

350 MW 超灵活锅炉深度调峰下水冷壁流动不稳定性及动态特性分析

卫子钰¹, 朱天如¹, 于婷婷¹, 殷亚宁², 王婷², 杨冬¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 150046, 哈尔滨)

摘要: 针对工质参数快速变化在超灵活锅炉深度调峰过程中引起的典型流体动力不稳定现象, 提出了一种深入探究超灵活锅炉的密度波不稳定性机理及水冷壁动态响应特性的预测模型。基于频域法, 将整个蒸发管段划分为过冷区、两相区和过热区 3 部分; 对守恒方程进行线性化和微小扰动处理, 利用拉普拉斯变换求解获得管道段的传递函数; 基于 C 语言和 MATLAB 软件, 开发一维线性三区段临界热流密度预测程序, 并采用奈奎斯特(Nyquist)稳定性判据评估系统的稳定性。以 350 MW 超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象, 结果表明: 在 75% 和 30% 额定负荷下, 临界热流密度分别为 194.90、26.38 kW/m², 实际工况点距离热流密度边界有足够的安全裕度; 当锅炉在两种负荷之间运行时, 提高运行压力和热流密度可增强流动稳定性, 增加管段长度和降低管道倾角会降低流动稳定性; 入口焓越大, 系统恢复稳定所需的时间越短。该研究可为锅炉深度调峰安全运行提供理论基础。

关键词: 深度调峰; 密度波不稳定性; 动态特性; 频域法; 拉普拉斯变换

中图分类号: TK223.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202602009 **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0092-11

Analysis of Flow Instability and Dynamic Characteristics in Water Wall of 350 MW Ultra-Flexible Boiler During Deep Peak-Shaving Operation

WEI Ziyu¹, ZHU Tianru¹, YU Tingting¹, YIN Yaning², WANG Ting², YANG Dong¹

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

2. The National Key Laboratory of Low-Carbon Thermal Power Generation Technology and Equipment,

Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China)

Abstract: To address the typical hydrodynamic instability phenomena caused by rapid changes in working fluid parameters during deep peak-shaving operation of ultra-flexible boilers, a predictive model is proposed to deeply investigate the density wave instability mechanism and dynamic response characteristics of water walls. Based on the frequency domain method, the entire evaporator tube section is divided into three parts: subcooled, two-phase, and superheated regions. The conservation equations are linearized and subjected to small perturbation treatment, and the transfer function of the pipe section is obtained by solving with Laplace transform. Based

收稿日期: 2025-06-17。 作者简介: 卫子钰(2001—), 女, 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: 2025-08-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250811.0914.002>

on this process, a one-dimensional linear three-region critical heat flux prediction program is developed using C language and MATLAB software, and the Nyquist stability criterion is employed to evaluate system stability. Taking a 350 MW ultra-flexible tower-type supercritical coal-fired boiler as the research object, the results show that at 75% and 30% rated loads, the critical heat flux values are 194.90 kW/m² and 26.38 kW/m², respectively, with actual operating points maintaining sufficient safety margins from the heat flux boundary. When the boiler operates between these two loads, increasing operating pressure and heat flux enhances flow stability, while increasing tube length and reducing pipe inclination angle reduce flow stability. Higher inlet enthalpy shortens the time required for the system to return to stability. This study provides a theoretical basis for the safe operation of boilers during deep peak-shaving.

Keywords: deep peak regulation; density wave oscillation; dynamic characteristics; frequency domain method; Laplace transform

超灵活锅炉由于高效率、低排放、强调峰能力等优点,被广泛应用于电力生产中。近年来,在“双碳”目标下,新能源发电发展迅猛,要求传统火电机组必须具有深度调峰能力^[1-3]。目前,我国怀柔实验室正在开发的超灵活塔式锅炉,具备宽负荷高效运行、快速变负荷响应以及深度调峰能力^[4-5],并在满足新能源主导的新型电力系统调峰要求的同时,保障了电网稳定性^[6]。当前电力系统中,以风电和光伏为代表的清洁能源装机容量占比逐年提高。这些清洁能源发电方式所具有的波动性和不可控特性,使得常规燃煤发电机组不仅需要具备更强的运行灵活性^[7]和快速响应能力,还需要在低负荷工况下保持稳定运行^[8]。在此背景下,锅炉系统中水冷壁的流动不稳定问题以及水冷壁出口参数动态特性问题日益凸显,已成为制约系统安全高效运行的关键技术瓶颈^[9-10]。

频域法在流体动力稳定性研究中的应用正日益受到重视^[11]。李军等^[12]采用奈奎斯特(Nyquist)准则评估流动的稳定性,Zhang等^[13]针对内螺纹管,考虑管壁储热效应建立了频域数学模型。田晓艳等^[14]采用频域分析法开发了超临界水冷堆计算模型,深入研究了堆芯流体的动态特性。薛爱君等^[15]建立超临界水系统的单区域热力学模型,研究了关键参数对稳定性边界、阶跃响应和衰减比的影响。Liang等^[16]基于频域法建立了三区段计算模型,用于研究竖直管道中的流体动力特性。李维腾等^[17]开发了适应多种运行条件的广义频域模型,对基本守恒方程实施线性近似和频域变换,然后建立数学模型评估系统的动态特性。然而,现有研究对管道结构的探讨仍不充分,往往忽略了内螺纹管、倾斜角

度等因素的影响。

本文采用频域分析法构建了一维单通道三区段计算模型,用于探究管道内汽液两相流的动态特性,并以350 MW超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象,重点考察了低负荷工况下的流动稳定性问题。在稳态工况分析的基础上,深入探讨了运行压力、热流密度、入口工质焓和管道几何尺寸等关键参数对系统动态响应的影响机理。研究结果可为超灵活锅炉深度调峰运行的优化设计和安全控制提供理论支撑。

1 典型回路概况及参数

在深度调峰过程中,超灵活锅炉的运行负荷呈现快速下降的变化特征。在此过程中,水冷壁管内的工质会出现两相共存现象,导致流动系统的稳定性显著降低^[18-19],此类不稳定现象往往源于各管组之间的流量分配失衡。以某350 MW超灵活塔式超临界煤粉锅炉为研究对象,选取两种负荷工况下流量热偏差较大的回路进行计算分析,以考察单管流动不稳定性特征,进而评估锅炉在当前负荷下的运行稳定性。锅炉炉膛断面尺寸为14.187 3 m×14.187 3 m,下炉膛水冷壁高度为45 m,采用264根规格为Φ38 mm×6.5 mm、节距为53 mm的管道组成螺旋管圈水冷壁,管道以14°倾角布置。

由于管段长度增加和质量流速降低的共同作用,锅炉水冷壁在低负荷工况下更易出现流动失稳问题。基于频域分析方法研究水冷壁稳定性时,以左侧墙工质流速最小的第1回路为研究对象,考虑了75%、30%两种额定负荷工况。各工况下水冷壁管回路1的稳态运行参数见表1。

表1 不同额定负荷工况下回路1的稳态运行参数
Table 1 Steady-state operating parameters of circuit 1 under different rated load conditions

参数	75 % 额定负荷	30 % 额定负荷
入口压力 p_{in}/MPa	21.442 9	12.193 1
入口焓 $h_{in}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1 535.083	1 341.435
出口压力 p_{out}/MPa	19.983 4	11.608 0
出口焓 $h_{out}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	2 692.705	2 710.169
回路长度 L/m	187.321	187.321
质量流速 $G/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1 774.767	722.834 6

2 流动不稳定性数值计算模型

采用频域法建立计算模型时,运用三区段划分策略,将饱和水临界面与饱和蒸汽临界面作为分区边界。基于图1所示的过冷-两相-过热三区划分方法,重点探究了管道几何尺寸、流动参数和热力学状态对两相流动稳定特性的调控规律。

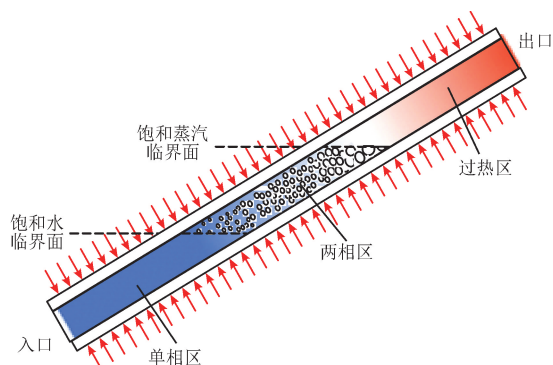


图1 三区段划分策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-zone segmentation strategy

2.1 模型假设

针对超灵活塔式锅炉水冷壁系统的结构特点,采用一维单通道频域法构建了简化计算模型。针对锅炉深度调峰运行时的工质密度波动稳定性问题,在构建数学模型时引入以下基本假设^[20]。

(1)轴向热流简化假设:仅考虑管道轴向传热效应,不考虑径向传热对工质热力特性的影响。

(2)单相未饱和区不可压缩性:单相未饱和水的密度变化极小,忽略其压缩性和密度扰动不会引入显著误差。

(3)单向流动简化:仅分析工质轴向运动特性,忽略切向流动分量,以降低传递函数求解复杂度。

(4)均相平衡模型:基于热力学平衡假设,将两相流视为完全混合的均匀介质。

(5)热流均匀分布:沿管道轴向的热流密度分布保持恒定。

(6)恒定节流系数:进出口节流系数保持不变。

2.2 守恒方程

(1)入口压降方程。工质在入口处经过节流会产生压降,此处的压降方程^[21]可表示为

$$\Delta p_0 = k_{in} \frac{\rho_{hm} u_{in}^2}{2} \quad (1)$$

式中: Δp_0 为入口节流区的压降; k_{in} 为入口节流系数; ρ_{hm} 为流体密度; u_{in} 为工质入口速度。

(2)过冷区和过热区守恒方程。基于假设(1)和(4)建立一维流动模型,由于过冷区与过热区流动传热相似,故推导公式相同。设定过冷/过热区域工质不可压缩且密度恒定,推导出该区域的守恒方程^[22],展现管段热流密度与管内工质流动参数的传递关系。其中,质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0; \rho(z) = \text{const} \quad (2)$$

式中: u 为工质流速; z 为沿管段轴向方向的位置坐标; ρ 为工质密度。

能量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u_{in} \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{P_h}{A_c} q \quad (3)$$

式中: h 为工质焓; t 为时间; q 为对管段施加的热负荷; P_h 为管段湿周; A_c 为管段的流通截面积。

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{du}{dt} + \rho g \sin \varphi + \frac{f_i}{2D} \rho u^2 \quad (4)$$

式中: p 为压力; $f_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为过冷区、两相区和过热区的流动摩擦系数; D 为受热管段当量直径; g 为当地的重力加速度; φ 为管段倾斜角。

(3)两相区守恒方程。其中,质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_h (1 - \alpha)] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_h u_h (1 - \alpha)] = -\frac{q P_h}{A_c h_{hl}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \alpha) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l u_l \alpha) = \frac{q P_h}{A_c h_{hl}} \quad (6)$$

式中: 下标 h, l 分别表示饱和水点和饱和蒸汽点; α 为截面含汽率; h_{hl} 为饱和蒸汽与饱和水的焓差。

能量守恒方程为

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + \rho_m u_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q P_h}{A_c} \quad (7)$$

式中: ρ_m 、 h_m 、 u_m 分别为混合工质的密度、焓和流速。

动量守恒方程为

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho_m} \right) + \frac{f_2 \rho_m u_m^2}{2D} + \rho_m g \sin \varphi \quad (8)$$

式中: G 为工质的质量流速。

2.3 稳态参量的计算方法

数值计算前,需预先确定3个流动分区的摩擦系数 f_1 、 f_2 、 f_3 ,稳态工况下液相区与两相区交界位置坐标 z_{hm} ,以及气相区与两相区交界位置坐标 z_{ml} 。

(1)内螺纹管流动摩擦系数的计算方法。对于亚临界压力条件下的流动过程,摩擦系数的计算采用如下数学模型

$$f_1 = \frac{1}{4d(\lg(3700d/0.06))^2} \quad (9)$$

式中: d 为管道内直径。

(2)三区分界点稳态坐标的计算方法。基于稳态能量平衡方程,管段输入的热能完全转化为工质内能,导致其焓升高,由此可确定饱和和水点位置坐标 z_h 的计算式为

$$z_h = z_{in} + \frac{GA_c(h_h - h_{in})}{qP_h} \quad (10)$$

式中: z_{in} 为管段入口的位置坐标; h_{in} 为管段入口的工质焓。

$$G_2(t) = -\frac{1}{\Omega - t} \left\{ G\Omega + \rho_{ml}g + \frac{f_2}{2D}G[u_{in} + \Omega(z_{ml} - z_{hm})] \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{\Omega}{t} \left[1 - \exp\left(-\frac{t z_{hm}}{u_{in}}\right) \right] - \exp\left(-\frac{t z_{hm}}{u_{in}}\right) \left[1 + \frac{\Omega(z_{ml} - z_{hm})}{u_{in}} \right]^{\Omega - t / \Omega} \right\} \quad (17)$$

式中: $\Delta p_2(t)$ 、 $G_2(t)$ 分别为管段两相区的压降和前向通路传递函数; Ω 为工质流速沿轴向的变化率; ρ_{ml} 为两相区流体密度。

当出口处于过热状态时,系统的整体传递函数由入口节流区、过冷区、两相区和过热区4部分组成。若出口位于两相区,则整体传递函数仅包含前3部分,两相段的传递函数特性也会相应改变。基于此传递函数,以进口速度扰动为输入,压降扰动为输出,推导出系统整体 Nyquist 开环传递关系如下

$$\frac{\delta u_{in}(t)}{\delta \Delta p(t)} = 1 / \sum_{k=0}^3 G_k(t) \quad (18)$$

式中: $\Delta p(t)$ 为系统整体压降。

根据控制理论基本原理,建立该闭环系统的通用传递特性模型如下

$$\frac{\delta u_{in}(t)}{\delta \Delta p(t)} = \sum_{k=0}^3 G_k(t) / (1 + \sum_{k=0}^3 G_k(t) H(t)) \quad (19)$$

式中: $H(t)$ 为反馈通路传递函数。

饱和蒸汽点位置坐标 z_l 的计算式为

$$z_l = z_{in} + \frac{GA_c(h_l - h_{in})}{qP_h} \quad (11)$$

2.4 传递函数的推导

基于守恒方程组,通过线性微扰方法将变量分解为稳态量与扰动量之和,采用拉普拉斯变换导出各流动区域的传递特性模型^[22]。

采用小扰动线性化方法处理压降方程,分离稳态分量后得到入口节流区的传递函数为

$$\delta \Delta p_0(t) = G_0(t) \delta u_{in}(t) \quad (12)$$

$$G_0(t) = k_{in} \rho_h u_{in} \quad (13)$$

式中: δ 为小扰动线性变化量; G_0 为管段入口节流区的前向通路传递函数。

过冷区和过热区的传递函数可写为

$$\delta \Delta p_j(t) = G_j(t) \delta u_{in}(t) \quad (14)$$

$$G_j(t) = \rho_{hm} z_{hm} t + \frac{f_1}{D} \rho_{hm} u_{in} z_{hm} +$$

$$\frac{1}{t} (\rho_{hm} g + \frac{f_1}{2D} \rho_{hm} u_{in}^2) \left[1 - \exp\left(-\frac{t z_{hm}}{u_{in}}\right) \right] \quad (15)$$

式中: $\Delta p_j(t)$ 、 $G_j(t)$ 分别为管段过冷区($j=1$)及过热区($j=3$)的压降和前向通路传递函数。

同理,两相区的传递函数^[23]写为

$$\delta \Delta p_2(t) = G_2(t) \delta u_{in}(t) \quad (16)$$

系统的开环传递函数为

$$G_{open}(t) = \sum_{k=0}^3 G_k(t) H(t) \quad (20)$$

由式(18)~(20),可解得

$$1 + G_{open}(t) = \sum_{k=0}^3 G_k(t) \quad (21)$$

在频域稳定性分析中,传递函数 Nyquist 曲线 $1 + G_{open}(t)$ 与坐标原点的相对位置是判断系统稳定性的重要依据:极坐标图环绕原点时为不稳定状态,穿过原点为临界稳定,不环绕原点为稳定状态^[24]。

3 典型回路的 Nyquist 曲线

当前,在两相流稳定性研究中,普遍是以无量纲过冷度 N_{sub} 和相变数 N_{pch} 为基本参数,来界定流动失稳边界。其计算式^[25]如下

$$N_{sub} = \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \frac{c_{fg}}{c_f} \quad (22)$$

$$N_{pch} = \frac{Q}{G h_{fg}} \frac{c_{fg}}{c_f} \quad (23)$$

式中: Δh_{sub} 为入口欠焓; h_{fg} 为汽化潜热; c_{fg} 为饱和水和饱和蒸汽的比热容差; c_f 为饱和水的比热容; Q 为总加热功率。

3.1 75%额定负荷工况下典型回路的 Nyquist 曲线

在 75% 额定负荷工况下, 将左侧墙 1 回路入口压力维持在 21.442 9 MPa, 入口节流系数设为 0.5。在入口焓为 1 535.083 kJ/kg、质量流量为 1 774.767 kg/(m²·s)、热流密度为 180.05 kW/m² 的工况下, 测得无量纲入口过冷度 $N_{\text{sub}}=0.9516$, 相变数 $N_{\text{pch}}=4.0777$ 。根据 21.442 9 MPa 压力下 NIST 物性数据库的查询结果, 该压力对应的饱和水温度为 372.45 °C。应用 Nyquist 稳定性理论对 75% 额定负荷工况进行分析, 得到图 2 所示的频率响应曲线, 表明该流动系统处于稳定工作状态。

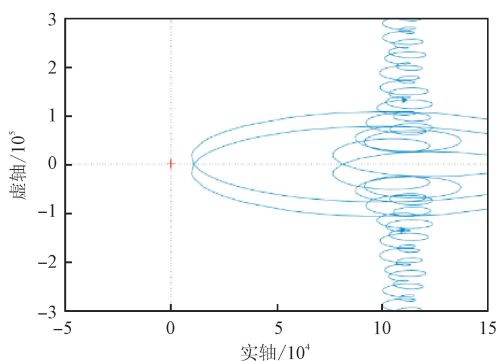


图 2 $N_{\text{sub}}=0.9516$ 和 $N_{\text{pch}}=4.0777$ 时的 Nyquist 曲线
Fig. 2 Nyquist diagram of $N_{\text{sub}}=0.9516$ and $N_{\text{pch}}=4.0777$

在恒定过冷度工况下, 逐步提高热流密度会导致系统稳定性状态发生显著转变。图 3 显示, 当热流密度增至 194.90 kW/m² (对应 $N_{\text{pch}}=6.8657$) 时, Nyquist 曲线通过坐标原点, 表明流动处于临界稳定状态。如图 4 所示, 当热流密度继续增加至 220 kW/m² (对应 $N_{\text{pch}}=7.7499$) 时, Nyquist 曲线将原点包围, 系统进入不稳定状态。

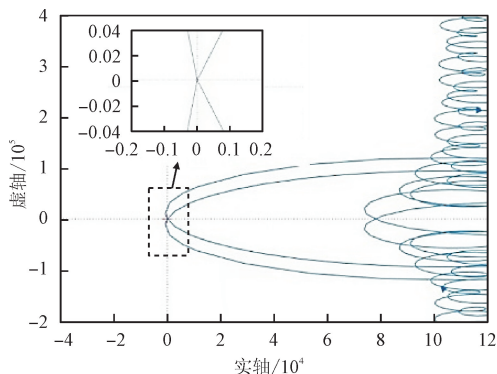


图 3 $N_{\text{sub}}=0.9516$ 和 $N_{\text{pch}}=6.8657$ 时的 Nyquist 曲线
Fig. 3 Nyquist diagram with $N_{\text{sub}}=0.9516$ and $N_{\text{pch}}=6.8657$

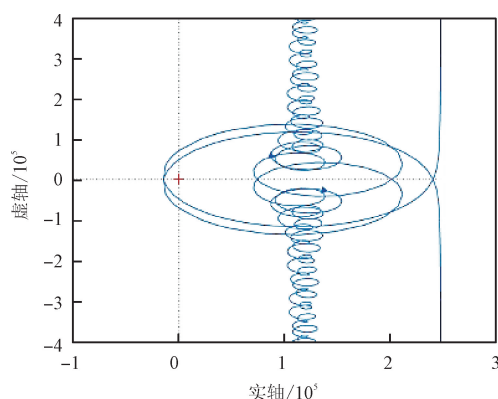


图 4 $N_{\text{sub}}=0.9516$ 和 $N_{\text{pch}}=7.7499$ 时的 Nyquist 曲线
Fig. 4 Nyquist diagram of $N_{\text{sub}}=0.9516$ and $N_{\text{pch}}=7.7499$

3.2 30%额定负荷工况下典型回路的 Nyquist 曲线

在 30% 额定负荷工况下, 左侧墙 1 回路入口压力维持在 12.193 1 MPa, 此时将入口节流系数设为 0.5。当入口焓为 1 341.435 kJ/kg、质量流量为 722.834 kg/(m²·s)、热流密度降至 20.01 kW/m² 时, 测得无量纲入口过冷度 $N_{\text{sub}}=0.9557$, 相变数 $N_{\text{pch}}=3.8125$ 。基于 12.193 1 MPa 压力下 NIST 物性数据库的查询结果, 该压力对应的饱和水温度为 325.90 °C。采用频率域分析方法, 进一步验证 30% 额定负荷工况下前墙回路的流动稳定性。当入口过冷度保持恒定时, 增加热流密度会改变系统的稳定特性。如图 5 所示, 当热流密度增至 26.38 kW/m², $N_{\text{pch}}=5.0287$, Nyquist 曲线通过坐标原点, 表明流动处于临界稳定状态。此时, 若继续增加热流密度至 30.12 kW/m², $N_{\text{pch}}=5.7188$, Nyquist 曲线将原点包围, 系统进入不稳定状态。

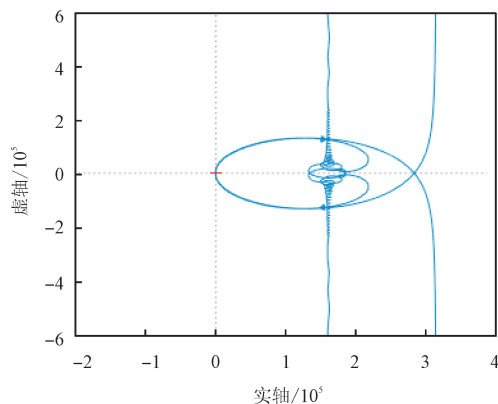


图 5 $N_{\text{sub}}=0.9557$ 和 $N_{\text{pch}}=5.0287$ 时的 Nyquist 曲线
Fig. 5 Nyquist diagram of $N_{\text{sub}}=0.9557$ and $N_{\text{pch}}=5.0287$

4 超灵活锅炉的动态特性分析

4.1 模型预测

将数学模型计算结果与杜晓成等^[8]的实验结果进行对比,保持工况参数相同:管长为2 m,压力为26.0 MPa,入口焓为1 443.74 kJ/kg,质量流速为660 kg/(m²·s),热流密度为240 kW/m²。当热流密度增至290 kW/m²,即变化20%后,出口焓预测曲线与实验数据吻合,如图6所示。由图可见,计算结果与实验结果的相对误差小于8%,趋势一致,表明模型准确可靠,适用于水冷壁动态特性研究。

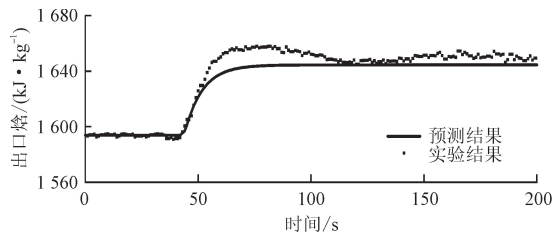


图6 热流密度为290 kW/m²时出口焓预测结果和实验结果的对比

Fig. 6 Comparison between predicted and experimental results of outlet enthalpy at a heat flux density of 290 kW/m²

4.2 压力对动态特性的影响

在分析75%额定负荷水冷壁管道的动态特性时,选择水冷壁热流密度最大且管道最长的第1回路作为研究对象。回路入口压力为21 MPa,入口热流密度为80 kW/m²,入口焓为1 535 kJ/kg,管道计算长度为187 m,管道倾角为14°。为简化计算结果,突出参数的变化趋势、变化幅值和响应时间,下文均将出口焓及出口质量流量作无量纲化处理。

图7揭示了不同压力对热流密度扰动响应的调控作用。由图可见,当压力在13~21 MPa变化时,较高压力工况下焓变化更为平缓,这源于比定压热

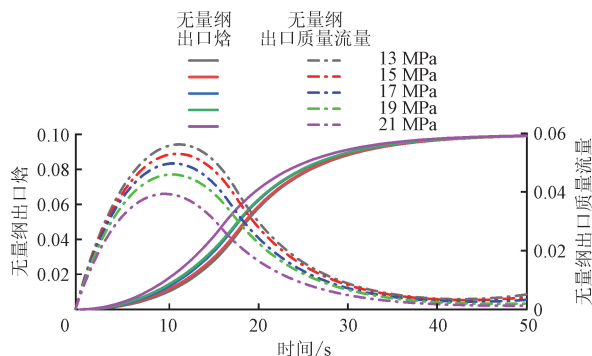


图7 热流密度扰动条件下压力对动态特性的影响

Fig. 7 Effect of pressure on dynamics under heat flux disturbance

容与压力的负相关特性:压力提升导致比定压热容减小,相同温升对应的焓变降低。对于质量流量响应,高压工况显著抑制了扰动幅值,其机理在于工质比热容的压力依赖性:压力升高使得单位温升引起的比体积增大幅度降低,热膨胀效应减弱,从而降低了对进出口流体的排挤作用。值得注意的是,管壁热惯性使得在10%热流密度阶跃条件下,压力变化对响应时间参数的影响相对有限,出口参数变化量不超过10%且在50 s内均能恢复至稳态。

图8给出了入口焓扰动条件下压力对动态特性的影响规律。由图可见,入口焓阶跃增加,工质比热容瞬时增大产生体积膨胀,推动管内流体加速向出口移动,导致出口质量流量增大。由于热流密度保持恒定,出口焓在初始阶段呈下降趋势,高焓工质到达引发出出口参数显著变化,即焓急剧上升而流量快速下降,随后在调节机制作用下于20 s内回归稳态。随着系统压力的升高,工质的物性参数变化梯度显著减小,比定压热容和比热容降低,动态过程中出口焓与质量流量的波动幅值呈衰减现象。

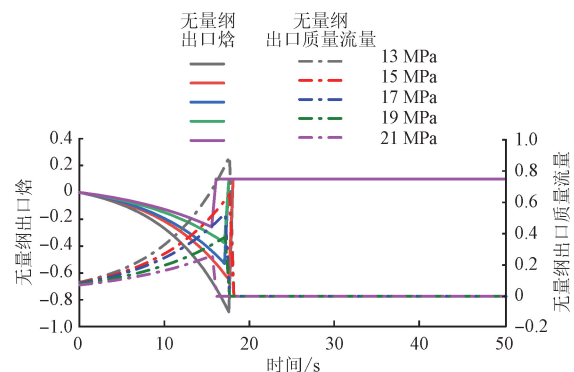


图8 入口焓扰动条件下压力对动态特性的影响

Fig. 8 Effect of pressure on dynamics under inlet enthalpy disturbance

入口质量流量扰动条件下压力对动态特性的影响如图9所示。由图可见,与其他参数扰动不同,流量变化引发的响应最为迅速,几乎不存在时间延迟,其变化过程可分为初始阶跃突变、渐进上升阶段和最终稳态平衡3个阶段。在热流密度恒定的约束条件下,出口焓呈单调递减,其变化幅值与质量流量的增量严格满足能量守恒关系,出口参数在20 s内恢复至稳态且最大变化幅值不超过10%。由图9还可以看出,系统响应时间与操作压力呈正相关,其物理机制在于高压条件下工质比热容降低导致物性变化速率减小。这种物性变化延缓了进口扰动向出口的传递过程,从而延长了动态响应时间。

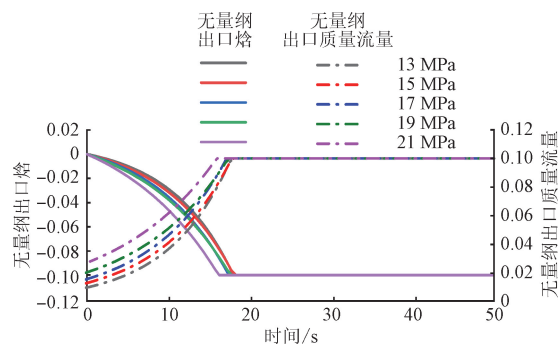


图9 入口质量流量扰动条件下压力对动态特性的影响

Fig. 9 Effect of pressure on dynamics under inlet mass flow disturbance

图10展示了出口压力阶跃增加触发的动态过程。由图可见,压力突升导致出口焓瞬时跃增,引发质量流量骤降,随后质量流量逐步回升促使焓递减。在压力扰动作用下,工质物性参数发生改变,部分热量被管壁暂存,从而造成无量纲焓瞬时呈负向波动。在恒定入口质量流量和热流密度条件下,系统经过动态调整后焓最终恢复至稳态水平。

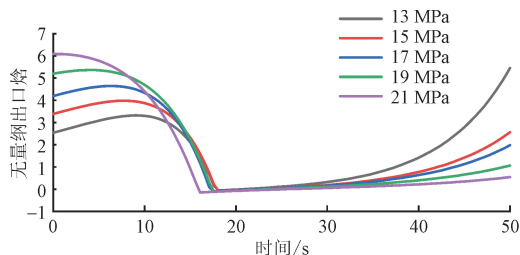


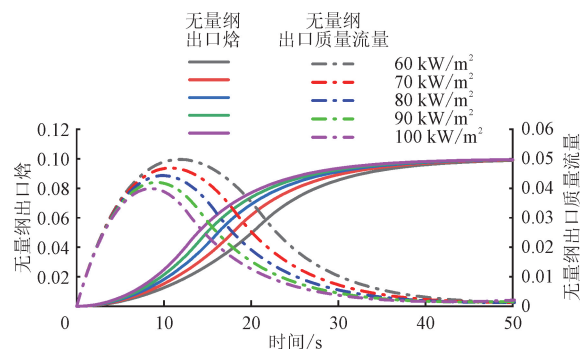
图10 出口压力扰动条件下压力对动态特性的影响

Fig. 10 Effect of pressure on dynamics under outlet pressure disturbance

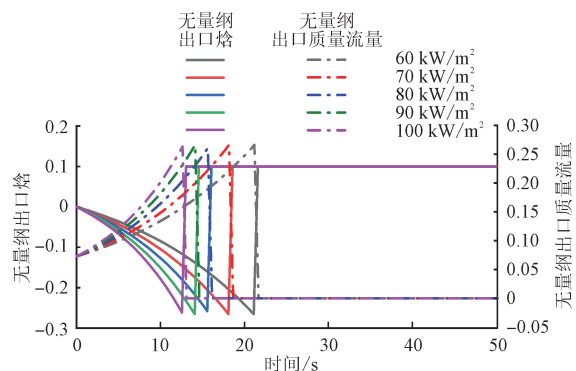
4.3 热流密度对动态特性的影响

不同扰动条件下热流密度对动态特性的影响如图11所示。由图可见,随着热流密度增加,工质物性参数性能提升,使得扰动传播速度加快,响应时间相应减少,比热容增大,任何参数变化都能更快地传递到出口位置,从而缩短了扰动传播所需的时间。图11(a)表明,随着热流密度增加,出口质量流量在热流密度扰动下的波动幅度更为明显。这主要源于两个因素:一是较高的热流密度使得温度、压力等工质参数升高,系统对扰动更加敏感导致质量流量的波动加剧;二是在相同扰动幅度下,热流密度越大,其实际变化量也越大,进一步放大了出口质量流量的波动,出口焓在50 s内恢复至稳态且最大变化幅值不超过10%。图11(b)和图11(c)表明,相较于低负荷工况,高负荷条件下入口焓扰动和入口质量

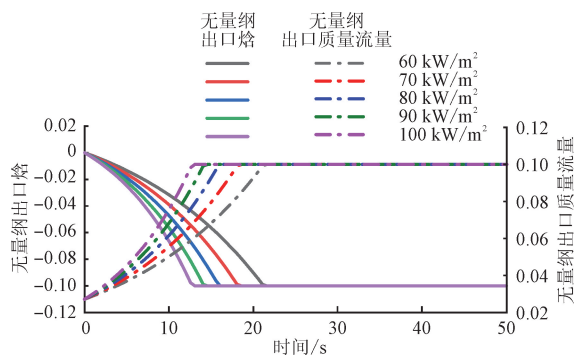
流量扰动会引起更快的出口焓波动和质量流量变化。高热流密度条件下,工质热力学参数性能提升,系统对扰动的敏感性增强。如图11(d)所示,随着热流密度提升,相同的出口压力扰动所产生的焓波动呈现衰减趋势。这一现象可能与压力扰动时的工



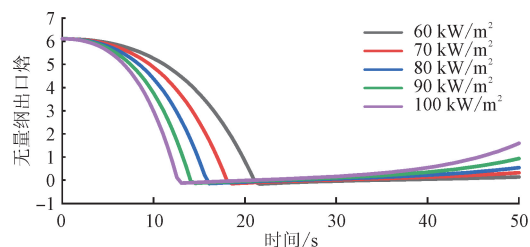
(a) 热流密度扰动



(b) 入口焓扰动



(c) 入口质量流量扰动



(d) 出口压力扰动

图11 不同扰动条件下热流密度对动态特性的影响

Fig. 11 Effect of heat flux on dynamics under different disturbance conditions

质状态有关。与低负荷工况相比,高负荷条件下增大的焓差和提升的基准值共同作用,显著降低了无量纲焓的相对变化幅度。

4.4 入口焓对动态特性的影响

图 12 给出了不同扰动条件下入口焓对系统动态特性的影响。

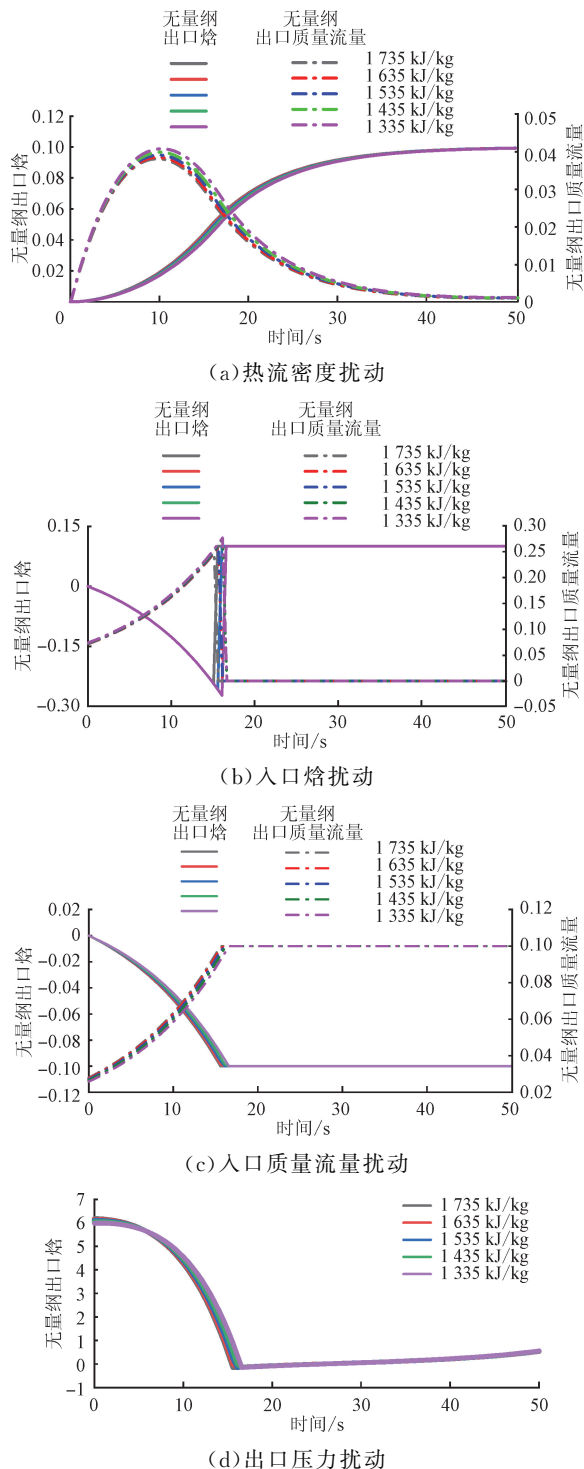


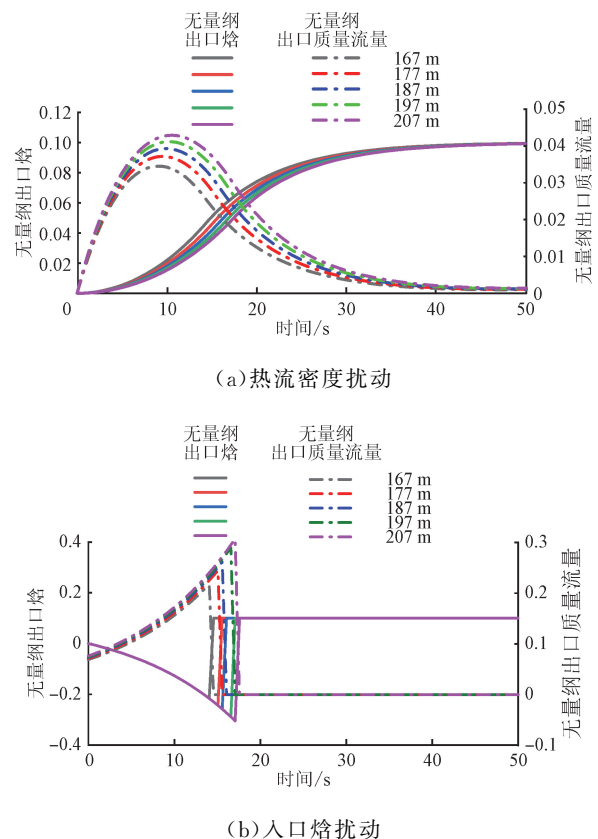
图 12 不同扰动条件下入口焓对动态特性的影响

Fig. 12 Effect of inlet enthalpy on dynamics under different disturbance conditions

由图可见,随着入口焓增加,系统对扰动的响应时间呈减小趋势。图 12(a)显示,入口焓的降低会提升系统对热流密度扰动的敏感性,具体表现为出口质量流量的波动幅度增大。该现象的本质在于较低的入口焓工况下,热流密度扰动导致的工质状态参数变化更为剧烈,产生更强的进出口流量抑制作用,导致出口流量波动幅值增大,此扰动时间不超过 50 s 且最大变化幅值不超过 10%。图 12(b)和 12(c)结果显示,随着入口焓增加,出口焓和质量流量的扰动幅值先上升后下降。图 12(d)表明,在出口压力扰动工况下,较小的入口焓会导致较大的出口焓波动。这是因为低焓工况下,工质比热容较大,在相同压力扰动下会产生更显著的质量流量变化,在恒定热流密度条件下这种变化会直接反映为出口焓的更大波动,扰动时间在 20 s 以内。

4.5 管道长度对动态特性的影响

图 13 给出了不同扰动条件下管道长度对动态特性的影响。从图 13(a)可以看出,管道长度与出口质量流量的扰动幅度呈正相关。在固定热流密度工况下,管段长度增加使得出口工质能够获得更高的焓和更大的比热容。当系统受到热流密度扰动时,这种物性变化会加剧工质的膨胀效应,表现为质量流量波动的显著增强。图 13(b)表明,管道长度与



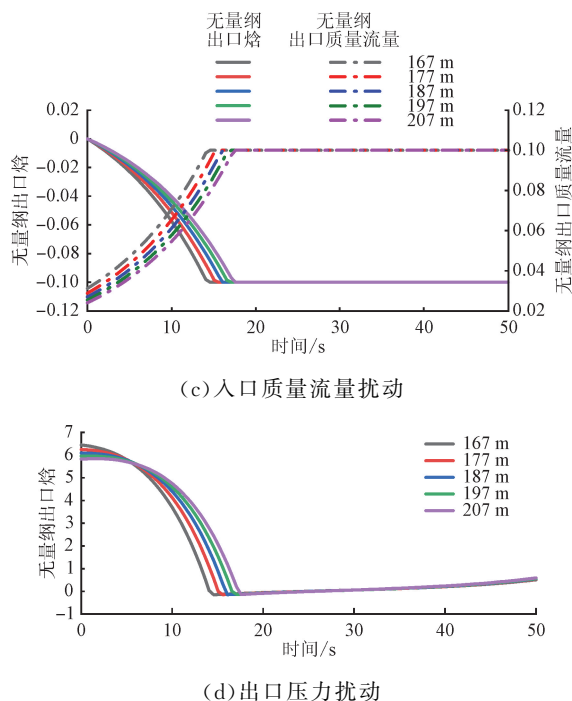


图13 不同扰动条件下管道长度对动态特性的影响

Fig.13 Effect of tube length on dynamics under different disturbance conditions

系统动态响应特性存在显著相关性,即入口焓的阶跃变化会引发比热容的突变,促使工质向出口方向加速流动。随着管段长度的增加,工质膨胀程度更大,入口焓扰动引起的出口参数变化更为显著。图13(c)的结果表明,管道长度与出口流量的初始响应幅度存在负相关,其长度增加会衰减入口流量扰动的传播效应,从而降低出口质量流量的瞬态响应强度。图13(d)揭示了管道长度对压力扰动响应的影响,即长管段在恒定热流密度下会产生更大的进出口焓差。这使得当系统受到相同压力扰动时,由于初始焓较大,经过无量纲化处理后出口焓的相对变化幅度会呈现减小趋势。

4.6 管道倾角对动态特性的影响

图14给出了不同扰动条件下管道倾角对动态特性的影响。图14(a)~14(c)的计算结果表明,倾角越大,两相区的气泡分布和流速分布越均匀,扰动越小且扰动越快恢复平稳,恢复平稳所需时间不超过50 s,阶跃幅度不超过10%。图15(d)表明,在出口压力发生阶跃时,管道倾斜角度越大,出口焓扰动越剧烈,此时重位压降的影响占主导地位,系统稳定性变差,但在随后一段时间内可逐渐恢复平稳。由此可知,倾斜角度的变化对流动稳定性的影响具有双重作用。

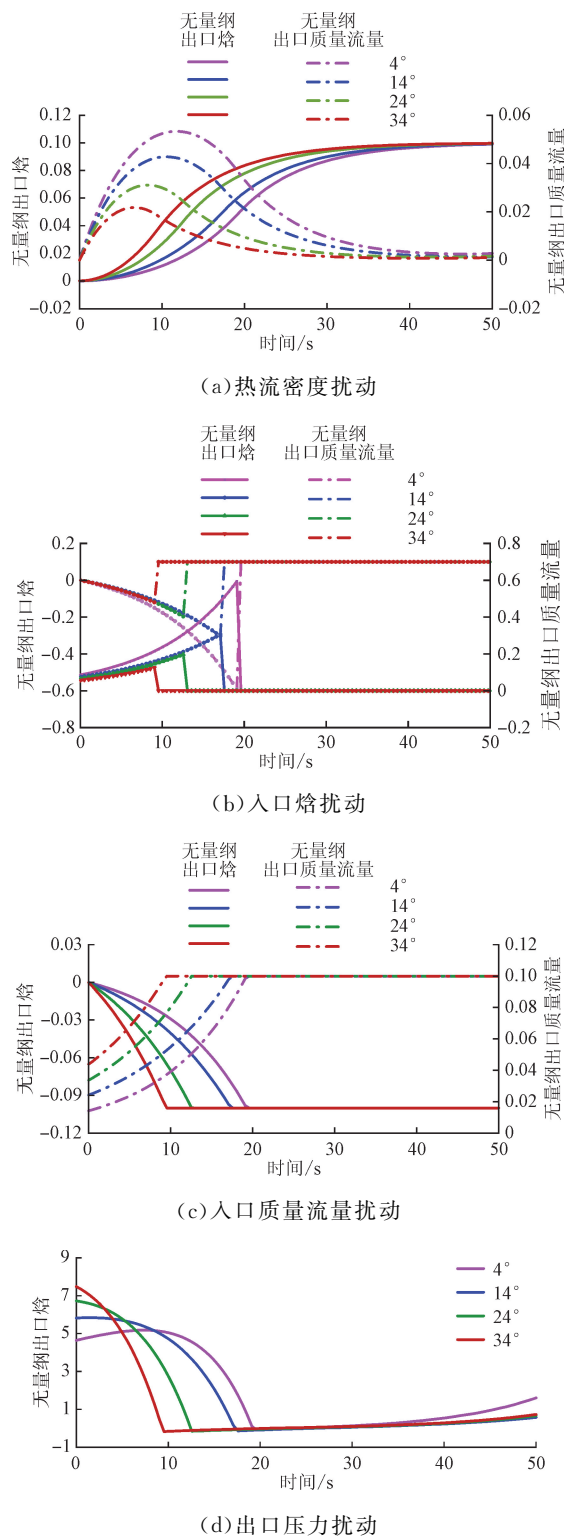


图14 不同扰动条件下管道倾角对动态特性的影响

Fig.14 Effect of pipe inclination angle on dynamics under different disturbance conditions

5 结论

本文以某350 MW超灵活塔式超临界煤粉锅

炉为研究对象,采用频域分析方法,构造了一种适用于多种运行状况的一维单通道水动力数值计算模型,系统分析了锅炉水冷壁在低负荷运行时的两相流稳定性问题,重点考察了不同锅炉水冷壁运行参数对流动不稳定性的作用机制,得到如下主要结论。

(1)75%额定负荷和30%额定负荷工况下,左墙1回路的临界热流密度分别为194.90、26.38 kW/m²。深度调峰运行工况分析表明,锅炉水冷壁系统在各运行点均维持稳定状态,且具有显著的安全裕度。

(2)热流密度扰动工况下,压力、入口焓和入口流量阶跃提升10%可抑制出口流量波动,而热流密度增加和管段延长则会放大该波动,热流密度阶跃造成的出口参数变化可在50 s内恢复至稳态。入口焓阶跃分析显示,高压大流量工况下出口参数变化较小,但受热流密度和管道长度影响显著,且呈现非线性响应特性;质量流量阶跃主要导致出口焓初始突变;出口压力阶跃在高压大流量时引发更明显的焓变化;倾斜角度越大,阶跃扰动会越快恢复稳定。入口焓等阶跃扰动造成的出口参数变化可在20 s内恢复至稳态,且最大变化范围不超过10%。入口焓阶跃导致出口焓最大变化幅值达到30%,但热流密度具有足够的安全裕度,仍能保证锅炉水冷壁安全运行。

由于在超灵活锅炉水冷壁动态特性的计算当中,过程相对简化,假设条件与实际情况有所偏差,因此该模型只能对实际运行的锅炉控制提供理论参考。在今后的工作中,可以 Aspen 建模平台或 MATLAB 的 Simulink 平台为基础,建立整个电厂的动态仿真模型,分析多参数扰动对不同位置工质参数的影响。

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)[2025-03-15]. <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性试验与理论计算 [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] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 侯素霞, 赵福宇, 刘成. 频域法分析两相流动不稳定性 [C]//中国核学会 2007 年学术年会论文汇编. 北京:

- 中国核学会, 2007: 29.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李维腾, 郭泽瑞, 韩磊, 等. 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 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 68-77.
- LI Weiteng, GUO Zerui, HAN Lei, et al. Calculation and analysis of flow instability characteristics in water wall of supercritical circulating fluidized bed boiler during deep peak shaving [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 68-77.
- [18] 王芊. 垂直上升管内汽液两相流不稳定性实验研究与数值计算 [D]. 西安: 西安交通大学, 1988.
- [19] 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.
- [20] ZHAO Jiyun. Stability analysis of supercritical water cooled reactors [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [21] 辛亚飞, 聂超, 毕凌峰, 等. 倾斜管内汽水两相流动不稳定特性的数值分析 [J]. 电力科技与环保, 2022, 38(3): 195-201.
- XIN Yafei, NIE Chao, BI Lingfeng, et al. Numerical analysis of unstable characteristics of steam-water two-phase flow in inclined pipe [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(3): 195-201.
- [22] 王志勇, 李维腾, 堵根旺, 等. 自然循环锅炉深度调峰时水冷壁汽水两相流动不稳定特性计算及安全分析 [J]. 热力发电, 2024, 53(11): 119-129.
- WANG Zhiyong, LI Weiteng, DU Genwang, et al. Calculation and safety analysis of unstable characteristics of vapor-liquid two-phase flow in water wall during deep peak shaving of natural circulation boiler [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 119-129.
- [23] 毕凌峰, 杜晓成, 张西容, 等. 基于频域法的超超临界锅炉水冷壁动态特性模型验证及计算分析 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(12): 1557-1566.
- BI Lingfeng, DU Xiaocheng, ZHANG Xirong, et al. Model verification and calculation analysis of dynamic characteristics of water wall of ultra-supercritical boiler based on frequency domain method [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(12): 1557-1566.
- [24] 茆凯源, 聂鑫, 谢海燕, 等. 超超临界 1 000 MW 二次再热机组锅炉水动力及流动不稳定性计算分析 [J]. 热力发电, 2017, 46(8): 36-41.
- MAO Kaiyuan, NIE Xin, XIE Haiyan, et al. Computational analysis on hydrodynamic characteristics and flow instability of an ultra supercritical 1 000 MW double-reheat unit boiler [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 36-41.
- [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.

(编辑 李慧敏)