文章编号:1001-4888(2017)04-0506-11

基于 DIC 方法的残余应力快速测量系统*

宋秋，李晓星，杨岩峰
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘要：结合数字图像相关(Digital Image Correlation，DIC)方法与钻孔法，开发了残余应力快速测量系统。该系统可分为两部分：适用于现场测量的便携式机械系统与针对残余应力测量而改进的基于 DIC 算法的程序。在四点弯曲加载平台上对工件进行载荷释放前后的残余应力测量试验，通过与应变片测量结果进行对比，该残余应力测量系统的精度达到了应变片测量的同等精度。同时，该测量系统解决了传统应变片测量系统对心误差大、操作繁琐、效率低和测量结果稳定性差等问题，具有较高的工程应用价值。

关键词：数字图像相关；钻孔法；残余应力；机械系统；算法程序
中图分类号：O348.1 **文献标识码**：A DOI：10.7520/1001-4888-16-144

0 引言

在零件的制造过程中，为了控制加工变形，需要控制毛坯的残余应力水平。因此首先要了解残余应力分布情况，根据残余应力的分布采用合适的加工工艺，避免或减少应力突然释放和不均匀释放造成的工件变形。近年来国内外许多学者对残余应力测量方法进行了大量研究[1-4]，对于零件加工工艺优化以及确保零件的安全性与可靠性方面都有着非常重要的意义。

目前，对残余应力的研究主要采用两种方法：一种是利用数值计算的方法对残余应力进行模拟计算，另一种是通过实际测量来获得残余应力的大小及分布。残余应力的测量技术概括起来可以分为两大类：具有一定损伤性的机械释放测量法和无损的物理测量法。

机械释放测量法的原理是用机械加工的方式将零件一部分去除，释放部分或全部残余应力而产生应变。测量这部分应变的大小，通过力学分析就可以推算出残余应力的大小[5,6]。机械测量方法主要包括截条法、逐层剥层法、Gunnert 切铣环槽法、钻孔法。机械法测量残余应力需要首先释放残余应力，这就需要对工件局部分离或分割，从而会对工件造成一定的损伤或破坏。但机械法理论完善且技术成熟，目前在残余应力现场测试中广泛应用，其中尤以钻孔法的破坏性最小。

物理测量法的原理是测量材料中残余应力释放过程引起的某种物理量的变化值，建立起该物理量与残余应力或应变的关系，来计算残余应力的大小[7-9]。物理方法主要有 X 射线法、超声法和磁性法。这些方法均属于无损检测法，对工件不会造成破坏。其中 X 射线法使用较多且比较成熟，被认为是物理测量法中较为精确的一种测量方法。但是物理测量法的测量设备复杂，对测量环境要求较高，而且仅能测量浅表层残余应力，在工程现场的实测时有较大局限性。

测量残余应力的一个关键环节就是测量残余应力释放过程中的应变，传统方法是通过粘贴应变片测量，而目前比较热门的是非接触式变形测量。非接触式变形测量方法中主要包括数字图像相关方法(Digital Image Correlation，DIC)、云纹干涉法和电子散斑干涉法。云纹干涉法和电子散斑干涉法的测

* **收稿日期**：2016-08-09；**修回日期**：2016-12-04
通讯作者：李晓星(1953—)，男，博士，教授。主要从事板料成形与检测技术研究。Email：li.xiaoxing@buaa.edu.cn

量精度非常高，但这些方法的测量光路（以及云纹干涉法的制栅技术）较为复杂并且测量通常只能在实验室暗室中的光学隔振平台上进行[10]。此外，测量结果以条纹图的形式呈现，需对条纹图进行分析才能获得变形信息，实验结果可视化较差。与上述两种方法比较，基于数字图像相关的 DIC 方法则更适合进行工程现场测量。DIC 方法具有如下优点：光路简单，不需要特殊的光学仪器，可以使用白光甚至环境光做光源；对测试环境要求较低，受外界影响小，便于工程现场应用；测量范围大，灵敏度高，可以实现全场测量。

1　钻孔法测量残余应力

1.1　钻孔法原理

美国材料试验协会于 2008 年颁布了最新的钻孔法测量残余应力的 ASTM 标准[11]，并于 2009 年做了少量修正。钻孔法是由 Mather 于 1934 年提出的，经过 Soete 和 Vancombrugge 等人的发展，具有很高的检测精度。钻孔法作为一种局部破坏性残余应力测量方法，利用钻孔使构件中的残余应力得到全部或部分释放，根据释放应变和释放方法求出相应的残余应力大小[12]。近些年来在钻孔法的基础

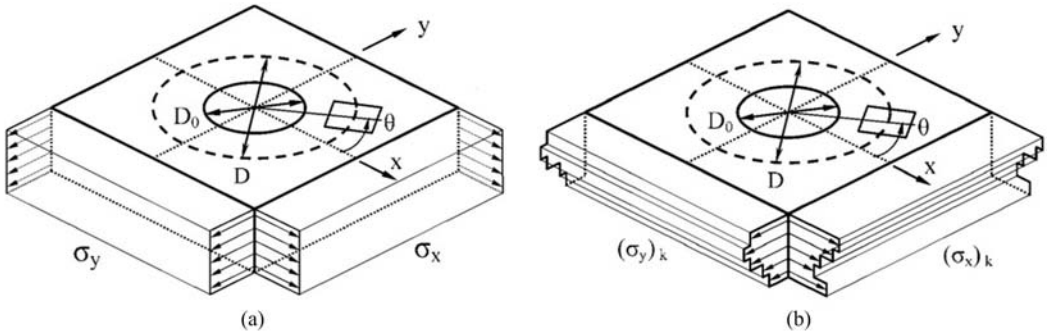


图 1　钻孔尺寸与残余应力示意图

Fig. 1　A schematic illustration of drilling size and residual stress

上，学者又发展起来盲孔法，把钻孔法中将试件钻透的过程改为不钻透，降低了试件的受损程度[13,14]。工件上的测量点应选择在一个平坦的表面，同时应该注意避开工件边缘或其他不规则物体。该方法假设应力在 $x-y$ 平面分布是均匀的，图 1 显示了钻孔后测量点部位的应力分布情况。在图 1(a)中，工件内的残余应力沿孔深方向是一致的，$x-y$ 平面内的应力有 σ_x、σ_y 和 τ_{xy}。可采用这种方式测量薄工件内的均匀残余应力，对于厚工件内的均匀残余应力也可以采用该方式。图 1(b)中，工件内部残余应力沿孔深方向上大小是变化的。该方法将其描述成阶梯状应力分布，在钻孔过程中每一个深度增量对应一个深度梯度。在第 k 个深度梯度内的平面应力有 $(\sigma_x)_k$、$(\sigma_y)_k$ 和 $(\tau_{xy})_k$。可采用这种方式测量厚工件内的非均匀残余应力。

钻孔法钻孔过程中会产生加工应变，加工应变会影响残余应力的释放，所以钻孔法中残余应力计算公式引入了应力标定常数 A、B 来进行计算。根据钻孔方式的不同，应力标定常数可以通过实验或者有限元分析获得。其中，高速钻的加工应变很小，应力标定常数可以完全依据柯西公式的有限元分析得到。低速钻的加工应变比较大，不能忽略，应力标定常数要通过综合性的标定实验得到。

利用图 2 所示的应变花采集钻孔后的释放应变 ε_1、ε_2 和 ε_3，再基于线弹性理论[15,16]公式可以计算出原先在孔洞位置上的残余应力，释放应变的大小取决于孔内材料原始的残余应力。根据测得的释放应变 ε_1、ε_2 和 ε_3，按式(1)、式(2)和式(3)计算组合应变：

$$p=\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_3}{2} \tag{1}$$

$$q=\frac{\varepsilon_3-\varepsilon_1}{2} \tag{2}$$

$$t=\frac{\varepsilon_3+\varepsilon_1-2\varepsilon_2}{2} \tag{3}$$

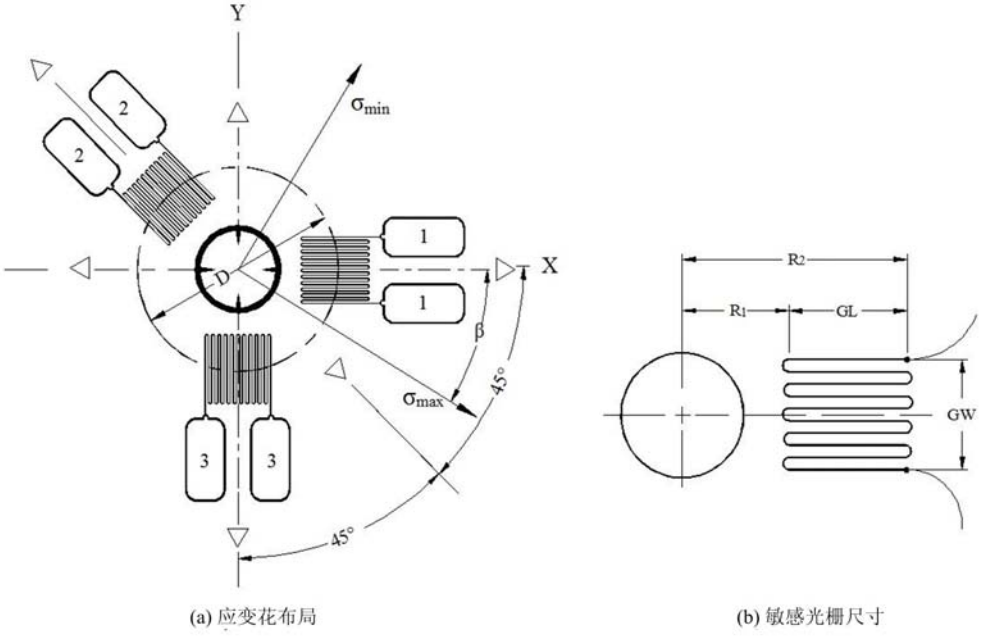


图 2 典型三向应变花的布局与尺寸示意图

Fig. 2 A schematic illustration of typical strain rosettes distribution and size

将组合应变 p、q 和 t 代入式(4)、式(5)和式(6)分别计算三个组合应力 P,Q 和 T:

各向同性(等轴)应力:
$$P=\frac{\sigma_y+\sigma_x}{2}=-\frac{Ep}{A(1+\nu)} \tag{4}$$

45°方向切应力:
$$Q=\frac{\sigma_y-\sigma_x}{2}=-\frac{Eq}{B} \tag{5}$$

$x-y$ 方向切应力:
$$T=\tau_{xy}=-\frac{Et}{B} \tag{6}$$

式中,E 为被测试件材料的弹性模量;ν 为材料的泊松比;A 为各向同性应力标定常数;B 为切应力标定常数。A、B 的数值与孔径大小、钻孔速度和应变花类型有关。

按公式(7)、公式(8)和公式(9)分别计算平面笛卡儿坐标系下应力值 σ_x,σ_y 和 τ_{xy}:

$$\sigma_x=P-Q \tag{7}$$

$$\sigma_y=P+Q \tag{8}$$

$$\tau_{xy}=T \tag{9}$$

根据式(10)计算主应力 σ_{max}和 σ_{min}:

$$\sigma_{max,min}=P\pm\sqrt{Q^2+T^2} \tag{10}$$

如图 2 所示,最大拉伸(或最小压缩)主应力 σ_{max}位于从 1#敏感栅方向顺时针转过 β 角的方向。与此类似,最小拉伸(或最大压缩)主应力 σ_{min}位于从 3#敏感栅方向顺时针转过 β 角的方向。按公式(11)计算 β 角:

$$\beta=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \tag{11}$$

1.2 应变片测量的缺点与 DIC 方法分析

工程中利用应变片结合钻孔法,通过应变测量仪测量残余应力,测量结果基本能够满足工程上对残余应力的测量精度需要。但应变片容易受到温度、电磁环境和粘贴技术的影响,对测量环境和操作者的要求较高。另外应变片与被测试样表面直接接触,会对被测材料有一定的强化作用,从而导致测量精度有所降低。再者,应变片测量需要连接应变仪,钻孔时需要精确对准应变花中心点,实验准备时间较长效率低。因为应变片是一次性使用,测量结果的一致性受到应变片性能差异的影响。

为了改进残余应力测量系统，近年来在检测中用 DIC 方法取代传统的应变测量仪越来越得到重视。与应变片测量相比，DIC 方法有如下优点：

1）不改变被测试样表面力学性能，提高了测量准确性；

2）不需要粘贴一次性使用的应变片，准备所需时间短、效率高、测量成本低；

3）能进行全场测量，数据处理便于进行统计计算；

4）根据实际孔提取圆心，解决了应变片测量钻孔对中误差问题；

5）不存在应变片之间个体性能差异，提高了结果稳定性。

然而，现有的基于 DIC 方法的残余应力测量系统，如一种实时残余应力测量系统及方法（中国发明专利申请公开说明书 CN201010587490）与残余应力测量装置（中国发明专利申请公开说明书 CN200820090081.9），虽然在一定程度上简化了应变片测量的步骤，但此类系统和方法的设备复杂，不适用于工程现场的残余应力测量要求。因此，有必要开发一套适用于工程现场的残余应力快速测量系统，以满足在工程现场高精度、快速可靠的残余应力测量需求。

2　残余应力快速测量系统

2.1　DIC 原理

数字图像相关方法（DIC）是对全场位移和应变进行量化分析的非接触光测实验力学方法。最早于 20 世纪 80 年代初由美国 W. H. Peter，W. F. Ranson 与日本 I. Yamaguchi 等人同时独立提出。近年来，国内外学者对 DIC 方法进行了大量研究[17-20]。与传统的光学测量方法相比，它是利用灰度信息的相关统计性匹配，搜索变形前后的散斑图像的测量点，从而实现对面内位移与应变的测量。图 3 是典型的数字散斑相关方法二维测量系统示意图。

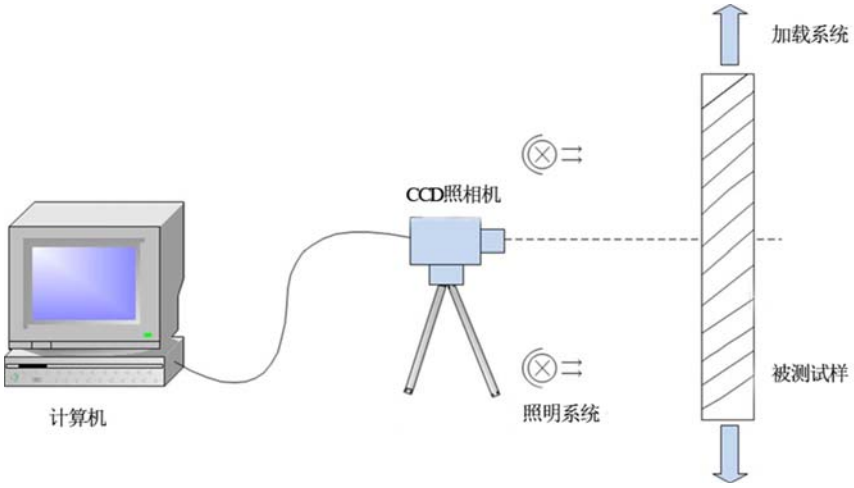


图 3　典型的数字散斑相关方法二维测量系统示意图

Fig. 3　Typical two-dimensional DIC optical image capture system

DIC 方法已经广泛应用于表面变形测量，作为一种基于数字图像处理和数值计算的光测方法，它通过处理不同状态下被测物体表面的两幅数字图像直接获得各感兴趣区域（Region of Interest，ROI）内像素点的位移信息。通常将变形前的数字图像称为参考图像，将变形后的数字图像称目标图像。其基本原理如图 4 所示，在参考图像中取待求像素点 $P(x_0, y_0)$ 为中心的 $(2M+1)\times(2M+1)$ 像素大小的矩形作为参考图像子区，在目标图像中通过一定的搜索方法按预先定义的相关函数进行相关计算，寻找与参考图像子区互相关系数最大，并以 $P'(x'_0, y'_0)$ 为中心的目标图像子区，以确定 $P(x_0, y_0)$ 点在 x 和 y 方向上的位移分量 u 和 v。

2.2　机械系统

为了实现残余应力快速测量的特点，满足工程现场实测需求，重点将测量系统设计成为轻巧便携式。根据 GB/T31310－2014《金属材料残余应力测定钻孔应变法》标准要求，当采用低速钻孔时，常用

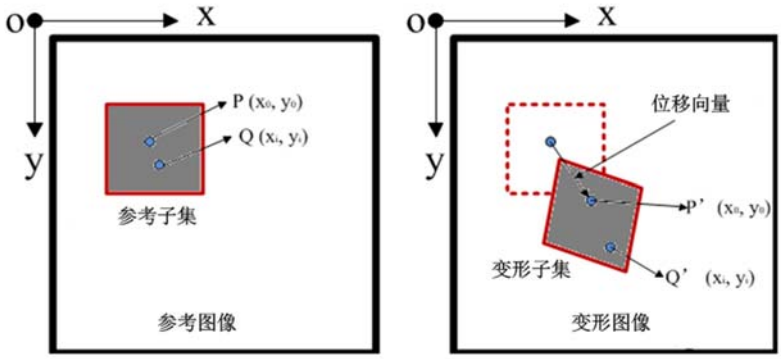
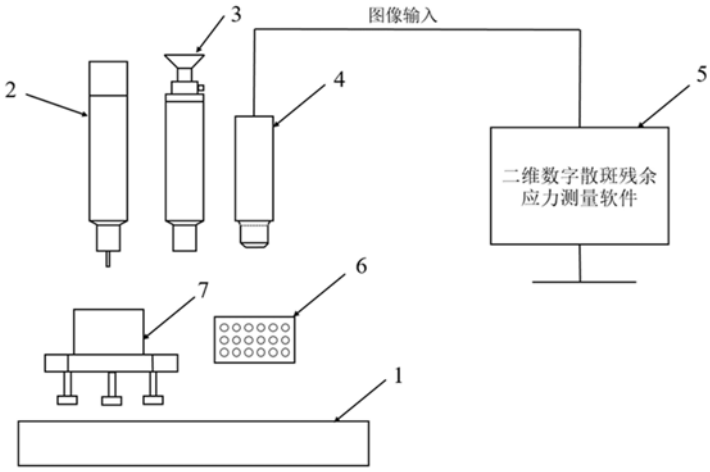


图 4 变形前参考子集与变形后目标子集原理示意图

Fig. 4 A schematic illustration of a reference square subset before deformation and a target subset after deformation

钻孔刃具为直径 1.5mm 或者 2.0mm 的麻花钻头,钻速为 1500～3000r/min 的传统手电钻。

该测量系统中采用博世公司生产的 TBM3400 型专业手电钻,额定转速 0～2500r/min,满足国标要求。在机械测量系统中最重要的组成部分就是 CCD 照相机,相机与镜头的选取很大程度上决定了残余应力测量系统的精度。根据测量精度要求与经济性,残余应力测量系统最终选用大恒公司的 300 万像素分辨率相机与 Computar 公司的 MLM3X-MP 型号镜头,该镜头工作距离 90mm,放大倍率可调。图 5 所示为残余应力测量系统机械组成部分示意图。由于在钻孔前后需要两次放置照相机,为了定位方便,在 CCD 照相机外固连一个套筒,套筒与三角支架之间采用 C 型平键定位,键与键槽采用间隙配合,定位精度 0.1mm。



1－残余应力试件;2－钻孔装置;3－电动推杆;4－CCD 照相机;
5－有“二维数字散斑残余应力测量软件”的计算机;6－圆形方阵标定板;7－带有磁性三角支架固定平台

图 5 残余应力测量系统机械组成部分示意图

Fig. 5 A schematic illustration of the mechanical constructions of DIC system

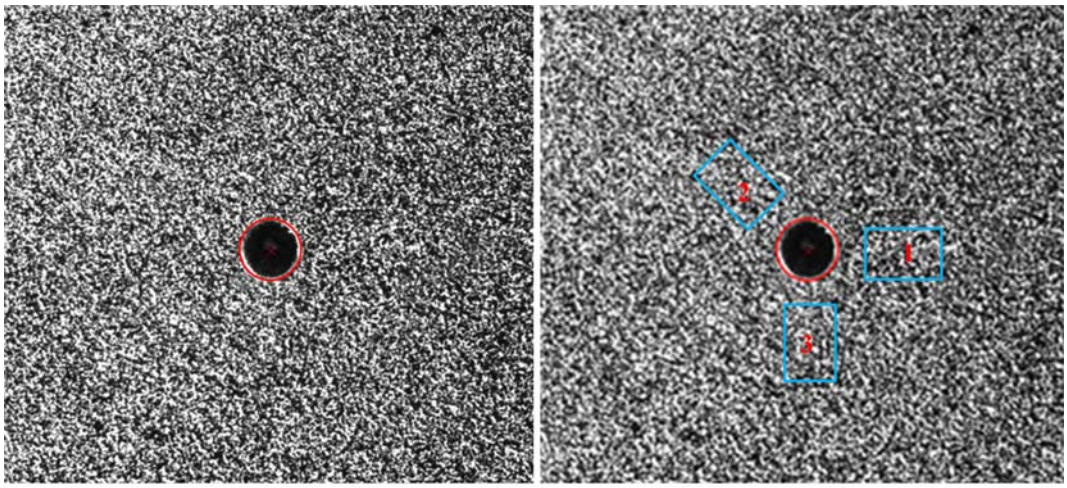
2.3 算法程序

该测量系统的核心部分是通过计算机程序计算得到被测试样表面的位移与应变信息。基于 DIC 方法的残余应力算法程序由四个部分组成:钻孔圆心提取;模拟光学应变片(ROI);变形前后图像匹配;计算被测试样位移与应变。根据计算得到的应变代入低速钻孔残余应力计算方法,从而得到被测材料的残余应力。

(1) 钻孔圆心提取

根据钻孔前后 CCD 相机采集到的照片,对其进行预处理,提取钻孔圆心。通常,在传统的应变片测

量方法中都有钻孔对心环节，即要保证钻孔的圆心处于应变花的中心，否则会导致计算结果出现较大误差。而采用 DIC 方法不需要精确制定钻孔位置，而是直接在钻孔后的照片中应用霍夫圆算法提取圆心与边界（图 6(a)），根据提取的圆心确定 ROI 的位置，从而保证钻孔的圆心在 ROI 的中心位置。相对于人工对准应变花的中心并钻孔，DIC 方法提高了测量效率与精度。



(a) 利用霍夫圆算法提取圆心和边界　　(b) 模拟光学应变片的ROI区域

图 6　采用霍夫圆算法提取钻孔后的圆心与边界并且模拟光学应变片

Fig. 6　Extracting center and boundary after drilling using HoughCircles algorithmand imitating optical strain gauge

（2）模拟光学应变片

根据国标给出的应变片位置与尺寸大小，将测量系统中的 ROI 区域模拟成应变片（图 6(b)）。每隔 15°重新设置一组 ROI 区域再计算应变，最后取这些组的平均值作为最终应变计算结果。

（3）匹配前后变形图像

准确地匹配变形前后图像像素点对最终得到的位移与应变结果有着重要影响。在变形前后同一像素点灰度值不变的假设下，DIC 方法的基本原理是根据灰度分布匹配变形前后图像的同一目标点。为得到被测物体表面的计算区域（ROI）位移信息，在利用 DIC 方法进行计算时，将参考图像中感兴趣的待计算区域划分成 5×5 像素大小的虚拟矩形网格形式，通过计算每个网格节点的位移得到全场位移进而获得全场应变。

为了计算每个网格节点的位移，以节点周围 31×31 像素大小的矩形区域作为节点的参考子集（图 4）。在变形图像中，节点的参考子集变形为变形子集，为了定义变形子集的形状，需要定义参考子集内各个像素点的位移形式，即形函数。因为残余应力释放过程中，位移量相对较小，且主要体现为面内位移，所以采用式(12)给出的一阶形函数[18,19]。其中(x_i, y_i)，(x'_i, y'_i)分别表示变形前后图像子区中某点的像素坐标；u, v, u_x, u_y, v_x, v_y 是描述图像子区位移和应变的参数。

$$\begin{cases} x'_i = x_i + u + u_x\Delta_x + u_y\Delta_y \\ y'_j = y_j + v + v_x\Delta_x + v_y\Delta_y \end{cases} \tag{12}$$

为了衡量参考图像中参考子集与变形图像中搜索子集的相关性，相关函数必须要先被确定，根据参考文献[17]，选用式(13)给出的相关函数。其中 $f = f(x_i, y_i)$，$g = g(x'_i, y'_i)$分别为变形前后图像子区中某点的灰度值，$\overline{f}$，$\overline{g}$ 分别为变形前后图像子区的平均灰度值。

$$C = \frac{\{\sum\sum[(f-\overline{f})\cdot(g-\overline{g})]\}^2}{\sum\sum(f-\overline{f})^2\cdot\sum\sum(g-\overline{g})^2} \tag{13}$$

在相关函数被确定后，匹配过程即变成搜索相关系数的峰值位置。一旦相关系数的极大值或极小值被搜索到后，变形子集的位置就被确定。由于被测物体的实际位移值通常都不是整像素的，而在搜索

过程中是整像素求解,所以由整像素搜索算法获得相关系数峰值点后,以该点为中心取其 3×3 邻域内另外 8 个点的相关系数值,然后利用这 9 个点的相关系数拟合为二次连续曲面,该曲面的极值点位置即对应最终的亚像素位移点。

(4) 计算被测试样位移与应变

相关搜索后,就可以得到虚拟网格的每个网格点在变形前后的位移 u,v。通过光滑样条曲面拟合可得到平滑后的位移场 S_u,S_v,利用柯西公式就可以求得 ε_x,ε_y,γ_{xy},投影到主应变空间,即可得到最大主应变的值。

(5) 计算被测试样应力

采用低速手工钻孔时,产生的加工应变较为明显。GB/T31310－2014 中给出了在低速钻孔时应力标定常数(A、B)的获取方法。由于手工钻孔时很难控制进给深度,因此钻孔不再分步而是直接钻到规定深度(1.2 倍孔径)。式(14)给出了在低速钻的条件下残余应力计算公式,其中 p、q 与 t 已经在式(1)、式(2)和式(3)中给出。

$$\sigma_{\max,\min}=\frac{p}{2A}\pm\frac{\sqrt{\frac{q^2}{2}+\frac{t^2}{2}}}{2B} \tag{14}$$

3 四点弯曲验证试验

为了验证残余应力快速测量系统的准确性,设计了四点弯曲加载试验。通过四点弯曲加载,使被测试件产生残余应力,并应用钻孔法释放残余应力。最后对比应变片测量结果与 DIC 方法得到的应变结果,证明该残余应力快速测量系统能够满足工程测量需求。

3.1 试验过程

(1) 准备被测试件并对试件进行局部打磨,依次对试件喷涂白色底漆和黑色散斑,喷漆时应尽量使散斑颗粒大小均匀分布。利用压头(试验中为负载螺栓)给被测试件施加压力,使试件产生微小变形。重新打磨图 7 所示粘贴应变片区域,根据国标中应变片粘贴方法粘贴应变片,并连接应变仪。在应变花中心钻孔,并记录钻孔前后应变仪的应变值,计算残余应力。

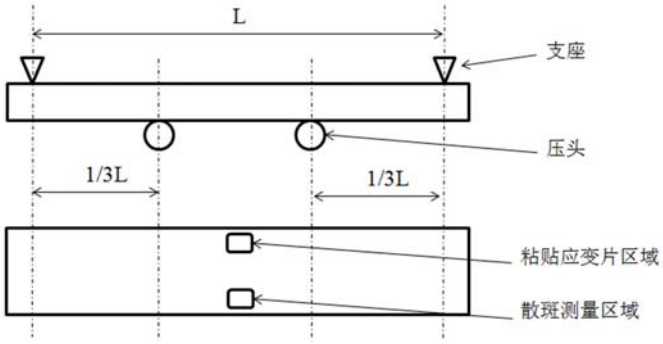


图 7 四点弯曲试验示意图

Fig. 7 A schematic illustration of four-point bending test

(2) 安装 DIC 测量组件,将支架的三个磁性支架固定在四点弯曲加载平台上,调节支架高度和 CCD 相机光学参数(焦距、放大倍率与光圈),打开 LED 照明灯,使 CCD 照相机可以采集到清晰的照片(图 8)。

(3) 将标定板放置于 CCD 照相机与被测试件之间,根据采集到的标定板图像标定获得 CCD 照相机的内置参数。

(4) 取出标定板,CCD 相机采集被测试件应力场改变之前的散斑图像(即未钻孔之前的散斑图像,见图 9(a)。

(5) 利用钻孔法测量残余应力:从固定平台中取出 CCD 相机并钻孔(图 10)。钻孔后取出钻孔设

备，安装 CCD 相机，拍摄试件应力释放后的散斑图像（图 9(b)）。利用残余应力测量程序，计算钻孔区域周围的应变，并计算低速钻孔时被测试件的残余应力。

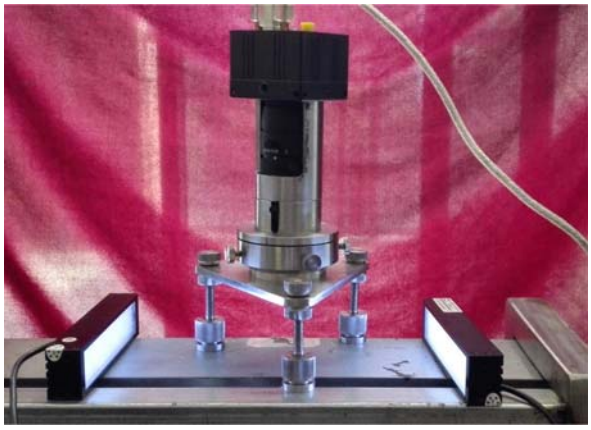


图 8　CCD 相机采集被测试件改变前后（钻孔前后）图像

Fig. 8　CCD camera capturing images of work piece before and after drilling

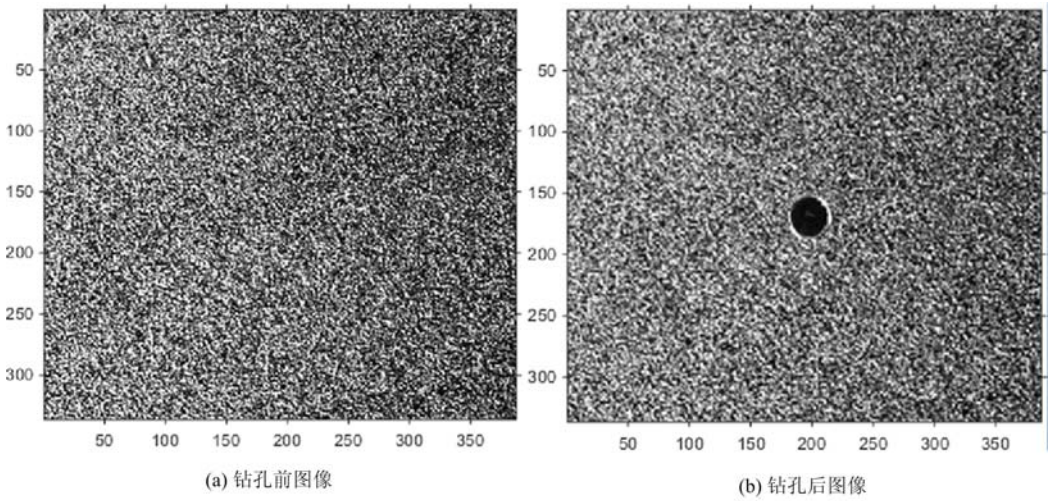


图 9　CCD 相机采集到的被测试件钻孔前后的图像（尺寸裁剪过）

Fig. 9　Theimages captured by CCD camera of work piece before and after drilling

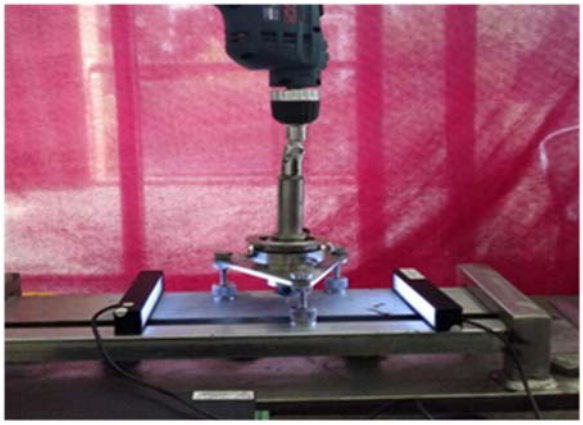


图 10　手电钻钻孔

Fig. 10　Drilling holes

3.2　试验结果分析

将钻孔前采集的照片作为参考图像，钻孔后的图像为变形图像，选定 ROI 区域计算应变。经过

DIC 处理后的结果如图 11 所示,三组散斑模拟应变片按照 GB/T31310－2014《金属材料残余应力 钻孔应变法》进行应变片布置,测量钻孔区域的应变大小。对比 DIC 与电阻应变片测量结果,可以发现应变测量误差在 5%以内 (表 1)。

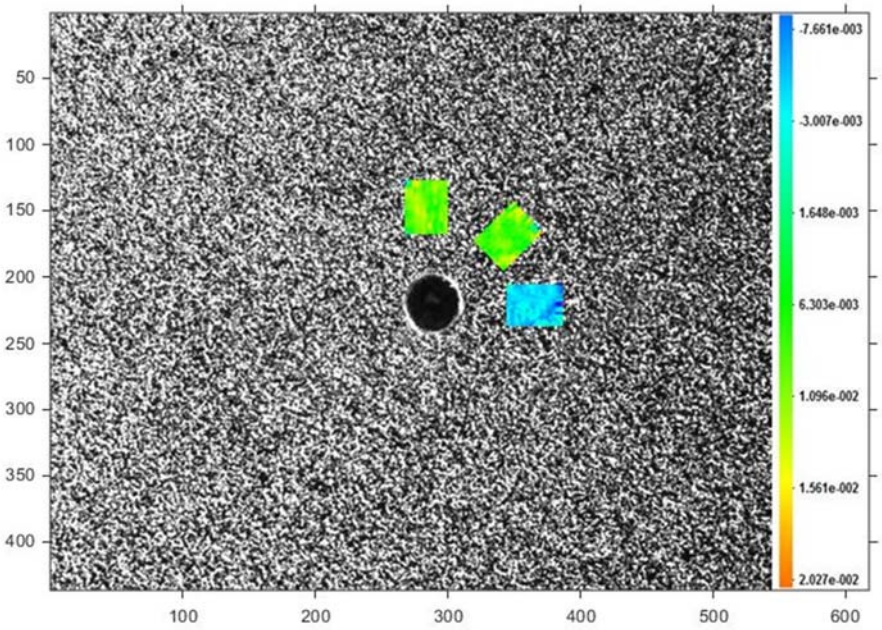


图 11 DIC 模拟应变片方法计算孔周应变结果

Fig. 11 DIC calculates strain field around the holes by simulating the strain gauge method

表 1 应变片与 DIC 结果对比

Tab. 1 Comparison of strain gauge and DIC results

测量方向	0°	45°	90°
应变片测量结果	－0.223%	0.143%	0.165%
DIC 测量结果	－0.231%	0.136%	0.173%
相对误差	3.59%	4.89%	4.85%

4 结论

经过四点弯曲试验验证,所开发的残余应力快速测量系统满足工程现场快速测量残余应力要求。通过与应变仪测量结果进行对比,该测量系统的精度达到了传统的应变片测量方式的相似测量精度。在系统硬件方面,简化了钻孔设备使其更具有便携性与经济性;在系统软件方面,针对残余应力测量的特点,应用 DIC 算法开发了专用的测量软件。与传统的残余应力测量设备相比,其测量效率、操作性能有所提升,可应用于工程现场残余应力测量。

参考文献:

[1] 董美伶,金国,王海斗,等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. 材料导报,2014,28(3):107－113 (DONG Meiling, JIN Guo, WANG Haidou, et al. The research status of nanoindetation methods for measuring residual stresses[J]. Materials Review, 2014, 28(3):107－113(in Chinese))

[2] 马军,傅子霞,袁海洋. 工程残余应力测试方法分析[J]. 热加工工艺,2014,43(6):45－46 (MA Jun, FU Zixia, YUAN Haiyang. Analysis on testing methods for engineering residual stress[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(6):45－46(in Chinese))

[3] Liu C，Zhang J. Numerical and experimental investigations on the modification of as-welded residual stress after local material removal[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design，2011，46(6)：444－455.

[4] Faghidian S A，Goudar D，Farrahi G H，et al. Measurement，analysis and reconstruction of residual stresses[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design，2012，47(4)：254－264.

[5] 郑建毅，庄明凤，郑高峰，等. 用逐层钻孔的小孔法测量非均匀残余应力[J]. 振动、测试与诊断，2014，34(3)：420－425，585－586（ZHENG Jianyi，ZHUANG Mingfeng，ZHENG Gaofeng，et al. Measurement of non-uniform residual stresses by incremental hole-drilling method[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2014，34(3)：420－425，585－586(in Chinese))

[6] 卢国鑫，陆峰. 一种定性判断三维残余应力场测量值的新思路[J]. 中国腐蚀与防护学报，2014，34(3)：283－286(LU Guoxin，LU Feng. A new idea to qualitatively determine 3D residual stress measurements[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection，2014，34(3)：283－286(in Chinese))

[7] 张超. 基于电子散斑的毛坯内应力场在线测量技术研究[D]. 上海交通大学，2012：85（ZHANG Chao. Study on online measurement of blank inner stress field using ESPI[D]. Shanghai Jiaotong University，2012：85(in Chinese))

[8] 杨吟飞，万云，何宁，等. 基于电子散斑干涉技术的微变形场测量及残余应力分析[J]. 机械制造与自动化，2014(2)：144－146（YANG Yinfei，WAN Yun，HE Ning，et al. Micro-deformation field and residual stress measurement based on electronic speckle pattern interferometry[J]. Machine Building & Automation，2014(2)：144－146(in Chinese))

[9] 金香花，陈巨兵，辛全成. 钻孔法和光栅应变花测试复合材料的残余应力[J]. 实验力学，2005，20(1)：77－82（JIN Xianghua，CHEN Jubing，XIN Quancheng. A study on grating rosette and its application in measuring residual stresses of composite material[J]. Journal of Experimental Mechanics，2005，20(1)：77－82(in Chinese))

[10] 吴立夫，张宝鸽，霍成民，等. 基于云纹干涉技术的环芯和切槽残余应力测量方法的实验研究[J]. 中国科学：技术科学，2015，45：503－511（WU Lifu，ZHANG Baoge，HUO Chengmin，et al. Experimental study on residual stress measurement methods of moiré interferometry based on ring-core and slitting[J]. Science China Technological Sciences，2015，45：503－511(in Chinese))

[11] E837－08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method[S]，2008.

[12] Schajer G S. Hole-drilling residual stress measurements with artifact correction using full-field DIC[J]. Experimental and Applied Mechanics，2010，50(2)：245－253.

[13] Moharami R，Sattari-Far I. Experimental and numerical study of measuring high welding residual stresses by using the blind-hole-drilling technique[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design，2008，43(3)：141－148.

[14] 陈岚树，董军，彭洋，等. 用于残余应力现场检测的 DIC-盲孔法研究进展[J]. 建筑钢结构进展，2014，16(3)：37－44（CHEN Lanshu，DONG Jun，PENG Yang，et al. An overview on field residual stress detection using DIC-hole drilling methodology[J]. Progress in Steel Building Structures，2014，16(3)：37－44(in Chinese))

[15] Waele W D，Hertele S，Denys R，et al. Investigation of strain measurementsin (curved) wide plate specimens usingdigital image correlation and finite element analysis[J]. Journal of Strain Analysis，2012，47(5)：276－288.

[16] Valente T，Bartuli C，Sebastiani M，et al. Finite element analysis of residual stress in plasma-sprayed ceramic coatings[J]. Journal of Materials Design & Applications，2004，218(4)：321－330.

[17] 金观昌，孟利波，陈俊达，等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. 实验力学，2006，21(6)：689－702（JIN Guanchang，MENG Libo，CHEN Junda，et al. The progress and application of digital speckle correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2006，21(6)：689－702 (in Chinese))

[18] 王博，俞立平，潘兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. 实验力学，2016，31(3)：291－298（WANG Bo，YU Liping，PAN Bing. On the error analysis of matched and overmatched shape function in digital Image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics，2016，31(3)：291－298(in Chinese))

[19] 潘兵，吴大方，谢惠民，等. 基于梯度的数字体图像相关方法测量物体内部变形[J]. 光学学报，2011，31(6)：120－126（PAN Bing，WU Dafang，XIE Huimin，et al. Spatial-gradient-based digital volume correlation technique for internal deformation measurement[J]. Acta Optica Sinica，2011，31(6)：120－126(in Chinese))

[20] Pan Bing, Li Kai. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7):841－847.

[21] SuttonM A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out of plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10):848.

[22] Pan Bing, Qian Kemao, Xie Huimin, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6):152－154.

A Rapid Measurement System of Residual Stress Based on DIC Method

SONG Qiu, LI Xiao-xing, YANG Yan-feng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on digital image correlation (DIC) method and drilling method, a rapid measurement system of residual stress was developed. This system can be divided into two parts: a portable mechanical system, which is suitable for field measurement, and an improved algorithm for residual stress measurement based on DIC. Experimental study of residual stress measurement of specimen before and after load release was carried out on a four-point bending loading platform; its results were compared with that from strain gauge measurement. The accuracy of this DIC measurement system is equal to that of strain gauge measurement. Moreover, DIC measurement system has solved some problems of traditional strain gauge measurement system, such as large error of central alignment, complicated operation, low efficiency and poor stability. This rapid DIC residual stress measurement system exhibits a wide engineering application prospect.

Keywords: digital image correlation (DIC); drilling method; residual stress; mechanical system; algorithmic program