

# CNP1000 反应堆下空腔交混及压降试验研究

王 盛, 杨来生, 李朋洲, 胡 俊, 尹 涛, 黄兆庆, 赵 玲

(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:**本工作涉及 CNP1000 反应堆下空腔交混及压降试验。试验目的是:获得下空腔交混因子和反应堆各部分的阻力系数,确定事故工况下硼水及冷水注入量,为主蒸汽管道断裂等事故分析提供依据;确定原型堆各部分的压降,为主泵扬程及结构选择提供数据,同时为堆芯热工水力设计和安全分析提供必要的输入数据。试验模型与原型比例为 1/4,模型设计基于水力相似理论,与原型在形状、尺寸上对应成比例,并对一些部件和结构进行简化,模拟燃料组件应用 Khan 的压水堆堆芯流动模型理论进行开式栅格动力相似准则设计,棒束为  $2 \times 2$  方形布置。堆芯模拟燃料组件下管座均安装一个特制的电导电极,并配一个变送单元,采用分析纯 KCl 溶液作为示踪剂。模型相应位置设置压差测点,用差压变送器进行测量。配置专门的数据采集系统。试验装置回路系统由 3 条环路组成,在模型两进口管前设置 KCl 溶液注射系统。试验得到了各种工况下的下空腔交混因子和反应堆各部分的阻力系数,并给出了相关结论,为堆芯热工水力设计和安全分析提供了试验数据。

**关键词:**CNP1000 反应堆;交混因子;下空腔;压降

**中图分类号:**TL33      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-6931(2007)S0-0151-05

## Test Research on Flow Mix and Pressure Loss of CNP1000 Reactor Lower Plenum

WANG Sheng, YANG Lai-sheng, LI Peng-zhou, HU Jun, YIN Tao,  
HUANG Zhao-qing, ZHAO Ling

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

**Abstract:** This research concerns in flow mix and press drop test of CNP1000 reactor lower plenum. The purpose of the test is to provide the indispensable hydraulic characteristics parameters such as the flow mix factors at the lower plenum and the various components' resistance coefficients for reactor structure, thermal hydraulic design and safety analysis. The integral hydraulic simulation model design principles are low-pressure and temperature model, geometrical similarity criterion, Reynolds criterion and Euler criterion. Integral model was designed and fabricated to scale 1 : 4. Exact geometrical similarity was maintained between the main flow paths of the model and the prototype, with the exception of the core and all the leakage and bypass locations. Simulation of the fuel assemblies was performed according to the

收稿日期:2007-05-08;修回日期:2007-07-19

作者简介:王 盛(1973—),男,四川仁寿人,副研究员,硕士研究生,反应堆流体力学专业

open lattice core simulation criterion in this study, lateral and axial flow characteristics were designed to be the same as the prototype respectively. Inlet and outlet flow paths of the fuel assembly model were maintained to be geometric similar to the prototype. The rods of the fuel assembly model was arranged in  $2 \times 2$  square shape. In the bottom nozzle of each fuel assembly model was lay a conductance pole, which was used to measure the KCl concentration of the fuel assembly. The integral test facility was composed of 3 loops. The test was performed by researching fluid flow characteristics in the reactor, the corresponding hydraulic parameters had be obtained to verify and improve the reactor structure, thermal hydraulic design and safety analysis.

**Key words:** CNP1000 reactor; flow mix factors; lower plenum; pressure loss

CNP1000 是我国首次自主设计的百万千瓦级核电站,与国内现役核电站相比,设计上进行了改进,堆芯装载 177 盒燃料组件,增大了堆芯和压力容器尺寸。结构的改变引起堆内冷却剂流动特性发生变化。通过下空腔交混及压降试验研究获得各种工况下的下空腔交混因子和反应堆各部分的阻力系数,可确定事故工况下硼水及冷水注入量,为主蒸汽管道断裂等事故分析提供依据;可确定原型堆各部分的压降,为主泵扬程及结构选择提供数据,为堆芯热工水力设计和安全分析提供必要的输入数据。

## 1 研究内容

1) 反应堆压力容器进出口总压降和各部分压降(包括堆进口管嘴,环形下降段、下腔室、堆芯入口段、堆芯区、堆芯出口段、堆出口管嘴等),给出相应的阻力系数。

2) 下空腔交混水力特性,给出下空腔流动交混因子。

## 2 试验技术路线

在整体水力模拟体上进行下空腔交混因子测量和反应堆各区段阻力特性研究。下空腔交混试验采用示踪剂法。试验工作介质为去离子水,选分析纯 KCl 作示踪剂,用特制的微型电导电极和专用数据采集系统测量 KCl 浓度,从而获得交混因子。在整体模型相应的部位设置压差测点,用智能式差压变送器结合数据采集系统测量各区段压降,从而得到各部分阻力系数。

## 3 试验模型

该模型比例为 1/4,模型外径 1.085 m,高度约 2 m(图 1)。

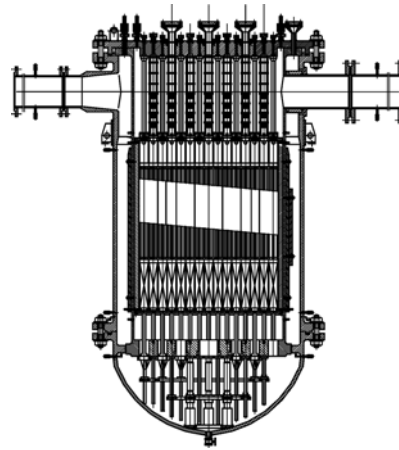


图 1 整体试验模型结构图

Fig. 1 Integral experiment model

模型设计基于水力相似理论,与原型在形状、尺寸上对应成比例,并对一些部件和结构进行简化;将原型上封头部分简化为平顶盖;去掉吊篮出口管与压力容器间环缝,改为套管压紧式结构;简化围板结构,试验时不再考虑围板外腔旁漏流;下空腔的支撑结构以及上部堆内构件保证外形尺寸与原型相似;凡原型中流速低的流道,模型对应部分的表面粗糙度相似要求适当放宽;原堆芯 AFA3G 组件用动力相似原则设计的非几何相似结构的模拟组件替代。

模拟燃料组件应用 Khan 的开式栅格理论进行动力相似准则设计,由入口段、棒束段、出口段三部分组成(图 2)。每个模拟组件下管座上安装一个电导电极。

根据堆内各部分阻力系数和旁漏流驱动头的测量要求,在整体模型相应的部位设置压差测点(图 3),就近用  $\phi 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  引压管引到模型外。

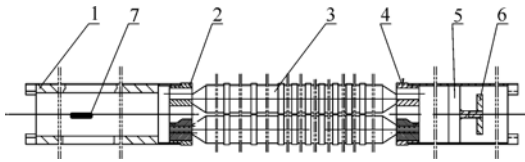


图2 模拟燃料组件结构

Fig. 2 Fuel assemble model

1—下管座;2—下管板;3—模拟燃料棒;4—上管板;  
5—上管座;6—阻力调整片;7—电导电极

## 4 试验装置

试验装置回路系统由 A、B、E 3 条环路组成,回路主泵额定流量  $1\ 260\ \text{m}^3/\text{h}$ ,额定扬程  $85\ \text{m H}_2\text{O}$ ,主管道 DN300,工作介质为去离子水,工作温度  $\leq 70\ ^\circ\text{C}$ 。试验模型中的 2 条入口管(A 和 B 环路)设置 KCl 溶液注射系统。在 A 环路主泵出口装一 DN300 气动调节蝶阀,模拟两环路运行时第 3 个环路突然启动注入冷水工况。KCl 溶液储存罐内溶液由压缩空气加压后经电磁阀、手动截止阀和注射管注入主回路。注射管插到整体试验模型入口上游 5 m 处的主管道,注射管周向布置 3 排小孔,其中一排面向来流,保证从注射管喷出的 KCl 溶液和主管道的去离子水到达下空腔前混合均匀。

## 5 测量装置

### 5.1 测试仪器仪表

试验所用测试仪器仪表列于表 1。

电导电极变送系统为模块化设计,具有消除电导电极测量时的极化现象、保证输出信号的实时性、消除温度变化对浓度测量影响以及电路之间的无电磁干扰的特点和优点。

### 5.2 测试系统

动态数据采集系统由 NI 的 PXI1045 18 槽机箱和 14 块 PXI2650 高速采集卡组成,采集

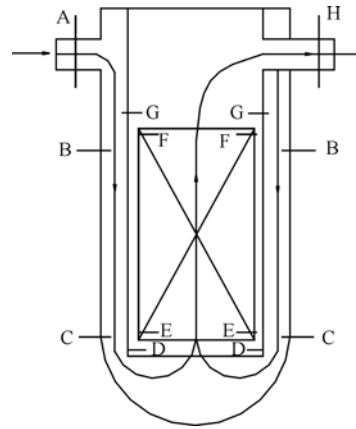


图3 试验模型差压测点布置

Fig. 3 Distribution of pressure test points in model

各段压差:AH——进出口;AB——入口段;  
BC——下降段;CD——下腔室;DE——堆芯入口;  
EF——堆芯区;FG——堆芯出口;GH——堆芯出口腔

电导电极信号。静态数据采集系统由 IMP35951C 模块和 IMP35952A 模块组成。涡轮流量计频率信号经频率放大器放大后由 IMP35952A 采集;差压变送器电压信号经配电器转换由 IMP35951C 采集。

## 6 试验工况

压降试验工况列于表 2,下空腔交混试验工况列于表 3。

## 7 试验数据处理及分析

### 7.1 压降试验数据处理及分析

根据试验测得的模型各部分的压差计算各部分的阻力系数(为了对比和换算,均以入口管横截面为参考截面),结果列于表 4。

在工况为  $850\ \text{m}^3/\text{h} \times 3, 50\ ^\circ\text{C}$  下,堆入口雷诺数  $Re$  为  $3.01 \times 10^6$ ,堆芯区入口雷诺数  $Re$  为  $0.94 \times 10^5$ ,均已达到自模。总阻力系数直

表 1 试验所用仪器仪表

Table 1 Devices in experiment

测量参数	所用仪表名称及型号	测量范围	精度/%	数量
回路温度	温度变送器 SBWZK-2460S-B/23K	0~100 $^\circ\text{C}$	0.5	3
回路流量	涡轮流量计 LW-300	300~1 600 $\text{m}^3/\text{h}$	0.5	3
压差	差压变送器 EJA110A	5~500 kPa	0.1	8
电导率	电导电极及变送系统	0.5~3 mmol/L	1.5	177

表2 压降试验工况

Table 2 Work condition of pressure loss experiment

工况	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		
	A 环路	B 环路	E 环路
三环路运行	850	850	850
	820	820	820
	785	785	785

表3 下空腔交混试验工况

Table 3 Work condition of lower plenum mix experiment

工况	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )		
	A 环路	B 环路	E 环路
三环路运行,	850 <sup>1)</sup>	850	850
一环路注入硼工况	785 <sup>1)</sup>	785	785
	350 <sup>1)</sup>	350	350
	850	850 <sup>1)</sup>	850
	785	785 <sup>1)</sup>	785
	350	350 <sup>1)</sup>	350
三环路运行,	850 <sup>1)</sup>	850 <sup>1)</sup>	850
两环路注入硼工况	785 <sup>1)</sup>	785 <sup>1)</sup>	785
	350 <sup>1)</sup>	350 <sup>1)</sup>	350
两环路运行,	启动 <sup>1)</sup>	850	850
第三环路注入冷水工况	启动 <sup>1)</sup>	785	785
	启动 <sup>1)</sup>	350	350

注:1) 为注射 KCl 溶液环路

表4 CNP1000 反应堆各部分阻力系数

Table 4 Resistance coefficient in each part of CNP1000 reactor

部位标记	部位名称	全压差/kPa	阻力系数
AB	入口管	34.00	0.708
BC	环形下降段	3.84	0.080
CD	下腔室	4.14	0.086
DE	堆芯入口段	3.58	0.074
EF	模拟堆芯区	58.49	1.215
FG	堆芯出口段	12.58	0.261
GH	堆出口管嘴	23.45	0.486
AH	堆进、出口管	149.34	3.011
ΣAH	堆进、出口管		2.910

接测量值为 3.011, 各区段阻力系数总和为 2.910, 这归因于堆内结构复杂, 压差测量存在误差。

## 7.2 下空腔交混试验数据处理及分析

下空腔交混因子指来自注射 KCl 溶液环路的流量占被测组件来自各环路的总流量份额。

若主系统 1 个环路(如 A 环路)注入 KCl 溶液, 第  $i$  个组件的交混因子  $\alpha_i$  则为:

$$\alpha_i = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho_i - \rho_b}{\bar{\rho} - \rho_b}$$

式中:  $\rho_i$  为第  $i$  个组件中的 KCl 溶液浓度;  $\rho_b$  为环路及模型中 KCl 溶液本底浓度;  $\bar{\rho}$  为堆芯中 KCl 溶液的平均浓度,  $\bar{\rho} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i$ ,  $n$  为模拟燃料组件数(177)或实际测到的通道数量。

同理, 当 KCl 溶液分别从 A 环路和 B 环路同时注入到试验模型,  $\alpha_i$  为:

$$\alpha_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_i - \rho_b}{\bar{\rho} - \rho_b}$$

由试验数据计算得到各种工况下的下空腔交混因子, 根据组件在活性区内座标位置, 填上其  $\alpha_i$  便得活性区交混因子图。

由试验获得了大量的数据, 并得到了各种工况下的交混因子图。受篇幅限制, 只给出了 850 m<sup>3</sup>/h×3 在 A 环路入 KCl 溶液工况下的交混因子图(图 4)。图 4 中所示均为 3 次试验的算术平均值, 其中, 有些通道因电导电极及变送单元损坏而无数据, 由插值法进行补充(带下划线数据)。全堆芯下空腔交混因子平均值为 0.336, 120°堆芯最大交混因子平均值为 0.527 (150°~270°)。

对各种工况下的下空腔交混因子数据进行分析比较可知, 其分布基本与流体流动规律一致。对应注入 KCl 溶液进口管的下空腔部分, 来自该环路的水流量份额(交混因子)较大, 越远越小(有些图给出了交混因子的等值线), 但 A、B 环路非完全对称, 原因是下部堆内构件布置不对称, 且模型内流体的流动具有不对称性。小流量工况下的交混因子不如大流量下的均匀, 这与流动不稳定等有关。A、B、E 环路的流量并非完全相同, 且有一定波动, 相互之间有一定偏差, 这影响了下空腔的交混因子分布及其测量。

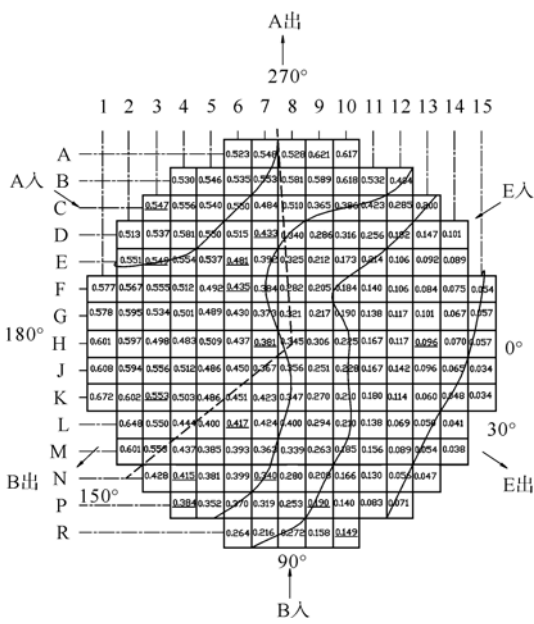


图4 850 m<sup>3</sup>/h × 3 A 环路

注入 KCl 溶液的下空腔交混因子

Fig. 4 Mixing factor in lower plenum

at KCl solution injected into loop A (850 m<sup>3</sup>/h × 3)

## 8 不确定度分析

### 8.1 模型阻力系数的不确定度

影响模型阻力系数的因素有直径、流量、压差、密度。 $u(\Delta p)$  主要反映压差的波动和仪表的系统误差,为 1.2%;  $u(Q)$  来自于主回路涡轮流量计,其精度为 0.5%; 模型进口管直径不确定度  $u(d_0) = \frac{0.1}{175} \times 100\% = 5.7 \times 10^{-2}\%$ ; 参数测量过程中的温度变化很小,为  $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 故可认为水的密度变化很小,  $u(\gamma)$  约为 0.002%, 可忽略不计。由此得到模型阻力系数不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u^2(\Delta p) + u^2(\gamma) + 4u^2(Q) + 16u^2(d)} = \sqrt{1.2\%^2 + 4 \times (0.5\%)^2 + 16 \times (5.7 \times 10^{-2}\%)^2} = 1.6\%$$

### 8.2 下空腔交混因子的不确定度

影响模型下空腔交混因子的因素有直径、流量、电导率、温度。模型进口管直径不确定度  $u(d_0) = 5.7 \times 10^{-2}\%$ ;  $u(Q)$  精度为 0.5%;  $u(K)$  主要反映电导率测量系统的测量精度,为 1.5%; 温度变化为  $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $u(t)$  为 1.0%。由此得到下空腔交混因子不确定度为:

$$u_c = [u^2(K) + u^2(t) + 4u^2(Q) + 16u^2(d)]^{\frac{1}{2}} = [1.5\%^2 + 1.0\%^2 + 4 \times (0.5\%)^2 + 16 \times (5.7 \times 10^{-2}\%)^2]^{\frac{1}{2}} = 2.1\%$$

## 9 结论

1) 试验获得了 CNP1000 反应堆各部分的阻力系数,压差测量不确定度为 1.58%; 总阻力系数直接测量值为 3.011, 各区段阻力系数总和为 2.910, 两者相差 3.35%, 压差测点布置合理, 测量准确。

2) 试验获得了 CNP1000 反应堆各种工况下的下空腔交混因子, 测量不确定度为 2.07%; E 环路的交混因子可以用计算得到的 1-(A+B) 环路下空腔交混因子代替。

3) 下空腔交混因子分布基本合乎流体流动规律, 对应注入 KCl 溶液进口管的下空腔部分, 来自该环路的水流量份额(交混因子)较大, 且越远越小; A、B 环路交混因子分布不对称, 与下部堆内构件布置不对称、模型内流体的流动具有不对称性有关, 且小流量工况下的交混因子不如大流量情况下的均匀; 在各种工况下, 120° 堆芯区最大交混因子平均值为 0.545 (350 m<sup>3</sup>/h × 3, A 环路注入 KCl 溶液, 150° ~ 270° 堆芯区)。

## 参考文献:

- [1] 汪利民, 宗桂芳. 600 MW 反应堆堆芯入口流量分配试验研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(2): 185-189.  
WANG Limin, ZONG Guifang. Test of flow distribution at the core inlet of 600 MW reactor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(2): 185-189(in Chinese).
- [2] 列兹尼亚夫 A. 相似方法[M]. 王成斌, 译. 北京: 科学出版社, 1963.
- [3] KHAN E U. Analytical investigation and design of a model hydrodynamically simulating a prototype PWR core[J]. Nucl Technol, 1972, 16(3): 479-40.
- [4] 依杰里奇克(苏). 水力摩阻[M]. 黄俊, 夏颂佑, 译. 北京: 电力工业出版社, 1957.
- [5] 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.