

燃尽风与水平浓淡燃烧联用对NO_x生成的影响

张晓辉, 孙锐, 孙绍增, 秦明

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

Effects of Combined Application of OFA and Horizontal Bias Burner on NO_x Emission Characteristics

ZHANG Xiao-hui, SUN Rui, SUN Shao-zeng, QIN Ming

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: An experimental investigation to reduce the NO_x emission during burning bituminous coal has been carried out in a 220 t/h tangential pulverized coal firing rectangle furnace, with a technique combining horizontal bias combustion (HBC) burners in the primary zone and retrofitted separated over fire air (SOFA) nozzles above the tertiary air. The influences of SOFA on NO_x emission and unburned carbon in fly ash were experimentally studied. Results show that the amount of NO_x emission is decreased to less than 450 mg/m³ adopting the suitable arrangement of OFA, when the time equals 0.32s as the fuel flows from top primary air to OFA, and reasonable distribution of secondary air, when the excess air coefficient equals 0.85. The unburned carbon content in fly ash is as low as 1.6%-2% at the same time. Adjusting the distribution of secondary air can also improve the tube temperature distribution of superheater.

KEY WORDS: staging combustion technique; over fire air; horizontal pulverized coal bias combustor; NO_x emission; unburned carbon content in fly ash; pulverized fuel boiler

摘要: 针对燃烧器采用四角切圆矩形炉膛布置方式的某燃用烟煤 220 t/h 锅炉, 在主燃烧区域通过采用水平浓淡燃烧器、在三次风上层加装高位燃尽风喷口(SOFA), 采取燃料水平分级与空气垂直分级结合的方式进行改造, 降低氮氧化物(NO_x)排放水平。研究了SOFA对锅炉NO_x排放和飞灰可燃物的影响规律。试验结果表明, 当采用合理的燃尽风布置, 煤粉由上层一次风喷口至OFA喷口间的流动时间保持在 0.32 s 左右时, 采用合理的二次风配风调节方式, 主燃烧器区域过量空气系数控制在 0.85 时, 机组NO_x排放量可降低到 450 mg/m³以下。同时, 对飞灰含碳量影响较小, 保持在

1.6%~2%之间, 有效避免了过热器超温问题。

关键词: 分级燃烧技术; 燃尽风; 水平浓淡煤粉燃烧器; NO_x排放; 飞灰含碳量; 煤粉锅炉

0 引言

煤燃烧过程中产生的氮氧化物(NO_x)是大气污染的主要污染物之一。NO_x不仅本身是神经毒剂, 而且会在大气中形成臭氧(O₃)和酸雨, 超标臭氧所导致的光化学烟雾, 对人类健康危害极大, 大气中的NO_x形成酸雨, 不仅对人类生活环境产生破坏, 同时也制约着经济发展。

1 NO_x生成机理及控制手段

1.1 NO_x生成机理

锅炉运行过程中生成的NO_x是大气中NO_x的主要来源。煤燃烧过程中产生的NO_x可分为 3 类, 分别是燃料型、热力型和快速型, 其中燃料型NO_x占锅炉排放NO_x总量的 75%~95%^[1]。

近年来, 以燃料中N赋存形态^[2-3]及煤粉燃烧过程中产生的NO_x的中间产物及来源为研究对象, 展开了大量的研究。在De Soete^[4]提出的NO_x生成模型基础上扩展的综合考虑热力型NO_x及焦炭对NO的异相还原机理的NO_x生成、控制机理是目前引用最广泛的NO_x生成机理之一, 见图 1。

后续研究又对该控制机理进行了深入的扩展研究^[5-7], 均认为还原性燃烧气氛对NO_x的生成有显著的抑制作用。因此, 在各种燃烧法控制NO_x排放技术中, 通过调整燃烧区域过量空气系数及风粉混合方式, 对抑制、还原热解过程中析出的NO及其中间产物起着重要作用^[7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576020); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0336)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50576020).

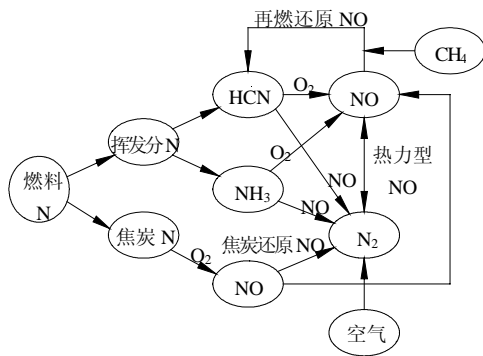


图 1 NO 生成和还原机理

Fig. 1 Principle of NO formation and reduction

1.2 空气分级燃烧技术的进展

燃烧区域的过量空气系数是燃料型NO_x的主要影响因素，几十年来，根据炉内一次风、二次风间的不同组合方式已开发出多种炉内空气分级燃烧技术。目前空气分级技术总体上可分为 3 大类，分别是水平分级(concentric firing system系列水平分级燃烧技术)、垂直分级(单级OFA与多级OFA系统)及两者相结合的空间立体式分级(LNCFSI系统和LNCFSII系统^[8]及TFS2000系统)。从这些技术出发，合理配置燃尽风系统，可降低 20%~40%的NO_x排放。

1.3 水平浓淡低NO_x燃烧器技术

两股一次风煤粉气流各自偏离化学当量比，可以有效地降低NO_x的生成。浓煤粉气流是富燃料燃烧，使挥发分析出速度加快，更造成挥发分析出区域缺氧，促使含N化合物生成N₂，从而达到低NO_x排放的目的。淡侧煤粉气流由于煤粉浓度较小，含氮基团析出量小，这样与氧反应生成NO的量较小，总体效应使浓淡分离后一次风产生NO水平较普通型直流燃烧器小得多^[9-12]。

秦明等^[13]采用燃尽风与水平浓淡燃烧相结合的方式对某燃用褐煤 670t/h六角切向燃烧锅炉进行了低NO_x试验研究，NO_x排放浓度下降 23%以上。

针对环保的要求，考虑到电厂机组的实际运行状况，为能保证锅炉机组的经济性及可靠性，采用单级OFA系统与水平浓淡低NO_x燃烧器相结合对某台HG-220/100-1型锅炉进行低NO_x燃烧系统改造，预期目标为NO_x排放 450mg/m³(φ(O₂)=6%)。

2 机组概况及改前运行情况

2.1 机组概况

哈尔滨锅炉厂生产的HG-220/100-1型自然循环汽包锅炉，固态排渣，采用两台钢球磨煤机、中

储仓式制粉系统，热风送粉，燃烧器形式为直流、四角切圆，双层布置。改造前锅炉NO_x排放量较高，达到 681 mg/m³。锅炉主要技术参数、燃煤特性及改前试验工况分别见表 1~3。

根据锅炉运行实际状况，采取空气分级燃烧(燃尽风)与水平浓淡煤粉燃烧相结合的炉内立体分级燃烧技术，来降低NO_x的排放，并进行相应的试验研究。

表 1 改前试验工况(φ(O₂)=681mg/m³)
Tab. 1 Experimental condition before alteration (φ(O₂)=681mg/m³)

参数	主蒸汽流量/(t/h)	主蒸汽温度/℃	过热器壁温/℃
数值	187.4	534.4	539
参数	一级减温水/(t/h)	排烟温度/℃	φ(CO)/(μL/L)
数值	2.2/2.2	138.2	-
参数	尾部烟气氧量/%	给水温度/℃	送风机入口温度/℃
数值	8.31	223.9	27.49

表 2 锅炉主要技术参数
Tab. 2 Main parameters of the boiler

参数	过热蒸汽流量/(t/h)	过热蒸汽温度/℃	过热蒸汽压力/MPa	锅筒工作压力/MPa	给水温度/℃
数值	220	540	9.8	10.78	215
参数	热风温度/℃	冷风温度/℃	排烟温度/℃	热效率/%	
数值	336	20	120/118	92.3	

表 3 燃煤特性
Tab. 3 Ultimate and proximate analysis of coal

煤种	w(C _{ar})/%	w(H _{ar})/%	w(O _{ar})/%	w(N _{ar})/%	w(S _{ar})/%
设计	69.48	4.18	7.22	0.82	1.78
改前试验	47.91	3.28	9.53	0.75	1.01
改后试验	46.16	2.86	6.41	0.76	1.78
煤种	w(A _{ar})/%	w(W _t)/%	w(V _{dat})/%	Q _{net,ar} /(kJ/kg)	
设计	12.04	4.48	23.99	27170	
改前试验	31.72	5.8	40.35	18470	
改后试验	35.54	6.4	37.98	17540	

2.2 燃尽风位置的确定

燃尽风位置的确定取决于燃料由一次风进入炉膛后流动至燃尽风的停留时间。煤粉在炉内的停留时间由文献[14]计算得到。考虑到烟煤热风送粉，燃料 N 中的挥发分 N 容易析出，将燃料从上层一次风至燃尽风喷口之间停留时间定为 0.32 s，结合燃尽及现场实际情况，燃尽风位置约高出上一次风 2000mm，这约比文献[15]提供的燃尽风喷口距最上层一次风喷口距离计算结果少 0.3 m 左右。具体改造前后的燃烧器系统布置如图 2，改造前后一次风标高不变，为满足燃尽风风率要求，在总风量不变的前提下，改造后各二次风喷口面积较改前均有所缩小。

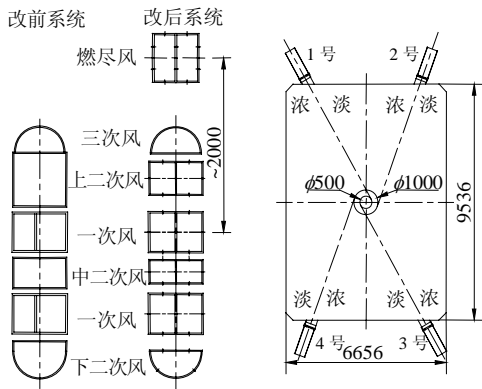


图2 低NO_x燃烧系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Low NO_x combustion system

3 试验结果及分析

3.1 冷态空气动力场试验

在实炉上进行冷态模化试验，除了保证煤粉燃烧器出口气流的雷诺数达到自模区，还要保证冷、热态时煤粉燃烧器一、二、三次风出口气流量比相等。此次模化试验按设计参数进行，冷态模化试验结果见表4。

表4 冷态模化试验结果

Tab. 4 Results of cold modeling experiment

位置	一次风	下二次风	中二次风
速度/(m/s)	20	28.47	24.16
位置	上二次风	三次风	燃尽风
速度/(m/s)	24.16	47.34	28.47

采用 ANEMOMASTER Model KA21 热式风速计对各风门曲线进行标定后，可确定燃尽风与各层二次风在试验过程中的分配比例，根据标定结果调整挡板开度将各喷口风速调整到冷态模化值后，对炉内空气动力场进行测量。测试结果见图3，切圆直径为5300mm×3300mm。

作为矩形炉膛，且燃烧器喷口布置在两侧墙，长宽比较大(燃烧器喷口连线高宽比约为2.05)。若同层平面的4支燃烧器出口射流速度一样，则由于各股射流在相互撞击前行程不一样，使得1号、3号燃烧器分别对2号、4号燃烧器射流的冲击作用较为强烈。受到强烈冲击的2号、4号燃烧器射流更贴近壁面，其对下游3号、1号燃烧器射流的撞击更贴近射流根部，导致3号、1号燃烧器射流偏转更为严重，这使得切圆呈椭圆形，在矩形炉膛长轴方向上相对扩展强烈。这与李彦鹏等^[16]得出的炉内旋转气流对燃烧器射流的横向冲击是影响燃烧器射流偏转的重要原因这一结论相一致。同时，如图2，煤粉射流两侧压差及补气条件的差异也是椭

圆形切圆产生的重要因素。因此，在上游燃烧器射流与自身两侧压差的共同影响，导致在炉内冷态空气动力场试验中出现了椭圆形切圆。这与文献[17-18]在研究矩形炉膛的炉内切圆试验及数值模拟后得出的结论基本相同。

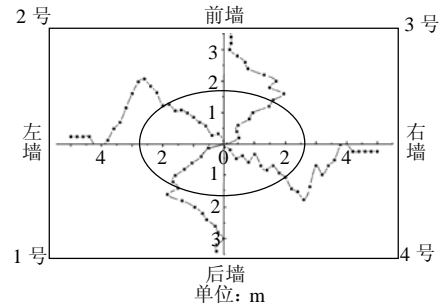


图3 炉膛内实测空气动力场

Fig. 3 Experimental aerodynamic field in the furnace

3.2 锅炉低NO_x排放性能试验结果和分析

3.2.1 配风方式对NO_x排放的影响

锅炉在2台磨煤机常规运行方式下，以束腰配风方式与倒宝塔配风方式为对比工况，对其实际NO_x排放结果进行比较，试验条件和结果分别见表5和图4。比较可知，采用倒宝塔的配风方式对NO_x的排放影响较大，NO_x排放量由束腰配风的660.83mg/m³降低到595.84mg/m³，降幅达9.8%。倒宝塔的配风方式使煤粉燃烧初期处于还原气氛，有效抑制了燃料N与氧的结合，同时燃烧被推迟，降低了主燃区整体温度水平，抑制了热力型NO_x的生成，因此采用倒宝塔配风方式可以降低10%左右的NO_x排放量。

表5 变二次风配风方式的试验条件及NO_x浓度

Tab. 5 Experimental condition and NO_x concentration in different secondary air arrangements

配风方式	风门开度/%				$\varphi(\text{NO}_x)$ /(mg/m ³) ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$)
	上	中	下	燃尽风	
束腰配风	20~30	0	20~30	30	660.83
倒塔配风	20~30	0	5	30	595.84

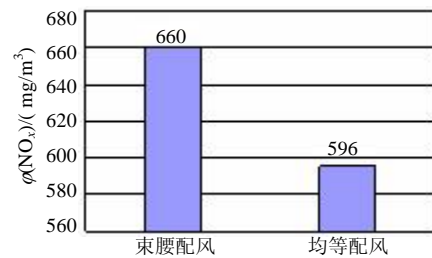


图4 变二次风配风方式对NO_x排放浓度影响 ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$)

Fig. 4 Influence of different secondary air arrangements on NO_x concentration ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$)

3.2.2 燃尽风份额对 NO_x 排放的影响

增设燃尽风喷口后, 为了考察其对 NO_x 排放结果的影响, 通过调整不同开度下的燃尽风风门挡板, 对主燃区过量空气系数进行调整, 对不同主燃区过量空气系数下的 NO_x 排放结果纪录并采用远红外高温测定仪对炉膛火焰温度进行测量。随着燃尽区过量空气系数的增加, 燃尽区区域温度水平整体提高, 当燃尽风过量空气系数为 0.2 时, 燃尽区温度最高, 随着燃尽风过量空气系数的进一步增加, 燃尽区温度有所降低, 见图 5。当过量空气系数为 0.2 时, 燃尽区供风与未燃尽炭充分混合、燃尽, 而混入的冷二次风量较少, 使得此时燃尽区炉膛温度水平达到最高值; 而随着燃尽风风量的持续增加, 冷二次风供入相对较多, 对炉内烟气有一定的混合冷却作用, 使得燃尽区整体温度水平降低。燃尽区温度水平的变化对热力型 NO_x 的生成有较大影响, 较低的温度水平将有效抑制残余焦炭在燃尽区燃烧时热力型 NO_x 的生成。

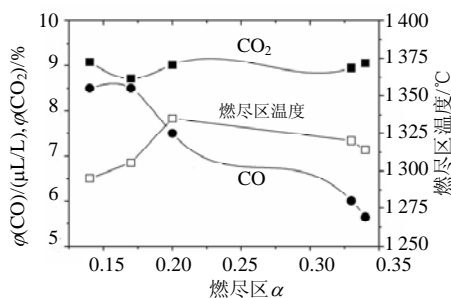


图 5 燃尽区过量空气系数对 CO、CO₂ 排放及燃尽区温度的影响

Fig. 5 Influence of excess air in the OFA zone on CO, CO₂ emission and temperature of OFA zone

随着燃尽区过量空气系数的增加, CO 排放浓度显著降低。较低的过量空气系数及火焰在燃烧过程中较低的炉膛充满度是生成 CO 的主要原因。随着燃尽风风量所占份额逐渐增大, 强化了烟气在燃尽区及其至炉膛出口的扩散及分布, 对主燃区产生的 CO 起到了一定的氧化作用, 有效的缓解了主燃区由于水平浓淡分级燃烧所产生的还原区域对 CO 生成的促进作用。因此, 随着燃尽区过量空气系数的增加, 尾部 CO 排放浓度降低, 见图 5。CO₂ 排放量在变燃尽区过量空气系数试验过程中变化不大, CO₂ 的生成主要受到燃料燃烧效率的影响; 由图 6 可以看出在试验过程中飞灰含碳量变化不大, 燃料燃烧效率受试验条件影响不大, 这从燃料利用率方面验证了过量空气系数在不同参数下 CO₂ 排放量波动不大的现象。

由图 6 可以看出, 随着主燃区过量空气系数的降低, NO_x 排放量由主燃区过量空气系数 $\alpha=1.05$ 时的 599 mg/m³ 降低到过量空气系数 $\alpha=0.85$ 时的 472 mg/m³, 降幅达 21.2%。曹红加等^[19]针对过量空气系数对 NO_x 排放的影响展开研究, 得出类似的结论。燃尽风风量的增加, 是对倒宝塔配风方式的深化, 结合图 1 可知, 随着主燃区过量空气系数的降低, 燃料 N 在燃烧过程中挥发分 N 首先以氰类 (HCN 等) 及氨类 (NH₃ 等) 等形态释放, 这些中间产物在燃尽风创造的还原气氛下 (主燃区过量空气系数小于 1) 生成 N₂; 同时, 在三次风中超细煤粉颗粒的再燃、还原作用下, 也会有部分 NO 被还原成 N₂^[20]。

采用水平浓淡燃烧器后, 使得煤粉着火点的前移, 延长煤粉燃烧时间^[21], 使得即使在较低的过量空气系数的条件下, 飞灰含碳量仍然会维持在较低的水平 (平均为 1.6%)。

NO_x 生成及飞灰含碳量随尾部氧量的波动现象较明显, 当主燃区过量空气系数由 0.85 升高到 0.9 时, 尾部烟气氧量增加趋势明显, 同时飞灰含碳量明显降低, 而 NO_x 生成量也有较大幅度增加, 这与以上机理分析相吻合, 剩余氧量的增加表明在燃烧过程中有较充足的氧气参与燃烧, 使得燃料可以充分燃烧, 飞灰含碳量降低, 但同时也导致 NO 生成量的增加。

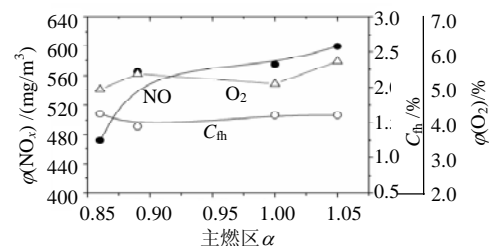


图 6 主燃区过量空气系数对 NO_x 排放、尾部氧量及飞灰含碳量的影响

Fig. 6 Influence of excess air in the primary zone on NO_x emission concentration, oxygen content of flue gas and unburned carbon content in fly ash

3.2.3 中二次风对 NO_x 排放的影响

试验过程中发现适当引入中二次风可以强化对 NO_x 排放量的降低效果。取中二次风风量分为 0、3.8%、4.4%、5.1% 4 个试验点, 对 NO_x 排放量进行比较, 发现中二次风风量为 0 时, NO_x 排放量相对较高, 可达到 467 mg/m³, 而适当引入中二次风后, NO_x 排放量会降低到 438 mg/m³ 左右, 当中二次风份额为 3.8%、4.4% 时结果相近, 而当中二次风风量份额增加到 5% 左右时, NO_x 排放量显著增加, 接近 520 mg/m³, 如图 7 所示。

NO_x排放量降低到 438 mg/m³时的运行参数见表 6。此时主燃区过量空气系数为 0.85, 燃尽风区域过量空气系数为 0.33, 主燃区低过量空气系数可有效抑制NO的生成, 较充足的燃尽风风量既强化了烟气在燃尽风区域的炉膛充满度, 同时使得主燃区生成的CO得到充分燃尽。燃尽风的投入, 尽管在某种程度上导致着火点的上移, 但同时也对主燃区的高温烟气及高强度辐射产生压制、缓解作用, 有效降低了高温过热器壁面温度(535.5℃)。由于采用水平浓淡燃烧器, 促使着火点前移, 燃烧时间的延长有效缓解了燃尽风所带来的未燃尽损失增加的趋势, 保持稳定的较高的锅炉燃烧效率。因此, 此工况为最佳工况。

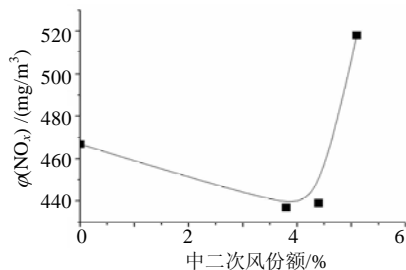


图 7 中二次风分额对NO_x生成的影响

Fig. 7 Influence of secondary air proportion on NO_x emission content

表 6 $\phi(\text{NO}_x)=438\text{mg}/\text{m}^3$ 时试验工况

Tab. 6 Experimental condition ($\phi(\text{NO}_x)=438\text{mg}/\text{m}^3$)

参数	主蒸汽流量/(t/h)	主蒸汽温度/℃	过热器壁温/℃
数值	197	535	535.5
参数	一级减温水/(t/h)	排烟温度/℃	$\phi(\text{CO})/(\mu\text{L}/\text{L})$
数值	3/3	133.5	2.5
参数	燃尽区 α	主燃区 α	飞灰含碳量/%
数值	0.33	0.85	1.62

4 结论

(1) 采取空气垂直分级燃烧技术对中等烟煤及次烟煤的低NO_x改造时, 煤粉由上层一次风喷口至OFA喷口间的流动时间可保持在 0.32s左右。

(2) 倒宝塔运行方式降低NO_x排放量效果明显, 降低效率可达 10%左右。

(3) 燃尽风风量的增加使主燃区过量空气系数降低, 在采用倒宝塔配风方式基础上, 当主燃烧器区过量空气系数为 0.85 时, 可降低 21.2%左右的NO_x排放。

(4) 对于一二次风间隔布置, 且间距较小的燃烧器组合, 可适当通入中二次风, 其对主燃区的冷却作用可进一步抑制热力型NO_x的生成, 从而达到降低锅炉尾部NO_x排放量的效果。

(5) 采用水平浓淡燃烧器与燃尽风相结合的空间立体式分级燃烧方式, 可将燃用烟煤的 50MW 机组锅炉尾部NO_x排放量控制到 450mg/m³以下。

(6) 在取得较大幅度降低NO_x的同时, 由于燃尽风喷口高度的布置特点, 对飞灰含碳量影响较小, 保持在 1.6%~2%之间, 保持了较高的燃烧效率, 没有对锅炉的经济性运行带来负面影响。

参考文献

- [1] Pershing D W, Wendt J O L. Pulverized coal combustion: The influence of flame temperature and coal combustion on thermal and fuel NO_x[C]. Sixteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1976: 389-399.
- [2] Nelson P F, Buckley A N, Kelly M D. Functional forms of nitrogen in coals and the release of coal nitrogen as NO_x Precursors (HCN and NH₃)[C]. 24th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1992.
- [3] 谭厚章, 廖晓伟, 徐通模, 等. 煤燃烧过程中吡啶型氮迁徙规律的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 251-253. Tan Houzhang, Liao Xiaowei, Xu Tongmo, et al. Experimental investigation of the transformation of pyridinic-nitrogen in coal combustion[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 251-253(in Chinese).
- [4] De S. Overall Reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen[C]. Fifteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1975: 1093-102.
- [5] Glarborg P, Jensen A D, Johnsson J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2): 89-113.
- [6] Wendt J O L, Pershing D W. Physical mechanisms governing the oxidation of volatile fuel nitrogen in pulverized coal[J]. Flames Combustion Science and Technology, 1977, 149(16): 111-121.
- [7] Larry L Baxter, Reginald E Mitchell, Thomas H Fletcher, et al. Nitrogen release during coal combustion[J]. Energy and Fuels, 1996, 10(1): 188-196.
- [8] 张惠娟, 惠世恩, 周屈兰, 等. 300MW 煤粉炉低 NO_x 正反切同轴燃烧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 116-120. Zhang Huijuan, Hui Shien, Zhou Qulan, et al. Experiment study of low NO_x positive/opposing concentric tangential firing system in a 300 MW pulverized fuel boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 116-120 (in Chinese).
- [9] 秦裕琨, 李争起, 孙锐, 等. 风包粉煤粉燃烧原理及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 59-62. Qin Yukun, Li Zhengqi, Sun Rui, et al. Study on experiment and the principle of air-surrounding-fuel (ASF) pulverized coal combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 59-62(in Chinese).
- [10] 孙锐, 李争起, 孙绍增, 等. 四角切圆锅炉炉内煤粉燃烧过程数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 107-113. Sun Rui, Li Zhengqi, Sun Shaozeng, et al. Numerical simulation on pulverized coal combustion process in a tangential firing furnace [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 107-113 (in Chinese).
- [11] 周武, 庄正宁, 刘泰生, 等. 炉膛结渣问题的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 131-135.

- Zhou Wu, Zhuang Zhengning, Lu Taisheng, et al. Study on slagging problem in the furnace of a tangential fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 131-135(in Chinese).
- [12] 聂其红, 孙绍增, 吴少华, 等. 新型水平浓淡风低 NO_x 煤粉燃烧器在贫煤锅炉的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 155-159.
- Nie Qihong, Sun Shaozeng, Wu Shaohua, et al. Study on application of new type HBC-SSA burners with low NO_x emissions in a lean coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 155-159(in Chinese).
- [13] 秦明, 吴少华, 孙绍增, 等. 六角切圆燃烧褐煤煤粉锅炉低 NO_x 燃烧技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 158-162.
- Qin Ming, Wu Shaohua, Sun Shaozeng, et al. Low NO_x emission study for six point tangential burning of PC boiler firing lignite coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 158-162(in Chinese).
- [14] 何佩鳌, 赵仲琥, 秦裕琨. 煤粉燃烧器设计及运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [15] 闫志勇, 张惠娟, 邱广明, 等. 锅炉分级燃烧降低 NO_x 排放的技术改造及分析[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 764-769.
- Yan Zhiyong, Zhang Huijuan, Qiu Guangming, et al. Technical reformation and experimental analysis on NO_x exhaust reduction by classified combustion at Boiler[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2000, 20(4): 764-769(in Chinese).
- [16] 李彦鹏, 王金枝, 许晋源. 切向燃烧锅炉燃烧器区流场及壁面负压的试验与数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 65-69.
- Li Yanpeng, Wang Jinzhi, Xu Jinyuan. Experimental and numerical studies of the velocity and pressure fields on the furnace wall in the burner zone in the tangentially fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 65-69(in Chinese).
- [17] 朱彤, 范卫东, 信伟, 等. 双炉膛炉内空气动力场的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 1997, 12(6): 401-404.
- Zhu Tong, Fan Weidong, Xin Wei, et al. A numerical study of aerodynamic field characteristics in a double-furnace[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1997, 12(6): 401-404(in Chinese).
- [18] 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 Tangential Firing Single Chamber Boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 51-57(in Chinese).
- [19] 曹红加, 唐必光, 许洪波. 煤粉浓淡燃烧方式对电站锅炉 NO_x 排放影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 229-232.
- Cao Hongjia, Tang Biguang, Xu Hongbo. The influence of coal bias combustion mode on NO_x emission from power station boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 229-232(in Chinese).
- [20] 程俊峰, 曾汉才, 熊蔚立, 等. 降低 300MW 贫煤锅炉 NO_x 排放的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 157-160.
- Cheng Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili, et al. Research and test for reducing NO_x emission of a 300 MW lean coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 157-160(in Chinese).
- [21] 樊越胜, 邹峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 118-121.
- Fan Yuesheng, Zou Zheng, Gao Jubao, et al. Study of oxygen combustion characteristics of pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 118-121(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-30.

作者简介:

张晓辉(1979—), 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为燃煤污染物生成控制机理及技术, zhangxh2003@hit.edu.cn;

孙锐(1970—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为浓淡煤粉燃烧技术和燃烧过程及污染物生成过程的数值模拟研究;

孙绍增(1963—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为清洁燃烧和污染控制技术的研究;

秦明(1963—), 男, 副研究员, 主要研究方向为洁净煤燃烧、流化床燃烧技术等。

(编辑 王庆霞)