

文章编号 1004-924X(2002)04-0388-04

# 微摩擦测试仪力传感器的研究

黎海文,贾宏光,吴一辉,李 锋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130022)

**摘要:**讨论了微尺度构件的摩擦力测试问题。Bhushan 和 Koinkar 分别对硅材料的宏观摩擦系数和纳米摩擦系数进行了对比实验,实验表明纳米摩擦系数远远低于宏观摩擦系数。而在微机械构件中,零件的大小一般为微米级,甚至更大,接触面积也较大。载荷介于宏观和微观之间,有时会大于 nN 范围,因此其摩擦特殊,有可能不完全等同于宏观摩擦和纳米摩擦,因此需进一步研究。但现有的微摩擦测试仪器不管是载荷还是测量范围都是基于纳米量级,因此需要一种用于研究微机械样品间摩擦的专用仪器。本文主要对这种微摩擦测试仪中关键技术之一力传感器进行了研究。由于普通传感器在测量精度较高时,分辨率、灵敏度等均较低,不能满足系统的要求。针对普通传感器的不足,本文采用微机械工艺加工微力传感器的办法。这是由于微机械工艺采用的技术多是半导体工业的硅表面工艺和体硅加工工艺,因此这种传感器可以大批量制造,且具有低成本、高精度、低驱动、高可靠性、低功耗、占用空间小、重量轻和响应速度快等优点。最后对力传感器的性能进行了分析。

**关键词:**MEMS;微摩擦测试;力传感器;结构设计

**中图分类号:**TP212 **文献标识码:**A

## 1 引言

微光机电系统(MEMS)的出现,说明微电子技术已经渗透到机械、光学等多个传统领域,使系统集成和批量化生产成为可能,同时也提出了许多新的问题。摩擦问题对于所有运动机构来说都是不可回避的。传统的摩擦学理论在微系统中是否适用需要进一步去考察<sup>[6,7]</sup>。

1993年 Bhushan 和 Koinkar 分别采用球-盘摩擦实验机和摩擦力显微镜 FFM 对硅材料的宏观摩擦系数和微观摩擦系数进行了对比实验,实验表明微观摩擦系数远远低于宏观摩擦系数。他们认为根据微小尺度和极轻载荷测量的材料硬度和弹性模量都比宏观测量的数值要高,因而微观磨损过程中,也减少了犁沟效应对摩擦力的影响。实验还证明,当载荷增加时,微观摩擦系数和微观磨损都显著增加,因而经典的 Amontons 公式<sup>[1]</sup>为:

$$F = \mu P, \quad (1)$$

其中  $P$  为载荷,  $\mu$  为摩擦系数

由公式(1)可得摩擦系数与接触面积和载荷无关的结论显然不符合微观摩擦规律。但是已有的微摩擦测试仪(包括摩擦力显微镜 FFM, 横向力显微镜 LFM 等)都是基于纳米量级的测量范围,其探针和被测样品的接触面积是原子间的接触,而在微机械构件中,零件的大小一般为微米级,甚至更大,接触面积也较大,因此需要一种适用于微机械样品间摩擦力测试的专用仪器。本文就该仪器中的关键部件力传感器的工作原理、结构及其性能进行了初步的探讨。

## 2 微力传感器的工作原理与结构设计

### 2.1 微摩擦测试仪的工作原理

1993年 Bhushan 和 Koinkar 测量硅材料微观摩擦系数采用的是摩擦力显微镜 FFM,其针尖半径约为 50nm,探针扫描面积为  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ,载荷为 10 ~ 150nN。为进一步探讨针尖半径为  $\mu\text{m}$  级,探针扫描面积为  $\mu\text{m}$  级到 mm 级,载荷为  $1\mu\text{N}$  ~ 1mN 条件下硅材料的微观摩擦系数,为此设计

了一种能够同时施加恒定微小纵向载荷 (1μN ~ 1mN) 和测量横向微小摩擦力的仪器,该仪器的工作原理如图 1 所示。被测样品固定在压电陶瓷驱动伸缩筒上,探针安装在一个微力传感器上,通过控制压电陶瓷筒的伸缩使探针与被测样品产生正压力,这个正压力可以通过探针上部的测量纵向载荷的力传感器测出。通过 x 方向工作台的移动控制探针在被测试样表面移动,使探针在试样表面上的相对位置改变。由于试样表面与探针有摩擦,横向摩擦力传感器有信号输出,就可得到试样表面与探针之间的摩擦力。通过计算机软件处理可以获得纵向载荷与横向摩擦力之间的关系曲线。调节手动工作台的 y 向移动,可获得另一区域关系曲线。

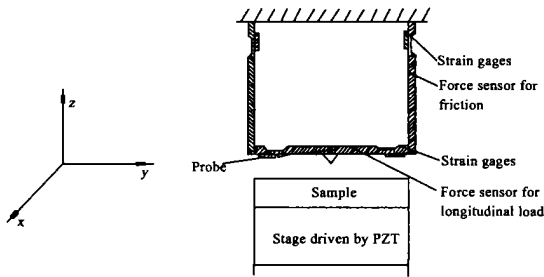


图 1 微摩擦测试仪结构简图  
Fig. 1 Structure of the test rig.

该仪器的组成主要包括:纵向载荷加载装置、

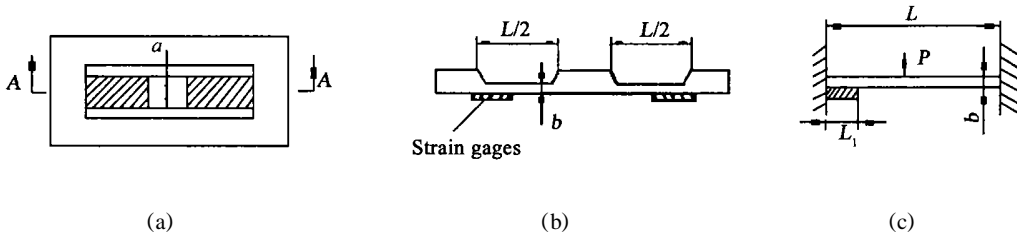


图 2 法向力传感器结构图

Fig. 2 Construction of the force for longitudinal load.

由于硅片支架的变形主要集中在凹槽部分,则可将其对称结构进行简化,如图 2(c) 所示。

由扰度公式<sup>[2]</sup>:

$$f = \frac{PL^3}{192EI} \quad (2)$$

其  $f$  为力传感器在  $P$  作用下的最大变形,  $I$  为梁的惯性矩,电阻应变片可感知的最小变形  $= 0.8 \times 10^{-10}m$ ,最小载荷  $P = 10^{-6}N$ ,硅片  $E = 150 \times 10^9 Pa$ ,假定应变片长度  $L_1$  为 4mm,硅片变形部位的厚度为  $b$ ,宽度  $a = 4mm$ ,则可得  $b, L$  的关

测量纵向载荷的力传感器、横向摩擦力传感器、计算机控制系统。

## 2.2 力传感器的工作原理与结构设计

### 2.2.1 力传感器的工作原理

微摩擦测试仪需要同时测量纵向力(法向力)和横向力(摩擦力),而且它的工作性能主要取决于力传感器的设计及其变形位移的检测,微摩擦测试仪的改善也正是围绕这两个关键技术而发展的。在该仪器中测量纵向载荷的力传感器和测量横向摩擦力的力传感器均采用硅材料作为力臂,当硅片受力产生变形时,硅片上的应变片的电阻发生变化,通过测量其变化即可知其大小。传统的传感器在测量精度较高时,其分辨率、灵敏度等均不符合测试要求。在该仪器中采用微机械加工方法制作力传感器和执行机构,这样可以提高仪器的灵敏度,减小仪器的体积。

### 2.2.2 力传感器的结构设计

#### 2.2.2.1 测量纵向载荷的力传感器的设计

为了使仪器的体积尽量小,这就要求力传感器在受微力作用下的变形要尽量大,因此硅片凹槽部分就必须设计得非常薄,但过薄又使力传感器变得很脆弱。为了使其更加稳固,并提高其灵敏度,在硅片凹槽下方采用微电子工艺直接溅上康铜材料的电阻应变片。该力传感器的结构如图 2(a)、(b) 所示。

系式

$$L = 876.4b \quad (3)$$

由公式(3)可得到  $b$  与  $L$  二者之间的关系,如表 1 所示。

表 1 硅膜厚度  $b$  不同时  $L$  的长度

Table 1 Length  $L$  of beam when the thickness  $b$  of silicon film is defined

Parameter			
$b$	100μm	50μm	30μm
$L$	88mm	44mm	26mm

要想减小力传感器的体积,需尽量减小敏感部位的厚度  $b$ 。但如果  $b$  的厚度太小又影响力传感器的强度。综合考虑力传感器的强度及体积,取  $b = 30\mu\text{m}$ ,  $L = 26\text{mm}$ 。

2.2.2.2 测量横向摩擦力的力传感器的设计

横向摩擦力传感器结构如图 3 所示。假定摩擦力为  $f$ , 凹槽部分厚度为  $b$ , 悬臂梁宽度为  $a$ ,

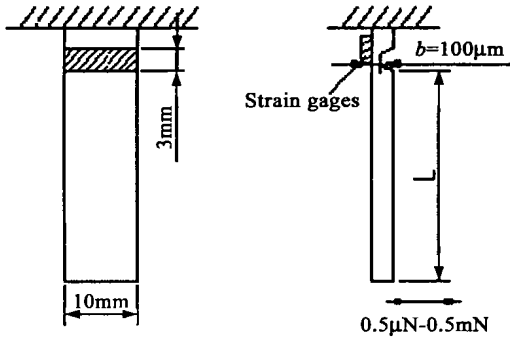


图 3 摩擦力传感器结构图

Fig. 3 Construction of the force sensor for friction.

在凹槽表面采用与纵向载荷测量装置相似的办法溅射形成的传感器。由于凹槽部分相对于悬臂梁非常薄,可以认为其变形均发生在凹槽部分,将其简化为图 4 所示的变形图。

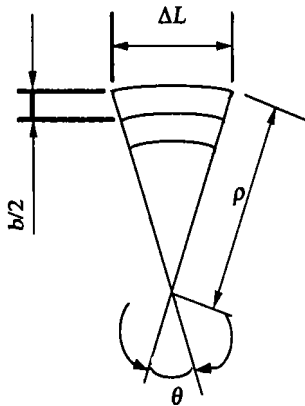


图 4 传感器薄膜变形简图

Fig. 4 Bend of the sensor's film.

参考文献:

[1]温诗铸. 纳米摩擦学. [M]. 北京:清华大学出版社,1998.  
 [2]成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,1999.  
 [3]刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1991.  
 [4]Maarten P. A hinged - pad test structure for sliding friction measurement in micro-machine[J]. SPIE,1998,3512:241 - 250.

由变形公式<sup>[3]</sup>:

$$= \frac{EI}{M}, \tag{4}$$

其中  $\rho$  为中性层的曲率半径,  $L$  为悬臂梁凹槽处伸长后的长度,悬臂梁所受力矩  $M = fL$ ,  $f$  为悬臂梁所受摩擦力,  $L$  为悬臂梁的长度,悬臂梁凹槽处受力后旋转一个角度  $\theta = 3 \times 10^{-3}$ ,当  $f = 0.5\mu\text{N}$ ,悬臂梁凹槽处的长度为  $3 \times 10^{-3}\text{mm}$ ,电阻应变片可感知的最小变形  $\epsilon = 0.8 \times 10^{-10}$ ,悬臂梁的宽度为  $10\text{mm}$  时,可得悬臂梁的凹槽处的厚度  $b$  与悬臂梁的长度  $L$  的关系式:

$$L = 1.33 \times 10^7 b^2, \tag{5}$$

由公式(5)可得  $b, L$  的关系如表 2 所示。

表 2 硅膜厚度  $b$  不同时梁的长度  $L$

Table 2 Length  $L$  of beam when the thickness  $b$  of silicon film is defined.

Parameter			
$b$	100µm	50µm	30µm
$L$	134mm	34mm	12.6mm

由图 1 可知,在该力传感器下方有很多零件,如法向载荷力传感器、针尖及固定针尖的针尖座等,因此要求该力传感器的强度大一些。所以取  $b = 100\mu\text{m}$ ,  $L = 134\text{mm}$ 。

3 结论

通过以上的分析计算,证明了所设计的力传感器在该仪器中的适用性。它能够测量出载荷  $\mu\text{N}$  级时被测样品表面的摩擦力。设计的力传感器基本上可以满足微摩擦测试实验的需要。实验证明,在信号处理电路放大倍数约为  $3 \times 10^4$  时,该微力传感器的分辨率为  $46\mu\text{N}$ ,基本符合设计要求。

- [5] Bharat B. Tribology on the macro - to nanoscales of MEMS materials :a review DSC[J]. *Micro - Electro - Mechanical Systems ( MEMS )* ,1998 ,66 :265 ~ 266.
- [6] 曾毅,侯国章. 一种新型光纤传感器在精密产品加工中的应用研究[J]. *光学 精密工程* ,2001 ,9(2) :139 - 141.
- [7] 迟冬祥,颜国正,丁国清. 基于惯性 - 摩擦原理的 PZT 驱动器自由度驱动器的研究[J]. *光学 精密工程* ,2001 ,9(2) :135 - 138.

## Research on force sensors in a micro - friction test rig

LI Hai-wen , JIA Hong-guang , WU Yi-hui , LI Feng

( *Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,  
Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022 , China* )

**Abstract :** In this paper , the problem of friction testing in micro-components is discussed. The experimentation made by Bhushan and Koinkar shows that the coefficients of macro friction and nano friction are different. But in MEMS , the size of the part is several microns ,or even greater than that , and the interface area is beyond nano with the load between N and nN. So the MEMS 's friction is neither macro friction nor nano one , which should be studied further. But there is no any appropriate instrument to do so because the present instruments are designed for macro or nano friction testing. This paper discusses the force sensor which is used in the instrument for testing the MEMS 's friction. The general force sensor 's resolving power and sensitivity are too low. And we make the force sensor by MEMS technics ,which has many advantages such as low cost ,high precision and reliability , low drive and power consume ,etc. Finally , the performance of the force sensor is present.

**Key words :** MEMS ; micro-friction testing ; force sensors ; structure design

**作者简介:**黎海文(1976 - ) ,男 ,江西省丰城市人 ,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士 ,研究方向 :微光机电集成系统。