

微力学测试仪在 MEMS 键合强度测试中的应用*

APPLICATION OF SUPER-MICRO TESTER IN MEMS BONDING STRENGTH TEST

郇勇**^{1,3} 张泰华***¹ 杨业敏****¹ 阮勇² 张大成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. 北京大学 微电子学系 MEMS 工艺研究室, 北京 100871)

(3. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

HUAN Yong^{1,3} ZHANG TaiHua¹ YANG YeMin¹ RUAN Yong² ZHANG DaCheng²

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

(2. *Department of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

摘要 研制微力学测试仪,对微电子机械系统中键合结构的强度进行测试。最大载荷为 1.4 N,在载荷量程为 450 mN 时仪器的最高分辨力为 10 μ N。采用键合在玻璃基底上的硅悬臂梁作为试样。为模拟横力剪切破坏和扭转破坏工况,用微力学测试仪分别在悬臂梁的固定端和自由端施加载荷至试样破坏。测得相应的破坏载荷并计算出最大剪应力。对破坏残骸的显微观察发现,存在玻璃开裂和硅开裂 2 种失效模式。该技术为微电子机械系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)键合结构的强度表征提供一种有效方法,并可用来进行微悬臂梁或微桥的强度测试。

关键词 微电子机械系统 键合 微悬臂梁 强度

中图分类号 O334

Abstract An instrument named Super Micro-Tester (SMT) has been designed for testing the bonding strength of anchors. The maximum load capacity of SMT is 1.4 N, and the minimum resolution is 10 μ N at a range of 450 mN. Silicon micro-cantilever specimens with one end anchored on glass were fabricated for this test. In order to simulate shear failure and torsion failure, SMT applied a force through a probe to push micro-cantilevers at the fixed-end and free-end respectively until they failed. The corresponding critical loads were recorded for calculating the bonding strength of different specimens. A microscope was set in front of the specimen to capture the whole test process. The rupture occurs in glass or silicon respectively for different samples. This novel technique provides an effective solution for determining bonding strength in MEMS(micro-electro-mechanical system) devices, and it also can be used to evaluate the strength of micro-cantilevers or micro-bridges.

Key words Micro-electro-mechanical system(MEMS); Bonding; Micro-cantilever; Strength

Corresponding author: HUAN Yong, E-mail: huany@lnm.imech.ac.cn, Tel: + 86-10-62545533-3204, Fax: + 86-10-62579511

The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No.10372103 and 10432050), Chinese Academy of Sciences(No. KJCX2-SW-L2), China High Tech Research and Development Program (No.2002AA04420), China National Basic Research Priorities Program(No. G1999033108).

Manuscript received 20041022, in revised form 20050120.

* 20041022 收到初稿,20050120 收到修改稿。国家自然科学基金项目(10372103, 10432050),中科院知识创新工程项目(KJCX2-SW-L2),国家重大基础研究项目(G1999033108),国家高技术研究发展计划(2002AA04420)资助项目。

** 郇勇,男,1975年11月生,山东临沂人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室在读博士研究生,主要研究方向为微尺度力学测试方法研究,通讯地址:北京市海淀区北四环西路15号LNM。

*** 张泰华,男,1966年4月生,江苏省盱眙县人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室高级工程师,博士。主要研究领域为微尺度力学性能检测和爆炸力学研究。E-mail: zhangth@lnm.imech.ac.cn,电话: + 86-10-62541733,传真: + 86-10-62579511

**** 杨业敏,男,1942年2月生,湖南省长沙市人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室研究员。主要从事力学测量技术工作。E-mail: ymyang@lnm.imech.ac.cn,电话: + 86-10-62545533-2098,传真: + 86-10-62579511

1 引言

键合 (bonding) 是微电子机械系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 工艺中最为常用的连接方法。键合强度的好坏直接决定 MEMS 器件的可靠性, 是工程上非常关心的问题。然而, 多年来由于缺乏对键合结构进行强度测试的技术, 因此 MEMS 工艺中多凭借经验来估计所需锚点的形状和尺寸, 而不是根据键合结构的强度要求进行设计。显然, 这种设计方式会给 MEMS 的研制带来很多不必要的麻烦和浪费。因此迫切需要发展相关测试技术对键合强度进行表征。

但是, MEMS 器件的特征尺寸一般在微米量级, 键合结构的破坏载荷在 1 N 以下甚至更小。因此, 传统的材料试验机受载荷分辨力和结构尺寸的限制, 不适合对锚点键合强度进行测试。近年来, 纳米压入仪凭借其极高的载荷和位移分辨力^[2], 越来越多地应用到微尺度力学测试领域^[1]。例如, MTS Nano-Indenter XP 的载荷分辨力为 50 nN, 位移分辨力 < 0.01 nm。然而, 该类设备的工作方式主要为压入或划入, 难以完成剪切和扭转测试, 且不能在测试中实时监控试样破坏过程。基于以上原因, 采用自行研制的微力学测试仪 (Super Micro-Tester) 来完成该测试。

2 实验设备

微力学测试仪是由中国科学院力学研究所张泰华等人自行研制的仪器, 主要用于微尺度力学性能的测试。该仪器的电磁驱动机构主要由线圈和磁钢组成, 是仪器的驱动部分和载荷计量部分。线圈在均匀磁场中受到的电磁力和线圈中通过的电流成正比, 因此测量线圈中的电流即可以计量电磁力的大小。位移测量部分采用电容式位移传感器。两平行极板之间的电容变化和其之间的距离变化在一定条件下近似成线性关系^[3], 因此当两极板之间的距离变化时, 通过测量代表电容变化的电压信号就可以测量位移。

测试仪最大载荷量程为 1.4 N; 当量程为 450 mN 时, 载荷最高分辨力可以达到 10 μ N。位移最大量程为 600 μ m, 分辨力为 15 nm。

由于该仪器载荷和位移分辨力高, 工作方式灵活, 因此该仪器实际上提供了一个微小载荷和微小位移的测量平台, 针对不同试样的测试需要, 可以完成拉伸、弯曲、扭转、剪切等测试。

3 实验

由于硅—玻璃键合是 MEMS 工艺中常用的键合方

式^[4], 因此本工作采用键合在玻璃基底上的硅悬臂梁作为测试对象, 该试样由北京大学微电子学研究所制作提供。测试结构在加工时, 先采用 KOH 湿法腐蚀来形成 4 μ m 的键合台阶; 之后硅—玻璃阳极键合, 键合是在 1 200 V 电压、一个大气压 380 $^{\circ}$ C 下完成的; 硅—玻璃键合后用 KOH 减薄, 硅结构余 76 μ m。具体结构尺寸如图 1 所示。

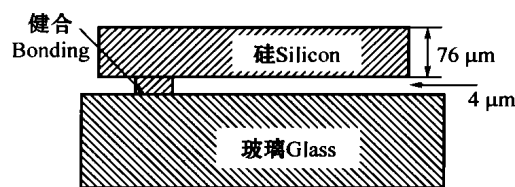


图 1 悬臂梁试样结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of micro-cantilever specimen

如图 2 所示, 在微力学测试仪作用轴的上端安装探针。将悬臂梁试样用 502 胶固定在试样板上, 将试样板竖直安装在微力学测试仪的 XYZ 定位台的下面, 使探针运动方向和试样的玻璃基底平面平行。调节 XYZ 定位台, 将试样上待测悬臂梁的位置调整到针尖行程之内。在试样前面放置体视显微镜进行观察, 调节过程在显微镜观察下完成。为避免产生摩擦力, 需确保针尖和玻璃基底之间不接触。

计算机控制微力学测试仪产生一个线性增大的载荷, 通过探针推动悬臂梁。为考察键合区域在剪切和扭转情况下的强度极限, 采用两种测试方式, 探针将载荷施加在悬臂梁根部即固定端, 使锚点在剪力作用下发生纯剪切破坏; 探针将载荷施加在悬臂梁自由端, 使锚点发生扭转破坏。仪器自动记录下相应的破坏载荷的大小。用体视显微镜对整个测试过程进行实时监测, 并通过 CCD (charge coupled device, 电荷耦合器件) 将图象采集到计算机。

用微力学测试仪测得锚点破坏时的最大载荷, 根据以下两种力学模型进行计算。

对于剪切破坏情况^[5], 如图 3 所示。此时, 最大剪应力出现在截面中性轴上^[5], 如图 5 所示。

$$\tau_{1\max} = \frac{3}{2} \frac{P}{bh} \quad (1)$$

式中 h 和 b 分别为矩形键合截面的两个边长。

对于扭转破坏情况, 如图 4 所示, 将作用于悬臂梁自由端的载荷 P 简化为作用于锚点的剪力 P 和扭矩 Pl (l 为载荷作用点到键合截面中点的距离, 即力臂的长度)。在剪力 P 作用下, 最大剪应力由式 (1) 给出。在扭矩 Pl 作用下, 矩形截面上的最大剪应力 (出现在长边的中点, 如图 6 所示) 为^[5]

$$\tau_{2\max} = \frac{Pl}{ahb^2} \quad (2)$$

式中, α 为与截面形状有关的系数。对正方形键合区

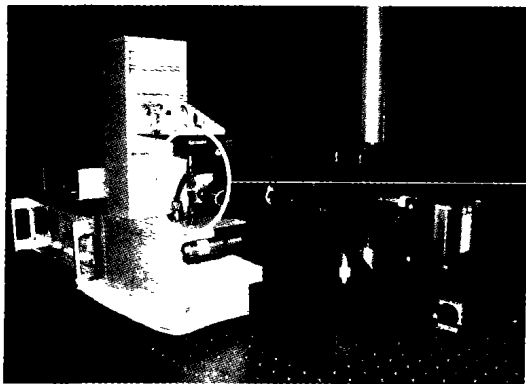


图 2 键合强度测试装置

Fig.2 The setup of experiment

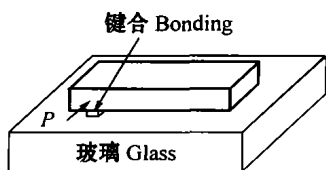
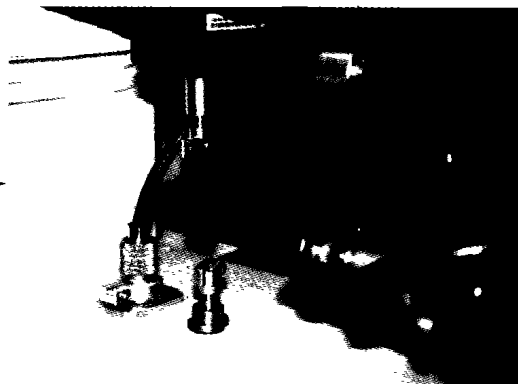


图 3 剪切破坏示意图

Fig.3 Schematic drawing of shearing test

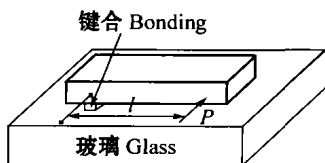


图 4 扭转破坏示意图

Fig.4 Schematic drawing of torsion test

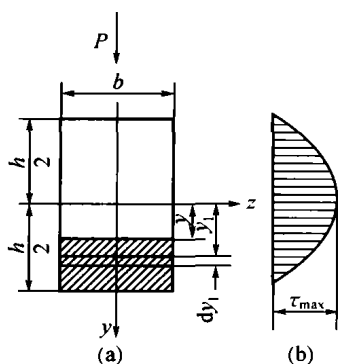


图 5 剪切状态下矩形截面剪应力分布

Fig.5 Shear stress distributing under shear force

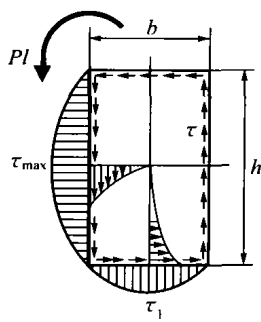
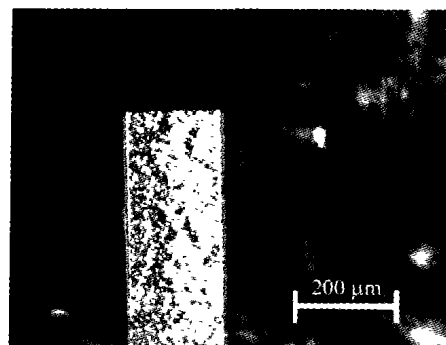


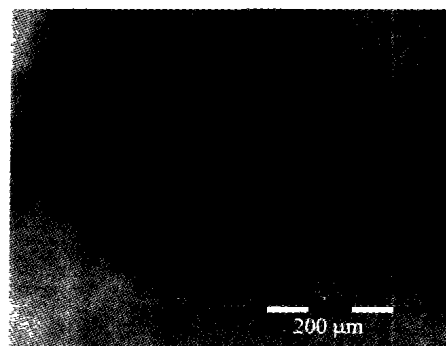
图 6 扭转状态下矩形截面剪应力分布

Fig.6 Shear stress distributing under torsion



(a) 测试中的 3 号试样

(a) No.3 specimen in test



(b) 3 号试样锚点破坏残骸

(b) Anchor debris of No.3 specimen

图 7 3 号试样破坏前后照片

Fig.7 The photos of No.3 specimen

域, $\alpha = 0.208$ 。所以,在组合载荷作用下,最大剪应力出现在截面长边的中点,其大小为

$$\tau_{max} = \tau_{1max} + \tau_{2max} = \frac{3}{2} \frac{P}{2bh} + \frac{Pl}{abh^2} \quad (3)$$

由式(1)、(3) 可以计算出锚点在剪切和扭转破坏时的最大剪应力。

4 结果和讨论

对 3 个试样进行剪切破坏测试,对 2 个试样进行扭转破坏测试。测试结果见表 1。可以看出,剪切破坏的最大剪应力要明显小于扭转破坏的最大剪应力。这可能与计算所采用的力学模型有关。

对破坏过程的监测发现,5 个试样的破坏过程均小于 0.05 秒,表现为悬臂梁突然飞出视场。3 个横力剪切破坏的试样,有 2 个为玻璃基底开裂,另外 1 个的锚

点残骸中也可明显观察到玻璃开裂的痕迹。图 7 为 3 号试样受横力剪切破坏前后照片,可以看出断裂发生在玻璃中。在 2 个扭转破坏的试样中,受力点处的最大位移均小于 $7 \mu m$,锚点残骸中可观察到硅和玻璃的痕迹。图 8 为 4 号试样扭转破坏前后的显微照片,锚点残骸基本为正方形,开裂主要发生在硅中离键合界面较近的部位。目前所有测试结果中未发现键合界面完全开裂的情况,说明被测试样的键合界面的强度可能要优于硅和玻璃。

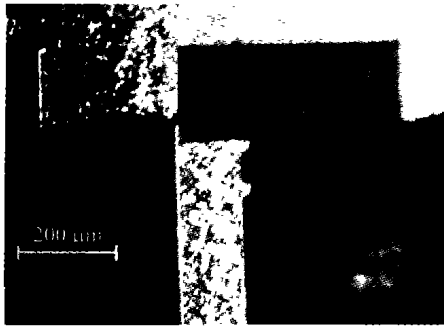
5 结论

中科院力学所自行研制的微力学测试仪具有高的

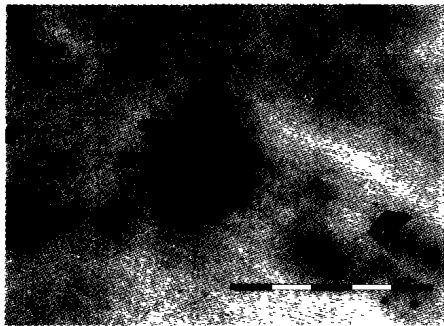
表 1 键合强度测试结果

Tab.1 Testing results of specimens

测试类型和序号 Test type and number	键合尺寸 Bonding size $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	力臂长度 l μm	破坏载荷 Failure load mN	最大剪应力 Critical stress MPa
剪切 Shear	1	90 × 90	—	62.3
	2	110 × 110	—	67.4
	3	120 × 120	—	75.9
扭转 Torsion	4	60 × 60	596	359
	5	70 × 70	605	336



(a) 测试中的 4 号试样
(a) No.4 specimen in test



(b) 4 号试样锚点破坏残骸
(b) Anchor debris of No.4 specimen

图 8 4 号试样破坏前后照片

Fig.8 The photos of No.4 specimen

载荷和位移分辨力及灵活的工作方式。本文利用微力学测试仪对硅—玻璃键合结构进行横力剪切破坏和扭转破坏测试,测得键合破坏的极限载荷,计算出最大剪应力,对破坏残骸的显微观察发现,存在玻璃开裂和硅开裂 2 种失效模式。

由于本工作侧重于测试方法的研究,因此未对试样的几何尺寸、剪切强度与键合时的参数(键合的面积、所用电压或温度)的关系以及测试精度等进行讨论,所得测试结果只有相对参考意义。通过更为全面的实验,该技术有望为 MEMS 键合结构的设计和 optimization 提供科学的依据。虽然本文是针对锚点键合强度进行的测试,但不难看出,该技术同样适用于某些 MEMS 微结构(例如微桥、微悬臂梁等)的强度测试。

References

- ZHANG TaiHua, YANG YeMin. Developments and applications of nano-hardness techniques. *Advances in Mechanics*, 2002,32(3):349 ~ 364(In Chinese)(张泰华,杨业敏. 纳米硬度技术的发展和应. 力学进展,2002,32(3):349 ~ 364).
- ZHANG TaiHua, HUAN Yong, YANG YeMin, et al. Tribological behavior of plasma-arc-deposited TiN coating on a stainless steel. *Tribology*, 2003,23(5): 367 ~ 370(In Chinese)(张泰华,郇勇,杨业敏,等. 氮化钛沉积膜的摩擦性能研究. 摩擦学学报,2003,23(5): 367 ~ 370).
- WANG HuaXiang, ZHANG ShuYing. Theories and applications of sensors. Tianjin:Tianjin University Press, 1988. 79 ~ 82(In Chinese)(王化祥,张淑英. 传感器原理及应用. 天津:天津大学出版社,1988. 79 ~ 82).
- WANG QiMin. Introduction of micro electron mechanical system. Heifei: Press of University of Science and Technology of China, 2003. 60 ~ 61(In Chinese)(王琪民. 微型机械导论. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003. 60 ~ 61).
- DAI ShaoDu. Material mechanics. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 70 ~ 71,120 ~ 122(In Chinese)(戴少度. 材料力学. 北京:国防工业出版社,2000. 70 ~ 71,120 ~ 122).