

数据中心浸没式液冷表面结构强化沸腾传热的研究进展

刘腾庆, 林浩鹏, 陈应周, 何小鹏, 向鸿飞, 张尧康*

广东海洋大学海洋工程与能源学院, 广东 湛江

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年4月7日; 发布日期: 2026年6月9日

摘要

表面结构的形貌和性质对沸腾传热的强化作用是提升数据中心两相浸没式液冷散热效率的关键。本文系统总结了铜、铝表面通过表面结构优化设计与改性技术, 如构建微纳结构、调控润湿性及制备多孔涂层等, 以强化沸腾传热的研究进展。重点分析了不同结构表面在去离子水、电子氟化液等工质中的作用机制与沸腾传热性能表现。研究表明, 表面结构与工质物性的匹配是提升临界热通量与传热系数的核心, 对于铜表面, 多层铜网与烧结多孔涂层实现沸腾传热性能的显著提升, 对于铝表面, 激光织构与微孔涂层在特定条件下可媲美甚至超越铜的性能。最后结合表面结构优化设计与改性的技术瓶颈, 展望了表面结构设计和改性, 以及强化沸腾传热机理的未来研究方向, 为设计面向数据中心冷却的高效、可靠的两相浸没式液冷表面结构提供参考。

关键词

两相浸没式液冷, 表面结构, 沸腾传热, 数据中心冷却

Research Progress on Enhanced Boiling Heat Transfer through Surface Structure Modification in Immersion Liquid Cooling for Data Centers

Tengqing Liu, Haopeng Lin, Yingzhou Chen, Xiaopeng He, Hongfei Xiang, Yaokang Zhang*

College of Ocean Engineering and Energy, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: March 27, 2026; accepted: April 7, 2026; published: June 9, 2026

*通讯作者。

文章引用: 刘腾庆, 林浩鹏, 陈应周, 何小鹏, 向鸿飞, 张尧康. 数据中心浸没式液冷表面结构强化沸腾传热的研究进展[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(3): 204-213. DOI: 10.12677/aepe.2026.143021

Abstract

The morphology and properties of surface structures play a critical role in enhancing boiling heat transfer, serving as a key factor in improving the heat dissipation efficiency of two-phase immersion liquid cooling for data centers. This paper systematically reviews the research progress in enhancing boiling heat transfer through the optimized design and modification techniques of copper and aluminum surfaces, such as constructing micro/nano structures, regulating wettability, and preparing porous coatings. The analysis focuses on the mechanisms and boiling heat transfer performance of different structured surfaces in working fluids such as deionized water and electronic fluorinated liquids. Research indicates that the compatibility between surface structures and the physical properties of the working fluid is essential for enhancing the critical heat flux and heat transfer coefficient. For copper surfaces, multilayer copper mesh and sintered porous coatings have achieved significant improvements in boiling heat transfer performance. For aluminum surfaces, laser texturing and microporous coatings can achieve performance comparable to or even surpassing that of copper under specific conditions. Finally, considering the technical bottlenecks in the optimized design and modification of surface structures, this paper discusses future research directions for surface structure design and modification, as well as the mechanisms underlying enhanced boiling heat transfer, providing a reference for designing efficient and reliable surface structures for two-phase immersion liquid cooling in data center cooling applications.

Keywords

Two-Phase Immersion Liquid Cooling, Surface Structure, Boiling Heat Transfer, Data Center Cooling

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. 引言

在全球能源消耗持续攀升与电子设备热流密度急剧增长的背景下,开发高效、节能的散热技术已成为数据中心及相关高功耗电子设备冷却领域的迫切需求。两相浸没式液冷技术作为一种新兴的直接接触式散热方案,通过将发热元件浸没于绝缘工质中并利用液体汽化相变吸收热量,展现出远高于传统风冷的传热效率和温度均匀性,成为实现绿色低碳数据中心的关键路径之一。

沸腾传热作为两相浸没式液冷的核心过程,其传热性能直接决定了系统散热能力与能效水平。表面结构设计和改性技术通过调控固体表面的宏观结构、微观结构与润湿性,能够有效促进气泡成核、增强气泡脱离频率、优化液体补充路径,从而显著提升临界热通量(Critical Heat Flux, CHF)与沸腾传热系数(Heat Transfer Coefficient, HTC),被视为强化沸腾传热最具潜力的手段之一。近年来,以铜、铝为代表的金属表面结构设计与改性研究不断深入,通过构建微纳复合结构(Micro-nano Composite Structures)、实施润湿性调控(Wettability Modification)、制备多孔涂层(Porous Coatings)等方法,实现了去离子水、电子氟化液等不同工质在金属表面结构上沸腾传热性能的提升。

目前,常用于强化沸腾传热的表面结构设计与改性技术的制备方法主要包括激光织构(Laser Texturing)、电化学沉积(Electrochemical Deposition)、喷砂处理(Sandblasting)、烧结涂层(Sintered Coating)等。其中,激光加工因其精度高、可控性强而备受关注;而化学改性则通过引入亲/疏水官能团或纳米结构,有

效调节表面能状态,进一步优化气液界面行为。在工质方面,电子氟化液(如 HFE-7200、Novec-7100、FC-72 等)因其高绝缘性和适宜的沸点,广泛应用于直接浸没冷却场景,而去离子水则凭借高热潜力和低成本,在液冷系统中仍占重要地位,不同工质与表面结构的适配性成为当前研究的热点与难点。

尽管表面结构设计与改性技术在实验室阶段已取得显著进展,但在实际工程应用中仍面临结构稳定性、工艺复杂性、成本控制及长期抗污染能力等多重挑战。因此,探索兼具高效、经济与耐用的表面改性方法,已成为当前研究的重点方向。基于此,本文系统梳理了近年来经优化设计和改性处理后的铜、铝等金属表面强化沸腾传热的研究进展,工质为在去离子水与电子氟化液,重点分析了不同表面结构对沸腾传热性能的影响机制,比较了多种金属表面结构在不同工质中的适用性,旨在为数据中心两相浸没式液冷系统中表面结构的设计优化与改性,以及工程应用提供理论依据与技术参考。

2. 表面结构优化设计与改性技术

表面结构优化设计与改性是强化沸腾传热最直接有效的策略之一,其核心在于通过物理或化学手段调控表面的宏观结构、微观形貌与润湿性,从而优化气泡成核、生长和脱离的动态过程。理想的沸腾表面应能提供大量稳定的气化核心,促进气泡快速脱离以减少热阻,并保障液体及时回流以防止干涸。本节将系统梳理铜和铝两种主流散热金属在不同工质沸腾传热下的表面结构优化设计与改性技术,分析其强化沸腾传热机理与应用效果。

2.1. 铜表面结构

铜因其卓越的导热系数和成熟的加工工艺,成为浸没式液冷系统中散热表面的首选材料。其表面结构的研究集中于构建多尺度微纳结构与精准调控表面润湿性,以应对不同工质的沸腾特性。

2.1.1. 铜 - 去离子水

在以去离子水为工质的铜表面沸腾传热研究中,表面结构设计与润湿性调控被证明是提升沸腾传热性能的关键路径。研究表明,构建多尺度复合结构能够有效协同增强气泡成核与液体补充过程。多层多孔结构通过提供稳定的气化核心与液体回流通道实现持续高效换热,其中安逸等[1] (图 1(a))开发五层亲水铜网,将换热系数提升至光滑表面的 2.10 倍,揭示了层间毛细力对气泡脱离频率的促进作用。值得注意的是,这种增强效应在中高热流密度下尤为显著,说明多孔层级结构能够有效延缓蒸汽膜形成,推迟沸腾危机。

表面润湿性调控与微观结构设计的结合被证明是优化沸腾行为的有效策略。Liu 等[2] (图 1(b))通过化学氧化法构建的纳米棒-纳米花复合结构,将超亲水表面(接触角 8.9°)的临界热通量(CHF)和传热系数(HTC)分别提升至未处理表面的 1.16 与 1.59 倍。这种增强归因于纳米结构提供的密集成核位点与亲水表面促进的液体铺展效应。类似地,Rakesh 等[3] (图 1(c))采用电火花加工纹理化与表面活性剂协同策略,通过微凹坑结构与润湿性改良的耦合作用,使换热系数提升达 50%,证明了表面化学特性与物理结构对沸腾性能的协同影响。

先进宏观结构设计为沸腾传热强化提供了新思路。Meng 等[4] (图 1(d))开发的仿叶脉双回流通道结构,通过异质导热分区实现了气液路径的空间分离,使六通道样品的 CHF 和 HTC 分别提升 121%和 200%。这种设计巧妙地模拟了自然界中的高效运输系统,为解决高热流密度下气液交互干扰问题提供了创新方案。Wang 等[5] (图 1(e))则通过氢气泡模板电沉积构建了具有微米孔与纳米枝晶的双孔结构,将气泡生长周期缩短至 20 ms 以内,换热系数达光滑表面的 4.8 倍,表明多级孔道结构对气泡动力学的优化效果。

特殊润湿性表面在特定应用场景中展现出独特优势。Gaspar 等[6] (图 1(f))利用纳秒激光制备的超疏

水铜表面(接触角 162°)不仅改善了传热性能,还显著提升了抗垢能力,为长期稳定运行提供了保障。Liu 等[7] (图 1(g))系统比较了超亲水、疏水、超疏水及双亲性表面的沸腾特性,发现超疏水柱状结构性能最优,其临界热通量较原始平面提升 72.34%,换热系数峰值达 $246.21 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,证明在三维结构上耦合超疏水改性可协同提升成核点密度与气泡脱离频率。

然而,微纳结构表面在特定条件下的局限性也不容忽视。崔文彬等[8] (图 1(h))研究表明,虽然微纳结构表面在低热流密度下因气泡尺寸小、脱离频率高而优于光滑表面,但在高热流密度下气泡聚合现象严重,性能反而下降,提示在实际应用中需根据热负荷特性优化结构参数。

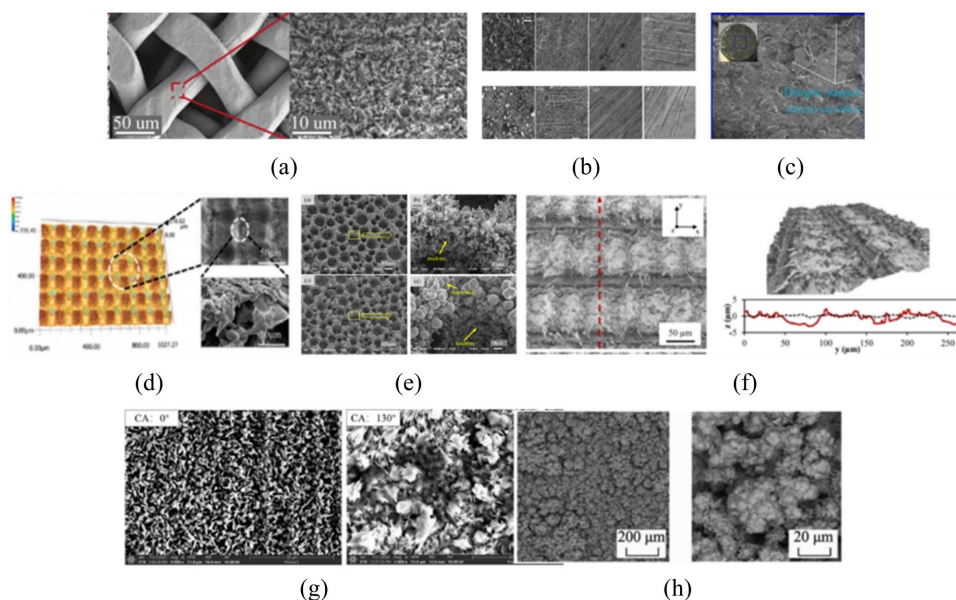


Figure 1. Copper surface structure: (a) Super-hydrophilic copper mesh [1]; (b) Super-hydrophilic surface by alkaline-assisted oxidation [2]; (c) Electrical discharge machining textured copper surfaces [3]; (d) Venation-inspired leaf vein return flow path [4]; (e) Micro nano bi-porous copper surface structure [5]; (f) Laser-induced copper superhydrophobic surface [6]; (g) Super-hydrophilic, hydrophobic, superhydrophobic and hybrid biphilic surface [7]; (h) Micro nano structure copper surface [8]

图 1. 铜表面结构: (a) 超亲水铜网[1]; (b) 碱性辅助氧化超亲水表面[2]; (c) 电火花纹理化铜表面[3]; (d) 仿叶脉双回流通道[4]; (e) 微米孔与纳米枝晶的双孔结构[5]; (f) 激光制备超疏水铜表面[6]; (g) 超亲水、疏水、超疏水及双亲性表面[7]; (h) 微纳结构铜表面[8]

综上所述,以去离子水为工质的铜表面改性已从单一结构设计发展为多尺度的复杂系统优化,通过微纳复合结构、润湿性调控与先进流道设计的有机结合,实现了沸腾传热的显著强化。

2.1.2. 铜 - 电子氟化液

电子氟化液因其优异的绝缘性能和适宜的沸点特性,成为数据中心浸没式液冷的理想工质,但其低表面张力、低潜热的物理特性也对表面改性策略提出了特殊要求。研究表明,微米级结构在电子氟化液中的性能普遍优于纳米结构,这与工质的物性密切相关。Tang 等[9] (图 2(a))系统比较了纳米结构(超疏水、亲疏水混合)与微米结构(铜网、铜泡沫)对 Novec-7100 沸腾性能的影响,发现 150 目和 250 目铜网分别使传热系数提升 37.14%和 61.90%,临界热通量提升 65.23%和 43.37%,而纳米结构的增强效果相对有限。这种差异主要源于电子氟化液的低表面张力削弱了纳米结构对润湿性的调控能力,而微米结构则通过毛细作用强化了液体补充。

多孔泡沫结构的优化设计对电子氟化液沸腾性能具有决定性影响。Li 等[10] (图 2(b))研究发现,无通道泡沫铜在低热通量($<179 \text{ kW}/\text{m}^2$)下传热增强达 2.2 倍,但在高热通量下因气泡逃逸阻力增大导致性能恶

化；而引入圆形通道的泡沫铜在全热通量范围内均实现传热增强，最高提升 2.4 倍，说明合理的流道设计对缓解气泡阻塞具有关键作用。类似地，Yao 等[11] (图 2(c))通过磁控溅射对泡沫铜骨架进行表面改性，优化后的样品传热系数和临界热通量分别提升 75.6%和 17.3%，装配于热管蒸发器后传热系数提升 144.3%~333.4%，证明了表面化学特性与三维多孔结构协同增强的潜力。

烧结多孔涂层在降低沸腾起始过热度方面表现突出。Dang 等[12] (图 2(d))开发的烧结铜粉多孔涂层使 R245fa 的起始沸腾过热度低于 7°C (远低于普通铜表面的 30°C)，传热系数最大提升 151%，临界热通量提升 160%。值得注意的是，纳米处理对烧结多孔表面的增强效果受颗粒尺寸与热流区域共同影响，说明多孔结构与表面化学的匹配需根据具体应用条件优化。

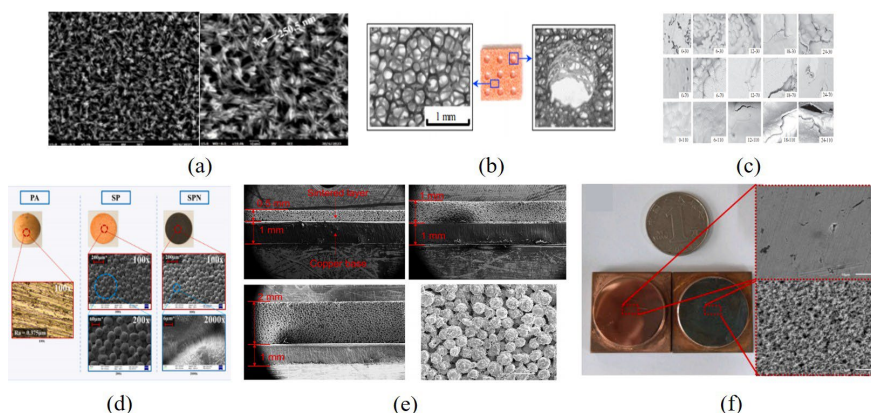


Figure 2. Copper surface structure: (a) Nano/micro structured surfaces [9]; (b) Copper foam with circular-shaped channels [10]; (c) Deposit ZnO coating on copper foam [11]; (d) Sintered copper powder coatings with nanostructure [12]; (e) Graphene coated sintered porous copper [13]; (f) Nanowire array copper substrate [14]

图 2. 铜表面结构: (a) 纳米/微米结构表面[9]; (b) 圆形通道泡沫铜[10]; (c) 氧化锌溅射改性泡沫铜[11]; (d) 具有纳米结构的烧结铜粉涂层[12]; (e) 烧结多孔铜涂层石墨烯[13]; (f) 铜纳米线阵列[14]

表面涂层技术为电子氟化液沸腾传热强化提供了多样化解决方案。Guler 等[13] (图 2(e))在烧结多孔铜表面涂覆石墨烯，用于 HFE-7100 流动沸腾，在 13.2 W/cm² 高热流密度下仍能保持稳定表面温度，展现了二维材料在电子冷却中的应用前景。Du 等[14] (图 2(f))则通过电沉积法制备铜纳米线阵列，使氟化液 TUW-52 在过冷状态下的传热系数提升 47.16%，这种增强主要源于气泡脱离过程的优化(脱离频率提高、气泡尺寸减小至 0.1~0.35 mm)与表面再润湿能力的强化。

工质特性与表面设计的匹配性是实现最优性能的关键。EL-Genk 等[15]研究了 HFE-7100 在不同倾角铜表面的沸腾特性，发现向上表面($\theta = 0^\circ$)在高热通量下性能最佳，临界热通量达 24.4 W/cm²，而垂直表面($\theta = 90^\circ$)在低热流下因增强混合而表现更好，提示表面取向设计需考虑热负载分布。Zhou 等[16]进一步研究了沸腾态氟化液在电场中的介电性能，发现气泡会扭曲电场分布、形成介电薄弱点，当工作条件接近起始沸腾点时，击穿电压显著降低，这对浸没式液冷系统的电气安全设计具有重要指导意义。

综上所述，针对电子氟化液的物性特点，微米级多孔结构结合表面化学改性是最有效的强化策略，其中铜网、铜泡沫及其复合结构强化沸腾传热性能的表现优异。

2.2. 铝表面结构

铝材料因轻质、导热性好、耐腐蚀、成本低，在浸没式液冷系统，特别是对重量和成本敏感的大规模应用场景中成为铜的替代材料。铝表面改性研究侧重通过结构加工与功能涂层弥补本征导热系数不足，利用化学活性调控表面润湿性。

2.2.1. 铝 - 去离子水

铝表面在去离子水中的沸腾传热研究主要集中在润湿性调控与表面纹理化两方面, 其低成本与轻质特性使其在大型冷却系统中具有应用优势。表面润湿性对铝表面沸腾行为的影响尤为显著。Yang 等[17] (图 3(a))通过系统实验发现, 亲水铝表面具有最高的临界热通量(914 kW/m^2), 而疏水表面最低(603 kW/m^2)。亲水表面气泡数量少、液体接触面积大, 有效延缓了蒸汽膜的形成; 而疏水表面气泡密集甚至形成连续蒸汽膜, 严重阻碍传热。这一结果明确了在高热流应用中优先选择亲水表面的必要性。微纳复合结构通过增加比表面积与成核位点密度显著增强沸腾传热。其对比了微/纳米颗粒改性铝表面的沸腾性能, 发现改性表面不仅提高了临界热通量, 还显著降低了起始沸腾过热度, 这种增强在低过热度区域尤为明显, 说明微纳结构有效降低了成核能垒。

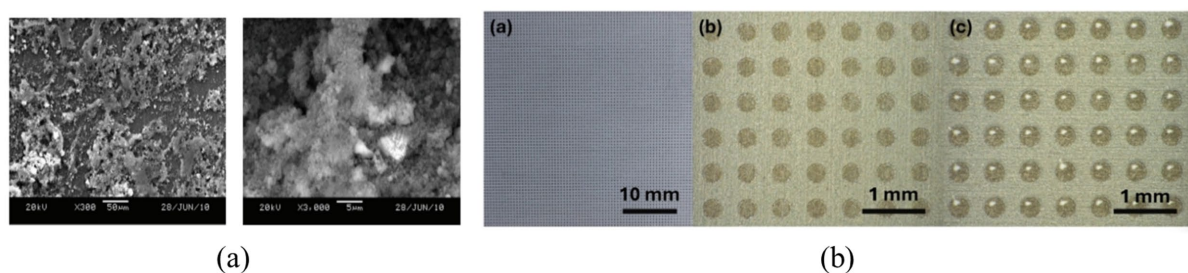


Figure 3. Aluminum surface structure: (a) Hydrophobic/hydrophilic surface [17]; (b) Laser texturing and chemical treatments for superhydrophilic patterns on superhydrophobic aluminum surface [18]

图 3. 铝表面结构: (a) 疏水/亲水表面[17]; (b) 激光结构与化学处理超疏水铝表面上超亲水点阵图案[18]

激光纹理化技术为铝表面精密结构加工提供了高效解决方案。Bappy 等[18] (图 3(b))开发了一种环保、高效的激光结构与化学处理组合工艺, 成功实现了直径为 $300 \mu\text{m}$ 、间隔为 $250 \mu\text{m}$ 的超亲水点阵图案, 密度达 333 点/cm^2 。研究表明, 激光速度越慢(能量输入越高), 水滴铺展越快, 超亲水性能越好, 这种精确的润湿性图案化控制为设计局部差异润湿性表面奠定了基础。更重要的是, 液滴被超疏水屏障有效分隔, 实现了对沸腾位置的定点控制, 为优化气泡行为提供了新思路。

综上所述, 铝表面在去离子水中的沸腾性能优化主要依赖于亲水化处理与微结构设计的结合, 其中激光纹理化技术与润湿性图案化控制展现出良好的应用前景。

2.2.2. 铝 - 电子氟化液

铝表面在电子氟化液中的沸腾传热研究侧重于表面粗糙度与微结构涂层的优化, 以适应低表面张力工质的特性。表面粗糙度对电子氟化液沸腾行为的影响机制与去离子水中存在显著差异。Tran 等[19] (图 4(a))通过系统的实验与可视化分析发现, 喷砂粗糙表面的传热性能优于机械加工表面, 且随着粗糙度增加, 传热系数提高, 壁面过热度降低。喷砂表面具有更多、更深的空穴, 促进了气泡成核和脱离, 同时, 表面倾角对沸腾性能的影响也十分显著: 90° 倾斜表面在低热通量下传热性能略优于 0° , 而 180° 倾斜表面在高热通量下因气泡积聚形成蒸汽膜而显著恶化传热。

微结构表面设计在铝表面电子氟化液沸腾中展现出强大潜力。Jiang 等[20] (图 4(b))研究表明, 铝基微结构表面(尤其是微沟槽表面)的气泡密度高、尺寸小、脱离频率快, 有效增强沸腾传热, 其临界热通量显著高于光滑表面, 且随压力升高而增强。微结构表面的传热系数远高于光滑表面, 微沟槽表面表现最佳, 压力升高对所有表面的临界热通量和传热系数均有增强作用, 微结构表面的增强效果更显著。这种压力依赖性为变工况应用提供了设计依据。

涂层结构优化是提升铝表面沸腾性能的另一重要途径。Mudhafar 等[21] (图 4(c))系统研究了微孔铝

保持综合性能优势，特别是在复杂结构加工方面。Manetti 等[23] (图 5(b))系统研究的镍和铜金属泡沫在 HFE-7100 中的性能表明确保了铜泡沫在所有热通量下的优越性，镍泡沫在高温通量下因气阻增大而性能下降，同时泡沫表面的气泡直径大于光滑表面，表明材料选择对多孔结构中的气相运输效率具有重要影响。

铝材料在电子氟化液中通过针对性结构设计可发挥其独特优势。微孔铝涂层在 FC-72 中使传热系数达铜光面的 2.4 倍，展现了铝表面在特定涂层结构下的竞争力。Orlova 等[24] (图 5(c))的研究也表明，铝表面通过激光纹理化可获得与铜表面相当的沸腾性能，特别是在微翅片结构设计中，铝合金表现优异，说明表面结构设计可弥补材料本征特性的不足。

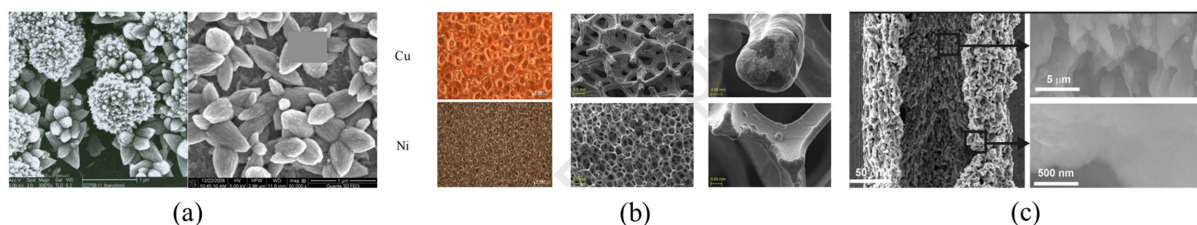


Figure 5. Surface structure comparison: (a) ZnO nanostructured surfaces on aluminum and copper [22]; (b) Metal foam surface [23]; (c) Laser-textured metal surfaces [24]

图 5. 表面结构对比: (a) 铝和铜上的氧化锌纳米结构表面[22]; (b) 泡沫金属表面[23]; (c) 激光纹理化金属表面[24]

综上所述，在电子氟化液工质中，铜材料在复杂结构制造与综合性能方面仍占优势，但铝材料通过优化的表面改性可在特定条件下实现更具竞争力的性能成本比。

4. 总结与展望

本文系统综述了当前数据中心浸没式液冷技术中，针对铜、铝两种核心散热金属的表面结构优化设计和改性研究进展，探讨了在不同工质(如去离子水、电子氟化液)中，各类微纳结构与润湿性调控策略对沸腾传热性能(包括临界热通量 CHF 与沸腾传热系数 HTC)的强化机理与效果，并剖析了各类技术路径面临的瓶颈与挑战。总结如下，表面结构与改性通过精准调控气泡成核、生长与脱离动力学，是突破相变传热极限的关键，铜表面凭借其高导热性，通过构建多层铜网、微纳复合及仿生流道等结构，在水与电子氟化液中均能实现传热性能的显著提升，而铝表面则通过激光纹理化、微孔涂层等针对性设计，在特定条件下可媲美甚至超越铜的性能，同时展现出成本与轻量化优势。此外，表面结构与改性策略必须与工质物性紧密匹配。

尽管表面结构与改性技术已展现出巨大的性能提升潜力，但在数据中心两相浸没式液冷的工程应用过程中，仍面临改性工艺的经济性、环保性、复杂结构在长期相变工况下的机械与化学稳定性等一系列挑战。为此，本文提出以下几点未来研究展望：(1) 开发绿色、低能耗、低成本的复合表面改性工艺，设计兼具高效沸腾、抗结垢、抗腐蚀乃至自修复功能的多功能表面。(2) 加强从微观纳米结构到宏观流道设计的多尺度协同优化设计，探索 3D 打印技术在制备具有复杂内部流道(如仿生叶脉)的一体化散热器方面的应用潜力。(3) 研究电子氟化液等电绝缘工质在新型表面结构上的沸腾传热特性以及强化沸腾传热机理，采用基于机器学习的表面结构逆向设计方法，以实现特定工质沸腾性能的主动优化。

基金项目

广东省基础与应用基础研究基金项目(2026A1515011178)、广东海洋大学教育教学改革项目(PX-

972024037)、广东海洋大学大学生创新创业训练计划项目(CXXL2025091 和 CXXL2025086)。

参考文献

- [1] 安逸, 王誉凯, 黄丛亮. 表面亲疏水性改性多层铜网的池沸腾换热特性研究[J]. 热科学与技术, 2025, 24(2): 168-173.
- [2] Liu, K., Gan, H., Wen, Y., He, W., Liu, C. and Zhao, J. (2024) Experimental Investigation on the Boiling Heat Transfer Characteristic of Copper Surfaces with Different Hydrophilicity. *Thermal Science and Engineering Progress*, **51**, Article 102631. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102631>
- [3] Rakesh, A., Inbaoli, A. and Sujith Kumar, C.S. (2025) Experimental Investigation on Effects of Surface Texturing and Surfactant on Pool Boiling Performance of a Vertically Downward-Faced Copper Surface. *Thermal Science and Engineering Progress*, **62**, Article 103676. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103676>
- [4] Meng, L., Zhang, J., Xu, L., Zhu, H., Wang, S., Han, S., et al. (2026) Experimental Study and Mechanistic Analysis of Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on Surfaces with Heterogeneous Thermal Conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **255**, Article 127756. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127756>
- [5] Wang, Y.Q., Luo, J.L., Heng, Y., Mo, D.C. and Lyu, S.S. (2018) Wettability Modification to Further Enhance the Pool Boiling Performance of the Micro Nano Bi-Porous Copper Surface Structure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **119**, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.080>
- [6] Gaspar, G., Salvador, M.A., Pereira, M.J., Carvalho, A.F., Amaral, V.S., Tedim, J., et al. (2025) Laser-Induced Copper Superhydrophobicity to Improve Heat Transfer and Reduce Limestone Deposition in Water Heating Systems. *Applied Surface Science*, **691**, Article 162614. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162614>
- [7] Liu, S., Chen, J., Ji, W., Tong, Z., Fu, Y., Qian, N., et al. (2024) Analysis of Pool Boiling Heat Transfer Characteristics on Copper-Based Structured Surfaces Modified with Superhydrophilic, Hydrophobic, Superhydrophobic and Hybrid Biphilic Properties. *Case Studies in Thermal Engineering*, **61**, Article 105044. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105044>
- [8] 崔文彬, 王茂州, 欧阳志豪, 苏凤民, 吴桂涛. 微纳结构铜表面低液位池沸腾实验研究[J]. 热科学与技术, 2021, 20(1): 14-21.
- [9] Tang, Y.Q., Hu, X.J., Wang, Z.J., Sun, C.H., Fang, W.Z., and Tao, W.Q. (2025) Enhanced Pool Boiling of Novec-7100 Using Nano/Micro Structured Surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **250**, Article 127320. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127320>
- [10] Li, T., Wu, X. and Ma, Q. (2019) Pool Boiling Heat Transfer of R141b on Surfaces Covered Copper Foam with Circular-Shaped Channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **105**, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.03.015>
- [11] Yao, H., Zhou, C., Li, Y., Liu, H., Wang, Y., Wang, X., et al. (2023) Modification and Pool Boiling Performance Elevation of Copper Foam Wicks for High Power Applications. *Applied Thermal Engineering*, **220**, Article 119788. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119788>
- [12] Dang, C., Min, R., Pan, L., Yin, L., Zhang, Z. and Hu, Y. (2023) Saturated Pool Boiling Heat Transfer Enhancement of R245fa Based on the Surface Covered by Sintered Copper Powder with and without Nanostructure. *International Journal of Thermal Sciences*, **187**, Article 108183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108183>
- [13] Guler, T., Ahmadi, V.E., Alagozoglul, I., Amin, S., Apak, A.M., Apak, A., et al. (2025) Flow Boiling of HFE-7100 over Graphene Coated Sintered Porous Copper Surfaces in a Minichannel. *Results in Engineering*, **26**, Article 104653. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104653>
- [14] Du, H., Liang, X., Yang, W., Vujanović, M., Wang, J. and He, Y. (2025) Effect of Surface Modification with Copper Nanowire Arrays on Nucleate Boiling in a Liquid Cooler. *Energy*, **335**, Article 138168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138168>
- [15] El-Genk, M.S. and Bostanci, H. (2003) Saturation Boiling of HFE-7100 from a Copper Surface, Simulating a Microelectronic Chip. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 1841-1854. [https://doi.org/10.1016/s0017-9310\(02\)00489-1](https://doi.org/10.1016/s0017-9310(02)00489-1)
- [16] Zhou, Z., Hong, S., Wu, Z., Qiu, Q. and Sheng, K. (2025) Effects of Thermally Induced Bubbles on the Dielectric Performance of Fluorinated Liquid under Intense Electric Field. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **167**, Article 109283. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109283>
- [17] Yang, C.T. and Yu, C.C. (2013) Pool Boiling of Micro-/Nanoparticles Modified Aluminum Surface. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2013**, Article ID: 258241. <https://doi.org/10.1155/2013/258241>
- [18] Bappy, M.I., Malik, M.S. and Chun, D. (2025) Laser Texturing and Non-Hazardous Chemical Treatments for High-

- Throughput Droplet Microarrays with Precise Superhydrophilic Patterns on Superhydrophobic Aluminum Surface. *Journal of Alloys and Compounds*, **1016**, Article 178945. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178945>
- [19] Tran, N., Sajjad, U., Lin, R. and Wang, C. (2020) Effects of Surface Inclination and Type of Surface Roughness on the Nucleate Boiling Heat Transfer Performance of HFE-7200 Dielectric Fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **147**, Article 119015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119015>
- [20] Jiang, Z., Bu, S., Yang, X., Liu, F., Sun, Z., Duan, K., *et al.* (2025) Saturated Pool Boiling Heat Transfer of R1233zd(e) on Aluminum-Based Microstructured Surfaces: Experimental Study and a Model for Critical Heat Flux. *Applied Thermal Engineering*, **274**, Article 126713. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126713>
- [21] Mudhafar, M.A.H. and Zheng-Hao, W. (2022) Optimization of Pool Boiling Heat Transfer on Microporous Metal Coating Surfaces with FC-72 as a Working Fluid. *Heat and Mass Transfer*, **58**, 1963-1977. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03229-8>
- [22] Hendricks, T.J., Krishnan, S., Choi, C., Chang, C. and Paul, B. (2010) Enhancement of Pool-Boiling Heat Transfer Using Nanostructured Surfaces on Aluminum and Copper. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, 3357-3365. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.025>
- [23] Manetti, L.L., Ribatski, G., de Souza, R.R. and Cardoso, E.M. (2020) Pool Boiling Heat Transfer of HFE-7100 on Metal Foams. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **113**, Article 110025. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.110025>
- [24] Orlova, E.G., Glushkov, D.O., Pleshko, A.O., Gulkin, K.N., Abdelmagid, A.M., Maximov, P.N., *et al.* (2025) Pool Boiling on the Aluminum Alloy, Copper and WC-Coated Copper with Micro-Finned Textures and Developed Multimodal Roughness Formed by Nanosecond Laser Radiation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **162**, Article 111366. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2024.111366>