

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170308.002

# 高温下不同银含量微电子胶连点的力学性能及膨胀系数不匹配热应力

吉新阔<sup>1</sup>, 肖革胜<sup>1</sup>, 刘二强<sup>2</sup>, 杨雪霞<sup>2</sup>, 树学峰<sup>\*1</sup>

(1. 太原理工大学 应用力学与生物医学工程研究所, 太原 030024; 2. 太原科技大学 应用科学学院, 太原 030024)

**摘 要:** 采用热机械分析仪和微压入测试系统对不同银含量微电子互连导电胶进行测试表征, 并基于数值模拟分析其用于倒装芯片封装时胶层的不匹配热应力。结果表明, 较高银含量固化导电胶的玻璃化转变温度滞后于较低银含量固化导电胶, 且其热膨胀系数较低。随着温度的升高, 导电胶的模量与硬度由玻璃态时的较高值降低到高弹态时的较低水平, 且银含量较高时的刚度与强度较大; 各不匹配热应力分量随温度的变化呈现出“蝌蚪状”或“半蝌蚪状”, 玻璃态时用于倒装芯片封装的导电胶未发生屈服。

**关键词:** 导电胶; 微压入; 力学性能; 数值模拟; 热应力

**中图分类号:** TB332; Q34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)11-2455-08

## High-temperature mechanical properties and thermal mismatch stress of conductive adhesive with different silver contents in flip chip packaging

Ji Xinkuo<sup>1</sup>, XIAO Gesheng<sup>1</sup>, LIU Erqiang<sup>2</sup>, YANG Xuexia<sup>2</sup>, SHU Xuefeng<sup>\*1</sup>

(1. Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The thermal mechanical analyzer and micro-indentation test system were used to characterize the mechanical properties of isotropic conductive adhesive (ICA) with different silver contents. Based on numerical simulation, the thermal mismatch stress of cured ICA in flip chip packaging was analyzed. The results show that the glass transition temperature of cured ICA with high silver content is relatively higher and the thermal expansion coefficient is lower than those of cured ICA with low silver content. The elastic modulus and hardness of the cured ICA are higher in the glassy state than those in the high-elastic state, and the stiffness and strength are relatively larger for cured ICA with high silver content. On the whole, with the increasing temperature the maximum of thermal stress component increases, then declines rapidly, and decreases slowly, showing a “tadpole shaped” or “semi-tadpole shaped”. In the glassy state, the conductive adhesive in flip chip packaging exhibits elasticity.

**Keywords:** conductive adhesive; micro-indentation; mechanical properties; numerical simulation; thermal stress

电子封装工业的无铅化使无铅焊料与导电胶 (ECA) 成为目前主要的微电子互连材料, 相比于传统的合金焊料, 导电胶具有工艺温度低、表面安装工艺简单、印刷线条细及可连接性好等优点<sup>[1-4]</sup>。常用导电胶一般主要由基体树脂、固化剂、导电填料、偶联剂、增韧剂及其他助剂等组成, 用于微电子封装固化时, 基体树脂中的活性基团与固化剂发生交联反应并收缩使导电填料相互接触以形成导电通路, 其中基体树脂是固化后导电胶连接性能和力学性能的主要来源<sup>[5]</sup>。电子元器件主要由半导体材料构成, 其上面各导电通路相互连接形成功能电路模块, 诸多这样的电路模块集成在同一芯片上就构

收稿日期: 2016-11-29; 录用日期: 2017-03-01; 网络出版时间: 2017-03-08 17:23  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170308.1723.004.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(11602157); 山西省青年科技研究基金(201601D202004)  
通讯作者: 树学峰, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为弹塑性力学 E-mail: shuxuefeng@tyut.edu.cn  
引用格式: 吉新阔, 肖革胜, 刘二强, 等. 高温下不同银含量微电子胶连点的力学性能及膨胀系数不匹配热应力[J]. 复合材料学报, 2017, 34 (11): 2455-2462.  
JI Xinkuo, XIAO Gesheng, LIU Erqiang, et al. Research on the high-temperature mechanical properties and thermal mismatch stress of conductive adhesive with different silver contents in flip chip packaging[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34 (11): 2455-2462 (in Chinese).

成集成电路。微电子器件服役过程中电流流经芯片，部分电能会转化为热能，另外引线、电阻及某些特定高功能密度器件也会产生较多热量<sup>[6-7]</sup>。

随着电子产品的微型化和多功能化，芯片的集成度不断提高、功率也不断增大，使微电子互连材料的尺寸越来越小(微米级)，这导致了导电胶作为传统微电子互连材料 Sn-Pb 的替代品被越来越广泛应用并对导电胶力学性能表征技术提出了更高要求<sup>[8]</sup>；截至 20 世纪 90 年代，集成电路芯片的热流密度已增加到 100 W/cm<sup>2</sup> 且仍在持续增长，已有统计表明，导致电子产品失效的原因约 55% 可归结于封装体内过高的温度。固化导电胶作为一种聚合物基复合材料，其力学性能严格依赖于温度，对其不同温度下相关力学性能的研究有助于理解和分析封装中导电胶连接界面的热应力不匹配性及粘结可靠性<sup>[9]</sup>。

本文对不同银含量固化导电胶的热膨胀性能予以分析，采用微纳米压入法对其不同温度下的力学性能进行测试，在此基础上基于数值模拟分析了倒装芯片封装中导电胶的不匹配热应力，为封装工业设计提供参考。

1 实 验

1.1 实验材料

采用三种银质量分数(50wt%、60wt% 和 70wt%)的 UNINWELL 热固性中温固化型环氧树脂基填充银粉各向同性导电(ICA)为研究对象，该产品固化后导热系数大、粘结强度高且工作时长，其主要成分为银粉、环氧树脂、酸酐类固化剂、促进剂、偶联剂和其他助剂等，其中银粉粒径分布如表 1 所示。使用时将其在 120℃ 下固化并切割成实验测试所需尺寸，固化后不同银含量导电胶经日本电子株式会社 JSM-6700F 电镜扫描后的表面形

貌如图 1 所示。

表 1 导电胶中银粉粒径分布

Table 1 Particle size distribution of silver flakes

| Specific surface area/(cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | Size distribution/μm |       |
|---|----------------------|-------|
|   | D90                  | 7.420 |
| 1.113   | D50                  | 2.912 |
|   | D10                  | 0.766 |

1.2 导电胶热膨胀系数测量

基于上海精密科学仪器有限公司生产的 RJY-1P 型热机械分析仪(TMA)对不同银含量固化导电胶进行热膨胀系数测量，使用 4 mm×4 mm×9 mm 的柱状固化导电胶试样进行测试，经估算将位移量程(TMA)设置为±250 μm，微分量程(DTMA)为 25 μm/min，温度控制单元的升温速率与采样升温速率均设置为 10℃/min，最高加热温度为 170℃，采样温度范围为 30~150℃，每种银含量的导电胶测量三次，相应的平均值作为最终测试结果。测试时先启动加热炉，达到初始采样温度(30℃)后开始采样，达到终点采样温度(150℃)后停止加热并关闭加热炉，然后存取实验结果。

1.3 导电胶高温力学性能测试

采用 Agilent Technologies Inc. 生产的配备 CSM 模块的 Nano Indenter G200 测试系统对固化导电胶进行不同温度压入测试，以得到其在不同温度下的弹性模量和硬度。其载荷和位移分辨率分别为 50 nN 和<0.01 nm，加载机架刚度为≈1.0×10<sup>7</sup> N/m，压头为三棱锥 Berkovich 金刚石压头，实验前对仪器机架柔度与压头面积函数进行校准以保证测试结果的精度。测试时将打磨抛光且上下表面平行的固化导电胶试样(厚度≤3 mm)用专用黏胶粘贴在高温测试台上，为保证试样在特定测试温度下的温度稳定性，热漂移需降低至≤5 nm/s。

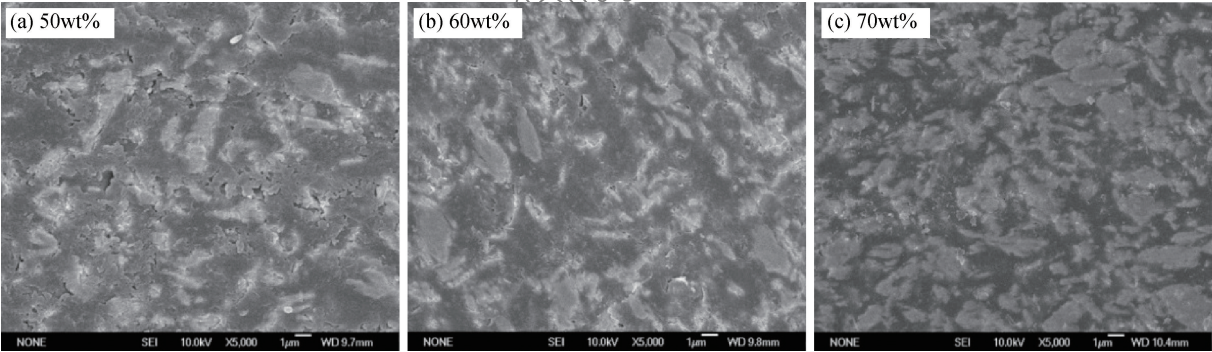


图 1 不同银含量固化导电胶的 SEM 图像

Fig. 1 SEM images of cured ICA with different silver filler contents

为降低卸载过程中的粘性效应, 达到最大压入载荷时保载 500 s 以进行粘性释放, 加载和卸载时间均设置为 2 s, 相应地可由卸载曲线顶点的斜率得到接触刚度, 进而得到其不同温度下的弹性模量和硬度。选取 8 个离散温度点进行高温压入测量, 即 30℃、50℃、70℃、90℃、100℃、110℃、130℃和 150℃。测试前先对固化导电胶进行不同离散温度(30℃、50℃、70℃、90℃、100℃、110℃、130℃和 150℃)下的预测量, 大致确定出其在相应温度下压深达到 4 000 nm 时所需的压入载荷(加载时间均为 2 s), 结果如表 2 所示。随着温度的升高, 固化导电胶树脂基体由玻璃态转变为高弹态(橡胶态), 其泊松比存在较大变化<sup>[10]</sup>, 高温测试时需考虑温度对其影响(如图 2 所示)。

表 2 不同温度下的压入载荷

| Temperature/℃       | 30  | 50  | 70  | 90 | 100 | 110 | 130 | 150 |
|---------------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| Indentation load/mN | 150 | 130 | 110 | 50 | 25  | 15  | 5   | 2   |

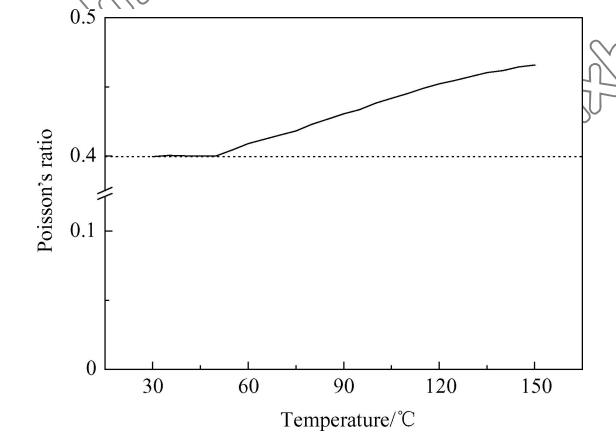


图 2 不同温度下不同银含量固化导电胶的泊松比  
Fig. 2 Poisson's ratio of cured isotropic conductive adhesive (ICA) with different silver contents under different temperatures

2 结果与分析

2.1 固化导电胶热膨胀性能

物体在等压下单位温度变化所引起的体积、面积和长度的变化(变化量与原尺寸比值)分别被定义为体膨胀系数、面膨胀系数及线膨胀系数<sup>[11]</sup>:

$$\gamma = \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial V}{\partial T} \right]_P \tag{1}$$

$$\beta = \frac{1}{A} \left[ \frac{\partial A}{\partial T} \right]_P \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \left[ \frac{\partial L}{\partial T} \right]_P \tag{3}$$

式中:  $V$ 、 $A$ 、 $L$ 、 $T$ 、 $P$  分别表示体积、面积、长度、温度和等压条件下。对于各向同性固体材料, 三者存在近似关系:  $\gamma = 3\alpha$ ,  $\beta = 2\alpha$ , 因此可以用线膨胀系数来表征其热膨胀性能。

图 3 为固化导电胶不同温度下的线膨胀系数及相应的 B-spline 曲线, 总体上银含量较高导电胶所对应的线膨胀系数较低。玻璃化转变前试样的线膨胀系数维持在相对较低的水平, 随着温度升高进入玻璃化转变区, 其线膨胀系数先急剧增加然后维持在相对较高的水平, 此时进入高弹态。达到玻璃化转变温度后, 基体树脂分子链段运动被“解冻”, 这使玻璃化转变前后的线膨胀系数存在较大差异, 进而导致了封装后导电胶服役时玻璃化转变前后不匹配热应力的较大差异。同时作为交联高分子复合材料, 固化导电胶在高温下不存在黏流转变。

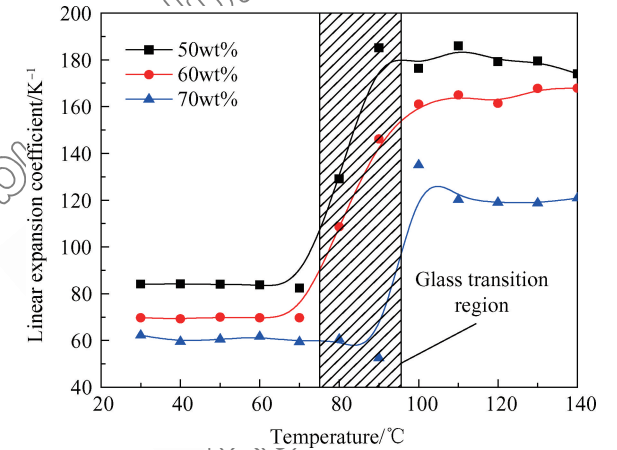


图 3 不同温度下不同银含量固化导电胶的线膨胀系数  
Fig. 3 Linear expansion coefficient of cured ICA with different silver contents under different temperatures

2.2 固化导电胶高温力学性能

基于 Oliver-Pharr 方法<sup>[12-14]</sup>, 在实验测得压入接触刚度  $S$  的基础上可得到压入接触深度:

$$h_c = h_{\max} - \epsilon \frac{P_{\max}}{S} \tag{4}$$

式中:  $h_{\max}$  为最大压入深度;  $S$  接触刚度;  $h_c$  为接触深度;  $\epsilon$  为与压头形状有关的常数, 玻氏压头  $\epsilon = 0.75$ 。压头实际的投影接触面积为

$$A_c = \sum_{n=0}^8 C_n h_c^{\frac{1}{2n-1}} \tag{5}$$

式中,  $C_n$  为经熔融硅标准校准后的面积函数常数, 折合模量(缩减模量)  $E_r$  表示为

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \tag{6}$$



式中,  $\beta$  为压头形状相关常数, 玻氏压头  $\beta=1.034$ 。进一步可得到材料的弹性模量如下:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \tag{7}$$

式中:  $E_i$ 、 $\nu_i$ 、 $E$  和  $\nu$  分别为压头和被测材料的弹性模量和泊松比, 对于金刚石压头,  $E_i=1\,141\text{ GPa}$ ,  $\nu_i=0.07$ 。对于各向同性材料, 存在以下关系:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{8}$$

式中:  $G$ 、 $E$  和  $\nu$  分别为材料的剪切模量、弹性模量与泊松比。

硬度值反映了样品材料对接触载荷的承受能力, 定义为

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \tag{9}$$

基于上式, 硬度可理解为单位投影接触面积的压入载荷, 即压头与被测试材料的平均接触压力; 当压入过程进入完全塑性阶段时(不考虑材料的加工硬化特性), 压入硬度正比于材料的屈服应力  $\sigma_y$ , 即

$$H = C\sigma_y \tag{10}$$

上式中的比例系数  $C$  称为约束因子, 对于金属类材料,  $\sigma_y/E$  较小,  $C$  为  $2.8\sim3.2$ ; 而玻璃类材料  $\sigma_y/E$  较大,  $C$  约为  $1.5$ <sup>[15]</sup>。

图 4 和图 5 为不同温度下固化导电胶的弹性模量、剪切模量和硬度及相应的 B-spline 曲线。整体上不同温度下银含量较高导电胶的弹性模量(刚度)较大, 随着温度的升高, 导电胶由玻璃态逐渐转变为高弹态, 其弹性模量由  $3\,000\sim7\,000\text{ MPa}$  降低至  $6\sim200\text{ MPa}$ , 在玻璃化转变区存在一个比较明显的台阶, 剪切模量也类似。银含量较高导电胶的硬度值较大, 表明其抵抗塑性变形的能力较强; 固化导电胶的硬度随温度的升高逐渐减小, 进入玻璃化转变区迅速降低, 温度进一步升高, 其硬度值维持在一较低水平, 玻璃化转变前后, 硬度值由  $100\sim300\text{ MPa}$  降低至  $1\sim10\text{ MPa}$ 。故导电胶在玻璃态和高弹态抵抗塑性变形的能力发生了很大变化, 玻璃态时导电胶抵抗塑性变形的能力较强, 高弹态时则较弱。

2.3 固化导电胶不匹配热应力

ICA 具有较高的导电颗粒含量, 实际中主要用于芯片贴装、表面安装和印刷电路板连接等<sup>[16-17]</sup>, 并被建议用于倒装芯片封装中<sup>[18]</sup>; 由于集成电路

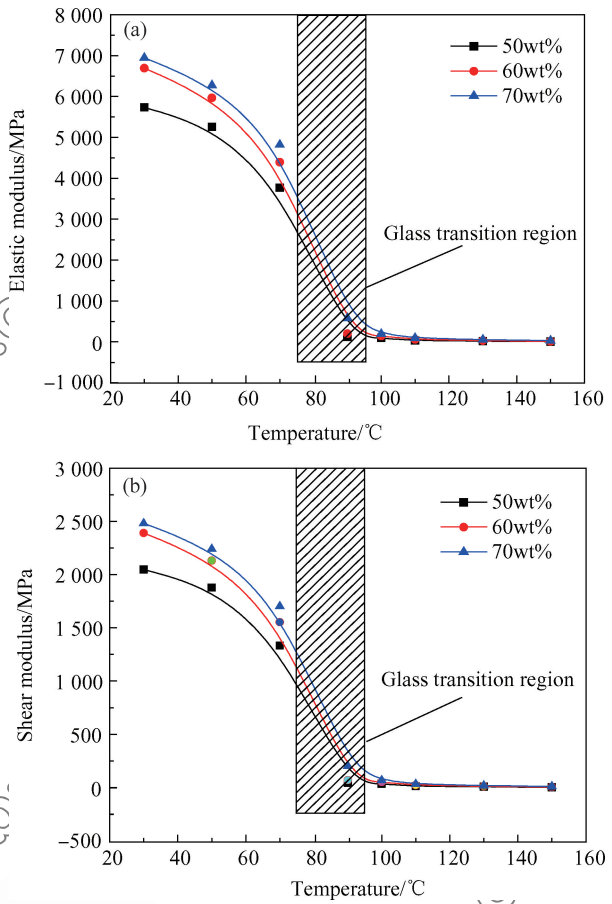


图 4 不同温度下固化导电胶的弹性模量与剪切模量  
Fig. 4 Elastic modulus and shear modulus of cured ICA under different temperatures

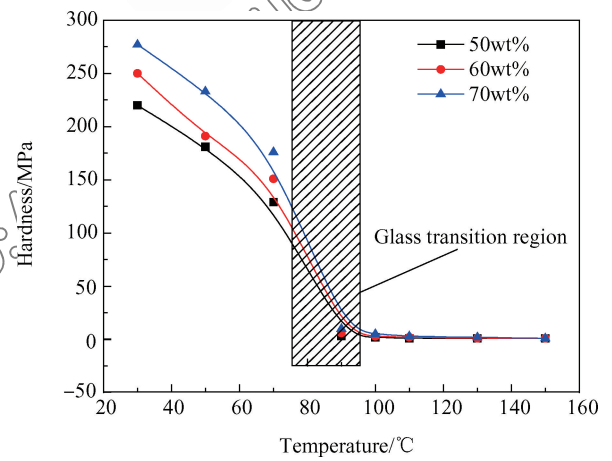


图 5 不同温度下固化导电胶的硬度值  
Fig. 5 Hardness of cured ICA under different temperatures

芯片和基板的热力学性能存在显著差异, 由其所造成的不同温度下固化导电胶与芯片和基板界面的不匹配热应力也会相应地存在较大差异。因此针对不同银导电颗粒含量、不同胶层厚度的导电胶应用于



倒装芯片封装, 采用有限元分析软件 ANSYS15.0 对其在不同温度下胶连界面的不匹配热应力予以研究。

2.3.1 模型建立

重点分析不同温度下导电胶层的不匹配热应力, 采用只有两个凸块(Bumps)的二维平面模型进行分析; 考虑到几何模型与载荷的对称性, 计算时只采用一半 2D 模型。如图 6(a)所示, 该二维有限元模型主要包括: 集成电路硅片(Chip)、芯

片凸块(Cu)、各向同性导电胶(ICA)、BT 基板和 Cu 电极(忽略 Ni 涂层的影响), 硅片的尺寸为  $500\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$ , 芯片凸块(Cu)和 Cu 电极的尺寸为  $120\text{ }\mu\text{m}\times 18\text{ }\mu\text{m}$ , BT 基板尺寸为  $600\text{ }\mu\text{m}\times 200\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[19-21]</sup>; 对不同银颗粒含量导电胶(50wt%、60wt%和 70wt%)分别采用  $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 和  $60\text{ }\mu\text{m}$ 三种厚度进行热分析, 建模时不考虑封装固化后胶层界面的残余应力, 视其各部分间为理想连接。

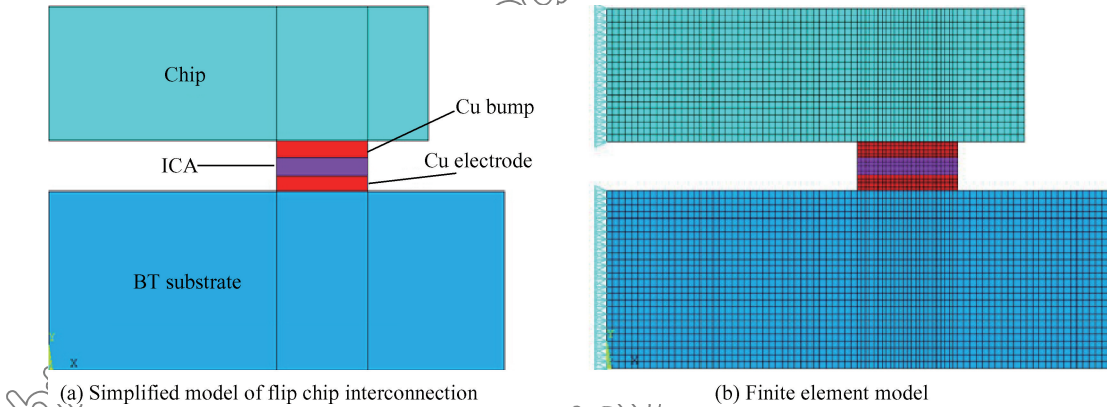


图 6 倒装芯片互连简化模型及有限元网格划分

Fig. 6 Simplified model of flip chip interconnection and finite element model

基于以上测量结果, 三种银含量固化导电胶不同温度下的热膨胀系数、弹性模量及泊松比分别如图 2、图 3 和图 4 所示, 芯片、Cu 和 BT 基板的相关材料属性如表 3 所示<sup>[22-23]</sup>; 该有限元模拟属于热结构耦合分析, 选用二维四节点耦合场单元 PLANE13 进行直接耦合分析并考虑其平面应变状态。划分网格后的有限元模型如图 6(b)所示, 在模型  $X=0$  边界节点处施加对称边界约束, 即限制  $X=0$  处所有节点的水平位移; 选取基板底面中心点(模型左下方边角点)为变形参考点, 约束该节点  $X$ 、 $Y$  方向的自由度, 其余各节点均为自由变形。

表 3 芯片、Cu 和 BT 基板材料属性

| Properties  | Chip | Cu    | BT substrate              |
|---|------|-------|---------------------------|
| Elastic modulus/GPa                               | 131  | 110   | 24                        |
| Poisson's ratio                                   | 0.28 | 0.343 | 0.3                       |
| Coefficient of thermal expansion/ $\text{K}^{-1}$ | 2.8  | 16.4  | 16( $X, Z$ )<br>35( $Y$ ) |

2.3.2 载荷施加与模拟结果

模型初始零应力状态的参考温度设为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 求解时各节点施加相同的温度载荷  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 载荷子步

数为 110(每步增加  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 选择稳态大变形求解设置; 针对 3 种银颗粒含量(50wt%、60wt%和 70wt%)、3 种导电胶层厚度( $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 和  $60\text{ }\mu\text{m}$ )下的 9 种倒装芯片连接模型分析结果, 重点提取并分析了不同温度下胶层中的剥离应力( $Y$  方向)与 Mises 应力(如图 7 和图 8 所示)。

不同温度下胶层中的最大剥离应力主要出现在其两侧, 其中左侧方向朝上、右侧朝下, 二者随温度升高表现为如图 7 所示的“蝌蚪状”。整体上胶层越厚, 所产生的正向剥离应力越小, 而负向剥离应力则相反; 相同胶层厚度下, 玻璃态时较高银含量导电胶的正向剥离应力较小、高弹态时则较大, 负向剥离应力类似。

如图 8 所示, 胶层的最大 Von Mises 应力出现在其与芯片 Cu 凸块界面的右侧, 整体上随着温度的升高, Von Mises 应力先增加, 在玻璃化转变区域快速下降, 然后缓慢降低, 呈现出“半蝌蚪状”; 作为一种基于剪切应变能的等效应力, Von Mises 应力表示单元体的形状改变比能, 较厚导电胶层的不匹配 Von Mises 热应力相对较大, 即相应的形状改变比能较大; 相同层厚的导电胶, 银含量越高,

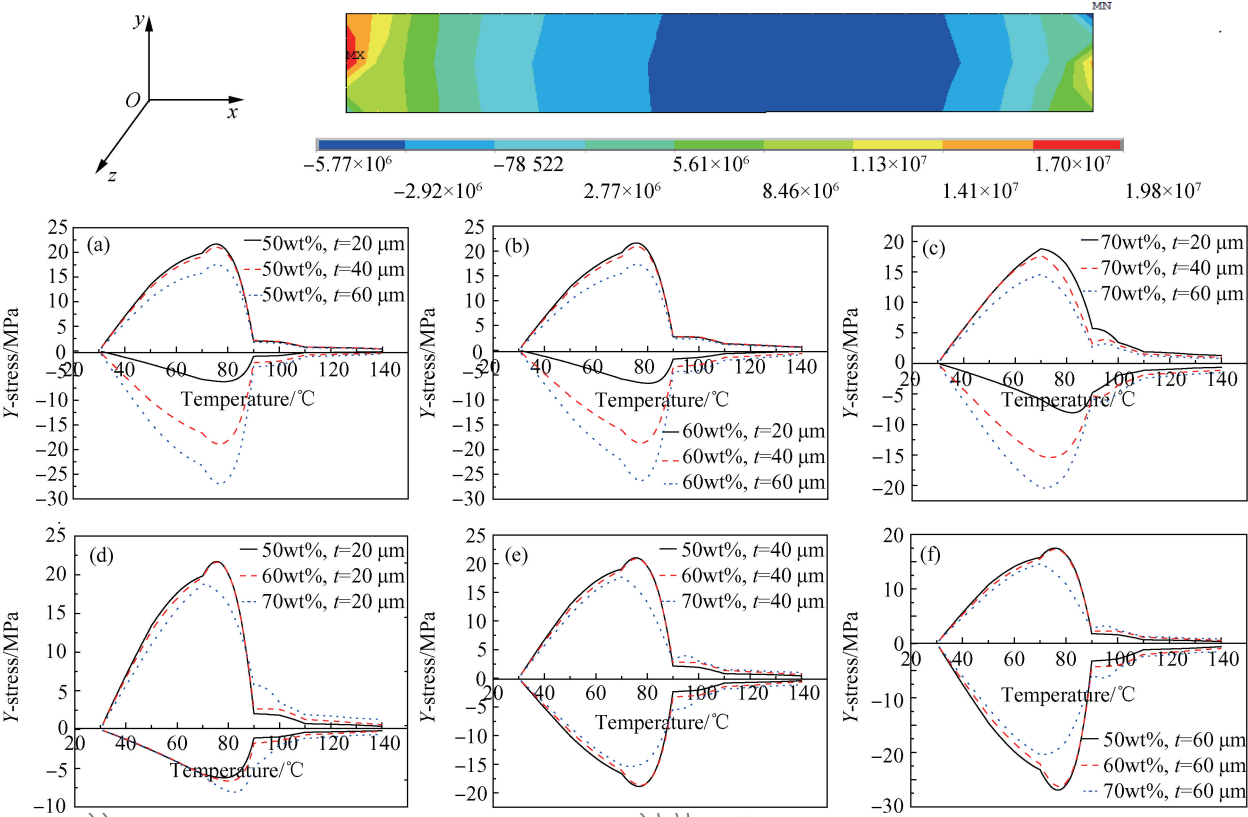


图 7 不同温度下导电胶的最大剥离应力  
Fig. 7 Maximum peeling stress of cured ICA under different temperatures

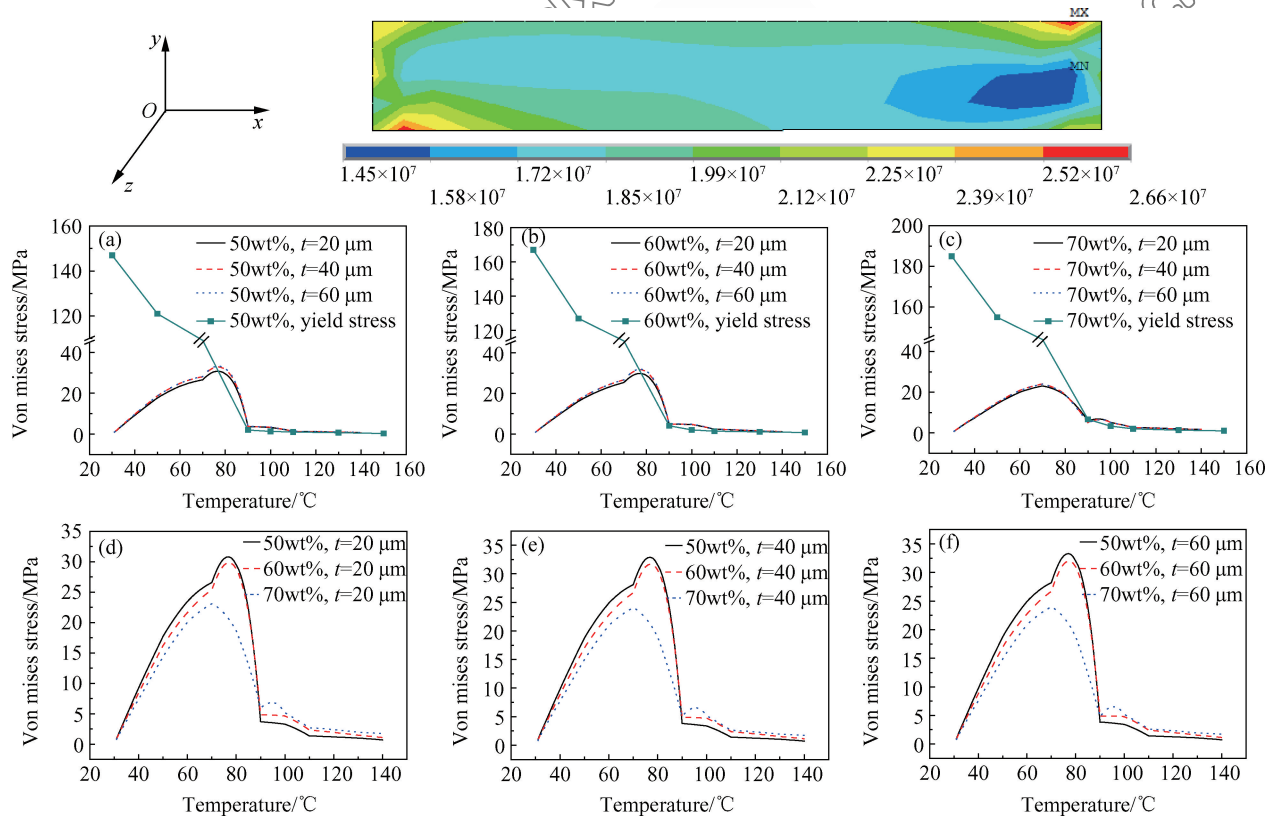


图 8 不同温度下导电胶的最大 Von Mises 热应力  
Fig. 8 Maximum Von Mises thermal stress of cured ICA under different temperatures

玻璃态时的 Von Mises 应力越小、形状改变比能也越小,高弹态时则相反。

基于式(10)与固化导电胶不同温度下的硬度值(见图5),可近似得到其不同温度下的屈服应力。由图8可知,导电胶在玻璃态各不匹配热应力分量均以  $0.5 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$  的速率随着温度的升高而增大,进入玻璃化转变区域后以  $6 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$  的速率随着温度的升高迅速减小,到高弹态则随着温度的进一步升高仅以  $0.05 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$  的速率而减小;玻璃态时3种银含量导电胶的最大 Von Mises 应力均远小于其相应的屈服应力值,胶层未发生屈服;而进入玻璃化转变区域和高弹态,导电胶的最大不匹配 Von Mises 热应力基本上大于其相应的屈服应力值,胶层发生屈服。因此,高温下为防止固化导电胶因热不匹配而发生屈服,在保证其导电性能的前提下应提高其玻璃转化温度并降低热膨胀系数。

### 3 结 论

对用于微电子互连的不同银颗粒含量固化导电胶的热膨胀性能、高温力学性能进行测试表征,并基于数值模拟分析了不同层厚导电胶用于倒装芯片封装时胶层的不匹配热应力。

(1) 高弹态时导电胶基体树脂的分子链段运动被“解冻”,其热膨胀系数明显大于玻璃态时;银颗粒的类交联作用使基体树脂体系的自由体积减小,一定程度上限制了基体树脂分子链段的运动,使较高银含量导电胶的玻璃化转变温度相对滞后、热膨胀系数较低。

(2) 导电胶的弹性模量、剪切模量及硬度在玻璃化转变区大幅降低,存在一个比较明显的台阶,高温下的刚度及屈服强度较小,其高弹态时的承载能力明显弱于玻璃态。

(3) 各不匹配热应力分量的最大值随着温度的升高先增加,进入玻璃化转变区域后快速下降,并随着温度的进一步升高而缓慢减小,导电胶在玻璃转化温度区、玻璃态及高弹态各不匹配热应力分量最大值的变化速率相差十倍左右,整体上呈现出“蝌蚪状”或“半蝌蚪状”;固化导电胶在高温服役时,为防止因热膨胀系数不匹配而发生屈服、提高粘接可靠性,应使其玻璃化转变温度高于服役温度。

### 参考文献:

[1] 马缓,齐暑华. 高热导率 Ag-AIN/聚丙烯酸酯导电胶黏剂的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 558-563.

MA H, QI S H. Preparation and properties of Ag-AIN/acrylate electrically conductive adhesives with high thermal conductivity[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 558-563 (in Chinese).

[2] 郑涛,王洪,杨旭明. 银粉-环氧树脂导电胶的研制[J]. 塑料工业, 2016, 44(1): 133-136.

ZHENG T, WANG H, YANG X M. Development of silver-epoxy resin electro-conductive adhesive[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(1): 133-136 (in Chinese).

[3] 夏静,向雄志,曾其海,等. 镀银石墨/有机硅导电胶的耐热性能研究[J]. 中国胶黏剂, 2014, 23(7): 373-376.

XIA J, XIANG X Z, ZENG Q H, et al. Study on heat resistance of silver-plating graphite/silicone conductive adhesive [J]. China Adhesives, 2014, 23(7): 373-376 (in Chinese).

[4] 吴红丽,张伟. 二氧化硅对碳黑/环氧树脂复合材料渗透特性的影响[J]. 材料工程, 2010(4): 46-50.

WU H L, ZHANG W. Effect of silica on percolation characteristics of carbon black/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(4): 46-50 (in Chinese).

[5] 张博,饶智敏. 低温快速固化环氧导电胶的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 34-40.

ZHANG B, DANG Z M. Preparation and performance of epoxy resin conductive adhesive with fast-curing feature at low temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5): 34-40 (in Chinese).

[6] 刘勇,梁利华,曲建民. 微电子器件及封装的建模与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

LIU Y, LIANG L H, QU J M. Microelectronic devices and packaging modeling and simulation [M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese).

[7] 王长宏,朱冬生. 电子封装热管理的热电冷却技术研究进展[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(11): 4-7.

WANG C H, ZHU D S. Research progress on thermoelectric cooling technology applied in electronic packaging thermal management [J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(11): 4-7 (in Chinese).

[8] 陶宇,夏艳平,张国庆,等. 填料长径比对导电胶渗流阈值的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 27(6): 213-217.

TAO Y, XIA Y P, ZHANG G Q, et al. Influence of slenderness ratio on the percolation threshold of conductive adhesives [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 27(26): 213-217 (in Chinese).

[9] 刘培生,杨龙龙,刘亚鸿,等. 导电胶在倒装芯片互连结构中的应用进展[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(9): 13-18.

LIU P S, YANG L L, LIU Y H, et al. Application of conductive adhesive in flip chip interconnection structure[J]. Electronic Components and Materials, 2015, 34(9): 13-18 (in Chinese).

[10] JONG W R, PENG S H, TSAI H C. Characteristics of a new-type anisotropic conductive film joints during the bonding



- process[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(5): 506-513.
- [11] 吴嘉杰. 测试温度范围对环氧树脂平均线膨胀系数的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(5): 291-294.
- WU J J. Influence of testing temperature range on average coefficient of linear expansion of epoxy resins[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2016, 52(5): 291-294 (in Chinese).
- [12] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [13] PHARR G M, OLIVER W C, BROTZEN F R. On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(3): 613-617.
- [14] OLIVER W C, PHARR G M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advance in understanding and refinements to methodology[J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(1): 3-20.
- [15] FISCHER-CRIPPS A C. Nanoindentation[M]. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [16] 李志远, 钱乙余, 张九海. 先进连接方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- LI Z Y, QIAN Y Y, ZHANG J H. Advanced connection method[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000 (in Chinese).
- [17] 卢龙飞, 齐署华, 马缓, 等. 高性能导电胶研究新进展[J]. 中国胶黏剂, 2016, 2(4): 230-234.
- LU L F, QI S H, MA H, et al. New research progress of electrically conductive adhesives with high properties[J]. China Adhesives, 2016, 2(4): 230-234 (in Chinese).
- [18] VRIES H D, DELFT J V, SLOB K. SMT-compatibility of adhesive flip chip on foil interconnections with 40-/spl mu/m pitch[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(3): 499-505.
- [19] GUAN Y L, CHEN X, LI F Q, et al. Study on the curing process and shearing tests of die attachment by Ag-epoxy electrically conductive adhesive[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010, 30(2): 80-88.
- [20] CHENG H C, HSIEH K Y, CHEN K M. Thermal-mechanical optimization of a novel nanocomposite-film typed flip chip technology[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(4): 826-836.
- [21] HWANG J S, YIM M J, PAIK K W. Effects of bonding temperature on the properties and reliabilities of anisotropic conductive films (ACFs) for flip chip on organic substrate application[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(2): 293-299.
- [22] RIZVI M J, BAILEY C, LU H. Failure mechanisms of ACF joints under isothermal ageing[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39(9): 1101-1107.
- [23] TEE T Y, ZHONG Z W. Board level solder joint reliability analysis and optimization of pyramidal stacked die BGA packages[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(12): 1957-1965.