

# 超高速数字图像相关实验系统及其在爆炸研究中的应用

杨立云<sup>1</sup>, 张蓝月<sup>1</sup>, 丁晨曦<sup>1</sup>, 孙金超<sup>1,2</sup>, 刘林林<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083

2. 中国一冶集团有限公司, 武汉 430081

**摘要** 基于数字图像相关方法和超高速摄像技术,建立了超高速数字图像相关实验系统,并应用该系统和UV平板打印制斑技术,通过在聚碳酸酯(PC)平板试件上进行爆破模型实验,分析了爆破应变场的演化过程和衰减规律。结果表明,爆炸产生应力波的表现形式以压缩波为主、剪切波为辅;随着应力波在试件平面内的传播,应力波频率由高频向低频衰减,应力波能量逐渐耗散。采用ABAQUS有限元分析软件对爆破模型实验的动态过程进行模拟,数值模拟的变形演化规律与模型实验结果基本吻合,验证了超高速数字图像相关实验系统对爆炸问题的研究具有良好的适用性。

**关键词** 数字图像相关方法;高速摄像;爆炸;应变场;应力波

20世纪80年代初,随着计算机技术和数字摄像机的发展,数字图像相关方法(digital image correlation, DICM)又称数字散斑相关测量(digital speckle correlation measurement, DSCM)逐渐发展起来。1982年, Peters等<sup>[1]</sup>通过电视摄像管采集试件变形前后的激光散斑图,用微型计算机进行数字化转换,由此得到了散斑图的离散型数字灰度场,用此灰度值进行变形前后的相关计算,找出相关系数的最大值,从而计算出了相应的位移和应变。随后,经过多位学者的努力<sup>[2-5]</sup>,数字图像相关方法的基本概念、原理和相关搜索的基本程序得到了详细的论述,相关实验也证明了这种方法不仅能够实现对变形信息进行全场测量的要求,而且具有光路系统简单、实验操作过程简便、对环境及隔震要求低、测量过程易实现自动化、测量范围更广、结果处理更方便等优点,是传统电测法和常用光测法无可比拟

的。进入20世纪90年代,数字图像相关方法继续发展,这一时期的工作则是更多的把数字图像相关方法作为一种有效的研究手段,应用于实际问题的解决。Dai等<sup>[6]</sup>对单轴拉伸试件的激光衍射图像进行了数字图像分析,以此研究了试件弹塑性界限。Sutton等<sup>[7]</sup>对含一条边界裂纹的试件进行了裂纹尖端变形场的研究,应用数字图像相关方法通过测定裂纹尖端局部塑性区研究了三维效应的影响区域。近年,数字图像相关方法进一步发展,郝文峰等<sup>[8-9]</sup>采用该方法测量了裂纹尖端应力强度因子,使该方法在断裂力学中的应用更加成熟。数字图像相关方法作为一项简便的光学测试方法,已经应用于多个领域<sup>[10-14]</sup>,成为现代光测力学领域的重要测试方法。

在爆炸力学领域中,有很多光测力学的实验方法得到应用,如纹影法<sup>[15]</sup>、焦散线法<sup>[16]</sup>、光弹法<sup>[17]</sup>等。但是,

收稿日期:2017-09-18;修回日期:2018-05-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51404273);国家重点研发计划项目(2016YFC0600903)

作者简介:杨立云,副教授,电子信箱:yangly@cumb.edu.cn;丁晨曦(通信作者),博士研究生,电子信箱:dingcx91@sina.com

引用格式:杨立云,张蓝月,丁晨曦,等.超高速数字图像相关实验系统及其在爆炸研究中的应用[J].科技导报,2018,36(13):58-64;doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2018.13.008

这些方法因为各自使用条件所限, 具有较大的应用局限。纹影法对于流场的气流密度具有较高的要求, 并且主要适用于对流体边界层的研究。焦散线法适用于对裂纹尖端场的局部研究, 并且目前对于非透明介质的反射式焦散线的研究还未达到较好的应用效果。光弹法虽然能够进行全场的应变研究, 但主要适用于透明的光弹性材料。相较而言, 数字图像相关方法是一种适用范围广, 对材料的光学性质和环境因素要求较低的光测力学实验方法。

由于高速摄影技术的限制, 数字图像相关方法在爆炸研究中的应用一直偏弱。在爆炸载荷作用下, 被爆介质的动态响应问题是工程爆破施工过程中最重要的核心问题, 但由于爆炸载荷具有瞬态、高幅值以及强间断等特征, 给相关研究带来很大困难。另外, 为了降低爆破实验中试件的边界效应, 通常采用的试件尺寸相对较大(上述文献中多采用 300 mm×300 mm 的平面试件), 观测区域也较大, 因此需要采用高分辨率和超高速的相机才能满足超高速数字图像相关测量研究。从现有的文献记录来看, 鲜有将数字图像相关方法直接应用于爆炸这一超动态问题的研究。本文基于数字图像相关方法和超高速摄像技术, 构建超高速数字图像相关实验系统, 通过模型实验将该系统应用于爆炸载荷作用下超动态应变场的监测与分析, 为研究爆炸力学领域中被爆介质的动态响应问题提供一种新方法。

## 1 数字图像相关方法原理

本文将数字图像相关方法与超高速摄像技术相结合, 通过对试件表面变形前后的数字散斑图像的灰度矩阵进行相关计算, 跟踪计算点变形前后的空间位置, 从而获得试件表面位移和应变信息。数字图像相关方法的基本原理如图 1 所示。

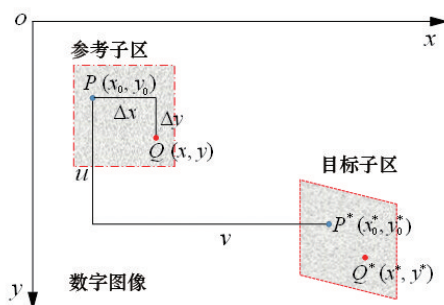


图1 数字图像相关方法基本原理示意

Fig. 1 Basic principle diagram of digital image correlation

进行相关计算时, 首先选定试件加载变形前的散斑图像作为参考图像, 在参考图像中选定 1 个以  $P(x_0, y_0)$  点为中心, 大小为  $(2M+1) \times (2M+1)$  pixel 的参考图像子区, 通过特定的搜索方法和相关函数在变形后的图像中进行搜索和灰度相关计算。相关系数为最大或最小值时, 即为以  $P(x_0, y_0)$  为中心, 大小为  $(2M+1) \times (2M+1)$  pixel 的参考子区在变形后图像中对应的目标子区, 进而可以确定  $P(x_0, y_0)$  的位移分量  $u$  和  $v$ 。

采用标准化相关函数作为相关准则

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)g(x^*, y^*)]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f^2(x, y) \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g^2(x^*, y^*)}} \quad (1)$$

参考子区内任意一点  $Q(x, y)$  变形后的坐标位置可以表示为

$$\begin{aligned} x^* &= x_0 + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \\ &\quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} (\Delta y)^2 \\ y^* &= y_0 + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \\ &\quad \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} (\Delta y)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $f(x, y)$  为参考图像中坐标为  $(x, y)$  点图像的灰度值;  $g(x^*, y^*)$  为目标图像中对应  $(x^*, y^*)$  点图像的灰度值;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为点  $Q(x, y)$  到中心点  $P(x_0, y_0)$  的水平距离和垂直距离;  $u$ 、 $v$  分别为参考子区中心点  $P(x_0, y_0)$  变形前后的水平位移和垂直位移分量;  $\left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right)$  为相关计算待求的 6 个参数;  $\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\right)$  为位移分量的二阶梯度。

采用 N-R 迭代法即可获得式(1)的最大值, 从而计算得到参考子区中心的位移值  $u$ 、 $v$  及其导数, 继而求得参考子区内各个整像素点的位移, 再通过三次样条插值法求得亚像素点的位移。

## 2 超高速数字图像相关实验系统

本实验采用的超高速数字图像相关实验系统如图 2 所示。该实验系统主要由超高速相机、计算分析系统、照明系统、爆炸加载装置和同步控制系统组成。

考虑试件边界效应和爆炸应力波速度等因素, 爆

破实验一般要求试件尺寸较大,继而要求高速相机不仅拍摄速度快,同时像素要高。传统的多火花式高速相机,拍摄速度能达到0.2 Mf/s,但其为胶片式,无法满足数字化要求。普通的高速CCD相机或CMOS相机,随着拍摄速率的增加,图像分辨率大幅降低,如Photron公司的Fastcam系列相机,拍摄速度最快能达到1 Mf/s,但图像分辨率只有 $64 \times 28$  pixel,无法满足大尺寸爆破实验要求。另外一种分幅式超高速相机,如PCO公司的HSFC-pro相机,采用2~4个CCD,拍摄速度能达到200 Mf/s,但每次最多拍摄32幅照片,且这些照片由4个CCD镜头成像,导致图像灰度不一致,且有畸变,不适合数字图像相关分析。随着科技的发展,一种新型的 $\mu$ CMOS传感器超高速相机Kirana-5M逐渐成熟,拍摄速度为5 Mf/s,图像分辨率为 $924 \times 768$  pixel,能够满足爆破实验要求。

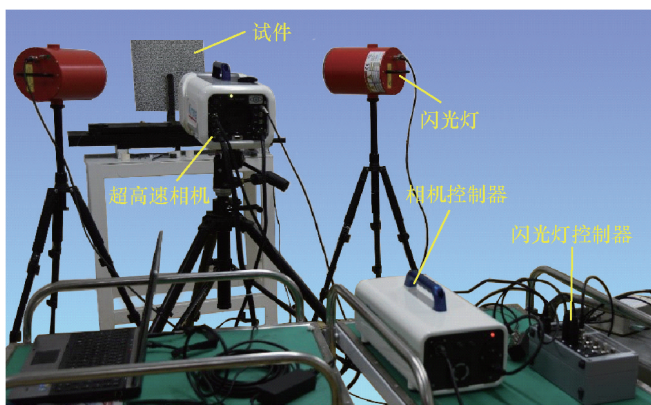


图2 超高速数字图像相关实验系统  
Fig. 2 Experimental system of ultra high digital image correlation

国内外成熟的数字图像相关计算分析系统,有美国CSI公司的VIC系统、德国GOM公司的ARAMIS系统和德国DANTEC公司的Q系列系统等,其原理基本相同,计算和后处理方面各有特色。新构建的超高速数字图像相关实验系统选用美国CSI公司的VIC-2D系统,采用标准化的平方差相关函数进行相关计算,具有自动标定图形缩放系数的功能,对光线明亮变化不敏感,能在满足精度和计算速度前提下进行最优的计算。

针对5 Mf/s超高拍摄速度,要求曝光速率小于200 ns,传统的LED光源已无法满足要求。本实验采用SI-AD500照明系统,由控制器和闪光灯组成。控制器为四通道CU-500型控制器,可以控制多个闪光灯同时或顺序工作。闪光灯为FH-500型氙气灯,可以实现40

$\mu$ s达到最强照明亮度,并持续2 ms的恒定光强时间。

爆炸加载装置系自主设计,采用自制药包(一般为叠氮化铅),置于试件上的预制炮孔中,药包内埋设引爆线,通过螺栓的拧紧对加载头施加压力,从而夹紧炮孔,炸药由同步控制系统中的脉冲打火器引爆。

爆破实验中闪光灯、相机拍摄、炸药起爆等一系列动作需要依次进行,要求同步控制系统必须满足微秒级的精确控制。由于FH-500闪光灯得到触发信号后,40  $\mu$ s后光照强度才能达到稳定状态,且其稳定状态只能持续2 ms,因此以单炮孔触发为例,若闪光灯触发信号定义为0  $\mu$ s时刻,那么相机的拍摄时刻为40  $\mu$ s,炸药起爆时刻为45  $\mu$ s。基于此,研发了四通道HD12-2型程序控制多路脉冲控制系统,可以设置起爆、照明与相机等设备的触发顺序和延时时间,实现了微秒级精确控制。设备同步控制原理如图3所示。

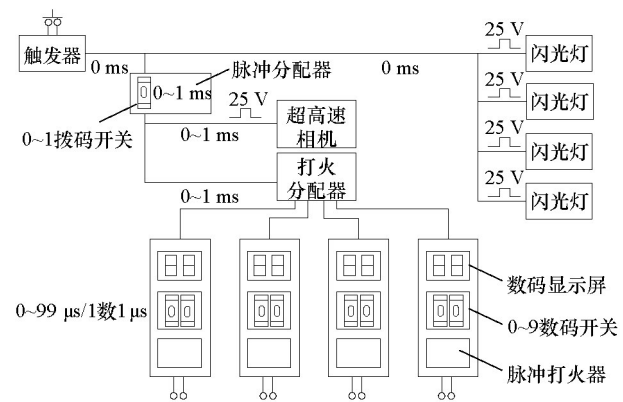


图3 同步控制原理示意  
Fig. 3 Synchronic control schematic diagram

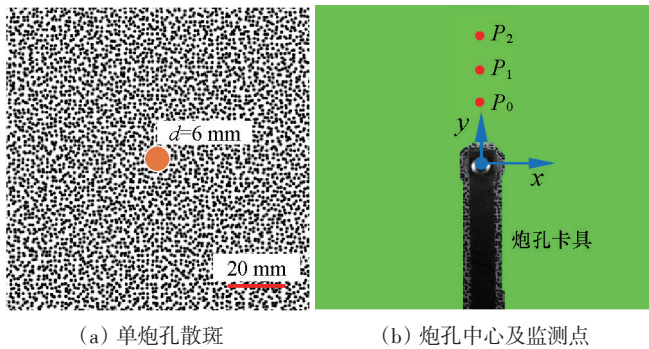
### 3 爆破实验实例

#### 3.1 实验参数确定

试件及相关参数。试件采用 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的PC板,其纵波波速 $v_p=2125 \text{ m/s}$ ,横波波速 $v_s=1090 \text{ m/s}$ ,弹性模量 $E_d=3.595 \text{ GN/m}^2$ ,泊松比 $\nu_d=0.32$ 。在试件中心加工直径 $d=6 \text{ mm}$ 、深度 $h=6 \text{ mm}$ 的炮孔。炸药为叠氮化铅,质量80 mg,装药密度 $\rho_0=2.51 \text{ g/cm}^3$ 。

散斑及相关参数。散斑质量是决定数字图像相关计算精度的重要因素之一。通常而言,散斑直径范围在3~7个像素最优,本实验综合考虑试件尺寸 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、相机像素 $924 \times 768$  pixel等因素,确定散斑直径2mm。在试件表面喷涂黑白哑光漆以形成随机散斑的传统方法,操作简便,但散斑质量受喷嘴大小、喷漆粘

性、喷涂时间、喷涂方向以及操作者熟练程度等因素的影响,制作的散斑存在个别散斑点极大或极小、散斑分布密度不均匀等问题,导致实验误差较大或失败。另外,常用的手工点斑法效果相对较好,但这种方法费时费力,散斑密度不易控制,且更适合尺寸较小的试件。本实验采用计算机辅助制斑方法,首先以计算机模拟设计散斑样式,然后利用UV平板激光打印技术将所设计的散斑图样打印到试件表面。散斑点直径2 mm,散斑密度75%,散斑不规则度75%。单炮孔散斑打印到试件上的显微照片和炮孔中心及监测点如图4所示。



(a) 单炮孔散斑 (b) 炮孔中心及监测点  
图4 单炮孔散斑与监测点示意

Fig. 4 Diagrams of single-borehole speckle and monitor points

拍摄及相关参数。PC材料纵波波速为2125 m/s,从炮孔传播到边界约70 μs,若考虑反射波在试件中传播情况,那么整个实验过程将不少于140 μs。因此,设置相机拍摄速度为1 Mf/s,曝光速率为100 ns,总拍摄时长为180 μs。参数确定后,进行不加载的拍摄与计

算分析调试,发现静止状态下最大应变为30 με,说明拍摄参数合理,满足实验要求。

### 3.2 应变场演化过程

实验中高速相机拍摄了180张图像,对数字照片进行标定,缩放系数为0.35766 mm/pixel。将炸药起爆时刻设为0 μs, VIC-2D计算时子区大小设为29×29 pixel,步长设为7,选择标准化平方差相关函数和Optimized 6-tap B样条插值方法进行计算。整个试件呈轴对称分布,为了便于描述和分析,建立以炮孔中心(图4(b))为坐标原点的坐标系,并在y轴上布设3个虚拟监测点,坐标分别为P<sub>0</sub>(0, 4)、P<sub>1</sub>(0, 7)、P<sub>2</sub>(0, 10)。

通过实验可以直接得到试件平面内水平方向、竖直方向、剪切方向的全场应变和最大主应变云图。由于对称性,这里重点对竖向应变 $e_{yy}$ 和剪切应变 $e_{xy}$ 进行讨论和分析。实验所得竖向应变和剪切应变云图如图5所示。炸药起爆后,15 μs时,爆炸应力波进入观测区。22 μs时在炮孔周围形成明显压应变区,同时炮孔周围也出现了明显的拉伸应变区,证明在径向压缩变形的同时,在切向上会产生拉伸变形。随着应力波的向前传播,49 μs时,整个压缩波完全进入观测区。58 μs时,压缩波的后面出现了1个明显拉伸变形区,说明爆炸应力波由1个压缩波和1个拉伸波组成。87 μs时,压缩波的后面出现了1个明显拉伸变形区,说明爆炸应力波传播到试件边界处,并发生反射,入射压缩波变为反射拉伸波。105 μs时,反射拉伸应力波再次进入观测区,并与入射拉伸波在观测区域内相遇并叠加,在试件边界处产生更大的拉伸作用。113 μs时,反

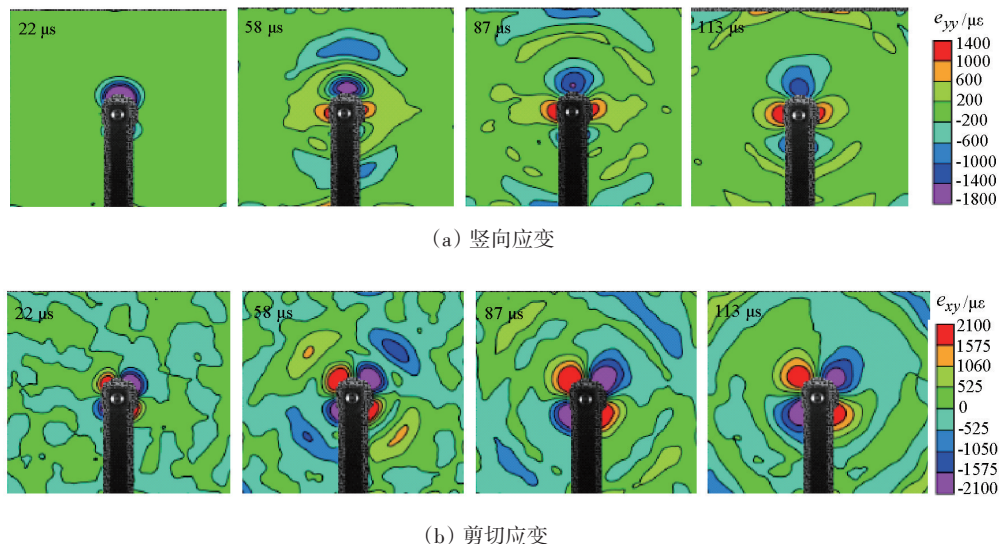


图5 实验应变场云图

Fig. 5 Strain contours from experiment

射拉伸波的波峰与入射拉伸波的波峰相遇叠加。131  $\mu\text{s}$ 时,入射拉伸波反射后再次进入观测区,变为反射压缩波,同时反射拉伸波与爆生气体的准静态作用产生的压缩变形区相遇,由于应力波传播过程中的衰减,此时的反射拉伸应变波峰值为 500  $\mu\epsilon$ ,远小于静态压缩产生的压缩应变 1300  $\mu\epsilon$ 。随着应力波的继续传播、反射、衰减、叠加等,试件平面内应变云图越来越紊乱。

从剪切应变  $e_{xy}$ 云图上可以看出,在炮孔水平径向方向上,剪切应变值一直很小(最大为 300  $\mu\epsilon$ ),也说明爆炸产生的应力波以压缩波为主,剪切波的作用较小。

采用 ABAQUS 有限元分析软件对爆破实验的动态过程进行有限元数值模拟,结果如图 6 所示。可以看出,数字图像相关方法实验中的变形演化规律基本与模拟结果吻合良好,只在时间节点选取方面略有差异。

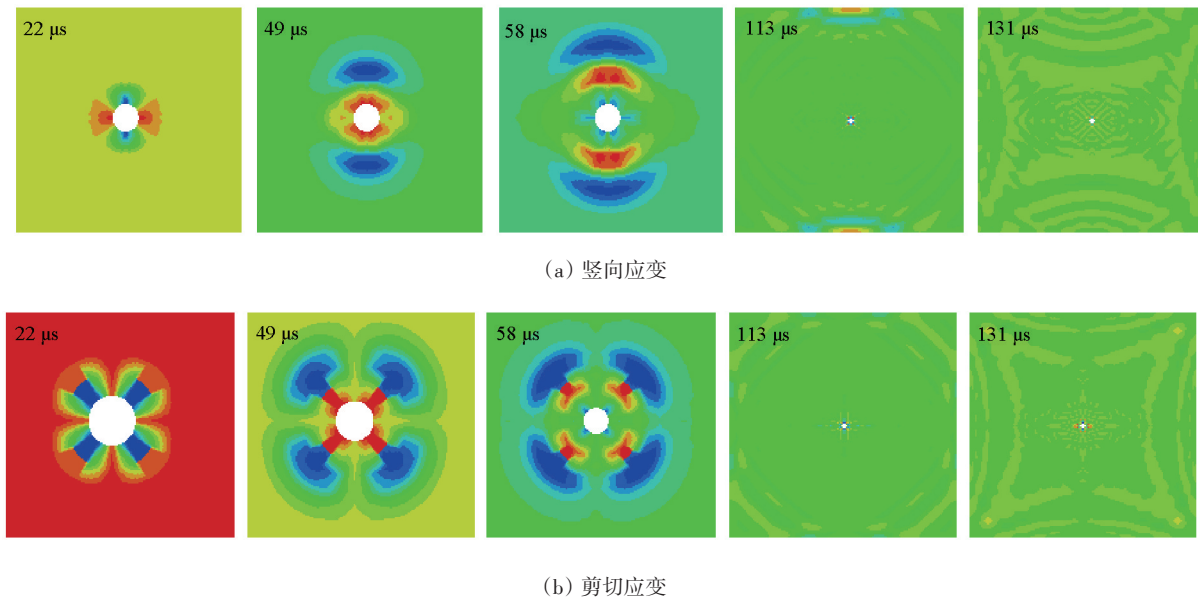


图 6 数值模拟应变场云图

Fig. 6 Strain contours from numerical simulation

提取 51、67  $\mu\text{s}$  两时刻  $P_0$  和  $P_2$  连线上各点的竖向应变  $e_{yy}$ , 得到如图 7 所示的波形。51  $\mu\text{s}$  时,  $P_0$ 、 $P_2$  连线段显示 1 个完整的正弦波, 波长为 47 mm。67  $\mu\text{s}$  时, 波形发生变化, 波长变长,  $P_0$  和  $P_2$  连线段只能显示 1/2 波长, 此时的波长为 66 mm, 增长约 40.4%。弹性应力波在介质中的传播速度为常数, 波速是波长与频率的乘积, 从 51~67  $\mu\text{s}$ , 波长增加, 则波的频率就会相应减小。说明随着时间的增长, 介质中的应力波由高频向低频衰减, 造成应力波能量的损耗, 这符合应力波传播过程中的能量衰减规律。

### 3.3 监测点应变曲线

提取 3 个监测点  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  的应变-时间曲线, 如图 8 所示。可以看出,  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  点的  $e_{xx}$  (炮孔切向应变) 主要表现为拉应变, 这是径向压缩波在切向方向上产生的拉伸效应。随着距离炮孔的位置越远, 该拉伸应变不断衰减, 其中最大拉应变值为 807  $\mu\epsilon$ 。距离炮孔最近的  $P_0$  点的拉应变在后期基本维持在 650  $\mu\epsilon$  的水平, 这

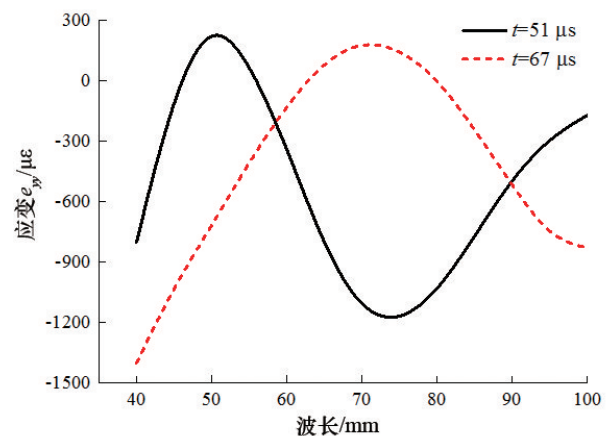


图 7  $P_0$ - $P_2$  段波形

Fig. 7 Oscillo graph of  $P_0$ - $P_2$

主要是由于爆生气体准静态压缩作用在切向上产生拉伸效应。 $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  点的  $e_{yy}$  (炮孔径向应变) 主要以压应变为主, 同时出现了拉应变, 进一步说明爆炸应力波由 1 个压缩波和拉伸波组成。由于  $P_0$  点距离炮孔最近, 爆

生气体的准静态压缩作用导致 $P_0$ 点的拉伸应变被抵消,在整个观测时间内 $P_0$ 点径向始终处于压缩应变区。 $P_2$ 点距试件边界最近,压缩波经自由边界反射后变为反射拉伸波,反射拉伸波最先与该点作用,使得120  $\mu\text{s}$ 时 $P_0$ 点出现第二次拉伸变形,该反射拉伸波产生的最大拉应变为500  $\mu\epsilon$ 。

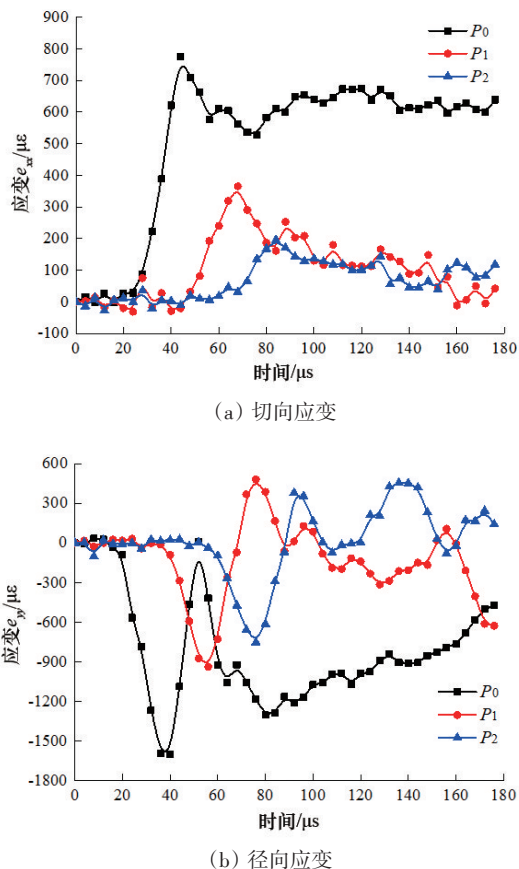


图8 监测点的应变-时间曲线

Fig. 8 Curves of strain vs. time in monitor points

## 4 结论

建立了由超高速相机 Kirana-5M、爆炸加载装置、照明系统和同步控制系统等组成的用于研究爆炸问题的超高速数字图像相关分析实验系统。

采用优化设计的爆破实验参数和UV平板激光打印斑技术,进行了PC平面模型试件单炮孔爆破实验,分析了应变云图演化过程,并与数值计算结果对比,表明爆炸产生的应力波以压缩波为主,剪切波的作用较小;随着时间的增长,介质中的应力波频率由高频向低频衰减,应力波能量逐渐损耗,实验结果与数值计算结果吻合良好。

新建立的超高速数字图像相关实验系统,实现了

对爆炸应力波的传播和衰减的深入量化研究,为研究爆炸力学领域中被爆介质的动态响应问题提供一种新手段。

## 参考文献 (References)

- [1] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [2] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25(3): 232-244.
- [3] Sutton M A, Cheng M, Peters W H, et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis [J]. *Image and Vision Computing*, 1986, 4(3): 143-150.
- [4] Tian Q, Huhns M N. Algorithms for subpixel registration[J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1986, 35(2): 220-233.
- [5] Sutton M A, McNeill S R, Jang J, et al. Effects of sub-pixel image restoration on digital correlation error[J]. *Optical Engineering*, 1988, 10(27): 870-877.
- [6] Dai Y Z, Tay C J, Chiang F P. Determination of the plastic zone by laser-speckle correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1991, 31(4): 348-352.
- [7] Sutton M A, Turner J L, Chao Y J, et al. Experimental investigations of three-dimensional effects near a crack tip using computer vision[J]. *International Journal of Fracture*, 1992, 53(3): 201-228.
- [8] 郝文峰, 原亚南, 姚学锋, 等. 基于数字图像相关方法的含双裂纹复合材料薄板应力强度因子测量[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2015(4): 22-26.  
Hao Wenfeng, Yuan Ya'nan, Yao Xuefeng, et al. Measurement of mode-I stress intensity factor in a double-cracked composite sheet using digital image correlation method[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2015(4): 22-26.
- [9] 郝文峰, 陈新文, 邓立伟, 等. 数字图像相关方法测量芳纶纤维复合材料I型裂纹应力强度因子[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(2): 90-95.  
Hao Wenfeng, Chen Xinwen, Deng Liwei, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of aramid fiber composite materials utilizing digital image correlation method[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, 35(2): 90-95.
- [10] Sabate N, Vogel D, Gollhardt A, et al. Digital image correlation of nanoscale deformation fields for local stress measurement in thin films[J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(20): 5264-5270.
- [11] Knauss W G, Zhu W. Nonlinearly viscoelastic behavior of

- polycarbonate: I. Response under pure shear[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2002, 6(3): 231-269.
- [12] Lee S, Barthelat F, Moldovan N, et al. Deformation rate effects on failure modes of open-cell Al foams and textile cellular materials[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2006, 43(1): 53-73.
- [13] Kodaka T, Higo Y, Kimoto S, et al. Effects of sample shape on the strain localization of water-saturated clay[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 31(3): 483-521.
- [14] Finno R J, Rechenmacher A L. Effects of consolidation history on critical state of sand[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(4): 350-360.
- [15] 杨立云, 许鹏, 高祥涛, 等. 数字激光高速摄影系统及其在爆炸光测力学实验中的应用[J]. *科技导报*, 2014, 32(32): 17-21.
- Yang Liyun, Xu Peng, Gao Xiangtao, et al. Digital laser high-speed photography system and its application in Photomechanics with blast loading[J]. *Science and Technology Review*, 2014, 32(32): 17-21.
- [16] 杨立云, 杨仁树, 许鹏. 新型数字激光动态焦散线实验系统及其应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 188-194.
- Yang Liyun, Yang Renshu, Xu Peng. Caustics method combined with laser & digital high-speed camera and its applications[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 188-194.
- [17] 杨立云, 许鹏, 郭东明, 等. 新型数字激光动光弹性实验技术在爆炸力学中的应用[J]. *科技导报*, 2013, 31(15): 27-30.
- Yang Liyun, Xu Peng, Guo Dongming, et al. Dynamic photoelasticity method combined with laser & digital ultra high-speed camera and its applicationsits applications in blasting mechanics[J]. *Science and Technology Review*, 2013, 31(15): 27-30.

## Ultra high speed digital image correlation system and its application in blasting research

YANG Liyun<sup>1</sup>, ZHANG Lanyue<sup>1</sup>, DING Chenxi<sup>1</sup>, SUN Jinchao<sup>1,2</sup>, LIU Linlin<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2. China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan 430081, China

**Abstract** Combining with the digital image correlation method and the ultra high speed photography technology, an experimental system of ultra high speed digital image correlation is set up to realize monitoring and analysis of the ultra-dynamic strain field under blasting loading. By using the experimental system and the UV flatbed printing technology, a blasting model experiment on polycarbonate (PC) plate is conducted, the evolution of blasting strain field and the attenuation law are analysed. The results show that the compressive wave is the main form of blasting stress wave and the shear wave is the minor form. With the propagation of stress wave in the specimen plane, the stress wave decays from high frequency to low frequency, and the energy of stress wave dissipates gradually. In addition, the ABAQUS finite element analysis code is used to simulate the dynamic process of blasting. The deformation evolution of numerical simulation is in good agreement with the experimental results, it is verified that the experimental system has good applicability to blasting research.

**Keywords** digital image correlation method; high speed photography; blasting; strain field; stress wave ●



(责任编辑 韩星明)