

蒸汽流量对蒸汽直接接触冷凝的影响

唐继国^{1,2}, 阎昌琪¹, 孙立成², 莫政宇²

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院

核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001;

2. 四川大学 水利水电学院

水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610207)

摘 要: 为研究蒸汽流量对蒸汽直接接触凝结及汽泡表面变化过程的影响, 利用高速摄像机记录一定过冷度、不同蒸汽流量条件时过冷水中蒸汽的凝结过程。实验结果表明: 蒸汽流量小于 $0.36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 汽泡表面始终较光滑; 当蒸汽流量升至 $0.74 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 汽泡表面上出现波动, 汽泡最终逐渐分裂成数个小汽泡; 当蒸汽流量大于 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 汽泡表面上的波动非常剧烈, 汽泡不稳定性增强, 并最终破碎成大量微汽泡。且随蒸汽流量增, 这些微汽泡的直径减少, 喷射速度增加。蒸汽流量超过 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 后, 汽泡在凝结时, 其相对半径迅速减小, 半径变化率迅速增加。汽泡表面剧烈的波动会极大的增加汽泡有效换热面积, 导致蒸汽与过冷水间的传热和传质过程被极具的加强。

关 键 词: 直接接触凝结; 汽泡表面; 汽泡破裂; 微汽泡; 蒸汽流量

中图分类号: V129; TK124

文献标志码: A

Effect of vapor injection rate on direct contact condensation of vapor

TANG Ji-guo^{1,2}, YAN Chang-qi¹, SUN Li-cheng², MO Zheng-yu²

(1. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,

College of Nuclear Science and Technology,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering,

College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract: In order to investigate the effect of vapor injection rate on the direct contact condensation and evolution of vapor bubble surface, a high-speed video camera was employed to record the process of vapor condensation in the cold bulk at a certain liquid subcooling and different vapor injection rates. Experimental results showed that the bubble surface was relatively smooth throughout the whole slow process of bubble condensation when the vapor injection rate was less than $0.36 \text{ m}^3/\text{h}$. As the vapor injection rate increased to $0.74 \text{ m}^3/\text{h}$, surface wave appeared on the bubble surface and the bubble was split up into some tiny bubbles finally. When the vapor injection rate was larger than $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$, surface wave on the bubble was very violent. The bubble instability was enhanced and the bubble would collapse into many microbubbles. Furthermore, with the increase of the vapor injection rate, the diameter of these microbubbles decreased and the average velocity increased. When the vapor injection rate exceeded $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$, the bubble relative radius decreased and the change rate of bubble radius increased rapidly. The strong surface wave on the bubble could increase the bubble ef-

收稿日期:2014-10-08

基金项目:国家自然科学基金(51376052,11175050,51106101); 四川大学科研基金(YJ201432)

作者简介:唐继国(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要从事沸腾换热及两相流动研究。

fective area of heat transfer significantly, resulting in a substantial enhancement of heat and mass transfer between vapor and cold bulk.

Key words: direct contact condensation; bubble surface; collapse of bubble; microbubble; vapor injection rate

由于极高的传热和传热能力,直接接触冷凝(direct contact condensation, DCC),在航空航天、核能和化工等诸多领域中都有极其重要的应用。

Ju 等^[1]利用全息干涉仪和高速摄像测量了直接接触冷凝过程中汽泡周围的传热系数。Youn 等^[2]研究了低蒸汽流速下的蒸汽直接接触冷凝过程,并对由凝结引入的压力波动进行了分析。Clerx 等^[3]研究了蒸汽注射方向与液体流动方向垂直条件下的直接接触冷凝过程,发现液体的横向冲刷会提高凝结传热系数,进而减小汽泡贯穿深度。而 XU, Issa 等^[4-5]对蒸汽注射方向与液体流动方向相同条件下的蒸汽射流过程进行了实验研究。武心壮、唐思、QIU 等^[6-8]分别分析了亚声速和声速蒸汽直接接触冷凝过程中的压力波动特性。Takase 等^[9]对抑压水池中蒸汽与水的直接接触凝结过程进行了数值模拟。Chan, Nariai, Lee, Petrovic 等^[10-14]根据实验结果和理论分析提出了直接接触冷凝过程的分区图谱,其中 Lee 等^[12]引入 Ja 数和 Fr 数代替常用的水温和质量流速作为图谱的横纵坐标。Ueno 等^[15]利用过冷水中蒸汽的直接接触凝结过程模拟过冷沸腾时过冷液体与汽泡间的相互作用,以此来简化对于一种特殊的沸腾现象——汽泡微细化沸腾^[16](microbubble emission boiling, MEB)现象形成机理的分析。

目前,国内外学者对直接接触冷凝进行了大量的实验和理论研究。但是,蒸汽凝结时汽泡表面

特性以及蒸汽汽泡破碎特性方面的研究却极少。因此,本文通过向过冷水池中注射不同流速的蒸汽,以研究蒸汽注射速度和汽泡表面特性对蒸汽直接接触凝结过程的影响。

1 实验装置

实验装置简图如图 1 所示。不锈钢水箱(300 mm×240 mm×120 mm)开有观察窗口,用于观察和拍摄汽泡行为。实验过程中,蒸汽由蒸汽发生系统产生,通过内径为 4 mm,外径为 49.5 mm 的孔板注入到水箱中。蒸汽发生系统主要包括电加热锅炉、挡板式汽水分离器、疏水池、管道以及阀门等。蒸汽发生装置以及蒸汽管道外壁均包有隔热材料,以减少热量损失。蒸汽流量通过蒸汽阀与旁通阀调节。水箱中分别安装了电加热棒和冷却器,用于调节水温,达到控制过冷度的目的。电加热棒直径为 15 mm,冷却器则采用铜制冷却盘管。1 根直径为 0.5 mm 的 K 型铠装热电偶用于测量水箱中的水温,温度信号由美国国家仪器公司(NI)数据采集系统采集。热电偶端部距蒸汽管道出口约为 45 mm。水箱中的工质为蒸馏水,实验在常压下进行。每组实验选定一蒸汽体积流量(简称蒸汽流量),维持其稳定,逐渐调节过冷度。过冷度范围为 0~85 K,其波动维持在±1 K 内。蒸汽汽泡凝结过程由 PHOTRON 公司生产的 Fastcam SA5 高速摄影仪观测与采集。实验的拍摄速度设定范围为

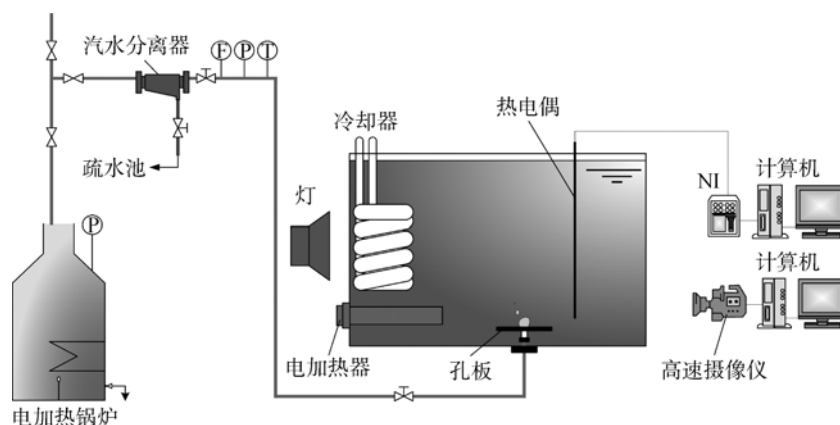


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

2000~20000 帧/s,同时还配备了背光系统,以增强拍摄的清晰度.为获得每组实验中的蒸汽流量,在实验前先将水箱中的水加热至饱和,维持蒸汽流量稳定,用高速摄像机记录蒸汽气泡脱离前的生长过程.气泡体积随时间的变化率即为蒸汽的流量.由于在高蒸汽流量条件下气泡生长时会出现较大变形,该方法测得的蒸汽流量可能会有较大误差.因此,蒸汽流量需控制在一定范围内以保证其准确性.目前在饱和水中 $7.61 \text{ m}^3/\text{h}$ 蒸汽流量下还可观察到具有较好对称性的蒸汽泡.虽然气泡表面不光滑,但其对气泡体积影响较小.因此,目前实验中的蒸汽流量限制在 $7.61 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下.此外,为进一步确保所测流量准确性,对每组蒸汽流量工况进行多次测量.选取 4~6 组具有高对称性的实验数据进行处理、测量.各组实验数据所得流量的波动相对于流量本身极小.因此取各组的平均值作为最终结果.

2 图像处理

为获得气泡位置、直径、面积等参数,必须对数字图像进行处理,图 2 所示是由高速摄像拍摄得到的一个典型蒸汽气泡及图像的处理过程.实验中得到的汽液界面通常比背景颜色深,如图 2(a)所示.因此利用灰度滤波去除图像中的背景.灰度图中白色为 255,黑色为 0,因此灰度滤波定义为

$$P(x, y) = \begin{cases} P(x, y) & P(x, y) < \delta(P_{\max} - P_{\min}) \\ 255 & P(x, y) > \delta(P_{\max} - P_{\min}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P(x, y)$ 为图像中第 x 行、第 y 列像素点的灰度值; $P_{\max}$, $P_{\min}$ 分别为图像中所有像素点灰度值的最大值以及最小值; δ 为滤波阈值,通常对于同一组实验中的图像,其为一固定值.

为消除这些噪声并保持气泡的边缘信息,采用 Winner 滤波器对图像进行去噪.图 3 所示是原始图像中三列背景的灰度值,灰度值梯度存在明显的分界.为提高图像处理精度,根据背景灰度将图像分为两部分,分割后的图像分别进行灰度滤波和 Winner 滤波.图 2(b)是处理后合并的图像.为去除图像中小突刺、小气泡以及细长搭接等,且保证不影响气泡结构,对图像进行形态学开操作,之后再进行腐蚀和形态学重建,结果如图 2(c)所示.

为提取气泡各参数,对预处理后的图像采用 Otsu 法^[17]进行二值化分割处理,结果如图 2(d).

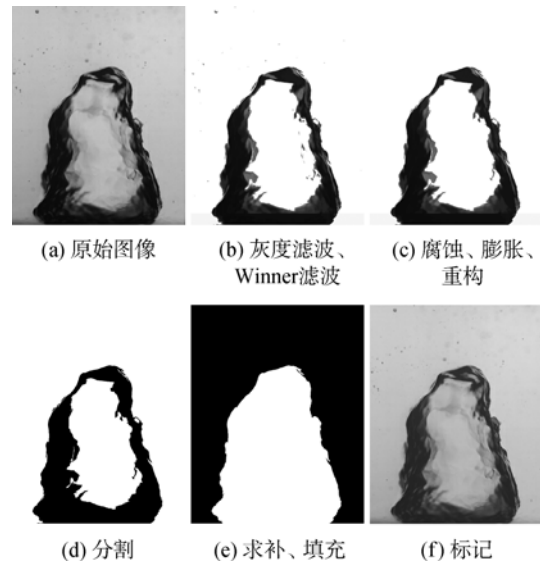


图 2 图像预处理过程

Fig. 2 Steps of image pre-processing

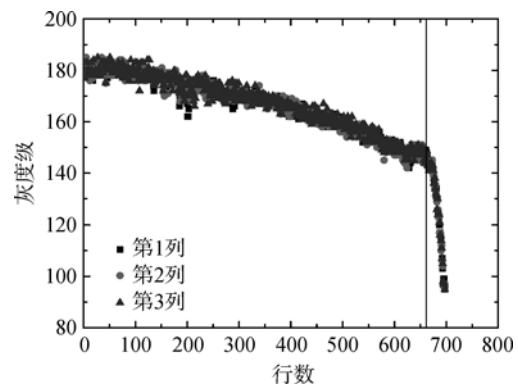


图 3 背景灰度值

Fig. 3 Gray level of the background

由于反光等原因,图像二值化后,气泡中间通常是不连通的.需要对图像进行求补和填充,然后对填充后的图像分别标记,结果分别见图 2(e)和图 2(f).当图像中存在多个气泡时,采用与文献[18]中类似的粒子跟踪测速(PTV)算法对连续两帧中的标记气泡进行匹配.根据实际图像的特点,可对上述过程中的操作和限值进行一定的调整.

由于气泡外形通常并非理想圆形,多数研究利用等效半径来衡量气泡的大小.因此,本文采用与所测气泡相同体积的球体半径作为等效半径

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = V_b \quad (2)$$

式中 R 为气泡等效半径, V_b 为气泡体积.气泡相对半径定义为

$$\beta = \frac{R}{R_{\max}} \quad (3)$$

式中 $R_{\max}$ 为汽泡等效半径最大值. 在生长过程中或脱离后不久的汽泡, 可以近似为沿竖直轴对称的回转体, 因此, 对于处理后的二维图像, 可以利用离散积分计算得到汽泡的体积

$$V_b = K^3 \sum_{x \in \Omega} \frac{1}{4} \pi d_x^2 \quad (4)$$

式中 d_x 为汽泡第 x 行的宽度, K 为像素大小与实际尺寸之间比例因子, Ω 为同一汽泡所有像素点集合. 由于两张图像间的时间间隔很短, 因此汽泡等效半径变化速率可以近似为

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\Delta R}{\tau} \quad (5)$$

式中 τ 为两张图像间的时间间隔, ΔR 为两张图像间汽泡等效半径变化.

3 实验结果及分析

3.1 可视化结果

图4所示是40 K过冷度下不同蒸汽流量时的蒸汽汽泡凝结过程. 在极低的蒸汽流量下 ($Q_m < 0.36 \text{ m}^3/\text{h}$), 在整个蒸汽汽泡凝结过程中, 汽泡表面都极其光滑没有界面波动形成. 如图4(a)和图4(b)所示, 较大的蒸汽汽泡在 $t=9 \text{ ms}$ 时脱离孔板, 随后逐渐分裂成数个小汽泡. 当蒸汽流量增加到 $0.74 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 汽泡表面在凝结过程中出现波动, 但波动发展较慢, 波长较大. 当汽泡脱离、凝结一段时间后, 其逐渐分裂成一些小汽泡, 如图4(c)所示. 当蒸汽流量升至 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 汽泡表面上的表面波动更加剧烈. 脱离后, 汽泡不会分裂, 而是在凝结一段时间后直接破碎成许多微小汽泡, 如图4(d)所示. 在较高的蒸汽流量下 ($Q_m > 3.73 \text{ m}^3/\text{h}$), 汽泡表面在整个凝结过程中都极其不光滑, 汽泡界面上的波动异常剧烈, 其波长和幅值都非常小, 如图4(e)和图4(f)所示. 汽泡脱离孔板后, 与蒸汽流量在 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的情况不同, 其会立即破碎成大量的微小汽泡. 当 $Q_m = 7.61 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 由于极其剧烈的界面波动和快速喷射出的大量微汽泡, 汽泡表面已经很难被捕捉清楚.

从上述过程可以看出, 随着蒸汽流量的增加汽泡表面在凝结过程中会越来越粗糙. 这可能是由以下原因造成的: 随着蒸汽流量的增加, ①蒸汽汽泡内的湍流程度增加; ②蒸汽汽泡周围逐渐很难形成稳定的热边界层; ③向上运动的蒸汽与静止的过冷水之间的剪切应力逐渐增加. 而粗糙的汽泡表面会增加汽泡凝结换热的有效表面积.

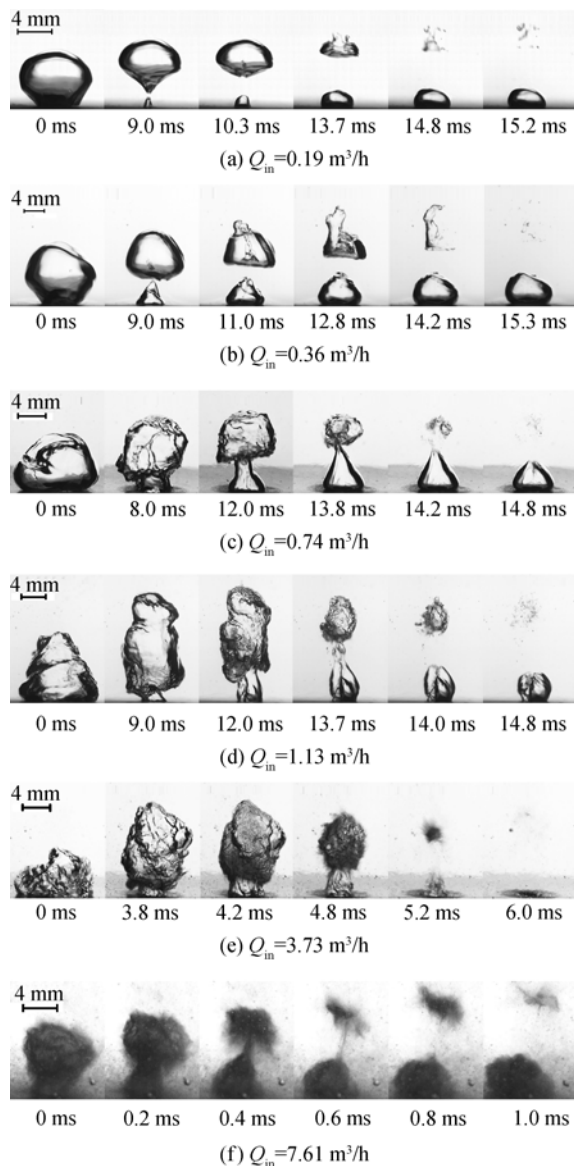


图4 蒸汽汽泡凝结过程

Fig. 4 Condensing process of vapor bubbles

3.2 汽泡行为

图5和图6分别示出不同蒸汽流量下汽泡相对半径随时间变化以及汽泡等效半径的变化速度. 图6中黑色箭头标出剧烈界面波动出现的位置. 在低蒸汽流量下 ($Q_m < 0.36 \text{ m}^3/\text{h}$), 蒸汽汽泡凝结过程不剧烈. 在脱离孔板前汽泡半径基本无变化, 而脱离后开始缓慢减小. 在整个凝结过程中, 汽泡等效半径变化速度都非常平稳. 在较高的蒸汽流量下 ($1.13 \text{ m}^3/\text{h} < Q_m < 3.73 \text{ m}^3/\text{h}$), 凝结过程较剧烈, 在脱离前汽泡等效半径就开始减小. 当汽泡开始凝结一段时间后, 汽泡表面上出现剧烈的界面波动, 这增加了汽泡有效凝结面积, 汽泡凝结速度进一步加快. 如图6所示, 出现界面波动后, 汽泡半径变化速率开始逐渐增加. 这可能会使

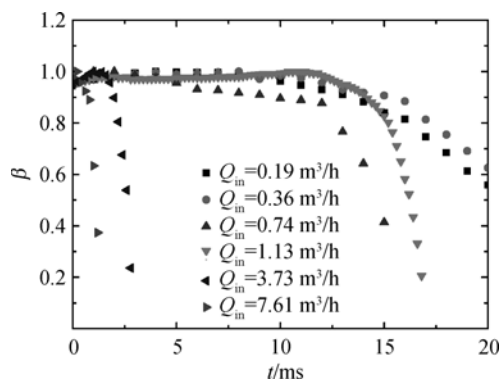


图5 不同蒸汽流量下气泡相对半径变化

Fig. 5 History of bubble dimensionless radius at different vapor injection rates

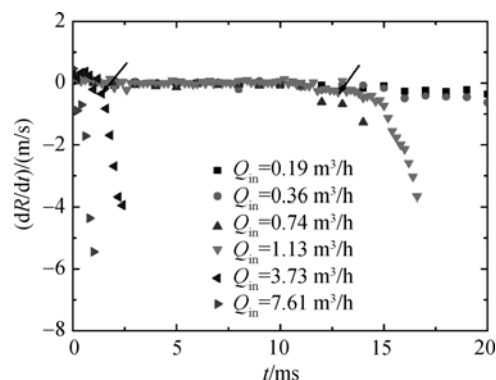


图6 气泡等效半径变化速度

Fig. 6 Variation rate of the equivalent bubble radius

气泡表面上出现 Rayleigh-Taylor 不稳定性现象^[15],最终导致气泡破碎. 在更高的蒸汽流量下 ($Q_m = 7.61 \text{ m}^3/\text{h}$), 气泡在长大过程中, 其表面上就存在极其剧烈的界面波动. 当气泡凝结体积大于注射体积时, 气泡相对半径开始迅速下降, 而其变化速率迅速增加. 综上, 在较高过冷度下, 当蒸汽注射速度达到一定值后, 气泡表面上出现的界面波动增强了气泡表面的不稳定性, 并极大程度的强化了蒸汽与过冷水间的传热和传质过程.

3.3 气泡破碎后的微气泡

40 K 过冷度下, 实验中观察到的蒸汽气泡破碎形成大量微气泡的过程与 MEB 现象中微气泡喷射过程类似^[16]. 蒸汽流量可以看作沸腾时的蒸汽产生速率, 通常其随热流密度增加而增加. 因此, 蒸汽注射流量越大代表相应沸腾时的热流密度越大. 实验中发现只有当蒸汽注射流量超过 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时才会有微气泡形成. 而 MEB 现象只有当热流密度超过临界热流密度后才会发生, 两者趋势一致.

图7和图8分别示出不同蒸汽流量下, 蒸汽气泡破碎后 1 ms 内典型的微气泡直径 (D_m) 分布和速度 (v_m) 分布情况. 随着蒸汽流量的下降, 微气泡直径分布范围被展宽, 微气泡速度分布范围缩小; 此外, 微气泡直径的峰值区域逐渐向较大直径范围转移, 而微气泡速度的峰值区域逐渐向较小速度范围转移.

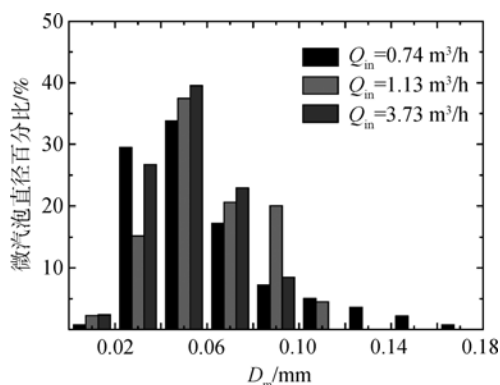


图7 不同蒸汽流量下微气泡直径分布

Fig. 7 Distribution of microbubble diameter at different vapor injection rates

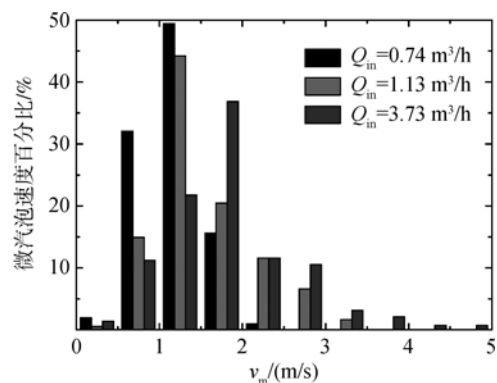


图8 不同蒸汽流量下微气泡速度分布

Fig. 8 Distribution of microbubble velocity at different vapor injection rates

图9示出蒸汽流量对微气泡直径平均值和速度平均值的影响. 如图所示, 随着蒸汽流量增加, 微气泡平均直径逐渐下降, 而平均速度逐渐升高. 这主要是因为随蒸汽流量的增加, 蒸汽气泡破碎过程更加剧烈. Tange, Hattori 等^[19-20]对 0.3 mm 铂丝上的 MEB 现象进行了实验研究, 发现 43.5 K 过冷度下微气泡平均直径为 $21 \mu\text{m}$, 40 K 过冷度下微气泡速度平均值为 0.85 m/s , 两者在量级上接近于实验中获得的数据.

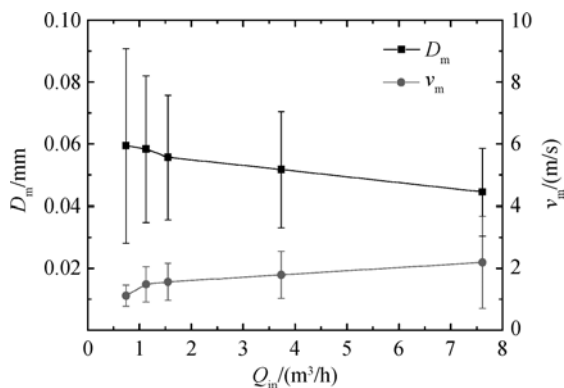


图9 蒸汽流量对微气泡直径和速度的影响

Fig. 9 Effect of vapor injection rate on microbubble diameter and velocity

4 结 论

本文通过向过冷水中注入蒸汽来研究蒸汽流量对蒸汽气泡凝结过程和气泡表面的影响,得到以下结论:

1) 蒸汽流量 Q_m 小于 $0.36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,凝结过程中气泡表面都极其光滑. 当 Q_m 增加到 $0.74 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡表面开始出现波动,气泡脱离后逐渐分裂成小气泡. 当 Q_m 超过 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡表面上的波动非常剧烈. 气泡脱离后,突然破碎成大量微小气泡,与 MEB 中气泡破碎和微气泡喷射过程类似.

2) 蒸汽流量 Q_m 较小时,气泡大小变化缓慢,其变化速度基本不变. Q_m 超过 $1.13 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡表面上的界面波动会极大的增加有效凝结面积,加快凝结过程,使气泡迅速减小,其变化速率迅速增加.

3) 随蒸汽流量增加,蒸汽气泡破碎后形成的微气泡的直径减少,而其速度增加,且两者在量级上与 MEB 区域微气泡的大小及平均速度接近.

参考文献:

- [1] Ju S H, No H C, Mayinger F. Measurement of heat transfer coefficients for direct contact condensation in core makeup tanks using holographic interferometer[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 199(1): 75-83.
- [2] Youn D H, Ko K B, Lee Y Y, et al. The direct contact condensation of steam in a pool at low mass flux[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2003, 40(10): 881-885.
- [3] Clerx N, Van der Geld C W M. Experimental and analytical study of intermittency in direct contact condensation of steam in cross-flow of water[R]. Florianopolis, Brazil; ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, 2009.
- [4] XU Qiang, GUO Liejin, ZOU Suifeng, et al. Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66(6): 808-817.
- [5] Issa S A, Weisensee P, Macian-Juan R. Experimental investigation of steam bubble condensation in vertical large diameter geometry under atmospheric pressure and different flow conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70(2): 918-929.
- [6] 武心壮, 李文军, 严俊杰. 音速蒸汽浸没射流凝结轴向全压分布特性研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(6): 76-80.
WU Xinzhuang, LI Wenjun, YAN Junjie. Research on axial total pressure distributions of sonic steam jet in subcooled water[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(6): 76-80. (in Chinese)
- [7] 唐思, 邱斌斌, 种道彤, 等. 音速蒸汽射流凝结压力振荡强度的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(8): 1479-1482.
TANG Si, QIU Binbin, ZHONG Daotong, et al. Experimental investigation on magnitude of pressure oscillation due to the sonic steam jet condensation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(8): 1479-1482. (in Chinese)
- [8] QIU Binbin, TANG Si, YAN Junjie, et al. Experimental investigation on pressure oscillations caused by direct contact condensation of sonic steam jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52(1): 270-277.
- [9] Takase K, Ose Y, Kunugi T. Numerical study on direct-contact condensation of vapor in cold water[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 63/64(2): 421-428.
- [10] Chan C K, Lee C K B. A regime map for direct contact condensation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(1): 11-20.
- [11] Nariai H, Aya I. Fluid and pressure oscillations occurring at direct contact condensation of steam flow with cold water[J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 95(1): 35-45.
- [12] Lee S I, No H C. Gravity-driven injection experiments and direct-contact condensation regime map for passive high-pressure injection system[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 183(3): 213-234.
- [13] Petrovic A. Analytical study of flow regimes for direct contact condensation based on parametrical investigation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(1): 20-25.
- [14] Petrovic A, Calay R K, With G. Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9/10): 1762-1770.
- [15] Ueno I, Arima M. Behavior of vapor bubble in subcooled pool[J]. Microgravity Science and Technology, 2007, 19(3): 128-129.
- [16] 唐继国, 孙立成, 朱光昱. 微气泡发射沸腾形成机理[J]. 航

- 空动力学报, 2014, 29(4): 777-782.
- TANG Jiguo, SUN Licheng, ZHU Guangyu. Formation mechanism of microbubble emission boiling[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 777-782. (in Chinese)
- [17] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernet, 1979, 9(1): 62-66.
- [18] 浦兴国, 浦世亮, 袁镇福, 等. 激光干涉气液两相流颗粒速度矢量测量的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 237-240.
- PU Xinguo, PU Shiliang, YUAN Zhenfu, et al. A research on the interferometric laser imaging droplet velocimetry technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 237-240. (in Chinese)
- [19] Tange M, Takagi S, Watanabe M, et al. Microbubble emission boiling in a microchannel and minichannel[J]. Thermal Sciences Engineering, 2004, 12(1): 23-29.
- [20] Hattori Y, Ueno I. Microbubble formation in abrupt condensation of vapor bubble exposed to subcooled pool[R]. Shanghai: ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference, 2009.

(编辑: 叶 青)