

过冷池沸腾落塔短时微重力实验研究

赵建福 万士昕 刘刚

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 本文研制了一套控温池沸腾实验设备, 利用中国科学院国家微重力实验室落塔开展了短时微重力环境下的过冷池沸腾传热实验研究。加热元件为长 30 mm、直径 60 μm 的铂丝。实验工质为 0.1 MPa 压力下过冷度为 24 $^{\circ}\text{C}$ 的 R113。在地面常重力和落塔短时微重力实验中, 观测到核态沸腾和双模态过渡沸腾现象。对核态沸腾, 微重力传热效果稍有增强而汽泡形态却呈现出剧烈变化。对双模态过渡沸腾, 微重力下膜态沸腾部分有明显收缩, 但热流密度值仍比常重力时减小 20%。

关键词 微重力; 池沸腾; 过冷度; 落塔

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2007)01-0098-03

EXPERIMENTAL STUDY ON SUBCOOLED POOL BOILING IN MICROGRAVITY UTILIZING THE DROP TOWER BEIJING (NMLC)

ZHAO Jian-Fu WAN Shi-Xin LIU Gang

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

Abstract A temperature-controlled pool boiling device was developed to perform pool boiling heat transfer studies in microgravity utilizing the Drop Tower Beijing (NMLC). A platinum wire of 60 μm in diameter and 30 mm in length was simultaneously used as heater and thermometer. The fluid was R113 at 0.1 MPa and subcooled by 24 $^{\circ}\text{C}$ nominally for all cases. Nucleate and two-mode transition boiling were observed during the experiments in both normal gravity and microgravity. For nucleate boiling, the heat transfer was slightly enhanced, while the bubble pattern is dramatically altered by the variation of the acceleration. For two-mode transition boiling, about 20% decrease of the heat flux was obtained, although the part of film boiling was receded in microgravity.

Key words microgravity; pool boiling; subcooling; drop tower

1 前言

沸腾传热因其高传热能力在地面和空间科技实践中有着巨大的应用价值。航天技术的发展, 大功率、高集成度设备的研制日益受到重视, 也因此使微重力沸腾传热研究成为微重力科学前沿。但是, 微重力实验受到尺寸、功耗、质量及实验持续时间等诸多严格的限制, 目前相关研究还非常有限^[1~2]。

本文研制了一套控温池沸腾实验设备, 利用中国科学院力学研究所百米落塔提供的 3.6 秒微重力时间, 研究了丝状加热表面微重力过冷池沸腾现象。

2 实验设备与流程

实验采用控制加热面温度的方式以避免实验中

加热元件的烧毁^[3~4]。加热元件为长 30 mm、直径 60 μm 的铂丝, 它同时也用来测量自身温度。实验过程中采用自反馈回路控制铂丝的电阻即温度保持恒定。

实验工质为 R113, 其平均温度由两个精度为 0.25 $^{\circ}\text{C}$ 、量程为 (0~60) $^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻温度计测量。液池内绝对压力由一量程为 (0~0.2)MPa 的压力传感器测量, 其精度为满量程的 0.25%。实验过程中热丝表面蒸汽泡和蒸汽膜的形态通过 CCD 并由一台小型摄像机以 25 帧/秒的速度记录。铂丝和参考电阻两端的电压(后者用来计算通过铂丝的电流)及压力、温度、残余加速度等信号均采用 50 Hz 的采样频率由落舱内部计算机采集并存储下来, 以备后续

收稿日期: 2006-01-23; 修订日期: 2006-10-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目 (No.KJ CX2-SW-L05); 国家自然科学基金资助项目 (No.10432060)

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为微重力气液两相流动与传热。

分析。在部分实验中还采用了 200 Hz 的采样频率。

实验所用中国科学院国家微重力实验室落塔地面高 116 m，地下深 8 m，其中自由落体高度约 60 m，可提供约 3.6 s 的微重力实验时间。落舱为内、外双舱结构。落舱释放后外舱在空气中飞行，而内舱则在内、外舱间约 100 Pa 的真空中自由下落，以提高实验环境的微重力水平。

鉴于落塔的微重力持续时间很短，在释放前先置于较高的温度，使沸腾起始（通常为双模态过渡沸腾）后，再将温度调至所需状态，稳定（一般大于 10 s）后释放落舱。当落舱停止下落后，关闭加热电源。

3 实验结果

8 次落塔实验中液体标称压力 P_{bulk} 与过冷度分别为 0.1 MPa 和 24°C。表 1 列出了自由落体前、后（即常重力和微重力条件下）的实验结果。

图 1 为一次典型的落塔实验中残余重力加速度 g 、热丝电阻 R_W 和加热功率 Q_E 随时间的变化情况。图中清楚地表明，热丝电阻在实验过程中很好地维持了恒定，表明加热面温度控制系统工作正常。加热功率的变化则反映了不同重力环境中传热效率的变化。

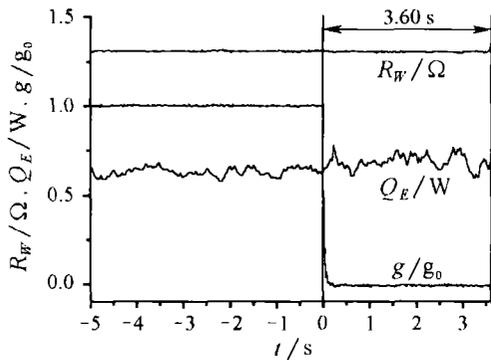


图 1 落塔实验典型过程

实验中观测到了核态沸腾和双模态过渡沸腾现象。图 2 所示的为一些典型沸腾状态的热流密度随时间的变化情况。可以看到，在落舱释放后除初期短暂的变化外，实验参数呈现出明显的统计稳定性，这表明沸腾状态在落塔所提供的 3.6 秒短微重力环境下能够达到稳定状态，其实验数据可以反映微重力环境的结果。图 3 则给出了与图 2 对应的 3 个实验工况下不同重力环境中（即释放前、后）的典型的气泡形态。

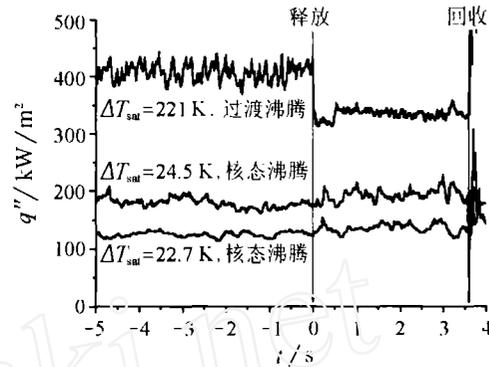
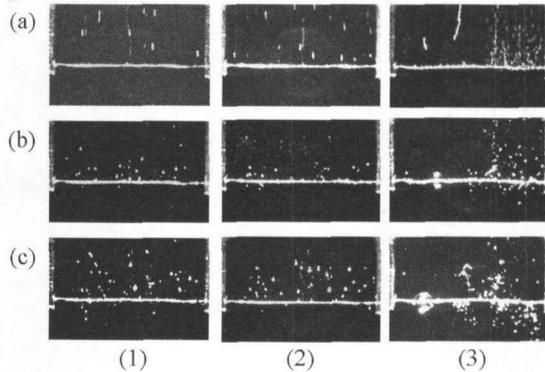


图 2 不同重力水平下的热流密度



(1) $\Delta T_{sat} = 22.7$ K, 核态沸腾
 (2) $\Delta T_{sat} = 24.5$ K, 核态沸腾
 (3) $\Delta T_{sat} = 221$ K, 双模态过渡沸腾
 (a) $t = -2$ s (b) $t = 1$ s (c) $t = 3$ s

图 3 不同重力水平下的气泡形态

表 1 常重力和微重力条件下过冷池沸腾传热实验结果
 (表中, N 代表核态沸腾, T 代表双模态过渡沸腾)

P_{bulk} (kPa)	t_{bulk} (°C)	ΔT_{sub} (K)	t_w (°C)	ΔT_{sat} (K)	模态	q''_{1g} (kW/m ²)	$q''_{\mu g}$ (kW/m ²)	$\alpha_{\mu g} / \alpha_{1g}$
99.2	22.8	24.1	62.6	15.7	N	139	140	1.01
102.2	24.0	23.7	64.8	17.1	N	140	137	0.97
102.8	24.4	23.6	69.1	21.2	N	149	149	1.00
104.6	26.1	22.4	71.2	22.7	N	144	157	1.09
95.4	17.9	27.8	70.2	24.5	N	210	225	1.07
101.8	23.6	24.0	99.7	52.1	T	406	327	0.81
99.2	21.0	25.9	151.2	104.3	T	405	338	0.83
106.5	28.0	21.0	270.1	221.1	T	474	391	0.83

对核态沸腾, 微重力环境下传热效果维持不变或稍有增强, 热流密度的增幅不超过 10%。但此时的汽泡形态却有着剧烈的变化。在常重力环境下, 一些细小的汽泡不断地从热丝表面的某些固定位置上的空穴中喷射而出, 呈 Z 字型雾状轨迹。在微重力环境下, 这一现象依旧存在, 直到附近的大汽泡扫过这些空穴。微重力环境中汽泡尺寸略有增加, 并附着在铂丝上不断长大, 直到脱落, 这与 Straub^[1] 的描述基本一致。在汽泡生长过程中, 存在明显的横向移动现象, 这种现象直接导致相邻汽泡间的融合、形成新的汽泡并脱离热丝表面。有时相邻汽泡间融合出的新汽泡并不能立即脱离热丝, 它将包围在热丝表面形成一个亮斑, 但亮斑不能维持, 随着汽泡的增大而很快消失, 因此, 沸腾模态依旧为核态沸腾。

对双模态过渡沸腾, 微重力环境下测量到的热流密度比常重力环境减小约 20%。常重力环境中, 双模态过渡沸腾中的膜态沸腾部分, 蒸汽包裹在热丝表面形成波浪状汽膜, 并以大汽泡的形式从波浪状气膜的节点处脱落。这源于 Taylor 不稳定性。在微重力环境中, Taylor 不稳定性机制不复存在, 表面张力的作用使包裹于热丝表面的蒸汽膜自动收缩为球形。球状汽泡横向尺度增加的同时, 沿热丝方向上的气膜长度逐渐收缩, 使得膜态沸腾部分明显收缩, 核态沸腾部分增加。在此过程中, 球状汽泡中心在热丝上不断摆动, 并且随着球体体积的增加, 其摆动速度逐渐减小。整个实验过程中, 球状汽泡尺寸的增加未有间断, 其包裹着的铂丝变红发亮。这说明此时沸腾仍然处于非稳定状态, 同时似乎也预言在真正的微重力环境中, 膜态沸腾将无法维持, 这与利用失重飞机开展的同类实验不同, 后者能观察到膜态沸腾^[5], 主要原因也许正在于其较大的残

余重力(约 $3 \times 10^{-2}g$)影响。

4 结 论

本文利用中国科学院国家微重力实验室百米落塔, 开展了短时微重力环境下过冷池沸腾传热实验研究, 观测了不同重力环境中的核态沸腾和双模态过渡沸腾现象。对核态沸腾, 尽管汽泡形态在不同的重力水平下有着剧烈变化, 但微重力环境中的传热效果基本不变或稍有增强, 热流密度增幅不超过 10%。对双模态过渡沸腾, 微重力环境中膜态沸腾部分有明显收缩, 但测量到的热流密度值反而比常重力环境减小 20%。本文还对微重力环境膜态沸腾之可能形状进行了讨论。

致 谢 作者感谢中国科学院国家微重力实验室落塔全体工作人员的优异支持及与日本九州大学大田治彦教授的讨论。

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, Grassi W. Motivation and Results of a Long-Term Research on Pool Boiling Heat Transfer in Low Gravity. *Int. J. Therm. Sci.*, 2002, 41(7): 567-585
- [3] Wan S X, Zhao J F, Liu G, et al. TCPB Device: Description and Preliminary Ground Experimental Results. In: 54th Int. Astronautical Cong.. Bremen, Germany, 2003
- [4] Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Subcooled Pool Boiling at Microgravity: Preliminary Ground-Based Experimental Results. In: 2nd Int. Sym. on Phy. Sci. in Space/Spacebound. 2004. Toronto, Canada, 2004
- [5] Di Marco P, Grassi W, Trentavizi F. Pool Film Boiling Experiments on a Wire in Low Gravity: Preliminary Results. In: *Microgravity Transport Processes in Fluids, Thermal, Biological and Material Sciences II*. Banff, Alberta, Canada, 2001