

# 自然循环流动不稳定条件下的 传热特性实验研究

王 强, 高璞珍\*, 谭思超, 王忠乙, 陈先兵, 黄 莹

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为探究流动不稳定性机理,在低压自然循环系统中开展了一系列相关实验,分析了不同流量振荡模式下自然循环的沸腾传热机制及局部传热特性。实验表明:中、低热流密度下出现的较规则的周期性振荡由加热段内流动沸腾诱发,壁面过热度不会随流量振荡而大幅度变化;高热流密度下自然循环系统出现的周期性不规则振荡现象中,流动沸腾类型间的相互转变不是流量波动的唯一原因。大幅度的流量脉动可能在高热流密度下导致沸腾临界的发生,出口壁面出现间歇性干涸,局部传热系数下降的同时伴随壁温的短暂飞跃。随着热流密度的提高,自然循环系统可能出现持续性干涸。

**关键词:**自然循环;流动不稳定性;流动沸腾;干涸;沸腾临界

中图分类号:TL33 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2019)04-0632-09

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0464

## Experimental Study on Heat Transfer Characteristic for Natural Circulation Flow Instability

WANG Qiang, GAO Puzhen\*, TAN Sichao, WANG Zhongyi,  
CHEN Xianbing, HUANG Ying

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,  
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A series of natural circulation experiments were carried out in order to explore the flow instability mechanism. The flow boiling mechanism and local heat transfer characteristics were analyzed for different natural circulation oscillation modes. The experimental results show that the periodic and regular oscillation is induced by flow boiling under low and/or medium heat flux. Meanwhile, the wall superheat varies within a small range when flow rate oscillates. Under high heat flux conditions, an irregular but periodic oscillation is observed in the experiment. The transition of different boiling regimes is not the unique reason for this oscillatory circulation mode. Large amplitude oscillation is likely to trigger transient critical boiling. Periodic dryout occurs near the

收稿日期:2018-06-21;修回日期:2018-07-13

作者简介:王 强(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,核科学与技术专业

\* 通信作者:高璞珍, E-mail: gaopuzhen@sina.com

网络出版时间:2018-09-04;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180903.1116.002.html>

outlet and gives rise to the decrease of local heat transfer coefficient and the fly-up of wall temperature. With the increase of heat flux, continuous dryout might take place in natural circulation system.

**Key words:** natural circulation; flow instability; flow boiling; dryout; critical boiling

在核电厂设计过程中,为提高反应堆的固有安全性,增强其对各事故工况的承受能力,非能动原理受到了越来越高的重视。自然循环作为一种重要的非能动手段,在核电站事故工况的应对方面扮演了十分重要的角色。然而,流动不稳定性的发生,却严重制约了自然循环原理的应用<sup>[1-3]</sup>。

自然循环流动不稳定性发生后,流体与热构件之间的传热特性往往十分复杂。对于某些极端工况,如流体滞止、倒流等,加热构件表面会出现瞬时干涸,甚至持续地处于缺液状态<sup>[4]</sup>。这种沸腾临界的发生会伴随着局部传热系数的骤降,严重时会导致壁面烧毁,进而破坏反应堆包壳等结构的完整性,导致放射性物质的泄漏等严重事故。因此,针对自然循环流动不稳定性发生期间,沸腾传热过程及传热系数变化规律的研究十分必要。Zhao等<sup>[5]</sup>和Okawa等<sup>[6]</sup>研究了流量正弦波动条件下,宏观通道内发生的瞬态沸腾临界和液膜蒸干问题。结果表明,周期性的流量波动在高温流下会出现局部干涸与再润湿现象,导致临界热流密度 $q_{CHF}$ 降低。Barber等<sup>[7]</sup>和Lee等<sup>[8]</sup>的研究则表明,微通道内流动沸腾的传热机制与宏观通道的存在差异,更易发生流动不稳定性。

国内外学者对流量振荡条件下传热特性的研究,多数集中在强迫循环条件下,而自然循环下的研究仍不完善。本文着重讨论在自然循环系统中,流量发生自持的周期性振荡后沸腾传热特性的变化规律,并通过对实验结果的深入分析,结合流动不稳定性类型、参数特征,总结沸腾传热系数(瞬时值和时均值)在不同模式下的变化规律,以揭示自然循环两相流动不稳定性的机理。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

实验回路如图1所示,主回路由电加热实验段、绝热上升段、管壳式冷却器、循环泵、变频

器、稳压器、预热器、测量仪表等组成。流体在预热器中被加热至设定温度后,进入实验段继续加热至沸腾,两相流体经过绝热上升段后在冷却器内被二次侧流体冷凝,然后经过下降段、水平管段流回预热器入口完成整个循环。在进行自然循环相关实验时,循环泵被隔离。

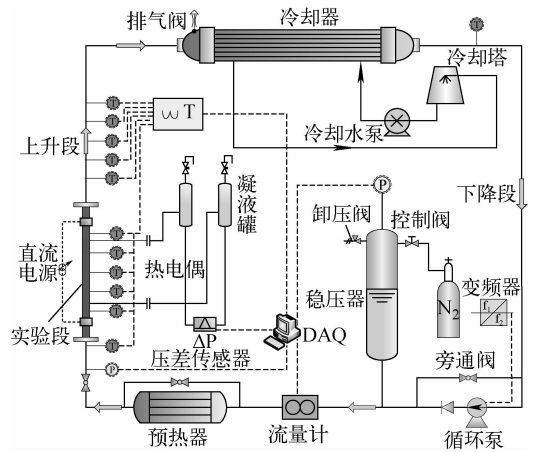


图1 自然循环实验回路示意图

Fig. 1 Schematic of natural circulation experimental apparatus

实验段采用 $\phi 16\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 圆形通道,有效加热长度 $L_h$ 为1.6 m。利用高频直流电源对实验段加热,通过固定在实验段两端的铜制电极将电流加载于实验段上。实验段上下法兰处利用聚四氟乙烯与回路其他部分绝缘,实验段外侧缠绕硅酸铝纤维绳、保温棉等材料进行保温,以降低对环境的散热。实验段外壁面布置有21根N型热电偶测量外壁温 $T_{wo}$ ,在实验段进、出口,上升段,冷却器出口等位置处,设有若干等级为I级的铠装热电偶监测水温(图1)。另外,在实验段不同位置开有测压孔,经过凝液罐后将压差信号传递到压差传感器( $\pm 0.1\%$ )。关于实验段热电偶具体的布置方式以及压降测量方式,详见王强等<sup>[2]</sup>和Chen等<sup>[9]</sup>的研究。

本文的实验条件为:系统压力 $p_{sys}$ , 0.2 ~

0.5 MPa; 实验段入口过冷度  $\Delta T_{\text{sub.in}}$ , 35~65 °C; 入口质量流速  $G_{\text{in}}$ , -621.7~1 480.8 kg/(m<sup>2</sup>·s); 加热段热流密度  $q$ , 28.4~369.6 kW/m<sup>2</sup>.

## 1.2 数据处理

实验段热流密度  $q$  可利用式(1)计算:

$$q = \frac{\eta UI}{\pi d_i L_h} \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为实验段的加热效率, 其值由稳态热平衡实验获得;  $U$  为实验段两端电压,  $V$ ;  $I$  为实验段电流,  $A$ ;  $d_i$  为实验段内径,  $m$ ;  $L_h$  为实验段有效加热长度,  $m$ .

根据柱坐标下的稳态导热微分方程, 结合实验中外壁面处的两类边界条件, 可计算实验段的内壁温  $T_{\text{wi}}$  (°C)。导热方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \lambda r \frac{dt}{dr} \right) + q_v = 0 \quad (2)$$

边界条件为:

$$r = \frac{1}{2} d_o, t = T_{\text{wo}}$$

$$r = \frac{1}{2} d_o, -\lambda \frac{dt}{dr} = 0 \quad (3)$$

内壁温  $T_{\text{wi}}$  为:

$$T_{\text{wi}} = T_{\text{wo}} - \frac{q_v}{16\lambda} \left[ d_o^2 \ln \frac{d_o}{d_i} - (d_o^2 - d_i^2) \right] \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为导热率,  $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $q_v$  为体积释热率,  $W/m^3$ ;  $d_o$  为实验段外径,  $m$ ;  $T_{\text{wo}}$  为外壁温,  $^\circ\text{C}$ ;  $r$  为圆柱坐标下管壁的径向位置,  $m$ .

实验中采用薄壁不锈钢管作为实验段(厚度  $\delta=1$  mm), 管壁的导热热阻远小于表面对流传热热阻。因此, 忽略实验段内、外壁面间温度变化的相位差, 实验段内局部传热系数  $h_j$  ( $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ) 为:

$$h_j = \frac{q}{T_{\text{wi}} - T_f} \quad (5)$$

式中:  $j$  为热电偶测点序号;  $T_f$  为当地流体温度,  $^\circ\text{C}$ 。流动不稳定性发生期间, 局部传热系数也随壁温、流量等参数的变化而发生周期性振荡。因此, 局部传热系数时均值  $\bar{h}_j$  由式(6)计算得到:

$$\bar{h}_j = \frac{1}{T} \int_0^T h_j dt \quad (6)$$

式中,  $T$  为流量自持振荡期间有效数据的采样时间,  $s$ 。

## 1.3 不确定性分析

本实验中涉及到的参数可分为直接测量值

与间接测量值两类。对于直接测量值, 如温度、流量、压力等, 其不确定度  $\sigma_i$  使用 B 类不确定度的评价方法。而对于间接测量值, 如热流密度  $q$ 、传热系数  $h$  等, 则首先根据其物理意义建立相应的数学模型, 并以误差传递公式求出这些参数的相对不确定度<sup>[10]</sup>。据此, 自然循环实验中各参数的不确定度分析结果列于表 1。

表 1 自然循环实验参数的相对不确定度

Table 1 Relative uncertainty of natural circulation experimental parameter

参数	相对不确定度/%
质量流速	0.43
系统压力	0.22
水温	0.46
壁面温度	0.41
热流密度	0.55
传热系数	1.24

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 流动不稳定性模式

实验中保持加热段入口过冷度  $\Delta T_{\text{sub.in}}$  不变, 步进增加加热功率, 即实验段热流密度  $q$ 。在低压(0.2~0.5 MPa)自然循环实验中, 主要观察到两种典型的周期性振荡模式, 如图 2 所示, 随热流密度的增加, 自然循环平均流量逐渐增大, 系统由稳态首先发展为沸腾诱发的流动不稳定性。随加热段热流密度的继续增加, 系统进入复合型流动不稳定性状态。图中以误差棒

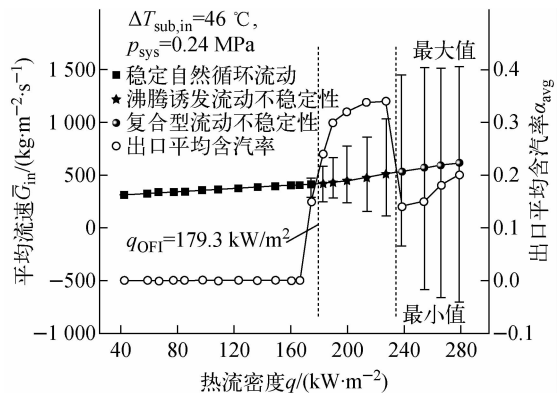


图 2 不同热流密度下自然循环流动模式

Fig. 2 Natural circulation modes under different heat fluxes

的方式描述流量振荡的最大值与最小值,工况中 OFI(流动不稳定性起始点)对应的热流密度为  $179.3 \text{ kW/m}^2$ 。

在中等热流密度下发生的自然循环流动不稳定性,随热流密度的增加,流量振荡幅值会逐渐变大。然而,高热流密度下出现的复合型流动不稳定性,流量振荡的幅值随热流密度的增加变化并不显著。随着自然循环流动模式的转变,实验段出口的平均含汽率( $\alpha_{\text{avg}}$ )有较大变化。由于高热流密度下流量大幅度振荡,实验段出口在较长时间内都为单相,所以出口含汽率的平均值低于中、低热流密度的工况。另外,在高热流密度下,实验段内流体会反向流动,流量的大幅度振荡使实验段内存在多种传热模式的交替。可见,可通过出口平均含汽率的突降点以及流量振荡相对值( $\Delta G/G_{\text{avg}}$ )的转折点,来界定中、低热流密度与高热流密度这两种流动不稳定性模式。

### 2.2 沸腾流动不稳定性

在中、低热流密度条件下,自然循环系统首先出现由沸腾诱发的流动不稳定性,如图 3 所示。自然循环流量振荡较为规则,类似于正弦

曲线。由于实验段有效加热段的两端固定有铜制电极,考虑到电极与实验段间的导热及蓄热作用,故分别选取  $x/L_h=0.2, 0.9$ ( $x$  为测点与入口的距离, m) 处的温度测量值作为进、出口壁温进行分析。流动不稳定期间,实验段出口位置的壁面过热度  $\Delta T_{w,\text{out}}$  及中间位置的壁面过热度  $\Delta T_{w,\text{middle}}$  基本不变,而入口位置的壁面过热度  $\Delta T_{w,\text{in}}$  波动较大。水温呈现另一种情况,在整个热管段(实验段+上升段)的进、出口水温不随流量而改变,且上升段出口水温为当地压力下的饱和温度,而加热段出口水温在饱和温度附近发生周期性振荡。

从上述实验结果可知,实验段内存在持续的流动沸腾现象,出口附近过冷沸腾与饱和沸腾交替发生,所以出口的壁面过热度  $\Delta T_{w,\text{out}}$  基本不变。在实验段中下部分,由于两相交界面的上下移动,壁面与流体的局部传热特性在单相对流传热与过冷沸腾传热之间切换,因而壁面过热度变化更明显。此外,实验段出口处产生的气泡经历长大、冷凝、输运等过程,使得实验段入口压力小幅度波动。入口压力  $p_{\text{in}}$  实际上为高频与低频脉动的叠加,既具有与流

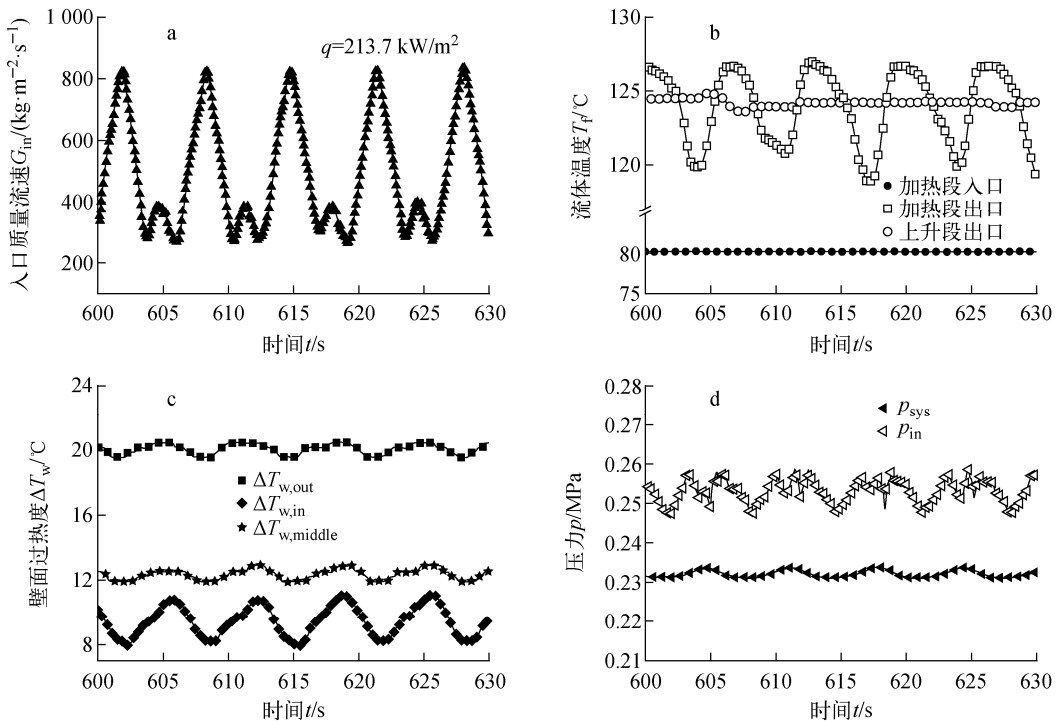


图 3 沸腾流动不稳定性实验结果

Fig. 3 Experimental result of boiling induced flow instability

量相似的振荡周期,又伴随有小幅度的高频波动。杨瑞昌等<sup>[3,11]</sup>研究了自然循环系统在过冷沸腾作用下出现的密度波不稳定性,从流量及压力的脉动频率区分了两种不稳定性模式。据此,本实验得到的这种流动不稳定性可认为是两种沸腾过程的叠加。

本实验中尽管流量振荡曲线较为规则,但实际上这种自然循环流动不稳定性由多个因素共同支配。结合上述实验结果可知,这种中、低热流密度下出现的不稳定性由沸腾诱发,并伴随有间歇喷泉与闪蒸现象。实验段中由于沸腾而产生的气泡涌入上升段后,会有一部分被冷凝,同时加热上升段内流体,使其温度接近当地压力下的饱和温度并保持不变(图3b),为闪蒸的发生提供了条件。两相流体进入上升段后发生的喷发、冷凝、再填充现象,使有效驱动压头周期性变化,从而导致自然循环流量波动<sup>[12-14]</sup>。而这种间歇泉的程度由实验段出口流体的状态决定,可见,这种流动不稳定性受加热段内的传热特性所支配。

### 2.3 复合型流动不稳定性

在高热流密度条件下,实验观察到另一种自然循环的流量振荡模式,如图4所示,相比中、

低热流密度的实验结果,流量振荡曲线并不规则,但具有明显的周期性。流动不稳定性诱发沸腾临界,出口壁面可能间歇性干涸,壁温短暂飞跃。随着瞬时流量的增加,管壁被重新润湿,传热系数变大,因而壁温回落。Kyung等<sup>[15]</sup>在开式自然循环回路中观察到这种类型的流动不稳定性,并通过频谱分析等手段将其归结为一种由两种振荡模式(PC(A)和PC(B))叠加而形成的复合型流动不稳定性。

加热段流量在振荡期间可能会滞止,甚至倒流(图4a)。在壁面高热流密度的作用下,可能导致壁面蒸干,局部传热系数骤降,壁温飞升(图4b)。Ozawa等<sup>[16]</sup>指出,低压低流量条件( $p_{\text{sys}}=0.1\text{ MPa}$ ,  $\bar{G}_{\text{in}}=100\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )下,在流动不稳定所引起的沸腾临界工况中, $q_{\text{CHF}}$ 可降低90%以上。对这种极端工况下局部传热特性的研究,在安全分析中尤为重要。由于自然循环流量大幅度振荡( $\Delta G/G_{\text{avg}}>3.0$ ),瞬时的高流量会使大量过冷流体涌入上升段,因而上升段水温会因流体的混合而降低(图4c)。但由于上升段较长,水装量远大于实验段,这种混合而导致的温度降低在其出口处的作用较弱。另外,如图4d所示,稳压器压力、实验段入

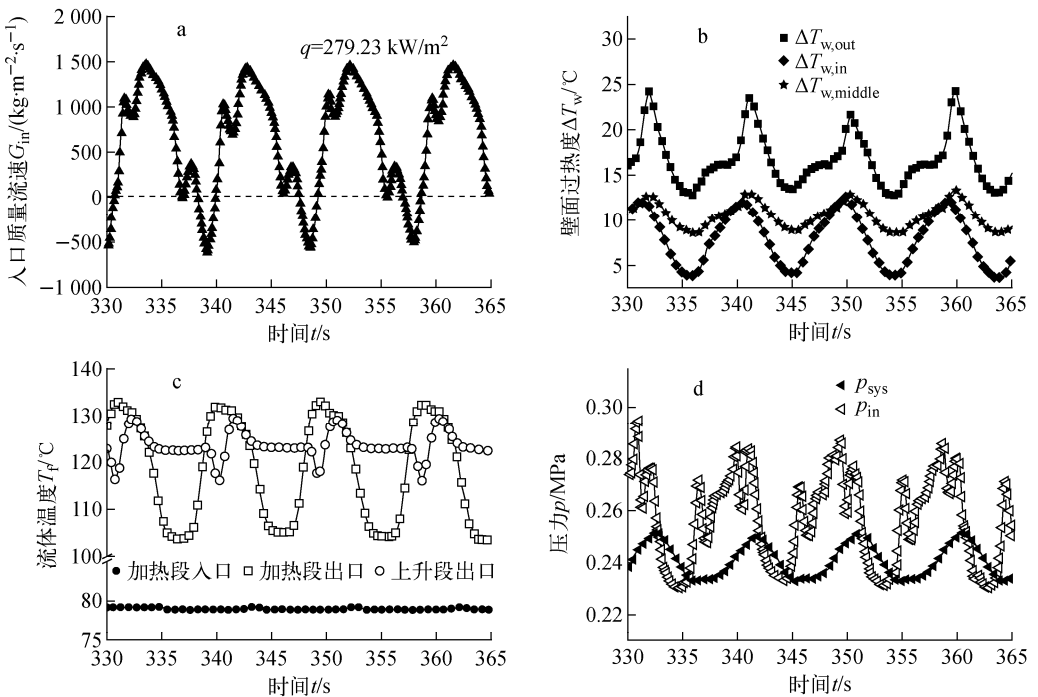


图4 复合型流动不稳定性实验结果

Fig. 4 Experimental result of compound dynamic flow instability

口压力在振荡期间也发生周期性波动且幅值较大。这说明,部分工质从稳压器波动管流入/流出主回路,而稳压器的这种卸压过程对自然循环回路流量的影响已不能忽视<sup>[17]</sup>。可见,实验段内发生的流动沸腾是流量周期性不规则振荡的必要不充分条件。

### 3 流量不稳定期间传热特性分析

周期性流量波动条件下,加热通道内沸腾传热机制也会相应改变,在自然循环系统中该问题更为复杂。在自然循环回路中,流量振荡首先使得实验段内截面含汽率波动,从而导致两相流体的平均密度改变。由于自然循环驱动压头由冷、热段流体的密度差决定,所以驱动压头反过来影响系统流量。因此,对于自然循环

系统中出现的沸腾流动不稳定性,自然循环流量的自持振荡既是沸腾发生的条件,也是沸腾与其他因素耦合后的结果。

沸腾通道内流量的脉动往往伴随着两相流型的变迁,这意味着相间动量传递模式和传热模式的变化。对于系统暂态过程流型的判别,通常利用 Mishima 等<sup>[18]</sup>提出的流型过渡准则。由于某些过渡区的判据以表观速度  $J$  为依据,所以本文结合各阶段流型及本实验流道型式尺寸( $\phi 16 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  圆管),推出以含汽率  $\alpha$  为自变量的流型过渡判据(表 2)。在流量不稳定期间,尽管加热通道内的流型往往是不充分发展的,但传热特性与之密切相关,所以本文借此说明流量振荡期间加热段内的传热分区。

表 2 流型过渡判据

Table 2 Flow regime transition criteria of selected model

流型	判据
泡状流-弹状流	$\alpha_{\max} = 0.3$
弹状流-搅混流	$\alpha_{\max} = 1 - 0.813 \left( \frac{(C_0 - 1)J + 0.35 \sqrt{\Delta \rho g d_i / \rho_l}}{J + 0.75 \sqrt{3 \Delta \rho g d_i / \rho_l}} \right)^{0.75}, C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$
搅混流-环状流	$\alpha_{\max} = 0.11 + \left( \frac{\sigma}{\Delta \rho g D^2} \right)^{0.25} N_{\mu l}^{-0.2}, N_{\mu l} = \frac{\mu_l}{(\rho_l \sigma \sqrt{\sigma / g \Delta \rho})^{0.5}}$

图 5 为实验段出口的壁面过热度  $\Delta T_{w,out}$ 、传热系数  $h_{out}$  及出口含汽率  $\alpha_{out}$  在流量振荡下随时间的变化曲线。对于中、低热流密度下出

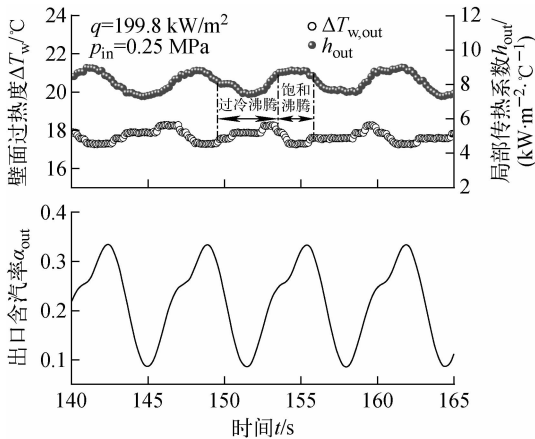


图 5 沸腾流动不稳定性传热特性  
Fig. 5 Heat transfer characteristic of boiling induced flow instability

现的沸腾流动不稳定性,由于流量振荡幅值较小( $\Delta G/G_{avg} = 0.8 \sim 2.0$ ),实验段出口处于过冷沸腾与饱和沸腾交替的状态。一般认为,当气泡间碰撞聚结的频率达到一定值后,紊流应力的作用大于浮力,会发生从泡状流到弹状流的过渡。Mishima 等<sup>[18]</sup>认为当含汽率大于 0.3 时,基本上过渡到了弹状流。据此可认为在中、低热流密度下的流量脉动期间,流型为泡状流和弹状流(图 2、5)。局部传热系数虽具有明显的周期性,但变化幅度较小。过冷沸腾阶段,气泡弥散于近壁处,气泡沿壁面边滑移边增长,并随汽化核心的增多而脱离壁面进入主流区。局部传热靠单相对流和气泡沸腾两种作用,靠近壁面的液体边界层温度和壁面温度随热量的持续输入而逐渐升高,但传热系数下降。饱和沸腾阶段,壁面与流体传热主要为泡核沸腾。随着截面含汽率的增加,两相自然循环流量不断提高,壁面过热度略有下降。

当自然循环系统进入高热流密度下的复合型流动不稳定状态后,加热段内传热特性变化更为显著。这种不规则的自持振荡,是流动沸腾、上游可压缩容积、上升段水装量等多个因素共同耦合的结果。本文仅以这种周期性的流量作为条件,分析在流量振荡条件下局部传热特性的变化规律。

复合型流动不稳定性传热特性如图6所示,流量脉动期间( $\Delta G/G_{\text{avg}} = 3.0 \sim 3.7$ ),实验段出口依次经历单相对流传热、核态沸腾、液膜对流沸腾、湿蒸汽传热等传热类型。结合图4a中流量的变化规律可知,自然循环系统中产生的瞬时高流量带动大量过冷液体进入加热段,管内首先进入单相对流传热区(阶段I)。在第II阶段内,由于实验段平均流量极低,出口含汽率迅速增加,使流体由泡状流迅速过渡为环状流,期间部分流型未充分发展。流体从核态沸腾进入液膜强制对流蒸发区后,传热系数迅速增加,液膜随蒸发而不断变薄,但壁面过热度 $\Delta T_w$ 基本不变。虽然实验段内蒸发导致流体平均密度降低,即驱动压头提高,但由于流体惯性的作用,自然循环流量并不会及时响应。因此,入口流量相对于实验段驱动力存在时间滞后,流动进入短暂的缺液区(阶段III)。湿蒸汽代替液膜层与壁面直接接触,传热系数陡降,壁面过热度显著升高。但由于自然循环流量已开始上升,这种瞬时的沸腾临界并未持续太久。在第IV阶段,壁面被再次润湿,传热进入泡核沸

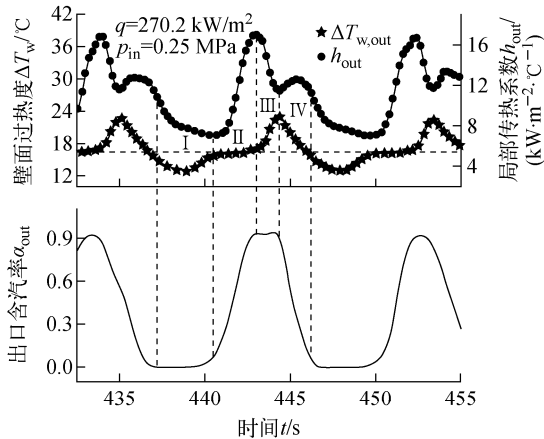


图6 复合型流动不稳定性传热特性  
Fig. 6 Heat transfer characteristic of compound dynamic flow instability

腾区。

密度波型脉动(DWO)是自然循环系统中最常出现的动态流动不稳定性,其主要形成原因在于流体密度周期性变化<sup>[1]</sup>。DWO发生在N型曲线的正斜率区,可近似通过振荡周期与输运时间的倍数关系进行判定(约为输运时间的1~2倍)。压力降型脉动(PDO)也常出现于工质具备压缩空间的两相系统中。而从上述传热特性的分析中不难看出,复合型流动不稳定性加热段出口处于单相、两相交替的状态,即该类流动不稳定性并不局限在DWO-I或DWO-II,自然循环驱动压头受到流体密度波动的影响十分显著。另外,从图4d中压力变化的相对幅值可知,主回路与稳压器之间存在PDO的工质交换。可见,这种复合型流动不稳定性由密度波流动不稳定性支配,同时受到加热段上游波动箱(即稳压器)的联合作用<sup>[2]</sup>。

自然循环在不同流动模式下,加热段内局部传热特性差异较大。不同热流密度下局部传热系数的瞬时值和平均值如图7所示。在单相稳态自然循环下,传热系数随热流密度近似呈线性增加。进入两相流动后,系统在较窄的热流工况内维持稳定流动,传热系数远高于单相对流传热。

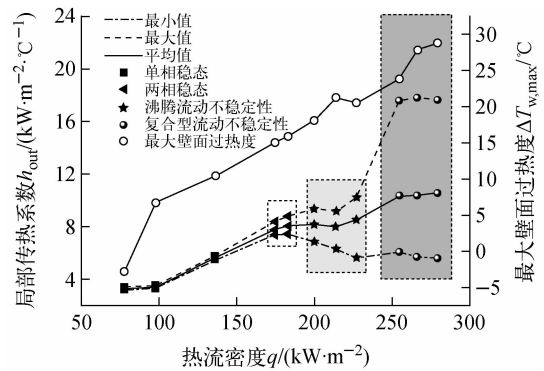


图7 自然循环流动不稳定性下的局部传热系数  
Fig. 7 Local heat transfer coefficient under natural circulation flow instability

在沸腾诱发的流动不稳定性中,局部传热系数的平均值与两相稳态工况基本相同,但振荡幅值会随热流密度的增加而增大。自然循环进入复合型流动不稳定后,传热系数的平均值及脉动幅值随热流密度的增加并无显著变化,

但最大壁面过热度  $\Delta T_{w,\max}$  持续变大。结合图 6 中瞬时值的变化规律可知,传热系数的最大值对应液膜强制对流蒸发区与缺液区的交界点,而其最小值却并不对应沸腾临界后传热系数的最小值。这是因为在流量波动条件下,入口流量的迅速补充使壁面重新润湿,沸腾临界现象消失而回到泡核沸腾。尽管这种周期性干涸导致的壁温上升幅度低于持续性干涸,且局部传热系数较大,但随着热流密度的增加,自然循环可能长时间处于低流量状态,管壁上的干涸点无法及时被液膜重新润湿时,壁面可能因发生持续干涸而烧毁,危及系统的安全性。

随热流密度的增加,平均传热系数持续变高,但壁面仍可能因为短时间处于缺液区而干涸,甚至烧毁。这种瞬态沸腾临界在流量脉动条件下,由于过冷流体的润湿作用,并不会导致壁温大幅度飞升,但仍会对热构件造成极大的热冲击。相对于流量稳定条件下发生的持续性沸腾临界,复合型流动不稳定性导致间歇性干涸的热流密度较低,即自然循环出现的复合型流动不稳定性会使沸腾临界提前发生,在自然循环系统的设计中应予以充分考虑。

## 4 结论

在实验系统压强  $p_{\text{sys}}$  为 0.2~0.5 MPa、入口质量流速  $G_{\text{in}}$  为  $-621.7 \sim 1\,480.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、入口过冷度  $\Delta T_{\text{sub,in}}$  为  $35 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$  的实验工况下,进行了一系列自然循环实验,得出以下结论。

1) 中、低热流密度下,自然循环进入由流动沸腾诱发的流动不稳定性,并伴随有间歇喷泉与闪蒸现象。高热流密度下,自然循环流量发生周期性的不规则振荡,实验段内发生的沸腾是发生这种复合型不稳定性的必要不充分条件。

2) 沸腾流动不稳定期间,自然循环局部传热系数的时均值不随热流密度的增加而变大。复合型流动不稳定性中,局部传热系数会因出现瞬时的液膜蒸干而迅速下降。

3) 复合型流动不稳定性的平均传热系数高于两相稳定自然循环,流量的大幅度振荡诱发间歇性干涸。随着热流密度的提高,传热过程可能由间歇性干涸转变为持续性干涸的沸腾

临界形式。

4) 在自然循环系统设计中,应充分考虑流动不稳定引起的间歇性沸腾临界,避免热构件受到持续的热冲击及可能因为长时间缺液而发生持续性干涸。

## 参考文献:

- [1] 徐济璽,鲁钟琪. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京:原子能出版社,2001:183-188.
- [2] 王强,高璞珍,王忠乙,等. 低压高过冷度下自然循环流动不稳定性实验研究[J]. 原子能科学技术,2018,52(5):822-828.  
WANG Qiang, GAO Puzhen, WANG Zhongyi, et al. Experimental investigation on flow instability under low pressure and high subcooling natural circulation conditions[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(5): 822-828(in Chinese).
- [3] 杨瑞昌,王彦武,王飞,等. 自然循环过冷沸腾流动不稳定性实验研究[J]. 核动力工程,2005,26(4):317-322.  
YANG Ruichang, WANG Yanwu, WANG Fei, et al. An experimental investigation on flow instability under natural circulation under subcooled conditions[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(4): 317-322(in Chinese).
- [4] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004:69-70.
- [5] ZHAO D W, SU G H, LIANG Z H, et al. Experimental research on transient critical heat flux in vertical tube under oscillatory flow condition [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37: 1 235-1 244.
- [6] OKAWA T, GOTO T, MINAMITANI J, et al. Liquid film dryout in a boiling channel under flow oscillation conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 3 665-3 675.
- [7] BARBER J, SEFIANE K, BRUTIN D, et al. Hydrodynamics and heat transfer during flow boiling instabilities in a single microchannel[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 1 299-1 308.
- [8] LEE S, DEVAHDHANUSH V S, MUDAWAR I. Investigation of subcooled and saturated boiling heat transfer mechanisms, instabilities, and

- transient flow regime maps for large length-to-diameter ratio micro-channel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 123: 172-191.
- [9] CHEN Xianbing, GAO Puzhen, TAN Sichao, et al. An experimental investigation of flow boiling instability in a natural circulation loop[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117: 1 125-1 134.
- [10] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3-17.
- [11] 杨瑞昌, 唐虹, 王彦武. 自然循环过冷沸腾流动不稳定性的研究[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(3): 435-438.  
YANG Ruichang, TANG Hong, WANG Yanwu. Study on flow instability in a natural circulation system with subcooled boiling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(3): 435-438(in Chinese).
- [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: 1 557-1 569.
- [13] ARITOMI M, CHIANG J H, MORI M. Geysing in parallel boiling channels[J]. *Nuclear Engineering Design*, 1993, 141: 111-121.
- [14] MARCEL C P, ROHDE M, van der HAGEN T H J J. Experimental and numerical investigations on flashing-induced instabilities in a single channel[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33: 1 197-1 208.
- [15] KYUNG I S, LEE S Y. Periodic flow excursion in an open two-phase natural circulation loop[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1996, 162: 233-244.
- [16] OZAWA M, UMEKAWA H, UOSHIOKA Y, et al. Dryout under oscillatory flow condition in vertical and horizontal tubes-experiments at low velocity and pressure conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36: 4 076-4 078.
- [17] 彭传新, 陈炳德, 卓文彬, 等. 两相自然循环系统压降震荡流动不稳定性起始点研究[J]. *核动力工程*, 2017, 38(2): 32-37.  
PENG Chuanxin, CHEN Bingde, ZHUO Wenbin, 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(in Chinese).
- [18] MISHIMA K, ISHII M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, 27: 723-737.