

文章编号: 1001-4888(2006)05-0651-04

材料力学性能显微测试系统^{*}

张东升¹, 罗 淼², 韩永胜²

(1. 上海大学 力学系, 上海市上大路 99 号 200444; 2. 上海市应用数学与力学研究所, 上海市延长路 149 号 200072)

摘要: 介绍了适用于毫、微米量级材料的力学性能测试系统, 该系统包括微型加力装置、显微镜及数字图像处理系统。通过计算机控制, 加力机构可以对微小试件按力或位移控制方式加载, 载荷大小通过传感器直接由计算机数字化。试件的变形测量采用数字图像相关技术, 通过序列图像分析方式, 获得试件在不同外力作用下对应的变形, 从而获得该材料的应力应变关系。在利用显微镜对微细观图像进行放大时, 图像的畸变会影响相关计算的精度, 本文采用了精度极高的正交栅板, 对成像系统进行标定, 有效地消除了高放大倍数下的图像畸变。图像相关技术对被测物体的表面处理非常敏感, 本文也对这一问题进行了讨论, 并给出两个不同的应用实例。第一个为材料性能试验, 对厚度为 0.1mm 的铝材进行单向拉伸, 给出了材料的应力应变关系; 第二个为稳态裂纹扩展试验, 对用人牙制作的紧凑拉伸试件进行测试, 获得裂尖后的 COD 曲线。实验表明, 该测试系统在微细观力学实验中具有广阔的应用前景。

关键词: 显微; 力学性能测试; 图像相关技术; 断裂韧性

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

随着 MEMS、纳米技术的不断发展, 对微细材料和结构的机械力学性能的研究逐渐成为一个焦点问题。由于尺寸的限制, 通用的材料试验机对试件的夹持以及力的响应都存在一些问题。更严重的是, 传统的变形测量工具——机械引伸计, 已不能再用于该领域的测量中。

数字图像相关法^[1-3]是力学测量中一种重要的测量手段, 它具有非接触、全场测量的优点。能够有效地避免传统引伸计的限制。随着计算机和摄像机硬件的发展, 以及快速算法^[4-6]的提出, 光测方法中的数字图像相关法以其设备简单、对环境要求低等优点而获得广泛的应用。然而在显微测试中, 由于镜头等成像系统不可避免的缺陷, 必须有合适的方法校正这种影响。

本文介绍了一种微细尺度下材料机械力学性能的测试系统, 它有效地解决了微小试件的夹持、加载、记录数据以及分析数据等问题。它的应用将对细观力学及相关学科的发展起积极的推动作用。

1 测试系统

微细材料/结构力学性能测试系统由控制计算机、微型机械加载机构、光学体视显微镜和图像采集系统组成。微型机械加载机构采用了调速范围为 0.01 mm/min ~ 100 mm/min、调速比为 1 : 10000 的交流伺服系统和电机。电机转速经减速机减速后传递给丝杠副, 丝杠副的螺纹由左旋和右旋两段组成。当电机旋转时带动连接在丝杠副上的夹具接头作相对运动, 以保证试件中心位置固定。力传感器安装

^{*} 收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2006-08-11

基金项目: 上海市教委发展基金(No. 04AB59)

通讯作者: 张东升(1967—), 男, 博士, 教授, 研究领域: 实验力学、生物力学。E-mail: donzhang@staff.shu.edu.cn

在夹具的一端,测力范围:0~100N。在工作时,力传感器的信号通过 A/D 转换直接记录在控制计算机中。

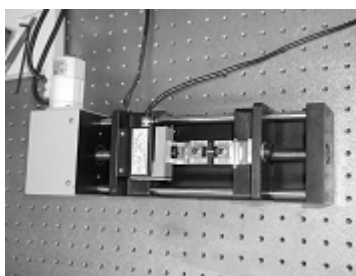


图 1 微型机械加载机构

Fig. 1 Miniature loading frame



图 2 微细材料/结构力学性能测试系统

Fig. 2 Test system of mechanical behavior of materials

为了保证高质量的图像,系统采用了逐行扫描电视摄像机和图像采集卡,可获得 $1376 \times 1035, 8\text{bit}$ 灰度图像,配合长工作距离、高放大倍数显微镜,成像系统可观测到物面 $600\mu\text{m}$ 见方范围的图像。微细材料/结构的变形采用了数字图像相关这种光学非接触测量方式^[7,8]。安装在显微镜上的图像采集系统保证有足够的分辨率对物面进行采样。在试件加载过程中,图像采集系统把物体表面的光强信号转化为序列数字图像存储在控制计算机中,以便通过数字图像相关分析获得物面的变形。由于采用了显微镜对物面进行高倍放大,本文采用了标准正交栅格对成像系统的畸变误差进行了修正。

2 畸变的矫正

对于显微测试,由于采用了显微镜对物面进行高倍放大,因而畸变的影响将不可忽略。本文采用了精密度极高的标准正交栅格对成像系统的畸变误差进行了修正。此栅格是在玻璃载体上刻画出正交的网格,其空间频率为 10 l/mm 。首先用该栅格代替试件位置,记录栅格在显微镜中的成像,然后通过程序计算出每个十字交叉点的位置,它们表示着畸变的信息。大量的研究表明,对于桶形等放射状畸变而言,其中心位置的变形是最小的。通过对中心位置的统计可以得到真实的水平竖直方向的间隔,从而获得各个节点的误差情况。利用如下的公式(1)对所有的节点的误差进行拟合。

$$\begin{cases} \delta_x(x_i, y_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2 + a_6 x_i^3 + a_7 x_i^2 y_i + a_8 x_i y_i^2 + a_9 y_i^3 \\ \delta_y(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + b_7 x_i^2 y_i + b_8 x_i y_i^2 + b_9 y_i^3 \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_i, y_i 是图像坐标系中的位置, $a_i, b_i (i=0, \dots, 9)$ 为待求解的 20 个系数。

该方法要求用于畸变计算的节点数目要足够多。通过计算出公式(1)中的 20 个系数,从而可以计算出该成像系统中任何一个位置的畸变情况,然后在计算中利用公式(2)再把畸变的影响去除,即可得到真实的坐标位置,达到提高计算精度的目的^[9]。

$$\begin{cases} x_0 = R_x[x_i - \delta_x(x_i, y_i)] \\ y_0 = R_y[y_i - \delta_y(x_i, y_i)] \end{cases} \quad (2)$$

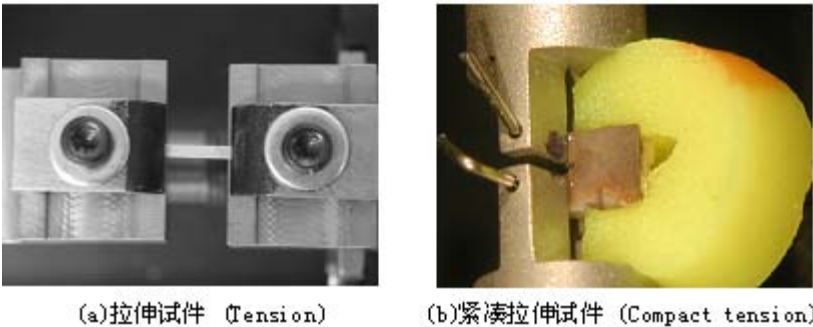
3 实验

本文采用该力学性能测试系统分别对铝质薄膜和由人牙制作的紧凑拉伸试件的力学行为进行了测试。

3.1 铝质薄膜的拉伸试验

铝质薄膜的几何尺寸为 $12\text{mm} \times 1.2\text{mm} \times 0.13\text{mm}$ 。通过夹压方式将试件固定在微型加载机构上,见图 3(a)所示。测试中,采用位移加载模式,加载速率为 0.4mm/min 。在加载瞬时开始记录物面的序列图像,力传感器的采样频率为 20Hz ,图像记录的频率为 0.25Hz 。对记录的图像做数字图像相关分析后,获得物面的变形,有力传感器获得的数据以及材料的初始截面积,可获得应力。它们合成的应

力应变斜率即是材料的弹性模量。有四个样品获得的铝材弹性模量见表 1 所示,它们与机械手册中的标准值是一致的。



(a)拉伸试件 (Tension) (b)紧凑拉伸试件 (Compact tension)

图 3 试件的夹持方式

Fig. 3 The hold methods of the experiments

表 1 铝质薄膜拉伸试验获得的弹性模量值

Tab. 1 The experimental results of Yong's Moduli for Aluminum sheets

试件数	1	2	3	4
弹性模量(GPa)	70.2	72.8	72.3	74.5

3.2 紧凑拉伸试验

从人牙中制作的紧凑拉伸试件见图 4 所示,预制裂纹后的试件通过特殊设计的夹具安装在加载机构上,见图 3(b)所示,并对它进行稳态裂纹扩展试验。采用位移加载模式,每当张力增加 1N 时记录一次物表面的图像,当发现张力突然降低时,停止加载并记录当时的图像。序列图像经数字图像相关分析后可以获得试件在裂纹稳态扩展过程中全场的变形信息,经处理后获得的裂纹尖端位置,裂尖后的 COD 即是裂纹边缘在竖直方向的位移,见图 5 所示。

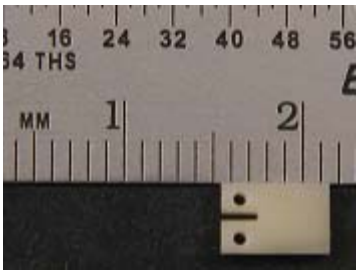


图 4 人牙紧凑拉伸(CT)试件
Fig. 4 Dentin CT specimen

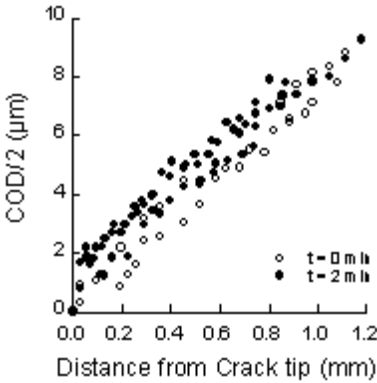


图 5 裂纹的 COD 曲线
Fig. 5 COD profile behind crack tip

4 结论

本文介绍的微型材料力学性能测试系统采用计算机控制机械加载荷图像采集,利用微观数字图像相关技术测量物体的变形。并通过两个微小试件的测试,表明该技术是可行的。该技术将在细观力学研究中发挥重大作用。

参考文献:

- [1] Peters W H, Ranson W F. Digital image technique in experimental stress analysis[J]. Opt Eng, 1982, 21(3):427~431.
- [2] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A, et al. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. Exp Mech, 1985, 25(3):232~244.
- [3] Sutton M A, Chao Y J, Lyons J S. Computer vision methods for surface deformation measurements in fracture mechanics, novel experimental techniques in fracture mechanics[J]. ASME-AMD, 1993, 176: 20317.
- [4] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correlation[J]. Exp Mech, 1989, 29 (3):261~267.
- [5] Zhao W, Jin G. Experimental study on measurement of Poisson's ratio with digital correlation method[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60(8):1083~1088.
- [6] Zhang D, Arola D. A new fast-search strategy for digital image correlation[C]. Proceedings of the SEM Annual Conference on Theoretical, Experimental and Computational Mechanics, Milwaukee, Wisconsin, June 10-12, 2001, Paper No. 80.
- [7] Schreier H W, Garcia D, Sutton M A. Advances in light microscope stereo vision[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(3):278~288.
- [8] Dongsheng Zhang, Arola D. Applications of Digital Image Correlation to Biological Tissues[J]. Journal of Biomedical Optics, 2004, 9(4):691~699.
- [9] Dongsheng Zhang, Miao Luo, Dwayne Arola. Displacement/strain measurement under optical microscope with Digital Image Correlation[J]. Optical Engineering, 2006, 45(3):033605.

A Test System for Mechanical Behavior of Materials in Microscale

ZHANG Dong-sheng¹, LUO Miao², HAN Yong-sheng²

(1. Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China)

Abstract: In this paper, a test system for mechanical Behavior of materials in meso and micro scales is described. It is comprised of a miniature loading frame, a microscope and an imaging system. The loading frame can work in either load-control or displacement-control mode, and signals from the load sensor are digitalized with the control computer. Sequential images are taken while specimens are stressed. Digital Image Correlation (DIC) is employed to analyze the corresponding strain in each load step. In order to improve the precision of strain analysis, lens aberration is considered at high magnification. A plane glass plate coated with precise cross grating is used as a benchmark to eliminate the error caused by microscope. Surface preparation is also discussed at microscale. Two examples are presented. One is the mechanical property of an Aluminum sheet with thickness of 0.1 mm tested under uniaxial tension. The other shows the COD curve behind the crack tip in a small dentin compact tension specimen after the whole displacement field is determined with DIC. Experimental results illustrate that DIC is a powerful tool in identifying the displacement/strain field in micro scale.

Key words: micro scale; mechanical behavior; DIC; fracture toughness