中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 2309 ~ 2311
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

穿孔铜网表面强化喷雾冷却换热

胡雍炎[1], 刘修良[1], 杨荣贵[1,2*]

1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074
2. 北京大学力工学院能源与资源工程系, 北京 100871
* E-mail: ronggui@pku.edu.cn

1 研究背景

在人工智能、通信、国防及航空航天等领域, 设备功率密度不断提高, 使散热技术面临更严苛的挑战[1]. 喷雾冷却通过雾化的液滴撞击表面, 并依靠对流、液膜蒸发和核态沸腾共同作用实现冷却, 具有换热表面温度均匀、过热度低、所需工质流量小等优势, 被视为突破1 kW/cm^{2}级散热能力的潜在方案[2]. 然而, 早期的喷雾冷却换热强化多依赖提高流量和液滴速度, 换热仍以单相强制对流为主导, 难以同时提升换热系数(heat transfer coefficient, HTC)和临界热流密度(critical heat flux, CHF). 为提升HTC, 近年来很多研究转向构建微/纳结构表面以强化液膜蒸发与沸腾过程, 如翅片、纳米线及多孔金属结构等可增强润湿性、扩展三相接触线长度或提供更多成核位点[3]. 其中, 多孔金属结构因换热面积大、成核点丰富而表现出较好的HTC提升能力, 但普遍存在孔隙无序、汽泡排出受阻等问题, 易加剧汽液逆流现象, 限制了其高热流密度下的散热性能, 甚至导致传热的急剧恶化. 因此, 如何实现快速供液、强化相变传热与低阻汽泡排出的协同优化, 已成为发展高功率喷雾冷却的关键科学问题.

基于上述关键问题, 作者团队围绕利用结构表面强化喷雾冷却开展了一系列研究. 在前期工作中, 通过引入多层铜网结构表面, 显著降低了喷雾冷却的核态沸腾起始温度, 并有效提升了HTC. 然而, 他们发现, 无序堆叠的铜网在高热流密度下易导致严重的汽液逆流, 从而引发换热恶化. 针对这一问题, 本团队系统分析了铜网结构参数与喷雾流量对汽液逆流行为的协同影响机理, 为不同喷雾工况下的表面结构优化提供了设计依据[4]. 为突破高热流阶段的汽液逆流瓶颈, 团队随后采用3D打印与模板辅助电沉积相结合的工艺制造了3D有序微纳多级结构. 该结构通过引入高度有序的孔隙加快了液滴浸润过程, 并降低了汽泡排出阻力. 同时利用微沟槽与纳米孔的协同作用强化成核与蒸发过程, 从而获得了高达1273 W/cm^{2}的超高CHF以及443.7 kW/(m^2 K)的HTC, 达到目前喷雾冷却领域的领先水平[5]. 然而, 此类3D打印-电沉积复合制备技术的流程复杂、成本较高, 难以满足大面积制备和工程化应用的要求. 基于上述研究积累, 为进一步在保持优异传热性能的同时简化制备工艺、降低成本, 本文提出在多层铜网表面采用激光打孔技术构建穿孔结构. 该结构设计在保留铜网丰富成核位点和良好毛细吸液能力的前提下, 通过定向穿孔形成低阻力汽泡排出通道, 从而有效分离汽液路径, 从结构层面为抑制汽液逆流、强化换热提供了新的可行途径.

2 本文工作

本文围绕穿孔铜网表面的喷雾冷却强化传热展开研究, 结合结构设计、实验测量与机理分析, 系统探讨了穿孔参数、汽液输运特性及其对换热性能的影响.

英文全文见: Hu Y Y, Liu X L, Yang R G. Enhanced spray cooling on patterned perforated micromesh surface. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1420101, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2885-9

© 2026《中国科学》杂志社

如图1(a)所示，采用激光打孔与热扩散键合技术制造的多层穿孔铜网表面旨在维持稳定薄液膜的同时降低汽泡排出阻力, 进而促进核态沸腾并延缓换热恶化. 该结构中，多层铜网提供了丰富的微孔以维持液膜并促进汽泡成核，而有序排列的穿孔则作为主通道，在核态沸腾主导的工况下(图1(b))，能够有效引导汽泡迅速排出，缓解无序多孔结构中常见的汽泡合并阻塞的问题(图1(c))．这一设计实现了液体补给路径与汽泡排出路径的空间分离，显著降低了局部干涸与过热风险(图1(d)~(e))，使得换热系数在较宽的热流范围内保持在较高水平. 实验结果表明, 穿孔铜网结构在中高热流密度区域的换热性能显著优于未穿孔的普通铜网．同时，穿孔几何参数对整体换热性能具有决定性影响. 本文系统评估了不同孔径与孔间距的穿孔铜网对换热性能的影响. 结果表明, 增大穿孔直径和缩小穿孔间距有助于促进汽液协同输运，但也会减少有效沸腾面积, 从而导致换热性能下降．在四层200目铜网中，当穿孔直径为500 μm、孔中心距为950 μm时，蒸汽排出效率与有效沸腾面积达到最优平衡，获得了最佳综合性能: CHF达到1222 W/cm^2, HTC达到365.2 kW/(m^2 K), 较均匀铜网分别提升42%和68%．进一步的实验表征显示, 多层铜网表面的渗透率具有明显的各向异性，对蒸汽的排出路径有重要影响．排汽阻力分析表明，当铜网厚度与平均汽泡运动距离的比值大于垂直面内与平行面内方向渗透率之比时，穿孔铜网能有效实现汽液路径分离．当穿孔参数刚好满足这一条件时，穿孔铜网可以既可维持足够的液膜沸腾面积，又能够引导汽泡主要从穿孔处排出, 从而获得最优的换热性能.

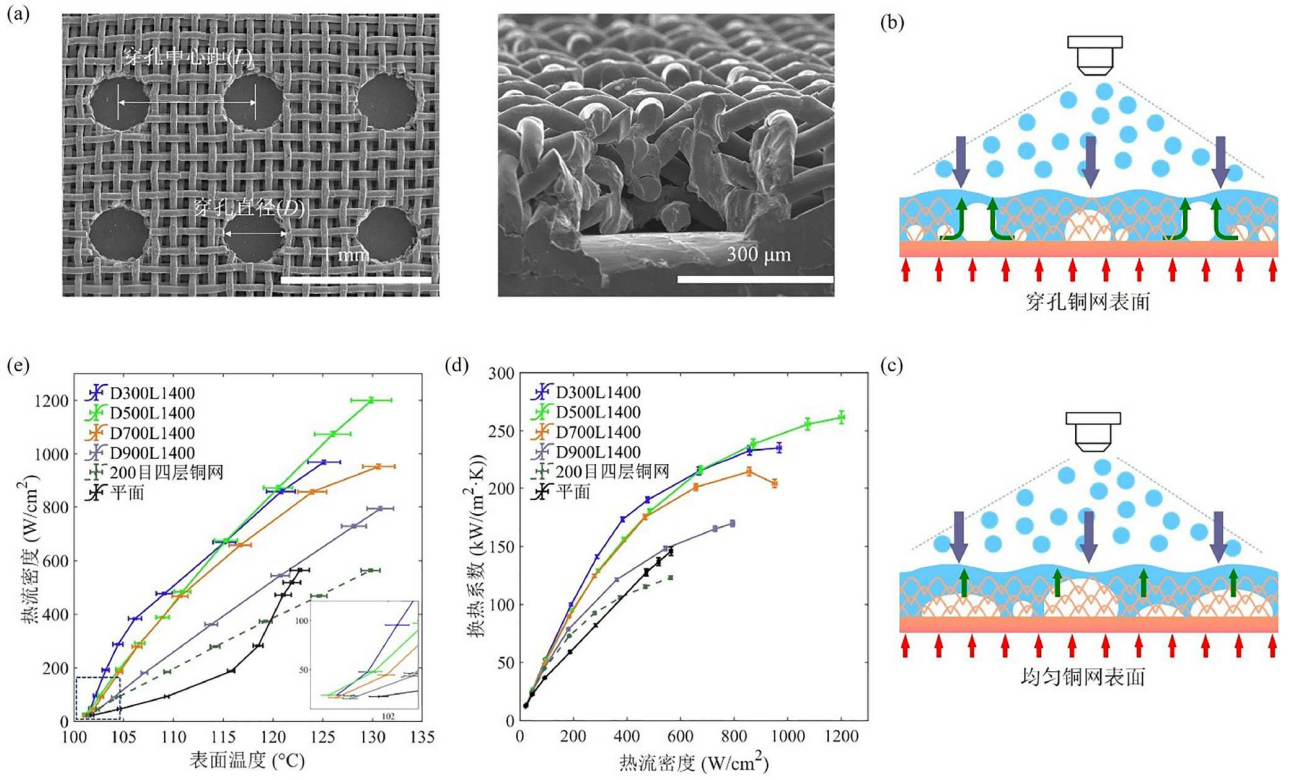


图 1　(网络版彩图) (a) 穿孔多层铜网表面的SEM图(左图: 俯视图; 右图: 穿孔处截面图); (b) 穿孔铜网表面的喷雾冷却过程示意图; (c) 均匀铜网表面的喷雾冷却过程示意图; (d), (e) 不同穿孔直径但穿孔中心距相同的穿孔铜网表面的换热系数曲线和热流密度曲线

Figure 1　(Color online) (a) SEM images of the perforated multilayer copper micromesh surface (left: top view; right: cross-sectional view of the perforation site); (b) schematic of the spray cooling process for perforated micromesh surface; (c) schematic of the spray cooling process for uniform micromesh surface; (d), (e) heat transfer coefficient curves and heat flux curves for perforated micromesh surfaces with varying perforation diameters but the same perforation center distance.

3 本文结论

本文提出的穿孔铜网结构在喷雾冷却中展现出优异的传热性能, 并具备加工简便、成本低廉及易于规模化制备等工程优势. 该结构在保持普通铜网良好毛细输运能力的基础上, 通过引入穿孔构建了低阻排汽通道, 促进了汽泡的快速脱离, 抑制了汽泡阻塞与局部干涸; 同时依靠铜网微结构维持薄液膜, 保障持续液膜沸腾. 增大穿孔直径和减小穿孔间距虽有助于汽泡排出, 却会减小有效沸腾面积. 对此, 本文给出了穿孔参数的设计方法, 即当铜网厚度与平均汽泡运动距离的比值恰好大于垂直面内与平行面内方向渗透率之比, 可实现有效汽液分离, 并达到蒸汽排出效率与有效沸腾面积的最优平衡.

参考文献

1 Kandlikar S G, Bapat A V. Evaluation of jet impingement, spray and microchannel chip cooling options for high heat flux removal. Heat Transfer Eng, 2007, 28: 911–923

2 Kim J. Spray cooling heat transfer: The state of the art. Int J Heat Fluid Flow, 2007, 28: 753–767

3 Liu X, Yang J, Zou Q, et al. Enhancing liquid-vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces. ACS Nano, 2025, 19: 9513–9589

4 Hu Y, Lei Y, Liu X, et al. Heat transfer enhancement of spray cooling by copper micromesh surface. Mater Today Phys, 2022, 28: 100857

5 Hu Y, Lei Y, Liu X, et al. Record-high heat transfer performance of spray cooling on 3D-printed hierarchical micro/nano-structured surface. Sci Bull, 2024, 70: 223–231