

数字图像分析法在薄板成形应变场测量中的应用

王勇, 罗耕星, 陈光南

(中科院力学研究所表面改性实验室, 北京 100080)

[摘要] 对薄板成形应变场的传统的测量方法进行了研究, 指出其不足和误差的来源, 并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, 新的测量方法对老方法的改进, 以及如何降低误差进行了介绍, 指出了这种方法的前景, 同时提出了改进意见。

[关键词] 应变; 应变场; 数字图像; 图像处理

中图分类号: TG86.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-8446(2002)03-0027-04

Application of Digital Image Analysis for Measuring Stress Field of Deforming Plate

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

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

Abstract: This work explores the traditional method of measuring stress-field of deforming plate, and points out the shortage of the old method. And it gives a method based on Digital Image Analysis to measure the stress-field of deforming plate. 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 points how to improve the method.

Key words: stress; stress field; digital image; image process

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。譬如汽车覆盖件、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。而因为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一个高的要求。

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的变形后的长度;

l_0 ——初始长度(测量前已知的量);

ϵ_n 、 ϵ_n ——分别为应变场的每一个标距的真实应变和工程应变。

由 ϵ_n 与 ϵ_n 的计算公式可知其为 l_0 和 l_n 的导出式, 因此试验中要测量的物理量是 l_n 。

1 网格应变场测量法

网格应变场测量法是应变场测量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上一层网格(如图1所示), 在拉、胀成形时, 网格与试件会一同变形, 通

收稿日期: 2002-02-05

作者简介: 王勇(1976-), 男, 山西侯马市人。主要从事应变测量方法的研究。

过测量网格的变形参量(大小、方向)就可以得到该试件的变形参量(即应变场)。在测量的过程中作了如下假设:网格与试件的结合要足够好,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;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。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。

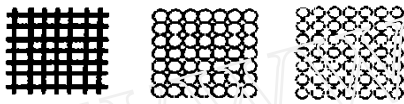


图1 网格的基本形式(方形、圆形)

网格应变场测量法有其不足的地方: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,而轮廓的中心线的确定会因人而异,人为误差影响大;测量工作量大,后续数据处理繁杂。因此我们需要一种更精确、高效的测量手段。

2 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^[1,2],例如:全息干涉法、散斑法、云纹法等方法^[3],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”^[4],在随后的10年中发展为实用的产品。笔者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。由于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”

中繁琐的对每一个网格的变形参数的测量,即减轻了人的工作量,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观、细观和微观结构的变形测量分析中都具有突出的优越性^[4,5],因此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”中选用了方形的网格作为试验中网格的形式。点A为测量点, l_1 、 l_2 为反映该点的应变情况的两个标距(如图3所示)。任务就是测量出变形后网格的几何参数 l_1 和 l_2 具体的测量方法如下。

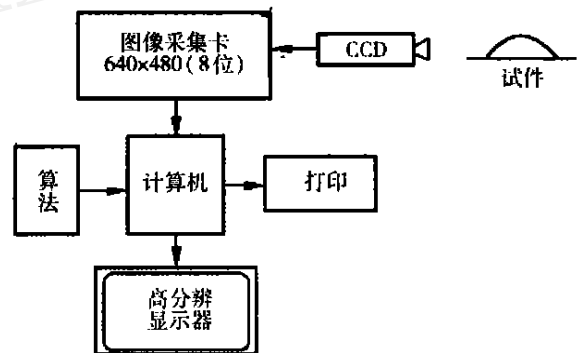


图2 基于数字图像处理的应变场测量系统

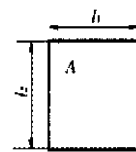


图3 测量单元和测量量

2.1 提取试件的数字化图像

试件经过拉、胀成形试验后,用CCD摄像头来拍摄到所需测量的部位的高分辨率的图像,通过CCD摄像头所连接图像采集卡,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要测量的目标,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。

2.2 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”滤除随机噪声。文中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，目的是可以清晰的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，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区域，用普通的直方图法无法得到满意的结果，文中的二值化算法采用动态阈值法，获得了满意的结果。

2.3 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4所示），由

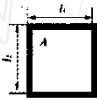


图4 二值化网格示意

于变形造成边界模糊，通过边界有时也不易确定中线长度，而且测量的人不同，所确定的中线就有差别，造成人为误差较大。新方法中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3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。而对该算法的研究发现这些问题是算法的保留模板的问题，增加保留模板解决了该问题。如下为增加的保留模板，其中0、1为匹配元素，x为任意元素。

```

x 1 x 0 x x 0 0
0 1 1 0 0 1 1 0
x 1 x 0 x x 1 x
x x x x x x x x

x x 1 x x 0 x x
0 1 1 0 1 1 1 x
x x 0 0 x 1 x x
x x x x 0 0 0 x
    
```

```

x 0 x x x 0 x x
x 1 x x x 1 x x
1 1 0 x 0 1 1 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 、 l_2 ，而提取中线后的网格如图5所示，在此基础上可较精确地测量 l_1 、 l_2 的值。

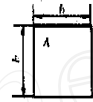


图5 骨架化后的网络

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。对于如图6所示的一组测量点 $A_{i,j}$ ，测得每一个点的坐标为 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ ，由距离

A_{11}	A_{12}	A_{13}
A_{21}	A_{22}	A_{23}
A_{31}	A_{32}	A_{33}

图6 测量点分布

公式(3) 计算得点 $A_{i,j}$ 的两个标距长度 l_1 、 l_2 。

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \sqrt{(x_{i,j} - x_{i,j+1})^2 + (y_{i,j} - y_{i,j+1})^2} \\
 l_2 &= \sqrt{(x_{i,j} - x_{i+1,j})^2 + (y_{i,j} - y_{i+1,j})^2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

求出标距的伸长量 l_1 、 l_2 ：

$$l_1 = l_1 - l_0, \quad l_2 = l_2 - l_0 \quad (4)$$

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。

2.4 定标和当量换算

要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。方法为：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 $a = \frac{1}{n}$ 。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。将测量到的 l_n 分别代入公式

(1) 和 (2) 即可得到试件的真正应变场和工程应变场。

2.5 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。

2.6 误差分析

试验中的系统误差主要来源两个方面: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);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,而前面所述的平滑去噪、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。

综上所述,应变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,利用模式识别的结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。再结合应力-应变关系还可以解决应力场的测量问题。

[参 考 文 献]

- [1] 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, (1) :98 - 102.
- [2] 潘洁, 李叶芳. 一种数字图像测量试验的设计[J]. 物理实验, 1999, (3) :11 - 13.
- [3] 赵清澄, 石沅. 试验应力分析[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [4] Lee C, Peters W H, Chao YJ, et al. Improved digital image processing technique to investigate plastics zone formation in steel[J]. Image and Vision Computing, 1986, (4) :203 - 207.
- [5] 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, (7) :17 - 18.

(上接第 4 页)

力,见图 7。图中 $m = 1.0$ 的曲线即为平底模的情况, m 取其他值的曲线即为流线模内各种润滑情况的相对应力曲线。使挤压力最小的变形区长度 h_{opt} 即为流线型凹模合理型腔深度。由此可知,只要润滑良好,流线模挤压力小,不均匀变形减弱,对改善产品质量,提高模具寿命都是有利的。

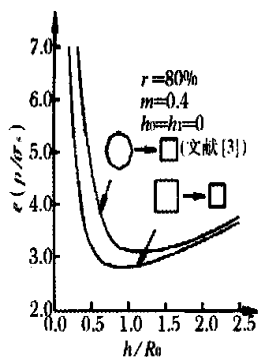


图 8 相对挤压力的比较

8 计算结果与其他结果的比较

为了证明文中所提出的上限解的可行性,将它与 J. S. Gunasekera 等人提出的由圆形毛坯挤压正方形工件的上限解^[3]进行比较,见图 8。在相同挤压比下,按照文中计算的由方形毛坯挤压方形工件的挤压力略小于文献[3]的计算结果,考虑到两者的毛坯形状不一样,相似形挤压所消耗的剪切力会

稍小一些,所以可以证明文中所述的结果是可取的。

9 结论

(1) 提出了由矩形毛坯挤压矩形出口截面的等挤压比流动模型,推导出了流线方程、挤压变形区的动可容速度场、应变速率场及上限功率的计算公式,并利用高斯积分法得到了挤压力的数值解。

(2) 矩形截面工件挤压时,截面的长宽比 a/b 越大,挤压力也越大。得到了相同挤压比下任意矩形工件挤压与正方形工件挤压的挤压力关系式。

(3) 根据流线方程所设计的挤压凹模,其挤压力小,不均匀变形减弱,对改善产品质量、提高模具寿命都是有利的。

[参 考 文 献]

- [1] Jia Lili, Gao Jinzhang. An upper bound analysis for extrusion of splines[A]. Advanced technology of plasticity - Proc. of 4th ICTP[C]. Beijing:1993. 582 - 585.
- [2] 贾俐俐, 高锦张. 实心铝型材挤压导流模应用研究[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(2) :66 - 69.
- [3] J S Gunasekera, S Hoshino. Analysis of polygonal sections through streamlined dies[J]. Journal of engineering for industry, 1985, (107) :229 - 233.