

# 热工水力参数对矩形双通道管间脉动的影响

李虹波, 黄彦平, 卢冬华, 王艳林

(中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:**在中国核动力研究设计院热工试验回路上进行了矩形双通道管间脉动试验。通过对各种热工水力参数的试验研究, 得出以下结论: 随着进口过冷度增加, 界限热流密度增大, 脉动振幅增大, 脉动周期变长, 进口过冷度对界限含汽率的影响表现出一定程度的非单值性; 随着进口质量流速增大, 界限热流密度增加, 界限含汽率减小, 脉动振幅增大, 脉动周期变短; 随着系统压力升高, 界限热流密度和界限含汽率增加, 脉动振幅减小, 系统压力对脉动周期的影响表现出一定程度的非单值性; 根据进口过冷度数  $N_{\text{sub}}$  和相变数  $N_{\text{pch}}$  绘制出的脉动界限图, 拟合出判断管间脉动界限的准则关系式  $N_{\text{pch}} = 3.1419 N_{\text{sub}} + 10.014$ 。

**关键词:** 矩形双通道; 管间脉动; 流动不稳定性; 热工水力

**中图分类号:** TL33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0129-07

## Effects of Thermohydraulic Parameters on Flow Oscillation in Double Narrow Rectangular Channels

LI Hong-bo, HUANG Yan-ping, LU Dong-hua, WANG Yan-lin

(National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation,  
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Flow instability in parallel rectangular channels is one of the important factors to affect the operating safety of the flat-plate-type fuel assembly cores. The experiment of flow oscillations in double narrow rectangular channels was carried out in the thermohydraulic loop in Nuclear Power Institute of China. The results of experimental research of thermohydraulic parameters on characteristics of flow oscillation in double narrow rectangular channels show that: with the increasing of inlet subcooling, the limit heat flux, amplitude and period of oscillation are increased; nonlinear effects of inlet subcooling on limit quality of oscillation are revealed experimentally; with the increasing of inlet flow velocity, the limit heat flux and amplitude of oscillation are increased; the critical quality and period of oscillation are reduced; with the increasing of system pressure, the limit heat flux and critical quality of oscillation are increased, the amplitude of oscillation is reduced; nonlinear effects of system pressure on period of oscillation are revealed experimentally. Based on the stability boundary map obtained by using  $N_{\text{sub}}$  and  $N_{\text{pch}}$ , an

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-24

作者简介: 李虹波(1980—), 男, 重庆人, 博士研究生, 研究实习员, 反应堆热工水力及两相流动与传热专业

experimental correlation of stability boundary in double narrow rectangular channels was obtained to be,  $N_{pch} = 3.1419N_{sub} + 10.014$ .

**Key words:** double narrow rectangular channels; oscillation in double channels; flow instabilities; thermohydraulics

两相流不稳定性是一种热工水力参数的非周期性漂移或周期性振荡现象,是汽液两相流研究领域中的一个重要研究方向。两相流不稳定现象会造成受热面热流密度分配不均、传热恶化、机械疲劳及热疲劳损坏等,严重时还会导致受热面烧毁,直至威胁整个反应堆系统的安全运行。随着社会对核反应堆安全性及经济性要求的日益提高,弄清反应堆堆芯中存在的两相流不稳定性规律,进而提出相应的解决措施,对优化反应堆设计及安全运行具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

有关管间脉动已有的研究主要针对圆管,且试验装置差异较大,试验参数范围有一定的局限性。近年来,虽然进行了一些针对矩形通道的试验研究,但矩形通道的形状差异很大,研究内容较窄,参数范围较小,而且,对于矩形双通道管间脉动的研究难以见诸文献。本工作利用矩形双通道管间脉动试验本体,针对这一问题进行研究。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置简介

试验回路流程如图1所示。试验回路包括电加热与冷却系统、试验段、质量流速调节系统、测量与数据采集系统等几个部分。为使试验段进口总质量流速尽可能稳定,利用质量流速调节阀使主泵出口与试验段总管进口始终保持1 MPa左右的节流压降。为保证试验水质,在试验段总管文丘里流量计进口加装了200目滤网。

试验段由两个并联的0Cr18Ni10Ti不锈钢垂直矩形通道组成,其周围套有1层云母玻璃,通过外部的承压壳来承受通道传来的压力。矩形通道两端用0Cr18Ni10Ti不锈钢端盖与圆管连接,其结构如图2所示。每个矩形通道的加热段长度为1 000 mm,间距为610 mm,用上下两个0Cr18Ni10Ti不锈钢三通连接,上下三通间距为1 357 mm。整个管路用硅酸铝陶

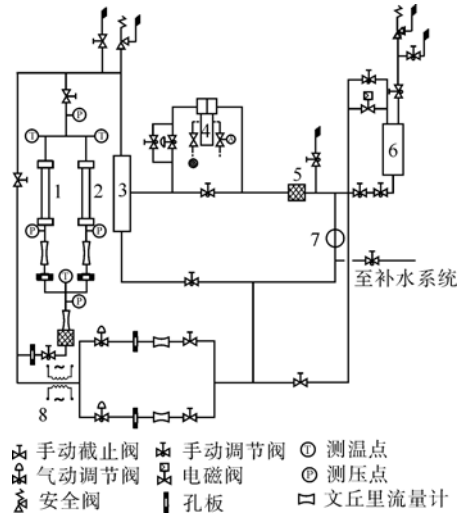


图1 试验回路流程图

Fig. 1 Flow chart of experimental loop

- 1, 2——试验本体; 3——混合冷凝器; 4——热交换器;  
5——过滤器; 6——电加热稳定器;  
7——主循环器; 8——预热器

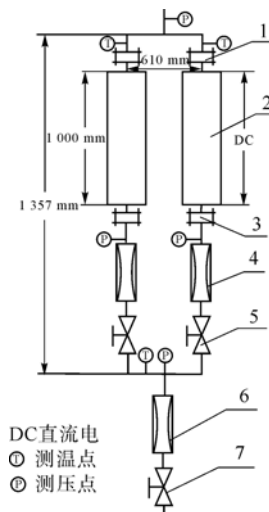


图2 试验本体示意图

Fig. 2 Sketch of test section

- 1——上绝缘; 2——矩形通道; 3——下绝缘;  
4——支路流量计; 5——支路节流阀;  
6——总流量计; 7——总节流阀 DC 直流电

瓷纤维绝热保温。

试验中用交流电对预热段进行加热,用低

电压大电流直流电直接对试验段进行加热。流经试验段的质量流速用文丘里流量计配 MB26C 高速差压传感器<sup>[4]</sup>测量。试验段总进出口和各分管进口均装有取压嘴,与 ST3000 智能式压力(或压差)变送器连接来测量压力(或压降)。总管进出口和各分管出口流体温度用  $\phi 1$  mm 铠装 N 型热电偶测量。加热段出口附近布置 40 个 K 型热电偶监控临界。

所有稳态信号通过 IMP 数据采集板连接到计算机进行监视和采集。对于管间脉动的关键参数,如质量流速、压降等信号,还需接入 NI 公司的 PCI 动态数据采集系统进行监视和采集,以得到连续的脉动曲线。采集频率设置为 20 Hz。

试验参数范围如下:系统压力,1~10 MPa;质量流速,200~800  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;进口过冷度,20~50  $^{\circ}\text{C}$ ;试验段加热功率,0~77 kW;热流密度,0~837  $\text{kW}/\text{m}^2$ ;加热方式,双面均匀加热;预热段加热功率,0~23 kW。

## 1.2 试验方法

试验从稳定流动开始,逐步调节系统压力、质量流速和进口过冷度至设定值。在进口总管质量流速基本保持稳定的前提下,缓慢提升试验段加热功率,直至发生脉动。试验中主要依靠分管进口质量流速的波动情况来判断管间脉动是否发生。当两分管内的质量流速表现出持续的周期性异相脉动时,就认为系统发生了管间脉动(图 3)。

从图 3 可看出,在脉动起始段左边,虽然两

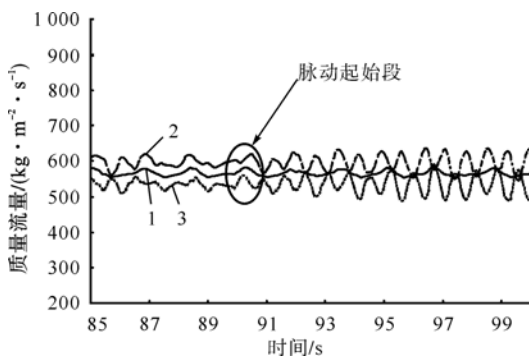


图 3 管间脉动起始段判定示意图

Fig. 3 Sketch of starting section of oscillation in double channels  
1——总管;2——分管 1;3——分管 2

分管质量流速也有一些波动,但尚未形成明显的周期性异相脉动。在脉动起始段右边,两分管质量流速形成了明显的周期性异相脉动,因此,把图中黑圈所示部分作为管间脉动的起始段。

## 2 试验数据的处理及结果分析

用获得的试验数据绘制出脉动曲线。当发生管间脉动后,脉动界限参数将随着热流密度的波动而变化。因此,以管间脉动开始的前十个周期为基准,界限热流密度和界限含汽率取这段时间内的平均值,取这段时间内的振幅平均值作为管间脉动的脉动振幅,脉动周期取这段时间内的周期平均值。其中,界限参数是指使系统发生管间脉动所需的最小参数值。

在分析各系统参数对脉动的影响时,选出所要分析的参数不同而其余几个参数基本相同的工况点,通过试验数据比较得出此参数对发生脉动时的界限热流密度、界限含汽率、脉动振幅及周期的影响关系。

### 2.1 进口过冷度的影响

随着进口过冷度的增加,界限热流密度增大,系统的稳定性增加(图 4a)。在图 4 中, $p_m$  为入口压力, $G$  为质量流速。由图 4a 可见,进口过冷度增加使单相区变长,从而阻力增大,对系统的稳定性有利。圆管平行双通道管间脉动特性的研究结果<sup>[5]</sup>表明,当系统压力为 1 MPa、质量流速为 713~738  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,随着进口过冷度的增加,界限热流密度先减小、后增大。而在本试验中,不论系统压力和质量流速如何变化,界限热流密度随进口过冷度的增加总是单调增大。

进口过冷度对管间脉动的界限含汽率的影响表现出一定程度的非单值性。从图 4b 中可以看出,当系统压力在 1 MPa 左右、质量流速在 230  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右时,界限含汽率随着进口过冷度的增加,先增加、后减小。当进口过冷度较低时,单相加热区很短,从而使进口质量流速扰动传到两相区的延迟时间减小,因而不易形成正反馈,系统比较稳定,即界限含汽率较高。当进口过冷度继续增大时,单相区阻力增加,对稳定有利,同时,进口过冷度增加,单相区变长,从而使进口质量流速扰动到两相区的延

迟时间变长,这容易使得两相区压降的扰动与进口质量流速扰动反相,从而形成正反馈,对稳定性不利,即界限含汽率减小。在针对圆管<sup>[6]</sup>的研究中已得出了相同的研究结果,即随着进口过冷度的增加,界限含汽率先增加、后减小这一非单值性的趋势。在本试验其它参数范围内,随着进口过冷度的增加,界限含汽率总是增加的,从而使得系统的稳定性增加。

随着进口过冷度的增加,脉动振幅增大(图4c)。因为随着进口过冷度的增加,系统稳定性增加,使系统发生管间脉动的界限热流密度大。因此,当热流密度达到界限值后,对系统提供的能量越大,这使得系统在发生管间脉动时的脉动振幅增大。

随着进口过冷度的增加,脉动周期变长(图4d)。在其它条件相同时,随着进口过冷度的增加,单相区长度增加,使汽液两相混合物的密度增加;在相同质量流速条件下,汽液两相的平均流速减小;在一定长度的流道内,流体通过流道的时间将增加,最终导致周期变长。

## 2.2 质量流速的影响

随着质量流速的增加,发生管间脉动的界限热流密度总是增加的,系统的稳定性增加(图5a,其中, $\Delta T_{\text{sub}}$ 为过冷温度差值)。在其它系统参数基本不变的条件下,质量流速的增加相当于增加了单相液区的长度和摩擦压降,起到了抑制质量流速波动的作用,导致产生管间脉动所需的界限热流密度更高。

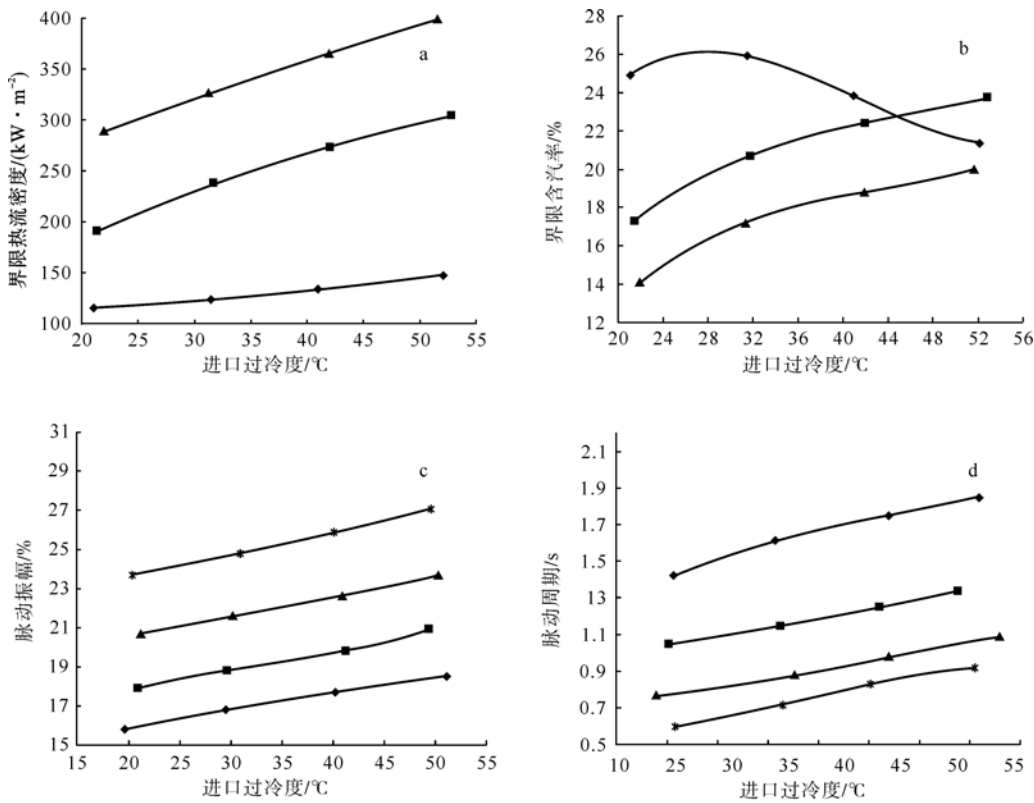


图4 进口过冷度对管间脉动的影响

Fig. 4 Effects of inlet subcooling on flow oscillation

a——对界限热流密度的影响;b——对界限含汽率的影响;c——对脉动振幅的影响;d——对脉动周期的影响

a, b: ◆—— $p_{\text{in}}=1.07 \text{ MPa}$ ,  $G=228 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ■—— $p_{\text{in}}=1.06 \text{ MPa}$ ,  $G=399 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

▲—— $p_{\text{in}}=1.07 \text{ MPa}$ ,  $G=592 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

c: ◆—— $p_{\text{in}}=6.03 \text{ MPa}$ ,  $G=223 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ■—— $p_{\text{in}}=6.04 \text{ MPa}$ ,  $G=396 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

▲—— $p_{\text{in}}=6.05 \text{ MPa}$ ,  $G=597 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; \*—— $p_{\text{in}}=6.01 \text{ MPa}$ ,  $G=789 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

d: ◆—— $p_{\text{in}}=3.02 \text{ MPa}$ ,  $G=236 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; ■—— $p_{\text{in}}=3.05 \text{ MPa}$ ,  $G=400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

▲—— $p_{\text{in}}=3.06 \text{ MPa}$ ,  $G=588 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; \*—— $p_{\text{in}}=3.07 \text{ MPa}$ ,  $G=784 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

随着质量流速的增大,界限含汽率减小(图 5b)。因为随着质量流速的增加,相当于增加了单相液区的长度,而缩短了两相沸腾区的长度,这导致了产生管间脉动时的界限含汽率减小。

从图 5c 中可以看出,在其它条件相同时,随着质量流速增加,脉动振幅增大。这主要是因为,随着质量流速的不断增大,系统的稳定性将随之增加,使系统发生管间脉动的界限热流密度也随之不断增加。当加热热流密度达到界限值而使系统产生管间脉动时,对整个系统提供的能量增多,这使得系统在发生管间脉动时的脉动振幅增大。

在其它条件相同时,随着质量流速增加,脉

动周期变短(图 5d)。这是因为,当进口质量流速增加时,由于界限热流密度总是单调增加,所以,加热段(进口到沸腾起始点)的长度变化并不大。但由相同的热流密度增加而产生汽化的液体份额减少,从而导致两相区的摩擦压降减小,致使流体流过加热段乃至整个试验段的时间缩短(延迟时间缩短),导致了系统在发生管间脉动时的脉动周期将变短。

### 2.3 系统压力的影响

在同样的条件下,压力越高,汽液两相间的密度差越小,并使整个两相区的长度减小,从而使两相区压降扰动强度比低压下的小,且较难形成两相区压降扰动与进口质量流速的扰动反相,即不易于形成正反馈。欲产生管间脉动,

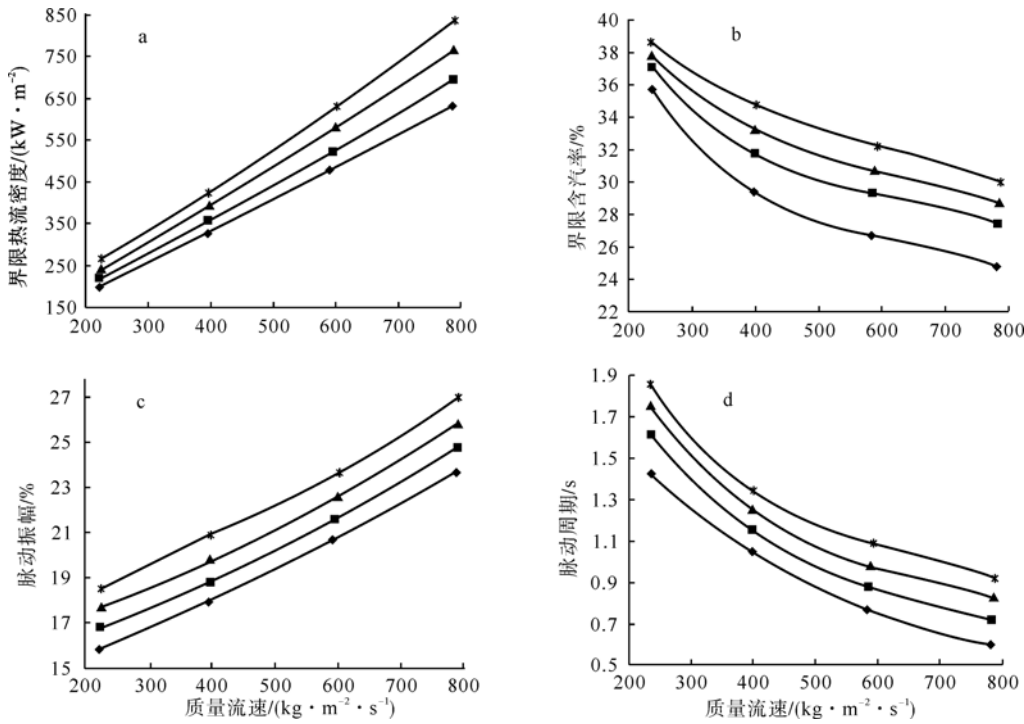


图 5 质量流速对管间脉动的影响

Fig. 5 Effects of mass flow velocity on flow oscillation

a——界限热流密度;b——界限含汽率;c——脉动振幅;d——脉动周期

- a: ◆—— $p_{in}=6.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■—— $p_{in}=6.03 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
▲—— $p_{in}=6.04 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=40.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ; \*—— $p_{in}=6.03 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=50.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- b: ◆—— $p_{in}=3.04 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=19.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■—— $p_{in}=3.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=31.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
▲—— $p_{in}=3.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=41.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ; \*—— $p_{in}=3.06 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=50.8 \text{ }^\circ\text{C}$
- c: ◆—— $p_{in}=6.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■—— $p_{in}=6.03 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
▲—— $p_{in}=6.04 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=40.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ; \*—— $p_{in}=6.03 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=50.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- d: ◆—— $p_{in}=3.04 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=19.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ; ■—— $p_{in}=3.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=31.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
▲—— $p_{in}=3.05 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=41.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ; \*—— $p_{in}=3.06 \text{ MPa}, \Delta T_{sub}=50.8 \text{ }^\circ\text{C}$

则需更高的界限热流密度。因此,随着系统压力的升高,界限热流密度增加(图 6a)。

在本试验参数范围内,随着系统压力升高,界限含汽率单调增加(图 6b)。系统压力越高,产生管间脉动所需的界限热流密度越大,因此,系统的稳定性增加,在产生管间脉动时的界限含汽率也相应增加。

从图 6c 中可以看出,脉动振幅随着系统压力的升高而减小,说明系统压力升高时系统的稳定性增加。在同样的条件下,系统压力升高,汽液两相间的密度差减小,并使整个两相区存在的范围变小,这使得在相同的含汽率条件下增加相同的热流密度所引起的压降扰动小于低压下引起的压降扰动,且较难形成两相区的压降扰动与进口质量流速的扰动反相。因而,发生管间脉动时的脉动振幅减小。

系统压力对脉动周期的影响表现出一定程度的非单值性。随着系统压力的不断升高,脉动周期先变短、后变长(图 6d)。当热流密度不变时,升高系统压力将使通道内的截面含汽率减小,两相流动阻力或压降减小,从而使流体流过通道需要的时间减少,脉动周期变短。当系统压力达到某一值后,随着系统压力的继续升高,系统的稳定性增加将占主导地位,因而,脉动周期变长。

圆管的研究结果表明:在 1~3 MPa 压力范围内,随着系统压力的增加,脉动周期变短<sup>[5]</sup>;在 3~12 MPa 压力范围内,随着系统压力的增加,脉动周期变长<sup>[6-7]</sup>。这一结果说明,在圆管平行通道内,当系统压力的范围为 1~12 MPa 时,系统压力对管间脉动的脉动周期的影响具有一定程度的非单值性。这一规律

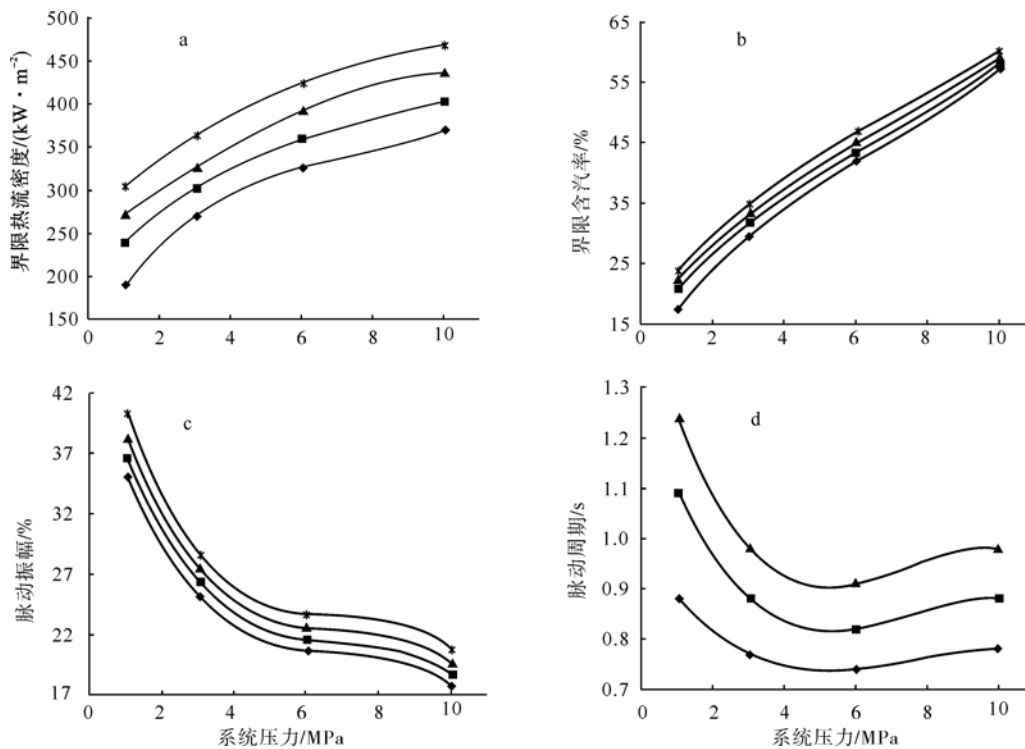


图 6 系统压力对管间脉动的影响

Fig. 6 Effects of system pressure on flow oscillation

a——界限热流密度;b——界限含汽率;c——脉动振幅;d——脉动周期

- a, b: ◆—— $G=395 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=20.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ■—— $G=396 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=30.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 ▲—— $G=398 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=40.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; \*—— $G=400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=50.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 c: ◆—— $G=587 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=20.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ■—— $G=590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=31.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 ▲—— $G=594 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=40.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; \*—— $G=598 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=51.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 d: ◆—— $G=587 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=20.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ■—— $G=590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=31.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 ▲—— $G=594 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \Delta T_{\text{sub}}=40.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

与本工作在矩形双通道内的研究结果一致。

## 2.4 脉动界限图

采用两个无量纲数,即进口过冷度数  $N_{\text{sub}}$  和相变数  $N_{\text{pch}}$  来拟合判断管间脉动界限的准则关系式。它们的定义式<sup>[6-8]</sup>为:

$$N_{\text{sub}} = \frac{c_{pl} \Delta T_{\text{sub}}}{h_{lg}} \cdot \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \quad (1)$$

$$N_{\text{pch}} = \frac{q_w}{G h_{lg}} \cdot \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \cdot \frac{\xi L}{A} \quad (2)$$

式中:  $c_{pl}$  为液相比定压热容;  $\rho_l$ 、 $\rho_g$  分别为液、汽两相密度;  $h_{lg}$  为汽化比焓;  $q_w$  为壁面热流密度;  $\xi$  为加热周长;  $L$  为加热段长度;  $A$  为通道流通面积。

从这两个准则数的定义可以看出,它们基本涵盖了影响管间脉动的主要系统参数。利用这两个定义式计算出试验数据点的进口过冷度数和相变数,绘制出  $N_{\text{pch}}-N_{\text{sub}}$  脉动边界图(图7)。

对图7上的试验数据点进行拟合,得到的判断脉动界限的准则关系式为:

$$N_{\text{pch}} = 3.1419 N_{\text{sub}} + 10.014 \quad (3)$$

利用拟合出的准则关系式(3)绘制出的拟合曲线如图7所示。从图7中可以看出,对于本试验所得的试验数据,拟合出的判断管间脉动界限的准则关系式,能够把95%以上的试验数据都包含在±15%的包络线内。根据图7划定的分界线,即可确定系统的稳定区域。

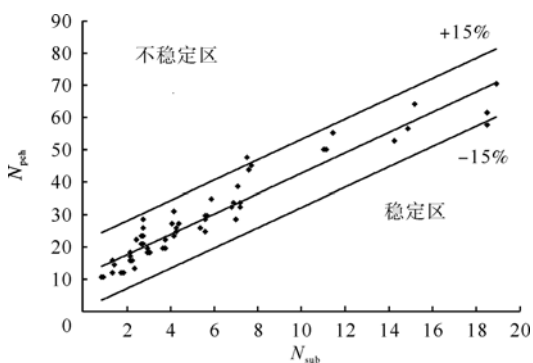


图7 脉动边界图

Fig. 7 Diagram of oscillation boundary

## 3 结论

通过对试验数据的分析和比较,得出以下结论。

1) 发生管间脉动时,本体进、出口总压降以及总管进口质量流速均基本保持不变。两分管间的进口质量流速、文丘里管上的压降和加热段上的压降分别作反相脉动;在各分管内,其进口质量流速与文丘里管上的压降作同相脉动,与加热段上的压降作反相脉动。

2) 进口过冷度对矩形双通道内管间脉动的界限热流密度、界限含汽率及脉动周期的影响规律与圆管内的相同;对脉动振幅的影响规律与圆管内的不同。质量流速和系统压力对矩形双通道内管间脉动及脉动界限参数的影响规律与圆管内的相同。进口过冷度和系统压力等影响较复杂的热工水力参数对矩形双通道和圆管平行通道内的管间脉动有着相同的非单值性影响规律。

3) 根据进口过冷度数  $N_{\text{sub}}$  和相变数  $N_{\text{pch}}$  绘制出的管间脉动界限图,拟合得出判断管间脉动界限的准则关系式  $N_{\text{pch}} = 3.1419 N_{\text{sub}} + 10.014$ 。这一关系式适用于判断与本工作试验本体类似、试验参数相近的试验装置管间脉动界限的计算和分析。

## 参考文献:

- [1] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京:清华大学出版社,2002:111-125.
- [2] 徐济黎. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京:原子能出版社,1993:313-357.
- [3] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003:247-277.
- [4] 李虹波. MB26C 差压变送器动态响应特性试验研究[R]. 成都:中国核动力研究设计院,2004.
- [5] 黄军. 平行双通道管间脉动特性基础研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,2005.
- [6] 肖岷. 平行管内高压汽液两相流动不稳定性研究[D]. 西安:西安交通大学,1991.
- [7] 荆建刚. 垂直并联管高压汽水两相流不稳定性研究[D]. 西安:西安交通大学,1995.
- [8] 汤良孙,韦斯曼. 压水反应堆热工分析[M]. 北京:原子能出版社,1983.