

文章编号: 1001-1455(2003)04-0355-05

# 几种高性能纤维束的冲击动力学性能实验研究\*

陈思颖<sup>1</sup>, 黄晨光<sup>2</sup>, 段祝平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 利用直拉式 Hopkinson 装置研究了碳纤维、无碱 E 玻璃纤维、Kevlar 49/964/964c、Twaron2000、Dyneema Sk66 等纤维的动态拉伸性能。与准静态加载条件下相比, 纤维束的拉伸强度基本与应变速率无关(玻璃纤维除外), 而纤维束的弹性模量和失效应变随应变率的升高而明显变大。从高分子物理以及两种无机纤维的内部微观结构特征对纤维的力学性能与加载速率的关系进行了初步的物理阐释。讨论了实验数据的发散原因。

**关键词:** 材料力学; 冲击力学性能; Hopkinson 装置; 高性能纤维; 高应变率

**中图分类号:** O347.3      **国标学科代码:** 430·1010      **文献标志码:** A

## 1 引 言

先进复合材料越来越广泛的应用, 引起了科学工作者对复合材料高性能和多功能的不断追求。作为增强体的高性能纤维(新型纤维), 在复合材料的强度、刚度等性能的改善中发挥着决定性的作用。从 20 世纪 90 年代起, 形成了研究新型纤维制备技术和工艺的热潮<sup>[1]</sup>。

新型高性能纤维主要包括以碳纤维、特种玻璃纤维等为代表的无机纤维以及以芳纶纤维、超高分子质量聚乙烯等为代表的有机纤维。在新型纤维日益拓展的应用范围内, 用作防护材料可以充分发挥这些材料比强度高和吸能性能优良的特点, 并已经在武装直升机、防弹衣、头盔、复合装甲等方面取得成功应用<sup>[1~2]</sup>。为了充分发挥新型纤维的防护性能、优化防护结构, 人们必须掌握各种新型纤维在冲击载荷作用下的动力学性能。

20 世纪 80 年代, 国内外一些科学工作者便致力于研究高应变率下新型纤维的力学性能。J. R. Brown 等<sup>[3]</sup>、J. E. Ward 等<sup>[4]</sup>用爆炸驱动的方法研究了 Nylon66、Kevlar 29、Spectra 和 PBT 纤维的冲击拉伸性能, 发现冲击加载下各种纤维的强度、弹性模量和延伸率较之于准静态下测得的值均有明显的下降。熊杰<sup>[5]</sup>利用 Hopkinson 拉杆研究了在应变率为  $10^3 \text{ s}^{-1}$  时 PVA7901、Twaron 纤维的动态拉伸性能, 发现了两种纤维强度和模量的正的率相关性。XIA Yuan-ming 等<sup>[6]</sup>也对纤维的冲击拉伸性能以及纤维的统计本构关系进行了富有成效的研究。总的看来, 关于新型纤维冲击拉伸性能的研究还相对薄弱, 实验结果缺乏系统性, 有些结果甚至相互矛盾。

本文中利用直拉式 Hopkinson 装置, 较为系统地研究了碳纤维、无碱 E 玻璃纤维、Kevlar 49/964/964c、Twaron2000、Dyneema Sk66 等纤维的动态拉伸性能, 重点关注纤维主要力学性能的应变率相关性以及一些相关因素的影响, 并对实验结果进行了讨论。

## 2 实验材料

实验用纤维及其基本性能和准静态参数见表 1, 表中  $\rho$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $p_0$ 、 $\epsilon_f$  分别表示纤维的密度、直径、弹性模量、拉伸强度和失效应变。

\* 收稿日期: 2002-07-08; 修回日期: 2003-02-08  
基金项目: 国家自然科学基金项目(10002021)  
作者简介: 陈思颖(1975—), 女, 博士研究生。

表 1 中的碳纤维,类似于日本 Torey Industrial 的 M40。碳纤维是在先进复合材料中应用最广泛的一种多晶新型无机非金属材料,具有高强度、高模量和耐高温等优异性能。高性能的碳纤维主要采用以 PAN (Polyacrylonitrile, 聚丙烯腈) 纤维为先驱体,经高温固相转变而成。

玻璃纤维从 20 世纪 60 年代起就开始在多种飞行器中应用。实用的玻璃纤维是由  $\text{SiO}_2$ 、铝、钙、硼等的氧化物经熔炼、熔融、拉丝、表面浸润等多种工艺加工而成。本文中采用的无碱 E 玻璃纤维,具有较高的强度。

Kevlar 纤维由美国 Dupont 公司在 1972 年率先推出。它属于 PPTA (Polyparaphenylene Terephthalamide, 聚对苯二甲酰对苯二胺) 纤维。PPTA 纤维的制备主要包括缩聚和纺丝。PPTA 纤维除了 Kevlar,还有荷兰 AKZO 公司的 Twaron、俄罗斯的 Terlon、德国的赫司特公司的 Trevar 等。PPTA 纤维的高性能主要归功于:线性刚性伸直链构型;大分子间酰胺基中的氢和羰基结合成氢键,构成高度结晶聚合物;成纤时,大分子在剪应力的作用下沿轴向的取向;微纤结构、皮芯结构等超分子结构存在。

Dyneema 是世界上第一种 UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, 超高相对分子质量聚乙烯) 纤维的商品名。UHMWPE 的密度很低,拥有所有纤维中最高的比强度。它的制备首先是通过 Ziegler Natta 催化剂将乙烯聚合成  $10^6$  以上的相对分子量,然后经过稀溶液凝胶纺丝超倍热拉伸法成纤。在热拉伸过程中,排列整齐的链节分子形成伸直链结晶,具有碳—碳主链化学键,结合强度高,结晶取向度近 100%。

### 3 实验

实验采用的装置为中科院力学所研制的气动控制直接拉伸式 Hopkinson 杆,装置的原理图如图 1 所示。开始实验时,子弹位于发射管靠近压力室的一端,在控制台发出击发的信号后,压力室阀门自动快速开启,在尾部压力的作用下,子弹跨在膛杆上向左加速飞行,与砧杆撞击,在膛杆及与之相连的入射杆上产生右行拉伸波。拉伸波的波形主要由子弹的速度、弹长、砧杆形状与结构确定。实验采用的试样如图 2 所示。试样有效长度 8~30mm,纤维根数 1000~12000。

试样设计参考文献[5]的方案,但为了提高实验效率,在纤维束与输入杆和透射杆之间加了一个转换接头。当然由于螺纹连接的存在会在测试信号上引入新的噪声,不过,实验表明,如果螺纹精度较高,且采用合适的滤波算法,新的噪声并不会对测试结果产生明显的影响。每种材料制备约 15 个样品。

典型的输入和透射波形参见图 3。其中,输入杆上采用的两个对称粘贴的 2mm×3mm 普通应变

表 1 各种纤维的基本参数和准静态性能

Table 1 Selected parameters and quasi-static properties of various fibers studied in this work

纤维	$\rho/(\text{Mg}/\text{m}^3)$	$D/\mu\text{m}$	$E/\text{GPa}$	$p_a/\text{GPa}$	$\epsilon_f$
Twaron 2000	1.44	12.2	105	2.85	0.035
Dyneema	0.97	12	110	2.60	0.052
Kevlar 964	1.44	12	120	2.50	0.040
Kevlar 964c	1.44	12	125	2.90	0.036
玻璃纤维	2.53	8	74	3.50	0.040
碳纤维	1.8	7	320	3.10	0.050
Kevlar 49	1.44	16	115	2.80	0.040

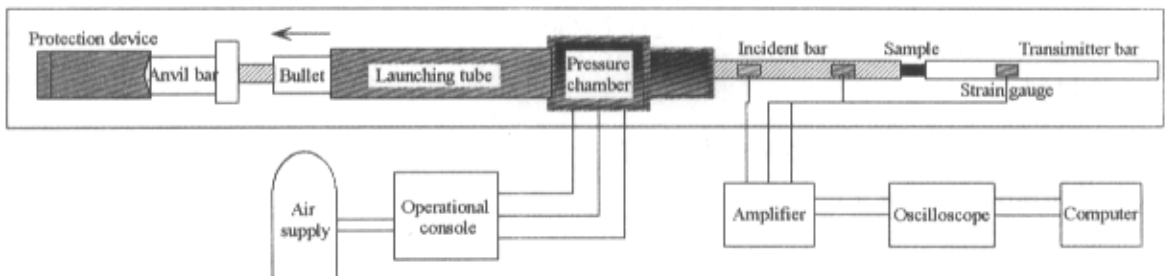


图 1 直接拉伸式 Hopkinson 拉杆

Fig. 1 Sketch drawing of modified split Hopkinson tension bar device

片,其灵敏系数为 2.18,单个应变片的电阻为 120Ω。由于透射信号较弱,透射杆使用了半导体应变片,其电阻为 128Ω,灵敏系数为 116。放大和记录采用了频响为 10<sup>6</sup> Hz 的动态应变仪以及采样率为 500MHz 的 Pm2232 示波器。

对于碳纤维一类的脆性材料,实验中往往通过对砧杆的处理获得上升前沿较缓的输入波。本文在砧杆前部与子弹碰撞的区域,采用了双层套筒结构,外部为马氏体高强钢,内部为软铝或者工程塑料。应力应变关系的计算采用行波法来处理(见图 4),其公式为

$$v_i = c(2\epsilon_a - \epsilon_b + \epsilon'_a - \epsilon'_b), \quad \epsilon_i = \epsilon_b - \epsilon'_a + \epsilon'_b, \quad \epsilon = \frac{1}{l} \int_0^t (v_i - c\epsilon_i) dt, \quad \sigma = \frac{1}{2} EA (\epsilon_i + \epsilon_t) \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 、 $\epsilon$  为试样上的应力和应变, $v_i$ 、 $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_t$  为入射杆连接试样处的质点速度和应变以及透射波信号, $c$ 、 $E$ 、 $A$  分别为拉杆的声速、弹性模量、截面积。 $\epsilon_a$ 、 $\epsilon'_a$ 、 $\epsilon_b$ 、 $\epsilon'_b$  分别为图 4 所示各处的应变。

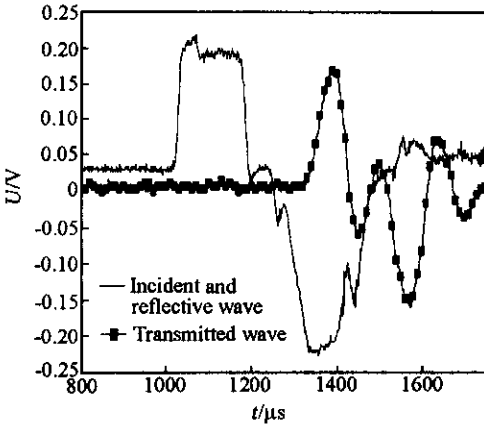


图 3 典型的入射和透射波形

Fig. 3 Typical profiles of stress waves on bars

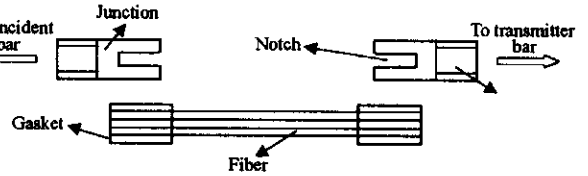


图 2 试样图及其与输入杆和透射杆的连接

Fig. 2 Sample and its connection to Hopkinson bar

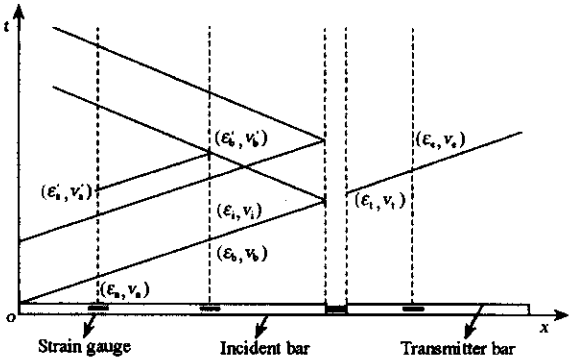


图 4 行波法处理 Hopkinson 杆示意图

Fig. 4 Application of motion wave method in the SHPB/SHTB experiments

### 4 结果与讨论

利用上节中提及的测试和分析方法,得到了前述的碳纤维、玻璃纤维、Kevlar49/964/964c、Twaron 2000、Dyneema 等 7 种纤维的应力应变关系,如图 5 所示。其中的每条应力应变关系曲线是从每种材料约 15 个试样的测试结果中选出的代表性曲线。

应变率对纤维的极限拉伸强度  $p_u$ 、弹性模量和延伸率的影响参见表 2 和图 6~8,表 2 中  $L$ 、 $N$ 、 $n$  分别表示试样的有效长度、单束纤维内的纤维根数和试样数, $\dot{\epsilon}$  表示平均应变率,括号内的数字表示试样包含的纤维束数目。图 6 显示了几种纤维的  $p_u$  在准静态和冲击加载条件下的比较,从中可以发现,除了玻璃纤维的强度有明显下降以外,其余各种纤维的强度对应变率并不十分敏感;Dyneema 纤维的动态强度较之于准静态时略有升高,其余各种纤维在冲击加载下的强度值与准静态相比基本一致或略有下降。另外玻璃纤维强度的下降,有一部分原因应该归结于在动态试样制作过程中的纤维损伤。在图 7 中展示了纤维弹性模量对与加载速率的依赖关系;无一例外地随着应变率的升高而增大。应该说明,利用 Hopkinson 方法测量材料的模量是存在较大的误差的,它受装置本身、应力波形状、试样尺寸等多方面因素的影响。本文中采用平缓上伸的加载波形和行波法处理结果,会在一定程度减小这种误差。更加严格的测试方法还需进一步探讨。

影响聚合物纤维力学性能的因素很多,包括链结构中的近程与远程结构因素、聚集态结构和更高层次的纤维形态结构。文中几种 PPTA 纤维表现出的不同力学性能主要与超分子结构的相异有关。聚

合物纤维弹性模量与加载速率相关的物理机制为:在高速加载时,由于载荷的作用时间较短,能够越过势垒克服障碍产生运动的单元(分子键长与键角、分子构象、链段、高分子间的相互运动等)较少,且尺寸小,材料表现出的刚性增加。

表 2 试样的特征参数和动态力学性能

Table 2 Basic parameters and dynamic behaviors of fiber cluster sample

纤维	L/mm	N	D/ $\mu\text{m}$	n	$\dot{\epsilon}/(10^3 \text{s}^{-1})$	$\rho_u/\text{GPa}$	E/GPa	$\epsilon_f$
Twaron 2000	8, 10, 15	1000	12.2	14(3)	0.6~1.7	2.55	155	0.053
Dyneema	10, 15, 30	1170	12.0	15(2)	0.55~1.4	2.68	152	0.064
Kevlar 964	10, 15	1000	12.0	3(4), 8(2)	0.5~1.9	2.41	142	0.060
Kevlar 964c	10, 15	667	12.1	3(4), 9(2)	0.7~1.7	2.54	197	0.049
玻璃纤维	10, 15	1600	8.0	4(4), 8(2)	0.7~1.6	2.23	141	0.048
碳纤维	10, 15, 30	12000	7.0	17(1)	0.3~1.2	2.75	360	0.018
Kevlar 49	10, 30	1084	16.0	3(3), 8(2)	0.7~1.5	2.52	157	0.044

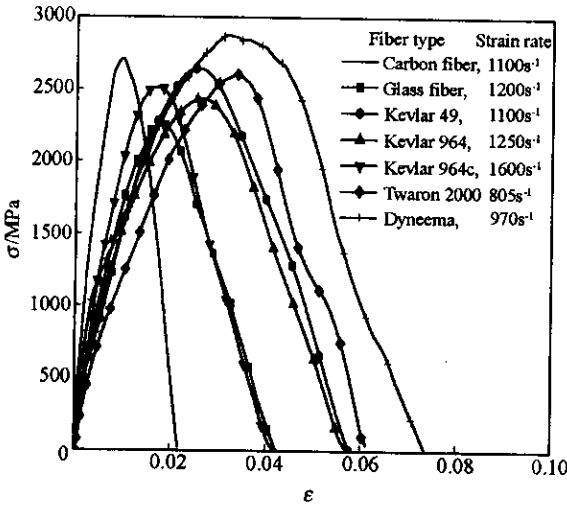


图 5 几种纤维束的动态应力应变关系曲线

Fig. 5 Strain vs. stress curves of various fiber clusters

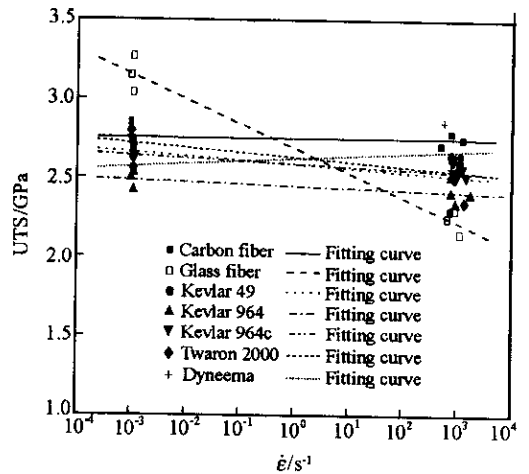


图 6 纤维束拉伸强度的应变率效应

Fig. 6 Rate effect of UTS for different fiber clusters

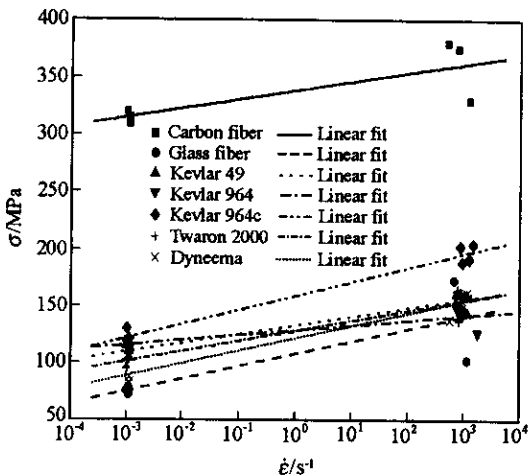


图 7 加载速率对纤维束弹性模量的影响

Fig. 7 Rate effect of elastic Modulus for different fiber clusters

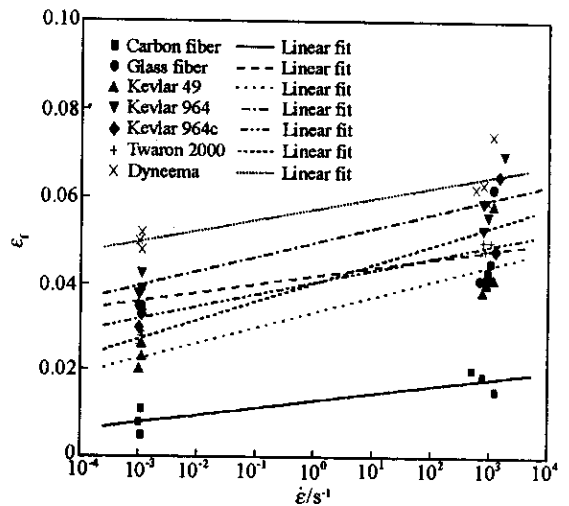


图 8 两种加载条件下的纤维束延伸率

Fig. 8 Elongation of fibers for two loading rates

碳纤维由不完全石墨结晶结构沿纤维轴向排列而成<sup>[7]</sup>。碳纤维的弹性模量与微晶含量及尺寸、微晶层面向沿纤维轴的取向度等微观结构特征密切相关。碳纤维的强度取决于纤维内部的杂质及缺陷的数目和大小,同时纤维的表面状况对纤维强度的影响也较显著。纤维力学性能对应变率的依赖可以尝试用皱褶带模型解释:应变速率较高时,主要变形机制是带状碳原子的展开,而在较低的变形速率下则会伴随一定数量的原子带群的滑移。

玻璃纤维一般用 SiO<sub>2</sub> 四面体构成的“微晶子”与“网络结构假说”来描述微结构特征。对于这样的结构,其变形和破坏的时间相关性没有可信的机制。

图 8 显示纤维束的延伸率(失效应变)在不同加载条件下的取值。可以发现每种纤维的延伸率在冲击加载下都有不同幅度的上升。综合分析图 6、8,可以看出有机纤维的抗冲击性能较好,碳纤维和玻璃纤维的冲击吸能能力相对较差。需要说明的是,本文反映的是纤维束本身的抗冲击性能,不等同于单根纤维的性能。制成后的复合材料的综合冲击性能则还与基体以及纤维与基体的相互作用等因素有关。

本文中实验数据的分散性较大,作者加大了试样量提高数据的可信度。造成实验数据分散的如下几个重要因素是:(1)手工制作试样过程中带来的纤维的损伤;(2)纤维束与连接头的粘结情况及纤维束的排列;(3)测试系统本身的因素等;(4)纤维材料性能本身存在较大的分散性。

## 参考文献:

- [1] 罗益锋,冯春祥. 新型增强体[A]. 吴人洁. 复合材料[C]. 天津:天津大学出版社, 2000:26-85.
- [2] 李成功,傅恒志,于翹. 航天航空材料[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [3] Brown J R, Egglestone G T. Ballistic properties of composite materials for personal protection[R]. AD-A215 100, 1989.
- [4] Ward J E, Koza W. Hi-tech fibers for improved ballistic protection[A]. Science Symposium Proceedings[C]. Paris, France: Natick Research, Development and Engineering Center, 1986: 279-305.
- [5] 熊杰. 防弹层压复合材料及其动态冲击和侵彻性能研究[D]. 上海:中国纺织大学,1998.
- [6] XIA Yuan-ming, Yuan J M, Yang B H. A statistical model and experimental study of the strain-rate dependence of the strength of fibers[J]. Composites Science and Technology, 1994,52(4):499-504.
- [7] Donald J B, Bansel R C. Carbon fibers[M]. Beijing: Science Press, 1989.

## Experimental study on the dynamic properties of high strength fiber clusters

CHEN Si-ying<sup>1\*</sup>, HUANG Chen-guang<sup>2</sup>, DUAN Zhu-ping<sup>1</sup>

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *National Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract:** Dynamic behaviors of several kinds of high strength fibers, including Kevlar, UHMWPE, glass fibers, carbon fibers etc., were studied experimentally with split Hopkinson tension bar. The effect of strain rate on the modulus, strength, failure strain and failure characteristics, under impact loading, was analyzed with the measured stress vs. strain curves and results were discussed in terms of the mechanism of high velocity deformation in fibers. The present study will benefit to understand the energy absorption mechanism and to build up the constitutive law of composite plates reinforced by high strength fibers.

**Key words:** mechanics of materials; dynamic behaviors; split Hopkinson tension bar; high strength fiber; high strain rate

\* Corresponding author; CHEN Si-ying; E-mail address: huangcg@imech.ac.cn; Telephone: 101-62622876