

· 研究论文 ·

基于类哑铃结构填料增强聚合物复合材料导热性能

周晓萌¹ 周雪颖¹ 张志兴¹ 秦盟盟^{1*} 封伟^{1,2*}

(天津大学¹材料科学与工程学院²贵金属功能材料全国重点实验室 天津 300350)

摘要 高功率密度电子器件运行过程中产生的局部热积累会降低器件性能和服役可靠性, 因此发展高效聚合物基热管理材料具有重要意义. 提高导热填料含量通常可有效改善聚合物基复合材料的导热性能, 但过高的填料添加量往往会削弱材料的力学性能、电磁性能和绝缘性能等. 因此, 在有限填料用量条件下提高其结构贡献和传热效能, 对于聚合物基热管理复合材料导热性能的改善具有重要意义. 基于填料几何结构拓扑优化, 建立了一种聚合物基复合材料导热性能提升策略, 旨在通过合理调控填料构型提高其热贡献效率. 系统考察了迭代次数、体积分数、设计域几何形状和目标函数等因素对优化构型及传热性能的影响, 在此基础上构建了一种简化的类哑铃填料结构. 与传统圆柱状填料结构相比, 该结构表现出更优异的热响应特性, 所制备的类哑铃阵列石墨/聚二甲基硅氧烷(graphite/polydimethylsiloxane, graphite/PDMS)复合材料散热效率为圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料的 1.47 倍. 相关结果为高性能聚合物基热管理复合材料的填料结构设计提供了有效方法.

关键词 聚合物复合材料; 拓扑优化; 导热填料; 热管理

引用: 周晓萌, 周雪颖, 张志兴, 秦盟盟, 封伟. 基于类哑铃结构填料增强聚合物复合材料导热性能. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26142.

Citation: Zhou, X. M.; Zhou, X. Y.; Zhang, Z. X.; Qin, M. M.; Feng, W. Enhanced thermal conductivity of polymer composites based on dumbbell-like filler structures. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26142.

随着电子器件向小型化、集成化和高功率化方向发展, 单位体积发热量持续增加, 对热管理材料的传热效率和温度均匀化能力提出了更高要求^[1,2]. 聚合物基复合材料具有质量轻、成本低、易加工等优异综合性能, 在集成电路和通信基站等热管理领域展现出重要应用潜力^[3-6]. 然而, 聚合物本征热导率较低^[7], 通常仅为 $0.1\sim 0.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[8-10], 难以满足高效散热需求. 传统方法通常通过提高导热填料含量来改善复合材料的导热性能^[11-14], 但高填料含量往往会导致材料力学性能、电磁性能及绝缘性能等下降^[15-18].

因此, 在有限填料用量下提高其利用效率, 是实现聚合物基热管理复合材料高效导热的关键.

已有研究表明, 在聚合物基体中构筑连续且取向的导热通路, 可显著提升复合材料的定向传热能力^[19-22]. Ruan 等^[23]采用液晶分子对碳纳米管进行功能化, 并在交变电场作用下诱导其在液晶聚酰亚胺基体中取向排列, 从而构筑了更加连续的取向导热通路, 使复合材料的面内和面外热导率分别提高 90.5% 和 71.9%. Zhang 等^[24]在垂直取向碳纳米管体系中引入共聚物, 在保持厚度方向连续导热通路的同时, 通过氢键作用和机械互锁

2026-04-27 收稿, 2026-05-20 录用, 网络出版.

基金项目: 国家自然科学基金(项目号 U25A20254, 52130303, 52173078, 52327802).

* 通信联系人, E-mail: qmm@tju.edu.cn; weifeng@tju.edu.cn

本文附有电子支持信息, 与正文一并刊登在本刊网站(www.gfzxb.org).

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26142; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7634

增强界面结合, 所得复合材料面外热导率达到 $21.46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Xu 等^[25]通过一步磁场辅助法制备取向碳纤维/PDMS 柔性导热垫片, 使碳纤维沿厚度方向取向排列并形成连续贯穿的导热通路, 复合材料面外热导率达到 $141.57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 接近金属导热水平. 然而, 上述研究主要基于现有填料的有序组装, 填料自身结构对复合材料导热性能的影响仍缺乏系统认识.

目前, 填料结构调控研究主要集中于尺寸、长径比和形貌等简单几何参数的调节^[26-28]. Yan 等^[29]发现, 具有超高长径比的氮化硼(boron nitride, BN)纳米片更易在聚乙烯醇薄膜中构筑高效面内导热通路. Luo 等^[30]研究了BN 尺寸对柔性热塑性聚氨酯/BN 复合材料性能的影响, 结果表明, 在相同加工工艺和取向条件下, 较大尺寸片状填料更有利于形成连续导热通路, 并减少界面数量和界面热阻. Jin 等^[31]通过引入球形非导热空心玻璃微珠, 抑制熔融加工过程中片状石墨的强面内取向, 从而改善材料面外导热性能. 这些研究表明, 填料几何结构特征对复合材料热传导性能具有重要影响. 然而, 现有研究多停留在简单几何参数的经验调控层面, 面向高效传热的填料构型设计规律仍缺乏系统认识. 拓扑优化^[32,33]作为一种反向设计方法, 已广泛应用于结构设计领域^[34-37]. 但受制备工艺、成本等因素限制, 优化结构的实际应用仍存在一定挑战^[38,39], 尤其是在导热填料结构设计方面, 相关研究仍较为缺乏.

本工作将拓扑优化引入导热填料结构设计, 提出“拓扑优化—结构简化—实验验证”的填料构型设计策略. 通过系统研究迭代次数、体积分数、设计域几何形状及目标函数对优化拓扑结构和热传导性能的影响, 确定了优化填料结构的设计条件. 在此基础上, 进一步提出一种具有中部贯通连接和端部扩展特征的一类哑铃简化导热单元. 与简单圆柱体和立方体结构相比, 该结构的冷热端温差(ΔT)分别降低 8.6 和 5.4 °C. 通过进一步调控端部棱台厚度和连接段几何形状, 研究了几何参数对复合材料热响应行为的影响. 结果表明, 端部棱台厚度为 1 mm 时, 材料表现出更优的综合传热性能; 厚度为 2 mm 时, 则具有更优的热点抑制效果. 所制备的一类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料表现出优异的热管理能力, 其散

热效率达到 $0.028 \text{ W}\cdot\text{°C}^{-1}$, 为圆柱阵列复合材料的 1.47 倍. 本研究为高性能聚合物基热管理复合材料的导热填料结构设计提供了新的思路和方法.

1 实验部分

1.1 拓扑优化

采用拓扑优化策略, 在设定目标函数和约束条件下获得最优材料分布. 计算采用基于密度插值的固体各向同性材料惩罚法(solid isotropic material with penalization, SIMP). 为降低计算复杂度, 模型仅考虑固体介质内的热传导过程. 拓扑优化流程及相关参数设置详见电子支持信息 S1, 整体制备流程如图 1(a)所示.

1.2 实验材料

聚二甲基硅氧烷(PDMS) (Sylgard 184)及其固化剂购自美国道康宁公司; 石墨(YC-8)购自深圳市烨驰科技有限公司. PDMS 及其固化剂的代表性结构和固化反应示意图见电子支持信息 S1.

1.3 Graphite/PDMS 复合材料的制备

Graphite/PDMS 导热复合材料通过计算机数控(computer numerical control, CNC)加工获得石墨结构, 并结合 PDMS 封装制备. 根据预先设计的几何尺寸和空间位置信息, 利用 CNC 车床加工制备石墨导热单元. 加工过程中, 将石墨块固定于加工平台, 并通过高速旋转刀具进行精密切削, 获得目标石墨结构. 随后, 将 PDMS 基本组分与固化剂按质量比 10:1 混合, 充分搅拌后浇注至含有石墨导热单元的模具中, 经超声处理去除残留气泡. 最后, 将模具置于 80 °C 下固化 3 h, 脱模后得到 graphite/PDMS 导热复合材料.

1.4 测试与表征

1.4.1 原材料物理性质测试

采用示差扫描量热法测试并计算样品的比热容(C_p), 测试温度范围为 10~350 °C. 采用质量-体积法测定样品密度(ρ): 使用分析天平称量样品质量(m), 并采用游标卡尺测量样品尺寸以计算体积(V), 通过公式(1)计算 ρ . 采用激光闪射法测定样品的热扩散系数(α), 通过公式(2)计算样品的导热系数(λ). 样品为直径 25.4 mm、厚度 1 mm 的圆片, 测试温度为室温, 测试气氛为氮气.

$$\rho = m/V \quad (1)$$

$$\lambda = \alpha \times \rho \times C_p \quad (2)$$

式中, ρ 的单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, m 的单位为 g, V 的单

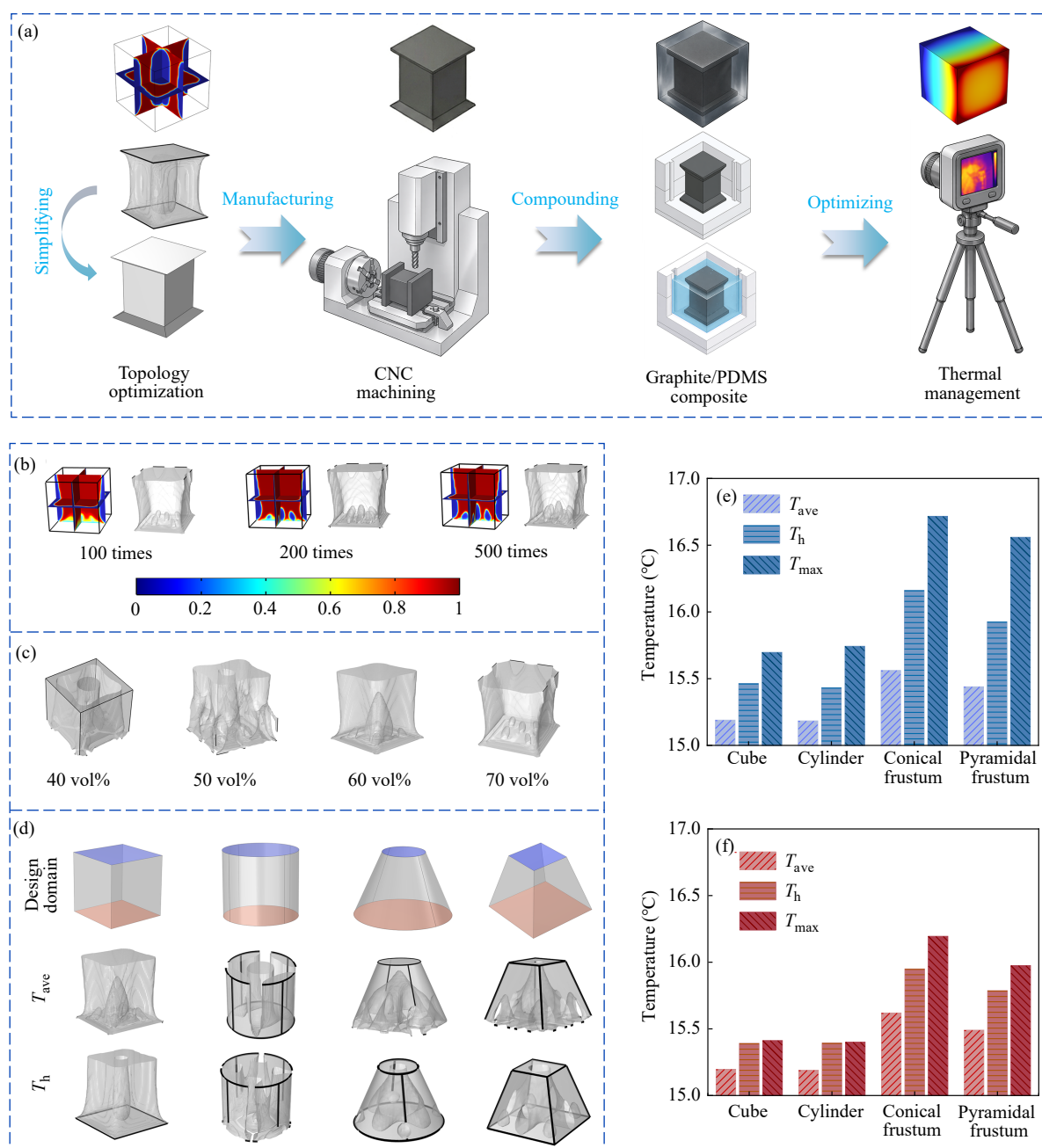


Fig.1 (a) Schematic illustration of the overall design and fabrication process; Topology optimization results with different (b) iteration numbers, (c) volume fractions, (d) design-domain geometries and objective functions; Thermal performance comparison using (e) domain-averaged temperature (T_{ave}) and (f) heating-side average temperature (T_h) as objective functions.

位为 cm^3 , λ 的单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, α 的单位为 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, C_p 的单位为 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

1.4.2 有限元模拟

采用 COMSOL Multiphysics 中的固体传热物理场进行稳态和瞬态有限元模拟, 具体模拟方法见电子支持信息 S3.

1.4.3 传热性能可视化表征

采用红外热像仪对 graphite/PDMS 复合材料

热稳态下的表面温度分布进行记录. 热源功率 1.25 W, 样品在空气中通过自然对流散热.

1.4.4 传热性能测试

采用热流法测试 graphite/PDMS 复合材料的传热性能, 样品尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 热端与功率为 1.25 W 的加热元件接触, 冷端通过铜散热器散热, 在真空和非真空条件下, 采用热电偶记录加热端与冷却端的温度.

2 结果与讨论

2.1 输入参数对拓扑优化构型的影响

首先考察迭代次数、体积分数约束、设计域几何形状及目标函数对拓扑优化构型及其热性能的影响. 结果表明, 上述参数共同调控高导热相在设计域内的空间分布, 进而影响主导导热通路及温度场分布.

不同迭代次数下的拓扑优化结果如图1(b)所示. 迭代100次时, 结构中仍存在较多中间密度区域, 相界面较模糊, 表明优化尚未充分收敛. 迭代200次后, 中间密度区域明显减少, 结构边界清晰, 主导导热通路基本稳定, 说明已获得较可靠的收敛结果. 继续增加至500次迭代时, 整体拓扑构型较200次迭代变化较小, 仅局部边界略有细化, 表明进一步迭代对拓扑演化贡献有限, 却会增加计算成本. 因此, 后续计算采用200次迭代. 体积分数约束对优化拓扑结构的影响如图1(c)所示. 随着高导热相体积分数由40%提高至70%, 结构连通性逐渐增强, 主导传热路径由分散孤立区域演化为连续集中的导热网络. 体积分数为40%时, 导热材料含量不足, 难以形成有效传热骨架. 提高至50%后, 材料分布有所改善, 但仍存在局部不连续. 体积分数达到60%时, 结构连续性和完整性显著提升, 形成清晰的主导导热通路, 可实现加热端与冷却端之间的有效热连接. 进一步增加至70%时, 局部出现明显材料堆积, 新增导热相难以继续有效提升传热性能. 综合热性能、结构清晰度和材料利用效率, 后续拓扑优化选取60%作为高导热相体积分数.

在确定迭代次数和体积分数后, 进一步考察加热域和设计域几何形状的影响. 加热面积相同时, 加热域形状变化对拓扑构型及热性能影响较小(电子支持信息图S2). 相比之下, 设计域几何形状对拓扑构型影响显著(图1(d)). 在相同体积分数约束下, 不同设计域均可形成连接加热端与冷却端的导热结构, 但其拓扑形态受几何边界明显限制. 当以区域平均温度(T_{ave})为目标函数时, 优化过程倾向于调控整个设计域的温度场, 所得结构兼具整体导热能力和几何适应性. 立方体和圆柱体设计域中结构较规则, 分别呈现竖直导热路径和轴向对称特征. 圆台和四棱台设计域因横截

面积沿高度方向减小, 导热材料由较宽底部向较窄顶部收缩, 形成汇聚型多分支导热通路. 当目标函数调整为加热端平均温度(T_{h})时, 导热相进一步向热源区域集中, 中心传热路径更加突出, 表明该目标函数更侧重于热源区域的快速热量导出和局部散热能力提升.

不同目标函数和设计域下拓扑结构的热性能如图1(e)和1(f)所示. 当以 T_{ave} 为目标函数时, 立方体设计域表现出最佳综合热性能, 其 T_{ave} 、 T_{h} 和最高温度(T_{max})分别为15.19、15.46和15.69 °C, 均低于其他3种设计域; 圆柱体设计域次之, 圆台和四棱台设计域的 T_{h} 和 T_{max} 相对较高. 这主要归因于上部区域几何收缩限制热量扩散空间, 易导致局部热量集中, 从而削弱整体散热能力. 当以 T_{h} 为目标函数时, 各设计域的加热端温度均进一步降低. 其中, 立方体设计域仍表现出最佳综合性能, 其拓扑结构的 T_{ave} 、 T_{h} 和 T_{max} 分别约为15.20、15.39和15.41 °C. 与以 T_{ave} 为目标函数的结果相比, T_{ave} 与 T_{max} 之间的差值整体减小; 在圆台和四棱台设计域中, 二者差值分别由约1.16和1.12 °C降至0.57和0.48 °C. 结果表明, 以 T_{h} 为目标函数不仅能更有效抑制热源温升, 还可降低局部热源区域与整体设计域之间的温差, 改善温度场均匀性. 结合图1(d)可知, 这主要源于导热相在加热端附近分布更充分, 导热通路更加集中, 有利于热量由加热端快速传递至冷却端, 并缓解局部过热. 此外, 局部圆形加热区域下的补充优化结果表明, 当加热面积和材料体积分数一致时, 不同设计域虽引起拓扑特征细微差异, 但热性能较为接近(电子支持信息图S3). 综合本文设定的边界条件、体积分数约束和设计域范围内的拓扑构型热性能, 确定以 T_{h} 为目标函数、立方体为设计域作为最优拓扑设计参数.

2.2 拓扑优化及其简化结构

基于最优立方体设计域(图2(a)), 在高导热相体积分数为60%、以加热端平均温度(T_{h})为目标函数的条件下, 设置2种边界条件, 考察冷却端边界对拓扑构型的影响. 边界条件A中, 底面设为恒定功率密度加热端, 顶面设为15 °C恒温冷却端, 其余边界设为绝热, 以模拟理想稳态冷却条件. 边界条件B中, 顶面设为强制对流散热边界, 其余边界保持不变, 以模拟更接近实际的

热交换过程. 2种边界条件下的拓扑优化结果如图2(b)所示. 优化结构均形成了由加热端贯通至冷却端的连续高导热网络. 边界条件A下, 顶面为恒温冷却端, 冷却能力较强且分布均匀, 优化结构倾向于形成集中、直接的纵向导热通路, 整体结构较为紧凑. 边界条件B下, 顶面为对流散热边界, 散热能力相对有限, 热量在接近冷却端时需沿横向扩展, 以增大有效散热面积, 因此高导热相呈现更明显的端部扩展特征. 拓扑优化结构通常具有较高几何复杂性, 难以直接制备和测试. 因此, 在保留主要导热通路的基础上, 对优化结构进行几何简化, 以便开展热性能验证. 针对边界条件A下获得的拓扑结构, 设计了圆台和四棱台2种简化结构; 针对边界条件B下获得的拓扑结构, 设计了具有中心贯通导热路径和端部扩展特征的一类哑铃简化结构. 同时, 选取圆柱体和立方体结构作为参比构型. 简化结构和对照结构按如图2(c)所示进行编号, 并在边界条件A和B下进行有限元热模拟. 为保证不同构型热响应性能比较的可靠性, 5种导热单元的石墨体积分数均控制为50%, 样品尺寸统一为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 以确保其与冷热源的接触面积一致.

5种结构在2种边界条件下的稳态温度场分布如图2(d)所示. 边界条件显著影响不同构型的温度水平和热点分布. 在边界条件A下, 顶面为恒温冷却端, 各结构整体温度较低, 说明恒温边界对温度场具有较强约束作用. 此时, 不同构型间的平均温差较小, 但加热端局部温度分布仍存在明显差异. 构型1、2和3的高温区域主要集中在加热端聚合物基体中, 且中心高导热区域温度明显低于周围基体相, 表明热量可通过中心高导热通道快速传递至冷却端, 从而降低局部温升. 相比之下, 构型4和5在加热端的温度分布更均匀, 主要归因于高导热材料在加热端附近分布更充分, 增大了初始导热截面积并增强了热扩散能力, 从而减少了聚合物基体中的局部热积累. 当边界条件切换为B时, 各构型整体温度均显著升高, 构型间差异也更加明显. 这表明在对流散热条件下, 冷却端换热能力有限, 热量更易积累, 几何构型对散热性能的影响更加突出. 加热端温度分布仍与边界条件A下的变化趋势相似, 但冷却端温度场呈现更明显的梯度特征, 说明对流冷却条件下高导热相与聚合物基体的换热响应差异进一步增大.

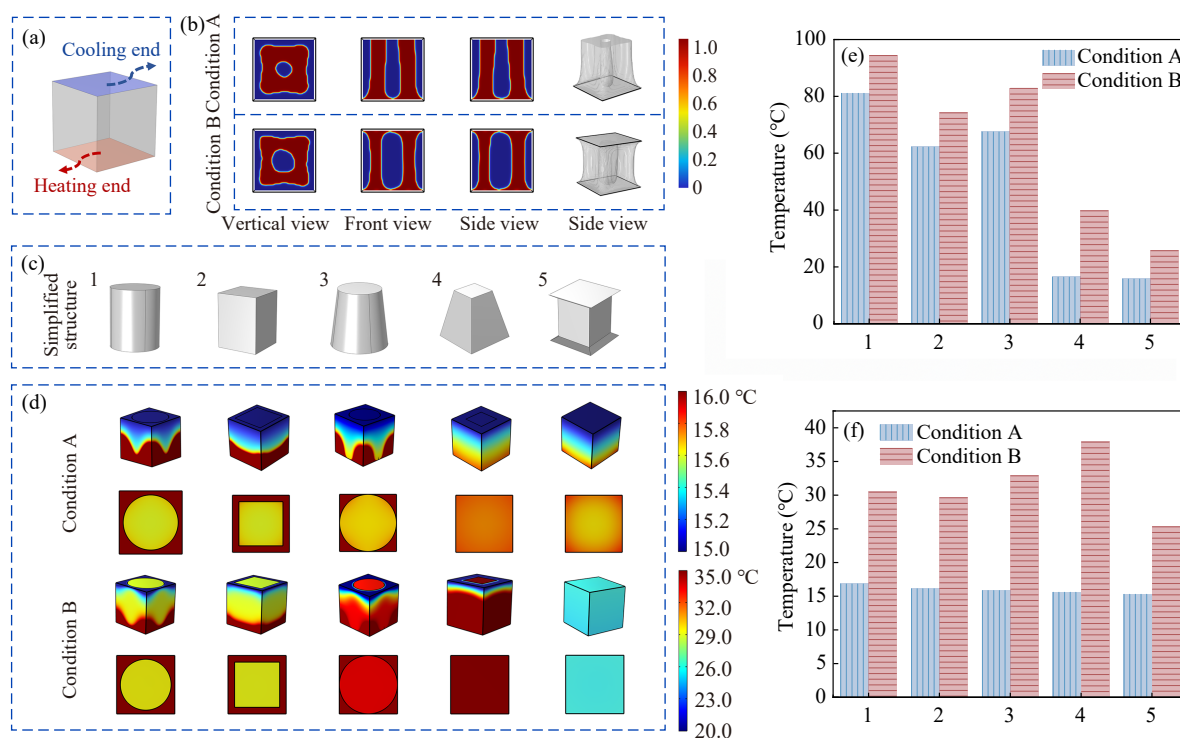


Fig. 2 (a) Optimal cubic design domain; (b) Topology optimization results under different boundary conditions; (c) Simplified structures and numbering; (d) Steady-state temperature fields and heating-side temperature distributions of different structures under boundary conditions A and B; Comparison of (e) T_{\max} and (f) T_{ave} under the two boundary conditions.

比较的5种构型及设定的边界条件下, 构型5在加热端和冷却端均表现出最均匀的温度分布, 且整体温度最低、热集中程度最小. 这主要归因于类哑铃结构的中心贯通导热通路和端部扩展特征, 可协同实现纵向快速传热和两端横向热扩散. 其中, 中心贯通导热通路降低了热源与冷却端之间的热阻, 端部扩展结构则增大了加热端导热截面积和冷却端有效散热面积, 从而同时提升局部热点抑制能力和整体温度均匀性.

图2(e)和2(f)进一步比较了5种结构在2种边界条件下的 T_{\max} 和 T_{ave} . 在边界条件B下, 由于强制对流条件下冷却端换热能力有限, 结构内部热量积累增加, 所有构型的温度指标均显著高于边界条件A下的结果. 2种边界条件下, 构型1~3的最高温度均明显较高, 而构型4和5表现出更优的热点抑制能力. 值得注意的是, 构型5表现出最佳的热点抑制性能, 其在边界条件A和B下的 T_{\max} 分别为15.8和25.88 $^{\circ}\text{C}$, 显著低于构型1的81.24和94.53 $^{\circ}\text{C}$, 也低于构型3的67.64和82.98 $^{\circ}\text{C}$. 相比之下, 构型4在边界条件A下的 T_{\max} 为16.53 $^{\circ}\text{C}$, 但在边界条件B下升高至39.89 $^{\circ}\text{C}$, 表明其对边界条件变化更为敏感.

对于 T_{ave} , 在边界条件A下, 不同构型之间

的差异相对较小, 但构型5仍表现出最低的整体温度, 其 T_{ave} 为15.36 $^{\circ}\text{C}$, 低于构型1的16.89 $^{\circ}\text{C}$. 当边界条件切换为B时, 不同构型之间的差异显著增大, 构型5的 T_{ave} 稳定在25.37 $^{\circ}\text{C}$, 明显低于构型3的32.95 $^{\circ}\text{C}$ 和构型4的37.95 $^{\circ}\text{C}$. 该结果进一步表明, 即使在换热受限条件下, 构型5仍能够维持较低的整体温度, 并表现出更优的散热能力.

为验证上述模拟结果, 进一步制备五种结构的graphite/PDMS复合材料并开展热成像和传热性能测试. 图3(a)为5种简化结构的实物照片及其加热过程中的红外热像图. 构型1~4中心区域均出现明显高温区, 其中构型1和构型3的热点更为集中, 表明结构内部存在显著局部热积累. 相比之下, 构型5表面温度分布更均匀, 高温区域扩散更充分, 未出现明显局部过热现象. 该结果与图2(d)中的数值模拟趋势一致, 说明构型5的中心贯通导热通路和端部扩展结构有利于热量快速传递, 并可改善表面温度均匀性, 体现出优异的整体导热性能.

为定量评价不同导热单元构型的实际传热性能, 采用图3(b)所示真空导热测试箱, 通过热流法测试graphite/PDMS复合材料的传热性能. 测

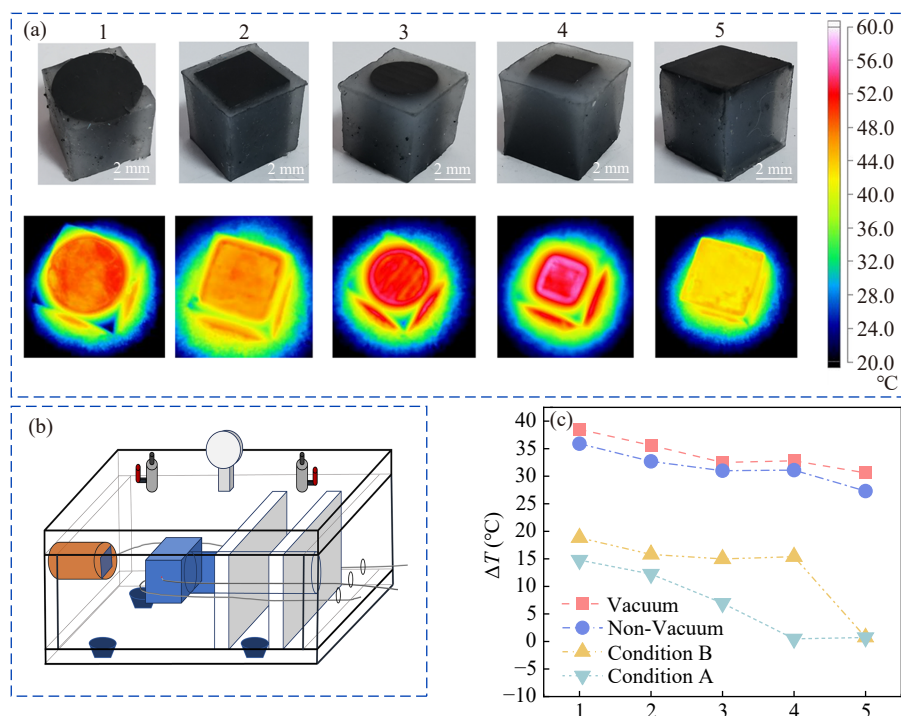


Fig. 3 (a) Photographs and infrared thermal images of the five simplified structures; (b) Schematic of the vacuum thermal conductivity testing chamber; (c) Experimental ΔT values under vacuum and non-vacuum conditions, compared with simulated results under conditions A and B.

试过程中，以功率为1.25 W的加热元件加热复合材料热端，冷端与铜柱接触散热，并利用热电偶连续监测热端和冷端温度.在输入热量和样品

图3(c)比较了5种导热单元构型在真空和非真空条件下的实验 ΔT 结果，以及条件A和条件B下的模拟结果.构型5始终表现出最小的 ΔT .真空条件下，与构型1和构型2相比，构型5的 ΔT 分别降低8.60和5.40 $^{\circ}\text{C}$ ；条件B下，其 ΔT 模拟值分别降低18.08和15.06 $^{\circ}\text{C}$.上述结果与前述温度场分布及温度指标分析一致.非真空条件下， ΔT 整体较大，表明环境对流参与散热过程，并影响样品冷热端温差响应.实验结果更接近条件B下的模拟曲线，说明条件B能更准确反映实际测试及服役过程中冷却端换热受限的散热特征.

2.3 简化构型的结构参数调控

前述结果表明，构型5具有最佳综合导热性

厚度恒定的条件下，以 ΔT 表征复合材料导热性能^[40]. ΔT 越小，说明热量越容易由热端传递至冷端，材料导热性能越好.

为进一步探究具有中心贯通导热通路和端部扩展特征类哑铃导热单元对复合材料传热性能的影响，对端部棱台厚度和中心连接段几何形状进行了调控.其中，中心连接段分别设计为立方体和圆柱体，端部棱台厚度设为0.2、0.5、1.0、2.0和3.0 mm，并在强制对流散热边界条件(条件B)下进行有限元热模拟.

图4(a)和4(b)分别给出了立方体连接组和圆柱体连接组的导热单元结构，以及相应 graphite/PDMS 复合材料的表面温度分布和温度等值面图.总体来看，随着端部棱台厚度增加，两组结构的温度场均呈现先改善后减弱的变化趋势.对于立方体连接组，当端部棱台厚度较小，即0.2

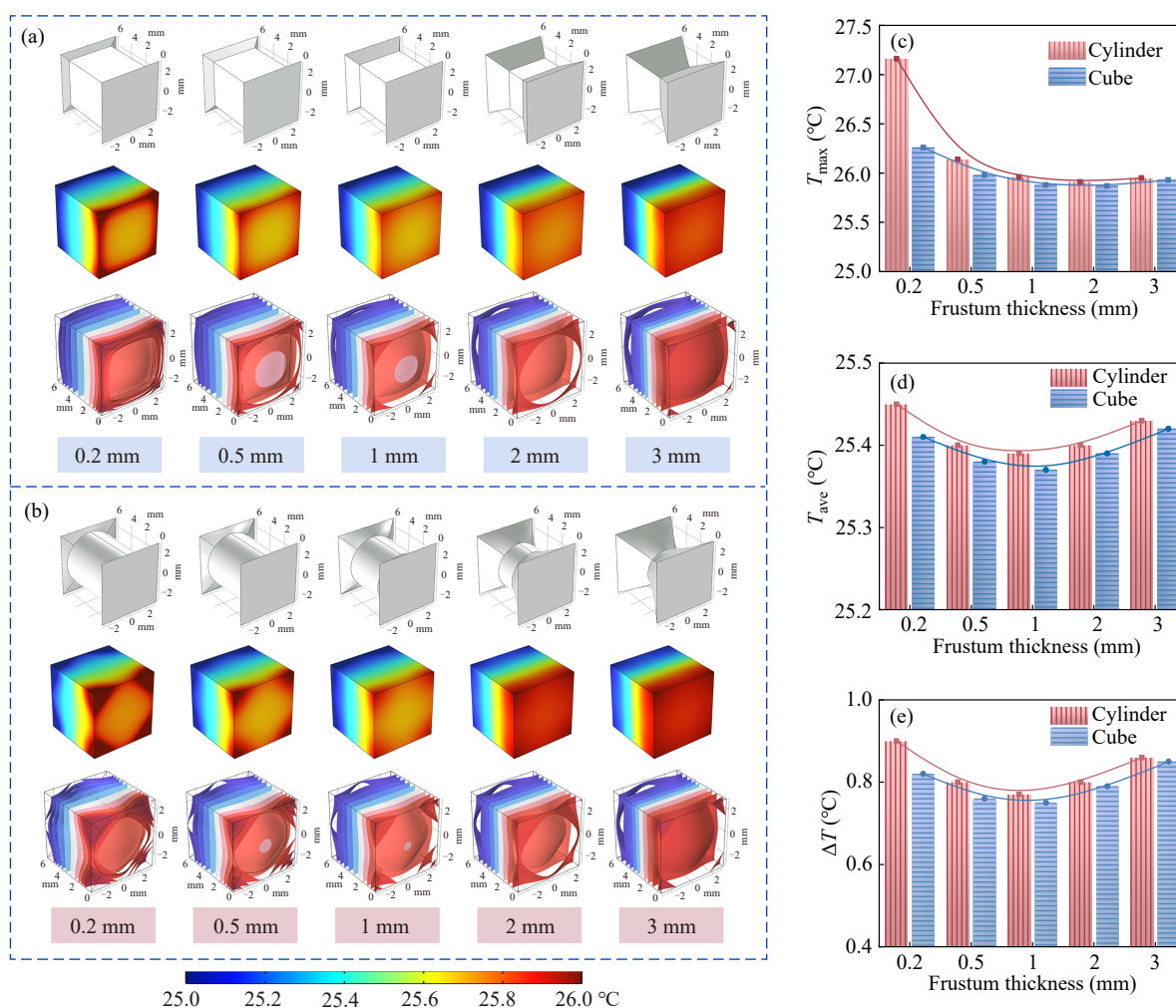


Fig. 4 Thermal unit structures and temperature distributions of the (a) cube-connected and (b) cylinder-connected groups with different frustum thicknesses; variations of (c) T_{\max} , (d) T_{ave} , and (e) ΔT with frustum thickness.

和 0.5 mm 时, 端部扩展区域有限, 加热端和冷却端的横向导热能力不足, 结构中仍存在局部高温区和明显温度梯度, 尤其在加热端四角处出现较明显的热集中. 当端部棱台厚度增加至 1~2 mm 时, 端部扩展作用显著增强, 表面温度分布和温度等值面更加均匀、连续. 然而, 当端部棱台厚度进一步增加至 3 mm 时, 尽管加热端温度分布更加均匀, 但整体温度略有升高. 圆柱体连接组表现出相似的变化趋势, 但其温度场对端部棱台厚度变化的响应更加明显. 图 4(c) 显示, 随着端部棱台厚度增加, 2 组结构的 T_{\max} 均先降低后略有升高, 并在约 2 mm 时达到最低值. 对于圆柱体连接组, T_{\max} 由 0.2 mm 时的 27.16 °C 降低至 2 mm 时的 25.91 °C; 对于立方体连接组, T_{\max} 由 26.26 °C 降低至 25.87 °C. 该结果表明, 适当增加端部棱台厚度可有效增大加热端传热截面积, 并提高冷却端散热能力, 从而分散局部热流并抑制热点形成. 图 4(d) 和 4(e) 进一步给出了 T_{ave} 和 ΔT 的变化. 与 T_{\max} 类似, T_{ave} 和 ΔT 均随端部棱台厚度增加呈现先降低后升高的趋势, 并在约 1 mm 时达到较优值. 对于立方体连接组, 当端部棱台厚度为 1 mm 时, T_{ave} 和 ΔT 分别为 25.37 和 0.75 °C, 低于 0.2 mm 时的 25.41 和 0.82 °C, 说明该厚度下整体温度控制和端到端传热效率进一步改善. 圆柱体连接组也表现出类似的响应规律. 综上, 端部棱台厚度对哑铃状导热单元的热响应具有显著影响. 其中, 2 mm 厚度更有利于降低 T_{\max} 并抑制局部热点, 而 1 mm 厚度在降低 T_{ave} 和 ΔT 方面表现更优, 更有利于提升整体传热性能.

不同温度指标对应的最优几何参数存在差异, 反映了热点抑制与整体传热效率之间的不同优化侧重. 较大的端部棱台厚度有助于降低局部热流集中, 因此更有利于降低 T_{\max} . 然而, 当端部棱台厚度过大时, 端部扩展区域占比增加, 会削弱中心贯通结构的高效传热作用, 不利于进一步降低 T_{ave} 和 ΔT . 相比之下, 当端部棱台厚度为 1 mm 时, 端部扩展导热能力与中心贯通传热能力之间达到较优平衡, 因此在整体传热效率和温度均匀性方面表现较优. 进一步比较发现, 在相同端部棱台厚度下, 立方体连接组的 T_{\max} 、 T_{ave} 和 ΔT 均略低于圆柱体连接组. 这主要是因为立方体连接段能够提供更大的有效传热截面积, 并与端部棱台形成更充分的接触, 从而提高热流传递

效率. 因此, 从整体温度控制和端到端传热效率角度看, 立方体连接结构表现出更优的综合导热性能.

2.4 热管理性能

为评价类哑铃石墨填料和圆柱状石墨填料在聚合物基复合材料中的热管理性能, 设计了 2 种三维阵列结构, 其尺寸参数统一为 18 mm × 18 mm × 6 mm, 以保证可比性. 图 5(a) 给出了类哑铃阵列和圆柱阵列复合材料的结构模型, 以及条件 B 下的瞬态有限元模拟结果. 随着加热时间由 5 s 延长至 50 s, 2 种复合材料的表面温度均逐渐升高, 但温度场分布呈现明显差异. 类哑铃阵列复合材料表面温度分布更加均匀, 局部高温区域扩展更平缓, 表明类哑铃石墨单元能够有效构筑连续的纵向导热通路. 同时, 其端部扩展结构增强了相邻单元之间的横向热扩散能力, 从而提升阵列整体热量分布能力. 相比之下, 圆柱阵列复合材料在加热端聚合物基体中出现更明显的热集中和局部热点, 说明其横向热扩散能力相对较弱.

图 5(b) 给出了相应的定量分析结果. 随着加热时间延长, 2 种复合材料的 T_{ave} 均快速升高后逐渐趋于稳定, 但圆柱阵列复合材料的 T_{ave} 始终高于哑铃阵列复合材料. 约 100 s 后, 圆柱阵列复合材料的 T_{ave} 达到 30.42 °C, 而类哑铃阵列复合材料稳定在 25.38 °C, 二者相差 5.04 °C. 此外, ΔT 随时间增加后逐渐稳定, 圆柱阵列复合材料的 ΔT 最终稳定在 18.68 °C, 而类哑铃阵列复合材料仅为 0.75 °C. 上述结果表明, 类哑铃阵列结构能够更有效降低整体温度水平, 并显著减小冷端温差, 从而提升端到端传热效率和温度均匀性.

基于有限元模拟结果, 进一步制备了 2 种三维阵列 graphite/PDMS 复合材料, 并采用自制热管理测试平台评价其热响应性能. 测试装置及类哑铃阵列、圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料实物图像如电子支持信息图 S4 所示, 复合材料的关键尺寸信息见电子支持信息表 S2. 随后, 对复合材料进行了 100 次加热—冷却循环热响应测试, 结果如图 5(c) 所示. 长期循环曲线显示, 在 0~6000 s 范围内, 热源温度呈周期性波动, 且温度波动幅度稳定在 2.8~3.4 °C 之间. 该结果表明, 复合材料在长时间热冲击条件下具有良好的热响

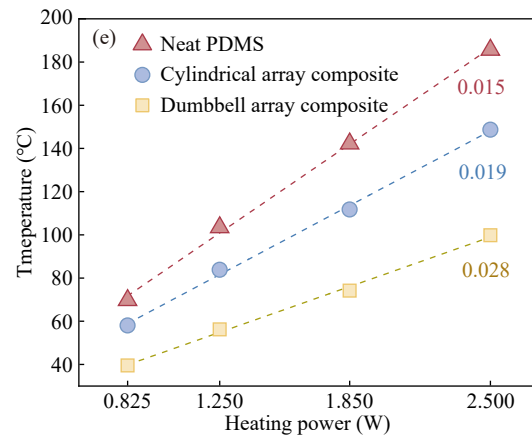
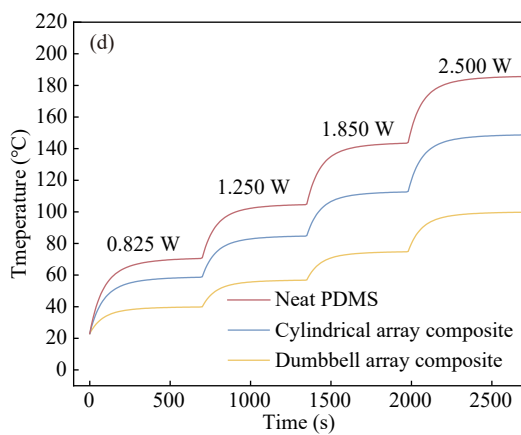
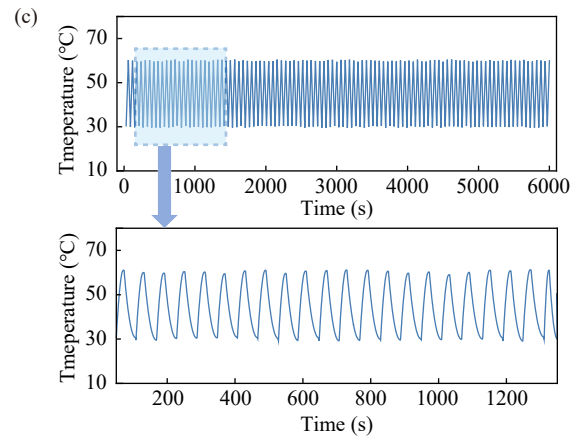
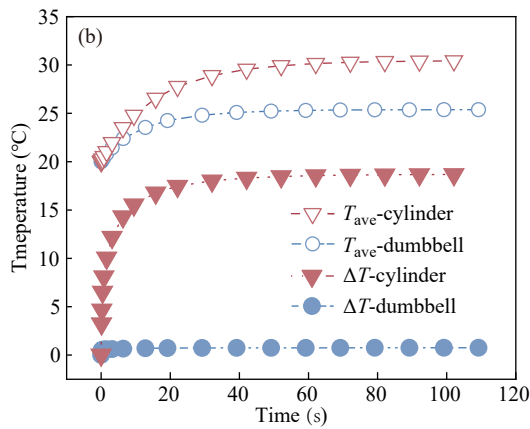
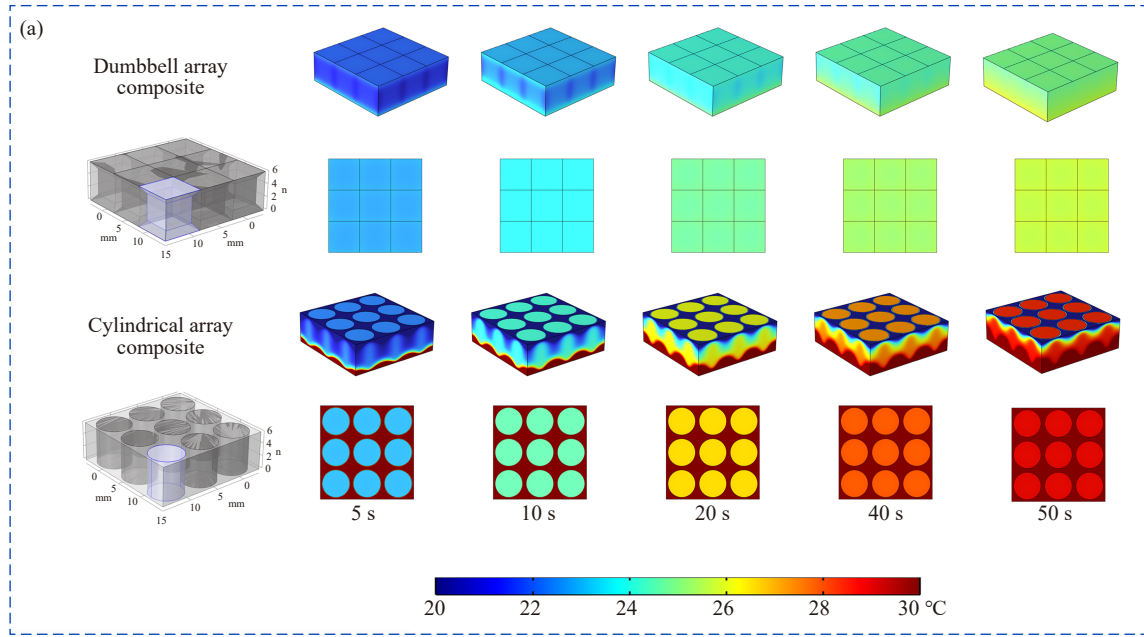


Fig. 5 (a) Transient temperature fields of dumbbell- and cylindrical-array Graphite/PDMS composites; (b) Time-dependent T_{ave} and ΔT ; (c) Cyclic heating-cooling response of the dumbbell-array composite; (d) Thermal source temperature under different heating powers; (e) Linear fitting of steady-state thermal source temperature versus heating power.

应稳定性和结构可靠性，其内部导热网络能够保持连续、可重复的传热行为。

图5(d)比较了不同加热功率下3种材料体系

的热源温度随时间变化情况。随着加热功率由0.825 W提高至2.500 W，纯PDMS、圆柱阵列和类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料的热源温度

均逐渐升高,并在各功率下达到新的稳态.然而,在相同功率条件下,类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料的稳态热源温度始终最低,圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料次之,纯 PDMS 最高.当加热功率为 2.500 W 时,纯 PDMS 的热源温度约为 186 °C,圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料为 149 °C,而类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料仅为 100 °C.该结果说明,引入三维石墨导热单元阵列可显著提高热源向外部环境的传热效率,其中类哑铃阵列结构表现出较突出的散热性能.为定量评价不同材料体系的散热能力,对图 5(d)中的稳态热源温度与加热功率进行线性拟合,结果如图 5(e)所示.拟合直线斜率的倒数用于表征散热效率;斜率越小,散热效率越高^[41].计算结果表明,类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料、圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料和纯 PDMS 的散热效率分别为 0.028、0.019 和 0.015 W·°C⁻¹.由此可见,圆柱阵列石墨填料可在一定程度上提高复合材料的散热能力,而类哑铃阵列结构能够实现更高效的热管理,其散热效率为圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料的 1.47 倍.类哑铃石墨导热单元构筑的三维阵列不仅增强了热源

与冷却端之间的纵向热传导,还通过端部扩展结构改善了阵列两端的横向热扩散能力.与圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料相比,类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料在整体温度控制、温度均匀性和散热效率方面均表现出更优性能.

3 结论

通过拓扑优化设计与结构简化,获得了具有中心贯通和端部扩展特征类哑铃填料结构,该结构在促进热量传递和降低局部热积累方面表现出较好的应用潜力.与纯 PDMS 及圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料相比,类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料不仅具有更均匀的温度分布,并在一定程度上降低了热点区域温度.在真空条件下,与简单圆柱体和立方体结构相比,类哑铃结构的 ΔT 分别降低 8.6 和 5.4 °C.在实际热管理测试中,类哑铃阵列 graphite/PDMS 复合材料表现出更高的散热效率,达到 0.028 W·°C⁻¹,为圆柱阵列 graphite/PDMS 复合材料的 1.47 倍.上述结果表明,优化填料几何结构可在一定程度上提升复合材料的综合传热性能,为高效热管理材料的设计与制备提供了有益思路.

REFERENCES

- 1 Sun, Y.; Su, Y. T.; Chai, Z. Y.; Jiang, L.; Heng, L. P. Flexible solid-liquid bi-continuous electrically and thermally conductive nanocomposite for electromagnetic interference shielding and heat dissipation. *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 7290.
- 2 Wang, Z. F.; Wu, Z. J.; Weng, L.; Ge, S. B.; Jiang, D. W.; Huang, M. N.; Mulvihill, D. M.; Chen, Q. G.; Guo, Z. H.; Jazzar, A.; He, X. M.; Zhang, X. H.; Xu, B. B. A roadmap review of thermally conductive polymer composites: critical factors, progress, and prospects. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(36), 2301549.
- 3 Cheng, R.; Wang, Q. X.; Wang, Z. X.; Jing, L.; Garcia-Caraveo, A. V.; Li, Z.; Zhong, Y. B.; Liu, X.; Luo, X.; Huang, T. Y.; Yun, H. S.; Salihoglu, H.; Russell, L.; Kazem, N.; Chen, T. Y.; Shen, S. Liquid-infused nanostructured composite as a high-performance thermal interface material for effective cooling. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 794.
- 4 Liu, X. R.; Wen, J. W.; Xu, R.; Huang, M. Z.; Huang, J. J.; Lin, W. B.; Luo, M.; Bohm, S.; Snyder, G. J.; Lin, Y. Flexible rubber with metal-like thermal conductivity achieved via hydrogen bonding engineering. *Nat. Commun.*, **2026**, 17(1), 4480.
- 5 Han, G. J.; Cheng, H. L.; Feng, Y. Z.; Zhang, S. L.; Dong, J. W.; Zhou, B.; Liu, X. H.; Liu, C. T.; Tao, G. M.; Shen, C. Y. Efficient thermal management of electronic devices by constructing interlayer phonon bridges. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 10533.
- 6 Gao, S. Y.; Guo, H.; Guo, Y. Q.; Qiu, H.; Gong, W.; Gu, J. W. Superior through-plane thermal conductivity in carbon fibers/spherical graphene/epoxy laminated composites for low-altitude aircrafts. *InfoMat*, **2026**, 8(6), e70139.
- 7 Yang, X. T.; Zhong, X.; Zhang, J. L.; Gu, J. W. Intrinsic high thermal conductive liquid crystal epoxy film simultaneously combining with excellent intrinsic self-healing performance. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2021**, 68, 209–215.
- 8 Luo, B. Y.; Liang, X. L.; Ruan, H.; Li, Y. Q.; Wen, Z. Bioinspired asymmetric porous natural rubber films: wearables for electromagnetic shielding, fetal monitoring, and personal thermal management. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(22), e21742.

- 9 Wang, H.; Xing, W.; Chen, S.; Song, C.; Dickey, M. D.; Deng, T. Liquid metal composites with enhanced thermal conductivity and stability using molecular thermal linker. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(43), 2103104.
- 10 Cheng, B.; Ruan, K. P.; Li, M. K.; Gong, W.; Guo, Y. Q.; Loh, X. J.; Gu, J. W. Improved intrinsic thermal conductivity of highly crystalline polyimide films by regulating aggregation structures. *Macromolecules*, **2026**, 59(4), 2601–2612.
- 11 Pang, K.; Xia, Y. X.; Liu, X. T.; Tong, W. H.; Li, X. T.; Li, C. Y.; Zhao, W. B.; Chen, Y.; Qin, H. S.; Fang, W. Z.; Peng, L.; Liu, Y. L.; Gao, W. W.; Xu, Z.; Liu, Y. J.; Gao, C. Dome-celled aerogels with ultrahigh-temperature superelasticity over 2273 K. *Science*, **2025**, 389(6757), 290–294.
- 12 Zhang, L. Y.; Wang, M. H.; Jeon, D.; Meng, Y. Q.; Lee, S. H.; Choe, M.; Li, Y. Q.; Wang, M. R.; Lu, S. J.; Lee, Z.; Seong, W. K.; Ruoff, R. S. Synthesis and properties of mirror-like large-grain graphite films. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 7180.
- 13 He, M. K.; Zhong, X.; Lu, X. H.; Hu, J. W.; Ruan, K. P.; Guo, H.; Zhang, Y. L.; Guo, Y. Q.; Gu, J. W. Excellent low-frequency microwave absorption and high thermal conductivity in polydimethylsiloxane composites endowed by hydrangea-like CoNi@BN heterostructure fillers. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(48), 2410186.
- 14 Shi, X. T.; Zhang, R. H.; Ruan, K. P.; Ma, T. B.; Guo, Y. Q.; Gu, J. W. Improvement of thermal conductivities and simulation model for glass fabrics reinforced epoxy laminated composites *via* introducing hetero-structured BNN-30@BNNS fillers. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2021**, 82, 239–249.
- 15 Wu, W. J.; Fan, J. F.; Zeng, C.; Cheng, X. X.; Liu, X. W.; Guo, S. F.; Sun, R.; Ren, L. L.; Hao, Z. F.; Zeng, X. L. Soft, tough, antifatigue fracture elastomer composites with low thermal resistance through synergistic crack pinning and interfacial slippage. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(40), 2403661.
- 16 Liu, Y.; Zou, W. Z.; Zhao, N.; Xu, J. Electrically insulating PBO/MXene film with superior thermal conductivity, mechanical properties, thermal stability, and flame retardancy. *Nat. Commun.*, **2023**, 14(1), 5342.
- 17 He, Q. X.; Qin, M. M.; Zhang, H.; Yue, J. W.; Peng, L. Q.; Liu, G. J.; Feng, Y. Y.; Feng, W. Patterned liquid metal embedded in brush-shaped polymers for dynamic thermal management. *Mater. Horiz.*, **2024**, 11(2), 531–544.
- 18 Guo, Y. Q.; Ruan, K. P.; Wang, G. S.; Gu, J. W. Advances and mechanisms in polymer composites toward thermal conduction and electromagnetic wave absorption. *Sci. Bull.*, **2023**, 68(11), 1195–1212.
- 19 Yu, H. T.; Guo, P. L.; Qin, M. M.; Han, G. Y.; Chen, L.; Feng, Y. Y.; Feng, W. Highly thermally conductive polymer composite enhanced by two-level adjustable boron nitride network with leaf venation structure. *Compos. Sci. Technol.*, **2022**, 222, 109406.
- 20 Qin, M. M.; Xu, Y. X.; Cao, R.; Feng, W.; Chen, L. Efficiently controlling the 3D thermal conductivity of a polymer nanocomposite *via* a hyperelastic double-continuous network of graphene and sponge. *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, 28(45), 1805053.
- 21 Ma, T. B.; Ruan, K. P.; Guo, Y. Q.; Shi, X. T.; Xu, B. B.; Gu, J. W. Thermal conduction pathways with specific angles and distributions to improve the thermal conductivity of copper wire/poly(lactic acid) composites. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2026**, 262, 261–269.
- 22 Jiang, H.; Xie, Y. H.; He, M. K.; Li, J. D.; Wu, F.; Guo, H.; Guo, Y. Q.; Xie, D. L.; Mei, Y.; Gu, J. W. Highly thermally conductive and flame-retardant waterborne polyurethane composites with 3D BNNS bridging structures *via* magnetic field assistance. *Nano Micro Lett.*, **2025**, 17(1), 138.
- 23 Ruan, K. P.; Shi, X. T.; Zhang, Y. L.; Guo, Y. Q.; Zhong, X.; Gu, J. W. Electric-field-induced alignment of functionalized carbon nanotubes inside thermally conductive liquid crystalline polyimide composite films. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(38), e202309010.
- 24 Zhang, H.; He, Q. X.; Yu, H. T.; Qin, M. M.; Feng, Y. Y.; Feng, W. A bioinspired polymer-based composite displaying both strong adhesion and anisotropic thermal conductivity. *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(18), 2211985.
- 25 Xu, K.; Wang, Y. D.; Zhang, Z. B.; Li, M. H.; Yang, R. J.; Guo, Y. Y.; Zhang, J. X.; Zhu, B. D.; Zhou, Y. W.; Wang, X. Y.; Qin, Y.; Li, L. H.; Cai, T.; Dai, W.; Lin, C. T.; Nishimura, K.; Wu, X. F.; Jiang, N.; Yu, J. H. Magnetic field-oriented one-step fabrication of metal-grade thermally conductive carbon fiber flexible thermal pad. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(43), 2505225.
- 26 Alexis, L.; Lee, J.; Alvarez, G. A.; Awale, S.; Jesus, D. S.; Lizcano, M.; Tian, Z. T. Significantly enhanced thermal conductivity of hBN/PTFE composites: a comprehensive study of filler size and dispersion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(22), 29042–29048.
- 27 Qi, W.; Liu, M.; Wu, J. L.; Xie, Q.; Chen, L.; Yang, X.; Shen, B. Y.; Bian, X. M.; Song, W. L. Promoting the thermal transport *via* understanding the intrinsic relation between thermal conductivity and interfacial contact probability in the polymeric composites with hybrid fillers. *Compos. Part B Eng.*, **2022**, 232, 109613.

- 28 Ma, X.; Zhang, H. T.; Guo, Y. Q.; He, M. K.; Guo, H.; Liu, Z. Y.; Jing, X. R.; Zheng, X. X.; Liu, Y. J.; Bai, S. L.; Shi, X. T.; Wang, J. T.; Gu, J. W. Enhancing thermal conductivity in polysiloxane composites through synergistic design of liquid crystals and boron nitride nanosheets. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2025**, 231, 54–61.
- 29 Yan, Q. W.; Dai, W.; Gao, J. Y.; Tan, X.; Lv, L.; Ying, J. F.; Lu, X. X.; Lu, J. B.; Yao, Y. G.; Wei, Q. P.; Sun, R.; Yu, J. H.; Jiang, N.; Chen, D.; Wong, C. P.; Xiang, R.; Maruyama, S.; Lin, C. T. Ultrahigh-aspect-ratio boron nitride nanosheets leading to superhigh in-plane thermal conductivity of foldable heat spreader. *ACS Nano*, **2021**, 15(4), 6489–6498.
- 30 Luo, M. N.; Yang, T.; Wang, T.; Yan, Z.; Zhang, J. The effect of filler size on the properties of TPU/BN flexible thermal conductive composites prepared by Fused Filament Fabrication. *Polymer*, **2024**, 296, 126810.
- 31 Jin, Y. C.; Ye, L. J.; Chai, Y. C.; Hong, J. H.; Li, Y. J. Tailoring asymmetric filler arrangement by hollow glass microspheres towards polymer composites with improved through-plane thermal conductivity. *Compos. Sci. Technol.*, **2023**, 233, 109904.
- 32 Song, M. X.; Chen, K.; Zhang, X. Optimization of the volume-to-point heat conduction problem with automatic differentiation based approach. *Int. J. Heat Mass Transf.*, **2021**, 177, 121552.
- 33 Sha, W.; Xiao, M.; Huang, M. Z.; Gao, L. Topology-optimized freeform thermal metamaterials for omnidirectionally cloaking sensors. *Mater. Today Phys.*, **2022**, 28, 100880.
- 34 Chen, J. Y.; Su, R. Y.; Zhang, X. Q.; Li, Y.; He, R. J. 3D printed leaf-vein-like Al₂O₃/EP biohybrid structures with enhanced thermal conductivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(41), 56191–56198.
- 35 Xiao, M.; Sha, W.; Zhang, Y.; Liu, X. L.; Li, P. G.; Gao, L. CMTO: Configurable-design-element multiscale topology optimization. *Addit. Manuf.*, **2023**, 69, 103545.
- 36 Sun, S. C.; Rankouhi, B.; Thoma, D. J.; Cheadle, M. J.; Maples, G. D.; Anderson, M. H.; Nellis, G.; Qian, X. P. Topology optimization, additive manufacturing and thermohydraulic testing of heat sinks. *Int. J. Heat Mass Transf.*, **2024**, 224, 125281.
- 37 Sha, W.; Hu, R.; Xiao, M.; Chu, S.; Zhu, Z.; Qiu, C. W.; Gao, L. Topology-optimized thermal metamaterials traversing full-parameter anisotropic space. *npj Comput. Mater.*, **2022**, 8, 179.
- 38 Zhu, J. H.; Zhou, H.; Wang, C.; Zhou, L.; Yuan, S. Q.; Zhang, W. H. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chin. J. Aeronaut.*, **2021**, 34(1), 91–110.
- 39 Liu, S. T.; Li, Q. H.; Hu, J. Y.; Chen, W. J.; Zhang, Y. C.; Luo, Y. F.; Wang, Q. A survey of topology optimization methods considering manufacturable structural feature constraints for additive manufacturing structures. *Addit. Manuf. Front.*, **2024**, 3(2), 200143.
- 40 Zhao, D. L.; Qian, X.; Gu, X. K.; Jajja, S. A.; Yang, R. G. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *J. Electron. Packag.*, **2016**, 138(4), 040802.
- 41 Xiao, P.; El Sachat, A.; Angel, E. C.; Ng, R. C.; Nikoulis, G.; Kioseoglou, J.; Termentzidis, K.; Sotomayor Torres, C. M.; Sledzinska, M. MoS₂ phononic crystals for advanced thermal management. *Sci. Adv.*, **2024**, 10(13), eadm8825.

Research Article

Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Composites Based on Dumbbell-like Filler Structures

Xiao-meng Zhou¹, Xue-ying Zhou¹, Zhi-xing Zhang¹, Meng-meng Qin^{1*}, Wei Feng^{1,2*}

⁽¹⁾School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

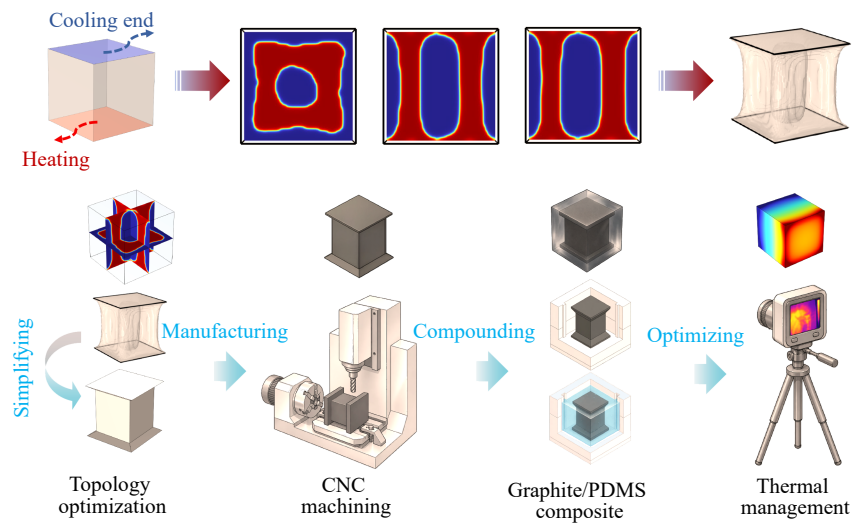
⁽²⁾State Key Laboratory of Precious Metal Functional Materials, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract With the increasing power density of electronic devices, efficient thermal management is essential for improving device reliability. Polymer-based composites are promising thermal management materials because of their low density, good processability, and structural flexibility. However, the low intrinsic thermal conductivity

*Corresponding authors: Meng-meng Qin, E-mail: qmm@tju.edu.cn

Wei Feng, E-mail: weifeng@tju.edu.cn

of polymer matrices limits their heat dissipation capability. Increasing filler loading can improve heat conduction, but excessive filler content often deteriorates mechanical, electrical insulating, and processing properties. Therefore, improving filler utilization efficiency at a moderate filler fraction is important. In this work, topology optimization was used to guide the design of graphite filler structures in polydimethylsiloxane (PDMS) composites. Based on finite element simulations, a simple dumbbell-shaped graphite filler was proposed. This structure contained a continuous central heat-conduction path and expanded end regions, which could reduce through-plane thermal resistance and promote lateral heat spreading. Graphite/PDMS composites with cubic, cylindrical, frustum-like, and dumbbell-shaped fillers were fabricated by computer numerical control machining, followed by PDMS encapsulation and curing. Infrared thermal imaging and heat-flow-based tests were used to evaluate their thermal responses. Compared with conventional cylindrical and cubic fillers, the dumbbell-shaped filler produced a more uniform temperature distribution and stronger hotspot suppression. Under vacuum conditions, the hot-cold side temperature difference was reduced by 8.6 and 5.4 °C, respectively. The dumbbell-array composite showed a heat dissipation efficiency of $0.028 \text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$, 1.47 times that of the cylindrical-array composite. This work provides an effective strategy for designing conductive filler architectures in polymer-based thermal management composites.



Keywords Polymer composites; Topology optimization; Thermally conductive fillers; Thermal management