

灌密封胶封装对高量程 MEMS 加速度计 动态性能的影响^{*}

蒋玉齐 程迎军 张 鲲 李昕欣 罗 乐

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 利用有限元模拟方法, 对一种压阻式高量程 MEMS 加速度计进行了 10 万 g 峰值的半正弦加速度脉冲下的响应分析. 灌密封胶弹性模量的变化对高量程加速度计输出电压信号的影响可以忽略, 且模拟输出电压的峰值与解析解接近. 应力分析表明, 芯片粘结胶、芯片与芯片盖板之间密封胶环的等效应力均随灌密封胶弹性模量的增加而减小; 弹性模量在 4 GPa 以上的灌密封胶适宜用来保护芯片. 动态有限元模拟结果与自由落杆测试结果接近.

关键词: 高量程 MEMS 加速度计; 灌封; 弹性模量; 有限元分析

EEACC: 2575D

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1245-05

1 引言

高量程 MEMS (micro electro mechanical systems) 加速度计设计用于苛刻的撞击、爆炸、冲击场合, 所测加速度可达几万 g 到几十万 g^[1~3] ($1g = 9.8 \text{ m/s}^2$). 其失效模式包括传感器的无阻尼高频共振失效^[2]、管壳的灾难性失效^[2,3]等. 芯片安装到管壳中之后, 灌封可显著提高封装的可靠性. Davies 等人^[2]将承受能力达 20 万 g 的加速度计芯片及其互连金丝都塑封起来, 同时又不限制传感器中敏感结构元件的运动.

但是通常的实验室条件如自由落杆试验、霍普金森压杆试验等难以产生如此高的冲击加速度. 与实验测量手段相比, 有限元分析技术已经成熟, 具有快速高效、信息量大的优点. 黄卫东^[4]等人通过无阻尼自由振动的冲击模拟, 观察到加速度计悬臂梁末端挠度的平均值不受所用的粘结胶弹性模量的影响. 目前在高量程 MEMS 加速度计的灌封方面的报道很少. 本文通过有限元方法, 对一种实用的高量程

MEMS 加速度计的封装结构进行了动态响应分析, 并观察灌密封胶对加速度计的影响, 最后将模拟结果与测试结果进行比较.

2 有限元模拟

本文所用为自制的双悬臂梁压阻式高量程 MEMS 加速度计, 悬臂梁的敏感方向平行于芯片平面. 加速度计封装结构如图 1(a) 所示. 采用商用 ANSYS 软件进行有限元动态冲击模拟. 封装结构用 Solid164 单元进行网格划分即得有限元模型, 如图 1(b) 所示. 所用材料参数列于表 1. 灌密封胶通常为掺杂或不掺杂 SiO_2 填充料的环氧胶或有机硅胶. 当有 SiO_2 填充料时弹性模量比较高. 为便于考察灌密封胶弹性模量的影响, 假定灌密封胶的密度都为 1.5 g/cm^3 . 一个峰值为 10 万 g, 历时 $50 \mu\text{s}$ 的半正弦加速度脉冲被加载到管壳的左侧面, 沿加速度计的敏感方向 x 方向. 封装结构所受到的粘性阻尼比 $\zeta = 0.22$. 管壳底面在法线方向 (z 方向) 的位移约束为零 ($U_z = 0$).

^{*} 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: A139701)

蒋玉齐 男, 博士, 从事电子器件封装及其可靠性研究. Email: yuqi_jiang@163.com

2004-09-25 收到, 2005-02-24 定稿

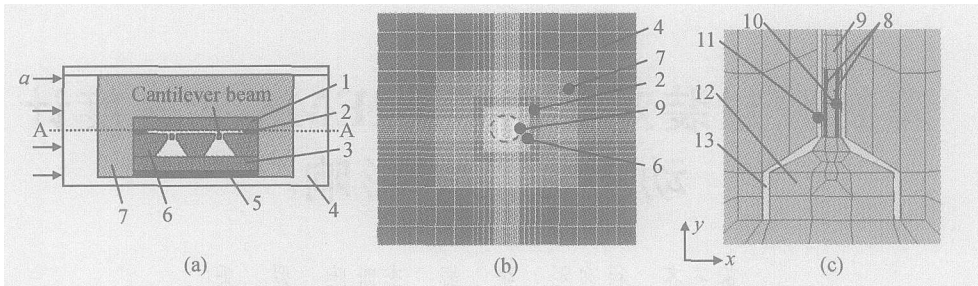


图 1 加速度计的封装结构及有限元模型 (a) 封装结构示意图; (b) 有限元模型(从 A-A 截面观察); (c) 悬臂梁 1. 硅盖板; 2. 环氧封接胶环; 3. 玻璃衬底; 4. 可伐合金管壳; 5. 环氧粘结胶; 6. 芯片; 7. 灌密封胶; 8. 电阻条; 9. 悬臂梁; 10. 电阻条中心节点; 11. 过载保护间隙; 12. 悬臂梁的支撑块; 13. 应力屏蔽槽

Fig. 1 Package structure and finite element model for the accelerometer (a) Schematic diagram of package structure; (b) Finite element model; (c) Cantilever beam

表 1 有限元模型中所用的材料参数

Table 1 Material parameters used in the finite element model

	Elastic modulus, E /GPa	Density, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Poisson's ratio, ν
Kovar header	140	8360	0.32
Silicon protective cap, silicon chip	170	2330	0.28
Epoxy die attach adhesive	3	1200	0.35
Epoxy sealing ring	3	1200	0.35
Encapsulant	0.1 ~ 12	1500	0.3
Glass substrate	63	2230	0.22

3 结果与分析

3.1 输出电压的解析解和有限元解

在器件的悬臂梁的根部两侧制作了应力屏蔽槽,目的是使悬臂梁免受芯片上传播的动态应力波的影响而断裂(图 2(a)). 传感器靠悬臂梁根部的压敏电阻条组成惠斯登全桥来检测加速度信号(图 3),每个悬臂梁的根部都有两个电阻条(图 1(c)).

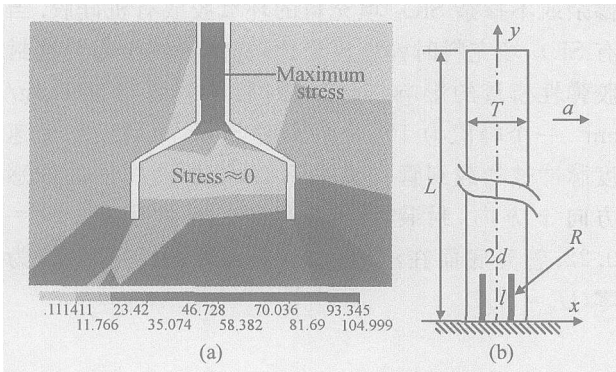


图 2 悬臂梁模型 (a) 实物模型; (b) 物理模型

Fig. 2 Models of cantilever beam (a) Real model with equivalent stress distribution; (b) Physical model

当输入电压为 V_B 时,该电桥的输出电压为:

$$V_{out} = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_B \quad (1)$$

理想情况下,每根电阻条的阻值 R 相等,每根电阻条的阻值变化 ΔR 相等,电桥没有零漂. 据此可将实物模型(图 2(a))简化为悬臂梁的物理模型(图 2(b)). 此时加速度计的输出电压为

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_B \quad (2)$$

根据硅的压阻效应得到电阻条微元的电阻变化率为^[5]

$$\frac{d\Delta R}{dR} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_y - \sigma_x) \quad (3)$$

其中 σ_x, σ_y 均为电阻条微元的轴向应力 σ_x 很小,可以忽略; π_{44} 为硅的剪切压阻系数. 对于悬臂梁的物理模型有

$$dR = \frac{R}{l} dy \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{6\rho da(y-L)^2}{T^2} \quad (5)$$

其中 ρ 为硅的密度; d 为电阻条中心到悬臂梁的中性面的距离; l 为电阻条的长度; T 为悬臂梁的厚度; L 为悬臂梁的长度; a 为待测加速度. 将(4), (5)

式代入(3)式,然后沿电阻条积分得 $\Delta R/R$,再代入(2)式得到加速度计输出电压的解析解为:

$$V_{out} = V_B \pi_{44} \rho d a (L^3 - (L - l)^3) / (l T^2) \quad (6)$$

取 $a = 9.8 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ (即 10 万 g 加速度), $V_B = 5 \text{ V}$, $\pi_{44} = 60 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$, $d = 4.5 \mu\text{m}$, $l = 60 \mu\text{m}$, $T = 16 \mu\text{m}$, $L = 515 \mu\text{m}$, 则芯片的满量程输出电压的解析解为 $V_{out} = 85.1 \text{ mV}$.

在有限元模拟中,假设封装结构中电阻条的中心节点(见图 1(c))的轴向应力 σ_x, σ_y 为单根电阻条的平均轴向应力,且器件制备出来之后每根电阻条的阻值相等(均为 R ,理想情况).但在外界载荷情况下,每根电阻条的阻值变化 ΔR 可能不相等.所以对于电阻条 R_1 有

$$\frac{\Delta R_1}{R} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_{y1} - \sigma_{x1}) \quad (7)$$

其他电阻条也有类似的结果.当电阻条的阻值发生改变时,惠斯登电桥(图 3)的输出电压表达式为:

$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_B \\ &= \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_B \end{aligned} \quad (8)$$

注意到 $R_1 = R + \Delta R_1$, $R_2 = R + \Delta R_2$, $R_3 = R + \Delta R_3$, 以及 $R_4 = R + \Delta R_4$. 令 $D_1 = \Delta R_1/R$, $D_2 = \Delta R_2/R$, $D_3 = \Delta R_3/R$, $D_4 = \Delta R_4/R$, 那么

$$V_{out} = \left(\frac{1 + D_2}{2 + D_1 + D_2} - \frac{1 + D_3}{2 + D_3 + D_4} \right) V_B \quad (9)$$

根据有限元分析得到的电阻条的中心节点的轴向应力,可通过(9)式获得输出电压的有限元解.

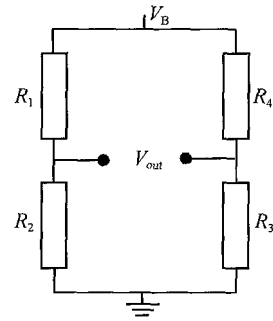


图 3 惠斯登电桥

Fig. 3 Wheatstone bridge

3.2 加速度计的时域响应分析

由于加载的是一个脉冲载荷,所以加速度计的输出电压随时间变化.图 4 中改变灌封胶的模量,输出电压曲线并无明显不同,输出电压峰值均约为 79mV,与解析解(85.1mV)接近.之所以比解析解略小些,是因为有阻尼作用.在 $10 \sim 20 \mu\text{s}$ 处输出电压曲线均有一个台阶(图 4),可能由于阻尼比 $\zeta < 1$,故冲击载荷作用时间内的受迫振动仍表现出固有频率振动特征.图 5(a)是输出电压曲线的峰值及电阻条 R_1 的中心节点应力随灌封胶弹性模量变化情况.当灌封胶的弹性模量 E 在 0.5GPa 左右时,输出电压达到其最大值.但灌封胶的弹性模量一般都在 $1 \sim 12 \text{ GPa}$,在此范围内输出电压缓慢地随着灌封胶弹性模量的增大而减小.由于输出电压的变化幅度小于 0.3% ($= 0.25/78.75$),故灌封胶弹性模量对输出信号的影响可以忽略.这与黄卫东^[4]的结果类似.

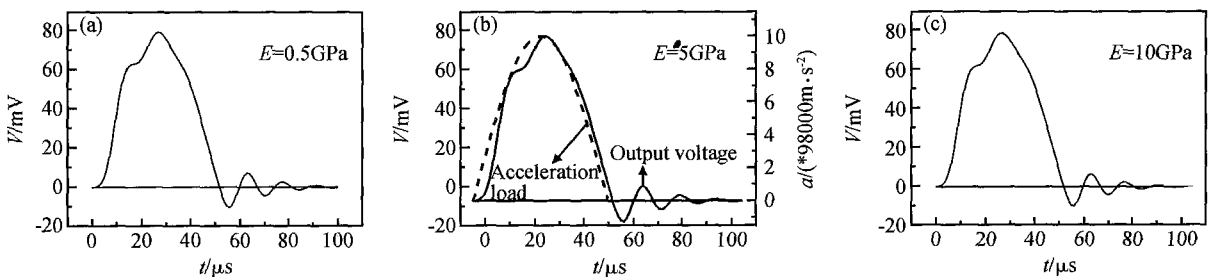


图 4 输出电压的响应曲线

Fig. 4 Output voltage versus time

模拟表明,当悬臂梁的支撑块没有应力屏蔽槽时,加速度计不能经受高 g 值的冲击载荷的作用,因为在悬臂梁的支撑块会产生高度的应力集中.但不管悬臂梁根部有没有应力屏蔽槽,静态模拟(管壳底

部完全固定,加速度计处于 10 万 g 加速度场中)表明,灌封胶的弹性模量对模拟输出信号的影响可以忽略,如图 5(b) 所示.最大应力产生于悬臂梁边缘靠近电阻条中心节点处,在不同灌封胶弹性模量下

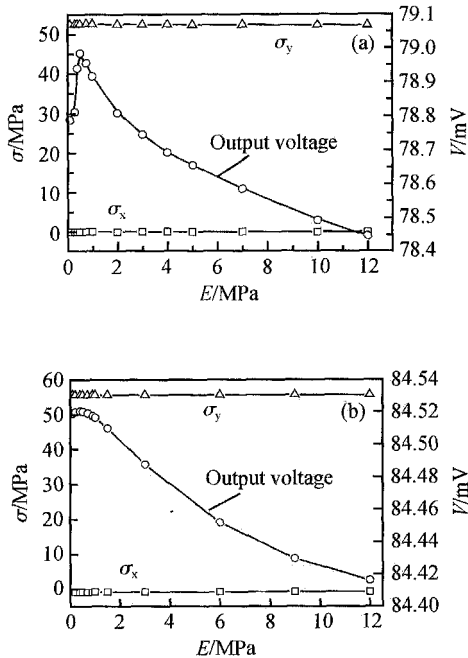


图 5 灌封胶弹性模量对输出信号的影响 (a) 动态模拟, 有应力屏蔽槽; (b) 静态模拟, 无应力屏蔽槽

Fig. 5 Effect of elastic modulus of encapsulant on output voltage (a) Dynamic simulation; (b) Static simulation

及 10 万 g 冲击加速度下, 保持 105 MPa 左右 (图 2 (a)), 与该点应力的解析解 (101 MPa) 接近。

封装后加速度计的线性性能对于加速度的测量很重要。所模拟的加速度计输出信号的峰值与加速度载荷峰值之间的线性关系如图 6 (灌封胶 $E = 5$ GPa) 所示。虽然输出信号随时间变化的关系曲线并不严格地遵循半正弦曲线, 但是信号的峰值与加速度载荷峰值之间的线性关系很好。模拟表明, 当 E 取其他值时, 也有类似的线性关系, 这是因为灌封胶弹性模量对输出电压的影响很小。

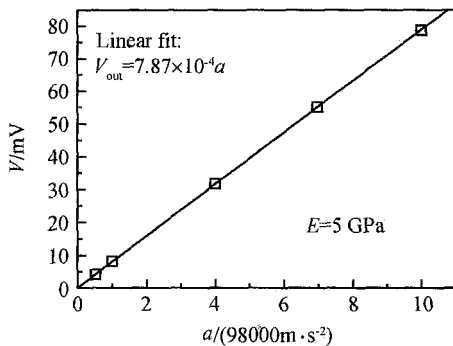


图 6 加速度计响应的线性性能

Fig. 6 Linearity of the accelerometer's response

3.3 封装结构应力分析

封装结构各组成材料的 Von Miss 等效应力的峰值随灌封胶的弹性模量的关系曲线如图 7 所示。各个材料的最大等效应力均未超过材料的屈服强度。提高灌封胶的弹性模量, 将降低管壳的最大应力, 有利于管壳经受高冲击作用。芯片粘结胶和介于芯片与芯片盖板之间的封接胶环 (sealing ring) 的应力都随灌封胶模量的增加而减小。当 $E > 4$ GPa 时, 封接胶环的最大等效应力基本不再改变。芯片的玻璃衬底也大体如此。这表明灌封胶 $E > 4$ GPa 已经足以保护加速度计芯片。

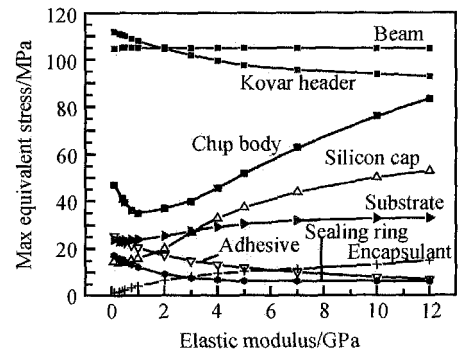


图 7 不同灌封胶模量下各组成材料的最大等效应力

Fig. 7 Maximum equivalent stress versus modulus of encapsulant

3.4 与实验结果比较

将自由落杆测试 (落高 35 cm) 结果与有限元模拟结果进行了比较, 如图 8 所示。加速度计测得最大加速度为 9351 g, 其响应曲线近似于高斯分布函数曲线, 因此可用高斯分布函数对曲线的脉冲部分进行拟合:

$$V_{\text{out}} = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} e^{-2\left(\frac{t-t_c}{w}\right)^2} \quad (10)$$

其中 $A = 7666.1$ (曲线下面积); t 为时间; 中心时刻 $t_c = 45.358 \mu\text{s}$; $w = 32.220 \mu\text{s}$ (标准时间偏差); $y_0 = -4.9060 \text{ mV}$ (输出电压偏移量)。在 $t = t_c$ 时刻, $V_{\text{out}} = 184.88 \text{ mV}$ (放大 20 倍), 对应加速度峰值 9351 g。根据此比例关系可转换为服从高斯分布函数的加速度脉冲曲线。设定阻尼比 $\zeta = 0.45$, 电阻条的剪切压阻系数 $\pi_{44} = 90 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{[5]}$, 结果模拟输出电压峰值为 211 mV, 与实际结果 (184 mV) 接近; 而根据公式 (6), 简化的悬臂梁模型的解析解为

239mV (均放大 20 倍). 由于实验条件所限, 没有比较 10 万 g 加速度载荷的冲击响应. 由于加速度计的线性很好, 故比较自由落杆试验的结果同样能说明有限元模型的有效性.

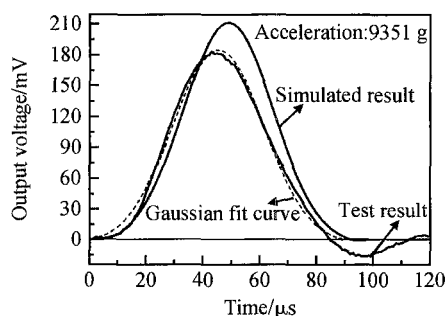


图 8 测试结果与模拟结果的比较

Fig. 8 Comparison between simulated result and test result

4 结论

通过加载 10 万 g 峰值的半正弦加速度冲击载荷可知, 灌密封胶弹性模量的变化对高量程加速度计输出电压信号的影响可以忽略, 且模拟输出电压的峰值与解析解接近. 加速度计的时域响应表现为有

阻尼下的受迫振动以及悬臂梁的固有频率振动, 输出电压的峰值与冲击加速度载荷的峰值之间具有很好的线性关系. 等效应力分析结果表明, 芯片粘接胶、芯片与保护硅片之间封接胶环的等效应力随着灌密封胶弹性模量的增加而减小. 当灌密封胶的弹性模量足够高 ($E > 4 \text{ GPa}$) 时, 封接胶环的最大等效应力趋于恒定, 使用这样的灌密封胶来保护芯片是适宜的. 动态有限元模拟结果与自由落杆测试结果接近.

参考文献

- [1] Ning Y, Loke Y, McKinnon G. Fabrication and characterization of high g-force, silicon piezoresistive accelerometers. *Sensors and Actuators A*, 1995, 48:55
- [2] Davies B R, Barron C C, Montague S, et al. High G MEMS integrated accelerometer. *SPIE Proceedings*, 1997, 3046:52
- [3] Tanner D M, Walraven J A, Helgesen K, et al. MEMS reliability in shock environments. *IEEE International Reliability Physics Symposium*, San Jose, 2000:129
- [4] Huang Weidong, Cai Xia, Xu Bulu, et al. Packaging effects on the performances of MEMS for high-G accelerometer with double-cantilevers. *Sensors and Actuators A*, 2003, 102:268
- [5] Bao Minhang. *Micro mechanical transducers—pressure sensors, accelerators and gyroscopes*. Elsevier, 2000:11

Effect of Plastic Encapsulation on Dynamic Response of High-g MEMS Accelerometer^{*}

Jiang Yuqi, Cheng Yingjun, Zhang Kun, Li Xinxin, and Luo Le

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The dynamic response of the package structure of a piezoresistive high-g MEMS accelerometer under a half sine pulse of acceleration with 100,000 g's peak is simulated using the finite element method. Results show that the effect of the modulus of encapsulant on the simulated output voltage can be ignored. The peak value of output voltage is close to the analytic solution. Stress analysis show that the maximum equivalent stress in the die-attach adhesive and sealing ring decreases with the increase in elastic modulus of encapsulant. The encapsulant with elastic modulus above 4 GPa is also suitable for encapsulation. The simulated output voltage is close to the drop test result.

Key words: high-g MEMS accelerometer; encapsulation; elastic modulus; finite element analysis

EEACC: 2575D

Article ID: 0253-4177(2005)06-1245-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. A139701)

Jiang Yuqi male, PhD. His research interests are packaging and reliability of electronic devices.

Received 25 September 2004, revised manuscript received 24 February 2005