

# 单脉冲加载的 Hopkinson 扭杆装置<sup>\*</sup>

薛青 沈乐天 陈淑霞 白以龙

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 分析了反复加载现象及其对变形微结构的影响,介绍了对现有标准 Hopkinson 扭杆的改进。改进后的新型 Hopkinson 扭杆是具有特殊设计的加载头和传动器的四杆系统,它完全消除了应力波的反复加载效应,实现了过程的单脉冲加载。改进前后的实验波形和变形局部化微结构形态的比较证实了改进的有效性。

**关键词** Hopkinson 扭杆 反复加载 微结构形态

**中图法分类号** O347.41

## 1 引言

Hopkinson 扭杆是研究高应变率下材料动态剪切行为的重要工具之一。这一技术最初由 Baker 等<sup>[1]</sup>根据 Kolsky<sup>[2]</sup>的原理建立,此后 Campbell 等<sup>[3]</sup>、Nichlas<sup>[4]</sup>、Duffy 等<sup>[5]</sup>、Frantz 等<sup>[6]</sup>和 Lipkin 等<sup>[7]</sup>许多研究者又进行了完善和改进。他们的工作主要是改进加载形式、应力波形、建立适于考察材料应变率变化历史效应(如加、减应变率)的加载装置等。这些改进使 Hopkinson 扭杆技术越来越广泛地被用来研究材料高应变率下剪切的力学行为和剪切局部化现象。

随着人们对于材料动力学行为研究的深入,材料在动态变形过程中微结构、微损伤的演化过程以及这些微结构特征同宏观力学响应的对应关系已成为人们关注的焦点<sup>[8]</sup>。然而,现有的标准 Hopkinson 扭杆实验中来回反射的应力波形成对试件的反复加载,破坏了材料在首次加载过程中的变形微结构,严重地妨碍了宏微观的对应研究。为了解决这一问题,Xue 等<sup>[9]</sup>改进了标准的 Hopkinson 扭杆。通过引入卸波杆和传动器把透射部分的应力波完全导出扭杆系统。同时,控制加载应力波幅值使反射部分不再引起试样的塑性变形。这在一定范围内保证了宏微观对应研究的准确性。但是,控制加载条件就限制了加载应变率,因此要根本解决问题必须对扭杆系统进行重新设计。我们介绍了进一步改进 Hopkinson 扭杆的方法。在应力波分析的基础上提出了完全消除反复加载的原理。重新设计的扭杆系统把反射的应力波导出了杆系,实现了单脉冲加载过程。利用改进后的扭杆可以定量地确定材料微结构与应力应变响应的对应关系,特别是材料剪切局部化中微结构的演化过程,剪切局部化实验的结果证实了改进的成功。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目。

1995年12月19日收到原稿。

## 2 Hopkinson 扭杆的反复加载现象及其对材料微结构的影响

### 2.1 反复加载现象

众所周知,材料在高应变率下的变形是一个瞬态过程。要在此过程中确定材料微结构的变化与发展无疑是十分困难的,通常只能考察加载过程完成后材料残余塑性变形的微结构形貌。所观察的微结构应该是单次波动加载过程的结果,这样才能定量地确定材料微结构变化的程度和真实特征。

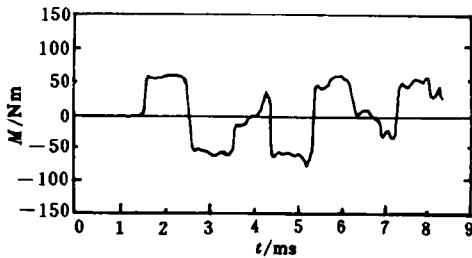


图1 标准 Hopkinson 扭杆标定波形

Fig.1 The oscillogram of a standard SHTB with a dummy specimen

由于 Hopkinson 扭杆技术具有许多优点,近十几年来许多研究者利用该技术研究了剪切局部化中的材料微结构特征和演化过程<sup>[10~12]</sup>。然而,现有标准 Hopkinson 扭杆是由输入、输出杆中间固连试件而构成。这种结构存在着应力波对试件的反复加载问题,即应力脉冲对试件加载后在杆系两端引起反射,形成再次、甚至后续多次对试件的加载过程。因此标准扭杆不能保证单脉冲加载条件。图1为装有伪试样的标准扭杆上的实验波形( $M$ 为扭矩)。输出杆上记录的应力波形表明在第一个加载方波后跟随数个具有同样幅度和脉宽的正、反向应力波脉冲。

毫无疑问,如果二次加载波产生的应力幅值高于实验材料的二次屈服极限,会发生材料后续的塑性变形,从而破坏由第一个加载波所产生的微结构变形特征。

### 2.2 应力波分析

为了确定二项加载波形成的过程和形式,对扭杆中应力波传播规律作一简单分析。分析中采用两个基本假设:(1)忽略试件的长度,认为它是一个界面;(2)一次加载波的透射比近似为一常量。按照一维应力波理论,扭转波动方程为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

式中: $\theta$ 为单位长度扭转角, $x$ 为沿杆长方向坐标, $G$ 和 $\rho$ 分别为扭杆的剪切模量和密度, $c$ 为扭杆材料的剪切波速。由特征线法可得到

$$\tau \pm \rho c v = \text{const} \quad \text{沿} \quad x \pm ct = \text{const}$$

式中: $\tau, v$ 为扭杆外表面单元承受的剪应力和质点速度。

根据扭杆的结构特征,在分析中将输入杆加载端简化为固定端。忽略二次加载效应意味着后续载荷对试件只产生弹性响应。在此情况下,可计算出物理空间中各区域的波状态( $\tau, v$ ),如图2所示。波状态初值 $\tau_0, v_0$ 为

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \frac{M_r}{J_b}, \quad v_0 = \frac{\tau_0}{\rho c}$$

式中: $M_r$ 为储存扭矩, $J_b$ 为扭杆的极惯性矩。

由应力波分析可以发现试件在图 2 的 13 波区中将承受与一次加载波等幅反向的应力波作用。图 2 左边给出了在应变片 E 处分析计算波形(实线)与实测波形(虚线)的比较。在时刻  $t^*$  实测波形的突降恰恰说明了再次塑性变形的存在。上述分析说明了两个问题。首先, Hopkinson 扭杆上的二次加载是由于试件的反射波与透射波在杆系两端再次反射后叠加作用在试件上的结果。透射波幅与材料力学响应相对应, 反射波幅制约着加载应变率。其次, 二次加载波可与一次波幅相等, 试件的再次塑性变形不可避免。

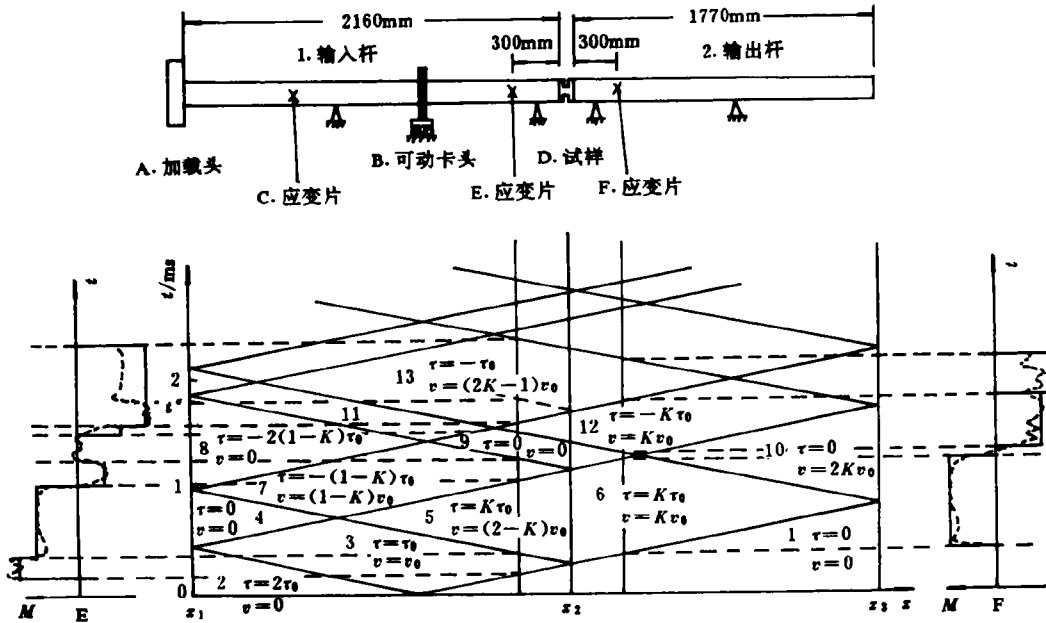


图 2 标准 Hopkinson 扭杆及其应力波分析

Fig. 2 Standard split Hopkinson torsional bar apparatus and its stress wave analysis

1. Input bar; 2. Output bar

A. Loading end; B. Movable clamp; C, E, F. Strain rosettes; D. Specimen

### 2.3 反复加载对材料微结构变形特征的影响

Hopkinson 扭杆中的反复加载现象不同程度地影响了材料在第一次加载后的微结构形貌, 这种影响不能被忽略。因为二次加载波为一个反向等幅脉冲, 它会使材料以首次加载相似的应变率反向变形。若考虑材料 Bauschinger 效应, 反向屈服点可能低于首次屈服应力, 材料易于发生二次变形。此外, 材料在高应变率下发生近乎绝热的热塑剪切局部化变形, 在一次加载后局部变形区仍维持一定的热集中。所以当跟随而至的二次应力波作用时, 由于热软化效应, 材料更容易发生反向的再次塑性变形。因此, 反复加载效应对定量考察材料变形后的微结构特别是对考察热塑剪切局部化现象危害极大。

一个典型的例子是在利用标准扭杆研究材料剪切局部化变形时出现的反向扭折, 见图 3。实验材料为热轧正火态 20 号钢。在实验中, 入射波波幅为透射波的 3 倍多, 亦即无论反射波还是透射波单独作用都足以使试件再次塑性变形。图 3 显示了材料用标准扭杆



图3 标准扭杆上为反复加载破坏的20号钢剪切  
局部化微结构形态(箭头所示反“S”型扭杆)

Fig. 3 A destroyed microstructure of shear localization for No. 20 steel due to the loading reverberation of a standard SHTB (the arrow mark the reverse “S” kink)

加载后被破坏了的剪切局部化区域的微结构形态。变形前,铁素体晶粒和珠光体群沿轧制方向形成平行的沉析线,且垂直于剪切方向。正常情况下,剪切变形会使这些沉析线沿剪切方向发生偏转。然而在实验中的试件局部化变形中心区内,一些偏转的沉析线又在反向应力波的作用下转回到初始垂直于剪切方向的位置。更严重的是有些沉析线甚至发生与剪切方向相反的反“S”型花样。这表明 Hopkinson 扭杆中反复加载作用破坏了变形后材料的微结构。因此要进行动态扭转下材料宏、微观力学行为的对应研究,必须对标准 Hopkinson 扭杆进行改进,以消除反复加载现象。

### 3 Hopkinson 扭杆的改进

#### 3.1 改进扭杆的原理

消除反复加载的关键是在一次加载后及时地释放残余能量。显然,用阻尼的方法吸收能量不能解决这个问题。借助 Hopkinson 压杆中飞杆的概念,若将第一次加载波后的所有应力波导出杆系,使之不再进入扭杆,则可以彻底地去除反复加载。分析表明,试件的反射波与透射波在杆端的再反射是形成反复加载的根源,消除反复加载需要从这两个端部着手。

考虑在输出杆后和输入杆前各加上一根同样的杆。假设上述两个应力波可以完全传入这两个附加杆,并且在应力波全部进入此两杆后,附加杆又可以立即与主杆系自动脱离,那么就可将二次加载波孤立在主杆系外。进行相应的应力波分析可以得到四杆系统各区域波状态,如图4所示。在输出杆尾端和输入杆首端附加的杆分别记为卸波杆Ⅰ和卸波杆Ⅱ。为使应力波完全传入卸波杆而没有再反射的波返回主杆系,要求在应力波前沿由两个卸波杆的尾端(自由端)反射回进入端之前,应力脉冲全部进入卸波杆。这样,两个卸波杆的长度  $L$  都要求满足

$$L \geq L_i - x_m$$

式中:  $L_i$  为输入杆长度,  $x_m$  为卡头与试件之间的最小距离。

依据上述原理可以把一次加载后的应力波导出主杆系。问题的关键归结为如何实现假设的条件以及如何保证反射波通过输入杆的加载系统自由地传入卸波杆。



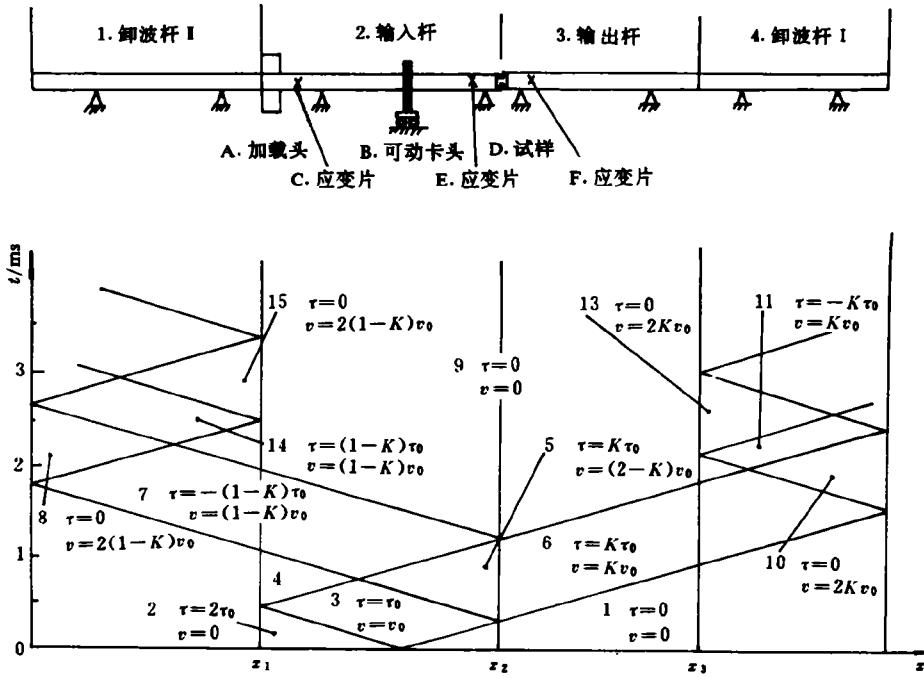


图 4 改进 Hopkinson 扭杆及其应力波分析

Fig. 4 Modified SHTB and its stress wave analysis

1. Unloading bar II; 2. Input bar; 3. Output bar; 4. Unloading bar I

A. Loading end; B. Movable clamp; C, E, F. Strain rosettes; D. Specimen

### 3.2 传动器的设计与加载端的处理

导出应力波的难点是卸波杆与主杆系之间的连接方式,它要求满足两个功能:首先,它必须使由试件反、透射的应力波可以完全传入卸波杆;其次,当应力波脉冲完全进入卸波杆后立即使卸波杆与主杆系脱离。

从图 4 可以发现透射波从卸波杆 I 的自由端反射回  $x_3$  处时,卸波杆 I 将以比输出杆更快的角速度转动(图中 13 区)。同理,试件反射波从卸波杆 II 的自由端反射回  $x_1$  处时也有相似情形(图中 15 区)。利用这一性质,一个单向传递扭矩的传动器可凭借角速度差的作用使两个卸波杆与主杆系自行脱离。为此,我们设计了一个特殊的扭转传动器,其原理如图 5 所示。传动器由 A, B 两个分别粘在主杆和卸波杆上的接头组成。它的四个滑键 C 初始被放在 A 中滑槽内并插入 B 中,保持滑键 C 与 B 中槽侧壁紧密接触。当接头 A, B 的转动角速度满足  $\omega_A \geq \omega_B$  时,扭矩波将通过滑键 C 由 A 传至 B 中,见图 5(a)。一旦  $\omega_A < \omega_B$ ,滑键 C 将被 B 中斜导槽推回 A 中,从而断绝两者的联系,见图 5(b)。这样,卸波杆与主杆系自动脱开。根据其工作原理,

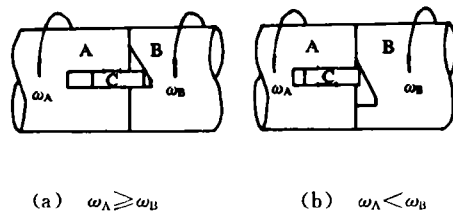


图 5 传动器工作原理

Fig. 5 The principle of the clutches

这种传动器称为内推式传动器。传动器配合卸波杆可以把试件的反射波和透射波都孤立  
在主杆系之外。

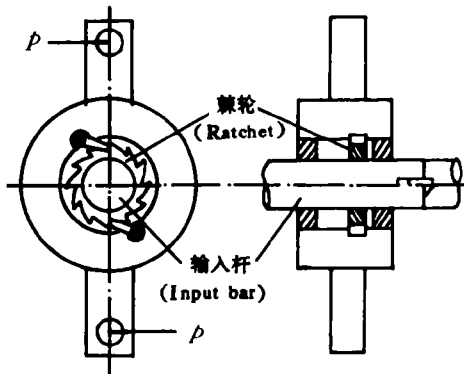


图6 特殊设计的加载系统

Fig. 6 The specially designed loading system

输出杆的尾端为自由端,利用卸波杆和  
传动器可较容易地把应力波导出主杆系。但  
输入杆前端为加载端,原设计中为一个与输  
入杆固连的大惯性矩的加载标定系统,其惯  
性矩使此端对应力波的作用相当于固定端。  
反射波无法传入卸波杆 I。若将其改为自由  
端,则预储存扭矩无法实现。为了解决这一矛  
盾,加载系统重新设计以实现由固定端向自  
由端的适时转变。该加载装置为管轴形式,输  
入杆由它的中心穿过并能自由转动。输入杆  
与加载装置的联系由一个棘轮机构来完成,  
见图 6。棘轮内轮的设计尽可能地减少其本  
身对应力波的反射,棘爪在加载时带动扭杆

储存扭矩,使之起到单向限制的固定端作用。一旦扭矩释放,输入杆连同内轴套一起转  
动,对于试件的反射波,近乎一个自由端。结合反向的传动器和卸波杆 I,反射波可被完全  
导入卸波杆而与主杆系分离,消除了它对试件的反复加载。

#### 4 实验结果与讨论

现有的标准 Hopkinson 扭杆是由直径为 25mm 的 LY12 铝合金杆制成,输入杆、输  
出杆长度分别为 2160,1770mm。卡头距试件的最小距离为 500mm。根据改杆原理,两个  
卸波杆的长度皆应大于 1660mm。现选两根长为 1780,2160mm 的杆分别作为卸波杆 I 和  
卸波杆 II。

实验时,先将扭矩储存在卡头与加载端之间,此后将两个传动器中的滑键插入斜滑道  
底部,并保持其良好接触。释放扭矩后应力波对试件加载,透射部分传入卸波杆 I,反射部  
分传入卸波杆 II。图 7 为改进后的 Hopkinson 扭杆在 F 处记录的伪试件实验波形(标定  
波形)。它是一个单脉冲方波,与预期结果相同。图中方波之后还出现一些幅值为 1/3 加  
载波幅的小峰,这是由于传动器滑键接触不完善所致。图 8 为在改进后的扭杆上 F 处记  
录的真实实验波形。实验材料和实验条件与发生反“S”型扭折的实验相同。从波形上可以  
看出,材料仅受到一次加载脉冲,后续的小波来自传动器引起的小反射峰的叠加。图 9 为  
相应实验所得到的材料剪切局部化的微结构形态,珠光体沉析线清楚地显示了剪切带区  
域,带内最大剪切应变约为 3.5。完好的剪切局部化的变形微结构没有任何反向塑性变形  
的痕迹。事实证明,Hopkinson 扭杆的改进确实消除了反复加载对变形材料微结构观察的  
影响,可以有效地保证材料微观的变形结构与宏观应力应变响应的对应研究。

反复加载问题在许多应力波加载的实验装置中都存在。例如,Hopkinson 压杆在进行  
直接拉伸实验时就存在载荷波对试样的多次作用。实际上,凡是薄试件与两个长波导固连  
的系统在波动加载时都存在相似问题。人们也早已开始注意此类问题,但由于扭杆结构和

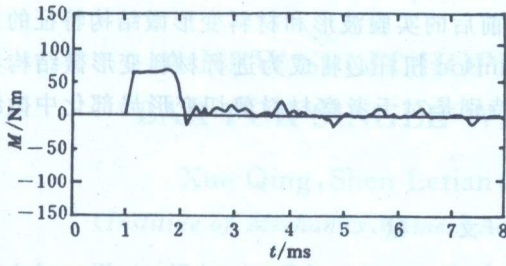


图 7 改进扭杆的标定波形

Fig. 7 A calibrating oscillogram on the modified SHTB

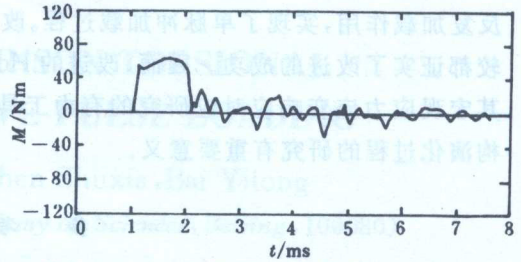


图 8 改进扭杆的实验波形

Fig. 8 An oscillogram of a test on the modified SHTB

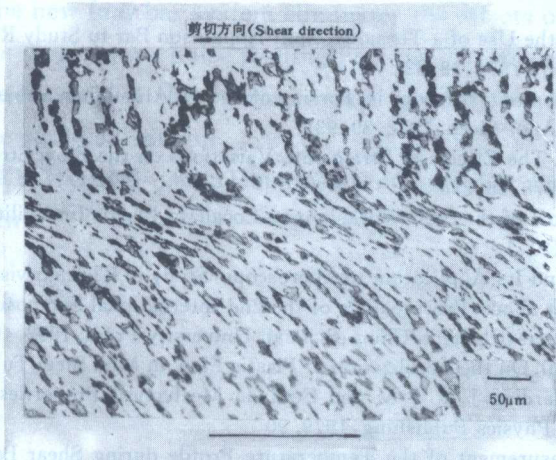


图 9 在与前述被破坏的剪切局部化形态相同的加载条件下,改进后的扭杆获得的完好的剪切局部化微结构形貌

Fig. 9 A perfect pattern of the shear band microstructure obtained in a test on the modified SHTB under the same conditions as the destroyed one

应力波传递的复杂性,这个问题一直没有得到解决。早期的研究主要针对材料的力学响应,这一矛盾尚不突出。近十几年来,材料变形中微结构和微损伤的考察越来越显示出重要地位。但在利用标准扭杆考察动态变形后的微结构时,人们只能忽略反复加载的影响,观察多次加载变形后的形态。Xue 等<sup>[9]</sup>在考察剪切局部化微结构演化过程的研究中,注意到 Hopkinson 扭杆中的反复加载现象及其对变形微结构的破坏,在输出杆后加上了卸波杆和传动器,有效地去除了与材料承载能力相当的透射波。但是,该修改不能消除反射波的再次作用,因此改进的扭杆要求限制加载波幅以使反射波诱导的应力低于材料二次屈服限,这在一定程度上限制了加载应变率。我们的研究是在上述工作的基础上进一步

改进 Hopkinson 扭杆,重新设计了扭杆的加载系统,配合附加的卸波杆和传动器,可将一次加载波后的反射波和透射波全部导出主杆系。

### 5 结 论

我们对现有的标准 Hopkinson 扭杆进行了改进,即在原杆系中附加了两个卸波杆,分别置于输入杆首端和输出杆尾端。通过两个特殊设计的传动器保证将一次加载后的应力波导入卸波杆,并及时地分离杆系和卸波杆,从而达到了消除应力波对试件反复加载过程的目的。为了导出反射波,对标准扭杆的加载系统进行了重新设计,用棘轮机构实现了

输入杆与加载装置的正向约束而反向自由的连接方式。改进后的扭杆完全消除了应力波反复加载作用,实现了单脉冲加载过程。改进前后的实验波形和材料变形微结构特征的比较都证实了改进的成功。因而,改进的 Hopkinson 扭杆必将成为进行材料变形微结构与其宏观应力应变响应对应研究的有力工具,特别是对于考察材料剪切变形局部化中微结构演化过程的研究有重要意义。

#### 参 考 文 献

- 1 Baker W E, Yew C H. Strain-rate Effects in the Propagation of Torsional Plastic Wave. *J Appl Mech*, 1966, 33: 917
- 2 Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading. *Proc Phys Soc*, 1949, 62 B: 676
- 3 Campbell J D, Dowling A R. The Behaviour of Materials Subjected to Dynamic Incremental Shear Loading. *J Mech Phys Solids*, 1970, 18: 43
- 4 Nicholas T. Strain-rate and Strain-rate History Effects in Several Metals in Torsion. *Exp Mech*, 1971, 11: 370
- 5 Duffy J, Campbell J D, Hawley R H. On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effects in 1100-0 Aluminum. *J Appl Mech*, 1971, 38: 83
- 6 Frantz R A, Duffy J. The Dynamic Stress-strain Behavior in Torsion of 1100-0 Aluminium Subjected to a Sharp Increase in Strain Rate. *J Appl Mech*, 1972, 39: 939
- 7 Lipkin J, Campbell J D, Swearingen J D. The Effects of Strain-rate Variations on the Flow Stress of OFHC Copper. *J Mech Phys Solids*, 1978, 26: 256
- 8 Anand L, Dillon O, Place T A et al. Report of the NSF Workshop on Localized Plastic Instabilities and Failure Criteria. *Int J Plast*, 1990, 6(2): 1
- 9 Xue Q, Bai Y, Shen L. Modified SHTB and Its Application to Microscopic Study of Thermo-viscoplastic Shear Localization. In: Zhang G et al eds. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*. Chengdu China: Sichuan University Press, 1992. 405
- 10 Costin L S, Crisman E E, Hawley R H et al. On the Localization of Plastic Flow in Mild Steel Tubes under Dynamic Torsional Loading. In: Harding J ed. *Proc 2nd Conf on Mechanical Properties at High Rates of Strain*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1979. 90
- 11 Hartley K A, Duffy J, Hawley R H. Measurement of the Temperature Profile during Shear Band Formation in Steels Deforming at High Strain Rates. *J Mech Phys Solids*, 1987, 35: 283
- 12 Marchard A, Duffy J. An Experimental Study of the Formation Process of Adiabatic Shear Bands in a Structural Steel. *J Mech Phys Solids*, 1988, 36: 251



## A NEW SPLIT HOPKINSON TORSIONAL BAR FOR SINGLE WAVE PULSE LOADING

Xue Qing, Shen Letian, Chen Shuxia, Bai Yilong

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080*)

**ABSTRACT** The loading reverberation is a multiple wave effect on the specimen in the split Hopkinson torsional bar (SHTB). It intensively destroys the microstructural pattern produced by the first loading pulse. This paper discusses this phenomenon and its effects on the deformed microstructure. A thorough-going modification of the SHTB is introduced, which involves attaching two unloading bars at the two ends of original clutches. The new four bar system eliminates the effects of the loading reverberation and provides the single wave pulse loading process. The wave recording results and the post mortem observation of the microstructure in shear banding highly support the effectiveness of the modified version.

**KEY WORDS** split Hopkinson torsional bar, loading reverberation, microstructure pattern