

引用格式: 石尔, 王友兰, 叶双瑞, 等. 高效热管理用多层级孔金属材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(11): 984-995.
SHI E, WANG Y L, YE S R, *et al.* Research Progress on Hierarchical Porous Metal Materials for Efficient Thermal Management[J]. Materials China, 2025, 44(11): 984-995.

高效热管理用多层级孔金属材料研究进展

石尔, 王友兰, 叶双瑞, 汪琼, 赵斌, 彭启

(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 高效热管理是保障高热流密度和大功率新兴电子设备与机械器件运行安全性和稳定性的关键技术, 多孔金属作为兼具结构和功能的一体化材料, 凭借其高孔隙度、高比表面积、高连通孔隙度以及材料本身优良的导热性, 在高效热管理领域展现出巨大的潜力。随着应用环境的变化, 人们对多孔金属的综合性能提出了越来越高的要求, 与传统的单层孔结构金属材料相比, 多层级孔结构金属由于具有两级甚至多级孔结构特征, 表现出更加优异的综合性能, 因此成为研究和关注的热点。综述了高效热管理用多层级孔金属的制备方法, 主要包括烧结、电化学沉积以及选区激光熔合法等, 并总结了对应方法在制备多层级孔材料方面的最新研究进展; 分析和讨论了部分制备技术的优缺点以及层级多孔结构热性能的关键参数及其热管理性能评价; 介绍了多层级孔金属材料在航空航天、电力电子、新能源汽车等领域基于相变传热的热管理研究现状, 最后展望了用于高效热管理的多层级孔金属材料的发展方向。

关键词: 多层级孔表面; 金属; 制备工艺; 热管理; 沸腾传热

中图分类号: TK124; TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)11-0984-12

Research Progress on Hierarchical Porous Metal Materials for Efficient Thermal Management

SHI Er, WANG Youlan, YE Shuangrui, WANG Qiong, ZHAO Bin, PENG Qi

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Improving thermal management is crucial for addressing the safety and stability associated with high heat flux density and high power in emerging electronic devices and mechanical components. Porous metals, which possess advantageous structural and functional properties, offer high porosity, specific surface area, pore connectivity and thermal conductivity, making them an attractive material choice for efficient thermal management. As the service environment evolves, there is a growing need for enhanced performance of porous metals. In contrast to traditional single-layer porous metals, hierarchical porous metals have gained attention for their superior comprehensive performance, which is attributed to their multi-level pore structure features. This study provided a comprehensive review of the preparation methods for hierarchical porous metals used in efficient thermal management, such as sintering, electrochemical deposition and selective laser melting. It also summarized the latest research progress in applying these methods to prepare hierarchical porous materials, analyzing and discussing the advantages and disadvantages of various preparation techniques, as well as the key parameters of hierarchical porous structures and the evaluation of thermal management performance. This paper summarized recent advances in thermal management based on phase-change heat transfer within hierarchical porous metal materials, covering their applications in aerospace, power electronics and new energy vehicles. It also prospected the future development directions of these materials for efficient thermal management.

Key words: hierarchical porous surface; metal; preparation method; thermal management; boiling heat transfer

收稿日期: 2024-01-30 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52576056); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30603); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CXCLY2022095)

第一作者: 石尔, 女, 1979年生, 副教授, 硕士生导师,
Email: shier@csust.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202401030

1 前言

随着科技的发展, 航空航天机载电子舱、高性能计算机、微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)以及动力电池正朝着更高的功率密度、更小的尺寸和更高的集成度迈进。这种趋势导致了热载荷和热流

密度的持续攀升,若缺乏高效的散热措施,如此高的热通量将使芯片及半导体组件温度快速升高,严重威胁其可靠性及寿命^[1]。传统的空气或液体单相冷却技术无法满足高/超高热流密度设备的散热需求,而气/液两相沸腾传热技术充分利用冷却液所蕴含的巨大潜热,在短时间内带走更多的热量^[2],成为满足高效热管理迭代升级需求的新兴解决方案。

多孔金属材料因其优异的导热性能、高比表面积、汽化核心数量多、毛细芯吸能力强和在恶劣环境中可靠性高等独特优势,成为强化相变传热表面研究的重要方向^[3-5]。例如,泡沫金属作为一种轻质多孔材料,其高孔隙率和低密度特性显著降低了相变过程中气泡流动的阻力^[6];其强大的耐形变和导热能力使其适用于高温烧结工艺,高达 $8000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的比表面积有利于增加固-液接触面积,提高传热效率^[7]。丝网多孔表面由金属丝编织而成,具有高导热系数和良好的柔性,其高比表面积和低流阻特性使其成为一种良好的沸腾传热基材^[8]。

研究者们通过多种方法构建多孔金属表面,研究其传热性能,结构从宏观到微观、从单层到层级、从均匀到梯度、从单一尺度到多尺度不断演变^[9]。与单级孔结构的金属相比,具有两级甚至多级孔结构的金属表现出更为卓越的综合性能。例如,高孔隙率区域为气泡及时脱离提供了足够的空间,而低孔隙率区域则保证了液体补充所需的毛细作用。通过不同的制备方法和工艺优化,

可以实现多层级孔金属表面和内部结构的精确调控,以满足不同传热阶段和尺度的需求。本文综述了多层级孔金属材料在高效热管理技术中的研究进展,特别是对多层级孔金属表面的制备工艺、结构特征以及工程应用进行了系统阐述,并对未来多层级孔金属材料在高效热管理领域的发展方向提出了展望。

2 多层级孔金属表面制备工艺

随着表面制备工艺的不断发展和完善,表面加工不仅可以实现尺度由微米向纳米的转变,而且可以实现多层级多孔表面的构筑。光滑、均匀或耐磨涂层技术不能增加成核位点密度,而采用现有的烧结、电化学沉积、选区激光熔化(selective laser melting, SLM)技术以及复合工艺制备出的多层级多孔表面在提高相变表面汽化核心密度的同时,实现了不同尺度和层级结构之间的协同,在沸腾过程中表现出优异的传热性能。

2.1 烧结

对于金属材质,烧结是制备多孔表面最简单的技术之一^[10],包括粉末烧结、丝网烧结以及金属泡沫烧结等方式,可以实现金属颗粒或金属纤维之间的高强度结合以及多孔层与散热表面的稳固结合。研究者开展了大量基于烧结多孔表面相变传热性能的研究,其表面结构研究进程如图 1 所示^[11-19],技术路线已实现从单一结构到多元适配的演进。

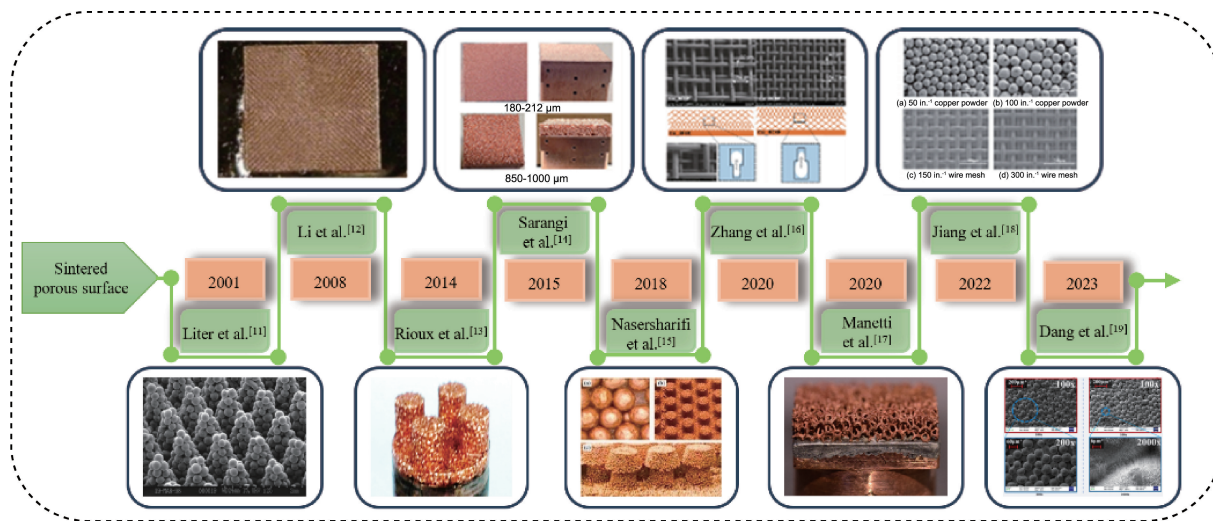


图 1 强化传热烧结多孔表面的发展^[11-19]

Fig. 1 Development of sintered porous surfaces in pool boiling^[11-19]

对于粉末烧结,添加造孔剂是制备多层级孔的普遍做法,其制备过程如图 2 所示。将金属粉末和可溶性造孔剂混合均匀后,通过压制-烧结-脱溶过程得到具有多层级孔结构特征的多孔材料,其中大孔由造孔剂去除后

留下的孔隙组成,而小孔则由粉末之间烧结颈连接而成,大小孔之间形成大量层级贯通的孔隙网络。Lu 等^[20]采用粒径为 $425 \sim 710 \mu\text{m}$ 的 K_2CO_3 作为造孔剂,根据目标孔隙率按照一定的体积比混合铜粉和 K_2CO_3 颗粒,在

200 MPa 压力下压制成预制件, 在 800 °C 下烧结 30 min 使得铜粉末之间相互结合, 然后在 950 °C 下烧结 2 h 分解 K_2CO_3 , 制备了孔隙率、孔径和孔型可控的开孔铜多孔材料。在实验研究范围内, 当孔隙率为 0.66 时, 通过 Cu 基体的热传导和通过孔隙之间的对流传热相匹配, 获得最佳的整体传热性能。Ma 等^[21]以 NaCl 作为造孔剂, 通过将不同混合比例的铜粉和 NaCl 混合均匀后逐层放入模具中压制成片烧结, 通过控制烧结参数和造孔剂的粒径, 以 150-100-75-50 μm 的孔径顺序制备 4 层梯度结构多孔材料。此结构满足沸腾时气泡逸出和液体补给对孔径的要求, 其沸腾起始点为 0.9 °C, 仅为光滑表面 (12 °C) 的 8.3%, 最大传热系数 (heat transfer coefficient,

HTC) 达到 8.25 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, 为光滑表面的 8 倍。Lv 等^[22]对金刚石进行金属化处理后, 采用粒径为 75 μm 的 NaCl 作为造孔剂, 和铜粉颗粒冷压成片, 通过真空烧结制备具有高导热系数的金刚石/铜复合多孔材料。Rishi 等^[23]将石墨烯纳米颗粒与铜粉混合, 以 Na_2CO_3 为孔隙模板, 烧结制备孔隙可控、结合力和稳定性优异的层状多孔网络结构材料, 将石墨烯的高导热性与烧结铜粉结合, 有效延迟了热点的形成。需要注意的是, 在利用造孔剂制备层级多孔金属时, 如造孔剂未能完全移除而残留在多孔材料内部, 可能会影响材料的性能。截至目前, 由于在金属粉末中难以分散超细的造孔剂颗粒, 因此利用造孔剂法烧结制备亚微米级多孔材料面临严峻的挑战。

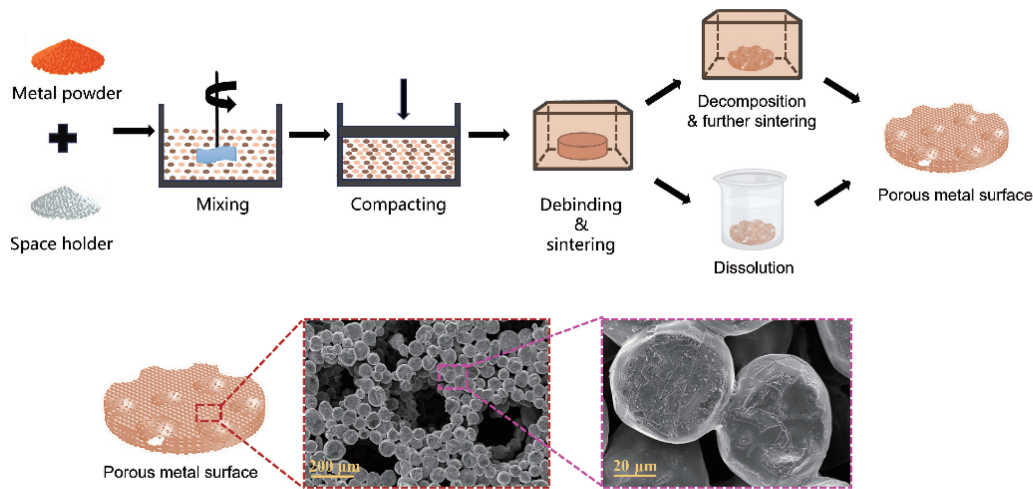


图 2 造孔剂法制备多层级孔表面

Fig. 2 Preparation of hierarchical porous surface by pore-forming agent

研究者发现具有可控的多孔结构以及可复合叠加制备多层级孔道的金属丝网在传热领域具有重要的应用前景。Zhang 等^[16]将多张单层丝径不同的金属丝网复合后, 经高温烧结制备具有均匀和梯度孔隙层级结构的多孔表面, 研究梯度结构对材料传热性能的影响。研究表明, 梯度铜网具有的烟囱效应显示出强大的毛细芯吸效应和小气泡快速脱离特性, 延缓了沸腾危机的发生。Jiang 等^[18]对比热管理领域应用最广泛的烧结铜粉和丝网表面饱和池沸腾传热性能, 发现在低热流密度下烧结铜粉的传热系数略高, 而在高热流密度下烧结丝网具有较大的传热系数和烧干热流密度。从实际应用来看, 两种材料各有优缺点, 如多层丝网堆叠难, 但成本低于烧结铜粉, 需要根据不同应用场景选用。

近年来, 孔隙率超过 90% 的泡沫铜因为质量轻和传热性能优异引起关注。Manetti 等^[17, 24]讨论了泡沫金属材料及其厚度对沸腾传热特性的影响, 泡沫铜由于其优异的导热性能在整个沸腾阶段的传热系数高于同等体积的

泡沫镍; 厚度对传热性能的影响随着热流密度而变化, 厚度较大的泡沫铜在低热流密度下性能较好, 但随着热流密度增加气液逆流阻力增大, 因此厚度最小的材料在高热流条件下表现出优异的性能。Dang 等^[25]在纯铜表面烧结不同孔径和厚度的泡沫铜多孔层, 实验发现可通过多孔材料结构参数的设计和实验条件的组合实现过热度最小和传热系数最大的多目标优化。

烧结工艺流程涉及高温形变, 一般不选取温度敏感型材料加工, 烧结温度过高或烧结时间过短都将引起多孔表面的孔隙率和渗透率下降, 粉末颗粒间收缩率增加。同时由于高温而引起的表面氧化问题, 通常需要采用通入惰性气体或还原气体等作为保护措施。烧结多孔表面可在一定程度上强化传热效果, 通过改变烧结层厚度、多孔烧结用粉末的形状、粒径、造孔剂的种类及其脱除方法等实现多孔表面高毛细作用和强渗透性的调控。粉末粒径通过控制成核位点数量影响表面传热; 烧结层厚度影响表面的毛细芯吸效应。但是, 对于沸腾的不同阶

段，厚度的变化对传热的影响可能呈现相反的趋势^[26]。因此，粒径与厚度如何组合以实现表面强毛细作用力和高渗透率，同时避免或延迟因气液逆流产生的流动阻力还有待研究。为实现沸腾全过程表面传热特性的提升，通过控制烧结工艺参数中的孔隙率和烧结层厚度，采用不同粒径或丝径烧结形成层级梯度多孔表面将是未来研究的主要趋势。

2.2 电化学沉积

电化学沉积为在金属基底构筑用于高效热管理的微-纳层级多孔表面提供了灵活、精密的调控方法^[27]。它以氢气为动态模板，通过在阴极还原溶液中的正离子，在气泡周围沉积金属，从而形成相互连通的多孔结构，通过改变电流密度、电位差、电解液组成和沉积时间等参数可实现对多孔金属形貌的灵活调控。此工艺操作环境安全，流程简单，实用性强，可批量生产。

Xu 等^[28]沉积的层级多孔铜表面孔隙层由直径 2 mm 以上的宏观孔和直径 2 μm 左右的微孔组成。如图 3a1 和 3a2 所示，微孔侧壁含大量直径 400 nm 的枝晶结构。层级多孔表面提供较多的活化核位点，改善了低热流密度下沉积表面的传热性能，沸腾过程中大气泡的脱离使表面过冷液体的补充量增加，提高了传热效率，获得高

达 239 W/cm² 的临界热流密度 (critical heat flux, CHF)。Mo 等^[29]通过向均匀孔径表面充注去离子水，获得具有径向梯度孔径的蜂窝状多孔铜，如图 3b 所示。梯度孔径表面促进工质向中间补充，在高热流密度下，传热系数是均匀孔径表面的 1.4 倍。研究发现多步电化学沉积对于多孔表面稳定性的提高具有促进作用，Li 等^[30]通过多级电化学沉积制备了分别包含微孔、微树枝晶簇、纳米颗粒的 3 层级多孔铜表面，如图 3c1~3c3 所示。3 层级多孔表面成核位点数量的增加、树枝晶簇对气泡动力学行为的调节、纳米颗粒提供的毛细芯吸作用和多孔层形成的气-液分离通道，使得表面烧干热流密度和传热系数较光滑铜表面分别增加了 245% 和 133%。Gheitaghy 等^[31, 32]在采用两步电沉积的基础上，通过改变温度使基体粗化，形成均匀开放的互通孔隙，如图 3d1 所示，不同热流密度下多孔表面的气泡演变行为也存在差异，如图 3d2 所示。通过提高电解质溶液性能，不仅调控了多孔层的孔隙特征，还间接提升了多孔层的机械稳定性。沉积过程中交替施加高低电流将改变基底表面的润湿性，亲(疏)水表面由于自由能不同抑制(促进)气泡的生长及脱离，影响表面沸腾传热效率。Cao 等^[33]通过在短时间内施加高电流密度制得具有薄片状结构的涂层，如图 3e1

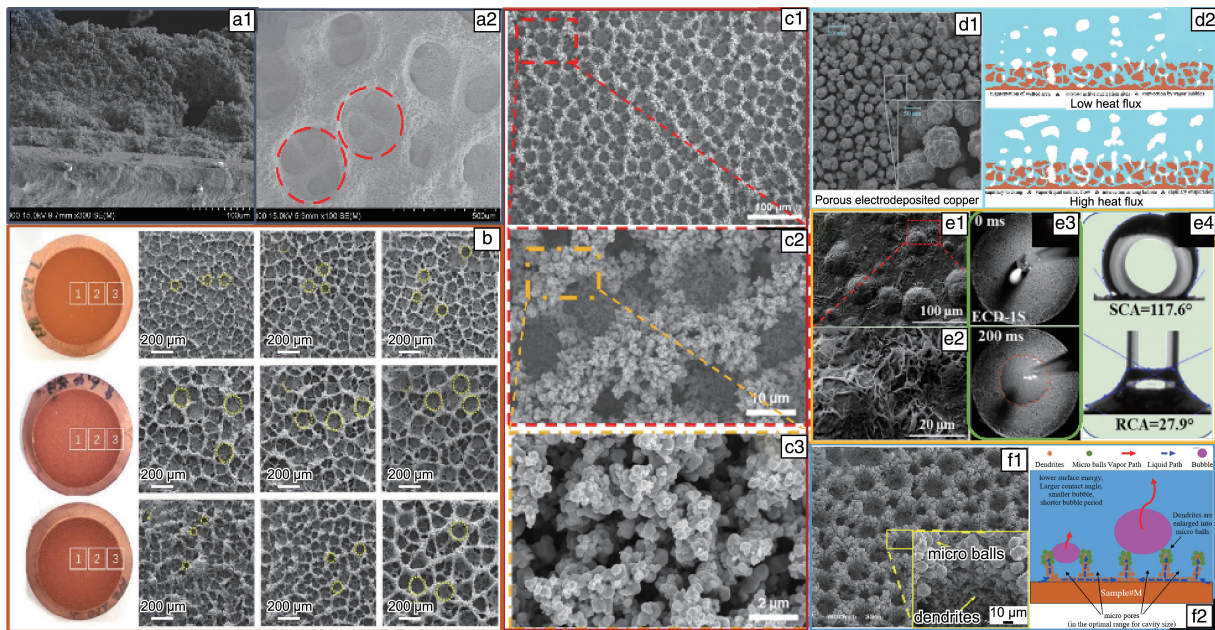


图 3 电化学沉积制备的微-纳多孔铜表面: (a1, a2) 宏观-微观层级多孔表面^[28]; (b) 具有径向梯度孔径的微-纳多孔表面^[29]; (c1~c3) 3 层级多孔铜表面^[30]; (d1, d2) 25 °C 电解液沉积的多孔铜表面及气泡动力学示意图^[31]; (e1~e4) 多孔铜涂层表面^[33]; (f1, f2) 梯度结构蜂窝状多孔铜表面^[34]

Fig. 3 Surface structure of micro-nano porous copper fabricated by electrochemical deposition: (a1, a2) macro-micro hierarchical porous surface^[28]; (b) micro-nano porous surface samples with radial diameter gradient^[29]; (c1~c3) three-tier hierarchical porous copper surface^[30]; (d1, d2) 25 °C electrolyte solution electrodeposited porous surface and schematic representation of the bubble dynamic^[31]; (e1~e4) porous copper coating surface^[33]; (f1, f2) the gradient structured honeycomb-like porous surface^[34]

和 3e2, 经过一次沸腾实验后表面涂层润湿性出现超亲水性向疏水性的转变, 如图 3e3 和 3e4。Wang 等^[34]采用氢气模板法制备梯度结构蜂窝状多孔铜表面, 在单步沉积的基础上, 第二次施加低电流密度, 最终表面微孔侧壁含有丰富的纳米枝晶, 侧壁结构呈现出由下至上从纳米枝晶扩大为微球的梯度结构, 如图 3f1 所示, 使层级多孔表面能降低, 加速气泡演化(图 3f2)。

总的来说, 电化学沉积作为一种较为成熟的多孔表面制备手段, 为强化多孔表面传热提供了新的强大工具。对于具有导电性的基底材料, 能够快速在任意表面上制备高度可扩展、形状可调控的多孔表面。电解液中氢离子及铜离子的浓度增加有利于增加表面孔径, 保证多孔表面形成完整孔隙, 为表面沸腾提供足量的汽化核心, 具有最佳空腔尺寸的孔隙结构还能缩短气泡的生长周期, 加速表面传热。通过改变电流密度大小控制反应过程中氢气形成速率以调控孔径大小, 较高的电流密度可以加速氢气脱离, 降低表面孔径, 减小枝晶的长度和直径, 使得表面孔壁结构趋近光滑、完整^[35]; 低电流密度的施加抑制气泡脱离, 有利于沉积的多孔结构与基底表面稳定结合; 高低电流交替施加的多步沉积工艺既能保证多孔层级结构的高效可控, 又能对表面的润湿性产生影响; 而探索电流电压交变复合沉积过程多孔孔隙的形成规律和基底结合特性, 可达到增加汽化核心数量, 提高表面毛细芯吸性能、分离气-液通道等目的, 优化表面的沸腾传热特性^[30]。

2.3 选区激光熔化

SLM 技术是以激光为热源, 通过控制光束的扫描路径选择性熔化金属粉末并逐层累积成形, 实现形状设计

高自由度和加工尺寸高精度的增材制造技术, 成型表面具有质量优异、结构多变等优点^[36]。该技术通过 CAD 辅助设计具有恒定晶胞的层级多孔结构, 能对多孔金属的孔径、孔型和孔分布等几何参数进行精准控制, 实现对多层级孔表面的直接制造。

Wong 等^[37]以球形 AlSi10Mg 合金粉末为原料, 选取八角体-桁架几何体作为多孔网格结构的晶胞结构(图 4a), 制备出具有高度有序排列和良好孔隙连通性的三维多孔结构。实验研究晶胞尺寸和结构高度对多孔晶格沸腾传热性能的影响, 发现晶格尺寸为 3 mm、高度为 5 mm 的多孔表面传热系数为光滑表面的 2.81 倍; 当晶格尺寸增大至 5 mm 时, 临界热流密度达到 107 W/cm², 是光滑表面的 6.11 倍。多孔晶格的毛细作用实现了表面过冷液体的持续补充, 显著延缓了多孔晶格表面的沸腾危机。由于加工机器的限制, 多孔晶格结构处在宏观尺度范围, 然而激光烧蚀过程产生的微孔结构也能实现表面沸腾效果的增强。Bian 等^[38]制备出立方体、针鳍和凹槽上具有微孔结构的 3 种表面, 如图 4b 所示。研究发现凹槽表面传热系数是铬镍铁合金光滑表面的 2.22 倍, 凹槽侧壁覆盖的 32.6 μm 左右的微颗粒提高了表面粗糙度, 可加速气泡演化; 微孔结构供应过冷液体, 缩短表面汽化核心再润湿进程, 实现表面传热强化。Hayes 等^[39]制备的空心锥形结构表面(如图 4c1 和 4c2)的顶部孔隙及侧面孔隙处形成独立的气-液流场, 通过平衡顶部孔径和脱离气泡直径大小关系, 实现液体和蒸汽两种路径的单向流动, 实现传热强化。

激光的扫描速度、扫描间距及激光功率是影响多孔结构表面成型特性的主要因素。激光扫描间距过小时无

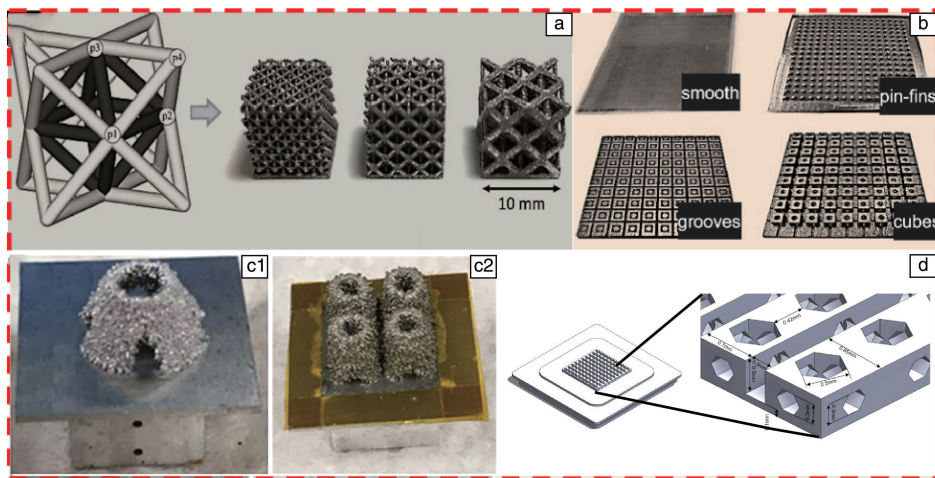


图 4 SLM 技术打印的多孔表面: (a) 晶格尺寸为 2~5 mm 的多孔晶格样品^[37]; (b) 多孔针鳍、微孔凹槽、微孔立方体打印样品^[38]; (c1, c2) 带有空心锥的芯片样品^[39]; (d) 单层多孔针鳍阵列^[41]

Fig. 4 Porous structure fabricated by SLM: (a) porous lattice sample with lattice size of 2~5 mm^[37]; (b) 3D-printed porous samples of pin-fins, grooves and cubes^[38]; (c1, c2) chip with hollow conical structure^[39]; (d) one-layer porous fin arrays^[41]

法形成通孔; 而扫描间距过大, 低激光能量密度导致粉末成形质量差, 粉末粘结减少, 不利于形成规则的晶胞结构, 同时会导致表面形成裂纹、空隙等问题。激光功率影响通道成型, 功率较低难以形成连续的熔化通道, 激光功率增加, 产生的液相增加, 扫描过程中更易形成连续的熔化通道^[40]。Wu 等^[41]借助 SLM 技术参数的灵活性, 实现 0.5 mm 单层与 1.0 mm 双层多孔鳍阵列“层数可调、精细特征可控”的设计, 其中单层多孔鳍阵列如图 4d 所示。通过优化激光加工参数, 可实现对多孔材料的高自由度设计和可控制备, 但是考虑成形尺寸的限制、成形零件的经济性以及粉末特性等, 构建 SLM 工艺参数与梯度多孔结构几何优化的最优匹配模式, 对多层级孔金属表面的强化沸腾传热技术研究尤为关键。

2.4 其他加工方法

除上述常用的烧结、电化学沉积和 SLM 以外, 通过冷冻铸造和去合金化等技术也可以制备层级多孔表面用于强化传热。Lin 等^[42]以水性镍浆为原料, 基于冰晶的造孔和定向生长作用, 通过连续冷冻铸造制备了双孔径-定向孔隙的多孔镍材料, 由以冰晶为模板形成的层状垂直大孔和颗粒堆积形成的小孔构成。根据浆料厚度和冻结温度的不同, 大孔约为 10~100 μm , 而小孔约为 1 μm , 为取得最佳传热系数, 需权衡汽化核心密度和气泡脱离频率。冷冻铸造只需改变工艺参数就可以制备具有特定孔隙结构特征的多孔材料, 通过在定向凝固过程中施加不同的热梯度和凝固前沿速度, 可实现梯度层级孔隙结构的调控^[9]。

通过去合金化制备层级多孔金属材料的方法分为化学去合金化和物理去合金化。化学去合金化将金属浸入含有腐蚀性粒子的溶液中, 通过选择性地溶解活泼金属元素留下活性较低的元素, 形成孔隙率随机分布的三维孔隙结构。Huang 等^[43]将 Cu-Zn 合金放入 10% (质量分数) 的 H_2SO_4 中 8 h 去合金化形成纳米多孔网络结构, 纳米孔结构改善表面润湿性促使沸腾在较低的过热度下发生, 强化了沸腾传热。Li 等^[44]通过利用 Cu, Zn 两种合金的电势差, 通过烧结-合金化-去合金化处理在微米级的烧结铜粉上加工纳米孔穴结构制备层级多孔铜, 去合金化处理使得铜粉表面留下岛状突起和孔穴, 直至形成连续纳米结构。铜粉表面的纳米孔结构有利于沸腾起始阶段气泡的生成, 而烧结铜粉之间的微米级孔在高热流密度下起主导作用。物理去合金化是近年来发展起来的一种制备多孔金属的新方法, 它利用合金组分间的蒸气压差来选择性地去除高蒸气分压组分^[45]。Nikulin 等^[46]将铜锌合金 CW614N 在 650 $^{\circ}\text{C}$ 管式炉中维持绝对压力为 0.8~2.5 Pa 进行 0.5~3 h 去合金化处理, 制备微孔和纳米凸起修饰

的层级多孔金属。孔隙深度测量和样品质量损失计算发现, 物理去合金具有高度非线性, 且随着时间的推移去合金速度显著减慢, 0.5 h 的去合金化处理使得表面传热系数增加 100%~150%。去合金化工艺被证明是生产纳米多孔金属非常有效且方便的方法, 其制备的纳米多孔金属中孔隙相互连通, 不需要额外的物理支撑, 避免了使用纳米颗粒时常遇到的脱落问题^[47]。

基于对沸腾相变全过程强化传热的综合考虑, 将两种或两种以上的加工方法结合起来制备多层级孔表面可以摆脱一种加工方法的局限, 兼顾结构和功能的需求。Tang 等^[48]结合交错犁切-线切割-超声加工制备包含宏观内凹孔、互通孔和微尺度多孔结构的铜基双尺度多孔微通道表面, 该表面可承受的热流密度高达 232 W/cm^2 。冉令鸿等^[49]采用溶胶-凝胶法制备纳米孔隙尺度的珊瑚状结构氧化铜粉体, 以 Na_2CO_3 作为造孔剂, 通过还原烧结法在 650 $^{\circ}\text{C}$ 氢气氛围下还原焙烧 1 h 制得微纳双尺度层级多孔表面。研究发现, 随造孔剂 Na_2CO_3 体积比的增加, 传热表面颗粒间微米孔隙直径不断增大, 但颗粒内部纳米孔隙尺度保持不变。纳米结构可以增强孔隙毛细吸力, 强化吸液能力; 微米尺度孔隙为气泡逸出提供通道, 减弱气相流动阻力。双尺度协同有助于气泡核化、生长、逸出及吸液分区降阻, 从而提高传热性能。Sudhakar 等^[50]结合烧结和激光加工制备毛细进液双层吸液芯结构, 双层吸液芯液体输运方式在保证低热阻的同时减缓烧干区域的发展、增加气-液-固三相接触线的薄液膜面积以及降低液膜的传递阻力, 是提高其热传输效率的关键。表 1 列出了复合工艺构筑的多层级孔表面的结构和制备方式^[48-57], 由表可知, 目前研究者结合两种或两种以上的制造方法制备组合结构以兼顾高临界热流密度和传热系数以及低壁面过热度的热管理要求。但是, 使用多种加工方法可能会增加制造时间和成本, 从而限制其大规模的产业应用。

3 多层级孔结构及其热管理性能的综合评价

3.1 影响多孔结构传热性能的关键参数

在层级多孔结构中, 不同层级的孔径分布、孔隙率和多孔层厚度是影响沸腾传热性能的关键结构参数, 通过优化这些参数, 可以显著提高沸腾传热效率并改善温度分布的均匀性^[58]。

Zhang 等^[16]将 3 层 11 811 m^{-1} (300 in^{-1}) 细丝网叠加在 3 层 3937 m^{-1} (100 in^{-1}) 粗丝网之上烧结正梯度层级多孔结构, 实验发现底层孔径小、顶层孔径大的正梯度结构在粗细丝网的交界处形成类似烟囱的形状, 产生的微烟囱效应使得气泡能够在小直径下快速脱离, 与 3 层粗丝

表 1 复合工艺构筑的强化沸腾传热用多层级孔表面

Table 1 Hierarchical porous surfaces for enhanced boiling heat transfer fabricated by composite process

Ref.	Fabrication technique	Surface feature	Advantage	Limitation
Tang <i>et al.</i> [48]	Plough-extrusion + wire electrical discharge machining + ultrasonic machining	Microchannels with interconnected holes, reentrant cavities and micro-nanopores	Efficient removal of large-area material, capability of fabricating complex structures	The surface morphology is influenced by tool cutting depth and feed rate
Ran <i>et al.</i> [49]	Sol-gel method + reduction sintering	Micro porous with coral-like network nanopores	Uniform powder dispersion, simple manufacturing process, economic	Long processing time, material properties influenced by the sintering temperature
Sudhakar <i>et al.</i> [50]	Sintering + laser machining	Porous copper layer, base wick layer	Flexible processing, quick time production, wide applicability, precise machining	Expensive equipment, temperature-sensitive materials are limited
Khan <i>et al.</i> [51]	Hot powder compaction + nanoparticles coating	Hybrid micro-nano scale porous surfaces	Variable pore shapes, precisely control the pore diameter	High cost of nanoparticles, the uniformity and porosity of the surface are influenced by the concentration of nanoparticles
Li <i>et al.</i> [52]	Powder sintering + chemical etching	Hierarchical porous surfaces of microcavities	Designable layered structure	High processing costs
Ha <i>et al.</i> [53]	Sintering + micro milling	Micro porous with micromachined channels	Wide range of processing materials, small processing size	High manufacturing cost, low production efficiency, poor connectivity in the pore structure of the material
Mehdikhani <i>et al.</i> [54]	Electrodeposition + etching	Fin-shaped structures with porous layer	Capable of large-scale production, high precision, excellent structural integrity	Difficulty in controlling the uniformity of porous structures, poor mechanical stability of the process
Deng <i>et al.</i> [55]	Solid-state sintering + electrical discharge machining (EDM)	Porous coating with parallel Ω shaped reentrant channels	High surface strength, controllable shape, high precision in machining dimensions, low processing cost	Low production efficiency, the size and shape of the product are limited
Zhang <i>et al.</i> [56]	Powder sintering + wire electrical discharge machining (WEDM)	Porous interconnected micro-channel nets	High production efficiency and material utilization rate, uniform distribution of surface structure within the materials	High manufacturing cost, complex manufacturing process, applicable to conductive materials
Hu <i>et al.</i> [57]	Wire-cutting + TiO ₂ nanotube layers	Microchannel with nanotube array	Dense structure, low production cost, high processing accuracy, complex shapes product can be prepared	Large-scale production is limited

网叠加在 3 层细丝网之上构成的逆梯度结构相比展现出了更优异的沸腾传热性能。Ma 等^[21]制备了具有层级梯度孔径的三维多孔表面,其层级孔径分别为 55.6, 81.9, 125.0 和 179.5 μm 。梯度多孔表面从底层到顶层孔径的增大可以匹配沸腾过程中样品内部气泡直径增大的趋势,有利于结构内部的气泡逸出,底部小孔径有利于结构内部的液体补充。Huang 等^[59]构建了如 20-30-40-50 PPI 排列的正梯度泡沫铜结构 (positive gradient metal foams, PGMFs) 和 40-20-30-50 PPI 排列的混合梯度泡沫铜结构 (hybrid gradient metal foams, HGMFs)。正梯度泡沫铜结构通过增加气泡脱离时带走的热量和增大温度梯度来提高传热性能,而混合梯度泡沫铜结构通过改变气泡脱离的方向和缩短气泡逃逸路径来增强传热性能,但可能导致气泡尺寸不规则。除了层级孔径梯度变化方向与沸腾表面垂直外,还有尺寸梯度变化方向与沸腾表面平行的

径向梯度层级多孔表面。Mo 等^[29]制备了具有径向孔径梯度的多孔蜂窝状铜表面,其孔径从中心到边缘的范围为 60~120 μm ,加热中心较小的孔径保持加热中心表面结构具有较大的毛细再润湿作用,边缘较大的孔径可以减小从边缘到中心的补充液体的流动阻力,该结构在高热流密度下传热性能尤为突出。

孔隙率是多孔介质中孔隙体积与总体积的比值。在总体积确定的情况下,孔隙率越高,固体部分的体积就越小,热阻必然越低。但是,当孔隙率较高时,传热面积不可避免地减小,传热效果又会减弱。目前,研究者很难就孔隙率对传热效果的影响达成一致意见^[60, 61]。Habibishandiz 和 Saghir^[62]认为,不同材料的不同结构形状导致了不同的传热速率。换言之,由不同方法制备得到的层级多孔结构具有适用于特定结构以产生最大传热速率的最佳孔隙率。

多孔层的厚度影响表面成核点的数量、导热热阻以及气泡脱离与液体回流双重阻力。Xu 等^[63]研究了烧结金属和泡沫金属等多孔结构厚度的影响, 结果发现, 对于顶部和侧面具有相同结构的烧结金属多孔颗粒层, 厚度较小时, 由于较好的毛细芯吸作用和较低的气泡脱离阻力, 在顶部具有大量的活性成核位点; 而在厚度增加时, 侧面的汽化成核位点阻碍了液体的有效供应, 由于更高的气泡脱离阻力导致成核位点减少。对于泡沫金属多孔材料, 厚度较大时在沸腾初期显著增加活性成核位点; 但在高热流密度下可能因气泡脱离表面阻力增大, 导致传热性能变差。而对于电化学沉积制备的多孔结构, 沉积时间过长, 厚度增加, 可能导致多孔层的塌陷; 对于包含碳纳米管的多孔层级结构, 由于自身的机械强度原因限制了厚度。

3.2 多层级孔结构表面的热管理性能评价

热管理技术的优劣直接关系到电子设备和器件的可靠性、性能和寿命。在极端情况下, 如动力电池的热失控现象, 还可能引发安全事故, 造成人员伤亡和财产损失。随着电子技术的发展和热管理政策的更新, 热管理

技术不只局限于高效的散热性能, 还应考虑均温性、安全性、资源消耗、经济效益和生态影响。鉴于此, 层级多孔结构因其出色的综合性能而受到广泛关注。

层级多孔结构在热管理中应用, 其性能评价主要考虑以下几个关键指标: ① 散热性: 材料或系统将热量从热源传递到周围环境的速率; ② 均温性: 确保系统中不同部件的温度分布均匀, 避免局部过热; ③ 临界热流密度: 涉及系统和器件安全操作的重要参数; ④ 成本效益: 在满足热管理性能要求的同时, 考虑材料和制造工艺的成本增加与能量成本节约之间的平衡; ⑤ 生态影响: 减少能源消耗、碳排放和有害气体释放, 完善材料的回收和再利用。

多层级孔的独特参数允许在沸腾过程中增加表面有效成核位点、协同气液运输, 在降低沸腾起始点的同时显著提高传热系数和临界热流密度。多孔结构的发展响应热管理政策的需要, 有助于解决散热问题, 并可以在可持续发展中发挥关键作用。层级多孔结构的特点多样, 制备方法各异, 表 2^[19, 21, 29, 42, 59, 64-69]所示信息为层级结构的选择、工作流体的选择以及热管理适应场景的匹配提供参考。

表 2 多层级孔表面的相关信息

Table 2 Information about hierarchical porous surfaces

Ref.	Hierarchical surface feature	Preparation method	Substrate	Size of structure	Fluid medium	HTC _{max} / (W / (cm ² · K))	CHF / (W / cm ²)
Dang et al. ^[19]	Compound porous layer with burr-like nanostructure	Sintering and nano treatment	Copper	Spherical copper powder: 10 ~ 30 μm, thickness: 0.6 mm, porosity: 37% ~ 68%	R245fa	1.68	55.43
Ma et al. ^[21]	Multi-layer gradient aperture open-cell porous copper	Cold pressing and vacuum sintering	Copper	Pore diameter: 50 ~ 150 μm, 100 ~ 300 μm, specific surface area: 2.33 ~ 7.64 cm ² /cm ³ , porosity: 70%	Water	8.25	57.97
Mo et al. ^[29]	Porous honeycomb surface with radial diameter gradient	Electrochemical deposition with infusing liquid onto the reaction surface	Copper	The range of pore diameters from the center to the edge: 60 ~ 120 μm, thickness: 0.12 ~ 0.18 mm, porosity: 90% ~ 92%	Deionized water	16.10	
Lin et al. ^[42]	Double-layered bi-porous coatings	Freeze casting and sintering	Copper	Nickel powder: 400 nm, pore size: 1 ~ 100 μm, thickness: 80 ~ 500 μm, porosity: 30% ~ 80%	Ethanol	5.15	63.35
Huang et al. ^[59]	Gradient metal foams	Welding	Copper foam	PPI: 20 ~ 50, pore size: 0.44 ~ 1.27 mm, layer thickness: 2.5 ~ 5.0 mm	Deionized water	5.02	88.48
Zhang et al. ^[64]	Gradient-aperture and bi-porous structures	Vacuum sintering	Copper	Particles diameter: 40 ~ 180 μm, thickness: 4.75 mm, porosity: 44% ~ 65%	Deionized water	72.50	554
Liang et al. ^[65]	Gradient mesh wick (2D screen woven mesh on the bottom and rhombus flat punching structure on the top)	Sintering and punching	Aluminum	Large hole: the rhombus opening size 325×575 μm ² , small hole: aluminum screen woven mesh wick 158×158 μm ² , thickness: 0.073 ~ 0.331 mm, porosity: 67% ~ 75%	Ethanol	4.62	109.55

续表

Ref.	Hierarchical surface feature	Preparation method	Substrate	Size of structure	Fluid medium	$HTC_{max}/$ ($W/(cm^2 \cdot K)$)	CHF/ (W/cm^2)
Zhang <i>et al.</i> [66]	Hybrid surfaces coupling capillary wick and minichannels	Sintering and mechanical process	Copper	Particle size: 70 μm , channels width: 0.9 mm, channels depth: 1.0 ~ 2.0 mm, thickness: 1.0 mm	HFE-7100	2.69	147.40
Zhang <i>et al.</i> [67]	Hierarchical gradient mesh	Diffusion bonding and chemical surface treatment	Copper	Wire diameter: 50/100 μm , mesh number: 3937/11 811 m^{-1} (100/300 in^{-1}), opening width: 204/45 μm , thickness: 0.36 mm	Deionized water	34.52	300
Shah <i>et al.</i> [68]	Multistage cross-flow porous structure	Wire cutting and drilling	Copper	Channels height: 1.5 mm, channels width: 1.0 mm, pores diameter: 0.325 mm	FC-72	4.71	107
Zhou <i>et al.</i> [69]	Copper foams with pore-density gradient structure	Diffusion welding	Copper foam	PPI: 10~100, density: 0.52~0.65 g/cm^3 , thickness: 25~30 mm, porosity: 51%~88%	Aqueous <i>n</i> -butanol solution	1.15	9.11

4 高效热管理应用场景

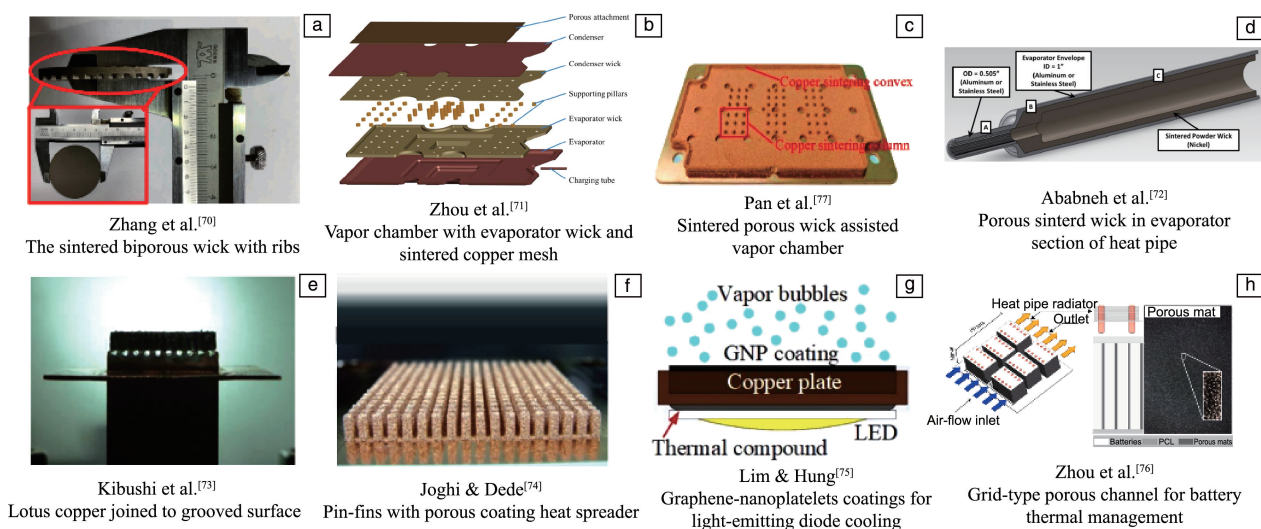
面向现代高端技术应用, 包括航空电子设备、数据中心、高性能计算机、高速列车、LED 照明技术和新能源汽车等领域, 研究人员已经对多层级孔结构及

其烧结毛细芯的相变传热性能进行了深入研究。这些研究致力于开发和优化热管理系统中的核心组件, 包括散热器、冷板和热管等, 以满足这些领域对于高效散热解决方案的迫切需求, 其具体应用如表 3^[70-76] 和图 5^[70-77] 所示。

表 3 采用层级多孔结构的高热流电子器件冷却技术

Table 3 Cooling technology for high-heat-flux electronic devices employing hierarchical porous metal materials

Reference	Application	Technology	Conclusion
Zhang <i>et al.</i> [70]	Long-distance thermal control systems	Twelve ribs were sintered on one side of the biporous wick, in contact with the heater surface	Under horizontal conditions, the loop reached a max heat transfer of 110 W at 6.6 W/cm^2 and a minimum thermal resistance of 0.38 $^{\circ}C/W$, rising to 330 W at 19.9 W/cm^2 with gravity assistance
Zhou <i>et al.</i> [71]	Data center servers cooling	Gradient wicking structures were developed in the vapor chamber, a thin porous attachment was sintered on the outer surface of the condenser plate	At 50 W heat load and below 65 $^{\circ}C$, the vapor chamber can manage up to 900 W without dry-out and has a minimum thermal resistance of 0.05 $^{\circ}C/W$ at 500 W
Ababneh <i>et al.</i> [72]	Thermal management of warm electronics box (WEB) in lunar and martian landers and rovers	Porous sintered wick in evaporator section of heat pipe	Operating at high heat fluxes conditions over long distance in space, eliminates the temperature shoot-up in vertical gravity conditions
Kibushi <i>et al.</i> [73]	High performance computers, next-generation supercomputers	Lotus copper joined to grooved surface	The critical heat flux is 534 W/cm^2 in the case of water using a 1.0-mm-square groove, which was a great improvement over the smooth surface (by a factor of 3.7)
Joshi <i>et al.</i> [74]	Wide bandgap (WBG) devices cooling	Submerged two-phase jet impingement cooler in combination with porous coated heat spreaders and multi-jet orifices	The pin-fin porous coated heat spreader has the highest two-phase performance with nearly zero penalty to cooler pressure drop
Lim <i>et al.</i> [75]	Light-emitting diode cooling	Distinctive GNP's coatings was applied on the detachable copper plate, the LED was adhered directly to the bottom side of the copper casing	The case temperatures of LED cooled by the cured coatings is drastically reduced by 15.5 $^{\circ}C$, at a power supply of 36 W, the illuminance of LED cooled by the cured-GNP's is enhanced by 13.0%
Zhou <i>et al.</i> [76]	Battery thermal management system (BTMS)	The grid-type porous materials were sandwiched between each pouch cell of the module	Under high discharge rates and high-power cycle, the maximum battery temperature can be limited to approximately (47 ± 1) $^{\circ}C$

图 5 多层级孔结构和烧结毛细芯的应用^[70-77]Fig. 5 Application of hierarchical porous structures and sintered capillaries^[70-77]

Zhang 等^[70]将双孔径吸液芯结构应用于航天航空热管理长距离热输运环路热管中。这种双孔隙结构的复合吸液芯以 T255 镍粉作为烧结粉末， Na_2CO_3 作为造孔剂，大孔和小孔的孔径分别为 10 和 $2.6 \mu\text{m}$ ，孔隙率为 74.2%，双孔毛细芯中的大孔具有高渗透性，能够大幅度减小气体工质的流动阻力；小孔能够提供大毛细力，促进液体工质流动。Zhou 等^[71]提出将均温板散热器的两相浸没式冷却策略用于数据中心服务器冷却，均温板采用铜粉烧结梯度多孔毛细结构，粒径从上到下逐渐减小，孔隙率从 0.51 到 0.47 到 0.42。梯度孔径毛细芯兼具高极限毛细力和高渗透性，促进了工作液体的循环，可有效处理高达 900 W 的热负载。Pan 等^[77]将多孔泡沫铜吸液芯烧结在基板上制备出超薄均温板，通过与微通道液冷热集成用于高功率绝缘栅双极晶体管的热管理。均温板和热沉的集成结构减小了接触热阻，多孔吸液芯增加了器件的均温性。Ababneh 等^[72]开发了一种新型混合吸液芯热管，可实现在重力和微重力环境中运行，蒸发器中烧结多孔芯具有大量的成核位点，缓解了垂直重力辅助热管中的启动难题。Du 等^[78]开发了一种带蒸汽槽的烧结铜粉吸液芯新型环形热管，通过在液体管路上加装烧结毛细芯结构有效保证热管的启动及平稳运行。在实验热负荷下，环形热管均能实现顺利启动，且最高工作温度不超过 90°C ，这种无温度振荡和超调的热管适用于数据中心 CPU 及电子芯片等器件的冷却。Zhang 等^[79]引入了一种填充微米多孔铜材料的散热器设计，对其在 CPU 上的散热效果进行研究。结果表明，与传统的微通道 CPU 散热器相比，多孔铜的散热器传热效率提高了 28.5%，表面温度降低了 10°C 以上。

5 结 语

多层级孔表面实现不同尺度孔隙在空间上衔接，成为满足沸腾传热多重需求的有效方法之一。需要进一步探索并完善制备工艺，控制孔的结构、大小和分布等，作用于涉及汽泡的成核、生长、合并和脱离等跨尺度的沸腾传热过程，实现多孔金属的多功能化。

烧结层级多孔表面在精确调控孔隙率和渗透率的同时，其孔隙梯度和孔隙精度的控制仍有待深入研究。通过反应电流(电压)、沉积时间或电解液浓度的变化，可以控制电化学沉积多孔表面的形貌和厚度，多步沉积或电流电压交变复合沉积正成为多孔表面制备的一种新趋势。烧结铜粉易于成型，电化学沉积枝晶结构简单可控，石墨烯薄片具有导热优势，发展跨尺度多级孔结构的设计与制备技术，并将不同材料优势有机结合，正逐渐成为应用于热管理领域的层级多孔金属材料研究和发展的方向。层级多孔层厚度、热导率和表面强度等因素在加工过程中需着重考虑，多孔层的稳定性和耐久性一直是衡量该工艺是否适用于热管理装置工业化应用的重要因素。

基于多层级孔材料沸腾特性揭示沸腾过程的原理与本质，在常见的相变器件(热管、均温板和散热器)中证明了沸腾传热应用模式下的高效冷却潜力，但对于层级多孔表面规模化生产和低成本制造等问题需要进一步深入研究。同时随着柔性电子器件的兴起，现有的器件对于冷却系统提出柔性要求，新的柔性多层级孔结构表面有待开发，以适用更多热管理应用场景。随着科学技术的不断进步，对跨尺度多级孔金属材料的研究将继续推

动热管理领域的创新,为能源效率提升和社会可持续发展做出更大贡献。

参考文献 References

- [1] 罗松, 严昱昊, 叶恭然, 等. 制冷学报[J], 2024, 45(3): 1-22.
LUO S, YAN Y H, YE G R, *et al.* Journal of Refrigeration[J], 2024, 45(3): 1-22.
- [2] LIN X W, LI Y B, WU W T, *et al.* Renewable & Sustainable Energy Reviews[J], 2024, 189: 114052.
- [3] SUN Y, TANG Y, ZHANG S, *et al.* Renewable & Sustainable Energy Reviews[J], 2022, 162: 112437.
- [4] LIANG G, MUDAWAR I. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2019, 128: 892-933.
- [5] 张凯, 吴引江, 刘高建, 等. 中国材料进展[J], 2023, 42(10): 814-825.
ZHANG K, WU Y J, LIU G J, *et al.* Materials China[J], 2023, 42(10): 814-825.
- [6] 魏凯, 张优, 王菊萍, 等. 中国表面工程[J], 2021, 34(6): 168-174.
WEI K, ZHANG Y, WANG J P, *et al.* China Surface Engineering [J], 2021, 34(6): 168-174.
- [7] 刁明霞, 果春焕, 高华兵, 等. 材料工程[J], 2022, 50(12): 60-70.
DIAO M X, GUO C H, GAO H B, *et al.* Journal of Materials Engineering[J], 2022, 50(12): 60-70.
- [8] 马军, 王建忠, 吴琛, 等. 粉末冶金技术[J], 2023, 41(6): 554-563.
MA J, WANG J Z, WU C, *et al.* Powder Metallurgy Technology[J], 2023, 41(6): 554-563.
- [9] 梁加森, 李东, 张震, 等. 中国有色金属学报[J], 2023, 33(12): 3961-3978.
LIANG J M, LI D, ZHANG Z, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2023, 33(12): 3961-3978.
- [10] 郑敏, 杨瑾, 张华. 材料导报[J], 2022, 36(18): 78-93.
ZHENG M, YANG J, ZHANG H. Materials Reports[J], 2022, 36(18): 78-93.
- [11] LITER S G, KAVIANY M. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2001, 44(22): 4287-4311.
- [12] LI C, PETERSON G P, EL-GENK M S. Experimental Studies on CHF of Pool Boiling on Horizontal Conductive Micro Porous Coated Surfaces [C]//AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 2008, 969: 12-20.
- [13] RIOUX R P, NOLAN E C, LI C H. AIP Advances[J], 2014, 4(11): 117133.
- [14] SARANGI S, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2015, 81: 103-113.
- [15] NASERSHARIFI Y, KAVIANY M, HWANG G. Applied Thermal Engineering[J], 2018, 137: 268-276.
- [16] ZHANG S, JIANG X, LI Y, *et al.* Energy Conversion and Management[J], 2020, 209: 112665.
- [17] MANETTI L L, MOITA A S O H, de SOUZA R R, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2020, 152: 119547.
- [18] JIANG Y, ZHOU G, ZHOU J, *et al.* Applied Thermal Engineering [J], 2022, 216: 119067.
- [19] DANG C, MIN R, PAN L, *et al.* International Journal of Thermal Sciences[J], 2023, 187: 108183.
- [20] LU X, ZHAO Y. International Journal of Heat and Fluid Flow[J], 2019, 80: 108482.
- [21] MA Y, HUANG C, WANG X. Applied Thermal Engineering [J], 2021, 191: 116877.
- [22] LV Z, AN Y, HUANG C. Applied Thermal Engineering[J], 2023, 226: 120288.
- [23] RISHI A M, KANDLIKAR S G, GUPTA A. Science Reports [J], 2020, 10(1): 11941.
- [24] MANETTI L L, RIBATSKI G, de SOUZA R R, *et al.* Experimental Thermal and Fluid Science[J], 2020, 113: 110025.
- [25] DANG C, DING Y, QI Z, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2021, 179: 121740.
- [26] DANG C, PAN L, MIN R, *et al.* Case Studies in Thermal Engineering [J], 2022, 37: 102223.
- [27] SHARIFZADEH A M, MOGHADASI H, SHAKERI H, *et al.* International Communications in Heat and Mass Transfer [J], 2022, 138: 106381.
- [28] XU P, LI Q, XUAN Y. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2015, 80: 107-114.
- [29] MO D, YANG S, LUO J, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2020, 157: 119867.
- [30] LI J, FU W, ZHANG B, *et al.* ACS Nano [J], 2019, 13(12): 14080-14093.
- [31] GHEITAGHY A M, SAFFARI H, GHASIMI D, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2017, 113: 1097-1106.
- [32] GHEITAGHY A M, SAFFARI H, ZHANG G. Heat Transfer Engineering[J], 2018, 40(9/10): 762-771.
- [33] CAO Z, SUNDÉN B, WU Z. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2022, 196: 123272.
- [34] WANG Y, LUO J, HENG Y, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2018, 119: 333-342.
- [35] XU N, YU X, YU S, *et al.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects[J], 2022, 654: 130074.
- [36] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 表面技术[J], 2018, 47(3): 78-84.
PU Y S, WANG B Q, ZHANG L G. Surface Technology[J], 2018, 47(3): 78-84.
- [37] WONG K K, LEONG K C. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2018, 121: 46-63.
- [38] BIAN H, KURWITZ C, SUN Z, *et al.* Applied Thermal Engineering [J], 2018, 141: 422-434.
- [39] HAYES A, RAGHUPATHI P A, EMERY T S, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2019, 149: 1044-1051.

- [40] 李培, 钱波, 张池, 等. 粉末冶金工业[J], 2019, 29(4): 21–28.
LI P, QIAN B, ZHANG C, *et al.* Powder Metallurgy Industry[J], 2019, 29(4): 21–28.
- [41] WU T Q, LEE P S, MATHEW J, *et al.* Pool Boiling Heat Transfer Enhancement with Porous Fin Arrays Manufactured by Selective Laser Melting[C]//Proceedings of 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas: IEEE, 2019: 1107–1114.
- [42] LIN T, MA X, QUAN X, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2020, 153: 119622.
- [43] HUANG G, TANG K, YU S, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2022, 184: 122382.
- [44] LI H, LI R, ZHOU R, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2020, 147: 118962.
- [45] LU Z, LI C, HAN J, *et al.* Nature Communications[J], 2018, 9(1): 276.
- [46] NIKULIN A, GROSU Y, DAUVERGNE J L, *et al.* International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2023, 146: 106913.
- [47] 徐云浩, 王岚, 余森, 等. 热加工工艺[J], 2021, 50(10): 12–16+21.
XU Y H, WANG L, YU S, *et al.* Hot Working Technology[J], 2021, 50(10): 12–16+21.
- [48] TANG K, JIA M, ZHONG G, *et al.* International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2022, 138: 106339.
- [49] 冉令鸿, 郎中敏, 吴刚强, 等. 中国电机工程学报[J], 2022, 42(7): 2630–2638.
RAN L H, LANG Z M, WU G Q, *et al.* Proceedings of the CSEE[J], 2022, 42(7): 2630–2638.
- [50] SUDHAKAR S, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2019, 135: 1335–1345.
- [51] KHAN S A, SEZER N, ISMAIL S, *et al.* Energy Conversion and Management[J], 2019, 195: 1056–1066.
- [52] LI Q, LAN Z, CHUN J, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2021, 177: 121513.
- [53] HA M, GRAHAM S. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2019, 143: 118532.
- [54] MEHDIKHANI A, MOGHADASI H, SAFFARI H. International Journal of Mechanical Sciences[J], 2020, 187: 105924.
- [55] DENG D, WAN W, FENG J, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2016, 107: 420–430.
- [56] ZHANG S, TANG Y, ZENG J, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2016, 93: 1135–1144.
- [57] 胡柏松, 陈兴林, 张少峰, 等. 工程热物理学报[J], 2017, 38(12): 2725–2730.
HU B S, CHEN X L, ZHANG S F, *et al.* Journal of Engineering Thermophysics[J], 2017, 38(12): 2725–2730.
- [58] YUE S J, XU Z G. International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2023, 142: 106640.
- [59] HUANG C, WANG H, LICHTFOUSE E, *et al.* International Journal of Thermal Sciences[J], 2023, 183: 107856.
- [60] LEI Q, ZHANG D, FENG L, *et al.* Processes[J], 2023, 11(2): 617.
- [61] JADIDI M, PARAM H K, MAHMOUDI Y. International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2023, 208: 124006.
- [62] HABIBISHANDIZ M, SAGHIR M Z. Thermal Science and Engineering Progress[J], 2022, 30: 101267.
- [63] XU N, LIU Z, YU X, *et al.* Renewable & Sustainable Energy Reviews[J], 2024, 192: 114244.
- [64] ZHANG K, BAI L, YAO G, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2023, 209: 124116.
- [65] LIANG Y, HUANG H, YAN C, *et al.* International Communications in Heat and Mass Transfer[J], 2024, 152: 107320.
- [66] ZHANG Y, MA X, WANG J, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2023, 203: 123804.
- [67] ZHANG S, CHEN G, JIANG X, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2023, 219: 119513.
- [68] SHAH Y, KIM H G, CHOI W W, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2023, 213: 124270.
- [69] ZHOU L, LI W, MA T, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2018, 124: 210–219.
- [70] ZHANG Z, ZHAO R, LIU Z, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2021, 184: 116283.
- [71] ZHOU G, ZHOU J, HUAI X, *et al.* Applied Thermal Engineering[J], 2022, 210: 118289.
- [72] ABABNEH M, TARAUC, ANDERSON W G, *et al.* Hybrid Heat Pipes for Lunar and Martian Surface and High Heat Flux Space Applications[C]//Proceedings of 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna: ICES Steering Committee, 2016.
- [73] KIBUSHI R, YUKI K, UNNO N, *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer[J], 2021, 179: 121663.
- [74] JOSHI S N, DEDE E M. Applied Thermal Engineering[J], 2017, 110: 10–17.
- [75] LIM Y S, HUNG Y M. Energy Conversion and Management[J], 2021, 244: 114522.
- [76] ZHOU H, DAI C, LIU Y, *et al.* Journal of Power Sources[J], 2020, 473: 228545.
- [77] PAN M, HU M, WANG H. Applied Thermal Engineering[J], 2021, 190: 116827.
- [78] DU S, ZHANG Q, HOU P, *et al.* Sustainable Cities and Society[J], 2020, 53: 101894.
- [79] ZHANG Y, LONG E, ZHANG M. Materials Today: Proceedings[J], 2018, 5(7): 15004–15009.