

# 微重力下微结构表面强化沸腾换热研究

薛艳芳<sup>1</sup> 魏进家<sup>1</sup> 赵建福<sup>2</sup> 李 晶<sup>2</sup> 郭 栋<sup>1</sup> 万士昕<sup>2</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** 为了提高航天器中电子器件的冷却效率, 本文利用干式腐蚀方法形成方柱微结构, 通过控制加热电流方法, 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。研究表明: 相比光滑表面, 方柱微结构表面利用其独立于重力水平的毛细作用力, 显著地强化了微重力沸腾换热。

**关键词** 池沸腾; 微重力; 方柱微结构; 毛细作用力; 强化换热

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)03-0441-04

## Boiling Heat Transfer Enhancement by Using Micro-Structure Surface Under Microgravity

XUE Yan-Fang<sup>1</sup> WEI Jin-Jia<sup>1</sup> ZHAO Jian-Fu<sup>2</sup> LI Jing<sup>2</sup> GUO Dong<sup>1</sup> WAN Shi-Xin<sup>2</sup>

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

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

**Abstract** For the purpose of cooling electronic devices in space systems with high heat flux efficiently, experiments of highly subcooled pool boiling of FC-72 on micro-pin-finned surface structure were studied in short-term microgravity utilizing Drop-Tower Beijing with duration of about 3.6 s. The micro-pin-fins were fabricated on the silicon chip surface with the dry etching technique. The silicon chip was heated by means of controlling heating dc current for the desired heat flux. The bubble behavior for a smooth surface was also provided for comparison. The results indicated that the performance of high efficient heat transfer on micro-pin-finned surface is independent of the gravity, which stems from the sufficient supply of fresh liquid to the heater surface due to the capillary forces.

**Key words** pool boiling; microgravity; micro-pin-fin; capillary force; enhanced boiling heat transfer

## 0 引 言

利用沸腾传热进行高效电子器件冷却, 在地面和空间科技实验中具有巨大的应用价值<sup>[1]</sup>。当前, 随着微电子机械加工技术(MEMS)的迅速发展及其在航空、航天和太空领域的应用, 电子器件集成电路不断向高度集成化方向发展, 导致超高热流密度问题, 引起航空航天设备中散热器热量急剧增加。然而, 航天器在空间运行时处于微重力状态, 这将严重影响两相流沸腾换热过程。由于浮力作用在微重力条件下大大减弱, 沸腾气泡停留加热面时间较长, 气泡相互之间会发生合并, 大大阻碍了新鲜液体向加热面的不断供给, 从而导致沸腾换热性能恶化, 临界热流密度降低。那么, 如何高效提高微重力条件下沸腾换热是一个至关重要的问题。

通常, 通过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换热性能<sup>[2-7]</sup>。但由于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。同时, 在微重力条件下, 由于浮力作用大大减弱, 这些蘑菇状大气泡几乎完全覆盖加热表面, 这将进一步降低沸腾换热性能。然而, 采用干式腐蚀方法形成的方柱微结构<sup>[8-11]</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。为此, 依据常重力条件下方柱微结构的强化沸腾换热机理, 本文利用干式腐蚀方法在芯片表面(10 mm×10 mm×0.5 mm)加工生成边长为 50 μm, 高为 60 μm 的方柱微结构简称为 PF50-60, 通过控制加热电流方法, 在中国科学院国家微重力重点实验室落塔中进行了持续 3.6 s 有

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.10972225); 北京中科院国家微重力重点实验室落塔资助项目

作者简介: 薛艳芳(1984-), 女, 山西忻州人, 博士研究生, 主要从事电子器件高效散热技术研究。通信作者: 魏进家, 教授, Email: jjwei@mail.xjtu.edu.cn

效微重力时间,其微重力水平小于  $10^{-2}g_0$  ( $g_0=9.81 \text{ m/s}^2$ ) 的过冷 FC-72 池沸腾实验研究。最后所得结果与光滑表面的微重力实验结果进行了对比。

## 1 实验装置与测试过程

微重力池沸腾的实验所用系统如图 1 所示。主要由液池,测试段,数采接口,图像接口,光源接口,电控制加热接口组成。为了能够清晰地观察沸腾现象,液池由透明有机玻璃制作其内部尺寸为  $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$  的方形容器,内部装有约 3 L 含溶解空气的 FC-72 作为实验工质。为了保证容器内部为一个大气压,其液池与一个 3 L 橡皮袋相连。连接有测试芯片的测试部件至于方形容器底部,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 处的地方分别各自布置一个 T 型热电偶进行壁温 ( $T_1$ ) 和主流液体温度 ( $T_2$ ) 的测量,其热电偶线连接到数采系统中。

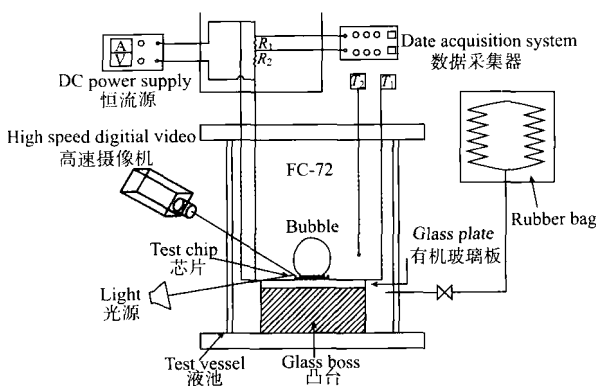


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

测试芯片为一边长为 10 mm,厚度为 0.5 mm 的正方形掺磷 N 型硅片,比阻为  $1.5 \Omega \text{ cm}$ 。为了强化沸腾换热,在芯片的表面采用干式腐蚀方法加工生成边长为  $50 \mu \text{m}$ ,高度为  $60 \mu \text{m}$  的方柱微结构 PF50-60。其芯片的测试段如图 2 所示。在芯片的相对两侧分别焊接 0.25 mm 粗的铜导线,通过直流电源对芯片进行加热,芯片的加热量可由流经芯片的电流及印加在芯片上电压得到。用环氧胶将测试芯片粘附在有机玻璃平板上 ( $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ),测试表面周围的空隙同样用环氧胶填充。这样能够保证只有芯片的上表面进行有效散热。同时,这样的测试部件组合便于芯片的拆卸和更换。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。

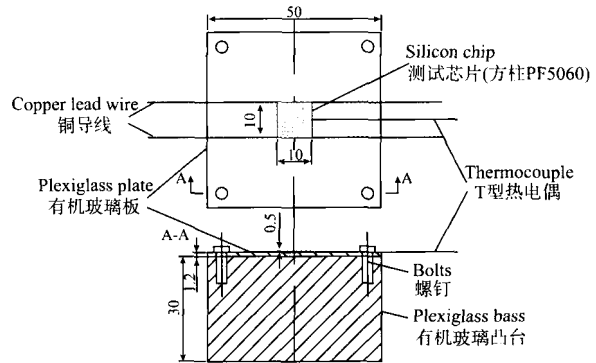


图 2 测试段示意图

Fig. 2 Details test section

实验数据通过数据采集器采集并独立存储,内存为 2 GB,采样频率为 50 Hz/通道。沸腾现象通过高速摄像机与加热面呈  $30^\circ$  的方向拍摄,设置 8 s 独立存储,其中存储空间被外触发信号分成前后各一半,前一半 4 s 记录落舱释放之前气泡行为,后 4 s 用来记录释放后微重力条件下气泡行为。拍摄速度设置为 250 帧/秒,曝光时间为  $1/2000 \text{ s}$ 。实验系统整个硬件装置和操作过程与光滑芯片微重力实验完全相同<sup>[12]</sup>,这样为了能够进行直接对比。整个落塔实验过程持续约 90 min,期间液体过冷度保持约为 41 K,液池内液体压力保持约 102 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 实验结果和讨论

图 3 显示了不同重力条件下发展核态沸腾区,光滑芯片 S 和方柱微结构 PF50-60 的气泡动力行为(其中,  $t=0$  表示微重力时刻的开始,负表示常重力,正表示微重力)。从图 3 可以看出,在进入微重力条件之前,无论对于光滑芯片还是方柱微结构(图 3(a)、(d)  $t=-1 \text{ s}$ ),其表面气泡动力行为周期性地发生气泡产生,成长,脱落,只是对于方柱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,由于常重力条件下浮力对流占主导地位,所以两者都可以维持稳定核态池沸腾换热。然而,在实验完全进入微重力条件之后(如图 3(b)、(e)  $t=1.5 \text{ s}$ ),对于光滑表面和方柱微结构表面两者呈现出完全不同形态的气泡动力行为,并且相比常重力条件气泡动力行为都发生明显的改变。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,对于光滑表面,合并形成的一个大气泡呈半球形态,也称球帽(如图 3(b)),随着时间的推移,一直覆盖在芯片表面的球帽尺寸大大增加(图 3(c)),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,这样阻止了新鲜液体向加热表面的直接供给,同样阻碍了微液层蒸发换热,从而导致芯片壁温逐渐升高,相比常重力条件下光滑芯片表面换热略微降低。但是,对于方柱微结构,在发展核态沸腾区,气泡不断产生,长大,相互之间合并形成几个较大合并二次气泡(图 3(e)),由于方柱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,通过这种毛细泵吸作用,新鲜液体可以在二次合并气泡基底不断供给,在微方柱之间形成强烈的液体微对流,这样方柱侧表面也成为有效换热表面积,可进行高效蒸发换热,相比常重力条件方柱微结构表面换热有所强化(图 3(f))。

图 4 显示了不同重力条件下充分发展核态沸腾区,光滑芯片 S 和方柱微结构 PF50-60 的气泡动力行为。由图 4 清楚地看出,在实验完全进入微重力条件之后,气泡动力行为相比低热流密度区发生了非常显著的变化。首先,随着热流的增加,气泡核化

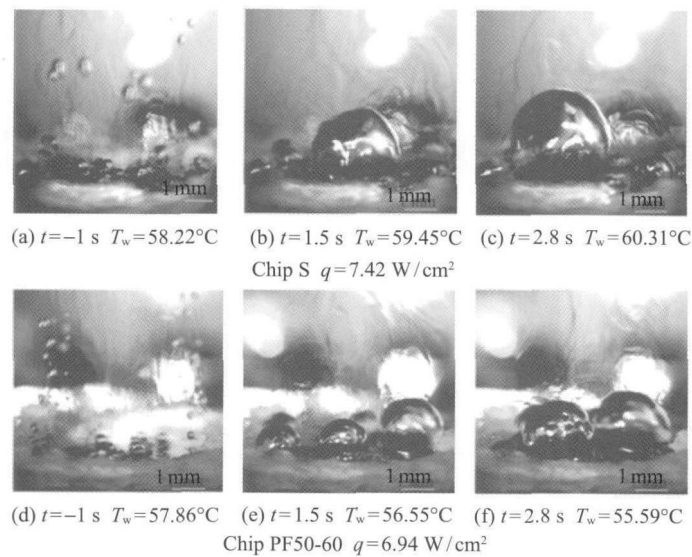


图 3 发展核态沸腾区(低热流)气泡动力行为  
Fig. 3 Bubble dynamics behavior for developing nucleate boiling region

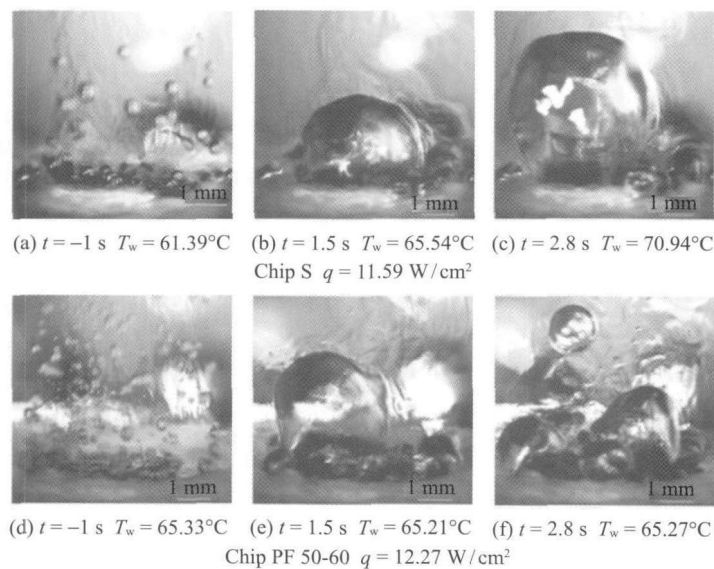


图 4 充分发展核态沸腾区(高热流)气泡动力行为  
Fig. 4 Bubble dynamics behavior for fully developed nucleate boiling region

数目增多,相互之间发生剧烈合并,对于光滑表面 $S$ ,呈半球形态的大气泡很快在加热表面合并形成,并且和加热表面有较大接触面积,几乎覆盖加热表面绝大部分,这样阻止了新鲜液体向加热表面的直接供给,导致加热表面温度明显增加(如图4(b)).然而,方柱微结构表面同样合并形成大气泡,但是加热壁面温度相比常重力几乎维持恒定(如图4(e)),这说明合并大气泡基底存在强烈的蒸发换热,其机理说明示意图如图5所示.那么,随着微重力时间的推进,光滑表面大气泡不断增大,导致壁温大幅上升,底部可能出现局部干斑(如图4(c)).而方柱 PF50-60 由于微结构之间存在液体微对流效应,这样方柱根部产生的汽化核心,随着微液层蒸发,逐渐形成核态气泡并长大,同时在液体微对流作用下,该核态气泡开始向上运动,与方柱表面形成的合并大气泡发生垂直合并,其合并引起的大气泡重心发生振荡和核态气泡向上运动产生的向上推动双重作用,导致方柱微结构加热壁面大气泡发生脱落(如图4(f)),这样加热壁温可以维持恒定,所以对于方柱微结构在微重力条件高热流密度区仍然可以获得稳定的核态沸腾换热。

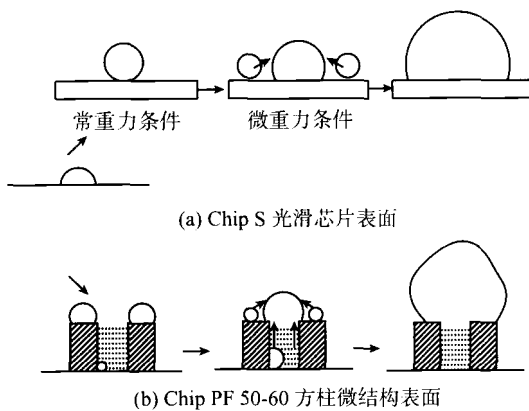


图5 气泡动力学行为机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanism of bubble dynamics behavior

### 3 结 论

总之,相比光滑表面和其他换热表面结构来说,方柱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,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,从而大大增强了微重力条件下沸腾换热.因此,利用方柱微结构表面进行高效强化沸腾换热不仅在地面条件下而且在微重力条件下都具有很大的应用前景和实用价值,同时,可以有助于减轻未来航天器冷却系统的重量。

### 参 考 文 献

- [1] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity [J]. *Adv Heat Trans*, 2001, 35: 57-172
- [2] Anderson T M, Mudawar I. Microelectronic Cooling by Enhanced Pool Boiling of a Dielectric Fluorocarbon Liquid [J]. *ASME J of Heat Transfer*, 1989, 111: 752-759
- [3] You S M, Simon T W, Bar-Cohen A. A Technique for Enhancing Boiling Heat Transfer With Application to Cooling of Electron Equipment [J]. *IEEE Transactions of CHMT*, 1992, 15: 823-831
- [4] O'Connor J P, You S M, Price D C. Thermal Management of High Power Microelectronics Via Immersion Cooling [J]. *IEEE Transactions of CHMT*, 1995, 18: 656-663
- [5] O'Connor J P, You S M. A Painting Technique to Enhance Pool Boiling Heat Transfer in Saturated FC-72 [J]. *ASME J of Heat Transfer*, 1995, 117: 387-393
- [6] CHANG J Y, YOU S M. Heat Orientation Effects on Pool Boiling of Micro-Porous-Enhanced Surfaces in Saturated FC-72 [J]. *ASME J of Heat Transfer*, 1996, 118: 937-943
- [7] CHANG J Y, YOU S M. Enhanced Boiling Heat Transfer From Micro-Porous Surfaces: Effects of a Coating Composition and Method [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 4449-4460
- [8] WEI J J, GUO L J, 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] WEI J J, Honda H. Effects of Fin Geometry on Boiling Heat Transfer From Silicon Chips With Micro-Pin-Fins Immersed in FC-72 [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2003, 46: 4059-4070
- [10] MA A X, WEI J J, YUAN M Z, et al. Enhanced Flow Boiling Heat Transfer of FC-72 on Micro-Pin-Finned Surfaces [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, 52: 2925-2931
- [11] WEI J J, ZHAO J F, YUAN M Z, et al. Boiling Heat Transfer Enhancement by Using Micro-Pin-Finned Surface for Electronics Cooling [J]. *Microgravity Sci Technol*, 2009, 21: S159-S173
- [12] 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]. *工程热物理论*, 2011, 32(3): 423-426

XUE Yanfang, WEI Jinjia, ZHAO Jianfu, et al. Experimental Study of Pool Boiling of FC-72 Over Smooth Surface Under Microgravity [J]. *J Engineering Thermophys*, 2011, 32(3): 423-426