0254-6124/2012/32(4)-544–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Jing, Zhao Jianfu, Xue Yanfang, Wei Jinjia, Du Wangfang, Guo Dong. Experimental study on growth of an isolated bubble utilizing short-term microgravity drop tower. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 544-549

孤立气泡生长过程的短时微重力落塔实验研究 *

李 晶[1] 赵建福[1] 薛艳芳[2]
魏进家[2] 杜王芳[1] 郭 栋[2]

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)

摘 要 利用中国科学院国家微重力实验室北京落塔提供的 3.6 s 微重力时间开展了短时微重力条件下的池沸腾实验研究, 分析了微重力条件下孤立的单个气泡生长过程特征. 实验中采用掺杂磷的 N 型光滑硅片作为加热面 (加热片尺寸 10 mm×10 mm×0.5 mm), 以含气率 0.0046 (气液摩尔分数比) 的 FC-72 作为工质, 利用恒流源对加热片通电加热. 通过对实验观测到的单个气泡生长图像及相应传热数据分析可知, 经典传热机制控制的气泡生长模型可以描述其早期特征. 相关模型中经验参数的拟合结果在文献报道的数值范围内, 表明重力对气泡生长早期影响较小, 但较大的气泡尺寸可以提供更准确的数值结果.

关键词 微重力, 核态池沸腾, 气泡动力学

中图法分类号 V 524

Experimental Study on Growth of an Isolated Bubble Utilizing Short-term Microgravity Drop Tower

LI Jing[1] ZHAO Jianfu[1] XUE Yanfang[2] WEI Jinjia[2]
DU Wangfang[1] GUO Dong[2]

1(*Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049)

Abstract Pool boiling in short-term microgravity has been studied experimentally utilizing the Drop Tower Beijing of the National Microgravity Laboratory of Chinese Academy of Sciences, which can provide a microgravity period of 3.6 s. The growth process of an isolated bubble in microgravity has been presented and analyzed in detail. A P-doped N-type square silicon chip with the dimension of 10 mm×10 mm×0.5 mm with a smooth surface was used for the heater element. Subcooled FC-72 with a concentration of air of 0.0046 moles gas/mole liquid was used as the working fluid. Electric heating with constant current was used to input the heat into the heater element. Analyses on high-speed images of the growth process of an isolated bubble and on the data of heat transfer obtained

* 国家自然科学基金项目资助 (10972225, 11102213, 50806057)
2011-12-14 收到原稿, 2012-05-08 收到修定稿
E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

in the experiments have also been conducted. It is found that the bubble growth model based on classical thermal-controlled mechanism can describe the early period of bubble growth observed in the experiments. The value of the empirical parameter in the relative model is inside the range reported in the literature, which indicates that gravity has a much slight influence during the early period of bubble growth. For large size bubble in microgravity, however, data accuracy can be greatly improved than the small sized bubble.

Key words Microgravity, Nucleate pool boiling, Bubble dynamics

0 引言

沸腾是伴随有大量气泡生成运动的高效传热过程, 广泛应用于工业生产中. 同时由于其较高的传热性能, 满足空间应用对设备高效、轻质以及尺寸限制等严格要求, 随着航天事业和空间应用的发展, 在设计及运行过程中, 需要相关的沸腾传热理论支持, 但在空间微重力环境下, 由于重力的减弱或消失, 现有的地面理论模型和传统经验公式难以准确计算预测, 这就迫切需要完善微重力沸腾传热理论. 与此同时, 在微重力条件下, 沸腾传热可以避免浮力效应的影响, 凸显被浮力掩盖的微观效应, 气泡尺度扩大有助于研究液气固三相界面间的细观流动, 揭示沸腾传热的机理, 因此, 在探索沸腾传热内在机制的过程中, 微重力沸腾研究具有重要意义.

对微重力沸腾传热的研究始于 20 世纪五六十年代 [1], 其主要动力来自航天活动需要. 现有的实验结果证明, 稳态的池沸腾是可以在微重力条件下存在的, 尤其是在高过冷度和低热流的情况下, 但是微重力沸腾传热性能较地面强化或恶化以及具体变化大小, 目前仍无定论 [2−6]. 造成上述现状的原因首先在于极为紧缺的空间实验机会. 其次, 已有研究较为普遍地沿袭了基于平均特征及半经验数据关联等的传统研究方法也是其中原因之一. 由此, 细观流动过程和传热机制的研究成为关注的热点. 例如, Ohta 等 [7] 研制了具有微型温度传感器和液膜厚度传感器的透明加热元件, 对微重力池沸腾过程中的聚合气泡底部微液膜厚度和局部温度分布进行观测, 指出微液膜对传热特征具有重要影响. Kim 等 [8] 研制了微型加热元件阵列, 精确控制加热面温度的均匀与恒定, 实验研究了加热元件尺寸影响, 并精细区分了加热面上局部沸腾模式, 指出核态沸腾传热性能基本不受重力影响, 但其份额在不同重力条件下有极大差异. Qiu 和 Dhir 等 [9] 研制了具有人工空穴的单气泡沸腾装置, 对失重条件下气泡生长过程进行了观测, 发现失重条件下气泡尺寸和生长时间均明显高于地面, 气泡脱落直径正比于重力加速度的 -0.5 次方, 生长时间则正比于重力加速度的 -1.05 次方. Schweizer 和 Stephan[10] 研制了具有人工空穴的金属薄板加热器, 采用红外热像和液晶测温技术对气泡底部加热面温度分布进行观测, 指出液气固三相接触线附近蒸发剧烈, 加热面温度存在明显下降, 而局部热流密度增强. 微重力沸腾传热精细化的机制性研究作为一种重要发展趋势, 正越来越得到重视, 以充分利用珍稀的微重力实验机会, 促进沸腾传热研究水平的提高.

本文利用中国科学院国家微重力实验室北京落塔提供的短时 (3.6 s) 微重力环境, 对微重力孤立气泡区核态池沸腾现象中的单个气泡生长过程进行实验研究, 并对所获得的气泡生长图像与传热数据进行分析和比较.

1 实验装置

加热片采用尺寸为 10 mm×10 mm×0.5 mm 的掺杂磷的 N 型光滑硅片, 其底部用环氧胶无缝粘连在聚碳酸酯基座上, 整个基座固定于有机玻璃底座, 后者又粘接在液池底部. 这既有利于加热片的拆卸和替换, 又可以避免微重力实验过程中测试件的漂移, 同时还可减少通过芯片背部的热量损失. 加热片底部连接两根直径 0.25 mm 的铜线, 电阻变化范围约为 74.6 ∼ 73.5 Ω. 沸腾实验采用恒电流加热方式. 加热片背面中心处和距芯片外缘 45 mm 处的液体内各布置一个直径 0.13 mm 的 T 型热电偶进行加热片壁温和工质温度的测量, 测量范围均为 0∼100 °C, 不确定度均为 0.5 °C. 实验过程中, 温度、加热电压

等信号采用 DI-710 数字信号采集器采集. 加热电压和电流的不确定度分别为 0.001 V 和 0.01 A. 由此推算, 加热面向液体工质传递的热流密度不确定度为 0.5 W·cm^{-2}.

沸腾过程中的气泡行为采用高速摄像机 (VITcam CTC) 记录, 拍摄速度设置为 250 frame·s^{-1}, 分辨率 1024×640 (pixel), 曝光时间为 1/2000 s. 图像逐帧分析时, 首先采用 MATLAB 提取气泡边缘坐标. 由于只有单方向图像, 并考虑到微重力条件下没有对流等因素影响, 假设气泡是一个旋转体, 旋转轴垂直于加热表面, 进而计算出气泡尺寸等参数随时间的变化. 根据图像分辨率及视场尺寸估算, 气泡等效直径的不确定度为 0.01 mm.

2 实验流程与参数选择

实验在中国科学院微重力重点实验室北京落塔中采用单舱模式进行, 微重力水平 $10^{-2} \sim 10^{-3}\,g_0$, 微重力持续时间 3.6 s. 为避免重力引起的自然对流影响, 沸腾实验的启动在落舱释放后开始. 这需要精心选择沸腾延迟时间, 以保证在 3.6 s 的短时微重力条件下沸腾能够达到稳定状态.

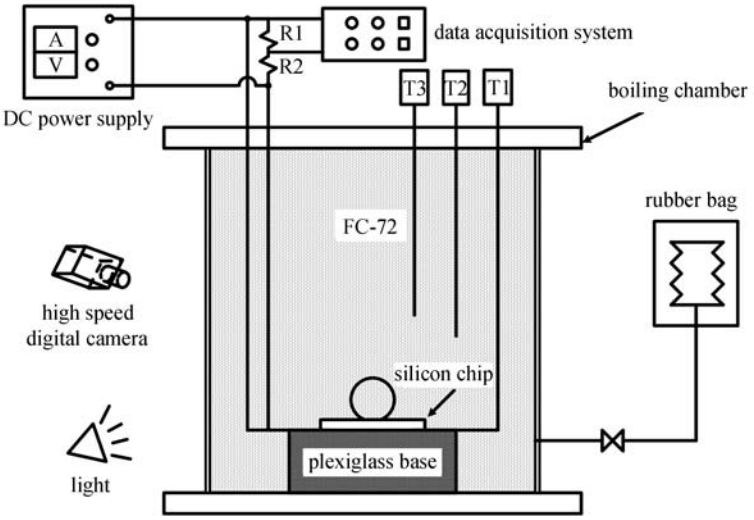

图 1 单气泡落塔实验装置

Fig. 1 Facility of single bubble pool boiling for drop tower experiments

为此, 落塔实验前首先利用该装置进行沸腾延迟时间的地面测量. 图 2 表明, 从加热开始到加热面温度达到稳定所需要的时间 (即延迟时间) 随着加热电流的增加而减小, 当电流大于 0.3 A 时, 延迟时间小于 3.6 s. 另外, 为了观测孤立的单个气泡的生长过程, 还需要限制加热电流不能过大, 以免沸腾起始之后直接进入充分发展的核态沸腾模式, 从而导致无法分辨单个气泡的生长过程. 经过实验, 确定落塔实验中加热电流在 0.3~0.35 A 范围内.

实验过程采用人工遥控方式启动, 落塔系统及沸腾装置自检完成后, 在释放落舱的同时, 利用无线遥控装置启动恒流源对加热片进行加热, 恒流源启动与落舱释放时间的差别保持在 ±1.2 s. 图 3 显示了压力

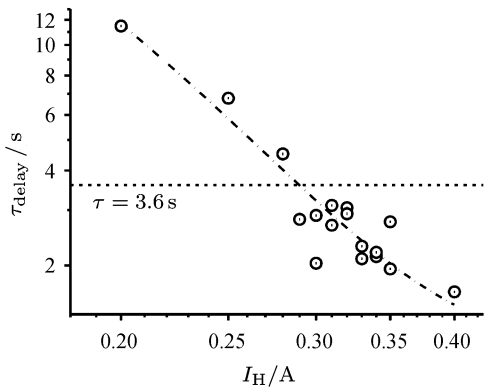

图 2 地面常重力环境中沸腾延迟时间与加热电流的关系

Fig. 2 Relationship between delay time and heating current under normal gravity

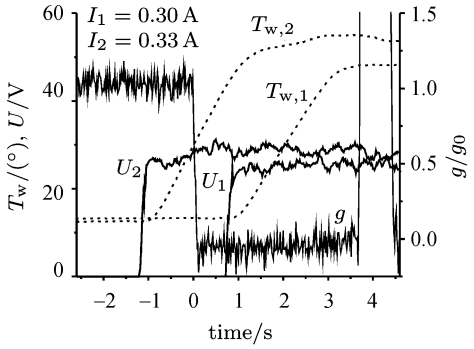

图 3　落塔实验过程

Fig. 3　Processes of drop tower experimental runs

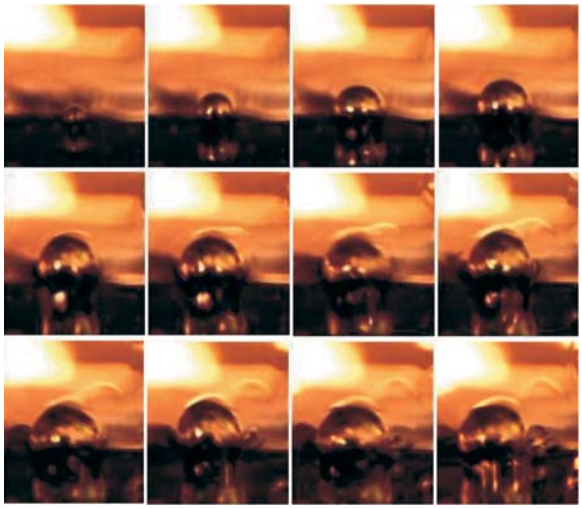

图 4　孤立气泡生长过程 (图像间隔 0.02 s, 首帧对应落舱释放后 0.644 s)

Fig. 4　Growing process of a single isolated bubble (interval between adjacent images is 0.02 s, while the first image is obtained at 0.644 s after the release of drop capsule)

102 kPa、过冷度 45.9 K、加热电流分别为 0.30 A 和 0.33 A 时加热电压、加热片温度及重力信号的变化. 实验数据与图像表明, 在 3.6 s 的短时微重力条件下, 两次实验中沸腾过程均达到了统计意义上的稳定状态. 此外, 对图像的分析也表明, 即使在落舱释放前 1.2 s 开始加热, 液池内也没有形成明显的自然对流, 不会导致残余的自然对流效应衰减不掉而影响微重力实验结果.

3　实验结果与分析

对短时落塔实验中记录的高速图像分析发现, 在加热电流为 0.33 A, 落舱释放后 0.644 s 时, 观察到了孤立的单个气泡产生; 随后, 该气泡在加热面固定位置处不断长大 (见图 4). 0.944 s 时, 沸腾进入充分发展模式, 该气泡被周围激发出来的大量气泡包围、合并, 形成为一个较大的聚合气泡.

利用 MATLAB 提取了该气泡的边缘位置坐标. 鉴于高速摄像机只从一个方向 (即接近与加热面平行的方向) 观测和记录气泡形态, 这里假设气泡是一个绕其垂直于加热面的中心轴旋成体. 同时, 为避免读数误差, 首先对提取的气泡边缘位置坐标进行平均化处理, 再计算其体积及等效直径等 (见图 5).

图 6 显示了该气泡生长过程中等效直径 $d_{B,eff}$ 以及加热面温度 T_W、传递给液体的热流密度 q 等的变化. 这里, 气泡生长时间的 0 点假设为首次观测到明显气泡所对应的时刻. 图 3 和图 6 均显示了气泡生长过程中壁面温度和热流密度的非稳态性, 不过, 整个生长过程中, 壁温升高幅度约为 11%, 而热流密度下降约 13%, 可以近似视作准稳态过程.

可以看到, 气泡生成后, 其等效直径随时间增加而增大. 在气泡生长早期, 等效直径与时间的 1/2 次方成正比; 而在气泡生长后期, 气泡尺寸增长变慢, 近似维持在一个定值, 甚至有略微的下降. 前者类似于经典传热机制控制的沸腾气泡生长模式, 而后者可能源于气泡顶端与冷液体接触, 导致气泡冷凝收缩.

在进一步分析之前, 由于本文研究中, 实验工质

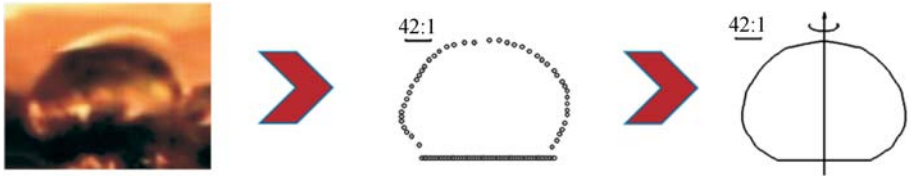

图 5　气泡等效直径的计算方法

Fig. 5　Method for computing of the equivalent diameter of bubble

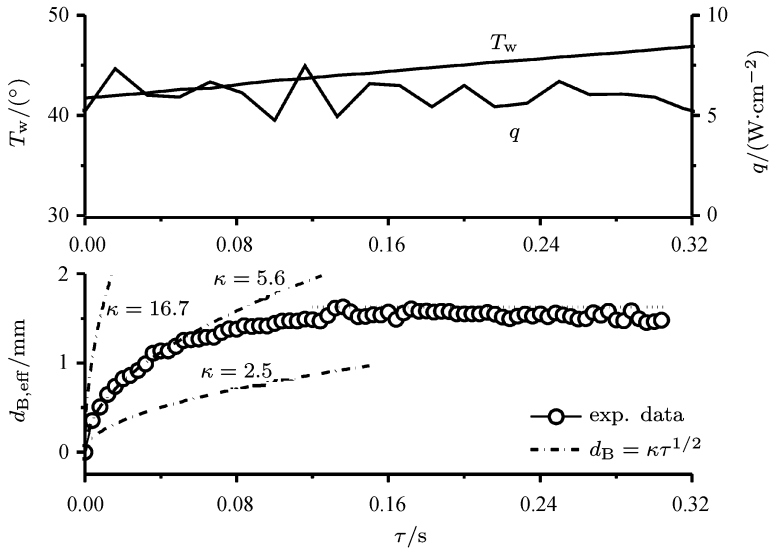

图 6 孤立气泡生长曲线

Fig. 6 Growing curves of a single isolated bubble

并未除气, 因此必须首先确定含气率等相关参数. 对含不凝气体的实验工质 FC-72, 定义其含气量为 [11−12]

$$C_g = M_g/M_l. \tag{1}$$

其中, M 代表摩尔数, 下标 g 和 l 分别代表不凝气体和 FC-72 液体. 根据 Herry 定律,

$$C_g = H(T_l)p_g. \tag{2}$$

在本文研究参数范围内, 比例常数 $H(T_l) = 5.4\times10^{-5}$ $(mol·mol^{-1}·kPa^{-1})$[13], 不凝气体分压 $p_g = p_t - p_v$, 而 FC-72 的蒸气分压 p_v 为液体温度 T_l 所对应的饱和压力, 即 $p_v = 10^{9.729-1562/T_l}$. 由此可以计算出本文研究中实验工质 FC-72 的含气量 $C_g = 0.0046$.

关于池沸腾现象中气泡生长过程的半理论机制模型或纯经验数据关联式非常多. 对于传热机制控制的区域, 不同模型均归结为 [14]

$$d_B = \kappa\tau^{1/2}. \tag{3}$$

其中, 比例常数 κ 依赖于实验工质物性、过冷度等, 但不同模型取值变化极大. 例如, Labuntsov 模型 $\kappa = 2(2\beta\alpha_l Ja)^{1/2}$, Hutcherson 模型 $\kappa = 2(12\alpha_l Ja/\pi)^{1/2}$, Cole-Shulman 模型 $\kappa = 5Ja^{3/4}\alpha_l^{1/2}$. 其中, Jacob 数 $Ja = \rho_l c_{p,l}[T_w - T_{sat}(p_v)]/(\rho_l h_{lv})$, 液体热扩散系数 $\alpha_l = k_l/(\rho_l c_{p,l})$, 参数 β 约为 5.6~6.7 (推荐值为 6). 这些不同模型预言的 κ 值相差极大, 分布在相当宽的范围 (2.5~16.7) 内. 从侧面反映了当前研究的缺陷和不足, 究其原因, 在地面常重力下浮力主导的气泡脱落过程中, 气泡脱落尺寸过小且气泡生长时间极短导致测量误差难以缩小可能是关键因素之一. 因此, 利用微重力实验减弱浮力影响, 增大气泡生长时间和脱落尺寸, 可以提供更准确的测量数值, 对模型参数的具体取值在精度上可能有较大提高, 更利于相关分析过程.

基于现有落塔实验数据, 对单个气泡生长的早期阶段进行拟合, 可以得到 $\kappa = 5.6$. 该结果未超出上述范围, 既表明经典传热机制控制的气泡生长模型可以描述其早期特征, 也间接表明重力对气泡生长早期影响较小.

4 结论

利用中国科学院国家微重力实验室北京落塔提供的 3.6 s 微重力时间开展了短时微重力条件下的池沸腾实验研究, 分析了微重力条件下孤立的单个气泡的生长过程特征. 首先, 利用地面热延迟实验结果, 精心设计落塔实验参数, 确保在 3.6 s 短时微重力时间内获得稳定的核态池沸腾现象. 对实验观测到的

单个气泡生长图像及相应传热数据的分析表明, 经典传热机制控制的气泡生长模型可以描述其早期特征. 相关模型中的经验参数拟合结果在文献报道的数值范围内, 表明重力对气泡生长早期影响较小. 微重力实验中较大气泡尺寸可以提供更准确的测量数值, 因此, 对模型参数的具体取值在精度上可能有较大提高, 更利于相关分析过程.

致谢 中国科学院国家微重力实验室北京落塔工作人员在项目准备与实施中给予了大力帮助.

参考文献

[1] Siegel R. Unsiskin C. A photographic study of boiling in the absence of gravity [J]. *J. Heat Transfer*, 1959, **81**:230-236

[2] Straub J. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity [J]. *Adv. Heat Transfer*, 2001, **35**:57-172

[3] Di Marco P. Review of reduced gravity boiling heat transfer, European research [J]. *J. Jpn. Microgr. Appl.*, 2003, **20**:252-263

[4] Kim J. Review of reduced gravity boiling heat transfer: US research [J]. *J. Jpn. Microg. Appl.*, 2003, **20**:264-271

[5] Ohta H. Review of reduced gravity boiling heat transfer: Japanese research [J]. *J. Jpn. Microg. Appl.*, 2003, **20**:272-285

[6] Zhao J F. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2010, **36**(2):135-143

[7] Ohta H, Kawasaki K, Azuma H, *et al*. On the heat transfer mechanisms in microgravity nucleate boiling [J]. *Adv. Space Res.*, 1999, **24**(10):1325-1330

[8] Kim J, Lee J, Kim M H. Experimental study on single bubble growth under subcooled, saturated, and superheated nucleate pool boiling [J]. *J. Mech. Sci. Tech.*, 2006, **20**(5):692-709

[9] Qiu D M, Dhir V K. Single-bubble dynamics during pool boiling under low gravity conditions [J]. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2002, **16**(3):336-345

[10] Schweizer N, Stephan P. Experimental study of bubble behavior and local heat flux in pool boiling under variable gravitational conditions [J]. *Multiphase Sci. Tech.*, 2009, **21**:329-350

[11] You S M, Simon T W, Bar-Cohen A, *et al*. Effect of dissolved gas content on pool boiling of a highly wetting fluid [J]. *J. Heat Transfer*, 1995, **117**:687-692

[12] O'Connor J P, You S M, Chang J Y. Gas-saturated pool boiling heat transfer from smooth and micro porous surfaces in FC-72 [J]. *J. Heat Transfer*, 1996, **118**:662-667

[13] Henry C D, Kim J, McQuillen J. Dissolved gas effects on thermocapillary convection during boiling in reduced gravity environments [J]. *Heat Mass Transfer*, 2006, **42**:919-928

[14] Kolev N I. Multiphase Flow Dynamics 2 Mechanical and Thermal Interactions [M]. Berlin: Springer, 2002. 387-389