

棒束通道环状流中并流-逆流不稳定性特性研究

金光远^{1,2}, 王睿^{1,2}, 白镜湖^{1,2}, 李伟链^{1,2}

(1. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012;

2. 东北电力大学 热流科学与核工程实验室, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 开展堆芯流动单元内两相逆流行为的实验研究, 能为不同形态反应堆系统的顺利运行和应急处理提供足够的理论支撑。本研究对 3×3 棒束通道环状流中并流-逆流不稳定性携带行为、流动参数特性和形成机理进行了分析。结果表明, 一个携带周期由携带上行起始区域、完全上升环流区域和整体下行区域组成。实验工况根据 Wallis 判别式判断处于携带状态, 根据 Zapke 和 Alekseev 判别式的预测结果则处于携带和不能携带的转换线上。当压差达到局部最大值时, 高速摄影捕捉到上行起始点; 当压差达到局部最小值时, 高速摄影拍摄到下行起始点。当液相流速低于 0.1 m/s 时, 整体周期长度并无明显变化; 当液相折算速度在 0.1~0.3 m/s 范围内, 整体周期随气相折算速度的增加而减小, 上行与下行的时间比值变化较小, 液相折算速度高于 0.3 m/s 时该比值则随气相折算速度的增大而增加。当液相流速低于 0.2 m/s 时, 携带起始混流上升速度高于气相折算速度; 当液相流速逐渐增加, 携带起始混流上升速度高于气相折算速度的量逐渐减小; 当液相折算速度高于 0.2 m/s, 在高气相折算速度条件下携带起始混流上升速度低于气相折算速度。发生并流-逆流不稳定性原因是在不同区域内气芯变化的携带力和液相重力的周期性起主导作用。

关键词: 棒束通道; 环状流; 流动不稳定性; 逆流

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)11-2318-09

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0014

Characteristics of Parallel and Countercurrent Flooding Instability of Annular Flow in Rod Bundle Channel

JIN Guangyuan^{1,2}, WANG Rui^{1,2}, BAI Jinghu^{1,2}, LI Weilian^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Laboratory of Thermo-Fluid Science and Nuclear Engineering,

Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Carrying out the experimental researches on the two-phase countercurrent behaviors in the flow unit of reactor core can provide sufficient theoretical supports for the smooth operation and emergency treatment of different forms of the reactor systems. In this research, the flooding phenomenon, the characteristics of flow parameters and formation mechanisms of parallel and countercurrent flooding instability of annular flow in rod bundle channel were analyzed, and the result indicates that one flooding cycle could be divided into the onset flooding region, the full flooding region and the whole liquid phase downstream region. The experimental conditions where the flow instability

appeared in the rod bundle structure are in the flooding state according to the criterion from Wallis, but on the conversion line of flooding and not flooding state according to the criterion from Zapke and Alekseev. The experimental pressure drop changing with time was compared to the instability behaviors of annular flow, and the result shows that when the pressure drop reaches a local maximum, the high-speed photography captures the starting point of onset flooding region, and when the pressure difference reaches a local minimum, the starting point of whole liquid phase downstream region is seen in the field of view. According to the high-speed photographic image data processing, the parallel flow time, the countercurrent flow time and the overall cycle time were acquired and analyzed. When the liquid phase flow rate is lower than 0.1 m/s, the overall cycle time does not change significantly, and the parallel flow time is lower than the countercurrent flow time. When the liquid superficial velocity is within the range of 0.1-0.3 m/s, the overall cycle time decreases with the increasing gas superficial velocity, and the time ratio of the parallel and countercurrent flow time changes little. When the liquid superficial velocity is higher than 0.3 m/s, the time ratio increases with the increasing gas superficial velocity. The study on the micelle velocity for onset-flooding shows that when the liquid superficial velocity is lower than 0.2 m/s, the micelle velocity for onset-flooding is higher than the gas velocity. The value with which the micelle velocity for onset-flooding is higher than gas superficial velocity decreases gradually with the increasing liquid velocity. At some conditions with high gas velocity, the micelle velocity for onset-flooding is lower than the gas superficial velocity when the liquid superficial velocity is higher than 0.2 m/s. The formation mechanisms of parallel and countercurrent flooding instability depend upon the changing force of gas core and the effect of liquid gravity in different flooding regions.

Key words: rod bundle channel; annular flow; flow instability; countercurrent flow

竖直上升管内两相逆流机理分析对核电厂的稳态运行和事故处置起极其重要的作用。发生小破口事故时,冷却剂在蒸发器U型管道中聚集,自然循环受到破坏使部分流体回流至堆芯,防止传热恶化带来的堆芯损伤;当大破口事故发生时,安注系统投入使用,压力容器堆芯产生的蒸汽与下降冷却水也形成逆流,类似的逆流也可能出现在热管段和压力容器下降通道处^[1]。在液相下落过程中,若气相上行速度较高,在气液交聚位置将产生较大阻碍,发生液泛^[2]。因此,有必要对堆内两相逆流发生条件、两相作用机理和液滴夹带机理等进行研究,为反应堆主回路的顺利运行和应急处理提供热工水力特性实验研究和理论支撑。

近年来,对气液逆流开展的研究涉及管内气液逆流形态捕捉、液泛或携带特征点判定、液滴夹带机理、精准模型预测等方面^[3]。学者针对上升通道内液泛或携带特征点判定和影响因素进行了研究,比较常用的判别关系式来自于Wallis^[4]、Kutateladze等^[5]、Zapke等^[6]和Alekseev等^[7]。阎昌琪

等^[8-9]定义了不同直径圆管中淹没开始点、全部携带点、淹没消失点和流向反转点,同时指出,管径越小全部携带点对应的无量纲气相折算速度越高,流向反转的差异性受注水条件影响越明显。Vijayan等^[10]的研究表明,小直径通道在淹没过程出现大波状结构、液滴生成、环形波和上行波等特征,测试段长度也会影响淹没过程的参数变化。金光远等^[11]对窄通道中周期性携带行为和形成原因进行了分析,结果表明周期性携带过程包括携带起始区、完全携带区、液膜反转区和液相下行区4个区域,多尺度排列熵分析方法可以对携带状态进行判别。鉴于国内外学者关于堆芯流动单元内两相并流和逆流过程的流态判定、影响因素、基本原理尚不清楚,本文重点研究3×3棒束通道中环状流中的并流-逆流行为,分析其上行和下行过程中两相行为特点,并对其周期性携带行为的形成原因进行分析。

1 实验装置与实验内容

常温常压状态下,选用空气和去离子水作为

工质开展实验,实验系统包括开式供气系统、闭式水循环系统、高速摄影系统、实验数据处理与记录系统,如图1所示。开式供气系统中,空气经活塞气泵加压进行压缩储存于储气罐,在入口处设置止逆阀。实验时通过调节储气罐出口阀门保

证实验回路所需空气流量,气相流经实验段后在上部的气水分离装置中直接排入大气。去离子水平时储存于水箱,实验时通过调节旁通和实验段进口阀门获得所需流量进入注水环隙,流经实验段后液相回流至水箱。

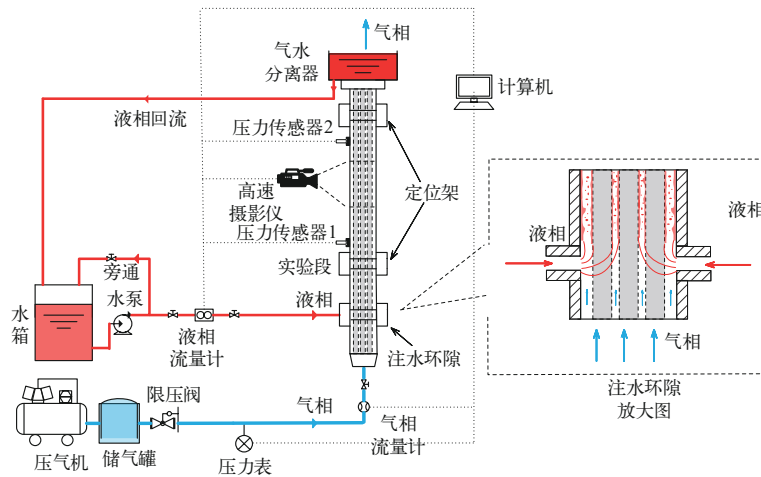
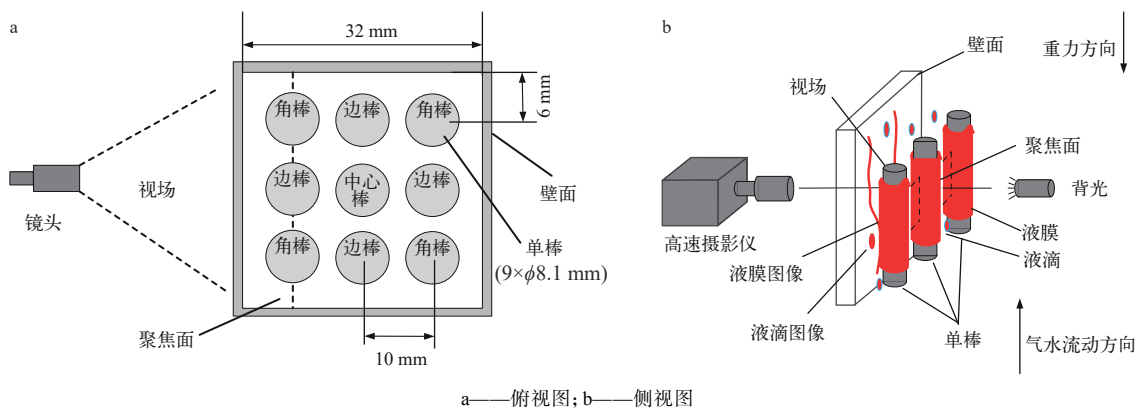


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

实验段核心部件采用有机玻璃材料制成(折射率与水近似相等),长度为2 000 mm,3×3棒束结构使用9根直径为8.1 mm的隔离棒排列而成,四周壁面由有机玻璃围成,如图2a所示。实验时将摄影仪与台架上端的卡扣连接,调节水平和上

下位置,参考图2b使其正对实验段中心,高速摄影系统负责辨别、拍摄和记录边壁与第一排管之间的环状流并流-逆流不稳定性行为。高速摄影仪采样频率根据实验工况设定为1 000~2 000帧,采集时间均不低于20 s。



a——俯视图;b——侧视图

图2 通道结构与高速摄影系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rod bundle channel structure and high-speed photography system

实验中的高速摄影、气液流量、压力传感器的数据由计算机同时记录并存入硬盘。实验中,水流量和气流量分别采用不同质量流量计测得,精度分别为0.1级和0.2级,压差数据通过安放于

两测压点的压力传感器数据之差得到,两测压点安装在距离实验段进出口500 mm处,压力传感器根据工况的不同,选择量程为50 kPa或100 kPa,精度都为0.1级。实验流动工况范围为:气相折算

速度 j_g , 1.17~3.80 m/s; 液相折算速度 j_l , 0.07~0.40 m/s。

2 实验数据处理与误差分析

高速摄影视频数据处理的目的是识别棒束通道中环状流动不稳定性, 判别其所处携带过程的状态, 标记典型气液形态并获得特性参数。视频数据处理过程如图3所示, 主要包括以下步骤: 1) 将视频数据通过观察和筛选, 设定好图片存储

间隔, 转存为一组原始图像数据, 记录每张图片所处视频中的时间; 2) 以两侧壁面为界, 将原始图片进行裁剪(一般裁成 600×400 像素左右)和保存, 以提升处理效率; 3) 进行亮化和提升对比度处理, 方便对气液行为进行辨识; 4) 结合整体视频判别该图片对应流动不稳定性中的状态, 标记图片中的气、液相特征行为; 5) 对处理的不同时间序列图片进行分析, 获知该气液行为存在的时间和行进的距离。

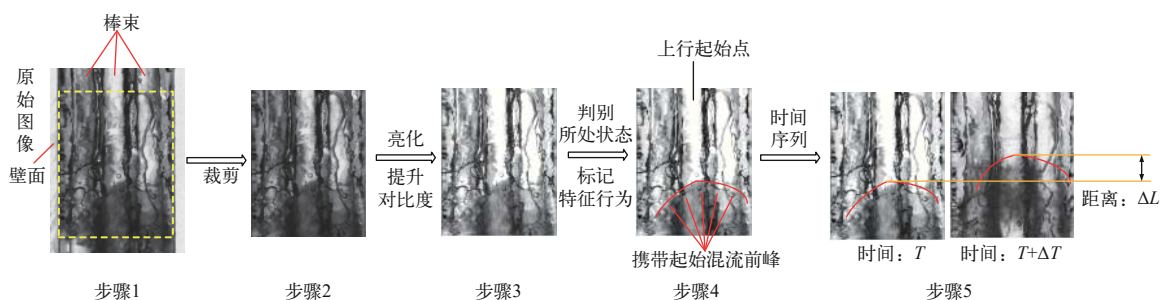


图3 高速摄影图像处理过程

Fig. 3 Image processing in high speed photography

高速摄影图像处理除了判别所处状态外, 还将得到上行、下行时间占比和携带起始混流的上行速度, 其中携带起始混流的上行速度 v 由式(1)计算获得。

$$v = \Delta L / \Delta T \quad (1)$$

其中: ΔL 为两图片中携带起始混流进行的距离; ΔT 为在时间序列中两图片的时间差。

在压差数据分析中, 首先对数据进行无量纲化处理, 定义相对压差 Δp_{0N} 为该气液相工况下的压差 Δp_N 与平均值 $\overline{\Delta p_N}$ 的比值, 即:

$$\Delta p_{0N} = \frac{\Delta p_N}{\overline{\Delta p_N}} \quad N = 1, 2, 3, \dots, 5120 \quad (2)$$

压力传感器的采集频率为 256, 通常采集 20 s。

图4为相对压差的局部最大值和最小值的寻峰过程示意图, 利用编程手段对数据中的局部最大值进行寻峰, 寻峰原则是以数值 1 作为分界点, 对大于 1 的信号进行局部最大值寻峰, 对小于 1 的信号进行局部最小值寻峰; 在时间差值小于 0.1 s 内若出现多个峰值仅计数 1 次, 对应的时间为多个峰值的均值。

根据高速摄影仪所拍视场大小、架设位置及拍摄视深误差进行分析, 高速摄影图像处理的长

度误差低于 3.2%; 结合不同工况条件下手动计算和编程处理相对压差数据结果分析, 压力数据的特征点辨别的误差小于 2.7%。

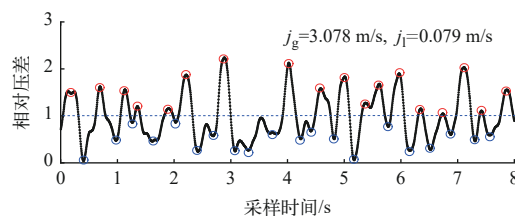


图4 相对压差的寻峰过程

Fig. 4 Peak-finding process for relative pressure drop

3 实验结果分析

3.1 棒束通道中环状流并流-逆流不稳定性行为记录

本研究关注的 3×3 棒束通道中的并流-逆流不稳定性主要是指特定气液流动工况下出现的局部周期性上行-下行交替过程。图5给出了液相折算速度为 0.079 m/s、气相折算速度为 3.078 m/s 时, 一个完整周期内出现的携带上行起始区域、完全上升环流区域和整体下行区域示意图, 其中的时间为视频数据记录的绝对时间。

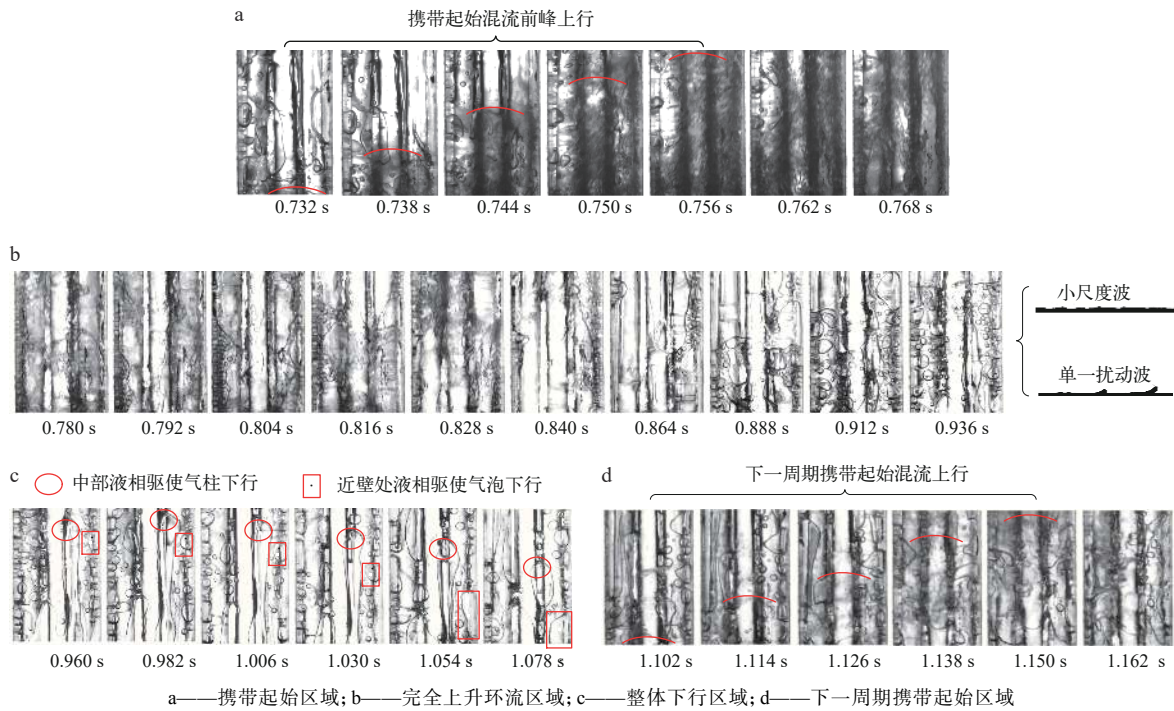


图5 棒束通道中环状流动不稳定性行为分析

Fig. 5 Analysis of annular flow instability in rod bundle channel

1) 上行部分主要包括携带起始区域和完全上升环流区域。

(1) 携带起始区域(约 0.732~0.770 s)

携带上行过程的起点是管内出现高速携带起始混流,该两相混流由气相为主导,携带大量交混液相,上行过程与周围液膜产生强烈交混作用,使下降液膜获得上升加速度,在约 0.05 s 内速度反转向。携带起始混流经过视场引起区域黑度明显升高,据此捕捉携带起始混流前峰位置及运行方式,当携带起始混流从视场经过后,局部黑度回到原有状态。起始混流上升形态有的仅在轴向运动、径向运动不明显,有的在径向方向上左右摆动,该行为与局部气相湍动作用有关。

(2) 完全上升环流区域(约 0.770~0.962 s)

当携带起始混流从视场经过后,两相进入完全上升环流区域,气相在通道中心以气芯形态向上行进,液相多为上升环流形态,也有少量被气相卷吸进入主流形成液滴。在完全上升环流区域中观察到纯剪切型的气液边界极少,液膜受气相卷吸、剪切等携带作用明显,其厚度随气相湍动产生大幅波动。结合文献 [11] 中对完全携带区波状界面行为的描述,本研究发现气相湍动引发两种形态的波状结构,一种是波动幅值较低、数量较

多的小尺度波,另一种是幅值变化较大、数量相对较小的单一扰动波。在完全上升环状流动区域中,气液波状界面开始时上行速度较高、两种波状结构行为交替变化,演变过程受液相重力影响明显;结束时单一扰动波出现频率明显减小,液膜上升速度逐渐降低,直至为 0。

2) 整体下行区域(约 0.962~1.088 s)

整体下行区域主要指液膜所受空气上升携带能力低于液相重力的影响,在液膜上升速度降为 0 后产生反转下降的过程,该区域产生气液逆流,图 5c 中标记了受到中部和近壁液相驱使的气柱和气泡的下降和变形行为。整体下行区域所占时间约为 0.14 s,重力对液相下降产生的加速作用未充分体现,因此液相下降速度不高,气相在此区域主要受液相下行的压缩作用较为明显。在整体下行区域中气液界面交混作用强度不高,其波状界面大都呈现稳定的小尺度波,气芯上升速度较慢,直至下一周期的携带起始混流到来。

结合文献 [12-15] 所叙述的棒束通道中流型特点,本研究中棒束通道周向壁面与棒组距离较小,整体流通结构属于紧凑型棒束通道,相应搅混流向环状流的过渡点对应流动工况较早出现,隔

离棒和壁面的存在为液相提供一定的附着条件, 整体流型在进入环状流区域时产生了并流-逆流不稳定性。搅混流的气液相形态变化多样, 动力学特性分析上存在很多的无规则或不确定成分, 与搅混流相比, 本研究中环状流不稳定性体现在并流-逆流对应的上升环流和下降环流主体形态比较清晰, 在不同流动区域内, 从受力分析角度则体现为气芯变化的携带力和液相重力的周期性主导作用, 气液界面多以小尺度波和单一扰动波体现其流动不稳定性。

3.2 周期性携带工况与常见携带判别经验式比较

通常判断发生携带的方式是观察实验段中是否有液相随气相上升经过注水点, 根据实验结果给出携带经验预测式。本实验观察的周期性携带不稳定性与携带经验预测结果^[4-7]的对比如图6所示。

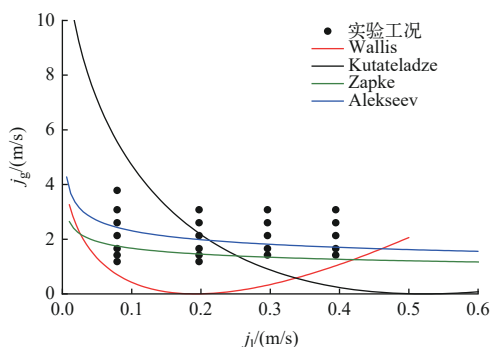


图6 实验气液工况与4个携带经验式结果比较
Fig. 6 Results comparison of experimental conditions with predictions of four flooding formulas

由图6可看出, Kutateladze 判别式对流动工况是否产生携带预测结果与其他3组预测线相差较大, 分析原因是 Kutateladze 判别式在形式上未充分考虑到通道尺寸的影响。当液相折算速度高于0.07 m/s 时, Zapke 和 Alekseev 判别式的预测结果受液相速度变化不明显, Wallis 判别式随液相折算速度的增加呈先减小后增大的趋势。实验工况根据 Wallis 判别式判断处于携带状态, 根据 Zapke 和 Alekseev 的预测结果则处于携带和不能携带的转换线上, 考虑到以上经验预测方法仅通过液相是否高于注水点对携带行为进行判定, 并未深入分析液相上升后进入不同流通结构中的携带特性, 结合前文对不同流动区域内气液相形态和作用机理的分析, 并行棒束通道结构对周期性携带

流动不稳定性产生的影响不可忽视。结合文献[11]的相关结论, 单纯从液相是否高于注水点判别气液工况是否处于携带状态不能充分体现携带发生后通道中两相演变特性, 在经验式预测的两种状态之间应增加并流-逆流携带这一过渡工况, 后续对携带行为的研究和分析应结合实际工程应用充分考虑不同通道结构和系统环境因素等对流动不稳定性影响。

3.3 并流-逆流不稳定性图像数据与压差信号对比

携带发生后引发流动不稳定性的表现可以总结为实验段压差上升, 液相上升越过注水点, 下行液体流量减少和出现高幅值横向扰动4种^[10], 实验中压力传感器和高速摄影仪采集的数据同时记录, 将相对压差局部最大值发生位置与周期性携带图像的对比结果进行整理, 如图7所示。

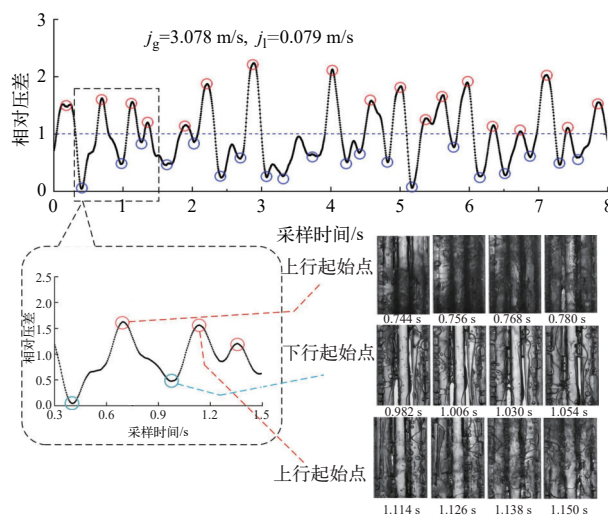


图7 周期性携带图像数据与相对压差时域图的比较

Fig. 7 Comparison of periodic flooding image data with relative pressure drop at same time

由图7可看出, 当压差达到局部最大值时, 高速摄影仪捕捉到上行起始点, 此时正处于携带起始混流高速经过视场, 气液之间的强交互作用产生较大压力波动; 当压差达到局部最小值时, 高速摄影仪拍摄到下行起始点, 此时液膜速度方向由向上变为向下, 气液间相互作用强度最低, 产生较小的压力波动。经过对所有实验工况的并流-逆流不稳定性图像数据与相对压差时域图进行对比, 一致性为89.2%, 因此在实验中可通过压差的局部最大值点判别管内两相所处周期性携带所处

区域。

3.4 不同流动工况上行-下行时间占比

对实验工况中并流-逆流不稳定性对应的液

相上行和下行区域时间做统计和均值处理,不同流动工况下,上行和下行区域的时间变化情况(相应时间比值标于其后)如图8所示。

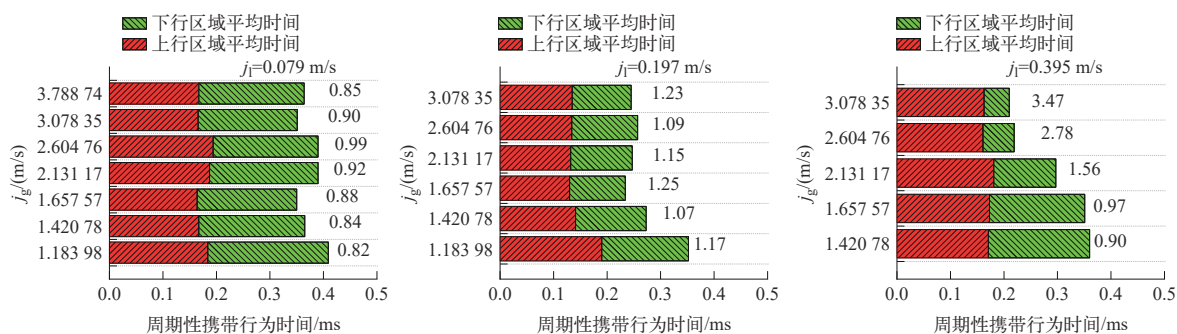


图8 不同流动工况上行-下行时间占比

Fig. 8 Proportion of time for upward-downward flow time in different flow conditions

图8表明,当液相折算速度较低($j_l=0.079$ m/s),气相折算速度在1.184~1.658 m/s范围增加时其整体周期逐渐变小,当气相折算速度进一步增加时,整体周期长度变化不明显,上行和下行时间比值在0.82~0.99间变化。当液相折算速度逐渐增大,整体携带周期随气相折算速度的增加而减小,上行与下行时间比值保持在1.1左右,高液相折算速度条件下时间比值则随气相折算速度的增大从0.905增加到3.468。当两相环状流动处于上行区域时,受携带起始混流影响明显,与下行区域相比其整体运行速度较高。当液相流量较低时,液相重力产生的影响较小,对气芯产生的压缩和阻碍作用较小,两相在并流和逆流过程的相互作用强度较低,携带周期较大,上行时间普遍低于下行时间;当液相流量较高时,液相重力对气芯产生的压缩和阻碍作用增强,使得携带起始混流上行势头明显,携带过程的周期随气相速度的增加而减小,对应的下行时间也大幅减少。

3.5 携带起始混流上升速度特性与流动不稳定性形成机理分析

不同液相折算速度条件下携带起始混流上升速度 v 与气相折算速度 j_g 的比较如图9所示。当液相流量较低时,携带起始混流上升速度高于气相折算速度,尤其在低气相流速携带起始混流速度高于气相折算速度70%以上;当液相流量逐渐增加时,携带起始混流上升速度高于气相折算速度的量逐渐减小,在较高气相折算速度条件下出

现携带起始混流上升速度低于气相折算速度的情况。结合不同流动工况上行-下行时间占比的相关结论,在低液相折算速度条件下液相下行时间较长,对气相产生更多的压缩效果,下部气芯对携带起始微团产生的上推效果明显;当液相流量较高时液膜厚度增加,液膜受携带力上升和重力影响下降的反应敏感,相应的上行和下行时间均不同程度减少,对于气相的增压效果不明显,相应的起始混流速度也随之降低。

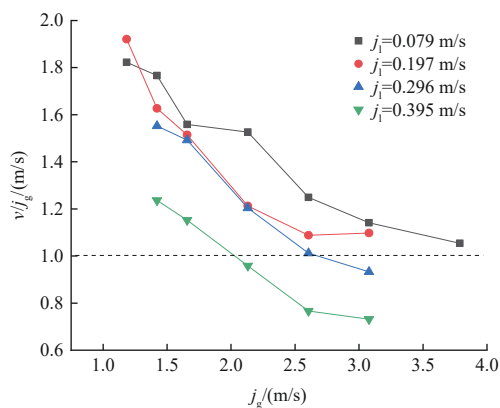


图9 不同流动工况携带起始混流上升速度与气相折算速度的对比

Fig. 9 Comparison of micelle velocity for onset-flooding and gas superficial velocity in different flow conditions

综上所述,在携带起始区域中,下降液膜受到携带起始两相混流影响在较短时间内速度方向变为向上,该携带起始混流为后续的气芯上升开辟了足够空间。进入完全上升环流区域后,液相受

到气芯携带作用向上并行运动,但由于气相对近壁液膜的携带或支撑作用不足,液膜重力高于气相携带力,导致液相整体加速度方向向下,上行速度逐渐变小。进入整体下行区域的起点是液相上行速度均值为0,此时受重力影响,液膜下行速度逐渐变快,产生气液逆流,下行过程使得液相流通面积增加,对气相产生阻碍和挤压作用,下部气芯受到挤压引发内压升高直至高于液相下降冲击力,内压升高的程度与液相折算速度关系密切,此时以气芯为主体形成携带起始两相混流,使得下降液相短时重新上行形成并流。

4 结论

本研究对3×3棒束通道环状流中的并流-逆流不稳定性进行了观察和记录,将实验工况与携带预测关系式的结果进行对比和分析,讨论了携带行为与压差特性之间的关系,对上行-下行时间占比和携带起始混流速度进行了分析,得到如下结论。

1) 一个完整携带周期由携带上行起始区域、完全上升环流区域和整体下行区域组成;并行棒束通道结构对周期性携带流动不稳定性产生的影响不可忽视,在经验式预测的两种状态之间应增加并流-逆流携带这一过渡工况;当压差达到局部最大值时,对应高速摄影数据中的上行起始点,当压差达到局部最小值时,高速摄影拍摄到下行起始点。

2) 当液相流速较低时,整体携带周期随气相折算速度变化不明显,上行时间普遍低于下行时间;当液相折算速度逐渐增大时,整体携带周期随气相折算速度的增加而减小,上行时间高于下行时间。当液相流量较低时,携带起始混流上升速度高于气相折算速度;当液相流量逐渐增加,携带起始混流上升速度高于气相折算速度的量逐渐减小,在较高气相折算速度条件下,携带起始混流上升速度低于气相折算速度。

3) 发生并流-逆流不稳定性原因是在不同的区域内气芯变化的携带力和液相重力的周期性主导作用。携带起始区域中,下降液膜受到携带起始两相混流影响在较短时间内速度方向变为向上,完全上升环流区域中,液膜重力高于气相携带力,导致液相上行速度逐渐变小,在整体下行区域中,液相下行对气相产生阻碍和挤压作用积累,导

致气相携带力逐渐高于液相重力促使携带起始混流生成。

参考文献:

- [1] MA Youfu, ZENG S, SHAO J, et al. An experimental study on gas-liquid two-phase countercurrent flow limitations of vertical pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 141: 110789.
- [2] 李希川. 竖直窄矩形通道液泛特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [3] 潘良明, 朱隆祥, 万洁, 等. 轻水堆两相流机理研究的若干关键问题、现状与发展前沿[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(8): 1483-1498.
PAN Liangming, ZHU Longxiang, WAN Jie, et al. Challenge, state-of-art and future of two-phase flow in light-water nuclear reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(8): 1483-1498(in Chinese).
- [4] WALLIS G. Flooding velocities for air and water in vertical tubes[R]. United Kingdom: United Kingdom Atomic Energy Authority, 1961.
- [5] KUTATELADZE S, SOROKIN Y. The hydrodynamic stability of vapour-liquid systems[M]. [S. l.]: [s. n.], 1969.
- [6] ZAPKE A, KROGER D. Countercurrent gas-liquid flow in inclined and vertical ducts—II: The validity of the Froude-Ohnesorge number correlation for flooding[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(9): 1457-1468.
- [7] ALEKSEEV V, POBEREZKIN A, GERASIMOV P. Determination of flooding ranges in regular packings[J]. *Heat transfer/Soviet Research*, 1972, 4: 159-163.
- [8] 阎昌琪, 黄渭堂, 王文祥, 等. 竖管内淹没及其消失滞后问题的研究[J]. *核科学与工程*, 1994, 14(1): 34-41.
YAN Changqi, HUANG Weitang, WANG Wenxiang, et al. Study on flooding and hysteresis of deflooding in vertical tubes[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1994, 14(1): 34-41(in Chinese).
- [9] 阎昌琪, 孙福泰, 孙仲宁. 管径和气体入口条件对淹没过程的影响[J]. *核动力工程*, 1993, 14(3): 238-243.
YAN Changqi, SUN Futai, SUN Zhongning. Effects of diameter and air inlet on flooding[J]. *Nuclear Power Engineering*, 1993, 14(3): 238-243(in Chinese).
- [10] VIJAYAN M, JAYANTI S, BALAKRISHNAN A. Effect of tube diameter on flooding[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(5): 797-816.
- [11] 金光远, 赵珂欣, 王睿, 等. 窄矩形通道内环状流周期性

- 携带特性研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(8): 1553-1560.
- JIN Guangyuan, ZHAO Kexin, WANG Rui, et al. Periodic flooding characteristics of annular flow in narrow rectangular duct[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(8): 1553-1560(in Chinese).
- [12] LIU H, HIBIKI T. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical rod bundles[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2017, 108: 423-433.
- [13] HAN X, SHEN X, YAMAMOTO T, et al. Flow regime and void fraction predictions in vertical rod bundle flow channels [J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2021, 178: 121637.
- [14] 周云龙, 尹洪梅. 棒束通道气液两相流流型识别及动力学特性分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(5): 851-857.
- ZHOU Yunlong, YIN Hongmei. Flow pattern identification and dynamics characteristics of gas-liquid two-phase flow in rod bundle channel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(5): 851-857(in Chinese).
- [15] KAMEI A, HOSOKAWA S, TOMIYAMA A, et al. Void fraction in a four by four rod bundle under a stagnant condition[J]. [Journal of Power and Energy Systems](#), 2010, 4(2): 315-326.