

# 六角切圆燃烧褐煤煤粉锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术研究

秦 明<sup>1</sup>, 吴少华<sup>1</sup>, 孙绍增<sup>1</sup>, 孙 锐<sup>1</sup>, 成庆刚<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省 哈尔滨市 150001; 2. 龙高科环境工程技术有限公司, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

## LOW NO<sub>x</sub> EMISSION STUDY FOR SIX POINT TANGENTIAL BURNING OF PC BOILER FIRING LIGNITE COAL

QIN Ming<sup>1</sup>, WU Shao-hua<sup>1</sup>, SUN Shao-zeng<sup>1</sup>, SUN Rui<sup>1</sup>, CHENG Qing-gang<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

2. LongTech Environment Technology Co. Ltd, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** For reducing NO<sub>x</sub> emission of six point tangential burning PC(pulverize coal) boiler firing lignite coal, the paper describe the test study of NO<sub>x</sub> emission of one 670t/h PC boiler firing lignite coal after it was modified with horizontal lean-rich combustion and air stage feeding technology. The test studied the influence of each kind of air feeding type on NO<sub>x</sub> emission and combustion. The test showed that through applying air stage technology combining the horizontal lean-rich combustion, the NO<sub>x</sub> emission of this boiler was reduced above 23%, thus to 388.3mg/m<sup>3</sup>. Meanwhile, the boiler efficiency kept high and its low rate capacity was improved.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; Low NO<sub>x</sub> emission; Horizontal lean-rich combustion; Air stage feeding; PC boiler

**摘要:** 为了降低六角切圆燃烧褐煤煤粉锅炉的 NO<sub>x</sub> 的排放量, 文中对一台燃用褐煤的 670t/h 煤粉锅炉燃烧器, 采用水平浓淡燃烧和分级送风技术后, 进行了 NO<sub>x</sub> 排放特性的工业性试验研究。试验中研究了各种送风方式对 NO<sub>x</sub> 排放和燃烧特性的影响。试验表明, 采用分级送风和水平浓淡燃烧相结合, NO<sub>x</sub> 排放浓度下降了 23% 以上, 达 388.3mg/m<sup>3</sup>, 而锅炉效率有所提高, 低负荷稳燃能力有所加强。

**关键词:** 热能动力工程; 低 NO<sub>x</sub> 排放; 水平浓淡燃烧; 分级送风; 煤粉锅炉

## 1 引言

燃煤造成的污染是我国目前环境污染的关键问题之一, 其中氮氧化物(NO<sub>x</sub>)气体是煤粉燃烧时产生的主要污染物之一。我国于 1997 年实施的《火

电厂大气污染排放标准》(GB13223-96), 对于 300MW 及以上机组要求 NO<sub>x</sub> 的排放量不得超过 650mg/m<sup>3</sup>[1]。随着环保要求的不断提高, 研究和开发低 NO<sub>x</sub> 技术具有很大的社会意义和广阔的市场前景。

在煤粉的燃烧过程中, NO<sub>x</sub> 的生成方式主要有 3 种: ①热力 NO<sub>x</sub>, 它是助燃空气中的 N<sub>2</sub> 在高温下氧化而生成的氮氧化物, 当燃烧温度低于 1500℃ 时, 热力 NO<sub>x</sub> 生成量不多, 当温度高于 1500℃ 时, 热力 NO<sub>x</sub> 生成量则急剧上升; ②燃料 NO<sub>x</sub>, 指的是燃料中有机氮化合物在燃烧过程中氧化生成的氮氧化物, 主要分为挥发分 NO<sub>x</sub> 和焦炭 NO<sub>x</sub>; ③快速 NO<sub>x</sub>, 是由碳化氢系燃料在燃烧时分解所产生的中间产物和 N<sub>2</sub> 反应生成的氮氧化物[2]。在煤粉燃烧生成的氮氧化物中, 热力 NO<sub>x</sub> 占 15%~25%, 燃料 NO<sub>x</sub> 占 70%~85%, 其余为快速 NO<sub>x</sub>, 所占比例很小, 一般不考虑[3]。

对于煤粉燃烧, 影响 NO<sub>x</sub> 生成的主要有以下几个因素:

### (1) 氧量

燃料燃烧时, 氧量对 NO<sub>x</sub> 生成的影响是十分明显的, 氧量高, 则 NO<sub>x</sub> 的生成量增加; 氧量低, NO<sub>x</sub> 的生成量减少。这主要是因为挥发分 NO<sub>x</sub> 的生成受着火区的氧量影响十分明显。当着火区氧量高时, 随挥发分析出的氮能够充分的经氧化生成 NO<sub>x</sub>; 当着火区氧量少时, 挥发分析出的氮没有足够的氧与之反应生成 NO<sub>x</sub>, 因而还原成 N<sub>2</sub>[4]。此外, 氧量对

焦炭燃烧时 NO<sub>x</sub> 的形成也有一定的影响，但是不像挥发分 NO<sub>x</sub> 那样明显。

### (2) 挥发分

当挥发分燃烧处于缺氧状态时，由于挥发分中的氮不能与足够的氧形成 NO<sub>x</sub>，还原成为 N<sub>2</sub>，因此挥发分中 NO<sub>x</sub> 的生成量相比之下则可以显著降低。这也正是在实际操作中高挥发分的煤能够达到低 NO<sub>x</sub> 排放的原因<sup>[5]</sup>。这时燃料 NO<sub>x</sub> 中挥发分 NO<sub>x</sub> 占了较大比重，采用分级燃烧或浓淡燃烧的方式能显著降低挥发分 NO<sub>x</sub> 的生成，从而就减少了整个燃料 NO<sub>x</sub> 的生成量。

### (3) 温度

温度对燃料燃烧时 NO<sub>x</sub> 的生成影响是非常明显的。当煤燃烧温度超过 1500℃ 时，由于热力 NO<sub>x</sub> 生成量急剧增加的影响，使总 NO<sub>x</sub> 量又增加了<sup>[3]</sup>。

目前控制 NO<sub>x</sub> 排放的技术主要是低 NO<sub>x</sub> 燃烧法和尾部烟气中脱硝法（如 SCR 法等）。其中烟气脱硝技术效率最高，可达 80%~90%，但是这类方法的投资和运行成本都很高。低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术主要是低 NO<sub>x</sub> 燃烧器、烟气再循环和燃料再燃烧。相比之下，低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术特别是低 NO<sub>x</sub> 燃烧器技术则成本较低且易于实现。现在低 NO<sub>x</sub> 燃烧器主要是利用燃料燃烧时在生成 NO<sub>x</sub> 的过程中，在缺氧状态下 N 将还原成 N<sub>2</sub> 的特性，采用分级燃烧，如分级送风和浓淡燃烧等方式来降低 NO<sub>x</sub> 的生成。

分级送风是使燃料在燃烧初期所需要的氧量小于燃烧所需要的化学当量比，即处于缺氧状态，从而使 N 还原成 N<sub>2</sub>，其余的空气在燃烧后期送入。分级送风有上下分级和水平分级两种形式。上下分级送风主要措施是在燃烧器上部布置燃尽风；水平分级送风则是将部分二次风偏转，加大切圆，沿水平方向减少燃烧初期的氧量<sup>[6]</sup>，见图 1。

浓淡燃烧是将含有煤粉的一次风经过一个煤粉分离装置，使一次风分成浓淡煤粉两股气流，浓煤粉气流在燃烧初期处于缺氧状态，实现降低 NO<sub>x</sub> 生成的目的。浓淡燃烧分为垂直浓淡燃烧和水平浓淡燃烧两种方式，垂直浓淡燃烧是将一次风沿高度方向分为浓淡两股气流，典型的垂直浓淡燃烧为 PM 燃烧；而水平浓淡燃烧则是将一次风沿水平方向分成浓淡两股气流，其中浓煤粉气流位于向火侧，淡煤粉气流位于背火侧<sup>[7]</sup>，见图 2。由于水平浓淡燃烧同时具有稳燃能力强、缓解结焦等特点<sup>[8]</sup>，目前我国采用水平浓淡燃烧的情况多一些。

低 NO<sub>x</sub> 燃烧器由于易于实现、而且成本较低，是目前使用最普遍的一种技术，也最适合我国当前

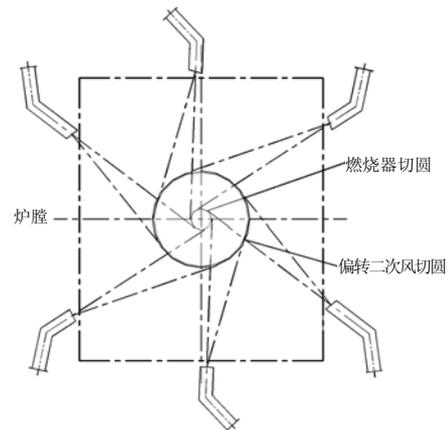


图 1 水平分级送风示意图

Fig. 1 Horizontal air stage feeding sketch

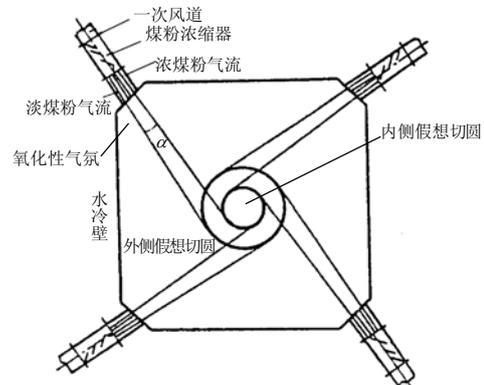


图 2 水平浓淡煤粉燃烧器原理图

Fig. 2 Horizontal lean-rich PC burner principle sketch

的国情。但是这种方式的效果不是很稳定，而且采用这种技术有时是以牺牲一定的燃烧效率为代价的<sup>[9]</sup>。因此，将来随着环保排放标准的更加严格，单纯采用低 NO<sub>x</sub> 燃烧器可能将难以满足要求。

## 2 在一台 670t/h 褐煤锅炉上进行的低 NO<sub>x</sub> 燃烧研究

### 2.1 设备概况

为了研究实际在煤粉炉中 NO<sub>x</sub> 的排放特性及影响因素，并降低 NO<sub>x</sub> 的排放量，对一台燃用褐煤的 670t/h 煤粉锅炉进行了低 NO<sub>x</sub> 燃烧器改造，并进行了工业性试验研究。

这台锅炉的额定出力为 670t/h，配 200MW 发电机组；燃烧器采用六角切圆布置的直流煤粉燃烧器，配 6 台风扇磨煤机直吹式制粉系统，一次风采用干燥剂送粉方式。燃烧器一、二次风相间布置，三层一次风口（有中心十字风），六层二次风口，

见图 3 和图 4。锅炉燃用的设计煤种为褐煤，设计煤质资料见表 1，燃烧器设计参数见表 2。

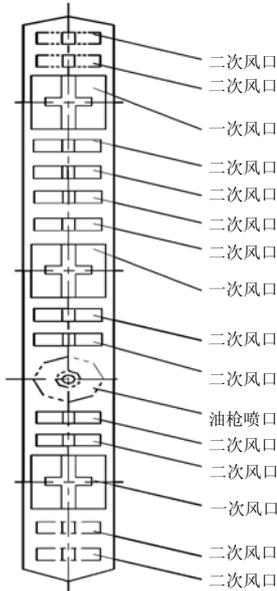


图 3 改前燃烧器喷嘴布置图

Fig. 3 Burner nozzle arrangement before modification

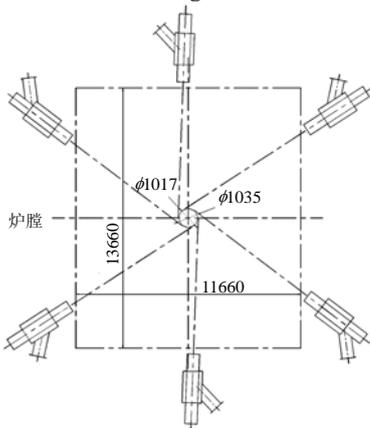


图 4 改前燃烧器水平布置图

Fig. 4 Burner horizontal arrangement before modification

表 1 设计煤质资料

Tab.1 Datas of design coal

C <sub>ar</sub> %	H <sub>ar</sub> %	O <sub>ar</sub> %	N <sub>ar</sub> %	S <sub>ar</sub> %	A <sub>ar</sub> %	M <sub>t</sub> %	V <sub>daf</sub> %	Q <sub>net ar</sub> kJ/kg
32.63	2.14	9.17	0.54	0.27	17.4	37.85	54.97	11329.5

表 2 燃烧器设计参数

Tab.2 Burner design parameters

项目	风速/(m/s)	风温/℃	风率/%
一次风	16.67	120	23.87
二次风	50	286	63.86
中心风	26.73	286	4.9
漏风			4.17

锅炉改造前曾进行了 NO<sub>x</sub> 排放浓度和锅炉效率的试验。NO<sub>x</sub> 排放浓度的测量值为 520mg/m<sup>3</sup> (按 6%O<sub>2</sub>)，锅炉的设计效率为 89.47%，改造前的实际运行效率为 89.73%。

## 2.2 改造方案简介

根据设备的实际情况，确定了燃烧器改造的具体措施如下：

(1) 将全部一次风口改为水平浓淡燃烧器。一次风口取消了中心风结构 (这是多年来燃用褐煤的典型方法)，在一次风口的淡煤粉侧增加侧二次风，将原中心风风量变为侧二次风风量，减少煤粉着火初期的氧量以减少 NO<sub>x</sub> 的生成，同时使燃烧器区的水冷壁周围处于氧化性气氛中<sup>[10]</sup>，使整个燃烧区域达到“风包粉”的效果。

(2) 减少中部二次风量，以降低煤粉燃烧初期的氧量。

(3) 部分二次风偏转，加大切圆，目的是实现水平分级送风以减少燃烧初期氧量，见图 1。

(4) 在燃烧器上方增加一层共 6 个燃尽风口 (OFA)。

## 2.3 NO<sub>x</sub> 排放和燃烧特性热态调整试验

锅炉运行后，为了掌握采用分级送风和浓淡燃烧时 NO<sub>x</sub> 的排放特性及其燃烧特性，进行了分级送风工况的热态调整试验。

试验时机组负荷为 185~190MW，燃用的煤种为褐煤。试验用煤取样在给煤机入口处，每 30min 采样一次，每次 2 kg，试验用煤的工业分析数据(平均值)见表 3。利用安装在空气预热器出口水平烟道上的惯性撞击式飞灰取样器采集飞灰，送电厂化学分析室分析。排烟成分测点设在空气预热器出口的水平烟道上，用 NOV350 烟气分析仪测量 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub> 浓度，将实测的 NO<sub>x</sub> 浓度值折算到 6% O<sub>2</sub> 条件下以 mg/m<sup>3</sup> 计量的 NO<sub>x</sub> 浓度。

表 3 试验用煤的工业分析数据

Tab.3 Proximate analysis of firing coal during test

全水分 %	空气干燥 基水分/%	收到基 灰分/%	干燥无灰基 挥发分/%	收到基低位发 热值/(kJ/kg)
30.58	16.93	13.40	44.28	15070

(1) 改变入炉总风量 NO<sub>x</sub> 排放及燃烧特性试验

二次风的配风方式基本是均匀配风方式，上、中、下二次风和燃尽风的挡板开度均为 60%，侧二次风挡板开度为 100%；入炉总风量的变化用转向室的烟气含氧量变化来衡量。

由图 5 可以看出，随着入炉总风量的增加，NO<sub>x</sub> 排放量呈增加趋势，转向室中的烟气氧量从 4.0% 增加到 5.2%，NO<sub>x</sub> 的排放浓度由 341.5mg/m<sup>3</sup> 增加到 525.3mg/m<sup>3</sup>。增加了 183.8 mg/m<sup>3</sup>，增幅达 53.38%。

增加的幅度较大。主要是因为，随着入炉总风量增加时，煤粉燃烧器区域的供氧量增加，为燃料氮形成的中间产物与氮的反应提供了条件，燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成量随之增加。同时，在 NO<sub>x</sub> 排放浓度为最小（341.5 mg/m<sup>3</sup>）时，飞灰含碳量则达到最大值，为 1.10%，说明由于送风量的减少，使燃烧效率下降，但是其数值并不大。

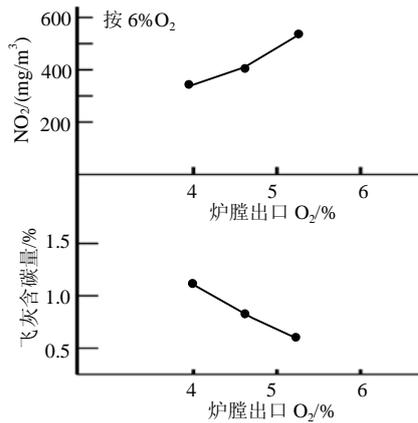


图 5 NO<sub>x</sub> 排放浓度、飞灰含碳量随总风量的变化曲线  
Fig. 5 Influence of excess air on NO<sub>x</sub> emission and unburned carbon in fly ash

(2) 改变二次风配风方式 NO<sub>x</sub> 排放及燃烧特性试验

保持燃尽风的挡板均为 60%、侧二次风挡板开度为 100% 不变。二次风的配风方式分别为：正宝塔(即燃烧器下部二次风多、上部二次风少)、倒宝塔(即燃烧器下部二次风少、上部二次风多)、均匀配风方式。这几种工况下对 NO<sub>x</sub> 排放浓度、飞灰可燃物含量进行了测试，见表 4。

表 4 变二次风配风方式对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响  
Tab. 4 Influence of varies SA distribution on NO<sub>x</sub> emission

配风方式	正宝塔	倒宝塔	均匀
上	40	80	60
	40	80	60
中	60	60	60
	60	60	60
下	80	40	60
	80	40	60
转向室氧量/%	4.0	4.0	4.0
NO <sub>x</sub> 排放浓度/( mg/m <sup>3</sup> )	337.4	312.8	415.0
飞灰可燃物含量/%	2.62	2.81	0.63

从试验数据可以看出，在采用“倒宝塔”配风方式时，由于减少了燃烧初期的氧量供应，使燃料氮缺乏足够的氧与之形成 NO<sub>x</sub> 而还原成 N<sub>2</sub>，因此这种运行方式下 NO<sub>x</sub> 的排放浓度最小；而均匀配风

方式使燃烧初期处于富氧状态下，有较多的氧参与生成 NO<sub>x</sub>，因而此时 NO<sub>x</sub> 的排放浓度相对最大，但这种运行方式的燃烧效率相比却是最高的。

(3) 改变燃尽风风量 NO<sub>x</sub> 排放及燃烧特性试验  
维持转向室氧量为 4%、6 个角侧二次风挡板开度为 100% 保持不变、6 个角燃尽风的挡板分别为 40%、60% 和 100% 的运行方式下，对 NO<sub>x</sub> 的排放浓度进行的测量。结果表明，当燃尽风挡板开度由 40% 增加到 100% 时，NO<sub>x</sub> 排放量由 462.9mg/m<sup>3</sup> 降低到 359.1mg/m<sup>3</sup>，降低了 103.8 mg/m<sup>3</sup>，降幅为 22.42%，见图 6。由图 6 可见，强化整体分级送风可以大幅度的降低 NO<sub>x</sub> 的排放浓度，此时飞灰含碳量最高为 2.8%，增加的并不大。

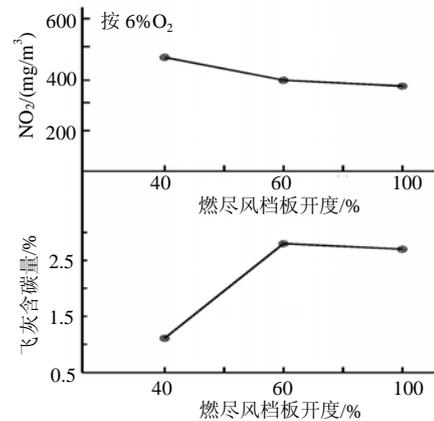


图 6 NO<sub>x</sub> 排放浓度、飞灰含碳量随燃尽风量的变化曲线  
Fig. 6 Influence of over firing air on NO<sub>x</sub> emission and unburned carbon in fly ash

(4) 改变侧二次风风量 NO<sub>x</sub> 排放及燃烧特性试验

燃尽风的挡板为 60%，二次风的配风方式为倒宝塔配风方式，侧二次风挡板开度分别为 30%、100% 时，测量了 NO<sub>x</sub> 的排放浓度，结果见表 5。从表 5 可以看出，当侧二次风风门挡板开度由 30% 增加到 100% 时，NO<sub>x</sub> 排放量由 361.7mg/m<sup>3</sup> 增加到 450.0mg/m<sup>3</sup>。说明由于侧二次风量的增加，增加了煤粉燃烧器区域的氧浓度所致。因此，侧二次风量的选择应该综合考虑防结焦和低 NO<sub>x</sub> 排放。

表 5 侧二次风量变化对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响  
Tab. 5 Influence of side SA on NO<sub>x</sub> emission

转向室氧量/%	NO <sub>x</sub> 排放浓度/( mg/m <sup>3</sup> )	飞灰可燃物含量/%	侧二次风挡板开度/%
4.0	361.7	1.24	30
4.0	450.0	0.64	100

(5) 机组额定负荷下 (ECR 工况) 锅炉热效率

及  $\text{NO}_x$  排放量考核试验

试验在 200MW 负荷下进行, 侧二次风挡板开度为 100%, 二次风的配风方式为倒宝塔配风方式, 燃尽风的挡板均为 60%, 转向室氧量为 4.0%, 结果见表 6。测试结果表明, 在机组额定负荷下, 锅炉效率由改造前的 89.73% 提高到 90.27%, 而  $\text{NO}_x$  排放浓度则下降到  $388.3\text{mg}/\text{m}^3$ 。

表 6 机组额定负荷 (ECR 工况)  
下锅炉测试和计算结果

Tab. 6 Test and calculation at unite rated capacity

锅炉蒸发量/(th)	电负荷 MW	转向室氧量/%	$\text{NO}_x$ 排放浓度 $\text{mg}/\text{m}^3$	锅炉效率/%
610	200	4.0	388.3	90.27

(6) 锅炉低负荷不投油稳定燃烧及  $\text{NO}_x$  排放特性试验

当机组负荷降到 103.5MW 时, 此时磨煤机的投运方式为: 2 号、5 号、6 号共 3 台磨。测定炉膛四周一层一次风喷口燃烧区域火焰温度, 此时, 该区域的火焰温度为  $1014\sim 1246^\circ\text{C}$ 。现场观察一次风煤粉气流着火稳定, 无脉动, 更无爆燃。表明在此温度下, 煤粉燃烧是稳定的, 水平浓淡燃烧技术用于风扇磨褐煤切圆燃烧, 能维持低负荷稳定燃烧。

另外, 在低负荷稳定燃烧试验时,  $\text{NO}_x$  排放浓度达  $826.1\text{mg}/\text{m}^3$ , 这是由于在低负荷运行时, 过量空气相对较大, 主燃区处于较强的氧化性气氛, 排烟处烟气含氧量达到了 10.8%。主要是因为低负荷运行时, 停用的另外 3 台磨相应的一次风量基本维持不变, 使得燃烧区的氧量过大。这也证明了炉内燃烧区域的氧量对  $\text{NO}_x$  的生成影响是很大的。

### 3 结论

(1) 在机组额定负荷 (ECR) 下,  $\text{NO}_x$  的排放浓度由改前的  $520\text{mg}/\text{m}^3$  下降到  $388.3\text{mg}/\text{m}^3$ , 在试验期间最低达到  $312\text{mg}/\text{m}^3$ ; ECR 工况下锅炉效率由改造前的 89.73% 提高到 90.27%。试验表明, 将分级送风和水平浓淡燃烧相结合, 可以显著降低切圆燃烧煤粉锅炉  $\text{NO}_x$  的排放量, 特别是高挥发分的煤种。同时维持比较高的燃烧效率, 取得较好的综合效果。

(2) 在一般煤粉炉工况下, 燃烧区域的氧量对于  $\text{NO}_x$  的生成影响非常明显。

(3) 通过试验, 初步掌握了各种分级燃烧情况下  $\text{NO}_x$  排放和燃烧效率的变化程度, 有利于设备运行方式的优化。试验结果证明, 通过燃料分级与空气分级(包括水平分级和上下分级)燃烧相结合, 可

以有效的降低  $\text{NO}_x$  的排放, 并且提高了锅炉效率。

(4) 此次改造和试验研究成果, 对锅炉的低  $\text{NO}_x$  燃烧器改造和运行方式的优化以及新设备的设计, 都有一定的参考意义。

### 参考文献

- 程俊峰, 曾汉才, 熊慰立, 等. 降低 300MW 贫煤锅炉  $\text{NO}_x$  排放的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 157-160.  
Chen Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili, et al. Research and test for reducing  $\text{NO}_x$  emission of a 300MW lean coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 157-160.
- 魏恩宗, 骆仲决, 岑可法. 燃煤锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧技术及其试验研究[J]. 电站系统工程, 2001, 17(11): 361-365.  
Wei Enzong, Luo Zhongyuan, Cen Kefa. Low  $\text{NO}_x$  combustion technology for coal-fired boiler and experimental research[J]. Power System Engineering, 2001, 17(11): 361-365.
- 韩才元, 徐明厚, 周怀春, 等. 煤粉燃烧. 北京: 科学出版社, 2001.
- 李永华, 李松庚, 冯兆兴, 等. 褐煤及其混煤燃烧  $\text{NO}_x$  生成的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 34-41.  
Li Yonghua, Li Songgeng, Feng Zhaoxing, et al. Experimental study on the formation of  $\text{NO}_x$  of brown and brown-blending coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 34-41.
- 唐志国, 朱全利, 唐必光, 等. 空气分级燃烧降低  $\text{NO}_x$  排放的实验研究[J]. 电站系统工程, 2003, 19(5): 7-9.  
Tang Zhiguo, Zhu Quanli, Tang Biguang, et al.  $\text{NO}_x$  emissions researched of air staging combustion burning pulverized coal[J]. Power System Engineering, 2003, 19(5): 7-9.
- 周昊, 童汇源, 孙平, 等. 600MW 锅炉偏转二次风系统炉内流动和  $\text{NO}_x$  排放特性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 68-76.  
Zhou Hao, Tong Huiyuan, Sun Ping, et al. Investigation of aerodynamics and  $\text{NO}_x$  emission property in a 600MW utility boiler with deflected second air system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 68-76.
- 吴少华, 孙绍增, 李争起, 等. 水平浓缩煤粉燃烧器关键技术的实验研究[J]. 动力工程, 1999, 19(4): 14-18.  
Wu Shaohua, Sun Shaozeng, Li Zhengqi, et al. Industrial experimental study of the key technique of horizontal bias combustion burners[J]. Power Engineering, 1999, 19(4): 14-18.
- 王纪宏. 百叶窗式水平浓淡煤粉燃烧器在燃贫煤 300MW 机组的应用[J]. 热能动力工程, 2002, 17(11): 632-634.  
Wang Jihong. The use of horizontal and louver type concentrated pulverized coal burner in a 300MW lean coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2002, 17(11): 632-634.
- 曹焰, 薛益鸣, 赵宗让. 电站燃煤锅炉控制  $\text{NO}_x$  排放的技术策略[J]. 热力发电, 1999, 6: 2-3.  
Cao Yan, Xue Yiming, Zhao Zongrang. Technical methods of controlling  $\text{NO}_x$  emission for power unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 1999, 6: 2-3.
- 张泽, 秦裕琨, 吴少华, 等. 水平浓淡风煤粉燃烧技术在 1025t/h 贫煤锅炉上的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 110-115.  
Zhang Ze, Qin Yukun, Wu Shaohua, et al. Application of HBC-SSA combustion technology at 1025t/h lean coal tangentially fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 110-115.

收稿日期: 2004-07-22。

作者简介:

秦明(1963-), 男, 副研究员, 主要从事热能工程专业的研究。

吴少华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热能工程专业的研究;

孙绍增(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热能工程专业的研究。