

200 MW 低温供热堆容积补偿器仿真

周涛^{1,2}, 贾斗南², 苏光辉², 秋穗正², 杨瑞昌¹

(1. 清华大学 热能系, 北京 100084; 2. 西安交通大学 核能系, 陕西 西安 710049)

摘要:建立高精度的容积补偿器仿真模型是实现 200 MW 低温供热堆全系统仿真的重要环节。本工作将容积补偿器内的水区分成波动水区 and 主水区, 由此建立了有别于二区模型的氮气区、主水区和波动水区三区模型。建模时, 对氮气区分别按接近真实空间气体变化的多变过程或按容积补偿器阀门打开的等温过程和阀门关闭的绝热过程进行模拟, 前者更接近真实空间气体性质的变化过程。选用吉尔方法求解微分方程。计算结果表明: 三区模型更精确地描述了容积补偿器的热工水力特性。本研究结果为低温供热堆及其非能动余热排出系统的设计和运行提供了有价值的分析方法。

关键词:低温供热堆; 容积补偿器; 三区模型; 仿真

中图分类号: TL364

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2005)04-0330-04

Simulation of Volume Compensator in 200 MW Low Temperature Heating Reactor

ZHOU Tao^{1,2}, JIA Dou-Nan², SU Guang-hui², QIU Sui-zheng², YANG Rui-chang¹

(1. Thermal Energy Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Nuclear Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The establishment of the simulation model of the volume compensator is significant for the simulation of operation of 200 MW low-temperature heating reactor. In the paper, the water region of the volume compensator was divided into water fluctuation region and main water region, and three regions, nitrogen region, main water region and water fluctuation region occur in the simulation model of the volume compensator. This three region model is different from two region model available. The behavior of the nitrogen in the volume compensator was simulated by polytropic process similar to real variety process of gas, or constant temperature process of gas with the valve opening in the volume compensator and adiabatic process of gas with the valve closed in the volume compensator, respectively. The former were closed relatively to real variety process of gas space nature. The differential equations were solved by using Gear method. The calculated results show that the model presented in the paper can simulate the behavior of the volume compensator well. This study provides a valu-

收稿日期: 2003-12-09; 修回日期: 2004-03-09

基金项目: “九五”国家重点科技攻关项目(96-G01-02-05); 博士后基金(023101020)

作者简介: 周涛(1965—), 男, 陕西商州人, 副教授, 博士后, 热能与核能专业

able method for the design and safe operation analysis of the 200 MW low-temperature heating reactor.

Key words: low-temperature heating reactor; volume compensator; three region model; simulation

供热反应堆是一种安全、清洁而又经济的能源。我国已完成了 200 MW 低温供热堆及其非能动余热排出系统的设计。容积补偿器^[1]作为低温供热堆非能动余热排出系统的重要组成部分,在反应堆正常运行和停堆后,它分别起着维持中间回路压力或余热排出系统稳定的作用,它为一直立式圆柱形容器。该容器分为氮气空间和水空间。容器下方由管道连接到空气冷却器出口水管上,上方有安全阀和释放阀作为超压保护装置^[2]。反应堆正常运行时,容积补偿器内水容积约为 7 m³,上部约 17 m³ 充以氮气,维持压力为 3.0 MPa。反应堆停堆后,余热排出系统投入运行。当余热排出系统内冷却剂温度升高而引起压力上升时,容积补偿器中的氮气被压缩,使得压力升高减缓而维持压力边界的完整;当一回路系统内冷却剂温度下降而引起压力降低时,容积补偿器依靠水的波动和氮气空间增大而减缓压力的继续降低。容积补偿器承担着缓冲非能动余热排出系统由于冷却剂温度升高和降低而引起的压力波动。反应堆正常运行时,它作为中间回路的容积补偿器起着维持中间回路压力稳定的作用。因此,选择三区模拟可精确地仿真容积补偿器的动态特性,这对提高整个核动力系统的仿真精度至关重要。

1 数学模型

在容积补偿器模型中,将工质分为三区,即波动水区、主水区和氮气区,依次分别记为 I、II、III 区,并作如下简化假设:1) 在同一时刻,容积补偿器内各区具有相同的压力,即各区的压力具有相同的时间特性;2) 同一区中的工质在同一时刻具有相同的热工参数;3) 忽略容积补偿器对外散热。

1.1 质量守恒方程

数学模型中的质量守恒方程如下:

$$\frac{dm_1}{dt} = W_{su} \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dm_3}{dt} = -W_{re} - W_{sa} \quad (3)$$

式中:W_{su}为波动水流量,kg/s,流入容积补偿器为正,反之为负;W_{re}为释放阀氮气流量,kg/s;W_{sa}为安全阀氮气流量,kg/s;m₁为波动水区水质量,kg;m₂为主水区水质量,kg;m₃为氮气区氮气质量,kg;t为时间,s。

1.2 能量守恒方程

能量守恒方程如下:

$$\frac{d(m_1 h_1)}{dt} = W_{su} h_x + V_1 \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d(m_2 h_2)}{dt} = V_2 \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d(m_3 h_3)}{dt} = -W_{re} h_3 - W_{sa} h_3 + V_3 \frac{dp}{dt} \quad (6)$$

$$h_x = \begin{cases} h_{su} & \text{正波动} \\ h_l & \text{负波动} \end{cases} \quad (7)$$

式中:h_x为波动流体焓,J/g;h₁、h₂、h₃分别为第 I、II、III 区焓,J/g;p为系统压力,Pa。

1.3 总体积 V 不变方程

总体积不变方程为:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{d(m_i v_i)}{dt} \quad (8)$$

其中,单相和两相分别为:

$$v_i = \begin{cases} v_i(h_i, p) \\ x_i v_g + (1 - x_i) v_f \end{cases} \quad (9)$$

把式(8)展开,即得容积补偿器的压力方程为:

$$\frac{dp}{dt} = \left[- \sum_{i=1}^3 \left[m_i \frac{dv_i}{dh_i} \frac{dh_i}{dt} \right] - \sum_{i=1}^3 \left[v_i \frac{dm_i}{dt} \right] \right] / \sum_{i=1}^3 \left[m_i \frac{dv_i}{dp_i} \right] \quad (10)$$

式中:x_i为含汽量;v_g为气相比热容,m³/kg;v_f为液相比热容,m³/kg;i为1、2、3区。

1.4 容积补偿器水位方程

设第 I、II 区总体积为 V₁₂(m³),L为水位(m),A为流通管道横截面积(m²),则有:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^2 (m_i \dot{v}_i)}{A \dot{v}} \quad (11)$$

即水位方程为：

$$\frac{dV_{12}}{dt} = A \frac{dL}{dt} \quad (12)$$

1.5 波动流量方程

容积补偿器的波动水流量等于非能动回路侧各控制体冷却剂的质量波动之和,即：

$$W_{su} = - \sum_{i=1}^N V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (13)$$

式中： ρ 为工质密度,kg/m³。

1.6 氮气状态方程

氮气状态方程如下：

$$p_N = R_N T_N \quad (14)$$

$$m_N = \frac{pV_N}{R_N T_N} \quad (15)$$

$$h = u + p \quad (16)$$

$$dh = du + pd + dp \quad (17)$$

安全阀门和释放阀门关闭时,可认为氮气处于绝热状态,则有：

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{1.4} \quad (18)$$

当安全阀门和释放阀门开启时,可认为氮气处于等温状态,则有：

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (19)$$

实际气体的压缩是个多变过程^[3],所以,有：

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{0.38} \quad (20)$$

式中： p 为氮气压力,Pa； T 为氮气温,度,K； m 为氮气质量,kg； V 为氮气容积,m³； ρ 为氮气比热容,m³/kg； u 为氮气内能,J； R 为氮气常数, $R = 1.297 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；下标“N”为氮气；下标“1”、“2”分别为变化前后的状态。

2 仿真分析

所有数学模型均可归纳成以时间 t 为基本变量参数的变系数非线性微分方程组初值问题,有：

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y, y) \quad (21)$$

$$y = y_0(t_0) \quad (22)$$

在总结分析以往其它程序所采用的求解方

程组的数值方法后,选用了上世纪60年代末提出并逐步加以完善的吉尔方法^[4]。该方法既适于求解刚性方程,也适合于求解非刚性方程。

图1示出了对低温堆余热排出系统的容积补偿器内氮气区用多变过程与绝热过程两种算法描述的压力比较。设在100s时反应堆停堆,余热排出系统投入,在停堆后一短时间内,反应堆剩余功率大于空气冷却器的散热能力,功率变化导致余热排出回路水温将有较大上升,造成容积补偿器内水温升高、水的体积膨胀而压缩容积补偿器内的气空间,系统压力突然跃升,但由于氮气空间的补偿作用和释放阀的动作,系统压力的升高很快被限制在允许值范围内,反应堆剩余功率与空气冷却器的散热能力达到平衡,系统压力维持平衡数值。考虑到实际的气体散热和特性影响,多变过程所描述的系统压力的稳定数值低于绝热过程的压力数值。本工作选用曲线2表示的多变过程的仿真更符合实际工况。经计算,两种算法数值间的偏差不超过2%。

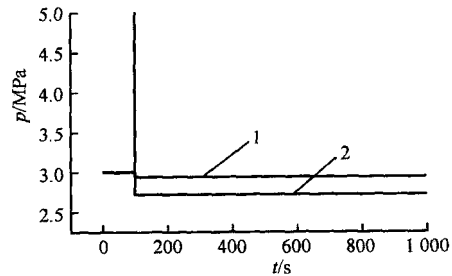


图1 容积补偿器内氮气区的压力比较

Fig. 1 Pressure comparison of nitrogen space in the volume compensator
1——绝热过程；2——多变过程

图2示出余热排出系统分别以微流量(系统中原有一微小反向流量存在)和零流量两种启动方式下系统压力的变化过程。由图2a可知:微小流量的存在造成余热排出系统中流体的平均温度上升和容积补偿器内水温升高较慢,导致压缩气空间速率较慢,系统压力的上升因而也较慢,且上升幅度较小。由图2b可知,在零流量下启动时,由于温升的速度较快,导致压力上升幅度和速率均相对大些,但最终均能达到稳定压力值。

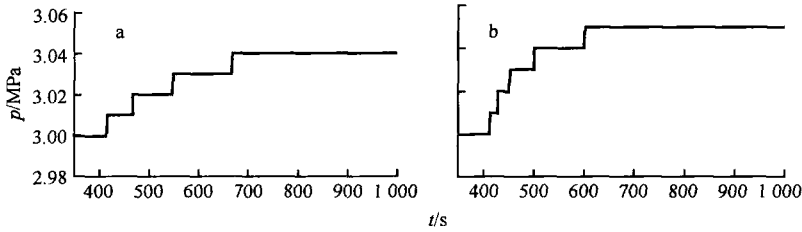


图2 低温供热堆余热排出系统投入过程中系统压力的瞬态变化

Fig.2 Transitional variation of pressure in the residual heat removal process of low-temperature heating reactor running process

a——微流量启动;b——零流量启动

3 结论

1) 研究建立了更为准确模拟容积补偿器的三区数学模型。波动水区的划分更精确描述了容积补偿器中有别于主水区的水波动变化特性。若在事故工况下回路中有汽的生成,以上模型还可进一步考虑水汽的质量交换,方便地写出类似方程,得到更加完善的模拟仿真。

2) 在对容积补偿器中氮气空间的变化计算中,采用实际气体多变过程模型和理想气体模型。当使用理想气体模型时,在阀门关闭下,采用绝热过程;打开时,采用等温过程。实际气体多变过程更符合实际工况。

3) 余热排出系统分别以微流量和零流量两种方式启动时,系统压力的变化幅度范围和速率有一定差异,但容积补偿器对此均能发挥

良好作用。

4) 容积补偿器动态特性的仿真结果符合实际工况要求,可为非能动余热排出系统的整体设计和运行提供有益参考。

参考文献:

- [1] 马昌文. 核能利用的新途径——低温供热堆供热[M]. 北京:科学出版社, 1997. 117~129.
- [2] 蒸汽发生器编写组. 蒸汽发生器[M]. 北京:原子能出版社, 1982. 23~25.
- [3] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1983. 115~131, 216, 498.
- [4] Gear CW. 常微分方程初值问题的数值解法[M]. 费景高, 刘得贵, 高永春, 译. 北京:科学出版社, 1978. 251~274.