

文章编号: 1001-1455(2002)04-0377-04

波形整形器在酚醛树脂的霍普金森压杆 实验中的应用*

徐明利^{1,2}, 张若棋^{1,2}, 王 悟², 李英华²

(1. 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中物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: 利用霍普金森压杆在室温下进行了应变为 $10^2 \sim 10^3 \text{s}^{-1}$ 的冲击压缩实验, 同时采用波形整形器使入射波的上升沿变宽, 更好地满足试件中应力应变均匀分布的条件, 使实验更接近常应变率加载的条件。结果表明, 酚醛树脂是一种应变率敏感材料, 在室温下和高应变率下表现出冲击脆化的特征。

关键词: SHPB 实验技术; 波的弥散; 整形器; 断裂

中图分类号: O348; TB332 文献标识码: A

1 引言

1949年 Kolsky 首次提出了利用分离式霍普金森压杆研究材料在高应变率下的动态性能的方法, 由此产生了拉伸或纯剪切的加载及测量技术。与无弥散的扭转波不同的是, 当利用加载杆产生纵波以确定材料的压缩或拉伸力学性能时, 必须面对波的弥散问题。

为了消除波的弥散对 SHPB 实验结果的影响, 早期主要开展了两种分析和修正工作: 一种是在时域内进行的, 如 R. M. Davies^[1] 的工作等; 另一种是在频域内的, 如 J. M. Lifshitz 等^[2]、J. C. Gong 等^[3]、王从约等^[4] 的工作, 主要立足于数学角度。在认识到 SHPB 中 Pochhammer-Chree 振荡的起因之后, 采用平滑入射波的方法以尽量消除入射波的高频振荡, 从而减小波的弥散效应的做法逐渐发展起来。入射波整形技术最初用来过滤加载波中的高频部分, 后来, 常用作实现常应变率加载的技术手段^[5-6], 而在传统的 SHPB 技术中, 与反射波成正比的应变率在实验过程中是逐渐减小的。

酚醛树脂是一种常见的纤维预浸料基体, 经热压固化后成为固态。平均密度为 1240kg/m^3 , 一维弹性应力波速度为 2342m/s , 其波阻抗低于常见金属材料的波阻抗。此外, 固化后的酚醛树脂表现出比较明显的冲击脆化特征。传统 SHPB 的加载波上升时间为 $10 \sim 20 \mu\text{s}$, 在如此短的时间内, 很难保证试件中早期应力的均匀性, 实验结果很难反映出材料真实的动态力学性能。

对于波阻抗较低的材料, 在实验中采用整形器, 一方面拓宽加载波的上升沿, 以便试件中应力应变加载波的上升阶段达到或接近均匀分布, 即早期应力均匀性(作者将另文讨论); 另一方面, 延长试件破坏前的应力均匀状态, 使实验结果更真实、更准确。

2 实验方法

依据 L. D. Bertholf 等^[7] 和 D. J. Parry^[8] 的试件尺寸设计思路, 针对 $\varnothing 14.5 \text{mm}$ 霍普金森杆, 将试件加工成 $\varnothing 12 \text{mm} \times 6 \text{mm}$ 、端面平行度小于 $10 \mu\text{m}$ 的圆柱形。三种尺寸的整形器分别以 S、M、L(即小号、中号、大号)标记。有关波形整形器的理论设计公式见文献[9]。

实验时用黄油将整形器贴于入射杆受撞击端面中心位置, 通过调整子弹速度和整形器的组合, 得到

* 收稿日期: 2001-10-16; 修回日期: 2002-06-18

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室基金项目(97JS752.2KG0107)

作者简介: 徐明利(1973—), 男, 博士研究生。

不同上升沿的加载波。

图 1 给出了实验用的 SHPB 装置。

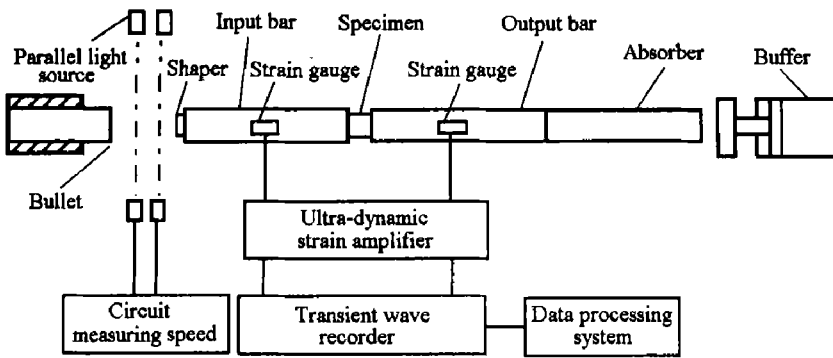


图 1 实验装置简图
Fig. 1 Schematic of SHPB

整形后,入射波的下降沿也有不同程度的“拉宽”,峰值平台变窄甚至不出现。还可以看出,经整形后的入射波比较光滑,这说明整形器过滤掉了由瞬时碰撞引起的高频波,正是由于这些高频波的传播滞后于低频波,导致压杆中应力波的弥散。

从图 2(b)可以看出,尺寸相同的整形器,入射波拐点的高度大致相同,入射波上升沿也基本相同。值得注意的是,只有当碰撞速度达到某一值时,才出现拐点。速度为约 19.2m/s 时,拐点还不是很明显,当速度增加到 25m/s 以上时,拐点才清晰可见。另外,在相同的碰撞速度下,采用小尺寸的整形器时,入射波形的拐点高度低于采用大尺寸整形器的拐点,但入射波峰值基本相同,入射波上升沿也基本相同,见图 2(c)。

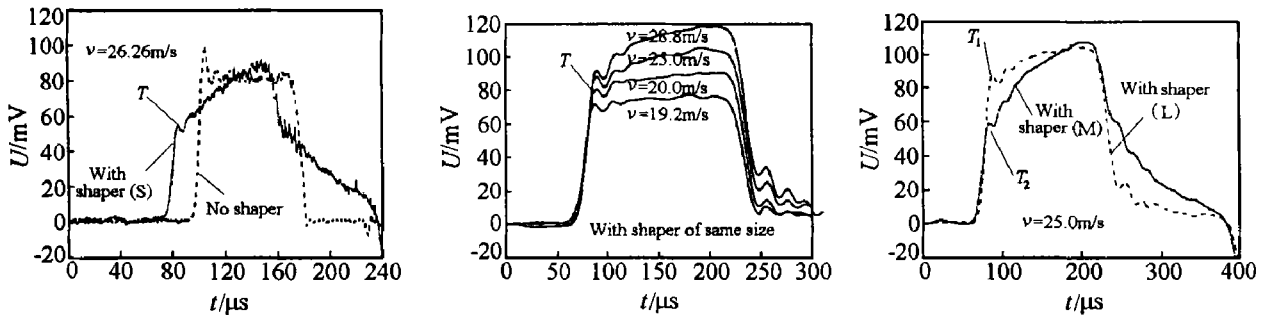


图 2 入射波形的比较

Fig. 2 Comparison of incident waves

3.2 波形整形器对反射波的影响

图 3(a)是未经整形的典型原始信号(铝杆)。在加载期间,透射波连续上升,大约 $70\mu\text{s}$ 之后达到峰值,当入射波开始卸载时,透射波转而连续下降。透射波宽度与入射波相同,这表明试件中的应力是连续变化的,试件没有出现明显的损伤或破坏。图 3(b)是经整形后的典型波形(钢杆),其反射波在形状上与图 3(a)中的反射波有明显的差别。在入射波与试件作用约 $20\mu\text{s}$ 之后,反射波开始并保持了约 $70\mu\text{s}$ 的平台,然后恢复到基线,试件中的应变基本恢复。图 3(c)是与两次试验相应的工程应变率曲线,可以看出,加波形整形器后,可以平滑试件在整个加载过程中的应变率,除在加载的最初阶段 ($< 10\mu\text{s}$) 和卸载阶段 ($> 90\mu\text{s}$),应变率的波动幅度远比没有加整形器时的应变率的波动小得多,由此按几何平均计算得到的平均应变率应该更准确,得到的试件的应力-应变曲线应该更能真实地反映材料在常应变率下的动力学性能。

实验中还发现,当采用与试件波阻抗不匹配的钢杆、而整形器相同时,反射波形和透射波形均好于

3 实验结果与分析

3.1 波形整形器对入射波的平滑作用

采用整形器后,能明显改善入射波的上升沿,图 2 为入射波应变信号。在图 2(a)中,两发实验的子弹速度相同;在图 2(b)中,采用相同的整形器。从图可以看出,整形后的入射波明显被“拉宽”,上升时间比未整形时宽得多。入射波上有一拐点(标为 T 点),拐点之后入射波继续增长,但速度

采用铝杆的反射波形和透射波形。这是因为，相比之下，钢杆与酚醛树脂波阻抗更不匹配，因而透射波幅度更低，容易实现反射波平台。

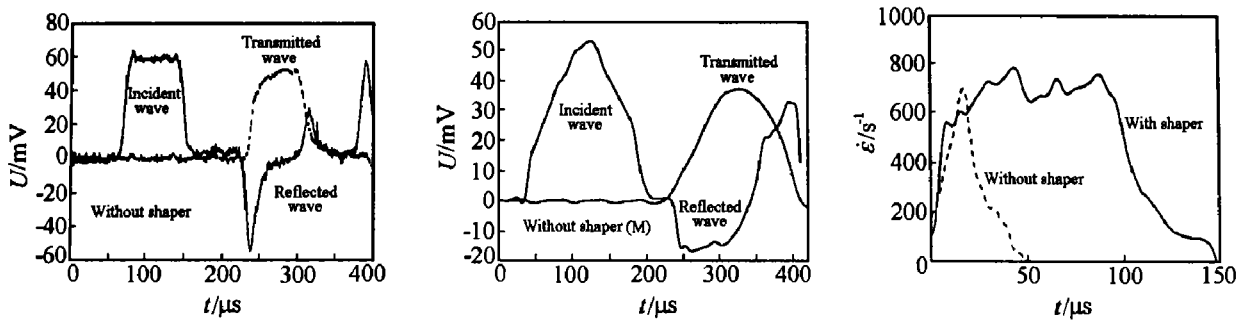


图 3 试件未发生断裂或破坏时的试验记录及应变率曲线

Fig.3 Typical record and strain rate curves without damage or failure in specimens

3.3 试件的破坏特征

在图 4 所示的试验记录中，反射波和透射波均突然出现大幅度的变化，透射波脉宽明显窄于入射波，表明试件在加载过程中发生了断裂破坏。由图 4(b)中的反射波可以看出，在试件发生破坏之前的应变率的平均性要好于图 4(a)中的平均性。

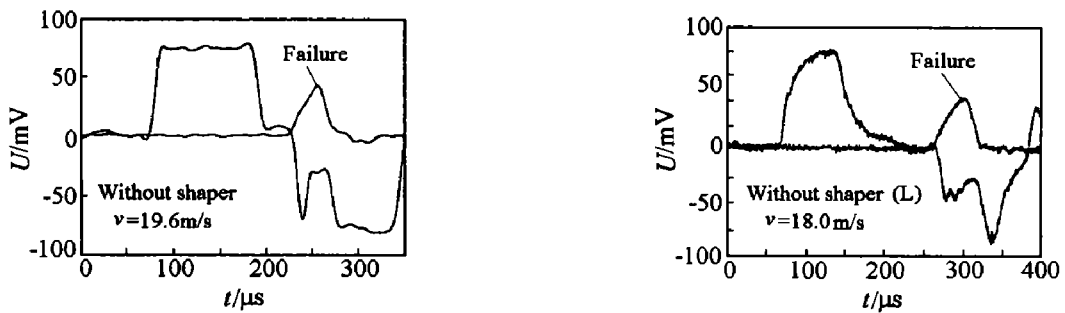


图 4 试件发生断裂或破坏的典型试验记录

Fig.4 Typical record with damage or failure in specimens

当透射波达到适当强度时，酚醛树脂试件中有明显的裂纹出现(见图 5)。动态加载下的裂纹与准静态加载的裂纹有不同之处，准静态下，裂纹沿试件径向，交叉少；动态下，裂纹方向不规则，交叉明显。测量回收样品的厚度后也发现，动态下所有试样(包括径向开裂的试件)几乎没有残余变形，而准静态加载后试件有不同程度的残余变形。另外，在开裂的试样断口上同时存在光滑区和粗糙区，还可以观察到明显的直线条纹和肋状条纹(见图 6)，这是高分子材料脆性断裂的部分特征^[10]。由此可见，酚醛树脂材料表现出冲击脆化特征。

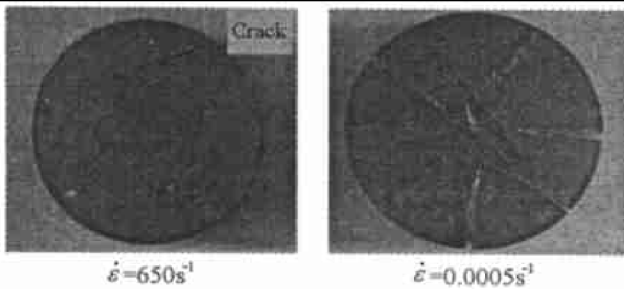


图 5 酚醛树脂试件中裂纹
Fig.5 Crack in phenolic resin specimens

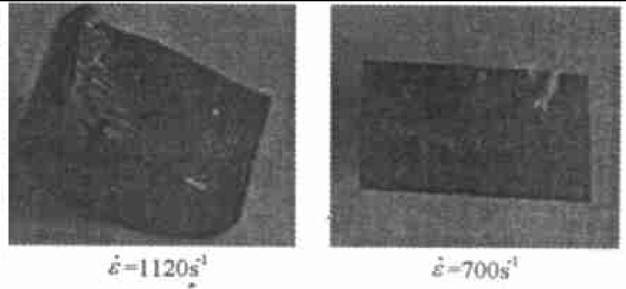


图 6 酚醛树脂的断口形貌
Fig.6 Failure morphology of phenolic resin

4 结 语

对于类似酚醛树脂这类波阻抗较低的高分子材料,在 SHPB 试验中通过采取入射波整形技术,可以获得比较光滑的入射波,降低波的弥散效应,并且可以获得更接近常应变率的动态加载条件。实验结果表明酚醛树脂材料具有应变率敏感性,并表现出冲击脆化特征。

感谢卢芳云教授的帮助和指导。

参考文献:

- [1] Davies R M. A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar[J]. *Phil Trans A*, 1948, 240:375-457.
- [2] Lifshitz J M, Leber H. Data Processing in the Split Hopkinson Pressure Bar Tests[J]. *Int J Impact Engng*, 1994, 15(6):723-733.
- [3] Gong J C, Malvern L E, Jenkins D A. Dispersion Investigation in the Split-Hopkinson Pressure Bar[J]. *J Engng Mater Technol*, 1990, 112:309-314.
- [4] 王从约,夏源明.圆杆中弹性应力波的傅立叶弥散分析[J].*爆炸与冲击*, 1998, 18(1):1-7.
WANG Cong-yue, XIA Yuan-ming. Dispersion Analysis for Elastic Wave in the Cylindrical Bar by Fourier Transform [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(1):1-7.
- [5] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Technique for Dynamic Recovery Experiments[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1991, 435:371-391.
- [6] Bragov A M, Lomunov A K. Methodological Aspects of Studying Dynamic Material Properties Using the Kolsky Method [J]. *Int J Impact Engng*, 1995, 16(2):321-330.
- [7] Bertholf L D, Karnes C H. Two-dimensional Analysis of the Split Hopkinson Pressure Bar System[J]. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23:1-19.
- [8] Parry D J. The Effect of Strain Rate on the Compressive Stress-strain Properties of PEEK and Epoxy Carbon Fibre Composites[J]. *J Phys IV*, 1997, 7(C3):605-610.
- [9] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz-crystal-embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1):1-6.
- [10] 许凤和. 高分子材料力学试验[M]. 北京:科学出版社, 1987:106-116.
XU Feng-he. *High Molecular Material Mechanical Testing* [M]. Beijing: Science Press, 1987:106-116.

Application of Wave Shaper in SHPB Experimental Study of Phenolic Resin

XU Ming-li^{1,2}, ZHANG Ruo-qi^{1,2}, WANG Wu², LI Ying-hua²

(1. *Science College, National University of Defense Technology,*

Changsha 410073, Hunan, China;

2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,*

Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The dynamic compressive behavior of phenolic resin has been studied at room temperature and at strain rates from about 10^2 to 10^3 s^{-1} using SHPB technique. Wave shapers have been utilized to modify the incident wave, the rising time of the wave was effectively expanded as compared with those in traditional SHPB, so that the condition of uniform distribution of stress and strain in specimen is satisfied more sufficiently, and furthermore a constant strain rate is ensured during the loading history. The experiments show that the stress-strain curve of solidified phenolic resin is rate dependent, and solidified phenolic resin shows character of brittleness at high strain rate.

Key words: SHPB technique; wave dispersion; shaper; failure