

复合异构型表面池沸腾传热特性数值模拟

刘琪¹, 李树谦^{2,3,4,*}, 袁慧⁵, 郭博文², 苏志鹏¹

(1. 河北建筑工程学院能源工程系, 河北张家口 075000; 2. 河北水利电力学院土木工程系, 河北沧州 061001; 3. 河北省数据中心相变热管理技术创新中心, 河北沧州 061001; 4. 沧州市储热及低品余热利用型电磁供热技术创新中心, 河北沧州 061001; 5. 北京文达利通科技有限公司, 北京 101100)

摘要: 为提高电子器件双相浸没液冷传热性能, 基于分区功能协同的设计理念提出了一种由中心蘑菇装微柱与外围非对称沟槽区组成的复合异构型表面, 分别强化气泡成核及脱离与液体回补过程。采用体积分数 (VOF) 方法的三维瞬态数值模拟, 研究复合异构型表面的传热性能以及表面结构对气泡成核及脱离行为的影响, 并将其与光滑表面和凹槽表面对比分析。结果表明, 在研究的热流密度范围内, 复合异构型表面表现出了更优的传热性能, 对比光滑表面和凹槽表面的壁面过热度平均降低了 28.3%和 18.7%, 传热系数平均提高了 39.5%和 22.0%。这归因于其表面结构增加了表面有效传热面积与活化位点密度。此外复合异构型表面的异构结构通过协同设计, 同步提升了成核效率, 气泡脱离速率与表面再湿润能力。

关键词: 池沸腾; 表面改性; 传热特性; 数值模拟

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 2096-7705 (2026) 02-0000-09

Numerical Simulation of Pool Boiling Heat Transfer Characteristics on a Composite Heterogeneous Surface

Liu Qi¹, Li Shuqian^{2,3,4,*}, Yuan Hui⁵, Guo Bowen², Su Zhipeng¹

(1. Department of Energy Engineering, Hebei Institute of Architecture and Engineering, Zhangjiakou 075000, Hebei, China; 2. Department of Civil Engineering, Hebei Institute of Water Conservancy and Electric Power, Cangzhou 061001, Hebei, China; 3. Hebei Provincial Data Center Phase Change Thermal Management Technology Innovation Center, Cangzhou 061001, Hebei, China; 4. Cangzhou City Thermal Storage and Low-Grade Waste Heat Utilization Electromagnetic Heating Technology Innovation Center, Cangzhou 061001, Hebei, China; 5. Beijing WenDa Litong Technology Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: To enhance the heat transfer performance of two-phase immersion cooling for electronic devices, a composite heterogeneous surface was proposed based on a partitioned functional synergy design, consisting of a central mushroom-like

收稿日期: 2026-01-05

基金项目: 河北省“三三三人才工程”(C2024037); 河北水利电力学院基本科研业务费专项资金资助(SYKY2429); 企业委托“高热流密度电路板浸没相变液冷传热特性研究”

第一作者: 刘琪(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为相变流动与传热、热管理技术。E-mail: lq19948086669@outlook.com

*通信作者: 李树谦(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为相变流动与传热、热管理技术。E-mail: lsqtcc@163.com

引用格式: 刘琪, 李树谦, 袁慧, 等. 复合异构型表面池沸腾数值模拟[J]. 能源研究与管理, 2026, 18(2): 000-000.

(VOF) method was conducted to investigate the heat transfer performance of the composite heterogeneous surface and the effects of surface structures on bubble nucleation and departure behaviors, with comparisons made against smooth and grooved surfaces. The results show that, within the investigated heat flux range, the composite heterogeneous surface exhibits superior heat transfer performance. Compared with the smooth and grooved surfaces, the average wall superheat is reduced by 28.3% and 18.7%, while the heat transfer coefficient is increased by 39.5% and 22.0%, respectively. This enhancement is attributed to the increased effective heat transfer area and higher density of active nucleation sites induced by the surface structure. In addition, the synergistic design of the composite heterogeneous surface simultaneously improves nucleation efficiency, bubble departure rate, and surface rewetting capability.

Keywords: composite heterogeneous surface; pool boiling; surface modification; heat transfer characteristics; numerical simulation

引言

两相浸入式冷却技术基于液-气相变过程中的潜热,能够实现近似等温并具有较高的传热系数^[1-6]。鉴于此,其在热管理,比如数据中心冷却和电子设备散热以及其他工业领域中备受关注,是当前电子器件热管理领域的研究热点之一。此技术核心机制是池沸腾,其性能在很大程度上取决于加热表面的特性。因此,深入理解池沸腾机理,并通过表面改性策略优化沸腾过程,对于有效提升散热效率、防止电子器件过热失效至关重要^[7]。

早在1957年,JAKOB等^[8]从传热机理角度系统分析了核态沸腾过程,指出加热表面粗糙度以及腐蚀和氧化程度会极大的影响沸腾曲线。CLARK等^[9]在1959年首次系统探讨了活性位点在核沸腾中形成与作用,提出了通过改变表面结构促进成核位点形成的思想。KURIHARA等^[10]在1960年首次定量分析了液体过热度 and 表面粗糙度对沸腾系数的影响。近年来,表面微细结构设计因其可通过增加气泡成核位点密度和有效换热面积,从而显著提升加热壁面的传热性能,并实现对气泡行为的有效调控,已成为池沸腾强化领域的研究热点^[11-14]。根据微细结构改性表面作用机制差异,将改性方法主要分为以下3类:微柱与翅片阵列结构、沟槽与凹坑结构、三维复杂结构(3D-CS)^[15]。微柱与翅片阵列结构主要通过毛细力引导液体回流迅速补液,从而提高表面再湿润率,延长核态沸腾区间,有效防止干斑,还可增加表面有效传热面积与成核位点密度促进气泡成核。JIANG等^[16]的研究表明,微米级圆柱支柱阵列的间距显著影响了气泡脱离动力学行为,而减小微柱直径可增加毛细力、降低表面张力从而增强气泡脱离速率。对于微小翅片阵列在池沸腾中的应用而言,FALSETTI^[17]采用电火花加工(electrical discharge machining, EDM)铜基针翼表面,通过实验

研究了翅片几何参数对工质为Novec 649的池沸腾临界热流密度、气泡成核尺寸与脱离效率的影响规律。沟槽与凹坑结构主要通过液体通道和局部陷窝引导定点成核与液体回流,从而可减少气泡堆积并防止蒸汽层的形成。RAGHUPATHI等^[18]通过实验研究了微槽的几何参数对传热性能的影响特性,发现当槽宽为300 μm、深度为10 μm时,临界热流密度CHF(critical heat flux)达到峰值1680 kW/m²。DEGHANI-ASHKEZARI等^[19]分析了三角形、半圆形和方形截面的凹槽对气泡生成和脱离模式的调控机制,发现三角形凹槽可增加表面湿润性且能够更有效地分割脱离气泡,当工质分别为水和体积分数为0.4%的二氧化钛纳米流体时,传热系数HTC提升幅度为120%和83.6%。三维复杂结构主要通过毛细通道和多孔网络增强液体再湿润能力,增加换热面积及成核位点密度,利用多种形式微结构限制气泡脱离直径以调控气泡行为与脱离频率。GHEITAGHY等^[20]研究了通过电火花线切割WEDM加工获得的垂直微通道表面、倾斜微通道表面及正交倾斜微通道表面对池沸腾传热性能的影响机制,发现正交切割微通道的HTC与CHF对比光滑表面分别提升170%与65%。

尽管上述3类改性表面在提升池沸腾性能方面取得了显著进展,但当前研究仍有部分局限。相关研究工作大多聚焦于单一类型的微结构(如仅微柱、仅沟槽或单一3D结构),导致难以同时调控成核、脱离与回补。此外,对于在单一表面上分区设置具有互补功能的异型结构并探索其协同强化效应的研究相对较少,多尺度结构之间的耦合作用机制尚缺乏系统性探究。

本文针对现有单一结构改性表面在协同调控沸腾核心环节方面的局限性,首次提出一种基于分区功能协同的微结构设计理念的复合异构型表面,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics,

CFD) 仿真模拟方法进行分析。基于三维数值模拟分析中的体积分数 VOF 方法的三维瞬态数值模拟, 通过构建两相不可压缩流动控制方程, 并引入体积分数函数对相界面进行捕捉, 实现对气泡生成、生长、合并及脱离过程的动态追踪。探讨异型结构对局部传热性能与气液分布特征的影响规律, 探索其对池沸腾气液流动及传热影响机制。通过上述数值模拟工作作为高效沸腾传热表面的设计与优化提供理论依据与方法支持。

1 模型与方法

1.1 物理模型

本文提出了一种蘑菇状微柱耦合非对称沟槽的复合异型表面, 该表面由中心微柱区与外围沟槽区构成。中心区基于蘑菇状微柱梯度分级的设计理念, 微柱高度由中心区域向相邻微柱以 0.10 mm 单位梯度逐级递减, 中心区域微柱最大高度 1.40 mm, 边缘区域微柱最小高度 1.00 mm。微柱柱径 0.50 mm, 顶部圆帽直径 1.20 mm。微柱排列采用均匀布置, 两相邻微柱底部圆心间距为 1.30 mm。

外围沟槽区环绕中心区域, 采用非对称 U 型沟槽结构。单个沟槽顶部宽度、底部宽度和深度分别为 0.80、0.17 和 0.40 mm。考虑非对称结构可能利于气泡脱离, 沟槽左右两侧壁面倾角分别设为 45° 和 60°, 相邻沟槽间距为 2.00 mm。结构参数见图 1。

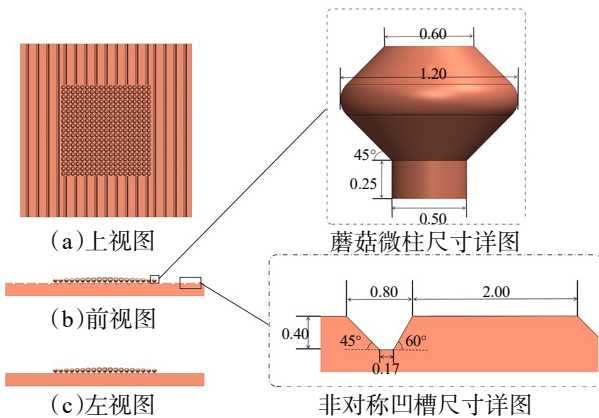


图 1 复合异型表面结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic structure of the composite heterogeneous surface (in mm)

数值模拟所采用的计算域模型与 3 种不同测试表面的结构形式模型见图 2。3D 物理模型见图 2(a)。如图所示, 计算域尺寸为 47 mm×47 mm×20 mm (长×宽×高)。加热面设置为不同结构改性表面用以对比, 3 种表面结构形式如图 2(b)所示。3 种表面材质均为铜-c10500, 其物性参数见表 1。内部流体工质为 3M 公司生产的电子氟化液 FC-72, 其详细物性参数见表 2。

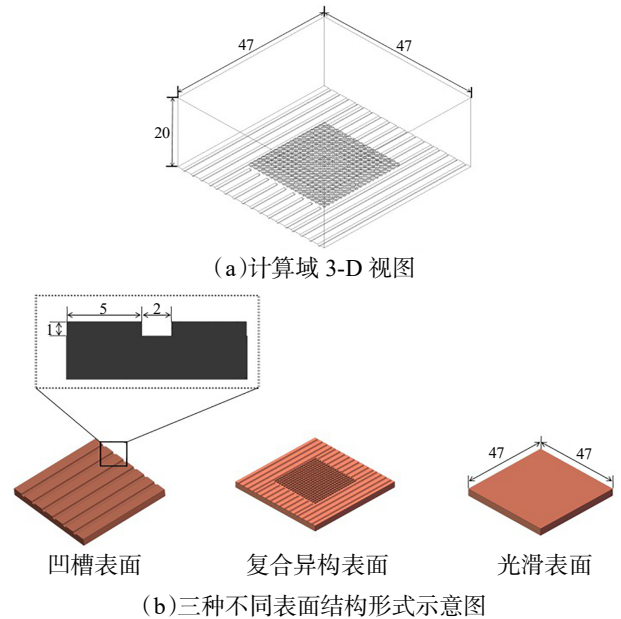


图 2 计算域与三种表面结构形式示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation domain with three surface structure forms(in mm)

表 1 铜-c10500 典型物理特性

Table 1 Typical physical properties of copper-c10500

比热 / (J·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	导热系数 / (w·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	密度 / (kg·m ⁻³)
383.22	389.49	8 942.5

边界条件设置: 计算域底部改性表面为加热壁面, 壁面接触角 θ 为 50°, 设定为恒定均匀热流密度边界, 加热面施加 50~300 kW/m² 的宽范围热流, 以 50 kW/m² 热流密度逐级递增的方式设计 6 种工况。假定沸腾室顶表面处于大气压, 即顶部边界条件设定为压力出口, 容器四周壁面设置为绝热边界条件。容器内流体区域设定初始时刻液相体积分数

表 2 电子氟化液 FC-72 典型物理特性(参考温度 25 °C)

Table 2 Typical physical properties of FC-72 electronic fluorinated liquid (reference temperature 25 °C)

介电常数 / (@1kHz)	平均分子量 / (g·mol ⁻¹)	沸点 / °C	蒸汽压力 / Pa	蒸汽密度 / (kg·m ⁻³)	液体密度 / (kg·m ⁻³)	运动黏度 / (m ² ·s ⁻¹)	液体比热 / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数 / (w·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	膨胀系数 / K ⁻¹	表面张力 / (N·m ⁻¹)	潜热 / (J·kg ⁻¹)
1.75	338	56	30.9×10 ³	13.8	1 680	3.8×10 ⁻⁷	1 100	0.057	1.56×10 ⁻³	1×10 ⁻⁴	88 000

为 1，初始时刻液体工质 FC-72 的温度设定为工质饱和温度 329.15 K。将流体与固体各物性参数设置为常数，假定流体稳定，不可压缩。

1.2 数学模型

数值仿真基于 ANSYS Fluent 2024R1 平台，采用三维压力基瞬态求解器，结合 VOF 多相流模型中的 Lee 相变模型与 $k-\varepsilon$ 模型对 3 种不同结构改性表面池沸腾进行数值模拟，以追踪气液界面并描述蒸发冷凝过程。使用有限体积法求解能量、动量、质量守恒。速度-压力耦合选择“PISO (pressure-implicit with splitting of operators)”算法求解，梯度项采用最小二乘法的单元格方法进行离散化，采用二阶迎风格式离散化动量和能量方程的对流项，使用“PRESTO (pressure staggering option)”方案对压力项进行离散化，湍流动能与湍流耗散率则采用一阶迎风格式离散化。为模拟湍流，选择了壁面增强函数的 $k-\varepsilon$ 湍流模型，该模型能够准确预测湍流及气泡与液体之间的复杂相互作用，从而更好地进行沸腾传热界面预测。

为提高计算精度，设置为自适应步长进行数值模拟，初始时间步长为 1×10^{-5} s，最小时间步长为 1×10^{-6} s。该方法确保了数值稳定性，并适应流动变化，保证了气泡行为和传热的准确模拟，同时平衡了计算精度和效率。

1.2.1 控制方程

质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (2)$$

式中： l 为主相液相； v 为第二相蒸汽相； ρ 为混合密度； α_l 为液相体积分数； α_v 为蒸汽相体积分数； \vec{V} 为速度矢量； S_m 为相变引起的质量源相。

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho g + F_{sv} \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v \quad (4)$$

式中： P 为压力； μ 为混合动力黏度； μ_l 为液相动力黏度； μ_v 为蒸汽相动力黏度； g 为重力加速度； F_{sv} 为表面张力项（采用 CSF 模型，即连续表面力模型）。

$$F_{sv} = \sigma \frac{(\alpha_l \rho_l k_l \nabla \alpha_v + \alpha_v \rho_v k_v \nabla \alpha_l)}{0.5 \cdot (\rho_l + \rho_v)} \quad (5)$$

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (6)$$

式中： σ 为表面张力系数； k 为界面曲率。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_e \quad (7)$$

式中： h 为混合焓； K 为热导率； K_l 为液相热导率； K_v 为蒸汽相热导率； S_e 为相变导致的能量源相。

其中混合焓表示见式(8)。

$$h = \sigma \frac{(\alpha_l \rho_l h_l + \alpha_v \rho_v h_v)}{\alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v} \quad (8)$$

每个相位的能量计算见式(9)、(10)。

$$h_l = C_{pl}(T - T_{ref}) \quad (9)$$

$$h_v = C_{pv}(T - T_{ref}) \quad (10)$$

式中： T_{ref} 为参考温度； C_{pl} 为液相比热； C_{pv} 为气相比热； T 为当前温度。

1.2.2 相变模型

选用 Lee 模型与 VOF 多相流模型结合，Lee 模型通过温度驱动假设简化相变过程，通过体积分方程更新气液相分布，适用于池沸腾中动态气液界面的质量传递计算。

在 Lee 模型中，液-汽传质（蒸发和冷凝）由蒸汽传输方程控制。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}) = \dot{m}_v - \dot{m}_{vl} \quad (11)$$

$$\dot{m}_v = C_e \alpha_v \rho_v \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{vl} = C_c \alpha_v \rho_v \frac{T_{sat} - T_v}{T_{sat}} \quad (13)$$

式中： \dot{m}_v 为蒸发速率； \dot{m}_{vl} 为冷凝速率； C_e 为蒸发经验系数； C_c 为冷凝经验系数； T_{sat} 为工质饱和温度。

在本研究中，对于 FC-72，选用 $C_e = 1 \text{ s}^{-1}$ ， $C_c = 1 \text{ s}^{-1[21]}$ 。

通过监测加热壁面的温度，经过下列公式得到壁面过热度 ΔT ，并根据所给定的不同工况热流密度，绘制出不同表面的沸腾曲线，加热壁面温度采用剔除瞬时波动数据后取均值。其中壁面过热度 ΔT 计算见式(14)。

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \quad (14)$$

式中： ΔT 为加热壁面过热度； T_w 为加热壁面温度。

改性表面传热系数计算见式(15)。

$$h' = \frac{q''}{\Delta T} \quad (15)$$

式中： h' 为传热系数； q'' 为加热壁面热流密度。

1.3 网格无关性验证

计算域采用多面体网格进行划分（图 3），界面采用“连接与相交”的共享拓扑连接来建立，同时

对贴近加热壁面的流固耦合区域网格进行适当加密,这种细化确保了关键传热区域的解析,即沸腾开始与显著传热发生位置得到了更高的模拟计算精度,靠近加热表面的较细化网格能够更加准确地捕捉温度梯度与气泡的生成与脱离现象。

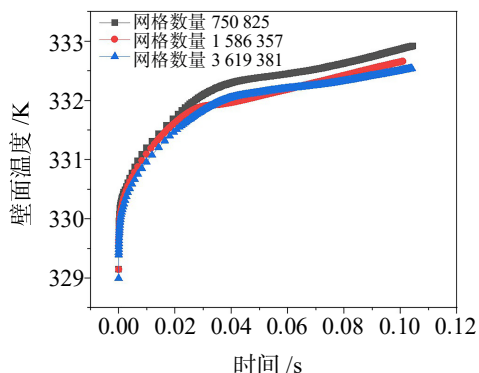


图3 复合异构型表面的网格独立性测试

Fig. 3 Mesh independence testing of composite heterogeneous surface

采用3种网格数量进行了网格无关性验证,数量分别为750 825、1 586 357和3 619 381。重点关注网格数量差异对 T_w 的影响,其结果见图3。由图可知,在固定热流条件下,网格数量为750 825时结果偏差略大,在网格数量为1 586 357时结果偏差在1%以内。因此,考虑计算成本和精度,采用了网格数量为1 586 357的模型。

2 结果与分析

2.1 不同结构表面传热性能对比

图4展示了光滑表面、凹槽表面与复合异构型表面3种条件下,加热壁面过热度 ΔT 随加热壁面热流密度 q'' 的变化关系,即3种表面沸腾传热性能曲

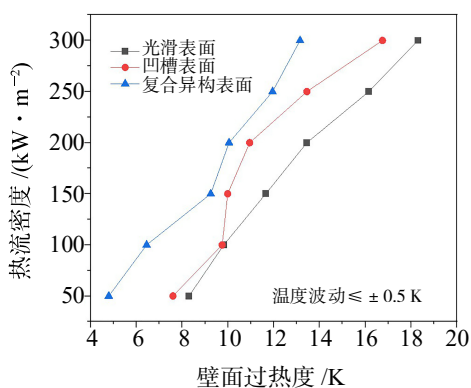


图4 三种表面热流密度与壁面过热度的关系变化(即沸腾传热性能曲线)

Fig. 4 Variations in the relationship between surface heat flux density and wall superheat (boiling heat transfer performance curves)

线。不同表面形貌对沸腾传热性能具有显著的调控作用。

由图可知,在相同热流密度条件下,复合异构型表面的壁面过热度最低,表明其具备最优的散热性能。这一结果说明该类表面结构能够有效强化沸腾换热过程。其主要原因在于异构壁面中心区域布置的蘑菇状微柱阵列结构,微柱顶部的扩展特征可形成局部空腔结构,从而显著增加表面的有效传热面积与成核位点密度;同时,该结构在气泡生成过程中有助于抑制相邻气泡的过早合并,促进气泡有序生长与脱离,进而降低壁面过热度。

复合异构型表面的壁面过热度对比光滑表面和凹槽表面分别平均降低了28.3%和18.7%。特别是,在热流密度为 50 kW/m^2 时,异构壁面的过热度与凹槽表面和光滑表面相比分别低36.0%和42.0%。其主要原因可能是分区协同结构设计使复合异构型表面在低热流工况下,具备最低的成核壁面过热度和最早的沸腾启动时间。RAHMAN等^[22]研究也指出多尺度结构表面能显著降低启动过热度 and 增加成核位点密度。

观察发现,相较于光滑表面条件下的沸腾曲线,复合异构型表面和凹槽表面条件下的沸腾曲线呈现了明显的振荡上升趋势。为了阐明其中的机理,进一步分析了不同结构表面下的气泡动态演变特征。

结合图5可以判断,以热流密度为 50 kW/m^2 时为例,由图可见光滑表面时的气泡在不同阶段的空间分布较为均匀。在其他两种表面情况下,可以发现气泡在演变过程中由于受到凹槽和异型凸起的作用,导致气泡的产生位置和脱离以后的空间分布的均匀性受到一定影响。可以推测,表面结构影响了气泡的分布形式,从而可能进一步导致不均匀的流场分布和传热性能。

进一步观察发现,在较低热流密度($\leq 100 \text{ kW/m}^2$)和较高热流密度(即 300 kW/m^2)时,凹槽表面与光滑表面的壁面过热度差异较小。然而,在中间热流密度区域($100 \sim 250 \text{ kW/m}^2$)时,凹槽表面条件下的壁面过热度较低,此时凹槽表面的壁面过热度更接近复合异构型表面。从表面加工的经济性和散热性能这两个角度综合分析,可以推测凹槽表面在中间热流密度区域具有一定的比较优势。

不同结构表面传热系数 h 随加热壁面热流密度 q'' 的变化规律见图6。由图可知,在测试热流密度范围内,复合异构型表面均表现出显著优于凹槽表面和光滑表面的换热性能。其中,凹槽表面次之,

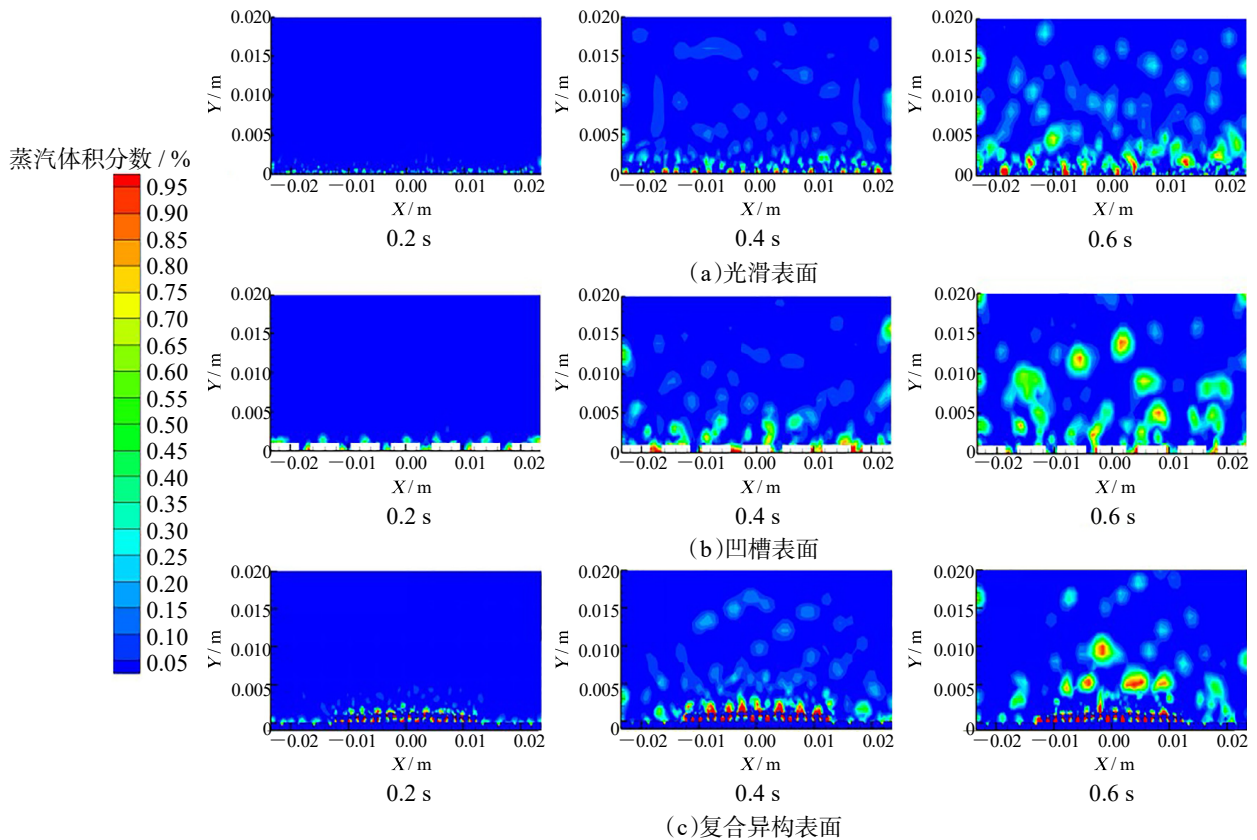


图 5 加热壁面热流密度为 50 kW/m² 时三种不同表面的三个典型时刻的蒸汽体积分数云图

Fig. 5 Vapor volume fraction contour plots for three representative time points across three different surfaces at a heating wall heat flux density of 50 kW/m²

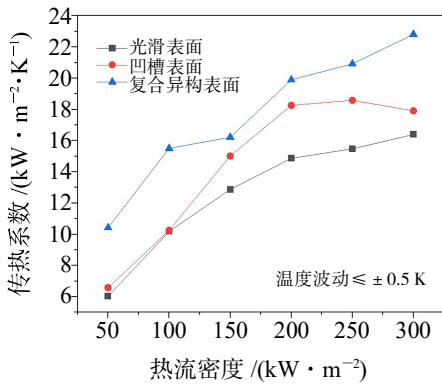


图 6 三种表面传热系数与热流密度的关系变化

Fig. 6 Variation of three surface heat transfer coefficients with respect to heat flux density

而光滑表面因成核位点密度较低，换热能力始终较弱。与光滑表面和凹槽表面对比，复合异构型表面的平均传热系数分别提升了 39.5%和 22%。特别的是，在较低热流密度 ($\leq 100 \text{ kW/m}^2$) 和较高热流密度 (即 300 kW/m^2) 区间内壁面过热度变化趋势一致，凹槽表面与光滑表面的换热性能差异不显著；在中间热流密度 ($100 \sim 250 \text{ kW/m}^2$) 时，凹槽表面的传热系数较高，接近复合异构型表面，这一结果

与沸腾传热性能曲线相匹配。

2.2 复合异构型表面结构对气泡成核及脱离行为的影响

热流密度为 50 kW/m^2 条件下，不同结构加热表面在气泡初始成核阶段相同时刻的蒸汽分数三维视图见图 7。由图可知，在相同热流条件下，在气泡初始成核阶段，光滑表面仅在边角区域出现了局部汽化现象；凹槽结构表面则显示出规则的条带状蒸汽分布，蒸汽主要集中于凹槽内部；而复合异构型表面的蒸汽分布高度密集，中央区域呈现出均匀细密的点状蒸汽聚集，外围沟槽区域气泡规则排布在沟槽内部与两沟槽间壁上。以上现象可以看出复合异构型表面的气泡数量最多、扰动最剧烈，且蒸汽体积分数最高。这表明复合异构型表面的结构设计可能有助于降低壁面温度，使其更早达到起沸点。

在热流密度为 100 kW/m^2 时，选取 $Z=23.5 \text{ mm}$ 截面 (即计算域正视图) 工质温度、速度及蒸汽体积分数云图 (图 8~10)。结合 3 组图中现象分析复合异构型表面结构对气泡成核与脱离行为的影响。在气泡成核期 ($t=0.1 \text{ s}$)，蘑菇状微柱根部、顶面及沟槽夹角处观察到局部高温过热点并呈线状排列

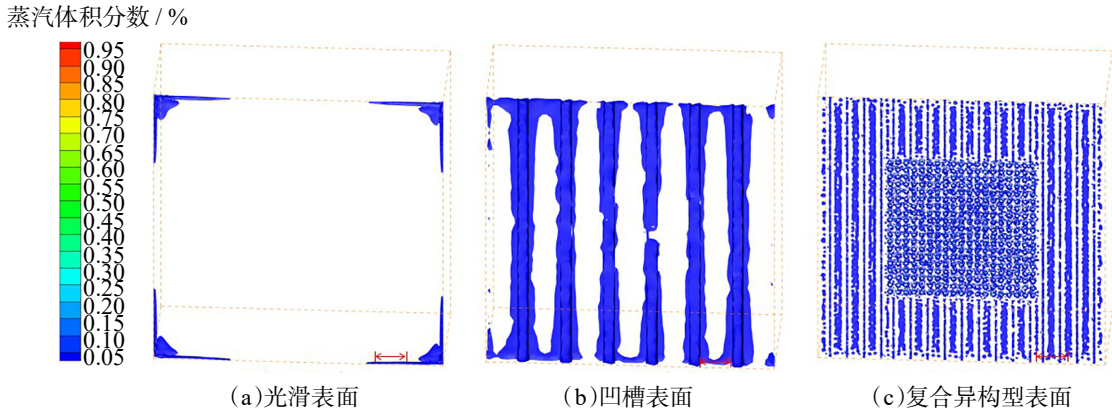


图 7 在相同加热壁面热流密度 ($q''=50 \text{ kW/m}^2$) 条件下,不同结构表面的蒸汽体积分数的三维视图

Fig. 7 Three-dimensional view of vapor fraction on different structural surfaces under identical heating wall surface heat flux density

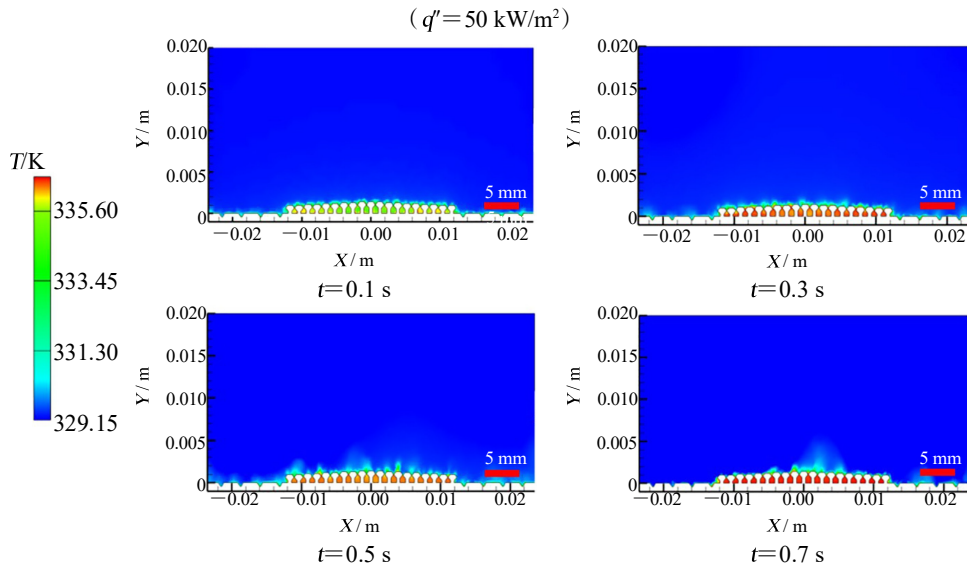


图 8 复合异构型表面 X-Y 平面中心剖面不同时刻温度云图 ($q''=100 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 8 Temperature distribution at different times for the center section of the X-Y plane of the composite heterogeneous surface

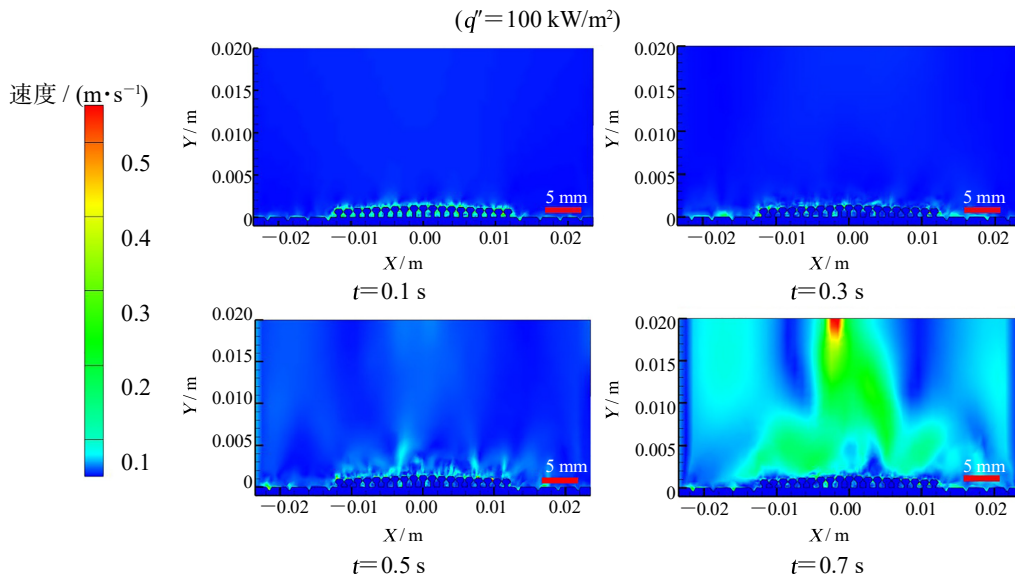


图 9 复合异构型表面 X-Y 平面中心剖面不同时刻速度云图 ($q''=100 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 9 Velocity cloud diagram at different times for the center section of the X-Y plane of the composite heterogeneous surface

($q''=100 \text{ kW/m}^2$)

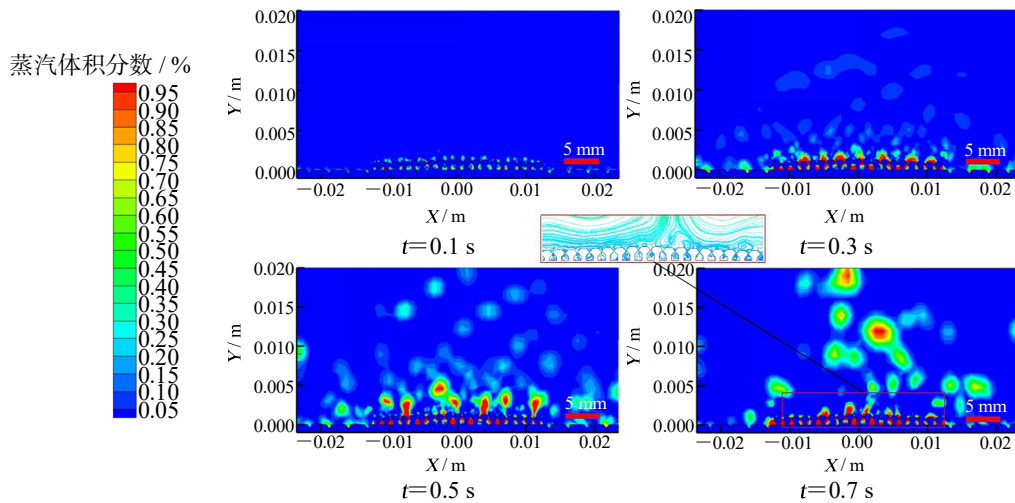


图 10 复合异构型表面 X-Y 平面中心剖面不同时刻蒸汽体积分数云图及对应流线图 ($q''=100 \text{ kW/m}^2$)

Fig. 10 Vapor volume fraction distribution and corresponding streamline map at different times for the center section of the X-Y plane of the composite heterogeneous surface ($q''=100 \text{ kW/m}^2$)

的微小气泡成核，表明该结构提供了丰富的成核位点，其原因在于蘑菇状微柱与非对称沟槽提供了大量低能垒的夹角或缝隙成核区域；进入生长期 ($t=0.3 \text{ s}$)，气泡从成核点膨胀、紧贴加热面的薄液层蒸发以及附近工质过热度持续升高，支撑了气泡的快速生长；在脱离期 ($t=0.5 \text{ s}$)，微柱间产生显著浮升力，还观察到沟槽倾角处涡流 ($v_{\text{max}}=0.42 \text{ m/s}$) 引导气泡向边缘移动的现象，有效促进了气泡脱离并减少了沟槽内气泡堆积；在 $t=0.7 \text{ s}$ 时，观察到气泡脱离后液体迅速回填微柱根部的现象 (图 10 中流线图)，这表明蘑菇状微柱底部空腔结构强化了毛细抽吸作用，促进了周围液体快速回流，显著提升了干涸表面的再湿润能力。

复合异构型表面表现出更优的沸腾换热能力，其强化机制主要归因于蘑菇状微柱结构与非对称沟槽的协同作用，提升了成核效率、气泡脱离效率与液体再润湿能力。

3 结论

1) 与光滑表面和凹槽表面相比，拥有蘑菇状微柱耦合非对称沟槽结构的复合异构型表面具有更好的传热性能，对比另外两种表面，其壁面过热度平均降低了 28.3% 和 18.7%，传热系数平均提高了 39.5% 和 22.0%。

2) 复合异构型表面与光滑表面和凹槽表面相比，具有更高的成核位点密度，从而在相同热流密度下降低壁面过热度并提前沸腾启动；以热流密度 50 kW/m^2 为例，在气泡初始成核阶段 (0.1 s)，其气泡数量更多且扰动更为剧烈，表现出更早的起沸

特征。

3) 复合异构表面强化沸腾换热的核心机制在于其协同作用提升了成核效率、利用浮升力与几何引导优化了气泡脱离效率、借助微柱空腔的毛细效应增强了再湿润能力。

在后续研究中需进一步考虑加工方法，例如可采用精密 CNC 铣削或者 3D 打印技术。此外，当前模拟并未考虑到实际运行中可能出现的材料老化、表面氧化、长期运行下的结构变形等，后续将进一步通过实验研究进行验证和修正，同时可优化结构参数以实现 CHF 提升。

参考文献

- [1] LIN Lin, HU Yanxin, SU Zipei, et al. Comparative study of pool boiling heat transfer on different subtractive surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 195: 123126.
- [2] KANBUR B B, WU C, FAN S, et al. Two-phase liquid-immersion data center cooling system: Experimental performance and thermoeconomic analysis[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 118: 290–301.
- [3] RUZAIKIN V, LUKASHOV I, YEVGEN T, et al. Two-phase immersion cooling technology perspectives in electronics[J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 808: 307–318.
- [4] 樊凯伦, 李树谦, 周鹏程, 等. 间断布类水滴型肋微通道的流动与传热特性[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(4): 118–125.
- [5] 张超群, 李树谦, 周鹏程, 等. 具有仿生结构的并联微细多通道蒸汽直接接触凝结数值模拟[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(2): 69–78.
- [6] FAN Simiao, DUAN Fei. A review of two-phase submerged boiling in thermal management of electronic cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119324.

- [7] 袁慧,侯娜娜,李树谦,等.数据中心相关器件的浸没液冷技术研究进展[J].能源研究与管理,2022(1):19-28.
- [8] JAKOB M,HAWKNS G.Elements of heat transfer [M].New York:Wiley,1957.
- [9] CLARK H B,STRENGE P S,WESTWATER J W.Active sites for nucleate boiling [J].Chemical Engineering Progress,1959,55(29):103-110.
- [10] KURIHARA H M, MYERS J E. The effects of superheat and surface roughness on boiling coefficients[J].AIChE Journal, 2010,6(1):83-91.
- [11] PEREIRA J,SOUZA R,MOREIRA A,et al.An overview of innovative surface-modification routes for pool boiling enhancement[J].Micromachines,2024,15(3):302.
- [12] 王子瑜,刘俊浩,梁膳攀,等.不同加工方法的表面结构强化池沸腾传热进展[J].机床与液压,2025,53(12):87-97.
- [13] 白依冉,翟玉玲,戴晶慧,等.微纳尺度池沸腾表面润湿性的气泡成核及强化传热机制[J].化工进展,2025,44(2):743-751.
- [14] 刘厚励,顾中浩,阳康,等.3D 打印槽道结构槽宽对池沸腾传热特性的影响[J].化工进展,2023,42(5):2282-2288.
- [15] SUN Yalong,TANG Yong,ZHANG Shiwei,et al.A review on fabrication and pool boiling enhancement of three-dimensional complex structures[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2022,162:112437.
- [16] JIANG Hantao,XU Nian,WANG Dongdong,et al.Experimental investigation of the effect of cylindrical array structure on heat transfer performance during nucleate boiling[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2021,174:121319.
- [17] FALSETTI C.Performance of pin-fin structures on pool boiling heat transfer [J].International Journal of Thermofluids, 2024,23:100784.
- [18] RAGHUPATHI P A,KANDLIKAR S G.Pool boiling enhancement through contact line augmentation[J].Applied Physics Letters,2017,110(20):204101.
- [19] DEGHANI-ASHKEZARI E,SALIMPOUR M R.Effect of groove geometry on pool boiling heat transfer of water-titanium oxide nanofluid [J].Heat and Mass Transfer,2018,54(11):3473-3481.
- [20] GHEITAGHY A M,SAMIMI A,SAFFARI H.Surface structuring with inclined minichannels for pool boiling improvement[J].Applied Thermal Engineering,2017,126:892-902.
- [21] JIA Hongwei,ZHANG Peng,FU Xin,et al.A numerical investigation of nucleate boiling at a constant surface temperature [J].Applied Thermal Engineering,2015,88:248-257.
- [22] RAHMAN M M,MCCARTHY M.Effect of length scales on the boiling enhancement of structured copper surfaces[J].Journal of Heat Transfer,2017,139(11):111508.