微细窄通道内纳米线表面的过冷沸腾流动与传热特性

李蔚^{1*}, 李俊业¹, 汪秋刚², 邵帅^{3*}, 冯钊赞⁴

1. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310027;

2. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000;

3. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027;

4. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 株洲 412001

* 联系人, E-mail: weili96@zju.edu.cn; shaos@zju.edu.cn

2019-07-27 收稿, 2019-09-29 修回, 2019-10-08 接受, 2019-12-10 网络版发表

浙江省自然科学基金(LY19E060004)资助

摘要 微/纳米结构表面对流动沸腾过程有着显著影响, 被应用于高热流的设备散热中. 为了进一步探究其物理规律, 以去离子水为工质, 配合高速摄像观测, 研究了截面为 $0.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的矩形微细窄通道内纳米线表面的竖直流动过冷沸腾. 一种TiC纳米线的直径约 230 nm , 高度约 $4\text{ }\mu\text{m}$; 另一种直径约 535 nm , 高度约 $12\text{ }\mu\text{m}$. 过冷沸腾的质量流量是 200 和 $300\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ s})$, 过冷度为 10 K , 热流密度范围是 $20\sim 200\text{ kW}/\text{m}^2$. 分析了不同工况下过冷沸腾的沸腾曲线、平均换热系数和两相流型. 研究发现, $4\text{ }\mu\text{m}$ 高度纳米线表面的两相换热系数更高, 但高热流条件下传热恶化更早. $4\text{ }\mu\text{m}$ 高度纳米线表面形成了“形成拉长气泡——气泡上下游扩张——局部干涸——流体重新润湿”的周期性两相流型, 而 $12\text{ }\mu\text{m}$ 高度纳米线表面的流型在高热流下仍以气泡聚合以及形成受限拉长气泡向下游扩张为主.

关键词 微细窄通道, 过冷流动沸腾, 纳米线, 两相流型

传统的单相强化传热方式已不能满足设备功率密度的急剧增加和设备微型化对换热装置的紧凑性及高效性要求. 利用蒸发潜热的微尺度沸腾相变冷却技术被认为是解决当下高热流器件热管理问题最有前景的方法之一. 相比常规尺度通道, 微尺度通道具有紧凑的结构、更高的表面积体积比和换热系数以及需求更小的工质流量和泵送功率, 逐步受到学术界和工业界的研究与重视. 对于两相流动, 微细通道由于重力作用降低, 表面张力等界面力作用凸显^[1], 其两相流型和传热传质特性与常规通道有较大区别.

微/纳米尺度改性结构对微细通道内流动沸腾过程有着显著影响. 表面材料组成、结构形貌等特征参数的不同会改变表面润湿性、汽化核心尺寸分布以及密

度和多孔性等, 影响壁面气泡成核与脱离等与核态沸腾密切相关的气泡动力学特征, 显著改变沸腾传热性能^[2]. Morshed等人^[3]通过电化学沉积技术在微细单通道内沉积了 200 nm 直径的铜纳米线, 并研究了其流动沸腾传热特性. 相比平滑表面, 纳米线表面能在提升换热系数的同时不增加压降损失. Li等人^[4]在微细平行多通道的底面和出入口腔涂敷了一层纳米线阵列, 发现其可以使起始核态沸腾提前, 增强换热系数并减缓流动不稳定性发生. Kumar等人^[5]在微细矩形通道内制备了不同亲疏水性的喷砂粗糙表面、金刚石沉积光滑表面和金刚石/碳纳米管沉积表面. 疏水金刚石/碳纳米管沉积表面上气泡成核最为剧烈, 并快速向环形流域过渡, 其换热系数和临界热流相较其他表面都有所提升.

引用格式: 李蔚, 李俊业, 汪秋刚, 等. 微细窄通道内纳米线表面的过冷沸腾流动与传热特性. 科学通报, 2020, 65: 2178–2186

Li W, Li J Y, Wang Q G, et al. Flow and heat transfer characteristics of subcooled flow boiling on nanowires surfaces in a narrow microchannel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2178–2186, doi: 10.1360/TB-2019-0339

目前人们仍在继续探究微/纳米尺度改性结构对沸腾的影响。本文对纳米线结构的换热表面在过冷流动沸腾中的换热特性进行了实验研究,并根据拍摄的两相流型做了分析。

1 实验方法

1.1 实验设备

图1为微细通道流动沸腾实验测试系统示意图。采用去离子水为流体工质。实验前先在储液罐中对去离子水持续加热至沸腾,以除去空气等不凝性气体。实验时,经除气的去离子水由磁力驱动齿轮泵引出,先后经过科里奥利质量流量计、过滤芯、板式换热器、电加热预热器,随后进入微细通道实验装置。安装在微细通道实验装置上方垂直于加热面的高速相机可以观察和记录通道内发生沸腾现象时的气泡动力学与两相流型演变,拍摄帧数为3000帧/s。实验段入口水温控制精度在 ± 0.1 K以内,环境散热损失在5%以内。

实验段如图2所示,整个微细通道实验装置主要由盖板与底座两部分构成。选用聚砜(polysulfone, PSU)作为微细通道实验装置盖板与底座材料。未抛光的聚砜呈棕色半透明状,最高长期运行温度可达 150°C ,其良好的机械加工特性可供数控机床精密加工;抛光后的光滑聚砜表面呈透明,便于观察通道内流动与沸腾相变情况。微细矩形通道的横截面宽 5.0 mm、高 0.5 mm,通道总长度 80 mm。在流道后半段设置了 30 mm长的加热段,沸腾换热现象在此发生。在测试片底部采用施加

直流电源的蛇形加热丝作为发热源。壁温测量模块由 0.254 mm线径的T型热电偶焊接于 1 mm厚度的微型铜块上,共计4个铜块嵌入加工有合适凹槽的PEEK(poly-etheretherketone)载体上。测温点的轴向位置距离加热段入口距离分别为 7.5 、 12.5 、 17.5 和 22.5 mm。

1.2 表面表征与实验工况

以 (15×30) mm²的平整钛片为基底,使用电沉积(electro-deposition method)处理技术在钛片表面上生长TiC纳米线。通过合理调控沉积时间和优化工序参数,制备得到了具有两种不同高度的纳米线表面。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)测量的纳米线表面的表观形貌结构如图3所示。可以看到,一种纳米线的直径约 230 nm,高度约 4 μm ;另一种纳米线的直径约 535 nm,高度约 12 μm 。纳米线错列而紧密地排在表面上,并且彼此倾斜弯曲,相互堆积叠加在一起,形成大小尺度不一的微/纳米尺度缝隙。两种TiC纳米线表面的静态接触角分别是 150° 和 154° ,呈现超疏水润湿性。纳米线错列排布形成的三维立体结构可以有效吸附气核,减少传热面上的固/液相接触区域。因此,液滴在不同高度的TiC纳米线表面上始终处于Casie-Baxter状态^[6],显著增大了表面接触角。实验前后分别进行了SEM和静态接触角的测试,微观结构以及接触角大小未发生变化。

在常压条件下进行微小窄矩形通道的竖直流过冷沸腾。过冷度为 10 K,质量流速为 200 和 300 kg/(m² s),加热功率为 $20\sim 200$ kW/m²。

图1 实验装置系统图
Figure 1 Schematic of the experimental setup

图 2 (网络版彩色)实验段示意图. (a) 矩形通道截面; (b) 流道结构

Figure 2 (Color online) Schematic of the test section. (a) Cross section of rectangular channel; (b) structure of flow channel

图 3 纳米线的SEM微观形貌. (a) 4 μm高度纳米线的俯视图; (b) 12 μm高度纳米线的俯视图; (c) 4 μm高度纳米线的断面侧视图; (d) 12 μm高度纳米线的断面侧视图

Figure 3 SEM images of the microstructure of nanowires with the length of (a) 4 μm, top view; (b) 12 μm, top view; (c) 4 μm, side view; (d) 12 μm, side view

1.3 数据处理与不确定度

定义微细矩形单通道的通道宽度为 W , 通道高度为 H , 横截面积 $A_{ch} = W \times H$, 湿周 $P_w = 2 \times (W + H)$. 通道的等效水力直径 D_h 是0.91 mm, 其定义为

$$D_h = \frac{4A_{ch}}{P_w} = \frac{2WH}{W+H}. \quad (1)$$

热边界条件近似为底面轴向均匀热流、底面横向均匀壁温、其余三面绝热.

因为出口腔流体温度小于当地饱和温度, 因此可认为有效换热量为流体进出口显热差值. 传热面与工质间的有效加热量 Q_{eff} 通过流体进出口显热焓变计算:

$$Q_{eff} = mc_p(T_{out} - T_{in}), \quad (2)$$

其中, m 为质量流速, c_p 为工质定压比热容, T_{in} 和 T_{out} 分别为实验段入口和出口混合腔测点的流体温度.

单相和过冷沸腾局部换热系数可通过下式得到:

$$h_z = \frac{q_{eff}}{(T_{w,z} - T_{f,z})} = \frac{Q_{eff}}{A_h(T_{w,z} - T_{f,z})}, \quad (3)$$

式中, A_h 代表传热面积, 采用投影面积 (5×30) mm^2 作为传热面积; $T_{w,z}$ 和 $T_{f,z}$ 分别代表 z 轴(流动方向)局部位置壁面温度和相应位置流体温度. 因为单相或者过冷沸腾实验中认为流体处于过冷状态, 而加热条件为底面均匀热流密度, 因此局部流体温度通过进出口流体混合腔内测得的流体温度线性插值计算.

对实验中用到的测量仪器的直接测量参数进行了不确定度分析, 对换热系数等计算参数根据误差传递原理进行计算, 结果如表1所示.

2 结果与讨论

2.1 过冷沸腾曲线

图4为微细通道内两种高度的纳米线表面在入口过冷度为10 K和质量流量为300 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 的工况下的局部沸腾曲线. 由于流体以过冷状态进入实验加热段, 因而在较低壁面热流下不同高度纳米线的表面温度随热流密度的增加呈线性增长趋势, 并且轴向4个热电偶测点位置处的壁温亦依次增加. 在壁面施加热流增长到一定值后, 在4 μm 高度纳米线表面上下游位置第4个热电偶测点处首先出现沸腾曲线斜率变化, 象征起始核态沸腾的发生(图4(a)). 相较之下, 在12 μm 高度纳米线表面上起始核态沸腾所需的热流密度更高, 轴向4个热电偶测点处的壁面温度同时出现明显的斜率变化,

表1 实验的不确定度

Table 1 Uncertainty of the experiment

参数	不确定度
热电偶温度(K)	± 0.1
压力(Pa)	$\pm 3.75\%$
差压(Pa)	$\pm 1.5\%$
质量流量($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$)	$\pm 0.3\%$
热流密度(W/m^2)	$\pm 3.6\%$
沸腾换热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$)	$\pm 6.5\%$

且分布较为均匀并呈现依次增长趋势(图4(b)). 在纳米线表面上出现起始核态沸腾后, 其上数量众多的潜在汽化核心腔将诱发剧烈的气泡成核并吸收汽化潜热降低壁面温度, 导致沸腾曲线中出现起始核态沸腾后斜率为负的情形. 错列而紧密生长的纳米线间形成丰富的纳米尺度缝隙, 有助于捕获气核形成潜在的汽化核心腔; 并且堆叠排列的纳米线簇可以有效保护汽化核心腔, 防止其被流体浸润, 在起始核态沸腾条件达到后持续产生成核气泡, 在纳米线表面上沸腾发生后形成剧烈的气泡成核、聚合与拉长作用^[7]. 随着壁面热流增加, 其气泡动力学特征参数, 诸如气泡脱离直径、脱离频率及汽化核心密度均将增大^[8], 造成其换热特性随热流密度的增加稳步增长. 而当热流密度继续增长, 在4 μm 高度纳米线表面上首先出现曲线斜率趋于平缓, 象征着传热逐渐变差, 而在12 μm 高度纳米线表面上未出现此明显变化.

2.2 平均换热系数

图5为微通道内两种高度的纳米线表面在入口过冷度为10 K和质量流量为200和300 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 工况下的

图4 (网络版彩色)纳米线表面的沸腾曲线. (a) 4 μm 高度纳米线表面; (b) 12 μm 高度纳米线表面
Figure 4 (Color online) Boiling curves of the nanowires with length of 4 μm (a) and 12 μm (b)

图5 (网络版彩色)不同质量流量下纳米线表面的平均换热系数. (a) 200 kg/(m² s); (b) 300 kg/(m² s)
Figure 5 (Color online) Average heat transfer coefficients at mass flux of 200 kg/(m² s) (a) and 300 kg/(m² s) (b)

平均换热系数随热流密度的变化趋势. 纳米线表面的单相及沸腾换热系数在传热恶化到达前均随热流密度提升而增加. 可以看到, 在起始核态沸腾发生前, 纳米线表面上的单相对流换热系数随热流密度提升, 其增长幅度较小; 并且在单相对流换热区域, 12 μm高度纳米线表面的换热特性要优于4 μm高度纳米线表面. 随着纳米线生长高度增大, 在通道内进行单相对流时, 12 μm高度纳米线表面具有较高的换热面积, 且对流动边界层产生更大扰动. 这两点均是被动强化传热技术强化单相对流换热系数的主要手段, 其单相换热系数更高^[9].

随着壁面热流进一步提升, 达到起始核态沸腾条件后, 12 μm高度纳米线表面的两相换热系数逐渐变得低于4 μm高度纳米线表面. 由图3可以看出, 随着纳米线生长高度增大, 表面纳米线堆积形成缝隙尺寸, 即潜在活化汽化腔尺寸范围相应增大. 但另一方面, 纳米线

簇相互缠绕堆叠, 导致气泡在汽化核心腔内成核并脱离过程受到阻碍, 气泡脱离阻力增大, 影响后续气泡沸腾过程^[8]. 因而, 12 μm高度纳米线表面上起始核态沸腾发生后的换热差于4 μm高度纳米线表面. 类似的结论亦被其他研究者得出. Launay等人^[10]发现垂直对齐碳纳米管的生长高度会引起壁面热阻增加, 对沸腾换热有重要影响. Jo等人^[11]在表面沉积不同时间BiVO₄纳米柱并进行池沸腾传热特性实验时发现, 增加沉积时间可以提升壁面粗糙度和单位面积汽化核心密度. 然而, 由于纳米柱长度增加且纳米柱簇间距减小, 气泡脱离路径更加曲折, 成核气泡在改性表面上附着时间增加, 传热特性发生恶化.

2.3 两相流型

图6为质量流量为300 kg/(m² s)时两种高度纳米线

图6 发生起始核态沸腾后的下一个增大热流工况的两相流型. (a) 4 μm高度纳米线表面, $G=300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $q=129 \text{ kW}/\text{m}^2$; (b) 12 μm高度纳米线表面, $G=300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $q=149 \text{ kW}/\text{m}^2$

Figure 6 Two phase patterns on the next higher heat flux condition after ONB of the nanowires with length of 4 μm at $G=300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $q=129 \text{ kW}/\text{m}^2$ (a) and 12 μm at $G=300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $q=149 \text{ kW}/\text{m}^2$ (b)

表面上发生起始核态沸腾的下一个增大热流工况的两相流型演变图像。从图6(a)可以看到,在4 μm 高度纳米线表面上,当壁面热流密度自起始核态沸腾所需热流增加后,孤立气泡流立刻过渡到以气泡生长、聚合、形成受限拉长气泡沿通道上下游扩张以及壁面液膜破裂和流体重新润湿为主的两相流型,拉长气泡的气液分界面被曲线标记出。而如图6(b)所示,在12 μm 高度纳米线表面上两相流型仍以孤立气泡成核继而发生合并形成受限气泡为主,并未形成受限拉长气泡,其传热面上气泡成核密度、气泡脱离直径均低于4 μm 高度纳米线表面,孤立气泡的气液分界面被曲线标记出。正如前文所述,纳米线高度增加导致其壁面导热热阻及气泡脱离阻力增加,因而气泡成核及脱离循环受到影响,核态沸腾强度明显减弱。

由图6可知,不同高度纳米线表面上发生起始核态沸腾后的主要两相流型分别为受限气泡和受限拉长气泡,而这两种气泡行为诱发的主导传热机制亦有所区别。图7所示为微尺度通道内传热面上形成受限气泡和拉长气泡时的传热机制示意图。如图7(a),当传热面上呈现的主要两相流型为气泡成核、生长、合并以及形成受限气泡时,由于此时气泡仍依附于壁面上,其沸腾蒸发所需液体来自初始气泡成核汽化核心附近薄液膜以及气泡根部三相接触线外部液相有效蒸发区^[12]。

Gerardi等人^[13]及Yabuki和Nakabeppu^[14]发现,由于气泡根部吸附薄液膜内热传导以及周围流体与壁面热对流作用对传热贡献较小,受限气泡生长阶段的主导强化传热机制为因气泡沿轴向扩张引起的三相接触线附近界面蒸发强度增加。而相比孤立气泡流动,受限气泡在矩形微细窄通道内将首先受到通道高度限制,因而在通道长度方向上生长速率加快,明显增加气泡根部有效蒸发区域,相比孤立气泡流其传热特性更好。而如图7(b),当传热面上主要两相流型为受限气泡生长至一定程度或者相互发生聚合形成拉长气泡时,气核将沿通道上下游急剧扩张,并在连续液塞间的气弹区域与壁面之间形成环形液膜。此时气泡前端和后端弯月面与液塞接触区域能有效吸收流体过热度,并且过冷来流可以进入气泡上游末端及下游前端弯月面与壁面间形成的楔性有效蒸发区^[12]。同时气核周围高比面积的环形液膜能够有效得到相邻流动液塞补充,从而维持其高效的气液界面蒸发过程^[15],因此相比受限气泡,拉长气泡的传热效率更好。这也解释了图8中12 μm 高度纳米线表面的两相换热系数低于4 μm 高度纳米线表面的现象的原因。

在4 μm 高度纳米线表面更容易形成拉长气泡,进而容易产生局部干涸。由于传热面具有超疏水特性,干涸一旦形成便难以排除。当拉长气泡沿通道轴向方向

图7 (网络版彩色)不同高度纳米线表面的主导两相流型的气泡传热机制对比。(a)受限气泡传热机制;(b)拉长气泡传热机制^[12]

Figure 7 (Color online) Comparisons of bubble heat transfer mechanisms dominating two phase flow patterns on different nanowires surfaces. (a) Confined bubble; (b) elongated bubble^[12]

图8 实验中最大热流时不同纳米线表面的两相流型。(a) 4 μm 高度纳米线表面, $G=300\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ s})$, $q=182\text{ kW}/\text{m}^2$; (b) 12 μm 高度纳米线表面, $G=300\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ s})$, $q=184\text{ kW}/\text{m}^2$

Figure 8 Two phase patterns on the different nanowires surfaces at the largest heat flux in the experiment. (a) 4 μm length nanowires at $G=300\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ s})$, $q=182\text{ kW}/\text{m}^2$; (b) 12 μm length nanowires at $G=300\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ s})$, $q=184\text{ kW}/\text{m}^2$

扩张至一定程度后,其底部液膜最终破裂。随着热流密度增加,其传热性能在达到极值后出现拐点,即产生传热恶化的现象。从图5可以发现,4 μm 高度纳米线表面质量流量为200和300 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{ s})$ 时,在高热流工况下出现传热恶化的热流密度分别为120和167 kW/m^2 。图8所示为质量流量300 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{ s})$ 时最大实验热流下的两相流型,主要的气液分界面被曲线标出。图8(a)显示,在4 μm 高度纳米线表面上,受限拉长气泡及其诱发的局部干涸现象是传热面上的主导两相流型。在热流变大的过程中,受限拉长气泡在通道内沿轴向进一步向上游扩张,产生逆流直至实验装置入口混合腔,严重阻碍了过冷来流。而且,在靠近传热面的两侧角落区域有明显的局部干涸斑块,传热发生急剧恶化。结合图6(a),在4 μm 高度纳米线表面上,传热面上周期性的“形成拉长气泡——气泡扩张——局部干涸——流体重新润湿”是其两相流型。随着热流密度的增大,干涸时间占比增加,最终导致传热恶化。相比之下,如图8(b)所示,12 μm 高度纳米线表面上只在实验段下游位置出现气泡聚合以及形成受限拉长气泡,并未形成更为剧烈的逆流,因而其未产生传热恶化。

3 结论

对直径分别约为230和535 nm,高度分别约为4和12 μm 的纳米线表面进行了过冷沸腾实验研究。工质是去离子水,过冷度为10 K,质量流量为200和300 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{ s})$ 。主要结论如下:

(1) 随着壁面热流增加,在传热恶化出现之前,纳米线表面的换热特性随热流密度的增加稳步增长。在单相对流换热区域,12 μm 高度纳米线表面的换热特性优于4 μm 高度纳米线表面。两相沸腾发生后,12 μm 高度纳米线表面的换热性能变低,原因是其纳米线簇相互缠绕堆叠的尺度导致气泡在汽化核心腔内成核并脱离过程受到阻碍,增大了近壁面区域的换热热阻。

(2) 4 μm 高度纳米线表面形成了“形成拉长气泡——气泡上下游扩张——局部干涸——流体重新润湿”的周期性两相流型。随着热流变大,局部干涸占比变大,在靠近侧面角落区域产生明显的局部干涸斑块,进一步出现传热恶化现象。12 μm 高度纳米线表面的流型发展没有这么迅速,高热流下仍以气泡聚合以及形成受限拉长气泡向下游扩张为主;随着热流密度增加,更不易出现传热恶化。

参考文献

- Li W, Wu Z. A general correlation for adiabatic two-phase pressure drop in micro/mini-channels. *Int J Heat Mass Transf*, 2010, 53: 2732–2739
- Feng Z Z. Enhancing internal convection heat transfer with nano-fluids and nano-surfaces (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 [冯钊赞. 纳米流体及纳米表面的管内对流强化传热. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2015]
- Morshed A, Yang F, Yakut Ali M, et al. Enhanced flow boiling in a microchannel with integration of nanowires. *Appl Therm Eng*, 2012, 32: 68–75
- Li D, Wu G S, Wang W, et al. Enhancing flow boiling heat transfer in microchannels for thermal management with monolithically-integrated

- silicon nanowires. [Nano Lett](#), 2012, 12: 3385–3390
- 5 Kumar C S S, Suresh S, Yang L, et al. Flow boiling heat transfer enhancement using carbon nanotube coatings. [Appl Therm Eng](#), 2014, 65: 166–175
- 6 Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces. [Trans Faraday Soc](#), 1944, 40: 546–551
- 7 Betz A R, Jenkins J, Kim C J, et al. Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces. [Int J Heat Mass Transf](#), 2013, 57: 733–741
- 8 Kumar U, Suresh S, Thansekhar M R, et al. Effect of diameter of metal nanowires on pool boiling heat transfer with FC-72. [Appl Surf Sci](#), 2017, 423: 509–520
- 9 Khanikar V, Mudawar I, Fisher T. Effects of carbon nanotube coating on flow boiling in a micro-channel. [Int J Heat Mass Transf](#), 2009, 52: 3805–3817
- 10 Launay S, Fedorov A G, Joshi Y, et al. Hybrid micro-nano structured thermal interfaces for pool boiling heat transfer enhancement. [MicroElectron J](#), 2006, 37: 1158–1164
- 11 Jo H S, Kim M W, Kim K, et al. Effects of capillarity on pool boiling using nano-textured surfaces through electrosprayed BiVO₄ nano-pillars. [Chem Eng Sci](#), 2017, 171: 360–367
- 12 Yin L F. Experimental investigation on the characteristics of bubble confined behaviors during flow boiling in mini/micro-channel (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015 [银了飞. 微细通道流动沸腾气泡受限行为特性实验研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2015]
- 13 Gerardi C, Buongiorno J, Hu L, et al. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video. [Int J Heat Mass Transf](#), 2010, 53: 4185–4192
- 14 Yabuki T, Nakabeppu O. Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor. [Int J Heat Mass Transf](#), 2014, 76: 286–297
- 15 Thome J R. Boiling in microchannels: A review of experiment and theory. [Int J Heat Fluid Flow](#), 2004, 25: 128–139

Summary for “微细窄通道内纳米线表面的过冷沸腾流动与传热特性”

Flow and heat transfer characteristics of subcooled flow boiling on nanowires surfaces in a narrow microchannel

Wei Li^{1*}, Junye Li¹, Qiugang Wang², Shuai Shao^{3*} & Zhaozan Feng⁴

¹ Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

² College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

³ College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

⁴ CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China

* Corresponding authors, E-mail: weili96@zju.edu.cn; shaos@zju.edu.cn

Nowadays, heat dissipation methods of single-phase air cooling or liquid cooling, such as natural convection and forced convection, are unable to meet the high heat flux density dissipated by the heat exchange components of the thermal management system in many relevant fields, such as energy, electronic, and chemical engineering industries. With the recent increase in the power density consumption and miniaturization trend of various equipments, the compactness and efficiency of heat exchangers are becoming increasingly demanding. Compared to conventional channels, heat sinks fabricated using micro-scale channels have a compact structure, higher surface area-to-volume ratio, and heat transfer coefficient, together with less demand for the working fluid and the pumping power supply, which have been gradually paid attention to as remarkable cooling scheme candidates for applications in modern-day and next-generation electronic elements. Recently, the rapid development of the surface modification technology has prompted the development of heat transfer surfaces with micro- or nano-scale structures ranging from a few micrometers to tens of nanometers, which can enhance the boiling heat transfer coefficient and critical heat flux. Therefore, the combination of structured surface and microchannel flow boiling is a highly promoted method of achieving a higher heat transfer performance. Nanowire is one of the micro-structures that can enhance boiling heat transfer. Previous experimental results showed that a nanowire-structured surface could increase the nucleate site density and enhance the capillary wicking process, thereby achieving a higher heat transfer coefficient and a critical heat flux.

Herein, TiC nanowires were synthesized on a titanium wafer surface through the electro-deposition method. The diameters of the two types of nanowires were approximately 230 and 535 nm, and their heights were 4 and 12 μm , respectively. The nanowires were staggered and closely arranged on the surface, forming micro-/nano-scaled gaps. The static contact angles were 150° and 154° , respectively. An experiment of subcooled vertical flow boiling on nanowire surfaces in a narrow rectangular microchannel was conducted using a high-speed camera. The working fluid was deionized water. The channel cross-section was $0.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. The mass fluxes of the subcooled flow boiling were 200 and 300 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{ s})$. The heat flux was in the 20–200 kW/m^2 range. The experiment was conducted under atmospheric pressure, with a subcooled degree of 10 K.

The slopes of the boiling curves on the two surfaces were both negative near the ONB points and changed to positive with the increasing heat flux. The single-phase heat transfer performance on the 12- μm -height nanowire surface was better than that on the 4- μm -height nanowire surface. The 4- μm -height nanowire surface in the two-phase condition had higher heat transfer coefficients. However, the heat transfer deterioration only occurred on the 4- μm -height nanowire surface at a high heat flux. Thus, the heat transfer performance on the 12- μm -height nanowire surface was better at a high heat flux. The two-phase periodic flow pattern on the 4- μm -height nanowire surface was “elongated bubble—expanding to upstream and downstream—local dryout—rewetting”. The main flow pattern on the 12- μm -height nanowire surface was bubble coalescence and elongating to downstream.

narrow microchannel, subcooled flow boiling, nanowires, two phase flow pattern

doi: [10.1360/TB-2019-0339](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0339)