

微重力下光滑表面上 FC-72 的池沸腾实验研究

薛艳芳¹ 魏进家¹ 赵建福² 李 晶² 郭 栋¹ 万士昕²

(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 本文利用小尺度光滑芯片(10 mm×10 mm×0.5 mm), 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池沸腾实验研究。在低热流和中等热流区, 微重力条件下可以观察到稳态或准稳态池沸腾现象, 传热特性基本维持不变; 在中等热流区域, 气泡的横向合并会引起合并后的大气泡表面剧烈震荡, 进而引发合并大气泡从加热表面脱落。在高热流密度区, 微重力条件下加热表面很快形成半球形状并几乎完全覆盖其表面的聚合大气泡; 随后, 由于高过冷液体冷凝作用, 聚合大气泡收缩为半椭球形状, 界面也变得更为光滑, 且完全覆盖了加热表面, 壁温曲线明显升高, 可能提前发生临界热流或转变为膜态沸腾, 导致微重力条件下沸腾换热显著恶化。

关键词 池沸腾; 微重力; 气泡行为; 传热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)03-0423-04

Experimental Study of Pool Boiling of FC-72 Over Smooth Surface Under Microgravity

XUE Yan-Fang¹ WEI Jin-Jia¹ ZHAO Jian-Fu² LI Jing² GUO Dong¹ WAN Shi-Xin²

(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 Experiments of subcooled pool boiling of FC-72 on a small scale smooth silicon chip with the dimensions of 10 mm×10 mm×0.5 mm were studied in short-term microgravity utilizing Drop-Tower Beijing with duration of about 3.6 s. The smooth silicon chip was heated by means of controlling heating current for the desired heat flux. The results indicate that steady or quasi-steady nucleate pool boiling was observed in the experiments in low and intermediate heat flux regions. The performance of boiling heat transfer can be maintained unchanged. It is found that the oscillation due to coalescence of adjacent bubbles is the primary reason of bubbles departure in microgravity condition in intermediate heat flux regime. At high heat fluxes, a large coalesced bubble forms quickly and covers the heater surface completely in microgravity, followed by shrinking to an oblate in shape and smooth in contour due to the highly subcooled condensation. The mean heater surface temperature increases significantly, which indicates the deterioration of boiling heat transfer. It is possible for the occurrence of local dry-out or transition to film boiling at the bottom of the large coalesced bubble.

Key words pool boiling; microgravity; bubble behavior; heat transfer

0 前 言

随着微电子机械加工技术(MEMS)的迅速发展及其在航空, 航天和太空技术上的广泛应用, 电子器件集成电路不断向高度集成化方向发展, 从而导致电子器件的功耗和热流密度急剧增加。目前, 将芯片直接浸在不导电液体中, 利用沸腾相变传热对其进行冷却, 是一种非常有效的冷却方式。

沸腾传热因其传热能力高在地面和空间散热技术中有显著的应用价值^[1]。目前, 国内外学者大多数主要从事于微重力沸腾传热的基础研究, 虽然取得一定的成果, 但是沸腾是一种非常复杂的过程, 存在众多影响因素, 因此在很多基本问题上还没有达成一致性的结论, 甚至存在明显的矛盾。

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50806057; 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: 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。

本文利用我国中科院国家微重力重点实验室提供的百米落塔平台,进行了短时微重力过冷液体 FC-72 的池沸腾实验研究,以能够更深入地揭示微重力池沸腾现象并发现实验规律,获得微重力沸腾过程中气泡行为及传热特性数据,进一步发展和理解沸腾传热特性与理论机理;同时,为航空航天事业的发展提供一定的理论依据和技术指导。

1 实验装置与测试过程

根据落塔中落舱对用户载荷的空间和重量有严格限制以及本文研究目的,我们研制了一套简单控制加热电流的池沸腾实验系统。图 1 为实验装置图。液池是由有机玻璃制作的方形容器,其内部尺寸为 140 mm×140 mm×155 mm,装有约 3 L 含不凝气体的 FC-72 作为实验工质。一个 3 L 橡皮袋与液池相连以保持其内压力为一个大气压。粘附有测试芯片的测试部件置于方形容器底部,浸没在 FC-72 液体中。测试芯片背面中心处和距芯片端部 45 mm 处的地方各布置一个 T 型热电偶进行壁温和沸腾介质主体温度的测量,热电偶线连接到数采器中。

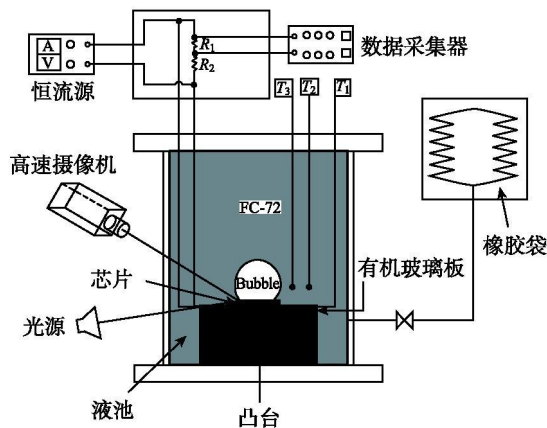


图 1 实验装置示意图

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。关于测试芯片的特性,在文献 [2] 有具体报道。在芯片的相对两侧分别焊接 0.25 mm 粗的铜线,通过直流电源对芯片进行加热,热量可由流经芯片的电流及印加在芯片上电压得到。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。

实验数据通过数采采集并独立存储。沸腾现象通过高速摄像机进行摄像,设置 4 s 独立存储,拍摄

速度设置为 250 帧/秒。在落舱释放之前,光滑芯片进行预加热使得加热表面开始起泡,待加热表面达到稳定状态约 2 min 之后,通过监测录像观察液池温度趋于稳定,然后开始释放落舱进行自由落体运动,持续时间约 3.6 s,微重力水平为 $10^{-2} \sim 10^{-3} g_0$,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工作并记录整个微重力池沸腾过程。同时,数采器采集并记录微重力过程所测数据的变化。在北京中科院国家微重力重点实验室进行了 5 次光滑表面落塔实验,按照不同电流值定义为, SI0.20、SI0.24、SI0.30、SI0.36、SI0.40,具体实验条件见表 1。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Run#	p/kPa	$T_l/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{sub}}/\text{K}$	$q/\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	I/A
SI0.20	102.2	15.0	40.7	3.18	0.20
SI0.24	101.9	14.5	41.1	4.92	0.24
SI0.30	101.7	15.5	40	7.56	0.30
SI0.36	102.6	14.4	41.4	11.16	0.36
SI0.40	102.7	14.9	40.9	14.16	0.40

2 实验结果和讨论

本文主要分析了 3 组有代表性的实验结果,即分别在低热流,中间热流和高热流密度区的结果。图 2、图 3 分别表示光滑芯片表面在低热流密度区 $I=0.20\text{ A}$ 时的沸腾气泡行为和对应的芯片壁温、加热电压和重力加速度随时间变化的原始电压信号。实验工质 FC-72 的过冷度保持约为 41 K。由图 2 可知在进入微重力条件之前气泡不断地生长,脱落,而且维持稳定的核态沸腾状态,这主要是由于常重力条件下存在浮升力,能够使气泡从加热表面脱离而保持。但是,在释放落舱 0.12 s 之后,实验完全进入微重力条件,气泡行为发生明显的改变,尺寸变大,而且从加热表面没有观察到脱离气泡的产生,气泡之间发生少许合并形成相对大的球形合并气泡如图 2(d),并且从加热面中心游离到边缘如图 2(e)。本文所观察的气泡现象与其他研究者如 Lee^[3], Kim^[4], 和 ZHAO^[5] 所报道的现象相一致。图 2(a)~(e) 的位置相应地标在平均壁温曲线如图 3 所示。

值得注意的是,图 3 曲线显示微重力条件下加热表面平均壁温相比常重力条件几乎保持不变,而且不随气泡行为的改变而改变,表明稳态池沸腾现象在微重力条件下可以获得。

图 4、图 5 分别表示对于较高热流,加热电流为 0.36 A 时的实验结果。从图中可以看到,气泡行为

和平均壁温曲线在微重力条件下相比低热流密度区有较大和明显的变化, 而且气泡运动变得非常剧烈, 随后, 相邻气泡不断地和相对较大气泡合并形成一个更大的合并气泡如图 4(c)。而且, 这个大的合并气泡不断捕获它周围的零星小气泡。那么, 这个大的合并气泡被周围气泡从加热表面挤压, 同时由于表面张力作用形状发生变化。最后, 由于大的合并气泡下面的微层蒸发和由合并引发的表面剧烈振荡作用, 使得合并大气泡很快从加热表面脱离, 抑制了加热器表面干斑的发生, 同时周期性地开始了新一轮新的气泡产生, 合并过程。图 5 表示所测变量随时间变化的原始电压信号曲线, 其中壁温曲线上标出对应图 4(a)~(e) 的相应位置。从图中可以看出, 随着时间的增加, 壁温在逐渐升高直到达到最大峰值, 然后逐渐降低, 并同时调整曲线达到准稳态状态, 最后在微重力条件下实现了准稳态核态池沸腾。

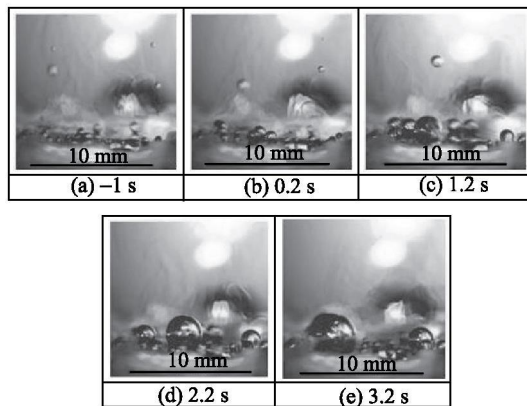


图 2 $I=0.20$ A 时沸腾气泡行为

Fig. 2 Bubble behaviors for $I=0.20$ A

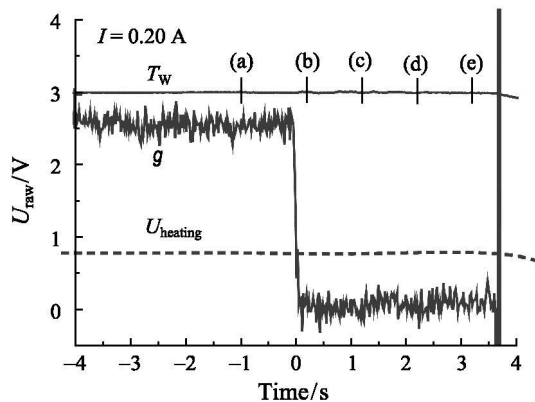


图 3 $I=0.20$ A 时 T_w , $U_{heating}$, g 随 t 变化的 U_{raw} 信号

Fig. 3 The raw voltage signal of the surface temperature, heating voltage, and gravity at $I=0.20$ A

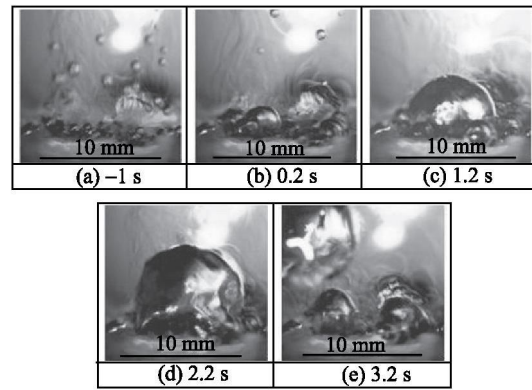


图 4 $I=0.36$ A 时沸腾气泡行为

Fig. 4 Bubble behaviors for $I=0.36$ A

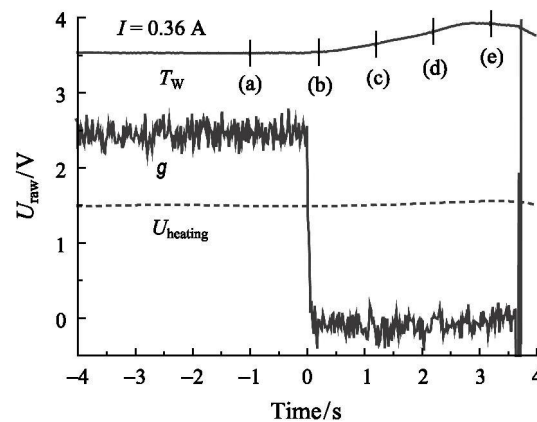


图 5 $I=0.36$ A 时 T_w , $U_{heating}$, g 随 t 变化的 U_{raw} 信号

Fig. 5 The raw voltage signal of the surface temperature, heating voltage, and gravity at $I=0.36$ A

图 6、图 7 分别表示在高热流密度区, 沸腾气泡行为和壁温、加热电压和重力加速度随时间变化曲线。由图 6 清楚地显示了随着热流的增加, 进入微重力环境之后, 气泡经历了非常显著的变化。首先, 气泡保持半球形态和加热表面有较大接触面积, 几乎完全覆盖加热表面, 阻止了液体与芯片表面的直接接触受热, 从而导致芯片温度剧增, 同时引起加热电压急剧上升, 如图 7 所示。另外, 根据气泡录像观察, 合并形成大的气泡能够保持恒定气泡尺寸, 因为气泡顶部的冷凝和底部小气泡的合并达成平衡。其次, 随着加热时间的推移, 气泡的形状逐渐变成椭球型而且界面变得更为光滑, 如图 6(d), 这主要是由于较高液体过冷度导致气泡顶部的冷凝作用加强。本文沸腾机理和 ZHAO 等^[6]报道的相类似, 但是 ZHAO 等发现合并大气泡很难覆盖整个加热器表面。这可能与加热器的尺寸有关系。然而, 随着加热时间的更进一步推移, 半椭球型气泡的尺寸慢慢变大, 而且平均壁温 T_w 逐渐增加。这里需

要强调的是, 由于最终壁面温度超出温度变送器量程, 导致壁面温度曲线在微重力持续时间约 3.34 s 之后被截断, 最后出现如图 7 所示壁温在 (e) 点之后变为恒定直线。但是, 根据微重力条件下加热器平均壁温曲线随时间变化的规律能够提供一些关于临界热流密度 (CHF) 发生的重要信息, 比如壁温由缓慢上升转向快速增长, 表明膜态沸腾的开始, 而恒定不变的增长温度曲线斜率表示完全转变为膜态沸腾。

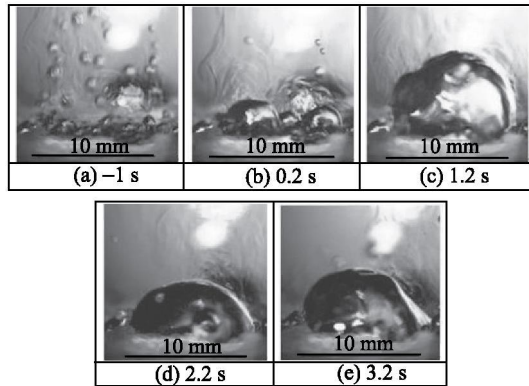


图 6 $I=0.40$ A 时沸腾气泡行为
Fig. 6 Bubble behaviors for $I=0.40$ A

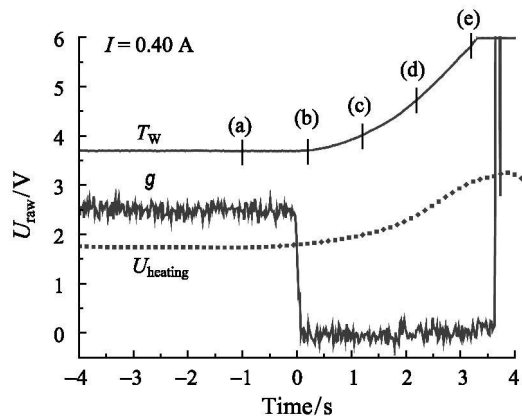


图 7 $I=0.40$ A 时 T_w , U_{heating} , g 随 t 变化的 U_{raw} 信号
Fig. 7 The raw voltage signal of the surface temperature, heating voltage, and gravity at $I=0.40$ A

3 结 论

(1) 在低热流密度区, 微重力条件下气泡尺寸增大, 并没有覆盖加热表面。由于加热表面上相邻气泡之间有较大空间, 所以较小气泡发生合并, 相比常重力条件而言, 传热特性基本保持不变, 可以观察到稳态池沸腾现象。

(2) 随着热流的增加, 微重力条件下气泡数目以及气泡尺寸大幅增加, 相邻气泡不断地进行合并。由于气泡横向合并会引起合并后的大气泡表面剧烈震荡, 进而引发合并大气泡从加热表面脱落。因此与常重力条件相比, 传热略有恶化。但是, 壁温和加热电压最后在微重力条件下趋于稳定, 所以准稳态池沸腾现象可以获得。

(3) 在微重力条件下的高热流密度区, 加热表面很快形成大的合并气泡并且完全覆盖加热表面。由于高过冷度冷凝作用, 合并大气泡随后缩小成半椭球形状, 而且界面变得更为光滑。与常重力条件相比, 微重力条件下壁温明显增加, 表明沸腾换热恶化, 可能提前发生临界热流或转变为膜态沸腾。

参 考 文 献

- [1] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity [J]. *Adv. Heat Trans.*, 2001, 35: 57-172
- [2] 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: 744-755
- [3] Lee H S, Merte H, Chiamonte F M. Pool Boiling Curve in Microgravity [J]. *J. thermophys. Heat Transfer*, 1997, 11(2): 216-222
- [4] Kim J, Benton J, Wisniewski D. Pool Boiling Heat Transfer on Small Heaters: Effect of Gravity and Subcooling [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 3919-3932
- [5] ZHAO Jianfu, LIU Gang, WAN Shixin, et al. Bubble Dynamics in Nucleate Pool Boiling on Thin Wires in Microgravity [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2008, 20: 81-89
- [6] ZHAO Jianfu, LI Jing, YAN Na, et al. Bubble Behavior and Heat Transfer in Quasi-Steady Pool Boiling in Microgravit [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2009, 21: S175-S183