**文章编号:** 0253-2239(2010)06-1662-05

# 光学引伸计在低维材料实时应变测量中的应用

## 王 伟<sup>1,2</sup> 何小元<sup>2</sup>

(1南京工程学院建筑工程学院,江苏南京 211167;2东南大学工程力学系,江苏南京 210096)

摘要 随着低维材料的广泛应用,有关低维材料力学性能的研究成为当前热点之一。在低维材料实时应变测量 中,大标距试件表面上的跟踪目标移出图像跟踪范围,会导致跟踪目标的丢失,影响材料的实时应变测量。利用基 于数字图像跟踪技术的光学引伸计将大标距转换成小标距,不仅可以在应变测量时保持跟踪目标在视场范围内移 动,实现实时跟踪,而且可以动态了解低维材料应变变化规律。利用微力学万能试验机和光学引伸计同时进行低 维材料的应变测量,实验结果表明,二者规律基本吻合且后者利用双线性插值可以将目标定位在 0.01 pixel 上,说 明光学引伸计完全可以应用于低维材料的实时应变测量中,并为探讨低维材料动态力学性能提供了一种新的实验 方法。

关键词 实验力学;数字图像跟踪;光学引伸计;低维材料;实时应变 中图分类号 O348 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1662

## Application of Optical Extensometer on the Real-Strain Measurement of Low-Dimensional Materials

Wang Wei<sup>1,2</sup> He Xiaoyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Architectural Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China <sup>2</sup> Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

**Abstract** The study of mechanical property about low-dimensional materials with its wide application has been one of the hot-spots. In the real-strain measurement of low-dimensional materials, the tracking target on the surface of large distance specimen would move out the scope of image tracking. In this way, the tracking target might be lost, which affects the real-strain measurement. So the optical extensometer based on digital image tracking technology is proposed to change the large distance to small one. Then, the tracking objective is adjusted to move in the screen field of view. The method of real tracking can be realized. Moreover, the strain regulation of low-dimensional materials might be dynamically learned. The strain measurement is carried out using micro-mechanics universal testing machine and optical extensometer together. From the experiment, the results obtained by the optical extensometer are agreed with ones obtained by the micro-mechanics universal testing machine. And, the objective is orientated in the 0.01 pixel location using the arithmetic of bilinear inter value. So, the optical extensometer can be applied on the real-strain measurement of low-dimensional materials. Also, a new experimental method is offered for studying the dynamic mechanics of low-dimensional materials.

Key words experimental mechanics; digital image tracking; optical extensometer; low-dimensional material; realstrain

## 1引言

随着人类社会对信息量需求的不断增加,基于 低维材料的量子力学效应的纳米电子学、光电子学、 量子计算和量子通信等正受到广泛的重视,低维材 料已成为当前材料学研究的热点之一。目前,已有 学者在该领域取得了可喜的成果<sup>[1~3]</sup>,中国科学院 力学研究所研制出可用于低维材料测量的微力学万 能试验机,雷振坤等<sup>[4]</sup>利用数字标记点识别法研究 了细丝的微力学性能。但对低维材料进行实时应变 跟踪测量的研究尚不多见。近年来,数字图像处理

收稿日期: 2009-06-15; 收到修改稿日期: 2009-07-24

基金项目:南京工程学院人才科研启动基金(KXJ08016)资助课题。

作者简介: 王 伟(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学测试及其分析等方面的研究。E-mail: ww1177114@163. com

技术越来越多地用于解决以前使用常规方法难以完 成的测试[5~9],其基本原理就是数字图像相关方法。 随着科学研究的深入,该方法得到了进一步改进,应 用范围也进一步拓展[10~13]。

由于低维材料中的一维尺寸占主导地位,故容 易产生长标距试件。但长标距试件表面目标易移出 图像跟踪范围,影响数字图像的实时跟踪测量。因 此,提出基于数字图像跟踪技术[14,15]的光学引伸计 应用于低维材料的实时应变测量。实验证明该方法 不仅可以避免跟踪目标移出视场范围,而且可以嵌 入到跟踪测量系统中,满足实时观察和实时测量的 要求,为探讨低维材料动态力学性能提供了一种新 的实验方法。

#### 跟踪测量原理和实验 2

### 2.1 跟踪测量原理

针对低维材料试件表面的特征,将跟踪目标定 为一块具有明显特征的小区域。该区域可以在试件 上预先制定或者利用试件表面上的斑点。设图像平 面坐标系为 XOY,利用数字图像相关公式(1)式进 行前后两帧连续图像的相关运算,在后续图像中匹 配到目标,然后实时更换模板,实现实时跟踪。

$$C(x,y) = \frac{\sum \sum \left\{ \left[ f(t+1) - \overline{f}(t+1) \right] \times \left[ f(t) - \overline{f}(t) \right] \right\}}{\left\{ \sum \sum \left[ f(t+1) - \overline{f}(t+1) \right]^2 \times \sum \sum \left[ f(t) - \overline{f}(t) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}.$$

式中 C(x, y) 是两幅图像的相关系数, f(t+1) 和 f(t)分别表示目标区域在t+1和t时刻图像灰度  $(f_{t}, \overline{f}(t+1))$  和  $\overline{f}(t)$  分别表示目标区域在 t+1 和 t时刻图像灰度的平均值。

实时跟踪到目标的同时,利用材料的应变公式 计算材料的应变并实时显示在计算机屏幕上,实现 跟踪测量。

#### 2.2 实 验

6期

为测量低维材料的力学性能,将中国科学院力 学研究所研制的微力学万能试验机(MicroUTM)作 为施加载荷的装置,如图1所示,对试件进行加载。 利用光学引伸计(如图2所示)将实际的试件上距离 较长的两标志点转化成图像上可以实时跟踪测试的 距离较短的标志点,其原理图如图3所示。该光学 引伸计是用若干块棱镜组合而成的,而2008年Hua 等使用的是一块楔形镜<sup>[16]</sup>。本光学引伸计的转换 关系为R=1/30,也就是说,假设试件上长标距为



图 1 微力学万能试验机 Fig. 1 Micro-mechanics universal testing machine



图 2 光学引伸计 Fig. 2 Optical extensometer



### 图 3 光学引伸计原理图

Fig. 3 Principle scheme of optical extensomet 30 mm,那么在图像上就会变成长度为1 mm 的两 标志点所占的像素数,这样就可以在同一个视场范 围内实时观察到整个试件的变形情况。截取45 mm 长的一根头发丝作为试件,使其在拉伸端和固定端

(1)

之间留有原始长度为 30 mm 的试验段,30 mm 试验 段的两端用白漆轻轻涂在头发丝上作为标志点,布 置图如图 4 所示。选择三种不同的载荷对试件进行 拉伸实验,三种载荷最大值分别为 0.1N,0.15N 和 0.2N。通过实验,不仅实时观察到目标被跟踪的情 况,而且将每一状态下的应变值自动存储于计算机 上,同时微力学万能试验机将相应状态下的荷载值 记录下来,以便下一步进行数据处理和对比。



图 4 实验布置图 Fig. 4 Experimental arrangement picture

3 数据处理和实验结果

通过分析,得到试件上标志点的跟踪情况及试

件的应变变化规律(以最大载荷为 0.2N 时的变形 结果为例,如图 5 所示)。

图 5(a) 是试件未变形前的状态, 令 L<sub>0</sub> 表示试 件的原长, $L_0 = 30$  mm,看到的长度是经光学引伸 计转化后的结果,上面的那根水平线表示靠近固定 端的标志点所在的位置,下面的那根水平线表示靠 近拉伸端的标志点所在的位置,白色标志就是跟踪 的目标。图 5(b)是试件经拉伸后达到最大拉伸位 置处被成功跟踪的结果,当逐渐卸载时,试件回缩。 图 5(c)是试件在卸载后的状态图。通过仔细观察, 试件没有完全回复到原来的位置,只是很接近初始 状态,说明试件存在残余变形。图5(d)是根据两点 跟踪系统输出的目标移动坐标值绘制的目标轨迹 图,可见靠近固定端的上标志点基本没有移动,而靠 近拉伸端的下标志点随着试件的拉伸发生了运动, 运动轨迹是一条直线,这与实时观察到的运动现象 是一致的。图 6 给出了试件在循环拉伸过程中的应 变变化规律,根据光学引伸计的原理和成像镜头的 放大原理,结合应变公式推导出适合于实验的应变 计算公式(2)式。



图 5 两点跟踪结果图。(a)原始状态图;(b)最大应变位置图;(c)卸载后结果位置图;(d)目标运动轨迹图 Fig. 5 Resulting images of two point tracking. (a) original image;(b) location image of maximum; (c) location image of

result after unloading; (d) track scheme of objective moving



图 6 试件应变变化曲线。最大载荷为(a)0.1N; (b)0.15N; (c)0.2N Fig. 6 Deformation curve of specimen strain. the maximum loading is (a) 0.1N; (b) 0.15N; (c) 0.2N

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \times K, \qquad (2)$$

式中 $\Delta l$ 表示图像上跟踪的两目标之间的距离与原 始距离的差值,单位为 pixel; l表示试件原始长度, l=30 mm; K表示成像镜头的放大倍数,由实验前 的标定系数确定,单位为 mm/pixel。

通过数据处理,分别绘出了 0.1,0.15 和0.2N 时标距为 30 mm 试件相应的应变变化曲线,由于镜 头分辨率较低导致计算应变时只有当试件被拉伸的 长度被图像识别出来之后才开始计算。因此,在试 件拉伸的长度未能被图像分辨率识别时图像计算的 结果仍然是上一次的应变值。如图 6 所示。可以看 出,试件在小载荷拉伸状态下呈现较好的线性性质。 实验结果表明,将光学引伸计引入到低维材料实时 应变测试中,不仅可以成功跟踪到移动的目标,而且 可以同步计算出试件的应变。通过对比微力学万能 试验机绘制的载荷一位移曲线,如图 7 所示,可以看 出试件的载荷一位移曲线同样呈现线性关系,并且 循环两次的过程中线性关系都比较好。同时也可以 看出卸载后仍然残有一定的位移,说明试件发生了 残余变形。两种方法得到的实验结论是一样的,因 此,可以说明提出的方法所得计算结果的可靠性和 有效性,如果提高系统镜头的分辨率,就可以得到更 微小的应变值。



图 7 试件载荷-位移曲线。最大载荷为(a)0.1N;(b)0.15N;(c)0.2N

Fig. 7 Loading-displacement curve of specimen. the maximum loading is (a) 0.1N; (b) 0.15N; (c) 0.2N

从整个实验来看,在一定的外载荷范围内,头发 这一复合低维材料在拉伸时呈现线性的变化规律, 但是在逐渐撤去外荷载时没有完全回归原始状态, 说明头发丝发生了残余变形。

通过三种载荷状态下的跟踪实验,发现 0.2N 载荷下的实验效果最好,这可能是由于试件在 0.2N 载荷拉伸下位移变化比较明显,并且变化频率与目 标跟踪系统运算频率比较接近,才使得跟踪实验的 结果比较理想。因此,实验时选择合适的载荷量也 是提高跟踪系统准确性的一个重要方面。根据 0.2N载荷下的跟踪结果,通过试件截面积的换算可 以得到试件在此拉伸状态下的应力一应变曲线,如 图 8 所示。通过最小二乘法拟合可以看出,在小载 荷拉伸状态下试件变形具有较好的线性性质。



Fig. 8 Stress-strain curve

4 结 论 提出利用基于数字图像跟踪技术的光学引伸计 将大标距转换成小标距,不仅可以在应变测量时保持跟踪目标在视场范围内移动,实现实时跟踪,且可以动态了解低维材料应变变化规律。实验结果表明,微力学万能试验机和光学引伸计进行低维材料的应变测量规律基本吻合,且光学引伸计利用双线性插值可以将目标定位在 0.01 pixel 上。

### 参考文献

- 1 T. Hua, H. M. Xie, B. Pan *et al.*. A new micro-tensile system for measuring the mechanical properties of low-dimensional materials-fibers and films [J]. *Polym. Test.*, 2007, **26** (4):  $513 \sim 518$
- 2 B. Pan, H. M. Xie, Z. Q. Guo *et al.*. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation[J]. *Opt. Eng.*, 2007, 46(3): 033601
- 3 Ji Hongwei, Yu Bennong, Ping Youmei *et al.*. Investigation of the mechanical properties of molded pulp with DICM [J]. *Packaging Engineering*, 2004, **25**(4): 168~170 计宏伟,余本农,平幼妹等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑

材料拉伸时的力学性能[J]. 包装工程,2004,25(4):168~170

4 Lei Zhenkun, Kang Yilan, Wang Huaiwen et al... Micromechanical tensile characterization of single fiber [J]. J. Experiment Mechanics, 2005, 20(1): 72~76

雷振坤, 亢一澜, 王怀文等. 单纤维细丝微力学性能实验研究 [J]. 实验力学, 2005, **20**(1): 72~76

5 Hua Jin, Zhao Zhimin, Wang Kaisheng. Measurement of fiber diameter based on digital image processing [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 220~222

华 晋,赵志敏,王开圣. 基于数字图像处理的光纤直径测量方 法[J]. 光学学报,2009,**29**(s1):220~222

- 6 Sun Wei, He Xiaoyuan. Experimental studies on application of digital image correlation in measuring field of civil engineering [J]. J. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(2): 71~75
  - 孙 伟,何小元. 数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研

究[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(2): 71~75

- 7 Wang Wei, Liu Gendi, Dong Eliang *et al.*. Digital image analysis applied to a mandibular molar and its post-core prosthesis[J]. *J. applied sciences*, 2006, 24(6): 637~641
  王 伟,刘根娣,董萼良等.数字图像分析用于下颌后磨牙及其 桩核修复体[J]. 应用科学学报, 2006, 24(6): 637~641
- 8 Sun Wei, He Xiaoyuan, Quan Chenggen *et al.*. Threedimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28 (5): 894~901

孙 伟,何小元, C. Quan 等. 基于数字图像相关的三维刚体位 移测量方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 894~901

9 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming et al.. Research of highaccuracy digital image correlation measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 197~201

杨 勇,王琰蕾,李 明等.高精度数字图像相关测量系统及其 技术研究[J].光学学报,2006,**26**(2):197~201

10 Pan Bing, Xie Huimin, Xia Yong et al.. Large-deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (2): 400~406

潘 兵,谢惠民,夏 勇等.数字图像相关中基于可靠变形初值

估计的大变形测量[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 400~406

11 Chen Yu, Zhang Xinrong, Zhu Yiwei *et al.*. Micro-dimension detection by means of multi-level segmentation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(2): 64~66
陈 燏,张新荣,朱轶伟等. 多层次分割实现微小尺寸实时测量[I]. 光电工程, 2005, **32**(2): 64~66

12 P. Zhou, K. E. Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image speckle correlation (DISC) [J]. Opt. Eng., 2001, 40(8); 1613~1620

13 Pan Bin, 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

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

- 14 A. Montera Dennis, K. Steven. Object tracking through adaptive correlation[J]. Opt. Eng., 1994, 33(1): 294~301
- 15 D. S. Jang, H. I. Choi. Active models for tracking moving objects[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(7): 1135~1146
- 16 Tao Hua, Huimin Xie, Bing Pan et al. A new mark shearing technique for strain measurement using digital image correlation method[J]. Rev. Sci. Instrum., 2008, 79(10): 105101