

# 1 000 MW 机组锅炉氮氧化物排放影响的试验研究

高小涛<sup>1</sup>, 黄 磊<sup>2</sup>, 张恩先<sup>2</sup>, 章名耀<sup>3</sup>

(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 211102 2 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102  
3 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 基于现场燃烧调整试验方法, 对某厂 1 台 1 000 MW 超超临界切圆燃烧锅炉 NO<sub>x</sub> 的排放特性及其影响因素进行了系统的分析。针对锅炉燃烧系统的运行特点, 主要进行了氧量、负荷、燃尽风量(包括 AA 风和 OFA 风)、主燃烧区燃烧器风量和配风方式、磨煤机运行组合方式、燃烧器摆角、煤质等因素的试验研究。研究结果表明: 对于具有先进低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统的锅炉, 其锅炉负荷、锅炉燃用的煤质、运行时氧量的变化和燃烧器喷口摆角及磨煤机机组的运行方式都是锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的影响因素, 其中运行时氧量的变化对 NO<sub>x</sub> 排放影响最重, 随着氧量的增加, 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度呈线性增加。而在保持大量燃尽风实现空气分级燃烧的条件下, 主燃烧区燃烧器风量和配风方式对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响是微弱的。

**关 键 词:** 超超临界锅炉; 低 NO<sub>x</sub> 燃烧; NO<sub>x</sub> 排放; 燃烧器风量; 配风方式; 运行因素

中图分类号: TK224.4; X701.7 文献标识码: A

## 引 言

随着锅炉燃烧技术的发展, 现代大型切圆燃烧锅炉一般采用紧凑燃尽风和分离燃尽风与低 NO<sub>x</sub> 燃烧器相配合的设计, 通过在炉内组织的合理燃烧实现高效低 NO<sub>x</sub> 排放, 这已经成为现代大型切圆燃烧锅炉的共同特征。1 000 MW 超超临界锅炉在华能玉环电厂<sup>[1]</sup>的运行实践表明, 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度均在 300 mg/m<sup>3</sup> (折算到 6% O<sub>2</sub>, 下同) 以下, 最低可实现 200 mg/m<sup>3</sup> 以下的排放浓度。本研究基于现场燃烧调整试验方法, 对国产 1 000 MW 超超临界切圆燃烧锅炉 NO<sub>x</sub> 的排放特性及其主要运行影响因素进行系统的研究, 以确定锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度运行因素的重要性和运行控制的原则。

## 1 锅炉和燃烧系统概况

对于 1 000 MW 超超临界锅炉燃烧调整试验和 NO<sub>x</sub> 排放的研究是在某厂 1 号锅炉进行的。该锅

炉为超超临界变压运行直流锅炉, 锅炉采用 II 型布置、单炉膛、一次中间再热、低 NO<sub>x</sub> PM 主燃烧器和 MACT 燃烧技术 (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) 和反向双切圆燃烧方式。锅炉设计煤种为神华煤, 校核煤种分别为兖州煤和同忻煤。

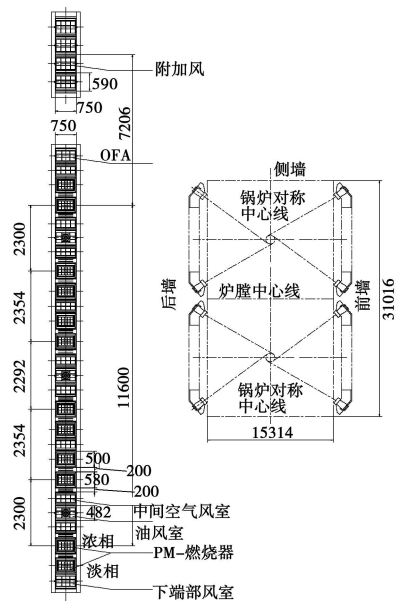


图 1 燃烧器布置示意图 (mm)

锅炉炉膛为长方形结构, 其燃烧器布置在前后墙上, 共布置 8 只燃烧器, 前墙布置 4 只燃烧器, 后墙布置 4 只燃烧器, 逆时针排列, 顺序为 1~8。8 只燃烧器为反向双切圆摆动式燃烧器, 如图 1 所示。

## 2 燃烧调整试验方法

试验采用单因素轮换法, 即在改变某一工况参数时, 其它运行参数保持不变, 分析和计算运行因素对锅炉的效率和 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响, 系统地研究各单一因素变化的影响。针对锅炉燃烧系统的运行

特点,主要进行了氧量、负荷、燃尽风量(AA风和OFA风)、主燃烧区燃烧器风量和配风方式(改变一次风量、煤粉喷口周界风量、各辅助二次风量分配、燃烧器配风方式等)、磨煤机运行组合方式、燃烧器摆角和煤种等因素的研究。

试验及试验数据整理、计算、结果修正等依据ASME PTC4.1进行<sup>[2]</sup>。锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度试验数据整理、计算,结果修正依据《火电厂大气污染物排放标准》执行<sup>[3]</sup>。

采用统计方法对各单因素的影响程度进行分析,并计算因素变化时锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度的平均值和因此导致NO<sub>x</sub>排放浓度变化的标准偏差。

燃烧调整试验期间的主要试验煤种特性分析结果如表1所示。燃烧调整试验工况如表2所示。

表 1 主要试验煤种的特性

煤种	工业分析/%				热值 /MJ kg <sup>-1</sup>		元素分析/%				
	Mar	Var	Aar	FCar	Q <sub>gr,net</sub>	Q <sub>gr,net</sub>	Car	Har	Oar	Nar	Sar
1	13.4	25.13	10.67	50.80	24.24	24	64.41	3.59	6.39	0.68	0.86
2	16.7	25.85	10.99	46.46	22.27	27	59.36	3.42	8.22	0.81	0.50
3	16.0	26.00	13.70	44.31	21.59	59	57.28	3.37	8.47	0.74	0.44
4	16.3	27.77	7.94	47.99	23.34	34	62.16	3.57	8.86	0.81	0.36
5	9.2	29.10	16.10	45.50	23.50	50	60.80	4.11	7.46	1.05	1.21
6	16.3	25.99	11.63	46.08	22.07	07	58.83	3.40	8.48	0.77	0.59

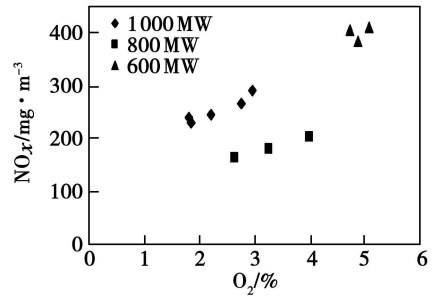
表 2 燃烧调整试验工况汇总表

工况因素	工 况
变氧量	◆1 000 MW 负荷, 5个氧量 ◆800 MW 负荷, 3个氧量 ◆600 MW 负荷, 3个氧量
燃尽风量调整	
◆AA风调整	◆基本工况和减AA风, 3个工况
◆OFA风调整	◆基本工况和减OFA风, 3个工况
主燃烧区燃烧器风量和配风方式调整	
◆燃烧器周界风	◆—
◆辅助风 1	◆辅助风 1 风门开度, 3个工况
◆辅助风 2	◆辅助风 2 风门开度, 4个工况
◆整体配风方式	◆正塔型、束腰型、倒塔型和自动, 4个工况
燃烧器摆角	主燃烧器水平、上摆 10°、下摆 10°, AA风水平、下摆 15°, 4个工况
磨组运行方式	ABCDE, ABDEF, ABCEF, ABCDE, BCDEF, 5个工况
煤种	3个煤种, 3个工况
负荷	BMCR, BRI, THA(1 000 MW)、800 MW, 600 MW, 500 MW, 6个工况

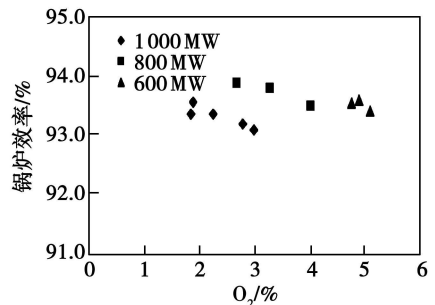
### 3 NO<sub>x</sub>排放浓度影响分析

#### 3.1 燃烧氧量的影响

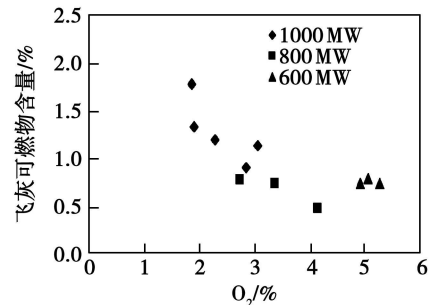
氧量一般是影响NO<sub>x</sub>生成和排放浓度的主要运行因素。对氧量单因素变化的影响各进行了3个负荷(即1 000 MW、800 MW和600 MW)、11个工况的试验。试验结果如图2(a)~图2(c)所示。



(a)氧量变化对锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度影响



(b)氧量变化对锅炉效率的影响



(c)氧量变化对锅炉飞灰可燃物含量影响

图 2 氧量变化对锅炉运行性能的影响

由图2(a)可以看出,在各种试验负荷下,随着O<sub>2</sub>的增加,锅炉的NO<sub>x</sub>排放浓度均是增加的,这种变化趋势是符合预期的。这是因为燃烧O<sub>2</sub>是通过总风量来控制的,而总风量的变化一般不改变锅炉各级燃烧空气的比例,所以增加燃烧氧量也意味着增加了燃烧器区域和还原区的氧浓度,有利于NO<sub>x</sub>的生成<sup>[5]</sup>。1 000 MW时NO<sub>x</sub>排放浓度与800 MW时相同氧浓度下NO<sub>x</sub>排放浓度有较大的差异,这是

因煤种特性的差异造成的, 该炉 1 000 MW、800 MW 和 600 MW 的试验煤种分别为煤种 1、3 和煤种 6。

图 2 (a) 的结果还可以看出, 对于同一负荷下, 单一氧量因素的变化对  $\text{NO}_x$  排放浓度有较大影响。对满负荷 (1 000 MW) 条件下氧量影响的统计分析表明: 在试验氧量变化范围内, 锅炉  $\text{NO}_x$  排放浓度平均值为  $254.9 \text{ mg/m}^3$ , 标准偏差为  $\pm 24.1 \text{ mg/m}^3$ , 为平均值的  $\pm 9\%$ 。

图 2 (b) 显示, 在各种负荷下锅炉效率随氧量的增加呈下降趋势。而同一锅炉各负荷下相同氧量时锅炉效率水平差异较大, 主要是煤质差异造成的。图 2 (c) 可以看出, 飞灰可燃物含量随氧量增加而呈下降趋势。

除上述氧量单因素试验是在多负荷下进行的以外, 其余燃烧调整试验的工况都是在满负荷 (约 1 000 MW) 条件下进行的。

### 3.2 AA 风门开度的影响

AA 风门开度变化对  $\text{NO}_x$  排放浓度及飞灰可燃物含量的影响如图 3 所示。

AA 风开度试验是在燃用煤种 2、总风量基本不变,  $Q_2$  为 2.5% 的条件下逐渐关小 AA 风门。其中 100% 开度是系统自动配风运行条件下的设定值。可以看出, 风门开度在 100% 到 50% 变化时,  $\text{NO}_x$  排放浓度仅略有增加, 而继续关小风门至 20%,  $\text{NO}_x$  排放浓度则由约  $182 \text{ mg/m}^3$  显著增加至  $258 \text{ mg/m}^3$ ; 同时, 随着 AA 风门由 100% 关至 50%, 飞灰可燃物含量显著增加, 而进一步关小风门则影响不大。

由于该锅炉采用的 MACT 燃烧系统的主燃烧器区域 (包括 OFA 风) 过量空气系数约为 1。所以, 小幅度上关小 AA 风, 并没有显著炉内空气分级燃烧的特征, 而只有在大幅度关小 AA 风的条件下, 才能显著改变主燃烧区域的气氛为氧化性气氛, 炉内分级燃烧的减弱导致了  $\text{NO}_x$  排放浓度的大幅升高<sup>[5-9]</sup>。

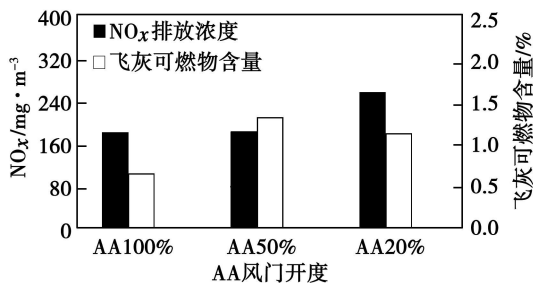


图 3 AA 风开度变化的影响

试验结果得到: AA 风门从 100% 关小至 20% 后, 锅炉  $\text{NO}_x$  排放浓度增加了  $53.0 \text{ mg/m}^3$ , 相对于自动配风运行状态  $\text{NO}_x$  排放浓度增加了 29%。

### 3.3 OFA 风门开度的影响

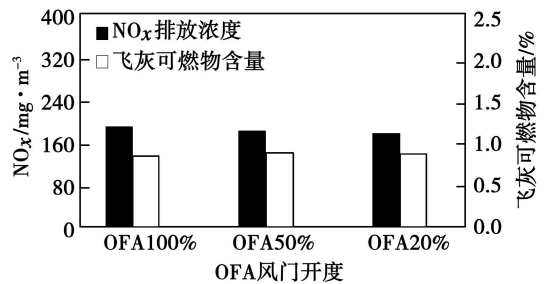


图 4 OFA 风门开度变化的影响

对于 1 号炉 OFA 风门开度影响的试验是在 AA 风门的开度为 100% 的情况下进行的, 这种条件下主要是研究单独改变 OFA 风量的影响。试验结果如图 4 所示。OFA 风门开度试验与 AA 风门开度试验条件相似, 是在燃用煤种 3、总风量基本不变,  $Q_2$  为 2.5% 的条件下逐渐关小 OFA 风门, 其中 100% 开度是系统自动配风运行条件下的设定值。可以看出, OFA 风门开度在 100% 到 20% 变化时,  $\text{NO}_x$  排放浓度略有减小, 由约  $185 \text{ mg/m}^3$  降低至  $173 \text{ mg/m}^3$ , 而飞灰可燃物含量几乎无变化。这是因为 OFA 风门开度减小, 相应 OFA 风量减小, 导致主燃烧器区域 (包括 OFA) 过量空气系数的降低, 所以  $\text{NO}_x$  排放浓度略降低。

从 OFA 风门开度影响试验得到: 在试验运行条件下关小 OFA 风门对  $\text{NO}_x$  排放浓度影响在  $8.3 \text{ mg/m}^3$  范围内, 相对于自动配风运行状态  $\text{NO}_x$  排放浓度变化 4% 之内, 影响是轻微的。

### 3.4 二次风配风方式变化的影响

燃烧器区域二次风 (辅助风) 配风方式对  $\text{NO}_x$  排放浓度的影响如图 5 所示。试验时辅助风风量分配采用了正塔式 (各层辅助风风门开度从上至下为由小到大)、缩腰式 (中间辅助风风门开度最小)、倒塔式 (各层辅助风风门开度从上至下为由大到小) 和系统自动设置的配风方式, 试验是在燃用煤种 2、总风量不变、氧量为 2.5% 的条件下改变二次风的配比方式。

试验结果表明: 二次风配风方式的改变对锅炉  $\text{NO}_x$  的排放浓度影响不大, 此外对飞灰可燃物含量和锅炉效率的影响也微弱。这是因为, MACT 系统中燃烧器区域一、二次风风量提供的过量空气系数约为 0.8~0.9 燃烧器区域形成了强烈的还原性气

氛<sup>[1]</sup>,属还原态燃烧方式,即使加上紧凑燃尽风 OFA 过量空气系数也仅为 1.0 这有效抑制了主燃烧区域 NO<sub>x</sub>的生成。二次风配风方式的改变,只是改变了主燃烧区域局部的氧浓度和燃烧,对主燃烧区域气氛和整体燃烧温度水平的影响很小,因此不会显著影响 NO<sub>x</sub>的生成、排放浓度及燃烧效率。

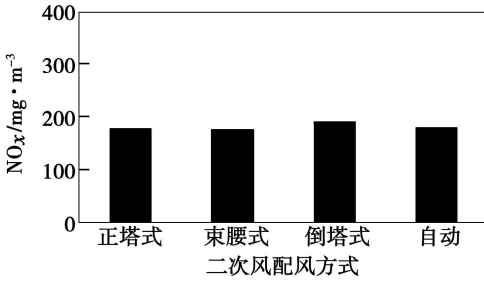


图 5 二次风配风方式对 NO<sub>x</sub>排放浓度的影响

对燃烧器一二风配风试验各工况的结果进行统计分析得到:1号炉 NO<sub>x</sub>排放浓度平均值为 196.3 mg/m<sup>3</sup>,配风变化导致的标准偏差为 ±30.4 mg/m<sup>3</sup>,为平均值的 ±15%。这其中还包含着煤质变化和运行氧量变化的影响。

### 3.5 燃烧器摆动的影响

进行燃烧器喷口摆动影响试验时,AA风燃烧器的水平摆动未作调整,而对一、二次风喷口进行了向上 10°、水平、向下 10°的调整,1号炉试验时还进行了 AA向下 15°、水平调整的比对试验。试验煤种为煤种 4 试验结果如图 6 所示。

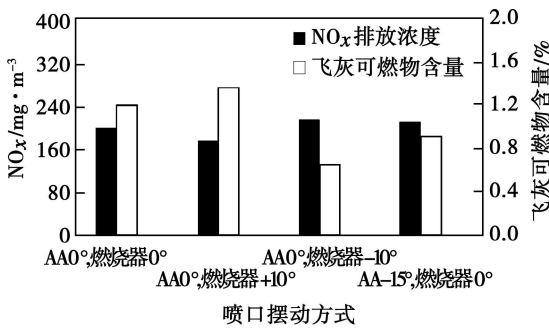


图 6 燃烧器喷口摆动的影响

对试验结果的统计分析表明,试验条件下,在燃烧器摆动角度范围内,锅炉 NO<sub>x</sub>排放浓度平均值为 197.7 mg/m<sup>3</sup>,与燃烧器喷口水平时的排放值接近,而燃烧器摆动导致的排放浓度变化的标准偏差为 ±24.1 mg/m<sup>3</sup>,为平均值的 ±12%。尽管如此,与

配风方式变化的影响相比,燃烧器摆动对 NO<sub>x</sub>排放浓度的影响相对较明显。

### 3.6 变磨组运行方式的影响

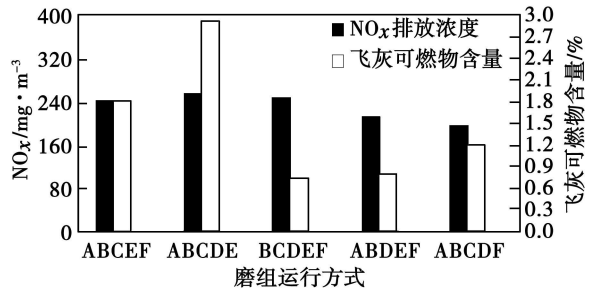


图 7 磨组运行方式变化的影响

对于所研究的 5种磨组运行方式下,NO<sub>x</sub>排放浓度平均值为 230.0 mg/m<sup>3</sup>,而磨组变化导致的标准偏差范围为 ±24.2 mg/m<sup>3</sup>,为平均值的 ±11%。BCDEF和 ABDEF磨组运行时使用的煤质非常接近,前者 NO<sub>x</sub>排放浓度为 246.2 mg/m<sup>3</sup>,后者为 212.0 mg/m<sup>3</sup>,差异也相当明显。这是因为 BCDEF运行时一方面燃烧器火焰集中,可能导致燃烧区域温度的升高有利于 NO<sub>x</sub>的生成;另一方面,上 5层燃烧器运行,燃烧区域离 AA风区域相对较近,导致还原区短而生成较多的 NO<sub>x</sub>而采用 ABDEF磨组运行时,主燃烧区域扩大,势必导致该区域平均温度的降低,且较大的低过量空气区域减少了 NO<sub>x</sub>的生成。

### 3.7 锅炉负荷的影响

针对负荷变化对锅炉运行性能的影响,进行了 6个负荷的试验,试验结果如图 8 所示。由试验结果分析得出:

(1) 随着机组负荷的降低,NO<sub>x</sub>排放浓度降低,在 800 MW左右达到最小,随后则增加。这是因为,虽然 800—1000 MW范围内氧量变化不大,但负荷越高意味着炉内热负荷、燃烧温度也越高,随燃料入炉的 N 的量也越多,这些都意味着高负荷时生成的 NO<sub>x</sub>多;而低负荷时,虽然炉内热负荷和燃烧温度水平低,但习惯运行的高氧量导致了 NO<sub>x</sub>的显著增加如图 8(a)所示。

(2) 随着机组负荷的降低,锅炉效率在 800 MW附近出现最大值,而满负荷和低负荷时效率均明显低。

### 3.8 煤种变化的影响

煤种是影响 NO<sub>x</sub>排放的重要因素。对于煤种变化的单因素影响,共进行了煤种 2、3和煤种 5三

个变煤种的试验。试验时采用各级配风方式一致、氧量控制在 2.5%、ABCDE 磨组运行方式。试验结果如图 9 所示。

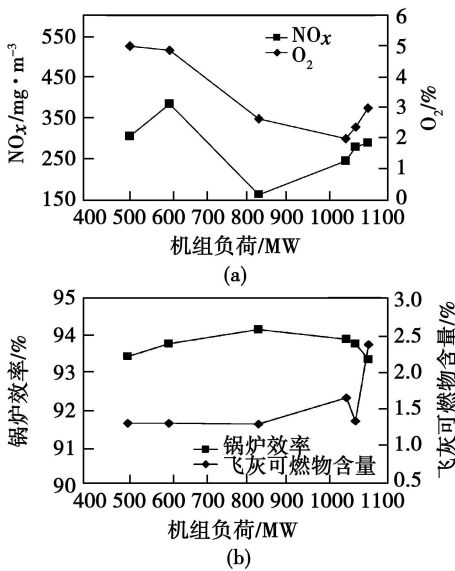


图 8 机组负荷变化对锅炉运行性能的影响

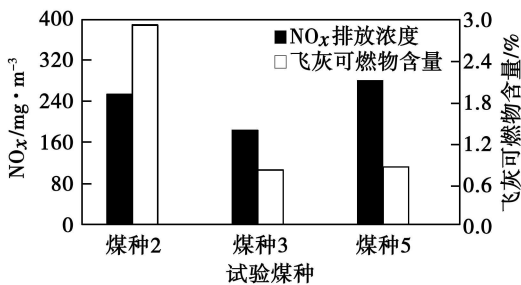


图 9 煤种变化的影响

试验结果统计分析显示: 3 个煤种试验工况 NO<sub>x</sub> 排放浓度平均值为 239.5 mg/m<sup>3</sup>, 煤种变化导致的标准偏差为 ±48.9 mg/m<sup>3</sup>, 为平均值的 ±20%。煤种 5 含氮量最高, 因此其生成的 NO<sub>x</sub> 最高并不意外; 煤种 2 和煤种 3 虽然煤质特性差异相对较小, 但煤种 2 含 N 量高而挥发份低, 可能导致其 NO<sub>x</sub> 排放浓度较大, 这在对飞灰可燃物含量的影响上也有体现, 如图 9 所示。对于具有优良 NO<sub>x</sub> 燃烧系统的 1 000 MW 超超临界锅炉, 煤质因素是 NO<sub>x</sub> 排放浓度的最主要影响因素之一。

## 4 结 论

通过进行 1 000 MW 超超临界锅炉 NO<sub>x</sub> 排放影响因素的试验研究, 可以得出以下结论:

(1) 由于采用显著的炉内空气分级燃烧, 决定了煤质变化对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响是显著的。

(2) 锅炉运行氧量变化是 NO<sub>x</sub> 排放浓度的重要影响因素, 氧量增加, 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度呈线性增加。较低的氧量是充分发挥低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统作用的前提, 而运行氧量的提高不仅增加主燃烧区 NO<sub>x</sub> 生成量, 更重要的是削弱了空气分级的作用。

(3) 锅炉负荷也是 NO<sub>x</sub> 排放浓度的主要影响因素, 其影响的程度取决于负荷和相应负荷下的运行氧量水平。

(4) 改变燃烧器喷口的角度和改变磨组的运行方式对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度有相当的影响, 其共同的特点是: 这些运行因素的变化一定程度上影响了炉内 NO<sub>x</sub> 还原区的相对范围, 因而影响炉内空气分级对 NO<sub>x</sub> 排放控制的效果, 成为锅炉运行中影响 NO<sub>x</sub> 排放浓度不可忽视的因素。

(5) 相对于上述因素的影响, 在保持大量燃尽风实现空气分级燃烧的条件下, 主燃烧区一、二次风各配风因素变化对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响是微弱的。这主要原因是在采用低过量空气燃烧的主燃烧区, 改变配风不会对低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统的主要特性产生明显影响。

## 参考文献:

- [1] 路野, 吴少华, 玉环 1000 MW 超超临界锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧系统的设计和 NO<sub>x</sub> 性能考核试验简析 [J]. 锅炉制造, 2008 (4): 1-4.
- [2] ASME PTC4-1 (Steam Generating Units), 1964 蒸汽锅炉性能试验规程 [S].
- [3] GB13223-2003 火电厂大气污染物排放标准 [S].
- [4] VAN DER LANS R P, GLARborg P, DAM, JOHANSEN K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(4): 349-377.
- [5] SPLETHOFF H, GREUL U, RÜDGER H, et al. Basic effects on NO<sub>x</sub> emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility [J]. Fuel, 1996, 75(5): 560-564.

content of the flying ash will be the highest when the initial oxygen concentration is 21%. It will drop by a great margin when the initial oxygen concentration increases to 30% ~ 40%. Thus 30% initial oxygen concentration is considered as a comparatively rational choice for the oxygen enriched combustion. Key words: utility boiler; flame temperature; oxygen concentration;  $O_2/CO_2$  atmosphere;  $NO_x$ ; numerical simulation

1 000 MW 机组锅炉氮氧化物排放影响的试验研究 = Experimental Study of the Influence of  $NO_x$  Emissions from the Boiler of a 1000 MW Power Plant [刊, 汉] / GAO Xiao-tao (Jiangsu Electric Power Test and Research Co., Ltd., Nanjing, China; Post Code 211102), HUANG Lei, ZHANG En-xian (Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing, China; Post Code 211102), ZHANG Ming-yao (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China; Post Code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25 (2). — 221 ~ 225

On the basis of the on-site test methods for combustion adjustment, a systematic study and analysis was performed of the  $NO_x$  emissions characteristics of a 1000 MW ultra-supercritical tangentially-fired boiler in a power plant along with its influencing factors. In the light of the operation characteristics of the boiler combustion system, mainly studied were such influencing factors as the oxygen quantity, load, burn-out air quantity (including additional air and over-fired air), air quantity and air distribution mode for burners in the main combustion zone, ball-mill operation combination mode, swaying angle of burners and coal ranks etc. The test and research results show that as an air staged combustion in the furnace is adopted, it is decisive that the change of coal quality will remarkably affect the concentration of  $NO_x$  emissions. The change of the oxygen quantity during the operation is an important factor influencing the concentration of  $NO_x$  emissions. With an increase of the oxygen quantity, the concentration of  $NO_x$  emissions from the boiler will increase linearly. The boiler load is also a major factor influencing the concentration of  $NO_x$  emissions. The extent of such an influence depends on the boiler load and the operating oxygen quantity during the corresponding load. The swaying of the burner spout and the change of the ball-mill operation mode will exercise a significant influence on the concentration of  $NO_x$  emissions from the boiler. Relative to the influence exerted by the above-mentioned factors, under the condition that a large amount of burn-out air is maintained to realize an air staged and fractional combustion, the change of the primary and secondary air distribution in the main combustion zone has a weak influence on the concentration of  $NO_x$  emissions. Key words: ultra-supercritical boiler; low  $NO_x$  combustion;  $NO_x$  emissions; burner air feed; air distribution mode; operating factors

依托高楼的太阳能热气流电站系统的 CFD 模拟 = CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation of a Solar Energy Hot Airstream Power Plant System Installed in a High Building [刊, 汉] / ZHOU Yan, LI Jie-hao, LI Qing-ling (College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, China; Post Code 266042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25 (2). — 226 ~ 229

Designed was a solar energy hot airstream power plant installed in a high-rise with a corresponding mathematical model being established. By using software Fluent, a numerical simulation was performed of the flow and temperature fields in the power plant system under discussion. Moreover, the power plant configuration also underwent an optimized design. The simulation results indicate that with an increase of the smoke stack height, the airstream temperature in the smoke stack will ceaselessly rise and drop slightly at the outlet as influenced by the return flow. With the airstream velocity ever increasing, the airstream pressure distribution will first decrease and then increase. In the meantime, as the airstream is being heated by a plate-type heat collector, the airstream temperature distribution in the smoke stack is not homogeneous. The plate-type heat accumulator can be designed as one with finned ex-