

Study on the Thermal Stress of MEMS High- g Accelerometer in the Package *

LI Ping, SHI Yunbo *, GUO Tao, LIU jun, ZHANG Xiaoming

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Thermal stress in the package is one of factors that lead to the failure of MEMS device. A MEMS high- g accelerometer was designed, at the same time, thermal stress and the factors which effect thermal stress was simulated during the sensor packaging process in this paper. According to packaging technology, the finite element model of high- g accelerometer package was built by ANSYS software and thermal stress was simulated in the different joining technology. The results show that thermal stress can be reduced from 135 MPa to 33 MPa by comparison with directly patch to the bottom of the shell when it bonded with the glass. In the joining technology, the thermal expansion coefficient of the substrate and elastic modulus, thermal expansion coefficient and the thickness of the adhesive are the main factors that would effect the thermal stress; In the bonding process, the substrate and the bonding temperature mainly effect the thermal stress.

Key words: package; MEMS high- g accelerometer; thermal stress; joining technology; thermal expansion coefficient
EEACC: 7230;7320G **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.12.005

MEMS 高 g 加速度传感器封装热应力的研究 *

李 平, 石云波 *, 郭 涛, 刘 俊, 张晓明

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘 要: 封装热应力是导致 MEMS 器件失效的主要原因之一, 本文设计了一种 MEMS 高 g 加速度传感器, 并仿真研究了传感器在封装过程中的热应力及影响其大小的因素。根据封装工艺, 建立设计的高 g 加速度传感器封装的有限元模型, 利用 ANSYS 软件仿真传感器在不同的贴片工艺中受到的热应力及影响热应力的因素。结果显示, 在封装中, 与直接贴片到管壳底部相比, MEMS 高 g 加速度传感器芯片底面键合高硼硅玻璃后再贴片到管壳底部时, 封装热应力可从 135 MPa 降低到 33 MPa; 在贴片工艺中, 基板的热膨胀系数和贴片胶的弹性模量、热膨胀系数及厚度是影响封装热应力的主要因素; 在键合工艺中, 基板和键合温度主要影响到热应力的大小。

关键词: 封装; MEMS 高 g 加速度传感器; 热应力; 贴片工艺; 热膨胀系数

中图分类号: TP212.1; TH824.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-1699(2010)12-1695-05

封装是 MEMS 高 g 加速度传感器制造中一个非常重要的环节, 对器件的性能和可靠性等都有直接的影响。MEMS 高 g 加速度传感器的封装工艺中包含了多种不同的材料和结构, 且需要在一定的温度下进行。由于封装的各个不同部分存在着几何形状、材料组成和热膨胀系数的失配, 因此, 在封装的过程中, 由于温度梯度的分布不均而产生热应力, MEMS 封装中的热应力是 MEMS 封装工艺可靠性的重要指标要求之一, 同时, 封装热应力是导致 MEMS 高 g 加速度传感器失效的主要原因之一。因此, 在

MEMS 高 g 加速度传感器的封装工艺中应尽量减小封装热应力对传感器的影响, 即应尽可能的减小由封装引起的热应力^[1-2]。

本文针对特殊环境的要求, 设计了一种 MEMS 高 g 加速度传感器。利用 ANSYS 建立了传感器封装的二维模型, 并根据封装工艺的实际环境仿真研究了设计的加速度传感器受到的热应力。通过研究得出, 在封装时, 当 MEMS 高 g 加速度传感器底面键合高硼硅玻璃后再贴片到管壳底部时, 封装热应力将会减小。在贴片工艺中, 传感器受到的封装热

应力随贴片胶弹性模量、热膨胀系数的增大而增大,并且与热膨胀系数成线性关系;同时,贴片胶越厚,封装热应力越小。

1 传感器结构的设计

设计的高 g 加速度传感器的量程为 $150\,000\ g_n$ 。传感器结构的梁长度和宽度一致,压敏电阻对称布置在梁的根部,可以很好的抑制非对称性结构引起的沿梁长度方向横向加速度的影响^[3]。

高过载加速度传感器失效的主要方式是断裂,尤其是传感器结构的梁根部和端部最易断裂^[4],因此,本文设计的高 g 加速度通过在这些最易断裂的部位添加等腰直角棱柱倒角,以分散梁的根部和端部受到的最大应力,在不改变应力大小的基础上避免了梁根部和端部处应力集中、尖锐,进而提高加速度传感器的抗过载能力。加工好的传感器结构及倒角如图 1 所示。

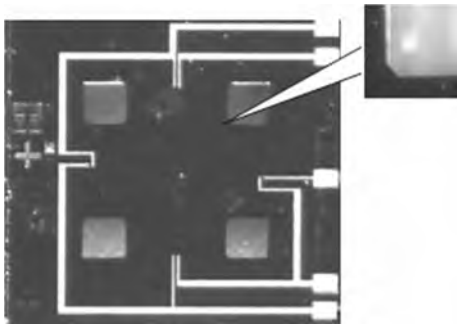


图 1 高 g 加速度传感器结构和倒角图

2 贴片工艺

贴片工艺是 MEMS 高 g 加速度传感器封装中很重要的一环,贴片工艺的好坏将直接影响到传感器在应用时的可靠性,同时,贴片工艺是封装热应力的最主要来源。因此, MEMS 封装中热应力的分析主要是贴片工艺中热应力的分析^[5-6]。

高 g 加速度传感器芯片的贴片主要有以下两种方法:

(1) 传感器芯片通过贴片胶直接粘结到基板(陶瓷, FR4, 玻璃等);

(2) 先将传感器芯片键合到玻璃基板,然后再将芯片-玻璃的封装体通过贴片胶粘结到基板上。

MEMS 器件的贴片工艺需要在一定的温度下进行,并且器件封装过程的温度是变化的,因为芯片的热膨胀系数与基板、粘结剂的热膨胀系数不匹配,造成芯片、基板与贴片胶的热膨胀程度不同,由于封装结构中各部分之间相互的约束而产生的应变和应力^[7-8]。

3 贴片热应力分析

为了分析比较两种不同的贴片方法下封装模型中热应力的分布及影响热应力的因素,首先建立有限元模型,并采用 ANSYS 软件进行仿真分析。根据实际的贴片工艺环境,贴片胶需要在 $180\ ^\circ\text{C}$ 的环境下固化两个小时,因此,在仿真中假设整个封装体的初始温度为 $180\ ^\circ\text{C}$,并且此时的环境温度与封装体的温度相等,在求解过程将整个封装结构从 $180\ ^\circ\text{C}$ 冷却到室温 $25\ ^\circ\text{C}$ 。传感器封装模型中各部件的结构尺寸及材料属性如表 1 所示。

表 1 封装模型中材料的属性

	E/GPa	泊松比	热膨胀系数
硅	190	0.3	3.1
贴片胶	3	0.3	26
玻璃	63	0.22	3.3
陶瓷	307	0.28	7.5
FR4 基板	17.2	0.28	16
可伐合金	138	0.368	5.6
不锈钢	200	0.3	16

3.1 传感器芯片直接贴片到基板

将实际的三维模型简化等效成二维模型,如图 2 所示,选取 Vector Quad13 类型。

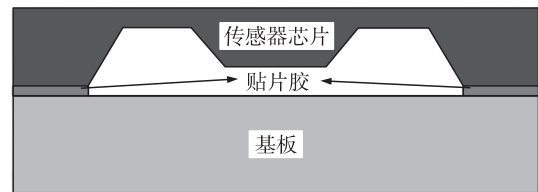


图 2 直接贴片时的封装模型图

当传感器粘结在热膨胀系数不同的基板上时,芯片受到的热应力、应变如表 2 所示。

表 2 传感器芯片受到的热应力、应变

基板	芯片热应变/ μm	芯片热应力/MPa
玻璃	1.44	125
可伐合金	1.6	120.6
陶瓷	1.783	131.04
FR-4	3.01	131.22
不锈钢	3.037	135

分析表 2 所示的几种基板下封装体的热应力,

基板为高硼硅玻璃时,芯片受到的热应力和热应变最小,依次增大是可伐合金、陶瓷,FR-4 基板,其中当基板为不锈钢时应力和应变最大。分析原因,这是因为与其它几种基板材料相比较,高硼硅玻璃的热膨胀系数最小,且与硅芯片的热膨胀系数最相近。因此,在贴片胶固化冷却到室温下时,玻璃与贴片胶间的热失配最小,所以造成的热应变最小;相反,与硅芯片相比,不锈钢的热膨胀系数最大,达到 16×10^{-6} ,因此由于热失配引起的热应变最大。从分析得出,其它条件一定,只有基板材料可选时,封装体中的热应变主要与基板材料的热膨胀系数有关,热膨胀系数与贴片胶的热膨胀系数越相近,则热应力和热应变越小;反之,则越大。同时,热膨胀系数越大,芯片结构的变形就越大。

分析图 3 所示的热应力路径分布得出,硅芯片在高硼硅玻璃基板的贴片工艺中,热应力分布以质量块为中心对称,这是加速度传感器微结构对称的结果。分析得到,结构的边框处应力值最小;从边框到结构梁的区域应力显著增大,并在结构梁根部附近的区域受到的应力值最大;从结构梁中心区域起应力值又开始减小,在质量块上应力值降低到一个最小值。

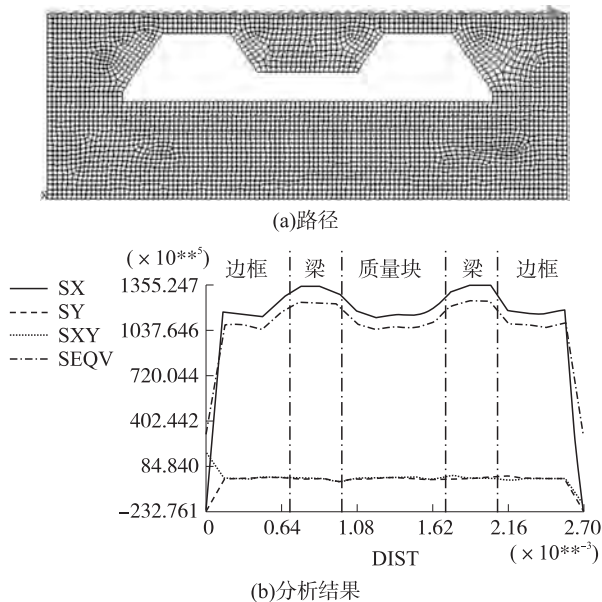


图 3 热应力的路径分析

根据分析结果,芯片结构在梁根部区域受到的热应力最大,因此在贴片工艺中由于温度引起的热应力使芯片结构最可能失效的部位为结构梁根部。同时这个区域是加速度传感器压敏电阻的布置区域,因此,压敏电阻的阻值在热应力作用下会发生变化,对压阻式加速度传感器的输出影响较大,造成传感器输出的漂移,这是应该避免的。

3.2 传感器芯片间接贴片到基板

传感器芯片直接粘接到基板上的缺点是没有抗拉强度、易老化、贴片胶易进入芯片结构中导致传感器失效,而且不能做到密封^[9],这在要求有高可靠的机械强度和密封性能,并且要求器件受过强运动冲击的高 g 加速度传感器芯片是远远不能满足实际要求的。解决这一问题的方法是先将传感器裸片键合到玻璃上,然后将芯片-玻璃的封装体通过贴片胶粘结到基板上。

由于设计的传感器封装管壳为不锈钢,所以,以不锈钢基板为例研究传感器受到的热应力。建立的仿真模型如图 4 所示。

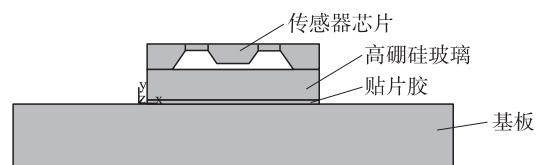


图 4 贴片时封装模型

当基板确定后,研究贴片胶对封装热应力的影响,分别改变贴片胶的热膨胀系数、弹性模量及度中一个参量并保持另外两个参量不变时,仿真封装热应力的变化,仿真的环境与 3.1 所述一致,仿真结果如图 5 所示。

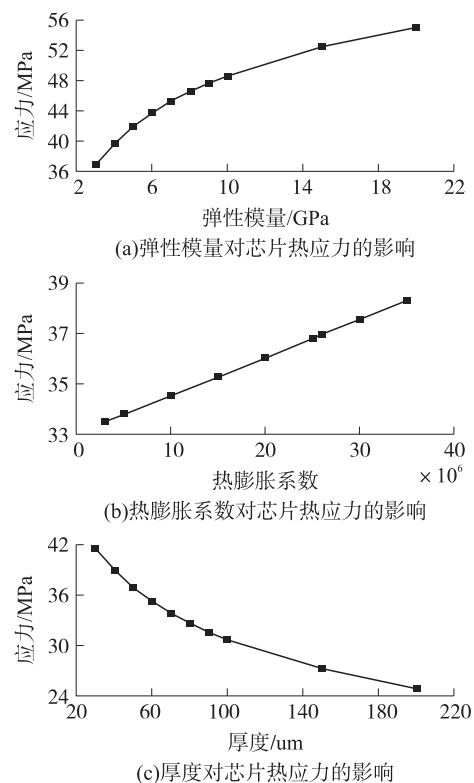


图 5 贴片胶对芯片封装热应力的影响

分析图 5 中仿真结果,贴片胶的材料属性将影响到芯片受到的封装热应力。贴片胶的弹性模量越

大,热应力越大;并且,随着热膨胀系数的增大,热应力线性增大;贴片胶越厚,热应力越大。

当贴片胶厚度为 100 μm,弹性模量为 3 GPa,热膨胀系数为 26×10^{-6} 时,仿真得到的封装体的热应力云图如图 6 所示。

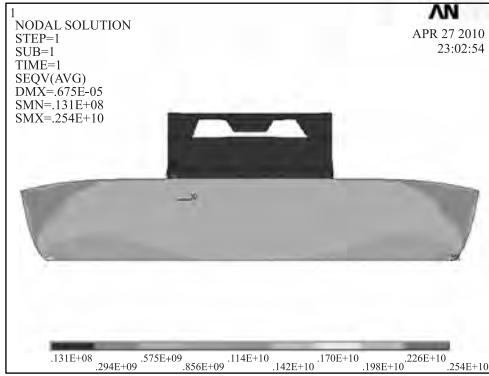


图 6 封装体的等效热应力云图

根据图 6 中封装体受到的热应力的分布,贴片胶与基板粘结处应力值较大,这将会导致芯片-玻璃的封装体容易从基板上脱落,图中所示贴片胶与基板间出现了剥离现象。

在相同环境下进行贴片工艺时,与芯片直接贴片到封装管壳基板相比,传感器芯片与高硼硅玻璃键合后再贴片时,传感器受到的封装热应力将从 135 MPa 降低到 33 MPa,这主要是因为高硼硅玻璃的热膨胀系数与硅芯片的相近,且具有较好的隔热特。因此,在 MEMS 高 g 加速度传感器封装时应采用后一种方法,降低传感器的封装中失效的可能性。同时,芯片表面的热应力分布规律与 3.1 研究的结果一致。

4 键合热应力分析

在间接贴片工艺中,为实现传感器芯片的密封,用键合工艺对裸片进行封装,键合工艺包括阳极键合、焊料焊接、硅熔融键合、玻璃粉键合及共晶键合等。其中,由于阳极键合具有键合温度低,工艺简单,与其他工艺相容性较好,键合强度及稳定性高,键合设备简单等优点,所以阳极键合是最常用的键合方法,并且常用来将硅键合到玻璃上,它提供了可靠的键合性能,可用作形成气密性封装^[10-11]。

阳极键合又称静电键合,它的键合机理是:在强大的静电力作用下经两个被键合面(硅芯片和玻璃)紧压在一起;在一定温度下,通过氧-硅化学键合,将硅芯片和高硼硅玻璃基板牢固地键合在一起,其键合原理及装置如图 7 所示。

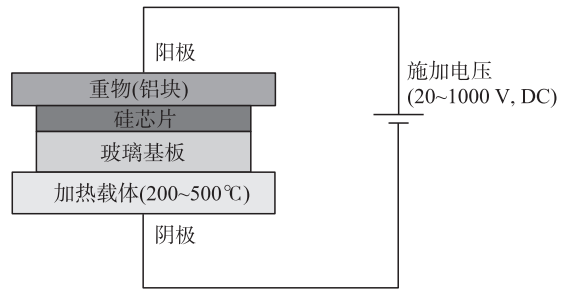


图 7 键合原理图

在键合中,需要在 200 - 500 °C 的温度下进行,如果基板和芯片的热膨胀系数不匹配,键合过程和键合结束后就容易产生热应力和热应变,影响键合的质量,并且产生的热应力引起硅芯片的挠曲,甚至可能使硅芯片失效。因此,需要分析影响键合质量和键合热应力的因素,以研究热应力对芯片的影响。

根据键合工艺,建立仿真模型,如图 8 所示,在仿真中键合温度为 350 °C,研究影响键合热应力的因素。芯片/基板比(芯片一定时,改变基板的面积)、玻璃基板厚度、基板的热膨胀系数、键合温度对键合中热应力的影响结果如表 3 和图 9、10、11 所示。

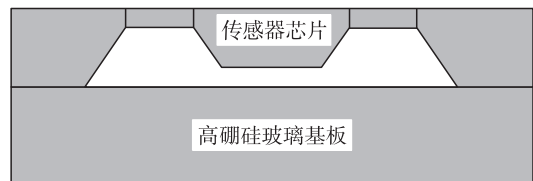


图 8 键合模型图

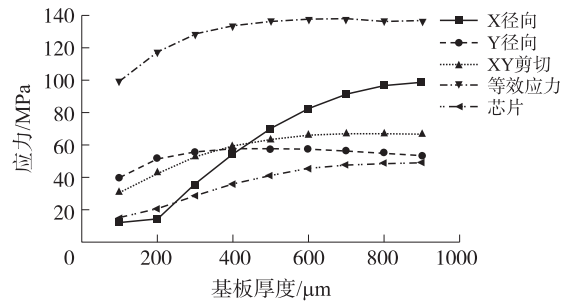


图 9 基板厚度的影响

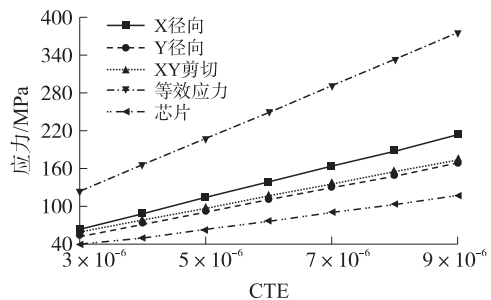


图 10 基板的热膨胀系数的影响

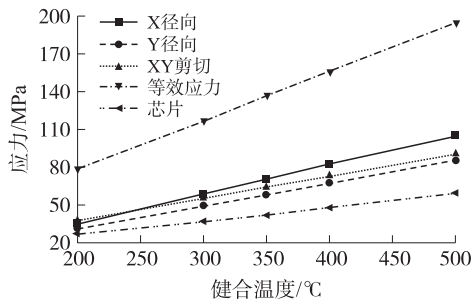


图 11 键合温度的影响

表 3 芯片/基板比对热应力、应变的影响

芯片/基板比	芯片热应力/MPa	芯片热应变/ μm
1	41.81	0.53
2	19.75	0.608
4	18.67	0.604

分析表 3 的仿真结果, 芯片与基板比越大(即芯片大小一定时, 基板面积越大)键合产生的热应力越小, 热应变越大, 但是当基板面积增大到 1:3 时, 芯片受到的热应力、应变变化趋缓, 这主要是由于当基板面积越大时, 基板分散了部分芯片受到的应力和应变。

分析图 9、10、11, 随着基板厚度的增加, 热应力也随着增大, 但基板的厚度增大到一定程度后热应力几乎不再发生变化; 基板的热膨胀系数和键合温度与热应力呈线性增大关系, 基板的热膨胀系数越大, 与芯片的热失配就越大, 使得芯片受到的热应力越大; 同样, 键合温度越高, 芯片和基板的热膨胀越大, 芯片热应力同样将增大。

5 结论

(1) MEMS 高 g 的封装应该在低温低应力环境下进行, 以减小封装热应力;

(2) 通过键合高硼硅玻璃后再贴片可降低传感器芯片受到的封装热应力;

(3) 基板材料影响封装热应力的主要因素之一, 并且基板的热膨胀系数与硅芯片的热膨胀系数越

相近, 封装热应力越小。

(4) 在贴片工艺中, 贴片的弹性模量、热膨胀系数、厚度是影响封装热应力的主要因素, 其中, 弹性模量越大, 芯片的热应力相应的越大; 贴片胶越厚, 热应力越小; 热膨胀系数系数与热应力成正比线性关系。

(5) 在键合工艺中, 基板和键合温度是影响热应力的主要因素, 尤其是基板的热膨胀系数和键合温度对热应力的影响呈线性增大的关系。

参考文献:

- [1] 徐敬波, 赵玉龙, 蒋庄德, 等. 集成传感器芯片的封装应力分析[J]. 西安交通大学学报, 2006, 11(40): 1338 - 1342.
- [2] 宋竟, 黄庆安, 唐洁影, 等. MEMS 器件热致封装效应的解析建模研究[J]. 传感技术学报, 2006, 5(19): 1613 - 1616.
- [3] 石云波, 祁晓谨, 刘俊, 等. 微型高过载加速度传感器的加工与测试[J]. 机械工程学报, 2008, 9(44): 200 - 203.
- [4] Andrew R Atwell, Robert S Okojie, Kevin T Kornegay, et al. Simulation, Fabrication and Testing of Bulk Micromachined 6H-SiC High-g Piezoresistive Accelerometer[J]. Sensors and Actuators A: Physics, (S0924 - 4247), 2003, 104(1): 11 - 18.
- [5] Peng C P, Lin J C, Lin C T, et al. Performance and Package Effect of A Novel Piezoresistive Pressure Sensor Fabricated by Front-Side Etching Techonology[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 119(3): 28 - 37.
- [6] 葛增杰, 顾元宪, 靳永欣, 等. PBGA 封装体的热-结构数值模拟分析及其优化设计[J]. 大连理工大学学报, 2006, 5(46): 633 - 638.
- [7] 刘晓明, 朱钟淦. 微机电系统的设计与制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] Tai Ran Hsu. 微机电系统封装[M]. 姚军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] Huang Meijia, Chou Pokuai, Lin Mingchuan. Thermal and Thermal Stress Analysis of a Thin-Film Thermo-Electric Cooler Under the Influence of the Thomson Effect[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 126: 122 - 128.
- [10] 赵翔, 梁明富. MEMS 封装中阳极键合技术的影响因素研究和设计因素分析[J]. 新技术新工艺, 2009, 12: 104 - 107.
- [11] Lin Liwei. Thermal Challenges in MEMS Applications: Phase Change Phenomena and Thermal Bonding Processes[J]. Microelectronics Journal, 2003, 3(34): 179 - 185.



李 平(1987 -), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 惯性器件的设计、制造及测试等方面的研究, gstwlping@126.com;



石云波(1978 -), 男, 副教授, 主要研究方向为 MEMS、微惯性器件等方面的研究, 参加了国防 973, 国家 863、国家自然科学基金等多项科研项目, 获得山西省技术发明一等奖 1 项、高等学校科学技术一等奖 2 项、国内发明专利 4 项, 发表相关论文 24 篇, y. b. shi@126.com。