

低压低功率条件下两相自然循环特性试验研究

刘小丫, 张永发, 蒋立志, 焦 猛, 赵新文, 王鑫铭, 王晓龙

Experimental Study on Two-phase Natural Circulation Characteristics under Low-voltage and Low-power Conditions

Liu Xiaoya, Zhang Yongfa, Jiang Lizhi, Jiao Meng, Zhao Xinwen, Wang Xinming, and Wang Xiaolong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0082>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加热功率对低压低高差自然循环系统两相流动特性影响研究

Research on Influence of Heating Power on Two-Phase Flow Characteristics in Natural Circulation System with Low Height Difference at Low Pressure

核动力工程. 2021, 42(6): 183-189

两相条件下主泵特性试验研究

Experimental Research on Pump Characteristics under Two-Phase Condition

核动力工程. 2021, 42(1): 129-132

低功率条件下低高度差开式自然循环流动模式研究

Study on Flow Patterns of Open Natural Circulation with Low Height Difference under Low Power Conditions

核动力工程. 2020, 41(4): 50-54

铅基快堆自然循环实验台架比例分析方法研究

Research on Scaling Analysis Method for Natural Circulation Test Facility of Lead-Based Fast Reactor

核动力工程. 2020, 41(6): 207-213

基于Modelica的两相热工水力特性仿真模型架构与概念验证

Simulation Model Architecture and Concept Validation for Thermal Hydraulic Characteristics of Two-Phase Fluid Based on Modelica

核动力工程. 2021, 42(1): 1-7

自然循环条件下蒸汽发生器U型传热管倒流分布特性的实验研究

Experimental Study on Distribution Characteristics of Flow Reversal in U-Tubes of Steam Generator under Natural Circulation

核动力工程. 2018, 39(4): 43-47



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0082-07; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0082

低压低功率条件下两相自然循环特性试验研究

刘小丫, 张永发*, 蒋立志, 焦 猛, 赵新文, 王鑫铭, 王晓龙

海军工程大学核科学技术学院, 武汉, 430033

摘要: 相比于陆基核电厂, 船用核动力装置的非能动安全系统运行压力较低, 运行功率变化频繁, 在两相自然循环条件下, 非能动安全系统内的流动更加复杂多变。为了研究两相自然循环在低压、低功率条件下的循环特性, 基于比例分析方法搭建了两相自然循环的原理试验台架, 研究了低压条件下功率和初始液位高度对自然循环特性的影响。结果表明, 在低压条件下, 系统稳定运行后的压力、流量等均受初始液位高度和功率的影响。当功率为 50 kW 时, 初始液位越高, 系统稳定后的压力越大, 但是流量相差较小; 初始液位一定时, 功率在 40% 满功率~100% 满功率内, 随着功率的增大, 系统稳定后的压力也逐渐增大。这为试验台架后续两相自然循环的研究提供了方向, 也为船用核动力装置非能动安全系统研究提供了参考。

关键词: 两相自然循环特性; 低压低功率; 原理试验; 比例分析方法

中图分类号: TL334 文献标志码: A

Experimental Study on Two-phase Natural Circulation Characteristics under Low-voltage and Low-power Conditions

Liu Xiaoya, Zhang Yongfa*, Jiang Lizhi, Jiao Meng,
Zhao Xinwen, Wang Xinming, Wang Xiaolong

College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, China

Abstract: Compared with the land-based nuclear power plant, the passive safety system of marine nuclear power plant has lower operating pressure and frequent changes in operating power. Under the condition of two-phase natural circulation, the flow in the passive safety system is more complex and changeable. In order to further study the circulation characteristics of two-phase natural circulation under the condition of low pressure and low power, the principle test bench of two-phase natural circulation is built based on the proportional analysis method, and the influence of power and initial liquid level height on the characteristics of natural circulation under the condition of low pressure is studied. The results show that under low pressure, the pressure and flow of the system after stable operation are affected by the initial liquid level and power. When the power is 50 kW, the higher the initial liquid level is, the greater the pressure after the system is stabilized, but the flow difference is small; When the initial liquid level is constant, the power is in the range of 40% full power to 100% full power. With the increase of power, the pressure after the system is stabilized also gradually increases. This provides a direction for the follow-up research of two-phase natural circulation of the test bench, and also provides a reference for the research of passive safety system of marine nuclear power plant.

Key words: Two-phase natural circulation characteristics, Low pressure and low power, Theory experiment, Proportional analysis method

收稿日期: 2021-09-25; 修回日期: 2021-11-30

作者简介: 刘小丫 (1993—), 女, 讲师, 现主要从事热工水力方面的研究, E-mail: yokalxy@163.com

*通讯作者: 张永发, E-mail: 49290412@163.com

0 引言

非能动安全系统是先进核反应堆的典型标志之一，能有效提高反应堆的固有安全性^[1-2]，被广泛应用于核动力装置中。相比于陆基核电厂，船用核动力装置的运行工况复杂，不同工况之间变化频繁。以非能动余热排出系统为例，在两相自然循环条件下，尤其在低功率或刚启动条件下，系统压力较低，系统内两相自然循环流动复杂多变，受外界功率或者负荷变化影响明显。而两相自然循环特性又关系到非能动余热排出系统的功能，进而对堆芯安全产生影响，故有必要对船用核动力装置在低压、低功率条件下的两相自然循环特性进行进一步研究。

考虑到经济性和安全性，通常采用比例分析方法搭建缩比试验台架来进行非能动安全系统自然循环特性的研究。Reyes^[3]使用 H2TS 法对非能动安全系统进行了模化。Ishii 和 Kataoka^[4]对稳态两相自然循环方法进行了分析研究。研究人员还对基于比例分析方法设计出的台架，如 SPES-2、ROSA、APEX、ACME 等进行了相关的研究^[5-6]。

国内学者也进行了相关研究，如中国核动力研究设计院^[7-8]设计并建立模拟试验装置来掌握 AC600 的非能动余热排出系统的瞬态特性和稳态特性。房芳芳^[9]讨论了基于 H2TS 比例分析法的试验台架模型的建立。武玉增^[10]通过分析确定了一回路失电事故情况下非能动余热排出系统的比例模化系统。卢霞^[11]对小破口失水事故（SBLOCA）整体试验台架进行了比例模化分析与初步评估的研究。卢冬华等^[12-13]对自然循环的比例模化准则及试验都进行了研究。Wu J B^[14]对以二代反应堆为基础的三代压水堆进行了非能动安全系统设计。

综上所述，国内外研究人员对非能动安全系统比例模化理论及试验进行了大量研究，试验台架大多聚焦于高压、高功率条件。对于船用核动力装置低功率运行工况，或是非能动系统刚启动工况时的低压、低功率条件下的自然循环特性研究较少。本文以船用核动力装置二次侧非能动余热排出系统为原型，基于比例分析方法，搭建了两相自然循环特性的原理性试验台架，对低压、低功率下影响两相自然循环特性的因素进行了探索。

1 试验装置

1.1 设计原理

在船用核动力装置上，当发生全船断电（含可靠电源丧失）事故时，反应堆紧急停堆，二次侧非能动余热排出（简称余排）系统投入运行。传递到蒸汽发生器（SG）的反应堆衰变热，再通过余排系统内流体的两相自然循环传递给最终热阱——海水。在此过程中，余排系统内最主要的流动换热是因相变传热产生密度差驱动的汽液流体在管道内的两相自然循环。

为了搭建研究两相自然循环的原理性试验台架，本文采用 H2TS 法对两相自然循环进行比例分析，流程图如图 1 所示。建立两相自然循环流动相关的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

质量守恒方程为：

$$\frac{d}{dt}(\rho_{TP} V_{TP}) + \Delta(\rho_{TP} Q_{TP}) + \Delta(\alpha a_c \Delta \rho v_{gi}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为：

$$\frac{d}{dt}(\rho_{TP} u_{TP} V_{TP}) = \Delta(\rho_{TP} u_{TP} Q_{TP}) + \Delta \rho g \alpha V_{TP} + \Delta \left[\frac{\alpha \rho_{gs} \rho_{ls} a_c}{(1-\alpha) \rho_{TP}} v_{gi}^2 \right] - \frac{\rho_{TP} u_{TP} Q_{TP}}{2} \left(K + \frac{f l}{d_h} \right) \quad (2)$$

能量守恒方程为：

$$\frac{d}{dt}(\rho_{TP} h_{TP} V_{TP}) = \Delta(\rho_{TP} h_{TP} Q_{TP}) + H_{st} A_s (T_s - T_{TP})|_{\text{boundary}} + \Delta \left(\frac{\alpha \rho_{gs} \rho_{ls} a_c}{\rho_{TP}} h_{lg} v_{gi} \right) \quad (3)$$

式中， ρ_{TP} 为两相密度， kg/m^3 ； V_{TP} 为两相体积， m^3 ； Q_{TP} 为两相体积流量， m^3/s ； α 为空泡系数；

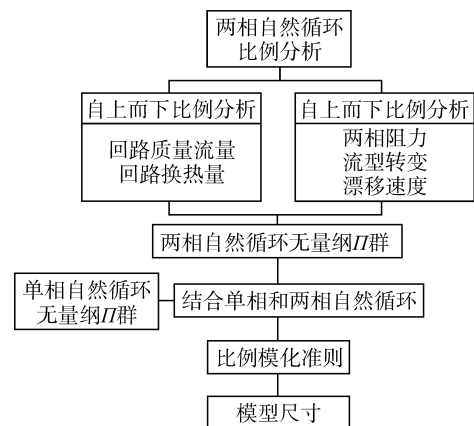


图 1 两相自然循环比例分析流程图
Fig. 1 Flow Chart of Proportional Analysis on Two-phase Natural Circulation

a_c 为截面积, m^2 ; $\Delta\rho$ 为密度改变量, kg/m^3 ; v_{gj} 为两相漂移速度, m/s ; u_{TP} 为两相速度, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ_{gs} 为气体单相密度, kg/m^3 ; ρ_{ls} 为液体单相密度, kg/m^3 ; K 为节流系数; f 为摩擦系数; l 为长度, m ; d_h 为水力学当量直径, m ; h_{TP} 为两相焓, kJ/kg ; H_{sf} 为对流传热系数, $w/m^2 \cdot K$; A_s 为对流传热面积, m^2 ; T_s 为固体壁面温度, K ; T_{TP} 为两相温度, K ; h_{lg} 为单相液体焓, kJ/kg ; 下标: TP 为两相, gs 为气相, ls 为液相, i 为第 i 个构件。

选择初始稳态参数作为无量纲化的特征尺度, 采用该特征尺度来无量纲化系统各段的控制方程, 进而推导出能够保证试验装置整体性能与原型系统自然循环系统特性相似的无量纲 Π 群, 具体推导过程在此不再赘述, 最终得到表 1 所示的无量纲 Π 群。

表 1 两相自然循环无量纲群

Tab. 1 Dimensionless Group of Two-phase Natural Circulation

| 序号 | 无量纲数 | 说明 |
|----|---|--------------|
| 1 | $\tau_{TP,0} = \frac{V_{TP,0}}{Q_{TP,0}}$ | 无量纲时间 |
| 2 | $\Pi_{Fr} = \frac{u_{TP}^2 \rho_{TP}}{\alpha g l \Delta \rho}$ | Froude 数 |
| 3 | $\Pi = \frac{\rho_g \rho_l}{\alpha(1-\alpha)\Delta\rho^2}$ | |
| 4 | $\Pi_{Nd} = \frac{v_{gj} \alpha \Delta \rho}{u_{TP} \rho_{TP}}$ | drift flux 数 |
| 5 | $\Pi_F = \frac{f l}{d} + K$ | Friction 数 |
| 6 | $\Pi_{HT} = \frac{H_s A_s (T_s - T_{TP})}{\rho_{TP} h_{TP} u_{TP} d_c}$ | 与传递热量相关比例准则数 |
| 7 | $\Pi_h = \frac{h_{lg}(1-\alpha)\Delta\rho}{h_{TP} \rho_{TP}}$ | 与焓相关比例准则数 |
| 8 | $\Pi_{qf} = \frac{q_s l}{u_{TP} \rho_s c_{vs} (T_s - T_{TP}) V_s}$ | 流体无量纲热量 |
| 9 | $\Pi_q = \frac{q_s}{H_s A_s (T_s - T_{TP})}$ | 固体无量纲热量 |
| 10 | $\theta_s = \frac{T_s - T_{TP}}{T_s}$ | 无量纲温度 |

H_s —热传递系数, c_{vs} —固体比热, q_s —产热率; 下标 0 表示相关物理量的初始参数

在此次试验中, 不考虑无量纲时间 $\tau_{TP,0}$, 设备热容量相对 SG 模拟体产热很小, 对试验结果影响很小, 故也不考虑设备热容量的影响。欲保证所有准则数在缩比模型与原型中一致是较难实现的, 而对于两相自然循环, 整个过程中流体的浮力、重力与摩擦力是首要考虑的因素, 故在试验装置的设计中, 优先保证 Froude 数、Friction 数等在原型和模型上一致。

1.2 装置组成

试验装置由自然循环回路和冷却水回路 2 个回路组成, 工作介质为去离子水, 试验装置的流程图如图 2 所示。自然循环回路由 SG 模拟体、余排换热器、球阀和管道等组成, 冷却水回路由冷却水箱、循环泵、冷却管道等组成。在试验装置上还布置了相关的压力测点、温度测点和流量测点来监测自然循环系统和冷却水系统中温度、流量和压力等物理参数的变化。

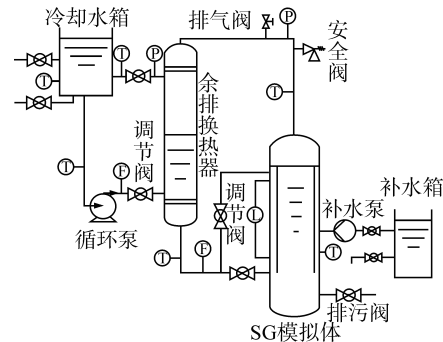


图 2 试验装置流程图

Fig. 2 Flow Chart of Experiment Device

T—温度测点; F—流量测点; P—压力测点

去离子水在 SG 模拟体内被加热生成蒸汽后, 经过管道, 在位于较高位的余排换热器管程内被冷却后, 由管道返回 SG 模拟体内, 完成自然循环回路。冷却水箱内的冷却水由循环泵驱动经冷却管道进入余排换热器壳程, 带走自然循环回路热量后返回冷却水箱, 完成冷却水回路的循环。

1.3 试验方法

在进行试验时, 操作分为上水、升温排气、达到初始条件和工况运行 4 步。操作步骤如下:

(1) 上水: 打开排气阀, 将去离子水注入 SG 模拟体直至充满整个系统, 然后关闭余排换热器到 SG 模拟体的球阀, 降低 SG 模拟体内部初始液位高度到指定值。

(2) 升温排气: SG 模拟体内电加热器对去离子水进行加热, 控制升温速度不超过 $1^\circ C/min$, 观察排气口, 当排出的全部是蒸汽时关闭排气阀, SG 模拟体内水继续升温, 回路压力升高。

(3) 达到初始条件: 当 SG 模拟体出口温度和内部压力均达到指定值时, 将 SG 模拟体电加热功率调整到指定值。

(4) 工况运行: 开启冷却水回路的循环泵,

调节冷却水流量到指定值，并打开余排换热器到 SG 模拟体的球阀。随着时间的推移，系统内逐渐建立两相自然循环，直至稳定状态。

1.4 试验误差分析

在试验过程中，由于环境因素、测量仪表精度限制等原因，实际测量结果和真实值存在一定的差距，为了提高试验数据的可信度，对试验中测量的数据，如温度、流量、压力等进行测量误差分析。

温度测量采用的是一级铠装 T 型热电偶，热电偶的量程为 0~300℃，允差为 0.5℃。

流量测量采用的是压差式流量计，根据测量的位置不同，量程范围不同。以测量自然循环回路蒸汽流量的压差式流量计为例，量程为 46~120 kg/h，允差为 0.66 kg/h。

压力测量采用的是压力变送器，根据测量的位置不同量程范围不同。以测量蒸汽压力的压力变送器为例，量程为 0~10 MPa，允差为 0.01 MPa，假设测量符合正态分布，按照 99% 置信概率，取包含因子为 3，则压力的不确定度分量为 0.0033 MPa。

2 影响自然循环特性因素分析

船用核动力装置实际运行时，随着航速的变化，SG 热负荷发生变化，堆芯产热量也会随之变化，给水调节还未响应时，SG 内液位的高度也会发生变化。在试验装置中，SG 模拟体内电加热功率的大小变化可以模拟堆芯产热量的变化，SG 模拟体内初始液位的高低可以模拟液位高度的变化。通过本试验装置，可以详细分析 SG 模拟体电加热功率和初始液位高度的变化对两相自然循环特性的影响。

2.1 初始液位高度

SG 模拟体电加热功率为 100% 满功率（50 kW）不变，对 3 种不同初始液位高度（1.2、1.5、1.8 m）的两相自然循环回路特性进行研究。图 3 给出了不同初始液位下 SG 模拟体内压力的变化趋势。试验过程中 SG 模拟体初始压力高于 2.4 MPa^[15]。从图 3 中可知，对于不同初始液位高度的二次侧非能动自然循环系统，当冷却水回路投入运行后，SG 模拟体的压力均先降低后保持不变。这是因为由于冷却水回路的投入，余排系统内产生的热量在余排换热器中不断传递给冷

却水被带走，此时处于自然循环系统的初步建立阶段。当 SG 模拟体产生的热量和冷却水带走的热量达到平衡时，余排系统内的自然循环逐渐建立起来，此后 SG 模拟体压力达到了稳定值。

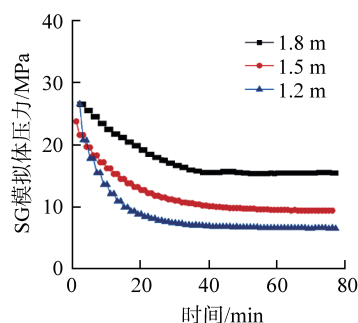


图 3 不同初始液位下 SG 模拟体内压力的变化曲线
Fig. 3 Variation Curve of Internal Pressure in SG Simulant under Different Initial Liquid Levels

在试验范围内，SG 模拟体初始液位高度越高，自然循环系统稳定后的 SG 模拟体压力越大，该压力大小与冷却水投入时刻的压力大小无关。此外，在试验范围内，当初始液位高度的增长速率保持不变时，余排系统内自然循环稳定后的压力的增长速率也近似相等。

图 4 给出了不同初始液位下 SG 模拟体流量的变化曲线。在本次试验所搭建的试验台架上，自然循环系统的系统流量的变化通过监测 SG 模拟体的流量获得的。从图中可以看出，在试验范围内，当初始液位分别为 1.2、1.5、1.8 m 时，自然循环系统稳定后的流量相差不大，同时系统稳定后的流量存在较小的波动性。初始液位为 1.2 m 时系统稳定后的流量为 73.5 kg/h，初始液位为 1.5 m 时系统稳定后的流量为 71.2 kg/h，相差 2.3 kg/h。初始液位为 1.8 m 和液位为 1.5 m

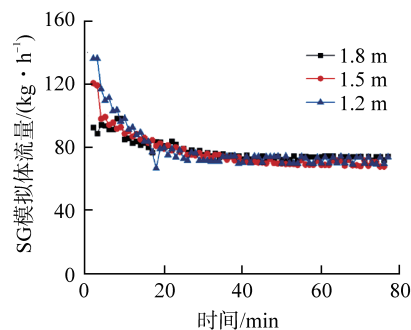


图 4 不同初始液位下 SG 模拟体流量的变化曲线
Fig. 4 Variation Curve of SG Simulant Flow under Different Initial Liquid Levels

时的稳定流量相差 7.3 kg/h。对比不同初始液位下自然循环系统稳定后的压力和流量,可以发现,自然循环系统稳定后压力受初始液位的影响较大,初始液位越高,压力越大,而自然循环系统稳定后流量受初始液位的影响很小。

不同初始液位下 SG 模拟体的出口温度曲线如图 5 所示。SG 模拟体内的去离子水被电加热棒加热后温度升高,生成蒸汽。当冷却水回路的冷却水投入运行后监测 SG 模拟体出口温度的变化趋势,由图可知,随着系统内自然循环的稳定运行,SG 模拟体出口温度逐渐下降并趋于稳定。在试验范围内,随着初始液位的增高,SG 模拟体出口温度逐渐升高,当初始液位为 1.8 m 时,自然循环稳定后 SG 模拟体的出口温度为 203.5℃。这是因为随着初始液位的增高,自然循环系统稳定后的压力逐渐增大,SG 模拟体出口介质为蒸汽,故 SG 模拟体出口温度也逐渐增大。

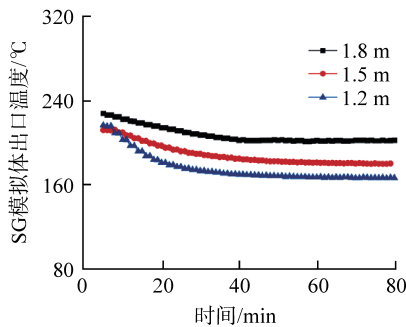
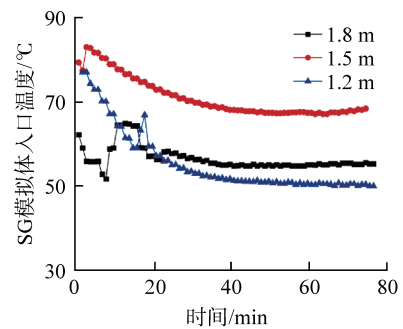


图 5 不同初始液位下 SG 模拟体出口温度的变化曲线
Fig. 5 Variation Curve of Outlet Temperature of SG Simulant under Different Initial Liquid Levels

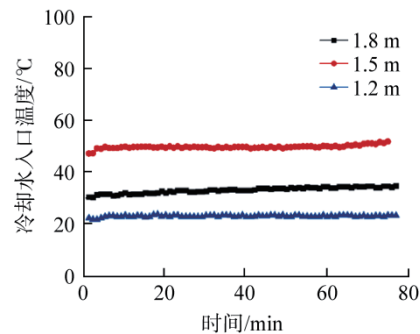
在自然循环系统中,系统稳定后的自然循环流量、压力以及 SG 模拟体进、出口温度都是重要的物理量,故在试验装置中对相关的物理量进行了监测。不同初始液位下 SG 模拟体及冷却水的入口温度的变化曲线如图 6 所示。在自然循环系统稳定之前,SG 模拟体入口温度存在一定的波动,这是由自然循环流量较小导致的。当系统稳定后,SG 模拟体入口温度也随之趋于稳定,而余排换热器的入口温度随系统状态的变化不大,前后趋于一致。

SG 模拟体内初始液位高度不同时,SG 模拟体入口温度和余排换热器冷却水入口温度也不一致。在试验范围内且系统稳定后,初始液位高度

为 1.5 m 时的 SG 模拟体入口温度最高,为 68.2℃,其冷却水入口温度也是最高的,是 51.3℃。其次是初始液位高度为 1.8 m 的工况,最低的是初始液位高度为 1.2 m 的工况。对比发现,SG 模拟体入口温度主要受余排换热器冷却水入口温度的影响,受初始液位高度变化的影响很小,当余排换热器冷却水入口温度较高时,SG 模拟体的入口温度随之升高,当余排换热器冷却水入口温度较低时,SG 模拟体的入口温度随之降低。



a SG 模拟体入口温度的变化



b 冷却水入口温度的变化

图 6 不同初始液位下 SG 模拟体及冷却水的入口温度的变化曲线

Fig. 6 Variation Curve of Inlet Temperature of SG Simulant and Cooling Water under Different Initial Liquid Levels

2.2 功率

经过分析,相同功率条件下,SG 模拟体不同初始液位高度对自然循环系统稳定后的压力影响较大,初始液位越高,稳定后压力越大,但对自然循环系统的流量的影响较小。除了初始液位高度会对自然循环系统的运行特性产生影响外,不同加热功率也会影响到自然循环系统的运行性能。保证 SG 模拟体初始液位为 1.4 m 不变,对 4 种不同工况(40% 满功率、60% 满功率、80%

满功率、100% 满功率) 下自然循环系统特性进行研究, 在试验操作中采用的是逐级升功率的方法。当功率为 40% 满功率、冷却水系统投入运行时开始数据记录, 保持 40% 满功率不变, 自然循环系统稳定运行一段时间后, 调节电加热器至 60% 满功率。同样待系统在 60% 满功率稳定运行一段时间后再次提高电加热功率, 如此循环至电加热器为 100% 满功率工况下自然循环系统稳定运行, 在此期间记录相关数据。

图 7 给出了不同功率下 SG 模拟体压力变化曲线。从图 7 中可知, 在冷却水系统开启时, 余排系统内的压力迅速下降, 在 40% 满功率的工况下逐步趋于稳定在 0.23 MPa。随着功率的提升, 自然循环系统的压力也逐渐升高, 功率越大, 自然循环稳定后的压力越大。当电加热功率为 100% 满功率工况下, 系统稳定后的压力稳定在 0.87 MPa。

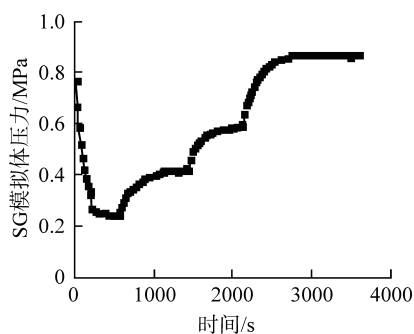


图 7 不同功率下 SG 模拟体压力变化
Fig. 7 Pressure Variation of SG Simulant under Different Powers

图 8 给出了不同功率下 SG 模拟体进口温度、出口温度的变化曲线。从图 8 中可以看出, SG 模拟体进口温度和出口温度的曲线变化趋于一致, 均随着功率的增加而不断增大。在 100% 满功率条件下, 自然循环系统稳定后 SG 模拟体出口温度为 178.6℃, 入口温度为 46.3℃。对比不同功率下的压力变化和温度变化可知, 自然循环系统稳定后的压力随功率的变化要更敏感。

3 结论

本文主要是基于两相自然循环原理性缩比试验装置, 研究了 SG 模拟体内初始液位高度变化和功率变化对系统运行特性的影响, 结论如下:

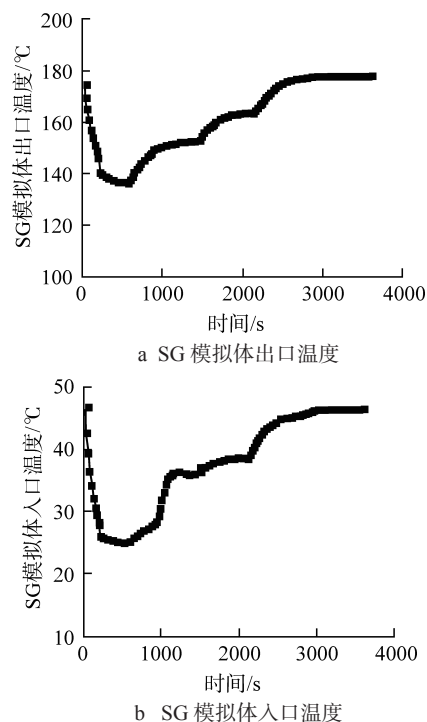


图 8 不同功率下 SG 模拟体出口温度、入口温度的变化曲线

Fig. 8 Variation Curve of Outlet Temperature and Inlet Temperature of SG Simulant under Different Powers

(1) 进行比例模化分析时, 根据目的不同可有选择性的优先保证重要准则数在模型和原型中的一致性, 本文中设计时, 优先保证 Froude 数、Friction 数等的一致性。

(2) 当功率为 100% 满功率 (50 kW) 时, SG 模拟体初始液位高度为 1.2~1.8 m, 初始液位越高, 自然循环系统稳定后的压力越大, 但是流量相差不大, 这说明 SG 模拟体初始液位高度的变化对系统压力影响较大, 对流量影响很小。

(3) 当 SG 模拟体初始液位为 1.4 m 时, 功率在 40% 满功率~100% 满功率范围内, 随着功率的增大, 自然循环系统稳定后的压力也逐渐增大。SG 模拟体入口温度和出口温度也随功率的升高而升高。

参考文献:

- [1] IAEA. Passive safety systems and natural circulation in water cooled nuclear power plants: IAEA-TECDOC-1624[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009: 6-7.
- [2] IAEA. Natural Circulation phenomena and modelling for advanced water cooled reactors: IAEA-TECDOC-

- 1677[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012: 286-298.
- [3] REYES JR J N, HOCHREITER L. Scaling analysis for the OSU AP600 test facility (APEX)[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 186(1-2): 53-109.
- [4] ISHII M, KATAOKA I. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 81(3): 411-425.
- [5] FRIEND M T, WRIGHT R F, HUNDAL R, et al. Simulated AP600 response to small-break loss-of-coolant-accident and non-loss-of-coolant-accident events: analysis of SPES-2 integral test results[J]. *Nuclear Technology*, 1998, 122(1): 19-42.
- [6] D'AMICO S, LOMBARDO C, MOSCATO I, et al. Transient analysis of "2 inch direct vessel injection line break" in SPES-2 facility by using TRACE code[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2015, 655: 012059.
- [7] 陈炳德, 肖泽军, 周仁明, 等. 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[J]. *核动力工程*, 1998, 19(2): 97-101.
- [8] 黄彦平, 卓文彬, 杨祖毛, 等. 先进压水堆非能动余热排出技术试验研究[J]. *核动力工程*, 2003, 24(1): 18-23.
- [9] 房芳芳, 常华健, 秦本科. 核反应堆试验台架比例分析方法的发展和应用[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(6): 658-664.
- [10] 武玉增, 李常伟. 非能动余热排出系统模化及验证分析[J]. *船舶*, 2014(4): 75-81.
- [11] 卢霞, 匡波, 孔浩铮, 等. SBLOCA整体试验台架的比例模化分析与初步评估[J]. *应用科技*, 2019, 46(5): 80-87.
- [12] 卢冬华, 肖泽军, 陈炳德. 压水堆自然循环比例模化基本方程及相似准则数的研究[J]. *核动力工程*, 2009, 30(3): 72-84,94.
- [13] 卢冬华, 肖泽军, 陈炳德. 运动状态下压水堆自然循环比例模拟方法研究[J]. *核动力工程*, 2009, 30(6): 28-37.
- [14] WU J B, BI Q C, ZHOU C S. Experimental study on circulation characteristics of secondary passive heat removal system for Chinese pressurized water reactor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 77: 106-112.
- [15] 张金玲, 郭玉君, 秋穗正, 等. 船用核动力装置自然循环载热能力的分析与计算[J]. *西安交通大学学报*, 1994, 28(6): 35-42.

(责任编辑: 张祚豪)