

底部填充胶在倒装焊中的应用

汤春江 李舒琳 刘俊夫 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：倒装焊技术作为高密度电子封装的核心工艺，其可靠性高度依赖底部填充胶的性能优化。本文系统分析了底部填充胶的材料特性与作用机理，重点探讨了其通过热膨胀系数（CTE）匹配和界面应力调控提升焊点可靠性的机制；结合工艺优化案例，总结了预烘烤、等离子清洗、点胶轨迹设计等对降低空洞率的关键作用；通过失效案例分析，揭示了湿热分层、热疲劳开裂等典型失效模式的根因及改进策略。然而，材料性能矛盾、工艺兼容性及长期可靠性仍是当前主要挑战。未来需通过多学科协同创新，进一步推动底部填充技术的发展。

关键词：底部填充胶；化学成分；应力调控机制；工艺优化；失效模式

引言

随着电子产品向小型化、高性能化方向发展，倒装芯片焊接技术（Flip-Chip）因其高密度互连、短信号传输路径等优势，已成为先进封装领域的核心工艺。由于芯片与基板材料的热膨胀特性差异显著（芯片 $\approx 2.6\text{ppm}/^\circ\text{C}$ vs. 基板 $\approx 18\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ），在温度循环或功率波动工况下，焊点界面易产生集中应力，导致疲劳裂纹甚至早期失效，这一问题制约高可靠性设备（如汽车电子、航空航天器件）发展的主要瓶颈。

为缓解热机械应力，底部填充胶（Underfill）被引入倒装焊工艺中。其通过填充芯片与基板间的间隙，形成均匀的应力缓冲层，从而显著提升微焊点的抗疲劳寿命。研究表明，优化后的底部填充胶可使焊点在 $-40\sim 125^\circ\text{C}$ 温度循环下的寿命提高3~5倍。然而，传统底部填充胶仍面临多重技术瓶颈：在材料层面，环氧树脂基填充胶的固化收缩率高，易导致界面分层；在工艺层面，毛细流动型填充胶对点胶精度和基板清洁度要求苛刻，易产生空洞缺陷；在可靠性层面，湿热环境下填充胶吸湿后易膨胀，加速焊点失效。

本文旨在系统探讨底部填充胶在倒装焊微焊点中的应用机理与技术进展。首先，分析底部填充胶的化学成分及其通过CTE匹配降低应力的机制；其次，结合文献案例研究点胶参数、固化条件等工艺优化的影响；进而，总结典型失效模式的根因与改进策略；最后，对底部填充胶的未来发展方向提出展望。通过多维度解析，本文希望为倒装焊可靠性的提升提供理论参考与实践指导。

1 底部填充胶的材料特性与作用机理

1.1 化学成分与配方设计

底部填充胶（Underfill）是一种专为倒装焊（Flip-Chip）封装设计的高分子复合材料，其核心功能是填

充芯片（Die）与基板（Substrate）之间的间隙，并通过固化形成稳定的力学支撑结构，以降低微焊点（Microbump）的应力集中。典型的底部填充胶主要由树脂基体、无机填料、固化剂及助剂组成，如表1所示。

表1 底部填充胶典型配方示例

成分	比例（wt%）	功能
环氧树脂	25-35	基体粘接与固化
二氧化硅填料	50-65	降低CTE，增强刚度
酸酐固化剂	5-10	促进交联反应
硅烷偶联剂	0.5-2	提升填料-树脂界面粘结性
其他助剂	1-3	调节流动性与韧性

1.1.1 树脂基体

底部填充胶的树脂基体通常采用环氧树脂（Epoxy Resin）或丙烯酸酯（Acrylate），其中环氧树脂因其优异的粘接强度、耐热性（ $T_g > 120^\circ\text{C}$ ）及化学稳定性，成为主流选择。例如，双酚A型环氧树脂（DGEBA）通过胺类或酸酐类固化剂交联后，可形成三维网络结构，提供高机械强度。近年来，为适应低温固化需求（ $< 100^\circ\text{C}$ ），部分研究采用改性环氧树脂（如脂环族环氧树脂）或UV/热双固化体系。

1.1.2 无机填料

为调节热膨胀系数（CTE）并提高刚性，底部填充胶需添加二氧化硅（ SiO_2 ）等无机填料，其含量通常占配方的40-70wt%。填料的粒径（ $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ）和形貌（球形/角形）会影响流动性。比如，纳米 SiO_2 （粒径 $< 100\text{nm}$ ）可减少沉降问题，但可能增加粘度；而微米级 SiO_2 （ $1\sim 5\mu\text{m}$ ）成本较低，但需搭配偶联剂（如硅烷KH-550）改善界面结合。部分高端配方会引入氮化铝（AlN）或金刚石粉以进一步提升导热性（ $> 1\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ）。

1.1.3 固化剂与助剂

固化剂主要为酸酐类（如甲基四氢苯酐），适用于高温固化（150-180℃），对比之下潜伏性固化剂（如双氰胺）可实现低温储存、高温反应。助剂则包括消泡剂（减少点胶空洞）、润湿剂（改善基板铺展性）及增韧剂（如橡胶微粒，抑制脆性开裂）。

1.2 热-机械性能与应力调控机制

底部填充胶的热-机械性能及其应力调控机制是决定倒装焊封装可靠性的核心因素，也是目前众多高校和研究所以于提升倒装焊结构可靠性的研究方向之一。

1.2.1 热力学匹配机制与CTE协同设计

倒装焊结构的失效根源在于多层材料间的热膨胀失配。在温度循环中，芯片（以Si为例，CTE ≈ 2.6ppm/℃）、焊点（以SAC305为例，CTE ≈ 22ppm/℃）和有机基板（以FR4为例，CTE ≈ 18ppm/℃）的膨胀收缩差异会导致界面剪切应力累积。底部填充胶通过以下多尺度机制实现应力缓冲：（1）CTE梯度设计：通过调控SiO₂填料含量（40-70wt%），可将填充胶CTE从纯树脂的60-80ppm/℃降至20-30ppm/℃，形成介于芯片与基板之间的过渡层。研究表明，当填充胶CTE ≈ 25ppm/℃时，焊点界面应力可降低55%。（2）动态CTE补偿效应：填充胶的CTE具有温度依赖性：在玻璃化转变温度（T_g）以下呈线性膨胀（α₁），T_g以上则急剧升高（α₂）。通过选择高T_g树脂（> 130℃）可抑制高温段的热失配。

1.2.2 动态力学响应与能量耗散

填充胶的粘弹性行为对冲击和振动工况下的应力释放至关重要。从频率-温度叠加效应的角度来讲，典型填充胶在1Hz频率下的储能模量（E'）随温度变化曲线可分为三个阶段：玻璃态区（< T_g）：E' ≈ 8-10GPa，提供刚性支撑；转变区（T_g附近）：E'快速下降至1-2GPa，吸收变形能；橡胶态区（> T_g）：E' ≈ 0.5-1GPa，允许适度形变。通过引入聚氨酯改性环氧树脂，可在玻璃态保持高模量（9GPa）的同时，在转变区实现30%更高的损耗因子（tanδ）。

1.2.3 界面应力调控的多物理场耦合

近年来，有学者通过多尺度表征技术揭示了界面应力的演化规律。使用微拉曼光谱对微区应力映射的结果表明，某倒装焊结构在未填充时焊点边缘应力集中系数达4.2，而填充后降至1.8。此外，同步辐射X射线衍射发现，填充胶可使芯片翘曲量从15μm减少至5μm以下。而在湿热耦合效应下，如在85℃/85%RH条件下，吸湿膨胀（湿膨胀系数 ≈ 140ppm/%RH）会导致界面附加应力。采用疏水化处理的SiO₂（接触角 > 110°）可使吸湿率降低至0.3wt%。

2 底部填充工艺优化研究

底部填充工艺的优化对倒装焊封装可靠性至关重要。近年来，研究者们从材料选择、工艺参数调控、缺陷抑制等多个角度展开研究，以提高填充质量并降低空洞率，总结如表2所示。

表2 工艺优化总结

优化方向	关键措施	效果
材料适配性	预烘烤、等离子清洗、排泡	空洞率 ≤ 5%
点胶参数	U形轨迹、针头选型	电性能衰减 ≤ 2dB
基板表面处理	微波等离子清洗	流动时间缩短30%
空洞抑制	真空排泡、助焊剂清洗	综合空洞率 < 5%

底部填充胶的流动性、固化特性需与封装结构相匹配。例如，冯春苗等针对硅通孔（TSV）转接板的倒装芯片叠层组装需求，对国产底部填充胶（U21308）进行了系统性评估^[1]。通过理论计算与仿真分析，结合可靠性测试，验证了该材料在TSV结构中的适用性。研究发现，优化后的工艺参数（如填充前烘烤、等离子清洗、排泡处理等）可将空洞率控制在 ≤ 5%，显著提升了封装良率。其中，预烘烤处理能够去除基板湿气并减少气泡形成，等离子清洗能够增强基板表面能并改善填充胶浸润性，排泡工艺能够通过真空或离心处理消除胶内微气泡。

点胶方式直接影响填充胶的流动均匀性及空洞分布。兰元飞等以相控阵天线接收子阵的硅基芯片为研究对象，系统考察了点胶针头选型、清洗条件及分配模式

对填充质量的影响^[2]。实验表明，点胶针头内径需与焊点间距匹配，避免胶量不足或溢出；基板清洗（如超声清洗+等离子处理）可减少助焊剂残留，降低界面缺陷；U形点胶轨迹相较于I形，能缩短流动时间，提高填充效率。最终优化方案使硅基芯片的边缘胶层无开裂，填充区总空洞率 < 10%（单个空洞率 < 2%），且电性能衰减（增益下降）控制在 ≤ 2dB，满足高精度射频器件的需求。

基板表面能对填充胶的毛细流动具有显著影响。翟培卓等通过对比接触角及流动时间，研究了微波等离子清洗对底部填充胶流动性的促进作用^[3]。结果表明，等离子处理使基板接触角从75°降至25°，大幅提升浸润性；U形点胶轨迹因路径更长，能加速胶体铺展，缩短填充时

间30%以上。该研究为高密度互连封装提供了工艺优化依据,尤其适用于陶瓷基板等低表面能材料。

空洞是底部填充工艺的主要缺陷之一。陈志健等从孔洞类型和工艺对策两方面进行了系统分析^[4]。随机分散性孔洞:因胶内裹挟空气形成,可通过真空排泡或离心脱气消除;空气内包型孔洞:由基板湿气挥发导致,需预烘烤(120℃/2h)去除水分;助焊剂残留型孔洞:因清洗不彻底引发,优化助焊剂用量及清洗参数(如溶剂类型、超声功率)是关键。通过综合调控点胶参数、固化条件及基板预处理,可将空洞率降至行业可接受水平(<5%)。

3 失效案例分析

底部填充胶在倒装焊封装中的应用虽然能显著提升可靠性,但在极端环境(如高温高湿、温度循环等)下仍可能发生失效。

湿热环境下的界面分层是底部填充胶失效的主要原因之一。赵文中等研究了不同厚度Parylene(聚对二甲苯)涂覆层对倒装焊器件耐湿性能的影响。通过高温高湿加速试验(HAST)和超声扫描分析发现:未涂覆Parylene的器件焊点在HAST中迅速失效,剪切强度下降超过40%;涂覆X μm Parylene的样品表现出最佳性能,焊点无失效,且剪切力提升25%;过厚涂覆(3X μm)反而导致内部分层,尤其在焊点疏松区与密集区交界处,因应力集中引发早期失效,在失效机理上,Parylene涂层可阻隔水汽渗透,但过厚涂层会引入额外界面应力,反而促进分层,如图1所示。

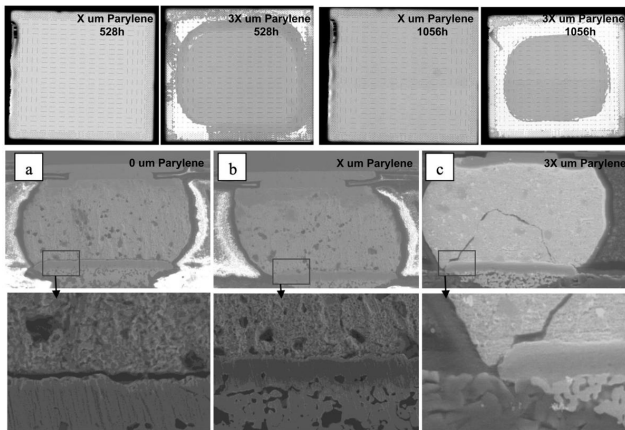


图1 HAST试验中器件的超声扫描图像,及1056小时HAST后失效焊点横截面照片^[5]

至于热疲劳失效,文惠东等对比了有无底部填充胶的陶瓷封装倒装焊器件在温度循环(-55~125℃)中的表现^[6]。发现未填充样品在200次循环后焊点出现疲劳裂纹,裂纹起源于焊点与UBM界面,并沿金属间化合物层扩展;而填充胶保护样品在3000次循环后仍无失效,填

胶通过CTE匹配降低了焊点应变幅值。有限元分析显示,填充胶使焊点最大应变能密度降低60%,显著延缓裂纹萌生。同一研究中还对比了底部填充胶在HAST和高温存储中的表现。结果发现未填充器件因湿气渗透导致焊点腐蚀,792小时内全部失效;而填充胶样品无失效,其湿气扩散系数<1×10⁻⁶mm²/s,如图2所示。

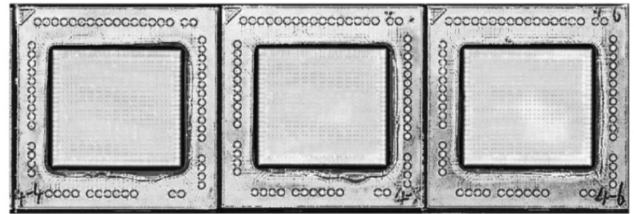


图2 792小时HAST试验后器件的超声扫描图像

4 底部填充胶在倒装焊接应用中的挑战

尽管底部填充胶在提升倒装焊可靠性方面具有重要作用,但在实际应用过程中仍面临诸多技术挑战,主要集中在材料性能极限、工艺兼容性、长期可靠性及新兴需求适应等方面。

4.1 材料性能的固有矛盾:底部填充胶需同时满足多项性能指标,但这些要求往往相互制约。首先是低CTE与高流动性,降低CTE需增加无机填料(如SiO₂),但高填料含量会显著提高黏度,导致毛细填充困难,易产生空洞缺陷。其次是高模量与高韧性,为有效分散应力,填充胶需具备高弹性模量,但这可能牺牲断裂韧性,在机械冲击下引发脆性开裂。最后是快速固化与低收缩率,缩短固化时间可提高生产效率,但快速固化常伴随体积收缩率增加,导致界面分层风险。

4.2 工艺兼容性问题:随着封装结构复杂化,底部填充工艺面临新的适配挑战。首先是窄间距微焊点的填充难题,当焊点间距<50μm时,传统毛细填充难以完全渗透,需开发非流动型(No-Flow)或模塑型(Molded Underfill)工艺,但这些技术对材料黏度和固化特性要求更为苛刻。其次是与低k介电层的兼容性,先进芯片采用低k介质作为钝化层,而填充胶的固化收缩应力可能造成低k层微裂纹,需优化界面粘接材料。最后是多步组装工艺的匹配,在3D封装中,底部填充需与TSV、混合键合等工艺协同,温度与化学兼容性问题突出。

4.3 长期可靠性与失效机制:在严苛工况下,填充胶的退化行为可能加速焊点失效。首先是湿热老化导致的性能衰减:吸湿后填充胶体积膨胀并生成水解产物,使界面粘接强度下降50%以上。其次是热循环中的疲劳累积,CTE不匹配会引发周期性应力,导致填料-树脂界面脱粘,进而形成微裂纹网络并扩展至焊点。最后是电

化学迁移风险,含离子杂质的填充胶在电场下可能引发电迁移,造成短路失效,这点尤其适用于高密度互连的2.5D/3D封装。

结束语

本文系统研究了底部填充胶在倒装焊中的应用机理、工艺优化及失效分析。研究表明,通过精确调控热膨胀系数和优化动态力学性能,底部填充胶可显著降低焊点应力集中。环氧树脂基体与二氧化硅填料的协同设计使填充胶兼具高刚度和韧性,而新型智能材料的引入进一步提升了应力调控能力。在工艺优化方面,预烘烤和等离子清洗可有效改善填充质量,U形点胶轨迹使空洞率控制在5%以内。针对特殊应用场景,优化工艺可确保电性能衰减 $\leq 2\text{dB}$ 。失效分析表明,Parylene涂覆可显著提升耐湿性,底部填充胶使焊点温度循环寿命从200次提升至3000次以上。

参考文献

- [1]冯春苗,韩文静,汤姝莉,等.基于国产胶的底部填充工艺优化及可靠性验证[J].电子工艺技术,2024,45(05):43-47.
- [2]兰元飞,焦庆,姬峰,等.硅基芯片低空洞率底部填充工艺技术研究[J].科学技术创新,2024,(06):91-94.
- [3]翟培卓,洪根深,王印权,等.等离子清洗及点胶轨迹对底部填充胶流动性的影响[J].半导体技术,2023,48(03):268-271.
- [4]陈志健,高娜燕,罗佳明.倒装工艺中底部填充胶孔洞的分析与改善[J].电子产品可靠性与环境试验,2020,38(04):94-97.
- [5]赵文中.宇航用非气密性倒装焊器件耐湿技术研究[D].中国航天科技集团公司第一研究院,2018.
- [6]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.