

文章编号 1004-924X(2018)05-1061-09

基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究

朱飞鹏*, 龚 琰, 白鹏翔, 雷 冬

(河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 基于数字图像相关(DIC)方法的光学引伸计在应变测量领域有着广泛的应用。为了提高数字图像相关方法的测量精度,本文采用二维 DIC 与三维 DIC 的光学引伸计、基于双 45°反射镜成像的二维光学引伸计以及电测法,对单轴拉伸试验中不锈钢试件的应变进行同时测量,比较分析了各个光学引伸计在测量轴向与横向应变方面的优劣以及误差产生的原因。实验结果表明:试件离面运动的存在大幅降低了普通二维光学引伸计的应变精度;基于双 45°反射镜成像的二维光学引伸计可以有效消除离面刚体位移对测量结果的影响,其应变测量精度(尤其是横向应变精度)高于其他光学引伸计,且测量结果与电测法的测量结果高度吻合;三维 DIC 光学引伸计的横向应变精度明显不如轴向应变精度。

关键词: 数字图像相关;光学引伸计;双反射镜成像;应变测量精度;离面位移

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1061

Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation

ZHU Fei-peng*, GONG Yan, BAI Peng-xiang, LEI Dong

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

* Corresponding author, E-mail: zhufeipeng@hhu.edu.cn

Abstract: Although optical extensometers based on Digital Image Correlation (DIC) method have widespread applications in strain measurement, there is a lack of systematic research on the strain measurement accuracy. For the uniaxial tensile test, testing equipment including the traditional 2D-DIC optical extensometer, three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) optical extensometer, 2D-DIC optical extensometer equipped with dual-reflector imaging capability, and strain gauge were employed to measure the strain of stainless steel simultaneously. The results of axial and transverse strain measurement using different optical extensometers were compared, and the corresponding sources of measurement error were analyzed. The experimental results revealed that the traditional 2D-DIC optical extensometer yields low measurement accuracy because of the presence of out-of-plane motion. The 2D-DIC optical extensometer equipped with dual-reflector imaging capability can eliminate the effect of out-of-plane rigid body displacement and thus, ensure higher measurement accuracy, especially for transverse strain measurement, compared to other optical extensometers. Notably, the strain measurement results obtained using the 2D-DIC optical extensometer equipped with dual-reflector imaging capability were in good agreement with those obtained using a strain

收稿日期:2017-10-19;修订日期:2017-12-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11402074, No. 51679078)

gauge. The measurement accuracy of transverse strain using 3D-DIC optical extensometer is apparently lower than that of axial strain.

Key words: digital image correlation; optical extensometer; dual-reflector imaging; strain measurement accuracy; out-of-plane displacement

1 引言

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)法是数字图像处理技术和现代光测力学相结合的产物,具有非接触、全场、高精度测量等优点,在科学研究领域和工程技术领域都有着广泛的应用^[1-6]。通常将 DIC 分为使用单相机测量的二维 DIC 和使用两(多)相机测量的三维 DIC。其中,二维 DIC 只能测量平面物体的面内位移,根据相机的针孔成像原理可知,其应变测量精度受离面刚体位移的影响很大;而三维 DIC 利用双目相机重构出被测物表面在变形前后的三维形貌,进而获得三维位移场与应变场,由于三维 DIC 计算时考虑了离面位移的影响,因此离面位移的存在不会对其应变测量结果产生影响。

基于 DIC 技术,使用相机对试件表面标距点进行跟踪定位形成的光学引伸计^[7],作为一种新型的材料力学性能测试方法得到了日益广泛的应用^[8]。Kumr 等^[9]利用光学引伸计确定了材料力学性能测试中所用微型试样的最优厚度。Dubos 等^[10]将 3D 视频引伸计应用到高纯金属薄板成形过程中尺寸效应的实验研究。王伟等^[11]将光学引伸计应用到低维材料的实时应变测量中。由于基于二维 DIC 的普通光学引伸计的应变测量精度(尤其是横向应变)不高,Pan 等^[12]利用双侧远心镜头提出了一种视频引伸计,结合主动成像理念可获得高保真的试样表面图像,实现了实时、高精度的应变测量,该引伸计的横向与轴向应变精度都小于 $30 \mu\epsilon$ 。虽然双侧远心镜头可有效减小离面位移对普通镜头^[13]的影响,但其成本昂贵、体积较大,不易推广。近年来,作者所在课题组基于电测外补偿的思想,提出一种用于消除离面刚体位移影响的方法^[14]。这种方法在试件表面粘贴一刚性薄片作为补偿片,用试件表面点的位移减去补偿片上对应点的位移即可消除刚体位移;然而,在更换试件时,该方法需要重新粘贴薄片,

使得测量有诸多不便之处。因此,基于双 45° 反射镜成像的二维光学引伸计被提出^[15],用试件正反面的位移相互补偿,降低了离面位移对二维 DIC 引伸计测量精度的影响,该方法原理简单、装置简易、成本低且测量精度高。此外,基于三维 DIC 的引伸计^[16-17]考虑了离面位移的影响,因此其应变测量精度受离面位移的影响较小,也可以达到很高的应变测量精度。本文以电测法的测量结果作为标准,在同等试验条件下研究了普通二维 DIC 引伸计、三维 DIC 引伸计以及基于双 45° 反射镜成像的二维 DIC 引伸计的横向与轴向应变的测量精度,从而为材料的力学性能测试提供合适的解决方案。

2 实验原理

2.1 二维 DIC 的基本原理

图 1 所示为二维 DIC 方法原理示意图。假设物体表面同一点在变形前后图像中的灰度保持不变,将每个点所在的邻近小区域称为子区或者模板。通过子区图像的灰度匹配方法,求解物体表面任一点的变形可以转化为子区移动的研究。选择参考图像 $f(x, y)$ 中 (x_0, y_0) 为中心、 $(2M+1) \times (2N+1)$ 的矩形为参考子区,在变形后的图像 $g(x', y')$ 中搜索与参考子区灰度匹配的目标图像子区,称为变形子区。搜索过程中需遵循一定的搜索策略并按照预先选定的相关函数,常用的标准化互相关函数为:

$$C = \frac{\sum_{i=-Mj=-N}^M \sum_{i=-Mj=-N}^N f(x_i, y_i) g(x'_i, y'_i)}{\sqrt{\sum_{i=-Mj=-N}^M \sum_{i=-Mj=-N}^N f^2(x_i, y_i)} \cdot \sqrt{\sum_{i=-Mj=-N}^M \sum_{i=-Mj=-N}^N g^2(x'_i, y'_i)}} \quad (1)$$

计算时,将使相关函数出现极值的目标子区作为最终的变形子区。通过计算点 (x_0, y_0) 和变形子区中心 (x'_0, y'_0) 的坐标之差,即可计算出该点在 x 和 y 方向的位移 u 和 v 。

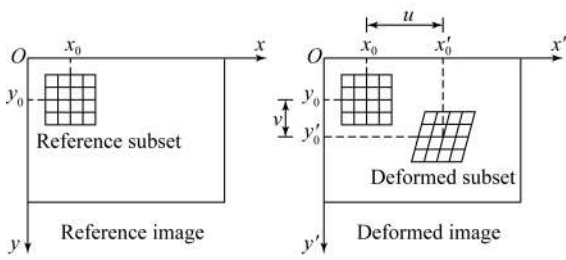


图 1 二维数字图像相关原理

Fig. 1 Principle of two-dimensional digital image correlation

2.2 基于双 45°反射镜成像的二维光学引伸计

基于双 45°反射镜成像的二维 DIC 测量系统俯视图如图 2 所示。平面待测试件夹持于试验机上且垂直于相机光轴,将两块互相垂直的平面反射镜固定在试件两侧,与待测面各成 45°,使得试件前后表面的镜像能被单个相机同时拍摄。当物体在测量过程中有离面刚体位移时,前后表面的镜像正好一个靠近相机靶面,另一个远离靶面,且位移量大小相等,符号相反。

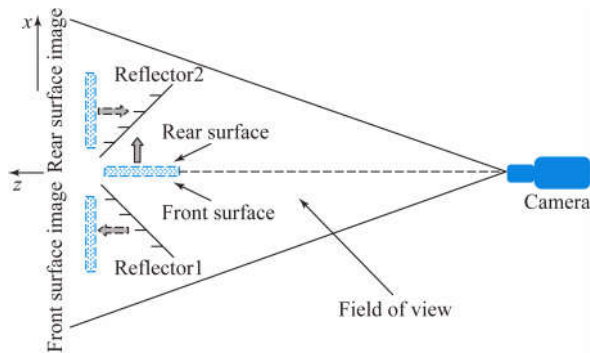


图 2 双 45°反射镜成像技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-reflector imaging technique

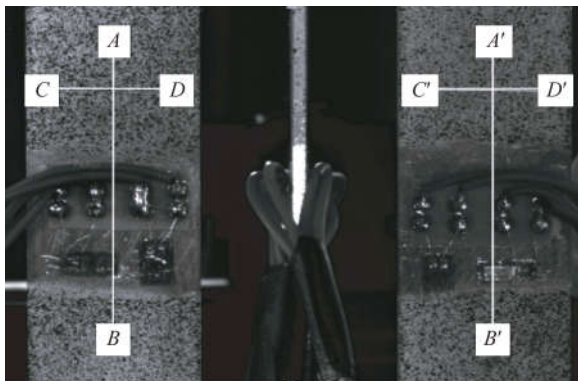


图 3 左、右光学引伸计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of left and right optical extensometers

在试件前表面选取 4 个特征点 A, B, C, D 作为标距点,图 3 所示为相机拍摄到的试件前、后表面的散斑图像, AB, CD 分别为测量试件轴向与横向应变的光学引伸计,由于两者的测量原理相同,此处仅介绍轴向应变的测量原理。设 A, B 两点之间的图像距离为 l_0 ,两点在拉伸方向上的图像位移分别为 v_A, v_B ,那么该引伸计测得的轴向应变表示为:

$$\epsilon = \frac{v_A - v_B}{l_0} \quad (2)$$

试件在实验过程中标距点 A, B 的位移可表示为^[14]:

$$\begin{cases} v_A = v_{def}^A + v_{rig}^A \\ v_B = v_{def}^B + v_{rig}^B \end{cases} \quad (3)$$

其中: v_{def}^A, v_{def}^B 为试件真实变形所引起的 A, B 点的位移, v_{rig}^A, v_{rig}^B 为试件离面刚体位移所引起的 A, B 点的位移。

将式(3)代入式(2),得到光学引伸计的应变为:

$$\epsilon = \frac{v_{def}^A - v_{def}^B}{l_0} + \frac{v_{rig}^A - v_{rig}^B}{l_0} = \epsilon_{def} + \epsilon_{rig} \quad (4)$$

式中 $\epsilon_{def}, \epsilon_{rig}$ 分别为荷载引起的真实应变和离面刚体位移引起的虚假应变。与试件前表面标距点相对应的后表面上的点 A', B', 构成了另一个光学引伸计,如图 3 所示。在单轴拉伸试验中,对于厚度不大的试件,前后表面对应点应具有相同的真实应变。而试件离面刚体位移引起的点 A(或 B)和 A'(或 B')的位移量 v_{rig}^A (或 v_{rig}^B)和 $v_{rig}^{A'}$ (或 $v_{rig}^{B'}$)则大小相等、方向相反。那么试件后表面点 A', B'的位移可表示为:

$$\begin{cases} v_{A'} = v_{def}^A + v_{rig}^{A'} = v_{def}^A - v_{rig}^A \\ v_{B'} = v_{def}^B + v_{rig}^{B'} = v_{def}^B - v_{rig}^B \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),得到试件后表面光学引伸计的应变如下:

$$\epsilon' = \frac{v_{def}^A - v_{def}^B}{l_0} - \frac{v_{rig}^A - v_{rig}^B}{l_0} = \epsilon_{def} - \epsilon_{rig} \quad (6)$$

比较式(4)和式(6)可以发现,试件前后表面引伸计的应变表达式中都含有真实应变项 ϵ_{def} 和虚假应变项 ϵ_{rig} ,不同的是两者的虚假应变大小相

等、符号相反。两式求平均正好可消除虚假应变,得到:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon + \epsilon'}{2} = \epsilon_{\text{def}}. \quad (7)$$

由式(7)可见,利用双 45°反射镜成像技术在试件前后同时构成两个光学引伸计,取这两个引伸计的轴向应变均值从理论上可以完全消除离面刚体位移对应变结果的影响,从而提高应变测量精度。然而,实际上很难准确取到试件前、后表面相对应的标距点,因此在实验中难以完全消除离面刚体位移的影响。

3 实验过程

实验采用如图 4 所示的不锈钢拉伸试样,其矩形截面尺寸为 19.8 mm×1.35 mm。为验证光学引伸计的应变测量精度,在其前、后表面各粘贴两个测量轴向应变与横向应变的应变片。将前后表面喷制好散斑的试件夹持于试验机的上下夹头之间。为便于调整双反射镜的位置,设计加工了一个 L 型直角装置,将两块反射镜粘贴在成直角的两个平面上,这样可保证双反射镜严格垂直;再借助一个 45°三角板,容易将试样与反射镜调成 45°。实验装置如图 5 所示,三维 DIC 测量系统主要包括左、右两个相同型号的相机,每个相机由一个分辨率为 2 448×2 048 pixel 的 PointGrey CCD 图像传感器和焦距为 50 mm 的 Schneider 定焦镜头组成。图中左相机光轴要垂直于试件表面的镜像,构成二维 DIC 系统。左相机拍摄的图像用于二维 DIC 计算,两相机同时拍摄的图像用于三维 DIC 计算。

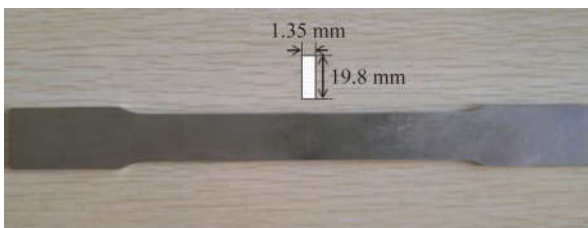


图 4 拉伸试样

Fig. 4 Tensile specimen

实验前给试件施加 0.5 kN 作为初始荷载,同时采集参考图像并将应变仪通道的读数清零。试验采用逐级等量的加载方式,每级荷载增量为

0.5 kN。每施加一个荷载增量的同时,采集一组图像,同时记录下应变仪通道的读数。试验中施加的最大荷载为 7 kN,以保证试件仍处于其弹性范围内,不会影响其重复使用,将该试验重复进行了 3 次。利用二维和三维 DIC 计算出试件表面标距点的位移,代入式(2),便可得出光学引伸计的应变测量结果。

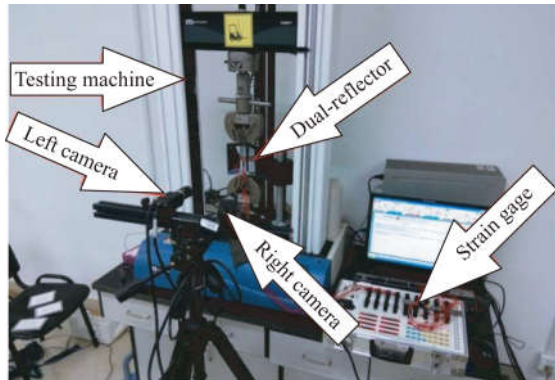
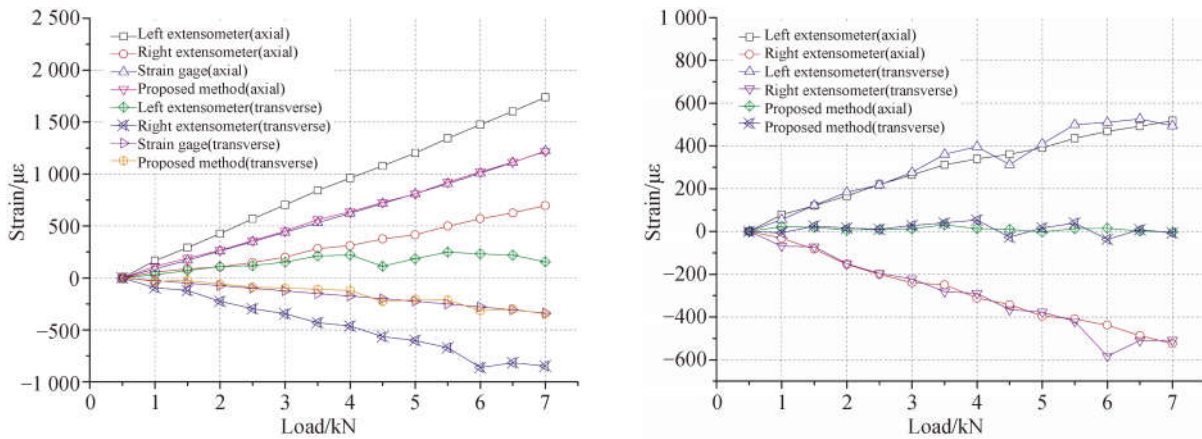


图 5 三维 DIC 测量系统的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of three-dimensional DIC measuring system

4 实验结果与讨论

从实验得到的图像中提取二维 DIC 图像,取模板大小为 27 pixel×27 pixel、步长为 5 pixel 进行位移计算。标距点如图 3 所示 A~D 和 A'~D',其中轴向与横向引伸计的标距分别为 1 545 pixel 与 625 pixel,计算相应的应变结果,并与电测法相比。由图 6(a)可知,与电测法相比,左、右普通光学引伸计测得的轴向与横向应变都包含了不小的误差,且误差随着荷载的增大也逐渐增大。此外,在单轴拉伸实验中,试样横向应变应为负值,而由左引伸计测得的横向应变却为正值。如前面分析,该类误差主要来自实验中试样的刚体离面位移(主要由试样与相机光轴不垂直引起的)。将左、右引伸计的结果取均值,得到基于双 45°反射镜成像的二维引伸计(后面称为改进的引伸计)的测量结果,该结果与电测法的一致性很好。为便于观察,图 6(b)给出了 3 种引伸计方法与电测法的误差,可以发现无论是轴向还是横向的应变测量,左、右引伸计的误差的几乎相等,但符号相反。改进引伸计轴向与横向的应变测量误差都非常小,明显优于普通二维引伸计的测量结果。



(a) 三种引伸计和电测得到的应变值 (b) 三种方法与电测法的误差
 (a) Strain measured by three optical extensometers and strain gage (b) Strain errors between three extensometers and strain gage

图 6 普通引伸计与改进引伸计的结果比较

Fig. 6 Comparison of strain results obtained by common and proposed optical extensometers

为评估应变测量的精度及稳定性,将 3 次重复实验中各方法的应变误差统计值列于表 1,由表 1 可知改进引伸计测得的 3 次轴向应变误差均值分别为 $(6 \pm 12) \mu\epsilon$ 、 $(11 \pm 10) \mu\epsilon$ 和 $(-5 \pm 22) \mu\epsilon$, 横向应变误差均值分别为 $(16 \pm 17) \mu\epsilon$ 、 $(11 \pm 26) \mu\epsilon$ 和 $(10 \pm 17) \mu\epsilon$, 可见改进引伸计不论在轴向应变还是在横向应变测量方面都具有非常高的测量精度。

由于三维 DIC 受离面刚体位移的影响较小,可以提供比普通二维 DIC 更高的应变精度,因此需要详细比较一下改进引伸计与三维引伸计的应变测量精度。对实验中左、右相机的图像进行处

理,为了进行定量比较,处理时选用的模板、步长均与 2D-DIC 相同,且三维 DIC 引伸计的标距点同样选择如图 3 所示的 A' 、 B' 、 C' 、 D' 四点,以保证标距相同。将 A' 、 B' 点和 C' 、 D' 点的三维坐标和三维位移分别代入式(8),得到三维 DIC 引伸计轴向与横向的应变测量值为:

$$\epsilon = \frac{\overline{M_1 N_1} - \overline{M_0 N_0}}{\overline{M_1 N_1}}, \quad (8)$$

式中 $\overline{M_0 N_0}$ 和 $\overline{M_1 N_1}$ 分别为参考和变形状态下标距点之间的距离。

表 1 三种光学引伸计测得的轴向与横向应变的测量误差统计值

Tab. 1 Statistics of axial and transverse strain errors of three kinds of optical extensometers (μϵ)

Methods	Avg. (axial)			Std. (axial)			Avg. (transverse)			Std. (transverse)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Left extensometer	308	312	308	174	175	163	292	297	318	166	162	160
Right extensometer	-277	-289	-288	170	181	158	-280	-276	-294	167	168	170
Proposed method	16	11	10	17	26	17	6	11	-5	12	10	22

仍然以电测结果为标准值,比较改进引伸计与三维 DIC 引伸计的应变测量误差,如图 7(a) 所示。由该图可知,改进引伸计的轴向应变和横向应变与电测法十分接近,而三维引伸计的轴向应变测量值与电测法相近,但其横向应变测量值与电测法有着显著的差异。图 7(b) 给出了相应方

法的应变测量误差,可明显发现这两种方法的轴向应变测量误差均较小,而在横向应变方面,改进引伸计的测量精度明显高于三维引伸计。为验证实验结果的重复性与稳定性,对第 2 次与第 3 次实验中的图像进行同样的处理,得到的结果如图 8 和图 9 所示。

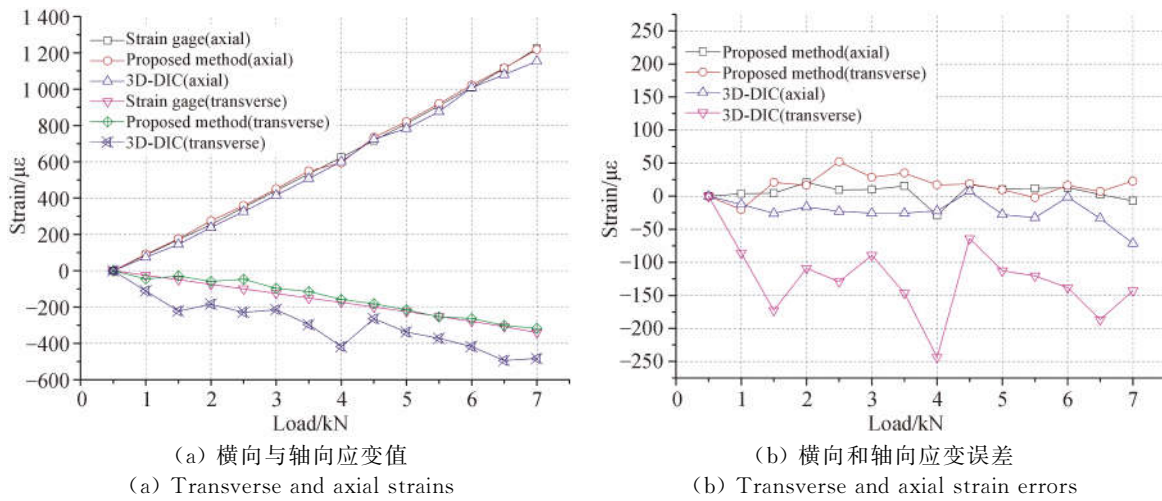


图 7 第 1 次实验的应变结果

Fig. 7 Strain results obtained in the first test

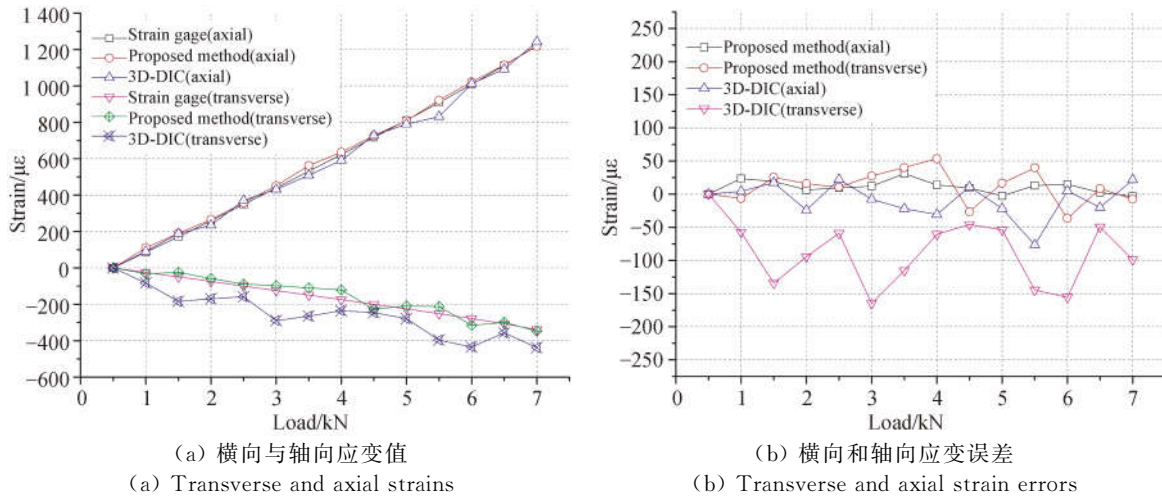


图 8 第 2 次实验的应变结果

Fig. 8 Strain results obtained in the second test

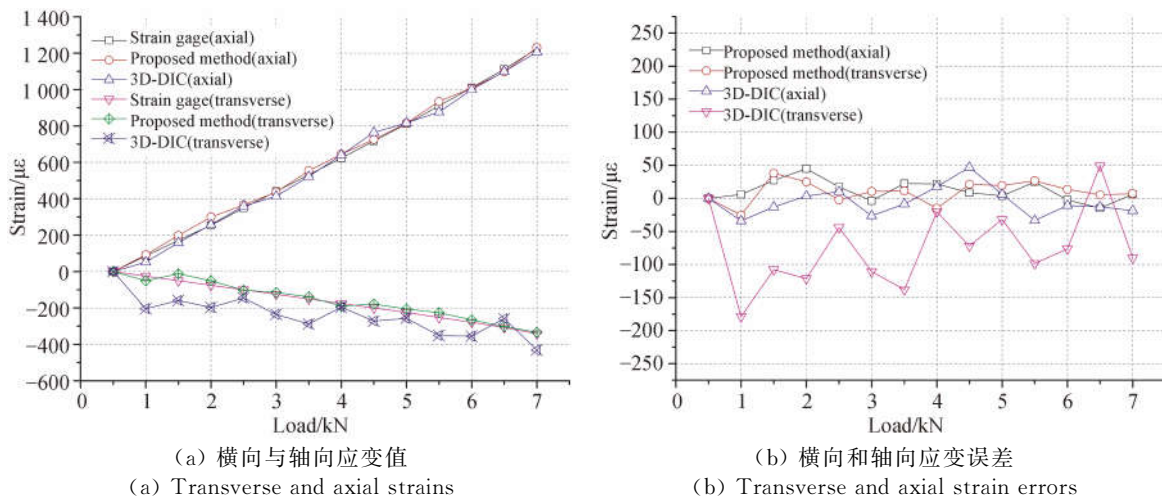


图 9 第 3 次实验的应变结果

Fig. 9 Strain results obtained in the third test

为便于比较,将上述两种引伸计测得的轴向与横向应变误差统计值列于表 2 中,可知改进引伸计与三维 DIC 引伸计的轴向应变误差相近,分别为 $(4 \pm 15) \mu\epsilon$ 和 $(-6 \pm 21) \mu\epsilon$ (取三次结果中均值和标准差的平均值);横向应变误差分别为 $(12 \pm 20) \mu\epsilon$ 和 $(-95 \pm 56) \mu\epsilon$,显然改进引伸计在横向应变方面要优于三维 DIC 引伸计(精度高 3 倍)。因此,综合前文横向应变和轴向应变的测量结果,改进引伸计在应变测量误差(尤其是横向应变)和结果稳定性方面的表现均优于另外两类光学引伸计。

DIC 算法的位移精度约为 0.01 pixel,因此本次实验所取的光学引伸计理论上能达到的轴向应变精度为 $0.02/1.545 \approx 13 \mu\epsilon$,横向应变精度为 $0.02/625 \approx 32 \mu\epsilon$ 。表 2 表明改进引伸计的实际应变精度与理论预测基本一致;三维 DIC 引伸计的轴向应变精度略低于理论的 $13 \mu\epsilon$,而横向应变精度则远逊于 $32 \mu\epsilon$ 。其原因是三维 DIC 位移计算精度依赖于双目立体视觉系统的标定精度、相关运算的精度以及双相机之间的同步效果。在计算位移时,三维 DIC 需要对变形前后的四幅散斑图像进行三次相关运算,而这三次相关运算的误差以及系统标定误差会在试件三维形貌重构过程中^[18]叠加,进而在一定程度上降低三维 DIC 的位移计算精度。三维 DIC 虽然可以有效降低离面位移对应变测量的影响,但是误差无法完全消除,比如实验中试验机夹头之间不可避免的微小相对转动引起的旋转位移分量,都会对三维 DIC 的应变测量精度造成影响。此外,基于 45° 反射镜成像的二维 DIC 可以看作是一种特殊的三维 DIC,

单相机同时拍摄试件的前、后表面,相当于双目相机光轴成 180° 。对于单相机成像而言,试件表面的三维位移可以看作是面内位移与离面位移的简单相加,只要将试件前、后表面标距点的位移叠加求均值,就能得到试件的面内位移,只需要进行一次相关运算,且不需要进行系统标定,故误差来源只有相关算法精度。正因如此,消除离面位移影响之后,改进的光学引伸计在横向应变测量方面有着更高的精度。若采用更高分辨率的相机,便可取到更长的标距,进而得到精度更高的应变测量结果。

当然,改进引伸计也存在一些不足之处。首先,它只能测量平面试件或者近似平面试件的应变,而三维 DIC 不仅适用于平面试件,也适用于曲面试件的应变测量。其次,在测试前需要精确调整双反射镜的位置,否则试样两侧的放大倍率会不一样,刚体位移不能完全消除,进而给应变带来误差,且试件前后表面的变形在同一个坐标系中必须是相同的,比如在试件拉伸发生颈缩时不能使用该引伸计,此类情形可使用三维 DIC 解决。再次,由于需要足够大的空间布置反射镜,该引伸计更适合拉伸与压缩试验,不太适用于弯曲试验,而三维 DIC 引伸计适用于包括拉压、弯曲等在内的各种试验情形。最后,该引伸计的抗环境干扰能力不如三维 DIC 引伸计,当环境震动使得相机有沿其光轴方向的位移时,试件相对于相机的离面位移的影响是无法用该引伸计消除的;而三维 DIC 测量中,双相机固定在三脚架上,不会因环境震动改变相机的相对位置,因此三维 DIC 引伸计可以得到相对稳定的结果。

表 2 两种光学引伸计的轴向与横向应变测量误差统计值

Tab. 2 Statistics of axial and transverse strain errors measured by two kinds of optical extensometers ($\mu\epsilon$)

Methods	Avg. (axial)			Std. (axial)			Avg. (transverse)			Std. (transverse)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
3D-DIC	-22	-9	12	19	27	16	-124	-88	-74	58	49	60
Proposed method	6	11	-5	12	10	22	16	11	10	17	25	17

5 结 论

本文开展了不锈钢试件的单轴拉伸试验,分别

采用普通 2D-DIC 光学引伸计、3D-DIC 光学引伸计、基于双 45° 反射镜的改进光学引伸计以及电测法测量了试件的轴向应变与横向应变。以电测法的测量结果为基准,对这三类光学引伸计的应变测

量结果进行了分析与比较。实验结果表明:试件离面刚体位移的存在严重影响了普通二维 DIC 光学引伸计的应变测量精度,但这个影响对试件正、反面的光学引伸计而言效果却正好相反。因此,改进光学引伸计可以有效消除试件离面刚体位移的影响,提供远优于普通二维 DIC 光学引伸计的测量精度。三维 DIC 引伸计虽然可以有效降低试件离面刚体位移的影响,但并没有完全消除,实验结果表明,该引伸计的横向应变误差为 $(-95 \pm 56) \mu\epsilon$,远超过

其轴向应变误差 $(-6 \pm 21) \mu\epsilon$;而改进光学引伸计可提供比三维引伸计高 3 倍的横向应变精度,其轴向和横向的应变误差分别为 $(4 \pm 15) \mu\epsilon$ 、 $(12 \pm 20) \mu\epsilon$,基本能达到该方法的理论应变测量精度。

综合不同光学引伸计与电测法的测量结果,较普通二维 DIC 光学引伸计和三维 DIC 光学引伸计,改进的光学引伸计在试件应变测量方面(尤其是横向应变)精度更高,有望取代应变片及机械引伸计,成为一种有效的材料变形测量手段。

参考文献:

- [1] 刘聪,戴云彤,戴美玲,等. 二维多相机全场数字图像相关变形测量方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(12):1212002.
LIU C, DAI Y T, DAI M L, *et al.*. Deformation measurement by two-dimensional multi-camera full-field digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12):1212002. (in Chinese)
- [2] YONEYAMA S, KITAGAWA A, IWATA S, *et al.*. Bridge deflection measurement using digital image correlation [J]. *Experimental Techniques*, 2007, 31(1):34-40.
- [3] 戴云彤,陈振宁,朱飞鹏,等. 小尺寸低碳钢试件吕德斯效应的三维数字图像相关测量 [J]. 力学学报, 2015, 47(1):119-126.
DAI Y T, CHEN ZH N, ZHU F P, *et al.*. Measurement of Lüders band in small size low carbon steel specimen by 3D digital image correlation method [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(1):119-126. (in Chinese)
- [4] SHAO X X, DAI X J, CHEN ZH N, *et al.*. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4):696-704.
- [5] ZHU F P, BAI P X, ZHANG J B, *et al.*. Measurement of true stress-strain curves and evolution of plastic zone of low carbon steel under uniaxial tension using digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65:81-88.
- [6] 戴美玲,徐向阳,杨福俊,等. 薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形测量 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5):993-1000.
DAI M L, XU X Y, YANG F J, *et al.*. Measurement of continuous deformation of thin-walled spheres compressed by a rigid plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5):993-1000. (in Chinese)
- [7] TOURLONIAS M, BUENO M A, BIGUÉ L, *et al.*. Contactless optical extensometer for textile materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2005, 45(5):420-426.
- [8] ZHANG D, AROLA D, CHARALAMBIDES P G, *et al.*. On the mechanical behavior of carbon-carbon optic grids determined using a bi-axial optical extensometer [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(14):4495-4505.
- [9] KUMAR K, POOLEERY A, MADHUSOODANAN K, *et al.*. Optimisation of thickness of miniature tensile specimens for evaluation of mechanical properties [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 675:32-43.
- [10] DUBOS P A, FLEURIER G, HUG E. An experimental investigation of the size effects in forming processes of high-purity thin metallic sheets [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 879:459-464.
- [11] 王伟,何小元. 光学引伸计在低维材料实时应变测量中的应用 [J]. 光学学报, 2010, 30(6):1662-1666.
WANG W, HE X Y. Application of optical extensometer on the real-strain measurement of low-dimensional materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6):1662-1666. (in Chinese)
- [12] PAN B, TIAN L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17):19082-19093.
- [13] SUTTON M 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):746-757.
- [14] BAI P X, ZHU F P, HE X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane mo-

- tions [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65:28-37.
- [15] ZHU F P, BAI P X, SHI H J, *et al.*. Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(6):065007.
- [16] 朱飞鹏, 王京荣, 雷冬, 等. 三维 DIC 在 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试中的应用 [J]. *实验力学*, 2014, 29(3):302-309.
- ZHU F P, WANG J R, LEI D, *et al.*. Application of 3D-DIC in tensile mechanical properties test for glass fiber reinforced plastic bolt [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(3):302-309. (in Chinese)
- [17] SHAO X X, EISA M M, CHEN ZH N, *et al.*. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26):30124-30138.
- [18] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法 [J]. *实验力学*, 2007, 22(6):556-567.
- PAN B, XIE H M, LI Y J. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(6):556-567. (in Chinese)

作者简介:



朱飞鹏(1983—),男,江苏盐城人,副教授,2005年、2011年于东南大学分别获得学士、博士学位,主要从事光测实验力学与数字图像处理方面的研究与应用。E-mail: zhufeipeng@hhu.edu.cn



龚 琰(1993—),男,江苏南通人,硕士研究生,2015年于苏州科技学院获得学士学位,主要从事光学测量的研究。E-mail: hhu16131gy@163.com

(本栏目编辑:曹 金)