

文章编号: 1001-1455(2010)01-0105-04

阵列 DPS 测量技术在材料动态力学性能研究中的应用*

胡昌明, 王翔, 刘仓理, 蔡灵仓

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用 $\varnothing 37$ mm 火炮加载装置, 在平板撞击下, 以含预制内部缺陷的 K9 玻璃作为实验样品, 采用具有高空间-时间分辨率的阵列式多普勒探针测量技术(空间和时间分辨率分别为 $127 \mu\text{m}$ 和 50ps), 测到了样品后界面不同位置的粒子速度。简略分析了材料内部缺陷对样品自由面粒子速度信号的影响, 探索了从微观尺度研究材料动态力学性能的实验方法。

关键词: 固体力学; 动态力学性能; 多普勒探针测量系统; K9 玻璃

中图分类号: O346.5

国标学科代码: 130 · 1540

文献标志码: A

1 引言

冲击载荷下材料的动态力学响应特性是冲击动力学研究领域中既古老又具有前沿的研究课题, 主要涉及材料的物态方程、相变、本构、动态断裂等动力学特性的实验和理论研究。其中, 实验研究的中心问题是对应力波/冲击波在材料中的传播历史或材料内部(表面)的粒子速度的变化历史进行测量, 获取冲击波与材料相互作用后的物理、力学信息。实验研究通常采用的传感器有锰铜计、电容器、VISAR 等, 锰铜计因埋入式破坏了材料的连续性, 对应力波的传播造成一定的影响; 电容器和 VISAR 采用非接触式测量, 测到界面粒子运动信息。严格来说, 这 2 种测量方法测到的都是界面一定区域内粒子运动的平均效应。目前, 实验研究由于受实验测试技术的限制而难以推进, 只有测试技术上的进步, 才能推动材料动态力学响应研究领域的进步, 尤其是动态断裂问题。为此, 近年来不断发展了新的诊断技术, 如质子照相技术^[1]、同步辐射技术^[2]及电子背向散射技术(electron backscatter diffraction, EBSD)^[3]等。这些新的诊断方法, 给材料动态断裂研究带来新的期望。L. C. Chhabildas 等^[4]在气炮上利用 Line-imaging ORVIS 测试技术(空间分辨率小于 $50 \mu\text{m}$)测到的自由面时间-空间速度历史信号, 研究了冲击压缩下钼样品内部微孔洞的长大过程, 揭示了材料内部孔洞或缺陷成核、增长的非均匀随机过程, 为材料动态破坏机理和层裂的研究提供了新的实验研究方法。本文中, 采用阵列式多普勒光纤探针测量系统(Doppler pins system, DPS)作为测量技术, 从微观尺度上探讨研究材料动态力学响应特性的实验研究方法。

2 激光多普勒速度测量基本原理

激光多普勒测量的基本原理是利用光学多普勒效应实现对位移或速度的测量。测量系统见图 1, 光纤激光器发出的单一频率 f_0 被分成 2 束, 其中 1 束直接到达探测器上, 作为参考光; 另 1 束通过光学探头垂直照射在物理表面, 一部分物体表面反射或散射光由探头收集也送到探测器, 这部分光称为信号光。当物体以速度 v 相对光纤探头运动时, 导致物体表面反射光的频率发生改变。设物体朝向探头运动, 反射光的频率将增加为 $f_0 + \Delta f$, 其中 Δf 称为多普勒频移, 与物体运动速度成正比, 即

$$\Delta f = 2v(f/c)\cos\theta \quad (1)$$

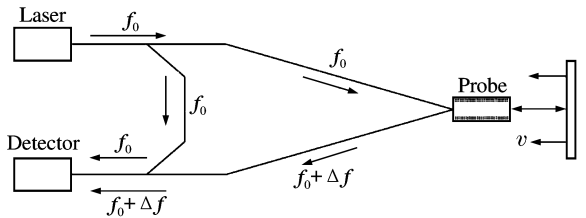


图 1 激光多普勒测速原理图

Fig. 1 Principle of laser Doppler velocity interferometer

* 收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2009-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(10802080); 中国工程物理研究院基金项目(2007B01003)

作者简介: 胡昌明(1974—), 男, 助理研究员。

式中: c 为光速, θ 为探头入射光与物体表面的夹角。通常探头垂直于测量面, 有 $c = \rho\lambda$, 则式(1)可写为

$$\Delta f = 2v(t)/\lambda \quad (2)$$

根据空间分辨率大小的要求, 利用多通道的光探头的阵列式布局, 可实现具有一定空间分辨率的多点测量。采用 16 通道的光探头, 布局在 2 mm 的线长度范围内, 实现了空间分辨率为 $127 \mu\text{m}$ 的自由面粒子速度测量。相对于其他光学测量系统, DPS 系统采用全光纤结构, 具有结构简单、体积小、抗振动、免调试和可靠性高等特点。一方面, 系统无须调节, 实验准备周期短, 避免了传统光学系统的干涉仪结构复杂(如 VISAR)、体积庞大、需要专业人员调试、不易操作等缺点, 可以方便地进行阵列布局测量。另一方面, 多点测量可以进行空间-时间速度分辨的诊断, 可以从材料微观观尺度、均匀性及晶粒大小等方面研究材料内部微观观结构对材料动态力学性能的影响。

3 平板撞击实验

实验由 $\varnothing 37 \text{ mm}$ 火炮加载, 进行了 2 发实验, 弹速分别为 312 m/s (飞片为 PMMA) 和 317 m/s (飞片为 K9)。样品为 $\varnothing 36 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的 K9 玻璃, 样品内部利用激光内刻机在样品中心烧蚀 $\varnothing 0.5 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的预制缺陷, 如图 2 所示, 中间最小白点为预制缺陷, 黑色圆圈

为样品后界面的镀膜。K9 玻璃材料参数为: 密度 $\rho = 2.52 \text{ t/m}^3$, 体积模量 $K = 47.14 \text{ GPa}$, 剪切模量 $G = 34.04 \text{ GPa}$, 纵波速度 $c_1 = 6.06 \text{ km/s}$, 横波速度 $c_s = 3.70 \text{ km/s}$; PMMA 材料参数为: 密度 $\rho = 1.187 \text{ t/m}^3$, 剪切模量 $G = 2.31 \text{ GPa}$, 纵波速度 $c_1 = 2.76 \text{ km/s}$, 横波速度 $c_s = 1.38 \text{ km/s}$ ^[5]。为了给光学测试提供一个反射面, 在样品的后界面上(自由面)

均匀镀了 1 层厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的铝膜, 飞片 Fig. 2 Sample with preexisted defect

材料为 PMMA 和 K9 玻璃, 尺寸均为 $\varnothing 36 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。将 16 路 DPS 探针对称布置在样品后界面的 1 条直径上(见图 3), 并保持探针顶端离样品后界面有 0.5 mm 的垂直距离, 且中间探针 7~10 正对样品内部的预制缺陷, 探针 1~16 的 x 轴位置坐标分别为 $-952.5, -825.5, -698.5, -571.5, -444.5, -317.5, -190.5, -63.5, 63.5, 190.5, 317.5, 444.5, 571.5, 698.5, 825.5$ 和 $952.5 \mu\text{m}$ 。

3.1 实验结果

第 1 发实验飞片材料是 PMMA, 弹速为 312 m/s , 利用阵列 DPS 探针测得处理后的自由面速度剖面结果见图 4。从实验结果中可以看到, 在冲击压缩加载的前 100 ns 内, 由于材料内部缺陷的影响, 导致正对缺陷的探针 7~10 所测到的样品自由面的粒子速度信号有明显的震荡, 即中间部分出现明显的凸起, 凸起最大振幅为约 10 m/s (探针 8 信号见图 5(a))。进一步分析看出, 偏离缺陷的探针 1~6, 11~16 测到的自由面粒子速度信号经历一个缓慢上升到最大值的过程, 然后达到一个恒定的速度 123 m/s (探针 1 信号见图 5(b))。在冲击压缩加载的前 100 ns 内, 没有出现明显的振荡, 反而正对缺陷的 DPS 探针测得的信号出现明显的振荡, 最后达到一个稳定值 123 m/s 。由此可以推断, 在冲击压缩加载过程中, 缺陷对自由面速度的最终稳定值不存在影响, 只是影响到前 100 ns 左右的信号。也就是说, 如果材料内部的夹杂或缺陷的尺寸超过 $127 \mu\text{m}$ 时, 这套 DPS 测量系统可以反映材料内部非均匀性对材料动态力学性能的影响。

第 2 发实验飞片是 K9 玻璃, 弹速为 317 m/s , 图 6 为 16 路 DPS 探针测量结果及曲线顶部放大结果。从实验结果可以看到, 无论是偏移缺陷位置, 还是正对缺陷位置, 各路探针测到的信号 100 ns 后基本一致。而在冲击加载到 450 ns

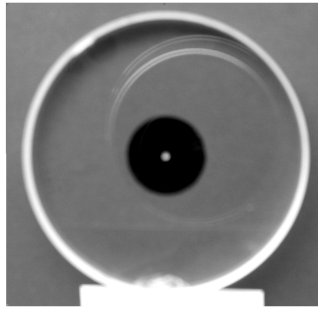


图 2 预制缺陷的样品

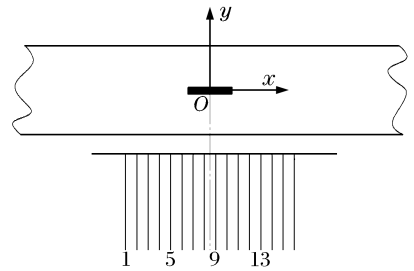


图 3 阵列 DPS 探针与样品相对位置

Fig. 3 Relative position between arrays DPS pins and sample

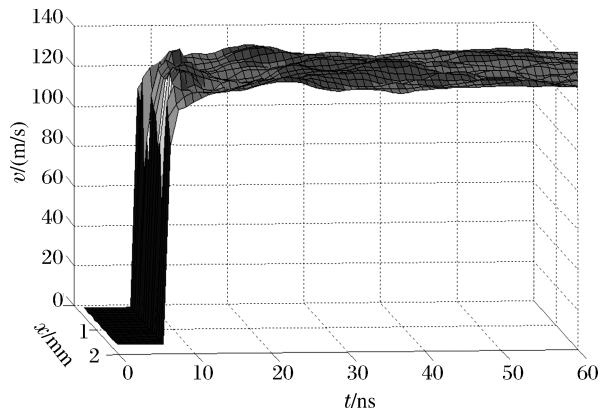


图 4 实验 1 中 16 路探针测到的自由面速度
Fig. 4 Free surface velocities from pins 1~16
in experiment 1

后,自由面速度均出现了 1 m/s 的速度跳跃。这一微小的速度变化现象是否为样品内部预制缺陷处因动态应力集中造成的失效波,还有待于进一步的实验核实。需要说明的是,样品中缺陷离自由面还有一定的距离,而本文中忽略冲击波在传播这段距离时因材料本构、波形弥散等因素的影响;并且,实验重点观察冲击压缩过程,记录时间较短,只进行了少量的实验。因此,从此次实验结果看不出缺陷对材料拉伸断裂信号的影响,需进一步的实验。

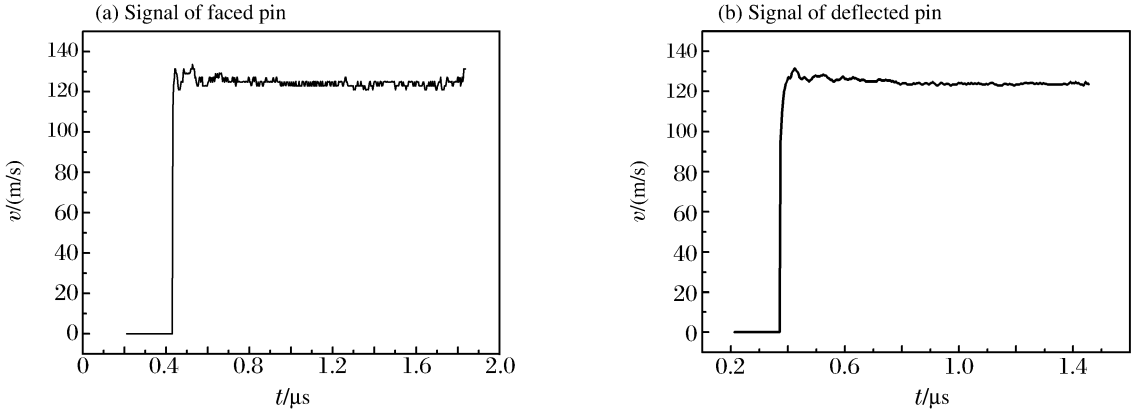


图 5 正对缺陷和偏离缺陷的探针信号差异示意图

Fig. 5 Signals difference between the faced pins and deflected pins to the defects

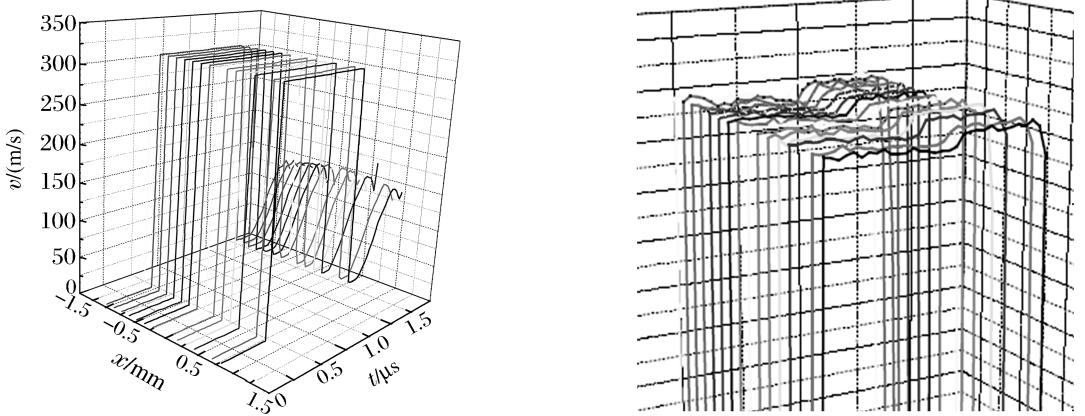


图 6 实验 2 中 16 路探针测到的自由面速度

Fig. 6 Free surface velocities from pins 1~16 in experiment 2

3.2 分析与讨论

(1) 本文中的测试方法可用来推测材料内部缺陷对材料动态力学性能的影响。另外,由于缺陷离样品自由面有一定的距离,这段距离大小也影响到测得信号的差异,飞片后界面产生的稀疏波可能赶上冲击波并影响冲击波的传播。随着传播距离的增加,这段距离大小就会因距离不同导致测到的样品自由面的粒子速度信号存在差异。为了避免飞片后界面所产生的稀疏波赶上前面的冲击波,后续实验的预制缺陷需距离自由面一段合理距离,即测试界面与缺陷的距离不能太远。

(2) 仅从冲击压缩信号可以看出,材料内部存在的缺陷与压缩冲击波相互作用后,测得的自由面粒子速度信号与理想无缺陷材料的后界面粒子速度存在差异。因此,可以利用测得的后界面粒子速度信号,分析材料内部微细观缺陷(微孔洞、微裂纹等)在动态载荷下的成核、长大过程,因为缺陷的长大过程必然会导致测试界面上相应正对的探针测得的信号存在差异。进一步的工作,需要研究在拉伸应力状态下,分析材料内部微缺陷对材料拉伸断裂特性的影响,以及利用数值模拟确定缺陷距样品后界面的距离,研究材料内部微缺陷对材料动态断裂特性的影响。

4 结论

(1) 采用了具有高空间-时间分辨率的阵列 16 通道 DPS 测试技术,从微观尺度上探讨了材料内部缺陷对波传播的影响,为获取详细的波剖面粒子速度信息提供了新的实验方法。

(2)利用激光内刻技术,测到了冲击载荷下带预制缺陷的 K9 样品的自由面的粒子速度变化历史。在忽略波形的弥散、材料本构特性对波传播的影响等条件下,通过对测试结果的分析,发现当碰撞速度为 312 m/s 时,样品自由面粒子速度信号在前 100 ns 内存在差异,认为样品内部预制缺陷干扰了冲击压缩波在样品中的传播;在碰撞速度为 317 m/s 时,发现样品自由面速度剖面上出现 1 m/s 的速度跳跃,推测是样品内部预制缺陷处因动态应力集中造成的失效波。

实验得到了翁继东、汪小松、陈宏、王为、付秋卫、卢敏、叶素华、陈志云、王青松、鲜海峰等的协助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Holtkamp D B, Clark D A, Ferm E N, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography[C]//Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock Compression of Condensed Matter—2003. Portland; American Institute of Physics, 2003;477-482.
- [2] Becker B. How metals fail[J]. Science & Technology, 2002(7-8):13-18.
- [3] Zurek A K, Thissell W R, Trujillo C P, et al. Damage evolution in ductile metals[C]//Los Alamos Science, 2003; 111-113.
- [4] Chhabildas L C, Trott W M, Reinhart W D, et al. Incipient spall studies in tantalum-microstructural effects[C]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter—2001. Atlanta, Georgia, 2001; 483-486.
- [5] 胡昌明,王翔,刘仓理,等.非均匀性对自由面粒子速度信号的影响[J].实验力学,2008,23(3):271-275.
HU Chang-ming, WANG Xiang, LIU Cang-li, et al. Influence of inhomogeneity of the materials on free surface velocity signals[J]. Experimental Mechanics, 2008,23(3):271-275.

Applications of DPS arrays testing technique to dynamic properties study of materials *

HU Chang-ming, WANG Xiang, LIU Cang-li, CAI Ling-cang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Study on the dynamic property of materials under impact loading depends closely on the progress of experimental testing techniques. The power gun with a 37-mm-diameter chamber was used as the loading equipment, and K9 glass with internal preexisted defects was chosen as the sample. Under plate impacting conditions, Doppler pins system (DPS) testing technique, whose space and time resolutions were 127 μm and 50 ps respectively, was adopted to measure the velocity history of free surfaces located in different places on sample's free surface. Influence of internal preexisted defects on the velocity signal of sample's free surface was analyzed in brief, and the experimental method to study materials' dynamic property from the point of meso-microcosmic view was also discussed.

Key words: solid mechanics; dynamic mechanical properties; Doppler pins system; K9 Glass

* Received 16 October 2008; Revised 11 May 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10802080)

Corresponding author: HU Chang-ming, cmhu@caep.ac.cn