

不同润湿性表面池沸腾换热特性研究

赵鹏飞, 冀文涛, 赵二涛, 何雅玲, 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要:通过实验的方法研究了亲水、疏水及超疏水表面的池沸腾换热特性。亲水表面通过120#砂纸打磨纯铜表面获得,疏水和超疏水表面通过疏水型SiO₂低温烧结和Parylene C膜气相沉积法制备。在常压下,以去离子水为工质,进行了池沸腾换热测试,同时用高速摄像仪对其进行可视化研究。结果表明,在热流密度为30~300 kW/m²时,疏水表面可以强化池沸腾换热。对超疏水表面,当热流密度小于93 kW/m²时,其换热性能被强化,强化倍率甚至超过2.5;而当热流密度大于93 kW/m²时,其换热性能恶化。

关键词:工程热物理;疏水;超疏水;池沸腾;换热强化

中图分类号:TK121

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2018)11-1211-06

Study on the pool boiling heat transfer of surfaces with different wettability

ZHAO Pengfei, JI Wentao, ZHAO Ertao, HE Yaling, TAO Wenquan

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Pool boiling heat transfer of water on hydrophilic, hydrophobic and superhydrophobic surfaces were investigated. The hydrophilic surface was obtained by polishing pure copper surface by 120# sandpaper. Hydrophobic and superhydrophobic surfaces were prepared by hydrophobic SiO₂ low-temperature sintering and Parylene C film vapor deposition, respectively. The pool boiling heat transfer test was carried out with deionized water as working fluid under atmospheric pressure. At the same time, the pool boiling phenomenon was visualized by the high-speed camera. The results showed that the pool boiling heat transfer could be enhanced by hydrophobic surface in the heat flux range of 30~300 kW/m². For the superhydrophobic surface, the heat transfer performance was enhanced when the heat flux was less than 93 kW/m², and the enhancement ratio was even larger than 2.5. However, the heat transfer deteriorated when the heat flux was greater than 93 kW/m².

Keywords: engineering thermophysics; hydrophobic; superhydrophobic; pool boiling; heat transfer enhancement

相变传热作为自然界中一种高效的能量传递方式已被广泛应用于工程实际中,而相变表面的润湿特性对相变传热的强化有重要的影响,早在上个世纪就有学者开始研究这些表面的润湿现象^[1-3]。随着微纳加工技术的发展,不同润湿表面的制备技术也越来越成熟,如机械加工法、激光刻蚀法、气相沉积法和溶胶-凝胶法等。1902年,Boys记载了“洒在石松膜上的水可以自发地形成球状水滴并在表面上自由滚动”的超疏水现象^[1]。1996年,日本Kao公司的科学家人工制备了与水的接触角高达174°的超疏水表面,并研究了表面的分形结构与超疏水性之间的关系^[2]。1997年,德国科学家Bathlott等^[3]对植物叶表面的超疏水性进行了系统研究,阐明了表面微细结构在超疏水特性的形成中所起的关键性作用。Yu等^[4]利用高速电火花线切割技术和溶液刻蚀的方法制备出了一种各向异性的V型凹槽阵列的微米层级超疏水表面,并研究了凹槽尺寸对表面润湿性能的影响。

疏水性表面可以有效地降低沸腾起始阶段的壁

面过热度^[5-7],近几年来国内外很多学者开始研究这些表面的相变换热特性。Nam等^[8]和Li等^[9]研究了疏水和超疏水表面去离子水池沸腾换热的单气泡动力学特性。陈粤等^[10]采用物理气相沉积法得到了超疏水表面,并进行了沸腾换热实验,发现超疏水表面的沸腾效果较差,类似于膜态沸腾,其临界热流密度也较低。Fan等^[11-12]研究了大气压下不锈钢球体超疏水表面的淬火过冷沸腾过程,发现沸腾表面存在一层稳定的蒸汽薄膜,因此膜态沸腾是淬火过程中主要的沸腾模式,并且随着过冷度的增大,换热效果也被强化。Shi等^[13]实验研究了去离子水在纳米线阵列表面的池沸腾换热,发现由于纳米线表面的成核密度和毛细力被强化,其沸腾换热系数和临界热流密度与光滑表面相比都得到了提高。

以上文献中,学者们对各种改性表面的相变换热特性进行了研究,但这些研究还远远不够。本文通过搭建池沸腾换热实验台,制备润湿性能不同的沸腾表面,并以去离子水为沸腾工质,对光滑表面、疏水表面与超疏水表面进行池沸腾换热测试与分

收稿日期:2017-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51776160);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130201120057)

第一作者:赵鹏飞(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为强化相变传热

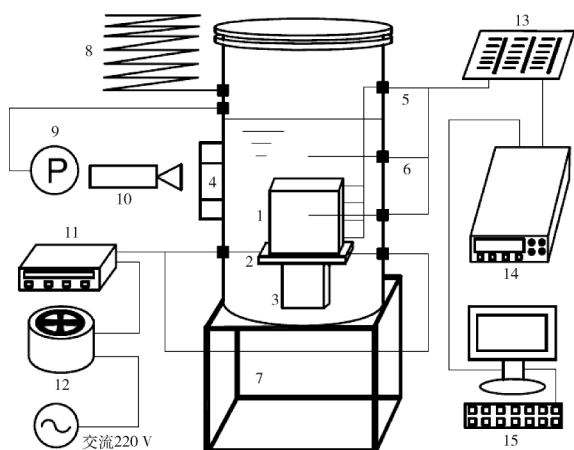
通信作者:冀文涛,副教授,主要研究方向为传热传质过程强化, wentaoji@xjtu.edu.cn

析,研究其换热特性,为深入研究相变换热提供依据。

1 实验方法

1.1 池沸腾实验装置

图 1 为池沸腾实验装置图,主要包括沸腾容器、沸腾表面、电加热调节系统、冷凝系统、数据采集系统和支撑架等。沸腾容器的内径为 300 mm,高为 505 mm,壁厚为 6 mm。测试铜块的尺寸为 100 mm×50 mm×70 mm,上表面为沸腾表面。电加热器尺寸为 150 mm×150 mm×15 mm。2 个直径为 80 mm 的视镜安装在沸腾容器的侧面,用来观察池沸腾过程。电加热器通过接触调压器控制加热功率,为减小接触热阻,电加热器表面和实验铜块底部之间涂有导热性能良好的导热硅脂。铜块侧面加工有 12 个小孔用于插装热电偶,测量各个位置的温度。除沸



1—实验铜块;2—电加热器;3—支撑物;4—视镜;5—T 型热电偶;6—铂电阻;7—沸腾容器支架;8—冷凝系统;9—压力表;10—高速摄像仪;11—电参数测量仪;12—接触调压器;13—数据采集卡;14—吉时利 2700;15—计算机

图 1 实验装置

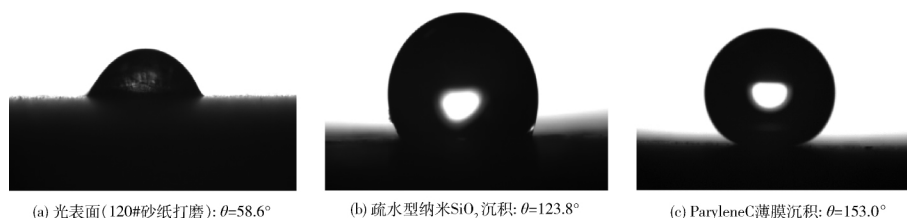


图 2 不同润湿沸腾表面的接触角

光滑表面(120 # 砂纸打磨亲水表面)、疏水表面(疏水纳米 SiO_2 颗粒)和超疏水表面(Parylene C 薄膜)具有不同的表面特性和润湿性能,因此理论上应具有不同的沸腾换热特性,这 3 种沸腾表面分别被用于池沸腾换热测试,研究并比较其换热规律。

1.3 数据处理与不确定度分析

饱和压力用压力表(精度为 0.25 级)测量,饱和液体的温度用铂电阻 Pt100(A 级,不确定度为

沸腾表面,铜块和电加热器的其他表面均用绝热材料(环氧树脂和聚四氟乙烯)封装,具有防止液体浸入和绝热的作用。池沸腾容器四周也用保温材料(橡塑海绵保温材料和铝箔)进行隔热处理,以减少热量散失。

沸腾容器通过冷凝系统与大气相通,因此整个实验测试过程都在大气压(96 kPa)下进行。沸腾介质为去离子水,沸腾容器工质充灌量为 18 L,其先用 2 个 2 kW 的辅助加热器将工质加热到饱和温度,并保持沸腾状态 30 min,以排净容器中的空气,然后用电加热器对实验铜块加热,开始进行池沸腾换热实验测试,电加热器的加热功率通过接触调压器来调节。接触调压器的调压范围为 0~260 V,沸腾换热的热流密度的变化范围为 30~300 kW/m^2 。

1.2 沸腾表面的制备与表征

为进行实验对比,首先对纯铜表面用 120 # 砂纸打磨制备了光表面,经过 Attension Theta 接触角测量仪和 OneAttension 光学测量软件测得其接触角为 58.6° ,为亲水表面。然后在光表面的基础上,用疏水 SiO_2 纳米颗粒低温烧结法和 Parylene C 薄膜气相沉积法,制备了疏水和超疏水表面,如图 2 所示。各种表面的制备方法如下。

1) 经过低温热压烧结法,在光表面烧结一层疏水型气相纳米 SiO_2 ,经测量其接触角为 123.8° ,为疏水表面。其中,烧结温度为 200°C ,压力为 40 kPa,烧结时间为 95 min。

2) 为增大沸腾表面的疏水性,得到超疏水表面,使用派瑞林真空气相沉积镀膜机在光表面镀一层 Parylene C 超疏水薄膜。Parylene C 粉末首先在真空烘箱中进行加热(150°C)变成蒸汽,然后在高温炉内裂解($650\sim 700^\circ\text{C}$)转变为活性大分子单体;最后气相的大分子单体在固体沸腾表面沉积(35°C)。其制备的沸腾表面接触角达到 153.0° ,为超疏水表面。

$\pm 0.15\text{ K}$)测量,铜块各个位置的温度由 12 个 T 型热电偶(不确定度为 $\pm 0.2\text{ K}$)测量,铜块的尺寸用游标卡尺(不确定度为 $\pm 0.02\text{ mm}$)测量。电信号数据的采集用吉时利 2700 完成,每 10 s 采集 1 次数据。当温度稳定时,记录并保存数据,改变热流密度,开始下一次数据采集。数据稳定的判据为在 100 s 内饱和液体和铜块的温度波动在 $\pm 0.1\text{ K}$ 内。

实验铜块侧面加工有 12 个小孔用于插装热电

偶,测量不同位置铜块的温度,如图 3 所示。小孔的直径为 $\Phi=3\text{ mm}$,孔深为 $h=25\text{ mm}$ 。 x 为最上面一排热电偶与沸腾表面之间的距离; y 为竖直方向上相邻两排热电偶之间的距离; z 为水平方向上相邻两列热电偶之间的距离。

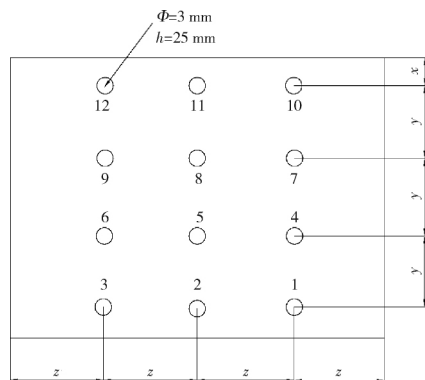


图 3 铜块侧面热电偶布置

实验中铜块四周绝缘良好,对于光滑表面去离子水池沸腾换热,温度在热流传递方向上呈近似线性分布趋势,如图 4 所示。4 条拟合曲线对应实验中的 4 个热流密度值,分别为 118、200、290、393 kW/m^2 。图 4 中横轴为热电偶安装位置与铜块底部的距离,纵轴为同一行 3 个热电偶温度示数的平均值。由图 4 可知,随着距离的增加,平均温度值线性下降,4 组温度变化曲线的线性拟合 R^2 均大于 0.99。因此,本文采用一维傅里叶导热定律和线性外推法来计算通过沸腾表面的热流密度和沸腾表面温度。

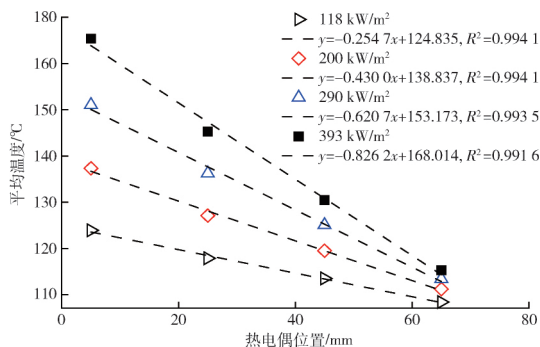


图 4 在不同热流密度下沿热流传递方向的温度变化拟合曲线

由一维傅里叶导热定律,通过沸腾表面的热流密度 q 为

$$q = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda \cdot |k|, \quad (1)$$

式中: λ 为纯铜的导热系数; k 为线性拟合曲线的斜率。

由线性外推法,沸腾表面的温度 T_w 为

$$T_w = \frac{T_{10} + T_{11} + T_{12}}{3} - \frac{q}{\lambda} \cdot x, \quad (2)$$

式中: $T_1, T_2, \dots, T_{12}$ 分别为孔 1, 2, $\dots$, 12 处的温度。

由牛顿冷却定律,池沸腾换热系数 h 为

$$h = \frac{q}{T_w - T_s}, \quad (3)$$

式中: T_s 为相对于当地大气压下的饱和温度。

为确保实验数据处理结果的可靠性,根据文献[14]对实验结果进行不确定度分析,如式(4)所示:

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} w_n\right)^2}, \quad (4)$$

式中: R 为变量 v 的函数; w_n 为变量 v_n 的相对不确定度; w_R 为 R 的总不确定度。由不确定度分析可知,通过沸腾表面的热流密度 q 的不确定度小于 4.46%,沸腾换热系数 h 的不确定度小于 6.32%。

2 实验结果与讨论

2.1 实验系统验证

在一个大气压(96 kPa)下,对光滑纯铜表面进行去离子水的池沸腾换热测试,在相同条件下连续进行 3 次实验测试,并将实验结果与如下的 Rohsenow 关联式[15]进行对比:

$$\frac{c_{pl} \Delta T}{h_{fg}} = C_{wl} \left[\frac{q}{\mu_1 h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma_1}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^r Pr_l^s (s = 1, r = 0.33). \quad (5)$$

式中: μ_1 为液体运动黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; h_{fg} 为汽化潜热, kJ/kg ; c_{pl} 为液体比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; σ_1 液体表面张力, N/m ; Pr_l 为液体普朗特数; q 为核态池沸腾的热流密度;经验参数 C_{wl} 的值取决于流体和表面的组合,这里取 $C_{wl} = 0.013$ 。实验数据与 Rohsenow 关联式的对比结果如图 5 所示。由图 5 可知,光滑表面上的池沸腾换热测试具有较好的重复性,3 次测量实验结果间的最大误差小于 5%。并且在热流密度为 30~300 kW/m^2 , 本文的实验结果与 Rohsenow 关联式的偏差范围为 -4.39%~18.30%,也证明了实验装置和实验过程的准确性和可靠性。

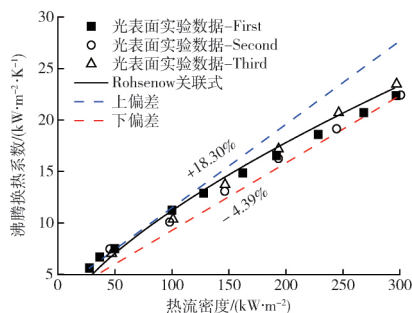


图 5 去离子水在光表面池沸腾实验结果与 Rohsenow 关联式的对比

2.2 疏水/超疏水表面池沸腾实验结果与分析

疏水和超疏水表面在1个大气压下的沸腾曲线如图6所示。由图6可见,疏水表面和超疏水表面呈现出不同的沸腾换热规律,但与光滑表面相比,都只需要更小的起始壁面过热度(比亲水表面低 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$),其原因是表面的疏水和超疏水的特性强化了活化核心数量,有利于早期的气泡成核。在本文研究的热流密度范围内,疏水表面的沸腾曲线总是位于光滑表面的上方,而超疏水表面的沸腾曲线仅在低过热度下在光滑表面上方,随着壁面过热度的增大,其与光滑表面的沸腾曲线相交(约为 8.6 K)。当过热度超过 15 K 左右时,随着热流密度的增大,过热度稍有下降。

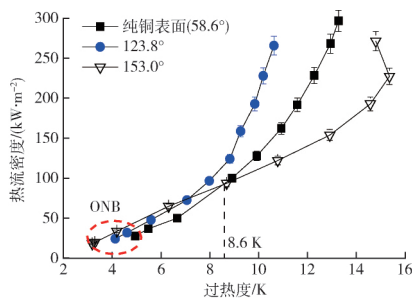


图6 疏水和超疏水表面的沸腾曲线

图7为疏水和超疏水表面的沸腾换热强化倍率随热流密度的变化关系。沸腾换热强化倍率 c 是指所测表面的沸腾换热系数与光滑表面(亲水性的纯铜表面)的换热系数的比值。由图7可知,疏水表面的换热系数在整个实验的热流密度范围内要大于光滑表面。而对于超疏水表面,在热流密度小于 93 kW/m^2 时,其沸腾换热强化倍率大于1,甚至超过2.5,而在热流密度大于 93 kW/m^2 时,其沸腾换热强化倍率小于1,换热恶化。其原因是由于超疏水表面的超疏水性,在大热流密度下,表面的气泡更容易团聚成为更大的气泡块或者局部蒸汽膜,从而恶化换热。由图7还可以看出,在低热流密度下,随着接触角的增大,沸腾换热系数强化倍率增大,说明随着疏水性的增强,其强化活化核心数量的作用也增强。

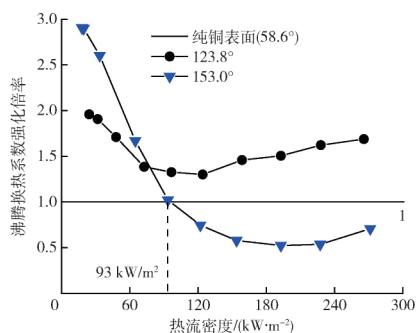


图7 疏水和超疏水表面沸腾换热系数强化倍率随热流密度的变化

本文的实验结果也与文献中的实验结果进行了比较,如图8所示。对于疏水性表面,Jo等^[16]和Betz等^[17]的沸腾换热系数随热流密度的变化规律基本相似,都是先增大后减小,实验过程中都达到临界热流密度。而本文疏水表面的实验结果在较低的热流密度下与文献中接近,但在更高的热流密度下,其换热系数比文献中的更大,并且在整个实验的热流密度范围内,没有达到临界热流密度。这些差异可能与实验中沸腾表面的疏水材料和粗糙度有关,在文献^[16-17]中,使用了含氟聚合物涂层材料,并且沸腾表面粗糙度都是纳米级的(几纳米到几百纳米)。在本文的实验中,使用的是疏水性的二氧化硅纳米粒子,其表面粗糙度更大(约一个数量级),为微米级($R_a = 4.427\text{ }\mu\text{m}$)。对于超疏水表面,文献^[18]中的Glaco涂层表面的换热状况最差,沸腾刚开始就进入膜态沸腾模式。Betz等^[17]和Takata等^[19]制备的超疏水表面的换热系数随热流密度的增大,先增大后减小,其均在较小的热流密度下($<100\text{ kW/m}^2$)进入过度沸腾和膜态沸腾阶段。而本文的实验结果,在低热流密度下与文献^[17,19]较接近,随着热流密度的增加,本文制备的超疏水表面的换热性能逐渐优于文献^[17,19],这与超疏水薄膜的材料和沸腾表面的粗糙度有关。文献^[17-19]中超疏水表面的粗糙度都是纳米尺度的,而本文沉积Parylene C薄膜后的沸腾表面的粗糙度是微米级别的($R_a = 4.135\text{ }\mu\text{m}$)。因此,疏水和超疏水表面的沸腾换热性能不仅与沸腾表面的润湿性能有关,还可能与沸腾表面的微观结构和疏水材料的种类有关。由于本文制备的疏水表面具有较大的粗糙度,其强化了核态沸腾活化核心的数量,使得疏水表面的换热性能优于文献中的沸腾表面。并且由于较大的表面粗糙度(微米尺度)能够对沸腾表面的蒸汽块或者局部蒸汽薄膜产生扰动和切割的作用,本文的疏水和超疏水表面在研究的热流密度范围内均未达到临界热流密度。

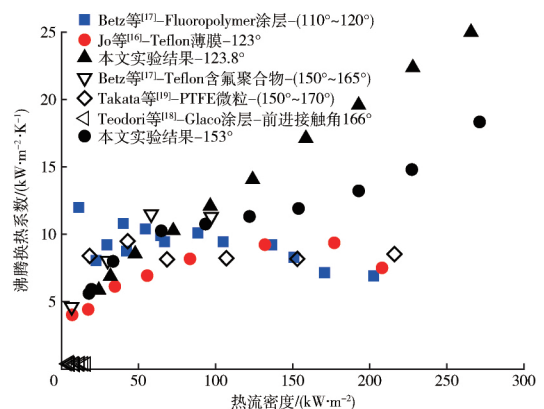


图8 疏水和超疏水表面池沸腾换热结果与文献对比

2.3 沸腾现象可视化与分析

为更清楚地观察沸腾换热现象,理解沸腾换热

的机理,用 Phantom[®] Miro[®] Series C210 高速数码相机对沸腾表面的沸腾过程进行了拍摄,如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可知,对于疏水表面和超疏水表面,在很小的热流密度下,便有沸腾气泡产生,说明这些表面和光滑表面相比,有更小的核态沸腾起始点,自然对流换热过程区间更小。疏水表面和超疏水表面的亲气疏水特性更易于气泡的产生,因此在较低的热流密度下,这些表面的换热性能均优于亲水的光滑表面。

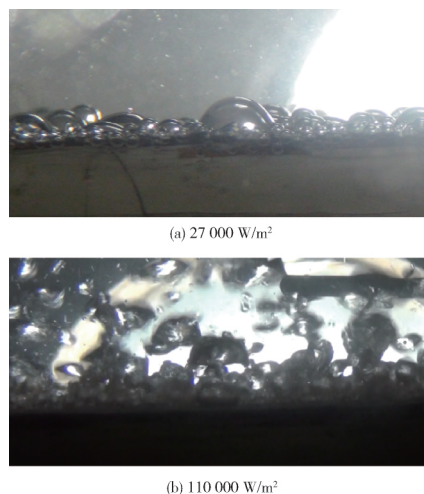


图 9 超疏水表面(接触角为 123.8°)池沸腾照片

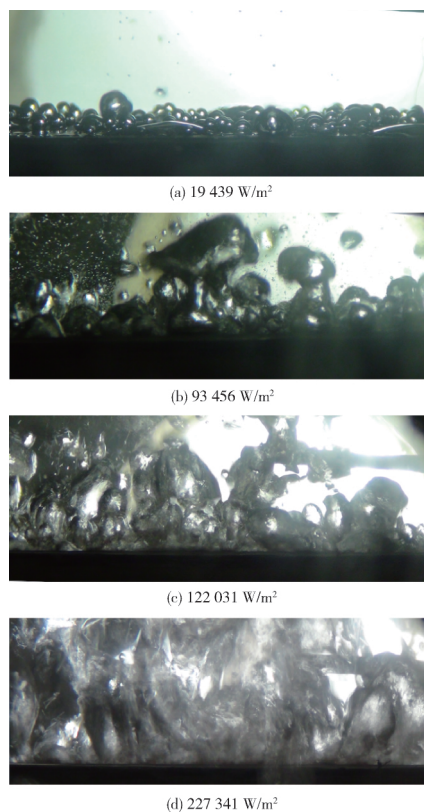


图 10 超疏水表面(接触角为 153.0°)池沸腾照片

由图 9(a)、图 9(b)和图 10(a)、图 10(b)可知,在低热流密度下,超疏水表面更容易产生大量气泡,

因此与疏水表面相比,有更高的沸腾换热强化倍率。但随着热流密度的增大,沸腾换热变得更加剧烈,又由于超疏水沸腾表面的超亲气疏水特性,大量的气泡开始合并,并且聚合的大气泡不易脱离,在沸腾表面上形成局部的蒸汽块,阻碍液体及时向加热表面补充,增大了传热热阻,最终使换热性能下降,换热系数强化倍率减小甚至低于亲水的光滑表面。由图 10(c)可以看出,气泡的脱离半径随热流密度的增大而增大。由图 10(d)可以看出,在超疏水沸腾表面上出现局部蒸汽块。

3 结 论

本文介绍了常压下光滑表面、疏水表面和超疏水表面的池沸腾换热性能实验研究结果,准确测量了水在不同表面的静态接触角,用高速摄像机对沸腾过程进行了观测,得以下结论。在 $30 \sim 300 \text{ kW/m}^2$ 的热流密度范围内,因疏水表面的亲气疏水特性更有利于气泡的产生,疏水表面的换热性能优于亲水光滑表面。当热流密度小于 93 kW/m^2 时,超疏水表面表现出最好的换热性能,强化倍率甚至超过 2.5。但随着热流密度的增大,当热流密度大于 93 kW/m^2 时,由于气泡的聚合,以及在沸腾表面上局部气膜的形成等,使超疏水表面的换热恶化。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录 <http://www.paper.edu.cn/journal/zgkjlw.shtml>)

[参考文献] (References)

- [1] QUERE D. Non-sticking drops [J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68(11): 2495.
- [2] ONDA T, SHIBUICHI S, SATOH N, et al. Super-water-repellent fractal surfaces [J]. Langmuir, 1996, 12(9): 2125-2127.
- [3] BARTHOLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces [J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.
- [4] YU Huadong, LIAN Zhongxu, WAN Yanling, et al. Fabrication of durable superamphiphobic aluminum alloy surfaces with anisotropic sliding by HS-WEDM and solution immersion processes [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 275: 112-119.
- [5] MALAVASI I, BOURDON B, MARCO P D, et al. Appearance of a low superheat “quasi-Leidenfrost” regime for boiling on superhydrophobic surfaces [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2015, 63: 1-7.
- [6] TEODORI E, VALENTE T, MALAVASI I, et al. Effect of extreme wetting scenarios on pool boiling conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 1424-1437.
- [7] VILLA F, GEORGOULAS A, MARENGO M, et al. Pool boiling versus surface wettability characteristics [C]// 16th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer, Prague, Czech Republic; MHMT'16,

- 2016; ICMFHT-110.
- [8] NAM Y, WU J, WARRIER G, et al. Experimental and numerical study of single bubble dynamics on a hydrophobic surface [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2009, 131(12): 315-320.
- [9] LI Yinxiao, ZHANG Ke, LU Mingchang, et al. Single bubble dynamics on superheated superhydrophobic surfaces [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 99: 521-531.
- [10] 陈粤, 刘俊威, 莫冬传, 等. 超疏水纳米结构表面池沸腾特性[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(4): 634-636. CHEN Yue, LIU Junwei, MO Dongchuan, et al. Pool boiling performance of superhydrophobic nanostructured interface [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(4): 634-636. (in Chinese)
- [11] FAN Liwu, LI Jiaqi, LI Danyang, et al. Regulated transient pool boiling of water during quenching on nanostructured surfaces with modified wettability from superhydrophilic to superhydrophobic [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 76(6): 81-89.
- [12] FAN Liwu, LI Jiaqi, SU Youyou, et al. Subcooled pool film boiling heat transfer from spheres with superhydrophobic surfaces: an experimental study [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2016, 138(2): 021503.
- [13] SHI Bo, WANG Yibiao, CHEN Kai. Pool boiling heat transfer enhancement with copper nanowire arrays [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 115-121.
- [14] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single sample experiments [J]. *Mechanical Engineering*, 1953, 75(7): 3-9.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006. YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer* [M]. Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [16] JO H, AHN H S, KANG S, et al. A study of nucleate boiling heat transfer on hydrophilic, hydrophobic and heterogeneous wetting surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(25): 5643-5652.
- [17] BETZ A R, JENKINS J, KIM C C, et al. Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 57(2): 733-741.
- [18] TEODORI E, PALMA T, VALENTE T, et al. Bubble dynamics and heat transfer for pool boiling on hydrophilic, superhydrophobic and biphilic surfaces [C]// IOP. 7th European Thermal-Sciences Conference, Krakow, Poland; IOP, 2016; IOP-032132.
- [19] TAKATA Y, HIDAKA S, URAGUCHI T. Boiling feature on a super water-repellent surface [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2006, 27(8): 25-30.