**文章编号**：1000-5773(2003)02-0153-04

# 确定SHPB实验中延迟时间的曲线拟合法*

徐明利[1,2]，张若棋[1,2]，张光莹[2]

(1. 国防科技大学理学院，湖南长沙 410073；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900)

**摘要**：利用已知的试件密度，用预估的透射波与实测的透射波进行早期形状比较，确定试件弹性波速度，进而确定了SHPB试验数据处理时的延迟时间。

**关键词**：SHPB试验；延迟时间；弹性波
**中图分类号**：O347.4 **文献标识码**：A

## 1 引 言

试件的几何效应是影响SHPB实验结果的几个因素之一，由Davies和Hunter的研究结果可知[1]，不同类型的材料进行SHPB实验时的最优几何尺寸、长径比并不同。但无论长径比如何选取，试件厚度总是确定值，应力波穿越试件的时间也是，反射波和透射波之间就存在延迟时间。

早期的SHPB数据处理往往忽略透射波相对于反射波的延迟时间。现在，国内外比较常见的处理方法是先在时间域将透射波往前简单平移，平移的时间就是应力波穿越试件的时间，即延迟时间，再处理得到应力应变曲线。不过，关于SHPB数据处理时透射波平移与否，现在也有不同的意见，本研究关注的是如何确定这个延迟时间。

高阻抗的实验材料(脆性材料除外)，如金属类，应力波在其中的传播速度很大($>10^3$ m/s)，极短的时间内应力波在试件中多次来回反射从而达到应力均匀，因此不仅应力均匀化的假设合理，而且在实验数据处理时忽略反射波和透射波的延迟时间，对得到的应力应变关系影响不大。但对于低波阻抗材料(泡沫、橡胶类软材料)，其应力波速度较小，应力波穿越试件的时间相对较长，这一方面导致试件中较长时间内应力不均匀，另一方面，导致反射波和透射波的延迟时间也相对较大，因而如果忽略延迟时间，将导致应力应变关系不准确，甚至是错误的。

由Pochhmamer-Chree解可知，子弹与入射杆的瞬时碰撞所引起的入射波在圆杆中传播时产生弥散。因此，本研究所有实验均采用了平滑入射波的方法(物理滤波而不是数字滤波)以尽量消除入射波的高频振荡，减小了波的弥散效应，同时获得了均匀性好的应变率[2]。

Lifshitz和Leber分析过试件的波速对测量的应力应变曲线的影响，并提出了一种准确地求波速的方法[3]，Zhao等在研究材料在小应变范围内的动态特性时，分析了延迟时间和波的弥散效应的重要性[4]，提出了曲线拟合法以确定延迟时间，即先取一个虚拟波速，用试件中弹性波的特征线网络方法模拟产生透射波，将该模拟透射波与实测波形进行比较以确定延迟时间。由于特征线网络同时依赖于波速和试件长度，这种操作方法相当费时，某些材料在实验时有压实现象，长度有变化因而影响结果。由此，J. Yuan和N. Takeda等人[5]发展了曲线拟合法，他们先推导得到透射弹性波和入射波的解析关

* **收稿日期**：2002-01-16；**修回日期**：2002-10-10
**基金项目**：国防科技重点实验室基金(97JS752.2KG0107)
**作者简介**：徐明利(1973—)，男，博士研究生.

系[4]，并利用试件的初始密度，通过比较模拟透射波与实测的波形得到最优的波速。

本研究采用一种新的解析关系式来构建透射波，与实验波形进行比较以确定透射波的延迟时间。实验材料是高分子材料，平均密度为 1240 kg/m$^3$，用超声波测量得到的 P 波速度为 2992 m/s，S 波平均速度为 1423 m/s，由此可得到一维弹性应力波速度为 2342 m/s。

## 2 SHPB 实验试件中弹性波传播的分析

SHPB 实验装置及入射波、反射波和透射波见图 1。由于压杆与试件截面不匹配，采用声阻抗 $Z=\rho cA$，其中 $\rho$、$c$、$A$ 分别是密度、声速和截面积。在试件的线弹性动态响应范围内，声速 $c_S=\sqrt{E_S/\rho_S}$，其中 $E_S$ 是试件的杨氏弹性模量，下标 S 代表试件。

一般地，入射杆和输出杆上的应变量计与试件距离相等，当与这两个量计相连接的记录仪触发时，两条信号时间起点相同。依据一维波和试件中应力均匀分布的假设，当考虑透射波与入射波延迟时间时

$$\varepsilon_R(t)=\varepsilon_T(t+\tau)-\varepsilon_I(t) \tag{1}$$

试件中的平均应力为

$$\sigma_S(t)=(1/2)E_B(A_B/A_s)\cdot[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_T(t+\tau)+\varepsilon_R(t)] \tag{2}$$

试件中的平均应变为

$$\varepsilon_S(t)=-\frac{2c_B}{L_{S0}}\int_0^t\varepsilon_R(\xi)\mathrm{d}\xi \tag{3}$$

式中：$L_{S0}$ 为试件初始长度，下标 B 代表压杆。要确定延迟时间 $\tau$，就需要事先确定试件的弹性波速。试件的杨氏模量一般是未知量，而密度容易测量，因而弹性波速和 $\tau$ 都是未知量，这导致试件的平均应力、应变均无法按(1)式～(3)式得到。

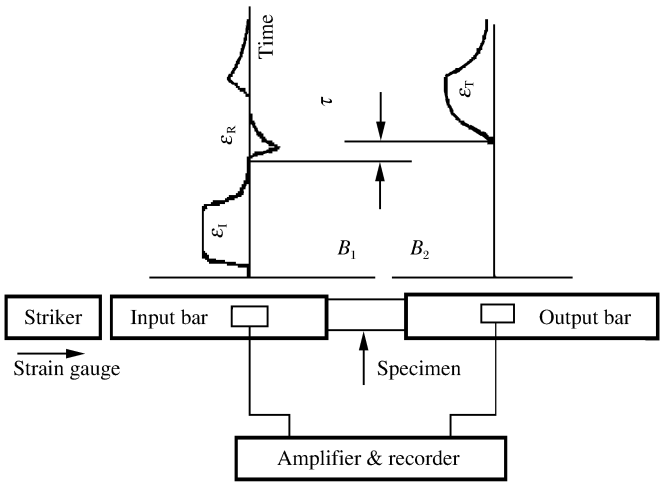



图 1 SHPB 装置及典型信号

Fig. 1 Schematic of SHPB and signals in experiments

## 3 SHPB 实验中延迟时间的确定

以入射波到达界面 $B_1$（见图 1）时刻为时间零点，当试件中的弹性波尚未传播到界面 $B_2$ 时，即 $0<t<\tau$ 时，试件中的透射波、输入杆中的反射波分别为[6]

$$\sigma_{TS0}=T_1\sigma_{I0},\ \sigma_{R0}=R_1\sigma_{I0} \tag{4}$$

而当 $\tau\leqslant t<2\tau$ 时，输出杆中的透射波、试件中的反射波及输出杆中的反射波分别为

$$\begin{cases}\sigma_{T1}=T_2\sigma_{TS0}=T_1T_2\sigma_{I0}\\ \sigma_{RS1}=R_2\sigma_{TS0}=-R_1T_1\sigma_{I0}\\ \sigma_{R1}=R_1\sigma_{I1}\end{cases} \tag{5}$$

而当 $2\tau\leqslant t<3\tau$ 时，

$$\begin{cases}\sigma_{T2}=T_1T_2\sigma_{I1}\\ \sigma_{RS2}=R_2\sigma_{RS1}+T_1\sigma_{I2}\\ \sigma_{R2}=R_1\sigma_{I2}-R_1T_1T_2\sigma_{I0}\end{cases} \tag{6}$$

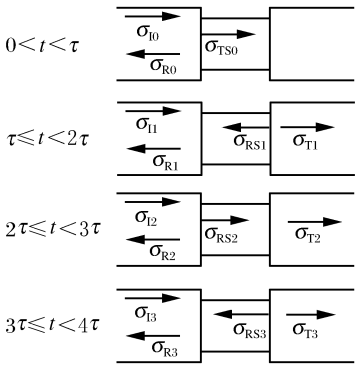



图 2 弹性波在试件中前三次反射时透射波和反射波的起建

Fig. 2 Build-up of the transmitted and reflected pulses up to the first three -reflection

同样,当 $3\tau \leqslant t < 4\tau$ 时

$$\sigma_{T3} = T_2\sigma_{RS2},\ \sigma_{RS3} = R_2\sigma_{RS2},\ \sigma_{R3} = R_1\sigma_{I3} - R_1T_1T_2\sigma_{I1} \tag{7}$$

式中:$R_1$、$T_1$ 分别是弹性波由压杆传播到试件中时的反射系数、透射系数,$R_2$、$T_2$ 是试件中的弹性波传播到压杆中时的反射、透射系数。

依次类推,可得到任意 $t$ 时刻的透射波

$$\sigma_T(t) = \frac{4F}{(1+F)^2}\sum_{n=0}\left\{\left(\frac{1-F}{1+F}\right)^{2n}\sigma_I[t-(2n+1)\tau]H[t-(2n+1)\tau]\right\} \tag{8}$$

式中:$F = \rho_B c_B A_B/(\rho_S c_S A_S)$,$H(t)$ 是 Heaviside 函数,$\tau$ 即是延迟时间。

先取一个虚拟的弹性波速度 $c_{vis}$,$\tau = L_{S0}/c_{vis}$,用(8)式构造弹性透射波 $\sigma_T'$,比较其与所测量的透射波的起始段的形状,当二者的初始段一致时,$c_{vis} = c_S$ 。

表 1 中所列是从 4 发实验结果中通过曲线拟合得到的弹性波速,与参考波速相比,还是很接近的。由于我们的高分子试件制作工艺有一定分散性,导致了密度的分散性,因而计算波速也有一定分散性。

**表 1　用曲线拟合法计算的弹性波速度**

**Table 1　Elastic velocities obtained by curve-fitting method**

| Shot No. | Specimen length/(mm) | Travel time/(μs) | Calculated velocity/(m/s) | Referenced velocity/(m/s) |
|---|---|---|---|---|
| Shot-01-20 | 6.029 | 2.600 | 2319 | |
| Shot-01-24 | 5.943 | 2.532 | 2347 | 2342 |
| Shot-01-50 | 5.951 | 2.532 | 2350 | |
| Shot-01-60 | 5.978 | 2.576 | 2321 | |

实验 Shot-01-50、Shot-01-60 中测量的透射波与拟合波分别见图 3。由于拟合波代表试件纯弹性的响应,因此仅在很小的应变范围内两条曲线才重合得较好,随着应力的增加,试件的动态响应偏离弹性响应愈远,特别是当试件在加载过程中发生了破坏时,透射波很快就开始下降,而拟合波仍随入射波上升,见图 3(a)。

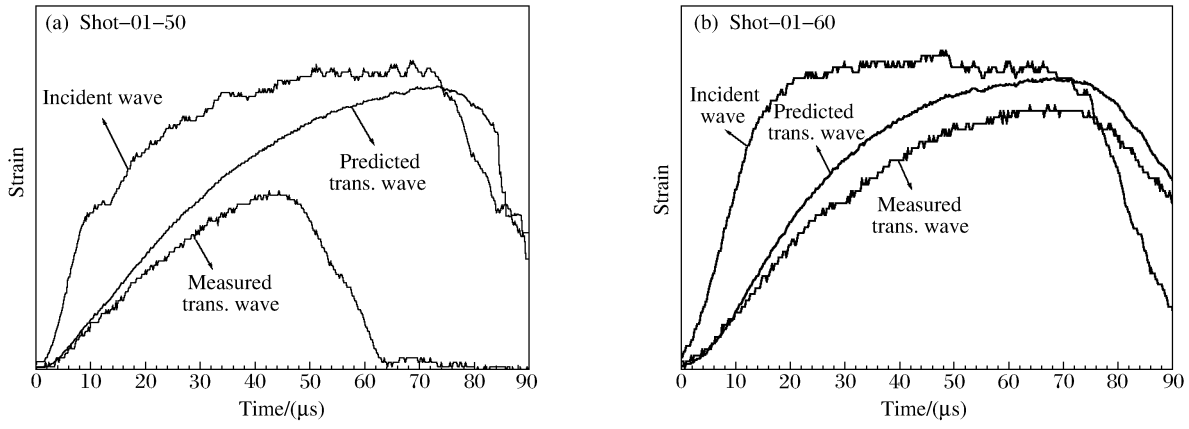



图 3　实验测量的入射波、透射波及拟合的透射波

Fig. 3　Measured incident waves, transmitted waves, and predicted transmitted waves

## 4 结论及讨论

(1) 利用曲线拟合法确定了 SHPB 实验中的延迟时间,计算的波速与超声测量得到的弹性波速很接近。这对于需要作透射波平移的软材料,有一定的可行性。

(2) 由于电路噪声的干扰,从信号中提取入射波、透射波的起点时会带来一定误差,影响计算结果。另外,由于进行比较的是弹性应变部分,而试件的应变一般并不限于弹性范围,因而参入比较的实测透射波的长度也是影响计算结果的一个重要因素。

## References:

[1] Davies R M, Hunter S C. The Dynamic Compression test of Solid by the Method of the Split Hopkinson Pressure Bar [J]. J Mech Phys Solids, 1963, 11: 155.

[2] Xu M L, Zhang R Q, Wang W, et al. Application of Wave Shaper in SHPB Experimental Study of Phenolic Resin [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 377－380. (in Chinese)
徐明利,张若棋,王 悟,等. 波形整形器在酚醛树脂的霍普金森压杆实验中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 377－380.

[3] Lifshitz J M, Leber H. Data Processing in the Split Hopkinson Pressure Bar Tests [J]. Int J Impact Engng, 1994, 15: 723.

[4] Zhao H, Gray G. On the Use of SHPB Techniques to Determine the Dynamic Behavior of Materials in the Range of Small Strains [J]. Int J Solids Structures, 1996, 23: 3363.

[5] Takeda Y J, Was A M. A Note on Data Processing in the Split Hopkinson Pressure Bar Tests [J]. Exp Tech, 1998, 22(6): 21－24.

[6] Parry D J, Dixon P R, Hodson S, et al. Stress Equilibrium Effects within Hopkinson Bar Specimens [J]. Journal de Physique IV France, 1994, C8: 107－112.

## Curve-Fitting Method for Determining the Delay-Time in SHPB Experiments

XU Ming-Li[1,2], ZHANG Ruo-Qi[1,2], ZHANG Guang-Ying[2]

(1. *Science College, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

**Abstract**: With the pre-determined density of specimen, the elastic velocity can be solved by the shape fitting of the predicted transmission wave with the measured transmission wave in the initial stage, and then the delay-time in SHPB data processing can be determined.

**Key words**: SHPB experiment; delay-time; elastic wave