

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.024

多填料填充高导热PTFE覆铜板的制备与性能

高枢健,冯春明,武聪,乔韵豪

(中国电子科技集团公司第四十六研究所,天津 300220)

摘要:在高频高功率电子设备领域,覆铜板导热性能是衡量电子电路散热能力的关键评判指标。为了同时满足此类覆铜板关于“介电常数精准可控、导热性能优异、加工性能稳定”的多重需求,针对玻纤布增强聚四氟乙烯(PTFE)树脂基覆铜板,深入探究了三种不同类型的陶瓷粉(大粒径高导热的氧化铝 Al_2O_3 、中粒径低介电常数的二氧化硅 SiO_2 和小粒径高介电常数的钛酸钡 BaTiO_3)的复配填充对覆铜板导热性能、介电性能、力学性能及钻孔加工性能的影响。通过系统设计填料配比和优化制备工艺,有效控制了填料-树脂界面特性,成功在复合材料中形成了高效的导热通路,并实现了覆铜板介电常数的精准调控。研究结果表明,当在填料体系中采用质量分数60%大粒径 Al_2O_3 、35%中粒径 SiO_2 与5%小粒径 BaTiO_3 的复配方案时,所制备的覆铜板热导率达 $1.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,介电常数为 3.511 (要求 3.50 ± 0.05),精确达成设计目标。该材料同时表现出低介电损耗(0.0015)、较高的剥离强度($0.85\text{ N}/\text{mm}$)及低吸水率(0.041%),具备良好的可加工性,为开发毫米波通信等领域的高性能高导热覆铜板提供了借鉴。

关键词:覆铜板;聚四氟乙烯;填料复配填充;高导热;介电性能;工艺优化

中图分类号: TB332, TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0207-07

Preparation and properties of high thermal conductivity PTFE copper-clad laminates with multiple fillers

GAO Shujian, FENG Chunming, WU Cong, QIAO Yunhao

(The 46th Research Institute of CETC, Tianjin 300220, China)

Abstract: In the fields of high-frequency and high-power electronic devices, the thermal conductivity of copper-clad laminates is a key evaluation indicator for measuring the heat dissipation capacity of electronic circuits. In order to meet the multiple requirements of the copper-clad laminates, including precisely controllable dielectric constant, excellent thermal conductivity, and stable processing performance, the effects of the mixed filling of three different types of ceramic powders (Al_2O_3 with large particle size and high thermal conductivity, SiO_2 with medium particle size and low dielectric constant, and BaTiO_3 with small particle size and high dielectric constant) on the thermal conductivity, dielectric properties, mechanical properties and drilling performance of glass fiber cloth reinforced polytetrafluoroethylene (PTFE) resin based copper-clad laminates were deeply investigated. By systematically designing the filler ratio and optimizing the preparation process, the interface characteristics between the filler and resin were effectively controlled, and an efficient thermal conductivity pathway was successfully formed in the composite, achieving precise control of the dielectric constant of the copper-clad laminates. The research results show that when the compounding scheme consisting of 60 wt% Al_2O_3 with large particle size, 35 wt% SiO_2 with medium particle size, and 5 wt% BaTiO_3 with small particle size is adopted in the filler system, the thermal conductivity of the obtained copper-clad laminate reaches $1.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and the dielectric constant is 3.511 (within the required range of 3.50 ± 0.05), accurately achieving the design goals. This material exhibits low dielectric loss (0.0015), good peel strength ($0.85\text{ N}/\text{mm}$), and low water absorption (0.041%), with excellent processability, which provides reference for the development of the copper-clad laminates with high-performance and high thermal conductivity in fields such as millimeter wave communication.

Keywords: copper-clad laminate; polytetrafluoroethylene; filler compound filling; high thermal conductivity; dielectric property; process optimization

通信作者:高枢健,工程师,研究方向为高分子复合材料的研发

收稿日期:2026-02-25

引用格式:高枢健,冯春明,武聪,等.多填料填充高导热PTFE覆铜板的制备与性能[J].工程塑料应用,2026,54(5):207-213.

GAO Shujian, FENG Chunming, WU Cong, et al. Preparation and properties of high thermal conductivity PTFE copper-clad laminates with multiple fillers[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5):207-213.

随着5G通讯、高端处理器及功率电子设备的快速发展,高频高速覆铜板需求激增,对电子设备的运算速度、功率密度和集成度提出了前所未有的高要求^[1-2]。聚四氟乙烯(PTFE)因其固有的低介电常数和极低的介电损耗,被公认为高频覆铜板的理想基体树脂。作为电子设备中主要的绝缘和支撑材料,PTFE覆铜板的导热性能直接决定了电子电路的散热效率和工作可靠性,传统以玻纤布增强PTFE树脂制备的覆铜板,其热导率通常较低 $[0.2\sim 0.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,无法满足高功率电子设备的散热要求^[3]。因此,开发兼具高导热性和优异电性能(精准介电常数和低介电损耗)的PTFE覆铜板已成为当前电子材料领域的研究热点之一。

为了提高覆铜板的导热性能,通常向PTFE中引入高导热的陶瓷填料^[4-8]。其中,传统的高导热填料氮化铝(AlN)、氧化铝(Al_2O_3)、氮化硼(BN)等陶瓷填料^[9-13]具有优异的导热性能,但是单一的陶瓷填料在填充过程中容易形成大量的界面热阻,且填充密度有限,难以形成高效的导热网络。此外,填料的大量引入可能会对覆铜板的加工性能造成不利影响,尤其在钻孔质量方面,如导致孔壁粗糙度增加、孔内出现残胶等问题。因此,单一填料体系往往难以同时兼顾高导热、预定的介电常数以及良好的可加工性能^[14-17]。这就要求研究过程中不能只考虑某一种特定填料的导热特性,还必须精密计算和统筹其介电特性,同时探索多种填料协同作用的可能性。

Pan等^[18]利用片状BN与AlN颗粒共同填充PTFE,当总填料质量分数为30%时,复合材料的热导率达到 $1.04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,且AlN的加入有效地降低片状BN的取向度,有利于导热性能的协同提升。目前行业内的研究普遍集中在二元填料的复配,但这种情况下无法进一步通过精细调控填料粒径和配比的方法来提升材料的电性能和加工性能,无法实现最终材料每个性能的协同精准调控。基于此,本研究尝试采用三种不同属性陶瓷粉的复配填充来解决上述问题。通过优化不同粒径填料的比例,建立梯度粒径堆积形成协同填充机制,使小粒径填料填充在大粒径填料之间形成紧密结构,从而在相同填料含量下能够实现更高的堆积密度和更连续的导热通路,这也意味着可以在较低填料含量下就能达到目标导热率和介电常数,有利于保持材料的

可加工性。

本研究以玻纤布增强PTFE树脂基覆铜板为研究对象,以产品介电常数为 3.50 ± 0.05 、热导率 $\geq 1.0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 为预定的最终目标,选取三种在粒径和属性上互补的陶瓷填料——大粒径高导热的 Al_2O_3 、中粒径低介电常数的二氧化硅(SiO_2)和小粒径高介电常数的钛酸钡(BaTiO_3),系统研究其复配填充对覆铜板导热、介电、力学及加工性能的影响。这种方法既保留了PTFE本身的超低介电损耗优势,又可通过介电常数的精准调控缩小天线尺寸,同时通过陶瓷粉填充提升导热性能,满足目标场景的商用需求。通过精确调控三者的比例、优化混胶与层压工艺等方法,显著提升了覆铜板的热导率,为高频高速电子设备的材料开发提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTFE浓缩分散乳液:D-210C,固含量为60%,日本大金工业株式会社;

电子级玻纤布:1080,面密度为 $46.8\text{ g}/\text{m}^2$,浙江巨石集团有限公司;

大粒径高导热填料 Al_2O_3 :粒径范围 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$,安徽鑫磊粉体科技有限公司;

中粒径低介电常数填料 SiO_2 (熔融型球形粉体):粒径范围 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,安徽鑫磊粉体科技有限公司;

小粒径高介电常数填料 BaTiO_3 :粒径范围 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$,安徽鑫磊粉体科技有限公司;

硅烷偶联剂:KH-570,纯度98%,南京创世化工助剂有限公司;

非离子表面活性剂:AEO-9,纯度98%,南京创世化工助剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

分散搅拌机:TDPPM-200L,搅拌转速 $0\sim 3\text{ }000\text{ r}/\text{min}$,奎特(上海)机电科技有限公司;

立式上胶机:定制规格,浸渍速度 $0.5\sim 8\text{ m}/\text{min}$,南通凯迪自动机械有限公司;

高温热压机:定制规格,最高温度 $400\text{ }^\circ\text{C}$,德国Lauffer Pressen GmbH公司;

激光导热分析仪:LFA467,测试温度 $-100\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$,德国耐驰仪器制造有限公司;

矢量网络分析仪:N5224B,工作频率 $10\text{ MHz}\sim 50\text{ GHz}$,美国安捷伦科技有限公司;

万能拉力测试机:WDW-50,最大试验力 50 kN, 济南焯瑞试验仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU8010,放大倍数 20~1 000 000,日本日立高新技术株式会社。

1.3 样品制备

覆铜板的制备工艺流程主要包括机械混胶、上胶和层压等工序,具体如下。

1.3.1 机械混胶

(1)填料湿法改性:将表面活性剂和硅烷偶联剂在去离子水中完全溶解后,将三种填料按设计比例混合后高速搅拌。表面活性剂用量为填料总质量的 2.5%,硅烷偶联剂用量为填料总质量的 1.0%。

(2)胶液配制:将 PTFE 乳液与经过表面处理的陶瓷浆料混合。搅拌均匀后调至目标黏度,经一定孔径(400 μm)的纱布过滤,得到混合胶液。最后,将胶液转移至真空脱泡罐中脱泡,得到均一、稳定且无大量气泡的胶液。

1.3.2 上胶

采用立式上胶机,将胶液倒入浸渍槽中,用玻纤布在胶液中浸渍烘干后得到目标面密度的胶片,收卷待用。其中控制浸渍速度为 4 m/min,在烘道中采用三段式升温,温度依次为 120、250、360 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 层压

将胶片按固定尺寸裁切成片材,然后数张叠层后再两侧覆铜,在一定温度、压力和时间下层压,即得到 PTFE 基覆铜板。

1.4 性能测试

参照 ASTM D5470-17,使用激光导热分析仪测试热导率。

参照 GB/T 12636-1990,使用矢量网络分析仪测试介电性能。测试频率范围为 100 kHz~10 GHz,样品尺寸为 50 mm×50 mm×1.0 mm。测试结果为 10 GHz 下的介电性能。

参照 IPC-TM-650,使用万能拉力测试机剥离强度,测试速率为 50 mm/min。

参照 GJB 1651A-2017,使用恒温恒湿称重法测试吸水率。

使用 SEM 观察覆铜板的填料分布、断面形貌及孔壁质量。将覆铜板在液氮环境中脆断以获得平整断面,断面经 10 nm 金膜喷金处理后,在 5 kV 加速电压下观察。

1.5 多级填料复配设计

为实现在介电常数满足 3.50 ± 0.05 的设计目标下,材料能具备较高的热导率,首先利用有效介质理论(EMT)对配方进行大量的迭代计算,预测不同配比下复合材料的介电常数和热导率,从而初步筛选出配方的理想比例范围。

初步选定填料配比范围后,为实现较高的热导率,填料需要在树脂基体中致密堆积。本研究采用 Andreassen 颗粒堆积模型计算三种不同粒径填料的最佳配比。该模型的表达式见式(1)^[19]。

$$C=[(D/D_{\max})^q]\times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为累积百分数; D 为颗粒粒径; $D_{\max}$ 为最大颗粒粒径; q 为分布模数。

根据理论计算和前期摸底试验,为满足介电常数和热导率的要求,确定 $q=0.3\sim 0.35$ 时可获得较高的理论堆积密度。此时三种填料之间的比例(质量分数)为: Al_2O_3 占比 55%~65%, SiO_2 占比 30%~40%, BaTiO_3 占比 3%~6%。据此设计 6 组填料复配方案进行对比试验,通过性能结果优选填料配比,见表 1,其中所有填料复配方案中填料的总质量占复合材料体系总干重的 60.0%。

表 1 不同填料复配方案中的填料配比(质量分数)

Tab. 1 Filler ratio in different filler compounding schemes (mass fraction)

Samples	% fraction)		
	Al_2O_3	SiO_2	BaTiO_3
A1	50	45	5
A2	58	37	5
A3	60	35	5
A4	63	32	5
A5	68	27	5
A6	100	0	0

2 结果与讨论

2.1 不同填料复配的性能优化

本研究设计了填料复配方案,重点研究了在介电常数可控的条件下如何实现高导热。基于上述复配方案中设计的实验配比,制备的板材关键性能测试结果如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以清晰地看到,通过精细调整三种不同粒径填料的比,可以成功找到能够同时满足预设性能目标的“最佳窗口”。样品 A3 (60% Al_2O_3 + 35% SiO_2 + 5% BaTiO_3)的性能测试结果完美契合最初的设计目标,其介电常数为 3.511,完全落在 3.50 ± 0.05 的范围内,同时热导率达到 1.15 W/(m·K),满足

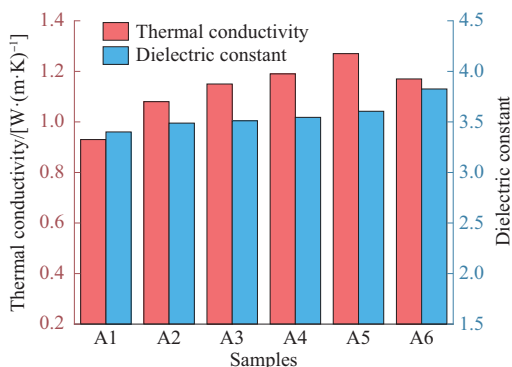


图1 不同填料配比下的覆铜板介电常数和热导率

Fig. 1 Dielectric constant and thermal conductivity of copper-clad laminate under different filler ratios

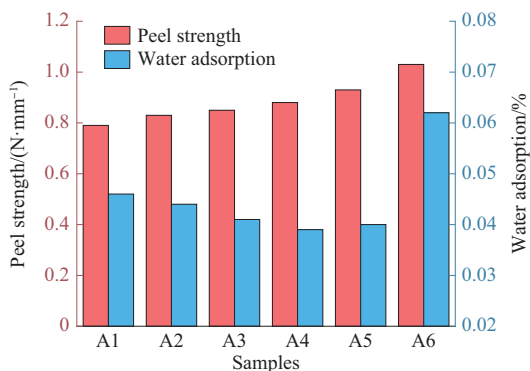


图2 不同填料配比下的覆铜板剥离强度和吸水率

Fig. 2 Peel strength and water adsorption of copper-clad laminate under different filler ratios

大于 $1.0 W/(m \cdot K)$ 的要求。在实现介电常数精准可控的同时,使热导率达到最大化。上述结果实现了多属性填料复配设计的精准控制,充分验证了前期配方设计的有效性和准确性。

从图1可以看出,在理论设计范围内,热导率随着高导热 Al_2O_3 填料比例的增加而逐步提升。相比之下,单一填料配方A6虽然具有较高的导热填料含量,但由于缺乏多级复配填充,实际热导率反而出现一定下降。这是因为,中粒径 SiO_2 和小粒径 $BaTiO_3$ 在辅助填充空隙、完善导热网络方面起到了一定的积极作用,减少了界面热阻,同时多粒径的填料复配增加了填料彼此间的接触面积和接触概率,提供了更多高效的传输路径。这一结果验证了多粒径填料复配填充在构建高效导热网络方面的优势。另外,超出理论设计范围的两个配方(A1和A5)的介电常数或热导率出现了预料中的问题,这两个“失败”案例从反面证实了理论设计范围的合理性。

覆铜板的吸水率直接影响其在潮湿环境下的

可靠性。低的吸水率能够确保覆铜板在高湿环境下仍能具备良好的加工可靠性。测试结果(图2)显示,单一填料配方A6的吸水率最高(0.062%),而A3样品的吸水率低至0.041%,表现出优异的防潮性能。除了PTFE树脂本身优异的疏水性,这主要归因于多级填料的改性和紧密的堆积结构减少了树脂内部的自由体积,有效阻碍了水分子的渗透,从而降低了板材的吸水率。

剥离强度是评价覆铜板基材与铜箔结合力的关键指标。图2显示,A3样品的剥离强度达到 $0.85 N/mm$,表现出良好的界面结合力。这是因为填料使用偶联剂进行了表面改性,且多级填料复配的紧密结构,增强了树脂基体的刚度。此外合适的填料配比也保证了树脂与铜箔间有足够的接触面积,提高了介质层与铜箔的结合力,进而提高了剥离强度。

综上所述,A3配方能够在“高导热”与“精准调控介电常数”之间取得最佳平衡,同时板材具有较低的吸水率和较高的剥离强度,被确定为最优方案。

2.2 微观结构分析

通过SEM对填料分布形貌进行观察,可以更直观地理解复配填充的机理,如图3所示。图3展示了最优配方A3对应的覆铜板断面SEM图像。从图3a可见,填料在PTFE树脂中均匀分布,无明显团聚。从图3b中可清楚地看到在多粒径填料复配填充的样品中,不同粒径的填料相互填充,形成了紧密的堆积结构,填料-填料接触点增多,减少了树脂富集区域,为热量传输提供了更多通路,从而显著提高了导热性能。

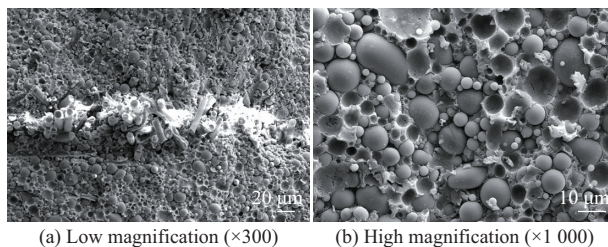


图3 A3配方覆铜板中填料分布的SEM图像

Fig. 3 SEM images of fillers distribution in copper-clad laminate with A3 formula

3 工艺优化研究

3.1 混胶工艺的优化

在填料含量一定的条件下,合适的混胶工艺能够确保填料在树脂中均匀分散,不合理的工艺反而

会阻碍材料导热性能的提高。任何填料分散不均或胶液中的微小气泡都会引起介电常数或热导率的局部波动。本研究对比了不同混胶工艺对胶液状态及最终板材性能的影响,见表2。为快速评估不同混胶工艺下填料的分散情况,采用重力沉降法

测试填料团聚指数。取量筒称取不同混胶工艺的胶液,记录胶液初始液面高度,然后在相同条件下静置24 h,记录上层澄清液高度,两者的比例百分数即为团聚指数,数值越高代表填料沉降越明显、团聚越严重,分散均匀性越差。

表2 不同混胶工艺的影响

Tab. 2 Effects of different mixing processes

Process conditions	Mixing speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Mixing time/min	Vacuum degassing	Filler agglomeration index/%	Thermal conductivity/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]
a	1 000	30	Without	15.6	1.03
b	1 000	60	Without	13.8	1.05
c	2 000	60	Without	8.3	1.12
d	2 000	60	With	5.1	1.15

由表2可见,采用工艺d能够显著降低填料的团聚指数,提高材料的导热性能。这是因为高速搅拌(2 000 r/min)能够提供足够的剪切力避免填料团聚,特别是对于粒径小易团聚的 BaTiO_3 ,使所有填料都能均匀分布在整个体系中,避免形成团聚缺陷。而真空脱泡则去除了高速混胶过程中带入的气体,减少了材料中的微孔隙等缺陷。由此工艺制备的覆铜板,其性能测试数据与理论模型吻合度更高,且重复性好。这表明优化的混胶工艺是实现材

料设计预期的重要保障。

3.2 层压工艺的优化

层压是制备PTFE基覆铜板的重要工序。由于PTFE树脂在高温下熔融黏度仍较高,导致其流动性差,需要更高的温度和压力以实现充分的熔融复合与致密化^[20]。

本研究系统考察了层压最高温度、保温时间以及层压压力三个关键参数对覆铜板性能的影响。优化实验设计及结果见表3。

表3 不同层压工艺下覆铜板的性能

Tab. 3 Performances of copper-clad laminate under different laminating processes

Process condition	Max laminating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/min	Laminating pressure/MPa	Thermal conductivity/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	Dielectric constant
A	360	60	4	1.05	3.478
B	360	60	8	1.13	3.485
C	370	60	8	1.15	3.511
D	380	60	8	1.12	3.529
E	370	90	8	1.15	3.517
F	370	60	12	1.16	3.516

3.2.1 层压最高温度的影响

对比工艺B(360 $^{\circ}\text{C}$)、工艺C(370 $^{\circ}\text{C}$)和工艺D(380 $^{\circ}\text{C}$)可见,温度对PTFE的熔融与流动至关重要。在360 $^{\circ}\text{C}$ 时,PTFE树脂未能实现充分的流动,导致其与填料、玻纤布的界面不能被充分浸润,致使介电常数和热导率未达最佳。随着层压温度升高,PTFE黏度下降、流动性增强,PTFE分子链的运动能力增强,PTFE可充分浸润其与填料的界面,使致密度提高。将温度升至370 $^{\circ}\text{C}$,PTFE获得了在本体系中的最佳状态,既能保持一定的流动性以填充空隙,形成更致密的结构,又未发生明显的热分解,使得各项性能均达到最优。当温度进一步升至380 $^{\circ}\text{C}$,短链PTFE分子已经发生断键,对PTFE与填料界面造成破坏,使材料性能恶化,反而损害了长

期可靠性。因此,370 $^{\circ}\text{C}$ 被确定为最优的层压最高温度。

3.2.2 层压压力的影响

层压工艺中,加压的目的是促进树脂流动,使树脂充分浸润纤维和陶瓷粉,并在复合材料中均匀分布,可以保证树脂与纤维的结合紧密,排出材料中残留的气泡及挥发物,降低孔隙率。分别对比工艺A(4 MPa)和工艺B(8 MPa)、工艺E(8 MPa)和工艺F(12 MPa),在4 MPa的低压下,无法有效压缩填料骨架并推动树脂流动,导致性能较差。当压力提升至8 MPa,已经能提供足够的力使材料形成致密结构,从而显著提高性能。而当压力增至12 MPa,玻纤布有被过度压缩甚至压伤的风险和趋势,这对材料的机械完整性构成潜在风险。因此,8 MPa被

确定为最优的层压压力。

3.2.3 保温时间的影响

对比工艺 C (60 min) 和工艺 E (90 min), 延长保温时间至 90 min, 热导率、介电常数无明显变化。这表明, 60 min 的保温时间已足以使 PTFE 完成必要的熔融、流动和界面结合过程。过长的保温时间会降低生产效率并增加能源消耗。

综上所述, 工艺 C (370 °C、8 MPa、60 min) 能够在满足性能指标的同时, 提高生产效率, 被确定为最优工艺。

4 综合性能与加工性评估

通过调整填料复配比例和优化工艺, 制备的覆铜板具有良好的介电稳定性、较低的介电损耗和 CTE, 且批次性良好, 满足印刷电路板 (PCB) 加工的使用要求, 证明了工艺的稳定性 and 可靠性。表 4 为覆铜板的主要性能指标。

表 4 覆铜板的主要性能指标

Tab. 4 Main performances of copper-clad laminate

Technical parameters	Typical values
Dielectric constant (10GHz)	3.51
Dielectric dissipation factor (10GHz)	0.001 5
Coefficient of thermal expansion (-55~288 °C)/(×10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	11/13/50
Copper foil peel strength (1oz ¹⁾ , after thermal stress)/(N·mm ⁻¹)	0.85
Flexural strength/MPa	65
Moisture absorption/%	0.041
Volume resistivity/(MΩ·cm)	1.2×10 ⁹
Surface resistivity/MΩ	1.5×10 ¹⁰
Thermal conductivity/[W·(m·K) ⁻¹]	1.15
Thermal decomposition temperature (5% weight loss)/°C	500

Notes: 1) 1oz represents the copper thickness is 35 μm.

由表 4 可见, 除了上文分析过的介电常数与热性能外, 该覆铜板在其他方面的综合性能也同样优异。通过填料的表面改性, 进一步降低了界面极化的影响, 其介电损耗因子为 0.001 5, 证明复合材料具有较低的介电损耗, 满足高频应用的使用要求。

在力学性能测试中, 覆铜板的弯曲强度达到了 65 MPa, 具备一定的强度, 能够满足电路板加工和使用过程中的机械应力要求。另外, 覆铜板的剥离强度达到 0.85 N/mm, 吸水率低至 0.041%。

覆铜板的导通孔壁是通过钻孔成型、孔壁金属化等工艺形成的, 首先通过钻孔在板材上切削出贯穿的导通孔, 再经去钻污、沉铜镀铜等工艺, 在树脂孔壁上沉积均匀致密的铜层, 形成连续导电的孔壁

结构。为验证孔壁的可靠性, 对覆铜板进行了热应力测试, 随后制备孔壁切片, 观察孔壁的微观形貌, 如图 4 所示。由图 4 可见, 覆铜板经钻孔、孔金属化后未见孔内有明显铜肌瘤产生, 也未见明显孔铜缺陷, 且经热应力后板材未见孔铜开裂、分层等不良质量事故发生, 能够实现高质量的微孔加工, 表现出优异的孔壁质量。这证实了优化的填料复配方案不仅使覆铜板实现了高导热和可控介电常数, 还具备了良好的机械加工性能, 特别是孔壁质量。

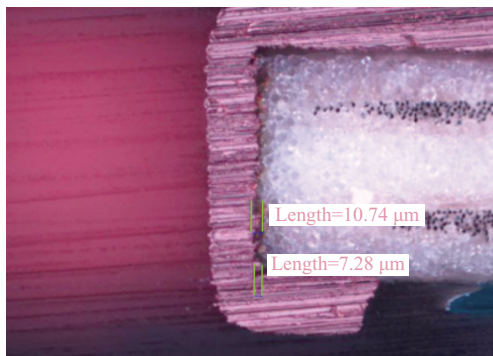


图 4 覆铜板热应力测试后孔壁的图像

Fig. 4 Image of hole wall of copper-clad laminate after thermal stress test

5 结论

(1) 采用多种粒径陶瓷粉复配填充可显著提高覆铜板的导热性能, 通过调控 Al₂O₃、SiO₂ 和 BaTiO₃ 的比例 (三者质量分数分别为 60%、35% 和 5%), 实现了覆铜板热导率 1.15 W/(m·K) 和介电常数 3.511 的完美匹配, 精确达到了预设的性能目标。

(2) 优化的混胶工艺 (高速搅拌与真空脱泡) 和层压工艺窗口 (370 °C、8 MPa、60 min), 确保填料在材料中能够均匀分散, 最终保障板材性能的一致性和良好的加工性能。

(3) 通过填料复配在树脂基体中形成了紧密堆积的导热通路, 使材料在获得高导热性能的同时, 兼顾了板材的介电性能和力学性能, 使材料具备良好的可加工性。

(4) 本研究不仅成功开发出一款满足特定高性能要求的覆铜板配方, 同时提供了一种通用的、通过多属性填料协同设计来实现复合材料目标性能的研发思路, 为新一代电子基板材料的设计与开发提供了借鉴。

参考文献

- [1] YANG X T, TANG L, GUO Y Q, et al. Improvement of thermal conductivities for PPS dielectric nanocomposites via incorporating NH₂-POSS functionalized nBN fillers[J]. Composites Part A:

- Applied Science and Manufacturing, 2017, 101:237–242.
- [2] 付彦志, 吴定超, 刘峰, 等. 一种应用于智能通信终端的三频小型化微带天线设计[J]. 电子质量, 2025(5):10–14.
- FU Yanzhi, WU Dingchao, LIU Feng, et al. Design of a miniaturized tri-band microstrip antenna for intelligent communication terminals[J]. Electronics Quality, 2025(5):10–14.
- [3] ZHAO C G, LI Y F, LIU Y C, et al. A critical review of the preparation strategies of thermally conductive and electrically insulating polymeric materials and their applications in heat dissipation of electronic devices[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6(1). DOI:10.1007/s42114-022-00584-2.
- [4] 张凯, 桂泰江, 吴连锋, 等. 导热绝缘聚合物复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(Z1):571–575.
- ZHANG Kai, GUI Taijiang, WU Lianfeng, et al. Research progress of thermal conductive and electrical insulating polymer composites[J]. Materials Reports, 2021, 35(Z1):571–575.
- [5] 徐建林, 王程程, 牛磊, 等. 导热绝缘复合材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(8):120–123.
- XU Jianlin, WANG Chengcheng, NIU Lei, et al. Research progress on thermal conductivity and electrical insulation composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8):120–123.
- [6] 曹金梅, 田付强, 雷清泉. 高导热聚合物复合绝缘材料研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(7):640–654.
- CAO Jinmei, TIAN Fuqiang, LEI Qingquan. Progress on the polymer composite insulating materials with high thermal conductivity[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(7):640–654.
- [7] 孙喆, 陈金, 黄其忠, 等. 导热聚合物复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12):177–183.
- SUN Zhe, CHEN Jin, HUANG Qizhong, et al. Research advances in thermally conductive polymer composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12):177–183.
- [8] 韩桂云, 韩伏龙, 冯春明, 等. TiO_2 形貌和添加量对PTFE基微波基板性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6):140–145.
- HAN Guiyun, HAN Fulong, FENG Chunming, et al. Effect of TiO_2 morphology and addition amount on performances of PTFE-based microwave substrate[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6):140–145.
- [9] SHIVA M, KAMKAR DALLAKEH M, AHMADI M, et al. Effects of silicon carbide as a heat conductive filler in butyl rubber for bladder tire curing applications[J]. Materials Today Communications, 2021, 29:102773. DOI:10.1016/j.mtcomm.2021.102773.
- [10] KHALIFA M, WUZELLA G, BAGAWAN A H, et al. Poly(vinylidene fluoride)/mica nanocomposite: A potential material for photovoltaic backsheet application[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 277. DOI:10.1016/j.matchemphys.2021.125551.
- [11] 秦彤, 姜宏川, 张宇, 等. 球形氮化硼填充聚酰胺12T导热复合材料的制备、性能与应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7):32–37.
- QIN Tong, LOU Hongchuan, ZHANG Yu, et al. Preparation, properties and applications of spherical boron nitride filled polyamide 12T thermally conductive composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7):32–37.
- [12] GAO M Y, ZHAI L, MO S, et al. Thermally conductive polyimide/boron nitride composite films with improved interfacial compatibility based on modified fillers by polyimide brushes[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2023, 41(12):1 921–1 936.
- [13] 张恩宁, 金石磊, 马峰岭, 等. SiO_2 颗粒形貌及粒径对 SiO_2 填充碳氢树脂覆铜板性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(1):65–69.
- ZHANG Enning, JIN Shilei, MA Fengling, et al. Effect of SiO_2 particle morphology and particle size on properties of SiO_2 filled hydrocarbon resin copper clad laminate[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(1):65–69.
- [14] 王艳芝, 吴露露, 岳献阳, 等. 混合粒径BN填充PP/PE复合材料的结构与性能[J]. 塑料工业, 2023, 51(12):118–124.
- WANG Yanzhi, WU Lulu, YUE Xianyang, et al. Structure and properties of PP/PE composites filled with mixed particle size BN[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(12):118–124.
- [15] PATEL M, JANARDHANA REDDY J, BHANU PRASAD V V, et al. High thermal conductivity aluminium nitride-zirconium diboride(AlN-ZrB_2) composite as microwave absorbing material[J]. Ceramics International, 2021, 47(15):21 882–21 889.
- [16] 伍良晴. 铝粉形貌对原位构建AlN骨架增强EP热学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):49–53.
- WU Liangqing. Effect of Al powder morphology on in-situ AlN framework reinforced EP thermal properties[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):49–53.
- [17] 王艳芝, 陈厚振, 张艳丽, 等. Al_2O_3 和BN共混合填充PP复合材料的结构与性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(12):69–75.
- WANG Yanzhi, CHEN Houzhen, ZHANG Yanli, et al. Structure and properties of PP composites filled with Al_2O_3 and BN[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(12):69–75.
- [18] PAN C, KOU K C, ZHANG Y, et al. Enhanced through-plane thermal conductivity of PTFE composites with hybrid fillers of hexagonal boron nitride platelets and aluminum nitride particles[J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 153:1–8.
- [19] 王建栋, 祝洪喜, 邓承继, 等. 颗粒级配对低碳镁碳砖性能的影响[J]. 耐火材料, 2018, 52(4):273–275, 279.
- WANG Jiandong, ZHU Hongxi, DENG Chengji, et al. Effect of grain size distribution on performance of low carbon MgO-C brick[J]. Refractories, 2018, 52(4):273–275, 279.
- [20] 庞子博, 纪秀峰, 张伟, 等. 正交法优化PTFE复合基板层压工艺[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(4):43–46.
- PANG Zibo, JI Xiufeng, ZHANG Wei, et al. Optimizing lamination process of a PTFE composite laminate using orthogonal method[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(4):43–46.