0254-6124/2009/29(1)-145-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhao Jianfu, Hu Wenrui. Study on pool boiling heat transfer in microgravity. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(1): 145~149

微重力池沸腾传热研究*

赵建福 胡文瑞

(中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100190)

摘 要 对利用中国返回式卫星搭载开展的两次微重力池沸腾空间实验及地基常重力和落塔短时微重力实验的结果进行了评述. 研究发现微重力时丝状加热器沸腾传热会略有强化, 而平板加热器则在高热流条件下明显恶化. 微重力时, 气泡脱落前存在沿加热面的横向运动, 加剧了相邻气泡间的合并, 合并气泡会在其表面振荡作用下从加热面脱落. Marangoni 效应对于微重力气泡行为有重要影响.

关键词 微重力; 池沸腾; 传热; 气泡行为; 空间实验

中图法分类号 V 524

Study on Pool Boiling Heat Transfer in Microgravity

ZHAO Jianfu HU Wenrui

(*National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Two experiments on pool boiling in microgravity have been conducted aboard the Chinese recoverable satellites. Ground-based experiments have also been performed both in normal gravity and in short-term microgravity in the Drop Tower Beijing. A thin platinum wire and a plain plate were used as heaters, respectively. Steady boiling of R113 on the wire was studied with a temperature-controlled heating method, while quasi-steady boiling of FC-72 on the plate was investigated with an exponentially increasing heating voltage. In the first case, slight enhancement of heat transfer is observed in microgravity, while diminution is evident for high heat flux in the second one. Lateral motions of bubbles on the heaters are observed before their departure in microgravity. The surface oscillation of the merged bubbles due to lateral coalescence between adjacent bubbles drives it to detach from the heaters. It's also discussed about the Marangoni effect on the bubble behavior.

Key words Microgravity, Pool boiling, Heat transfer, Bubble behavior, Space experiment

1 引言

沸腾传热因其高传热能力在地面和空间科技实验中有巨大的应用价值. 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之一[1].

沸腾现象中存在众多影响因素, 例如成核过程、气泡生长、加热面处固-液-气三相间的相互作

* 中国科学院知识创新工程 (KACX2-SW-02-03) 和国家自然科学基金项目 (10432060) 共同资助

2008-01-22 收到原稿, 2008-05-10 收到修定稿

E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用、气-液界面处的蒸发过程以及使蒸气和热液体远离加热界面的输运过程等. 上述因素间存在着错综复杂的相互作用, 使得沸腾传热过程异常复杂. 迄今为止, 从基本原理的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, 其结果导致了沸腾传热学知识的显著经验性特点, 最明显的就是众多的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, 极大地制约了相关应用技术的发展, 尤其是空间应用技术的研究与发展.

常重力环境中气-液两相间密度差引起的浮力作用, 是影响无强迫对流作用时的池沸腾传热的主要因素, 并在绝大部分经验关联式中得以体现. 然而, 由于数据主要来自地面常重力实验, 重力并不作为变量出现, 对重力效应的模化是否合理无法直接检验. 微重力实验提供了一个将重力因素孤立出来的机会, 便于对重力效进行深入研究. 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.

利用中国返回式科学技术实验卫星所提供的微重力空间实验平台, 中国科学院国家微重力实验室设计了一系列池沸腾传热实验, 希望能综合利用地面常重力实验、地基短时微重力落塔实验和空间飞行实验等手段, 结合理论分析与数值模拟研究, 对微重力环境中沸腾传热特性、气泡形成-成长-脱落过程特性、液-气-固相互作用、液体内部热毛细流动及其对传热的影响等进行深入研究, 以获得微重力沸腾过程中气泡动力学特征及传热特性数据, 加深对相关流动与传热规律的认识. 本文对相关研究的结果进行了评述, 并对相关领域内研究进展及发展趋势予以讨论.

2 丝状加热器

2005 年 9 月, 中国首次空间微重力池沸腾实验搭载第 22 颗返回式卫星顺利完成[2]~[7]. 该项研究针对丝状加热表面, 采用控制加热面温度的稳态加热方式, 即控制加热面温度阶梯状升或降, 并保证每一温度阶梯持续时间约 30 s, 以便沸腾实验处于 (统计) 平稳状态. 在飞行实验前后, 利用相同装置开展了地面常重力对比实验. 此外, 还利用中国科学院国家微重力实验室北京落塔 (Drop Tower Beijing/NMLC) 进行了地基短时微重力实验.

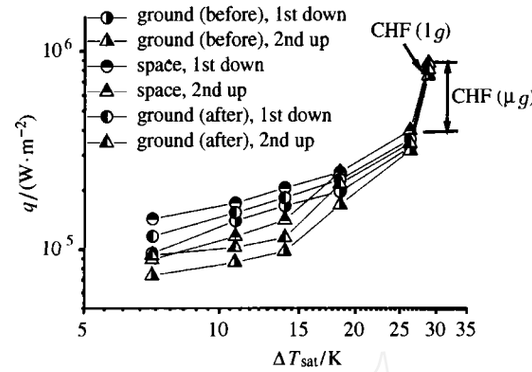

图1 不同重力条件下核态池沸腾传热曲线

Fig.1 Nucleate pool boiling curves in different gravity

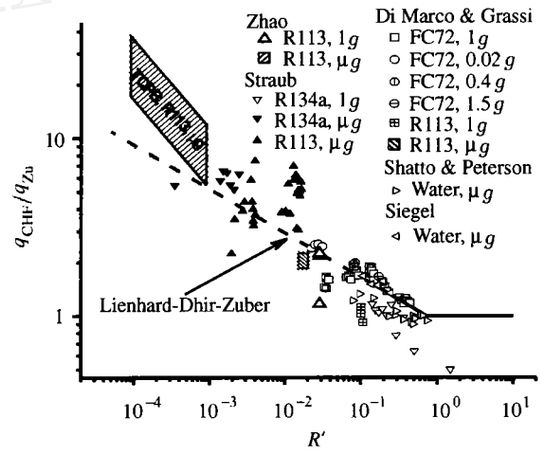

图 2 临界热流 (CHF) 的重力尺度效应

Fig.2 Scaling of CHF with gravity

对单相传热数据的分析充分验证了实验装置及数据测试系统的可靠性.

不同重力条件下的实验结果表明, 沸腾起始温度基本上不受重力的影响; 核态沸腾在微重力时略有强化 (见图 1); 基于流体动力学不稳定性机制的 Lienhard-Dhir-Zuber 模型可以很好地预测不同重力条件下的池沸腾临界热流 (CHF) 的变化趋势 (见图 2), 尽管热丝无量纲半径比该模型的适用范围扩大了 3~4 个数量级 (这与地面常重力环境中关于临界热流尺度效应的研究结果有很大差异), 表明热丝无量纲半径 (等价于 Bond 数) 在小 Bond 数情形中, 不再是描述临界热流尺度效应的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

唯一参数. 作者由此提出了"极限核化尺寸"的概念, 以反映具体核化过程在临界热流现象中的作用, 并定性解释了地面实验和空间实验所发现的临界热流尺度关系的差异.

空间飞行实验还发现, 在长期微重力环境中, 孤立气泡区内气泡脱落行为有着与常重力时迥然不同的特征, 即在一般理论预测的气泡脱落直径之上, 气泡会粘附在加热丝表面, 直到超过某临界尺寸后才会再次脱落 (见图 3). 现有模型均无法完全描述相关发现. 我们将 Marangoni 效应引入气泡脱落过程分析, 得到了与空间飞行实验相一致的结果 (见图 4), 表明 Marangoni 效应在微重力沸腾传热现象中具有重要作用, 同时, 也暴露了传统沸腾理论中关于相变界面数理模型 (特别是相变界面两侧温度关系模型) 的不足, 相关方面的研究需要进一步加强.

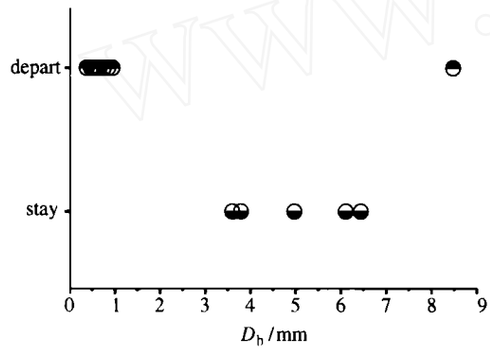

图 3 离散气泡区的气泡脱落直径

Fig.3 Bubble departure diameters in the discrete bubble regime

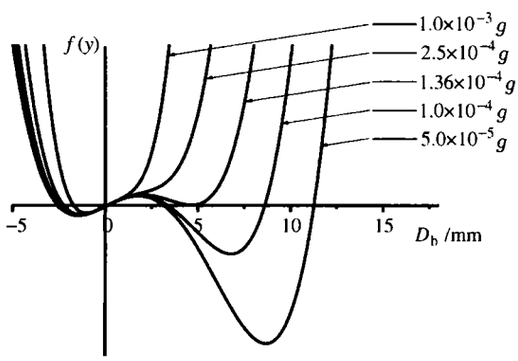

图 4 不同重力条件下生长气泡的受力特征

Fig.4 Forces acting on the growing bubble in different gravity

3 平板加热器

2006 年 9 月, 完成了实践 8 号育种卫星搭载的平板加热表面微重力池沸腾传热实验[8],[9]. 该实验采用控制加热电压按指数形式增长的准稳态加热方式, 并通过压力、温度控制装置对系统的压力、液体过冷度等进行控制. 飞行前的地面常重力对比实验得到了与文献报道相一致的沸腾传热曲线和 CHF 数值, 验证了实验装置及数据测试系统的可靠性.

空间微重力实验结果表明, 在相近的压力或过冷度条件下, 随着过冷度或压力的增大, 沸腾传热略有增强, CHF 值也有所增加, 这与地面研究结果定性一致. 与地面实验相比, 微重力条件下的沸腾传热曲线相当平缓, 甚至不出现明显的转折点, 导致难以准确确定 CHF 的具体数值; 沸腾起始略有提前, 也就是说, 在略微偏小的壁面过热度时即已开始沸腾; CHF 值远低于地面实验值, 不超过地面常重力环境中测量值的 40% (见图 5, 图中 I-1和 I-2分别表示空间实验第一阶段第一、二次实验过程, 下文同).

微重力条件下的气泡动力学特征与常重力时相比有显著差异, 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

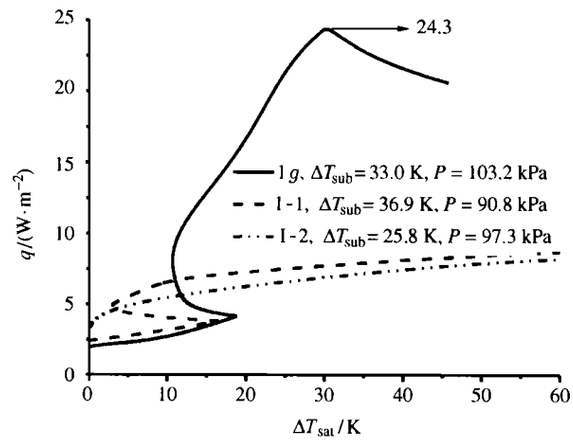

图 5 不同重力下沸腾曲线的比较

Fig.5 Comparison of boiling curves in different gravity

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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 (见图 6), 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.

空间首次实验中, 首个气泡的出现是突然、爆炸型的; 相应地, 传热曲线显示出明显的温度过冲现象, 如图 7(a) 所示. 随后的实验中, 没有出现爆沸现象, 首个气泡出现后甚至有明显的停顿, 然后才又缓慢地长大; 相应地, 沸腾传热曲线中没有明显的壁温过冲现象, 如图 7(b) 所示. 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, 从而使得后续实验中起始沸腾很容易在较低的壁面过热度下开始, 并对临近核化点的活化起到抑制作用.

4 展望

目前国际上对池沸腾传热的研究逐渐转为对相关微观过程与机制的探索[10]. 中国在今后几年内的微重力池沸腾传热研究, 也同样强调了这种趋势, 以具有若干人工空穴的加热面上气泡的形成、发展、脱落及其运动为主要研究对象, 通过改变加热功率或加热面温度、压力、液体温度等实验条件, 实现微重力池沸腾起始过程及随后的稳定沸腾过程, 并测量微重力环境中传热效率等宏观平均的参数以及加热面局部温度分布、气泡周

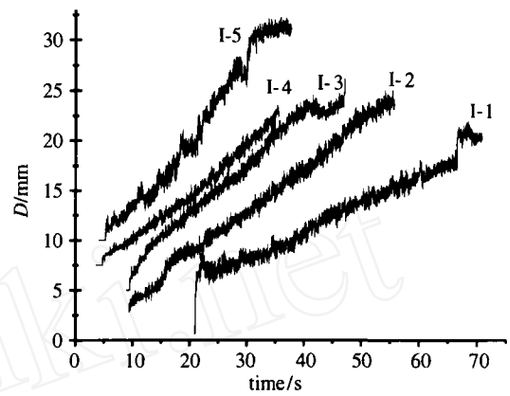

图 6 不同过冷条件下聚合气泡的生长速度

Fig.6 Growth rate of the merged bubbles in different subcooling

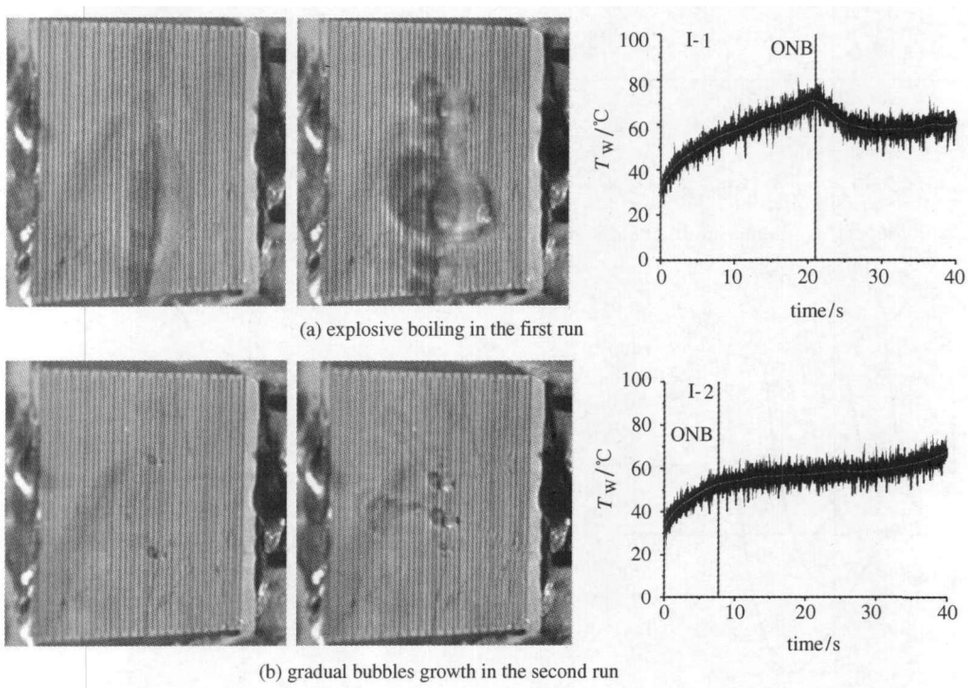

图 7 空间实验中起始沸腾的不同特征

Fig.7 Onset of boiling in the space experiments

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围液体内部微流动结构等局部参数的变化, 综合利用地面实验、地基短时微重力实验和返回式卫星或飞船实验等多种实验手段, 结合数值模拟研究, 对微重力环境中沸腾传热特性、气泡形成-成长-脱落过程特性、液-气-固相互作用、液体内部热毛细流动及其对传热的影响等进行深入研究, 以获得微重力沸腾过程中气泡动力学特征及传热特性数据, 加深对相关流动与传热规律的认识. 这些项目的实施, 将有助于深入认识微重力沸腾过程中的流动与传热规律, 极大地促进该学科的发展及其在相关技术领域的应用.

参考文献

[1] Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv. Heat Trans.*, 2001, **35**:57~172

[2] Zhao J F, Wan S X, Liu G, Li Z D, Hu W R. Pool boiling heat transfer in microgravity. *Microg. Sci. Tech.*, 2007, **19**(3/4):135~136

[3] Zhao J F, Yan N, Liu G, Wan S X, Hu W R. On the scaling of CHF with gravity in pool boiling on cylinders. *JASMA*, 2007, **24**(1):66~70

[4] Zhao Jianfu, Wan Shixin, Liu Gang. Experimental study on subcooled pool boiling in microgravity utilizing the Drop Tower Beijing (NMLC). *J. Eng. Thermophys.*, 2007, **28**(1): 98~100. in Chinese (赵建福, 万士昕, 刘刚. 过冷池沸腾落塔短时微重力实验研究. 工程热物理学报, 2007, **28**(1):98~100)

[5] Zhao Jianfu, Wan Shixin, Liu Gang, Yan Na. Experimental study on pool boiling in microgravity. *J. Eng. Thermophy.*, 2007, **28**(3):454~456. in Chinese (赵建福, 万士昕, 刘刚, 闫娜. 微重力池沸腾实验研究. 工程热物理学报, 2007, **28**(3):454~456)

[6] Liu Gang, Zhao Jianfu, Wan Shixin, Yan Na. CHF of nucleate pool boiling in microgravity. *J. Eng. Thermophy.*, 2007, **28**(Supp.2):13~16. in Chinese (刘刚, 赵建福, 万士昕, 闫娜. 微重力池沸腾现象中的临界热流密度. 工程热物理学报, 2007, **28**(增刊 2):13 ~16)

[7] Liu Gang, Zhao Jianfu, Wan Shixin, Yan Na. Bubble departure diameter in microgravity pool boiling. *J. Eng. Thermophy.*, 2008, **29**(1):93~95. in Chinese (刘刚, 赵建福, 万士昕, 闫娜. 微重力池沸腾现象中的气泡脱落直径. 工程热物理学报, 2008, **29**(1):93~95)

[8] Zhao J F, Yan N, Li J, Li Z D, Hu W R, Ohta H. Pool boiling heat transfer in microgravity. In: 3rd Int. Symp. on Phy. Sci. in Space, 2007, Nara, Japan

[9] Li Jing, Zhao Jianfu, Yan Na, Li Zhengdong, Ohta H. Bubble behavior in microgravity pool boiling. *J. Eng. Thermophy.*, 2008, **29**(3):439~442. in Chinese (李晶, 赵建福, 闫娜, 李震东, 大田治彦. 微重力池沸腾现象中的气泡行为特性研究. 工程热物理学报, 2008, **29**(3):439~442

[10] Pacros A, Minster O. The ESA contribution to space research on two-phase systems. *Microg. Sci. Tech.*, 2007, **19**(3/4):9~10

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net