文章编号: 1001-1455(2014)04-0476-07 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)04-0476-07

一种绸布的冲击拉伸性能实验*

赵 磊,李玉龙,陈 煊
(西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072)

摘要: 采用改进的分离式 Hopkinson 拉杆测试技术对低强度材料进行动态拉伸。该装置采用铝杆作为透射杆,并且透射杆采用半导体应变片。针对一种芳纶绸布材料,进行了试样两端应力平衡、实验速度、半导体应变片与电阻应变片测量的验证,获得了不同速度下被测材料的本构曲线,并通过高速照相机清楚地观察了试样的整个破坏过程。实验结果表明,设计的实验方法行之有效。

关键词: 固体力学;动态拉伸;SHTB 改进装置;芳纶绸布
中图分类号: O347.1 **国标学科代码**: 1301515 **文献标志码**: A

低强度材料或低波阻抗材料由于抗冲击缓冲吸能性能,被广泛应用于仪器设备在运输和搬运过程中的破坏防护、结构内部的填充和重要物品的缓冲保护,因此,在航空航天、包装运输、军事防护和汽车等各领域内起到非常重要的作用。一些低强度材料还应用于复合材料的构造中,在复合材料中起到主导作用;还有一些在工程结构设计中时常用到;很多聚合物都是低强度材料。所以,研究低强度材料在动态冲击下的本构行为是非常有必要的。

由于低强度材料的特点,使运用传统的 Hopkinson 杆技术不能获得有效可用[1]的实验结果。对这类材料的加载过程中,很难保证试样中的力平衡或变形均匀性[2],而且,测量的应力信号微弱,使真实信号的误差偏大。针对以上两个问题,L. Wang 等[3]建议改用波阻抗较低的聚合物杆取代传统的金属杆;H. Zhao 等[4]则采用弹性模量较低的黏弹性杆测试了泡沫塑料的动态压缩应力应变曲线。而采用黏弹性杆,既需要考虑黏弹性波的弥散,又需要考虑黏弹性波的衰减,数据处理十分复杂;A. Sharma 等[5]使用高速摄像机和黏弹性分离式 Hopkinson 压杆技术对低强度材料在动态载荷下的行为进行了研究;W. Chen 等[6]采用空心铝杆作为透射杆,试图减小压杆与试样之间的波阻抗差距,但信号的增益仅在一个量级以内。胡时胜等[7]采用半导体应变片技术测量透射波信号,可以将信噪比提高 50 倍以上,但半导体应变片的缺点是电阻的变化与应变之间的关系随温度变化。王宝珍[8]对肌肉动态拉伸力学性能进行研究,通过离散傅里叶变换编写了计算黏弹性杆波传播系数的程序,并由实验和数值计算得到了尼龙杆的衰减系数和相速度,验证了该程序在修正弥散和衰减效应问题上结果可信,可是这一方法不容易推广。X. Nie 等[9]在对三元乙丙橡胶进行实验时,对 Hopkinson 拉杆进行创新性改变:使用短管状式样减小轴向径向惯性影响,对脉冲整型。

本文中,采用分离式 Hopkinson 拉杆的测试技术,采用铝杆作为透射杆,并且使用半导体应变片测量数据,通过一种芳纶绸布材料,验证这种实验方案的可行性。

1 实 验

芳纶绸布材料的动态拉伸实验在分离式 Hopkinson 拉杆系统进行。试样由芳纶绸布裁剪制成,尺寸为长度 46 mm、宽度 11 mm。

目前,分离式 Hopkinson 拉杆已广泛地应用在测定材料动态力学行为的研究中,它通过调节气炮气压及使用不同长度的子弹实现不同应变率的加载,原理如图 1 所示。开始加载时,气室推动子弹撞击

* **收稿日期**: 2012-11-29; **修回日期**: 2013-05-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(10932008,11102166);高等学校学科创新引智计划项目(B07050)
作者简介: 赵 磊(1987—),男,硕士。

入射杆端处的凸缘，在凸缘中产生压缩应力波，压缩应力波在自由端面反射成为拉伸应力波，然后，拉伸波沿拉杆向试样传播，到达入射杆与试样接触面时，一部分入射波反射回入射杆中，另一部分经过试样传入透射杆。利用入射杆和透射杆上的应变片可以精确地测出入射波 ε_i、反射波 ε_r 和透射波 ε_t 信号，这些信号经过超动态应变仪传给波形存贮器，最后将数据存入计算机并进行处理。

在获得入射波 ε_i、反射波 ε_r 和透射波 ε_t 数据后，根据一维应力波理论[10]，试样的应力、应变、应变率历史可以分别用下列公式计算：

$$\sigma_s = E\left(\frac{A_b}{A_s}\right)\varepsilon_t, \qquad \varepsilon_s = -\left(\frac{2c_0}{L_s}\right)\int_0^t \varepsilon_r \mathrm{d}t, \qquad \dot{\varepsilon}_s = -\left(\frac{2c_0}{L_s}\right)\varepsilon_r$$

式中：L_s 为试样的长度，E 和 c_0 分别为压杆材料的弹性模量和弹性波波速，A_b 和 A_s 分别为入射杆/透射杆和试样的横截面积。

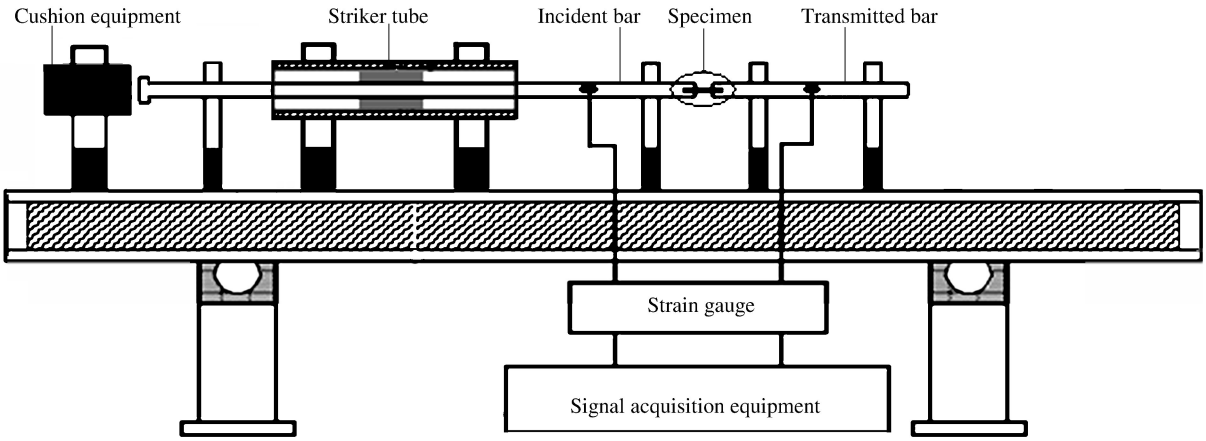

图 1　分离式 Hopkinson 拉杆原理图

Fig. 1　Scheme of split Hopkinson bar

实验中，采用钢杆作为入射杆，铝杆作为透射杆，并且采用半导体应变片采集数据。为了将芳纶绸布固定在杆子上，采用了加强垫片，针对入射杆和透射杆垫片也分钢制和铝制两种，长度 18 mm、宽度 11 mm、厚度 1 mm。先使用胶黏剂(DG-3S 环氧胶黏剂)将试样左右两端上下面分别黏贴一对钢制和铝制垫片。考虑试样与垫片边缘接触，冲击加载时有可能出现应力集中问题，因此，给垫片边缘倒圆角。黏贴垫片的试样，室温放置 24 h 凝固。再使用黏粘剂将凝固的试样固定在杆子上，室温放置 24 h 凝固后，进行实验。考虑实验需耗时间，使用了转接头(见图 2)，转接头也分钢制和铝制两种，钢制转接头与入射杆连接，铝制转接头与透射杆相连接，开槽尺寸为长度 18 mm、宽度 11 mm、厚度 3 mm。先将黏贴垫片的试样与转接头胶黏凝固后，再将转接头分别于钢杆和铝杆连接，然后进行动态拉伸实验。图 3 是试样连接后的照片 。

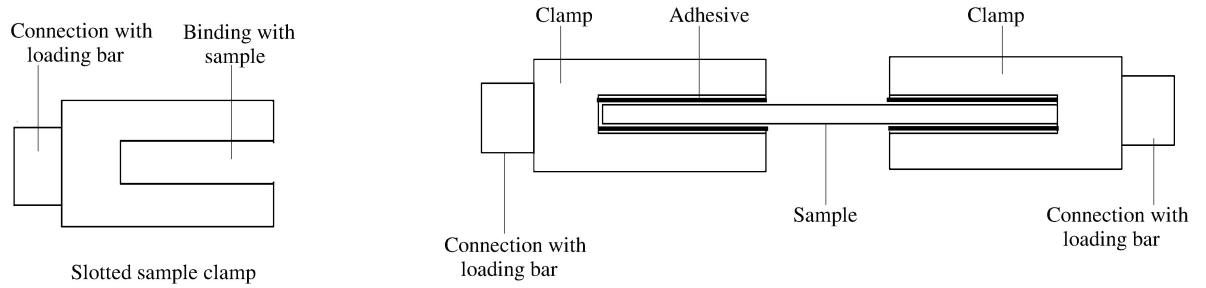

图 2　转接头与试样连接示意图

Fig. 2　Sketch of the connection between adapter and sample



图 3 试样连接照片

Fig. 3 Photo of sample connection

2 结果与讨论

2.1 有效性验证

由于低强度材料的低模量和低强度特点，有必要进行一系列的验证，确保实验的有效性。分别对试样两端应力平衡、冲击速度以及半导体应变片与电阻应变片的对比进行了验证。

2.1.1 应力平衡

比较与入射杆和透射杆黏接在一起的试样两端的载荷曲线 P_1 和 P_2，如图 4 所示：$P_1=(\varepsilon_i+\varepsilon_r)E_iA_i$，$P_2=\varepsilon_tE_tA_t$。其中，$\varepsilon$、$E$ 和 A 分别表示弹性杆的应变、弹性模量和横截面积，i、r 和 t 则分别表示入射、反射和透射。从图 4 可以看到，试样两端的载荷基本平衡。

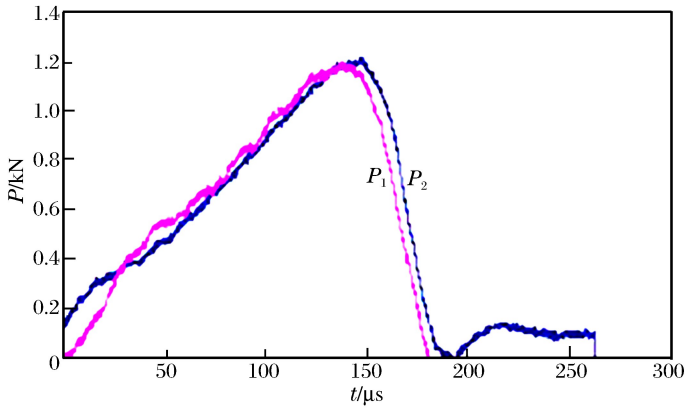

图 4 试样两端的应力平衡

Fig. 4 Equilibrium of stress on the two sides of specimen

2.1.2 冲击速度

所采用的速度是入射杆和透射杆端的速度差。由入射应变、反射应变和透射应变，可以得到速度：$v=-c\cdot(\varepsilon_i-\varepsilon_r+\varepsilon_t)$。

为了验证该速度是否准确，采用激光测速仪进行验证。首先，在入射杆与透射杆杆端处放置测速激光器，激光器由发射器和接收器两部分组成。发射器发出的激光面照射在入射杆和透射杆下沿，激光穿过端面间下沿的空挡进入接收器，激光器的信号将在示波仪上显示为电压值。开始实验后，当入射波传至入射杆端面时，根据激光器电压差 ΔU 和在一个脉宽内所用的时间 Δt，可得到试样的速度 $v=15.2\Delta U/(254\Delta t)$，254/15.2 是标定出来的单位长度下的激光器的电压值。另外，根据实验要求，可以通过调节气室的气压控制实验过程中试样所承受的速度。图 5 为某实验中激光器测得的实验速度与计算得出的实验速度的比较。

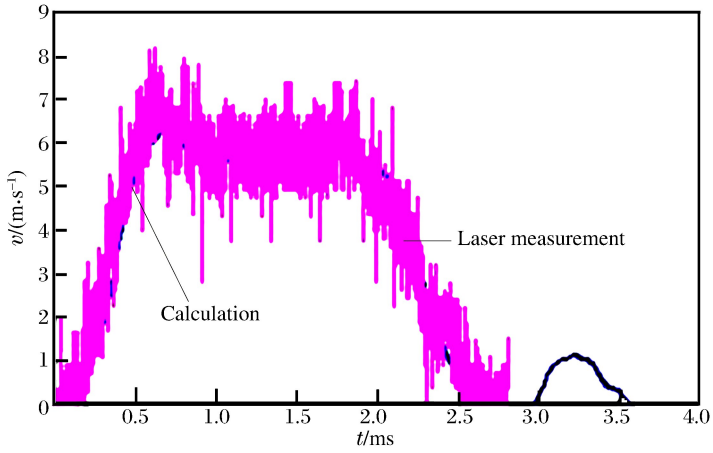

图 5 激光器测得的实验速度与计算得出的速度

Fig. 5 Impact velocities from laser measurement and from calculation

2.1.3　半导体应变片和电阻应变片的对比

由于试样的波阻抗很低，用传统的应变片测量得到的透射波信号很弱，受噪声的干扰较大，因此需采用高灵敏度的应变传感器，比如半导体应变片。图 6 是分别用半导体应变片和电阻应变片测量的原始波形，可以看出半导体测量的波形的透射波比半导体测量的透射波明显。图 7 是半导体应变片和电阻应变片测量的伸长载荷曲线，可以明显看出，半导体应变片所测量的曲线比电阻测量的光滑，电阻测量的信号过于震荡。由以上对比，可知半导体应变片测量的波形和电阻测量的波形相同，而半导体测量的效果更好。

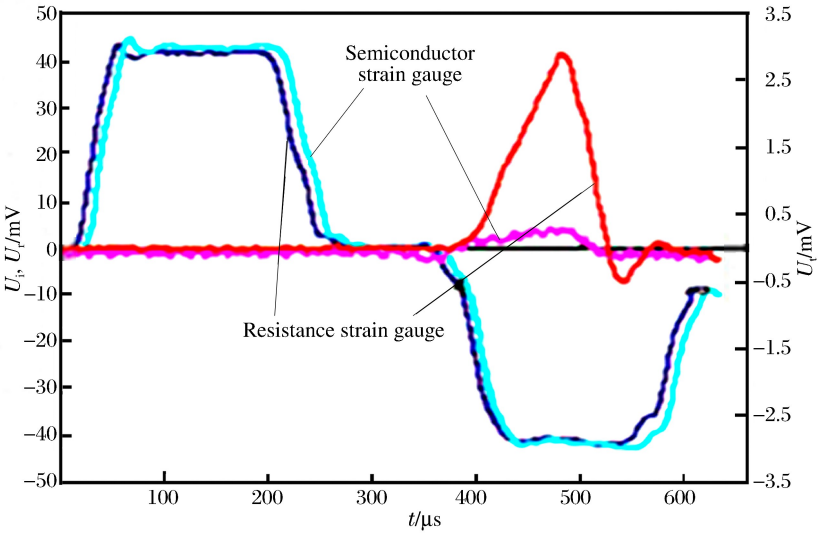

图 6　半导体应变片与电阻应变片测得的原始波形

Fig. 6　Original signals from semiconductor and resistance strain gauges

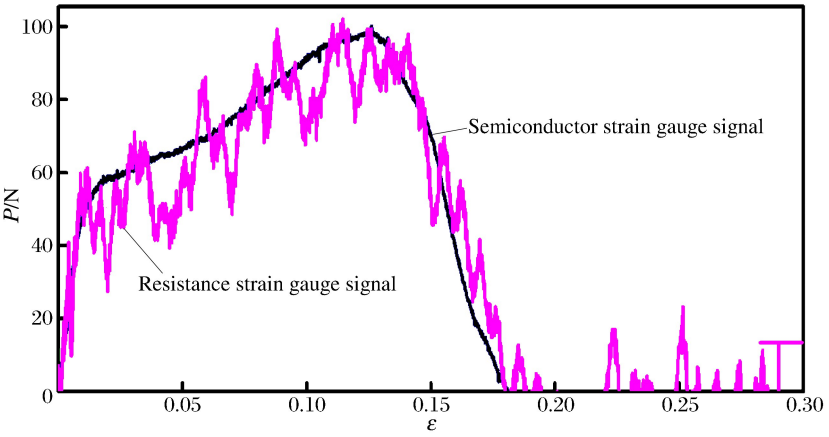

图 7　半导体应变片和电阻应变片的伸长载荷

Fig. 7　Load-strain curves from semiconductor and resistance strain gauges

2.2　结　果

如图 8 所示，准静态加载时，刚开始随着应变增加应力增加缓慢，应变到 0.02 以后，随着应变的增加，载荷急剧增加。造成这种原因是由于绸布材料的编织成型有很多间隙，缓慢加载时，这些间隙逐渐达到密实。图 9 是同种速度下的应变载荷曲线，可见相同条件下实验有很好的重复性。

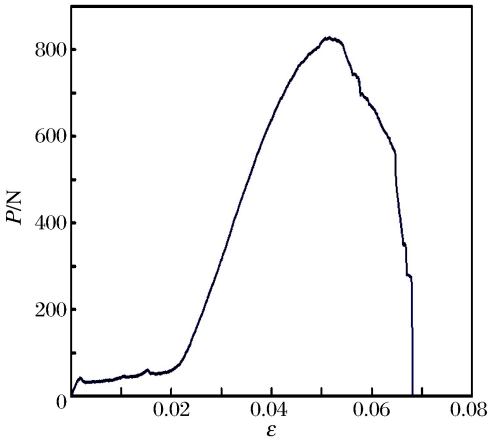

图 8　芳纶绸布准静态时的应变-载荷曲线

Fig. 8　Strain-load curve of aramid fiber silk under quasi-static loading

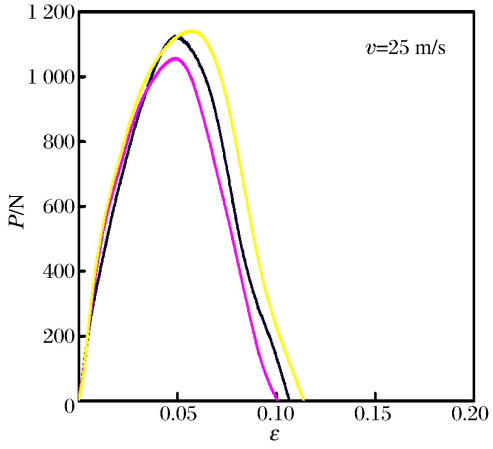

图 9　相同速度下芳纶绸布的应变-载荷曲线

Fig. 9　Strain-load curves of aramid fiber silk under a impact loading

对所测试的绸布材料，其力学性能无论在准静态还是高速度下都具有明显的规律性，而且本构曲线呈非线性。图 10 给出了芳纶绸布不同速度下的应变率曲线和应变-载荷曲线。从应变率曲线可见，这个装置给出的加载过程比较理想：在相当大的范围内，比较接近于恒应变率，而初期的斜坡上升沿则有利于试件中的应力趋于均匀。从应变载荷曲线中可见，随着速度的增加，载荷和应变都明显增加。

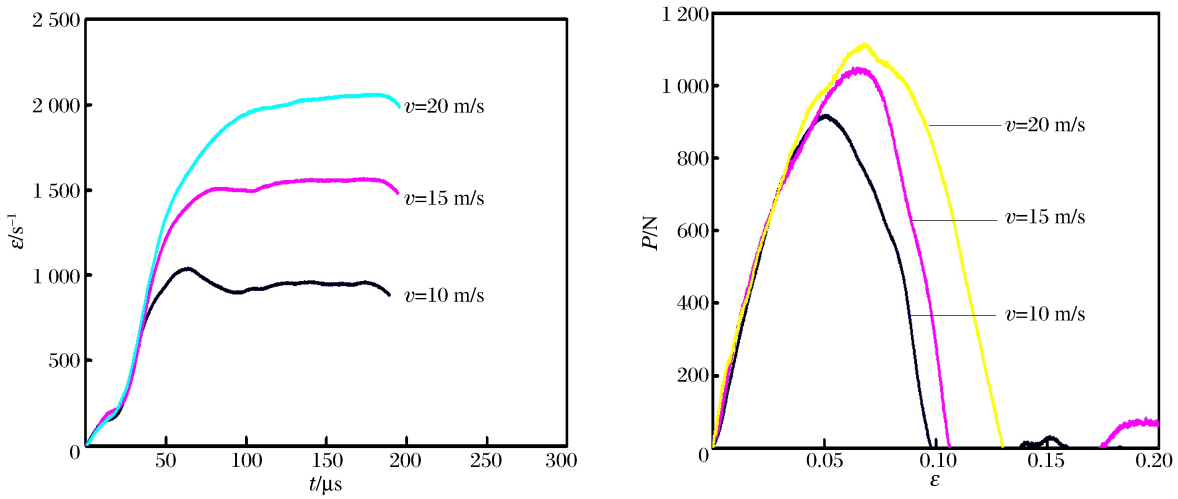

图 10 不同速度下芳纶绸布的应变率曲线和应变-载荷曲线

Fig. 10 Strain rate and strain-load curves of aramid fiber silk at different loading velocities

图 11 是芳纶绸布在不同速度断裂时的载荷和应变。从图 11(a)可见，断裂时随着速度，载荷呈现增加的趋势；从图 11(b)可知，速度在 10 至 20 m/s 时，伸长也有增长趋势，然而 20 到 25 m/s 时伸长减小，造成这种情况的原因是，在 25 m/s 的高速冲击下，冲击速度由之前的均值速度变为了峰值速度，这加剧试样两端的应力集中，影响试样的破坏模式，从而影响试样伸长的测定，导致在 25 m/s 冲击速度下试样的伸长出现了下降。从试样破坏图(见图 12)可见，试样断裂时出现拔丝相互扯断的情况。

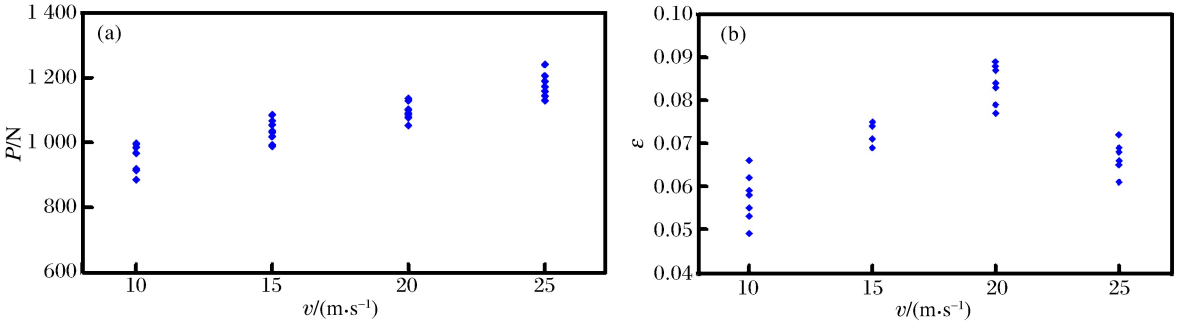

图 11 不同速度下芳纶绸布断裂时的载荷和应变

Fig. 11 Load and strain of aramid fiber silk at fracture at different impact velocities

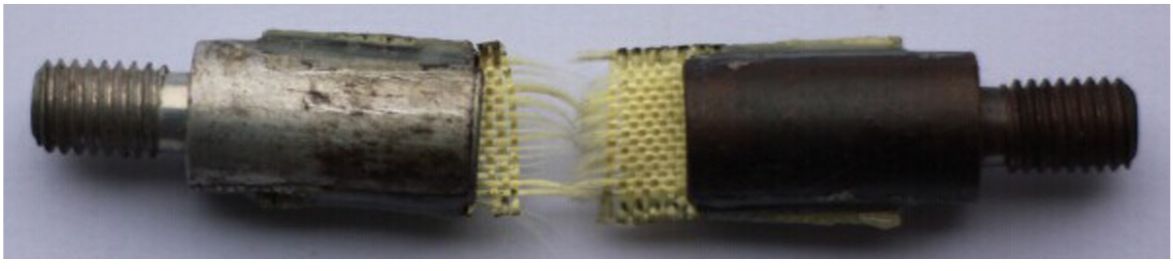

图 12 芳纶绸布的拉伸断裂图

Fig. 12 Diagram of tensile fracture of aramid fiber silk

为了更好地观察试样的破坏过程，使用高速摄像机进行拍摄，幅频为 55 016 s^{-1}，即两张照片间隔 18.2 μs。图 13 是芳纶绸布整个破坏过程的典型图组，对应于图 14 中各点：(1)图 13(a)中，试样未受到载荷，整个试样编织完整，材料编织分为径向和纬向，加载时承受力的方向是径向，与其垂直的方向是纬线方向；(2)图 13(b)中，试样承受载荷，径线方向受力逐渐拉紧，它与纬线方向相交的节点处，径线方向由原先的自然状态到拉紧状态过度，纬线方向材料之间的间隙逐渐增大，出现 AB 段平缓曲线的情形。

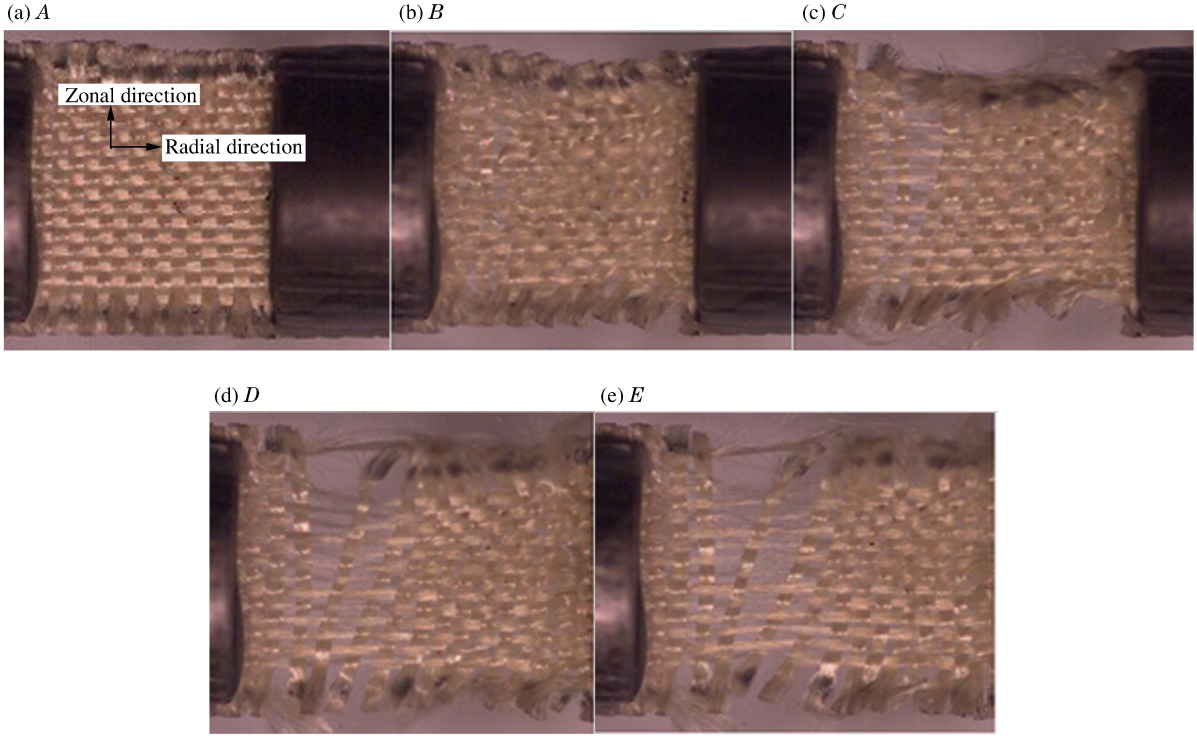

图 13 芳纶绸布动态拉伸破坏图组

Fig. 13 Fracture process of aramid fiber silk under dynamic loading

而纬线方向因为没有承受载荷，丝线变得越来越弯曲，试样宽度逐渐变窄；(3)图 13(c)中，试样的径线方向因受力由拉紧持续伸长，此时的材料随着时间的增加，载荷增加的幅度较大，纬线方向材料之间的间隙继续增大，试样的宽度越来越窄；(4)图 13(d)中，随着径线方向的载荷逐渐增加，试样两边缘的材料先达到极限承载，逐渐被拉断，此时材料所受的载荷最大，纬线方向材料之间的间隙继续增大，试样的宽度继续变窄；(5)图 13(e)中，由于试样边缘的材料失去承载能力，破坏形式由边缘逐渐向中心扩展，最终导致整个材料破坏，此时纬线方向材料之间的间隙最大，试样的宽度最小。

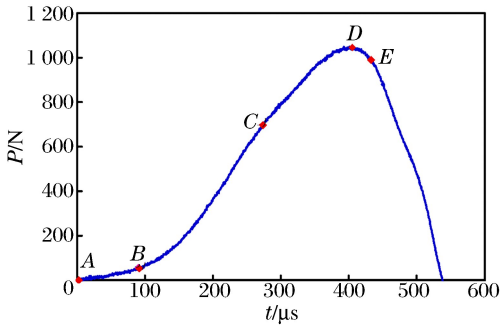

图 14 芳纶绸布动态拉伸破坏的载荷曲线

Fig. 14 Load curve of aramid fiber silk under dynamicloading

3 结　论

采用改进的 Hopkinson 拉杆测试技术对一种芳纶绸布材料进行了动态测试，并进行了一系列验证。从实验结果看，该装置可以很好地捕捉微弱的应力信号，实现对低强度材料试件的动态拉伸实验。

参考文献:

[1] Gray Ⅲ G T, Blumenthal W R. Split-Hopkinson pressure bar testing of soft materials[C]// Mechanical testing and evaluation: Metals handbook, Vol. 8. Park, Ohio: American Society for Metals Materials, 2000:488-496.

[2] 周风华,王礼立,胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响[J]. 实验力学,1992,7(1):23-29.
Zhou Feng-hua, Wang Li-li, Hu Shi-sheng. On the effect of stress nonuniformness in polymer specimen of SHPB tests[J]. Experimental Mechanics, 1992,7(1):23-29.

[3] Wang L, Labibes K, Azari Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(5):669-686.

[4] Zhao H, Gary G, Klepaczko J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(4):319-330.

[5] Sharma A, Shukla A, Prosser R A. Mechanical characterization of soft materials using high speed photography and split Hopkinson pressure bar technique[J]. Journal of Materials Science, 2004,37(5):1005-1017.

[6] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low impedance materials[J]. Experimental Mechanics, 1999,39(2):81-85.

[7] 胡时胜,唐志平,王礼立. 应变片技术在动态力学测量中的应用[J]. 实验力学,1987,2(2):73-82.
Hu Shi-sheng, Tang Zhi-ping, Wang Li-li. Application of strain gage technique in dynamic measurement[J]. Experimental Mechanics, 1987,2(2):73-82.

[8] 王宝珍. 肌肉类软组织动态力学性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.

[9] Nie X, Song B, Ge Y, et al. Dynamic tensile testing of soft materials[J]. Experimental Mechanics, 2008,49(4):451-458.

[10] 郭伟国,李玉龙,索涛. 应力波基础简明教程[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007:128-132.

Experimental study on dynamic tensile behaviour of a kind of fiber silk*

Zhao Lei, Li Yu-long, Chen Xuan

(*School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: An improved split Hopkinson bar was used for testing the dynamic tensile behaviour of low strength materials. This device included an aluminum transmitted bar and the semiconductor gages to capture the weak strain signal. For material of aramid fiber silk, the stress equilibrium on both sides of specimen as well as the test speed was verified; a comparison between the measurements from semiconductor strain gauge and from resistance strain gauge was made; the stress-strain curves of tested material under various impact velocities were obtained; the failure process of specimen was captured by a high-speed camera. The experimental results show that the design of the experiment method is feasible.

Key words: solid mechanics; dynamic tensile; modified SHTB; aramid fiber silk

---

* Received 29 November 2012; Revised 28 May 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10932008,11102166)

Corresponding author: Li Yu-long, liyulong@nwpu.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)