

# 双模态过渡池沸腾实验研究\*

赵建福<sup>\*</sup>, 刘刚, 万世昕

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

电话: 010-62615542, 传真: 010-62615524, E-mail: jfzha@imech.ac.cn

**摘要:** 本文实验研究了常压 (1atm)、室温 (16℃) 条件下 R113 过冷池沸腾传热现象, 着重研究了核态沸腾和膜态沸腾共存的稳定双模态过渡沸腾现象, 并与饱和双模态沸腾传热进行了比较。

**关键词:** 池沸腾, 双模态过渡沸腾, 过冷<sub>x</sub>

## EXPERIMENT ON TWO-MODE TRANSITIONAL POOL BOILING

Zhao Jianfu, Liu Gang, Wan Shixin

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** In the present, subcooled pool boiling of R113 at 0.1MPa and 16℃ is experimentally studied. The emphases are focused on the steady two-mode transitional boiling in which nucleate and film pool boiling co-exist. The results are compared with those obtained at saturation.

**Keywords:** pool boiling, two-mode transitional boiling, subcooling

### 引言

沸腾传热是一类具有重要学术意义和应用价值的自然现象, 从人类日常生活到航天活动中都有不可或缺的应用。一般情况下, 池沸腾实验中按加热面温度由低到高依次可观察到单相液相自然对流、核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾等现象。现有研究多以核态沸腾和膜态沸腾为主要对象。当采用丝状加热元件时, 过渡沸腾往往呈现为稳定的双模态沸腾<sup>[1]</sup>, 相关知识还十分匮乏。

另一方面, 由于沸腾传热现象的复杂性, 目前关于沸腾传热的知识, 绝大部分属于对实验数据的经验性关联, 极大地受制于相应的经验基础, 而对其经验之外的情形无法保证预测的精度, 甚至连变化趋势都难以正确预言。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-气界面处相变、流动与热传递过程, 有利于揭示沸腾传热规律, 增进对沸腾传热现象的认

\*中国科学院知识创新工程 (KJCX2-SW-L05) 资助项目。

识。迄今为止,限于极为有限的空间实验机会等,微重力沸腾传热研究尽管取得了一些初步的成果(如微重力沸腾可以持续进行、沸腾传热系数往往极大地偏离基于地面实验所得经验关联或半经验模型的预测等)<sup>[2]</sup>,但距实用需求或理论创新尚有很大距离。

为此,针对我国返回式卫星搭载实验条件,我们研制了一套池沸腾实验装置,采用控制加热壁面温度的方式,研究微重力条件下过冷池沸腾传热规律。控制加热壁面温度方式的优点在于加热元件壁面温度是严格受控的,经过临界热流点时不会突然升高,保证了加热元件不会意外烧毁。这对于空间实验有着重要意义。该装置同时也可用于地面常重力实验和国家微重力实验室落塔短时微重力实验。本文将报道地面实验结果,重点在于过冷状态下的双模态过渡池沸腾传热现象。

## 实验装置

实验装置由加热元件、液池、控制电路、CCD和数据采集装置等组成<sup>[3]</sup>。加热元件采用99.99%的铂丝,长40mm,直径0.06mm,两端分别焊接在直径3mm的黄铜支架上。壁温控制电路类似于恒温工作模式下的热线风速仪,利用铂丝温度和电阻的对应关系,通过桥式电路控制其电阻,从而维持温度的恒定。铂丝壁面温度测量即基于同样原理得到。液池内部尺寸约为90×90×90mm<sup>3</sup>,由LY12CZ制成。铂丝附近汽泡形态及其运动由CCD通过液池正面透明观察窗记录。

## 实验结果与讨论

作为对比,本实验除采用了控制热丝壁面温度的加热方法外,还利用恒压电源控制加热功率实验研究了不同加热方式的影响。每种方法都由升温(压)、降温(压)、再升温(压)三个步骤组成。实验过程中使壁面温度(或电压)变化幅度尽可能小,尤其是在充分发展核态沸腾区,壁面温度的很小变化即可导致热流密度很大的差异。

实验在常压(1atm)、室温(16℃)条件下进行,相应的过冷度为31.6℃。实验中观察到四种传热模态:单相液体自然对流、核态沸腾(图1)、双模态过渡沸腾(图2)和膜态沸腾(图3)。典型传热曲线如图4、5所示。

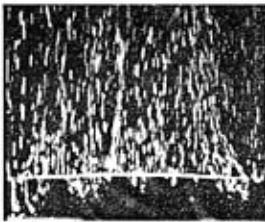


图1 核态沸腾



图2 双模态过渡沸腾

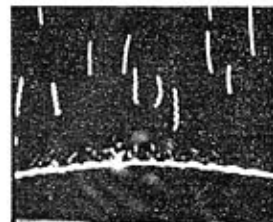


图3 膜态沸腾

实验过程中,由于R113具有很强的润湿性,沸腾滞后十分严重,在两种不同加热方式下的初始沸腾温度基本一致,超过了临界热流温度,因此在控制壁温首次上升时传热模态直接由单相液体自然对流转变为双模态过渡沸腾。而再次升温时初始沸腾温度降

低可能源于汽穴内残存气体的影响, 传热模态则由核态沸腾经临界热流点进入双模态过渡沸腾。

在双模态过渡沸腾过程中, 加热电流近似为一常数, 随着壁面温度的升高, 加热功率(即热流密度)首先略有下降, 然后缓慢上升, 直到进入完全膜态沸腾。降低壁面温度, 在完全膜态沸腾最先出现的地方, 完整汽膜部分消失, 出现双模态沸腾, 直到铂丝表面膜状汽层无法维持, 传热模态跳变为核态沸腾, 但不经过临界热流点, 呈现出一定的滞后特性。在控制加热电压逐渐升高时, 传热模态直接由核态沸腾经临界热流点跳变为完全膜态沸腾, 不出现双模态沸腾过程。降低加热电压, 双模态沸腾在相同位置出现, 但不能越过最小双模态沸腾热流点, 而是直接跳变到核态沸腾。

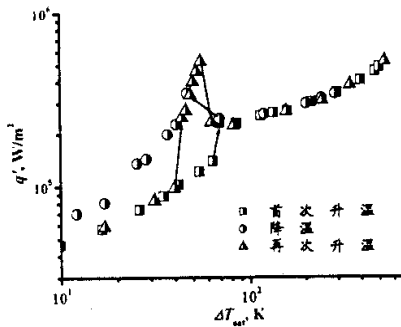


图 4 控制壁面温度时沸腾传热曲线及其模态变化

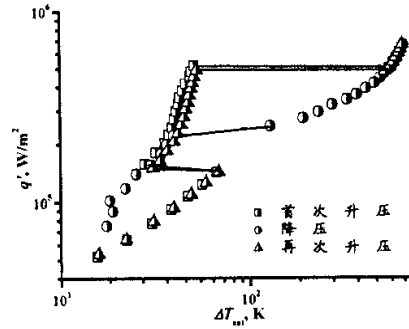


图 5 控制加热功率时沸腾传热曲线及其模态变化

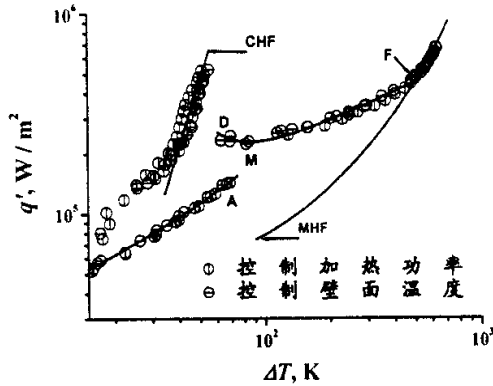


图 6 沸腾传热曲线

图 6 表明不同加热方式获得的沸腾传热曲线本质上是一致的。在充分发展核态沸腾时传热曲线与经典 Rohsenow 关联式(模型参数  $C_{w1}=0.0065$ )相吻合。临界热流密度(CHF)比 Inoue 关联式<sup>[4]</sup>预测值约低 23%, 考虑到经验关联式自身的不确定度, 二者的符合程

度还是令人满意的。而稳定膜态沸腾传热曲线与 Sakurai 关联式<sup>[5, 6]</sup>符合甚好,但在双模态沸腾终止点 F 之下,实验中无论如何小心,均不能得到完全膜态沸腾,相应地无法达到膜态沸腾最小热流点(MHF)。这和 Lu 和 Lee<sup>[1]</sup>饱和池沸腾实验的结果不同,后者通过减小加热电压或电流的增减幅度,可以实现亚稳态的膜态沸腾,尽管也不能达到经验关联式所预测的膜态沸腾最小热流点。

另外, Lu 和 Lee<sup>[1]</sup>根据其饱和池沸腾实验的结果,认为稳定的双模态过渡沸腾传热曲线对特定材料、尺寸的加热元件而言是普适的,并且是一直线,利用该直线分别和核态、膜态沸腾传热曲线交点处的传热特征,可以由线性插值的办法确定整条曲线。本实验中,该曲线(DMF)不是一条直线,而具有明显一最小值,该点(M)临近临界热流点。差别产生的原因可归结为实验方法的不同。在 Lu 和 Lee<sup>[1]</sup>实验中,采用了控制加热电压和控制加热电流两种方法,它们实际上均相当于控制加热功率。在相应控制量逐渐增加的过程中,控制加热电流不能得到双模态过渡沸腾,而控制加热电压时得到双模态过渡沸腾需要大幅度增加电压,也无法得到 CHF 附近的双模态过渡沸腾;而在相应控制量逐渐减小时,双模态过渡沸腾到达点 M 后将直接跳变到核态沸腾,同样无法实现 CHF 点和 M 点之间的双模态过渡沸腾。而 M 点之后,曲线 MF 是可以近似视为直线的。二者差别尽管不大,但对理解双模态过渡沸腾形成机制仍有重要意义。

#### 参考文献

1. Lu SM, Lee DJ. The effects of heating methods on pool boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, 34: 127-134 (1991).
2. Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172.
3. Wan SX, Zhao JF, Liu G, Li B, Hu WR. TCPB device: description and preliminary ground experimental results. *54<sup>th</sup> Int. Astro. Cong.*, Sep. 29-Oct 3, 2003, Bremen, Germany.
4. Inoue T, Kawae N, Monde M. Effect of subcooling on critical heat flux during pool boiling on a horizontal heated wire. *Heat Mass Transfer*, 1998, 33: 481-488.
5. Sakurai A, Shiotsu M, Hata K. Effect of system pressure on minimum film boiling temperature for various liquids. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1990, 3: 450-457.
6. Sakurai A, Shiotsu M, Hata K. A general correlation for pool film boiling heat transfer from a horizontal cylinder to subcooled liquid (part 2): experimental data for various liquids and its correlation. *J. Heat Transfer*, 112: 441-450.