

通过调整配风降低锅炉 NOx 排放的试验研究

梁 川，陈 博，韩钟国

(国电科学技术研究院，江苏 南京 210046)

**摘 要：**大容量燃煤锅炉的配风方式对NOx的生成影响很大，针对锅炉低氮燃烧器运行效果不理想，锅炉排放的NOx浓度不能满足设计要求的运行状况，燃烧调整是降低NOx排放的首选方法。在保证锅炉燃烧的稳定性、燃烧损失不受影响的基础上，通过改善配风方式，在炉膛主燃烧区和燃尽区分别创造出低氧富燃料和富氧低燃料环境，能有效降低燃烧过程中NOx的生成量，大大缓解了下游SCR脱硝系统的处理负担，既提高了达标排放的可靠性，又能节省液氨的消耗量，降低运行费用。最后，根据试验结果，对经济效益进行了估算。

**关键词：**300MW；锅炉；NOx；配风调整

0 引言

为了满足国家对火电厂氮氧化物（NOx）的排放要求，国内的大型火电厂在近几年都在进行脱硝设施技术升级或设备改造。目前，国内、外火电机组降低NOx排放的手段主要分两阶段进行<sup>[1]</sup>：首先是降低燃烧过程中NOx生成量的方法，称为低氮燃烧技术，新建的燃煤锅炉普遍具备这一工艺；第二阶段是脱除烟气中已生成的NOx，称为烟气脱硝，在大容量火电机组上应用最多的是选择性催化还原法（SCR）<sup>[2]</sup>。在实际运行中，由于受煤质、负荷等因素限制，一些锅炉的低氮燃烧器在降低NOx生成上的运行效果并不理想，难以达到设计指标。例如，2011 年 1 月投产的某 2×300MW燃煤电厂，采用“低氮燃烧器+SCR”的方式对锅炉烟气进行联合脱硝<sup>[3]</sup>，但由于低氮燃烧器运行效果不好，下游SCR反应器入口的 NOx 浓度经常高于设计值（≤350mg/Nm<sup>3</sup>（标干，6%O<sub>2</sub>）），造成机组NOx达标排放的可靠性较差。

针对这种情况，在不对设备进行二次改造的前提下，进行锅炉燃烧优化是降低NOx排放的重要手段，通过控制过剩空气量、调整一次风率、分配燃烧区不同高度的二次风量、平衡送入每只燃烧器的风量等方法，力求在燃烧过程中把NOx的生成量降到最低<sup>[4]</sup>。

本文以该厂锅炉作为研究对象，通过试验研究，探讨调整配风对降低 NOx 排放的作用及锅炉燃烧方面的影响。

1 设备概况

1.1 锅炉参数及煤质资料

锅炉为哈尔滨锅炉厂有限责任公司生产的 1035t/h 煤粉炉，亚临界参数、一次中间再热、自然循环汽包炉，采用平衡通风、四角切圆燃烧方式，设计燃料为褐煤。锅炉主要参数见表 1，煤质资料见表 2。

表 1 锅炉参数				
名 称	单 位	BMCR 工况	TRL 工况	
主蒸汽流量	t/h	1035	960	
主蒸汽出口压力	MPa.g	17.50	17.37	
主蒸汽出口温度	℃	540	540	
给水压力	MPa.g	19.39	19.05	
给水温度	℃	282.8	277.7	
再热蒸汽流量	t/h	846.8	784.7	
再热蒸汽进口压力	MPa.g	3.996	3.693	
再热蒸汽进口温度	℃	333.5	325.3	
再热蒸汽出口压力	MPa.g	3.816	3.526	
再热蒸汽出口温度	℃	540	540	
燃煤量	t/h	195.84	184.13	
锅炉计算效率	%	92.41	92.42	
过量空气系数	/	1.2	1.2	

表 2 煤质数据					
项 目	符号	单位	设计煤质	校核煤质	
元素分析	收到基碳	C <sub>ar</sub>	%	40.25	35.23
	收到基氢	H <sub>ar</sub>	%	3.28	2.69
	收到基氧	O <sub>ar</sub>	%	9.74	8.65
	收到基氮	N <sub>ar</sub>	%	0.71	0.63
	收到基硫	S <sub>ar</sub>	%	0.43	0.68
工业分析	收到基灰分	A <sub>ar</sub>	%	15.99	19.12
	收到基水分	M <sub>t</sub>	%	29.6	33
	空气干燥基水分	M <sub>ad</sub>	%	14.2	15
	干燥无灰基挥发分	V <sub>daf</sub>	%	47.97	46.91
收到基低位发热量		Q <sub>net.ar</sub>	kJ/kg	14510	12570

1.2 低氮燃烧器

锅炉燃烧器采用水平浓淡煤粉燃烧技术，通过改变风煤比例，使燃烧器内部或出口射流的空气分级，以控制燃烧器中燃料与空气的混合过程，尽可能降低着火区的温度和氧浓度，在保证煤粉着火和燃烧的同时抑制NO<sub>x</sub>生成<sup>[5]</sup>。在富燃料燃烧条件下，选择合适的停留时间和温度可使燃料中的“N”元素最大限度地转化成“N<sub>2</sub>”。

煤粉进入燃烧器一次风喷嘴体后，经百叶窗的分离作用，将一次风气流分离成浓淡两部分，两部分之间用垂直隔板分开，燃烧器出口处设有带波纹形的稳燃钝体。浓相气流的煤粉浓度高，着火特性好，即使在低负荷情况下，浓相气流的风煤比仍可保持在较合适的范围内，使着火特性不会明显恶化。钝体形成的高温烟气回流区又充分为煤粉着火提供了热源，这两者的结合为低负荷稳燃提供了保证。

为保证进一步降低燃烧中产生的NO<sub>x</sub>，改变传统集中送风的方式，将部分助燃空气从主燃烧区分离出来，通过燃烧器上方布置的燃尽风门送入炉内，在炉膛高度方向形成空气分级燃烧的模式<sup>[6]</sup>。

2 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放现状

2.1 摸底测试结果

为全面摸清锅炉 NO<sub>x</sub> 的排放情况，首先对锅炉出口的 NO<sub>x</sub> 排放现状进行了摸底测试，选择在 300MW、230MW、210MW、180MW 四个负荷段下进行，运行氧量、配风方式等按照日常方式操作不作调整。为了方便识别，由下及上对锅炉的二次风门进行排序，具体方式见表 3。摸底测试期间，二次风系统各风门开度见图 1。

测试工况稳定后，使用烟气分析仪在锅炉省煤器出口烟道截面（SCR反应器入口）按网格法测量 NO<sub>x</sub>、O<sub>2</sub>等烟气参数，测试结果见表 4<sup>[7]</sup>。

表 3 二次风门序号

序号	名称	序号	名称
1	底部二次风	11	D 磨周界风
2	A 磨周界风	12	OC 层油枪周界风
3	OA 层油枪周界风	13	E 磨周界风
4	B 磨周界风	14	燃尽风 2
5	二次风	15	燃尽风 1
6	二次风	16	消旋风 3
7	C 磨周界风	17	消旋风 2
8	二次风	18	消旋风 1
9	OB 层油枪周界风	19	消旋风总门
10	二次风		

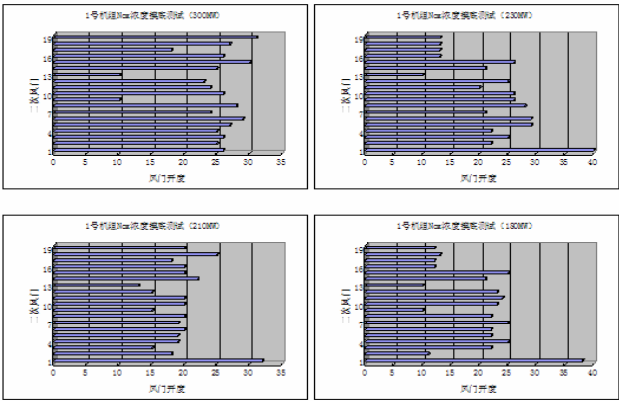


图 1 摸底测试期间不同负荷下的二次风配风方式

表 4 摸底测试结果

1 号锅炉					
测试项目	单位	300MW	230MW	210MW	180MW
NO <sub>x</sub> (6%O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	507.9	442.1	581.2	533.8
O <sub>2</sub> 平均值	%	2.55	3.27	4.82	4.56
2 号锅炉					
测试项目	单位	300MW	230MW	210MW	180MW
NO <sub>x</sub> (6%O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	544.0	536.4	605.5	603.5
O <sub>2</sub> 平均值	%	3.26	4.40	5.29	5.47

摸底测试期间，一次风率保持在 40%左右，锅炉二次风量分配基本为均等配风，上层的燃尽风和消旋风风量相对偏小。通过测试结果可以看出：

1) NO<sub>x</sub>排放浓度最高值出现在 2 号炉 210MW 负荷时，为 605.5mg/m<sup>3</sup>（标干、6%O<sub>2</sub>），同时段的烟气氧量平均值为 5.29%；最低浓度出现在 1 号炉 230MW负荷时，为 442.1mg/m<sup>3</sup>（标干、6%O<sub>2</sub>），同时段的烟气氧量平均值为 3.27%。

2) 2 号炉运行氧量较 1 号炉偏高，NO<sub>x</sub> 排放浓度也高，说明在同一负荷，锅炉配风方式不变的情况下运行氧量是制约 NO<sub>x</sub> 生成的主要因素之一。

2.2 原因分析

在煤粉燃烧过程中，生成的 NO<sub>x</sub> 有 3 个来源：燃料型、热力型和快速反应型。燃料型 NO<sub>x</sub> 是由于燃料中含有氮化合物，在燃烧时氮作为挥发分以离子状态析出，和高浓度氧化合生成。热力型 NO<sub>x</sub> 是由空气中的氮气在炉膛内的高温环境中氧化而成，生成量主要取决于温度。快速反应型 NO<sub>x</sub> 是由燃料挥发物中的碳氢化合物在高温分解生成的 CH 自由基和空气中的氮反应生成 HCN 和 N，再进一步与氧作用以极快的速率生成 NO<sub>x</sub>。一般来说，锅炉燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 主要是燃料型，可占 NO<sub>x</sub> 总生成量的 60%~80%。

影响 NO<sub>x</sub> 生成的因素较多,具体可归纳为以下 5 个方面。

1) 炉膛温度的影响。NO<sub>x</sub> 的生成温度一般为 1300~1500℃,炉膛温度越高,高温区域越多,生成的 NO<sub>x</sub> 越多。

2) 烟气中氧量的影响。在高于 1300℃的主燃烧区中,氧含量越高,氧化性气氛就越浓,煤的氮元素就越容易与氧化合成 NO<sub>x</sub>。

3) 烟气在高温区域停留时间的影响。烟气在高于 1300℃的高温区域停留时间越长,NO<sub>x</sub> 的生成率越高。

4) 锅炉结构形式的影响。主要是炉膛结构和燃烧器布置形式会影响 NO<sub>x</sub> 的生成,具体影响机理比较复杂,主要包括燃烧器的布置形式、燃烧区的高度、二次风门的距离等。炉膛内主要是氧化性气氛,局部区域处于还原性气氛,在高温氧化气氛中生成的 NO<sub>x</sub> 到达高温还原性气氛中将部分还原为 N<sub>2</sub>,使 NO<sub>x</sub> 有所减少。相对来说,切圆燃烧的布置形式更有利于降低 NO<sub>x</sub> 生成。

5) 煤质因素的影响。主要是挥发分中氮元素含量多少的影响。燃用氮元素含量多的煤生成的燃料型 NO<sub>x</sub> 也多;另外,煤的发热量高低也会影响 NO<sub>x</sub> 的生成量,因为低热值的煤种会使相同负荷下燃煤量相对增加,从而导致 NO<sub>x</sub> 的总生成量增加。

从摸底测试情况看,在不考虑锅炉结构和煤质因素的前提下,锅炉出口 NO<sub>x</sub> 浓度偏高的原因主要体现在两方面,首先,根据设计要求,机组负荷在 40%以上时的过量空气系数为 1.2,此系数对应的运行氧量为 3.5%,而运行中为防止结焦和保证稳定运行等原因,实际控制的氧量在中、低负荷时远大于这一数值(60%负荷时甚至超过 6%)。由于氧量高使得参与燃烧的空气量增加,在主燃烧区没有形成良好的还原性气氛,从而使大量 NO<sub>x</sub> 在燃烧中生成[8]。

另一方面,高位燃尽风(OFA)没有正常投入使用也是 NO<sub>x</sub> 排放高的一个主要的原因。高位燃尽风是布置在燃烧器最上面的风口提供的二次风,在燃尽区设置 OFA 供风,既能使主燃区产生的含氮中间产物在进入 OFA 区后被还原一部分,又能使未燃尽的燃料得到充分燃烧[9]。此外, OFA 和上层辅助风还会压住火焰,不使其上飘,控制火焰位置,延长煤粉在还原区的停留时间,从而抑止 NO<sub>x</sub> 的生成

[10]。按照锅炉设计,最大可允许其中的两层全开以实现有效的分级燃烧,并控制燃烧温度降低 NO<sub>x</sub> 排放量。但实际运行中各层二次风门开度基本属于均匀配风,高位燃尽风投入较少,起不到分级燃烧的效果,这就造成炉膛内火焰中心不够集中,炉膛上下氧量比较均匀,使烟气会在高温区域停留时间过长,造成锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度较高。

### 3 配风调整试验

#### 3.1 调整方案

分析上述影响 NO<sub>x</sub> 生成的因素可以发现,锅炉结构和煤质在当前属不可控因素,而前三种影响因素可通过适当的优化配风调节得到改善。

根据摸底测试结果,结合锅炉的运行现状,制定出配风调整方案,选择 1 号锅炉进行试验研究,具体为:①选在 300MW 和 210MW 两个负荷下进行调整试验;②由于燃煤的水分含量较大,达到了 30%,为保证锅炉的稳定燃烧和磨煤机安全,一次风率仍维持在 40%左右;③按照“倒塔”和“收腰”两种方式对二次风各风门进行调节,每种方式又分两种不同开度,如图 2 所示。

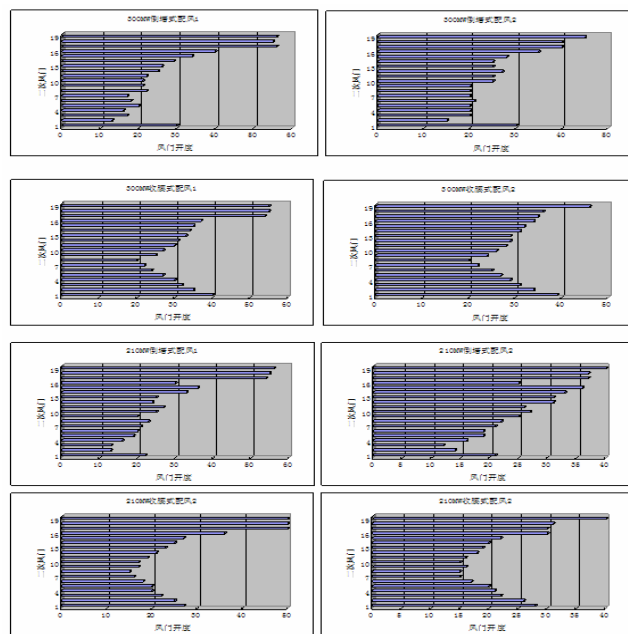


图 2 调整后的二次风配风方式

#### 3.2 测试结果比较

通过表 5、表 6 对比摸底测试结果,可以看出,配风调整对抑制燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 的生成是有效的,炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 浓度下降较为明显。除 210MW 负荷下的收腰式配风方式外,其它的调整方式下 NO<sub>x</sub>

浓度保持在 374.0~411.7mg/Nm<sup>3</sup>，与摸底测试结果比较，在运行氧量偏差相对不大的工况下，NO<sub>x</sub>浓度降低了 20.91~30.39%。

表 5 1 号锅炉调整前后测试结果对比（300MW）

测试项目	单位	调整前			
		300MW	300MW	300MW	300MW
NO <sub>x</sub> （6%O <sub>2</sub> ）	mg/Nm <sup>3</sup>	507.9	507.9	507.9	507.9
O <sub>2</sub>	%	2.55	2.55	2.55	2.55
调整后					
		倒塔 1	倒塔 2	收腰 1	收腰 2
NO <sub>x</sub> （6%O <sub>2</sub> ）	mg/Nm <sup>3</sup>	380.5	374.0	401.7	395.9
O <sub>2</sub>	%	2.35	2.62	2.40	2.32
NO <sub>x</sub> 偏差	%	-25.08	-26.36	-20.91	-22.05
O <sub>2</sub> 偏差	%	-7.7	2.8	-5.7	-8.8

表 6 1 号锅炉调整前后测试结果对比（210MW）

测试项目	单位	调整前			
		210MW	210MW	210MW	210MW
NO <sub>x</sub> （6%O <sub>2</sub> ）	mg/Nm <sup>3</sup>	581.2	581.2	581.2	581.2
O <sub>2</sub>	%	4.82	4.82	4.82	4.82
调整后					
		倒塔 1	倒塔 2	收腰 1	收腰 2
NO <sub>x</sub> （6%O <sub>2</sub> ）	mg/Nm <sup>3</sup>	411.7	404.6	503.8	494.1
O <sub>2</sub>	%	4.21	4.56	4.13	4.24
NO <sub>x</sub> 偏差	%	-29.16	-30.39	-13.32	-14.99
O <sub>2</sub> 偏差	%	-12.8	-5.5	-14.4	-12.1

3.3 调整结果分析

通过改善二次风的分配，锅炉排放出的 NO<sub>x</sub> 浓度得到明显降低，且燃尽风门开度越大，效果越明显，如图 3 所示。

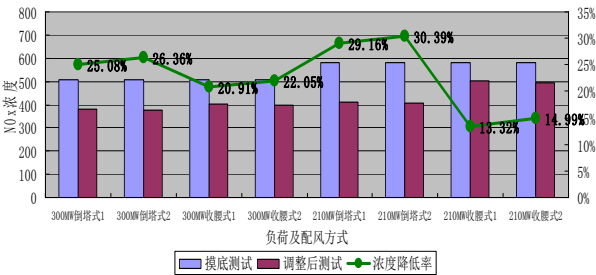


图 3 调整前后 NO<sub>x</sub> 浓度比较

这主要因为，在总送风量保持不变的基础上，通过调整主燃烧区和燃尽区送风量配比，形成了“上多下小”的二次风比例，使炉膛下部的高温主燃烧区域处于缺氧燃烧状态，产生出低氧富燃料的还原性气氛，并延长了煤粉在此区域的停留时间，从而抑制了 NO<sub>x</sub> 的生成；而炉膛上部则形成富氧低燃料的低温燃烧区，主燃烧区未完全燃烧的煤粉随烟气沿炉膛逐渐上升，到达富氧区后进一步燃烧达到完全燃烧的目的<sup>[11]</sup>。燃尽区的温度一般保持在

900~1150℃，不适宜 NO<sub>x</sub> 生成，对总的 NO<sub>x</sub> 生成量影响不大。

相对于“收腰”式配风，“倒塔”式配风形成的分级燃烧程度更大，在主燃烧区创造的还原性气氛更强，所以对抑制锅炉燃烧生成 NO<sub>x</sub> 的效果更好。

3.4 对锅炉燃烧的影响

锅炉的配风方式对锅炉的燃烧稳定性、热量分配及污染物排放均会产生影响<sup>[12]</sup>，为了验证调整方式是否影响锅炉的正常运行，在试验中加入了 CO 测试和灰、渣含碳量分析。其中，与 NO<sub>x</sub> 同步测试的烟气中 CO 值保持在 10ppm 以内，灰、渣含碳量相对于调整前也未发生大的变化。另外，经一段时间的运行观察，炉膛内没有出现明显的结焦，说明配风调整对燃烧未产生大的影响，对锅炉的其它影响也是可接受的。

表 7 灰、渣含碳量分析结果 %

分类	炉渣	飞灰
调整前 1	1.892	0.331
调整前 2	0.904	0.147
平均值	1.398	0.239
调整后 1	1.055	0.320
调整后 2	1.242	0.222
平均值	1.149	0.271

4 经济效益分析

降低锅炉燃烧中 NO<sub>x</sub> 的生成量，可减轻下游 SCR 烟气脱硝系统的处理负担，减少液氨的消耗量，节约运行费用。

根据配风调整前、后测试的 NO<sub>x</sub> 浓度、O<sub>2</sub>、烟气流量等数据，计算 NO<sub>x</sub> 达标排放（≤100mg/Nm<sup>3</sup>（标干态，6%O<sub>2</sub>））所需的液氨消耗量，对经济效益进行估算。其中，机组年利用小时数按 4800 小时计，液氨的价格采用当地市场价格。通过计算得出，1 号锅炉的 SCR 系统每年最高可减少纯氨消耗量 351.8t，节省运行费用约 161.8 万元。

表 8 直接经济效益分析（单台炉）

项 目	单 位	调整前	调整后
机组利用小时数	小时/年	4800	4800
纯氨价格	元/吨	4600	4600
纯氨消耗量	千克/小时	193.0	119.7
费用总计	万元	426.1	264.3
纯氨节省量	吨/年		351.8
直接经济效益	万元		161.8

催化剂是 SCR 烟气脱硝装置的核心装置，占投资成本的 50% 以上。催化剂有一定的运行寿命，受

运行条件和 NO<sub>x</sub> 总脱除量的制约。降低锅炉燃烧中 NO<sub>x</sub> 的生成量,对延长催化剂的使用寿命也有一定的作用。

## 5 结论

1) 大容量燃煤锅炉的配风方式对 NO<sub>x</sub> 的生成有很大影响,通过改善锅炉配风是降低 NO<sub>x</sub> 生成的首选方法。在保证锅炉燃烧的稳定性、燃烧损失不受影响的基础上,在炉膛主燃烧区和燃尽区分别创造出低氧富燃料和富氧低燃料环境,能有效降低燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 的生成量。

2) 试验结果表明,二次风量分配采用“上大下小”形式,能有效抑制燃烧过程中生成的 NO<sub>x</sub>,且比例相差越大,效果越好。但锅炉的配风方式对炉膛的燃烧稳定性、热量分配都会产生影响,因此,制定调整方案时要兼顾锅炉燃烧不受影响以及避免炉膛结焦等问题。

3) 尽管烟气脱硝是降低 NO<sub>x</sub> 排放的根本性手段,但在不影响锅炉正常燃烧的前提下,降低进入 SCR 区的 NO<sub>x</sub> 总量后,既能保证理想的脱硝效果,又可节省 SCR 系统的液氨耗量,对延长催化剂的使用寿命也有一定的作用,从而大大降低运行费用。

### 参考文献:

- [1] 张强.燃煤电站SCR烟气脱硝技术及工程运用[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 朱宝山,周艳,刘海峰,等.燃煤锅炉大气污染物净化技术手册[M].北京:中国电力出版社,2006.

- [3] 马风哪,程伟琴.国内火电厂氮氧化物排放现状及控制技术探讨[J].广州化工,2011,39(15):57-59.
- [4] 高小涛,高绥强,张恩先.燃烧优化降低锅炉NO<sub>x</sub>排放的试验研究[J].锅炉技术,2003,34(3):74-76.
- [5] 岑可法,姚强,骆仲泐.燃烧理论与污染控制[M].北京:机械工业出版社,2004:414-416.
- [6] 王学栋,栾涛,程林,等.锅炉燃烧调整对NO<sub>x</sub>排放和锅炉效率影响的试验研究[J].动力工程,2008,28(1):19-23.
- [7] 东北电力科学研究院有限公司.烟气SCR脱硝系统优化运行研究测试报告[R].沈阳:东北电力科学研究院有限公司,2012.
- [8] 贾自臣,徐兴科.优化燃烧降低锅炉NO<sub>x</sub>排放质量浓度的措施[J].华电技术,2009,31(3):76~80.
- [9] 肖琨,陈飞,陈楠,等.配风方式对锅炉氮氧化物排放影响的研究[J].动力工程学报,2010,30(6):405-408.
- [10] GOLRIZ M R, GRACE J R. Predicting heat transfer in large scale CFB Boilers[C]//Circulating Fluidized Bed Technology VII. Niagara Falls: ASME, 2002:21-128.
- [11] 蒋文举.烟气脱硫脱硝技术手册[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [12] 温智勇,徐程宏,殷立宝,等.烟气脱硝工程的调试及其分析[J].广东电力,2007,20(6):51-54.

### 作者简介:

梁 川(1983—),男,河北保定人,工程师,从事脱硫、脱硝、除尘设备试验、调试工作, E-mail: 15998857856@163.com.

## The experimental investigation of reduce NO<sub>x</sub> emission of boiler by adjusting the air distribution

Liang Chuan, Chen Bo, Han Zhongguo

(Guodian Science And Technology Research Institute, Jiangsu Nanjing 210046)

**Abstract:** The air distribution mode of large capacity coal-fired boiler influence on NO<sub>x</sub> emissions of the great, aiming at the situation of NO<sub>x</sub> emission from coal-fired power plant can not meet the design requirement due to the low nitrogen burners operating effect is not ideal, adjustment of combustion is the preferred method to reduce NO<sub>x</sub> emission. In the premise of ensuring the stability of the boiler, it can effectively reduce NO<sub>x</sub> emissions in the combustion process by improved the air distribution mode, it can form low hypoxia more coal environment in the combustion zone, and form high oxygen and low coal environment in the burnout zone of boiler. This result greatly eased the burden of SCR system in the lower reaches, it can meet the environmental discharge requirement more easily, and reduce operating costs by reducing the consumption of ammonia. In the end, according to the test results, the economic benefits are estimated.

**Key words:** 300 MW unit; boiler; NO<sub>x</sub>; adjust air distribution mode