

# 微重力池沸腾现象中的临界热流密度

刘 刚 赵建福 万士昕 闫 娜

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

**摘 要** 本文利用我国第 22 颗返回式卫星实验研究了微重力条件下池沸腾临界热流现象, 发现基于流体动力学不稳定性机制的 LD-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变化趋势, 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。这和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, 表明在 Bond 数很小时, 热丝无量纲半径已不再是描述临界热流尺度效应的唯一参数。此外, 本文提出了“极限核化尺寸”的概念, 来解释了不同条件下临界热流的变化特征。

**关键词** 微重力; 池沸腾; CHF; 尺度效应; 极限核化尺寸

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)Suppl.2-0013-04

## CHF OF NUCLEATE POOL BOILING IN MICROGRAVITY

LIU Gang ZHAO Jian-Fu WAN Shi-Xin YAN Na

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

**Abstract** In the present paper, the phenomenon of critical heat flux (CHF) of pool boiling in microgravity are studied experimentally aboard the 22<sup>nd</sup> Chinese recoverable satellite. It has been found that the trend of CHF in different gravity conditions can be predicted well by the LD-Zuber model based on the mechanism of hydrodynamic instability, although the range of the dimensionless radius is extended by 3~4 decades above the originally set limit. It's utterly different from the results in normal gravity. Thus, it must be concluded that the dimensionless radius is not able to describe adequately the scaling of CHF in the cases of small Bond number. A new concept, namely the critical nucleate size, is proposed to explain the difference of CHF in different conditions.

**Key words** microgravity; pool boiling; critical heat flux

## 1 前 言

临界热流 (CHF) 是沸腾传热中极重要的现象, 对其准确的预测对于换热设备运行的安全性有着至关重要的意义。在过去的几十年中, 各国学者已总结出很多相关的经验或半经验关联式, 并且与相对应的地面实验结果很好地相符合, 但其经验之外的情形差异往往相当显著, 甚至存在趋势迥然不同的结果。

在计算常重力 CHF 值时, 人们较多地采用基于流体动力学不稳定性的 Zuber-Kutatelatse 关联式, 见文献 [1,2]:

$$q''_{CHF, Zuber} = K h_{lv} \rho_v^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (1)$$

其他类型的临界热流机制 (如微液膜蒸干假设等), 在某些假设前提下, 最终也得到与式 (1) 相一致的

表述 [3]。因此, 该关联式是关于临界热流最常用的预测公式和进一步研究的基础。

式 (1) 只适用于大尺寸的加热表面, CHF 与加热元件尺寸间存在着不可忽视的联系, 即所谓的尺度效应, 通常采用 Bond 数的平方根作为无量纲参数 (记为  $R'$ ) 来衡量尺度效应:

$$R' = \sqrt{Bo} = R \sqrt{\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \quad (2)$$

图 1 定性地给出了 CHF 值随  $R'$  的变化: 对于尺寸足够大的加热元件 ( $R'$  大于临界值  $R'_3$ , 区域 IV), 可以利用流体动力学不稳定性理论来描述 CHF 的产生机制, 此时 CHF 值随  $R'$  的增加而减小, 并趋于一固定值, 最为常用的是 LD-Zuber [4] 模型:

收稿日期: 2007-03-09; 修订日期: 2007-07-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程 (No.KJJCX2-SW-L05); 国家自然科学基金资助项目 (No.10432060)

作者简介: 刘 刚 (1981-), 男, 北京市人, 硕士研究生, 主要从事微重力沸腾传热的研究。

$$q''_{\text{CHF,LD}} = 0.94 (R')^{-1/4} q''_{\text{CHF,Zuber}} \quad (3)$$

$$0.15 \leq R' \leq 1.2$$

$$q''_{\text{CHF,LD}} = 0.9 q''_{\text{CHF,Zuber}} \quad R' > 1.2 \quad (4)$$

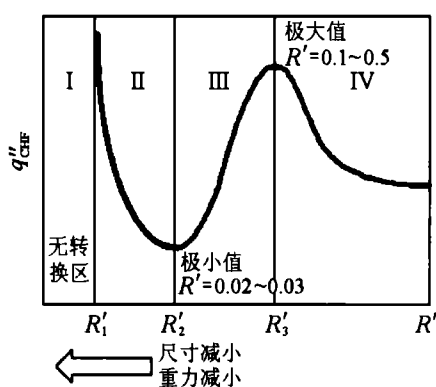


图 1 CHF 随热丝特征尺寸的变化

对于极小尺寸的加热元件  $R' < R'_1$ ，核态沸腾消失，直接由单相自然对流传经沿热丝横向扩展的汽膜过渡到膜态沸腾，传热曲线连续、单调上升，CHF 消失。当  $R'_1 < R' < R'_2$  时，CHF 值随  $R'$  的增加而减小，CHF 的产生将源于蒸汽沿热丝表面的横向传播，主要受表面张力和壁面润湿特性等影响，此时的 CHF 产生机制又被称为干斑扩展机制。而当  $R'_2 < R' < R'_3$  时为过渡区，干斑扩展机制与流体动力学不稳定性机制共存并存在相互竞争，CHF 值随  $R'$  的增加而增加。但是，目前关于不同区域的分界位置，不同研究者间有极大的差异。

上述结论来源于地面常重力实验。Straub<sup>[5]</sup> 报道了其研究小组在失重飞机和轨道飞行器上进行的丝状加热器池沸腾实验所获得的 CHF 数据，发现虽然微重力实验中获得的 CHF 值一致地低于相应的地面实验值，但仍可用 LD 模型描述，尽管其实验中加热丝的无量纲半径已超出模型原适用范围 3 个量级。Di Marco 和 Grassi<sup>[6]</sup> 依据对不同重力条件下 CHF 的比较，提出在  $R' > 0.08$  时，Bond 数是衡量尺度效应的适当参数；在 Bond 数很小时，需将重力和加热柱体尺寸的影响分别考虑。然而，Di Marco 和 Grassi 在处理微重力实验数据时存在明显的纰漏，误将常重力加速度带入 LD-Zuber 模型。重新计算后发现 Di Marco 和 Grassi 的微重力实验结果实际上仍符合 LD-Zuber 模型。

本文利用我国第 22 颗返回式卫星搭载实验机会，对微重力池沸腾中的 CHF 现象进行实验研究和理论分析，以揭示其发生机制。

## 2 实验结果

实验装置的详细描述参见文献 [7,8]。实验工质为 0.1 MPa、21°C 的 R113，空间实验中残余重力水平约  $10^{-3} \sim 10^{-5} g$ 。

图 2 为本次空间实验过程中 CHF 点附近的热流密度变化状况，此时处于热丝壁面温度的第二次上升阶段，时间轴上的点对应实验进行时间。图中同时还给出了飞行实验前、后地面常重力实验的结果。

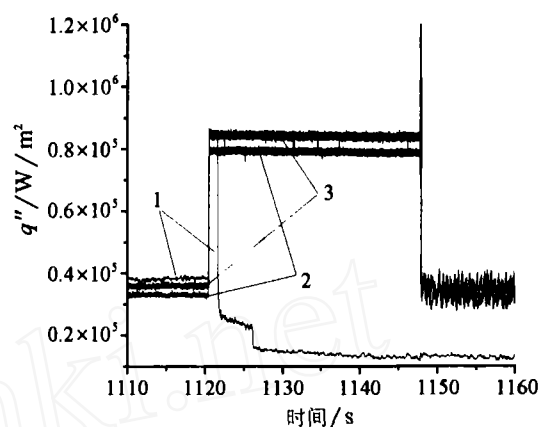


图 2 不同重力条件下 CHF 点附近热流密度的变化 (图中 1、2、3 分别表示空间与飞行前、后的实验结果)

图 2 中，左侧平台对应前一温度状态稳定的热流密度，此时沸腾处于充分发展的核态沸腾阶段。设定温度状态切换时，壁面温度的突然升高，导致热流密度随之升高：空间实验中，充分发展的核态沸腾持续存在了 1 s 左右。如图 3 所示，壁面温度的升高导致图中大气泡的脱落；脱落的大气泡与热丝右部的中等气泡合并、振荡，引起附近热丝被汽膜包裹，沸腾状态转变为双模态过渡沸腾，热流密度随之急剧下降。显然，微重力时临界热流密度应位于相邻两个温度状态对应的核态沸腾热流密度间，由此给出本次空间实验 CHF 的范围为  $(3.8 \sim 8.4) \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。而飞行前、后地面常重力环境中的 CHF 值的下限为  $7.9 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  和  $8.4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。

采用 Ivey-Morris 模型<sup>[9]</sup> 消除过冷度对 CHF 的影响。图 4 给出了本次空间实验所得到的 CHF 及其与 LD-Zuber 模型预测曲线的相对关系，二者定性相符合，尽管本次实验相比于 LD-Zuber 模型的原始适用范围  $R' \geq 0.15$  已扩大了 3~4 个数量级。

图 4 同时还显示了本项目研究过程中的地面预研实验与飞行实验前、后的地面对比实验以及文献中报道的其他实验数据，都显示了同样的趋势，即

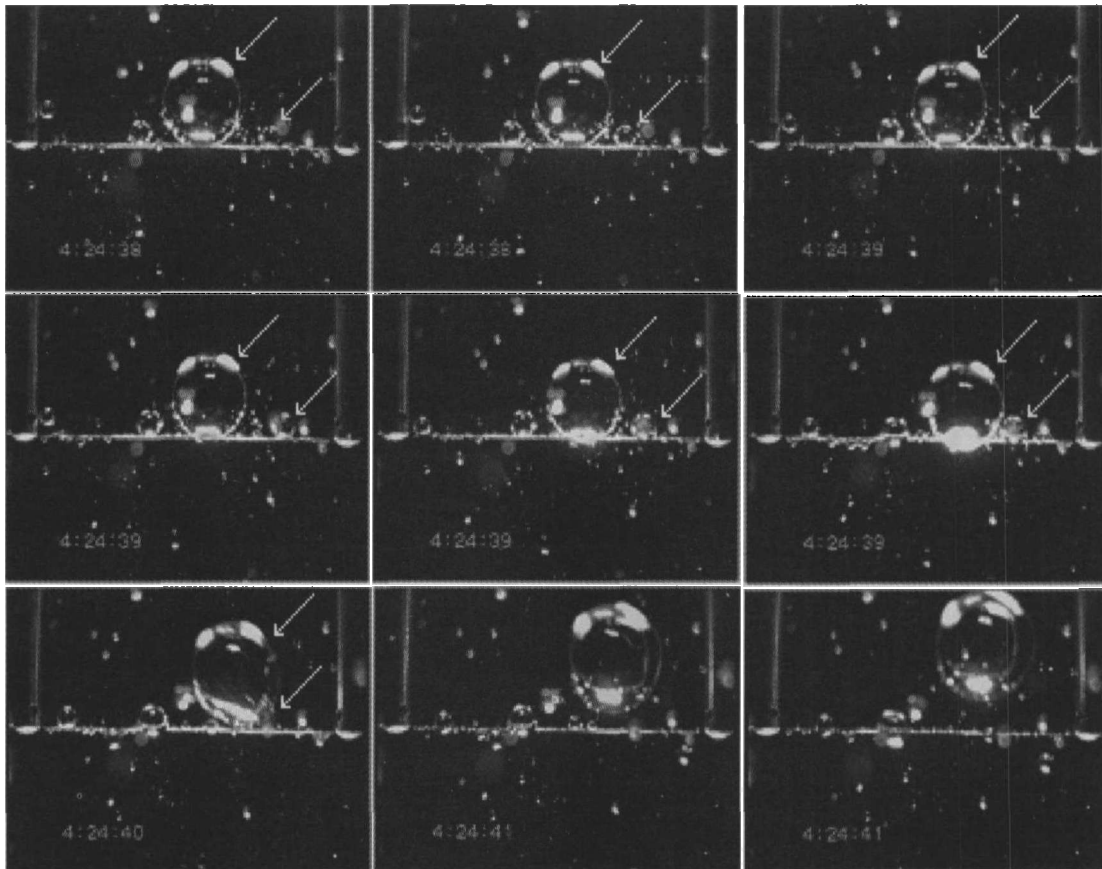


图 3 微重力时 CHF 附近的汽泡形态

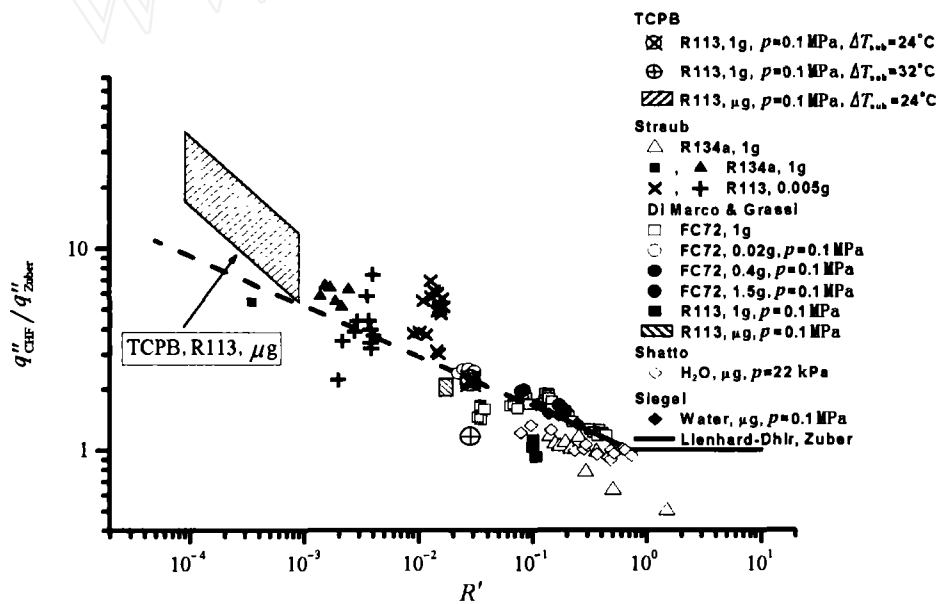


图 4 CHF 实验数据与 LD-Zuber 关联式的比较

LD-Zuber 模型定性地预测了 CHF 随重力的变化趋势。

显然, 上述结论与地面常重力实验结果差异深远, 这需从新的角度出发重新考虑了加热器尺寸对 CHF 的影响。

首先, 鉴于加热表面汽泡的生成过程是一个区域性事件, 我们提出“极限核化尺寸  $d_N$ ”的概念, 即加热表面核化点过热液体汽化时体积瞬间膨胀后所形成汽泡的最小尺寸。显然, 极限核化尺寸将与系统压力、壁面过热度、表面张力、加热表面润湿性、液体过冷度等系统热物理状态参数及加热表面活化

空穴尺寸、形状等有关,而与加热柱体直径、重力加速度等无关。因此,对于给定的系统状态,极限核化尺寸为定值,将不随重力变化而改变。由此可以组成一个新的无量纲参数  $R$ : 极限核化尺寸与加热柱体直径的比值  $R = d_N/d$ , 该参数将与 CHF 机制的转变有着直接的关系。

常重力环境中,由于重力保持不变, Bond 数  $R'$  的变化是通过改变热丝的直径来实现的。  $R'$  较大时,对应热丝直径大,无量纲参数  $R$  比较小,气泡难于包裹热丝,而倾向于从侧面脱离加热面,此时发生 CHF 的条件将满足流体动力学不稳定性机制;  $R'$  较小时,对应热丝直径小,无量纲参数  $R$  比较大,气泡易于包裹热丝,从而难于从加热面脱离,只能沿加热面横向扩展,此时发生 CHF 的条件,极有可能遵循干斑扩展机制。

变重力条件下, Bond 数  $R'$  的变化可以在保持热丝尺寸不变的前提下,通过改变重力水平来实现。由于重力不会影响极限核化尺寸,因此,无量纲参数  $R$  不会受到重力改变的影响,只要常重力时流体动力学不稳定性机制控制着热丝表面 CHF 现象的发生,则在微重力条件下同样热丝表面 CHF 的发生将依然遵循流体动力学不稳定性机制。这应该是图 4 所示结果的内在原因。

不过,如何确定极限核化尺寸以及区分不同 CHF 机制的临界无量纲参数  $R$  值,将是今后研究工作的一个重要方面。

### 3 结 论

本文对空间实验所得到的及文献中报导的不同重力条件下的临界热流密度的综合分析,发现基于流体动力学不稳定性机制的 LD-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变化趋势,尽管热丝无量纲半径比现有模型的适用范围扩大了 3~4 个数量级。这和地面常重力环境中关于临界现象尺度效应的研究结果相矛盾。本文提出了“极限核化尺寸”与无量纲参数  $R$ (即极限核化尺寸与加热柱体直径的比值)的概念,基于极限核化尺寸不依赖于重力的特点,成功解释了上述矛盾产生的原因:当  $R$  较小时,CHF 的产生将满足流体动力学不稳定性机制;当  $R$  较大时,CHF 的产生将遵循干斑扩展机制。不过,区分两种机制作用的临界参数尚需进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Zuber N. Hydrodynamic Aspect of Boiling Heat Transfer. AECU-4439, Research Laboratory Los Angeles and Ramo-Woolbridge Corporation, UCLA, 1959
- [2] Kutatelatse S S. Heat Transfer in Condensation and Boiling. AEC-tr-3770, 1959
- [3] 林瑞泰. 沸腾换热. 北京: 科学出版社, 1988
- [4] Lienhard J H, Dhir V K. Hydrodynamic Prediction of Peak Pool Boiling Heat Fluxes from Finite Bodies. J. Heat Transfer, 1973, 95: 152-158
- [5] Di Marco P, Grassi W. Motivation and Results of a Long-Term Research on Pool Boiling Heat Transfer in Low Gravity. Int. J. Thermal Sci., 2002, 41: 567-585
- [6] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity. Adv. Heat Transfer, 2001, 35: 57-172
- [7] Wan SX, Zhao JF, Liu G, et al. TCPB Device: Description and Preliminary Ground Experimental Results. In: 54<sup>th</sup> Int. Astronautical Cong.. Bremen, Germany, 2003
- [8] 赵建福, 万士昕, 刘刚, 等. 微重力池沸腾实验研究. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 454-456
- [9] Ivey H J, Morris D J. Critical Heat Flux of Saturation and Subcooled Pool Boiling in Water at Atmospheric Pressure. In: Proceedings of the 3rd International Heat Transfer Conference. Vol.III, Chicago, IL, 1966. 129-142