

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.026

# 聚合物基热界面材料的研究进展

赖倩<sup>1</sup>, 厉德<sup>1</sup>, 卞军<sup>1</sup>, 吴俊君<sup>1</sup>, 杨尚科<sup>1</sup>, 蔺海兰<sup>1</sup>, 陈代强<sup>2</sup>, 常凯军<sup>3</sup>, 蔡旭光<sup>4</sup>(1. 西华大学材料科学与工程学院, 成都 610039; 2. 四川大学高分子科学与工程学院, 成都 610065;  
3. 海南古樽科技有限公司, 海口 570100; 4. 常州源自然新材料科技有限公司, 江苏常州 213000)

**摘要:** 热界面材料是一类用于快速降低电子元件中热源温度的功能性材料。相较于传统导热材料, 聚合物基材料具备优异的耐化学腐蚀性、易于成型加工和良好的柔韧性等特点, 在现代电子器件等领域应用广泛。本文综述了近年来高热导聚合物基热界面材料的研究进展。首先分析了不同类型的功能填料对聚合物基复合材料导热性能的影响, 包括陶瓷填料、金属填料、碳填料和新型结构填料; 随后重点概述了基体分子设计、界面工程和多尺度结构设计等复合材料热导率提升策略的最新研究成果; 进一步阐述了计算模拟技术在热界面材料开发中的应用进展; 最后对聚合物基热界面复合材料未来发展可能面临的挑战、研究方向及应用趋势进行了展望。

**关键词:** 聚合物基复合材料; 界面热管理; 功能性填料; 结构设计; 界面工程

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0210-06

## Research progress in polymer-based thermal interface materials

LAI Qian<sup>1</sup>, LI De<sup>1</sup>, BIAN Jun<sup>1</sup>, WU Junjun<sup>1</sup>, YANG Shangke<sup>1</sup>, LIN Hailan<sup>1</sup>, CHEN Daiqiang<sup>2</sup>, CHANG Kaijun<sup>3</sup>, CAI Xuguang<sup>4</sup>(1. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Hainan Guzun Technology Co., Ltd., Haikou 570100, China;  
4. Changzhou Yuanziran New Material Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

**Abstract:** Thermal interface materials(TIMs) is a class of functional materials used to rapidly reduce the temperature of heat sources in electronic components. Compared with traditional thermally conductive materials, polymer-based materials are widely used in modern electronic devices and related fields due to their excellent chemical resistance, ease of processing and molding, and good flexibility. Recent research progress in highly thermally conductive polymer-based TIMs is summarized in this review. Firstly, the effects of different types of functional fillers on the thermal conductivity of polymer composites are analyzed, including ceramic fillers, metal fillers, carbon-based fillers, and novel structural fillers. Subsequently, the latest research advances in strategies for enhancing thermal conductivity are highlighted, covering matrix molecular design, interface engineering, and multiscale structural design of composites. Furthermore, the application progress of computational simulation techniques in the development of TIMs is outlined. Finally, potential future challenges, research directions, and application trends for polymer-based thermal interface composites are prospected.

**Keywords:** polymer-based composites; thermal interface management; functional fillers; structural design; interface engineering

随着电子设备向小型化、高集成化和高功率密度方向发展, 高效散热已成为保障其性能、可靠性与使用寿命的关键。热界面材料是可以提高热传递性能, 增强对热流的敏感性,

并能够快速降低电子元件中热源的温度从而保持电子产品的运行稳定性和使用寿命的功能性材料<sup>[1]</sup>。近年来, 聚合物材料因其优异的电绝缘性、易加工性、轻质及低成本等优点

**基金项目:** 教育部春晖计划合作项目(Z2018088), 西华大学大学生界面创新研究工作室项目(2019-07), 西华大学“双碳”材料创新研究工作室建设项目, 国家级大学生创新创业项目(202410623025、20241623039), 西华大学研究生科技创新竞赛项目(YK20240042、YK20240049)以及西华大学“西华杯”创新创业训练计划项目(xhb2023067、xhb2023068)

**通信作者:** 卞军, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为结构与功能高分子复合材料

**收稿日期:** 2025-11-06

**引用格式:** 赖倩, 厉德, 卞军, 等. 聚合物基热界面材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3):210-215.

LAI Qian, LI De, BIAN Jun, et al. Research progress in polymer-based thermal interface materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3):210-215.

被广泛用作热界面材料的基体。然而,大多数聚合物本征热导率较低,见表1<sup>[2-3]</sup>,难以满足高效散热需求。已有研究发现,通过将高导热填料引入聚合物基体中可以显著提高复合材料的热导率<sup>[4]</sup>。此外,通过聚合物基体的分子设计、复合材料界面工程以及多尺度结构设计等策略,也可进一步优化

热管理性能,这对提升聚合物基复合材料的附加值,拓展其在热界面领域的应用具有重要的实际意义。鉴于此,笔者对提高聚合物基复合材料导热性的近期研究进展进行总结和分析,并指出其优点与不足,以期高性能热界面材料的设计与开发提供参考。

表1 常见聚合物在室温下的热导率

Tab. 1 Thermal conductivity of common polymers at room temperature

| Materials                   | Thermal conductivity/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ] | Materials                       | Thermal conductivity/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| Poly(vinyl alcohol)(PVA)    | 0.2                                           | Polyimide (PI)                  | 0.18                                          |
| Polypropylene (PP)          | 0.14                                          | Polyethylene (PE)               | 0.25-0.41                                     |
| Epoxy resin (EP)            | 0.17-0.21                                     | Natural rubber (NR)             | 0.13                                          |
| Polycarbonate (PC)          | 0.19                                          | Polystyrene (PS)                | 0.04-0.14                                     |
| Polydimethylsiloxane (PDMS) | 0.25                                          | Poly(methyl methacrylate)(PMMA) | 0.17-0.25                                     |

### 1 聚合物基热界面材料的填料及其功能化研究进展

功能性填料在提高聚合物基复合材料的热导率方面具有关键作用。通过引入高导热填料并在基体中构建有效的热传导通路,可显著提升复合材料的热导率。常用的导热填料主要包括陶瓷填料、金属填料、碳填料以及新型结构填料等。

#### 1.1 陶瓷填料

陶瓷填料如氮化硼(BN)、氧化铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、氮化铝(AlN)等兼具高导热性与优良的电绝缘性,是制备绝缘导热复合材料的理想选择。Yang等<sup>[5]</sup>通过冰模板与原位合成,优化了多孔Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>陶瓷的制备,其有序结构缩短了热传递路径,热导率达到12.17 W/(m·K),并在700 °C及酸碱盐腐蚀环境中保持稳定。尽管该研究对聚合物基复合材料设计具有启发意义,但由于其体系为无机MAX相陶瓷,与聚合物在材料属性存在本质差异,导致界面结合困难,在直接指导聚合物基复合材料的界面声子传输设计及规模化制备方面仍有局限。而秦彤等<sup>[6]</sup>制备了球形BN(sBN)/聚酰胺(PA)12T复合材料,并通过有限元研究了sBN粒径对复合材料导热性能的影响。当sBN填充质量分数达40%时,复合材料的面内热导率达3.39 W/(m·K),提升9.6倍,垂直热导率也提高2.7倍,实现了导热与流动性的协同优化。有效解决了PA12T加工流动性差与导热不足的难题,并通过有限元模拟与实验验证了填料粒径与分散性对导热通路构建的关键作用。但研究中填料粒径偏大、界面结合机制未优化。

利用陶瓷导热填料形成的复合材料其热导率通常远低于理论值。这是由于基体与填料的界面相容性较差,填料难以形成有效的导热路径。在本课题组前期的工作中,Huang等<sup>[7-9]</sup>向热塑性聚氨酯(TPU)中掺入铝酸酯偶联剂DL-411化学官能化的微米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,制备了具有优异力学、热稳定性和导热性的复合材料。通过显微观察证实,化学官能化的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒均匀分散并构建了较为完善的导热网络。随着填料含量的增加,材料的热导率持续提升,最高为0.28 W/(m·K)。为继续改善TPU的力学性能和导热性能,杨佳等<sup>[10]</sup>又向其中加入了多壁碳纳米管杂化填料。结果显示,添

加质量分数2.5%的杂化填料后,复合材料热导率显著提升,达到了0.449 W/(m·K),且在相同填料含量下,复合材料的平行热导率高于垂直热导率。

#### 1.2 金属填料

金属填料,如金、银、铜、铝、铁和镍,凭借其内部自由电子运动而具备极高的热导率,可以用于制备聚合物基热管理复合材料<sup>[11-12]</sup>。Zhang等<sup>[13]</sup>通过构建液态金属桥接石墨烯的三维导热网络,制备出聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合材料,其在低填料负载下实现了1.86 W/(m·K)的热导率。由于液态金属的流动填充优化了网络的连续性与界面接触面积,显著降低了界面热阻并赋予材料优异的柔韧性和循环变形稳定性。但三维互联的PDMS/GNPs/LM泡沫支架在长期热循环或湿热环境中的界面稳定性较差,且热导率仍难以满足高功率器件的散热需求。尽管PDMS/GNPs/LM复合材料表现出良好的柔韧性、传感能力和疏水性,但仍需进一步优化填料负载量和界面调控机制,以实现更高的热导率和多功能集成。金属填料聚合物复合材料适用于电绝缘要求较低的应用,如化学生产和污水处理中使用的热交换器、太阳能热水器、电池冷却器等。

#### 1.3 碳填料

碳在自然界中以多种同素异形体存在,其结构的差异导致碳基材料的热导率范围很广<sup>[14]</sup>。其中,零维无定形炭黑的热导率通常低于0.1 W/(m·K)。相比之下,碳纳米管(CNTs)、石墨烯、碳纤维(CF)和金刚石表现出超高热导率,被广泛用作制备高性能聚合物基热界面材料的填料。Huang等<sup>[15]</sup>通过制备氧化石墨烯(GO)/苯甲酸钠(Sb)复合成核剂来增强PA6纳米复合材料,结果显示复合材料的热导率显著提升。这种简单而有效的方法为开发用于高性能热界面材料的PA6-石墨烯纳米复合材料提供了新途径。Wang等<sup>[16]</sup>通过在CF表面生长CNTs模板并诱导液晶环氧树脂(EP)形成超厚取向层,显著提升了复合材料的热导率。该方法依靠取向层构建的三维连续传热网络,增强了声子传导并抑制裂纹扩展。然而,该工艺存在CNTs生长均匀性控制难、取向层厚度调控复杂、多步制备不易规模化等问题限制了实际应用前

景。而 Xie 等<sup>[17]</sup>从填料结构入手,协同利用不同粒径的金刚石填料来实现紧密堆积结构。研究发现,较小颗粒对大颗粒之间间隙的有效填充形成了高效的导热网络,得到的复合材料热导率大大提升,达到 12.45 W/(m·K)。尽管该方法显著增强了散热性能,但在填料比例和粒径组合方面仍有优化空间。未来的改进可能涉及多尺度颗粒杂化或表面功能化改性,以进一步提高界面热传输效率。

#### 1.4 新型结构填料

##### 1.4.1 二维层状填料

二维材料因其高比表面积和易取向特性,有利于在特定方向形成高效导热通路。为了解决用于锂离子电池热管理的有机相变材料导热性差和结构不稳定的问题,Piao 等<sup>[18]</sup>优化了原位乳液聚合法,开发了 MXene 桥接的微封装相变材料。利用 MXene 形成的热传导网络,使复合材料的热导率提高了 237.5%。然而, MXene 添加量限制了热导率的进一步提高,并且 MXene 在潮湿环境中的长期稳定性仍然不足。未来的工作可能集中在 MXene 的表面功能化以改善分散性,构建杂化填料体系以平衡整体性能,以及将智能电池管理系统与可扩展的封装技术集成,以促进其在高能量密度电池热管理中的实际应用。

##### 1.4.2 多孔结构填料

多孔材料可作为三维支撑模板,辅助构建连续导热网络,该网络有效增加了聚合物基体中的热传递路径,显著提高了复合材料的整体热导率。Xu 等<sup>[19]</sup>的研究通过氢键辅助冰模板组装策略成功构建了由 CF 和 GO 组成的垂直排列三维碳网络,并将其与 PA6 复合,在质量分数低至 5.2% 的填料含量下,实现了贯穿面热导率达 1.45 W/(m·K),相比基体提升了 644%。该工作通过调控碳纤维的表面改性和构建长程有序的声音传递路径,有效降低了界面热阻,显著提升了复合材料的面内导热性能,并为低填充量下获得高导热性提供了创新的结构设计思路。然而,该方法依赖低温冷冻与冷冻干燥等复杂工艺,难以实现规模化制备;同时,研究虽对网络的压缩回弹性能进行了表征,但未充分评估其在长期界面压力与热循环下多孔结构的形态稳定性及接触热阻的演变,这在一定程度上限制了该材料在高可靠、高强度要求的界面热管理场景中的实际应用潜力。引入多孔材料,特别是具有特定结构的多孔材料,可以在不牺牲甚至提升复合材料机械性能的情况下优化热导率<sup>[20]</sup>。这对于既需要导热性又需要结构完整性的应用至关重要。吴海华等<sup>[21]</sup>研究了高强高导热多孔石墨骨架的制备工艺,通过添加中间相碳微球对其进行增强改性,碳微球的加入使得界面结合增强。结果显示,碳微球使复合材料的热导率大幅提升,为高导热结构材料的快速成型提供了有效的工艺方案。然而,该研究对界面热阻的主动调控机制讨论不足,工艺复杂度较高,限制了其在聚合物基界面热管理复合材料中的直接借鉴与规模化应用潜力。尽管在使用多孔材料进行聚合物基界面热管理复合材料方面取得了显著进展,但降低二者之间的界面热阻,减少声音

散射仍是挑战。构建具有高导热效率和结构稳定性的多孔网络,同时确保其在长期使用条件下的可靠性,也是实际应用中的重要考虑因素。

## 2 聚合物基界面热管理复合材料的基体分子设计研究进展

添加导热填料可以显著提高复合材料的热导率,但填料与聚合物基体之间产生的界面热阻会影响整体传热效率。这种界面热阻会导致声子散射,从而阻碍热传递。通过分子工程设计可以显著增强聚合物本身的传热能力<sup>[22]</sup>并优化其与填料的界面相互作用。研究发现,在聚合物链中引入能够与填料表面形成强相互作用的官能团可以有效降低界面热阻<sup>[23]</sup>。Yangthong 等<sup>[24]</sup>制备了环氧化天然橡胶(ENR)导热复合材料。结果表明,填料中的极性官能团与 ENR 中的环氧基团之间的相互作用促进了填料在基体内的均匀分散,复合材料的热导率达到 2.23 W/(m·K),较纯 ENR 提高约 92%,同时保持了较好的力学性能,为开发极性橡胶基导热复合材料提供了有价值的配方与机理参考。此外,由于声子是聚合物中热能的主要载体,其散射程度显著影响聚合物的热导率。因此,有序的聚合物链结构有利于声子传输,从而提高热导率<sup>[25]</sup>。因此,分子的结构设计应旨在实现尽可能有序排列的分子链。近年来,精确调控聚合物基体的结晶度也已成为增强材料本征热导率的核心策略。Trinh 等<sup>[26]</sup>通过阴离子开环聚合制备了一系列不同烷基链长度的侧链液晶环氧聚合物(SCLCEPs),研究了介晶结构对其热导率的影响。研究发现,缩短烷基链可显著提升聚合物的结晶度与介晶有序排列,使其体热导率升高,并表现出良好的热稳定性与可逆液晶行为,证明了其通过阴离子开环聚合实现结构精准控制的有效性,且介晶有序组装有助于构建高效导热路径,并明确建立了热导率随烷基链缩短而增加的规律,将最短烷基链对应的聚合物热导率提升至 0.57 W/(m·K)。但是液晶结构在应力或热循环中的稳定性尚不明确。Gu 等<sup>[27]</sup>设计了一种侧链液晶 EP,通过硫醇-环氧化物反应制得自修复液晶环氧薄膜,其面内热导率达 1.25 W/(m·K),贯穿面热导率为 0.33 W/(m·K),显著高于传统双酚 A 环氧树脂,为本征导热聚合物的设计与制备提供了重要范例,也从理论上验证了提升基体本征热导率对复合材料整体导热性能的增强效果。该工作虽在理论引导方面具有重要价值,但在面向工程化、高可靠、低界面热阻的聚合物基界面材料体系设计方面仍显不足。

聚合物基界面热管理复合材料的基体分子设计已取得显著进展,其核心在于通过化学修饰增强基体与填料的界面相互作用,促进填料分散并降低界面热阻。然而,当前研究仍多集中于单一橡胶或树脂体系,所涉及填料的热导率普遍较低,对界面的多尺度热输运机制、界面热阻的动态调控及高导热网络的跨尺度构建机制尚缺乏系统深入的阐释。

## 3 聚合物基界面热管理复合材料的界面工程研究进展

界面工程通过改善基体与填料之间的界面结合,从而降低界面热阻,提高复合材料的热导率<sup>[28]</sup>。强的界面结合确保了热量从填料到聚合物基体及反之的有效传递。

### 3.1 表面改性

通过对填料表面进行改性可以形成共价键或物理吸附,同时能与基体反应或缠结,是增强界面结合的常用手段。葛舟等<sup>[29]</sup>采用改性球形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与褶皱石墨烯协同构建导热网络,制备出面内与面外热导率均显著提高的复合材料,但其面外远低于面内,表明垂直方向的导热网络构建不充分,在实际热界面中可能因各向异性导致散热不均。该方法通过结构设计促进填料形成互联导热网络,工艺简单、可规模化成型,适用于高功率电子器件的热管理。等离子体处理以改变填料表面的化学成分和形态、引入反应性官能团以增强与聚合物基体的界面结合。Jongil 等<sup>[30]</sup>采用逐层等离子体表面处理在堆叠预浸料的表面和界面形成粗糙且亲水的氧化界面层,有效提升了复合材料垂直方向的热导率与耐油性。结果表明,层压碳纤维增强复合材料中垂直分布的氧化物部分

降低了堆叠预浸料之间的垂直热阻,从而在贯穿厚度方向上提供了有效的散热路径。

聚合物基复合材料的界面工程,特别是通过表面改性优化填料与基体之间的结合,是提高复合材料热导率的关键途径。随着新材料和新技术的不断涌现,界面工程将继续为高性能复合材料的发展注入新的活力。然而,复合材料的界面改性仍然存在挑战,例如在微观尺度上准确测量填料与基体之间的界面结合强度等。

### 3.2 核壳结构

构建核壳结构填料可通过中间层降低界面声子失配与散射<sup>[31]</sup>。核壳结构的有序组装能够将原本为0维、1维或2维的低维填料转化为三维的填料网络结构,产生协同效应。这赋予了填料新的功能性并增强了复合材料的热导率<sup>[32-33]</sup>。表2总结了核壳结构填料聚合物复合材料的热导率。

表2 核壳结构填料聚合物复合材料的热导率

Tab. 2 Thermal conductivity of polymer composites with core-shell structure fillers

| Fillers                              | Polymer matrixes | Filler loading | Thermal conductivity of composites/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ] | Refs. |
|--------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|-------|
| Ag@SiO <sub>2</sub>                  | PI               | 50 vol%        | 7.88                                                        | [34]  |
| AgNWs@SiO <sub>2</sub>               | EP               | 4 vol%         | 1.03                                                        | [35]  |
| AgNWs@h-BN                           | PI               | 20 vol%        | 4.33                                                        | [36]  |
| MWCNTs@SiO <sub>2</sub>              | EP               | 1 wt%          | 0.24                                                        | [37]  |
| MWCNTs@h-BN                          | PI               | 3 wt%          | 0.388                                                       | [38]  |
| h-BN@SiO <sub>2</sub>                | EP               | 50 wt%         | 1.33                                                        | [39]  |
| SiC@SiO <sub>2</sub>                 | PVDF             | 65 vol%        | 1.72                                                        | [40]  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @h-BN | PDMS             | 60 vol%        | 2.23                                                        | [41]  |

Notes: AgNWs is silver nanowires; h-BN is hexagonal boron nitride; MWCNTs is multi-walled carbon nanotubes.

近年来,金属导热填料的电绝缘处理引起了显著关注,许多研究人员为此采用了化学涂层方法,以实现三维、完整的核壳结构填料。Xu 等<sup>[42]</sup>开发了一种双核壳结构填料  $\text{Al@Al}_2\text{O}_3@\text{SiO}_2$ , 填充到 EP 中以避免热导率性能下降。Mun 等<sup>[43]</sup>通过喷雾干燥与热处理制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{h-BN}$  核壳微球,并在表面生长硼酸铝( $\text{Al}_{18}\text{B}_4\text{O}_{33}$ )晶须,形成了高度各向同性的三维导热网络,其 PDMS 复合材料贯穿面热导率达 8.8 W/(m·K)。为了提高复合材料的热导率和电绝缘性能,核壳结构可以成功解决高热阻电绝缘填料的问题。然而,核壳填料工艺复杂、收率低,限制了其产业化。改进核壳填料的制备工艺,提高产量,降低成本是核壳填料未来的发展方向。

## 4 多层结构设计多尺度界面效应

多尺度结构设计通过在不同尺度上进行设计和优化材料,宏观上提高复合材料的热传导路径,进一步提升其热管理性能。这包括对填料结构、排列以及复合材料整体结构的精细控制。采用多层结构、三维网络结构和仿生结构设计等策略来克服传统聚合物低热导率的局限性,并优化填料与基体之间的传热效率。

### 4.1 多层结构

通过交替堆叠不同材料的层,可以创建特定的热传导路径,并调控界面热阻。Zhao 等<sup>[44]</sup>采用真空交替过滤技术制备了多层梯度氮化硼纳米片(BNNS)芳纶纳米纤维/(ANF)薄

膜,通过 BNNS 定向排列与层间高相容性降低界面厚度,从而减少接触热阻。该结构使面内热导率显著提升,在总填料质量分数固定为 50% 的条件下,双层梯度结构(BNNS/ANF-2L)实现了 19.13 W/(m·K)的高面内热导率和 59.3 MPa 的拉伸强度,相比同填料含量的单层薄膜分别提升了 23.6% 和 61.6%,有效解决了高导热填料填充通常导致机械性能劣化的经典矛盾,为热界面材料的梯度设计提供了有效策略。同时,研究通过有限元分析和 LED 散热实验,不仅验证了“正梯度”结构的优越散热性能,还深入揭示了梯度结构通过优化层间热匹配和应力分布来实现性能协同增强的机制。Balan 等<sup>[45]</sup>使用醇基溶剂剥离石墨获得多层石墨烯,后将其掺入石蜡基体中。发现复合相变材料的热导率随着多层石墨烯含量的增加而增加。该研究采用环保方法获得石墨烯化学物质。这种创新策略还可以改善石蜡的传热,从而在电子应用中实现更有效的热缓冲。

### 4.2 仿生设计与三维网络

受自然界启发,仿生设计为构建高效热管理结构提供了新思路。Chen 等<sup>[46]</sup>创造性地融合了仿生学理念、拓扑优化算法与 3D 打印技术,设计的仿生森林状 3D  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EP}$  复合结构显著提升了材料的热导率,当陶瓷填料体积分数仅为 40% 时,复合材料的热导率达到了 15.76 W/(m·K),相比纯环氧树脂提升了 7 778.2%,其结构设计理念具有创新性。这一飞跃

性性能提升远超常规共混复合材料,有效验证了从二维平面到三维互穿结构范式转变在构建高效导热通路上的巨大潜力;同时,研究通过有限元分析和LED散热实测,将材料本征性能与实际散热效能紧密关联,证明了该结构优异的主动散热能力,为高热复合材料的设计与制备提供了一条快速、高效的创新路径。Chen等<sup>[47]</sup>通过溶剂交换诱导自组装策略,将BNNSs嵌入玻璃态自修复TPU中,构建了一种具有仿珍珠母层状结构的纳米复合材料,该方法解决了BNNS团聚问题,并重建了坚固而动态的非共价界面相互作用。高度排列和互连的BNNS骨架赋予纳米复合材料高达11.54 W/(m·K)的面内热导率。研究虽验证了短期耐湿性与导热恢复,但长期热循环稳定性和耐久性未充分说明,该材料体系在面向实际器件热管理应用时,仍需开展更深入的研究。

构建三维互连热传导网络也是提高聚合物复合材料热效率的关键策略。热导率提高的关键在于是否最大程度地构筑了导热通路<sup>[48]</sup>。Wang等<sup>[49]</sup>通过将波纹石墨烯与扁平石墨烯纸黏结,采用表面功能化来增强石墨烯纸框架与聚合物基体之间的界面相互作用,制备了在面内和横向上都具有连续填充结构的石墨烯框架,大大提高了复合材料的导热通路,从而降低界面热阻。Wang团队开发的复合材料具有高导热性、低接触热阻和低压缩模量的特点,与先进的导热商业产品TIMTFLEX-700相比,在TIMs测试中表现出更优越的性能,有效解决了电子系统中的界面传热问题。这种新型填料结构框架也提供了一种在高效热管理和易于加工之间取得平衡的解决方案。

### 5 计算模拟辅助热界面材料开发

随着人工智能的快速发展,研究人员开始利用计算模拟来预测材料的热导率,以远超实验的速度和极低的成本在材料被制造出来之前就预测其性能,深刻理解其热传导机理,并高效地筛选出最优的候选材料,极大地缩短了新材料的研发周期。Du等<sup>[50]</sup>利用分子动力学模拟研究了影响PDMS的因素,得出非晶结构、链长、旋转柔韧性好、振动更强、Si和O原子更多以及沿热通量方向的密度更高,对提高热导率有积极贡献。该工作不仅通过对比不同链长与形态的PDMS体系,明确了结构柔韧性与链长对热传导的促进机制,还通过二面角分布与声子态密度分析,从原子尺度阐明了非晶态PDMS骨架的相对稳定性及其振动特性对热运输的影响,为理解聚合物本征导热行为提供了重要的理论依据,并对热界面材料的分子设计具有指导意义。但界面及实际加工使用环境的考虑不足,需结合多尺度实验与模拟进一步拓展至填充体系及实际应用场景。然而,该研究主要聚焦于纯PDMS的本征性质,未涉及填料-基体界面效应及实际加工与使用环境的影响,因此后续可结合多尺度模拟与实验,进一步拓展至填充体系及实际应用场景下的导热机制研究。王才进等<sup>[51]</sup>运用多种前沿人工智能算法探究了土体的热传导机制,构建了相应的热导率预测模型,并对影响因素进行了系统分析。结果显示,这些模型均能实现土体热导率的准确预测,

且所建立的模型精度明显优于传统经验公式。人工智能与计算模拟技术正引领导热性能预测范式革新,为聚合物基热界面材料的理性设计与高通量筛选提供了变革性手段,然而从分子动力学揭示的本征热传导机制到人工智能建立的宏观性能预测模型,均需进一步突破“数据-机理-环境”的多尺度耦合瓶颈,以推动预测工具从理论验证向实际复合材料体系与复杂服役环境的可靠设计与性能调控跨越。

### 6 结语与展望

聚合物因其耐化学腐蚀、易加工和柔韧等特性,广泛应用于航空航天、微电子等领域,但其本征热导率低限制了在高温环境中的应用。当前研究主要通过填料功能化、基体设计、界面及多尺度结构调控来提升导热性能,但仍面临填料分散、导热与力学性能协同以及多功能集成等挑战。本文深入探讨了影响聚合物基复合材料导热性能的关键因素,为开发高性能聚合物基热界面材料提供了参考。未来应聚焦新型填料开发、人工智能辅助设计、绿色制备工艺及智能响应材料研发,推动聚合物基界面热管理复合材料在高温、高功率电子等严苛环境下的可靠应用。

#### 参考文献

- [1] 韩咚林,等.工程塑料应用,2022,50(3):14-18.  
HAN Donglin, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3): 14-18.
- [2] FENG T, et al. Physical Review Applied, 2020, 14(4). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.044023.
- [3] LEUNG S N. Composites Part B:Engineering, 2018(150):78-92.
- [4] ZHANG L, et al. Composites Communications, 2018(8):74-82.
- [5] YANG F, et al. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(8):3 112-3 121.
- [6] 秦彤,等.工程塑料应用,2025,53(7):32-37.  
QIN Tong, et al. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 32-37.
- [7] HUANG H, et al. Polymer, 2020(188). DOI: 10.1016/j.polymer.2019.122119.
- [8] ZHANG X T, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(39). DOI:10.1002/app.52938.
- [9] 张迅韬,等.西华大学学报(自然科学版),2025,44(6):59-69.  
ZHANG Xuntao, et al. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2025, 44(6):59-69.
- [10] 杨佳,等.工程塑料应用,2022,50(07):20-27.  
YANG Jia, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7): 20-27.
- [11] DAVIS L C, et al. Journal of Applied Physics, 1995, 77(10):4 954-4 960.
- [12] GUAN C, et al. Composites Part B:Engineering, 2020(198). DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108167.
- [13] ZHANG Y, et al. Chemical Engineering Journal, 2025(515). DOI: 10.1016/j.cej.2025.163651.
- [14] YUAN Q, et al. Applied Physics Letters Materials, 2019, 7(3).

- DOI:10.1063/1.5082767.
- [15] HUANG H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(10). DOI:10.1002/app.51761.
- [16] WANG H, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2025(297). DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112297.
- [17] XIE S, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(12):10 686–10 699.
- [18] PIAO J, et al. *Applied Thermal Engineering*, 2025(279). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127760.
- [19] XU T, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2021(224). DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109205.
- [20] PANG Z, et al. *Polymers*, 2023, 15(16). DOI: 10.3390/polym15163341.
- [21] 吴海华,等. *材料热处理学报*, 2023, 44(6):37–45.  
WU Haihua, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(6):37–45.
- [22] 何鹏,等. *材料工程*, 2018, 46(4):1–11.  
HE Peng, et al. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(4): 1–11.
- [23] JO J O, et al. *Materials & Design*, 2015(83):777–785.
- [24] YANGTHONG H, et al. *Polymers*, 2024, 16(23). DOI: 10.3390/polym16233362.
- [25] LI M, et al. *Nano Letters*, 2017, 17(3):1 587–1 594.
- [26] TRINH T E, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2025, 46(6). DOI:10.1002/marc.202400762.
- [27] GU J, et al. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13(1). DOI: 10.1007/s40820-021-00640-4.
- [28] YAO Y, et al. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8(45):31 248–31 255.
- [29] 葛舟,等. *工程塑料应用*, 2024, 52(6):8–13.  
GE Zhou, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(6): 8–13.
- [30] JONGIL A, et al. *Surfaces and Interfaces*, 2023(37). DOI:10.1016/j.surfin.2023.102723.
- [31] ZHANG M, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2021(215). DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108764.
- [32] NGO I L, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016(101):147–155.
- [33] WANG Y, et al. *Polymer Bulletin*, 2019, 76(8):3 957–3 970.
- [34] ZHOU Y, et al. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(1). DOI: 10.1063/1.4733324.
- [35] CHEN C, et al. *Composites science and technology*, 2014(105): 80–85.
- [36] ZHOU Y, et al. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(8). DOI: 10.1063/1.4961625.
- [37] CUI W, et al. *Carbon*, 2011, 49(2):495–500.
- [38] YAN W, et al. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(48): 20 958–20 965.
- [39] GE M, et al. *Materials & Design*, 2019(182). DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108028.
- [40] ZOU D, et al. *Composites Science and Technology*, 2019(177): 88–95.
- [41] GUAN S, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(41). DOI:10.1002/app.51211.
- [42] XU X, et al. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(14). DOI:10.1063/5.0020409.
- [43] MUN H J, et al. *Applied Materials Today*, 2025(45). DOI:10.1016/j.apmt.2025.102795.
- [44] ZHAO L H, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2022(229). DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109454.
- [45] BALAN A E, et al. *Materials*, 2023, 16(6). DOI: 10.3390/ma16062310.
- [46] CHEN J, et al. *American Chemical Society Applied Polymer Materials*, 2025, 7(17):11 598–11 605.
- [47] CHEN J, et al. *Advanced Materials*, 2025, 37(42). DOI: 10.1002/adma.202507548.
- [48] 姚正高,等. *工程塑料应用*, 2022, 50(5):159–164.  
YAO Zhenggao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(5):159–164.
- [49] WANG B, et al. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2024, 42(07):1 002–1 014.
- [50] DU Y, et al. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021(618). DOI:10.1016/j.colsurfa.2021.126409.
- [51] 王才进,等. *岩土工程学报*, 2022, 44(10):1 899–1 907.  
WANG Caijin, et al. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10):1 899–1 907.