

# 基于 Aspen Plus 的超超临界循环流化床锅炉的性能计算及分析

李娟, 李银龙, 牛田田, 辛亚飞, 杨冬

(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)

**摘要:** 循环流化床发电技术以其特有的优势, 得到了迅速发展和广泛应用。近年来, 为了实现超低排放和超低能耗, 大型化与高参数化的超超临界循环流化床锅炉(CFB)的设计研究成为我国洁净煤发电技术的主要发展方向。目前超超临界发电机组的基础理论与设计计算还不完善, 因此对于其运行模拟以及在运行条件变化时锅炉主要参数的预测尤为重要。Aspen Plus 能够对复杂的化工过程进行精细的稳态模拟和流程设计, 基于 Aspen Plus 软件提供的内置模块和 FORTRAN 编译器的外部子程序, 建立了 660 MW 超超临界 CFB 锅炉燃烧室煤解耦燃烧过程模拟模型, 主要包括煤的等效热解模型、简约解耦燃烧模型、分离器、外置床及尾部烟道低温过热器、低温再热器模型。依据所建立的稳态模型, 可模拟计算 660 MW 超超临界循环流化床锅炉在满负荷工况(B-MCR)下锅炉性能, 得到其各处主要温度的计算结果, 分析燃烧室中密相区和疏相区的气体组分浓度, 并且预测了循环流化床燃烧室运行参数一次风配比对密相区组分  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{SO}_2$  浓度的影响以及过量空气系数对排烟气体组分  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的影响。同时, 利用该模型计算了过量空气系数和改变一次返料比例对中温过热器、低温过热器出口汽温和低温再热器、省煤器出口烟温的影响。在 660 MW 超超临界循环流化床锅炉的设计研究上, 为降低污染物排放、减少锅炉热损失和提高锅炉效率提供了参考依据。

**关键词:** 超超临界; CFB; Aspen Plus; 耦合燃烧; 数学建模

中图分类号: TK229 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2020)03-0031-07

## Performance calculation and analysis of ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler based on Aspen Plus

LI Juan, LI Yinlong, NIU Tiantian, XIN Yafei, YANG Dong

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

**Abstract:** Circulating fluidized bed(CFB) power generation technology has been rapidly developed and widely used due to its unique advantages. In recent years, in order to achieve the goals of ultra-low emission and ultra-low energy consumption, the design and research of large-scale and high-parameter ultra-supercritical CFB boiler) has become the main development direction of clean coal power generation technology in China. At present, the basic theory and design calculations of ultra-supercritical generating units are not perfect, so it is particularly important for the simulation of its operation and the prediction of the main parameters of the boiler when the operating conditions change. Aspen Plus can perform sophisticated steady-state simulation and process design of complex chemical processes. Based on the built-in modules provided by the Aspen Plus software and the external subroutines of the FORTRAN compiler, the simulation model of coal decoupled combustion process in combustion chamber of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler was established. The process simulation model mainly includes the equivalent pyrolysis model of coal, simplified decoupled combustion model, separator, external bed

收稿日期: 2020-01-16; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20011602

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600201)

作者简介: 李娟(1994—), 女, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事多相流动与传热研究。E-mail: 1640235257@qq.com。

通讯作者: 杨冬, 博士生导师, 研究方向为多相流与锅炉水动力。E-mail: dyang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 李娟, 李银龙, 牛田田, 等. 基于 Aspen Plus 的超超临界循环流化床锅炉的性能计算及分析[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 31-37.

LI Juan, LI Yinlong, NIU Tiantian, et al. Performance calculation and analysis of ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler based on Aspen Plus[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 31-37.



移动阅读

and tail flue low temperature superheater and low temperature reheater model. Based on the established steady-state model, the performance of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler under full-load operating conditions (B-MCR) was simulated and calculated. The calculation results of its main temperature can be obtained, the gas component concentrations in the dense phase zone can be analyzed and the sparse phase zone in the combustion chamber, and the influence of the primary air ratio of the CFB combustion chamber operating parameters on the concentration of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  and  $\text{SO}_2$  in the dense phase zone and the influence of excess air coefficient on the concentration of the exhaust gas components  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}$  and  $\text{N}_2\text{O}$  can be successfully predicted. At the same time, the model was used to calculate the effect of excess air coefficient and changing the ratio of primary return material on the outlet steam temperature of medium temperature superheater, low temperature superheater, and the temperature of flue gas at low temperature reheater and economizer. The design and research of the 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler provides a reference basis for reducing pollutant emissions, reducing boiler heat loss and improving boiler efficiency.

**Key words:** ultra-supercritical; CFB; Aspen Plus; coupled combustion; mathematical modeling

## 0 引言

循环流化床(CFB)锅炉的大型化和高参数化具有节能和环保双重效益,从亚临界参数(16.7 MPa, 538/538  $^{\circ}\text{C}$ )提高到超临界参数(24.1 MPa, 538/538  $^{\circ}\text{C}$ ),发电效率可提高3.0%,若采用超超临界参数,热效率还可以提高2%~4%<sup>[1]</sup>,大型化与高参数化是 CFB 锅炉技术发展的必然趋势。

目前已有1台600 MW和42台350 MW超临界 CFB 投入商业运行,2台660 MW超临界 CFB 进入调试阶段。这些锅炉机组投入运行后,经逐步完善,显示出良好的经济性和排放控制优势<sup>[2-3]</sup>。为了进一步提高效率、降低排放,超超临界 CFB 锅炉的设计研究势在必行。

目前大型化与高参数化的循环流化床锅炉的基础理论与设计计算还不完善,尤其是超超临界 CFB 锅炉,因此对于其运行模拟以及在运行条件变化时锅炉主要参数的预测尤为重要。Aspen Plus 作为先进的过程模拟软件,被广泛应用于石油化工、电力等领域的流程设计和模拟,可实现过程优化、技术可靠性、经济效益和环境评估。Aspen Plus 基于顺序模块化方法和面向方程的方法进行灵敏度分析、设计优化和案例研究,可应用于模拟含有固体、电解质、煤和生物质的稳态过程<sup>[4-7]</sup>。

Aspen Plus 软件应用于煤解耦燃烧技术,以降低  $\text{NO}_x$  排放,特别是降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[8]</sup>。在无  $\text{O}_2$  环境

中,煤热解气相产物中的 N 主要以还原性物质  $\text{NH}_3$  形式存在;而在有  $\text{O}_2$  环境中,气相产物中的 N 以  $\text{NO}_x$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  形式存在。本文建立的煤耦合燃烧模型中,煤解耦燃烧过程分为3个阶段:①煤颗粒在 RYield 反应器中热解后,在化学计量 RStoic 反应器中合成煤热解产物;②热解产物在 GIBBS 反应器中烧尽,于 CFB 顶部安装的旋风分离器中分离气体、灰及未燃烧尽的煤颗粒;③煤焦燃烧生成的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  与热解气相产物中含氮化合物  $\text{NH}_3$ , 在燃烧区上部发生还原反应,降低  $\text{NO}_x$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的排放。基于 Aspen Plus 建立的 660 MW 超超临界循环流化床锅炉煤解耦燃烧模型中,模拟了循环流化床燃烧室中一次风配比对密相区气体组分浓度以及过量空气系数对排放烟气组分浓度的影响,定量计算了过量空气系数和一次返料比例对中温过热器、低温过热器出口汽温和低温再热器、省煤器出口烟温的影响。

## 1 660 MW 超超临界 CFB 锅炉

### 1.1 系统结构

660 MW 超超临界 CFB 采用单炉膛单布风板结构, M 型布置, 4 个汽冷旋风分离器, 分别对应 4 个中温过热器外置床, 一次中间再热, 尾部双烟道结构, 前烟道布置低温再热器, 后烟道布置低温过热器, 低温再热器温度由挡烟板调节, 2 台回转式空气预热器, 8 个排渣口。在 BMCR 工况时锅炉主要设计参数见表 1。

表 1 锅炉主要参数

Table 1 Main parameters of boiler

主汽流量/ ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	主汽压力/ MPa	主汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	再热蒸汽流 量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	再热器入口		再热器出口		给水温 度/ $^{\circ}\text{C}$
				压力/MPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/MPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	
1 925.1	29.4	605	1 619.1	5.696	352	5.464	623	300

### 1.2 锅炉汽水流程

660 MW 超超临界 CFB 锅炉汽水流程如图 1 所

示。锅炉给水首先进入省煤器(ECO)进口集箱,经省煤器加热后由导管引至集中下降管进入炉膛水冷

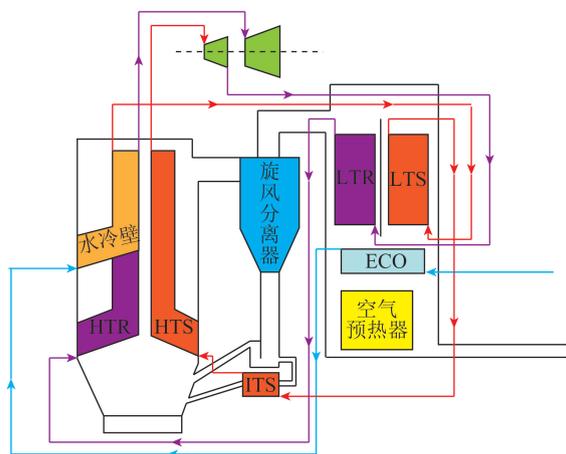


图 1 660 MW 超超临界 CFB 锅炉汽水流程

Fig.1 660 MW ultra-supercritical CFB boiler steam water process

壁下集箱,经炉膛屏式水冷壁加热后成为过热蒸汽,再通过导管引入汽冷分离器的下集箱,经蒸汽连接管引至布置在尾部后烟道的低温过热器(LTS),再进入布置在外置床中的中温过热器(ITS),经连接管引入炉膛内壁中的高温过热器(HTS),最后将合格的过热蒸汽引向汽轮机。从汽轮机引出的再热蒸

表 2 燃料工业分析和元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of fuel

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{ar,net}/$
$A_{ar}$	$M_{ar}$	$V_{ar}$	$FC_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$	$(MJ \cdot kg^{-1})$
43.690	5.220	31.691	19.399	40.06	2.89	0.71	0.94	6.49	15.557

根据物料平衡原理,由稳定的元素物质(除 Ash、UBC)在化学计量反应器(RStoic)中合成煤热解产物(气态挥发分和煤焦),其中气态挥发性物质的主要成分为  $CH_4$ 、 $H_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$  和焦油。

煤的气态挥发分产率计算公式<sup>[10]</sup>为

$$V_{yield} = VM - \alpha - \beta \quad (1)$$

$$\alpha = \exp(26.41 - 3.961 \ln T + 0.011 5VM) \quad (2)$$

$$\beta = 0.2(VM - 10.9) \quad (3)$$

式中,  $V$  为挥发分;  $M$  为水分;  $T$  为热解温度。

煤热解产物气态挥发分中各组分的质量分数

$\omega(i)$ <sup>[10]</sup>为

$$\omega(CH_4) = 0.201 - 0.469(VM/100) + 0.241(VM/100)^2 \quad (4)$$

$$\omega(H_2) = 0.157 - 0.868(VM/100) + 1.388(VM/100)^2 \quad (5)$$

$$\omega(CO_2) = 0.135 - 0.900(VM/100) + 1.906(VM/100)^2 \quad (6)$$

$$\omega(CO) = 0.428 - 2.653(VM/100) + 4.845(VM/100)^2 \quad (7)$$

$$\omega(H_2O) = 0.409 - 2.389(VM/100) + 4.554(VM/100)^2 \quad (8)$$

汽进入位于尾部前烟道内的低温再热器(LTR)进口集箱,经低温再热器加热后通过蒸汽连接管引至炉膛内的高温再热器(HTR)进口集箱,经高温再热器加热后成为合格的再热蒸汽引向汽轮机。

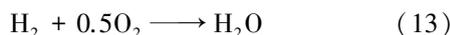
## 2 基于 Aspen Plus 的 CFB 锅炉仿真模型构建

### 2.1 等效热解模型

由于煤结构复杂、组成多样,无法用唯一分子式描述煤的化学成分,因此将煤视为由一系列稳定元素组成的混合物,如碳、氢、氧、氮、硫和灰分等<sup>[9]</sup>。在等效热解模拟过程中,煤颗粒的快速热解过程在 Aspen Plus 的内置模块反应器(RYield)中完成,煤颗粒先等效分解为元素 C、元素 S、 $H_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ 、Ash。若煤全部转化为煤气,则无法计算碳转化率、能量平衡不严格,因此需释放部分煤来模拟煤的不完全转化,定义为 UBC(未燃尽碳),作为非常规物质(NC),故模块 RYield 的输出物流组分为 C、S、 $H_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$ 、Ash 和 UBC。煤的工业分析和元素分析见表 2。

$$\omega(\text{Tar}) = -0.325 + 7.279(VM/100) - 12.880(VM/100)^2 \quad (9)$$

热解产物的合成反应有



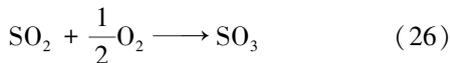
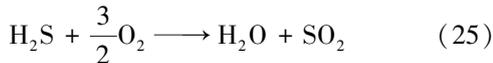
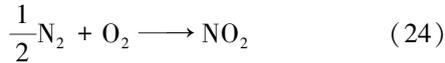
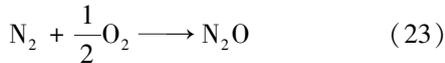
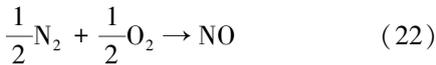
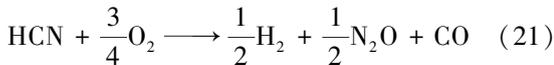
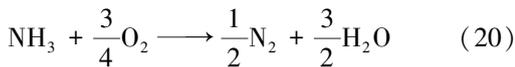
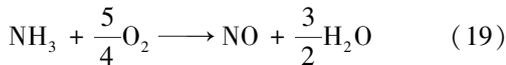
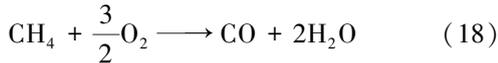
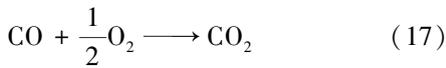
### 2.2 简约解耦燃烧模型

热解产物在热力学平衡反应器 GIBBS 模块中进行解耦燃烧,燃烧后的气体、UBC(未燃尽碳)和 Ash 在循环流化床顶部的旋风分离器(CYCLONE 模块)中分离,输出 2 股物流:一部分为分离出的全部气体和少量固体颗粒的烟气流,进入尾部烟道,与低温过热器、低温再热器和省煤器等尾部受热面进行换热后,经空气预热器和灰灰收集系统,最后由烟囱排入大气;另一部分为大量固体灰分颗粒和未燃尽碳(UBC),经分离模块(SEP1)分成 2 股组分相同的物流,分别返回下炉膛用于控制炉膛温度和进入外置床与中温过热器换热

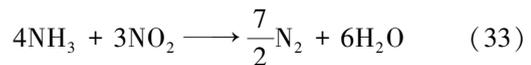
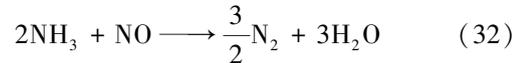
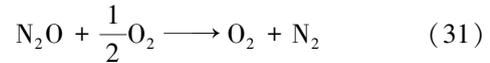
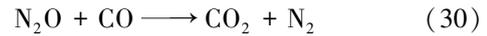
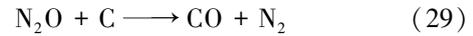
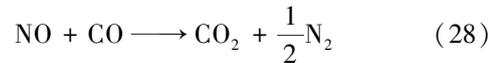
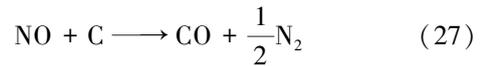
后返回下炉膛,以维持主循环回路固体颗粒平衡。返回下炉膛的物流均先经过 SSplit 模块,将固体灰分颗粒(Ash)和未燃尽碳(UBC)分开,仅允许未燃尽碳(UBC)返回下炉膛进行循环,Ash 作为灰渣排出。

模块 Gibbs 通过自由能最小化来计算化学反应平衡和相平衡,热解产物在循环流化床中解耦燃烧的化学反应为

1) 氧化反应:



2) 还原反应:



### 2.3 系统模型创建

分别通过了 RYield 模块和 RStoic 模块对煤等效热解过程进行建模,GIBBS 模块对热解产物燃烧过程进行建模,由于在 CFB 锅炉中注入二次空气将锅炉大致分为密相区和疏相区,因此通过 2 个 GIBBS 模块模拟炉中的燃烧过程。炉膛中水冷壁、高温再热器、高温过热器的换热过程采用 MHeatX 模块建模,使用 CYCLONG 模块对旋风分离器的分离过程进行建模,考虑到旋风分离器中的后燃烧,应用 GIBBS 模块。最后,烟气到达尾部烟道,与低温再热器、低温过热器、省煤器的换热过程用 HeatX 模块建模。基于 Aspen Plus 对 660 MW 超超临界 CFB 锅炉的整体建模流程如图 2 所示。

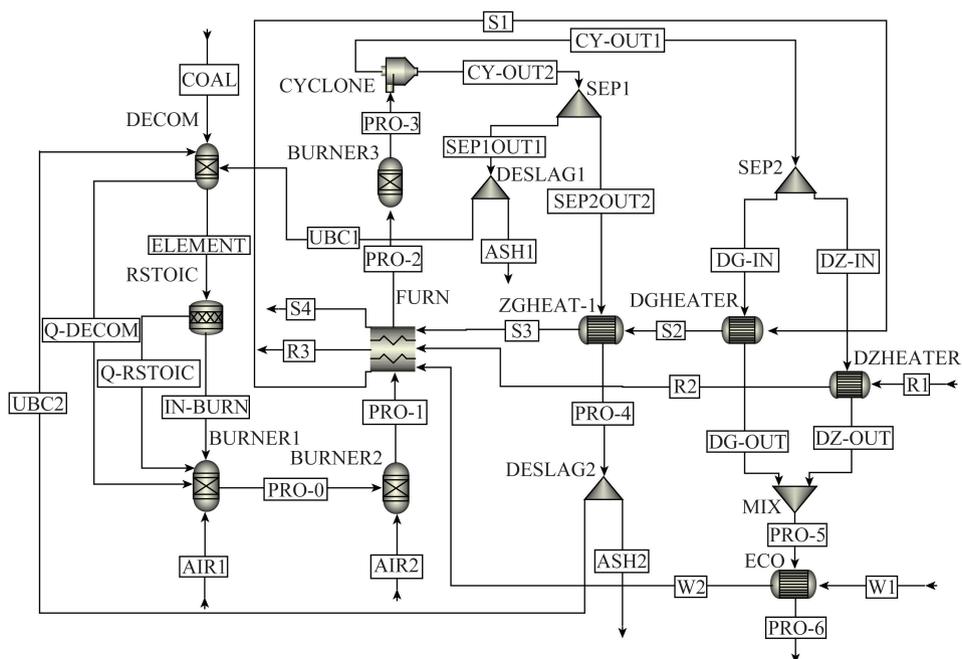


图2 基于 Aspen Plus 的 660 MW 超超临界 CFB 锅炉流程

Fig.2 Flowsheet of 660 MW ultra-supercritical CFB boiler based on Aspen Plus

在锅炉换热过程模拟时,对于用户定义的水冷壁总传热系数,计算方法为

$$\frac{1}{H_{bt}^0} = \frac{1}{H_{con}^{ext} + H_{rad}^{ext}} + \frac{1}{H_{int}} + \frac{e}{\lambda} \quad (35)$$

式中,  $H_{bt}^0$  为水冷壁的总传热系数;  $H_{con}^{ext}$  为对流传热系数;  $H_{rad}^{ext}$  为辐射传热系数;  $H_{int}$  为水间传热系数,在超临界情况下  $\frac{1}{H_{int}}$  可忽略;  $e$  为水冷壁管厚度;  $\lambda$  为导热系数。

$H_{con}^{ext}$  是烟气速度  $u_f$  和悬浮颗粒浓度  $C_p$  的函数,因此可使用工业设计图计算  $H_{con}^{ext}$ 。一般情况下  $C_p$  为平均悬浮颗粒浓度<sup>[11]</sup>,计算公式为

$$C_p = \int_{0.16}^1 14 \frac{G_s}{u_f} \exp\left(-2.61 \frac{h}{H}\right) d\left(\frac{h}{H}\right) \quad (36)$$

式中,  $G_s$  为颗粒循环流率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $h$  为计算部位高度,  $\text{m}$ ;  $H$  为床总高度,  $\text{m}$ 。

$H_{rad}^{ext}$  的计算公式为

$$H_{rad}^{ext} = \varepsilon \sigma \frac{T_{bed}^4 - T_{wall}^4}{T_{bed} - T_{wall}} \quad (37)$$

式中,  $\varepsilon$  为火焰发射率<sup>[12]</sup>;  $\sigma$  为玻尔兹曼常数;  $T_{bed}$  为床层温度,简化为烟气平均温度;  $T_{wall}$  为壁面温

度,简化为炉内管壁温平均温度。

由于目前 660 MW 超超临界 CFB 锅炉尚处于规划阶段,而采用 Aspen Plus 软件模拟循环流化床锅炉技术已较为成熟<sup>[13-16]</sup>,故可根据所建模型,对 660 MW 超超临界循环流化床锅炉满负荷工况 (B-MCR) 下锅炉性能进行模拟计算,得到的温度计算结果见表 3。

### 3 动态仿真结果与讨论

#### 3.1 密相区组分浓度模拟

在 660 MW 超超临界循环流化床燃烧室中,密相区组分  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{SO}_2$  浓度分布随一次风比例的变化如图 3 所示。

由图 3 可知,总风量不变时,随着一次风比例增大(即二次风减少),密相区  $\text{CO}_2$  浓度增大,  $\text{CO}$  浓度减少,  $\text{SO}_2$  浓度先增大后减少,这是因为一次风增多,密相区  $\text{O}_2$  含量增多,  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  燃烧生成的  $\text{CO}_2$  量增大;  $\text{H}_2\text{S}$  转化为  $\text{SO}_2$  量增大,当  $\text{O}_2$  含量增加到一定程度时,  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{O}_2$  的燃烧反应达到平衡,不再有  $\text{SO}_2$  生成,此时  $\text{SO}_2$  含量达到最大,而密相区气体总量不断增多,故  $\text{SO}_2$  浓度逐渐减少。

表 3 B-MCR 下锅炉主要温度计算结果

Table 3 Main temperature calculation results of boiler at B-MCR

项目	炉膛床温	中温过热器出口烟温	低温过热器出口烟温	低温再热器出口烟温	省煤器出口烟温	省煤器入口工质温度	省煤器出口工质温度	水冷壁出口工质温度	低温过热器出口工质温度	中温过热器出口工质温度	高温过热器出口工质温度	低温再热器入口工质温度	低温再热器出口工质温度	高温再热器出口工质温度
温度/°C	890	474	421	398	340	300	355	420	472	496	605	352	512	623

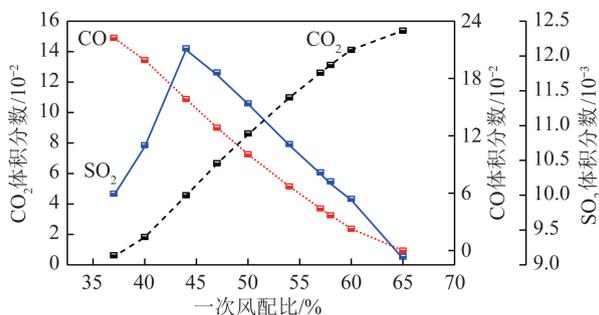


图 3 一次风比例对密相区组分浓度的影响

Fig.3 Effect of primary air ratio on component concentration in dense phase zone

#### 3.2 排烟气体组分浓度模拟

660 MW 超超临界循环流化床锅炉煤解耦燃烧过程中,排烟气体  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度随过量空气系数变化的分布曲线如图 4 所示。从图 4(a) 可以看出,随过量空气系数的增加,  $\text{SO}_2$  浓度逐渐降低,  $\text{SO}_3$  浓度先增大后减小,说明增大过量空气系数

可明显降低  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  排放。这主要是因为  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{O}_2$  的燃烧反应(式(25))已达平衡,  $\text{SO}_2$  含量不再增加,故  $\text{SO}_2$  浓度随气体总量的增多而减少;过量空气系数越大,说明循环流化床燃烧室内  $\text{O}_2$  浓度越高,促进  $\text{SO}_2$  与  $\text{O}_2$  反应(式(26)),  $\text{SO}_3$  浓度越来越高,当  $\text{O}_2$  浓度增加到一定程度时,  $\text{SO}_2$  与  $\text{O}_2$  反应达到平衡,此时  $\text{SO}_3$  含量达到最大,高浓度的  $\text{SO}_3$  抑制了新的  $\text{SO}_3$  生成,排烟气体总量增多,故  $\text{SO}_3$  浓度降低。

从图 4(b) 可以看出,660 MW 超超临界循环流化床煤解耦燃烧过程中,过量空气系数越大,产生的  $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  越多,这与文献[17-18]的研究结果相符。其原因为:①由  $\text{NO}_x$  的形成机理可知,循环流化床锅炉燃烧中  $\text{NO}_x$  的生成主要是燃料型  $\text{NO}_x$ 。煤在燃烧分解过程中,煤中 N 形成挥发分 N(主要以  $\text{HCN}$ 、 $\text{NH}_3$  和焦油氮形式存在)和焦炭氮,随着过量空气系数增大,CFB 燃烧室内  $\text{O}_2$  浓度增加,  $\text{HCN}$  和  $\text{NH}_3$  与  $\text{O}_2$  的反应几率增大,生成的  $\text{NO}$  与  $\text{N}_2\text{O}$  增多

(式(19)、(21));②  $O_2$ 浓度增加使还原性气体(如  $CO$  和  $H_2$ )浓度迅速降低,导致其对  $N_2O$  的还原作用减弱;③ 在还原区域内,几乎无  $N_2O$  生成,增大过量空气系数,炉内  $O_2$ 浓度增加,炉内的还原区域减少,使  $N_2O$  排放浓度升高。故在不影响锅炉燃烧的情况下,应适当减小过量空气系数,以降低  $NO$  和  $N_2O$  的排放量。

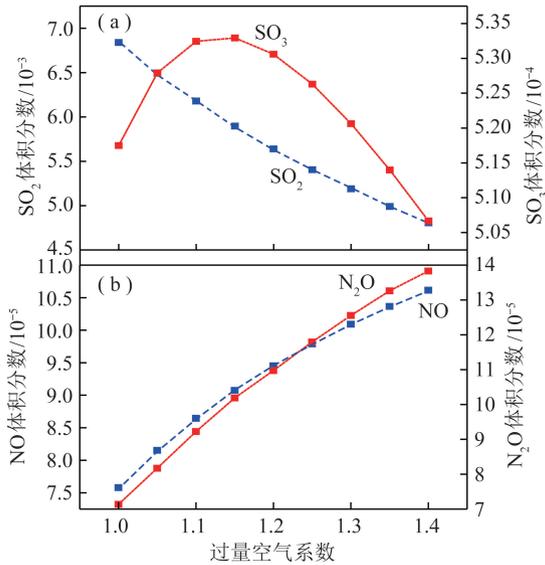


图4  $SO_2$ 、 $SO_3$ 、 $NO$  和  $N_2O$  浓度随过量空气系数变化曲线

Fig.4 Change curves of  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO$  and  $N_2O$  concentrations with excess air coefficient

### 3.3 受热面温度模拟

基于 Aspen Plus 建立的 660 MW 超超临界循环流化床锅炉煤解耦燃烧过程仿真模型,过量空气系数和一次返料比例对中温过热器出口汽温、低温过热器出口汽温和低温再热器出口烟温、省煤器出口烟温的影响,如图 5 所示。由图 5(a)可知,过量空气系数增大,对中温过热器和低温过热器出口汽温的影响不大,但对低温再热器出口烟温和省煤器出口烟温的影响较大。随着过量空气系数增加,低温再热器和省煤器的出口烟温随之升高,导致排烟热损失增大,锅炉热效率降低。

从图 5(b)可以看出,一次返料比例对低温过热器出口汽温的影响不大,但对外置床中温过热器的出口汽温影响较大。随一次返料比例增加,中温过热器的换热量逐渐减少,当一次返料比例为 0.9 时,中温过热器的换热温差几乎不到  $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。另外,低温再热器和省煤器出口烟温随一次返料比例的增大而减小,但总体上变化不大。综上,一次返料比例的增大,使锅炉整体换热器的换热效率下降,虽然返回燃烧室的固体物料比例可调节和控制床温,仍应尽可能减少一次返料比例。

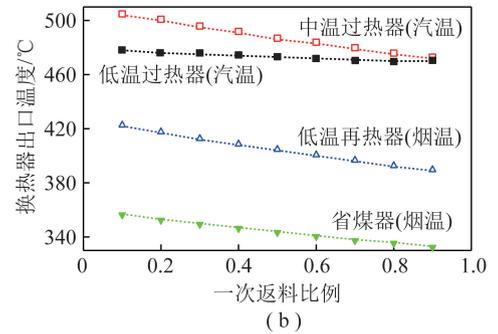
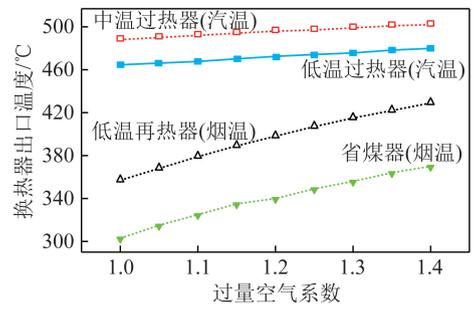


图5 过量空气系数、一次返料比例对受热面出口温度的影响

Fig.5 Effect of excess air coefficient and primary return ratio on outlet temperature of heated surface

## 4 结 论

1) 在煤解耦燃烧过程中,预测了循环流化床燃烧室中密相区气体组分浓度分布,研究了过量空气系数对排烟气体组分浓度的影响,通过数值模拟得到,提高过量空气系数会导致排烟气体中  $NO$  和  $N_2O$  浓度增加,但可明显降低  $SO_2$  和  $SO_3$  的排放。

2) 若仅降低排烟气体中  $SO_2$  和  $SO_3$  浓度,根据煤解耦燃烧过程中  $SO_2$  和  $SO_3$  排放浓度的模拟结果,可得到最佳过量空气系数。

3) 通过建立的过程模拟模型,研究了 660 MW 超超临界循环流化床锅炉过量空气系数和一次返料比例对中温过热器出口汽温、低温过热器出口汽温和低温再热器出口烟温、省煤器出口烟温的影响。模拟结果表明,随着过量空气系数和一次返料比例的增大,排烟热损失增大,锅炉热效率降低,故应选择合适的过量空气系数,并尽可能减少一次返料比例。

### 参考文献 (References):

- [1] 曹志猛,汤盛萍,肖汉才.我国发展超超临界机组参数和容量优先选择的研究[J].电站系统工程,2007,23(5):41-42,48. CAO Zhimeng, TANG Shengping, XIAO Hancan. Research on preference and parameter selection of ultra-supercritical unit in China [J]. Power Station System Engineering, 2007, 23(5): 41-42, 48.
- [2] 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 Wen, LYU Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of 660MW ultra supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Chinese Journal of electrical engineering, 2019, 39 (9): 2515-2524.
- [3] 莫鑫, 蔡润夏, 吕俊复, 等. 600 MWe 超临界循环流化床锅炉的运行特性[J]. 锅炉技术, 2016, 47(4): 34-38.
- MO Xin, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. The performance evaluation of the 600 MWe super-critical circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2016, 47(4): 34-38.
- [4] CIMINI S, PRISCIANDARO M, Barba D. Simulation of a waste incineration process with flue-gas cleaning and heat recovery sections using Aspen Plus[J]. Waste Manage, 2005, 25: 171-175.
- [5] DOHERTY W, REYNOLDS A, Kennedy D. The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation [J]. Biomass Bioenergy, 2009, 33: 1158-1167.
- [6] MORE R K, BULASARA V K, Uppaluri R, et al. Optimization of crude distillation system using aspen plus; Effect of binary feed selection on grass-root design[J]. Chem. Eng. Res. Des., 2010, 88: 121-134.
- [7] SAHU J N, CHAVA V S R K, HUSSAIN S, et al. Optimization of ammonia production from urea in continuous process using ASPEN Plus and computational fluid dynamics study of the reactor used for hydrolysis process[J]. J. Ind. Eng. Chem., 2010, 16: 577-586.
- [8] ZHANG L, YANG X, XIE J, et al. Investigation progress on release and control of NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O during coal combustion in circulating fluidized bed combustor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 6: 104-110.
- [9] 熊杰明, 李江宝. 化工流程模拟 Aspen Plus 实例教程[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2015: 266-281.
- XIONG Jieming, LI Jiangbao. Aspen Plus Example Tutorial for Chemical Process Simulation [M]. 2th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 266-281.
- [10] RAJAN R R, WEN C Y. A comprehensive model for fluidized bed coal combustors[J]. A. I. Ch. E. J., 1980, 26: 642-655.
- [11] ZHANG Man, BIE Rushan. Heat transfer coefficient of water wall in circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2005, 2: 32-33, 58.
- [12] LYU Junfu, ZHANG Jiansheng, YUE Guangxi, et al. Heat transfer coefficient calculation method of heater in circulating fluidized bed furnace[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7): 540-550.
- [13] LIU Bing, YANG Xuemin, SONG Wenli, et al. Process simulation of formation and emission of NO and N<sub>2</sub>O during coal decoupling combustion in a circulating fluidized bed combustor using Aspen Plus [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71: 375-391.
- [14] 王龙飞, 兰勇, 解雪涛, 等. 基于 Aspen Plus 的超临界循环流化床锅炉特性分析[J]. 锅炉技术, 2018, 49(3): 27-32.
- WANG Longfei, LAN Yong, XIE Xuetao, et al. Analysis of radon characteristics of supercritical circulating fluidized bed boiler based on Aspen Plus [J]. Boiler Technology, 2018, 49(3): 27-32.
- [15] 张斌, 李政, 江宁, 等. 基于 Aspen Plus 建立喷流床煤气化炉模型[J]. 化工学报, 2003, 54(8): 1179-1182.
- ZHANG Bin, LI Zheng, JIANG Ning, et al. Modeling of a fluidized bed gasifier based on Aspen Plus [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(8): 1179-1182.
- [16] 张媛, 陈隆, 肖翠微, 等. 基于 Aspen Plus 的煤粉工业锅炉烟气再循环研究[J]. 广州化工, 2018, 46(2): 72-76.
- ZHANG Yuan, CHEN Long, XIAO Cuiwei, et al. Research on flue gas recycling of pulverized coal industrial boiler based on Aspen Plus [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(2): 72-76.
- [17] 李影平, 辛胜伟, 王凤君. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉超低 NO<sub>x</sub> 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 86-92.
- LI Yingping, XIN Shengwei, WANG Fengjun. Research on ultra-low NO<sub>x</sub> emission of 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 86-92.
- [18] 李楠, 张世鑫, 赵鹏勃, 等. 循环流化床锅炉低氮燃烧技术试验研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 84-89.
- LI Nan, ZHANG Shixin, ZHAO Pengbo, et al. Experimental research on low nitrogen combustion technology of circulating fluidized bed boilers [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 84-89.