

# 新型数字激光动光弹性实验技术在爆炸力学中的应用

杨立云, 许鹏, 郭东明, 杨仁树

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083

**摘要** 用泵浦激光器和高速数码相机(Fastcam-SA5)分别取代传统的多火花式点光源和多幅式胶片相机,将高速数码相机和激光光源组成的高速摄影系统与动光弹性实验方法相结合,建立了新型数字激光动光弹性实验系统。应用该系统进行了爆炸载荷下的动光弹性实验研究,实验显示,与传统动光弹性实验系统相比,新型数字激光动光弹性实验系统具有记录时间长、采集频率高、实验结果可靠、操作方便、便于实现自动化分析处理等特点。研究结果表明,这一新型数字激光动光弹性实验技术是研究爆炸力学的有效工具。

**关键词** 动光弹性实验;高速数码相机;激光光源;爆炸力学

中图分类号 O348

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.003

## Dynamic Photoelasticity Method Combined with Laser and Digital Ultra High-speed Camera and Its Applications in Blasting Mechanics

YANG Liyun, XU Peng, GUO Dongming, YANG Renshu

School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** Combined with pump laser and high-speed digital camera, a new dynamic photoelasticity method is developed, in which the traditional Cranz-Scharding camera is replaced by a new photography system. The new dynamic photoelasticity method was applied in the blasting mechanics, and some digital images, which were much clearer, are got. Compared with the traditional dynamic photoelasticity system, the new digital laser dynamic photoelasticity experimental system possesses longer recording time, higher sampling frequency; the results are much more reliable and easy to be processed automatically. It is shown that the new dynamic photoelasticity is useful in the field of blasting mechanics.

**Keywords** dynamic photoelasticity; high-speed digital camera; laser source; blasting mechanics

### 0 引言

在矿山建设、隧道开挖、石材开采等实际工程中,爆破法是常用的一种施工方法。然而由于爆破过程的复杂性和瞬时性,人们至今对爆破现象的了解还非常有限,对爆炸理论的研究也难以深入。因此,对爆炸机理、爆炸应力波及其在介质中传播的研究仍是一个重要的研究课题<sup>[1]</sup>。对爆炸力学的研究手段中,动光弹性实验是采用光学灵敏性材料制成与实物相似的模型,在动载荷作用下,用偏振光照射,在底板上直接记录模型中应力等差线的一种光学测量方法。它能够直接得到应力波在固体介质中的传播、迭加,以及裂纹与应力波相互作用的动态过程中瞬间全场应力分布图,具有全场性、连

续性和直观性等特点,可以真实反映出动态过程的信息与规律,因而在爆炸力学领域得到广泛应用<sup>[2,3]</sup>。

要实现对动态过程的观测和记录,需要一套高速图像采集设备。国外学者 Cranz 等<sup>[4]</sup>建立了多火花式照相系统(即沙丁相机),采用多个闪光光源和对应数目的照相镜头分别记录了连续多个时刻的瞬态条纹图。Tuzi 等<sup>[5]</sup>采用条纹照相相机记录了每秒 5000 幅瞬态干涉条纹图。Allison 等<sup>[6]</sup>采用频闪光源对循环荷载下的动态条纹进行了研究。Holloway 等<sup>[7]</sup>采用红宝石激光器记录了瞬态干涉条纹图。国内学者在动光弹性实验方面也开展了大量的研究,20 世纪 80 年代苏先基等<sup>[8]</sup>在沙丁相机基础上成功研制了多火花式动态光弹性仪,为国内动光

收稿日期:2013-02-01;修回日期:2013-04-09

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)项目(20120023120020);国家自然科学基金重点项目(51134025);国家自然科学基金面上项目(51274204)

作者简介:杨立云,博士,研究方向为光测力学、爆炸理论与工程爆破技术,电子信箱:yangly@cumt.edu.cn

弹性实验的研究提供了装备。王祥林等<sup>[9]</sup>研制了高压脉冲闪光机,不仅可以进行透射式动光弹性实验,而且可以在实物上进行反射式动光弹性实验。近几年,杨国标等<sup>[10]</sup>对多火花式动光弹性系统加以改进,应用激光和数码摄像机建立了新型动光弹性实验系统,对低速冲击载荷下介质中的应力场分布进行了研究。

对于超动力学领域中的动光弹性实验,尤其是在爆炸力学领域,采用的动光弹性实验设备主要有三种类型。一种是高速自动分幅激光照相系统,它主要由激光光源系统、外光路系统、同步控制系统和试件加载系统组成,采用红宝石序列脉冲激光器作为激光器光源,可根据预先设定的8个脉冲激光实现自动分幅,一次可记录不同时刻的动态等差线和等和线各4幅。陈斌林等<sup>[11]</sup>即采用GSI型分幅高速摄影机对爆炸载荷下结构的动应力波传播规律进行了研究。但这种自动分幅激光照相系统由于体积庞大、同步控制系统复杂等原因,阻碍了其发展。另一种是以沙丁相机(Cranz-Scharding)为原型,结合光弹性实验装置而发展的动光弹性实验系统,其中又以多火花动光弹性仪的应用最为广泛。多火花动光弹性仪主要由多火花放电装置、光学记录系统和同步控制系统组成,它具有16个点光源和相对应的16个摄影镜头,以4×4方阵的形式分布。实验时,电火花式点光源依次放电,光线经过各透镜后依次进入对应的镜头中,并成像在底片上,从而获得一系列的光弹性照片。第三种是在现代计算机技术基础上发展起来的新型数字式动光弹性实验系统,将数字摄像机和激光器应用到传统动光弹性实验中。杨国标等<sup>[12]</sup>即应用新型动光弹性系统对冲击载荷下结构内部的动态应力分布情况进行了研究,但采用的Motion Xtra HG 100K高速CMOS相机采集速度较低,对超动态现象的研究还存在一定问题。所以目前在超动态(爆炸)力学领域采用的动光弹性实验系统,还是以沙丁相机为原型的多火花式高速摄影系统为主。然而由于多火花动光弹性仪自身的局限性,影响了其进一步发展,主要问题是:(1)实验周期较长,仪器不能满足安全可靠、快速采集和实时分析的要求,如实验需要在暗室操作,实验照片需要进行冲洗、扫描处理等;(2)单次拍摄的幅数有限,最多只能拍摄到16幅图片,实验得到的信息较少;(3)点光源和相机镜头都不在透镜主光轴上,由于斜射照片产生了不同程度的像差,给实验结果带来误差。

随着计算机技术尤其是高速数码相机的发展,为动光弹性实验提供了发展空间。本文提出将高速数码相机和激光光源组成的高速摄影系统与动光弹性实验方法相结合,建立新型数字激光动光弹性实验系统,并应用于爆炸载荷作用下具有预制裂纹的动光弹性模型。

## 1 动光弹性实验原理

动光弹性实验的理论基础是利用光弹性材料的暂时双折射现象,以应力—光学定律为基础,通过偏振光场获得反映全场主应力差变化的连续等差条纹图,进而求解动态过程

中全场任一点的瞬时应力值。对平面应力问题,在动荷载和正入射的偏振光场下,动态应力—光学定律还应包含速度和应力随时间的变化率两个参量,即

$$N = N \left( \sigma_1 - \sigma_2, h, f_d, v_\sigma, \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2$ 为各点主应力值,Pa; $v_\sigma$ 为冲击速度,m/s; $\partial \sigma / \partial t$ 为应力随时间的变化率,Pa/s; $N$ 为条纹级数; $h$ 为模型厚度,m; $f_d$ 为材料动态条纹值,N/m·级。

对于动光弹性记录的模型上任一点的主应力差与条纹级数间有如下关系:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max} = f_d N / (2) \quad (2)$$

式中, $\tau_{\max}$ 为最大剪应力,Pa。

## 2 新型动光弹性实验系统

新型数字激光动光弹性实验系统如图1所示,由激光器、扩束镜、场镜、1/4波片、起偏镜、检偏镜、加载装置、触发线、高速数码相机和PC组成,其中场镜1和场镜2为直径300mm/焦距1500mm的平凸透镜。该系统的核心是在传统的动光弹性实验系统的基础上,利用激光器和高速数码相机取代传统的电火花式点光源和多幅式胶片相机,实现对高速冲击(爆炸)载荷下应力波在固体中的传播、迭加等现象的采集和记录,并利用计算机对整个实验系统进行控制,实现图像的高速数字化采集。

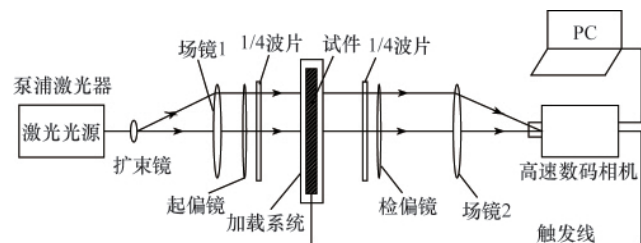


图1 新型数字激光动光弹性实验系统

Fig. 1 New digital laser and dynamic photoelasticity experimental system

### 2.1 图像采集系统

记录瞬时的动光弹性条纹图,图像采集系统需要满足以下要求:(1)高速记录。在高弹模的光弹性材料中,应力波的传播速度在2000m/s以上,这就要求照相机能够在极短的时间内完成曝光,并把瞬时图像计算存储起来。(2)精确同步。高速相机的记录与实验发生时间的精确同步。根据上述要求,本实验系统采用日本Photron公司生产的Fastcam-SA5(16G)型高速数码相机作为图像采集设备,该相机的最大拍摄速度为10<sup>6</sup>fps,最大曝光时间为369ns。当拍摄速度为10<sup>6</sup>fps时,其图像的最大分辨率为320×192像素,最大记录时长为1.86s。同时,该相机具有信号输入/输出端口,能够与计算机系统相连接,并通过专业系统软件PFV(Photron Fastcam Viewer)实现对实验、相机拍摄和图像采集的同步控制。此外,该相机配有Nikon卡尼尔AF系列长/短焦镜头,可实现对拍

摄视场的大幅度调整。实验时,将数码相机放置在三脚架上,调节三脚架使光线能够垂直射入相机镜头。然后根据拍摄区域、像素分辨率及拍摄速度等因素综合确定拍摄参数。

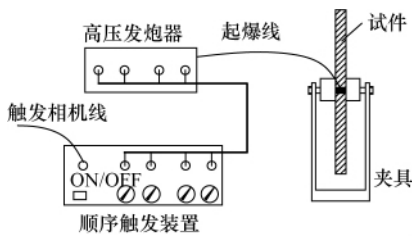
### 2.2 激光光源

要使该系统得到理想的动光弹性条纹图,就需要寻找一种持续高亮、稳定,且光的波长能够与高速相机的感光灵敏度相适应的光源。经过反复调试,最终选取输出功率为0~200mW可调的泵浦激光器作为系统的激光光源,其发射的激光波长为532nm,是Fastcam-SA5型高速数码相机的最敏感光波波长。同时,该激光光源功率可调,可满足多种曝光速度的要求,且激光本身为偏振光,更加适用于动光弹性实验。

### 2.3 爆炸加载系统

在爆炸模型实验中,采用敏感度较高的单质猛炸药二硝基重氮酚(DDNP)或叠氮化铅( $PbN_6$ )作为药包。首先将药包放置于模型试件的炮孔中,然后把模型试件固定在加载架上,炮孔两侧用铁夹夹紧,调整加载架的位置,使观测区域位于实验光路中,如图2(a)所示。通过在炮孔中插入一根探针,探针与高压发炮器相连,利用发炮器高压放电产生的火花引爆炸药。另外,高压发炮器还与顺序触发装置相连,通过顺序触发装置,可以实现多个炮孔的顺序微差起爆。其中,高压发炮器和顺序触发装置组成的多通道起爆加载装置如图2(b)所示。

实验过程中,预先设置好起爆顺序和间隔时间,然后对



(a) 爆炸加载示意

(a) Schematic diagram of blast loading



(b) 多通道起爆器

(b) Multi-channel electric detonator

图2 爆炸加载装置

Fig. 2 Equipment of blast loading

高压发炮器充电,当充电完成后,启动顺序触发开关,高压发炮器将按照预设顺序和时间对药包进行起爆。另外,启动顺序触发开关的同时,通过触发线给相机一个外触发信号,相机亦启动拍摄功能,完成对爆炸载荷下试件上动光弹性条纹的采集和记录。由于炸药爆炸时会产生炮烟,影响相机的拍

摄效果,因此实验中采用导烟管来减轻炮烟对拍摄效果的影响。另外,为防止爆炸产生的碎片对透镜造成损坏,在模型两侧各放置一块钢化玻璃板作防护。

## 3 爆炸光弹性实验

### 3.1 实验描述

实验材料选用环氧树脂板,它在室温下具有较高的光弹性灵敏度和弹性模量,蠕变和时间边缘效应较小,且易于加工。对浇筑后的环氧树脂模型板进行超声波测试,纵波波速  $C_p=1940\text{m/s}$ ,横波波速  $C_s=1180\text{m/s}$ ,弹性模量  $E_d=3.45\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.36$ ,动态条纹级数  $f_d=1730\text{N/m}^2$ 级。实验用试件尺寸为  $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 8\text{mm}$ ,炮孔位于试件的中心,直径为6mm,在距炮孔25mm处预制一个与炮孔垂直的穿透型裂纹,尺寸为  $50\text{mm}\times 1\text{mm}$ ,如图3所示。炸药为单质猛炸药叠氮化铅( $PbN_6$ ),装药量为80mg。高速相机拍摄速度为  $10^5\text{fps}$ ,拍摄照片像素为  $256\times 144$ ,拍摄区域如图3所示。

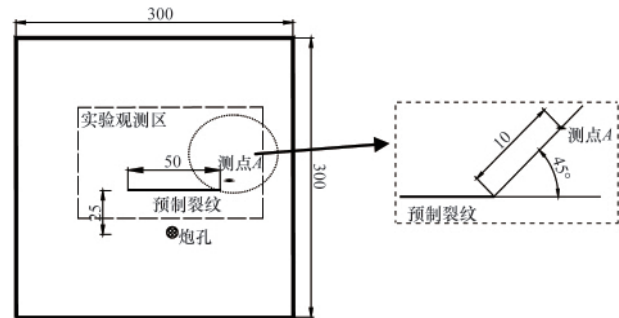


图3 模型试件示意(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of specimen model (unit: mm)

### 3.2 实验结果

应用新型数字动光弹性实验系统,成功记录了爆炸载荷下模型试件上等差应力条纹的变化和预制裂纹两端翼裂纹的扩展情况。设炸药起爆瞬间为零时刻( $t=0\mu\text{s}$ ),到试件中的等差应力条纹完全消失( $t=2630\mu\text{s}$ ),共拍摄到有效照片263幅,选取其中的4幅,分别为90、120、170和  $220\mu\text{s}$ 时刻试件拍摄区内的等差应力条纹分布图,如图4所示。

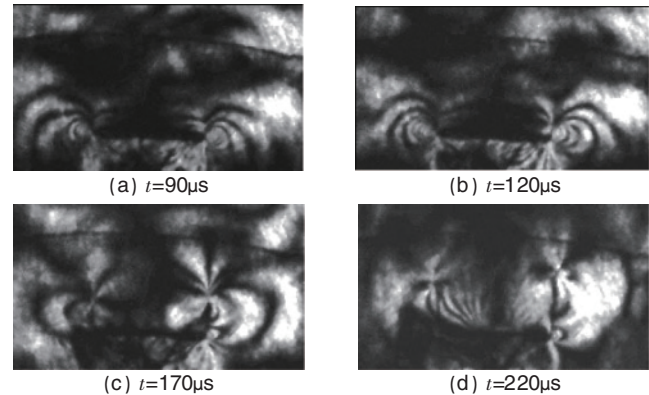


图4 等差应力条纹图

Fig. 4 Isochromatic-fringe pattern

从等差应力条纹图中可以看出爆炸应力波传播过程中的特点。如图4所示,在 $t$ 为 $0\sim 20\mu\text{s}$ 时段,应力波主要为膨胀波,其特点是以爆炸点为圆心近似圆形的方式向外传播,在预制裂纹背后有明显的削弱,即穿透型裂纹阻碍了应力波的传播。在 $t$ 为 $20\sim 120\mu\text{s}$ 时段,在应力波的作用下,预制裂纹两端的等差应力条纹不断增加,条纹级数由裂纹尖端向外逐次降低,而在试件的其他区域条纹相对较少。在 $t$ 为 $120\sim 400\mu\text{s}$ 时段,预制裂纹两端分别产生一条翼裂纹,并向前扩展,等差应力条纹布满整个观测区域,并随裂纹的扩展而不断变化,以裂纹尖端处最为密集。在 $t=400\mu\text{s}$ 以后,预制裂纹两端产生的翼裂纹基本停止扩展,应力波在试件内相互作用,应力条纹混乱,并逐渐衰减直至消失。图5为试件上监测点A的条纹级数随时间变化曲线图(监测点A具体位置见图3)。

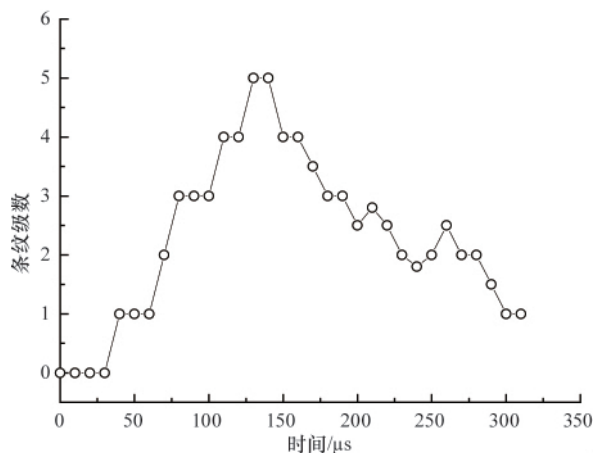


图5 测点A的条纹级数随时间变化曲线

Fig. 5 Fringe orders of point A changing with time

与文献[13]采用传统多火花高速摄影系统得到的爆炸光弹性图片进行对比,发现采用新型数字动光弹性实验系统具有明显的优势:(1)可直接对照片上的应力条纹值进行判读,省去了胶片冲洗、扫描等处理工作,大大降低了胶片处理技术熟练程度对实验结果的影响;(2)得到的动光弹性图像更清晰,单次实验拍摄的照片幅数多;(3)图像直接输入计算机,更易实现计算机自动化处理分析,并可长久保存;(4)所拍摄的每一幅等差应力条纹图均位于透镜主光轴上,减小了实验的系统误差,得到的实验数据更加可靠准确。

#### 4 结论

将高速数码相机和激光光源组成的高速摄影系统与光弹性实验方法相结合,建立了新型数字激光动光弹性实验系统,并成功地将该系统应用到爆炸加载动光弹性实验研究中,取得了较好的实验效果,说明新型实验系统对爆炸力学的研究是可行的。同时与传统的多火花式动光弹性实验系统

进行对比,新型数字动光弹性实验系统表现出较多的优越性,将成为研究爆炸力学问题的有效工具之一,其推广应用前景广阔。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曲中伟. 岩石爆破中炸药爆炸应力波分布的测试与研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2009.  
Qu Zhongwei. Rock blasting explosives test the distribution of stress wave and research[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009.
- [2] Burger C P. Photoelasticity [M]. 2nd ed. New York: VCH Publishers, 1993.
- [3] 戴福隆, 沈观林, 谢惠民. 实验力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
Dai Fulong, Shen Guanlin, Xie Huimin. Experimental mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [4] Cranz C, Schardin H. Kinematograohic auf ruhendem film and mit extreme hoher bildfrequenz [J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1929, 56: 147-183.
- [5] Tuzi Z, Nisida M. Photo-elastic study of stresses due to impact [J]. Philosophical Magazine Series 7, 1936, 21(S1): 448-473.
- [6] Allison I M, Nurse P. Automatic acquisition of photoelastic data[C]// Proceeding of JBCSA Conference on the Recording and Interpretation of Engineering Measurements. London: Institute of Marine Engineers, 1972: 203-207.
- [7] Holloway D C, Ranson W T, Taylor C E. A neoteric interferometer for use in holographic photoelasticity [J]. Experimental Mechanics, 1972, 12 (10): 461-465.
- [8] 苏先基, 马连芬. 多火花式动光弹性仪及其初步应用 [J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 56-67.  
Su Xianji, Ma Lianfen. Explosion and Shock Waves, 1984, 4(1): 56-67.
- [9] 王祥林, 郭靖华. 用于动光弹的高压脉冲闪光系统[J]. 实验力学, 1987, 2(4): 74-79.  
Wang Xianglin, Guo Jinghua. Journal of Experimental Mechanics, 1987, 2(4): 74-79.
- [10] 杨国标, 朱启荣, 倪凡, 等. 激光光源在动光弹法设备中的应用研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(12): 66-68.  
Yang Guobiao, Zhu Qirong, Ni Fan, et al. Experimental Technology and Management, 2010, 27(12): 66-68.
- [11] 陈斌林, 刘德宝. 大爆破对水工圆隧洞影响的动态光弹性实验研究[J]. 工程爆破, 1996, 2(4): 44-50.  
Chen Binlin, Liu Debao. Engineering Blasting, 1996, 2(4): 44-50.
- [12] 李松刚, 杨国标, 倪凡, 等. 应用新型动光弹系统研究某设备受冲击载荷作用[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 229-233.  
Li Songgang, Yang Guobiao, Ni Fan, et al. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 229-233.
- [13] 朱振海, 曲广建, 杨永琦, 等. 起爆时差对孔间裂缝贯穿影响的动光弹研究[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(4): 346-352.  
Zhu Zhenhai, Qu Guangjian, Yang Yongqi, et al. Explosive and Shock Waves, 1991, 11(4): 346-352.

(责任编辑 韩黎明)