



梯度结构多孔表面强化沸腾及其在相变器件中的应用

莫冬传^{1,2}, 罗佳利^{1,2}, 汪亚桥^{1,2}, 衡益^{2,3}, 符远翔^{1,2}, 吕树申^{1,2*}

1. 中山大学材料学院, 广州 510275;

2. 广东省先进热控材料及系统集成工程技术研究中心, 广州 510275;

3. 中山大学数据科学与计算机学院, 广州 510006

* 联系人, E-mail: lvshsh@mail.sysu.edu.cn

2019-08-07 收稿, 2019-10-10 修回, 2019-10-11 接受, 2020-03-02 网络版发表

国家自然科学基金(51876226)、广东省自然科学基金(2018A030313482)和广州市珠江科技新星项目(201710010043)资助

摘要 表面微/纳加工是强化沸腾传热的重要方法和研究热点. 很多基于表面微/纳加工技术的梯度结构多孔表面也展现出了良好的强化沸腾能力, 但不同的梯度结构多孔表面对沸腾传热的影响目前尚缺少系统性的研究. 本文从几何尺寸梯度和润湿性梯度两个方面回顾了梯度结构多孔表面的沸腾强化进展以及对应的相变器件研究. 几何尺寸梯度结构表面可分为单层几何梯度结构多孔表面、多层几何梯度结构多孔表面、覆盖微/纳米层的梯度结构多孔表面以及径向梯度孔径多孔表面. 除几何尺寸上的梯度结构对强化沸腾有明显效果, 润湿性梯度的改变也被证明可以大大提高沸腾换热效果. 由于梯度结构多孔表面优异的沸腾传热性能, 其在相变器件(如环路热管、平板热管等)方面得到了广泛应用, 并有效提升了器件的传热性能. 本文总结了部分梯度结构多孔表面在强化沸腾传热及提高相变器件性能方面的共同点, 为后续的进一步研究奠定了基础. 但是梯度结构多孔表面还有进一步优化的空间, 对梯度结构多孔表面的进一步研究将有助于得到更高效的沸腾换热表面和相变传热器件.

关键词 梯度结构多孔表面, 多尺度, 润湿性梯度, 强化沸腾, 相变器件, 热管

沸腾是典型的液-气相变过程, 在日常生活、工业生产以及航天航空等领域得到了广泛应用, 如核电站、高热流密度电子元件散热以及航天热控系统等. 研究沸腾强化传热有着重要的科学意义和实用价值.

对工质进行改性是常用的强化沸腾手段. 宣益民和李强^[1]利用纳米流体进行了系统的强化沸腾传热研究. 实验结果表明, 纳米粒子显著增大了液体导热系数. 在水中添加5%体积分数的铜纳米粒子, 可以使导热系数增加约1.5倍. 王晔春等人^[2]研究了表面活性剂对乙醇-水混合工质的强化沸腾换热规律. 实验结果表明, 表面活性剂在一定程度能起到强化沸腾换热的作用, 可以有效减少使用双组分混合工质引起的换热性能下降.

对沸腾表面进行微/纳加工也是一种常见的强化沸腾途径. Wei和Honda^[3]在硅基板上制备了6种不同的针状微翅片, 以FC-72为介质进行了沸腾传热实验, 并在宽50 μm 、高270 μm 的针状表面上获得了84.5 W/cm^2 的最大传热热流密度, 是平板的4.2倍. Liao和Zhao^[4]研究了4种不同粒径颗粒堆积的多孔介质内的沸腾换热, 发现在特定情形下, 最大的沸腾传热系数(heat transfer coefficient, HTC)和临界热流密度(critical heat flux, CHF)都随粒径的减小而增大, 说明较小粒径提供的较大毛细力在沸腾中起了重要作用. Hu和Tang^[5]在平板热管的蒸发器中加工了微槽群, 使蒸发器的最大热流密度达到了168 W/cm^2 . 随着纳米技术的发展, 沸腾强化表面加工由微米尺度向纳米尺度发展. Li等人^[6]制备

引用格式: 莫冬传, 罗佳利, 汪亚桥, 等. 梯度结构多孔表面强化沸腾及其在相变器件中的应用. 科学通报, 2020, 65: 1638–1652

Mo D C, Luo J L, Wang Y Q, et al. Porous surfaces with structural gradient: Enhancing boiling heat transfer and its application in phase-change devices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1638–1652, doi: 10.1360/TB-2019-0380

了直径约50 μm 、高约500 μm 的纳米铜线进行强化沸腾换热. 结果显示, 采用纳米铜的表面可以降低壁面过热度, 但对CHF的提升有限. 换言之, 单纯的微米结构或纳米结构对强化沸腾的提升效果是有限的, 从纳米到微米的多尺度结构有望在强化沸腾中起到更重要的作用.

除此之外, 沸腾表面的润湿性对沸腾传热性能也有显著影响. Takata等人^[7]使用紫外线照射 TiO_2 覆盖的沸腾表面, 使之达到超亲水状态, 可使CHF提升2倍. 因此, 许多研究者制作了超亲水表面来进行强化传热. 但近年来, 研究者们发现亲水表面与疏水表面组成的图案化表面可能会比单一的亲水表面或者单一的疏水表面有更好的沸腾传热性能. 例如, Betz等人^[8,9]制备了6种不同的润湿性表面, 发现超疏水“岛屿”与周围的超亲水表面构成的润湿性梯度表面有较好的强化沸腾性能, 原因是亲水结构部分能够有效地延迟气泡成膜而导致的沸腾危机, 而疏水“岛屿”部分则能够促进气泡成核. 本文将这种亲水与疏水结构组合在一起的表面定义为润湿性梯度表面.

进一步地, 将具有梯度变化的多孔表面统一称为梯度结构多孔表面, 其梯度变化的物理量可以是结构(多尺度的几何尺寸), 也可以是表面的浸润性等. 其中,

几何尺寸梯度结构表面又分为单层几何梯度结构多孔表面、多层几何梯度结构多孔表面、覆盖纳米层的结构表面以及径向梯度孔径多孔表面.

1 单层几何梯度结构多孔表面

微米和纳米结构都可以强化沸腾传热, 微、纳米结合的结构则有望获得比单纯的微米或纳米结构更好的强化沸腾效果. 特别地, 本文中单层几何梯度多孔结构表面有一层相对规则的微米级拓扑结构, 而微米级的拓扑结构由纳米或亚微米拓扑结构组成. Dong等人^[10]通过实验指出, 微米结构可以在低热流密度时增强气泡的成核, 降低过热度, 而纳米结构可以加速气泡的脱离, 因此这种单层几何梯度多孔结构表面受到了研究者的青睐.

图1给出了几种典型的微/纳米多尺度结构多孔表面^[11~16]. 其中, 图1(a)为Min等人^[11]开发的山脉状多孔表面. 这些山脉的尺寸为毫米量级, 而每个山峰又是由粒径约100 μm 的颗粒组成的, 这种山脉形多孔表面的CHF可达光滑表面的3.3倍. Ji等人^[12]制备的3D多孔铜表面(图1(b))由一系列规整的毫米级微柱组成, 而每一个微柱又由粒径100 μm 左右的铜粉烧结而成. 其实验结果显示, 这种结构可以显著强化沸腾传热, 最高可将

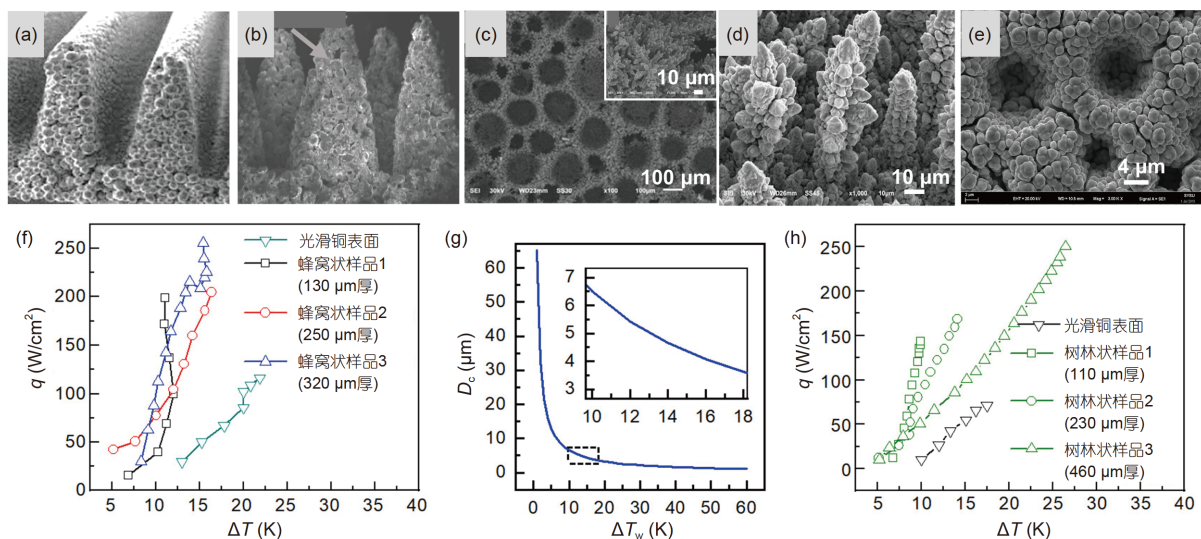


图1 (网络版彩色)几种典型的单层几何梯度结构多孔表面的电子显微镜图及沸腾曲线. (a) 山脉状多孔表面^[11]; (b) 3D多孔铜表面^[12]; (c) 蜂窝状多孔铜表面^[13]; (d) 树林状多孔铜表面^[14]; (e) 蜂窝状多孔镍表面^[15]; (f) 蜂窝状微/纳多孔铜表面的沸腾曲线^[13]; (g) 活化穴直径(D_c)与壁面过热度(ΔT_w)的关系^[13]; (h) 树林状多孔铜表面的沸腾曲线^[16]

Figure 1 (Color online) The SEM images and boiling curves of several typical single-layer geometry gradient porous surfaces. (a) Mountain-like porous surface^[11]; (b) 3-D porous copper surface^[12]; (c) honeycomb-like porous copper surface^[13]; (d) forest-like porous copper surface^[14]; (e) honeycomb-like porous nickel surface^[15]; (f) boiling curve of honeycomb-like micro-nano porous copper surface^[13]; (g) relationship between the nucleation site diameter (D_c) and the wall superheat (ΔT_w)^[13]; (h) boiling curves of the forest-like copper surfaces^[16]

临界热流密度提高3.7倍. Khan等人^[17]也做了类似的结构, 并在此基础上将铜球表面覆盖上CuO纳米颗粒, 形成毫/微/纳三级尺度结构. 然而, 这种三级尺度的样品的沸腾传热性能反而没有毫/微两种尺度的样品的性能好, 这可能是覆盖在表面的CuO纳米颗粒使回流的毛细力恶化的缘故.

El-Genk等人^[18]、Li等人^[19]、Furberg和Palm^[20]、Xu等人^[21]和Wang等人^[13,22,23]都使用电化学沉积的方法分别制备了微/纳米双尺度结构的铜表面, 并取得了较好的沸腾强化效果. 其中, 图1(c)给出了我们所制备的蜂窝状微/纳米多孔铜表面的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图. 该多孔表面由许多孔径约100 μm 的蜂窝状孔组成, 而每一个蜂窝的壁面都由纳米(亚微米)晶枝组成^[13]. 我们做了一系列不同高度的样品, 并进行池沸腾实验, 相应的沸腾曲线如图1(f)所示.

从图1(f)可以看出, 蜂窝状样品有着比光滑铜表面更好的沸腾传热性能. 非常有趣的是, 当壁面过热度大于一定值时(样品1约为13°C, 样品3约为16°C), 其壁面过热度几乎不再随着热流密度的上升而上升. 我们猜测, 这是由双尺度多孔表面上大孔的孔壁中纳米(亚微米)尺度结构产生了数目繁多的活化中心造成的. 提高表面沸腾换热的一个关键是使表面形成有效的汽化核心, 而通过微加工所形成的孔要变为有效的汽化核心, 其尺寸应满足一定条件. 活化穴直径(D_c)与壁面过热度(ΔT_w)之间的关系可用式(1)来描述^[24,25]:

$$D_c = \frac{4\sigma T_{\text{sat}}}{\rho_v h_{\text{fg}} \Delta T_w} K_{\text{max}}, \quad (1)$$

式中, ΔT_w 为固体表面的壁面过热度, T_{sat} 为饱和温度, σ 为液体表面张力, ρ_v 为气相密度, h_{fg} 为气液相变焓值. 由上式作出 D_c 与 ΔT_w 之间的关系曲线, 如图1(g)所示. 可以看出, 当壁面过热度在13~16°C之间时, 对应的活化穴直径在4~5 μm 之间. 本文所制得的双尺度多孔表面, 每一个表面上都有一系列直径约为100 μm 的大孔, 而孔壁上则是纳米(亚微米)尺度的孔隙, 此类孔隙可能形成4~5 μm 直径活化穴. 当壁面过热度不高时, 只有大孔可以形成活化穴. 但当壁面过热度超过一定值后, 孔壁上的孔隙形成了大量的活化穴, 使得壁面过热度几乎不再随着热流密度的上升而上升, 甚至还有所下降.

此外, 从图1(f)可以看出, 多孔结构的厚度对沸腾传热效果有明显影响. 在低热流密度时, 样品2的沸腾

传热效果明显好于样品1和样品3, 说明此时存在最优厚度, 使得沸腾换热性能最佳, 这与孙振等人^[26]的实验结果类似. 而样品1在200 W/cm²时的壁面过热度为11.0 K, 低于样品2的16.3 K和样品3的13.4 K, 具有最好的沸腾性能. 之所以存在最佳厚度, 主要是多孔结构的复杂作用引起的. 多孔结构可以增大毛细力促使液体回流, 但是它的存在也会阻碍气泡的生长与脱离.

我们通过改变电沉积的条件, 使用线性电流法, 找到了控制晶枝垂直生长的关键因素, 得到了另一种多尺度结构, 即树林状多孔铜表面, 如图1(d)所示. 该表面有许多类似树木的微米级结构, 而这些结构同时又拥有树叶般的纳米级晶枝^[14]. 我们也做了一系列不同高度的样品, 并进行池沸腾实验, 相应的沸腾曲线如图1(h)所示^[17]. 实验结果显示, 树林状多孔表面高度越高, 其吸液性能越强, 越有利于液体回流, 使得CHF更高. 其中, 460 μm 高的树林状多孔表面的CHF高达250 W/cm².

当然, 除了常见的金属铜, 其他材料也可以形成这种多尺度结构多孔表面. 比如, 我们最近制备的多孔镍由一系列孔径约10 μm 的孔组成, 而这些孔壁又由1 μm 左右的微球组成(图1(e))^[15]. 实验结果表明, 这种结构也可以有很好的强化沸腾效果.

2 多层几何梯度结构的多孔表面

本文所指的多层几何梯度结构多孔表面, 是指该多孔表面由两层或两层以上的拓扑结构组成. 与前述单层几何梯度结构多孔表面不同的是, 多层几何梯度结构多孔表面各层之间是相互独立的, 而单层几何梯度结构表面较大一级拓扑结构由较小一级拓扑结构组成.

泡沫金属有很好的强化沸腾效果, 但Xu和Zhao^[27]发现均匀金属泡沫在沸腾过程中受到金属框架和补充汽化区液体的双重阻力, 沸腾换热恶化. 因此, 他们使用一种在底面垂直方向(法向)上具有梯度密度变化的金属泡沫(图2(a))进行实验. 与单层均匀泡沫相比, 梯度结构的金属泡沫可以显著提高沸腾传热性能. 当然, 沸腾强化的效果与泡沫金属的厚度以及孔的梯度有很大关系. 也正因如此, 不同研究者得到了不一样的结果. Zhou等人^[28]使用两层不同的泡沫金属形成梯度结构, 发现其反而阻碍气泡脱离而导致更差的传热性能.

Patil和Kandlikar^[29]在微槽道翅片顶部电沉积一层微米铜颗粒(图2(b)). 以水为工质的池沸腾实验表明, 在

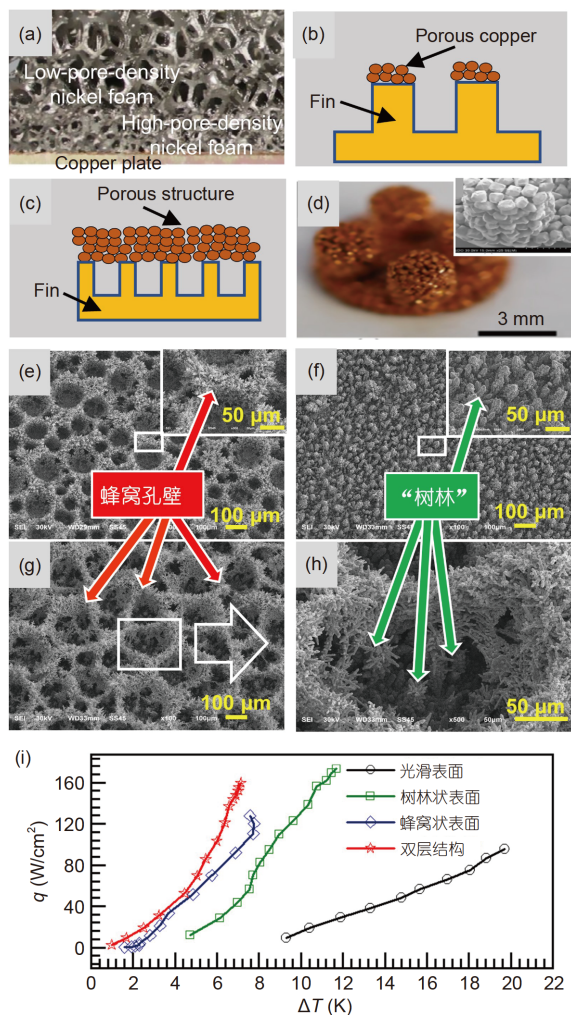


图 2 (网络版彩色) 几种典型的多层几何梯度结构多孔表面。(a) 梯度密度多孔镍表面^[27]；(b) 翅片顶部沉积多孔铜的微槽道的示意图^[29]；(c) 上方覆盖多孔铜层的微槽道的示意图^[30]；(d) 由若干层几何梯度结构组成的梯度结构多孔表面^[31]；(e)~(h) 复合双层多孔表面 (composite two-layer porous surface, TLCS)^[32]：(e) 上层的蜂窝状结构；(f) 下层的树林状结构；(g) 完整的复合双层多孔表面；(h) (g) 的放大图；(i) 池沸腾曲线

Figure 2 (Color online) Several typical multilayer geometric gradient porous surfaces. (a) Gradient density porous nickel surface^[27], (b) schematic of microchannels with porous copper deposited on top of the fins^[29], (c) schematic of microchannel covered with a porous copper layer above^[30], (d) gradient structured porous surface consisting of several layers of geometrically graded structures^[31], (e)~(h) composite two-layer porous surface (TLCS)^[32]: (e) The upper layer of honeycomb-like structure; (f) the underlying forest-like structure; (g) the complete composite two-layer porous surface; (h) an enlarged view of (g); (i) the boiling curves

顶部电沉积铜颗粒后, 其槽道可以作为液体补充的路径, 而翅片顶部作为气化核心, 从而达到气体路径和液体路径分离的效果。在相同热流密度下, 壁面过热度大大降低, 沸腾传热系数增加, 最高可达 $99.5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ K})$,

CHF也提高到 $325 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。类似地, Bai等人^[30]也在微槽道(底部宽 1.0 mm 、深 1.5 mm)的表面加了一层烧结多孔颗粒表面(粒径 $250 \mu\text{m}$)(图2(c))。不一样的是, 多孔表面不单在槽道的肋片顶部, 而是覆盖了整个微槽道上方。与Patil和Kandlikar^[29]实现气液路径分离的原理相反, 该表面的烧结多孔结构作为吸液通道, 而槽道结构为气体通道, 从而实现更好的气液分离。在以水为工质的池沸腾测试中, 当加热功率高达 $610 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时, 仍没有达到膜沸腾。

当然, 多层几何梯度结构多孔表面的每一层也有可能是前述的单层几何梯度结构多孔表面。

Li等人^[31]制备了如图2(d)所示的两层几何梯度结构多孔表面, 其底层为铜粉烧结的均匀多孔层(厚度 0.5 mm), 上层是4个均匀排布的柱状(直径 3 mm 、高度 3.6 mm)结构, 而这些柱状结构又是由多种不同粒径颗粒烧结而成。这种结构的底层可以增加水平方向的液体供应, 而柱状结构可以增强垂直方向的液体供应, 大大延迟了水力不稳定波长的到来, 从而显著增强CHF, 最高可达 $450 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

我们在前期成功制备了树林状结构的微/纳多孔表面(图1(d))和蜂窝状结构的微/纳多孔表面(图1(c))。总的来说, 树林状多孔结构的吸液性更强, 而蜂窝状多孔表面更易于气泡脱离。我们考虑, 如果在树林状结构(图2(f))的基础上再沉积一层蜂窝状多孔结构(图2(e)), 得到两层结构组成的复合双层多孔表面(composite two-layer porous surface, TLCS)(图2(g)和(h))^[32], 是否可以得到更好的强化沸腾效果呢? 图2(i)给出了这种复合双层多孔表面与单层梯度结构多孔表面的池沸腾特性对比图。结果表明, 这种双层结构表面比单纯的树林状结构、蜂窝状结构表面的传热系数分别提高了50%和20%, 说明制备的TLCS成功地结合了蜂窝状多孔表面成核点多和树林状多孔表面吸液能力强的优点, 使得TLCS比单纯的蜂窝状多孔表面和树林状多孔表面的沸腾效果好。

3 覆盖微/纳米层的梯度结构多孔表面

在此, 将覆盖微/纳米层的梯度结构多孔表面与第2节所讲的多层几何梯度结构多孔表面区分开来, 原因是第2节的多层几何梯度结构多孔表面各层之间有尺寸梯度, 但其尺度的差异不会太大, 而本节的微/纳米层与被覆盖的主体微米结构的尺度差异较大。前人也对这种梯度结构的沸腾传热性能进行了探究。Dhillon等

人^[33]使用干腐蚀法在硅微柱上得到了一层10 nm高的纳米草丛结构,实验表明,当硅柱间距在5~50 μm 时,纳米结构的引入可以较好地增强CHF. Rahman等人^[34,35]利用病毒模板(即烟草花叶病毒作为模板)在Si微针翅表面沉积了金属纳米多孔结构(图3(a)),并以此结构为基础验证了“毛细芯性能决定CHF”的机制;在以水为工质时,获得了257 W/cm²的热流密度. Cao等人^[36]在硅微针翅表面利用静电沉积的方法修饰了粒径为35 nm的铁锰氧化物,并在1100°C的条件下烧结后用于强化池沸腾传热;在以FC-72为工质实验时,微柱表面能够大大降低沸腾时的壁面过热度,而经过纳米结构修饰后,壁面过热度进一步降低,并能够增强CHF. Liu等人^[37]利用飞秒激光法制备微米结构表面,在此基础上利用电泳法沉积纳米结构;以正戊烷为工质进行池沸腾实验时,微/纳复合表面的HTC与光滑平表面相比,最大增加了3.3倍. McHale等人^[38]在烧结多孔铜颗粒的表面覆盖了一层碳纳米管;采用HFE-7300为工质进行测试时,表面覆盖了碳纳米管的结构有着较低的表面过热度 and 更高的热流密度. 王高远等人^[39]使用反应离子刻蚀制备了微米结构,通过热溶液生长法在微米结构表面生长了氧化锌纳米线阵列,所得的微/纳复合结构表面可以增强液滴的铺展和蒸发,进而提高喷雾冷却换热系数.

基于上述基础,我们思考:如果在前述的蜂窝状多孔材料基础上,在表面修饰一定的微/纳米结构,能否进一步提升沸腾传热效果?首先制备了普通的微/纳(蜂窝状)多孔表面,其含有一系列微米级大孔,壁面上又含有丰富的纳米枝状结构(图3(b)).在此基础上,对该结构进行修饰,得到一种壁面修饰后的梯度结构蜂窝状多孔表面(图3(c)).从两者的电子显微镜图可以看出,这种壁面修饰后的蜂窝状多孔表面与壁面无修饰的原始蜂窝状多孔表面相比,其微米级的大孔基本不变,但壁面结构变成了从下到上为纳米枝状结构到微米球的梯度结构.图3(d)给出了这两种不同蜂窝状多孔表面的池沸腾曲线.可以看出,此种梯度结构的蜂窝状多孔表面可将未修饰的蜂窝多孔表面的沸腾传热系数提升1.7倍^[23],原因在于,壁面经过微米级修饰后可以有效降低沸腾表面表面能,促进气泡脱离,从而达到强化沸腾的效果.

4 径向梯度孔径结构的多孔表面

前述的多层梯度结构多孔表面,可以认为各层的

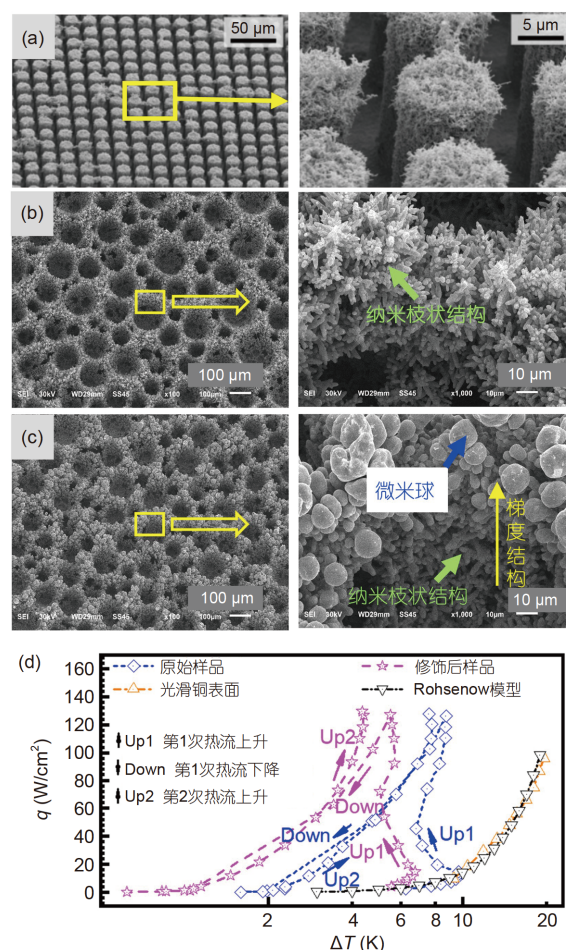


图3 (网络版彩色)几种典型的覆盖微/纳米层的梯度结构多孔表面。(a)表面沉积了金属纳米多孔结构的硅微柱^[34]; (b)~(d)梯度结构蜂窝状多孔表面^[23]: (b)壁面无修饰的原始蜂窝状多孔表面(原始样品); (c)壁面修饰后的梯度结构蜂窝状多孔表面(修饰后样品); (d)池沸腾曲线

Figure 3 (Color online) Several typical gradient structure porous surfaces covered by micro/nano-layer. (a) The silicon micropillars with metal nano-porous structures deposited on the surface^[34]; (b)~(d) the honeycomb-like structures with a gradient structure sample^[23]: (b) The original honeycomb-like porous surface without modification (original); (c) the gradient structured honeycomb-like porous surface modified by wall surface (modified); (d) the pool boiling curves

主要梯度变化方向是与沸腾表面垂直的,即与气泡脱离方向相同,而本节所介绍的径向梯度结构多孔表面,其尺寸的梯度变化方向与沸腾表面平行.

需要注意的是,即使是同一种结构表面,其沸腾性能也会受加热表面尺寸的影响. Wang等人^[40]在实验中发现加热表面的尺寸会影响沸腾传热性能,而Zhang等人^[41]从理论上分析了不同加热表面尺寸对沸腾传热的影响. 沸腾包括“成核→气泡生长→气泡脱离→再润湿→再成核”的基本过程. 其中,再润湿过程是防止烧

干的关键。很多研究者制备了与底面平行方向(径向)上具有梯度润湿性变化的材料,用来增强再润湿过程。

事实上,根据 $\Delta p = \sigma \cos \theta / R_c$,要改变毛细力(Δp),除了改变表征润湿性的接触角 θ ,还可以改变有效毛细孔径 R_c 。考虑到液体从边缘到中心的过程属于逐渐蒸发的过程,如果构建孔径在径向上梯度变化的微/纳多孔表面,使其在加热中心的孔径较小,而在边缘的孔径较大,则有望保持加热中心的表面结构因孔径较小有较大的毛细力的同时,又减小从边缘到中心的补充液体的流动阻力,进一步提高沸腾传热性能。

最近,我们采用前述方法^[23]制备了传统的均匀蜂窝状多孔铜表面,如图4(a)和(b)所示。另外,通过在沉积过程中向表面滴加纯水的方法制备了孔径呈径向梯度的蜂窝状多孔铜表面,如图4(c)所示。池沸腾实验(图4(d))结果显示,径向梯度孔径表面能促进工质从四周向中间补充,具有更低的过热度 and 较高的传热系数,且在高热流密度下尤为明显;当热流密度为 84 W/cm^2 时,传热系数是均匀孔径表面($120 \mu\text{m}$)的1.4倍。

5 润湿性梯度结构的多孔表面

沸腾表面的润湿性对沸腾传热性能也有显著影响。Kandlikar^[43]分析了光滑平表面上CHF受表面润湿性影响的规律,得到“CHF随着接触角的增大而减小”的结论。因此,许多研究者开始制作超亲水表面来进行强化传热。我们前期验证了亲水的 TiO_2 可以强化沸腾传热^[44],并对不同管径的 TiO_2 纳米管阵列表面的传热特性进行了研究^[45]。后来,我们又开发了一种氟致超亲水技术^[46],可以将金属或硅表面变成超亲水。使用这种技术也可以制备超亲水 TiO_2 纳米管阵列,并有很好的强化沸腾效果^[47]。

那么,是不是越亲水的表面,沸腾传热效果越好呢?答案是否定的。近年来,研究者们发现,亲水表面与疏水表面组成的图案化表面可能会比单一的亲水表面或者单一的疏水表面有更好的沸腾传热性能。本文将这种亲水与疏水结构组合在一起的表面定义为润湿性梯度表面。

许多研究者对润湿性梯度表面的沸腾传热特性进行了丰富的研究。Dai等人^[48]在金属铜网上喷涂了经过功能化修饰的多壁碳纳米管,使铜网变为微观上亲疏水相间的结构,大大增加了沸腾传热性能。Zupancic等人^[49]用疏水的聚氟硅烷修饰采用激光照射法制备的亲水不锈钢表面,形成亲疏水梯度表面,将CHF提高了

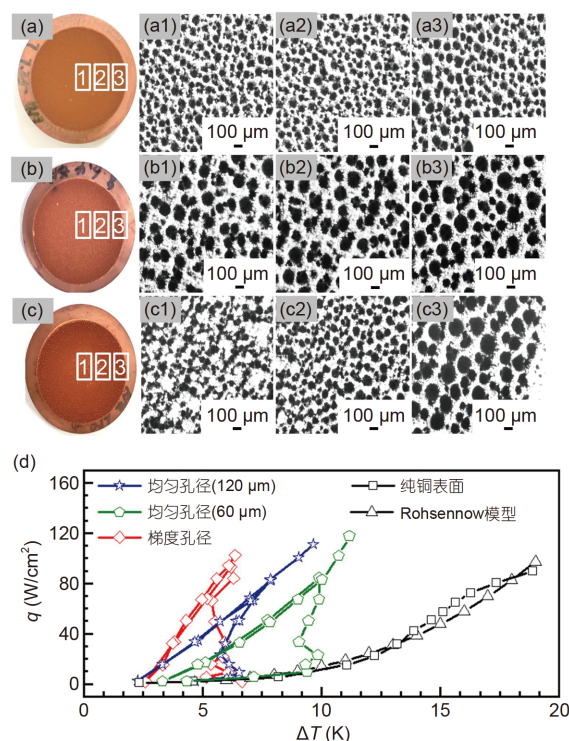


图4 (网络版彩色)具有径向梯度孔径的微/纳多孔表面^[42]。(a) 均匀孔径($60 \mu\text{m}$)样品的实物图, (a1)~(a3) 该样品的1, 2, 3位置的金相显微图; (b) 均匀孔径($120 \mu\text{m}$)样品的实物图, (b1)~(b3) 该样品的1, 2, 3位置的金相显微图; (c) 梯度孔径样品的实物图, (c1)~(c3) 该梯度孔径样品的1, 2, 3位置的金相显微图; (d) 池沸腾曲线

Figure 4 (Color online) Micro-nano porous surface samples with radial diameter gradient^[42]. (a) Photo of the sample with uniform diameter of about $60 \mu\text{m}$, and (a1)~(a3) are microscope images of positions 1, 2, and 3 on this sample, respectively; (b) photo of sample with uniform diameter of $120 \mu\text{m}$, and (a1)~(a3) are microscope images of positions 1, 2, and 3 on this sample, respectively; (c) photo of sample with radial diameter gradient, and (c1)~(c3) are microscope images of positions 1, 2, and 3 on this sample, respectively; (d) the pool boiling curves

200%。Wang等人^[50]制备的具有超疏水点阵的铜表面可以显著降低气泡的成核温度。Peng等人^[51]使用亲疏水相间的表面显著提高了冷凝传热。Chen等人^[52]利用具有梯度粗糙度的表面控制了液滴的蒸发。Luo等人^[53]通过纳米粒子改变铜表面的润湿性来增强冷凝换热。Gong和Cheng^[54]与Li等人^[55]则分别采用格子波尔兹曼方法(lattice boltzmann method, LBM)研究了不同润湿性的表面,验证了具有润湿性梯度的表面确实可以更好地强化沸腾。

前述制备的蜂窝状结构与树林状结构的双层多孔表面有很好的强化沸腾效果,但其有一个明显的缺点,就是存在沸腾迟滞现象。既然疏水表面能够有效地降低气化核心及成核的壁面过热度,那么对这种表面进

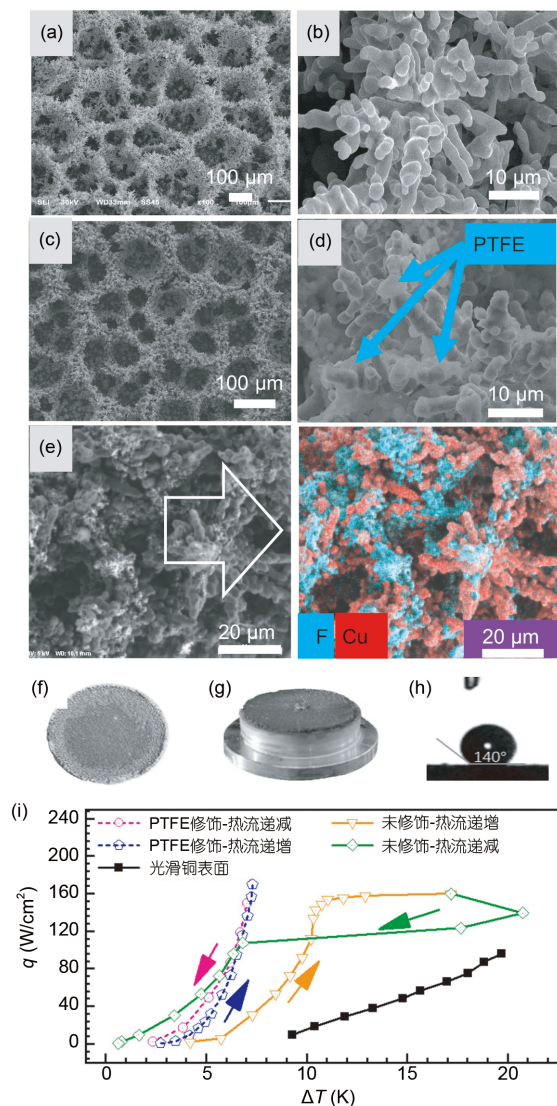


图5 (网络版彩色)PTFE修饰的双层结构多孔表面^[56]. (a), (b) 未修饰样品; (c), (d) 修饰后样品; (e) PTFE修饰后样品能谱图; (f) 未修饰样品的润湿性能; (g), (h) 修饰后样品的润湿性能; (i) 池沸腾曲线
Figure 5 (Color online) PTFE modified TLCs^[56]. (a), (b) The original sample; (c), (d) the PTFE modified sample; (e) the EDS image of the PTFE modified sample; (f) wettability of the original sample; (g), (h) wettability of the PTFE modified sample; (i) pool boiling curves

行疏水处理, 是否可以通过降低沸腾成核时所需的壁面过热度消除沸腾迟滞呢? 我们制备了图5(a)和(b)所示的双层结构, 并在其表面使用聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)进行处理, 得到了图5(c)和(d)所示的PTFE修饰的双层结构^[56]. 从图5(e)的EDS(energy dispersive spectroscopy)可以看出, 该表面为超疏水的氟和亲水的铜相间的结构, 是一种亲疏水相间的润湿性梯度表面. 通过高速摄像机拍摄5 μL的纯水液滴与

样品的接触角及其变化来衡量样品表面的润湿性能. PTFE修饰前的样品表面为超亲水状态, 5 μL的水滴在接触到表面后的12 ms内完全吸入多孔层内, 最终如图5(f)所示. 而经PTFE修饰后, 样品表面的润湿性由超亲水变为疏水, 5 μL的水滴在接触到表面后缩聚为球状, 其接触角约为140°, 如图5(g)和(h)所示.

将PTFE修饰前后样品的沸腾曲线进行对比(图5(i)), 可以清晰地看出, 未修饰样品在热流递增过程中的壁面过热度明显大于热流递减过程中的壁面过热度, 出现了明显的沸腾迟滞现象. 而PTFE修饰的表面在热流递增过程中, 其壁面过热度并没有上升到比热流递减过程较高的温度, 基本消除了沸腾迟滞现象. 对于固体平表面, 其成核时所需的壁面过热度可以由式(2)计算:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{sat}}}{\rho_v h_{\text{fg}}} \left[\frac{16\pi\sigma^3 f(\theta)}{3kT \ln\left(\frac{n_T T_L}{h}\right)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

其中, $f(\theta) = (2 + 3\cos\theta - \cos^3\theta)/4$, 为表面形成气泡胚核所需的吉布斯自由能降低的系数, 该系数由表面接触角 θ 决定; ΔT 为固体表面的壁面过热度; T_{sat} 为饱和温度; σ 为液体表面张力; ρ_v 为气相密度; h_{fg} 为气液相变焓值; k 为玻尔兹曼常数; T_L 为气相温度; n_T 为核化速率; h 为普朗克常数.

由式(2)可知, 成核时所需壁面过热度随 θ 增大而减小, 即疏水表面更利于成核. 修饰了PTFE后, 样品表面的接触角从0°变为约140°, $f(\theta)$ 为0.038, 核化所需的自由能变化大大减小, 显著降低了表面成核所需的壁面过热度. 由此可知, PTFE修饰后, 表面能降低, 易于气泡成核, 基本消除了沸腾迟滞现象.

当然, 可以通过控制修饰时间实现PTFE覆盖量的变化, 得到不同的亲疏水相间的润湿性表面.

此外, 将PTFE应用于树林状结构, 也取得了很好的进一步强化沸腾效果^[57].

6 不同的梯度结构多孔表面池沸腾传热特性对比

前面介绍了5大类梯度结构多孔表面及它们的强化沸腾特性. 为进一步对比不同结构的强化效果, 将不同的梯度结构多孔表面的 $q-h$ 曲线总结在图6中. 需要说明的是, 为了更清晰地分辨不同的样品, 只取每个样品最佳强化沸腾时的一组数据, 忽略沸腾迟滞等过程. 从图6可以看出, 蜂窝状多孔表面的HTC普遍比树林状多

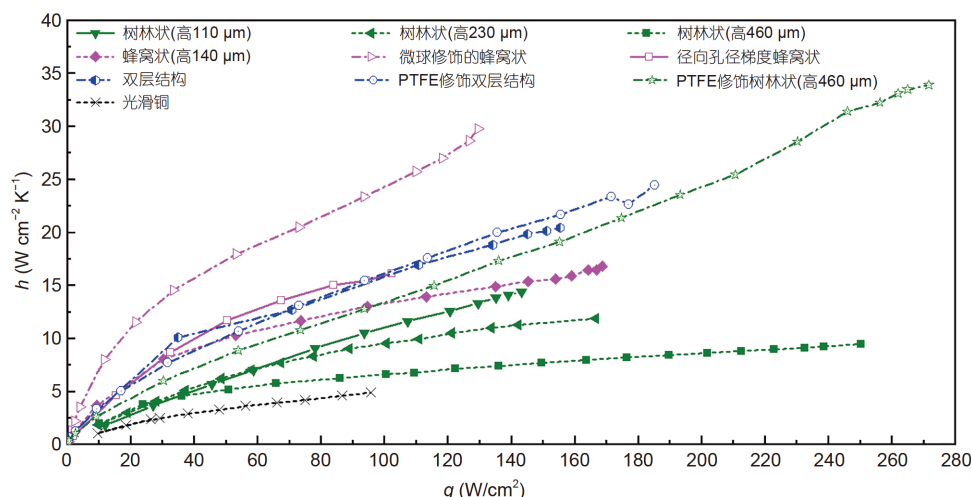


图6 (网络版彩色)不同的梯度结构多孔表面的 q - h 曲线

Figure 6 (Color online) The q - h curves of different gradient structure porous surfaces

孔表面高,这主要是由于,蜂窝状结构比较容易使气泡脱离,而树林状结构随着高度增加,HTC下降,说明晶枝结构厚度增加不利于气泡脱离。但是,树林状结构越厚,其晶枝越丰富,吸液性能越强,越有利于液体回流,使得CHF更高。由两者制备的双层结构则可以在两者基础上进一步提高HTC。

采用径向孔径梯度的蜂窝状结构可以进一步提高蜂窝状结构的HTC,说明径向孔径梯度有利于径向上的液体补充。当然,采用微球修饰的蜂窝状结构的HTC是最高的,主要原因是微球修饰的蜂窝状结构更容易使气泡脱离。

在多孔表面的沸腾过程中,沸腾迟滞现象是常见的负面效应。PTFE修饰表面的结构,由于其疏水结构有利于气泡的成核,可成功消除复合双层多孔表面的沸腾迟滞效应。

从上述讨论来看,不同的梯度结构多孔表面在强化沸腾传热方面各有特点,或是提高CHF,或是提高HTC,或是消除沸腾迟滞。如果要进一步同时提高CHF和HTC,并消除沸腾迟滞,同时采用前述若干种结构的复合结构是一个可能的突破方向。

7 梯度结构多孔表面在相变器件中的应用

多孔材料除了应用于池沸腾系统,也常应用于相变器件中,如环路热管、平板热管等。热管主要靠毛细力驱动液体回流维持沸腾表面的润湿来保证正常运转。常见的毛细力可以来自沟槽,如曲伟等人^[58]研究了微小空间薄液膜相变传热的微尺度效应;范春利等人^[59]

加工了3种微槽结构的平板热管;张任平等^[60]制备了燕尾槽热管并测试了它们的传热性能;王晨等人^[61]用微通道制备了平板热管;Hong等人^[62]通过微槽道构建了超薄环路热管。除此之外,这些毛细力也可以来自丝网^[63]或者粉体烧结而成的多孔结构^[16,64-66]。

近年来,研究者们把目光聚集到梯度结构多孔表面上,将它们应用于各种相变传热器件,并取得了较好的效果。表1给出了部分典型的采用梯度结构多孔表面的相变传热器件。

我们也采用梯度结构作为热管的吸液芯结构以有效提高其传热性能。如前所述,槽道是热管常见的毛细力来源,而 Ω 型的槽道(图7(a))性能犹为优异,但不易加工。受自然界启发,其实树林之间也可以形成类似 Ω 型的槽道(图7(b)),如果是成片的树林,还可以认为是形成了很多相互贯通的 Ω 型槽道(图7(c))。但问题是,如何制备这种结构呢?采用前述的电沉积制备树林状多孔表面的方法^[14],成功制备了类似的结构,其电子显微镜图如图7(d)所示。其中,在厚度为0.1 mm的铜板上制备出孔隙率高达80%的铜基树林状阵列结构,并作为吸液芯组装出厚度仅为0.6 mm的超薄平板热管(ultra-thin heat pipe, UTHP)(图7(e))。实验表明,树林状阵列吸液芯吸液性能比传统的烧结球堆积吸液芯性能好。图7(f)和(g)给出了采用铜基树林状阵列的超薄平板热管的传热性能与同厚度铜板的对比。可以看出,UTHP的传热性能明显优于铜板。其中,在加热功率为6 W时,UTHP的蒸发段温度比铜板低了约10°C,且均温性良好,局部各点最大温差约为2°C。

表1 采用梯度结构多孔表面的相变传热器件

Table 1 Phase change heat transfer devices with gradient-variable porous surfaces

文献	器件	吸液芯特点	吸液芯尺寸(mm)	工质	热管/蒸发器尺寸(mm)	传热性能
Semenic等人 ^[67]	环路热管	53~63 μm 铜粉烧结成的500~710 μm 簇状结构,再烧结形成复合多孔吸液芯	20×3×5 20×3×7.5 20×3×10	乙醇	—	CHF=494 W/cm ²
Singh等人 ^[68]	环路热管	复合多孔吸液芯,双层结构,下层为200目的铜粉,上层为50~140目的混合铜粉	Ø28×3	水	Ø30×10	HTC _{evap} =26270 W/(m ² K), R _{evap} =0.06~0.10°C/W, 80 W
Wang等人 ^[69]	环路热管	颗粒烧结复合多孔吸液芯+不锈钢丝网	Ø37.6×4.3 Ø37.6×4.2 Ø37.6×6	水	—	R=0.218°C/W, 270 W, 倾斜90°
李强等人 ^[70]	环路热管	0.7 μm 羰基镍粉+10 μm 以上不锈钢粉复合多孔吸液芯	Ø50×5	水	Ø50×24	R=0.4°C/W, 80 W
Li和Lv ^[71]	环路热管	烧结50~100 μm 杂化铜粉	41×10×0.5	水	100×50×2	CHF=120 W (100 W/cm ²); R=0.196°C/W, 120 W
Cheng等人 ^[72]	槽道热管	具有梯度润湿性的矩形槽(CA=20°~80°)	矩形槽 0.23×0.3	水	Ø6×190	R=0.208°C/W, 50 W
Lee等人 ^[73]	热管	在烧结铜颗粒热管中逐层组装碳纳米管-聚乙烯亚胺层	—	水	Ø8×350	HTC=1350 W/(m ² K), R=0.25°C/W, 100 W
Xu和Li ^[74]	槽道平板热管	CuO纳米花层覆盖矩形槽道	矩形槽0.5×0.5	乙醇	—	热负荷192 W, λ =982 W/m K
Hu等人 ^[75]	槽道热管	槽道具有润湿性梯度结构	—	水	Ø6×190	热负荷>50 W
He等人 ^[76]	闭式热虹吸管	蒸发器为混合润湿性阵列表面	—	水	90×96×33	R=0.057°C/W, HTC= 21000 W/(m ² K)
Wang等人 ^[77]	环路热管	采用山谷状微/纳米混合结构	—	水	68×61×6	HTC=42170 W/(m ² K), CHF=35.12 W/cm ²
Ji等人 ^[78]	热管	吸液芯为纳米花修饰乳突阵列结构,蒸发器和冷凝器具有不同的润湿性	—	水	Ø100×3.4	HTC _{evap} =195000 W/(m ² K)
Sun和Qiu ^[79]	均温板(平板热管)	微/纳米结构修饰复合多孔烧结铜粉	—	水	—	CHF>100 W/cm ²
Hao等人 ^[80]	脉动热管	具有润湿性梯度槽道	—	水	—	HTC _{evap} ≈42000 W/(m ² K)

此外,我们还将蜂窝状多孔铜(原文称为“双尺度多孔铜”)^[82]作为毛细芯制作了平板环路热管.作为对比,采用粒径为10 μm 的铜粉进行烧结制备了毛细芯,并制备了另外一个相同尺寸的平板环路热管,通过实验研究了两种不同毛细芯结构对环路热管在不同功率下对蒸发器温度的影响.实验结果显示,与10 μm 的铜粉烧结毛细芯的平板环路热管相比,采用蜂窝状多孔铜毛细芯的平板环路热管可以明显降低蒸发器温度:当加热功率为160 W时,可将蒸发器温度降低约10°C,充分显现了采用双尺度多孔铜毛细芯的优异性,这可能与双尺度毛细芯大尺度的孔径可以减小流动的阻力,而小孔径可以增大毛细力有关^[82].

8 总结与展望

本文总结了部分梯度结构多孔表面在强化沸腾传

热及提高相变器件性能方面的共同点,并着重介绍了我们在这方面的的工作.其中,蜂窝状结构与仿生树林状结构表现出微/纳梯度结构有利于气泡的脱离及液体回流的特点.在此基础上的多层几何梯度结构表面则结合较大尺度上的微米结构利于气泡脱离和液体回流,及纳米尺度上利于增加成核密度的优点,来达到强化沸腾的目的.蜂窝状结构和树林状结构结合的双层结构表现出蜂窝状多孔表面成核点多和树林状多孔表面吸液能力强的优点,使沸腾性能明显提高.相较于多层几何梯度结构,层间尺度差异较大的覆盖纳米层的微米梯度结构则从另一个方面体现了梯度结构强化沸腾传热的效果,壁面经过微米级修饰的蜂窝状多孔结构可以有效降低沸腾表面能,促进气泡脱离,从而达到强化沸腾的效果.对于垂直于加热面的径向梯度结构来说,其可以通过孔径上的结构变化,改变从边缘到中间

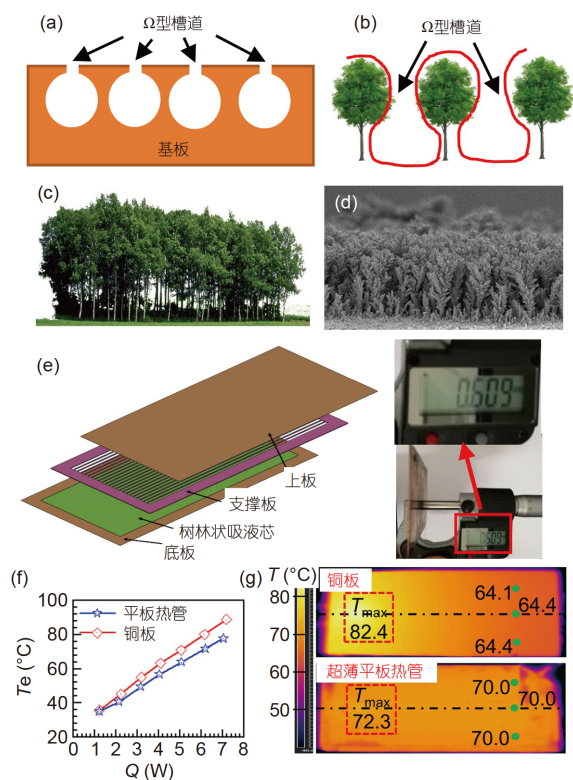


图7 (网络版彩色)采用铜基树林状阵列的超薄平板热管^[81]。(a)~(d)树林状阵列用于平板热管的构想:(a)热管常用的Ω型槽道;(b)树林之间可以形成类似的Ω型槽道;(c)成片的树林可以形成很多相互贯通的Ω型槽道;(d)树林状吸液芯的电子显微镜图;(e)超薄平板热管的组装示意图;(f)不同功率下,平板热管和铜板的蒸发段温度;(g)6 W时,铜板和平板热管的表面温度分布(红外照片)

Figure 7 (Color online) Ultra-thin flat heat pipes using forest-like porous copper as the wick^[81]. (a)~(d) The conception of forest-like array for flat heat pipes: (a) The common Ω-like groove for heat pipes; (b) the Ω-like groove can be formed between the trees; (c) the forest can form interconnected Ω-like grooves; (d) the SEM image of a typical forest-like wick; (e) the fabrication of the ultra-thin flat heat pipes; (f) the evaporation temperature of UTFHP and copper plates under different heating power; (g) surface temperature distribution (infrared image) of copper plates and the ultra-thin flat heat pipe at 6 W

区域的毛细作用力,增强液体回流,同时减小气泡脱离时的流动阻力,以此增强沸腾中的再润湿过程,进而增强沸腾过程的传热系数。除结构(几何尺寸)上的梯度结构对强化沸腾有明显效果,润湿性梯度的改变也被证明可以大大提高沸腾效果。相对于单一的亲水表面,亲疏水结合的梯度结构表面呈现出更大的优势。经疏水材料修饰过的蜂窝-晶枝双层结构明显体现出疏水表面能够有效降低气化核心及成核的壁面过热度的优点,同时保留亲水结构吸液能力强的特点,消除了沸腾迟滞现象,提高了沸腾传热特性。

梯度结构多孔表面在相变器件(如环路热管、平板

热管等)中也得到了成功应用。将单层的树林状梯度结构应用于超薄平板热管中,取得了优异的均温效果及传热性能。另外,相较于均一结构,单层蜂窝状结构作为吸液芯的环路热管可以明显降低热管的热阻及增强传热量。

展望梯度结构多孔表面的研究,我们有以下思考:

(1) 本文涉及的梯度结构多孔表面在不同文献中拥有不同的名字,本文试图提取它们的共性,并以梯度结构多孔表面进行概括,但这一概念还需进一步完善。

(2) 现有的梯度结构多孔表面还有进一步优化的空间,一些新的梯度结构多孔表面也有待进一步开发。不同因素对沸腾传热的影响规律非常复杂,如何从理论上进行分析,并通过实验进行验证,还需要做很多工作。仅以纳米尺寸结构为例,其会影响有效孔径 R_{eff} ,进而影响液体补充的吸引动力;同时,其还会影响渗透率 K ,影响液体流动时的阻力;此外,纳米结构还会影响表面的表面能,表面能又同时影响着液体的浸润性和气泡的成核。

(3) 制备方法及表面的稳定性仍需要进一步改善。目前大多数性能优异的表面的制备过程还较复杂,成本较大,如何低成本快速制备沸腾效果优异的表面,是其得到大规模应用的重要前提条件。此外,很多表面在制备时有优异的强化传热性能,但长期运行后,可能面临性能严重衰退的问题^[45],因此需要提高沸腾结构表面的强度。

(4) 数值模拟可以帮助我们更深刻地认识表面沸腾强化的机理。目前,相关的模拟方法已经由原来的流体体积函数(volume of fluid, VOF)、Level-set发展到了格子波尔兹曼方法(lattice boltzmann method, LBM),甚至是分子动力学。具体工作可以参见Gong和Cheng^[83]、Chen等人^[84]、Li等人^[85]的论文。

(5) 对于梯度结构多孔表面的沸腾实验研究,大部分研究采用的样品尺寸较厚,测温点较少,温度采集的频率不够高,无法准确捕捉在较小尺度上精密时间序列下的准确温度分布,从而缺失了在微/纳结构表面的温度分布及瞬态热流密度分布等信息。采用超薄基底的样品,结合高速红外摄像机以及三维瞬态热传导反问题计算手段,可估算出局部瞬态热流密度信息,对池沸腾中的两相流动与传热过程进行精准模拟,进行最优实验设计,为计算出最佳操作参数以及沸腾表面结构参数、指导实验提供建议^[86]。

(6) 本文综述的梯度结构多孔表面主要集中在沸腾传热。实际上,这些表面也可以用在冷凝传热。梯度

结构多孔表面应用于冷凝传热的相关研究可以参考 Liao等人^[87]、Xie等人^[88]、Wen等人^[89]、Ma等人^[90]、Niu和Tang^[91]、Chen等人^[92]、Peng等人^[93]的工作, 本文不再赘述.

(7) 基于梯度结构多孔表面的相变器件除了涉及沸腾(蒸发)外, 还涉及冷凝、气体和液体的运动等, 如

何对其进行优化还有待一步研究. 此外, 新型的相变器件也有待进一步开发.

总的来说, 梯度结构多孔表面有较好的强化沸腾效果, 并可以在相变器件中得到应用. 对梯度结构多孔表面进一步研究, 将帮助我们得到更高效的沸腾换热表面和相变传热器件.

参考文献

- 1 Xuan Y M, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2000, 21: 466–470 [宣益民, 李强. 纳米流体强化传热研究. *工程热物理学报*, 2000, 21: 466–470]
- 2 Wang Y C, Peng X F, Guo L J. Pool boiling heat transfer enhancement in binary mixtures by surfactant additives (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 1707–1710 [王晔春, 彭晓峰, 郭烈锦. 表面活性剂强化双组分混合工质沸腾换热实验研究. *工程热物理学报*, 2008, 29: 1707–1710]
- 3 Wei J J, Honda H. Effects of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72. *Int J Heat Mass Transf*, 2003, 46: 4059–4070
- 4 Liao Q, Zhao T S. Evaporative heat transfer in a capillary structure heated by a grooved block. *J Thermophys Heat Transf*, 1999, 13: 126–133
- 5 Hu X, Tang D. Experimental investigation on flow and thermal characteristics of a micro phase-change cooling system with a microgroove evaporator. *Int J Therm Sci*, 2007, 46: 1163–1171
- 6 Li C, Wang Z, Wang P I, et al. Nanostructured copper interfaces for enhanced boiling. *Small*, 2008, 4: 1084–1088
- 7 Takata Y, Hidaka S, Masuda M, et al. Pool boiling on a superhydrophilic surface. *Int J Energy Res*, 2003, 27: 111–119
- 8 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
- 9 Betz A R, Xu J, Qiu H H, et al. Do surfaces with mixed hydrophilic and hydrophobic areas enhance pool boiling? *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 3
- 10 Dong L, Quan X, Cheng P. An experimental investigation of enhanced pool boiling heat transfer from surfaces with micro/nano-structures. *Int J Heat Mass Transf*, 2014, 71: 189–196
- 11 Min D H, Hwang G S, Usta Y, et al. 2-D and 3-D modulated porous coatings for enhanced pool boiling. *Int J Heat Mass Transf*, 2009, 52: 2607–2613
- 12 Ji X, Xu J, Zhao Z, et al. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces. *Exp Therm Fluid Sci*, 2013, 48: 198–212
- 13 Wang Y Q, Mo D C, Lyu S S. Effect of copper micro-nano bi-porous surface thickness on boiling (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2016, 37: 1519–1522 [汪亚桥, 莫冬传, 吕树申. 铜基双尺度多孔表面厚度对沸腾传热的影响. *工程热物理学报*, 2016, 37: 1519–1522]
- 14 Wang Y Q, Lyu S S, Luo J L, et al. Copper vertical micro dendrite fin arrays and their superior boiling heat transfer capability. *Appl Surf Sci*, 2017, 422: 388–393
- 15 Yao K M, Yang S, Huang X Z, et al. Pool boiling heat transfer performance of porous nickel surface (in Chinese). In: *Proceedings of the 16th National Heat Pipe Conference*. Dalian, 2019. 630–638 [姚坤满, 杨朔, 黄希哲, 等. 多孔镍微结构表面的池沸腾传热特性. 见: 第十六届全国热管会议论文集. 大连, 2019. 630–638]
- 16 Wang Y Q, Luo J L, Fu Y X, et al. Pool boiling performance of electrodeposited copper micro dendrite arrays (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2018, 39: 844–847 [汪亚桥, 罗佳利, 符远翔, 等. 电沉积枝状微针翅铜的池沸腾传热特性. *工程热物理学报*, 2018, 39: 844–847]
- 17 Khan S A, Sezer N, Koç M. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces. *Appl Therm Eng*, 2019, 153: 168–180
- 18 El-Genk M S, Ali A F. Enhancement of saturation boiling of PF-5060 on microporous copper dendrite surfaces. *J Heat Transf-Trans ASME*, 2010, 132: 1–9
- 19 Li S, Furberg R, Toprak M S, et al. Nature-inspired boiling enhancement by novel nanostructured macroporous surfaces. *Adv Funct Mater*, 2008, 18: 2215–2220
- 20 Furberg R, Palm B. Boiling heat transfer on a dendritic and micro-porous surface in R134a and FC-72. *Appl Therm Eng*, 2011, 31: 3595–3603
- 21 Xu P, Li Q, Xuan Y. Enhanced boiling heat transfer on composite porous surface. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 80: 107–114
- 22 Wang Y Q, Luo J L, Heng Y, et al. Wettability modification to further enhance the pool boiling performance of the micro nano bi-porous copper surface structure. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 119: 333–342
- 23 Wang Y Q, Mo D C, Lyu S S. Enhanced pool boiling heat transfer on mono and multi-layer micro-nano bi-porous copper surfaces. In: *Proceedings of the the ASME 5th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*, 2016
- 24 Dhir V K. Boiling heat transfer. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 365–401

- 25 Wang C H, Dhir V K. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface. *J Heat Transf*, 1993, 115: 659–669
- 26 Sun Z, Hong F J, Zheng P. Experimental investigation on pool boiling heat transfer of gradient metal foam (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2011, 32: 1745–1748 [孙振, 洪芳军, 郑平. 颗粒烧结多孔芯蒸发/沸腾换热的实验研究. *工程热物理学报*, 2011, 32: 1745–1748]
- 27 Xu Z G, Zhao C Y. Enhanced boiling heat transfer by gradient porous metals in saturated pure water and surfactant solutions. *Appl Therm Eng*, 2016, 100: 68–77
- 28 Zhou L, Li W, Ma T, et al. Experimental study on boiling heat transfer of a self-wetting fluid on copper foams with pore-density gradient structures. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 124: 210–219
- 29 Patil C M, Kandlikar S G. Pool boiling enhancement through microporous coatings selectively electrodeposited on fin tops of open microchannels. *Int J Heat Mass Transf*, 2014, 79: 816–828
- 30 Bai L Z, Zhang L P, Lin G P, et al. Pool boiling with high heat flux enabled by a porous artery structure. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 5
- 31 Li C H, Li T, Hodgins P, et al. Comparison study of liquid replenishing impacts on critical heat flux and heat transfer coefficient of nucleate pool boiling on multiscale modulated porous structures. *Int J Heat Mass Transf*, 2011, 54: 3146–3155
- 32 Wang Y Q, Luo J L, Heng Y, et al. The two-layers composite structure of biomimetic copper forest and honeycomb-like porous structure to enhance pool boiling performance. In: Proceedings of the the 16th International Heat Transfer Conference, 2019
- 33 Dhillon N S, Buongiorno J, Varanasi K K. Critical heat flux maxima during boiling crisis on textured surfaces. *Nat Commun*, 2015, 6: 12
- 34 Rahman M M, Ölçeroğlu E, McCarthy M. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces. *Langmuir*, 2014, 30: 11225–11234
- 35 Rahman M M, Ölçeroğlu E, McCarthy M. Scalable nanomanufacturing of virus-templated coatings for enhanced boiling. *Adv Mater Interfaces*, 2014, 1: 1300107
- 36 Cao Z, Liu B, Preger C, et al. Pool boiling heat transfer of FC-72 on pin-fin silicon surfaces with nanoparticle deposition. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 126: 1019–1033
- 37 Liu B, Cao Z, Zhang Y, et al. Pool boiling heat transfer of N-pentane on micro/nanostructured surfaces. *Int J Therm Sci*, 2018, 130: 386–394
- 38 McHale J P, Garimella S V, Fisher T S, et al. Pool boiling performance comparison of smooth and sintered copper surfaces with and without carbon nanotubes. *Nanoscale Microscale Thermophys Eng*, 2011, 15: 133–150
- 39 Wang G Y, Xu R N, Chen J N, et al. Experimental investigation of droplet spreading and evaporation on hybrid micro and nano-structured surfaces (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2018, 39: 1797–1802 [王高远, 胥蕊娜, 陈剑楠, 等. 微/纳复合结构表面液滴铺展及蒸发特性实验研究. *工程热物理学报*, 2018, 39: 1797–1802]
- 40 Wang X, Zhang Y, Qi B, et al. Experimental study of the heater size effect on subcooled pool boiling heat transfer of FC-72 in microgravity. *Exp Therm Fluid Sci*, 2016, 76: 275–286
- 41 Zhang C, Cheng P, Hong F. Mesoscale simulation of heater size and subcooling effects on pool boiling under controlled wall heat flux conditions. *Int J Heat Mass Transf*, 2016, 101: 1331–1342
- 42 Yang S, Luo J L, Wang Y Q, et al. Pool boiling performance of porous copper surface with radial diameter gradient (in Chinese). In: Proceedings of The National Heat and Mass Transfer Conference. Qingdao, 2019 [杨朔, 罗佳利, 汪亚桥, 等. 径向梯度多孔表面制备及池沸腾性能研究. 见: 中国工程热物理学会传热传质学术年会论文集. 青岛, 2019]
- 43 Kandlikar S G. A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation. *J Heat Transf*, 2001, 123: 1071–1079
- 44 Chen Y, Mo D C, Zhao H B, et al. Pool boiling on the superhydrophilic surface with TiO₂ nanotube arrays. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 1596–1600
- 45 Mo D C, Zhang H, Lyu S S. Pool boiling experiment on TiO₂ nanotube array surface (in Chinese). *CIESCI J*, 2014, 65: 308–315 [莫冬传, 张晖, 吕树申. TiO₂纳米管阵列表面的池沸腾实验. *化工学报*, 2014, 65: 308–315]
- 46 Luo Z Y, Chen K X, Mo D C, et al. A new route for surface modification: fluorine-induced superhydrophilicity. *J Phys Chem C*, 2016, 120: 11882–11888
- 47 Luo Z Y, Mo D C, Lyu S S. Fluorine-induced superhydrophilic TiO₂ nanotube arrays. In: Proceedings of the the ASME 5th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer, 2016
- 48 Dai X M, Huang X Y, Yang F H, et al. Enhanced nucleate boiling on horizontal hydrophobic-hydrophilic carbon nanotube coatings. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 5
- 49 Zupancic M, Steinbücher M, Gregorčič P, et al. Enhanced pool-boiling heat transfer on laser-made hydrophobic/superhydrophilic polydimethylsiloxane-silica patterned surfaces. *Appl Therm Eng*, 2015, 91: 288–297
- 50 Wang X, Zhao S, Wang H, et al. Bubble formation on superhydrophobic-micropatterned copper surfaces. *Appl Therm Eng*, 2012, 35: 112–119
- 51 Peng B, Ma X, Lan Z, et al. Experimental investigation on steam condensation heat transfer enhancement with vertically patterned hydrophobic–

- hydrophilic hybrid surfaces. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 83: 27–38
- 52 Chen X M, Yao S H, Wang Z K. Evaporation of condensate droplets on structured surfaces with gradient roughness. *J Heat Transf-Trans ASME*, 2015, 137: 1
- 53 Luo Y, Li J, Zhu J, et al. Fabrication of condensate microdrop self-propelling porous films of cerium oxide nanoparticles on copper surfaces. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54: 4876–4879
- 54 Gong S, Cheng P. Numerical simulation of pool boiling heat transfer on smooth surfaces with mixed wettability by lattice Boltzmann method. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 80: 206–216
- 55 Li Q, Yu Y, Zhou P, et al. Enhancement of boiling heat transfer using hydrophilic-hydrophobic mixed surfaces: A lattice Boltzmann study. *Appl Therm Eng*, 2018, 132: 490–499
- 56 Wang Y Q, Luo J L, Heng Y, et al. PTFE-modified porous surface: Eliminating boiling hysteresis. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2020, 111: 104441, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104441
- 57 Wang Y Q, Luo J L, Heng Y, et al. PTFE modification to enhance boiling performance of porous surface. In: *Proceedings of the ASME 6th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*. Dalian, 2019
- 58 Qu W, Ma T Z, Miao J Y. Microscale effect of phase change heat transfer in thin liquid membranes (in Chinese). *Spacecr Engineer*, 2004, 13: 36–45 [曲伟, 马同泽, 苗建印. 微小空间薄膜相变传热的微尺度效应. *航天器工程*, 2004, 13: 36–45]
- 59 Fan C L, Qu W, Sun F R, et al. The experimental study of the performance of flat miniature heat pipes with three kinds of micro grooves (in Chinese). *Chin J Electron Devices*, 2003, 26: 357–360 [范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 等. 三种微槽结构的平板热管的传热性能实验研究. *电子器件*, 2003, 26: 357–360]
- 60 Zhang R P, Chen Y P, Shi M H. Thermal response of heat pipe with axially swallow-tailed microgrooves for the application of multiple heat sources (in Chinese). *J Astronaut*, 2013, 34: 590–596 [张任平, 陈永平, 施明恒. 多热源工况下燕尾形轴向槽道热管的热响应特性. *宇航学报*, 2013, 34: 590–596]
- 61 Wang C, Liu Z L, Zhang G M, et al. Experimental study on a flat plate heat pipe with intersected micor-grooves (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2013, 34: 698–701 [王晨, 刘中良, 张广孟, 等. 新型微槽道平板热管的实验研究. *工程热物理学报*, 2013, 34: 698–701]
- 62 Hong S, Wang S, Zhang Z. Multiple orientations research on heat transfer performances of Ultra-Thin Loop Heat Pipes with different evaporator structures. *Int J Heat Mass Transf*, 2016, 98: 415–425
- 63 Mo D C, Lyu S S, Jin J D. Experimental study on heat tranfer characteristics of high heat flux vapor chamber (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 317–319 [莫冬传, 吕树申, 金积德. 高热流密度均温板的传热特性实验研究. *工程热物理学报*, 2008, 29: 317–319]
- 64 Zhang H X, Lin G P, Ding T, et al. Experimental investigation on temperature oscillation of loop heat pipes (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2005, 31: 116–120 [张红星, 林贵平, 丁汀, 等. 环路热管温度波动现象的实验分析. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31: 116–120]
- 65 Mo D C, Ding N, Lu S S. Gravity effects on the performance of a flat loop heat pipe. *Micrograv Sci Technol*, 2009, 21: 95–102
- 66 Zhang C, Huang H, Xin G M, et al. Study on starting characteristics of nickel-copper based composite capillary loop heat pipe (in Chinese). In: *Proceedings of the 14th National Heat Management Conference*. Beijing, 2015. 208–214 [张冲, 黄腾, 辛公明, 等. 镍铜基复合毛细芯环路热管的启动特性研究. 见: 第十四届全国热管会议论文集. 北京, 2015. 208–214]
- 67 Semenik T, Lin Y Y, Catton I. Biporous sintered copper for a closed loop heat pipe evaporator. In: *Proceedings of the the ASME Heat Transfer Division*. Orlando, FL, USA, 2005
- 68 Singh R, Akbarzadeh A, Mochizuki M. Effect of wick characteristics on the thermal performance of the miniature loop heat pipe. *J Heat Transf-Trans ASME*, 2009, 131: 10
- 69 Wang D, Liu Z, He S, et al. Operational characteristics of a loop heat pipe with a flat evaporator and two primary biporous wicks. *Int J Heat Mass Transf*, 2015, 89: 33–41
- 70 Li Q, Zhou H Y, Xuan Y M. Investigation on heat transfer characteristics of composite capillary evaporator (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 148–150 [李强, 周海迎, 宣益民. 复合结构毛细蒸发器传热特性研究. *工程热物理学报*, 2008, 29: 148–150]
- 71 Li J, Lv L. Experimental studies on a novel thin flat heat pipe heat spreader. *Appl Therm Eng*, 2016, 93: 139–146
- 72 Cheng J, Wang G, Zhang Y, et al. Enhancement of capillary and thermal performance of grooved copper heat pipe by gradient wettability surface. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 107: 586–591
- 73 Lee S, Lee J, Hwang H, et al. Layer-by-layer assembled carbon nanotube-polyethyleneimine coatings inside copper-sintered heat pipes for enhanced thermal performance. *Carbon*, 2018, 140: 521–532
- 74 Xu P F, Li Q. Visualization study on the enhancement of heat transfer for the groove flat-plate heat pipe with nanoflower coated CuO layer. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 5
- 75 Hu Y, Cheng J, Zhang W, et al. Thermal performance enhancement of grooved heat pipes with inner surface treatment. *Int J Heat Mass Transf*, 2013, 67: 416–419
- 76 He H, Furusato K, Yamada M, et al. Efficiency enhancement of a loop thermosyphon on a mixed-wettability evaporator surface. *Appl Therm Eng*,

- 2017, 123: 1245–1254
- 77 Wang X, Wei J, Deng Y, et al. Enhancement of loop heat pipe performance with the application of micro/nano hybrid structures. [Int J Heat Mass Transf](#), 2018, 127: 1248–1263
 - 78 Ji X, Xu J, Li H, et al. Switchable heat transfer mechanisms of nucleation and convection by wettability match of evaporator and condenser for heat pipes: Nano-structured surface effect. [Nano Energy](#), 2017, 38: 313–325
 - 79 Sun Z, Qiu H. An asymmetrical vapor chamber with multiscale micro/nanostructured surfaces. [Int Commun Heat Mass Transf](#), 2014, 58: 40–44
 - 80 Hao T T, Ma X H, Lan Z, et al. Effects of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces on heat transfer and oscillating motion of an oscillating heat pipe. [J Heat Transf-Trans ASME](#), 2014, 136: 13
 - 81 Wang Y Q, Luo J L, Heng Y, et al. Ultrathin flat heat pipe with biomimetic copper forest structure wick. In: Proceedings of the the 13th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Applications. Xi'an, 2018
 - 82 Mo D C, Wang Y Q, Lyu S S. Flat loop heat pipe with micro nano bi-porous wick (in Chinese). In: Proceedings of The 14th National Heat Pipe Conference. Beijing, 2015. 235–241 [莫冬传, 汪亚桥, 吕树申. 微/纳双尺度毛细芯结构的平板环路热管. 见: 第十四届全国热管会议论文集. 北京, 2015. 235–241]
 - 83 Gong S, Cheng P. Lattice Boltzmann simulations for surface wettability effects in saturated pool boiling heat transfer. [Int J Heat Mass Transf](#), 2015, 85: 635–646
 - 84 Chen Y, Zou Y, Sun D, et al. Molecular dynamics simulation of bubble nucleation on nanostructure surface. [Int J Heat Mass Transf](#), 2018, 118: 1143–1151
 - 85 Li Q, Luo K H, Kang Q J, et al. Lattice Boltzmann methods for multiphase flow and phase-change heat transfer. [Prog Energy Combust Sci](#), 2016, 52: 62–105
 - 86 Luo J, Yang Q Q, Lu S, et al. A novel formulation and sequential solution strategy with time-space adaptive mesh refinement for efficient reconstruction of local boundary heat flux. [Int J Heat Mass Transf](#), 2019, 104: 1288–1300
 - 87 Liao Q, Gu Y B, Zhu X, et al. Experimental investigation of dropwise condensation heat transfer on the surface with a surface energy gradient. [J Enh Heat Transf](#), 2007, 14: 243–256
 - 88 Xie J, Xu J L, Liu Q, et al. Coupling diffusion welding technique and mesh screen creates heterogeneous metal surface for droplets array. [Adv Mater Interfaces](#), 2017, 4: 12
 - 89 Wen R, Li Q, Wu J, et al. Hydrophobic copper nanowires for enhancing condensation heat transfer. [Nano Energy](#), 2017, 33: 177–183
 - 90 Ma X H, Wang S F, Lan Z, et al. Wetting mode evolution of steam dropwise condensation on superhydrophobic surface in the presence of noncondensable gas. [J Heat Transf-Trans ASME](#), 2012, 134: 9
 - 91 Niu D, Tang G H. Molecular dynamics simulation of droplet nucleation and growth on a rough surface: Revealing the microscopic mechanism of the flooding mode. [RSC Adv](#), 2018, 8: 24517–24524
 - 92 Chen X, Wu J, Ma R, et al. Nanograsped micropyramidal architectures for continuous dropwise condensation. [Adv Funct Mater](#), 2011, 21: 4617–4623
 - 93 Peng Q, Jia L, Guo J, et al. Forced jumping and coalescence-induced sweeping enhanced the dropwise condensation on hierarchically microgrooved superhydrophobic surface. [Appl Phys Lett](#), 2019, 114: 4

Summary for “梯度结构多孔表面强化沸腾及其在相变器件中的应用”

Porous surfaces with structural gradient: Enhancing boiling heat transfer and its application in phase-change devices

Dongchuan Mo^{1,2}, Jiali Luo^{1,2}, Yaqiao Wang^{1,2}, Yi Heng^{2,3}, Yuanxiang Fu^{1,2} & Shushen Lü^{1,2*}

¹ School of Materials, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

² Guangdong Engineering Technology Research Centre for Advanced Thermal Control Material and System Integration (ATCMSI), Guangzhou 510275, China;

³ School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

* Corresponding author, E-mail: lvshsh@mail.sysu.edu.cn

Surface micro/nano processing is an important method and research hotspot for enhancing the boiling heat transfer process. However, the effects of a structural gradient on a boiling surface have not been systematically studied. In this paper, we review researches that focus on porous surfaces with a structural gradient and their effects on the enhancement of boiling heat transfer and performance of phase-change devices from two main aspects: Geometric gradient and wettability gradient. Porous surfaces with a geometric (structural) gradient were divided into four series: single-layer geometric gradient structure, multi-layer geometric gradient structure, surface covered with a micro/nanolayer, and surface with a radial gradient. In addition, the surface with a wettability gradient also has a considerable improvement in boiling heat transfer. Especially, we present some of the work related to the improvement in boiling heat transfer for porous surfaces with structural gradient, which has been carried out by our research group.

Honeycomb-like and forest-like porous copper surfaces are typical single-layer geometric gradient porous surfaces with excellent boiling heat transfer performance. They have abundant microstructures and sub-microstructures/nanostructures, which are favorable for vapor escaping and liquid rewetting, respectively. For all the mentioned single-layer geometry gradient porous surfaces, the critical heat flux increases as the sample thickness increases.

Furthermore, we fabricated a two-layer composite porous surface (TLCS) with a honeycomb-like porous copper surface on top of a forest-like porous copper surface. This TLCS is a multilayer geometric gradient structure porous surface that can further enhance the boiling heat transfer process. The heat transfer coefficient (HTC) of TLCS is 1.5 and 1.2 times larger than those of the biomimetic copper forest and honeycomb structures, respectively.

When a small current is applied to the honeycomb-like porous copper surface, the dendrites on the pore wall transferred to micro balls and a surface with a structural gradient is obtained. The modified surface is a microstructural porous surface covered by a nanolayer that further enhances the HTC (1.7 times).

The diameter of the honeycomb-like porous copper surface can be controlled with a radial diameter gradient. A sample in which the diameter around the center is much smaller than that around the edge enhances the HTC 1.4 times compared with a sample with uniform diameter.

When the TLCS was modified with polytetrafluoroethylene (PTFE), it became a hybrid wetting surface. The experimental results show that the wall superheat temperature at the same heat flux during the heat flux decreasing can repeat that during the heat flux increasing well within 0.5°C, demonstrating that the boiling hysteresis was successfully eliminated.

As the porous surface with a structural gradient has excellent performance in boiling heat transfer, it has been widely used in phase-change devices, such as loop and flat heat pipes, to improve their functioning. An ultra-thin flat heat pipe (UTHP), which is only 0.6 mm thick, can significantly reduce the evaporator temperature by 10°C under a 6 W heat load compared with a copper plate.

This paper summarizes the most relevant features related to boiling heat transfer enhancement when using structural-gradient porous surfaces and the improvements in phase-change devices that use such surfaces. Despite the advances in this aspect, the porous surfaces can be further optimized to achieve a better heat transfer performance.

gradient structure porous surface, multi-scale, wettability gradient, enhanced boiling, phase-change device, heat pipe

doi: [10.1360/TB-2019-0380](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0380)