

300 MW 四角切圆锅炉低负荷下燃烧特性数值模拟研究

江志铭^{1,2}, 张妍³, 李越胜^{1,2}, 邱燕飞², 宋长志², 刘虎³, 邓磊³, 车得福³

(1.广东省特种设备检测研究院 顺德检测院, 广东 佛山 528300; 2.国家工业锅炉质量监督检验中心, 广东 佛山 528300;

3.西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:随着环保标准提高, 电站锅炉 NO_x 排放量控制日益严格。低氮改造可以有效降低 NO_x 生成, 而对于改造后低负荷下炉内燃烧特性研究有限。对某电厂低氮改造后的一台 300 MW 四角切圆煤粉锅炉进行了低负荷下多工况燃烧特性的数值模拟, 研究了过量空气系数、燃尽风量和一次风喷口给煤量对炉内速度场、温度场、组分浓度场的影响。通过改进网格系统, 提高模拟结果的准确性。数值模拟结果和试验测量值偏差较小, 说明其数值模拟结果可信。结果表明: 随着过量空气系数的增加, 炉内燃烧温度升高, 还原性物质减少, NO_x 排放量增加, 当过量空气系数从 1.20 增加到 1.30 时, NO_x 排放从 221.12 mg/m^3 增加到 196.26 mg/m^3 ; 随着燃尽风量增加, 主燃区温度降低, 燃尽区温度升高, 主燃区温度的降低抑制了热力型 NO_x 的生成, NO_x 排放量降低, 当燃尽风量从 20% 增加到 30% 时, NO_x 从 231.21 mg/m^3 降低到 180.95 mg/m^3 ; 一次风喷口给煤量变化对炉膛内温度场、组分浓度场和 NO_x 生成影响较小。

关键词:四角切圆锅炉; 低氮改造; NO_x ; 燃烧特性; 数值模拟

中图分类号:TK16

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)03-0182-07

Numerical simulation on combustion characteristics of a 300 MW tangentially-fired boiler under low load

JIANG Zhiming^{1,2}, ZHANG Yan³, LI Yuesheng^{1,2}, QIU Yanfei², SONG Changzhi², LIU Hu³, DENG Lei³, CHE Defu³

(1.Shunde Institute of Inspection, Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Foshan 528300, China;

2.Quality Supervision and Inspection Center of National Industrial Boiler, Foshan 528300, China;

3.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the improvement of environmental protection standards, NO_x emission control of power plant boilers is increasingly strict. Low- NO_x retrofit can effectively reduce NO_x generation, but the research on combustion characteristics in low load after retrofit is limited. The combustion characteristics of a 300 MW low- NO_x retrofitted tangentially-fired boiler under low load and multiple operating conditions were numerically simulated in this work. The influence of excess air ratio, burnout air ratio and pulverized coal feeding rate of primary air nozzle on the velocity, temperature and species distributions in the furnace were studied. By improving the grid system, the accuracy of simulation results is improved. The deviation between the simulation results and the experimental measurements is small, which shows that the simulation results are reliable. The results show that with the increase of excess air ratio, the temperature rises up, the reducing species decrease and the NO_x emission increases. When the excess air coefficient increases from 1.20 to 1.30, the NO_x emission increases from 221.12 mg/m^3 to 196.26 mg/m^3 . With the increase of burnout air ratio, the temperature of the main combustion zone decreases, the temperature of the burnout zone increases. The reduction of the temperature of the main combustion zone inhibits the generation of thermal NO_x , and the NO_x emission decreases. When the burnout air ratio increases from 20% to 30%, the NO_x emission decreases from 231.21 mg/m^3 to 180.95 mg/m^3 . The influences of pulverized coal feeding rate for primary air nozzle on temperature, species concentration and NO_x emission are small.

Key words: tangentially-fired boiler; low- NO_x retrofit; NO_x ; combustion characteristic; numerical simulation

收稿日期:2020-03-17; **责任编辑:**白娅娜 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.20031701

基金项目:广东省质量技术监督局科技项目(2018CT17); 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602102)

作者简介:江志铭(1982—), 男, 广东顺德人, 高级工程师, 主要从事锅炉安全节能研究。E-mail: 4487718@qq.com。通讯作者: 邓磊, 副教授, 从事生物质热转化及生物质能利用。E-mail: leideng@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:江志铭, 张妍, 李越胜, 等. 300 MW 四角切圆锅炉低负荷下燃烧特性数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 182-188.

JIANG Zhiming, ZHANG Yan, LI Yuesheng, et al. Numerical simulation on combustion characteristics of a 300 MW tangentially-fired boiler under low load[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 182-188.



移动阅读

0 引 言

随着环保标准提高,电站锅炉 NO_x 排放量控制日益严格。目前,国内外主要通过低氮燃烧和烟气后处理 2 类技术进行 NO_x 排放控制。低氮燃烧是通过改变不同燃烧阶段燃料和空气比率来控制 NO_x 排放,由于性价比高,普遍作为低氮控制技术的首选方案。烟气后处理技术是将燃烧过程中已经生成的 NO_x 通过技术手段还原为无害 N₂,最常用的方法有选择性催化还原法 (SCR) 和非选择性催化还原法 (SNCR)^[1-6]。

国内外众多学者采用数值计算方法对不同炉型^[7-14]和燃烧气氛^[15-16]下锅炉燃烧和组分浓度分布进行研究,发现数值计算可以获得较可靠的结果。李德波等^[12]研究了风速对四角切圆锅炉的影响,结果表明随着风速增大,炉膛内和炉膛出口处的平均温度均下降。同时炉内切圆半径和切圆中心位置均未发生改变,但切圆最大风速增大。王秋红等^[13]研究不同负荷下炉内燃烧特性的变化情况,结果表明 NO_x 浓度随负

荷的降低而降低。CHOI 等^[17]通过数值模拟研究了一台塔式锅炉的燃烧特性,结果表明,与不采用燃尽风喷口相比,采用燃尽风喷口能很好地降低 NO_x 的生成。低氮改造可以有效降低 NO_x 生成,而对于改造后低负荷下炉内燃烧特性研究有限。

本文以某电厂一台低氮改造后的 300 MW 四角切圆煤粉锅炉为研究对象,进行了 60% 负荷下氧量扰动、燃尽风量扰动和煤层扰动数值模拟试验,对低氮改造后不同负荷下锅炉的燃烧情况进行分析,为该电厂低氮改造效果及不同负荷下运行方式提供参考依据。

1 锅炉概况

某电厂锅炉为 300 MW 亚临界压力、一次中间再热、自然循环、单炉膛、平衡通风、四角切圆燃烧、固态排渣、露天“π”型布置、全钢架全悬吊结构的燃煤锅炉。锅炉炉膛宽 14 706.6 mm、深 13 743.4 mm、高 56 400 mm。锅炉设计用煤为甘肃华亭煤,煤质分析见表 1。

表 1 煤种参数
Table 1 Properties of coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
16.01	17.32	37.66	29.01	52.50	3.03	9.96	0.54	0.64	19.65

改造前该锅炉未采用空气分级燃烧,存在燃烧稳定性差和 NO_x 排放浓度高等问题。为满足 NO_x 排放标准,燃烧器进行了低氮改造。增加分离式燃尽风 (Separated over-fire air, SOFA) 喷口,改造后的燃烧器喷嘴能在水平和垂直方向上摆动,具有汽温调节功能。

改造后锅炉的三维结构布置如图 1 (a) 所示。锅炉原有燃烧器采用一、二次粉喷口相间布置 (图 1 (b)), 保持原有燃烧器的标高不变,在燃烧器的上方设 4 组可水平和垂直摆动的分离燃尽风,每组 2 层,改造后的燃烧器喷口布置如图 1 (c) 所示。改造后的燃烧器从下至上分为 3 个区,依次为主燃烧器区、主还原区及燃尽区。主燃烧器区为集中氧化还原区,风量占总风量的 70%~80%,保证煤粉初期燃烧;在主燃烧器上方合适位置引入适量的燃尽风,占总风量的 20%~30%,燃尽风采用多喷口多角度射入;在主燃烧器区与燃尽区之间形成了主还原区。通过纵向三区布置,形成纵向空气分级,NO_x 和飞灰都得到一定程度的控制。

数值模拟过程中,燃烧器喷口采用速度入口边界定义。在 60% 负荷下,给煤量为 88.2 t/h,一次风

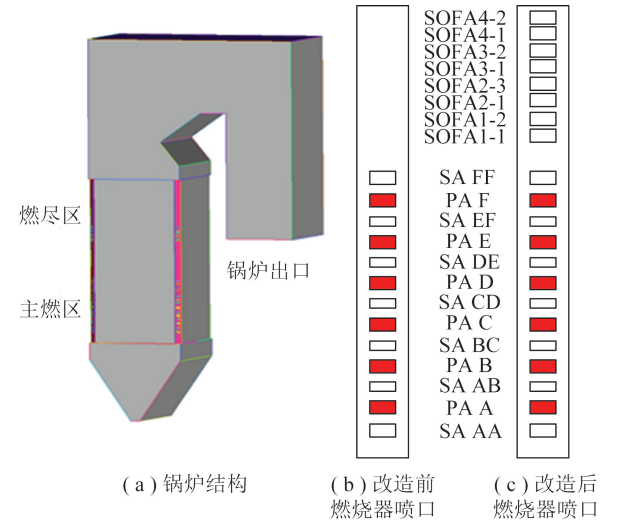


图 1 锅炉结构示意图及改造前后燃烧器喷口布置
Fig.1 Schematic diagram of boiler structure and layout of burner nozzle before and after retrofit

和二次风的温度分别为 343 和 623 K,锅炉出口采用自由流出口边界定义。炉膛壁面采用标准壁面方程,水冷壁温度为 700 K,发射率为 0.8。采用压力和速度耦合的 SIMPLE 算法进行求解。60% 负荷下该炉内给煤量及风量分配情况见表 2。

表 2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

项目		风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风率/%
一次风		28	23.00
二次风	辅助风	48	47.76
	燃尽风	31	25.00
漏风		—	4.24

2 物理模型

由于四角切圆燃烧锅炉燃烧器区域横截面为切角四边形,相邻结构为四边形,因此采用分块划分完成锅炉网格划分。按照炉膛内物理化学反应的特点,将整个炉膛分为冷灰斗区域、燃烧器区域、还原区域、燃尽风区域、尾部烟道区域。因为燃烧器区域布置在切角上的一次风和二次风入口方向与直角坐标的网格边界的夹角约为 45° ,直接采用直角坐标系进行数值计算会产生数值伪扩散,影响计算准确性。减少因网格结构造成的伪扩散的根本方法是使流动方向与网格边界夹角远离 45° ,以近似垂直于网格边界的方向进入计算微元体。

本文采用改进的网格系统,尽可能使速度以垂直于网格边界的方向进入计算微元体。同时为了适应燃烧器区域和燃尽风区域剧烈的化学反应,对对应网格进行加密,冷灰斗区域和尾部竖井区域采用较稀疏的网格。网格结构如图 2 所示。

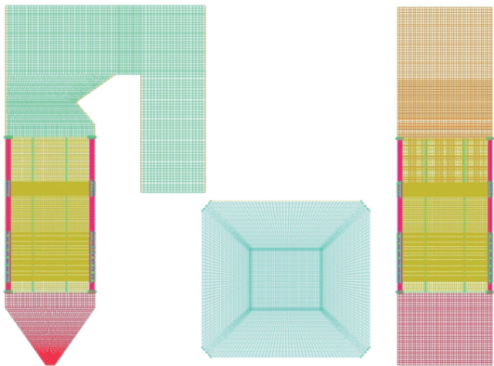


图 2 炉膛网格结构
Fig.2 Grid structure of the furnace

考虑到计算时间和计算精度,对 3 种不同数量网格的数值模拟结果进行对比。不同网格数量下沿炉膛高度方向截面平均温度变化趋势如图 3 所示。可知 3 种网格下,其温度分布大体一致,最终选择 2 045 208 个网格进行数值模拟计算。

3 数学模型

燃烧过程涉及流动、传热、化学反应等多个物理

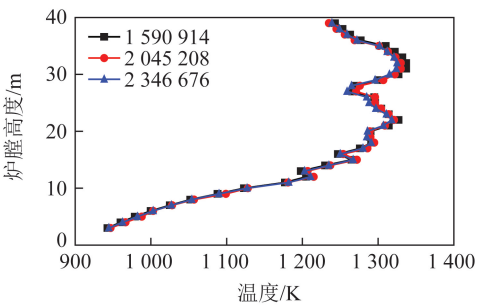


图 3 网格无关性验证
Fig.3 Grid independence verification

化学过程。其中,传热过程包括辐射和对流传热;燃烧过程包括气相燃烧和焦炭燃烧。本文中气相湍流采用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[5]描述,组分之间的燃烧采用概率密度函数模型模拟^[4,11],煤热解采用双方程模型进行模拟,焦炭燃烧采用动力/扩散模型描述,煤粉轨迹采用颗粒随机轨道模型进行追踪,炉膛内辐射传热计算采用 P1 法^[17]。以上模型被大量学者在不同研究中采用,证明这些模型能够适用煤粉锅炉燃烧模拟。

为进行锅炉低负荷燃烧工况下氧量扰动、燃尽风扰动和煤层扰动试验,本文结合锅炉设计运行情况设定数值模拟工况,具体见表 3。

表 3 数值模拟工况
Table 3 Simulation conditions

项目	工况	参数	数值
氧量 扰动试验	60-1.20	炉膛出口 过量空气系数	1.2
	60-1.25		1.25
	60-1.30		1.3
燃尽风 扰动试验	60-20	燃尽风量	20%
	60-25		25%
	60-30		30%
煤层 扰动试验	60-d	给煤量	从上向下逐层递减
	60-s		中间层最少, 向上下 2 个方向递增
	60-z		从上向下逐层递增

4 计算结果及分析

4.1 数值模拟与试验测量结果比较

为了获得可信的数值模拟结果,本文将数值模拟结果和低氮燃烧器改造后性能测量值进行比较。在满负荷工况下,过量空气系数为 1.15 时,燃尽区 4 个观火孔测得平均温度为 $1\,299\,^\circ\text{C}$,大屏区温度 $1\,070\,^\circ\text{C}$,数值计算得到燃尽区温度为 $1\,216\,^\circ\text{C}$,大屏区为 $950\,^\circ\text{C}$;其燃尽区温度的相对偏差为 6.3%,大屏区温度的相对偏差为 11.2%。现场测量锅炉出

口 NO_x 排放浓度为 173 mg/m^3 , 数值计算 NO_x 排放量为 165 mg/m^3 。数值计算结果和现场测值偏差较小, 说明数值计算结果可信。煤粉在锅炉内燃烧过程中发生复杂的物理化学反应, 本文依次对炉内的温度场和组分浓度场进行介绍, 分析不同因素扰动工况。

4.2 不同过量空气系数工况下炉内燃烧情况

不同过量空气系数下炉膛内温度分布如图 4 所示, 可知 3 种工况下炉膛内温度分布情况类似: 主燃区燃烧器喷口附近燃烧反应发生最为剧烈, 温度水平最高; 沿着炉膛高度方向, 炉膛平均温度随着高度的增加逐渐升高, 燃尽风喷口附近炉膛整体温度水平达到最高; 燃尽风喷入后, 炉膛温度先下降而后随焦炭颗粒的燃烧放热又逐渐升高; 大屏区, 由于水冷壁等的吸热, 炉膛温度水平随着高度的增加又逐渐下降。同时, 结合炉膛截面平均温度沿高度方向分布(图 5)可知, 随着过量空气系数的增加, 燃烧器区域温度水平逐渐增加。这是由于主燃区氧量随着过量空气系数的增加而增加, 主燃区燃烧更加充分, 燃烧反应放热量更大。燃尽风喷入后, 3 种工况下炉膛平均温度水平几乎一样。这可能由以下原因造成: ① 虽然炉膛出口过量空气系数越大, 主燃区炉膛平均温度水平越高, 但燃尽风喷口喷入炉膛内温度相对较低的二次风量也越大, 加热二次风所需热

量较大; ② 锅炉燃烧煤种挥发分很高, 达到 37.66%, 属于极易燃烧和燃尽煤种, 燃烧器区域已进行了较充分的燃烧放热, 燃尽区域燃烧反应占很少份额。

炉膛内主要组分 CO 、 CO_2 、 O_2 体积分数分布如图 6 所示。可知在燃烧器区域及分离燃尽风喷口下部, O_2 量较少而 CO 量较大。这是由于锅炉采用了分级燃烧, 在燃烧器区域及分离燃尽风喷口下部区域, 过量空气系数小于 1, 因此该区域形成了一个强还原性气氛, 燃烧反应不能充分进行, 产生大量 CO 。但随着过量空气系数的增加, 主燃区氧量逐渐增加, CO 生成量减少, 随着过量空气系数的增加, CO 生成量减小, 炉膛内燃烧更加充分, 炉内高温区域逐渐扩大, 炉膛整体温度水平升高。 O_2 浓度曲线比较符合整组燃烧器的配风和燃料燃烧情况, 表明煤粉主要在燃烧器区域和上炉膛旺盛燃烧, 而在燃烧器下部区域, 燃烧相对较弱, 耗氧量较小。还原区氧浓度降到 0.8% 左右, 达到最低。分离燃尽风投入后, 氧浓度明显增加, 随着焦炭燃尽, 氧浓度逐渐下降。不同过量空气系数下锅炉出口 NO_x 浓度见表 4。 NO_x 的生成与炉膛内的燃烧方式、氧浓度和温度相关。随着过量空气系数的增加, 炉膛内的氧浓度增加, 同时, 主燃区燃烧更加充分, 导致主燃区温度增加, 最终使得锅炉出口 NO_x 排放量随着过量空气系数的增加而增加。

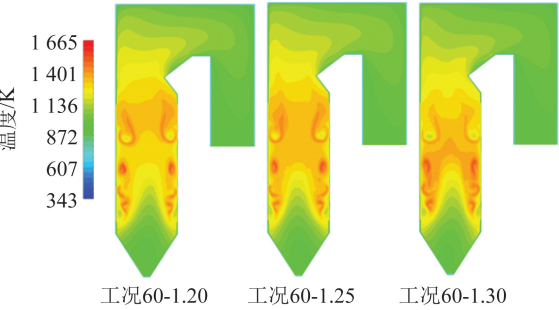


图 4 不同过量空气系数下炉膛中心纵截面温度分布
Fig.4 Temperature distribution along furnace height at different excess air ratios

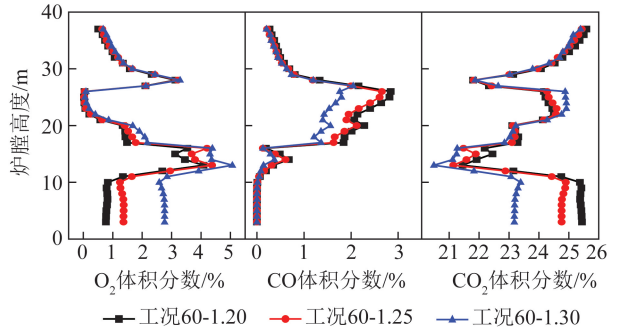


图 6 炉膛组分浓度沿高度方向分布
Fig.6 Component concentration distribution along the furnace height

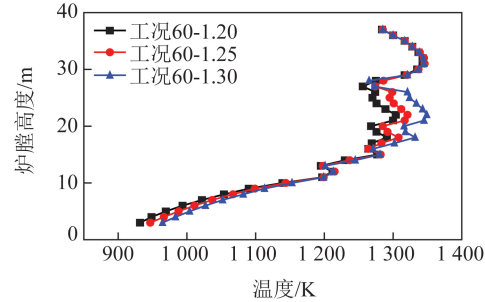


图 5 炉膛截面平均温度沿高度方向分布
Fig.5 Average temperature distribution along the furnace height

表 4 不同过量空气系数工况下锅炉出口 NO_x 浓度
Table 4 NO_x concentration of the boiler outlet at different excess air ratios

工况	锅炉出口 NO_x 浓度/($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)
60-1.20	196.26
60-1.25	209.76
60-1.30	221.12

4.3 不同燃尽风工况下炉内燃烧情况

不同燃尽风量工况下炉膛纵截面温度分布如图7所示,可知燃尽风量越大,主燃区高温区域面积越小,燃尽区高温区域面积越大。这是由于分级燃烧后,燃尽风量越大主燃区氧量越少,主燃区燃烧更加不充分,更多的未完全燃烧产物在燃尽区燃烧。沿炉膛轴线高度方向截面上的平均烟气温度分布如图8所示,可在燃烧器区域烟温很高,在主燃烧器的上部区域达到峰值,表明燃料在此区域燃烧旺盛。同时发现燃尽风量越大,主燃区温度水平越低,这是由于燃尽风量越大,主燃区助燃空气量越少,该区域燃烧越不充分,燃烧放热量越少。

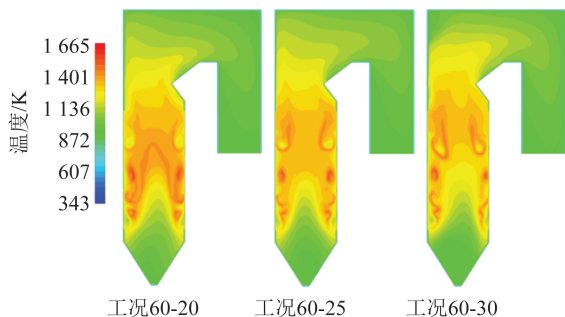


图7 不同燃尽风量下炉膛纵截面温度分布

Fig.7 Temperature distribution of longitudinal section at different burnout airs

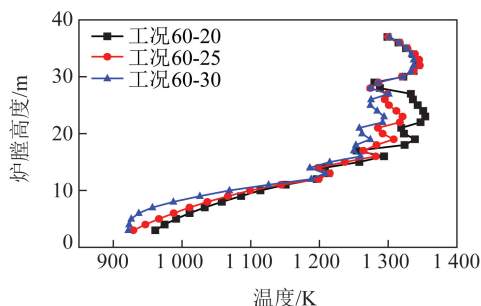


图8 炉膛截面平均温度沿炉膛高度分布

Fig.8 Average temperature distribution along the height direction

不同燃尽风量时炉膛纵截面和沿炉膛高度方向烟气中组分浓度分布如图9所示。可知CO浓度随着燃尽风量的增加而增加;CO₂浓度则随燃尽风量的增加而递减。这是因为该锅炉所燃煤种挥发分高,易于燃烧,主燃区燃烧发生的非常剧烈,氧气消耗量非常大,虽然3种工况下供入主燃区氧量不同,但3种工况下主燃区都处于欠氧燃烧工况,供入的氧气被快速消耗,造成3种工况剩余氧气量几乎相同。随着燃尽风量的增加,主燃区欠氧程度加剧,燃烧不充分程度加剧,生成CO量增加,CO₂量减少。

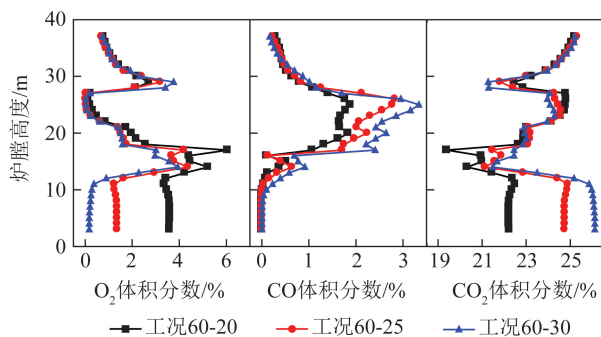


图9 炉膛截面平均组分浓度沿炉膛高度分布

Fig.9 Average component concentration distribution along the furnace height

不同燃尽风量下锅炉出口NO_x浓度见表5。可知NO_x排放量随燃尽风量的增加而降低。这是由于保持总过量空气系数不变的情况下,随着燃尽风量增加,主燃区风量减少,煤粉在主燃区燃烧更加不充分,主燃区炉膛内温度水平降低,从而抑制了热力型NO_x的生成。同时,主燃区形成了富燃欠氧还原性气氛,还原性物质生成量增加,可以有效降低NO_x的生成。

表5 不同燃尽风量工况下锅炉出口NO_x浓度

Table 5 NO_x concentration of boiler outlet at different burnout air

工况	锅炉出口NO _x 浓度/(mg·Nm ⁻³)
60-20	231.21
60-25	209.75
60-30	180.95

4.4 不同给煤方式下炉内燃烧情况

燃烧器给煤量变化时炉膛纵截面温度分布如图10所示,炉膛横截面平均温度沿炉膛高度分布如图11所示。可知3种工况下炉膛横截面平均温度几乎相同,仅略有差别,这可能是由于该煤种挥发分高,易于燃烧。工况60-d主燃区温度水平略高于工况60-s和工况60-z,这是由于工况60-d最下层燃烧器给煤量最少,该区域整体温度水平较低,少量煤粉更易被加热升温进而燃烧放热,且该区域氧量充分,燃烧更易发生;虽然该工况上层燃烧器给煤量最大,但由于该区域炉膛整体温度水平较高,煤粉进入炉膛后能够快速升温燃烧,加热烟气提高炉膛温度水平。工况60-z则相反,下层煤粉喷口给煤量最大,该区域炉膛整体温度水平较低,大量煤粉升温较慢,不及工况60-d燃烧剧烈,温度水平比工况60-d低。工况60-s则由于最上层和最下层燃烧器给煤量较大,下层喷口附近温度水平接近60-z工况,上层喷口附近温度水平接近60-d工况。

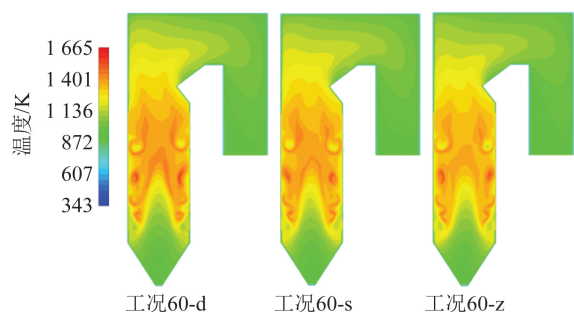


图 10 燃烧器给煤量变化时炉膛纵截面温度分布

Fig.10 Temperature distribution along furnace height with the variation of providing coal

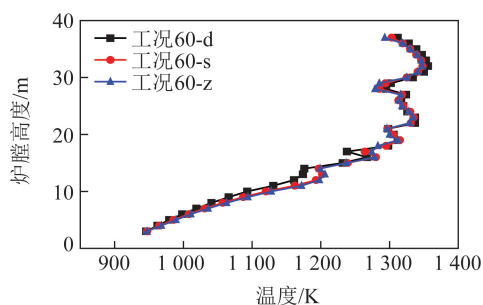


图 11 炉膛横截面平均温度沿炉膛高度分布

Fig.11 Average temperature distribution along the height direction

炉膛横截面组分浓度沿炉膛高度分布如图 12 所示,可知 3 种工况截面平均组分浓度分布情况几乎一致,仅在下层燃烧器喷口附近略有差别。表现为:下层燃烧器喷口附近,工况 60-d 剩余氧气浓度最高,工况 60-z 剩余氧气浓度最低;工况 60-d 生成的 CO 浓度最低,而工况 60-z 生成的 CO 浓度最高,工况 60-s 介于两者之间。

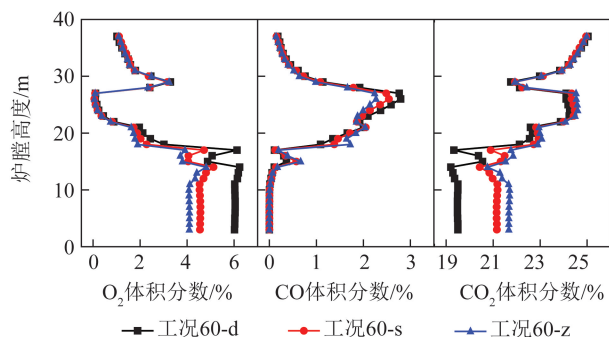


图 12 炉膛横截面组分浓度沿炉膛高度分布

Fig.12 Concentrations of species on furnace cross-section along the height direction

燃烧器给煤量变化时锅炉出口 NO_x 浓度见表 6,可知煤粉分布对 NO_x 生成量的影响微弱。在 3 种不同给煤方式下,其温度场和组风场比较接近,导致 NO_x 生成量变化不大。这意味着锅炉实际运行中,如磨煤机和制粉系统运行导致各层燃烧器给煤量不

均时,对 NO_x 排放浓度不会产生明显影响。

表 6 燃烧器给煤量变化时锅炉出口 NO_x 浓度Table 6 NO_x concentration of the boiler outlet for the combustors with the variation of providing coal

工况	锅炉出口 NO_x 浓度/($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)
60-d	206.27
60-s	212.51
60-z	213.97

5 结 论

1)通过数值模拟研究了某电厂 300 MW 机组锅炉在 60% 负荷下的流动、燃烧、传热和组分分布情况,以及氧量扰动、燃尽风量扰动和煤层扰动。本文选择的计算模型经过众多学者验证有效,且计算结果和现场实测数据吻合较好,计算结果可信。

2)低负荷下, NO_x 生成量随着炉膛出口过量空气系数的增加而增加。这是由于随着炉膛出口氧量增加,主燃区送入的氧量增加,炉膛内主燃区煤粉燃烧更加充分和剧烈,炉膛内高温区域扩大,含氮基团在高温富氧条件下燃烧更易生成 NO_x 。

3)低负荷下, NO_x 生成量随着燃尽风量的增加而降低。这是由于过量空气系数不变的情况下,随着燃尽风量增加,主燃区氧量逐渐减少,煤粉在主燃区燃烧更加不充分,主燃区炉膛平均温度降低,同时还原性物质生成量增加, NO_x 生成量减少。

4)低负荷下,煤层扰动对炉膛整体温度水平影响不大,组分浓度变化不大,最终造成 NO_x 生成量变化不大,主要是因为该锅炉燃烧煤种挥发分特别高,易于点火燃尽。

参考文献 (References):

- [1] 李德波,徐齐胜,沈跃良,等.660 MW 四角切圆锅炉低氮改造后变磨煤机组合方式下燃烧特性数值模拟[J]. 动力工程学报,2015,35(2):89-95,146.
LI Debo, XU Qisheng, SHEN Yuejiang, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of 660 MW tangentially fired boiler after low nitrogen retrofit with variable pulverizer combination mode [J]. Journal of Power Engineering, 2015, 35(2): 89-95, 146.
- [2] 李德波,廖永进,陆继东,等.燃煤电站 SCR 催化剂更换周期及策略优化数学模型[J]. 中国电力,2013,46(12):118-121.
LI Debo, LIAO Yongjin, LU Jidong, et al. Mathematical model of SCR catalyst replacement cycle and strategy optimization for coal-fired power plants [J]. China Power, 2013, 46(12): 118-121.
- [3] BAI W G, LI H, DENG L, et al. Air-staged combustion characteristics of pulverized coal under high temperature and strong reducing atmosphere conditions [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(3):

- 1820-1828.
- [4] DU Y B, WANG C A, LV Q, et al. CFD investigation on combustion and NO_x emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler under high temperature and strong reducing atmosphere[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126:407-418.
 - [5] LIU H, LIU Y H, YI G Z, et al. Effects of air staging conditions on the combustion and NO_x emission characteristics in a 600 MW wall fired utility boiler using lean coal[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(10):5831-5840.
 - [6] LIU H, TANG C L, ZHANG L, et al. Effect of two-level air on the combustion and no emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler [J]. Numerical Heat Transfer Part A-Applications, 2015, 68(9):993-1009.
 - [7] LI Z, LIU G, CHEN Z, et al. Effect of angle of arch-supplied overfire air on flow, combustion characteristics and NO_x emissions of a down-fired utility boiler[J]. Energy, 2013, 59:377-386.
 - [8] REN F, LI Z, LIU G, et al. Numerical simulation of flow and combustion characteristics in a 300 MWe down-fired boiler with different overfire air angles[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(4):1457-1464.
 - [9] REN F, LI Z, LIU G, et al. Combustion and NO_x emissions characteristics of a down-fired 660 MWe utility boiler retro-fitted with air-surrounding-fuel concept[J]. Energy, 2011, 36(1):70-77.
 - [10] LIU H, XIN N, CAO Q, et al. Numerical simulation of the influence of over fire air position on the combustion in a single furnace boiler with dual circle firing[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(4):1137-1143.
 - [11] DIEZ LI, CORTES C, PALLARES J. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation [J]. Fuel, 2008, 87(7):1259-1269.
 - [12] 李德波, 徐齐胜, 沈跃良, 等. 变风速下四角切圆锅炉燃烧特性的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(3):172-177.
LI Debo, XU Qisheng, SHEN Yueliang, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of tangentially fired boiler with variable wind speed [J]. Journal of Power Engineering, 2013, 33(3):172-177.
 - [13] 王秋红, 王超, 张小桃, 等. 四角切圆锅炉炉内燃烧数值模拟[J]. 热力发电, 2016, 45(9):61-66.
WANG Qihong, WANG Chao, ZHANG Xiaotao, et al. Numerical simulation of combustion in a tangentially fired boiler [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9):61-66.
 - [14] 李德波, 李方勇, 许凯, 等. 四角切圆锅炉变 CCOFA 与 SOFA 配比下燃烧特性数值模拟[J]. 广东电力, 2016, 29(1):1-7, 16.
LI Debo, LI Fangyong, XU Kai, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of a tangentially fired boiler with a ratio of ccofa to sofa [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(1):1-7, 16.
 - [15] NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A, KARAMPINIS E, et al. Numerical investigation of the oxy-fuel combustion in large scale boilers adopting the ECO-Scrub technology [J]. Fuel, 2011, 90(1):198-214.
 - [16] NIMMO W, DAOOD SS, GIBBS BM. The effect of O_2 enrichment on NO_x formation in biomass co-fired pulverised coal combustion [J]. Fuel, 2010, 89(10):2945-2952.
 - [17] CHOI C R, KIM C N. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88(9):1720-1731.