

# CNP1000 反应堆控制棒导向管旁流试验研究

孟 洋, 李华奇, 王 盛

(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:**对 CNP1000 反应堆控制棒导向管旁流进行试验研究。实验测定导向管模型的阻力系数,将试验测定结果运用到原型导向管中,计算获得导向管旁流份额最大为 1.43%。

**关键词:**CNP1000 反应堆;控制棒导向管;阻力系数;旁流份额

**中图分类号:**TL41      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-6931(2007)S0-0031-04

## Bypass-flow Experimental Research of CNP1000 Reactor's Guide Pipe

MENG Yang, LI Hua-qi, WANG Sheng

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

**Abstract:** The bypass-flow of CNP1000 reactor's guide pipe was experimentally studied. In this study, the guide pipe model's resistance coefficient was obtained and it was used in the real reactor guide pipe. The calculated maximal bypass-flow fraction of the real reactor's guide pipe is 1.43%.

**Key words:** CNP1000 reactor; guide pipe; resistance coefficient; bypass-flow fraction

在反应堆中,导向管的主要作用是为控制棒组件提供运动通道并为其导向。在结构设计中,导向管需满足热工水力设计要求,既要保证反应堆在运行时能有适量的冷却水通过导向管,冷却控制棒组件,又要保证旁流不致过大而降低反应堆的热效率。导向管缩颈段上部开有流水孔,以允许正常运行时冷却剂流入,冷却控制棒,同时也保证控制棒进入缓冲区前能快速下落。因此,导向管结构复杂,开孔形阻、环缝摩阻和导向管进出口形阻混为一体,难以用计算的方法确定其阻力特性,只能通过试验获得

此种旁流的流动阻力特性,从而确定其原型的旁流量。

本试验测试控制棒在全提、全插、提 1/2 等棒位下导向管内旁流份额和不同阻力塞棒外径下导向管内旁流份额。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

**1.1.1 试验回路** 试验装置主要由回路系统和电气系统组成。回路系统主要设备有主泵、补水泵、冷却器、稳压器等。试验件垂直安装在

试验回路中。工作介质为去离子水。试验回路流程图示于图1。试验装置参数为:回路最大流量,200 m<sup>3</sup>/h;最大压力,1 MPa;最高温度,70 ℃。电气系统主要包括主泵电机、变频器等装置。主泵额定扬程 65 m H<sub>2</sub>O。变频器分辨率 0.1 Hz。

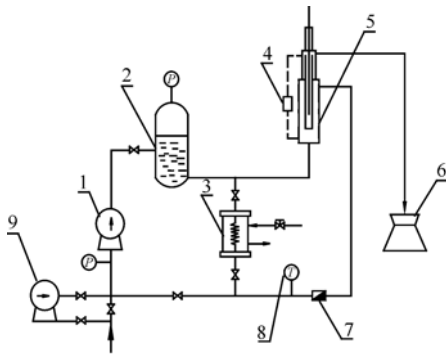


图1 试验回路流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental loop

- 1——主泵;2——稳压器;3——冷却器;  
4——压差传感器;5——试验段;6——标准量筒;  
7——流量计;8——温度计;9——补水泵

**1.1.2 试验本体** 为模拟反应堆控制棒导向管的真实流动,试验本体以 1:1 为基础,加工出导向管带有开孔和缩径的一段,导向管总长 1 200 mm,缩颈段内径为  $\phi 11.09$  mm,导向管上端内径为  $\phi 12.45$  mm,缩颈段上端开有 4 个  $\phi 3.4$  mm 孔,下端塞上有 1 个  $\phi 1$  mm 的孔。控制棒和阻力塞棒严格按原设计尺寸(长度缩短)加工。控制棒棒径为  $\phi 10.68$  mm,5 根阻力塞棒棒径分别为  $\phi 12.0$  mm、 $\phi 12.1$  mm、 $\phi 12.17$  mm、 $\phi 12.25$  mm 和  $\phi 12.35$  mm,流道部分几何尺寸、表面粗糙度与原型的相同。原型当量直径为 12 mm。按照当量直径相等的原则,确定试验筒体内径为  $\phi 24.45$  mm,保证导向管外流动特性与原型近似。试验模型如图 2 所示。在试验中,使试验段垂直放置,满足对中要求,防止控制棒水平放置时产生变形而使流道偏心。模型上端用法兰压紧橡皮垫圈的方法固定控制棒,同时起到密封作用。控制棒可上下移动,从而可进行控制棒插入不同深度时的试验。

## 1.2 试验方法

导向管旁流的驱动头是开孔当地与堆芯出

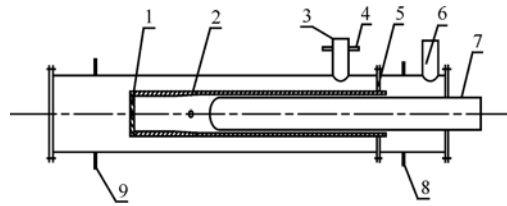


图2 试验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental model

- 1——下端塞;2——导向管;3——主流出水管;  
4、8、9——测压嘴;5——密封环;  
6——旁流出水管;7——控制棒

口的压力之差,即 0.163 MPa 的堆芯压降。欲获得导向管内旁流份额,需先测定出导向管旁流的总阻力系数。导向管的流动阻力系数包括以下 4 个部分:

- 1) 导向管下端 5 个小孔(下端塞 1 个小孔和缩径上 4 个小孔)的形阻系数;
- 2) 导向管内流体环隙流动(或圆管流动)的摩擦阻力系数;
- 3) 导向管内流道变化的形阻系数;
- 4) 导向管出口形阻系数。

总阻力系数以导向管下端 5 个小孔的截面为参考截面计算获得。原型导向管旁流总阻力系数等于试验测得的总阻力系数加上相应减少长度段的摩擦阻力系数。

根据试验的具体内容,如图 1 所示,把 9 与主回路连通,4 接一阀门直接通向大气。原型的旁流驱动头与主流驱动头一致。为模拟原型流动,将 6、7 压差与 6、8 压差调成一致,6、7 压差反映主流流动特性,6、8 压差反映旁流流动特性,从而建立与原型相似的流量分配关系。用计时称重法测得导向管旁流量,6、8 压差为旁流驱动头。获知旁流驱动头和旁流量后,可计算试验模型旁流总阻力系数。

## 1.3 试验工况

**1.3.1 插入控制棒时的工况** 控制棒棒位为全插入、1/2 棒位、全提。3 种工况的模型插入深度(插入深度从导向管上端面算起)分别为 1 105、450、177 mm。控制棒全插工况与原型的区别是环缝流动长度缩短了 2 689.5 mm(原型导向管长度 3 889.5 mm 减去模型导向管长度 1 200 mm)。控制棒提 1/2 棒位工况与原型的区别是环缝流动长度缩短了 1 494.75 mm,空

管流动长度缩短了 1 194.75 mm。控制棒全提工况与原型区别是空管流动长度缩短 2 689.5 mm。

**1.3.2 插入阻力塞棒时的工况** 阻力塞棒棒径分别为  $\phi 12.0$  mm、 $\phi 12.1$  mm、 $\phi 12.17$  mm、 $\phi 12.25$  mm 和  $\phi 12.35$  mm。5 种工况下的阻力塞棒的插入深度与原型的一致,均为 172 mm,区别是空管流动长度缩短了 2 689.5 mm。

## 2 总阻力系数和导向管旁流份额

试验需测量的参数有回路温度、主流压差、旁流压差和导向管旁流量(计时称重测量)。根据试验测取的数据,估算总阻力系数和导向管旁流份额。

### 2.1 模型导向管总阻力系数

模型导向管总阻力系数由下式计算:

$$A_0 = \pi d^2 + \pi d_0^2 / 4$$

$$L_0 = 4\pi d + \pi d_0$$

$$d_{e0} = 4A_0 / L_0$$

$$V_0 = Q_0 / A_0$$

$$Re_0 = V_0 d_{e0} / \nu_0$$

$$\zeta_0 = 2\Delta p_0 / \rho_0 V_0^2$$

在以上各式中:  $A_0$  为参考截面面积,  $m^2$ ;  $d$  为 4 个小孔直径,  $m$ ;  $d_0$  为下端塞小孔直径,  $m$ ;  $L_0$  为参考截面润湿周长,  $m$ ;  $d_{e0}$  为参考截面当量直径,  $m$ ;  $Q_0$  为模型导向管旁流量,  $m^3/s$ ;  $V_0$  为模型参考截面平均流速,  $m/s$ ;  $Re_0$  为参考截面雷诺数;  $\nu_0$  为运动粘度,  $m^2/s$ ;  $\rho_0$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $\zeta_0$  为模型导向管总阻力系数(参考截面为 5 个小孔);  $\Delta p_0$  为旁流驱动头,  $Pa$ 。

### 2.2 原型导向管总阻力系数

原型导向管的总阻力系数等于模型导向管总阻力系数加上相应减少长度段的摩擦阻力系数,包括空管流动摩擦阻力系数和环缝流动摩擦阻力系数。计算公式如下:

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4$$

$$\zeta_1 = \frac{0.3164}{Re_1^{0.25}} \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{A_0^2}{A_1^2}$$

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2$$

式中:  $A_1$  为空管截面面积,  $m^2$ ;  $d_1$  为空管直径,  $m$ ;  $l_1$  为空管长度,  $m$ ;  $\zeta_1$  为空管流动摩擦阻系数(参考截面为 5 个小孔);  $Re_1$  为空管雷诺数;  $\zeta_2$  为环缝流动摩擦阻系数(参考截面为 5 个小

孔);  $\zeta$  为原型导向管总阻力系数(参考截面为 5 个小孔);  $V$  为原型参考截面平均流速,  $m/s$ ;  $\Delta p$  为原型的旁流驱动头,  $Pa$ ;  $\rho$  为原型的流体密度,  $kg/m^3$ ;  $Q$  为原型旁流量,  $m^3/s$ 。

### 2.3 导向管旁流份额

导向管旁流份额等于堆芯所有导向管的总旁流量除以反应堆总流量,即  $V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho\zeta}}$ ,  $Q = VA_0$ 。

## 3 试验结果处理

### 3.1 导向管旁流试验

导向管旁流试验雷诺数与阻力系数的关系曲线示于图 3 和 4。

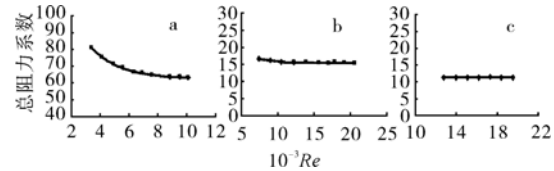


图 3 控制棒不同插入工况下的阻力特性曲线

Fig. 3 Resistance characteristic curves at various control-rod all-insert conditions  
a——全插入工况; b——1/2 棒位工况; c——全提工况

对上述试验数据进行初步分析后得知,导向管旁流的 8 种工况在实际原堆中的雷诺数均远大于试验所测得的最大雷诺数,原堆导向管旁流已达到自模状态。8 种工况中有 5 种工况(控制棒全插、1/2 棒位和全提、阻力塞棒棒径为  $\phi 12.0$  mm、 $\phi 12.1$  mm)流动已基本自模,模型总阻力系数  $\zeta_0$  可以应用于原型,其大小依次为 63.11、15.47、11.34、110.92 和 216.98。另外 3 种工况(阻力塞棒棒径为  $\phi 12.17$  mm、 $\phi 12.25$  mm、 $\phi 12.35$  mm)因阻力太大,试验得到的雷诺数很小,流动未进入自模状态,试验所得阻力系数无法应用于原型。

控制棒提 1/2 棒位工况和控制棒全提出工况达到自模后的阻力系数分别为 15.47 和 11.34。两者阻力系数的差异是由控制棒插入深度的不同所引起,即由摩擦阻力引起的。分析得知,这两种工况下达到自模后的阻力系数差值为  $15.47 - 11.34 = 4.13$ ,它是由环缝流动变为空管流动造成的,流动长度为两者插入深

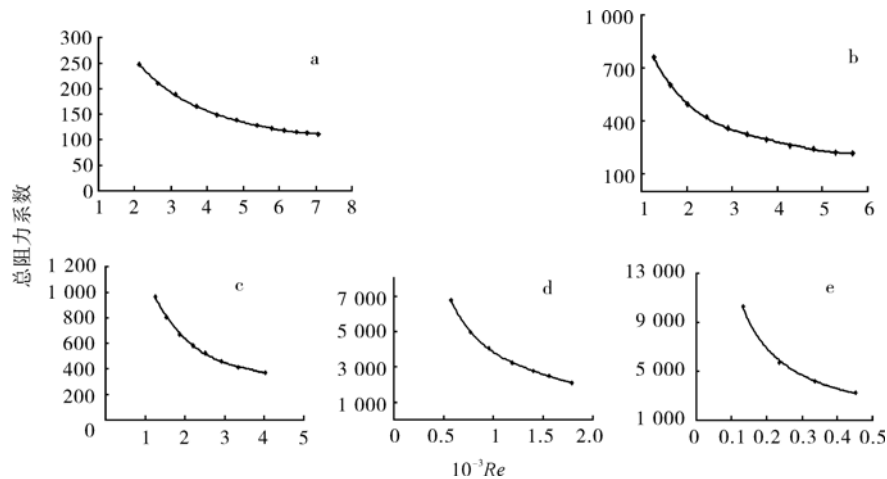


图4 不同阻力塞棒工况下的阻力特性曲线

Fig. 4 Resistance characteristic curves for various resistance rods

a— $\phi 12.0$  mm; b— $\phi 12.1$  mm; c— $\phi 12.17$  mm; d— $\phi 12.25$  mm; e— $\phi 12.35$  mm

度的差值  $450 - 177 = 273$  (mm)。用经验公式算得空管流动的阻力系数为 0.022。所以,环缝流动的摩擦阻力为  $4.13 + 0.022 = 4.152$ 。换算得到,流动长度为 1 000 mm 时,对应的环缝摩擦阻力系数为 15.21。此值将用于原型导向管总阻力系数的计算中。

### 3.2 原堆各种工况下单根导向管的旁流量

堆芯压降, 0.163 MPa; 冷却剂系统压力, 15.5 MPa; 堆芯平均温度, 311.1  $^{\circ}\text{C}$ 。

在此条件下, 计算得到原堆中不同工况下单根导向管旁流量列于表 1。

### 3.3 原堆各种工况下导向管内总旁流份额

原型堆芯中插入控制棒的导向管为 1 464 根, 插入阻力塞棒的导向管为 2 776 根, 反应堆

流量为  $23\,790 \times 3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。不同工况下导向管内的旁流份额列于表 2。

表 1 原堆中各种工况下的单根导向管旁流量

Table 1 Real reactor's bypass-flow flux of one guide pipe in each conditions

工况	$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2$	单根导向管旁流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
控制棒全插	104.017	0.143 6
控制棒提 1/2 棒位	38.276	0.236 7
控制棒全提出	11.477	0.432 3
阻力塞棒棒径 $\phi 12.00$ mm	111.086	0.139 0
阻力塞棒棒径 $\phi 12.10$ mm	217.166	0.099 4

表 2 原堆中不同工况下的导向管旁流份额

Table 2 Real reactor's bypass-flow quotient of guide pipe in each conditions

工况	单根导向管旁流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	总旁流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	旁流份额/%
1 464 根控制棒全插	0.143 6	210.23	0.29
1 464 根控制棒提 1/2 棒位	0.236 7	346.53	0.49
1 464 根控制棒全提出	0.432 3	632.89	0.89
2 776 根阻力塞棒棒径 $\phi 12.00$ mm	0.139 0	385.86	0.54
2 776 根阻力塞棒棒径 $\phi 12.10$ mm	0.099 4	275.93	0.39

## 4 结论

通过对试验数据的分析处理, 计算得到原堆中不同工况下的导向管旁流份额。控制棒全

提工况下的旁流份额为 0.89%, 阻力塞棒棒径  $\phi 12.0$  mm 工况的旁流份额为 0.54%, 原堆中导向管旁流份额最大值为这两者相加, 即为 1.43%。