

# 纤维束动态拉伸力学性能的实验研究

## Experimental Study on the Dynamical Properties of Fibre Bundles

汪 洋, 夏源明 (中国科学技术大学 力学与机械工程系, 合肥 230026)

WANG Yang, XIA Yuan-ming (Dept. of Mechanics and Mechanical Engineering,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[摘要] 对 Polyvinyl-alcohol (PVA), E-glass 和 Kevlar49 纤维束的应变率相关性和能量吸收能力进行了对比, 冲击拉伸实验结果表明: 除 PVA 纤维束的初始弹性模量外, 三种纤维束的力学性能均具有应变率相关性, 其中 PVA 和 E-glass 的应变率敏感性较 Kevlar49 强烈; Kevlar49 的能量吸收能力高于 PVA 并且明显优于 E-glass。

[关键词] 纤维束; 冲击拉伸; 应变率相关

[中图分类号] V 258.3 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 12-0013-03

**Abstract:** The strain-rate dependence and energy absorption ability of Polyvinyl-alcohol (PVA), E-glass and Kevlar49 fibre bundles were compared at the present paper. The tensile impact experimental results show that mechanical properties of three fibre bundles are rate-dependent, except for the elastic modulus of PVA fibre bundles. The rate-sensitive degrees of PVA and E-glass fibre bundles are greater than that of Kevlar49 fibre bundles, while Kevlar49 has the highest energy absorption ability.

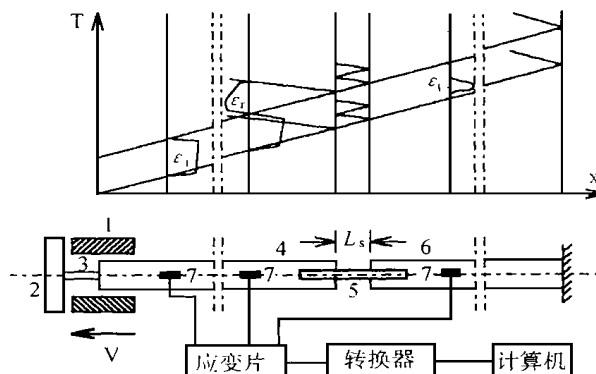
**Key words:** fibre bundles; tensile impact; strain-rate dependence

聚合物基复合材料具有重量轻、比强度高的特点, 目前已被广泛用于装甲防护结构<sup>[1]</sup>, 其中玻璃纤维、芳纶和聚乙稀醇纤维是三种主要使用的增强纤维。一方面, 弹体作用于靶板的瞬间是一个高速冲击的动态过程, 应变率效应不能忽略; 另一方面, 纤维是复合材料结构的主要承载部分, 纤维的性能直接影响着复合材料的弹性性能。因此, 研究高应变率下纤维及纤维束的力学性能是十分必要的。对于 E-glass 和 Kevlar 49 纤维束的冲击拉伸性能, 文献 [2~3] 已有报道。本文对聚乙稀醇 (Polyvinyl-alcohol) 纤维束进行了冲击拉伸实验, 考察了应变率效应对其拉伸力学性能的影响, 并且对三种纤维束的应变率敏感性和能量吸收能力进行了比较。

### 1 冲击拉伸实验

高应变率下的冲击拉伸实验在旋转盘式杆杆型冲击拉伸试验装置<sup>[4]</sup>上进行。旋转盘式杆杆型冲击拉伸试

验装置及其试验原理<sup>[5-6]</sup>的示意图见图 1。当安装在高速旋转盘上的双片锤头 1 打击撞块 2 时, 撞块与输入杆 4 相连的接近理想弹塑性的前置金属短杆 3 便被拉断, 从而在输入杆中产生弹性拉应力方波脉冲。该拉应力脉



1- 锤头; 2- 撞块; 3- 前置金属短杆; 4- 输入杆;  
5- 试件; 6- 输出杆; 7- 应变片

图 1 冲击拉伸试验装置及其试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile impact apparatus  
and its measuring principle

冲作用于试件 5 后，一部分反射回输入杆，一部分透射到输出杆 6 中，用固定在输入、输出杆上的半导体应变片即可分别测得输入、输出杆上的入射波、反射波和透射波应变信号。输入杆和输出杆由相同的材料制成且具有相同的直径。依据一维应力波理论及试件中应力、应变均匀性假设，试件试验段中的平均应力、应变和应变率可以分别表示为：

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{2A_s} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)]$$
$$= E \frac{A}{A_s} \epsilon(t) \tag{1}$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\epsilon_i(\tau) - \epsilon_r(\tau) - \epsilon_t(\tau)] d\tau$$
$$= \frac{2C_0}{L_s} \int_0^t [\epsilon_r(\tau) - \epsilon_t(\tau)] d\tau \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = \frac{C_0}{L_s} [\epsilon_r(t) - \epsilon_t(t) - \epsilon_t(t)]$$
$$= \frac{2C_0}{L_s} [\epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中  $A_s$  和  $L_s$  分别为试件试验段的横截面积和长度， $C_0$ 、 $A$  和  $E$  分别为图 1 中输入杆和输出杆的弹性纵波速度、横截面积和弹性模量， $\epsilon_i(t)$  和  $\epsilon_r(t)$  分别为输入杆上的应变片测得的入射波、反射波应变信号， $\epsilon_t(t)$  为输出杆上的应变片测得的透射波应变信号。

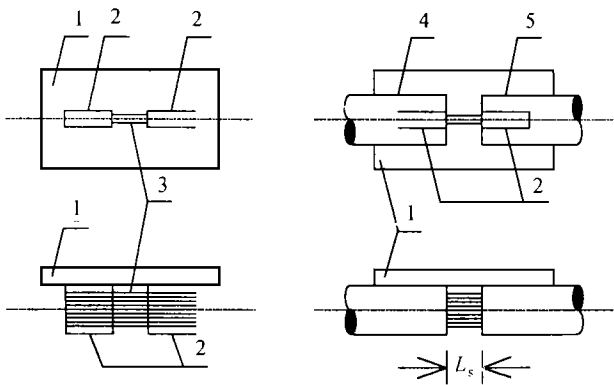


图 2 试件及其连接示意图

Fig.2 Specimen and its connection with bars

纤维束试件的制作及其与试验装置的连接见图 2。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，最后用改性聚丙烯酸胶粘剂将缠绕了纤维束的衬块粘到输入杆、输出杆的叉口中进行常温固化，待固化结束后将辅助板取下即可进行冲击拉伸试验。试件试验段长度  $L_s$  为 8.0mm。PVA 纤维束由日本 Toray 公司生产，密度为 1.28g/cm<sup>3</sup>；Kevlar49 纤维束由美国 Dupont 公司生产，

密度为 1.44g/cm<sup>3</sup>；E-glass 纤维束由上海耀华玻璃厂生产，密度为 2.54g/cm<sup>3</sup>。

2 实验结果与分析

对 PVA 纤维束进行了三组应变率的实验，应变率分别为 270/s、600/s 和 1500/s，实验所得纤维束完整的应力应变曲线见图 3。PVA 纤维束的初始弹性模量  $E$ 、破坏应力  $\sigma_b$ （最大应力）和失稳应变  $\epsilon_b$ （与破坏应力  $\sigma_b$  相对应的应变）在各组应变率下的平均值见表 1。图 4 所示为  $E$ 、 $\sigma_b$  和  $\epsilon_b$  随应变率变化的情况。由图 3~4 及表 1 可以看出，PVA 纤维束的破坏应力和失稳应变是应变率相关的，随应变率的增加而较大增加；但是初始弹性模量几乎不随应变率的增加而变化。线性拟合  $E$ 、 $\sigma_b$  和  $\epsilon_b$  与应变率对数的关系，可得：

$$\begin{cases} E = 1.25 \lg \dot{\epsilon} + 46.51 \\ \sigma_b = 0.334 \lg \dot{\epsilon} + 0.61 \quad 270/s \leq \dot{\epsilon} \leq 1500/s \\ \epsilon_b = 1.521 \lg \dot{\epsilon} + 0.948 \end{cases} \tag{4}$$

图 5~6 及表 1 亦列出了 E-glass 和 Kevlar 49 纤维束的力学性能与应变率对数的关系，两种纤维亦具有应

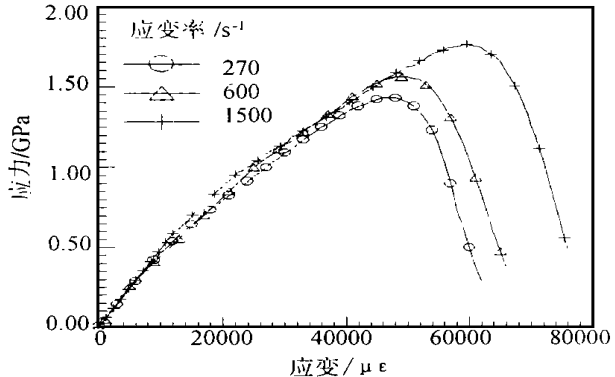


图 3 PVA 纤维束拉伸应力应变曲线

Fig.3 Tensile stress/strain curves for PVA fibre bundles

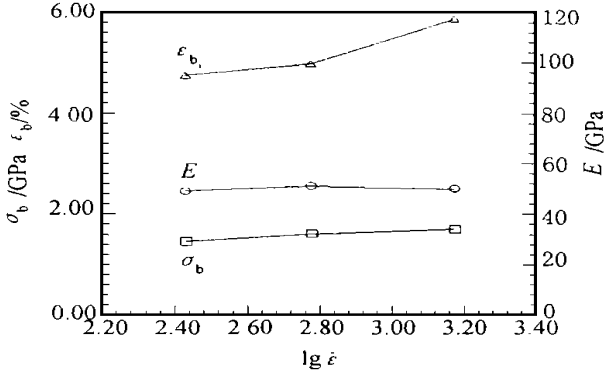


图 4 PVA 纤维束力学性能与应变率关系

Fig.4 Mechanical properties of PVA fibre bundles versus strain rates

表 1 纤维束的动态拉伸力学性能

Table 1 Dynamic tensile properties of fibre bundles

|                       | PVA   |       |        | Kevlar49 |       |        | E-glass |       |       |        |
|-----------------------|-------|-------|--------|----------|-------|--------|---------|-------|-------|--------|
|                       | 270/s | 600/s | 1500/s | 140/s    | 440/s | 1350/s | 90/s    | 200/s | 450/s | 1100/s |
| $E/\text{GPa}$        | 49    | 51    | 50     | 112      | 119   | 125    | 65      | 67    | 70    | 74     |
| $\sigma_b/\text{GPa}$ | 1.46  | 1.61  | 1.71   | 2.94     | 3.02  | 3.08   | 2.07    | 2.37  | 2.56  | 2.80   |
| $\epsilon_b/\%$       | 4.75  | 4.98  | 5.87   | 3.54     | 3.64  | 3.86   | 3.52    | 3.92  | 4.08  | 4.27   |

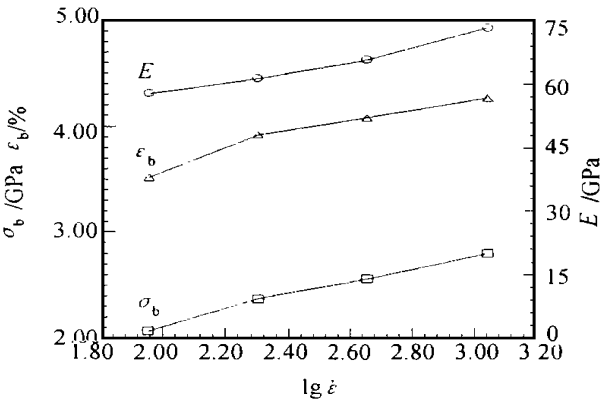


图 5 E-glass 纤维束力学性能与应变率关系  
Fig.5 Mechanical properties of E-glass fibre bundles versus strain rates

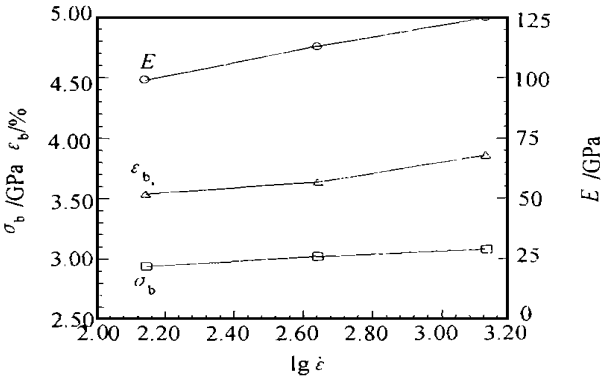


图 6 Kevlar49 纤维束力学性能与应变率关系  
Fig.6 Mechanical properties of Kevlar49 fibre bundles versus strain rates

为确切表征纤维束对应变率的敏感程度, 定义应变率敏感系数  $\alpha_E$ ,  $\alpha_\sigma$  和  $\alpha_\epsilon$  为:

$$\begin{cases} E/E_0 = 1 + \alpha_E \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 \\ \sigma_b/\sigma_b^0 = 1 + \alpha_\sigma \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 \\ \epsilon_b/\epsilon_b^0 = 1 + \alpha_\epsilon \ln \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率,  $E^0$ ,  $\sigma_b^0$  和  $\epsilon_b^0$  分别表示参考应变率下的初始弹性模量、破坏应力和失稳应变。取 140/s 作为参考应变率, 所得应变率敏感系数见表 2。由表 2 可见, 尽管 PVA 的初始弹性模量几乎与应变率无关, 但 PVA 和 E-glass 纤维束的  $\sigma_b$  和  $\epsilon_b$  的应变率敏感性均明显高于 Kevlar49 纤维束, 表现出较强的应变率相关性。

表 2 应变率敏感系数

Table 2 Strain-rate sensitivity coefficients

|                   | PVA  | Kevlar49 | E-glass |
|-------------------|------|----------|---------|
| $\alpha_E$        | 0.01 | 0.05     | 0.06    |
| $\alpha_\sigma$   | 0.11 | 0.02     | 0.12    |
| $\alpha_\epsilon$ | 0.16 | 0.04     | 0.08    |

不同纤维束的能量吸收能力可用纤维束的比断裂应变能 ( $U$ ) 来表达, 亦即纤维束拉伸应力应变曲线下的面积与纤维密度的比值。为了计算上的简便, 本文令  $U = \frac{1}{2} \sigma_b \epsilon_b / \rho$ , 其中  $\rho$  为纤维的密度。图 7 所示为  $U$  与应变率对数的关系。由图可见,  $U$  具有明显的应变率相关性。三种纤维相比较, Kevlar49 纤维具有最高的能量吸收能力, PVA 纤维其次。在相同的应变率下, Kevlar49 纤维束的比断裂应变能至少是 E-glass 纤维束的 1.5 倍。

3 结论

(1) 除了初始弹性模量外, PVA 纤维束的破坏应力和失稳应变是应变率相关的, 随应变率的增加, 均表现

(下转第 34 页)

变率相关性。类似地, 可得如下的线性拟合表达式<sup>[2-3]</sup>:

$$\begin{cases} E = 8.49 \lg \dot{\epsilon} + 47.60 \\ \sigma_b = 0.6561 \lg \dot{\epsilon} + 0.818 \quad 90/\text{s} \leq \dot{\epsilon} \leq 1100/\text{s} \\ \epsilon_b = 0.6631 \lg \dot{\epsilon} + 2.296 \quad \text{E-glass} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E = 13.21 \lg \dot{\epsilon} + 83.79 \\ \sigma_b = 0.142 \lg \dot{\epsilon} + 2.638 \quad 140/\text{s} \leq \dot{\epsilon} \leq 1350/\text{s} \\ \epsilon_b = 0.3251 \lg \dot{\epsilon} + 2.823 \quad \text{Kevlar49} \end{cases} \quad (6)$$

头,一方面由于结构形式造成搭接处的应力集中,另一方面由于中间层合金的用量较大,在搭接圆角处产生焊料堆积,由于堆积处焊料层较厚,Cu、Ni的总量较多,扩散至此处母材而使母材变脆。图3断口照片也表明在搭接圆角处产生约0.2mm的脆性区。尽管所测搭接试样均断于母材,未能测出焊缝的实际强度,但可以肯定其抗剪强度均大于400MPa。为了不过分削弱母材的性能,在中间层合金添加时,一定要控制其用量,避免形成过大的圆角。

表1中对接头数据基本上反映了接头的实际强度。15min保温时接头为钎焊组织,强度较低,断口分析表明其断口为脆性断口,随着保温时间的增加,接头中Cu、Ni元素扩散越来越远,接头中化学成分逐渐均匀化,接头强度提高,脆性减弱。940 / 4h的TLP接头的强度达到907MPa,接近母材水平,断口分析表明,接头具有较好的韧性。

3 结论

(1) BTi35ZrCuNi系非晶态箔中间层合金可成功地用于钛合金的TLP扩散焊。

(2) 所得TLP接头组织为 $\alpha + \beta$ 组织,4h扩散后焊缝区为网蓝状组织,片状组织宽度远大于原始装配间隙。

(3) 随着保温时间的增加,TLP接头的元素分布趋于均匀化,4h扩散后Cu、Ni最高含量分别降至1.63%和0.99%。

(4) 在规范下TLP接头抗拉强度大于900MPa,随着保温时间的增加接头的韧性提高。

参考文献

[1] E. A. 鲍利索娃等著. 钛合金金相学. 陈石卿译. 北京: 国防工业出版社, 1986. 4.  
[2] R. R. wells. Microstructure Control of Thin-Film Diffusion-Brazed Titanium. Welding Journal, 1976, 1.

[作者简介] 程耀永(1968-), 男, 工程师, 专业从事高温合金、不锈钢、钛合金、铝合金及陶瓷等新材料的钎焊和扩散焊工艺研究和钎焊技术开发工作。通讯地址: 北京 81 信箱 20 分箱(100095)

(上接第15页)

出明显的增大趋势。PVA 和 E-glass 纤维束应变率敏感

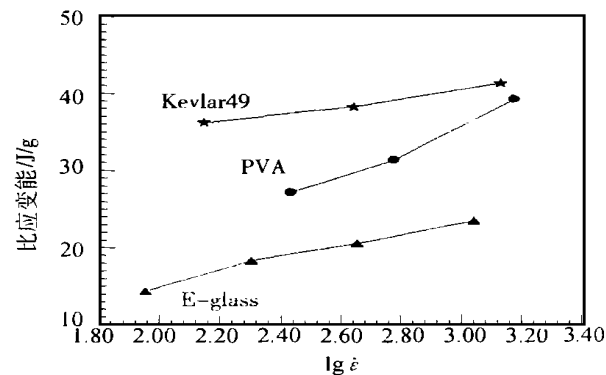


图7 三种纤维能量吸收能力的比较

Fig.7 Comparison of energy absorption ability

性的程度较 Kevlar 49 纤维束强烈。

(2) Kevlar49 纤维具有较高的能量吸收能力, 优于 PVA 纤维, 至少是 E-glass 纤维的 1.5 倍。

参考文献

[1] Weatherall James M., RappaportMark S., Morton James. 34.

T., The outlook for advanced armor materials. 22<sup>nd</sup> International SAMPE Technical Conference. California: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1990, 22: 1070 ~ 1077.  
[2] Xia Yuanming, Yuan Jianming, Yang Baochang. Composite Sci. and Tech., 1994, 52: 499 ~ 504.  
[3] Wang Yang, Xia Yuanming. Composite Part A, 29A (1998), 1411 ~ 1415.  
[4] 夏源明等. 旋转盘冲击拉伸试验装置和冲击拉伸试验技术. 科学技术成果鉴定证书, 编号(92)国科金-鉴字 030 号.  
[5] 姚亚平. 高速旋转盘冲击拉伸试验机的研制及复合材料性能的研究. 中国科技大学硕士论文, 1989.  
[6] 汪洋, 夏源明. 杆杆型冲击拉伸试验装置一维试验原理有效性的论证. 实验力学, 1997, 12: 126 ~ 134.

[作者简介] 汪洋(1968-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为复合材料的动态力学行为。联系地址: 中国科技大学, 合肥 230026