

微重力准稳态池沸腾中的气泡动力学研究

李晶 赵建福 闫娜 李震东

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100190)

摘要 本文实验研究了微重力条件下的准稳态核态池沸腾现象中的气泡动力学特征及其对传热特性的影响, 发现在低过冷度沸腾中, 聚合汽泡表面的强烈振荡促进了整个加热面上的核化过程与核态沸腾传热; 而高过冷沸腾中, 聚合气泡在表面张力作用下呈球状, 难以覆盖整个加热表面, 导致核态沸腾向膜态沸腾的过度过程表现为“核态沸腾 + 局部的干斑扩展”现象, 相应的传热曲线没有明显转折。微重力条件下池沸腾临界热流随过冷度和压力的增加而升高, 与地面结果定性相符。

关键词 微重力; 核态池沸腾; 气泡动力学; 临界热流; 过冷度

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)03-0419-04

BUBBLE DYNAMICS OF QUASI-STEADY POOL BOILING IN MICROGRAVITY

LI Jing ZHAO Jian-Fu YAN Na LI Zhen-Dong

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The bubble dynamics and heat transfer in quasi-steady pool boiling on a plane plate have been studied experimentally in microgravity. At low subcooling, strong oscillation of the coalesced bubbles on their surfaces may promote the process of nucleate and heat transfer; at high subcooling, the coalesced bubble shrinks to an elliptical sphere under the surface tension. Thus, it's very difficult to cover the whole surface. There is a region of transitional boiling, in which nucleate boiling and local dry area can co-exist, no turning point corresponding to CHF will be observed on the boiling curve. The CHF will increase with the subcooling or pressure in microgravity, similarly with the results obtained on Earth.

Key words microgravity; nucleate pool boiling; bubble dynamics; CHF; subcooling

0 引言

沸腾传热是一种高强度的热传递方式, 在航天领域有重要应用前景。另一方面, 由于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-汽界面处相变、流动与热传递过程, 其研究对传热学自身发展也具有重要学术意义。因此, 微重力沸腾传热研究日益受到重视, 成为微重力科学和传热学研究的前沿和热点之一, 其中, 随着研究的深入和测试技术的进步, 微重力条件下的气泡动力学特征更是目前研究的重点内容之一^[1~4]。

利用实践 8 号卫星搭载实验机会, 我们对微重力条件下不同压力、过冷度池沸腾传热现象进行了实验研究, 本文仅就空间实验中的气泡行为特性进

行分析, 以探讨相关因素对微重力核态池沸腾传热的影响。

1 实验装置与条件

本次实验装置详见参考文献 [5]。实验工质为去除不凝气体后的 FC-72。加热方式采用控制加热电压指数增加的准稳态加热方式 $U = U_0 \exp(\tau/\tau_0)$, 其中, τ 代表加热时间, 参数 τ_0 约 80 s, 满足准稳态加热条件^[6]。加热元件为嵌于聚四氟基座中的 Al_2O_3 陶瓷基片, 尺寸为 $28 \times 20 \times 1$ (mm), 有效加热区域为面积为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的蛇形多层合金薄膜 ($\text{Cu}、\text{Au}、\text{Ni}、\text{Cr}$, 总厚度约 $10 \mu\text{m}$), 标称电阻为 6Ω 。地面实验结果表明, 加热面可以视作光滑表面。

收稿日期: 2008-11-12; 修订日期: 2009-02-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程 (No.KAXC2-SW-02-03)

作者简介: 李晶 (1985-), 女, 吉林公主岭人, 硕士研究生, 主要从事微重力沸腾传热的研究。

表 1 第一阶段空间实验条件
Table 1 Space experimental conditions of the first stage

	温度 (°C)	压力 (kPa)	过冷度 (°C)	加热时间 (s)	壁面过热度 (°C)	临界热流 (W/cm ²)
I-1	17.5±1.8	90.8±0.5	36.9±2.0	52~70	22.05~89.87	7.36~9.36
I-2	30.6±1.6	97.3±0.8	25.8±1.8	50~63	28.62~64.66	6.80~8.28
I-3	36.2±1.3	102.3±0.8	21.8±1.5	50~60	30.16~59.46	6.78~7.64
I-4	39.5±1.0	105.7±0.7	19.5±1.2	53~56	15.62~32.84	7.30~7.65
I-5	43.3±1.4	111.7±1.7	18.4±1.9	55~58	10.79~27.94	7.84~8.34

空间实验分为常压与低压阶段, 共包括 12 组实验工况。限于低压实验阶段图像质量较差, 本文仅就第一阶段常压实验(表 1)的结果进行分析和讨论。

2 结果与讨论

图 1 给出了典型的空间实验过程中测量的总加

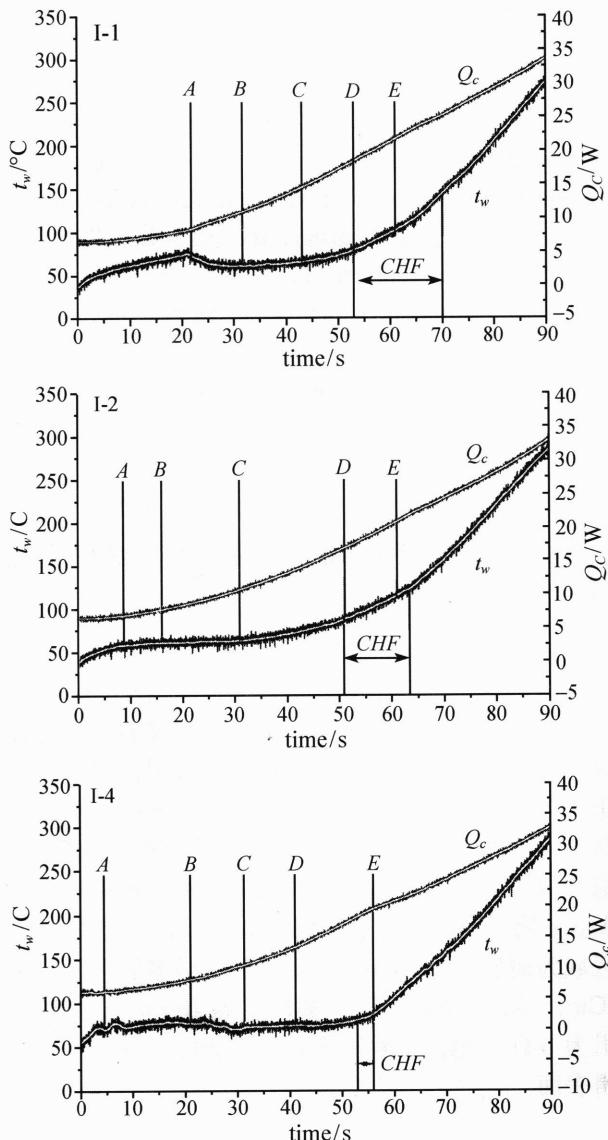


图 1 加热功率与壁温变化曲线

Fig.1 Heat transfer rate and heater temperature curves

热功率与壁面温度的变化过程, 图 2 则显示了相应的池沸腾传热曲线^[5]。空间实验中首先出现的仍然是单相传热, 由于残余重力的存在, 空间实验中可能仍存在较弱的自然对流, 首个气泡的出现即对应着单相传热模式的终止和沸腾的起始, 该时刻分别对应加热时间 21.89、8.68、8.12、4.54 s 和 4.84 s。

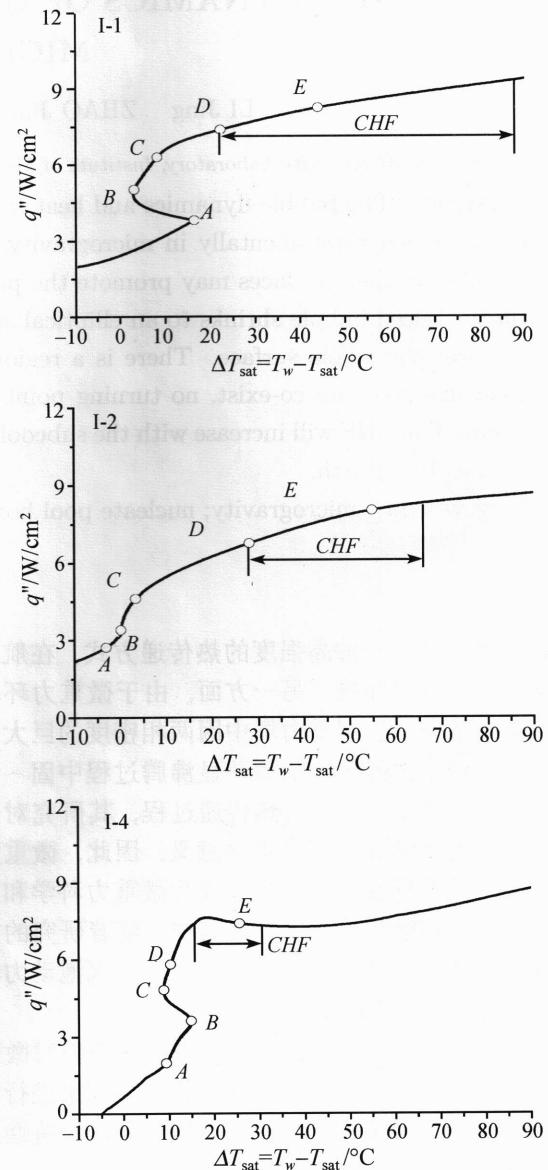


图 2 沸腾传热曲线

Fig. 2 Boiling curves in microgravity

根据记录图像回放分析发现,微重力条件下的气泡动力学特征与常重力相比有显著差异。首先,气泡生成后难以从加热面脱落,而是在加热面上不停的移动。其次,原生气泡聚合并形成大气泡,大气泡不断捕掠小气泡而长大,直到大气泡覆盖整个加热面,进入膜态沸腾。为了说明整个核态沸腾过程中气泡的动力学特性及其对传热的影响,依据壁面温度变化曲线并结合沸腾传热曲线,在沸腾起始到临界热流之间的核态沸腾阶段,选取有代表性的时刻进行分析和讨论。

实验I-1中首个气泡的出现是突然、爆发型的,呈剧烈爆沸现象(图3(a))。与此相应,壁面温度显示出了明显的回退现象。沸腾起始前壁温过冲现象,与工质和加热面间的高润湿性有关。在随后的实验I-2和I-3中,并没有出现爆沸现象,气泡在某个位置出现后,甚至有明显的停顿现象,随后才又缓慢地长大(图3(b))。相应地,壁面温度显示出了缓慢上升的趋势,没有明显的回退现象。该差异应源于前次实验的历史效应,即前次实验后壁面缺陷处可能残留有未完全凝结的气泡,导致该点易于活化,生成气泡所需的热量降低,沸腾起始难度大为下降^[7]。实验I-4、I-5中,先出现了单个气泡逐渐长大的过程(图3(c)),随后的沸腾状态处于孤立气泡区,热流密度随壁面过热度增加缓慢增大;不过,经过几秒钟后,在加热面其他部位又出现了气泡急剧生成的类似爆沸现象(图4),略有延迟之后,壁温发生明显回退,相应地沸腾进入多气泡充分发展沸腾区,而热流的迅速增加并不源于壁面过热度的增大,甚至壁面过热度还会有一些下降。

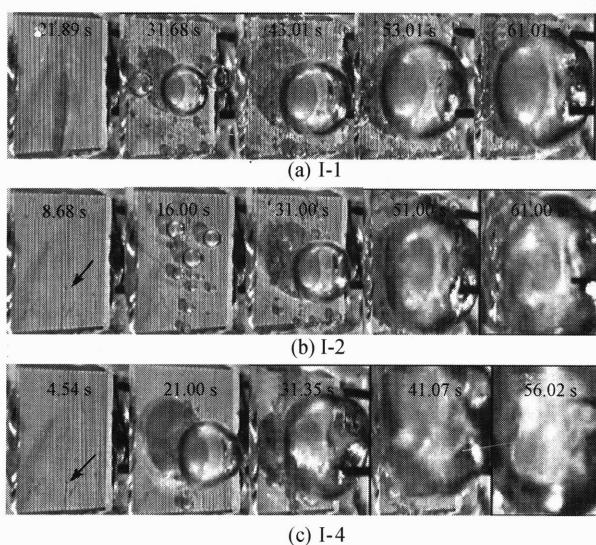


图3 典型实验中气泡行为特征

Fig.3 Bubble dynamics in the typical space experimental runs

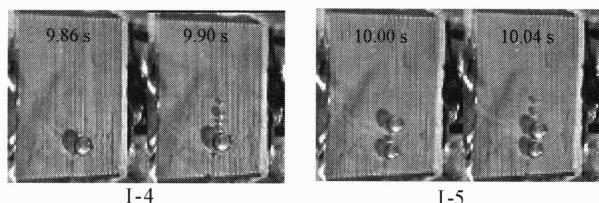


图4 类似爆沸现象

Fig. 4 Pseudo-explosive boiling

由于微重力条件下气泡难以从表面脱落,原生气泡逐渐合并,形成一个大的聚合气泡,在原生气泡及其周围液体内部微流动的影响下沿表面滑移。不过,每次实验后期,聚合气泡体积过大,同时单方向记录的图像信息也制约了对聚合气泡底部结构的详细观察。尽管如此,在临界热流附近,仍可以观察到聚合气泡底部有原生气泡生成,进而可以推断在聚合气泡底部的原生气泡活动区间存在着一个宏观液层。随着壁面过热度的增加,宏观液层的厚度将不断减小,甚至发生局部的蒸干而出现干斑;局部干斑的稳定扩展将导致临界热流现象的发生,而当在干斑完全扩展到整个加热面时,沸腾模式将由核态沸腾转变为膜态沸腾。

比较图1~3所提供的临界热流附近的信息可知,在前三次实验中,壁面温度进入明显的快速升高阶段时,由于高过冷度液体对气泡的强烈的凝结作用,原生气泡会聚合并形成的聚合汽泡尺寸较小,在表面张力作用下收缩成球状,难以覆盖整个加热面;此时,聚合汽泡底部可能发生了局部干涸,而加热面边角区域仍然维持着核态沸腾。随着加热功率的持续增加,聚合汽泡尺寸及其底部干斑尺寸相应增加,沸腾模式逐渐由核态沸腾向膜态沸腾过度。限于观测图像提供的信息较为模糊,这里假设该转变的完全实现对应于壁温随时间增长速度稳定之时。这种“核态沸腾+局部的干斑扩展”现象,应该就是对应的沸腾传热曲线上没有类似常规沸腾传热曲线对应临界热流点的明显转折点的主要原因。因此,在没有能够对加热面局部热流的详细测量的条件下,本文只能暂将该过度区间所对应的热流密度范围视作相应实验条件下的临界热流(表1)。

而在实验I-4、I-5中,液体过冷度减小,气泡被凝结的程度降低。同时,液体压力的升高也使其饱和温度有所提高,引起表面张力下降,对气液界面的约束能力降低。这样,气泡合并及其横向滑移等原因引起的聚合汽泡的表面振荡,将使其能较好地覆盖整个加热表面,引发加热面上大范围的缺陷空穴(核化点)的活化,导致在壁面过热度增加不大甚至

略有下降的情况下，热流密度仍能不断增长；同时，聚合气泡的表面振荡也使得加热面局部干斑难以稳定地持续扩展，除非整个加热面都被气膜覆盖而完全转变为膜态沸腾。因此，沸腾模式由核态沸腾向膜态沸腾的转变会对应着沸腾传热曲线上的一个明显的转折点。不过，本文仍然依据壁温变化曲线，将相关范围内的热流密度作为其临界热流密度的变化范围，显然，其变化幅度要小于前3次实验。

实验结果表明，随着过冷度的减少，临界热流呈下降趋势，这与地面研究结果定性相符，应该源自过冷液体的贡献。实验I-5略显异常，究其原因，可能在于相对于前几次实验，其过冷度变化甚微而对应压力却有明显的增加（表1），因此，反映了压力对临界热流的影响，这种影响也与地面研究关于压力对临界热流的影响相一致。

3 结 论

本文对准稳态加热条件下的微重力核态池沸腾中的气泡行为特征进行了实验研究，分析了初始核化过程、以及气泡的运动特性对核态沸腾、临界热流的影响，探讨了过冷度及加热历史等因素对相关特性的影响。

微重力条件下的气泡动力学特征与常重力相比有显著差异，并直接影响着沸腾传热特征。高过冷沸腾中，球状聚合气泡难以覆盖整个加热表面，导致核态沸腾向膜态沸腾的过度对应于“核态沸腾+局部的干斑扩展”现象，相应的沸腾传热曲线上没有类似常规沸腾传热曲线对应临界热流点的明显转折点。高压力、低过冷度沸腾中，表面张力的下降及聚

合汽泡表面的强烈振荡，促进了整个加热表面上的核化过程，强化了核态传热，也使得临界热流现象接近于常规途径，即整个加热面都被气膜覆盖而完全由核态沸腾转变为膜态沸腾。

根据沸腾过程中记录的图像及壁温变化趋势，确定了临界热流发生的位置。比较发现，临界热流随过冷度减小而降低，而压力的增加也会导致临界热流的升高。这些均与地面研究结果定性相符。

参 考 文 献

- [1] Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity. *Adv. Heat Transfer*, 2001, 35: 57-172
- [2] Di Marco P. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: European Research. *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 252-263
- [3] Kim J. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: US Research. *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 264-271
- [4] Ohta H. Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: Japanese research, *J. Jpn. Microgravity Appl.*, 2003, 20(4): 272-285
- [5] 闫娜. 微重力池沸腾传热实验研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007
YAN Na. Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer in Microgravity: [Master's Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [6] Johnson H A. Transient Boiling Heat Transfer to Water. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1971, 14(1): 67-82
- [7] 李晶, 赵建福, 闫娜, 等. 微重力池沸腾实验中的气泡行为特性研究. *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