

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260124001

超疏水表面微纳结构协同强化冷凝传热研究

谢淮润¹ 何嘉诚^{1,2} 陈健勇^{1,2} 陈颖^{1,2}

(1 广东工业大学材料与能源学院 广州 510006; 2 广东省功能软凝聚态物质实验室 广州 510006)

摘要 通过构建微纳结构表面来调控液滴行为是强化冷凝传热的有效方法,现有研究大多聚焦创新微结构或纳结构来调控液滴弹跳行为,鲜有讨论2种结构的适配关系对冷凝传热的影响。本文通过调控制备工艺参数,获得了相同微结构、不同纳结构和相同纳结构,不同微结构的3片CuO纳米片-微槽道超疏水表面,通过对比两两表面的液滴动力学行为,探索表面强化冷凝传热的机制。研究表明:提高微结构参数可促进液滴的合并弹跳,有效减小钉扎液滴尺寸;降低纳结构参数可增加成核位点,降低Cassie态液滴的临界尺寸。微纳结构的协同调控可提高一次拉普拉斯压力 $F_{\Delta p1}$ 和二次拉普拉斯压力 $F_{\Delta p2}$,获得更小的临界液滴弹跳直径,提高弹跳频率,在过冷度1~16 K之间提升冷凝传热系数12%~41%。这种调控微纳结构协同作用的方法为冷凝表面传热强化提供了新的思路。

关键词 滴状冷凝;液滴弹跳;微纳结构协同;强化传热

中图分类号: TB61¹;TK124;O647.6

文献标识码: A

Study on Condensation Heat Transfer Enhancement via Synergistic Regulation of Micro/Nano Structures on Superhydrophobic Surfaces

Xie Huairun¹ He Jiacheng^{1,2} Chen Jianyong^{1,2} Chen Ying^{1,2}

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Laboratory of Functional Soft Condensed Matter, Guangzhou 510006, China)

Abstract Constructing micro/nanostructured surfaces to manipulate droplet behavior is an effective approach for enhancing condensation heat transfer. However, existing studies rarely discuss the matching effect of micro- and nano-structures. In this study, three CuO nanosheet-microchannel superhydrophobic surfaces (with identical microstructures and different nanostructures, and vice versa) were used to investigate the condensate droplet dynamics of paired surfaces and the heat transfer enhancement mechanism. The results show that increasing the microstructure parameters promotes droplet coalescence bouncing and reduces the size of pinned droplets, whereas decreasing the nanostructure parameters increases the number of nucleation sites and lowers the critical size of Cassie-state droplets. Synergistic regulation of micro/nano structures enhances both the primary Laplace pressure ($F_{\Delta p1}$) and the secondary Laplace pressure ($F_{\Delta p2}$), thereby achieving a smaller critical bouncing diameter and higher bouncing frequency. The condensation heat transfer coefficient was enhanced by 12%–41% at subcooling temperatures of 1–16 K. This method provides new insights into condensation heat transfer enhancement via micro/nano-structure synergy.

Keywords dropwise condensation; droplet bouncing; micro/nano-structure synergy; heat transfer enhancement

冷凝作为典型的高效相变传热过程,广泛应用于发电^[1]、设备热管理^[2-3]、制冷^[4-5]、海水淡化^[6]等领域。冷凝分为膜状冷凝与滴状冷凝,前者在冷凝过程中形成铺展的液膜,后者则形成离散小液滴并快速脱离更新表面,其传热性能较膜状冷凝提升数倍,一直是相变传热领域研究热点。近年来,超疏水表面上的液滴合并诱导弹跳成为强化滴状冷凝传热的新路径。

J. B. Boreyko等^[7]首次在超疏水表面上观察到

冷凝微液滴合并后自发跳离,从而实现持续的表面更新。随后N. Miljkovic等^[8]在可规模化制备的纳米结构铜表面上实现弹跳滴状冷凝并展示了对换热的促进作用,推动了弹跳滴状冷凝的研究热潮。从能量转化可描述液滴合并弹跳机理:两液滴并合后表面积减少释放界面自由能 $\Delta E_{\sigma} \approx \gamma_{lv} \Delta A$ (γ_{lv} 为气-液界面张力、 ΔA 为并合前后表面积变化),当该能量在克服接触线钉扎(与接触角滞后相关)以及合并回缩过程的黏性耗散后,仍有足够的能量转化为动能^[7,9]即

基金项目:国家自然科学基金(52436003)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52436003).)

收稿日期:2026-01-24;修回日期:2026-02-17;录用日期:2026-03-12

可实现液滴弹跳。液滴弹跳由3个变量决定:液滴合并后的尺寸(ΔA 决定)、接触线尺度(由液滴底部接触半径 R_c 决定)以及钉扎强度(由接触角滞后值 $\Delta \cos \theta$ 决定)^[9-12]。这3个变量均与微结构和纳结构尺寸有关。目前实现液滴弹跳的冷凝表面有纳米结构、微米结构、微纳复合结构等。其中微纳复合结构因兼顾纳米结构的低黏附性与微米结构的高液滴合并弹跳频率,冷凝性能最佳^[13],因此学者研究微结构和纳结构的变化对冷凝性能的提升。

在微米结构上,C. Sharma等^[14]构建CuO纳米片-梯形槽道的微纳超疏水表面,当梯形槽道开口角度为 26° 时,液滴内部所受拉普拉斯压力达到最大,液滴脱离尺寸降至 $250 \mu\text{m}$;Dong Jian等^[15]设计纳米草-V型沟槽(槽内有微柱阵列)的微纳超疏水表面,V型沟槽开口角度在 30° 时槽内微柱生成的液滴自发迁移至槽底的速度更快,液滴滚动角增大,液滴脱离尺寸降至 $200 \mu\text{m}$;Cheng Yaqi等^[16]构建CuO纳米片-V型槽道的微纳超疏水表面,V型槽道开口角度为 30° 时蒸汽优先在脊上成核并迁移至槽内,对液滴受压自发弹跳促进效果更佳,液滴脱离直径降为 $375 \mu\text{m}$ 。上述研究表明,通过调控微结构几何参数可以调整液滴底部接触半径 R_c ,进而调控液滴合并弹跳尺寸。

在纳米结构上,纳米结构中液滴容易进入结构间隙导致润湿状态向高黏附状态(Wenzel态)转变,导致接触角滞后甚至出现钉扎效应。Zhang Wenjing等^[17]构建具有缩合微滴自去除功能的仿生聚合物纳米锥薄膜超疏水表面,将纳米锥顶端尺寸降为 25nm ,有效减小固液接触面积和固液黏附力,使得液滴脱

离尺寸降至 $50 \mu\text{m}$;Wang Rui等^[18]构建几何参数可调的ZnO纳米针超疏水表面,当减少纳米针间隙为 84nm 时,成核密度提高,冷凝液滴脱离直径降为 $30 \mu\text{m}$;Wang Rui等^[19]通过调控电镀液成分浓度,制备具有不同密度的铜纳米锥超疏水表面,当纳米锥密度达到 $1.5 \times 10^6 \text{mm}^{-2}$ 时,可抑制蒸汽渗入内部成核,同时纳米锥的低黏附性提高液滴合并弹跳频率,其液滴脱离直径降为 $100 \mu\text{m}$;T. M. Thomas等^[20]在花型微米腔铝表面沉积3种超疏水物质构建出具有不同纳米纹理的超疏水表面,经Glaco涂层修饰的双层纳米纹理表面更加致密,冷凝液滴呈现稳定的Cassie态,液滴脱离尺寸达到 $50 \mu\text{m}$ 。上述研究表明,通过调控纳米结构高度、间距和直径,可显著降低接触角滞后值 $\Delta \cos \theta$ 与液滴底部接触半径 R_c ,降低合并能量损失并提高弹跳频率。

从上述微纳结构调控机理来看,单一调控微结构或纳结构难以满足液滴弹跳所需的低黏附性与小钉扎效应,微结构导致液滴底部接触半径变大和纳结构引起接触角滞后或黏附力增加,能量转化损失迅速增大。因此,协同微纳结构来调控液滴的动力学行为,降低能量损失,有望获得稳定的液滴弹跳直径和提升弹跳频率。

本文制备CuO纳米片-微槽结构,通过改变微槽的宽度 W_2 与间距 L_2 和纳米片高度 h_1 、宽度 W_1 与间距 L_1 ,制备出相同纳结构、不同微结构和相同微结构、不同纳结构3种微纳超疏水表面(图1)。通过对比三表面上液滴弹跳动力学行为以及冷凝传热特性,研究成核液滴在不同结构尺寸下的动力学行为以及液滴调控机制。

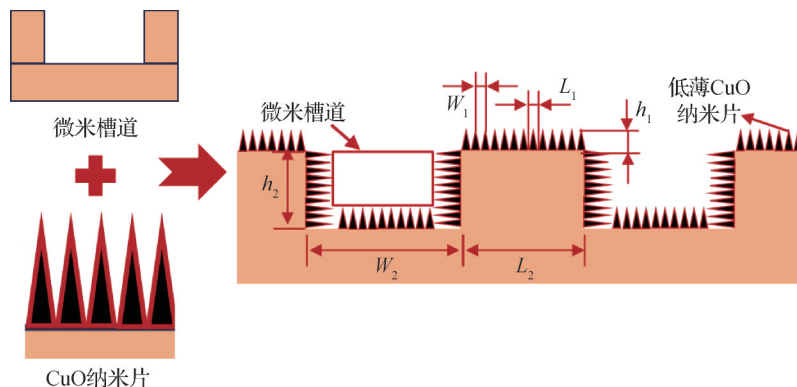


图1 超疏水表面微纳结构的协同调整图

Fig.1 Synergistic adjustment of micro/nano structures on superhydrophobic surfaces

1 实验研究

1.1 冷凝微纳表面的制备

微纳超疏水表面制备工艺流程如图2所示。

选取2块直径为 40mm 的紫铜片,分别用 4000 目和 320 目砂纸按同一方向打磨紫铜片,加工出不同尺寸的微槽道,然后依次使用丙酮、无水乙醇、 0.5mol/L 的柠檬酸溶液对铜表面清洗,彻底去除表面残留的

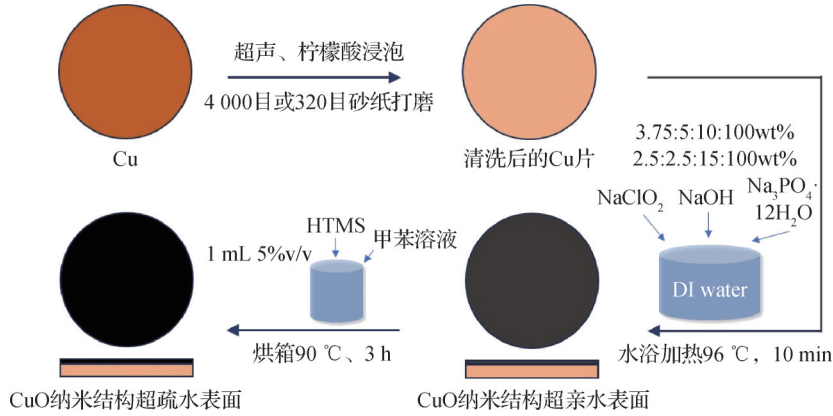


图2 表面制备流程

Fig.2 Surface fabrication process

打磨粉末、有机污染物和氧化层。之后,将铜片放入 $\text{NaClO}_2:\text{NaOH}:\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$:去离子水(各组分质量比为 3.75:5:10:100)组成的 96 °C 碱性溶液中浸泡 10 min,直至铜表面氧化生成致密均匀的 CuO 纳米片结构。用去离子水冲洗干净已氧化的紫铜片,并用氮气吹干,得到具有 CuO 纳米片的超亲水表面。然后将此超亲水表面与 1 mL 的 HTMS 甲苯溶液(各组分体积分数比为 5:95)一起置于密封的容器中,放入 90 °C 的恒温箱中加热 3 h,即可将超亲水表面改性为超疏水表面,分别命名为 SH4000 和 SH320。

将另一片经 320 目砂纸打磨后的微槽道铜片放入浓度不同的碱性溶液($\text{NaClO}_2:\text{NaOH}:\text{Na}_3\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$:去离子水(各组分质量比为 2.5:2.5:15:100)中加热至 96 °C 浸泡 10 min,可改变生成的 CuO 纳米片高度和长度,经气相沉积后获得与 SH320 不同纳结构的表面,命名为 SP320。

1.2 表面特性表征

经固液接触角测量仪(CA-100S)测得,SH4000、SH320 和 SP320 表面的表观接触角分别为 154°、151.2°、151°,由扫描电子显微镜(Hitachi SU8010)表征结果可知,3 个表面的 CuO 纳米片和微槽道结构明显不同,如图 3 所示,具体尺寸如表 1 所示。

表 1 所示为由表面 SEM 图经 image J 软件测量获得的微观尺寸,SH4000 与 SH320 表面有相同的纳结构,但前者的微槽更小;SH320 和 SP320 表面有相同的微结构,但后者的纳结构更低薄。

1.3 实验台设计

这 3 片具有不同微纳结构尺寸的铜表面在下面的实验中充当不同的冷凝表面,研究不同过冷度下不同微纳结构尺寸的铜表面的液滴动力学行为及其冷凝传热性能。

本文搭建的蒸汽冷凝可视化实验系统由冷凝

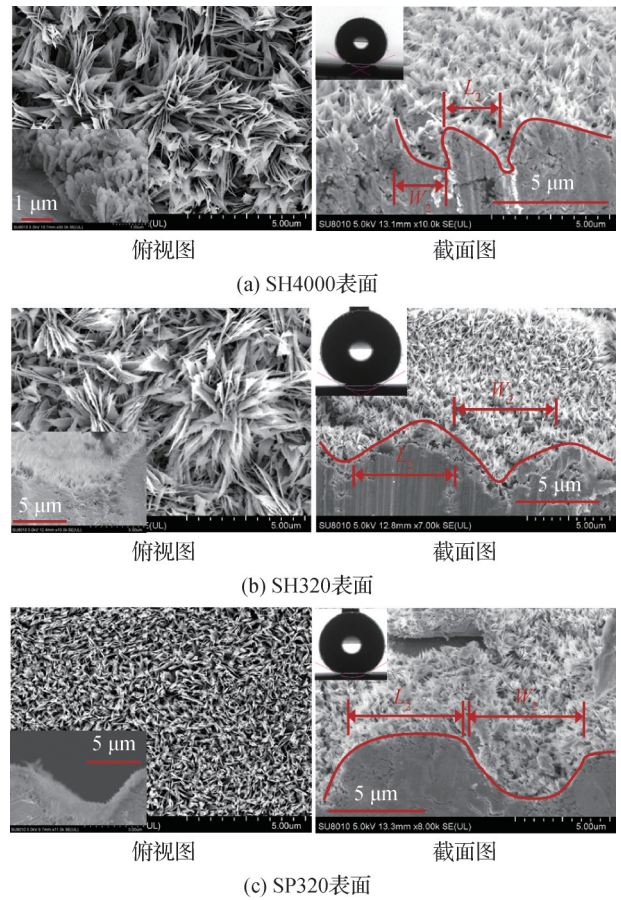


图3 改性表面 SEM 图

Fig.3 SEM images of modified surfaces

表 1 CuO 纳米片和微槽道的结构尺寸

| 超疏水表面 | CuO 纳米片 | | | 微槽道 | | |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | L_1 | W_1 | h_1 | L_2 | W_2 | h_2 |
| SH4000 | 0.27 | 1 | 1 | 2.4 | 2.2 | 1.5 |
| SH320 | 0.27 | 1 | 1 | 6 | 6 | 3 |
| SP320 | 0.12 | 0.35 | 0.6 | 6 | 6 | 3 |

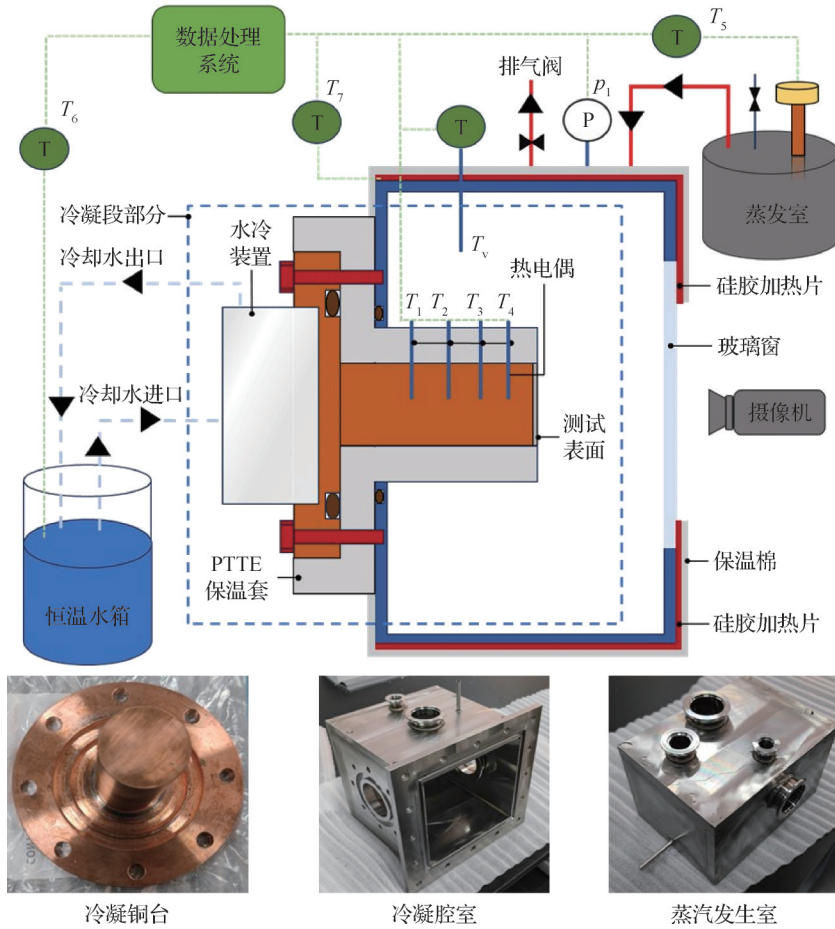


图4 实验台示意图

Fig.4 Schematic of the test rig

室、蒸发室、真空泵、高速相机、恒温水箱子系统 and 数据采集子系统构成,如图4所示。冷凝室为边长200 mm的不锈钢正方形箱体,冷却台设置在其侧面,由直径为40 mm和140 mm的紫铜圆柱和圆盘构成。小圆柱段用于固定测试表面,柱体上均匀分布了4个直径为2 mm、间隔为20 mm的圆孔,圆孔中布置4根T型热电偶来测量柱体的不同位置温度 $T_1 \sim T_4$ 。大圆盘背后布置水冷腔,带走经铜圆柱导热过来的测试表面蒸汽冷凝热量,利用热电偶测得的恒温水箱的冷却水温度 T_6 精准控制冷凝表面的温度。冷却台用聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)作绝热处理,冷却台与冷凝室之间通过螺栓连接。为防止蒸汽在冷凝室内壁面冷凝,使用硅胶加热片覆盖整个冷凝室外壁,通过热电偶测得外壁温度 T_7 进行控温,再对其包裹保温棉加强保温。在冷凝室右侧开有视窗,便于高速相机在实验过程中实时记录测试表面的液滴行为。通过T型热电偶测得冷凝室内蒸汽的温度 T_v 和压力传感器测得冷凝室内压力 p_1 。蒸发室是边长为190 mm、宽为80 mm,高为100 mm的不锈钢箱体。箱体中去离子水的温度通过调节箱体中的

电加热棒功率控制,并由T型热电偶来监测蒸汽和去离子水的温度 T_5 。蒸发室产生的蒸汽经内径为40 mm的真空波纹管流入冷凝室。各实验部件机械加工精度为 ± 0.02 mm,用于测量的T型热电偶的精度均为 ± 0.05 K,测量蒸汽压力的压力传感器的精度均为 $\pm 0.25\%$ 。

实验装置由氦质谱检漏仪进行检漏保证其气密性良好。本实验中,蒸汽饱和和压力为60 kPa,饱和温度为85.9 °C,通过冷却水温度将冷凝表面过冷度控制在0~16 K。

1.3 实验数据处理及不确定度

测试表面的冷凝热流密度由冷却台柱体内热电偶测得的温度梯度计算得到,冷凝热流密度通过傅里叶一维稳态导热定律计算,其表达式为:

$$q = \frac{k}{3} \left[\frac{(T_4 - T_3) + (T_3 - T_2) + (T_2 - T_1)}{\delta} \right] \quad (1)$$

式中: k 为铜的导热系数, $W/(m \cdot K)$; $T_4 \sim T_1$ 为距离测试表面80~20 mm的热电偶温度,每个温度点相距20 mm,K; δ 为热电偶之间的距离,m; q 为冷凝热流密度, kW/m^2 。

冷凝表面温度通过傅里叶导热定律逆推获得:

$$T_s = \frac{q\delta}{k} + T_4 \quad (2)$$

式中: T_4 为最靠近冷凝表面的热电偶温度,K; T_s 为冷凝表面温度,K。

根据式(1)和式(2),可以求得实验测试样品表面的冷凝传热系数:

$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{q}{T_v - T_s} \quad (3)$$

式中: ΔT 为冷凝壁面的过冷度,K; T_v 为冷凝室内测得的蒸汽温度,K; h 为冷凝表面的冷凝传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

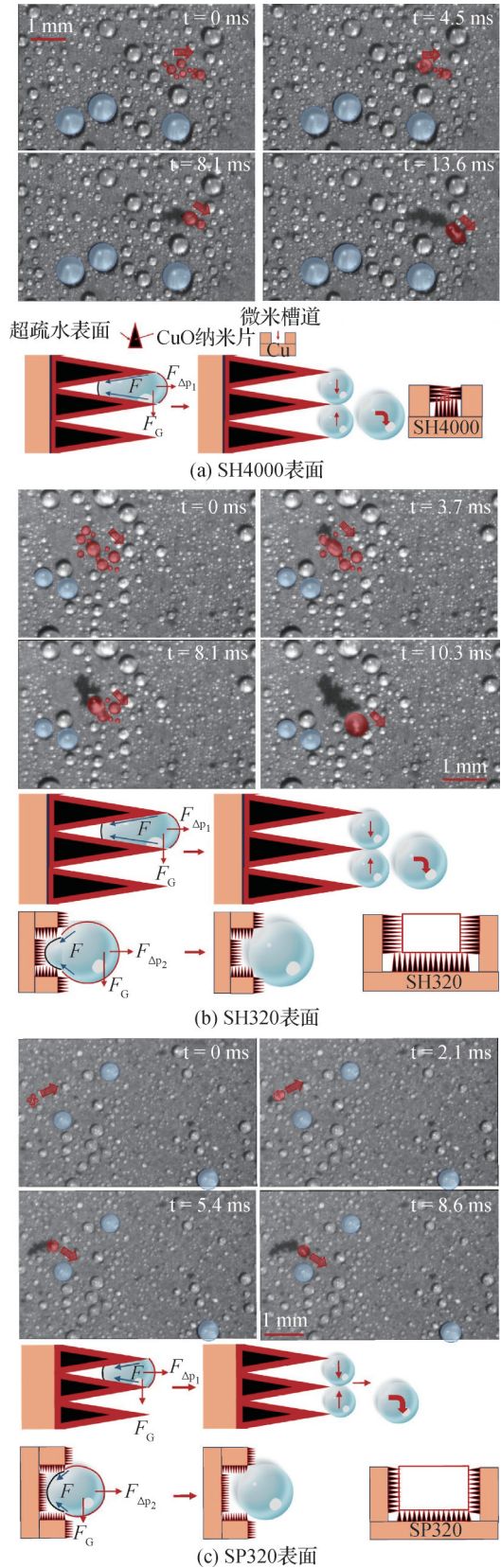
实验过程的蒸汽热流密度 q 的不确定度为 $\pm 9.4\%$,壁面过冷度 ΔT 的不确定度为 $\pm 4.6\%$,传热系数 h 的不确定度为 $\pm 10.3\%$ 。

2 结果与分析

2.1 冷凝液滴动力学行为

为了研究不同微纳结构表面上的液滴动力学行为,将3种超疏水表面置于蒸汽冷凝可视化实验系统中,开展纯蒸汽冷凝实验,采用高速摄像机记录冷凝过程液滴行为。图5所示为3种超疏水表面在 $\Delta T=5\text{ K}$ 时冷凝液滴形态(图中红色表示冷凝液滴合并弹跳行为,蓝色表示冷凝液滴滞留现象)。

具有相同纳结构的SH4000表面和SH320表面上因微结构改变呈现了不同的液滴演变过程。由图5(a)可知,SH4000表面上布满大小不一的Cassie态液滴,随着时间的推移,表面发生微小液滴合并弹跳现象。Cassie态液滴在CuO纳米片上相互接触合并($t=0\text{ ms}$),液滴释放的表面能克服自身震荡的黏性耗散和固液黏附力后,剩余能量转化为动能促使液滴弹跳滚向右侧,触碰到右侧离散的小液滴($t=4.5\text{ ms}$),继续合并形成椭圆形的液滴($t=8.1\text{ ms}$)再次弹跳后受到重力作用下坠,在下坠过程中接触到另一个液滴发生合并,最终形成直径 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的纺锤状液滴弹跳离开表面($t=13.6\text{ ms}$),露出黑色的冷凝表面进行新的成核生长。SH4000表面的CuO纳米片提供的拉普拉斯压力 $F_{\Delta p_1}$ 促使大部分成核液滴形成Cassie态,纳米片内少部分成核液滴相互聚并无法形成Cassie态,变成大尺寸钉扎液滴(蓝色区域)无法脱离表面,最大钉扎液滴直径为 $720\text{ }\mu\text{m}$ 。相较于SH4000表面,SH320表面布满了尺寸更小的Cassie态离散液滴,表面离散的液滴随着冷凝进行开始相互接触发生合并弹跳(图5(b)),从离散的液滴合并弹跳($t=0\text{ ms}$)后下坠到与右下方液滴继续合并($t=8.1\text{ ms}$)弹跳,最终形



F 液滴所受的黏附力; F_G 液滴所受的重力; $F_{\Delta p_1}$ 液滴所受纳米片挤压产生的一次拉普拉斯压力; $F_{\Delta p_2}$ 液滴所受微槽道挤压产生的二次拉普拉斯压力。

图5 $\Delta T=5\text{ K}$ 时3种表面液滴形态及脱离机理
Fig.5 Droplet morphology on three types of surfaces at $\Delta T=5\text{ K}$ and schematic of departure mechanism

成直径 250 μm 的大液滴弹离表面, 露出表面成核位点 ($t=10.3 \text{ ms}$), 其表面合并液滴的滞留时间较 SH4000 缩短 3.3 ms。SH320 表面液滴所受微槽道拉普拉斯压力 $F_{\Delta p_2}$ 可由式(4)^[16]得到:

$$F_{\Delta p_2} = (p_1 - p_2) = 2\gamma_{lv} \left(\frac{\cos(\alpha/2 - \theta_1 + \pi)}{r_1} - \frac{\sin(\theta_2)}{r_2} \right) \quad (4)$$

式中: r_1 为液滴受槽道挤压的靠近气相一侧的上表面曲率半径, μm ; r_2 为液滴受槽道挤压的靠近槽道一侧的下表面曲率半径, μm ; θ_1 为受挤压液滴靠近气相一侧上表面与槽道边缘的接触角, ($^\circ$); θ_2 为受挤压液滴靠近槽道一侧下表面与槽道边缘的接触角, ($^\circ$); α 为槽道开口角度, ($^\circ$)。微米结构内受挤压的 Cassie 态液滴的 θ_1 和 θ_2 分别随微米结构尺寸的增大而减小和增大, 因此 Cassie 态液滴所受的 $F_{\Delta p_2}$ 随微米结构尺寸的增大而提高。SH320 表面较 SH4000 表面的微槽道结构更大, 液滴接触角滞后 $\Delta\cos\theta$ 值更小, 液滴受到更大的拉普拉斯压力 $F_{\Delta p_2}$, 液滴有更高的初始速度弹离表面, 液滴滞留时间的缩短加快了液滴合并弹跳频率, 表面钉扎液滴直径降为 680 μm (蓝色区域), 说明纳米结构尺寸不变时, 提高微槽道结构尺寸可降低 Cassie 态液滴的接触角滞后值 $\Delta\cos\theta$, 促进小液滴的合并弹跳, 降低钉扎液滴尺寸。

相较于 SH320 表面, SP320 表面在相同微槽道结构下改变了纳米结构尺寸, SP320 表面拥有更加致密低薄的 CuO 纳米片。纳米结构致密程度的提升增多了表面成核位点, 因此 SP320 表面布满更多密集微小的冷凝液滴 (图 5(c)), 液滴直径较 SH320 表面明显下降, 随着时间推移, SP320 表面发生液滴合并弹跳 ($t=0 \text{ ms}$), 合并液滴滚向右侧, 与右上方液滴继续合并 ($t=2.1 \text{ ms}$) 形成椭圆形液滴 ($t=5.4 \text{ ms}$), 再次弹跳后受重力作用下落, 与右下方液滴合并形成直径 200 μm 的大液滴弹离表面 ($t=8.6 \text{ ms}$), 液滴滞留时间较 SH320 表面缩短 1.7 ms。SP320 表面液滴脱离直径的下降与 Zhang Wenjing 等^[17] 研究结果一致: 纳米结构高度和间距的降低会增加成核密度并提高液滴合并的概率, 减小液滴脱离直径, 有助于提高传热性能。SP320 表面较 SH320 表面的 CuO 纳米片高度和间距更小, 成核液滴移动到纳米片顶部距离更短, 形成 Cassie 态临界尺寸变小, 使得液滴在纳米片上的接触半径 R_c 和接触角滞后 $\Delta\cos\theta$ 减小, 因此 Cassie 态液滴合并后有更多能量转化为动能, 加快弹跳速度, 缩短滞留时间, 降低表面钉扎液滴直径为 650 μm (蓝色区域)。

为进一步揭示 3 种表面微纳结构的调控机制, 我们对测试表面上的冷凝液滴特性进行了量化分析。图 6 所示为 $\Delta T=5 \text{ K}$ 时 3 种表面液滴尺寸分布及弹跳频率、滞留时间。图 6(a) 通过记录连续的 5 幅冷凝图像统计液滴尺寸平均值得到 $\Delta T=5 \text{ K}$ 时 3 种表面的液滴尺寸分布。SP320 表面液滴直径在 100 μm 以下占全部液滴的 66%, 在 400 μm 以上的钉扎液滴占全部液滴的 3%。这说明 SP320 表面主要是小液滴之间发生合并, 容易摆脱表面的黏附, 实现弹跳。相比之下, SH320 表面液滴直径在 100 μm 以下占全部液滴的 50%, 在 400 μm 以上的钉扎液滴占全部液滴的 7%, 说明 SH320 表面主要也是液滴发生合并弹跳, 但液滴合并弹跳尺寸变大。SH4000 表面的液滴直径在 100 μm 以下仅占全部液滴的 37%, 大部分液滴合并弹跳直径达到 300 μm , 表面钉扎液滴更多。图 6(b) 通过统计冷凝过程视频中 5 次液滴合并弹跳滞留时间的平均值和单位时间内液滴弹跳次数给出了液滴滞留时间和弹跳频率, SH320 表面较 SH4000 表面的液滴滞留时间 14.2 ms 降至 10.6 ms、较 SH4000 表面的液滴弹跳频率 $132 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $162 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 滞留时间过长导致液滴弹跳频率降低, SP320 表面的液滴滞留时间降至 8.3 ms, 因此液滴弹跳频率提高为 $238 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 7、图 8 所示为不同 ΔT 下最大液滴脱离直径 D 、平均液滴直径 D_c 和液滴合并弹跳频率 F_s 的变化。随着 ΔT 增大, 3 个表面的 D 和 D_c 均呈现增大的趋势, 但增幅不同, SH4000 表面和 SH320 表面的 D 和 D_c 相差较小, SH4000 表面的 D 和 D_c 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 的 450、160 μm 升至 $\Delta T=10 \text{ K}$ 的 1 070、510 μm ; SH320 表面的 D 和 D_c 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 的 390、140 μm 升至 $\Delta T=10 \text{ K}$ 的 1 050、500 μm ; 但 SP320 的表面的 D 和 D_c 增幅更小, 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 的 340、130 μm 升至 $\Delta T=10 \text{ K}$ 的 870、460 μm 。弹跳频率 F_s 也呈现相似的变化趋势: SH4000 表面 F_s 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 时的 $203 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $\Delta T=5 \text{ K}$ 的 $132 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; SH320 表面的 F_s 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 的 $236 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $\Delta T=5 \text{ K}$ 的 $162 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 二者略有差距, 但 SP320 表面的 F_s 进一步拉大了与 SH4000 表面的差距, 从 $\Delta T=1 \text{ K}$ 时的 $309 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $\Delta T=5 \text{ K}$ 时的 $238 \text{ mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可见, 降低 CuO 纳米片尺寸, 同时提高微槽道结构尺寸, 可形成更多 Cassie 态的小液滴, 小液滴的合并弹跳降低了液滴脱离直径, 宽槽道赋予了液滴更大的弹跳动能, 增强了液滴弹跳频率, 降低了钉扎液滴数量。

2.2 冷凝传热性能

依据实验过程中记录的热电偶温度变化情况,

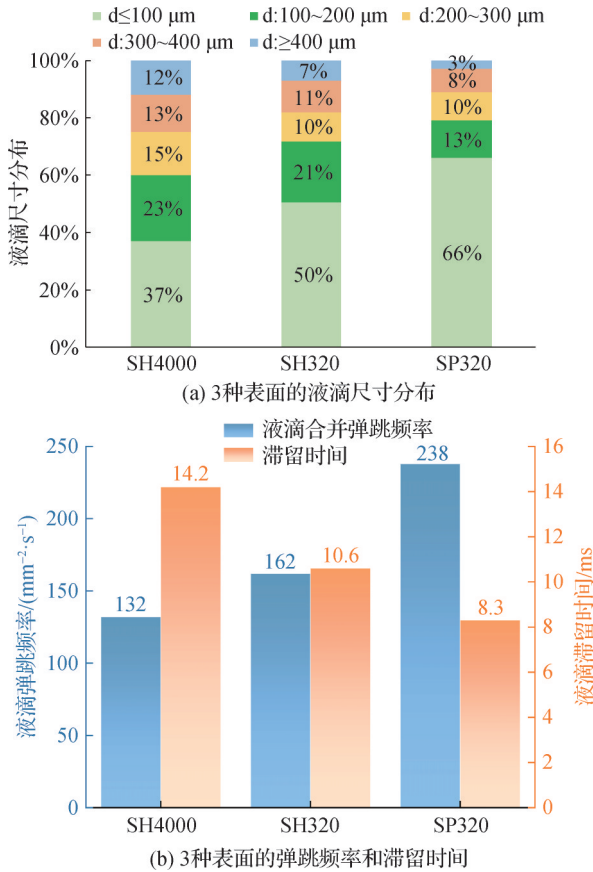


图6 $\Delta T=5\text{ K}$ 时液滴尺寸分布及弹跳频率和滞留时间
Fig.6 Droplet size distribution, bouncing frequency and residence period on the surfaces at $\Delta T=5\text{ K}$

计算得到不同超疏水表面和裸铜表面的冷凝传热系数和热流密度,结果如图9所示。

总体来看,3片超疏水表面的传热系数 h 随 ΔT 升高呈下降趋势,热流密度 q 随 ΔT 的升高呈现上升趋势。但在 $0\text{ K}<\Delta T\leq 5\text{ K}$ 时,三者的传热系数相差较大。随着 ΔT 增加,三者的传热系数略有差异,SP320表面略有优势:SP320表面的传热系数在 $\Delta T=1\text{ K}$ 达到最大 $18\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,然后随过冷度的增大而下降,在 $\Delta T=8\text{ K}$ 下降速率变缓,基本维持在 $9.5\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;SH320表面的传热系数在 $\Delta T=1\text{ K}$ 达到最大 $15.5\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,随 ΔT 增大,在 $\Delta T=6\text{ K}$ 降至 $9\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 后变化较小,但 $\Delta T>12\text{ K}$ 时再次出现下滑趋势,这可能是冷凝表面微槽道面积的增大,导致大液滴黏附力提高,降低表面刷新频率使传热恶化;SH4000表面传热系数的初始值为 $13\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,但在 $\Delta T=5\text{ K}$ 时停止下降,随后维持在 $9\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。当 ΔT 较小时,表面更新方式是多个小尺寸冷凝液滴的合并弹跳,传热系数较高,随着 ΔT 增大至一定程度,液滴通过合并长大后少有弹跳脱离,主要依靠大液滴的滑移扫除,表面刷新频率降低。由于三表面的液滴弹跳行

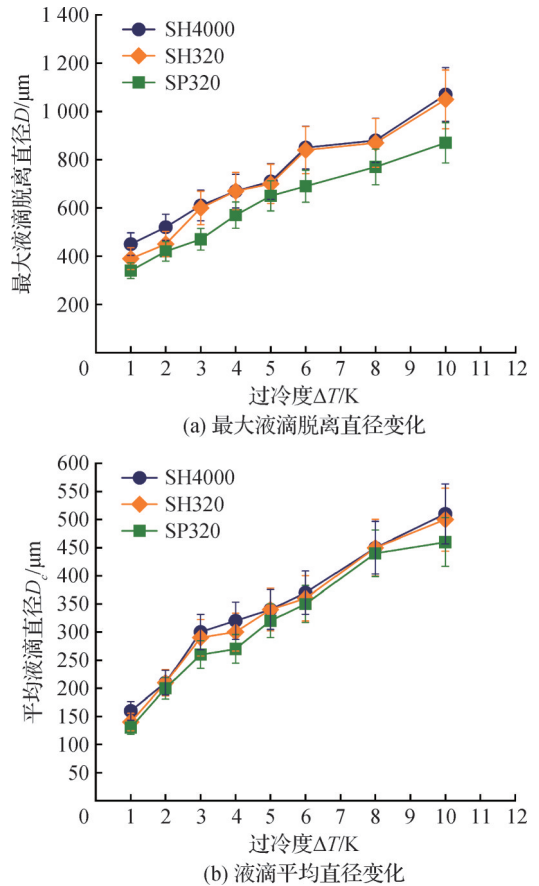


图7 不同 ΔT 的最大液滴脱离直径和平均液滴直径变化
Fig.7 Variation of maximum droplet departure diameter and average droplet diameter at different ΔT

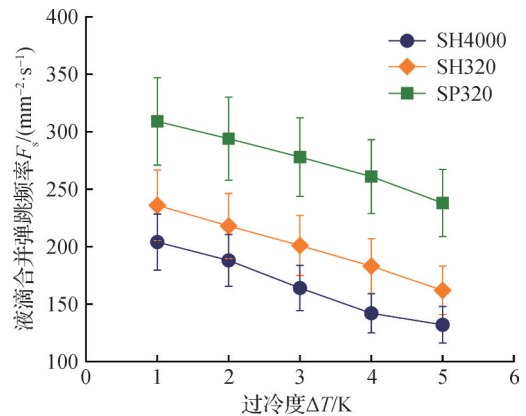


图8 不同 ΔT 下的液滴弹跳频率变化
Fig.8 Variation of droplet renewal frequency at different ΔT

为不同,出现传热系数稳定时对应的 ΔT 不同,具有更好液滴弹跳条件的SP320表面传热系数最高,维持液滴弹跳的 ΔT 更大。SP320表面的传热系数较SH320表面在 $0\text{ K}<\Delta T\leq 5\text{ K}$ 时提升12%~16%,在 $5\text{ K}<\Delta T\leq 10\text{ K}$ 时提升5~11%,在 $10\text{ K}<\Delta T\leq 16\text{ K}$ 时提升9%~13%。SH320表面的传热系数与SH4000表面相比,在 $0\text{ K}<\Delta T\leq 5\text{ K}$ 时提升12%~21%,然后在 $5\text{ K}<\Delta T\leq 16\text{ K}$ 时基本相同。

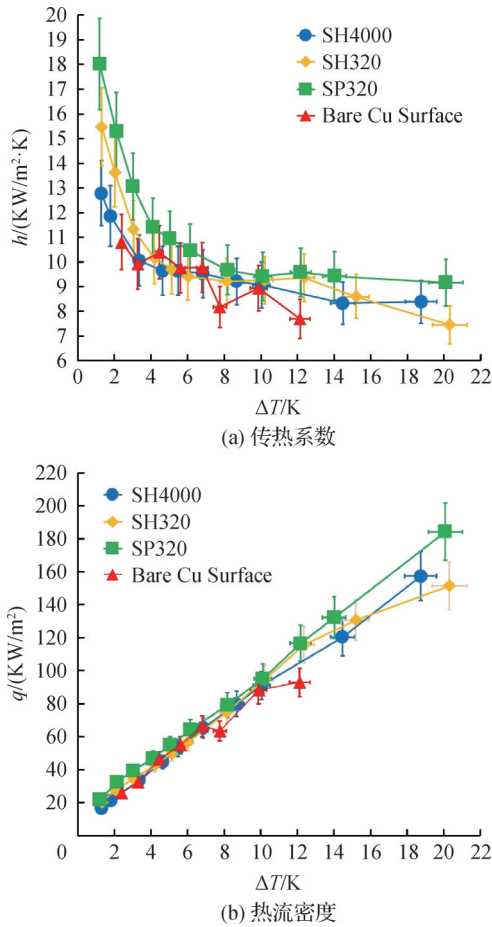


图9 不同超疏水表面与裸铜表面传热系数和热流密度变化
Fig.9 Variation of heat transfer coefficients and heat fluxes of different superhydrophobic and bare copper surfaces

三表面热流密度的变化在 $\Delta T=10 \text{ K}$ 后出现差异, SP320 表面的热流密度持续上升, 而 SH320 表面和 SH4000 表面上升速率变缓, 且随 ΔT 的增大 SP320 表面与另外 2 个表面差值更大, 当 ΔT 较大时, 蒸汽冷凝的热驱动力更大, 表面冷凝速率加快, SP320 表面仍能维持较小液滴尺寸的滑移扫除脱离, 而 SH320 表面和 SH4000 表面均被大液滴覆盖表面, 液滴脱离速度较慢, 导致冷凝位点被占据无法提高热流密度 q 。

3 结论

本文通过制备 3 种不同微纳结构尺寸的超疏水表面进行纯蒸汽冷凝传热实验, 分析协同调整微米与纳米结构尺寸对冷凝液滴动力学行为的调控作用, 得到结论如下:

1) 保持纳米结构相同, 提高微米结构尺寸, 可降低液滴的接触角滞后值 $\Delta \cos \theta$, SH320 表面微槽道增大了 $F_{\Delta p_2}$ 促进小液滴的合并弹跳, 降低钉扎液滴尺寸。其液滴弹跳频率较 SH4000 表面提高 10%~17.5%, 在 $0 \text{ K} < \Delta T \leq 5 \text{ K}$ 时 SH320 表面传热系数较

SH4000 表面提升 12%~21%。

2) 保持微米结构不变, 降低纳米结构尺寸, SP320 表面的 CuO 纳米片更致密低薄, 增加表面成核位点, 降低 Cassie 态液滴的临界尺寸, 从而降低液滴合并弹跳直径。SP320 表面最大液滴脱离直径和平均液滴直径较 SH320 表面分别平均降低 14.8%、6.5%, 其液滴合并弹跳频率较 SH320 表面提高 30%~46%, 因此冷凝传热系数在 $0 \text{ K} < \Delta T \leq 16 \text{ K}$ 内达到 18~9.5 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 较 SH320 表面提升 11%~23%。

3) 提高微米结构尺寸, 同时降低纳米结构尺寸, 可降低液滴接触角滞后值 $\Delta \cos \theta$ 和液滴接触线尺度 R_c , 获得更小临界液滴弹跳直径, 提高弹跳频率, 加速液滴脱离, 因此冷凝传热系数在 $0 \text{ K} < \Delta T \leq 16 \text{ K}$ 较 SH4000 表面提升 12%~41%。

本文受东莞市重点研发项目(20241200300072)资助。(The project was supported by the Major Science and Technology Project of Dongguan (No. 20241200300072).)

参考文献

- [1] Beér J M. High efficiency electric power generation: the environmental role[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(2): 107-134.
- [2] Hadžić A, Može M, Zupančič M, et al. Superbiphilic laser-microengineered surfaces with a self-assembled monolayer coating for exceptional boiling performance [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(10): 2310662.
- [3] Wiedenheft K F, Guo H A, Qu Xiaopeng, et al. Hotspot cooling with jumping-drop vapor chambers [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(14): 141601.
- [4] 蔺维杰, 岑继文, Hassan A, 等. 基于热管与热泵直接换热式蒸发-冷凝器设计计算及性能测试[J]. 制冷学报, 2025, 46(5): 105-114. (Lin Weijie, Cen Jiwen, Hassan A, et al. Design calculation and performance test of the evaporator-condenser for direct heat transfer between heat pipe and heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(5): 105-114.)
- [5] 周汉涛, 张良, 李昊玥, 等. 空间站用泡沫铜冷凝除湿芯体热质传递性能研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(5): 157-165. (Zhou Hantao, Zhang Liang, Li Haoyue, et al. Research on the heat and mass transfer performance of the copper foam condensation dehumidifier for space stations [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(5): 157-165.)
- [6] 端木琳, 贾欣, 马伟强, 等. 典型海水温度年计算方法及其应用(续)[J]. 制冷学报, 2022, 43(6): 18-24. (Duanmu Lin, Jia Xin, Ma Weiqiang, et al. Generation of typical seawater temperature year and its applications (part II) [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(6):

- 18–24.)
- [7] Boreyko J B, Chen Chuanhua. Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(18): 184501.
- [8] Miljkovic N, Enright R, Nam Y, et al. Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(1): 179–187.
- [9] Mulroe M D, Srijanto B R, Ahmadi S F, et al. Tuning superhydrophobic nanostructures to enhance jumping-droplet condensation [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(8): 8499–8510.
- [10] Butt H J, Liu Jie, Koynov K, et al. Contact angle hysteresis [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2022, 59: 101574.
- [11] Lü Cunjing, Hao Pengfei, Zhang Xiwen, et al. Dewetting transitions of dropwise condensation on nanotexture-enhanced superhydrophobic surfaces [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(12): 12311–12319.
- [12] 刘天庆, 孙玮, 孙相彧, 等. 超疏水表面上冷凝液滴发生弹跳的机制与条件分析 [J]. *物理化学学报*, 2012, 28(5): 1206–1212. (Liu Tianqing, Sun Wei, Sun Xiangyu, et al. Mechanism and condition analysis of condensed drop jumping on super-hydrophobic surfaces [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(5): 1206–1212.)
- [13] 马学虎, 兰忠, 王凯, 等. 舞动的液滴: 界面现象与过程调控 [J]. *化工学报*, 2018, 69(1): 9–43. (Ma Xuehu, Lan Zhong, Wang Kai, et al. Dancing droplet: interface phenomena and process regulation [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(1): 9–43.)
- [14] Sharma C, Stamatopoulos C, Suter R, et al. Rationally 3D-textured copper surfaces for Laplace pressure imbalance-induced enhancement in dropwise condensation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(34): 29127–29135.
- [15] Dong Jian, Dong He, Jin Yanli, et al. Nanograssed micro-V-groove architectures for continuous dropwise condensation and droplet directional movement [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(16): 1800202.
- [16] Cheng Yaqi, Liu Yuanbo, Ye Xuan, et al. Macrotextures-enabled self-propelling of large condensate droplets [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 126901.
- [17] Zhang Wenjing, Lin Guanghui, Li Juan, et al. Fabrication of biomimetic polymer nanocone films with condensate microdrop self-removal function [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2015, 2(12): 1500238.
- [18] Wang Rui, Zhu Jie, Meng Kaixin, et al. Bio-inspired superhydrophobic closely packed aligned nanoneedle architectures for enhancing condensation heat transfer [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(49): 1800634.
- [19] Wang Rui, Wu Feifei, Xing Dandan, et al. Density maximization of one-step electrodeposited copper nanocones and dropwise condensation heat-transfer performance evaluation [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(21): 24512–24520.
- [20] Thomas T M, Sinha Mahapatra P. Condensation of humid air on superhydrophobic surfaces: effect of nanocoatings on a hierarchical interface [J]. *Langmuir*, 2021, 37(44): 12767–12780.

通信作者简介

陈颖,女,教授,广东工业大学材料与能源学院,13602873181, E-mail:chenying@gdut.edu.cn。研究方向:微尺度流动及传热、能源材料及应用。

About the corresponding author

Chen Ying, female, professor, School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, 86–13602873181, E-mail: chenying@gdut.edu.cn. Research fields: microscale flow and heat transfer; energy materials and applications.

(责任编辑:王亚薇)