

LIU Peng, WU Ke, DU Wangfang, ZHAO Jianfu, LI Huixiong, LI Kai. Experimental study on bubble behaviors in microgravity pool boiling (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, 38(2): 221-226. DOI:10.11728/cjss2018.02.221

微重力池沸腾中的气泡行为实验研究^{*}

刘鹏^{1,2} 吴克^{1,2} 杜王芳¹
赵建福^{1,2} 李会雄³ 李凯^{1,2}

1(中国科学院力学研究所 中国科学院微重力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

3(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 采用图像分析方法,对实践十号返回式科学实验卫星沸腾气泡实验项目获得的微重力单气泡过冷沸腾实验图像进行研究,提取并分析了微重力条件下单个气泡的生长过程.实验中观察到气泡激发形成、稳定黏附生长和滑移三个阶段,其中气泡稳定黏附生长又可分为底部扩张与回退两个子阶段.在气泡稳定黏附生长的底部扩张子阶段,气泡半径可以表示为时间的指数函数,时间指数从初期小气泡时的 0.42 减小到中期的 0.28,最终趋于 0.气泡尺寸在气泡底部收缩之初略有回调,随后再次缓慢增大,直到过冷液体完全侵入气泡底部,使气泡与加热面脱离,并在外界扰动作用下在加热面上滑移.相关数据可以作为沸腾现象中气泡热动力学分析的依据.

关键词 微重力,单气泡沸腾,气泡热动力学

中图分类号 V524

Experimental Study on Bubble Behaviors in Microgravity Pool Boiling

LIU Peng^{1,2} WU Ke^{1,2} DU Wangfang¹
ZHAO Jianfu^{1,2} LI Huixiong³ LI Kai^{1,2}

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

2(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

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

Abstract In this paper, the image analysis method is used to study the experimental data of the single bubble subcooled boiling experiment aboard the Chinese recoverable satellite SJ-10. The growth process of single vapor bubble in microgravity is extracted and analyzed. The bubble formation by the pulse excitation, steady growth of the bubble adhering to the excitation point, and its sliding over the heating surface are observed. Among the above three stages, the stage of steady

* 国家自然科学基金项目 (U1738105) 和中国科学院前沿科学重点研究计划项目 (QYZDY-SSW-JSC040) 共同资助

2017-08-22 收到原稿, 2018-01-11 收到修定稿

E-mail: liupeng173@mails.ucas.ac.cn. 通信作者赵建福, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

growth of the bubble adhering to the excitation point can be divided into two sub-stages, *i.e.* expansion and retreat of the bubble base. During the bubble base expansion sub-stage, its radius can be expressed as an exponential function of time. The exponent decreases from 0.42 for the smaller size to 0.28 for the medium one, and finally to 0. The bubble size slightly retraces at the beginning of the bubble base retreat, and then slowly increases again until the subcooled liquid penetrated the bottom of the bubble completely, causing the bubble to detach from the heating surface and then slid on the heating surface under the external disturbance. The results can be used as the basis for the analysis of bubble thermal dynamics in boiling phenomena.

Key words Microgravity, Single bubble boiling, Bubble thermal dynamics

0 引言

核态沸腾具有很高的传热效率,在工程中有着广泛应用.核态池沸腾中伴随有大量气泡的形成、生长、脱离和运动等复杂行为,气泡复杂的热动力学行为对沸腾传热特性有着显著影响.常重力环境中,浮力通常主导着气泡的热动力学行为,尤其是气泡脱落行为及随后的运动^[1].浮力主导的气泡运动客观上掩盖了加热面附近局部相变、流动与传热过程的基本特征,妨碍了对沸腾传热机理的理解.微重力环境能够有效抑制浮力作用,使沸腾过程中相应的时间尺度和空间尺度都得到很大扩展,便于深入探究加热面附近的局部相变、流动与传热过程的基本特征,揭示沸腾传热机理,推动沸腾传热学发展.

为了排除加热表面核化点随机分布及其与邻近气泡间的相互作用等影响,更好地探索气泡生长过程中的微观流动与局部传热过程特征,通常采用单气泡沸腾作为研究核态池沸腾的单元模型.这对于低热流条件下孤立气泡区的沸腾现象尤为适宜.

单气泡沸腾实验中常见的气泡生成方法有人工空穴法、电解法和局部过热法等. Qiu 等^[2]在硅加热表面蚀刻出约 $10\mu\text{m}$ 的人工空穴,研究了失重条件下的气泡生长过程. Dhir 等^[3]在抛光的铝加热面上设置 5 个人工空穴作为气化核心用以激发气泡,在国际空间站进行了单气泡沸腾和多气泡沸腾的实验. Fischer 等^[4]同样采用人工空穴法,观测微重力环境中单个气泡的生长、运动及其底部温度和热流的分布.然而人工空穴法难以保证气泡激发的成功率和准确时间,给实验现象的精细观测带来一定困难.

Nakabeppu 和 Wakasugi^[5]利用 MEMS 技术制作了集热触发和薄膜热电偶于一体的传感器,进行地

面常重力条件下的单气泡池沸腾实验.实验最初设计采用局部过热法产生微小气泡囊胚,但初步测试中热触发器即烧断,无法使用.不过由于其实验工质为去离子水,因此将断开的热触发器两端作为电极,改用电解法成功获得单气泡,实现了对气泡行为和气泡底部加热面温度的观测.但是电解法对其他工质并不适用.

在实践十号返回式科学实验卫星项目中,SOBER-SJ10 作为其中一项空间实验任务,采用局部过热法在固定位置和确定时刻激发气泡的生成^[6-8],成功实现了气泡激发时空精准控制下的单气泡池沸腾微重力实验.本文对实验中得到的气泡生长过程图像资料进行分析,研究气泡的生长过程,特别是气泡直径变化规律,为相应数值模型提供比较的依据.

1 单气泡沸腾实验装置

SOBER-SJ10 装置主要由密封机箱、电控箱、沸腾液池和 CCD 组件等功能单元模块组成(见图 1),其外包络尺寸为 $424.5\text{mm}\times 330\text{mm}\times 280\text{mm}$,质量 24.8kg .其中,沸腾液池本体为正八边形柱体,内部截面积约 166cm^2 ,深为 21.6cm ,盛装约 2.8L 除气后的 FC-72 液体.液池端盖上焊接有波纹管稳压器,以被动调节液池内部的液体压力,保证实验过程中液池压力的相对稳定.液池侧壁安装的配件包括 3 个照明窗口组件(含 LED 照明灯)、2 个观察窗口组件、密封接插件、薄膜预热器(外壁)及 2 路液池壁温传感器(内壁).

单气泡沸腾实验的核心装置为集成微加热器,其采用了 MEMS 技术,在厚度为 2mm 、面积为 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的石英玻璃基片正面上集成加工了

气泡激发器和 10 个局部温度传感器 (见图 2a 和 2b), 同时在石英玻璃基片背面加工了主加热器 (见图 2c), 并采用 COB 封装技术形成一个独立的器件 (见图 2d). 实验过程中利用气泡激发器局部过热生成气泡, 并由主加热器持续加热促使气泡生长. 集成微加热器焊装在前置采集板上, 后者通过安装支架固定在液池底部. 前置采集板上还焊装有 2 只 Keller PAA-4LD 型数字式绝压传感器, 对液池温度及压力进行测量. 其中, 压力量程为 0~0.3 MPa, 测量不确定度为 0.5%FS; 温度量程为 0~100°C, 测量不确定

度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. 前置采集板还直接对液池内部 16 路模拟量数据 (包括 2 路液池壁温、12 路集成微加热器多点局部温度信号、主加热器加热电流和电压各 1 路) 进行采集. 在整个实验过程中, 液池壁温、液池温度及压力的采样频率为 1/3 Hz; 而集成微加热器相关信号 (局部温度、主加热器加热电流和电压) 的采样频率在非单气泡沸腾阶段为 1/3 Hz, 在单气泡沸腾过程中为 500 Hz, 以获得足够的时间分辨率.

实验过程中通过 2 路 CCD 同时视频记录相互垂直的两个方向上气泡生长的图像, CCD 相机采用已取得航天应用经验的 Watec WAT-660D CCD 相机, 采样帧率为 25 fps, 图像采用奇、偶行扫描方式, 按照 H.264 格式进行数字编码压缩存储, 在卫星过境期间下传地面; 采用光控方式实现视频图像与科学数据记录同步, 即先开启图像系统记录一段无光照全暗影像, 然后定时启动光照, 以明暗帧位置交替时刻确定记录图像与科学数据的时间同步.

空间实验按照液体温度分为 5 个阶段, 每个阶段包括 5 次沸腾实验. 其中前 4 次实验为单气泡沸腾模式, 气泡激发器启动, 主加热器电压保持恒定. 第 5 次实验为常规池沸腾模式, 气泡激发器不启动, 主加热器电压阶梯提升. 本文分析对象为 SE1/3.2 (空间在轨实验第 3 阶段第 2 次实验) 中的单气泡沸腾模式实验中观测到的生长气泡特征. 该实验中, 液体温

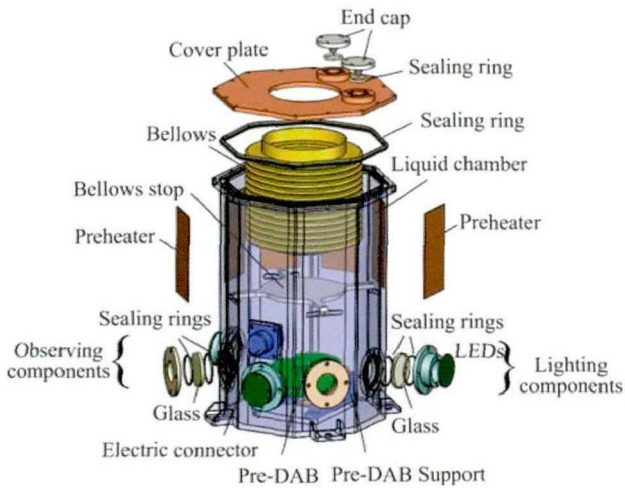


图 1 沸腾液池结构

Fig. 1 Assembly of boiling pool

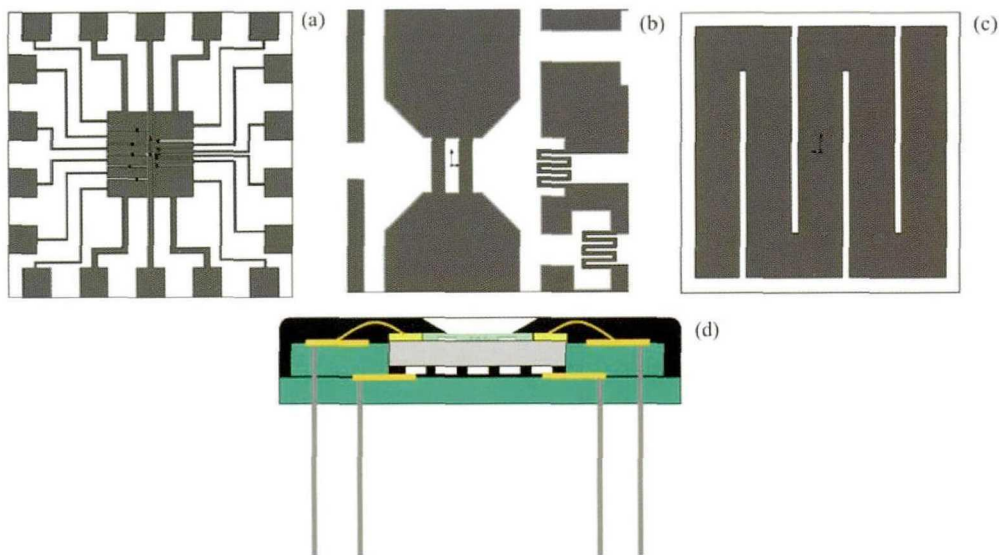


图 2 集成微加热器

Fig. 2 Schematic of the integrated micro-heater

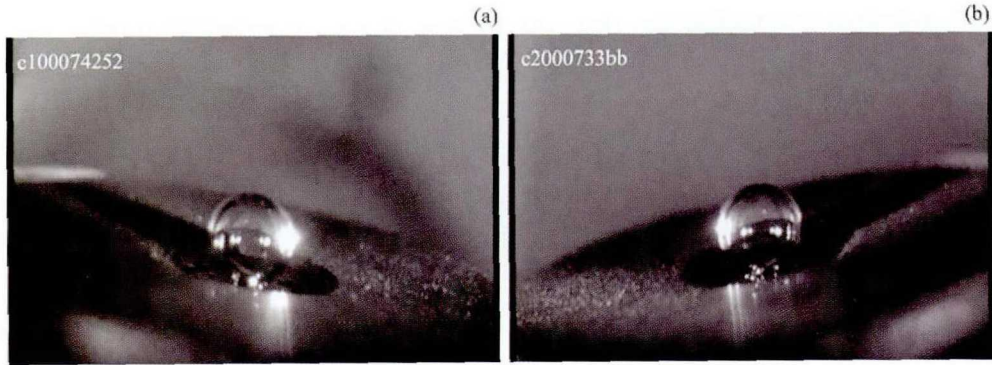


图3 左 (c1) 右 (c2) CCD 采集的气泡实验图像

Fig. 3 Left (c1) and right (c2) CCD images of the growing bubble in SE1/3.2

度 39.9°C , 液池内部压力 106.6 kPa , 相应的液体过冷度为 17.7°C .

2 气泡参数提取方法

气泡参数的提取依赖于对空间实验中记录图像的处理. 首先, 需要对按照 H.264 数字编码压缩的视频数据进行解压反演, 还原成视频信号, 并拆分为连续帧的静态图像以开展进一步的处理与分析. 图像分辨率为 $740\pm 480\text{ pixel}$, 静态图像拆分格式可以是全像素, 也可以将原图像奇、偶行拆开单独存储, 形成 $740\pm 240\text{ pixel}$ 的半分辨率图像. 后者可以将采样帧率由 25 fps 提高到 50 fps , 从而在部分牺牲垂直方向分辨率的情况下, 将时间分辨率提高为原来的 2 倍. 本文采用半分辨率图像分析提取气泡参数, 但在显示生长气泡特征时仍采用全分辨率图像. 此外, 基于图像采集时添加的时间标记 (图 3 所示图像左上角编码, 其中 c1, c2 分别表示左右 CCD), 核对与图像相关的时间信息, 发现每秒内采集的图像在固定位置丢失 1 帧. 因此, 时间信息是基于图像中时标换算而不是帧计数得到的. 时间起点对应于气泡发生器脉冲电压发出时刻. 同时, 根据图像上的时间标记可知, 帧间间隔并非严格相等, 其误差不超过 1 ms .

在微重力环境中, 浮力作用被抑制, 气泡生长过程中基本呈现出理想的截球形状. 因此在气泡参数提取时将气泡表面投影视为理想的圆弧, 通过对气泡边界信息的提取, 确定圆弧半径及其圆心位置, 即气泡半径和形心投影坐标. 为简化计算, 并借助人工判读消除气泡表面光斑对边界识别的影响, 实际操作

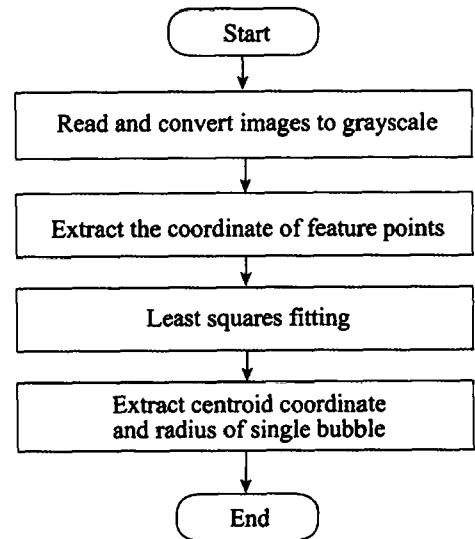


图4 气泡参数提取程序流程

Fig. 4 Flow chart for bubble parameter extraction

中, 人工方式在气泡边界最清晰部位选取有限数目的点, 并编制 Matlab 程序读取相应位置的坐标, 再通过最小二乘法拟合获得圆的大小和圆心位置. 相应的 Matlab 处理程序流程如图 4 所示.

通过加热面表面上两个标志点 A, B 的实际距离、图像中的间隔像素数以及图像视角与加热面的关系, 可以标定出真实物理尺寸与图像尺寸之间的换算关系. 此外, 分辨率、光照条件以及加热表面形状等因素会导致实际图像边界位置确定的不确定性, 不过即使在极端条件下, 气泡边界水平和垂直方向上位置的最大偏差也不超过 5 pixel . 为了验证气泡半径提取的准确性, 采用标准圆弧, 在与实验图像取点部位相同的地方选取若干点, 对其坐标添加 $[-5, +5]$ 范围

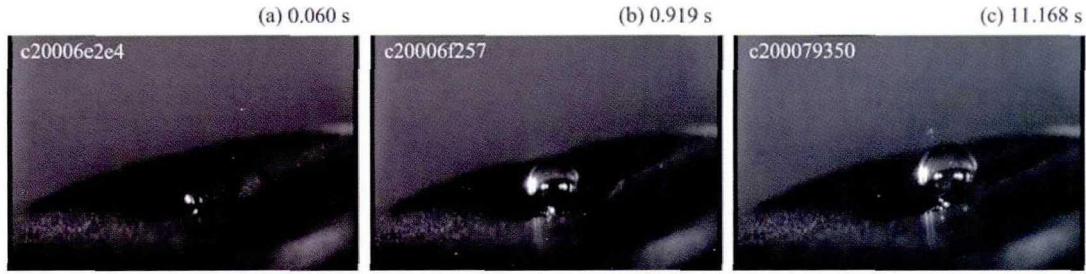


图 5 生长气泡的激发、稳定生长和滑移过程

Fig. 5 Excitation, stable growth, and sliding of the growing bubble

内均匀分布的随机扰动, 对扰动数据反演计算圆心位置和半径. 数值实验发现, 针对实验图像特征, 只需在圆弧适当部位选取 8~10 个点即可将半径反演计算的标准偏差降低到 2.5 pixel, 圆心位置偏差不超过 2 pixel, 且随着圆弧半径的增大还会略有下降. 左右视图计算不确定性相近, 因选取点的部位略有不同, 右图会略小一些.

因此, 在实际气泡半径提取时, 一般人工选择 10 个边界点用于数据的反演, 在气泡初始生成时, 因尺寸所限, 只选择了 8 个边界点. 由此确定的气泡半径, 其不确定度约为 0.06 mm.

3 结果分析与讨论

图 5 显示了实验中观察到的气泡生长过程中的若干典型特征, 即气泡被激发形成、气泡黏附在激发点稳定生长和气泡在加热面上滑移.

图 6 给出了 SE1/3.2 单气泡沸腾实验模式中气泡被激发之后的生长过程曲线, 其中 CCD1 和 CCD2 分别对应左右 2 路视频信号. 由图 6 可以看到, 基于观测方向相互垂直的 2 路图像所得到的气泡半径相互符合非常好, 这也进一步验证了理想截球模型的合理性.

如前所述, 图像处理中相邻的 2 帧半分辨率图像之间的时间间隔为 20 ms. 实验中气泡激发脉冲持续时间约为 50 ms, 原则上应能够捕捉到激发中的气泡. 实际上气泡激发时局部过热能量的释放极为迅速, 首个可辨识气泡出现在气泡激发脉冲启动之后的第 2 帧, 或半分辨率图像第 3 帧. 气泡生长速度初期很快, 气泡半径近似与生长时间的 0.45 次方成正比. 随着气泡尺寸的增大, 气泡生长变缓, 在 0.15~1 s 内

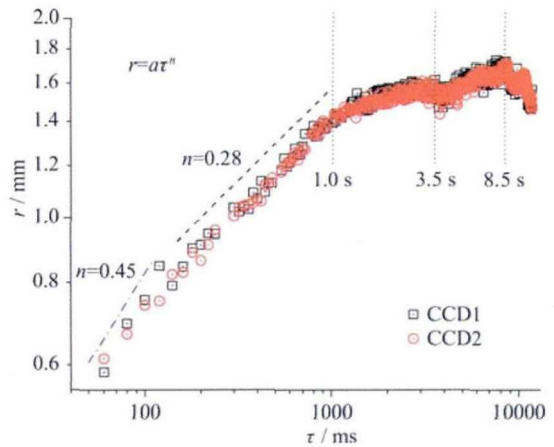


图 6 单气泡沸腾模式中气泡的生长过程 (SE1/3.2)

Fig. 6 Growth of vapor bubble in single bubble pool boiling mode (SE1/3.2)

气泡半径约正比于生长时间的 0.28 次方. 随后气泡尺寸的增加更为缓慢, 甚至在 3.5 s 时存在明显减小, 尽管随后又稳定增大, 但增大速度依然远小于气泡生长初期, 在 8.5 s 左右气泡半径达到最大, 约 1.7 mm. 随后则呈现震荡降低的趋势.

Straub^[1] 研究了微重力条件下 R113 工质内气泡在加热平面上生长过程的结果, 发现气泡半径可以利用时间的指数函数 $r = a\tau^n$ 来描述: 在饱和沸腾中, 指数 $n = 0.555$, 略大于热扩散控制机制下的理论预测结果 ($n = 1/2$); 而在过冷沸腾中, 指数 n 的平均值约为 $1/3$, 并且与气泡尺寸有关, 其数值从 $R < 1.5$ mm 时的 0.527 降低到 $R \leq 3.5$ mm 时的 0.286. 在过冷沸腾中, 如果气泡顶部凝结量超过底部蒸发, 气泡将收缩. Wan 等^[9] 在空间微重力丝状加热面 R113 过冷池沸腾实验中, 同样观测到气泡生长过程中指数 n 从初始小气泡 ($R < 0.5$ mm) 时的 $1/3$ 减小到较大气泡 ($R \leq 1$ mm) 时的 $1/5$. 这些

已有结果特别是关于指数 n 的变化趋势与本文结果一致。

由于本文采用截球模型描述生长气泡的形状, 得到的气泡半径即气泡表面球弧对应的球半径, 这与文献中常用的等效半径存在一定差异。对于截球状气泡, 后者因扣除了缺失的球缺部分体积, 数值会有所减小。对于像 FC-72 这样的高润湿性液体, 缺失的球缺部分体积很小, 二者差异不大。该假设可能在生长气泡底部扩张期较为适用, 而在气泡底部回退时, 接触线附近强蒸发效应使表观接触角显著增大, 气泡底部偏离球形, 采用截球模型可能会低估气泡内部蒸气体积。事实上 3.5s 左右对应着生长气泡底部干斑扩展到最大位置的时刻, 其外部的加热面过热状态消失^[10]。在气泡周围过冷液体的冷凝作用下, 气泡底部三相接触线开始回退, 表面张力作用使气泡逐渐抬升。图 6 中气泡半径在 3.5s 左右先降后升的表象可能正是这样形成的。但是空间实验中难以实现对气泡底部结构的详细观测, 相关推断尚需后续实验或数值仿真予以确认。

此外, 通过动态视频图像回放可以发现, 8.5s 后气泡不再稳定黏附在其生成位置, 而是在加热表面上滑动。加热面温度变化显示此时整个加热面均处于过冷状态^[10], 这表明气泡附近的过冷液体侵入了生长气泡底部, 其底部可恢复性的局部干斑被再润湿, 接触线消失, 气泡不再直接黏附在加热面上, 因此其在环境扰动作用下在加热面上滑移。

4 结论

对 SOBER-SJ10 项目中获得的微重力沸腾气泡图像进行了处理, 提取了 SE1/3.2 单气泡沸腾实验模式中单个气泡生长过程中气泡尺寸等信息, 分析了生长气泡随时间的变化规律, 得到如下结果。

(1) 微重力过冷沸腾中, 气泡生长过程可以划分为气泡激发形成、稳定黏附生长和滑移三个阶段, 而气泡稳定黏附生长又可以细分为底部扩张与回退两个子阶段。

(2) 在气泡稳定黏附生长的底部扩张子阶段, 气泡半径可表示为时间的指数函数, 指数 n 从初期小气泡时的 0.42 减小到中期的 0.28, 最终趋于 0。

(3) 在气泡底部收缩之初, 气泡尺寸略有回调, 随后再次缓慢增大, 直到过冷液体完全侵入气泡底部, 使气泡与加热面脱离, 被周围过冷液体冷凝变小, 气泡在外界扰动作用下在加热面上滑移。

上述结果可以作为后续气泡热动力学模拟对比分析的基础。

参考文献

- [1] STRAUB J. boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity [J]. *Adv. Heat Trans.*, 2001, **35**: 57-172
- [2] QIU D M, DHIR V K, CHAO D, et al. Single-bubble dynamics during pool boiling under low gravity conditions [J]. *J. Thermophys. Heat Trans.*, 2002, **16**(3): 336-345
- [3] DHIR V K, AKTINOL E, CHAO D, et al. Nucleate Pool Boiling Experiments (NPBX) on the International Space Station [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2012, **24**(5): 307-325
- [4] FISCHER S, SIELAFF A, SLOMSKI E M, et al. Experimental investigation of nucleate boiling on a thermal capacitive heater under variable gravity conditions [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2012, **24**(3): 139-146
- [5] NAKABEPPU O, WAKASUGI H. Approach to heat transfer mechanism beneath single boiling bubble with MEMS sensor [C]//Proceeding of 13th International Heat Transfer Conference, 2006. DOI: 10.1615/IHTC13.p28.430
- [6] HU W R, ZHAO J F, LONG M, et al. Space program SJ-10 of microgravity research [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2014, **26**(3): 159-169
- [7] WU K, LI Z D, ZHAO J F, et al. Partial nucleate pool boiling at low heat flux: preliminary ground test for SOBER-SJ10 [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2016, **28**: 165-178
- [8] WU Ke, ZHAO Jianfu, LI Huixiong. Thermal dynamical behavior of vapor bubble during pool boiling in microgravity [J]. *Mech. Eng.*, 2016, **38**(2): 203-206 (吴克, 赵建福, 李会雄. 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究 [J]. *力学与实践*, 2016, **38**(2): 203-206)
- [9] WAN S X, ZHAO J F, LIU G. Dynamics of discrete bubble in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity [J]. *J. Thermal Sci.*, 2009, **18**(1): 13-19
- [10] WU K, LIU P, ZHAO J F, et al. Single bubble pool boiling experiment aboard SJ-10: bubble behavior and local heat transfer [C]//12th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Application. Novosibirsk, Russia: Center of Applied Space Technology and Microgravity, 2017