

燃尽风率对二次再热锅炉热量分配及 NO_x 的影响

肖 寒¹, 蒙晨玮², 吴玉新¹, 冯乐乐¹, 张 海¹, 张 缙¹

(1. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 2. Sibley School of Mechanical and

Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853)

摘 要:合理的燃尽风率对降低 NO_x 排放十分关键,也显著影响大容量锅炉炉膛内的燃烧和传热特性。针对 1 000 MW 超超临界二次再热塔式锅炉开展三维 CFD 数值模拟,研究燃尽风(OFA)率对于炉内 NO_x 生成及吸热量分配的影响规律。模型采用贴体六面体非结构网格,通过用户自定义函数(UDF)设置炉膛及各受热面的壁面温度;煤粉颗粒在炉内的运动及燃烧过程基于随机轨道法计算,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型模拟四角切圆炉内的湍流流动,采用离散坐标(discrete ordinates, DO)法计算炉内辐射传热;采用简化概率密度函数(probability density function, PDF)模型模拟湍流与化学反应的耦合特性。结果表明,燃尽风率对炉内的温度分布、炉膛的吸热比率以及污染物排放情况均存在显著影响。当燃尽风率在 0~40% 时,主燃区的平均温度随燃尽风含量的增大先升后降,而燃尽风区域的平均温度则随着燃尽风率升高显著上升。随着燃尽风率的升高,由于温度和氧含量变化等共同作用,原始 NO_x 排放量先降后升,燃尽风率在 11%~25% 时达到最低。随燃尽风率从 0 增至 25%,锅炉炉膛吸热比率降低 12%,过热器、再热器、省煤器等对流受热面的吸热比例相应增加。当燃尽风率大于 25% 时,炉膛吸热比例的降低趋势减缓。因此,建议在锅炉设计中应综合考虑 OFA 比例变化对炉膛吸热量以及污染物排放的影响。

关键词:燃尽风;二次再热锅炉;热量分配; NO_x ;热流分布

中图分类号:TM621.2;TK16

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)04-0080-07

Influence of over fire air ratio on heat absorption and NO_x of a double reheated boiler

XIAO Han¹, MENG Chenwei², WU Yuxin¹, FENG Lele¹, ZHANG Hai¹, ZHANG Man¹

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853)

Abstract: Over Fire Air (OFA) ratio not only has strong influence on NO_x emission, but also on heat flux and combustion inside the large capacity boilers. To investigate such effects, three-dimensional CFD numerical simulations were conducted for a 1 000 MW ultra-supercritical double reheated tower boiler. 3D body fitted hexahedra meshes were adopted to discretize the simulation domain. Temperature of membrane wall and the tubes were identified through user defined functions (UDF). Stochastic particle tracking model was used to calculate dispersion of the pulverized coal particles. The turbulence information was calculated through Realizable $k-\varepsilon$ model. Discrete-Ordinates model was used for the radiation heat transfer. The simplified PDF model was used to solve the coupling of turbulence and chemical reactions. The results show that OFA ratio has significant influence on the temperature, pollutant emission, and heat flux. When OFA ratio increases from 0 to 40%, the temperature of burner area will firstly increase and then drop down; the temperature of OFA area will increase, and the original NO_x emission will decrease and reach the minimum value of 25% of OFA ratio. The heat absorption by the furnace mem-

收稿日期:2019-03-11; **责任编辑:**张晓宁 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.19031101

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602102)

作者简介:肖 寒(1995—),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要从事二次再热锅炉的数值模拟及热力计算研究。E-mail: immesut@foxmail.com。

通讯作者:吴玉新(1979—),男,副教授,博士,主要从事煤的清洁燃烧技术、多相流的流动和传热过程的数值模拟及机理研究。E-mail: wuyx09@mails.tsinghua.edu.cn

引用格式:肖寒,蒙晨玮,吴玉新,等.燃尽风率对二次再热锅炉热量分配及 NO_x 的影响[J]. 洁净煤技术,2019,25(4):80-86.

XIAO Han, MENG Chenwei, WU Yuxin, et al. Influence of over fire air ratio on heat absorption and NO_x of a double reheated boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 80-86.



移动阅读

brane wall decreases by 12% with the increases of OFA ratio from 0 to 25%, then the heat absorption decreases slowly when OFA ratio increases. The heat absorption by the convection heat surfaces increases so that the total heat absorption doesn't change. Such trend shows the effect of OFA ratio on heat absorption of furnace has to be considered in the design of the large capacity boilers.

Key words: over fire air; double reheated boiler; heat absorption; NO_x ; heat flux distribution

0 引 言

火力发电是我国电力生产的主要方式,提高蒸汽参数是获得更高机组效率的最直接手段。但受到耐高温材料的限制,在目前情况下很难大幅提高蒸汽温度至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1-2],因而二次再热技术成为目前提高机组效率的重要手段[3-4]。如传统 1 000 MW 机组发电循环效率为 45% 左右,采用二次再热技术后,其发电效率可达 47.94% [5]。

由于二次机组增加了更多的高温受热面,导致锅炉受热面传热量分配和调温技术难度增加,特别是在低负荷工况下,二次再热机组调温的不可控性提高[6]。因此,精确掌握炉内传热特性和二次再热锅炉汽温的灵活调节手段,是二次再热技术应用中的关键问题。目前对二次再热锅炉汽温的调节方法研究集中于烟气再循环、烟气挡板、燃烧器摆动对汽温的影响[7-8]。

为了降低 NO_x 排放,目前电厂常采用空气分级燃烧法[9-10]。随着空气深度分级技术的使用,燃尽风率变化对炉内燃烧和传热的影响引起了学者们的关注,肖海平等[11]对 1 025 t/h 自然循环锅炉的研究表明,随着燃尽风比例增加,锅炉效率下降。方庆艳等[12]针对 1 000 MW 超超临界锅炉的研究表明,随着燃尽风比例增加,炉膛最大热流密度区域上移,最大热流密度值逐渐减小,综合分析优化的燃尽风比例为 25.7%。吴东垠等[13]研究表明,燃尽风的加入若引起炉内高温区缺氧,会对锅炉效率产生影响。文献[14]研究表明,燃尽风配风率的提高会导致炉膛火焰中心位置上移,对主燃烧区温度、炉膛出口烟温、未燃尽碳含量均有不同程度的影响,从而影响锅炉运行的安全性和经济性。为此,需要分析燃尽风率变化对 1 000 MW 等级的二次再热锅炉传热和燃烧特性的影响,尤其是掌握对受热面吸热量分配的影响规律,从而对高参数大容量锅炉的设计优化提供依据。

本文对某电厂 1 000 MW 二次再热塔式锅炉开展三维 CFD 数值模拟,分析宽 OFA 风率范围内锅炉主燃区燃烧特性、炉膛壁面吸热量以及 NO_x 生成规律。

1 数值模型

1.1 模拟对象及网格

模拟对象为某电厂 1 000 MW 超超临界二次再热机组,采用单炉膛塔式锅炉,四角切圆燃烧方式。计算域下至炉膛底部,上至省煤器上方烟道,炉膛底部至烟气出口高度为 115 m。燃烧区域炉膛截面的长宽均为 21 m。在高度方向上,锅炉炉膛区域由主燃区与燃尽区组成,主燃区由 3 组燃烧器及其二次风喷口所组成,二次风分为直吹二次风喷口和偏置二次风喷口;燃尽风分为高位燃尽风和低位燃尽风 2 组,分别布置在 52 m 及 57 m 高度,喷口均采用四角切圆布置方式。该锅炉计算区域如图 1 所示。

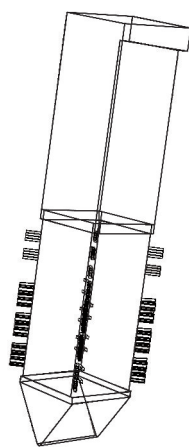


图 1 1 000 MW 锅炉计算区域

Fig. 1 Calculation domain of 1 000 MW boiler

相关研究表明[15],流动方向与网格方向不一致时,可能会在数值求解过程中产生伪扩散误差,当网格线与射流方向成 45° 夹角时,伪扩散误差达最大值。为消除伪扩散带来的误差,采用与流场接近的贴体六面体网格划分计算域,以确保燃烧器喷口附近的辐射状网格(图 2)与实际流体的流动方向一致,同时在计算上采用二阶差分格式来降低伪扩散误差。为了兼顾计算准确度和处理器计算能力的要求,对于燃烧器高度的网格进行了局部加密。本文设计了不同数量的 4 套网格来进行网格无关性验证,采用相同的网格划分方法,网格的疏密程度不同。网格独立性检验结果表明,当网格数量超过 210 万时,计算结果不再随网格的增加而变化。

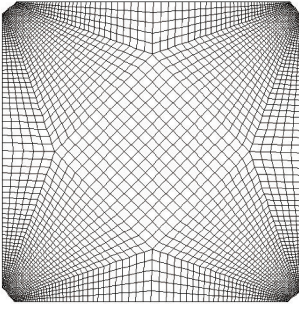


图 2 炉膛一次风入口高度截面网格划分

Fig. 2 Meshing of the furnace cross section at the primary air inlet

1.2 数值模型

湍流燃烧反应采用简化的 PDF 模型^[16],对于反应过程中状态 f 出现的时间概率,将其记作 $p(f)$,其数学表达式为

$$p(f) \Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (1)$$

简化的 PDF 采用最为广泛的 β 函数模型^[17-18],即

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df}, \alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{(\bar{f}^2) - 1} \right] \quad (3)$$

式中, α 和 β 为与状态 f 相关的函数; T 为时间尺度; τ_i 为状态 f 在 Δf 区间内消耗的时间; $\bar{f}$ 为平均混合分数; $\bar{f}^2$ 为平均分数方差。

煤升温过程中,脱挥发分时间不到煤粉燃尽时间的 1/10,但对脱挥发分过程的准确计算对于预测煤粉燃烧特征及其火焰温度十分重要。本文采用双方程模型来模拟煤的脱挥发分过程^[19],在低温和高温下分别由 2 个反应来主导煤粉的脱挥发分过程,2 者共同确定颗粒的质量变化速率。

$$\frac{m_v(t)}{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) e^{-\int (R_1 + R_2) dt} dt \quad (4)$$

式中, R_1 和 R_2 为与温度相关的反应系数,分别控制高温区和低温区的脱挥发分速率; $m_{p,0}$ 为颗粒的初始质量; $f_{w,0}$ 为可蒸发物质的质量分数; $m_v(t)$ 为脱挥发分质量随时间的变化量; m_a 为煤粉颗粒中的灰分; α_1 、 α_2 为经验值。

对于湍流模型,选用 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型,由其导出 ε 的修正输运方程,同时包含湍流黏度的替代公式,在求解类似四角切圆的旋流流场时具有更优的计算结果^[20];由于炉内煤粉在两相中占比很低,忽略颗粒与颗粒间的相互作用,而对于气固相间的相互作用,采用基于欧拉-拉格朗日方法的离散相模型,对每个代表性的煤粉颗粒采用随机轨道法进行计算;由于锅炉炉膛几何尺度较大,且炉内有一定浓度的煤粉颗粒,计算域内光学厚度较大,因此采用 DO 模型求解炉内辐射传热过程^[21]。

标准工况下,煤粉活化能取 120 MJ/kmol,焦炭指前因子为 6 kg/(m² · s),本文利用扩散-动力耦合模型求解焦炭的燃烧过程,该模型下化学动力学和扩散作用共同确定焦炭燃烧速率^[19]。在较高 OFA 条件下,焦炭在还原性气氛下还会发生与 CO₂ 及 H₂O 的气化反应,通过用户自定义函数方法 (UDF) 将其嵌入至 Fluent 求解器中,具体模型及方法详见文献[20]。NO_x 生成主要考虑热力型和燃料型^[21],由于炉内 NO_x 含量对炉内燃烧和其他组分分布的影响有限,因而采用燃烧后处理方法^[22]。

1.3 边界条件

在本算例中,换热壁面均设为无渗透、无滑移壁面。在计算受热面传热时,需要对各受热面温度进行准确预测,通过锅炉热力计算确定各受热面温度,并采用 UDF 方法在三维模型中分别定义各壁面的温度。将燃烧器、二次风、燃尽风等入口均设定为质量入口边界条件并按工况要求指定送风量,将炉膛出口设定为压力出口边界条件。对于煤粉颗粒粒度,基于 $R_{90} = 15\%$ 的要求,利用 Rosin-Rammler 粒度分布拟合,煤粉元素及工业分析见表 1。

表 1 煤粉工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析/%				低位热值/	元素分析/%				
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	(MJ · kg ⁻¹)	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{t,ar}$
8.4	8.8	26.2	49.4	23.4	61.7	3.7	1.1	8.6	0.6

计算过程中,对于计算收敛的判据是:各残差绝对值小于 10^{-4} ,且基本不再变化,同时煤粉、二次风以及燃尽风喷口高度截面的平均温度及速度波动范围小于 0.5%。为分析燃尽风对锅炉性能的影响,对不同 OFA 比例的工况进行数值模拟及结果分析。选取 OFA 风率为 11% 的工况作为标准工况(实际设计工况),计算 OFA 风率为 0、25%、30% 和 40% 四组工况,分析 OFA 风率变化对炉内燃烧特性、吸热量分配以及 NO_x 排放的影响规律。

2 计算结果及分析

2.1 对炉内燃烧特性的影响

炉膛中心截面沿高度方向的温度场如图 3 所示,可见,在不同燃尽风率下,炉膛纵向截面的高温区分布特征存在一定差异。一般来说,各工况下最高温度区域更贴近壁面,但当 OFA 风率 11% ~ 30%

时,炉膛中心处存在高温区,且炉膛内火焰中心高温区随 OFA 风率的增加显著上升。

在不同燃尽风率下,各高度截面的平均温度如图 4 所示。当燃尽风率从 0 升至 25% 时,燃烧器区域($H=26 \sim 45 \text{ m}$)的截面温度逐渐上升,其主要原因是局部过量空气系数降低,而煤粉燃尽份额变化不大,因此参与吸热的惰性气体减少,使燃烧区的火焰温度更高。第 3 层燃烧器喷口($H=45 \text{ m}$)截面平均温度最高,OFA 比例达 25% 时,该截面平均温度达 1 700 K 以上。当燃尽风率进一步增加时,燃烧器区域的温度随燃尽风率的上升逐渐下降,尤其是 OFA 比例大于 30% 后,燃烧器区域温度大幅下降,说明煤粉在此区域内燃烧份额降低,因而总释放热量减少。同时,未燃尽焦炭及 CO 、 H_2 等还原性气体在 OFA 喷入后发生燃烧,使得 OFA 以上 65 m 高度处的烟气温度显著上升。

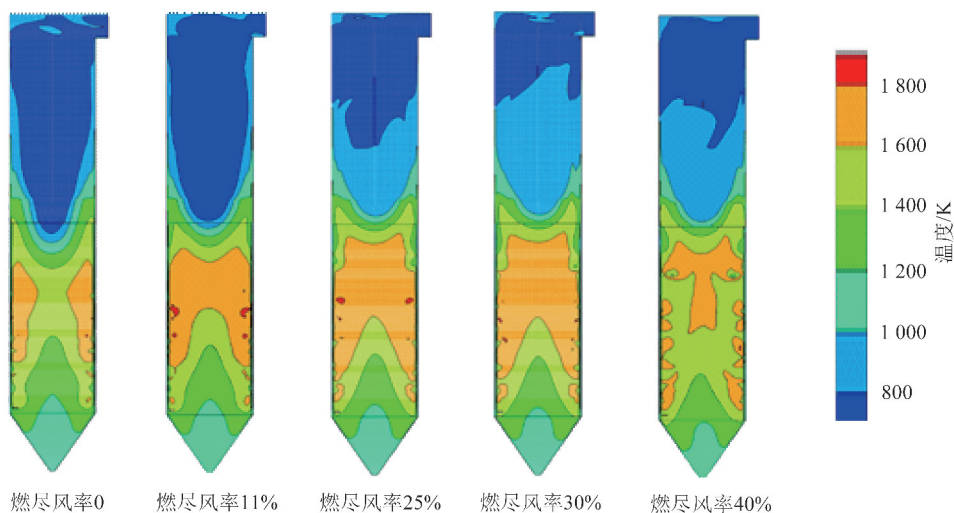


图 3 炉膛中心截面温度分布

Fig. 3 Temperature of central section of the furnace

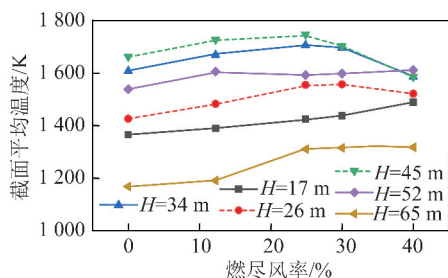


图 4 不同燃尽风率下各高度截面的平均温度

Fig. 4 Average temperature of different heights section under different height

平均温度最高的第 3 层燃烧器喷口($H=45 \text{ m}$)温度场如图 5 所示,其温度呈四周高、中间低的特征。主燃区温度主要受通入的冷风温度和煤粉的燃

烧情况影响。当 OFA 风率从 0 ~ 25% 变化时,随 OFA 风率不断增加,空燃比降低,主燃区由空气过量逐渐变为燃料过量,且此时煤粉燃尽情况较好,因此温度逐渐升高。当 OFA 风率高于 25% 时,煤粉颗粒在主燃区完全燃烧所需要的风量超过一、二次风的风量,温度开始下降。当燃尽风风率达 40% 时,该高度截面下,除喷口附近外,温度高于 1700 K 的区域很少。

不同 OFA 风率下,各高度截面的 CO 平均质量份额如图 6 所示,OFA 风率达 25% 时,燃烧器区域的 CO 含量显著提高,OFA 风率进一步增加时,燃烧器区域的 CO 质量分数大幅上升。随着 OFA 的通入, CO 快速燃烧,其含量迅速下降,最终降低至接近 0,并且不受 OFA 风率的影响。

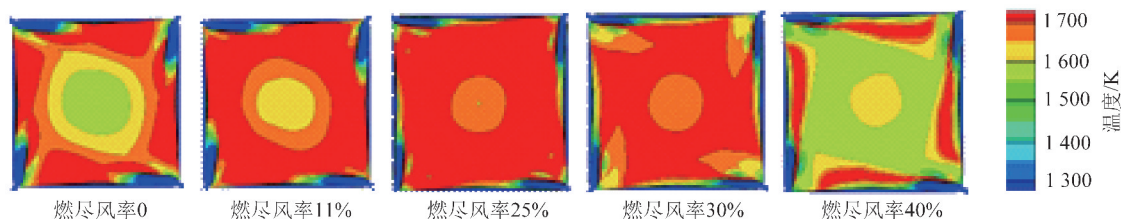
图 5 第 3 层燃烧器喷嘴高度($H=45\text{ m}$)截面温度场

Fig. 5 Temperature of the third layer burner nozzle height section

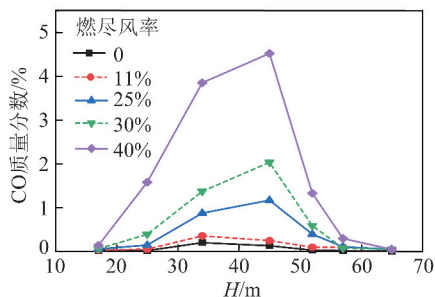
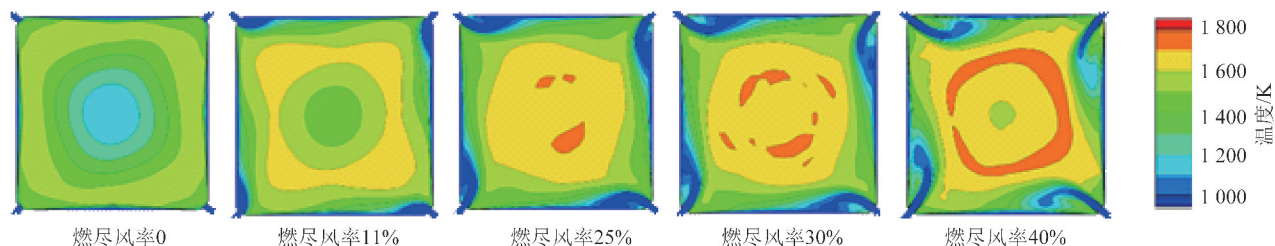


图 6 不同高度下 CO 的质量分数

Fig. 6 Mass fraction of CO at different height

上级燃尽风高度截面($H=57\text{ m}$)的温度分布如图 7 所示。

由图 7 可知,与燃烧区域的温度分布不同,当 OFA 区域通入燃尽风时,OFA 区域壁面附近温度降低,未燃尽的煤粉颗粒及 CO 继续燃烧,中心区域温度升高,温度场呈中心区域高、四周低的特点。OFA 风率为 11% 时,低位燃尽风区开始出现局部高温。当燃尽风率达到 25%、30% 时,燃尽风区域中心出现显著的高温区域。

图 7 上级燃尽风高度截面($H=57\text{ m}$)温度场Fig. 7 Temperature of the upper OFA section($H=57\text{ m}$)

2.2 OFA 风率吸热量分配及 NO_x 的影响

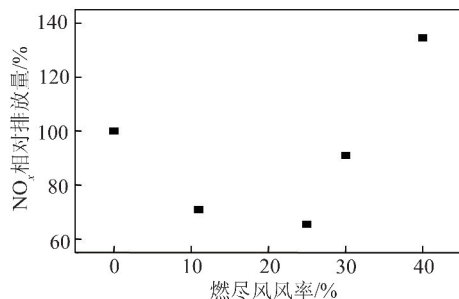
炉内温度分布对受热面吸热量分配具有重要影响(表 2)。尽管整体吸热量基本不受 OFA 风率的影响,但随着 OFA 风率提高,炉膛高温区域上移,因而屏区换热面的吸热量逐渐增加,炉膛吸热量逐渐降低,尤其是当 OFA 风率在 11%~25% 时,炉膛吸热量降低了 12%,说明 OFA 风率对二次再热机组的热负荷分配影响明显。

表 2 不同燃尽风率下的受热面吸热量

Table 2 Heat absorption at different OFA rate

OFA 风率/%	受热面吸热量/GW		
	炉膛壁面	屏区换热面	总和
0	1.170	0.893	2.063
11	1.184	0.887	2.071
25	1.035	1.021	2.056
30	1.017	1.036	2.053
40	0.996	1.058	2.054

(归一化排放值)如图 8 所示,可以看出,随 OFA 风率的增加,出口 NO_x 排放量先降后升,以 OFA 风率为 0 时的 NO_x 排放量为 100% 计,风率为 11%、25%、30% 和 40% 时,其出口 NO_x 相对排放量分别为 70.9%、65.5%、90.9% 和 134.5%。可见 OFA 比率为 11%~25% 时,其 NO_x 排放较低。

图 8 不同燃尽风率下 NO_x 的归一化排放值Fig. 8 NO_x emission at different OFA rate

炉膛不同高度截面的 O_2 含量平均值由图 9 所示。可见,当 OFA 风率较低时,炉膛区域 O_2 始终保持较高的质量分数,处于过量状态,燃烧反应完全,

不同燃尽风率下,炉膛出口 NO_x 相对排放量

NO_x 大量产生。随着 OFA 风率逐渐变大,主燃区内一、二次风风量减少,此时上层燃烧器喷口区域为缺氧环境, O_2 的不足抑制了主燃区 NO_x 的生成,在 OFA 区域,一方面有燃尽风通入(燃尽风布置在 50 ~ 57 m)使 O_2 含量的增加,另一方面 O_2 和未燃尽煤粉、CO 反应,使该区域内的温度升高, O_2 质量分数在屏区入口区域($H=65$ m)经过燃尽风区域后($H=57$ m)逐渐趋于一致,基本不再变化。

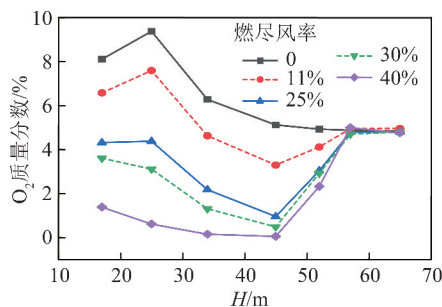


图 9 不同高度下 O_2 质量分数

Fig. 9 Volume fraction of O_2 at different heights

燃尽风的加入能减少 NO_x 的排放,是由于其有效降低了主燃烧区 O_2 质量分数,进而形成 NO_x 还原区,但随着燃尽风率的提高,燃尽风区的 O_2 质量分数较快增长,因而该区域促进了 NO_x 的生成。

3 结 论

1) OFA 风率在 0 ~ 40% 时,随着燃尽风率的升高,原始 NO_x 的排放量将先降低后上升,燃尽风率为 11% ~ 25% 时, NO_x 排放达到最低。

2) OFA 风率为 11% ~ 25% 时,锅炉炉膛吸热比率有较大幅度降低,共下降 12%,而对于过热器、再热器、省煤器等对流受热面而言,其吸热比例则有所增加。当燃尽风率大于 25% 时, NO_x 排放升高,炉膛吸热量降低趋势减缓。

3) OFA 风率变化对大容量锅炉炉膛吸热量分配及污染物排放具有显著影响,在设计时应当予以综合考虑。

参考文献 (References):

[1] 朱宝田,周荣灿. 进一步提高超超临界机组蒸汽参数应注意的问题[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):95-100.
ZHU Baotian, ZHOU Rongcan. Problems paid attention to raise the ultra supercritical units steam parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 95-100.

[2] BUGGE J, KJÆR S, BLUM R. High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives[J]. Energy, 2014, 31(10): 1437-1445.

[3] 蒋敏华,黄斌. 燃煤发电技术发展展望[J]. 中国电机工程学

报,2012,32(29):1-8.

JIANG Minhua, HUANG Bin. Prospects on coal-fired power generation technology development[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29):1-8.

[4] LI Y, ZHOU L, XU G, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant[J]. Energy, 2014, 74(2):202-214.

[5] 张方伟,刘原一,谭厚章,等. 超临界火力发电机组二次再热技术研究[J]. 电力勘测设计,2013(2):34-39.

ZHANG Fangwei, LIU Yuanyi, TAN Houzhang, et al. Study of secondly reheat technique of supercritical fire power generators[J]. Electric Power Survey & Design, 2013(2):34-39.

[6] 蔡宝玲,高海东,王剑钊,等. 二次再热超超临界机组动态特性分析及控制策略验证[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5288-5299.

CAI Baoling, GAO Haidong, WANG Jianzhao, et al. Dynamic process characteristic analysis and control strategy verification on double-reheat ultra-supercritical coal-fired power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5288-5299.

[7] 李传胜. 二次再热塔式锅炉再热蒸汽调温方式工程应用[J]. 热力发电,2016,45(8):68-74.

LI Chuansheng. Engineering application of reheat steam temperature control mode for double-reheat tower boilers[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8):68-74.

[8] 郭馨,赵广播,孙志浩,等. 再循环烟气对 660 MW 二次再热锅炉蒸汽参数的影响[J]. 中国电机工程学报,2018,38(4):1101-1110.

GUO Xin, ZHAO Guangbo, SUN Zhihao, et al. Effect of recirculated flue gas on steam parameters of 660 MW double reheat boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):1101-1110.

[9] 郝雪梅. 空气分级燃烧技术中两级燃尽风技术试验研究[J]. 洁净煤技术,2007,13(2):70-72.

HAO Xuemei. Study on two-stage air over-fire technology of staged-air combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(2):70-72.

[10] 李瑞扬,董利. 空气分级燃烧技术在六角切圆燃烧锅炉中的应用研究[J]. 洁净煤技术,2005,11(2):33-35.

LI Ruiyang, DONG Li. Study on six corners tangentially boiler with the air gradation combustion technology[J]. Clean Coal Technology, 2005, 11(2):33-35.

[11] 肖海平,张千,王磊,等. 燃烧调整对 NO_x 排放及锅炉效率的影响[J]. 中国电机工程学报,2011,31(8):1-6.

XIAO Haiping, ZHANG Qian, WANG Lei, et al. Effect of combustion adjustment on NO_x emission and boiler efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(8):1-6.

[12] 方庆艳,汪华剑,陈刚,等. 燃尽风对超超临界锅炉燃烧特性影响的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010(11):92-95.

FANG Qingyan. Numerical simulation on effects of over fire air on the combustion characteristics in an ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(11):92-95.

[13] 吴东垠,魏小林,盛宏至,等. 炉内配风方式对锅炉经济性的

- 影响[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 165-168.
- WU Dongyin, WEI Xiaolin, SHENG Hongzhi, et al. Influence of air distribution in the furnace on economical operation of the boiler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 165-168.
- [14] 曹乘雀, 丁士发, 施鸿飞. 燃尽风配风率对炉膛出口烟气温度的影响[J]. 动力工程学报, 2017, 37(8): 603-607.
- CAO Chengque, DING Shifa, SHI Hongfei. Effect of OFA ratio on outlet gas temperature of a boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(8): 603-607.
- [15] MALLINSON G D, DAVIS G D V. The method of the false transient for the solution of coupled elliptic equations[J]. Journal of Computational Physics, 1973, 12(4): 435-461.
- [16] REICHERT F, RÜMLER C, BERGER F. Application of different radiation models in the simulation of air plasma flows[C]// International Conference on Gas Discharges and Their Applications. IEEE, 2008: 141-144.
- [17] SILAEN A, WANG T. Effect of turbulence and devolatilization models on coal gasification simulation in an entrained-flow gasifier[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53, (9/10), 2074-2091.
- [18] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flow[J]. Computer Methods in Applied Mech. and Eng., 1974, 3: 269.
- [19] MENG C, WU Y, ZHANG H, et al. Investigation of coal reactivity effects on a 1 000 MW tangential coal-firing boiler[C]//Clean Coal Technology and Sustainable Development. Berlin: Springer, 2016.
- [20] WU Y, ZHANG J, SMITH P J, et al. Three-dimensional simulation for an entrained flow coal slurry gasifier[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(2): 1156-1163.
- [21] ZHANG Z, WU Y, CHEN D, et al. A semi-empirical NO_x model for LES in pulverized coal air-staged combustion[J]. Fuel, 2019, 241: 402-409.
- [22] KUROSE R, MAKINO H, SUZUKI A. Numerical analysis of pulverized coal combustion characteristics using advanced low- NO_x burner[J]. Fuel, 2004, 83(6): 693-703.