

DOI: 10.7652/xjtuxb201809018

高速蒸汽与过冷水直接接触凝结 局部换热特性研究

宗潇^{1,2}, 刘浩³, 杨赅石², 严俊杰¹, 刘继平¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国船舶重工集团公司第705研究所, 710075, 西安; 3. 河南博腾环保技术有限公司, 450046, 郑州)

摘要: 针对气液两相流喷射器内高速蒸汽与过冷水直接接触凝结过程,设计并搭建了使用矩形截面喷嘴及混合腔的可视化实验台,在蒸汽质量流率为 $200\sim 600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入口过冷水质量流率为 $4\sim 18\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入口过冷水温度为 $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验条件下,使用图像处理技术分析可视化图像,研究了气液界面的波动特性,建立了局部凝结换热系数的计算方法,并对界面波动与局部凝结换热系数的关系进行了研究。研究表明:实验中观察到的界面波是界面不稳定性的一种表现形式;界面波在传播过程中振幅逐渐增加,强度增大,平均振幅在 $0.12\sim 0.38\text{ mm}$ 之间;局部凝结换热系数沿流动方向逐渐增大,其值在 $1.8\sim 5.9\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 之间;界面波振幅与局部凝结换热系数对比的结果表明,界面的波动对汽水直接接触凝结的换热过程具有强化作用。

关键词: 气液两相流喷射器;蒸汽射流;直接接触凝结;局部凝结换热特性

中图分类号: TK2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0134-06

Experimental Study on the Local Heat Transfer Characteristics in the Direct Contact Condensation of Steam Jet with Subcooled Water

ZONG Xiao^{1,2}, LIU Hao³, YANG Chengshi², YAN Junjie¹, LIU Jiping¹

(1. Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China;
3. Boteng Environmental Technology of Henan Corporation Limited, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aiming at the direct contact condensation process of steam jet with subcooled water, a visualized experimental rig composed of rectangular steam nozzle and mixing chamber was designed and built. The flow field was observed when the steam mass flux, water mass flux and water temperature were in the range of $200\sim 600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $4\sim 18\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The steam-water interfacial fluctuation was investigated by image processing techniques, and a model for calculating local heat transfer coefficients was established. Besides, the relationship between interfacial fluctuation and local heat transfer characteristic was also studied. The results indicate that the interfacial wave observed in the research implies an interfacial instability, the interfacial wave amplitude and local heat transfer coefficient increase along the interface, and a relatively great local heat transfer coefficient can be achieved at steam jet tail. Furthermore, the interfacial fluctuation can enhance the heat and mass transfer in the condensation process of steam jet in water flow.

Keywords: two-phase flow steam injector; steam jet; direct contact condensation; local condensation heat transfer characteristics

汽液两相流喷射器具有换热强度大、体积小、可靠性高等优点,在能源动力、石油化工等领域有广阔的应用前景。由于气液两相流喷射器内高速蒸汽与过冷水的直接接触凝结过程十分复杂,从20世纪70年代开始,国内外学者从气液界面出发,对汽水直接接触凝结现象进行了研究。美国学者 Simpson 等对亚声速蒸汽浸没射流进行了可视化研究,观察到了界面的周期性运动^[1]。意大利学者 Celata 等对静止饱和及过热蒸汽在低速水平流动状态下过冷水表面的直接接触凝结现象进行了实验研究,发现凝结换热过程的热阻主要集中在气液界面的过冷水侧^[2]。美国学者 Chawla 等对声速和亚声速射流气液界面稳定性进行了理论研究,从小扰动模型出发,建立气相和液相非线性运动方程,分析了低黏性以及高黏性液体下气液界面的稳定性^[3]。巴基斯坦学者 Khan 等对超声速蒸汽浸没射流凝结气液界面不稳定性的传播以及耗散进行了研究,结果表明气液界面不稳定性的传播与耗散受过冷水温度的影响更加显著^[4]。

在汽水直接接触凝结换热特性方面,韩国学者 Kim 等提出了3种界面传输模型——湍流强度模型、表面恢复模型和剪切力模型,以预测平均凝结换热系数^[5]。日本学者 Aya 和 Nariai 研究了不同流型下的换热系数,发现在蒸汽间歇流区,凝结换热系数达到 $2 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;在凝结振荡区,换热系数为 $0.1 \sim 1 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;在层状流动的表面,凝结换热系数为 $3 \sim 30 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[6]。国内学者徐强等研究了蒸汽与低速过冷水竖直同向流动的蒸汽浸没射流现象,实验中得到的平均凝结换热系数在 $0.34 \sim 11.36 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 之间^[7]。武心壮等使用热平衡方法得到的超声速蒸汽浸没射流平均凝结换热系数在 $0.7 \sim 2.5 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 之间,并使用归一化穿透长度实验关联式、分子动力学模型、湍流强度模型以及表面恢复模型预测了平均凝结换热系数^[8]。

尽管前人对蒸汽射流凝结过程进行了大量研究,但是由于直接接触凝结过程的复杂性,其气液界面的波动特性,尤其是与界面波动相关的局部凝结换热特性的研究尚未开展。本文将从气液界面出发,分析界面波动机理,研究高速蒸汽与过冷水直接接触凝结过程的局部换热特性,为气液两相流喷射

器的优化和设计提供实验依据和理论基础。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

图1所示为实验系统示意图,实验系统主要由锅炉、给水泵、调节阀、流量计、实验段、可视化系统及数据采集系统组成。锅炉产生的饱和蒸汽通过蒸汽流量计、调节阀以及矩形截面的缩放形蒸汽喷嘴进入实验段,与由给水泵升压并流过调节阀和流量计的过冷水在混合腔中相遇,发生汽水直接接触凝结过程。

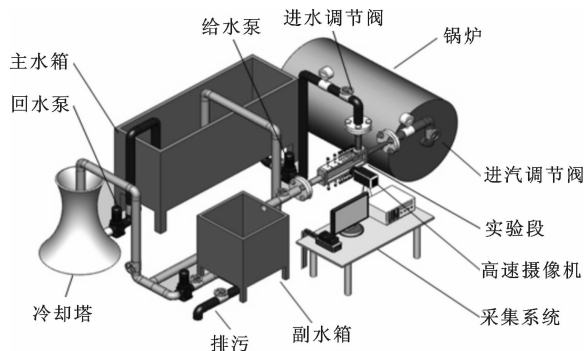


图1 实验系统图^[9]

图2所示为可视化实验段结构和测点布置示意图,实验段采用矩形截面的蒸汽与水喷嘴,前后壁面安装耐高温玻璃,与混合腔上下壁面组成矩形混合腔,通过耐高温玻璃构成的可视化窗口可以观察和拍摄混合腔内流动与换热过程,通过在壁面附近安装的22组测点可同时进行温度和压力测量。实验段主要尺寸和实验条件如表1所示。

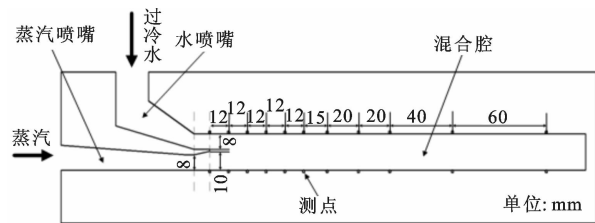


图2 可视化实验段示意图

实验时高速摄像机曝光时间设置为 $20 \mu\text{s}$,采样频率为 10 kHz ;温度测量使用 K 型热电偶,适用量程为 $0 \sim 150 ^\circ\text{C}$,温度不确定度为 $1 ^\circ\text{C}$,测量前统一用标定水槽标定,为减小温度测量对流场的干扰,热电偶末端与上下壁面齐平布置;入口过冷水流量使用电磁流量计测量,量程为 $0 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,测量精度

为 0.2 级;蒸汽质量流量使用涡街流量计测量,量程为 $0\sim 0.27\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,测量精度为 1 级。

表 1 实验条件

参数	数值
入口过冷水流率 $G_w/\text{t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	4~18
入口蒸汽流率 $G_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	200~600
入口过冷水温度/ $^{\circ}\text{C}$	20~50
蒸汽喷嘴喉部尺寸/ $\text{mm}\times\text{mm}$	8×8
蒸汽喷嘴出口尺寸/ $\text{mm}\times\text{mm}$	10×10
水喷嘴出口尺寸/ $\text{mm}\times\text{mm}$	8×10
混合腔尺寸/ $\text{mm}\times\text{mm}$	19×10
混合腔长度/ mm	250

1.2 图像处理方法

高速蒸汽与过冷水直接接触凝结流场主要由汽羽、气液界面、过冷水区以及气液混合层组成^[9]。可视化图像的质量及其后处理过程对气液界面特征的识别至关重要。为提取气液界面轮廓,研究界面波动特性,本文使用 Matlab 软件编译图像处理程序对可视化图像进行处理,图 3 所示为图像处理过程。

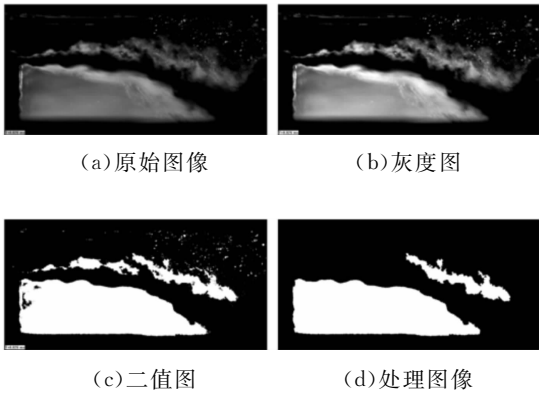


图 3 图像处理结果

Matlab 软件内置函数将原始图像转化为矩阵,图像每一个像素点都对应矩阵的一个元素,因此对矩阵的分析和计算过程实现了对原始图像的处理,图像处理步骤如下:

- (1)原始图像的读取;
- (2)将原始图像转化为灰度图,增加对比度,使原始图像轮廓更加清晰;
- (3)使用 Otsu 阈值分割方法将灰度图变换后得到黑白的二值图,由于可视化拍照时仅打背光,在蒸汽气泡浓度较高的气液混合层内光线不能透过,因此气液混合层在阈值分割后主要呈黑色(纯蒸汽区正上方部分),而在气液混合层逐渐向纯过冷水区过渡的过程中,蒸汽气泡浓度逐渐减小,有部分背光

可以从此区域透过,因此呈较亮颜色,在國值分割后呈白色,如图 3c 所示;

(4)形态学计算与区域填充,使用先腐蚀后膨胀的开运算形态学算子,一般来说,使用开运算能够使图像轮廓变得光滑,消除边界细小毛刺,开运算后对图像进行区域填充,消除局部小孔,使联通的区域更加完整,得到连续的边界,处理结果如图 3d 所示;

(5)使用边缘检测函数,从黑白二值图中获取轮廓,结果如图 4 所示。

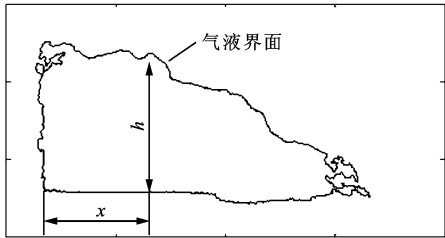


图 4 轮廓获取结果

2 气液界面波动特性

2.1 界面波动的形成

高速蒸汽射流与过冷水直接接触凝结过程的气液界面是蒸汽与过冷水进行质量、动量和能量交换的关键区域。深入了解界面特性,对研究汽水直接接触凝结过程的换热机理具有重要意义。

图 5 给出了蒸汽质量流率为 $450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、过冷水质量流率为 $8\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、水温为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,气液界面形态的变化过程,可以看出,气液界面不断起伏波动,并且界面波动具有一定的规律性。初始时刻($\tau=0\text{ ms}$),在距喷嘴出口较近处产生了一个波峰,随着时间的推移($\tau=0.1\sim 0.4\text{ ms}$),波峰在气液界面上向汽羽尾部传播,同时波峰形状发生改变。当波峰传播到汽羽尾部($\tau=0.6\sim 1.2\text{ ms}$)时,波形已经产生较大变化。可以看出,界面波峰向下游的传播使汽羽穿透长度增加,蒸汽区扩大。随着汽羽穿透长度的进一步增加,汽羽尾部开始出现颈缩($\tau=1.0\text{ ms}$),蒸汽区变得不连续,汽羽尾部发生汽泡脱离($\tau=1.2\text{ ms}$)。

当两种不同速度流体同向流动时,在黏性作用下,由速度剪切而引起的界面不稳定特征称为开尔文-赫姆霍兹(K-H)不稳定性。K-H 不稳定性广泛存在于自然界中,如风吹过水平面产生的水波和天空中形成的波浪云等现象,其形成机理如图 6 所示。在黏性作用下,当高速和低速流体相遇时,高速流体流动受阻,流速减小,动能转化为势能。因此,在高

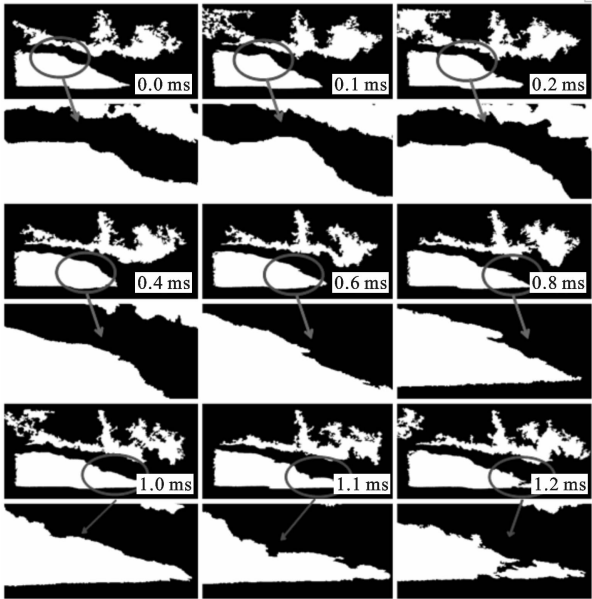


图 5 气液界面形态的变化过程

速流体侧局部会形成高压区,使高速流体流向低速流体一侧,原本光滑的界面产生形变,向低速流体一侧突出,产生波峰,在惯性力作用下,形变加剧,界面形状进一步改变。另一方面,表面张力有使气液界面尽量收缩、界面面积减小的趋势,使界面趋于稳定,在黏性力和表面张力共同作用下,界面形状不断变化。由 K-H 不稳定性形成机理可知,本文观察到的气液界面波动也是 K-H 不稳定性的一种表现形式。

当气液界面产生波动时,部分蒸汽在波峰处雾化成气泡进入过冷水,因此气液界面波动的存在将会促进汽水之间的质量交换。此外,界面的波动还会增加气液混合层内扰动,减小换热阻力,因此界面的波动也会促进气液两相间的传热过程。

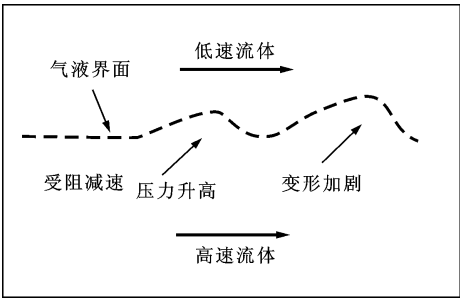


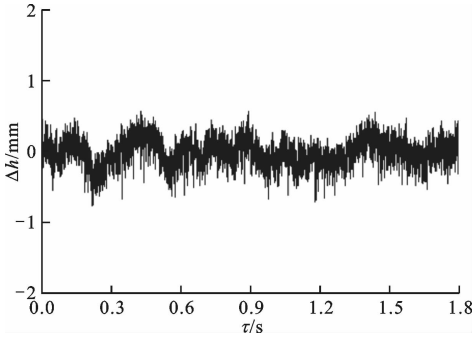
图 6 K-H 不稳定性形成机理

2.2 界面的波动形式

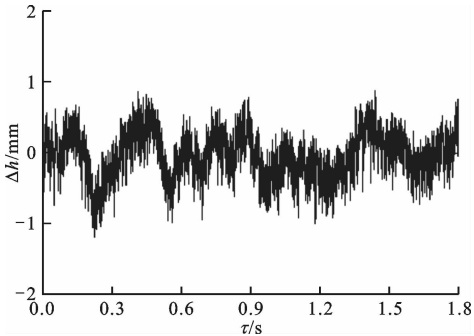
本文采用高速摄影法和图像处理技术获得气液界面,在测量得到固定位置处的动态界面高度 h 后,就获得了如嵌入式电导探针等直接测量结果类似的动态界面高度信号,从而为分析界面的波动特性提

供了实验依据。

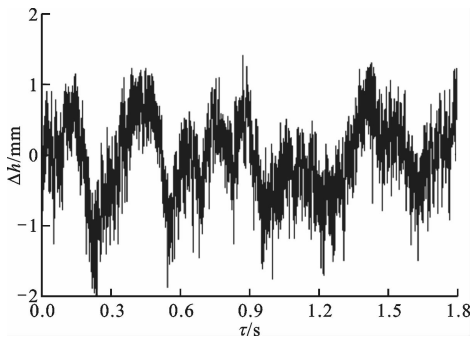
图 7 给出了蒸汽质量流率为 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,过冷水质量流率为 $8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,入口过冷水温度为 45°C ,归一化位置 $X(X=x/d_c)$ 分别为 0.4、



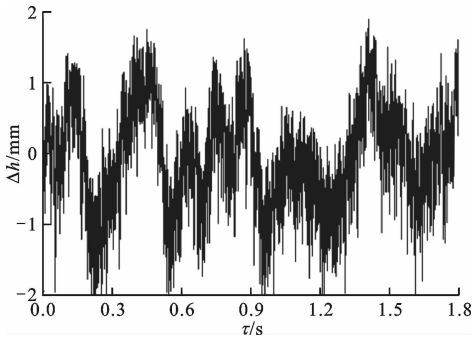
(a) $X=0.4$



(b) $X=0.8$



(c) $X=1.2$



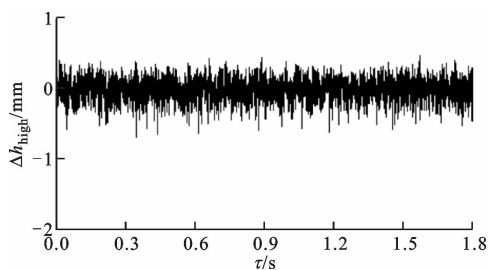
(d) $X=1.6$

图 7 不同归一化位置的界面波动

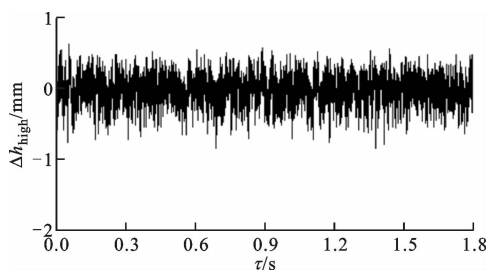
0.8、1.2 和 1.6 时的界面波动原始信号, d_e 为蒸汽喷嘴出口当量直径。可以看出, 不同归一化位置处的界面波动形状相似, 但振幅明显不同; 随着归一化位置的增大, 界面整体振幅逐渐增大; 界面的波动至少是由两种波动形式叠加而成, 两种波动的频率有明显区别, 低频波动在较大时间尺度内产生波峰, 高频波动在局部时间内也有明显峰值。

通过观察原始可视化图像可以看出, 气液界面的波动同样存在两种形式: 低频率的界面整体波动和高频率的界面局部波动, 即上文提到的由 K-H 不稳定性引起的界面波。由此可知, 图 7 中的界面波动低频分量由气液界面的整体波动引起, 而高频分量由界面波引起。为研究由 K-H 不稳定性引起的界面波动, 本文使用移动平均的方法将原始波动中的高频分量分离出来, 如图 8 所示。界面波平均振幅是反映界面波动强度的主要参数, 本文中高频界面波动的平均振幅由下式计算其中 σ 为界面高频波动的标准方差

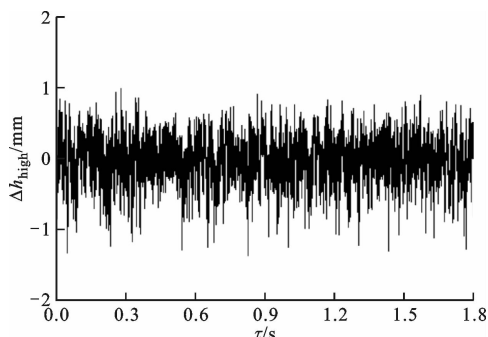
$$\Delta h_{\text{rms}} = 2\sqrt{2}\sigma \quad (1)$$



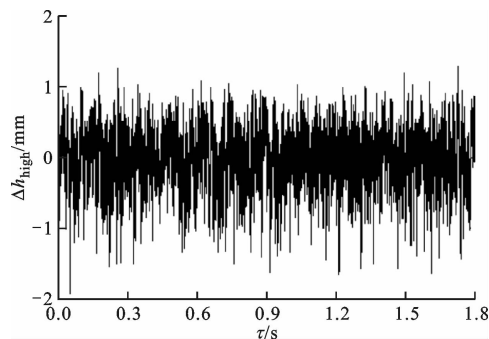
(a) $X = 0.4$



(b) $X = 0.8$



(c) $X = 1.2$



(d) $X = 1.6$

图 8 高频界面波动

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta h(i) - \bar{h})^2}{N-1}} \quad (2)$$

图 9 给出了界面波平均振幅随归一化位置的变化规律。从图中可以看出, 界面波平均振幅在 0.12 ~ 0.38 mm 之间, 界面波平均振幅随着归一化位置的增大而增大, 表明界面波在沿气液界面的传播过程中振幅逐渐增大, 强度也逐渐增大。

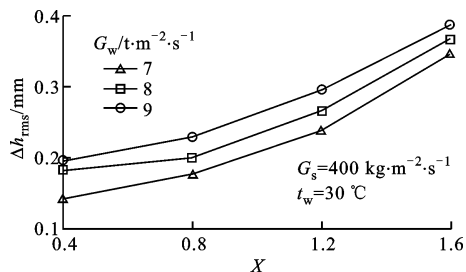


图 9 界面波平均振幅随归一化位置的变化

3 局部凝结换热特性

3.1 局部凝结换热系数的计算

图 10 所示为局部凝结换热系数计算示意图。假设蒸汽的凝结全部发生在气液界面上, 当蒸汽沿水平方向流动到界面上时, 沿法向的部分穿过界面进入气液混合层内逐渐凝结, 切向的部分沿界面流向下流, 因此某一界面位置处的热流密度为

$$q = \rho_s u_s h_{fg} \sin\theta \quad (3)$$

局部凝结换热系数可由下式计算

$$h_{\text{local}} = \frac{\rho_s u_s h_{fg} \sin\theta}{\Delta t_{\text{sub}}} \quad (4)$$

式中 Δt_{sub} 为换热温差。

在实际计算中, 很难得到气液界面每一点的热流密度。假设蒸汽区内部流速均匀, 且均为喷嘴出口速度, 因此可以通过获取局部区域内的平均热流密度, 从而得到局部凝结换热系数。局部平均热流

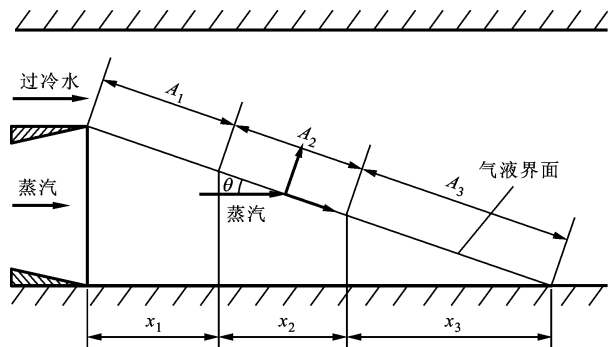


图 10 局部凝结换热系数计算示意图

密度为

$$q_{ave} = \bar{\rho}_s u_{se} h_{lg} \sin \bar{\theta} \quad (5)$$

式中: $\bar{\rho}_s$ 为平均密度; u_{se} 为蒸汽喷嘴出口速度; $\bar{\theta}$ 为局部区域中点处蒸汽流与气液界面的夹角。根据局部平均热流密度,可以计算得到局部平均凝结换热系数

$$h_{ave} = \frac{q_{ave}}{\Delta t_{sub}} \quad (6)$$

图 11 给出了局部平均凝结换热系数随归一化位置的变化规律。从图中可以看出,局部凝结换热系数随归一化位置的增大而增大,表明越靠近汽羽尾部局部凝结换热系数越大,凝结换热强度沿流动方向逐渐增大。

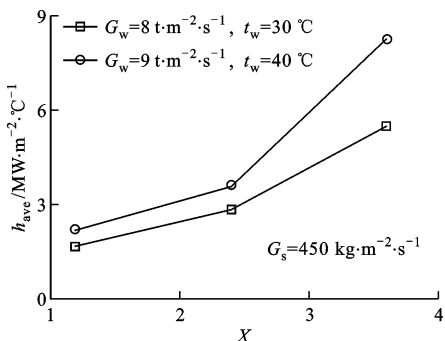


图 11 局部凝结换热系数随归一化位置的变化

3.2 局部凝结换热特性和界面波动特性的关系

图 12 给出了局部凝结换热系数随界面波平均振幅的变化。从图中可以看出,实验中获得的局部凝结换热系数在 $1.8 \sim 5.9 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 之间,随着界面波平均振幅的增大,局部凝结换热系数逐渐增大。事实上,由界面波动的形成机理可知,气液界面的波动会促进气液间的质量和热量交换,同时也会增加界面附近的扰动,因此在界面波动剧烈的区域内局部凝结换热系数也会相应较大。界面平均振幅沿流动方向逐渐增大,因此下游局部换热系数明显大于上游。从以上实验结果和分析可以看出,

气液界面的波动对汽水直接接触凝结换热过程具有强化作用。

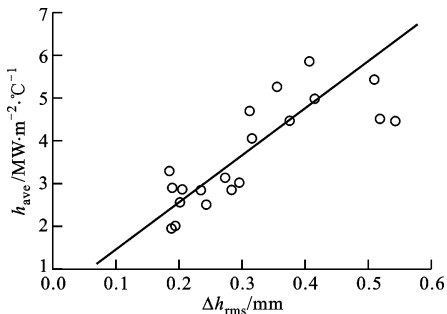


图 12 局部凝结换热系数随界面平均振幅的变化

4 结 论

本文对高速蒸汽与过冷水直接接触凝结过程的局部凝结换热特性进行了研究,主要结论如下:

(1)在蒸汽与过冷水直接接触凝结实验中观察到了界面波,其形成机理表明本文实验中的界面波是 K-H 不稳定性的一种表现形式。

(2)界面波在传播过程中振幅逐渐增大,界面波动强度也逐渐增大,实验中获得的界面波平均振幅在 $0.12 \sim 0.38 \text{ mm}$ 之间;局部凝结换热系数沿流动方向逐渐增大,实验中获得的局部凝结换热系数在 $1.8 \sim 5.9 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 之间。

(3)界面波动会促进气液间的质量和热量交换;界面波动平均振幅与局部凝结换热系数对比结果表明,界面波动对高速蒸汽与过冷水直接接触凝结换热过程具有强化作用。

参考文献:

- [1] SIMPSON M E, CHAN C K. Hydrodynamics of a subsonic vapor jet in subcooled liquid [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1982, 104(2): 271-278.
- [2] CELATA G P, CUMO M, FARELLO G E, et al. Direct contact condensation of steam on slowly moving water [J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 96 (1): 21-31.
- [3] CHAWLA T C. The Kelvin-Helmholtz instability of the gas-liquid interface of a sonic gas jet submerged in a liquid [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 67 (3): 513-537.
- [4] KHAN A, HAQ N U, CHUGHTAI I R, et al. Experimental investigations of the interface between steam and water two phase flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73: 521-532.

(下转第 147 页)