

# 固体材料在高应变率条件下的 TSHB 实验技术\*

杨桂通 宋育兆

(太原工业大学, 1984年7月24日收到)

## 提 要

本文介绍了分离式Hopkinson扭杆技术(TSHB), 它克服了压杆技术的主要缺陷. 具有测试精确, 容易获得较大变形等特点. 文中给出了在我们自制试验机上获得的部分工程材料的动态应力应变曲线.

## 一、引 言

众所周知, 在高应变率条件下, 许多材料的流动应力都有明显的提高. 这在研究材料的破坏机理、建立动态本构关系及在某些工程领域中都有重要的应用.

H. Kolsky (1949年) 首先提出了分离式Hopkinson压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, 缩写为SHPB)技术<sup>[1]</sup>, 用来测定一维应力状态下高速变形时的应力-应变-应变率关系曲线. 之后, 许多学者对SHPB技术做了论证、改进和发展. 由于应力波传播过程中的弥散效应以及试件的径向惯性和端面摩擦的影响, 使试验结果的分析工作变得相当复杂, 需要人为地给进一些修正因子. 图1给出了SHPB试验的典型曲线, 由图可见, 由于径向膨胀引起的振动振幅达到基本波形幅值的20%或更高一些.

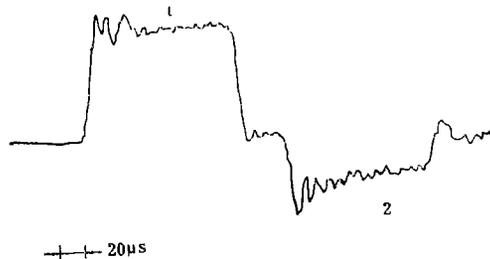


图 1

基于上述原因, 自六十年代中期以来, 分离式Hopkinson扭杆(Torsional Split Hopkinson Bar, 缩写为TSHB)技术得到了发展, 它是在1966年首先由Baker和Yew提出的, 后来许多学者如Cambell, Lewis, J. Duffy, Nicholas, Lawson在扭转波的发生和试验装置方面做了许多改进<sup>[3,4]</sup>. 试验与理论分析都表明, 当初始条件为关于圆柱径向坐标的线性函数时, 扭转波沿圆杆的传播没有弥散现象<sup>[6]</sup>. 由于试件没有径向运动, 所以在SHPB技术中的径向惯性效应和界面摩擦问题也不复存在(详见文献[5].[6]).

本文根据在自制的试验装置上所做的试验, 讨论了TSHB技术上的得失, 指出了TSHB

\* 中国科学院基金资助课题。

技术是一种简单、有效适用的实验方法,给出了一些工程上常用材料的应力-应变-应变率曲线,并做了讨论。

## 二、TSHB 技术

Hopkinson扭杆装置见图2,其原理见图3,其中杆AC和杆CD分别为输入和输出波导杆,薄壁管试件用强力粘合剂粘在C处。卡紧装置首先在B处将输入波导杆固定。转动旋转头,予贮扭矩 $M$ 于AB段后再将旋转头固定。此时,若突然释放卡紧机构,在输入杆上将得到一个幅值为 $M/2$ 的右行扭转波,其延续时间为二倍的AB段杆长除以波速。同时,一幅值为 $M/2$ 的卸

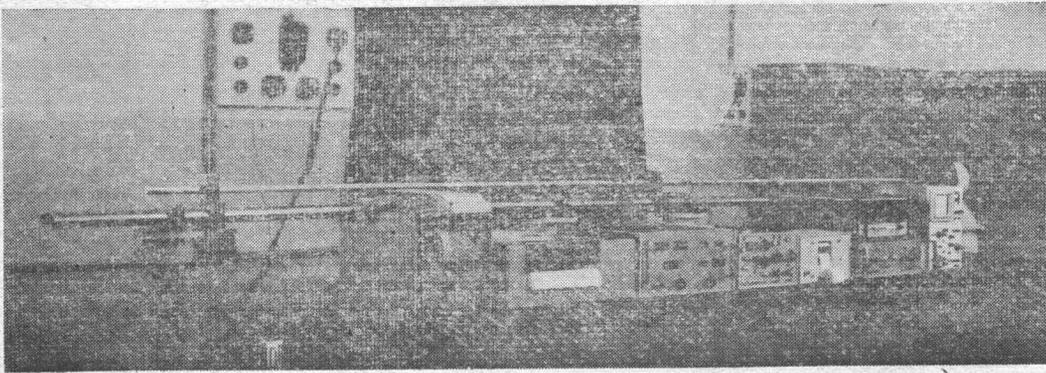


图 2

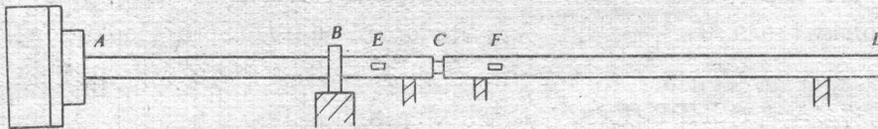


图 3

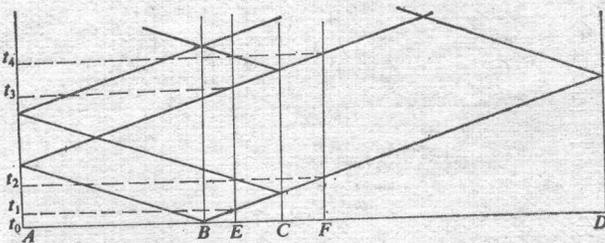


图 4

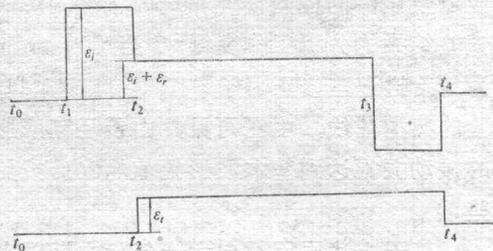


图 5

载波向左传播,经固定端反射后,形成扭转波波尾。由于试件的声抗与波导杆不同,扭转波通过试件时形成反射和透射。在波导杆的E、F处贴有应变片,用于定量地测量通过的应变波。在应变波传播过程中,波导杆始终处于弹性状态。

图4在 $x-t$ 平面上给出了扭转波传播的特征线。图5为贴在E、F处的应变片接受理想矩形波且试件刚度不变时应当得到的波形图。在 $t_0$ 时刻卡紧机构释放,幅值为正、负 $M/2$ 的扭转波向两个方向传播。在 $t_1$ 时刻,右行波到达应变片E处,应变片E检测到入射波 $\epsilon_i$ 。当入射波到达试件后,一部分透射,一部分反射。在 $t_2$ 时刻,应变片E记录到入射波 $\epsilon_i$ 和反射波 $\epsilon_r$ 的迭加,应变片F记录到透射波 $\epsilon_t$ ,在 $t_3$ 时刻,扭转波的波尾通过E。在 $t_4$ 时刻,反射波和透射

波的波尾分别通过  $E$ 、 $F$ 。由上述分析得知，通过贴在波导杆上的应变片，可以很容易地测取入射波  $\epsilon_i$ ，反射波  $\epsilon_r$  和透射波  $\epsilon_t$ 。

实际上，波的发生有一前沿时间，并非理想矩形。图 6 给出了将波导杆连接在一起时得到的波形图，照片上两个波形的时差为  $EF$  段的长度除以波速，由图可见，入射波  $\epsilon_i$  接近理想矩形，照片上横坐标的时基为每格  $100\mu\text{s}$ ，可见波的上升时间在  $40\mu\text{s}$  左右。

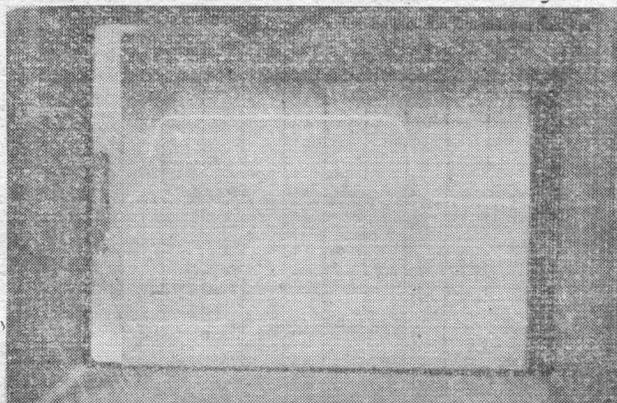


图 6

图 7 为试件接近理想塑性时的波形图即扭转波通过试件时，透射波和反射波接近常数，在整个变形过程中，试件的刚度基本不变。

图 8 为强化材料的波形图。由图，透射波的波幅随时间增加而增加，反射波波幅随时间增加而减小，即试件的扭转刚度在变形过程中增加了。

理论分析可以得出试件变形过程中瞬时的应变率、应变和应力，其表达式为<sup>[4]</sup>：

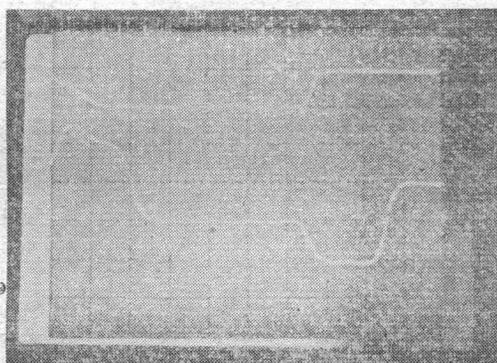


图 7

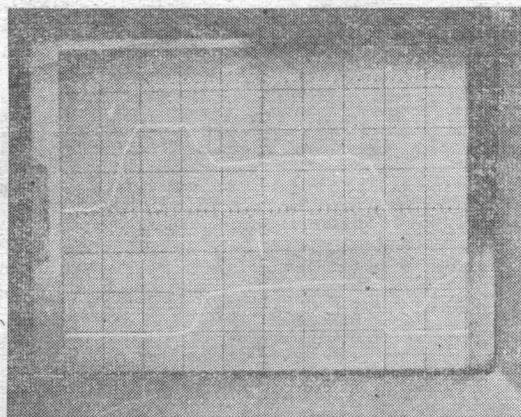


图 8

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{r_s}{r_b} \frac{c}{l} \epsilon_r; \quad \gamma = 2 \frac{r_s}{r_b} \frac{c}{l} \int \epsilon_r dt; \quad \tau = G_b \frac{r_s}{r_b} \frac{J_b}{J_s} \epsilon_t \quad (1)$$

式中  $r$  是半径， $J$  是极面积矩， $G$ 、 $c$  是波导杆中剪切弹性模量和波速。下标  $b$ 、 $s$  分别代表杆和试件，其中  $r_s$  是薄壁管的平均半径。

由 (1) 式可知，变形过程中试件的剪应力和剪应变率分别与透射波和反射波的幅值成正比。对于强化不是特别强的材料，当扭转波的前沿通过后，应变率的差异将不是很大，一般可以认为是在同一应变率水平上，将第二、第三式中的  $t$  消去，即得一组在某一平均应变率下的应力-应变关系曲线。实际上，当  $\dot{\epsilon}$  接近常数时，由第二式可得到  $\epsilon = kt$ ，即透射波的横坐标与应变成比例，又由于透射波的纵坐标与应力成正比，故透射波可以看成是横轴与纵轴分别按一定比例放大或缩小了的应力-应变图。

在推导公式 (1) 的过程中，引入了如下假设：

1. 变形是一维的; 2. 应力和应变在试件内均匀分布; 3. 不计试件塑性变形的能耗。

如前所述, 在满足一定初始条件下, 第一项假设是严格满足的。对第二项假设, 由于在本装置中波通过试样的时间与波的延续时间相比非常短, (大约在 $1/500 \sim 1/200$ ), 对塑性较好的材料而言, 可以认为上述假设是成立的。我们曾在铝和软钢试件上划线, 试验后观察变形情况, 可以看到变形是很均匀的。

假设了主要用于公式  $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ , 显然试件在变形过程中会有能量损失, 但由于试件的尺寸较小, 能量的损失与能量的传递在一定条件下可以被忽略, 上式近似地成立。图9将两波形图放在了相同的基零位置, 可见在变形过程中  $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$  是近似地得到满足的, 即两波形在变形过程中重合。由图7、8的观测, 也不难得到这样的结论。

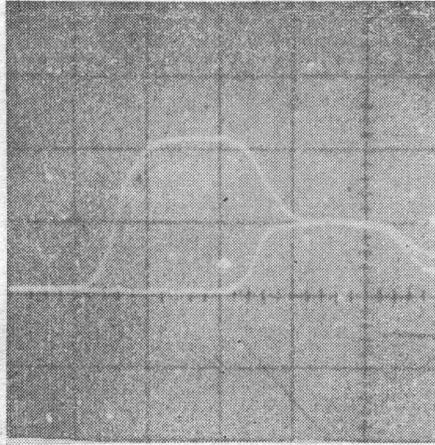


图 9

使用预加扭矩式Hopkinson 扭杆装置的另一突出优点是输入波导杆的扭矩贮存段可以做得较长, 以得到较长的扭转波延续时间。目前我们使用的装置的延续时间约为 $650\mu\text{s}$ , 是一般Hopkinson 压杆的 $2 \sim 4$ 倍, 若稍加改进还可大幅度增加, 这对获得大变形条件下的本构关系是十分有利的。

### 三、几种工程材料的动态应力应变曲线

应用自制的TSHB装置对L4工业纯铝(GB3190-82), 20号优质碳素结构钢(GB699-65)和60Si<sub>2</sub>Mn弹簧钢(YB8-59)做了试验。试样化学成分见表1, 其中弹簧钢经过淬火和回火, 图10、7、8分别为L4工业纯铝, 20号碳结钢和60Si<sub>2</sub>Mn的典型波形照片。由波形图可以看到L4工业纯铝和60Si<sub>2</sub>Mn弹簧钢的透射波幅在波头通过后随时间历程的增加有所提高, 这表明这两种材料在塑性变形过程中有明显的应变强化, 20号碳结钢在材料屈服后, 透射波波幅几乎不再增加, 表现出接近理想塑性变形性质。

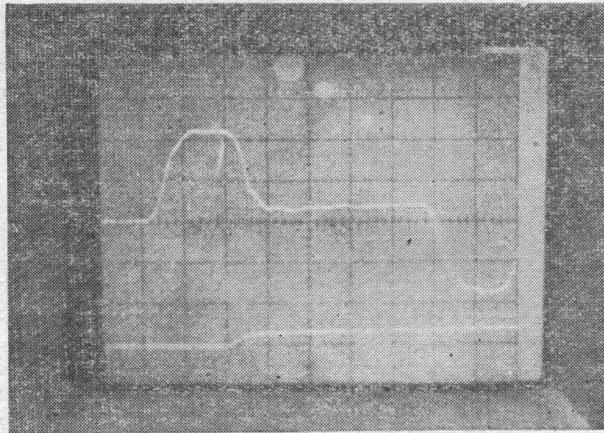


图 10

图11、12、13给出了按公式(1)计算得到的L4纯铝, 20号碳结钢和60Si<sub>2</sub>Mn弹簧钢的应力-应变-应变率图形。计算所用数据是由瞬态记录仪

记录, 并由其中10bit的AD变换器离散为数字信号给出的。由图可见, L4纯铝和20号钢的流动应力与应变率是有关的。随着应变率的提高, 材料的流动应力明显地提高。对于L4纯铝, 当应变为0.1, 应变率为 $1070\text{s}^{-1}$ 和 $2460\text{s}^{-1}$ 时, 流动应力分别比静态提高32.8%和64.2%, 对

	(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
20号钢	0.2	0.69	0.04	0.02	0.02	0.52	0.05
60Si <sub>2</sub> Mn	0.65	0.51	0.07	0.01	0.013	1.05	0.08
	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti
L4 纯铝	0.19	0.1	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

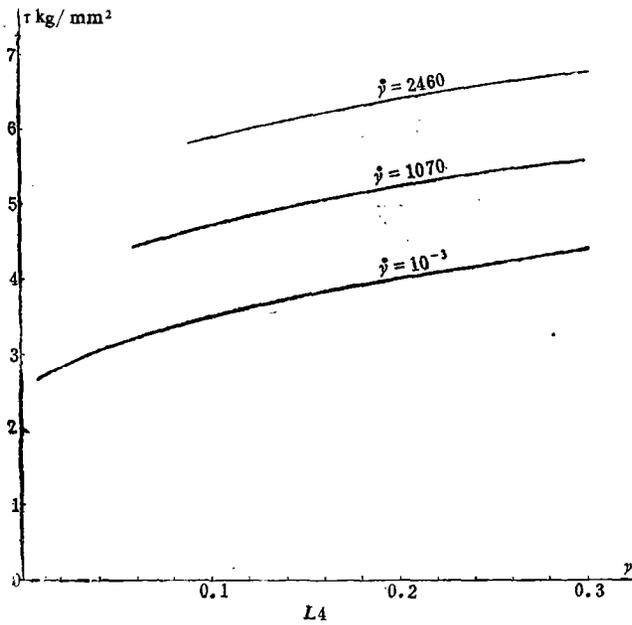


图 11

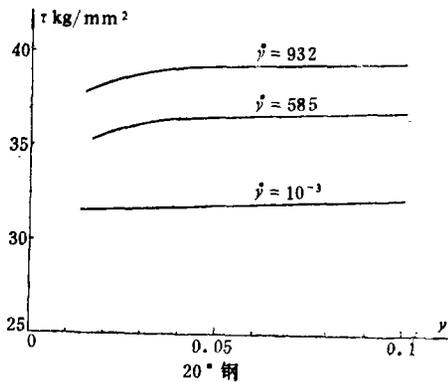


图 12

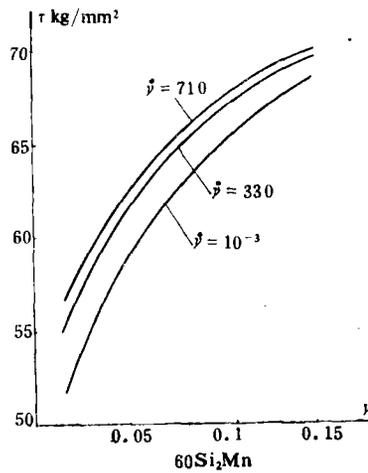


图 13

于20号钢, 当应变率为 $590\text{s}^{-1}$ 和 $930\text{s}^{-1}$ 时, 分别提高15%和23.4%。但对于弹簧钢, 应变率效应却不够明显, 当应变为0.1, 应变率分别为 $330\text{s}^{-1}$ 和 $710\text{s}^{-1}$ 时, 流动应力分别比准静态试验提高2.9%和3.7%。

目前我们使用的试验装置, 能够达到的应变率水平大约为 $100\sim 3000\text{s}^{-1}$ , 若要大幅度地提高, 主要途径是进一步减小试件的计量长度, 这是由于应变率与计量长度成反比。但这样做, 会给试样的加工和测量带来一定的困难。

由以上讨论可见, TSHB技术能克服SHPB的主要缺陷, 且结构相当简单易于制造和使用。在同样应变率下能获得更大的变形, 在应变率为 $10^2\sim 10^3\text{s}^{-1}$ 范围内能得到更为工程所关注的剪切应力-应变关系曲线, 是一种很有前途的材料实验技术。

最后, 本文在试验过程中得到了赵勇刚、阎庆荣、林洁同志的帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Kolsky, H., An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proc. phys. soc.*, (1949) 676-700.
- [2] Nicholas, T., J. Lawson. and I. Fiscus., The AFML Torsional Split Hopkinson Bar, *AFML-TR-71-145*.
- [3] 段祝平、孙琦清、杨大光、田兰桥、褚瑶, 高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究, *力学进展*, (1980).
- [4] 赵西环, SHPB技术的进展, *太原工学院学报*, (1981).
- [5] 张善元、杨绍瑞, 弹性圆柱体中扭转波的几何弥散效应, *太原工学院学报*, 4(1983) 2-14
- [6] 杨桂通, 塑性动力学概论, *应用数学和力学讲座讲义*, (1983).

## The TSHB Technique for Material Testing at High Rates of Strain

Yang Gui-tong Song Yu-zhao

(*Taiyuan University of Technology, Taiyuan*)

### Abstract

The material testing technique of Torsional Split Hopkinson Bar(TSHB) is investigated in this paper. It can solve nearly all the problems of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). Furthermore, accurate experimental results can be obtained in large deformation condition with it. In this paper some dynamic stress-strain curves of some engineering materials are also plotted which are obtained from a TSHB apparatus made by ourselves.