

填充密度调控3D打印h-BN/TPU复合材料热力学性能研究

唐 澳, 魏 赛, 刘 湛*

五邑大学机械与自动化工程学院, 广东 江门

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年6月5日; 发布日期: 2026年6月12日

摘 要

为探究填充密度对FDM 3D打印h-BN/TPU导热聚合物复合材料热力学性能的调控规律, 以20 wt%填料含量下的h-BN/TPU为研究体系, 设置80%、90%、100%三组填充密度开展单因素实验, 结合SEM、激光导热仪、热重分析仪与万能材料试验机表征材料微观结构与宏观性能。结果表明: 填充密度从80%提升至100%, 熔丝界面融合更紧密、内部孔隙率明显降低, h-BN片层沿水平方向取向程度提高; 复合材料热导率、700°C残炭率、拉伸强度与断裂伸长率均呈上升趋势, 实现导热性能、热稳定性与力学性能协同增强。研究明确填充密度通过调控熔丝粘合形貌与填料取向影响材料性能, 为3D打印导热复合材料工艺优化提供实验依据。

关键词

3D打印, 填充密度, 聚合物复合材料, 热力学性能

Research on Thermo-Mechanical Properties of 3D Printed h-BN/TPU Composites with Filling Density Regulation

Ao Tang, Sai Wei, Zhan Liu*

School of Mechanical and Automation Engineering, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

Received: May 12, 2026; accepted: June 5, 2026; published: June 12, 2026

Abstract

In order to explore the regulation of filling density on the thermodynamic properties of FDM 3D

*通讯作者。

printed h-BN/TPU thermal conductive polymer composites, a single factor experiment was carried out to h-BN/TPU with filler mass fraction of 20 wt% and three groups of filling densities of 80%, 90% and 100%. The microstructure and macro properties of the composites were characterized by SEM, laser thermal conductivity analyzer, thermogravimetric analyzer and universal material testing machine. The results show that the filling density increases from 80% to 100%, the fusion interface is closer, the internal porosity is significantly reduced, and the horizontal orientation of h-BN layer is improved; The thermal conductivity, 700°C residual carbon rate, tensile strength and elongation at break of the composite showed an upward trend, achieving the synergistic enhancement of thermal conductivity, thermal stability and mechanical properties. The results show that the filling density affects the material properties by adjusting the fuse bonding morphology and filler orientation, which provides an experimental basis for the process optimization of 3D printing thermal conductive composites.

Keywords

3D Printing, Filling Density, Polymer Composites, Thermodynamic Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着电子器件朝着高功率、微型化、集成化方向快速发展, 散热问题已成为制约器件性能、寿命与可靠性的核心问题[1]。传统金属散热材料[2]存在密度大、耐腐蚀差、绝缘性不足等缺陷, 难以满足新一代电子设备的轻量化与安全化需求。聚合物基导热复合材料[3]凭借质轻、绝缘、易加工、耐腐蚀等优势, 成为热管理领域的研究热点。其中, 以热塑性聚氨酯(TPU)为基体、六方氮化硼(h-BN)为导热填料[4]的复合材料, 兼具高韧性、高绝缘性与优良导热能力, 在柔性散热、电子封装、智能穿戴等领域展现出广阔应用前景[5]。

熔融沉积成型(FDM) 3D 打印技术[6]无需模具、可快速定制复杂结构, 为导热聚合物复合材料的成型制备提供了高效灵活的解决方案。然而, FDM 工艺属于逐层堆积成型, 熔丝形貌、层间结合状态、内部孔隙缺陷等微观结构直接决定材料的宏观性能[7]。在众多工艺参数中, 填充密度[8]是调控内部致密度、界面结合强度与缺陷分布的关键变量, 它通过改变熔丝间距与搭接状态, 影响填料取向、孔隙率及传热传力通路, 最终对复合材料的导热、热稳定与力学性能产生明显作用[9]。

当前国内外针对 3D 打印聚合物复合材料的研究, 多集中于填料配比、打印层高、打印速度等工艺参数, 而围绕填充密度的系统性研究仍较为缺乏, 尤其缺少“填充密度 - 微观形貌 - 热力学性能”的定量关联机制。已有研究显示, 提高填充密度能够降低制品孔隙率、增强层间结合强度, 但在 h-BN/TPU 柔性导热体系中, 填充密度对熔丝铺展行为、填料取向规律及多性能协同调控的作用机制尚不明确。同时, 填充密度过高易引发韧性下降、成型缺陷增多, 过低则会导致性能明显衰减, 需确定合理区间以实现性能最优调控。高士友[10]等人发现填充密度提升可增强 PLA 制品力学性能, 同心线填充优于直线与方格填充。魏彬[11]等人探究了填充密度等参数对制品力学性能的影响, 提出构型优化方法, 为强度导向的打印参数设计提供依据。刘勇[12]等人证实提高填充密度可提升 POE/PP 混合物的杨氏模量、屈服应力与能量吸收能力。田玉琬[13]等人通过正交试验表明, 优化填充率能减小翘曲变形, 提升打印件精度与表面质量。刘娇[14]等人采用浆料挤出 3D 打印制备中空铸造型壳, 探究填充密度与轮廓层数对型壳性能的影响。

结果表明, 填充密度提升可降低孔隙率、减小收缩率并提高弯曲强度, 80%填充密度、1层轮廓时综合性能最优, 经铝合金试铸验证效果良好; Yamada [15]等人发现填充率会明显影响结构力学性能与劣化模式, 低填充率下形成的空隙会改变材料失效行为; 王晗[16]等人则系统研究了 PLA 与 ABS 材料, 发现拉伸强度与模量随填充率提升而增强, 断裂伸长率呈先升后降趋势, 且 100%填充率下 FDM 制品性能可接近甚至超过注塑件水平, 合理调控填充率可实现性能与成本的平衡。上述研究均表明填充密度是调控 3D 打印制品结构与性能的关键参数。

因此, 本文以 h-BN/TPU 复合材料为研究对象, 系统探究不同填充密度对 3D 打印试样微观形貌、导热性能、热稳定性及力学性能的影响规律。通过扫描电子显微镜观察熔丝界面与孔隙特征, 采用激光导热仪、热重分析仪、万能材料试验机进行多维度性能表征, 探究填充密度对复合材料热力学性能的作用机制。研究结果可为 FDM 3D 打印柔性导热复合材料的工艺优化提供实验支撑与理论参考, 推动高性能热管理材料在电子器件领域的工程化应用。

2. 试验材料及方法

2.1. 主要原料与仪器设备

热塑性聚氨酯(Thermoplastic Polyurethane, TPU)型号为型号 1190A, 采购自德国巴斯夫股份公司生产。六方氮化硼(Hexagonal Boron Nitride, h-BN)型号为型号 ML-BN-PW40, 由浙江曼粒纳米科技有限公司生产, 平均粒径 40 μm , 纯度 99.9%, 形貌为片状。为对 h-BN/TPU 复合材料进行制备与性能表征, 本研究主要使用以下仪器设备完成丝材制备、样品打印及性能测试工作, 具体实验设备如表 1 所示。

Table 1. Experimental apparatus

表 1. 实验仪器

设备名称	型号	厂家
传统双螺杆挤出机	HK2.6	南京科亚
3D 打印耗材牵引机	HTES-25	HARTEK
FDM3D 打印机	Ender-3 S1 Pro	创想三维
恒温干燥箱	DHG-9070A	上海一恒
扫描电子显微镜	Star	Thermo Fisher Scientific
红外热成像分析仪	R60	MISSION
激光导热仪	LFA467	德国耐驰
X 射线衍射仪	Xpert Powder	荷兰帕纳科
热重与差热联用仪	TGA/DSC 3+	梅特勒-托利多
材料试验机	5966	Instron

2.2. 3D 打印实验与材料制备方法

本文选取 h-BN 填料质量分数为 20 wt%, 主要基于以下考虑: 该含量接近 h-BN/TPU 体系的导热逾渗阈值, 可在较低添加量下形成有效导热网络; 同时 20 wt%添加量可保证复合材料熔体流动性适中、丝材韧性良好, 满足 FDM 3D 打印连续挤出、不堵头、不断丝的工艺要求, 在导热性能、成型加工性与力学性能之间达到最佳平衡。为制备 h-BN/TPU 复合材料 3D 打印丝材, 先将 TPU 与 h-BN 原料在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥 6h, 充分去除水分。按质量比 8:2 准确称量两种原料, 在烧杯中初步搅拌混合均匀。将混合物料加

入 HK2.6 型双螺杆挤出机, 螺杆直径 26 mm, 长径比 68:1, 进行熔融共混与挤出造粒。挤出工艺参数为: 螺杆转速 100 rpm, 进料频率 5 Hz, 各温区温度由进料至机头依次设为 120℃、150℃、170℃、180℃、180℃、175℃、170℃, 熔丝挤出温度 190℃。挤出的复合材料经牵引机匀速牵伸拉丝, 将丝材直径稳定控制在 1.75 ± 0.1 mm。最后将丝材收卷, 并置于恒温干燥箱中保存备用。

通过 SolidWorks 完成打印样品的三维建模, 将模型保存为 STL 格式后导入 Creality Slicer 4.8.2 切片软件, 为排除无关变量干扰、保证实验条件一致性, 填料体系为 h-BN/TPU, 其余打印参数均固定为: 打印温度为 220℃、底板温度为 60℃、喷头直径为 0.4 mm、壁走线次数 3 次, 以此构建系统的参数研究体系。完成参数设定与切片处理后, 生成 G 代码并导入 FDM 3D 打印机执行打印, 完成样品制备, 不同填充密度的实验分组如表 2 所示。

Table 2. Experimental groups with different fill densities

表 2. 不同填充密度的实验分组

组号	填充密度(%)	层高(mm)	打印速度(mm/s)	喷嘴直径(mm)
1.	100	0.2	40	0.4
2.	90	0.2	40	0.4
3.	80	0.2	40	0.4

2.3. 材料表征与性能测试方法

为对 h-BN/TPU 复合材料进行多维度表征测试, 本文主要采用扫描电子显微镜观测熔丝截面微观形貌。将 $20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 样品液氮脆断、180 s 金靶喷金后, 在 5 kV 加速电压、8 mm 工作距离下, 对同一截面进行相同倍率观测, 并用 Image J 软件定量统计孔隙率, 分析打印工艺对孔隙结构的影响规律; 利用 X 射线衍射仪对直径 30 mm、厚度 0.6 mm 的薄膜样品进行测试, 扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$ 、速度 $5^\circ/\text{min}$, 通过(002)与(100)晶面衍射峰强度比定量表征 h-BN 取向; 采用红外热成像分析仪对 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的片状样品进行测试, 样品置于 80℃ 恒温加热台, 搭配直径 10 mm、厚度 5 mm 导热铜柱, 连续测试 140 s 并记录温度场变化; 使用 TGA/DSC 3+热重-差热联用仪, 取 10~20 mg 样品于 70 μL 氧化铝坩埚, 在氮气氛围下以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 从 25℃ 升温至 700℃, 测试热稳定性并获取残炭率等指标; 依据公式 $k = \alpha \times C_p \times \rho$ 计算热导率, 采用 LFA467 激光导热仪在 25℃ 下测试直径 25 mm、厚度 0.6 mm 圆片样品的水平热扩散系数(每组 3 次平行测试取平均), 比热容采用蓝宝石法计算, 密度由阿基米德排水法测得; 按照 ASTM-D638 IV 型标准制备长 115 mm、厚 3.6 mm 的哑铃形拉伸试样, 使用 5966 型万能材料试验机以 10 mm/min 速率拉伸至断裂, 每组至少 3 次平行试验, 取平均值得到拉伸强度与断裂伸长率。

3. 仿真结果与性能分析

3.1. 填充密度对复合材料结构的影响

填充密度是调控 FDM 3D 打印 h-BN/TPU 复合材料内部微观结构的核心参数, 通过改变熔丝间距直接决定界面融合状态与孔隙缺陷特征。由 SEM 图(图 1)与孔隙率数据(图 2)可知, 填充密度从 80% 提升至 100% 时, 熔丝间距逐步减小, 界面粘合质量显著改善。80% 填充密度下, 熔丝间距过大, 沉积过程中无法充分填充间隙, 界面融合差, 截面存在大量明显孔隙, 孔隙率高达 1.89%; 90% 填充密度时, 熔丝侧向约束增强, 间隙减小, 孔隙数量与尺寸明显降低, 孔隙率降至 1.07%; 100% 填充密度下, 熔丝受挤压充分铺展, 与相邻熔丝形成连续紧密的粘合界面, 内部孔隙极少, 孔隙率仅 0.84%。

因此，填充密度通过调控熔丝预设间距，决定熔丝流动铺展与间隙填充的匹配效果。高填充密度可强化熔丝横向铺展，提升界面结合致密性；低填充密度则因铺展空间不足，导致粘合界面劣化、孔隙率上升，为后续热力学性能差异奠定微观结构基础。

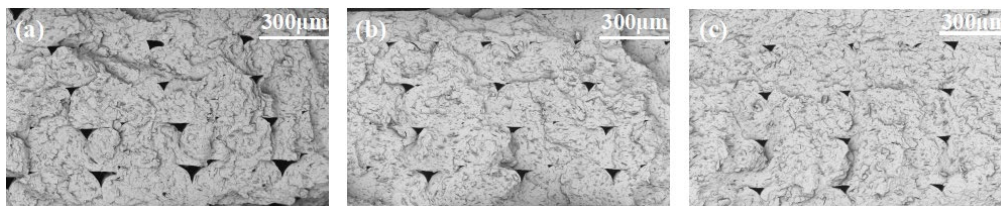


Figure 1. (a), (b) and (c) are the SEM cross-section of the fuse with the filler densities of 80%, 90% and 100%, respectively

图 1. (a)、(b)、(c)分别为填充密度 80%、90%、100%的熔丝截面 SEM 图

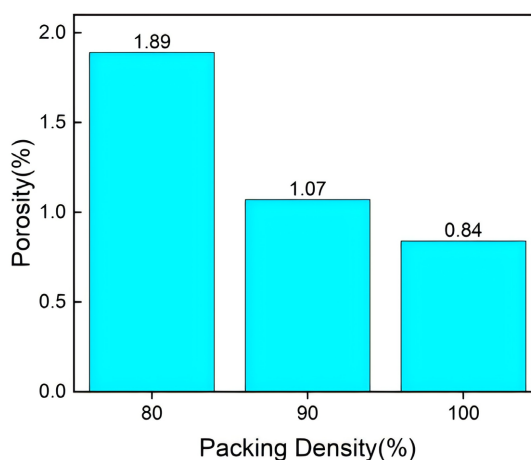


Figure 2. Porosity of filament cross-section at different filler densities

图 2. 不同填充密度的熔丝截面孔隙率

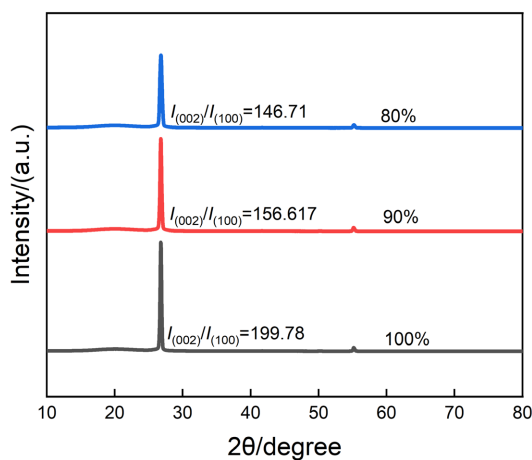


Figure 3. XRD patterns of h-BN/TPU composites with different filler densities

图 3. 不同填充密度的 h-BN/TPU 复合材料 XRD 图谱

XRD 结果表明，填充密度明显调控 h-BN 片层在复合材料中的取向程度，以(002)与(100)晶面衍射峰

强度比(I_{002}/I_{100})定量表征取向效果。由图 3 可知, 100%填充密度下, 该比值达 199.78, h-BN 片层沿打印平面高度取向; 填充密度降至 90%、80%, 比值分别降至 156.62、146.71, 取向程度持续下降。高填充密度时, 单位区域内熔丝挤出量充足, 铺展均匀且界面粘合紧密, 熔丝流动产生的横向约束较强, 带动 h-BN 片层沿铺展方向定向排列, 形成优异的水平取向结构。低填充密度下, 熔丝铺展不充分、孔隙增多、界面粘合松散, 横向约束大幅减弱, h-BN 片层难以规整排列, 取向无序化明显。这种取向差异直接影响导热通路构建与载荷传递效率, 是决定复合材料宏观性能的关键微观因素。

3.2. 填充密度对复合材料导热性能的影响

导热性能测试结果(图 4、图 5)显示, h-BN/TPU 复合材料热导率与热扩散系数随填充密度升高同步提升。100%、90%、80%填充密度对应的热导率分别为 1.01 W/(m·K)、0.84 W/(m·K)、0.67 W/(m·K), 热扩散系数依次为 0.582 mm²/s、0.513 mm²/s、0.406 mm²/s, 证实填充密度与导热性能呈正相关。高填充密度下, 熔丝紧密排列、充分铺展, 形成连续无缺陷的粘合界面, 内部孔隙率极低, h-BN 片层沿水平方向高度取向, 构建起连续高效的导热网络, 热量可沿低热阻通路快速传递。低填充密度时, 熔丝间距大、界面融合差, 大量空气孔隙阻断导热通路, 热量传递需频繁穿越高阻基体与孔隙, 热传导效率大幅下降。红外热成像结果进一步验证该规律, 加热 140 s 后, 100%填充密度样品表面温度达 77.2℃, 90%、80%填充密度样品分别降至 75.5℃、74.3℃, 高填充密度样品升温速率更快、散热能力更优。

与已有文献报道的 h-BN/TPU 导热复合材料相比, 本研究在 20 wt% 较低填料添加量下, 通过填充密度优化与 h-BN 取向调控, 实现了 1.01 W/(m·K) 的热导率, 处于同类 FDM 3D 打印柔性导热复合材料的中上水平。多数研究需在 30~50 wt% h-BN 填充条件下才能达到 0.8~1.2 W/(m·K) 的热导率, 本研究在更低填料用量下获得了更优的导热效果, 表明通过打印工艺调控可提升填料利用效率, 为低成本、高韧性柔性热管理材料的开发提供了可行的工艺借鉴。

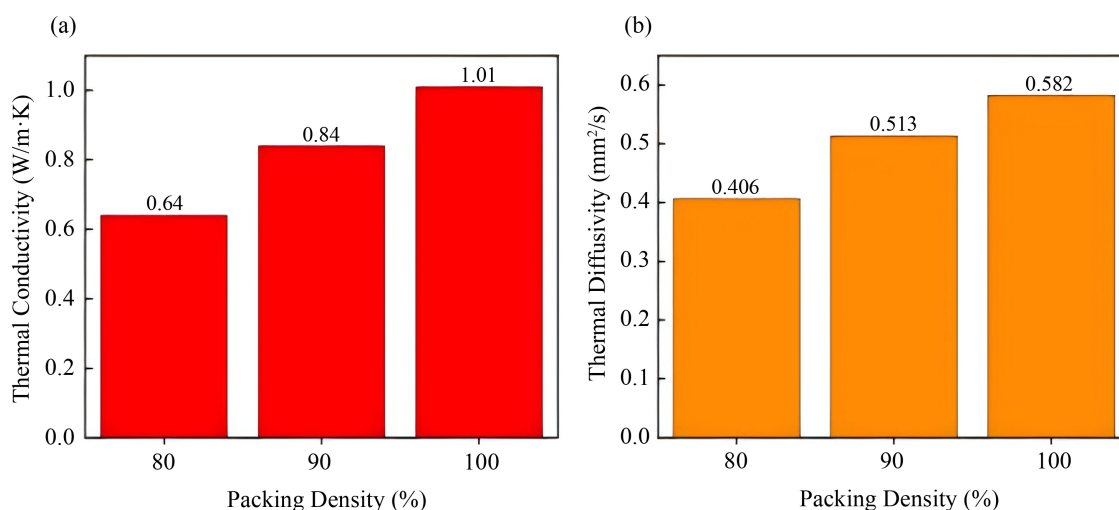


Figure 4. (a) and (b) show the thermal diffusivity and thermal conductivity of h-BN/TPU composites with different filler densities, respectively

图 4. (a)、(b)分别为不同填充密度的 h-BN/TPU 复合材料热扩散系数和导热系数

3.3. 填充密度对复合材料热稳定性能的影响

热重测试结果表明, h-BN/TPU 复合材料热稳定性与填充密度呈正相关。700℃时, 100%、90%、80%填充密度样品的残炭率分别为 20.84%、20.51%、19.60%, 随填充密度降低持续下降。高填充密度下, 熔丝

排布紧密、横向铺展充分,界面结合牢固,材料内部致密度高、孔隙缺陷少,有利于 h-BN 形成连续导热网络,使热量传递更均匀,抑制局部过热分解,有效延缓基体热失重,提升残炭率,不同填充密度的 h-BN/TPU 复合材料热重曲线如图 6 所示。填充密度降低会增大熔丝间距,内部孔隙增多且连通性增强,破坏导热通路连续性,导致热量分布不均、局部热积累加剧,加速材料热分解,最终使热稳定性与残炭率明显下降。

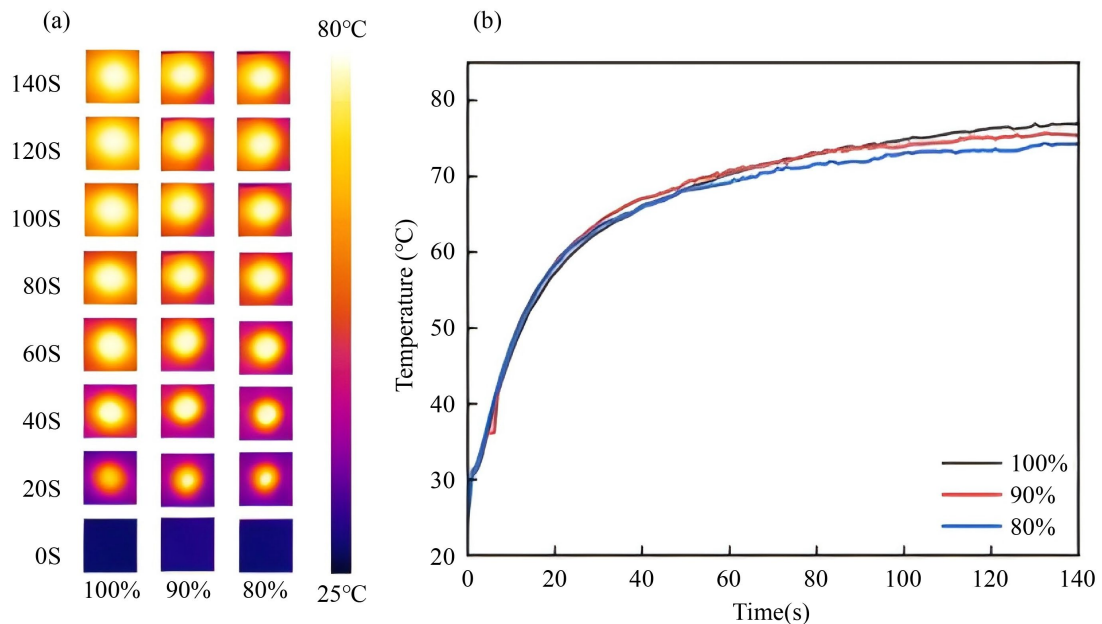


Figure 5. (a) and (b) show the infrared thermal imaging and surface temperature rise curves of 3D printed samples under different filler densities, respectively

图 5. (a)、(b)分别为不同填充密度下 3D 打印试样的红外热成像与表面温升曲线

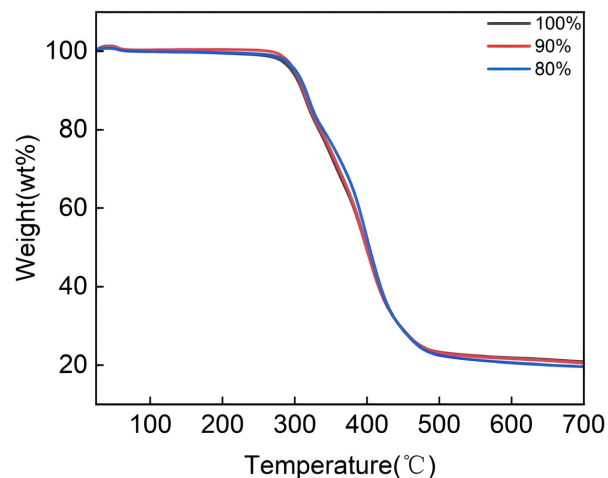


Figure 6. Thermogravimetric curves of h-BN/TPU composites with different filler densities

图 6. 不同填充密度的 h-BN/TPU 复合材料热重曲线

3.4. 填充密度对复合材料力学性能的影响

力学测试结果(图 7)显示,复合材料拉伸强度与断裂伸长率均随填充密度升高而提升。100%填充密度

下, 拉伸强度为 19.11 MPa, 断裂伸长率达 440.05%; 降至 90% 时, 强度为 16.64 MPa, 伸长率为 360.26%; 80% 时, 强度仅 11.72 MPa, 伸长率为 346.67%, 力学性能随填充密度降低大幅衰减。在高填充密度下, 熔丝界面融合充分、孔隙缺陷少, 形成连续完整的力学传递网络, 有效减少应力集中点。拉伸过程中, TPU 基体可通过大分子链滑移与取向实现高延伸, h-BN 填料网络同步分担载荷, 使材料兼具高强度与高韧性。低填充密度时, 熔丝间隙大、孔隙多, 破坏基体连续性与填料增强网络, 孔隙成为应力集中点, 引发裂纹过早扩展, 导致应力传递路径中断, 材料在低应力下即发生断裂, 强度与韧性同步下降。

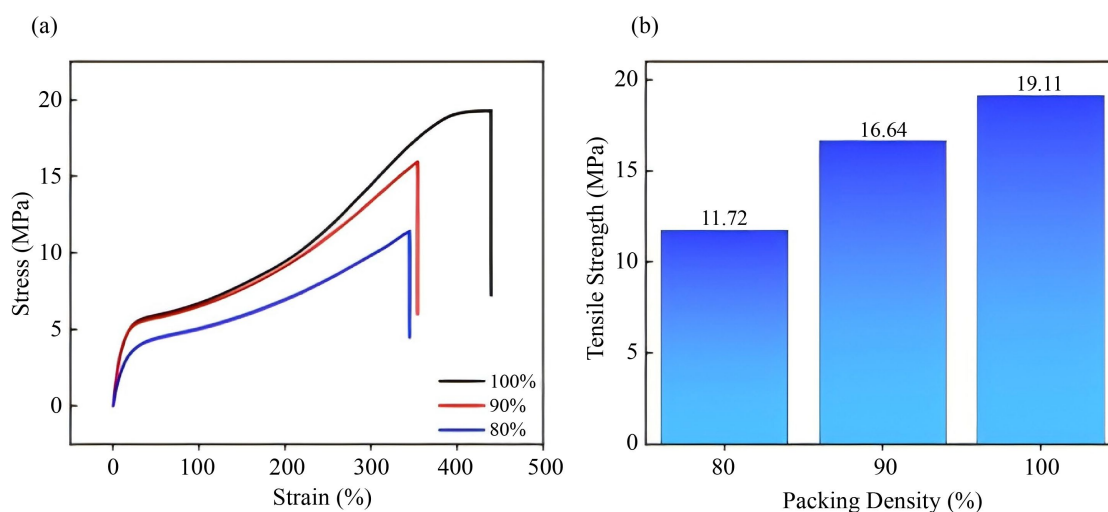


Figure 7. (a) and (b) show the tensile properties of h-BN/TPU composites with different filler densities, respectively
图 7. (a)、(b) 分别为不同填充密度的 h-BN/TPU 复合材料拉伸性能

4. 结论

本文通过研究填充密度对 3D 打印 h-BN/TPU 复合材料热力学性能的影响, 发现填充密度对 FDM 3D 打印 h-BN/TPU 复合材料的微观结构与热力学性能具有明显的调控作用。

(1) 随着填充密度从 80% 提升至 100%, 熔丝间距逐渐减小, 界面融合质量改善, 材料内部孔隙率从 1.89% 降至 0.84%, 结构致密度大幅提升。同时, 高填充密度下熔丝铺展充分, 横向约束作用增强, 促使 h-BN 片层沿打印平面形成高度取向排列, (I_{002}/I_{100}) 比值从 146.71 提升至 199.78, 为构建连续高效的导热与力学传递网络奠定了微观基础。

(2) 填充密度的提升明显改善了复合材料的热力学性能。在导热性能方面, 100% 填充密度样品的热导率达 1.01 W/(m·K), 较 80% 填充密度样品提升 50.7%, 红外热成像结果也证实其散热效率更优; 热稳定性方面, 700℃ 残炭率从 19.60% 提升至 20.84%, 表明致密结构能有效延缓基体热分解; 力学性能上, 拉伸强度从 11.72 MPa 提升至 19.11 MPa, 断裂伸长率从 346.67% 提升至 440.05%, 实现了强度与韧性的协同增强。

(3) 本研究明确了“填充密度 - 微观形貌 - 热力学性能”的关联机制, 证实 100% 填充密度为 h-BN/TPU 柔性导热复合材料的最优工艺参数, 可实现结构致密化、填料高取向与性能协同提升。研究结果为 FDM 3D 打印导热聚合物复合材料的工艺优化提供了实验依据, 对其在电子散热、柔性封装等领域的工程化应用具有重要指导意义。

基金项目

江门市基础与理论科学研究类科技计划项目(2024030001670011599)。

参考文献

- [1] Moore, A.L. and Shi, L. (2014) Emerging Challenges and Materials for Thermal Management of Electronics. *Materials Today*, **17**, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.04.003>
- [2] Feng, W. (2025) Design of Intelligent Thermally Conductive Materials. In: *Design and Application of Intelligent Thermally Conductive Materials*, Elsevier, 117-211. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-40409-2.00004-9>
- [3] He, L.L. (2021) Improve Thermal Conductivity of Polymer Composites via Conductive Network. *ES Materials & Manufacturing*, **13**, 1-2.
- [4] 陈沛嘉, 葛鑫, 梁伟杰, 尹爽, 张志聪, 吕健儿, 刘卫东, 陈友鹏, 葛建芳. 聚合物基热界面材料与导热性能研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(S1): 269-281.
- [5] Zhao, C., Li, Y., Liu, Y., Xie, H. and Yu, W. (2023) A Critical Review of the Preparation Strategies of Thermally Conductive and Electrically Insulating Polymeric Materials and Their Applications in Heat Dissipation of Electronic Devices. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, **6**, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00584-2>
- [6] Daminabo, S.C., Goel, S., Grammatikos, S.A., Nezhad, H.Y. and Thakur, V.K. (2020) Fused Deposition Modeling-Based Additive Manufacturing (3D Printing): Techniques for Polymer Material Systems. *Materials Today Chemistry*, **16**, Article ID: 100248. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100248>
- [7] Li, S., Zi, Q., Lu, S., Xu, W. and Tao, J. (2022) Preparation of Ultrahigh Thermally Conductive Materials of Graphene Composites by Electrophoresis on Carbon Fiber. *Journal of Materials Science*, **57**, 4210-4220. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-06888-4>
- [8] 王新艳, 沈芳. 3D 打印技术综述[J]. 江西化工, 2019(3): 242-243.
- [9] Ferretti, P., Leon-Cardenas, C., Santi, G.M., Sali, M., Ciotti, E., Frizziero, L., *et al.* (2021) Relationship between FDM 3D Printing Parameters Study: Parameter Optimization for Lower Defects. *Polymers*, **13**, Article No. 2190. <https://doi.org/10.3390/polym13132190>
- [10] 高士友, 黎宇航, 周野飞. 熔融沉积(FDM) 3D 打印成形件的力学性能实验研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 200-206.
- [11] 魏彬, 丁逸昊, 刘晓鹏, 李锦赫, 于洪杰. 3D 打印工艺参数对制品力学性能影响实验研究[J]. 机械强度, 2022, 44(3): 594-599.
- [12] 刘勇, 王信, 毕超, 等. PP 含量与填充密度对 3D 打印 POE/PP 复合材料压缩性能的影响研究[J]. 机电信息, 2025(10): 82-84.
- [13] 田玉琬, 文成, 安芬菊, 等. FDM 3D 打印件翘曲变形的工艺分析与优化[J]. 轻工科技, 2016, 32(6): 61-62+91.
- [14] 刘娇, 刘洪军, Yatskovskyi Dmytro, 等. 填充密度和轮廓层数对浆料挤出 3D 打印型壳性能的影响[J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 181-189.
- [15] Yamada, A. and Tatebe, K. (2025) Effect of the Interior Fill Percentage on the Deterioration of the Mechanical Properties of FFF-3D-Printed PLA Structures. *Polymers*, **17**, Article No. 828. <https://doi.org/10.3390/polym17060828>
- [16] 王晗, 杨卫民, 焦志伟, 等. FDM 工艺中填充率对塑料制品力学性能的影响[J]. 塑料, 2018, 47(1): 92-94+112.