

密度锁启动特性实验研究及计算验证

陈薇, 阎昌琪, 谷海峰

(哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:以基于密度锁的非能动余热排出系统 (PRHRS) 为研究背景, 实验验证了密度锁自平衡启动方案的可行性。结果表明: 主回路流量接近平衡流量启动 PRHRS 时, 密度锁内冷热流体温度分界面将在不平衡力作用下向上或向下移动, 减小或增大了余热排出回路重位压差, 使密度锁内冷热流体温度分界面在新的位置达到受力平衡, 最终实现密度锁的自平衡启动, 以及余热排出回路与主回路的隔离。依据一维连续性方程、能量方程及动量方程建立数学模型, 用 Matlab 语言编程, 对密度锁启动过程进行了数值模拟分析, 证明了密度锁自平衡启动方案合理、有效。计算值与实验值符合较好, 用该程序可较好地模拟密度锁自平衡启动过程中系统的瞬态运行特性。

关键词:密度锁; 自平衡启动; 数值计算

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)01-0029-05

Experimental Study and Numerical Calculation on Density Lock for Self-Equivalence Startup

CHEN Wei, YAN Chang-qi, GU Hai-feng

(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the passive residual heat removal system (PRHRS) with density lock, the validity of self-equivalence startup for density lock was proved by experimental study. It is shown that the cold-hot liquid interface will move up or down because of the unbalance pressure between the PRHRS and primary loop during the startup process when the primary mass flow is close to the balance flow, which will make the gravity pressure difference in PRHRS become lower or higher, and the cold-hot liquid will be balance in new position. Finally the density lock starts up by self-equivalence, and PRHRS is separated from the primary loop. The Matlab code was used to analyze the startup characteristic of the density lock, and the process of self-equivalence startup for density lock was proved reasonable and effective. The numerical calculation results agree well with the experimental data, and the code is well to analyze the transient phenomenon during the self-equivalence startup process for density lock.

Key words: density lock; self-equivalence startup; numerical calculation

密度锁^[1]是安装在反应堆主冷却剂系统与余热排出系统之间的一个设备。系统稳态运行时,密度锁内将形成稳定的冷热流体温度分层,依靠非能动余热排出回路与主回路之间的压力平衡,密度锁能有效隔离余热排出回路冷却水和主回路高温工质。一旦发生事故,密度锁将自动开启,含硼水注入主冷却剂系统,使反应堆停堆,并通过自然循环将堆芯热量带走,从而保证反应堆安全停堆。密度锁的打开过程不需外界动力和人员的干预,这使得系统具有良好的非能动安全性,因此,许多先进反应堆概念化设计中均应用了密度锁技术^[2-4]。

密度锁如何启动,即如何建立两个回路之间的压力平衡,保证系统启动过程中冷热流体温度分层始终维持在密度锁中,确保主回路和余热排出回路的隔离,是需要解决的技术难题之一。国外一些学者对基于密度锁的非能动余热排出系统(PRHRS)的启动方案进行了有益的探索^[5-6],他们多是采用控制主泵转速的方法来维持密度锁内冷热流体温度分界面处于下密度锁中心位置。然而,现有反应堆主泵转速多数不可调,且根据下密度锁温度分布不断调整主回路流量易造成主回路流量振荡,系统运行不稳定。因此,亟需根据系统本身具有的自稳定性提出一种新的启动方案,我们称之为密度锁自平衡启动方案。

本工作将实验验证密度锁自平衡启动方案的可行性,并依据一维连续性方程、动量方程及能量方程对实验装置建模,对密度锁自平衡启动过程进行分析模拟。

1 实验装置

所模拟的 PRHRS 实验装置简图如图 1 所示。实验装置由两个回路组成,分别模拟反应堆主冷却剂回路及非能动余热排出回路。回路 I 为主回路,由主泵、加热水箱、换热器等组成。主回路流体靠主泵驱动,流经加热水箱被加热,经主回路换热器被冷却,通过调节换热器冷却水流量维持加热水箱入口温度恒定。回路 II 为余热排出回路,由上、下密度锁,换热器,阀门等组成。整个实验装置与大气相连,以维持系统内压力恒定。

实验装置总高约 7.7 m,换热器与加热水

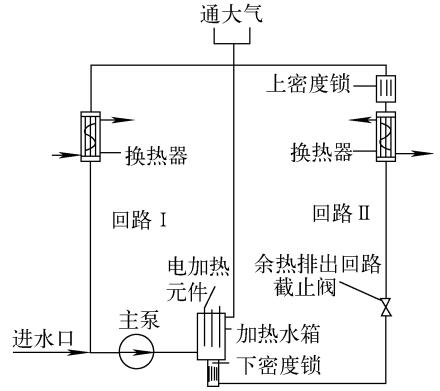


图 1 PRHRS 实验简图

Fig. 1 Sketch of PRHRS

箱中心处高度差约为 4.9 m,上、下密度锁高 0.6 m,实验管道内径 51 mm。加热水箱内布置了 15 根电加热元件,每根加热元件电加热功率 3 kW,通过控制加热元件开、关实现加热功率在 3~45 kW 范围内调节,调节步长为 3 kW。主回路流量可在 1.1~1.7 kg/s 范围内调节。实验装置上共布置了 3 个流量测点、1 个压力测点、25 个温度测点,其中,下密度锁内布有 14 个温度测点,以保证实时监测系统瞬态运行特性。下密度锁内热电偶布置方式列于表 1,以加热水箱底部为起始位置,向下为正。

表 1 下密度锁内热电偶布置

Table 1 Location of thermocouples in low density lock

编号	坐标/mm	编号	坐标/mm	编号	坐标/mm
1	164	6	289	11	414
2	189	7	314	12	439
3	214	8	339	13	539
4	239	9	364	14	564
5	264	10	389		

2 密度锁自平衡启动方案

在主回路系统稳定运行过程中,密度锁内将形成稳定的冷热流体温度分界面,非能动余热排出回路重位压差平衡于主回路上升段阻力压降^[7]时,密度锁将实现封闭,主回路和余热排出回路被隔离,此时的主回路流量被称之为平衡流量。若主回路流量大于或小于平衡流量时,密度锁内冷热流体温度分界面由于受力不均将发生向上或向下的移动,冷热流体温度分

界面的移动增大或减小了余热排出回路重位压头,使余热排出回路重位压差自动地与主回路上升段阻力压降相平衡,冷热流体温度分界面将在新的位置达到受力平衡,实现主回路和余热排出回路的隔离,这种特性被称之为系统的自稳定性。由此可看出,主回路流量在一定范围内波动时,依靠系统的自稳定性,亦可实现非能动余热排出回路的封闭。基于此,提出了密度锁自平衡启动方案。

系统启动前,先关闭余热排出回路截止阀,保证主回路与余热排出回路的完全隔离;开启主回路循环泵及加热器,对主回路流体进行预热,加热器出口温度接近运行工况时,打开主回路换热器,并不断调节冷却水流量,以维持加热水箱进出口温度恒定;系统稳定运行一段时间后,下密度锁内将形成稳定的冷热流体温度分层,当主回路上升段阻力压降基本等于余热排出回路重位压差时,打开余热排出回路截止阀,由于此时余热排出回路左右两侧压力基本平衡,密度锁中冷热流体温度分界面将发生小幅向上或向下移动,最终在新的位置达到压力平衡,从而有效隔离了主回路和非能动余热排出回路,这一过程被称之为非能动余热排出回路的自平衡启动过程。

3 实验结果及分析

在开阀前,主回路流量为 1.519 kg/s ,加热水箱进出口温度分别稳定在 69.5 、 $73.2 \text{ }^\circ\text{C}$,加热功率 21 kW 。开阀前后余热排出回路流量及下密度锁温度变化曲线分别如图 2、3 所示。

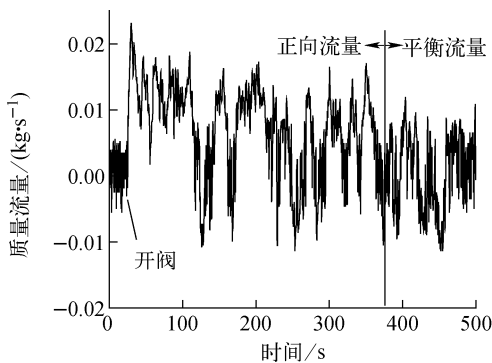


图2 自平衡启动过程中余热排出回路流量
Fig. 2 Mass flow rate of PRHR during self-equivalence startup

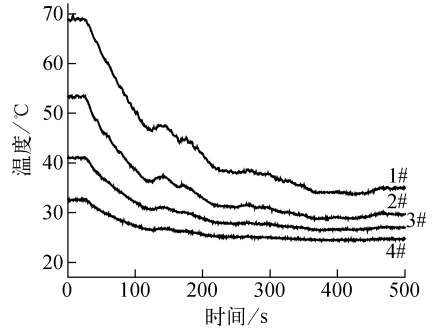


图3 自平衡启动过程中下密度锁内温度曲线
Fig. 3 Temperatures curves in low density lock during self-equivalence startup

在开阀前,主回路高温流体与余热排出回路低温冷却水之间存在较大温差,下密度锁内流体依靠导热形成了稳定的冷热流体温度分层,越靠近加热水箱,密度锁内流体温度越高,如图 3 所示,从上至下分别为下密度锁内 1#~4# 热电偶温度。我们定义冷热流体温度分界面处的温度为加热水箱入口处流体与余热排出回路流体的平均温度。由图 3 可知,在开阀前,冷热流体温度分界面大致在下密度锁 228 mm 处。主回路系统稳定运行一段时间后,打开余热排出回路截止阀,开阀后,主回路上升段阻力压降小于余热排出回路重位压降,在不平衡力驱动下,余热排出回路冷却水通过下密度锁流入主回路系统,如图 2 所示,余热排出回路中瞬间产生约 0.022 kg/s 的正向流量。由于冷却水的流入,下密度锁温度逐渐降低,下密度锁内冷热流体温度分界面上移,密度锁内流体重位压头增大,导致余热排出回路左右两侧驱动压头降低。此后,正向流量逐渐减小,开阀后约 100 s 时,余热排出回路第 1 次出现反向流量,但系统中仍以正向流量为主,下密度锁内流体温度出现小幅上升后继续缓慢下降。直至 400 s 左右,下密度锁内各处流体温度均围绕某一温度发生小幅振荡,且基本维持不变,余热排出回路流量亦在 0 kg/s 附近波动,认为此时两个回路达到压力平衡,冷热流体被重新隔离开。与开阀前相比,下密度锁内流体温度有所降低,但仍存在较为明显的冷热流体温度分界面,由于冷却水的进入,冷热流体温度分界面上移,至下密度锁 144 mm 处附近,并在新的位置重新达到受力平衡,系统启动成功。

4 计算模型

实验装置流动分析模型如图4所示。模型中包括3个并联的通道,即主回路下降段、主回路上升段、非能动余热排出回路下降段,分别用通道a、b、c表示。流体从余热排出回路流向主回路称为正向流动(图中实线方向);从主回路流向余热排出回路称为反向流动(图中虚线方向)。3个流道的上端和下端分别汇聚于 P_1 、 P_2 点。

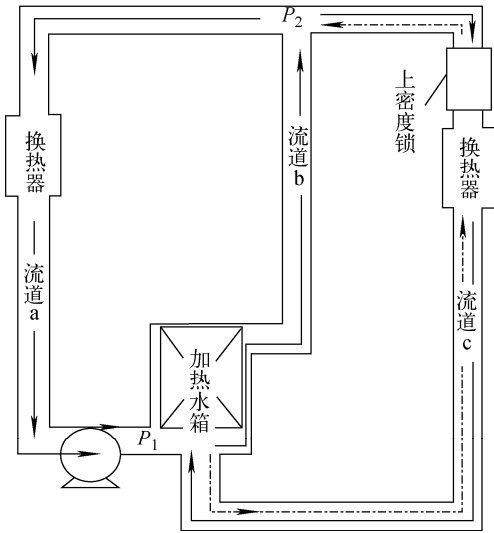


图4 实验装置流动分析模型
Fig.4 Flow analytical model
for experimental apparatus

分别应用一维动量方程、连续性方程及能量方程对流体流动及传热特性进行分析。

4.1 动量方程

动量方程为:

$$\frac{dG}{dt} = \sum p \times \sum \frac{A_i}{L_i} \quad (1)$$

式中: G 为各通道中质量流量,kg/s; $\sum p$ 为驱动压头,Pa; A_i 为控制体截面积, m^2 ; L_i 为控制体长度,m。

4.2 连续性方程

连续性方程为:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

连续性方程采用向前差分的隐式格式离散,为:

$$\rho_i = \frac{A_i C_i \bar{\rho}_i}{A_i v_i - A_{i-1} v_{i-1} + A_i C_i} \quad (3)$$

式中: $C_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}$, Δx_i 为空间步长,m, Δt 为时间步长,s; ρ 为主回路流体密度,kg/ m^3 ; v 为主回路工质流动速度,m/s。

4.3 能量方程

能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho A H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A H)}{\partial x} = E \quad (4)$$

式中: H 为流体焓,kJ/kg; E 为单位管长流体吸热量或放热量,kJ/m。

能量方程离散为:

$$H_i = \frac{Q_i + A_i(\bar{\rho}_i C_i - \rho_i v_i) \bar{H}_i}{A_i C_i \rho_i} + \frac{A_{i-1} v_{i-1} \rho_{i-1} \bar{H}_{i-1}}{A_i C_i \rho_i} \quad (5)$$

式中:加热水箱各控制体的 Q_i 为单位时间吸热量(即单位控制体加热功率),kJ/s。

换热器各控制体的 Q_i 为单位时间释热量,计算公式如下:

$$Q_i = -KS\Delta t \quad (6)$$

式中: K 为换热器总传热系数,W/($m^2 \cdot K$); S 为换热面积, m^2 ; Δt 为对数平均温差, $^{\circ}C$;其余控制体 Q_i 为0。

4.4 求解思路

将整个实验装置划分为100个控制体,其中,下密度锁控制体划分较密,根据实验中下密度锁内热电偶布置位置划分了14个控制体,上密度锁划分了10个控制体。在计算过程中,先调节主回路系统,使其达到稳定运行状态,此后打开余热排出回路截止阀,根据系统初始温度分布及速度分布,应用动量方程计算此时3个通道中的质量流量,再根据连续性方程及能量方程求出系统下一时刻的温度分布,进行往复迭代。

在系统自平衡启动过程中,主回路流量变化很小,计算中可近似忽略加热水箱进出口温度的变化,重点关注余热排出回路截止阀打开后能否依靠密度锁内冷热流体温度分界面的移动使两个系统之间的压力达到平衡,实现余热排出回路的封闭。

4.5 计算结果及分析

图5为计算得到的开阀前后余热排出回路流量、下密度锁内流体温度及上密度锁流体温度变化曲线。计算结果表明:开阀后,系统产生正向流量,下密度锁温度降低,上密度锁温度略

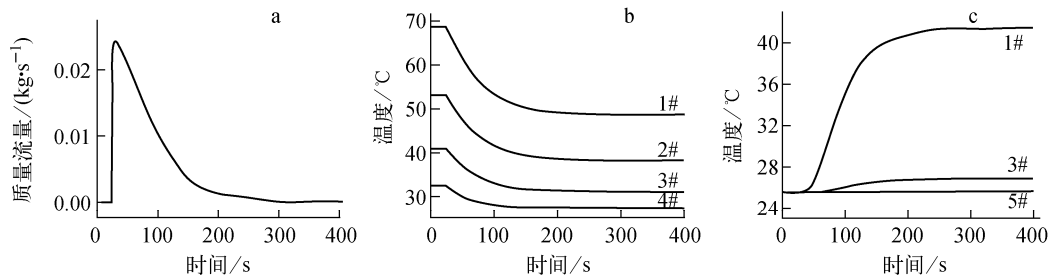


图5 自平衡启动过程中余热排出回路流量(a)、下密度锁温度(b)和上密度锁温度(c)的数值模拟

Fig.5 Numerical simulation on mass flow (a), temperature in low density lock (b) and temperature in up density lock (c) for PRHRS during self-equivalence startup

有升高,余热排出回路冷热流体芯位差逐渐降低,约400s时,余热排出回路与主回路实现完全隔离,此时,上下密度锁内各控制体温度亦维持不变,与开阀前相比,余热排出回路冷热流体芯位差减小,密度锁冷热流体温度分界面在新的位置达到受力平衡。计算值与实验值的比较表明,两者符合较好,计算模型基本可描述系统自平衡过程中的瞬态特性。

5 结论

通过实验及数值计算方法分析了密度锁自平衡启动方案的可行性,二者结果均表明:当主回路流量接近平衡流量启动PRHRS时,密度锁内冷热流体温度分界面将在不平衡力作用下向上或向下移动,减小或增大余热排出回路重位压头,使密度锁内冷热流体温度分界面在新的位置达到受力平衡,维持主回路和余热排出回路的隔离。分析结果证明了密度锁自平衡启动方案合理、有效。

参考文献:

- [1] KARE H. The PIUS pressurized water reactor: Aspects of plant operation and availability[J]. Nuclear Safety, 1989; 82: 56-63.
- [2] TAKAYUKI M, TATSUYA I. The inherently-

safe fluidized-bed boiling water reactor concept [J]. Ann Nucl Energy, 1990, 17(9): 487-492.

- [3] GRIBORIEV O G, LEONCHYK M P. IRIS: Minimizing internal energy accumulated in the primary circuit of an integral PIUS type PWR with natural circulation[C] // Proceedings of a Technical Committee Meeting. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1995: 119-122.
- [4] CINOTTI L, RIZZO F L. The inherently safe immersed system (ISIS) reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993, 143: 295-300.
- [5] KATSUHIRO H, KANJI T, YUTAKA K. The simulation test to start up the PIUS-type reactor from isothermal fluid condition[J]. Journal of Nuclear and Technology, 1995, 32 (9): 846-854.
- [6] TAKAHIRO I, YOSHIYUKI T, MASAYOSHI T, et al. Recoupling and decoupling of parallel loops in simulated PIUS-type reactor shutdown and restart transients[J]. Journal of Nuclear and Technology, 1997, 34(11): 1 067-1 078.
- [7] TAKAHIRO I, TETSUYA K, FUMIYOSHI N, et al. Thermal-hydraulic experiments of an advanced PIUS-Type reactor[C] // The 4th International Conference on Nuclear Engineering, Nuclear Orleans. Louisiana: ASME, 1996: 163-170.