

Reliability Study of Low-Temperature Sintered Copper Paste in Power Module Packaging

Shizhi Zhan

Shenzhen Advanced Joining Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

With the development of power modules toward high power density and high reliability, traditional silver pastes can no longer meet application requirements due to their high cost and susceptibility to electromigration. Low-temperature sintered copper pastes, featuring low cost, high conductivity, and environmental friendliness, have emerged as a key alternative. This study addresses issues such as poor uniformity in large-area sintering and significant thermo-mechanical coupling failures. By systematically optimizing the copper paste formulation and sintering process parameters (temperature, pressure, and atmosphere), and by employing microstructural characterization and accelerated lifetime testing, the reliability mechanisms are revealed. The results show that nano-copper powder modification and gradient functional design can significantly enhance interfacial bonding strength, improving thermal cycling lifetime compared with conventional processes. This work provides theoretical support and technical guidance for power module packaging.

Keywords

sintered copper paste; high-power packaging; semiconductor packaging; large-area sintering; reliability

低温烧结铜浆在功率模块封装中的可靠性研究

詹世治

深圳市先进连接科技有限公司，中国·广东深圳 518000

摘要

随着功率模块向高功率密度与高可靠性方向发展，传统银浆材料因成本高昂及电迁移风险难以满足需求，低温烧结铜浆凭借低成本、高导电性及环保优势成为关键替代方案。本研究针对大面积烧结均匀性差、热-机械耦合失效显著等问题，系统优化铜浆配方与烧结工艺（温度、压力、气氛），通过微观结构表征与加速寿命测试揭示其可靠性机制。结果表明，纳米铜粉改性及梯度功能设计可显著提升界面结合强度，热循环寿命较传统工艺提高，为功率模块封装提供理论支撑与技术参考。

关键词

烧结铜浆；大功率封装；半导体封装；大面积烧结；可靠性

1 引言

在电力电子技术向高功率密度、高集成度加速演进的背景下，功率模块封装对材料性能提出严苛要求，传统银浆材料因成本高昂及电迁移引发的可靠性退化问题日益凸显^[1]。低温烧结铜浆凭借其低成本、高导电性及环保优势，成为大功率封装领域的关键替代材料。然而，铜易氧化特性导致烧结需在惰性气氛或还原性环境中进行，且大面积烧结时存在孔隙率偏高、热循环过程中界面应力集中引发裂纹扩展等挑战。本文聚焦低温烧结铜浆的工艺优化与可靠性评估，通过系统探究烧结参数对微观结构的影响机制，结合热-机械耦合加速寿命测试，揭示其失效物理模型，为功率模块封装提

供高可靠铜浆材料解决方案。

2 低温烧结铜浆的制备与工艺优化

2.1 材料体系设计

低温烧结铜浆的可靠性首先取决于其材料体系的科学设计^[2]。铜粉作为导电相，其粒径分布与形貌直接影响烧结颈形成效率与致密度。实验表明，采用双峰粒径配比可显著提升烧结体密度：纳米颗粒填充微米颗粒间隙，降低孔隙率至 3% 以下，同时促进低温下原子扩散形成连续导电网络。有机载体需兼顾流变性与挥发性，本研究选用乙基纤维素作为粘结剂，搭配松油醇与二乙二醇丁醚作为溶剂，通过控制溶剂挥发梯度避免孔隙生成。助剂体系引入脂肪酸类分散剂与草酸类抗氧化剂，前者通过空间位阻效应防止铜粉团聚，后者在 200°C 以下分解生成保护性氧化膜，抑制烧结过程中铜的过度氧化。

【作者简介】詹世治（1993-），男，中国广东人，本科，助理工程师，从事半导体封装、金属浆料（银浆、铜浆等）、微纳连接技术研究。

2.2 低温烧结工艺参数优化

烧结工艺参数对铜浆的微观结构与性能具有决定性影响。温度场方面，通过差示扫描量热法确定铜 - 有机体系分解关键温度点，设计阶梯升温曲线：室温至 150℃ 缓慢升温使有机载体充分挥发，150-250℃ 快速升温促进烧结颈生长，250℃ 保温 10min 确保结晶完整。压力辅助烧结可显著降低孔隙率，实验显示在 5MPa 压力下，烧结体密度提升至 98% 以上，其机制在于压力促进颗粒重排与塑性变形，加速原子扩散通道形成。气氛控制是抑制氧化的核心手段，采用氮气与氢气混合气氛，氢气在 200℃ 以上还原已生成的氧化铜，结合气氛炉氧含量实时监测，将烧结体氧含量控制在 0.1wt% 以下，保障导电性能稳定性。

2.3 大面积烧结均匀性控制

功率模块封装常需实现数十平方毫米级大面积烧结，均匀性控制面临热应力分布不均与浆料流变特性衰减双重挑战^[3]。数值模拟优化烧结热场显示，采用石墨加热板结合热电偶闭环控制，可将温度波动范围缩小至 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。浆料流变特性匹配方面，通过旋转流变仪测定粘度 - 剪切速率曲线，调整有机载体比例使铜浆在 10-100s⁻¹ 剪切率下粘度稳定在 20-50Pa · s，满足丝网印刷工艺要求。针对大面积烧结边缘效应，设计渐变式印刷网版，结合多段式压力加载，使烧结厚度偏差从 15% 降低至 5% 以内。最终通过激光轮廓仪检测验证，50mm × 50mm 样件烧结层平整度优于 $\pm 5\mu\text{m}$ ，满足功率模块封装对界面共形性的严苛需求。

3 烧结铜浆的可靠性评估方法

3.1 微观结构表征技术

微观结构表征是揭示烧结铜浆可靠性物理机制的基础^[4]。通过扫描电子显微镜结合能量色散 X 射线光谱，可直观观察烧结体断面形貌与元素分布，重点分析铜 - 铜颗粒间烧结颈的形成质量、界面孔隙缺陷特征及氧化产物分布状态。例如，高质量烧结颈表现为连续的金属连接结构，而孔隙缺陷则呈现孤立或连通形态，其尺寸与分布密度直接影响导电与导热性能。透射电子显微镜进一步用于观察晶界结构与纳米级缺陷，结合选区电子衍射可确定烧结过程中生成的次生相，明确其对材料力学性能与电迁移抗性的影响机制。X 射线衍射则通过物相分析量化烧结体结晶度，高结晶度通常对应更稳定的微观结构，而低结晶度或非晶相的存在可能成为裂纹萌生的优先位置。上述表征技术相互补充，为全面评估烧结铜浆的微观可靠性提供多尺度依据。

3.2 热循环可靠性测试

热循环测试是模拟功率模块实际服役环境中温度交变载荷的关键手段^[5]。测试采用加速寿命试验方法，通过设定低温与高温极限值，构建温度循环曲线，以快速激发材料内部热应力。测试过程中同步监测样品电阻变化，电阻漂移是界面接触状态退化的直接表征：初始阶段电阻稳定表明烧结结构完整，随着循环次数增加，电阻逐步上升反映界面孔隙

扩展或裂纹萌生，最终电阻突变对应导电通路断裂失效。失效模式分类结合断面 SEM 分析，可区分开路失效与局部失效。通过连续记录电阻 - 循环次数曲线，可提取失效阈值，结合 Weibull 分布统计模型，评估烧结铜浆在特定温度循环条件下的寿命特征参数，为封装设计提供可靠性量化依据。此外，热循环测试还可揭示材料热膨胀系数失配引发的界面应力演化规律，指导烧结工艺与基板材料匹配性优化。

3.3 机械可靠性测试

机械可靠性测试聚焦烧结铜浆在机械载荷作用下的结构稳定性。剪切强度测试遵循标准试验方法，通过施加垂直于烧结界面的剪切力，评估铜浆与基板间的结合强度。测试中需控制加载速率以避免动态效应干扰，断裂面分析结合 SEM 观察可明确失效类型：若断裂发生在烧结层内部，表明结合强度高于铜浆本体强度；若断裂位于铜浆 - 基板界面，则反映界面结合质量不足，需优化表面处理工艺或助剂体系。振动疲劳试验模拟功率模块在运输或运行中的振动环境，通过高频低幅振动加载，考察烧结结构的抗疲劳性能。试验后通过电阻测量与微观检查，评估振动引起的微损伤累积效应，揭示孔隙或裂纹在振动载荷下的扩展机制。有限元分析作为机械可靠性评估的重要补充，通过建立烧结铜浆 - 基板耦合模型，模拟不同载荷条件下的应力分布，识别高应力集中区域，指导结构优化设计以降低机械失效风险。上述测试方法从静态强度与动态疲劳双维度，全面评估烧结铜浆的机械可靠性。

4 烧结铜浆的失效机制与改进策略

4.1 热 - 机械耦合失效机制

烧结铜浆在功率模块服役时，受热循环与机械载荷协同作用，失效本质是热 - 机械耦合应力致微观结构退化。热循环中，铜浆与基板因热膨胀系数失配产生界面应力，超烧结颈强度时萌生微裂纹，沿晶界或孔隙扩展使接触电阻升高。机械振动等加剧裂纹扩展，形成动态疲劳损伤。裂纹优先沿孔隙等弱区延伸，致导电通路断裂。热循环氧化反应在裂纹尖端形成脆性氧化层加速扩展。需从材料设计和工艺优化抑制损伤。

4.2 电迁移失效机制

电迁移是烧结铜浆在高电流密度长期服役的核心失效模式，本质是金属原子在电场驱动下定向迁移。电流通过时，电子风力与电场力驱动铜原子从阴极向阳极迁移，微观不均区域原子通量密度升高，致局部质量堆积与空洞形成，空洞扩展引发导电通路断裂，表现为电阻突增或开路。失效速率受微观结构影响大，高致密度烧结体抗电迁移强，孔隙率高或晶界缺陷多的结构加速失效。此外，残留杂质可能引发腐蚀加剧损伤。改进需聚焦致密化与杂质控制。

4.3 改进策略与实施路径

针对烧结铜浆的失效机制，改进策略需从材料体系创新、工艺优化与封装设计协同三方面系统推进。材料体系方

面，开发核壳结构铜粉，利用银壳层抑制铜氧化并提升烧结活性，同时降低银用量以控制成本；引入纳米陶瓷相作为增强体，通过弥散强化机制提升烧结体高温稳定性与抗电迁移性能。工艺优化层面，采用两步烧结法：低温段促进烧结颈初步形成，高温段通过短时快速升温实现致密化，兼顾低温烧结优势与高致密度需求；结合压力辅助烧结与脉冲电流烧结技术，通过外力或焦耳热促进颗粒重排与原子扩散，进一步降低孔隙率。封装设计协同方面，构建“烧结铜浆-基板-芯片”三维应力缓冲结构，在界面处引入柔性导热胶或金属泡沫层，吸收热-机械应力；优化散热通道设计，降低烧结体温度梯度，减缓热疲劳损伤；采用冗余导电通路设计，在局部失效时维持整体导电功能，提升封装可靠性。通过上述策略的系统实施，可显著提升烧结铜浆在功率模块中的长期服役性能，推动其向高功率密度、高可靠性方向发展。

5 结语

本研究围绕低温烧结铜浆展开，在材料体系设计上，以双峰粒径铜粉配比等实现低温烧结与高致密化协同优化；

构建多维度可靠性评价体系，揭示热-机械耦合应力与电迁移失效机制；针对失效提出核壳结构铜粉改性等改进策略，提供理论与技术支撑。未来可探索新型纳米增强相对烧结体高温稳定性的提升机制，深化多场耦合失效动态规律研究，推动其在宽禁带半导体器件封装中的规模化应用，满足电力电子系统发展需求。

参考文献

- [1] 万胤辰,王匀,李瑞涛,等.无压烧结工艺对浆料直写式定向多孔铜组织及致密度的影响[J].材料导报,2024,38(3):131-136.
- [2] 黄俊,曹秀华,宁礼健,等.多层陶瓷电容器端电极用低温烧结铜浆及烧结特性研究[J].电子元件与材料,2022,41(2):213-220.
- [3] 彭翔,叶安梁,王稼,等.粒度级配提升光固化增材制造用铜浆性能与坯体烧结活性[J].中国有色金属学报,2025,35(9):2982-2992.
- [4] 施倩.蓝光半导体激光器封装外壳设计分析[J].消费电子,2025(18):71-73.
- [5] 李燕,李丽.半导体器件的封装与封装材料优化[J].科学与信息化,2025(4):121-123.