

基于铜粉的导热导电硅脂制备及性能研究

范晋锋^{1*}, 王执乾¹, 李炳章¹, 李 静¹, 侯 震¹, 云广徽²

¹中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

²太原国际机场有限责任公司, 山西 太原

收稿日期: 2024年12月3日; 录用日期: 2025年1月14日; 发布日期: 2025年1月26日

摘 要

以球形铜粉、氧化锌为功能填料, 然后以二甲基硅油为基体, 制备导热导电硅脂, 并研究了铜粉与氧化锌不同复配比例对其性能的影响。结果表明, 以球形铜粉为主填料, 可构建高效导热、导电网络, 同时引入一定量的小粒径氧化锌, 能优化导热网络, 进一步增强导热性能, 并提升体系的稳定性。当铜粉与氧化锌比例为2:1时, 所制备的导热导电硅脂具有良好的综合性能, 导热系数达到 $2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 体积电阻率为 $1.32 \Omega\cdot\text{cm}$, 黏度为 $287 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 且油离度为0.2%。

关键词

导热, 导电, 硅脂, 铜粉, 氧化锌

Preparation and Properties of Thermal and Electrical Conductive Silicone Grease Based on Copper Powder

Jinfeng Fan^{1*}, Zhiqian Wang¹, Bingzhang Li¹, Jing Li¹, Zhen Hou¹, Guanghui Yun²

¹133th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

²Taiyuan International Airport Co. Ltd., Taiyuan Shanxi

Received: Dec. 3rd, 2024; accepted: Jan. 14th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

Thermal and electrical conductive silicone grease was prepared by using spherical copper powder and ZnO as functional fillers and dimethyl silicone oil as matrix. The effect on properties of silicone grease by different proportions of copper powder and ZnO was studied. The result showed that the spherical copper powder as the main filler could build an efficient thermal and electrical conductive

*通讯作者。

文章引用: 范晋锋, 王执乾, 李炳章, 李静, 侯震, 云广徽. 基于铜粉的导热导电硅脂制备及性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(1): 60-65. DOI: 10.12677/ms.2025.151008

network. Then adding a certain amount of small particle size ZnO could promote thermal conduction, further enhancing the stability of silicone grease. When the proportion of copper powder to ZnO was 2:1, the silicone grease reached good comprehensive properties, the thermal conductivity was 2.5 W/m·K, the volume resistivity was 1.32 $\Omega\cdot\text{cm}$, the viscosity was 287 Pa·s and the oil dispersion was 0.2%.

Keywords

Thermal Conduction, Electrical Conduction, Silicone Grease, Copper Powder, ZnO

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年电子技术迅猛发展, 电子设备的尺寸越来越小, 集成度越来越高, 热功耗越来越大。在热设计过程中, 为了提高散热效率, 有效控制发热部位的温度, 通常会采用热界面材料作为传热介质, 降低电子元件的工作温度, 保证设备稳定运行。同时由于某些电子设备内部结构越来越紧凑, 设计空间受限, 无法直接对元件做接地处理, 所面临的静电放电情况也越来越严峻, 处理不当则会影响设备正常运行[1]-[3]。这就要求热界面材料不仅需要具备优异的导热性能, 同时能够拥有良好的导电性能。

通常热界面材料类型主要包括导热垫片、导热硅脂、导热凝胶、导热胶等[4][5]。其中导热硅脂一般由导热填料和基础油组成, 常选用陶瓷粉体、金属粉体、碳材料等无机填料作为导热填料[6]。以氧化铝、氮化硼、氧化锌等陶瓷粉体为主体填料时, 制备的硅脂具有优异的导热性和良好的绝缘性[7][8]; 而以银、液态金属等金属或石墨、碳纳米管等碳材料为主体填料时, 制备的硅脂则具备优异的导热性和良好的导电性[9], 可满足不同应用场景使用需求。

因此, 针对某些电子设备散热及防静电应用场景, 本研究选用了球形铜粉为导热导电功能填料, 采用氧化锌为导热填料优化导热网络, 然后以二甲基硅油为基体, 开展导热导电硅脂制备, 并进行性能研究。

2. 主要原材料及仪器设备

2.1. 原材料

二甲基硅油: 黏度 500 cps;

球形铜粉: 中位粒径 20 μm , 纯度 $\geq 99.6\%$, 松装密度 4 g/cm³;

氧化锌: 粒径 3 μm , 纯度 $\geq 99.9\%$, 比表面积 20~30 m²/g;

偶联剂: γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550), 纯度 99%。

2.2. 仪器设备

直流恒速搅拌器(DC-1); 双行星搅拌机(HY-HHJ0.5L); 真空烘箱(DZF-6020); 界面材料热阻及热传导系数数量测仪(LW-9389); 宽带电阻表(HG1942); 旋转黏度计(SNB-2); 钢网分油测定器。

3. 实验部分

3.1. 粉体的处理

首先分别将铜粉和氧化锌粉体置于烧杯中, 并放入烘箱进行干燥, 设置温度 80℃, 干燥时间 6 h, 取

出后封口，冷却至室温，备用。

然后按一定比例称取铜粉与 KH550 放入烧杯中，并加入 100 mL 无水乙醇，使用搅拌器在室温下搅拌 2 h。表面处理，将烧杯放入 80℃ 烘箱，观察直至烧杯内无明显的无水乙醇溶剂。最后将铜粉均匀铺在烤盘中，80℃ 下加热至完全除去无水乙醇，未防止加热时间过长，导致铜粉氧化，加热半小时后每 10 min 进行称重，至重量不发生变化即可。

3.2. 导热导电硅脂的制备

本实验中导热导电硅脂的制备使用双行星搅拌机进行混合，混合过程中先将小粒径的颗粒与基体混合，然后再加入大粒径颗粒进行混合。

按比例称取铜粉、氧化锌粉体和二甲基硅油，先将氧化锌粉体与二甲基硅油置于双行星搅拌机中，在室温下以 50 r/min 的速度搅拌 10 min，然后抽真空，以 300 r/min 的速度搅拌 30 min，期间分三次加入铜粉，制备导热导电硅脂样品。为制备导热和导电综合性能较优的导热导电硅脂，选取了三种不同配比通过上述方法进行试样制备，具体配比如表 1 所示。

Table 1. Preparation scheme of silicone grease

表 1. 导电导热硅脂配比

原材料名称	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
铜粉	90 份	75 份	60 份	45 份
氧化锌	0	15 份	30 份	45 份
二甲基硅油	10 份	10 份	10 份	10 份

3.3. 测试

3.3.1. 导热系数及热阻测试

导热系数测试采用稳态热流法进行，利用界面材料热阻及热传导系数测量仪进行。

3.3.2. 体积电阻率测试

体积电阻率测试采用宽带电阻表进行，测试过程使用电极片和限位框对硅脂的体积电阻进行了测量，并计算出体积电阻率。

3.3.3. 黏度测试

黏度测试采用旋转黏度计法进行。测试前试样经过真空脱泡处理，并在室温下进行测试。

3.3.4. 油离度

油离度测试使用钢网分油测定器进行。测试条件：温度 200℃，时间 48 h。

4. 结果与讨论

4.1. 导热系数表征

物质的传热特性是由内部微观粒子的运动和碰撞来实现能量的传递，从而表现出宏观的导热能力。本研究中，导热导电硅脂主要由铜粉、氧化锌和二甲基硅油组成，二甲基硅油由于本证导热性能较低，所提供的传热介质的作用相对较小，主要为功能填料提供载体，而铜粉及氧化锌具有较高的本证导热性能，是硅脂中主要的热量传递介质，其中铜粉为金属材料，氧化锌为介电材料，因此导热导电硅脂的导热性能主要依靠自由电子运动以及晶格振动实现。

基于相同的功能粉体添加总量, 采用相同的方法制备了四种不同配比的导热导电硅脂, 并进行了导热系数测试, 测试结果如下图 1 所示。从测试结果可以看出, 当填充量为 90w% 时, 四种不同配比的导热导电硅脂都具有良好的导热性能, 随着体系中铜粉与氧化锌配比的逐渐变化, 导热系数呈现先升高后下降的趋势。当填充粉体只有铜粉时, 虽然铜粉本身导热性能优异, 可以形成有效的导热链, 但由于粒径较大, 体系内部微观界面接触热阻较大, 未能表现出最佳的导热性能; 当填充粉体由铜粉与氧化锌复配时, 较大粒径的铜粉作为主填料提供了主体导热链, 小粒径的氧化锌则填充了铜粉之间的空隙, 提供了更多的接触点, 增加了更多的传热路径, 因此铜粉与氧化锌复配后, 导热性能有所提升。而当氧化锌含量过高, 一方面由于氧化锌体积占比过高, 会影响铜粉构建的主体导热链, 另一方面由于粒径小, 大量的氧化锌会形成过多的微观热界面, 导致内部热阻增大。因此随着小粒径氧化锌含量增加, 呈现出导热性能先增大后下降的趋势, 其中当铜粉与氧化锌比例为 2 比 1 时, 所测的导热系数较优, 达到 2.5 W/m·K。

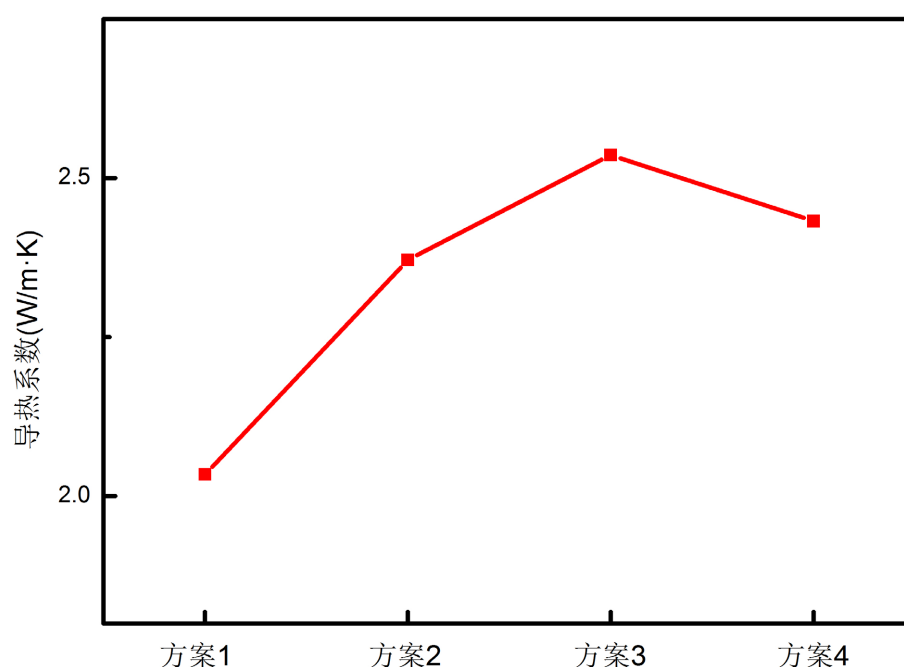


Figure 1. Thermal conductive of silicone grease

图 1. 不同配比导热导电硅脂的导热系数

4.2. 体积电阻率表征

体积电阻率是表征导电性最直观的指标。渗流理论认为, 当基体中导电颗粒含量较低时, 无法形成有效导电网络, 体积电阻率较高; 当导电颗粒填充量达到一定阈值时, 材料的体积电阻率会急剧下降, 形成良好的导电网络。因此, 铜粉颗粒的填充量以及氧化锌的复配量会直接影响整体的导电性, 图 2 为不同的粉体配比下导热导电硅脂的体积电阻率测试结果。

由图 2 可知, 体系中只有铜粉时, 体积电阻率最低, 随着氧化锌颗粒的增加, 导电性呈下降趋势。当铜粉在体系中保持较高含量时, 虽然氧化锌含量逐渐升高, 由于粒径较小, 铜粉颗粒仍可以相互接触, 构建有效的导电网络, 表现出较低的体积电阻率; 由于氧化锌导电性能差, 当氧化锌含量过高时, 会分布于铜粉颗粒之间, 阻断导电网络, 导致体系的导电性快速下降。同时结合不同配比导热导电硅脂所表现的导热性能, 选定实验方案 2 及方案 3 的体系进一步进行性能表征。

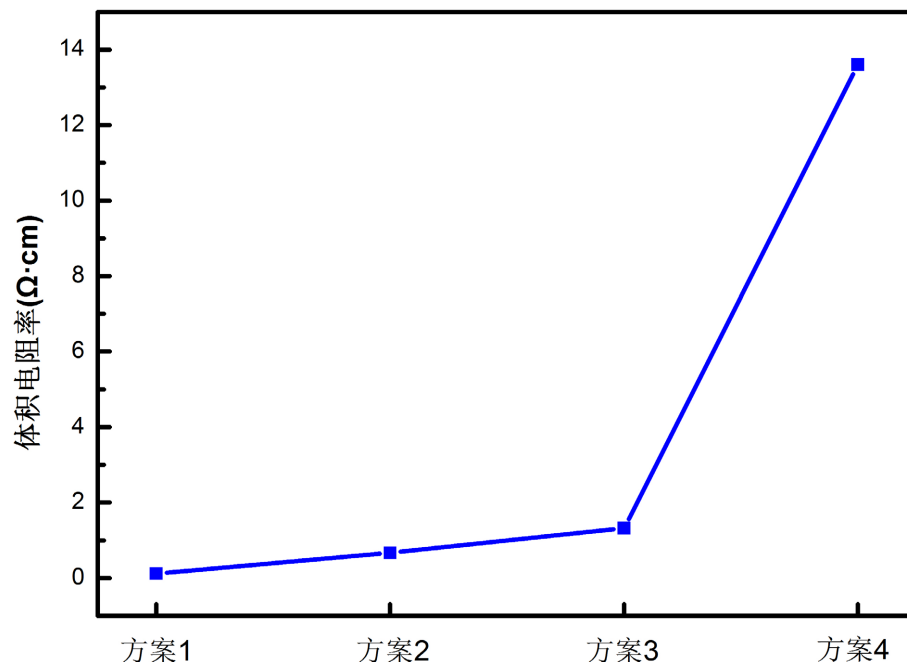


Figure 2. Electrical conductive of silicone grease
图 2. 不同配比导热导电硅脂的体积电阻率

4.3. 黏度表征

黏度是影响硅脂使用性能的重要指标，具有较低黏度的硅脂可以采用滚轴、刮刀等方法涂覆使用，而高黏度的硅脂可使用模板、丝网印刷的方式使用。实验方案 2 及方案 3 的黏度测试结果如表 2 所示。

由测试结果分析可知，当氧化锌含量较高时，体系具有较高的黏度。这是由于相比铜粉颗粒，氧化锌密度较小，同质量下体积占比高，且所使用氧化锌粒径小，具有较大的比表面积，因此氧化锌含量高的体系，黏度更大，更适用于模板、丝网印刷使用工艺。

Table 2. Viscosity of silicone grease
表 2. 导热导电硅脂的黏度

序号	配比	黏度(25℃)
1	方案 2	245 Pa·s
2	方案 3	287 Pa·s

Table 3. Oil dispersion of silicone grease
表 3. 导热导电硅脂的油离度

序号	配比	油离度
1	方案 2	0.7%
2	方案 3	0.2%

4.4. 油离度表征

油离度直接反映了导热导电硅脂体系的稳定性，测试结果如表 3 所示，其中氧化锌含量较高的体系，油离度更低。由于铜粉颗粒较大，且密度大，当体系中铜粉含量较高时，铜粉由于自身重力作用，易发

生沉降现象,造成硅油基体溢出,导致油离度变大;当氧化锌含量提高后,由于其粒径小、密度小,粉体比表面积大,吸油值高,会更有效地束缚硅油基体,有效减缓铜粉颗粒和氧化锌颗粒的沉降速率,降低体系的油离度,提高硅脂的稳定性。

5. 结语

通过研究发现,铜粉具有优异的导热、导电特性,以其为主体功能填料可以构建高效的导热、导热网络;氧化锌在一定填充量下可有效填充于铜粉颗粒间隙,起到优化导热网络的作用,进一步提升导热性能。基于铜粉与氧化锌颗粒配比优化,可以制备出具有导热性能优异、导电性能良好、黏度合适且油离度低的导热导电硅脂,可用于高功率电子设备中发热元器件的热设计中,起到传热及电连接作用,有效降低设备的热负荷及静电损伤,满足高功率器件在复杂热环境下的热管理需求。

参考文献

- [1] 杨士亮, 张欣卉, 姬国庆, 等. 微电子器件静电损伤实验[J]. 半导体技术, 2008(9): 70-71+78.
- [2] 李柯逊. 浅谈集成电路静电损害及防护措施[J]. 中国科技信息, 2014(7): 227-228.
- [3] 吕红杰, 汪张超. 集成电路芯片静电损伤的失效分析研究[J]. 混合微电子技术, 1995(5): 28-29+32.
- [4] 韩蒙蒙, 张阔, 李敬. 有机硅基热界面材料的研究进展[J]. 有机硅材料, 2023, 37(6): 73-78.
- [5] 杨宇军, 李逵, 石钰林, 等. 微电子封装热界面材料研究综述[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(1): 64-74.
- [6] 李金洪, 吴林健. 导热硅脂研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(11): 66, 68.
- [7] 陈冉冉, 郭成, 陈砚朋, 等. 低迁移绝缘导热硅脂界面材料的制备及其性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20176-20182, 20189.
- [8] 林菊香. 超低热阻触变型导热硅脂的制备与性能研究[J]. 有机硅材料, 2023, 37(6): 28-35.
- [9] 席翔. 氮化铝/银/石墨导热硅脂的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.