文章编号:1674-7607(2026)01-0001-09 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240620

# 超超临界锅炉水冷壁动态响应特性仿真研究

王登亮[1], 陈 禄[1,2], 景 浩[1], 崔志鹏[1], 陈伟雄[1]
(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. 中国能源建设集团科技发展有限公司,天津 300000)

**摘 要**:为研究超超临界锅炉水冷壁的动态特性,在沿高度方向热负荷分布不均的情况下,建立了某1 100 MW超超临界锅炉水冷壁的动态仿真模型,通过模拟得出了沿高度方向水冷壁的工质温度和金属壁温分布,分析了在水冷壁入口流量阶跃扰动时工质主要热力参数和壁温的动态响应特性。结果表明:50%THA(汽轮机热耗率验收)工况下,37.5 m高度处工质干度达到0.994,内壁面温度最高达到466.1 ℃;30%THA下,42.0 m高度处内壁面的峰值温度达到375.3 ℃;流量阶跃量越大,动态响应时间越长,同时会加剧传热恶化,蒸干区域的壁温升高;50%THA下,流量阶跃降低5.0%后,36.0 m高度处壁面温度最高会达到547.9 ℃,未发生超温现象;在流动稳定后,相较于设计流量,当流量分别阶跃降低2.5%和5.0%时,在50%THA下34.5 m高度处,内壁面温度分别提高5.6和17.2 K。

**关键词**:超超临界锅炉;动态响应特性;金属壁温;水冷壁
**中图分类号**:TK223.3 **文献标志码**:A **学科分类号**:470.10

# Simulation Study on Dynamic Response Characteristics of Cooling Wall in Ultra-supercritical Boiler

*WANG Dengliang*[1], *CHEN Lu*[1,2], *JING Hao*[1], *CUI Zhipeng*[1], *CHEN Weixiong*[1]
(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. China Energy Engineering Group Science and Technology Develop Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

**Abstract**: In order to study the dynamic characteristics of the cooling wall in the ultra-supercritical boiler, a dynamic simulation model of the cooling wall in a 1 100 MW ultra-supercritical boiler was established under the condition that the heat load distribution along the height of the cooling wall was uneven. The distribution of the working fluid temperature and the metal wall temperature along the height of the cooling wall were simulated. The dynamic response characteristics of the main thermodynamic parameters of the working fluid and the metal wall temperature were analyzed when the flow rate at the cooling wall inlet was step-disturbed. Results show that under the design condition of 50%THA(turbine heat acceptance), the dryness of the working fluid at the height of 37.5 m in the cooling wall reaches 0.994, and the inner wall temperature reaches up to 466.1 ℃. At 30%THA, the peak temperature of the inner wall at 42.0 m

**收稿日期**:2024-10-05 **修订日期**:2024-10-24
**基金项目**:国家重点研发计划项目(2022YFB4100400)
**作者简介**:王登亮(1997—),男,山西朔州人,博士研究生,研究方向为燃煤发电热力系统瞬态过程灵活与安全性分析。
陈伟雄(通信作者),男,教授,博士,E-mail:chenweixiong@mail.xjtu.edu.cn。

reaches 375.3 ℃. The larger the flow steps, the longer the dynamic response time is, the heat transfer deterioration is aggravated, and the wall temperature in the evaporation and drying region increases. At 50%THA, after the flow step is reduced by 5.0%, the wall temperature at 36.0 m reaches 547.9 ℃ in this process, and no overheating occurs. After the flow stability, compared with the design flow, when the flow step is reduced by 2.5% and 5.0%, the inner wall temperature at 50%THA and 34.5 m will be increased by 5.6 and 17.2 K respectively.

Key words: ultra-supercritical boiler; dynamic response characteristic; metal wall temperature; cooling wall

为了实现“双碳”目标，我国正在构建以风电和光伏为代表的新型电力系统，但可再生能源发电固有的间歇性和随机性会严重影响电网的安全、稳定运行[1-2]。截至 2023 年，虽然煤电装机量占比降至 39.9%，但燃煤发电机组的发电量在总发电量中占比接近六成，且燃煤机组承担了 70%的调峰任务，即要求燃煤机组持续在低负荷下运行以及有更高的变负荷速率[3]。

锅炉是燃煤发电系统中最关键的设备之一。根据调查数据，火力发电厂 80%的强制停机与炉膛内管道故障有关，其中 40%的事故是由水冷壁爆管引起的[4]。在机组低负荷运行期间，由于水冷壁内流量分配不均、流速下降和运行压力降低，金属管壁容易超温甚至爆管[5]，进而影响水冷壁的安全运行。因此，保证水冷壁安全、稳定运行是燃煤发电机组能够深度调峰、可靠运行的关键[6-7]。

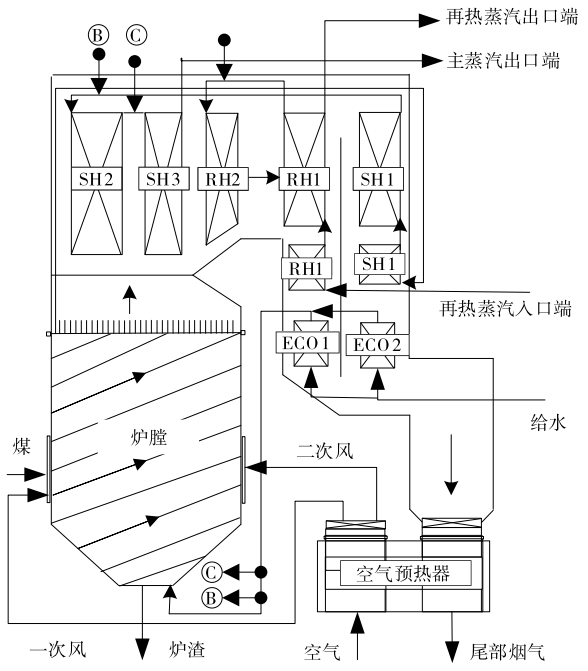
水动力特性是锅炉设计和运行的关键技术之一，精准的水动力计算和分析是锅炉安全运行的重要保证。目前已有很多学者对锅炉水动力特性展开了大量研究，并取得了一定的进展。Pan 等[8]基于水冷壁流动网络的质量、动量和能量守恒，提出了一种适用于超临界直流锅炉的非线性水动力计算模型，该模型已成功应用于 600 MW 超临界循环流化床锅炉的热工水力计算。吴鹏举等[9]以某超临界 660 MW 机组为研究对象，其水冷壁由内螺纹螺旋管圈构成，通过现场试验和仿真模拟发现，该锅炉在 20%BMCR(BMCR 表示锅炉最大连续蒸发量)时可以保证水动力安全。万李等[10]经模拟得出了 700 ℃超超临界锅炉分别在 100%BMCR、50%BMCR 和 30%BMCR 时的压降、流量以及沿水冷壁高度方向的工质温度和管壁温度分布，其中管壁温度满足锅炉设计要求，证明该水冷壁设计合理。Dong 等[11]提出了一种结合炉内燃烧和水冷壁换热的耦合传热模型，并利用该模型针对 1 000 MW 二次再热超临界锅炉螺旋水冷壁进行模拟，得出在炉膛中间宽度处水冷壁壁温最高可达到 530 ℃，在材料允许范围内。周科等[12]分析了 30%BMCR 下某 660 MW 超临界褐煤机组的水动力参数，发现汽温偏差和最高壁温均处于合理区间，即锅炉可安全运行。庞力平等[7]研究了 660 MW 超临界机组在 100%BMCR、30%BMCR 以及提高运行压力后 30%BMCR 时水冷壁水动力参数及壁温的变化情况。然而，针对锅炉水冷壁多侧重于稳态工况下的水动力特性研究，通过计算各设计工况下水冷壁的工质温度和金属壁温，发现水冷壁可安全运行。由于对锅炉深度调峰的要求越来越高，仅从锅炉稳态工况下计算水冷壁的水动力特性远远不够，需要着重关注动态研究。

目前，在水冷壁动态特性研究方面，王超等[13]针对水冷壁建立了动态仿真模型，比较了在不同边界变化下水冷壁的动态响应特性，但是在建模过程中并未考虑金属蓄热过程。雒青等[14]以单根管子代替整体受热面进行分析，将水冷壁简单分为高温段和低温段，重点关注了锅炉内各受热面的动态响应特性，但并未详细研究水冷壁的动态响应特性。为了研究在深度调峰过程中水冷壁的动态响应特性，本文以某 1 100 MW 超超临界直流锅炉为研究对象，在考虑了水冷壁沿高度方向热负荷分布不均的情况下，基于 GSE 仿真平台建立了水冷壁的一维动态仿真模型，主要研究了低负荷工况下在水冷壁入口流量阶跃扰动下工质主要热力参数和壁温的动态响应特性，以期为燃煤机组在变负荷过程中的安全运行提供理论指导。

## 1 热力系统描述

图 1 为某 1 100 MW 超超临界直流锅炉示意图。该锅炉采用Ⅱ型布置、单炉膛和一次中间再热。炉膛水冷壁采用焊接膜式壁、内螺纹管垂直上升式。炉膛断面尺寸为 34 220 mm×16 738 mm，水冷壁管共有 2 288 根，均采用 $\Phi$28.6 mm×5.8 mm(壁厚)四头螺纹管，管材为 15CrMoG，其许用温度为

550 ℃[15]。锅炉的主要热力参数见表 1。




注：SH—过热器；RH—再热器；ECO—省煤器；B—过热器一级减温水；C—过热器二级减温水。

图 1　1 100 MW 超超临界直流锅炉示意图

Fig. 1　Schematic diagram of 1 100 MW ultra-supercritical direct current boiler

**表 1　锅炉的主要热力参数**

**Tab. 1　Main thermodynamic parameters of the boiler**

| 参数 | 各工况下设计值 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 100%THA | 75%THA | 50%THA | 30%THA |
| 主蒸汽温度/℃ | 605 | 605 | 605 | 605 |
| 主蒸汽压力/MPa | 28.00 | 20.85 | 13.76 | 10.00 |
| 再热蒸汽温度/℃ | 623 | 623 | 613 | 603 |
| 再热蒸汽压力/MPa | 5.82 | 4.37 | 2.93 | 1.85 |
| 给水温度/℃ | 305.3 | 286.2 | 261.2 | 236.8 |
| 给水压力/MPa | 32.78 | 24.61 | 16.72 | 12.75 |

在 100%THA（THA 表示汽轮机热耗率验收）工况下，主蒸汽温度和再热蒸汽温度分别为 605 和 623 ℃，主蒸汽压力和再热蒸汽压力分别为 28.00 和 5.82 MPa。根据炉膛热平衡[16]以及文献[17]得到的超超临界锅炉分别在 100% THA、75% THA、50%THA和 30%THA 下沿炉膛高度方向的热负荷分布如图 2 所示。文献[17]中同样是以 1 000 MW 等级的超超临界 Ⅱ 型炉为研究对象，其锅炉结构与本文所使用的锅炉结构基本一致。其中水冷壁管道高度为45 m，且分为 30 个节点。沿炉膛宽度方向不均匀的热负荷分布对管壁温度的影响很小[18]，因此本文在炉膛宽度方向采用平均热负荷。

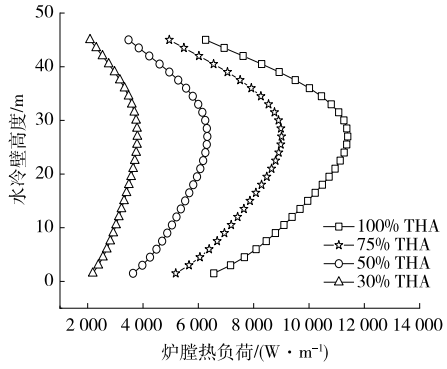



图 2　炉膛热负荷分布

Fig. 2　Distribution of furnace heat load

## 2　水冷壁系统动态模型建立与验证

### 2.1　瞬态控制方程动态模型

工程应用中水冷壁内工质流动过程是一个复杂的问题。为了简化数学模型，针对所研究的管段提出以下假设[19]：(1)采用一维模型，并考虑了工质的压缩性；(2)在锅炉低负荷运行工况下，蒸汽和水处于热力平衡状态，且被认为是一个均相模型；(3)忽略工质和金属管壁之间的轴向传热，只考虑径向传热；(4)同一截面处的工质温度和流速分布均匀，管道内无循环。

基于上述假设条件，内螺纹管内工质流动的一维动态模型[20-21]描述如下。

质量守恒方程为

$$A\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\frac{\partial q_m}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中：$\rho$ 为工质密度，kg/m$^3$；$q_m$ 为工质质量流量，kg/s；$\tau$ 为时间，s；$z$ 为沿金属管长的轴向坐标，m；$A$ 为金属管道横截面积，m$^2$。

对于单相或超临界水，内螺纹管的动量守恒方程为

$$\frac{\partial q_m}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{q_m^2}{\rho A}\right)+A\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g A\sin\theta-\frac{q_m^2}{2\rho A}\left[\frac{F}{d_{\text{in}}}+k_{\text{in}}\delta_{\text{d}}(z)+k_{\text{ex}}\delta_{\text{d}}(z-L)+k_{\text{jb}}\delta_{\text{d}}(z-z_{\text{jb}})\right] \tag{2}$$

$$F=\frac{1.979\ 12}{Re^{0.547\ 9}}+0.038\ 22 \tag{3}$$

式中：$p$ 为工质压力，MPa；$g$ 为重力加速度，m/s$^2$；$\theta$ 为流体流动方向与水平面的夹角，(°)；$F$ 为摩擦阻力系数；$d_{\text{in}}$ 为管子内径，m；$k_{\text{in}}$ 为进口阻力系数；$k_{\text{ex}}$ 为出口阻力系数；$k_{\text{jb}}$ 为弯头局部阻力系数；$\delta_{\text{d}}$ 为狄拉克函数，m$^{-1}$；$z_{\text{jb}}$ 为存在局部阻力处的局部长度，m；$L$ 为金属管总长度，m；$Re$ 为雷诺数。

对于汽液两相混合物，内螺纹管的动量守恒方

程为

$$\frac{\partial q_m}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{q_m^2}{\rho A}\right)+A\frac{\partial p}{\partial z}=-\rho g A\sin\theta-\frac{q_m^2}{2\rho A}\cdot\left[\frac{F}{d_{\mathrm{in}}}+k_{\mathrm{in}}\delta_{\mathrm{d}}(z)+k_{\mathrm{ex}}\delta_{\mathrm{d}}(z-L)+k_{\mathrm{jb}}\delta_{\mathrm{d}}(z-z_{\mathrm{jb}})\right]-\phi_{\mathrm{lo}}^2\frac{F}{d_{\mathrm{in}}}\frac{q_m^2}{2\rho_{\mathrm{f}}A} \tag{4}$$

$$\phi_{\mathrm{lo}}^2=1+\left(\frac{\rho_{\mathrm{l}}}{\rho_{\mathrm{g}}}-1\right)\left[C(x)+x^2\right] \tag{5}$$

$$C(x)=1.447\ 691\ x^{0.705\ 69}(1-x)^{0.039\ 6} \tag{6}$$

式中：$\phi_{\mathrm{lo}}^2$为汽液两相混合物的摩擦因数；$\rho_{\mathrm{f}}$为工质的密度，kg/m$^3$；$\rho_{\mathrm{l}}$为饱和水密度，kg/m$^3$；$\rho_{\mathrm{g}}$为饱和蒸汽密度，kg/m$^3$；$C(x)$为拟合系数；$x$为工质干度，kg/kg。

能量守恒方程为

$$A\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau}+\frac{\partial(q_m h)}{\partial z}=Q_l \tag{7}$$

式中：$h$为工质比焓，kJ/kg；$Q_l$为热负荷线密度，代表单位管长水冷壁的吸热量，W/m。

状态方程为

$$\rho=f(p,h) \tag{8}$$

式中：$f()$为表征密度与压力、焓值的函数关系。

金属蓄热方程为

$$Q_{\mathrm{l},1}-Q_{\mathrm{l},2}=c_{p,\mathrm{w}}\rho_{\mathrm{w}}\left(\frac{\pi d_{\mathrm{out}}^2}{4}-\frac{\pi d_{\mathrm{in}}^2}{4}\right)\frac{\partial T_{\mathrm{w}}}{\partial \tau} \tag{9}$$

式中：$\rho_{\mathrm{w}}$为管道金属密度，kg/m$^3$；$c_{p,\mathrm{w}}$为金属比热容，J/(kg·K)；$T_{\mathrm{w}}$为金属管道温度，℃；$Q_{\mathrm{l},1}$和$Q_{\mathrm{l},2}$分别为单位长度金属管壁的吸热量和放热量，W/m；$d_{\mathrm{out}}$为管道外径，m。

工质侧传热方程为

$$Q_{\mathrm{l},2}=\alpha_{\mathrm{in}}A_l(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{f}}) \tag{10}$$

式中：$T_{\mathrm{f}}$为工质温度，℃；$\alpha_{\mathrm{in}}$为工质传热系数，W/(m$^2$·K)；$A_l$为单位长度金属管壁的传热面积，m。

## 2.2 离散方法

将工质流动的通道划分为多个长度相等的控制体。图 3 为控制体同位网格划分示意图，其中：$i$为第$i$个控制体；$n$为第$n$个控制体。将控制体划分为同位网格，并将管道内工质热力参数(如压力、焓、密度、质量流量等)均内置于控制体中心。

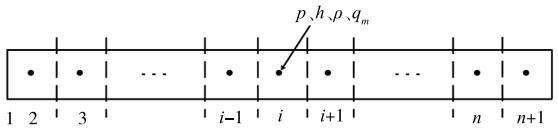



图 3 控制体同位网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of homogeneous meshing of the governing body

将上述瞬态控制方程采用显示差分方式进行离散，得出下述瞬态离散方程。由于单相和两相的离散化方法相同，此处只需给出单相模型的方程。其中，对质量守恒方程进行离散可计算得到工质的质量流量。

$$A\frac{\rho_z^\tau-\rho_z^{\tau-1}}{\Delta\tau}+\frac{q_{m,z}^\tau-q_{m,z-1}^\tau}{\Delta z}=0 \tag{11}$$

$$q_{m,z}^\tau=-A\cdot\frac{\rho_z^\tau-\rho_z^{\tau-1}}{\Delta\tau}\Delta z+q_{m,z-1}^\tau \tag{12}$$

式中：$\Delta\tau$为时间步长，s；$\Delta z$为空间步长，m；上标$\tau$为时间变量，s，并且$\tau$表示当前时间，$\tau-1$表示前一时间；下标$z$为空间变量，m，并且$z$表示当前节点，$z-1$表示前一个节点。

将动量守恒方程进行离散后可计算得到工质压力，即

$$\frac{q_{m,z}^\tau-q_{m,z-1}^\tau}{\Delta\tau}+\frac{1}{A\Delta z}\left[\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_z^\tau-\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_{z-1}^\tau\right]+A\frac{p_z^\tau-p_{z-1}^\tau}{\Delta z}=-\rho_z^{\tau-1}gA\sin\theta-\frac{1}{2A}\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_z^{\tau-1}\cdot\left[\frac{F}{d_{\mathrm{in}}}+k_{\mathrm{in}}\delta_{\mathrm{d}}(z)+k_{\mathrm{ex}}\delta_{\mathrm{d}}(z-L)+k_{\mathrm{jb}}\delta_{\mathrm{d}}(z-z_{\mathrm{jb}})\right] \tag{13}$$

$$p_z^\tau=p_{z-1}^\tau-\frac{\Delta z}{A\Delta\tau}(q_{m,z}^{\tau-1}-q_{m,z}^\tau)-\left[\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_z^\tau-\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_{z-1}^\tau\right]\frac{1}{A^2}-\rho_z^{\tau-1}g\sin\theta\Delta z-\frac{1}{2A^2}\left(\frac{q_m^2}{\rho}\right)_z^{\tau-1}\cdot\left[\frac{F}{d_{\mathrm{in}}}+k_{\mathrm{in}}\delta_{\mathrm{d}}(z)+k_{\mathrm{ex}}\delta_{\mathrm{d}}(z-L)+k_{\mathrm{jb}}\delta_{\mathrm{d}}(z-z_{\mathrm{jb}})\right] \tag{14}$$

将能量守恒方程进行离散后计算得到工质焓，即

$$A\frac{(\rho h)_z^\tau-(\rho h)_z^{\tau-1}}{\Delta\tau}+\frac{(q_m h)_z^\tau-(q_m h)_z^{\tau-1}}{\Delta z}=Q_l \tag{15}$$

$$h_z^\tau=\frac{-A\,h_z^{\tau-1}(\rho_z^\tau-\rho_z^{\tau-1})\Delta z+A\,\rho_z^{\tau-1}h_z^{\tau-1}\Delta z}{A\rho_z^{\tau-1}\Delta z+q_{m,z}^{\tau-1}\Delta\tau}+\frac{-h_z^{\tau-1}(q_{m,z}^\tau-q_{m,z-1}^\tau)\Delta\tau+q_{m,z}^{\tau-1}h_{z-1}^\tau\Delta\tau+Q_l\Delta\tau\Delta z}{A\rho_z^{\tau-1}\Delta z+q_{m,z}^{\tau-1}\Delta\tau} \tag{16}$$

通过状态方程计算得出工质密度，即

$$\rho_z^\tau=\rho(p_z^\tau,h_z^\tau) \tag{17}$$

将金属蓄热方程进行离散计算得出金属管壁平均温度。

$$Q_{l,1}-Q_{l,2}=c_{p,\mathrm{w}}m_{\mathrm{w}}\frac{T_{\mathrm{w},z}^\tau-T_{\mathrm{w},z}^{\tau-1}}{\Delta\tau} \tag{18}$$

$$T_{\mathrm{w},z}^\tau=T_{\mathrm{w},z}^{\tau-1}+\frac{Q_{\mathrm{l},1}-Q_{\mathrm{l},2}}{c_{p,\mathrm{w}}m_{\mathrm{w}}}\Delta\tau \tag{19}$$

式中：$m_{\mathrm{w}}$为单位长度管壁质量，kg/m。

将工质侧换热方程进行离散后计算得出金属管壁的放热量。

$$Q_{l,2}=\alpha_{\mathrm{in}}A_l(T_{\mathrm{w},z}^\tau-T_{\mathrm{f},z}^\tau) \tag{20}$$

在计算得出工质温度、压力、流量等热力参数后，准确计算水冷壁的金属内外管壁温度也是至关

重要的。文献[22]中给出了考虑金属蓄热后金属内外管壁温度的计算模型。同时，超超临界直流锅炉的水冷壁涉及复杂的换热过程。文献[23]和文献[24]给出了在亚临界区、近临界区和超临界区工质的传热系数关联式，特别是蒸干（第二类传热恶化）的临界干度判断准则及蒸干后传热计算公式。

### 2.3　模型验证

所构建的超超临界燃煤机组模型已在前述工作中完成验证，其最大相对误差为−0.98%[22]。另外，沿水冷壁高度方向工质温度的模拟结果与文献[17]结果的对比如图 4 所示。为验证水冷壁模型精度，采用文献[17]中 100%THA、75%THA 和 30%THA 下水冷壁的入口工质温度和压力作为边界条件，基于本文的水冷壁模型计算出沿高度方向的工质温度，其中 30% THA 下最大相对误差为 4.2%，证明水冷壁模型的精度是足够的。

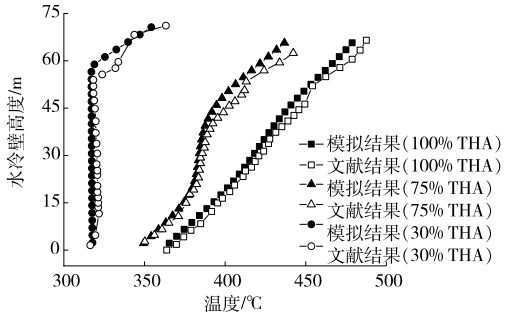


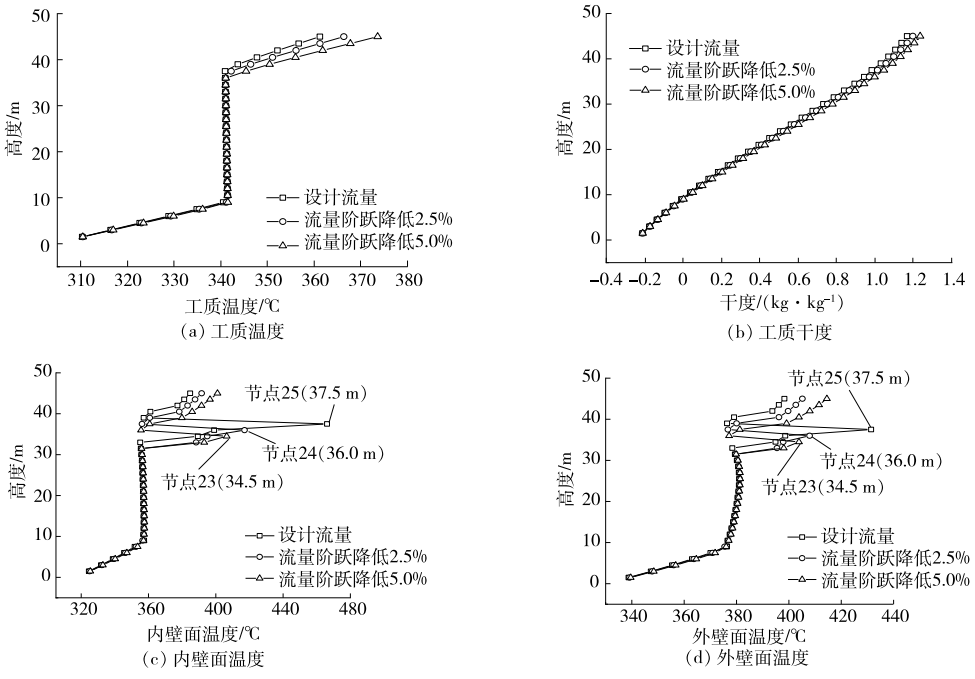

图 4　沿水冷壁高度方向工质温度模拟结果与文献结果的对比

Fig. 4　Comparison of simulation results and literature results for the working fluid temperature along the height of the cooling wall

## 3　工质流量扰动下的动态响应特性

### 3.1　50%THA

以水冷壁入口工质温度、压力以及炉膛热负荷一致作为边界条件，将水冷壁入口工质设计流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%。50%THA 下工质流量阶跃降低后工质热力参数和金属管道温度分布如图 5 所示。工质流量下降对过冷水区的工质温度和壁温的影响很小，但是会加速工质由汽液两相混合物转化为过热蒸汽。其中，在设计流量下处于水冷壁 37.5 m 高度处的工质仍为两相区，而在流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%后，该位置的工质均已转变为过热蒸汽。相较于设计流量，水冷壁入口流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，水冷壁出口蒸汽温度分别提高 6.9 和 16.3 K。在热负荷较低且工质干度较高时，由于该处壁面液膜蒸干，与蒸汽接触而得不到液体冷却，导致传热系数明显下降，壁温升高，这被称为蒸干（第二类传热恶化）[25-26]。在蒸干区域，由于壁温周期间歇性波动以及管壁中存在大量的金属储热，内壁面温度的波动幅度要高于外壁面温度的波动幅度，这导致管壁与蒸汽直接接触时内壁面温度会高于外壁面温度。蒸干区域处的壁面温度受流量变化影响较大。对于管壁的同一位置（例如 36.0 m 高度处），相较于设计流量，流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，内壁面温度分别提高 5.6 和 17.5 K。在 37.5 m 高度处，在设计流量时工质干度达到 0.994，因此内壁面温度会达到 466.1 ℃。




(a) 工质温度　(b) 工质干度　(c) 内壁面温度　(d) 外壁面温度

图 5　50%THA 下工质流量阶跃降低后工质热力参数和金属管道温度分布

Fig. 5　Distribution of thermal parameters of working fluid and metal pipe temperature after the step decrease of flow rate at 50%THA

50%THA 下工质流量阶跃降低后水冷壁蒸干区域的干度和内壁面温度的动态特性如图 6 所示。50%THA 下，蒸干区域基本位于水冷壁 34.5～37.5 m 高度处。随着入口流量阶跃降低，工质干度迅速上升。蒸干区域的内壁面温度大幅提高，同时由于发生传热恶化时，部分液膜虽已撕破，但壁面仍有残余的少许液体流动，可使得壁面轮番与蒸汽和残余液流接触，造成壁温周期性波动[26]。流量阶跃量越大，动态响应时间越长，其中流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，动态响应时间分别为 39 和 52 s。在 34.5 m 高度处，相较于设计流量，流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，壁温分别提高 5.6 和 17.2 K。在 36.0 m 高度处，流量阶跃降低 5.0%时，工质由汽液混合物转换为过热蒸汽，而且干度提高会导致壁温急剧飞升，最高会达到 547.9 ℃，然后稳定在 354.0 ℃，这一过程中并未发生超温现象。在 37.5 m 高度处，流量阶跃降低 2.5%也会使工质变为过热蒸汽。同样地，这一过程中壁温会急剧升高，最高可达 523.9 ℃，最后稳定在 353.3 ℃，该过程中也未发生超温现象。

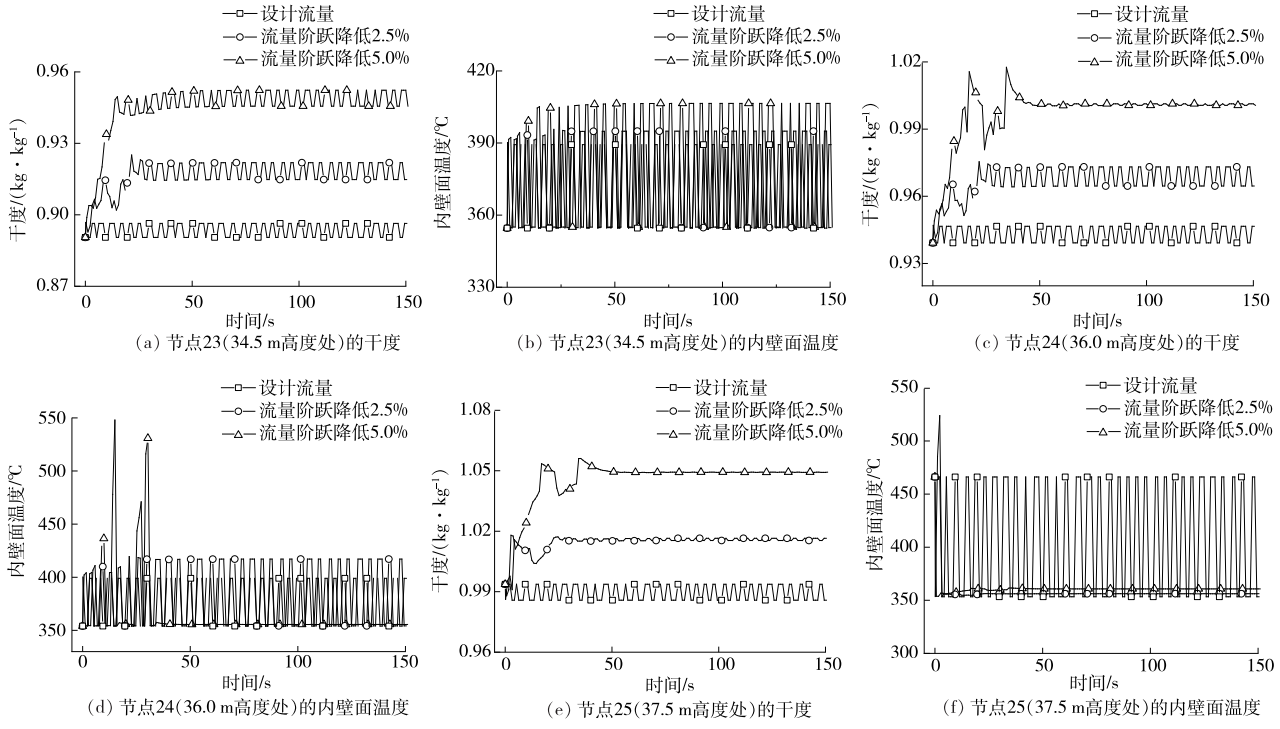



图 6 50%THA 下工质流量阶跃降低时蒸干区域干度和内壁面温度的动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of dryness and inner wall temperature in the evaporation and drying region for the step decrease in the working fluid flow rate at 50%THA

### 3.2 30%THA

30%THA 下工质流量阶跃降低时工质热力参数和金属管道温度分布如图 7 所示。30%THA 下工质温度和壁温分布与 50%THA 相似。但是相较于 50%THA，30%THA 下汽液两相区域变长，在 6.0 m 高度处过冷水被加热为汽液混合物，在 42.0 m 高度处汽液混合物被加热为过热蒸汽，蒸干区域上移到 42.0 m 高度处。两相区域内汽液混合物的传热系数较高，因此内壁面温度变化较小，而外壁面温度先升高再降低，这是由于炉膛热负荷在 27.0 m 高度处达到最高值。相较于设计流量，水冷壁入口流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，出口蒸汽温度分别提高 6.4 和 14.1 K。在设计流量、流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时，蒸干区域内壁面的峰值温度分别为 375.3、407.3 和 412.4 ℃。

30%THA 下工质流量阶跃降低后蒸干区域的干度和内壁面温度的动态特性如图 8 所示。与 50%THA 相似，30%THA 下流量阶跃越大，动态响应时间越长，其中流量阶跃降低 2.5%和 5.0%时，动态响应时间分别为 44 和 57 s。在 39.0 和 40.5 m 高度处，流量阶跃降低 5.0%时，工质干度会提高，且均会超过临界干度，从而发生第二类传热恶化；而流量阶跃降低 2.5%时，未发生第二类传热恶化。在 42.0 m 高度处，流量阶跃降低 5.0%时，工质由汽液混合物转换为过热蒸汽，其中工质干度继续提高会导致壁温急剧飞升，壁温最高可达 481.3 ℃，最后稳定在 329.7 ℃。在设计流量和流量阶跃降低 2.5%时，工质干度均超过临界干度，出现蒸干

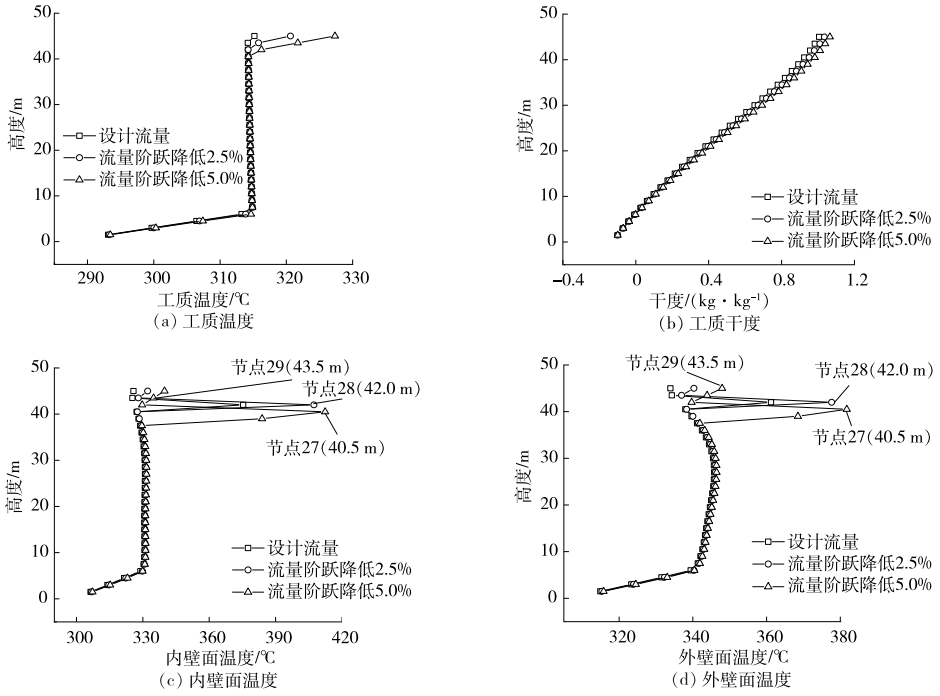



图 7　30%THA 下工质流量阶跃降低后工质热力参数和金属管道温度分布

Fig. 7　Distribution of thermal parameters of working fluid and metal pipe temperature after the step decrease of flow rate at 30%THA

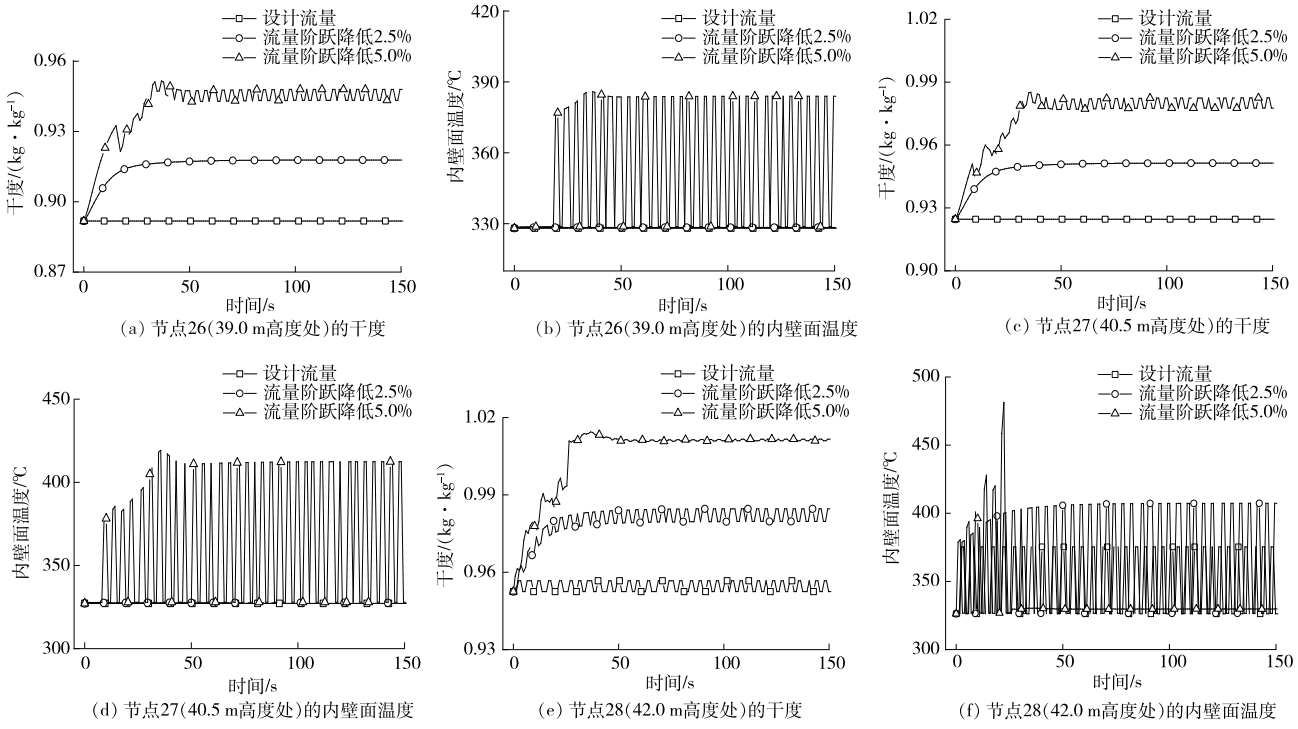



图 8　30%THA 下工质流量阶跃降低时蒸干区域干度和内壁面温度的动态特性

Fig. 8　Dynamic characteristics of dryness and inner wall temperature in the evaporation and drying region for the step decrease in the working fluid flow rate at 30%THA

现象，壁温会间歇波动；而且流量阶跃降低 2.5% 时，壁温要比在设计流量时高 30.7 K。

## 4　结论

(1) 50%THA 下，水冷壁 37.5 m 高度处的内壁面温度处于峰值，达到 466.1 ℃，同时工质干度达到 0.994。30%THA 下，42.0 m 高度处的内壁面峰值温度达到 375.3 ℃。可以看出，随着锅炉负荷下降，水冷壁的两相区变长，蒸干区域位置也向水冷壁出口方向移动。

(2) 随着水冷壁内工质流量阶跃量增大,动态响应时间变长。50%THA 下流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时,动态响应时间分别为 39 和 52 s。30%THA 下流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时,动态响应时间分别为 44 和 57 s。

(3) 水冷壁内流量阶跃下降会加剧传热恶化,使蒸干区域的壁温急剧升高,但最后会将高干度工质加热为过热蒸汽,壁温随之下降后趋于稳定。50%THA 下流量阶跃降低 5.0%时,该过程中 36.0 m 高度处的壁温最高会达到 547.9 ℃,最后稳定在 354.0 ℃,且并未发生超温现象。

(4) 在流动稳定后,50%THA 下在 34.5 m 高度处,相较于设计流量,流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时,内壁面温度分别提高 5.6 和 17.2 K。30% THA 下,在设计流量、流量分别阶跃降低 2.5%和 5.0%时,蒸干区域处内壁面的峰值温度分别为 375.3、407.3 和 412.4 ℃,且未出现超温现象。

**参考文献:**


[1] 袁荣胜,俞聪,刘明,等. 燃煤机组调峰运行的碳经济性分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1033-1041.
YUAN Rongsheng, YU Cong, LIU Ming, et al. Carbon economic analysis of peak shaving operation of coal-fired unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1033-1041.

[2] 刘吉臻,李云鹭,宋子秋,等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 993-1004.
LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 993-1004.

[3] 赵永亮,许朋江,居文平,等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2099.
ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2099.

[4] 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.

[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] TANG Guoli, ZHANG Man, GU Junping, et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis on evaporator system of a 660 MWe ultra-supercritical CFB boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151: 385-393.

[7] 庞力平,袁虎,丘文生,等. 深度调峰锅炉水动力特性分析[J]. 化工进展, 2023, 42(4): 1708-1718.
PANG Liping, YUAN Hu, QIU Wensheng, et al. Hydrodynamic characteristics during peaking operation in utility boiler[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(4): 1708-1718.

[8] PAN Jie, WU Gang, YANG Dong. Thermal-hydraulic calculation and analysis on water wall system of 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 82: 225-236.

[9] 吴鹏举,朱超,万李,等. 超临界机组锅炉 20%负荷深度调峰水动力实炉试验研究[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 59-66.
WU Pengju, ZHU Chao, WAN Li, et al. Actual furnace test research on hydrodynamics of a supercritical boiler at 20% deep peak load[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 59-66.

[10] 万李,朱超,吴鹏举,等. 700 ℃超超临界对冲燃烧螺旋管圈锅炉水动力计算与壁温安全性分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(12): 949-957.
WAN Li, ZHU Chao, WU Pengju, et al. Hydrodynamic calculation and wall temperature safety analysis of a 700 ℃ ultra supercritical opposed firing boiler with spiral tubes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(12): 949-957.

[11] DONG Jiancong, ZHOU Tuo, WU Xiaojiang, et al. Coupled heat transfer simulation of the spiral water wall in a double reheat ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Thermal Science, 2018, 27(6): 592-601.

[12] 周科,何敏强,牛田田,等. 超临界 660 MW 褐煤锅炉深度调峰负荷水动力特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 88-95.
ZHOU Ke, HE Minqiang, NIU Tiantian, et al. Research on hydrodynamic characteristics at deep peak load regulation of 660 MW supercritical lignite boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 88-95.

[13] 王超,王研凯,陈相如,等. 660 MW 超临界直流锅炉水冷壁动态特性仿真研究[J]. 动力工程学报,

2024，44(7)：1001-1009.
WANG Chao，WANG Yankai，CHEN Xiangru，et al. Simulation study on dynamic characteristics of water-cooled wall of a 660 MW supercritical once-through boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(7)：1001-1009.

[14] 雒青，王伟，范庆伟，等. 火电机组快速变负荷的锅炉动态响应分析[J]. 热能动力工程，2019，34(6)：78-84，99.
LUO Qing，WANG Wei，FAN Qingwei，et al. Study on the dynamic characteristics of boiler during fast load regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2019，34(6)：78-84，99.

[15] 姜求志，王金瑞. 火力发电厂金属材料手册[M]. 北京：中国电力出版社，2001.

[16] 上海发电设备所. 电站锅炉水动力计算方法：JB/Z 201－1983[S]. 上海：上海发电设备成套设计研究院，1983.

[17] WAN Li，YANG Dong，ZHOU Xihong，et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis on evaporator system of a 1 000 MW ultra-supercritical pulverized combustion boiler with double reheat[J]. Journal of Thermal Science，2021，30(3)：807-816.

[18] PAN Jie，YANG Dong，CHEN Gongming，et al. Thermal-hydraulic analysis of a 600 MW supercritical CFB boiler with low mass flux[J]. Applied Thermal Engineering，2012，32：41-48.

[19] NIE Chao，ZHANG Xirong，LI Weiteng，et al. Numerical simulation on the hydrodynamic performance of high-pressure evaporator in once-through heat recovery steam generators[J]. Applied Thermal Engineering，2022，217：119208.

[20] 董乐，辛亚飞，李娟，等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉水动力及流动不稳定特性计算分析[J]. 中国电机工程学报，2020，40(5)：1545-1553.
DONG Le，XIN Yafei，LI Juan，et al. Computational analysis on thermal-hydraulic characteristics and flow instability of a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(5)：1545-1553.

[21] 高琴，肖峰，许秀启，等. 超超临界循环流化床锅炉水冷壁并联管流动不稳定性计算分析[J]. 热力发电，2020，49(5)：81-88.
GAO Qin，XIAO Feng，XU Xiuqi，et al. Calculation of flow instability in water wall parallel tubes of ultra-supercritical CFB boiler[J]. Thermal Power Generation，2020，49(5)：81-88.

[22] WANG Dengliang，CHEN Lu，ZHAO Yongliang，et al. Thermomechanical stress analysis and fatigue lifetime evaluation of coal-fired boiler components during peak shaving transient processes：effects of load cycling rate[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2023，206：105083.

[23] PAN Jie，YANG Dong，YU Hui，et al. Mathematical modeling and thermal-hydraulic analysis of vertical water wall in an ultra supercritical boiler[J]. Applied Thermal Engineering，2009，29(11/12)：2500-2507.

[24] 杨冬，潘杰. 超(超)临界锅炉水动力特性：试验研究与理论计算[M]. 北京：中国电力出版社，2017.

[25] SHI Jianxin，YU Xiang，SUN Baozhi，et al. A review on dryout and post-dryout heat transfer inside tubes and tube bundles[J]. Applied Thermal Engineering，2023，218：119300.

[26] 车得福，庄正宁，李军，等. 锅炉[M]. 西安：西安交通大学出版社，2008.