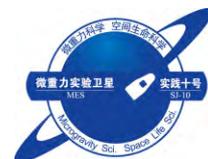


微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究¹⁾

吴 克* 赵建福^{*,2)} 李会雄[†]

* (中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)

† (西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 700049)



摘要 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究项目是实践十号返回式卫星科学实验任务之一, 主要关注微重力池沸腾过程中孤立生长气泡周围局部流动与传热机理。目前, 实验装置 SOBER-SJ10 正样产品已完成研制和地面测试, 并开展了一系列地面对比实验。地面实验结果表明设备工作正常, 性能指标达到设计要求。地面实验结果表明过冷度对起始沸腾过热度影响甚微。空间飞行实验将于近期进行, 其结果将加深对沸腾传热机理的认识。

关键词 核态池沸腾, 沸腾起始, 气泡热动力学行为, 微重力

中图分类号: O359+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.6052/1000-0879-16-067

引 言

沸腾过程因相变潜热的释放而具有极大的热传递能力等优点, 不论在地面常重力环境还是空间微重力环境都有十分重要和广泛的应用, 具有非常实际的研究价值。传统的沸腾传热理论中, 一般都明显包含重力加速度的影响, 但是据以构建相关理论的经验基础往往只是地面常重力条件下的实验结果, 因此, 重力加速度无法作为一个可控变量, 也就无从直接验证相关理论的正确与否。此外, 地面常重力环境中, 浮力主导着气泡的动力学特征, 极大地掩盖了加热面附近相变过程及其特征。因此, 利用空间微重力环境开展沸腾实验研究, 对于揭示沸腾现象中的重力作用机制具有显著的学术意义。

微重力沸腾研究可以追溯到 20 世纪 50 年代, 迄今已超过半个世纪, 在基本现象及传热规律等方面取得了明显的进步^[1-2]。不过, 由于空间实验机会的缺乏, 以及空间实验在设备尺寸、重量、能耗和微重力持续时间等方面的严格限制, 微重力沸腾实验

非常有限, 且多关注宏观平均的传热性能, 缺乏对加热面附近局部细观行为的观测, 需要进一步来研究。

“微重力沸腾过程中的气泡动力学特征研究”项目是实践十号科学实验卫星任务之一^[3], 其主要研究目标为: 通过局部过热实现微重力沸腾气泡生成位置的精确定位, 认识生长气泡周围细观运动与加热器三维瞬态温度场演化特征, 揭示气泡热动力学与局部热量传输过程间的耦合作用及其对沸腾传热性能的影响机制, 理解沸腾传热内在机理。本项目研究成果可以服务于我国航天(尤其是载人航天)事业相关技术的研发, 同时为地面常重力环境相关应用提供理论指导。

1 实验装置及研究内容

沸腾气泡箱 SOBER-SJ10 (图 1) 是用来完成“微重力沸腾过程中的气泡动力学特征研究”项目空间实验任务的硬件设备。在载荷支撑系统的支持下, 沸腾气泡箱将完成不同过冷度条件下单气泡沸

本文于 2016-03-11 收到。

1) 中国科学院空间科学先导计划 (XDA04020404) 和国家自然科学基金 (11372327) 资助项目。

2) E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

引用格式: 吴克, 赵建福, 李会雄. 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究. 力学与实践, 2016, 38(2): 203-206

Wu Ke, Zhao Jianfu, Li Huixiong. Thermal Dynamical Behavior of Vapor Bubble during Pool Boiling in Microgravity. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 203-206

腾和常规池沸腾两种模式的空间科学实验任务, 获得微重力沸腾过程中的气泡动力学行为特征的图像与科学测试数据, 对微重力池沸腾现象中气泡生长过程的热动力学特征进行细致观测, 认识生长气泡周围细观流动、气泡底部干斑与微液层演化以及加热器内部三维瞬态温度场演化等过程特征, 揭示气泡热动力学与局部热量传输过程间的耦合作用及其对沸腾传热性能的影响机制, 理解沸腾传热内在机

理.

集成微加热器 (图 2) 是沸腾气泡箱核心部件之一, 采用 MEMS 技术在厚度 2mm、面积 10mm×10mm 的石英玻璃基片的正面上集成加工了气泡激发器和 10 个局部温度传感器 (图 2(a) 和图 2(b)), 同时在石英玻璃基片背面加工了主加热器 (图 2(c)), 并采用 COB (chip-on-board) 封装技术形成一个独立的器件 (图 2(d)).

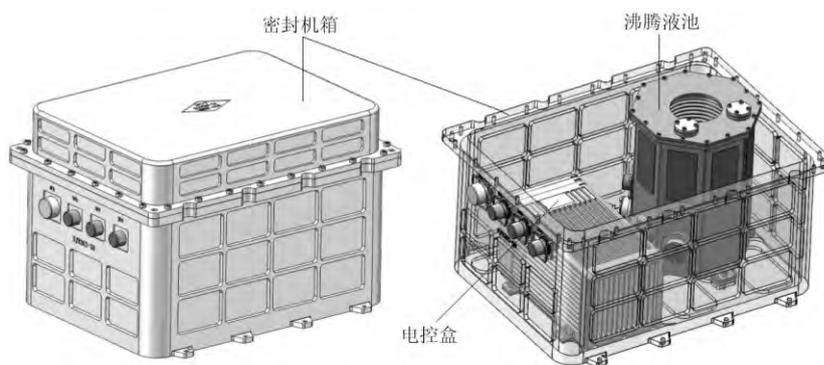


图 1 沸腾气泡箱正样飞行件结构示意图

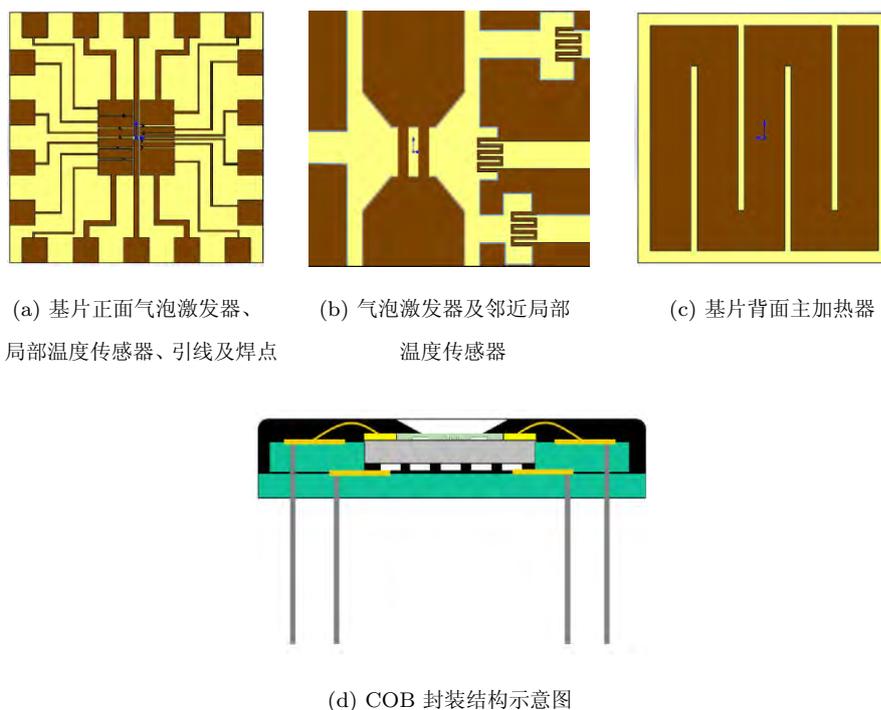


图 2 集成微加热器

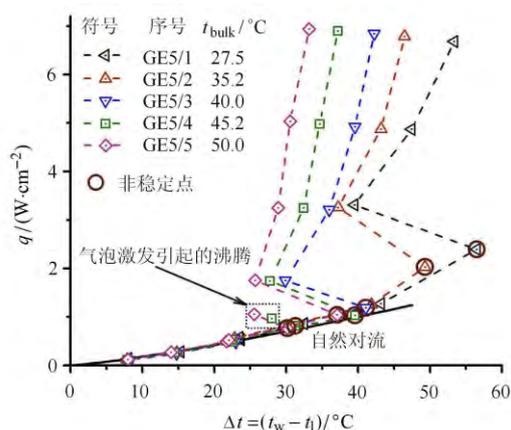
气泡激发器采用脉冲电加热形成的局部过热激发模式, 即在设定时刻通过脉冲加电引起设定位置处的电阻元件发热形成局部高过热状态, 进而激发出微小的气泡囊胚, 作为“种子”气泡, 并在石英玻

璃基片背面主加热器供应的稳定热流作用下连续生长. 此时的实验为单气泡沸腾模式. 若不启动气泡激发器, 仅依靠石英玻璃基片背面主加热器稳定加热, 则实验将处于常规池沸腾模式.

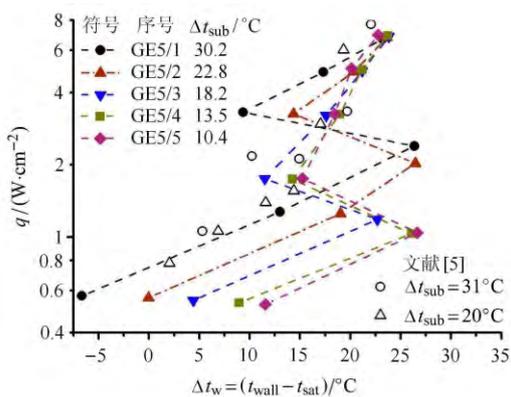
2 地面常重力对比试验

目前,实验装置 SOBER-SJ10 正样产品已完成研制和地面测试,并开展了一系列地面对比实验^[4].地面实验结果表明设备工作正常,性能指标达到设计要求.

图 3 显示了地面常重力对比实验所获得的地面常重力条件下的池沸腾传热曲线,实验数据在单相自然对流区域与经典模型符合甚好,沸腾阶段数据与前人在相近条件下的实验结果同样符合很好,验证了该装置的可靠性.



(a) 基于加热面与液体温差的地面沸腾传热曲线



(b) 基于壁面过热度的地面沸腾传热曲线

图 3

地面实验结果显示,以壁面过热度表征的沸腾起始条件几乎不受液体过冷度的影响,验证了过冷度对起始沸腾过热度影响甚微.

图 4 则是基于集成微加热器局部温度传感器测量结果重构的地面常重力条件下单气泡沸腾时加热表面局部温度的时空演化特征.不过,地面常重力条件下,气泡受浮力控制,其尺寸与生命周期分别

在 10^{-3} m 和 10^{-3} s 的量级,而限于空间资源的紧缺,加热表面局部温度测点的分布和测量数据采样频率都略显宽疏,难以显示其细致结构特征.在空间微重力条件下,气泡热动力学行为将在空间和时间尺度上都得以显著扩大,有望获得更为精细的加热表面局部温度的时空演化过程特征,加深对相应过程的认识.

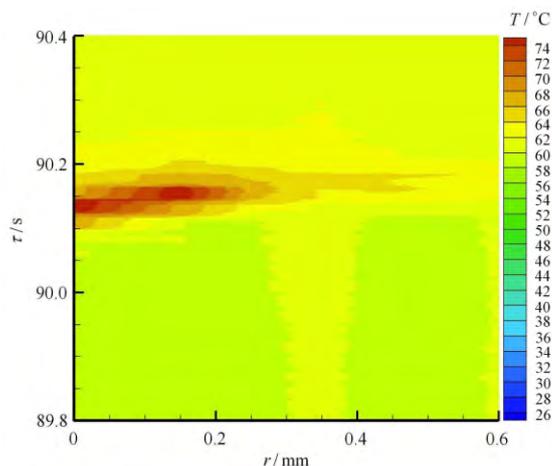


图 4 地面常重力条件下单气泡沸腾时加热表面局部温度的时空演化特征

3 展望

制约沸腾传热理论发展的主要原因之一,在于对液气固三相界面附近细观流动与传热结构的研究较少.地面常重力环境中,浮力主导着气泡的动力学特征,极大地掩盖了加热面附近相变过程及其特征.因此,尽管经典传热学理论和实践已表明,沸腾传热表面上气泡的动力学行为对换热设备的传热效率和可靠性具有决定性影响,并且基于这种认识,地面常重力环境下的气泡动力学行为特性,包括气化核心的形成与分布、气泡脱离换热表面时的尺寸与频率、气泡脱离壁面后的运动轨迹、气泡的再生长及合并等已得到了广泛关注,迄今仍无法给出公认的结果.空间微重力条件下,重力作用被极大削弱甚至完全抑制,生成的气相脱离加热表面的动力减弱,将极大地增加气泡热动力过程的时间和空间尺度,凸显液-气-固三相界面附近细观流动与传热结构特征,极大地方便了对细观机理的深入研究,有利于认识生长气泡周围细观流动、气泡底部干斑与微液层演化以及加热器内部三维瞬态温度场演化等过程特征,揭示气泡热动力学与局部热量传输过程间的耦合作用及其对沸腾传热性能的影响机制,理解沸

腾传热内在机理.

针对微重力池沸腾过程中孤立生长气泡周围局部流动与传热机理,提出了微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究项目,目前已完成了空间实验装置(SOBER-SJ10)正样飞行件产品的研制和地面测试,结果表明设备工作正常,性能指标达到设计要求.实践十号返回式卫星将按计划于近期发射,利用其提供的长期、稳定的空间微重力环境,SOBER-SJ10将开展一系列微重力条件下的单气泡沸腾和常规池沸腾现象实验研究,其结果将加深对沸腾传热机理的认识,促进学科的发展.

参 考 文 献

- 1 Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- 2 Zhao JF. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *Int J Multiphase Flow*, 2010, 36(2): 135-143
- 3 Hu WR, Zhao JF, Long M, et al. Space program SJ-10 of microgravity research. *Microgravity Sci Technol*, 2014, 26, 159-169
- 4 Wu K, Li ZD, Zhao JF, et al. Partial nucleate pool boiling at low heat flux: preliminary ground test for SOBER-SJ10. *Microgravity Sci Tech*, doi 10.1007/s12217-016-9495-8 (2016)
- 5 Kim J, Benton JF, Wishiewski. Pool boiling heat transfer on small heaters: effect of gravity and subcooling. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45(19): 3919-3932

(责任编辑:刘希国)

实践十号返回式科学实验卫星发射圆满成功

北京时间2016年4月6日1时38分,我国首颗微重力科学实验卫星——实践十号返回式科学实验卫星,由长征二号丁运载火箭在酒泉卫星发射中心发射升空.随后,卫星进入预定轨道,发射任务圆满成功.卫星回收舱在轨飞行若干天后,将利用我国成熟的返回式卫星技术按预定程序返回地球,并在内蒙古四子王旗着陆.回收的11台科学实验载荷及实验样品将交付科学应用系统,部分空间生命科学样品还将与地面对比试验结果进行比照.留轨舱内的8台有效载荷,将继续开展流体物理和燃烧实验等实验.(实践十号卫星实拍,中国科学院国家空间科学中心供图)

