

文章编号: 1001-1455(2004)05-0413-06

SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究^{*}

陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 陈刚, 张方举, 李思忠, 黄西成

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了获得材料准确的动态力学性能参数, 提出了两种对试件实现恒应变率加载的实验方法: 双试件 SHPB 方法和将圆柱形子弹改变成柱锥形子弹的 SHPB 方法。对三种金属材料进行了实验, 并用数值模拟的手段对这两种方法进行了验证和比较。

关键词: 固体力学; 恒应变率; SHPB; 金属材料

中图分类号: O347.1 国标学科代码: 130°15 文献标志码: A

1 引言

在用 SHPB 系统进行材料动态力学性能研究中, 应变率是一个重要的参量, 材料的动态力学性能如材料的屈服强度、破坏强度、破坏应变等参数以及材料的应力应变曲线等均与试件的应变率有关。然而, 在传统的 SHPB 系统实验过程中, 试件的应变率并非是恒定的, 试件典型的应变率曲线见图 1。

通过实验获得材料在某个应变率下的动态力学性能参数时, 应变率是 SHPB 实验中试件各个时刻应变率的算术平均值。理论分析和数值模拟中所需的材料动态力学性能参数应是恒应变率下获得的参数。对试件实现恒应变率加载是获得材料准确的动态力学性能参数的必要条件之一。为了给理论分析和数值模拟提供更准确的材料参数, 应深入开展材料在恒应变率下的力学性能测试, 这需要首先开展恒应变率实验技术研究。

S. Ellwood 等^[1]首先在 SHPB 实验中使用了如图 2 所示改进的 SHPB 系统(在普通的 SHPB 系统的子弹和入射杆之间添加一根预载杆和一脉冲整形器, 且脉冲整形器与试件的材料和尺寸均一样), 获得了一种不锈钢材料在 $100 \sim 3000\text{s}^{-1}$ 范围内的近似恒应变率加载。从所给的应变率曲线来看, 平均应变率在 100s^{-1} 时的应变率基本恒定, 平均应变率在 $400, 1800\text{s}^{-1}$ 时的应变率不太恒定, 但比普通 SHPB 实验获得的应变率恒定。C. E. Frantz 等^[2]、P. S. Follansbee^[3]在 SHPB 实验中使用脉冲整形技术(脉冲整形技术是指在普通 SHPB 系统入射杆前端加一薄的软质小试件), 使试件在加载过程

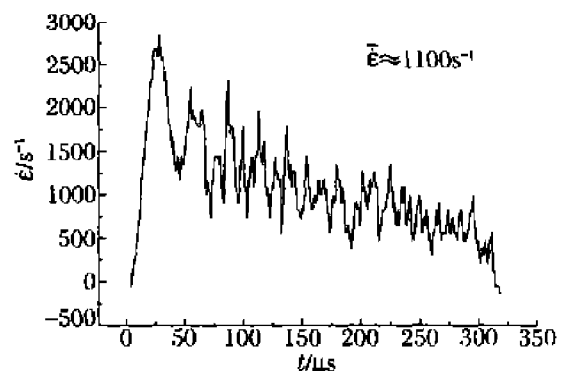


图 1 SHPB 实验所得的某特种钢的应变率曲线
Fig.1 The curve of strain rate changing vs time of an special steel obtained by an SHPB experiment

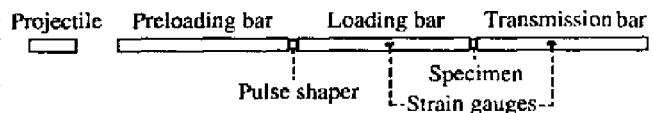


图 2 Ellwood 等改进的 SHPB 系统
Fig.2 SHPB System Modified by Ellwood

* 收稿日期: 2003-11-28; 修回日期: 2004-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(10232040); 中国工程物理研究院基金项目(2000Z0307, 4210501-4-03)

作者简介: 陶俊林(1972—), 男, 博士研究生。

中应变率近似为一常数,获得了 304L 不锈钢在应变率接近 4500s^{-1} 时的动态压缩力学性能。D. J. Frew 等^[4~5] 也利用该技术获得了石灰石、可加工玻璃陶瓷等脆性材料的动态压缩应力应变曲线,指出在实验的大部分时间里,试件的应变率接近常数。

本文中通过对恒应变率实验技术的研究,提出了两种实现恒应变率加载的实验方法:一种是在文献 [1] 的基础上将其预载杆去掉,称为双试件 SHPB 方法;另一种是利用柱锥形子弹代替圆柱形子弹,称为柱锥形子弹 SHPB 方法。

2 恒应变率实验设计

在 SHPB 系统中,恒应变率加载表现为实验记录的反射波形为一理想方波(应变率与反射波信号成正比, $\dot{\epsilon}_s = (2c/l)\dot{\epsilon}_r$)。在 SHPB 实验中,普通 SHPB 系统的入射波接近为一理想方波,根据入射波 ϵ_i 、反射波 ϵ_r 、透射波 ϵ_t 的关系 $\epsilon_i + \epsilon_r = \epsilon_t$,在普通 SHPB 系统上如果实现了试件的恒应变率加载,透射波也为理想方波。透射波的形状与试件材料的应力应变曲线是非常类似的,因此,传统 SHPB 系统只能对理想塑性材料实现恒应变率加载,无法对其他类型材料实现恒应变率加载。

根据以上分析可知,改变入射波形(使其与透射波形一样)可对线性硬化材料实现恒应变率加载。S. Ellwood 等^[1] 在普通 SHPB 系统的子弹和入射杆之间添加了一根预载杆和一脉冲整形器使试件的入射波形和透射波形一致。实验表明,取消预载杆也能获得与透射波形一致的入射波。将这种改进的方法称为双试件 SHPB 方法(见图),入射杆前后两个试件的尺寸和材料均相同。

双试件 SHPB 方法与脉冲整形技术类似。脉冲整形技术使用的脉冲整形器均是较软的材料且试件很薄,其目的是使原来陡峭的上升沿变得缓慢,同时可减少入射波形的高频振荡。但脉冲整形技术使用软材料作波形整形器,不能获得较高强度、较大塑性硬化材料的恒应变率加载,并且波形整形器很薄时,弹速越高,入射波形越接近没有波形整形器的情况。在双试件 SHPB 方法中,不把入射杆前面的试件 1 作为脉冲整形器,并非用来延长入射脉冲的上升时间从而使试件在这段时间内达到应力平衡状态,而是用来获得与试件(入射杆与透射杆之间)应力应变曲线一致的入射波形,因此,将这种方法称为双试件 SHPB 方法而不是脉冲整形方法。

在双试件 SHPB 方法中,入射杆前后两个试件的尺寸和材料均相同,对于强度较低或较高的材料均能实现恒应变率加载,在以后的恒应变率研究中,使用了双试件 SHPB 方法。

另外,还可以通过改变子弹的形状来使试件的入射波形和透射波形一致。根据不同材料的应力应变曲线,设计对应形状子弹。由于常用金属材料几乎均是线性硬化材料,子弹可设计为柱锥形。柱锥形子弹 SHPB 系统如图 4 所示。

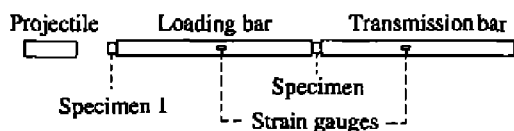


图 3 双试件 SHPB 系统

Fig. 3 SHPB System with two specimens

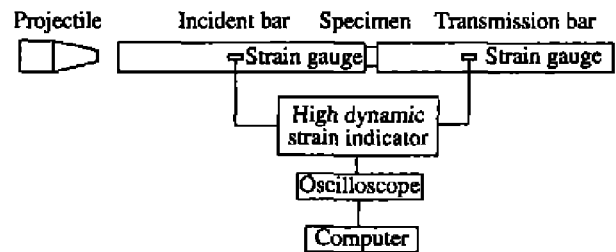


图 4 柱锥形子弹 SHPB 系统示意图

Fig. 4 SHPB system with a cylinder-cone projectile

3 恒应变率实验

利用双试件 SHPB 方法对一种特种钢、一种 WMo 合金、一种 MgAl 合金进行了恒应变率实验,图 5~图 7 分别是对这三种材料用双试件 SHPB 方法获得的原始波形和用普通 SHPB 方法获得的原始波形。

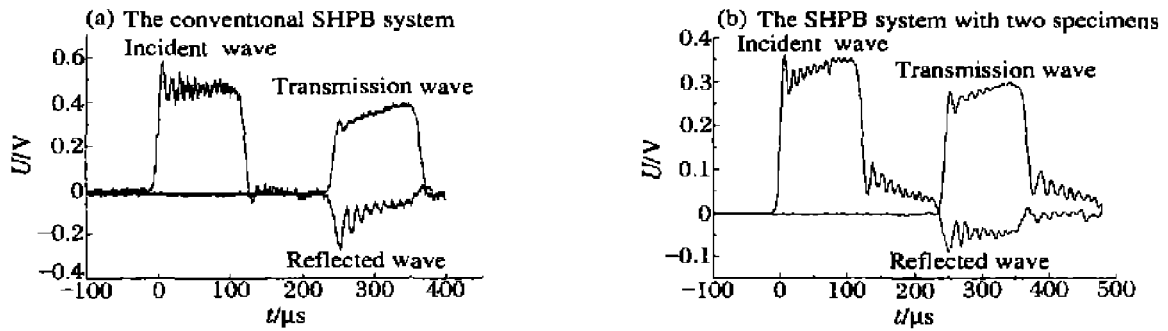


图 5 特种钢的实验波形

Fig.5 Curves of a special steel obtained by experiments

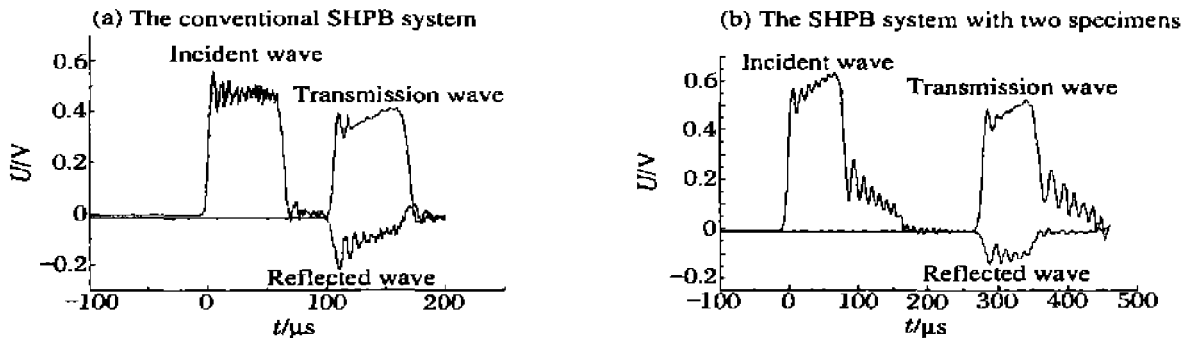


图 6 WMo 合金的实验波形

Fig.6 Curves of a WMo alloy obtained by experiments

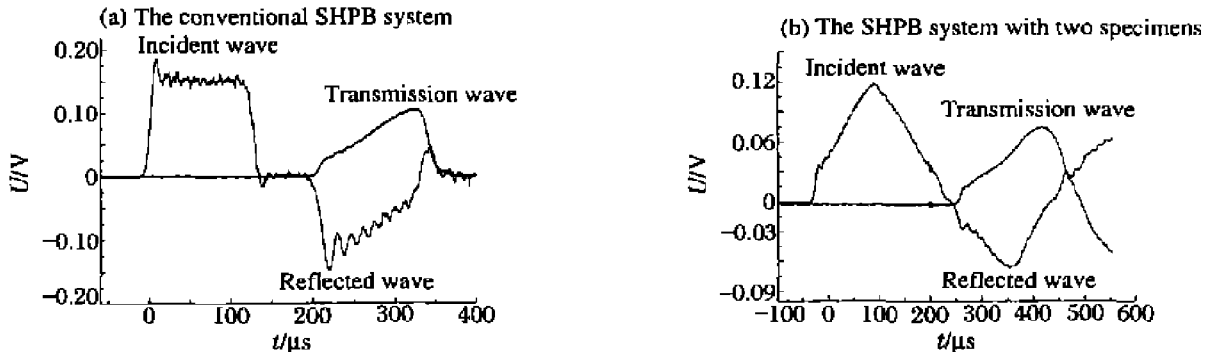


图 7 MgAl 合金的实验波形

Fig.7 Curves of a MgAl alloy obtained by experiments

由图 5~图 7 可知,与普通 SHPB 系统相比,双试件 SHPB 系统可以对特种钢和 WMo 合金进行恒应变率加载;普通的 SHPB 系统和双试件 SHPB 系统均不能对 MgAl 合金进行恒应变率加载。将波形整形器的材料换成薄铜片,所得的反射波形与普通 SHPB 实验所得的反射波形类似。利用柱锥形子弹的 SHPB 系统对 MgAl 合金进行了实验,所获得的波形如图 8、图 9 所示。

比较图 7、图 8、图 9 可知,无论 MgAl 合金试件在实验过程中是否被破坏,与普通 SHPB 系统实验相比,利用柱锥形子弹 SHPB 系统, MgAl 合金试件可获得更恒定的应变率历程。图 8 和图 9(b)的反

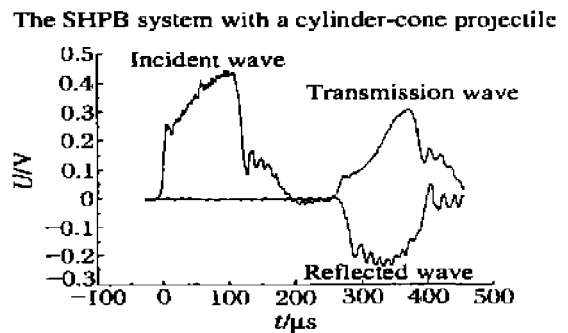


图 8 MgAl 合金在未发生破坏时的实验波形
Fig.8 Curves of an unbroken MgAl alloy obtained by experiments

射波不十分恒定,可以改变子弹的设计使其更恒定。

由上面的实验可知,利用双试件 SHPB 方法可对特种钢和 WMo 合金进行恒应变率加载,而对 MgAl 合金则不行。这是由材料的动态力学性能所决定的。在双试件 SHPB 方法和原来的 Ellwood 方法中,波形整形器与试件的材料和尺寸均一样,在实验中的变形速率大于试件的变形速率,因此,利用双试件 SHPB 方法和 Ellwood 方法来实现材料的恒应变率加载,要求在某应变率范围内(波形整形器的应变率与试件应变率所在的范围)材料的屈服强度随应变率增加而增加,但硬化模量不随应变率变化或变化非常小。对于硬化规律随应变率变化较大的材料,利用双试件 SHPB 方法不能对其进行较好的恒应变率加载,要对其进行恒应变率加载,需要采用其他的方法,如柱锥形子弹的 SHPB 方法等。严格说来,对于硬化规律随应变率变化较大的材料,要获得各个应变率下的恒应变率加载均需要设计不同的子弹,同一种子弹不能获得所有应变率下的恒应变率加载。图 8 与图 9(b)相比,这次实验所用的子弹对于图 9(b)这种情况所得到的恒应变率加载更理想一些。

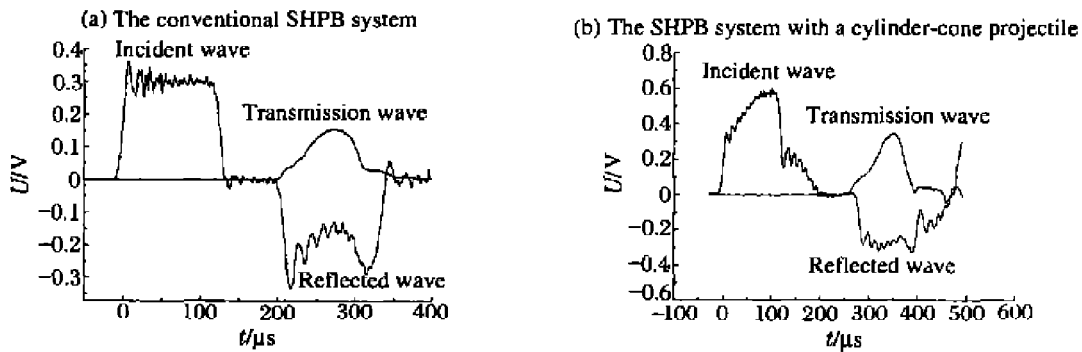


图 9 MgAl 合金试件在发生破坏时的实验波形

Fig.9 Curves of a broken MgAl alloy obtained by experiments

4 恒应变率实验数值模拟

通过实验已初步获得了恒应变率加载方法,但为了弥补实验研究的不足,利用有限元程序对上面讨论的两种恒应变率加载方法进行了大量的数值模拟。由于实验系统是轴对称的,取其 1/4 建立三维模型。在数值模拟中,除低速撞击时 MgAl 合金的应力应变关系用线性硬化近似外,子弹、波导杆、前后试件的材料及尺寸均与实验一致,且试件的应力应变关系由实验给出。

首先,对图 5(b)、图 6(b)、图 8 这三种恒应变率实验及其对应的普通 SHPB 实验进行数值模拟。图 10 和图 11 分别是对特种钢和 WMo 合金的普通 SHPB 实验与双试件 SHPB 实验的数值模拟所得的三波应力历程。图 12 则是对 MgAl 合金的普通 SHPB 实验和柱锥形子弹 SHPB 实验的数值模拟所得的三波应力历程。

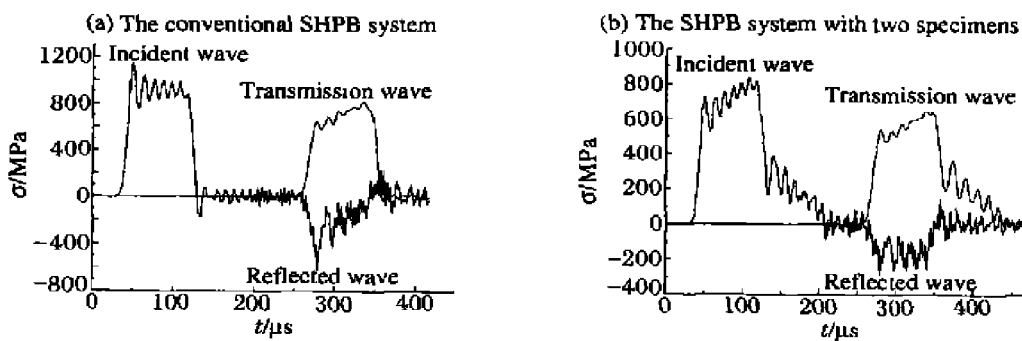


图 10 特种钢的数值模拟结果

Fig.10 The simulation results of special steel

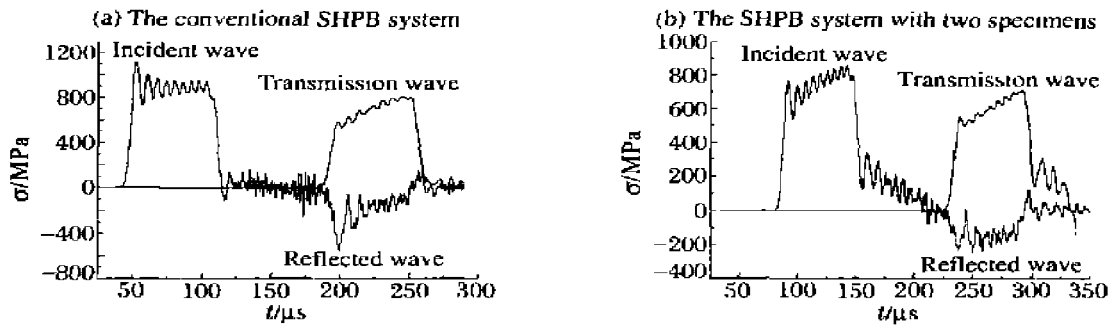


图 11 WMo 合金的数值模拟结果
Fig.11 The simulation results of WMo alloy

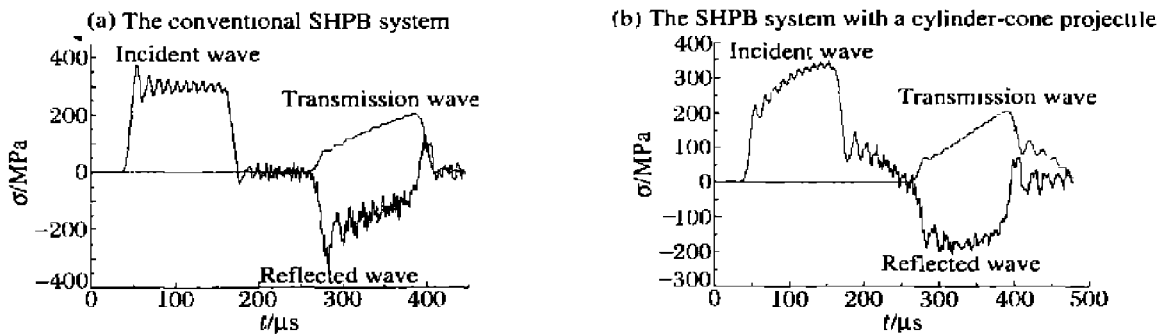


图 12 MgAl 合金的数值模拟结果
Fig.12 The simulation results of WMo alloy

由图 10 ~ 图 12 可以看出, 双试件 SHPB 方法可获得特种钢和 WMo 合金的恒应变率加载, 柱锥形子弹 SHPB 系统可获得 MgAl 合金的恒应变率加载。比较数值模拟结果和实验结果可以看出, 数值模拟结果和实验结果非常吻合, 可用数值模拟方法开展更多的工作。

实验表明: 双试件 SHPB 方法不能对 MgAl 合金进行恒应变率加载。由于特种钢和 WMo 合金具有较高的强度, 担心使用柱锥形子弹 SHPB 系统对其进行实验时损坏子弹和入射杆, 未用柱锥形子弹 SHPB 系统对它们进行实验。通过数值方法来模拟柱锥形子弹 SHPB 系统对特种钢的实验。

图 13 是三种不同锥度的柱锥形子弹 SHPB 系统数值模拟结果, 这三种子弹的柱段直径均为 22mm, 柱段长度均为 100mm, 锥段长度均为 200mm, 其撞击端的直径分别为 12.5、14.5、16mm。

由图 13 可以看出: 试件在加载过程中应变率的恒定程度依次增加, 说明通过改变柱锥形子弹的锥度可以改善试件在加载过程中应变率的恒定程度。与图 5 (b) 和图 10 (b) 相比, 图 13 所示的应变率恒定程度稍差, 但数值模拟结果揭示, 通过进一步改变柱锥形子弹的锥度或者改变子弹的形状可以对试件进行更加恒定的应变率加载。

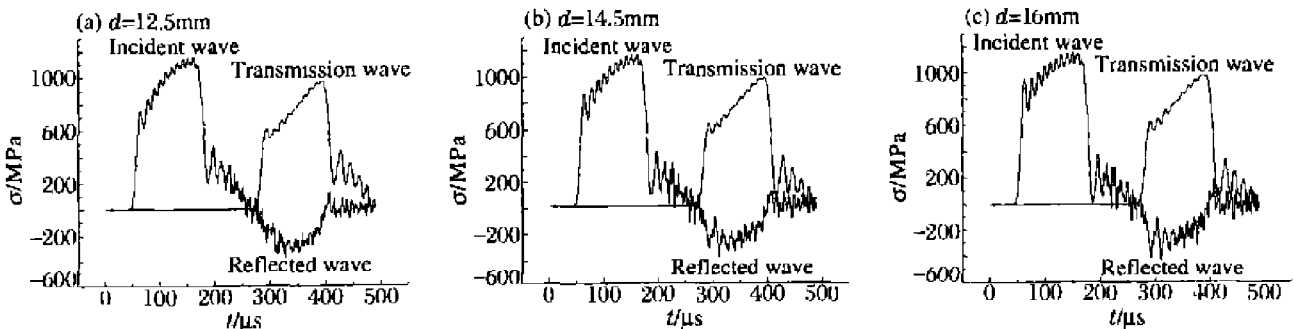


图 13 三种不同锥度的柱锥形子弹 SHPB 系统的数值模拟结果
Fig.13 The simulation results of the cylinder-cone projectile SHPB system with three different tapers

5 结论和讨论

实验和数值模拟证明: 本文中所提出的两种 SHPB 方法均可很好实现对试件的恒应变率加载。

将圆柱形子弹改变为柱锥形子弹或其他形状的子弹来实现对试件的恒应变率加载的方法原则上适用于所有的塑性材料, 但对于不同的材料甚至同一材料在不同应变率下的恒应变率加载均需要设计相应的子弹形状。

虽然, 双试件 SHPB 方法原则上只适用于在某应变率范围内屈服强度随着应变率增加而增加, 而且硬化模量不随应变率变化或变化非常小的材料, 但由于该方法简单易行, 并且在一定应变率范围内, 大多数金属材料的硬化模量随应变率变化较小, 因此, 在对试件进行恒应变率加载时, 建议首先选用双试件 SHPB 方法, 若结果不理想时, 可采用改变子弹形状的方法。

另外, 与普通 SHPB 方法相比, 双试件 SHPB 方法获得了更加恒定的应变率历程, 但它同时将入射波的上升时间拉长, 柱锥形子弹 SHPB 方法则没有这种影响。

参考文献:

- [1] Ellwood S, Griffiths L J, Parry D J. Materials testing at high constant strain rates[J]. *Journal of Physics E: Science Instrument*, 1982, 15:280—282.
- [2] Frantz C E, Follansbee P S, Wright W E. New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar[A]. Berman I, Schroeder J W. *High Energy Rate Forming*[C]. New York: ASME, 1984:229.
- [3] Follansbee P S. “The Hopkinson bar” materials testing[A]. American Society for Metals. *Metals Handbook* (8), 9th edition[C]. Ohio: Metals Park, 1985:198—217.
- [4] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. A split Hopkinson bar technique to determine compressive stress ~ strain data for rock materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41:40—46.
- [5] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse-shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42:93—106.

Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB

TAO Jun-lin^{*}, TIAN Chang-jin, CHENG Yu-ze, CHEN Gang,
ZHANG Fang-ju, LI Si-zhong, HUANG Xi-cheng

(Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics Research,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: To obtain correct dynamics parameters of material, propose two methods to realize the constant strain rate of specimen in SHPB. One is using the improved Ellwood SHPB system. The other is using a cylinder-cone projectile to replace the cylinder projectile in the SHPB system. The two methods are proved and compared by experiments and numerical simulations with three kinds of metal.

Key words: solid mechanics; constant strain rate; SHPB; metal material

^{*} Corresponding author: TAO Jun-lin
E-mail address: junlintao@sina.com
Telephone: 0816-2495604