北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

碳化汉麻秆纤维氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料

李淼 赵俊博 刘付 陈瑶

Carbonized hemp fiber-boron nitride 3D thermal network for constructing high-thermal-conductivity epoxy composites

Li Miao, Zhao Junbo, Liu Fu, Chen Yao

引用本文:
李淼, 赵俊博, 刘付, 陈瑶. 碳化汉麻秆纤维氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):177–184. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240297
Li Miao, Zhao Junbo, Liu Fu, Chen Yao. Carbonized hemp fiber–boron nitride 3D thermal network for constructing high–thermal–conductivity epoxy composites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):177–184. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240297

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240297

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

木基金属功能复合材料研究进展
Progress of wood based metal functional composites
北京林业大学学报, 2019, 41(3): 151–160. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180382

桦木单板/玻璃纤维复合材料声学振动性能的研究
Acoustic vibration properties of birch veneer/glass fiber composites
北京林业大学学报, 2019, 41(1): 126–133. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180317

一步水热合成ZnO/水热炭复合材料及其性能表征
One–step hydrothermal synthesis and characterization of the ZnO/hydrothermal carbon composite material
北京林业大学学报, 2017, 39(7): 111–116. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170014

桦木单板/玻璃纤维复合材料的制备工艺优化
Optimization of preparation process of birch veneer/glass fiber composite
北京林业大学学报, 2019, 41(4): 127–135. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190049

MDI低密度纤维板制备工艺和性能研究
Preparation process and properties of MDI low density fiberboard
北京林业大学学报, 2019, 41(2): 134–139. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180297

填缝型微波膨化木基金属复合材料制备及其性能表征
Preparation and property characterization of crack–filled type microwave puffed wood based metal composites
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 118–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210209

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240297

碳化汉麻秆纤维−氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料

李　淼[1]　赵俊博[1]　刘　付[2]　陈　瑶[1]
（1. 北京林业大学木质材料科学与应用教育部重点实验室，木材科学与工程北京市重点实验室，北京 100083；
2. 苏州佰旻电子材料科技有限公司，江苏 苏州 215137）

摘要:【目的】本研究旨在利用碳化汉麻秆纤维构建三维导热网络，解决传统环氧树脂（EP）复合材料中氮化硼（BN）填料添加量高导致的力学性能下降、加工性降低和成本增加的问题，提升环氧树脂的导热性能。**【方法】**采用碳化汉麻秆纤维（C）作为基础骨架，与氮化硼（BN）复合，利用二者协同增效作用构建高导热复合骨架，以环氧树脂（EP）为基体，制备 BN-C/EP 复合材料。通过表征材料的微观形貌、化学成分、力学性能及导热散热性能，研究其内部三维导热网络的形成机制和作用原理。**【结果】**（1）BN-C/EP 复合材料中，碳化汉麻秆纤维相互交织并与改性后的 BN 协同作用，形成了丰富的三维热传导网络；其导热系数较 EP 提高了 496%，每单位填料的导热系数提高了 58.63%，有效降低了导热填料的添加量，从而降低了成本。（2）在跨面导热测试中，BN-C/EP 复合材料的导热效率较 EP 提高了 11.95%；在面内散热测试中，散热效率较 EP 提高了 23.33%。这些结果表明，该材料在跨面导热和面内散热应用（如散热器）方面具有良好的潜力。（3）BN-C/EP 复合材料的抗弯强度提高至 68.7 MPa，较 EP 和 BN/EP 分别提高了 2.08% 和 9.74%，满足作为热界面材料的使用条件。**【结论】**本研究利用高长径比的碳化汉麻秆纤维，成功构建了 BN-C/EP 复合材料的三维导热网络，显著提升了其导热性能。研究揭示了汉麻秆纤维在构建三维导热网络中的关键作用，其天然、环保、低成本的特性为复合材料的开发提供了新的思路。未来可进一步探索天然纤维与导热填料的协同作用机制，优化复合材料的微观结构，开发更高性能、更绿色的复合材料，以满足工业对高效热管理材料的需求。

关键词：汉麻纤维；碳化；氮化硼 (BN)；环氧树脂 (EP)；BN-C/EP 复合材料；导热；散热；热界面材料
中图分类号：S216.2；V258+.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)04−0177−08
引文格式：李淼，赵俊博，刘付，等. 碳化汉麻秆纤维−氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：177−184. Li Miao, Zhao Junbo, Liu Fu, et al. Carbonized hemp fiber-boron nitride 3D thermal network for constructing high-thermal-conductivity epoxy composites［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 177−184.

Carbonized hemp fiber-boron nitride 3D thermal network for constructing high-thermal-conductivity epoxy composites

Li Miao[1]　Zhao Junbo[1]　Liu Fu[2]　Chen Yao[1]
(1. Key Laboratory of Wooden Materials Science and Application of Ministry of Education, Key Laboratory of Beijing for Wood Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Suzhou Baimin Electronic Material Technology Co., Ltd., Suzhou 215137, Jiangsu, China)

Abstract:［**Objective**］This study aims to use carbonized hemp fibers to build a 3D thermal network, so as to solve problems like reduced strength, poor processability, and higher cost caused by high boron nitride (BN) filler content in epoxy composites, thereby enhancing the thermal conductivity of epoxy resin (EP).

收稿日期: 2024−11−26　**修回日期:** 2025−02−22
基金项目: 广西林业科技推广示范项目（2024GXLK23）。
第一作者: 李淼。主要研究方向：木材功能性改良。Email：limiao0423@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。
责任作者: 陈瑶，副教授。主要研究方向：木材功能性改良。Email：ychen@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

［**Method**］Carbonized hemp fibers (C) were selected as the base framework material and combined with BN to create a synergistic composite framework with high thermal potential. EP was used as the matrix to fabricate the BN-C/EP composite with enhanced thermal conductivity. The formation mechanism and working principles of internal 3D thermal network were investigated by characterizing the microstructure, chemical composition, mechanical properties, thermal conductivity, and heat dissipation performance of the materials. ［**Result**］(1) In the BN-C/EP composite, carbonized hemp fibers interwove and synergized with modified BN, forming a rich 3D thermal conduction network. The thermal conductivity increased by 496% compared with EP, and the thermal conductivity per unit filler increased by 58.63%, effectively reducing the amount of filler needed and lowering costs. (2) In through-plane thermal conductivity tests, the thermal conductivity efficiency of BN-C/EP composites increased by 11.95% compared with EP. In in-plane heat dissipation tests, the heat dissipation efficiency increased by 23.33% compared with EP. These results indicated that the material had good potential for applications in through-plane thermal conductivity and in-plane heat dissipation (such as heat sinks). (3) The flexural strength of BN-C/EP composite increased to 68.7 MPa, an improvement of 2.08% over EP and 9.74% over BN/EP, meeting the requirements for use as a thermal interface material. ［**Conclusion**］This study used high-aspect-ratio carbonized hemp fibers to build a 3D thermal network in BN-C/EP composites, which improved thermal conductivity significantly. It reveals the key role of hemp fibers in forming the network. Their natural, eco-friendly, and low-cost nature offers new ideas for composite development. Future work can explore the synergy between natural fibers and fillers, optimize composite microstructures, and develop higher-performance, greener composites to meet the industrial demand for efficient thermal management.

Key words: hemp fibers; carbonization; boron nitride (BN); epoxy resins (EP); BN-C/EP composites; thermal conductivity; heat dissipation; thermal interface material

环氧树脂（epoxy resins，EP）是一种常见且重要的聚合物材料，具有高黏接强度、优良的电绝缘性能、易固化和低成本等优点[1−2]，在先进热界面材料领域受到广泛关注。然而，由于其分子链结构导致严重的声子散射，缺乏有效的热传导路径，环氧树脂的导热性能不足，成为制约其大规模工业应用的关键瓶颈。为改善聚合物基材料的导热性能，科研人员探索了多种方法，其中一种是将高导热填料与绝缘聚合物结合，制备综合性能优异的复合材料[3]。氮化硼（boron nitride，BN）因具有电绝缘、重量轻和高导热性等优势，被称为“白色石墨烯”，常被用作导热填料以提升复合材料的导热系数[4−6]。然而，提高聚合物基材料的导热性能需要构建高效且连通的导热通路[7]。对于低浓度导热填料的复合材料，其导热形式为“导热填料—聚合物—导热填料”，由于聚合物导热能力较差且填料之间缺乏有效连续传导[8]，其导热性能较低。为实现复合材料的高导热率，通常需要添加较高比例的导热填料，但这会牺牲基体性能，降低复合材料的加工性，并显著增加制备成本[9]。因此，如何在提高导热率的同时避免上述问题，成为先进热界面材料领域亟待解决的关键问题。

导热填料的选择对材料的导热性能有直接影响，然而，对于杂乱无序分布的导热填料，构建有序且高效的连接通道同样关键。在这一过程中，成本因素不容忽视，需要选择合适的材料进行搭接。在众多导热材料中，碳材料在热管理领域扮演着重要角色。与碳纳米管、石墨烯等昂贵的纳米材料相比，碳化生物质纤维不仅成本低、可持续性强，而且在碳化后能保留生物质的三维结构，富含活性官能团并具备较高的韧性。例如：Liu 等[10]以汉麻（*Cannabis sativa*）为原料制备的三维网状结构生物质碳气凝胶，展现出优异的热稳定性和阻燃性；Wang 等[11] 通过构建三维连续网络结构的碳纤维/碳毡，相邻的碳纤维之间形成连接点，显著提升了复合材料的导热性。从资源角度看，中国是麻类植物种植大国，原材料供应充足。其中，汉麻作为一种广泛分布的植物，具有易于种植、产量高的特点。其秆部纤维长径比高[12]，便于后续加工和搭接操作。例如：阮芳涛等[13]通过调整长秸秆排列取向，制备了较高力学强度的长秸秆纤维增强聚丙烯复合材料；Soni 等[14]制备了不同纤维负载量的麻纤维/环氧树脂复合材料，尽管其弯曲强度较纯环氧树脂有所下降，但随纤维负载量增加，抗弯强度逐步提高。这种结构为纤维与纤维之间的相互搭接提供了便利，有利于发挥其在导热性能方面的优势，为开发高性能、低成本的导热材料提供了极具潜力的原材料基础。

本研究旨在构建连续的三维导热网络，以提升聚合物基材料的导热性能。由于 BN 与聚合物基体之间存在相容性差的问题[15]，本研究首先采用硅烷偶联剂（KH570）对 BN 进行表面接枝改性[16−17]。随后，以碳化后的汉麻秆纤维为骨架，将其与改性后的 BN 复合，并以 EP 作为聚合物基体，最终制备出碳化汉麻秆纤维/BN 导热增强的聚合物基材料。在该复合体系中，碳化的汉麻秆纤维相互交织，形成了基础的三维框架；改性后的 BN 则附着于纤维表面，并与其他 BN 颗粒相互搭接。纤维的交织与改性 BN 的协同作用，共同在三维空间内构建了丰富的热传导通道。通过这种设计，有望在显著提升聚合物基材料导热性能的同时，避免因高比例填料添加而导致的基体性能下降和成本增加，为先进热界面材料的发展提供一种新的思路和方法。

1　材料和方法

1.1　材　料

汉麻秆采自云南省西双版纳州，经高速万能粉碎机（型号 FW-100，北京中兴伟业仪器有限公司）粉碎至 40 ~ 60 目（粒径 250 ~ 425 μm），并密封于自封袋中，避光、低温保存备用。氮化硼（BN）由上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产，纯度为 99.9%。聚乙烯醇（PVA，1799 型）由上海泰坦科技有限公司生产，黏度为 27.0 ~ 34.0 MPa·s。环氧树脂（EP）AB 胶由惠州市三泰胶业有限公司生产，型号为 E-51，采用胺类固化剂。其中，A 组分主剂为透明液体，黏度为 80 ~ 120 P（25 ℃），相对密度为 1.17；B 组分硬化剂为透明液体，黏度为 80 ~ 120 P（25 ℃），相对密度为 0.97。固化温度 25 ℃，固化时间约 15 h。无水乙醇、硅烷偶联剂（KH570，纯度 98%）为源叶生物公司生产。去离子水为北京林业大学实验中心制取。

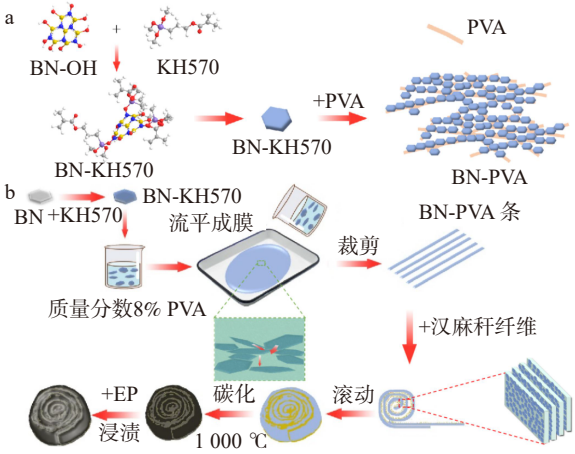
1.2　复合材料制备

1.2.1　BN 的表面改性

取 15 g BN 分散到 200 mL 95% 乙醇溶液中，经 100 W 超声（型号 KQ5200DE，昆山市超声仪器有限公司）处理 30 min。随后，加入 0.03 g 的 KH570，将混合液转移至水浴锅中，分别在 50 和 98 ℃ 下搅拌 2 h，进行接枝改性。改性后的 BN 在烘箱（型号 101-1AB，天津市泰斯特仪器有限公司）中于 103 ℃ 干燥至绝干状态。

1.2.2　BN-PVA 和 BN-C-PVA 的制备

将改性后的 BN 与 22 g 固体 PVA 加入到 253 g 去离子水中，利用磁力加热搅拌器（型号 DF-101S，金坛区西城新瑞仪器厂）在 60 ℃ 下搅拌，直至底部无颗粒残留。随后，将混合物置于平底容器中自然成膜，制成 BN-PVA 复合材料（图 1a）。将成膜后的 BN-PVA 切割成 5 mm 宽的长条状，以 8% PVA 溶液作为胶黏剂，将汉麻秆纤维均匀铺满在改性 BN 的内侧，卷制成卷状结构。最后，将其在 103 ℃ 下烘至绝干，命名为 BN-C-PVA。



BN. 氮化硼；PVA. 聚乙烯醇；EP. 环氧树脂；KH570. 硅烷偶联剂。下同。

图 1　BN-PVA 合成示意图（a）和 BN-C/EP 的制备流程图（b）

Fig. 1　Synthesis diagram of BN-PVA (a), and preparation flow chart of BN-C/EP (b)

1.2.3　BN-PVA 和 BN-C-PVA 的碳化

将成型的卷状试样 BN-PVA 和 BN-C-PVA 置于管式炉（型号 SK-G08123K-2-420）中，在氩气气氛下进行碳化处理，分别记作 BN 和 BN-C。此外，将一部分汉麻秆纤维单独进行碳化处理，记作 C。碳化过程为：以 10 ℃/min 的升温速率从室温加热至 120 ℃，并保持 1 h；以 5 ℃/min 的升温速率从 120 ℃ 加热至 360 ℃，并保持 3 h；以 3 ℃/min 的升温速率加热至 1 000 ℃，并保持 2 h。

1.2.4　BN/EP、BN-C/EP 和 C-EP 的制备

BN、BN-C 以及 0.13 g 碳化后的汉麻秆纤维浸渍于 EP 中，置于真空干燥箱（型号 ZK-2BS）中进行真空除气泡处理，接着在常温下固化 15 h。固化完成后，通过机械加工去除试样表面多余的 EP，最终得到试样 BN/EP、BN-C/EP 和 C-EP，BN-C/EP 制备流程如图 1b 所示。

1.3　复合材料性能表征

1.3.1　微观形貌和成分

使用场发射扫描电子显微镜（FESEM，型号 SU8010，日本日立）对复合材料的微观形貌进行分析。试样经喷金处理，测试电压为 3 kV。利用能谱仪（EDS）分析复合材料的成分和元素分布。

1.3.2　力学性质

使用万能力学试验机（型号 WDW-50，济南东测试验机技术有限公司）表征复合材料的抗弯强度。测

试前，记录试样的截面尺寸，并在万能力学试验机上以 5 mm/min 的加载速率进行测试。

1.3.3 导热系数

复合材料的导热系数采用导热系数测试仪（型号 DRE-2C，湘潭市仪器仪表有限公司）进行测定，测试方法依据 ASTM D5470-17（2024）标准《Standard test method for thermal transmission properties of thermally conductive electrical insulation materials》。试样厚度为 5 mm，直径 > 20 mm。测试前需确保试样直径大于探头的双螺旋线直径，且试样与传感器接触的表面平整光滑，Hot Disk 探头夹于试样的两侧。

导热系数增强效率是一个用于衡量填料或改性措施对复合材料导热性能提升效果的指标。它反映了在添加填料或进行改性后，复合材料导热系数的相对提升程度，能够直观地反映导热性能的提升程度。具体定义为

$$\eta = \frac{\lambda_c - \lambda_b}{\lambda_b} \times 100\%$$

式中：η为导热系数增强效率，λ_c是添加填料后的复合材料导热系数，λ_b是未添加填料的基体材料导热系数。

每单位填料导热系数增强效率为衡量填料对复合材料导热性能提升效果的一个量化指标，它反映了每单位质量或体积的填料对复合材料导热系数的提升程度。具体可以定义为

$$\eta_u = \frac{\eta}{V} \times 100\%$$

式中：η_u为每单位填料导热系数增强效率，V为填料 BN 的体积分数。

1.3.4 跨面导热和面内散热性能

复合材料的散热性能通过红外相机（型号 HIKMICRO）进行记录。将待测试样放置于 90 ℃ 的铝制散热板上，通过测量试样表面温度变化评价其跨面导热性能。将待测试样置于大功率 LED 元件之间，通过测量 LED 元件表面温度来表征其面内散热性能。

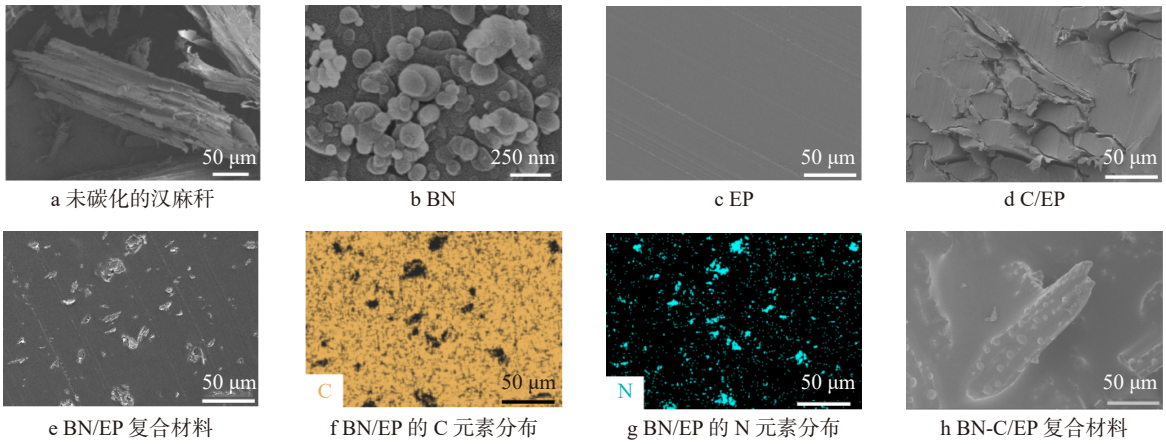
2 结果与分析

2.1 微观形貌和元素成分

汉麻秆纤维呈细条棒状（图 2a），其细长的形状和相对规整的外观使得纤维之间能够更容易地相互接触和搭接。在热传递过程中，这种搭接方式如同构建起一条条的“桥梁”，可以有效地连接各个区域，形成相互搭接的传热通道，从而有利于热量在材料内部的传递。氮化硼的微观形貌呈现片状结构，片的大小在 50 ~ 100 nm 之间（图 2b）。固化后的环氧树脂表面均匀且光滑（图 2c）。而在 C/EP 复合材料中，汉麻秆纤维虽然相互搭接，但纤维与 EP 之间存在许多孔隙结构（图 2d）。这些孔隙结构会阻碍热量传递，从而在一定程度上降低材料的导热性能。在 BN/EP 复合材料中，氮化硼散乱地分布在环氧树脂中，部分氮化硼发生了团聚现象，但团聚体之间并未形成搭接（图 2e ~ g）。这使得复合材料难以形成有效的导热网络，因此其导热性能的提升十分有限。而从 BN-C/EP 的 SEM 图（图 2h）中可以看到，碳化汉麻秆纤维与 BN 被 EP 完全包裹，这得益于 KH570 对材料间相容性的改善。同时，细长的碳化汉麻秆纤维之间相互搭接，形成了网络状结构，为热量传导搭建了一个基础骨架体系，使热量能够沿着纤维的搭接路径进行传递。此外，BN 在整个碳化汉麻秆纤维骨架上均匀分布，二者相互协同，有望提升材料的整体导热性能。

2.2 抗弯强度

固化后的 EP 具有较高的抗弯强度，其抗弯强度为 67.3 MPa。然而，在添加 BN 后，BN/EP 复合材料的抗弯强度下降至 62.6 MPa（图 3），这一结果与



a 未碳化的汉麻秆　b BN　c EP　d C/EP

e BN/EP 复合材料　f BN/EP 的 C 元素分布　g BN/EP 的 N 元素分布　h BN-C/EP 复合材料

图 2 各材料的 SEM 图

Fig. 2 SEM images of each material

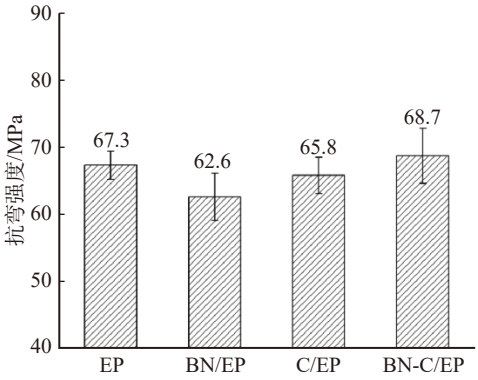


图 3　各材料的抗弯强度

Fig. 3　Bending strength of each material

Weng 等[18]的研究一致。这是由于 BN 的加入破坏了 EP 基体结构的连续性。此外，BN 在 EP 中发生了一定程度的团聚（图 2e～g），导致基体中缺陷位点数量增加，从而进一步降低了抗弯强度。汉麻秆纤维的添加也会破坏环氧树脂基体的连续性，同时，汉麻秆纤维与 EP 之间的孔隙结构（见图 2d）进一步降低了材料的抗弯强度。但汉麻秆纤维之间的相互搭接在一定程度上增加了材料的强度，因此 C/EP 材料的抗弯强度较 BN/EP 下降较少，其抗弯强度为 65.8 MPa。由于 KH570 改善了材料间的相容性，并且汉麻秆纤维之间相互搭接形成了增强网络，BN-C/EP 复合材料的抗弯强度提高至 68.7 MPa。与纯 EP 和 BN/EP 相比，其抗弯强度分别提高了 2.08% 和 9.74%。BN-C/EP 复合材料的力学性能满足作为热界面材料的使用要求。

2.3　BN 的添加对复合材料导热系数的影响

环氧树脂（EP）的导热性能较低，其导热系数为 0.15 W/(m·K)，导温系数为 0.305 mm^2/s（图 4a）。这主要是由于 EP 自身分子链结构导致声子散射较为严重，缺乏有效的热传导路径。当加入碳化汉麻秆纤维后，C/EP 的导热系数下降至 0.135 W/(m·K)，导温系数下降至 0.278 mm^2/s。这可能是由于汉麻秆纤维之间存在许多微小孔隙结构，而 EP 无法完全填充这些孔隙。这些孔隙会阻碍热量的传递，同时引入更多界面，增加声子散射，从而导致导热性能进一步降低。相比之下，BN/EP 的导热系数提升至 0.552 W/(m·K)，导温系数提升至 0.388 mm^2/s，这表明导热填料对 EP 的导热性能有显著的促进作用。值得注意的是，BN-C/EP 的导热系数显著增加至 0.894 W/(m·K)，导温系数增加至 0.880 mm^2/s。这一显著提升归因于复合材料中细长的碳化汉麻秆纤维相互搭接，形成了复杂且有序的三维网络结构，为热量传递提供了高效的传导路径。同时，BN 本身具有良好的导热性能，并且在碳化汉麻秆纤维骨架上均匀分布。两者的协同作用大幅降低了热量在传递过程中的阻力，使热量在材料内部的传导更加高效，从而显著提高了材料的导热系数和导温系数。

与 EP 相比，C/EP 的导热系数降低了 10%，BN/EP 的导热系数提高了 268%，而 BN-C/EP 的导热系数则显著提高了 496%。从每单位填料的导热系数变化来看，C/EP 每单位填料的导热系数降低了 1.6%（体积分数 6.25%），BN/EP 每单位填料的导热系数提高了 31.68%，BN-C/EP 每单位填料的导热系数则大幅提高了 58.63%。这些结果表明，BN-C/EP 的导热系数提升最为显著，远超 BN/EP 和 C/EP 材料，这表明碳化汉麻秆纤维与 BN 的协同作用能够显著提高材料的导热系数。此外，BN-C/EP 中 BN 的体积分数仅为 8.46%。这表明在 BN 含量相对较低的情况下，通过与碳化汉麻秆纤维的协同作用，仍可实现导热系数的大幅提升。这一结果充分展示了该复合体系在提升导热性能方面的显著优势，并为高性能导热材料的制备提供了有价值的思路。

通过对各种复合材料的综合对比分析（表 1），本研究中 BN-C/EP 的每单位填料导热系数增强效率达到了 58.63%，显著高于其他复合材料。这表明本

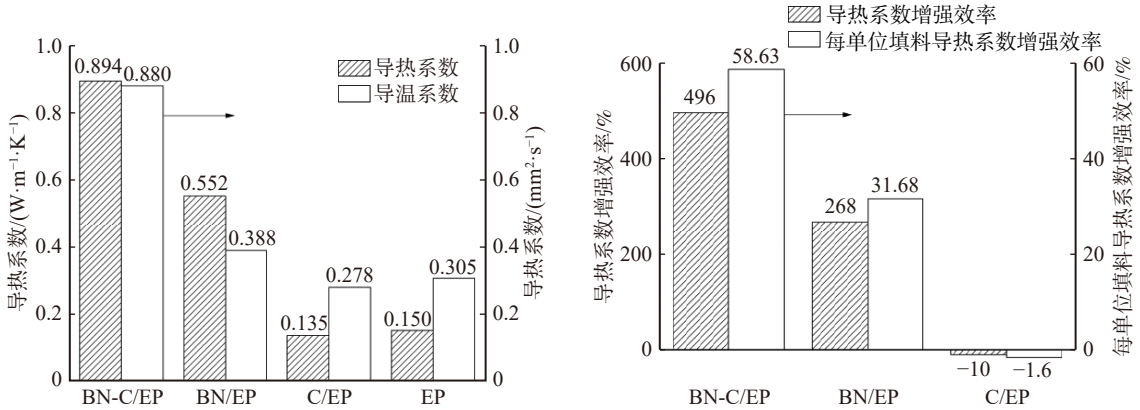


图 4　各材料的导热性能

Fig. 4　Thermal conductivity of each material

表 1 不同复合材料的每单位填料导热系数增强效率对比

Tab. 1 Comparison of filler amounts in different composites and thermal conductivity enhancement per unit of filler

基体	填料	填料体积分数/%	每单位填料导热系数增强效率/%	数据来源
EP	BN/Fe_3O_4	20	4.48	[19]
硅橡胶	Al_2O_3(粒径10 μm)/ZnO(粒径1 μm)	10	6.67	[20]
高密度聚乙烯醇	BN(粒径0.5 μm)	35	9.05	[21]
硅橡胶	Al_2O_3(粒径25 μm、5 μm、0.5 μm、50 nm的混合体积比为2∶5∶1∶1)	64	14.65	[22]
硅橡胶	BN(粒径0.3、6、20 μm的混合体积比为1∶1∶2)	40	16	[23]
EP	AlN	60	19.76	[24]
聚苯乙烯	胶体石墨(粒径4 μm)	34	25.74	[25]
硅脂	碳纳米管(CNTs)	16	45.83	[26]
EP	BN	8.46	58.63	本研究

研究制备的复合材料在导热性能方面具有显著优势，尤其在热界面材料的应用中展现出巨大的潜力和价值。

2.4 导热机制

图 5 展示了 BN-C/EP 试样的导热机制。碳化后的汉麻秆纤维保持了其细长的形态，并在复合材料内部相互搭接，形成了复杂而有序的三维网络结构，为热量传导提供了基础骨架。氮化硼呈片状结构，均匀分布在碳化汉麻秆纤维构成的骨架上。这种紧密的连接方式减少了热量在氮化硼与纤维界面处的传递阻碍和能量损失。氮化硼本身具有良好的导热性能，与碳化汉麻秆纤维之间产生了显著的协同效应。当热量传递至氮化硼区域时，氮化硼能够迅速将热量传导至纤维网络中，使热量沿着纤维的传导路径顺畅传递。这种协同作用使热量在材料内部的传递过程高效且连续，显著降低了热量传递过程中的阻力，从而大幅提升了材料的导热性能。

2.5 跨面导热和面内散热性能

从图 6d 中可以看出，随着放置时间的延长，BN-C/EP 和 EP 试样的表面温度均逐渐升高。升温曲线表明，在相同时间内，BN-C/EP 试样的表面温度更高。当持续升温 240 s 时，BN-C/EP 试样的温度为 75.9 ℃，而 EP 试样的温度为 67.8 ℃，两者温度差为 8.1 ℃。BN-C/EP 试样的导热效率较 EP 试样提高了 11.95%。这一温度差异充分表明，在导热性能方面，BN-C/EP 试样相较于 EP 试样具有显著优势，导热效率更高。在实际应用中，这意味着 BN-C/EP 复合材料在热量传递和散发方面表现更为迅速和高效，尤其适用于需要良好散热性能的场景，展现出更大的应用潜力。

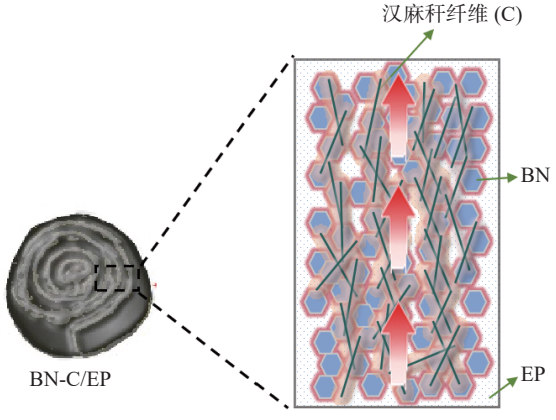


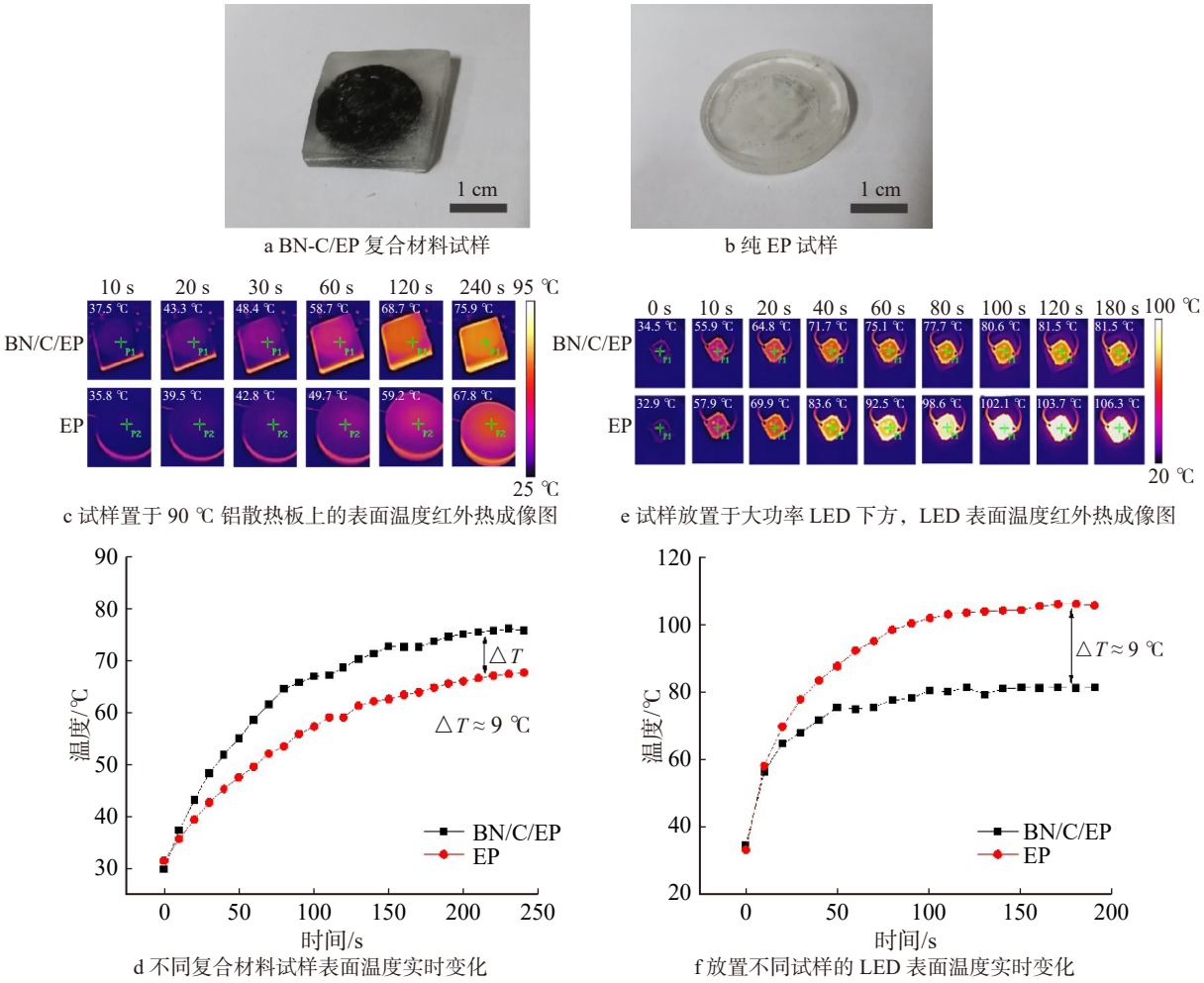
图 5 BN-C/EP 的导热机制示意图

Fig. 5 Thermal conduction mechanism diagram of BN-C/EP

为了进一步评估材料的散热效率，将 BN-C/EP 试样和 EP 试样分别放置于大功率 LED 下方，记录 LED 表面的温度变化，结果如图 6e 和图 6f 所示。从图中可以看出，随着加热时间的延长，两种试样的 LED 表面温度均逐渐升高。当持续加热 180 s 时，BN-C/EP 试样的表面温度达到并保持在 81.5 ℃，而 EP 试样的表面温度达到并保持在 106.3 ℃，两者温度差为 24.8℃。这表明 BN-C/EP 试样的散热效率较 EP 试样提高了 23.33%。这一较大的温差表明两者在散热效率方面存在显著差异。从温度变化幅度来看，EP 试样的温度变化更大，这意味着在相同的加热条件下，EP 材料的散热能力相对较弱，无法像 BN-C/EP 材料那样有效地散发热量，导致热量更容易在局部积聚，从而使 LED 表面温度升高得更为明显。这一结果进一步印证了 BN-C/EP 材料在散热效率方面的优势。

3 结 论

为了构建连续的三维导热网络，提升聚合物基材料的导热性能，本研究以碳化汉麻秆纤维为基础骨架材料，与氮化硼(BN)复合，并以环氧树脂(EP)为基体，制备了碳化汉麻秆纤维–氮化硼协同导热的环氧树脂基复合材料(BN-C/EP)。具体研究结果如下。



a BN-C/EP 复合材料试样　　b 纯 EP 试样

c 试样置于 90 ℃ 铝散热板上的表面温度红外热成像图　　e 试样放置于大功率 LED 下方，LED 表面温度红外热成像图

d 不同复合材料试样表面温度实时变化　　f 放置不同试样的 LED 表面温度实时变化

图 6　BN-C/EP 复合材料和纯 EP 试样跨面导热和面内散热性能测试结果

Fig. 6　Test results of through-plane thermal conductivity and in-plane heat dissipation performance of BN-C/EP composite and pure EP samples

（1）BN-C/EP 复合材料中，碳化汉麻秆纤维相互交织，并与改性后的 BN 协同作用，在三维空间内形成了丰富的热传导通道。与 EP 相比，BN-C/EP 复合材料的导热系数提升了 496%，每单位填料的导热系数提高了 58.63%，能够有效减少导热填料的用量并降低成本。

（2）在跨面导热测试中，BN-C/EP 复合材料的导热效率较 EP 提高了 11.95%；在面内散热测试中，其散热效率较 EP 提高了 23.33%。这表明 BN-C/EP 复合材料在跨面导热材料和面内散热应用（如散热器）方面具有良好的潜力。

（3）BN-C/EP 复合材料的抗弯强度达到 68.7 MPa，较 EP 和 BN/EP 分别提高了 2.08% 和 9.74%，满足作为热界面材料的使用要求。

综上所述，BN-C/EP 复合材料中，汉麻秆纤维与 BN 构建的三维导热网络显著提升了复合材料的导热能力，使其在跨面导热材料和面内散热应用（如散热器）方面展现出良好的应用前景。同时，其抗弯强度满足热界面材料的使用条件，进一步拓展了其在电子封装、航空航天和新能源汽车等高热管理需求领域的应用潜力。此外，本研究揭示了汉麻秆纤维在构建三维导热网络中的重要作用，作为一种天然纤维，汉麻秆纤维不仅具有良好的导热性能，还具备可再生、环境友好和成本低廉等优势。这为类似天然纤维材料的开发和应用提供了有益的参考，也为未来高性能复合材料的设计提供了新的思路。未来的研究可以进一步探索其他天然纤维与不同导热填料的协同作用机制，优化复合材料的微观结构，以实现更高的导热性能和力学性能。同时，随着对可持续发展和绿色材料需求的增加，天然纤维基复合材料的开发将成为材料科学的重要发展方向。通过深入研究天然纤维的改性和复合技术，有望开发出更多高性能、环境友好型的复合材料，满足现代工业对高效热管理材料的需求。

参　考　文　献

[1] Liu C, Xu Z, Song Y, et al. A novel shape-stabilization strategy for phase change thermal energy storage[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(14): 8194−8203.

[2] Pascu O, Garcia-Valls R, Giamberini M. Interfacial

polymerization of an epoxy resin and carboxylic acids for the synthesis of microcapsules[J]. Polymer International, 2008, 57(8): 995−1006.

[3] Li X H, Liu P, Li X, et al. Vertically aligned, ultralight and highly compressive all-graphitized graphene aerogels for highly thermally conductive polymer composites[J]. Carbon, 2018, 140: 624−633.

[4] 寇雨佳, 周文英, 龚莹, 等. 高导热绝缘 BN/聚合物复合材料研究进展 [J]. 绝缘材料, 2017, 50(8): 41−45.
Kou Y J, Zhou W Y, Gong Y, et al. Research progress in thermal conductive and insulating BN/polymeric composites[J]. Insulating Materials, 2017, 50(8): 41−45.

[5] He L, Zeng J, Huang Y, et al. Enhanced thermal conductivity and dielectric properties of h-BN/LDPE composites[J]. Materials, 2020, 13(21): 4738.

[6] Sarkarat M, Lanagan M, Ghosh D, et al. Improved thermal conductivity and AC dielectric breakdown strength of silicone rubber/BN composites[J]. Composites Part C: Open Access, 2020, 2: 100023.

[7] Wang Z, Wang X, Zhang Z, et al. Preparation of a 3D BN network structure by a salt-template-assisted method filled with epoxy resin to obtain high thermal conductivity nanocomposites[J]. Polymer Composites, 2023, 44(6): 3610−3621.

[8] Zhang X, Li J, Gao Q, et al. Nerve-fiber-inspired construction of 3D graphene “tracks” supported by wood fibers for multifunctional biocomposite with metal-level thermal conductivity[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(18): 2213274.

[9] Bao D, Xu F, Cui Y, et al. High-thermal conductivities of epoxy composites via p-phenylenediamine interfacial modification and process intensification[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(41): 51218.

[10] Liu J, Yang K, Yang Y, et al. A waste hemp-based biomass carbon aerogel with high fire-resistance[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(27): e55616.

[11] Wang Y, Tang B, Gao Y, et al. Epoxy composites with high thermal conductivity by constructing three-dimensional carbon fiber/carbon/nickel networks using an electroplating method[J]. ACS Omega, 2021, 6(29): 19238−19251.

[12] 任丹瑶. 汉麻纤维增强复合材料制备和力学性能提升及电磁屏蔽功能实现 [D]. 上海: 东华大学, 2023.
Ren D Y. Fabrication of hemp fiber reinforced composites and enhancement of mechanical properties and realization of electromagnetic shielding [D]. Shanghai: Donghua University, 2023.

[13] 阮芳涛, 吴浩, 朱金伟, 等. TEOS 改性和长秸秆纤维取向对 PP/SF 复合材料性能的影响 [J]. 中国塑料, 2024, 38(2): 14−19.
Ruan F T, Wu H, Zhu J W, et al. Effect of TEOS modification and long straw fiber orientation on properties of PP/SF composites[J]. China Plastics, 2024, 38(2): 14−19.

[14] Soni P, Sinha S. Synergistic effect of alkali and silane treatment on mechanical, flammability, and thermal degradation of hemp fiber/epoxy composite[J]. Polymer Composites, 2022, 43(9): 6204−6215.

[15] Shi X, Wei B, Gao H. Enhanced flame retardancy of epoxy composites containing melamine polyphosphate-modified boron nitride[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(48): e53215.

[16] Yang D, Ni Y, Kong X, et al. Mussel-inspired modification of boron nitride for natural rubber composites with high thermal conductivity and low dielectric constant[J]. Composites Science and Technology, 2019, 177: 18−25.

[17] Jang I, Shin K H, Yang I, et al. Enhancement of thermal conductivity of BN/epoxy composite through surface modification with silane coupling agents[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 518: 64−72.

[18] Weng L, Wang H, Zhang X, et al. Improved thermal conductivities of epoxy resins containing surface functionalized BN nanosheets[J]. Nano, 2018, 13(11): 1850133.

[19] Kim K, Ju H, Kim J. Surface modification of BN/Fe_3O_4 hybrid particle to enhance interfacial affinity for high thermal conductive material[J]. Polymer, 2016, 91: 74−80.

[20] Sim L C, Ramanan S R, Ismail H, et al. Thermal characterization of Al_2O_3 and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes[J]. Thermochimica Acta, 2005, 430(1): 155−165.

[21] Zhou W, Qi S, Li H, et al. Study on insulating thermal conductive BN/HDPE composites[J]. Thermochimica Acta, 2007, 452(1): 36−42.

[22] Zhou W, Qi S, Tu C, et al. Effect of the particle size of Al_2O_3 on the properties of filled heat-conductive silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(2): 1312−1318.

[23] Zhou W Y, Qi S H, Zhao H Z, et al. Thermally conductive silicone rubber reinforced with boron nitride particle[J]. Polymer Composites, 2007, 28(1): 23−28.

[24] Yu H, Li L, Kido T, et al. Thermal and insulating properties of epoxy/aluminum nitride composites used for thermal interface material[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 124(1): 669−677.

[25] Tu H, Ye L. Thermal conductive PS/graphite composites[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2009, 20(1): 21−27.

[26] Park J J, Taya M. Design of thermal interface material with high thermal conductivity and measurement apparatus[J]. Journal of Electronic Packaging, 2005, 128(1): 46−52.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）