

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.001

面向热功能应用的聚合物复合材料增材制造综述

张皓博^{1,2}, 熊 异^{1,2}

(1. 南方科技大学连续碳纤维增强复合材料智能制造深圳市重点实验室, 深圳 518055; 2. 南方科技大学自动化与智能制造学院, 深圳 518055)

摘要: 聚合物复合材料因其轻量化、易加工、耐腐蚀等性能, 在热功能应用中展现出独特优势。近年来, 聚合物复合材料增材制造技术的前沿突破, 为构筑具备可调热学性能与集成复杂功能的热功能器件提供了重要机遇。本文系统总结了面向热功能应用的聚合物复合材料增材制造研究进展, 并从材料、工艺与结构设计 3 个维度总结了关键设计原则, 包括导热填料的合理选择与定向调控、打印工艺参数优化及空间与仿生结构设计等, 以实现热导率提升与热分布的精确调控。同时, 梳理了其在热致动器、热界面材料、热隐身及高效散热系统等领域的初步应用。最后, 本文指出增材制造、智能复合材料与多功能设计的深度融合趋势, 并展望其在电子器件、机器人等应用的广阔前景, 为新一代热功能系统的开发提供了创新思路。

关键词: 增材制造; 聚合物复合材料; 填料定向; 导热结构; 热管理

中图分类号: TB381 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2026)01-0001-18

Review on Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites for Thermal Functional Applications

ZHANG Haobo^{1,2}, XIONG Yi^{1,2}

(1. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Continuous Carbon Fibre Reinforced Composites, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. School of Automation and Intelligent Manufacturing, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Polymer-based composites exhibit unique advantages in thermal functional applications due to their lightweight, processability, and corrosion resistance. In recent years, advances in additive manufacturing of polymer-based composites have provided important opportunities for constructing thermal functional devices with tunable thermal properties and integrated complex functionalities. This paper summarizes recent progress in additive manufacturing of polymer-based composites for thermal functional applications and outlines key design strategies from three dimensions: Material, process, and structural design. These include rational selection and orientation control of thermally conductive fillers, optimization of printing parameters, and the design of spatial and bioinspired structures to achieve enhanced thermal conductivity and precise regulation of heat distribution. Meanwhile, their preliminary applications in thermal actuators, thermal interface materials, thermal cloaking, and efficient heat dissipation systems are reviewed. Finally, this paper highlights the trend

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52575290);“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09X256)。

收稿日期: 2025-11-17; **修订日期:** 2025-12-31

通信作者: 熊异, 男, 副教授(正高级), 博士生导师, 长期从事智能增材制造与机械优化设计交叉领域研究, 当前研究方向包括: 智能化设计与制造、复合材料增材制造、面向增材制造的设计、智能材料与结构。先后承担有科技部重点研发计划项目课题、国家自然科学基金面上/青年及省市级项目多项。在 Nature Communications, Additive Manufacturing, Composite Science and Technology 等国际学术期刊上发表论文 60 余篇。E-mail: xiongy3@sustech.edu.cn。

引用格式: 张皓博, 熊异. 面向热功能应用的聚合物复合材料增材制造综述[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 1-18. ZHANG Haobo, XIONG Yi. Review on additive manufacturing of polymer-based composites for thermal functional applications[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(1): 1-18.

toward deep integration of additive manufacturing, intelligent composites, and multifunctional design, and envisions broad prospects in electronics, robotics, and aerospace, providing innovative insights for the development of next-generation thermal functional systems.

Key words: additive manufacturing; polymer-based composites; filler alignment; thermal conductive structures; thermal management

热作为最基本的能量形式之一,其传递过程广泛存在于自然界与工程实践中。从日常生活中的水蒸发^[1]、冰块融化^[2]、房屋温度维持^[3],到高端技术领域如柔性电子封装散热^[4]、汽车工业热管理^[5]、航空航天器热防护系统^[6],对热传递过程的认知与调控始终至关重要。然而,热流自发地由高温区向低温区扩散的特性,使得在特定应用场景下实现对其定量、定向、按需的精确操控面临巨大挑战^[7]。尤其是在高功率密度芯片、车载电子和大规模数据中心等场景中,电子器件运行产生的大量热量在有限空间内快速积聚,局部热流密度可达 200 W/cm^2 甚至超过 $2\,000 \text{ W/cm}^2$ ^[8]。传统依赖自然对流、简单散热片以及均质金属导热部件的散热方案,对高热流密度和小型化器件的适应能力有限。同时,航空航天、新能源汽车等领域对轻量化、集成化、高可靠热管理的需求日益迫切,发展能够跨尺度精确调控热传导、对流与辐射的新材料与新技术,已成为前沿交叉领域的核心课题^[9]。通过引入具备热响应特性的材料,设备能够在复杂工作环境下实现对环境的自感知、自适应与自调节功能,从而实现更高效的运行状态。高效的热管理不仅能显著提升设备性能,还能有效防止过热与系统故障,延长使用寿命^[10]。

在此背景下,聚合物基复合材料凭借轻量化、易加工、耐腐蚀等优势,在热功能应用中展现出巨大潜力^[11]。通过向聚合物基体中引入高导热或高热阻填料,并对其空间排布与取向进行精细调控,可构建具有增强或抑制热传导、选择性热发射或吸收等功能的热超材料^[12-14]。这类材料的功能实现往往依赖于复杂有序的定向结构,如一维纤维^[15]、二维层状^[16]或三维网络^[17]。然而,传统制造工艺受限于模具形状与分步加工流程,难以实现填料取向、组分梯度与三维结构的协同优化,因而在构建满足多尺度、多物理场耦合需求的热管理结构方面面临显著挑战。

增材制造作为一种新兴制造技术,通过逐层堆叠实现自由成形,不仅突破了传统工艺在几何复杂度和设计自由度上的限制,还可实现对材料内部结构与性能的精确控制^[18]。对于聚合物复合材料的热功能应用,增材制造能够在微观尺度上调控材料结构,构建定向导热通道,从而显著提升热导率与

传热效率^[19]。相较于传统方法仅在宏观尺度调整结构或简单改变填料含量,增材制造的优势在于能够在单一构件内同步实现材料组分梯度与三维网络的协同设计^[20]。结合多材料打印^[21]、外场诱导材料取向^[22]及后处理^[23]等先进工艺,还可进一步实现热响应行为的可编程调控,使增材制造逐渐成为开发高效热管理与智能热系统的重要手段。

本文系统性地总结了增材制造在聚合物复合材料热功能应用领域的设计原则,并展望了其未来发展方向。首先,概述了聚合物复合材料中的热传导机制,阐明增材制造在材料设计与性能调控方面的优势,并据此提出填料设计、工艺设计和结构设计 3 大核心设计原则(图 1)。在填料层面,通过优化填料类型、含量、尺寸及配比构建有效导热通路;在工艺层面,通过填料预处理、外场辅助定向以及专用增材制造和后处理工艺调控导热网络与界面质量;在结构层面,通过材料空间分布、层间排布及仿生/梯度结构设计塑造热流路径和温度场,从而实现聚合物复合材料导热性能的定向提升。在此基础上,本文进一步围绕热致动器、热界面材料、热隐身结构以及散热器与热交换器等典型热功能器件,梳理增材制造聚合物复合材料在不同应用场景下的代表性研究与关键设计要点,重点讨论如何将上述设计原则映射到具体器件的结构/材料一体化设计方案,并通过有效热导率、温度场均匀性、热响



图 1 面向增材制造的先进热功能材料设计原则

Fig.1 Design principles of advanced thermal functional materials for additive manufacturing

应速度和服役可靠性等指标评价其热管理性能。最后,本文讨论了未来的发展方向,重点强调多功能复合材料体系、智能材料设计及先进增材制造工艺的融合趋势,并进一步展望将仿生结构设计、取向工程与基于机器学习的拓扑优化等方法引入“电、热、力”耦合的多物理场的协同调控,为新一代高性能热管理系统的开发提供更加系统的设计范式。这些见解凸显了增材制造技术在推动热功能应用与智能热管理系统发展中的潜在应用。

1 聚合物复合材料导热设计

在聚合物基复合材料中,热主要以声子形式在聚合物链段及无机/碳基填料中传播^[24]。由于大多数聚合物链段间作用力弱、结构无序,其本征热导率通常低于 $0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,必须依赖高导热填料构建有效热通路。实际体系中,热流在跨越填料/基体界面及孔隙等缺陷时会遭遇显著热阻,使有效热导率远低于简单混合定则的预测值^[25];同时,填料的类型、尺寸和长径比决定了能否形成贯通的导热网络。在增材制造中,层间欠熔合、打印路径诱导的各向异性以及工艺引入的孔隙/微裂纹,会进一步破坏热通道的连续性^[26]。因此,后文将围绕上述关键问题展开:1.1节从填料种类、含量及形貌设计入手,讨论如何构建高效导热或隔热网络;1.2节聚焦增材制造工艺与外场调控对填料分散、取向及界面缺陷的影响;1.3节则从宏观结构与拓扑设计出发,阐述如何利用路径规划与梯度结构重构三维热流通道,实现材料、工艺与结构的协同导热设计。

1.1 填料设计

由于聚合物基体材料通常具有较低的导热性能,引入高效导热填料已成为复合材料热性能优化的关键策略。表 1 列出了常用于增材制造的典型填料及其在提升导热性能方面的作用^[27-44]。导热填料主要可分为 3 类:陶瓷填料、碳基填料和金属填料。需要指出的是,陶瓷填料并不天然等同于“高导热填料”。一方面,高导热陶瓷(如六方氮化硼、氮化铝以及部分高纯氧化铝等)在室温下本征热导率可达数十至上百瓦每米开尔文^[45],经增材制造过程中的取向排布后,可在保持电绝缘性的同时显著提升复合材料在特定方向上的热导率^[46],适用于电子封装、热界面材料和散热器件等同时要求高导热与电绝缘的应用;另一方面,氧化锆^[47]、玻璃陶瓷^[48]等低导热陶瓷的本征热导率通常低于 $2\sim 3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,更常作为隔热层或热障涂层材料,用于构筑热屏蔽结构、缓冲温差和保护温度敏感部件^[49]。不同类型的碳基填料(如石墨、石墨烯、碳纤维和碳纳米管)在增强复合材料导热性能方面具有显著差异。片状石墨与石墨烯填料通常能显著提升热导率^[50]。当与其他材料混合时,短碳纤维和碳纳米管可以形成导热通路,从而进一步提高热传导能力^[51]。连续碳纤维则凭借其不间断的各向异性结构,展现出极高的定向导热性能^[44]。金属填料尽管在可打印性方面受限,且在低填料含量下导热增强效果不佳^[52],但在柔性电子皮肤与软体机器人等需兼顾拉伸性、力学性能及导热性的应用中,引入液态金属填料可有效满足导热^[53]、隔热^[54]以及吸热^[55]等多种需求。

表 1 增材制造聚合物复合材料的导热性能

Table 1 Thermal conductivity of additively manufactured polymer-based composites

填充材料	基体材料	导热率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	测量方式	填料形状	导热 提升/%	参考 文献
20%(质量分数)六方氮化硼	聚氨酯	1.3	PPMS-9	层状结构	442	[27]
40%(质量分数)六方氮化硼		2.56//0.91 \perp			967	
—		0.24			—	
20%(质量分数)氮化硼-5.0	液晶聚合物	1.02//0.21 \perp	TPS 2500S	层状结构	38	[28]
20%(质量分数)氮化硼-50		1.77//0.22 \perp			139	
—		0.74//0.2 \perp			—	
40%(体积分)六方氮化硼	聚乳酸	2.1	LFA 457	层状结构	—	[29]
还原氮化硼纳米片	聚二甲基硅氧烷	0.7	稳态热流	层状结构	289	[30]
氮化硼阵列		1.5			733	
棒状氮化硼		5.65			3 039	
—		0.18			—	
氮化硼/银	金属有机聚合物	2.52//0.7 \perp	LFA 467	层状结构 颗粒	996	[31]
—		0.23			—	

续表

填充材料	基体材料	导热率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	测量方式	填料形状	导热 提升/%	参考 文献
8% 六方氮化硼/2% 膨胀石墨/5% 碳纤维/5% 铝粉(均为质量分数)	聚碳酸酯	1.36//0.27 \perp	LFA 457	层状结构、短 纤和颗粒	444	[32]
—	—	0.25//0.19 \perp	—	—	—	—
短碳纤维	—	0.31//0.15 \perp	—	—	48	—
连续碳纤维	聚碳酸酯	0.6	LFA 447	连续、短纤维	186	[33]
—	—	0.21	—	—	—	—
连续碳纤维	聚乳酸	37.1	稳态热流	连续纤维	20 511	[34]
—	—	0.18	—	—	—	—
50%(质量分数)石墨	改性聚酰胺	5.5	LFA 447	层状结构	—	[35]
15%(质量分数)(石墨烯+碳纳米管)	—	0.73	—	—	161	—
10%(质量分数)(碳纳米管+碳纤维)	聚酰胺 12	0.3	LFA	层状结构 短纤	7	[36]
20%(质量分数)(碳纳米管+碳纤维)	—	0.37	—	—	32	—
—	—	0.28	—	—	—	—
10%(质量分数)改性碳纤维	—	0.19	—	—	19	—
20%(质量分数)改性碳纤维	聚乳酸	0.21	LFA	短纤	31	[37]
30%(质量分数)改性碳纤维	—	0.24	—	—	50	—
—	—	0.16	—	—	—	—
12%(质量分数)碳纳米管	—	0.37	—	—	102	—
12%(质量分数)石墨烯纳米片	聚乳酸	0.668	TPS	纳米管 层状结构	265	[38]
—	—	0.183	—	—	—	—
12%(质量分数)碳纳米管	—	0.365	—	—	99	—
12%(质量分数)石墨烯纳米片	聚乳酸	0.664	TPS 2500S	多层结构 纳米微管	263	[39]
12%(质量分数)(碳纳米管+碳纤维)	—	0.553	—	—	202	—
—	—	0.183	—	—	—	—
2%(质量分数)石墨烯纳米片/海泡石	丙烯酸酯	0.48//0.29 \perp	TPS 2500S	层状结构	220	[40]
—	—	0.15	—	—	—	—
45%(质量分数)石墨烯纳米片	聚氨酯	12.25	DXF 500	层状结构	4 800	[41]
—	—	0.25	—	—	—	—
1.7%(体积分数)碳纤维	—	0.2//0.24 \perp	—	—	33	—
4.3%(体积分数)石墨	丙烯腈-丁二烯-苯乙 烯共聚物	0.37//0.25 \perp	TPS 1500S	短纤、层状结 构和颗粒	147	[42]
1.4%(体积分数)银颗粒	—	0.14//0.24 \perp	—	—	-7	—
—	—	0.15//0.22 \perp	—	—	—	—
磁颗粒填充聚乳酸	—	0.29	—	—	61	—
不锈钢	聚乳酸	0.39	ASTM F433	颗粒	117	[43]
—	—	0.18	—	—	—	—
黄铜	—	0.31//0.24 \perp	—	—	55	—
青铜	—	0.32//0.23 \perp	—	—	60	—
铜	聚乳酸	0.34//0.23 \perp	ASTM C177	颗粒	70	[44]
铝	—	0.42//0.22 \perp	—	—	110	—
—	—	0.2//0.18 \perp	—	—	—	—

注：“//”表示沿定向方向的热传导；“ \perp ”表示垂直定向方向的热传导。

填料含量是影响聚合物复合材料导热性能的关键因素之一^[31]。对于单一类型填料,复合材料的导热系数通常随填料含量的增加呈线性上升趋势^[27,37-38]。然而,当填料含量超过特定阈值后,过量填料会导致复合材料内部空隙率增加,从而削弱

整体导热性能^[56]。同时,界面特性也是决定热传导效率的重要因素。如图 2(a)所示,基于声子传热理论,增材制造过程中填料在聚合物基体中的分散会引入一定程度的不连续性,导致填料/基体界面处产生显著的声子散射与界面热阻^[57]。图 2(b)

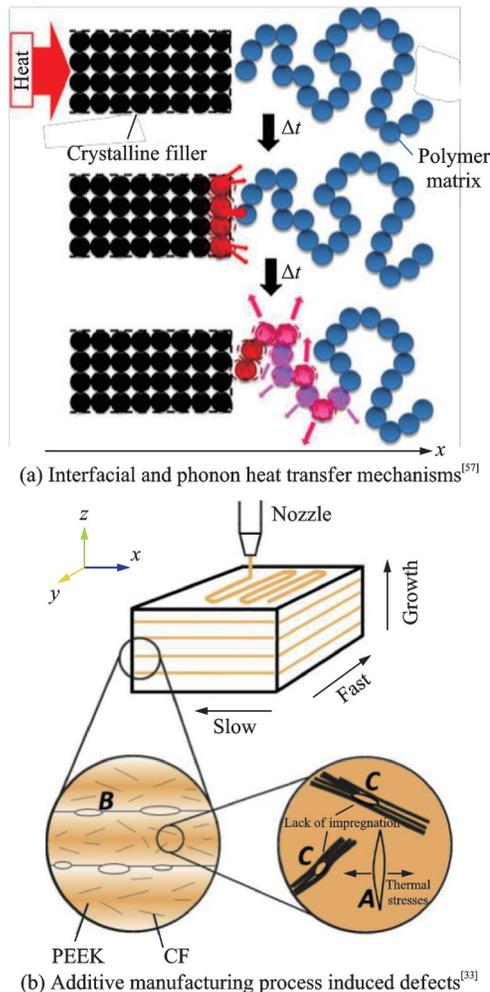


图 2 聚合物复合材料热传导机理与工艺影响因素

Fig.2 Thermal conduction mechanisms and processing related factors in polymer-based composites

进一步表明,增材制造工艺还可能引入额外的孔隙与宏观缺陷,从而影响整体导热通道的连续性^[33]。

影响聚合物复合材料导热性能的另一关键因素是填料形貌。如表 1 所示,片状填料(如六方氮化硼^[30]、石墨烯纳米片^[41])通常比球形填料(如金属颗粒^[43])、不连续纤维填料(如碳纤维^[27])和管状填料(如碳纳米管^[36])具有更显著的导热增强效果。填料尺寸同样对复合材料的导热性能具有重要影响^[28]。此外,混合填料体系通过合理级配不同类型填料,可进一步提升热导率^[58]。例如,Zhang 等^[36]通过将碳纳米管接枝到短碳纤维与石墨烯纳米片表面,制备出适用于增材制造的改性聚酰胺复合材料,显著提升了导热性能,最高导热系数达 $0.73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。Roudný 等^[32]的研究考察了包含二元和三元填料组合(六方氮化硼、膨胀石墨、沥青碳纤维和铝颗粒)的聚合物复合材料导热性能,结果表明质量分数含 40% 混合填料的复合材料导热系数为 $2.35\sim 2.55 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,呈现对填料含量的指数依赖关系。采用纤维状填料(如海泡石黏土)稳定石墨烯

构建混合填料体系,通过气相聚合打印复合材料可实现导热性能 160% 的提升^[40]。综上所述,通过策略性选择和优化填料的类型、含量、尺寸、混合比例及空间分布,可实现聚合物复合材料导热性能的定向调控,为热功能结构的高效设计提供了坚实基础。

1.2 工艺设计

聚合物复合材料的导热性能可通过 3 大类工艺设计方法进行优化调控:前处理方法、过程中调控方法以及后处理方法。前处理主要涉及导热填料或基体材料的改性。在增材制造前,采用物理或化学手段对填料进行表面改性或界面活化,可有效提升填料分散性与界面结合能力,从而增强复合材料的整体导热性能。Ji 等^[59]通过应用硅烷偶联剂(Dynasylan 9116)改善了氧化铝颗粒在碳纤维/硅橡胶复合材料中的分散性,使其热导率提升至 $7.36 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。Pan 等^[60]则在碳纳米管表面包覆三聚氰胺酰亚胺聚合物,实现了碳纳米管在聚苯硫醚复合材料中的均匀分散,从而显著提升了其力学性能与热导性能。此外,Gao 等^[61]开发了一种两步合成法制备二维氮化硼纳米片,有效增强了热塑性聚氨酯弹性体复合材料的热导率。Jing 等^[62]结合固态剪切研磨策略与石墨烯纳米片,并通过增材制造技术成功制造高导热线性低密度聚乙烯纳米复合材料。同时,Xu 等^[63]则通过球磨与超声剥离处理六方氮化硼,制备出高热导率的碳化硅/六方氮化硼/聚酰胺/聚对苯二甲酸乙二醇酯复合薄膜。不同的前处理方法针对不同类型的材料与应用需求,旨在优化填料的分散性、增强填料与基体之间的界面相容性,并通过精细设计的预处理工艺促进导热网络的形成,从而实现复合材料热性能的有效提升。

过程调控主要包括外场辅助定向与工艺参数优化,以实现填料排列及热性能的精确控制。近年来,电场、声场、磁场与激光等外场辅助技术在增材制造中得到广泛研究,为复合材料的导热通路构建提供了新思路。从微观机理上看,这类外场主要通过调控导热填料的取向与局部体积分数、改变基体相结构以及影响孔隙和界面状态,从而重构热在材料内部的传输路径与扩散行为。如图 3(a)所示,提出的流体辅助熔融沉积建模技术在打印过程中喷射含氮化硼的导热流体,可制备具有各向异性导热性能的聚合物复合材料。该方法结合了熔融沉积成形增材制造的灵活性与流体喷射路径可控性,实现了导热网络的精确构筑^[64]。具体而言,由氮化硼、羟乙基纤维素和水组成的导热流体在挤出

丝两侧形成连续涂覆层,氮化硼片在羟乙基纤维素链构成的网络中沿喷射路径富集并部分嵌入基体表,从而在指定位置构建起可编程的各向异性导热通路,同时通过在基体晶体表面引入缺陷而降低结晶度、改善两相界面相容性。如图 3(b)所示,电场辅助立体光刻增材制造技术在光敏树脂浆料中施加外电场,石墨烯纳米片发生极化并在介电泳力和电场转矩作用下由随机取向逐渐转变为沿电场方向有序排布,随后通过光/热双固化提高树脂交联度,将这一有序石墨烯骨架“锁定”,既显著提升导热网络的连通性,又通过限制链段运动提高了复合材料的热稳定性^[65]。声场同样可用于增材制造中功能填料的空间分布调控,其机理在于驻波声场产生的声辐射力驱动铝粉等颗粒向声压节点/反节

点迁移。如图 3(c)所示,声场图案化在相同基体或填料浓度条件下能够提高局部填料质量分数并在光固化后形成层内连续、层间可搭接的高填料导热网络^[66]。如图 3(d)所示,预浸丝在喷嘴中熔融并在压力作用下完成第一次纤维束浸渍,在随后层的打印过程中,激光对下层材料进行局部再加热,使树脂再次熔融、黏度降低,在压头载荷和毛细力驱动下进一步渗入纤维束内部,从而显著降低束内孔隙率并提高纤维-基体界面接触面积,制备出高热导率的连续碳纤维增强复合材料^[67]。此外,磁场轨迹规划也可用于导热填料的定向控制。如图 3(e)所示,通过预先规划磁场分布,使具有磁性的镀镍碳纤维在树脂中按设计角度对齐,可在局部区域形成沿纤维方向的高效热流通道,使特定位置的导热率相对于基体实现约 1.39 倍的增强^[68]。

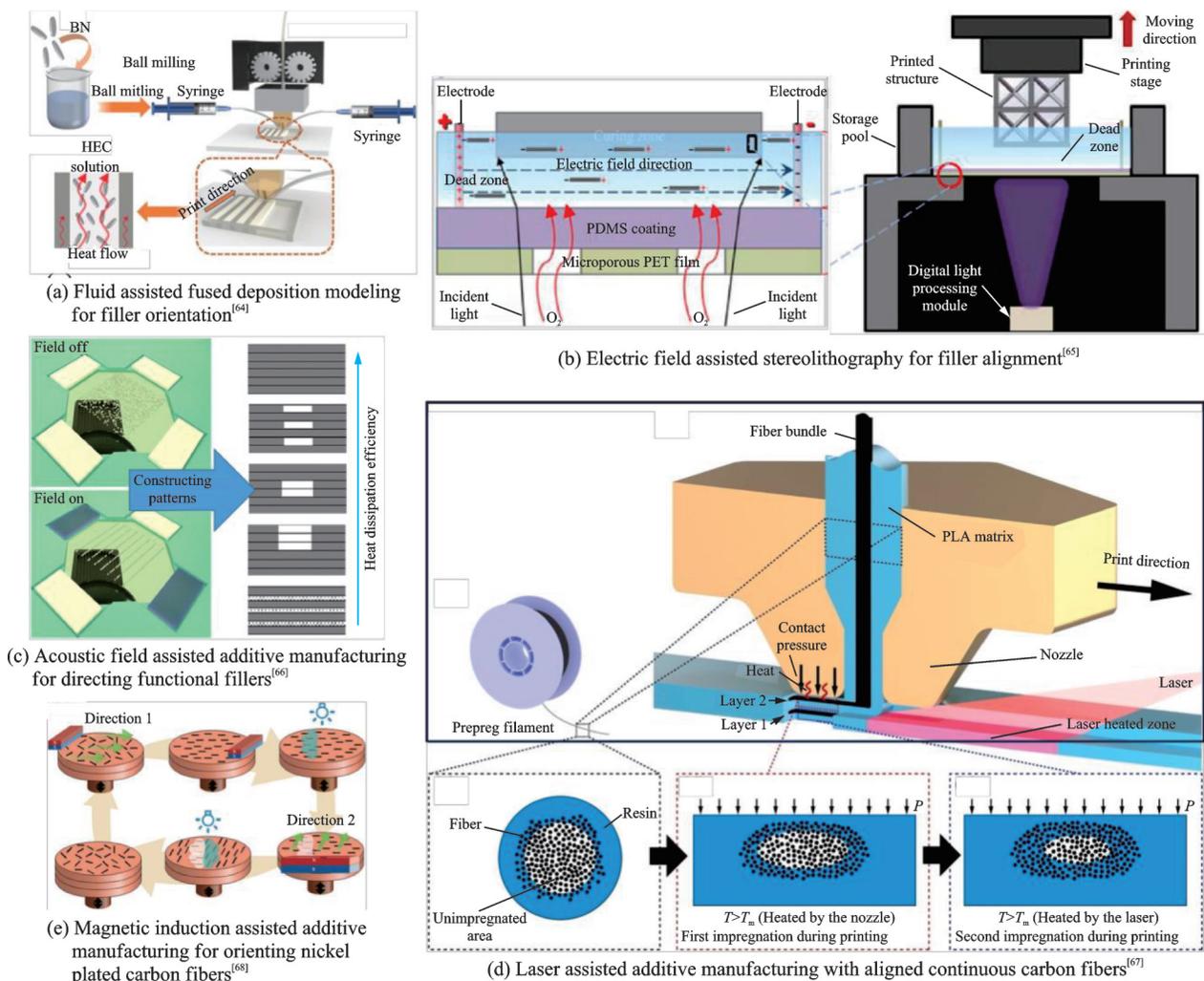


图 3 外场辅助的增材制造导热填料定向

Fig.3 External field assisted additive manufacturing for orienting thermally conductive fillers

除外场控制外,增材制造工艺开发与参数优化同样对热性能调控具有重要作用。如图 4(a)所示,采用 PolyJet 增材制造技术制造了一种集成可充气柔性囊体的可变形喷嘴。在材料挤出式增材

制造中,通过调节囊体充气状态改变材料挤出通道几何形状,从而实现对纤维分布与填料定向的可控调节^[69]。当气囊未充气时,短纤维/水凝胶复合材料在近似直线通道中流动,短纤维主要沿挤出/打

印方向取向;而在气囊充气后,复合材料经历更复杂的剪切和拉伸流动,导致纤维发生偏转甚至错位取向,使同一打印路径内由强各向异性导热结构过渡到近各向同性网络。如图 4(b)所示,Wang 等^[70]提出在数字光处理增材制造中控制单层厚度小于六方氮化硼横向尺寸的方法,当层厚小于片状六方

氮化硼的横向尺寸时,填料更易在层面方向平铺并跨越整层厚度,取向度和片间接触面积随之提高,从而在面内和层间方向形成高度连通的片状导热网络。当填料含量为质量分数 30% 的六方氮化硼且层厚为 15 μm 时,热导率达到 7.962 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为纯树脂的 44 倍。

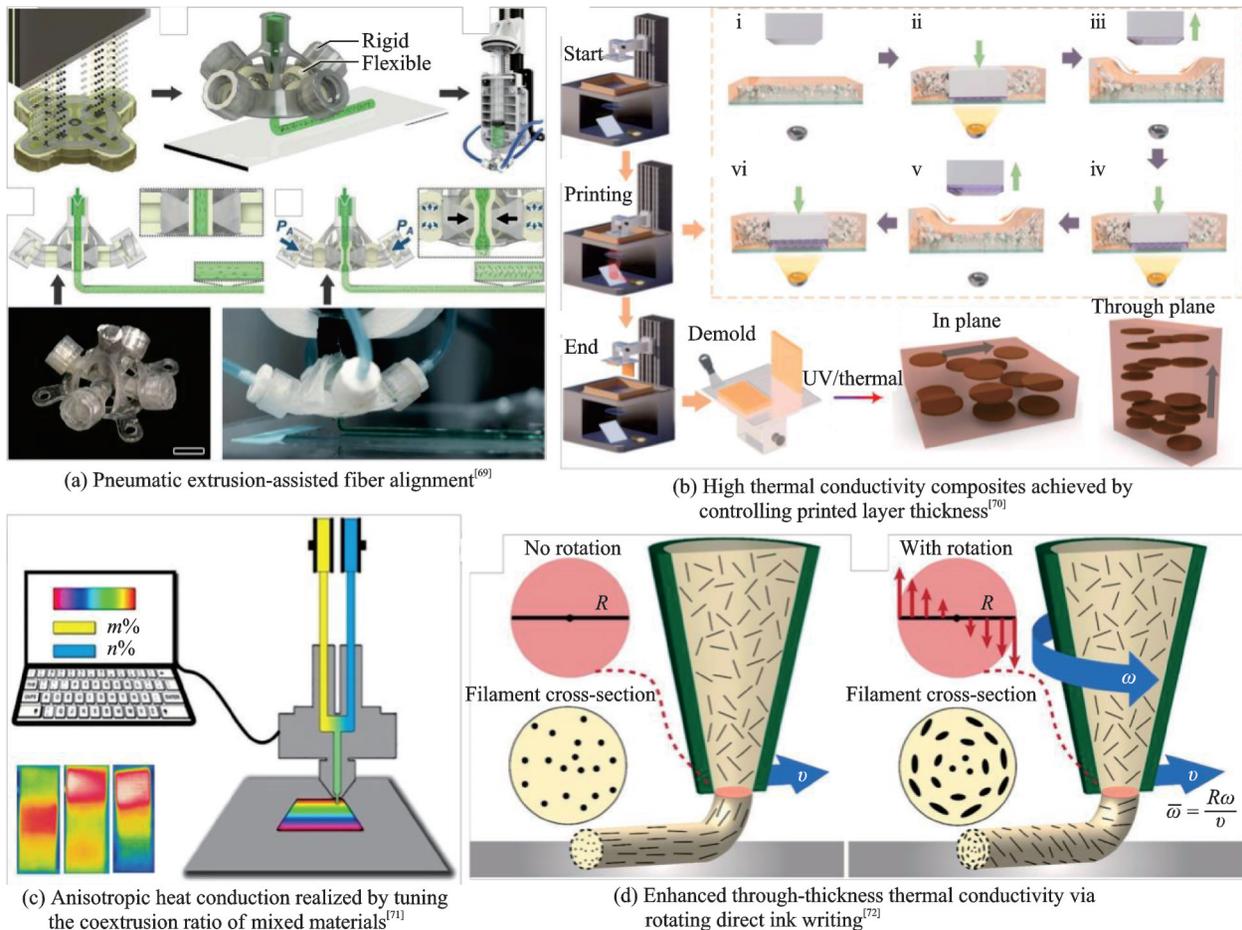


图 4 特殊结构设计的增材制造

Fig.4 Additive manufacturing with specialized structural designs

此外,通过共挤出含导电石墨烯的聚乳酸与纯聚乳酸丝材,可制备出具有各向异性热传导与电阻分布的复合材料。如图 4(c)所示,挤出比例及施加电压等因素均会影响打印部件的热分布。利用热成像设备对热信号进行彩色可视化,不仅能实现热响应的可观测性,还可用于表达与存储简单信息^[71]。如图 4(d)所示,采用旋转式直接书写技术对纤维进行重新定向,该技术通过在沉积过程中同步旋转和平移喷嘴,使沉积道截面内碳纤维由高度平行于打印方向逐渐转变为更各向同性的分布,尤其在道外表面附近产生显著纤维重排,从而打通原本薄弱的厚度方向热流通道,使厚向热导率提高约 40%,并减弱面内导热各向异性^[72]。

后处理是进一步提升增材制造聚合物复合材料热导性能的重要环节,其机理可从 3 方面理解:

一是调控热塑性基体的结晶结构,二是提高整体致密度,三是优化界面与表面状态。结晶通过提高聚合物链的有序性与刚性、减少非晶散射,使声子更高效传递,并降低基体在填料网络间的传热阻力。在致密、界面少的热轧样品中,这种提升能按渗流模型显著体现,而在增材制造弱轴样品中,层间界面与孔隙热阻成为主导瓶颈,导致结晶度提高也难以显著提升整体导热。研究表明,对熔融沉积技术制造的打印件在玻璃化转变温度与熔融温度间进行精细退火,可在不引起宏观变形的前提下显著提高聚合物结晶度和层间焊接质量,使热导率最高提升约至原始打印态的 2.5 倍^[73];而在连续碳纤维增强复合材料中进行适当温度后处理,则可将孔隙率降低约 87%,并同步增强层间强度与热稳定性^[74]。若需进一步提升致密度并优化界面,可采用二次烧

结、热压致密化或UV/热后固化等手段,以减少孔隙和界面缺陷、强化填料/基体接触,在不改变宏观形状的前提下同步提高导热率和热稳定性^[75]。对于表面构筑而言,静电纺丝/静电喷雾工艺可在外加电场下将细尺度纤维或颗粒均匀沉积于打印基体表面,跨越层间微孔并与基体填料网络形成面通道,显著增强表层热扩散能力^[76]。总体而言,这些后处理措施通过提升结晶度与链段取向、降低孔隙率并改善界面热接触,减少声子在晶粒边界、孔隙和界面处的散射,从而有效降低复合材料的整体热阻。

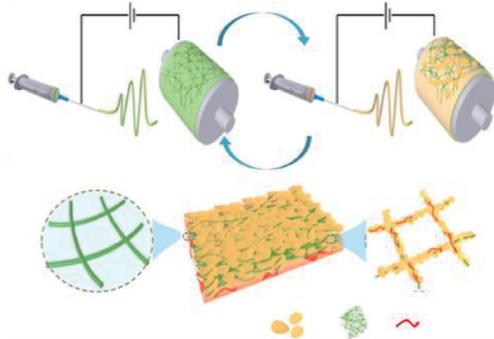
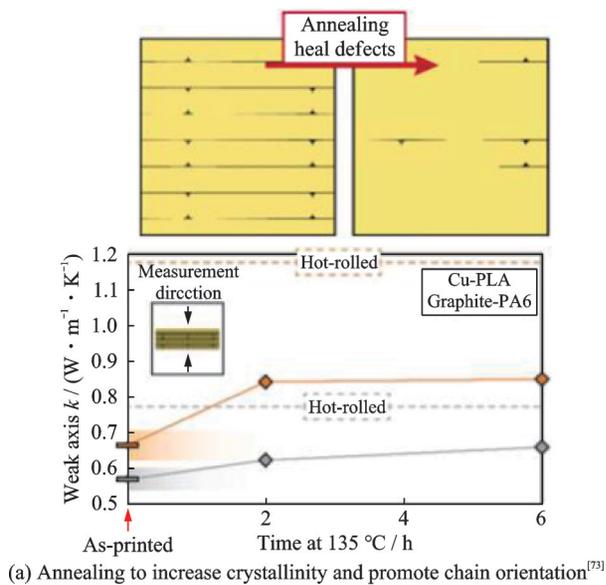


图5 后处理工艺对增材制造聚合物复合材料导热性能的影响

Fig.5 Effects of post-processing on the thermal conductivity of additively manufactured polymer-based composites

1.3 结构设计

结构设计是增材制造聚合物复合材料导热性能优化中的另一重要原则。通过构建多级结构、各向异性结构及仿生结构,可有效改善材料内部热流传输通道,从而显著提升整体传热性能。特别是在基于材料挤出的增材制造技术中,可通过调控空间分布、层间排布、填料定向及负载率等设计参数,实

现梯度热导率及可调空间热性能的复合材料制备^[77]。如图6(a)所示,利用多组分熔融沉积成形对材料比例进行精确控制,可制备具有梯度热导率的复合部件。不同填充量的氮化铝呈现出恒定斜率变化,而氮化硼则表现为先升高后降低的趋势。采用质量分数为50%氮化硼填料掺杂比例制备的聚己内酯样件热导率达到 $2.463 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,显示出其在热环境应用中的潜力^[78]。通过设计连续热传导路径的长度与数量,也可有效调节复合材料的热导率。如图6(b)所示,具有20条完整铜线热传导通路的复合材料,其热导率较9条通路结构的材料提高了87.2%^[79]。如图6(c)所示,在基底与封装层之间构建几何设计的加热阵列,可形成复合结构以控制加热阵列产生的全向热流。这些加热阵列由宽度不同的数字化加热单元组成,实现了区域内均匀的热分布以及区域间显著的热图案对比度^[80]。如图6(d)所示,采用氮化硼纳米片构建多尺度垂直排列的二维材料结构,表现出优异的Z轴方向热导性能,其热导率高达 $5.65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,远超传统结构^[30]。由图6(e)显示,通过改变打印方向可实现热分布的可控调节,使复合材料在热敏电阻、换热器及电磁干扰屏蔽等领域表现出良好的应用前景^[81]。

仿生设计是导热结构设计的新兴研究方向。此类结构通常由软硬相复合组成,具备多尺度分级特征,其特征尺寸从纳米级延伸至宏观尺度^[82]。仿生设计构造中往往同时包含相对“柔软”的相(如聚合物材料或其他弹性组分)与较“坚硬”的相(如碳基/金属/陶瓷材料等高刚性组分),软相有助于提供柔韧性、能量吸收能力以及热隔绝,硬相则提供主要的机械承载与导热骨架^[83]。在导热增强方面,通过构筑连续连通的硬相三维导热网络并以软相填充支撑,使热流优先沿高导通道传递,同时引入碳纳米管/石墨烯/金属纳米线等对网络结点进行桥联强化,以降低界面热阻;在隔热方面,通过分级孔隙封存低导热气体、增加热流路径曲折度并抑制对流,提升等效热阻;在辐射热管理方面,依靠表面仿生微结构提高太阳波段反射、增强红外发射,以调控辐射换热并实现高效散热。上述机制的协同,使材料在维持柔韧与耗能特性的同时,实现热传递效率或热防护能力的结构化提升。如图7(a)所示,仿生北极熊毛纤维具有方向性多孔结构,表现出优异的保温性和透气性,具有作为可穿戴加热器的应用潜力^[84]。图7(b)为通过生物模板碳化技术与环境浸渍法制备的各向异性聚合物复合材料,

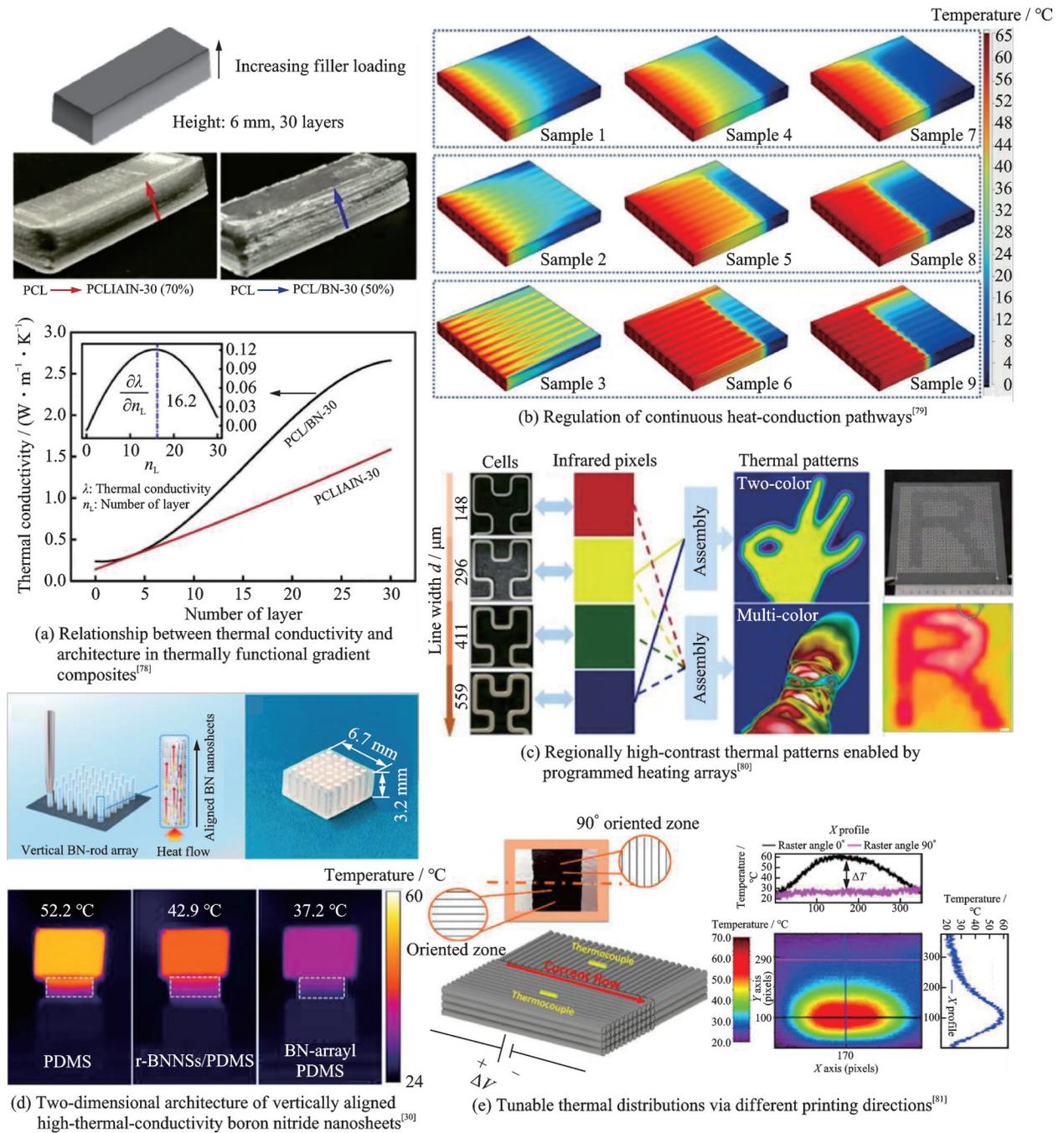


图 6 增材制造聚合物复合材料的空间传热结构设计

Fig.6 Spatial heat-transport architecture design in additively manufactured polymer-based composites

表现出高热导率与优异的各向异性热传导特性^[85]。图 7(c)展示了不同应变条件下单根天然蜘蛛丝纤维的热传导性能,发现其热导率可高达 400 W/(m·K),且随拉伸应变呈上升趋势蜘蛛丝的热性能及其在不同应变下的热效应研究结果^[86]。由于其可在应变作用下动态调节热特性, Lin 等^[87]通过水热反应、径向冻融成形和真空浸渍在石蜡中,制备了具有三维蜘蛛网状结构石墨烯骨架的高导热相变复合材料,表现出横向和纵向导热性能约 1 260% 和 840% 的提升。如图 7(d)所示,生活在撒哈拉沙漠的银蚁全身覆盖着三角形银色绒毛,以适应极端环境。这些绒毛在可见光和近红

外光谱范围内提高了银蚁体表的反射率,同时在全日照条件下可通过黑体辐射高效地将热量散发至周围环境^[88]。图 7(e)受蜜蜂螫针微结构启发的“超界面”概念结合人工智能算法,可实现可编程的力学、热学与主动界面效应,为仿生热功能材料的智能化设计提供了新范式^[89]。

2 聚合物复合材料热功能应用

在前文提出的“填料设计、工艺设计、结构设计”3大原则基础上,本节进一步从器件层级出发,围绕热致动器、热界面材料、热隐身结构以及散热器与热交换器等典型热功能器件,梳理增材制造聚

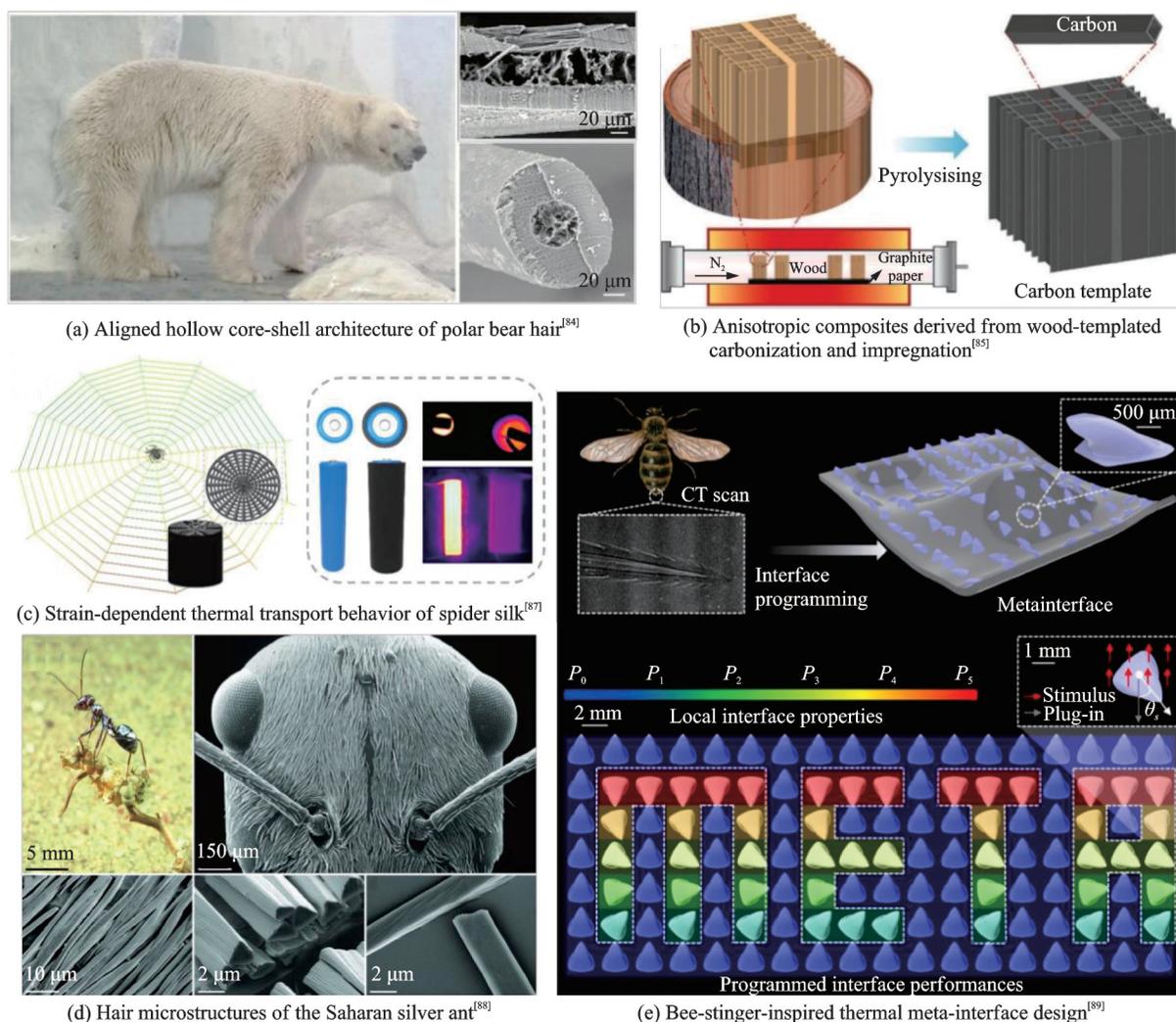


图7 生物启发的导热结构

Fig.7 Bioinspired thermally conductive architectures

合物复合材料在不同应用场景下的代表性研究与关键设计要点。与材料层面仅关注热导率不同,实际器件的热功能表现取决于体相导热网络、界面热阻以及几何换热结构共同构成的系统热阻网络。因此,本节在综述具体工作的基础上,重点讨论如何将前述设计原则映射到具体器件的材料/结构中,并结合有效热导率或等效热阻、温度场均匀性、热响应速度和服役可靠性等指标,对其热管理性能进行分析与评价。2.1节主要聚焦热响应机制与器件实现,2.2节则综述了热管理结构与系统集成。

2.1 热响应

热响应聚合物复合材料致动器的核心在于通过受控的热传导与温度场分布,将热能高效转化为可用的形变或功能输出。温度变化一方面触发材料内部的相态或力学性质演化,另一方面其触发效率和响应速度又强烈依赖于内部导热路径的连续性和各向异性设计。增材制造可通过多材料共打印在局部构建高/低导热区域,利用填料取向与分层/夹层结构设计实现定向导热,并集成嵌入式加

热单元和冷却微通道,对几何形貌和材料分布进行精细调控,从而在保证足够输出力和形变量的同时,实现快速加热与高效散热,在响应幅值、速度、能耗和循环寿命之间获得更优的综合性能。通过精确的结构设计与材料选择,增材制造技术可实现聚合物复合材料在温度变化下对形状、颜色、透明度及力学性能的可控调节。这一研究方向在热响应开关、驱动器及热致变色装置等领域具有广阔的应用前景。

图8(a)为一种聚丙烯酰胺柔性水凝胶驱动器,其主体由异丙基丙烯酰胺聚合物构成,背层含有微孔结构,可通过自主“排汗”来维持稳定体温。与无“排汗”功能的相似装置相比,该驱动器的冷却速率提升了600%^[90]。该类致动引入约200 μm孔径的多孔层,在低温下孔隙基本闭合,有利于维持内部液压并输出较大驱动力;当温度高于相转变温度时,孔隙打开,内部液体被动排出并在表面迅速蒸发,单位质量致动器的蒸发冷却能力可达百瓦每千克量。如图8(b)所示,通过增材制造技

术制备的热响应开关采用双层复合结构,将 PLA 丝沉积于纸基上,实现了可逆形变驱动调节 PLA 层厚度可以在响应时间与输出推力之间进行调节,其中约 0.45 mm 厚的 PLA 层在测试中表现出较快的加热/冷却响应和较大的推力,并在 500 次以上热循环中保持良好的电学导通性能和界面粘结稳定性^[91]。如图 8(c)所示,研究了水凝胶复合材料的热响应性能。实验结果显示,水凝胶在不同温度下发生显著的形状变化,表明其热致变形的可控性与灵敏度^[92]。如图 8(d)所示,利用多材

料混合增材制造技术设计并制备的快速热响应柔性驱动器,通过电加热快速升温触发玻璃化转变,实现由“硬”到“软”的快速切换,再通过流体循环或环境换热快速冷却并恢复高刚度,使得完整的软化-加固循环时间可控制在几十秒量级。在此基础上,三指夹持器可在保持高形状适应性的同时,实现千克级负载能力,使整体刚度提升 120 倍,实现高效可调的热响应驱动性能^[93]。Chen 等^[94]基于紫外固化与热致变色效应开发了一种形状记忆聚合物系统,实现了具有可逆颜色变化的

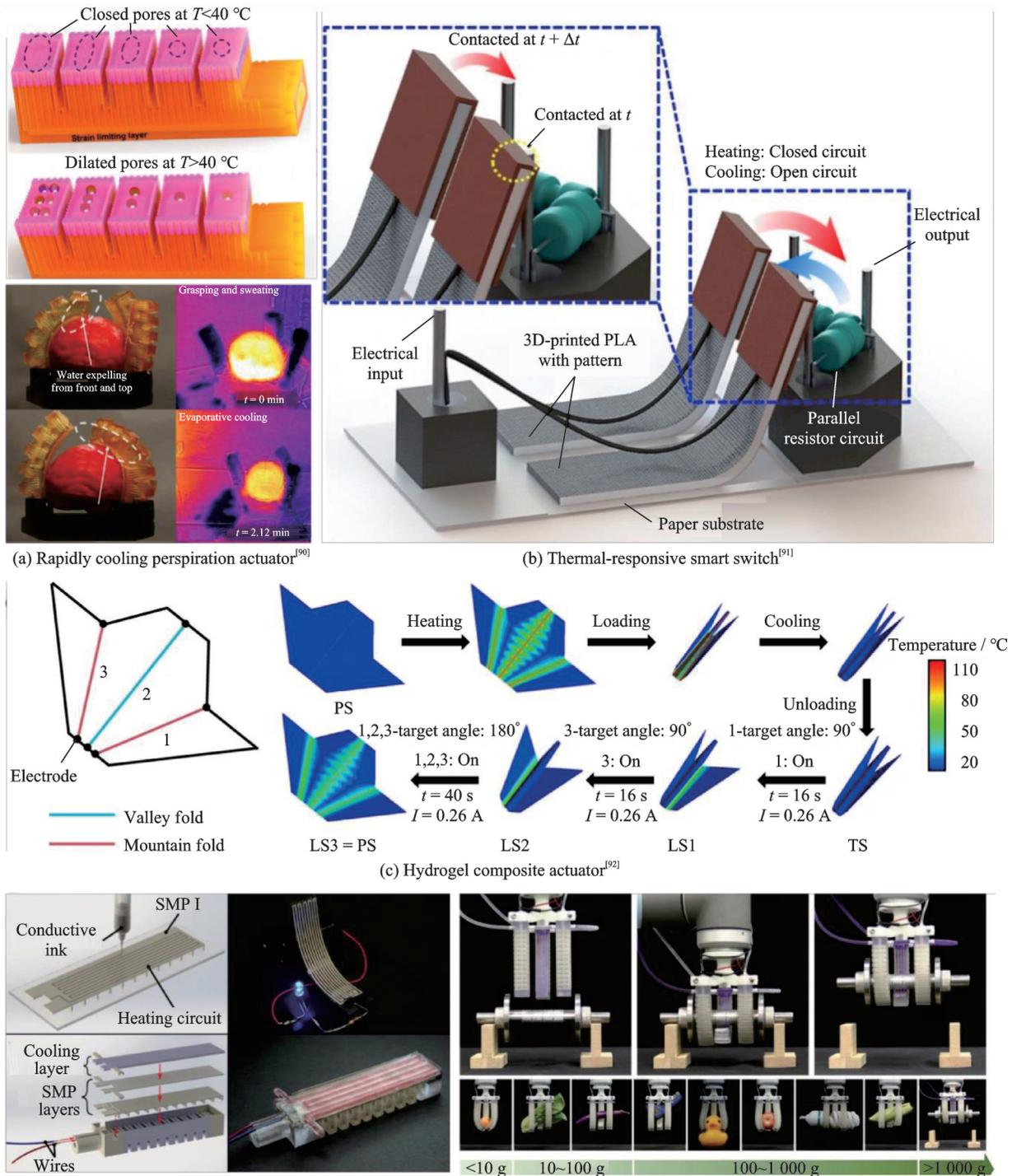


图 8 基于增材制造的热响应致动器

Fig.8 Thermo-responsive actuators based on additive manufacturing

4D 打印。在升温与降温过程中,材料颜色可在两种状态间切换,并被成功应用于二维编码与防伪图案设计。Alam 等^[95]制备了功能化聚合物基热致变色纤维,用于温度与应变传感。该研究为智能纤维器件与自适应感知系统的设计提供了新的技术途径。

综上所述,热响应增材制造聚合物复合材料大致可以分为以溶胀/蒸发冷却为主的水凝胶与排汗型致动器、以热膨胀失配为主的双层结构致动器以及以玻璃化转变和形状记忆效应为主的刚度可调执行器 3 类。前者适合于大变形与高散热功率场景,但对水分管理 & 长期稳定性要求较高;第二类结构简单,易于集成到电子开关和自适应冷却组件中,但需要精细设计界面粘结和热疲劳行为;第三类则在输出力和刚度切换方面具有明显优势,关键在于实现快速、可控的热输入与散热通路。整体来看,增材制造通过在几何尺度和材料构成上的可编程设计,使“热、形变、信号”转换过程中的关键参数更加可控,为热响应驱动、热显示与多功能感知器件的工程化应用奠定了基础。

2.2 热管理

在聚合物复合材料中,热管理的核心目标是调节热传导、扩散与散热过程,以防止过热或过冷,并保持系统热稳定性。增材制造通过实现复杂几何结构、功能集成及轻量化设计,为先进热管理器件的制造提供了前所未有的自由度。这些特性使得传统制造难以实现的高效散热与热流调控结构成为可能^[96]。通过优化流道设计与结构拓扑,可制造出兼具高导热性与轻量化特征的复杂换热系统。图 9(a)展示了首个采用熔融沉积成形聚合物复合空气/水热交换器^[97]。借助数值模拟,可以实现复杂换热器的制造^[98]、形状参数优化、复合材料与结构设计^[99]。Kim 等^[100]利用体积距离场算法提出了超高效紧凑型热交换器设计策略。Dixit 等^[101]通过增材制造与拓扑优化相结合,构建出螺旋晶格结构热交换器,其传热性能提升达 55%。此外,如图 9(b)所示,增材制造连续碳纤维复合材料在制造具有高导热性和机械性能的复杂晶格结构方面具有独特优势,这使其在未来高性能热交换器的制造中展现出良好的应用前景^[102]。

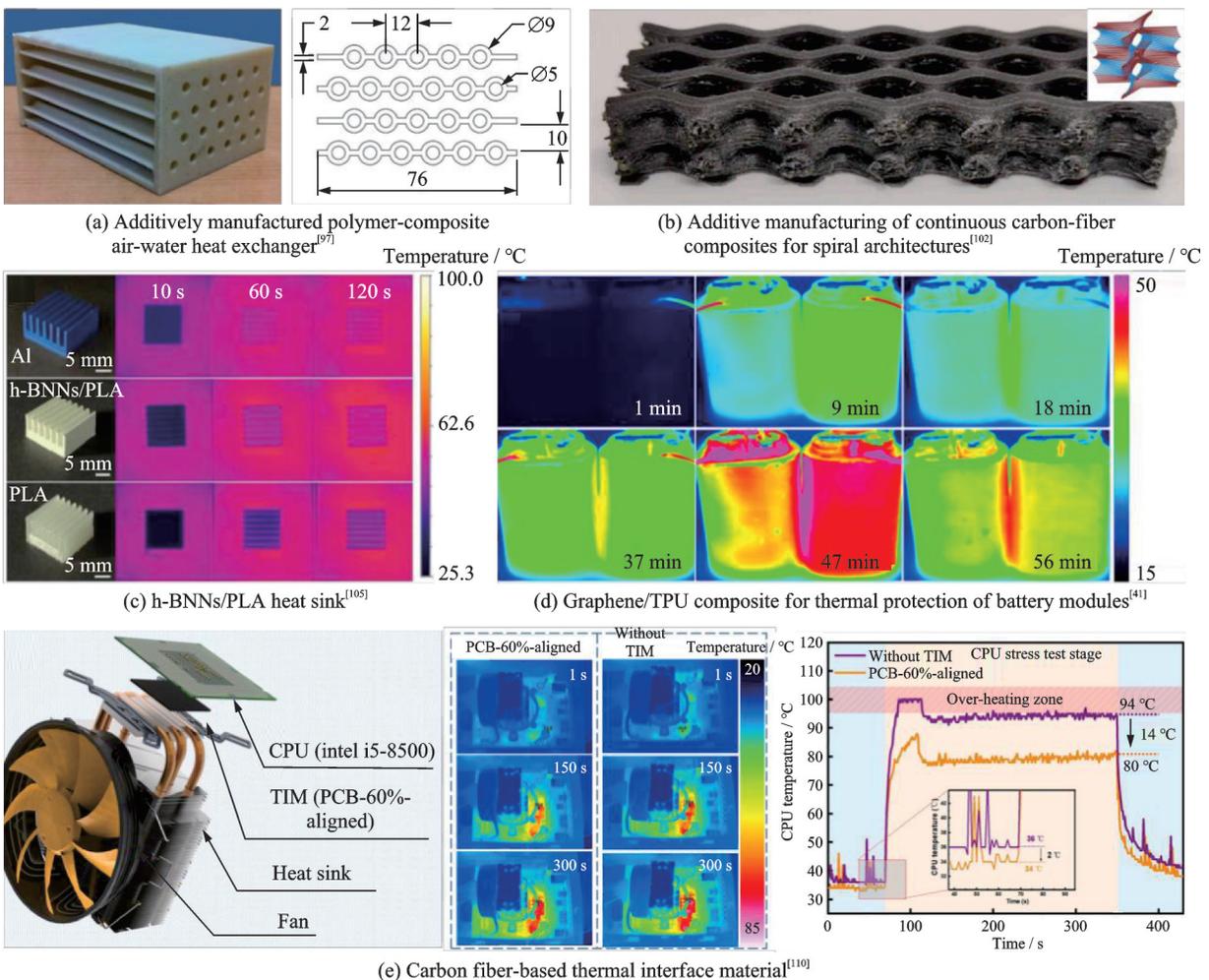


图 9 通过增材制造的聚合物复合材料实现集成热管理技术

Fig.9 Integrated thermal management technologies enabled by additively manufactured polymer-based composites

在散热器领域,采用高导热性复合填料的增材制造工艺可直接制备多功能一体化散热结构^[103]。由于封装的定向,散热器的热导率可能呈现各向异性。可以利用这一特性来优化散热器在特定方向上的热导率,从而实现更高效的散热^[104]。如图 9(c)所示,Gorur等^[105]通过向聚乳酸中添加体积分数为 40% 的六方氮化硼纳米片,使其热导率提高了 400%。这种纳米复合材料可应用于 LED 灯泡支架的散热,其散热效率几乎与商用铝散热器相当。热隐身衣是另一种通过操控热流来实现特定热管理效果的装置,通常利用热超材料和变换理论来引导或屏蔽热流,从而控制特定区域内的温度分布^[106]。Sha等^[107]通过运用变换光学计算所需的热导率张量分布,进而采用拓扑功能单元设计微观结构,创造了一种能够操纵和控制热流的超材料,并展现了其在自由形式热集中器、旋转器和隐形斗篷。

凭借高导热聚合物复合材料的可设计性与增材制造的工艺灵活性,复杂场景下的集成热管理系统得以实现。Al-Zareer等^[108]利用增材制造制备了一种聚合物基电池热管理系统,通过在冷却通道中嵌入散热结构,实现高传热系数,使电池组在不同放电率下的最高温度分别为 22.8 与 24.5 °C。如图 9(d)所示,Guo等^[41]通过制备了具有优异纵向热导率的石墨烯/TPU 复合材料,并设计了多尺度致密结构,有效提高了复合材料的纵向热导率。研究还表明,将这种复合材料应用于电池组中,可以显著提高散热性能。Li等^[4]提出了一种具有高导热路径的电热聚合物互穿结构,该结构利用连续的三维导热网络有效收集热能,实现了电热性能提高 240%、导热系数提高 300%,可用于 5G 芯片单热点散热设备的原型制造。Khakbaz等^[109]开发了一种高导热性的氮化硼纳米颗粒/聚氨酯复合材料。他们通过增材制造制作出生物支架结构,展示了这种复合材料优异的热性能、机械性能和生物相容性。如图 9(e)所示,Zhang等^[110]开发了一种低成本、高导热率、低界面热阻的先进碳纤维热界面材料,可用于大规模生产,在 CPU 热保护方面比商用热界面材料低 17.4 °C,体现了其在电子设备热管理中的实际应用潜力。

总体来看,增材制造聚合物复合材料在热管理领域的研究正从单一材料导热率的提升,逐渐转向基于系统热阻分配的多层次协同设计:在换热器中,通过复杂流道与晶格拓扑实现对流强化和高效利用有限体积;在散热器和电池模组中,通过各向异性导热网络与结构一体化设计兼顾轻量化与高

热流密度散热需求;在热超材料与隐身结构中,通过空间可编程的等效热导率张量实现对热流路径与温度场的精确重构。合理选择并组合这些设计策略,并以有效热导率、温度场均匀性、换热系数与压降、界面热阻及循环稳定性等指标进行统一比较,是推动增材制造聚合物复合材料从实验室概念向工程化应用过渡的关键。

3 结 论

本文围绕面向热功能应用的聚合物复合材料增材制造,从导热机理、材料设计、工艺调控与结构优化等多个层面系统梳理了近年来的研究进展,重点阐明了增材制造在提升聚合物复合材料热导率、构建复杂热管理结构以及实现智能热响应方面的独特优势。在设计层面,本文总结并对比了填料设计、工艺设计和结构设计 3 大核心原则。填料方面,通过合理选择高导热或高热阻填料并精细调控其类型、含量、尺寸与形貌,可在保持可打印性的前提下构建连续导热网络或隔热屏障,显著改善聚合物本征低热导率带来的限制。工艺方面,增材制造结合填料预处理、外场辅助定向以及退火、表面喷涂等后处理手段,有助于提升导热网络的取向度和界面质量,实现材料组分和三维网络的协同构筑。结构方面,依托梯度与仿生结构设计,可以在宏观尺度上重构热流通道与温度场,将各向异性导热、分级晶格和复杂流道等多种结构单元有机整合。

在应用层面,本文围绕热致动器、热界面材料、热隐身结构以及散热器与热交换器等典型器件,对增材制造聚合物复合材料的代表性工作进行了对比分析。对于热响应驱动与热致变色器件,增材制造使得水凝胶、形状记忆聚合物和热致变色体系能够与局部导热网络、微孔/通道和嵌入式加热单元深度耦合,实现由温度场到形变、刚度或光学信号的可编程转换,并在响应速度、输出能力与循环稳定性之间取得更优平衡。对于散热器、热交换器和电池热管理系统,增材制造通过构建高导热填料取向网络、轻质晶格与复杂流道结构,在有限体积和压降约束下有效降低等效热阻并提高温度场均匀性。对于热隐身与热超材料结构,则依托可打印的拓扑功能单元,实现了空间可编程的等效热导率张量和多种热流操控功能。

与此同时,当前研究仍面临高填料含量下的可打印性与界面完整性不足、工艺一致性和尺寸精度控制难度较大、服役过程多场耦合下的长期可靠性评估匮乏等挑战。未来工作有望沿多尺度协同设计与智能制造方向深化:一是结合实验、模拟与数

据驱动方法,构建从工艺参数、微观结构到等效热物性与器件温度场的关联模型,引入机器学习与拓扑优化实现填料排布、结构拓扑和打印路径的一体化设计;二是将 4D 打印与刺激响应型材料结合,发展可自适应调节导热通道和界面热阻的热管理结构,满足高端电子、柔性机器人和航天器在复杂工况下的动态热控制需求;三是引入仿生结构设计、取向工程以及多物理场拓扑优化,实现导热、导电与力学性能的综合平衡。随着材料体系、增材制造工艺与数据智能技术的持续发展,增材制造聚合物复合材料将在高性能热管理系统及新一代智能热功能器件的工程化与产业化中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] PANG Y S, ZHANG J J, MA R M, et al. Solar-thermal water evaporation: A review[J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(2): 437-456.
- [2] EAMES I W, ADREF K T. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(7): 733-745.
- [3] YE X F, QIU Y L, NOCK D, et al. The comfort rebound from heat pumps and impact on household cooling behaviour and energy security[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(9): 1166-1177.
- [4] LI M D, SHEN X Q, CHEN X, et al. Thermal management of chips by a device prototype using synergistic effects of 3-D heat-conductive network and electrocaloric refrigeration[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5849.
- [5] 刘重洋, 李文, 虞翔宇, 等. 基于涵道换热器的燃料电池热管理系统仿真研究[J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(5): 965-975.
LIU Chongyang, LI Wen, YU Xiangyu, et al. Simulation research on fuel cell thermal management system based on ducted propeller heat exchanger[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition)*, 2025, 57(5): 965-975.
- [6] 裘进浩, 季宏丽, 徐志伟, 等. 智能材料与结构及其在智能飞行器中的应用[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(5): 867-888.
QIU Jinhao, JI Hongli, XU Zhiwei, et al. Smart materials and structures and their applications on smart aircraft[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(5): 867-888.
- [7] TOBERER E S, BARANOWSKI L L, DAMES C. Advances in thermal conductivity[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2012, 42: 179-209.
- [8] XING W K, XU Y, SONG C Y, et al. Recent advances in thermal interface materials for thermal management of high-power electronics[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(19): 3365.
- [9] TU Y Q, LIU B, YAO G H, et al. A review of advanced thermal interface materials with oriented structures for electronic devices[J]. *Electronics*, 2024, 13(21): 4287.
- [10] CHEN H Y, GINZBURG V V, YANG J, et al. Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2016, 59: 41-85.
- [11] XU X F, ZHOU J, CHEN J. Thermal transport in conductive polymer-based materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(8): 1904704.
- [12] XU X, YAN N N, TONG T T. Longer waiting, more cancellation? Empirical evidence from an on-demand service platform[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 126: 162-169.
- [13] RAMAN A P, ABOU ANOMA M, ZHU L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540-544.
- [14] VIJAYARAGHAVAN P, LIU C H, VANKAYALA R, et al. Designing multi-branched gold nanochinus for NIR light activated dual modal photodynamic and photothermal therapy in the second biological window[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(39): 6689-6695.
- [15] XIAO Z T, SHI H J, WANG W, et al. Glass fiber-reinforced epoxy composites with high thermal conductivity, flame retardancy and mechanical strength[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 194: 108905.
- [16] LI M S, HAN S F, DAN C, et al. Boron nitride-polymer composites with high thermal conductivity: Preparation, functionalization strategy and innovative structural regulation[J]. *Small*, 2025: e2412447.
- [17] LU X H, LIU J, SHU C, et al. Densifying conduction networks of vertically aligned carbon fiber arrays with secondary graphene networks for highly thermally conductive polymer composites[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(11): 2417324.
- [18] LIGON S C, LISKA R, STAMPFL J, et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(15): 10212-10290.
- [19] WANG X, JIANG M, ZHOU Z W, et al. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 110: 442-458.

- [20] HONG Y L, AZCUNE I, REKONDO A, et al. Additive manufacturing of shape memory thermoset composites with directional thermal conductivity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(9): 2311193.
- [21] PENG Z L, LV Q N, JING J J, et al. FDM-3D printing LLDPE/BN@GNPs composites with double network structures for high-efficiency thermal conductivity and electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 251: 110491.
- [22] JIANG H, XIE Y H, HE M K, et al. Highly thermally conductive and flame-retardant waterborne polyurethane composites with 3D BNNS bridging structures via Magnetic Field assistance[J]. *Nano-micro Letters*, 2025, 17(1): 138.
- [23] LILA M K, KOMAL U K, SINGH I. Thermal post-processing of bagasse fiber reinforced polypropylene composites[J]. *Composites Communications*, 2021, 23: 100546.
- [24] LUO Y X, YANG X L, FENG T L, et al. Vibrational hierarchy leads to dual-phonon transport in low thermal conductivity crystals[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2554.
- [25] IM H, KIM J. Thermal conductivity of a graphene oxide-carbon nanotube hybrid/epoxy composite[J]. *Carbon*, 2012, 50(15): 5429-5440.
- [26] LI M Y, ZHOU H, ZHANG Y, et al. Effect of defects on thermal conductivity of graphene/epoxy nanocomposites[J]. *Carbon*, 2018, 130: 295-303.
- [27] BLANCO I, CICALA G, RECCA G, et al. Specific heat capacity and thermal conductivity measurements of PLA-based 3D-printed parts with milled carbon fiber reinforcement[J]. *Entropy*, 2022, 24(5): 654.
- [28] LUO F B, YANG S G, YAN P P, et al. Orientation behavior and thermal conductivity of liquid crystal polymer composites based on three-dimensional printing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 160: 107059.
- [29] GUINEY L, MANSUKHANI N D, JAKUS A E, et al. Three-dimensional printing of cytocompatible, thermally conductive hexagonal boron nitride nanocomposites[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(6): 3488-3493.
- [30] LIANG Z Q, PEI Y, CHEN C J, et al. General, vertical, three-dimensional printing of two-dimensional materials with multiscale alignment[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 12653-12661.
- [31] LIU J C, GUO Y F, WENG C X, et al. High thermal conductive epoxy based composites fabricated by multi-material direct ink writing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 129: 105684.
- [32] ROUDNÝ P, KAŠPAROVÁ J, GRANSOW P, et al. Polycarbonate composites for material extrusion-based additive manufacturing of thermally conductive objects[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 79: 103901.
- [33] STEPASHKIN A A, CHUKOV D I, SENATOV F S, et al. 3D-printed PEEK-carbon fiber (CF) composites: Structure and thermal properties[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 164: 319-326.
- [34] OLCUN S, IBRAHIM Y, ISAACS C, et al. Thermal conductivity of 3D-printed continuous pitch carbon fiber composites[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2023, 4: 100106.
- [35] JIA Y C, HE H, GENG Y, et al. High through-plane thermal conductivity of polymer based product with vertical alignment of graphite flakes achieved via 3D printing[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 145: 55-61.
- [36] ZHANG Z X, GKARTZOU E, JESTIN S, et al. 3D printing processability of a thermally conductive compound based on carbon nanofiller-modified thermoplastic polyamide 12[J]. *Polymers*, 2022, 14(3): 470.
- [37] LAMBERTI P, SPINELLI G, KUZHIR P P, et al. Evaluation of thermal and electrical conductivity of carbon-based PLA nanocomposites for 3D printing[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018(1): 20158.
- [38] LIU J C, LI W W, GUO Y F, et al. Improved thermal conductivity of thermoplastic polyurethane via aligned boron nitride platelets assisted by 3D printing [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 120: 140-146.
- [39] SPINELLI G, LAMBERTI P, TUCCI V, et al. Nanocarbon/poly(lactic) acid for 3D printing: Effect of fillers content on electromagnetic and thermal properties[J]. *Materials*, 2019, 12(15): 2369.
- [40] LIGATI SCHLEIFER S, REGEV O. Additive manufacturing of anisotropic graphene-based composites for thermal management applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 70: 103567.
- [41] GUO H C, ZHAO H Y, NIU H Y, et al. Highly thermally conductive 3D printed graphene filled polymer composites for scalable thermal management applications[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6917-6928.
- [42] SHEMELYA C, DE LA ROSA A, TORRADO A R, et al. Anisotropy of thermal conductivity in 3D printed polymer matrix composites for space based cube satellites[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 186-196.
- [43] LAURETO J, TOMASI J, KING J A, et al. Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2017, 2(1): 57-71.
- [44] ELKHOLY A, KEMPERS R. An accurate steady-

- state approach for characterizing the thermal conductivity of Additively manufactured polymer composites [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 31: 101829.
- [45] XI G Y, ZHOU Z Z, LI J, et al. Transparent composite ceramic@aluminum with ultra-high thermal conductivity for high-brightness laser-driven lighting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(36): 2401026.
- [46] FUGALLO G, CEPELLOTTI A, PAULATTO L, et al. Thermal conductivity of graphene and graphite: Collective excitations and mean free paths[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6109-6114.
- [47] REZAEI S, RANJBAR K. Thermal conductivity of porous Alumina-20wt% zirconia ceramic composites [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 16564-16571.
- [48] LU Y, SHAN Y T, GUO X, et al. Enhanced thermal conductivity and mechanical performance of CaO-B₂O₃-SiO₂ glass ceramic with AlN addition for LTCC applications[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 36328-36336.
- [49] HE Q L, YANG D L, XIA S Y, et al. Ultra-low thermal conductivity and improved thermoelectric performance in La₂O₃-dispersed Bi₂Sr₂Co₂O_y ceramics[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2024, 299: 116976.
- [50] HAN Z D, FINA A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review[J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(7): 914-944.
- [51] CHUNG D D L. Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2017, 113: 1-29.
- [52] XU P H, ZHU L D, ZHAO Z X, et al. Anisotropy behavior of liquid metal elastomer composites with both enhanced thermal conductivity and crack resistance by direct ink writing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 177: 107890.
- [53] QIU L, WANG X T, SU G P, et al. Remarkably enhanced thermal transport based on a flexible horizontally-aligned carbon nanotube array film[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21014.
- [54] SI Y, WANG X Q, DOU L Y, et al. Ultralight and fire-resistant ceramic nanofibrous aerogels with temperature-invariant superelasticity[J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaas8925.
- [55] LIN K T, LIN H, YANG T S, et al. Structured graphene metamaterial selective absorbers for high efficiency and omnidirectional solar thermal energy conversion[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1389.
- [56] MOSER N, STRASSER C, TANDA A, et al. Influence of printing direction and filler orientation on the thermal conductivity of 3D printed heat sinks[J]. *SPE Polymers*, 2024, 5(1): 83-94.
- [57] BURGER N, LAACHACHI A, FERRIOL M, et al. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory[J]. *Progress in Polymer Science*, 2016, 61: 1-28.
- [58] ROUDNÝ P, SYROVÝ T. Thermal conductive composites for FDM 3D printing: A review, opportunities and obstacles, future directions[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83: 667-677.
- [59] JI J C, CHIANG S W, LIU M J, et al. Enhanced thermal conductivity of alumina and carbon fibre filled composites by 3-D printing[J]. *Thermochimica Acta*, 2020, 690: 178649.
- [60] PAN S Y, SHEN H Y, ZHANG L C. Effect of carbon nanotube on thermal, tribological and mechanical properties of 3D printing polyphenylene sulfide[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102247.
- [61] GAO J, HAO M Y, WANG Y Y, et al. 3D printing boron nitride nanosheets filled thermoplastic polyurethane composites with enhanced mechanical and thermal conductive properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 56: 102897.
- [62] JING J J, CHEN Y H, SHI S H, et al. Facile and scalable fabrication of highly thermal conductive polyethylene/graphene nanocomposites by combining solid-state shear milling and FDM 3D-printing aligning methods[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402: 126218.
- [63] XU Q C, LI X X, CHEN Z X, et al. Highly thermally conductive polymer-based composites with 3D exfoliated BNNS/functionalized SiC networks prepared by rapid solidification and hot pressing[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2023, 186: 105539.
- [64] CAI Z W, ZHANG J F, ZHANG L Z, et al. Fluid-assisted fused deposition modeling 3D printing of anisotropically thermally conductive polymer composites with precisely tunable heat transfer pathways[J]. *Composites Communications*, 2024, 46: 101835.
- [65] ZHANG G M, SONG D S, JIANG J, et al. Electrically assisted continuous vat photopolymerization 3D printing for fabricating high-performance ordered graphene/polymer composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250: 110449.
- [66] LU L, ZHANG Z F, XU J, et al. 3D-printed polymer composites with acoustically assembled multidimensional filler networks for accelerated heat dissipation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019,

- 174: 106991.
- [67] ZHANG J M, YANG W D, LI Y. Process-dependent multiscale modeling for 3D printing of continuous fiber-reinforced composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 73: 103680.
- [68] REN L Q, ZHOU X L, XUE J Z, et al. Thermal metamaterials with site-specific thermal properties fabricated by 3D magnetic printing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900296.
- [69] ARMSTRONG C D, TODD N, ALSHARHAN A T, et al. A 3D printed morphing nozzle to control fiber orientation during composite additive manufacturing [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(1): 2000829.
- [70] WANG H H, HUANG Z Y, LI L C, et al. Internal oriented strategy of the hBN composite resin with enhanced in-plane or through-plane thermal conductivity via 3D printing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 173: 107638.
- [71] ZHUANG Y, SONG W T, NING G, et al. 3D-printing of materials with anisotropic heat distribution using conductive polylactic acid composites[J]. *Materials & Design*, 2017, 126: 135-140.
- [72] WILT J K, HMEIDAT N S, BOHLING J W, et al. High through-thickness thermal conductivity of 3D-printed composites via rotational direct ink writing[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2023, 7: 100167.
- [73] BRACONNIER D J, DUNN R M, WETZEL E D, et al. The role of crystallization and annealing on the thermal conductivity of material extrusion additively manufactured parts[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 89: 104265.
- [74] PASCUAL-GONZÁLEZ C, MARTÍN P S, LIZARRALDE I, et al. Post-processing effects on microstructure, interlaminar and thermal properties of 3D printed continuous carbon fibre composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 210: 108652.
- [75] PRAJAPATI H, RAVOORI D, WOODS R L, et al. Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM)[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 84-90.
- [76] WU X H, ZHANG X Y, YAN X X, et al. A review: From the whole process of making thermal conductive polymer, the effective method of improving thermal conductivity[J]. *Journal of Polymer Science*, 2024, 62(11): 2410-2442.
- [77] GENG Y, HE H, JIA Y C, et al. Enhanced through-plane thermal conductivity of polyamide 6 composites with vertical alignment of boron nitride achieved by fused deposition modeling[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(9): 3375-3382.
- [78] WANG J L, MUBARAK S, DHAMODHARAN D, et al. Fabrication of thermoplastic functionally gradient composite parts with anisotropic thermal conductive properties based on multicomponent fused deposition modeling 3D printing[J]. *Composites Communications*, 2020, 19: 142-146.
- [79] MA T B, RUAN K P, GUO Y Q, et al. Controlled length and number of thermal conduction pathways for copper wire/poly(lactic acid) composites via 3D printing[J]. *Science China Materials*, 2023, 66(10): 4012-4021.
- [80] LONG C Y, CHEN H Y, LI Z H, et al. Geometrically engineered heating arrays enabled by electric-field-driven 3D printing for on-demand thermal patterning [J]. *Additive Manufacturing Frontiers*, 2024, 3(3): 200141.
- [81] GUADAGNO L, ALIBERTI F, LONGO R, et al. Electrical anisotropy controlled heating of acrylonitrile butadiene styrene 3D printed parts[J]. *Materials & Design*, 2023, 225: 111507.
- [82] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(1): 23-36.
- [83] SALDÍVAR M C, TAY E, ISAAKIDOU A, et al. Bioinspired rational design of bi-material 3D printed soft-hard interfaces[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7919.
- [84] CUI Y, GONG H X, WANG Y J, et al. A thermally insulating textile inspired by polar bear hair[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(14): e1706807.
- [85] ZHOU X N, XU S S, WANG Z Y, et al. Wood-derived, vertically aligned, and densely interconnected 3D SiC frameworks for anisotropically highly thermally conductive polymer composites[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(7): 2103592.
- [86] HUANG X P, LIU G Q, WANG X W. New secrets of spider silk: Exceptionally high thermal conductivity and its abnormal change under stretching[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(11): 1482-1486.
- [87] LIN Y, KANG Q, WEI H, et al. Spider web-inspired graphene skeleton-based high thermal conductivity phase change nanocomposites for battery thermal management[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13(1): 180.
- [88] SHI N N, TSAI C C, CAMINO F, et al. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants[J]. *Science*, 2015, 349(6245): 298-301.
- [89] GAO Z Y, WANG H Z, REN P Y, et al. Metainterfaces with mechanical, thermal, and active program-

- ming properties based on programmable orientation-distributed biometric architectonics[J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(17): 4037-4053.
- [90] MISHRA A K, WALLIN T J, PAN W Y, et al. Autonomous perspiration in 3D-printed hydrogel actuators [J]. *Science Robotics*, 2020, 5(38): eaaz3918.
- [91] SHIN S, SO H. Time-dependent motion of 3D-printed soft thermal actuators for switch application in electric circuits[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101893.
- [92] PODSTAWCZYK D, NIZIOŁ M, SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA P, et al. Development of therminks for 4D direct printing of temperature-induced self-rolling hydrogel actuators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(15): 2009664.
- [93] ZHANG Y F, ZHANG N B, HINGORANI H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(15): 1806698.
- [94] CHEN L, ZHANG Y R, YE H T, et al. Color-changeable four-dimensional printing enabled with ultraviolet-curable and thermochromic shape memory polymers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(15): 18120-18127.
- [95] ALAM F, ELSHERIF M, SALIH A E, et al. 3D printed polymer composite optical fiber for sensing applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 102996.
- [96] DEISENROTH D C, MORADI R, SHOOSHTARI A H, et al. Review of heat exchangers enabled by polymer and polymer composite additive manufacturing [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2018, 39(19): 1648-1664.
- [97] CEVALLOS J G. Thermal and manufacturing design of polymer composite heat exchangers[D]. College Park, MD: University of Maryland, 2014.
- [98] LEBAL N, SETTAR A, ROTH S, et al. Conjugate heat transfer analysis within in lattice-filled heat exchanger for additive manufacturing[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(10): 1361-1369.
- [99] RASOULI E, FRICKE E, NARAYANAN V. High efficiency 3-D printed microchannel polymer heat exchangers for air conditioning applications[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2022, 28(3): 289-306.
- [100] KIM J, YOO D J. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2020, 7(4): 527-550.
- [101] DIXIT T, AL-HAJRI E, PAUL M C, et al. High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 210: 118339.
- [102] LIU P Q, LU L, LIU J K. Path-driven shell lattices designed for continuous fiber composite 3D printing [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 78: 103838.
- [103] NGUYEN N, MELAMED E, PARK J G, et al. Direct printing of thermal management device using low-cost composite ink[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, 302(10): 1700135.
- [104] SPOERK M, SAVANDAIAH C, ARBEITER F, et al. Anisotropic properties of oriented short carbon fibre filled polypropylene parts fabricated by extrusion-based additive manufacturing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113: 95-104.
- [105] GORUR M C, DOGANAY D, DURUKAN M B, et al. 3D printing of hexagonal boron nitride nanosheets/poly(lactic acid) nanocomposites for thermal management of electronic devices[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 265: 110955.
- [106] LI Y, LI W, HAN T C, et al. Transforming heat transfer with thermal metamaterials and devices[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(6): 488-507.
- [107] SHA W, XIAO M, ZHANG J H, et al. Robustly printable freeform thermal metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 7228.
- [108] AL-ZAREER M. Numerical study of flow and heat transfer performance of 3D-printed polymer-based battery thermal management[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 158: 119995.
- [109] KHAKBAZ H, RUBERU K, KANG L Z, et al. 3D printing of highly flexible, cytocompatible nanocomposites for thermal management[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(10): 6385-6400.
- [110] ZHANG Z B, LI M H, WANG Y D, et al. Ultrahigh thermal conductive polymer composites by the 3D printing induced vertical alignment of carbon fiber[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(20): 10971-10983.