

强迫循环并联通道流量漂移现象研究

夏庚磊, 郭 贇, 彭敏俊

(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: 使用 RELAP5 程序对垂直并联环隙窄缝通道流量漂移现象进行研究, 分析了强迫循环并联通道流量漂移现象的形成过程及其原因, 研究了主要运行参数对垂直并联环隙窄缝通道流量漂移现象的影响。结果表明: 增大窄缝间隙, 降低入口欠热度, 增大系统压力, 减小热流密度, 增加入口单相阻力, 减小出口两相阻力均可减小通道压降-流量特性曲线的斜率, 从而提高系统的稳定性, 避免流量漂移现象的发生。

关键词: 并行通道; 流量漂移; RELAP5 程序

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1445-06

Flow Excursion Instability in Forced Circulation Parallel Channels

XIA Geng-lei, GUO Yun, PENG Min-jun

(National Defense Key Subject Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The flow excursion instability in vertical parallel narrow channels under different flow conditions was performed by the best estimate system computer code RELAP5. The process and inherent reason of flow excursion in forced circulation parallel channel system were analyzed in detail. The effects of main operating parameters on the system behavior were studied. The results show that decreasing the inlet subcooling, the heat flux or outlet resistance, and increasing the system pressure, the hydraulic diameter or inlet resistance can depress the slope of the pressure drop-mass flux curve and avoid the flow excursion phenomenon.

Key words: parallel channel; flow excursion; RELAP5 code

近年来,随着现代核电事业的发展,特别是新堆型的出现,对反应堆系统中两相流动不稳定问题的研究越来越多。由于单通道的分析已不能满足需求,所以,对于并联通道的各种不稳

定现象的研究备受关注,诸如堆芯及直流蒸汽发生器内的并联流道等^[1-3]。并联流道两相流动的复杂性不仅会导致出现整体的流动不稳定现象,且由于管道间的相互作用还会出现一些

并联通道特有的不稳定现象,会产生持续震荡,从而降低设备的运行性能,降低系统的安全性。目前,对密度波不稳定、管间脉动、压降震荡等动力学不稳定和自然循环系统中的不稳定现象均已进行了较为深入的研究,但对于强迫循环并联多通道的流量漂移现象的研究则尚未见报道。

早在 1938 年, Ledinegg 研究了系统内流量的非周期性漂移现象, 20 世纪 70 年代, Boure 等^[4]对当时的两相流稳定性成果进行了分类,其中包括强迫循环静态流量漂移。Zhang 等^[5]研究了水平微通道的流量漂移不稳定现象,得出各系统参数的影响规律。Minzer 等^[6]研究了汽液两相流在并联通道内的流量分配不均匀现象。本工作使用 RELAP5 软件对套管式直流蒸汽发生器中使用的窄环隙强迫循环并联通道的流动特性进行研究,探索其中可能存在的流量漂移现象,并通过独立开发的程序进行校核计算,以对在并联通道中有可能出现的类似静态不稳定性的流量漂移予以确认,并讨论其发生的过程及原因,给出系统参数对流量漂移的影响。

1 流量漂移现象

流量漂移也称为水动力学稳定性,其特征是受扰动的流体偏移原来的流体动力平衡工况,在新的流量下重新稳定运行。图 1 示出具有恒定加热热流的窄环隙直管通道的压降-流量($\Delta p-G$)特性曲线。随着通道给水流量的降低,当运行到泡核沸腾起始点(ONB)时,通道内开始出现沸腾,这时的压降随流量变化的趋势由两个因素决定:1)由于流量降低,压降有下降的趋势;2)由于产生沸腾,汽水混合物体积膨胀、流速增加,从而使压降反而随流量的减小而增大。两种因素结合可能会形成水动力特性曲线的“N”字形变化^[7]。

当系统在单相区(曲线的正斜率段)运行时,因扰动而出现的流量增量会使通道的压降增大而导致驱动压头不足,从而迫使系统恢复到原来的工作点。流量的减小也会产生相同的效果。当系统在两相区(曲线的负斜率段)运行时,如图中点 *a*,若外部驱动压头特性曲线的斜率大于管路的特性曲线的斜率,如图中直线 *B*,

扰动产生的流量增大则使得通道的压降减小,驱动压头过剩,从而使流量进一步增大,直到达到 *b* 点时为止。同样,扰动产生的流量减小使通道的压降增大,驱动压头不足,直至运行到 *c* 点时为止。

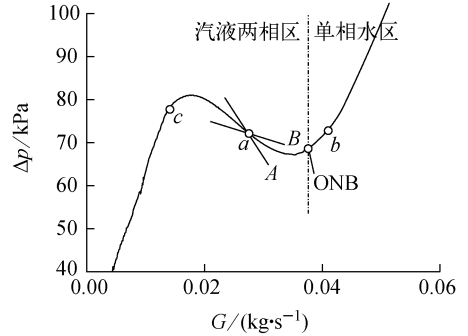


图 1 固定功率下通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线
Fig. 1 $\Delta p-G$ curve with constant heat flux

2 两管并联通道的流量漂移现象

对于单通道,满足流量漂移现象的判据^[4]如下:

$$\left. \frac{\partial(\Delta p)}{\partial G} \right|_F \leq \left. \frac{\partial(\Delta p)}{\partial G} \right|_D \quad (1)$$

式中:*F*为管路的阻力特性;*D*为驱动压头的特性。

如果满足式(1),则通道内流量的微小扰动会使流量发生很大变化。对于强迫循环的两管平行通道,在两管总的流量保持不变的条件下,系统的微小扰动有可能使两管的流量 1 个增大而另 1 个降低,两分管的流量同时发生很大的漂移,并最终达到新的平衡。

所研究的系统参数列于表 1。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters for system

参数	数值
管长, m	1.5
窄缝间隙, m	0.001~0.003
管道根数, 根	2
加热功率, kW	15~35
压力, MPa	1~8
节流系数	0~50
入口欠热度, K	0~120

其他系统参数及节点图参见文献[8], RELAP5程序的数学物理模型参见文献[9]。

通过大量计算研究发现,有以下两种方法可用来确定窄环隙并联通道的流量漂移现象。

1) 保持加热功率不变,逐渐降低进口给水的流量。当加热功率固定时,通道的水动力特性曲线是特定的,随着进口流量的降低,系统运行工作点将沿着 $\Delta p-G$ 特性曲线由过冷水区向过热蒸汽区变化,如果系统的 $\Delta p-G$ 特性曲线存在负斜率区,且满足式(1)的条件,则会出现流量漂移现象。如图2所示,随着总流量的不断降低,两管并联通道的流量在A点发生了漂移,其中1根管的流量升高,沿图2中ABD曲线到达B点,另1根管的流量则沿ACD曲线到达C点,随着流量的进一步降低,最终又重新回到等流量的D点。这一过程中各通道的动态 $\Delta p-G$ 特性曲线的变化如图3所示。根据图3可清楚地解释这一流量漂移的过程。当双管运行到工况A点时,总流量的继续降低相当

于对两管施加了一扰动而使其中1根管跃迁到B点运行,另1根管跃迁到C点运行。图中B、C两点的压降略有不同归因于图中的压降未包含惯性压降。随着流量的不断降低,两管最终又回到D点。所以,流量漂移工况可视为起始于A点,终止于D点。

2) 保持进口给水的流量不变,改变加热功率。系统的 $\Delta p-G$ 特性曲线与加热功率相关。图4示出固定两管的进口流量、逐渐增加通道的加热功率时得到的流量漂移现象。随着功率的增加,所研究通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线发生如图5所示的变化。当系统运行到 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段时,两根并联管的流量会发生非周期性偏移,如图4、5中的A点。随着加热功率的升高,系统两条通道的运行点沿着如图5所示的曲线变化,直到曲线的工作点超出 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段为止,如图4、5中的B点。加热功率较低时,系统运行在 $\Delta p-G$ 特性曲线的正斜率段,在A点时,系统运行点到达 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段,并联流道的流

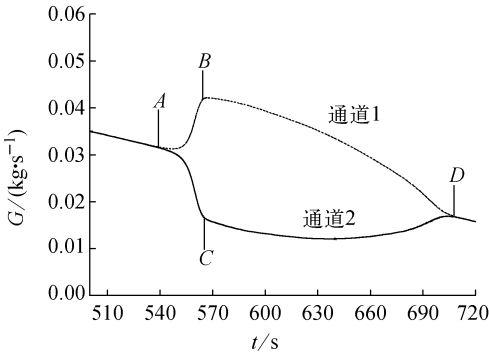


图2 变流量时的流量漂移现象

Fig. 2 Flow excursion with mass flow rate varying

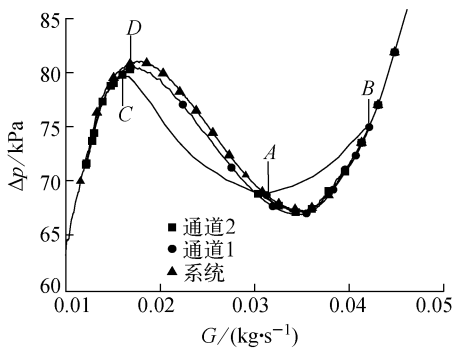


图3 变流量时通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线

Fig. 3 $\Delta p-G$ curves with mass flow rate varying

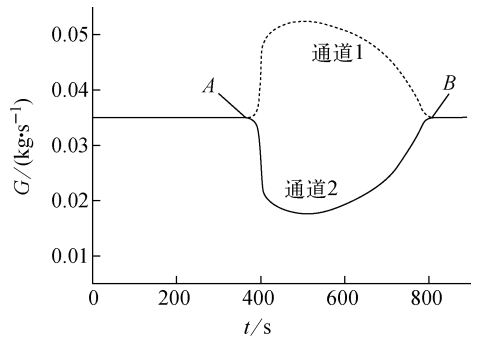


图4 变功率时的流量漂移现象

Fig. 4 Flow excursion with heat power varying

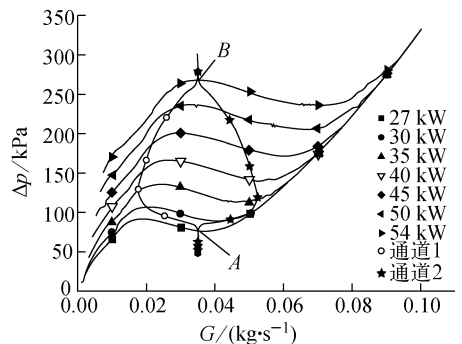


图5 变功率时通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线变化

Fig. 5 $\Delta p-G$ curves with heat power varying

量将出现流量漂移的现象,当通过负斜率段到达 B 点时,并联通道的流量重新达成一致,继续运行在曲线的正斜率段。所以,同样可视为起始于 A 点,终止于 B 点。

3 程序模型的验证

图 6a 为使用 RELAP5 程序在窄缝间隙为 1 mm、系统压力为 3 MPa、进口给水温度为 425 K 时得到的两管平行通道的流量漂移现象。由图 6a 可看出,通道 1 的流量降低,通道 2 的流量升高,但两管总的进口流量保持不变,且当流量漂移发生时,在相同的加热条件下,流量降低的通道出口空泡份额提高,当达到某一

阈值时,将同时出现管间脉动现象。因此,流量漂移有可能是管间脉动的序曲。

图 6b 为使用文献[3]的平衡态模型在相同的条件下计算得到的流量漂移现象。通过两分图的比较可得出:在一定的条件下,并联通道非常有可能出现这种流量漂移现象。使用不同的模型及程序所获得的结果在流量漂移幅度及后期的管间脉动振幅方面会存在一定差别,但这种流量漂移的现象极有可能是存在的。

这种现象一旦发生,有可能在管间脉动发生前业已造成管道的烧毁。在流量降低的管道中,偏离泡核沸腾起始点(DNB)现象有可能提前出现,而不必等到后期的管间脉动才诱发。

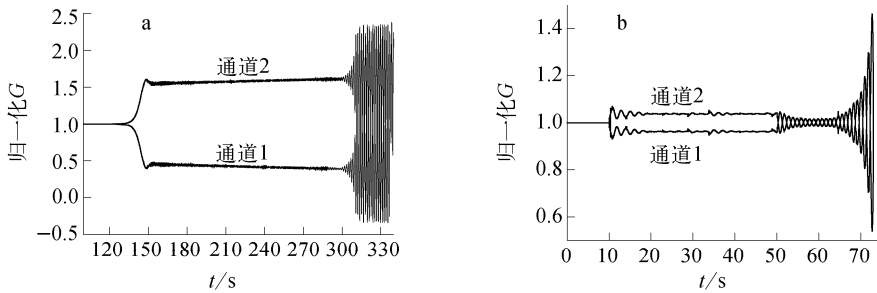


图 6 流量漂移结果

Fig. 6 Flow excursion results

a——RELAP5 程序;b——文献[3]

4 影响流量漂移的因素

从上述分析可看出,系统的 $\Delta p-G$ 特性曲线对于这种管间流量漂移现象有重要影响。对于一特定的系统,当其他系统参数固定时,可通过改变流量得到通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线,根据曲线负斜率段的情况来判定该系统的流动特性。本文通过研究系统参数对通道 $\Delta p-G$ 特性曲线的影响规律探讨系统参数对管间流量漂移的影响。

管间流量漂移的产生原因是通道的水动力曲线存在负斜率段。因此,可通过改善曲线斜率来避免管间流量漂移现象的出现。

大量的计算分析表明:扩大窄缝间隙、增大进口节流、提高系统压力、减小入口欠热度等均可减小负斜率段的斜率,从而避免管间流量漂移的发生。

4.1 窄缝间隙

不同窄缝间隙时的 $\Delta p-G$ 特性曲线示于图

7。由图 7 可看出,随着窄缝当量直径 d ($d = 2\delta$) 的减小,所对应的 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段的斜率增大,窄缝间隙越小,流速越大,两相流动产生的压降变化越大,因此,负斜率段的斜率越大,这将导致加热通道更易发生管间流量漂移现象。对于圆管和间隙很大的窄缝隙通道而言,不会存在 $\Delta p-G$ 曲线的负斜率段,因此,也不可能出现流量的漂移现象,这也是先前的研究中未出现这种现象的原因。

4.2 加热功率

图 8 中的不稳定边界为在不同的加热功率条件下确定的流量漂移起始点 A 和终止点 D 组成的不稳定区间。由图 8 可看出,对于特定的流道系统,采用不同的加热功率,所得到的 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段的斜率是相同的,但随着加热功率的增大,负斜率区间长度变长。图中的曲线 1 和 2 为出现流量漂移不稳定现象时的漂移起始边界与结束边界(如图 4 中的 A

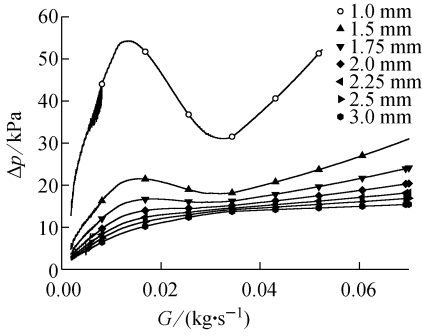


图7 不同窄缝间隙时的 Δp - G 特性曲线

Fig. 7 Δp - G curves for different hydraulic diameters

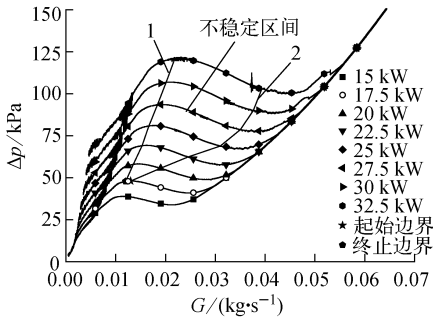


图8 加热功率的影响

Fig. 8 Effects of heat powers

下,随着系统压力的提高,两相差别减小。因此,系统压力提高可改变通道 Δp - G 特性曲线的斜率,从而提高系统的稳定性。系统的运行压力越高,汽液两相的比体积相差越小,使得当水变成蒸汽时的汽水混合物比体积变化减小,两相流动产生的压降变化因而减小,流动趋于稳定。当压力达到临界压力时,水和蒸汽的比体积相同,此时,不稳定现象不会出现(图9)。从图9可看出,当系统压力增加到8 MPa时,负斜率区几乎消失,管间流量漂移现象不会出现。

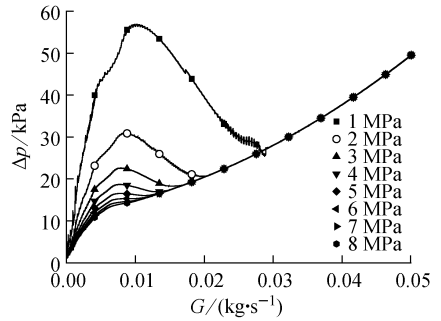


图9 系统压力的影响

Fig. 9 Effects of pressures

点和B点)。当加热功率很小时,其负斜率区非常窄,甚至即使存在曲线的负斜率区也不会出现流量漂移的现象(如 $P=15$ kW),而是快速通过两相不稳定区到达过热区;但当热流密度很大时,流量漂移区间逐渐扩展到整个的负斜率段(如 $P=32.5$ kW)。这是因为,负斜率区过窄,则难以出现使两管呈现动态压降相等的平衡点。

4.3 系统压力

在进口温度和加热功率保持不变的条件

4.4 进出口节流

增大进口节流可使 Δp - G 特性曲线的负斜率段的斜率减小,而增大出口节流会使得 Δp - G 曲线的负斜率段的斜率增大,不利于系统的稳定性。增大进口节流,则增大了进口的局部阻力,进口局部阻力压降随流量单值变化,可有效消除系统 Δp - G 特性曲线的负斜率,减小曲线斜率;增大出口节流则增大了两相区的压降,不利于系统的稳定(图10)。从图10可看出,进口阻力系数增加到50时,负斜率区基本消失;出口阻

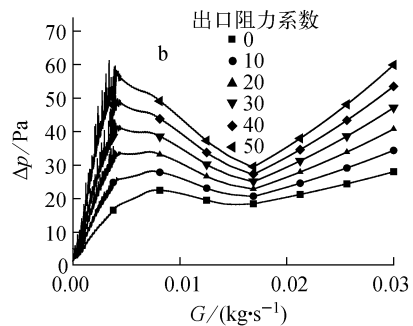
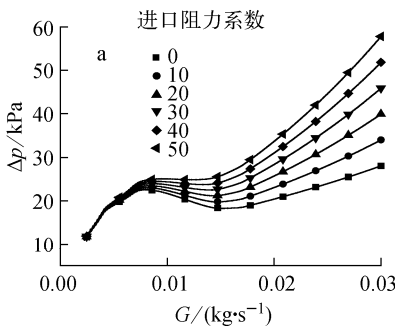


图10 进口节流(a)和出口节流(b)的影响

Fig. 10 Effects of inlet resistance (a) and outlet resistance (b)

力系数增大到 50 时,负斜率区变得非常陡峭。

4.5 入口欠热度

入口欠热度对水动力特性的影响具有一定的界限值,不同装置的界限值可能不相同。小于该界限值,减小水的欠热度,使得沸腾段所占的比例增大,因沸腾所产生的压降变化减弱,可使流动趋于稳定。图 11 示出了入口欠热度对 $\Delta p-G$ 特性曲线的影响。在较小的入口欠热度下,系统的负斜率区较窄。

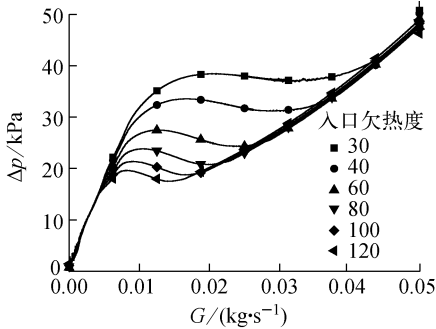


图 11 入口欠热度的影响

Fig. 11 Effects of inlet subcoolings

5 结论

当并联通道系统出现管间流量漂移现象时,某根通道内的流量将急剧减小,这时,有可能诱发 DNB 的提前出现,严重影响系统的安全运行,应尽量避免这种现象的出现。缩短或避免通道 $\Delta p-G$ 特性曲线出现负斜率段是防止出现这一现象的有效手段。通过分析可得出以下结论:

1) 增大通道窄缝间隙、提高系统压力、增大进口节流以及减小入口欠热度,均有利于避免管间流量漂移现象的发生;

2) 增大出口节流不利于防止系统发生管间流量漂移;

3) 在不同加热功率下,通道的 $\Delta p-G$ 特性曲线负斜率段的斜率相同,但系统加热功率越高,所对应的 $\Delta p-G$ 特性曲线的负斜率段越长,出现流量漂移的不稳定性区间越大。

参考文献:

- [1] ANTONELLA L C, CLAUBIA P. Simulation of an hypothetical out-of-phase instability case in boiling water reactor by RELAP5/PARCS coupled codes[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, 35: 947-957.
- [2] 李虹波,黄彦平,卢冬华. 热工水力参数对矩形双通道管间脉动的影响[J]. *核动力工程*, 2008, 25(1):81-86.
LI Hongbo, HUANG Yanping, LU Donghu. Effects of thermo-hydraulic parameters on flow oscillation in double narrow rectangular channels [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 25(1): 81-86(in Chinese).
- [3] GUO Y, QIU S Z, SU G H, et al. Theoretical investigations on two-phase flow instability in parallel multichannel system[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2008, 35: 665-676.
- [4] BOURE J A, BERGLES A E, TONG S L. Review of two-phase flow instability[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1973, 25: 165-192.
- [5] ZHANG Tiejun, TONG Tao. Ledinegg instability in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52: 5 661-5 674.
- [6] MINZER U, BARNEA D, TAITEL Y. Evaporation in parallel pipes-splitting characteristics [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30: 763-777.
- [7] 于平安,朱瑞安. 核反应堆热工分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社,2002.
- [8] 夏庚磊,彭敏俊,郭赞. 基于 RELAP5/MOD3.4 的环隙窄缝多通道管间脉动流动不稳定性分析 [C]//第十一届全国反应堆热工流体会议论文集. [出版地不详]:[出版者不详],2009:195-199.
- [9] Nuclear Safety Analysis Division. RELAP5/MOD3.3 code manual volume I: Code structure, system models, and solution methods[M]. Idaho Falls: Information Systems Laboratories, 2001.