

超临界 CFB 锅炉压火启动过程活性存量动态特性研究

申欣¹, 刘明学¹, 杨海瑞², 金燕^{3*}

(1 山西科技学院智能制造工程学院, 山西省晋城市 048000; 2 清华大学能源与动力工程系, 北京市海淀区 100084;

3 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030021)

摘要: 循环流化床燃烧技术是一种近年来发展迅速的洁净煤燃烧技术。循环流化床机组在快速升降负荷时, 由于炉内存在大量的床料, 其中未完全燃烧残碳和未完全反应的钙基脱硫剂, 不仅会影响锅炉的负荷变化率, 也会影响锅炉的污染物排放。因此, 如何合理利用锅炉内的活性存量, 对改善锅炉热量释放速率和提高负荷响应速率具有重要作用。以 350MW 超临界 CFB 锅炉为研究对象, 对 CFB 锅炉周期性压火启动过程进行数值模拟, 构建了活性残碳存量动态模型和活性石灰石动态模型, 对周期性压火启动过程的气固流动和活性存量进行分析。结果表明: 当停止二次风机和引风机后, 锅炉处于密闭状态, 炉膛内物料回落速度加快, 返料腿内的物料受重力作用返回到炉膛, 密相区平均颗粒体积分数为 0.45, 返料室在物料沉积后颗粒体积分数达到了 0.52。周期性压火启动过程中, 稳定工况阶段活性残碳存量为 6353.11kg, 氧气浓度为 5.35%, 启动二次风机和给煤机后, 氧气浓度急剧下降, 活性残碳存量增至 2868.76kg。周期性压火启动过程, 稳定工况阶段脱硫效率为 59.58%, 活性石灰石存量为 2702.29kg, 启动二次风机和给煤机后, 活性石灰石存量增加到 1482.93kg, 脱硫效率达到了 50.35%。

关键词: 循环流化床; 周期性压火启动; 气固流动; 活性残碳; 活性石灰石

中图分类号: TK116

文献标志码: A

Study on dynamic characteristics of active stock in supercritical CFB boiler during periodic bank fire and start-up

Xin Shen¹, Mingxue Liu¹, Hairui Yang², Yan Jin^{3*}

(1. College of Intelligent Manufacturing Engineering, Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng 048000, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

3. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Circulating fluidized bed combustion technology is a kind of clean coal combustion technology, which has developed rapidly in recent years. Due to the large amount of bed material in the furnace, the incomplete combustion residual carbon and the incomplete reaction calcium-based desulfurizer will not only affect the load change rate of the boiler, but also affect the pollutant discharge of the boiler. Therefore, how to rationally utilize the active stock in the boiler plays an important role in improving the boiler heat release rate and load response rate. Taking 350MW supercritical CFB boiler as the research object, a numerical simulation was carried out on the periodic bank fire and start-up process of CFB boiler, a dynamic model of active carbon residue stock and a dynamic model of active limestone stock were constructed, and the gas-solid flow and active stock were analyzed during periodic bank fire and start-up process. The results show that when the secondary air and induced draft air are stopped (stage 4), the boiler is in a closed state, the material in the furnace falls back faster, the material in the return

收稿日期: XXXX-XX-XX 责任编辑:

基金项目: 新型电力系统运行与控制国家重点实验室资助课题 (SKLD23KM25); 山西省高等学校科技创新项目 (2023L442); 山西科技学院科研启动经费项目 (2023014) 资助; 山西科技学院大学生创新训练项目 (XG2023001) 资助。

作者简介: 申欣 (1992 年-), 男, 山西长治人, 讲师, 博士, 研究方向为洁净煤燃烧技术。E-mail: shenxin@sxist.edu.cn

通讯作者: 金燕 (1963 年-), 女, 山西太原人, 教授, 博士, 研究方向为燃煤污染物排放与控制。E-mail: jinyan@tyut.edu.cn

leg is returned to the furnace by gravity, the average particle volume fraction in the dense phase zone is 0.45, and the particle volume fraction in the return chamber reaches 0.52 after the material is deposited. During the periodic fire starting process, the active carbon residue stock was 6353.11kg and the oxygen concentration was 5.35% in the stable working condition stage. After the secondary air and coal feeder were started, the oxygen concentration decreased sharply and the active carbon residue stock increased to 2868.76kg. During the periodic bank fire and start-up process, the desulfurization efficiency in the stable working condition stage is 59.58%, and the active limestone stock is 2702.29kg. After the secondary air and coal feeder are started, the active limestone stock increases to 1482.93kg, and the desulfurization efficiency reaches 50.35%.

Key words: Circulating fluidized bed; Periodic bank fire and start-up; Gas-solid flow; Active carbon residue; active limestone

0 引 言

循环流化床 CFB (Circulating Fluidized Bed) 燃烧技术是一种近年来发展迅速的洁净煤燃烧技术^[1-4]。目前中国已经有 2 台 660MW, 1 台 600MW 和 54 台 350MW 超临界循环流化床锅炉投入商业运行, 其中 350MW 超临界循环流化床锅炉应用最广。当循环流化床锅炉系统或辅机系统出现故障时, 可以在短时间完成修复, 经常采用的方法是机组解列后压火, 待故障解除, 可以迅速热启动, 充分体现了循环流化床锅炉的优越性。对于较长时间的停炉, 可以采用周期性压火启动的方式解决。

循环流化床机组在快速升降负荷时, 由于炉内存在大量的床料, 其中未完全燃烧残碳和未完全反应的钙基脱硫剂, 不仅会影响锅炉的负荷变化率, 也会影响锅炉的污染物排放。循环流化床锅炉中决定锅炉燃烧热量的是活性残碳存量, 而不是瞬间加入的给煤量。炉内脱硫所需的石灰石不仅会对锅炉的经济性产生影响, 同时也不利于燃烧传热。因此有必要对活性石灰石存量进行关注, 进而一方面可以掌握炉膛脱硫情况, 另一方面可以控制 SO₂ 浓度, 从而避免石灰石浪费, 保障锅炉的正常运行。因此, 如何合理利用锅炉内的活性存量, 对改善锅炉热量释放速率和提高负荷响应速率具有重要作用。

高明明等^[19,20]提出, 循环流化床炉膛内存储的活性残碳燃烧是燃烧瞬间发热量的主导因素, 也是造成循环流化床锅炉燃烧响应比煤粉炉滞后的主

要原因。Bidwe 等^[21]实验研究了床料的磨损对于床存量的影响, 发现实际床料的高度往往大于通过运行参数得到的高度, 由此认为总的床存量应包含炉内自由下落区的“过渡床料”。Chourasia 等^[22]研究发现, 随风速和床料量增加, 磨损程度增大, 床料表面磨损后更易破碎, 细小颗粒的生成和淘洗现象更加明显, 并且磨损改变了床料的粒径分布和颗粒表面形貌, 从而对流化状态以及循环流化床运行工况产生影响。Yang 等^[23]基于理论分析和实验验证, 研究了床压降和床存量对循环流化床性能的影响发现, 随着床压降减小, 炉膛底部密相区高度下降, 飞灰中含碳量减小, 床压降存在一个最佳值, 可使燃烧效率达到最大而受热面的磨损和风机耗电最小。目前的研究基本上是将炉内床料作为一个整体, 并未考虑床料中残碳存量的变化规律, 以及其对炉内的燃烧、传热和负荷变化率的影响。

刘光辉等^[24]通过研究发现, 石灰石脱硫会对循环流化床锅炉效率产生较大影响, 炉内脱硫造成锅炉飞灰含碳量升高, 进而锅炉效率降低 5% 以上。高明明等^[25]基于活性石灰石存量模型和 SO₂ 排放预测模型, 对 600MW 锅炉的实际运行数据进行仿真计算, 验证了所构建模型的准确性。Park 等^[26]基于床料质量平衡对床料中碳浓度的瞬时变化以及对瞬时温度的响应速率进行了探讨, 研究发现随着给煤速度的阶跃变化, 床层温度发生相应变化, 达到稳态后, 燃烧释放的能量等于床层损失的能量。颜云等^[27]基于机理分析法, 构建了 330MW 锅炉的动态数学模型, 研究内容包括了床料颗粒质量、O₂ 浓度、炉膛温度等。但是, 这些研究处于对锅炉启停过程的初步分析阶段, 尚未涉及周期性压火启动

过程的动态变化过程。

由于活性残碳存量和活性石灰石存量均无法测量得到，给锅炉的运行和调整造成了一定的困难。锅炉床温或床压的波动会导致燃烧传热不稳定，甚至造成停炉停机事故。活性存量是锅炉床温和床压的决定性因素，准确地估算锅炉内活性存量对于控制系统和提高燃烧效率非常重要，因此研究循环流化床锅炉活性存量动态特性具有重要的实际意义。笔者以 350MW 超临界 CFB 锅炉为研究对象，对 CFB 锅炉周期性压火启动过程进行数值模拟，其中所构建的 CPFD 模型以及模型验证已在相关研究^[28]进行了详细表述，本文不再赘述。

1 锅炉概况

350MW 超临界 CFB 锅炉为超临界参数变压运行直流锅炉，锅炉型号为 SG-1208/25.4-M4605，采用单炉膛、汽冷式旋风气固分离器、一次中间再热、平衡通风、固态排渣。燃料破碎系统采用二级破碎方案，保证入炉煤粒度范围 0mm~12mm， $d_{50}=1.1\text{mm}$ ，粒度合格的燃料进入炉前大煤斗，由给煤机将煤粒送至锅炉落煤管上方，入炉煤为洗中煤、煤矸石和煤泥的混煤，混煤比例为 5:3:2。启动床料一般采用河沙或粉煤灰，颗粒范围 0mm~1mm， $d_{50}=0.4\text{mm}$ ，石灰石入炉颗粒范围 0mm~1mm， $d_{50}=0.3\text{mm}$ 。每个返料腿上设有一个石灰石给料口，石灰石喷管插入返料腿中，可使石灰石迅速与大量床料均匀混合，提高使用率和脱硫效率。石灰石粉一般采用气力输送，石灰石喷口规格为 159×5mm，喷口处压力不小于 15kPa，钙硫摩尔比 (Ca/S) 为 2.0。

周期性压火启动过程包括了压火和热态启动两个过程。当循环流化床锅炉准备进行压火操作时，负荷首先降至最低稳燃负荷，即 100MW 负荷，此时主蒸汽压力为 14.04MPa，给水流量为 438.22t/h。达到最低负荷后，进行主燃料跳闸 MFT (Main Fuel Trip) 操作。切断进入炉膛的燃料后，保持引风机、二次风机、一次风机和高压流化风机运行，使残存在炉膛内的挥发分和可燃物燃烬，主蒸汽压力为 12.36MPa，给水流量为 391.35t/h。当炉膛出口氧量达到 18%时，锅炉跳闸 BT (Boiler Trip)，主蒸汽压力为 8.92MPa，给水流量为 187.51t/h。当炉膛温度降至 750℃时，停止一次风机和高压流化风机；当炉膛温度降至 700℃时，停止二次风机、引风机以及关闭所有风道挡板，以减

少炉内的热量损失；当炉膛温度降至 600℃，启动一次风机、高压流化风机和引风机，床料达到流化状态后，启动二次风机、给煤机和石灰石输送机，观察床温和氧量的变化。当床温逐渐升高而氧量持续减小时，调整给煤量和风量，使锅炉恢复到压火前的燃烧状态，即完成了一个周期的压火启动，此时可以进入下一个周期的压火启动。

基于循环流化床锅炉实际压火和热态启动的操作，通过数值模拟方法分析周期性压火启动过程的气固流动特性和活性存量动态特性，模拟工况的主要参数如表 1 所示。对 350MW 超临界循环流化床锅炉进行全回路 3D 建模，如图 1 所示，主要包括炉膛、旋风分离器、双“U”型回料阀等。锅炉前墙设置 6 个给煤口，12 个上二次风口；后墙设置 7 个上二次风口，7 个下二次风口；左右墙各设置 1 个上二次风口；炉膛下部设置 6 个排渣口；每个返料腿设置 1 个石灰石进口，共计 6 个。

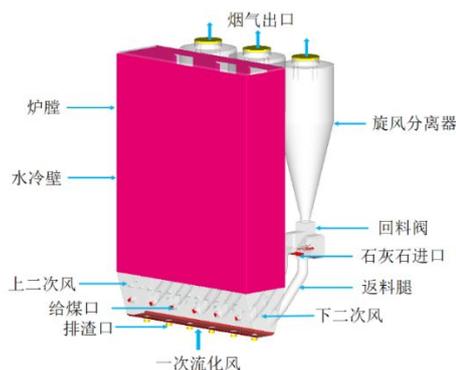


图 1 循环流化床锅炉全回路 3D 模型

Fig. 1 3D model of full loop for CFB boiler

表 1 模拟工况的主要参数

Table 1 Main parameters of simulated conditions

名称	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7
时间(分钟)	0~3	3~8	8~11	11~20	20~22	22~28	28~30
煤量(t/h)	88	0	0	0	0	5~88	88
石灰石(t/h)	12	0	0	0	0	1~12	12
引风机($\times 10^5 \text{Nm}^3/\text{h}$)	3.5	3.5	1.2	0	1.6	1.6~3.5	3.5
一次风($\times 10^5 \text{Nm}^3/\text{h}$)	2.3	2.3	0	0	1.5	1.5~2.3	2.3
上二次风($\times 10^5 \text{Nm}^3/\text{h}$)	0.6	0.6	0.6	0	0	0.2~0.6	0.6
下二次风($\times 10^5 \text{Nm}^3/\text{h}$)	0.4	0.4	0.4	0	0	0.1~0.4	0.4
回料阀流化风($\times 10^3 \text{Nm}^3/\text{h}$)	2.5	2.5	0	0	2.5	2.5	2.5
回料阀松动风($\times 10^3 \text{Nm}^3/\text{h}$)	0.6	0.6	0	0	0.6	0.6	0.6

可以计算得到飞灰的质量；底渣通量面设置在出渣口，可以对底渣排放量进行统计。

2 活性存量动态模型

2.1 活性残碳存量动态模型

循环流化床锅炉原煤颗粒经过两级破碎变成 0mm~12mm 的宽筛分煤颗粒，直接投入炉膛，煤颗粒从着火燃烧到变成细灰飞出炉膛或者成为底渣排出炉膛要经历漫长的过程，这一过程长达几分钟到几十分钟。循环流化床燃烧过程体现的正是残碳的积蓄与消耗的动态过程，这也是循环流化床燃烧系统大惯性、滞后性的产生来源。锅炉中未完全燃烧的残碳定义为活性残碳，目前活性残碳存量是无法用仪器测量的变量，给循环流化床燃烧系统的调节和控制带来了困难，燃烧系统不稳定而引起的停炉事故很多都是因为床温或者床压无法稳定。活性残碳的燃烧是床温的决定性因素，准确地估算活性残碳的存量对于控制系统和提高燃烧效率非常重要^[19,20,29]，因此对循环流化床锅炉活性残碳动态特性进行研究具有重要的实际意义。

在循环流化床锅炉燃烧过程中，送入炉膛内的燃料中碳颗粒主要有 3 种演化可能，即一部分燃烧释放热量，一部分积蓄在锅炉床料中，一部分作为损失存在于飞灰和底渣。积蓄在床料中的碳颗粒即为活性残碳颗粒，因此通过燃料量、活性残碳存量的消耗量以及飞灰和底渣的排量，根据碳颗粒的质量守恒可以推算出活性残碳存量。基于 CPFD 方法，在数值模型中设置相应的通量面，可以得到炉膛出口的氧量、飞灰生成量以及底渣排量。如图 2 所示，设置 3 个活性残碳存量动态模型通量面，其中 O₂ 通量面设置在炉膛出口，可以通过模拟得到炉膛出口的 O₂ 浓度；飞灰通量面设置在旋风分离器出口，

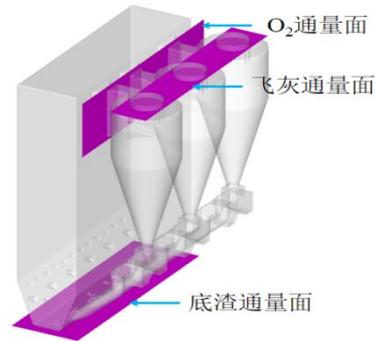


图 2 活性残碳存量动态模型通量面设置

Fig. 2 Flux surface of dynamic model of active carbon residue stock

单个活性残碳颗粒的燃烧速率 r_c 为 (1) ^[30,31]:

$$(1)$$

式中： r_c ——单个活性残碳颗粒的燃烧速率，kg/h； d_c ——活性残碳颗粒的平均直径，m； k_c ——活性残碳颗粒的燃烧速率常数； P ——炉膛内的平均床压，Pa； R ——摩尔气体常数， $R=8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； T ——炉膛内的平均床温，K； γ ——炉膛出口的氧气浓度，%。

根据炉膛床温对活性残碳颗粒燃烧速度的影响，可以得到锅炉中活性残碳颗粒燃烧速率常数 k_c 的表达式为 (2) ^[32]:

$$(2)$$

假设活性残碳存量 B 全部由粒径为 d_c 的颗粒组成，则活性残碳存量的燃烧速率 R_c 为 (3)：

$$(3)$$

式中： R_c ——活性残碳存量的燃烧速率，kg/h；

B ——活性残碳存量, kg; ρ_c ——活性残碳颗粒的密度, kg/m^3 。

由式 (1) 和式 (3) 得 (4) :

$$(4)$$

基于活性残碳颗粒的质量守恒, 建立活性残碳存量动态模型, 可得 (5) :

$$(5)$$

式中: $W(t)$ ——进入锅炉的燃料量, kg/h ; X_B ——燃料的收到基碳质量分数, %; $Z(t)$ ——排渣流率, kg/h ; X_z ——底渣含碳量, %; $F(t)$ ——飞灰流率, kg/h ; X_F ——飞灰含碳量, %。活性残碳存量动态模型的相关参数如表 2 所示。

表 2 活性残碳存量动态模型的相关参数

Table 2 Parameters of dynamic model of active carbon residue stock

项目	数值
X_B (%)	32.86
X_z (%)	1.29
X_F (%)	1.91
d_c (m)	5×10^{-4}
ρ_c (kg/m^3)	1800

2.2 活性石灰石存量动态模型

循环流化床锅炉运行温度通常在 $850^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$, 这是一个理想的脱硫温度区间, 采用炉内脱硫技术, 向炉内加入石灰石作为脱硫剂, 燃料及脱硫剂经多次循环, 反复进行低温燃烧和脱硫反应。然而, 过量的脱硫剂会造成很大的附加灰渣量和相应物理热损失, 同时又增加了炉膛磨损, 影响燃烧工况和锅炉效率。对炉内存储的活性石灰石存量状态进行监测, 可以提前了解炉膛内当前的脱硫状况, 及时调节石灰石给料量控制 SO_2 排放, 避免 SO_2 排放浓度不稳定和石灰石投入过量。

循环流化床锅炉中存储的未完全反应的钙基脱硫剂 (CaO) 定义为活性石灰石, 钙基脱硫剂主要有两类来源, 一类是石灰石进入炉膛高温分解成 CaO 和 CO_2 ; 另一类是燃料的灰分中含有一定的 CaO 成分, 这部分 CaO 对 SO_2 同样具有固硫作用^[25]。循环流化床锅炉粒度合格的燃料由给煤机送至锅炉落煤管上方, 入炉煤为洗中煤、煤矸石和煤泥的混煤, 每个返料腿上设有一个石灰石给料口。石灰石喷管插入返料腿中, 石灰石粉采用气力输送, 进

入炉膛的石灰石和燃料中析出的 SO_2 进行脱硫反应, 未反应的活性石灰石积蓄在床料中, 另外一部分石灰石伴随底渣和飞灰排放。如图 3 所示, 设置 3 个活性石灰石存量动态模型通量面, 分别对飞灰排量、底渣排量和炉膛出口 SO_2 浓度进行模拟计算, 其中 SO_2 通量面设置在炉膛出口, 可以得到炉膛出口 SO_2 的浓度。

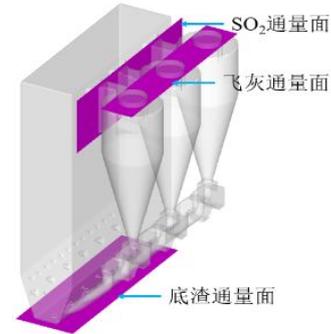


图 3 活性石灰石存量动态模型通量面设置

Fig. 3 Flux surface setting of dynamic model of active limestone stock

单个活性石灰石颗粒的反应速率 r_{ca} 为 (6) ^[33,34]:

$$(6)$$

式中: r_{ca} ——单个活性石灰石颗粒的反应速率, kg/h ; d_{ca} ——活性石灰石颗粒的平均直径, m ; k_{ca} ——活性石灰石颗粒的反应速率常数; ——炉膛出口的 SO_2 浓度, kg/m^3 。

活性石灰石颗粒反应速率常数 k_{ca} 的表达式为 (7) ^[35]:

$$(7)$$

式中: T ——炉膛内的平均床温, K ; R ——摩尔气体常数, $R=8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; S_g ——活性石灰石有效比表面积, m^2/kg ; λ ——石灰石反应活性系数, 取值为 0.035。

活性石灰石有效比表面积 S_g 的表达式为 (8) ^[36]:

$$(8)$$

假设活性石灰石存量 C 全部由粒径为 d_{ca} 的颗粒组成, 则活性石灰石存量的反应速率 R_{ca} 为 (9) :

$$(9)$$

式中: R_{ca} ——活性石灰石存量的燃烧速率, kg/h ; C ——活性石灰石存量, kg ; ρ_{ca} ——活性石

灰石颗粒的密度, kg/m^3 。

由式 (6) 和式 (9) 得 (10) :

$$(10)$$

基于石灰石的质量守恒, 建立活性石灰石存量动态模型, 可得 (11) :

$$(11)$$

式中: $M(\text{CaO})$ ——CaO 的摩尔质量, kg/mol ; $M(\text{CaCO}_3)$ —— CaCO_3 的摩尔质量, kg/mol ; X_C ——石灰石中 CaCO_3 的质量分数, %; $H(t)$ ——石灰石给料量, kg/h ; $W(t)$ ——进入锅炉的燃料量, kg/h ; X_D ——燃料中 CaO 的质量分数, %; $Z(t)$ ——排渣流率, kg/h ; Y_z ——底渣中 CaO 含量, %; $F(t)$ ——飞灰流率, kg/h ; Y_F ——飞灰中 CaO 含量, %。活性石灰石存量动态模型的相关参数如表 3 所示。

表 3 活性石灰石存量动态模型的相关参数

Table 3 Parameters of dynamic model of active limestone stock

项目	数值
X_C (%)	90
X_D (%)	2.5
Y_z (%)	0.58
Y_F (%)	2.18

3 结果与讨论

3.1 周期性压火启动过程气固流动特性

从表 1 可以看出, 循环流化床锅炉周期性压火启动过程可以分为 7 个阶段: 阶段 1 为负荷 100MW 稳定工况阶段; 阶段 2 为停止给煤机和石灰石输送阶段; 阶段 3 为炉膛温度降至约 750°C 时, 停止一次风机和高压流化风机; 阶段 4 为炉膛温度降至约 700°C 时, 停止二次风机和引风机; 阶段 5 为炉膛温度降至约 600°C 时, 启动一次风机、高压流化风机和引风机; 阶段 6 为启动二次风机、给煤机和石灰石输送机; 阶段 7 为锅炉恢复到负荷 100MW 稳定工况阶段。锅炉不同阶段的颗粒流场变化如图 4 所示。

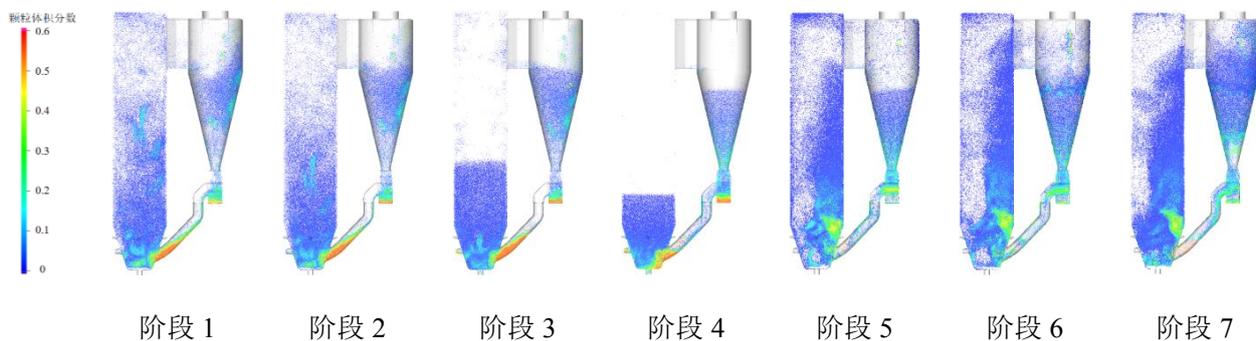


图 4 不同阶段颗粒流场变化

Fig. 4 Particle flow field change at different stages

为了更清晰地表达不同阶段的颗粒流场, 不同阶段密相区、稀相区和返料室的颗粒体积分数变化如图 5 所示。循环流化床锅炉处于阶段 1 时, 由于工况稳定, 炉膛内的颗粒流动呈现稳定状态。颗粒体积分数随着炉膛高度增大呈下降趋势, 由于二次风的扰动以及回料阀返料影响, 密相区颗粒体积分数分布不均匀, 密相区平均颗粒体积分数为 0.14; 稀相区受二次风和返料影响较小, 床料比密相区分布均匀, 稀相区的平均颗粒体积分数为 0.051; 回料阀返料室的平均颗粒体积分数为 0.48。锅炉的循环倍率约为 30, 由于炉膛内存在大量的床料, 停止给煤机后 (阶段 2), 炉膛内的颗粒体积分数先保

持不变, 后呈下降趋势, 其中密相区平均颗粒体积分数从 0.14 降至 0.11, 稀相区平均颗粒体积分数从 0.051 降至 0.018, 返料室平均颗粒体积分数从 0.48 降至 0.44。压火启动过程达到阶段 3 时, 一次风机和高压流化风机停止, 大颗粒物料开始回落, 小颗粒物料受引风机作用进入旋风分离器, 二次风扰动对物料回落速度产生影响, 密相区颗粒体积分数增加到 0.25, 稀相区颗粒体积分数迅速降至 0, 返料室平均颗粒体积分数从 0.44 增加到 0.50。当停止二次风机和引风机后 (阶段 4), 锅炉处于密闭状态, 炉膛内物料回落速度加快, 返料腿内的物料受重力作用返回到炉膛, 密相区平均颗粒体积分数为 0.45,

返料室在物料沉积后颗粒体积分数达到了 0.52。当锅炉进行热态启动时，首先启动一次风机、高压流化风机和引风机（阶段 5），使床料达到流化状态，密相区平均颗粒体积分数为 0.18，稀相区平均颗粒体积分数为 0.028，返料室平均颗粒体积分数为 0.44。对料层流化后的温度进行监测，如果仍可以达到煤燃烧温度，启动二次风机、给煤机和石灰石输送机（阶段 6），并且通过不断调整给煤量和风量，使锅炉恢复到压火前的燃烧状态，密相区、稀相区和返料室的颗粒体积分数和阶段 1 相当，分别为 0.14、0.050 和 0.48。

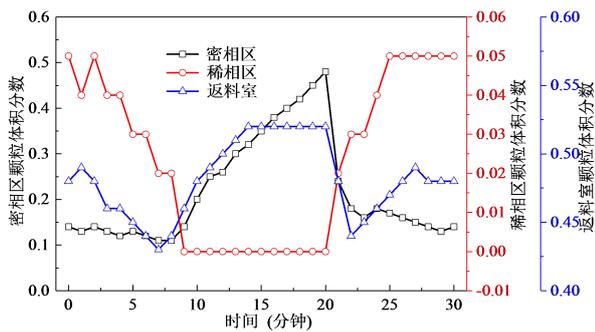


图 5 颗粒体积分数分布

Fig. 5 Particle volume fraction distribution

3.2 周期性压火启动过程活性残碳存量动态特性

周期性压火启动过程燃料和灰渣中总碳量动态变化如图 6 所示。阶段 1 燃料中总碳量从 26646.05kg/h 降至 24015.12kg/h；阶段 2 到阶段 5 由于停止燃料供给，燃料中总碳量均为 0kg/h；阶段 6 启动给煤机后，燃料中总碳量急剧上升，从 1500.25kg/h 增大到 25500.50kg/h，燃料中总碳量变化率为 3428.57kg/h；阶段 7 恢复到压火前的燃料中总碳量，为 26650.46kg/h。阶段 1 到阶段 2，飞灰中总碳量从 559.83kg/h 降至 350.05kg/h，阶段 3 开始停止飞灰排放。阶段 1 到阶段 3 底渣中总碳量从 309.36kg/h 降至 100.68kg/h，阶段 4 开始停止底渣排放。随着阶段 6 启动给煤机后，飞灰和底渣排放开启，飞灰中总碳量从 31.52kg/h 增至 545.76kg/h，底渣中总碳量从 17.42kg/h 增大至 296.06kg/h。

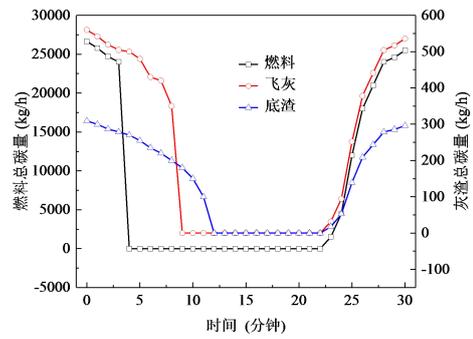


图 6 燃料和灰渣的碳量动态变化

Fig. 6 Dynamic change of carbon content of fuel and ash slag

循环流化床锅炉的周期性压火启动操作以及压火时间取决于床温的变化，压火过程炉膛内物料的沉积状态可以通过床压反映，同时炉膛内燃料的燃尽程度可以通过炉膛出口氧量变化进行监测，周期性压火启动过程床温、床压和氧量的动态变化如图 7 所示。阶段 1 锅炉运行稳定，床温、床压和氧量呈现稳定波动，活性残碳存量为 6353.11kg，平均床温为 1051.31K，平均床压为 1108Pa，氧气浓度为 5.35%。阶段 2 停止给煤机和石灰石输送后，由于炉膛内存在大量的活性残碳以及挥发分，床温和氧量刚开始变化不大，随着活性残碳和挥发分的消耗，平均床温从 1051.31K 降至 976.55K，氧量急剧上升，从 5.35% 增加到 17.59%，平均床压从 1108Pa 变化到 871Pa。当床温降至 970K，氧量约为 18.62%，表明炉膛内的活性残碳和挥发分已经基本燃尽，活性残碳存量仅为 100.55kg。为避免旋风分离器和回料装置内的低温物料返回炉膛，此时一次风机和高压流化风机停止，炉膛内物料开始回落。随着床温降至约 920K 时，炉膛出口氧量持续上升，停止二次风机和引风机，锅炉进入密闭状态，不再有空气进入，由于可燃物进一步燃烧，氧气浓度出现了一些波动，最终稳定在 20.82%，活性残碳存量降至 0kg。床温降至 950K 后，降温速率变小，由 10K/min 变为 3K/min，表明锅炉的热量损失减弱，从而延长压火时间。随着床料回落，平均床压从 975Pa 降至 544Pa，床料回落完成后，平均床压稳定在 532Pa。阶段 5 启动一次风机、高压流化风机和引风机后，氧气浓度保持不变，平均床温从 900.05K 降至 800.55K，平均床压从 529Pa 增加到 721Pa。启动给煤机和二次风机后（阶段 6），氧气浓度急剧下降，从 20.91% 降至 8.01%，活性残碳存量增至 2868.76kg，平均床温从 800.55K 增加到 950.05K，表明燃烧正常，此时平均床压为 961Pa。阶段 7 的床温、床压和氧量与阶段 1 相当，活性残碳存量为

6550.05kg, 平均床温为 1046.31K, 平均床压为 1095Pa, 氧气浓度为 5.10%。

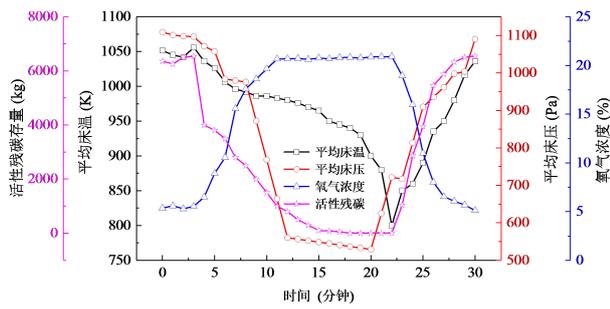


图 7 活性残碳存量、床温、床压和氧量的动态变化

Fig. 7 Dynamic change of active carbon stock, bed temperature, bed pressure and oxygen

3.3 周期性压火启动过程活性石灰石存量动态特性

图 8 所示为周期性压火启动过程燃料中 CaO 和石灰石中 CaO 的动态变化。周期性压火启动过程分为 7 个阶段, 阶段 1 为稳定负荷 100MW, 燃料中 CaO 的平均值为 632.25kg/h, 石灰石中 CaO 的平均值为 16314.48kg/h。

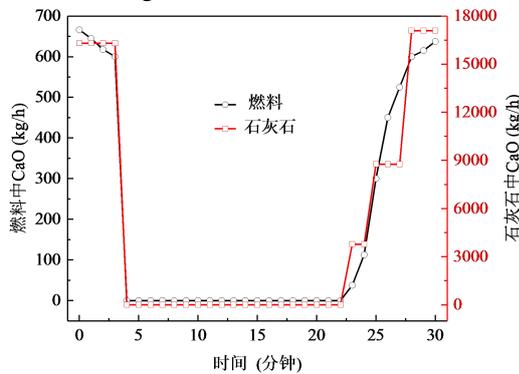


图 8 燃料和石灰石中 CaO 的动态变化

Fig. 8 Dynamic change of coal and limestone CaO

周期性压火启动过程活性石灰石存量、SO₂ 浓度、平均床温和脱硫效率的动态变化如图 9 所示。阶段 1 为负荷 100MW 稳定工况阶段, 平均床温为 1045.10K, 低于循环流化床锅炉的最佳脱硫温度, 脱硫效率为 59.58%, SO₂ 浓度为 3380.15mg/m³, 活

4 结 论

1) 基于 CFPD 方法, 构建了循环流化床锅炉活性残碳存量动态模型和活性石灰石存量动态模型, 对周期性压火启动过程的气固流动特性和活性

性石灰石存量为 2702.29kg。阶段 2 停止给煤和石灰石后, 由于炉膛内有大量的活性残碳和活性石灰石, 阶段 2 初始 SO₂ 浓度和稳定工况阶段相近, 脱硫效率没有明显变化, 第 5 分钟后的平均床温为 1036.01K, 脱硫效率下降到 51.03%, SO₂ 浓度为 2519.29mg/m³, 活性石灰石存量为 800.37kg。阶段 3 停止一次风机和高压流化风机后, 床料开始回落, 由于炉膛内 SO₂ 浓度达到了 1847.93mg/m³, 脱硫反应仍在进行, 此时床料状态接近固定床, 平均床温为 986.05K, 脱硫效率明显下降, 脱硫效率仅为 19.93%, 活性石灰石存量为 500.37kg。阶段 4 停止二次风机和引风机, 锅炉处于密闭状态, 床料回落完成后, 平均床温为 930.15K, 活性石灰石存量为 0kg, 脱硫反应停止, SO₂ 浓度为 502.44mg/m³。阶段 5 启动一次风机、高压流化风机和引风机后, 平均床温降至 800.01K, SO₂ 浓度为 200.86mg/m³。阶段 6 启动二次风机、给煤机和石灰石输送机后, 床温从 800.01K 上升到 980K, 活性石灰石存量增加到 1482.93kg, 脱硫效率达到了 50.35%, SO₂ 浓度为 1652.97mg/m³。阶段 7 恢复到负荷 100MW 稳定工况, 平均床温为 1036.95K, 活性石灰石存量平均值为 2374.90kg, 脱硫效率稳定在 62.05%, SO₂ 浓度平均值为 2350.56mg/m³。这是因为阶段 7 和阶段 1 均为 100MW 负荷, 锅炉处于稳态运行状态, 脱硫效率相近。由图 8 可知, 此时阶段 1 的燃料量高于阶段 7, 因此阶段 7 的 SO₂ 浓度低于阶段 1。

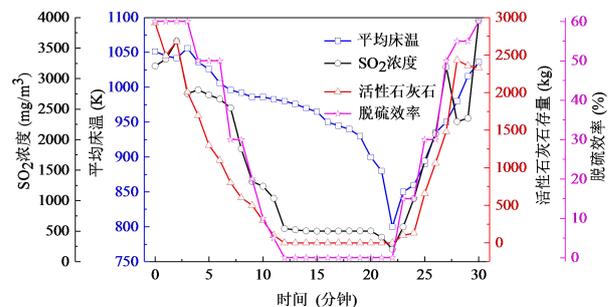


图 9 活性石灰石、SO₂ 浓度、床温和脱硫效率的动态变化

Fig. 9 Dynamic change of active limestone, SO₂ concentration, bed temperature and desulfurization efficiency

存量动态特性进行研究。

2) 当停止二次风机和引风机后 (阶段 4), 锅炉处于密闭状态, 炉膛内物料回落速度加快, 返料

腿内的物料受重力作用返回到炉膛，密相区平均颗粒体积分数为 0.45，返料室在物料沉积后颗粒体积分数达到了 0.52。

3) 周期性压火启动过程中，稳定工况阶段活性残碳存量为 6353.11kg，氧气浓度为 5.35%。启动二次风机和给煤机后，氧气浓度急剧下降，活性残碳存量增至 2868.76kg。

4) 周期性压火启动过程，稳定工况阶段脱硫效率为 59.58%，活性石灰石存量为 2702.29kg。启动二次风机和给煤机后，活性石灰石存量增加到 1482.93kg，脱硫效率达到了 50.35%。

参考文献(References):

- [1] 冯俊凯, 岳光溪, 吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[M]. 北京: 电力工业出版社, 2003.
FENG Junkai, YUE Guangxi, LV Junfu. Investigation on Design Rule of CFB Boiler [M]. Beijing: Electric Power Industry Press, 2003.
- [2] 崔健. 煤与石油焦混燃的循环流化床锅炉重金属、SO_x和 Cl 排放特性[D]. 南京: 东南大学, 2018.
CUI Jian. Emission characteristics of heavy metal SO_x and Cl from circulating fluidized bed boilers co-firing petroleum coke and coal [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [3] 赵立正. 煤研混烧超临界 CFB 锅炉气固流动及污染物生成特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
ZHAO Lizheng. Research on Gas-solid Flow and Pollutants Generation Characteristics of a Coal-gangue-fired Supercritical CFB Boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [4] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
XU Xuchang, LV Junfu, ZHANG Hai. Combustion Theory and Combustion Equipment [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [5] 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 Guangxi, LV Junfu, XU Peng, etc. The Up-To-Date Development and Future of Circulating Fluidized Bed Combustion Technology [J]. China Electric Power, 2016, 49 (1): 1-13.
- [6] 吴守城. 300MW CFB 锅炉动态特性研究及仿真建模[D]. 南京: 东南大学, 2015.
WU Shoucheng. Research on Dynamic Characteristics and Simulation Modeling of 300MW CFB Boiler [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [7] 岑可法, 倪明江, 骆仲泐, 等. 循环流化床锅炉理论与设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
CEN Kefa, NI Mingjiang, LUO Zhongyang, etc. Theoretical design and operation of circulating fluidized bed boilers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [8] 吕俊复, 岳光溪, 张建胜, 等. 循环流化床锅炉运行与检修(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
LV Junfu, YUE Guangxi, ZHANG Jiansheng, etc. Operation and Maintenance of Circulating Fluidized Bed Boilers (Second Edition) [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2005.
- [9] 黄中. 循环流化床锅炉优化改造技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
HUANG Zhong. Optimization and renovation technology for circulating fluidized bed boilers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [10] LYU J, YANG H, LING W. Development of a supercritical and an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Frontiers in Energy, 2019, 13: 114-119.
- [11] 周一工. 中国循环流化床锅炉的发展: 从低压到超临界[J]. 锅炉技术, 2009, 40(20): 21-27.
ZHOU Yigong. The development of circulating fluidized bed boilers in China: from low pressure to supercritical [J]. Boiler Technology, 2009, 40 (20): 21-27.
- [12] 孙献斌. 循环流化床锅炉大型化的发展与应用[J]. 电站系统工程, 2009, 25(4): 1-4.
SUN Xianbin. Scaling-up Development and application of Circulating fluidized bed boiler [J]. Power Station System Engineering, 2009, 25 (4): 1-4.
- [13] 帅太平. 超临界循环流化床锅炉气固流动和结构布置优化实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
SHUAI Daping. Experimental Study on Hydrodynamics and Structural Arrangements Optimization of Supercritical Circulating Fluidized Bed Boilers [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [14] 郑兴胜. 首台自主研发 600MW 超临界 CFB 锅炉启动调试及试运行[J]. 东方电气评论, 2014, 28(1): 1-4.
ZHENG Xingsheng. Startup Debugging and Commissioning of the First Independent R&D 600 MW Supercritical CFB Boiler [J]. Dongfang Electric Review, 2014, 28 (1): 1-4.

- [15] 邹阳军, 何胜, 郑文广. 超临界循环流化床锅炉的发展[J]. 能源工程, 2016, 35(4): 19-24.
ZOU Yangjun, HE Sheng, ZHENG Wenguang. Development of supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Energy Engineering, 2016, 35 (4): 19-24.
- [16] 周金良. 白马 600MW 超临界 CFB 锅炉二次风均匀性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
ZHOU Jinliang. Research on the Uniformity of Secondary Air of Baima 600MW Supercritical CFB Boiler [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [17] 连娥桂. 世界首台 350MW 超临界 CFB 低热值煤发电机组配套 DSC-M 烟气干式超净技术在山西国金电力的应用[J]. 能源与环境, 2019, 36(2): 81-83.
LIAN Egui. The application of the world's first 350MW supercritical CFB low calorific value coal power generation unit equipped with DSC-M flue gas dry ultra clean technology in Shanxi Guojin Power [J]. Energy and Environment, 2019, 36 (2): 81-83.
- [18] 翟小俊, 宋海峰, 赵耀兴. 350MW 超临界 CFB 锅炉给水运行调整控制浅析[J]. 山东工业技术, 2018, 6(22): 157+218.
ZHAI Xiaojun, SONG Haifeng, ZHAO Yaoxing. Analysis of Adjustment and Control of Feed Water Operation for 350MW Supercritical CFB Boiler [J]. Shandong Industrial Technology, 2018, 6 (22): 157+218.
- [19] 高明明, 岳光溪, 雷秀坚, 等. 600MW 超临界循环流化床锅炉控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(35): 6319-6328.
GAO Mingming, YUE Guangxi, LEI Xiujian, etc. Research on Control System of 600MW Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34 (35): 6319-6328.
- [20] 高明明, 刘吉臻, 牛玉广, 等. 基于 EKF 技术的 CFB 锅炉残碳量估计[J]. 热能动力工程, 2013, 28(5): 492-496+552-553.
GAO Mingming, LIU Jizhen, NIU Yuguang, etc. Application of the Extended Kalman Filtering Technology in the Estimation of the Residual Carbon Content of a CFB Boiler [J]. Thermal Power Engineering, 2013, 28 (5): 492- 496+552-553.
- [21] BIDWE A, DUELLI G, DIETER P, et al. Experimental study of the effect of friction phenomena on actual and calculated inventory in a small-scale CFB riser [J]. Particuology, 2015, 21: 41-47.
- [22] CHOURASIA S, ALAPPAT B. Effects of various parameters on the attrition of bed material in a recirculating fluidized bed with a draft tube [J]. Particuology, 2017, 34: 162-172.
- [23] YANG H, ZHANG H, YANG S, et al. Effect of bed pressure drop on performance of a CFB boiler [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(6): 2886-2890.
- [24] 刘光辉, 张秋红, 巩建华, 等. 添加石灰石脱硫对 CFB 锅炉热效率的影响[J]. 能源工程, 2019, 38(3): 43-44+50.
LIU Guanghui, ZHANG Qihong, GONG Jianhua, etc. Influence of limestone desulfurization to CFB thermal efficiency [J]. Energy Engineering, 2019, 38 (3): 43-44+50.
- [25] 高明明, 岳光溪, 雷秀坚, 等. 循环流化床锅炉石灰石控制研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(10): 759-764+777.
GAO Mingming, YUE Guangxi, LEI Xiujian, etc. Research on Limestone Control of Circulating Fluidized Bed Boiler [J]. Journal of Power Engineering, 2014, 34 (10): 759-764+777.
- [26] PARK C, BASU P. A model for prediction of transient response to the change of fuel feed rate to a circulating fluidized bed boiler furnace[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(20): 3499-3509.
- [27] 颜云, 周建新, 汪军, 等. 基于 gCCS 的 330MW 循环流化床锅炉燃烧系统动态建模[J]. 锅炉技术, 2016, 47(6): 27-32+40.
YAN Yun, ZHOU Jianxin, WANG Jun, etc. Dynamic Modeling for the Combustion System of a 330MW CFB Boiler Based on gCCS [J]. Boiler Technology, 2016, 47 (6): 27-32+40.
- [28] 申欣, 赵强, 乔晓磊, 等. 超临界 CFB 锅炉压火特性现场试验与数值模拟[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2797-2807.
SHEN Xin, ZHAO Qiang, QIAO Xiaolei, etc. Field test and numerical simulation of banked fire characteristics of supercritical CFB boiler [J]. Journal of Coal Science, 2022, 47 (7): 2797-2807.
- [29] 高明明, 刘吉臻, 牛玉广, 等. 裤衩腿结构循环流化床锅炉热量与残碳量的研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(2): 93-99.
GAO Mingming, LIU Jizhen, NIU Yuguang, etc. Study on Heat Release and Carbon Residue of CFB Boiler with Breeches Legs [J]. Journal of Power Engineering, 2013, 33 (2): 93-99.
- [30] WANG Q, LUO Z. A mathematical model for a circulating fluidized bed boiler [J]. Energy, 1999, 24(7):

633-653.

- [31] 高明明. 大型循环流化床锅炉燃烧状态监测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
GAO Mingming. Research on Combustion State Monitoring of Large Circulating Fluidized Bed Boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [32] NAUZE R. Mass transfer considerations in fluidised-bed combustion with particular reference to the influence of system pressure [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 1985, 64(4): 219-229.
- [33] 王帆. 循环流化床锅炉燃烧室建模与仿真[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
WANG Fan. Modeling and Simulation CFBB Combustion Chamber [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [34] 刘云飞. 循环流化床锅炉最佳风煤比模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
LIU Yunfei. Study on Model of Optimal Wind-coal Ratio in Circulating Fluidized Bed Boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [35] FERNÁNDEZ M, LYNGFELT A. Concentration of sulphur compounds in the combustion chamber of a circulating fluidised-bed boiler [J]. *Fuel*, 2001, 80(3): 321- 326.
- [36] DL/T 1150-2012. 火电厂烟气脱硫装置验收技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
DL/T 1150-2012. Acceptance technical specification of flue gas desulfurization equipment for thermal power plant [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.