

基于阻焊油墨粘弹性的封装基板翘曲仿真研究

李玉龙^{1,2,*}, 赵博宇¹, 薄彦琴², 熊佳², 张化宇¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518000

2. 广州广芯封装基板有限公司, 广东 广州 510700

摘要: [目的] 在半导体封装基板大尺寸、高层数的发展趋势下, 翘曲问题成为影响封装可靠性的重要因素。封装基板各层材料在加工过程中的结构变化与热膨胀失配是导致翘曲的主要原因, 而表层阻焊油墨在温度变化时的应力松弛行为对翘曲变形尤为关键。[方法] 通过对阻焊油墨的粘弹性与应力松弛特性进行表征及本构拟合, 并以封装基板加工翘曲形貌作为初始状态, 建立了封装基板回流过程翘曲的粘弹性模型。[结果] 相较于非线性弹性模型, 材料的粘弹性对应力松弛起主导作用。在260℃回流时翘曲仿真结果与实验结果的偏差仅为1.2 μm。[结论] 本研究提出的封装基板翘曲分析方法, 能够阐明阻焊油墨材料特性与翘曲变形的关联, 为封装基板的翘曲控制提供了理论依据, 有助于提高电子封装产品的可靠性。

关键词: 封装基板; 翘曲; 阻焊油墨; 粘弹性; 有限元分析

中图分类号: TN305.94

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2025)07-0062-08

Warpage simulation of package substrate based on the viscoelasticity of solder mask

LI Yulong^{1,2,*}, ZHAO Boyu¹, BO Yanqin², XIONG Jia², ZHANG Huayu¹

1. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China

2. GREATECH SUBSTRATES Co., Ltd., Guangzhou 510700, China

Abstract: [Objective] With the trend toward larger sizes and higher layer counts in semiconductor package substrates, warpage has become a critical factor affecting packaging reliability. Structural changes and thermal expansion mismatch among different material layers during processing are the primary causes of warpage. Solder mask, as a critical protective material on the substrate surface, significantly influences warpage deformation due to its stress relaxation behavior under temperature variations. [Method] A viscoelastic warpage model for the reflow process of packaging substrates was established, by characterizing the viscoelasticity and stress relaxation properties of solder mask, performing constitutive fitting, as well as using the post-processing warpage profile as the initial state. [Result] The viscoelasticity of solder mask had a significant effect on stress relaxation compared to nonlinear elastic models. At the reflow temperature of 260 °C, the discrepancy between simulated and measured warpage values was merely 1.2 μm. [Conclusion] The proposed warpage analysis method clarifies the relationship between solder mask properties and warpage deformation, providing a theoretical basis for warpage control in package substrate and contributing to improved reliability of electronic package products.

Keywords: package substrate; warpage; solder mask; viscoelasticity; finite element analysis

在当今数字化和自动化的时代, 集成电路(integrated circuit, IC)作为现代电子设备的核心组件, 扮演着至关重要的角色, 驱动着大数据分析、人工智能、自动驾驶等领域的持续发展。封装基板是电子封装中用于连接芯片与印制电路板(PCB)的关键结构, 它位于芯片和PCB之间, 起着电气互连、机械支撑、提供导热路径、物理保护等多重作用^[1]。因此封装基板不仅应满足高密度布线的要求, 还需具备良好的导热性和力学性能。然而, 由于封装基板的结构复杂、材料多样、加工流程繁琐等特点,

在封装基板的制造过程和封装阶段, 经常出现翘曲变形问题。基板变形可能导致芯片封装焊点对准不良、焊接润湿性差, 严重时可能引发芯片开裂, 严重影响电子器件的品质和可靠性^[2]。此外, 随着封装基板尺寸和焊接密度的持续增大, 对封装基板变形的管控也日益严格, 翘曲问题已成为制约封装基板技术发展的关键瓶颈。

封装基板翘曲问题直接影响电子封装的可靠性。为了深入理解翘曲的产生机制并实现有效控制, 研究人员采用了多种研究方法, 包括实验、数学

收稿日期: 2025-04-23 **修回日期:** 2025-06-03

通信作者: 李玉龙(1992-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为先进封装基板工艺开发及可靠性失效机理。

引用格式: 李玉龙, 赵博宇, 薄彦琴, 等. 基于阻焊油墨粘弹性的封装基板翘曲仿真研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(7): 62-69.

LI Y L, ZHAO B Y, BO Y Q, et al. Warpage simulation of package substrate based on the viscoelasticity of solder mask [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44(7): 62-69.

建模和仿真模拟^[3-4]。目前业内主要通过实验手段调控加工参数来研究封装基板的翘曲行为,进而获取加工参数与翘曲量的关系。然而,该方法通常耗时、耗力,成本较高,且难以及时预测和优化设计阶段的翘曲问题。

有限元分析法是运用现代计算机快速的运算能力对问题进行模拟仿真,可以在设计阶段对封装基板的变形情况进行预测,是一种更高效的分析方法^[5]。然而,有限元模拟分析的准确性依赖于模型建立和材料参数精确性。现有的多数有限元分析研究将材料简化为线弹性模型。而 Selvanayagam 等人^[6]的研究发现,材料真实特性对仿真模拟结果的准确性非常重要,他们对芯板层、金属层和介质层离散建模,得到的仿真结果更接近实际。在封装翘曲的有限元分析中,考虑材料的粘弹性可以显著提高仿真结果的准确性。传统线弹性模型难以准确描述高分子材料在不同温度和时间条件下的力学响应,容易导致翘曲预测出现偏差。

本研究以阻焊油墨为例,研究了其粘弹性对封装基板热翘曲变形的影响。通过将阻焊油墨粘弹性特性引入封装基板翘曲仿真模拟中,显著提升了封装基板翘曲变形仿真精度。首先对阻焊油墨的粘弹性与应力松弛特性进行了详细测试,并完成粘弹性

本构模型拟合。接着通过有限元节点信息传递方法,以封装基板加工翘曲形貌作为初始状态,建立了封装基板回流过程翘曲的粘弹性模型,分析了阻焊油墨粘弹性对基板翘曲变形的影响。本研究验证了材料非线性特性、材料粘弹性特性和初始应力应变对翘曲预测精度的重要性,揭示了阻焊油墨粘弹性对封装基板翘曲的影响机制,能够为封装基板翘曲行为的预测和控制提供可靠的理论依据。

1 实验

1.1 阻焊油墨试样制备

阻焊油墨薄膜试样的制备流程如图 1 所示。具体步骤如下:

- 1) 通过涂布机在可剥离的覆铜层压板上均匀涂覆厚度 25 μm 的阻焊油墨;
- 2) 烘烤除去溶剂后,通过 DI 曝光机对需要保留图形的区域进行初步固化;
- 3) 采用碱性显影药水褪去未曝光区域的油墨,随后进行光固化和热固化处理;
- 4) 待油墨充分固化后,将油墨与铜箔一起剥离下来,浸泡在硫酸/双氧水体系的微蚀药水中 3~5 min,以将铜箔完全蚀刻掉,最终获得目标形状的阻焊油墨薄膜。

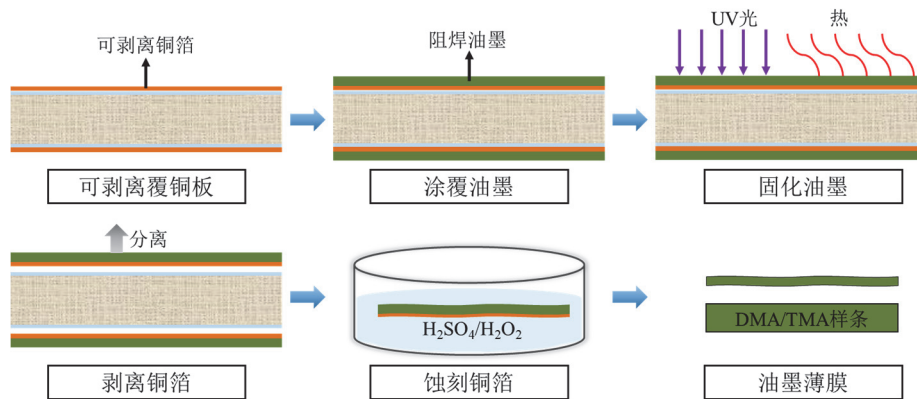


图 1 阻焊油墨薄膜试样制备过程示意图

Figure 1 Schematic diagram showing preparation process of solder mask film specimen

1.2 封装基板样品的制备

在覆铜层压板上滚涂厚度均匀的阻焊油墨,通过差异化曝光显影工艺使基板两面的阻焊油墨存量不同。具体设计如下:每 1/4 大板内设置 8×8 阵列分布的 64 个边长为 27 mm 的正方形单元(Unit)。Unit 在大板中的分布如图 2 和表 1 所示,这种排布方法既能关注所处位置差异对封装基板翘曲的影响,还能使大板的应力/应变分布均匀化,降低大板翘曲对 Unit 翘曲的影响。

1.3 有限元建模

封装基板有限元几何模型如图 3a 所示,该模型的整体尺寸为 27 mm×27 mm×0.484 mm,由五层结构组成,自上而下依次为阻焊油墨、铜箔、芯板、铜箔和阻焊油墨,其中芯板、铜箔和阻焊油墨的厚度分别为 410、12 和 25 μm。芯板上铜箔的两面均涂覆等厚的阻焊油墨,设计其中一面阻焊油墨的残墨率为 100%,另一面为网格状的油墨图形,残墨率分别为 90%、80%、70%等,通过两面阻焊油墨

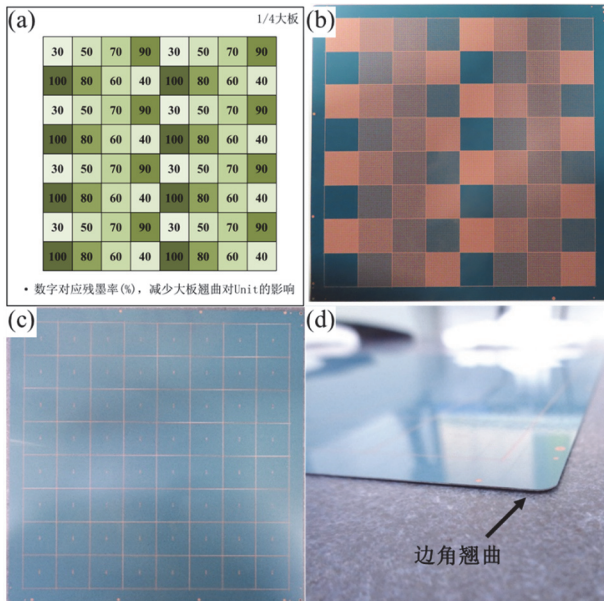


图2 简化设计的封装基板 1/4 大板底面残墨率排布示意图 (a)、实物底面 (b) 和顶面 (c) 照片, 以及边角翘曲情况 (d)
Figure 2 Simplified design of a quarter panel for packaging substrate: (a) sketch of ink residue distribution on bottom surface; photos of the object's bottom surface (b) and top surface (c); and (d) warpage at corner

残墨率的差异, 可以使封装基板产生不同程度的翘曲。底面阻焊油墨网格宽度依据残墨率计算, 具体列于表 1。

表 1 封装基板底面油墨残墨率设计

Table 1 Design of residual ink rate on bottom surface of packaging substrate

残墨率/ %	30	40	50	60
宽度/ μm	163.3	225.0	292.9	367.5
残墨率/ %	70	80	90	100
宽度/ μm	452.3	553.0	683.8	1000.0

由于本模型的几何结构较为规整, 因此采用六面体单元进行网格划分, 在保证计算精度和数值稳定性的同时, 对每层结构等距划分为三层, 确保层间单元的匹配性, 并控制有限元网格大小为 $200\ \mu\text{m}$, 如图 3b 所示, 网格数量控制在 20 万至 30 万个单元之间, 以平衡计算效率和精度。在模型的 A、B、C 三点施加约束条件, 如图 3c 所示。基于多层板变形理论进行封装基板的翘曲分析, 并使用数值方法 (直接求解法) 求解线性或非线性方程组, 得到节点位移等未知量。在后处理中根据求解结果, 进一步获得所需的物理量 (如应力、应变等), 同时对结果进行可视化展示和分析。

1.4 表征和性能检测

采用 TA DMA 850 动态热机械分析仪 (DMA) 检测阻焊油墨的储能模量 (E'), 试样尺寸为 $5\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} \times 25\ \mu\text{m}$, 采用温度扫描模式, 温度范围为

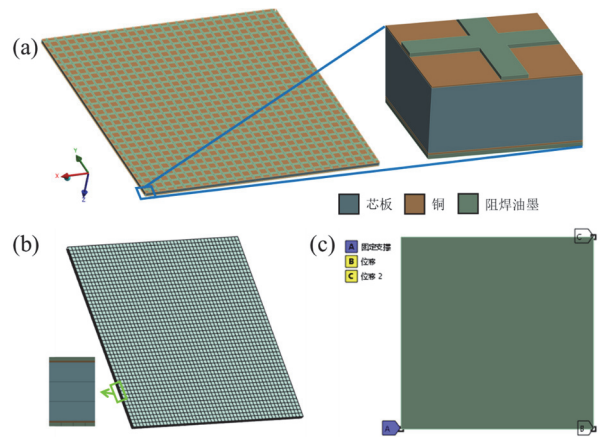


图3 封装基板仿真模型示意图: (a) 简化设计的封装基板几何模型; (b) 网格划分; (c) 约束施加
Figure 3 Schematic diagram of packaging substrate simulation model: (a) geometric model of the simplified design of packaging substrate; (b) grid division; and (c) constraint imposition

$30\ ^\circ\text{C}$ 至 $280\ ^\circ\text{C}$, 升温速率 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$, 频率 $1\ \text{Hz}$, 动态位移振幅 $20\ \mu\text{m}$ 。不同固化阶段阻焊油墨的粘弹性特性测试也在 DMA 上进行, 分别采用频率扫描模式和应力松弛模式。在频率扫描模式下, 频率范围为 $0.01\ \text{Hz}$ 至 $20\ \text{Hz}$, 温度从 $30\ ^\circ\text{C}$ 升至 $200\ ^\circ\text{C}$, 每隔 $10\ ^\circ\text{C}$ 测 1 次; 应力松弛测试时每个温度保持 $10\ \text{min}$, 以观察材料的应力松弛行为, 为建立阻焊油墨粘弹性本构模型提供数据支持。

采用 TA TMA Q800 热机械分析仪 (TMA) 检测阻焊油墨的热膨胀系数 (CTE), 试样尺寸为 $5\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} \times 25\ \mu\text{m}$, 加载力为 $0.05\ \text{N}$, 温度范围为 $30\sim 280\ ^\circ\text{C}$, 升温速率 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 阻焊油墨线弹性与非线性参数对封装基板翘曲的影响对比

阻焊油墨的 DMA 和 TMA 测试结果如图 4 所示。从图 4a 可以看到, 阻焊油墨的储能模量随温度升高而呈持续下降的趋势。在 $40\ ^\circ\text{C}$ 时, 储能模量约为 $3\ 500\ \text{MPa}$, 此时阻焊油墨处于玻璃态, 刚度较高; 温度升高至玻璃化转变温度 (T_g) $120\ ^\circ\text{C}$ 附近时, 储能模量急剧下降, 在 $150\ ^\circ\text{C}$ 时降至约 $1\ 000\ \text{MPa}$, 说明此时材料由玻璃态转变为高弹态, 分子链段开始大量运动, 刚性显著降低。从图 4b 可知, 在 $25\sim 120\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 阻焊油墨的 CTE 较小, 尺寸变化平缓, 尺寸变化量 (Δd) 不大。当温度接近 T_g 时, CTE 迅速增大; 在 $250\ ^\circ\text{C}$ 后随着温度进一步升高, 尺寸增长速率放缓。对比阻焊油墨的 DMA 和 TMA 测试结果可知, 储能模量和热膨胀系数均随温度

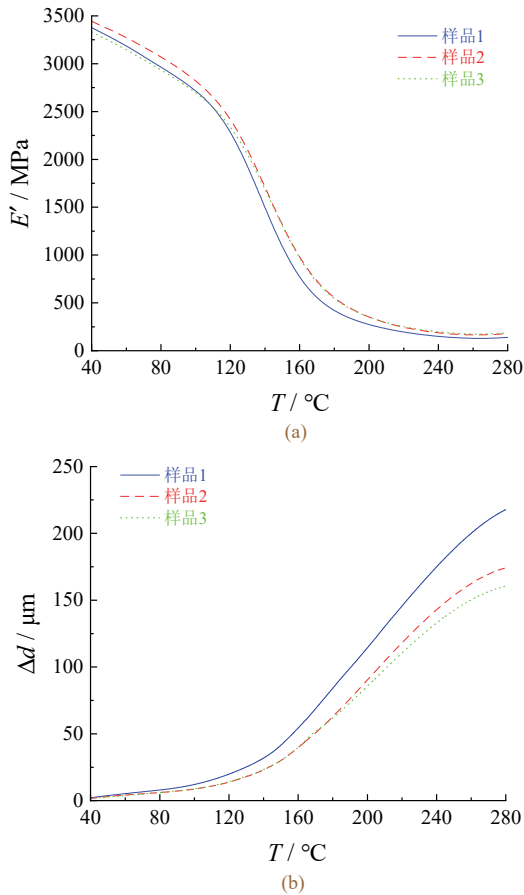


图4 阻焊油墨的储能模量(a)和尺寸(b)随温度的变化曲线
Figure 4 Variation curves of storage modulus (a) and dimension (b) with temperature for solder mask

升高呈现非线性变化，特别是在玻璃化转变温度附近，力学性能变化显著。

定值/线性材料参数假设储能模量和 CTE 不随温度变化，无法反映材料在高温下的软化行为，因此在外界热载荷作用下，采用线性材料参数的仿真模型无法准确反应材料的真实应力应变响应，可能导致封装基板的翘曲预测结果与实际情况不符。为此，通过仿真模拟对比了这两种材料特性参数对封装基板翘曲的影响。对于非线性材料参数模型，阻焊油墨的储能模量和 CTE 均采用图 4a 和图 4b 的实测数据；对于线性材料参数模型，则采用行业内常

用的定值材料参数，假设各材料的储能模量和 CTE 是不随温度变化的常数。为了评估简化的线性材料参数对翘曲预测精度的影响，本研究设计了一个简易的封装基板叠层结构，同时依据此结构建立有限元仿真的几何模型，如图 5a 和 5b 所示，包括芯板、铜层、阻焊油墨，封装基板的尺寸为 27 mm × 27 mm，总厚度为 480 μm。

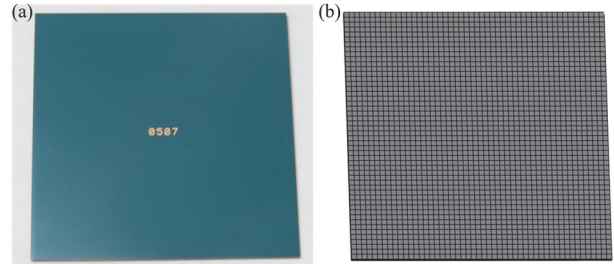


图5 封装基板实物图(a)和有限元建模示意图(b)
Figure 5 Physical image (a) and finite element modeling schematic diagram (b) of packaging substrate

采用摩尔云纹翘曲测试系统检测封装基板实验板的翘曲情况。将封装基板样品在 30 °C 至 260 °C 的温度范围内进行加热、保温和冷却，同时测量其间基板的翘曲变形量。如图 6 所示，采用非线性材料参数的仿真结果与热翘曲实验结果基本吻合，翘曲方向和变形趋势一致，在整个温度范围内的误差低于 20%；而采用线性材料参数的仿真结果则与实验结果存在较大的偏差，最大翘曲量的误差超过 50%。

由于线性材料忽略了温度对材料性能的影响，无法反映材料在高温下的软化和膨胀行为，导致仿真结果偏离实际；而非线性材料模型能够准确反映材料在不同温度下的力学性能变化，特别是在 T_g 附近的储能模量下降和 CTE 突变，使用非线性材料模型可以较为准确地预测基板翘曲。上述方法测试得到的非线性材料参数为传统的线弹性材料参数，而阻焊油墨属于典型的有机高分子复合材料，其具有很强的粘弹性，传统线弹性模型无法准确描述高分子材料在不同时间和时间条件下的力学响应，可能

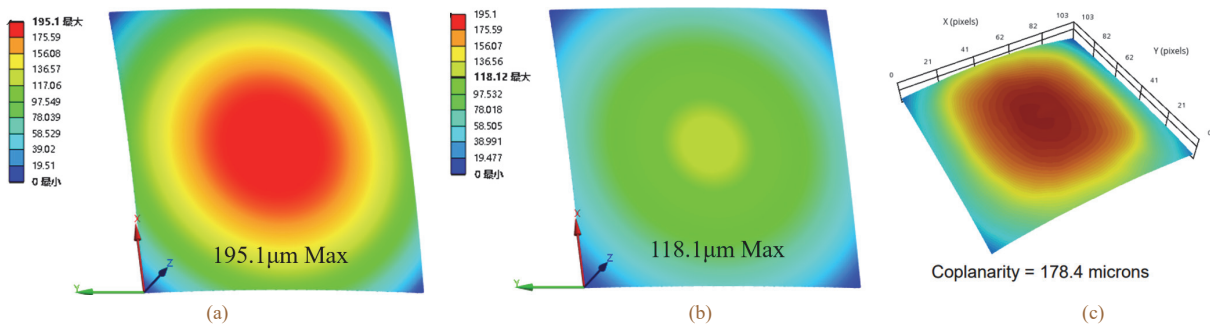


图6 两面残墨率相差 70% 的封装基板在 260 °C 时的翘曲非线性材料参数仿真结果 (a)、线性材料参数仿真结果 (b) 及实测结果 (c)

Figure 6 Warpage simulation and experimental results of a substrate with 70% residual ink difference between both sides at 260 °C: (a) nonlinear material parameter simulation, (b) linear material parameter simulation, and (c) measured results

导致对翘曲程度评估的偏差。因此，为了更加准确地分析阻焊油墨材料特性对封装基板翘曲的影响，需要考虑阻焊油墨的粘弹性。

2.2 阻焊油墨应力松弛分析

2.2.1 温域与频域材料测试

为研究阻焊油墨材料粘弹性对封装基板翘曲的影响，对阻焊油墨进行了 DMA 频率扫描及应力松弛测试，结果如图 7 所示。

从图 7a 可以看到，在相同温度下，阻焊油墨的储能模量随着频率增大而增大。温度为 30 °C、频率为 0.1 Hz 时，阻焊油墨的储能模量约为 3 400 MPa，频率增加到 20 Hz 的过程中，储能模量约提高 5%。随着温度升高，材料的整体储能模量下降。如在温度为 80 °C、频率为 0.1 Hz 时储能模量降至约 2 800 MPa，但仍保持随频率增大而增大的趋势。在接近玻璃化转变的温度范围内，储能模量的下降更为显著，且频率对储能模量的影响更加明显。

阻焊油墨在不同温度下的应力松弛表现如图 7b 所示。在 40 °C 温度下，对阻焊油墨施加恒定 0.5% 的应变保持 600 s，应力下降约 30%，表现出明显的

应力松弛特性。在 40 °C 至 100 °C 的温度范围内，应力松弛速率较低，应力衰减幅度相对较小。随着温度升高，应力松弛速率加快，在接近 T_g 时应力在短时间内迅速下降，显示出较强的粘弹性效应。

阻焊油墨的储能模量随着频率增大而增大，说明在高频/短时间下，材料表现出更高的刚性；而在低频/长时间下，材料表现出更大的变形能力。同时温度升高会提高分子链的运动能力，增强材料的粘性行为，降低材料的储能模量，使材料表现出更大的变形能力。阻焊油墨的储能模量和应力随温度、频率及时间的变化明显，这种粘弹性行为对封装基板的翘曲具有重要影响。因此，在后续的材料模型建立和仿真分析中，需要重点考虑阻焊油墨的粘弹性特征。

2.2.2 阻焊油墨材料的时温等效与迁移函数

为进一步研究阻焊油墨的粘弹性行为，获取其在更大频率/时间范围内的应力松弛特性，利用时温等效原理对图 7 进行处理和分析。取每间隔 10 °C 的 DMA 测试结果，并且选择接近阻焊油墨 T_g 的温度 (140 °C) 作为参考，以便得到较好的迁移结果。对每个温度 T 调整水平位移因子 a_T ，将所有温度下的频率扫描数据水平平移后，在参考温度下叠加，即得覆盖更宽频率范围的储能模量-频率主曲线，具体如图 8a 所示。

根据图 8a 可以得到不同温度下应力松弛曲线对应的位移因子 a_T ，进而绘制得到位移因子 a_T 与温度 T 的关系曲线 (如图 8b 所示)，二者的关系还可用式 (1) 所示 WLF (Williams-Landel-Ferry) 方程来描述。其中 C_1 和 C_2 为 WLF 方程的常数， T 为绝对温度， T_{ref} 为参考温度， C_1 和 C_2 可通过对 $\lg a_T$ 与 $(T - T_{ref})$ 进行非线性拟合得到。

$$\lg a_T = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (1)$$

如图 8b 所示，拟合结果与实验数据吻合良好，决定系数 R^2 高于 0.97，表明 WLF 方程能够准确描述阻焊油墨的位移因子与温度的关系。在此基础上，可以通过 WLF 方程拟合所得阻焊油墨材料的温域储能模量。如图 8c 所示。通过时温等效原理，阻焊油墨在参考温度 140 °C 下的粘弹性主曲线覆盖了从 10^{-15} s 到 10^7 s 的时间范围，远超单个温度下的测试范围。主曲线反映了阻焊油墨在极宽时间尺度下的应力松弛行为，为建立准确的粘弹性材料本构模型提供了有效的数据支持。

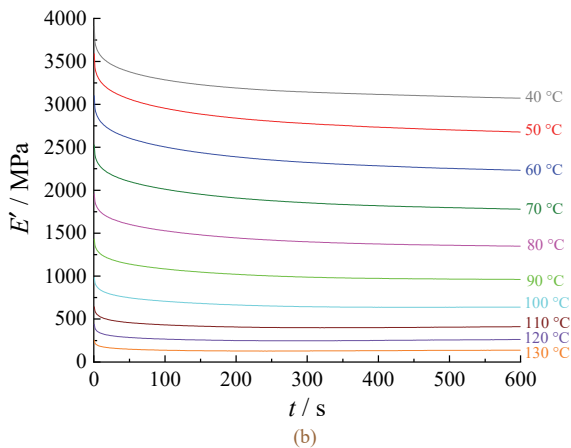
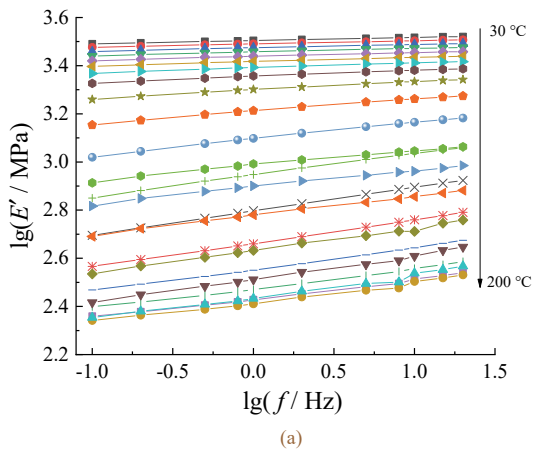


图 7 阻焊油墨在不同温度下的 DMA 频率扫描结果 (a) 和应力松弛结果 (b)

Figure 7 DMA frequency scanning results (a) and stress relaxation results (b) of solder mask at different temperatures

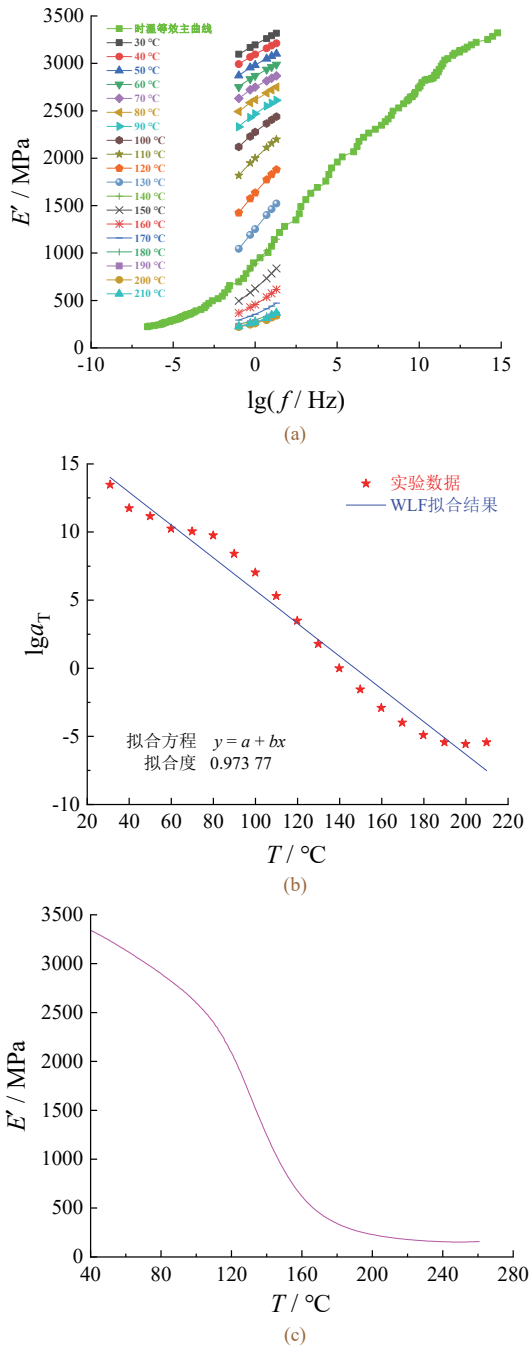


图8 阻焊油墨的储能模量-频率扫描主曲线(a)、 $\lg a_T-T$ 曲线(b)及根据WLF方程拟合所得温域储能模量(c)
Figure 8 (a) Storage modulus-frequency master curve of solder mask (a), $\lg a_T-T$ curve of solder mask (b), and storage modulus in temperature domain fitted according to the WLF equation (c)

2.2.3 阻焊油墨粘弹性本构拟合

阻焊油墨作为一种高分子复合材料,具有典型的粘弹性特征。材料的粘弹性行为可通过松弛模量进行表征,该参数描述了材料在恒定应变条件下应力随时间衰减的规律,能够有效反映应力松弛的时域特性。为准确表征阻焊油墨在不同温度下的粘弹性行为,本研究采用 Prony 级数方法对材料的应力松弛曲线进行拟合。根据粘弹性力学理论,材料的应力松弛行为可采用广义 Maxwell 模型(其数学

表达形式为 Prony 级数)来描述,对于一维粘弹性行为,松弛模量 $E(t)$ 可用式(2)表示。

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\tau_i} \quad (2)$$

式中: E_∞ 为无限时间后的剩余模量, E_i 和 τ_i 分别为第 i 个 Maxwell 元件的模量和松弛时间, N 为 Maxwell 元件的数量。对应力松弛测试数据进行拟合分析可得 E_∞ 、 E_i 和 τ_i 的值,进而建立阻焊油墨的粘弹性本构模型。

基于阻焊油墨在不同温度下的应力松弛测试数据,将应力松弛曲线归一化处理,得到相对模量 $E(t)/E_0$ 随时间的变化关系,其中 E_0 为初始时的模量,其值与无限高频下的储能模量对应。根据应力松弛曲线的形状,可初步估计各 Maxwell 元件的松弛时间 τ_i 和相应的松弛模量 E_i 。一般来说,松弛时间 τ_i 取对数间隔分布,如 0.1、1、10 和 100 s。利用最小二乘法等数值拟合方法,调整 E_i 和 τ_i 的值,使 Prony 级数表达式与实验数据的误差最小,并计算拟合曲线与实验数据的相关系数 R^2 ,以评估拟合精度。表 2 为阻焊油墨在不同温度下的 Prony 级数参数。

表2 不同温度下阻焊油墨的 Prony 级数参数
Table 2 Prony grade parameters of solder mask at different temperatures

温度/°C	40	50	60	70	80	90	100
E_∞/E_0	0.699	0.682	0.661	0.656	0.648	0.628	0.614

图 9 为导入有限元软件后的不同温度下的实验应力松弛曲线与 Prony 级数拟合曲线的对比。从中可以看出,拟合曲线与实验数据吻合良好,表明构建的 Prony 级数模型能够准确描述阻焊油墨的粘弹性行为。

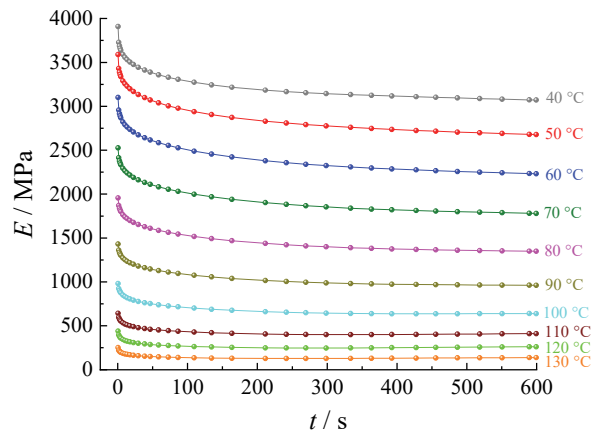


图9 阻焊油墨在不同温度下的应力松弛实验数据与 Prony 级数拟合曲线

Figure 9 Stress relaxation experimental data and the fitted Prony grade curves for solder mask at different temperatures

通过分析不同温度下的 Prony 级数参数,可以发现温度显著影响阻焊油墨的粘弹性。随着温度

升高,材料的分子运动能力增强,松弛比例明显增加。如从 40 °C 升高到 130 °C,在同等松弛 600 s 时间下,弹性模量相比于初始时多下降 23%,同时高温下的阻焊油墨在同等应力条件下所需的松弛时间更短,更容易发生应力松弛。

2.3 回流焊过程中的翘曲模拟与验证

基于上述阻焊油墨粘弹性研究及仿真翘曲结果,对封装基板翘曲进行了仿真预测与实验验证。图 10 为封装基板回流全过程中翘曲形貌变化的仿真结果。随着温度从 30 °C 升高至 210 °C,由阻焊油墨固化收缩导致的下凹形态的翘曲呈线性减小的趋势,从 -30.5 μm 逐渐增大到 +47.5 μm,并在约 134 °C 时发生由凹向凸的转变。这是因为基板的顶层含有较多阻焊油墨,其在升温时热膨胀更为显著,对基板产生的拉伸应力抵消了初始的下凹翘曲。在 210 °C 下保温 60 s 的过程中,由于阻焊油墨的粘弹性,基板的翘曲从 +47.5 μm 减小到 +45.1 μm,这可能是由于升温速率较快,材料的变形还未完全松弛,在保温阶段发生一定时间的应力松弛。当温度从 210 °C 升至 260 °C 时,由于高温下阻焊油墨的热膨胀更加明显,基板发生了进一步的上凸变形,翘曲从 +47.5 μm 增长至最大值 +65 μm。在降温阶段,基板翘曲随温度降低而呈非线性变化。当温度降至 151.6 °C 时,基板的形貌从凸向凹转变,进一步冷却至室温时,基板的翘曲为 -33.3 μm。相比于回流前的翘曲 -30.5 μm 有所增加,这主要是因为回流刚结束时,温度变化导致的变形应力还未来得及完全

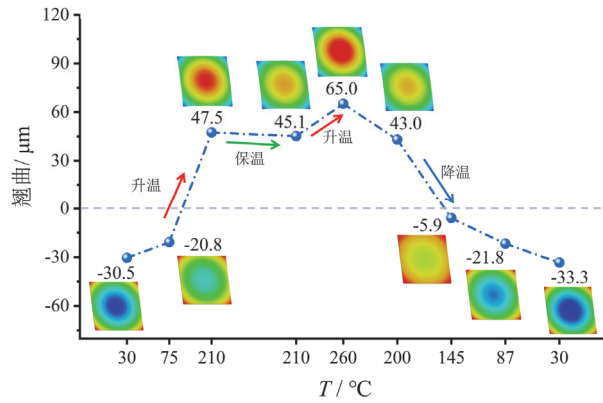


图 10 封装基板在回流过程中的翘曲仿真结果
Figure 10 Simulation results of warpage of packaging substrate during reflow process

释放,翘曲程度得以累积。

图 11 为封装基板回流过程的热翘曲实验结果,可以看出仿真数据和实验数据具有良好的一致性。通过对模型施加初始翘曲,也成功地模拟了基板在 100~150 °C 温度内翘曲形貌由凹向凸的转变;准确地预测了回流最高温度时的翘曲数值(260 °C 时的翘曲值为 63.8 μm,仿真值与其误差仅为 1.2 μm)。此外,该模型还准确地预测了回流始末状态下基板翘曲值的变化(回流前后室温下仿真值相差 2.8 μm,实验值相差 2.9 μm),这表明所建立的有限元模型能够有效反映封装基板在回流过程中的翘曲。

2.4 线弹性与粘弹性模型对比验证

线弹性模型中的材料假设为理想弹性体,其应力的大小仅与当前的应变有关,没有考虑应力松弛和蠕变等时间相关的特性。所以在温度不变的情况下,线弹性模型的应力和应变状态也恒定不变,

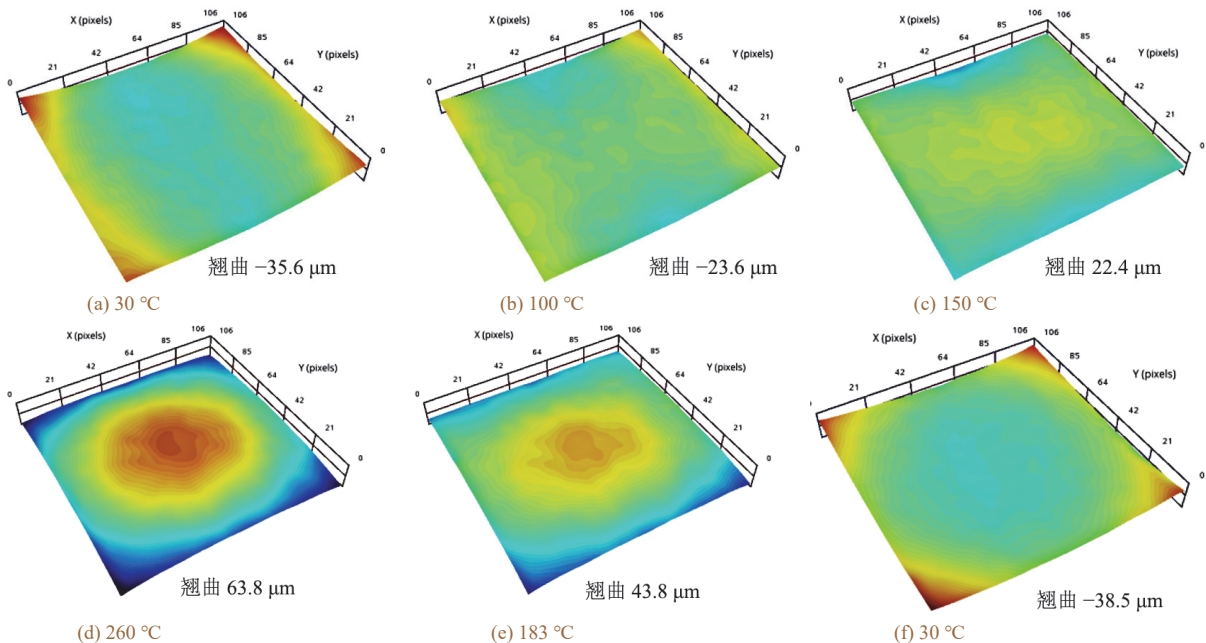


图 11 封装基板在回流过程中的翘曲实验结果
Figure 11 Warpage measurement results of packaging substrate during reflow process

翘曲不会随着时间的推移发生变化。当材料受到外力或温度变化时，高分子链段的运动导致应力和应变随时间逐渐变化。在回流焊的保温阶段，虽然温度恒定，但由于粘弹性效应，材料内部的应力会随着随着时间的推移而减小，翘曲程度也相应地有所恢复。如图 12a 所示，粘弹性模型的翘曲值在保温阶段逐渐减小，而线弹性模型的翘曲值则保持不变。为了对比线弹性和粘弹性模型与实验结果的差异，对比了回流焊最高温度 260 °C 和室温 (30 °C) 时的翘曲值。结果表明，260 °C 时的实验翘曲值、粘弹性翘曲值和线弹性翘曲值分别为 63.8、65.0 和 75.4 μm，如图 12b 和 12c 所示。此外，降至室温后线弹性模型

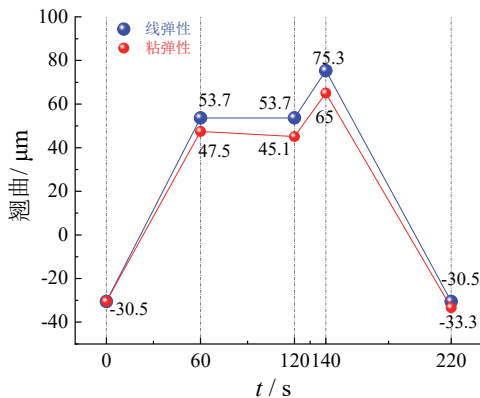
中基板的翘曲值恢复到升温前的翘曲值，这说明线弹性模型无法预测回流始末状态下封装基板翘曲值的变化。传统的温度相关线弹性模型在预测含有粘弹性材料的封装基板翘曲时存在局限性，粘弹性模型的预测翘曲值与实验数据更为接近。

3 结论

在封装基板回流过程的翘曲模拟中，通过对阻焊油墨的粘弹性与应力松弛特性的表征和本构拟合，并以封装基板加工翘曲形貌作为初始状态，建立了封装基板从阻焊加工到回流封装全过程翘曲的粘弹性模型。结果表明，材料的粘弹性对应力的松弛具有显著作用，回流最高温 260 °C 时翘曲下降 10.4 μm，与实验结果相差仅 1.2 μm。粘弹性模型能够更准确地预测基板的翘曲变化，而线弹性模型因忽略时间效应，预测精度不足。本研究为封装基板翘曲问题提供了一种新的分析方法，揭示了阻焊油墨材料特性与翘曲变形的内在联系，为封装基板的翘曲控制提供了依据，有助于提高电子封装产品的可靠性。

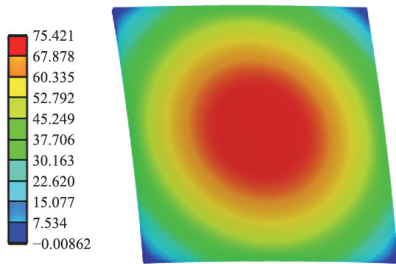
参考文献:

- [1] SHIH M, CHEN K, LEE T, et al. FE simulation model for warpage evaluation of glass interposer substrate packages [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2021, 11 (4): 690-696.
- [2] 杨建伟. 封装基板阻焊层分层分析与研究[J]. 电子与封装, 2019, 19 (2): 1-4, 12.
YANG J W. Analyses and study of substrate solder mask delamination [J]. Electronics & Packaging, 2019, 19 (2): 1-4, 12.
- [3] 郭威, 王小龙, 谢建友, 等. 一种基于板壳理论对芯片翘曲变形的研究[J]. 电子与封装, 2017, 17 (1): 15-18.
GUO W, WANG X L, XIE J Y, et al. A predictive model for thermo-mechanical warpage of micro-electronic packages [J]. Electronics & Packaging, 2017, 17 (1): 15-18.
- [4] KIM C, LEE T, CHOI H, et al. Methodology development of warpage analysis of polymer based packaging substrate [C] // Proceedings of the 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). S.I.: IEEE, 2014: 1004-1009.
- [5] MCCASLIN L, SITARAMAN S K. Methodology for modeling substrate warpage using copper trace pattern implementation [C] // Proceedings of the 58th Electronic Components and Technology Conference. S.I.: IEEE, 2008: 1582-1586.
- [6] SELVANAYAGAM C, MANDAL R, RAGHAVAN N. Comparison of experimental, analytical and simulation methods to estimate substrate material properties for warpage reliability analysis [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88/89/90: 817-823.



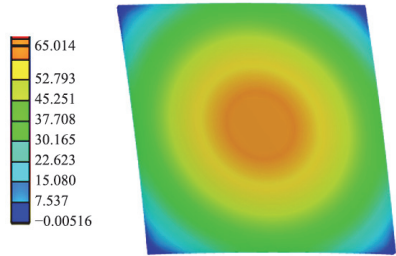
(a) 线弹性与粘弹性模型翘曲仿真结果

(a) Warpage simulation results of linear elastic and viscoelastic models



(b) 260 °C 时线弹性模型翘曲仿真结果

(b) Warpage simulation results of linear elastic model at 260 °C



(c) 260 °C 时粘弹性模型翘曲仿真结果

(c) Warpage simulation results of viscoelastic model at 260 °C

图 12 封装基板回流过程翘曲仿真结果

Figure 12 Warpage simulation results of packaging substrate during reflow process