

微重力池沸腾现象中的气泡行为特性

李晶¹ 赵建福¹ 闫娜¹ 李震东¹ 大田治彦²

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080; 2. 日本九州大学航空宇宙工学系, 福岡 812-8581)

摘要 本文对准稳态加热条件下的微重力核态池沸腾中的气泡行为特征进行了实验研究, 分析了初始核化过程、气泡数密度、气泡尺寸及其运动速度等的变化趋势, 探讨了过冷度及加热历史等因素对相关特性的影响。实验发现: 微重力条件下气泡生成后沿加热面不停地移动; 原生气泡会聚合形成大气泡, 大气泡不断捕掠小气泡而长大, 直到大气泡覆盖整个加热面; 气泡生长速度随过冷度增加而变慢。

关键词 微重力; 核态池沸腾; 气泡; 核化
中图分类号: TK124 **文献标识码**: **文章编号**: 0253-231X(2008)03-0439-04

BUBBLE BEHAVIOR IN MICROGRAVITY POOL BOILING

LI Jing¹ ZHAO Jian-Fu¹ YAN Na¹ LI Zhen-Dong¹ H Ohta²

(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Department of Aeronautics & Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan)

Abstract In the present paper, the bubble behavior in subcooled pool boiling of FC-72 on a plain plate used a quasi-steady heating method has been studied experimentally in microgravity aboard the Chinese recoverable satellite SJ-8. Based on the analyses of the number density, size and velocity of bubbles, and the nucleation process, the influence of subcooling and heating history are discussed. It's found that bubbles glide on the heating surface throughout the boiling process. They collide with each other and coalesce to form the bigger coalesced bubble. The bubble growing velocity decreases with the increase of subcooling.

Key words microgravity; nucleate pool boiling; bubble; nucleation

0 引言

沸腾传热是一种高强度的热传递方式, 在日常生活和各种工程技术领域中经常会遇到, 尤其是在航天事业飞速发展的今天, 为了更有效地节省航天器的重量、空间和能量, 就需要在有限的空间中释放大量的热量。另一方面, 由于空间微重力环境能削弱甚至完全抑制重力场中因两相密度的巨大差异而产生的浮力效应, 从而凸显沸腾过程中固-液-汽界面处相变、流动与热传递过程, 其研究对传热学自身发展也具有重要学术意义。因此, 微重力沸腾传热研究日益受到重视, 成为微重力科学和传热学研究的前沿和热点之一, 其中, 随着研究的深入和测试技术的进步, 微重力条件下的气泡动力学特征更是目前研究的重点内容之一^[1~4]。

利用实践 8 号卫星搭载实验机会, 我们对微重

力条件下不同压力、过冷度池沸腾传热现象进行了实验研究, 本文仅就空间实验中的气泡行为特性进行分析, 以探讨相关因素对微重力核态池沸腾传热的影响, 至于传热性能的分析则另文发表^[5]。

1 实验装置

根据卫星搭载条件及研究目标, 我们研制了一套控制加热功率的池沸腾实验设备。实验液池为内部尺寸约 $\phi 116 \times 200$ mm 的圆筒, 内装约 1.5 升去除了不凝气体的 FC-72 作为实验工质。液池一端安装有波纹管稳压器, 加热元件则安装在液池另一端。整个设备密封, 初始压力约为 0.1 MPa, 通过电磁阀控制的泄压孔与半个大气压力的卫星舱内环境相通, 以实现压力的调整。液体温度的调节则依靠 50 W 预热器实现, 预热过程采用 PID 自动控制, 并在每

收稿日期: 2007-10-15; 修订日期: 2008-01-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程 (No.KACX2-SW-02-03); 国家自然科学基金资助项目 (No.10432060)

作者简介: 李晶 (1985-), 女, 吉林公主岭人, 硕士研究生, 主要从事微重力沸腾传热的研究。

次沸腾实验前均留有 30 min 的稳定时间, 以保证液池内部温度分布均匀。

加热元件为嵌于聚四氟基座中的 Al_2O_3 陶瓷基片, 尺寸为 $28 \times 20 \times 1$ mm, 有效加热区域为面积为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的蛇形多层合金薄膜 (Cu、Au、Ni、Cr, 总厚度约 $10 \mu\text{m}$), 标称电阻为 6Ω 。实验中同时又作为测量加热表面温度元件。

加热方式采用控制加热电压指数增加的准稳态加热方式:

$$U = U_0 e^{\tau/\tau_0} \quad (i)$$

其中, τ 代表加热时间, 参数 τ_0 设为 30 s, 满足准稳态加热条件^[6]。

实验数据由内部控制器采集并打包传输给主控制器。加热器两端电压和电流的采样频率选为 400 Hz, 在内部控制器内利用 4 点平均的方法, 来消除干扰噪声, 最后输出结果为 100 Hz。其他参量的采样与传输频率均为 1 Hz。实验图像通过 1 路 CCD 沿与加热面呈 45° 的方向拍摄, 并进行数字化及压缩后, 通过 RS-422 口传输给主控制器存储。

2 实验结果与分析

按最初飞行控制计划, 池沸腾传热空间实验分为两个阶段, 每个阶段包括若干由预热、稳定及沸腾等部分组成的不同组次的实验。第一阶段实验在设备内部初始压力条件下进行, 即常压沸腾实验 (5 次)。间隔 1 天或更长长时间后, 设备第二次加电, 首先打开排气电磁阀, 向卫星舱内排气, 使设备内部压力与卫星舱内压力 ($40 \sim 60 \text{ kPa}$) 相同, 因此, 第二阶段为低压实验 (2 次)。实际飞行实验过程中, 又追加了 1 组实验 (5 次), 同样为低压实验。这样, 空间飞行实验共完成三个阶段 12 次实验。

然而, 由于加热片在第三阶段第 1 次加热过程后期烧毁, 实际有效实验数据只有 8 次, 具体的实验条件如图 1 所示。不过, 由于图像系统问题, 第二、三阶段实验图像模糊, 本文仅分析第一阶段的实验结果 (编号为 I-1 至 I-5)。

由于接收到的图像为专用压缩数据, 分析前首先需利用专用软件, 将空间实验过程中延时上传的压缩图像数据转换成一般图像处理软件可识别的视频数据, 再利用 VirtualDub 软件得到需要的图片数据库。基于本文目标和分辨率的客观限制, 这里只对核态沸腾时气泡演化过程进行了分析, 每组数据均从第一个气泡产生开始, 分别采集了 1250 张、1250 张、1000 张、800 张、850 张图片。

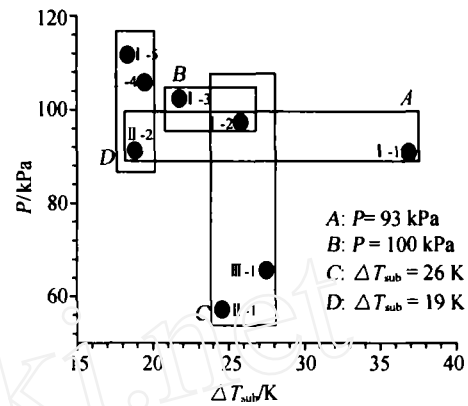


图 1 空间实验条件

Fig.1 Experimental conditions in space flight

由于残余重力的存在, 空间实验中可能仍存在较弱的自然对流。单相传热终止于首个气泡出现之时。在第一阶段 5 次实验中, 首个气泡出现时刻分别是: 20.89 s, 7.68 s, 7.12 s, 3.54 s 和 3.84 s。此外, 不同实验初始核化过程有着明显差异 (图 2): 实验 I-1 中初始核化过程是突然、爆发型的 (图 2(a)), 相应地, 传热曲线显示出明显的温度过冲现象。后续实验没有出现爆沸现象, 首个气泡出现后甚至有明显的停顿, 随后才又缓慢地长大 (图 2(b))。相应地, 沸腾传热曲线中没有明显的壁温过冲现象。

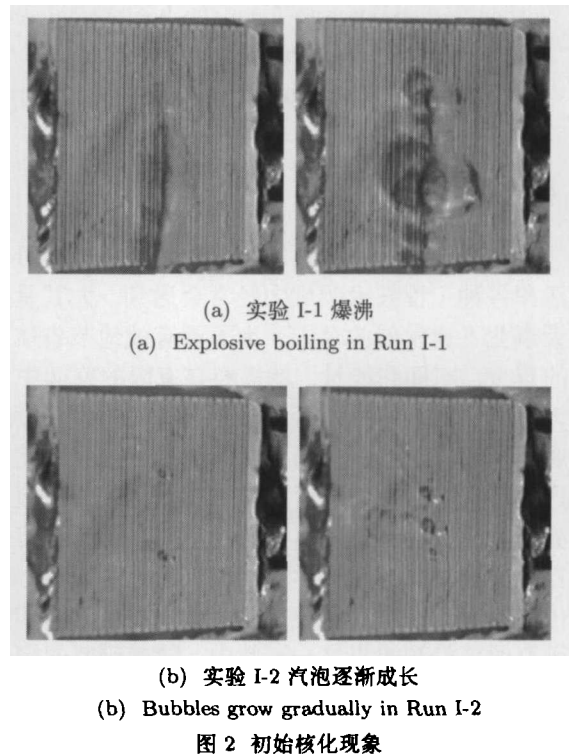


图 2 初始核化现象

Fig.2 Onset of nucleation in different runs

微重力下的气泡动力学特征与常重力相比有显著差异, 气泡生成后难以从加热面脱落, 而是在加热

面上不停的移动; 原生汽泡会聚合并形成大汽泡, 大汽泡不断捕掠小汽泡而长大, 直到大汽泡覆盖整个加热面。

图 3 给出了实验 I-1 和 I-2 中汽泡数密度的变化, 为对比起见, 图中还给出了壁面温度的变化情况。图 4 则比较了 5 次实验过程中汽泡数密度的变化 (为清晰起见, 从实验 I-4 至 I-1 依次上移了 $2.5/\text{cm}^2$)。需要说明的是, 由于只有一个观测方向, 汽泡合形成的大的聚合汽泡会遮挡对原生小汽泡的观测, 因此, 中后期的实际数据可能会比图中所示大。

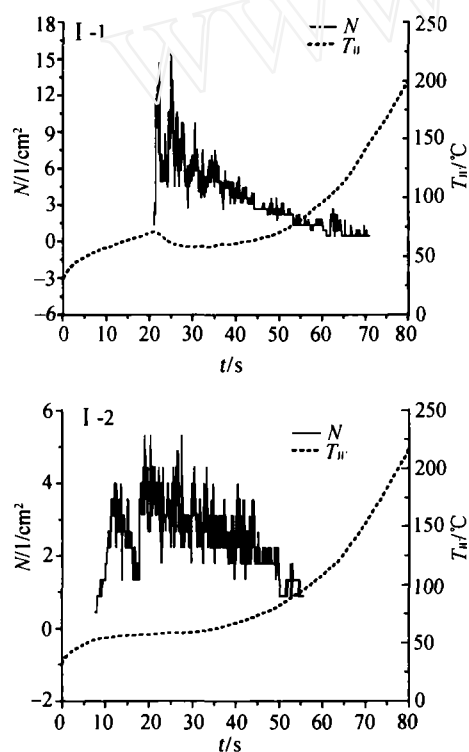


图 3 典型实验中的汽泡数密度变化

Fig.3 Number density of bubble in a typical run

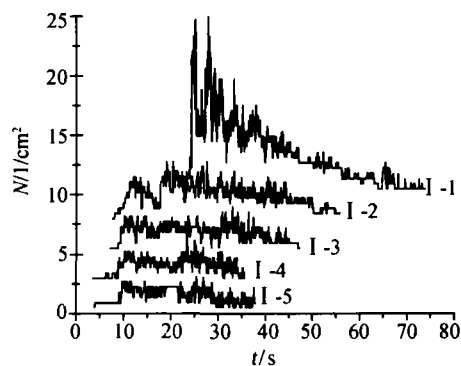


图 4 不同实验中的汽泡数密度比较

Fig.4 Comparison of bubble number density in different runs

从图 4 中可以观察到实验 I-1 中汽泡数密度明显高于其他 4 次实验, 但首个汽泡出现的时间显著滞后于其他实验, 而且越靠后的实验首个汽泡出现时间越早。这表明在前次沸腾实验之后, 加热表面上某些缺陷处可能更易于存留汽体, 从而使得该位置更易于活化, 生成汽泡所需的热量降低, 导致沸腾在较低的壁面过热度下即已开始。较早活化的核化点会抑制其他核化点地活化, 使得后续实验中的汽泡数密度有所下降。这在实验 I-1 和 I-2 间反映最为明显, 这可以由如下事实予以说明: 实验 I-1 前加热面长期浸润在液体工质中, 并经历卫星发射过程中的强烈震动与冲击作用, 加热面缺陷位置将极难存留汽体, 一方面核化点的活化过程变难, 另一方面, 相邻核化点间的差异减小, 在适当条件下会一起活化。而实验 I-2 与实验 I-1 仅有约 1 小时 50 分钟的间隔, 残留在某些孔穴中的汽体难以清除, 导致该核化点活化难度大大降低, 也使得与其相邻的核化点会受到其明显的抑制作用。

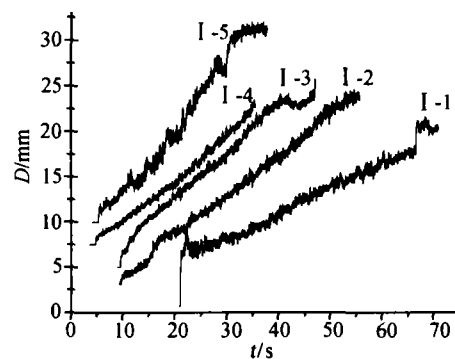


图 5 聚合汽泡的生长速度比较

Fig.5 Comparison of growth rate of coalesced bubbles

图 5 为 5 次实验中持续时间最长的汽泡 (即聚合汽泡) 直径变化的比较图 (同样, 为清晰起见, 从实验 I-2 至 I-5 依次上移了 2.5 mm)。图中曲线斜率对应着汽泡的生长速度。该图明显表明: 随着过冷度的增大, 大汽泡的生长速度越慢, 相应地, 核态池沸腾的持续时间将会得到延长。

实验中还观察到, 原生小汽泡的尺寸一般不超过 3~5 mm, 其独立生存时间一般不超过 10 s, 限于篇幅, 这里不再赘述。

聚合汽泡和原生汽泡沿加热面运动速度的典型变化曲线分别显示于图 6(a)、(b) 中 (实验 I-3), 图 6(b) 中标注时间对应于该原生汽泡的生成时刻。显然, 大汽泡的运动速度较缓慢, 且速度波动也较小; 而小汽泡运动速度接近 10 mm/s, 最高可达 20 mm/s, 明显比大汽泡运动速度大, 且波动幅度很大, 这也

表明小气泡更易于受周围扰动的影响。小气泡运动速度越快,就会加速气泡之间的合并,也会加大聚合气泡的生长速度,缩短核态沸腾时间。

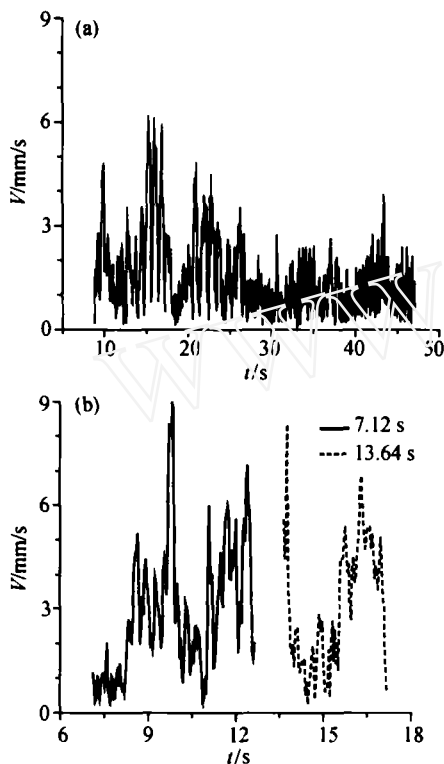


图6 聚合气泡与原生气泡的运动速度

Fig.6 Comparison between velocities of initial and coalesced bubbles

3 结 论

本文对准稳态加热条件下的微重力核态池沸腾中的气泡行为特征进行了实验研究,分析了初始核化过程、气泡数密度、气泡尺寸及其运动速度等的变化趋势,探讨了过冷度及加热历史等因素对相关特性的影响。

根据初始核化过程及气泡数密度变化趋势可以推测,每次实验后加热表面的某些空穴处极有可能残存有微气泡,使该点易于活化,从而使得起始沸腾很容易在较低的壁面过热度下即已开始,并对临近核化点地活化起到抑制作用。因此,首个气泡的出现时刻不断提前,气泡数密度也呈减小趋势。

微重力下的气泡动力学特征与常重力相比有显著差异,气泡生成后难以从加热面脱落,而是在加热面上不停地移动;原生气泡会聚合并形成大气泡,大气泡不断捕掠小气泡而长大,直到大气泡覆盖整个加热面,从而结束核态沸腾阶段进入膜态沸腾。

由气泡尺寸变化的比较可知,随着过冷度的增大,气泡的生长速度变缓,这源于气泡顶端接触过冷液体而不断冷凝的速度加大,有利于核态沸腾状态的延续。

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. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: European research. *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20: 252-263
- [3] Kim J. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: US Research. *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20: 264-271
- [4] Ohta H. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: Japanese Research. *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20: 272-285
- [5] 赵建福, 闫娜, 李震东, 等. 微重力池沸腾传热实验研究. 见: 2007年中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集(上册). 广州, 2007. 372-376
ZHAO Jianfu, YAN Na, LI Zhendong, et al. Experimental Study of Pool Boiling Heat Transfer in Microgravity. In: *Proceeding of Chinese Society of Engineering Thermophysics on Heat and Mass Transfer*. Guangzhou, 2007. 372-376
- [6] Johnson H.A. Transient boiling heat transfer to water. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1971, 14: 67-82