

DOI: 10.11949/0438-1157.

双亲性 Janus 颗粒强化池沸腾传热研究

王宗前¹, 纪献兵^{1,2}, 苑强¹, 谢一鸣¹, 徐进良^{1,2}

(¹ 华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206; ² 华北电力大学电站能量传递; 转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 为进一步提升池沸腾传热性能, 将双亲性 Janus 颗粒引入池沸腾体系。制备了不同粒径尺度的双亲性 Janus 颗粒, 研究了 Janus 颗粒的堆积层数和不同粒径颗粒组合对池沸腾传热性能的影响。结果表明, 2 层毫米级颗粒与 0.2 wt.% 纳米颗粒组合的强化效果最佳, 临界热通量达 $244.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 传热系数达 $250.6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 较光滑表面分别提升 117.7% 和 149.9%。强化机理在于: Janus 颗粒的疏水侧降低了气泡成核能垒, 促进气泡生成与脱离, 从而强化传热系数; 亲水侧凭借亲液特性促进液体向蒸发区域回流, 从而提高临界热通量。本研究为高功率电子器件的先进热管理提供了新思路与实验依据。

关键词: Janus 颗粒; 双亲性; 相变; 临界热通量; 传热

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Pool boiling heat transfer enhancement by amphiphilic Janus particles

WANG Zongqian¹, JI Xianbing^{1,2}, YUAN Qiang¹, XIE Yiming¹, XU Jinliang^{1,2}

(¹ Low Grade Energy Multiphase Flow and Heat Transfer Laboratory, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ² Power Station Energy Transfer Transformation and System Education Laboratory, Beijing 102206, China)

Abstract: To enhance the pool boiling heat transfer performance, amphiphilic Janus particles were introduced into the pool boiling system. Amphiphilic Janus particles with different particle sizes were prepared, and the effects of the stacking layer number of Janus particles and the combination of particles with different sizes on pool boiling heat transfer performance were investigated. The results showed that the combination of two layers of millimeter-sized particles and 0.2 wt.% nanoparticles exhibited the best enhancement effect, achieving a critical heat flux of $244.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ and a heat transfer coefficient of $250.6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, which were 117.7% and 149.9% higher than those of a smooth surface, respectively. The enhancement mechanism lies in that the hydrophobic side of Janus particles reduces the bubble nucleation energy barrier and promotes bubble generation and departure, thereby enhancing the heat transfer coefficient; meanwhile, the hydrophilic side facilitates liquid reflux to the evaporation region due to its lyophilic property, thus increasing the critical heat flux. This study provides a new idea and experimental basis for advanced thermal management of high-power electronic devices.

Keywords: Janus particles; amphiphilic; phase change; critical heat flux; heat transfer

收稿日期: 2026-05-08 修回日期: 2026-06-23

通信作者: 纪献兵 (1971—), 男, 博士, 教授, jxb@ncepu.edu.cn

第一作者: 王宗前 (2003—), 男, 硕士研究生, 17752186533@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52176154, 52130608)

引用本文: 王宗前, 纪献兵, 苑强, 谢一鸣, 徐进良. 双亲性 Janus 颗粒强化池沸腾传热研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–12

Citation: WANG Zongqian, JI Xianbing, YUAN Qiang, XIE Yiming, XU Jinliang. Pool boiling heat transfer enhancement by amphiphilic Janus particles[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–12

引 言

池沸腾传热作为一种高效的相变传热机制,凭借其高热通量、低过热度及优异的均温特性^[1],在核能^[2]、化工^[3]、冶金^[4]及高功率电子器件散热等领域具有重要工程应用价值^[5-6]。随着工业装备向高效化、小型化方向发展,传统热管理技术难以满足高热通量场景下的散热需求。因此,开发新型高效的池沸腾传热强化技术,成为提高能源利用效率的重要途径^[7-9]。

向系统工质中加入固体颗粒,以优化其热物性^[10-11]并调控固液界面行为^[12-13],已成为强化池沸腾传热的重要研究方向之一。固体颗粒对池沸腾传热的强化效果,与其在体系中的存在状态密切相关。当自由颗粒在工质中为静止状态时,会优先铺展于加热表面,并自发堆积形成多孔结构层,这不仅增加了表面粗糙度,还提供了大量稳定的活性成核位点,为核态沸腾的触发与维持创造了有利条件^[14-15]。当自由颗粒进入运动状态后,可对热边界层产生持续的机械扰动,通过撞击和剪切行为干预气泡的生长,从而加速气泡的合并与脱离过程^[16]。此外,对于悬浮在工质中的纳米颗粒,可通过增强工质的湍动,有效提升液相的导热能力,进而强化单相及两相换热效果^[17-18]。

国内外已有研究证实,引入纳米至毫米尺度的自由固体颗粒可有效强化池沸腾传热。早期研究主要关注颗粒的宏观物性对传热性能的影响。于志家等^[19]将流化固体颗粒引入流动沸腾系统,发现颗粒含量、尺寸及密度的增加均可提升沸腾传热系数。施明恒等^[20]进一步指出,颗粒直径、初始颗粒层高度和热通量是影响换热效果的关键参数。针对粒径这一核心参数,Wang等^[21]考察了不同粒径下自由颗粒的沸腾传热行为,结果表明,50 μm 颗粒在系统中的多孔覆盖层厚度最佳,流体携带效果最好,最大传热系数提升了15.02%。Sarangi等^[22]对比分析了不同粒径颗粒在不同传热方式下的换热表现,证实100 μm 粒径的自由颗粒强化效果最为优异。因此,无论颗粒以何种状态存在,对其粒径进行优选均具有普适性的强化效果。

除物理尺寸与存在形式外,颗粒表面性质同样是调控池沸腾传热的重要因素。刘藏丹等^[23]利用不同接触角的 SiO_2 纳米流体进行了沸腾实验,揭示了中等亲水性纳米颗粒的强化机理,颗粒通过吸附于

气液界面并增大加热面粗糙度,促进成核位点形成,从而显著提升了传热系数。赵昶^[24]采用直径为1.0 mm的双亲性Janus颗粒进行池沸腾实验,发现双层堆积时传热系数最高,较光滑表面提高约77%。与此同时,大量学者致力于通过表面改性构建具有特定润湿性的加热表面,从界面调控角度探究润湿性对沸腾过程的影响机制^[25-26]。Gong等^[27]通过数值模拟发现,疏水表面具有更低的沸腾起始过热度,但其临界热通量低于亲水表面。Li等^[28]进一步研究表明,亲疏水混合表面能有效降低过热度并提高传热系数,展现出优于单一润湿性表面的综合性能。Noh等^[29]采用软刻蚀技术制备了具有双润湿性(Janus)的多孔微结构表面,在大气压饱和池沸腾条件下,该表面较普通柱状微结构表面的传热系数提升50%,其强化机理归因于气泡生成更为活跃以及三相接触线的密度更高。

尽管现有研究已探索了单一润湿性颗粒以及润湿性加热表面对沸腾传热的影响,但针对同时具备亲、疏水区域的Janus颗粒对沸腾传热影响的研究较为匮乏。为此,本文将双亲性Janus颗粒引入池沸腾体系,制备了毫米级和纳米级Janus颗粒,研究了毫米级颗粒堆积层数、纳米颗粒质量分数及不同尺度颗粒组合对池沸腾传热性能的影响。

1 实验材料与方法

1.1 毫米级Janus颗粒的制备与表征

毫米级双亲性Janus颗粒以直径1.0 mm、密度 $8.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的紫铜球颗粒为基材进行制备。制备过程分为基底预处理与非对称改性两个阶段。首先,如图1(a)所示,通过丙酮-乙醇混合溶液超声清洗去除油污,再经稀盐酸刻蚀去除表面氧化层,随后用去离子水漂洗并干燥,得到洁净的改性基底。为实现颗粒表面的非对称润湿性,采用局部喷涂策略,具体流程如图1(b)所示。将预处理后的紫铜球置于特制丝网上固定,使上半球暴露于喷涂区域。先喷涂强化型疏水涂层,间隔一定时间后喷涂辅助型涂层以增强耐久性,下半球则保持原状不作处理。经充分通风固化后,制得具有双亲性表面的毫米级Janus颗粒。

采用接触角测量仪表征毫米级Janus颗粒两侧的润湿性。由于1.0 mm球形颗粒表面存在曲率,直接在单颗粒球面上测量静态接触角易受液滴尺度

和颗粒固定方式影响。因此,本文采用与Janus颗粒亲水侧和疏水侧相同处理工艺的平板表面进行表观接触角测试。结果如图1(c)所示,亲水侧对应

平板的表观接触角为 64.8° ,疏水侧对应平板的表观接触角为 137.3° ,说明局部喷涂改性方法可在毫米级颗粒表面构建显著的非对称润湿性差异。

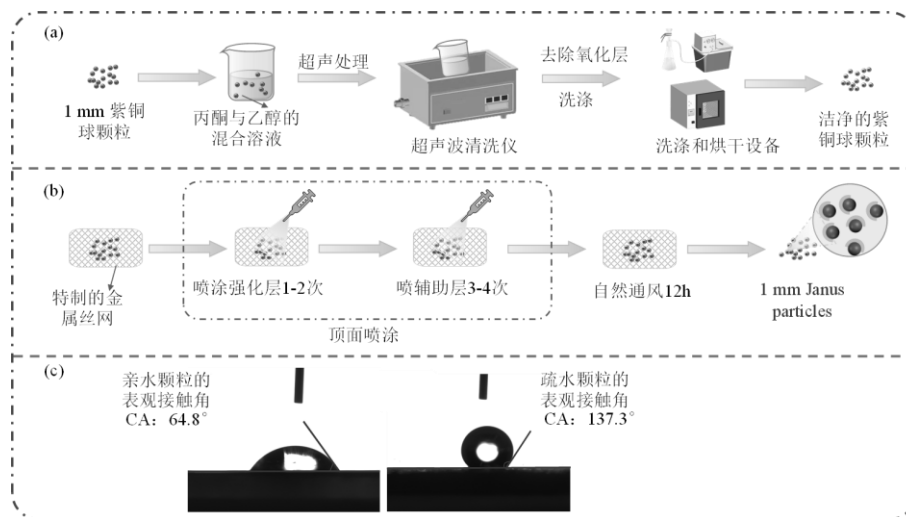


图1 1.0 mm Janus颗粒的制备流程与表观接触角测试图

Fig.1 Preparation process and apparent contact angle testing of 1.0 mm Janus particles

1.2 纳米级Janus颗粒的制备与表征

纳米级双亲性Janus颗粒以 Fe_3O_4 - SiO_2 核壳结构为基础,其等效密度约为 $4.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。采用Pickering乳液界面组装结合选择性刻蚀的方法进行制备,整体制备流程如图2(a)所示,制备过程分为以下四个步骤。(1)将 $6.0 \text{ g FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 超声分散于 500 ml 乙二醇中,加入适量 NaOH 并搅拌至形成棕色黏稠状胶体。随后将混合物转移至恒温电热套中,在 210°C 下回流反应 10 h ,反应过程持续搅拌。待产物冷却至室温后,经高速离心分离,并用去离子水和无水乙醇交替洗涤3次,最后于 65°C 鼓风干燥箱中干燥 5 h ,获得亲水性 Fe_3O_4 颗粒。(2)将上述 Fe_3O_4 颗粒用稀 HCl 溶液处理后,与 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、正硅酸乙酯(tetraethyl orthosilicate, TEOS)溶液混合,于 45°C 水浴加热反应 12 h ,制得具有核壳结构的 Fe_3O_4 - SiO_2 颗粒。将所得颗粒与3-氨丙基三乙氧基硅烷(3-aminopropyltriethoxysilane, APTES)按 $1:1(\text{g}\cdot\text{ml}^{-1})$ 的比例分散于适量无水乙醇中,在 100°C 下回流反应 6 h 。冷却至室温后,通过磁分离收集产物并反复洗涤,获得 Fe_3O_4 - SiO_2 - NH_2 改性颗粒。(3)将适量 Fe_3O_4 - SiO_2 - NH_2 颗粒置于 200 ml 无水乙醇中,超声分散 10 min 后,加入苯甲醛($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}$)和乙酸(CH_3COOH)溶液,于 30°C 下搅拌反应 24 h 。反应结束后,经磁分离收集产物,洗涤后于 65°C 干燥 5 h ,得到疏水改性的 Fe_3O_4 - SiO_2 颗粒。(4)将上述疏水改性

颗粒加入至石蜡-水混合液中,通过水浴加热与高速搅拌乳化的方式形成Pickering乳液。随后将乳液置于 NH_4F 溶液中进行选择性刻蚀,以去除部分 SiO_2 壳层并暴露下层亲水表面。刻蚀完成后用四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)溶解石蜡,反复洗涤产物,最后于 65°C 干燥 5 h ,制得同时具有亲水与疏水区域的 Fe_3O_4 - SiO_2 Janus颗粒。

为验证纳米级Janus颗粒制备过程中亲水组分与疏水改性组分的润湿性差异,采用压片法对前驱体进行了表观接触角测试。由于纳米颗粒尺寸远小于接触角测试液滴,测量结果反映的是颗粒压片整体的表观润湿性,不能代表单个Janus颗粒两侧的真实接触角。结果如图2(b)所示:亲水性 Fe_3O_4 颗粒压片的表观接触角为 19.8° ,呈强亲水性;疏水改性后的 Fe_3O_4 - SiO_2 颗粒压片表观接触角为 123.2° ,呈明显疏水性。

图3展示了纳米级 Fe_3O_4 - SiO_2 Janus颗粒的多维度表征结果。XRD谱图(见图3a)显示, Fe_3O_4 特征性的尖晶石结构衍射峰清晰尖锐,表明磁性内核在逐步化学修饰过程中晶体结构保持完整;背景中的宽弥散峰对应无定形 SiO_2 壳层,证实核壳结构未受破坏。FTIR光谱显示(图3b), 582 cm^{-1} 处吸收峰对应 Fe-O 键, 1180 cm^{-1} 及 930 cm^{-1} 附近吸收峰归属为 Si-O-Si 骨架振动。 3418 cm^{-1} 处宽峰(归属于氨基或羟基等亲水基团)与 1620 cm^{-1} 、 800 cm^{-1} 附近苯环骨架

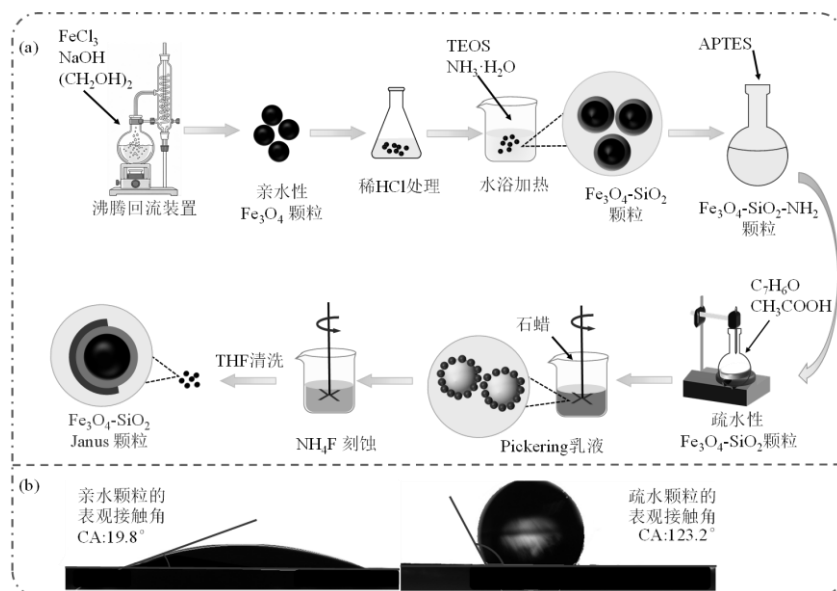


图2 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ nm Janus 颗粒的制备流程与表观接触角测试图

Fig.2 Preparation process and apparent contact angle measurement of nanoscale $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ Janus particles

振动峰(疏水基团标志)同时出现,从分子层面证实颗粒表面双亲基团的共存。Zeta 电位测试显示(图 3c),全疏水中间产物电位集中在 $0\sim\pm 5$ mV,表面被疏水层致密覆盖;刻蚀后 Janus 颗粒电位负移至

$-10\sim-20$ mV,这是部分区域疏水层被去除、带负电荷硅羟基重新暴露的结果。以上表征结果证实,具有非对称双亲结构的纳米级 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ Janus 颗粒已成功制备。

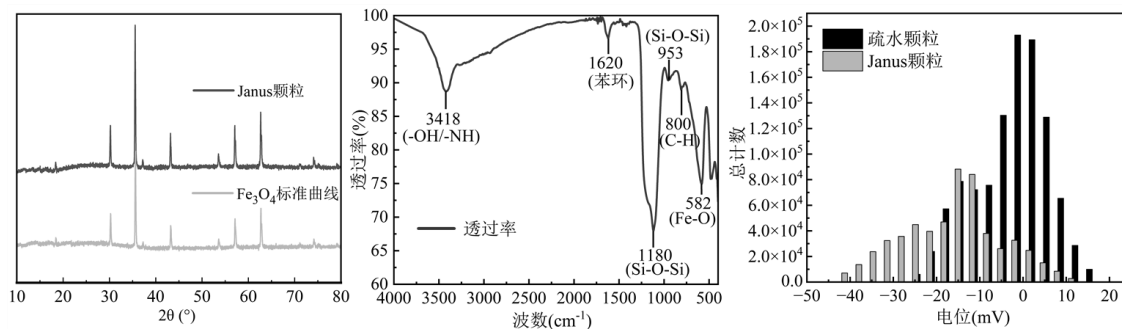


图3 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ Janus 颗粒的结构与表面性质表征

Fig.3 Structural and surface property characterization of nanoscale $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ Janus particles

注:(a)XRD 图谱 (b)FTIR 谱图 (c)刻蚀前后颗粒的 Zeta 电位对比图

1.3 实验装置系统

为研究 Janus 颗粒影响池沸腾传热的机理,搭建了可视化池沸腾实验系统,其整体结构见图 4。该系统由加热模块、沸腾腔室、隔热模块及数据采集模块四部分组成。

加热模块使用定制加工的圆柱形紫铜加热块,其顶部为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的方形加热面。加热块上缠绕两根并联的电阻加热丝作为主热源,通过直流电源调节输入功率。为准确测量温度并推算出热通量,沿加热块轴向从上往下开设 4 个深度为 5 mm 的盲孔,孔内插入 K 型热电偶,通过轴向温度梯度推

算加热面温度与表面热通量。

沸腾腔室由聚醚醚酮(PEEK)加热台、高透光石英玻璃沸腾池($40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 150\text{ mm}$)和不锈钢上盖板构成。其中,PEEK 加热台中心开孔以固定加热铜柱,孔的边缘设计了斜坡和漏斗结构,以确保沸腾过程中脱离的颗粒能顺利滑回加热面,避免颗粒滞留。石英玻璃池体便于使用高速摄影设备观察沸腾现象和颗粒的运动行为。上盖板集成了独立控温的辅助加热棒和测温热电偶,用于维持工质饱和温度并去除溶解气体。

隔热模块中,加热铜柱底部及侧面包裹多层耐

高温玻璃纤维棉,以最大限度减少热量损失。数据采集模块采用Agilent数据采集器,实时记录来自加

热铜柱、沸腾池内及环境的6个热电偶温度信号。

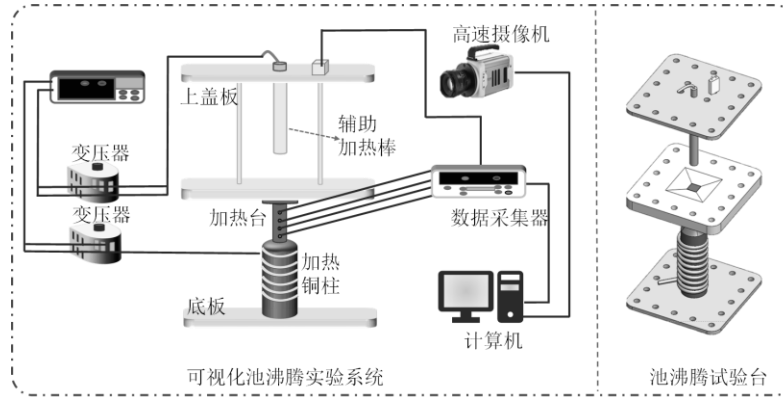


图4 池沸腾传热实验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of pool boiling heat transfer experimental system

1.4 实验流程

完成装置搭建与密封性检查后,在大气压下去离子水为工质开展池沸腾实验,具体操作流程如下。(1)颗粒铺设:每次实验前,使用1200目砂纸打磨加热铜块表面,随后用去离子水 and 无水乙醇反复清洗。对于毫米级颗粒,1层指将约100颗1.0 mm的Janus颗粒均匀铺在加热面上,使其呈单层紧密排列,颗粒之间相互接触且基本无堆叠;2层、3层和4层工况均在1层颗粒床层基础上逐层添加相同数量的颗粒,依靠重力自然堆积于下层颗粒之上,形成具有松散堆积结构的颗粒床层。对于纳米级颗粒,按预定质量分数称量,经超声分散于去离子水后缓慢注入沸腾池中。(2)稳态数据采集:启动辅助加热系统,将池内去离子水加热至饱和温度,维持沸腾30 min以上,随后降低辅助加热功率使系统稳定在饱和温度。开启主加热电源,从低功率起以固定步长逐级提升,在每个功率工况下持续监测各热电偶读数,当所有测点温度在5 min内波动小于0.5 K时,认定系统达到热平衡,并记录该稳态下的温度数据。重复上述过程,直至观察到壁面温度跃升,该现象标志着临界热通量点即将到达或已发生,此时应立即切断所有电源以保护加热表面及设备安全。

1.5 数据处理

由于对加热铜柱底部与侧面进行了保温隔热,加热铜柱仅通过上表面与液体进行热量交换,因此可将其近似为一维导热问题处理。基于一维导热模型,热通量计算公式如下:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中, λ 为铜块的热导率,取 $340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; dT/dx 通过对加热铜柱四个测点温度线性拟合求得。壁面温度计算如下:

$$T_w = kx + T_1 \quad (2)$$

式中, k 为温度梯度拟合斜率, x 是测点 T_1 距加热面的距离; T_1 为最下面测点热电偶温度。过热度 ΔT 计算公式如下:

$$\Delta T = T_w - T_{\text{sat}} \quad (3)$$

式中, T_{sat} 为工质常压下的饱和温度。由牛顿冷却公式得到表面传热系数 h :

$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{q}{T_w - T_{\text{sat}}} \quad (4)$$

根据Kline^[30]提出的误差传递分析方法,可推得壁面过热度 ΔT 、热通量 q 及传热系数 h 的相对误差的表达式,如下所示:

$$\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_w}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{\text{sat}}}{\Delta T}\right)^2} \quad (5)$$

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta T_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_4}{T_4}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta x)}{(\Delta x)}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_w}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{\text{sat}}}{\Delta T}\right)^2} \quad (7)$$

式中, T_1 为工质温度, $\delta(\Delta T)$ 、 δh 、 δT_w 、 δT_{sat} 、 δT_1 、 δT_4 、 δq 、 δT_1 、 $\delta(\Delta x)$ 分别为壁面过热度、传热系数、壁面温度、液体饱和温度、加热铜柱内部温度、热通量、工质温度和加热铜柱热电偶测点间距的标准误差。K型热电偶精度为0.3 K,从而可计算出 ΔT 、 q 和 h 的相对误差分别为1.89%、7.1%和7.35%。

2 实验结果与讨论

2.1 毫米级 Janus 颗粒堆积层数对沸腾传热性能的影响

图 5 展示了不同堆积层数 ($N=1\sim 4$) 下 1.0 mm Janus 颗粒床层的池沸腾传热特性。由图 5(a) 可见, 相较于光滑表面, 引入 Janus 颗粒床层后, 各工况的沸腾曲线均明显向左上方偏移, 核态沸腾起始过热度 (ONB) 均降至 1.4~2.3 K, 远低于光滑表面的 4.5 K。图 5(b) 为传热系数随热通量的变化曲线。在低热通量区域 ($q < 168.5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$), $N=2$ 工况的传热效率最为突出, 其传热系数达到 $238.7 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 较光滑表面提升 138%。相比之下, $N=1$ 工况因颗粒覆盖率不足, 强化效果相对最弱。

上述差异与颗粒床层内气液输运能力和附加传热阻力之间的竞争有关。 $N=1$ 工况下, 颗粒呈单层分布, 颗粒之间难以形成连通的三维孔隙网络, 导致液体横向供给受阻, 传热效率因此受限^[31]。 $N=2$ 工况则达到一种理想的结构平衡。一方面, 充足的颗粒接触点提供了高密度的活性成核位点; 另一方面, 2 层堆积形成的孔隙通道短而直, 在保证毛细吸液顺畅的同时, 将蒸汽逸出的流动阻力降至较低水平, 因此在中低热通量下表现最优。 $N=3$ 和 $N=4$ 工况虽然进一步增加了成核位点, 但在低热通量下, 床层厚度增加带来的颗粒间附加接触热阻和蒸汽逸出阻力较为明显, 导致其传热系数低于 $N=2$ 工况。

值得注意的是, 图 5(a) 中 $N=3$ 和 $N=4$ 工况的沸腾曲线在约 $200 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 附近出现后弯现象, 即热通量升高时壁面过热度降低。已有研究观察到类似的沸腾曲线后弯现象^[32]。对于 $N=3$ 、 $N=4$ 工况, 该现象主要与中高热通量下颗粒床层综合换热能力的增强有关。随着热通量升高, 颗粒间隙及床层邻近加热表面区域的气泡成核增强, 气泡生成与脱离过程促进了床层附近气液更新, 同时床层下部连通孔隙仍可维持液体补给, 从而削弱了床层厚度增加所带来的附加传热阻力, 使传热系数提高。由 $h=q/\Delta T$ 可知, 当传热系数增幅较大时, 壁面过热度可随热通量升高而降低, 从而呈现沸腾曲线的后弯特征。

当热通量继续升高至 $260 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上时, 各工况间的传热性能发生明显变化。如图 5(a) 所示, 薄层结构 ($N=1$ 、 $N=2$) 分别在 $143.7 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $168.5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 附近达到临界热通量 (CHF), 而厚层结构 ($N=3$ 、 $N=4$) 的 CHF 可突破 $300 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 较光滑表面提升幅度超过 173%。毫米颗粒在实验过程中并非始终静止于加热面。随着热通量升高, 气泡生成、合并和脱离对颗粒床层的扰动增强, 使颗粒在加热面附近发生局部浮动、短程位移和重排。对于厚层结构, 底层颗粒受上方颗粒约束, 能够维持相对稳定的孔隙通道, 保障液体向加热面的持续补给; 上层颗粒更易受蒸汽作用而发生运动, 从而强化气液混合并促进气泡脱离。底层供液与上层强化扰动的共同作用, 使厚层颗粒系统能够承受更高的热负荷。

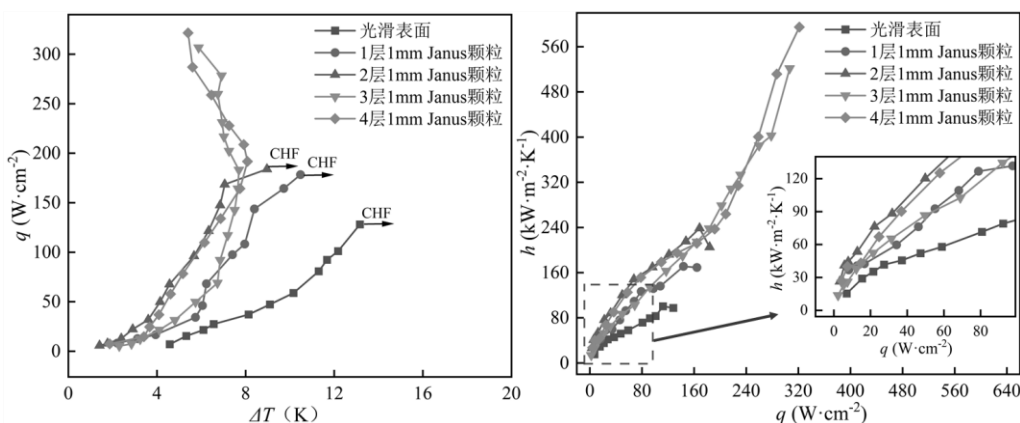


图 5 毫米级 Janus 颗粒堆积层数对池沸腾传热性能的影响

Fig.5 Effect of stacking layer number of millimeter-scale Janus particles on pool boiling heat transfer performance

注:(a)沸腾曲线 (b)传热系数随 q 的变化

2.2 纳米 Janus 颗粒对毫米 Janus 颗粒床层的协同强化作用

(1) 不同质量分数纳米 Janus 颗粒在 1 层毫米颗

粒床层中的传热性能。在 1 层毫米颗粒床层基础上, 分别引入质量分数为 0.02 wt.%、0.05 wt.% 和 0.08 wt.% 的纳米 Janus 颗粒进行实验。

图6(a)、(b)展示了添加纳米 Janus 颗粒后,1 层毫米颗粒床层的沸腾曲线与传热系数的变化。如图6(a)所示,随着纳米颗粒质量分数的增加,沸腾曲线呈单调优化趋势。其中,0.08 wt.%工况的综合性能最优,其 CHF 达到 $242.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,较纯毫米颗粒床提升 68.4%。图6(b)为对应工况下的传热系数变化曲线。在 0.08 wt.% 工况下,最高传热系数(HTC)达到 $232.9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,提升幅度达 36.2%。在低热通量区间($q < 61.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$),引入纳米 Janus 颗粒均能改善池沸腾传热性能。这是由于加入纳米颗粒丰富了毫米颗粒床层内的孔隙尺度,增加了潜在成核位点,并与毫米级孔隙结构协同改善液体补充,从而强化池沸腾传热。

随着热通量升高,不同质量分数工况的传热表现出现分化。0.02 wt.%与 0.05 wt.%工况因纳米颗粒对界面特性和床层孔隙结构的调节作用相对有限,因而传热强化幅度较小。在高热流下液体补充能力无法匹配剧烈的蒸汽生成速率,导致传热性能较早恶化。0.08 wt.%工况在成核位点、液体补充与床层流动阻力之间表现出较好的协调作用,因而在较高热通量下仍保持较好的传热性能。纯毫米颗粒工况虽无附加热阻且毛细作用稳定,但因成核点密度有限,其传热效果低于优化后的纳米复合体系。

(2)不同质量分数纳米 Janus 颗粒在 2 层毫米颗粒床层中的传热性能。在 2 层毫米颗粒床层(低热通量下性能最优)中,分别加入质量分数为 0.08 wt.%、0.2 wt.% 和 0.5 wt.% 的纳米 Janus 颗粒进行实验。

图6(c)和(d)展示了添加不同质量分数纳米 Janus 颗粒对 2 层毫米颗粒床层传热性能的影响。由图6(c)可见,0.2 wt.%工况的沸腾曲线位于最左侧,表明其传热性能最佳。该工况下,ONB 低至 0.91 K,CHF 达到 $244.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。相比之下,0.5 wt.% 工况的曲线向右偏移,性能明显恶化。图6(d)为传热系数变化曲线。0.2 wt.%工况的 HTC 在全热流范围内均为最高;而 0.5 wt.% 工况的 HTC 达到峰值后迅速衰减,甚至低于无纳米颗粒的基准组,这一趋势与沸腾曲线的变化趋势一致。

为验证实验结果的可重复性,对“2 层毫米级 Janus 颗粒与 0.2 wt.% 纳米级 Janus 颗粒”组合工况进行了多次独立重复实验。该工况下 CHF 和 HTC 的相对标准偏差分别为 6.72% 和 7.24%。考虑到测量

本身存在不确定性,以及颗粒重新铺设、纳米颗粒分散状态等因素,上述偏差处于合理范围内,表明该组合工况具有良好的可重复性。

在低热通量下,0.2 wt.%的纳米 Janus 颗粒能够在增加活性核化位点密度、增强毛细吸力的同时,避免对毫米级孔隙通道造成显著堵塞,因而表现出最优的传热性能。0.08 wt.% 工况中纳米颗粒含量相对较低,对界面特性和床层孔隙结构的调节作用有限,导致 HTC 和 CHF 的提升幅度较小^[33]。0.5 wt.% 工况中,颗粒团聚及其对床层孔隙通道的不利影响可能增强,同时附加传热阻力增大,导致传热性能下降。随着热通量升高($q > 66.8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$),各工况的性能差异进一步增大,0.5 wt.% 与 0.08 wt.% 体系传热性能不及纯 2 层毫米颗粒工况。

2.3 Janus 颗粒强化沸腾传热的机理分析与讨论

图7对比了光滑表面、单一毫米颗粒、单一纳米颗粒及毫纳颗粒组合工况的池沸腾传热性能。由图7(a)可知,光滑表面的沸腾曲线位于右下方,表明在相同热通量下其过热程度最高。引入不同尺度 Janus 颗粒后,沸腾曲线明显左移,ONB 降低。其中,由“2 层毫米 Janus 颗粒与 0.2 wt.% 纳米 Janus 颗粒”组成的复合工况,其沸腾曲线位于左上方区域,表现出最优的池沸腾传热性能。该工况的临界热通量较光滑表面提升 117.7%。图7(b)给出了各工况下传热系数的变化规律。上述毫纳组合工况在较宽的热通量范围内均能保持较高的传热系数,较光滑表面提升 149.9%。相比之下,单一毫米颗粒工况虽能提供一定的成核位点,但在高热流条件下受蒸汽逸出阻力增大与液体补给不足的共同制约,传热性能提升幅度有限;单一纳米颗粒(0.05 wt.%)工况的传热系数相对较低,表明仅加入该质量分数的纳米颗粒尚不足以形成与毫米颗粒床层相当的综合强化效果;光滑表面因核化点密度不足,缺乏动态扰动,因此强化效果最弱。在单一纳米颗粒及毫纳颗粒组合工况中,当总运行时间达到 190~210 min 后,平均 HTC 随时间的变化幅度均明显减小。此时,纳米颗粒继续沉积所引起的传热性能变化已十分有限,纳米颗粒的沉积接近动态平衡。

为分析毫米级 Janus 颗粒床层对沸腾过程的影响,图8给出了光滑表面和 2 层毫米级 Janus 颗粒床层在不同热通量下的高速摄影图像。由图8(a)可见,光滑表面在 $q = 7.2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时仅有少量气泡生成。随着热通量升高,气泡数量逐渐增多,相邻气泡间

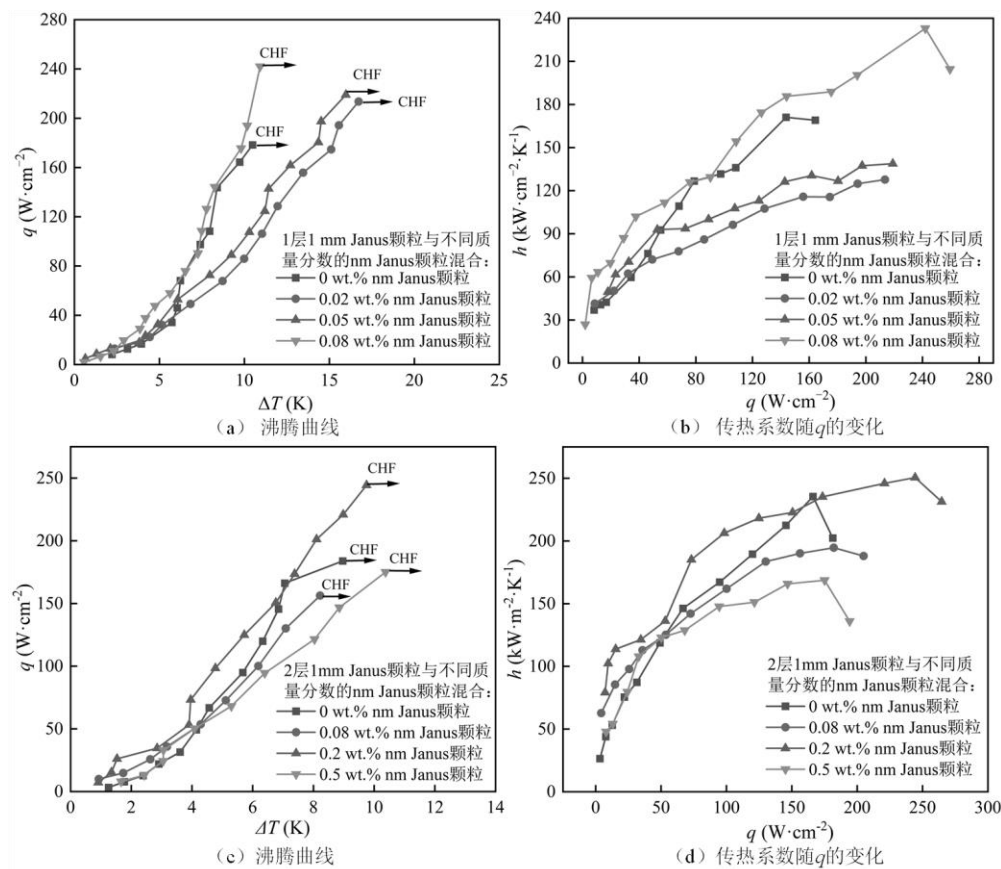


图6 纳米Janus颗粒质量分数对毫米颗粒床层传热性能的影响

Fig.6 Effect of Janus nanoparticle mass fraction on heat transfer performance of millimeter particle bed layer

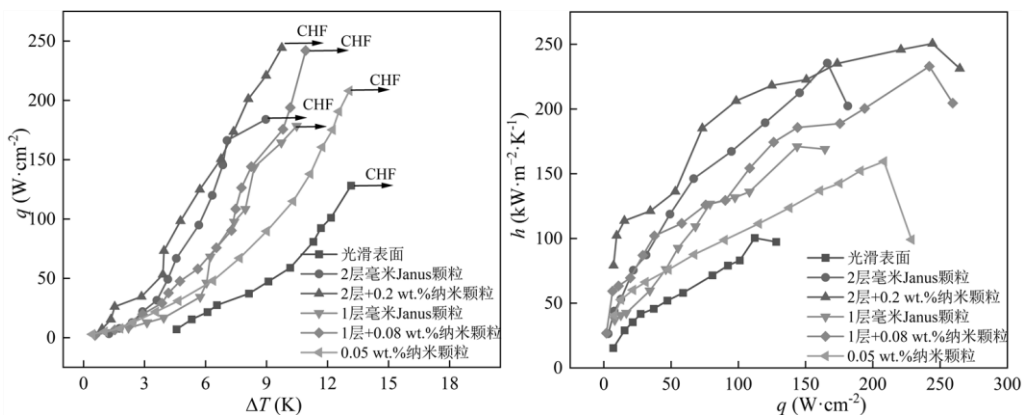


图7 不同Janus颗粒体系与光滑表面的池沸腾传热性能对比

Fig.7 Comparison of pool boiling heat transfer performance between different Janus particle systems and smooth surface

注:(a)沸腾曲线 (b)传热系数随 q 的变化

的合并现象也更明显。在较高热通量下,加热面上方可观察到较大的不规则气泡,局部气泡覆盖范围增大。由图8(b)可见,2层毫米Janus颗粒床层在 $q=5.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,颗粒及其间隙附近已有气泡生成。随热通量升高,床层不同位置的气泡数量均有所增加,呈现小气泡与合并气泡共存的状态。与光滑表面相比,颗粒床层附近的气泡分布范围更广、数量

更多,表明引入颗粒增加了气泡成核位点,并使气泡更新过程更加活跃。此外,颗粒间形成的孔隙有利于液体补充和蒸汽排出,从而削弱了气泡在局部区域的持续聚集。

图8(c)为2层毫米级Janus颗粒床层在 $q=96.2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时某一时刻的连续图像。随着气泡的生长、合并与脱离,部分颗粒在加热面附近发生短程位移

和局部重排,表明沸腾诱导的气液扰动能够改变颗粒床层的局部结构。图8(d)为2层毫米级Janus颗粒床层在 $q=121.6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时某一时刻的连续图像,可以看出,随热通量升高,气泡运动加剧,颗粒运动

及床层局部重排也更加显著。由于毫米级颗粒密度较大,其运动范围主要集中在加热面附近。这种运动增强了床层附近的流体扰动,有利于促进局部气液更新。

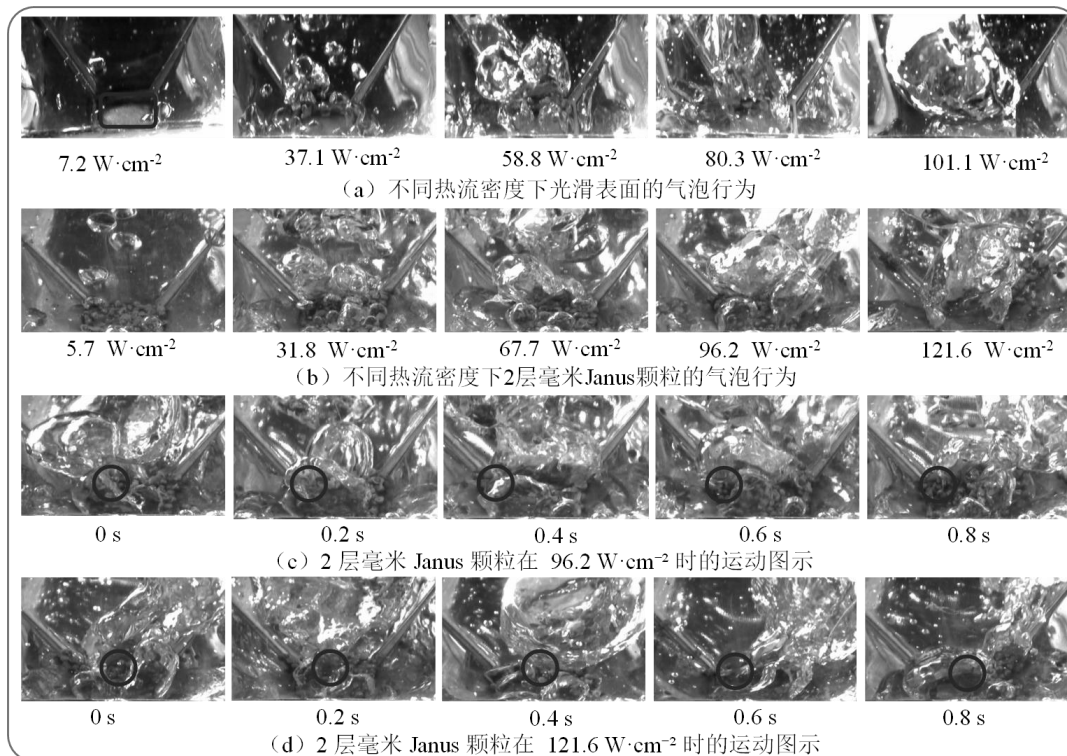


图8 光滑表面与2层毫米级Janus颗粒床层的沸腾可视化图像

Fig.8 Visualized boiling images of the smooth surface and two-layer millimeter-scale Janus particle bed

图9为双亲性Janus颗粒强化池沸腾传热的机理示意图。上述毫纳颗粒组合工况对池沸腾传热的强化,源于颗粒表面润湿性、床层孔隙结构及局部颗粒运动对气液两相输运过程的协同调节,具体可归结为以下三个方面。

(1) Janus颗粒疏水侧低表面能降低成核能垒,钉扎效应诱导气泡脱离。传热系数的提升依赖于核态沸腾的有效触发、活性成核位点密度的增加以及气泡脱离频率的提高。如图9(a)所示,双亲性Janus颗粒的疏水侧因具有较低的表面自由能,降低了液体在固体表面的附着功,从而为气相的生成提供了物理条件。经典非均相成核理论指出^[34],液体在固体表面形成临界汽核所需的自由能垒 $\Delta\Omega^*$ 由均相成核能垒 $\Delta\Omega_{\text{hom}}^*$ 与几何折减因子 $\Psi(\theta)$ 共同决定,其数学表达如下:

$$\Delta\Omega^* = \Delta\Omega_{\text{hom}}^* \cdot \Psi(\theta) \quad (8)$$

$$\Psi(\theta) = \frac{2 + 3\cos\theta - \cos^3\theta}{4} \quad (9)$$

式中, $\Delta\Omega_{\text{hom}}^* = 16\pi\sigma^3 \cdot (\Delta P)^{-2} \cdot 3^{-1}$, σ 为气液表面张

力, ΔP 为过热度驱动的饱和压差, θ 为流体的本征接触角。对于Janus颗粒的疏水侧,由于 $\cos(\theta) < 0$,几何折减因子减小,气泡成核自由能垒随之降低,使得该组合工况在低过热度下即可激活微小成核位点,进而增加整个体系内的活性成核位点密度。同时,Janus颗粒双亲性边界约束了气泡的脱离动力学行为。当气泡在疏水区成核并横向生长至亲水边界时,界面张力的空间变化会诱发三相接触线的钉扎效应^[35]。该钉扎效应限制了气泡底部接触直径的扩展,使得作用于气泡底部的表面张力垂直分量保持稳定。随着气泡体积增大,其所受向上浮力逐渐增大,促使气泡在较小体积下即可克服表面张力并脱离壁面。在相同热通量条件下,气泡生长周期缩短,脱离频率随之提高。因此,Janus颗粒表面的润湿性差异既有利于气泡成核,也能对气泡生长和脱离过程产生调节作用。

(2) Janus颗粒亲水侧亲液特性驱动毛细抽吸,持续向加热面补充液体。在高热通量区域,加热表

面局部液膜发生干涸是限制临界热通量上限的主要因素。Janus颗粒的亲水侧凭借其亲液特性,可主动驱动液体向蒸发区域进行回流补偿。如图9(b)所示,纳米Janus颗粒沉积于毫米颗粒床层及加热面上,可与毫米级颗粒床层共同形成分级孔隙结构。该结构的毛细抽吸压差 ΔP_{cap} 遵循 Young-Laplace 方程^[36]:

$$\Delta P_{\text{cap}} = \frac{2\sigma}{r_{\text{eff}}} \cos \theta \quad (10)$$

式中, r_{eff} 为有效孔隙半径。Janus颗粒的亲水侧使有效接触角 θ 减小,该特性与纳米Janus颗粒较小的有效孔隙半径 r_{eff} 相结合,在多孔网络内产生持续的毛细驱动力。底层毫米级孔道为蒸汽提供逸出通道,从而减小蒸汽逸出对液体回流的动力学阻碍。同时,纳米Janus颗粒的亲水侧凭借毛细作用,促进周围液体向蒸发区域的渗透与补充。该流体

输运机制补偿了微液层的蒸发消耗,减缓局部干斑向连续气膜的演化,进而推迟沸腾危机,提高临界热通量。

(3)毫米颗粒局部运动促进床层附近的气液更新。自由颗粒床层具有一定的可动性,气泡的生成、长大和脱离会引起颗粒床层的局部扰动。由图8(c)可见,在较高热流下,部分毫米级Janus颗粒发生短程位移和局部重排,说明气泡运动产生的气液扰动可作用于颗粒床层。颗粒的局部运动进一步增强了床层附近的流体扰动,有利于液体补充、蒸汽逸出及气泡脱离后的流体更新。对于毫纳组合工况,毫米颗粒床层形成的潜在成核位点和气液输运通道,与纳米颗粒沉积形成的微纳结构及毛细补液作用相互配合,从而改善复合体系的池沸腾传热性能。

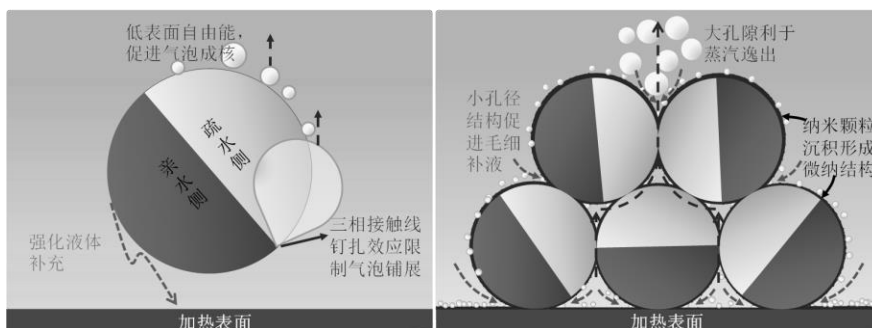


图9 双亲性Janus颗粒强化沸腾传热机理

Fig.9 Enhancement mechanism of boiling heat transfer using multi-scale amphiphilic Janus particles

注:(a)Janus颗粒表面的气泡钉扎与脱离 (b)多尺度颗粒床层的气液通道分离

3 结论

制备了毫米级与纳米级双亲性Janus颗粒,研究了Janus颗粒层数和不同粒径颗粒组合对池沸腾传热性能的影响,并分析了其强化机理。主要结论如下:

(1)毫米级Janus颗粒床层的堆积层数对池沸腾传热性能具有显著的影响。与光滑表面相比,毫米级颗粒床层均能降低沸腾起始过热度,并提高临界热通量与传热系数。低热通量下($q < 168.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$),2层堆积结构($N=2$)在成核位点密度、毛细吸液能力与蒸汽逸出阻力间取得了较优的流体动力学平衡,其最大HTC较光滑基准面提升138%。

(2)纳米级Janus颗粒的强化效果存在最佳质量分数阈值。在2层毫米Janus颗粒床层基础上,添加0.2 wt.%纳米Janus颗粒时,系统综合传热性能最

优,核态沸腾起始过热度降至0.91 K,CHF与HTC较光滑表面分别提升了117.7%和149.9%。纳米颗粒质量分数过低(0.08 wt.%),其对界面特性和床层孔隙结构的调节作用有限;质量分数过高(0.5 wt.%),颗粒团聚、床层流动阻力及附加传热阻力可能增大,从而导致系统传热性能下降。

(3)Janus颗粒的双亲结构实现了分区域协同强化。疏水侧通过降低气泡成核能垒并结合接触线钉扎效应,促进了气泡的脱离,从而提升核态沸腾阶段的HTC;亲水侧通过改善颗粒表面的润湿性和增强毛细抽吸,促进液体向受热区域补充,延缓加热面的局部干涸,从而提高CHF。此外,沸腾引起的气液扰动可使毫米颗粒发生短程位移和局部重排,进一步促进床层附近的气液更新。

符号说明

CHF——临界热通量, $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
 h ——传热系数, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
 HTC——传热系数, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
 N ——毫米级 Janus 颗粒堆积层数
 ONB——核态沸腾起始过热度, K
 q ——热通量, $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
 r_{eff} ——有效孔隙半径, m
 T_1, T_4 ——加热铜柱最下、最上盲孔测点的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_f ——工质温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{sat} ——工质饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_w ——加热表面中心温度, $^{\circ}\text{C}$
 ΔP ——过热液体与饱和液体之间的压力差, Pa
 ΔP_{cap} ——毛细抽吸压差, Pa
 ΔT ——壁面过热度, K
 $\Delta \Omega^*$ ——气泡成核自由能垒, J
 $\Delta \Omega_{\text{hom}}^*$ ——均相成核自由能垒, J
 θ ——有效接触角, $^{\circ}$
 λ ——铜块热导率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 σ ——表面张力, N/m
 $\psi(\theta)$ ——几何折减因子

参考文献

- [1] Liang G T, Mudawar I. Pool boiling critical heat flux (CHF) - Part 1: Review of mechanisms, models, and correlations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **117**: 1352-1367.
- [2] Lim J H, Yu S H. A historical review of high heat flux cooling techniques[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2025, **57**(10): 103725.
- [3] Meena C S, Kumar A, Roy S, et al. Review on boiling heat transfer enhancement techniques[J]. Energies, 2022, **15**(15): 5759.
- [4] 李文祥, 王钧禾, 郝怡静, 等. 淬火初温影响疏水表面沸腾传热特性的实验研究[J]. 化工学报, 2022, **73**(12): 5394-5404.
 Li W X, Wang J H, Hao Y J, et al. Experimental study on the effect of initial quenching temperature on the boiling heat transfer characteristics of hydrophobic surfaces[J]. CIESC Journal, 2022, **73**(12): 5394-5404.
- [5] Ding T, Chen X X, Li Z Y, et al. A review of flow boiling heat transfer: Theories, new methods and emerging applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, **215**: 115615.
- [6] Qin S Y, Ji R Y, Miao C Y, et al. Review of enhancing boiling and condensation heat transfer: Surface modification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, **189**: 113882.
- [7] Jiang Z Y, Bu S C, Yang X P, et al. Saturated pool boiling heat transfer of R1233zd(E) on aluminum-based microstructured surfaces: experimental study and a model for critical heat flux[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, **274**: 126713.
- [8] Jia H W, Xu L T, Xiao X, et al. Study on boiling heat transfer of surfactant solution on grooved surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **181**: 121876.
- [9] Liu X L, Yang J Y, Zou Q F, et al. Enhancing liquid - vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces [J]. ACS Nano, 2025, **19**(10): 9513-9589.
- [10] Kumar R, Pranav P, Gouda R K, et al. Enhancement of pool boiling heat transfer using eco-hybrid nanofluids[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2026, **196**: 105559.
- [11] 李康睿, 王军, 夏国栋. 锥形 Janus 颗粒强化纳米流体导热特性的模拟[J]. 物理学报, 2025, **74**(19): 166-173.
 Li K R, Wang J, Xia G D. Simulation study on thermal conductivity of conical Janus particles reinforced nanofluids[J]. Acta Physica Sinica, 2025, **74**(19): 166-173.
- [12] Nithyanandam T, Naveenraj A, Jeswanth R, et al. Review on the effect of various nanofluids, concentration and its thermophysical properties in pool boiling performance[J]. Annals of the Romanian Society for Cell Biology, 2021, **25**(5): 1899-1912.
- [13] 赵文琪, 邓燕君, 朱春英, 等. 纳米粒子稳定的 Pickering 乳液及其液滴聚并动力学研究进展[J]. 化工学报, 2024(1): 33-46.
 Zhao W Q, Deng Y J, Zhu C Y, et al. Research progress on nanoparticle stabilizing Pickering emulsion and droplet coalescence dynamics[J]. CIESC Journal, 2024(1): 33-46.
- [14] Lou D Y, Yang D C, Dong C S, et al. Enhancement of pool boiling heat transfer by laser texture-deposition on copper surface[J]. Applied Surface Science, 2024, **661**: 160015.
- [15] Ravichandran J, Das S. Silver dendrite decorated microporous copper structures for enhancement of nucleate boiling heat transfer [J]. Heat Transfer Engineering, 2026: 1-17.
- [16] Sezer N, Khan S A, Biçer Y, et al. Silver nanorod-induced porous networks: a pathway to efficient thermal energy transfer via pool boiling heat transfer[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, **44**: 102849.
- [17] Wang M, Wang J. Flow boiling of nanofluids in microchannel heat exchangers: a critical review[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, **55**: 102930.
- [18] Velazquez J, Keblinski P, Moran J L. Active heat transfer fluids (AHTF): Enhancement of convective heat transfer by bubble-driven self-propelled microparticles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, **256**: 127966.
- [19] 于志家, 刘展红, 孙成新, 等. 流态化固体颗粒对对流沸腾传热的强化[J]. 工程热物理学报, 2002, **23**(6): 745-748.
 Yu Z J, Liu Z H, Sun C X, et al. Heat transfer enhancement by fluidized solid particles in convective boiling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, **23**(6): 745-748.
- [20] 施明恒, 赵言冰, 刘中良. 固体颗粒强化液体沸腾换热和抗垢特性的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, **32**(3): 419-423.
 Shi M H, Zhao Y B, Liu Z L. Investigation on boiling heat transfer enhancement and anti-scaling process by using solid particles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, **32**(3): 419-423.
- [21] Wang D D, Chen L, Zhu X Y, et al. Numerical simulation study on the influence parameters of movable free particles on boiling heat transfer[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, **284**: 129154.
- [22] Sarangi S, Weibel J A, Garimella S V. Effect of particle size on surface-coating enhancement of pool boiling heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **81**: 103-113.
- [23] 刘藏丹, 王东民, 全晓军, 等. 纳米颗粒及其接触角对沸腾传热系数的影响[J]. 动力工程学报, 2018, **38**(7): 572-577.
 Liu C D, Wang D M, Quan X J, et al. Effects of contact angles of

- nanoparticles on the boiling heat transfer coefficients[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, **38**(7): 572–577.
- [24] 赵昶. Janus 颗粒对沸腾换热的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- Zhao C. Effect of Janus particles on boiling heat transfer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [25] Yuan X, Du Y P, Xu Q, et al. Synergistic effect of mixed wettability of micro–nano porous surface on boiling heat transfer enhancement[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, **42**: 101933.
- [26] 雷晴禾, 高文忠, 王诗悦, 等. 表面涂层技术强化池沸腾传热的研究进展[J]. 应用化工, 2022, **51**(2): 538–541, 546.
- Lei Q H, Gao W Z, Wang S Y, et al. Research progress of surface coating technology to enhance the pool boiling heat transfer[J]. Applied Chemical Industry, 2022, **51**(2): 538–541, 546.
- [27] Gong S, Cheng P. Lattice Boltzmann simulations for surface wettability effects in saturated pool boiling heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **85**: 635–646.
- [28] Yu Y, Wen Z X, Li Q, et al. Boiling heat transfer on hydrophilic–hydrophobic mixed surfaces: a 3D lattice Boltzmann study[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **142**: 846–854.
- [29] Noh H, Yoo J, Kim J O, et al. Porous and wettability–controlled microstructures for enhanced heat transfer coefficient in pool boiling[C]//ASME 2017 15th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2017: V001T04A003.
- [30] Kline S J. Describing uncertainties in single–sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, **75**: 3–8.
- [31] Dahariya S, Pai A J, Hwang G, et al. Pool boiling heat transfer enhancement using sintered particle wick structure[C]//Proceeding of 4th Thermal and Fluids Engineering Conference, 2019: 1269–1278.
- [32] Kim J S, Park S H, Kang S S, et al. Pool boiling inversion and secondary boiling effect on CNTs–Cu nanoparticles–coated porous surfaces[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, **38**(6): 3177–3184.
- [33] Huang C K, Lee C W, Wang C K. Boiling enhancement by TiO₂ nanoparticle deposition[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, **54**(23/24): 4895–4903.
- [34] Blander M, Katz J L. Bubble nucleation in liquids[J]. AIChE Journal, 1975, **21**(5): 833–848.
- [35] Lim D Y, Bang I C. Controlled bubble departure diameter on biphilic surfaces for enhanced pool boiling heat transfer performance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **150**: 119360.
- [36] Okwiri L A, Mochizuki T, Koito K, et al. Enhanced pool boiling via binder–jetting 3D–printed porous copper structures: CHF and HTC investigation[J]. Applied Sciences, 2025, **15**(14): 7892.