

Study of Shock-resistibility of High-g Microaccelerometer Chip Through Impact Using Hopkinson Bar

HUAN Yong¹ ZHANG Taihua¹ YANG Yemin¹ ZENG Zhaojun²

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China;
2. Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, P. R. China)

Abstract: Cross-shaped, high-g microaccelerometer chips have been developed using silicon micromachining techniques. In order to determine the Shock-resistibility of the chip, tests were performed using Hopkinson bar. The acceleration was estimated according to the theory of one-dimensional stress wave. The results show that the critical load resulting in chip failure is about 200 000 g_n . Cracks concentrate on the center of cross, corners of frame and juncture between cross and frame.

Key words: microaccelerometer; Hopkinson bar; shock-resistibility

用 Hopkinson 杆冲击加载研究 高量程微加速度计芯片的抗过载能力^①

郇 勇¹ 张泰华¹ 杨业敏¹ 曾昭君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. 北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 采用体硅微机械加工技术制作田字形结构的高量程微加速度计芯片。为了研究芯片的抗过载能力, 使用 Hopkinson 杆对其施加冲击载荷, 以一维应力波理论估计芯片受到的加速度。结果显示, 芯片破坏的临界载荷为 200 $k g_n$ 。裂纹和断裂主要发生在十字架中心、边框的 4 个角以及十字梁和边框的连接部位。

关键词: 微加速度计; Hopkinson 杆; 抗过载能力

中图分类号: TP0415 文献标识码: A 文章编号: 1004-1699(2003)02-0128-04

微加速度计是 MEMS 的一个重要分支, 在航空航天、汽车、国防等领域有着广泛的应用。按照敏感原理的不同, 微加速度计大致可以分为: 压阻式、压电式、电容式、谐振式、光纤式、电磁式、对流式等。其中压阻式具有线性度好、外围电路简单、抗过载能

力强等优点, 因而成为高量程微加速度计设计的首选, 广泛应用于冲击环境的测量^[1]。

可靠性研究是 MEMS 产业化的关键所在^[2], 这一点对于微加速度计来说更是如此。由于应用环境的特殊性, 要求高量程微加速度计必须具有极高的

① 收稿日期: 2002-12-05

基金项目: 受国家自然科学基金(10242001, 10172086)、中国科学院知识创新工程(KJCX2-SW-12)和“十五”国防科工委预研项目 41318080(C2)的共同资助。

作者简介: 郇勇(1975-11)男, 中国科学院力学研究所读博士, 主要研究方向为微系统力学, huany@LNM.imech.ac.cn.

抗过载能力。目前,研究 MEMS 芯片抗过载能力的方法主要有计算机模拟和实验测试。计算机模拟适用于芯片的设计阶段,在芯片制作成型后,则需要采用实验的方法来研究其抗过载能力。

实验测试多采用落锤、冲击摆、Hopkinson 杆、气炮等方法来模拟冲击环境。受冲击速度的限制,前两者所能获得的最大加速度相对来说比较低,最高不超过几万 g_n ,不适合模拟更高 g_n 值的冲击环境。Hopkinson 压杆装置自 1949 年问世以来,经过几十年的发展,已经成为动态力学测量的主要设备。它具有结构简单、操作方便、测量方法精巧、加载波形易控制等优点,因而被普遍采用^[3]。考虑到本文所要研究的芯片的设计抗过载能力高达 150 kg_n ,结构尺寸仅为毫米量级,因此选用 Hopkinson 压杆作为冲击加载工具,采用一维应力波理论估计芯片受到的加速度,对芯片进行冲击失效实验。最后通过显微观察,对芯片的破坏情况进行了研究。

1 微加速度计芯片

微加速度计芯片系北京大学微电子所采用硅微机械加工技术研制出的压阻式高量程微加速度计芯片,该芯片尚未扩散应变电阻和引线。芯片外形尺寸为 $5\ 000\ \mu\text{m} \times 5\ 000\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$ (图 1)。整体为田字形结构,材料为单晶硅。中心为活动质量块,由十字梁悬浮连接到边框上。边框作为锚区键合在玻璃基底上。设计抗过载能力为 150 kg_n 。

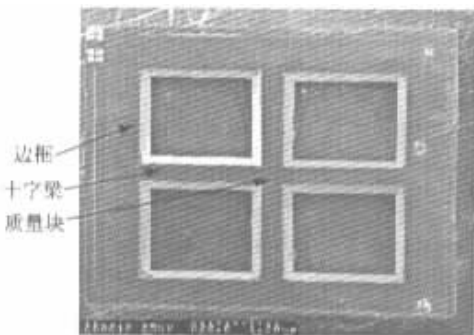


图 1 芯片的 SEM 照片

2 实验原理

利用 Hopkinson 压杆技术,如图 2、3 所示,将被测微加速度计芯片安装在 Hopkinson 杆的尾部,由压

缩空气发射一长约 49 mm 的子弹,同轴撞击 Hopkinson 杆的起始端,将会在 Hopkinson 杆中产生近似正弦的压应变脉冲,并沿 Hopkinson 杆纵向传播^[4,5]。

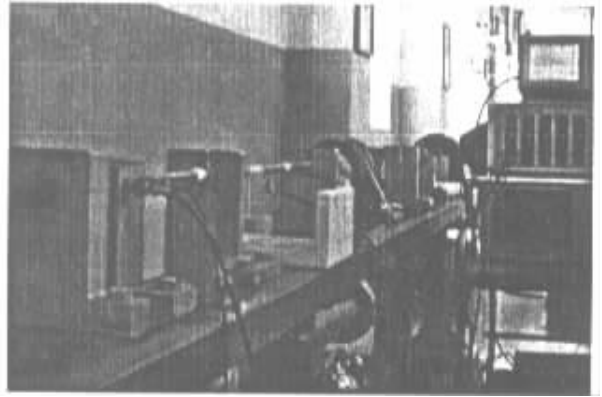


图 2 Hopkinson 杆实验装置

应力波在细长导杆中传播时,衰减和弥散可以忽略,贴在杆中央的应变片可以测得此应变脉冲。当应变脉冲传至 Hopkinson 杆与被测微加速度计芯片的界面时,芯片的质量可以忽略,根据一维应力波理论可以得出该界面质点的速度为

$$v_1(t) = 2C\varepsilon(t) \tag{1}$$

式中: C 为杆中波速, $\varepsilon(t)$ 由贴在 Hopkinson 杆中央的应变片测出。

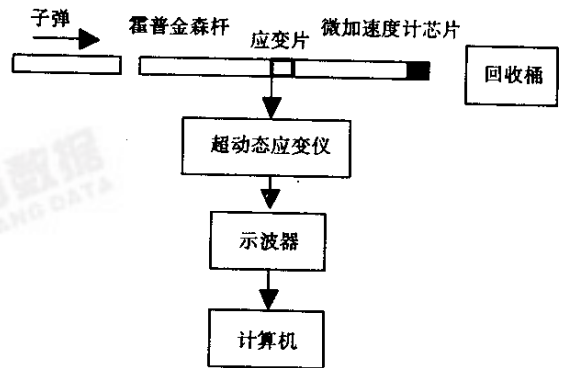


图 3 微加速度计芯片抗过载能力研究实验原理图

由于被测微加速度计芯片与 Hopkinson 杆尾部紧密相贴,且质量很小,可以忽略,所以微加速度计芯片的速度应与 Hopkinson 杆尾部界面质点速度相等

$$v_2(t) = v_1(t) \tag{2}$$

那么芯片获得的加速度为

$$a(t) = \frac{dv_2(t)}{dt} = 2C \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{3}$$

峰值加速度约为

$$a \approx 2C \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (4)$$

式中 $\Delta \epsilon / \Delta t$ 为应变上升阶段的平均应变率。

为了确定应变片的电压信号和应变之间的对应关系,首先要对超动态应变仪进行校准。记校准阶跃高度为 X ,对应的应变为 X_g 。在冲击实验时,如果应变片经超动态应变仪放大后的输出信号为 $U_g(t)$,那么对应的应变为

$$\epsilon(t) = \frac{X_g U_g(t)}{X} \quad (5)$$

由式(4)(5)可得

$$a \approx 2C \frac{X_g}{X} \cdot \frac{\Delta U_g}{\Delta t} \quad (6)$$

取 ΔU_g 和 Δt 分别为应变电压信号的峰值和应变脉宽的一半,根据式(6)就可以估计出芯片受到的加速度。

3 实验结果和分析

3.1 实验结果

本次实验共对 13 个芯片进行了抗过载能力测试,对每个芯片只进行一次冲击。共获得 10 组完整数据,有 3 组没能测得波形。芯片破坏的有 6 个,完好的有 7 个。破坏的芯片中,出现裂纹但尚未解体的有 4 个(图 6),完全断裂的有 2 个(图 7)。总的实验结果列在表 1 中。

图 4 是其中一次实验测得的应变片的信号。取 $C \approx 5070 \text{ m/s}$,根据式(2)就可以估算出芯片受到的峰值加速度。由于这种方法是取应变上升阶段的平均应变率来估算最大应变率,平均应变率小于最大应变率,因此该法估计出的加速度值偏小。

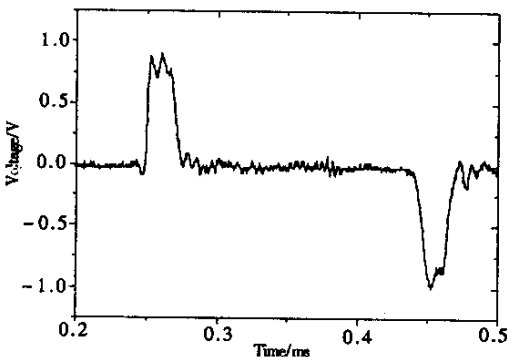


图 4 应变片输出的电压信号

表 1 实验结果统计

Tab.1 Summary of experiment

试样序号	速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	应变片信号 /mV	最大应变 / $\mu\epsilon$	脉宽 / μs	加速度 / $10^4 g_n$	损坏情况
16-1#	23.9	660	2357	28	17	
16-2#	26.2	720	2571	28	18.4	
16-3#	31.9	900	3214	28	23	裂纹
17AM-1#	28.6	860	3071	28	22	
17AM-2#	28.2	-	-	-	-	断裂
17AM-3#	28.4	850	3036	28	21.7	裂纹
17AM-4#	25.5	-	-	-	-	
17AM-5#	28.5	-	-	-	-	
17FM-1#	28.1	860	3071	29	21	断裂
17FM-2#	27.6	850	3036	30	20.2	裂纹
17FM-3#	27.9	860	3071	29	21	
17FM-4#	27.9	850	3036	30	20.2	
17FM-5#	26.7	850	3036	29	21	裂纹

根据表 1 中的数据,画出加速度和打击速度的关系图(图 5)。结果显示,半数左右的芯片在 200 kg_n 以上破坏,并且凡是低于此加速度值的实验中,芯片没有破坏。因此可以推断:芯片破坏的平均临界载荷约为 200 kg_n 。

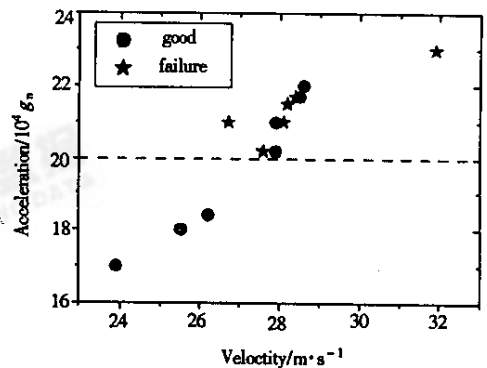


图 5 芯片受到的加速度和打击速度的关系

3.2 失效情况

实验中共有半数左右的芯片发生了破坏。较轻的表现为裂纹,但玻璃基底完好,整体结构仍然粘连在一起,没有彻底分离(图 6);严重的表现为断裂,包括玻璃基底在内的整个芯片解体,甚至发生梁的脱落(图 7)。裂纹和断裂主要发生在十字架中心、边框的 4 个角以及十字梁和边框的连接部位。由于试样数量较少,尚不能归纳出普遍的失效模式。还需要做进一步的工作。

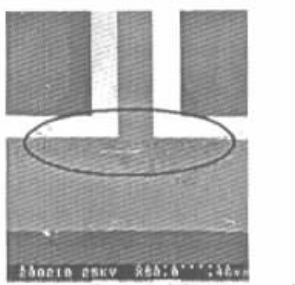


图 6 芯片出现裂纹但尚未解体(230 kg_n)

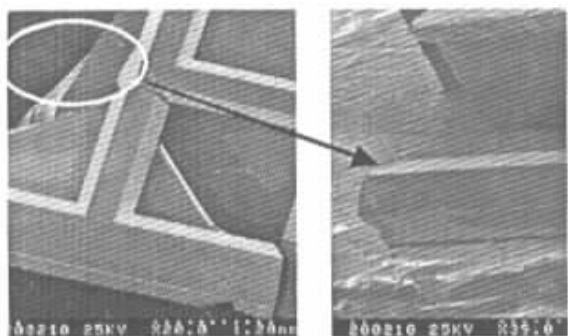


图 7 芯片完全断裂 ,十字梁脱落(220 kg_n)

4 结 论

① Hopkinson 杆可以对 MEMS 器件进行高达 200Kg_n 的抗过载能力研究。

② MEMS 芯片尺寸小 ,具有很高的抗过载能力。在高速冲击环境下 ,其破坏的主要方式为断裂。

(上接第 127 页)

成本仪器而言 ,电导分析显然可以达到更高的灵敏度。

5 结 论

纳米金生物组装体的电检测方法对于提高生物大分子检测灵敏度 ,简化检测方法以及研究体系中电子运输过程具有重要意义。这种方法有望以简洁的手段实现单分子检测。本文对于优化纳米金电检测方法的研究具有指导意义。今后将集中于研究灵敏度的提高和可测范围的扩大。

③ 此次实验的芯片尚未扩散电阻和引线。估计在芯片完成最终封装之后 ,其抗过载能力要降低。

参 考 文 献

[1] 黄全平 . 高量程微机械压阻式加速度传感器研究 [D]. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 , 2001 .
Huang Quanping . Study of High - g Piezoresistive Micromach-
ine Acceleromete[D]. Institute of Microsystem & Information
Technology , Chinese Academy of Sciences 2001 .

[2] Danelle M. Tanner , Jeremy A. Walraven , Karen Helgesen ,
et al . MEMS reliability in shock environments [C]. In :San
jose , IEEE International reliability Physics Symposium , CA ,
April 10 - 13 2000 ,129 - 138 .

[3] 夏开文 ,程经毅 ,胡时胜 . SHPB 装置应用于测量高温
动态力学性能的研究 [J]. 实验力学 ,1998 ,13 (3) 307 -
313 .
XIA Kaiwen , CHEND Jingyi , HU Shisheng . Application of
SHPB Apparatus to the Measurement of High Temperature Dy-
namical Mechanical Behavior of Material[J]. Journal of Ex-
perimental Mechanics , 1998 ,13 (3) 307 - 313 .

[4] 李玉龙 ,郭伟国 ,贾德新 ,等 . 高 g 值加速度传感器校
准系统的研究 [J]. 爆炸与冲击 ,1997 ,17 (1) 90 - 96 .
Li Yulong ,Guo Weiguo ,Jia Dexin , et al . An Equipment for
Calibrating High Shock Acceleration Sensors [J]. Explosion
and Shock Waves (in Chinese) , 1997 ,17 (1) 90 - 96 .

[5] Ueda K , Umeda A . Characterization of Shock Accelerometers
Using Davies Bar and Strain-gages [J]. Experimental Me-
chanics , 1993 ,8 (2) 228 - 233 .

参 考 文 献

[1] Liu Yanjing , et al . Chemical Physics Letter[J]. 1998 ,298 :
315 - 319 .

[2] So - Jung Park , T. Andrew Taton , et al . Science[J]. 2002 ,
295 (22) :1503 - 1506 .

[3] Velev O D , Kaler E W Langumir [J]. 1999 ,15 :3693 -
3698 .

[4] Jeong Hwan Kim , et al . Biosensor & Bioelectronics[J].
2000 ,14 :907 - 915 .

[5] Gil Markovich , C. Patrick Collier , et al . Acc . chem . Res . ,
1999 32 :415 - 423 .