

文章编号: 1001-1455(2008)02-0149-05

# 冲击拉伸实验试件几何尺寸的研究<sup>\*</sup>

徐伟芳, 钟卫州, 陈刚, 李思忠, 陈忠富, 黄西成  
(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 应用分离式 Hopkinson 拉伸实验技术研究了圆柱形冲击拉伸试件的长径比( $L/D$ )对实验结果的影响, 其中长径比从 1 到 5。研究表明: 对于 LY12 材料,  $L/D \geq 2.67$  的试件满足材料实验的要求,  $L/D \leq 2$  不能得到准确的材料参数。

**关键词:** 固体力学; 长径比; 冲击拉伸; 试件; 应变率

**中图分类号:** O341      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引言

在所有测试材料力学性能的实验中, 试件设计是实验成功的关键, 因为不合适的试件会在材料性能参数中引入非材料因素(如结构)的影响。材料准静态实验的试件及实验设计都有相应的标准以参考, 而材料动态力学性能的测试(如采用 SHB(split Hopkinson bar)技术测试材料的动态力学性能)则无标准可以参考, 因此应深入研究动态实验中的试件设计, 以确保材料参数中不含非材料因素的影响。SHB 技术是研究材料在冲击载荷作用下力学性能的常用技术之一, 其试件有一定的标距, 标距的设计要考虑到在变形过程中, 应力波在标距内的传播可以忽略, 以及标距内的应力、应变保持为均匀状态和一维状态, 并确保测得的参数不随标距大小的变化而变化。陶俊林<sup>[1]</sup>详细讨论了在冲击压缩实验中的试件设计, 而冲击拉伸实验中的试件设计很困难, 因为冲击拉伸实验中的试件需要与波导杆连接。

目前冲击拉伸实验中试件的连接方式基本上有两种形式: 螺纹连接和胶粘连接。螺纹连接的试件为哑铃状, 两端螺纹分别与块-杆或杆-杆中的螺孔连接。胶粘连接有几种方式, 一种典型的是 G. H. Staab 等<sup>[2]</sup>采用的线轴状试件, 其两端与两杆的端面粘接; J. Harding 等<sup>[3]</sup>采用的试件是厚度方向呈哑铃状, 试件与杆子的平叉口用高强度胶粘接; 王从约<sup>[4]</sup>采用的试件是宽度方向呈哑铃状, 试件与杆子的平叉口也是用高强度胶粘接。

王从约<sup>[4]</sup>初步讨论了宽度方向呈哑铃状的扁平拉伸试件的设计; 对于圆柱哑铃状拉伸试件, 试件的形状主要是指试件的长径比, G. H. Staab 等<sup>[2]</sup>曾对此做了研究, 并在大量的实验基础上确定了  $L/D \geq 1.60$  时可获得比较稳定的数据。

本文中利用旋转盘冲击拉伸实验装置<sup>[4]</sup>研究圆柱哑铃状试件的不同长径比对实验结果的影响。实验过程中, 试件材料选用应变率无关的 LY12, 目的是在数据分析中可以不考虑应变率对实验数据的影响, 因为在试件设计中主要考虑试件在变形过程中试件上的应力应变状态。试件设计时, 只改变试件的长度, 其他几何尺寸不变。

## 2 实验状态

### 2.1 实验装置

旋转盘冲击拉伸实验系统<sup>[4]</sup>(见图1)的实验原理与Hopkinson压杆的实验原理完全相同, 都是基

\* 收稿日期: 2006-09-13; 修回日期: 2007-01-19  
基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040)  
作者简介: 徐伟芳(1974—), 男, 硕士。

于以下两个基本假设：一维性假设和均匀性假设，其中一维性假设要求试件和波导杆中的应力处于一维状态，均匀性假设要求试件中的应力处于均匀状态。实验中，利用测得的波导杆上的应变信号可以得到试件中的应力、应变和应变率

$$\sigma(\tau) = \frac{EA}{A_2} \epsilon_i(\tau), \quad \epsilon(\tau) = \frac{2c_0}{l} \int_0^\tau [\epsilon_i(\xi) - \epsilon_t(\xi)] d\xi, \quad \dot{\epsilon}(\tau) = \frac{2c_0}{l} [\epsilon_i(\xi) - \epsilon_t(\xi)] \quad (1)$$

式中： $E$  为输入、输出杆的弹性模量； $c_0$  为输入、输出杆的弹性波波速； $A$  为输入、输出杆的横截面面积； $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_t$  分别为入射应变脉冲和透射应变脉冲； $A_2$ 、 $l$  分别为试件实验段的横截面面积和长度。

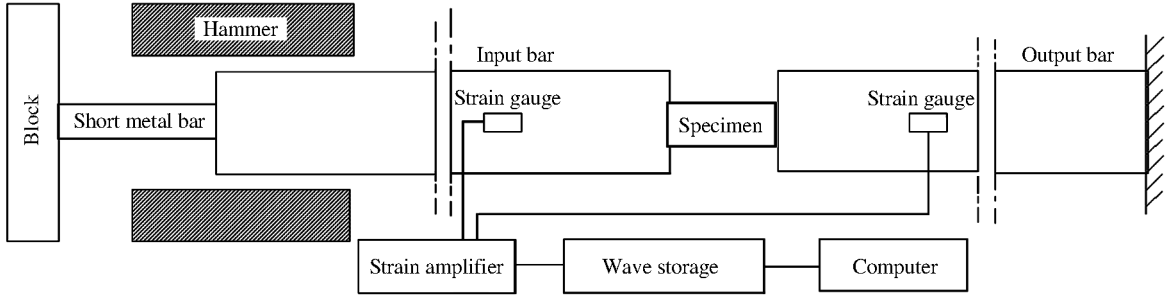


图 1 旋转盘式冲击拉伸实验机装置

Fig. 1 Schematic diagram of the rotating disk indirect bar-bar tensile impact apparatus

### 2.2 试件

试件为圆柱形哑铃状(见图 2)，两端通过螺纹与波导杆连接。由于试件的实验段和螺纹连接段都是用圆弧段过渡，因此在试件测量时很难获得准确的实验段长度，据此测得的误差可高达 5% ~ 10%<sup>[5]</sup>。在本文的研究中，假设实验段为图 2 中的  $L$ ，目的是使本文的研究在同一测试误差的条件下。根据公式(1)可知，此近似条件主要对应变率和应变的测量带来影响，有关实验段的精确测量还需进一步的研究。实验中试件设计的长径比有 5、2.67、2 和 1 四种。为研究相同应变率和相同长径比下实验数据的稳定性，在相同应变率不同长径比下进行了多个试件的实验。

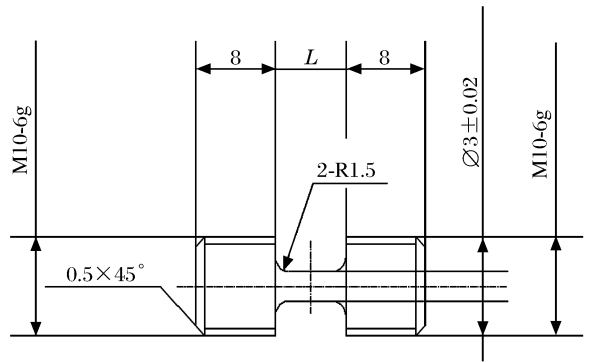


图 2 试件示意图

Fig. 2 Sketch of specimen

### 2.3 原始波形图

$L/D=5$  得到的原始波形图如图 3 所示，其中入射波的脉冲宽度为 368  $\mu s$ ，上升沿为 68  $\mu s$ 。试件材料为 LY12cz，弹性应力波波速约 5 km/s，长度为 15 mm 的试件两端应力达到平衡约需 12  $\mu s$ ，因此试件两端的应力在入射波上升沿段已经达到平衡。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果的稳定性分析

用公式(1)处理实验数据得到图 4 的应力应变曲线和对应的应变率时间曲线，各图中曲线标识对应于相应长径比下的试件编号。实验结果表明，在各应变率时间曲线中，虽然曲线有一定的分散性，但

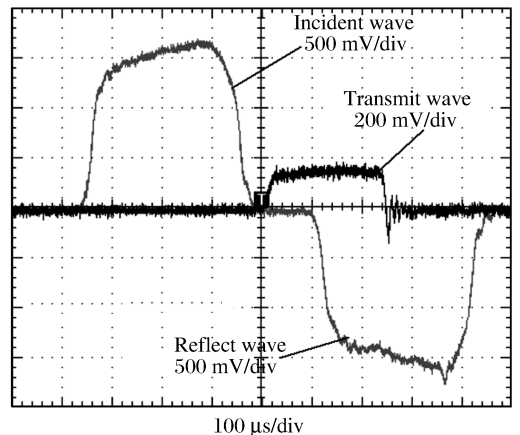


图 3 原始波形图

Fig. 3 The original waves

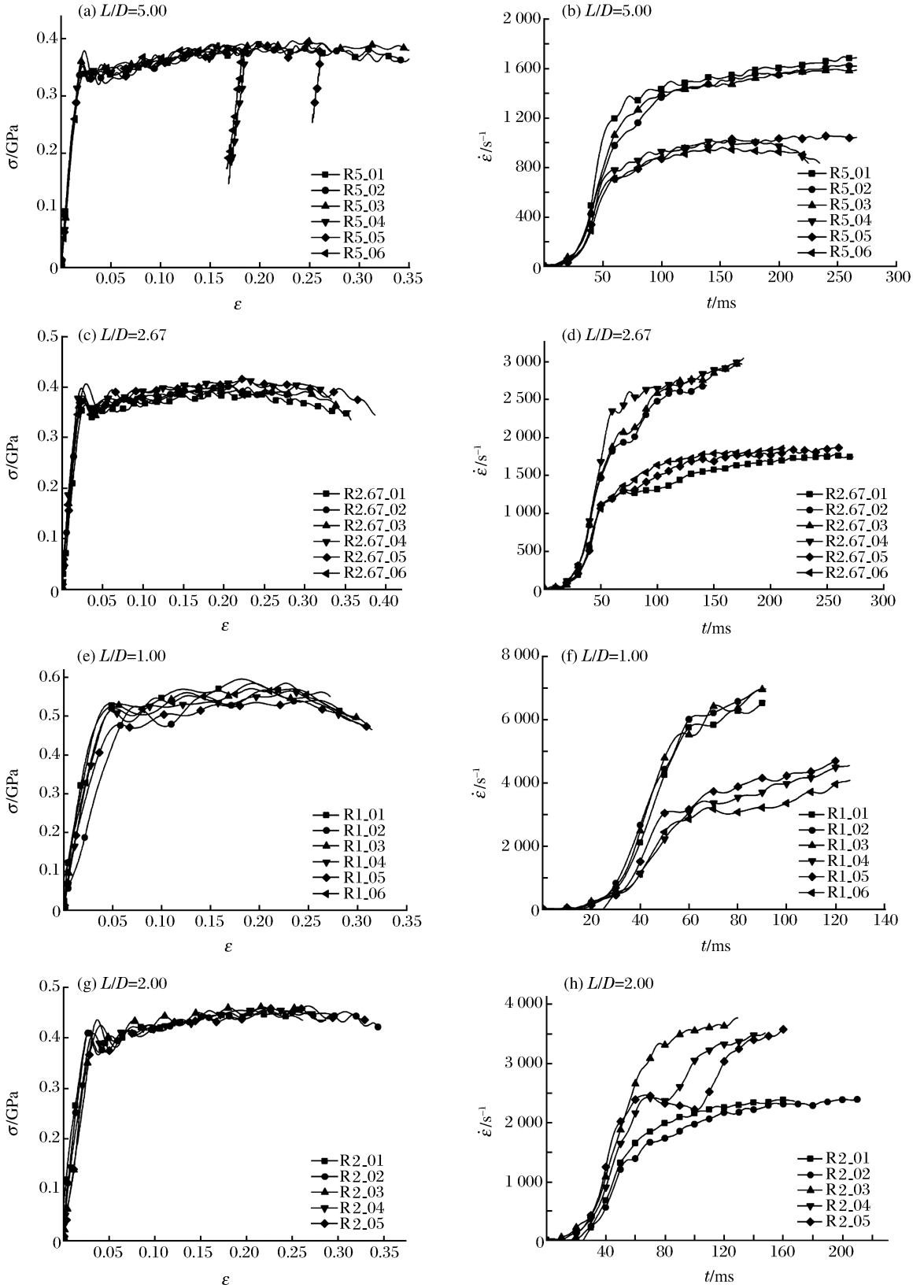


图 4 不同长径比时试件的应力应变曲线及应变率曲线

Fig. 4 Stress strain and strain rate curves of specimen for different  $L/D$

在相同实验条件下的塑性段的平均应变率接近,本文中假设平均应变率相近的实验为相同应变率下的实验。在相同应变率下,长径比相同(长径比为5、2.67和2)时的应力应变曲线重复性好,如实验R5\_01、R5\_02和R5\_03为 $L/D=5$ 时的试件在平均应变率为 $1500\text{ s}^{-1}$ 时的实验,图4(a)中应力应变曲线重复性很好;而 $L/D=1$ 时得到的应力应变曲线的分散性较大(图4(d))。这说明在其他几何尺寸保持不变时,长度越大,得到的实验结果越稳定。

### 3.2 实验结果的材料性分析

在实验结果中,每个长径比下都测有两个应变率下的应力应变曲线。虽然应变率发生了变化,长径比相同时的应力应变曲线之间相差很小,例如图4(a)为 $L/D=5$ 时两个应变率下的应力应变曲线,其中曲线R5\_01和R5\_04对应的应变率虽然不同(分别为 $1500\text{ s}^{-1}$ 和 $800\text{ s}^{-1}$ ),但它们吻合得很好,因此可以认为LY12的应力应变曲线在本实验的应变率范围内与应变率无关,论证了LY12材料性能的率无关性,所以在实验结果的分析过程中可以不考虑应变率对实验结果的影响。在 $L/D=5、2.67$ 时的测试结果中(图4(a)~(d)),LY12的屈服强度约330 MPa,与文献[6]一致,说明这两种长径比测得的数据为材料参数。而 $L/D=2、1$ 时测得的屈服强度结果偏高,分别约400、530 MPa(图4(e)~(h)),这是因为试件长度缩短,界面影响了试件中应力状态的一维状态,增加了试件中应力的三维性,偏离了SHB实验原理中的一维性的假设。

上述分析是将实验结果与相关文献进行对比分析,并得到 $L/D=5、2.67$ 时的实验数据为材料参数, $L/D=2、1$ 时得到的实验数据中含有结构因素的影响。本文将进一步对比分析实验结果。所有长径比下得到的应力应变曲线和对应的应变率曲线的对比见图5和图6。通过综合分析可得:

(1) 在相同应变率( $1500\text{ s}^{-1}$ ,对应图6中的曲线R5\_01、R2.67\_04)下, $L/D=5、2.67$ 得到的应力应变曲线(图5中的曲线R5\_01、R2.67\_04)吻合得很好,说明这两种长径比得到的应力应变曲线与试件标距的尺寸无关,满足材料实验的要求,得到的参数为材料参数,不含几何结构因素的影响。图5中的曲线R5\_04、R5\_01、R2.67\_04和曲线R2.67\_01是 $L/D=5、2.67$ 时得到的3个应变率( $800、1500、2750\text{ s}^{-1}$ ,图6)下的应力应变曲线,而且吻合较好,进一步证明了LY12材料性能的率无关性。

(2) 图5中,应力应变曲线R2\_01和R2\_03是由 $L/D=2$ 时得到的,他们都高于 $L/D=5、2.67$ 时得到的应力应变曲线;应力应变曲线R1\_01和R1\_04是由 $L/D=1$ 时的试件得到的,他们高于 $L/D=5、2.67、2$ 时得到的应力应变曲线,这种差异不是由于应变率不同引起的,因为LY12是率无关的材料,原因是试件长度变短,界面因素增加了实验段应力的三维性,对测试结果的影响增大。因此 $L/D=2、1$ 时得到的实验数据与试件标距的尺寸相关,不是材料参数,属于结构响应。

(3) 图4(g)说明 $L/D=2$ 时的试件可以得到稳定的数据,但得到的数据不是材料参数,说明稳定的数据不一定是材料参数。

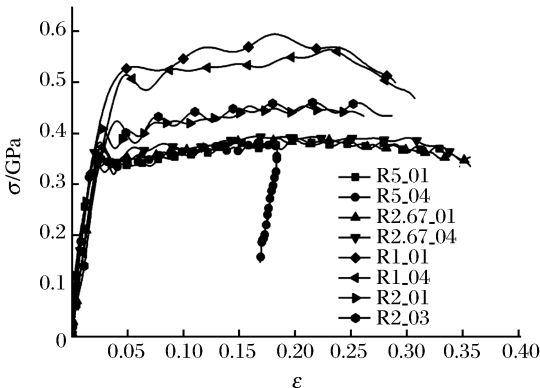


图5 不同长径比不同应变率时试件的应力应变曲线  
Fig. 5 Stress strain curves of specimen for different  $L/D$  and strain rate

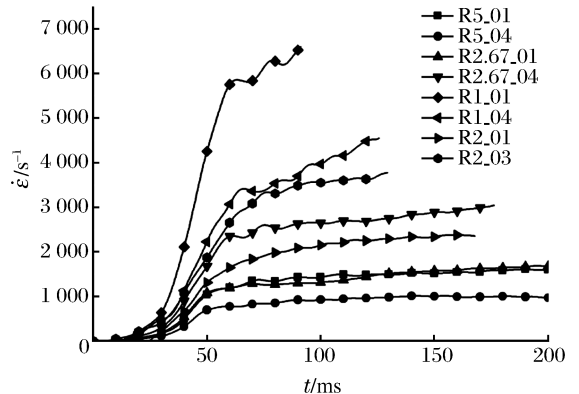


图6 图4(g)曲线对应的应变率曲线  
Fig. 6 Strain rate curves corresponding to Fig. 4(g)

## 4 结论与讨论

通过实验研究了不同试件长径比(5、2.67、2和1)对实验结果的影响。在本文的试件设计条件下,  $L/D \geq 2.67$  的试件满足材料实验的要求,  $L/D \leq 2$  不能得到准确的材料参数,原因是 SHB 等低压材料实验技术都要求试件中的应力处于一维状态,其他方向的应力可以忽略,但随着长径比的减小,试件中应力不再处于一维状态,应力的三维性增加,与材料性能测试的应力一维性条件相矛盾。研究同时表明稳定的实验数据不一定是材料参数,因为材料参数中不能含有结构等因素的影响。

在本文试件设计条件下,只初步研究了试件长度对实验结果的影响,  $2 < L/D < 2.67$  的试件对实验数据的影响以及其他几何尺寸如实验段的精确测定、倒角和直径对实验结果的影响还需进一步研究。不同材料的材料实验对试件的要求可能不一样,因此在测某种材料动态力学性能前期,应首先对试件形状进行研究和设计,可以采用实验研究结合数值分析进行研究。

## 参考文献:

- [1] 陶俊林. SHPB 实验技术若干问题研究[D]. 四川绵阳:中国工程物理研究院,2005.
- [2] Staab G H, Gilat A. A direct-tension split-Hopkinson bar for high strain-rate testing[J]. *Experimental Mechanics*, 1991, 31(3):232-235.
- [3] Harding J, Welsh L M. Impact testing of fibre-reinforced composite materials[C]. *Proc ICCM-IV*. Tokyo, 1982: 845.
- [4] 王从约. 杆-杆型冲击拉伸实验系统的动力学数值分析[D]. 安徽合肥:中国科学技术大学,1996.
- [5] 胡时胜,邓德涛,任小彬. 材料冲击拉伸实验中的若干问题探讨[J]. *实验力学*, 1998, 13(1):9-14.  
HU Shi-sheng, DENG De-tao, REN Xiao-bin. A study on impact tensile test of materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(1):9-14.
- [6] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册:第3卷[M]. 第2版. 北京:中国标准出版社,2002.

## On geometric shape of the specimen in impact tensile test

XU Wei-fang\*, ZHONG Wei-zhou, CHEN Gang,  
LI Si-zhong, CHEN Zhong-fu, HUANG Xi-cheng

(*Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics,*  
*Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** Effects of the length-to-diameter ( $L/D$ ) ratios of specimens on the experimental results were studied by using a split Hopkinson tensile bar, rotating disk indirect bar-bar tensile impact apparatus. The length-to-diameter ratios of the LY12 specimens used in the test range from 1 to 5. Results show that the specimens of  $L/D \geq 2.67$  can be used to obtain exact parameters of materials under the proposed conditions, but the specimens of  $L/D \leq 2$  can not be used in impact tensile test.

**Key words:** solid mechanics; length to diameter ratio; impact tensile; specimen; strain rate

\* Corresponding author: XU Wei-fang  
E-mail address: weifangxu@126.com  
Telephone: 86-816-2495604