

湿热条件下底部填充胶性能退化检测手段总结与分析

汤春江 陈桃桃 刘俊夫 魏鑫 刘进鸿

中国电子科技集团公司第四十三研究所 微系统安徽省重点实验室 安徽 合肥 230088

摘要: 底部填充胶 (underfill) 作为关键封装材料, 其在湿热环境下的服役可靠性愈发受到关注。本文系统总结并分析了湿热条件下用于评估底部填充胶性能退化的八种常用检测手段, 涵盖吸水率测试、三点弯曲力学性能测试、动态热机械分析 (DMA)、芯片剪切强度测试、热重分析 (TGA)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、流变性能测试及扫描电子显微镜 (SEM) 表征。每种方法均从基本原理出发, 结合实际操作与测试指标, 探讨其在揭示材料吸湿行为、力学性能衰退、热稳定性变化及界面失效机理中的应用优势与局限性。

关键词: 湿热条件; 底部填充; 力学性能; 微观结构

引言

随着微电子技术的迅猛发展, 电子器件不断向小型化、轻量化和多功能方向演进, 促使微电子封装技术也随之发生了深刻变革。为了有效控制制造成本, 以环氧树脂为基体的塑封工艺在封装领域得到了广泛推广, 包括底部填充胶、有机基板材料以及环氧类塑封料等。环氧树脂因其优良的机械性能和化学稳定性, 在封装过程中展现出低收缩率、良好的电绝缘性以及多种材料的优异附着性能, 成为电子封装材料中的重要组成部分。作为封装关键材料之一, 底部填充胶的多项物理特性, 例如热膨胀系数 (CTE)、玻璃化转变温度 (T_g)、流动性、弹性模量、吸湿特性以及与衬底的界面粘附性, 均直接影响电子器件的装配质量与服役稳定性^[1]。然而, 环氧树脂固化后所表现出的脆性较大、热膨胀性偏高以及易吸湿等特点, 可能会对封装结构的长期可靠性造成负面影响。研究表明, 因吸湿引起的界面黏附力降低, 是导致底部填充胶与芯片钝化层之间产生界面分层的主要因素之一^[2], 严重时会成为封装失效的主导机制。此外, 环氧体系中固化后仍残留大量亲水性基团, 在实际应用过程中易受到湿热环境的协同影响, 从而进一步加剧其性能退化问题^[3]。以常见的材料为例, 底部填充材料与BCB (苯并环丁烯) 和PI (聚酰亚胺) 之间的粘附性远比其与 SiO_2 和 Si_3N_4 钝化层之间的粘附性稳定得多。在清洁的 SiO_2 和 Si_3N_4 表面上, 水的接触角为零; 而在清洁的BCB或PI表面上, 水的接触角不为零。这表明水更容易停留在底部填充材料与 SiO_2 或 Si_3N_4 之间的界面, 而不易滞留在与BCB或PI钝化层的界面上^[4]。水在界面的存在会通过三种机制削弱界面结合力: 一是取代底部填充材料与基底之间的氢键; 二是降低界面处的偶极相互作用和色散相互作用; 是通过可能发生的水解反应破坏界面上的

化学键^[5,6]。

因此, 针对湿热环境下底部填充胶材料在服役过程中性能退化的问题, 开展有效的检测与评估具有重要的工程意义。尤其是从微观组织结构和力学性能两个维度出发, 系统分析现有检测手段的适用性和局限性, 对于提升封装可靠性评估水平具有重要参考价值。本文将就目前常用的表征与测试方法进行总结与比较, 以期为后续研究和工程应用提供有益参考。

1 检测手段简述

为系统研究底部填充胶在湿热服役环境中的性能退化行为, 科研与工程实践中发展并应用了多种表征手段, 涵盖材料的吸湿性、力学性能、热机械性能、界面粘附性、化学结构、热稳定性、加工流动特性以及微观结构特征等方面。以下将针对典型的八种性能检测方法进行系统介绍与分析。

2 材料吸水性测试

材料的吸湿行为受其分子结构、极性基团含量和网络交联程度等因素影响。吸水率测试的基本原理是通过监测材料在一定湿度或液态水环境中吸收水分前后的质量变化, 反映其对水分子的亲和能力。在电子封装中, 底部填充胶的吸水行为会显著影响其尺寸稳定性、电绝缘性能及界面可靠性, 因此该测试在湿热性能评估中具有重要意义。

吸湿测试通常采用质量差法进行, 即将样品在干燥条件下称重后, 浸泡于恒温水中特定时间, 再次称重并计算质量变化率。测试过程遵循ASTM D570标准, 选用尺寸为 $60 \times 12 \times 2 \text{ mm}^3$ 的样品, 先在烘箱中干燥至恒重以获得初始质量 W_0 , 随后在 90°C 去离子水中浸泡, 并在预设时间节点取出样品, 迅速擦干表面水分后称量当前质量 W_t 。吸水过程持续至样品质量趋于稳定, 最终质量记为

W_1 。吸水率 M 按如下公式计算:

$$M = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\%$$

通过绘制吸水率随时间变化曲线 ($M-t$), 可进一步探讨材料吸湿速率及饱和行为。吸水性不仅受基体极性基团含量影响, 还与填料类型、界面结合状态及固化程度密切相关, 是材料配方优化的重要依据。

3 三点弯曲测试

三点弯曲测试基于梁力学理论, 通过对一定跨距的梁状试样施加集中载荷, 测量其在弯曲状态下的承载能力及变形行为。该方法不仅反映材料的刚性和抗断裂性能, 也间接揭示其内部结构的完整性与缺陷演变, 适用于评估湿热老化后底部填充胶的力学稳定性。

试验依据ASTM D790标准进行, 采用尺寸为 $50.8 \times 12.7 \times 2.0 \text{mm}^3$ 的条状样品, 在 38.1mm 跨距条件下进行加载。加载头以固定速度向样品中心施加垂直力, 通过位移-载荷曲线获取最大载荷 F 后, 计算弯曲强度 σ_f :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$

其中, L 为跨距, b 为样品宽度, d 为厚度。通过比较样品在老化前后力学参数的变化, 可判断材料的性能退化程度。湿热处理常导致交联结构松弛和界面微裂纹生成, 引起弯曲模量降低、断裂韧性下降。该方法还可作为不同配方底部填充胶耐久性比较的工具, 为其在可靠性设计中的选型提供支持。

4 动态热机械分析 (DMA)

DMA是一种表征高分子材料热-力学响应特性的工具, 将外加动态载荷与温度控制相结合, 通过施加周期性应变并检测材料响应应力, 能揭示材料随温度变化所产生的储能模量 (E')、损耗模量 (E'') 以及阻尼因子 ($\tan\delta$)。测试采用DMA Q800系统, 样品为双悬臂梁结构, 尺寸为 $60 \times 12 \times 2 \text{mm}^2$, 设定测试频率 1Hz , 升温范围为 -20°C 至 200°C , 升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。在测试过程中, 样品被施加小幅周期性载荷, 设备记录其响应信号, 从而绘制模量和阻尼因子的变化曲线。湿热老化通常导致聚合物链段运动能力增强、交联结构破坏, 表现为储能模量下降、 $\tan\delta$ 峰值增强及玻璃化转变温度 (T_g) 降低。

5 芯片剪切强度测试

芯片剪切测试基于界面力学原理, 通过施加切向载荷来评估封装材料与芯片或基板之间的粘接强度, 适用于研究界面结合性能随环境因素变化的行为。芯片剪切强度是衡量底部填充胶与芯片或基板界面粘附性能的关键指标, 广泛应用于封装可靠性评价和材料筛选。测试

通常在DAGE等推力测试平台上进行。试件制备为“芯片-底部填充胶-基板”的三明治结构, 经标准固化及老化处理后进行剪切操作。剪切头以设定速率施加水平载荷, 记录达到破坏所需的最大力值 F_{\max} , 并依据芯片接触面积计算剪切强度 τ :

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A}$$

其中, A 为粘接面积。湿热处理后剪切强度下降, 通常表征界面失效或材料内部结构退化。结合断口形貌分析 (如SEM或光学显微镜观测) 可判别失效类型, 有助于界面结构优化和粘接改性策略的制定。

6 傅里叶变换红外光谱 (FTIR)

FTIR基于不同化学键在红外区域的特征吸收行为, 通过获取材料的红外吸收光谱来推断其分子结构和官能团组成。高分子材料在老化过程中常发生化学键断裂或重组, FTIR可灵敏识别这些结构变化, 对追踪材料降解路径及机理具有重要意义, 适用于研究聚合物在湿热环境下的化学稳定性。测试使用衰减全反射 (ATR) 模式对胶体样品进行扫描, 波数范围为 $4000-500 \text{cm}^{-1}$ 。比较老化前后光谱图的差异, 可观察是否出现如羟基 ($-\text{OH}$)、羧基 ($-\text{COOH}$) 或醚键等新基团, 判断是否存在水解、氧化或交联断裂等降解反应。在实际应用中, FTIR可作为材料筛选与老化机制研究的重要补充手段。

7 热重分析 (TGA)

TGA是一种通过连续升温过程记录材料质量变化的热分析方法。该方法基于材料在不同温度下热解反应中产生的质量损失, 用以表征材料的热稳定性和降解行为。对于底部填充胶, TGA不仅揭示其热分解温度, 还可识别老化引起的化学结构退化程度。测试在氮气气氛中进行, 温度从室温升至 600°C , 升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。通过记录样品质量随温度的变化曲线, 获取初始失重温度、最大失重速率温度及残余质量百分比等参数。老化处理后的样品若在较低温度下开始分解, 或残余质量显著减少, 说明材料结构发生劣化。此外, 结合导数热重 (DTG) 曲线可识别多阶段分解过程, 从而推断降解机理。TGA结果可用于不同配方胶体在极端环境下的热稳定性比较, 为高可靠性封装系统提供基础数据支持。

8 流变性能测试

流变学研究材料在外力作用下的流动与变形行为, 适用于评估底部填充胶的可加工性及其在湿热老化后流动性能的变化。利用旋转流变仪可测量材料在不同剪切速率下的黏度, 揭示其剪切稀化行为、屈服应力及粘弹转换特性。测试采用旋转流变仪, 在升温条件下测量材

料的剪切粘度变化。常用剪切速率范围为 $0.1-100s^{-1}$ ，温度控制在 $25-150^{\circ}C$ 。通过测得的流变曲线可判断其是否具备适合实际封装的施工窗口。

9 扫描电子显微镜 (SEM) 表征

SEM是一种高分辨率成像工具，广泛用于观察材料表面微观结构、裂纹扩展路径及填料分布情况。其工作原理是利用聚焦电子束扫描样品表面，通过二次电子或背散射电子信号形成图像。对底部填充胶而言，SEM可揭示湿热老化导致的界面空洞、剥离、裂纹萌生等结构缺陷，是评估材料结构完整性与失效机理的重要工具。测试中，样品断面经过冷冻脆断处理，喷金后放入扫描电镜观察。可识别填料分布状态、界面空洞、微裂纹等缺陷，分析吸湿引发的界面剥离、填料脱落或基体断裂等现象。结合能谱分析 (EDS)，还能确定特定区域的

元素组成，进一步验证界面迁移、腐蚀或成分变化等问题。SEM分析结果为理解底部填充胶的湿热失效行为提供了微观证据，对材料设计与封装结构优化具有重要指导意义。

综上所述，针对底部填充胶在湿热环境中的性能退化问题，不同的测试手段各有侧重，从宏观到微观、从物理性能到化学结构，形成了多维度、多尺度的表征体系。这些方法在实际研究与工程应用中常需综合运用，以建立底部填充胶性能变化与环境应力作用之间的因果关系，从而为材料配方优化、封装结构设计及可靠性提升提供科学依据。表1给出了上述8种测试手段的总结，从测试原理简介，主要评估指标，适用范围，优势与局限性的角度分别进行陈述。

表1 不同测试方法的对比与总结

序号	检测方法	测试原理	主要指标	适用范围	优势	局限性
1	材料吸水率测试	通过样品质量变化计算水分吸收量	吸水率、吸湿饱和时间	湿热稳定性初步评估	操作简便、结果直观	无法揭示微观结构变化，敏感度受限
2	三点弯曲测试	加载弯曲载荷，测试抗弯强度和模量	弯曲强度、弯曲模量	力学性能退化分析	方法成熟、结果具可比性	仅反映宏观性能，无法明确微观损伤机制
3	动态热机械分析 (DMA)	动态加载下测量粘弹性随温度变化	储能模量、损耗模量、Tg	粘弹行为与热老化研究	可高精度反映Tg和力学响应变化	仪器复杂、测试条件敏感
4	芯片剪切强度测试	测量界面粘接失效所需的剪切载荷	剪切强度、失效模式	封装界面可靠性评估	与实际应用场景相符、直观反映界面性能	受测试参数影响大，重复性需控制
5	热重分析 (TGA)	程序升温下监测材料失重过程	分解温度、残余质量	热稳定性、降解行为分析	灵敏度高、适用于材料对比	无法识别特定官能团变化、与吸湿行为耦合性弱
6	红外光谱分析 (FTIR)	通过光谱吸收识别分子结构变化	官能团特征峰位与强度	化学结构变化识别	能识别特定官能团变化，适用于老化机制初探	仅定性或半定量，空间分辨率有限
7	流变性能测试	旋转剪切下测量黏度变化规律	黏度、流动指数	材料加工与应用适应性评估	能评估流动性能及其老化影响	测试温度控制严格，难以反映实际服役条件
8	扫描电子显微镜 (SEM)	高能电子束扫描样品表面获取微观图像	表面形貌、孔洞、裂纹、失效特征	微观结构与失效分析	空间分辨率高、可视化强	样品制备复杂、需结合其他分析方法理解图像信息

10 结束语与展望

随着微电子封装向高密度、小型化、高可靠性方向持续发展，底部填充胶在封装结构中的性能稳定性与环境适应性显得尤为关键。湿热环境作为电子产品在实际应用中普遍面临的服役条件之一，极易引发底部填充胶的吸湿、界面失效及力学性能退化等问题，从而影响整个封装系统的可靠性与寿命。因此，构建科学、系统的

性能检测与评价手段，对于揭示其退化机理、推动材料优化与工艺改进具有重要意义。

本文系统总结了八种常用于湿热环境下底部填充胶性能表征的实验方法，涵盖从宏观力学性能（如三点弯曲、剪切强度）到微观结构与界面观测（如SEM）、从物理吸湿行为（吸水率测试）到化学结构变化（FTIR）、从热稳定性（TGA）到加工适应性（流变性

测试)的多个维度。这些测试方法各有侧重,能够相互补充,构建起完整的“性能—结构—机制”分析体系,为底部填充胶可靠性评估与材料设计提供了有力支撑。尽管现有检测手段已取得一定研究基础,但从未来封装材料发展的角度出发,仍需在以下几个方面加以深化:

10.1 测试条件的模拟真实性提升:目前多数测试手段采用理想化、单一变量的实验环境,难以完全模拟实际服役中温度、湿度、应力场的耦合作用。未来应加强多因素耦合老化平台的构建,提高测试结果与实际应用的一致性。

10.2 微纳尺度界面研究深化:界面失效仍是湿热退化的核心问题之一,亟需发展原位、高分辨率的表征手段(如原位SEM、AFM力学映射等),以揭示吸湿诱导界面裂纹萌生与扩展的动态过程。

10.3 智能化、高通量检测方法的引入:借助机器学习、图像识别等人工智能技术,可提升故障识别效率与准确性。

10.4 与可靠性建模的协同融合:将实验测试结果与有限元仿真、老化寿命预测模型相结合,建立性能衰减与可靠性寿命之间的定量关系,为工程应用提供更加精准的设计依据。

综上,底部填充胶在湿热环境下的可靠性评价仍是一个具有挑战性和工程价值的研究方向。未来需在实验

表征、理论建模与材料优化三方面协同推进,构建高效、智能、可预测的评价体系,以支撑下一代高性能电子封装技术的持续发展。

参考文献

[1]李智朋.硅烷改性对环氧复合材料性能的影响及其在湿热老化中的应用[D].中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院),2023.DOI:10.27822/d.cnki.gszxj.2023.000147.

[2]文惠东,黄颖卓,林鹏荣,等.陶瓷封装倒装焊器件热学环境可靠性评估[J].半导体技术,2019,44(09):723-727. DOI:10.13290/j.cnki.bdtjs.2019.09.012.

[3]彭小慧.倒装芯片封装中底部填充胶对应力的影响及调控研究[D].深圳大学,2022.DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2022.002574.

[4]李呈龙.底部填充胶粘弹性表征及其在倒装芯片封装中的应用[D].华中科技大学,2022.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.001275.

[5]王骏,赵富贵,樊竝君,等.用于底部填充的低黏环氧树脂胶粘剂的固化性能研究和评价[J].中国胶粘剂,2021,30(09):7-11.DOI:10.13416/j.ca.2021.09.003.

[6]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(01):47-54.