

# 微重力下微结构表面池沸腾气泡动力学研究

张永海<sup>1</sup> 薛艳芳<sup>1</sup> 魏进家<sup>1</sup> 赵建福<sup>2</sup> 龙延<sup>1</sup> 齐宝金<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室(国家微重力实验室), 北京 100190)

**摘要** 针对航天器中电子器件的高效冷却问题, 本文通过干式腐蚀技术在单晶硅表面形成一种新的柱状微结构(PF50-120), 通过控制加热电压方法, 在北京落塔进行了持续 3.6 s 有效微重力时间的过冷 FC-72 池沸腾强化换热实验研究。同时, 通过高速摄像对壁面气泡动力学行为进行观测分析, 结果发现柱状微结构不仅可以有效增加核态沸腾汽化核心数, 而且其独立于重力作用的毛细作用力可以驱动新鲜液体不断向附着在壁面上的大气泡底部供应, 在较高热流密度下, 柱状微结构表面仍然可以维持稳定的核态池沸腾换热, 相比于光滑表面, 强化换热效果显著。

**关键词** 池沸腾; 微重力; 柱状微结构; 强化换热

**中图分类号**: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2013)11-2112-04

## Pool Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics Over Micro-Pin-Finned Surface Under Microgravity

ZHANG Yong-Hai<sup>1</sup> XUE Yan-Fang<sup>1</sup> WEI Jin-Jia<sup>1</sup> ZHAO Jian-Fu<sup>2</sup> LONG Yan<sup>1</sup> QI Bao-Jin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory)/CAS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** For high-efficiently solving the power dissipation problem of electronic components on the spacecraft, experiments were performed using micro-pin-finned structure as heater surface in subcooled nucleate pool boiling of FC-72 under microgravity condition utilizing the drop tower Beijing. Micro-pin-fins with the dimensions of  $50\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$  (thickness  $\times$  height) were fabricated on the surface of square silicon by using the dry etching technique. The micro-pin-finned silicon chip was heated by means of controlling heating voltage for the desired heat flux. At the same time, video of the bubble behavior was obtained by using high speed camera. The results showed that micro-pin-fins can increase the effective nucleate boiling sites number and the heat transfer performance efficiently, which stems from the sufficient supply of fresh liquid to the heater surface due to the capillary force independent of gravity. The steady nucleate pool boiling heat transfer on micro-pin-finned surface can be obtained at high heat fluxes and is greatly enhanced compared with smooth surface in microgravity.

**Key words** pool boiling; microgravity; micro-pin-fins; heat transfer enhancement

## 0 引言

沸腾传热因利用相变潜热而具有很高的传热能力, 在地面和空间科学实验中有显著的应用价值<sup>[1]</sup>。然而, 在微重力状态下浮力作用大大减弱, 导致沸腾换热性能恶化, 临界热流密度降低。从航空热能工程的角度来看, 迫切的需要找出一种强化微重力沸腾换热的方法。目前, 关于微重力条件下强化沸腾换热的研究主要集中在利用外力作用如增加电场作用<sup>[2]</sup>、声场作用<sup>[3]</sup>和利用二元混合物作为工作介

质<sup>[4]</sup>, 产生浓度梯度引起马兰戈尼对流效应进行强化换热等。但是, 通过表面结构进行微重力条件下强化沸腾换热在公开发表文献中尚未见报道。

常重力条件下, 在电子器件表面加工凹坑和喷涂多孔介质等方法可有效提高电子器件的沸腾性能<sup>[5,6]</sup>。但这些微结构表面生成的蘑菇状大气泡在高热流密度时未能有效改善沸腾换热性能。然而, 魏进家等人采用干式腐蚀技术在硅片表面形成了柱状微

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-10-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No.51225601); 国家自然科学基金 (No.10972225); 中国科学院国家微重力重点实验室落塔资助项目

作者简介: 张永海 (1986-), 男, 内蒙古通辽人, 博士生, 主要从事电子器件高效冷却研究。通信作者: 魏进家, 教授, jjwei@mail.xjtu.edu.cn.

结构<sup>[7,8]</sup>, 利用其表面微结构间的毛细作用力可进行高效强化沸腾换热, 在常重力条件下, 临界热流密度相比光滑表面强化 2~3 倍。因此, 根据柱状微结构强化沸腾换热机理, 本文利用干式腐蚀技术在硅片表面 (10 mm×10 mm×0.5 mm) 加工生成边长为 50 μm, 高为 120 μm 的柱状微结构, 在北京中科院国家微重力重点实验室落塔中进行了持续 3.6 s 有效微重力时间的过冷 FC-72 池沸腾实验研究。所得结果与光滑表面的微重力实验结果进行了对比。

## 1 实验装置和参数测量

微重力下池沸腾的实验系统如图 1 所示。主要由液池、测试段、数采系统、图像采集系统、电控制加热系统和稳压系统组成。为了能够清晰地观察沸腾现象, 液池由透明有机玻璃制作, 为了减少空间和重量, 其内部尺寸由原来的 140 mm×140 mm×155 mm<sup>[9]</sup> 改进为 100 mm×100 mm×100 mm 的方形容器, 内部装有约 1 L 含溶解空气的 FC-72 作为实验工质。液池顶部与一个体积为 1 L 的橡皮袋相连以保证液池内部的压力为一个大气压。测试芯片置于方形容器底部, 浸没在 FC-72 液体中。测试芯片背面中心处和距芯片边缘处水平方向 20 mm, 垂直方向 40 mm 处的地方分别布置一个 T 型热电偶进行壁温 ( $T_1$ ) 和液体温度 ( $T_2$ ) 的测量。

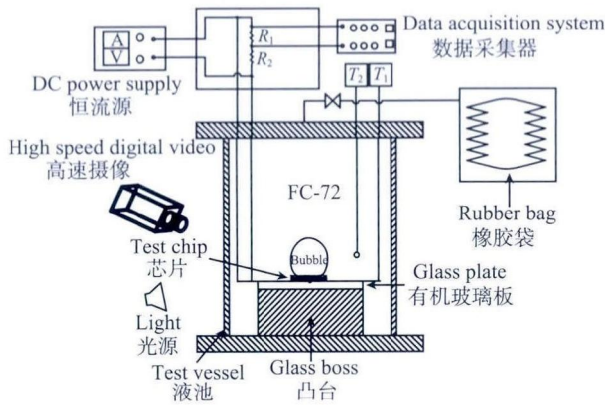


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

测试芯片是一边长为 10 mm, 厚度为 0.5 mm 的正方形掺磷 N 型硅片。关于测试芯片的特性在文献<sup>[8]</sup>中有具体描述。在芯片两侧分别焊接直径为 0.25 mm 的铜导线, 通过直流电源对芯片进行加热, 芯片的热量可由通过芯片的电流和芯片两端的电压得到。为了测得芯片两端电压, 在电路中并联两个串

联电阻 ( $R_1=5\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=100\text{ k}\Omega$ ), 通过数采测得电阻  $R_1$  的压降, 根据标定关系得出测试芯片所加电压。

实验数据通过数据采集器采集并独立存储, 数据采集器的内存为 2 GB, 采集频率为 60 Hz/通道。沸腾现象通过高速摄像机拍摄, 设置 8 s 独立存储, 拍摄速度设置为 500 帧/秒, 曝光时间为 1/2000 s。在落舱释放之前开始预热芯片, 待加热约 2~3 min 之后达到稳定状态, 然后落舱开始释放, 持续时间约 3.6 s 的有效微重力时间, 微重力水平小于  $10^{-2}g_0$  ( $g_0=9.81\text{ m/s}^2$ )。在落舱释放约 0.12 s 之后, 高速摄像机收到外触发信号之后开始记录沸腾现象, 数据采集器与高速摄像机进行同步采集。整个落塔实验过程持续约 90 min, 液体过冷度约为 31 K, 液池内液体压力约 101 kPa。最后, 回收落舱, 取出内存卡, 读出数据, 导出图像, 关闭电源, 实验结束。

## 2 结果分析及讨论

本文分析了三组有代表性的实验结果, 即低热流密度, 中间热流密度和高热流密度区的结果。图 2 显示了 PF50-120 在电流  $I_H=0.28\text{ A}$ , 热流密度  $q=10.06\text{ W/cm}^2$  的工况下, 对应不同重力条件下的沸腾气泡行为。同时与光滑芯片 S 在  $I_H=0.36\text{ A}$ ,  $q=11.59\text{ W/cm}^2$  工况下的气泡行为<sup>[10]</sup>进行了比较。其中图 2 中的不同时间位置对应标注在图 3 的壁温曲线上 (其中,  $t=0\text{ s}$  表示微重力时刻的开始, 负表示常重力, 正表示微重力)。从图 2 可以看出, 在进入微重力条件之前, 无论对于光滑芯片还是柱状微结构, 其表面气泡周期性地产生、成长、脱落。只是对于柱状微结构由于增加了汽化核心数目, 所以壁面气泡数目增多且尺寸减小。然而, 在完全进入微重力条件之后两者的气泡动力行为都发生了明显的改变。由于微重力条件下浮力作用大大减弱, 气泡停留加热壁面时间增长, 气泡尺寸增大, 相互之间会发生合并形成较大二次合并气泡。在相近的热流密度条件下, 光滑表面 S 合并形成的大气泡呈半球形, 随着时间的推移, 一直覆盖在芯片表面的气泡尺寸大大增加, 如图 2(a) 所示。由于气泡所受的向下动态阻力大于气泡所受向上的分离力, 所以合并大气泡很难从加热壁面脱落, 因此阻止了新鲜液体向加热表面地直接供给, 阻碍了微液层蒸发换热, 从而导致芯片壁温逐渐升高, 如图 3(a) 所示。然而, 柱状微结构在低热流密度条件下, 小气泡逐渐长大并合并形成几个较大的二次气泡, 但其尺寸相比于图 2(a) 光滑表面要小得多, 表明柱状微结构换热效果要好于光滑表面。原因在于柱状微结构之间

产生的毛细作用力在浮力逐渐减弱的条件下尤为凸显，通过这种毛细泵吸作用，新鲜液体可以在合并气泡基底不断供给，在微柱之间形成强烈的液体微对流，因此柱状微结构侧表面也成为有效换热表面积，可进行高效蒸发换热。如图 3(b) 所示柱状微结构的壁温在进入微重力后稍有下降，表明相比于常重力条件下柱状微结构表面换热有所强化。

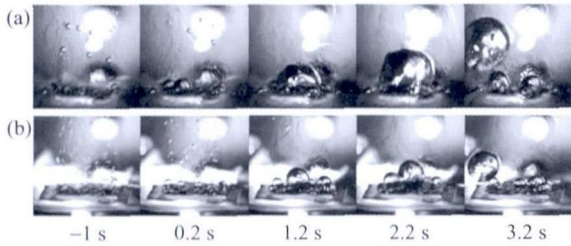


图 2 不同重力条件下气泡行为, (a) Chip S,  $I_H=0.36$  A,  $q=11.59$  W/cm<sup>2</sup>, (b) Chip PF50-120,  $I_H=0.28$  A,  $q=10.06$  W/cm<sup>2</sup>

Fig. 2 Bubble behaviors in normal gravity and microgravity: (a) Chip S,  $I_H=0.36$  A,  $q=11.59$  W/cm<sup>2</sup>, (b) Chip PF50-120,  $I_H=0.28$  A,  $q=10.06$  W/cm<sup>2</sup>

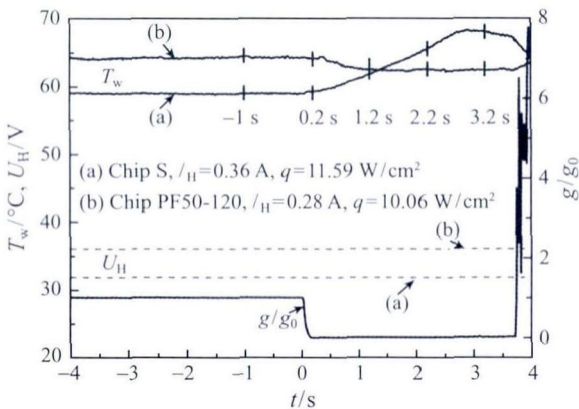


图 3 光滑芯片 S 和柱状微结构 PF50-120 的壁温  $T_w$ , 加热电压  $U_H$  在不同重力条件下随时间  $t$  的变化

Fig. 3 Variations of the heating voltage and the surface temperature in developing and fully developed nucleate boiling regions at different gravity levels

图 4、5 分别显示了中等热流密度条件下沸腾气泡行为和壁温、加热电压及重力加速度随时间变化曲线。图 4 清晰显示了随着热流密度的增加，进入微重力环境之后，气泡发生了非常显著的变化。小气泡逐渐长大并合并成二次气泡，其尺寸相比于低热流密度条件下的气泡要大的多。同时随着原生气泡的长大，不断向上抬高球形二次气泡，并在垂直方向上相互合并。当气泡长大到一定程度开始与加

热面分离，且气泡顶部浸没在过冷液体中，这样沿气泡界面会有很强的马兰戈尼对流作用，使得合并二次气泡最后从加热面脱离。与此同时，新的气泡又开始了周期性的生成，长大，合并和脱离。在此过程中二次气泡基底仍存在强烈的微对流蒸发换热。由图 5 可以看出，柱状微结构壁面温度相比常重力几乎恒定，表明中等热流密度条件下柱状微结构稳定的核态沸腾换热可以在微重力条件下获得。

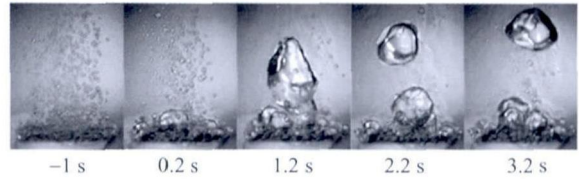


图 4  $U=48$  V, PF50-120 在不同重力条件下的气泡行为  
Fig. 4 Bubble behaviors in normal gravity and microgravity of PF50-120 at  $U=48$  V

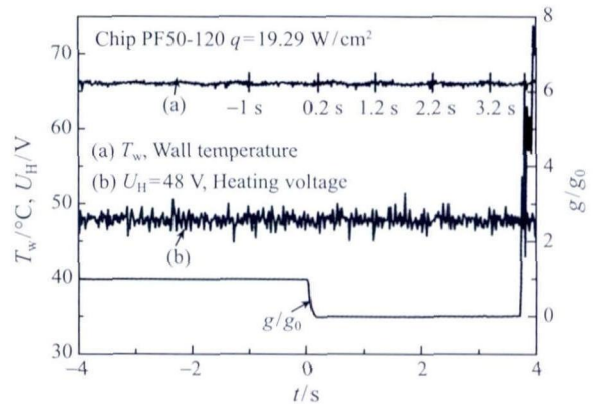


图 5  $U=48$  V, PF50-120 的壁温  $T_w$ , 加热电压  $U_H$  在不同重力条件下随时间  $t$  变化  
Fig. 5 Variations of the surface temperature  $T_w$ , heating voltage  $U_H$  at  $U=48$  V

图 6、7 分别显示了高热流密度区，沸腾气泡行为和壁温、加热电压及重力加速度随时间变化曲线。由图 6 可以发现进入微重力环境之后，高热流密度

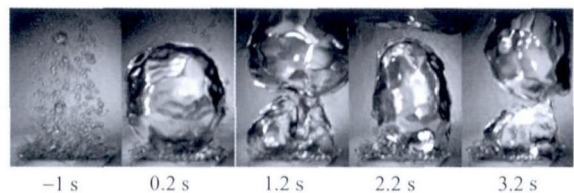


图 6  $U=70$  V, PF50-120 在不同重力条件下的气泡行为  
Fig. 6 Bubble behaviors in normal gravity and microgravity of PF50-120 at  $U=70$  V

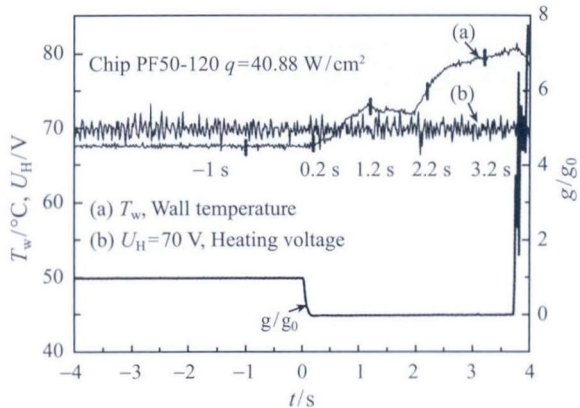


图7  $U=70$  V, PF50-120 的壁温  $T_w$ , 加热电压  $U_H$  在不同重力条件下随时间  $t$  变化

Fig. 7 Variations of the surface temperature  $T_w$ , heating voltage  $U_H$  at  $U=70$  V

下的气泡行为变化非常显著。合并生成的二次球形气泡尺寸在极短的时间内显著增大, 并在垂直方向发生合并形成气柱如图6中1.2 s所示, 最终不断地脱离壁面。马兰戈尼对流作用对气泡的脱离仍然起着重要的作用, 同时垂直方向气泡的合并和拖拽作用也相当明显。由于热流密度很高, 大气泡虽然能够脱离加热面, 但是加热面仍然被迅速形成还没来得及脱离的气泡覆盖着, 如图6中1.2 s、2.2 s和3.2 s时刻所示, 因此热量不能及时被带走, 加热表面壁温逐渐上升, 如图7所示, 表明此热流密度已经接近临界热流密度值。

### 3 结 论

通过分析光滑表面S和柱状微结构PF50-120微重力沸腾气泡行为及其壁温曲线, 得出以下结论:

1) 低热流密度区, 柱状微结构相比于常重力具有显著的强化换热性能。由于柱状微结构之间产生的毛细作用力在浮力逐渐减弱的条件下作用尤为凸显, 驱动新鲜液体不断供给二次合并气泡的基底, 在微柱之间形成强烈的微对流, 进行高效蒸发换热。

2) 微重力条件下中、高热流密度区, 柱状微结构表面利用其独立于重力水平的毛细作用力, 保证了液体微层不断进行蒸发散热, 马兰戈尼对流作用和垂直方向的合并拖拽作用致使合并大气泡在微重

力条件下仍然可以从加热面脱落, 避免了高热流密度区加热面蒸干现象的发生, 仍然可以维持稳定的核态沸腾换热。

3) 在微重力条件下与光滑表面S相比, 柱状微结构PF50-120强化沸腾换热效果显著。

### 参 考 文 献

- [1] Straub Johannes. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity [J]. *Advances in Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- [2] Di Marco Paolo, Grassi Walter. Effects of External Electric Field on Pool Boiling: Comparison of Terrestrial and Microgravity Data in the ARIEL Experiment [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(5): 780-787
- [3] Sitter J S, Snyder T J, Chung J N, et al. Terrestrial and Microgravity Pool Boiling Heat Transfer From a Wire in an Acoustic Field [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(14): 2143-2155
- [4] Ahmed, S, Carey, V P. Effects of Gravity on the Boiling of Binary Fluid Mixtures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(16): 2469-2483
- [5] Anderson T M, Mudawar I. Microelectronic Cooling by Enhanced Pool Boiling of a Dielectric Fluorocarbon Liquid [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1989, 111: 752-759
- [6] Chang J Y, You S M. Heat Orientation Effects on Pool Boiling of Micro-Porous-Enhanced Surfaces in Saturated FC-72 [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1996, 118: 937-943
- [7] WEI Jinjia, Honda H. Effects of fin geometry on Boiling Heat Transfer From Silicon Chips With Micro-Pin-Fins Immersed in FC-72 [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 4059-4070
- [8] WEI Jinjia, Guo Liejin, Honda H. Experimental Study of Boiling Phenomena and Heat Transfer Performances of FC-72 Over Micro-Pin-Finned Silicon Chips [J]. *Heat Mass Transfer*, 2005, 41(8): 744-755
- [9] 薛艳芳, 魏进家, 赵建福, 等. 微重力下光滑表面上FC-72的池沸腾实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(3): 423-426
- [10] XUE Yanfang, Wei Jinjia, Zhao Jianfu, et al. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of FC-72 Over Smooth Surface Under Microgravity [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(3): 423-426
- [10] XUE Yanfang, Zhao Jianfu, Wei Jinjia, et al. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of FC-72 on Smooth Surface Under Microgravity [J]. *Microgravity Science Technology*, 2011, 23: S75-S85