

文章编号: 1001-1455(2005)01-0080-05

应变率历史对应力应变曲线的影响*

陶俊林, 陈裕泽, 田常津, 陈刚, 李思忠, 黄西成, 张方举

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用普通 SHPB 实验系统、双试件 SHPB 实验系统, 对一特种钢材进行了不同应变率历史的动态压缩实验, 获得了不同应变率历史所对应的应力应变曲线。通过量化平均应变率相同的情况下不同应变率历史所对应的应力应变曲线的差别, 以及量化应变率历史的恒定程度, 初步分析了应变率历史对应力应变曲线的影响。研究表明: 特别是在较高平均应变率下, 应变率历史对试件材料的应力应变曲线有明显的影 响, 在材料动态本构关系研究中应当考虑应变率历史的影响。

关键词: 固体力学; 应力应变曲线; SHPB; 应变率历史; 动态压缩实验; 本构关系

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引 言

在材料动态力学性能描述中, 应变率是一个重要的特征参量, 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应变率有关。SHPB 系统是广泛应用于测试材料动态压缩力学性能的实验系统, 在普通 SHPB 系统对多数金属材料进行动态压缩实验中, 试件的应变率并非恒定, 应变率一般随加载时间的增加而减小, 并且平均应变率越高, 其应变率的变化越大, 如图 1 所示^[1]。在动态实验中所用的应变率均是指试件加载过程中的算术平均应变率, 而没有考虑平均应变率相同或相当而应变率历史差别较大时, 所对应的应力应变曲线的差别。

S. Ellwood 等^[2]首先进行了使试件的应变率保持相对恒定的 SHPB 实验, 并与普通 SHPB 实验结果比较, 发现在相同平均应变率下, 试件应变率相对恒定所得的应力应变曲线处于普通 SHPB 实验所得应力应变曲线的上方, 但随后的相关研究则少见报道。R. A. Frantz 等^[3]、T. Nicholas 等^[4]、C. Albertini 等^[5]、佟景伟等^[6-7]通过对同一试件进行两次不同应变率的加载, 分别研究了应变率历史对铝、不锈钢以及形状记忆合金等的力学性能的影响。更准确地说, 他们研究的是应变率跳跃对材料动态力学性能的影响。本文中研究的是单次加载过程中, 试件应变率历史对试件材料应力应变曲线的影响。

研究应变率历史对应力应变曲线的影响, 需要能够实现获得不同应变率历史的加载技术。利用文献^[8]中提出的双试件 SHPB 恒应变率实验技术和柱锥形子弹 SHPB 恒应变率实验技术, 并结合传统的 SHPB 实验技术, 可以对试件进行平均应变率相同但应变率历史不同的加载, 进而获得相应的应力应变曲线, 并分析他们的差别。

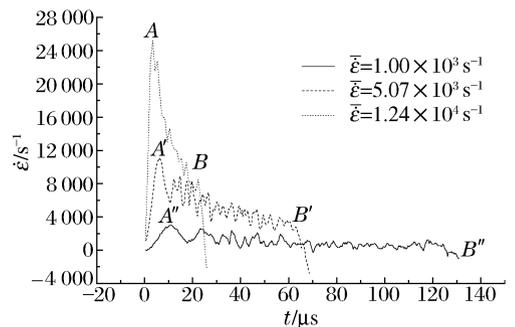


图 1 不同直径 SHPB 系统获得 WMo 合金的几个典型应变率差别曲线

Fig. 1 The typical strain rate histories of a WMo alloy obtained from different diameter SHPB system

* 收稿日期: 2004-03-19; 修回日期: 2004-10-21

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。

2 典型实验波形简介

图 2 是利用普通 SHPB 实验系统与双试件 SHPB 实验系统,对一特种钢材进行动态压缩实验的典型实验波形^[8]。由于试件的应变率历史与反射波波形基本上呈正比关系,由实验所得的反射波波形可基本得到试件应变率历史。从图 2 的反射波可知,图 2(a)和图 2(b)所示的试件的应变率历史有较大的区别,图 2(a)所示的应变率变化较大,而图 2(b)所示的应变率则变化较小。

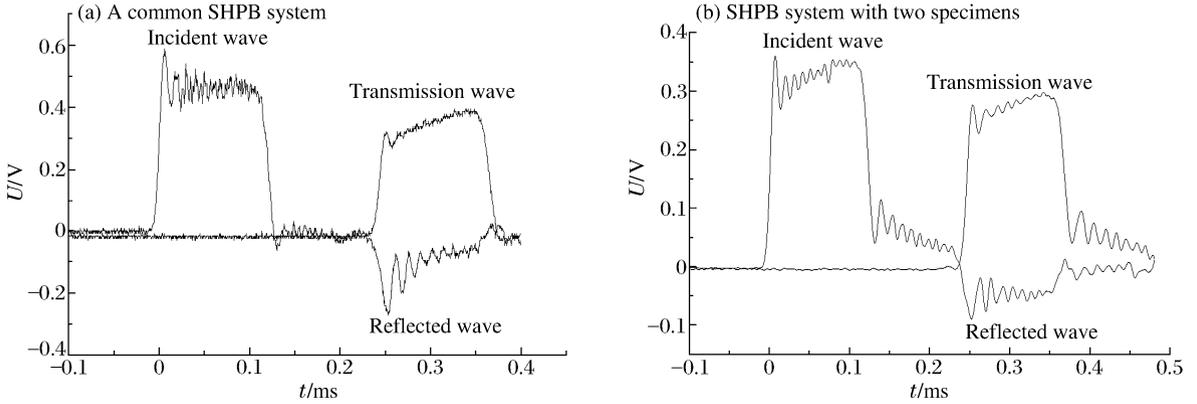


图 2 一种特种钢的实验波形

Fig. 2 The experimental wave profiles of a special steel

3 应变率历史对应力应变曲线的影响

为了便于比较不同应变率历史对应力应变曲线的影响,在获得材料不同的应变率加载历史时,仍然以传统的试件加载过程中的平均应变率作为比较的参考点,并且在同一平均应变率下,不同加载应变率历史所对应的应力应变曲线的获取是在试件和波导杆材料和尺寸均相同的情况下获得的,实验数据的处理方法也相同。

图 3 是对特种钢在平均应变率为 $1\ 100\ s^{-1}$ 时,不同应变率历史所对应应力应变曲线的比较,图 3 中的数字是试件的平均应变率。处于上面的两条实线表示的应力应变曲线是用双试件 SHPB 方法获得的,其典型的应变率历史如图 4 中曲线(a) (平均应变率为 $1\ 091\ s^{-1}$) 所示;处于下面的四条实线表示的应力应变曲线是用普通 SHPB 实验方法获得的,其典型的应变率历史如图 4 中曲线(b) (平均应变率为 $1\ 090\ s^{-1}$) 所示。实验时试件的尺寸为 $\varnothing 18.00\ mm \times 9.00\ mm$,子弹和波导杆的直径为 $22\ mm$ 。

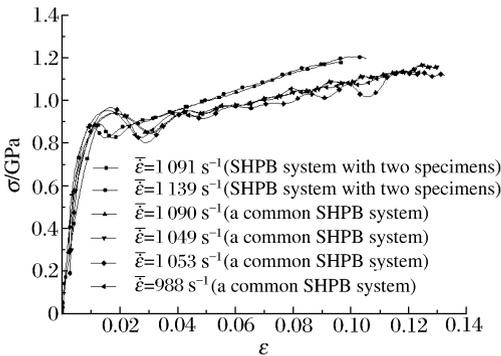


图 3 特种钢平均应变率约为 $1\ 100\ s^{-1}$ 时不同应变率历史所得的应力应变曲线的比较

Fig. 3 Stress-strain curves of the special steel with average strain rate $1\ 100\ s^{-1}$ but different strain rate histories

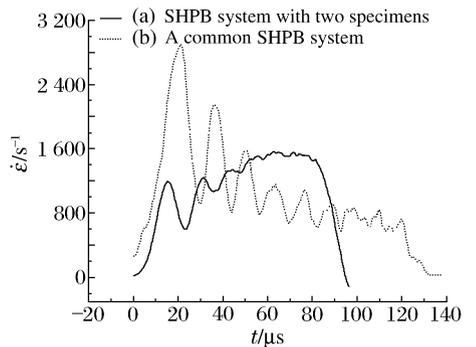


图 4 特种钢平均应变率约为 $1\ 100\ s^{-1}$ 时不同实验方法所得的试件应变率历史

Fig. 4 Strain rate histories of the special steel obtained by different experimental method at average strain rate $1\ 100\ s^{-1}$

图5是特种钢在平均应变率约为 $4\,700\text{ s}^{-1}$ 时,不同应变率历史所对应应力应变曲线的比较,图中的数字是试件的平均应变率。图5中,处于上面的三条实线表示的应力应变曲线是用双试件 SHPB 方法获得的,其典型的应变率历史如图6中曲线(a)(平均应变率为 $4\,765\text{ s}^{-1}$)所示;处于下面的四条实线表示的应力应变曲线是用普通 SHPB 方法获得的,其典型的应变率历史如图6中曲线(b)(平均应变率为 $4\,739\text{ s}^{-1}$)所示。实验时试件的尺寸为 $\varnothing 2.00\text{ mm}\times 1.00\text{ mm}$,子弹和波导杆的直径为 5 mm 。

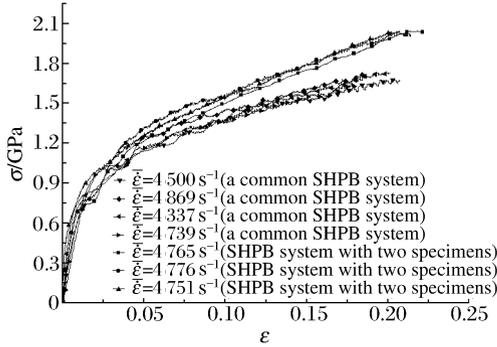


图5 特种钢平均应变率约为 $4\,700\text{ s}^{-1}$ 时不同应变率历史所得的应力应变曲线的比较

Fig. 5 Stress-strain curves of the special steel with average strain rate $4\,700\text{ s}^{-1}$ but different strain rate histories

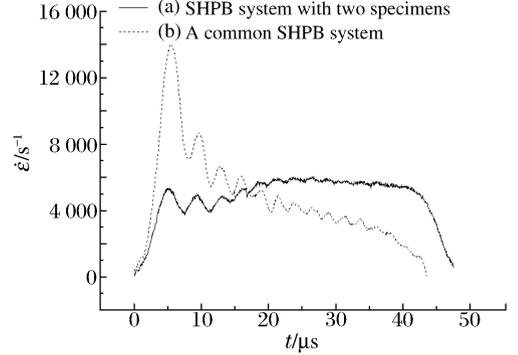


图6 特种钢平均应变率约为 $4\,700\text{ s}^{-1}$ 时不同实验方法所得的应变率历史

Fig. 6 Strain rate histories of the special steel obtained by different experimental method at average strain rate $4\,700\text{ s}^{-1}$

由图3~图6可知,该特种钢试件的应变率历史对试件材料的应力应变曲线有影响。如果加载过程中,在平均应变率相同的情况下,应变率恒定(试件的应变率随时间变化较小)所得的应力应变曲线(试件进入塑性后)将处于应变率随时间变化较大情况下所得的应力应变曲线的上面。这说明对材料的动态应力应变曲线描述只用平均应变率是不够的,还应当考虑应变率历史的影响。

由恒应变率实验技术获得的应力应变曲线与由普通 SHPB 系统获得的应力应变曲线的差别的量化可以用如下的方法表示。在平均应变率相同的情况下,以各个应变对应的两种方法获得的应力的差值 $\sigma_s - \sigma$ 与普通 SHPB 方法获得的应力 σ 的比值的绝对值的算术平均值 δ 来表示两者之差。 δ 可写为

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\sigma_{s,i} - \sigma_i}{\sigma_i} \right| \quad (1)$$

式中: n 表示所取应变值的点数。则图3中平均应变率为 $1\,091$ 、 $1\,090\text{ s}^{-1}$ 的由两种实验方法获得的两条应力应变曲线差别 $\delta=5.25\%$;则图5中平均应变率为 $4\,765$ 、 $4\,739\text{ s}^{-1}$ 的由两种实验方法获得的两条应力应变曲线差别 $\delta=9.83\%$,由此可以看出应变率历史对试件材料的应力应变曲线有较明显的影响,并且平均应变率越高,应变率历史效应越显著。

通过以上的分析表明,试件的应变率历史对试件的应力应变曲线有较明显的影响,并且平均应变率越高,应变率历史效应越显著,只用平均应变率来表征材料动态应力应变曲线是不行的,在材料本构关系研究中应当考虑应变率历史对其的影响。

4 应变率历史的描述

对于应变率历史的描述可用应变率历史的恒定程度来表示。对于如图1所示的应变率历史,判断其应变率历史程的恒定程度一般是根据其A、B两点之间,即去掉应变率快速上升和快速下降段的中间段的应变率历史与时间轴的平行程度(即应变率的恒定程度)来判断。应变率的恒定程度可以用AB段各个时刻的应变率与其算术平均值总的差别情况来表示,总的差别越小,则应变率越恒定。本文将这种差别情况由下式来表示

$$\Delta = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| \frac{\dot{\epsilon}_j - \bar{\dot{\epsilon}}}{\bar{\dot{\epsilon}}} \right| \quad (2)$$

式中： Δ 为应变率不恒定度； $\dot{\epsilon}_j$ 为不同时刻的应变率； $\bar{\dot{\epsilon}}$ 为 AB 段不同时刻应变率的算术平均值； m 为 AB 段的应变率点数。

利用式(2)，可对本文中几个实验的应变率历史进行初步的量化描述，由式(2)所得的应变率历史的不恒定程度 Δ 如表 1 所示。

结合第 3 节可知：图 3 所示的特种钢平均应变率为 $1\ 100\text{s}^{-1}$ 的两条应力应变曲线的差别 $\delta = 5.25\%$ ，他们应变率历史的不恒定度 Δ 分别为 17.1% 和 33.3% ，应变率历史的恒定程度相差约一倍；图 5 中特种钢平均应变率为 $4\ 700\text{s}^{-1}$ 的两条应力应变的曲线差别 $\delta = 9.83\%$ ，他们的应变率历史的不恒定度 Δ 则分别为 9.2% 和 28.6% ，应变率历史的恒定程度相差约两倍。由此可见，特别是在较高平均应变率下，应变率历史对材料的应力应变曲线有明显的影

表 1 几个实验的应变率历史恒定情况

Table 1 Constant degree of strain rate history of several SHPB experiments

实验波形图编号	实验方法	$\Delta / \%$
图 2(a)	普通 SHPB 方法	34.3
图 2(b)	双试件 SHPB 方法	20.8
图 4(a)	双试件 SHPB 方法	17.1
图 4(b)	普通 SHPB 方法	33.3
图 6(a)	双试件 SHPB 方法	9.2
图 6(b)	普通 SHPB 方法	28.6

至于应变率历史对不同性质材料的应力应变曲线的影响规律的异同有待于进一步的研究。

5 结 论

通过对应变率历史对试件材料应力应变曲线影响的初步研究结果表明，特别是在较高平均应变率的情况下，试件的应变率历史对试件的应力应变曲线有较明显的影响，材料的动态本构关系研究中应当考虑应变率历史的影响。

参考文献：

[1] 陶俊林,李玉龙,田常津,等. 10^4s^{-1} 应变率下 SHPB 系统实验相关问题探讨[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 245—250.
TAO Jun-lin, LI Yu-long, TIAN Chang-jin, et al. The discussion of SHPB test at very high strain rates up to 10^4s^{-1} [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 245—250.

[2] Ellwood S, Griffiths L J, Parry D J. Materials testing at high constant strain rates[J]. Journal of Physics of the Earth: Science Instrument, 1982, 15: 280—282.

[3] Frantz R A, Duffy J. The dynamic stress-strain behavior in torsion of 1100-0 aluminum subjected to sharp increase in strain rate[J]. ASEM Journal of Applied Mechanics, 1972, 39: 939—945.

[4] Nicholas T, Campbell J D. Shear strain rate effect in a high strength aluminum alloy[J]. Experimental Mechanics, 1972, 12: 441—447.

[5] Albertini C, Eleiche A M, Montagnani M. Strain rate history effects on the mechanical properties of AISI 316 stainless steel[A]. Ed. by Marr L E, et al. Metallurgical Applications of Shock Wave and High Strain Rate Phenomena[M]. Marcel Dekker Inc, 1986: 583—603.

[6] 李林安, 佟景伟, 李鸿琦, 等. 应变率历史对记忆合金在高应变率拉伸下力学行为影响的实验研究[J]. 实验力学, 1998, 13(4): 457—462.
LI Lin-an, TONG Jing-wei, LI Hong-qi, et al. Experimental study for the effect of strain-rate history on the mechanical behaviors of shape memory alloy under tension with high strain-rates[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(4): 457—462.

[7] 佟景伟, 高丛峰, 李林安, 等. 温度和剪应变率历史对扭转载荷作用下铁基合金本构关系影响的研究[J]. 爆炸与冲

击, 2000, 20(1): 74—78.

TONG Jing-wei, GAO Cong-feng, LI Lin-an, et al. Research for temperature and shear strain rate history effects on constitutive relation of Fe-base alloy under torsion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(1): 74—78.

[8] 陶俊林, 田常津, 陈裕泽, 等. SHPB 系统试件恒应变率加载实验方法研究[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(5): 413—418.

TAO Jun-lin, TIAN Chang-jin, CHEN Yu-ze, et al. Investigation of experimental method to obtain constant strain rate of specimen in SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 413—418.

Investigation of the effect of strain rate history on the stress-strain curves

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

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

Abstract: Dynamic compression experiments on a special steel were carried out using a common SHPB system and a two-specimen SHPB system. The dynamic compression stress-strain curves were obtained for different strain rate history. The effect of strain rate history on the stress-strain curves was investigated through comparing the two stress-strain curves with the same average strain rate but different strain rate history for the same specimen. The results show that the stress-strain curves are significantly affected by the strain rate history, and this effect must be accounted for in the study of material constitutive relations.

Key words: solid mechanics; stress-strain curves; SHPB; strain rate history; dynamic compression experiments; constitutive relations

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