

微重力池沸腾实验研究

赵建福 万士昕 刘刚 闫娜

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 本文利用我国第 22 颗返回式卫星开展了微重力条件下过冷池沸腾传热实验研究。实验中采用桥式自反馈电路控制加热面温度, 加热元件为长 30 mm、直径 60 μm 的铂丝, 实验工质为 0.1 MPa 压力下过冷度为 26°C 的 R113。实验发现, 沸腾起始温度不受重力水平影响, 而微重力核态沸腾传热略有增强, 汽泡脱落行为也有着不同的特征。

关键词 微重力; 池沸腾; 核态沸腾; 过冷度

中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2007)03-0454-03

EXPERIMENTAL STUDY ON POOL BOILING IN MICROGRAVITY

ZHAO Jian-Fu WAN Shi-Xin LIU Gang YAN Na

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A series of experiments on subcooled pool boiling in microgravity have been performed aboard the 22nd Chinese recoverable satellite. The temperature of heater is controlled using a bridge feedback electric circuit. A platinum wire of 60 μm in diameter and 30 mm in length was simultaneously used as heaters and thermometers. The fluid was R113 at 0.1 MPa and subcooled by 26°C nominally for all cases. It's not found any change of the temperature of the onset of boiling in different gravity conditions. For nucleate boiling, the heat transfer is slightly enhanced, while the bubble patterns have different characteristics in microgravity.

Key words microgravity; pool boiling; nucleate boiling; subcooling

1 引言

沸腾传热因其高传热能力在地面和空间科技实践中有着巨大的应用价值。航天技术的发展, 大功率、高集成度设备的研制日益受到重视, 也因此使微重力沸腾传热研究成为微重力科学前沿。但是, 微重力实验受到尺寸、功耗、质量及实验持续时间等诸多严格的限制, 目前相关研究还非常有限^[1,2]。

沸腾现象中存在众多影响因素, 如成核过程、汽泡生长、加热面处固-液-汽三相间的相互作用、汽-液界面处的蒸发过程以及使蒸汽和热液体远离加热界面的输运过程等。上述因素间还存在着错综复杂的相互作用, 这使得沸腾传热过程异常复杂。迄今为止, 从物理角度对沸腾过程的研究要远远少于以工程应用为目的的经验性研究, 其结果为众多具有可调参数的经验关联式, 它们强烈依赖于相应经验基础, 对超出其经验之外的情形, 难以保证预测精度, 甚至连变化趋势都不能正确预言。

常重力环境中气、液两相间密度差引起的浮力作用, 是影响池沸腾传热的主要因素。在大部分现有模型和经验关联式中, 重力被视为描述池沸腾传热重要的参量。然而, 由于绝大部分实验来自地面常重力环境, 其对重力效应的模化是否合理难以判断。微重力实验提供了一个将重力因素和非重力因素分开的重要手段, 十分便于对重力效应的深入研究。此外, 微重力环境可以极大地抑制浮力对流与相滑移现象, 凸显加热面附近相变过程在沸腾传热中的作用, 有助于揭示沸腾传热的基本机理。

本文研制了一套控温池沸腾实验设备, 利用我国第 22 颗返回式卫星, 实验研究了丝状加热表面微重力池沸腾传热现象。

2 实验设备

实验采用控制加热面温度的方式, 以避免空间实验中加热元件的烧毁。为此我们研制了一套控温

收稿日期: 2006-12-13; 修订日期: 2007-03-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程 (No.KJ CX2-SW-L05); 国家自然科学基金 (No.10432060) 资助项目

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要从事微重力气液两相流动与传热的研究。

池沸腾设备^[3], 这里仅介绍与卫星搭载实验相关的部分内容。

加热元件为长 30 mm、直径 60 μm 的铂丝, 它同时也作为测量自身表面温度的电阻温度计。铂丝的两端焊接在两根直径 3 mm 的铜柱电极上。采用一个与热线风速仪恒温工作原理类似的桥式自反馈回路来调节和控制热丝电阻(即热丝的壁面温度)。实验过程中, 热丝温度按“上升-下降-上升”方式在 16 个状态点循环变化, 而为了得到稳定的池沸腾过程, 在每个状态持续时间均为 30 s。

液池内部充满约 700 ml 的 R113 液体。两个精度为 0.25 $^{\circ}\text{C}$ 、量程为 (0~60) $^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻温度计置于液池内, 用来测量液池内液体的平均温度。液池内部的绝对压力由一量程为 (0~0.2) MPa 的压力传感器测得, 其精度为满量程的 0.25%。两个 LED(发光二极管) 通过液池底部的光源窗为液池内部提供充足的照明。实验过程中热丝表面汽泡形态通过 CCD 并由一台小型摄像机以 25 帧/秒的速度记录。铂丝和参考电阻两端的电压(后者用来计算通过铂丝的电流)及压力、温度等信号均由公用平台采集并存储下来, 采样频率为 20 Hz(卫星搭载实验)或 1 kHz(地面对比实验)。分析表明, 利用地面高频采样数据可以大大减小热丝温度的测量不确定度(不超过 3 $^{\circ}\text{C}$); 而热流密度的不确定度基本不受采样频率的影响, 空间和地面实验中分别不超过 24 kW/m² 和 21 kW/m²。

3 实验结果

表 1 列出了空间微重力实验和飞行前、后地面常重力对比实验所对应的实验条件。

表 1 飞行前、后地面对比及空间实验条件

	压力 (kPa)	液体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	过冷度 ($^{\circ}\text{C}$)
飞行前地面对比 实验 (BFE)	101.2	22.1	25.5
空间实验 (SFE)	101.0	21.3	26.2
飞行后地面对比 实验 (AFE)	101.4	20.5	27.1

图 1 将单相传热阶段实验数据与 Kuehn-Goldstein 关联式进行了比较, 地面常重力环境中实验结果与 Kuehn-Goldstein 关联式符合甚好, 说明实验装置及测试结果是可靠的; 而在空间实验中, Kuehn-Goldstein 关联式预测残余重力水平为 $10^{-3} \sim 10^{-5}g$ (g 为地面重力加速度), 这与卫星总体

给出的结果相符。

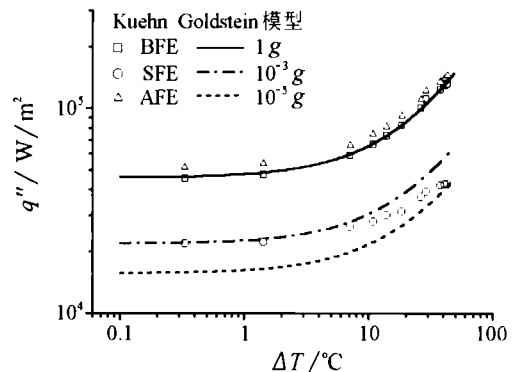


图 1 单相传热

在空间实验和地面对比实验中, 沸腾起始点均位于第 16 状态点, 此时热丝的壁面过热度为 83.2 $^{\circ}\text{C}$, 且初始沸腾状态为双膜态过渡沸腾。这表明沸腾起始温度基本上不受重力水平的影响。这与 Straub^[1]对控制热流密度的实验数据的分析结果相同。

图 2 给出了空间实验与飞行前、后地面对比实验所获得的核态沸腾实验结果(图注中序号 2、3 分别表示降温与第二次升温过程), 同时与 Straub^[1]、Di Marco 和 Grassi^[5] 相近条件下的微重力核态沸腾实验结果作了比较。如图所示, 本文结果与 Straub 结果 (0.2 mm 铂丝, R113 液体, 过冷度 22 $^{\circ}\text{C}$) 符合较好, 但高于 Di Marco 和 Grassi 的结果 (0.2 mm 铂丝, R113 液体, 近饱和)。不过, 在后一情形中, 二者在充分发展的核态沸腾传热曲线有着类似的变化趋势。与地面实验相比, 空间实验的热流密度均高于地面结果。此外, 空间实验与地面实验相同, 均出现升温曲线低于降温曲线的现象, 热丝表面汽泡形态的差异是产生此现象的原因。

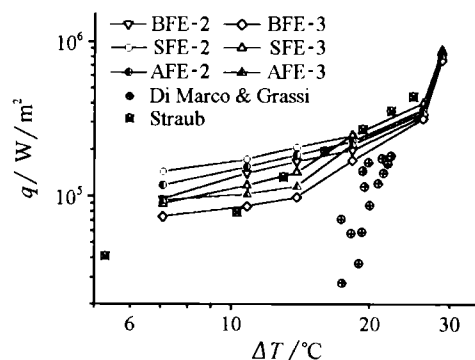


图 2 核态沸腾实验数据

图 3 表明在充分发展的核态沸腾阶段, 汽泡合并引起的振荡是汽泡脱落的主要方式。

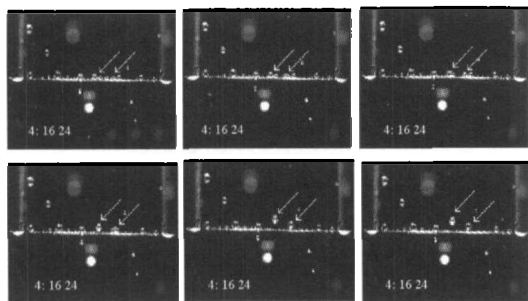


图3 多个汽泡间的合并、振荡、脱落

对观测面内热丝中部的孤立汽泡(图4)特征进行统计,发现在空间微重力环境中汽泡的脱落与常重力时有明显不同(图5):较小的汽泡(直径约为0.3~1.0 mm)不断从铂丝表面脱落并缓慢远离加热表面;中等尺寸汽泡(直径约为3.5~6.5 mm)则粘

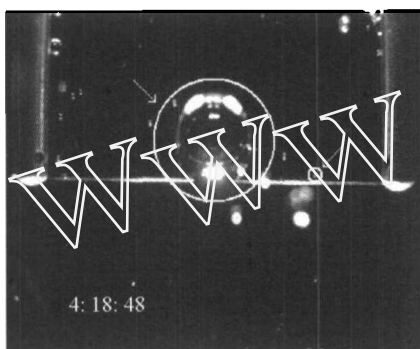


图4 孤立汽泡区的汽泡状态

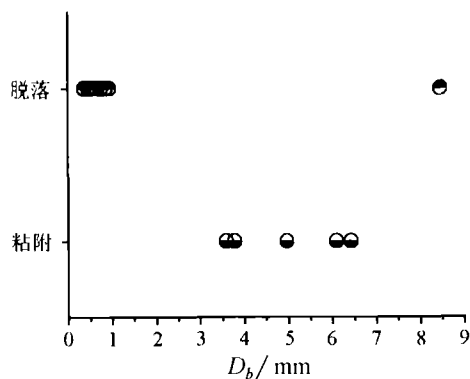


图5 汽泡脱落直径

附在铂丝上做横向振动,并会不断合并所碰到的小汽泡;铂丝表面在沸腾起始时形成的一个大汽泡一直粘附在加热丝上,但它并未包裹细丝,随着热流增大,该汽泡不断长大(其间也吸收底部其他小汽泡),最终在其直径达到约8.5 mm时从丝上脱落。这样,可以将汽泡按直径划分为4个区域:小于0.3 mm,粘附汽泡;0.3 mm~3.5 mm,脱落汽泡;3.5 mm~8.5 mm,粘附汽泡;大于8.5 mm,脱落汽泡。详细分析见文献[4]。

4 结 论

利用我国第二十二颗返回式卫星进行了微重力过冷池沸腾空间搭载实验,通过对单相传热数据的分析,不仅检验了研制装置尤其是数据测试系统的可靠性,而且确定了星上残余重力水平($10^{-3} \sim 10^{-5} g$)。实验发现沸腾起始温度基本上不受重力水平的影响,而核态沸腾在微重力时略有强化。在微重力环境中,汽泡合并振荡是充分发展的核态沸腾阶段汽泡脱落的主要方式;而在孤立汽泡区,汽泡脱落行为则有着与常重力时迥然不同的特征。

参 考 文 献

- [1] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- [2] Di Marco P, Grassi W. Motivation and Results of a Long-term Research on Pool Boiling Heat Transfer in Low Gravity. *Int. J. Therm. Sci.*, 2002, 41(7): 567-585
- [3] Wan S X, Zhao J F, Liu G, et al. TCPB Device: Description and Preliminary Ground Experimental Results. In: 54th Int. Astronautical Cong., Bremen, Germany, 2003
- [4] 刘刚, 赵建福, 万士昕, 等. 微重力池沸腾现象中的汽泡脱落直径. 见: 中国工程热物理学会多相流学术年会. 重庆, 2006. 124-129
- [5] Di Marco P, Grassi W. Nucleate Pool Boiling in the Presence of an Electric Field and in a Variable Gravity Field: Results of Experiments in Parabolic Flight. In: *Proc. of Eurotherm Seminar* (ed.: D Gorenflo, D Kenning, C Marvillet), Paderborn, 1996, 255-264