

材料微观力学性能测试加载装置研究

华顺明¹, 张宇¹, 王义强¹, 刘立君¹, 赵宏伟²

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:材料微观力学性能测试以纳米压痕和划痕最具代表性,通过连续记录载荷-深度关系曲线,进而分析获取被测材料的硬度、弹性模量及粘附性等参数。该文提出一种压头固定,试件运动的纳米压痕加载装置,以压电叠堆驱动、柔性铰链传动,实现压入与压出过程。首先讨论了两用于纳米压痕/划痕的直角式柔性铰链方案,进行了静力和模态分析;其次对精密加载单元进行具体结构设计和有限元分析;最后试制了加载装置样机并进行压痕实验。研究结果表明,该装置可较准确测取材料硬度,且具有较好的稳定性。

关键词:压电驱动;柔性铰链;纳米压痕;微观力学性能;有限元分析

中图分类号: TN384; TM359.9; TH87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.06.013

Study on Loading Device for Testing Micro-mechanical Property of Material

HUA Shunming¹, ZHANG Yu¹, WANG Yiqiang¹, LIU Lijun¹, ZHAO Hongwei²

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The nano-indentation and nano-scratch are the most representative tests of the micro-mechanical property testing of materials. The hardness, modulus of elasticity, adhesion and other parameters of the tested materials can be obtained by continuously recording the load-depth relationship curve. In this paper, a nano-indentation loading device with fixed indenter and moving specimen is proposed, which is driven by piezoelectric stack and flexible hinge to realize indentation and extrusion. Firstly, two schemes of right-angle flexible hinges for nanoindentation/scratch are discussed, and the static and modal analysis are carried out. Secondly, the detailed structure design and finite element analysis of the precision loading unit are completed. Finally, a prototype of loading device is manufactured and the indentation experiments are performed. The result shows that the device can measure material hardness accurately and bears good stability.

Key words: piezoelectric drive; flexible hinge; nanoindentation; micro-mechanical properties; finite element analysis

0 引言

目前,材料微观力学性能测试的前沿技术是原位纳米压痕/划痕等方法,通过实时观测分析载荷-深度关系,不仅可获取试样硬度、断裂韧性、蠕变特性等参数,且可考察服役性能,在材料科学、生物医学和微机电系统等领域发挥着巨大作用。该技术以超精密驱动和载荷力/位移的精密检测为支撑,即微纳米级精密驱动单元是材料微观力学性能测试技术的基石。自20世纪中后期以来,出现了利用电致/磁致伸缩材料、形状记忆合金及压电陶瓷等智能材料实现精密驱动的研究,近些年,尤以压电材料的驱

动、检测、控制技术成为热点。美国 MIT、UIUC、NASA 和 LBNL 等机构,德国 RWTH Aachen 大学、日本 AIST 和东京大学、韩国 KAIST、瑞士联邦理工学院洛桑分校(EPFL)等多种压电驱动机构及压电元件的非线性特性等问题开展了系统深入的研究。我国也持续开展了相关研究^[1-4]。

在各类压电驱动器中,直动式驱动机构(压电微位移工作台)输出精度较高,结构较紧凑,且技术较成熟,如德国的 Physik Instrumente(PI)和 Dynamic Structures & Materials(DSM)、美国 nPoint 及哈工大博实精密等公司都有商业化产品,其中的核心技

收稿日期:2019-04-29

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY16E050009);宁波市自然科学基金资助项目(2017A610091)

作者简介:华顺明(1973-),男,吉林大安人,教授,博士,主要从事精密机械与微小机械方面的研究。E-mail:nithuasm@126.com。

术之一即为柔性铰链设计。柔性铰链机构利用弹性材料微小变形及恢复特性,可消除传动空程和机械摩擦,能获得超高的位移分辨率,被广泛应用于精密机构的驱动中。由于柔性铰链机构省略了传统意义上的刚性运动副,按单件进行设计,因此,具有很多独特优点,如运动、定位精度高,成本低,结构紧凑精巧,无摩擦免润滑,使用寿命高等^[5-7]。本文针对材料微观力学性能测试中的精密加载问题,提出了一种利用直推式柔性铰链传动的纳米压痕测试加载装置。

1 直推式柔性铰链分析

直推式柔性铰链一般分为挠曲变形和拉伸变形两种,最简单的直角型柔铰结构简图如图1所示。图中, L 、 w 、 t 分别为铰链长度、宽度和厚度, a 、 b 为铰链截面的宽度和厚度, d 、 Δd 分别为铰链长度及其伸长量, F 为挠曲铰链所受推力和拉伸铰链所受拉力。其力学模型分别为

$$y = \frac{FL^3}{16Ewt^3} \quad (1)$$

$$\Delta d = \frac{Fd}{Eab} \quad (2)$$

式中 y 为铰链的挠曲变形量。据此可设计用于纳米压痕/划痕的结构。

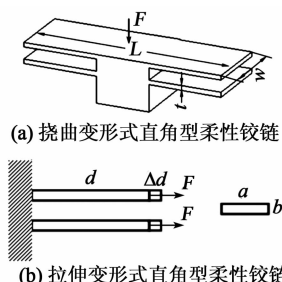


图1 直推式柔铰的两种常用形式

1.1 压痕方向的加载与检测

图2为单自由度直推式柔性铰链结构,适用于沿纳米压痕方向对被测材料进行加载/卸载,或以双悬梁结构检测压入深度。

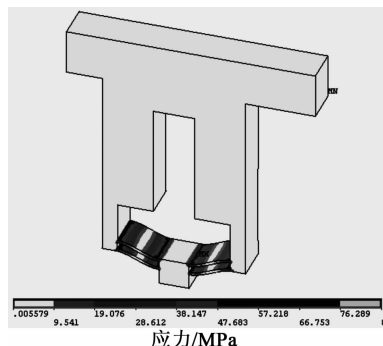


图2 压痕加载用柔铰应力图

通过ANSYS应力应变分析和模态分析^[8-9],该类型结构的一阶固有频率约为1 kHz,阶跃响应特性和输出特性曲线如图3所示(以5 V步距进行加载、卸载),响应时间和步距精度可满足压痕要求。

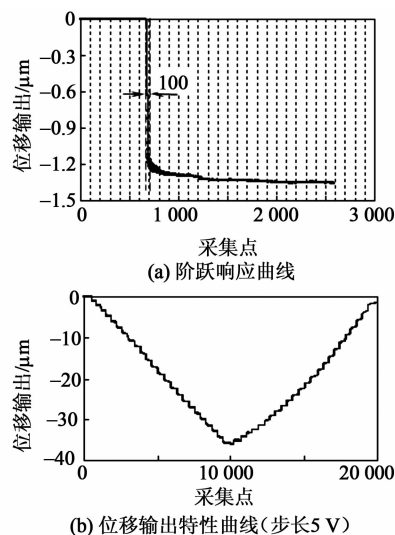


图3 双悬梁结构的特性曲线

1.2 刻划方向的加载与检测

图4为 x 、 y 两自由度直推式柔性铰链结构。以2只压电叠堆沿正交方向推动输出端,适于沿被测材料表面进行刻划测试或检测划痕位移。此时,2组铰链分别工作在挠曲和拉伸变形状态。

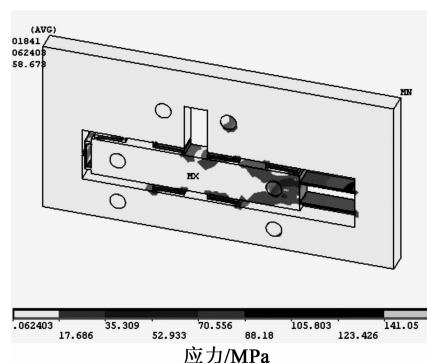
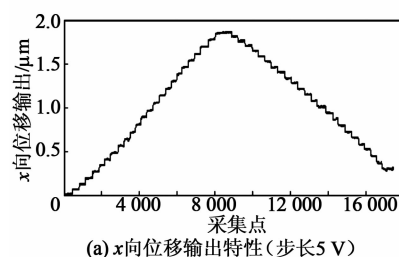
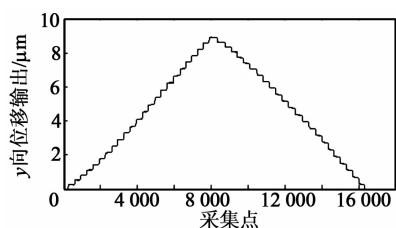


图4 x 、 y 两自由度刻划用柔铰应力图

该类型结构的一阶固有频率约为2.5 kHz,两正交方向的位移输出特性曲线如图5所示,其中 y 向挠曲变形步距大于 x 向拉伸步距。



图5 x 、 y 两自由度柔铰结构输出特性

2 精密加载单元设计

本文仅以实现纳米压痕为目的,故按图2所示原理设计直推式精密驱动机构,并采取金刚石压头固定、试件随柔性铰链机构输出端运动的策略实现压入与压出过程,如图6所示。

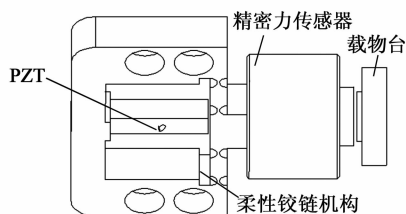


图6 精密驱动机构

实际条件下,柔性铰链多采用圆弧型结构而非直角结构^[10],此时铰链厚度是影响机构刚性和输出性能的最大因素。利用ANSYS软件,分析 $F=20\text{ N}$ 、 $t=0.3\sim 0.7\text{ mm}$ 时输出性能。通过HyperMesh对柔性铰链进行网格划分,在4个螺栓孔处施加全约束,在输出块上施加 20 N 的作用力(见图7)。

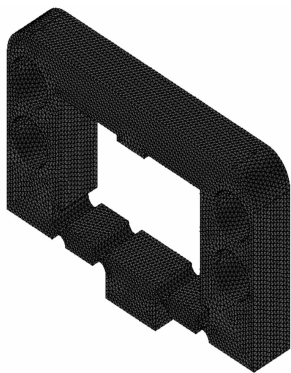
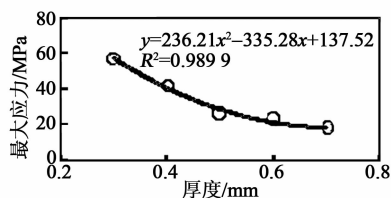
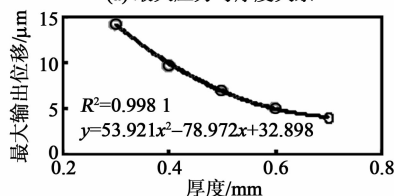


图7 HyperMesh划分网格结果图

将分析结果以最小二乘法进行曲线拟合^[11](见图8),可知最大应力和最大输出位移都近似为 t 的二次多项式,且线性相关系数 R^2 接近于1,说明拟合关系可靠,可用于铰链设计。



(a) 最大应力与厚度关系



(b) 最大输出位移与厚度关系

图8 最大应力、位移与铰链厚度关系

选取 $t=0.5\text{ mm}$ 进行铰链设计,在压电叠堆的作用面上施加向下的 $10\text{ }\mu\text{m}$ 位移载荷,分析结果如图9所示。铰链应力主要集中在A点至B点之间,最大应力为 14.78 MPa ,远小于65Mn的许用应力(432 MPa),铰链安全。

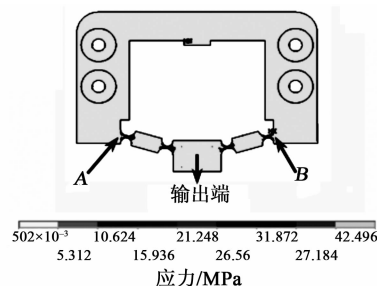


图9 柔铰应力分析结果

若将A点至B点的应力值提取并绘制曲线,可直观分析铰链的应力分布状况(见图10)。显然,应力峰值主要集中在铰链4个圆弧的中点处,特别是在靠近A、B点处。据此,将中间两处柔铰厚度和边缘柔铰厚度分别设计为 0.5 mm 和 0.7 mm 。

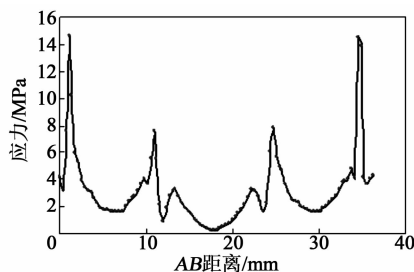


图10 柔性铰链由A点至B点的应力分布图

模态分析技术是评价结构动态特性的有效手段^[12]。分析表明,此机构前三阶固有频率分别为 3.992 kHz 、 8.912 kHz 和 10.077 kHz ,远高于压痕测试的工作频率(低于 100 Hz),测试加载过程柔铰不会出现共振。图11为柔铰机构一阶振型图

(3 992 Hz)。由图可看出,虽然在高阶固有频率附近,铰链存在附加扭转、摆转运动导致测量误差,但测量采用一阶振型,基本无附加运动误差。

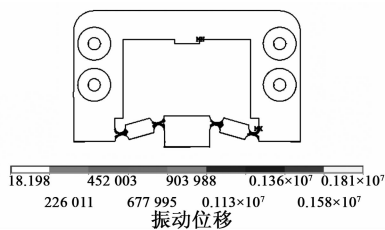


图 11 柔铰机构一阶振型图

3 纳米压痕加载装置及试验

3.1 样机试制及工作原理

根据以上设计和分析结果试制了纳米压痕测试装置,样机如图 12 所示,加载方式为压头固定、载物台运动,铰链材料为 65Mn,压电叠堆采用 NEC Tokin 公司 AE0505D16F 型积层压电驱动器。

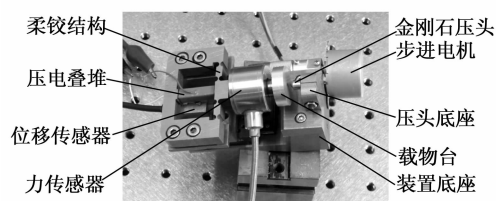
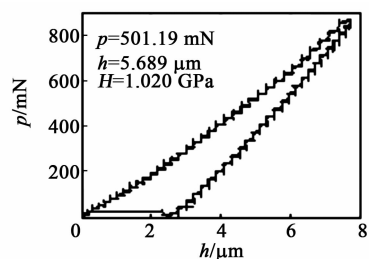


图 12 纳米压痕测试装置样机

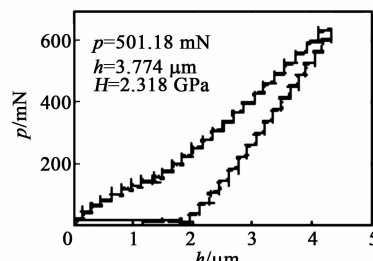
纳米压痕测试装置样机工作原理:载物台带动被测试件沿加载方向运动,先由步进电机宏动调整,通过力传感器读数变化判断压头与试件表面接触情况;待二者接触后,改用精密驱动机构实现金刚石压头对试件表面的压入与压出过程。测量过程中,通过力传感器和位移传感器对载荷信号和位移信号同步拾取,经调理后通过 A/D 卡转换并送入上位机,数据处理后得到被测试件的力学参数。同时,借助高倍显微组件,对压痕测试过程实时观测,初步实现了对材料变形、损伤机理的原位测试研究。

3.2 不同材料压痕测试

将样机配以三棱锥压头,对钠钙硅酸盐玻璃、碳化硅陶瓷分别进行压痕测试。根据所测数据,绘出压入载荷-深度关系曲线(p - h 曲线),如图 13 所示。随机选取卸载曲线在 501 mN 时的测量值,2 种材料的 h 分别为 5.689 mm、3.774 mm,根据 Oliver-Pharr 理论得到钠钙硅酸盐玻璃、碳化硅陶瓷在此载荷下硬度值 H 分别为 1.020 GPa 和 2.318 GPa,与工程材料技术手册数据值基本一致。



(a) 钠钙硅酸盐玻璃



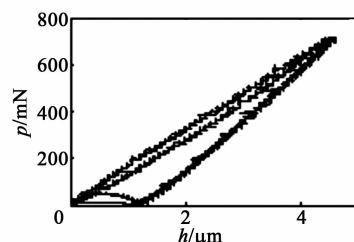
(b) 碳化硅陶瓷

图 13 2 种材料的压痕测试曲线

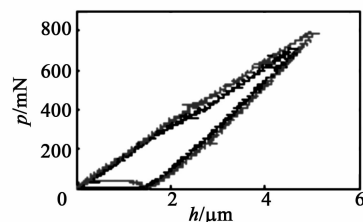
3.3 重复性试验

为做对比,将顶角 115° 的三棱锥压头更换为顶角为 118° 的四棱锥压头,并对钠钙硅酸盐玻璃、碳化硅陶瓷分别反复进行压痕试验,以考察样机重复性指标。

对 2 种材料各自选取 2 次实验数据,将 p - h 结果绘制在同一坐标系下(见图 14)作对比,可见曲线重合性较好,说明测试装置具有较稳定的测试性能,利用本装置可初步实现对不同材料的微观力学性能进行测试、分析与对比。



(a) 钠钙硅酸盐玻璃



(b) 碳化硅陶瓷

图 14 2 种材料的重复性试验结果

4 结束语

本文设计了一种压头固定、试件移动的纳米压痕加载测试装置。该装置以压电叠堆驱动、直推式

柔性铰链机构传动,通过串联的力和位移传感器拾取压力、深度信息。经过压痕实测,获得了与文献数据基本一致的钠钙硅酸盐玻璃、碳化硅陶瓷两种材料的硬度数据。试验表明,该加载装置结构简单紧凑,加工制作方便,测量结果一致性好,对开展材料微观力学性能测试研究具有实际意义。

参考文献:

- [1] 黎明,温诗铸. 纳米压痕技术理论基础[J]. 机械工程学报,2003,39(3):142-145.
LI Ming, WEN Shizhu. Theoretical methods on nanoindentation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 142-145.
- [2] 李言,孔祥健,郭伟超,等. 纳米压痕技术研究现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术,2017,36(3):469-474.
LI Yan, KONG Xiangjian, GUO Weichao, et al. Current state and development trends of nano-indentation technology[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(3): 469-474.
- [3] 张段芹,刘建秀,褚金奎. 低维纳米材料的力学性能测试技术研究进展[J]. 微纳电子技术,2014,51(7):451-457.
ZHANG Duanqin, LIU Jianxiu, CHU Jinkui. Research progress in testing techniques for mechanical properties of the low-dimensional nano-materials[J]. Micronano-electronic Technology, 2014, 51(7): 451-457.
- [4] HE D, ZHU J C, LAI Z H, et al. Residual elastic stress strain field and geometrically necessary dislocation density distribution around nano-indentation in TA15 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 7-13.
- [5] 黄虎,赵宏伟,史成利,等. 压电驱动型微纳米压痕测试装置的设计与试验研究[J]. 机械工程学报,2013,49(12):1-7.
HUANG Hu, ZHAO Hongwei, SHI Chengli, et al. Design and experimental investigation of PZT-driving type micro/nanoindentation device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 1-7.
- [6] XU J, CORR D J, SHAH S P. Nanomechanical properties of C-S-H gel/cement grain interface by using nanoindentation and modulus mapping[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2015, 16(1): 38-46.
- [7] 黄虎,赵宏伟,万顺光,等. 纳米压痕测试装置机架刚度直接标定法的改进[J]. 西安交通大学学报,2012,46(8):122-127.
HUANG Hu, ZHAO Hongwei, WAN Shunguang, et al. Direct calibration improvement for frame compliance of nanoindentation instrument[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(8): 122-127.
- [8] 邱丽芳,王栋,印思琪,等. Deform_X 柔性铰链设计与分析[J]. 农业机械学报,2017,48(4):370-376.
QIU Lifang, WANG Dong, YIN Siqi, et al. Design and analysis of deform-X flexure hinge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 370-376.
- [9] 余跃庆,李清清. 一种新型柔性铰链的设计、制作与试验研究[J]. 机械工程学报,2018,54(13):79-85.
YU Yueqing, LI Qingqing. On the design, manufacturing and experiment of a new type flexural joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 79-85.
- [10] 姚俊飞,陈超,陈海鹏. 基于三角位移放大机构的压电制动器研究[J]. 压电与声光,2017,39(6):813-816.
YAO Junfei, CHEN Chao, CHEN Haipeng. Research on the piezoelectric brake based on the triangle displacement amplification mechanism[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(6): 813-816.
- [11] 李如意. 仿生枪虾式压电射流泵的设计及实验研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [12] 王承涛,王禹桥,杨雪锋,等. 基于 ANSYS 的差动式位移放大机构性能分析[J]. 机械传动,2017,41(5):59-76.
WANG Chengtao, WANG Yuqiao, YANG Xuefeng, et al. Analysis of the stiffness characteristic of three types of four-bar flexure hinge mechanism based on ANSYS[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(5): 59-76.