

文章编号: 1001-4888(2023)06-0732-09

微结构表面核化沸腾初始气泡特征的微观观测*

王浩楠¹, 周展如¹, 黄生洪¹, 赵凯¹, 王光祖², 傅尧²

(1. 中国科学技术大学 材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 中国科学院城市污染物转化重点实验室, 安徽省生物质洁净能源重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 工质的沸腾传热特性明显优于其单相传热, 所以, 沸腾传热技术广泛应用于众多领域的冷却系统和设备中。沸腾传热中气化潜热可以带走大量的热量, 同时气泡的生长过程会对液体造成扰动, 加强液体与壁面的换热。初始气泡特征是影响核化沸腾传热特性的重要因素, 表面结构对初始气泡的生成具有十分重要的影响。本文制备了 3 种带有不同尺度微结构且比表面积相同的单晶硅片, 搭建了一套核化沸腾可视化微观观测实验平台; 通过该平台观测气泡生长的动态过程, 开展了核化沸腾实验。实验结果证实了微结构较光滑表面对气泡增长均有促进作用, 且实验范围内微尺度越大, 效果越明显。

关键词: 池沸腾; 微结构; 气泡初始温度; 动态过程

中图分类号: O34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-116

0 引言

精密电子设备在工作时会产生大量热量并在内部聚集, 若不能及时散热将会影响设备的正常运行, 甚至造成严重的结构损伤。芯片等高热流部件的散热问题是目前制约芯片性能发展的关键性问题之一。电子设备通常需要外部冷却, 相变冷却是一种常见的冷却方式, 但对于大功率电子设备, 其冷却效果还远没有达到要求, 现有成果表明, 表面加工微结构可以有效提高沸腾传热特性, 因此, 微结构表面核化沸腾气泡特征参数的研究对电子设备强化传热的发展具有重要的意义。

改变换热表面的结构是提高传热性能的常见方法之一, 由于精密电子设备结构细小, 为了不影响正常工作, 对其表面的加工尺度要控制到微米乃至纳米级别。随着纳米技术的进步, 各种材料、仪器的加工精度大大提升, 在精密仪器表面进行微纳米尺度的加工目前也已可以实现^[1]。如 Hong 等^[2]通过电镀在镍铬线材上加工出纳米结构来改善池沸腾性能, 控制电镀时间来调整表面的亲疏水性, 结果表明亲水性表面增加了成核点数量和临界热通量, 而疏水性表面增强了气泡活性, 使气泡更容易脱离表面, 从而局部降低了金属丝的表面温度, 提高了过热度和传热系数。Khan 等^[3-4]通过微加工多孔通道 (MMPC) 改变电子器件的表面性能, 从而增强了表面的沸腾传热系数; 通过与光滑硅表面进行对比发现 MMPC 结构表面的临界热流密度 (critical heat flux, CHF) 有了显著的提升, 在孔径大小为 0.5 mm 时具有最大的热流通量。Liu 等^[5]制备了微针翅结构与非均匀纳米壁表面相结合的多层次壁面结构, 发现与光滑表面及仅有微针翅结构表面相比, 多层次结构的传热系数 (heat transfer coefficient, HTC) 和 CHF 均显著增加。Noh 等^[6]通过红外测温法测量了沸腾过程中多孔表面和光滑表面的温度场, 发

* 收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 中国科学院合肥大科学中心协同创新培育基金项目 (2022HSC-CIP021); 国家磁约束核聚变能发展研究专项项目 (2019YFE03080400, 2015GB121007); 国家自然科学基金项目 (T2341001, 22293011)

通信作者: 周展如 (1987-), 女, 博士, 副研究员。主要研究领域: 多相流传热研究。Email: zhouzhan@ustc.edu.cn

现多孔结构在换热过程中比常规结构表面的温度场更加均匀。Huang等^[7]发现具有混合微纳米结构的表面在过冷沸腾状态下CHF提高了80%~200%，并使流道压下降幅度低于12%。Ji等^[8]使用高速摄像机可视化研究了不同倾斜角度(120°、135°、150°、160°、170°)的加热面对下方液体加热池沸腾中的蒸气行为，用图像处理方法确定了段塞的平移速度、频率、离开直径和蒸气产生速率；通过对比不同倾角换热面上的蒸气行为，发现倾角越大，蒸气离开换热面的速度越慢，从而阻碍了换热效率。

池沸腾过程中往往在换热面上产生大量气泡，气泡行为对核化沸腾传热性能的影响是不可忽视的。气泡对冷却系统产生的影响会关系到工程以及实验的安全性，因此对于沸腾过程中气泡行为的研究是十分必要的。Sultan等^[9]研究了单个大气压下，水在铜表面上的沸腾过程，发现气泡活性位点成泊松分布。Surtaev等^[10]用高速相机记录了乙醇在池沸腾过程中，单个蒸气泡的生长过程，通过红外相机记录壁面背部的温度场变化，发现了气泡成核频率与温度场变化之间的联系。Zhou等^[11]研究了流动状态下不同流速及过冷度对气泡成核点的影响，发现在过冷度和系统压力升高的情况下，成核点密度更大，气泡脱离壁面频率更高。Yabuki等^[12]用高速数字干涉仪测量了气泡在沸腾过程中周围宏观热场的变化。Narayan等^[13]使用基于梯度的彩虹纹影偏转法进行现场测量，研究了不同条件下各种传热机制(对流、气泡生长、过热层)在壁面向液体传热速率中的占比。Dong等^[14]发现微纳米结构上可以通过减小气泡离开直径和增加离开频率来加速气泡离开，同时纳米结构会延迟气泡合并。Kim等^[15]使用高速红外相机研究了核沸腾过程中微结构化表面上的气泡生长，发现大表面积和相对大量的成核点有助于增强结构化表面上的气泡生长。Yu等^[16]制作了带有微结构空腔的硅板，并以此观测了不同热流密度下硅板上的气泡行为，发现由于加热表面附近的气泡和蒸气聚结，腔体密度的影响在高热通量区域比在低热通量区域更强。

综上所述可知，在加热表面加工微结构是可以提高沸腾传热特性的，但微结构对沸腾时气泡特征参数的影响尚不明确，这可能是由于实验时的时间分辨率和空间分辨率不够所致，不能捕捉100 μm 以下的气泡，从而错过了气泡沸腾起始点和气泡生长初期的演化。本文搭建了沸腾气泡微观观测平台，该平台配有高时空分辨率成像设备和高频率温度测量设备；制备了单晶硅片为基底、表面具有不同尺寸相同形貌的微结构凹槽，通过高速相机记录沸腾过程中气泡的生长过程，以研究尺寸不同对气泡生成过程的影响，并分析气泡发展与表面结构的联系。

1 微结构表面核化沸腾微观观测实验

1.1 微观观测平台

本文搭建如图1所示的核化沸腾微观观测实验平台，以观测硅片表面去离子水在加热沸腾过程中表面气泡的生长过程。平台包括加热系统、微调平台、图像采集系统、温度采集系统和同步触发系统，各系统间通过同步延时触发器(DJ650)协调控制，以保证各系统对实验数据采集的同步性。加热装置部分通过恒流电源(HSP-12H75D)提供稳定的输出功率；微调平台主要由光学显微平台(MJ31)构成，平台上载有微纳表面样品试验件，调节旋钮可以微调样品的水平和高度位置，上端连接高速相机系统；图像采集系统由千眼狼高速相机(5F04)、光源及计算机组成，用以拍摄沸腾过程中表面气泡的生成与直径增长过程，高速相机的拍摄速率为100fps，分辨率为2320pixel \times 1720pixel，气泡生长直径的分辨率为1 μm ；同步触发系统由数字脉冲发生器组成。所有实验都在隔震光学平台上开展。

微纳表面微观观测样品试验件如图2所示，样品硅片的温度采集系统由K型热电偶(OMEGA's Cement-On Style 2)配合数据采集器(OM-DAQ-USB-2401)组成。试验件由聚四氟乙烯板和微结构单晶硅晶片组成。在聚四氟乙烯板上顶面的中心有一个2mm深的方腔，用于放置1.5mm厚的微结构表面的硅片。实验过程中硅片表面载有20 μL 去离子水，且去离子水顶部盖有载玻片，以防止加热过程中由于水分蒸发对拍摄的干扰。紫铜线由凹槽与硅片两端相接，并用绝热密封胶固定于凹槽中。热电偶位于硅片底部，用酒精清洗过的砝码压紧硅片后，再用绝热密封胶对硅片进行固定，热电偶的位置如图2(b)所示。

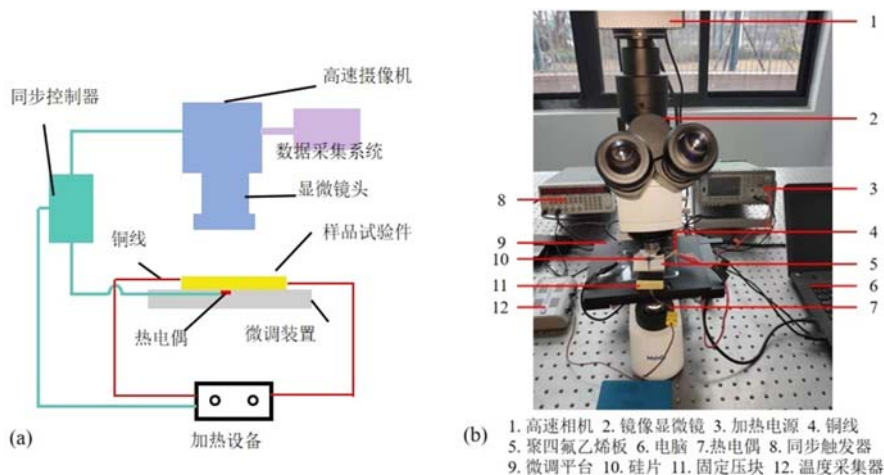


图1 微观观测平台:(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Microscopic observation platform: (a) schematic diagram; (b) actual structure

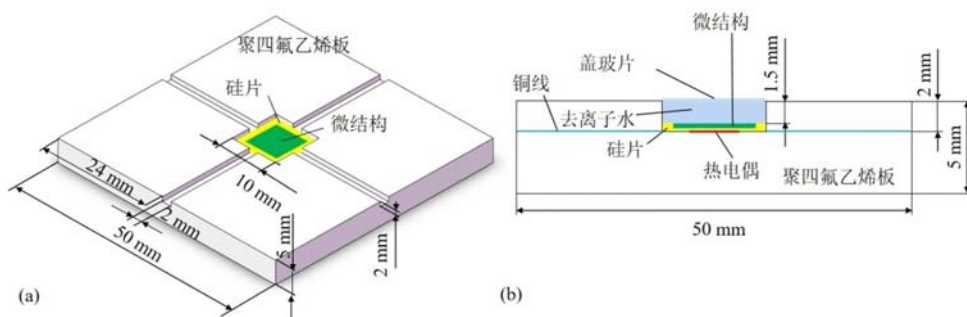


图2 实验段结构:(a)示意图;(b)剖面图

Fig. 2 Test section structure: (a) schematic diagram; (b) cross-sectional view

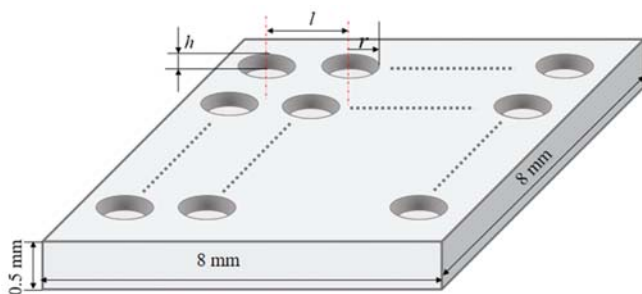


图3 微结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the microstructure

1.2 微结构表面

本文选用高纯度硅片为基底,其长宽均为 10mm,厚为 0.5mm。一共制备 3 种带有微结构表面的硅片,用激光在硅片表面刻蚀出矩形阵列微结构,刻蚀出的结构为圆柱型凹槽,半径与深度相同,半径分别为 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 。刻蚀范围为边长 8mm 的方形区域,该区域位于硅片中心位置,边界与硅片边界平行。微结构示意图如图 3 所示,图中 h

为刻蚀深度,其值与半径 r 相同,圆心距 l 等于 3 倍半径。刻蚀结构表面的细节如图 4 所示,图中表面 0 为光滑表面,表面 1、2、3 分别为凹槽半径 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 的表面。由于光滑硅片表面在沸腾过程中很难有气泡产生,为了观察气泡在光滑表面上的生长过程,需要为该表面添加成核点,因此在光滑硅片中心部分加工一个半径、深度均为 $1\mu\text{m}$ 的圆柱凹槽。刻蚀结果显示,通过电子束刻蚀的凹槽微结构整体上十分规整,没有明显的损伤可以满足实验需求。因为凹槽深度与硅片厚度之比远小于 1 : 100,故认为凹槽结构仅影响表面的物理性质而不破坏硅片自身整体的物理性能。

由图 4 中的金相显微镜图像可以看出 3 种表面下的凹槽结构清晰可辨,由润湿性图像可知光滑硅片表面去离子水的接触角为 90° ,即光滑硅表面既不亲水也不疏水,而随着凹槽尺寸的增大,表面接触角的角度也逐渐增大,即疏水性增强。表面粗糙度可由式(1)计算得到:

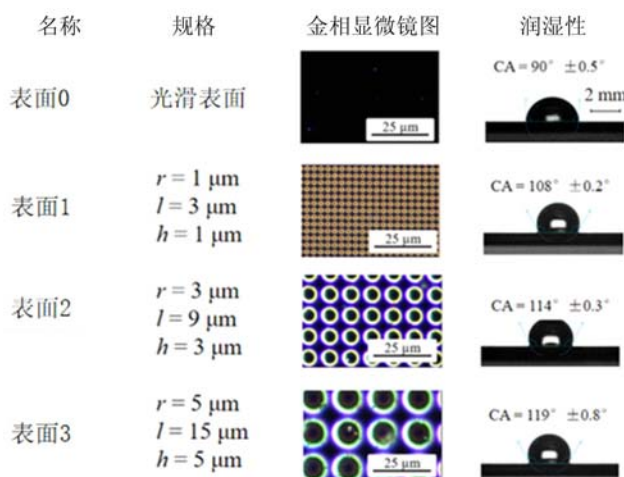


图 4 微结构表面和普通表面的细节

Fig. 4 Details of the microstructured surfaces and smooth surface

$$S_a = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} |E(x, y)| dx dy = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |E(x_i, y_j)| \quad (1)$$

式中：表面粗糙度 S_a 为 z 坐标绝对值的算术平均值； $E(x, y)$ 为该坐标点在 z 轴上的高度； l_x 为计算区域 x 方向长度值； l_y 为计算区域 y 方向的长度值。

本文实验表面微结构凹槽为均匀排列，因此对单个凹槽结构进行粗糙度计算即可获得整个刻蚀区域的表面粗糙度，由图 3 可知，对于单个凹槽结构，其边界为边长等于圆心距的方形，计算区域面积为 $a^2 r^2$ (a 为圆心距与半径之比)。把上表面作为基准， $|E(x, y)|$ 在计算域内仅有 2 个值，式(1)中右侧的求和项为 $\pi b^2 r^3$ (b 为凹槽深度与半径之比)，当表面微结构形貌不变时，该公式可简化为仅与凹槽半径线性相关的函数，即

$$S_a = \frac{b^2}{a^2} \pi r = \frac{\pi}{9} r = kr \quad (2)$$

式中， k 是一个与表面形状相关的常数，当半径与深度的比值或圆心距发生变化时，该值也会随之改变。

1.3 加热系统热校核

本文通过电流加热硅片，因此需要表面温度场的均匀性来保证实验的可靠性，温度场的分布由红外相机进行测量。红外相机在 20℃~100℃ 的测量范围内通过温度计进行标定，温度场测量结果如图 5 所示，在恒定 1A 电流的情况下，硅片整体上温度分布状况十分清晰，温度在外围边界处存在一定的温度梯度分布，但对于整体而言占比较小，中心部分温度分布较为均匀。由于本文实验所测量的范围为边

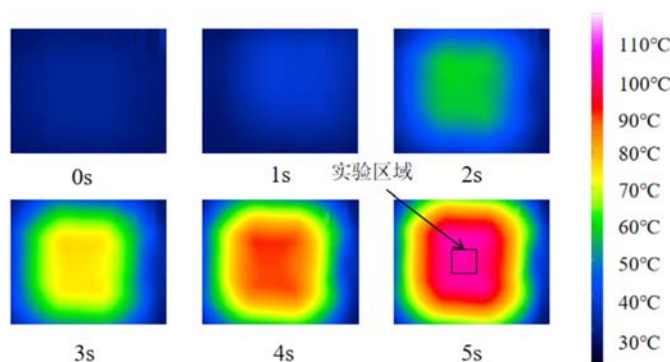


图 5 红外热成像图(电流 1A; 间隔 1s)

Fig. 5 Infrared thermogram (current: 1A; time interval: 1s)

长 2mm 的方形，且其位置位于硅片的中心，因此可认为实验过程中所测实验区的温度是均匀的。由于红外相机在工作过程中自身会产生轻微震动，因此需要对红外相机所拍摄的图像进行误差分析。选取

中心实验区域处随机几个点的温度数据进行统计,得到该区域内温度的标准差值约为 0.4°C ,该结果证明了由于系统本身对温度测量造成的误差较小,对温度场的均匀性验证没有影响。

2 微观观测实验步骤

本文实验是在常压下进行的,工质为去离子水。具体步骤如下:

(1) 校准热电偶,根据室温调节热电偶参数使其与环境温度保持一致,误差控制在 0.5K 以内。

(2) 用无水乙醇清洗硅片表面,之后用恒流电源加热硅片至 70°C 保持 1min ,再等待硅片冷却至室温。

(3) 用移液枪将 $20\mu\text{L}$ 去离子水滴在硅片表面中心位置,用移液枪在盖玻片中心处滴加微量去离子水,然后在液滴顶盖上盖玻片,该步骤可以防止安装盖玻片时由于接触而产生空气泡。由于盖玻片表面具有亲水性,液滴对其存在向下的吸附力,因此液滴可以在盖玻片与硅片间形成稳定的厚度为 0.5mm 的去离子水膜。

(4) 启动所有采集设备,确认同步触发器与高速相机和温度采集器之间连接完好,将恒流电源设置为输入信号。当恒流电源输出电压达到 5V 时,同步触发器将触发高速相机与温度采集器,触发延迟设置为 $5\mu\text{s}$,故认为各设备之间的数据基本是同时采集的。

(5) 待水膜稳定后,打开加热系统电源,设定电流,对硅片进行轻微加热,直至去离子水轻微沸腾。停止加热,放置至少 10min ,冷却至室温,然后用毛细管吸出微小气泡,该步骤称为去气化过程,目的是排除液体中溶解的气体和吸附在表面上的气体,减少其对实验产生的干扰。非去气化实验无需进行第(2)步。

(6) 用设定电流重新加热测试段,使输出功率为 5W ,再次进行沸腾实验。在此过程中,利用高速摄像系统对气泡的行为进行记录,并进行数据采集。

(7) 用不同微结构的硅片更换测试段。重复上述实验步骤,观察所有微观结构表面上气泡的生长情况。

3 实验结果与讨论

3.1 非去气化与去气化实验的对比

通过非去气化实验可以看出,在没有进行去气的条件下,由于微结构凹槽的存在,使得表面存在大量的气体空腔。在加热过程中,各个空腔迅速产生气泡,同时随着气泡的增长,相邻气泡之间出现了合并现象,但气泡合并所形成的新气泡并不是一个球形气泡而更加接近于扁平状的气膜,其边缘形貌首先呈现出不规整形状,随着时间的增加才逐渐恢复到球形,气泡生长过程如图6所示。

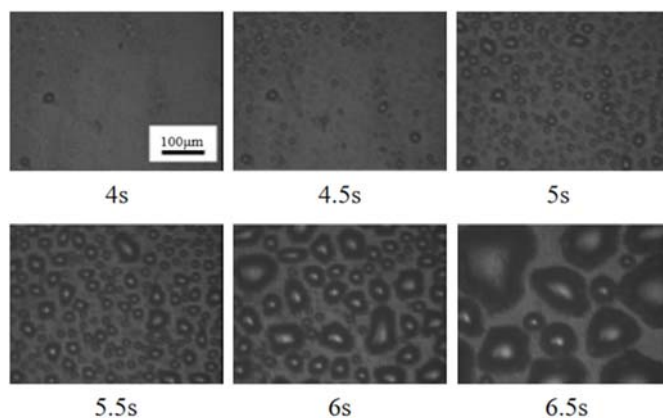


图6 非去气实验(表面2,功率 5W)

Fig. 6 Non-degassing experiment (surface 2 power 5W)

图7展示了去气后气泡的生长过程,其中表面2(凹槽半径 $3\mu\text{m}$)的图片与非去气化实验(图6)相

比,在相同的加热功率下,去气后核化沸腾的成核点明显变少,但气化核心点仍多于光滑表面。对于去气化实验,不同的表面气泡生长速率也有明显区别,相同时间内,表面0(光滑表面)与表面1(凹槽半径 $1\mu\text{m}$)的核化沸腾气泡生长速率低于表面2(凹槽半径 $3\mu\text{m}$)与表面3(凹槽半径 $5\mu\text{m}$)。

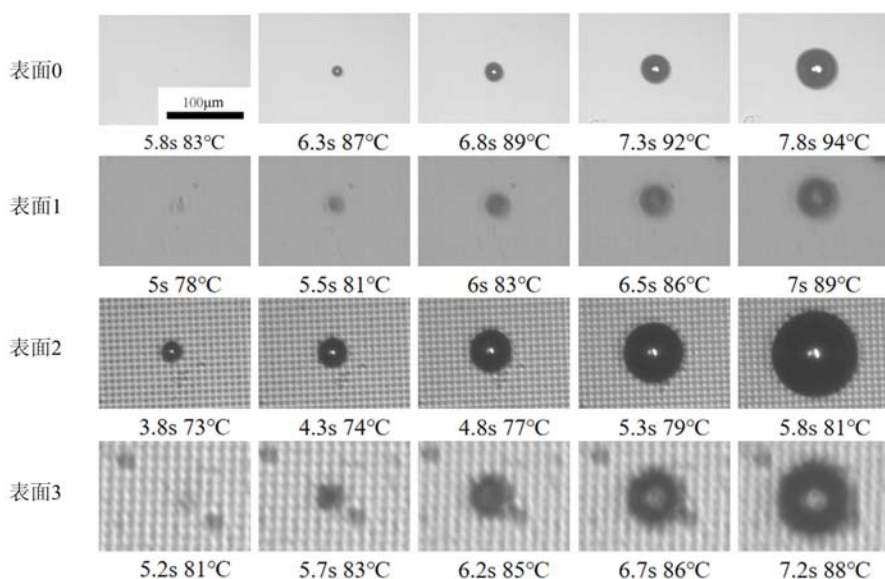


图7 去气条件下各表面上气泡的生长过程(5W加热功率)

Fig. 7 Growth process of bubbles on each surface under degassing conditions (5W heating power)

3.2 气泡生长直径分析

图8为5W加热功率下各表面的壁面温度随加热时间的增长曲线,由图可知,对于所有表面,在加热时间较短、壁面温度较低时,壁面的温升曲线无明显差异;当壁面温度超过某一值(约 80°C)时,壁温的增长曲线出现了差异,光滑表面温升最快,其次是半径 $1\mu\text{m}$ 的表面,半径 $5\mu\text{m}$ 的表面最慢,半径 $3\mu\text{m}$ 的表面略快于半径 $5\mu\text{m}$ 的表面。该现象表明当壁面温度较高时,微结构凹槽强化了壁面向液体的传热,同时凹槽结构越大,效果越明显。

本文对去气条件下不同尺度微结构硅片表面上气泡直径与温度的关系进行了统计,气泡直径的统计方法为测量3次取平均值,每次测量完成后旋转 60° 再次测量,以3次测量结果的标准差作为误差。研究了同一表面上气泡直径与温度之间的关系,半径为 $3\mu\text{m}$ 表面上不同初始温度下气泡直径随壁面温度的增长曲线如图9所示,气泡1为第一个出现的气泡,其初始温度为 70°C ,通过该曲线可知,对于同一表面,当气泡的初始生成温度不同时,气泡直径的增长曲线不同,初始生成温度越高,气泡直径增长越快。为了研究不同表面对气泡直径生长的影响,需要统一气泡的初始生成温度。

图10(a)为3种结构表面上气泡直径的增长曲线,图10(b)为相同初始温度下凹槽半径 $1\mu\text{m}$ 表面与光滑表面气泡直径增长的对比。由图10可以看出,不同微结构表面上,微观气泡直径的生长趋势基本一致,首先是一个线性增长阶段,然后经过某一点后其增长速率突然加快。由图10(a)可知,随着微

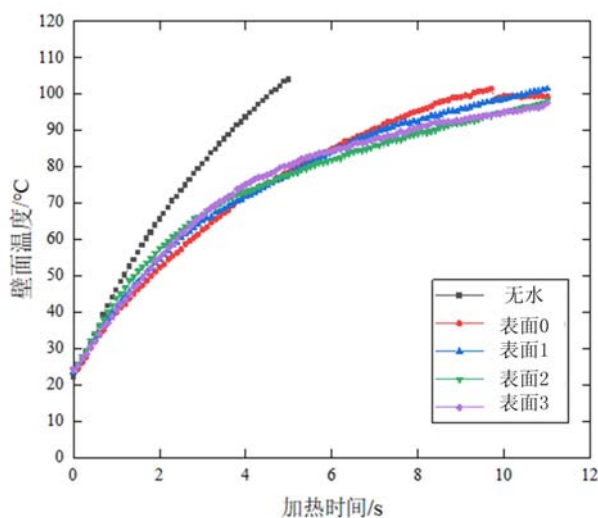


图8 温度变化曲线(加热功率5W)

Fig. 8 Temperature change curve (heating power 5W)

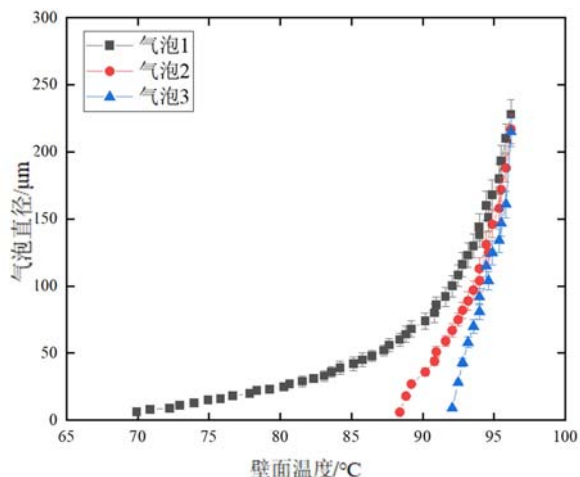


图9 表面2气泡直径增长曲线(加热功率5W)
Fig. 9 Surface2 bubble diameter growth curve
(heating power 5W)

面积内微结构凹槽侧壁与投影面积之比为定值 $2\pi/9$, 故当加热功率不变时, 气泡与底面接触面积越大, 单位时间传输的热量越多, 气泡直径增长越快。

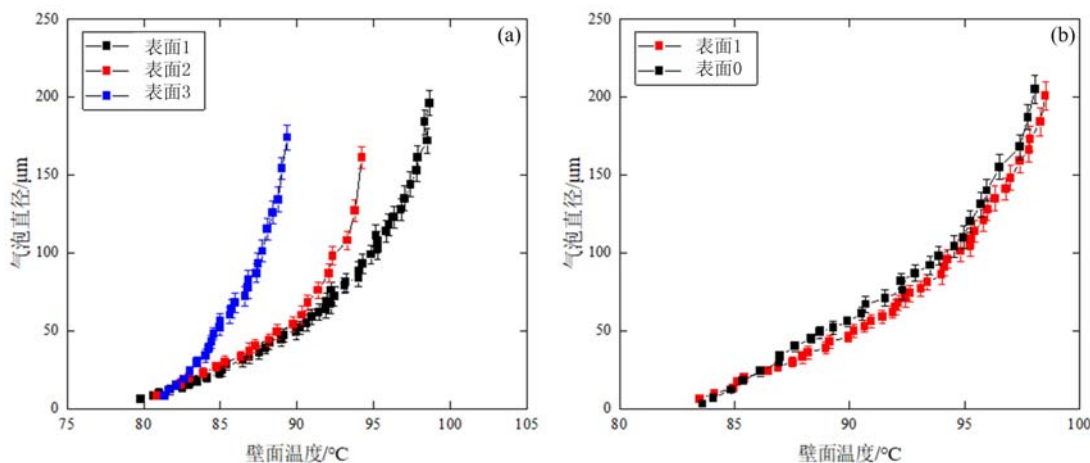


图10 气泡直径随温度的变化曲线(加热功率5W)
Fig. 10 Variation curve of bubble diameter with temperature (heating power 5W)

4 结论

本文搭建了核化沸腾可视化微观观测实验平台, 并制备了3种微结构表面, 通过平台对这3种微结构表面和光滑表面核化沸腾气泡特征进行了微观观测, 得到以下结论:

(1) 光滑硅表面本身既不亲水也不疏水, 微结构凹槽使硅表面表现出亲水性, 且随着凹槽半径的增加, 表面的亲水性增强。

(2) 在非去气的情况下, 由于微结构凹槽的存在, 使得表面存在大量的气体空腔, 在沸腾过程中有益于成核, 增强沸腾过程。

(3) 在去气条件下, 随着微结构的尺度增加, 气泡直径的生长速度加快, 而微结构尺度越小, 气泡直径的增长曲线越接近于光滑表面。

结构凹槽尺度的增加, 气泡直径的增长速率明显加快。由图10(b)可以看出, 对于凹槽半径 $1\mu\text{m}$ 表面和光滑表面, 相同初始温度下, 气化核心上气泡的增长曲线基本保持一致。对于图10的结果, 其原因是气化核心密度随着凹槽尺度的增加而增加, 提升了表面传热系数所致。Bon等^[17]研究了较大尺度(凹槽深度 $9\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$, 凹槽间距 $75\mu\text{m}\sim 600\mu\text{m}$) 凹槽对表面换热的影响, 其结果与本文相近。由图4中不同表面的接触角可知, 微结构尺度的增加会导致硅片表面的疏水性逐渐增强, 气泡体积相同时, 与硅片的接触面积会随着微结构尺度的增加而增大。根据图3可以计算得到单位

参考文献：

- [1] Garg V, Mote R G, Fu J. Facile fabrication of functional 3D micro-nano architectures with focused ion beam implantation and selective chemical etching[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 526:146644.
- [2] Hong S J, An S, Park H G, et al. Enhancement of critical heat flux and superheat through controlled wettability of cuprous-oxide fractal-like nanotextured surfaces in pool boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107:105–111.
- [3] Khan N, Pinjala D, Toh K C. Pool boiling heat transfer enhancement by surface modification/micro structures for electronics cooling; a review[C]//*Electronics Packaging Technology Conference*, 2005.
- [4] Khan N, Pinjala D, Toh K C. Passive two-phase cooling solution with a novel heat transfer enhancement technique for electronic packages[C]//*Electronic Packaging Technology Conference*, 2006.
- [5] Liu Bin, Yu Lingmin, Zhang Yonghai, et al. Enhanced nucleate pool boiling by coupling the pinning act and cluster bubble nucleation of micro-nano composited surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157:119979.
- [6] Noh H, Yoo J, Kim J, et al. Effective and uniform cooling on a porous micro-structured surface with visualization of liquid/vapor interface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 128:1114–1124.
- [7] Huang Shenghong, Wang Linlin, Pan Zhiwei, et al. Experimental investigation of a new hybrid structured surface for subcooled flow boiling heat transfer enhancement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192:116929.
- [8] Ji M K, Ji H K, Ahn H S. Hydrodynamics of nucleate boiling on downward surface with various orientation. Part I: Departure diameter, frequency, and escape speed of the slug[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116:1341–1351.
- [9] Sultan M, Judd R L. Spatial distribution of active sites and bubble flux density[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1978, 100(1):56–62.
- [10] Surtaev A, Serdyukov V, Moiseev I. Application of high-speed IR thermography to study boiling of liquids[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2016, 59(4):615–620.
- [11] Zhou Pei, Huang Ronghua, Huang Sheng, et al. Experimental investigation on active nucleation site density and bubble departure frequency in subcooled flow boiling by using bubble tracking algorithm[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148:119081.
- [12] Yabuki T, Hamaguchi T, Nakabeppu O. Interferometric measurement of the liquid-phase temperature field around an isolated boiling bubble[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2012, 7(3):463–474.
- [13] Narayan S, Singh T, Singh S, et al. Experiments on the effects of varying subcooled conditions on the dynamics of single vapor bubble and heat transfer rates in nucleate pool boiling regime[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 134:85–100.
- [14] Dong Lining, Quan Xiaojun, Cheng Ping. An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nano-structures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71:189–196.
- [15] Kim S H, Lee G C, Kang J Y, et al. A study of nucleate bubble growth on microstructured surface through high speed and infrared visualization[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 95:12–21.
- [16] Yu C K, Lu D C, Cheng T C. Pool boiling heat transfer on artificial micro-cavity surfaces in dielectric fluid FC-72[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10):2092–2099.
- [17] Bon B, Klausner J, McKenna E. An investigation of pool boiling heat transfer on single crystal surfaces and a dense array of cylindrical cavities[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(12):391–398.

Microscopic observation of initial bubbles in nucleate boiling on microstructured surfaces

WANG Haonan¹, ZHOU Zhanru¹, HUANG Shenghong¹, ZHAO Kai¹, WANG Guangzu², FU Yao²

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behaviour and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, Anhui, China; 2. CAS Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, Anhui Province Key Laboratory of Biomass Clean Energy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The heat transfer characteristics of nucleate boiling are significantly higher than that of single-phase heat transfer. Nucleate boiling is widely used in related systems and equipment in many fields such as aviation, aerospace, navigation, electronics, energy, power, air conditioning, refrigeration, and biomedicine. The latent heat of vaporization in boiling heat transfer can take away a large amount of heat, and the bubbles create a disturbance, which can enhance heat transfer. The initial bubble characteristics are an important factor affecting the heat transfer characteristics of nucleation boiling, and the surface structure on the heated wall has a very important influence on the formation of the initial bubbles. The surface structure can change the bubble characteristic parameters, such as the temperature of onset of nucleate boiling, bubble diameter, and nucleation site density, etc. Therefore, understanding the bubble characteristic parameters on the structured surfaces is significant to the development of the enhanced boiling heat transfer mechanism. Three kinds of single crystal silicon wafers with different scale microstructures and the same specific surface area were prepared. A set of nucleation boiling visualization microscopic observation experimental platforms to observe the dynamic process of bubble growth was built. Nucleation boiling test was performed. The experimental results showed that the microstructure on the heating surface could promote the growth of bubbles and the effect might be associated with the structural scale.

Keywords: nucleate boiling; microstructure; onset of nucleate boiling; dynamic process