

AC600 二次侧非能动余热排出系统 热工水力特性实验研究

陈炳德 肖泽军 卓文彬

(中国核动力研究设计院,成都,610041)

摘 要

为研究 AC600 二次侧非能动应急堆芯余热排出系统热工水力特性,专门设计建造了一座具有系统效应的整体实验装置以进行实验研究。稳态实验共获得 166 组数据。数据表明,在设计参数范围内,可通过自然循环流动带走堆芯衰变产生的热量。风速、功率和阀门开度的快速变化扰动对系统的稳定运行无大的影响,即系统运行对这些快速小扰动有一定的“容忍性”。通过引入系统特征参数建立了分析模型,得出含经验系数的自然循环流量等半经验公式。与实验数据比较,98.8%的数据点偏差小于 $\pm 15\%$ 。瞬态实验主要目的是探索系统备用与启动方式、过渡特性影响因素。共完成了 46 种工况。实验表明,所给定的三种启动方式都可以在系统中建立起自然循环流动。其过渡特性,尤其是稳定性和过渡时间既受启动方式,更受初始与边界条件、系统布置的影响。用实验结果对专门编制的计算机程序 MIS-AP-PRHRS Ver. 1.1 进行的计算结果表明,程序对系统的稳态特性,如压力、自然循环流量和排热能力的计算结果与实验数据符合较好。对系统瞬态特性,基本可模拟其平稳过渡过程。

Experimental Study on Thermal-Hydraulic Characteristics of Secondary-side Passive ECRHR System of AC600

(In Chinese)

CHEN Bingde XIAO Zejun ZHUO Wenbin

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

An integral system experimental test rig was designed to study the thermal-hydraulic characteristics of secondary-side passive emergency core residual heat removal (ECRHR) system of AC600. Total sets of 166 experimental data on steady state have been obtained and main influence factors on heat removal capacity are identified. The experimental data shows that core residual heat can be removed through natural circulation under the condition of circumstance temperature $6\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ and L_{th} of 11 m, provided wind-speed higher than 1.5 m/s in the test parameter scope. Experimental results illustrate that short disturbance of wind-speed, power and valve opening had no significant impact on natural circulation. The system seems to tolerate to these disturbance. A correlation of two-phase natural circulation flow rate is derived from constitutive equations by using of specific system parameters and several semi-empirical formulas are obtained. Compared with the measuring data, the deviation of 98.8% data points is within $\pm 15\%$. The objectives of transient experiment study is to investigate the start-up modes and transition behaviors. The results of 46 runs show the natural circulation of system can be set up by means of all three start-up modes, and its transient characteristics, especially, the system stability and transit time are determined by not only start-up modes, but also system's configuration, initial and boundary conditions, mainly. The calculating results of MISAP-PRHR code, a computer code developed for passive safety system, reveal that it can predict quantitatively the steady state characteristics, such as, pressure, flowrate, heat removal capacity and the stable transient process can be well simulated, too.

前 言

AC600 二次侧非能动应急堆芯余热排出系统(简称 AC600 非能动余热排出系统)是我国开发的下一代先进压水堆 AC600 非能动安全系统的重要组成部分。其实验研究课题属“八五”国家科技攻关课题。

AC600 非能动余热排出系统主要特点是系统位于蒸汽发生器的二次侧,完全由非能动设备组成。系统依靠上升段的水蒸汽和下降段的冷凝水间密度差所产生的驱动压头形成的自然循环将堆芯余热排向安全壳外大气。在核电站发生诸如全厂断电(同时可靠电源丧失)等事故工况时,保证堆芯余热的排出,其设计的自然循环能力可带走堆芯额定热功率的 2% (即衰变功率)。

实验研究是为了研究和验证系统设计的可行性、系统余热排出能力和系统瞬态特性、影响系统余热排出能力和系统过渡特性的各种因素以及计算机程序开发和验证而提出来的。

实验研究分稳态和瞬态两部分,稳态实验着重研究系统余热排出能力及空冷器放置方式、系统冷热芯高差变化、系统阻力特性、压力、空冷器风速等因素对系统余热排出能力的影响。瞬态实验主要目的是探索系统备用与启动方式、过渡特性影响因素及计算机程序的验证计算。

1 实验装置及实验方法

1.1 实验装置^[1]

实验装置是一座依据模拟准则建立起来的试验回路。由主回路系统、应急补水系统、安全排放与泄压系统、给水系统、热补偿、仪表测控以及电气系统组成(见图 1)。装置设计原则为:a. 应严格按修正的功率/容积模拟准则设计,保证与原型系统有相似的热工水力特性,原型系统中所有重要部件在模型系统中都有相应的模拟体。b. 模型系统中,个别设备和系统高度可变。蒸汽发生器模拟体与空冷器间位差可调,模型装置有较大的运行参数范围。

装置采用原型工质,在与原型相同的压力和温度下运行。总体容积比例为 1/390。系统主要设备包括蒸汽发生器模拟体、空冷器和应急给水箱。装置总高约 19 m,两主要设备间高差,即冷热芯位差可调。总体设计参数为:设计压力 8.6 MPa;设计温度 316 °C;总加热功率 150 kW。装置经过冷态调试,完全满足实验要求^[1]。

1.2 实验方法及参数范围

实验前先进行预实验,一方面探索自然循环流动建立方式,另一方面检验仪表、数据采集系统及其数据处理程序。正式实验额定工况为系统压力:6.71 MPa;蒸汽发生器模拟体水位:5.07 m;加热功率:100 kW;空冷器风速:约 2 m/s。

1.2.1 稳态实验

根据不同的实验要求,变动某一运行参数或改变装置布置,以研究系统自然循环余热排出能力和压力、风速、系统阻力、冷热芯位差、空冷器放置方式等对系统自然循环运行的影

响。当系统主要参数达到某一稳定值后,启动数采系统采集数据。然后转入下一工况,依此直至所有工况完成。

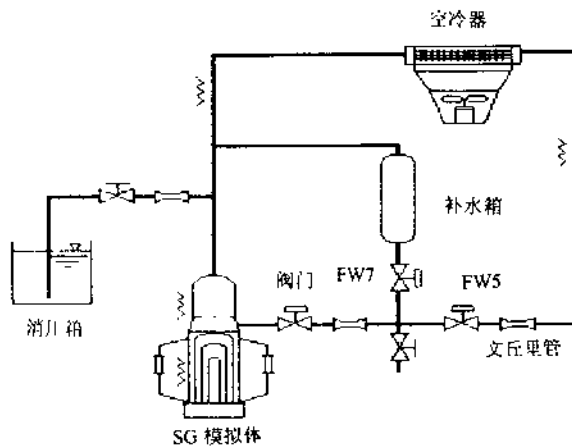


图1 AC600 试验装置系统流程图

1.2.2 瞬态实验

本实验研究了三种启动方式的过渡特性及其影响因素。其中,液柱启动是利用贮存在冷凝管下降段中不同贮量(即有不同初始液位差)的冷流体,利用阀门 VW5 突然开启时流体的抽吸作用建立起系统自然循环流动;微流量启动是液柱启动的一种特殊方式。微流量启动前,通过微循环使整个余热排出系统和冷凝管下降段中流体都处于加热状态。这样,一方面避免系统启动造成人的热冲击,另一方面可以改善冷启动的过渡特性;应急补水箱注水启动是在向蒸汽发生器补水的同时引射建立系统自然循环流动。各种启动前,都先运行数据采集系统然后才运行瞬态实验,以记录全部试验数据。待系统稳定或当系统流量出现发散脉动,或当系统主要参数达到某一定值后即结束此工况。依此直至所有工况完成。

在实验中,特别在实验运行初期,有选择地重复了部分工况,以确保所获得数据的正确性。另外,实验中还有意突然改变风速、阀门开度和加热功率,以研究系统的稳定性。

2 稳态数学模型

2.1 系统特征参数的引入

2.1.1 系统等效直径及系统等效截面积^[2]

(1)系统等效直径:

$$D_e = \frac{4V_{\text{loop}}}{S_{\text{wet}}} = \frac{4 \sum_i A_i L_i}{\sum_i \pi D_i L_i} \quad (1)$$

式中, V_{loop} 和 S_{wet} 分别为系统总体积和系统总润湿面积, A_i, D_i, L_i 分别为每段的面积、水力当量直径和长度(m)。

(2) 系统等效面积:

$$A_e = \frac{V_{\text{loop}}}{\sum_i L_i} = \frac{\sum_i A_i L_i}{\sum_i L_i} \quad (2)$$

2.1.2 系统等效阻力系数^[1]

系统等效阻力系数:

$$K_{\text{eff}} = \sum_i \frac{A_e^2}{A_i^2} \left(\frac{f_i L_i}{D_i} + K_i \right) \quad (3)$$

式中, f_i 和 K_i 分别为每段的摩擦系数和形阻系数。

2.1.3 系统特征速度

考虑自然循环系统特征, 引入如下系统特征速度:

$$U_m = (D_e L_{\text{th}} / A_e^2) (q_s \Delta \rho / \rho_{\text{ls}} \rho_{\text{gs}} h_{\text{fg}}) \quad (4)$$

式中, $L_{\text{th}}, q_s, \Delta \rho, \rho_{\text{ls}}, \rho_{\text{gs}}, h_{\text{fg}}$ 分别为系统冷热芯高差、热源功率、饱和蒸汽与饱和液体密度差、饱和液体密度、饱和蒸汽密度及汽化潜热。

2.1.4 系统冷热芯高差^[1]

系统冷热芯高差与热阱(空冷器)和热源(SG 模拟体)的热芯高度有关。空冷器的热芯高度、热源热芯高度和系统冷热芯高差分别为:

$$L_{\text{thair}} = \Delta H_{\text{air}} \cdot \int_0^{H_{\text{air}}} \rho dz / \bar{\rho} \quad (5)$$

$$L_{\text{thSG}} = \Delta H_{\text{SG}} \cdot \int_0^{H_{\text{SG}}} \rho dz / \bar{\rho} \quad (6)$$

$$L_{\text{th}} = L_{\text{thair}} + L_{\text{thSG}} \quad (7)$$

式中, $\Delta H_{\text{air}}, \Delta H_{\text{SG}}, H_{\text{air}}, H_{\text{SG}}, \bar{\rho}$ 分别为空冷器、SG 模拟体离地高度, 空冷器、SG 模拟体高度及系统平均密度。

2.1.5 修正的雷诺数^[5]

以系统冷热芯高度作为雷诺数公式中的定性尺寸, 得到修正的雷诺数为:

$$Re_m = \frac{U_m L_{\text{th}}}{\nu} = \left(\frac{D_e L_{\text{th}}}{A_e^2} \right) \left(\frac{q_s \Delta \rho}{\rho_{\text{ls}} \rho_{\text{gs}} h_{\text{fg}} \nu} \right) \quad (8)$$

式中, ν 为饱和液体运动粘度。

2.2 两相自然循环稳态流量理论解

2.2.1 基本假设

基本假设有:

① 一维模型假设。采用一维计算模型, 垂直于流动方向的任一截面上所有流体参数相同, 取其混合平均值; ② 流体不可压缩假设; ③ 忽略压力所作的功; ④ 流动是稳定的; ⑤ 忽略

粘性耗散损失。

2.2.2 分析解

根据基本假设,两相自然循环稳态特性控制方程^[6,7]可简化为:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (9)$$

动量守恒方程:

$$\sum \left(\frac{\rho_i U_i^2}{2} \right) \left(f_i \frac{L_i}{D_i} + K_i \right) = (\rho_l - \rho_{gs}) L_{th} g \quad (10)$$

能量守恒方程:

$$W(-h_l + h_{gs}) = q_s \quad (11)$$

据方程(9)与(10)得:

$$\frac{W^2}{2} \sum \left(f_i \frac{L_i}{D_i} + K_i \right) \frac{1}{A_i^2 \rho} = (\rho_l - \rho_{gs}) L_{th} g \quad (12)$$

即:

$$\frac{W^2}{2} \frac{K_{eff}}{A_e^2 \rho} = (\rho_l - \rho_{gs}) L_{th} g \quad (13)$$

由体积膨胀系数^[8]定义及变换处理,得:

$$\frac{W^2}{2} \frac{K_{eff}}{A_e^2 \rho} = \left[\frac{\beta \rho_{ls} (q_s / W - h_{lg})}{C_p} + \rho_{ls} - \rho_{gs} \right] L_{th} g \quad (14)$$

即:

$$W^3 + \left(\frac{\beta \rho_{ls} h_{lg}}{C_p} - \Delta \rho \right) L_{th} g \frac{2 A_e^2 \bar{\rho}}{K_{eff}} W - \frac{\beta \rho_{ls} q_s}{C_p} L_{th} g \frac{2 A_e^2 \bar{\rho}}{K_{eff}} = 0 \quad (15)$$

式中, C_p 为定压比热 $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。定义

$$B = \left(\frac{\beta \rho_{ls} h_{lg}}{C_p} - \Delta \rho \right) L_{th} g \frac{2 A_e^2 \bar{\rho}}{K_{eff}} \quad (16)$$

$$C = - \frac{\beta \rho_{ls} q_s L_{th} g}{C_p} \frac{2 A_e^2 \bar{\rho}}{K_{eff}} \quad (17)$$

则方程(15)为:

$$W^3 + BW + C = 0 \quad (18)$$

在自然循环系统中形阻起主导作用,因而 K_{eff} 是 W 的弱函数,可认为 B 和 C 是与 W 无关的系数;另一方面,系统热源功率、系统冷热芯高度、系统压力及系统阻力一定时,流量也一定。因此,方程(18)有唯一实根,其解为:

$$W = \sqrt[3]{-C/2 + \sqrt{(C/2)^2 + (B/3)^3}} + \sqrt[3]{-C/2 - \sqrt{(C/2)^2 + (B/3)^3}} \quad (19)$$

2.3 系统总体等效阻力系数模型

对于一个给定的系统,特别是两相自然循环系统,摩擦系数 f 和形阻系数 K 的确定非

常困难。但另一方面,自然循环系统中,自然循环流量又是与热源、冷热芯高差及几何形状相互密切关联的。由此,本研究通过修正雷诺数,将 K_{eff} 与之关联,即引入如下模型。

$$K_{eff} = (A_1\theta + A_2)Re_m^{A_3} \tag{20}$$

式中, θ 为空冷器放置倾斜角度, A_1, A_2, A_3 为经验系数,由实验确定。

3 稳态实验及结果分析

3.1 实验结果

稳态实验共获得 166 组实验数据,其参数范围见表 1。

表 1 实验参数范围一览表

参数	符号	单位	范围
冷热芯高差	L_{ch}	m	11.04, 15.04
空冷器倾角	θ	rad	$0, \pi/3$
系统压力	P	MPa	4.0~7.6
加热功率	q_s	kW	85~140
自然循环流量	W	kg/s	0.044~0.075
风速	v	m/s	0.65~2.9

稳态实验结果表明,对于本自然循环系统,自然循环流量与排热功率间无简单对应关系。即使在系统压力确定的情况下,自然循环流量还与空冷器出口流体温度(系统阻力,风速等综合影响的结果)有关。对于本实验装置和参数范围,在气温为 6~23℃ 时,即使冷热芯高差只有 11 m,只要风速不小于 1.5 m/s,即可通过自然循环流动(约 190~230 kg/h)带走堆芯衰变功率(见图 2)。

实验结果还表明,风速、功率和阀门开度的快速变化扰动对系统的稳定运行无大的影响,即系统运行对这些快速小扰动有一定的“容忍性”。

3.2 经验系数的确定及比较

3.2.1 系统总体等效阻力系数

为求解稳态自然循环流量,须先确定 K_{eff} ,基于系统总体等效阻力系数模型,用所得到的 166 组实验数据中的 83 组,按非线性回归方法,得系统总体等效阻力系数公式如下:

$$K_{eff} = (-0.242\theta + 2.044) \times 10^6 / Re_m^{0.044} \tag{21}$$

在求得 K_{eff} 后,就可以按系统稳态流量式计算各种稳态工况的自然循环流量,进而计算出系统排热能力。

3.2.2 分析式的修正及验证

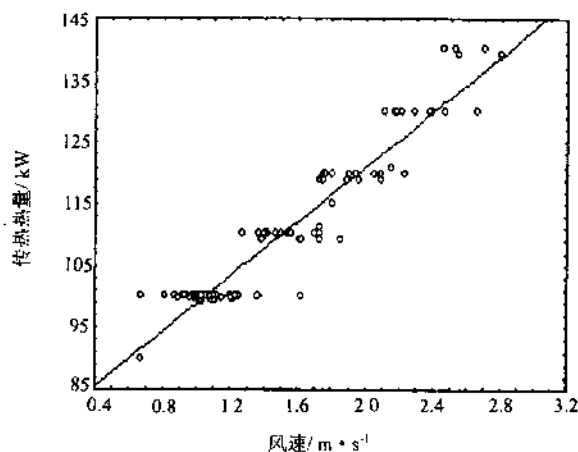


图2 自然循环排热能力与空冷器风速的关系

考虑在求解过程中引入的一些简化带来的误差,需对求解的稳态自然循环流量公式进行适当的修正。

$$W' = m \cdot K_{eff}^n \cdot W \quad (22)$$

经非线性回归处理后得: $m=0.645$; $n=0.027$ 。

用166组数据与计算结果相比,数据离散度为 $\pm 18.2\%$ 。图3给出了计算值与实验值的比较,98.8%的实验数据落在 $\pm 15\%$ 的相对误差范围内,88.0%的试验结果落在 $\pm 10\%$ 的相对误差范围内。

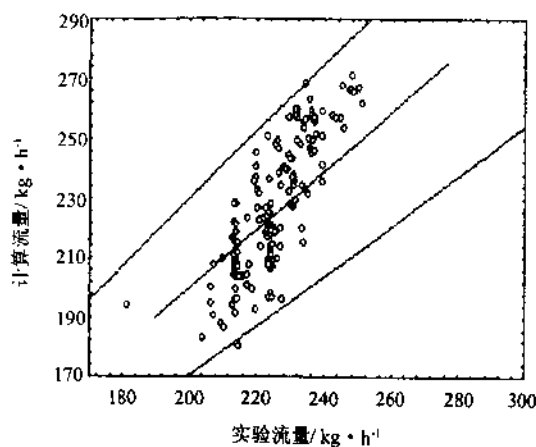


图3 自然循环流量计算值与测量值的比较

3.3 参数影响讨论

3.3.1 系统参数影响

风速:在其它条件一定的情况下,随着风速的增加,空气侧换热系数增加,空冷器总换热系数也随之增加。用实验数据简单回归出的余热排出能力与风速的关系为(见图 2):

$$q_s = 76.6 + 22.2v \quad (23)$$

上式适用范围为: $P=4.0\sim 7.6\text{ MPa}$; $T_{\text{环境}}=6\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v=0.6\sim 2.8\text{ m/s}$ 。

系统阻力:在本实验参数范围内,自然循环流量随阻力(通过改变阀门开度)的增加而略微降低,但影响不大。当阀门开度从 100% 变到约 15% 时,流量减小约为 15%。其原因在于冷凝管下降段中积聚的液柱随系统阻力的增加而增高,使驱动压头与系统阻力相匹配,因而维持了系统自然循环流量的基本稳定,从而表现出有一定的自调节能力。

系统压力:系统压力与自然循环流量的关系从实验数据上看似乎较复杂。一方面,在其它条件一定的情况下,压力增大需较大的自然循环流量来带走相同的加热功率。但另一方面,空冷器进出口温差也对流量有很大影响。从现有实验数据来看,其综合效果仍表现为随压力的增大,自然循环流量稍有增加。

系统冷热芯高差:与一般自然循环系统不同的是,在本系统这种汽液有截然分界面的自然循环系统中,冷热芯高差不总是对自然循环流量有影响。实验结果显示,在加热功率、系统压力和空冷器出口温度基本相同时,冷热芯高差对自然循环基本无影响。

空冷器放置方式:空冷器水平和 60° 倾斜放置,对稳态自然循环流量无明显影响。

4 瞬态实验及其特性分析

瞬态实验作为探索,目前只考虑了下降段液柱启动、微流量启动和应急补水箱注水启动等三种启动方式,完成了 46 种工况。在研究影响系统过渡特性的因素中,主要研究了冷热芯高差及各种初始与边界条件的影响。

4.1 启动方式及其过渡特性

4.1.1 液柱启动

共进行了 16 种工况的液柱启动,研究了不同初始液位高度、阀门开度、空冷器放置方式及系统初始参数等的影响。液柱启动实验数据表明(见图 4,5):①液柱启动是可行的,其过渡特性与空冷器放置方式、系统冷热芯高度、系统阻力、空冷器出口温度及冷凝管下降段液位等有关,过渡时间一般小于 50 s;②空冷器放置方式,空冷器初始进出口温差和冷凝管下降段启动液柱高度对稳定后自然循环流量无影响。空冷器倾斜,出口温度和启动液柱高有益干系统自然循环的平稳建立;③在系统阻力小,空冷器出口液体温度低和冷热芯高差小,特别是空冷器水平放置时,系统可能产生流动不稳定,甚至产生“汽锤”冲击。

4.1.2 微流量启动

微流量启动一共进行了十次运行,研究了空冷器放置方式、系统阻力和冷热芯位差的影响(见图 6)。实验结果表明,微流量启动比液柱启动有更好的过渡特性。系统流量能在较短时间(40~50 s)内过渡到稳定的自然循环流动。此外,与液柱启动相似,较大的系统阻力和

空冷器倾斜放置可使系统过渡更平稳。

4.1.3 应急补水箱注水启动

应急补水箱功能是在当蒸汽发生器处于低-低液位时,自动向蒸汽发生器注水以保证热阱的可靠性。启动由蒸汽发生器低-低液位信号触发进行,向蒸汽发生器的补水同时引射建立起系统自然循环流动。

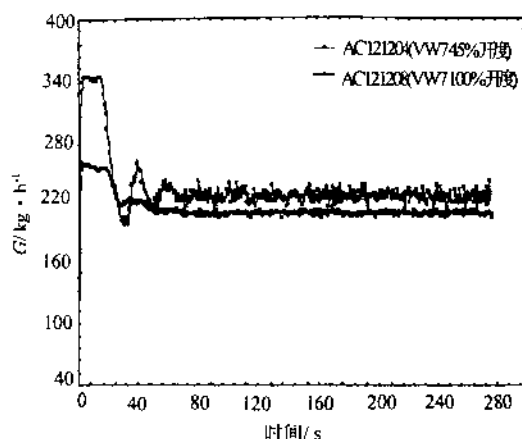


图4 液柱启动不同系统阻力的影响

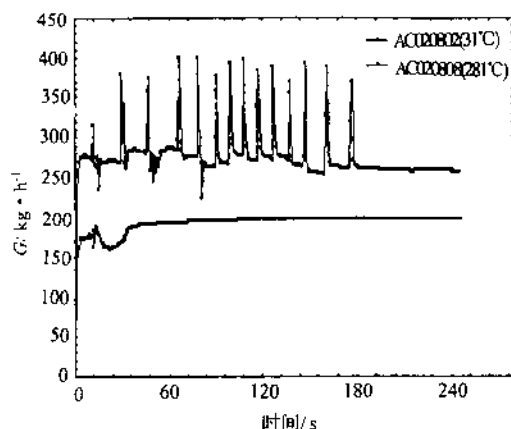


图5 液柱启动不同出口温度的影响

共进行了二十次不同初始和边界条件及系统布置的注水启动实验,着重研究了主给水阀开度大小、应急补水箱水温、系统压力和给水流量等的影响。

实验研究表明(见图7~9),补水水温过低,补水速度过快,系统压力较低和应急补水箱满初始液位时,很易激发强烈的汽击振动。表现为补水箱压力脉动并产生响声较大的“澎湃”敲击声。注水流量与被引射循环流量也产生同相脉动,但蒸汽发生器压力并不产生相应脉动。分析表明,振动的根本原因在于补水箱中冷流体及冷壁面使从平衡管中进入补水箱的饱和蒸汽快速冷凝所致,这和 PANTHERS-PCC 试验现象相似^[1]。实验也表明,上述振动可通过控制注水流量和适当增大系统阻力来避免。

4.2 MISAP-PRHRS 程序及计算结果

4.2.1 程序简介^[10]

MISAP-PRHRS 程序是西安交通大学与中国核动力院共同开发的一个用于 AC600 二次侧非能动堆芯余热排出系统稳态和瞬态特性分析的微机型计算机程序。该程序采用两相非均匀流模型,微分方程求解采用了适合于解刚性方程的吉尔(Gear)方法,结构模块化,移植和扩充较方便。

MISAP PRHRS 程序主要功能有:①计算蒸汽发生器稳态与瞬态热工水力特性;②计算全厂断电,主蒸汽管断裂,主给水丧失等各种事故工况;③计算二次侧非能动余热排出系统在液柱启动等启动方式下,系统的瞬态热工水力行为;④计算蒸汽发生器加热功率特性和

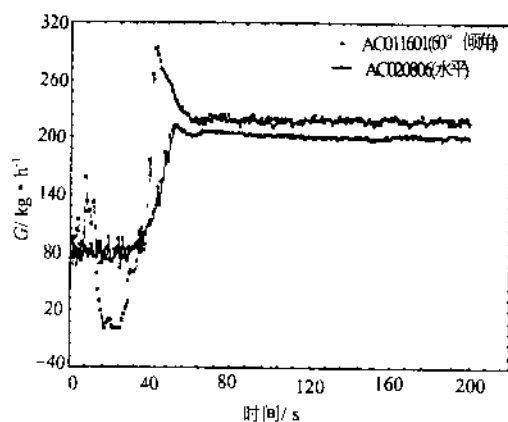


图 6 微流量启动空冷器放置方式的影响

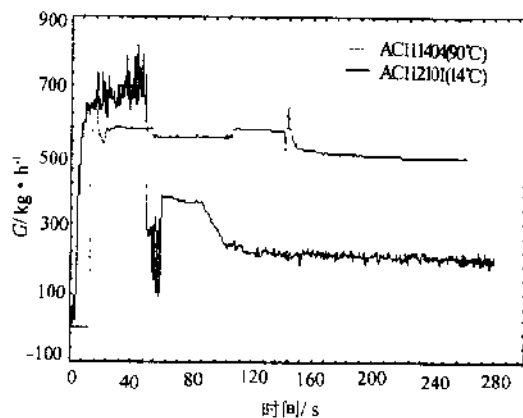


图 7 注水启动补水箱水温的影响

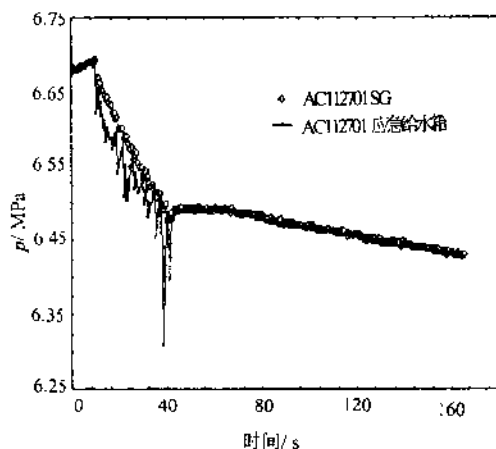


图 8 典型补水箱注水启动压力曲线

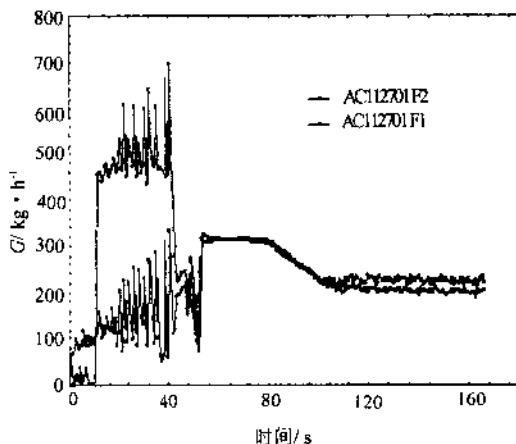


图 9 典型补水箱注水启动流量曲线

空冷器冷却能力变化等的瞬态特性。

4.2.2 程序计算结果

分三个方面用程序对实验结果进行了计算：①稳态特性：计算各种稳态工况下，程序关于自然循环流量的计算，也包括瞬态工况后期系统稳定后的自然循环流量。表 2 为部分计算结果与实验结果的比较；②瞬态特性：主要检验程序模拟各种启动方式和系统的过渡特性，特别着重检验当系统发生流动不稳定时，程序的模拟能力。图 10 和 11 为其中部分比较结果；③敏感性计算分析：主要计算了风速和系统形阻对系统自然循环的影响。

表 2 部分稳态工况计算比较表

序号	空冷器位置 m	实验参数			计算结果			
		功率 kW	压力 MPa	阀门开度	流量 kg/h	压力 MPa	流量 kg/h	误差 %
1	17	90	6.71	45	183	6.54	220	20.4
2	17	100	6.71	45	204	6.55	231	13.2
3	17	110	6.71	45	223	6.54	243	9.1
4	17	120	6.71	45	236	6.63	249	5.6
5	17	130	6.71	45	248	6.37	265	6.8
6	17	100	6.71	25	189	6.78	202	6.8
7	17	100	6.71	35	199	6.86	205	3.0
8	17	100	6.71	75	201	6.94	240	19.4
9	17	100	6.71	100	202	6.49	247	22.3
10	13	100	6.71	45	192	6.78	209	8.8

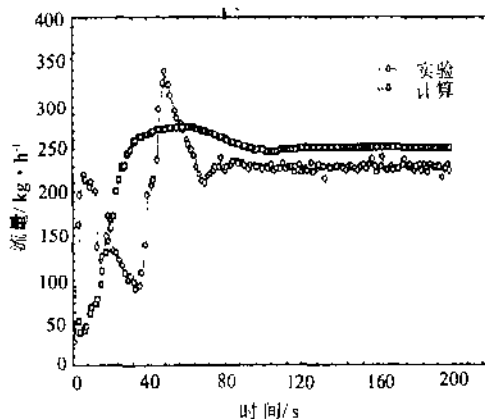


图 10 液柱启动平稳过渡结果比较

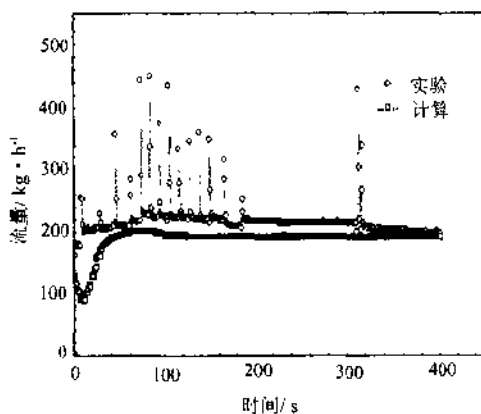


图 11 液柱启动存在流动不稳定结果比较

程序计算结果表明:①程序对系统稳态流量、压力、排热能力都能进行较好的计算,稳态自然循环流量相对偏差大部分小于 20%,一般小于 10%,最大为 22.3%;②对液柱、微流量启动瞬态平稳过渡工况有较好的模拟能力。但当系统存在流动振荡时,则对振荡过程不能作定量的描述。对注水启动功能的模拟能力仍有待于改进。据分析,主要问题在于三通部件缺少正确的引射模型;③敏感性分析表明系统流量对风速和系统形阻很敏感,存在一个阈值,当小于该值时,系统将出现流量的周期波动。

5 结 论

(1) AC600 二次侧非能动应急堆芯余热排出系统设计概念是正确可行的。实验表明,当环境温度为 6~23℃,冷热芯高差为 11 m 时,只要风速不小于 1.5 m/s,就可通过自然循环

带走相当于堆芯衰变功率的热量。

(2) 风速、功率和阀门开度的扰动对系统稳定运行无大的影响。

(3) 在系统配置确定后,风速是系统余热排出能力的决定因素。系统加热功率对该系统自然循环流量起主导作用。系统阻力、系统压力及空冷器风向的影响较小。空冷器放置方式对自然循环流量基本无影响。

(4) 针对本系统特征,在引出系统特征参数和适当假设后,通过理论分析与推导,给出了自然循环流量、系统总体等效阻力系数和余热排出能力等几个半经验关系式。公式(22)计算结果与166组稳态数据相比,数据离散度为 $\pm 18.2\%$ 。

(5) 液柱、微流量和注水三种启动方式都能建立系统自然循环流动,但微流量启动过渡特性(平稳性和时间)最好。

(6) 实验研究发现液柱启动可能在空冷器和冷凝段中引发由蒸汽快速冷凝引起的“汽(水)锤”现象。而注水启动中发生在补水箱中的“汽(水)锤”现象则更为严重。空冷器倾斜放置对避免液柱启动引发流量脉动有很大作用。

(7) 目前所完成的计算机程序 MISAP-PRHRS Ver. 1.1 对本系统稳态特性的计算结果与实验数据符合较好。其中自然循环流量计算的相对偏差一般小于20%。对液柱和微流量启动方式,可模拟其平稳过渡过程。

(8) 如何尽量避免产生在水平段和容器中的“汽(水)锤”现象非常值得深入研究。

参考文献

- 1 陈炳德,肖泽军,卓文彬,周仁明,刘文扬,党岩. AC600 二次侧非能动应急堆芯余热排出系统实验装置及研究计划,核动力工程,1998,19(2)
- 2 Zvirin Y, Jeuck J P R, Sullivan C W, Duffey R B. Experimental and Analytical Investigation of A Nature Circulation System with Parallel Loops. J. Heat Transfer, 1981, 103: 645~652
- 3 Vijayan P K, Mehta S K, Date A W. On the Steady State Performance of Nature Circulation Loops. Int. J. Heat Mass Trans., 1991, 34: 2219~2230
- 4 Ishii M, Katatavka I. Scaling Laws for Thermal-hydraulic System under Single Phase and Two Phase Natural Circulation. Nuclear Engineering and Design, 1984, 81: 411~425
- 5 杨世铭编. 传热学. 北京:高等教育出版社,1980. 150~189
- 6 Creveling H F, Depaz J F, Baladi J Y, Schoenhals R J. Stability Characteristics of A Single-Phase Free Convection Loop. J. Fluid Mech., 1975, 67: 65~84
- 7 Reyes J N. An Analytical Solution for Two-Phase Nature Circulation Flow Estimation. IAEA Program of Technical Cooperation, 1995. 1~6
- 8 沈维道等编. 工程热力学. 北京:高等教育出版社,1983. 230~232
- 9 Silveri R, PANTHERS Test Facility Description. Piacenza, 1995, 6
- 10 秋藤正,苏光辉,张金玲,郭玉君等. MISAP-PRHRS 资料,第三卷,用户手册,1994