

文章编号: 1001-4888(2018)03-0333-10

基于二维 DIC 的脆性材料拉伸 应力—应变曲线测定^{*}

朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 雷冬

(河海大学力学与材料学院, 南京 211100)

摘要: 在应变测量中, 基于普通二维数字图像相关(2D-DIC)的光学引伸计易受到离面刚体位移的影响, 从而使得应变测量精度不高。为此, 提出了基于双反射镜成像技术的光学引伸计, 将试样正反面同时记录在单相机的成像靶面上。在试样正反面对应位置各置一个光学引伸计, 取两者应变平均值, 则可消除离面刚体位移对光学引伸计应变测量结果的影响。基于该引伸计, 开展了环氧树脂和铸铁两类脆性材料的单轴拉伸实验, 分别得到了应力—应变曲线。实验结果表明, 本文提出的引伸计比基于普通二维 DIC 的光学引伸计具有更高的应变测量精度, 是一种便捷、高效、高精度的应变测量方法, 非常适用于脆性试样的应变测量。

关键词: 数字图像相关; 应力—应变曲线; 脆性材料; 光学引伸计; 双反射镜成像; 应变误差

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-023

0 引言

材料的应力—应变关系对材料而言具有至关重要的作用, 是进行数值模拟和结构设计的关键因素。因此, 如何准确测定材料应力—应变关系是实验力学中很常见也很重要的问题。其中, 应变的准确测量是关键。当前最常用的应变测试方法有电测法和引伸计方法, 然而这两种方法在使用时都存在一定的局限性, 比如接触测量、量程不大、对试样尺寸有要求。数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)作为一种新型的光学测量方法, 具有非接触测量、应变量程大、试样尺寸灵活多变等优势, 因此, 在变形测量中得到了越来越广泛的应用。

DIC 方法可分为二维 DIC(2D-DIC)和三维 DIC(3D-DIC)^[1,2]。2D-DIC 使用单个相机, 只能用于平面试样的变形测量^[3-5]。而 3D-DIC 使用光轴互成一个角度的两个相机, 可用于平面和曲面试样的变形测量^[6]。胡斌等^[7]用 2D-DIC 得到的全场应变平均值作为压缩应变, 得出了橡胶材料的弹性模量。对于应变的测量, 更简单的方法是采用与机械引伸计相似的思想, 跟踪试样上两个标距点在变形过程中的相对变形, 即构成一个光学引伸计。王伟等^[8]利用棱镜构成的光学引伸计测试了低维材料的在拉伸过程中的实时应变; Zhang 等^[9]构建了基于显微成像系统的光学引伸计, 并用来测试了金属薄片在疲劳实验时的应变。研究表明^[10], 基于 2D-DIC 的应变测量受试样离面位移的影响很大, 而离面位移在实验过程中是普遍存在的。因此, 许多学者提出了相应的解决方法。戴相录等^[11]通过对离面位移与虚假应变之间关系的分析, 提出了应变的修正模型; Bai 等^[12]在试样表面贴上一个薄的参考钢片, 该钢片在图像上反映的位移则完全是由离面位移引起的, 将离面位移消除便可大大提高光学引伸计的应变测量精

^{*} 收稿日期: 2017-02-16; 修回日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(11402074, 51679078)资助

通讯作者: 朱飞鹏(1983—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 光学测试方法的研究与应用。Email: zhufepeng@hhu.edu.cn

度;由于远心镜头具有在景深范围内放大倍率恒定的优异特性,Pan 等^[13]采用远心镜头成像,来消除离面位移对光学引伸计应变测量的影响,进而提高应变测量精度;Hoult 等^[14]提出了五种可消除离面位移影响的方案,并将其中的三种用在了实验测量中,达到了比较高的应变精度。然而,这些应变修正方案不够简单直接。由于 3D-DIC 在测量中,可得到试样的三维位移,受离面位移影响比较小,因而可以达到较高的应变测量精度。朱飞鹏等^[15]基于 3D-DIC 的光学引伸计研究了 GFRP 锚杆的拉伸力学性能;基于一个双侧远心镜头和一块光楔,Wu 等^[16]构建了基于单相机的 3D-DIC 测量系统,克服了传统 3D-DIC 对于观察角度的要求;Shao 等^[17]利用一块棱镜和两块平面反射镜,设计出了基于单相机的 3D-DIC 集成测量系统,该系统的光学引伸计可达到很高的应变精度。然而,3D-DIC 测量系统较 2D-DIC 复杂,计算量也大。

因此,本文将利用双反射镜成像技术,改进光学引伸计,得到基于 2D-DIC 的高精度光学引伸计,并用来测量两大类脆性材料的拉伸应力—应变曲线,分析与机械引伸计之间的应变误差。此外,还将应变结果与基于 3D-DIC 光学引伸计的结果作比较,用来评判这两种光学引伸计的表现。

1 基本原理

1.1 二维数字图像相关

DIC 需要待测试样表面具有随机分布的散斑特征,来作为变形的信息载体。用数字相机记录下试样变形前后的散斑图案,分别称为参考图像和变形图像。根据统计学原理,随机分布的散斑使得图像上任一个包含足够多像素点的子区域在灰度分布上具有唯一性。图 1(a)为 2D-DIC 测量原理的示意图,其中相机光轴垂直于平面待测试样的表面。参考图与变形图之间的匹配可以用图 1(b)来表示,在参考图上任选取一个方形子区,然后在变形图上搜索与之相对应的位置。一般用零均值归一化互相关函数^[18]来描述参考子区与目标子区的相似性。通过搜寻相关函数的极值点来确定变形图上目标子区的位置与形状。将目标子区与参考子区的中心坐标相减便得到某点的位移值。对其他参考图上的点重复该过程,得出试样计算区域内的全场位移。对位移场再进行差分运算可得应变场^[19]。

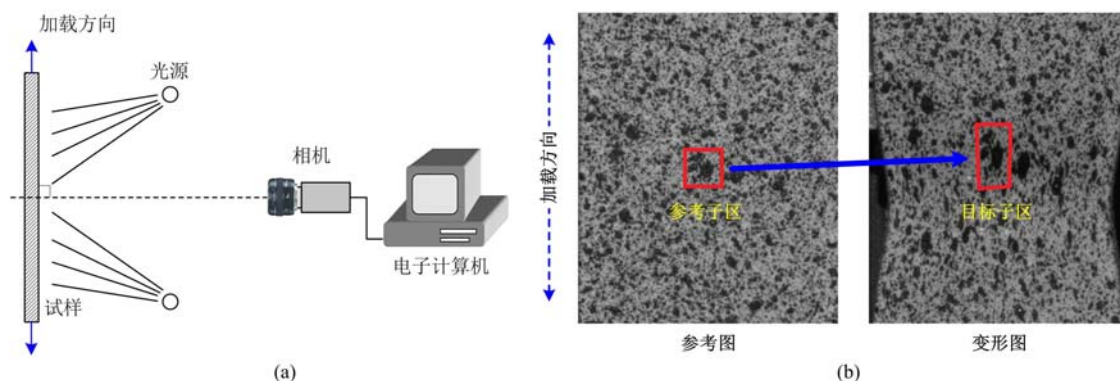


图 1 (a) 2D-DIC 原理示意图;(b) 图像匹配

Fig. 1 (a) Schematic diagram of 2D-DIC; (b) image matching before and after deformation

1.2 基于双 45°反射镜成像的光学引伸计

对 2D-DIC 而言,试样的离面刚体位移会在相机靶面上产生位移。根据已有分析^[20],对光学引伸计而言,在实验过程中试样标距点 A、B 的位移可表示为公式(1)所示两项的叠加,其中 u_{def}^A 、 u_{def}^B 为试件真实变形所引起的 A、B 点的位移, u_{rig}^A 、 u_{rig}^B 为试件发生离面刚体位移所引起的 A、B 点的位移。

$$\begin{cases} v_A = u_{\text{def}}^A + u_{\text{rig}}^A \\ v_B = u_{\text{def}}^B + u_{\text{rig}}^B \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1),得到标距点为 A、B 的光学引伸计的应变为:

$$\epsilon = \frac{u_{\text{def}}^A - u_{\text{def}}^B}{l_0} + \frac{u_{\text{rig}}^A - u_{\text{rig}}^B}{l_0} = \epsilon_{\text{def}} + \epsilon_{\text{rig}} \quad (2)$$

式中, l_0 为引伸计标距; ϵ_{def} 为试件受外荷载引起的真实应变; ϵ_{rig} 为离面刚体位移导致的虚假应变。考虑

到在实际实验过程中,试件表面与相机成像靶面之间不会严格平行、加载方向与像平面存在一定偏差以及材料的泊松效应等因素的存在,使得 ϵ_{rig} 项在实验中无法避免,其大小在实验中也无法预测。

由于虚假应变 ϵ_{rig} 项的存在,使基于普通 2D-DIC 的光学引伸计的应变测量精度不够高,这严重制约了光学引伸计的应用。文献[14]提出:在试样前、后各放置一个相机进行拍摄,试样的离面刚体位移对这两个相机而言则是相反的,两者的位移误差也是相反的,这样通过取两者位移均值即可消除离面刚体位移对测量结果的影响。然而,该方法存在一些不便之处:1) 需采用两个完全相同的相机,并需要做到严格同步;2) 前、后两相机的工作距离很难保证相同。因此,构思提出了双 45° 反射镜成像技术,利用单个相机即可方便实现上述功能,其示意图(俯视图)如图 2(a) 所示。平面待测试样垂直于相机光轴并夹持在试验机上,试验机加载方向沿着预设世界坐标系的 Y 轴,在试样两侧布置两块与试样待测面各成 45° 的平面反射镜,使得试样前后两个对立面的镜像(图中虚线表示)分别在左、右两块反射镜中可同时被相机拍摄,并且左右两个 45° 布置的平面镜使得试件左、右镜像的表面正好与光轴垂直。在该光路布置下,当被测平面物体产生离面位移时,其两个对立面在平面镜里的虚像正好一个产生靠近相机靶面的平移,另一个产生远离相机靶面的平移,且这两个位移的绝对值相等。

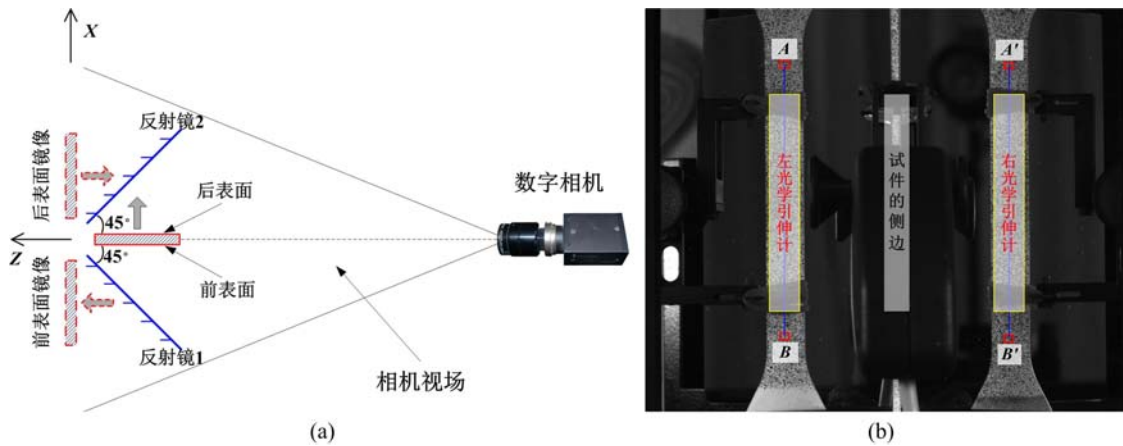


图 2 (a) 双反射镜成像;(b) 引伸计的选取

Fig. 2 (a) Dual-reflector imaging; (b) selection of optical extensometers

图 2(b) 所示为相机拍摄到的试件前、后表面的散斑图像,在这两个表面可以形成两个光学引伸计。试件前表面的引伸计上下标距点分别记为 A、B,与这两点相对应的试件后表面的点 A'、B' 构成了另一个光学引伸计。标距点 A(或 B)和 A'(或 B') 的离面刚体位移在图像中引入的像点位移量 v_{rig}^A (或 v_{rig}^B) 和 $v_{\text{rig}}^{A'}$ (或 $v_{\text{rig}}^{B'}$) 的数值也大小相等而方向相反。因此,试件后表面的标距点 A'、B' 的图像位移可表示为:

$$\begin{cases} v_{A'} = u_{\text{def}}^{A'} + v_{\text{rig}}^{A'} = u_{\text{def}}^A - v_{\text{rig}}^A \\ v_{B'} = u_{\text{def}}^{B'} + v_{\text{rig}}^{B'} = u_{\text{def}}^B - v_{\text{rig}}^B \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_{def}^A 、 u_{def}^B 、 v_{rig}^A 、 v_{rig}^B 与式(1)中的变量具有相同的意义。

根据式(3),得到试样后表面上光学引伸计的应变如下:

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

比较公式(2)和(4)可以发现,试样前、后表面光学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} ,不同的是两者虚假应变的大小相等、符号相反,因此,通过相加即可消去虚假应变的影响,得到:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon + \epsilon'}{2} = \epsilon_{\text{def}} \quad (5)$$

显然,在测量中由于离面刚体位移而产生的虚假应变 ϵ_{rig} 一项在平均之后被抵消,平均后的结果就是待测量的真实应变值 ϵ_{def} 。因此,用提出的双 45° 反射镜成像技术在试样前、后表面同时构成两个光学引伸计,将两个引伸计得到的应变值相加后求平均值可以有效消除离面刚体位移的影响。上述光学引

伸计可以测得具有很高精度的轴向应变,其实该方法也可进行推广至试样横向应变的测量(进而测得泊松比),只需要在如图 2(b)所示图像的左、右对应位置处选取好横向的标距点。需要注意的是为了保证较高的应变精度,横向引伸计的标距所占的像素数需尽量大一些,即需采用合适的焦距较长的镜头进行成像。

2 实验过程

2.1 试样

实验中选取了由两种脆性材料制成的哑铃状拉伸试样,即如图 3 所示的环氧树脂和铸铁试样。每种材料各有 4 根试样。其中板材环氧试样的横截面尺寸为 $10.06\text{mm} \times 1.85\text{mm}$,棒材铸铁试样横截面直径为 6.02mm 。在所有试样的平行段表面采用人工制斑方法制成随机分布的散斑图案。



图 3 (a) 环氧树脂试样;(b) 铸铁试样

Fig. 3 Specimen of (a) epoxy resin and (b) cast iron

2.2 实验装置和过程

实验中采用的加载设备是型号为 INSTRON 3367 的电子万能试验机,如图 4 所示,其荷载量程为 30kN 。将试件夹持在试验机的上、下夹头之间。为便于精确调整双反射镜相对于试样的位置,设计并加工了如图 4 右上所示的直角固定块。将两块尺寸相同的平面反射镜粘贴在直角块上,放置于试样正后方。这样只需保证其中一块反射镜与试样表面成 45° (借助于一块等腰直角三角板),即可完成如图 2(a)所示的双 45° 反射镜布置。为了与机械引伸计的测量精度作对比,在待测试样上夹持上标距为 50mm 的引伸计。

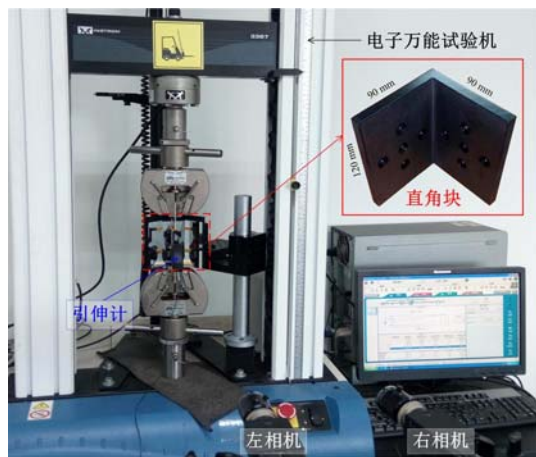


图 4 实验设备

Fig. 4 Experimental setup

在试样前方放置两个相同的数字相机(即图 4 的左相机与右相机),构成 3D-DIC 测试系统,每个相机由分辨率为 $2448 \times 2048\text{pixel}$ 的 Point-Grey CCD 图像传感器和 50mm 的 Schneider 定焦镜头组成。其中,左相机垂直于试件的侧边,构成 2D-DIC 测试系统。在调整该相机时,将相机的景深调至最小,这样使图像上部和下部同时达到最清晰时,基本可保证相机光轴与试样表面垂直。这样利用两个相机即可搭建成 2D-DIC 和 3D-DIC 测试系统。经标定,3D-DIC 系统中两相机的夹角为 16.3° 。

采用试验机的位移加载模式进行实验,所有试样的位移加载速率均为 0.5mm/min 。实验开始前施加 100N 作为试样的初始荷载,并设置图

像的采集速率为 1 帧/秒。之后,同时开始试验机加载和 DIC 系统的图像采集,直至试样被拉伸破坏为止。这样,作用在试样上的荷载便可与其变形一一对应。

3 实验结果与讨论

分别对 8 个试样在实验中得到的散斑图像进行计算。图 2(b)为环氧试样 1# 的参考图,在试样前、后表面对应位置分别取光学引伸计标距点 A、A' 和 B、B',标距为 1400pixel 。相关计算的模板大小为 $31 \times 31\text{pixel}$ 。

3.1 环氧试样

根据试验机记录下的荷载和机械引伸计的应变数据,容易得到试样 1# 在拉伸全过程中的应变—应力曲线,如图 5(a)所示。将 2D-DIC 计算得到的 A(A′)、B(B′)点(受机械引伸计夹持影响,取在试样夹持部位的外部)竖直方向位移之差除以原始标距,得到左(右)光学引伸计的应变测量结果。计算出左、右光学引伸计与机械引伸计之间的应变误差,如图 5(b)所示,从该图可以发现,左、右引伸计的应变误差大小几乎相等、符号正好相反,这正与前面公式(2)和(4)的分析结果一致。此外,应变误差逐渐增大,这主要是由试样在拉伸过程中的离面刚体位移所导致。根据公式(5),将左、右光学引伸计的应变结果相加取均值,便得到本文方法的测量结果,如图 6 所示的 2D-DIC 光学引伸计。

为了比较 2D-DIC 与 3D-DIC 光学引伸计的结果,取图 2(b)中右侧的标距点 A′、B′,用 3D-DIC 算法计算得到 3D-DIC 光学引伸计的应变测量结果,如图 6 所示的 3D-DIC 光学引伸计,可以发现 2D-DIC、3D-DIC 光学引伸计与机械引伸计的应变结果基本重合,难以分辨。在此基础上,计算出这两种光学引伸计与机械引伸计之间的应变误差,如图 7(a)所示。同样,给出另外 3 个试样的光学引伸计的应变测量误差,如图 7(b)~(d)所示。从图 7 可知,2D 光学引伸计的应变误差均小于 $200\mu\epsilon$,且 2D 引伸计比 3D 引伸计测量精度要略高一些。表 1 给出了两种引伸计测量误差的统计值,误差最大的是试样 4#,2D、3D 引伸计误差均值分别为 $-87\mu\epsilon$ 和 $-123\mu\epsilon$,而方差则几乎相等。

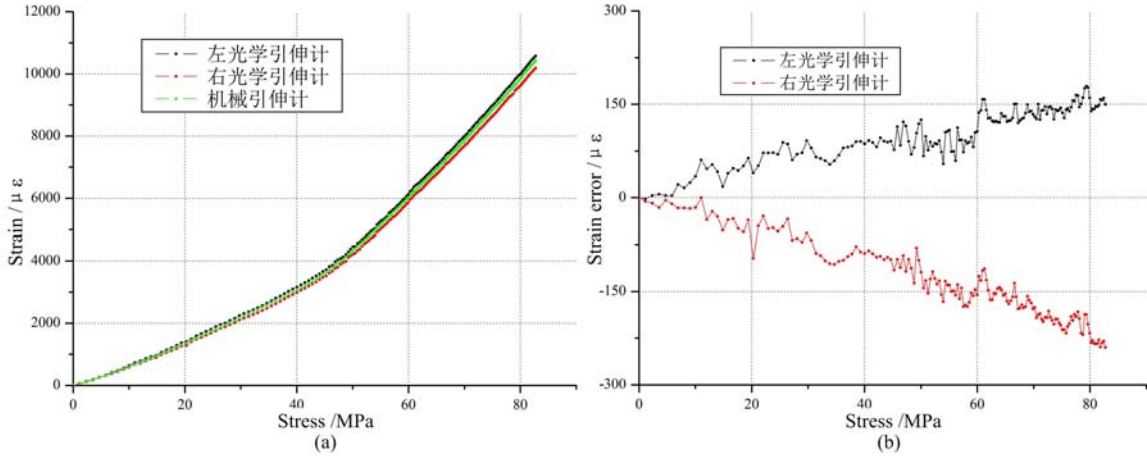


图 5 环氧试样 1# 的左、右引伸计应变测量结果

Fig. 5 Strain results of the left and right optical extensometers of epoxy resin specimen 1#

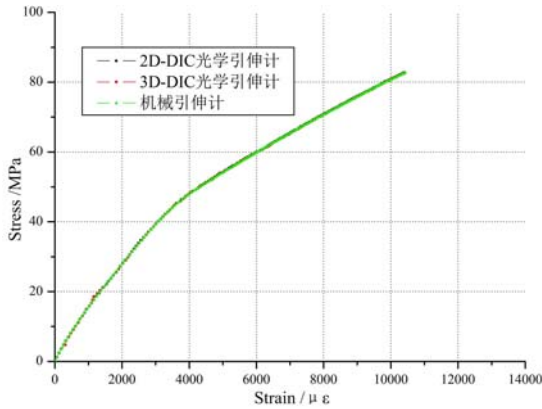


图 6 环氧试样 1# 由不同引伸计得到的应力—应变曲线

Fig. 6 The stress-strain curves of epoxy resin specimen 1# obtained using three extensometers

表 1 环氧试样两种光学引伸计应变测量误差的统计值

Tab. 1 Statistical values of strain errors of two optical extensometers used for epoxy resin specimens

环氧 试样	2D-DIC 光学引伸计		3D-DIC 光学引伸计	
	均值/ $\mu\epsilon$	方差/ $\mu\epsilon$	均值/ $\mu\epsilon$	方差/ $\mu\epsilon$
1#	-15	18	3	18
2#	19	24	4	44
3#	-86	51	-102	46
4#	-87	52	-123	53

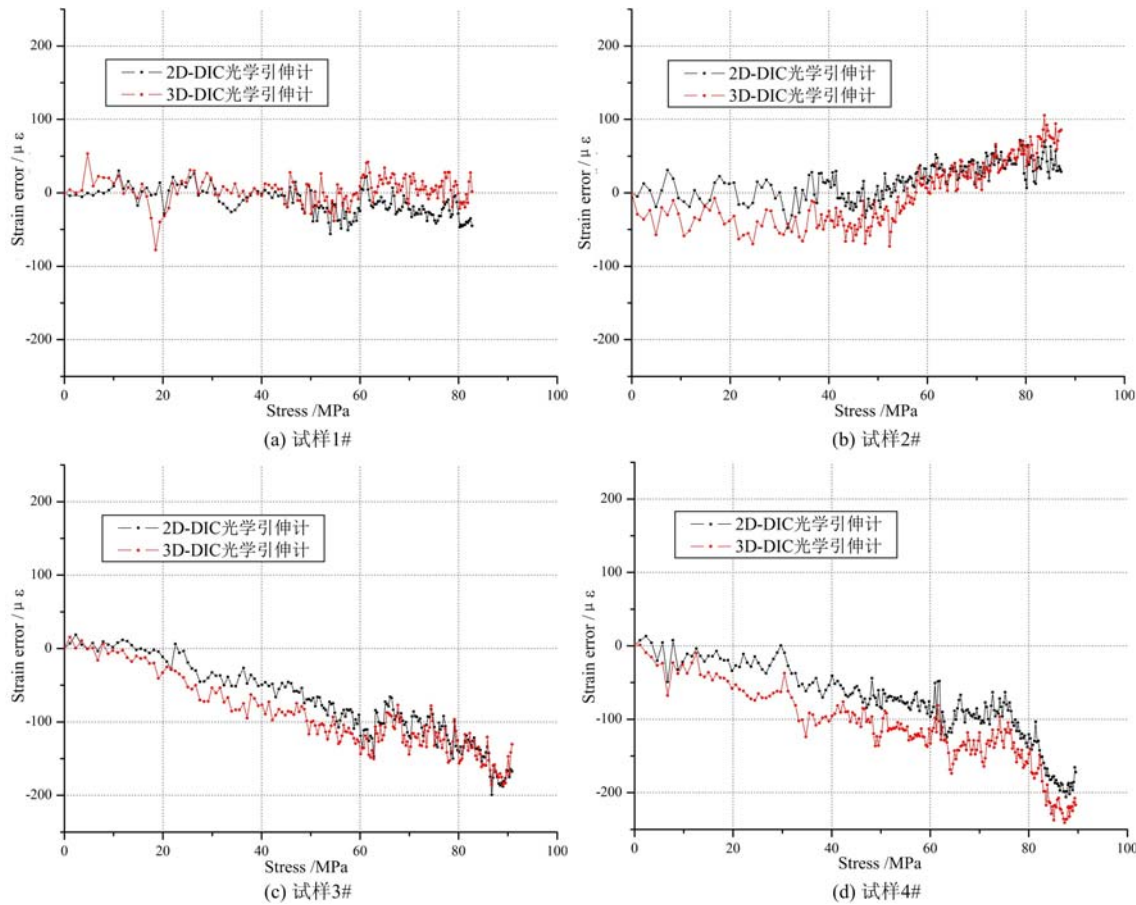


图 7 2D、3D 光学引伸计用于环氧试样应变测量时的误差
Fig. 7 Strain errors of 2D- and 3D- extensometer for epoxy resin specimens

3.2 铸铁试样

对于棒材铸铁试样,采用与 3.1 小节相同的处理方式得到如图 8~10 所示的结果。图 8(a)为铸铁试样 1#左、右光学引伸计的应变结果,与机械引伸计之间存在着明显的差异;图 8(b)给出了它们之间的应变误差,左、右光学引伸计的应变误差大小几乎相等、符号正好相反,这与环氧试样 1#的情况完全相同,不同的是误差要更大一些(最大达 $500\mu\epsilon$ 左右)。图 9 为 2D(取左、右引伸计的应变平均值)、3D 光学引伸计以及机械引伸计分别得到的铸铁试样 1#在拉伸过程中的应力—应变曲线。与材料力学一致,铸铁材料在拉伸过程中,并无明显的直线段。对于铸铁试样 1#~4#的拉伸实验,图 10(a)~(d)分别给出了 2D、3D 引伸计与机械引伸计之间的应变误差,其中 2D 引伸计的误差均小于 $200\mu\epsilon$,而 3D 引伸计则达到了 $300\mu\epsilon$ 。表 2 给出了相应的误差统计值,由该结果可知,对于铸铁棒材拉伸实验,2D 引伸计的精度要优于 3D 引伸计。

表 2 铸铁试样两种光学引伸计应变测量误差的统计值
Tab. 2 Statistical values of strain errors of two optical extensometers used for cast iron specimens

铸铁 试样	2D-DIC 光学引伸计		3D-DIC 光学引伸计	
	均值/ $\mu\epsilon$	方差/ $\mu\epsilon$	均值/ $\mu\epsilon$	方差/ $\mu\epsilon$
1#	-27	27	-59	39
2#	-121	41	-237	78
3#	-100	48	-130	65
4#	-31	28	-89	40

机械引伸计作为一种接触式测量手段,可以提供准确、稳定的应变测量结果;但在测量前需要人为

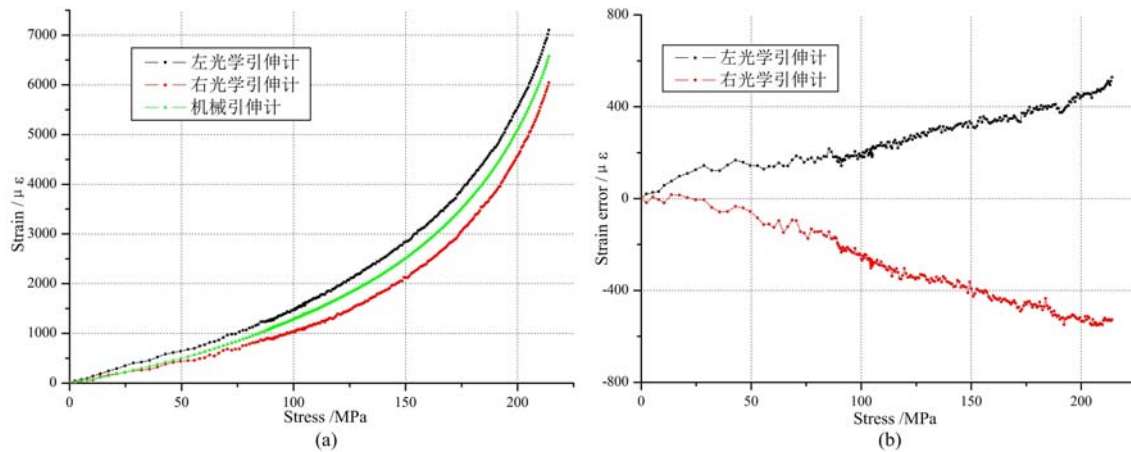


图8 铸铁试样1#的左、右引伸计应变测量结果

Fig. 8 Strain results of the left and right optical extensometers of cast iron specimen 1#

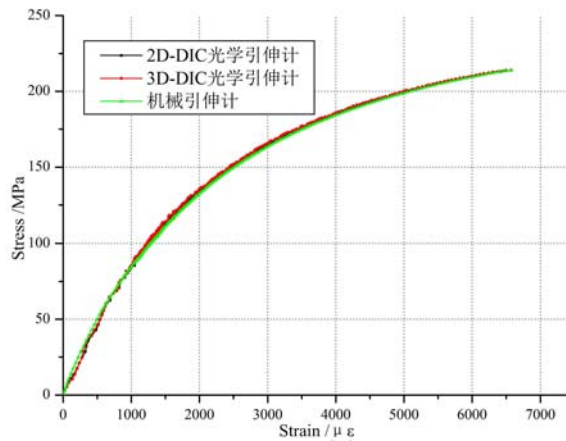


图9 铸铁试样1#由不同引伸计得到的应力—应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curves of cast iron specimen 1# obtained using three extensometers

将引伸计固定在试样表面,该过程略显繁琐,且固定效果的好坏容易对测量结果造成影响,此外,对不同尺寸试样的通用性并不好。与机械引伸计相比,文中2D引伸计虽然在应变测量精度方面稍有不,结果的稳定性也不够好,但作为一种非接触测量手段,1)不会对待测试样表面产生损害,2)更换试样更为方便,3)对不同尺寸试样,有很好的通用性(只需更换镜头),4)可推广至大变形(可达500%)测量中去。环氧试样拉伸破坏前最大应变约为 $12000\mu\epsilon$,而铸铁试样破坏前最大应变为 $7000\mu\epsilon$ 左右,对于本文的脆性拉伸试样,泊松效应所产生的应变约为 $-13\mu\epsilon$ (取物距为500mm)^[11],可以忽略不计。对于塑性材料而言,在小应变范围内(如 $10000\mu\epsilon$ 以内),采用本文提出的2D引伸计仍然可以获得很高的应变测量精度。而当塑性材料在拉伸过程中的塑性变形较大时会存在着较大的塑性变形,这使得试样厚度有较明显的减小,故由左、右光学引伸计得到的应变都较真实值偏小一些,即使采用文中两者求均值的方法也无法减小该误差。因此,利用该引伸计得到的塑性材料应力—应变全曲线的后面部分将存在一定的误差。值得注意的是,文中3D-DIC系统中左相机垂直放置,这限制了两相机之间的夹角(本文为 16.3°),而在一般的测量中,该角度可增加一倍,3D-DIC的测量精度也会有所提高。

综合比较图7、图10中2D与3D引伸计的误差,可以发现两者的误差趋势非常相似。原因是在计算时2D-DIC和3D-DIC取了同样的计算点,而对于相同的散斑分布,根据相关匹配算法得到的位移和应变结果自然是很相似的。本质上,基于双 45° 反射镜成像的2D-DIC可以看作是一种特殊的3D-DIC,其中(一半)个相机拍摄试件前表面,另一(一半)个相机拍摄后表面。这两(一)个相机光轴都垂直于试件表面,之间正好形成 180° 的角度。据前文公式(1)的描述,对单相机成像而言,试件表面的三维位移可

看作是面内位移与离面位移的简单叠加。因此,对试件前、后表面对应点的图像位移求平均值,便很容易直接得到试件的面内位移,故其位移误差只来自于单次的相关运算。而对 3D-DIC 而言,由于双相机的相交光轴布置,确定试样表面点的三维空间坐标时需要求解含有三个未知数的四个方程^[1],因而很难用一个简单的关系式来描述 3D-DIC 中面内位移和离面位移之间的关系。

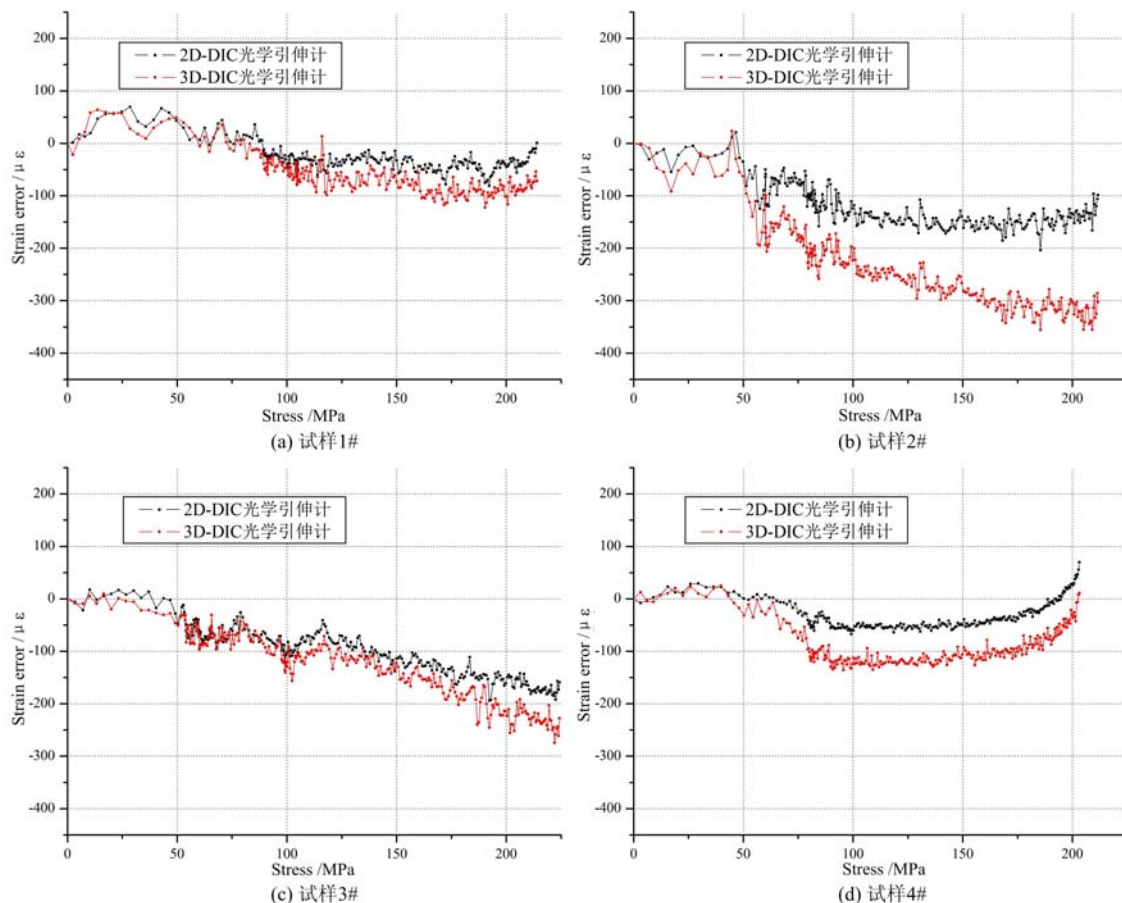


图 10 2D、3D 光学引伸计用于铸铁试样应变测量时的误差

Fig. 10 Strain errors of 2D- and 3D- extensometer for cast iron specimens

图 5 和图 8 表明,基于 2D-DIC 的常规引伸计测得的应变值往往是难以令人满意的,而本文推荐的 2D 引伸计则可消除离面刚体位移对应变造成的影响,且达到了与 3D-DIC 引伸计相仿甚至更高的应变测量精度。在实际测量中,2D 引伸计的实验装置更为简单,只需要使用一个相机;而 3D 引伸计使用光轴交叉的两个相机,计算应变前必须进行较为复杂的系统标定。此外,3D-DIC 引伸计中的双相机需要严格的同步采集,尤其是对于高速运动的变形测量^[21],而这对于 2D 引伸计而言根本不是问题。2D 引伸计在计算应变时需要进行四次相关运算,即每个标距点两次。而 3D 引伸计需要六次相关运算,即每个标距点三次,以及两次三维形貌重构,故 2D 引伸计的计算效率是高于 3D 引伸计的。总而言之,文中的 2D 光学引伸计是一种便捷、高效、高精度的应变测量方法,非常适用于脆性试样的应变测量,提供不亚于 3D 引伸计的应变测量精度。

4 结论

本文提出了基于 2D-DIC 和双 45°反射镜成像的高精度光学引伸计,可消除实验测试中普遍存在的试样离面刚体位移对应变测量结果的影响,从而提高应变测量结果的精度。基于该引伸计,开展了环氧树脂和铸铁拉伸试样的单轴拉伸实验,得到了这两类脆性材料的拉伸应力—应变曲线,并将应变结果与机械引伸计和基于 3D-DIC 的光学引伸计作了详细比较,得到如下结果:

(1) 本文提出的光学引伸计能有效消除离面刚体位移对应变测量结果的影响,与机械引伸计的结

果对比表明,两组共 8 根试样的应变误差均小于 $200\mu\epsilon$,有一半试样的应变误差均小于 $100\mu\epsilon$ 。

(2) 与 3D-DIC 光学引伸计相应结果的对比表明,提出的光学引伸计可提供更高的应变测量精度(对铸铁试样,优越性体现得比较明显)。

(3) 提出的光学引伸计不仅适用于板材试样(环氧树脂),还适用于棒材试样(铸铁)的应变测量,是一种便捷、高效、高精度的应变测量方法,非常适用于脆性试样的应变测量。

参考文献:

- [1] Sutton M A, Yan J H, Deng X M, et al. Three-dimensional digital image correlation to quantify deformation and crack-opening displacement in ductile aluminum under mixed-mode I/III loading[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5):05100301-05100317.
- [2] 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 Bing, XIE Huimin, LI Yanjie. 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))
- [3] Mudassar A A, Butt S. Improved digital image correlation for in-plane displacement measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5):960-970.
- [4] 邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003 (SHAO Xinxing, DAI Yuntong, HE Xiaoyuan, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10):1012003 (in Chinese))
- [5] 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 Cong, DAI Yuntong, DAI Meiling, et al. Deformation measurement by two-dimensional multi-camera full-field digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12):1212002 (in Chinese))
- [6] 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*, 2014, 65: 81-88.
- [7] 胡斌, 贺玲凤, 张蕊. 橡胶材料弹性模量数字图像相关测定法[J]. *实验力学*, 2011, 26(2):151-157 (HU Bin, HE Lingfeng, ZHANG Rui. Digital image correlation method for rubber elastic modulus measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(2):151-157 (in Chinese))
- [8] 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 Wei, HE Xiaoyuan. Application of optical extensometer on the real-strain measurement of low-dimensional materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6):1662-1666 (in Chinese))
- [9] Zhang S, Mao S, Arola D, et al. Characterization of the strain-life fatigue properties of thin sheet metal using an optical extensometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 60(3):44-48.
- [10] 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.
- [11] 戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(1):10-19 (DAI Xianglu, XIE Huimin, WANG Huaixi. Analysis of the error caused by off-plane displacement in two-dimensional digital image correlation measurement[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1):10-19 (in Chinese))
- [12] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 65:28-37.
- [13] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for noncontact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14):19082-19093.
- [14] Hoult N A, Take W A, Lee C, et al. Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using digital image correlation[J]. *Engineering Structures*, 2013, 46(6):718-726.
- [15] 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 Feipeng, WANG Jingrong, LEI Dong, et al. Application of 3D-DIC on tensile mechanical properties test for glassfiber reinforced plastic bolt[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(3):302-

- 309 (in Chinese))
- [16] Wu L, Zhu J G, Xie H M. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: validation and application[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(26):7842—7850.
- [17] Shao X X, Eisa M M, Chen Z 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] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28):5501—5509.
- [19] 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1980—1986 (PAN Bing, XIE Huimin. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1980—1986 (in Chinese))
- [20] 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.
- [21] Zappa E, Matinmanesh A, Mazzoleni P. Evaluation and improvement of digital image correlation uncertainty in dynamic conditions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59(3):82—92.

Determination of tensile stress-strain curve of brittle materials based on two-dimensional digital image correlation

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

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

Abstract: In strain measurement, the optical extensometer based on ordinary two-dimensional digital image correlation (2D DIC) is easily affected by out-of-plane displacement of rigid body, therefore, the accuracy of strain measurement is not high. For this purpose, an optical extensometer based on dual-reflector imaging technique is proposed, which may simultaneously record specimen's both positive and negative sides on the imaging target surface of single camera. Each optical extensometer is placed at corresponding position on both positive and negative surface of sample. Taking the average value of two strains, the effect of rigid body out-of-plane displacement on strain measurement of optical extensometer may be eliminated. Based on the proposed extensometer, uniaxial tensile experiment of two kinds of brittle material including epoxy resin and cast iron, were carried out, and stress-strain curves were obtained, respectively. Experimental results indicate that the proposed extensometer can provide higher strain measurement accuracy than that from ordinary 2D DIC extensometer, and is a convenient, high-efficiency and high-accuracy strain measurement method, suitable for strain measurement of brittle materials.

Keywords: digital image correlation; stress-strain curve; brittle material; optical extensometer; dual-reflector imaging; strain error