

文章编号:0253-9993(2012)02-0310-06

# 超临界锅炉劣质无烟煤燃烧 $\text{NO}_x$ 释放特性的数值模拟

王为术<sup>1</sup>, 刘 军<sup>1</sup>, 王保文<sup>1</sup>, 姚明宇<sup>2</sup>, 王纪宏<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电学院 电力学院, 河南 郑州 450011; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032; 3. 大唐林州热电有限责任公司, 河南 林州 455561)

**摘 要:**针对 600 MW 超临界 W 火焰锅炉, 通过数值模拟的方法研究了煤粉浓度和燃烬风对劣质无烟煤燃烧  $\text{NO}_x$  释放特性的影响。结果表明,  $\text{NO}_x$  主要在煤粉燃烧前期距一次风喷口 2~4 m 处大量生成, 选择合适的煤粉浓度, 炉内  $\text{NO}_x$  最大值可下降 16.5%; 与常规浓度相比, 高浓度煤粉燃烧可有效降低炉膛出口  $\text{NO}_x$  排放; 燃烬风对炉内各物质含量及  $\text{NO}_x$  的生成影响显著, 燃烬风率由 6% 增加到 15%, 炉膛出口  $\text{NO}_x$  排放量由 756.0  $\text{mg}/\text{m}^3$  下降到 502.9  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

**关键词:**超临界 W 火焰锅炉;  $\text{NO}_x$  释放; 煤粉浓度; 燃烬风; 数值模拟

**中图分类号:** TQ534.9 **文献标志码:** A

## Numerical simulation on the $\text{NO}_x$ release characteristics during the combustion of poor-quality anthracite in supercritical boiler

WANG Wei-shu<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, WANG Bao-wen<sup>1</sup>, YAO Ming-yu<sup>2</sup>, WANG Ji-hong<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China; 3. Linzhou Thermal Power Co., Ltd. of Datang, Linzhou 455561, China)

**Abstract:** In light of a 600 MW supercritical pressure W-flame boiler, the  $\text{NO}_x$  release characteristics during the combustion of poor-quality anthracite were numerically simulated at the conditions of different pulverized coal concentrations and different over-fire air rates. The results indicate that a large quantity of  $\text{NO}_x$  is generated in the initial burning stage of pulverized coal, at the distance of 2~4 m away from the primary air nozzles. The maximum of  $\text{NO}_x$  in the furnace can be reduced by 16.5% by choosing a reasonable pulverized coal concentration. Compared with the conventional concentration,  $\text{NO}_x$  emissions at furnace exit can be effectively reduced during the combustion of pulverized coal with higher concentration. Over-fire air has great effects on the substance contents and the generation of  $\text{NO}_x$  in the furnace,  $\text{NO}_x$  emissions at furnace exit decrease from 756.0  $\text{mg}/\text{m}^3$  to 502.9  $\text{mg}/\text{m}^3$  with the rate of over-fire air increasing from 6% to 15%.

**Key words:** supercritical pressure W-flame boiler;  $\text{NO}_x$  emissions; pulverized coal concentration; over-fire air; numerical simulation

电站锅炉是大气污染的主要排放源, 粉尘、N/S 氧化物的排放主要来源于煤粉燃烧<sup>[1]</sup>。据统计, 劣质无烟煤占全国煤炭资源总量的 13%, 其储量、价格低, 必将会被大量用于发电, 但劣质无烟煤品质低, 燃烧性和环保性差, 因此劣质无烟煤的高效低污染洁净燃烧发电技术备受关注。目前, 无烟煤主要用于

W 火焰锅炉, 与其他锅炉相比, W 火焰锅炉  $\text{NO}_x$  排放浓度最高, 常存在炉膛出口飞灰含量大、炉内结渣严重的问题<sup>[2]</sup>, 其原因是 W 火焰锅炉燃烧温度高, 过量空气系数大。超临界 W 火焰锅炉通过提高炉膛热负荷、延长火焰行程、煤粉浓淡分离等<sup>[3]</sup>技术手段可使锅炉热效率大为提高, 并能有效降低锅炉烟气中污染

收稿日期: 2011-04-19 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906030)

作者简介: 王为术(1972—), 男, 重庆开县人, 副教授, 硕士生导师。Tel: 0371-65790043, E-mail: wangweishu@newu.edu.cn

物含量,是有效解决劣质无烟煤高效低污染发电的最佳途径。

严峻的环境形势要求燃煤 NO<sub>x</sub> 的控制排放至关重要,张晓辉<sup>[4]</sup>、Hill<sup>[5]</sup>和 Spinti<sup>[6]</sup>等针对煤粉燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 排放特性进行了研究;李钧<sup>[7]</sup>、高正阳<sup>[8]</sup>、申春梅<sup>[9]</sup>等研究了在四角切圆锅炉中煤质、煤粉粒度、配风方式、负荷与燃烬风等因素对炉内 NO<sub>x</sub> 生成规律的影响;周俊虎等<sup>[10]</sup>从生成机理方面详细研究了煤粉浓度对炉内 NO<sub>x</sub> 生成的影响。国内外针对 W 火焰锅炉的研究主要集中在亚临界机组炉膛结构效应<sup>[11]</sup>、结渣特性<sup>[12]</sup>和配风方式<sup>[13]</sup>上,而关于 W 火焰锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的研究较少,超临界 W 火焰锅炉 NO<sub>x</sub> 释放的相关研究鲜见报道。因超临界 W 火焰锅炉独特的炉膛结构和配风特点,对超临界 W 火焰锅炉炉内 NO<sub>x</sub> 的生成进行研究具有重要的经济与环境效益。本文利用 Fluent 6.3 软件对 600 MW 超临界 W 火焰锅炉不同工况下 NO<sub>x</sub> 的生成规律进行数值研究,分析煤粉浓度、燃烬风对炉内 NO<sub>x</sub> 生成的影响,以揭示炉内 NO<sub>x</sub> 的释放规律,降低炉膛出口 NO<sub>x</sub> 排放量,为超临界 W 火焰锅炉现场运行提供指导。

## 1 模拟对象及网格划分

模拟对象为 600 MW 超临界 W 型火焰锅炉。锅

炉炉膛以前后拱顶水平断面为界,划分为上、下炉膛两部分,炉膛前后拱上分别垂直布置 12 只浓缩型 EI-XCL 燃烧器,图 1 为锅炉结构。

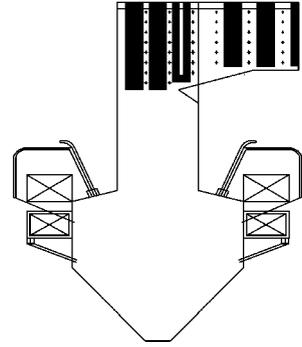


图 1 锅炉结构

Fig. 1 Structure diagram of the boiler

煤粉经过燃烧器浓缩装置后,浓相风粉混合物由一次风喷口喷入炉膛,淡相风粉混合物经乏气管进入炉膛,煤粉气流进入炉膛后,接受炉膛辐射对流换热,达到燃烧条件后点火燃烧,拱上内、外二次风为煤粉燃烧初期提供所需的空气量。乏气风管和分级风管下倾一定角度布置于下炉膛前后墙上,分级风管标高为 13 m,乏气风管标高为 16.6 m。锅炉燃用煤质特性见表 1,可见所用煤种收到基挥发分低,灰分高,为典型的难着火、难燃烬的劣质无烟煤,为此,下炉膛区敷设了卫燃带以促进煤粉燃烧。

表 1 设计煤种工业分析和元素分析

Table 1 The proximate and ultimate analysis of coals

元素分析					工业分析				%
C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>	M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	FC <sub>ar</sub>	
66.33	2.56	2.98	0.75	0.29	4.01	21.09	6.89	68.01	

本文主要模拟研究了不同煤粉浓度、不同燃烬风率下锅炉 NO 释放规律及炉膛出口 NO 排放特性,模拟计算区域为冷灰斗至炉膛出口。利用 Gambit 2.0 软件进行几何建模,采用非结构化网格进行网格划分,模拟对象与实际对象比例为 1:1。为更准确模拟炉内煤粉燃烧特性,锅炉下炉膛设为绝热壁面,在物理量变化剧烈、湍流强烈的主燃区及燃烧器区,采用非结构化四面体和楔形网格进行网格加密,模拟过程中通过逐步细化网格得到近似网格无关解。

## 2 数学模型及计算方法

利用 Fluent 6.3 中非预混燃烧模型模拟煤粉燃烧过程中的化学反应及各组分的输运,采用  $k-\epsilon$  双方程湍流模型模拟炉内湍流流动的三维流场,颗粒与

气体间相互作用采用拉格朗日离散相模型(DPM)。气相湍流燃烧采用混合分数/概率密度函数方法模拟(Mixture-Reaction/PDF),PDF 模型简化形式采用  $\beta$  函数分布,挥发分析出采用两步竞争反应模型(Two Competing Rates Model);煤焦颗粒燃烧采用动力/扩散反应速率模型(Kinetics/Diffusion-Limited Combustion Model),并考虑燃烧过程中颗粒的辐射传热,辐射采用 P-1 辐射模型(P-1 Radiation Model),假定颗粒直径分布遵循 Rosin-Rammler 分布。为提高计算精度,对流项采用二阶迎风格式,离散后的方程组采用 SIMPLEC 算法进行求解,近壁处采用标准壁面函数处理。

煤粉燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成机制主要有 3 种:热力学型 NO<sub>x</sub>、快速型 NO<sub>x</sub> 和燃料型 NO<sub>x</sub>。燃煤锅炉中燃

料型  $\text{NO}_x$  占 75% ~ 95%, 热力型  $\text{NO}_x$  占 5% ~ 25%, 快速性  $\text{NO}_x$  生成量很少<sup>[3]</sup>, 故计算中主要考虑燃料型  $\text{NO}_x$  及热力型  $\text{NO}_x$  的生成。

煤粉燃烧生成的  $\text{NO}_x$  中,  $\text{NO}$  占 90% 以上,  $\text{NO}_2$  占 5% ~ 10%, 而  $\text{N}_2\text{O}$  只占 1% 左右, 因此, 研究煤粉燃烧过程中  $\text{NO}_x$  生成时, 一般主要讨论  $\text{NO}$  的生成机理<sup>[14]</sup>。煤粉燃烧产物中,  $\text{NO}$  所占比例很小, 其生成过程对气相物质的混合特性、热力学特性及其他燃烧产物组分分布影响很小<sup>[3]</sup>, 因此对  $\text{NO}$  生成特性模拟采用后处理方法, 即首先计算炉内煤粉燃烧反应, 待燃烧结果收敛后再加入氮氧化物模型, 计算  $\text{NO}$  生成反应。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 煤粉浓度对 $\text{NO}$ 生成的影响

本文定义煤粉浓度为单位时间内一次风喷口煤粉质量与空气质量之比;  $\text{CO}$  质量分数为混合气体中  $\text{CO}$  质量占总气体质量的百分数;  $\text{O}_2$  质量分数为混合气体中  $\text{O}_2$  质量占总气体质量的百分数;  $\text{NO}$  质量浓度为单位体积混合气体中  $\text{NO}$  的质量, 单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$  (文中  $\text{NO}$  排放浓度均已换算到标准状况)。煤粉燃烧时, 燃料  $\text{N}$  生成  $\text{NO}$  的中间产物主要为  $\text{HCN}$ 。挥发分热解过程中生成  $\text{HCN}$ ,  $\text{HCN}$  在不同的环境中发生的反应不同: 氧化性气氛中,  $\text{HCN}$  的分解路线为  $\text{HCN} \rightarrow \text{NCO} \rightarrow \text{NO}$ ; 还原性气氛中,  $\text{HCN}$  的分解路线为  $\text{HCN} \rightarrow \text{NCO} \rightarrow \text{NH} \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{N}_2$ , 因此  $\text{NO}$  生成量取决于被氧化与被还原的  $\text{HCN}$  量的多少。

煤粉浓度由高向低变化时, 煤粉气流的着火方式由均相燃烧、经联合着火向异相燃烧过渡, 因此, 煤粉中燃料  $\text{N}$  的析出方式及析出量的多少也会发生变化<sup>[10]</sup>。计算过程中, 以前后墙对称配风为基础工况, 在基础工况基础上逐渐增大煤粉浓度, 研究煤粉浓度对炉内  $\text{NO}$  生成的影响。基础工况下煤粉浓度 0.583, 一次风速 19.61 m/s, 乏气风速 24.42 m/s, 分级风速 44.78 m/s。

选取典型截面分析炉内  $\text{NO}$  分布情况, 图 2 ~ 4 给出了不同煤粉浓度下沿炉膛轴向温度、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  分布。因下炉膛为煤粉主燃区, 燃烧需大量氧气, 炉膛周围氧气向下炉膛扩散, 导致炉膛标高 20 m 附近  $\text{O}_2$  质量分数出现峰值。由图 2 ~ 3 可见随煤粉浓度升高, 炉内温度变化不大, 而  $\text{O}_2$  质量分数的变化较大, 煤粉浓度由 0.583 升高到 0.938 时, 炉内  $\text{O}_2$  质量分数峰值由 0.107 下降到 0.047, 且温度与  $\text{O}_2$  质量分数峰值均出现在标高 20 ~ 25 m 内, 表明此区域煤粉剧烈燃烧, 放出大量的热。由图 4 可见随煤粉浓度增

加, 炉内  $\text{CO}$  质量分数逐渐升高, 煤粉浓度由 0.583 升高到 0.938 时, 炉内  $\text{CO}$  质量分数峰值由 0.001 9 升高到 0.002 3。随  $\text{CO}$  量的增加, 炉内还原性气氛增强, 强还原性气氛下大量含  $\text{N}$  中间产物被还原, 有利于减少  $\text{NO}$  的生成。

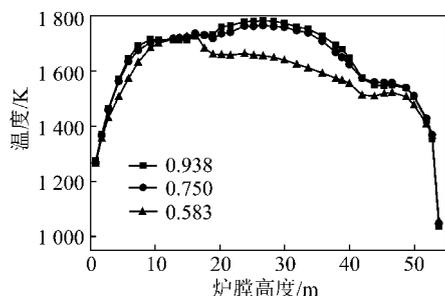


图 2 不同煤粉浓度下沿炉膛轴向温度分布

Fig. 2 Temperature distribution under different coal concentrations along the furnace axis

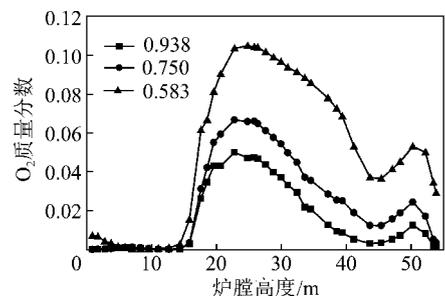


图 3 不同煤粉浓度下沿炉膛轴向  $\text{O}_2$  质量分数分布

Fig. 3 Mass fraction distribution of  $\text{O}_2$  under different coal concentrations along the furnace axis

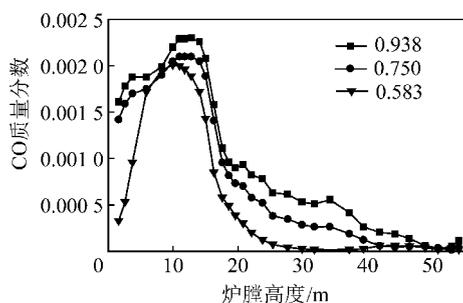


图 4 不同煤粉浓度下沿炉膛轴向  $\text{CO}$  质量分数分布

Fig. 4 Mass fraction distribution of  $\text{CO}$  under different coal concentrations along the furnace axis

图 5 ~ 7 给出了炉膛中心截面  $\text{NO}$  质量浓度分布。煤粉由一次风喷口喷入炉膛后, 经过一段距离, 煤粉挥发分快速热解, 生成含  $\text{N}$  中间产物  $\text{HCN}$ , 大量含  $\text{N}$  中间产物被氧化生成  $\text{NO}$ , 导致  $\text{NO}$  析出量急剧增加, 在炉膛拱下距一次风喷口 2 ~ 4 m 处  $\text{NO}$  质量浓度达到最大值, 之后焦炭中的部分  $\text{N}$  被氧化生成  $\text{NO}$ 。由于  $\text{CO}$  等还原性气体的还原作用, 沿炉膛高度方向上  $\text{NO}$  质量浓度逐渐降低。在炉膛折焰角附

近(标高 40~45 m),NO 质量浓度出现短暂的回升,但回升幅度很小,其原因是部分焦炭中 N 被氧化,生成 NO,但此时折焰角处 CO 含量已很小,还原性气氛较弱,对 NO 的还原性较差,两者平衡的结果使 NO 含量增加。因焦炭中 N 含量很小,故生成的 NO 量较少,之后由于 CO、H<sub>2</sub> 等还原性气体的还原作用,NO 质量浓度逐渐下降,直至稳定状态。以上结果表明 NO 释放过程包括前期快速生成阶段和后期稳定阶段,与 Taniguchi<sup>[15]</sup> 和方立军<sup>[16]</sup> 等的研究结果相一致。

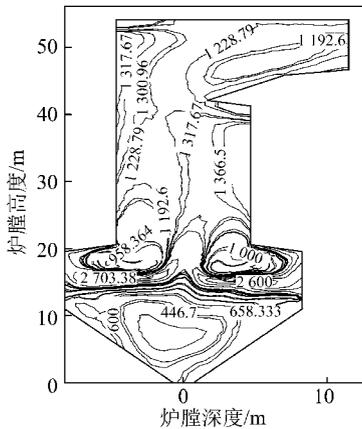


图 5 煤粉浓度 0.583 时炉膛中心截面 NO 质量浓度分布  
Fig. 5 Mass concentration distribution of NO on the central section of furnace when coal concentration is 0.583

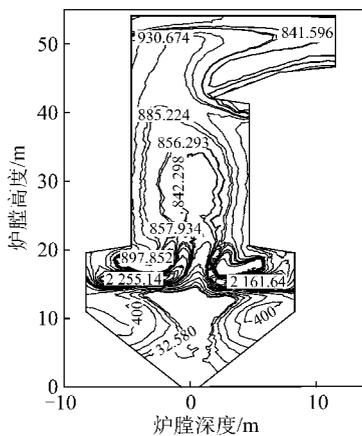


图 6 煤粉浓度 0.750 时炉膛中心截面 NO 质量浓度分布  
Fig. 6 Mass concentration distribution of NO on the central section of furnace when coal concentration is 0.750

对比图 5~7,随煤粉浓度升高,炉内 NO 质量浓度呈单调递减趋势。随煤粉浓度升高,煤粉燃烧所需的氧量逐渐增加,而炉膛送风量没有变化,导致下炉膛煤粉不完全燃烧加剧,不完全燃烧生成的 CO 量增多,炉内还原性气氛增强,在还原性气氛下,炉内含 N 中间产物 HCN 沿 HCN→NCO→NH→N→N<sub>2</sub> 路线被还原为 N<sub>2</sub>,同时煤焦对 NO 也有还原作用,导致 NO

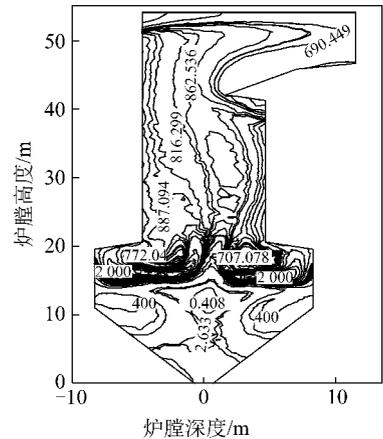


图 7 煤粉浓度 0.938 时炉膛中心截面 NO 质量浓度分布  
Fig. 7 Mass concentration distribution of NO on the central section of furnace when coal concentration is 0.938

质量浓度随煤粉浓度的升高而下降。

表 2 给出了不同煤粉浓度下炉膛出口截面平均 NO 质量浓度及炉内 NO 质量浓度最大值的分布。对比图 5~7 可见炉内 NO 质量浓度最大值发生在拱下 2~4 m 处,煤粉浓度由 0.583 升高到 0.750 时,炉内 NO 质量浓度最大值由 2 700 mg/m<sup>3</sup> 下降到 2 255 mg/m<sup>3</sup>,下降了 16.5%。随煤粉浓度增加,炉膛出口截面平均 NO 质量浓度逐渐下降,煤粉浓度由 0.583 升高到 0.750,炉膛出口截面平均 NO 质量浓度由 917 mg/m<sup>3</sup> 下降到 532 mg/m<sup>3</sup>,综合考虑锅炉负荷等因素,煤粉浓度选为 0.750 较为合理。

表 2 炉内 NO 分布

Table 2 NO distribution in the furnace

煤粉浓度	炉膛出口平均 NO 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	炉内 NO 质量浓度最大值/(mg·m <sup>-3</sup> )
0.583	917.58	2 700
0.750	532.41	2 255
0.938	336.32	2 000

### 3.2 燃烬风对 NO 生成的影响

燃烬风对炉内煤粉燃烧过程有重要影响。模拟过程中在基础工况基础上增设燃烬风,根据燃烬风率的不同分 3 个工况进行计算,研究不同燃烬风率对炉内 NO 生成的影响,此过程中总风量保持不变,炉膛各风量变化见表 3。

图 8 给出了 3 个工况下沿炉膛轴向温度分布。燃烬风的投入对炉内温度有两方面影响:一方面可促进未燃烬碳继续燃烧,使炉内温度上升;另一方面因燃烬风温度低于炉内温度,燃烬风与炉内烟气掺混而降低炉内温度。由图 8 可见 3 个工况下沿炉高方向温度变化规律基本相同,总体呈先上升后下降趋势,

在炉膛标高 20 m 附近,因燃烬风投入促进未燃烬碳继续燃烧放出的热量较大,导致温度继续升高达到峰值,之后炉内温度不断下降,且燃烬风率越大,炉内温度越低。

表 3 炉膛各风量变化

Table 3 Changes in air flow inside the furnace

风类型	风率/%			温度/K
	工况 1	工况 2	工况 3	
一次风	8.37	8.37	8.37	403
内二次风	21.24	21.24	21.24	642
外二次风	27.60	22.35	18.60	642
分级风	28.91	28.91	28.91	642
乏气风	7.88	7.88	7.88	403
燃烬风	6.00	11.25	15.00	642

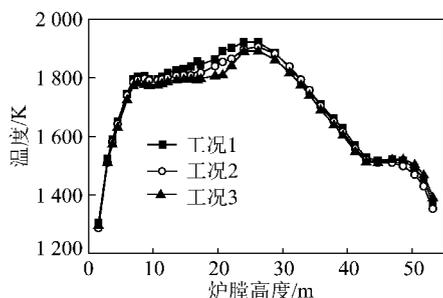


图 8 不同工况下沿炉膛轴向温度分布

Fig. 8 Temperature distribution under different conditions along the furnace axis

图 9,10 给出了 3 个工况下沿炉膛轴向  $O_2$ 、CO 分布。可见投入燃烬风后,炉内各物质含量分布趋于复杂,沿炉膛轴向  $O_2$  与 CO 质量分数出现多处波动。与未投入燃烬风相比,投入燃烬风后炉内  $O_2$  含量大量减少,因燃烬风投入增加了燃烬风出口附近空气量, $O_2$  含量再次增加,故炉膛标高 20~25 m 内  $O_2$  质量分数出现两个峰值。

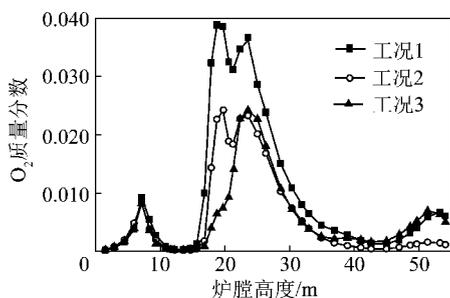


图 9 不同工况下沿炉膛轴向  $O_2$  质量分数分布

Fig. 9 Mass fraction distribution of  $O_2$  under different conditions along the furnace axis

炉膛温度、 $O_2$  与 CO 分布对 NO 生成有重大影响。图 11 给出了 3 个工况下沿炉膛轴向 NO 质量浓

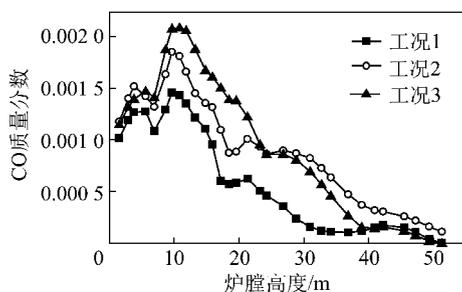


图 10 不同工况下沿炉膛轴向 CO 质量分数分布

Fig. 10 Mass fraction distribution of CO under different conditions along the furnace axis

度分布,可见燃烬风的投入对炉内 NO 生成影响较大。由图 8~10 可得随燃烬风率增加,炉内温度及  $O_2$  质量分数下降,而 CO 质量分数升高,还原性气氛增强,被还原的 NO 量增加,故炉内 NO 质量浓度逐渐降低。随煤粉燃烧,挥发分中 N 大量析出,炉膛标高 15~25 m 区域 NO 含量快速升高。因下炉膛配风量减少,不完全燃烧的焦炭含量大量增加,经燃烬风后,未燃烬的焦炭继续燃烧,释放出大量 NO,而此时 CO 含量较少,炉内还原性气氛较弱,NO 还原量减少,故 NO 含量再次上升。

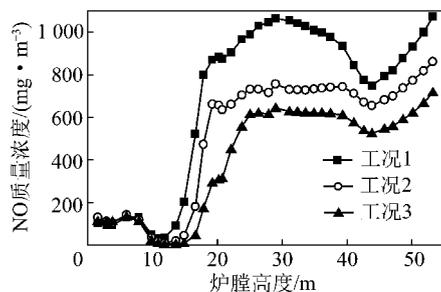


图 11 不同工况下沿炉膛轴向 NO 质量浓度分布

Fig. 11 Mass concentration distribution of NO under different conditions along the furnace axis

图 12 给出了 3 个工况下炉膛出口截面平均 NO 质量浓度分布,可见随燃烬风率增加,炉膛出口 NO 质量浓度大量减小,燃烬风率由 6% 增加到 15%,炉膛出口平均 NO 质量浓度由  $756.0 \text{ mg/m}^3$  下降到  $502.9 \text{ mg/m}^3$ ,下降了 33.5%。

## 4 结 论

(1) 炉内 NO 释放主要发生在煤粉燃烧前期,在距一次风喷口 2~4 m 处,NO 质量浓度达到最大值,之后 NO 质量浓度逐渐降低,在折焰角附近,由于焦炭中剩余 N 被氧化,NO 质量浓度出现回升。

(2) 高浓度煤粉燃烧可有效降低炉膛出口 NO 排放量,煤粉浓度由 0.583 升高到 0.750,炉膛出口平均 NO 质量浓度由  $917 \text{ mg/m}^3$  下降到  $532 \text{ mg/m}^3$ ,综

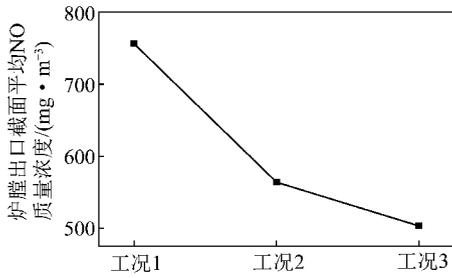


图12 不同工况下炉膛出口平均NO质量浓度分布

Fig. 12 Average mass concentration distribution of NO under different conditions at furnace exit

NO under different conditions at furnace exit

合考虑锅炉负荷等因素,煤粉浓度选为0.750较为合理。

(3)投入燃烬风对炉内各物质含量影响显著,造成O<sub>2</sub>与CO质量分数出现多处波动;燃烬风的投入可有效降低炉膛出口NO排放量,燃烬风率由6%增加到15%,炉膛出口平均NO质量浓度由756.0 mg/m<sup>3</sup>下降到502.9 mg/m<sup>3</sup>,降低了33.5%。

#### 参考文献:

[1] 周志军,周宁,陈瑶姬,等.低挥发分煤燃烧特性及NO<sub>x</sub>生成规律的试验研究[J].中国电机工程学报,2010,30(29):55-61.  
Zhou Zhijun,Zhou Ning,Chen Yaoji,et al. Experimental research on the combustion and NO<sub>x</sub> generation characteristics of low volatile coal[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(29):55-61.

[2] 王学栋,栾涛,程林.锅炉结构和形式对氮氧化物排放浓度影响的试验[J].煤炭学报,2007,32(9):984-988.  
Wang Xuedong,Luan Tao,Cheng Lin. Experiental of effects of boiler structures and burner models on NO<sub>x</sub> emission from coal-fired boiler [J]. Journal of China Coal Society,2007,32(9):984-988.

[3] 王为术,刘军,王保文,等.600 MW超临界W火焰锅炉无烟煤燃烧NO<sub>x</sub>释放规律研究[J].煤炭学报,2011,36(6):993-998.  
Wang Weishu,Liu Jun,Wang Baowen,et al. Study on the NO<sub>x</sub> emission during the combustion of anthracite coal in 600 MW supercritical pressure W-flame boiler [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(6):993-998.

[4] 张晓辉,孙锐,孙绍增,等.燃烬风与水平浓淡燃烧联用对NO<sub>x</sub>生成的影响[J].中国电机工程学报,2007,27(29):56-61.  
Zhang Xiaohui,Sun Rui,Sun Shaozeng,et al. Effects of combined application of a and horizontal bias burner on nox emission characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(29):56-61.

[5] Hill S C,Smoot L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion system[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2000,26(4-6):417-458.

[6] Spinti J P,Pershing D W. The fate of char-N at pulverized coal condition[J]. Combustion and Flame,2003,135(3):417-458.

[7] 李钧,阎维平,李春燕,等.基于数值计算的煤粉锅炉NO<sub>x</sub>释放规律研究[J].中国电机工程学报,2009,29(23):13-19.  
Li Jun,Yan Weiping,Li Chunyan,et al. Study on NO<sub>x</sub> emission characteristics of pulverized coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(23):13-19.

[8] 高正阳,崔伟春,杨毅栋,等.负荷与燃烬风对NO影响的数值模拟[J].热能与动力工程,2009,24(3):326-331.  
Gao Zhengyang,Cui Weichun,Yang Yili,et al. Numerical simulation of the effect of load and over-fire-air on NO emission[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2009,24(3):326-331.

[9] 申春梅,孙锐,吴少华.1 GW单炉膛双切圆炉内煤粉燃烧过程的数值模拟[J].中国电机工程学报,2006,26(15):51-57.  
Shen Chunmei,Sun Rui,Wu Shaohua. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a 1 GW dual circle tangentially firing single chamber boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (15):51-57.

[10] 周俊虎,宋国良,刘建忠,等.高浓度煤粉燃烧低NO<sub>x</sub>排放特性的试验研究[J].中国电机工程学报,2007,27(2):42-47.  
Zhou Junhu,Song Guoliang,Liu Jianzhong,et al. Experimental study on characteristics of low NO<sub>x</sub> emission during the dense phase pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(2):42-47.

[11] 高正阳,孙小柱,宋玮,等.W火焰锅炉结构效应对火焰影响的数值模拟[J].中国电机工程学报,2009,29(29):13-18.  
Gao Zhengyang,Sun Xiaozhu,Song Wei,et al. Numerical simulation on the effects of structure on flame for W-flame boiler[J]. Proceeding of the CSEE,2009,29(29):13-18.

[12] 方庆艳,周怀春,汪华剑,等.W火焰锅炉结渣特性数值模拟[J].中国电机工程学报,2008,28(23):1-7.  
Fang Qingyan,Zhou Huaichun,Wang Huajian,et al. Numerical simulation of the ash deposition characteristics in a W-flame boiler furnace[J]. Proceeding of the CSEE,2008,28(23):1-7.

[13] Fan J R,Liang X H,Xu Q S,et al. Numerical simulation of the flow and combustion processes in a three-dimensional,W-shaped boiler furnace[J]. Energy,1997,22(8):847-857.

[14] 孙小柱,高正阳,宋玮,等.非设计配风条件W火焰锅炉NO<sub>x</sub>排放特性分析[J].热能与动力工程,2010,25(1):57-60.  
Sun Xiaozhu,Gao Zhengyang,Song Wei,et al. An analysis of the nox emission characteristics of a boiler with a W-shaped flame under the condition of off-design air distribution[J]. Journal of Engineering for Energy and Power,2010,25(1):57-60.

[15] Taniguchi M,Yamamoto K,Kobayashi H,et al. A reduced NO<sub>x</sub> reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich combustion[J]. Fuel,2002,81(3):367-371.

[16] 方立军,高正阳,阎维平,等.低挥发分煤燃烧NO<sub>x</sub>排放特性的试验研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8):211-214.  
Fang Lijun,Gao Zhengyang,Yan Weiping,et al. Experimental study on performance of NO<sub>x</sub> emission for low volatilization coal[J]. Proceeding of the CSEE,2003,23(8):211-214.