

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171302

矩形通道内低压自然循环压降型脉动及其复合型脉动可视化研究

张文超, 焦琦, 周云龙, 杨美, 金光远, 杜利鹏

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

摘要: 以去离子水为工质, 对矩形通道内低压自然循环压降型脉动及其复合型脉动进行可视化实验研究, 利用可视化手段拍摄脉动过程气相分布状态图像。通过流量脉动曲线与图像进行对照, 分析流量脉动的物理过程及产生机理。实验过程中发现 4 类动态不稳定性: 第 I 类密度波 (DWO_I)、压降型脉动 (PDO)、复合型脉动 (SPO) 及第 II 类密度波 (DWO_{II})。重点分析了压降型脉动与复合型脉动产生机理、影响因素及流动不稳定性边界。实验研究发现, 受矩形通道挤压效应及稳压器内部可压缩空间影响, 工质在稳压器和循环回路之间往复波动, 形成压降型脉动, 增大加热功率压降型脉动会叠加第 II 类密度波形成复合型脉动。两类脉动的起始点会随入口过冷度增加呈现偏离趋势, 并且压力增加, 偏离趋势会随之增大。通过相变数、过冷度数等无量纲参数绘制了压降型脉动不稳定性边界。

关键词: 不稳定性; 气液两相流; 矩形通道; 压降型脉动; 可视化方法

中图分类号: TL 334

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 06—2455—08

Visualization study on pressure drop and superimposed oscillations under low pressure natural circulation in rectangular channel

ZHANG Wenchao, JIAO Qi, ZHOU Yunlong, YANG Mei, JIN Guangyuan, DU Lipeng

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: With deionized water as working fluid, visualization technique was used to study pressure drop and superimposed oscillations of low pressure natural circulation in rectangular channel. Gas-phase distribution images captured during oscillation processes were compared with flow pulsation curve to assess physical process and mechanism of flow oscillation. Four types of dynamic instabilities were found in the study, *i.e.*, density wave oscillation by gravity (DWO_I), pressure drop oscillation (PDO), superimposed oscillation (SPO), and density wave oscillation by friction (DWO_{II}). Due to squeezing effect of rectangular channel and compressible space limitation within surge tank, working fluid flew cyclically between surge tank and circulation circuit and generated pressure drop oscillation (PDO). With increase of heating power, superimposed oscillation was formed by overlapping PDO and DWO_{II} . The onset points of both oscillations tended to diverge with increase of inlet overcooling degree, and such diverging tendency enlarged when system pressure was increased. DPO instability boundary curve was plotted against dimensionless parameters, such as overcooling degree and phase change.

Key words: instability; gas-liquid flow; rectangular channel; pressure drop oscillation; visualization method

引 言

两相自然循环技术具有节约能源、安全性高等

特点, 被广泛应用于能源、动力、化工等领域^[1]。国内外学者针对自然循环流动不稳定性已进行了大量理论和实验研究^[2-8]。自然循环系统中的流动不稳

2017-09-27 收到初稿, 2017-12-20 收到修改稿。

联系人: 焦琦。第一作者: 张文超 (1984—) 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51776033); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目 (2016-79)。

Received date: 2017-09-27.

Corresponding author: JIAO Qi, jiao504684892@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51776033) and the Education Department of Jilin Province Science and Technology Research Project of “13th Five-Year” (2016-79).

定性有流量漂移(ledinegg)^[9-10]、闪蒸(FSH)^[11-12]、密度波型脉动(DWO)^[13-15]、压降型脉动(PDO)^[16-18]等。研究者们探究了各类不稳定性的发生机理,并根据实验、模拟的数据结合理论计算推导出判断不稳定性的半经验关系式和各类计算模型。然而对自然循环流动不稳定性的研究多集中于传统圆形通道,对矩形通道内自然循环的研究较为匮乏。矩形通道具有结构紧凑、换热效率高等特点,已在小型一体化核反应堆、航天器冷却系统得到了应用^[19]。矩形通道具有窄矩形效应,对通道内气泡形成挤压作用,通道的流动-传热特性与圆形通道存在较大差异^[20-22],因此,有必要开展矩形通道内自然循环流动特性的研究。

Kandlikar^[23]和 Tadrist^[24]分别对窄空间流动不稳定性进行了综述,总结了较全面的窄空间内不稳定性类型及其实验现象、影响因素、影响规律,并对各类计算模型、经验关系式的适用性进行评价。张炳雷等^[25]对矩形微通道进行实验研究,实验中发现三类不稳定性:流量漂移、压降型脉动和复合型脉动,并分析了系统参数对各类不稳定性周期和压降特性的影响。Zhang 等^[26]对微通道内压降型脉动进行数值模拟,从动量方程推导集总振荡模型,并提出了一种非线性参数辨识方法。Bergles 等^[27]对窄通道临界热通量(CHF)进行实验研究发现,发生压降型脉动、流量漂移等流动不稳定性会导致 CHF 现象提前出现,刘亮等^[28]和 Buyevich 等^[29]的实验也出现类似现象。Brutin 等^[30]的实验中多次出现由于壁面间歇性干涸所引起的蒸汽反冲现象,这种现象是窄矩形通道中特有的。

现有关于矩形通道流动不稳定性的成果大多只是分析流量、压降等数据参量变化,较少结合脉动过程中的气相分布变化。基于此,本文对低压自然循环矩形通道内流动不稳定性进行实验研究,利用可视化手段,将脉动曲线与高速摄影仪图像相互对照,深入分析了压降型脉动和复合型脉动两类不稳定性的发生机理、影响因素和影响规律,并根据实验数据绘制无量纲流动不稳定性边界,为进一步认知矩形通道内流动不稳定性提供可靠的数据和理论支撑。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验用矩形通道自然循环实验装置如图 1 所

示,整体实验台架高 3 m、宽 3.5 m,实验台由自然循环回路、冷却回路、稳压器及压力表、压差表等测量仪表组成,其中自然循环回路部分由包括预热器、实验段、换热器、主循环水泵、电磁流量计等。

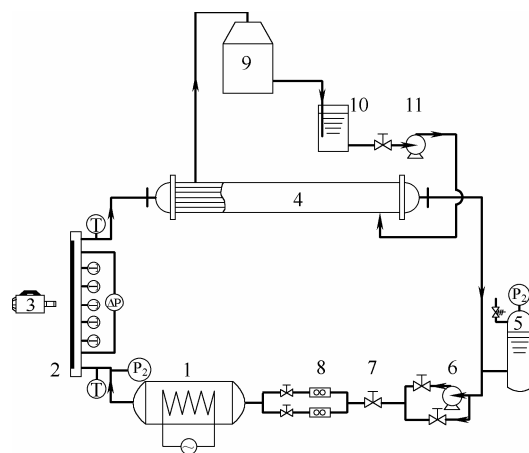


图 1 矩形通道自然循环实验装置

Fig.1 Narrow rectangular natural circulation test loop

- 1—preheater; 2—test section; 3—high-speed camera;
4—heat-exchanger; 5—surge tank; 6—main pump;
7—regulating valve; 8—electromagnetic flow meter;
9—cooling tower; 10—coolant box; 11—cooling water pump

矩形可视化实验段如图 2 所示,流道尺寸为 43 mm×3 mm,有效加热长度为 475 mm,实验过程由 Lavision 高速摄像仪进行图像拍摄。实验段利用保温棉进行保温,以减少热损失,经热平衡实验确定系统热效率约为 92.3%。

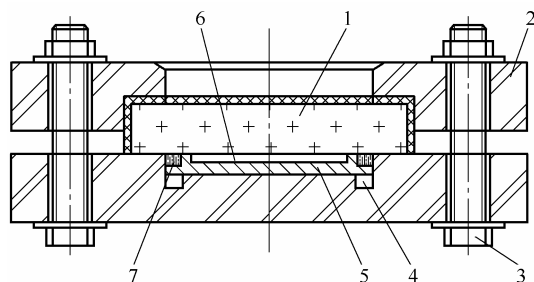


图 2 矩形通道实验段

Fig.2 Schematic diagram of rectangular channel experimental section

- 1—visual window; 2—pressure body; 3—bolt; 4—cooling runner for gasket ring; 5—heating plate; 6—rectangular channel; 7—insulated gasket ring

自然循环回路以去离子水为工质。去离子水在预热器中进行预热,达到设定入口温度后流入实验段,在实验段中继续加热并发生相变,之后流入冷凝器,在冷凝器中冷却后进入下降段,流经无泵旁

路后返回预热器,利用上升段与下降段中工质密度差形成自然循环。

实验系统流量由电磁流量计测量,其精度为0.3%。采用K型铠装热电偶进行温度测量,其温度传感器精度为0.2%,有7个温度测点平均布置于加热面背面,另有2个热电偶分别放置于实验段入口与出口处,记录入口及出口水温。加热段上方和下方开有引压孔,利用压差变送器测量加热段压降变化,其精度为0.2%。

1.2 实验参数及方法

自然循环实验台参数范围如表1所示。对于不同实验工况,利用稳压器保证自然系统压力在设定值,调节预热器功率使实验段入口水温达到设定温度,逐渐增加实验段加热功率,直至实验段系统出现脉动状态。通过改变系统压力、入口过冷度、加热功率等实验参数完成实验。本文采用传统无量纲判别方法定义稳定边界参数

$$N_{\text{sub}} = \frac{(h_f - h_i)\nu_{\text{fg}}}{h_{\text{fg}}\nu_f} \quad (1)$$

$$\nu_{\text{fg}} = \nu_g - \nu_f \quad (2)$$

$$h_{\text{fg}} = h_g - h_f \quad (3)$$

$$N_{\text{pch}} = \frac{Q_{\text{eff}}\nu_{\text{fg}}}{W\nu_f h_{\text{fg}}} \quad (4)$$

式中, N_{sub} 为无量纲过冷度数; h_f 为液相饱和比焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; h_i 为入口比焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; ν_g 为气相比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; ν_f 为液相比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; h_g 为气相饱和比焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; N_{pch} 为无量纲相变数; Q_{eff} 为有效加热功率, kW ; W 为质量流速, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameter

Parameter	Working condition
system pressure (P_{in})	0.1—0.25 MPa
inlet subcooling (T_{sub})	35—70℃
heating power (Q_{eff})	4.5—13.0 kW
vapor qualities (x)	0.1—0.3

2 实验现象及发生机理

在一定入口过冷度和压力下,当加热功率上升到一定程度,整个回路实验系统形成单相自然循环,提高加热功率,实验段出现气液两相流动,继续提高加热功率后,实验系统会出现下述四类脉动或其中的几类:第I类密度波、压降型脉动、复合型脉动(压降型脉动叠加第II类密度波)和第II类密度波。

2.1 压降型脉动现象及机理分析

当实验中出现第I类密度波型脉动后提高加热功率,系统出现压降型脉动,图3、图4为实验参数脉动曲线和拍摄图像,如图3所示,系统流量脉动首先保持小幅振荡状态(图3点a),流道内呈泡状流[图4(a)],某一时刻,由于加热功率波动,流道内部气泡大量增加,自然循环驱动力变大,流量脉动振幅变大,当流量达到一定值后(图3点b),流道内气泡基本消失,近似表现为单相流动,系统驱动力下降,系统流量也随之下降,流量下降到一定值后(图3点c),流道中出现弹状流[图4(c)],由于矩形通道的挤压作用,弹状流呈扁平状充满流道并产生堵塞作用,增加了系统阻力,两相流的液相部分在气弹下方堆积,系统压力与稳压器压力开

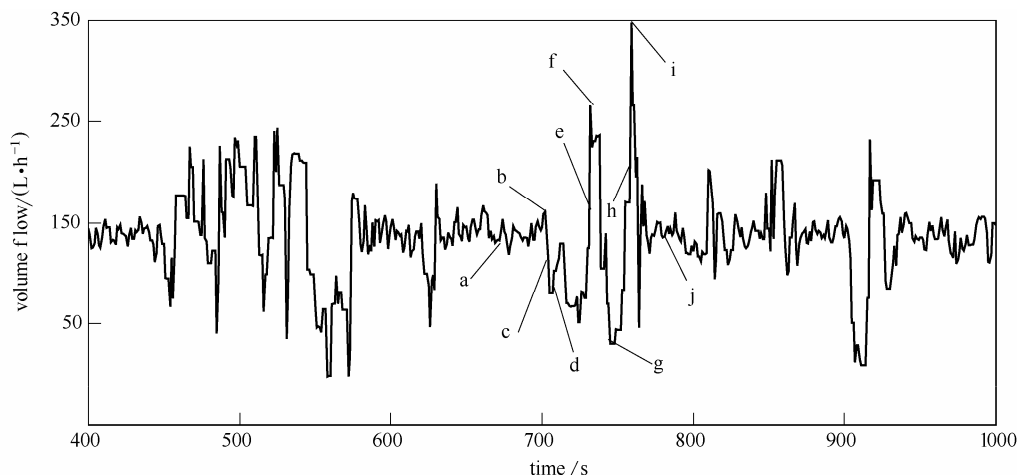


图3 压降型脉动流量变化曲线

Fig.3 Flow variation curve of pressure drop oscillation

($T_{\text{sub}}=71.9^\circ\text{C}$, $P_{\text{in}}=0.156\text{ MPa}$, $Q_{\text{eff}}=8.11\text{ kW}$)

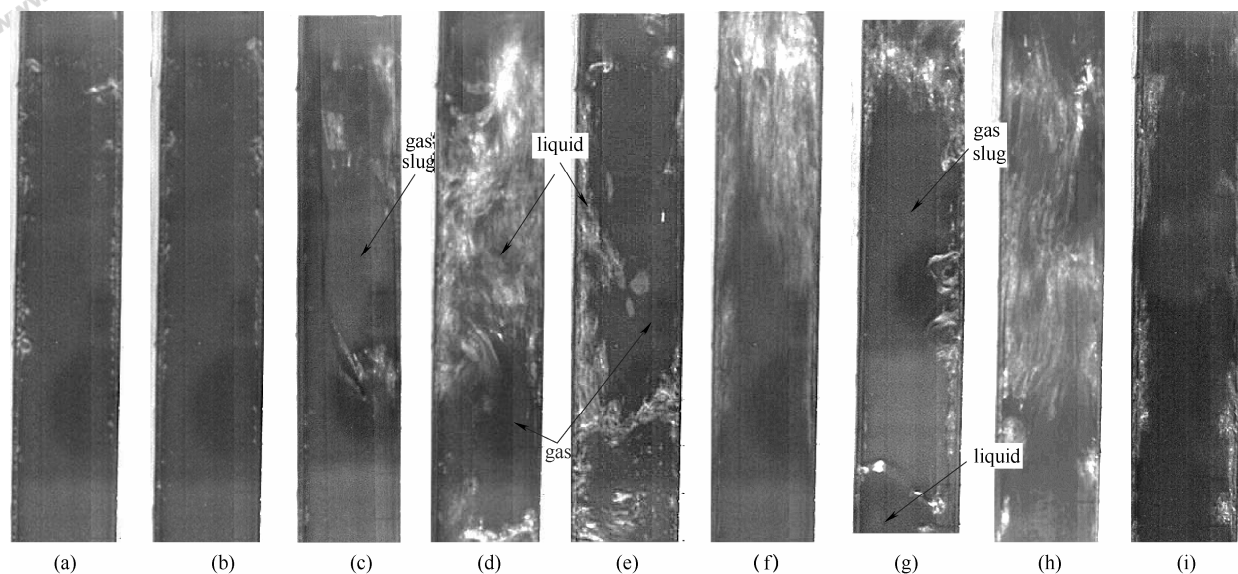


图 4 压降型脉动图像

Fig.4 Images of pressure drop oscillation

始出现压力差, 由于稳压器存在可压缩空间, 工质在压力差的作用下被压入稳压器中, 导致稳压器压力增大。系统阻力和弹性空间的共同作用, 促使流量进一步降低, 流量降低到一定值时 (图 3 点 d), 因为液相集聚后冲击速度较大, 液相会冲破气弹, 流动内部形成搅混流[图 4(d)]或环状流[图 4(g)]。此时, 由于实验装置冷热段密度差增大, 系统驱动力增加, 同时稳压器内部压力大于系统压力, 工质被压回循环回路, 两者共同作用, 使系统流量迅速增加, 实验段内部重新出现弹状流、泡状流等状态。系统流量增大到最大时 (图 3 点 f), 实验段呈现单相流动[图 4(f)], 驱动力减小, 系统流量又开始下降, 形成振幅较大的波动。由于稳压器与循环回路之间的流动惯性效应影响, 这种大幅波动会持续存在 (图 3 点 e 至图 3 点 i)。图 4(e)~(i) 为发生大振幅波动时工质的流动状态。随后, 由于流动惯性的逐渐降低, 流量振幅随之逐渐减小, 直至回到初始状态 (图 3 点 j), 系统进入下一周期脉动。

实验研究发现, 系统工况点处于水动力特性曲线的负斜率区是产生压降型脉动的必备条件, 两相流气相分布不规则变化与系统可压缩空间的相互作用是引起压降型脉动的根本原因。当实验工况点位于水动力曲线负斜率区时, 系统出现微小扰动, 流动内工质的气相、液相分布会出现不规则的变化, 这种变化打破了系统压力与稳压器压力之间的平衡, 使两者出现压力差, 由于稳压器内部存在可压缩体积, 压差驱使流体在循环回路与稳压器之间往

复波动, 引发自然循环压降型脉动。

2.2 复合型脉动实验现象及机理分析

实验系统出现压降型脉动后, 继续提高加热功率到一定值后, 实验段出口质量含气率相对较高, 流动中出现了压降型脉动叠加周期较小的第 II 类密度波。

复合型脉动参数变化图像如图 5 所示, 系统流量脉动较平稳区域消失, 流量脉动振幅增大, 脉动频率减小, 整体呈现较为规律的周期性。图 6 为复合型脉动图像, 如图所示, 实验段内部可以观察到工质的流型在单相[图 6(a)]→泡状流[图 6(b)]→弹状流[图 6(c)~(e)]→搅混流[图 6(f)]→环状流[图 6(g)]→单相[图 6(i)]的往复变化, 变化

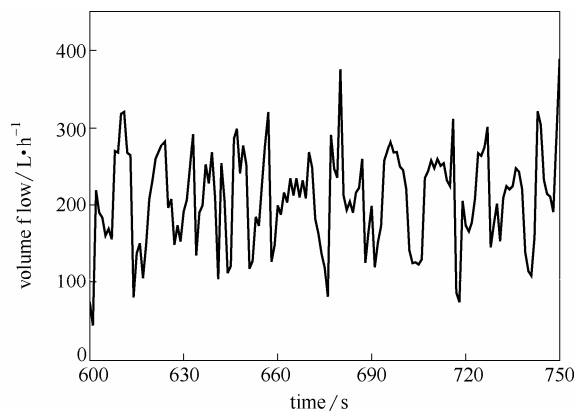


图 5 复合型脉动 (压降型脉动叠加密度波) 流量变化曲线

Fig.5 Flow variation curve of superimposed oscillation
(PDO with DWO_{II}, $T_{\text{sub}}=72.1^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{in}}=0.154\text{MPa}$, $Q_{\text{eff}}=9.63\text{kW}$)

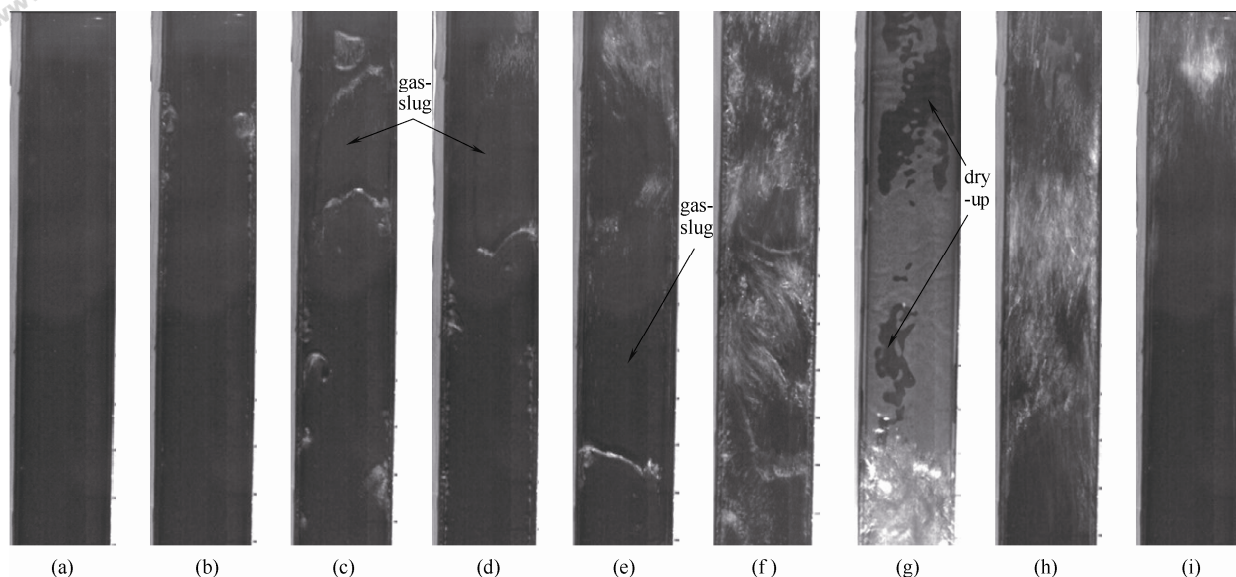


图6 复合型脉动图像

Fig.6 Images of superimposed oscillation

周期为 4~6.5 s。在图 6 (c) 中明显可以看出,在波动过程中出现弹状流时由于矩形通道的挤压作用,气弹呈现压扁状态,随着弹状流状态的发展,气弹快速充满流道[图 6 (e)],并将流道中的工质向气弹两侧,产生堵塞作用,极大地增加了系统阻力,也使循环回路与稳压器之间出现压差,驱使工质流入稳压器。此外,如图 6 (g) 所示,当实验段出现环状流时,可以观察到明显的干涸现象,并在实验段上方伴随有较大声响,这种现象的出现会对实验流道产生危害,并有可能导致 CHF 的发生,甚至导致实验段烧毁。当工质的流型由环状流向单相转变时[图 6 (h)],由于液相速度过大,流道中不会出现弹状流、泡状流等状态,而是直接充满流道呈现单相流动。

实验研究发现,系统出现复合型脉动需要具备两个条件:① 系统中已经出现压降型脉动;② 实验工况点位于系统水动力曲线负斜率区末端。当具备上述条件时,流道内工质的流型正处于剧烈变化状态,同时工质的密度大幅改变,增加加热功率,实验工况点会越过负斜率区进入正斜率区,流道中出现第 II 类密度波型脉动,与已存在的压降型脉动叠加形成复合型脉动。

进一步提高加热功率,系统流量振幅降低,压降型脉动消失,即复合型脉动消失,仅余第 II 类密度波。

3 实验结果分析

3.1 系统参数对脉动起始点的影响

(1) 入口过冷度 实验段入口过冷度是影响脉动起始点的重要因素之一。图 7 为常压条件下系统压降型脉动、复合型脉动及第 II 类密度波型脉动起始点分布。

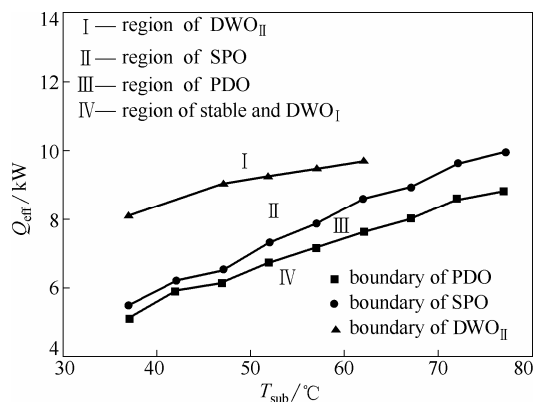


图7 常压下压降型脉动、复合型脉动及第 II 密度波型脉动起始点分布

Fig.7 Onset distribution of PDO, SPO and DWO_{II} under atmospheric pressure

由图可以看出,三类脉动的起始点功率均会随入口过冷度升高而变大,压降型脉动和第 II 类密度波型脉动起始点曲线斜率基本相同,而复合型脉动边界的曲线斜率较大,曲线最高点靠近第 II 类密度波型脉动边界,曲线最低点则靠近压降型脉动边界,

这说明当入口过冷度越高时, 压降型脉动存在区域越大, 复合型脉动区域越小, 甚至系统可能不出现复合型脉动, 而是直接由压降型脉动发展成为第 II 类密度波。

(2) 系统压力 系统压力是影响系统脉动的另一重要因素。分别在 0.15 MPa 和 0.25 MPa 两种系统压力下进行实验, 两种压力下脉动起始点分布如图 8 所示, 图中虚线为不同压力下复合型脉动起始点曲线, 实线为压降型脉动起始点曲线。由图可以看出, 系统压力增大, 出现压降型脉动需要的功率也增加, 这说明系统压力增大时, 系统稳定性提高; 不同压力下脉动边界曲线的斜率基本相同, 0.25 MPa 压力下压降型脉动与复合型脉动中间区域较宽, 说明系统压力越高, 压降型脉动存在范围越广。

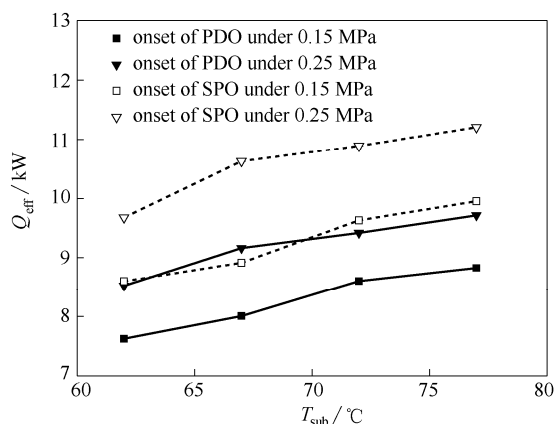


图 8 不同压力下压降型脉动及复合型脉动起始点分布
Fig.8 Onset distribution of pressure drop oscillation and superimposed oscillation under different system pressures

3.2 无量纲不稳定性边界图

结合实验数据得到实验工况下压降型脉动及复合型脉动无量纲不稳定性边界, 如图 9 所示。图中, 横坐标为无量纲相变数, 表征加热量与系统流量的比值; 纵坐标为无量纲过冷度数, 表征实验段入口温度。其中的每一个点代表实验值, 多个点的拟合曲线即为不稳定性边界。边界图被两条边界线划分为三个区域, 分别是: 左上 I 区域, 稳态和 I 类密度波区域; 中间 II 区域, 压降型脉动和复合型脉动区域; 右下 III 区域, II 类密度波区域。

当系统过冷度数一定时, 随系统相变数的增加, 系统运行工况点会依次经过三个区域: 相变数较低时, 工况点落于 I 区域, 系统呈稳态运行或出现第 I 类密度波; 相变数增加, 工况点经过第一条

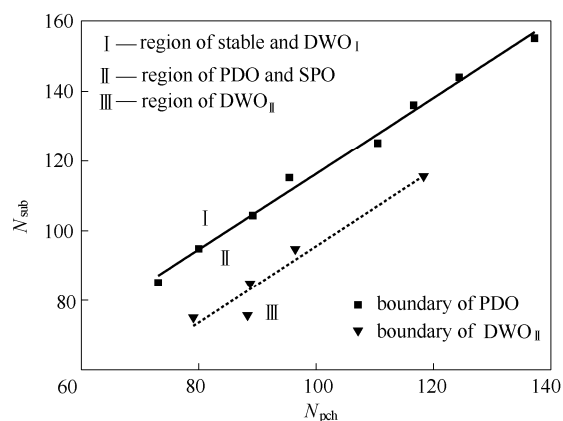


图 9 压降型脉动和复合型脉动无量纲不稳定性边界
Fig.9 Dimensionless flow instability boundary of pressure drop oscillation and superimposed oscillation

边界线进入 II 区域, 系统出现压降型脉动或复合型脉动; 相变数继续增加到一定值, 各工况点会越过第二条边界线, 落于 III 区域, 系统表现为第 II 类密度波。

4 结 论

本实验以去离子水为工质, 利用可视化方法对矩形通道内自然循环压降型及复合型脉动进行实验研究, 结论如下。

(1) 实验过程中观察到第 I 类密度波、压降型脉动、复合型脉动和第 II 类密度波 4 类动态不稳定性, 在一定压力和过冷度条件下, 会依次出现上述 4 类不稳定性或其中几种。

(2) 系统出现压降型脉动时, 由于扰动作用, 系统流量会间歇性出现大幅度振荡, 同时流道内的流型等也会出现不规律变化。压降型脉动的出现是由于气相分布变化与弹性空间、流动惯性等因素的共同作用, 驱使去离子水在循环回路与稳压器之间反复波动而形成的。

(3) 系统出现复合型脉动时, 流量小幅度振荡区域消失, 并且整体振荡幅度增加, 流道内流型压力表现出周期性的变化。复合型脉动出现时, 实验工况点基本位于系统特性曲线负斜率区末端, 当加热功率增加, 实验工况点会由负斜率区跨入正斜率区, 系统出现密度波型脉动, 与已存在的压降型脉动叠加形成复合型脉动。

(4) 对压降型脉动和复合型脉动起始点的影响因素进行分析, 两类脉动起始功率、压降型脉动存在区域均会随入口过冷度和系统压力的增加而变大。并根据实验数据, 绘制了实验工况下, 压降型

脉动和复合型脉动的无量纲不稳定性边界。

符 号 说 明

h ——比焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

N_{pch} ——无量纲相变数

N_{sub} ——无量纲过冷度数

P_{in} ——系统压力, MPa

Q_{eff} ——加热功率, kW

T_{sub} ——入口过冷度, $^{\circ}\text{C}$

W ——质量流速, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$

x ——热平衡含气率

ν ——比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$

下角标

f ——液相参数

fg ——气液混合物

g ——气相参数

i ——入口参数

References

- [1] 阎昌琪, 曹夏昕. 核反应堆安全传热[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
YAN C Q, CAO X X. Nuclear Reactor Safety Heat Transfer[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 65-83.
- [2] LEONARDO C R, CHRISTIAN P M. Two-phase flow instabilities: a review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **71**: 521-548.
- [3] DING Y, KAKAQ S, CHEN X J. Dynamic instabilities of boiling two-phase flow in a single horizontal channel[J]. Experimental and Thermal Fluid Science, 1995, **11**: 327-342.
- [4] 彭天骥, 邱金荣, 郭赞, 等. 欠热沸腾诱发自然循环不稳定性的研究[J]. 原子能科学技术, 2013, **47**(3): 381-390.
PENG T J, QIU J R, GUO Y, *et al.* Study on instability of natural circulation induced by subcooled boiling[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(3): 381-390.
- [5] GONELLA V P, MANMOHAN P. Review of research on flow instabilities in natural circulation boiling systems[J]. Progress in Nuclear Energy, 2007, **49**: 429-451.
- [6] KOMAKLI O, KARSLI S, YILMAZ M. Experimental investigation of two-phase flow instabilities in a horizontal in tube boiling system[J]. Energy Conversion and Management, 2002, **43**: 249-268.
- [7] KAKAC S, BON B. A review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling system[J]. International Journal Heat and Mass Transfer, 2008, **51**: 399-433.
- [8] 吴少融, 贾海军, 李怀萱, 等. 低压、低干度自然循环系统两相流动特性[J]. 核动力工程, 1997, **18**(4): 32-37.
WU S R, JIA H J, LI H X. Two-phase flow characteristics of natural circulation system with low pressure and low dryness[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, **18**(4): 32-37.
- [9] 周涛, 齐实, 宋明强, 等. 窄矩形通道内低压两相自然循环流量漂移实验研究[J]. 核动力工程, 2016, **37**(4): 1-5.
ZHOU T, QI S, SONG M Q, *et al.* Experimental study on flow excursion of two phase natural circulation under low pressure in narrow rectangular channel[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, **37**(4): 1-5.
- [10] 杨星团, 姜胜耀, 张佑杰. 低压低干度自然循环流量漂移分析[J]. 核科学与工程, 2002, **22**(1): 1-6.
YANG X T, JIANG S Y, ZHANG Y J. Analysis of ledinegg under natural circulation with low pressure and low dryness[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, **22**(1): 1-6.
- [11] LEE S Y, LEE D W. Linear analysis of flow instabilities in an open two-phase natural circulation loop[J]. Nuclear Engineering and Design, 1991, **128**(3): 317-330.
- [12] FURUYA M, INADA F, VAN DER HAGEN T H J J. Flashing induced density wave oscillations in a natural circulation BWR-mechanism of instability and stability map[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, **235**(15): 1557-1569.
- [13] 谭思超, 庞凤阁, 高璞珍, 等. 低压两相自然循环流动不稳定实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, **27**(2): 218-222.
TAN S C, PANG F G, GAO P Z, *et al.* Experimental research on natural circulation two-phase flow instability under low pressure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, **27**(2): 218-222.
- [14] 陈娟, 周涛, 齐实, 等. 矩形通道自然循环流动不稳定性实验研究[J]. 核动力工程, 2017, **38**(2): 51-55
CHEN J, ZHOU T, QI S, *et al.* Experimental study of natural circulation flow instability in rectangle channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, **38**(2): 1557-1569.
- [15] NAYAK A K, VIJAYAN P K, SAHA D, *et al.* Analytical study of nuclear-coupled density wave instability in a natural circulation pressure tube type boiling water reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, **195**: 27-44.
- [16] MANAVELA C E, FERNANDINO M, DORAO C A. Review on pressure drop oscillations in boiling systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **250**: 436-447.
- [17] MANAVELA C E, FERNANDINO M, DORAO C A. Experimental study of pressure drop oscillations in parallel horizontal channels[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, **50**: 126-133.
- [18] 彭传新, 陈炳德, 卓文彬, 等. 两相自然循环系统压降振荡流动不稳定性起始点研究[J]. 核动力工程, 2017, **38**(2): 32-37.
PENG C X, CHEN B D, ZHUO W B, *et al.* Research on onset of pressure drop oscillation flow instability in a two-phase natural circulation system[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, **38**(2): 32-37.
- [19] 马文昌, 徐元辉. 先进核动力反应堆[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
MA W C, XU Y H. Advanced Nuclear Power Reactor[M]. Beijing: Atom Energy Press, 2001.
- [20] 吕书平. 窄矩形通道中压降及自然循环流动不稳定性特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
LÜ S P. Investigation of pressure drop and flow instability characteristics of natural circulation flow boiling in narrow rectangular channel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [21] 陈冲, 高璞珍, 谭思超, 等. 竖直窄矩形通道内环流流的流动传热特性[J]. 化工学报, 2015, **66**(2): 537-544.
CHEN C, GAO P Z, TAN S C, *et al.* Flow and heat transfer

- characteristics of annual flow in vertical rectangular channel[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(2):537-544
- [22] 刘宇生, 许超, 谭思超, 等. 窄矩形通道内脉动湍流流动特性实验研究[J]. 核安全, 2017, **16**(2): 56-62.
- LIU Y S, XU C, TAN S C, *et al.* Experimental study on flow characteristics of pulsating turbulent flow in rectangular channel[J]. Nuclear Safety, 2017, **16**(2): 56-62.
- [23] KANDLIKAR S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, **26**: 389-407.
- [24] TADRIST L. Review on two-phase flow instabilities in narrow spaces[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, **28**: 54-62.
- [25] 张炳雷, 徐进良, 肖泽军. 低高宽比微通道中的流动沸腾不稳定性[J]. 化工学报, 2007, **58** (7): 1632-1640.
- ZHANG B L, XU J L, XIAO Z J. Flow boiling instability in microchannel with low aspect ratio[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2007, **58**(7): 1632-1640.
- [26] ZHANG T J, PELES Y, JOHN T, *et al.* Analysis and active control of pressure-drop flow instabilities in boiling microchannel systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, **53**: 2347-2360.
- [27] BERGLES A, KANDLIKAR S G. On the nature of critical heat flux in microchannels[J]. Heat Transfer. Trans. ASME, 2004, **127**: 101-107.
- [28] 刘亮, 张妍, 幸奠川, 等. 一种特殊的非对称加热矩形通道临界热流密度实验研究[J]. 核动力工程, 2016, **37**(S2): 116-121.
- LIU L, ZHANG Y, XING D C, *et al.* Experimental study on critical heat flux of rectangular channel under condition of single plate heater[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, **37**(S2): 116-121.
- [29] BUYEVICH Y A, NATLUKHA I A. Self-oscillating regimes of nucleate transition and film boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, **39**: 2363-2373.
- [30] BRUTIN D, TOPIN F, TADRIST L. Experimental study of unsteady convective boiling in heated minichannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, **46**: 2957-2965.