

# 软材料的 SHPB 实验设计

卢芳云<sup>1</sup>, W.Chen<sup>2</sup>, D.J.Frew<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073;

2. AME, The University of Arizona, Tucson, AZ 85721-01190, USA;

3. USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 39180-6199, USA)

摘要: 通过对 SHPB 实验中加载波波形的控制设计, 实现软材料试样在加载过程中的应力平衡和常应变率加载, 从而保证 SHPB 实验的前提条件。采用这种方法研究了两种材料的高应变率本构, 实验结果表明: 设计的方法是行之有效的。

关键词: 软材料; SHPB 实验; 加载波整形

\* 中图分类号: TB301 文献标识码: A

## 1 引言

近年来, 材料科学的兴起和不断发展, 使一大批新型工程材料不断涌现出来。其中, 软材料或低波阻抗材料作为一种新型的缓冲吸能材料, 越来越受到航空、航天、军事防护、包装运输, 甚至战斗部设计等各领域的重视, 被广泛应用于易损物品的缓冲包装、重要设备的防护及结构物内部填充, 甚至复合材料的构造中。因此, 研究这类材料在各种冲击载荷下的力学行为已成为有关设计部门日益关注的问题。许多材料的本构行为是应变率相关的(即材料在高应变率动载下的响应行为与其静态加载条件下的行为大不相同), 软材料尤其如此。准确获得材料在不同加载条件下的本构特性, 是合理进行工程设计的基础, 也为当今日益兴盛的计算机仿真提供正确的材料模型和可靠的材料数据。

分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 技术自 1949 年发明<sup>[1]</sup> 至今已有 50 多年, 已成为测量材料中高应变率本构行为的一项经典技术。然而, 由于软材料的低模量和低强度特点, 使得运用传统的 Hopkinson 杆技术不能获得有效可用的实验结果。原因有二: 第一, 在加载过程中难以保证试样中的力平衡或变形均匀性<sup>[2]</sup>, 而这是 Hopkinson 杆实验的前提之一; 第二, 应力信号微弱, 使得真实信号的误差很大。意识到这两个问题的研究人员, 目前主要考虑两类解决途径: 第一, 从实验技术上改进, 使实验过程满足 Hopkinson 杆实验的前提条件; 第二, 在数据处理上修正误差。针对应力信号较弱的问题, 常常采用降低输出杆的波阻抗, 如采用铝杆、粘弹性杆<sup>[3]</sup> 和空心杆<sup>[4]</sup> 作为输出杆的方法, 或采用高灵敏度石英晶体测试的方法<sup>[5]</sup>, 来提高信号的信噪比; 针对信号失真的问题, 或采用数据处理的解耦方法来修正数据误差<sup>[6]</sup>, 或考虑波传播的弥散效应进行理论分析<sup>[7]</sup> 对信号加以修正, 使之较准确地反映材料的本性。从我们的经验来看, 欲使软材料的 SHPB 实验能获得有效的实验数据, 改进实验技术使之满足其前提条件应该是一个首选的研究途径。因为, 数据处理过程可以修正信号失真, 但不能改善实验条件。

我们采用输入波整形技术, 通过调整加载波形, 使试样加载过程中达到应力平衡可变形均匀化, 并实现常应变率加载, 进行实时监测。实验结果表明, 运用这种方法, 大多数软材料在实验过程中能获得常应变率加载下的均匀变形, 保证了 SHPB 实验的前提条件, 从而保证了实验结果的有效可用。文中给出了两种软材料的实验本构曲线和试样在实验过程中受力平衡的监测情况。

与此同时, 一维应力波传播是 SHPB 实验技术的另一前提。对于软材料, 采取合理的试样设计原则

\* 收稿日期: 2000-11-30; 修回日期: 2001-06-20

作者简介: 卢芳云(1963—), 女, 博士, 教授。

也是实现试样在加载过程中应力平衡或变形均匀化,同时确保一维应力波假定的必要手段。从理论上获得试样设计的原则必须结合波传播的二维效应和弥散规律来研究。这项工作我们将另文详述。

## 2 传统的 SHPB 技术及其限制

传统的 SHPB 由撞击杆、输入杆和输出杆组成,试样夹在输入杆和输出杆之间(如图 1 所示)。实验中撞击杆以一定的速度沿轴向碰撞输入杆,引起压缩应力波在杆中传播。假定输入杆和输出杆只发生弹性变形,杆中应力波作一维传播。当应力波到达试样时,一部分波反射回输入杆中,一部分波作用于试样,之后穿过试样进入输出杆中。当应力波的宽度远大于波通过试样所需的时间时,则认为试样在受载期间处于一种均匀变形和应力平衡的状态,有  $P_1 = P_2$  ( $P_1, P_2$  是试样前后表面所受的力)。对于输

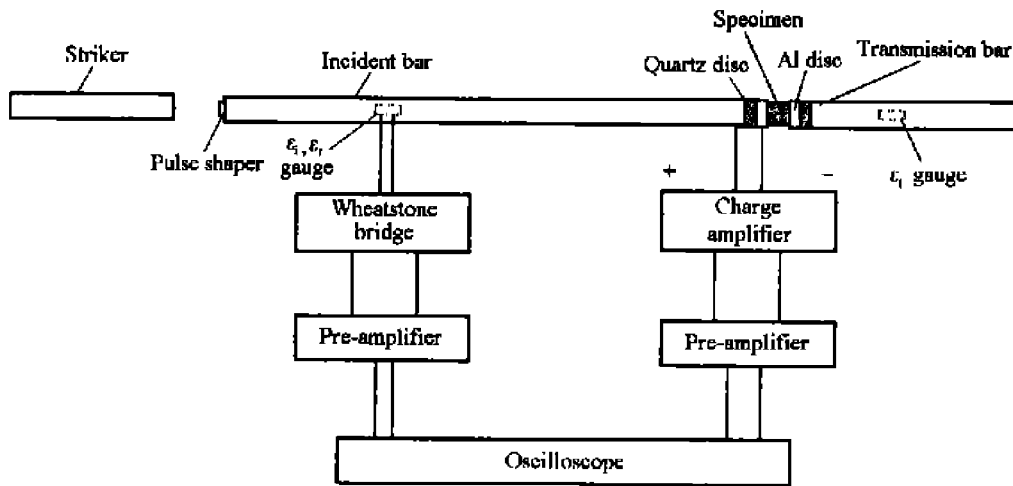


图 1 SHPB 实验装置示意图

Fig.1 Experimental set up of pulse-shaped SHPB with the end-forces monitoring

入杆和输出杆为相同材料,且有相同截面积时,有  $\epsilon_t = \epsilon_r + \epsilon_t$ , 式中  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_t$  分别表示由输入波、反射波和透射波在杆中传播引起的实时应变。这些应变由贴在杆表面的应变片测得。图 2 是一个典型的实验波形记录。这时,试样中的应力和应变由下列公式求出

$$\sigma(t) = (A_0/A_s)E\epsilon_t(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \int - (2c_0/L) \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

式中:  $E, A_0$  为杆的杨氏模量和截面积,  $c_0$  是杆中的弹性波速度;  $L$  和  $A_s$  为试样的厚度和截面积。试样材料的本构关系 ( $\sigma$ - $\epsilon$  曲线) 由 (1) 式和 (2) 式联合给出。

实验中,我们在试样的两端处各设计了一薄片压电石英晶体,用以实时监测试样两端面上的受力史。图 3 是从试样两端面上石英传感器得到的受力史监测实验记录。

应力波传播理论分析表明,加载波在试样中来回反射 3 次以上可以达到试样中应力平衡的要求。传统的 SHPB 技术采用直接碰撞加载,加载波的上升前沿约为  $10 \sim 20 \mu s$ 。对于像金属这类高阻抗材料,材料中的波速在  $3500 m/s$  以上,即使厚度超过  $10 mm$  的试样,也能在加载波的上升时间内达到应力平衡。而对于低阻抗的软材料,材料中的波速在  $1000 m/s$  甚至  $100 m/s$  以下,即使很薄的试样,达到应力平

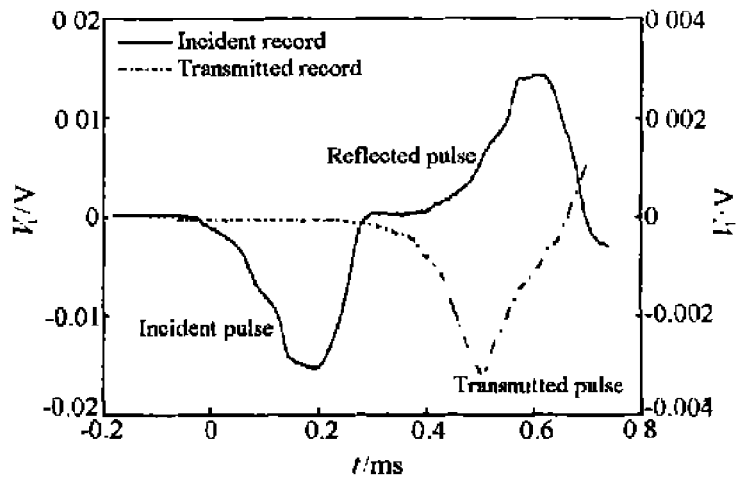


图 2 典型的常应变率加载效果

Fig.2 Typical oscilloscopic records of a pulse-shaped SHPB experiment on RTV630 with constant strain-rate loading

衡所需的时间也远大于  $20\mu\text{s}$ 。另一方面, 如果试样太薄, 会因长径比太小引起二维效应, 给实验结果带来新的问题(这涉及到我们前面提过的试样设计原则, 显然也会不同于传统观念)。这就是软材料 SHPB 实验的问题所在。设法增加加载波的上升时间, 使试样在上升时间内实现应力平衡, 是我们解决这个问题的设想。

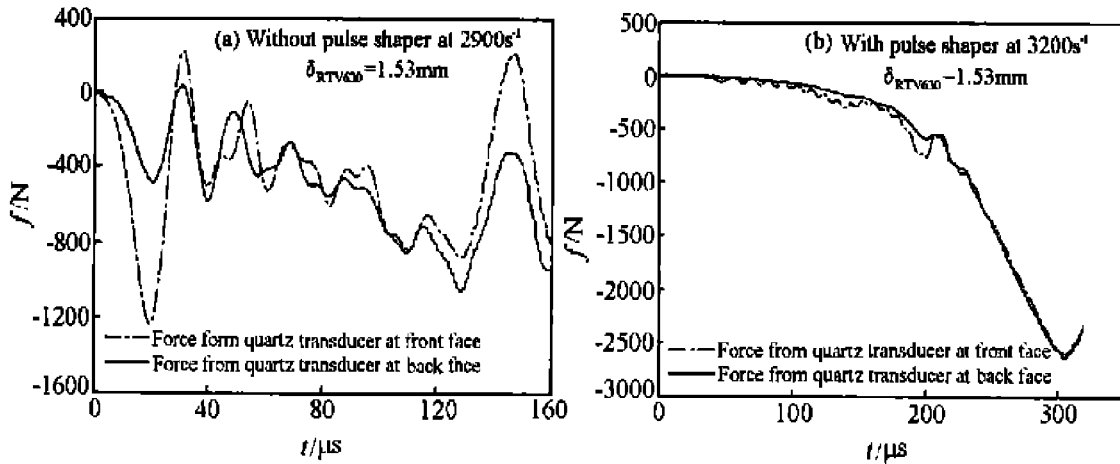


图 3 试样中应力平衡的监测

Fig. 3 Typical oscillographic records and end-forces measures of a pulse-shaped SHPB experiment for an RTV630 silicone rubber specimen testing

### 3 输入波整形技术

输入波整形技术是在输入杆的撞击端粘上一个直径小的波形整形器, 撞击杆在碰撞加载过程中先撞击整形器, 整形器的塑性变形使传入到输入杆中的加载波波形发生变化。改变整形器的材料和尺寸, 可以调整输入波的形状。这个思想的理论基础是冲击波理论中采用多次冲击过程实现等熵加载的斜波设计思想。输入波整形技术最初被用来过滤加载波中由于直接碰撞引起的高频分量, 以减少波形在长距离传播中的弥散失真。理论分析和实验经验表明, 波形整形器的使用将使加载波增宽, 上升前沿变缓。这正好与软材料中达到应力平衡需要较长时间的要求是一致的。为此, 我们可根据所测的软材料的特点, 设计整形器, 使得加载波形上升前沿大于软材料中应力平衡所需的时间。

通过理论预估和实验摸索, 我们选用合金铜作为整形器的材料, 实验中采用了直径为  $1.59 \sim 10.34\text{mm}$  圆饼整形器。图 4 给出了采用整形器前后的波形比较。图中实线是用传统方法加载得到的输入波形, 长虚线是采用了铜整形器后的典型输入波形。可见长虚线的上升前沿宽度已远大于实线的情况。

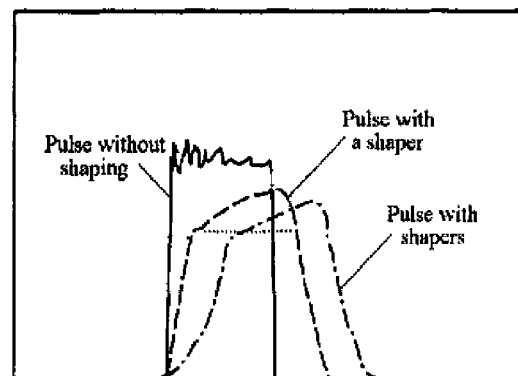


图 4 整形器对波形的改善说明

Fig. 4 Illustration of the pulse-shaping technique

合理的整形设计还可以方便地获得常应变率加载。从图 4 中的长虚线还可知, 输入波上升后出现一个拐点, 之后继续爬高至最高点, 然后开始下降卸载。第一个拐点的高度(或波强度)与整形器的直径成正比。波在最高点的强度与撞击杆的碰撞速度  $v_0$  成正比。只要碰撞速度大于达到第一个拐点处波强度所需的速度  $v^*$ , 这个波形就有很好的重复性。第二阶段加载波的上升斜率与  $v_0 - v^*$  成正比。考虑到试样中变形均匀化的具体表示 ( $\epsilon_i = \epsilon_r + \epsilon_l$ ), 如果选择加载条件, 设计加载波形  $\epsilon_i$  由两部分组

成, 即  $\epsilon_i = \epsilon_{i1} + \epsilon_{i2}$ , 并使  $\epsilon_{i2} = \epsilon_i$ , 于是有  $\epsilon_{i1} = \epsilon_i$ , 且反射波将是一个平台波, 如图 4 中虚线所示。由 (1) 式, 这个平台意味着试样中的常应变率加载, 平台对应了相应的应变率值。由于平台的高度基本对应了输入波第一个拐弯处的强度, 常应变率的值便可由这个拐弯点的状态预测。只有知道了该拐点的高度与整形器的直径之间的关系, 便可按实验需求的应变率条件选择整形器的尺寸, 获得可控制的常应变率加载实验效果。

采用一个铜合金整形器, 输入波的起跳点处有突跃。对于象硅橡胶这类特别软的材料, 一个整形器对波形的改善效果仍不能满足试样中变形均匀化的要求。为了进一步平缓加载波形, 延长上升时间, 我们采用了组合型的整形器。即, 在较大尺寸的主整形器上, 叠加一个很小的铜质整形器, 尺寸一般为  $\Phi 2\text{mm} \times 1.59\text{mm}$  左右, 再加上一个由硅橡胶制成的更小的整形器, 使波形加载得以多次缓冲。采取这样的措施以后, 得到的输入波形如图 4 中点划线曲线所示。

传统方法所得的输入波形为不可调方波, 反射波形所反映的应变率状态受透射波形 (即材料响应) 的制约, 也是不可调的, 因而难以保证试样中的常应变率加载。图 2 是采用了波形整形技术后一种硅橡胶 SHPB 实验的示波图, 图中所示的三个波形很好地实现了常应变率的设计思想。

试样两端的力平衡监测结果如图 3 所示。图 3(a) 是传统方法的实验结果, 图 3(b) 是采用了整形器后的实验结果, 两个实验采用了相同尺寸的试样和相近的加载应变率。图 3(a) 所示的受力史表现出大的振荡, 可能与冲击加载过程的波传播效应有关。在试样的输入端波形振荡幅度更大, 还出现了理论上不合理的正向振荡波形 (或拉应力状态), 这可能与石英传感器的惯性响应有关。图 3(b) 的力平衡波形与图 2 中的透射波是相对应的, 但图 3(b) 中的两条曲线显示出试样两端面上良好的力平衡情况。整形后的加载波有较长的上升段, 但从公式 (1) 分析知, 这个阶段引起的应变并不大, 在  $\sigma-\epsilon$  曲线上表现为  $\epsilon < 0.01$ 。即使是常规有效的传统 SHPB 实验得到的  $\sigma-\epsilon$  曲线, 由于波传播效应, 其开始上升的一段曲线也是无效的。有效的实验  $\sigma-\epsilon$  曲线应取自试样中达到应力平衡后的常应变率加载段的数据。这既是实验的基本要求, 也是建立一定应变率下有效本构关系的基本要求。

#### 4 两种软材料动态压缩应力应变曲线

采用整形器的方法测试了多种硅橡胶和泡沫材料试样的动态压缩曲线。图 5 和图 6 是实验获得的其中两种材料在不同应变率下的动态压缩  $\sigma-\epsilon$  曲线。图中曲线为相应数据点的拟合曲线。实验在美国亚利桑那大学 SHPB 上完成。图 5 是一种硅橡胶 RTV630 的实验结果, 图 6 一种刚性开孔 (open-cell) 结构的聚氨酯泡沫的实验结果。材料密度分别为,  $\rho_{\text{RTV630}} = 1.28\text{g/cm}^3$ , 和  $\rho_{\text{聚氨酯泡沫}} = 0.454\text{g/cm}^3$ 。试样厚度  $\delta_{\text{RTV630}} = 1.53\text{mm}$ ,  $\delta_{\text{聚氨酯泡沫}} = 2.0\text{mm}$  左右, 试样半径  $6.35\text{mm}$ 。图 6 所示的实验结果表明, 硅橡胶的应力

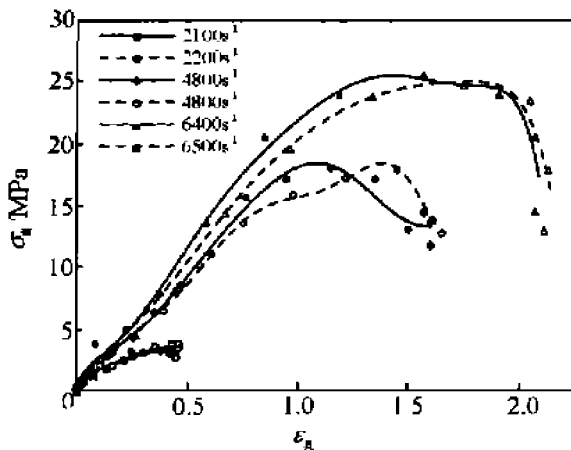


图 5 一种硅橡胶的动态压缩应力应变曲线  
Fig.5 Dynamic compressive stress-strain curves  
of the RTV630 rubber

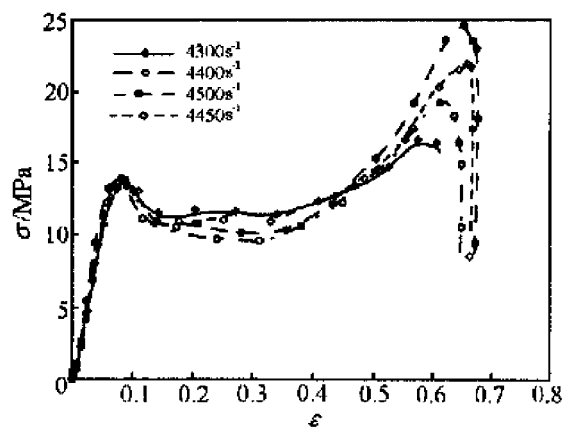


图 6 一种泡沫材料的动态压缩应力应变曲线  
Fig.6 Dynamic compressive stress-strain curves  
of the polyurethane foam

应变曲线表现出很强的应变率相关特性, 而且还明显与应变历史有关。聚氨酯泡沫的应力应变曲线则在大应变时(估计在孔穴压垮后)才开始表现出应变率相关, 因此本文中只给出了聚氨酯泡沫在应变率为  $4500\text{s}^{-1}$  时的情况, 如图 6 所示。图 6 还说明了实验结果的可重复性。这些实验现象的获得对完善认识这类材料的本构特性, 正确建立和运用材料的本构关系, 具有很高的学术价值和应用价值, 同时也肯定了我们的实验方法的合理性和可行性。

同时, 我们也注意到, 实验中采用的试样长径比较小, 可能引起试样中的非一维应力状态, 使测得的应力值高于真实的一维应力值。对此我们暂时未做深入分析和修正。我们对厚度为 1.53、3.06 和 6.35mm 的 RTV630 试样都进行了实验比较, 结果表明, 采用厚度为 6.35mm 的试样, 实验数据是不合理的。这也说明传统试样尺寸原则直接用于软材料 SHPB 实验的局限性, 同时对软材料试样尺寸原则的研究提出了新的需求。对此, 我们准备在实验研究的基础上, 结合数值模拟和理论分析做进一步的工作。

## 5 结 论

采用波形整形器技术获得了具有较长上升时间和平缓上升前沿的输入加载波, 使软材料试样在实验过程中实现了应力平衡和常应变率加载, 满足了 SHPB 实验方法的基本前提, 从而保证了材料动态响应实验测试结果的有效性。另一方面, 在我们的实验中试样的长径比较小, 可能引起试样中的非一维应力状态, 使测得的应力值高于真实的一维应力值。这个问题的进一步改进有待对试样尺寸原则做深入的研究。

## 参考文献:

- [1] Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading [J]. Proc Phys Soc, 1949, B62: 676-700.
- [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.
- [3] Zhao H, Gray G, Klepaczko J R. On the Use of a Viscoplastic Split Hopkinson Pressure Bar [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(4): 319-330.
- [4] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A Split Hopkinson Bar Technique for Low-impedance Materials [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(1): 81-85.
- [5] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz Crystal Imbedded Split Hopkinson Bar for Soft Materials [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 1-6.
- [6] 宋博, 宋力, 胡时胜. SHPB 实验数据处理的解耦方法 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(2): 167-171.
- [7] Gorham D A, Wu X J. Empirical Method of Dispersion Correction in the Compressive Hopkinson Bar Test [J]. Journal de Physique, IV, 1997, 7(3): 223-228.

## A Design of SHPB Experiments for Soft Materials

LU Fang-yun<sup>1</sup>, W. Chen<sup>2</sup>, D. J. Frew<sup>3</sup>

(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

2. AME, The University of Arizona, Tucson, AZ 85721-01190, USA;

3. USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 39180-6199, USA)

**Abstract:** Stress equilibrium and constant strain-rate loading on specimen during SHPB (split Hopkinson pressure bars) experiments, the basic requirements for SHPB technique, have been achieved by means of incident-pulse shaping technique. Based on this reasonable design, valid constitutive data for two kinds of soft material at high strain-rates have been got on SHPB.

**Key words:** soft material; SHPB experiments; pulse shaping