

## 5 MW 低温供热堆挤水器作用的数值分析

解 衡, 高祖瑛

(清华大学 核能技术设计研究院, 北京 100084)

**摘要:**用三维 CFD 软件 PHOENICS-3.3 计算了取消挤水器后 5 MW 低温供热堆(NHR-5)的稳态及非对称运行瞬态工况。分析研究了挤水器的设置在稳态及非对称瞬态工况下对一回路系统的影响。研究表明:设立挤水器对对称稳态工况影响不大,对非对称稳态及瞬态工况有较大影响。

**关键词:**低温供热堆;非对称运行;数值分析

中图分类号:TL334

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2003)01-0054-06

### Numerical Analysis of the Effect of Coolant Containers on the 5 MW Nuclear Heating Reactor

XIE Heng, GAO Zuying

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Three-dimensional CFD code, PHOENICS-3.3 is used to simulate the steady-state and asymmetric transient of 5 MW nuclear heating reactor (NHR-5) without coolant containers. The influence of the setting of coolant containers on the primary system under steady-state and asymmetric transient is analyzed. The result shows that the setting of coolant containers has not distinct effect under symmetric steady-state, but has sizeable effect under asymmetric state.

**Key words:** nuclear heating reactor; asymmetric operating; numerical analysis

5 MW 低温供热堆(NHR-5)一回路为一体化布置的自然循环系统。自然循环动力主要来自自主换热器下降段与烟囱区间冷却剂的温差造成的密度差。本工作采用三维数值模拟方法研究在停运一半主换热器的非对称运行工况下取消挤水器所产生的影响,并与安装挤水器的结果进行对比分析,以确定挤水器在稳态及非对称瞬态工况下的作用。

#### 1 NHR-5 一回路

一回路系统全封闭在压力壳内(图1)。堆壳中心为堆芯,堆芯上部为水力提升段——烟囱。压力壳壁与隔离筒间的环形空间中布置了4个主换热器。过冷水由堆芯下方流经堆芯被加热,再流经堆芯上方的烟囱,并由此流向布置于外侧环形空间的换热器。在换热器内,一回路将热量传给二回路,变冷的一回路水向下流

收稿日期:2001-06-29;修回日期:2001-09-04

作者简介:解 衡(1972—),男,江苏连云港人,助理研究员,博士,反应堆热工水力专业

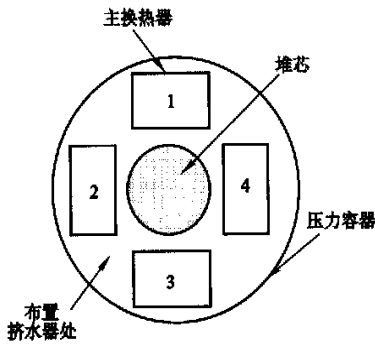


图1 一回路示意图  
Fig.1 Schematic diagram of primary loop

经压力壳与堆芯吊兰间的环形下降段到达堆芯下部的入口联箱<sup>[1]</sup>。主换热器下部的下降段

为一较大的环形空间。为了加快自然循环的流速,在换热器下降段分别安装挤水器。挤水器是表面开孔的可充水容器,放置于主换热器下降段后,可挤压水空间体积,减少下降段的流通面积,缩短工质从换热器出口到堆芯入口所需时间。

## 2 数学及物理模型

采用三维计算流体力学软件 PHOENICS-3.3<sup>[2]</sup>对 NHR-5 一回路及主换热器二次侧进行数值模拟。

建立数学及物理模型如下。

### 2.1 守恒方程

流体守恒方程通用形式<sup>[3]</sup>为:

$$\frac{\partial(\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(w\phi - \phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_\phi \quad (1)$$

紊流模型采用  $k-\epsilon$  模型,式(1)中: $\phi$ 表示  $u, v, w, T, k, \epsilon$ 。

对于连续方程,  $\phi = 1, S_\phi = 0$ 。

对于动量方程,  $\phi = u, v, w, S_\phi = \mu_{eff}$ 。

$$\phi = u \text{ 时, } S_\phi = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x});$$

$$\phi = v \text{ 时, } S_\phi = \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y});$$

$$\phi = w \text{ 时, } S_\phi = \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) - g$$

对于能量方程,  $\phi = T, S_\phi = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{T}, S_\phi = 0$ ;

对于紊流脉动动能方程,  $\phi = k, S_\phi = G - \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{k}$ ;

对于紊流耗散率方程,  $\phi = \epsilon, S_\phi = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{k} (C_1 G - C_2)$ 。

以上式中:  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \mu_t = c_\mu k^2 / \epsilon$ ;

$$G = \mu_t [2I(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2] + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 + (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})^2$$

其中:  $\rho$  为密度,  $u, v, w$  为速度,  $T$  为温度,  $k$  为紊动能,  $\epsilon$  为扩散率,  $p$  为压力,  $t$  为时间,  $g$  为重力加速度,  $x, y$  为坐标,  $Pr$  为普朗特数,  $\mu$  为动力粘度,  $\phi$  为名义扩散系数,  $S_\phi$  为源; 式中常数  $c_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma = 0.9, k = 1.0, \epsilon = 1.314$ 。

这样,每个控制体共有 7 个控制方程。为简化模型,采用计算自然对流时常用的

Boussineq 假设。该假设认为:除动量方程源项中的重力项外,其它项中的工质密度取作常数。这一假设是建立在密度变化相对密度本身较小的基础上的,这符合本工作计算的工况。这时,密度计算公式为:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta_0 (T - T_0)) \quad (2)$$

式中:  $\rho_0$  和  $T_0$  分别为基准密度和温度;  $\beta_0$  为热膨胀系数。

## 2.2 多孔介质模型

堆芯和换热器内存在大量的固体构件,对流动、传热产生很大影响。对固体构件,采用多孔介质模型进行简化。该模型假定固体构件均匀分布在控制体内,构件对控制体内流体体积的影响用体积穿透率,即流体体积与整个控制体体积的比值表示,对控制体表面作用力的影响用表面穿透率,即流体表面与控制体表面的比值表示。在方程中引入分布阻力和分布热源,以表示固体构件对动量及能量交换的影响,假定构件引起的流动阻力及换热量均匀分布在控制体内。简化后的守恒方程及所采用的分布阻力及分布热源经验关系式的详情参见文献[4]。

## 2.3 计算区域

因自然循环的驱动力来自一回路内工质本身的密度差,所以,研究一回路非对称运行时,必须研究整个一回路系统。

NHR-5 压力容器内的 4 台主换热器对称放置。堆内热量由主换热器传给二回路,再由二回路传给供热回路。对一回路工质而言,4 台主换热器并联运行。二回路主换热器则分为两组:1、3 为一组,2、4 为一组。每组的 2 台主换热器并联运行。组间也为并联运行,并与一、二回路相连接。因 4 台主换热器对称布置,故取 2 台主换热器相邻的一半,即 1/4 压力容器作为计算区域(图 2)。压力容器及堆芯上升段等为圆形结构,主换热器基本上为方形结构。

在 PHOENICS 程序的可视化输入界面

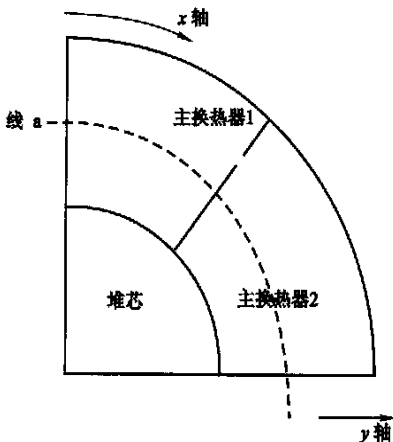


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculated area

VR 中无法同时实现两种坐标系。为确定计算坐标系,分别采用圆柱和直角坐标系,用流通面积等效法计算换热器及其上下腔室的流动情况,两种坐标系下的结果基本相同。为了方便计算,采用圆柱坐标系。 $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为周向、径向、轴向坐标。为简化计算区域,将压力容器等效为圆筒状,并忽略其上下封头。

## 2.4 求解方法

方程采用 SIMPLE 法求解,采用迎风差格式,压力  $p$ 、紊动能  $k$  及扩散率 采用线性松弛法迭代求解,其余变量采用附加伪时间步法进行松弛迭代求解。因反应堆以自然循环方式运行,动量、能量方程耦合紧密,松弛因子应取值很小,计算中取为 0.01。

## 2.5 模型验证

采用上述模型计算安装挤水器的实际运行工况,并与 NHR-5 的实际运行结果<sup>[5]</sup>进行对比分析。结果表明:对称稳态及非对称瞬态计算结果与实验值符合良好<sup>[4]</sup>。因有、无挤水器工况的计算模型基本相同,因此,该模型可用于无挤水器工况的稳态及瞬态计算。

## 3 计算结果及其分析

为便于与安装挤水器工况的计算结果进行对比分析,以确定挤水器的作用,无挤水器的计算工况以安装挤水器的实际运行工况<sup>[5]</sup>作为边界条件。

### 3.1 初始对称稳态工况

将非对称运行前的稳态对称运行状态作为瞬态运行的初始状态,以二回路的参数及反应堆功率以及一回路压力作为边界条件计算该稳态工况。计算结果为:堆芯入口温度, 142.5 ;主换热器入口温度, 163.0 ;主换热器出口温度, 142.5 。

该结果与安装挤水器工况的计算结果相同。

取消挤水器后,换热器出口到堆芯入口的阻力虽已发生了变化,但因流动的阻力主要在堆芯和换热器上,因此,挤水器对稳态对称工况影响不大。

### 3.2 非对称运行瞬态工况

初始状态为上述对称稳态运行工况,模拟时间为 2 000 s,在 20 s 时,1、3 号换热器的二

回路给水泵停运。

3.2.1 边界条件 计算中,边界条件(堆核功率和停运环路流量)采用实际运行测得值(图3、4)。由于一回路中的压力变化很小,因此,计算中将其忽略。

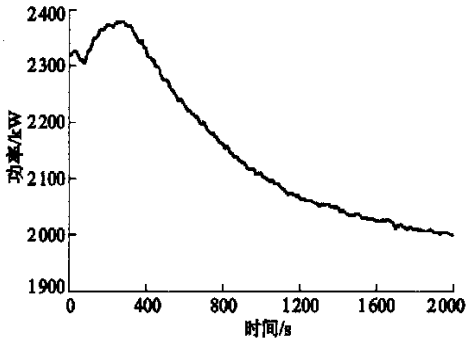


图3 堆功率变化值  
Fig.3 Recorded power history

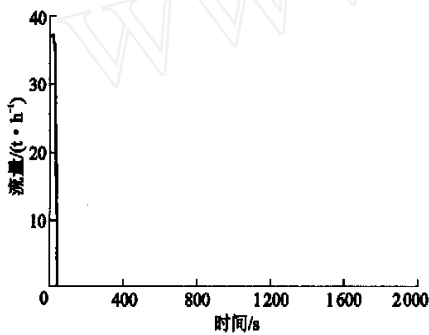


图4 停运主换热器二回路的流量变化  
Fig.4 Recorded secondary flowrate history at shutdown main heat exchanger

3.2.2 结果分析

1) 堆芯入口温度 图5为运行和停运环路堆芯入口温度随时间的变化曲线。两种环路工况下的入口温度变化规律基本相同。均因一条环路停运,二回路工质循环流量减少,主换热器传热效率降低,从而造成堆芯入口温度升高。运行环路无挤水器工况下的堆芯入口温度计算值由142.5 升至150.5 ,且温度升幅随功率降低而减小。无挤水器的运行环路在300s之后堆芯入口温度方出现明显变化,2000s左右时温升已很小,达到最高值,堆芯入口温度响应较慢。在有挤水器工况下,约50s时,温度

已明显上升,1000s左右时,温度已达到最大值,温度变化效应明显高于无挤水器工况。在无挤水器工况下,因从主换热器出口到堆芯入口间大空间内工质的热容延迟了功率变化等边界条件对堆芯入口温度的影响,使得堆芯入口温度上升时间增长,并使温度升幅由安装挤水器工况下的4 增至8 。在停运环路工况下,无挤水器时的温度效应同样低于有挤水器工况。在此工况下,300s后温度明显变化,1800s左右温度达到最大值,而在有挤水器工况下,温度达到最高值的时间则为800s。因堆芯入口温度响应慢而使其入口温度上升时间增长,温度升幅由有挤水器时的4 增至8 。

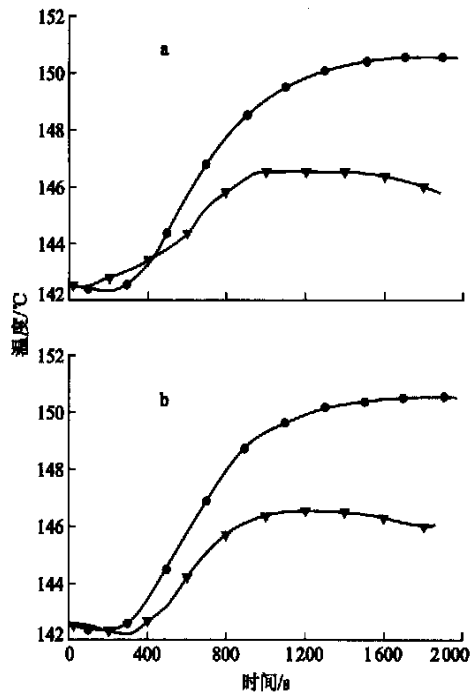


图5 堆芯入口温度变化曲线  
Fig.5 Calculated temperature history at core inlet  
a——运行环路;b——停运环路  
——无挤水器;▼——有挤水器

此外,无挤水器时,主换热器出口流体得到了更为充分的混合,使得停运与运行环路两种工况下的堆芯入口温度相差小于0.5 。

2) 主换热器入口温度 图6为运行环路与停运环路主换热器入口温度的变化曲线。由于一条环路停运,一回路工质循环流量减少,造成主换热器入口温度升高,两种环路工况下均

由 163.0 升至 171.5 ,然后,随着反应堆功率减小有所下降。运行环路的初始阶段,由于有挤水器时的堆芯入口温升较快,主换热器入口温升随之加快,1 000 s 时达到最大值。无挤水器时,温升时间长,在 1 600 s 左右达到最大值,升幅由有挤水器工况的 7 升至 8.5 。停运环路工况的主换热器入口温度的变化规律与运行环路工况下的相同。

3) 一回路流量 因一个环路的主换热器停运,该环路无法形成自然循环所需的温度差,这一环路的循环流量基本消失,整个一回路总循环流量因此而下降(图 7)。无挤水器时,主换热器入口温度与堆芯入口温度之间的温差变小,自然循环的压头减少,循环流量似应比有挤水器时低。但从图 7 看出:无挤水器时的一回路流量下降幅度相应地比有挤水器时的小。

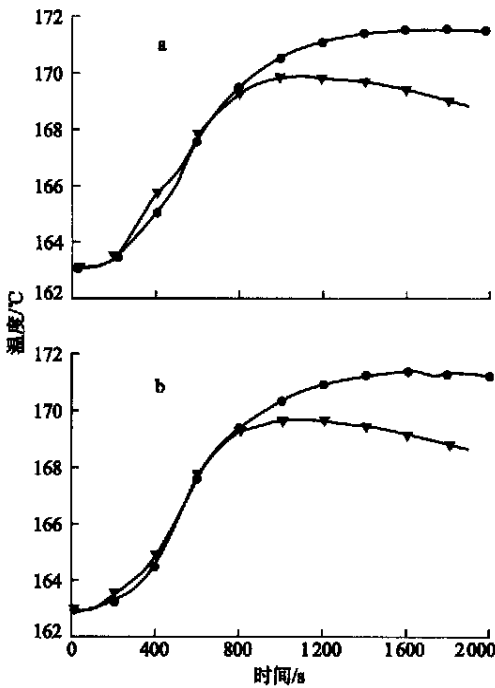


图 6 主换热器入口温度变化曲线  
Fig. 6 Calculated temperature history at main heat exchanger inlet  
a:运行环路;b:停运环路  
—无挤水器;▼——有挤水器

究其原因可能与流场分布有关。图 8 为沿图 2 中线 a 垂直于 y 轴剖面的流场图。模拟时间分别为 0、2 000 s。初始状态时,两个环路对

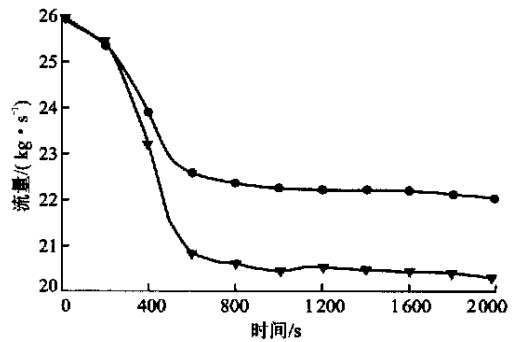


图 7 一回路流量变化曲线  
Fig. 7 Calculated primary flowrate history  
—无挤水器;▼——有挤水器

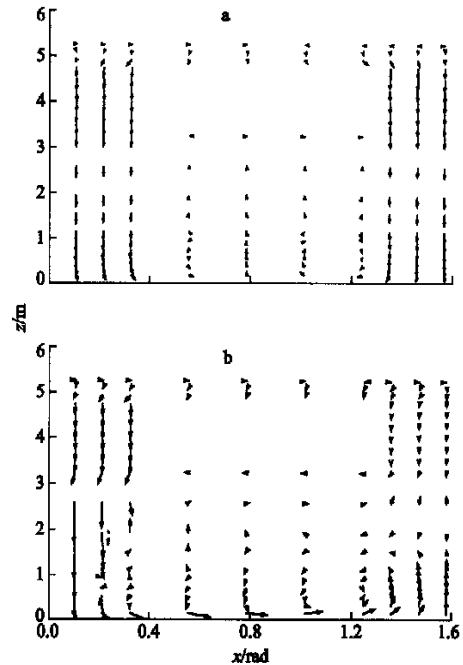


图 8 垂直于 y 轴流场图  
Fig. 8 Flow velocity vector on the plane perpendicular to y direction  
a —t=0 s;b —t=2 000 s

称,有、无挤水器工况的流场基本相同,初始计算值也基本相同。随着一个环路的停运,停运换热器内的工质下降速度降低,运行环路内的下降速度增加。两环路间的失衡在换热器下腔室形成一大旋涡,增强了运行环路内工质向下流动的动力,同时,该旋涡又使停运环路换热器内少量工质向下流动,这些均增大了一回路的

总流量。旋涡的作用类似于在突扩面后装设“袋室”以减少突扩段的流动阻力的作用机理,它可在其内部形成稳定的旋涡环,构造了一台独特的旋涡“泵”。以上分析可解释无挤水器时自然循环的压头小流量反而大的现象。取消挤水器后,一回路的总流量增大,工质由运行环路主换热器出口到堆芯入口的速度加快,但因运行环路主换热器出口流体在下降过程中与下腔室大空间内的原有流体混合,导致堆芯入口温度对主换热器出口温度变化的响应反而变慢。

### 3.3 非对称稳态工况

取消挤水器的影响不仅表现在瞬态上,也表现在非对称稳态上。分别计算以初始状态时的边界条件作为边界条件的对称运行工况和以2 000 s时的边界条件作为边界条件的非对称运行工况。计算结果表明:在对称运行工况下,有、无挤水器时的堆芯进、出口温度基本上无差别;非对称工况下,两者差别较大,有挤水器时的堆芯进、出口温度分别为145、167,无挤水器时的堆芯进、出口温度分别为150、171。另外,取消挤水器后流量相应变大。造成这一差别的原因是主换热器下降段的旋涡使停运环路仍有部分下降流量,这部分温度较高的工质使得堆芯入口温度升高。

## 4 结论

取消挤水器对对称稳态工况影响不大,对

非对称稳态及瞬态工况有较大影响。

对于非对称瞬态工况,取消挤水器后,因温度变化增大使得主换热器出口到堆芯入口所需的时间延长,堆芯入口温度变化的响应时间推后约200 s。主换热器出、入口温度变化也因此推后,达到最大值的时间比有挤水器时延迟约800 s,且时间延长,温升幅度增大。无挤水器时,停运及运行环路的不同温度的出口流体得到了更为充分的混合,堆芯入口温度差缩小至小于0.5。

对于非对称稳态工况,取消挤水器后的堆芯流量变大,堆芯进、出口温度升高。

### 参考文献:

- [1] 清华大学核能技术设计研究院. 5 MW 低温堆安全分析报告[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1985.
- [2] Ludwig J.C. PHOENICS Manual [Z]. Britain: CHAM,2000.
- [3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988. 431~438.
- [4] 解 衡. 低温供热堆三维热工水力数值分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,2000.
- [5] 张达芳,苏庆善,王瑞偏. NHR-5 主换热器不对称运行实验[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1992.