

# 中国实验快堆大栅板联箱 及一回路压力管数值模拟

冯预恒, 乔雪冬

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

**摘要:** 本文利用计算流体力学软件 CFX, 对中国实验快堆大栅板联箱及一回路压力管进行稳态模拟计算。计算得到大栅板联箱内及一回路压力管道的压力、速度分布。使用流道面积等效方法, 模拟大栅板联箱各流道的流量分配, 通过计算找出可适用区域, 尝试解决多流道相互发生动态影响的方法, 使模拟大栅板联箱瞬态过程成为可能。

**关键词:** 中国实验快堆; 计算流体力学软件 CFX; 面积等效; 大栅板联箱; 一回路压力管

**中图分类号:** TL33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2007)S0-0208-05

## Numerical Analysis of Distribution Header and Primary Loop Pressure Tube for China Experimental Fast Reactor

FENG Yu-heng, QIAO Xue-dong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-95, Beijing 102413, China)

**Abstract:** By using the hydromechanical code CFX, the fluid state of pressure tube and the distribution header in China Experimental Fast Reactor (CEFR) were simulated, and the simulated results of pressure and velocity distribution for flow paths of distribution header were obtained. Area equivalent method was used to decide proper zone, as a result a way was found to solve multi-path problem, and made it possible to simulate the transient state.

**Key words:** China Experimental Fast Reactor; hydromechanical code CFX; area equivalent; distribution header; pressure tube

中国实验快堆(CEFR)一回路主要由冷池、堆芯、热池 3 大部分组成, 包括 2 个环路。在每个环路中, 1 台一次钠泵及其 2 条压力管、大小栅板联箱将冷池和堆芯连在一起。为最大限度的减小入口边界对大栅板联箱内压力分布的影响, 提高计算精度, 将计算区域的入口边界

选择在 2 个泵的入口处。堆芯内各组件的流量分配首先由小栅板联箱及其节流件完成, 即必须保证小栅板联箱及其节流件入口流量的正确性。其入口即是大栅板联箱出口。因此, 计算区域的出口边界选择在小栅板联箱节流件入口处。

本文尝试在流道出口设置面积等效的方

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-01

作者简介: 冯预恒(1968—), 男, 北京人, 高级工程师, 核能与热能工程专业

法,对大栅板联箱及一回路压力管区域在额定功率运行的稳态工况进行数值模拟。

栅板联箱是 CEFR 堆芯支承的主要组成部分,由大栅板联箱、202 个小栅板联箱、1 个补偿器、7 个底部节流装置、1 个侧向节流装置和 12 套紧固件组成。冷却剂流入大栅板联箱经小栅板联箱再分配给堆芯各组件,带走热量、冷却组件。

大栅板联箱是由  $\phi 2035$  mm、厚为 50 mm 的上、下 2 块栅板和一  $\phi 1875$  mm  $\times$  30 mm 的圆筒焊接而成的圆柱形容器,其高为 800 mm。上、下 2 块栅板之间焊有 37 根套管(用于高压钠小栅板联箱的管脚固定)。在上栅板上装有固定自然循环供钠小栅板联箱管脚用的套管(共 48+117 个,2 种)。在下栅板上装有 7 个为主容器冷却系统供钠的节流装置。沿  $\phi 1875$  mm 的圆筒周向有 4 个与压力管对接焊用的管接头。靠堆内电离室侧装有一个用于堆内电离室冷却系统的供钠节流装置。计算中未考虑电离室冷却系统。

CFX 是大型通用 CFD 软件。特别是在计算三维流体领域内,无需简化而直接对真实的复杂几何结构的流体流动进行模拟,从真正意义上实现设计分析一体化。同时,CFX 采用的非结构化网格生成技术使复杂结构的网格基本可以做到自动生成。该程序尤其适合计算复杂结构下无相变的流体三维流场。

本研究计算给出计算区域内三维的温度、压力分布、流场速度动态分布,从而可得到任意位置的温度、流速、压力等,为了解和分析流动特性提供可能。

## 1 计算方法和基本方程

CFX 基于流体流动的基本方程如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla(\rho U \times U) = B + \nabla \sigma$$

能量方程:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla(\rho U H) - \nabla(\lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t}$$

## 2 计算模型和边界条件

### 2.1 建模

大栅板联箱一回路压力管模型示于图 1,真实模拟设备和部件的实际几何形状和尺寸。几何模型 360°,主要包括两大部分:

1) 2 台一次钠泵腔体及其 4 个一回路压力管,流体分别通过 2 台一次钠泵的 4 个入口经一回路压力管进入大栅板联箱;

2) 大栅板联箱内部结构示于图 2。流体进入大栅板联箱后,通过 37 个大栅板联箱套筒中的 25 个,经每个套筒上 6 个开孔流入环形套筒,然后在环状套筒中从各个出口流出。

### 2.2 边界条件

计算区域外边界假设为绝热边界条件。

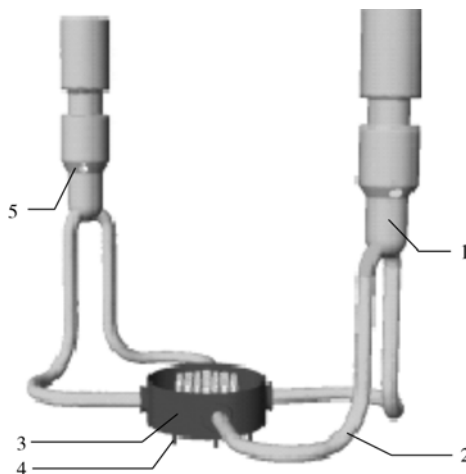


图 1 大栅板联箱一回路压力管

Fig. 1 Primary loop pressure tube of distribution header

1——一次钠泵腔体;2——一回路压力管;  
3——大栅板联箱;4——底部节流装置;  
5——一次钠泵入口



图 2 大栅板联箱内部结构

Fig. 2 Structure of distribution header

入口边界条件为:2台一次钠泵,  $Q_1 = Q_2 = 76.155 \text{ kg/s}$ ;入口钠温,  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

出口边界条件:出口边界条件是计算中的研究重点。根据相关报告<sup>[1]</sup>,计算出大栅板联箱各套筒流量,其数据及编号示于图3、4。

因计算精度有限,因此,将上述数据间相差小于5%者进行合并后,则出口流量分为5类,即: $Q_{A0} = Q_{A1} = Q_{A3} = Q_{A5}$ ;

$$Q_{A2} = Q_{A4} = Q_{A6};$$

$$Q_{B1} = Q_{B3} = Q_{B5} = Q_{B7} = Q_{B9} = Q_{B11};$$

$$Q_{B2} = Q_{B4} = Q_{B6} = Q_{B8} = Q_{B10} = Q_{B12};$$

$$Q_{C3} = Q_{C6} = Q_{C9} = Q_{C12} = Q_{C15} = Q_{C18}。$$

主容器冷却系统流量为  $Q_{d1}$ 。

计算中,通过调整出口面积,即通过设置出口流道面积来控制其出口流量。通过反复计算和调试后,确定上述5类出口的流道面积,其在

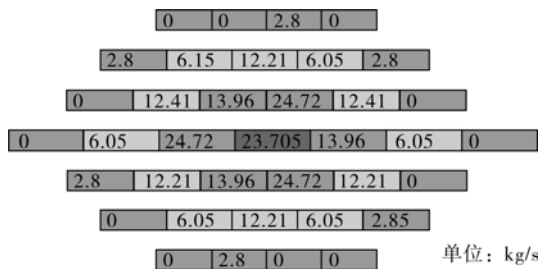


图3 大栅板联箱各套筒流量

Fig. 3 Outlet flux of distribution header

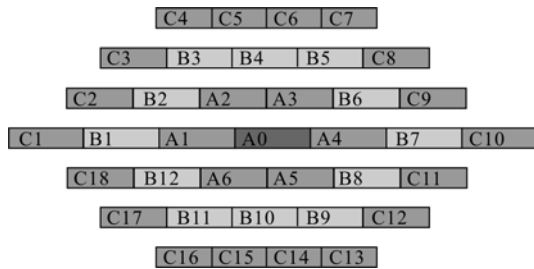


图4 大栅板联箱各套筒编号

Fig. 4 Number of distribution header

大栅板联箱模型中的所在区域示于图5。

计算中将大栅板联箱最中间套筒的出口流量和流道面积作为基准,其它24个套筒的出口流道面积决定于套筒中的流量与出口流道面积的比值(即流道阻力),再通过理论计算后,确定其它24个套筒的出口流道面积。

大栅板联箱各套筒出口对应的编号及流量列于表1。

### 2.3 计算模型

紊流模型采用  $k-\epsilon$  模型,壁面对紊流的影响为标准情况,考虑重力的影响,各流量下流道内初始流速以理论计算为准,且在内壁设置了膨胀网格。其它的输入和模型选择默认值。模拟计算时,壁面被设成光滑,计算模型的出口压力设为  $0 \text{ Pa}$ 。自动生成四面体非结构化网格。在结构复杂和流动间隙处采用密集网格。在保证计算精度前提下,尽量减少网格数量,采用网格一体化、模型分区等技术。

在计算中,将大栅板联箱的37个套筒从大栅板联箱中独立出来,分别建体,这样既有利于调试计算,又节省了大量的体网格。因大栅板联箱的37个套筒出口处的流道面积都非常小,采用上述方法后,在不增加整体网格数的情况

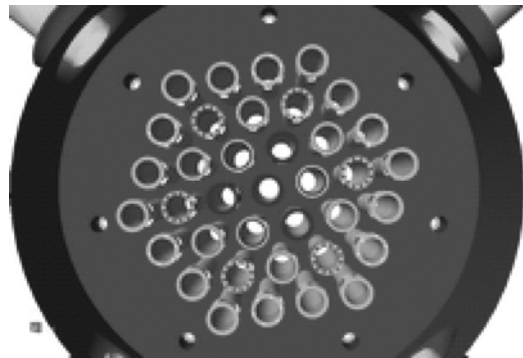


图5 大栅板联箱各套筒出口位置分布

Fig. 5 Outlet position in distribution header

表1 大栅板联箱各套筒出口对应的编号及流量

Table 1 Number and outlet flux of distribution header

编号 图示	$Q_{A0}$	$Q_{A2}$	$Q_{B1}$	$Q_{B2}$	$Q_{C3}$
流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	30.807 6	17.9	14.82	7.82	3.59

下,提高了各出口的网格密度。

## 2.4 物性参数

流质为钠,流体内压力为常压。为真实模拟额定工况下冷池的流动及温度的影响,液态钠的各物性参数皆随温度改变<sup>[2]</sup>。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 模拟计算与设计参数的对比

表2为各套筒出口流量的数值计算结果与设计值的比较。从表2可知,两者间相对偏差小于10%。

表2 计算结果与设计参数的比较

Table 2 Comparison between calculated data and design parameters

流量	设计参数/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算结果/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Q <sub>A1</sub>	30.80	31.85
Q <sub>A2</sub>	17.9	16.85
Q <sub>B1</sub>	14.82	13.85
Q <sub>B2</sub>	7.82	7.67
Q <sub>C3</sub>	3.59	3.4
Q <sub>d1</sub>	40	45

### 3.2 结果分析

采用控制出口流道面积的方法,模拟计算出了各大栅板联箱套筒开孔流量。因在一个确定的系统内,其形阻基本不变,但沿程阻力的大小受流速影响,因此,本次计算得到的流道面积,其使用范围有限,尤其在计算小流量时,计算结果的精度不高。

#### 1) 大栅板联箱压力场

大栅板联箱的压力分布在轴向和纵向皆极其复杂。在距离栅板联箱底部300、500、650 mm处,大栅板联箱压力分布分别示于图6~8。

从图6~8可知,大栅板联箱内的压力分布,其变化不大,压差约600 Pa。在图8中,压力变化较大,出现在纵向在大栅板联箱最内的4个套筒,即编号为A0至A1、A0至A3、A0至A5之间;轴向出现在联箱套筒的6个开孔的上沿,压力损失约1 000 Pa。A0、A1、A3、A5为燃料区提供流量,数值较大,占总流量约37%。

#### 2) 大栅板联箱流场

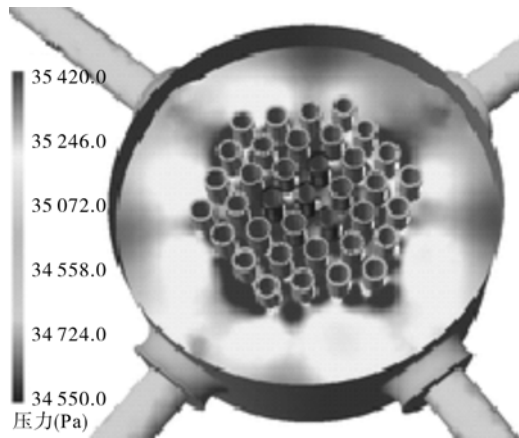


图6 300 mm处大栅板联箱压力分布

Fig. 6 Pressure distribution at height of 300 mm above distribution header bottom

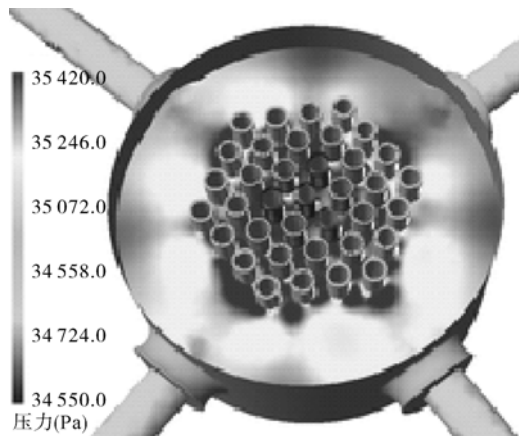


图7 500 mm处大栅板联箱压力分布

Fig. 7 Pressure distribution at height of 500 mm above distribution header bottom

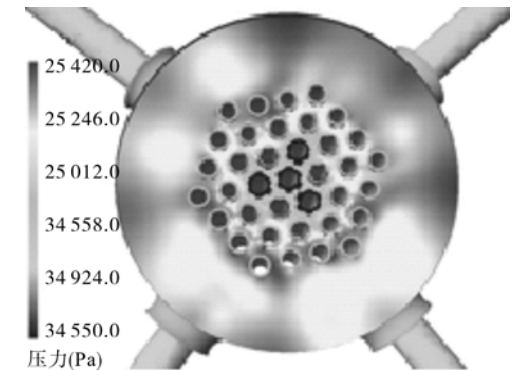


图8 700 mm处大栅板联箱压力分布

Fig. 8 Pressure distribution at height of 700 mm above distribution header bottom

大栅板联箱的速度分布示于图 9。在大栅板联箱的每个入口处周围,各形成 2 个旋涡。因受到一回路压力管排布非对称性的影响,在 8 个旋涡中,在一、二环路间的旋涡左右对称但上下不对称,旋涡的区域基本在大栅板联箱内壁与联箱套筒间,且旋涡的流速较小,其流速在 0.5 m/s 以下,最高流速出现在 A1、A3、A5 套筒的 6 个开孔的上沿,流速约为 1.2 m/s 时,与压力分布相耦合。

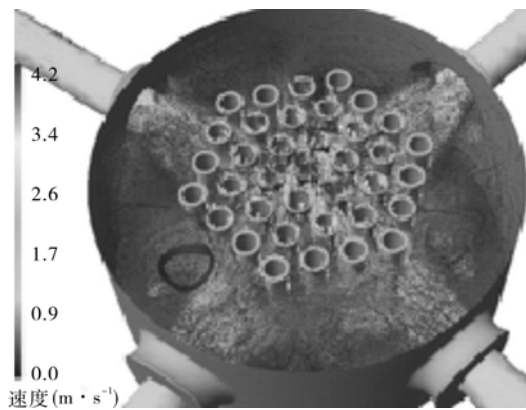


图 9 一回路压力管道内速度场

Fig. 9 Velocity distribution in distribution header

### 3) 一回路压力管道压力分布

一回路压力管道压力分布示于图 10。考虑到入口流速分布对大栅板连箱内流场和压力分布的影响,对其详细建模。在此只给出了主压力管道内的流速和管道的压力分布。因管道在三通出口处方向的变化最大,故最高压力分布在此。一回路压力管道内,速度压力分布示

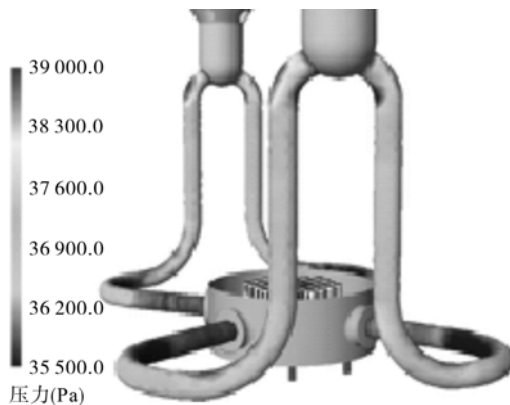


图 10 一回路压力管道压力分布

Fig. 10 Pressure distribution of primary loop pressure tube

于图 11。管道内速度值约为 2.5 m/s,但在管道转弯处内侧,流速有所提高,局部能达到 2.75 m/s。



图 11 一回路压力管道内速度分布

Fig. 11 Velocity distribution of primary loop pressure tube

## 4 结论

1) 应用计算流体力学软件 CFX 对中国实验快堆大栅板联箱及一回路压力管进行稳态模拟计算,计算获得大栅板联箱和一回路压力管道内的压力场、速度场、流场的分布和变化规律,及一回路压力管道的压力分布。模拟计算结果与理论分析结果在误差范围内一致。

2) 使用控制流道面积方法,不加入人为干预的边界条件,计算出和各大栅板联箱套筒开孔流量误差小于 16%。

本文计算结果为研究瞬态工况下大栅板联箱的各个套筒管脚流量变化提供了可能。同时,也为一回路主管道断裂时,研究断管可能的运动方向提供一定参考。

### 参考文献:

- [1] 杨福昌. 平衡态氧化铀堆芯稳态热工计算[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2001.
- [2] 冯预恒,乔雪冬. 中国实验快堆全堆芯整体热钠池三维数值模拟[J]. 原子能科学技术,2007,41(增刊):201-207.  
FENG Yuheng, QIAO Xuedong. Three-dimension numerical simulation of whole core composed heat sodium pool for China Experimental Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007,41(Suppl.):201-207(in Chinese).