第7卷第4期 复合材料学报 Vol.7 No.4
1990年 12月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA December 1990

纤维束的冲击拉伸实验研究

董立民 夏源明 杨报昌

中国科学技术大学

摘要：本文所述实验采用岛津DT-5000型万能实验机和自行研制的摆锤式杆-杆型冲击拉伸试验装置对玻璃纤维，Kevlar49及碳纤维束做了应变率从10^{-4}到$10^{2}s^{-1}$量级之间的冲击拉伸实验。首次得到纤维束在高应变率下的拉伸应力应变曲线。结果表明：玻璃纤维的强度，极限应变以及临界应变能密度对应变率非常敏感，弹性模量也随应变率的升高而增加。Kevlar49纤维对应变率不太敏感，而碳纤维的性能则对应变率不敏感。

关键词：纤维束，动态力学性能，冲击拉伸

一、引 言

一般说来，一种材料在高应变率或高速载荷下的力学性质常常同静态条件下不同，〔1，2,3〕做了应变率在$10^{3}s^{-1}$时织物增强及单向纤维增强树脂的冲击拉伸实验，得到相应的应力应变曲线，一致认为：玻璃纤维增强树脂在高应变率下强度增加，断裂应变增大，而碳纤维增强树脂则对应变率不敏感。

若从细观角度进一步研究复合材料的动态力学性能，则需要知道各组分材料，尤其是纤维材料的动态性能。基于实验技术的困难，这方面的数据非常少见。因而实际中常由复合材料测得的数据和基体性质反过来推算纤维的性质〔4〕。这样的结果实际上既有纤维的性质，又有纤维同基体界面的性质，同复合材料的复合效应耦合在一起，使得细观力学的研究复杂化了。尽管如此，A.Rotem和J.M.Lifshitz在落锤冲击机上做了E玻璃纤维束的冲击拉伸实验〔5〕，得到了应变率为5—30s^{-1}的应力对时间的曲线，只是由于应变测量条件的限制，无法得到相应的应力应变曲线，因而试验的应变率只能是一种名义上的。其结果表明：E玻璃纤维的冲击强度比静态值提高两倍。C.E.Morrison和M.G.Bader〔6〕从实用的角度做了Kevlar纤维纱的横向冲击实验，得出Kevlar纤维的动态模量与冲击速度无关，但其模量值比静态常规实验值低30%。J.Harding曾作出以下推断：一般说来碳纤维及Kevlar纤维的强度及断裂应变不会有明显的应变率相关性〔7〕。

本文1989年11月收到，国家自然科学基金资助课题

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

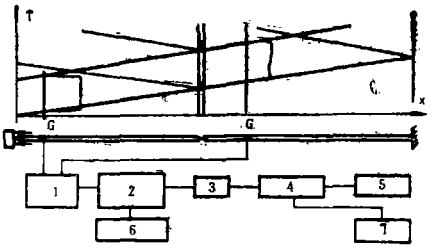
本文的目的是通过冲击拉伸实验来研究应变率对纤维力学性能的影响。本文采用摆锤式杆——杆型冲击拉伸试验装置（一种改进的SHPB实验装置[8]）和岛津DT—5000型万能材料试验机，对玻璃纤维，Kevlar-49及碳纤维做了应变率在10^{-4}—$10^{2}s^{-1}$之间的实验，得到了高应变率下的应力应变曲线，以及应力、应变和应变率对时间的曲线。

二、实验装置及测试原理

1． 静态实验采用岛津DT—5000型万能材料试验机，加载速度0.005—500mm/分。

2． 冲击实验是在摆锤式杆—杆型冲击拉伸试验装置上进行的，装置示意及测量原理如图1。

图中两长杆（输入杆和输出杆）中间所夹的是试件。输入杆与撞块之间夹着一个接近理想塑性的金属短杆。实验时用摆锤打击撞块使金属短杆尽快达到塑性并断裂。产生一个沿输入杆右行的弹性方波，方波的高度及宽度取决于金属短杆的直径，长度及摆锤的冲击速度。该方波作用于试件后，一部分透射到右边的输出杆中，用固定在两长杆上的应变片G测得输入及输出杆上的应变信号ε_I和ε_T随时间t的变化曲线。根据应变片距试件的位置将信号沿时间轴平移，并用下列各式计算试件中的应力 σ_S，应变ε_S和应变率$\dot{\varepsilon}_S$。这些公式是由一维简单波理论并根据在试件中应力均匀分布假定下得到的。



1.超动态应变仪；2.TCCJ瞬态波存；3.接口
4.IBM-PC；5.打印机；6.记录仪；7.绘图仪
图1 测试原理和Lagrange（x，T）图

$$\varepsilon_S(t)=\frac{2C_0}{l_S}\int_0^t[\varepsilon_I(\tau)-\varepsilon_T(\tau)]d\tau \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}_S(t)=\frac{2C_0}{l_S}[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_T(t)] \tag{2}$$

$$\sigma_S(t)=E_0\frac{A_0}{A_s}\varepsilon_T(t) \tag{3}$$

式中A_S，A_0分别为试件及导杆的截面积，l_S为试件实验段长，C_0为导杆弹性纵波波速。

由于采用半导体应变片测量导杆上的应变，信噪比非常高。动态应力的测量误差小于2％，动态应变的测量误差小于4％。静态实验中应力测量误差小于1％，应变测量误差小于4％。这样模量的测量误差可小于6％。

三、试件及其与实验装置的联接

1， 材料：玻璃纤维采用南京玻纤院的高强2号，碳纤维是上海碳素厂的产品，Kev-

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

lar-49系进口产品。

2. 试件的制作与联接：见图 2 和图 3 。

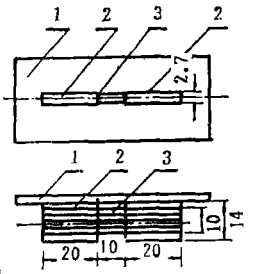


图 2　试件尺寸

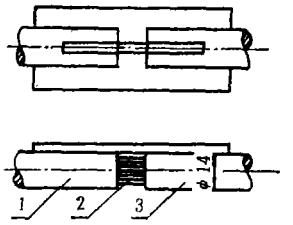


图 3　试件与装置的联接

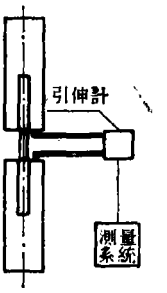


图 4　静态实验测量示意图

图 2 中 1 为辅助板，2 为衬块，3 为纤维束。将衬块 2 垂直地粘接在辅助板 1 上，然后将纤维束平行地缠绕在衬块上，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1与输出杆3的叉口中(图3）进行常温固化，实验前将辅助板取下。试验段纤维有20束左右双排排列。

为了便于比较，静态试件的粘接方式和外形均与动态试验时相同。只是将动态时的输入、输出杆换成截面相同的两根较短的金属连杆，并将连杆夹在静态试验机上，用夹式引伸计来测量两金属杆端部的相对位移（图 4），并把它作为试件试验段的相对位移。

四、实验结果

图 5 中的 6 组曲线是由计算机直接绘出的，包括原始曲线、根据应变片距试件的位置在时间轴上平移（计算前的预处理）后的曲线、时间对应力、应变及应变率和应力应变曲线等，其中应变率对时间的曲线中的水平直线段为平均应变率的大小及计算平均值的起点和终点。应力应变曲线起始处有一小段十分平缓的曲线，这是因为纤维初始受拉时长度不十分一致引起的，在以后的处理时被修正过来了。

图 6 、7 和 8 给出了玻璃纤维在应变率分别为8.3×10^{-4}（静态），50和$200s^{-1}$时每次实验的应力应变曲线，从中可看出，实验曲线重合较好，但强度值离散较大。需要说明的是在静态实验曲线里，曲线的终点只是断裂失稳过程的起始值。这是因为对于失稳这样一个快速过程，静态试验和测试系统的响应跟不上，无法得到整个断裂过程的描述，而动态实验中则可记录到整个过程。强度值的离散多半是由于单根纤维断裂应变不一致以及试样中单根纤维初始长度不太一致造成的。因而强度低的曲线常会有一段较为平缓的水平曲线，总的应变能并不减少很多。从这些曲线中可大致看出应变率对强度、模量及极限应变都有较大影响。

图 9 、10分别是Kevlar-49纤维束在应变率为8.3×10^{-4}（静态）和$170s^{-1}$时得到的应力应变曲线，其离散度较大。从这些曲线上可看出动态曲线的模量，强度比静态有所提高，但最大应力对应的应变比静态值有所降低。

图11、12是碳纤维在应变率分别为8.3×10^{-4}（静态)和$90s^{-1}$时每次实验的应力应变曲

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

线。

由玻纤、Kerlar-49和碳纤维动态断裂后的状态，可看出玻纤冲断后成毛刷状完全与另外两种纤维不同。静态断裂的情况基本与动态时一致。

图13、14和15分别为玻纤、Kevlar-49和碳纤维在不同应变率下的平均应力应变曲线。其曲线终点是某几条曲线应力最大值的平均值。

附表是实验结果。图16则是由该表制成的最大应力σ_b、模量E_f、与σ_b对应的应变ε_b、最大应变ε_{max}；以及临界应变能密度U_c分别对应平均应变率$\dot{\varepsilon}$的曲线。同时图16中也标出了各个数值的离散范围。其中E_f是初始值，$\dot{\varepsilon}$是ε由曲线起点到ε_{max}之间的平均值。动态条件的ε_{max}是选应力下降到$\frac{1}{2}\sigma_b$时对应的应变，它只有一般参考意义。U_c定义为$\frac{1}{2}\sigma_b\varepsilon_b$（只是为了计算简便）。表中$\delta_F$是F（F可以是$\sigma$，$\varepsilon_b$，$E_f$等）的动态值与相应静态值的相对变化值。

五、结果分析及结论

综合上述各图、表可以看出：

1. 玻璃纤维是应变率敏感材料。当应变率由$8.3\times10^{-4}s^{-1}$提高到$192s^{-1}$时，σ_b提高了59%，ε_b为31.9%，U_c110%，E_f12.1%。当应变率由$54s^{-1}$提高到$192s^{-1}$时σ_b提高了12%，ε_b18%，U_c50%，而模量E_f仅增加2.6%。在图中几乎分辨不出来，可能是应变率变化太小，即模量受应变率影响较小的缘故。

2. Kevlar-49纤维基本上是应变率不太敏感的材料。随着应变率增加，其E_f，σ_b略有增加，ε_b反而减小，使得U_c基本不变——这似乎是应变率不敏感的迹象。但是由图14看，尽管两条曲线初始斜率相近，随着应力增加，两条曲线也就分开了。由此可见应变率对该材料的影响不太明显。

3. 碳纤维几乎是应变率无关的材料。在图15上，动态与静态的应力应变曲线几乎重合。

最后应该说明实验用的纤维多半不是无损伤的，如碳纤维曾经过电沉积处理。且实验是对多股纤维进行的，因而有些静态值比一般典型单根纤维纱线的静态值偏低一点儿。好在对动态实验与静态实验，除加载速率不同外其他条件基本相同。

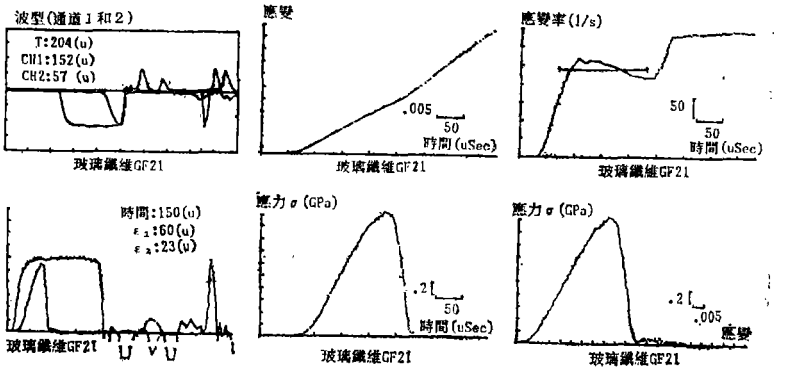


图5 GF纤维束冲击实验曲线

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

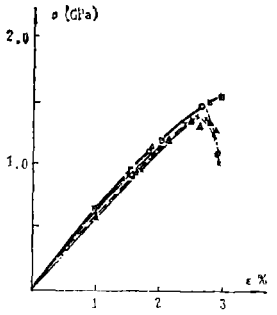


图 6　GF纤维束(静态)

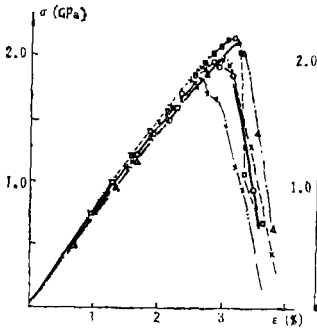


图 7　GF纤维束(应变率为$50s^{-1}$)

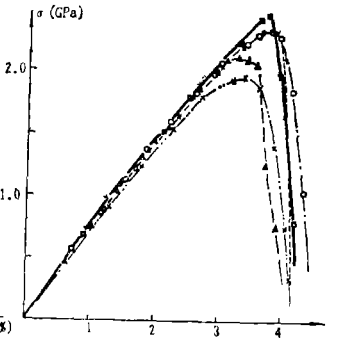


图 8　GF纤维束(应变率为$200s^{-1}$)

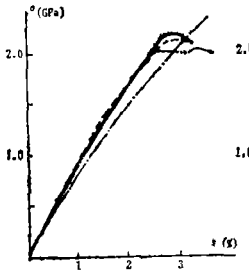


图9 KF纤维束静态拉伸应力应变曲线

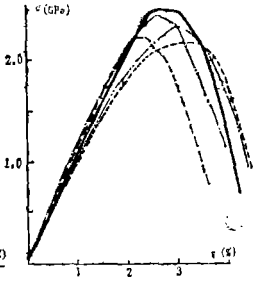


图10　KF纤维束冲击拉伸应力应变曲线

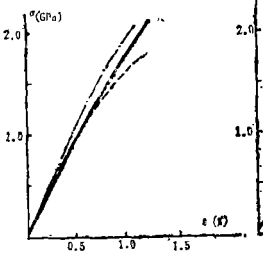


图11　CF纤维束静态拉伸应力应变曲线

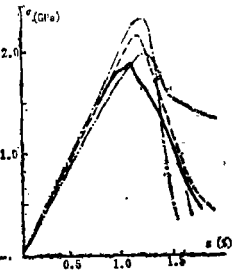


图12 CF纤维束冲击拉伸应力应变曲线

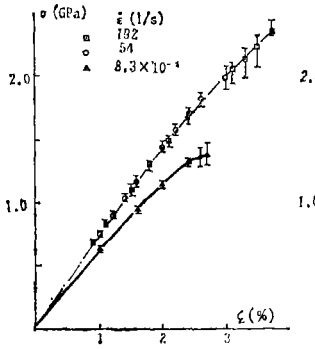


图13　GF纤维束冲击和静态的平均应力应变曲线

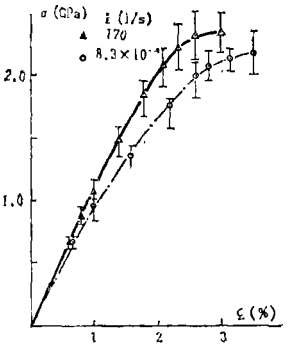


图14　KF纤维束冲击和静态的平均应力应变曲线

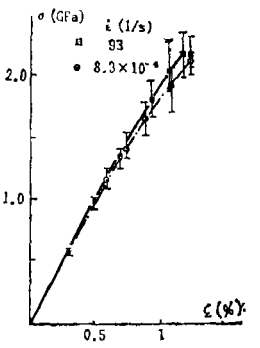


图15　CF纤维束冲击和静态的平均应力应变曲线

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

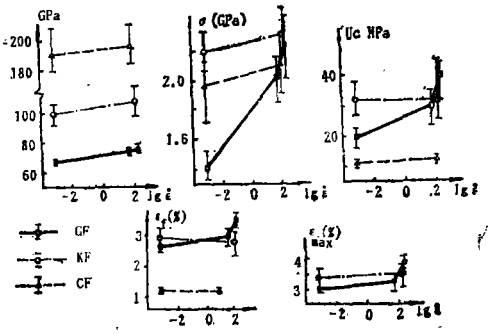


图16

附表 实验结果

材料	试件数	$\dot{\varepsilon}$ sec^{-1}	E_f GPa	σ_b GPa	ε_b %	ε_{max} %	*U_c MPa	**δE_F %	$\delta\sigma_b$ %	$\delta\varepsilon_b$ %	$\delta\varepsilon_m$ %	δU_c %
玻纤(高强)	5	8.3×10^{-4}	67.2	1.41	2.63	3.00	18.6					
	5	54	73 4	2.01	2.94	3.23	29.7	9.23	42.6	11.8	7.67	59.7
	5	192	75.3	2.24	3.47	3.87	39.0	12.1	59.0	31.9	29.0	110
Kevlar 49	4	8.3×10^{-4}	100	2.19	2.91	3.35	32.0					
	5	170	107	2.31	2.72	3.51	31.6	7.0	5.5	−6.5	4.8	−1.25
碳纤	3	3.3×10^{-4}	190	1.96	1.18		11.3	2.1	7.5	−2.5		7.1
	4	93	194	2.10	1.15		12.1					

* $U=\frac{1}{2}\sigma_b\varepsilon_b$

** $\delta F=\frac{F_{冲击}-F_{静}}{F_{静}}$ $F=\varepsilon_b$, ε_{max}, σ_b等

参 考 文 献

〔1〕 K.Kawata, S.Hashimoto, N.Takeda, Prog. in Sci.and Eng. of Composites, ICCM4, Tokyo, pp829—, 1982

〔2〕 J.Harding, L.M.Welsh, ICCM4, Tokyo, pp845—, 1982

〔3〕 Y.M.Xia, B.C.Yang, L.M.Dong, D.X.Jia, Proc.of ISCMS, Beijing 1986, pp994—

〔4〕 R.F.Gibson, Shock Vib.Dig., 19,PP13—, 1987

〔5〕 A.Rotem, J.M.Lifshitz, Proc.26th Annual Tech.Conf , SPI Reinforced Plastics/Composites Divison (Society of Plastics Industry, New York)Paper10G, 1977

〔6〕 C.E.Morrison, M.G.Bader, ICCM5, pp1533—, 1985

〔7〕 J.Harding, Report No.OUEL 1627/86, Material at High Strain Rates, Ed. J.Z.Blazynski Appl.Sci.Pubishers, 1986

〔8〕 夏源明，杨报昌，贾德新，董立民，“摆锤式杆-杆型冲击拉伸实验装置和低温动态测试技术”《实验力学》1989,Vol.4 No.1 P57

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

TENSILE IMPACT TESTING OF FIBER BUNDLES

DONG Limin, XIA Yuanming, YANG Baochang

Department of Modern Mechanics, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

ABSTRACT

A series of tensile experiments with the testing strain rate ranging from 10^{-4} to 10^{2} S^{-1}, were performed for glass fibre, kevlar-49 and carbon fibre bundles by DT-5000 Material Testing Machine and a self-designed Pendulum Tensile Impact Set-up. It was the first time to obtain the stress-strain curves of above materials at high strain rates. The results show that for glassfibre the strength, fracture strain and critical strain energy density are very sensitive to strain rate, and the elastic modulus increases with the rising of the rate. For the kevlar-49 fibre, the strain rate sensitivity is reduced; And for the carbon fibre, however, the mechanical properties are independent of the strain rate.

Key words: fibre bundle, dynamical behavior, tensile impact

复合材料文摘：

Composite Structures

Vol.9, No.1 (1987), p.1, p.19, p.37, p.53, p.69

半径方向受压缩载荷的铺层圆板

本文进行了对称铺层板的实体及环状圆板的屈曲解析，铺层板的纤维为一般取向。提出的解法基于盖勒金（Galerkin）和修正的盖勒金方程式。压缩载荷在圆板的边缘上对称地作用于面内，该圆板以种种方法沿边界得到支持。

本论文首先叙述适用方程的导出问题，随后就得到的数值结果加以讨论。

受音响励振屈曲后复合板的动态特性

本论文采用Rayleigh-Ritz法，求出受同样单轴面内压缩屈曲后复合板（CFRP）在音响励振下的变形图样。通过固有解析，评价以种种状态屈曲的板的共振频率和类型，将其理论结果与实验结果进行比较分析。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net