

测试方法

# 基于数字图像分析的薄板成形应变场测量方法

王 勇, 陈光南, 罗耕星

(中科院力学研究所表面改性实验室, 北京 100080)

**摘 要:** 对薄板成形应变场传统的测量方法进行了研究, 指出了其不足和误差的来源, 提出了数字图像分析法测量薄板成形中的应变场, 对测量原理、新的测量方法对传统方法的改进, 以及如何降低误差进行了介绍, 指出数字图像分析法的前景, 提出了改进意见。

**关键词:** 应变; 应变场; 数字图像; 图像处理

**中图分类号:** O344      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1001-4012(2002)05-0202-04

## A METHOD BASED ON DIGITAL IMAGE ANALYSIS FOR MEASURING THE STRAIN FIELD OF DEFORMED SHEET

WANG Yong, CHEN Guang-nan, LUO Geng-xing

(Laboratory of Surface Modification, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The traditional method of measuring the strain field of deformed sheet is discussed. The work explores the shortage of the old method. And it gives a method based on digital image analysis to measure the strain field of deformed sheet. The principle of the method is given. It also gives the improvement of the new method. And finally it not only shows the future of the method, but also points out where should be improved.

**Keywords:** Strain; Strain field; Digital image; Image processing

### 1 引言

应变是反映材料的应力-应变行为的一个基本力学参量, 是研究材料塑性变形能力、优化模具设计和薄板成形工艺的重要参数。如汽车覆盖件、飞机蒙皮、家用电器外壳等冲压零件模具的设计与优化, 就需要精确了解工件不同部位的应变情况(即应变场)及其变化。工件尺寸大以及变形复杂, 它的应变场的测量就具有以下特点: 需要小标距测量; 测量工作量大; 变形为曲面变形。所以这就对板材的应变场的测量速度和精度提出了更高的要求。

我们知道材料的应变可表述为真实应变

$$\epsilon_n = \ln \frac{l_n}{l_0} \quad (1)$$

或是工程应变

$$\epsilon_n = \frac{l_n - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $l_n$  ——应变场的每一个标距变形后的长度

$l_0$  ——初始长度(测量前已知的量)

$\epsilon_n$  ——应变场的每一个标距的真实应变

$\epsilon_n$  ——应变场的每一个标距的工程应变

由  $\epsilon_n$  与  $\epsilon_n$  的计算公式可知其为  $l_0$  和  $l_n$  的导出式, 因此试验中我们要测量的物理量是  $l_n$ 。

### 2 网格应变场测量法

网格应变场测量法是测量应变场的一种广泛采用的传统试验方法。它是通过贴膜、印刷或是光刻的方法在被测试件表面附着上一层网格(如图 1 所示), 在拉、胀成形时, 网格与试件一同变形, 通过测量网格的变形参数(大小、方向)就可以得到该试件的变形参量(即应变场)。在测量过程中我们作了如

收稿日期: 2002-02-07

作者简介: 王 勇(1976-), 男, 中科院力学研究所硕士。

下假设: 网格与试件的结合足够好,使得网格能精确反映试件的变形; 将每一个单元格看作是应变场中的一个标距; 每一个单元格的变形是均匀的,它的平均变形量(变形大小、方向)就作为该单元格的变形量; 将每一个变形后的单元格边界曲线看作是在空间的某个平面内; 单元格变形后的图形近似为一个椭圆。用显微镜测量出变形后的每一个单元格的变形量,再分析全部的单元格的变形量就可得到试件的应变场。因为网格的尺寸范围是1~5mm,相对于试件的变形尺寸来说网格较小,以上假设不会对测量造成大的影响。

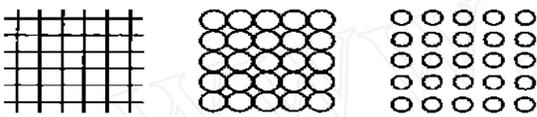


图1 网络的基本形式(方形、圆形)

网格应变场测量法也有其不足的地方,即将三维的变形近似为二维来测量; 测量工具为带有刻度的显微镜,测量网格轮廓中心线在胀形前后的变形量,而轮廓中心线的确定会因人而异,人为误差大; 测量工作量大,后续数据处理繁杂。因此需要一种更精确、高效的测量手段。

### 3 基于数字图像分析网格应变场测量法

随着模式识别技术,特别是数字图像处理技术在传统的变形测量方法中的应用<sup>[3, 5]</sup>,例如:全息干涉法、散斑法、云纹法等方法<sup>[6]</sup>,使得这些测量技术进入了数字化、自动化的时代。传统的网格应变场测量法中的一些不足之处也可以用图像处理的技术来改进。

1989年美国的J. H. Vogel和Lee共同提出了变形表面应力分布自动测量方法<sup>[7]</sup>,在随后的10年中发展为实用的产品。我们正是在此基础上提出了基于数字图像分析的应变场测量法,该方法是应用现代的计算机技术对网格应变场测量法进行改进。它是指通过数字摄像设备(如数码相机或CCD)将物体变形前后的图像转换成数字图像,由计算机做相关的运算,找出两幅数字图像之间的细微差别,从而测出物体的位移、应变等信息。因为它把物体的变形测量转化为数字计算过程,因而避免了传统的“网格应变场测量法中繁琐地对每一个网格的变形参数的测量,既减轻了工作量,又便于实现变形测量整个过程的自动化。而且数字图像分析的方法在

宏、微观结构的变形测量分析中都具有突出的优越性<sup>[1, 4]</sup>,因此我们选用数字图像分析的方法来改进网格法。

基于数字图像分析的应变场测量法是在图像处理技术的基础上提出来的,系统图如图2所示。为了方便运算,在基于数字图像分析的应变场测量法中我们选用了圆形的网格作为试验中网格的形式,并且在原有的假设的基础上对试验作了一些新的假设:椭圆的中心点为图像的几何中心;椭圆的长半轴为中心点到最远点的连线,短半轴为中心点到最近点的连线。以上的假设在网格的大小相对于变形工件较小时成立。我们的任务就是测量出变形后网格的几何参数 $l_n$ ,即测量出椭圆的长轴和短轴。具体的测量方法如下所述。

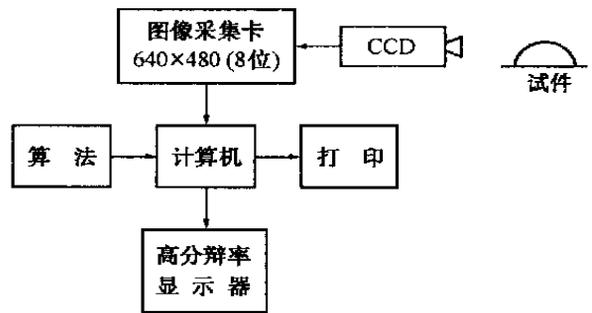


图2 基于数字图像处理的应变场测量系统图

#### 3.1 提取试件的数字化图像

试件经过拉、胀成形试验后,用CCD摄像头来拍摄所需测量部位的图像,通过CCD摄像头连接图像采集卡,可以将采集到的图像转化为位图文件保存到计算机内。试件的数字化图像文件是我们测量的目标,因此图像的质量就关系到测量结果的精确性,因此要选择较高分辨率的CCD和图像采集卡。

#### 3.2 对图像进行预处理

经过图像采集得到的数字化图像,首先需经过平滑滤波除随机噪声。我们所采用的低通滤波器的卷

积核是 
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
。然后,对消除噪音后的图像进

行二值化处理,目的是可以清晰地分辨出网格的轮廓曲线。因此图像的二值化是处理与识别图像中很关键的一个步骤,其效果的好坏直接影响到后续工作。由于胀形成形的试件在拍照时会形成一块高亮度的区域,用普通的直方图法无法得到满意的结果,

本文的二值化算法采用动态阈值法,获得了满意的结果。

### 3.3 长度和方向变化量的识别

在传统的网格应变场测量法中,测量误差在很大程度上是由确定网格轮廓的中线引起的, 网格的轮廓线具有一定的宽度,轮廓的中心不易确定;以边界的距离代替中心线的距离时(如图 3 所示),由于变形造成边界模糊,有时通过边界也不易确定中线长度,而且操作测量者不同,所确定的中线也有差别,造成人为误差较大。本文介绍的方法则是采用图像处理中的骨架化技术(也即细化),自动识别出网格轮廓线的中线。鉴于 OPTA 算法提取骨架后的图像在交叉点处往往细化不全,细化后的线条脊线不光滑,有许多毛刺,且纹线扭曲;对该算法的研究发现,这些均是算法的保留模板的问题,增加保留模板解决了该问题。以下为增加的保留模板,其中 0 和 1 为匹配元素,  $x$  为任意元素。

$x$	1	$x$	0	$x$	$x$	0	0	$x$	$x$	1	$x$
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
$x$	1	$x$	0	$x$	$x$	1	$x$	$x$	$x$	0	0
$x$											
$x$	0	$x$	$x$	$x$	0	$x$	$x$	$x$	0	$x$	$x$
1	1	1	$x$	$x$	1	$x$	$x$	$x$	1	$x$	$x$
$x$	1	$x$	$x$	1	1	0	$x$	0	1	1	$x$
0	0	0	$x$	$x$	0	0	$x$	0	0	$x$	$x$

相对于公式  $n = \ln \frac{l_n}{l_0}$  中的每一个  $l_n$  有两个几何参数  $l_1$  和  $l_2$ ,而提取中线后的网格如图 4 所示,在此基础上可较精确地测量  $l_1$  和  $l_2$  的值。

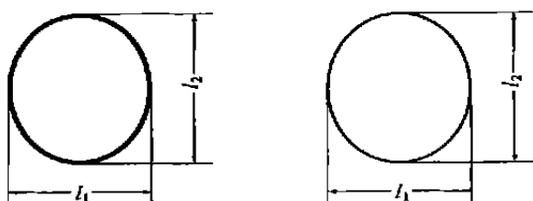


图 3 二值化网格示意图 图 4 骨架化后的网格

细化之后的网格轮廓图像为单像素线,也就是网格轮廓的中心线。由于通过质心的互相垂直的直径是变形的主方向,所以要提取出网格,采用质心算法找出网格的质心。假设网格由  $n$  个像素组成,每个像素的空间坐标为  $(x, y)$ ,灰度为  $g(x, y)$ ,则网格的质心坐标是<sup>[6]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i g(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n g(x_i, y_i)} \\ \bar{y} &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i g(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n g(x_i, y_i)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

用距离公式(2) 求出轮廓上的点与中心点的最大和最小距离  $l_{\max}$  和  $l_{\min}$

$$l = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

则与每一个  $l_n$  相对应的  $l_1$  和  $l_2$  为

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= 2 \times l_{\min} \\ l_2 &= 2 \times l_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

求出直径的伸长量  $l_1$  和  $l_2$

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= l_1 - l_0 \\ l_2 &= l_2 - l_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

计算得到的结果通过一定的当量换算可折算成实际图像的空间尺寸。

### 3.4 定标和当量换算

由数字图像测量实际的空间尺寸,必须对图像采集系统进行标定。方法:在试件处放置已知尺寸的标准模块,测得其在数字图像中对应的像素数  $n$ ,则可得一个像素所代表试件处的空间长度尺寸  $a = \frac{l}{n}$ 。若两点之间像素数为  $N$ ,则对应的空间长度为  $l = aN + b$ ,  $b$  为附加的系统误差。为减少系统误差,可采用多次定标,用最小二乘法来拟合确定  $a$  和  $b$  的值。将测量得到的  $l_n$  分别代入式(1)和式(2)即可得到试件的真实应变场和工程应变场。

### 3.5 平面的长度转换为空间长度

上述测量出来的长度值是球形弧长的平面投影的长度值(即弦长),而胀形试验中球的半径是已知的,通过转换可将其转换为弧长,变平面测量为空间测量,减小了测量方法带来的误差。

### 3.6 误差分析

试验中的系统误差主要来源两个方面,一是实验仪器设备方面(如 CCD 摄像头的分辨率、像素点分布的均匀一致性、A/D 转换的数字量化误差),二是数字图像的处理方法(如轮廓中心的识别、标定方法)。选取适当的实验仪器设备有助于误差的减少,而上述的平滑去噪、质心识别、多次定标等方法,对减小系统误差也具有显著的作用。

## 4 结论

综上所述,应变场的测量方法具有将经典的测量方法与现代的数字图像处理技术相结合的趋势,基于数字图像分析的网格应变场测量法,利用模式识别的成果分析获得的图像数据,达到应变测量自动化的程度。在该方法的基础上,可以解决动态测量应变场的变化;若结合应力-应变关系还可以解决应力场的测量问题。这些也将是作者以后的工作重点。

### 参考文献:

- [1] Chu T C, Ranson W F, et al. Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics[J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25 (3): 232 - 244.
- [2] Lee C, Peters W H, Chao Y J, et al. Improved Digital Image Processing Technique to Investigate Plastics Zone Formation in Steel[J]. *Image and Vision Computing*, 1986, 4(4): 203 - 207.
- [3] 高建新. 变形测量的数字图像相关分析法[J]. *同济大学学报*, 1997, 25(1): 98 - 102.
- [4] 林福严,刘巧静,李兴森. 人脸特征的定位和提取[J]. *电子技术应用*, 2000, 26(7): 17 - 18.
- [5] 潘洁,李叶芳. 一种数字图像测量试验的设计[J]. *物理实验*, 1999, 20(3): 11 - 13.
- [6] 赵清澄,石沅. 试验应力分析[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [7] Vogel J H, Lee D. An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces[J]. *Journal of Material Shaping Technology*, 1989, 6 (6): 171 - 175.
- [8] 刘涛,付霞. 图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社, 1998.

## 信息与动态

由中国机械工程学会主办的中德物流研讨会暨第三届物流工程论坛将于2002年6月12~14日在上海市光大国际酒店召开。

会议宗旨、主要议题、会议特色、演讲专家名单及会议日程安排等具体内容请浏览《材料与测试网》,网址:www.mat-test.com。

由中国机械工程学会和北京机械工程学会联合主办的2002年中国机械工程学会年会将于11月1~5日在北京举行。本次年会的主题为制造业与未来中国。届时中国机械工程学会第八届理事会第二次会议也将在年会期间举行。

构成本次年会活动主体的五个学术会议的组成单元及征文范围和注意事项、年会特邀主题报告名单、年会活动组成单元集萃、年会同期的重要活动等详细内容请浏览《材料与测试网》,网址:www.mat-test.com。

第二届超低碳马氏体不锈钢会议将于2002年10月3~4日在布鲁塞尔召开。

一种新型聚乙烯树脂粘结剂由中科院长春应用研究所研制成功。该产品拓宽了聚乙烯树脂粘结剂的用途。可用于金属、陶瓷和玻璃等材料。

华东理工大学材料科学研究所开发研制出的新型高碳酚醛树脂,具有优良的综合性能,尤其是在复合材料成型工艺温度下粘度及聚合速度均稳定,特别适合新一代热防护复合材料成型工艺。该树脂耐热性能优良,可作为汽车、火车、民航客机的耐高温制动材料树脂基体。

由日本日立研究所与超高温材料研究所合作开发了一种强度提高而韧性不减的不锈钢,该产品采用了粉末冶金技术,即使用机械合金化法将通用的不锈钢——奥氏体不锈钢(SUS304)和铁素体不锈钢(SUS410)加以粉碎,粉末微粒粒经达到200nm,然后在800℃左右的高温下,进行各向同性加压和挤压。与原通过压轧增加强度的方法相比,新产品既增加了强度又保持了原有的韧性。可制造电力、电机、化工等各种设备的管道和连接零件等。

一种可大幅提高普通铸钢性能,延长铸件寿命的新技术已由我国科技工作者研究成功。这种名为双相铸钢技术是在以铁素体为基体的组织中,嵌以孤岛状有较高强度的马氏体,再利用临界区处理技术制成,从而提高铸钢本身的性能。与传统的铸造技术相比,双相铸钢的优点是强度高、寿命长、成本低。