

# 用白光散斑方法测量动态变形\*

陈方 曹正元 方如华 陈萍萍

(同济大学工程力学系光测力学实验室, 1985年11月1日收到)

## 摘 要

本文提出一个简便的, 用多火花动光弹仪进行动态变形测量的白光散斑方法, 用此方法不但可以进行动态大变形测量<sup>[1]</sup>, 也可动态小变形测量. 如果和动光弹等色线结合, 可以同时获得被测材料的弹性模量、泊松比、材料条纹值参数.

## 一、引 言

在冲击、爆炸等动载荷的作用下, 结构物的应力应变分析是科学研究和工程实际中的重要课题. 光测力学进行动态应力分析的重要工具是动态光弹性仪. 但是, 目前所用的多火花式动光弹仪, 一般只能记录光弹等色线条纹, 记录等倾线较为困难, 因此, 需要寻求其它补充条件, 进行应力分离, 或直接从位移场求解应力. 在瞬变载荷下, 固体介质的力学响应不同于静载, 由于介质的惯性作用和材料本身对应变率的相关性, 探索不依赖于材料性质的测试方法, 对于动态问题的研究有很重要的意义, 而白光散斑方法恰恰具备这些价值, 它可以直接测得变形体的位移而不依赖被测物的材料特性, 它可以通过同一模型, 同时获得等色线条纹图和散斑条纹图, 进而可以联立求解出被测材料的有关参数. 应变, 应力, 实现对物体在动态载荷下的应力, 应变及材料特性的分析.

对于用白光散斑法进行动态测量的问题, 国内外有不少学者进行了研究<sup>[2,3,4]</sup>, 但是由于仪器的分辨率和其它因素的限制<sup>[1]</sup>, 只能进行大变形测量, 在实验时往往采用软材料作试件. 采用低弹模的软材料作试件, 在动态条件下, 它们高速变形时的粘弹性特性往往不能忽略, 因而保证它们与实际问题的动力系相似有困难.

本文提出的白光散斑方法, 不仅可以测量物体动态大变形, 也可以测量动态小变形. 当采用砂纸打磨环氧树脂表面制造人为白光散斑, 可以实现用同一模型得到等色线条纹图和散斑条纹图, 进而可以由本文给出的公式联立求解被测材料的弹性模量、泊松比、材料条纹值、应变, 本方法简单, 可靠, 精度满足要求.

关于应力的求解参见文[5].

## 二、原 理

白光散斑法由 Forno 于 1975 年提出<sup>[6]</sup>, 其原理为通过成像系统或直接采用胶片<sup>[6]</sup>, 对

\* 钱伟长推荐.

白光照射的物体进行加载前后两次曝光, 则像面胶片上可以记录两套物表面人为制作的散斑图样, 用相干光照射处理后的胶片, 根据夫琅和费衍射原理或付里叶变换原理, 可以通过全场滤波或点滤波分别得到全场等值线和杨氏干涉条纹图, 注意到它们的密度, 变化和方向, 就可以求得被测物体的位移的大小和方向. 本文采用错配白光散斑法, 使它能够在测量物体动态小变.

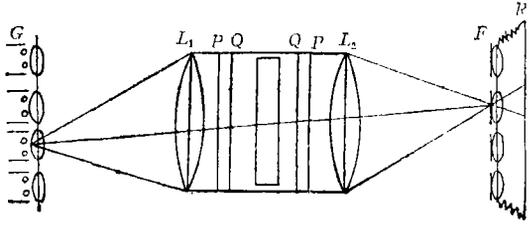


图 1

### 1. 动态光弹仪

本文采用的动态光弹仪为国产 WZDD-1 型, 其光学记录装置如图 1 所示, 图的左端是 16 个排成方阵的火花放电器 (图中仅画了四个), 用作闪烁照明的光源, 右端是 16 个镜头方降组成的照相机, 中间是偏振片 ( $P$ ) 和  $1/4$  波片, 下为光学滤波片, 两侧是视场镜  $L_1$  和  $L_2$ , 火花方阵平面位于  $L_1$  的前焦面, 相机镜头的入瞳平面与  $L_2$  的后焦面重合, 各个相机镜头的入射光瞳与火花一一对应. 相机镜头调焦到使被照明的模型成像在感光底片  $R$  上, 当火花放电器依次放光时, 则散斑图或光弹条纹图依次记录下来.

### 2. 错配原理

由于 WZDD-1 型动光弹仪上的照相机镜头的分辨率只有 10 线/毫米, 加上视场镜的象差产生弥散斑, 使得记录小变形有困难.

为了解决这个关键问题, 采用错配原理, 令  $d$  为被测物体上某点的位移,  $d_x, d_y$  分特为  $x, y$  方向上的位移分量,  $\theta$  为位移矢量  $d$  与  $x$  轴的夹角, 则有以下式.

$$d^2 = d_x^2 + d_y^2 \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d_y}{d_x} \quad (2.2)$$

当  $d$  小于动光弹仪相机镜头分辨率时, 就不能被测得. 现在令  $\delta x = d_{\min}$  为相机镜头分辨率所能测得的最小位移, 它可以计算出来. 在采用两次曝光记录信息时, 可以在加载第二次曝光之前, 使被测物体附加水平  $x$  方向的刚体位移  $\delta x$ , 这时式 (2.1)(2.2) 可以改写成为如下:

$$d^2 = (d_x + \delta x)^2 + d_y^2 \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d_y}{d_x + \delta x} \quad (2.4)$$

当采用点滤波方法提取信息时, 有以下式:

$$d = \frac{L\lambda M^{-1}}{e} \quad (2.5)$$

$$d_x = \frac{L\lambda M^{-1}}{e_x} \quad (2.6)$$

$$d_y = \frac{L\lambda M^{-1}}{e_y} \quad (2.7)$$

式中 $L$ 为散斑图到观察屏的距离,  $\lambda$ 为照明光波波长,  $e$ 为杨氏条纹的间距,  $e_x, e_y$ 分别为杨氏条纹在 $x, y$ 轴方向上的间距.  $M$ 为镜头的放大倍数. 这样由式(2.3)~(2.7)就可以测量小于镜头分辨率的位移了. 例如当 $d_y/(d_x + \delta x) = 0.1$ 时,  $\theta = 5.8^\circ$ ,  $d_x \ll \delta x$ , 这个 $\theta$ 角是完全可以测量出的, 而此时测得的 $d_y$ 小于镜头分辨率的0.1倍, 就是说灵敏度提高10倍, 当然可以测得的角度 $\theta$ 越小, 则灵敏度的提高就越大. 这样的灵敏度提高, 根据镜头的分辨率可知, 完全可以进行动态小变形的测量.

### 3. 材料参数的求解

由动光弹的光学应力定律有下式,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf_\sigma}{h} \quad (2.8)$$

式中 $n$ 为光弹等色线级数,  $f_\sigma$ 为材料动态条纹值,  $h$ 为材料的厚度. 当材料处在线弹性时, 由虎克定律有式(2.9)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \quad (2.9)$$

式中 $\mu$ 为泊松比,  $E$ 为弹性模量. 如果在被测物体上能找到自由边界, 那么在平面问题时就有 $\sigma_x$ 或 $\sigma_y$ 为零, 令 $\sigma_x = 0$ , 由式(2.9)可得下式

$$\varepsilon_x = -\mu\varepsilon_y \quad (2.10)$$

在此情况下,  $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 就是主应力, 由式(2.9)和(2.10), 式(2.8)变成式(2.11)、(2.12).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_y - \sigma_x = \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y - \mu^2\varepsilon_y) = E\varepsilon_y \quad (2.11)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_y = \frac{nf_\sigma}{h} \quad (2.12)$$

由固体中的应力波传播原理可知, 应力波的膨胀波速 $c_1$ 与材料的弹性模量 $E$ 与泊松比有下列关系

$$c_1 = \left( \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$c_1 = \frac{\Delta s}{t} \quad (2.14)$$

式中 $\rho$ 为材料质量密度,  $\Delta s$ 为光弹等色线在 $t$ 时间内的传播距离.  $\Delta s, t, \varepsilon_x, \varepsilon_y$ 可以测得, 因此, 根据式(2.10)~(2.15)就可以在进行应力应变分析的同时, 测得材料参数 $E, \mu, f$ , 而不用在实验之前进行特别的标定求得 $E, \mu, f$ , 使实验简化.

## 三、实验验证

实验试件: 环氧树脂光弹性材料, 矩形板中心开圆孔, 尺寸如图所示(单位: 厘米), 厚度0.8厘米, 底边固支.

加载方式: 落锤冲击中心加载, 如图2所示, 落锤质量487克, 高度22厘米.

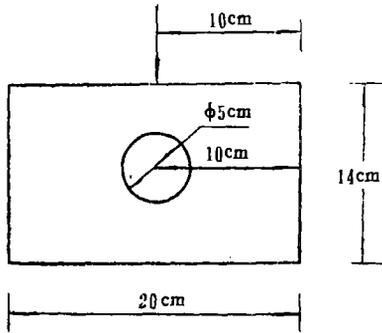


图 2

由虎克定律可得

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \mu} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{\frac{1}{2}}$$

由动态光力学定律可得

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf\sigma}{h}$$

这样对于不同的点  $i$  有

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_i = \frac{E}{1 + \mu} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]_i^{\frac{1}{2}}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_i = \frac{n_i f \sigma}{h}$$

因此有,

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]_i^{\frac{1}{2}}}{[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]_j^{\frac{1}{2}}} \quad (3.1)$$

由散斑条纹图及式(2.6)(2.7)可以差分求得  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ , 再结合动光弹等色线条纹级数  $n$ , 由式(3.1)可以进行对比验证, 而消除  $E, \mu, f$  值标定带来的误差影响. 本文取三点进行对比验证, 取点见图 4, 结果见表 1, 令

$$[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2]^{\frac{1}{2}} = A_i.$$

图 1 所示光路为明场,  $n_1=1.5, n_2=2.5, n_3=3.5$  (级)

**实验 2** 实验试件, 加载过程同 1. 但此时进行主观散斑记录, 16 只火花发光, 记录 16 张散斑图. 记录底片装入图 1 所光路的照相系统的暗箱里, 在第二次加载曝光之前, 给试件来个刚体平移  $\delta x$ ,  $\delta x=250\mu\text{m}$ . 这里为了得到较密的条纹, 取  $\delta x > d_{\min}$ . 由图 5 中所示的实验照片. 注意在这个实验中, 要把图 1 中的  $1/4$  入波片 Q 取掉.

可以看出, 杨氏条纹的密度与方向随着点滤波在散斑图上取点的不同而改变, (根据前面公式(2.3)(2.4)可知, 主要变化表现在方向上), 在同样的取点上, 又随着载荷的时间不因而变化. 取主观散斑图  $540\mu\text{s}$  时得到的位移与客观散斑图  $540\mu\text{s}$  时得到的位移进行比较, 仍然取三点, 取点见图 6 所示, 结果见表 2. 刚体位移跟踪得  $y$  轴刚体位移  $\delta y=30\mu\text{m}$ .

**实验 1** 以环氧树脂作为透明试件, 将试件打毛抛光, 作人工斑化的处理, 放入图 1 所示光路. 由于对称试件, 对称加载, 这样可以结合动光弹方法, 把照相底片的一角固定在试件的右半部上, 在冲击载荷延时  $540\mu\text{s}$  (微秒) 进行信息记录, 这样就可以分别得到一半部客观散斑图, 一半光弹等色线图.

由图 3 中的点滤波提取信息的实验照片可以看出, 杨氏条纹的密度与方向, 都在随着激光照射在散斑图上的取点不同而变化. 照片中的一条直黑线为重垂  $y$  轴, 坐标基线. 点滤波时, 观察屏到散斑图的距离为  $L=80\text{cm}$ .

表 1

点号 $j$	2	3
$n_1/n_j$	0.6	0.429
$A_1/A_j$	0.64	0.469
相对误差(%)	6.6	9.4

客观散斑杨氏条纹图  $t=540\mu s$

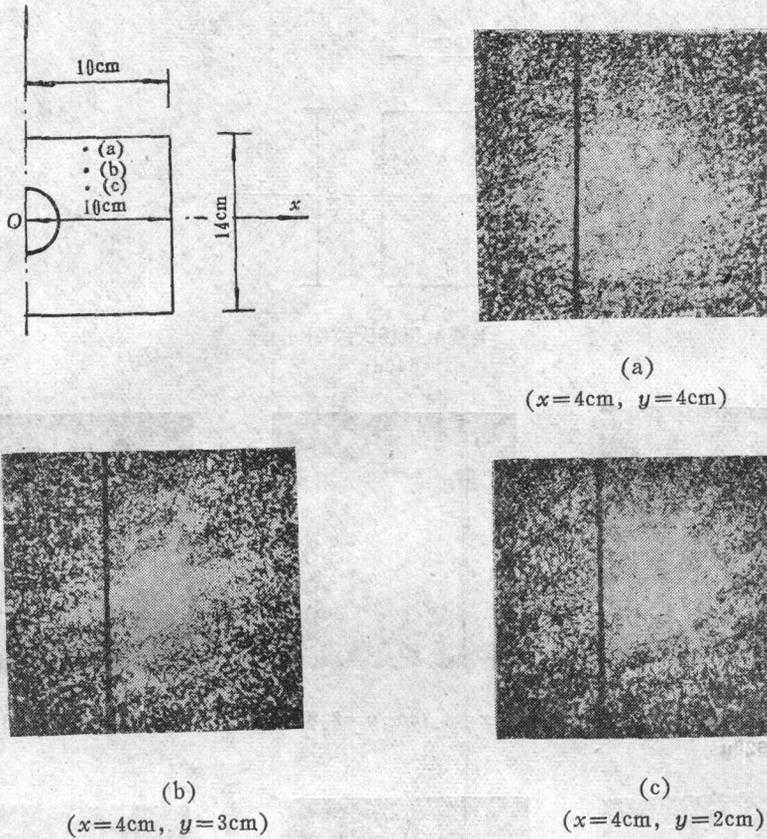


图 3

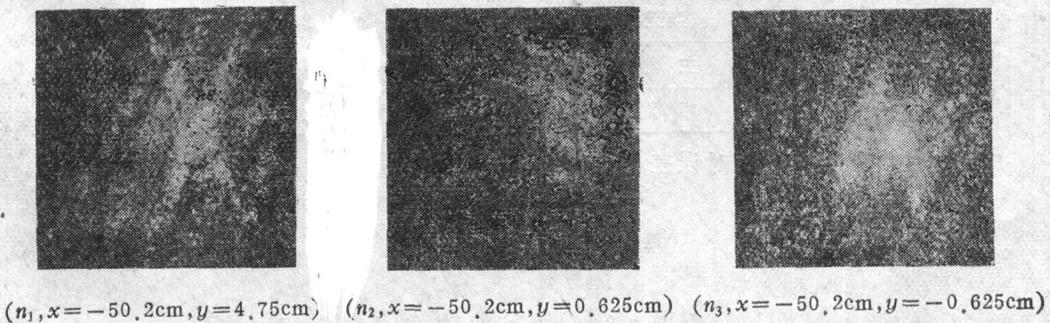
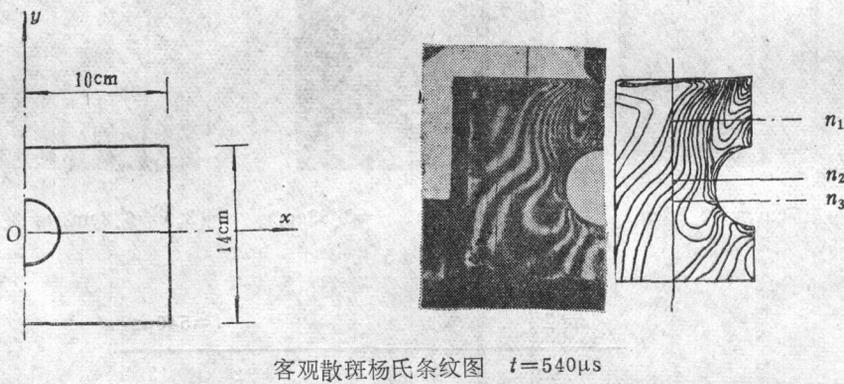
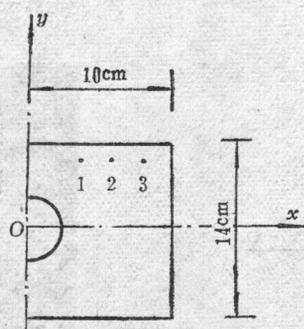
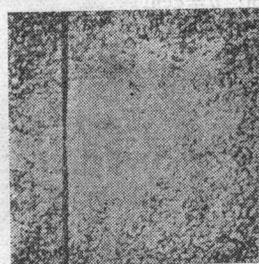


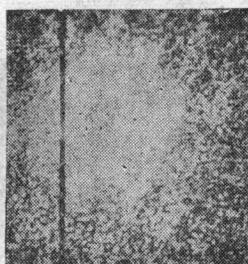
图 4



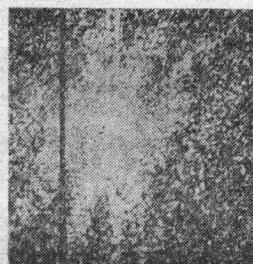
主观散斑杨氏纹图  
 $t=540\mu\text{s}$



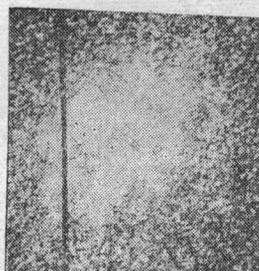
(1,  $x=3.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )  
 $t=620\mu\text{s}$



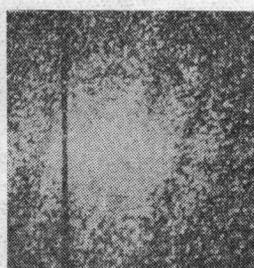
(2,  $x=4.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )



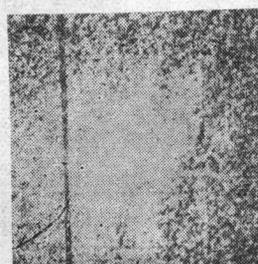
(3,  $x=6.2\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )



(1,  $x=3.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )



(2,  $x=4.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )



(3,  $x=6.2\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )

图 5

表 2

$t=540\mu\text{s}$

点 号	1	2	3
客观散斑位移 $d_y(\mu\text{m})$	126.6	101.2	75.5
主观散斑位移 $d_y(\mu\text{m})$	114.7	99	82.1
相对误差 (%)	9.4	2.2	8.7

由上面的实验可知, 相对误差小于10%。

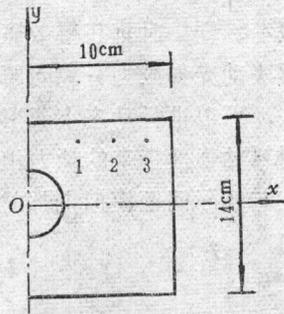
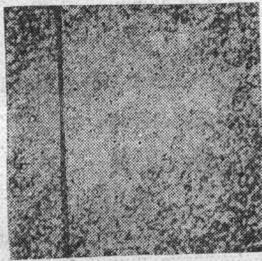
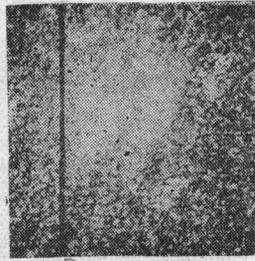
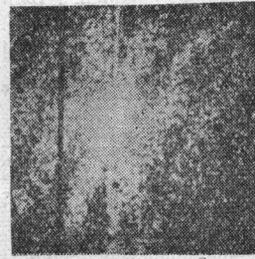
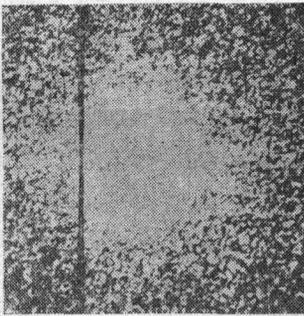
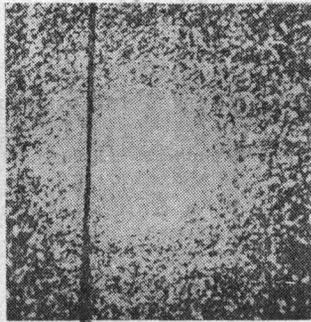
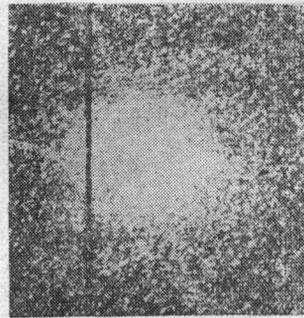
主观散斑杨氏条纹图  $t=540\mu\text{s}$ (1,  $x=3.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )(2,  $x=4.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )(3,  $x=6.2\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )客观散斑杨氏条纹图  $t=540\mu\text{s}$ (1,  $x=3.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )(2,  $x=4.7\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )(3,  $x=6.2\text{cm}, y=3.83\text{cm}$ )

图 6

#### 四、结论与讨论

用本文提出的方法,可以测量小于WZDD-1型动光弹信照相镜头分辨率的动态位移,相对误差在10%之内,满足工程上的要求。在一般情况下,WZDD-1型的照相镜头的分辨率在10线/毫米以上,这样就可以进行动态小变形的测量。如果可测角 $\theta$ 越小,则灵敏度提高越大,如果镜头的分辨越高,那么可测得的位移就越小。采用50线/毫米的镜头, $\theta$ 角仍为文中例子中的 $5.8^\circ$ ,则最小可测位移达 $2\mu\text{m}$ 。

用本文提出的方法,可以实现同一模型,记录散斑图和光弹等色线图,这样就可以在应

变分析的同时,得到被材料的参数  $E$ ,  $\mu$  和  $f$ ,使得实验简化。如果对图 1 所示光路做些改进,则可以实现同一模型、同一载荷、同一时刻获得散斑图和光弹等色线图。

用本文提出的方法,还可以解决动光弹应力分离问题,详细论述请见参考文献[5]。

综上所述,用本文提出的方法,可以进行动态小变形的测量,这样就可以使用高弹模的材料进行实验,避免了由低弹模材料粘弹性带来的动力相似性困难的问题。这样使得动态应变,应力分析,在定量计算上,在与实际问题模拟上都前进了一步。

李公宇同志参加了本项实验工作。

### 参 考 文 献

- [1] 韩雷、伍小平、苏先基,用多火花照相系统测量动态变形的白光散斑法,第四届中国实验应力分析学术会议论文(1984)。
- [2] 郭靖华、王祥林,应用云纹法测量瞬变形态,第三届中国实验应力分析学术会议论文(1982)。
- [3] 王祥林、郭靖华,测量位移的白光散斑法,第三届中国实验应力分析学术会议论文(1982)。
- [4] Forno, C., *Laser Speckle and Its Application*, London Press (1977)。
- [5] 曹正元、胡德敬、方如华、陈方,动态应力分离实验新方法,第四届中国高速摄影与光子学学术会议论文(1985)。
- [6] Forno, C., *Optics and Laser Technology* (1975), 217—219。

## Measurements for Dynamic Deformation by Mismatch with Speckle Method

Chen Fang Cao Zheng-yuan Fang Ru-hua Chen Ping-ping

(Laboratory of Photo-Mechanics, Department of Engineering

Mechanics, Tongji University, Shanghai)

### Abstract

This paper presents a simple method for measurements of dynamic deformation by mismatch white speckle method using dynamic photoelastic device. The method can be used to measure not only large dynamic deformation<sup>[1]</sup>, but also small dynamic deformation. By combining with dynamic isochromate pattern, the elastic modulus, Poisson's ratio and dynamic material fringe value of the material measured can be obtained by the method.