

过冷沸腾气泡在圆形朝下壁面上特性实验研究

李维仲*, 姬安生, 董波

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 气泡的始动直径与运动过程对于揭示沸腾传热机理有着重要意义. 利用高速摄像机对不同热流密度条件下, 过冷沸腾液体中气泡在圆形朝下壁面上生长及运动的过程进行了实验研究. 研究表明: 在气泡的生长及运动过程中, 气泡的形状从生长过程初期阶段的近似球体变化到滑移过程被拉长的椭圆柱体, 直至最后消失; 壁面热流密度对气泡的始动直径有一定影响, 热流密度越大气泡的始动直径也就越大.

关键词: 圆形朝下壁面; 气泡; 过冷沸腾; 高速摄像机

中图分类号: TK124

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201505003

0 引言

沸腾传热具有传热速率高和小温差传热等优点^[1], 因此得到了广泛应用, 譬如核电工程、热能工程、冷冻工业、化学工程等领域. 沸腾传热与气泡的产生和脱离有着密切的关系, 气泡在沸腾传热的3个机理^[2]中都有着非常重要的作用. 因此, 国内外学者希望通过研究在沸腾或过冷沸腾液体中气泡的生长、脱离等行为特性, 来揭示气泡对沸腾传热的影响机理. 潘良明等^[3]通过高速摄影技术研究了垂直窄缝流道内过冷沸腾时的气泡行为, 得出热流密度与断面平均过冷度等参数对初始气泡影响较大, 热流密度越高, 沸腾越早发生. 周定伟等^[4]实验研究了常规沸腾下的气泡生成状态对沸腾传热的影响, 得出诱发传热表面上气泡的成核可使沸腾换热强化, 相反, 使沸腾传热减弱的结论. 赵耀华等^[5]采用高速摄影技术实验研究了不锈钢箔表面的过冷沸腾现象, 认为高过冷度区域的沸腾换热机理主要是由气泡生长、消失过程中温度边界层的强制排除(即所谓强制对流)引起的. Houston等^[6]实验研究气泡滑移现象对传热有无影响时, 发现气泡的滑移会引起流体湍流运动, 从而强化了传热. Manickam等^[7]使用光学

全系干涉测量法, 实验研究了朝下倾斜加热壁面上气泡的滑移传热现象, 发现在气泡沿热壁面滑移的过程中, 气泡的形状、大小以及生长率都会随之改变, 且由于气泡滑移的存在, 其传热能力要比自然对流时高出两个数量级. Sateesh等^[8]数值模拟了非水平加热壁面上气泡滑移对池内沸腾传热的影响, 发现常压下在垂直墙面上由于气泡滑移现象的存在, 会很大程度地提高传热性能. Cornwell等^[9]通过可视化实验, 研究了水平圆管下端气泡滑移对传热的影响, 证明了气泡对液体的扰动会很大程度地影响换热.

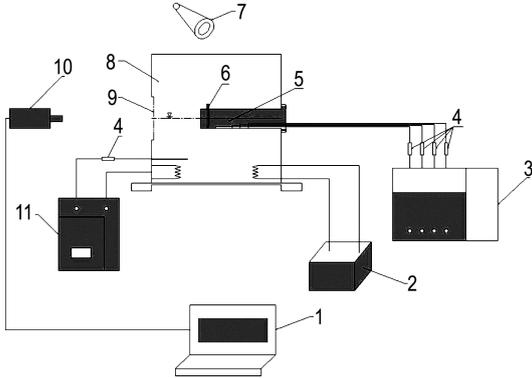
纵观国内外学者关于过冷沸腾中气泡动力学与传热传质学的研究, 绝大部分都是在关注朝上水平面上气泡的生成、长大和跃离对传热传质的影响机理及整个圆管上气泡形态对沸腾传热的影响. 仅Cornwell等^[9]通过实验研究了水平圆管下气泡滑移对传热的影响, 但是他们没有关注气泡在朝下曲表面上生成、长大和滑移消失等细节. 所以本文主要针对圆形朝下壁面上气泡的特性进行可视化实验研究, 探究气泡在圆形朝下壁面上的生长过程, 获知当气泡的当量直径为多大时, 气泡开始出现滑移现象, 并了解气泡沿壁面滑移过程中其形状的变化, 考察热流密度对气泡始动半径

的影响规律。

1 实验设备及实验方法

1.1 实验设备简介

为了便于获得较为理想的实验效果,实验装置主要由5部分组成,即主体实验台系统、温度检测仪、图像采集系统、冷却系统和温控加热系统,如图1所示。



1 计算机; 2 冷却系统; 3 温度检测仪; 4 热电偶连线; 5 测试段——光滑圆管; 6 点加热器; 7 补光灯; 8 主体箱; 9 视窗口; 10 高速摄像机; 11 温控加热系统

图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

实验的主体箱采用不锈钢材料制作,其尺寸为320 mm×320 mm×320 mm,在箱体的右侧、前侧、左侧分别开210 mm×175 mm、210 mm×175 mm、180 mm×175 mm大小的视窗口,视窗材料采用耐高温的光学石英玻璃。为了维持箱体内实验工质温度恒定,在箱体底部设计了温控加热系统与冷却系统。

测试段是一个用304不锈钢制成的光滑圆管,其结构与几何参数如图2所示。圆管长200 mm、直径48.2 mm、壁厚4 mm。为了能够在其下表面产生气泡,光滑圆管上部开宽为16.8 mm的口,以便在加热点安装加热器进行加热,同时为了得到加热点下表面的温度以及最终获得通过下壁面的热流量,在距加热点的不同位置开有4个直径为3 mm、深度为3 mm的盲孔,用以安装4个热电偶来测量温度,如图2所示。

为了能获得理想的气泡形态,光滑圆管实验件表面要具有一定的粗糙度,即要有汽化核心的存在,在实验中采用240级的砂布来控制其表面粗糙度。实验中采用无色透明的二氯甲烷液体作为实验工质,二氯甲烷液体的物性参数列于表1中。

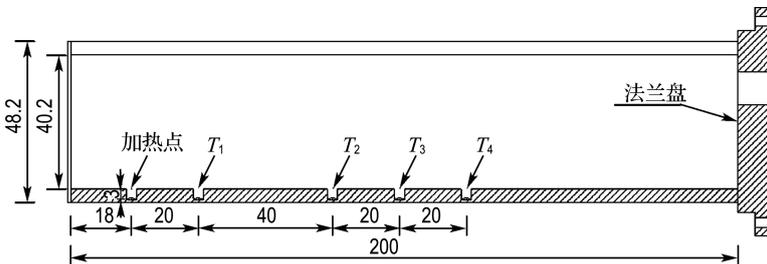
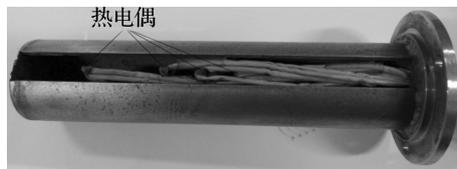


图2 实验光滑圆管示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental smooth pipe

表1 实验液体参数

Tab. 1 Parameters of the experimental liquid

液体名称	沸点/℃	密度/(kg·m ⁻³)	外观	安全性
二氯甲烷	39.8	1 326.6	无色透明液体	低毒

图像采集系统主要包括记录设备、1394 图像采集卡、补光装置以及配套的图像采集软件。实验中采用两个额定功率均为1 kW 的碘钨丝灯作为频闪光源进行补光,采取两侧对称的补光方

式^[10]. 记录设备采用产自瑞士 AOS Technologies 公司的 Motioneer 高速摄像机进行拍摄记录. 高速摄像机的拍摄速度为 1 000 f/s, 分辨率为 640 pixel×512 pixel, 原始储存为 RAW 格式的视频文件, 可以转化为 BMP 格式的图像进行后续处理.

1.2 实验方法

由于本实验获得气泡的方式是光滑圆管外壁面与实验液体之间存在一定温差从而驱动相变产生气泡, 所以, 实验中关键之处在于控制实验液体与气泡产生点的温差. 首先, 在气泡产生点的内侧安装加热器, 通过调压器调节加热器的工作电压, 使其在 150 V 电压下为该点加热. 待其温度达到稳定时, 通过温控加热系统与冷却系统使实验液体温度维持在一恒定数值. 观察气泡产生区域的变化, 待测温点温度稳定时分别记录光滑圆管内部 4 个测温点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的数值及液体温度 T_5 . 当气泡产生区域有气泡产生时打开照明设备为其补光, 利用高速摄像机采集气泡生成、长大及滑移的整个过程. 实验中为了能获得典型的实验现象, 每个工况下均进行多次实验. 之后分别记录、拍摄加热器在 160、170、180 V 电压下加热时的气泡图像及实验数据信息.

2 光滑圆管温度场的确定

由于加热点的温度无法测量, 本研究中采用数值模拟方法推测加热点的温度.

2.1 数值模拟未知参数的确定

数值模拟涉及几个未知参数: 光滑圆管与空气的对流换热系数、光滑圆管与二氯甲烷液体的对流换热系数.

加热器的最终温度处于稳定状态, 且二氯甲烷液体温度恒定, 所以光滑圆管传热问题可以当作稳态传热问题处理. 由于光滑圆管一半浸没在二氯甲烷液体中, 另一半与周围空气接触, 所以在忽略光滑圆管表面辐射传热影响的情况下, 光滑圆管的传热主要包括其本身的导热、光滑圆管下表面与二氯甲烷的对流换热以及上半表面与空气的对流换热.

本问题属于大空间自然对流问题, 此类对流换

热系数的计算都是根据经验公式 $Nu_m = C(Gr \cdot Pr)_m^n$ 获得, 结合相关物性参数计算得出光滑圆管与二氯甲烷液体的对流换热系数约为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 与空气的对流换热系数约为 $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

2.2 模型建立及网格生成

因光滑圆管尺寸较小, 结构简单, 所以采用光滑圆管的实际尺寸定义计算的几何模型, 光滑圆管的结构简图与几何参数见图 2.

采用 CFD 软件 Fluent5/6 进行数值模拟. 利用 Gambit 软件创建光滑圆管的三维物理模型. 划分网格单元类型为 Tet/Hybrid. 网格划分类别为 Tri 类别. 网格单元数为 760 637. 在此模型中一共有 3 种边界条件: 浸没在液体中光滑圆管的表面为与实验工质的对流换热边界, 光滑圆管上半表面为与空气的对流换热边界; 加热器外表面为对流、辐射的混合边界; 加热器上表面为面热源边界. 此模型中有两类区域条件: 一类是光滑圆管的区域类型, 另一类为加热器的区域类型.

2.3 求解模型及模拟结果

数值模拟中, 选用标准能量模型, 求解方法为 SIMPLE 方法.

分别模拟了加热器在不同电压时的光滑圆管温度场分布. 图 3 给出了加热器工作电压为 150 V 时, 光滑圆管的温度场分布情况.

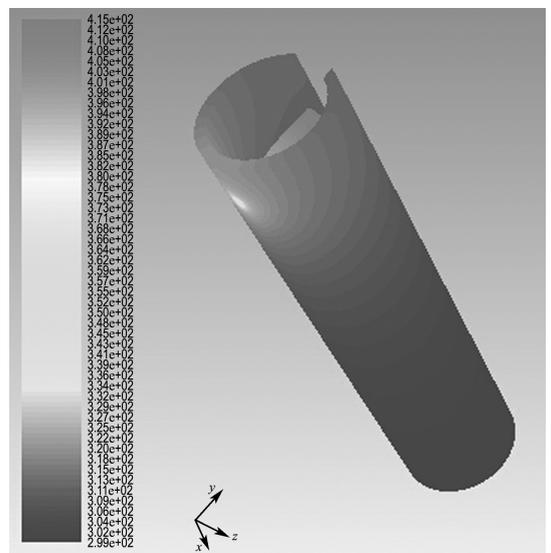


图 3 光滑圆管的温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution of the smooth pipe

150 V 电压下光滑圆管 4 个测温点的数值模拟结果与实测值列于表 2 中.

表 2 测温点的温度

Tab. 2 Temperature of test point

测温点	温度/℃		偏差/%
	实测	模拟	
T_1	39.1	40.1	2.6
T_2	32.5	33.3	2.5
T_3	32.1	31.1	-3.1
T_4	31.3	30.8	-1.6

在本实验的允许偏差之内, 数值模拟结果与实测值基本符合, 因此, 此时模拟出的加热点外壁的温度可视为实验中外壁的温度. 其余工况壁温获得与此一致, 不再赘述.

3 实验结果及分析

3.1 实验数据处理方法

在图像采集过程中, 高速摄像机拍摄速度被

设置为 1 000 f/s 来采集气泡生长、运动的整个过程. 将此过程采集到的视频文件通过高速摄像机的专业配套软件 VITcam 1.5.8.3 转换成 1 000 f/s 的 BMP 格式图片. 利用 Matlab 软件^[11] 对图像进行灰度化和二值化处理, 之后导入后处理软件, 从中获得气泡的像素投影面积, 再进行数据的后处理, 可获得气泡刚开始运动时的当量直径. 之后输出该参数随壁面热流密度的变化曲线, 并观察典型情况下气泡在运动过程中形状的变化.

3.2 气泡沿圆形曲面的运动过程

实验拍摄记录了 4 种工况下气泡的运动过程, 本文仅给出加热器在 150 V 电压下气泡的运动过程(对应的热流密度为 $1.78 \times 10^4 \text{ W/m}^2$), 其余工况与其一致, 不再赘述. 根据 CCD 图像分析可以获知, 气泡的运动主要有 3 个过程, 即生长、滑移、破灭. 加热器在 150 V 电压下工作时气泡的运动过程如图 4 所示.

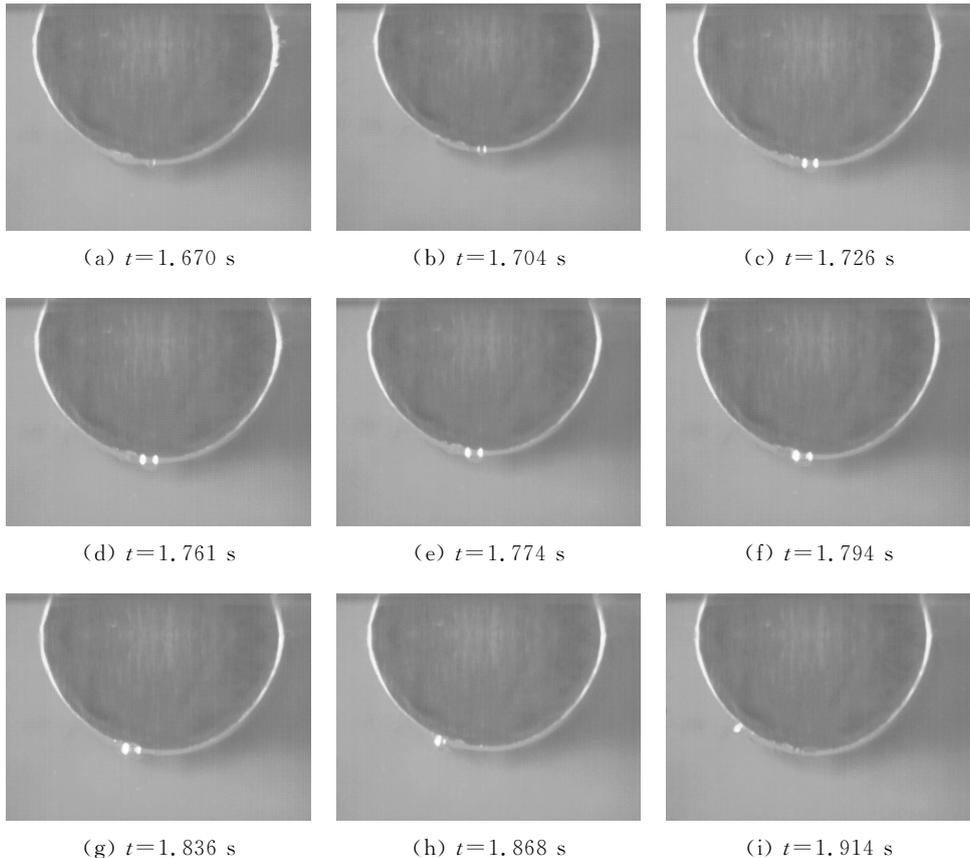


图 4 热流密度 $1.78 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 时气泡的运动过程

Fig. 4 Vapor bubble movement at heat flux of $1.78 \times 10^4 \text{ W/m}^2$

伴随着光滑圆管壁面气泡发生点内外温差的不断增大,该点附近区域壁面开始有气泡产生.随着热量的不断增加,气泡受热不断生长.在生长这一时段内,由于受力不均,气泡在光滑圆管面上会产生滑移现象,如图4(c)所示.从图4还可看出,在 $t=1.761\sim 1.774$ s时,气泡的位置发生变化.在气泡沿壁面滑移过程中,气泡和光滑圆管接触的壁面区域与加热点的距离逐渐加大,温度也随之降低,从而使得壁面传入气泡的热量减少,气泡开始冷凝使得体积缩小,如图4(g)、(h)所示.从气泡的整个运动过程可以看出,气泡的形状从初始的近似球体变化到最后被拉长的椭圆体直至气泡破灭.

3.3 气泡的始动直径

对光滑圆管上刚开始滑移的气泡图像进行灰度化、二值化处理,之后采用 Image Pro Plus 6.0 软件获得此时气泡的像素投影面积,计算得出此时气泡的当量直径 d 称之为始动直径,各工况下气泡的始动直径见表3.

气泡的热流密度是此次实验中一个非常重要的参数.本文中,利用数值模拟方法获得圆管内外壁的温度 T_{w1} 、 T_{w2} ,再依据傅里叶导热定律获得热流密度,如下式所示:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度; λ 为导热系数; $\frac{\partial t}{\partial x}$ 为垂直于截面方向上的温度变化率,本实验中其近似为 $\frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta}$, δ 为气泡产生区域管壁厚度.已知304不锈钢的导热系数为 $16.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,根据实验数据求得各工况的热流密度也列于表3中.

表3 不同工况下的相关参数

Tab.3 Parameters under various conditions

工作电压/V	热流密度/ $(10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$	始动直径/mm
150	1.78	3.54
160	2.11	3.82
170	2.43	4.10
180	3.08	4.34

以始动直径为纵坐标,热流密度为横坐标绘制出气泡始动直径随热流密度的变化曲线,如图

5所示.从变化曲线可以看出,气泡始动直径随壁面热流密度的增大而呈现上升趋势.

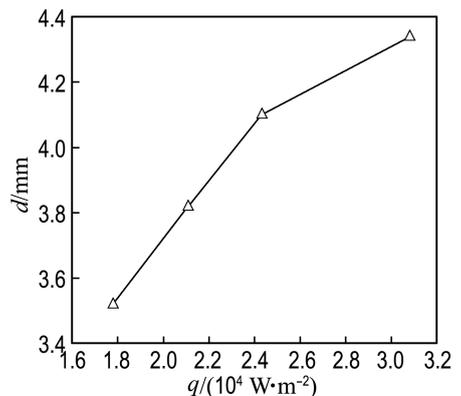


图5 始动直径随热流密度变化曲线

Fig.5 The variation curve of equivalent diameter of a vapor bubble when it starts to move with heat flux

4 结 论

(1)在生长阶段气泡的形状近似球体,体积不断扩大;沿壁面滑移过程中气泡的形状为被拉长的椭圆体,最后因热流量的减小而消失.

(2)壁面热流密度对气泡始动直径有一定影响:壁面热流密度越大,气泡始动直径也相应增大.

参 考 文 献:

- [1] 沈自求. 沸腾传热研究[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(3):253-259.
SHEN Zi-qiu. Study of boiling heat transfer [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(3):253-259. (in Chinese)
- [2] Kim J. Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(12):1067-1076.
- [3] 潘良明,辛明道,何川,等. 垂直窄缝通道内过冷沸腾时的汽泡行为[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4):661-663.
PAN Liang-ming, XIN Ming-dao, HE Chuan, et al. Bubble behaviors of subcooled flow boiling in vertical narrow channels [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(4):661-663. (in Chinese)

- [4] 周定伟, 刘登瀛, 马重芳. 汽泡生成状态对沸腾传热影响的实验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, **10**(1):63-67.
ZHOU Ding-wei, LIU Deng-ying, MA Chong-fang. Experimental study on the effect of bubble growth condition on boiling heat transfer [J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2002, **10**(1):63-67. (in Chinese)
- [5] 赵耀华, 姬朝玥. 过冷沸腾气泡行为的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, **25**(1):109-111.
ZHAO Yao-hua, JI Chao-yue. Experimental investigation on bubble behaviors in subcooled boiling [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2004, **25**(1):109-111. (in Chinese)
- [6] Houston S D, Cornwell K. Heat transfer to sliding bubbles on a tube under evaporation and non-evaporation conditions [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 1996, **39**(1):211-214.
- [7] Manickam S, Dhir V. Holographic interferometric study of heat transfer to a sliding vapor bubble [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2012, **55**(4):925-940.
- [8] Sateesh G, Das S K, Balakrishnan A R. Analysis of pool boiling heat transfer: Effect of bubbles sliding on the heating surface [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2005, **48**(8):1543-1553.
- [9] Cornwell K, Grant I A. Heat transfer to bubbles under a horizontal tube [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 1998, **41**(10):1189-1197.
- [10] 宁辉, 杨或, 唐远河, 等. 基于PIV技术的水中气泡的拍摄与用光技巧[J]. 纺织高校基础科学学报, 2005, **18**(4):356-358, 363.
NING Hui, YANG Yu, TANG Yuan-he, *et al.* The technique of shooting bubble and source in water based on PIV [J]. **Basic Sciences Journal of Textile Universities**, 2005, **18**(4):356-358, 363. (in Chinese)
- [11] 邓巍, 丁为民, 张浩. MATLAB在图像处理和分析中的应用[J]. 农机化研究, 2006(6):194-198.
DENG Wei, DING Wei-min, ZHANG Hao. Application of MATLAB in figure image processing and analysis [J]. **Journal of Agricultural Mechanization Research**, 2006(6):194-198. (in Chinese)

Experimental research on characteristics of vapor bubble in subcooled boiling liquid on downward facing circular surface

LI Wei-zhong*, JI An-sheng, DONG Bo

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The equivalent diameter of a vapor bubble starting to move and its motion behavior are important for the research on mechanism of boiling heat transfer. The vapor bubble's growth and motion on a downward facing circular surface in subcooled boiling liquid under various heat fluxes are studied experimentally by using a high-speed camera. The experimental results show that in the process of its growth and movement, the vapor bubble changes from a sphere in the growth process at the initial stage to an elongated ellipsoid in its sliding process, and then it is broken. The heat flux has an influence on the equivalent diameter of vapor bubble starting to move, and the equivalent diameter of vapor bubble starting to move increases with the increasing of heat flux.

Key words: downward facing circular surface; vapor bubble; subcooled boiling; high speed camera