

文章编号: 1001-1455(2011)04-0392-05

# 较低应变率大应变条件下聚氨脂泡沫材料的 动态力学性能实验\*

吴昊, 姜锡权

(合肥新星应用技术研究, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 利用加长型分离式霍普金森压杆(入射杆长 6 000mm、子弹长 800 mm)研究聚氨脂泡沫材料在较低应变率大应变条件一维应力状态下的动态力学性能, 获得了约 550  $\mu\text{s}$  的长加载脉冲, 得到了该材料在应变率 520  $\text{s}^{-1}$ 、应变 0.15 条件下的应力应变曲线, 对较低应变率条件下, 应变率与动态应力平衡之间的关联进行了讨论。

**关键词:** 爆炸力学; 动态力学性能; 霍普金森压杆; 泡沫材料; 低应变率

**中图分类号:** O347.1

**国标学科代码:** 130·3530

**文献标志码:** A

聚氨脂泡沫材料作为一种吸能、缓冲材料, 被广泛用于各种领域。贵重设备防护、军事运输、航空航天仪器隔振, 甚至在鱼雷和导弹的外包装等, 都采用了泡沫软材料。准确有效地获得这类低阻抗材料在动态载荷下的力学性能至关重要<sup>[1-2]</sup>。

霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置是在动载荷下材料力学性能的一种有效测试装置, 但利用该装置对泡沫等软材料进行动态力学实验时遇到如下问题:

(1)对传统的钢质子弹、压杆系统, 入射应力脉冲的上升时间约 10  $\mu\text{s}$ 。由于低阻抗材料的弹性波速很低, 如果在这上升时间内入射应力脉冲的幅值超过了软试件的动态屈服强度或破坏强度, 则试样在失效之前不可能达到均匀变形。于是在入射应力脉冲加载下, 试样在临近冲击端部分将发生大变形或破坏, 而另一端则保持着小变形。这种不均匀变形的结果导致非平衡的应力状态, 这时传统 SHPB 的数据处理方式不能适用。

(2)在研究材料的应变率效应时, 需进行某具体应变率下的动态力学性能实验, 而传统的霍普金森压杆难以保持恒应变率, 无法确定在哪个应变率下的实验结果。对某些应变率敏感材料, 解决这个问题非常关键。

(3)泡沫、橡胶等软材料往往表现出大变形特征, 要求加载波形幅值低而脉冲长。但传统的 SHPB 装置受杆长限制, 如果加长加载脉冲长度, 入射、反射波就会相互干扰, 难以进行数据处理。

针对以上问题, 已经做了不少工作, 主要有: 刘剑飞等<sup>[1]</sup>在透射杆采用半导体应变片<sup>[3]</sup>来测量微弱的透射信号; 林玉亮等<sup>[4]</sup>采用石英晶片监测试件两端面的动态应力平衡; 卢芳云等<sup>[5]</sup>利用脉冲整形技术解决了恒应变率问题; H. Meng 等<sup>[6]</sup>采用两应变片波形分离技术将入射波与反射波分离。这种分离不是在时间和空间上对两波形进行物理分离, 而是采用数值计算的方法进行分离, 它对入射杆材料和尺寸都有严格的要求。本文中, 采用加长型霍普金森压杆, 将入射波与反射波进行物理分离。

## 1 加长型霍普金森压杆装置

加长型霍普金森压杆的子弹长 800 mm、入射杆杆长 6 000 mm、透射杆长 3 500 mm, 如图 1 所示。经过脉冲整形, 在避免入射、反射波相互干扰的前提下, 获得长 550  $\mu\text{s}$  加载脉冲, 如图 2~3 所示。杆件

\* 收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2010-06-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724608)

作者简介: 吴昊(1985—), 男, 硕士研究生。

材料为铝合金 LY4, 子弹、入射杆、透射杆和吸收杆直径均为 20 mm。

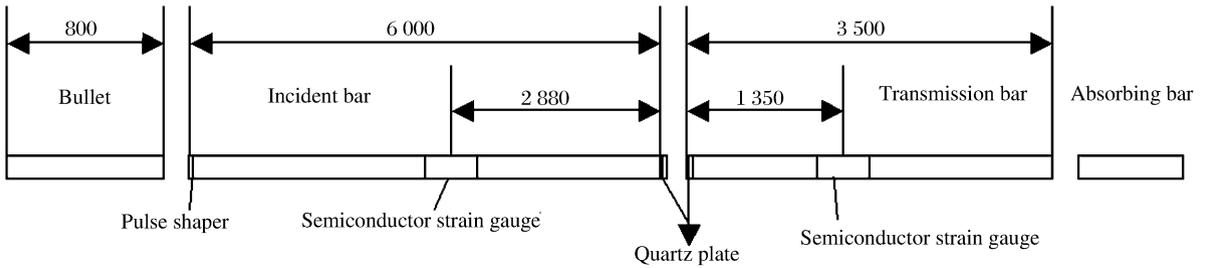


图 1 改进型 SHPB 实验装置

Fig. 1 The sketch of the modified SHPB

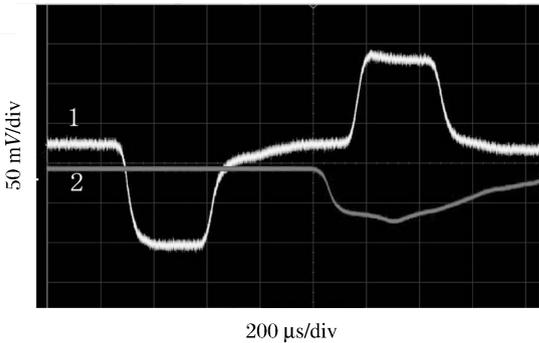


图 2 整形前的实验波形

Fig. 2 Experimental waveform without pulse shaper

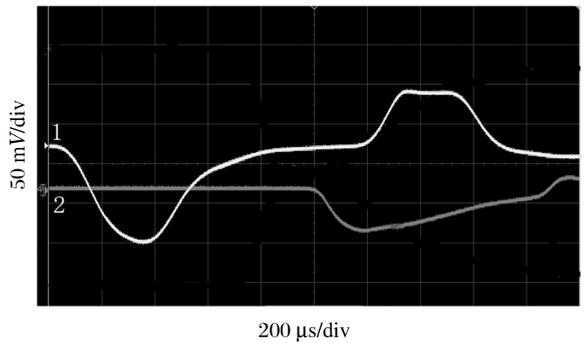


图 3 整形后的实验波形

Fig. 3 Experimental waveform with pulse shaper

## 2 动态力学实验

RPUF 材料由中国船舶科学研究中心提供, 密度为  $0.334 \text{ g/cm}^3$ 。试件为圆片状, 尺寸为  $\varnothing 12 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。由于泡沫软材料的特性, 入射杆与透射杆上贴的均为半导体应变片。静态实验在中国科大力学系基础实验中心 MTS 试验机上进行, 动态实验在该实验室研制的加长型 SHPB 上进行。测试仪器为美国 Agilent 公司的示波器 DSO6014A、扬州科动电子技术研究所的应变放大器 KD6009 和电荷放大器 KD5007 等。

通过调整脉冲整形器的材料和几何特性来调整入射脉冲加载形状, 以保证恒应变率和动态应力平衡的实现。根据需要, 选取 300B 和 350B 两种纸质作为整形器, 两种厚纸均从市场上购买。再通过裁剪得到不同直径的圆垫片, 整形后的垫片规格和应变率的对应关系如表 1 所示。试件在整形前的波形如图 2 所示, 通过改变应变片类型和子弹撞击速度得到应变率  $333 \text{ s}^{-1}$  下改进的波形图(见图

表 1 应变率与对应的纸质整形器

Table 1 The corresponding relationship of reshaper and strain rate

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	纸型号	层数	$d/\text{mm}$
200	300B	1	12
333	350B	1	12
520	300B	2	12
1 830	350B	3	12

3)。图中, 通道 1 为入射波与反射波信号, 通道 2 为透射波信号。

由波形图可见, 反射波平台比较明显, 说明动态变形过程中基本实现了恒应变率。由实验波形信号可知实验过程中基本实现了动态应力平衡。

图 4 为实验结果处理软件选取的一次处理结果( $\dot{\epsilon} = 428 \text{ s}^{-1}$ )。图 4(a)中,1、2 和 3 分别代表入射波、透射波和反射波,4 为入射波与透射波差值。图 4(b)说明了应变与时间的关系,可见改进的 SHPB 装置能在较低的应变率下产生较大的应变。

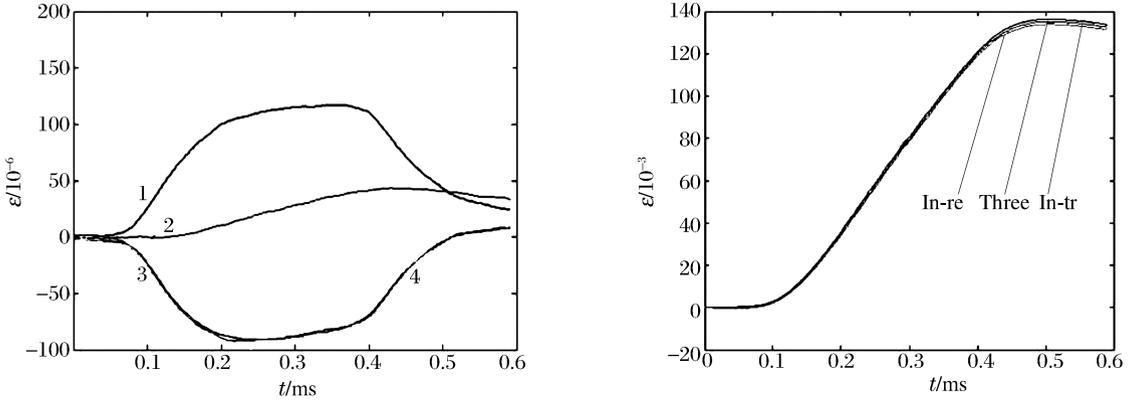


图 4 试件在低应变率条件下的大应变

Fig. 4 Large strain of specimen at low strain rate

软材料的波速小,试件在相当长的时间内达不到动态应力平衡。而动态应力平衡是 SHPB 实验的前提条件之一,利用波形整形器改变入射波形可以改变动态应力平衡状况。定义平衡误差为试样两端面应力差值与平均应力间的比值,反映加载过程中试样两端应力平衡状况<sup>[7]</sup>

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right| = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)/2} \right|$$

一般认为若  $R(t) < 0.1$ ,即可以看作试样两端应力达到了平衡状态。下面利用平衡误差对不同入射波形加载条件下试样两端应力平衡情况进行分析。

从实验数据发现,应变率与达到应力平衡所需时间存在关系。由图 5 可知,当应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  左右时,试件在刚加载时,两端压力的平衡误差为 0.2,经过约  $56 \mu\text{s}$  后,试件两端应力达到平衡。由图 6 可知,应变率为  $333 \text{ s}^{-1}$  时,石英晶体片在  $42 \mu\text{s}$  后达到平衡。

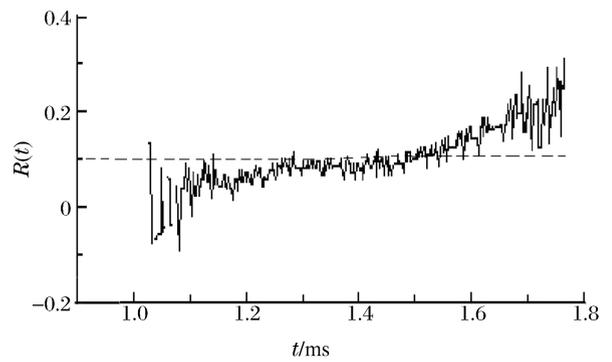
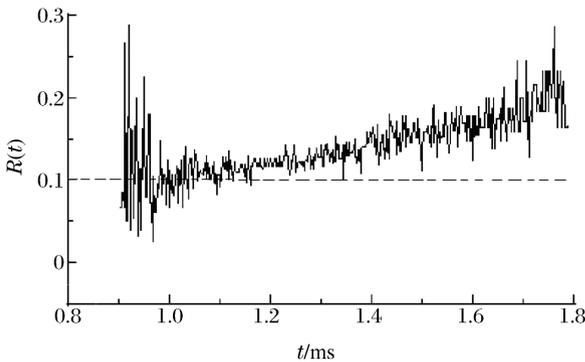


图 5 应变率为  $200 \text{ s}^{-1}$  时平衡误差和加载时间的关系

图 6 应变率为  $333 \text{ s}^{-1}$  时平衡误差和加载时间的关系

Fig. 5 The relation of the error in balance and loading time at strain rate  $200 \text{ s}^{-1}$

Fig. 6 The relation of the error in balance and loading time at strain rate  $333 \text{ s}^{-1}$

由图 7 可知,应变率为  $520 \text{ s}^{-1}$  时,  $30 \mu\text{s}$  后达到平衡,平衡持续  $646 \mu\text{s}$ ,整形效果明显。由图 8 可知,应变率为  $1\,830 \text{ s}^{-1}$  时,  $22 \mu\text{s}$  后开始平衡,平衡持续时间为  $230 \mu\text{s}$ 。根据上面数据发现,随着应变率的增大,试件两端的石英晶体片达到平衡时间所需时间减少。

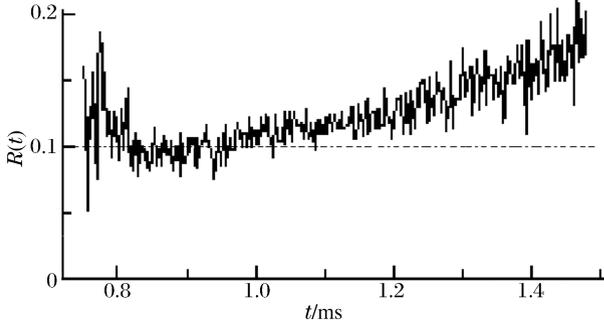


图 7 应变率为 520 s<sup>-1</sup>时平衡误差和加载时间的关系

Fig. 7 The relation of the error in balance and loading time at strain rate 520 s<sup>-1</sup>

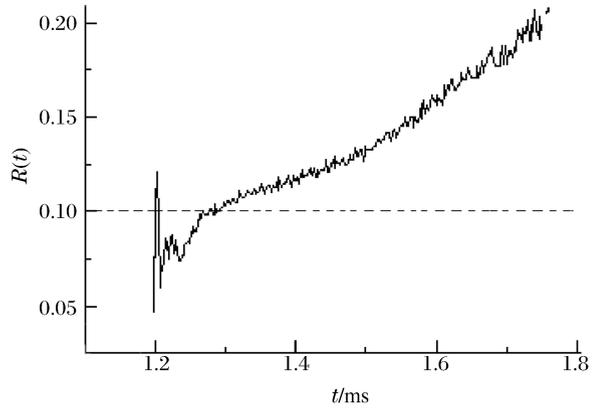


图 8 应变率为 1 830 s<sup>-1</sup>时平衡误差和加载时间的关系

Fig. 8 The relation of the error in balance and loading time at strain rate 1 830 s<sup>-1</sup>

### 3 实验结果处理

对实验结果进行处理,得出泡沫材料在中低应变率及准静态下的应力应变曲线(见图 9)。

不同的应变率下应力应变曲线的起始部分(起始部分一般定义为曲线的直线部分)是不同的。当应变率为 1 480 s<sup>-1</sup>时,起始部分应变为约 0.15,应力峰明显。在低于此应变率时,由于应力很快卸载,没有测出完整的应力应变波形。根据文献[8],应变 0.05 以下为线弹性区,0.05~0.15 为非线性区,0.15~0.30 为恒应力区,超过 0.30 时,应力随应变上升单调上升,直至材料被压实。在本文实验中,当试件应变率为 333 和 520 s<sup>-1</sup>时,应力应变曲线应变较小,未达到恒应力平台,不满足大应变 0.30 要求。

在应变率为 1 480 s<sup>-1</sup>时即可得到完整波形。考虑到试件厚度对实验结果的影响,在忽略端面摩擦效应的情况下,同样的材料,试件越薄,试件达到应力平衡时间越短。在本文实验中,为了实现试件内部的应力平衡,试件厚度取为 2 mm。

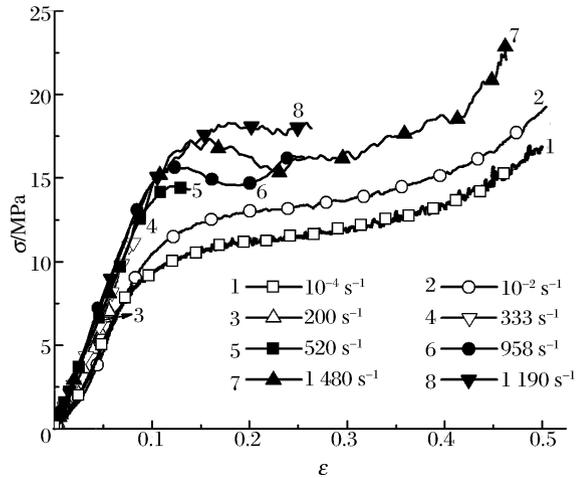


图 9 较低应变率及准静态条件应力应变曲线

Fig. 9 Stress strain curves of RPUF

### 4 结 语

为解决较低应变率下大应变问题,以加长入射杆和子弹的方法加长加载脉冲,使入射波、透射波有效分离。但如要出现恒应力平台(应变约 0.15),最低应变率不能低于 520 s<sup>-1</sup>;如需产生大应变(0.30),最低应变率不能低于 958 s<sup>-1</sup>。所使用实验设备能做到在较低应变率下(200 s<sup>-1</sup>)的实验波形,但试件没有达到大应变的要求。说明了延长杆件的方法能够在一定程度上解决软材料较低应变率大应变问题,还需进一步加长子弹和入射杆,以获得泡沫材料在更低应变率下的大应变曲线。

实验中发现应变率的大小与应力平衡所需时间有直接关系,针对这个关系作了定性和定量分析。应变率越高,达到平衡所需时间越短。在实验中,整形器对实验结果有重要影响,整形越好(即达到了动态应力平衡和恒应变率的要求),平衡持续时间越长。整形器影响试件端面平衡持续时间、试件中动态应力应变的均匀化。

感谢中国科学技术大学胡时胜教授提供了试件材料。

## 参考文献:

- [1] 刘剑飞,王正道,胡时胜.低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术[J].实验力学,1998,13(2):218-223.  
LIU Jian-fei, WANG Zheng-dao, HU Shi-sheng. The SHPB experiment technology for low wave impedance porous materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998,13(2):218-223.
- [2] 王永刚.泡沫铝动态力学性能与波传播特性研究[D].宁波:宁波大学,2003.
- [3] 胡时胜,刘剑飞,王正道,等.低密度多孔介质的缓冲和减振[J].振动与冲击,1999,18(2):39-44.  
HU Shi-sheng, LIU Jian-fei, WANG Zheng-dao, et al. Cushioning and damping of vibration of low density porous material[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999,18(2):39-44.
- [4] 林玉亮,卢芳云,卢力.石英压电晶体在霍普金森压杆实验中的应用[J].高压物理学报,2005,19(4):299-304.  
LIN Yu-liang, LU Fang-yun, LU Li. The application of quartz transducer technique in SHPB[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(4):299-304.
- [5] 卢芳云,Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计[J].爆炸与冲击,2002,22(1):15-19.  
LU Fang-yun, Chen W, Frew D J. A design of SHPB experiments for soft materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):15-19.
- [6] Meng H, Li Q M. An SHPB set-up with reduced time-shift and pressure bar length[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(6):677-696.
- [7] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994,77(1):263-267.
- [8] 姜锡权,陶杰,王玉志.改进的霍普金森压杆技术在聚氨酯泡沫塑料动态力学性能研究中的应用[J].爆炸与冲击,2007,27(4):358-363.  
JIANG Xi-quan, TAO Jie, WANG Yu-zhi. Application of modified split Hopkinson pressure bar technique in the study of dynamic behavior of a polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):358-363.

## Experimental study on dynamic properties of polyurethane foam subjected to large strains and low strain rates<sup>\*</sup>

WU Hao, JIANG Xi-quan

(Hefei New Star Applied Technology Research Institute, Hefei 230031, Anhui, China)

**Abstract:** Dynamic compression tests for polyurethane foam were performed on an elongated split Hopkinson pressure bar setup, the incident bar of which was six meter long and the striker was eight decimeter long. A pulse shaper was used to achieve the dynamic balance in the stresses at the two sides of the specimens. About 600-microsecond pulses were experimentally obtained and the stress-strain curves of polyurethane foam were attained at the strain rate of  $520 \text{ s}^{-1}$  and the strain of 0.15. And the discussions were carried out for the relation of strain rate and stress balance at the two sides of the specimens.

**Key words:** mechanics of explosion; dynamic properties; split Hopkinson pressure bar; polyurethane foam; low strain rate

<sup>\*</sup> Received 24 March 2010; Revised 9 June 2010

Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724608)

Corresponding author: JIANG Xi-quan, xiquanjiang@yahoo.com.cn