

强迫循环下蒸汽发生器流动不稳定性研究

吴鸽平^{1,2}, 秋穗正², 苏光辉², 贾斗南²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学核工程与核技术, 陕西 西安 710049)

摘要: 由于两相流不稳定性在实际应用中的重要性, 许多学者对其本质进行了大量的研究。本文建立数学模型对强迫循环下蒸汽发生器的流动不稳定性进行了计算。此模型采用均相流假设并认为相间热力学平衡。模型考虑了管壁的蓄热。此模型被用于系统压力、质量流速、进口过冷度、进、出口节流和间隙、不同内、外径之比和内、外管的加热比对不稳定性影响的研究。

关键词: 蒸汽发生器; 强迫循环; 流动不稳定性

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0918(2006)03-0193-06

Research of flow instability in forced-convection generator

WU Ge-ping^{1,2}, QIU Sui-zheng², SU Guang-hui², JIA Dou-nan²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi Prov. 710049, China; 2. Nuclear Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi Prov. 710049, China)

Abstract: Because of the importance of two-phase instabilities, substantial efforts have been made to understand the physical phenomena governing such instabilities. The purpose of this paper is to present a numerical model for the analysis of flow-induced instabilities in forced-convection steam generator. The model is based on the assumption of homogenous two-phase flow and thermodynamic equilibrium of the phase. The thermal capacity of the heater wall has been included in the analysis. The model is used to study the effects of system pressure, flow flux, inlet subcooling, inlet/outlet restriction, gap size and the ratio of d_o/d_i and the ratio of q_i/q_o on system behavior.

Key words: steam generator; forced-convection; flow instability

两相流不稳定性广泛存在于核反应堆、蒸汽发生器等存在两相流动的工业设备中。核动力系统中采用的蒸汽发生器,在一定条件下,气

液两相混合物也会发生高含汽率下密度波型流动不稳定现象。流动不稳定性不仅会降低它们的运行性能,还会危及安全。所以,研究蒸汽发

收稿日期:2005-11-24;修回日期:2006-01-05

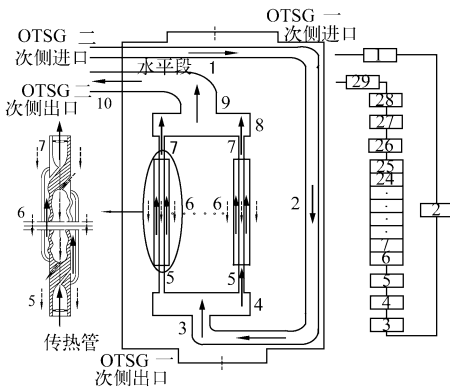
作者简介:吴鸽平(1977—),男,江苏人,西安交通大学在读博士生,从事反应堆热工水力研究

生器的流动不稳定性对核动力系统安全和运行至关重要。

前人对两相流不稳定性的本质进行了大量的研究,但也存在一些局限性。调研发现,两相流不稳定性试验研究^[1-2]较多,理论研究较少;频域法^[3]使用较多,时域法^[4]很少。目前,用时域法求解强迫循环下套管式蒸汽发生器不稳定性的文献尚未见公开发表,故有必要进行研究。

1 系统简介

压水反应堆分为一回路系统和二回路系统。蒸汽发生器是联接一、二回路的关键部件,它的可靠性关系到核动力系统的安全。它是一回路冷却剂将热量传输给二回路给水,产生一定压力、温度和过热蒸汽的热交换设备。核动力系统采用的蒸汽发生器简图如图1所示。一回路冷却剂流动自上向下,二回路冷却剂流动自下向上。传热管为套管。一回路冷却剂一部分在内管内侧流动,另一部分在外管外侧流动,二回路流体在环形间隙中流动。



1—水平段;2—下降段;3—圆管1;4—入口联箱;
5—圆管2;6—套管段;7—圆管3;8—出口联箱;
9—联箱后蒸汽管;10—出口蒸汽管

图1 新型蒸汽发生器示意图

Fig. 1 Schematic of steam generator

2 数学方程

2.1 基本方程组

1) 质量守恒方程:

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

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; G 为质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; z 为轴向长度, m ; A 为流通面积, m^2 。

2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{2} \right) + \frac{f}{d} \frac{G^2}{2} + g + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{G^2}{2} = 0 \quad (2)$$

式中: f 为摩擦系数; d 为当量直径, m ; P 为压力, MPa ; ξ 为局部阻力系数。

3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial (Gh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (Gh) = \frac{q}{A} \quad (3)$$

式中: h 为焓, kJ/kg ; q 为单位长度流体吸收的热量, 即线热流密度, kW/m 。对于圆管, 为圆管热流密度; 对于套管, 为内、外管热流密度之和。

4) 管壁导热方程:

$$C_p M \frac{\partial T_w}{\partial t} = Q_{in} - Q_f \quad (4)$$

$$Q_f = A_h (T_w - T_f) \quad (5)$$

式中: C_p 为比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; M 为管壁质量, kg ; T 为温度, K ; Q_{in} 为管壁吸收的热量, Q_f 为管壁传给流体的热量, W ; h 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_h 为传热面积, m^2 ; 下标 w 代表壁面; f 表示流体。

5) 状态方程:

$$h = f(P, h) \quad (6)$$

2.2 摩擦系数方程

$$f = \begin{cases} 64/Re & (Re < 1000) \\ 0.048 & (1000 < Re < 2000) \\ 0.3164/Re^{0.25} & (Re > 2000) \end{cases} \quad (7)$$

$$Re = Gd/\mu \quad (8)$$

式中: Re 为雷诺数, μ 为动力黏滞系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

μ 根据含汽率 x 不同计算如下

$$x = (h - h_l)/(h_v - h_l) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu} = \frac{1-x}{\mu_l} + \frac{x}{\mu_v} & 0 < x < 1 \\ \mu = \mu_f(P, h) & x < 0 \text{ 或 } x > 1.0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: 下标 l 表示饱和液体, v 表示饱和气体; μ_f 为流体动力黏滞系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 传热系数方程

二回路流体吸收热量, 由过冷水变为过热蒸汽, 将传热划分为4区: 单相水、饱和沸腾、干

润后传热和单相蒸汽(忽略过冷沸腾)。各区定义及传热系数如下:

单相水和单相蒸汽区: $x < 0$ 和 $x > 1$, 传热系数由 Dittus-Boelter^[5] 公式计算;

饱和沸腾: $0 < x < 1$ 且 $q < q_{CHF}$ (q_{CHF} 为临界热流密度, W/m^2 , 由文献公式^[5] 计算), 传热系数由陈氏公式计算;

干涸后传热: $0 < x < 1$ 且 $q > q_{CHF}$, 传热系数采用 Groeneveld^[5] 关系式计算;

2.4 初始条件和边界条件

蒸汽发生器的初始条件为稳态运行时参数值; 进出口边界条件为:

- 1) 进口压力和流体温度不变;
- 2) 进出口压降维持不变。

3 求解

蒸汽发生器计算结块图如图 1 所示。

令方程(1)~(4)时间导数项为零, 得到稳态守恒方程组。将稳态守恒方程组从进口沿控制体积分, 求解每个控制体稳态运行的焓、壁温和压力等参数。

瞬态方程组求解采用 Gear 算法。Gear 算法是求解非线性常微分方程组初值问题的基本方法, 具有计算速度快和稳定性好的优点。对每个控制体写出方程(1)~(4), 组成控制方程组, 并考虑初始条件和边界条件, 用 Gear 方法求解瞬态方程组。

4 计算结果分析

在低含汽率工况下, 出口工质达到或接近饱和。在绝热段和出口联箱, 由于压力降低, 发生汽化, 产生少许蒸汽, 两相比容差别非常大, 微量的蒸汽引起密度的巨大变化, 导致重位压头显著变化。此时, 系统微小的扰动, 便可能引起回路流量、温度等参数脉动。在高含汽率下, 由于空泡份额沿通道传播的延时以及压降的反馈, 特定条件下, 会发生自维持的脉动, 引起不稳定现象。

进行了 355 组工况计算, 图 2 给出了一典型高含汽率下密度波型不稳定工况。

4.1 蒸汽发生器的稳定性

反应堆按给定曲线在额定功率 10% ~

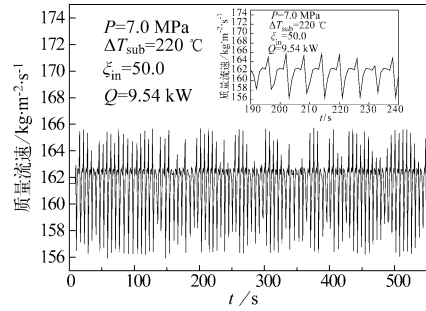


图 2 典型密度波型脉动

Fig. 2 A typical density-wave oscillation

20%运行时, 蒸汽发生器是稳定的; 当增大流量, 二回路出口仍保持是过热蒸汽时, 蒸汽发生器也能够稳定运行(图 3)。这主要是由特定进口结构决定的。因为进口段长度较长, 管径较细, 质量流速很大, 进口段摩擦阻力和局部阻力很大, 单相阻力占整个阻力的比重很大, 增加了系统的稳定性。

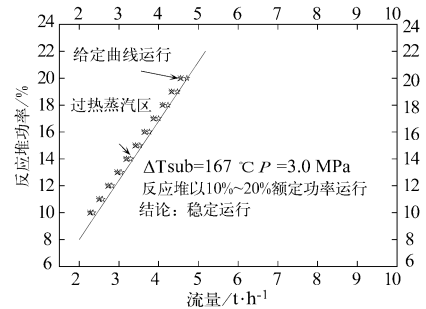


图 3 不同功率下的稳定性

Fig. 3 Generator's instability for different power

4.2 参数影响

蒸汽发生器出口为两相时, 会发生不稳定现象。通过计算, 得到了系统压力、质量流速、进口过冷度、进、出口节流和间隙等因素对流动不稳定性的影响。

4.2.1 质量流速影响

图 4 给出了同一间隙下质量流速对不稳定性的影响。由图可见, 质量流速增加, 极限热负荷增加, 因此系统的稳定性增加。因为质量流速增加, 气泡不易聚集, 对实验段管壁的冷却作用加强。但是, 随质量流速增加, 发生脉动的极限出口含汽率减小。所以, 在较高的质量流速条件下, 密度波脉动常发生在较低的出口含汽率下。

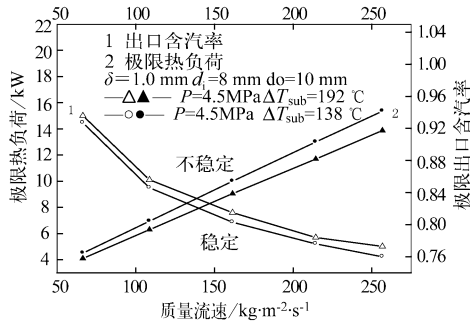
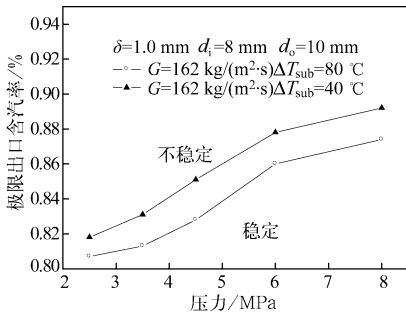


图4 质量流速对不稳定性的影响

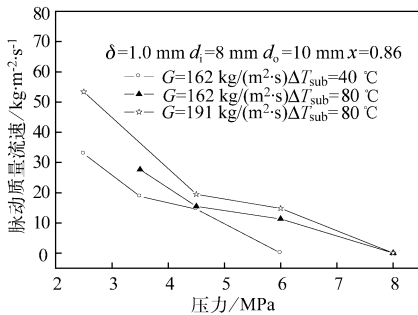
Fig. 4 Effect of flow flux on instability

4.2.2 压力影响

图5a给出了进口过冷度为40和80，质量流速为162 kg/(m²·s)时，系统压力对不稳定的影响。由图可见，压力增加，极限出口含汽率增加，所以有助于系统的稳定性。因为压力增加，汽液两相的密度差减小，在相同条件下，增加相同的热负荷，高压下引起的重位压差扰动小于低压下的扰动，系统不足以产生持续的流量脉动，系统趋于稳定。图5b给出了相同质量流速、进口过冷度下和出口含汽率下，压力对



5a 压力对极限出口含汽率的影响



5b 压力对脉动质量流速振幅的影响

图5 压力对不稳定性影响

Fig. 5 Effect of pressure on instability

脉动振幅的影响。由图可见，压力增加，脉动的振幅减小。

4.2.3 进口过冷度的影响

进口过冷度对流动不稳定性有较大影响。一方面，进口过冷度增大，单相区的长度增大，单相区有很好的稳定性，此时相当于增加了进口阻力，从而提高了系统的稳定性。另一方面，过冷度增加，在相同热负荷下，通道内含汽率下降，气泡的形成周期增大，蒸发时间增长，进口流量对汽化引起的压差变化响应时间减少，这又有助于脉动的发生。图6给出了压力为3.5 MPa，质量流速为190 kg/(m²·s)和253 kg/(m²·s)时，进口过冷度对不稳定的影响。由图可见，增加系统的进口过冷度有益于提高系统的稳定性。

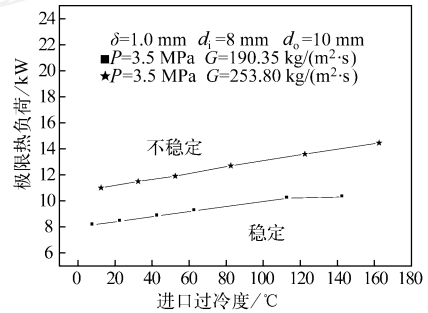


图6 进口过冷度对不稳定性的影响

Fig. 6 Effect of Inlet subcooling on system instability

4.2.4 进、出口节流的影响

图7给出了进、出口节流对不稳定的影响。由图可见，增加进口阻力，相当于增加单相区的长度，使脉动流量在进口处得到了抑制，有助于

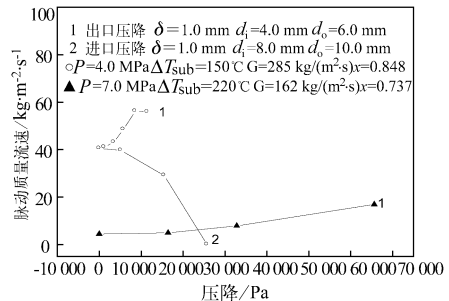


图7 进、出口节流对不稳定性的影响

Fig. 7 Effect of restriction on instability

系统的稳定性。进口阻力越大,系统稳定性越好。出口阻力增加,等同于增加了两相压降,有利于脉动的发生。出口节流阻力越大,脉动的质量流速振幅越大。

4.2.5 间隙的影响

图 8 给出了 $P=3.5\text{ MPa}$, $T_{\text{sub}}=192$, $G=214.4\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$, $d_i=8.0\text{ mm}$ 时,间隙对不稳定性的影响。由图可见,随间隙增加,极限热负荷增加,系统稳定性得到增强。但是,间隙对极限出口含汽率的影响比较复杂,出现了非单值性。一般地,在某一极限值内增加间隙,极限出口含汽率降低;超过此值继续增大间隙,极限出口含汽率反而升高。

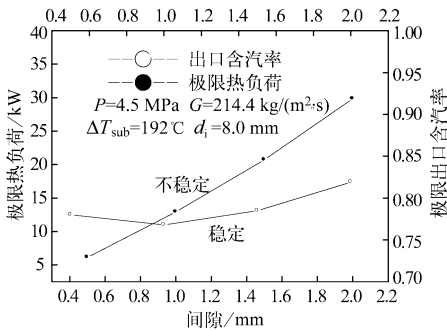


图 8 间隙对不稳定性的影响

Fig. 8 Effect of gap size on instability

4.2.6 内、外径之比的影响

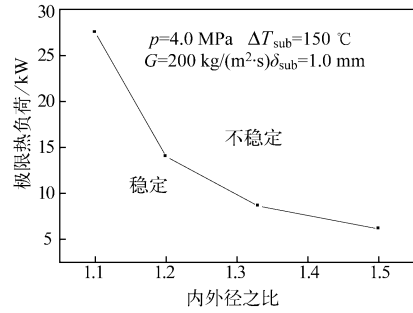
图 9 给出了 $P=4.0\text{ MPa}$, $T_{\text{sub}}=150$, $G=200\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$, 间隙为 1.0 mm 条件下,不同内、外管直径对不稳定性的影响。由图 9a 可见,随着内、外径之比的增加,极限热负荷降低,稳定性降低;由图 9b 可见,随内、外径之比的增加,极限出口含汽率降低。

4.2.7 内、外管加热功率比的影响

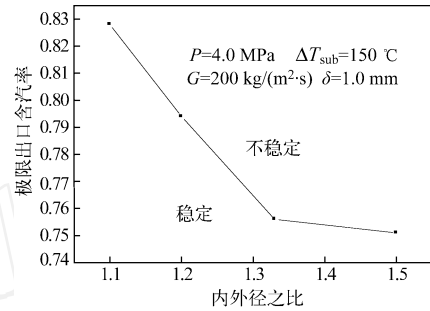
经过计算发现,在内、外管总加热功率一定的情况下,内、外管的加热功率比值对不稳定性没有影响。

4.3 不稳定性准则

热工水力系统的动态特性由系统的基本守恒方程组、初始条件和边界条件决定。在强迫循环流动中,质量流速一般是由驱动压头、进口过冷度、加热功率和回路的几何结构而确定。所以质量流速是加热功率、压力、进口过冷度相



9a 内、外径之比对极限热负荷的影响



9b 内、外径之比对极限出口含汽率的影响

图 9 内、外径之比对不稳定性的影响

Fig. 9 Effect of the ratio of d_o/d_i on instability

耦合的函数,在两相流动不稳定性研究中,当讨论系统压力、进口过冷度、加热功率等参数对脉动影响时,应该考虑质量流速与它们的耦合。本研究采用通用的无量纲的过冷度数 $N_{\text{sub}} = \frac{H_i - H_{\text{in}}}{H_{fg}} \frac{f_g}{f}$ 和相变数 $N_{\text{pch}} = \frac{Q}{W} \frac{f_g}{H_{fg} f}$ 来综合分析加热功率、质量流量、进口过冷度和压力对两相流动不稳定的影响。以无量纲量相变数和过冷度数为横坐标和纵坐标,作流动不稳定区域图(图 10)。从图中可以看出,不稳定区域为

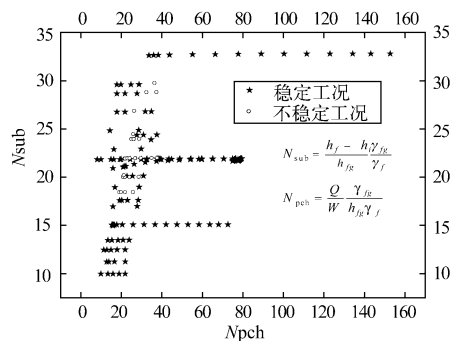


图 10 流动不稳定区域图

Fig. 10 Instability region described with subcooling number (N_{sub}) and phase-change (N_{pch})

一条很窄的窄条,在此狭长区域内的工况较易发生不稳定现象。

5 结论

1) 反应堆按给定曲线以额定功率 10% ~ 20% 运行,系统稳定;蒸汽发生器出口过热蒸汽时,系统也稳定。

2) 压力升高,有利于系统稳定。在相同质量流速、进口过冷度和出口含汽率下,压力越高,脉动质量流速的振幅越小。

3) 质量流速增加,有利于系统的稳定性。随质量流速增加,极限出口含汽率降低。

4) 增大进口阻力有利于系统稳定,增大出口阻力,有利于脉动发生。

5) 相同压力、质量流速和进口过冷度条件下,增加间隙有利于提高系统稳定性。

6) 相同间隙和质量流速下,随内、外径之比增加,极限热负荷降低,稳定性降低。

7) 内、外管总加热功率一定情况下,内、外管加热功率比对不稳定性没有影响。

8) 采用通用的无量纲的过冷度数和相变数作流动不稳定区域图,发现不稳定区域为一条很窄的窄条,在此狭长区域内的工况较易发生不稳定现象。

参考文献:

- [1] Ledinegg M. Instability of flow During Natural and Forced Circulation[Z]. Die Wärme, 1938:161-181.
 - [2] Boure J S, Bergles A E, Tong L S. Review of two-phase flow instability[J]. Nucl Eng & Des, 1973, 125:165-192.
 - [3] Chan K C, Yadigaroglu G. STM-FREQAN advanced code for stability analysis of steam generators [J]. Trans. ANS, 1979, 133:980-982.
 - [4] Vijay C. SPORTS-A simple nonlinear thermalhydraulic stability code[J]. Nucl & Eng & Des, 1986, 193:51-67.
 - [5] 苏光辉. 低温供热堆工况下第一类密度波不稳定性研究[D]. 西安交通大学, 1997:81-85.
 - [6] 高璞珍. 海洋条件对核动力装置热工水力特性的影响[D]. 哈尔滨工程大学, 1999.
-
- (上接第 214 页, continued from page 214)
- [3] Kokal S L, Stanislav J F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes. Flow patterns [J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44 (3): 665-679.
 - [4] Chen X T, Cai X D, Brill J P. A general model for transition to dispersed bubble flow [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(23): 4373-4380.