

文章编号: 0258-7025(2004)06-0735-05

# 数字散斑相关法在高速变形测量中的应用

陈思颖, 黄晨光, 段祝平

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要** 在 SHTB 加载装置上利用数字化的高速摄影和采集系统, 并结合数字散斑相关方法, 发展了一种光学动态变形测试技术, 在霍普金森(Hopkinson)加载装置上实现了具有较高精度和分辨率的位移和变形场的实时光学测量。实验中, 利用 Imacon-790 高速摄影机以  $10^5$  幅/s 的速度分别拍摄了两组 LY12 试件的动态拉伸情况(一维平板拉伸试样和含对称缺口的拉伸试样), 然后运用数字散斑相关方法对其不同时刻的图像进行分析和处理, 可以得到试样在各个时间点的位移场。最后利用有限元数值模拟技术与实验结果进行了比较, 验证了整个系统以及数字散斑相关方法用于高速动态测量中的可行性。

**关键词** 信息光学; 霍普金森杆; 高速摄影; 数字散斑相关方法

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Digital Speckle Correlation Method and Its Application on Impact Deformation Measurement

CHEN Si-ying, HUANG Chen-guang, DUAN Zhu-ping

(National Key Laboratory of Nonlinear Mechanics,  
Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A real-time and in situ optical measuring system is developed, which can be used to observe the deformation of structures under impacting loading. The system consists of the high-speed camera, digital acquisition, laser light source, synchronization controlling system and analysis software based on the digital correlation theory. The optical system has been adapted to investigate the dynamic deformation fields of normal impact tension sample and plain plate with notches loaded by split Hopkinson tension device. Results obtained in experiments are discussed and compared with finite element simulations and classical Hopkinson bar method. It is proved partly that the measuring system, developed in this paper, is effective and valid.

**Key words** information optics; Hopkinson bar; high-speed camera; digital speckle correlation method

### 1 引 言

霍普金森(Hopkinson)装置被广泛应用于材料冲击力学性能实验研究, 能够获得不同种类材料在应变率为  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  时的宏观应力-应变-应变率曲线。其测量往往是采用电测的方式, 根据输入、输出杆上的应变信号, 利用一维弹性波理论得出试样两端的相对速度、位移和载荷, 从而推演出材料的应力应变关系。然而有关材料变形局部和细节的特

征, 得到的有用信息甚少, 对材料的断裂和破坏也只能采用后效观察的方式。因此, 人们期待能有一种实时观测手段, 能够较为准确地描述在加载过程中试样变形和破坏的演化图案, 从而进一步加深人们对材料动力学性能的认识, 也为变形局部化、破坏的萌生与发展等热点力学问题的理论研究和数值模拟提供实验依据。

将光学方法用于动态测试中, 不但具有非接触、

收稿日期: 2003-03-04; 收到修改稿日期: 2003-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(10002021)和国家 863-802-4 资助项目。

作者简介: 陈思颖(1975—), 女, 中国科学院力学研究所博士研究生, 主要研究方向为动态光学测试及图像处理。E-mail: csy@lum.imech.ac.cn

全场测量、高灵敏度以及测量变形范围较大等特点,与计算机图像系统结合以后,还可使整个测量过程完全自动化,并且具有高精度、现场测量、实时显示等许多优点。近年来,在此领域的工作不断涌现。L. Han 等<sup>[1]</sup>将散斑技术结合 Hopkinson 加载方式,获得了试样在不同时刻的散斑图案及变形场。Li Hongqi 等<sup>[2]</sup>提出了一个瞬态光学图像采集系统,应用双脉冲激光技术,在撞击载荷下,使用全场和逐点散斑干涉法,对半无限平面和平面应力模型得到面内位移的等位移线条纹图,获得了模型受撞击后延时 40, 50 和 80  $\mu\text{s}$  截面上的位移分布解。近年来,国内外类似的利用脉冲激光器和电子散斑干涉法的实验研究工作还有很多<sup>[3~6]</sup>,它们共同的特点是,不同时刻变形场的测量是在一批试样不同试样上获得的。在动态断裂与破坏的光测实验中,人们采用较多的是光弹方法和焦散方法,工作主要集中在材料的动态断裂韧性的确定方面<sup>[7]</sup>。

本文研制了一套数字化的高速图像采集系统,配合使用霍普金森拉伸装置(SHTB)实时观测了两种 LY12 试样的动态拉伸与变形过程,获得了时间间隔为 10  $\mu\text{s}$  的 8 幅图像。实验结果分析采用了数字散斑相关方法。结果与计算值吻合良好,从而验证了该系统用于高速变形动态测量的可行性。

## 2 系统组成

系统主要由 Hopkinson 拉伸加载装置、高速摄影、激光光源、同步系统、数值记录系统等组成,示意

图见图 1。下面着重介绍系统中的高速摄影、同步系统的基本特性。

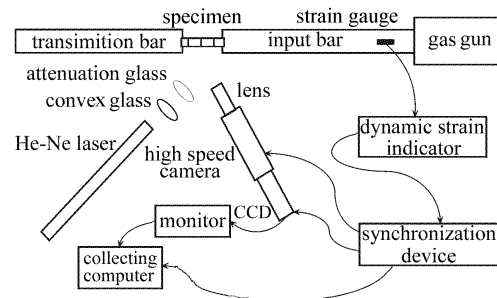


图 1 高速变形光学测量系统示意图

Fig. 1 Sketch map of high-speed deformation optical measuring system

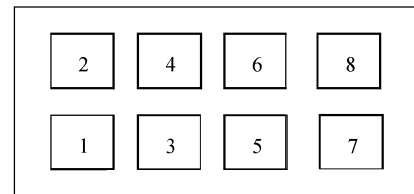


图 2 高速摄影成像顺序

Fig. 2 High-speed camera imaging sequence

### 2.1 高速摄影 Imacon

Imacon-790 是变像管高速摄影机。它以变像管为基本的图像转换器件。此系统带有四种分幅插件(Framing Plug-ins)及三种扫描插件(Streak-Plus-ins)。分幅各插件的性能指标见表 1。

高速摄影机一次成像拍摄 8 幅照片,顺序如图 2 所示。

表 1 Imacon-790 的主要指标  
Table 1 Main index of Imacon-790

Framing plug-in	Speed (frame/second)	Exposure time / $\mu\text{s}$	Frame time-interval / $\mu\text{s}$	Recording time / $\mu\text{s}$	Time-delay / $\mu\text{s}$
1/4T*	$1 \times 10^4$	20	100	800	50
5/4T*	$5 \times 10^4$	4	20	160	10
1/5T*	$1 \times 10^5$	2	10	80	5
1/6T*	$1 \times 10^6$	0.2	1	8	0.575

由于 Imacon-790 高速摄影机记录介质为卷状 Poland 胶片,为了直接得到数字化的照片,用敏通公司生产的 MTV-1881EX 型普通的 CCD 作为高速摄影机的记录系统,以代替高速摄影机的一次底片成像。实验中,将 Imacon-790 最后成像放置胶片的部分卸下,将 CCD 的长焦镜头对准该成像区域。

### 2.2 同步控制原理及其实现

系统主要是在 Hopkinson 拉杆上进行观测,由

于冲击过程的高速性,同步控制具有较大的难度。只能用实验现象本身去触发同步仪,然后再用同步仪输出的两路有精确延时的信号分别去触发高速摄影机和图像采集系统。

实验中使用的自动跟踪式同步仪可以精确测量和显示被测时间间隔,并根据测量值自动跟踪实验对象;可以准确给出三路延时信号,误差小于 1  $\mu\text{s}$ ,以此可解决多种实验手段的同步运转问题。高速摄

影机的外触发信号是同步仪输出的 50 V 的电压信号; CCD 的外触发信号, 是同步仪端口输出的 50 V 信号经电路转换后产生的负 TTL (Transister-Transister-Logic) 信号; 采集卡的外触发信号是由同步仪端口输出的 50 V 信号经电路转换后产生的正 TTL 信号, 其下降沿有效。

### 3 数字散斑相关方法的原理

数字散斑相关方法 (DSCM) 是对变形前后物体表面的两幅图像进行相关处理, 以实现物体变形场的测量。这两幅图像可以是物体表面本身的散斑场, 也可以是表面纹理; 使用的光源可以是激光或白光光源。设微小线段  $PQ(dx, dy, dz)$  变形后为  $P^*Q^*(dx^*, dy^*, dz^*)$ 。  $u, v, w$  分别表示一任意点在  $x, y, z$  方向的位移分量。可以得到

$$\begin{aligned} dx^* &\cong \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)dy + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)dz \\ dy^* &\cong \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)dy + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)dx + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)dz \\ dz^* &\cong \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right)dz + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)dx + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)dy \quad (1) \end{aligned}$$

变形前后线段的长度分别为

$$\begin{aligned} |PQ|^2 &= (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 \\ |P^*Q^*|^2 &= (dx^*)^2 + (dy^*)^2 + (dz^*)^2 \quad (2) \end{aligned}$$

通过相关运算, 能够在不同时刻的图像中, 分别获得任意线段  $PQ$  的对应线段  $P^*Q^*$ 。便可以得到被观察样品的位移场的分布和时间演化规律。

在相关运算中, 要使得相关系数 (定义为下式) 取极大值

$$\begin{aligned} C\left(x, y, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) &= \\ \frac{\Sigma[F(x, y) \cdot G(x^*, y^*)]}{\{\Sigma[F(x, y)^2] \cdot \Sigma[G(x^*, y^*)^2]\}^{1/2}} &= \\ \frac{\langle F \cdot G \rangle}{[\langle F^2 \rangle \cdot \langle G^2 \rangle]^{1/2}} \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $F(x, y)$  为第一个像的灰度函数,  $G(x^*, y^*)$  为第二个像的灰度函数。式 (3) 是实验中图像处理的重要判据。

另一种是用  $S'\left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 1 - C'$ , 它取最小值来判断<sup>[8]</sup>。

### 4 实验结果及讨论

实验是在 Hopkinson 拉杆上进行的。在输入

杆的某个特定位置贴上一个应变片 (参见图 1), 整个数据采集系统的外触发控制就来自于此应变片上的输出信号。所用试件材料为硬铝 LY12, 其弹性模量为 70 GPa, 屈服应力为 265 MPa。试件表面经过抛光处理。一共进行了两组实验, 所用试件的具体结构分别如图 3(a), (b) 所示。

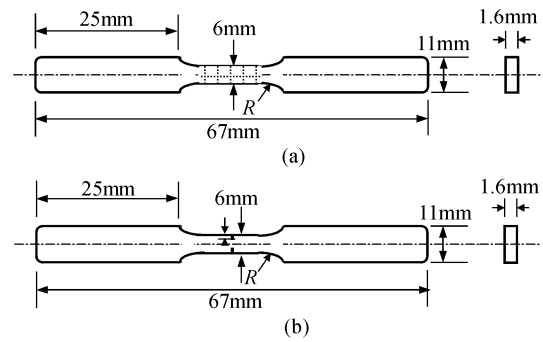


图 3 试样的尺寸与形状  
(a) 动态拉伸试样; (b) 含缺口拉伸试样  
Fig. 3 Dimensions of sample

(a) impact tension sample; (b) tension sample with notches

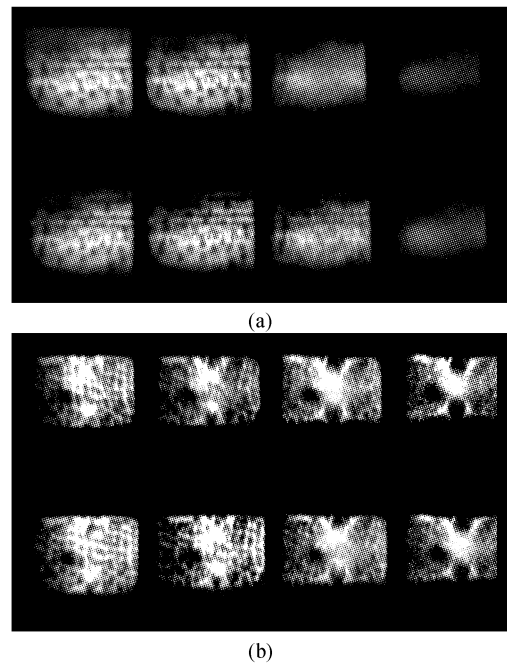


图 4 试样拉伸变形的高速摄影图片 ( $10^5$  幅/s)

(a) 一般拉伸试样; (b) 含缺口拉伸试样

Fig. 4 High-speed photographs of stretch deformation

(a) impact tension sample; (b) sample with notches

实验光源为 70 mW 的 He-Ne 激光器, 光斑直径约为 2 mm, 为了增大视场, 用一凸透镜将光斑扩束到 6 mm, 在凸透镜前方置一衰减镜用以调节光束的强度, 满足了实验的需要。实验中高速摄影选

用的拍摄速度插件为  $10^5$  幅/s, 应变片 1 距试件 0.85 m, 高速摄影延时  $155 \mu\text{s}$ , 图像采集卡和 CCD 没有延时。图 4(a), (b) 分别显示了一般拉伸试样和含缺口拉伸试样在冲击加载过程中不同时刻的表面纹理变化。

对以上两幅图像分别进行处理, 首先将每幅图像分割为 8 幅独立的小图, 每幅小图之间的时间间隔为  $10 \mu\text{s}$ , 利用数字散斑相关方法对 8 幅小图运算分析(运用式(1)~(3))。图 5, 6 显示的是图 4(a), (b) 中对第四、第五、第六幅图像进行处理的结果, 表明了试件在  $40 \sim 60 \mu\text{s}$  之间位移的变化。图像的分辨率为  $47.6 \mu\text{m}$ , 计算的精度为  $0.5 \mu\text{m}$ 。实验中为了满足摄影机对光源的要求, 镜头没有垂直于试件表面, 在图像处理中对于这个倾角作了修正。

图 5(a) 是一维冲击拉伸试样在  $50 \mu\text{s}$  的构型相对于  $40 \mu\text{s}$  时的位移场。而图 5(b) 是试样在  $50 \sim 60 \mu\text{s}$  之间发生的位移。从图中可以得出, 在选取的区域内(试样中心  $0.4 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ), 沿拉伸方向的平均应变分别为  $3.8 \times 10^4 \mu\epsilon$ ,  $2.7 \times 10^4 \mu\epsilon$ 。同样, 也可以获得在这两个时间段内的平均应变率分别为  $3.8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  和  $2.7 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  (用平均应变值除以时间间隔)。这些结果与通过经典 Hopkinson 方法得到的结果是基本一致的。另外, 由图 5 也可以通过简单的求导运算得到沿试样内不同时刻的应

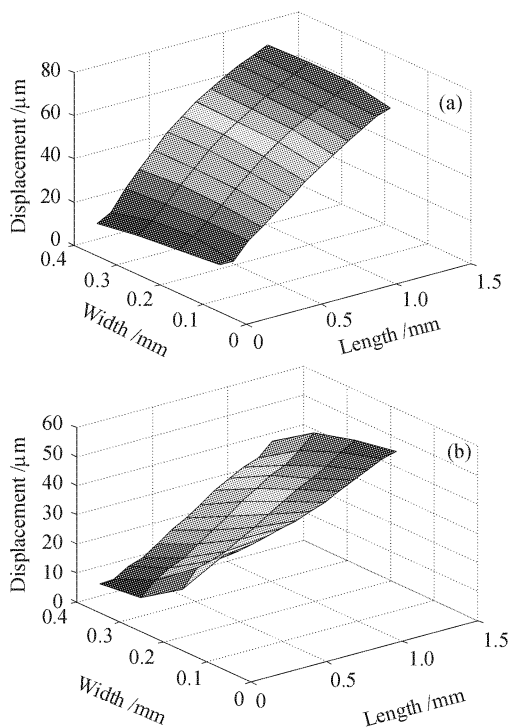


图 5 一般拉伸试样的相关处理结果

Fig. 5 Results by correlation method of tension specimen

变场。从图 5 中还可以发现, 在  $40 \sim 50 \mu\text{s}$  时间段内, 试样呈均匀的一维拉伸状态, 而在  $50 \sim 60 \mu\text{s}$  时间段内, 试样在被拉伸的同时发生了扭曲变形, 这与加载波形、试样性质的不均匀以及输入/输出杆的加工和布置精度有关。

图 6(a), (b) 分别显示了含对称缺口拉伸试样在  $40 \sim 50 \mu\text{s}$ ,  $50 \sim 60 \mu\text{s}$  之间的沿拉伸方向的位移场。选取的区域是试样中心一个  $0.1 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$  的窄条。从图 6 可以看到, 窄条内的位移场基本上是左右对称的, 并且可以分为三个区域: 平坦区、缓慢上升区和变形集中区。

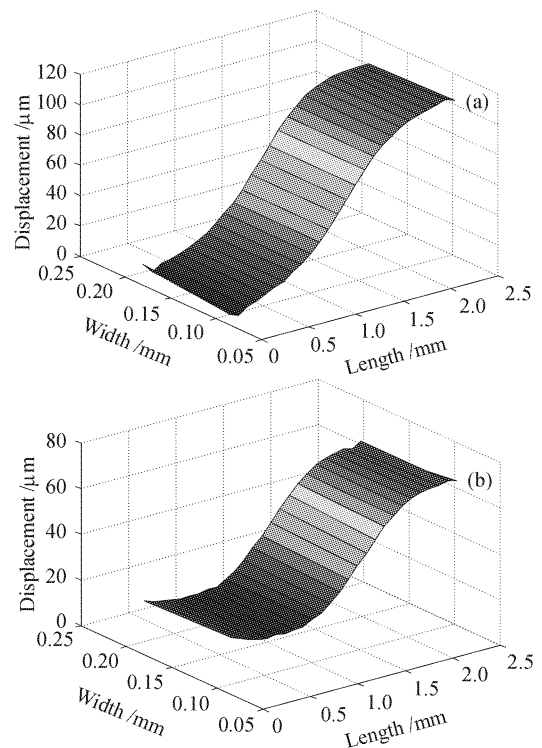


图 6 含缺口试件的相关处理结果

Fig. 6 Results by correlation method of notch specimen

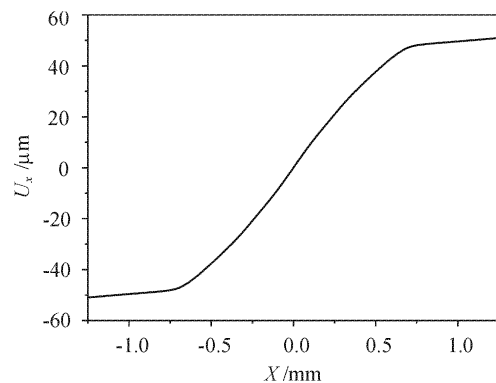


图 7 试件 2 拉伸过程的数值模拟

Fig. 7 Numerical simulation of specimen 2

为了验证实验结果,利用 LS-DYNA 程序对这一过程进行了三维有限元数值模拟,试样在 40~50  $\mu\text{s}$  时间段内沿拉伸方向的位移场参见图 7。比较图 6 和图 7,可以发现实验获得的位移场与计算值在分布规律上是完全吻合的。这从一个方面可以证明实验结果的可靠性。需要说明的是,为了节省计算时间,数值模拟中只取了试件的 1/4 部分。故图 6 和图 7 中坐标和位移的零点不一致。

## 5 结 论

在霍普金森拉伸装置上,利用数字散斑相关理论,发展了一套动态位移场的实时光学测量系统,获得了 LY12 拉伸试样和含缺口拉伸试样在冲击加载下的变形场(时间间隔为 10  $\mu\text{s}$ )。同时利用数值模拟方法,对缺口试样的动态拉伸过程进行了模拟,初步验证了该光测方法用于霍普金森装置动态测试的可行性。

### 参 考 文 献

- 1 L. Han, X. P. Wu, S. S. Hu. Pulsed holographic and speckle interferometry using Hopkinson loading technique to investigate the dynamical deformation on plates [C]. *SPIE*, 1990, **1358**: 793~803
- 2 Li Hongqi, Tong Jingwei, Wang Shibing *et al.*. Study on dynamic optical-mechanical metrology and its developments [J]. *J. Experimental Mechanics*, 1996, **11**(4):422~427  
李鸿琦,佟景伟,王世斌等. 动态光力学多种测试方法研究及其进展[J]. *实验力学*, 1996, **11**(4):422~427
- 3 A. J. Moore, D. P. Hand, J. S. Barton *et al.*. Transient deformation measurement with electronic speckle pattern interferometry and a high-speed camera [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7):1159~1162
- 4 F. V. Diaz, G. H. Kaufmann. Impact-induced transient deformation analysis by means of digital speckle pattern interferometry [J]. *Experimental Mechanics*, 1999, **39**(4):311~316
- 5 Abundio Davila, Guillermo H. Kaufmann, Carlos Perez-Lopez. Transient deformation analysis by a carrier method of pulsed electronic speckle-shearing pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19):4116~4122
- 6 P. D. Ruiz, G. H. Kaufmann, O. Möller *et al.*. Evaluation of impact-induced transient deformations using double-pulsed electronic speckle pattern interferometry and finite elements [J]. *Optic and Lasers in Engineering*, 2000, **32**:473~484
- 7 W. G. Knauss, K. Ravi-Chandar. Some basic problems in stress wave dominated fracture [J]. *International Journal of Fracture*, 1985, **27**:127~143
- 8 Jin Guanchang. Computer-aided Optical Metrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997  
金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京:清华大学出版社,1997