

DOI: 10.7652/xjtuxb201905014

Sierpinski 亲/疏水分形图案表面气泡分布及强化换热研究

于婷^{1,2}, 王雅¹, 齐宝金^{1,2}, 魏进家¹

(1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学苏州研究院, 215123, 江苏苏州)

摘要: 针对芯片散热表面热流具有典型的中心高四周低的非均匀分布特征,设计制备了具有三阶 Sierpinski 地毯曲线分形特点的亲疏水交错润湿铜表面,并通过实验观测了气泡在典型的亲/疏水分形表面的动力学特性。结果表明,气泡会首先在预设的高阶疏水点处成核、生长,并呈现典型的分形特征,实现了初始气泡成核位置的可控分布;之后,相互邻近的疏水点上的气泡开始克服能垒而发生合并,同时伴随着高阶疏水区域的气泡向中央低阶区域的定向移动、合并过程,最终在中心一阶疏水区域形成大气泡。相比于光滑及疏水点阵表面, Sierpinski 亲/疏水交错润湿表面不仅能够有效降低液体起始沸腾温度,提高沸腾换热的临界热流密度,而且可以规划气泡的成核点及移动、合并方向,进而实现气泡空间分布与加热壁面热流密度分布的协同一致。因此,具有 Sierpinski 分形特性的亲/疏水交错润湿表面进一步提高了沸腾换热性能。

关键词: 分形图案;亲/疏水;气泡分布;池沸腾

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0100-09

Study on the Bubble Distribution and Heat Transfer Enhancement on Sierpinski Hydrophobic/Hydrophilic Fractal Pattern

YU Ting^{1,2}, WANG Ya¹, QI Baojin^{1,2}, WEI Jinjia¹

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Jiaotong University Suzhou Institute, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: The heat dissipation of chip, which releases much more heat from its center than from the marginal area, shows a typical non-uniform distribution feature. Based on this, a non-uniform wetting copper surface with fractal features of three-order Sierpinski carpet was designed, and then the dynamic behaviors of the bubble on the surface with typical hydrophobic/hydrophilic fractal pattern were observed experimentally. The results showed that small bubbles would first nucleate and grow at the preset high-order hydrophobic points, and their distribution presented typical fractal feature, which indicates that the controllable distribution of the initial bubble nucleation sites is achieved. Subsequently, the neighboring bubbles at the hydrophobic points began to merge with each other after overcoming the energy barrier. Directional migration of small bubbles from the high-order hydrophobic region to central low-order region could also be observed simultaneously. A large bubble was finally formed in the central first-order hydrophobic region after bubbles coalescence. Compared with smooth and hydrophobic point array surfaces,

收稿日期: 2018-09-07。 作者简介: 于婷(1993—),女,硕士生;齐宝金(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776168);江苏省自然科学基金资助项目(BK20171236)。

网络出版时间: 2019-02-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190221.0900.007.html>

the fractal non-uniform wetting surface can reduce the onset boiling temperature effectively, and increase the critical heat flux density of boiling heat transfer. More importantly, the nucleation sites of the bubbles and their moving and merging processes on the fractal pattern surface can be designed and planned in advance, so the distribution of the bubbles can keep consistent with the heat flux on heating surface. Therefore, this non-uniform wetting surface with Sierpinski fractal pattern can further improve the boiling heat transfer performance.

Keywords: fractal pattern; hydrophobic/hydrophilic; bubble distribution; pool boiling

将高发热量的电子器件浸没于液体中,利用液体沸腾过程来吸收芯片表面的发热量,以确保芯片维持正常工作温度,正逐步成为最高效的电子器件散热手段。强化沸腾换热性能可以通过扩展表面积、增加汽化核心密度、调节润湿性、采用非共沸工质等途径实现^[1-6],其中通过调节散热表面润湿性能来降低起始沸腾的温度,提高传热性能,对满足电子器件小温差、高热流的散热需求具有重要的科学意义和应用价值。

郑晓欢等实验研究了超疏水表面沸腾换热,结果表明超疏水表面可在较低的热流密度下进入核态沸腾,得到较高的沸腾换热系数(HTC),但随着热流密度升高表面快速进入膜态沸腾,临界热流密度(CHF)较低^[7]。徐鹏飞等实验发现加热面润湿性的增强起到了强化 CHF 的作用,但亲水表面需要较高的壁面过热度才能进入核态沸腾,在低热流密度下沸腾换热系数很小^[8-9]。Hai 也发现在过冷沸腾中,低过热度下疏水表面可以更早地促使沸腾气泡成核,因而具有更高的沸腾传热量,亲水表面的临界热流密度更高^[10]。为了结合亲水表面可提高 CHF 和疏水表面能更早促使气泡成核的优点,Betz 等制作了亲疏水混合表面,通过池沸腾实验研究发现这种混合表面的 CHF 有所升高,而且气泡成核总是最先发生在亲疏水区域的交界处^[11]。Suroto 也发现亲疏水区域的交界处具有最大的粗糙度,亲疏水混合表面的沸腾传热量比亲水表面的沸腾传热量大^[12]。Jo 等在亲水表面上制作了不同数量、均匀分布的疏水点,指出 CHF 受疏水区域占加热表面的面积比例的影响较大,而 HTC 受疏水点的直径、数量及间距等因素影响,所以在亲水表面设置小而多的疏水点有望同时强化 HTC 和 CHF^[13-14]。

目前已有的研究文献中,为了减小气泡成核、生长过程的随机性,几乎全都是在亲水表面均布尺寸相同的疏水点阵^[15],但这种分布显然与散热表面热流密度非均匀分布(中心高四周低)的实际情况不符^[16],也与表面气泡生长、合并过程的动力学行为

不一致。更为重要的是,本课题组通过实验观测和文献查阅发现,均质表面上气泡的尺度分布具有典型的分形特征,并且还明显观察到小气泡从成核点向中心大尺寸气泡迁移合并的现象。基于此,本研究提出设计亲/疏水交错润湿的具有 Sierpinski 地毯曲线分形特性的加热表面,以实现气泡成核、移动及合并的可控规划,进而同步提高加热表面的沸腾换热系数和临界热流密度。

1 非均匀润湿分形结构制备及表征

1.1 Sierpinski 地毯分形结构设计及制备

基于电子器件表面中心发热高、四周低的热流分布特性(见图 1),在加热表面设计了一种具有典型分形特征的非均匀润湿结构——Sierpinski 地毯图形结构。具体步骤如下:先将一个正方形均分成 9 个小正方形,保留中间的正方形不变,对周围的 8 个正方形继续均分 9 份,重复上述过程即可获得 Sierpinski 地毯图案。均分 1 次得到一阶分形图形,如图 2a 所示;均分 2 次得到二阶分形图形,如图 2b 所示;均分 3 次即可得到三阶分形图形,如图 2c 所示。均分次数越多,得到的图形区域的阶数越高,反之则为低阶区域。为契合电子芯片散热过程中的热流分布特性,同时便于液相工质补给,将上述分形表面的白色点阵设计为疏水区域,其余区域为亲水区域。受限于掩模板的加工能力,同时考虑到水中沸腾气泡滑移、合并,将加热表面设计为三阶分形图形。

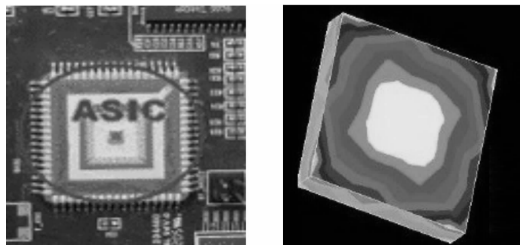


图1 电子器件及表面温度分布

首先,采用液相氧化沉积法制备亲水表面。将

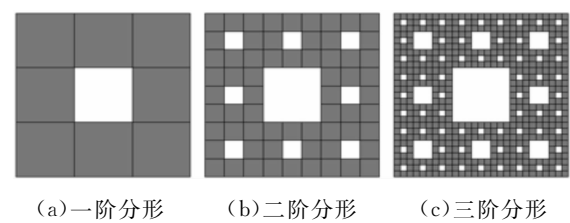


图 2 三阶 Sierpinski 地毯图案的形成

紫铜块打磨抛光,浸入 2 mol/L 的盐酸中超声波清洗 15 min 后,用去离子水冲洗干净,随后放入无水乙醇溶液中,超声波清洗 5 min 取出并常温吹干。配置 2.5 mol/L 氢氧化钠和 0.07 mol/L 过硫酸钾的混合溶液 1 L,铜块置于其中,经恒温水浴 60 min 后,取出用去离子水清洗,吹干表面,之后在 100 ℃ 恒温干燥箱中干燥 1 h。

然后,按照前文对于三阶 Sierpinski 地毯疏水点图案的构想,设计相应尺寸和分布的不锈钢掩模板(结构尺寸见图 3a)。将掩模板覆于制备好加工表面的紫铜块上并固定,置于磁控溅射机内,设置相应的溅射参数(溅射时间 20 min、溅射温度 100 ℃、溅射功率 70 W),在紫铜块表面被掩模板露出的区域溅射聚四氟乙烯(PTFE),20 min 后取出,即可得到疏水点按设计图案分布的非均匀润湿表面,如图 3b 所示。

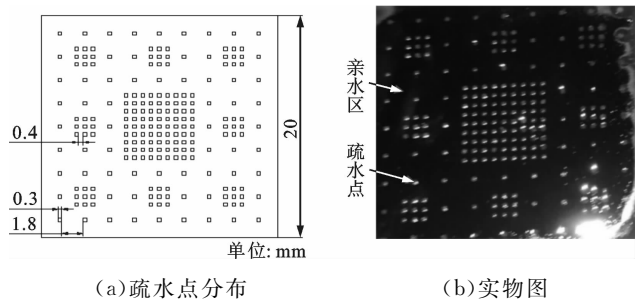


图 3 三阶分形图形的疏水点分布及实物图

为了便于实验现象、数据的对比,以及实验结果分析,分别制备了 5 种不同的表面,尺寸均为 20 mm×20 mm,其他相关特征如表 1 所示。

表 1 不同实验表面图形结构及静态接触角

实验表面	静态接触角 $\theta/(^{\circ})$	疏水点分布
光滑	30	无
亲水	12.2	无
疏水	150.1	全疏水
均布疏水	150.1(亲水)	27×27
点阵	12.2(疏水)	
分形疏水	150.1(亲水)	Sierpinski 地毯
点阵	12.2(疏水)	

1.2 Sierpinski 亲/疏水交错润湿分形表面表征

Sierpinski 亲/疏水交错润湿分形表面的微观结构的 SEM 照片及静态接触角如图 4 所示。从图中可以观察到,铜基板上均匀覆盖着一层针丛状 CuO 微米级结构,局部还零星散落分布着团簇状的结构(制备缺陷)。采用德国 KRUSS 的 DSA100 液滴形状分析仪,测得上述方法制备的疏水区区域的静态接触角为 150.1°,亲水区静态接触角为 12.2°。

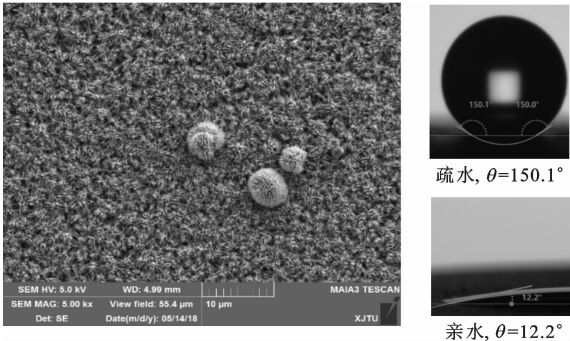


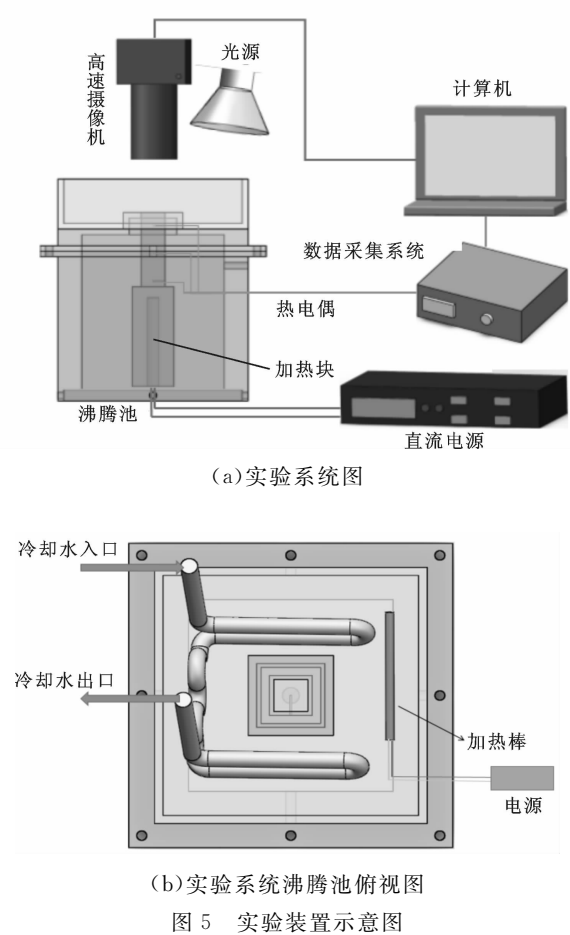
图 4 分形非均匀润湿表面的 SEM 照片及静态接触角

2 池沸腾换热系统

2.1 实验装置及方法

本实验所采用的池沸腾实验系统装置如图 5 所示。实验装置主要由敞口沸腾池、测试段、恒热流加热系统、温度控制装置、数据采集系统和图像高速采集系统组成,实验工质为去离子水。沸腾池底部开口以安装测试试样,试样通过可调热流铜棒进行加热(由内嵌电加热棒的铜棒和恒流源组成),加热铜块用保温棉包裹。采用热电偶测量铜棒轴线上沿热传导方向等距(9 mm)布置的 3 个测点温度,利用傅里叶一维导热定律,计算得到铜表面中心处的壁面温度。温度控制装置是为了维持工质在设定的实验温度,依靠布置在沸腾池内的辅助加热和冷却装置及时对液体工质加热或冷却,如图 5b 所示。通过调节温控装置,可保证介质过冷度维持在(10±0.5) K,以实现过冷沸腾。敞口沸腾池正上方放置高速摄像机用以拍摄实验图像,沸腾池侧面安装有小型风扇,以防止高速摄像机镜头产生水雾影响拍摄。

由于加热铜棒和测试表面向四周散热,因而形成了中心高四周低的热流密度分布。加热表面的温度可通过测量得到的表面温度分布红外数据对中心处的壁面温度修正获得,但由于试样尺寸较小(20 cm×20 cm),各点实际温度相差不大,故在计算加热表面传热性能时,采用中心处壁面温度作为平均壁面温度进行计算。



2.2 数据处理

加热铜块用保温棉包裹,故可以认为在加热过程中热量自下而上传递,利用傅里叶一维导热公式计算得到壁面温度

$$T_w = T_1 - \frac{(T_3 - T_2) + (T_2 - T_1)}{2} \tag{1}$$

铜块中心线某一点的热流密度可由下式计算

$$q = \frac{1}{3} K \left(\frac{T_1 - T_2}{L_1} + \frac{T_2 - T_3}{L_2} + \frac{T_3 - T_w}{L_3} \right) \tag{2}$$

沸腾换热系数

$$h = \frac{q}{T_w - T_f} \tag{3}$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 是沿热流传导方向的 3 个温度测点的温度; T_f 是实验工质的温度; L_1 、 L_2 、 L_3 是温度测点之间的距离,均为 9 mm。

实验采用的 T 型铜-康铜热电偶的最大误差为 ± 0.1 K。液体工质的温度不确定度不超过 ± 0.2 K。热流密度主要通过 3 个温度测点的温度计算得到,运用基于蒙特卡罗方法的误差传播定律,误差为 $0.58 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 。实验系统中的热损失不可避免,输入热功率根据 $P=UI$ 计算得到,实际热功率

P' 根据 3 个温度测点的温度采用一维导热计算得到,则热损失为 $(P - P')/P$,可得到平均热损失为 24.77%。

3 实验结果与讨论

3.1 气泡成核点可控排布

3.1.1 气泡的成核 图 6 展示了不同润湿性表面的初始沸腾换热现象。由图可知,亲水表面的壁面过热度达到 7.9 K 以上才开始出现沸腾气泡,即为沸腾起始点(ONB),而具有疏水结构表面的起始沸腾的壁面过热度都在 2.3 K 左右,表明亲水表面起始沸腾温度比具有疏水结构的表面高得多。这主要是因为疏水结构更容易捕获气相组分,十分有利于微气泡的形成和长大,进而使液体在很低的壁面过热度下就能进入发展充分的核态沸腾。分形交错润湿表面的沸腾起始壁面过热度为 2.3 K,与疏水表面和疏水点阵表面的沸腾起始过热度大致相同,相比于亲水表面下降了 71.1%。亲水、疏水表面不同的静态接触角对生成气泡的形状有很明显的影响,如图 7 所示。

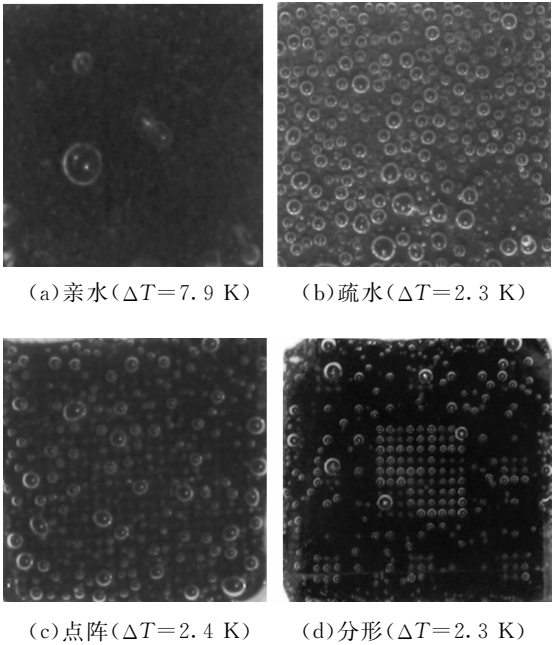


图 6 4 种表面在各自的沸腾起始点时的气泡成核现象

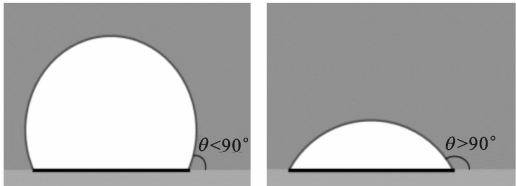


图 7 表面不同疏水性生成的气泡示意图

这里引入能量因子 $f(\theta)$, 定义式为

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

用相同直径的静态接触角为 θ 的截断球与完整球的体积比来表示不同静态接触角的表面生成气泡所需的能量与生成一个完整的球形气泡所需能量之比^[10]。气泡生长所需能量为

$$\Delta E_f(R^*, \theta) = \frac{4\pi(R^*)^2}{3} \sigma f(\theta) \quad (5)$$

能量因子随静态接触角的变化情况如图 8 所示, 随着静态接触角的增大, 能量因子逐渐减小, 气泡生长所需能量逐渐减小, 所以疏水点上气泡成核壁垒较低, 疏水点处易于活化成为汽化核心, 成核所需的过热温度低于亲水表面上的过热温度, 带有疏水点的表面可以有效提高其在低过热度时的沸腾换热系数。

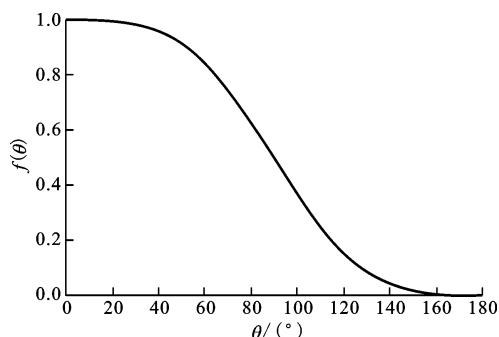


图 8 能量因子随静态接触角的变化情况

此时可以明显观察到, 在亲水或者疏水表面上初始气泡的形成位置具有很大的随机性。然而, 在观察图 6c、6d 时, 可以看到气泡在预先设计的疏水点处形成, 因为在疏水点处 ONB 比在亲水表面上低, 在亲水表面上的疏水点处会更容易首先形成气泡。进一步考虑到散热表面非均匀的热流密度分布(中心高四周低)的实际情况^[16], 所以采用非均匀润湿 Sierpinski 地毯图形结构的表面更符合气泡生长和热流密度分布的实际情况, 能实现更好的换热性能。如图 6d 所示, 气泡成核点的数量、分布基本与初始设计的疏水点重合, 小气泡在加热壁面上的分布基本符合设计的 Sierpinski 地毯疏水图案, 实现了通过布置疏水点控制气泡成核位置, 从而达到与热流密度分布协调一致的目的。

3.1.2 气泡生长过程中的分形排布特征 热流密度为 4.78 W/cm^2 时, 气泡在分形表面生长过程的分布特性如图 9 所示。在气泡成核初始阶段($t=0 \text{ s}$), 气泡成核位置的分布与实验制备的 Sierpinski 地毯分形图案上排布的三阶疏水点非常吻合, 如图

9a 所示, 而且由于亲/疏水非均匀润湿表面上产生的气泡所特有的气泡“钉扎”现象^[17]的存在(见图 10), 气泡在疏水点处成核后, 会由于亲/疏水分界线上能垒的存在而驻留在成核点生长至一定大小, 然后脱离或者与周围气泡合并。因此, 在气泡成核到生长的过程中, 其分布特性一直符合 Sierpinski 地毯三阶分形图案。

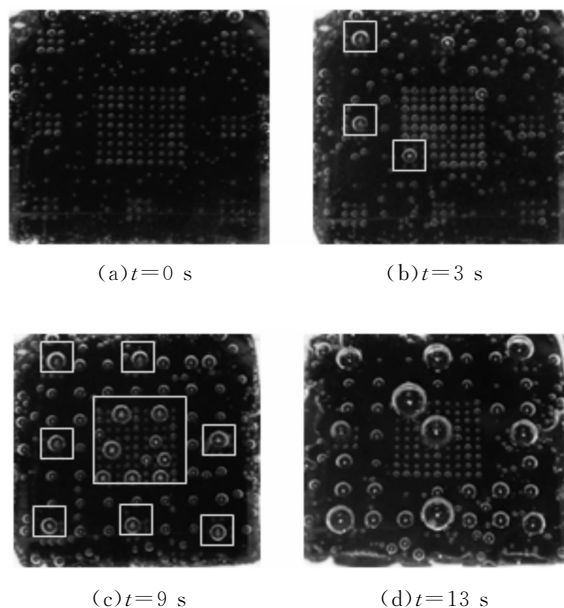


图 9 Sierpinski 地毯非均匀润湿表面气泡分布

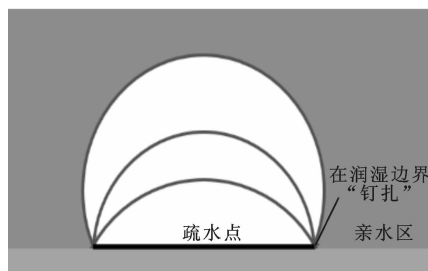


图 10 气泡在原位成核点的“钉扎”生长

之后, 随着时间变化($t=3 \text{ s}$), 三阶疏水点上产生的小气泡开始相互合并, 在二阶疏水区域内形成较大的二代气泡, 如图 9b 所示。随着壁面过热度升高, 气泡持续合并, $t=9 \text{ s}$ 时加热面形成了与二阶分形疏水结构类似的二代气泡, 同时四周裸露出来的三阶疏水点又开始重新形成小气泡, 如图 9c 所示。壁面过热度继续升高, $t=13 \text{ s}$ 时二阶疏水区域的气泡逐渐长大, 并开始向加热面中心一阶区域滑移, 如图 9d 所示, 这一现象会在 3.2 小节详细分析。气泡按照 Sierpinski 地毯分形图案从高阶向低阶区域滑移、合并, 尤其是越来越多的气泡向中心滑移、合并, 促进中央大气泡迅速地生成、脱离, 在一定程度上促

进了各阶气泡的脱离,加强了表面的换热。在图 11 中,相近热流密度($q\approx 10\text{ W/cm}^2$)下几个不同表面上相近尺寸气泡(1.6 mm 左右,约为分形表面上二阶气泡的大小)的脱离频率对比表明,亲/疏水结合的均匀点阵表面气泡脱离频率相比疏水表面略有提高,Sierpinski 地毯分形表面进一步提高了脱离频率,在图 12 中,随着壁面过热度增加,中央一阶大气泡的脱离频率逐渐升高。因此,Sierpinski 地毯分形表面可以有效改进疏水表面气泡脱离困难的问题,有利于进一步发挥亲/疏水表面在沸腾换热方面各自的优点。

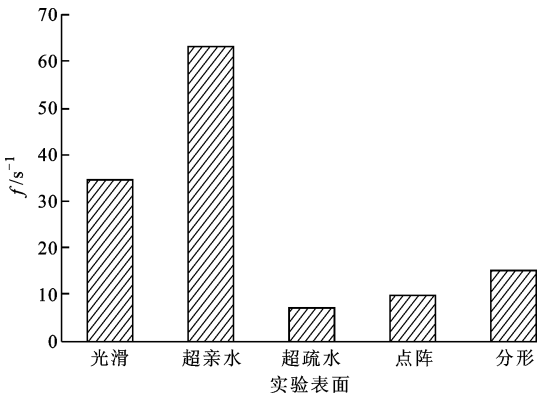


图 11 不同表面上相近尺寸气泡的脱离频率

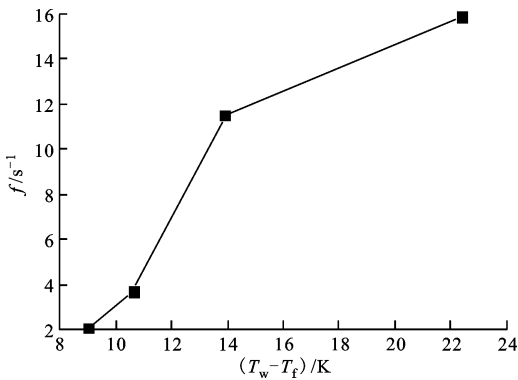


图 12 不同过热度分形表面中央大气泡的脱离频率

正是由于气泡在疏水点处易于成核,且亲水区域中的疏水点处产生的气泡“钉扎”现象的存在,气泡产生后会一直在初始成核位置成长至滑移、脱离,符合 Sierpinski 分形分布特性,实现了在加热表面中央高热流密度区分布较多的气泡,促进了沸腾换热。加热表面四周低热流密度区分布的气泡则较少,可在保证散热的前提下留出足够的亲水通道不被气泡占据,增强液体补给。气泡分布和加热表面热流密度分布特点的协同一致性,可以更好地增强表面沸腾换热性能。

3.2 气泡定向合并

3.2.1 气泡定向合并行为 随着热流密度升高,观察 Sierpinski 地毯曲线分形非均匀润湿表面上各个初始疏水点上气泡合并长大的过程,发现在第一阶(中央区域)疏水点组成的疏水区域,81 个初始疏水点上的邻近气泡发生合并,高阶区(四周)的气泡向更低阶区域(中央)方向移动、合并。如图 13 所示,观察热流密度 q 为 12.4 W/cm^2 的沸腾实验现象,发现气泡首先在多阶分形交错润湿结构的疏水区域成核,并会逐步从高阶(三阶)的疏水点区域向低阶疏水区域(二阶、一阶)聚合,最终在热流密度最高的表面中心区域聚合形成大气泡,并迅速脱离加热表面。气泡在加热壁面的分布十分符合散热壁面热流密度中心高四周低的特点,促进了中央气泡的生长合并以及脱离,强化了换热性能。

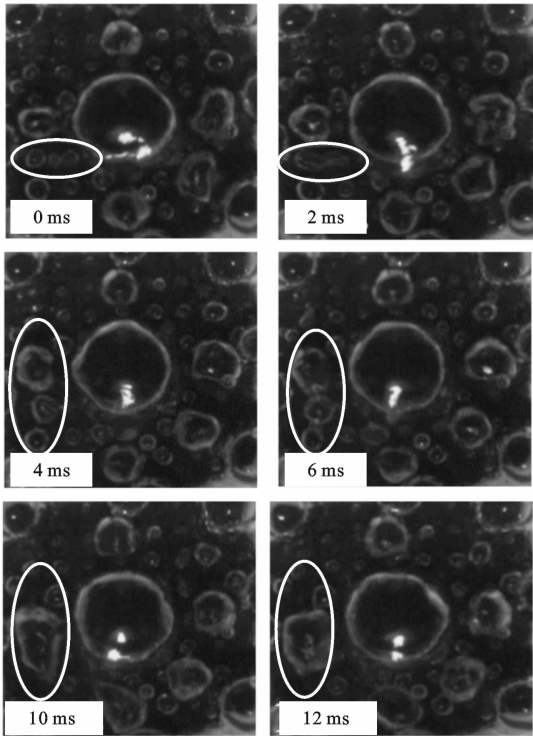


图 13 气泡从三阶疏水点向二阶疏水点移动、合并的过程

在热流密度 q 为 12.4 W/cm^2 时,三阶疏水点区的气泡向二阶疏水点处移动、合并的动态过程见图 13,在圈出的区域,三阶疏水点处形成的小气泡相互合并,然后在第 6 ms 时,合并后的气泡向二阶疏水点区域移动,并与此处的气泡合并,形成更大的气泡。二阶疏水区(加热壁面四周)的气泡向一阶中央疏水区移动、合并的动态过程见图 14。如图中圈出的区域,在第 3 ms 时二阶疏水点处生长合并形成的气泡向中央一阶疏水点区域移动,并逐渐与此处

气泡合并,开始只有气泡的一小部分接触,随着时间推移,可以明显看到二阶区域的气泡受到拉力,开始变形、拉长、移动,然后整个气泡脱离并与中央区域的气泡合并,最终在中央区域形成更大的气泡。

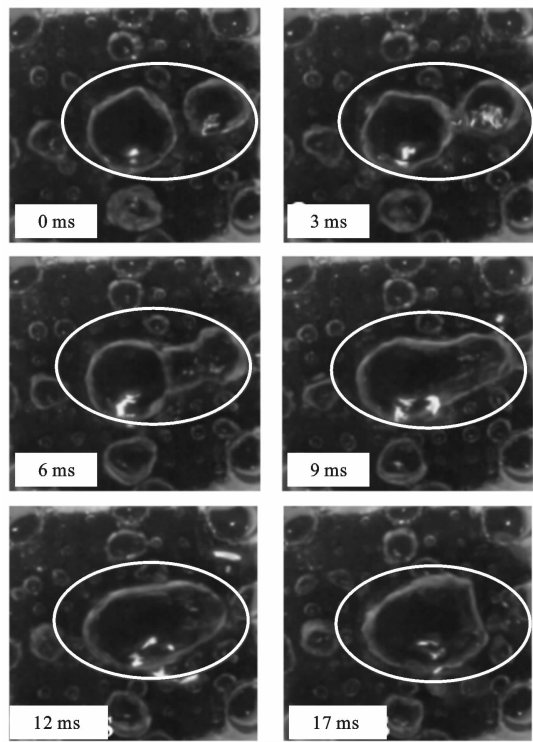


图14 气泡从二阶疏水点向中央一阶疏水点移动、合并的过程

3.2.2 气泡定向合并机理 本研究中设计的分形交错润湿表面中央有大量疏水点分布,形成一开始的大气泡。由1.1小节可知,均分次数越多,得到的图形区域的阶数越高,对应的是更高阶疏水点阵区域。这里假设图15中点1处为更靠近高阶疏水点区域,点2处为更靠近低阶疏水点区域,在两处分别取与低阶区大气泡所覆盖的面积相同的区域,易得高阶区域的平均表面能低于低阶区的平均表面能。将气泡沿运动方向简化为二维图形以便于分析,如果气泡三相接触线沿表面能增加方向发生一个微小的变化,从位置1到位置2界面能的变化量^[18-19]为

$$d\Delta G = [(\gamma_{sv} - \gamma_{sl})_2 - (\gamma_{sv} - \gamma_{sl})_1]dx \quad (6)$$

式中: ΔG 为界面自由能; γ_{sl} 为液固表面张力; γ_{sv} 为气固表面张力。

用气泡在表面上的界面能变化率来表征由于表面能梯度存在所引起的气泡驱动力

$$F_x = -\frac{d\Delta G}{dx} = (\gamma_{sl} - \gamma_{sv})_2 - (\gamma_{sl} - \gamma_{sv})_1 \quad (7)$$

又由 Young 方程

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta \quad (8)$$

则表面能梯度力

$$F_x = -\frac{d\Delta G}{dx} = \gamma_{lv}(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (9)$$

如前所述,低阶区域的平均表面能低于高阶区,两区域整体 $\cos \theta_1 > \cos \theta_2$, 所以表面能梯度力 $F_x > 0$, 即气泡受到向更低阶疏水区域运动的驱动力。

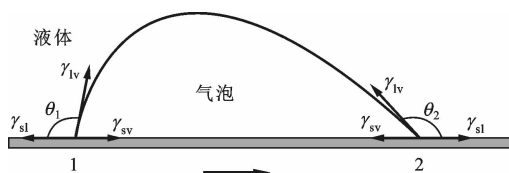


图15 气泡沿运动方向简化为二维图形

与单气泡生长相比,疏水点处气泡汽化核心的活化作用提供了稳定的气泡来源,四周小气泡受表面能梯度力的影响,向分形图案低阶区大气泡移动、合并,使气泡的生长周期变短,脱离频率上升^[20],提高了中心高热流密度区的 CHF 和表面整体的换热性能。

3.3 Sierpinski 交错润湿分形表面强化换热分析

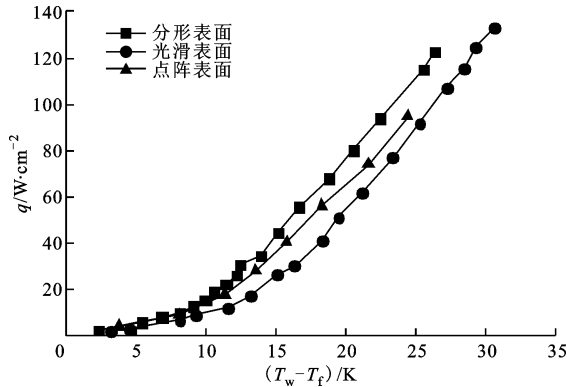
在相同的过热度下,图16中分形表面的热流密度比光滑铜表面和疏水点阵表面有所提高,如20 K时,分形表面的热流密度比光滑铜表面和疏水点阵表面分别提高了约35.09%和13.98%,这说明分形非均匀润湿表面实现了强化沸腾换热的目的。

疏水点阵表面和分形非均匀润湿表面结合了亲水区和疏水区沸腾换热的优点,疏水区域在低热流密度下容易产生气泡、HTC 较大^[21],低热流密度时具有较高的沸腾换热系数,而周围的亲水性区域可以约束气泡的生长,防止表面过早进入膜态沸腾,即提高了临界热流密度。

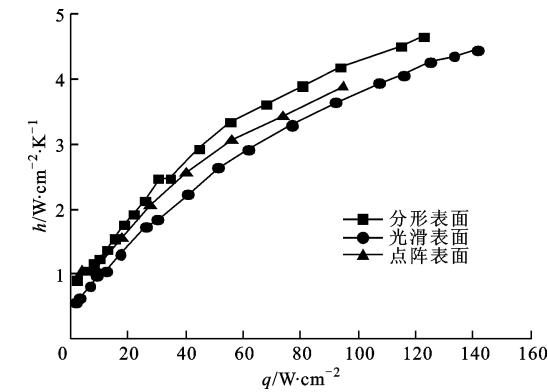
与疏水点阵表面相比,在壁面过热度达到10 K前,疏水点阵表面由于疏水点密度大于分形表面,故在低过热度时疏水点阵的热流密度略高于分形表面,随着壁面过热度升高,分形表面热流密度开始高于疏水点阵。这是由于分形表面不仅实现了疏水点的可控分布,在中央高热流密度区排布 9×9 的密集小气泡,形成沸腾表面中央高热流密度区的快速高效换热,而且当气泡按照规划从高阶(四周小疏水点)向低阶(中央疏水点区域)移动、合并时,加快了三阶小气泡和二阶气泡的脱离频率,同时也加快了中央一阶大气泡的形成和脱离,有效提高了加热面中央高热流密度区的沸腾换热。

分形交错润湿表面对于气泡分布和合并的定向

规划,符合加热壁面中心高四周低的热流密度分布,与气泡生长、合并中尺度变化的动力学过程相符合,实现了气泡空间分布与加热壁面热流密度分布的一致性,促进了中央气泡的脱离,进一步强化了沸腾换热。



(a) 沸腾特性曲线



(b) 传热特性曲线

图 16 不同表面沸腾传热特性曲线

4 结 论

根据气泡分布分形特性、加热壁面中央高四周低的热流密度分布特点,改进并制备了以三阶 Sierpinski 地毯曲线分形结构为基础的交错润湿铜表面。通过实验对比了不同疏水性及不同图形表面的传热性能,得到如下结论。

(1)Sierpinski 亲/疏水交错润湿分形表面池沸腾时,高阶疏水点处首先成为气泡成核点;在沸腾初始阶段,小气泡分布具有明显的 Sierpinski 地毯曲线分形特征;高阶疏水区小气泡克服能垒向低阶疏水区(即中央区)移动并合并形成大气泡,亲/疏水分形加热面能够很好地规划气泡的成核、定向移动及合并的过程。

(2)Sierpinski 亲/疏水交错润湿分形表面不仅能够有效降低液体起始沸腾温度,提高沸腾换热的

临界热流密度,更为重要的是,它对于气泡分布和合并的定向规划,符合加热壁面中心高四周低的热流密度分布,与气泡生长、合并中尺度变化的动力学过程相符合,这种重要的特性实现了气泡空间分布与加热壁面热流密度分布的协同一致,从而进一步提高了沸腾换热性能;与光滑及亲/疏水点阵表面相比,在相同的壁面过热度 20 K 下,Sierpinski 地毯分形表面的热流密度提高了约 35.09%和 13.98%。

参考文献:

[1] SHOJAEIAN M, KOSAR A. Pool boiling and flow boiling on micro-and nano-structured surfaces [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2015, 63: 45-73.

[2] 魏进家, 张永海. 柱状微结构表面强化沸腾换热研究综述 [J]. 化工学报, 2016, 67(1): 97-108.

WEI Jinjia, ZHANG Yonghai. Review of research on surface-enhanced boiling heat transfer of columnar microstructures [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2016, 67(1): 97-108.

[3] KONG X, ZHANG Y, WEI J, et al. Experimental study of pool boiling heat transfer on novel bistructured surfaces based on micro-pin-finned structure [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91: 9-19.

[4] 高明, 郑平, 全晓军. 电场作用下单个沸腾气泡动态特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1387-1390.

GAO Ming, ZHENG Ping, QUAN Xiaojun. Study on dynamic characteristics of single boiling bubbles under electric field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(7): 1387-1390.

[5] AHN H S, KIM M H. A review on critical heat flux enhancement with nanofluids and surface modification [J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(2): 155-172.

[6] DONG E K, DONG I Y, DONG W J, et al. Review of boiling heat transfer enhancement on micro/nano structured surfaces [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2015, 66: 173-196.

[7] 郑晓欢, 纪献兵. 超亲/疏水性表面池沸腾传热研究 [J]. 化工进展, 2016, 35(12): 3793-3798.

ZHENG Xiaohuan, JI Xianbing. Super-/hydrophobic surface pool boiling heat transfer research [J]. Chemical Progress, 2016, 35(12): 3793-3798.

[8] 徐鹏飞, 李强, 宣益民. 超亲水多孔表面制备及其池沸腾换热研究 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8):

- 1606-1609.
- XU Pengfei, LI Qiang, XUAN Yimin. Preparation of super-hydrophilic porous surface and its pool boiling heat transfer [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(8): 1606-1609.
- [9] KIM S J, BANG I C, BUONGIORNO J, et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(19): 4105-4116.
- [10] HAI T P, CANEY N, MARTY P, et al. Surface wettability control by nanocoating: the effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(23): 5459-5471.
- [11] BETZ A R, XU J, QIU H, et al. Do surfaces with mixed hydrophilic and hydrophobic areas enhance pool boiling? [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(14): 103115.
- [12] SUROTO B J. Effects of hydrophobic-spot periphery and subcooling on nucleate pool boiling from a mixed-wettability surface [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2013, 8(1): 294-308.
- [13] JO H J, KIM S H, PARK H S, et al. Critical heat flux and nucleate boiling on several heterogeneous wetting surfaces: controlled hydrophobic patterns on a hydrophilic substrate [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 62(2): 101-109.
- [14] JO H J, AHN H S, KANG S H, et al. A study of nucleate boiling heat transfer on hydrophilic, hydrophobic and heterogeneous wetting surfaces [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(25): 5643-5652.
- [15] MORI S, UTAKE Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: a review [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 108: 2534-2557.
- [16] LEE J S. Critical heat flux enhancement of pool boiling with adaptive fraction control of patterned wettability [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 96: 504-512.
- [17] JO H J, PARK H S, KIM M H. Single bubble dynamics on hydrophobic-hydrophilic mixed surfaces [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 93: 554-565.
- [18] SUBRAMANIAN R S, NADJOUA M A, MCLAUGHLIN J B. Motion of a drop on a solid surface due to a wettability gradient [J]. *Langmuir*, 2005, 21(25): 1184.
- [19] SATEESH G, DAS S K, BALAKRISHNAN A R. Analysis of pool boiling heat transfer: effect of bubbles sliding on the heating surface [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2005, 48(8): 1543-1553.
- [20] HSU C C, CHEN P H. Surface wettability effects on critical heat flux of boiling heat transfer using nanoparticle coatings [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2012, 55(13/14): 3713-3719.
- [21] BETZ A R, JENKINS J, KIM C J, et al. Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2012, 57(2): 733-741.

[本刊相关文献链接]

- 吕财,王广军,陈红,等. 钻孔工件移动热边界条件估计及温度场重构. 2019, 53(1): 18-24. [doi: 10. 7652/xjtuxb201901003]
- 马原,孙培杰,李鹏,等. 低温流体微重力池沸腾气泡脱落特性研究. 2018, 52(9): 89-94. [doi: 10. 7652/xjtuxb201809012]
- 周家森,齐宝金,魏进家,等. 铜基疏水冷表面液滴冻结实验研究. 2018, 52(7): 108-114. [doi: 10. 7652/xjtuxb201807016]
- 朱科,史晓军,高建民,等. 轴芯冷却电主轴热特性分析的数值模拟与实验研究. 2018, 52(4): 40-47. [doi: 10. 7652/xjtuxb201804006]
- 王宏朝,单希壮,杨志刚. 基于矩阵风扇的车辆前端换热优化. 2018, 52(1): 69-76. [doi: 10. 7652/xjtuxb201801011]
- 倪妮,孙中国,陈啸,等. 单液膜气泡聚并和连接过程的移动粒子半隐式法数值模拟. 2017, 51(12): 156-162. [doi: 10. 7652/xjtuxb201712023]
- 刘泳辰,魏进家,孔新,等. 交错排列柱状微结构表面池沸腾换热实验研究. 2016, 50(7): 13-17. [doi: 10. 7652/xjtuxb201607003]
- 王磊,谢福寿,朱康,等. 低温流体大空间膜态沸腾换热预测. 2016, 50(4): 131-138. [doi: 10. 7652/xjtuxb201604020]

(编辑 荆树蓉)