

导热填料对电子封装用环氧树脂复合材料的影响

邓稳¹, 陈良峰¹, 胡斌¹, 梁飞², 张彦熙²

(1.湖北龙腾电子科技股份有限公司,湖北孝感 432800; 2.华中科技大学集成电路学院,武汉 430074)

摘要:随着电子产业向高密度、微型化发展,热管理成为制约电子器件性能的核心瓶颈。尽管环氧树脂(EP)与多种基材兼容性好,但其热导率仅有 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,无法满足散热需求。因此,筛选合适导热填料对EP材料进行改性研究成为关键。本研究选取二氧化硅(SiO_2)、氮化铝(AlN)和六方氮化硼(h-BN)三种填料,制备30%~50%(体积分数)掺杂的EP基复合材料。采用热导率仪和阻抗分析仪等设备,系统探究填料种类与掺量对EP材料热传导效率、介电响应特征等的作用规律。试验数据表明,与未填充任何填料的纯EP相比,所有填充型复合材料的热导率均有提升。其中,50%(体积分数)h-BN填充EP试样的热导率达 $4.846\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,50% AlN 填充试样的热导率为 $2.790\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,50% SiO_2 填充试样的热导率为 $0.98\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。另一方面,导热填料的引入会导致复合材料在低频区间的介电损耗呈现上升趋势。当填料填充体积分数达到50%时,填充h-BN的EP复合材料介电损耗最高,达到0.25,填充 SiO_2 的复合材料介电损耗为0.048,而填充 AlN 的复合材料介电损耗表现最优,仅为0.03。研究证实,科学筛选导热填料可有效强化EP基复合材料的导热能力,同时也需要考虑对介电性能带来的影响。该研究为高功率密度电子器件热管理难题提供切实可行的解决方案,在电子装备、航空航天等领域具有重要应用价值。

关键词:复合材料;热导率;环氧树脂;改性;电子器件;电子封装

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0210-06

Effects of thermal conductive fillers on epoxy resin composites for electronic packaging

DENG Wen¹, CHEN Liangfeng¹, HU Bin¹, LIANG Fei², ZHANG Yanxi²

(1. Hubei Longteng Electronic Technology Co., Ltd., Xiaogan 432800, China;

2. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of the electronic industry towards high density and miniaturisation, thermal management has become the core bottleneck restricting the performance of electronic devices. Although epoxy resin (EP) has good compatibility with various substrates, its thermal conductivity is only $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, which cannot meet the heat dissipation requirements. Therefore, it is the key to screen the suitable thermal conductive fillers to modify EP materials. In this study, silica (SiO_2), aluminum nitride (AlN) and hexagonal boron nitride (h-BN) were selected as fillers to prepare EP-based composites with 30% to 50% (volume fraction) doping content. The effects of filler's type and content on thermal conductivity and dielectric response characteristics of EP materials were systematically investigated by means of thermal conductivity meter and impedance analyzer. The experimental data shows that the thermal conductivity of all filled composites is improved compared to that of pure EP resin without any filler. Among them, the thermal conductivity of 50vol.% h-BN filled EP sample is $4.846\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, the thermal conductivity of 50vol.% AlN filled sample is $2.790\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and the thermal conductivity of 50vol.% SiO_2 filled sample is $0.98\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. On the other hand, the introduction of thermally conductive fillers will lead to an upward trend in the dielectric loss of the composites in the low frequency range. When the filler content reaches 50vol.%, the dielectric loss of EP composites filled with h-BN is the highest, reaching 0.25, the dielectric loss of EP composites filled with SiO_2 is 0.048, and the dielectric loss of EP composites filled with AlN is the best, only 0.03. Studies have confirmed that scientific screening of thermally conductive fillers can effectively enhance the thermal conductivity of EP-based

基金项目: 湖北省中央引导地方科技发展专项-区域协同创新项目(2025EIA036)

通信作者: 梁飞,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为微波材料和器件的开发

收稿日期: 2026-02-05

引用格式: 邓稳,陈良峰,胡斌,等.导热填料对电子封装用环氧树脂复合材料的影响[J].工程塑料应用,2026,54(4):210-215.

DENG Wen, CHEN Liangfeng, HU Bin, et al. Effects of thermal conductive fillers on epoxy resin composites for electronic packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 210-215.

composites, and it is also necessary to consider the impact on dielectric properties. This research provides a practical and feasible solution to the thermal management challenges of high power density electronic devices, and has important application value in the fields of electronic equipment, aerospace, and so on.

Keywords: composite; thermal conductivity; epoxy resin; modification; electronic device; electronic packaging

近年来,电子产业正朝着高集成度、微型化方向飞速发展,热管理已成为阻碍电子器件性能提升与稳定运行的核心瓶颈^[1-4]。散热效率低下,不仅会影响设备的正常运行,还可能导致设备组件的永久性损害,因此,集成芯片封装技术的重要性日益凸显。封装材料需要同时达到高热导率、抗氧化能力、耐腐蚀性、易于加工以及优良绝缘性等关键指标。

因为环氧树脂(EP)与多种基板材料具备良好的兼容性而被广泛应用^[5-8],然而,纯EP的热导率只有 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,这无法满足现代电子设备对封装材料的散热需求。复合材料的热导率主要受填料含量、本征导热能力、颗粒尺寸及微观形态等因素制约^[9]。为提升EP的导热性能,研究人员已开展大量研究工作,主要形成两种技术路径:一是通过构建高结晶度、高取向度的聚合物结构以提高本征热导率^[10-12],该方法需精准调控聚合过程中的结晶度与取向度,工艺复杂且成本较高,难以应用于工业化大规模生产;二是向聚合物基体中填充高热导率填料(如碳基材料^[13]、金属材料^[14]及陶瓷材料^[15]),此方法不仅工艺简便、成本可控,还能兼顾材料的绝缘性与韧性,已在工业生产中广泛应用^[16-17]。本文采用单一填料填充模式,选取二氧化硅(SiO_2)、氮化铝(AlN)和六方氮化硼(h-BN)作为导热功能填料,使用 $1 \mu\text{m}$ 粒径填料,这样利于将不同填料填充复合材料的性能进行对比。选用 SiO_2 的原因在于其热导率高于EP,且具有优良的绝缘特性及与硅基板的良好相容性;选用 AlN 与 h-BN 则主要基于其优异的本征导热效能。通常情况下,材料最终的导热效果与填料自身的热导率呈正相关关系。本文通过制备填充不同含量填料的EP基复合材料,对其X射线衍射(XRD)特征图谱、微观结构形貌、介电特性、导电性能及导热性能开展了系统的测试与分析工作。研究结果显示,复合材料热导率的变化规律与填料自身的本征热导率呈现出一致性,具体表现为 $\text{h-BN} > \text{AlN} > \text{SiO}_2$ 。具体数据方面, SiO_2 填充型复合材料的热导率为 $0.98 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, AlN 填充型复合材料的热导率达到 $2.790 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而 h-BN 填充型复合材料的热导率

则高达 $4.846 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;与纯EP相比,上述三种复合材料的热导率分别实现了390%、1 295%和2 323%的提升,材料的散热能力得到了显著改善。本文系统比较了三种常见导热填料(SiO_2 、 AlN 、 h-BN)在相同粒径($1 \mu\text{m}$)和体积分数(30%~50%)下对EP复合材料导热与介电性能的影响,为不同应用场景的填料选择提供实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SiO_2 :广东源磊粉体有限公司;

AlN :zkyn-03-47329,北京中科言诺新材料科技有限公司;

h-BN :CG005-CG015,苏州纳朴材料科技有限公司;

丙酮:分析纯,国药化学试剂有限公司;

双酚A型EP:广东同宇新材料有限公司;

改性双酚A型EP:分析纯,广州市伟创高新材料科技有限公司;

二氰二胺:化学纯,国药试剂化学有限公司;

N,N -二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,国药试剂化学有限公司。

1.2 仪器及设备

流延机:MS-ZN320,厦门茂森自动化设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:HBGH-9000,天津市泰斯特仪器有限公司;

电炉: SX2-2.5-10,武汉电炉有限公司;

X射线衍射(XRD)仪: XRD-7000,日本Shimadzu公司;

热导率仪: LFA467,德国耐驰公司;

扫描电子显微镜(SEM): Nova Nano SEM-450,荷兰FEI公司;

阻抗分析仪: Wayne Kerr 6500B,英国稳科公司。

1.3 试样制备

选取一只洁净的专用填料罐置于分析天平上,首先精准称取设定用量的双酚A型EP,再按照EP质量4%~6%的比例精确量取固化剂二氰二胺。接

着加入相当于二氰二胺质量10倍的DMF溶剂,待固化剂完全溶解后,按顺序添加定量的增韧剂与填料,同时加入适量丙酮以调节体系的黏度。另外准备一只专用填料罐,向其中注入一定体积的去离子水,确保两只填料罐的质量保持一致。

将上述两只填料罐一同置于真空搅拌机中,设定1500 r/min的搅拌转速,持续搅拌5 min。搅拌程序结束后,取出盛有浆料的料罐,将浆料全部转移至流延设备中。提前在流延机的玻璃板表面铺设离型膜,待调试好复合膜的预设厚度参数后,启动设备进行流延成型操作。成型后,将带有浆料的离型膜移送至烘箱中进行烘干处理,烘干完毕后再转移至电炉内完成固化反应,最终获得固化复合膜测试样品。

1.4 测试与表征

晶体结构分析:采用XRD仪开展测试,扫描范围设定为 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$,扫描速度为 $5^{\circ}/\text{min}$,步长 0.02° 。

热导率测试:在 25°C 环境下测定试样的热扩散系数,通过排水法获取试样密度,借助TG-DSC综合热分析仪测得比热容,依据公式 $k=\alpha\rho_m C_p$,计算热导率 k (其中 α 为热扩散系数, ρ_m 为密度, C_p 为比热容)。

微观形貌分析:膜状试样直接放置于样品台,块状试样经液氮淬冷断裂后取其断面置于样品台;由于试样导电性较差,观测前需对测试表面开展喷金处理。

介电性能测试:性能测试的频率区间设定为 $100\text{ Hz}\sim 10\text{ MHz}$,测试环境维持在室温;试样制备过程中,先在复合材料表面均匀涂抹低温银浆,随后置于电炉中以 150°C 保温40 min进行烧结,完成电极制备后开展后续性能测试。

2 结果与讨论

2.1 晶格结构分析

选取适量复合材料膜样品放置于样品台上,对其进行XRD测试,所获三种复合材料的XRD特征谱线如图1所示。无定形 SiO_2 微粉填充复合材料仅在 $2\theta=20^{\circ}$ 处出现宽化弥散峰,这是无定形结构的典型特征;对于 AlN 和 h-BN 填充复合材料,其XRD谱图中除各自清晰的晶体衍射峰外,在 $2\theta=20^{\circ}$ 附近也出现明显的宽化峰,该现象源于无定形EP基体的存在。

2.2 微观形貌分析

图2为不同填料含量的复合材料膜样品表面

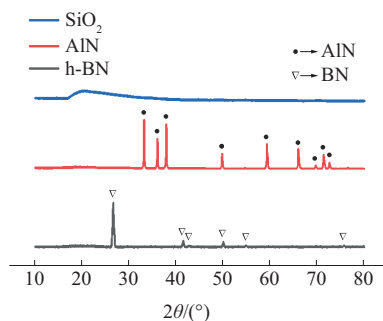


图1 EP基复合材料的XRD谱图

Fig. 1 XRD spectra of EP composites

SEM图。该组图像的排列规则为:从左至右分别对应 SiO_2 、 AlN 、 h-BN 三种填料填充的样品,从上至下则依次对应30%、35%、40%、45%、50%的填料体积分数。在上述不同填料含量的复合材料体系中,当填料添加体积分数为30%时,填料颗粒可在EP基体中实现均匀分散的状态。随着体积分数增加至50%,由于EP用量相对不足,填料颗粒之间直接接触并形成连续的导热网络,该结构对提升复合材料热导率起到关键作用。同时,填料比例升高导致EP占比降低,复合膜试样表面平整度下降、孔隙数量增多,可能对EP复合材料的力学性能产生不利影响。在50%填充量条件下, AlN 填充复合材料表面最为平整,说明 AlN 引入的缺陷最少,材料致密度更高。

2.3 热导率分析

图3为不同填料体积分数(30%~50%)时EP复合材料薄膜的热导率测试结果。可见,所有复合材料的热导率均随填料含量增加而上升,并在50%体积分数时达到最大值,这主要是因为填料本征热导率均高于EP基体。在相同填充含量下,复合材料热导率与填料本征热导率密切相关,整体呈现 $\text{h-BN}>\text{AlN}>\text{SiO}_2$ 的规律。具体来看, SiO_2 填充型复合材料的热导率为 $0.98\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, AlN 填充型复合材料的热导率为 $2.790\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, h-BN 填充型复合材料的热导率则达到 $4.846\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。以纯EP的热导率 $[0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 为参照基准,上述三种填充型复合材料的热导率分别实现了390%、1295%和2323%的提升。结合图2的SEM图像分析可知,随着填料含量增加,颗粒由孤立分散状态逐步转变为相互接触,进而构建出连续贯通的导热网络,促使热流的传递路径从填料低含量阶段的“无机相(填料)-有机相(EP)-无机相(填料)”间接传导模式,转变为填料高含量状态下“无机相(填料)-无机相(填料)”的直接传

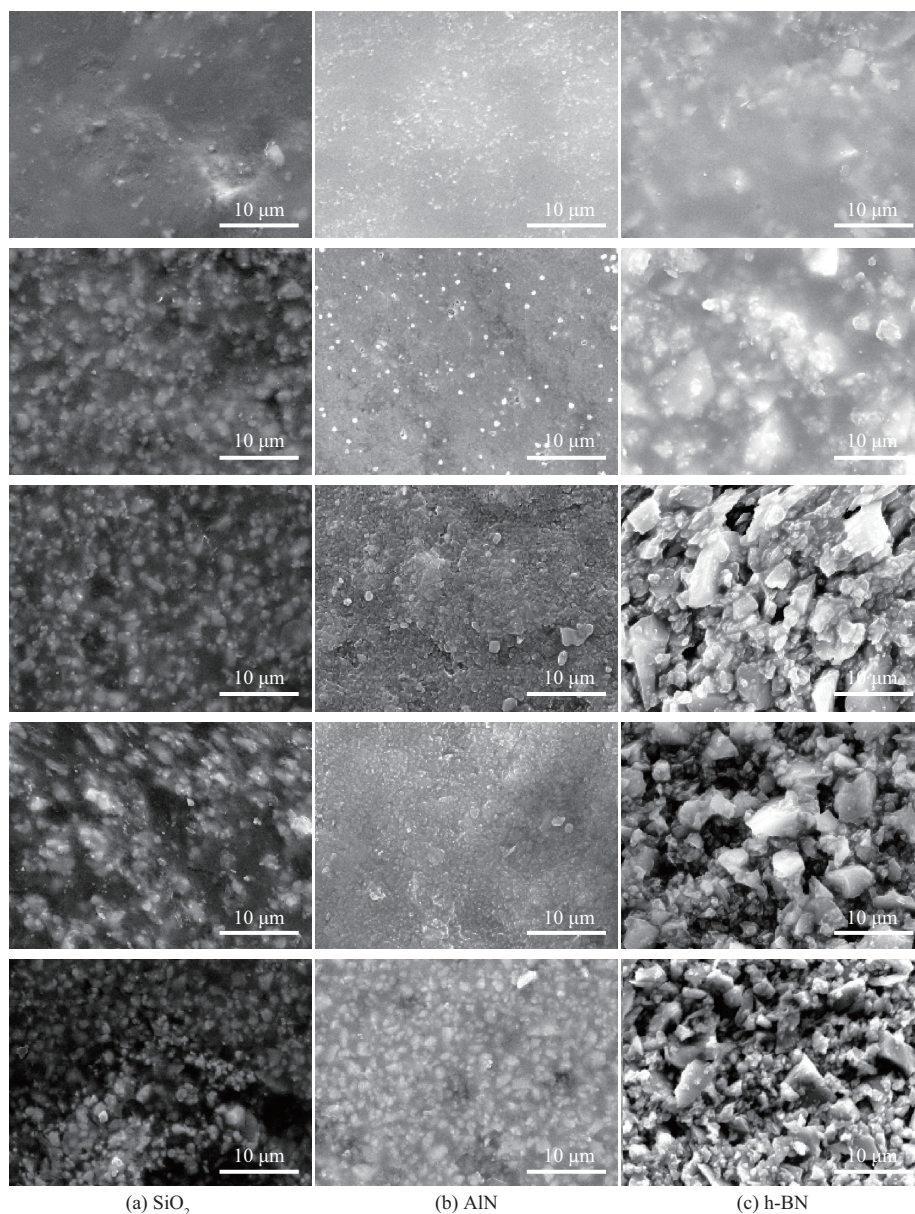


图2 EP复合材料的SEM图

Fig. 2 SEM images of EP composites

递形式,大幅减少了热传输过程中需要跨越的有机-无机界面,使界面热阻在体系总热阻中的占比显著降低,进而实现复合材料热导率的提升。

2.4 介电性能分析

图4展示了三种复合材料介电性能与频率的关联规律。总体来看,三种不同填料填充的复合材料,其介电常数均呈现出随填料添加量增加而逐渐升高的变化趋势。这一现象是因为无机填料被引入复合材料体系后,会在材料内部形成非均匀相的介质界面。在交流电场作用下产生界面极化现象,导致复合材料在低频区域的介电常数升高;随着频率升高,该极化现象逐渐弛豫,介电常数随之下降。

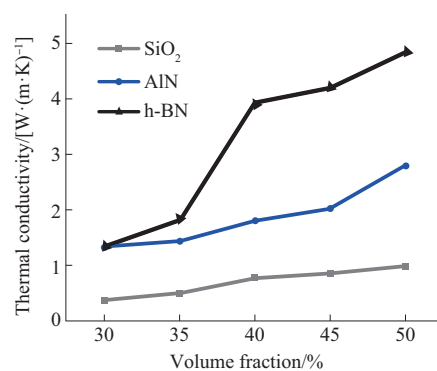


图3 不同填料体积分数时(30%~50%)EP基复合材料的热导率

Fig. 3 Thermal conductivity of EP composites with different filler volume fraction(30%~50%)

不同复合材料的介电损耗特性存在差异。 SiO_2 填充复合材料在整个测试频段内的介电损耗均较低(<0.05 , 量级为 10^{-2}), 其低频段(100 Hz~10 kHz)复合材料的介电损耗随填料含量增加先下降后上升, 主要是缺陷增多导致致密度下降; 高频段(10 kHz~10 MHz), 复合材料的介电损耗呈现先升后降的变化特征, 本质是高频下基体偶极子极化占据主导, 其损耗特性遵循松弛极化的基本规律。相比

之下, AlN 填充复合材料在低频区域的损耗更低(<0.04), 表明其引入的界面缺陷更少, 材料致密度更高; 而 h-BN 填充复合材料在低频区域的损耗最高(量级为 10^{-1}), 反映出其引入的缺陷最多, 材料致密度最低。三种填料填充复合材料在高频段均遵循相似的松弛极化损耗特性, 损耗均呈现先上升后下降的趋势。

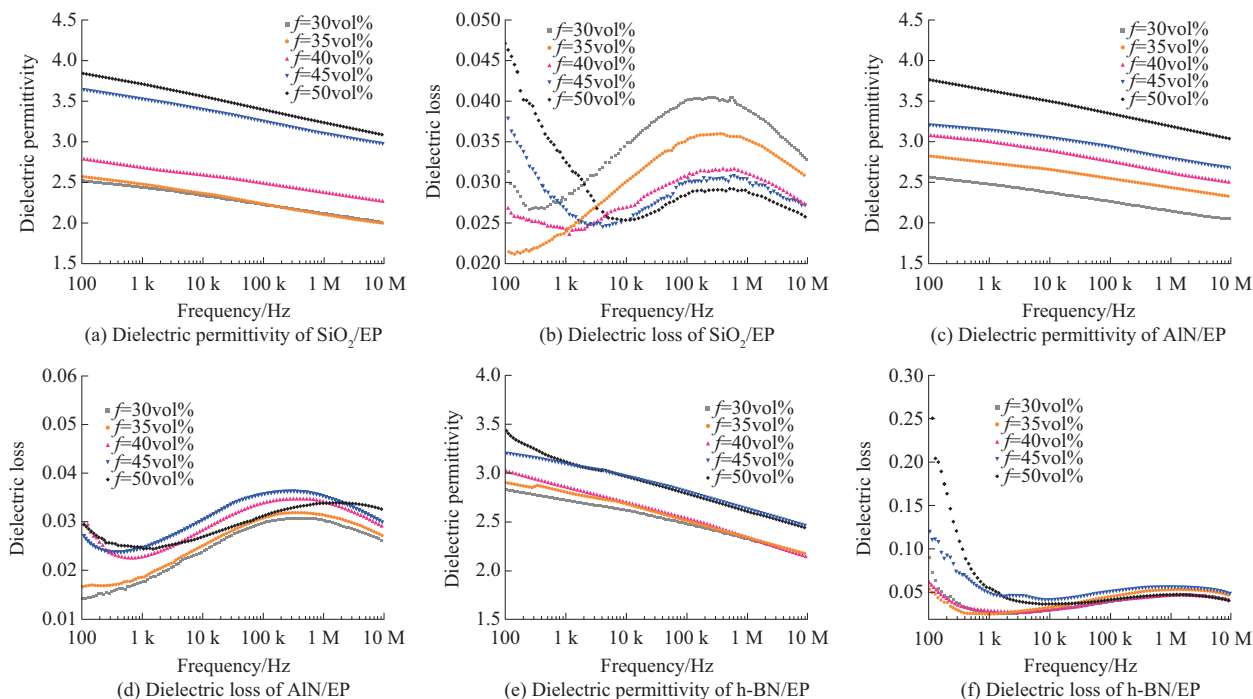


图4 EP复合材料的介电性能与频率的关系

Fig. 4 Relationship between dielectric properties and frequency of EP composites

2.5 电导率分析

三种两相复合材料的电导率随频率的变化关系, 如图5所示。在低频区域, 电导率随着填料含量增加而基本呈降低趋势, 其中填充体积分数为50%时下降最为明显, 这主要是由于EP基体比例减少导致。在三种填料中, h-BN 复合材料的电导率下降幅度最大, 其原因在于 h-BN 在树脂基体中引入了更多缺陷, 该现象与图2的SEM结果一致。此结论与前文分析一致, 即三种填料对基体缺陷的影响程度为: $\text{h-BN} > \text{SiO}_2 > \text{AlN}$ 。高频区域下, 所有复合材料的电导率最终基本趋于一致。

本文采用粒径均为 $1 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 、 AlN 和 h-BN 作为填料, 三者形貌相近但晶体结构与本征性质有所不同, 导致复合材料性能分化显著。 SiO_2 为非晶态, 热导率低但界面结合好, 故介电损耗低。 AlN 为晶体结构, 热导率较高且界面相容性优, 综合性能

最佳。 h-BN 虽层内热导出色, 但界面结合差, 致使介电损耗偏高。因此, h-BN 适于高导热场景, AlN 兼顾导热与介电, SiO_2 则适用于绝缘要求高的场合。

3 结论

(1) 制备了填充不同含量 SiO_2 、 AlN 和 h-BN 的EP基复合材料, 系统研究了填料类型以及其含量对EP复合材料热导率的影响。

(2) 实验结果表明, 复合材料热导率大小与填料的热导率大小呈正相关关系。由于填充材料的热导率大小依次为 $\text{h-BN} > \text{AlN} > \text{SiO}_2$, 当 h-BN 的填充体积分数达到50%时, 制备的EP复合材料热导率达到 $4.846 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的最大值; 而在相同的填充体积分数下, AlN 与 SiO_2 填充型复合材料的热导率则分别为 $2.790 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 与 $0.98 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(3) 在实际应用中, 填料的选择需综合考虑热导率、成本及功能需求。填充 h-BN 材料的复合材料

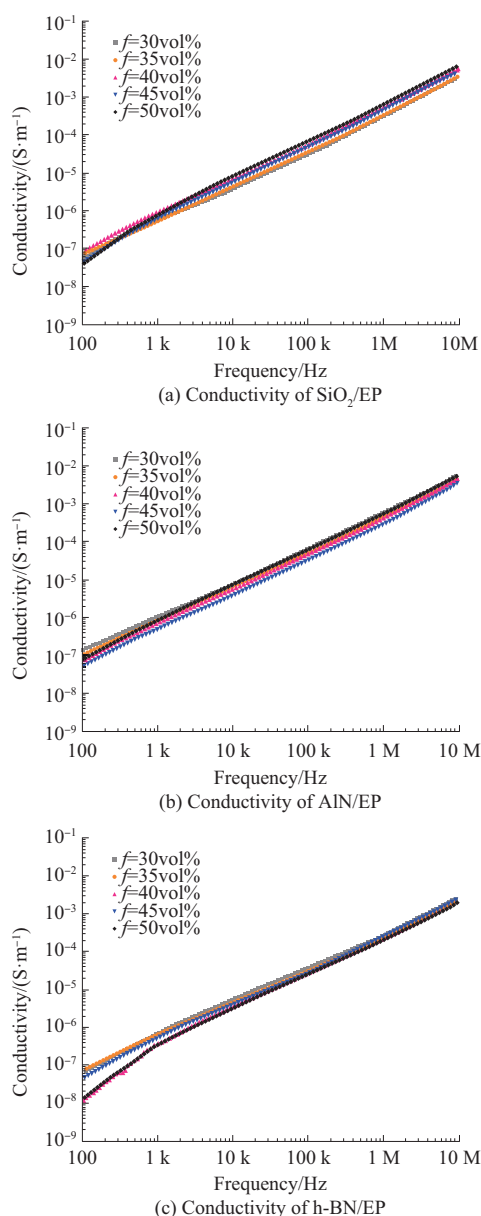


图5 EP复合材料的电导率与频率的关系
Fig. 5 Relationship between conductivity and frequency of EP composites

尽管其热导率最高,但是成本较高,一般适用于对散热性能要求极高的高端电子器件或功率模块。 SiO_2 价格低廉,并且具有良好绝缘性,与硅基板相容性较好,适用于电子封装以及绝缘散热领域。填充AlN材料的复合材料在保持较高热导率的同时具有较低的介电损耗,适用于高频通信设备、微波组件等对介电性能要求严格的情况。本文的研究为特定应用场景下导热填料选择提供了多种可行方案。

参考文献

- [1] LIM T, YOO J, PARK H, et al. Integrating boron nitride nanotubes into functionalized boron nitride/epoxy composites enhances thermal conductivity and other properties[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(16):9 477–9 487.
- [2] VU M C, CHOI W K, LEE S G, et al. High thermal conductivity enhancement of polymer composites with vertically aligned silicon carbide sheet scaffolds[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(20):23 388–23 398.
- [3] LONG H N, LIAO W L, LIU R, et al. Significantly improve the thermal conductivity and dielectric performance of epoxy composite by introducing boron nitride and POSS[J]. Nanomaterials, 2024, 14(2). DOI:10.3390/nano14020205.
- [4] YAO T, ZHANG C Y, CHEN K, et al. Hydroxyl-group decreased dielectric loss coupled with 3D-BN network enhanced high thermal conductivity epoxy composite for high voltage-high frequency conditions[J]. Composites Science and Technology, 2023, 234. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.109934.
- [5] LIN Z H, SUN Z J, FU W B, et al. Thermally conductive and electrically insulative alumina/epoxy composites for advanced electronic packaging applications: A comprehensive review of filler morphologies and surface modifications[J]. Materials Today, 2025, 86:393–413.
- [6] LV R C, GUO H C, KANG L, et al. Thermally conductive and electrically insulating epoxy composites filled with network-like alumina *in situ* coated graphene[J]. Nanomaterials, 2023, 13(15). DOI:10.3390/nano13152243.
- [7] 甘顺昌, 曾亮, 蒋庆庚, 等. 高韧性环氧树脂的制备及在复合材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1):44–49.
GAN Shunchang, ZENG Liang, JIANG Qinggeng, et al. Preparation and application in composites of high toughness epoxy resin [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1):44–49.
- [8] 文湘隆, 廖思凡, 陈凯, 等. 环氧树脂/玻璃纤维/石墨烯复合材料的电磁吸波性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3):126–131.
WEN Xianglong, LIAO Sifan, CHEN Kai, et al. Electromagnetic absorption performance of epoxy resin/glass fiber/graphene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 126–131.
- [9] WANG Z F, WU Z J, WENG L, et al. A roadmap review of thermally conductive polymer composites: Critical factors, progress, and prospects[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(36). DOI:10.1002/adfm.202301549.
- [10] YUAN S J, PENG Z Q, RONG M Z, et al. Enhancement of intrinsic thermal conductivity of liquid crystalline epoxy through the strategy of interlocked polymer networks[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2022, 6(9):1 137–1 149.
- [11] LI Y, LIU C, ZHOU W Y, et al. Microscopic ordered structure compactness and intrinsic thermal conductivity improvement of dispersed liquid crystal films of flexible epoxy-thiol polymers[J]. Materials Today Communications, 2021, 29. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102792.