

过冷水中蒸汽射流自旋凝结的实验研究

丛红钊, 韩沛东, 周子棋, 孙中国, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对蒸汽射流自旋凝结过程中的复杂流动和相变展开实验研究, 采用新型 X 型旋流压力喷嘴实现了蒸汽射流的自旋流动, 分析了不同流量下旋转气泡的冷凝模式以及相关参数的演化规律, 包括气泡半径、生长速率、溃灭速率、气泡质心最大迁移速度和溃灭频率。结果表明: 蒸汽射流自旋凝结可划分为光滑生长气泡机制、过渡气泡机制和粗糙生长气泡机制。在离心力作用下, 凝结过程中可能出现颈部螺旋发展和气泡顶部凸起不规则变形等典型行为。随着质量流量的增加, 气泡冷凝时间缩短, 生长速率有所增加, 气泡半径和溃灭速率呈现非线性变化, 气泡质心最大迁移速度范围为 24.3~73.23 m/s, 气泡溃灭频率为 20~302 Hz。同一质量流量下, 气泡可能在不同方向上发生冷凝并出现之字形运动轨迹。气泡质心偏离喷嘴中心轴线角度增大, 有助于减小气泡溃灭过程中发生回弹的次数, 对气泡生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度产生非线性影响。研究结果可为开发和优化相关工业领域中的冷凝技术提供重要的理论依据。

关键词: 旋转蒸汽射流; X 型旋流压力喷嘴; 气泡凝结特性

中图分类号: TK2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502003 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0023-09

Experimental Study of the Condensation of Swirling Steam Jet in Subcooled Water

CONG Hongchuan, HAN Peidong, ZHOU Ziqi, SUN Zhongguo, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To show the complex flow and phase change in the condensation of swirling steam jet, an experimental study was conducted in this paper. Firstly, a novel X-type swirl pressure nozzle was employed to achieve the swirling flow of the steam jet. Next, the condensation regimes of swirling bubbles and the evolution of related parameters were analyzed at various mass flow rates, and these parameters included bubble radius, growth rate, collapse rate, maximum migration speed of the bubble center, and collapse frequency. The results show that there were three condensation regimes: smooth grown bubble regime, transition regime, and rough grown bubble regime. Under the influence of centrifugal force, typical behaviors such as neck torsion and irregular deformation of the jet bulge at the top of bubbles may occur during the condensation process. As the mass flow rate increased, the bubble condensation time decreased, the growth rate increased, and both bubble radius and collapse rate exhibited nonlinear changes. The maximum migration speed of the bubble center ranged from 24.3 m/s to 73.23 m/s, while the

收稿日期: 2024-07-31。 作者简介: 丛红钊(1994—), 女, 博士生; 孙中国(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(51922085)。

网络出版时间: 2024-10-17

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241016.1726.006>

bubble collapse frequency varied between 20 Hz and 302 Hz. At the same mass flow rate, bubbles may condense in different directions and display a zigzag motion trajectory. An increasing in the deviation angle of the bubble center relative to the central axis of the nozzle helps reduce the rebound number during the collapse, exerting a nonlinear impact on the bubble growth rate, collapse rate, and maximum migration speed of the bubble center. This study can provide a theoretical support to some extent for the development and optimization of condensation technologies in related industrial fields.

Keywords: swirling steam jet; X-type swirl pressure nozzle; bubble condensation characteristics

蒸汽射流冷凝因其较高的传热传质效率而被广泛应用在核工程^[1]、船舶蒸汽动力系统^[2]和大推力液氧煤油火箭发动机^[3]等各个领域。冷凝过程伴随着相变、多物理场耦合、界面多尺度演化等瞬态特性^[4],不仅受外界条件的影响,还与自身运动状态密切相关。因此,蒸汽射流凝结的研究可分为静止射流凝结、摇摆蒸汽射流凝结和旋转蒸汽射流凝结3个方面,其中,旋转蒸汽射流凝结在复杂的两相相互作用中引入了离心力,给理论研究和实际应用带来了诸多挑战,尚未深入开展。

目前,蒸汽射流直接接触冷凝的研究中,静止蒸汽射流冷凝的研究最为成熟^[5-6]。Tang等^[7]研究了30~95℃水温和蒸汽0.19~7.61 m³/h体积流量对冷凝过程的影响,确定了光滑气泡区、形状振荡区、过渡区和毛细波区4种凝结特征。研究发现,随着液体过冷度和体积流量的增加,气泡表面变得更加粗糙和不稳定,扩大了凝结的有效面积,加速了气泡的凝结。文献[8-9]的研究表明,气液两相区是蒸汽凝结的主要区域,该区域传质过程中伴随着压力和速度的剧烈参数变化。Yang等^[10]分析了蒸汽射流的鼓泡频率和界面换热的关系,发现鼓泡越快,传递的热量越多。Qiu等^[11]通过实验将气泡凝结模式划分为喘振、光滑生长气泡和粗糙生长气泡。研究发现,气泡溃灭频率随水温的升高而减小,随蒸汽质量流量的增大而增大。Song等^[12]的数值研究结果表明,气泡凝结过程中,气泡半径变化率在气泡缩颈阶段达到最大值,界面传热系数和泡内速度的峰值出现在气泡颈部区域。Chong等^[13]实验讨论了蒸汽质量流量、水温度、管道尺寸和蒸汽喷射方向等因素对冷凝模式的影响,确定了喘振、半球形气泡振荡(HBO)和封装气泡振荡(EBO)3种典型的流动模式。研究表明,较大的管道直径会降低临界蒸汽质量流量,增加蒸汽流量和降低水温将增加冷凝震荡频率。Patel等^[14]实验研究表明,随着蒸汽射流管

内径增加,传热系数增加。当蒸汽射流管从垂直方向改变为倾斜方向时,压力波动幅度显著降低,而传热系数略有增加。闫良等^[15]对较大流量下的蒸汽羽流特征进行数值研究。研究表明,较高的水温和入口压力均会导致蒸汽羽流长度和影响区域增大。

针对海洋环境中的直接接触冷凝现象,摆动运动对相变换热的影响逐渐成为研究的热点^[16-17]。Chen等^[18-19]数值研究了摆动条件下蒸汽浸没射流的压力震荡和传热特性。研究结果表明,随着摆动周期的减小和摆动角度的增加,由于科里奥利力的增强,蒸汽浸没射流的主导振荡频率增加,与静态条件相比,摆动条件下可以加强传热和传质。Wang等^[20]数值研究结果表明,随着摆动角度和摆动频率的增大,附加惯性力和平均凝结速率增大,摆动运动引起的海水反向流动导致蒸汽在管道下部积聚,产生较大的压力脉冲。

旋转蒸汽射流凝结在相关冷凝技术的开发和应用中发挥着日渐重要的作用。在核热能发电领域,蒸汽驱动的发电厂的热效率仅为35%^[21]。其中,冷却塔排汽入水过程浪费了大部分能量,蒸汽以旋转的方式注入,可以诱导更多的周围水卷入,改善与周围水的相互作用,增强质量、动量和能量的传递^[22]。在热交换器开发技术中,通过引入旋转运动强化传热,实现减小热交换装置的尺寸和成本来提高热交换装置性能的目的^[23]。在海上天然气勘探和开发过程中,提取的混合物中含有大量蒸汽,可能导致管道腐蚀和设备结冰,所以必须在天然气运输前进行超声速脱水过程。旋流强度是超声速分离器脱水过程中的关键因素,对冷凝效果和脱水效率有重要影响^[24]。然而,相比于静止蒸汽射流冷凝和摆动条件下的蒸汽射流冷凝,旋转蒸汽射流冷凝的研究尚未开始。储小娜等^[25]虽对蒸汽旋转射流凝结进行了实验研究,但主要关注气液界面速度特性。因此,为了弥补当前直接接触冷凝的研究空白,提高汽

射流自旋凝结在工程实际中的应用价值,优化系统性能,本文将对蒸汽射流自旋凝结特性展开实验研究。

1 实验系统及图像处理

1.1 实验系统

蒸汽射流冷凝实验台主要由蒸汽供应系统、可视化实验水箱、测控系统和图像采集系统 4 部分组成。采用电磁蒸汽发生器连续供应高温水蒸气,电磁蒸汽发生器的额定蒸汽压力为 0.7 MPa,额定蒸汽量为 100 kg/h,饱和水蒸气经稳压罐稳压后在蒸汽管路中流动。蒸汽管道用玻璃纤维棉包裹,以减少蒸汽热量损失,实验水箱尺寸为 0.3 m×0.3 m×1 m,水箱顶部为开放式。喷嘴安装于水箱底部,蒸汽射流垂直向上射出,测控系统主要包括涡街流量计、压力变送器、温度变送器、温度热电偶和阀门组,蒸汽质量流量通过涡街流量计进行监测。在涡街流量计出口处安装压力变送器和温度变送器,用来测量蒸汽入口压力和温度,水箱内放置温度热电偶,用来测量实验水箱中过冷水温度,实验所需蒸汽质量流量通过调节电动蒸汽阀门开度来控制。图像采集系统采用千眼狼高速相机记录气泡的瞬态凝结过程,在水箱后方布置无频闪 LED 光源,为摄像机提供均匀的光背景。通过气液相数据采集程序,采集蒸汽和过冷水温度、蒸汽入口压力和蒸汽质量流量等数据。为研究不同流量对旋转蒸汽射流凝结的影响,使实验结果覆盖光滑、过渡和粗糙 3 种典型的气泡冷凝状态,考虑仪器的测量精度,实验参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

Table 1 Range of experimental parameters

参数	数值
蒸汽入口压力/MPa	0.2
蒸汽入口温度/℃	100~115
蒸汽质量流量 $G_s/(m^3 \cdot h^{-1})$	0.2~3.8
水温/℃	80
喷嘴直径/mm	3.6

实验所采用的旋流压力喷嘴为内部含有 X 型旋流芯的实心锥形喷嘴,X 型旋流芯和蒸汽射流流动示意图如图 1 所示。蒸汽射流流经旋流芯时将被分成两股,每股气流都沿着叶片表面流动并获得角动量,两股气流在叶片的末端汇合,形成一股螺旋上升的蒸汽射流后从喷嘴射出。

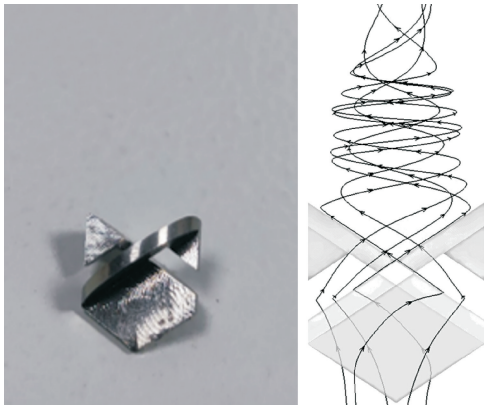


图 1 X 型旋流芯及其蒸汽射流流动示意图

Fig. 1 X-type swirl core and the schematic diagram of the steam jet flow

1.2 图像数据处理

为了识别相界面的位置,进一步提取和分析气泡参数,采用 MATLAB 软件编程对高速相机获得的图像进行处理,预处理过程如图 2 所示。首先,对原始图像使用 Wiener 滤波、intensity 滤波、erode 滤波和 dilate 滤波去除背景颜色和噪点;其次,利用 Otsu 方法将灰度图像转换为二值图像;最后,为了获得气泡的完整二元图像,提取特征参数,并对图像进行反色和填充处理。

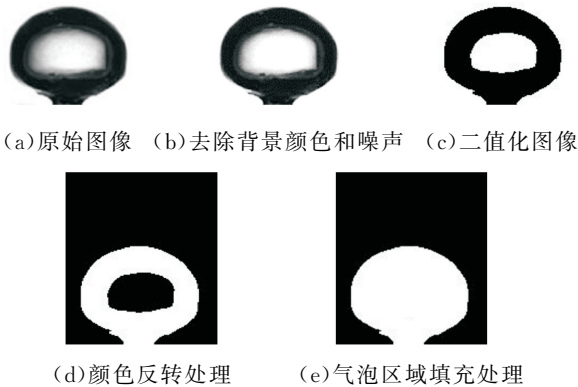


图 2 实验图像预处理过程

Fig. 2 Experimental image pre-processing process

假设蒸汽泡在垂直轴上为轴对称分布,气泡离散元素的所有水平截面均为圆形^[7]。根据得到的二维二进制图像,采用离散积分法计算气泡体积,即

$$V_b = \frac{\pi}{4} K^3 \sum_{i \in \Omega} d_i^2 \tag{1}$$

等效气泡半径计算为

$$R = \sqrt[3]{3V_b/4\pi} \tag{2}$$

气泡质心坐标为

$$x_c = K \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} \frac{x_{i,j}}{N}; y_c = K \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} \frac{y_{i,j}}{N} \quad (3)$$

式中: K 为将图像单位转换为实际值的比例因子; d_i 为气泡 i 行的宽度; Ω 为气泡中所有像素点的集合; $x_{i,j}$ 为气泡中像素的横坐标; $y_{i,j}$ 为气泡中像素的纵坐标; N 为气泡区域总的像素点数。

气泡速度定义为气泡中心在 x 、 y 方向上的位移变化与两帧图像之间时间间隔 Δt 的比值, 即

$$v_b = \frac{\sqrt{\Delta x_c^2 + \Delta y_c^2}}{\Delta t} \quad (4)$$

式中: $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$ 。

1.3 不确定度分析

测量参数的不确定度根据 Moffat 不确定度分析^[26]获得, 气泡体积不确定度与记录图像的分辨率以及气泡识别过程有关。同时, 计算气泡体积时, 假设气泡离散元素的所有水平截面都是圆形^[7]。本研究中, 计算得到气泡体积的不确定度小于 9%, 气泡半径不确定度为 3.5%, 气泡速度的不确定度约为 9.8%, 蒸汽入口压力的不确定度为 $\pm 1.2\%$, 蒸汽温度的不确定度为 $\pm 1.9\%$, 蒸汽质量流量 G_s 的不确定度为 $\pm 2.1\%$, 水温的不确定度为 $\pm 0.5\%$ 。

2 实验结果及讨论

2.1 蒸汽射流自旋凝结形态分析

本文对水温为 80°C 、质量流量为 $0.2 \sim 3.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 的蒸汽自旋凝结过程进行实验研究, 通过可视化的实验结果, 基于气泡表面呈现的特征, 以及气泡溃灭是否发生以及何时发生对气泡凝结形态进行定性分类^[7,11]。实验中识别了光滑气泡机制、过渡气泡机制和粗糙气泡机制 3 种凝结模式, 分别如图 3~图 5 所示, 图中将上一个气泡从喷嘴分离的时间定义为冷凝初始时刻。为了说明旋转气泡凝结过程中的典型变形行为, 在同一凝结模式下, 给出了不同流量下的实验结果。另外, 由于受流体流动等因素的影响, 很难保证同一实验工况下每个周期的气泡形态完全一致, 本文展示的气泡凝结过程为同一流量下重复性较高并能体现旋转运动作用的实验结果。

不同质量流量下的光滑生长气泡机制如图 3 所示, 在该机制下, 气泡缓慢生长, 形态基本保持稳定, 气液相界面较为清晰。图 3(a)中: 质量流量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 气泡表面非常光滑, 气泡形态沿轴向具有良好的对称性; 冷凝过程中, 由于气泡的下部锚定在喷嘴处, 气泡的上部向上移动, 气泡和喷嘴之间逐渐形成颈部并不断拉伸, 在 $t = 36 \text{ ms}$ 时, 颈部

发生夹断; 随着蒸汽的不断供应, 蒸汽气泡再次与喷嘴连通形成蒸汽柱; t 为 $39.5 \sim 45 \text{ ms}$ 时, 蒸汽柱持续生长并穿透气泡表面, 在 $t = 47 \text{ ms}$ 时, 达到最大体积; t 为 $49 \sim 49.6 \text{ ms}$ 时, 气泡与喷嘴发生分离并完成溃灭。图 3(b)中: 流量为 $1.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 气泡表面出现波纹; 随着气泡生长, t 为 $25 \sim 32.5 \text{ ms}$ 时, 气泡开始发生颈缩; t 为 $35 \sim 39 \text{ ms}$ 时, 周围液体在蒸汽射流卷吸夹带作用下涌入气泡内部并撞击气泡表面, 在气泡表面形成小凸起, 使气泡加速冷凝, 表面变得粗糙; t 为 $42.5 \sim 44.3 \text{ ms}$ 时, 可以观察到明显的螺旋状气泡结构, 气泡从喷嘴脱离后加速冷凝, 并有小气泡从气泡表面分裂出来。流量继续增加至 $1.76 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 图 3(c)中气泡表面扰动增加; 初始时刻, 上一个气泡从喷嘴分离时使下一个气泡顶部形成尖端; 随着气泡生长, 尖端在气泡表面形成凸起并发生不规则演化(t 为 $15 \sim 23 \text{ ms}$); t 为 $24.6 \sim 34 \text{ ms}$ 时, 顶部凸起先与主体气泡分离并冷凝消失, 而主体气泡在射流飞溅撞击作用下继续冷凝至结束。

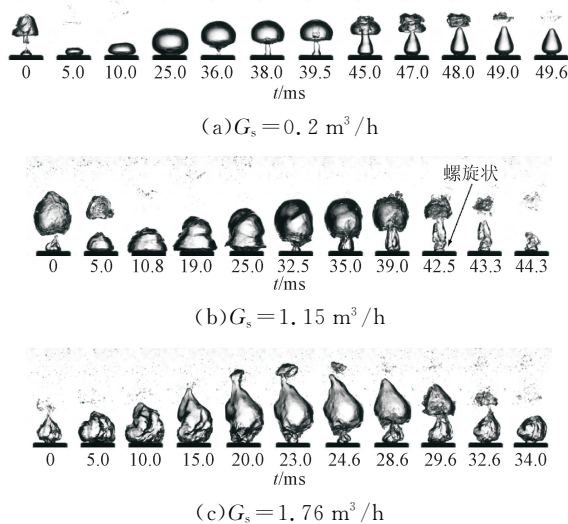


图3 不同质量流量下的光滑生长气泡机制

Fig. 3 Smooth grown bubble regime at different mass flow rates

过渡气泡机制是介于光滑生长气泡和粗糙气泡之间的状态, 不同质量流量下气泡过渡机制如图 4 所示。随着流量增大, 蒸汽射流速度增大。在这个机制下, 气泡表面扰动加剧, 冷凝过程伴随着气泡形状的快速变化, 但不如粗糙气泡溃灭那样剧烈, 冷凝初期可以观察到气泡顶端凸起螺旋向上生长的现象。图 4(a)中: t 为 9.6 ms 时, 凸起发生局部冷凝, t 为 $12.6 \sim 14.5 \text{ ms}$ 时, 气泡继续生长并再次形成

新的凸起;随后,凸起在气泡顶部发生脱落并冷凝消失, t 为 15.6~17.3 ms 时气泡界面变得粗糙; t 为 17.8~18.1 ms 时,气泡从喷嘴分离后溃灭形成微气泡云,并在 $t=18.3$ ms 时发生回弹。在图 4(b) 中: $t=3.9$ ms,气泡凸起冷凝消失,气泡继续生长但未形成新的凸起; $t=10.1$ ms 时气泡达到最大体积; $t=14$ ms 时,气泡颈部夹断,与喷嘴发生分离, $t=14.2$ ms 时溃灭至最小体积;在溃灭后期, $t=14.4$, 14.8 ms 时,气泡发生两次回弹。

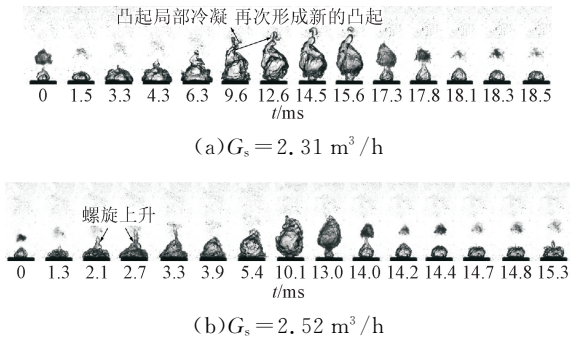
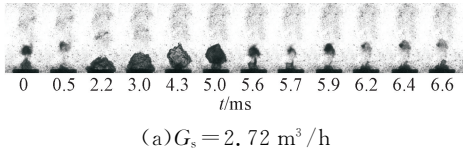


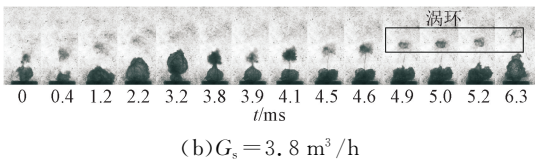
图 4 不同质量流量下气泡过渡机制

Fig. 4 Transition regime of the bubble at different mass flow rates

图 5 为粗糙生长气泡机制,在该机制下,蒸汽射流流动对周围液体产生剧烈扰动,使液体中充满小气泡。较强的冷凝作用使气泡冷凝时间缩短,气泡表面形成较强的毛细波,难以清晰捕捉,同时,气泡溃灭阶段回弹次数增多。文献[7]研究表明,随着蒸汽流量的增大,气泡与过冷水之间的剪切应力变大,气泡内部的湍流更加强烈,气泡周围没有足够的时间逐渐形成稳定的热场,因此气泡发生剧烈变形并形成强烈的表面波。图 5(a) 中 $t=0.5$ ms 和图 5(b) 中 $t=0.4$ ms 时,在周围环境压力作用下,蒸汽气泡会先发生塌缩现象,随着蒸汽的连续供应,气泡逐渐生长并发生颈缩。图 5(a) 中 $t=5.7$ ms 和图 5(b) 中 $t=3.9$ ms 时,气泡在从喷嘴分离后溃灭成气泡云,在溃灭阶段, $G_s=2.72$ m³/h 时发生 2 次回弹, $G_s=3.8$ m³/h 时发生 3 次回弹。与图 5(a) 相比,图 5(b) 中溃灭阶段形成的微气泡云的体积增大,这是由于,气泡的非球形溃灭引起微射流[27],图 5(b) 中可以观察到明显的涡环结构,溃灭结束后,涡环结构仍未消失, $t=5.2\sim6.3$ ms 时在液体中保持上升。



(a) $G_s=2.72$ m³/h



(b) $G_s=3.8$ m³/h

图 5 不同质量流量下粗糙生长气泡机制

Fig. 5 Rough grown bubble regime at different mass flow rates

不同蒸汽质量流量下气泡半径演化如图 6 所示。随着蒸汽质量流量的增加,气泡冷凝时间缩短,气泡半径先增大后减小,随后再次增大。质量流量为 0.2 m³/h 时,气泡半径增大到峰值后,曲线会出现一段波谷。这是因为:当 $t=36$ ms 时,气泡颈部夹断,气泡与喷嘴分离,体积减小;随着蒸汽射流的持续供应,气泡与喷嘴再次连接,气泡体积再次增长并在 $t=47$ ms 时达到最大体积;当质量流量大于 2.31 m³/h 时,冷凝后期气泡半径出现反弹。

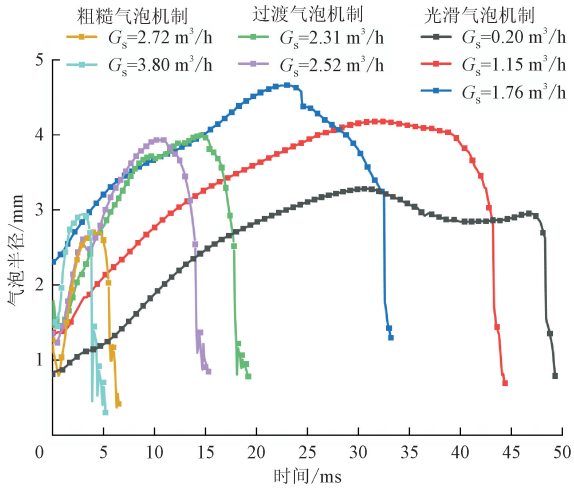


图 6 不同蒸汽质量流量下冷凝过程中气泡半径变化

Fig. 6 Bubble radius evolution during condensation under different steam mass flow rates

冷凝过程中气泡生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度的计算结果如表 2 所示,气泡生长速率定义为气泡生长阶段的半径变化和生长时间的比值,气泡溃灭速率为气泡溃灭阶段半径变化和溃灭时间的比值。可以看出,流量从 0.2 m³/h 增大到 3.8 m³/h 时,气泡生长速率增大,其中, $G_s<1.76$ m³/h 时,气泡生长速率较为接近。随着流量增大,气泡溃灭速率呈现增大趋势,但 $G_s=2.31$ m³/h 时的气泡溃灭速率略大于 $G_s=2.52$ m³/h 时的气泡溃灭频率。这是因为 $G_s=2.31$ m³/h 时,气泡凸起的发展使最大气泡半径增大,第一次溃灭时的气泡半径更小。随着质量流量

增加,气泡质心最大迁移速度呈非线性变化,当质量流量 $G_s=1.76\text{ m}^3/\text{h}$ 时,最大迁移速度最大,可达 73.23 m/s ,当 $G_s=2.72\text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡迁移速度最小,约为 24.31 m/s 。

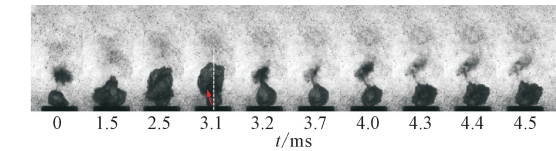
表 2 不同质量流量下气泡生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度

Table 2 Bubble growth rate, collapse rate and maximum migration speed of the bubble center at different mass flow rates

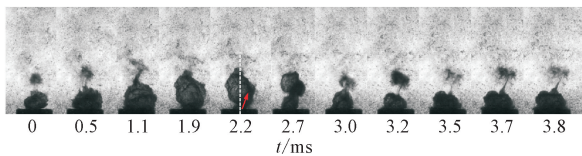
质量流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	生长速率/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	溃灭速率/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大迁移速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.20	0.080	-0.13	57.61
1.15	0.087	-0.29	64.27
1.76	0.100	-0.33	73.23
2.31	0.180	-0.89	44.50
2.52	0.260	-0.69	49.65
2.72	0.350	-1.19	24.30
3.80	0.430	-3.57	49.34

2.2 蒸汽射流在不同方向上的冷凝现象

实验中观察到,在 $G_s=3.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡冷凝过程中会偏离喷嘴中心轴线,在不同方向上发生冷凝,如图 7 所示。在图 7(a)中 $t=3.1\text{ ms}$ 时红色箭头表明,蒸汽射流偏离喷嘴中心轴线向左射出;在图 7(b)中 $t=2.2\text{ ms}$ 时,蒸汽射流偏离喷嘴中心轴线向右射出并完成冷凝。



(a)蒸汽射流向左凝结



(b)蒸汽射流向右凝结

图 7 气泡在不同方向上的冷凝现象

Fig. 7 The bubble condensation phenomenon in different directions

为了描述图 5(b)和图 7 中气泡冷凝的偏离方向,对冷凝过程中气泡质心坐标进行记录,如图 8 所示。通过对所有时刻的偏离角度求平均,得到气泡质心相对于喷嘴中心轴线的偏离角度分别为喷嘴左侧 1.58° ,喷嘴左侧 10.93° 和喷嘴右侧 7.13° 。图 8(a) 偏离角度为 1.58° 时,初始时刻,上一周期

的气泡脱离喷嘴时,位于喷嘴上的气泡发生塌缩,气泡质心先向下移动。随着气泡生长,气泡质心上移。由于气泡达到最大体积后开始收缩,气泡质心迁移路径出现拐点,开始向下移动。当气泡从喷嘴分离时,径向位移变化幅度明显增加。同时,脱离喷嘴后的气泡迁移路径开始发生偏转,产生近似之字形轨迹^[28]。

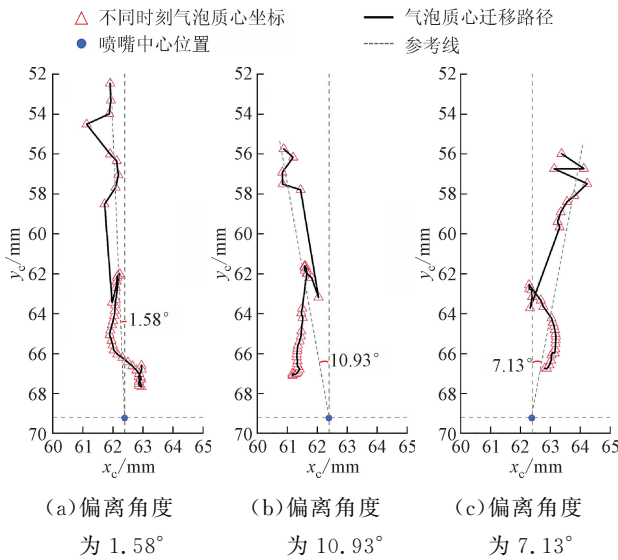


图 8 冷凝气泡质心迁移路径及其与喷嘴中心的偏离角度
Fig. 8 The migration path of the condensing bubble center and its deviation angle from the nozzle center

Fu 等^[29]对静止蒸汽射流凝结进行实验研究,发现涡团脱落过程中,强烈的夹带效应,会导致蒸汽射流尾部发生横向摆动,但这种现象对冷凝产生的影响尚未阐释。基于旋转蒸汽射流凝结的实验结果,本研究进一步分析了偏离角度对气泡半径、生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度的影响,偏离角度对气泡半径的影响如图 9 所示。

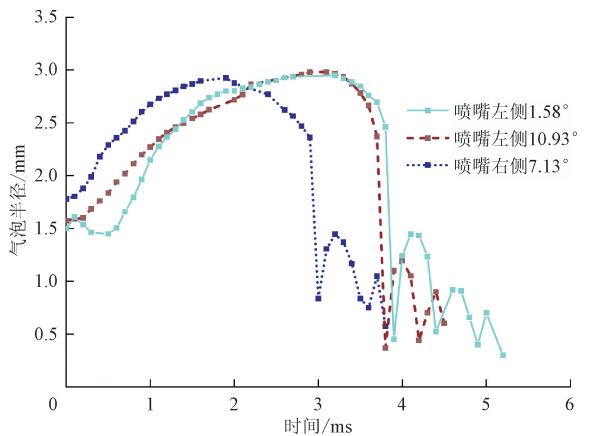


图 9 偏离角度对气泡半径的影响
Fig. 9 The influence of the deviation angle on the bubble radius

偏离角度变化对气泡半径影响不大,溃灭过程中第一次回弹时的气泡半径略有减小,偏离角度增大有利于减少溃灭过程中回弹次数,当偏离角度为 7.13° 时,气泡冷凝时间明显缩短。不同偏离角度下气泡生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度如表 3 所示。偏离角度对气泡生长速率、溃灭速率和最大迁移速度呈非线性影响。当偏离角度为 7.13° 时,气泡生长速率和最大迁移速度最大,溃灭速率最小。

表 3 不同偏离角度下气泡生长速率、溃灭速率和气泡质心最大迁移速度

Table 3 Bubble growth rate, collapse rate and maximum migration speed of the bubble center at different deviation angles

偏离角度/ $(^{\circ})$	生长速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	溃灭速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大迁移 速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
喷嘴左侧 1.58	0.40	-3.57	49.34
喷嘴左侧 10.93	0.45	-3.73	41.64
喷嘴右侧 7.13	0.62	-1.90	54.19

2.3 气泡溃灭频率分析

过冷水中汽泡溃灭过程会诱发压力波和水锤,通常会对相关设备造成严重的损坏^[30]。因此,根据高速摄像机记录的图像进一步对气泡溃灭频率进行研究,气泡溃灭频率定义为气泡连续两次溃灭的时间间隔的倒数,可表示为

$$f = \frac{1}{(1/(N_1 - 1)) \sum_{i=1}^{N-1} \Delta t_i} \tag{5}$$

式中: Δt_i 为气泡连续两次溃灭的时间间隔; N_1 为气泡溃灭的次数。

不同质量流量下气泡溃灭频率如表 4 所示。可以看出,随着蒸汽质量流量增大,气泡溃灭频率增大,气泡溃灭频率为 $20 \sim 302 \text{ Hz}$ 。当质量流量小于 $1.76 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡溃灭频率较为接近。

表 4 不同质量流量下气泡溃灭频率

Table 4 Bubble collapse frequency at different mass flow rates

质量流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	溃灭频率/Hz
0.20	21.96
1.15	27.23
1.76	30.24
2.31	42.59
2.52	62.44
2.72	194.09
3.80	302.80

3 结 论

本文对水温为 80°C 、质量流量为 $0.2 \sim 3.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 的蒸汽射流自旋凝结特性进行实验研究,并详细分析了质量流量对旋转气泡的冷凝模式,以及气泡半径、生长速率、溃灭速率、最大质心迁移速度和溃灭频率等参数的影响,可得如下结论。

(1)不同质量流量下,蒸汽射流自旋凝结可以识别为光滑生长气泡机制、过渡机制和粗糙生长气泡机制。在较大流量下,气泡溃灭过程中将发生回弹并伴有涡环结构生成。在离心力作用下,旋转气泡凝结过程中可能出现颈部螺旋发展和气泡顶部凸起不规则变形等典型行为。

(2)质量流量增加,旋转气泡冷凝时间缩短,气泡生长速率增大,气泡半径、溃灭速率和质心最大迁移速度呈非线性变化,气泡溃灭频率为 $20 \sim 302 \text{ Hz}$ 。

(3)同一流量下,气泡可能在不同方向上发生凝结,气泡从喷嘴分离后,呈现之字形运动轨迹。气泡质心偏离喷嘴中心轴线角度增大对气泡半径影响不大,有利于减少溃灭过程中回弹次数,对气泡生长速率、溃灭速率和最大迁移速度产生非线性影响。

参考文献:

[1] ZHAO Quanbin, HIBIKI T. Review: condensation regime maps of steam submerged jet condensation [J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, 107: 31-47.

[2] LI Yong, LI Hui, ZHANG Yonghao, et al. Experimental study on condensation and acoustic characteristics of steam underwater injection [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1027624.

[3] 孙强, 谢福寿, 张森, 等. 泵间管内多股液氧/气氧直接接触冷凝数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 169-178.

[3] SUN Qiang, XIE Fushou, ZHANG Miao, et al. Numerical investigation on direct contact condensation of multiple liquid oxygen/gas oxygen flow in inter-pump tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 169-178.

[4] 徐强, 郭烈锦. 气液两相射流凝结传热与压力波动特性研究进展 [J]. 中国科学(技术科学), 2020, 50(10): 1274-1287.

[4] XU Qiang, GUO Liejin. Review on condensation heat transfer and pressure fluctuation characteristics of gas-liquid two-phase jet flow [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2020, 50(10): 1274-1287.

[5] TANG Jiguo, SUN Licheng, LIU Hongli, et al. Re-

- view on direct contact condensation of vapor bubbles in a subcooled liquid [J]. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2022, 4(2): 91-112.
- [6] WANG Jue, CHEN Lisheng, CAI Qi, et al. Direct contact condensation of steam jet in subcooled water: a review [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2021, 377: 111142.
- [7] TANG Jiguo, YAN Changqi, SUN Licheng. A study visualizing the collapse of vapor bubbles in a subcooled pool [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 88: 597-608.
- [8] 宗潇, 刘继平, 杨赅石, 等. 矩形通道内蒸汽射流凝结换热面积的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(7): 46-51.
- ZONG Xiao, LIU Jiping, YANG Chengshi, et al. Experimental study on the interfacial heat transfer area of steam jet condensation in a rectangular mix chamber [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(7): 46-51.
- [9] XU Qiang, ZHU Yongshuai, ZHOU Haozu, et al. Flow characteristic of steam jet condensed into a water pipe flow-a numerical study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 205: 118034.
- [10] YANG S R, SEO J, HASSAN Y A. Thermal hydraulic characteristics of unstable bubbling of direct contact condensation of steam in subcooled water [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138: 580-596.
- [11] QIU Binbin, YANG Qingchuan, MENG Fanrui, et al. Experimental investigation on the interface shape of bubble condensation for vertical upward steam jet at low mass flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119909.
- [12] SONG Shilin, ZHAO Quanbin, CHONG Daotong, et al. Numerical investigation on the heat transfer characteristics of unstable steam jet under different operating conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 180: 121761.
- [13] CHONG Daotong, YUE Xiaoyu, WANG Lutao, et al. Experimental investigation on the condensation patterns and pressure oscillation characteristics of steam submerged jet through a horizontal pipe at low steam mass flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 648-659.
- [14] PATEL S, KUMAR P. Effect of diameter and inclination of steam injection pipe on chugging dynamics in direct contact condensation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121671.
- [15] 闫良, 李振中, 刘汉周, 等. 蒸汽直接喷射冷凝过程中两相流特性的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(10): 157-163.
- YAN Liang, LI Zhenzhong, LIU Hanzhou, et al. Numerical investigation for two-phase flow characteristics in direct steam injection condensation process [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(10): 157-163.
- [16] LIU Xiuliang, CHANG Yuxuan, ZHANG Xinlei, et al. Experimental study of pool boiling heat transfer under rolling condition [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2022, 139: 110741.
- [17] YANG Peixun, WANG Hui, LIU Jiabao, et al. Experimental study of steam condensation heat transfer characteristics in a horizontal tube under rolling motion [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 193: 108516.
- [18] CHEN Weixiong, MO Yuelin, WEI Pengbo, et al. Numerical study on dominant oscillation frequency of unstable steam jet under rolling condition [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 171: 109006.
- [19] CHEN Weixiong, LI Jingyu, MO Yuelin, et al. Numerical simulation on heat transfer characteristics of unstable steam jet condensation under rolling condition [J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 269: 118461.
- [20] WANG Zhiwei, HE Yanping, DUAN Zhongdi, et al. Direct contact condensation characteristics of steam injection into cold-water pipe under rolling condition [C]//*Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 753-763.
- [21] FEELEY T J, SKONE T J, STIEGEL G J, et al. Water: a critical resource in the thermoelectric power industry [J]. *Energy*, 2008, 33(1): 1-11.
- [22] KHAN A, TAKRIFF M S, ROSLI M I, et al. Turbulence dissipation & its induced entrainment in subsonic swirling steam injected in cocurrent flowing water [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 118716.
- [23] HASSAN A, SANAULLAH K, TARANENKO P A, et al. Experimental and computational study of convective heat fluxes in swirling two-phase flows [J]. *Heat Transfer*, 2024, 53(1): 259-276.
- [24] WANG Shiwei, WANG Chao, DING Hongbing, et al. Evaluation of dynamic behaviors in varied swirling flows for high-pressure offshore natural gas supersonic dehydration [J]. *Energy*, 2024, 300: 131498.
- [25] 储小娜, 徐强, 郭烈锦, 等. 蒸汽旋转射流汽-液界面

速度特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(6): 1434-1439.

CHU Xiaona, XU Qiang, GUO Liejin, et al. Investigation on velocity characteristics of steam-liquid interface in steam rotating jet [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(6): 1434-1439.

[26] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-17.

[27] LI Weichao, WANG Jianjun, ZHOU Yanmin, et al. Investigation on steam contact condensation injected vertically at low mass flux; part I pure steam experiment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 131: 301-312.

[28] 穆志强,张亚杰,魏衍举,等. 气泡在水中的之字形与螺旋上升轨迹机理研究研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(3): 213-220.

MU Zhiqiang, ZHANG Yajie, WEI Yanju, et al. Study on the mechanism of the zigzag and spiral motion of rising bubbles in water [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(3):213-220.

[29] FU Pengfei, ZHAO Quanbin, LIU Jiping, et al. Experimental and theoretical study on the association between entrainment vortex evolution and pressure oscillation of steam jet condensation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 141: 110797.

[30] TANG Jiguo, YAN Changqi, SUN Licheng. Feature of acoustic sound signals involved in vapor bubble condensation and its application in identification of condensation regimes [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 137: 384-397.

(编辑 赵炜)