

微加速度计在冲击载荷作用下的失效分析*

FAILURE ANALYSIS OF MICROACCELEROMETER UNDER IMPACT LOADING

王立森^{1,2} 胡宇群¹ 李志宏³ 余同希³ 赵亚溥¹

(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)

(3. 香港科技大学 机械工程系, 香港 九龙 清水湾)

WANG Lisen^{1,2} HU Yuqun¹ LI Zhihong² YU Tongxi³ ZHAO Yapu¹

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

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

(3. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Sciences and Technology, Hong Kong, China)

摘要 抗冲击性是加速度计的一个主要性能指标, 跌落实验则是一种测试结构冲击作用的有效方式, 本文利用跌落实验对一种折叠梁式微加速度计在冲击载荷作用下的失效模式进行了研究。实验发现在微加速度计中主要存在两种主要的失效模式, 即微梁结构的整体破坏和微结构在横向之间的粘附。应用拟静态和能量方法给出微结构在冲击载荷下的响应。

关键词 微加速度计 体硅加工工艺 冲击载荷 失效分析 粘附

Abstract Shock-resistibility is a major performance index for accelerometer. Drop test is a effective way test for the test of structures subjected to shock load. The failure modes of a folded flexure micro-accelerometer are verified by drop test. Two typical failure modes are observed: complete rupture or fragmentation of beams and stiction between moving parts. Pseudo-static and energy conservation method are used to analyze the response of the structure under this kind of impact load.

Key words Microaccelerometer; Bulk micro-machining; Impact loading; Failure analysis; Adhesion

Correspondent: ZHAO Yapu, E-mail: yzhao@lmm.imech.ac.cn, Fax: +86-10-62561284

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19928205 and No. 10072068) and "973 Project" of China (No. G19990331103), and Microsystem Mechanic Joint Laboratory of IMECH and HKUST.

Manuscript received 20010621, in revised form 20010901.

1 引言

微电子机械系统(MEMS)在近十年多来取得了飞速的发展。当前对于MEMS器件的设计和制作的工作已经取得了很大进展,但是,就整体而言, MEMS产品的成功商品化尚未实现。各种工况下失效问题是MEMS商品化的一大障碍^[1]。MEMS产品在可靠性方面所遇到的挑战是:(1)多数的当前已经进入应用领域的MEMS器件或者正在研制的其他微机械器件将在其所应用的系统中起着非常重要的作用,虽然MEMS器件本身价格便宜,但其失效造成的损失非常巨大,一个明显的例子就是应用于军事上的MEMS器件^[2]。(2)MEMS是一门全新的技术,对于其失效物理机制的了解还很少,特别是对尺度效应和表面效应影响的认识还很初步。(3)MEMS技术当前仍然处于飞速发展的阶段,不同的可靠性问题的相对重要性将会不断变化,

还缺乏具有可预测性的失效模型。(4)MEMS器件的可靠性的研究可以对其设计产生重要反馈。正确认识MEMS的失效模式是进行可靠性评估的前提条件。当前,对MEMS器件以及系统的失效的研究正逐渐引起人们的极大关注。由于器件尺寸的减小, MEMS器件非常容易受到自身或者外界一些因素的影响。对于MEMS失效的研究,不但包括宏观机械中所面临的一些问题,而且还有一些MEMS所特有的现象,需要进一步研究。

可靠性的研究和预测对MEMS的发展是非常重要的一个课题。动态载荷对MEMS器件的工作性能和稳定性都有很大的影响。这种载荷可能发生在装置使用过程中的错误操作,或者由于制造、测试以及运输过程中。在军事上,动态载荷更是经常遇到,例如炮弹发射时的瞬间冲击。在实验中一般使用Hopkinson杆或轻气炮等手段来实现冲击载荷。但是由于微机械结构的

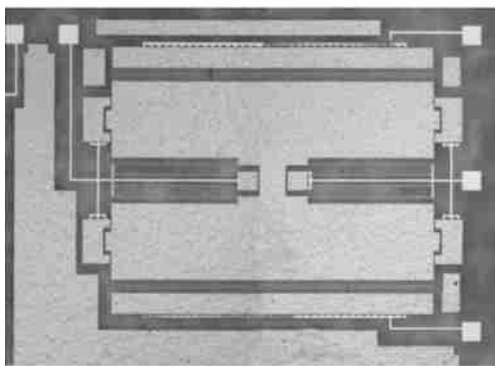
* 20010621 收到初稿, 20010901 收到修改稿。该工作受到国家“973”项目“集成微光机电系统研究”, 国家自然科学基金项目(19928205, 10072068)和“中科院力学所—香港科大微系统所的微系统研究联合实验室”联合资助。

体积非常小,这种加载方式难以用于 MEMS 器件冲击可靠性的实验研究,一种简单且有效的冲击方式就是采用跌落的方法,即让结构在一定的高度自由落下以产生适当的冲击。

文中采用这种跌落的方式来检验微加速度计在冲击载荷下的特性,并利用准静态以及数值模拟的方法对冲击作用下微加速度计结构的抗冲击性能进行分析,由此得到可能的失效模式,这对微加速度计结构的进一步优化设计具有一定的指导意义。

2 微加速度计的设计和制备

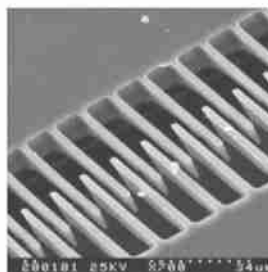
目前,多数微加速度计的制备都采用表面加工技术(surface micro-machining technology)。一般来说,利用表面加工工艺得到的微构件的侧向尺寸为 10~500 μm,厚度方向上为 0.1 μm 到几个 μm,与基底之间的间隙一般为 0.1~2 μm。在这种情况下,要得到高的灵敏度,需要大的质量块以及大的感应电容。表面工艺由于其自身的限制,使得质量块不可能达到很大,并且更重要的一点是感应电容的大小也受到很大的限制。采用体加工(bulk machining)的方法,结构的厚度可以达到 10~10² μm 的量级,这样增大了梳齿之间的交叠面积,有利于形成大电容,会大大提高加速度计的灵敏度。所以,本文采用硅-玻璃键合技术,利用重离子刻蚀,得到厚度方向上可以达到几十微米的结构^[3],如图 1 所示。对于较厚的结构,在垂直于基底方向上有非常大的刚度,会减少结构粘附到基底上的机会,而粘附



(a) 微加速度计光学显微照片(顶视图)
(a) Optical microscope of micro-accelerometer (top view)

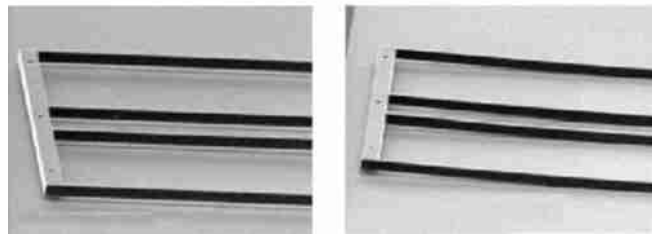


(b) 梁弹簧结构的 SEM 照片
(b) SEM of spring beam structure



(c) 梳齿部分的 SEM 照片
(c) SEM of comb structure

图 1
Fig. 1



(a) 自由的折叠梁 (a) Free folded flexure
(b) 粘附到衬底上的折叠梁 (b) Folded flexure adhered to substrate

图 2 折叠梁由于冲击载荷作用粘附到衬底上
Fig. 2 Stiction of folded flexure to substrate due to impact loading

正是微结构中一种典型的失效模式^[1,4]。图 2 显示了一种微折叠梁结构在冲击作用下粘附到基底上的情形^[5]。虽然在体加工的结构中,与基底之间的粘附发生的机会大大减小了,但是一般的结构在其工作平面内的敏感方向上,往往还会发生横向的粘附,而粘附是与接触面上的粗糙情况有直接关系的,在设计中这是应该考虑的一个因素。

3 跌落实验及结果

为了检验微加速度计各个方向上的抗过载情况,在实验中,采用同时将微加速度计以不同的姿态固定到跌落实验弹上的方法,这样可以产生如图 3 所示的三个方向上的加速度冲击。即分别为 x 方向(加速度计的工作方向)、y 方向(垂直于加速度计的工作方向)和 z 方向(使结构与衬底脱离的方向)。从下面图中可以看到,在平行于衬底的方向上均有抗过载的保护块,以防止结构在平行于衬底平面内过度的冲击。而在垂直于衬底平面上没有任何保护,所以此方向上虽然具有很大的刚度,仍然需要对其承载能力进行检验。

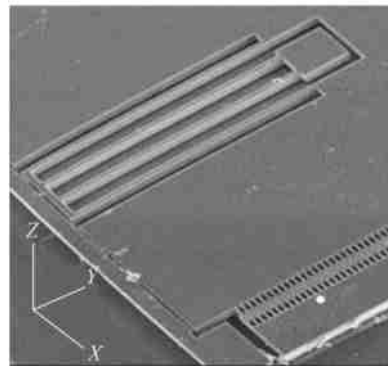


图 3 微加速度计所受的三个冲击方向
Fig. 3 Three impact directions for the micro-accelerometer

对两种不同宽度的梁结构(分别为 15 μm 的粗梁结构和 6 μm 的细梁结构)的微加速度计进行实验。实验高度采用 1.5 m 和 3 m 两个标准进行。

3.1 细梁微加速度计 1.5 m 落高实验

对于梁宽为 6 μm 的微加速度计进行落高为 1.5 m 的实验,结果列于表 1,图 4 为检测加速度计输出的信

号。其中,横坐标为作用时间,纵坐标为输出信号,输出为 0.1 mV/g;迟滞时间为最大加速度作用的时间,如图中 0 到 t 段。

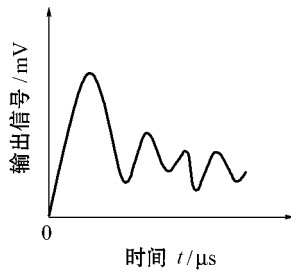


图4 标准微加速度计记录的瞬态信号

Fig. 4 Instant signals recorded by standard micro-accelerometer

表 1 中“-”表示微加速度计在作用之后完全失效,“+”表示结构仍然完整,并且具有良好的振动特性。

直接观察到多数发生质量块与基底的完全脱离,尤其是在与基底相脱离的方向上。从表 1 中可以看到,对于细梁结构的微加速度计,不能承受超过 5 000 g 的加速度冲击。

表 1 细梁结构 1.5 m 跌落实验结果

Tab. 1 Experimental results with 1.5 meters dropping of thin beam

输出 mV	等效加速度 g	迟滞时间 μs	工作方向 x	垂直方向 y	脱离基底 方向 z
512	5 120	31.2	+	+	-
556	5 560	32.4	-	-	-
524	5 240	30.6	+	+	-
400	4 000	33.6	-	-	-
576	5 760	31	-	+	-
512	5 120	30	-	-	-

3.2 粗梁(梁宽为 15 μm)微加速度计在 1.5 m 和 3 m 自由跌落实验

实验结果见表 2 和表 3。

表 2 粗梁结构 1.5 m 跌落实验结果

Tab. 2 Experimental results with 1.5 meters drop of thick beam

输出 mV	等效加速度 g	迟滞时间 μs	工作方向 x	垂直方向 y	脱离基底 方向 z
464	4 640	30.8	+	+	+
546	5 460	34	+	+	-
573	5 730	31.4	+	+	+

表 3 粗梁结构 3 m 跌落实验结果

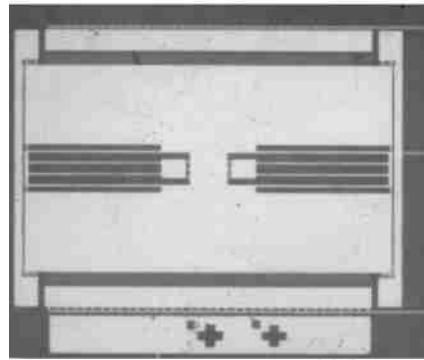
Tab. 3 Experimental results with 3 meters drop of thick beam

输出 mV	等效加速度 g	迟滞时间 μs	工作方向 x	垂直方向 y	脱离基底 方向 z
2 320	23 200	74	+	+	-
2 600	26 000	76	+	+	+
3 400	34 000	58	+	+	-
	> 10 000	176	+	+	-
	> 10 000	100	+	+	-

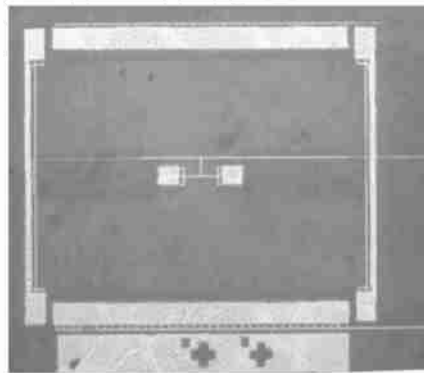
对于前三组结果,均在探针台下进行了测试,仍然具有良好的振动特性,可以认为粗梁结构的微加速度计可以承受 5 000 g 的加速度。后三组数据的结果,显微镜下观察结构仍然完好,没有发现失效的迹象。

实验结论为,粗梁的微加速度计比细梁更耐冲击。在平行于衬底方向,由于有抗过载保护块的限制,所以不易发生梁断裂现象,而在脱离衬底方向最容易发生断裂。断裂位置大多发生在梁的根部,即应力集中区域。图 5 给出实验前后加速度计结构的破坏

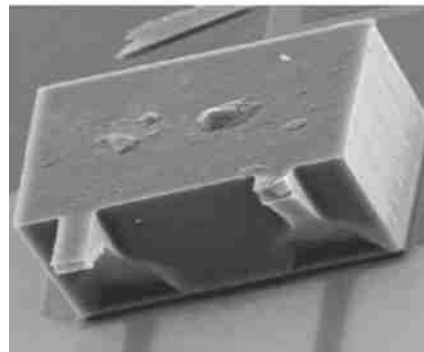
情况。



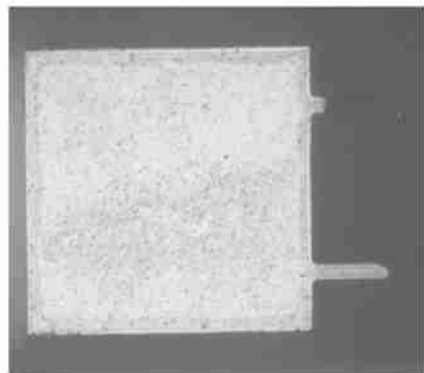
(a) 跌落冲击之前的完整结构
(a) Complete structure before dropping impact



(b) 冲击之后质量块与基底完全分离开
(b) Mass block and substrate separate completely after impact



(c) 根部附近发生断裂的电镜照片
(c) SEM of rupture near root



(d) 梁的断开位置多发生在根部附近
(d) Most rupture occurring near the beam root

图 5 微加速度计结构冲击破坏情况

Fig. 5 Destructive status under impact of micro-accelerometer structures

4 分析

4.1 梁结构的拟静态分析

作为问题的简化,可以将梁结构等效为悬臂梁,因为折叠梁中间支撑部分的刚度远大于长梁部分,所以暂时忽略这部分的变形。在这种情况下,可以将结构理想化为一个端部有集中质量的悬臂梁,如图 6 示^[6]。

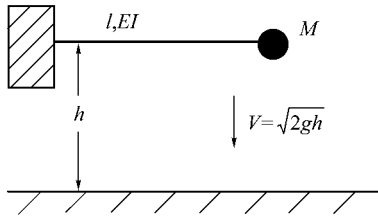


图 6 端部有集中质量的悬臂梁从一定高度落下
Fig. 6 A cantilever beam with heavy concentrated mass drop from a certain height

悬臂梁的最大弹性弯矩为

$$M_e = Ybt^2/6 \quad (1)$$

式中 Y 是单晶硅的屈服应力, b 和 t 分别是梁截面的宽度和厚度。如果假想有一个集中力 $(m + M)a$ 作用在质量块上,则梁的弯曲方程为

$$w(x) = \frac{(m + M)ax^2}{2EI} - \frac{(m + M)ax^3}{6EI} \quad (2)$$

式中 a 是跌落时产生的加速度。因为硅是一种脆性材料,所以它几乎不能承受塑性变形,当梁上的作用力超过弹性屈服强度时,梁将会发生断裂。此作用力可以由上面关系式得到

$$F_c = M_e/L = Ybt^2/6L \quad (3)$$

这样得到最大加速度的约束条件

$$(m + M)a > Ybt^2/6L \quad (4)$$

即

$$a > Ybt^2/6L(m + M) \quad (5)$$

将实际的几何参数代入,取单晶硅的屈服强度为 $Y = 1.2 \text{ GPa}$,梁宽为 $6 \mu\text{m}$ 的微加速度计结构可以承受的最大加速度为 $0.62 \times 10^4 g$ 。

4.2 能量分析的观点

在前面拟静态分析方法中,假设一个恒定的力作用,而不是冲击力作用在结构上。但是在实际的冲击过程中,决定应力和变形都是很困难的工作。于是,可以采用另外一种近似的方法,就是能量分析的观点。这里忽略梁结构的质量,假设系统的动能与梁内部的应变能构成一个守恒的系统,并且忽略冲击瞬间的能量损失,这样可以计算梁结构的最大变形和内部的最大应力。

图 7 给出梁结构各部分的受力和变形的情况。

CD 段可以看成是只有弯曲的悬臂梁。设有外力 F 作用在 D 端,则梁内的应变能为

$$V_{CD} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} [\sigma(x)]^2 dx = \frac{F^2 L_1^3}{6EI} \quad (6)$$

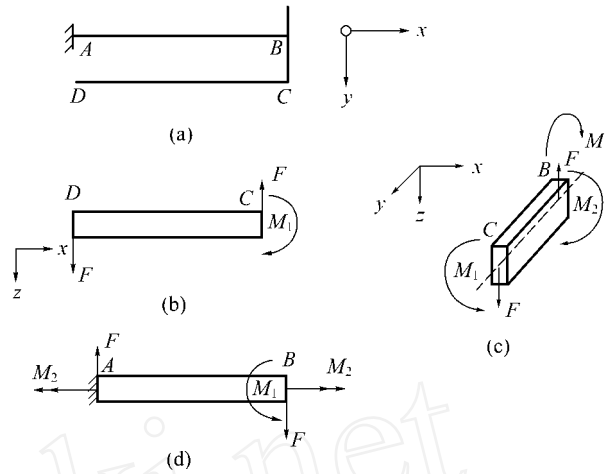


图 7 梁各部分受力分析

Fig. 7 Free-body diagram of various parts of the beam

BC 段是既有弯曲又有扭转的两端固支梁。总的应变能分为两部分,由于弯曲产生的应变能为

$$V_{BC}^b = \frac{F^2 L_2^3}{6EI} \quad (7)$$

由于扭转而产生的应变能为

$$V_{BC}^t = \frac{M_1^2 L_2^2}{2GC} \quad (8)$$

AB 段也包含两部分应变能,它们分别为

$$V_{AB}^F = \frac{F^2 L_1^3}{6EI} \quad V_{AB}^M = \frac{M_2^2 L_1^2}{2GC} \quad (9)$$

于是,折叠梁总的应变能为

$$V_T = 4(V_{AB} + V_{BC}^b + V_{BC}^t + V_{CD}^F + V_{CD}^M) \quad (10)$$

系统的初始能量为重力势能 $P = Mgh$ 。当 $V_T > P$ 时,意味着结构能够将势能完全转化为弹性应变能,即结构可以承受给定高度下跌落的冲击。否则,梁结构将产生断裂。将具体的几何参数及材料参数代入式(10),得到落高为 1.5 m 时微加速度计可以承受的最大加速度为 $0.89 \times 10^4 g$ 。

以上分析实际上采用的都是静态的方法,并且在梁变形的分析中没有考虑剪切的影响。实际上由于梁的厚度很大,剪切的作用也占有一定的地位。下面通过模拟的方法进一步考察所允许的最大加速度与梁的几何尺寸的依赖关系。

4.3 数值模拟

为了简化,只考虑结构之半,并将质量块集中简化为图 8 中所所示的情形。

通过在梁上施加不同的初速度来模拟不同高度的跌落,计算时间采用 $30 \mu\text{s}$ 。图 8 显示了不同时刻梁内应力的变化情况。可以清楚的看到,端部由于应力集中,将会更早达到最大应力值,当这个最大应力值超过材料的屈服强度,就会发生断裂。图 10 给出不同初速度下折叠梁在靠近固定端的节点处等效的 von Mises 应力的变化情况。其中 n_0, n_1, n_2, n_3 分别表示距离拐点位置的第一、二、三、四个节点,如图 9 所示。

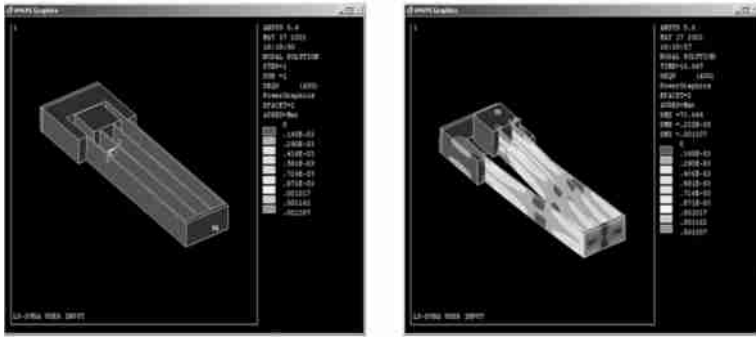


图8 折叠梁内部应力随时间的变化分布

Fig. 8 Internal stress distribution with time of the folded flexure

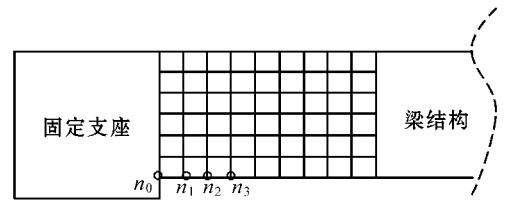


图9 固定端附近节点位置分布图

Fig. 9 Node position distribution near the built-in end

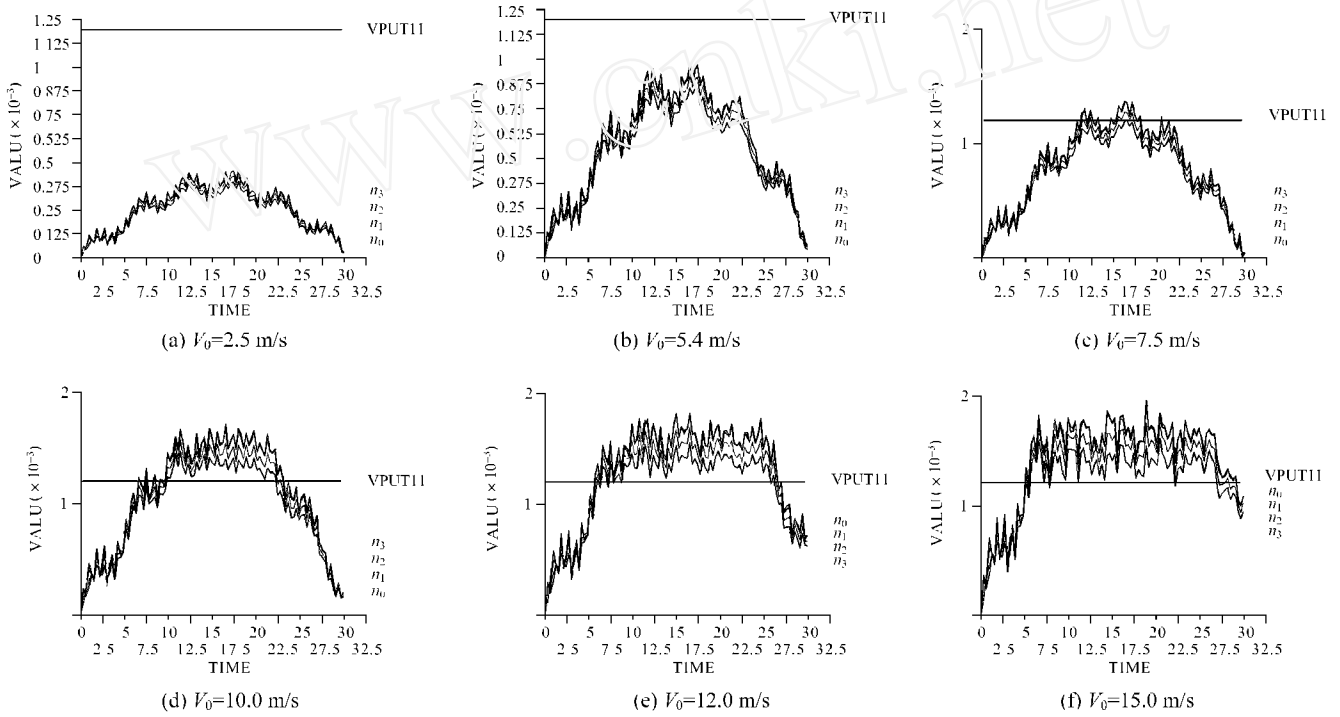


图10 不同初速度(对应不同的落高)下根部节点应力随时间的变化曲线

Fig. 10 Stress variation with time of nodes at root with different initial velocity (drop height)

图10中直线表示允许的最大应力值。从中可以看到,当初速度很低时,在冲击过程中应力值达不到允许应力。当初速度超过一个临界值,这里近似为7.5 m/s,随着时间的推移会使得梁内某点的应力超过允许值,这样就会发生梁的断裂。在各种情况下,均可以看到,总是 n_0 节点处的应力先于其他节点产生最大的应力,所以断裂总是从根部开始。当初速度增大时,最大应力达到允许应力值所需要的时间越短。

为了更明显的表示这种对于速度的依赖关系,将不同初速度下 n_0 节点处的应力值绘制到同一坐标系中,见图11。

从图8中可以看到在质量块一侧的节点上,也会有应力集中的现象,为了考虑究竟是哪里先达到最大应力,将两个位置上的应力绘制在图12中。可以看到在固定端的节点应力最大值要大于质量块端,而且产生超过允许应力的时间也早于质量块端,这就解释了多数断裂发生在固定端的根部,而不是质量块端的根部。

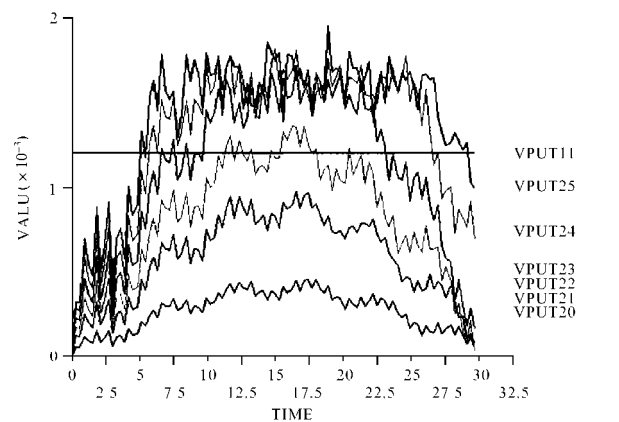


图11 不同初速度节点 n_0 上应力变化

Fig. 11 Stress variation of node n_0 under different initial velocity

跌落实验中,当落高为1.5 m时,其对应的初速度为 $V_0 = \sqrt{2gh} = 5.4$ m/s,但是计算模拟的结果要大于这个值。这是因为器件的实际参数和设计参数由于加工工艺的因素在厚度上没有达到 $6 \mu\text{m}$,并且在梁结构

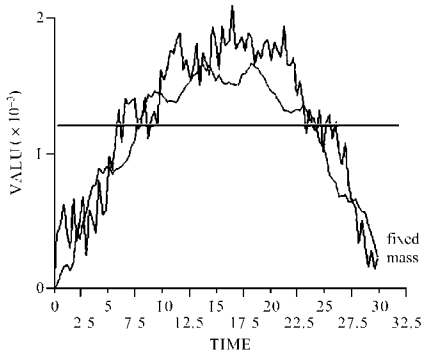
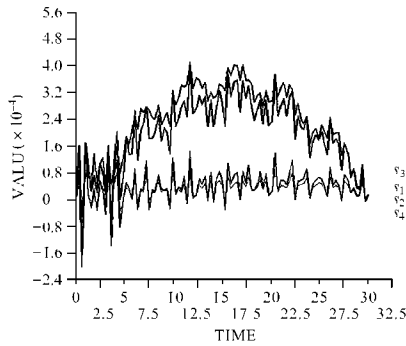
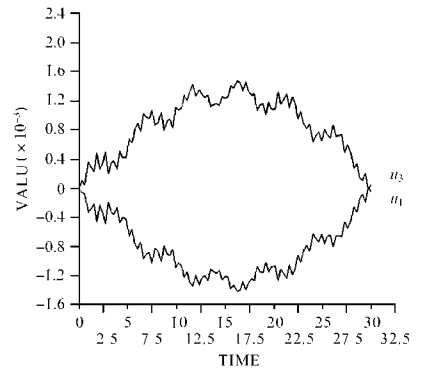


图 12 固定端处的节点与质量块一侧节点应力变化情况 ($V_0 = 10.0 \text{ m/s}$)

Fig. 12 Stress variation of nodes at the root and at lateral side of heavy mass with $V_0 = 10.0 \text{ m/s}$



(a) 应力集中区的剪切应力 τ_{xy}
(a) Shear stress τ_{xy} in the stress concentration zone



(b) 应力集中区沿 y 轴的拉伸应力 σ_y
(b) Tensile stress along y-axis in the stress concentration zone

图 14 剪应力与拉伸应力的分布比较
Fig. 14 Comparison of shear and tensile stresses distribution

的表面上有很大的粗糙度,这些都会降低梁的抗冲击性能,所以会产生实验和模拟结果之间的误差。

5 断口分析

对结构的破坏方式的分析,需要考察断裂面上的具体情况,图 13 给出断口处的扫描电镜照片。

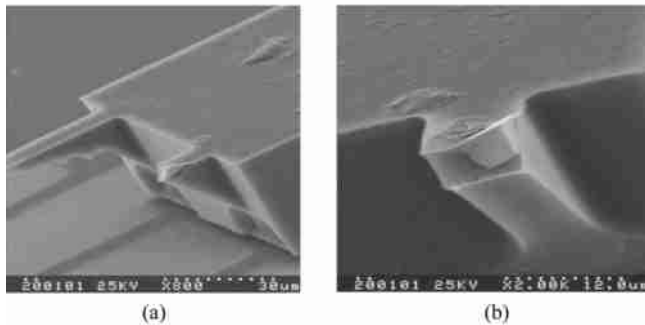


图 13 断口位置的形貌图
Fig. 13 Profile of fractography

从图 13a 中看到,断口面并不是垂直于梁内拉应力的方向,而是在大约 45° 方向的平面上发生的断裂。对于这一点有如下的分析。

单晶硅作为一种脆性材料,其几乎不能承受塑性变形,所以在冲击载荷作用后多发生脆性断裂,这从断口(图 13b)中可以看出。截面是非常光滑而没有任何塑性变形的痕迹,并且是沿着确定的平面取向,所以可以认为是一种解理断裂,解理面为(011)。在这附近处的内部应力主要是 y 轴上的拉伸应力(如图 14),拉伸应力要比剪切应力高一个数量级。

这样在考虑该位置的应力状态时,可以认为最大主应力方向即为 y 方向。由于最大剪切应力的方向与最大主应力成 45° ,所以此断裂面就是最大剪应力的方向,是由于剪切引起的断裂。

6 粘附现象

前面已经提到微机械中由于表面效应的影响,存

在一种特有的失效模式,即粘附问题^[1,4]。如前所述,大多数的粘附发生在表面加工工艺中,但是在体加工中侧面结构之间的粘附仍然有发生的可能,这同样是一类由于表面效应所产生的现象。由于微结构具有大的比表面积,表面力作用强烈的表现出来,减小接触面积是一种减小粘附的有效方法。

在跌落实验中,这种粘附也被观察到,如图 15 所示。虽然这时粘附的发生是少数的一些,但是这种由于梳齿之间的粘附而产生的失效在加速度计工作过程中也是致命的。这就需要在设计和操作过程中尽量避免结构之间发生接触。

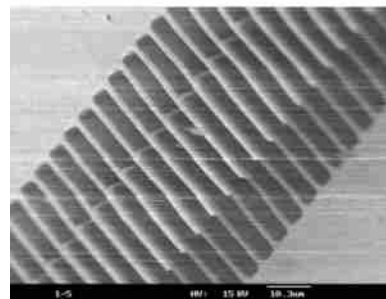


图 15 梳齿之间发生粘附的情况
Fig. 15 Adhesion between comb fingers

7 总结

本文利用自由跌落的方法对微加速度计结构在冲击载荷下的动态失效进行了研究,实验发现两种主要的失效模式,即微结构的断裂破坏和梳齿之间在横向的粘附。利用计算与模拟对微梁结构的断裂进行了分析,得到断裂首先发生在根部附近应力集中区的结论。梳齿之间的粘附证明了粘附是微结构中一种主要的失效模式。

微尺度下材料和结构的冲击动力响应和失效问题是一个有待深入开展的重要课题,微系统动力学的建立将对正确认识微系统的运动、失效等规律产生重要影响^[7]。

References

- 1 ZHAO Y P, YU T X. Failure modes of MEMS and microscale adhesive contact theory. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2000, 1: 361 ~ 372.
- 2 Tang W C, Lee A P. Defense applications of MEMS. *MRS Bulletin*, 2001, 26(4): 318 ~ 319.
- 3 WANGL S, ZHAO Y P, LI Z H, et al. A bulk micro-machined accelerometer with comb fingers sensed capacitors. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2000, 1: 431 ~ 436.
- 4 ZHAO Y P, WANGL S, SUN K H. Tabor number, adhesion parameter and elastic theory of microscale adhesive contact. *Advances in Mechanics*, 2000, 30(4): 529 ~ 537 (In Chinese) (赵亚溥, 王立森, 孙克豪. Tabor 数、粘着数与微尺度粘着弹性接触理论. *力学进展*, 2000, 30(4): 529 ~ 537).
- 5 Tanner D M, et al. MEMS reliability in shock environments, *IEEE International Reliability Physics Symposium in San Jose, CA, April. 2000.* 129 ~ 138.
- 6 Ephraim S. Is the maximum acceleration an adequate criterion of the dynamic strength of a structural element in an electronic product? *IEEE Trans. on Component, Packaging, and Manufacturing Technology*, 1997, 20(4): 513 ~ 517.

作者简介

王立森,男,1975年11月生,黑龙江大庆市人,汉族。2001年7月在中科院力学所取得硕士学位,研究方向为微机械加速度计

的设计、模拟及力学分析。曾于2000年在香港科技大学机械系学习三个月。现为美国宾州州立大学机械系博士研究生。

胡宇群,男,1969年1月生,上海市人,汉族。南京航空航天大学航空宇航学院讲师,博士研究生。研究方向为机械CAD/CAM,微系统力学等。E-mail: hyq@mailhost.nuaa.edu.cn。

余同希,男,1942年生。香港科技大学机械工程系教授,香港九龙清水湾。E-mail: metxyu@ust.hk。

李志宏,男,1969年生,吉林长春人,汉族。北京大学微电子学研究所副教授。研究方向为微加速度计等器件的设计与工艺制备。

赵亚溥,男,1963年8月生,河北晋州人,汉族。理学博士,现任中国科学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。主要从事微系统力学和冲击动力学的研究。

ZHAO Yapu, male, born in Jinzhou, Hebei Province in December 1963. He is a professor at LNM, Institute of Mechanics, CAS, and director of the State Key Lab. of Non-Linear Mechanics. His research interests include microsystem mechanics and impact dynamics.