

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0031- 04

动态拉伸实验数据处理方法的改进及应用*

王瑞峰, 卢芳云, 林玉亮, 陈 荣
(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过对反射式霍普金森拉杆实验技术进行分析,发现加载杆和承压环之间配合不够紧密时,在加载波到达承压环处可能出现影响实验结果的干扰信号。为了修正实验测试结果,编写了带有修正功能的实验数据处理程序对实验数据进行修正处理。利用带修正功能的数据处理程序对一种铝合金的动态拉伸实验结果处理,结果表明,新的数据处理程序得到的结果是合理的。

关键词:霍普金森拉杆; 动态拉伸实验; 数据处理

中图分类号: O347. 3 **文献标识码:** A

Improvement of Data Processing for Dynamic Tensile Experiment and Application

WANG Rui-feng, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, CHEN Rong
(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: SHTB tests were conducted and it was found that interfering signals coming from interfaces between specimen and bars influence the experimental results obviously. In order to get the real properties for the tested materials, an improved data processing was performed to revise the interfering signals. The experimental data of an aluminum alloy under the dynamic tension loading were processed by the improved program, and more reasonable results were achieved.

Key words: SHTB; dynamic tensile experiment; data processing

目前,材料动态力学性能的研究越来越受到人们的重视,分离式霍普金森杆是测试材料动态力学性能的主要手段之一。分离式霍普金森压杆是 1949 年由 Kolsky^[1]提出的,经过半个多世纪的发展,已形成比较完整的霍普金森实验技术,并获得广泛应用。

为了研究材料的冲击拉伸性能,由霍普金森压杆技术延伸拓宽发展的分离式霍普金森拉杆^[2-6]也得到了比较广泛的应用。分离式霍普金森拉杆实验技术依据加载方式的不同,可以分为反射式、转盘式和直接撞击式等。其中,反射式霍普金森拉杆技术是在压杆基础上改进的,成本较低,且操作简单。但是由于反射式霍普金森拉杆技术在试件连接处容易产生干扰信号,从而使得测到的应力应变曲线不能真实地反映材料的拉伸特性。为了改进这种冲击拉伸技术,国内一些文献介绍对这种拉伸技术的改进^[7-9],并取得了一定的效果。这些都是对实验装置进行的改进,具有一定的局限性,本文从实验数据处理方面着手,通过自行编写的程序将干扰信号与有效信号分离,得到了能真实反映材料冲击拉伸特性的应力应变曲线。

1 实验装置与原理^[10]

反射式霍普金森拉杆(SHTB)是在压杆基础上通过改变试样与加载杆的连接方式实现的。反射式 SHTB 实验将试样两端面分别粘贴或用螺纹等方式连接于输入杆与输出杆端面上,试样外围放置与压杆同种材料的承压环。实验装置如图 1 所示。

实验中子弹以一定速度沿轴向撞击输出杆,引起压缩应力波在杆中传播,当压力脉冲达到试样与压

* 收稿日期: 2006- 12- 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672177)

作者简介: 王瑞峰(1978-),男,博士生。

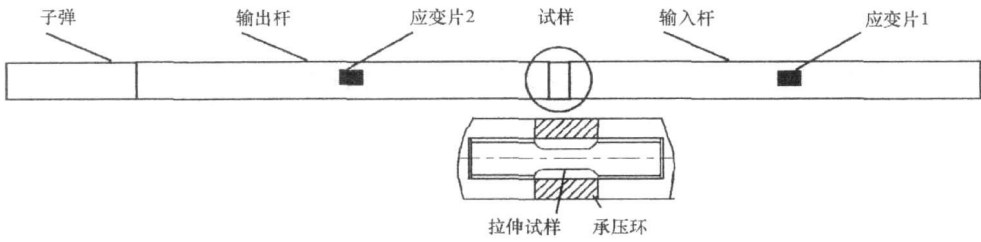


图1 SHPB装置示意图

Fig.1 The apparatus of SHPB

杆界面时,基本上以无耗散的方式通过承压环和试样共同组成的横截面。由于承压环的横截面积比试样横截面积大10倍以上,因此它将承受压缩脉冲的主要部分,使试样几乎不受压或只发生弹性变形。压缩脉冲透过试样继续前行,到达输入杆自由端以拉伸波的形式反射后继续传播,当拉伸波到达试样处,部分透过试样形成透射信号 ϵ_t ,另一部分被反射形成反射信号 ϵ_r ,此时承压环失去作用。

用类似 SHPB 实验相同的数据处理方法,可以得到材料动态拉伸性能。拉伸试样中的工程应力和应变、应变率为:

$$\sigma_s(t) = \frac{A_0}{A_s} E \epsilon_i(t) \tag{1}$$

$$\epsilon_s(t) = \int_0^t -\frac{2c_0}{l_s} \epsilon_i(t) dt \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -\frac{2c_0}{l_s} \epsilon_i(t) \tag{3}$$

式中, E, A_0 分别为压杆的杨氏模量和横截面积, c_0 是杆中弹性波速度, l_s 和 A_s 分别为试样厚度和横截面积。

2 干扰信号分析

图2是 SHPB 实验装置中波传播示意图,从波传播示意图中可以分析拉伸实验过程中可能出现的问题。在进行实验过程中,可能出现承压环与加载杆的连接不够紧密的情形,这样子弹撞击产生的压缩波在通过支撑环和试样时,就会出现界面效应,通常会在界面处形成干扰信号 ϵ_i ,即图2中虚线所示部分。界面不匹配是造成干扰信号产生的根本原因,该干扰信号造成了实验结果的误差。

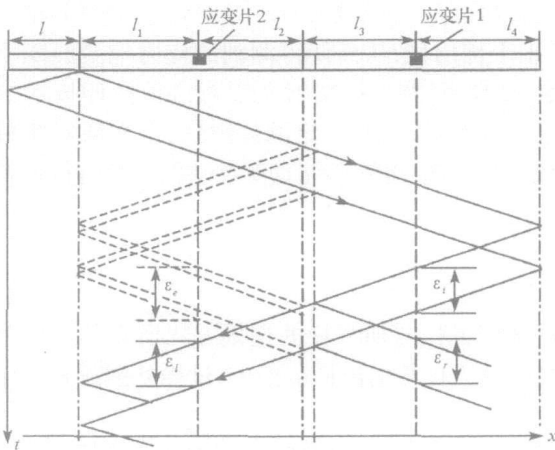


图2 SHPB中波传播示意图

Fig.2 Stress wave propagation in SHPB

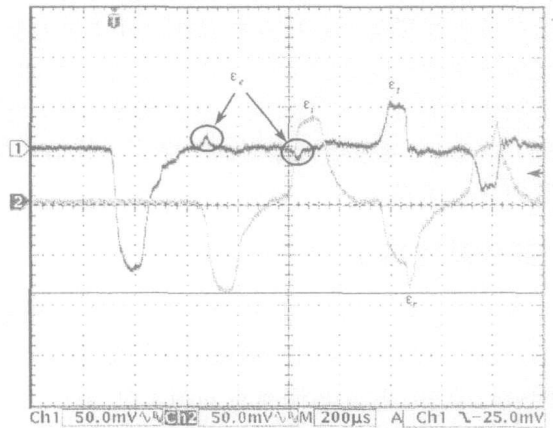


图3 动态拉伸实验信号图

Fig.3 Measured stress wave signals

本实验室所建立的分离反射式霍普金森拉杆实验装置采用的输入杆和输出杆长度相同,其长度为1800mm,材料为LY12铝,直径为20mm,密度为2.785g/cm³,杨氏模量为71GPa。使用如此长度的加载杆

是为了使入射波与反射波能更好地分离, 从而可以利用反射信号进行应变的计算, 使处理数据得到的应力应变曲线更可信。从图 3 的原始波形图也可以看出, 入射信号与反射信号分离与预期效果一致。

但这同时也带来另外一个问题: 由于两个加载杆长度相同, 界面反射形成的干扰信号在输出杆中经过两次反射后与透射波重合在一起, 从而使测到的透射信号 ε 不能反映材料所受到的真实应力, 而是包含干扰信号 ε_c 的合成信号, 因此需要对采集到透射信号进行分解才能得到真实的透射信号。图 3 是从一动态拉伸实验的原始波形图的分析图中采集到的信号, 在透射信号前有幅值较小拉伸信号和压缩信号, 这就是分析中的干扰信号 ε_c 。而从透射信号 ε 中可以发现其前半部要明显高于后半部分, 这是干扰信号叠加的结果。

3 数据处理修正

为了避免干扰信号影响实验结果, 有两种途径可以实现干扰信号与真实信号的分离。一种途径是通过改变输入杆和输出杆的长度实现, 即将输出杆的长度加长, 使干扰信号在透射信号之后到达应变片 2, 实现干扰信号与真实信号分离。利用杆中的波速和加载波宽可以计算出输出杆长度与输入杆长度的差异 Δl 。在动态拉伸实验中, 采用的子弹长度 l 为 300mm, 杆中弹性波速 c_0 为 5096m/s, 在理想方波加载情况下, 脉冲持续时间为 t 为:

$$t = 2l / c_0 \quad (4)$$

经计算得出加载脉冲时间持续时间 t 为 118 μ s, 但是在实验过程中为了防止加载信号出现高频震荡和保证常应变率加载, 通常要使用波形整形器, 这使得加载脉冲持续时间拉长, 从图 3 的实验信号中可以看出, 脉冲持续时间在 200 μ s 左右。在计算过程中, 取脉冲持续时间为 200 μ s。所以, 要保证干扰信号与透射信号分离, 就要使透射信号与干扰信号到达时间相差至少要 200 μ s。根据图 2 的波形分析图可以推出计算 Δl 的公式为:

$$\Delta l = c_0 t / 2 \quad (5)$$

由公式 (5) 可以计算出 Δl 为 500mm, 即输入杆长度保持不变, 输出杆长度要达到 2300mm, 由于材料特性的限制, 加工如此长度的杆是比较困难的, 所以目前没有采用该方法。

另一途径是通过数据处理程序对透射信号进行修正, 得出真实信号。本文就是从这方面出发实现干扰信号与真实信号分离的。

本文在数据处理程序中加入了对透射信号进行修正的部分, 利用加入修正功能的数据处理程序对得到的实验信号进行处理, 取得了令人满意的结果。修正程序采取的基本步骤为:

(1) 计算杆中波速: 利用程序分别判断示波器通道 1 和通道 2 的压缩信号起跳点, 并计算出其时间差为 Δt , 由此可以计算出杆中波速 c 。其计算公式为:

$$c = (l_2 + l_3) / \Delta t \quad (6)$$

(2) 采集干扰信号: 以通道 1 中压缩信号的起跳点为基准, 利用波速确定采集干扰信号 ε_c 的起始点 $t_1 = 2(l_1 + l_2) / c$, 采集信号宽度为 200 μ s。在程序中采用压缩干扰信号, 因为压缩干扰信号前基线较平, 可以减少数据采集的误差。

(3) 采集透射信号: 确定透射信号 ε 的起始点 $t_2 = 2(l_2 + l_3 + l_4) / c$, 采集信号宽度为 200 μ s。

(4) 透射信号修正: 将采集的透射信号 ε 与干扰信号 ε_c 相加, 得到修正后的透射信号 ε'_t , 即:

$$\varepsilon'_t = \varepsilon_t + \varepsilon_c \quad (7)$$

(5) 利用修正透射信号 ε'_t 进行数据处理, 就可以得到理想的应力应变曲线。

图 4 是一种铝合金的动态拉伸应力应变曲线, 实线表示利用修正数据处理程序得到的曲线; 虚线是没有进行修正得到的曲线。在没有进行修正的应力应变曲线中, 该合金的屈服应力为 437MPa, 而修正后的屈服应力为 363MPa, 相差 20%。而从应力应变曲线分析该合金特性会得到不同结论, 修正后的曲线表明该合金是应变硬化, 而没有修正的曲线则表明是应变软化。修正后得到铝合金具有应变硬化的特性与一些文献[11-12]给出铝合金的特性相同(如图 6 所示), 这说明修正结果是可信的。因此, 对实

验数据进行修正处理是必要的。

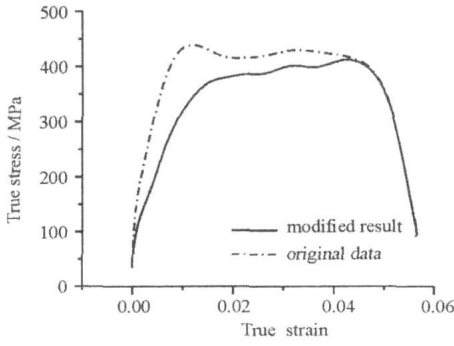


图4 修正前后的应力应变曲线对比

Fig. 4 The contrast of the stress-strain curve

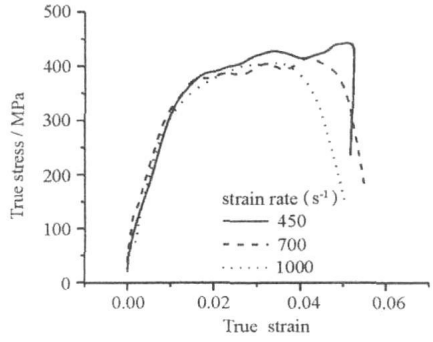


图5 某种铝合金动态拉伸应力应变曲线

The dynamic tensile stress-strain curves of an aluminum alloy

图4还表明干扰信号造成的影响主要在材料的初始阶段,这与图3中原始信号分析结果是一致的,也说明另外一个问题就是随着承压环与加载杆的紧密配合,干扰信号会减小。

图5是利用修正程序得到的某种铝合金在不同应变率下的动态拉伸应力应变曲线。实验结果表明,这种铝合金没有明显的应变率效应。

4 结论

通过对反射式霍普金森拉杆实验技术的分析,得出试样连接处产生的干扰信号是影响实验结果的主要因素。为了消除干扰信号的影响,在数据处理程序中加入对实验信号修正的功能。利用带修正功能的数据处理程序对某种铝合金的实验结果进行处理,得到了比较合理的结果。

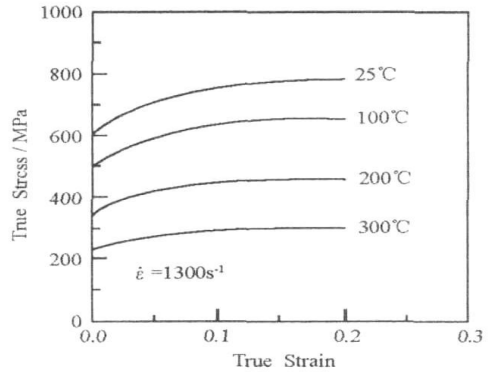


图6 应变率为 1300s⁻¹时 7075 铝合金在不同温度下的应力应变曲线^[11]

Fig. 6 True stress-strain curves of 7075 Al alloy deformed at 1300s⁻¹ for all of the temperature tested^[11]

参考文献:

[1] Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading[J]. Proc. Phys. Soc., 1949, B62: 676- 700.

[2] Harding J, Wood E D, Compbell J D. Tensile Testing of Material at Impact Rates of Strain[J]. J. Mech. Eng. Sci., 1960,2: 88- 96

[3] Lindholm U S, Yeakley L M. High Strain-rate Testing: Tension and Compression[J]. Exp. Mech., 1968, 8: 1- 9.

[4] Nicholas T. Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain[J]. Exp. Mech., 1981, 21: 177- 185.

[5] Li M, Wang R, Han M B. A Kolsky Bar: Tension, Tension-tension [J]. Exp. Mech., 1993, 33: 7- 14.

[6] Regazzoni G, Johnson J N, Follansbee P S. Theoretical Study of the Dynamic Tensile Test[J]. J. Appl. Mech., 1986, 53: 519- 528.

[7] 宋顺成, 田时雨. Hopkinson 冲击拉杆的改进和应用[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 62- 67.

[8] 胡时胜, 邓德涛, 任小彬. 材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J]. 实验力学, 1998, 13(1): 9- 14.

[9] 彭钢, 冯家臣, 胡时胜, 等. 纤维增强复合材料高应变率拉伸实验技术研究[J]. 实验力学, 2004, 19(2): 136- 143.

[10] 林玉亮. 软材料的高应变率测试实验技术及其本构行为的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.

[11] Lee W S, Sue W C, Lin C F, et al. The Strain Rate and Temperature Dependence of the Dynamic Impact Properties of 7075 A aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100: 116- 122.

[12] 高玉华. 铝合金 LC4和 LY12CZ 在高应变率拉伸和压缩下的本构关系[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(2): 24- 29.