

基于 RELAP5 的两管平行通道 流动不稳定性研究

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:利用 RELAP5 程序对垂直并联管中汽液两相流不稳定性实验装置进行了模拟,并与实验工况进行比较,结果表明:RELAP5 程序的非平衡态两流体模型的计算结果与实验数据符合较好。并在此基础上研究了主要运行参数对两管平行通道管间脉动流动不稳定性的影响。结果表明:入口欠热度对管间脉动的影响并非线性关系;系统压力的增加可提高系统的稳定性并减小管间脉动的振幅;进口节流增加,系统的稳定性明显提高;入口不均匀节流时两管总的极限热负荷升高;不均匀加热时两管总的极限热负荷降低。

关键词:并行通道;流动不稳定性;RELAP5 程序

中图分类号:TL331

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)06-0694-07

Investigation on Two-Phase Flow Instability in Parallel Channels Based on RELAP5 Code

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: Validation of the experiment of gas-liquid two phase flow instability in vertical parallel channel was performed by the best estimate system computer code RELAP5. The results calculated by the non-equilibrium two-fluid model of RELAP5 agree well with the experimental data. Based on these results, the effects of main operating parameters on the system behavior were studied. The results show that the effect of subcooling of inlet is nonlinear, and system pressure can increase the stability of the system and reduce the amplitude of oscillator, and the increasing of the inlet throttle improves the stability. With the dissymmetry degree of dissymmetry throttling increasing, the total critical heating power of oscillation is increased. With the dissymmetry degree of heated power increasing, the total critical heating power of oscillation is reduced.

Key words: parallel channel; flow instability; RELAP5 code

两相流动不稳定性是两相流学科中的一重要研究课题,是指因系统的质量流密度、压降或空泡变化而引起的热工参数的恒振幅或变振幅的周期性流量震荡和零频率的流量漂移现象^[1]。持续的汽液两相流动脉动不仅会引起部件的强制机械振动而导致疲劳破坏,还会影响局部传热特性,可能使沸腾危机提前出现,严重影响设备的安全运行。早在 1970 年,Boore 将两相流动不稳定性清楚地分为静态不稳定性和动态不稳定性^[2]。

静态不稳定性是指管路的压降与流量的水动力特性曲线呈多值性,管路内流量与参数发生非周期性偏移的现象,最常发生的为流量漂移;动态不稳定性是指流量与参数发生自维持的周期性脉动现象,最常发生的为密度波和压力降不稳定性。对于直流锅炉、直流蒸汽发生器等存在特殊并行通道结构的系统,在总流量不变和联箱两端压降不变的前提下,部分通道间可能发生通道间的流动不稳定性,通常称为管间脉动。

本工作利用 RELAP5/MOD3.4 程序对垂直并联管中汽液两相流动不稳定性的实验装置进行模拟,并与实验工况进行比较。在此基础上对并联通道中的两相流动不稳定性进行深入研究,以得出各系统参数对管间脉动的影响。

1 节点划分及研究方法

1.1 系统概述

详细的实验装置及实验数据可参考文献[3-4]。本研究尝试采用 RELAP5 程序来描述这一实验过程。RELAP5 程序是美国 Idaho 国家工程实验室针对轻水堆系统研制的两流体、非平衡、非均匀、6 方程大型热工水力系统分析程序^[5]。它被各国广泛应用于核反应堆安全分析、严重事故研究及风险概率评价等工作。参照实验装置得到的 RELAP5 程序节点如图 1 所示,两端用时间相关控制体控制入口的欠热度和出口的压力两个边界条件,使用时间相关接管控制入口水的流量,加热段由两个管型控制体 200 和 300 表示。

根据实验装置的具体结构及实验参数设定了程序的计算参数范围(表 1)。

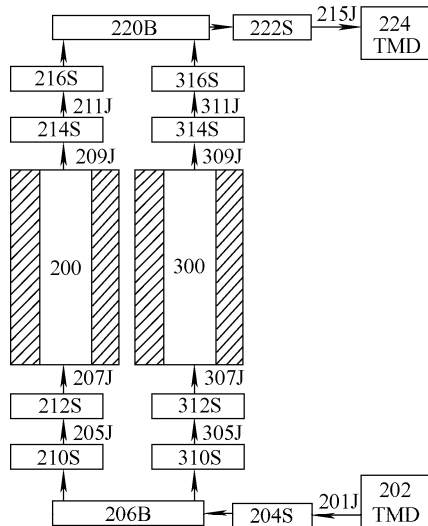


图 1 RELAP5 节点划分

Fig. 1 RELAP5 nodalization

表 1 系统参数

Table 1 Parameters for system

参量	数值
加热段长度, m	1.5
管道当量直径, m	0.01
管道根数	2
进口流速, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	382.17
加热功率, kW	0~45
压力, MPa	1~11 (实验为 1~3)
节流系数	0~60
入口欠热度, $^{\circ}\text{C}$	0~200

1.2 脉动发生的判断依据

实验中采用固定入口流量保持不变,逐渐增加加热功率的方法来确定发生流动不稳定的热负荷。当脉动发生时,两根分管形成明显的可持续周期性异相脉动现象,此时两分管相互作为对方的可压缩容积进行能量的吸收和释放,脉动引起流量在两分管之间的重新分配。因此,可依据加热段入口处两分管质量流量的变化情况作为脉动发生的标志。图 2 为模拟实验的 1 个算例,系统压力 $p=3 \text{ MPa}$,入口欠热度为 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$,质量流量为 0.03 kg/s 时,入口节流系数为 10,流动不稳定起始点寻找过程以及并行管道进口流量脉动情况,此时脉动周期约为 2.2 s 。在计算中使用了类似于实验的方法来寻找不稳定起始点,对于某一初始工况,固定

流量,逐步提高加热功率(图3),每次提高加热功率后计算至稳态后再进一步提高功率,直至出现流量脉动现象。

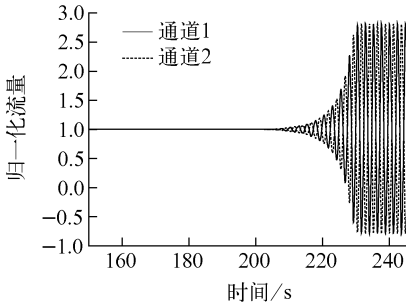


图2 平行通道流动不稳定性

Fig. 2 Flow instability in parallel channels

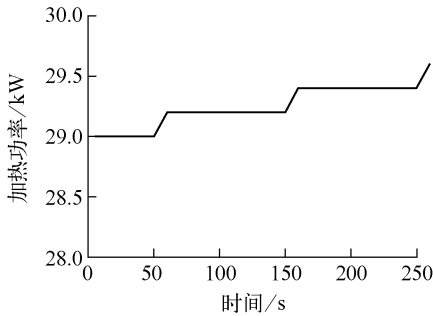


图3 加热功率与时间的关系

Fig. 3 Power vs. time

1.3 节点个数的评价

国内外的一些研究结果表明,RELAP5程序的节点划分对预测结果存在一定的影响^[5-6]。本工作分别在1、2、3 MPa 3种压力下对节点划分进行了验证(图4),结果表明,采用不同的节点划分对流动不稳定起始点的预测结果是有差

别的。程序在计算时以控制体为单位,当节点划分较少时,单个控制体的长度较大,控制体个数的增加对预测结果的影响较大。由图4可看出,控制体数目较少时预测结果差别较大,当控制体数目较多时,节点个数的增加对预测结果的影响趋于平缓,结果同节点数目呈现出无关性;但节点个数越多,所耗用的计算时间越多,综合考虑选择节点个数为120个。

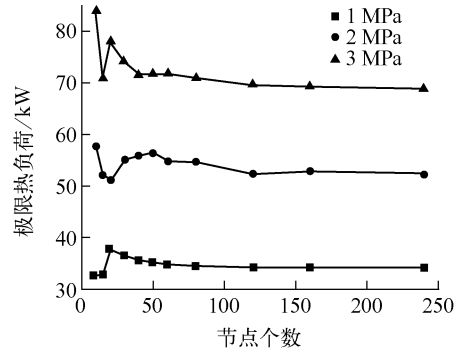


图4 节点划分比较

Fig. 4 Effect of nodalization

2 实验数据的验证

RELAP5程序计算结果与实验数据的比较示于图5。当采用平衡态模型进行计算时,得到的结果与实验数据相比偏于保守,这与文献^[7]的计算结果一致;当采用非平衡态模型进行计算时,所预测的结果与实验数据相比偏高一些。由图5可看出,使用平衡态模型或非平衡态模型均能够较好地预测出不稳定性边界,1 MPa时两种模型确定的不稳定性边界分别为含汽率 $x_c = 0.17$ 和 $x_c = 0.24$; 2 MPa 时为 $x_c = 0.29$ 和 $x_c = 0.46$; 3 MPa 时为 $x_c = 0.5$ 和

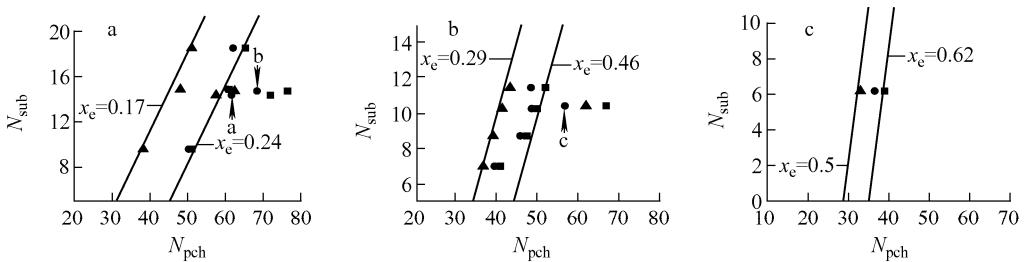


图5 不同压力下计算值与实验值的比较

Fig. 5 Instability boundaries at different pressures

系统压力:a—1 MPa;b—2 MPa;c—3 MPa

■——非平衡态;●——实验;▲——平衡态

$x_c = 0.62$, 实验结果位于两者之间。综合比较可看出,随着系统压力的提高,发生流动不稳定的临界含汽率增大,系统的稳定性提高。图中的 a、b、c 3 个点为增大管道入口节流系数时得到的不稳定性边界,可看出随着入口节流系数的提高,系统的不稳定边界移动到更高的含汽率位置,系统更加趋于稳定。RELAP5 程序亦可很好地模拟这一趋势。

图中相变数 N_{pch} 和欠热度数 N_{sub} 的表达式为:

$$N_{pch} = \frac{Q}{W} \cdot \frac{v_{fg}}{h_{fg} v_f}$$

$$N_{sub} = \frac{h_f - h_{in}}{h_{fg}} \cdot \frac{v_{fg}}{v_f}$$

式中: Q 为加热功率, W 为质量流量, kg/s; h_{fg} 为汽化潜热, J/kg; v_{fg} 为比容差, m^3/kg ; 下标 g 为饱和汽, f 为饱和水, in 为进口。

3 平行通道流动不稳定性的影响因素分析

两相流动不稳定现象是一非常复杂的问题,其影响因素很多^[8-9],如回路几何结构、系统压力、质量流量、进口欠热度、进出口节流、加热方式等。所有这些参数均相互耦合相互作用,但由于两相流动系统的复杂性,常将研究的问题分解为单个问题逐一进行研究。在实验结果验证的基础上,本研究拓展了系统压力范围,研究了入口节流、系统压力、入口欠热度、不均匀节流、不均匀加热等情况对不稳定区间的影响,希望获得较为全面的认识。

3.1 入口欠热度

当其它参数固定时,给水温度的变化反映的是换热区内液相和两相区间长度的变化。欠热度对系统的稳定性有两种不同的影响效果: 1) 相同的加热功率条件下,入口欠热度的增加导致两相流截面含汽率降低,增加了单相区的长度,同时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,因此,入口欠热度的增加可提高系统的稳定性; 2) 入口欠热度增加,在相同的加热功率条件下,管道中平均含汽率下降,汽相的形成周期增大,两相区的可压缩性降低,压降扰动对入口流量的响应加强,这又有助于脉动的发生。当系

统平均含汽率较低时,管道内单相区的长度较大,第 1 种效果对单相区长度的影响较明显。当系统平均含汽率较高时,系统内几乎全部是两相流动,整个管道内充满了汽相,第 2 种作用对系统的影响较大,两者综合作用形成系统极限热负荷随入口欠热度的增加呈现非单值性。

入口欠热度对系统极限热负荷的影响示于图 6。由图 6 可看出,在某一临界值内增加入口欠热度会降低系统的稳定性,超过此临界值继续增大欠热度,则系统的稳定性提高。

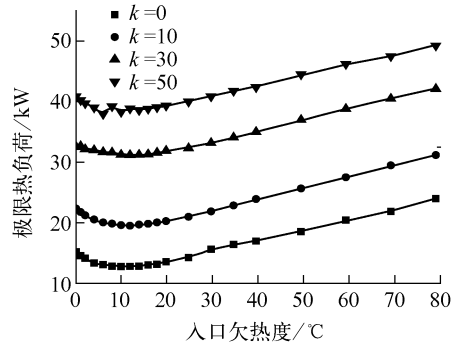


图 6 入口欠热度对系统极限热负荷的影响
Fig. 6 Effect of inlet subcooling on instability

3.2 系统压力

系统压力的提高,使汽液两相间的密度差减小,相同的热负荷变化在高压下引起的压差扰动小于低压下的压差扰动,因而扰动的幅度减小。图 7 为系统压力对流动不稳定性极限热负荷的影响。在相同入口欠热度条件下随着系统压力的升高,发生流动不稳定性极限热负荷升高,系统的稳定性提高。系统压力对不稳定性周期和振幅的影响示于图 8。由图 8 可看出,随着系统压力的增加,不仅减少了脉动的振幅,还会使脉动的周期变短。

3.3 入口均匀节流

入口节流阻力的增加,相当于增加了流道内单相区的压降,使单相区阻力占整个流道阻力的比重增大,对流量的增加和流动不稳定有一减振或缓冲的作用,从而提高系统的稳定性,如图 9 所示。当入口未加节流阻力时,系统的稳定性边界为 $x_c = 0.24$,随着入口节流阻力的增大,系统的稳定性边界逐渐右移,当入口阻力提高到 $k = 50$ 时,系统的不稳定性边界为

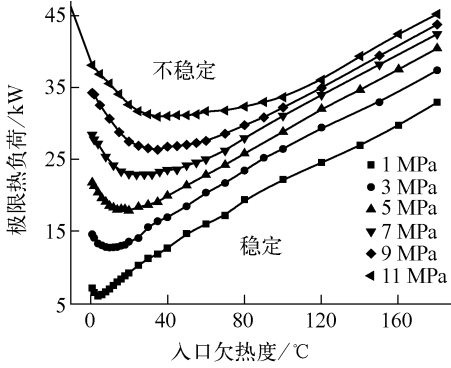


图7 系统压力对系统稳定性的影响

Fig. 7 Effect of pressure on instability

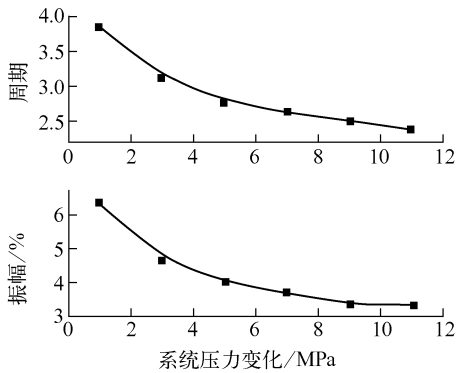


图8 系统压力对周期和振幅的影响

Fig. 8 Effect of system pressure on oscillation period and amplitude

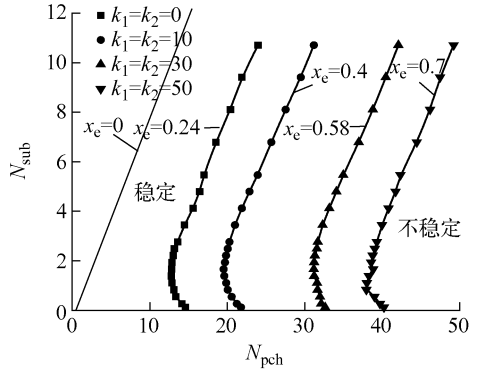


图9 入口节流对系统稳定性的影响

Fig. 9 Effect of inlet throttling on stability

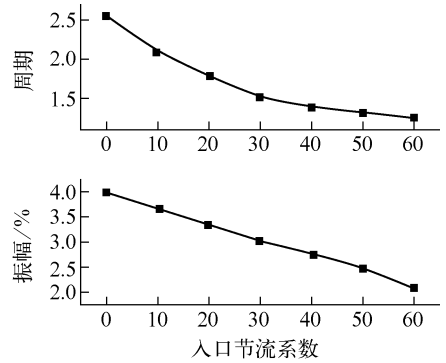


图10 入口节流对脉动周期和振幅的影响

Fig. 10 Effect of inlet throttling on oscillation period and amplitude

$x_c=0.7$,极大地提高了系统的稳定性。图10示出入口节流对管间脉动周期和振幅的影响。可看出,入口阻力的增加会使管间脉动的周期减小、振幅减小。如果振幅减小对系统有利,那么增加入口节流系数,不但可使系统的临界含汽率增加,且会由于减小了脉动振幅,使系统性能获得改善。

3.4 不均匀节流

当对分管入口实施不对称节流时,采用固定其中1管,增大另1根管的方式来研究不均匀节流的影响。由于1根分管的进口节流阻力很大,使另1根管中流量增大,在相同的热负荷下,通道内的平均含汽率降低,增加了这个通道内单相液区的压降,对两管间流量的脉动有一阻尼作用,从而会使系统趋向于更加稳定,其直接表现就是使平行通道发生管间脉动的临界热负荷增加。图11为入口分别采用不同的节流系数时,入口节流对流动不稳定性极限热负荷

的影响。由图11可看出,当两管采用不均匀节流时,其效果介于采用均匀节流系数之间。无论哪根管的节流系数增加均会提高系统的稳定性。尽管单独提高1个通道的入口节流没有同时提高所有通道入口节流的稳定效果好,但这对于工程设计仍具有一定的实际意义,在1个系统中,只需提高1个流道的入口节流系数便可全面改善全系统的稳定性。当然这一结论需更多通道的实验结果验证。

3.5 不均匀加热

定义不均匀加热系数 $r=Q_2/Q_1$ 。图12为 $r=0.2$ 时,两管平行通道内质量流速的变化情况,此时两管总的入口流量为 0.06 kg/s 。可看出,当两分管的加热功率不等时,亦即在不对称加热的情况下,两分管的流量分配是不均匀的,热流密度大的分管中质量流量较大,且随着不均匀系数的增大,流量分配不均匀的程度也是增大的。在发生流量脉动时,其入口总流量仍

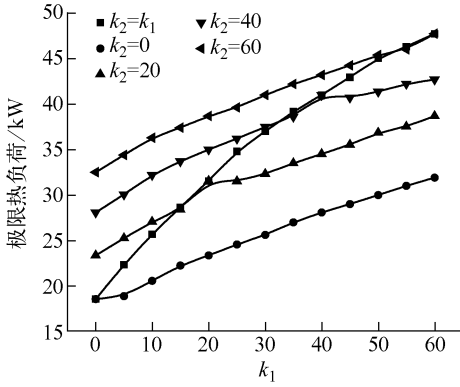


图 11 不对称节流对脉动极限热负荷的影响
Fig. 11 Effect of dissymmetry throttling on critical heated power

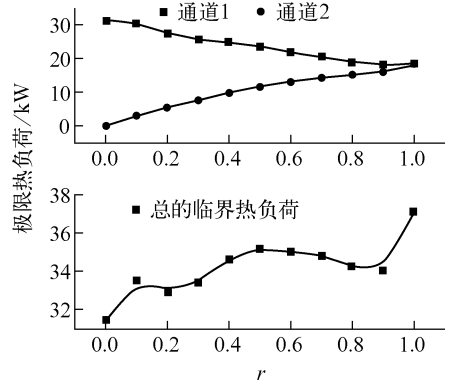


图 13 不对称加热对总热功率的影响
Fig. 13 Effect of dissymmetry heating on total heating power

保持不变,两分管内的流量作反相脉动,两分管的脉动频率相同。由于功率分配不均匀带来流量分配不均匀,会使每个通道出现不稳定性的临界热负荷的值非常复杂,很难确定是哪一个通道首先造成了系统的不稳定。由图 13 中不均匀系数对单管临界热流密度的比较可看出,当采用不均匀加热时,随着通道 2 的功率份额降低,通道 1 的流量份额增大,使通道 1 的临界热流密度升高。但双管总的临界热负荷呈现出一种复杂的关系,总体趋势上看,如果以系统总功率为参照,非均匀加热会使系统临界热负荷降低,使系统趋于不稳定。这一点对于反应堆热工设计有重要的指导意义,反应堆内功率分布的不均匀对于不稳定性是非常不利的。

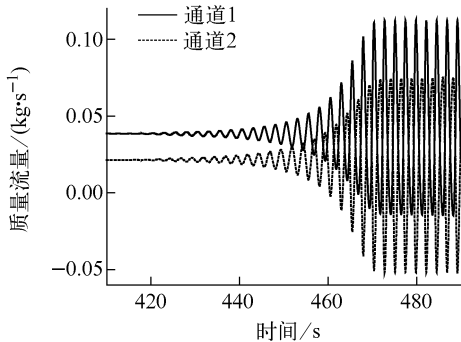


图 12 不对称加热时两管质量流量的变化
Fig. 12 Effect of dissymmetry heating on mass flux

影响主要有系统压力、入口欠热度和加热功率与流量的比值这 3 个条件,通过大量的计算可得到系统的不稳定性边界。假设 $x_c=1$ 作为系统不稳定区间的另一个边界,则在不同的系统压力下可分别确定出系统的不稳定性区间,再根据文献[9]中所介绍的方法可绘制所研究系统的不稳定空间(图 14)。可见,随着系统压力的升高,流动不稳定空间是不断减小的。

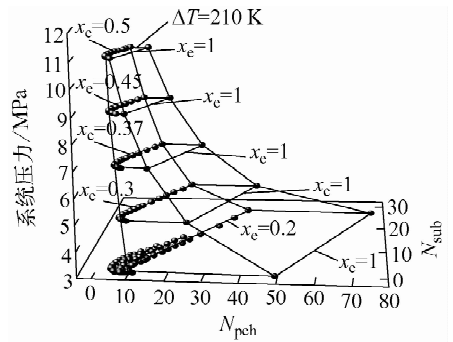


图 14 不稳定性区间
Fig. 14 Instability space

从不同系统压力下不稳定边界在 3 MPa 系统压力平面上的投影可看出,在低系统压力的不稳定边界投影不重合,而高系统压力的不稳定边界投影十分接近,这一点同文献[9]中的相关预测在高压下符合较好,但在低压时有偏差。

3.6 不稳定性区间

从欠热度数和相变数的表达式来看,对于 1 个几何结构固定的系统,对流动不稳定性的

4 结论

1) 使用 RELAP5 程序对系统分析计算前,必须对节点数目进行考察;

2) RELAP5 程序可较好地预测出双管平行通道的流动不稳定性区间;

3) 随系统压力增加,系统稳定性增强;

4) 入口欠热度对系统的稳定性呈非单值性的影响,且其临界值随系统压力的提高而增大;

5) 入口均匀节流时,入口均匀节流增大系统的稳定性提高;

6) 入口非均匀节流时,系统的稳定性倾向于节流系数较高的那根管,也就是偏于稳定;

7) 采用不均匀加热时,系统总的临界热负荷降低。

以上结论对实际问题的研究具有一定的参考价值,但对于更多通道系统的不均匀加热和不均匀节流还需进一步深入地研究,尤其是实验验证。

参考文献:

- [1] 贾斗南. 沸腾传热和汽液两相流动[M]. 北京: 原子能出版社,1993.
- [2] BOURE J A, BERGLES A E, TONG S L. Review of two-phase flow instability[J]. Nuclear Engineering and Design, 1973, 125: 165-192.
- [3] 郭赞. 自然循环系统和并联通道及其在海洋条件下的不稳定性研究[D]. 西安:西安交通大学, 2007.
- [4] 黄军,黄彦平,王飞,等. 不对称节流和不对称加热对平行双通道管间脉动特性影响实验[J]. 核动力工程,2006,27(6):18-22.

HUANG Jun, HUANG Yanping, WANG Fei, et al. Experiment of effect of dissymmetry throttling and heating on oscillation between double parallel channels[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(6): 18-22(in Chinese).

- [5] Nuclear Safety Analysis Division. RELAP5/MOD3. 3 code manual, volume V: User's guidelines [M]. Rockville, Maryland, Idaho Falls, Idaho: Nuclear Safety Analysis Division, Information Systems Laboratories, Inc., 2001.
- [6] URBONAS R, USPURAS E, KALIATKA A. State-of-the-art computer code RELAP5 validation with REMK-related separate phenomena data [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 225: 65-81
- [7] AMBROSINI W. Lesson learned from the adoption of numerical techniques in the analysis of nuclear reactor thermal-hydraulic phenomena [J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50: 866-876.
- [8] 吴鸽平,秋穗正,苏光辉,等. 蒸汽发生器强迫循环流动不稳定性分析[J]. 核动力工程,2006,27(4):16-20.
- WU Geping, QIU Suizheng, SU Guanghui, et al. Analysis of forced-convection flow instability in steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(4): 16-20(in Chinese).
- [9] 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.