

## 旋流燃烧锅炉低 NO<sub>x</sub> 改造后结渣分析与运行调整

靖东平

(国电双辽发电有限公司, 吉林 双辽 136400)

**摘要:**为降低 NO<sub>x</sub> 排放,某电厂对其超临界对冲旋流燃烧锅炉进行了低氮改造,改造后 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度平均降幅达到 50% 以上,但锅炉燃烧器周围及燃尽风区域均发生严重结渣问题。在现场测试和分析燃烧器特性的基础上,找出了锅炉结渣的原因,通过变旋流强度试验、变煤粉细度试验、变氧量试验及变燃尽风风量试验,解决了锅炉结渣问题。

**关键词:**旋流燃烧锅炉;低 NO<sub>x</sub> 燃烧器;结渣;燃烧调整

**中图分类号:**TK229.2

**文献标志码:**B

**文章编号:**2096-3203(2017)03-0120-05

### 0 引言

为降低 NO<sub>x</sub> 排放,满足国家日益严格的环保标准要求,某电厂对其超临界对冲旋流燃烧锅炉进行了低 NO<sub>x</sub> 改造。改造后锅炉 NO<sub>x</sub> 生成量大幅降低,但出现炉内严重结渣情况,在分析结渣原因的基础上进行了运行调整。本文介绍锅炉低氮改造情况及改造效果,重点阐述改造后锅炉结渣原因及解决方法。

### 1 设备简介

锅炉型号为 HG1956/25.4-YM,采用 Π 型露天布置、一次再热、固态排渣、平衡通风、前后墙对冲旋流燃烧方式。锅炉过热器采用两级喷水减温器,再热蒸汽采用尾部烟气挡板调温,并备有事故喷水减温器。采用正压直吹式制粉系统,配置 6 台 HP1003 型中速磨煤机。排渣系统为水力除渣。燃烧器改造前,前后墙各布置 3 层低 NO<sub>x</sub> 轴向旋流燃烧器(LNASB),每层各 5 只,共 30 只。其中 E、C、D 层燃烧器从下到上布置在前墙,B、F、A 层燃烧器从下到上布置在后墙。在上层燃烧器上方,前后墙各布置 1 层燃尽风(OFA),每层布置 5 只燃尽风喷口,共 10 只。国内学者对 LNASB 燃烧系统已有较多研究<sup>[1-10]</sup>。锅炉炉膛断面尺寸为 22.187 m×15.632 m,顶棚管标高为 66.55 m,其主要设计参数如表 1 所示。

燃烧系统改造后,除后墙最下层燃烧器保留外,其他 5 层均由 AireJet™ 低 NO<sub>x</sub> 双调风旋流燃烧器替代,在安装过程中,为防止改造后燃烧器周围出现结渣情况,将燃烧器喷口向炉内方向移动 141 mm。同时原有燃尽风喷口更换为新型的双风区燃

尽风喷口<sup>[11]</sup>。

表 1 锅炉主要设计参数

Table 1 Main design parameters of boiler

名称	BMCR 工况	BRL 工况
过热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1956	1862
过热蒸汽压力/MPa	25.4	25.28
过热蒸汽温度/℃	543	543
再热蒸汽温度/℃	569	569
给水温度/℃	290.0	286.4
炉膛容积热负荷/(kW·m <sup>-3</sup> )	83.54	—
炉膛截面热负荷/(MW·m <sup>-2</sup> )	4.324	—

### 2 低氮改造后运行状况

表 2 和表 3 分别为锅炉燃烧系统改造前后的性能试验数据。改造前在 600 MW,500 MW,400 MW 等不同负荷工况下测得 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度(折算到 6%O<sub>2</sub>)分别为 801 mg/m<sup>3</sup>,761 mg/m<sup>3</sup>,526 mg/m<sup>3</sup>,NO<sub>x</sub> 排放远超国家排放标准的要求<sup>[12]</sup>。燃烧系统改造后,经过燃烧优化调整,NO<sub>x</sub> 排放质量浓度较改造前降幅在 50% 以上,在 600 MW,500 MW,400 MW 负荷工况下测得的 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度分别为 352 mg/m<sup>3</sup>,327 mg/m<sup>3</sup>,238 mg/m<sup>3</sup>。

表 2 锅炉改造前试验数据

Table 2 Test data before retrofit of boiler

项目	600 MW	500 MW	400 MW
磨组方式	ABCDEF	ABDEF	ABDEF
氧量/%	2.73	2.87	4.17
NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	801	761	526
CO 体积分数/%	0	0	0
修正后排烟温度/℃	134.4	126.6	114.4
飞灰可燃物含量/%	1.0	0.85	0.40
锅炉热效率/%	93.93	94.37	94.57

收稿日期:2017-01-01;修回日期:2017-02-21

表 3 锅炉改造后试验数据

项目	600 MW	500 MW	400 MW
磨组方式	ABCDEF	ABDEF	BCEF
氧量/ %	2.52	3.74	4.60
NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	352	327	238
CO 体积分数/ %	0.041	0.046	0.015
修正后排烟温度/ °C	126.9	117.2	113.7
飞灰可燃物含量/ %	1.14	2.0	1.0
锅炉热效率/ %	93.90	93.93	94.05

从试验结果还可以看出,改造后飞灰可燃物含量及 CO 体积分数均有所上升,锅炉热效率略有下降。

### 3 结渣原因分析

锅炉改造完成启动运行后不久,便发现燃烧器周围及燃尽风区域结渣严重。致密大渣块常会堵塞出渣口引起碎渣机故障,必须进行人工排渣,炉内结渣严重已影响锅炉安全稳定运行。造成锅炉结渣的原因较多,在分析新型燃烧系统特性的基础上,结合现场测试及煤质分析结果,认为锅炉结渣严重主要有以下原因。

(1) 煤种特性。电厂燃用煤种较杂,煤质偏离设计值较大。表 4 给出了试验期间锅炉燃用煤种中几种灰熔点较低的煤种。现场测试结果显示燃烧器喷口周围烟温基本超过 1200 °C,高于常用煤种的软化温度。

表 4 试验煤质分析

煤种	伊泰煤	山西煤	神混煤
水分/ %	19.8	14.2	15.6
灰分/ %	8.71	11.01	9.77
硫分/ %	0.39	0.44	0.51
挥发分/ %	37.67	37.6	37.08
发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	21.44	23.15	23.08
变形温度/ °C	1110	1120	1110
软化温度/ °C	1160	1270	1200
半球温度/ °C	1180	1280	1220
流动温度/ °C	1240	1310	1260

(2) 外二次风及燃尽风旋流强度较大。通过观火孔发现燃烧器火炬及燃尽风喷口出口处卷吸较大,外侧回流强烈。燃烧器外二次风及燃尽风旋流强度较大,容易卷吸炉内的高温烟气到喷口根部,造成结渣。

(3) 燃烧火焰中心上移。低氮改造后,燃烧火焰中心上移,上层燃烧器至 OFA 区域热负荷升高。

根据现场炉膛各高度烟温测试分析,上层燃烧器至 OFA 区域烟温在 1300 °C 以上,有时能达到 1400 °C,该区域也是结渣相对严重的区域。同时,不同燃烧器区域烟温存在一定偏差,这与磨煤机出口各粉管风粉速度分布均匀性有关。

(4) 煤粉较粗。现场对磨煤机取粉样分析显示,6 台磨煤机平均煤粉细度  $R_{90}$  基本都在 28% 以上,煤粉偏粗。粗煤粉颗粒因惯性作用会直接冲刷受热面而粘接成渣,煤粉粗燃尽时间也更长,以致火焰中心上移,致使燃烧区域上部热负荷较高。同时,煤粉粗还会加重炉内还原性气氛,使燃煤灰熔点降低,增加炉内结渣风险<sup>[13,14]</sup>。

(5) 炉膛主燃烧区域过剩空气系数较低。低氮改造后,为实现分级送风,炉膛主燃烧区域过剩空气系数较改造前明显降低,该区域还原性气氛增强,这势必会降低燃煤灰熔点,进一步增加炉内结渣的可能。

### 4 燃烧优化调整及效果分析

为缓解炉内结渣严重问题,根据上述结渣原因进行了燃烧优化调整试验。

#### 4.1 变旋流强度试验

AireJet<sup>TM</sup> 燃烧系统的特性相关文献已作过详细报道<sup>[11]</sup>。其燃烧器及燃尽风喷口均设置有手动可调叶片,用于调节外二次风及燃尽风的旋流强度,叶片对应刻度越大,旋流强度越弱,其调节范围均为 40~80。通过看火孔发现燃烧器火炬和燃尽风喷口出口卷吸较大,此时燃烧器的外二次风可调叶片开度为 60,燃尽风喷口旋流可调叶片开度为 45。为降低旋流强度,将燃烧器外二次风可调叶片开度调整至 70,燃尽风喷口旋流强度可调叶片开度调整至 70。运行 2 d 后发现,炉内结渣情况较调整前有所减轻,燃尽风区域前墙较严重,燃烧器周围结渣情况则有较大缓解。

#### 4.2 变煤粉细度试验

为缓解炉内结渣并降低飞灰含碳量,首先对试验锅炉制粉系统进行了调整。在调整之前,对各磨煤机煤粉细度、煤粉分配均匀性及风速分布偏差进行了测试,发现 6 台磨煤机煤粉均偏粗, $R_{90}$  基本在 28% 左右,但单台磨 5 根支管粉量及风速分布偏差均较好,粉量偏差在 20% 以内,风速分布偏差在 10% 以内。调整磨煤机旋转分离器转速后,BDE 磨煤粉细度基本满足燃烧要求,而 ACF 磨在提高分离器转速后煤粉细度、磨电流及磨碗差压基本没变化。经现场检查发现,旋转分离器转向与厂家规定

转向相反,在 ACF 磨分离器转向反置后,3 台磨煤粉细度基本达到要求。制粉系统调整后,现场观火孔发现,各燃烧器周围区域结渣状况有所缓解。制粉系统调整前后各磨煤机煤粉细度如表 5 所示。

表 5 变煤粉细度试验结果  
Table 5 Test results of changing fineness of pulverized coal %

磨煤机编号	调整前 $R_{90}$	调整后 $R_{90}$
A	34.73	18.57
B	28.94	20.93
C	34.29	22.85
D	28.15	21.90
E	25.67	21.74
F	35.87	26.98

#### 4.3 变氧量试验

一般情况下,煤粉变细后,对炉内结渣和  $\text{NO}_x$  排放均有积极作用,同时,由于煤粉变细,锅炉运行方式如最佳运行氧量、燃尽风比例等均应有相应的变化<sup>[15,16]</sup>。基于此,在制粉系统运行较佳的情况下,进行了氧量调整试验。

维持机组电负荷在 600 MW 左右,ABDEF 5 台磨煤机运行,OFA 风门开度在 60%左右,维持蒸汽参数及其他参数稳定,控制运行氧量分别在 2.0%、2.4%和 2.7%进行试验,结果如表 6 所示。

表 6 变氧量试验结果  
Table 6 Test results of changing oxygen volumetric fraction

项目	工况 1	工况 2	工况 3
电负荷/ MW	602.7	602.9	602.6
运行磨组方式	ABDEF	ABDEF	ABDEF
运行氧量/ %	2.0	2.4	2.7
$\text{NO}_x$ 质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	309.85	346.55	363.76
飞灰可燃物含量/ %	1.76	1.23	1.09
锅炉热效率/ %	93.79	94.16	94.13

从试验结果可以看出,随着运行氧量的增加,锅炉热效率呈先增后降趋势,当氧量在 2.4%时,锅炉热效率最高。锅炉  $\text{NO}_x$  排放质量浓度随氧量的增加而呈上升趋势。

图 1 给出了炉膛不同高度的烟温随运行氧量的变化情况,从图中可以看出,不同氧量条件下,主燃烧区烟温相差不大,当氧量增加至 2.7%左右时,上层燃烧器至炉膛出口区域内的温度有所升高,这会增加该区域内结渣风险。而氧量较低时炉膛内峰值温度更低,有利于减轻炉内结渣,此外较低的运行氧量也有利于抑制  $\text{NO}_x$  生成。在额定负荷下,建议运行氧量控制在 2.5%左右。

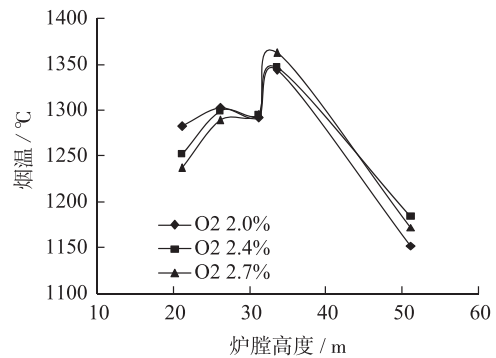


图 1 不同运行氧量下炉膛烟温变化情况

Fig.1 Influence of oxygen volumetric fraction on gas temperature of furnace

#### 4.4 变燃尽风风量试验

从炉膛烟温测试结果可知,燃尽风区域烟温水平最高,该区域结渣也最严重,适当降低该区域的热负荷有利于减轻该区域结渣。适当比例的燃尽风对煤粉燃尽率、 $\text{NO}_x$  排放及炉内结渣均有重要的影响<sup>[17]</sup>,因而进行了燃尽风量调整试验。

维持机组电负荷在 600 MW 左右,保持运行氧量在 2.5%左右,5 台磨煤机运行,中层 1 台停运。试验中保持锅炉蒸汽参数及磨煤机运行工况稳定。调整燃尽风风门开度分别在 60%、70%、80%,其他风门开度及整体配风方式基本维持不变,试验主要结果如表 7 所示。

表 7 变燃尽风风量试验结果

Table 7 Test results of changing flow rate of OFA

项目	工况 4	工况 5	工况 6
电负荷/ MW	601.8	601.7	604.3
运行磨组	ABCDE	ABCDE	ABDEF
OFA 风门开度/ %	60	80	70
运行氧量/ %	2.46	2.64	2.59
$\text{NO}_x$ 质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	351.23	353.21	348.68
飞灰可燃物含量/ %	0.55	0.90	0.85
锅炉热效率/ %	94.16	93.80	94.22

从试验结果可以看出,将 OFA 风门开度从 60%调整至 70%、80%时,锅炉效率先升高后降低。 $\text{NO}_x$  排放浓度随 OFA 风门开度的变化并不明显。此次改造,考虑  $\text{NO}_x$  风箱内流场的均匀性和各  $\text{NO}_x$  喷口的风量调平方便,在原  $\text{NO}_x$  风箱上部加装了一层旁路风道,旁路风道从总风道引出二次风,由旁路风道将一部分风量引入  $\text{NO}_x$  风箱,而风道上的 OFA 风门挡板则装在旁路风量引出之后,OFA 风门开关对旁路风量的影响不同于预期,在总风量及二次风压基本不变的情况下,OFA 开大后,旁路风量会略有降低,亦即总 OFA 风量的增加随着 OFA 风门开度的增加会愈不明显。因而,OFA 风门开度大于 60%

后,NO<sub>x</sub>排放质量浓度降低并不明显。

图2给出了炉膛不同高度的烟温随OFA风门开度的变化情况。从图中可以看出,OFA风门开度在60%和70%左右时,主燃烧区火焰温度相差不大;当OFA风门开度增加到80%时,主燃烧区火焰温度则有所降低;而在煤粉燃烧的关键区域(燃尽区30~40 m),OFA开度在60%左右时烟气温度最高,而进一步开大到80%时该区域烟温则明显降低。开大OFA风门对减轻炉膛结渣有利,但也会影响燃烧效率,综合考虑,在额定负荷下,OFA风门开度宜控制在70%左右。

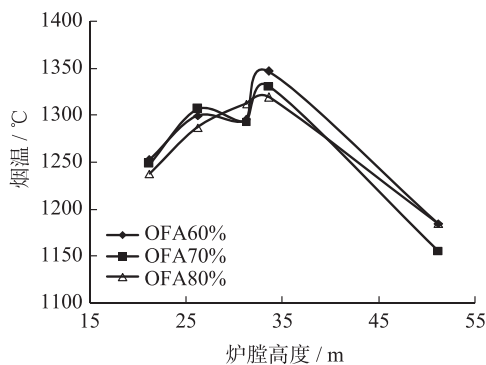


图2 不同OFA风门开度下炉膛烟温变化情况

Fig.2 Influence of OFA damper opening on gas temperature of furnace

经过一系列调整,炉内结渣情况明显减轻,除上层燃烧器周围有轻微挂渣外,其他燃烧器周围基本无渣,燃尽风层前墙结渣情况较调整前有所减轻,后墙则略为严重,炉底则基本不用人工放渣。

## 5 结语

试验锅炉经低氮改造后,NO<sub>x</sub>排放质量浓度降幅在50%以上,达到了预期的效果。但由于入炉煤灰熔点低、外二次风及燃尽风旋流强度大、燃尽风区域烟温较高、煤粉偏粗及炉膛主燃烧区域过剩空气系数低等原因,造成炉内结渣严重,威胁锅炉安全运行。通过一系列优化调整试验,如变旋流强度试验、变煤粉细度试验、变氧量试验及变燃尽风风量试验等,解决了炉内严重结渣问题,保证锅炉安全稳定运行,同时还提高了锅炉燃烧的经济性。

### 参考文献:

- [1] 黄磊,蔡其斌,岳峻峰. LNASB型旋流燃烧器锅炉燃烧调整试验与分析[J]. 江苏电机工程,2007,26(4):73-77.  
HUANG Lei, CAI Qibin, YUE Junfeng. Combustion tests and analysis of a power plant boiler using type LNASB burner[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007,26(4):73-77.
- [2] 刘建全,孙保民,白涛,等. 600 MW超临界旋流燃烧锅炉炉内温度场数值模拟及优化[J]. 中国电机工程学报,2011,

31(2):15-21.

LIU Jianquan, SUN Baomin, BAI Tao, et al. Numerical simulation and optimization on temperature field of 600 MW supercritical swirl combustion boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2):15-21.

- [3] 岳峻峰,高远,黄磊,等. 600 MW超临界旋流燃烧器锅炉优化运行研究[J]. 电站系统工程,2010,26(3):15-17,20.  
YUE Junfeng, GAO Yuan, HUANG Lei, et al. Optimization of a 600MW supercritical boiler operation using type LNASB burner[J]. Power System Engineering, 2010, 26(3):15-17,20.
- [4] 岳峻峰,秦鹏,邹磊,等. 600 MW超临界旋流燃烧烟煤锅炉NO<sub>x</sub>排放特性研究[J]. 中国电力,2012,45(3):62-67.  
YUE Junfeng, QIN Peng, ZOU Lei, et al. Experimental study of NO<sub>x</sub> emissions from 600 MW supercritical bituminous coal fired boiler with swirl burner[J]. Electric Power 2012,45(3):62-67.
- [5] 高小涛,黄磊,张恩先,等. 600 MW前后墙布置燃烧器锅炉的NO<sub>x</sub>排放特性及其影响因素的分析[J]. 动力工程,2009,29(9):806-812.  
GAO Xiaotao, HUANG Lei, ZHANG Enxian, et al. NO<sub>x</sub> emission and influence factors of 600 MW boilers with burners arranged in front and back walls[J]. Journal of Power Engineering, 2009,29(9):806-812.
- [6] 沈跃云,高小涛,孟硕. 600 MW墙式燃烧锅炉氮氧化物排放浓度与主要运行因素的多元线性回归研究[J]. 热能动力工程,2011,26(6):726-731.  
SHEN Yueyun, GAO Xiaotao, MENG Shuo. Study of a multivariable linear regression of the NO<sub>x</sub> emissions concentration and main operating factors of a 600 MW wall-type boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6):726-731.
- [7] 刘建全,孙保民,张广才,等. 1000 MW超超临界旋流燃烧锅炉稳燃特性数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(8):19-27.  
LIU Jianquan, SUN Baomin, ZHANG Guangcai, et al. Numerical simulation and optimization on stable combustion of a 1000 MW ultra supercritical unit swirl combustion boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8):19-27.
- [8] 林正春,范卫东,李友谊. 一种低NO<sub>x</sub>旋流燃烧器流场特性的研究[J]. 动力工程,2008,28(3):355-360.  
LIN Zhengchun, FAN Weidong, LI Youyi. Experimental research on aerodynamic field characteristic of a low NO<sub>x</sub> swirl burner[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3):355-360.
- [9] 白涛,郭永红,孙保民,等. 1025 t/h旋流燃烧器煤粉炉降低NO<sub>x</sub>生成的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2010,30(29):16-23.  
BAI Tao, GUO Yonghong, SUN Baomin, et al. Numerical simulation of decreasing NO<sub>x</sub> emission in a swirling combustion pulverized coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30

- (29):16-23.
- [10] 高小涛. 大型燃煤电站锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧及其排放特性的研究[D]. 南京:东南大学,2009.  
GAO Xiaotao. Study on low- $\text{NO}_x$  combustion and its emission characteristics in large-scale coal-fired power plant boilers [D]. Nanjing:Southeast University,2009.
- [11] 邹磊,张恩先,岳峻峰. 630 MW 对冲旋流燃烧锅炉低氮燃烧系统优化改造[J]. 锅炉技术,2015,46(2):65-69.  
ZOU Lei, ZHANG Enxian, YUE Junfeng. Retrofit of low nitrogen combustion system of a 630 MW opposed-firing boiler with swirl burner[J]. Boiler Technology,2015,46(2):65-69.
- [12] GB13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S].  
GB13223—2011 Emission standard of air pollutants for thermal power plants[S].
- [13] 马新立,徐颂梅. 低  $\text{NO}_x$  燃烧器改造后水冷壁横向裂纹原因及治理[J]. 江苏电机工程,2015,34(2):72-74.  
MA Xinli, XU Songmei. Cause and countermeasures of transverse cracks on water wall tubes after low  $\text{NO}_x$  burner rebuilding[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 72-74.
- [14] 吴英,毛晓飞,王潜,等. 600 MW 四墙切圆燃烧超临界锅炉结焦[J]. 中国电力,2013,46(5):1-5.  
WU Ying, MAO Xiaofei, WANG Qian, et al. Research on slagging prevention in 600 MW supercritical boilers with four-wall tangential firing[J]. Electric Power 2013,46(5):1-5.
- [15] 邹磊,梁绍华,岳峻峰,等. 1000 MW 超超临界塔式锅炉  $\text{NO}_x$  排放特性试验研究[J]. 动力工程学报,2014,34(3):169-175,195.  
ZOU Lei, LIANG Shaohua, YUE Junfeng, et al. Experimental study on  $\text{NO}_x$  Emission of a 1000 MW ultra supercritical tower type boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2014,34(3):169-175,195.
- [16] 岳峻峰,梁绍华,宁新宇,等. 600 MW 超超临界锅炉墙式切圆燃烧系统的特点及性能分析[J]. 动力工程学报,2011,31(8):598-604.  
YUE Junfeng, LIANG Shaohua, NING Xinyu, et al. Structural features and performance analysis of wall-arrangement tangential firing system for a 600 MW ultra supercritical boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(8): 598-604.
- [17] 邹磊,岳峻峰,陈永生,等. 1000 MW 超超临界锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧技术改造及性能优化试验[J]. 中国电力,2014,47(10):92-97.  
ZOU Lei, YUE Junfeng, CHEN Yongsheng, et al. Retrofit with low  $\text{NO}_x$  combustion technique and performance optimization test for a 1000 MW ultra supercritical boiler [J]. Electric Power, 2014,47(10):92-97.

作者简介:



靖东平

靖东平(1984—),男,吉林双辽人,工程师,从事发电运行技术研究工作。

## Analysis and Operation Adjustment for Slagging After Low $\text{NO}_x$ Combustion Retrofit of Boiler with Swirl Burner

JING Dongping

(Guodian Shuangliao Generating Co. Ltd., Shuangliao 136400, China)

**Abstract:** In order to reduce  $\text{NO}_x$  emission, technical retrofit of low  $\text{NO}_x$  combustion had been carried out for opposed-firing supercritical boiler with swirl burner in a power plant. After retrofit the mass concentration of  $\text{NO}_x$  emission declined by more than 50% compared with the test results before retrofit. But the serious slagging was found and research was conducted to analyse the reason of the slagging based on testing and analysing the characteristics of the new burner. The serious slagging problem was solved by a series of experiments such as changing the swirl intensity of secondary air, fineness of pulverized coal, oxygen volumetric fraction and flow rate of over-fire air(OFA) etc.

**Key words:** opposed-firing boiler; low  $\text{NO}_x$  combustion; slagging; combustion adjustment

(编辑 刘晓燕)