



短时间微重力池沸腾换热及其临界热流密度机理

刘斌¹, 孔新², 魏进家^{1,3*}, 张永海¹, 赵建福⁴, 杨扬⁵

1. 西安交通大学化学工程与技术学院, 西安 710049;
2. 西北大学化工学院, 西安 710069;
3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
4. 中国科学院力学研究所, 微重力重点实验室, 北京 100190;
5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094

* 联系人, E-mail: jijwei@mail.xjtu.edu.cn

2019-07-18 收稿, 2019-07-29 修回, 2019-07-30 接受, 2019-09-17 网络版发表

国家自然科学基金(51636006)、中国科协青年人才托举计划(2018QNRC001)、中欧载人航天合作空间应用合作项目(TGMTYY00-RW-05-1.00)和西安交通大学基本科研业务费(xjj2017085, cxt2017004)资助

摘要 研究了复合柱状微结构表面(PF30-60LP)在短时间微重力下的池沸腾传热性能, 并与文献中的光滑表面和柱状微结构表面(PF30-60和PF50-120)进行对比. 实验结果表明, 微重力条件下, PF30-60LP的临界热流密度(critical heat flux, CHF)与光滑表面相比虽有提高, 但却明显低于PF30-60和PF50-120, 与常重力下所得实验结果存在明显差异. 微重力条件下, 由于浮力缺失, 覆盖于加热表面的大气泡脱离周期远大于常重力条件. 大气泡覆盖于表面时间过长, 导致新鲜液体补给困难是造成微重力CHF显著降低的主要原因. PF30-60和PF50-120具备非常强的毛细芯吸作用, 可显著提高加热面的侧向补液能力, 因此其微重力下的CHF相比于光滑表面得到了十分显著的提高. 而PF30-60LP由于较大面积光滑通道的存在, 表面的毛细芯吸作用被削弱, 因此其CHF介于光滑表面和柱状微结构表面之间. 提高微重力池沸腾CHF, 关键在于提高覆盖于加热面的大气泡的脱离频率和液体对加热表面的补液能力. 可行的方法有降低液体工质表面张力或提高表面对液体的毛细芯吸性, 通过外部施加电场或声场加速气泡脱离, 强化Marangoni对流或采用局部加热法改变Marangoni力对气泡的作用力方向, 通过调控气泡合并行为增大气泡合并后释放的表面能从而促进气泡脱离等.

关键词 微重力, 池沸腾, 微结构, 临界热流密度, 气泡动力学, 毛细芯吸作用

池沸腾传热被广泛应用于电子器件散热、热管理系统、热能工程以及航天领域. 在微重力下, 由于浮力的缺失, 池沸腾传热存在着其特殊的气泡动力学行为和传热特性. 随着航天技术的发展, 特别是中国空间站建设的逐步完成, 微重力池沸腾传热得到了广泛的关注与研究^[1,2].

微重力条件下浮力不再主导气泡的脱离, 因此池沸腾气泡动力学行为是微重力池沸腾传热研究的热点.

Siegel和Keshock^[3]发现微重力条件下气泡脱离直径显著增大, 且当重力加速度小于 $0.1g$ 时($g=9.8\text{ m/s}^2$, 为地球表面重力加速度), 气泡主要由浮力和表面张力控制. Raj和Kim^[4]与Wang等人^[5]发现加热面尺寸对气泡动力学行为存在显著影响. Karri^[6]基于对气泡的受力分析, 提出了一个预测微重力下气泡脱离直径的力学模型, 其结果与Siegel和Keshock^[3]的实验结果吻合良好. Zhao等人^[7]发现Marangoni力对过冷池沸腾的气泡动力学行

引用格式: 刘斌, 孔新, 魏进家, 等. 短时间微重力池沸腾换热及其临界热流密度机理. 科学通报, 2020, 65: 1715-1722

Liu B, Kong X, Wei J J, et al. Pool boiling heat transfer and its critical heat flux mechanism in short-term microgravity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1715-1722, doi: 10.1360/TB-2019-0307

为存在显著影响. Xue等人^[8]、Zhang等人^[9]和Zhou等人^[10]考虑Marangoni力的作用, 建立和发展了可同时用于预测光滑表面和柱状微结构表面气泡脱离直径的力学模型, 使其可以精确地预测光滑表面和柱状微结构表面的气泡脱离直径.

由于微重力条件下池沸腾气泡脱离直径远大于常重力条件下, 且气泡脱离周期显著增长, 覆盖于加热面的大气泡很难脱离, 导致传热恶化提早发生, 且CHF远低于常重力条件. Oka等人^[11]研究发现微重力条件下正戊烷和CFC-113的CHF仅为常重力下的40%左右. Di Marco和Grassi^[12]研究了外加电场对微重力沸腾传热的强化, 发现外加电场可以很好地弥补重力缺失带来的传热恶化. Xue等人^[8]和Zhang等人^[9]发现即使在微重力条件下, 柱状微结构表面也可以获得十分高效的池沸腾换热性能, 其微重力下的CHF达到了常重力下的63%~80%, 约为光滑表面对应条件下CHF的3倍. 魏进家等人^[13]对常/微重力下微结构表面强化沸腾换热进行了综述, 指出微/纳结构不同组合方式的设计以及其与亲疏水性表面特性相结合是进一步增强池沸腾换热性能的一个重要途径.

微重力环境的难以实现制约了微重力池沸腾传热的广泛研究, 导致微重力沸腾传热机理, 特别是临界热流密度机理模型的研究依然匮乏. 本文研究了复合柱状微结构表面(PF30-60LP)在短时间微重力条件下的池沸腾传热性能, 并与本课题组之前研究的光滑表面和柱状微结构表面(PF30-60和PF50-120)的池沸腾换热性能进行对比. 进一步地, 本文将常重力下的微/纳复合结构CHF模型^[14]成功应用到微重力条件下, 解释和分析了各个表面CHF存在差异的主要原因, 并对微重力CHF强化提出相应的解决办法.

1 实验方法

本实验的微重力环境通过中国科学院力学研究所的微重力实验室落塔装置实现. 微重力水平为 $10^{-2}g \sim 10^{-3}g$, 微重力持续时间3.6 s. 落塔池沸腾实验装置如图1所示, 主要包括沸腾池、稳压橡胶袋、程控直流电源、加热硅片、数据记录仪、信号传感器(包括测量加热电压的标准电阻模块、测量加热电流的霍尔传感器和温度变送器)以及可视化系统(高速相机和光源).

本实验加热硅片为掺磷硅. 通过超声波焊接技术, 将两根铜导线分别焊接于硅片相对的两个侧面, 从而实现铜导线与硅片之间的欧姆接触, 并最大可能地减

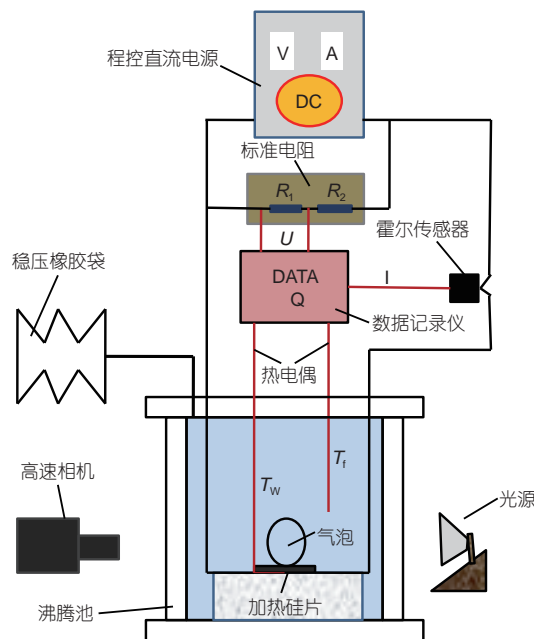


图1 (网络版彩色)池沸腾实验装置
Figure 1 (Color online) The experimental setup of pool boiling

小导线与硅片之间的接触电阻. 加热方式为恒电压焦耳加热. 换热工质为FC-72, 沸点为 $56^{\circ}C$, 实验压力为一个标准大气压, 液体过冷度约为40 K. 加热硅片的温度及液池中主流温度通过T型热电偶进行测量. 实验过程中液池主流温度、加热硅片温度、加热电流、加热电压以及重力加速度信号通过数据记录仪进行采集, 气泡行为用高速摄像机拍摄.

测试硅片(PF30-60LP)为复合式柱状微结构表面, 如图2所示. 该表面由正规排列的尺寸为 $30 \mu m \times 60 \mu m \times 60 \mu m$ (边长 \times 高度 \times 中心距)的微柱组成的边长为1.4 mm的微结构区域以及宽度为0.5 mm的光滑区域组成. 该表面在Wei和Honda^[15]的柱状微结构表面PF30-60的基础上改进而来. Kong等人^[16]的实验已经证明, 该换热表面在保证高气化核心密度的同时, 增加了聚集在凹槽内气泡间的合并概率, 使气泡受到向上的通道压力而提高脱离频率, 因此其在常重力下具有比PF30-60更高的换热系数和CHF.

一共进行了3次落塔实验, 每次实验测试1个热流密度下的池沸腾换热性能, 实验工况如表1所示. 热流密度的计算公式如下:

$$q = \frac{UI}{A}, \quad (1)$$

其中 q , U , I 和 A 分别为热流密度、加热电压、加热电流

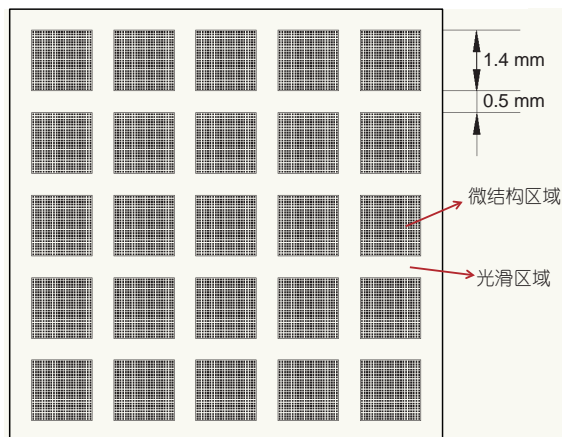


图2 (网络版彩色)PF30-60LP示意图
Figure 2 (Color online) The schematic image of PF30-60LP

表1 实验工况

Table 1 The experimental conditions

Run #	$P(\text{kPa})$	$\Delta T_{\text{sub}}(\text{K})$	$U(\text{V})$	$I(\text{A})$	$q(\text{W}/\text{cm}^2)$
1	102.5	39.7	28	0.46	12.9
2	102.0	37.4	34	0.55	18.7
3	102.4	40.0	40	0.65	26.0

和加热面积. 实验结果的不确定度主要来自于测量方法的不确定度以及数据采集系统的不确定度. 热电偶标定中标准铂电阻温度计的不确定度为 $\pm 0.033 \text{ K}$, 温度线性拟合不确定度为 $\pm 0.213 \text{ K}$, 热电偶的分辨率为 $\pm 0.2 \text{ K}$, 测量读数误差小于 0.1 K , 因此总的温度不确定度约为 $\pm 0.3 \text{ K}$. 实验过程中程控直流电源电压精度为 0.1 V , 电流精度为 0.01 A , 霍尔传感器精度为 $\pm 0.7\%$, 硅片尺寸加工误差为 $\pm 0.5\%$, 因此加热功率的误差约为 1.1% . 加热硅片沿铜导线和地面的漏热在稳态区约为 5% , 在非稳态区约为 12% ^[17], 因此稳态区总的热流密度不确定度约为 5.2% .

2 实验结果与分析

2.1 不同重力水平下沸腾换热性能

为了保证实验数据的可靠性, 在落塔实验前进行连续沸腾曲线与落舱释放前单点实验结果的对比, 如图3所示. 可以看出, 落塔释放前的单点实验数据与地面沸腾曲线基本重合, 说明单点加热与连续加热无明显差别, 验证了实验的准确性与重复性. 微重力下, 1#

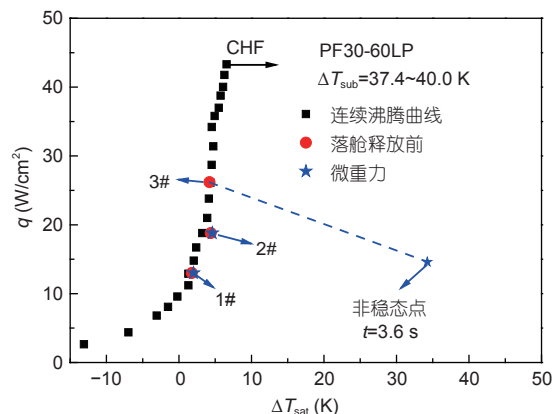


图3 (网络版彩色)落塔实验结果与地面连续沸腾曲线的对比
Figure 3 (Color online) Comparison of the drop tower experiment results and the boiling curve on the ground

和2#的壁面过热度相比于落舱释放前稍有提高, 说明在 $q=12.9$ 和 $18.7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时, 微重力条件下的换热性能存在一定恶化. 对于3#而言, 进入微重力后, 壁面过热度 ΔT_{sat} 飞速升高, 硅片电阻随着温度升高而增大. 由于实验采用恒电压加热, 导致热流密度迅速降低, 沸腾由核态沸腾转换为膜态沸腾. 根据2#和3#的实验现象, 可以推导出微重力下PF30-60LP的CHF在 $18.7\sim 26.0 \text{ W}/\text{cm}^2$ 范围内.

图4对比了文献中相近的液体过冷度下测量的光滑表面和柱状微结构表面在常/微重力条件下的沸腾换热性能. 图中 $1g$ 表示常重力状态, μg 表示微重力状态. 可以看出, 常重力和微重力下的稳定核态沸腾区, PF30-60LP具有最低的壁面过热度. 此外, 常重力下, PF30-60LP的CHF比PF30-60稍高, 但是其微重力下的

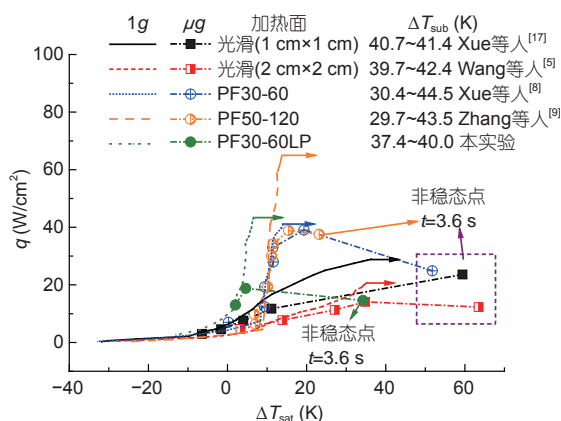


图4 (网络版彩色)PF30-60LP沸腾曲线与文献中的沸腾曲线对比
Figure 4 (Color online) Comparison of pool boiling heat transfer performance of PF30-60LP and the data in literatures

CHF明显比PF30-60低. 类似地, 常重力下PF50-120的CHF与PF30-60相比有显著提高, 但是微重力下二者相差不大. 这些特殊现象表明, 重力水平对池沸腾传热, 特别是对CHF的影响是极其显著的. 因此, 相比于目前已经探究得相对清楚的重力对换热系数的影响, 重力对CHF的影响规律更值得研究.

2.2 微重力条件下池沸腾CHF机理分析

从图4的对比可知, 微重力下的CHF规律与常重力

下的截然不同. 为了探究微重力下CHF发生机理, 首先对微重力下的CHF气泡行为进行分析, 如图5所示. 从图5(a)可以发现, 到达临界后($q=26.0 \text{ W/cm}^2$ 时), 微重力下气泡剧烈合并, 并迅速形成一个覆盖整加热面的大气泡; 进入微重力环境0.244和0.380 s时, 大气泡底层和周围存在一些细小气泡, 说明大气泡底层存在宏观液层和蒸发, 这一现象与Zhang等人^[9]以及Kawanami等人^[18]发现的现象一致. 随着时间的推移, 这些小气泡逐渐被大气泡吞并, 底层液体随之消耗殆尽, 转换成膜态沸腾.

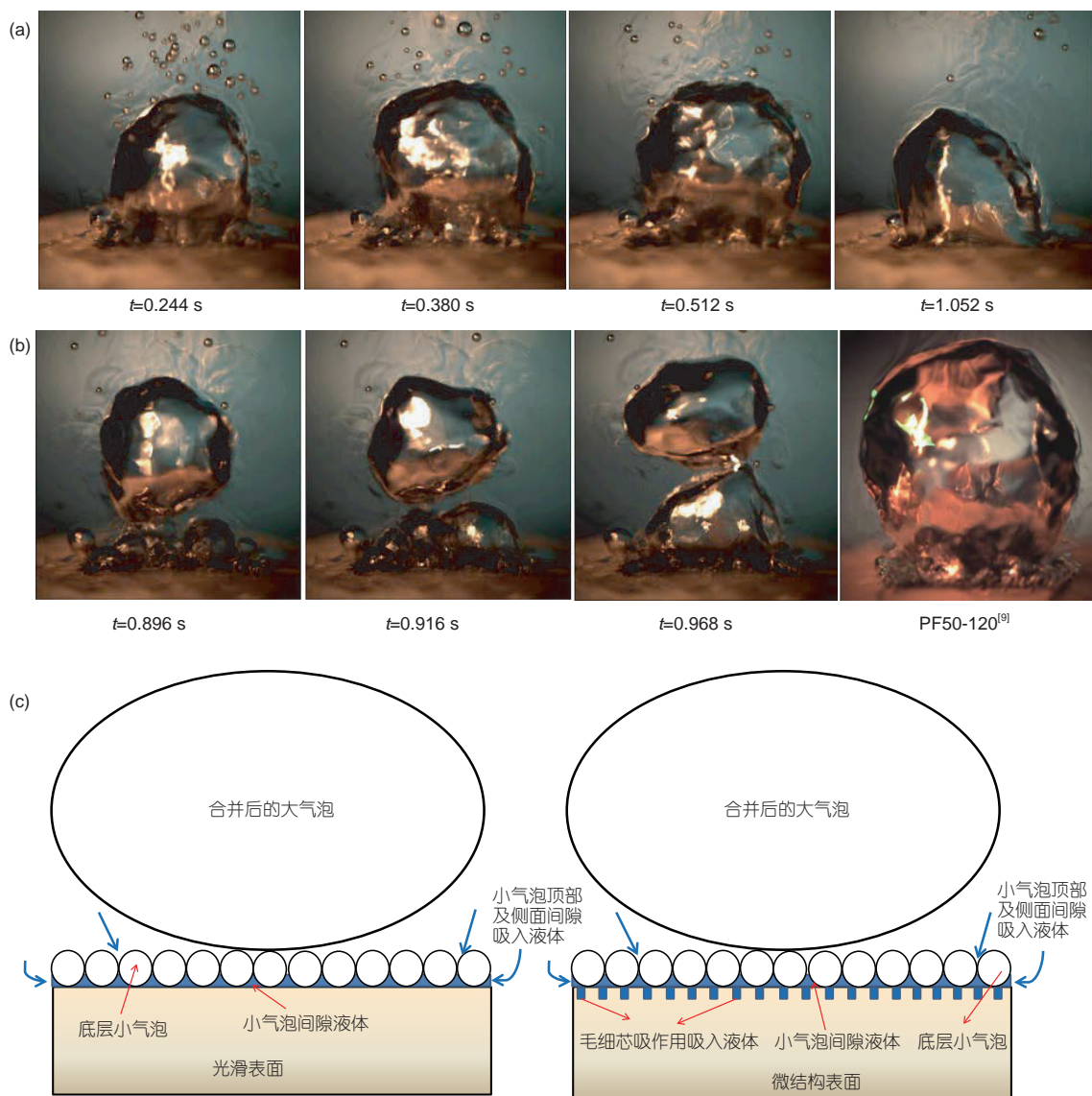


图5 (网络版彩色)CHF前后气泡行为对比及液体补给机理示意图. (a) PF30-60LP临界后气泡行为; (b) PF30-60LP临界前气泡行为; (c) 光滑表面和微结构表面补给机理示意图^[14]

Figure 5 (Color online) The bubble behavior before/after CHF and the mechanisms of liquid supply. (a) The bubble behavior of PF30-60LP after CHF; (b) the bubble behavior before CHF; (c) the mechanisms of liquid supply for smooth surface and microstructured surface^[14]

而在CHF发生前,如图5(b)所示,在大气泡即将脱离之际,可观察到大气泡底下存在一个小气泡层;而在大气泡脱离之后,小气泡层会迅速合并成一个大气泡,这一现象同样可以在其他表面观察到(如图5(b)中所示的PF50-120^[9]).这与Liu等人^[14]提出的常重力下微/纳复合结构表面CHF模型的假设完全一致.因此,可以假设微重力下光滑表面池沸腾补液具有如下两种途径:(1)对于光滑表面而言,临界时液体补给主要由小气泡间隙之间存在的液体以及从小气泡层上方以及侧面间隙补充的液体组成;(2)对于微结构表面而言,除了前面所述的途径以外,还存在微结构间形成的微通道的毛细芯吸作用补充的液体,如图5(c)所示.需要指出的是,从小气泡层上方以及侧面间隙补充的液体只存在于从大气泡脱离到新的大气泡界面形成的那一段时间.Liu等人^[14]的计算表明,由于气泡合并主要受表面张力控制,因此相对于气泡脱离周期,气泡合并的时间较短,该部分的补液对CHF的贡献量可以忽略.微重力条件下,气泡脱离周期显著增加,因而相对而言气泡合并时间所占比重更低,所以这一部分的补液对CHF的贡献量同样可以忽略.基于以上分析,微重力下的CHF计算公式为^[14]

$$q_{CHF} = q_{V_0} + q_{wi} \quad (2)$$

其中 q_{CHF} , q_{V_0} , q_{wi} 分别为临界热流密度、小气泡层间隙中存在的液体对CHF的贡献量以及毛细芯吸作用对CHF的贡献量. q_{V_0} 由式(3)给出:

$$q_{V_0} = 1.57 \times 10^{-6} \rho_1 h_{fg} f \sqrt{2\sigma / g(\rho_1 - \rho_v)} Ja^{0.32}, \quad (3)$$

其中 $Ja = \rho_1 C_{p1} \Delta T_{sat} / \rho_v h_{fg}$ 为Jakob数, f 为大气泡脱离频率.由于微重力下在CHF发生后,气泡的脱离频率为0,因此 Ja , f 以及 ΔT_{sat} 均取CHF之前一点的值.

光滑表面不存在微结构的毛细芯吸作用,因此 $q_{wi} = 0 \text{ W/cm}^2$ 对于微结构表面而言,其毛细芯吸作用可通过

实验测量得到^[14,19].本文中PF30-60和PF50-120的 q_{wi} 值在Liu等人^[14]的文章中已给出.对于PF30-60LP而言,由于其光滑区域的存在,微重力条件下大气泡覆盖整个加热面时,侧向的毛细芯吸能力不及PF30-60. PF30-60LP微柱所占的面积为PF30-60的48.8%,因此可认为其微通道所提供的毛细芯吸能力为PF30-60的48.8%.公式中 ΔT_{sat} , f 和 q_{wi} 可由实验参数测得,其他参数为物性参数,可以根据实验的液体过冷度查得.计算CHF的关键参数如表2所示.

从表2可以看出,对于光滑表面而言,由于其毛细芯吸作用对CHF的贡献值为0,因而其CHF主要取决于大气泡的脱离频率和壁面过热度,所以微重力下其CHF较低.而PF30-60和PF50-120的毛细芯吸作用额外提供了很强的液体补给能力,因此其CHF较高.此外,热流密度越高,单位时间内相变产生的气体体积越大,气泡越容易在更短的时间内达到脱离直径,对应的气泡脱离频率也越高.在这两者的叠加作用下,PF30-60和PF50-120的CHF比其他表面高很多.对于PF30-60LP而言,微重力下其毛细芯吸作用提供的额外液体补给能力相对较弱,因此其CHF值虽较光滑表面有所提高,但相对PF30-60和PF50-120而言较低.

式(2)和(3)的计算值与实验值的对比如图6所示.可以看出,光滑(1 cm×1 cm)表面微重力条件下CHF预测值显著偏低.这是因为该表面的热流密度较低,第一个大气泡脱离时刻为 $t=3.0 \text{ s}$,而微重力持续时间仅为3.6 s,因此后续的气泡脱离由于微重力持续时间的限制无法被记录到.然而, Qi等人^[20]的研究发现,微重力下第一个大气泡脱离后形成的尾流效应可以显著提高后续气泡的脱离频率,因此可以预见当微重力时间足够长时,光滑(1 cm×1 cm)表面的实际大气泡脱离频率会显著大于0.33 Hz.因此,本文的计算值与实验值有明显偏差.还可以看出,除了光滑(1 cm×1 cm)表面以外,

表 2 计算CHF所需参数

Table 2 The parameters for calculating the CHF

Sample	$\Delta T_{sub}(\text{K})$	频率 $f(\text{Hz})$	$\Delta T_{sat}(\text{K})$	小气泡层液体对CHF贡献值 $q_{wi}(\text{W/cm}^2)$	毛细芯吸作用对CHF贡献值 $q_{wi}(\text{W/cm}^2)$
光滑(1×1) cm ^{2[17]}	41.4	0.33	20.7	4.9	0
光滑(2×2) cm ^{2[5]}	39.7	1.21	35.0	20.3	0
PF30-60 ^[8]	27.3	2.24	14.4	22.0	9.3
PF50-120 ^[9]	32.1	3.03	15.3	32.4	15.0
PF30-60LP	37.4	2.22	4.6	18.6	4.5

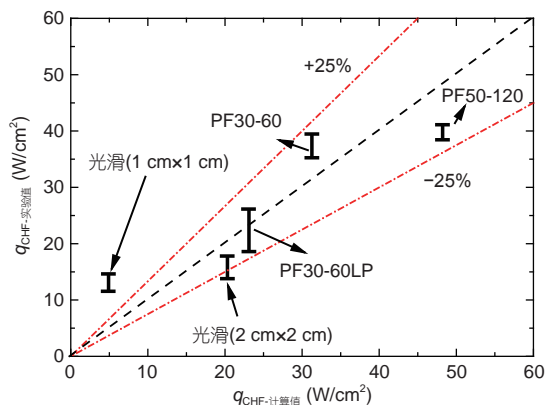


图6 (网络版彩色)CHF模型计算结果与实验值对比
Figure 6 (Color online) Comparison of the experimental results and the calculated values by the CHF model

其他表面的计算值与实验值的相对误差均在25%以内,说明该模型可以很好地揭示微重力池沸腾中CHF的发生机理。

从前面的分析可以得出,提高微重力条件下池沸腾CHF的关键有两点:(1)提高覆盖于加热面大气泡的脱离频率;(2)提高液体至加热表面的补给能力。根据这两点,可行的方法有如下几种:如采用毛细芯吸作用很强的微米或纳米结构表面^[8,9],通过外部施加电场或声场加速气泡脱离^[12,21],采用二元共沸物提高Marangoni

对流促进气泡脱离^[22],增强液体工质对表面的润湿性^[11],通过调控气泡合并提高气泡合并后释放的表面能从而促进气泡脱离^[23],或者采用局部加热法调控沸腾池内液体温度场从而改变Marangoni力对气泡的作用力方向。

3 结论

本文通过落塔实验研究了复合柱状微结构表面在短时间微重力条件下的池沸腾传热性能,并与文献中光滑表面及柱状微结构表面的池沸腾换热性能进行对比。此外,本文还对微重力下的CHF机理进行了深入研究。研究发现,常重力条件下,PF30-60LP的壁面过热度远低于光滑表面、PF30-60和PF50-120,CHF仅低于PF50-120。但是在微重力条件下,PF30-60LP表面CHF虽比光滑表面有小幅度提高,但却明显低于PF30-60和PF50-120。微重力条件下气泡脱离周期远大于常重力,且微重力下气泡覆盖于加热面时间过长,新鲜液体补给困难是导致微重力CHF显著降低的主要原因。在微重力下液体供给受阻的情况下,微结构表面强大的毛细芯吸作用可显著提高加热面的侧向补液能力,从而显著提高微重力下CHF。PF30-60LP的补液能力较PF30-60和PF50-120小得多,因此其微重力下的CHF不及PF30-60和PF50-120。

参考文献

- 1 Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv Heat Transfer*, 2001, 35: 57–172
- 2 Zhao J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *Int J Multiphase Flow*, 2010, 36: 135–143
- 3 Siegel R, Keshock E G. Effects of reduced gravity on nucleate boiling bubble dynamics in saturated water. *AIChE J*, 1964, 10: 509–517
- 4 Raj R, Kim J. Heater size and gravity based pool boiling regime map: Transition criteria between buoyancy and surface tension dominated boiling. *J Heat Transfer*, 2010, 132: 091503
- 5 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 Thermal Fluid Sci*, 2016, 76: 275–286
- 6 Karri S B R. Dynamics of bubble departure in micro-gravity. *Chem Eng Commun*, 1988, 70: 127–135
- 7 Zhao J F, Liu G, Wan S X, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2008, 20: 81–89
- 8 Xue Y F, Zhao J F, Wei J J, et al. Experimental study of nucleate pool boiling of FC-72 on micro-pin-finned surface under microgravity. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 63: 425–433
- 9 Zhang Y H, Wei J J, Xue Y F, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on micro-pin-finned surfaces in microgravity. *Appl Thermal Eng*, 2014, 70: 172–182
- 10 Zhou J, Zhang Y H, Wei J J. A modified bubble dynamics model for predicting bubble departure diameter on micro-pin-finned surfaces under microgravity. *Appl Thermal Eng*, 2018, 132: 450–462
- 11 Oka T, Abe Y, Mori Y H, et al. Pool boiling heat transfer in microgravity. Experiments with CFC-113 and water utilizing a drop shaft facility. *JSME Int J Ser B Fluids Thermal Eng*, 1996, 39: 798–807
- 12 Di Marco P, Grassi W. Effects of external electric field on pool boiling: Comparison of terrestrial and microgravity data in the ARIEL experiment. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2011, 35: 780–787

- 13 Wei J J, Liu B, Zhang Y H. Progress in enhanced boiling heat transfer over microstructured surfaces under normal/microgravity (in Chinese). *Chem Ind Eng Prog*, 2019, 38: 14–29 [魏进家, 刘斌, 张永海. 常/微重力下微结构表面强化沸腾换热研究进展. *化工进展*, 2019, 38: 14–29]
- 14 Liu B, Liu J, Zhang Y, et al. Experimental and theoretical study of pool boiling heat transfer and its CHF mechanism on femtosecond laser processed surfaces. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 132: 259–270
- 15 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 Transfer*, 2003, 46: 4059–4070
- 16 Kong X, Zhang Y H, Wei J J. Experimental study of pool boiling heat transfer on novel bistructured surfaces based on micro-pin-finned structure. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2018, 91: 9–19
- 17 Xue Y F, Zhao J F, Wei J J, et al. Experimental study of nucleate pool boiling of FC-72 on smooth surface under microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2011, 23 (Suppl): 78–85
- 18 Kawanami O, Ohta H, Kabov O, et al. Heat transfer and bubble behaviors in microgravity pool boiling in ESA parabolic flight experiment. *Microgravity Sci Technol*, 2009, 21: 3–8
- 19 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 Transfer*, 2018, 126: 1019–1033
- 20 Qi B J, Wei J J, Wang X L, et al. Influences of wake-effects on bubble dynamics by utilizing micro-pin-finned surfaces under microgravity. *Appl Thermal Eng*, 2017, 113: 1332–1344
- 21 Sitter J S, Snyder T J, Chung J N, et al. Acoustic field interaction with a boiling system under terrestrial gravity and microgravity. *J Acoust Soc Am*, 1998, 104: 2561–2569
- 22 Abe Y, Oka T, Mori Y H, et al. Pool boiling of a non-azeotropic binary mixture under microgravity. *Int J Heat Mass Transfer*, 1994, 37: 2405–2413
- 23 Zhou J, Liu B, Qi B J, et al. Experimental investigations of bubble behaviors and heat transfer performance on micro/nanostructure surfaces. *Int J Thermal Sci*, 2019, 135: 133–147

Summary for “短时间微重力池沸腾换热及其临界热流密度机理”

Pool boiling heat transfer and its critical heat flux mechanism in short-term microgravity

Bin Liu¹, Xin Kong², Jinjia Wei^{1,3*}, Yonghai Zhang¹, Jianfu Zhao⁴ & Yang Yang⁵¹ School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;² School of Chemical Engineering, Northwestern University, Xi'an 710069, China;³ State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;⁴ CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;⁵ Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

* Corresponding author, E-mail: jjwei@mail.xjtu.edu.cn

The pool boiling heat transfer performance of a bistructured surfaces, named PF30-60LP, was studied based on the micro-pin-finned surface under short-time microgravity conditions. The heat transfer performance of PF30-60LP was compared with those of the smooth surfaces and the micro-pin-finned surfaces (PF30-60 and PF50-120). The microgravity environment was realized by the drop tower in National Microgravity Laboratory, Chinese Academy of Sciences. The gravity level is $10^{-2}g$ – $10^{-3}g$ and the duration of microgravity is 3.6 s. The working fluid is FC-72, with the subcooling of 40 K, and the experimental pressure is a standard atmospheric pressure. It was observed that compared to the smooth surfaces and micro-pin-finned surfaces, PF30-60LP shows the best heat transfer coefficient both in normal gravity and microgravity in the stable nucleate boiling region. Besides, the critical heat flux (CHF) of PF30-60LP is much higher than that of the smooth surfaces, slightly greater than that of PF30-60, but smaller than that of PF50-120 in normal gravity. The CHF of PF30-60LP is observed much smaller than that of PF30-60 and PF50-120, although its CHF is still greater than that of the smooth surfaces under microgravity condition. The mechanism of critical heat flux of pool boiling in microgravity was analyzed. As the heat flux approaches to the CHF, a layer of small bubbles can be observed on the heated surface when the mushroom bubble departs. And the small bubbles will be quickly merged into a large bubble after the mushroom bubble departs. Based on the observed bubble behavior, the CHF model of the micro/nanostructured surface can be used for explaining the origins of difference in CHF among different surfaces. The liquid replenishment of pool boiling under microgravity can be divided into the following two ways: (1) For a smooth surface, the liquid is mainly supplemented by the pre-existing liquid in the gap between the small bubbles. (2) For the microstructured surface, in addition to the pre-existing liquid, the lateral capillary wicking effects generated by the microchannels also play a very important role for liquid supply. The period of coalesced bubble detachment in microgravity is much greater than that in normal gravity due to the lack of buoyancy. The liquid replenishment is significantly obstructed due to the difficulty of bubble departure, which is the main reason for the obvious decrease of CHF in microgravity. Besides, the coalesced bubble departure frequency increases with the increase of heat flux in microgravity, and the increased coalesced bubble departure frequency results in the increase of CHF. As for PF30-60 and PF50-120, with very strong capillary wicking effects which can significantly enhance the lateral liquid supply of the heated surface, their CHFs in microgravity are notably improved compared to that of the smooth surfaces. With regarding to PF30-60LP, the existence of large scale of smooth channels between the micro-pin-fin blocks weakens the capillary wicking effect of the surface. Therefore, its CHF is much smaller than that of PF30-60 and PF50-120. It is suggested that the CHF of pool boiling in microgravity can be improved by the following ways: Using micro/nanostructured surfaces with strong capillary wicking effects, accelerating bubble detachment by external electric field or sound field, using binary azeotrope to enhance the Marangoni convection, enhancing the wettability of liquid working fluid, promoting bubble departure by enhancing the released surface energy during bubble merging, and changing the direction of the Marangoni force of the bubble by local heating method.

microgravity, pool boiling, microstructure, critical heat flux, bubble dynamics, wicking effects

doi: 10.1360/TB-2019-0307