

文章编号: 1000-8055(2009)04-0799-05

高温、高应变率 LY12 铝压缩动态力学性能实验

谢若泽¹, 张方举¹, 邓志方¹, 卢子兴²

(1. 中国工程物理研究院 结构力学研究所, 绵阳 621900;

2. 北京航空航天大学 固体力学所, 北京 100191)

摘 要: 利用配备自动组装系统和高温加热系统的直径为 $\phi 5\text{ mm}$ 的 Hopkinson 压杆, 对温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变率在 $(5 \sim 14) \times 10^3\text{ s}^{-1}$ 范围内 LY12 铝的动态压缩力学性能进行了实验研究. 实验中采用波形整形技术, 有效地消除了入射波的高频振荡, 提高了测试精度. 实验结果表明: 当实验温度低于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度的影响较小, 而高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料的温度软化效应将十分明显, 且随着温度的升高, 流动应力逐步降低; LY12 铝的性质接近于线性硬化材料, 随温度的升高, 其硬化模量逐步降低; 在 $(5 \sim 14) \times 10^3\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内, LY12 铝的动态压缩性能的应变率效应并不明显.

关 键 词: 高温; 高应变率; LY12 铝; 动态压缩

中图分类号: TB331; O347.1

文献标识码: A

Experimental investigation into dynamic compressive mechanical properties of LY12 at high strain rates and high temperatures

XIE Ruozhe¹, ZHANG Fangju¹, DENG Zhi fang¹, LU Zixing²

(1. Institute of Structural Mechanics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Solid Mechanics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The dynamic mechanical properties of LY12 aluminum were studied experimentally by Hopkinson Bar of diameter 5mm with an automatic assembling system and heating system, within the range of temperature from $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ and strain rate from $5 \times 10^3\text{ s}^{-1}$ to $1.4 \times 10^4\text{ s}^{-1}$. In the experiments, a shaper was used to eliminate the oscillation of high frequency in the incident signal and to improve the experimental precision of bar system. The experimental results show that the effect of temperature on dynamic properties of LY12 is not great at temperature lower than $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; on the contrary, the thermal softening effect is obvious at temperature higher than $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, exhibiting the decrease of flow stresses and linear harden modulus with increase of temperature, which is similar to linear harden materials. From the experiments, the dynamic properties of LY12 don't show strong sensitivity to the strain rates.

Key words: high temperature; high strain rate; LY12 aluminum; dynamic compression

收稿日期: 2008-04-12; 修订日期: 2008-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(10572013)

作者简介: 谢若泽(1970-), 男, 湖北利川人, 副研究员, 主要研究方向: 冲击动力学及材料动态力学性能研究.

随着科学技术的进步,人们对产品可靠性设计精确性的要求越来越高,这要求更加注重动力学设计及结构与材料瞬态响应分析水平的提高,因此,必然涉及到对不同应变率下材料的动态力学行为的深入研究.众所周知,在航空航天领域,许多部件将经受高应变率($\sim 10^4\text{ s}^{-1}$)和高温($\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境的考验,所以,对高温和高应变率相关的材料动态力学行为的研究,近年来已成为产品设计中十分关注的问题,并成为固体力学和材料科学研究的重点课题.

尽管分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)已广泛地应用于材料的动态力学性能的研究,但高温、高率动态实验技术却一直是其中的难点之一^[12].本文利用小直径 Hopkinson 压杆,对高温、高应变率下 LY12 铝的动态压缩力学性能进行了实验研究,最高温度达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高应变率达 10^4 s^{-1} 量级.并且,在实验中采用波形整形技术,有效地消除了入射波的高频振荡,提高了测试精度.

1 实验系统简介

1.1 常温 SHPB 实验系统

图 1 所示为常规分离式 Hopkinson 压杆及其测量和数据采集系统的简图.其基本工作原理是,当子弹撞击输入杆时,在输入杆中产生一个弹性应力脉冲,该应力脉冲传至贴在输入杆上的应变片处,应变片开始感受该信号,然后应力脉冲传至输入杆与试件的交界面处,试件在该应力脉冲作用下发生变形,由于输入杆与试件的波阻抗不同,在交界面处会发生波的反射和透射;当透射波到达试件与输出杆的交界面时,同样再发生反射和透射,传过此分界面的透射波进入输出杆,输出杆上的应变片可感受到此透射波信号.由记录的入射波、反射波和透射波信号,根据一维应力波理论,便可得到试件的应力 σ 和应变 ε 及应变率 $\dot{\varepsilon}$ 之间的关系,从而获得材料的动态压缩应力-应变曲线及其力学性能.

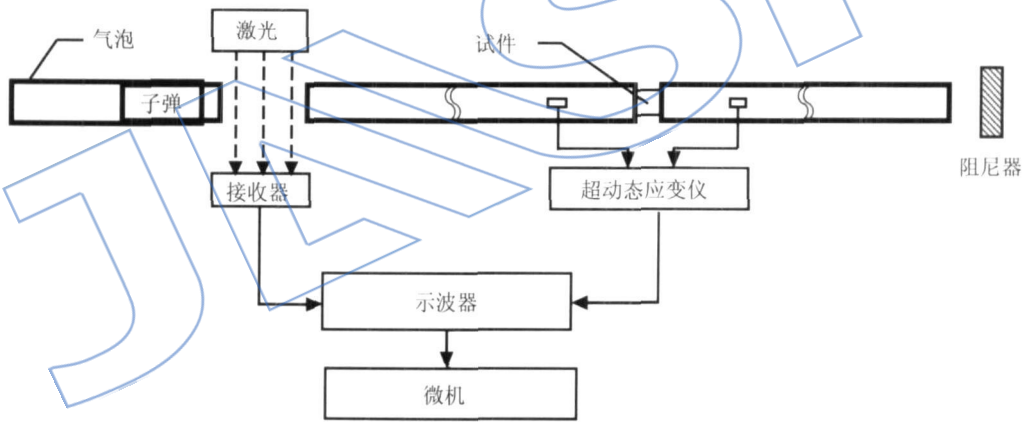


图 1 分离式 Hopkinson 压杆及数据采集系统简图

Fig.1 Sketch of split Hopkinson press bar and data capture system

1.2 高温 SHPB 实验系统

对材料进行不同温度下动态力学性能的测试,一般说来可以采用两种方法.一种是将试件及部分波导杆同时加热,波导杆中存在着温度梯度,在进行数据处理时,通过考虑波导杆中温度梯度对应力波传播的影响来对实验测得的信号进行修正处理.另一种则是只对试件进行加热,这种方法的优点是对波导杆上应变片所记录的信号进行处理时,只需按照常规 SHPB 实验数据处理方法进行.本文采用第二种方法,即先只对试件进行加热,待达到预设温度后再完成实验系统的组装并进行冲击实验^[34].实验系统结构如图 2 所示.

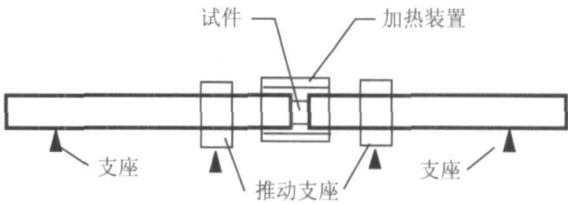


图 2 高温系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of high temperature experimental system

高温 SHPB 系统在常规 SHPB 系统的基础上增加了加热系统、温控系统以及自动组装系统等.当给试件加热时,波导杆位于加热范围之外,而试件温度达到实验所要求的温度时,立刻进行

系统组装并完成实验. 在 Hopkinson 压杆实验中, 由于输入矩形脉冲引起的二维效应, 入射波中往往带有较高幅值的高频振荡信号. 这些高频振荡信号的存在, 给实验数据处理带来较大困难, 有时甚至会掩盖真实信号而难以处理. 解决这一问题, 使用波形整形器 (Shaper) 是一个较好的方法^[5].

2 波形整形器(Shaper)

所谓波形整形器, 就是在入射杆前端安装一个由软材料制作的薄膜片, 其作用既可以减少入射波形的高频振荡, 同时也可以调节入射波的上升沿, 使其由陡峭变得平缓些. 在本文中, Shaper 材料选用厚度为 0.25mm 的铜片, 尺寸为 2mm×2mm, 用黄油将其粘贴在入射杆的前端. 图 3 为不使用 Shaper 时采集到的波导杆上的实验波形, 图 4 为使用 Shaper 时波导杆上的实验波形. 由上面两图可见, 利用波形整形器消除实验中的高频信号的效果是十分明显的. 本实验的测试全部采用了波形整形技术.

为 5mm 的小直径 SHPB 实验系统^[6], 子弹长度为 60mm, 入射杆和透射杆的长度均为 400mm, 应变片位于波导杆 1/2 处. 本实验的高温系统也是在小直径 SHPB 系统基础上建立的, 如图 5 所示. 实验材料为 LY12(CZ) 棒料, 试件经车削加工而成, 试件尺寸为 $\phi 3\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. 为了进行重复性检验, 每种条件一般进行 3 次以上实验.

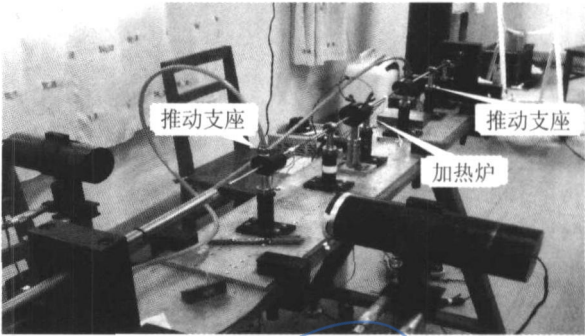


图 5 小直径高温 SHPB 系统
Fig. 5 High temperature SHPB system with diameter of 5mm

4 实验结果及讨论

4.1 常温实验结果

常温实验的典型原始波形如图 4 所示. 根据一维应力波理论, 对实验所得的入射波、透射波和反射波进行处理, 得到了 LY12 铝在 $10^3\text{ s}^{-1} \sim 10^4\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的动态压缩应力-应变关系, 如图 6 所示. 从图可以看出, 随着应变率的增加, 曲线形状没有发生明显的变化, 仅随应变率的增加最终应变量有所增大. 因此, 在 10^3 s^{-1} 到 10^4 s^{-1} 应变率范围内, LY12 铝在常温下是应变率不敏感的材料.

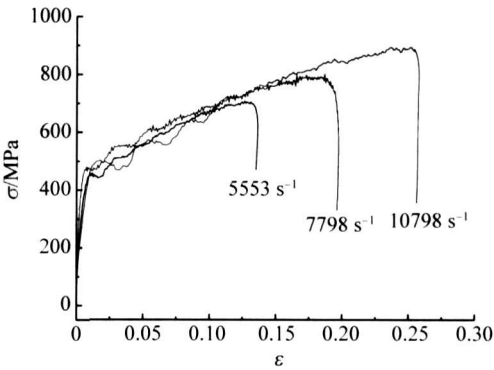


图 6 不同应变率时 LY12 铝的应力-应变曲线
Fig. 6 Stress strain curves of LY12 at different strain rates

4.2 高温实验结果

高温实验的典型实测信号如图 7 所示. 其中,

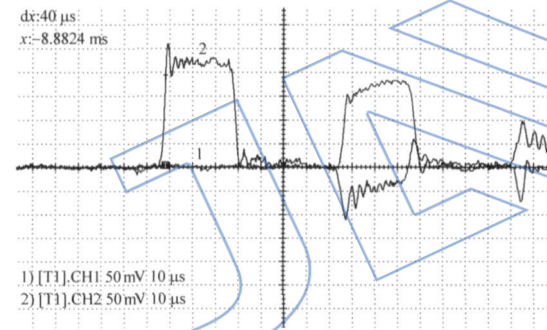


图 3 不使用 Shaper 时波导杆上的波形
Fig. 3 Wave forms on the bars without shaper

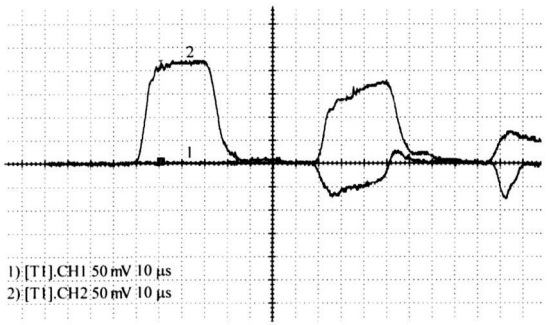


图 4 使用 Shaper 时波导杆上的波形
Fig. 4 Wave forms on the bars with shaper

3 实验设计

为获得较高的应变率, 本文采用波导杆直径

曲线 1 和 2 分别为入射杆和透射杆上应变片所记录的应变波形, 曲线 3 为利用电路的通断原理来检测杆的接触情况所获得的曲线, 即把入射杆和透射杆分别绝缘后作为电路的两极, 当两杆未接触时, 电路输出高电平, 两杆接触时, 电路输出低电平. 从图中可以清晰地看到应力波通过试件并传到透射杆上以后两杆才脱离接触, 表明组装正常. 多次实验表明, 本系统的组装接触时间可控制在 10^1 ms 量级以内.

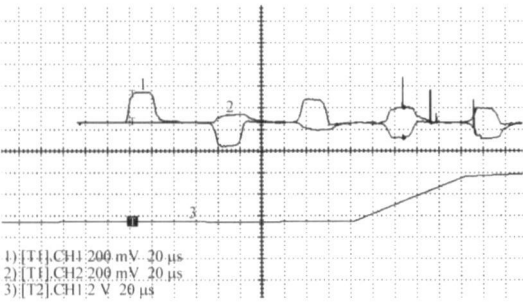


图 7 高温实验典型实测信号

Fig. 7 Typical signs of high temperature experiment

表 1 不同温度的流动应力对照表

Table 1 Flow stress of LY12 under several temperatures

温度/℃	15	100	200	300	400
流动应力/MPa	419	403	420	365	271

高温实验分别在 4 种温度, 即 100℃, 200℃, 300℃和 400℃情况下进行. 图 8 为几种不同温度下所获得的应变率约为 $6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 时 LY12 铝的动态应力-应变曲线(其中数字 1, 2, 3, 4 和 5 中所代表的数字符号中在横杠之前为应变率, 横杠之后为温度), 而表 1 给出相应的温度和流动应力(应变为 2% 时对应的应力)对照.

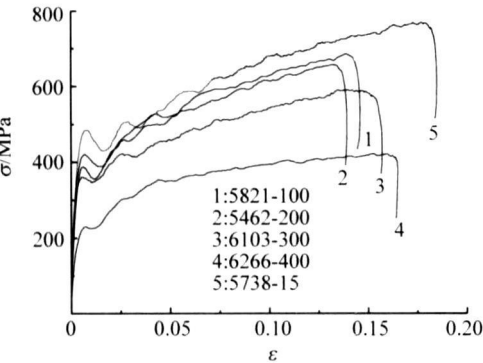


图 8 不同温度下 LY12 铝的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of LY12 at different temperatures

从图 8 和表 1 可以看到, 当温度低于 200℃时, 随着温度的上升, 材料的流动应力基本不变, 但当温度高于 200℃时, 材料的流动应力随温度的上升而急剧降低, 400℃时的流动应力仅为常温时流动应力的 64.7%, 表现出较明显的温度效应. 图 8 还表明, LY12 铝接近于线性硬化材料, 并且随着温度的提高, 其硬化模量呈下降的趋势.

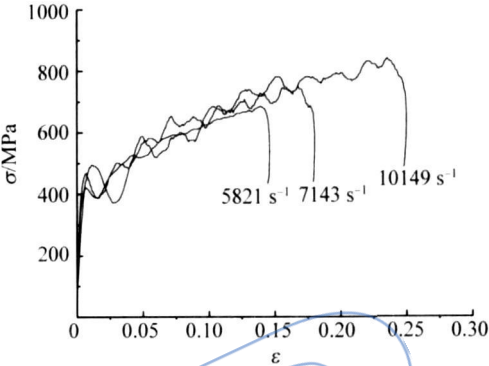


图 9 100℃时的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of LY12 at 100℃

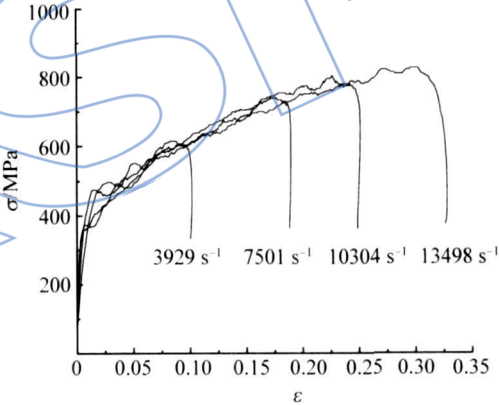


图 10 200℃时的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of LY12 at 200℃

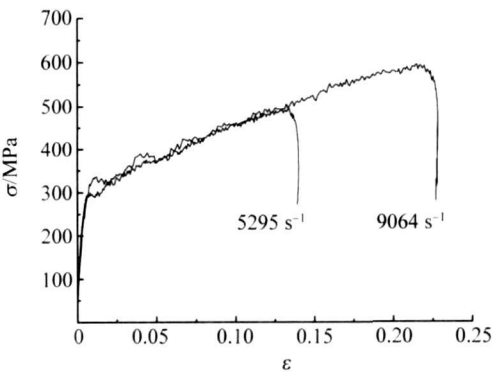


图 11 300℃时的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of LY12 at 300℃

下面进一步来考察 LY12 铝在高温情况下的应变率效应. 图 9~ 图 11 分别为 100℃, 200℃和 300℃时 LY12 铝在不同应变率下的应力-应变曲

线. 从图中可以看出, 在相同温度条件下, 应变率从 10^3 s^{-1} 变化到 10^4 s^{-1} 量级, LY12 铝的动态应力-应变曲线没有发生大的改变, 因此, LY12 铝的动态压缩力学性能在高温情况下对应变率也是不敏感的.

5 结 论

本文利用配备有自动组装系统和高温加热系统的 $\phi 5\text{ mm}$ 直径的 Hopkinson 压杆实验系统, 对不同温度 and 不同应变率下 LY12 铝的动态压缩力学性能进行了研究. 并且, 在实验中采用了波形整形技术, 有效地消除了入射波的高频振荡, 提高了测试的精度. 实验温度选择常温, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 5 种情况, 应变率达到了 10^4 s^{-1} 量级. 动态压缩实验的结果表明, 当实验温度低于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度效应不明显, 而高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 温度软化效应十分明显, 且随温度的升高, 材料的流动应力迅速降低; LY12 铝的强化性质接近于线性硬化材料, 随温度的升高, 其硬化模量逐渐降低; 在 $(5\sim 14)\times 10^3\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内, LY12 铝的动态力学性能对应变率是不敏感的.

参考文献:

[1] Gilat A, Wu X. Elevated temperature testing with the tor-

sional split Hopkinson bar[J]. Experimental Mechanics, 1994, 34(2): 166-170.

[2] 夏开文, 程经毅, 胡时胜. SHPB 装置应用于测量高温动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 1998, 13(3): 307-313.

XIA Kaiwen, CHENG Jingyi, HU Shisheng. Application of SHPB apparatus to the measurement of high temperature dynamical mechanical behavior of materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(3): 307-313. (in Chinese)

[3] 谢若泽, 张方举, 颜怡霞, 等. 高温 SHPB 实验技术及其应用[J], 爆炸与冲击, 2004, 25(4): 330-334.

XIE Ruoze, ZHANG Fangju, YAN Yixia, et al. High temperature SHPB experiment technique and its application [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 25(4): 330-334. (in Chinese)

[4] 张方举, 谢若泽, 田常津, 等. SHPB 系统高温实验自动组装技术[J]. 实验力学, 2005(2): 281-284.

ZHANG Fangju, XIE Ruoze, TIAN Changjin, et al. Auto assembling technique used in high temperature experiment of SHPB[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005 (2): 281-284. (in Chinese)

[5] Ellwood S, Griffiths L J, Parry D J. Materials testing at high constant strain rates[J]. J. Phys. E, Sci. Instrum., 1982, (15): 280-282.

[6] Gorham D A. The effect of specimen dimensions on high strain rate compress measurements of copper[J]. J. Phys. D, Appl. Phys., 1991, (24): 1489-1492.