

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.027

三维导热高分子复合材料制备方法研究进展

姚正高¹, 曹政¹, 张磊², 蔡计杰³, 孙昊³, 王明³, 石姗姗¹, 姜涛¹, 王瑛¹, 李文戈¹, 吴新锋¹

(1. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 中广核俊尔新材料有限公司, 浙江温州 325011;

3. 上海晋飞碳纤维科技股份有限公司, 上海 201306)

摘要: 分析了构筑三维导热网络结构在导热高分子复合材料上的应用优势, 介绍了构筑三维导热网络结构的不同方法, 包括冻干取向法、金属泡沫法、陶瓷泡沫法、3D 打印法、静电植绒法、静电纺丝法、碳泡沫法等, 概述了不同构筑方法的成型机理, 并对不同方法制备的三维导热高分子复合材料的热导率进行了归纳和总结。分析表明, 构筑三维导热网络结构对高分子复合材料的导热性能提升具有显著的正向效应。对在构筑三维导热网络结构的同时如何进一步提高复合材料的导热性能进行了展望。

关键词: 导热高分子复合材料; 热导率; 三维导热网络

中图分类号: O482.2+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0159-06

Research Progress on Preparation Methods of Three Dimensional Thermal Conductive Polymer Composites

Yao Zhenggao¹, Cao Zheng¹, Zhang Lei², Cai Jijie³, Sun Hao³, Wang Ming³,

Shi Shanshan¹, Jiang Tao¹, Wang Ying¹, Li Wenge¹, Wu Xinfeng¹

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. CGN Juner New Materials Co., Ltd., Wenzhou 325011, China; 3. Shanghai Cedar Composites Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract : The advantages of constructing three dimensional thermal conductive network structure on thermal conductive polymer composites were analyzed, and different methods of constructing three dimensional thermal conductive network structure were introduced, including freeze drying orientation method, metal foam method, ceramic foam method, 3D printing method, electrostatic flocking method, electrostatic spinning method and carbon foam method, etc. The forming mechanisms of different construction methods were summarized. The thermal conductivities of three dimensional thermal conductive polymer composites prepared by different methods were concluded. The analysis showed that the construction of three-dimensional thermal conductive network structure had a significant positive effect on the improvement of thermal conductivity of polymer composites. How to further improve the thermal conductivity of composites while constructing three-dimensional thermal conductive network structure was prospected.

Keywords : thermal conductive polymer composite ; thermal conductivity ; three-dimensional thermal conductive network

随着社会逐步迈向智能化, 当前对于材料的需求也向着小型化、便携化和高集成化方向发展, 电子器件在高功率状态下运行时会在其内部迅速产生和积累大量的热量, 使得电子器件的稳定性和可靠性面临严峻的挑战^[1]。这些热量的产生和积累主要归因于电子芯片和散热器之间的界面粗糙度, 这会导致更大的热阻并降低热扩散率^[2], 所以制备高热导率的复合材料是解决上述问题的一种重要途径。而现阶段为了降低热阻、提高复合材料的热导率, 已经提出了许

多可行性方案, 如填料杂化、建立热传导路径、涂层、表面处理等^[3-4]。从 20 世纪 40 年代以来, 导热高分子复合材料已经有了将近 80 年的历史。在导热材料的研究初始阶段, 材料导热性的高低直接决定了其本身热能和电能的相互转换效率。而且当时材料的类型较为单一, 成本也昂贵, 如硅和一些金属导热材料。随着需求的发展, 人们尝试将树脂和一些高热导性的材料混合来制备高热导复合材料, 这为制备新型导热复合材料提供了新思路。如今, 导热高分子复合材料

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2017M611757), 上海市科技人才计划项目 (19QB1402200), 上海市科委“科技创新行动计划”地方院校能力建设项 (19040501800), “上海高水平地方高校创新团队 (海事安全与保障)”项目

通信作者: 吴新锋, 副教授, 主要从事复合材料的研究

收稿日期: 2022-02-25

引用格式: 姚正高, 曹政, 张磊, 等. 三维导热高分子复合材料制备方法研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):159-164.

Yao Zhenggao, Cao Zheng, Zhang Lei, et al. Research progress on preparation methods of three dimensional thermal conductive polymer composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):159-164.

在航空航天、电子封装、相变储能、散热器等领域有着普遍的应用。但是随着经济、科技的发展,人们对导热材料的应用程度和要求更高,不再局限于传统材料的单一性能,而是对材料优良的综合性能寄予了更高的期望。其中,阻碍热导率提高的主要因素是界面热阻。随着填料维度增加,界面总面积减小,单位质量填料的热传输效率遵循从一维到三维递增的趋势。一维导热复合材料一般是填充单一填料,且是随机取向,不利于能量的传输;而二维导热复合材料尽管能够形成有效的取向结构,但是相比构筑三维导热网络,其导热只限于一个界面;对于三维导热复合材料,其热导率能否提高的关键在于是否最大程度地构筑了导热通路。图1是列举的构筑导热通路的导热高分子复合材料的一些制备方法。包括冻干取向法^[5]、金属泡沫法^[6]、陶瓷泡沫法^[7]、3D打印法^[8]、静电植绒法^[9]、静电纺丝法^[10]、碳泡沫法^[11]等。



图1 导热高分子复合材料导热通路的构筑方法

热传递主要包括3种形式:热传导、热对流和热辐射,在很多场合的传热过程都是这三种形式综合作用的结果。一般来说,热传导是固体材料传热的主要方式。从根本上讲,热传导是物质中微观粒子碰撞和转移的结果,材料中的热传导载流子主要包括电子、光子和声子,由于聚合物本身无自由电子,其热传导主要通过晶格振动和分子链振动来实现,热能的载体主要是声子。填料种类不同,其导热机理也不同。金属填料主要通过电子导热,而非金属填料主要依靠声子进行热传导,其热扩散速率主要取决于邻近原子或结合基团的振动^[12]。其中热导率与热传导呈直接关系,可通过公式(1)定义:

$$\lambda = \alpha C_p \rho \quad (1)$$

式中: λ ——热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

α ——热扩散系数, m^2/s ;

C_p ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

ρ ——密度, kg/m^3 。

对于导热复合材料,有许多因素影响其热导率,主要包括基体的固有热导率(分子链结构、分子链取向、结晶度等)、几何特征以及导热填料的聚集或分散状态,以及基体和导热填料之间的界面相互作用。其中,导热填料的分散状态及其与基体的界面等因素与制备方法息息相关,因此笔者总结了

当前构筑三维导热高分子复合材料的主流制备方法,选取典型文献分析制备三维导热高分子复合材料的方法及该方法的成型机理,最后对近几年使用该方法制备三维导热高分子复合材料的热导率进行了总结。

1 冻干取向法

冻干取向法是制备具有清晰孔隙结构的各向异性聚合物的主要方法。冻干取向法制备的复合材料的形态多样性主要取决于冰的冻结方向,从而决定最终性能。根据成核和冰生长模型(即冻结方向),冻干取向法大致分为四类:各向同性冻结、单向冻结、双向冻结和径向冻结。

图2是运用冻干取向法制备环氧树脂(EP)/碳纤维(CF)三维导热复合材料示意图, Ma等^[5]制备了一种基于三维垂直排列CF(3D-CF)骨架结构的导热界面材料,其中3D-CF骨架是通过垂直冷冻CF溶液,然后干燥除去冰,最后用EP基体渗透而制成。在相对较低的碳纤维体积分数(13%)下,制备的复合材料垂直于表面方向的热导率 $[2.84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 明显高于纯环氧树脂的热导率 $[0.19 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。表1是运用冻干取向法制备的导热复合材料的热导率。从表1可知,通过冻干取向法得到的复合材料的热导率普遍集中在 $3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下。



图2 冻干取向法制备 EP/CF 三维导热复合材料示意图

表1 冻干取向法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料含量 /%	热导率 / [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	参考文献
液体 EP/CF	13 (vol)	2.84	[5]
热塑性聚氨酯 / [改性氮化硼 (M-BN)+ 碳网络]	23 (wt, M-BN)	1.524	[13]
EP/六角氮化硼 (BN)	21 (wt)	1.227	[14]
聚乙二醇 (PEG)/壳聚糖 包覆 BN	27 (wt)	2.77	[15]
硅橡胶 / (碳化硅纳米线 + 还原氧化石墨烯)	1.84 (vol)	2.74	[16]

注: vol 表示体积分数, wt 表示质量分数, 下表同。

2 金属泡沫法

金属泡沫法是一种将金属泡沫结合相变材料(PCM)制备三维导热复合材料的方法。在同等体积的情况下, PCM在恒定温度下可以储存大量的能量,但热导率较低,而金属泡沫的加入能够增强PCM的导热性^[17-18]。金属泡沫具有较优的物理和力学性能,使其在许多工程应用中获得优先考虑,尤其是在储热系统、电池、散热器、太阳能集热器等^[6,18]。而在由金属泡沫法制备的导热复合材料中,采用的金属泡沫

大多以高孔隙率开孔金属泡沫为主,这是因为其具有良好的导热性能。

Liu 等^[6]利用“仿生方法”制备了一种高导热 PCM 复合材料。该复合材料是通过模拟自然珊瑚的生长方式,通过将编织芳基网络聚合物(KAPs)嵌入到泡沫铜(CuF)的骨架上得到的。在 KAPs 和 CuF 的协同作用下, KAPs-CuF PCM 复合材料的热导率高达 $55.37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。图 3 是运用金属泡沫法制备 KAPs-CuF PCM 复合材料示意图。首先通过生物激发生长方案在 CuF 骨架上制备 KAPs-CuF,该方案主要利用液相沉积法,以三苯基膦和苯为单体,甲醛二甲基缩醛(FDA)为交联剂,无水氯化铁(FeCl_3)为催化剂;随后将反应得到的嵌入 CuF 的聚合物 KAPs-CuF 用无水甲醇冲洗并真空烘干;最后通过引入石蜡进行真空浸渍获得 KAPs-CuF PCM 复合材料。由于具有良好的形状可调性、导热性,该 PCM 复合材料成为热能管理的理想候选材料。表 2 是运用金属泡沫法制备的导热复合材料的热导率。从表 2 可以看出,选取不同的泡沫金属,得到的复合材料的热导率也不同。一般来说,以 CuF 作为支撑得到的复合材料热导率最好,热导率最高达到 $55.37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而以泡沫铁和泡沫镍作为支撑得到的复合材料热导率相对较低。

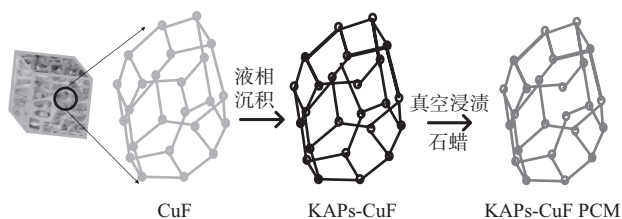


图3 金属泡沫法制备 KAPs-CuF PCM 复合材料示意图

表2 金属泡沫法制备的导热复合材料热导率

复合材料	方法	热导率 / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	参考文献
KAPs/CuF	液相沉积法	55.37	[6]
EP/ 石墨烯包裹泡沫镍	水热 + 液滴润湿	0.584	[18]
EP/ $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.3}$ 开孔泡沫	复制铸造法	0.326 8	[19]
双酚 F EP/(泡沫铜 + 金刚石泡沫)	热丝化学气相沉积 + 真空浸渍	2.28	[20]
EP/ 泡沫镍	真空辅助混合 + 填充策略	1.00	[21]

3 陶瓷泡沫法

陶瓷泡沫法是一种利用具有网络泡沫结构的陶瓷材料作为导热网络提高复合材料导热性能的方法。对于大多数陶瓷填料,其热传递主要是通过声子驱动^[22],具有较高的导热性和电绝缘性,为了增强复合材料的导热性,需要在陶瓷材料中构建有效且连续的热传导路径^[23]。

泡沫陶瓷作为多孔陶瓷中的一类特殊材料,具有较理想的空间结构和孔隙率。其中高孔隙率使得泡沫陶瓷广泛用于太阳能等热利用领域^[24-25],但具有特殊组合性能(如导热性和吸水性)的泡沫陶瓷也引起制造业的注意,Wu 等^[7]

报道了一种由 EP、四脚状氧化锌晶须(T-ZnOw)和网状多孔氧化铝(Al_2O_3)陶瓷(RPCs)组成的互穿网络结构复合材料。图4是运用陶瓷泡沫法制备 EP/T-ZnOw/RPCs 复合材料的示意图,主要包括 RPCs 的制备,EP/T-ZnOw 的制备,EP/T-ZnOw/RPCs 复合材料的制备。作者揭示了 5 种结构的 RPCs,以及 RPCs 和 T-ZnOw 含量对 EP 基复合材料导热性能的影响。发现当 RPCs 的体积分数小于 12% 时,EP 的导热率显著增加 $[>1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。表 3 是利用陶瓷泡沫法制备的导热复合材料热导率。从表 3 可以看出,用陶瓷泡沫法制备的导热复合材料的导热性能不尽相同,但是热导率大部分集中在 $3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以内。

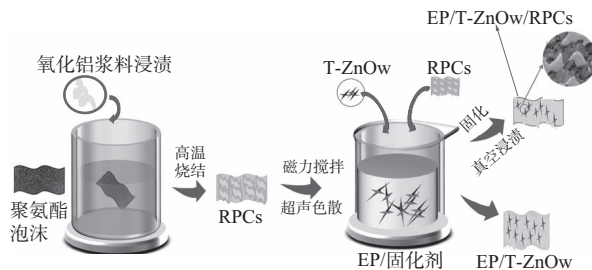


图4 陶瓷泡沫法制备 EP/T-ZnOw/RPCs 复合材料示意图

表3 陶瓷泡沫法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料体积分数 / %	方法	热导率 / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	参考文献
双酚 A EP/T-ZnOw/RPCs	6 (T-ZnOw), 11.7 (RPCs)	真空浸渍法	1.968	[7]
EP/(GaInSn 液态合金 + 陶瓷填料)		搅拌	2.46	[22]
EP/ 氮化铝蜂窝陶瓷	47.26	冷冻铸造 + 渗透法	9.48	[26]
酚醛树脂/ Al_2O_3		直接发泡法	>0.7	[27]

4 3D 打印法

3D 打印法也称为添加式制造法,可在不需要任何特殊工具、装置或夹具的情况下,将复杂几何图形加工成最终形状^[28]。其中“打印材料”包括金属和陶瓷、热塑性材料、树脂、水凝胶及黏弹性材料等。使用 3D 打印技术避免了传统制造业的切割程序,不需要通过模具进行制造,便能够得到更高的尺寸精度,还能够减少构建原型的时间,特别是在制造体积小、结构复杂的物体时具有很大优势。通过一体成型的打印技术,不需要二次加工,与电脑联机结合操作,实现了批量生产和远程操控。

Ji 等^[8]选择高导热 CF 与球形 Al_2O_3 结合形成导热网络,通过 3D 打印得到 CF 及 Al_2O_3 体积分数分别为 12% 和 30% 的导热复合材料,其热导率达到 $7.36 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。图 5 是运用 3D 打印法制备定向硅橡胶/ Al_2O_3 /CF (OCASR) 复合材料的示意图,表 4 是运用 3D 打印法制备的导热复合材料热导率。从表 4 可以看出,用 3D 打印法制备的导热复合材料在填料含量不同时,热导率也不尽相同,最低小于 $0.5 \text{ W}/$

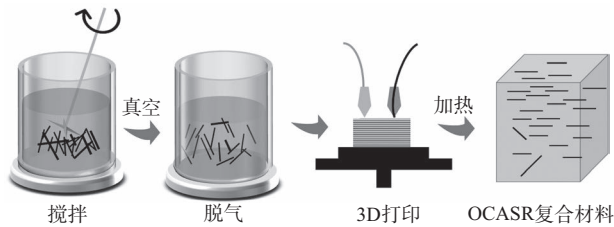


图5 3D打印法制备OCASR定向复合材料示意图

表4 3D打印法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料含量 /%	方法	热导率 / [W · (m · K) ⁻¹]	参考 文献
硅橡胶 /CF/Al ₂ O ₃	12 (vol, CFs), 30 (vol, Al ₂ O ₃)	3D 打印	7.36	[8]
聚己酸内酯 /BN/ 氮化铝	27 (wt, BN)	3D 打印	1.543	[29]
ABS ¹⁾ /PET ²⁾ /MoS ₂ / WS ₂ / 石墨	20 (wt, 石墨)	3D 打印 注塑 (IM)	<0.45 (3D) <0.3 (IM)	[30]
紫外线固化树脂 / Al ₂ O ₃	30(wt)	3D 打印	2.622	[31]
聚二甲基硅氧烷 / BN/Al ₂ O ₃	35 (wt, BN), 30 (wt, Al ₂ O ₃)	3D 打印	3.64	[32]

注:1)为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料;2)为聚对苯二甲酸乙二酯。
(m · K),最高可达到 7.36 W/(m · K)。

5 静电植绒法

静电植绒是一种利用库仑驱动力将导电微纤维推向涂有粘合剂的基材,留下一片排列整齐的“纤维林”的方法。这是一种有效的填料定向方法,相比冻干取向法,这种方法可以确保更高的填料负载和更好的取向^[33]。该方法工艺简单、成本低、适用范围普遍,特别适用于高纵横比填料,如CF。图6是运用静电植绒法制备毛绒毡复合材料示意图,Sun等^[9]利用静电植绒的方法,在薄CF毡中嵌入不同的填料,制备出一种高导热层的模糊毡,然后用EP将这些填料粘在纤维毡上,制备出原始的毛绒毡,然后制成复合材料层压板,其热导率达到 1.2 W/(m · K),比对照样品的热导率 0.38 W/(m · K)高 216%。表5是运用静电植绒法制备的

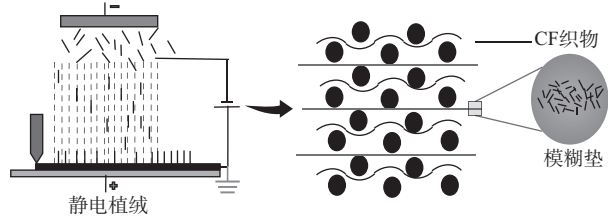


图6 静电植绒法制备毛绒毡复合材料示意图

表5 静电植绒法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料质量 分数 /%	方法	热导率 / [W · (m · K) ⁻¹]	参考 文献
乙烯基树脂 /CF	47.5	双层静电植绒	28.9	[33]
EP/ 中间相沥青基 CF (XN-100-25Z)/CF 100-25Z)	10 (XN- 100-25Z)	静电植绒 / 真空辅助	1.2	[9]
硅橡胶 / 定向 CF		静电植绒	8.92	[34]
硅树脂 / 中间相 沥青基 CF	13.4	静电植绒	15.3	[35]
EP/CF/ 水热碳包覆 埃洛石粘土纳米管		静电植绒	0.601	[36]

导热复合材料热导率。从表5可以看出,静电植绒法主要制备CF基底的复合材料,其中填料及填料含量的选取不同,都会导致复合材料的热导率差异很大,最高可达到 28.9 W/(m · K),但也能低到 0.601 W/(m · K)。

6 静电纺丝法

静电纺丝是一种制备直径为几十微米至数百纳米的连续纤维的纺丝工艺。得益于聚合物和纳米材料的原位改性和功能化,静电纺丝得到广泛的使用。依赖于表面电荷之间的静电斥力,可从黏弹性流体中连续拉伸纳米纤维。静电纺丝作为一种快速、简单和连续的工艺在制造纳米纤维以及形成其2D和3D结构方面具有重要意义^[10,37]。图7是运用静电纺丝法制备复合相变纤维材料(PCF)示意图。在图7中,Ji等^[10]利用聚乙二醇(PEG)为相变组分,氧化石墨烯(GO)为导热填料,复合相变纤维(PVPs)为纤维基体,首先利用超声波进行均匀分散,通过静电纺丝制备了新型PEG/GO PCF,热导率可达 0.5668 W/(m · K)。表6是运用静电纺丝法制备的导热复合材料热导率。从表6可以看出,利用静电纺丝法制备的导热复合材料的热导性与填料及填料含量相关性较大,选取的材料、填料含量不同,最终得到的复合材料的热导率的值也不尽相同。

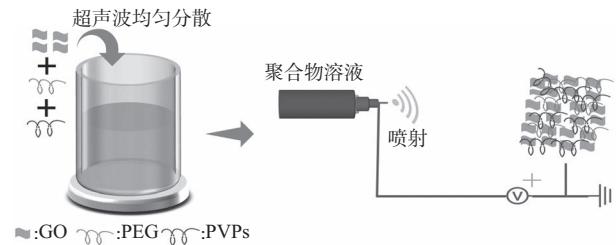


图7 静电纺丝法制备PCF示意图

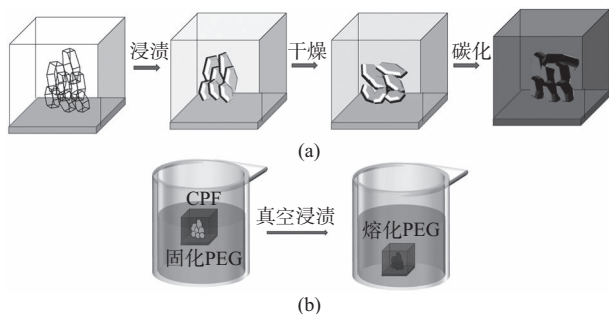
表6 静电纺丝法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料质量 分数 /%	热导率 / [W · (m · K) ⁻¹]	参考 文献
PEG/GO	0.5	0.5668	[10]
聚酰亚胺 / 改性石墨烯	5	1.05	[37]
PVDF/ 聚乙烯醇 (PVAL)		2.434	[38]
硅橡胶 / 丙烯腈-苯乙烯纳米纤维		0.32	[39]
PVAL/BN 纳米片	30	18.63	[40]

7 碳泡沫法

碳泡沫法是一种基于碳基多孔泡沫材料(CPF)为支撑载体,与PCM相结合,制备出具有热能储存的导热复合材料的方法,克服了传统PCM在储热结构中低导热性的缺点。由于高孔隙率的碳基材料具有高的导热性和高的形状稳定性,目前以碳基材料作为框架的PCM在研究中具有很大的吸引力^[41]。Lin等^[11]设计了基于CPF的复合PCM。图8是运用碳泡沫法制备复合PCM的示意图。其中,图8a是CPF制备示意图,以酚醛树脂(PF)为原料,采用碳化和牺牲模板技术相结合的工艺制备了具有三维互连微孔结构和

良好抗压强度的 CPF;图 8b 是运用真空浸渍制备 PCM 的示意图,通过真空浸渍法以确保 PEG 完全引入 CPF。与纯 PEG 相比,制备的 PEG/CF 复合材料热导率明显提高,热导率提高了 109.8%。表 7 总结了通过碳泡沫作为三维网络框架制备的复合材料的热导率。可以发现,运用碳泡沫法制备的导热复合材料在热能储存系统领域、电子元件保护方面具有巨大的应用潜力。



a—CPF 制备示意图; b—真空浸渍法制备 PCM 示意图

图 8 碳泡沫法制备 PCM 示意图

表 7 碳泡沫法制备的导热复合材料热导率

复合材料	填料质量分数 /%	方法	热导率 / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	参考文献
PEG/CPF		真空浸渍	0.531	[11]
脂肪族 EP/(BN 纳米片 + 碳纳米管)	20	共混法	1.49	[42]
EP/(碳纳米纤维网 + 碳化镍)	5	冷冻 + 真空干燥	0.5	[43]
商用 EP/三聚氰胺泡沫 /GO		浸渍法	0.92	[44]
双酚 F EP/(氨基功能化多壁碳纳米管 + 羧基化 $Fe_3O_4@Ag$)	15	共混浇铸法	0.46	[45]

8 结语

现阶段科研人员针对三维导热高分子复合材料已经进行了大量的研究工作。导热高分子复合材料在电子元件散热、储能领域有很可观的应用前景。由于填料的热导性差、现阶段研发技术相比未达到预期需求,限制了其在储能方面的应用,大大阻碍了我国电子信息产业的发展。

笔者主要阐述了现阶段通过三维网络制备高导热复合材料的方法,在导热复合材料中构建三维导热网络是有效提高复合材料导热性能的方法,尤其在制备高导热的复合材料中显得尤为重要。现对以上制备方法的优缺点总结如下。

(1) 对于冻干取向法,利用冰模板,使得纤维获得了取向,相当于间接获得了高取向的导热网络结构,但相较于泡沫法,其制备工艺相对比较复杂,耗时较长,难以实现规模化生产。但是此种方法优点在于可以选择纤维的取向,在低含量时,获得的导热材料的热导率相对较高。

(2) 泡沫法是利用金属泡沫、陶瓷泡沫以及碳泡沫法制备泡沫模板,然后将树脂等 PCM 灌入泡沫模板中制备高导热 PCM,制备工艺简单,但是需要平衡泡沫含量与热导率之

间的关系,尽量在低含量的情况下获得较高的热导率。

(3) 3D 打印技术避免了传统制造业的切割程序,不需要通过模具进行制造,便能够得到更高的尺寸精度,还能够减少构建原型的时间。特别是在制造体积小、结构复杂的物体时具有很大优势。但是存在成本高、工时的软肋、打印材料受到限制、规模化生产方面尚不具备优势。

(4) 静电纺丝法制备的导热复合材料具有比表面积大、孔隙率高、尺寸容易控制、表面易功能化(如表面涂覆、表面改性)等特点,在生物医学、环境工程以及纺织等领域都有重要的应用价值。

(5) 静电植绒法能够确保更高的填料负载和更精确的取向,但是该制备工艺不能保证热界面的表面光滑,会增加界面的热阻,而后续处理粗糙度也会增加成本。目前主要应用在纺织行业。

虽然目前制备的导热高分子复合材料的热导率显著提高,但是电子技术的快速发展对复合材料的导热性不断提出更高的要求。目前复合材料的热导性仍旧难以达到预期。导热复合材料在未来应有更多的发展选择。基于现阶段的研究方向,在将来可能会有以下的研发思路来突破当前瓶颈:①继续沿着降低导热复合材料界面热阻的思想探索,寻求更高的突破;②构筑更理想的热传导通路,研究内部热传导机理,优化实验;③彻底舍弃填充型导热复合材料的研究,转向本征型导热复合材料的研究和实验。现阶段许多三维导热高分子复合材料的制备还停留在实验室研制阶段,仍无法进行工业化生产,相信随着新技术、新材料的发展,三维导热高分子复合材料的性能会得到不断的改善,最终实现大规模工业化生成。

参考文献

- [1] Ruan K P, et al. Composites Communications, 2020, 22. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100518.
- [2] Wang J W, et al. Advanced Materials Interfaces, 2019, 7(4). DOI: 10.1002/admi.201901582.
- [3] Li X K, et al. Powder Technology, 2020, 361:957–967.
- [4] Jiang D P, et al. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2020, 35(1):9–15.
- [5] Ma J K, et al. Chemical Engineering Journal, 2020, 380. DOI: 10.1016/j.ccej.2019.122550.
- [6] Liu C H, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(30). DOI:10.1039/D0TA04626D.
- [7] Wu B Y, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 137. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.105993.
- [8] Ji J C, et al. Thermochimica Acta, 2020, 690. DOI:10.1016/j.tca.2020.178649.
- [9] Sun Y F, et al. Materials & Design, 2018, 144:263–270.
- [10] Ji R, et al. Journal of Energy Storage, 2021, 40. DOI:10.1016/

- j.est.2021.102687.
- [11] Lin F K, et al. *ChemistrySelect*, 2020, 5(11):3 217–3 224.
- [12] Yuan Z Y, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(11). DOI:10.1002/mame.202100428.
- [13] Pan D, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 209. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108609.
- [14] Chen X L, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(14). DOI:10.1021/acsami.0c04882.
- [15] Jia X W, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, 129. DOI:10.1016/j.compositesa.2019. 105710.
- [16] Song J N, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, 133. DOI:10.1016/j.compositesa.2020. 105873.
- [17] El Idi M M, et al. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 21. DOI:10.1016/j.csite.2020.100716.
- [18] Liang H, et al. *Applied Physics A*, 2016, 122. DOI:10.1007/s00339-016-0048-1.
- [19] Pinto S C, et al. *Metals*, 2019, 9(11). DOI:10.3390/met9111214.
- [20] Ye W T, et al. *Materials & Design*, 2018, 156:32–41.
- [21] Di B, et al. *Ceramics International*, 2020, 46(17):27 531–27 538.
- [22] Xiong S W, et al. *Composites Science and Technology*, 2021, 202. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108596.
- [23] He X H, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(3):1 137–1 154.
- [24] Chen X, et al. *Energy Conversion and Management*, 2015, 97: 282–289.
- [25] Huang T Q, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 198. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108322.
- [26] Wei Z L, et al. *Composites Science and Technology*, 2020. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108304.
- [27] Shimamura A, et al. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2020, 8(1):176–182.
- [28] Sanei S H R, et al. *Journal of Composites Science*, 2020, 4(3). DOI:10.3390/jcs4030098.
- [29] Wang J L, et al. *Composites Communications*, 2020, 19:142–146.
- [30] Gamboa G, et al. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2020, 38(4). DOI:10.1116/6.0000121.
- [31] Wang H H, et al. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(13). DOI: 10.1063/5.0042812.
- [32] Liu M J, et al. *Ceramics International*, 2020, 46(13). DOI:10.1016/j.ceramint.2020.05.096.
- [33] Ye Z Q, et al. Aligned-carbon-fibre/silicone-rubber composite with high thermal conductivity fabricated by double-stacked electrostatic flocking method[C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). New York:IEEE, 2020:1–4.
- [34] Ji T X, et al. *Carbon*, 2018, 131:149–159.
- [35] Yu Z F, et al. *Journal of Materials Science:Materials in Electronics*, 2019, 30(11). DOI:10.1007/s10854-019-01360-7.
- [36] Wu X P, et al. *Polymer Composites*, 2020, 41(7):2 687–2 703.
- [37] Guo Y Q, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(12): 3 004–3 015.
- [38] Zheng H T, et al. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(39):21 580–21 587.
- [39] Lv X H, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 200. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108414.
- [40] Yang X T, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 175. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107070.
- [41] Maleki M, et al. *Applied Energy*, 2020, 258. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114108.
- [42] Yang W, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2021, 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109168.
- [43] Qian Y X, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131608.
- [44] Li S, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019, 120:95–105.
- [45] Lei W, et al. *Carbon*, 2019, 141:506–514.

(上接第 147 页)

- [13] 杨坤. 无机刚性粒子及其级配共混增强增韧聚丙烯的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- Yang Kun. Study on polypropylene toughened and reinforced by inorganic single-filler and hybrid filler[D]. Chengdu:Sichuan University, 2006.
- [14] Liang J Z, Ruan J Q, Li B. Effects of the surface treatment of wollastonite on the tensile and flow properties for reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2014, 34(7):649–655.
- [15] 阮锦泉. 聚丙烯/硅灰石复合材料性能及其增强增韧机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- Ruan Jinqun. Research on properties and reinforcing & toughening mechanisms of PP/wollastonite composites[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.
- [16] 晏海霞, 胡珊, 刘娟. 绢云母/ABS 树脂复合材料的制备及性能 [J]. *非金属矿*, 2007, 30(5):19–21.
- Yan Haixia, Hu Shan, Liu Juan. Preparation and properties of ABS composites filled with sericite[J]. *Non-Metallic Mines*, 2007, 30(5):19–21.
- [17] 雷芸. 绢云母表面改性及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- Lei Yun. Study on surface modification and mechanism of sericite[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2003.