

带定位格架棒束通道内汽水两相流型研究

王小军, 陈炳德, 黄彦平, 徐建军

(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: 研究汽水两相流动情况下带定位格架棒束通道中存在的流动型式, 对深入理解定位格架对棒束通道热工水力特性影响机理和采用 CFD 程序计算通道内汽水两相流动奠定了一定基础。利用 RBI 光学探针测得的时序波形和目测相结合的方法, 对 AFA-2G 3×3 定位格架组成的棒束通道内存在的汽水两相流型进行了识别。通道水力当量直径为 8.98 mm, 元件的棒径为 9.5 mm, 栅距为 12.6 mm, 棒壁距为 2.65 mm。试验研究了带定位格架棒束通道内存在的流动型式和流型转变情况, 获得了 3 个压力下的流型图。

关键词: 定位格架; 光学探针; 流型; 汽水两相流

中图分类号: TL33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0074-05

Study on Steam-Water Two-Phase Flow Patterns in Rod Bundles With Grid Spacers

WANG Xiao-jun, CHEN Bing-de, HUANG Yan-ping, XU Jian-jun

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

Abstract: Study on steam-water two-phase flow patterns in rod bundles with grid spacers is helpful and useful to know more effect of spacers on thermal hydraulic performance and to simulate steam-water two-phase flow with CFD code in rod bundle. The sequence signal and visual observation were used to identify two-phase flow pattern in the 3×3 rod bundle with AFA-2G grid spacer under the condition of steam-water two-phase flow. The rod bundle consists of nine 9.5 mm diameter rods arranged in a square with 12.6 mm pitch. The rod bundle hydraulic diameter is 8.98 mm. The distance of rod to wall is 2.65 mm. The flow patterns and transitions were studied. A flow pattern diagram under three different pressures was obtained.

Key words: grid spacer; optical probe; flow patterns; steam-water two-phase flow

棒束通道内沸腾传热过程的模拟计算对反应堆安全分析和热工水力设计具有重要意义。但这一计算的基础在于弄清通道内两相流动的结构型式。在受热通道中, 汽相和液相形成汽

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-05

基金项目: 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基金资助项目(51482010103ZS8601)

作者简介: 王小军(1971—), 男, 四川巴中人, 副研究员, 博士, 反应堆热工水力专业

液混合物同时流动,可以形成各式各样的形态,即所谓的流动结构,这些流动结构通常被称为流型。确定两相流流型对于计算分析非常重要,不同的流型需采用不同的物理模型来描述。因为在两相流中,流型与系统的压力、流量、含汽率、壁面的热流密度以及通道的几何形状和流动方向有密切联系。流型的变化意味着流动特性和传热特性的改变,因而不同的流型在通道内将会形成不同的流动工况,产生不同的流动压降、传热方式和沸腾危机现象。在分析热工水力现象时,应采取不同的分析模型和经验关系式。

因此,必须首先弄清沸腾通道内可能存在的沸腾型式,以及发生这些沸腾的准确位置,研

究定位格架附近区域存在的流型以及交混叶片对格架附近区域两相流型的影响是非常重要的。鉴别在沸腾传热条件下该通道内实际存在的流动型式和弄清各种流动型式产生的条件,有助于了解定位格架对棒束通道内汽水两相流动和传热的影响机理。

1 实验装置

实验在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高温高压大回路上进行。回路流程如图1所示。

实验回路主要包括回路系统、水处理系统、参数测量系统、控制调节系统和数据采集系统。回路主要设备有主泵、热交换器、混合冷凝器、

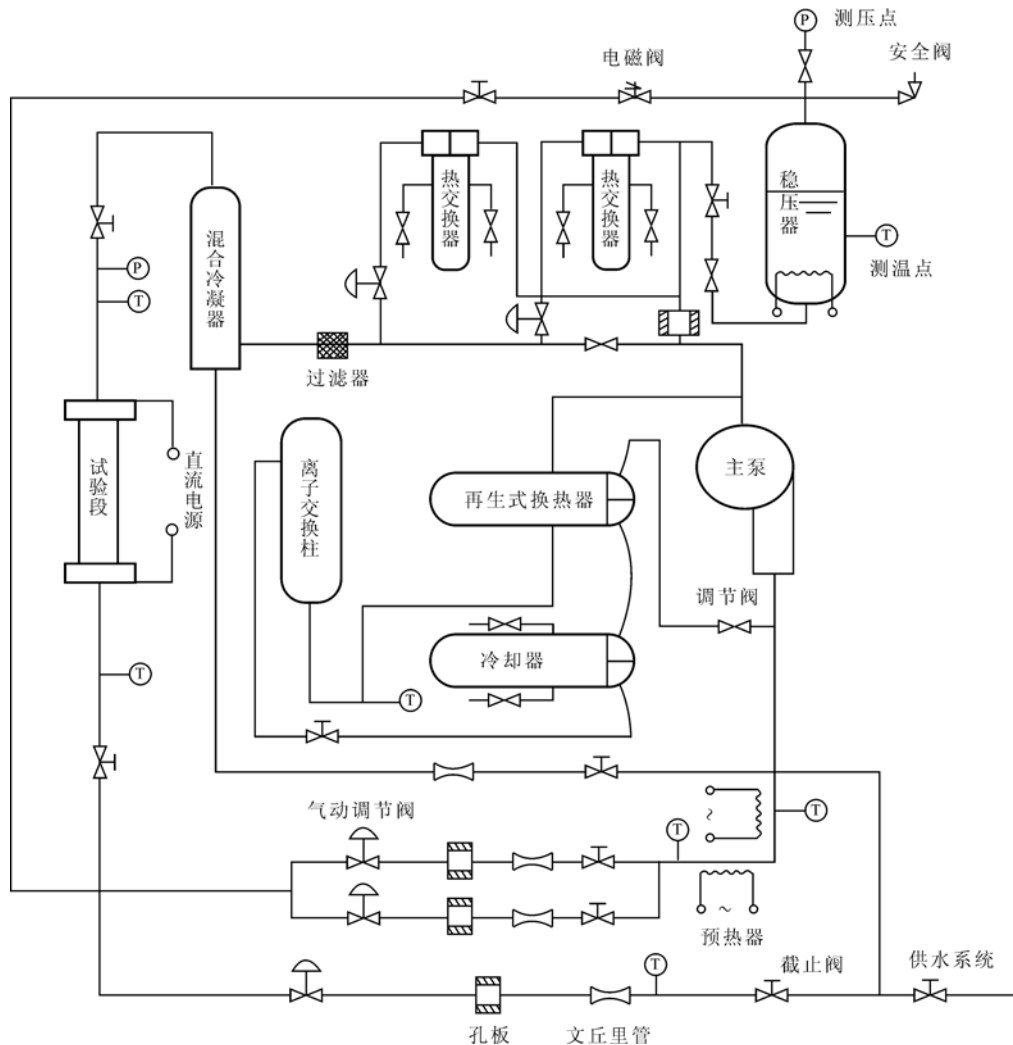


图1 实验回路流程图

Fig.1 Flow diagram of test loop

预热器和稳压器等。实验段垂直安装在回路的实验支路上,工质为去离子水,流体由下向上流动。

试验段为可视化试验段^[1],采用有机玻璃作为可视实验窗,便于观察。棒束组件由 3×3 正方形排列的9根 $\phi 9.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的不锈钢管、管板、定位格架、软铜辫和导电夹组焊而成。

每根元件管的两端分别焊有铜管和铜棒,加热长度为630 mm。沿棒束轴向设置了2个AFA-2G 3×3 定位格架^[2](图2),AFA-2G定位格架高度为33 mm。加热棒上部的定位格架上端面距离加热棒末端90 mm,两定位格架跨距为500 mm。总加热面积为 0.169 22 m^2 ,流通面积为 962 mm^2 ,棒束通道水力当量直径为9.0 mm,实验时的总电阻为 $1.91 \times 10^{-3} \Omega$ 。棒间距为12.6 mm,棒壁间距为2.65 mm。

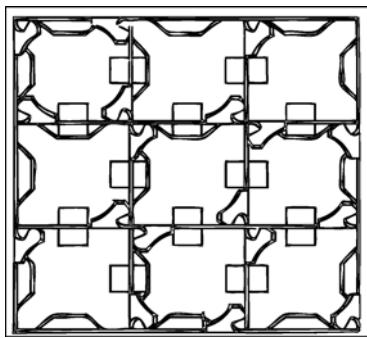


图2 AFA-2G 3×3 定位格架结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of AFA-2G 3×3 grid spacer

2 实验方法

2.1 光学探针系统

本实验采用的RBI光学探针系统如图3所示。该系统由光学探针(包括单探头与双探头探针)、光电转换模块、信号采集以及处理系统、计算及显示软件4部分组成。

光电转换模块发出的红外线经光纤传输,在光纤末端的探头处发生折射与反射,光电转换模块再将接收到的反射光信号转换为电信号,并对该信号放大整形,然后,电信号转换为逻辑信号(0, 5 V) TTL,并通过信号采集处理系统进入计算机。软件对接收到的数据进行计

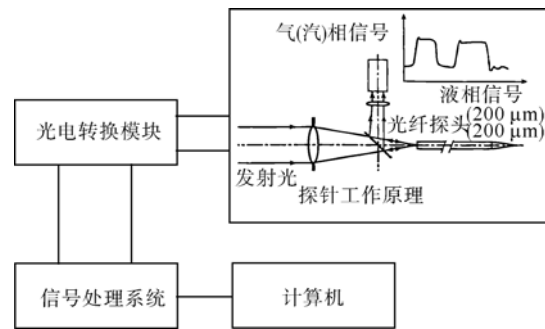


图3 RBI光学探针系统

Fig. 3 RBI optical probe system

算,并显示所得结果。

2.2 实验参数范围

本实验所用的主要参数为:冷却剂压力,0.44~1.37 MPa;入口过冷度,30.5~58.2 °C;质量流密度,737.19~1 587.71 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;加热段出口热平衡含汽率, -4.44%~+16.05%。

2.3 流型鉴别方法

到目前为止,在工程上确定流型主要依靠流型图。而流型图是通过流型实验或计算所取得的流型及其转变与各种参数的坐标关系。大多的流型实验都是针对一定的流道,在一定的实验参数下,进行直接观察实验,用目测或高速摄影来区分流型。这一方法带有主观因素,缺乏客观判断,尤其在流型转变区域,更难分辨。后来,许多学者通过对流场参数的随机信号进行分析,取得流型的判别条件,由此来确定流型。

本工作采用目测法和探针时序波形信号相结合对带定位格架棒束通道内的汽水两相流型进行识别。通过HP34810B BenchLink Scope软件将示波器波形存储为图形和数据2种格式的文件,然后根据时序波形识别流型。理想探针信号如图4所示,高低电平分别对应于气相和液相。

3 实验结果

3.1 流型鉴别

目前,对两相流动型式的研究较多,但大多流动型式的研究主要限于双组分(如空气-水)在圆管或螺旋管等简单结构内的情况,在加热

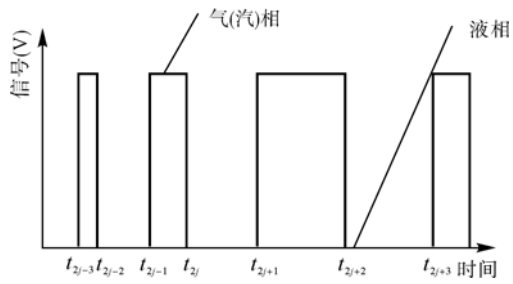


图4 理想探针信号

Fig. 4 Ideal signal of probe

工况下汽水两相单组分系统内的流动型式的研究工作相对较少,在反应堆堆芯结构内,特别是带定位格架棒束通道内由加热产生的汽水混合物垂直向上流动条件下,有关流型的研究工作更为鲜见。

为了确定带定位格架棒束通道内汽水两相流动型式,通过光学探针得到的波形及透过可视窗观察来鉴别不同的两相流动型式。对于加热的单相流,由于棒壁附近液体和通道中央汽水混合物温度和密度的变化使液体折射率发生较大变化,观测到一种阴影状流动型式。

在实验工况范围内,观察到的两相流动型式主要有以下几种。

1) 当单相水流过加热棒束通道时,随着加热量的增加,起泡点在加热棒壁面出现,且数目不断增加。热流密度进一步增加,造成更多的起泡点。当在液相内首次出现可观测到的汽泡时,泡状流动开始。这样就建立起靠泡核沸腾传热的泡状流动型式。刚开始出现汽泡流时,光学探针没有任何信号,主要是因为光学探针置于通道的中心,而汽泡开始时仅在加热壁面附近出现。

2) 在发生泡状流动之后再增加棒热流密度将导致泡状流向弹状流动过渡。汽泡数量

和尺寸逐渐增加,小汽泡开始聚结成大汽泡,当较大汽泡的直径接近等于子通道的等效直径时,弹状流动开始。

3) 当棒的热流密度进一步增加,轴向出现连续蒸汽并被液体包围时,环状流动开始。但此时液相内也含有小汽泡,连续蒸汽内也带有小液滴。

在该实验压力工况范围内,并未发现在高压情况下的泡状流向沫状流动过渡。将光学探针置于中央子通道的中心,可得到各种流型工况下典型探针波形如图5所示。

图5a显示,泡状流工况有高电平产生,波形较窄且波形之间有一定间隔,液相中弥散着小汽泡;图5b显示,在弹状流工况下,气泡尺寸增大,对应高电平波形较宽,其中夹杂的较窄波形则是弹状流中夹带的小气泡或大气泡边缘所致;图5c显示,环状流工况下几乎全为高电平波形,许多较窄低电平波形夹杂其中,则是连续蒸汽内也带有小液滴所致。

3.2 流型图

图6是3种压力(0.4、0.8和1.2 MPa)工况下以质量流密度和热平衡含汽率的函数关系绘制的流型图。每个图均给出了在给定压力下不同的流动型式以及从一种流型向另一种流型的近似过渡曲线。

图6a、b分别表示压力为0.4和0.8 MPa、质量流密度为750~1500 kg/(m²·s)情况下,从泡状流向弹状流动的过渡以及从弹状流向环状流动的过渡。图6c表示压力在1.2 MPa、质量流密度为750~1500 kg/(m²·s)情况下,从泡状流向弹状流动的过渡,由于实验条件限制无法得到该压力工况下环状流动型式。

由图6可见,两条过渡线的趋势均随热平



图5 泡状流、弹状流和环状流典型工况波形

Fig. 5 Representative sequence signal of flow patterns

a——泡状流;b——弹状流;c——环状流

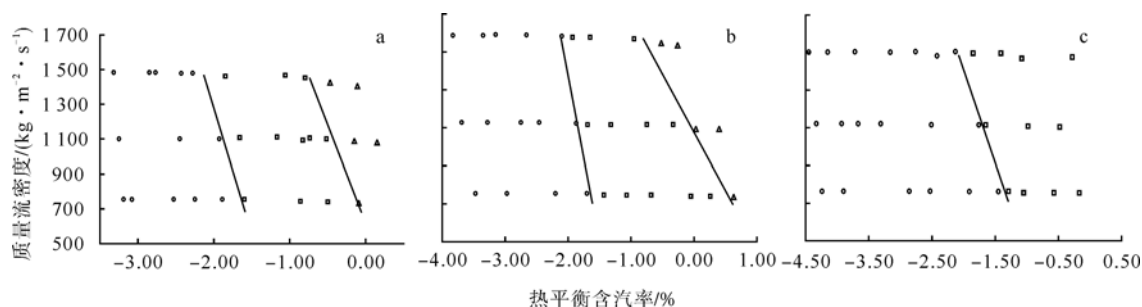


图6 不同压力下棒束中央通道内中心流型图

Fig. 6 Flow patterns map at center of central channel at pressures

a—0.4 MPa; b—0.8 MPa; c—1.2 MPa

○—泡状流; □—弹状流; △—环状流

衡含汽率的增大质量流密度下降。同时可看到,质量流密度对流动型式会产生较大影响,质量流密度的增大使过渡在较低的热平衡含汽量下发生。这可能是由于当质量流密度增加时,流体搅动增加,导致更多气泡合并。这种合并使流动型式的过渡发生在较低的热平衡含汽率下。由于实验压力范围有限,压力的影响尚无法确定。

4 结论

通过光学探针时序波形和可视窗观察相结合鉴别了带定位格架棒束通道内汽水两相流

型。实验获得了棒束通道内中央子通道中心的汽水两相流型图,不同流型过渡线的趋势均随热平衡含汽率的增大质量流密度下降。同时可看到,质量流密度对流动型式会产生较大影响,质量流密度的增大使流型过渡在较低的热平衡含汽量下发生。

参考文献:

- [1] 王小军. 棒束定位格架汽水两相流动特性研究[D]. 成都:中国核动力研究设计院,2005.
- [2] 姚溥. 实验用 3×3 定位格架图册[R]. 成都:中国核动力研究设计院设计所,1992.