

文章编号 : 0258-0926(2015)06-0024-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.06.0024

# 反向密度位差对核电厂一回路 自然循环影响研究

方红宇, 关仲华, 陈宏霞, 张晓华, 吴 鹏, 郑 强

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

摘要: M310 型核电厂在反应堆停堆、主泵停运并维持轴封注入工况下, 一回路过渡段存在反向密度位差, 堆芯余热较低时会终止自然循环。本文给出 M310 型反应堆一回路自然循环计算模型, 分析造成自然循环终止的原因, 并采用工程计算软件 MATHCAD 计算维持自然循环所需最小余热。

关键词: 自然循环; 最小余热; 硼稀释保护

中图分类号: TL334 文献标志码: A

## Study on Effect of Reverse Density Difference on Natural Circulation of Reactor Primary System

Fang Hongyu, Guan Zhonghua, Chen Hongxia, Zhang Xiaohua, Wu Peng, Zheng Qiang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** For M310 nuclear power plant, when reactor and coolant pumps trip, reverse density difference occurs in the crossover leg at seal injection condition, the natural circulation ceases if the core power decreases too much. This paper introduces the calculation model of the natural circulation, analyzes the reason for the ceasing of the natural circulation, and utilizes MATHCAD code to calculate the minimum core power.

**Key words:** Natural circulation, Minimum power, Protection of boron dilution

### 0 前 言

国内的 M310 型核电厂一回路主管道存在过渡段, 在反应堆停堆、主泵停运并维持轴封注入工况下, 由于主泵位于过渡段出口, 轴封注入较高密度水到过渡段的上升段, 过渡段内反向密度位差会在堆芯余热较低时终止自然循环, 在过渡段中形成低硼浓度的低温水团, 若重启主泵再次建立自然循环, 低硼浓度的低温水团进入堆芯后, 会引入正反应性, 降低停堆安全裕量。因此, 需要确定能够维持自然循环的最小堆芯余热功率, 以便在堆芯余热降到该值前进行相应的防硼稀释保护操作。

本文给出 M310 型反应堆一回路自然循环计

算模型, 推导一回路自然循环流量与堆芯余热的关系和一回路过渡段压降与流量的关系, 分析造成自然循环终止的原因, 并采用工程计算软件 MATHCAD 计算维持自然循环所需最小堆芯余热功率。

### 1 一回路流量与堆芯余热关系

M310 型核电厂一回路自然循环如图 1 所示。分析时采取的主要假设为: 一回路流动和传热为单相; 一回路处于水密实状态; 堆芯热量全部由蒸汽发生器导出, 忽略一回路装置到环境的热损失; 一回路流动处于稳定状态; 环路是对称的, 每条环路的阻力相同。稳定的闭合环

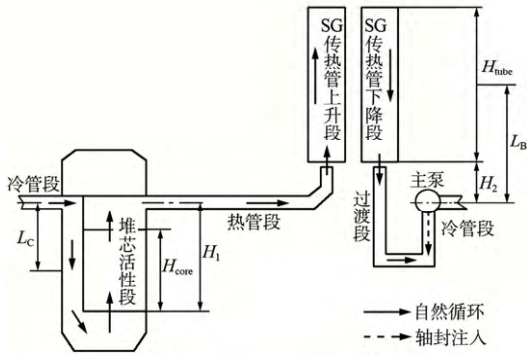


图 1 自然循环示意图

Fig. 1 Flow Chart of Natural Circulation

路中，回路压降为零。得如下方程：

$$g(\rho_C - \rho_H)(L_B + L_C) - \frac{1}{2}(K_C \times N_{\text{LOOP}}^2 + K_B) \frac{W_B^2}{\rho} = 0 \quad (1)$$

式中， $\rho_C$  表示 SG 冷中心密度， $\rho_H$  表示堆芯热中心密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $L_C$  和  $L_B$  表示堆芯热中心和蒸汽发生器冷中心到一回路冷段中心线的位差， $L_B = H_2 + 0.5H_{\text{tube}}$ ， $L_C = H_1 - 0.5H_{\text{core}}$ ，m； $H_{\text{core}}$  为堆芯活性段高度，m； $H_{\text{tube}}$  为 SG 传热管高度； $H_1$  为堆芯底部到一回路热段水平段中心线位差； $H_2$  为 SG 管板底部到一回路冷段中心线位差； $K_C$  表示压力容器压降系数， $K_B$  表示环路其余部分压降系数， $\text{m}^{-4}$ ； $W_B$  表示环路流量， $\text{kg}/\text{s}$ ； $N_{\text{LOOP}}$  表示运行环路数。

以  $\beta$  表示 SG 冷中心和堆芯热中心冷却剂温度相差 1 时密度变化量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，即： $\beta = (\rho_C - \rho_H) / (T_H - T_C)$ ，其中  $T_H$  表示堆芯热中心温度， $T_C$  表示 SG 冷中心温度，；代入式 (1) 可得：

$$g\beta(T_H - T_C)(L_B + L_C) = \frac{1}{2}(K_C N_{\text{LOOP}}^2 + K_B) \frac{W_B^2}{\rho} \quad (2)$$

稳态工况下堆芯和 SG 中能量方程为：

$$Q_C = N_{\text{LOOP}} Q_{\text{SG}} = N_{\text{LOOP}} W_B c_p (T_H - T_C) \quad (3)$$

式中， $Q_C$  为堆芯余热，MW； $Q_{\text{SG}}$  为每台 SG 的换热功率，MW； $c_p$  为冷却剂定压比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

联立式 (2) 与式 (3)，可得一回路流量与堆芯余热的关系式为：

$$W_B = \left[ \frac{10^3 \cdot 2 \cdot \bar{\rho} g \beta \frac{Q_C}{N_{\text{LOOP}}} (L_B + L_C)}{c_p (K_C N_{\text{LOOP}}^2 + K_B)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

采用式 (4) 计算一回路流量随堆芯余热的变化关系，结果见图 2。

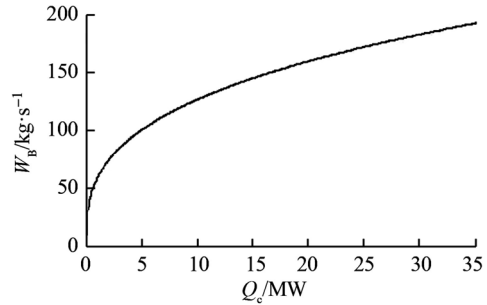


图 2 一回路流量与堆芯余热关系图

Fig. 2 Chart of RCS Flow Versus Core Power

## 2 过渡段压降与流量关系

过渡段流动见图 3。

由于轴封注入产生的重位压降为：

$$\Delta P_g = P_B - P_A = gh\beta(T_m - T_B) \quad (5)$$

式中， $\Delta P_g$  为重位压降，Pa； $P_A$ 、 $P_B$  为重位压头，Pa； $T_m$  为混合区温度（过渡段的上升段），； $T_B$  为过渡段入口温度，； $h$  为冷段中心线到过渡段水平段顶部的高度，m。

假定轴封注入流体在过渡段的上升段与一回路流体充分混合：

$$W_B T_B + W_{\text{seal}} T_{\text{seal}} = (W_B + W_{\text{seal}}) T_m \quad (6)$$

式中， $W_B$  为过渡段的入口流速， $\text{kg}/\text{s}$ ； $W_{\text{seal}}$  为轴封注入流速， $\text{kg}/\text{s}$ ； $T_{\text{seal}}$  为轴封注入温度。

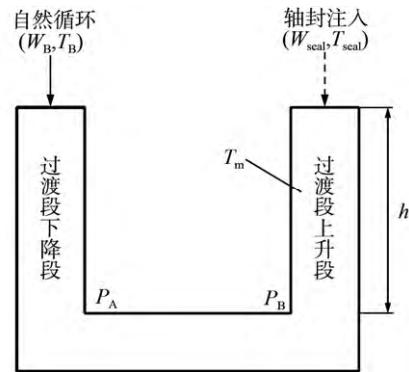


图 3 过渡段流动示意图

Fig. 3 Flow Chart of Crossover Leg

过渡段流动压降为  $K_G(W_B^2/2\bar{\rho})$ ，其中  $K_G$  为过渡段压降系数， $m^{-4}$ 。

联立式(5)、式(6)，可得过渡段总压降  $\Delta P$  为：

$$\Delta P = K_G \frac{W_B^2}{2\bar{\rho}} + \left[ gh \frac{W_{\text{seal}}}{W_{\text{seal}} + W_B} (\rho_{\text{seal}} - \rho_B) \right] \quad (7)$$

式中， $\rho_B$  为过渡段入口密度， $kg/m^3$ ； $\rho_{\text{seal}}$  为轴封注入密度， $kg/m^3$ 。

无轴封注入和有轴封注入时过渡段压降与流量的典型关系曲线见图4和图5。

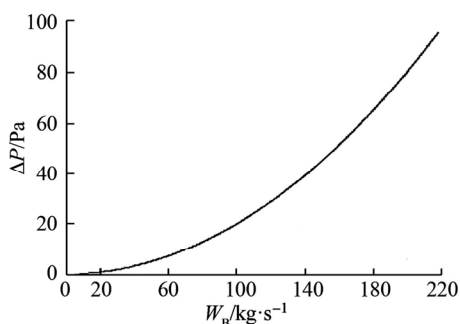


图4 无轴封注入时过渡段流量与压降关系图

Fig. 4 Chart of Crossover Leg Flow Versus Pressure (without Seal Injection)

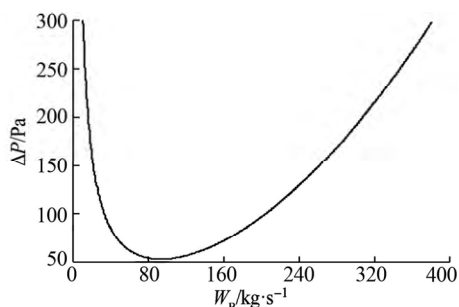


图5 有轴封注入时过渡段流量与压降关系图

Fig. 5 Chart of Crossover Leg Flow Versus Pressure (with Seal Injection)

从图4中可以看出，无轴封注入时，过渡段压降对环路流量变化率恒为正值，不会产生静态不稳定性。有轴封注入时，当流量过低时压降对环路流量的变化率为负值，会产生静态不稳定性，终止一回路自然循环（图5），因此应要求流量大于一定值，使得压降对流量的变化率恒为正值，

避免一回路自然循环终止。

### 3 维持自然循环所需最小堆芯余热

用MATHCAD软件对M310型反应堆一回路维持自然循环所需最小余热进行计算。

对于核电厂对称环路，计算工况为：假定3台SG运行，主泵全部停运，一回路压力为15.5 MPa，一回路平均温度为280℃，一回路冷热段温差为15℃，冷热中心位差为11.13 m，RPV压降系数为 $1.568m^{-4}$ ，环路其余部分压降系数为 $80m^{-4}$ ，这些数据来自M310型核电厂。

假定轴封注入压力为16 MPa，温度为7℃，注入流量为 $1.8m^3/h$ 。采用式(7)计算过渡段压降随一回路流量的变化关系，由式(7)可得压降对流量的变化率为0时（即图5中压降曲线的拐点）的流量为93.48 kg/s，将该流量值代入式(4)可得对应的堆芯余热值为4.03 MW。

计算结果表明，当堆芯余热大于4.03 MW时，过渡段压降对流量的变化率为正值，不会产生静态不稳定性导致一回路自然循环终止。

### 4 结束语

建立M310型核电厂一回路自然循环计算模型，推导出一回路自然循环流量与堆芯余热的关系以及一回路过渡段压降与流量的关系。

研究表明：当反应堆一回路存在U型过渡段时，在堆芯余热低于一定值时会因U型段的反向密度位差终止一回路自然循环。

采用工程计算软件MATHCAD计算维持自然循环所需最小堆芯余热，当实际堆芯余热大于该最小堆芯余热时，不会产生静态不稳定性，一回路的自然循环能够维持；当实际堆芯余热小于该最小堆芯余热时，会破坏一回路的自然循环。

本文仅给出核电厂对称环路工况（三条环路SG均可用）下的自然循环相关研究，对非对称环路工况下的自然循环现象有待进一步研究。

（责任编辑：刘君）