

## 引文格式:

杨媛媛, 李刚, 朱朋莉, 等. 环境老化对底部填充胶性能的影响 [J]. 集成技术, 2021, 10(1): 47-54.

Yang YY, Li G, Zhu PL, et al. The effect of environmental aging for performance of underfill [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(1): 47-54.

## 环境老化对底部填充胶性能的影响

杨媛媛<sup>1,2</sup> 李刚<sup>1,2</sup> 朱朋莉<sup>1,2\*</sup> 张超<sup>1,2</sup> 吴厚亚<sup>1,2</sup> 彭小慧<sup>1,2</sup>  
孙蓉<sup>1,2</sup> 汪正平<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>(深圳先进电子材料国际创新研究院 深圳 518103)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>3</sup>(佐治亚理工学院材料科学与工程学院 亚特兰大 30332)

<sup>4</sup>(香港中文大学电子工程系 香港 999077)

**摘 要** 焊球可靠性是电子封装过程中重点关注的问题之一, 底部填充胶被引入电子封装领域用来匹配基板和芯片之间的热膨胀系数, 从而保护焊球, 提高焊球的可靠性, 但是底部填充胶的引入也会出现老化过程中一些由材料本体变化造成的可靠性问题。该文主要研究了几种老化处理对底部填充胶热机械性能和黏接性能的影响。对于胶水的热机械性能, 经过水热老化处理和高温存储老化处理后的变化最为明显。对于胶水的黏接性能, 老化处理在有机基底和无机基底表现出的影响并不相同。其中, 对无机基底影响较为明显的是高温存储, 而对有机基底影响较为明显的是水热老化处理。

**关键词** 环境老化; 底部填充胶; 电子封装

中图分类号 TQ 433.4+3 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20200927001

## The Effect of Environmental Aging for Performance of Underfill

YANG Yuanyuan<sup>1,2</sup> LI Gang<sup>1,2</sup> ZHU Pengli<sup>1,2\*</sup> ZHANG Chao<sup>1,2</sup> WU Houya<sup>1,2</sup>  
PENG Xiaohui<sup>1,2</sup> SUN Rong<sup>1,2</sup> WONG Chingping<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen Institute of Advanced Electronic Materials, Shenzhen 518103, China)

<sup>2</sup>(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>3</sup>(School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332, USA)

<sup>4</sup>(Department of Electronics Engineering, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

\*Corresponding Author: pl.zhu@siat.ac.cn

收稿日期: 2020-09-27 修回日期: 2020-11-10

基金项目: 国家科技部国家重点研发项目(2017YFB0406000)

**作者简介:** 杨媛媛, 助理工程师, 研究方向为底部填充胶配方设计与性能测试; 李刚, 高级工程师, 研究方向为底部填充胶配方设计与可靠性研究; 朱朋莉(通讯作者), 研究员, 研究方向为电子封装用无机纳米材料的制备与性能研究, E-mail: pl.zhu@siat.ac.cn; 张超, 硕士研究生, 研究方向为无机纳米填料改性; 吴厚亚, 助理研究员, 研究方向为底部填充胶可靠性研究; 彭小慧, 硕士研究生, 研究方向为底部填充胶可靠性研究; 孙蓉: 研究员, 研究方向为高密度电子封装材料与产业化; 汪正平, 中国工程院外籍院士, 研究方向为高密度电子封装材料。

**Abstract** The reliability of solder joints is one of the key concerns in electronic packaging. Underfill was employed to match the thermal expansion coefficient between the substrate and the IC chip in electronic packaging, thereby protecting the solder joints and improving the reliability of the solder joints. However, the reliability of solder bumped flip chip will be affected by the changes in performance of underfill during the aging process. Therefore, the effects of several aging treatments on the thermo-mechanical properties and adhesion of underfill were studied in this paper. The thermo-mechanical properties of the underfill have the most obvious changes after hydrothermal aging treatment and high-temperature storage life treatment. There is no obvious similarity on organic interface and the inorganic interface for adhesion of underfill. High temperature storage has the most obvious effect on the adhesion of inorganic interfaces, while hydrothermal aging has the most obvious effect on the organic interfaces.

**Keywords** environmental aging; underfill; electronic packaging

**Funding** This work is supported by National Key R&D Project from Minister of Science and Technology of China (2017YFB0406000)

## 1 引 言

电子科学技术的高速发展, 给我们的生活带来了深远影响, 丰富多样的电子产品广泛应用于工业、农业和日常生活中。近年来, 大多数电子产品都持续朝着高性能、多功能、高可靠、小型化、薄型化、便捷化以及低成本的方向发展<sup>[1]</sup>。硅芯片作为电子产品的“大脑”, 需要具备更优异的性能以支撑多样化的作用。从硅芯片到最终产品, 电子封装主要基于以下 4 个功能进行关键桥梁的转换: (1) 提供电子通路; (2) 将信号分配到集成电路 (IC) 芯片上下部; (3) 分散电路中产生的热量; (4) 支持和保护 IC 芯片免受恶劣环境的影响。主要有 3 种方法可以将基板上的芯片互连: 面朝上的引线键合、面朝上的胶带自动键合 (TAB) 和倒装芯片技术。其中, 倒装芯片技术是一种将 IC 芯片通过焊点连接到基板, 且有源面朝下的封装方法。由于其在基板上互连的面积阵列, 可以满足高输入/输出 (I/O) 数量, 同时这种方法的互连路径变短, 信号传播速度也明显增加。所以, 倒装芯片技术是一种提高电子产品封装密

度和可靠性, 以及降低封装成本的有效方法<sup>[2-3]</sup>。

在早期的倒装芯片封装技术中, 使用的基板主要是陶瓷基板, 由于陶瓷基板和硅芯片之间的热膨胀系数不匹配问题并不明显, 所以在焊球上不会产生明显的热应力。但是, 随着有机基板的使用, 硅 IC 芯片 ( $2.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) 和印刷电路板 ( $18 \times 10^{-6}/\text{K} \sim 24 \times 10^{-6}/\text{K}$ ) 之间的热膨胀系数差别很大, 故在器件热循环过程中会因为热膨胀系数 (CTE) 不匹配而在焊球上产生热应力, 从而导致疲劳失效。因此, 需要用底部填充胶来保护焊球并填充 IC 芯片和有机基板之间的空隙<sup>[4-5]</sup>。底部填充胶是一种液体密封剂, 通常是基于大量填充有氧化硅的未固化环氧树脂复合材料。主要可以分为毛细管底部填充胶、模制底部填充胶、无流动底部填充胶和晶圆级底部填充胶。该材料体系通常由环氧树脂单体或环氧树脂混合物、固化剂、催化剂、 $\text{SiO}_2$  填料和取决于特定应用的其他必要添加剂 (如助熔剂、增韧剂、增黏剂和分散剂等) 组成。底部填充胶可以在芯片回流前后用于封装器件, 然后对其进行热固化形成交联网络从而转化为热固性聚合物。随着氧化硅填料的增

加, 底部填充胶表现出高模量、低热膨胀系数和良好的界面附着力。其中, 底部填充胶的引入会使得焊点上的热应力在芯片、底部填充胶、基板以及焊点之间重新分配, 通过将一些应变能转化到底部填充层来减少焊点中的应变, 而固化的底部填充胶可将焊点的应变水平降低到未封装焊点的应变的  $0.10\sim 0.25$ <sup>[6-7]</sup>。因此, 在芯片封装工艺中, 对底部填充胶有着高模量、高玻璃化转变温度( $T_g$ )、高度匹配焊料的热膨胀系数、低吸湿和对不同界面的高黏接等要求<sup>[8-9]</sup>。

即使在芯片和基板之间填充底部填充胶, 也会发生由于减小焊球尺寸和间距而导致的机械跌落、冷热冲击、热循环以及水热老化造成的焊球可靠性降低。因此, 器件可靠性评估是一项非常重要的工作。然而, 由于芯片设计和制造的成本极高, 如果直接将未经耐老化性能测试的底部填充胶用于实际封装器件中进行老化性能评估, 那么势必会浪费大量资源。所以在进行器件老化实验之前, 必须仔细考虑底部填充材料的性能和预期的使用环境, 即先对本体材料进行可靠性评估。由于底部填充胶中的环氧树脂存在羟基、醚键和高活性的环氧基团, 所以在环氧树脂中水分的渗透性要高于金属或陶瓷。而吸收水分会降低环氧树脂的热机械性能(如降低其  $T_g$  点、模量以及强度)并破坏环氧材料的黏接性能, 故水汽对环氧复合材料的影响尤其重要。此外, 当材料的使用温度超过其玻璃化转变温度时, 环氧材料从玻璃态转变为橡胶态, 材料的大部分性能都会发生改变, 因此温度对环氧复合材料的影响也很重要<sup>[10-13]</sup>。本文选择了一款底部填充胶水, 研究其在不同老化处理前后的热机械性能和在不同基底的黏接性能变化。

## 2 实验与方法

### 2.1 底部填充胶水的制备

本研究中使用的环氧树脂为双酚 F (EPON

862, 环氧当量:  $171 \text{ g/eqv}$ ), 固化剂为二乙基甲苯二胺 (DETDA, E-100)。首先, 将 1 当量的双酚 F 环氧树脂和 1 当量的二乙基甲苯二胺 (DETDA) 混合均匀; 然后, 分别将占总体含量  $0.5\%\sim 1\%$  的催化剂和环氧硅烷类偶联剂加入混合体系中, 采用高速混料机将胶水混合均匀; 最后, 将占总体含量  $65\%$  的氧化硅填料分多次加入体系中, 混合均匀后即可得到底部填充胶样品。其中, 胶水的固化程序为: 以  $5 \text{ }^\circ\text{C/min}$  的升温速率, 从  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并在  $165 \text{ }^\circ\text{C}$  保持  $2 \text{ h}$ , 随后自然冷却至室温即可得到固化样品。

### 2.2 动态热机械分析和热机械分析测试样条制备

本文用于热机械分析 (Thermal Mechanical Analyzer, TMA) 测试的模具为  $8 \text{ mm}\times 8 \text{ mm}\times 6 \text{ mm}$  (高) 的长方体, 动态热机械分析 (Dynamic Thermomechanical Analysis, DMA) 模具为  $12 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}\times 3 \text{ mm}$  (厚) 的长方体。首先, 将制备好的底部填充胶水注入到已准备好的模具中; 然后, 将胶水放入烘箱, 按照胶水的固化程序进行固化; 最后, 将固化好的样条打磨均匀光滑以备测试使用。

### 2.3 剪切力测试样品制备

选用面积为  $2 \text{ mm}\times 2 \text{ mm}$ , 带有氮化硅、氧化硅和聚酰亚胺钝化层的硅芯片以及裸硅芯片, 同时采用不同的标准流程清洗带有不同钝化层的硅芯片。同样地, 对应的基底也选用带有氮化硅、氧化硅和聚酰亚胺钝化层的硅片以及裸硅片, 此外还有绿油基底。样品制备步骤为: 首先, 将芯片放入底部填充胶液体膜中以其表面涂覆一层均匀的胶膜; 然后, 将其钝化层面朝下放在对应的基底上; 最后, 将制备好的样品放入烘箱中根据胶水的固化程序进行固化。固化后的样品温度降至室温即可用于剪切力测试。

### 2.4 环境老化测试

高温存储寿命测试 (HTSL) 用来评价材料对模拟存储环境的高温环境抵抗力。在本实验中,

将高温存储寿命测试的温度设定在 150 °C。具体地, 将制备好的 DMA 和 TMA 样条以及带有不同钝化层的剪切力样品放入老化箱中, 在 150 °C 保持 500 h。高低温循环试验(TCT)主要用来评估材料在经极高温和极低温的连续环境下所能忍受的程度。在本实验中, 采用的测试条件为: -55 °C 至 125 °C, 将 DMA 和 TMA 样条以及带有不同钝化层的剪切力样品放入高低温循环试验箱中, 进行 700 次循环。水热老化测试用来模拟材料对连续高温高湿条件的耐受程度。本实验将制备好的 DMA 和 TMA 样条以及带有不同钝化层的剪切力样品放入装有沸水的试验箱中 24 h, 并保持其中的水是连续沸腾的。

### 2.5 底部填充胶的热机械性能表征

将固化的底部填充胶样品研磨抛光, 直到获得约 6 mm 的均匀厚度。使用热机械分析仪(TMA, 德国 Netzsch, 型号 TMA 402 F1)在 N<sub>2</sub> 吹扫下以 5 °C/min 的加热速率测量样品的热膨胀, 记录其在  $T_g$  点之前和之后的热膨胀系数。将固化尺寸为 12 mm × 20 mm × 3 mm 的底部填充胶样条打磨光滑均匀, 在 1 Hz 正弦应变载荷下以单悬臂模式对其动态力学分析(DMA, 美国 TA, 型号 Q80)进行测试——从室温以 5 °C/min 的升温速率升至 200 °C, 记录其储能模量、损耗模量以及损耗因子。

### 2.6 剪切力样品测试

采用焊接强度测试仪(型号: Nordson DAGE 4000 PXY)对带有不同钝化层的剪切力样品老化前后的黏接强度进行测试。其中, 剪切速度为 300 μm/s, 剪切高度为 50 μm。

## 3 结果与讨论

底部填充胶是用于倒装芯片中的热固性环氧树脂复合材料。如图 1 所示, 底部填充胶是倒装芯片封装中的关键组分, 其在保护焊球的同时需要和多种界面相互接触, 如在下部与阻焊层以及焊盘接触、中部和焊球接触、上部和焊球底金属化层以及钝化层接触, 所以在测试底部填充胶性能的时候需要考虑多种界面。在本文中, 主要考虑了底部填充胶与阻焊层(绿油)、三种钝化层以及硅的界面黏接性。图 2 为硅、氧化硅/氮化硅/聚酰亚胺三种钝化层以及阻焊层和底部填充胶之间的界面黏接强度测试结果。从图 2 可以看出, 底部填充胶和三种钝化层的界面黏接强度相当, 并且都高于硅和阻焊层界面。

损耗因子是储能模量和损耗模量的比值, 一般取损耗因子的峰值作为材料的  $T_g$  点。在本研究中, 使用 5 °C/min 的升温速率和 1 Hz 的振荡频率获得了胶水初始状态和经过不同老化测试

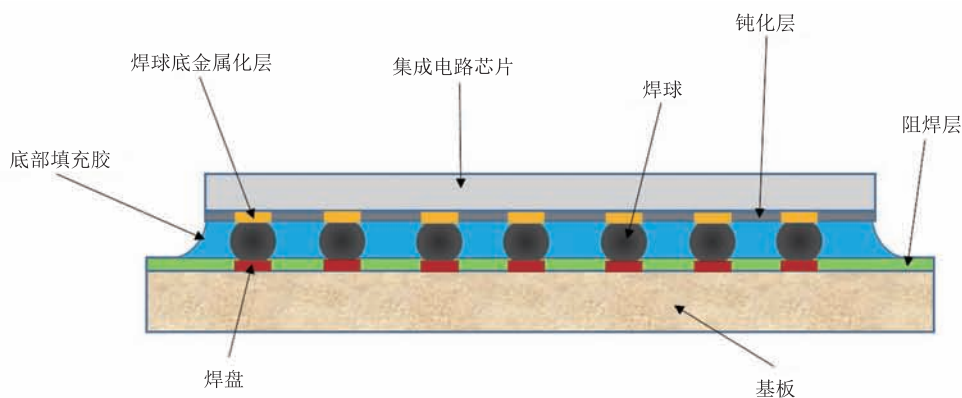


图 1 典型的倒装芯片球栅阵列(BGA)封装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical flip-chip ball grid array (BGA) package

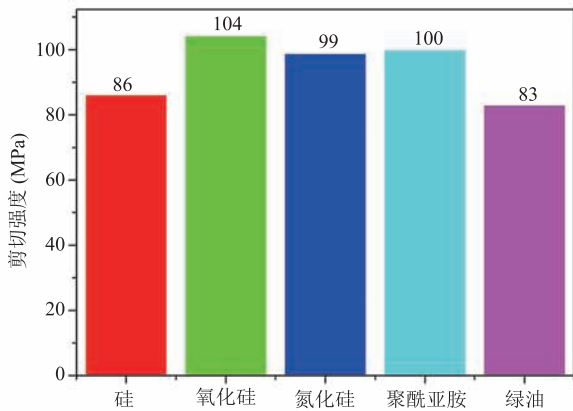


图 2 不同基底/底部填充胶的黏接强度

**Fig. 2 Adhesion strength of different substrate/underfill** 的损耗因子曲线。如图 3 所示, 胶水在经过老化处理之后,  $T_g$  点会发生不同程度的变化, 其中经过水热老化之后, 胶水的  $T_g$  点从 128.5 °C 降至 116.2 °C (如表 1 所示)。这是因为在水热老化实验中, 水汽进入环氧树脂导致复合材料的  $T_g$  点

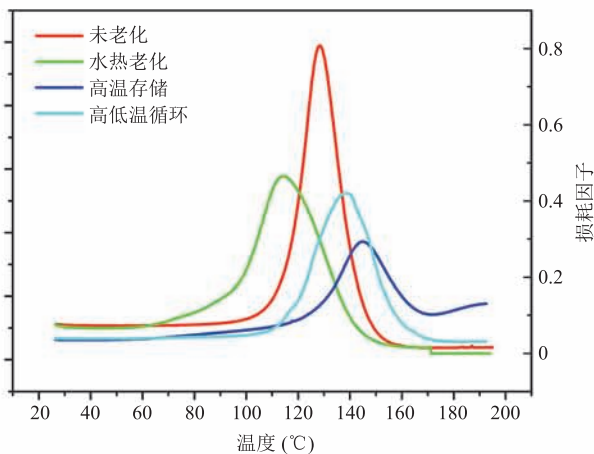


图 3 底部填充胶在老化前后的损耗因子变化曲线

Fig. 3 Tan delta curve of underfill before and after aging

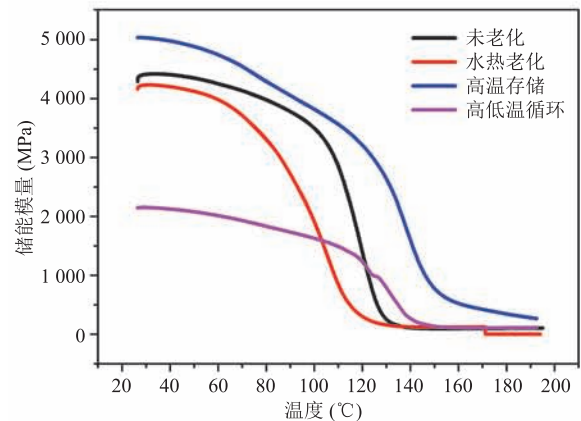
表 1 底部填充胶在老化前后的动态热机械分析数据

Table 1 Dynamic thermomechanical analysis (DMA) data of underfill before and after aging

老化项目	玻璃化转变温度 $T_g$ (°C)	储能模量 $E'$ (MPa)
未老化	128.5	4 415
水热老化	116.2	4 232
高温存储	147.3	5 036
高低温循环	140.8	2 151

降低。经过冷热冲击和高温存储老化后, 胶水的  $T_g$  点都有不同程度的增加, 其中高温存储老化对  $T_g$  点的影响最为明显。这可能是由于底部填充胶长期放置在高温环境中发生了后固化, 导致其交联密度增加, 从而提高了胶水的玻璃化转变温度。此外, 还观察到胶水的损耗因子值在经过老化处理之后都发生了明显的降低, 其中高温存储老化的影响最为明显。这是因为材料在经过老化处理之后, 由于高温和水汽的进入导致材料内部一些化学键的破坏, 从而降低了材料本体的韧性, 所以在损耗因子曲线中都表现出下降的趋势。

同样地, 采用 5 °C/min 的升温速率和 1 Hz 的振荡频率也可以获得胶水初始状态和经过不同老化测试的储能模量 ( $E'$ ) 曲线变化图, 如图 4 所示。在经过不同老化处理后, 胶水的储能模量变化趋势也不同: 经过高温存储老化处理后, 胶水的储能模量增大; 经过水热老化处理和冷热冲击老化处理后, 胶水的模量都发生了下降——水热老化过程中固化块吸收水分导致胶水的储能模量下降。

图 4 底部填充胶在老化前后的储能模量 ( $E'$ ) 变化曲线Fig. 4 The storage modulus ( $E'$ ) change curve of the underfill before and after aging

采用 TMA 测试了胶水在老化处理前后的热膨胀系数和玻璃化转变温度, 如图 5 和表 2 所示。同 DMA 测试结果, 胶水的玻璃化转变温度

在经过水热老化处理之后降低，而在经过高温存储和冷热冲击处理后升高，其中高温存储老化之后升高得最多，此结果和 DMA 测试结果一致。从热膨胀系数 ( $<T_g$ ) 来看，经过水热老化处理后的热膨胀系数变化最明显。这是因为在老化过程中水分吸收不均匀——在固化块外部吸收的水分高于内部，在较低温度时的热膨胀包含水的膨胀，而在较高温度时，水分蒸发，长度先收缩，然后才是胶水的膨胀，所以温度低于  $T_g$  时热膨胀系数升高，而高于  $T_g$  时降低。

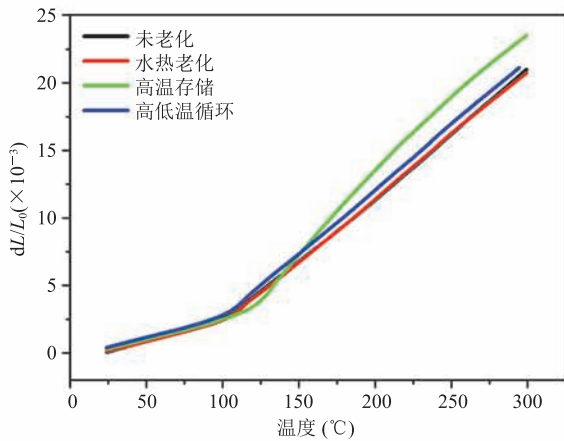


图5 底部填充胶在老化前后的长度变化曲线

Fig. 5 The length change curve of the underfill before and after aging

表2 底部填充胶在老化前后的 TMA 数据

Table 2 TMA data of underfill before and after aging

老化项目	玻璃化转变温度 $T_g$ (°C)	热膨胀系数
未老化	102.0	31.0/95.0
水热老化	98.5	41.6/86.1
高温存储	119.6	29.7/113.6
高低温循环	111.4	30.6/96.5

氮化硅作为一种较为常见的钝化层材料，也是本文研究的对象，如图6所示，胶水在经过水热老化和高温存储老化后的黏接力下降较多，黏接强度均从初始状态的 99 MPa 降至老化后的 79 MPa，下降约 20%。这是由于在水热老化过程中，水汽会留在底部填充胶和氮化硅界面处，破坏胶水和

基底之间的界面相互作用。而在高温存储中采用的温度为 150 °C，高于胶水的玻璃化转变温度，并且长时间的存储导致材料本体发生了变化，所以在氮化硅基底上的黏接力对高温存储较为敏感。而在经过冷热冲击老化后，胶水在氮化硅基底上的黏接力从 99 MPa 降至 85 MPa，下降约 14%，可见该款胶水对低于其  $T_g$  的温度敏感性较弱。

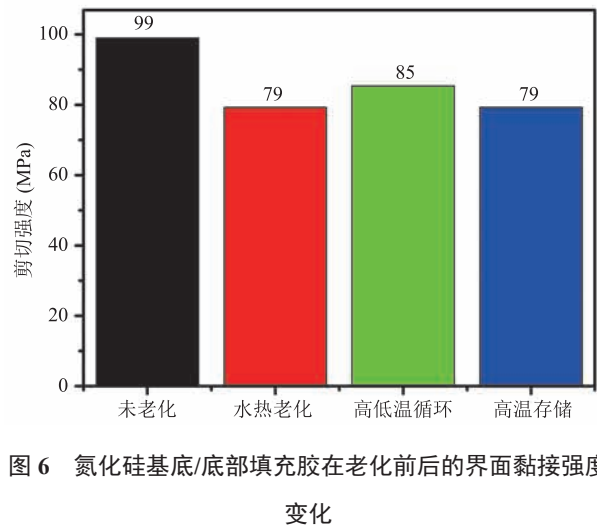


图6 氮化硅基底/底部填充胶在老化前后的界面黏接强度变化

Fig. 6 Change of adhesion strength of SiN/underfill before and after aging

聚酰亚胺作为一种有机钝化层，失效机制不同于无机钝化层，因此研究胶水在聚酰亚胺基底上的黏接力随老化条件的变化情况是非常必要的。如图7所示，胶水在聚酰亚胺基底上的初始黏接力与两种无机钝化层相当，但在经过水热老化处理后，胶水的黏接力发生了较为明显的下降，从初始状态的 100 MPa 下降至 49 MPa，下降约 51%；而经过冷热冲击和高温存储后，胶水的黏接力保持较好，大约是初始黏接力的 91%~92%。由于聚酰亚胺的大分子中含有相当数量的极性基团(如羰基和醚基)，导致聚酰亚胺比较容易吸水，所以在水热老化之后，水更倾向于留在聚酰亚胺和底部填充胶的界面处，可能会通过水解反应破坏底部填充胶和基底之间的化学键。

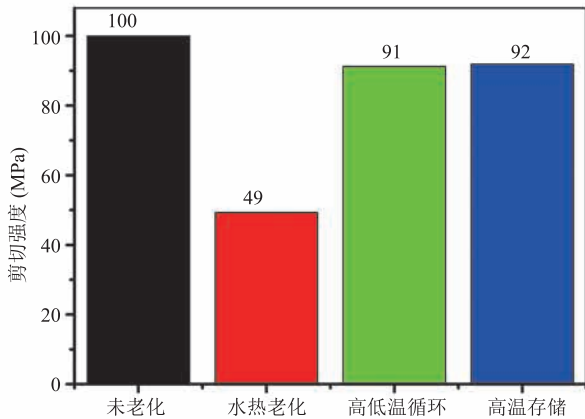


图7 聚酰亚胺基底/底部填充胶在老化前后的界面黏接强度变化

Fig. 7 Change of adhesion strength of PI/underfill before and after aging

## 4 讨论与分析

本文制备的底部填充胶水, 由于引入高填充量的氧化硅填料, 其本身在无机和有机基底上具有优异的黏接性能(在氮化硅基底上为 99 MPa, 在聚酰亚胺基底上为 100 MPa), 而在已有文献中黏接力基本在 60~70 MPa, 如 Luo 等<sup>[14]</sup>报道的底部填充胶在氮化硅基底上为 66 MPa 左右, 在聚酰亚胺基底上为 58 MPa, 可见本文制备的底部填充胶具有较优异的黏接性能。目前基于环境老化对底部填充胶性能影响的研究多集中在单一老化处理因素或单一性能变化<sup>[11,14-16]</sup>方面。如 Lall 等<sup>[15]</sup>研究了温度对底部填充胶性能的影响; Luo 等<sup>[14]</sup>研究了温度和湿度对底部填充胶黏接性能的影响。本文系统研究了温度、水汽等因素对材料物化性能以及在不同基底上的黏接性能影响, 发现对胶水各项性能影响最为明显的是高温存储老化和水热老化。其中, 高温存储对玻璃化转变温度的影响最大; 高低温循环导致模量下降得最明显; 水热老化导致热膨胀系数增加最多。不同的老化条件也导致底部填充胶和不同基底的

界面黏接性能下降。其中, 水热老化对各种界面的黏接性能的影响都很明显, 而高低温循环对界面黏接的影响较小。

此外, 本工作也存在一定的不足, 主要表现在以下几个方面: (1) 对于材料老化之后性能下降的机理问题没有进行深入研究; (2) 目前只对一款胶水的老化性能进行了研究, 没有对同族胶水进行对比研究。在后续的工作中, 将对胶水老化的机理进行更进一步的研究, 同时研究多款胶水的老化性能以得到更普适的结论。

## 5 结论

同款胶水在经过不同老化处理后的性能保持情况各不相同: 物化性能参数会发生不同程度的改变, 对不同基底的黏接力也会有不同程度的下降, 其中高温老化和水汽造成的影响对胶水各项性能的影响最为明显。由于在封装过程中的高温是不可避免的, 所以在材料开发时需要更加注重材料的耐热性能。此外, 水汽主要是由于材料本体的吸水率高、封装过程不当以及存储不当引入的, 所以在材料筛选、制备和封装过程中要严格控制水汽进入以减少其对材料和器件造成损害。

## 参考文献

- [1] Young WB. Effect on filling time for a non-newtonian flow during the underfilling of a flip chip [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(7): 1048-1053.
- [2] Fan LH, Moon KS, Wong CP. Adhesion study on underfill encapsulant affected by flip chip assembly variables [C] // Proceedings International Symposium on Advanced Packaging Materials Processes, Properties and Interfaces (IEEE Cat. No.01TH8562), 2001: 213-217.

- [3] Tseng WT, Tsai HY, Chiu S, et al. Molded underfill technology for low-k flip chip packages [C] // 2007 International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology, 2007: 335-337.
- [4] Chian KS, Lim SH, Yi S, et al. Effect of moisture on the curing behaviour of underfills [C] // International Symposium on Electronic Materials and Packaging (EMAP2000) (Cat. No.00EX458), 2000: 289-296.
- [5] Sabale M, Vinerkar K, Thakur S, et al. Effect of underfill design parameters on die cracking in flip chip on flexible substrates [C] // Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2014: 605-608.
- [6] Tsukada Y. Surface lamellar circuit and flip-chip attach packaging [C] // Proceedings of the 42nd Electronic Components and Technology Conference, 1992: 22.
- [7] Han B, Guo Y. Thermal deformation analysis of various electronic packaging products by moiré and microscope moiré interferometry [J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117(3): 185-191.
- [8] Yong D, Chunchao L, Peiqiang Z, et al. Reliability evaluation and selection of underfill adhesives [C] // 2019 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2019: 1-4.
- [9] Wang YP, Chai K, Her TD, et al. Evaluating underfill material for flip chip ball grid array package [C] // Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456), 2000: 223-227.
- [10] Lau JH, Lee SWR, Chang C. Effects of underfill material properties on the reliability of solder bumped flip chip on board with imperfect underfill encapsulants [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(2): 323-333.
- [11] Che FX, Zhang XR, Ji L. Thermal aging induced underfill degradation and its effect on reliability of advanced packaging [C] // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2020: 1525-1532.
- [12] Luo S, Wong CP. Moisture absorption in uncured underfill materials [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(2): 345-351.
- [13] Pun K, Sharma A, Singh A, et al. High reliability underfill encapsulated fine pitch system on flex packages [C] // 2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2013: 665-670.
- [14] Lall P, Zhang Y, Suhling J, et al. The degradation mechanisms of underfills subjected to high temperature long term aging [C] // 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2020: 1400-1407.
- [15] Lall P, Kasturi M, Wu HT, et al. Effect of long term isothermal exposure on underfill material properties [C] // 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2020: 1389-1394.
- [16] Luo S, Wong CP. Influence of temperature and humidity on adhesion of underfills for flip chip packaging [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(1): 88-94.