

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0191-05

楔形夹缝内部液体核态沸腾特性

田 勇¹, 徐 罕¹, 彭晓峰¹, 王补宣¹, 李笃中²

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084;

2. 台湾大学 化学工程系, 台北 106)

摘要: 针对楔形夹缝内部液体核态沸腾状况进行可视化实验研究。实验利用表面平整均匀的铜板作为加热平板, 用玻璃作为盖板形成楔形夹缝。实验现象表明沸腾核化现象比较容易在狭缝中相对较大的空间中形成, 而在狭缝中相对较小的空间里形成沸腾需要更高的热流密度。实验现象还表明, 在同一空间尺度条件处的核化和气泡演化情况基本相同, 气泡的生长速率在无量纲参数 $D \geq 0.1$ 时受到空间尺度的明显影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 沸腾; 气泡动力学; 楔形夹角; 核化

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Nucleation Boiling Characteristics of Liquid in Wedged Gaps

TIAN Yong¹, XU Han¹, PENG Xiao-feng¹,

WANG Bu-xuan¹, Lee Duu-jong²

(Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Taiwan University, Taipei 106, China)

Abstract: An experimental investigation was conducted to visually observe nucleate boiling phenomena in wedged gaps. A flat and uniform copper plate was used as a heater. The surface of copper plate was ground by polishing method in order to reduce rugosity. A glass plate was used as a sheet for forming a wedged gap in the experiments. Ethanol was the object for observing and measuring. The phenomena showed that boiling nucleation favorably occurs and bubble growing is faster in areas with larger space in narrow gaps. The nucleation on the surface in relatively narrow zone was more difficult and needed higher heat flux than that in larger space zone. Images and figures shot by CCD camera were used to record bubble growth processes. It is observed that nucleation and bubble dynamical evolution in the same gap spacing zone are identical and the growth rate was maintained at a constant value for $D \geq 0.1$.

Key words: aerospace propulsion system; boiling; bubble dynamics; wedged gap; nucleation

沸腾是在生产生活中广泛应用的可传递高热流的相变换热过程。随着科学技术的发展, 许多学者观察到了微小尺度条件下沸腾过程的特殊性^[1~3]。在此基础上开展的诸多理论和实验研究

表明, 在微小尺度下沸腾过程的热力学性质、热量传递规律等方面均与常规尺度下的理论和实践有很大的不同^[4~10]。但公开发表的文献对于此类问题尚没有一致公认的规律性认识和结论。因此,

收稿日期: 2003-04-25; 修订日期: 2003-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 59976016)

作者简介: 田勇 (1978-), 男, 辽宁鞍山人, 清华大学热能工程系博士生, 主要从事微小尺度相变过程研究。

需要一些比较简明、可突出细节的实验观察提供证据。

本文利用楔形夹缝提供一个连续变化的空间尺度,形成便于在同样的热流密度条件下一对比空间尺度对于核态沸腾过程的影响,通过可视化的实验手段观察楔形夹缝内部的核沸腾现象,进行初步的特性分析。

1 实验装置

实验系统包括测试用楔形夹缝和玻璃容器。楔形夹缝由水平铜板和玻璃板组成,置放在敞口玻璃容器内部(如图 1 所示)。水平铜板表面采用精磨抛光,粗糙度控制在 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 量级,平面度控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 量级。电加热片布置在铜板下方,借助铜的高导热扩散性和热容量,实现铜板均匀加热,通过测量加热片两端电压和电路中的电流密度来确定加热量。玻璃板一端直接放置在铜板上,另一端搭在一个 1 mm 厚的玻璃条上,这样便构成了一个在 70 mm 长度上由 0 mm 升高至 1 mm 宽的楔形夹缝。为确认保证实验的复现性和可对比性,在玻璃板两端均布置了支撑玻璃条,这样就可以获得左低右高,左高右低和左右均匀等高三种类型的狭缝。

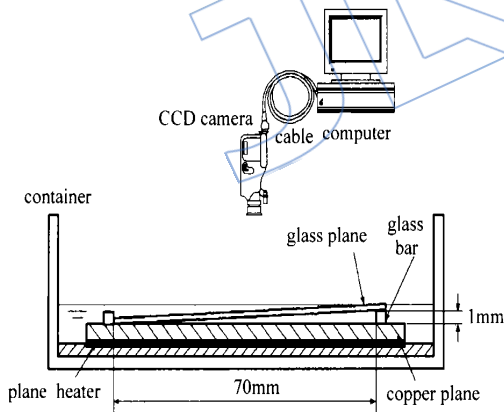


图 1 实验系统

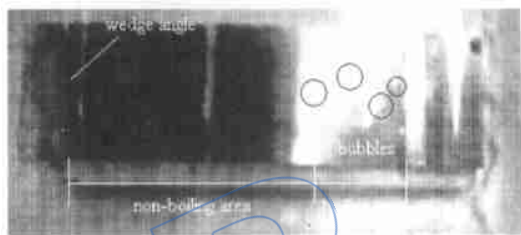
Fig. 1 Experimental facilities

实验中使用图象采集系统,包括 Nikon 数码相机、CCD 摄像头、Matrox Pulsar 高速图象采集卡,光学放大和调焦设备。CCD 摄像头型号为 WAT-505EX,其最低感光度是 0.003 Lux 。光学放大和调焦装置的放大倍数大约在 $8\sim 11$ 倍。加热电阻电压由一台 Agilent Model-6031A 1200 W 调压直流电源提供,本实验中电压变化范围为 $15\text{ V}\sim 24\text{ V}$ 。

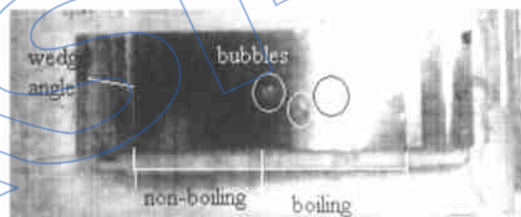
实验工质为 99% 的乙醇。实验前,已通过持续沸腾数小时的方式除去溶解的气体。

2 现象观察

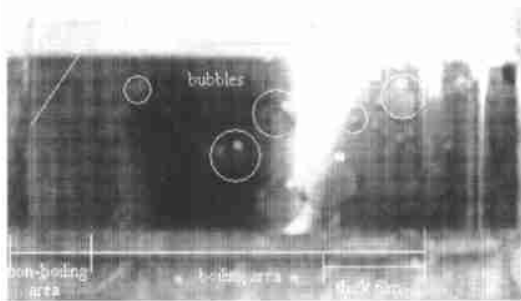
图 2 所示为狭缝内部沸腾的实验现象图片。该实验中楔顶角在图中左侧,热流密度分别为 2100 W/m^2 , 3100 W/m^2 , 5500 W/m^2 。当热流密度较低,即为 2100 W/m^2 时,加热板上出现少量气泡,而且全部集中在板右侧,即夹缝空间较大一侧,图 2 (a) 中所标示出的部分可见气泡。此时核化过程主要集中于加热板右侧 $1/3$ 的范围内,气泡生长较缓慢。



(a) 2100 W/m^2



(b) 3100 W/m^2



(c) 5500 W/m^2



(d) 楔形夹缝方向示意

图 2 不同加热负荷的核化现象

Fig. 2 Boiling at different heat fluxes

当热流密度提高到 3100 W/m^2 时,沸腾逐渐旺盛起来,发生沸腾的区域逐渐向左侧楔顶角方向移动,约占整个加热板面积的 $3/5$,如图 2 (b) 所示。但相对比较活跃的核化现象仍然集中在右端,此时气泡生长比较迅速。

当热流密度达到 5500 W/m^2 时, 如图 2 (c) 所示, 沸腾变得更为剧烈, 沸腾区域扩展到加热板面积的 $3/4$, 最活跃的核化现象仍然集中在右侧, 气泡的生长速度也相应继续提高。而在加热板左侧的楔顶角区域, 气泡数量仍很少, 生长速度也较慢。

通过 CCD 摄像头拍摄的连续画面可以看到, 随着热流密度的变大, 狭缝内沸腾变得更为剧烈, 而且核化点的位置逐渐向楔顶角移动。在此楔形狭缝内部核化点一般集中在空间较大的区域, 特别是右侧 $1/4$ 的范围内 (此处狭缝的宽度由 0.75 mm 升至 1 mm 的区域), 几乎 80% 的活化核心集中在这个区域内部。在加热板中段, 气泡数量较少, 且生长速度较小。而在加热板左 $1/4$ 区域, 也即狭缝宽度在 0 至 0.25 mm 的区域, 没有观察到明显可见的气泡。

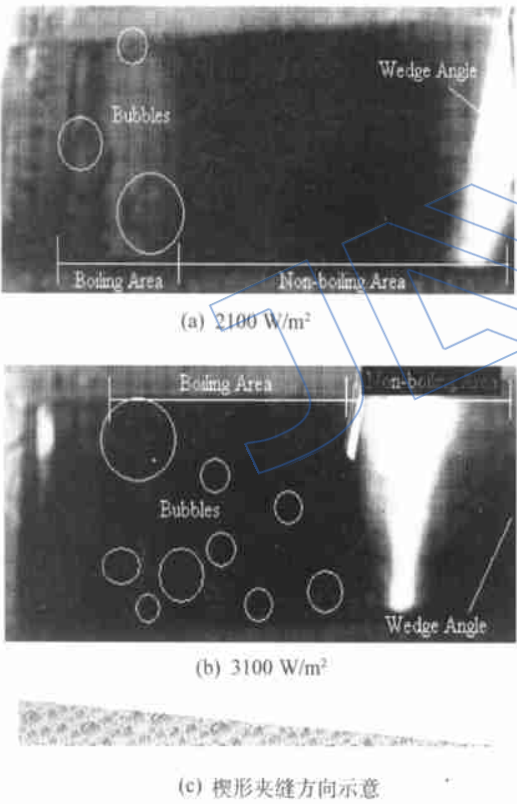


图 3 楔角在右侧时的沸腾现象

Fig. 3 Wedge angle at the right end

为了确定狭缝宽度对沸腾的影响, 进行了另外两种情形的对比实验。一是将玻璃板右端直接接触加热板而左端垫起, 形成与前述左右反置的情形; 二是左右两段均垫起, 形成等宽的缝隙。形成的实验现象如图 3 和图 4 所示。比较图 3 与图 2, 可以发现现象十分相似, 核化发生在狭缝宽度

比较大的区域, 随热流密度增大, 核化区域向楔顶角方向推进。

图 4 中狭缝的宽度处处相等, 核化现象比较均匀地分布在整個加热板上, 气泡生长速度也比较接近。没有明显可见的不发生核化的区域。在相同的热流密度下, 1 mm 宽的狭缝发生的沸腾现象与具有楔形角的情形下在 1 mm 宽度的一端发生的现象也是相似的。

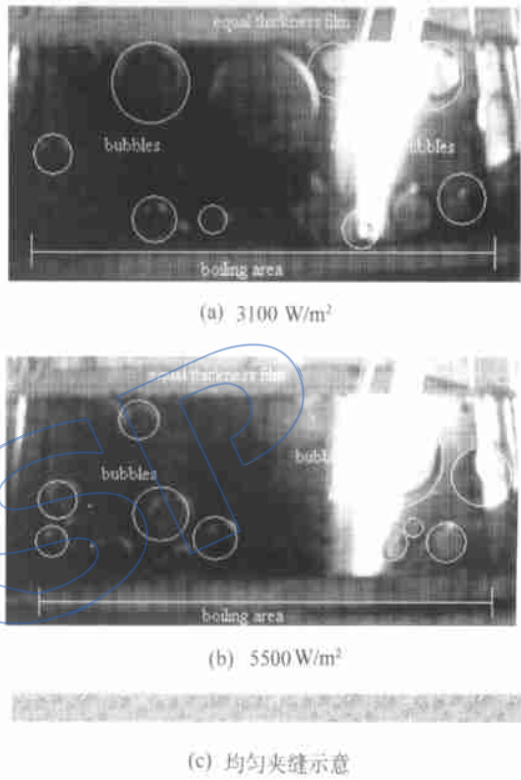


图 4 均匀夹缝内的沸腾现象

Fig. 4 Parallel plate gap

通过观察可以得出一些定性结论。在表面状况均匀的加热平板上, 沸腾较容易在空间比较大的地方形成, 在空间比较小的地方发生沸腾相对较困难, 需要更高的热流密度。通过观察发现, 气泡生长过程也与狭缝宽度有很大的关系。

3 气泡行为

对现象的观察和具体的测量结果都表明气泡生长的动力学行为与狭缝尺度有密切关系。实验中使用 WAT-505EX 型高速 CCD 摄像头采用 500 Frame/s 的速度对气泡生长过程进行图像采集。这些图像可以连续地记录下发生核化的位置以及气泡的生长过程。主要的实验误差来自于对时间和气泡尺寸的测量。气泡尺寸测量的误差可以通过放大图片来降低, 时间测量误差可以通过

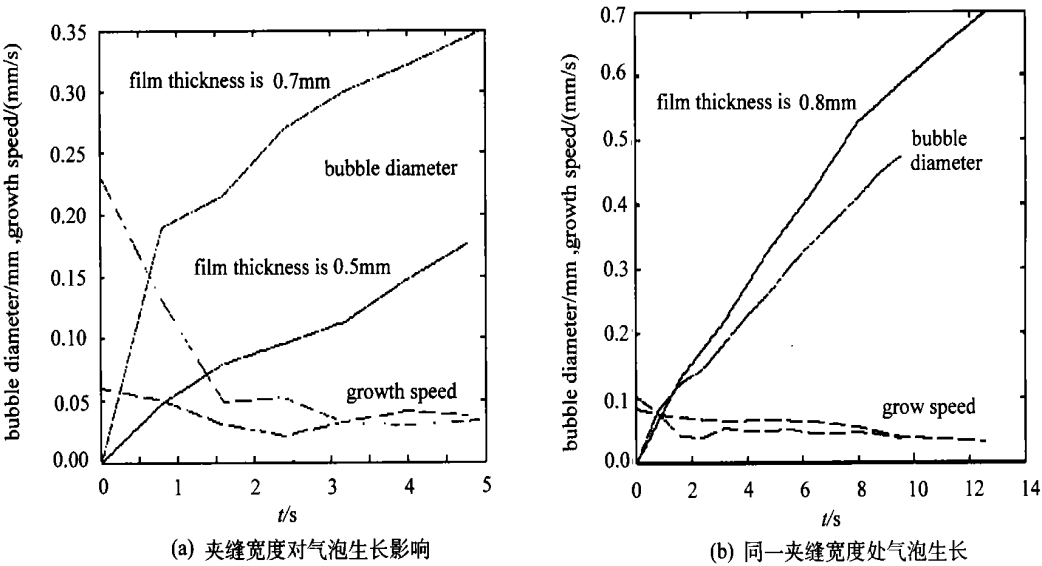


图 5 不同夹缝位置气泡生长比较
Fig. 5 Bubble diameter and growth rate at different locations

提高采集速率来降低。

图 5 所示为气泡生长过程的测量结果。在图 5 (a) 中, 比较了狭缝宽度为 0.5 mm 和 0.7 mm 处的气泡直径和生长速率变化。很明显, 在狭缝宽度较大的区域, 同一时刻形成气泡的尺寸较大, 初期随时间长大也较快。实验测试也表明, 初期生长速率较大且迅速下降, 夹缝空间越大生长速率也越大, 但大约在 1.5~2 s 后, 两处的气泡生长速率趋于相近, 说明空间尺寸对气泡生长速率的影响主要集中在初期。

深入考察气泡的直径与气泡处狭缝宽度的关系时, 可以发现很有趣的现象。这里定义无量纲参数 $\bar{D} = d/h$, 式中 d 是气泡直径, h 是局部狭缝宽度, 即气泡直径与夹缝宽度之比, 希望利用这个无量纲参数表征尺度对于沸腾的影响程度。图 5 中的实验结果显示, 气泡生长过程受到狭缝宽度明显影响的区域是 $\bar{D} \leq 0.1$ 。这表明当气泡直径大到使 $\bar{D} \geq 0.1$ 时, 气泡本身仍在长大, 大小也与夹缝尺寸有关, 但过程中的气泡生长速率却大约保持在某一常数, 不再受狭缝尺度的明显影响。

图 5(b) 所显示的是在狭缝宽度同为 0.8 mm 的地方产生的两个气泡的生长过程。可以看到其过程是非常接近的, 狭缝尺度对气泡生长过程的影响是确定的, 而且可以用参数 $\bar{D}$ 度量, 即 $\bar{D} \leq 0.1$ 气泡生长速率受夹缝尺寸影响, 相反生长速率将保持常数。显然, 无量纲参数 $\bar{D}$ 是一个描述楔形尺寸影响重要物理量。

4 结 论

本文进行了楔形空间内液体沸腾的可视化实验研究, 观察和测量了楔形狭缝的宽度对于核化过程以及气泡生长过程的具体影响。实验结果表明, 狭缝宽度对沸腾过程的影响是明显的, 表现在:

- (1) 核化过程很容易在狭缝较宽的地方发生, 而在狭缝宽度很小的地方不易发生, 需要较高热流密度。
- (2) 气泡在狭缝宽度较大的地方气泡尺寸大、生长速率较快, 而在狭缝宽度很小的地方, 气泡尺寸小、生长受到明显抑制。
- (3) 当气泡直径与狭缝宽度的比值 $\bar{D} \leq 0.1$ 时, 气泡生长速率受到明显的影响。相反, 当 $\bar{D} > 0.1$ 时, 生长速率将维持为一近似常数。

参考文献:

[1] Lin L, Pisano A P. Bubble Forming on a Micro Line Heater, Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems [J]. ASME DSC- Vol. 32, 1991: 147- 164.

[2] Lin L, Udell K S, Pisano A P. Liquid-Vapor Phase Transition and Bubble Formation in Micro Structures [J]. Thermal Science and Engineering, 1994, 2 (1): 52- 59.

[3] Asai A, Hara T, Endo I. One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers [J]. Japan J. Appl. Phys., 1987, 26: 1794- 1801.

[4] Hu H Y, Peterson G P, Peng X F, et al. Interface Fluctuation Propagation and Superposition Model for Boiling Nucleation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41: 3483- 3490.

[5] Peng X F, Wang B X. Evaporation Space and Fictitious Boiling for Internal Evaporation of Liquid [J]. Science Foundation in China, 1994, 2: 55– 59.

[6] Peng X F, Hu H Y, Wang B X. Boiling Nucleation During Liquid Flowing in Microchannels [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41: 101– 106.

[7] Peng X F, Liu D, Lee D J, et al. Cluster Dynamics and Fictitious Boiling in Microchannels [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2000, 43: 4259– 4265.

[8] Peng X F, Tian Y, Lee D J. Bubble Nucleation in Microchannels: Statistical Mechanics Approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2001, 44: 2957– 2964.

[9] Zhang L, Koo J, Jiang L N, et al. Measurements and Modeling of Two-Phase Flow in Microchannels with Nearly Constant heat Flux Boundary conditions [J]. Journal of Microelectromechanical Systems. 2002, 11 (1): 12– 19.

[10] 田勇, 彭晓峰. 毛细管内部核化过程分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18 (2): 225– 229.