

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2025.07.009

引用格式:李果,陶翔宇,张宗龙,等.超超临界循环流化床锅炉主燃料跳闸及锅炉跳闸动态特性仿真[J].重庆大学学报,2025,48(7): 94-103.



# 超超临界循环流化床锅炉主燃料跳闸及锅炉跳闸动态特性仿真

李 果<sup>1,3</sup>,陶翔宇<sup>2</sup>,张宗龙<sup>2</sup>,杨 晨<sup>2</sup>,邓启刚<sup>1,3</sup>,聂 立<sup>1,3</sup>,何 维<sup>1,3</sup>,李维成<sup>1,3</sup>,  
鲁佳易<sup>1,3</sup>,巩李明<sup>1,3</sup>

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室,成都 611731; 2. 重庆大学能源与动力工程学院,重庆 400044;  
3. 东方电气集团 东方锅炉股份有限公司,四川 自贡 643001)

**摘要:**为研究超超临界循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉在触发主燃料跳闸(main fuel trip, MFT)和锅炉跳闸(boiler trip, BT)时的动态特性,在Apros仿真平台上建立了660 MW超超临界循环流化床锅炉仿真模型,分别在100% BMCR(boiler maximum continuous rating)、75% THA(turbine heat acceptance)和50% THA工况下燃煤时对MFT和BT进行动态仿真。结果表明,在50% THA工况下,锅炉触发MFT与BT后汽水分离器很快由干态转为湿态运行,MFT、BT复位后逐渐由湿态转为干态运行。频繁干、湿态转换会增大汽水分离器热应力,影响设备寿命与安全,应避免在低负荷下触发锅炉MFT与BT。

**关键词:**超超临界;循环流化床锅炉;主燃料跳闸;锅炉跳闸;动态仿真

中图分类号:TK227.7 文献标志码:A 文章编号:1000-582X(2025)07-094-10

## Dynamic simulation of a ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler during main fuel trip and boiler trip

LI Guo<sup>1,3</sup>, TAO Xiangyu<sup>2</sup>, ZHANG Zonglong<sup>2</sup>, YANG Chen<sup>2</sup>, DENG Qigang<sup>1,3</sup>, NIE Li<sup>1,3</sup>,  
HE Wei<sup>1,3</sup>, LI Weichen<sup>1,3</sup>, LU Jiayi<sup>1,3</sup>, GONG Liming<sup>1,3</sup>

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731,  
P. R. China; 2. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
3. Dongfang Electric Corporation, Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Zigong, Sichuan 643001, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the dynamic characteristics of an ultra-supercritical circulating fluidized bed (CFB) boiler during main fuel trip (MFT) and boiler trip (BT) events, a mathematical model of a 660MW ultra-supercritical CFB boiler was established using the Apros simulation platform. The model dynamically simulates MFT and BT scenarios under coal combustion conditions at 100% BMCR (boiler maximum continuous rating), 75% THA (turbine heat acceptance) and 50% THA operating loads. Numerical results show that under 50% THA operating

收稿日期:2024-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51876011)。

Supported by the National Nature Science Foundation of China (51876011).

作者简介:李果(1986—),男,硕士,主要从事循环流化床锅炉运行研究,(E-mail)5928588126@163.com。

通信作者:杨晨,男,博士,教授,(E-mail)yxtc@cqu.edu.cn。

conditions, the steam-water separator rapidly transitions from dry to wet operation following MFT and BT activation and gradually returns to dry operation after system reset. These frequent dry-wet transitions increase thermal stress on the steam-water separator, potentially reducing its service life and compromising equipment safety. Therefore, triggering MFT and BT under low-load conditions should be avoided to ensure system reliability.

**Keywords:** ultra-supercritical; circulating fluidized bed boiler; main fuel trip; boiler trip; dynamic simulation

循环流化床燃烧技术得益于良好的燃料适应性和环保性能,在国内得到了快速发展,容量更大、参数更高、环保性能更好是循环流化床锅炉的主要发展方向<sup>[1-3]</sup>。2019年国家能源局正式批复贵州威赫电厂660 MW超超临界循环流化床锅炉示范项目<sup>[4]</sup>,2020年贵州威赫660 MW超超临界CFB(circulating fluidized bed, CFB)锅炉发电机组进入建造阶段,贵州威赫660 WM超超临界CFB锅炉是目前世界上循环流化床单机容量最大、参数等级最高、机组整体性能最先进的锅炉,解决了高硫无烟煤高效、清洁利用的世界难题。

国内针对清洁高效的超超临界循环流化床锅炉已有多项研究<sup>[5-8]</sup>,对于660 MW超超临界CFB锅炉的子系统的研究也有报道<sup>[9-11]</sup>,但对660 MW超超临界CFB锅炉的整体系统特性,尤其是系统动态特性的研究则较少。现有研究主要关注锅炉的子系统,如汽水系统、燃烧系统、灰循环系统等,而针对660 MW超超临界CFB锅炉系统级的仿真研究少有报道。研究锅炉整体的动态特性,特别是事故工况下锅炉的动态响应,对CFB锅炉的安全有效运行具有重要意义。文中利用APROS仿真支撑软件建立了660 MW超超临界CFB锅炉整体动态仿真模型,研究了660 MW超超临界CFB锅炉运行时的动态特性,包括主燃料跳闸(master fuel trip,MFT)和锅炉跳闸(boiler trip,BT)。

## 1 系统模型

### 1.1 锅炉本体

文中建立数学模型的对象为贵州威赫660 MW超超临界循环流化床锅炉,布置图如图1所示,该锅炉采用单炉膛,裤叉腿结构。一次风由底部的布风板进入炉膛,使炉膛底部的床层处于流化态。在一次风作用下,床料从底部炉膛向上运动。随着炉膛升高,固体向上运动速度逐渐减小,在炉膛壁面附近向下运动,形成炉膛内的物料循环过程。炉膛出口的颗粒物被旋风分离器捕获进入外置床并从返料器返回炉膛,形成物料的外部循环。

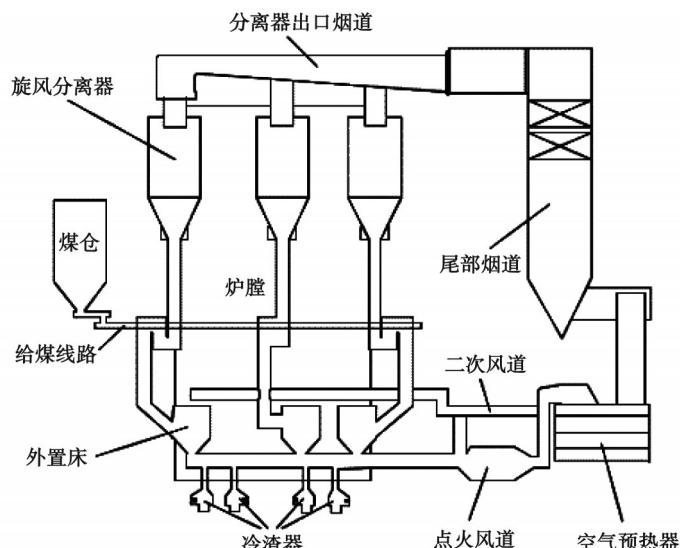


图1 循环流化床锅炉布置示意图

Fig. 1 Layout of circulating fluidized bed boiler

## 1.2 CFB 炉膛的气固两相流动与传热模型

### 1.2.1 气固两相流动模型

CFB 炉膛气固两相流动基于“核心-环”模型,由于炉膛内颗粒物浓度的分布不均匀,中心核心区固体颗粒浓度较低向上运动,壁面附近固体颗粒浓度较高围绕核心区向下运动形成环状区,构成“核心-环”流动结构,如图 2 所示<sup>[12]</sup>。

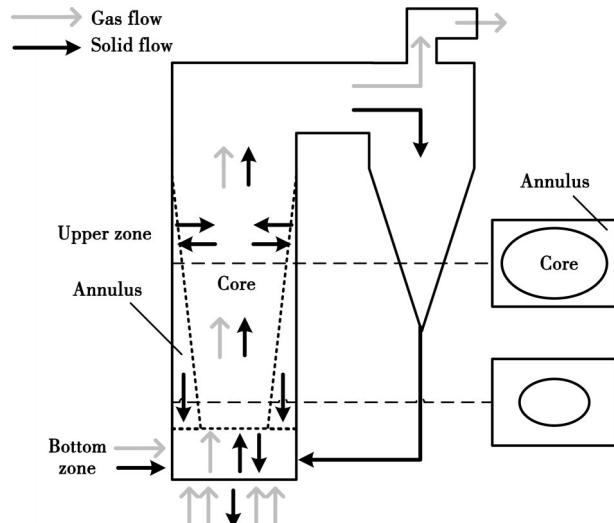


图 2 CFB 中“核心-环”流动结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the "core-ring" flow structure in CFB

在 APROS 仿真模型中,CFB 炉膛沿炉膛高度方向划分为若干个节点,每个节点包含 1 对“核心-环”,按照固体颗粒的浓度分布,将炉膛分为底部密相区和上部稀相区,如图 3 所示<sup>[13-14]</sup>。

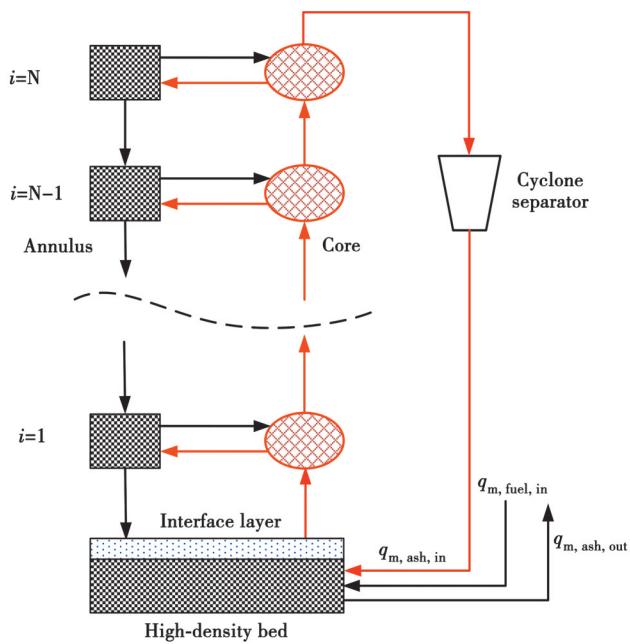


图 3 APROS 中 CFB 的“核心-环”模型

Fig. 3 The "core-ring" model of CFB in APROS

1)稀相区:每一个气相节点包含 2 个固相节点(“核心-环”对),用分流系数调节“核心-环”对之间的固体质量输运,最上部节点与旋风分离器相连。在核心区,固体颗粒向下运动,在环状区向下运动。

2)界面层(interface layer):提供稀相区求解的边界条件,是一个虚拟的界面。

3)底部床层(hight-density bed):只有一个节点,假定固体颗粒混合均匀。

### 1.2.2 传热模型

炉膛内的传热发生在炉内气固两相流与各受热面之间,如图4所示<sup>[14]</sup>。

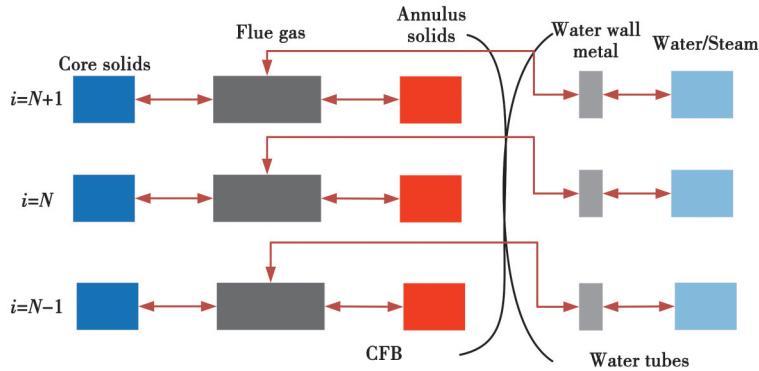


图4 APROS中CFB的传热模型

Fig. 4 Heat transfer model of CFB in APROS

传热模型简化为:

- 1)炉膛内气固两相之间充分换热,气固两相温度相等;
- 2)“核心-环”之间只有通过质量输运产生的能量交换,忽略热扩散;
- 3)将气-固两相与水冷壁之间的传热简化为只有气相与水冷壁进行传热。

努塞尔数  $Nu_{s,g}$ <sup>[15]</sup>:

$$Nu_{s,g} = 2.85 \left( \frac{\Delta p}{(\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf}) g \Delta L} \right)^{0.5} + 3.28 \times 10^{-3} Re Pr, \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{mf}$ 表示最小流化速度下的固相体积分数; $\rho_g, \rho_s$ 分别为气相和固相密度; $\Delta L$ 为节点高度; $g$ 为重力加速度; $Re$ 为雷诺数; $Pr$ 为普朗特数。

节点压损  $\Delta p$  计算式为

$$\Delta p = \frac{g m_s (\rho_s - \rho_g)}{\rho_s A_b}, \quad (2)$$

式中: $A_b$ 为节点面积; $m_s$ 为节点内质量。压力损失系数计算为

$$k = \frac{2\Delta p}{\rho_g v_g^2}, \quad (3)$$

式中, $v_g$ 为气相速度。床层和燃料的热扩散采用以下公式计算。用2个相邻节点*i*和(*i*+1)计算由于颗粒运动产生的热扩散<sup>[15]</sup>:

$$q = c_p D_{th} m_i (T_i - T_{i+1}), \quad (4)$$

式中: $c_p$ 为定压比热容; $D_{th}$ 是热扩散系数; $m_i$ 为节点*i*中质量; $T_i$ 和 $T_{i+1}$ 分别为节点*i*和(*i*+1)的平均温度。

燃料扩散的扩散速度为

$$\dot{m} = D_{fuel} (m_{i,fuel} - m_{i+1,fuel}), \quad (5)$$

式中: $m_{i,fuel}$ 和 $m_{i+1,fuel}$ 分别为节点*i*和*i*+1中的燃料。

平均床温为

$$T_{avg, bed} = \frac{\sum_i^n V_i T_i}{V_{tot, bed}}, \quad (6)$$

式中: $V_i$ 为节点*i*的体积; $V_{tot,bed}$ 为床层总体积。

### 1.4 烟风系统

#### 1.4.1 一次风系统

一次风经空气预热器加热后,作为一次燃烧用风和流化风进入炉膛底部的水冷风室,通过布置在布风板

上的风帽使床料流化,形成向上流动的气固两相流。

#### 1.4.2 二次风系统

二次风经暖风器,空气预热器加热后分为 2 层,进入炉膛下部内侧及外侧,作为燃烧以及燃烧调整用风。

#### 1.4.3 烟气系统

燃料燃烧产生的热烟气将热量传递给炉膛水冷壁,然后流经旋风分离器,进入后竖井包墙,墙内布置有低温过热器、低温再热器和省煤器。烟气再进入烟气给水加热器和空气预热器,最后进入除尘器,流向烟囱,排向大气。

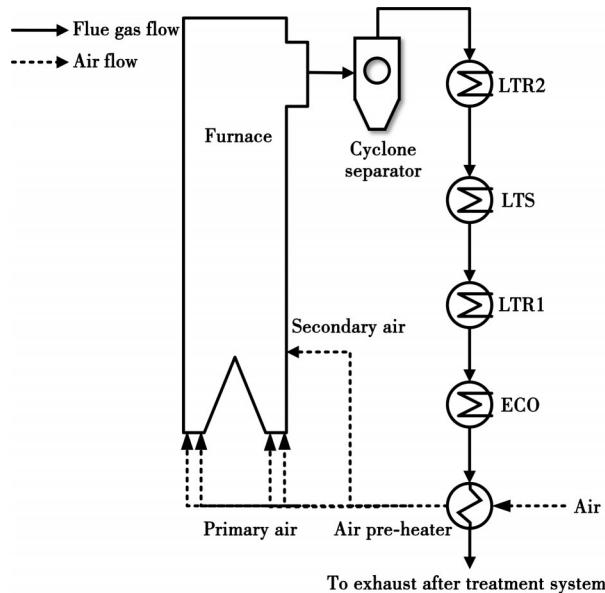


图 5 CFB 的烟-风系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the air-flu gas system

### 1.5 汽水系统

#### 1.5.1 气液两相流动模型

为了精确地模拟汽水系统“气-液”两相流动的动态特性,采用气液两相流动的“六方程”模型。气液两相流模型分别针对气相以及液相建立质量守恒、能量守恒以及动量守恒方程。汽水侧气液两相流数学模型如下所示<sup>[16]</sup>:

质量守恒:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mu_k)}{\partial z} = \Gamma_k, \quad (7)$$

动量守恒:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mu_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mu_k h_k)}{\partial z} + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial z} = \Gamma_k u_{ik} + \alpha_k \rho_k g_z + F_{wk} + F_{ik} + F_{va} + F_{fl} + \Delta P_{pu}, \quad (8)$$

能量守恒:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mu_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k \mu_k h_k)}{\partial z} = \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \Gamma_k h_{ik} + Q_{ik} + Q_{wk} + F_{ik} u_{ik}, \quad (9)$$

式中:下标  $k$  表示气体和液体中任意一种;下标  $i$  和  $w$  分别表示两相与壁面接触面; $\Gamma$  表示两相之间质量交换率; $F$  表示摩擦力; $Q$  表示热量;动量方程后 3 项分别表示阀门摩擦力、沿程摩擦和泵的压头,能量方程中  $h$  表示考虑了动能在内的总焓。

#### 1.5.2 过热蒸汽系统

锅炉给水从给水泵出口进入烟气给水加热器,吸收烟气热量后进入省煤器,由省煤器出口集箱经连接管进入水冷壁入口集箱,从水冷壁出口的蒸汽(或汽水混合物)进入汽水分离器。在锅炉低负荷运行时,水冷壁

出口为汽水混合物, 经汽水分离器后疏水进入储水罐, 蒸汽则依次流经旋风分离器入口烟道、后竖井包墙、吊挂管、低温过热器, 再流经炉膛内的中温过热器, 最后流经外置床中的高温过热器。过热蒸汽温度是由水-煤比和三级喷水减温来控制。第一级减温器布置在低温过热器(low temperature superheater, LTS)出口和一级中温过热器(intermediate temperature superheater 1, ITS1)之间; 第二级减温器布置在二级中温过热器(ITS2)出口和一级高温过热器(high temperature superheater 1, HTS1)之间; 第三级减温器布置在一级高温过热器和二级高温过热器(HTS2)之间, 减温水来自省煤器出口。

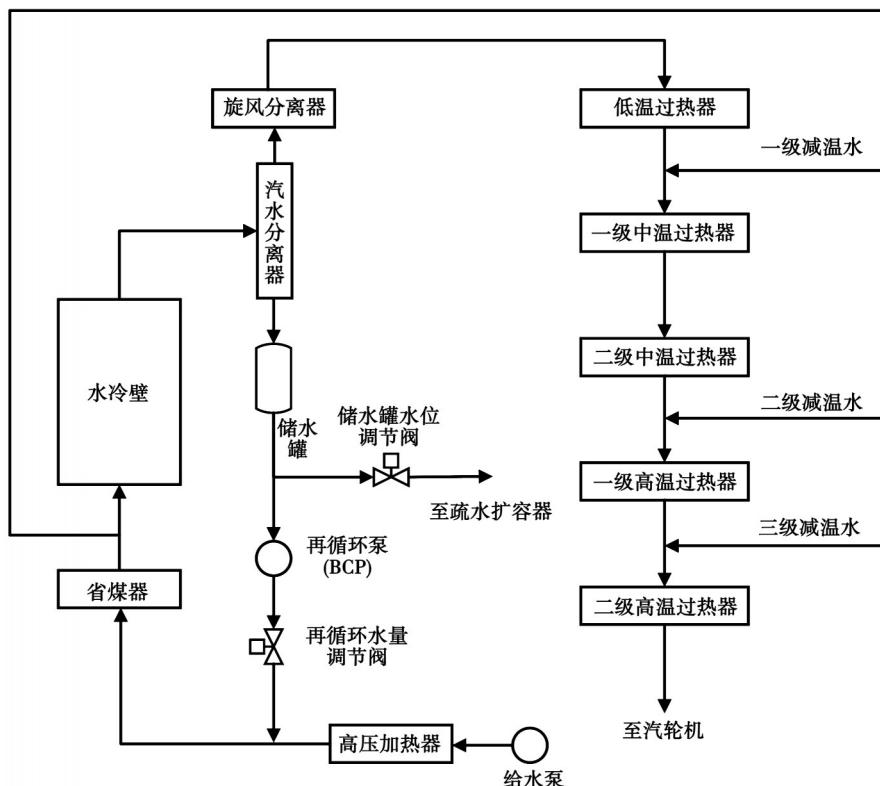


图 6 过热蒸汽系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the superheated steam system

### 1.5.3 再热蒸汽系统

从汽轮机高压缸抽取的再热蒸汽依次流经尾部烟道中的低温再热器(low temperature reheat, LTR)和外置床中的高温再热器(high temperature reheat, HTR), 最后引入汽轮机中压缸。再热蒸汽汽温主要通过调节外置床中高温再热器的灰流量实现, 在低温再热器出口管道上布置有事故减温水, 作为事故状态下的调节手段。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 模型的稳态校核

研究主要在 100%BMCR、75%THA 和 50%THA 工况下进行, 分别以上述 3 种的稳态工况进行稳态校核验证。100%BMCR、75%THA 和 50%THA 工况下主要参数的设计值和仿真值如表 1 所示。可以看出, 3 种工况下的主要参数的相对误差均在 1% 以内, 个别参数误差在 5% 以内, 说明该模型在上述 3 种工况下均有良好的仿真精度, 能够满足仿真要求。

图 7 给出了不同工况下, 炉膛内温度以及固体颗粒物浓度分布。可以看出, 随着炉膛高度升高, 炉膛内温度逐渐降低。颗粒物浓度随着炉膛高度升高而降低, 底部床层密度明显高于上部稀相区。

表 1 100% BMCR/75% THA/50% THA 工况下稳态仿真结果  
Table 1 Steady state simulation results of 100% BMCR/75% THA/50% THA

参数名	单位	100% BMCR			75% THA			50% THA		
		设计值	仿真值	相对误差/%	设计值	仿真值	相对误差/%	设计值	仿真值	相对误差/%
主蒸汽流量	t/h	1 902	1 902	0.01	1 254	1254	0.00	823.1	823.1	0.00
主蒸汽温度	°C	605	604.3	-0.12	605.1	603.2	-0.31	605	607.1	0.35
主蒸汽压力	MPa	29.3	29.3	0.00	24.2	24.2	0.00	15.6	15.6	0.00
再热蒸汽流量	t/h	1 612	1 612	0.00	1 064	1 064	0.00	698.8	698.8	0.00
再热蒸汽进口压力	MPa	6.116	6.117	0.02	4.078	4.078	0.00	2.78	2.78	0.00
再热蒸汽出口压力	MPa	5.9	5.9	0.00	3.932	3.932	0.00	2.681	2.681	0.00
再热蒸汽进口温度	°C	366.8	366.8	0.00	354.2	354.2	0.00	360.4	360.4	0.00
再热蒸汽出口温度	°C	623	624.4	0.22	623	622.2	-0.13	623	623.1	0.02
燃料消耗量	t/h	294.1	295.6	0.51	210.6	208.8	-0.85	146.8	145.6	-0.82
水冷壁出口温度	°C	435	435.4	0.09	404	420.7	4.13	376	376.7	0.19
平均床温	°C	895	895.2	0.02	870	873.4	0.39	830	851.2	2.55

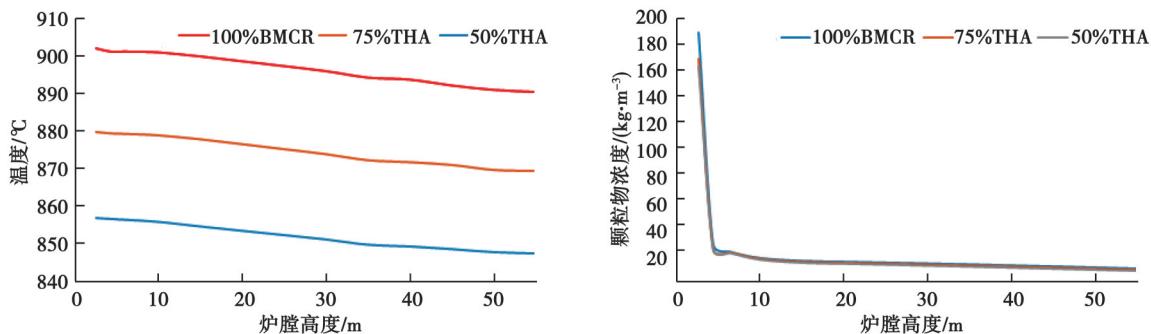


图 7 不同工况下炉膛内温度以及固体颗粒物浓度分布  
Fig. 7 Distributions of temperature and solid density in the CFB furnace

## 2.2 主燃料跳闸(MFT)仿真分析

主燃料跳闸是指锅炉的安全运行条件得不到满足、需要紧急停炉而发出指令快速切断所有通往炉膛的燃料并引发必要的连锁动作,避免对锅炉的潜在危害,以保护锅炉炉膛、其它设备及运行人员的安全。锅炉发出 MFT 后,将伴随以下动作:

- 1) 给煤、油切除;
- 2) 石灰石切除;
- 3) 外置床跳闸;
- 4) 减温水总门关闭;
- 5) 所有风量控制改为手动方式,并保持最后位置;
- 6) 冷渣器切除。

在 100% BMCR、75% THA 和 50% THA 工况下,锅炉触发 MFT,此时给煤量快速降为 0。由于循环流化床锅炉炉膛内有大量高温床料,具有极强的蓄热能力,给煤量降为 0 后,蒸汽依然从炉膛吸热维持一定的过

热度。在触发 MFT 后,由于主燃料切除,锅炉给水快速降低,从而维持床温以及主蒸汽、再热蒸汽温度的相对稳定。5 min 后 MFT 复位,锅炉进入热态启动,此时给煤量升高,外置床换热器灰流量逐渐升高。100% BMCR 工况下约 60 min 后,主蒸汽和再热蒸汽温度、流量恢复到设定值;75% THA 工况下 40 min 后,主蒸汽和再热蒸汽温度、流量恢复到设定值。50% THA 工况下 30 min 后,分离器由湿态逐渐转为干态运行,约 50 min 后,主蒸汽和再热蒸汽温度、流量恢复到设定值。锅炉各参数变化示意图,如图 8 所示。

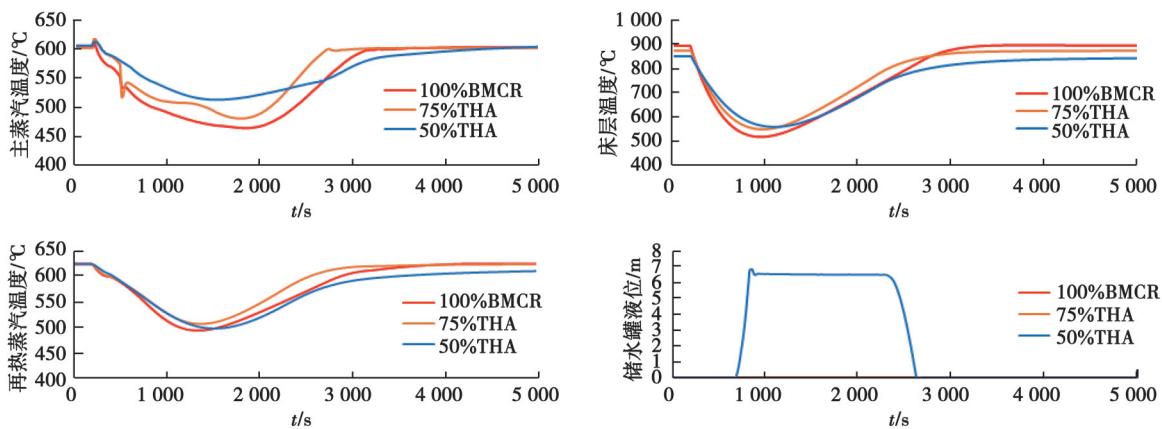


图 8 不同工况下 MFT 过程中各参数变化示意图

Fig. 8 Parameters of CFB boiler during the MFT process

从 100% BMCR、75% THA、50% THA 工况下 MTF 结果可以看出,在 50% THA 工况下触发 MFT 后,由于 50% THA 工况时负荷较低,触发 MFT 后汽水分离器由干态转为湿态运行,当 MFT 复位后,又逐渐由湿态转为干态。频繁干湿态转换会使汽水分离器产生较大热应力,影响设备安全,应避免在低负荷下触发 MFT。

### 2.3 锅炉跳闸(BT)仿真分析

当触发锅炉跳闸(BT)时,炉膛内仍有大量未燃尽燃料,为了保护锅炉安全,必须切断所有通入炉膛的物料。与锅炉 MFT 相比,当锅炉触发 BT 后,除了需要切断煤、石灰石外,还需要切断通往炉膛的一次风以及二次风,尽可能降低炉膛的燃烧,保证炉膛的安全。锅炉触发 BT 后,锅炉侧将伴随以下动作:

- 1) 给煤、油切除;
- 2) 石灰石切除;
- 3) 外置床跳闸;
- 4) 减温水总门关闭;
- 5) 所有风量控制改为手动方式,并保持最后位置;
- 6) 冷渣器切除;
- 7) 一次风机、二次风机、引风机跳闸。

在 100% BMCR、75% THA 和 50% THA 工况下,触发锅炉 BT。可以看出,和锅炉 MFT 相比,由于 BT 时一次风机、二次风机、引风机均跳闸,烟气无法将热量从炉膛内带走,因此炉膛温度比 MFT 后温度要高。触发 BT 后 5 min,锅炉开始极热态启动,在 100% BMCR 工况下,约 60 min 后主蒸汽、再热蒸汽温度、流量达到额定值;在 75% THA 工况下,约 55 min 后主蒸汽、再热蒸汽温度、流量达到额定值;在 50% THA 工况下锅炉触发 BT 后,约 8 min,分离器由干态逐渐转为湿态,液位控制在 6.5 m。此后,锅炉 BT 复位,给煤量、风量、给水量逐渐增加,约 25 min 后分离器由湿态逐渐转为干态,蒸汽温度、床温、外置床灰温不断升高,40 min 后各参数逐渐恢复到 50% THA。锅炉各参数变化示意图,如图 9 所示。

从 100% BMCR、75% THA、50% THA 工况下 BT 结果可以看出,与 MFT 结果类似,在 50% THA 工况下

触发BT后,由于50%THA工况时负荷较低,触发BT后汽水分离器由干态转为湿态运行,当BT复位后,又逐渐由湿态转为干态。频繁干湿态转换会使汽水分离器产生较大热应力,影响设备安全,应避免在低负荷下触发BT。

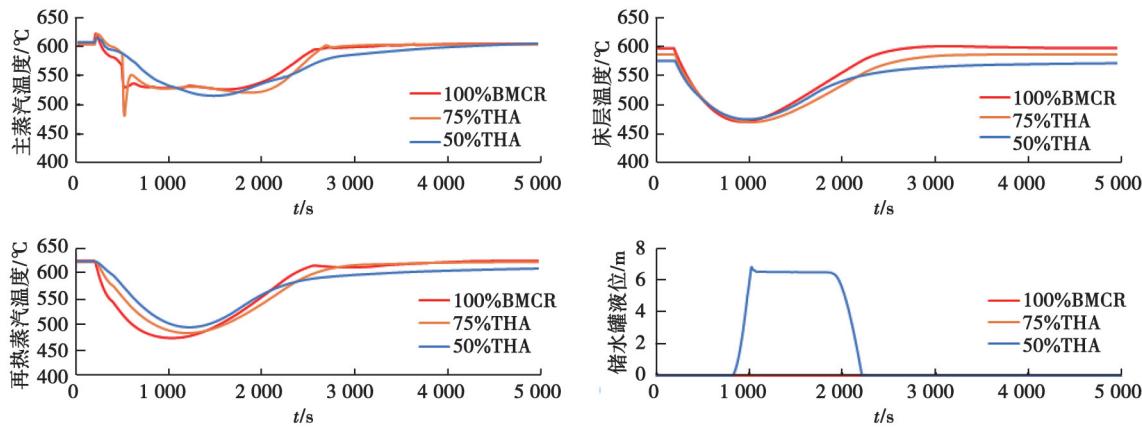


图9 不同工况下BT过程中各参数变化示意图  
Fig. 9 Parameters of CFB boiler during the BT process

### 3 结 论

文中以贵州威赫660 MW超超临界循环流化床锅炉为研究对象,通过仿真软件APROS建立了CFB锅炉的动态仿真数学模型,分别在100%BMCR、75%THA和50%THA工况下,进行模型稳态验证和动态仿真试验,研究CFB锅炉触发MFT和BT时的动态变化特性,得到如下结论。

1)模型稳态仿真结果表明,文中所建模型在100% BMCR、75% BMCR以及50% BMCR工况下,主要参数误差均小于1%,展示了良好的仿真精度。同时,炉膛内温度以及颗粒物浓度的分布表明,所建模型能准确反映炉膛内-固两相流动的特性。

2)不同工况下的MFT仿真结果显示,当触发MFT后,尽管主燃料切除,但由于炉膛内仍有大量未燃尽床料在继续燃烧,蒸汽依然可以从炉膛吸热并维持一定过热度。随着炉膛内残余燃料燃尽,炉膛发热量逐渐降低,床层温度以及主蒸汽、再热蒸汽温度均逐渐降低。在50% BMCR工况下,锅炉触发MFT后汽水分离器由干态逐渐转为湿态运行。MFT复位后,锅炉进入热态启动,给煤量逐渐升高,床层温度、主蒸汽温度以及再热蒸汽温度均逐渐升高恢复至设定值。

3)与锅炉MFT相比,锅炉触发BT后由于一次风机、二次风机、引风机均跳闸,烟气无法将热量从炉膛内带走,锅炉触发BT后床层温度比MFT后高。与MFT类似,在50% BMCR工况下,锅炉触发BT后汽水分离器逐渐由干态转为湿态运行。BT复位后,床层温度、主蒸汽、再热蒸汽温度均不断升高恢复至设定值,50%BMCR工况下,汽水分离器逐渐从湿态转为干态运行。

4)结合锅炉MFT、BT工况可以发现,在50% BMCR工况下,汽水分离器均会经历干态-湿态-干态的变化,干湿态转换会增大汽水分离器的热应力,应避免在低负荷下触发锅炉MFT和BT,以保证锅炉的安全、稳定运行。

### 参考文献

- [1] 辛胜伟,王虎.超超临界循环流化床锅炉发展及主要技术特性探讨[J].煤炭工程,2017,49(S1): 99-103.  
Xin S W, Wang H. Progress and main technical characteristics of ultrasupercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Coal Engineering, 2017, 49(S1): 99-103. (in Chinese)
- [2] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等.循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J].中国电力,2016,49(1): 1-13.  
Yue G X, Lyu J F, Xu P, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13. (in Chinese)

- [3] Cheng L M, Ji J Q, Wei Y J, et al. A note on large-size supercritical CFB technology development[J]. Powder Technology, 2020, 363: 398-407.
- [4] 东方电气网.世界单机容量最大、参数最高、整体性能世界领先的循环流化床机组项目获批国家电力示范项目[J].东方电气评论, 2019, 33(1): 23.  
Dongfang Electric Network. The circulating fluidized bed unit project with the largest single unit capacity, the highest parameters and the world-leading overall performance in the world was approved as a national power demonstration project[J]. Dongfang Electric Review, 2019, 33(1): 23. (in Chinese)
- [5] 高新宇,王凤君,王君峰,等.哈锅660 MW高效超超临界循环流化床锅炉方案研究[J].锅炉制造: 2021(2): 10-12,27.  
Gao X Y, Wang F J, Wang J F, et al. A design scheme of 660 MW ULTRA-supercritical CFB boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2021(2): 10-12, 27. (in Chinese)
- [6] 凌文,吕俊复,周托,等.660 MW超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J].中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2524.  
Ling W, Lyu J F, Zhou T, et al. Research and development progress of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2524. (in Chinese)
- [7] 聂立.660 MW超超临界循环流化床锅炉关键技术与方案研究[D].杭州:浙江大学, 2021.  
Nie L. Study on key technologies and scheme of 660 MW ultra supercritical circulating fluidized bed boiler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [8] Nie L, Lu J Y, Deng Q G, et al. Study on the uniformity of secondary air of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler[J]. Energies, 2022, 15(10): 3604.
- [9] Tang G L, Zhang M, Gu J P, 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.
- [10] Zhou X H, Niu T T, Xin Y F, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer in the vertical upward flow water wall of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 188: 116664.
- [11] Zhu S H, Zhang M, Huang Y Q, et al. Thermodynamic analysis of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler unit[J]. Energy, 2019, 173: 352-363.
- [12] Heimo H. Dynamic core-annulus model of circulating fluidized bed boilers [D]. Finland Master thesis, Lappeenranta University of Technology, 2018.
- [13] Yang C, Zhang Z L, Wu H C, et al. Dynamic characteristics analysis of a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Energies, 2022, 15(11): 4049.
- [14] Lappalainen J, Hiidenkari H, Tuuri S, et al. Dynamic core-annulus model for circulating fluidized bed boilers[C]//Nordic Flame Days 2019. August 28-29, 2019, Turku, Finland: IEEE, 2019: 1-5.
- [15] Apros. User manual: apros 6 feature tutorial; version 6.09 [J]. VTT & Fortum: Espoo, Finland, 2019.
- [16] 钟晶亮,邓康杰,杨晨.关于超临界直流锅炉的启动仿真研究[J].计算机仿真, 2018, 35(12): 96-99, 170.  
Zhong J L, Deng K J, Yang C. Research on start-up simulation of supercritical once-through boiler[J]. Computer Simulation, 2018, 35(12): 96-99, 170. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)