

# 微重力池沸腾传热实验研究

赵建福<sup>1</sup> 闫娜<sup>1</sup> 李震东<sup>1</sup> 李晶<sup>1</sup> 大田治彦<sup>2</sup>

( 1. 中国科学院力学研究所微重力实验室, 北京 100190; 2. 日本九州大学宇宙与航天工学系, 福岡 812-8581 )

**摘要** 本文实验研究了平板加热面 FC-72 液体的准稳态池沸腾传热现象, 利用地面常重力实验、SJ-8 卫星搭载微重力实验等手段, 分析了不同重力、压力及过冷度条件下平板加热面上的池沸腾传热特性。微重力条件下, 相近压力或过冷度时, 传热系数和 CHF 随过冷度或压力增大而增大。相对常重力, 传热曲线明显变缓, 沸腾起始时的壁面过热度降低, CHF 仅为常重力的 40% 或更低。

**关键词** 微重力; 核态池沸腾; 过冷度; 平板加热片

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)02-0264-03

## EXPERIMENTAL STUDY ON POOL BOILING HEAT TRANSFER IN MICROGRAVITY

ZHAO Jian-Fu<sup>1</sup> YAN Na<sup>1</sup> LI Zhen-Dong<sup>1</sup> LI Jing<sup>1</sup> H Ohta<sup>2</sup>

(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China  
2. Department of Aeronautics & Astronautics, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan)

**Abstract** In the present paper, pool boiling heat transfer of FC-72 on a plane plate used a quasi-steady heating method has been studied experimentally both in normal gravity on the ground and in microgravity aboard the Chinese recoverable satellite SJ-8. The influences of gravity level, pressure, and subcooling on heat transfer characteristics have been analyzed. It's found that the nucleate boiling will be enhanced with the increase of subcooling or pressure for the same pressure or subcooling in microgravity, and that CHF will also increase with the subcooling and/or pressure. The boiling curves in microgravity have much smaller slopes than that in normal gravity, and that CHF's are also quite lower in microgravity, which is no more than 40% of that in terrestrial condition.

**Key words** microgravity; nucleate pool boiling; subcooling; plane plate heater

## 0 引言

微重力沸腾传热研究是目前微重力科学和传热学研究的前沿和热点之一。但限于有限的空间实验机会和诸多尺寸、功耗、质量等的限制, 虽然取得了一定的成果, 但是在很多基本问题上, 尚不能得到公认结论, 甚至存在明显的矛盾。

本文利用我国实践 8 号卫星搭载实验机会, 对准稳态加热条件下平板加热面上不同压力、过冷度条件下的池沸腾传热现象进行了实验研究, 以探讨相关因素对沸腾传热的影响。

## 1 实验装置与流程

实验液池内部尺寸约  $\phi 116 \times 200$  (mm), 内装

约 1.5 L FC-72 作为实验工质, 一端连有波纹管稳压器, 并置于密封外舱内, 通过电磁阀控制排气降压以实现压力的调整。加热元件为嵌于聚四氟基座中的  $Al_2O_3$  陶瓷基片, 有效加热区域为面积为  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 标称电阻为  $6 \Omega$ 。采用控制加热电压指数增加的准稳态加热方式 ( $U = U_0 e^{\tau/\tau_0}$ , 其中,  $\tau$  代表加热时间。为了使加热处于准稳态,  $\tau_0$  的设置约为 80 s, 满足准稳态加热条件<sup>[1]</sup>)。加热器两端电压和电流的采样频率 400 Hz, 利用 4 点平均的方法来消除干扰噪声, 输出频率为 100 Hz。其他参量的采样与传输频率均为 1 Hz。实验中加热元件的电阻同时又用来测量加热表面温度。

空间实验分为三个阶段: 第一阶段为常压沸腾实验 (5 次), 实验设备内部初始压力约 100 kPa。

收稿日期: 2008-01-16; 修订日期: 2008-12-18

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 (No.10432060) 资助项目

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微重力气液两相流动与传热。

第二阶段为低压实验 (2 次), 排气阀打开, 设备内部压力与卫星舱内压力 (40~60 kPa) 相同。第三阶段同样为低压实验 (5 次), 为追加实验, 但加热元件烧毁, 只有 1 次有效数据。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 地面实验

图 1 给出地面实验沸腾传热曲线, 同时也给出了 Rainy 等 [2] 和 Honda 等 [3] 的实验结果以比较。利用 Zuber 关联式 [4] 并考虑过冷度修正, 在相应实验条件下, 各关联式所预测的 CHF 在 19.8~36.6 W/cm<sup>2</sup> 的范围内, 与实验结果相一致。由于加热面材质、大小及过冷度的不同, 导致了三组实验结果的差异, 但也比较定性地显示了本文实验数据的合理性。

### 2.2 空间实验

空间实验中的气泡行为特征已在文献 [5] 中报道, 这里只就传热特性进行分析。

空间飞行实验数据分作 4 组。图 2 给出了四组实验的沸腾传热曲线的比较。A 组实验压力  $P_{ave} =$

93 ± 4 kPa, 过冷度分别为 37°C, 26°C 和 19°C。在核态沸腾区, 第一阶段 2 次实验随着过冷度的增大, 沸腾传热曲线左移、上移, 传热效率提高, 这与地面常重力条件下的实验结果相一致。但第二阶段实验 II-2 并不遵循此规律, 详细原因尚待进一步分析。三次实验沸腾传热曲线明显变缓, 没有明显的转折点, 难以确定 CHF。B 组实验与 A 组趋势相似。

C 组实验过冷度  $\Delta T_{sub} = (26 \pm 1.5) K$ , 压力分

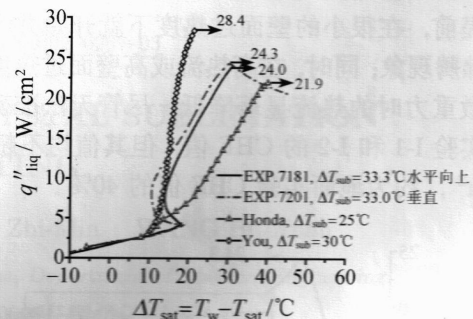


图 1 地面实验沸腾传热曲线

Fig.1 Boiling curves of ground experiments

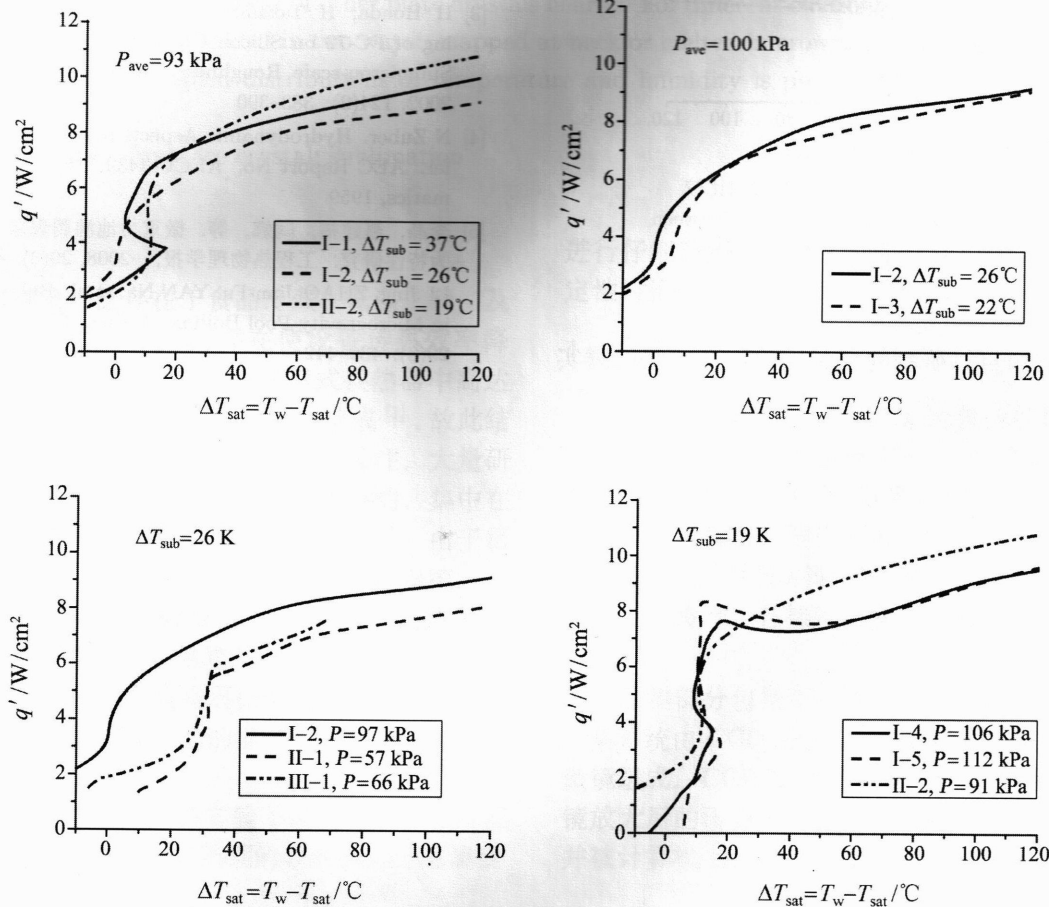


图 2 不同压力 / 过冷度条件下沸腾传热曲线的比较

Fig.2 Comparison of boiling curves in different pressure and/or subcooling

别为 97 kPa, 57 kPa 和 66 kPa。随着液池压力的增大, 沸腾曲线左移, 即产生汽泡所需的壁面过热度越小, 这也和地面常重力实验结果相一致。实验 II-1 和 III-1 在核态沸腾阶段传热曲线保持较陡的趋势, 并给出 CHF 值分别是  $5.5 \text{ W/cm}^2$  和  $6.0 \text{ W/cm}^2$ , 显示出压力越大, CHF 值越高, 这与地面常重力实验结果也是一致的。D 组实验核态沸腾传热曲线差异不大, 可能是源于液池压力变化较小。

图 3 比较了空间与地面实验的沸腾传热曲线, 可以看到: 空间实验沸腾传热曲线明显变缓, 沸腾起始提前, 在很小的壁面过热度下就开始并维持着核态沸腾现象; 同时, 在高热流或高壁面过热度时, 空间微重力时的热流显著降低。尽管无法准确判断空间实验 I-1 和 I-2 的 CHF 值, 但其值均不超过  $10 \text{ W/cm}^2$ , 约为地面实验 CHF 值的 40%。

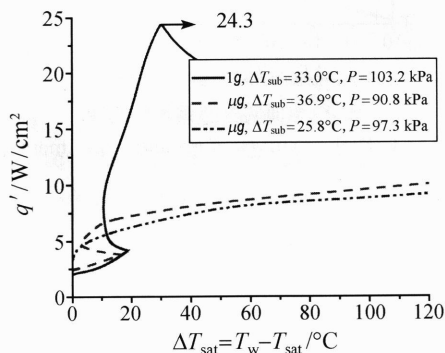


图 3 地面和空间沸腾传热曲线的比较  
Fig.3 Comparison of boiling curves between space and ground experiments

### 3 结 论

本文利用自行研制的控制加热功率的池沸腾实

验设备及 SJ-8(育种) 卫星搭载实验机会, 研究了在空间微重力与地面常重力环境中不同过冷度条件下平板加热面上 FC-72 液体的池内沸腾传热特性。

空间微重力实验结果表明, 在相近的压力条件下, 随着过冷度的增大, 沸腾传热曲线略偏左, CHF 值也有所增加; 而在相近过冷度条件下, 液池压力越大沸腾传热曲线越偏左, CHF 也略有增加。这与地面研究结果相似。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; 沸腾起始大为提前, 即在很小的壁面过热度时即已开始沸腾; CHF 值远低于地面实验, 不超过地面常重力环境中的 40%。

### 参 考 文 献

- [1] H A Johnson. Transient Boiling Heat Transfer to Water. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1971, 14(1): 67-82
- [2] K N Rainey, S M You, S Lee. Effect of Pressure, Subcooling, and Dissolved Gas on Pool Boiling Heat Transfer from Microporous Surfaces in FC-72. *J. Heat Transfer*, *Trans. ASME*, 2003, 125(1): 75-83
- [3] H Honda, H Takamastu, J J Wei. Enhanced Boiling of FC-72 on Silicon Chips with Micro-Pin-Fins and Submicron-scale Roughness. *J. Heat Transfer ASME*, 2002, 124(2): 383-390
- [4] N Zuber. Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer. AEC Report No. AECU-4439, Physics and Mathematics, 1959
- [5] 李晶, 赵建福, 闫娜, 等. 微重力池沸腾现象中的汽泡行为特性研究. *工程热物 理 学 报*, 2008, 29(3): 439-442  
LI Jing, ZHAO Jian-Fu, YAN Na, et al. Bubble Behavior in Microgravity Pool Boiling. *J. Eng. Thermophy.*, 2008, 29(3): 439-442