

超临界循环流化床锅炉深度调峰时 水冷壁流动不稳定特性计算分析

李维腾, 郭泽瑞, 韩磊, 杨冬

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对深度调峰时超临界循环流化床锅炉水冷壁管道内的汽液两相流动不稳定问题,提出了一种适用于不同工况的频域法数学模型。通过对质量、能量、动量方程进行小扰动线性化后经拉普拉斯变换得到了用于描述管道内汽液流体流动稳定性的传递函数,通过图解奈奎斯特图的方法判断管内工质流动的稳定性。然后,通过该模型计算了某 350 MW 超临界循环流化床锅炉水冷壁管段的不稳定边界并研究了不同参数对流动不稳定特性的影响。计算结果表明:所选回路在 20% 和 50% 锅炉最大连续蒸发量负荷发生流动不稳定时,热负荷分别为 $76.09 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $113.52 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,水冷壁管道流动稳定且安全;入口过冷度对临界热流密度的影响呈非单值性;增大质量流速使流体的进口和出口密度差减小,有利于流动的稳定性;增大入口节流系数,可以抑制入口处流量的脉动,有利于流动的稳定性;在不同的工况条件下,改变管段倾斜角度会对流动稳定性产生不同的影响。

关键词: 深度调峰;流动不稳定性;频域法;超临界循环流化床锅炉

中图分类号: TK223.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501007 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0068-11

Calculation and Analysis of Flow Instability Characteristics in Water Wall of Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler During Deep Peak Shaving

LI Weiteng, GUO Zerui, HAN Lei, YANG Dong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A frequency domain mathematical model is proposed to address the instability of gas-liquid two-phase flow in water-cooled wall pipelines of supercritical circulating fluidized bed boilers during deep peak shaving, suitable for various operating conditions. The transfer function characterizing the stability of gas-liquid flow within the tubes is derived by linearizing the mass, energy, and momentum equations with small disturbances and applying Laplace transform. The stability of the working fluid flow in the tubes is assessed using Nyquist diagram interpretation. Using this model, the instability boundary of the water wall tube segment of a 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler is calculated, and the impact of different parameters on the flow instability characteristics is investigated. The results show that the heat loads at which flow instability occurs during 20% and 50% of the boiler's maximum continuous evaporation rate are $76.09 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ and $113.52 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively, indicating the stability

收稿日期: 2024-02-28。 作者简介: 李维腾(1999—),男,硕士生;杨冬(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目:

国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100303)。

网络出版时间: 2024-10-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240930.1717.002>

and safety of the water wall tube flow. The effect of inlet subcooling on critical heat flux density exhibits a non-monotonic relationship. Increasing the mass flow rate reduces the density difference between the inlet and outlet fluids, promoting flow stability. Moreover, raising the inlet throttling coefficient can dampen flow pulsations at the inlet, further enhancing flow stability. Altering the tilt angle of the tube section under different operational conditions leads to varying effects on flow stability.

Keywords: deep peak shaving; flow instability; frequency domain method; supercritical circulating fluidized bed boiler

在我国“碳中和、碳达峰”的能源发展目标下,新能源发电量逐年增加,占据了电力结构组成的重要位置^[1-3]。超临界循环流化床(CFB)技术,以其超临界参数发电和循环流化床燃烧的优势,成为我国能源转型中的关键推动力^[4-5]。“十三五”期间,我国超临界循环流化床技术取得了显著的进展,为我国能源结构的升级提供了坚实的基础^[6-7]。然而,新能源如风能、太阳能具有随机间歇性的特点,使得传统火电机组面临更为复杂的深度调峰任务,需要具备快速响应和在低负荷条件下安全运行的能力^[8-11]。在实际运行中,锅炉系统中水冷壁的流动不稳定特性成为需要深入研究的关键问题^[12-13]。

目前,越来越多的研究人员通过频域法研究流动不稳定性,频域法避免了对复杂的非线性方程组的处理,直接通过奈奎斯特准则来判断流动的稳定性^[14]。Zhang 等^[15]以内旋纹管为对象建立了频域法数学模型,并考虑了管壁储热的影响,发现两相流的稳定性随着压力、质量通量或入口阻力系数的增加而增加。田晓艳等^[16]通过频域法构建了关于超临界水冷堆的理论框架,探析了堆芯的流动不稳定状况,但其建模时采用单区域模型且没考虑其他系统参数的影响。薛爱军等^[17]建立了单区域超临界水热力系统模型,并研究了一些重要参数对系统稳定边界、阶跃响应和衰减比的影响。Liang 等^[18]以垂直上升管内的工质为对象,通过频域法建立了三区域流动不稳定性的数值模型,但未考虑倾角的影响。目前的研究对管道的几何结构考虑的不够充分,忽略了受热管的倾斜角、进出口节流系数等因素的影响,或者在传递函数的构建中没有考虑时间的延迟性。

本文通过频域法建立了管道内汽液两相流动不稳定特性的一维单通道三区域数学模型,并分析了超临界循环流化床锅炉低负荷运行时的流动不稳定特性。在该数学模型建立程序的基础上,研究了入口过冷度、质量流速、管长、倾斜角度以及入口节流

系数等参数对流动不稳定特性的影响,研究结果对超临界循环流化床锅炉机组深度调峰优化以及安全运行具有参考意义。

1 计算模型

在超临界循环流化床锅炉深度调峰的过程中,锅炉会从高负荷运行迅速过渡到低负荷运行状态。水冷壁管内部分工质处于两相状态,在深度调峰过程中,流动系统的不稳定性增加,可能导致水冷壁的传热效率下降,进而引起水冷壁管的超温甚至爆管^[19]。锅炉运行中不稳定特性通常由管组间的流量分配不均引起,本文根据某 350 MW 超临界锅炉机组的实炉数据,选取某一负荷下流量小、热偏差高的最易发生流动不稳定现象的回路进行计算分析,研究最易发生不稳定特性的单根管道的流动状况,从而判断锅炉机组在当前负荷下运行的稳定性。本文建立了一个以频域法为基础的一维单通道数值计算模型,以瞬态饱和水临界点(λ_1)和瞬态饱和蒸汽临界点(λ_2)为边界,将加热管段分为单相区、两相区和过热区,如图 1 所示。通过计算分析管径、管长、倾斜角度、节流圈等几何结构参数和质量流速、系统压力、入口焓等工况参数研究其对汽液两相流动不稳定特性的影响。

针对水冷壁管道的特点,本文通过图 1 所示数学模型对超临界循环流化床锅炉在深度调峰时变负荷至低负荷运行时的水冷壁管道发生的密度波不稳定进行研究。在建立模型时作了以下假设^[20-21]:①只考虑轴向的水冷壁管道壁的加热,不考虑径向热负荷对管壁内工质的影响;②不考虑单相未饱和区工质的压缩性,相比于分区后的两相区和过热区,单相未饱和区水的密度基本不发生变化;③工质流动是一维的,只考虑工质在轴向的流动,不考虑工质因压力、温度分布等因素的影响而引起的周向流动,以便于传递函数的推导;④不考虑由管道进出口压力变化引起的密度变化;⑤汽液两相区采用均相流

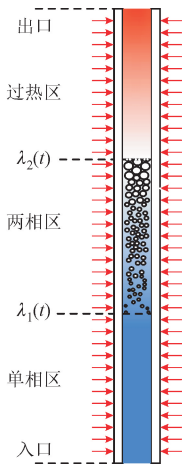


图1 入口模型示意图

Fig. 1 Entrance model diagram

热平衡模型,在两相区气体和液体能够混合均匀;⑥施加在管道上的热负荷为均匀热负荷;⑦进出口节流系数为常数。

1.1 控制方程

1.1.1 入、出口节流区

节流方程为

$$\Delta P_{\text{in,out}} = K_{\text{in,out}} \frac{\rho_{\text{f,g}} u_{\text{in,out}}^2}{2} \quad (1)$$

式中: ΔP 为节流压降, Pa; K 为节流系数; ρ 为流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u 为流体的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 下角 in 表示进口; 下角 out 表示出口; 下角 f 表示饱和液; 下角 g 表示饱和汽。

1.1.2 过冷区和过热区

在以上假设的基础上,过冷区和过热区用以下方程来描述。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: z 为流动方向坐标, m。

能量守恒方程为

$$\rho_{\text{f,g}} \frac{\partial h}{\partial t} + \rho_{\text{f,g}} u_{\text{in}} \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{q'' P_{\text{H}}}{A_{\text{c}}} \quad (3)$$

式中: h 为流体的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; t 为时间, s; q'' 为对管段施加的热负荷, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$; P_{H} 为管段的内圆周长, m; A_{c} 为管段的流通截面积, m^2 。

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_{\text{f,g}} \frac{du_{\text{in}}}{dt} + \frac{f_{\text{l,g}} \rho_{\text{f,g}} u_{\text{in}}^2}{2D_{\text{e}}} + \rho_{\text{f,g}} g \sin \varphi \quad (4)$$

式中: p 为流体的压强, Pa; f 为流动摩擦系数; D_{e} 为管段当量直径, m; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; φ 为

管段倾斜角, rad; 下角 l 和 g 分别表示过冷区和过热区。

1.1.3 两相区

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho_{\text{m}}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{\text{m}} u_{\text{m}})}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中: 下角 m 表示汽液两相混合物。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho_{\text{m}} h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{\text{m}} u_{\text{m}} h)}{\partial z} = \frac{q'' P_{\text{H}}}{A_{\text{c}}} \quad (6)$$

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial (\rho_{\text{m}} u_{\text{m}})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{\text{m}} u_{\text{m}}^2)}{\partial z} + \frac{f_{\text{m}} \rho_{\text{m}} u_{\text{m}}^2}{2D_{\text{e}}} + \rho_{\text{m}} g \sin \varphi \quad (7)$$

式中: f_{m} 为两相混合区的流动摩擦系数。

蒸汽产生率平衡方程为

$$\frac{\partial (\alpha \rho_{\text{g}} u_{\text{g}})}{\partial z} + \frac{\partial (\alpha \rho_{\text{g}})}{\partial t} = \Gamma_{\text{g}} \quad (8)$$

$$\Omega = \frac{\partial u_{\text{m}}}{\partial z} = \frac{\Gamma_{\text{g}} \Delta \rho}{\rho_{\text{f}} \rho_{\text{g}}} \quad (9)$$

式中: α 为空隙率; Γ_{g} 为蒸汽产生率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; Ω 为相变频率, s^{-1} ; $\Delta \rho$ 为饱和蒸汽和饱和液的密度差, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2 线性小扰动及拉普拉斯变换

采用线性频域法研究模型时,在流动系统的稳定边界附近,流体工质的工况参数的振荡曲线近似为峰值很小的正弦曲线,周期较大。因此,可以用小扰动线性化和拉普拉斯变换的方法对水冷壁管道模型的传递函数进行推导。对于任意的泛函,半经验公式都有如下形式

$$\delta f(x, y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_0 \delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_0 \delta y \quad (10)$$

式中: x, y 分别表示随时间、空间变化的参变量; 下角 0 表示参数的稳态值; δx 和 δy 为参数小扰动的变化量。根据式(10),有

$$x(z, t) = x_0(z) + \delta x(z, t) \quad (11)$$

$$y(z, t) = y_0(z) + \delta y(z, t) \quad (12)$$

式中: z 为空间坐标; t 为时间, s。

对 3 个区域的控制方程组进行小扰动线性化和 Laplace 变换,可以得到各个区域的小扰动量控制方程,根据总压降和各个区域压降的关系可以得到用于判断流动稳定性的传递函数。

对于任意变量 y 可以表示为

$$y = y^* + \delta y \quad (13)$$

式中: y^* 为变量的稳态值(* 表示稳态值); δy 为微小变量。

对微小变量进行 Laplace 变换可以得到

$$L[\delta y] = \delta y(s) \quad (14)$$

式中: s 为复变量。

1.3 各区域传递函数

按照上述方法对 3 个区域的守恒方程组进行小扰动线性化和 Laplace 变换可以得到各区域的传递函数^[22]。对单相区守恒方程进行小扰动线性化, 消去稳态量并对其微分形式进行 Laplace 变换, 在单相区积分后化简可以得到单相区压力扰动传递函

$$G_2(s) = L_{22}(s) \left[\frac{1}{s} (1 - \exp(-\lambda_1^* s / u_{in}^*)) \rho_m^* u_m^* \right] + L_{21}(s) + M(s) L_{23}(s) \quad (18)$$

$$M(s) = \rho_m^* u_m^* \Omega^* + \frac{f_m}{2D_e} \rho_m^* u_m^* u_{out}^* + \rho_m^* u_m^* \frac{g \sin \varphi}{u_{out}^*} \quad (19)$$

$$L_{21}(s) = \rho_m^* u_m^* \left[\frac{\mathcal{P}^2}{\Omega^* (s - \Omega^*)} + \frac{\Omega^{*2}}{(s - \Omega^*)^2} (\exp[\eta(\Omega^* - s)/\Omega^*] - 1) + \frac{f_m}{2D_e} (\lambda_2^* - \lambda_1^*) \left(\frac{2s - \Omega^*}{s - \Omega^*} \right) + \frac{f_m u_{in}^* \sigma}{2D_e} [\exp[\eta(2\Omega^* - s)/\Omega^*] - 1] + \frac{g \sin \varphi}{u_{in}^* (s - \Omega^*)} [1 - e^{-\eta} + \frac{\Omega^*}{s} (\exp(-s\eta/\Omega^*) - 1)] \right] \quad (20)$$

$$L_{22}(s) = \frac{\mathcal{P}^2}{s - \Omega^*} + \frac{s\Omega^{*2}}{(s - \Omega^*)^2} (\exp[\eta(\Omega^* - s)/\Omega^*] - 1) + \frac{f_m}{2D_e} \Omega^* (\lambda_2^* - \lambda_1^*) \left(\frac{2s - \Omega^*}{s - \Omega^*} \right) +$$

$$\frac{f_m}{2D_e} u_{in}^* [\sigma (\exp[\eta(2\Omega^* - s)/\Omega^*] - 1) + 1] + \frac{g \sin \varphi}{u_{in}^*} \left[\frac{\Omega^*}{s - \Omega^*} (\exp(-s\eta/\Omega^*) - e^{-\eta}) + 1 \right] + \Omega^* \quad (21)$$

$$L_{23}(s) = \frac{1}{\Omega^* - s} (\exp[\frac{\eta(\Omega^* - s)}{\Omega^*}] - 1) + \frac{1}{(s - \Omega^*)s} (1 - \exp(-\lambda_1^* s / u_{in}^*)) (s \exp[\eta(\Omega^* - s)/\Omega^*] - \Omega^*) \quad (22)$$

$$\eta = \ln \left[\frac{u_{in}^* + \Omega^* (\lambda_2^* - \lambda_1^*)}{u_{in}^*} \right] \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{\Omega^*}{(s - \Omega^*)(s - 2\Omega^*)} \quad (24)$$

同理, 过热区的扰动函数为

$$\delta(\Delta P_3) = G_3(s) \delta u_{in} \quad (25)$$

式中: ΔP_3 为过热区压力变化, 传递函数为

$$G_3(s) = F(s) \left[1 - \frac{\Omega^*}{s} (1 - \exp(-\lambda_1^* s / u_{in}^*)) \right] + [F(s)\Omega^* - K(s)]N(s) \quad (26)$$

其中

$$F(s) = s \rho_g (L_H - \lambda_2^*) + \frac{f_g}{D_e} u_{out}^* \rho_g (L_H - \lambda_2^*) + K_{out} u_{out}^* \rho_g \quad (27)$$

$$K(s) = \frac{f_g}{2D_e} \rho_g u_{out}^{*2} + \rho_g g \sin \varphi \quad (28)$$

$$N(s) = \frac{1}{(s - \Omega^*)s} (s \exp[\eta(\Omega^* - s)/\Omega^*] - \Omega^*) \cdot (1 - \exp(-\lambda_1^* s / u_{in}^*)) - \frac{1}{s - \Omega^*} (\exp[\eta(\Omega^* - s)/\Omega^*] - 1) \quad (29)$$

数为

$$\delta(\Delta P_1) = G_1(s) \delta u_{in} \quad (15)$$

式中: ΔP_1 为单相区压力变化, 传递函数为

$$G_1(s) = \rho_l \lambda_1^* s + \frac{f_l \rho_l \lambda_1^* u_{in}^*}{D_e} +$$

$$\frac{\rho_l s u_{in}^* + f_l \rho_l u_{in}^{*2}}{s} \frac{1}{2D_e + \rho_l g \sin \varphi} (1 - \exp(-\lambda_1^* s / u_{in}^*)) \quad (16)$$

同理, 两相区的扰动函数为

$$\delta(\Delta P_2) = G_2(s) \delta u_{in} \quad (17)$$

式中: ΔP_2 为两相区压力变化, 传递函数为

整个管路系统的总压降扰动与各区段的压降扰动的关系式为

$$\delta(\Delta P) = \delta(\Delta P_1) + \delta(\Delta P_2) + \delta(\Delta P_3) \quad (30)$$

各区段扰动函数如式(15)、(17)、(25)所述。根据上述三区段传递函数, 选取压降的扰动作为输入, 速度的扰动作为输出, 根据总的压降和各个区域压降的关系, 得到总的传递函数如下

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \quad (31)$$

根据经典自动控制理论, 本研究使用奈奎斯特稳定性判据来判定流动系统的稳定性。在使用奈奎斯特稳定性判据判断流动稳定性时, 需要使用系统的开环传递函数。在 Matlab 中绘制出开环传递函数的 Nyquist 曲线来判断流动的稳定性。

应用 Nyquist 稳定性判据来判别系统稳定性的步骤是: 绘制流动系统的开环频率特性图, 求曲线 $1 + G_{open}(j\omega)$ 包围原点的次数。当 Nyquist 曲线包围原点的次数大于等于 1 时, 流动是不稳定的。反之, 流动是稳定的。

1.4 模型验证

根据王文毓等^[23]的实验数据对本文建立的流动不稳定特性计算模型进行验证。表 1 为实验工况及结果,实验管道长度为 2 m,内径为 0.019 m。

表 1 实验工况及结果

Table 1 Experimental conditions and results			
工况	压力/ MPa	质量流速/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	临界热流密度/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)
1	18	310	377
2	18	420	407
3	18	478	417
4	19	310	350
5	19	420	362
6	19	478	403
7	20	310	272
8	20	420	280
9	20	478	338
10	21	310	253
11	21	420	214
12	21	478	219

本文模型临界热负荷计算结果 Q_{cal} 见图 2,可以看出计算误差基本在 10% 以内,与临界热负荷实验结果 Q_{exp} 符合度高,可用于锅炉水冷壁不稳定特性的计算。

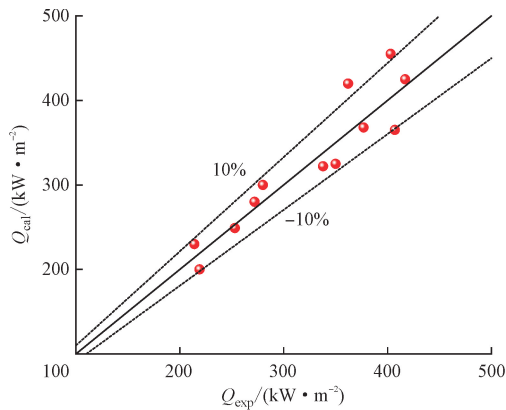


图 2 临界热负荷的计算验证

Fig. 2 Calculation and verification of critical heat load

1.5 回路不稳定边界计算

受热管的质量流速越低、管子越长、热负荷越大,越容易发生流动的失稳而引起安全事故^[24-26]。对于超临界锅炉机组,当负荷越高时运行越稳定,因此在计算时选取深度调峰的 50% 锅炉最大连续蒸发量

(BMCR) 负荷以及代表较低负荷的 20% BMCR 负荷,来研究深度调峰时的不稳定特性,同时选取水冷壁具有最大热负荷和最大管长的回路作为典型回路进行流动不稳定性的计算分析。本文研究对象为某 350 MW 超临界 CFB 锅炉机组,根据该机组锅炉说明书及厂家提供的数据选取热偏差最大、质量流速较低、管长较长的右墙某回路进行计算。该回路管段经 Y 型三通一分为二后,外径由 51 mm 变为 32 mm,内径由 37 mm 变为 18 mm,管长为 40.15 m,以分流后的管道来研究该机组不同负荷下水冷壁管道最易发生流动失稳部位的不稳定特性。表 2 为回路管段在 20% 以及 50% BMCR 负荷运行时的参数。

表 2 回路在不同负荷的工况参数

参数	数值	
	20% BMCR	50% BMCR
入口压力/MPa	10.275	15.623
入口温度/℃	313.00	294.06
入口流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.049 0	0.105 4
入口焓/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 426.016	1 305.780
出口压力/MPa	10.170	15.483
出口温度/℃	323.08	399.950
出口焓/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2 791.039	2 962.050

选取锅炉 20% BMCR 负荷的工况参数,增加热负荷,通过生成的 Nyquist 图是否包围原点对系统的流动不稳定性进行判断,得到典型回路在 20% BMCR 负荷条件下的流动不稳定边界如图 3 所示。

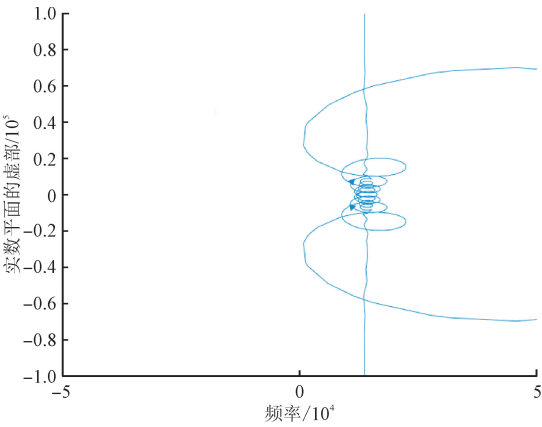


图 3 20% BMCR 工况 Nyquist 图

Fig. 3 Nyquist diagram under 20% BMCR working condition

经计算,当锅炉机组在 20% BMCR 负荷运行时,典型回路的热负荷为 $29.72 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,通过系

统参数进行程序计算生成的 Nyquist 曲线不包围原点,系统稳定。继续增加输入的热负荷到接近不稳定的状态,当热负荷为 $76.09 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, Nyquist 曲线刚好包围原点,系统为临界稳定状态,继续增加热负荷系统将发生流动不稳定现象。因此,针对本回路 20%BMCR 工况的压力和质量流速,通过计算得到的发生流动不稳定的热负荷为 $76.09 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 大于正常工况下的热负荷,具有较高的安全裕度。使用同样的方法可以计算得出锅炉机组在 50% BMCR 负荷运行时热负荷为 $76.89 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 发生流动不稳定的热负荷为 $113.52 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, 水冷壁管道流动稳定且安全。

2 流动不稳定特性计算与安全分析

2.1 无量纲不稳定边界判定参数

在两相流动不稳定边界特性的研究中,常使用无量纲入口过冷度数 (N_{sub}) 和无量纲相变数 (N_{pch}) 来构造流动不稳定边界图。 N_{sub} 和 N_{pch} 的计算公式分别为

$$N_{\text{sub}} = \frac{\Delta h_{\text{sub}}}{h_{\text{fg}}} \frac{v_{\text{fg}}}{v_{\text{f}}} \quad (32)$$

$$N_{\text{pch}} = \frac{Q}{G_{\text{in}} h_{\text{fg}}} \frac{v_{\text{fg}}}{v_{\text{f}}} \quad (33)$$

式中: Δh_{sub} 为管道进口水的欠焓; h_{fg} 为汽化潜热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; v_{fg} 为饱和水和饱和蒸汽的比热容差, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; v_{f} 为饱和水的比热容; Q 为加热功率, kW ; G_{in} 为进口流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 20%BMCR 及 50%BMCR 工况的不稳定边界计算及分析

选取典型回路 20%BMCR 以及 50%BMCR 运行工况,通过改变入口过冷度绘制流动不稳定边界图。

图 4 和图 5 为 20%BMCR 回路流动不稳定边界图。在相同的入口过冷度条件下,随着热负荷的增大,流动逐渐从稳定状态达到临界稳定状态,随后进入不稳定状态。通过观察可以发现,入口过冷度的变化对流动系统稳定性的影响是不固定的,呈非单值性。这主要是因为随着流入管内工质焓的增大,液气两相界面的动态扰动更容易向未加热的上游部分传播,抑制了管内工质的非定常流动的扰动,入口过冷度对应的临界热负荷在该原因的影响下会增大。但是,由于入口焓的上升,管段内单相过冷区域变短,不利于管内工质流动的稳定,在该因素影响

下此入口过冷度对应的临界热负荷会减小。两者影响的叠加可能在特定条件下增加或降低工质流动的稳定性。从图 4 和图 5 可以看出,在工况点附近随着入口过冷度数的减小,流动的稳定性得到增强,并且有很大的安全裕度。

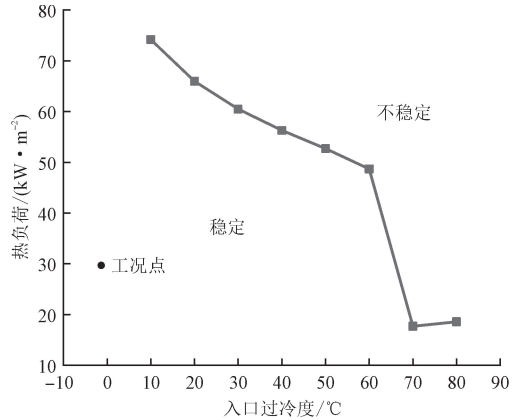


图 4 回路 20%BMCR 不稳定边界图

Fig. 4 20%BMCR typical loop instability boundary diagram

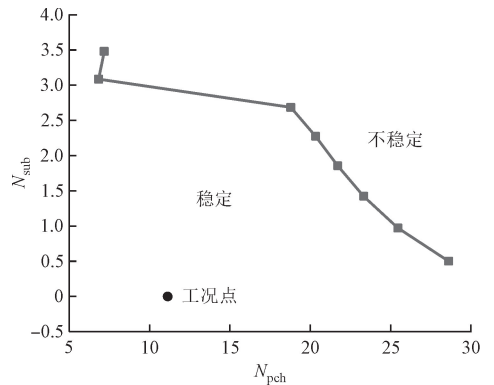


图 5 回路 20%BMCR 无量纲流动不稳定边界图

Fig. 5 Boundary diagram of dimensionless flow instability in 20%BMCR loop

50%BMCR 回路流动不稳定边界图见图 6 和图 7。可以发现,在工况点附近,随着入口过冷度的减小,流动稳定性先被削弱后得到增强,不稳定边界呈“C”型。通过比较不同负荷工况的不稳定边界可以发现,在 20%BMCR 负荷下流动的参数如入口过冷度发生变化时,流动稳定边界的变化更剧烈,更容易发生流动不稳定的现象,因此下文针对 20% BMCR 工况分析不同参数对流动不稳定特性的影响。

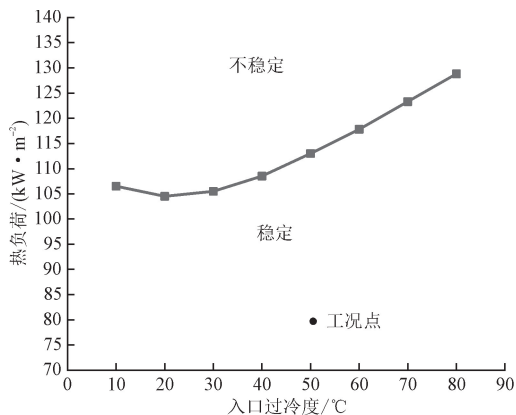


图 6 回路 50%BMCR 不稳定边界图

Fig. 6 50%BMCR typical loop instability boundary diagram

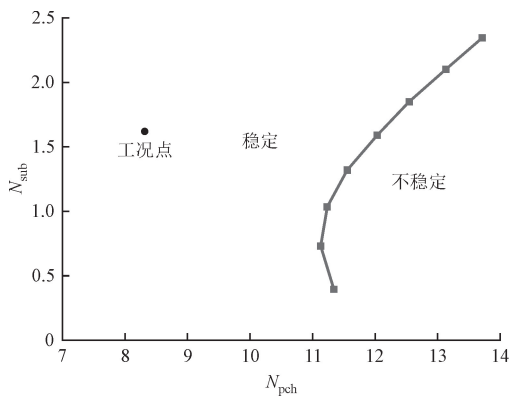


图 7 50%BMCR 回路无量纲不稳定边界图

Fig. 7 Dimensionless instability boundary diagram of a typical 50% BMCR loop

2.3 不同条件下质量流速对不稳定特性的影响

选取典型回路 20%BMCR 运行工况为基础工况,通过改变质量流速计算得到不同质量流速下的不稳定边界,同时通过改变系统压力、入口节流系数、入口过冷度等参数,计算得到不同条件下质量流速对应的临界热负荷边界并进行分析。

2.3.1 压力的影响

保持其他参数不变,计算不同压力(P)下不同质量流速对应的热负荷,结果见图 8。可以看出,在恒定压力下,随着质量流速的增加,临界热负荷也逐渐增大。这是因为在热负荷保持不变的情况下,质量流速的增大会使工质进出口的密度差减少,从而使得工质流动更为稳定。在固定的质量流速下,压力的增加也会使临界热负荷减小,是因为随着压力的增加,工质的沸腾点焓减小,在相同的入口焓的前

提下入口过冷度会减小,单相区变短,流动的稳定性被削弱。

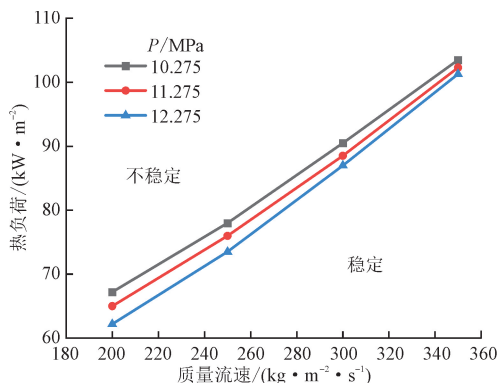


图 8 不同压力下的质量流速和热负荷边界图

Fig. 8 Boundary diagram of mass flow rate and heat load under different pressures

2.3.2 入口节流系数的影响

不同入口节流系数(K_{in})下不同质量流速对应的热负荷如图 9 所示。可以看出,在其他条件不变的情况下,入口节流系数越大,发生流动不稳定的临界热负荷越大。这是因为增大入口节流系数增大了入口阻力,抑制了入口处流量的脉动,使系统的振荡减弱,从而有利于流动的稳定。

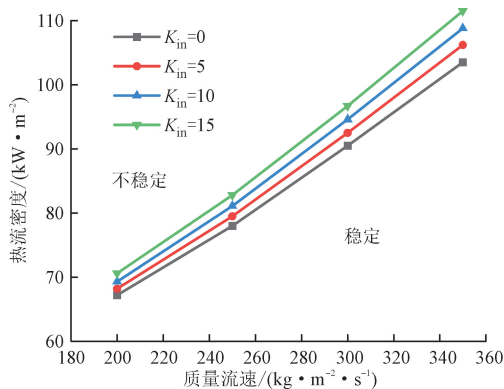


图 9 不同入口节流系数下的质量流速和热负荷边界图

Fig. 9 Boundary diagrams of mass flow rate and heat load under different inlet throttling coefficients

2.3.3 入口过冷度数的影响

不同入口过冷度(T_{sub})下不同质量流速对应的热负荷如图 10 所示。可以看出,入口过冷度对流动稳定性的影响受上文所述两种因素的相互制约呈现出非单调性。对于本计算对象,在工况点附近的范围内入口过冷度的减小会增大流动的稳定性。

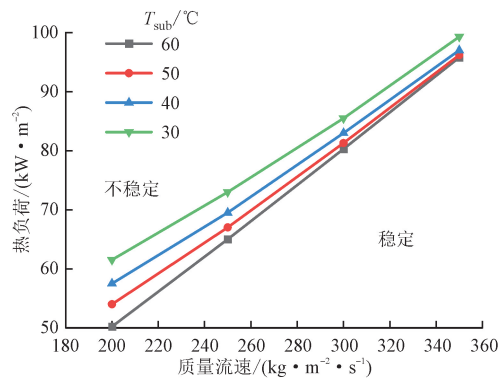


图 10 不同入口过冷度下的质量流速和热负荷边界图
Fig.10 Boundary diagram of mass flow rate and heat load under different subcooling conditions

从本节可以看出,增大质量流速可以提高流动的稳定性。

2.4 系统参数对无量纲流动不稳定边界的影响

选取回路 20%BMCR 运行工况为基本工况,通过改变入口过冷度计算得到不同入口过冷度下的不稳定边界,绘制流动不稳定边界图。

2.4.1 质量流速的影响

不同质量流速(G)对应的无量纲不稳定边界见图 11。可以看出,在同一质量流速下的不稳定边界上的总体趋势为随着无量纲过冷度数的减小,无量纲相变数增大。在其他条件相同的情况下,随着质量流速的增大,不稳定边界改变的整体趋势为向右偏移,流动不稳定的临界边界增大,流动的稳定性变强,这与已有的研究结论相同。在高流速条件下,惯性力对流体流动的影响会占据主导地位,在低流速条件下,黏性力所发挥的作用更明显。当惯性力增大时,流体对于扰动的响应时间会减小,从而增加工质流动的全局稳定性,并且在某些工况下,质量流速

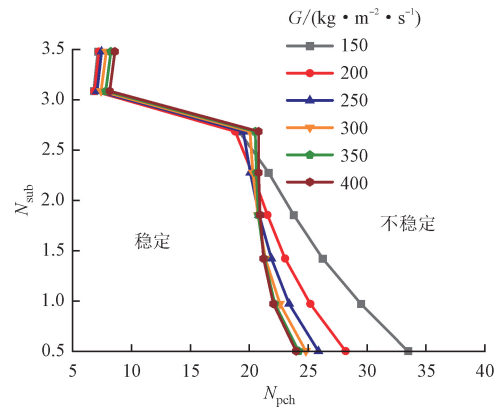


图 11 质量流速对流动不稳定边界的影响
Fig. 11 The influence of mass flow rate on unstable boundaries

的增加可能会导致流态从层流转变为湍流,可以有效抵抗管内工质流动时产生的扰动。增大质量流速还会通过使流场中温度压力分布更加均匀从而增加流动的稳定性。因此,质量流速对流动稳定影响的趋势为随着质量流速的增加,临界热负荷增大,管内工质流动的稳定性增强。

2.4.2 倾斜角度的影响

倾斜角度(φ)为管道与水平面的夹角。保持其他参数不变,通过改变倾斜角度研究不同安装方式对水冷壁管内工质流动稳定性的影响。倾斜角度的影响主要体现在以下两个方面:一方面,随着倾斜角的增大,流体经过整个管道的重力压降增大,使得流体在各个部分的物性差异增大,更易产生扰动,不利于流动的稳定性;另一方面,倾角的增大使重力与流动方向的夹角变小,会使两相区气泡分布以及流速分布更加均匀,减少压力波动和流动振荡,有利于流动的稳定性。因此,本文通过数值计算来研究不同负荷水冷壁管道、不同倾斜角度两种因素对流动不稳定特性的影响。

从图 12 可以看出,在低入口过冷度时,倾角的增大有利于流动的稳定性,高入口过冷度时则反之。其原因为入口过冷度较小时,单相区短,随着倾角的增大,重力与流动方向的夹角变小,两相区气泡分布及流速分布更加均匀,该因素对整体稳定性的影响占据主导地位,进而增加了流动的稳定性。在高入口过冷度时,单相区长,重力对局部汽化流动的影响小,而随着倾角的增加,重力压降扰动增加,且在整体表现中占据主导地位,流动的稳定性被削弱。

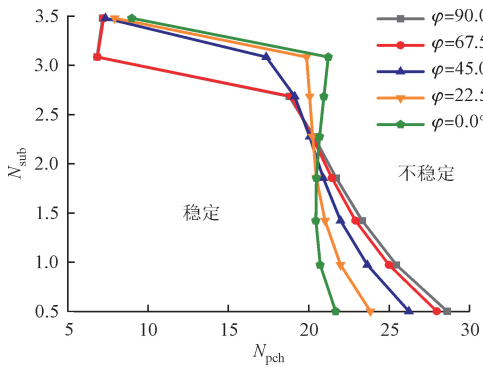


图 12 倾斜角度对流动不稳定边界的影响
Fig. 12 The influence of tilt angle on unstable boundaries

2.4.3 入口节流系数的影响

入口节流系数(K_{in})对流动不稳定边界的影响见图 13。可以看出,在其他条件相同的情况下,当入口过冷数不变时,随着入口节流系数的增大,临界

无量纲相变数逐渐增大,且与临界热负荷呈正相关,说明随着入口节流系数的增大,管段流动的稳定性增强。

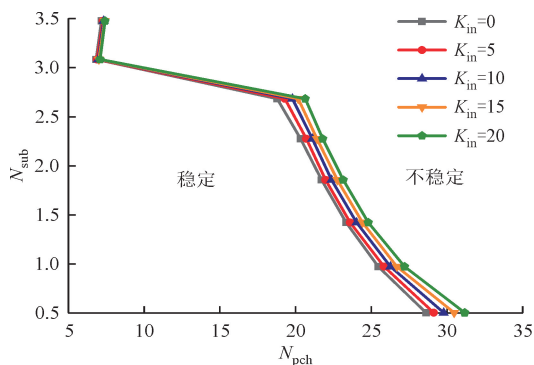


图 13 入口节流系数对流动不稳定边界的影响

Fig. 13 The influence of inlet throttling coefficient on unstable boundaries

2.4.4 管径的影响

不同管径(D_c)对应的无量纲不稳定边界图如图 14 所示。可以看出,随着管径的增大,流动的稳定性得到了增强。在质量流速和热负荷不变的前提下,增大管径,质量流量与加热功率同时增大,且质量流量增加的速度更快,其结果为单位质量工质吸热量减小,故在相同热负荷条件下,随着管径的增大,无量纲不稳定边界右移,流动的稳定性增强。

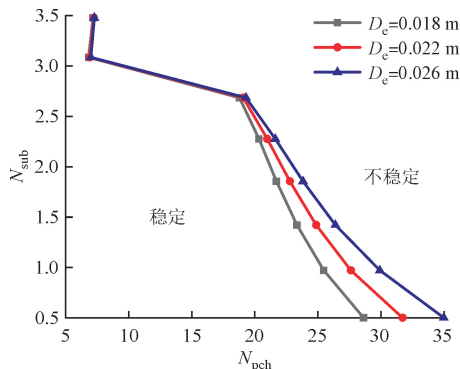


图 14 管径对流动不稳定边界的影响

Fig. 14 The influence of pipe diameter on unstable boundaries

2.4.5 加热段长度的影响

不同加热段长度(L_H)对应的无量纲不稳定边界图见图 15。可以看出,在其他条件相同时,加热管越长越容易发生流动的失稳。这是因为当质量流速和热负荷不变时,加热管越长,流体进口和出口的密度差越大,越容易发生流动失稳现象。因此,其他参数不变增加管长时,临界热负荷减小,流动稳定性减弱。

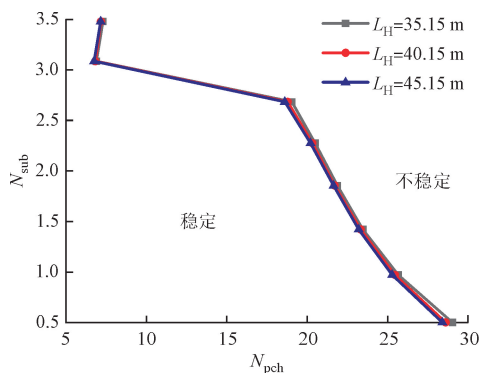


图 15 加热段长度对流动不稳定边界的影响

Fig. 15 The influence of heating section length on unstable boundaries

3 结 论

(1) 通过该锅炉机组 20% BMCR 负荷及 50% BMCR 负荷下右墙回路进行流动不稳定特性计算分析得到:锅炉在 20% BMCR 负荷和 50% BMCR 负荷运行时,右墙回路的临界热负荷分别为 $76.09 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $113.52 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。锅炉在深度调峰的不同工况运行时均处于稳定状态,且都存在足够安全裕度。

(2) 入口过冷度、倾斜角度以及压力对流动稳定性的影响呈非线性。对于 20% BMCR 负荷,在该工况参数附近的范围内,随着压力和入口焓的增加,系统的流动稳定性变差。对于 50% BMCR 负荷,在该工况参数附近的范围内,入口焓的增加不利于流动系统的稳定;压力的增加有利于流动系统的稳定。在低入口过冷度时,倾角的增加有利于流动的流动,高入口过冷度则反之。

(3) 增加管径、流量以及入口节流系数会增加临界热负荷,有利于流动的流动;增加管长会减小临界热负荷,不利于流动的流动。在深度调峰过程中,通过本文建立的模型可计算变参数管道发生流动不稳定时的临界热负荷,结合不同系统参数对流动不稳定特性的影响,可对流动不稳定的发生进行干预,从而为深度调峰机组的安全运行提供指导。

参考文献:

- [1] HASSAN Q, ALGBURI S, SAMEEN A Z, et al. A comprehensive review of international renewable energy growth [J/OL]. Energy and Built Environment. (2024-01-09) [2024-02-28]. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.12.002>.

- [2] QU Mofeng, YANG Dong, LIANG Ziyu, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer of ultra-supercritical water in vertical upward tube under uniform and non-uniform heating [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127(Part C): 769-783.
- [3] WIDJAJANTO T, DARMADI D B, IRAWAN Y S, et al. Failures analysis of tube coating in circulating fluidized bed (CFB) boiler [J]. Heliyon, 2024, 10 (4): e26134.
- [4] XI Kenan, LI Runqing, ZHAO Lixing, et al. Experimental investigations of flow dynamics in the riser of supercritical water circulating fluidized bed [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2023, 169: 104600.
- [5] 欧阳诗洁, 李娟, 董乐, 等. 超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性计算分析 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 84-91.
- OUYANG Shijie, LI Juan, DONG Le, et al. Calculation and analysis on the flow instability of an ultra supercritical boiler under low load [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 84-91.
- [6] 杨冬, 聂超, 周科, 等. 超临界机组深度调峰工质流动不稳定试验与理论计算 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29 (6): 40-48.
- YANG Dong, NIE Chao, ZHOU Ke, et al. Experiment and theoretical calculation of flow instability in deep peak-shaving of supercritical units [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 40-48.
- [7] 张鑫, 刘朝晖, 毕勤成, 等. 倾斜内螺纹管中超临界水的传热和流动阻力特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 106-115.
- ZHANG Xin, LIU Zhaohui, BI Qincheng, et al. Heat transfer and resistance characteristics of water in an inclined internally ribbed tube under supercritical pressure conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 106-115.
- [8] 周旭, 周妍君, 李维成, 等. 660 MW 超超临界 CFB 锅炉失电壁温计算及运行措施 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(11): 91-98.
- ZHOU Xu, ZHOU Yanjun, LI Weicheng, et al. Calculation of heating surface wall temperature and operation measures for 660 MW ultra supercritical CFB boiler under electricity failure [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(11): 91-98.
- [9] 严俊杰, 刘明, 王朝阳, 等. 燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配技术及应用 [J/OL]. 西安交通大学学报 (2023-07-05)[2024-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230705.0927.004.html>.
- YAN Junjie, LIU Ming, WANGChaoyang, et al. Energy-potential dynamic matching technology for the synergy of high-efficiency, flexibility and clean for coal-fired power generation units during the transient processes and its application [J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University (2023-07-05)[2024-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230705.0927.004.html>.
- [10] 吴浩民, 王烈高, 卫鹏凯, 等. 电站锅炉深度调峰超温工况下水冷壁腐蚀机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(11): 118-129.
- WU Haomin, WANG Liegao, WEI Pengkai, et al. Overheating corrosion behavior of heat resistant steels during deep peaking [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 118-129.
- [11] 杜晓成, 王奥宇, 项昱轩, 等. 超临界 CFB 锅炉灵活运行方式下的流动传热及动态特性试验研究 [J]. 热力发电, 2023, 52(9): 76-86.
- DU Xiaocheng, WANG Aoyu, XIANG Yuxuan, et al. Experimental investigation on flow heat transfer and dynamic characteristics of supercritical CFB boiler under flexible operation [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 76-86.
- [12] HU Wei, XUE Song, GAO Hongchen, et al. Leakage failure analysis on water wall pipes of an ultra-supercritical boiler [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107670.
- [13] CARRASCO D S, GOODWIN G C, PEIRCE R D. Novel modelling for a steam boiler under fast load dynamics with implications to control [J]. Automatica, 2023, 156: 111184.
- [14] 李军, 李晓明, 刘长亮. 开式自然循环流动不稳定性的频域法分析 [J]. 原子能科学技术, 2017, 51(10): 1800-1805.
- LI Jun, LI Xiaoming, LIU Changliang. Instability analysis of open natural circulation system using frequency domain method [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(10): 1800-1805.
- [15] ZHANG Yifan, LI Huixiong, LI Liangxing, et al. Study on two-phase flow instabilities in internally-ribbed tubes by using frequency domain method [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1/2): 1-13.
- [16] 田晓艳, 田文喜, 朱大欢, 等. 基于频域法超临界水冷堆 CSR1000 流动不稳定性研究 [J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 402-408.

(下转第 92 页)

- 15): 3160-3168.
- [20] 兰述. 摇摆条件下瞬变流动传热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014: 40-64.
- [21] 王占伟. 摇摆运动下冷却剂低流速流动、传热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 36-70.
- [22] NIST. Thermophysical properties of fluid systems [EB/OL]. [2024-05-22]. <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
- [23] WANG Biaoxin, SU Bo, ZHENG Wei, et al. Experimental study on flow rate and pressure drop characteristics in T-junction pipes under rolling conditions [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4): 045111.
- [24] SU Bo, LIN Mei, WANG Qiuwang. Study on the flow mixing of hot and cold fluids in the T-junction under rolling motion condition [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 403: 112126.
- [25] 刘超群. Liutex-涡定义和第三代涡识别方法 [J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(3): 413-431.
- LIU Chaoqun. Liutex-third generation of vortex definition and identification methods [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(3): 413-431.
- [25] KICKHOFFEL J, VALORI V, PRASSER H M. Turbulent penetration in T-junction branch lines with leakage flow [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 276: 43-53.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 77 页)

- TIAN Xiaoyan, TIAN Wenxi, ZHU Dahuan, et al. Flow instability analysis of supercritical water-cooled reactor CSR1000 based on frequency domain [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(3): 402-408.
- [17] 薛爱军, 程旭. 超临界水热力系统的稳定性的简化模型分析 [J]. *核动力工程*, 2009, 30(5): 35-39.
- XUE Aijun, CHENG Xu. Stability analysis of a simplified model of supercritical water-cooled system [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, 30(5): 35-39.
- [18] LIANG Qian, LI Xiaowei, SU Yang, et al. Frequency domain analysis of two-phase flow instabilities in a helical tube once through steam generator for HTGR [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168: 114839.
- [19] 王芊. 垂直上升管内汽液两相流不稳定性的实验研究与数值计算 [D]. 西安: 西安交通大学, 1988.
- [20] BI Lingfeng, ZHANG Xirong, LI Weiteng, et al. An improved frequency-domain model for the supercritical flow instability analysis in vertical tubes [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 194: 110114.
- [21] ZHAO Jiyun. Stability analysis of supercritical water cooled reactors [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [22] 辛亚飞. 超超临界锅炉深度调峰时的流动不稳定性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
- [23] 王文毓, 曲默丰, 赵云杰, 等. 近临界压力区低质量流速光管水冷壁临界热流密度试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 3015-3021.
- WANG Wenyu, QU Mofeng, ZHAO Yunjie, et al. Experimental investigation on critical heat flux of smooth water wall tube with low mass flux at near-critical pressures [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 3015-3021.
- [24] LONG Jianping, YANG Baowen, ZHANG Bin, et al. Computational case study on upward two-phase flow in vertical circular pipe based on CFD approach: multidimensional flow instabilities investigation [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 144: 104085.
- [25] SHIN C W, NO H C. Experimental study for pressure drop and flow instability of two-phase flow in the PCHE-type steam generator for SMRs [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 318: 109-118.
- [26] CUI Fulong, HONG Fangjun, LI Chen, et al. Two-phase flow instability in distributed jet array impingement boiling on pin-fin structured surface and its affecting factors [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118495.

(编辑 亢列梅)