

文章编号:1000-6931(2001)05-0436-05

200 MW 核供热堆余热排出系统排热能力 及其影响因素分析

廖义香, 秋穗正, 郭玉君, 贾斗南

(西安交通大学 能源与动力工程学院 核能系, 陕西 西安 710049)

摘要:运用一维流体动力学模型对 200 MW 核供热堆余热排出系统的余热排出过程进行数值模拟, 并对该系统的排热能力及其影响因素进行了分析。分析表明:余热排出系统的空冷器面积和空冷塔高度是影响余热排出能力的主要因素, 主换热器与空冷器间的高度差的影响次之。

关键词:核供热堆; 余热排出系统; 自然循环; 排热能力

中图分类号: TL333 **文献标识码:** A

反应堆停堆后的剩余功率仍然可观, 余热的及时排出对反应堆安全运行至关重要。200 MW核供热堆设有非能动自然循环余热排出系统, 依靠自然循环把反应堆剩余功率带出堆芯, 而无需外部驱动设备。本工作采用一维流体动力学模型对余热排出系统的排热能力进行数值计算并对其影响因素进行分析^[1]。

1 余热排出系统^[2]

200 MW 核供热堆(NHR)的余热排出系统(RHRS)是一从主换热器二次侧进出口管道引出与中间回路并联的余热冷却系统(图 1)。此系统为非能动安全系统, 无驱动设备。主换热器布置在压力容器与堆芯吊兰之间的环形空间中, 以与堆芯形成全功率自然循环。空冷器管束水平放置在反应堆厂房屋顶的冷却塔底部, 其下方侧面为空气冷却塔的进风门。上升管和下降管上的隔离阀将系统与中间回路隔离。

该堆的余热排出过程为三重自然循环相互耦合的瞬态过程。这 3 个自然循环回路为: 1) 一回路冷却剂在主换热器壳侧与堆芯之间的自然循环; 2) 二回路冷却水在主换热器管侧与空冷器之间的自然循环; 3) 空冷器管外空气在冷却塔的导向下与塔外冷空气之间的自然循环。

收稿日期:2000-05-08; 修回日期:2000-06-05

作者简介:廖义香(1974—), 女, 湖南衡阳人, 在读硕士研究生, 核能与热能工程专业

2 计算模型的基本方程^[3]

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial q_m}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; q_m 为质量流量; A 为流通截面积。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (h)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (q_m h)}{\partial z} = \frac{q U_h}{A} \quad (2)$$

式中: h 为单位质量流体焓; q 为壁面热流密度; U_h 为加热周长。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial q_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{q_m^2}{A} \right) = - A \frac{\partial p}{\partial z} - U_w f dl - gA - F \quad (3)$$

式中: F 为局部阻力损失; p 为压力; g 为重力加速度; U_w 为润湿周长。

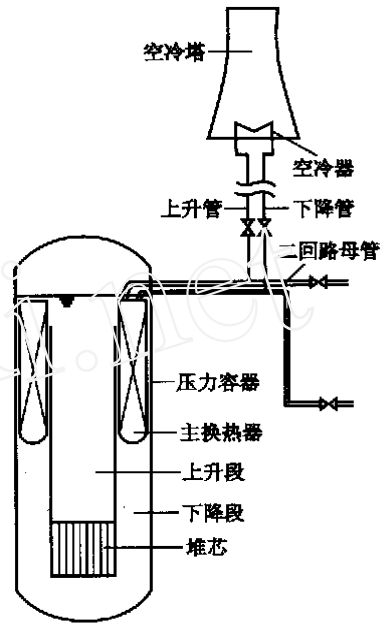


图1 200 MW 核供热堆余热排出系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of 200 MW-NHR-RHRS

3 系统模块化及其求解

对 200 MW 余热排出系统的排热过程进行数值模拟。用主换热器一、二次侧流体间的传热模拟一、二回路间的耦合关系;用空冷器管内水和管外空气间的传热模拟二回路和空气回路间的耦合关系。

将余热排出系统的设备模块化。反应堆一回路为堆芯、上升段、主换热器壳侧和下降段 4 个模块;二回路为主换热器管内侧、上升管、空冷器管内侧和下降管 4 个模块;空气自然循环为空冷器管外侧和除空冷器以外的空冷塔其他部分 2 个模块。

针对各回路中的各模块,耦合求解质量、动量和能量基本守恒方程组,得出各节点上的参数值;尔后,按回路间的耦合关系进行迭代求解,直至满足能量守恒。

由于系统的基本方程均为关于时间和空间的偏微分方程,这里将其做空间离散处理,使方程的求解转化为常微分方程组的初值问题。本工作采用有利于求解刚性方程组的吉尔向后差分法求解常微分方程组的初值问题。

4 余热排出系统特性分析

以上述数学模型为基础,开发研制了 200 MW 核供热堆余热排出系统的安全分析程序 SAC-PRHRS。应用该程序对余热排出系统特性进行分析计算。计算条件为:

- 1) 反应堆停堆后,由非能动余热排出系统带走堆芯剩余功率;
- 2) 反应堆的停堆、中间回路的失流及余热排出系统的投入同时发生,不考虑时间的延迟;
- 3) 计算的热源边界条件示于图 2,空气进口温度恒为 300.20 K。

运用一维动力学模型模拟计算获得了余热排出过程中一些主要参数的变化曲线(图 3)。事故假设为中间回路循环泵故障或隔离阀被卡位,反应堆失去了主热阱(中间换热器)。

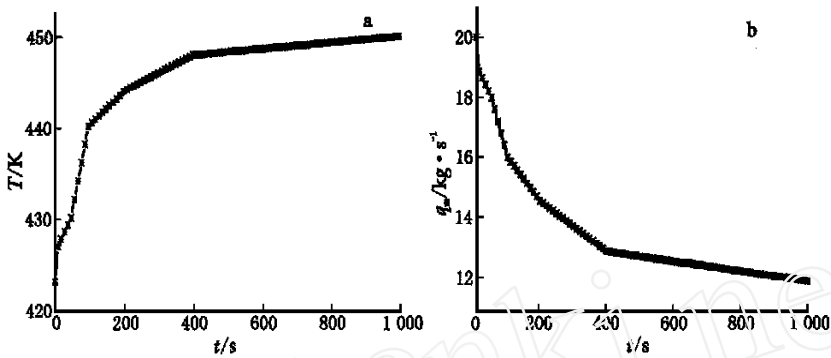


图2 主换热器一次侧进口温度(a)和流量(b)

Fig. 2 Inlet temperature(a) and flowrate(b) in the primary side of main heat-exchanger

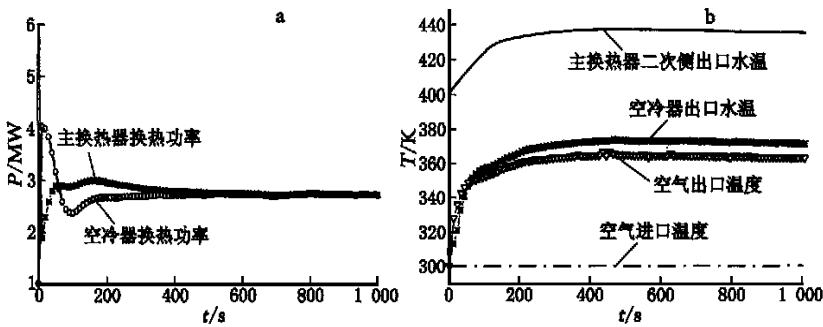


图3 余热排出过程主要参数变化

Fig. 3 Variation of main parameters during residual heat removed process

这时,主换热器管侧流量突然下降为零,由于主换热器流量的突然降低,它的传热功率急剧下降,二次侧流体出口温度持续升高;同时,余热排出系统开始投入运行,空气冷却器及下降管内的温度均很低,余热排出系统中存在着很大的密度差,使得系统的自然循环流量迅速增大,空气冷却器的传热功率随之迅速上升,它的出口水温持续升高;空气冷却器传热功率的上升使得空冷塔中空气平均温度升高,塔内热空气与塔外冷空气逐渐形成了自然循环。

几分钟后,空气冷却器的传热功率与主换热器的传热功率达到平衡(图3a),系统中各参数的变化达到最大值,反应堆进入安全停堆状态。安全停堆状态下的平衡功率反映着余热排出系统的排热能力。

5 影响余热排出能力的几个主要因素

堆芯、主换热器和空冷器是余热排出系统的3个主要设备。这3个设备之间的提升高度以及它们各自的传热性能皆是影响系统自然循环能力的关键因素。200 MW 低温供热堆的一回路采用全功率自然循环,具有保证堆芯冷却的能力。主换热器按反应堆额定功率设计,剩余

功率排出能力绰绰有余。在这样的条件下,空冷器的传热特性,即空冷器与主换热器之间的高度差、空冷器的传热面积、空冷塔高度及环境温度则成为影响余热排出能力的主要因素。图4中各曲线的冷热源边界条件是:主换热器壳侧进口温度为452.20 K;堆芯流量为12 kg/s;空气进口温度为303.20 K。

5.1 主换热器和空冷器间的高度差

空冷器与主换热器间的高度差直接关系到二回路自然循环的能力。高度差越大,自然循环驱动压头越大,循环流量亦越大。因此,增大高度差,能够提高主换热器和空冷器的传热功率,缩短主换热器传热功率达到并超过堆芯剩余功率的时间,减少回路中的热量积聚(图4a)。

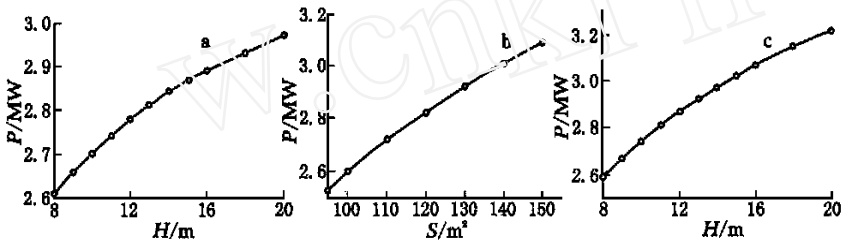


图4 主换热器和空冷器间的高度差(a)、空冷器传热面积(b)和空冷塔高度(c)对排热能力的影响

Fig.4 Influence of height difference between main heat exchanger and air condenser(a), heat transfer area of air condenser(b), height of air cooling tower(c) on heat removed ability

5.2 空冷器传热面积

从余热排出过程的分析中可以看到,几分钟后空冷器传热功率与主换热器传热功率方能达到平衡。空冷器的传热能力提高,达到功率平衡的时间则缩短,一、二回路中流体压力和温度的最大值亦随之降低。在管径、流通截面、流动长度及冷热源边界条件等不变情况下,空气冷却器的传热功率与传热面积近似呈线性关系(图4b)。

5.3 空冷塔高度

空冷塔高度增大有利于空冷器管外空气回路的自然循环,通过空冷器管束的空气流速也随之提高。流速的提高意味着传热系数的增大,从而提高了空冷器的传热能力(图4c)。

比较图4中a、c可看出:空冷塔的高度对于余热排出能力的影响较空冷器与主换热器间的高度差影响大。这是因为:空气的传热系数比水的小得多,系统中的主要热阻存在于空冷器的空气侧。因而,提高空气侧传热系数是改善整个系统传热性能的关键。

增大空冷器的传热面积比提高空冷器与主换热器间的高度差对提高排热能力更有效。这是因为,传热面积与传热量间近似呈线性关系,而高度与传热量间则为小于1/2次方关系。

6 结论

1) 在余热排出系统投入的初始时刻,由于热源释放的热量大于冷源带走的热量,各自然循环回路的温度和压力均升高,直至冷热源达到能量平衡,即空冷器换热功率与主换热器换热功率相等,主换热器换热功率与反应堆剩余功率相等。

2) 余热排出系统排热能力的提高将缩短回路中冷热源达到平衡的时间,并降低一、二回路中流体温度和压力的最高值。

3) 空冷器面积和空冷塔高度对余热排出系统排热能力的影响较大,主换热器与空冷器间高度差的影响次之。在空冷塔高度与主换热器和空冷器间高度差之和一定时,两者的比例存在一最佳值。

参考文献:

- [1] 王大中,林家桂,马昌文,等. 200 MW 核供热站方案设计[J]. 核动力工程,1993,14(4):289~295.
- [2] 彭木彰,万渡江,高勇. 自然循环的余热排出系统的分析[J]. 清华大学学报,1996,36(12):51~56.
- [3] 于平安,朱瑞安,喻真烷,等. 核反应堆热工分析[M]. 北京:原子能出版社,1986. 346~353.

Heat Removed Ability and Its Influencing Factors Analysis on Residual Heat Removed System of 200 MW Nuclear Heating Reactor

LIAO Yi-xiang, QIU Sui-zheng, GUO Yu-jun, JIA Dou-nan

(*Department of Nuclear Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract: The 200 MW-NHR (nuclear heating reactor)-RHRS (residual heat removed system) is numerically simulated by one-dimension fluid dynamics model. The heat removed ability of 200 MW-NHR-RHRS and its influencing factors are analyzed. The area of air-condenser and the height of air-cooling tower in RHRS are the main factors influencing the residual heat removed ability, the height difference between the main heat-exchanger and air-condenser is the secondary factor.

Key words: nuclear heating reactor; residual heat removed system; natural circulation; ability to remove residual heat