

微型材料的拉伸测试方法研究*

RESEARCH ON TENSION MEASUREMENTS FOR MINISIZE MATERIALS

张泰华¹ 杨业敏¹ 赵亚溥¹ 余同希² 孙庆平²

(1. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

(2. 香港科技大学 机械工程系, 香港九龙清水湾)

ZHANG Taihua¹ YANG Yemin¹ ZHAO Yapu¹ YU Tongxi² SUN Qingping²

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

摘要 微电子机械系统技术的迅速崛起,推动了微型材料拉伸测试方法的发展。文中列举几种典型的微型材料拉伸实验方法,具体说明其驱动方式、力和位移测试原理,并介绍实验中的难点,如试样加工、夹持和对中等方法。并进一步分析能满足未来发展需求的拉伸测试原理。

关键词 微电子机械系统 微型材料 拉伸

Abstract The rapid developments of micro-electro-mechanical systems (MEMS) make progress in the research on the tension measurements of minisize materials. The paper is specially focused on introducing several typical tension ways, and cited in illustration of the tension measuring principles for drive, load and displacement and the difficulties of sample handling, alignment and gripping. Finally, a discussion of the future on tension measuring principle is given.

Key words Micro-electro-mechanical system; Minisize materials; Tension

Correspondent: ZHANG Taihua, E-mail: zhangth@lnm.imech.ac.cn, Fax: +86-10-62561284

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10102021 and No. 10172086).

Manuscript received 20010704, in revised form 20010723.

1 引言

微电子机械系统(MEMS)已广泛应用于国防、医疗、航空航天、汽车等领域。如今人们已不再满足某些系统功能的实现,而是更多地关注 MEMS 结构的优化设计及其工作的稳定性和可靠性等问题。这就对 MEMS 所用材料和结构的力学性能检测与破坏机理提出新的要求^[1]。

MEMS 器件的加工常采用表面或体加工技术,所用材料多为 Si、Si₃N₄、SiO₂、Al、Au、Ni 等。在设计 MEMS 结构和进行可靠性分析时,迫切需要知道所用材料微构件的力学性能参数,如弹性模量和断裂强度等。单轴拉伸是测量弹性模量、泊松比、屈服强度和断裂强度等最直接的方法。目前,对典型的微尺度拉伸试样,假定有效标距的长度约为 1 mm,厚度为几微米,所需拉力小于 1 N,弹性变形一般在 1~5 μm,断裂变形一般低于 20 μm^[2,3]。虽然单轴拉伸实验的数据容易解释,但是由于试样尺寸小,传统的单轴拉伸测试设备在诸多方面不能满足要求。这就迫切需要设计出能满足上述要求的单轴拉伸实验系统。

一般说来,拉伸装置主要包括四部分,驱动、力传

感器、位移传感器、机械框架和夹具。微拉伸实验的难点主要在于如何提高载荷和位移的测量精度,试样的加工、夹持和对中即保持试样与拉力之间的同轴性。以下分别举例说明微拉伸装置的测试原理、结果和发展趋势。

2 测试原理

拉伸实验装置主要由四部分组成,驱动器、力传感器、位移传感器、机械框架和夹具。对于微拉伸实验来说,这四部分必须与微试样相匹配。

2.1 驱动方式

Ogawa^[4]采用线性马达作为驱动方式,加载较为连续,但中途无法停止。Tsuchiya 等人^[5,6]使用步进马达作为驱动方式,载荷呈台阶状,但中途可以停止。

目前,使用压电式激励器^[3,5~15]作为驱动方式的较多,主要用计算机编程控制压电单元释放位移,从而带动夹头提供驱动力,但压电单元中有蠕变、滞后和非线性等问题,至今未能很好解决^[12]。

电磁驱动是一种较为理想的驱动方式,它具有很好的线性、低滞后性、无摩擦,能直接进行精确控制等特点;运动的磁铁或线圈相对于结构具有很小的惯性,

* 20010704 收到初稿,20010723 收到修改稿。国家自然科学基金资助项目(10102021 和 10172086)和受香港科技大学微系统力学研究“种子经费”资助。

在磁力作用下能实现沿轴向自动对中,从而消除横向力,同时也能降低振动。在得到电磁力与电流的线性关系后,可通过施加变化电流控制力的大小,从而克服微拉伸装置中微小力的测量困难^[16,17]。

温诗铸课题组的拉伸装置使用载流线圈驱动磁铁运动的动磁驱动方式,具体工作原理如图 1 所示。利用磁力驱动拉杆,对试样施加拉伸载荷。驱动力的大小受磁场梯度的控制,而磁场梯度取决于电流的大小,因此可实现精确控制,使得磁场梯度和驱动力与线圈激励电流呈线性关系^[17]。

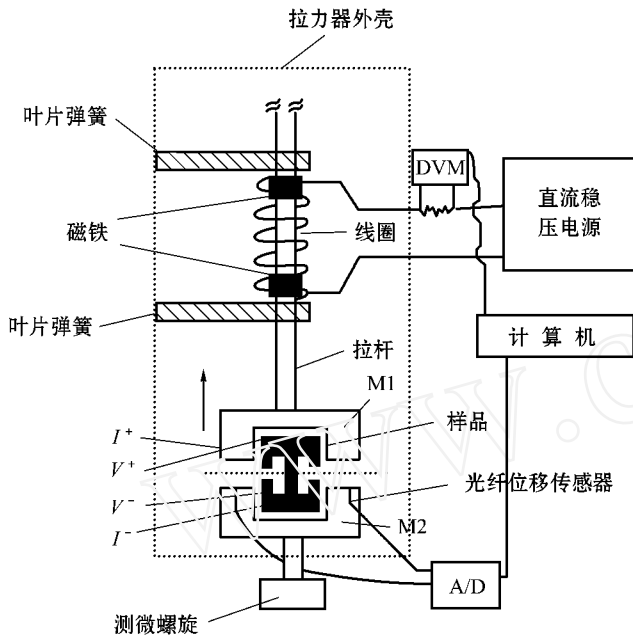


图 1 电磁力驱动实验装置^[17]

Fig. 1 The testing set-up with a magnet-coil force actuator^[17]

力学所的本文作者研制的拉伸装置采用磁场驱动载流线圈运动的动圈驱动方式,并能通过控制电流波形,实现单调拉伸、拉拉疲劳和其他复杂加载方式。

2.2 载荷测量

对线性或步进马达、压电式激励器等驱动方式,载荷大小需经力传感器测量。目前,已有量程为~0.2 N 的商品化力传感器,一般用标准砝码标定传感器的精度^[2],分辨率约为 1 mN。

Mazza 等人^[14,15]的拉伸装置的载荷测量非常巧妙。他们用计算机通过压电控制器去控制压电单元产生拉力,载荷大小用电子分析天平测量。这种天平可以看成是一种电磁力平衡式称重传感器,它是利用电磁力平衡重力原理制成的。当加上或卸除载荷时,称盘位置发生变化,从而带动线圈移动,位移传感器将此位置改变转化为电信号,经 PID(比例—积分—微分)调节器、放大器后,以电流形式反馈到线圈中,使电磁力与被称物体的重力相平衡,称盘恢复到接近原来的平衡位置。因此,反馈电流与被称物体的重量成正比关系,只要测出该反馈电流,就可知道被称物体重量的大小。

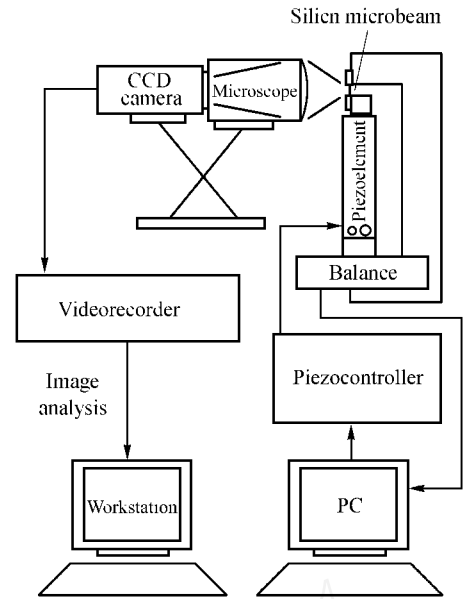


图 2 天平实验装置^[14]

Fig. 2 The testing set-up with a balance^[14]

该天平的最大量程为 12 N,分辨率为 10 μN,具体装置见图 2。

Mazza 等人仅仅把电子分析天平作为力传感器使用,而没有赋予它驱动功能。我们的拉伸装置的驱动和载荷测量是合二为一的。具体原理为,载流线圈在恒定磁场中所受到的电磁力为 $F = kIBL$ (I 为电流强度, B 为磁场强度, L 为线圈长度, k 为与磁场和线圈结构相关的常数)。对这种电磁驱动方式,经合理设计后可保证电流和载荷具有很好的线性度。目前,该装置的电压和砝码重量拟合曲线的线性度达 0.999 51。这种方法能直接提供高分辨率的载荷。如 MTS 公司生产的 Nano Indenter XP 中的 DCM 配件的载荷分辨率已达 1 nN(量程 10 mN,驱动方式为载流线圈在磁场中受力)^[18]。

2.3 位移测量

位移测量主要有平均位移和全场位移测量两种方法。

2.3.1 平均位移测量

双视场标记法(见图 3)^[4]。Ogawa 为了测量位移,事先在试样表面上沉积两个厚为 50 nm 的氧化铬标记点,再用高放大倍数光学显微镜观察试样的变形。由于视场较小,他设计了双视场的光学显微镜,通过在两个视场中分别观察各自标记点的运动,最终测量出两标记点之间的位移。这种方法可以达到 1 μm 的分辨率或更高一些。

干涉应变计标记法^[7~10]。Sharpe 等人^[7]设计一种称为干涉应变计 (ISDG: Interferometric Strain/Displacement Gauge) 的方法测位移。他制作多晶硅试样,有效标距段部分的宽 600 μm 和厚 3.5 μm。事先在有效标距段内沉积上厚为 0.5 μm、宽为 20 μm 的两条金线,金

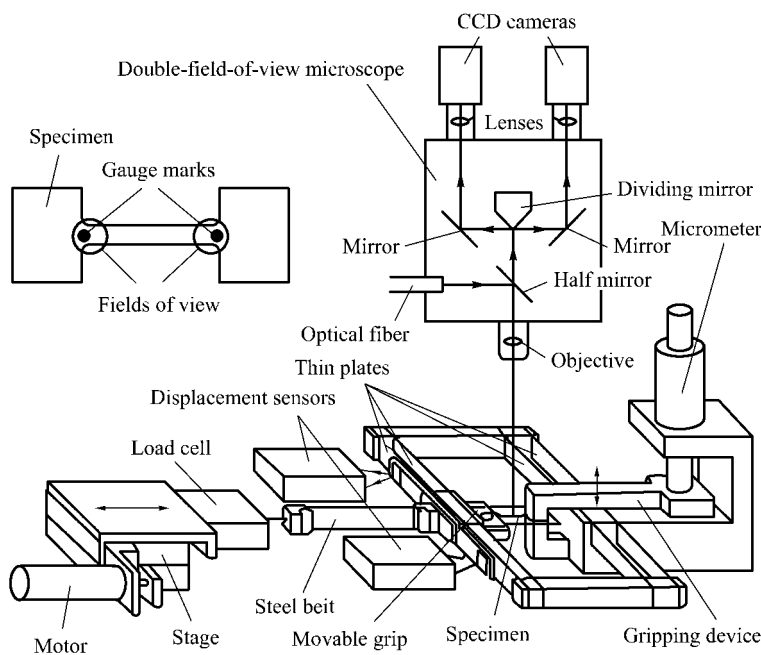


图3 双视场光学显微镜实验装置^[4]

Fig. 3 The testing set-up with a double-field-of-view microscope^[4]

线之间间距为 300 μm。在激光(波长 632.8 nm)照射下,从带有斜度的两条金线边缘反射的光,经干涉后可得到较清晰的干涉条纹。两金线之间的位移测量分辨率可达 1 μm。如果再沿试样长度方向沉积两条平行金线,就可测量试样的泊松比。Taechung 等人^[10]也借鉴此方法进行位移测量。

光纤法^[16,17]。温诗铸课题组采用基于改变反射面和光纤端面之间距离的反射光强调制型传感器,以动

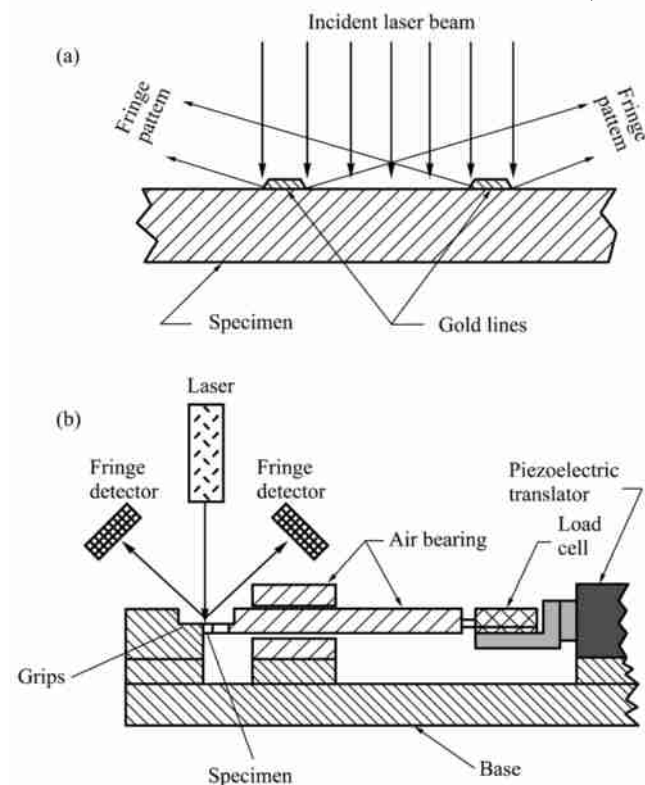


图4 干涉实验装置^[7]

Fig. 4 The interferometric testing set-up^[7]

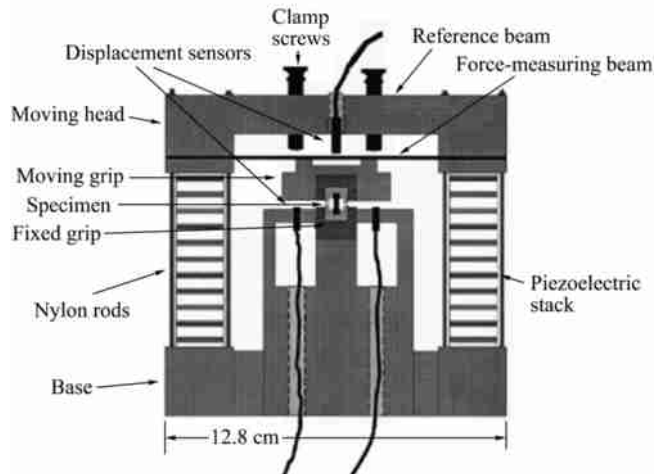
卡头的表面作为反射面(见图 1)。为提高反射效果,在反射面上安装一微镜。在恒温条件下其测量分辨率为 50 nm。

平板电容法。我们对电容法测位移进行了可行性研究,电容法能达到很高的位移分辨率,如 MTS 公司生产的 Nano Indenter XP 中的 DCM 配件,能在 2 mm 范围内分辨 1 nm 以下的位移,测量方式为平板电容^[18]。

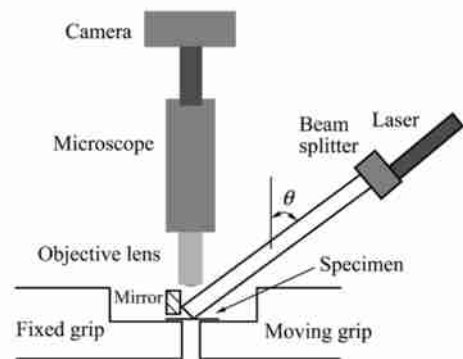
2.3.2 全场位移测量

散斑法^[3,11,12]。Read 等人^[3]采用电子散斑干涉法(electronic speckle pattern interferometry: ESPI)测长 1 000 μm、宽 250 μm 和厚 1 μm 的铜膜在拉伸下的面内位移。使用的激光波长 632.8 nm,装置和光路分别见图 5a 和 b。散斑图像经装有 CCD 的光学显微镜和 12 bits 的数据采集系统放大记录下来。散斑法是一种无接触的全场测量方法。所需设备简单,仅需一些简单的光具、一台激光器、相机和计算机等。

标记法是直接将标记制作在试样的有效标距段内,测量值直接为试样的位移,但试样制作复杂,标记对实验结果可能有一定的影响。光纤传感器有较高的



(a) 实验装置
(a) The test apparatus



(b) 光路
(b) The experimental arrangement

图5 电子散斑干涉测量^[3]

Fig. 5 The electronic speckle pattern interferometry measurement^[3]

分辨率,但在使用前必须进行标定,通过实验建立传感器输入量和输出量之间的关系,并确定出使用条件下的误差,所测位移必须考虑扣除夹头等机构的位移变化。散斑干涉法,无需在试样上作任何标记,并且能达到亚微米的分辨率,测量结果为试样本身的位移。

2.4 机械框架

从装置整体结构上看,对于位移测量有两种解决方案,一种是直接测量试样有效标距内的位移,这种方案多采用在位的非接触式光学测量方法,如文献[3,4,7~15],不需要考虑测量系统即力传感器和夹具的刚度或柔度,但结构相对比较复杂。另一种是沿用传统的材料试验机的设计思想,位移传感器装在力传感器的尾部,即位移和力传感器耦合在一个框架内,结构紧凑、操作方便,但系统的刚度或柔度需事先标定,位移测量结果最后应扣除夹具和力传感器的位移。

对某些局部结构,如可移动夹具和力传感器之间应该使用空气轴承的作动杆,这样可以减小摩擦。MTS 公司的 Tytron250 微力实验系统^[18]和 Sharpe 等人的拉伸实验装置^[7]考虑到这个问题。

2.5 试样的制作

由于试样的特征尺寸在微米量级,一般在加工时应注意两点。首先,应将试样制作在保护性框架内或基底上,避免试样在安装时被损坏;其次,试样被夹具夹持的面积应远大于试样的横截面积,这样便于夹具夹持。如 Ogawa 等人^[4]在测量靠电磁溅射(magnetron sputtering)制作的 0.5 μm 厚钛膜和 1.0 μm 厚铝膜的拉伸力学性能时,发现这两种试样易碎,于是利用微加工技术,把有效标距宽为 300 μm 和长 1 400 μm 的试样固定在硅片上,然后再将试样下面和周围的硅腐蚀掉,只剩下四个宽为 30 μm 的梁与周围的保护性硅框架连接,以便于试样的安装。试样夹持部分被加工成两端较大的哑铃状,这样在拉伸时能提供足够大的剪切力,

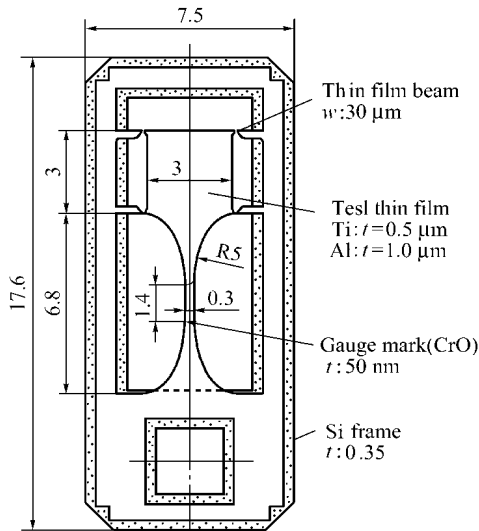


图 6 Ogawa 的试样^[4]
Fig. 6 Ogawa's sample^[4]

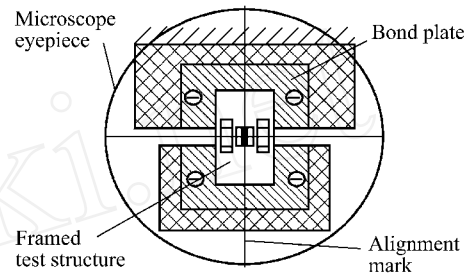
以保证夹具和试样之间无滑动(图 6)。

2.6 试样的对中和夹持

一般说来,试样需在光学显微镜下装配,试样靠显微镜视场中十字标记来对中,如图 7a。

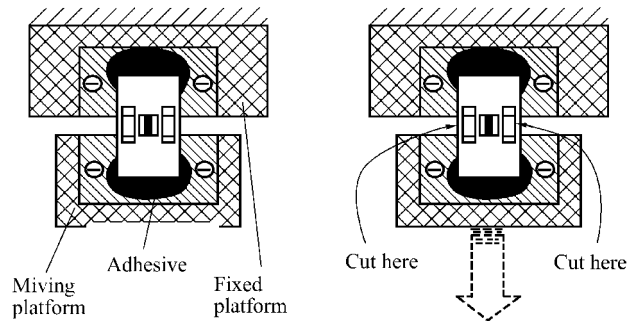
夹持一个特征尺寸在微米量级的微小试样,可能是微拉伸试样中最具挑战性的任务^[9]。微小偏差即未对中(misalignments)将会导致大的扭曲应变,另外夹具也很容易损坏试样。目前有胶粘、机械夹持和静电夹持三种办法夹持微小试样。

胶粘固定方式。Wan Suwito 和 Read^[11]的试样装配采用此方式。具体作法如下:在所有的测量部件被校准以后,带有保护性框架的试样被放置在静夹具平台上,并利用光学显微镜调整位置,确保试样对中(图 7a)。



(1) 放置和对中

(1) Place and align the test structure on top of the bond plates



(2) 粘结

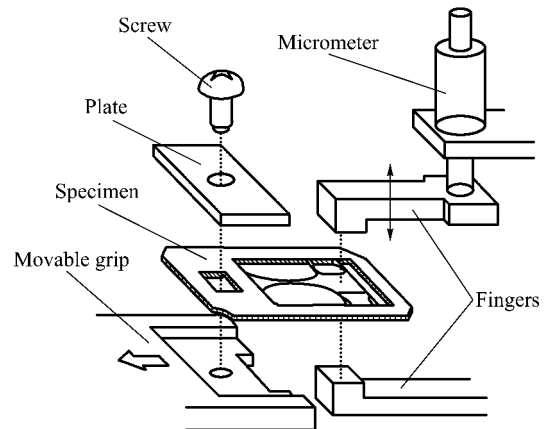
(2) Bond the test structure to the bond plates

(3) 释放拉伸试样

(3) Sever the ligaments to render the test structure ready for tensile testing

(a) 胶粘试样示意图^[11]

(a) A schematic drawing of fixing the sample using the adhesive^[11]



(b) 机械夹持试样示意图^[4]

(b) A schematic drawing of fixing the sample using mechanical force^[4]

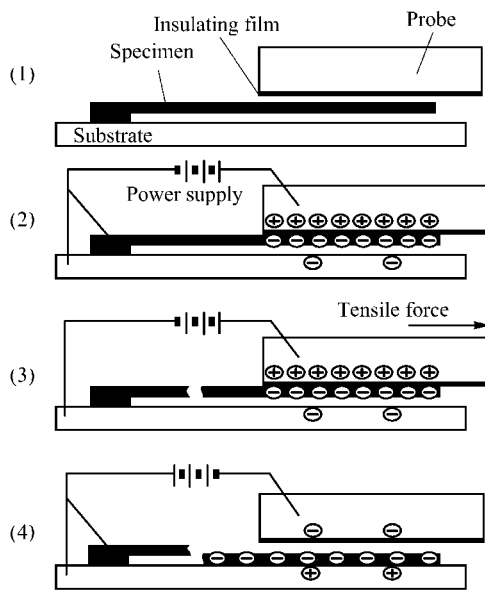
(c) 静电夹持试样示意图^[5,6](c) A schematic drawing of fixing the sample using electrostatic force^[5,6]

图 7

Fig. 7

先滴少许胶在静平台上,由于毛细效应,试样框架被粘在静夹具平台上。然后用同样的方法将试样另一端粘在动夹具平台上,以减少试样的变形。粘好后,用带有金刚石毛刺的高速涡轮牙科车刀将试样两边的保护性框架切掉,最后只剩下待测试样连接在动静平台上。

机械夹持方式。Ogawa 等人用此方法夹持试样^[4],见图 7b。带有硅保护框架的试样靠螺钉和平板夹在动夹具上,另一端用带有微米精度定位台的夹具夹上,最后用针把试样和硅保护性框相连的四个微梁切断,于是实验用的有效标距段就被释放出来。

静电夹持方式。Tsuchiya 等人^[5,6]设计的拉伸实验系统被装置在扫描电镜中,其中设计最巧妙的是图 7c 所示的夹持工具。试样是用表面微加工技术制作成的多晶硅悬臂梁,自由端较大,便于夹持;另一端键合在硅片上。整个试样放在高精度定位平台上。首先,在与试样接触的探针表面处涂上绝缘膜。其次,用探针与电源的正极相连,带正电;试样和硅片与负极相连,带负电。调节电源电压,静电力控制在保证拉伸过程中探针和试样之间无滑动。在扫描电镜观察下,高精度的定位平台和静电夹具配合使用,以保证试样的对中。接着,用步进马达带动微探针,直至拉断。最后,电路中的电源反接,探针和硅片分别带负电荷和正电荷,这样被拉断试样和探针均带负电荷,彼此相斥而分离。

这里,静电力的大小为

$$F = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2d^2}$$

式中 A 为静电力垂直作用于试样表面的面积, d 为绝缘层的厚度, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ 为绝缘常数, V 为所加电压。

在上述三种办法中,静电夹持方法操作简单,是一种较为理想的方法。目前已广泛应用。

2.7 商品化装置

以上介绍的装置主要由各研究机构根据需要自行研制的,没能商品化。MTS 公司 1999 年推出了商品化的 Tytron 250 微力实验系统(Microforce Testing System)^[18]。该系统主要针对电子及其封装材料(包括 MEMS)、生物软组织、医疗器材、高聚物和其他材料等设计的拉压实验装置。驱动由线性伺服马达(linear servomotor)提供。为了减少摩擦,使用的是空气轴承。可在 $1 \mu\text{m/h} \sim 0.5 \text{ m/s}$ 速度和 $0.001 \text{ Hz} \sim 50 \text{ Hz}$ 频率范围内完成静态和动态实验。可调整的实验距离为 $0 \sim 0.5 \text{ m}$,位移为 $100 \text{ mm} (+/- 50 \text{ mm})$ 。主机的载荷分 $\pm 250 \text{ N}$ 和 $\pm 25 \text{ N}$ 两档,精度为 0.5% 。整个系统用计算机控制,并配有便于操作和分析的软件。其中,适于测量上述 MEMS 薄膜构件的配件有 MTS 661.09 低力传感器(量程为 $\pm 5 \text{ N}$ 和 $\pm 1 \text{ N}$,分辨率 1 mN)、高精度位移传感器(量程为 $\pm 2 \text{ mm}$,分辨率 $0.1 \mu\text{m}$;量程为 6 mm ,分辨率 $0.3 \mu\text{m}$), $X-Y$ 高精度定位平台和夹具等。

综上所述,目前单轴拉伸实验方法大致可分成

驱动方式——线性或步进马达、压电激励器、电磁力。

载荷测量——力传感器和测量电流。

位移测量——平均位移测量(光学显微镜、干涉应变计法、光纤法、电容法),全场位移测量(散斑干涉)。

系统结构——是否需要标定系统结构的柔度或刚度。

3 实验结果

目前,微拉伸测试方法多种多样。表 1 是典型微拉伸实验的总结,这包括驱动方式、力和位移测量、试样制作与夹持、实验结果等。从表 2 铜的实验结果来看,工艺条件影响薄膜材料的特性。为了比较不同的测试方法,常用同种工艺加工的试样分别进行实验。Sharpe (Johns Hopkins University)、Brown (the Failure Analysis Association)、Johnson (University of California, Berkeley) 和 Knauss (California Institute of Technology) 这四个研究小组分别用自己发展起来的实验方法进行多晶硅的循环实验(Round-robin Testing),具体结果见表 3。

总之,微构件的力学性能测试目前尚未形成统一的实验标准和规范,各种方法得到的微构件力学特性参数有一定的差异(表 1 和表 3),这除了与微构件的制造工艺有关外,可能还与实验误差和微构件固有的一些特性相关。

4 发展需求

从目前的发展趋势尤其纳米电子机械系统

表 1 实验方法和结果总结一览表
Tab.1 The summary of some testing ways and results

文献	测量方法				试样*				实验结果	
	驱动方式	载荷测量	位移测量	夹持方式	材料	工艺	厚度/ μm	晶粒/ μm	弹性模量/GPa	断裂强度/GPa
[5,6]	步进马达	应变计	应变计	静电	n/P	LPCVD	1.8/2.4	0.3/0.3	163/167	2.0~2.7/ 2.0~2.8
[7]	压电	力传感器	ISDG	胶粘/静电	P	LPCVD	3.5	0.1~0.9	170.0 \pm 6.7	1.21 \pm 0.16
[16,17]	电磁	测量电流	光纤	胶粘	n	LPCVD	2.4	0.2	164.0 \pm 1.2	1.36 \pm 0.14
[10]	压电	力传感器	ISDG	机械	单晶硅 110	LPCVD	2~5		169.2 \pm 3.5	0.6 \pm 1.2
[11]	压电	力传感器	散斑干涉	胶粘	单晶硅 110	外延	15		166	1.21
[4]	线性马达	力传感器	光学显微镜	机械	Ti/Al	电磁溅射	0.5/1.0			1.06/0.15
[15]	压电	电子天平	光学显微镜		Ni-Fe	LIGA	20	0.03	202	0.78

注:n代表 non-doped polysilicon, P为 P-doped polysilicon, LPCVD(Low Pressure Chemical-Vapor Deposition)为低压化学气相沉积

表 2 Read 等人的测试结果^[3]
Tab.2 Read's experimental results^[3]

	厚度/ μm	弹性模量/GPa
Electron-beam evaporated Cu, Wafer C	1.72	109.3
Electron-beam evaporated Cu, Wafer I	1.73	98.8
Sputtered Cu	0.99	109.6
Al-Ti multilayer	1.26	69.8
Electrodeposited Cu	7.32	66.0

表 3 多晶硅的循环实验结果^[19]
Tab.3 The round-robin testing results for polysilicon^[19]

试样厚度/ μm	Caltech	Hopkins	
弹性模量/GPa	132	136 \pm 14	142 \pm 25
断裂强度/GPa	2.8 \pm 0.5	1.3 \pm 0.2	1.3 \pm 0.1

(NEMS)来看,构件的特征尺寸在不断地减小,对拉伸装置的载荷和位移分辨率的要求也越来越高。

一般说来,沉积在氧化物上的金属薄膜为多晶,晶粒通常为 $\sim 10^1\text{nm}$;单晶体如单晶硅晶格常数 $\sim 10^{-1}\text{nm}$ 。假定试样最小特征尺寸 $\sim 10^2\text{nm}$,这里连续介质力学估计仍然适用。由上述相关文献的实验结果可知,对于力的测量,金属的拉伸断裂强度 $\sim 10^{-1}\text{GPa}$ — 10^0GPa 。假设试样截面积为 10^5nm^2 ,断裂时的拉力为 $\sim 10^{-5}\text{N}$ — 10^{-4}N 。上述文献中的所有以马达或压电式激励器提供载荷的力传感器分辨率($\sim 10^{-3}\text{N}$)均满足不了要求。对于位移测量,假定典型试样的有效标距为1mm,拉伸断裂变形在0.01以下,1 μm 的分辨率略显不足。在这些装置中^[3-13],由于工作原理的限制,载荷和位移的分辨率很难突破 10^{-3}N 和 10^{-7}m 。要想适应MEMS/NEMS和新材料如碳纳米管发展需要,必须根据新原理去设计微拉伸装置。目前,使用电磁驱动和电容或光纤测位移的原理设计的拉伸装置有望满足未来的发展要求。

References

1 Brown S B. Unresolved issues in the material properties of MEMS (Invited

paper). MEMS Reliability for Critical and Space Applications. SPIE's 1999 Symposium and Education Program on Micromachining and Microfabrication, Santa Clara, California, USA, 20-22 Sep. 1999.

2 Taechung Yi, Chang-Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials. Meas. Sci. Technol., 1999, 10: 706~716.

3 Read D T. Young's modulus of thin films by speckle interferometry. Meas. Sci. Technol., 1998, 9: 676~685.

4 Ogawa H, Suzuki S, Kaneko S, et al. Tensile testing of microfabricated thin films. Microsystem Technologies, 1997, 3: 117~121.

5 Tsuchiya T, Tabato O, Sakata J, Taga Y. Specimen size effect on tension strength of surface-micromachined polycrystalline silicon thin films. J. of Microelectromechanical Systems, 1998, 7(1): 106~113.

6 Tsuchiya T, Inoue A, Sakata J. Tensile testing of insulating thin films; humidity effect on tensile strength of SiO₂ films. Sensors and Actuators, 2000, 82: 286~290.

7 Sharpe W N, Bin Yuan, Edwards R L. A new technique for measuring the mechanical properties of thin films. J. of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(3): 193~198.

8 Sharpe W N, Turner K T, Edwards R L. Tensile testing of polysilicon. Experimental Mechanics, 1999, 39(3): 162~170.

9 LaVan D A, Sharpe W N. Tensile testing of microsamples. Experimental Mechanics, 1999, 39(3): 210~216.

10 Taechung Yi, Chang-Jin Kim. Microscale material testing: etchant effect on the tensile strength. Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators, Sendai, June, 1999. 518~521.

11 Wan Suwito, Martin L D, Cunningham S J, Read R T. Elastic moduli, strength, and fracture initiation at sharp notches in etched single crystal silicon microstructures. J. of Appl. Phys., 1999, 85: 3519~3543.

12 Read D T. Piezo-actuated microtensile test apparatus. J. Testing and Evaluation, 1998, 26: 255~259.

13 Staffan Greek, Fredric Ericson, Stefan Johansson, et al. Mechanical characterization of thick polysilicon films: Young's modulus and fracture strength evaluated with microstructures. J. of Micromech. Microeng., 1999, 9: 245~251.

14 Mazza E, Danuser G, Dual J. Light optical deformation measurements in microbars with nanometer resolution. Microsystem Technologies. 1996, 2(2): 83~91.

15 Mazza E, Abel S, Dual J. Experimental determination of mechanical properties of Ni and Ni-Fe microbars. Microsystem Technologies, 1996, 2: 197~202.



- 16 DING Jianning, MENG Yonggang, WEN Shizhu. Magnet-coil force actuator for microtensile test device. Chinese Journal of Scientific Instruments. 2000, 21: 440 ~ 447 (In English) (丁建宁, 孟永刚, 温诗铸. Magnet-coil force actuator for microtensile test device. 仪器仪表学报, 2000, 21: 440 ~ 447).
- 17 丁建宁, 孟永刚, 温诗铸. 微结构和尺寸约束下多晶硅微机械构件拉伸强度的尺寸效应. 科学通报, 2001, 46(5): 436 ~ 440.
- 18 www.mts.com.
- 19 Sharpe W N, Brown S, Johnson G, Knauss W. 1998 round-robin tests for modulus and strength of polysilicon. Proc. Microelectromechanical Structures for Materials Research, Vol. 518, Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, CA, April 1998. 57 ~ 65.

作者简介

张泰华, 男, 1966 年 4 月生, 江苏省盱眙县人, 汉族。中科院力学研究所高级工程师, 博士。主要从事微型材料的力学性能检测和爆炸力学研究。通讯地址: 北京市海淀区中关村路 15 号

LNM, 电话: 010-62541733, 传真: 010-62561284, E-mail: zhangth @ lnm.imech.ac.cn

ZHANG Taihua, male, born in Xuyi County, Jiangsu Province in 1966, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the mechanical properties of minisize materials and mechanics of explosion.

杨业敏, 男, 1942 年 2 月生, 湖南省长沙市人, 汉族。中科院力学研究所研究员。主要从事力学测量技术工作。通讯地址: 北京市海淀区中关村路 15 号 LNM, 电话: 010-62541733, 传真: 010-62561284, E-mail: ymyang @ lnm.imech.ac.cn

赵亚溥, 男, 1963 年 8 月生, 河北晋州人, 汉族。中科院力学研究所研究员, 博士生导师, 非线性力学国家重点实验室(LNM)主任, 理学博士。主要从事微系统力学和冲击动力学的研究。通讯地址: 北京市海淀区中关村路 15 号 LNM, 电话: 010-62541734, 传真: 010-62561284, E-mail: yzhao @ lnm.imech.ac.cn

www.cnki.net