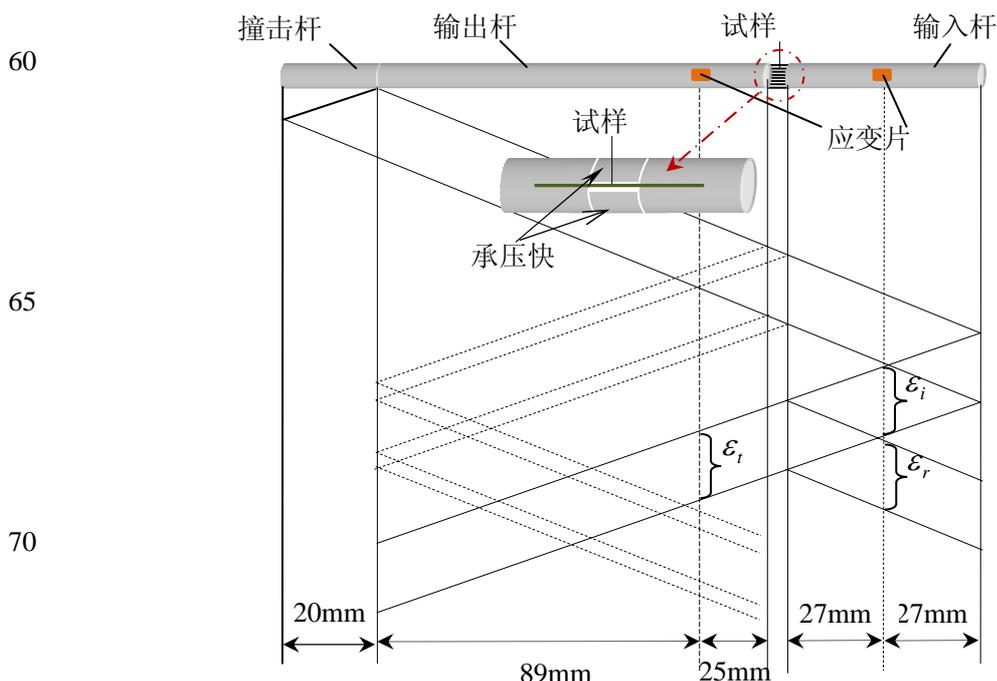


图 1 分离式 SHTB 装置测试原理图

Fig. 1 Principle of SHTB apparatus and positions of strain gages

### 1.3 试件与试验装置的连接

纤维束试件制作及其实验装置的连接如图 2 所示。实验前，先将衬块用 502 快干胶垂直地粘结在辅助板上，然后将纤维束平行且均匀地缠绕在衬块上，玄武岩纤维共缠 4 股(芳纶纤维共缠 10 股)，纤维束上下对称排列，纤维束的试验长度为 10 mm，最后将缠有纤维束的衬块放入输入杆和输出杆的叉口中并用高性能结构 AB 胶进行粘结固化，固化后取下辅助板，加上承压块即可进行冲击拉伸实验。

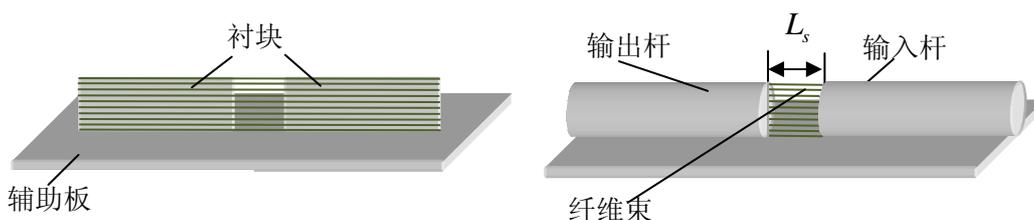


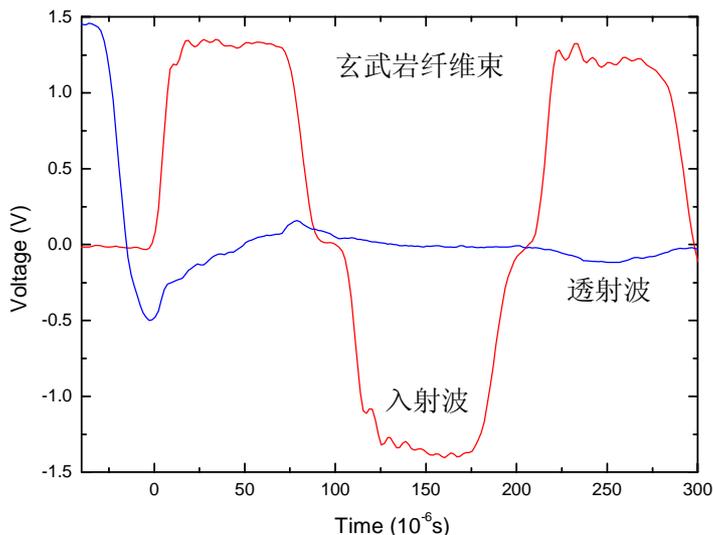
图 2 试件及其连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of the fiber bundles specimen

## 2 实验结果与分析

本研究对玄武岩纤维束和芳纶纤维进行了 4 种应变率的拉伸试验，其应变率分为：1200/s, 1800/s, 2400/s, 3000/s 和 800/s, 1200/s, 1600/s, 2400/s。每个纤维束在不同应变率条件下至少测试 5 次，相同的气压和杆子条件产生差不多相同的应变率差。图 3 和图 4 显示了在高应变率冲击拉伸测试中得到的典型入射波和透射波波形图，通过接收到的应力波，纤维束的应力应变关系可以通过公式(1)-(3)计算。

100



105

图3 玄武岩纤维束典型的实测波形图

Fig.3 Typical signals of basalt filament on the incident and transmission bar

110

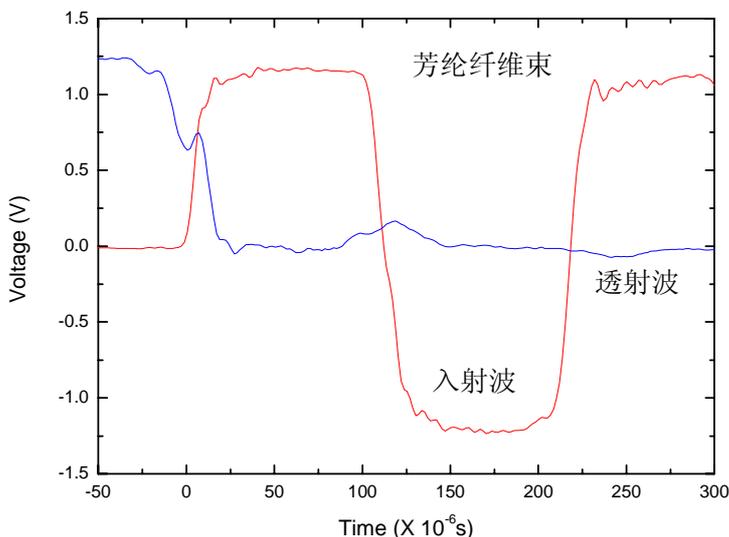


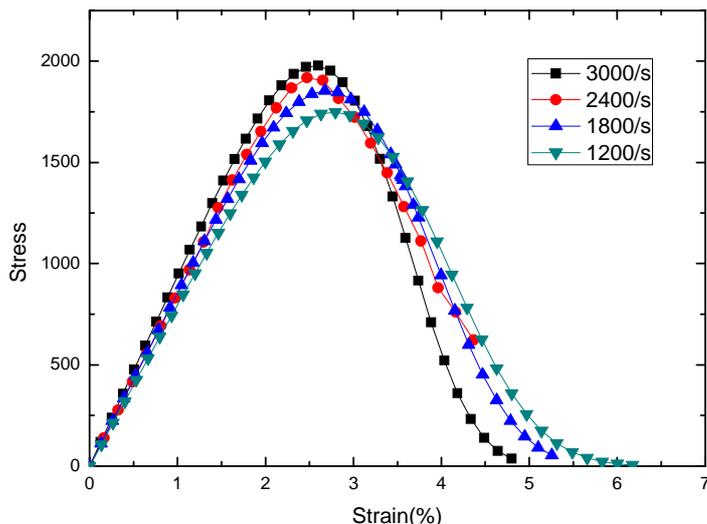
图4 芳纶纤维束典型的实测波形图

Fig.4 Typical signals of Twaron fiber tows on the incident and transmission bar

## 2.1 玄武岩纤维和芳纶纤维力学性能的应变率效应

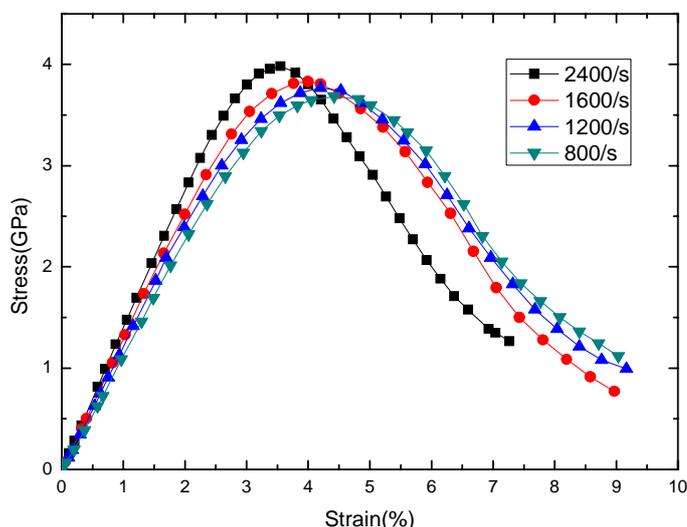
115

在高应变率下,两种纤维束的应力应变曲线如图5和图6所示,从图中可以看出在拉伸初始阶段,纤维束的应力应变呈线性关系,最大应力和刚度随着应变率的增加而呈现增长趋势,并且材料的屈服时间随着应变率的增加而提前,而失效应变整体呈现下降趋势。应变率越大,失效所用的时间越小,失效应力和失效应变都显示出两种纤维都是应变率敏感性材料。从图中可以看出芳纶纤维比玄武岩纤维具有更高的模量和拉伸强度。



120

图5 不同应变率下玄武岩纤维束的应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves of basalt filament at various strain rates



125

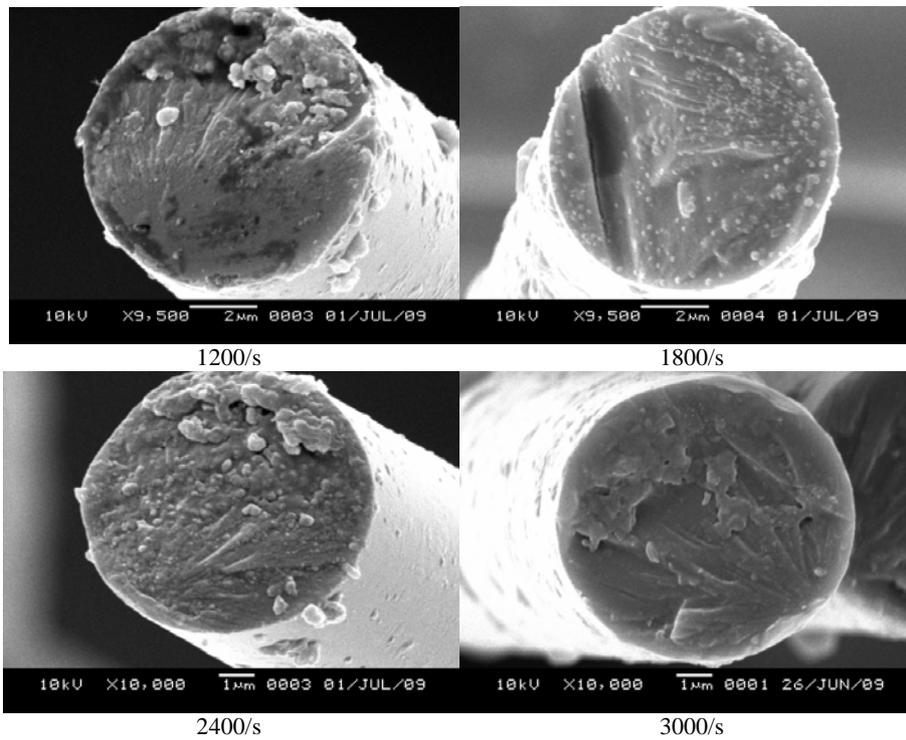
图6 不同应变率下芳纶纤维束的应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curves of Twaron fiber tows at various strain rates

## 2.2 玄武岩纤维和芳纶纤维冲击拉伸断裂机理

图7是玄武岩纤维束在高应变率下破坏模式的SEM照片。从图中可以看出，纤维断裂面和应变率之间具有相关性，随着应变率的增加，玄武岩纤维断裂横截面逐渐规整。相比玻璃纤维，玄武岩纤维的表面相对粗糙，这增加了纤维表面缺陷的几率，使玄武岩纤维的拉伸性能低于玻璃纤维。与玻璃纤维韧性-脆性转变的断裂方式不同，玄武岩纤维的断裂模式为脆性断裂，纤维从截面缺陷处沿着横截面方向开始断裂，直至完全破坏。应变率的提高使纤维断裂所需的时间减少，减少了纤维在缺陷处断裂的几率，因受内部缺陷的控制，许多细小的裂纹来不及生长，就在裂纹严重处被拉断，从而使断裂横截面变得逐渐规整。

图8是芳纶纤维束在高应变率下破坏模式的SEM照片。从图中可以看出，芳纶纤维的断裂方式为韧性断裂。在断裂头端，纤维产生颈缩现象，随着应变率的增加，纤维轴向劈裂加剧并呈现原纤化形状，即产生原纤化效应，这是芳纶纤维在高应变率下的主要破坏模式，纤维的原纤化有利于纤维受拉时吸收外界能量，也是纤维韧性的主要特征。与玻璃纤维相比

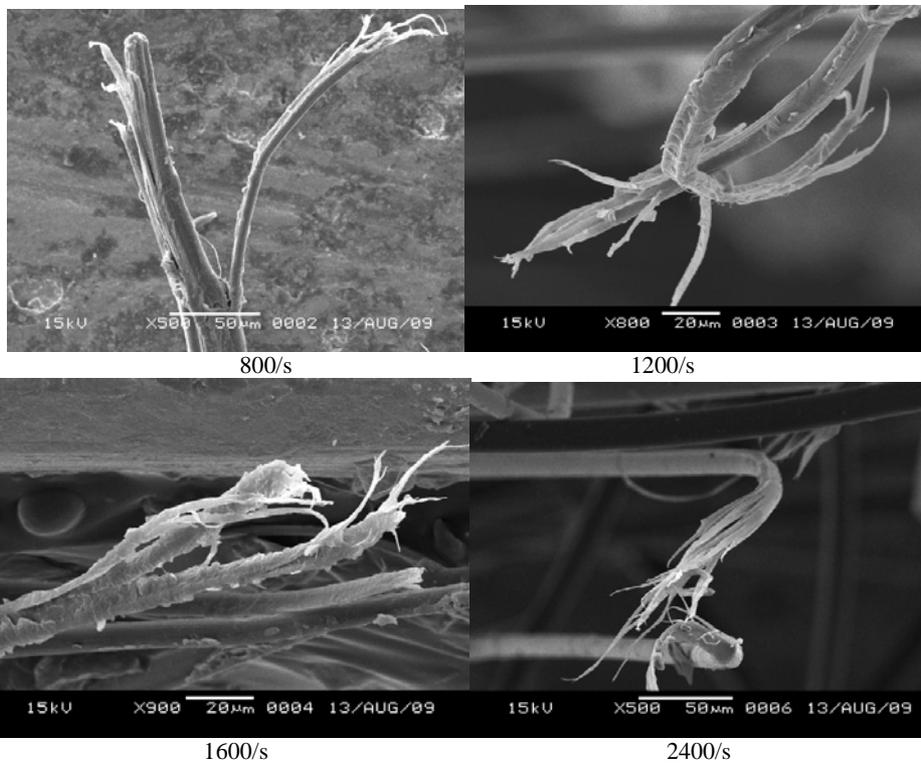
140 [7], 芳纶纤维也没有经历韧性-脆性的转变过程, 芳纶纤维的裂缝从纤维的缺陷开始产生, 并沿着纵向方向产生劈裂, 但是随着应变率的提高, 纤维轴向劈裂的深度却变小。



145

图7 不同应变率下玄武岩纤维束拉伸断裂的SEM照片

Fig.7 The SEM observation on fracture surfaces of basalt fibers at the various strain rates



150

图8 不同应变率下芳纶纤维束拉伸断裂的SEM照片

Fig.8 The SEM observation on fracture surfaces of Twaron fiber tows at the various strain rates

## 155 3 结论

(1) 实验测试了玄武岩纤维束和芳纶纤维束在高应变率下的轴向拉伸性能, 从试样的应力应变曲线中可以看出, 玄武岩纤维和芳纶纤维都是应变率敏感性材料, 当应变率增加时, 纤维的刚度和失效应力都增加, 而失效应变却随着应变率是增加而下降。

160 (2) 玄武岩纤维的断裂模式为脆性断裂, 随着应变率的增加, 纤维的断裂横截面趋于规整; 而芳纶纤维的断裂模式为韧性断裂, 并产生严重的原纤化现象。断裂模式的不同也是两种纤维具有不同的模量和拉伸强度的原因之一。

**[参考文献] (References)**

- [1] 齐风杰, 李锦文, 李传校等. 连续玄武岩纤维研究综述[J]. 高科技纤维与应用, 2006,31(2): 42-46
- 165 [2] Mouritz, AP, Bannister, MK, Falzon, PJ, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites: Part A-Applied science and manufacturing, 1999(30):1445-1461.
- [3] 王岚, 陈阳, 李振伟. 连续玄武岩纤维及其复合材料的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2000, 06 22-24
- [4] Tan VBC, Zeng XS, Shim VPW. Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35 1303-1313
- 170 [5] 孙宝忠, 顾伯洪. 用于纤维和纤维复合材料高应变率力学性能的 Hopkinson 系统[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2004, 30(4): 89-91
- [6] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京理工大学出版社, 1992, 289-310
- [7] Xia YM, Wang X, Yang BC. Brittle-ductile brittle transition of glass-fiber-reinforced epoxy under tensile impact. Journal of materials science letters 12 (18): 1481-1484 1993

175