

SOBER-SJ10 池沸腾现象天地实验研究

吴克^{1,4} 赵建福^{1,4} 李会雄² 张磊³ 张建泉³ 李响³

- (1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190;
2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
3. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094;
4. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 SOBER-SJ10 是实践十号科学实验卫星 19 项科学实验载荷之一, 通过局部过热在固定位置预定时刻激发产生气泡, 并细致观测空间微重力条件下池沸腾现象中生长气泡热动力学过程与传热特征, 来揭示沸腾气泡底部细观流动以及传热特性。利用已完成的 7 次地面实验、1 次在轨阶段空间实验以及 3 次留轨阶段补充实验相关数据, 分析了不同过冷度下地面实验沸腾曲线, 并通过对天地实验中的沸腾气泡行为及气泡底部加热面温度等结果的对比分析, 探讨了微重力环境对相关过程的影响。

关键词 SOBER-SJ10; 池沸腾; 地面实验; 空间实验

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2017)11-2378-04

Space and Ground Experiments on Pool Boiling Phenomenon Utilizing SOBER-SJ10 Facility

WU Ke^{1,4} ZHAO Jian-Fu^{1,4} LI Hui-Xiong² ZHANG Lei³ ZHANG Jian-Quan³ LI Xiang³

- (1. Key Laboratory of Microgravity/CAS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences. Beijing 100094, China;
4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences. Beijing 100049, China)

Abstract SOBER-SJ10 is one of the 19 scientific experimental payloads aboard SJ-10 satellite. By exciting a micro-bubble at fixed time and position using local overheating method, the thermal dynamics of the growing bubbles and heat transfer in pool boiling are observed and measured in order to reveal the local micro-flow and heat transfer mechanism underneath the bubbles in microgravity. Based on the data of 7 ground experiments, boiling curves under different subcooling in normal gravity were analyzed. Furthermore, 1 in-orbit space experiment and 3 additional in-orbit space experiments have been performed. The influence of gravity on boiling process was discussed by comparing bubble behaviors and temperature variation beneath the bubble in different gravity conditions.

Key words SOBER-SJ10; pool boiling; ground experiment; space experiment

0 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, 在地面常重力环境以及空间微重力环境都有广泛的应用, 具有非常实际的研究价值。地面常重力环境中, 密度差引起的浮力对流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。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, 一方面极大地增加气泡热动力过程的时间和空间尺度, 有助于对气泡动力学行为做细致观察; 另一方

面, 浮力对流作用的削弱也凸显了液-气-固三相界面附近细观流动与传热结构特征, 更好地揭示气液相变对沸腾传热的影响, 极大地方便了对细观机理的深入研究^[1-3]。

SJ-10 卫星单气泡池沸腾微重力实验装置(SOBER-SJ10) 是我国空间科学先导计划支持下的 SJ-10 科学实验卫星项目^[4] 科学实验载荷之一, 采用局部过热的方式在加热表面固定位置上激发形成单个种子气泡, 在持续、稳定的主加热器作用下维

收稿日期: 2017-01-08; 修订日期: 2017-10-20

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导专项 (No.XDA04020404); 国家自然科学基金项目 (No.11372327, No.11402273)

作者简介: 吴克 (1990-), 男, 博士研究生, 主要从事微重力沸腾传热的研究。

持微重力单气泡池沸腾过程,实现对加热面上单个气泡的生长、变形及其运动等特征的观察以及对加热器表面局部温度分布及其变化等的测量。利用空间实验观测数据,可以重构加热器内部温度及热流的三维分布,分析加热固壁内部瞬态导热与周期性蓄热、气泡底部干斑与微液膜演化等过程特征及其对沸腾传热性能的影响,揭示微液膜蒸发的物理机制,加深对沸腾传热现象内在机理的理解和掌握。

目前,利用 SOBER-SJ10 飞行实验装置已经完成了 7 次地面常重力池沸腾实验。2016 年 4 月 6 日 SJ-10 卫星成功发射后,顺利完成了 1 次在轨阶段全流程池沸腾实验及 3 次留轨阶段补充池沸腾实验,空间实验数据接收完整。本文全面分析了地面常重力实验中不同过冷度条件下核态池沸腾传热特性,对比分析了空间实验和地面实验过程中沸腾气泡行为及加热面温度变化特征,探讨了重力效应对相关过程的影响。

1 SOBER-SJ10 实验装置简介

SOBER-SJ10 装置主要由密封机箱、电控箱、沸腾液池和 CCD 组件等功能单元模块组成。其中,如图 1 所示,沸腾液池本体为正八边形柱体,内部截面积约 166 cm^2 ,深 21.6 cm ,盛装约 2.8 L 除气液体实验工质(3M 公司 FC-72)。液池端盖上焊接有波纹管稳压器,来被动的调节液池内部的液体压力,保证实验过程中液池压力的相对稳定。在液池侧壁安装的配件包括 3 个照明窗口组件(含 LED 照明灯)、2 个观察窗口组件、密封接插件、薄膜预热器(外壁)及 2 路液池壁温传感器(内壁)。

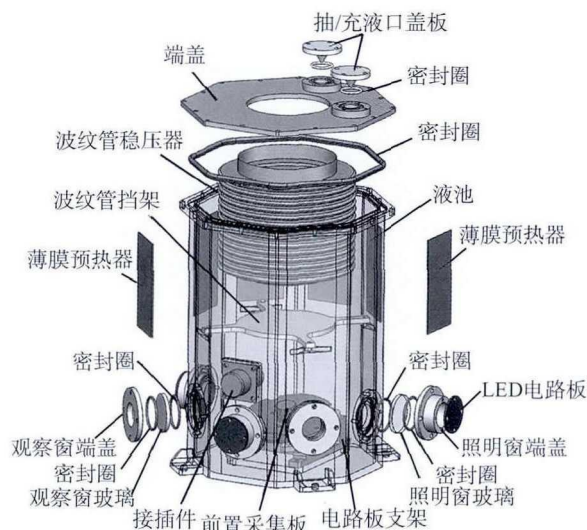
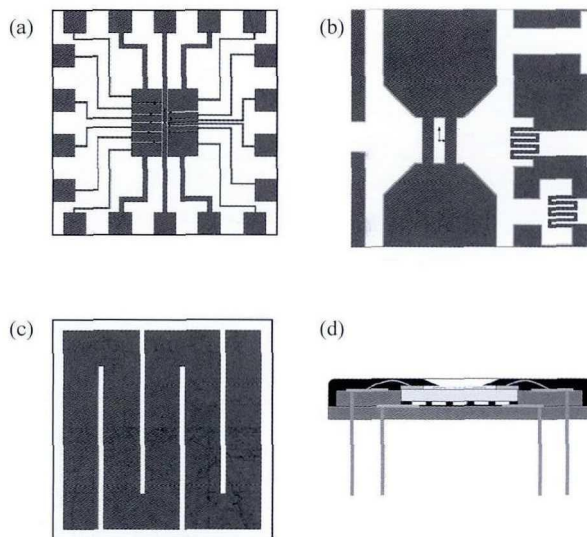


图 1 沸腾液池示意图

Fig. 1 Schematic of the boiling chamber

单气泡沸腾实验的核心部件为集成微加热器,采用 MEMS 技术在厚度 2 mm 、面积 $10\times 10\text{ mm}^2$ 的石英玻璃基片的正面上集成加工了气泡发生器和 10 个局部温度传感器(图 2(a), (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 封装技术形成一个独立的器件(图 2(d))。实验过程中利用气泡发生器局部过热生成气泡,并由主加热器持续加热促使气泡生长。集成微加热器焊装在前置采集板上,后者通过安装支架固定在液池底部。前置采集板上还焊装有 2 只 Keller PAA-4LD 型数字式绝压传感器,对液池温度以及液池压力进行测量。其中,压力的测量量程 $0\sim 0.3\text{ MPa}$,测量不确定度 $0.5\%FS$;温度的测量量程 $0\sim 100^\circ\text{C}$,测量不确定度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。在整个实验过程中,液池壁温、液池温度和液池压力的采样频率为 $1/3\text{ Hz}$;而集成微加热器相关信号(局部温度、主加热器加热电流和电压)的采样频率在非实验阶段为 $1/3\text{ Hz}$,在沸腾实验过程中为 500 Hz 以便获得足够的时间分辨率。



(a) 基片正面; (b) 气泡发生器及邻近局部温度传感器; (c) 基片背面主加热器; (d) COB 封装结构

(a) Top view of the substrate; (b) Bubble trigger and local temperature sensors; (c) Main heater on the back of the substrate; (d) Structure of COB encapsulate

图 2 集成微加热器示意图

Fig. 2 Schematic of the integrated micro heater

实验过程中通过 2 路 CCD 同时视频记录相互垂直的两个方向上气泡生长的图像,CCD 相机采用具有成功的航天应用经验的 Watec WAT-660D CCD 相机,采样帧率为 25 fps ,并经过 H.264 数字编码压缩,最终分辨率为 720×480 像素。

2 地面实验结果

利用 SOBER-SJ10 正样件设备, 在发射前共进行了 7 次地面实验。实验包括 5 个阶段, 对应液体环境温度依次为室温、35°C、40°C、45°C 以及 50°C(图 3)。每个阶段又包括 5 次实验, 前 4 次为单气泡实验模式, 而后 1 次为常规池沸腾模式 (即气泡发生器不工作)。图 3 中, 除第 1 次实验外, 其他各次实验中, 压力基本恒定在一个大气压左右。第一次地面实验则由于液池灌液量不足, 导致在低温段波纹管稳压器限位挡板功能启动, 液池处于低压半充满状态; 35~40°C 间限位挡板功能逐渐消除, 液池压力快速升高, 与密封外舱内初始压力相平衡。

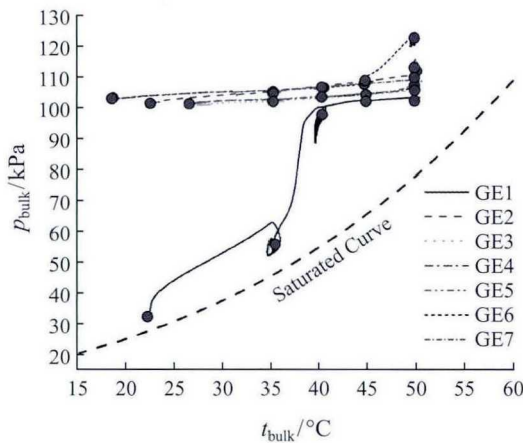


图 3 地面实验液体热力学状态
Fig. 3 Bulk liquid state in ground experiments

在地面实验前, 对液体工质进行了除气处理, 并利用 Henry 定律估算了不凝气体含量: 第 1 次地面实验中不凝气含量约为 300 μL/L, 其他的地面实验及空间实验中不凝气含量约为 1200 μL/L。

鉴于局部温度电阻温度关系随时间 (或加热历史) 有确定性的偏移, 为保证主加热器温度及加热面局部温度测量精度, 采用同步标定的方式, 即利用当次实验中液池温度相对均匀时刻的液池温度与各传感器阻值, 标定该次实验中的主加热器及 10 路局部温度传感器的电阻 - 温度关系。地面实验中浮力对流强化了液池内温度混合效果, 采用该方法标定所得到的 10 路局部温度测量不确定度为 1.0°C, 主加热器温度测量不确定度为 1.5°C; 而空间实验中主加热器温度测量不确定度不变, 但 10 路局部温度测量不确定度略有增加, 为 1.5°C。

根据实验过程中采集到的集成加热器上表面 10 路局部温度电阻值以及主加热器电阻阻值变化, 可以根据标定公式计算出上下表面平均温度的变化,

其中上表面温度采用的是 10 路局部温度进行加权平均后的值, 进一步可以计算出沸腾达到稳态条件下的热流, 从而得出各次地面实验过程中的沸腾传热曲线, 图 4 显示了典型实验 (GE7: 第 7 次地面实验) 中所得到的沸腾传热曲线。

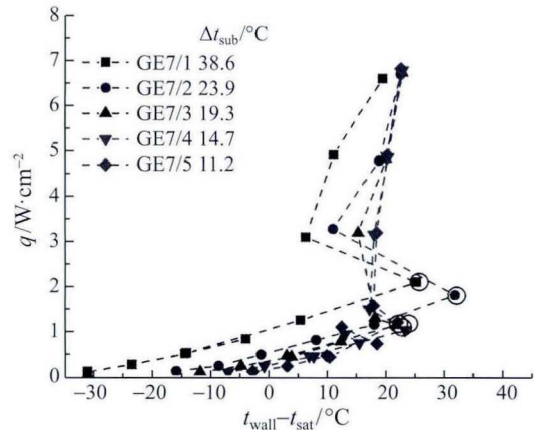


图 4 典型地面实验中不同过冷度条件下的沸腾传热曲线
Fig. 4 Typical boiling curves at different subcooling conditions in ground experiment

可以看出, 在低热流密度区, 自然对流以及沸腾传热的传热效率很大程度上受过冷度影响, 过冷度越高, 自然对流以及沸腾的传热能力更强; 随着热流密度的增加, 沸腾传热受过冷度的影响越来越小, 沸腾曲线最终都朝着同一条曲线发展。沸腾曲线中标注圆圈的点为沸腾起始点 [5]。

3 空间实验结果及与地面实验的比较

实践十号卫星于 2016 年 4 月 6 日发射入轨后, 按照在轨飞控计划, SOBER-SJ10 于 4 月 10 日一次性完成了计划中的在轨阶段连续 15 h 的全部流程的沸腾实验, 并在回收舱分离返回后, 分别于 4 月 19 日、23 日、25 日进行了三次留轨阶段补充飞行实验, 所进行的分别为正常实验流程中的第二阶段 (23 日) 和第三阶段 (25 日、27 日)。在轨以及留轨段实验过程顺利, 除第 3 次补充实验因卫星电源耗尽未能接收到科学数据外, 其他空间实验数据均已完整接收。

图 5 显示了在轨阶段空间实验 (SE1) 与第七次地面实验 (GE7) 过程中液池控温及相应压力的比较。在液体预热升温过程中, 地面上池壁与液池的升温速率基本一致; 而空间池壁要大于液池的升温速度, 而且二者均大于地面相应数值。在液池控温过程中, 空间的池壁和液池温度波动范围均大于地面, 波动的频率则低于地面。这主要归结于微重力环境下浮力对流作用遭到抑制, 液池加热以及控温过程中传

热恶化, 过冲变大变缓。

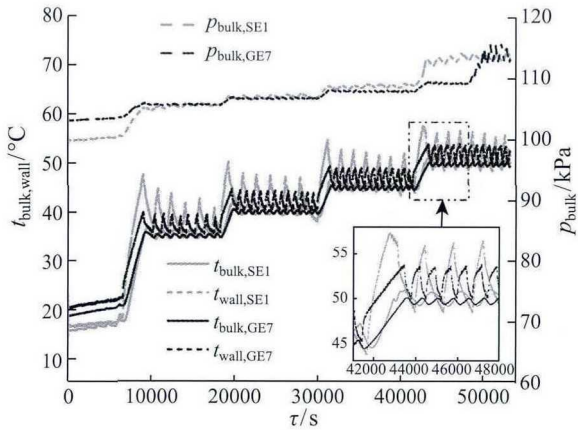


图 5 天地实验中液池温度、液池压力及池壁温度的变化
Fig. 5 Variations of bulk liquid temperature, pressure and wall temperature in space and ground experiments

图 6 比较了地面与空间实验中气泡形态的不同: 由于浮力的作用, 地面上气泡一旦产生便很快脱离加热壁面, 气泡周期短, 尺寸小, 移动速度快 (图像中显示为一条亮线); 空间实验中浮力被抑制, 气泡不易脱离加热壁面, 将黏附在加热面上部段长大, 呈球状。

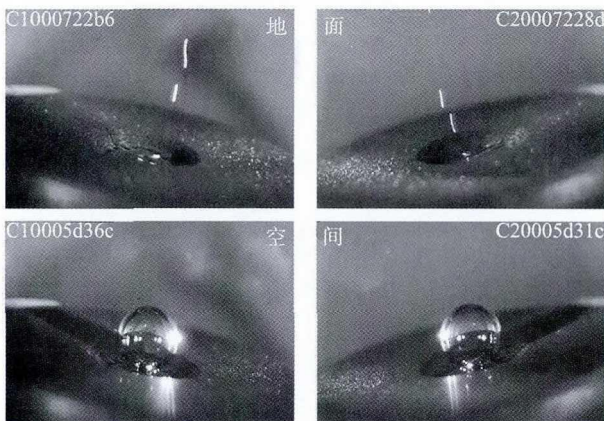


图 6 天地实验中沸腾气泡形态的差异
Fig. 6 Differences of bubbles in space and ground experiments

图 7 显示了天地实验中局部温度测点 10#在第一阶段第 1(单气泡沸腾模式) 和第 5 次(常规池沸腾模式) 实验中温度的变化情况。可以看出, 虽然空间实验中液体温度略低于地面, 但在主加热器工作后, 空间实验中加热面表面温度均高于地面; 空间常规池沸腾在加热电压第二个台阶即开始沸腾, 要提前于地面实验, 且沸腾起始温度也略高于地面; 地面

实验中, 核态池沸腾在 5 个台阶均能维持, 但空间实验后 2 个台阶温度剧增, 表明沸腾已转变为膜态沸腾, 临界热流将远低于地面。

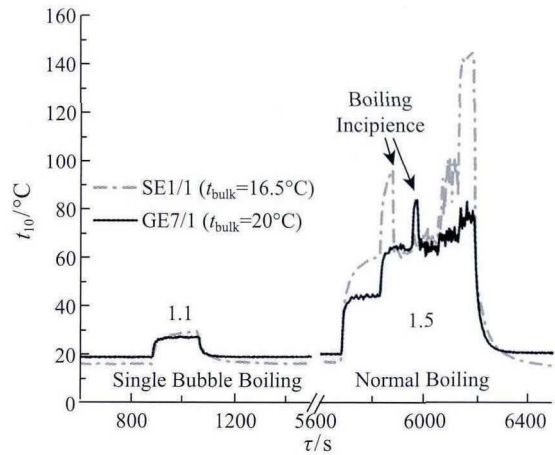


图 7 天地实验中局部温度测点 10#温度变化
Fig. 7 Temperature variation in space and ground experiments of the 10# local temperature sensor

4 结 论

本文介绍了 SOBER-SJ10 天地实验结果。地面常重力实验中, 低热流密度区沸腾传热受过冷度影响较大, 过冷度的增加强化了传热能力; 高热流密度区沸腾传热能力受过冷度影响较小, 传热曲线趋于一致。相比于地面实验, 空间微重力实验中, 气泡难以脱离加热表面, 尺寸明显增大, 加热面表面温度更高, 传热恶化, 且临界热流密度将远低于地面。地面与空间实验中的不同现象表明重力对沸腾气泡行为及传热性能具有重要的影响。

参 考 文 献

- [1] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity [J]. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- [2] Kim J. Review of Nucleate Pool Boiling Bubble Heat Transfer Mechanisms [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2009, 35: 1067-1076
- [3] Zhao Jianfu. Two-Phase Flow and Pool Boiling Heat Transfer in Microgravity [J]. *Int J Multiphase Flow*, 2010, 36: 35-143
- [4] Hu Wenrui, Zhao Jianfu, Long Mian, et al. Space Program SJ-10 of Microgravity Research [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2014, 26: 159-169
- [5] Wu Ke, Li Zhendong, Zhao Jianfu, et al. Partial Nucleate Pool Boiling at Low Heat Flux: Preliminary Ground Test for SOBER-SJ10 [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, 28: 165-178