

文章编号: 1001-1455(2010)04-0429-04

金属材料 SHPB 实验数据处理的三波校核法*

尚 兵^{1,2}, 胡时胜², 姜锡权^{2,3}

(1. 清华大学航空航天学院, 北京 100084;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

3. 炮兵学院, 安徽 合肥 230027)

摘要: 通过自编程序调整入射波、透射波和反射波的相对位置。当移动波相对位置时, 程序界面显示 2 幅图: 一幅显示入射波、透射波、反射波以及透射波与反射波之差; 另一幅显示试样的 3 条应力应变。这 3 条曲线分别由第 1 幅图中的入射波与透射波、入射波与反射波以及三波法求得。根据 SHPB 实验的基本假定, 这 3 条应力应变曲线的塑性段应该一致, 同时透射波与入射波之差应等于反射波, 把这 2 个等价的特点作为正确处理 SHPB 实验数据标准的方法称为三波校核法。

关键词: 固体力学; 三波校核; Hopkinson 压杆; 数据处理

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130 · 1515

文献标志码: A

1 引言

自 H. Kolsky 提出分离式 Hopkinson 标杆实验装置以来, 基于一维假定及均匀性假定的测试数据处理方法(二波法)一直作为标准方法, 广泛应用于各种材料测试结果的处理。但是经典二波法的一个重要问题就是在透射波与反射波波头对齐过程中的误差及人为性, 导致人们对 SHPB 技术的怀疑^[1]。唐志平等^[2]对波头斜率进行特殊化的线性处理, 以避开零线振荡, 先按一定高度找到入射波前沿上一点 A, 再顺前沿找到第 1 振荡峰值点 B, 然后反向找到前沿上 1/3 高度点 C, 再按点 C 前后 6 点的平均斜率找到与基线相交的点 D, 作为计算波头。这种处理方法可以明显消除波形反常记录, 是一种有效的方法。但是, 这种经验性方法没有足够的理论说明波头是否真正对齐, 存在较大的人为因素, 因此误差较大。目前, 有些研究者通过测量入射杆和透射杆应变计的距离, 结合实测压杆波速及预估的试样波速计算三波之间的波头差, 在理想条件下, 该方法得到的实验结果精度较高。但是当任何一个因素, 如波速、应变片间的距离等, 测量误差偏大的时候, 应力应变曲线就会偏离真实值, 由于没有反馈机制, 这种偏差不易被发现, 最终影响到实际的工程应用。本文中, 提出三波校核法, 综合考察 Hopkinson 实验的基本假定, 首先由波速及距离对齐波头, 再分别用二波法、三波法处理数据, 可以得到 3 条应力应变曲线, 且波形和应力应变曲线分别显示在同一界面的 2 个窗口。当 3 条应力应变曲线对齐时, 说明正确对齐了波头。否则移动波相对位置, 则另一窗口动态的显示当前位置的应力应变曲线, 再次判断是否正确对齐波头。本方法动态、直观, 对于 SHPB 实验数据处理结果的正确性有参考价值。

2 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示, 入射杆、透射杆为 $\varnothing 14.5$ mm 的合金钢杆。入射杆和透射杆上分别粘贴应变计。紫铜试样的尺寸为 $\varnothing 12$ mm \times 6 mm。为了减小入射波波形弥散, 在入射杆端采用 $\varnothing 5$ mm \times 1 mm 的橡胶作为波形整形器。

根据 SHPB 实验的一维假定, 可以用三波法^[3]确定试件材料的应变率、应变和应力

* 收稿日期: 2009-03-10; 修回日期: 2009-10-31

作者简介: 尚 兵(1979—), 男, 博士研究生。

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{c}{l_0}(\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t), \quad \epsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt, \quad \sigma(t) = \frac{A}{2A_0} E(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (1)$$

式中： ϵ_i 、 ϵ_r 和 ϵ_t 为杆上应变计记录的入射波、反射波与透射波； A_0 和 l_0 为试样的面积与厚度； A 、 c 和 E 为杆的横截面面积、波速与杨氏模量。

根据均匀假定，有如下关系

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon_t(t) \quad (2)$$

式(2)代入式(1)，可得到 2 种二波法的形式^[4]。一种用入射波和透射波计算应力、应变、应变率

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E \epsilon_t(t), \quad \epsilon(t) = -\frac{2c}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)) dt, \quad \dot{\epsilon}(t) = \frac{2c}{l_0} (\epsilon_i(t) - \epsilon_t(t)) \quad (3)$$

另一种用入射波和反射波计算应力、应变、应变率

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E(\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)), \quad \epsilon(t) = -\frac{2c}{l_0} \int_0^t \epsilon_r(t) dt, \quad \dot{\epsilon}(t) = -\frac{2c}{l_0} \epsilon_r(t) \quad (4)$$

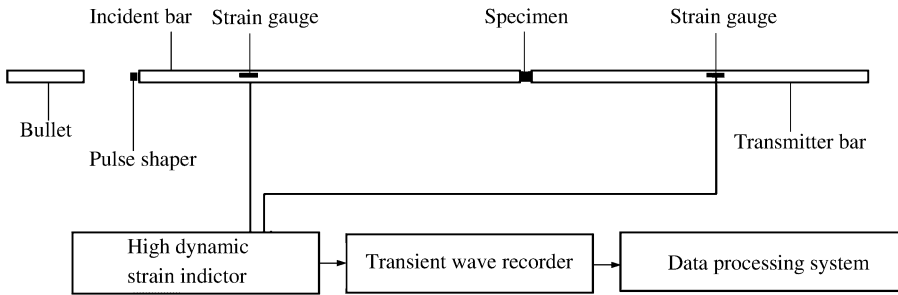


图 1 SHPB 实验装置图

Fig. 1 Schematic view of SHPB system

对于金属材料，应力均匀性假定是可以接受的^[5-7]，即 3 个公式得出来的应力应变关系基本一致。程序编制就是依据这个原理。

3 实验数据及分析

加载速度 30 m/s 时，实验所得原始波形如图 2 所示。图 3~4 为程序截图。入射波的位置固定，而透射波与反射波的位置可以左右移动，即可以人为调整波头。 σ_1 表示由入射波与透射波计算得到的应力应变曲线， σ_2 表示由入射波与反射波计算得到的应力应变曲线， σ_3 表示用三波法得到的应力应变曲线。

图 3(a)中，由于透射波与入射波之差与反射波的值相差较大，这种结果不符合均匀性假定，因此得到的应力应变曲线不精确。图 3(b)中，3 条应力应变曲线是用图 3(a)波形的相对位置，分别用 3 种方法计算得到。这 3 条应力应变曲线的差异，可以直观、明显地反应波头没有对准确，这是单纯用二波法或三波法所不能体现的。因此这种方法称为三波校核法。

图 4 为恰当对齐波头以后的波形图。判断波头对齐的标准是，透射波与入射波之差近似等于反射波。这用所有采样点上透射波减入射波再加反射波的均方差判断。3 个波在不同的相对位置上，均方差是不相等的，均方差最小时，对应的波位置，就是波头对的最准确的一个。可以看出，透射波与入射波之差基本等于反射波。与此同时得出的 3 条应力应变曲线也比较一致。

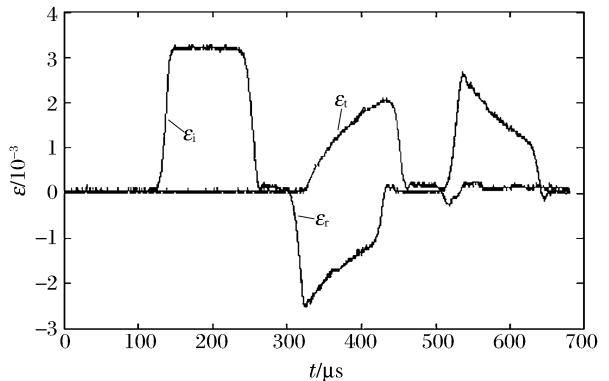


图 2 原始波形图

Fig. 2 The origin waves

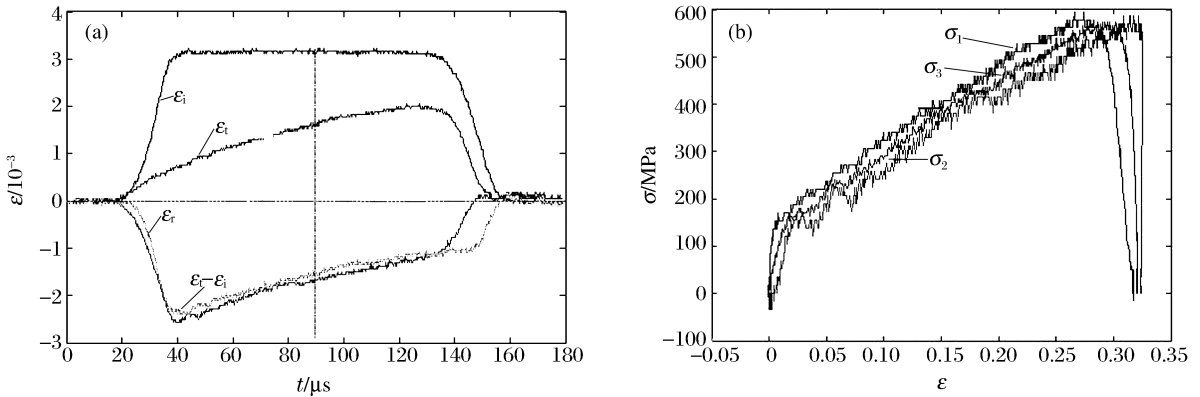


图 3 三波未对齐时的程序截图

Fig. 3 The select figure of the program as the three waves aren't even

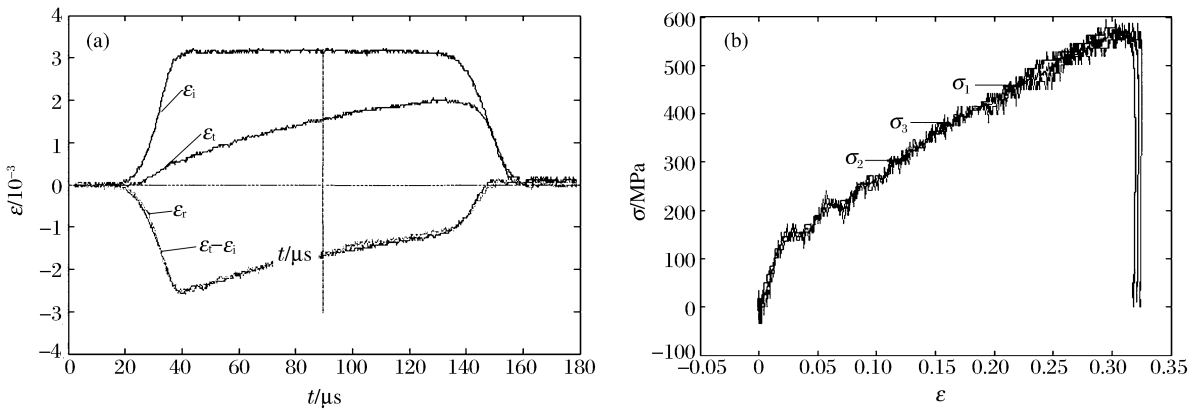


图 4 三波对齐时的程序截图

Fig. 4 The select figure of the program as the three waves are even

由图 4(b)可以发现,卸载段的应变并不完全一致,这主要是由于反射波与透射波和入射波之差并不完全相等引起的。例如图 4 中试件的应变为约 0.3,但是 3 种不同的方法得出来的应变相差不到 0.005,这个误差是可以接受的。这个误差,主要由于仪器的精度,及标定时的人为误差引起。因此文中的一致通常指在一定数值范围内的一致。

利用三波校核法处理了不锈钢、钛合金、铜、SuAgCu 等金属材料的 SHPB 实验数据,3 种数据处理方法得到的应力应变曲线都具有较好的一致性。但是弹性段的数据并不可靠,主要有 2 个原因:(1)在加载初期阶段,试样内存在严重的应力不均匀性,即不满足均匀性假定;(2)试件与杆端的面积失配会导致压杆在与试件接触处产生凹陷,形成凹陷二维效应,对于极小变形的弹性阶段影响极大^[8]。

由式(1)~(4)和实验结果可以得出:正确对齐波头,无论三波法还是二波法得出来的应力应变曲线是一致的。而三波法相当于二波法的平均,可以减小系统误差,因此三波法得到的结果更为精确。

4 结 论

提出了三波校核法处理 Hopkinson 压杆试验数据的方法。引入了动态、显式的反馈机制来校核是否正确对齐了波头,减小了实验数据处理的人为因素影响,提高了实验结果的可靠性。同时简化了实验和数据数据处理过程,只要有三个波即可以得到较准确的实验结果。仅讨论了三波校核法处理金属材料的 SHPB 实验数据,需进一步研究用该方法处理脆性材料、软材料等的 SHPB 实验数据。

参考文献:

[1] 宋力,胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.

- SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(4):368-373.
- [2] 唐志平,王礼立. SHPB 实验的电脑化数据处理系统[J]. *爆炸与冲击*,1986,6(4):320-327.
TANG Zhi-ping, WANG Li-li. A computerized system of data processing used in SHPB experiments[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1986,6(4):320-327.
- [3] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [4] 胡昌明. 镁铝合金动态力学性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2003.
- [5] 巫绪涛,胡时胜,陈德兴,等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. *爆炸与冲击*,2005,25(2):125-131.
WU Xu-tao, HU Shi-sheng, CHENG De-xing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(2):125-131.
- [6] 刘瑞堂,果春焕,张智峰. 分离式 Hopkinson 压杆系统冲击压缩过程中试样的应力均匀化过程[J]. *机械工程材料*, 2009(2):25-27;95.
LIU Rui-tang, GUO Chun-huan, ZHANG Zhi-feng. Stress uniformization process in specimens during compression process with split Hopkinson pressure bar system[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009(2):25-27;95.
- [7] 毛勇建,李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性[J]. *爆炸与冲击*,2008,28(5):448-454.
MAO Yong-jian, LI Yu-long. Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008,28(5):448-454.
- [8] 肖大武,胡时胜. SHPB 实验试件横截面积不匹配效应的研究[J]. *爆炸与冲击*,2007,27(1):87-90.
XIAO Da-wu, HU Shi-sheng. Study of two-dimensional effect on SHPB experiment[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007,27(1):87-90.

A three-wave coupling method for data treatment in SHPB experiments with metal samples *

SHANG Bing^{1,2}, HU Shi-sheng², JIANG Xi-quang^{2,3}

(1. *School of Aerospace and Aeronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

3. Artillery Academy, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: The relative positions of incident wave, transmission wave and reflection wave can be changed by the self-developed program. When the relative position of the waves is adjusted, the self-developed program gives two images. One image displays incident, transmission, reflection waves and the difference between transmission and incident waves. The other image lays out the three strain-stress curves of the specimen. The three curves are plotted separately through incident and transmission waves, incident and reflection waves, and the three waves from the first image. According to the basic assumptions of the SHPB experiment, the three curves should be consistent in the plastic region, and the difference of transmission and incident waves should be equal to the reflective wave. The two equivalent characteristics can be used as criteria of treating the experimental data correctly or not. This experimental data treatment method is called the three-wave checking method.

Key words: solid mechanics; three-wave coupling; SHPB; data processing

* Received 10 March 2009; Revised 31 October 2009

Corresponding author: SHANG Bing, shang@mail.ustc.edu.cn