

新型低氮旋流燃烧器 NO_x 排放特性

龚彦豪¹, 许鑫玮¹, 王登辉¹, 王学斌¹, 谭厚章¹, 牛艳青¹, 惠世恩¹, 李在让², 刘愿武³

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 泰山集团股份有限公司, 山东 泰安 271000; 3. 西安交大思源科技股份有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:为应对燃煤工业锅炉日益严苛的排放标准,提出了一种新型低 NO_x 旋流燃烧器,将煤粉预燃与燃烧器空气分级、炉膛空气分级进行耦合,通过改变燃烧系统的配风布置对煤粉预燃燃烧状态进行调整,研究了一次风率、内外二次风率、外二次风入射方式、循环风率和燃尽风率对 NO_x 排放特性的影响。结果表明:在试验工况下当一次风率从 15.4% 提高到 28.7%,预燃室内氧气浓度增大,一次风携带的氧气可直接将煤粉热解释放挥发分中含氮化合物 HCN 、 NH_3 等中的 N 氧化为 NO , NO_x 生成量由 284.4 mg/m^3 逐渐增至 326.7 mg/m^3 。当内外二次风率比由 0.46 增大到 1.4, NO_x 排放浓度先下降后上升;由于内二次风量影响预燃室内过量空气系数和湍动强度,外二次风量影响炉膛内部主燃区煤粉发生燃烧反应的湍动混合强度,在二次空气配比变化的综合作用下,内外二次风率比为 1.0 时, NO_x 排放值最低为 211.2 mg/m^3 。随着外二次风内部入射风量与端面入射风量比值由 0 增大到 4.56, NO_x 生成浓度先下降后上升;由预燃室端面入射的外二次空气射流边界较长,主燃区相对较大,燃烧整体较为均衡,而从预燃室内部入射的外二次风促进了预燃室出口气粉混合物在炉膛内与助燃空气的混合;当外二次风内部、端面射流风率比为 0.25 时,煤粉在预燃室出口区域的湍动强度提高,在局部还原性气氛下, NO_x 生成浓度有最低值 230.9 mg/m^3 。当循环风率从 0 增大到 30.6% 时,内外二次风中氧气浓度降低,预燃室和炉膛主燃区还原性气氛增强,挥发分中含氮化合物 HCN 、 NH_3 等中的 N 迁移形成 N_2 的概率增加, NO_x 排放量由 250.7 mg/m^3 逐渐降低到 221.1 mg/m^3 。随着燃尽风率由 0 提高到 29%, NO_x 排放值先减小后增大;燃尽风率提高时二次风率随之降低,内外二次风湍动扩散能力减弱,主燃区还原性气氛增强;燃尽风率进一步提高使得主燃区氧量不足,燃尽区氧化性气氛较强,大量焦炭和含氮化合物在燃尽区发生氧化反应,导致 NO_x 生成量增加;当燃尽风率为 19.6% 时, NO_x 生成值最低为 253.5 mg/m^3 。整体上,当一次风率为 17%~19%,内外二次风率比为 0.8~1.0,外二次风由预燃室端面入射,循环风率为 15%~20%,燃尽风率为 19%~22% 时, NO_x 排放值为 $212 \sim 231 \text{ mg/m}^3$,相比试验工况下最大 NO_x 排放量下降 29%~35%。

关键词:工业锅炉;燃烧器;煤粉预燃;空气分级; NO_x 排放

中图分类号:TK223.2

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)06-0118-08

NO_x emissions characteristics of a novel low- NO_x swirl burner

GONG Yanhao¹, XU Xinwei¹, WANG Denghui¹, WANG Xuebin¹, TAN Houzhang¹,
NIU Yanqing¹, HUI Shien¹, LI Zairang², LIU Yuanwu³

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Taishan Group Co., Ltd., Tai'an 271000, China; 3. Xi'an Jiaoda Siyuan Technology Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: Aiming at increasingly stringent emission standards of coal-fired industrial boilers, a novel low- NO_x swirl burner was proposed in this paper. The pulverized coal preheating was coupled with the air staging of burner and furnace, and the pulverized coal preheating

收稿日期:2019-06-06;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19060601

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603900)

作者简介:龚彦豪(1994—),男,四川乐山人,硕士研究生,研究方向为煤的清洁高效燃烧。E-mail:howie3@stu.xjtu.edu.cn。

通讯作者:惠世恩,教授,博士生导师,研究方向为煤的洁净利用与污染防治。E-mail:sehui@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:龚彦豪,许鑫玮,王登辉,等.新型低氮旋流燃烧器 NO_x 排放特性[J].洁净煤技术,2019,25(6):118-125.

GONG Yanhao, XU Xinwei, WANG Denghui, et al. NO_x emissions characteristics of a novel low- NO_x swirl burner[J].

Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 118-125.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



ting combustion state was adjusted by changing the air distribution of the combustion system. The effects of primary air rate, inner and outer secondary air rate, outer secondary air injection method, recirculating flue gas rate and over fire air (OFA) rate on NO_x emissions were studied. The results show that with the increase of primary air rate from 15.4% to 28.7% in the experimental conditions, the oxygen concentration in the preheating chamber increases, and N which is present in nitrogen-containing compounds HCN, NH_3 , etc. in the volatile matter from the pyrolysis of pulverized coal is directly oxidized to NO by the oxygen carried by primary air, resulting in increasing NO_x formation from 284.4 mg/m^3 to 326.7 mg/m^3 . When the ratio of internal and external secondary air increases from 0.46 to 1.4, the NO_x emission concentration decreases first and then increases. The inner secondary air volume affects the excess air ratio and turbulence intensity in the preheating chamber, and the outer secondary air volume affects the turbulence intensity of pulverized coal combustion reaction in the primary combustion zone inside the furnace. Due to the combined effects of changes in secondary air distribution, the lowest NO_x emission value is 211.2 mg/m^3 when the ratio of inner and outer secondary air is 1.0. As the ratio of the air volume injected from the inside of the preheating chamber to injected from the end face of the preheating chamber of the outer secondary air increases from 0 to 4.56, the NO_x formation concentration reduces first and then increases. The outer secondary air injected from the end face of the preheating chamber has a longer injection boundary, which makes the primary combustion zone relatively larger and the overall combustion is relatively uniform. Whereas, the outer secondary air injected from the inside of the preheating chamber promotes the mixing of preheating products at the outlet of the precombustion chamber with combustion air in the furnace. When the inside/end face injection air ratio of the outer secondary air is 0.25, the turbulence intensity of pulverized coal in the outlet area of the preheating chamber is improved, and the NO_x formation has a minimum value of 230.9 mg/m^3 in a partially reducing atmosphere. As the recirculating flue gas rate increases from 0 to 30.6%, the oxygen concentration in the inner and outer secondary air decreases, which makes the reducing atmosphere in the preheating chamber and the primary combustion zone enhanced. The probability that N which is present in nitrogen-containing compounds HCN, NH_3 , etc. in the volatile matter reacts to form N_2 increases, and NO_x emission gradually decreases from 250.7 mg/m^3 to 221.1 mg/m^3 . As the OFA rate increases from 0 to 29%, the NO_x emission value decreases first and then increases. With the increase of the OFA rate, the secondary air rate decreases, and the turbulence diffusion capacity of the inner and outer secondary air is weakened, meanwhile, the reducing atmosphere in the primary combustion zone is enhanced. The further increase of the OFA rate makes the oxygen content in the primary combustion zone insufficient, and the oxidizing atmosphere in the burnout zone is strong. At this time, a large amount of coke and nitrogen-containing compounds undergo oxidation reactions in the burnout zone, resulting in the increase in the NO_x formation. When the OFA rate is 19.6%, the lowest NO_x emission value is 253.5 mg/m^3 . Overall, When the primary air rate is 17%–19%, the inner and outer secondary air ratio is 0.8–1.0, the outer secondary air is injected from the end face of the preheating chamber, the recirculating flue gas rate is 15%–20%, and the OFA rate is 19%–22%, the NO_x emission value is 212–231 mg/m^3 , which is 29%–35% lower than the maximum NO_x emissions in the experimental conditions.

Key words: industrial boiler; burner; pulverized coal preheating; air staging; NO_x emissions

0 引言

煤炭是我国能源的主体消费形式,而燃烧是煤炭的最主要消耗方式。煤炭燃烧是 NO_x 的主要来源, NO_x 是光化学烟雾的主要成因,同时也是形成酸雨的主要因素,近年来作为 $\text{PM}_{2.5}$ 的成因之一更是受到了广泛关注^[1-2]。目前,我国投用的燃煤工业锅炉约 50 万台,是世界上燃煤工业锅炉最多的国家,工业锅炉煤炭消耗量约占能源消费总量的 20%,其排放的 NO_x 占全国 NO_x 排放总量的 12% 左右,仅次于电站锅炉^[3-4]。然而,煤粉工业锅炉普遍存在燃烧技术落后、锅炉能耗高、热效率低、污染物排放高等问题,在环保要求日益严峻的今天受到了广泛关注。

NO_x 减排的控制技术主要有低氮燃烧器、空气分级燃烧、燃料再燃、烟气再循环 (FGR)、选择性催

化还原 (SCR) 和选择性非催化还原 (SNCR) 等方法。燃煤工业锅炉燃烧后烟气脱硝成本较高,因此通过低氮燃烧器和空气分级等技术的应用,使煤粉在炉内进行清洁高效燃烧,是最直接经济的 NO_x 脱除手段。目前我国投用的典型低 NO_x 燃烧器包括美国 B&W 公司的 DRB/XCL 燃烧器^[5]、日立-Babcock 公司的 HT-NR 燃烧器^[6]、美国 FW 公司的 CF/SF 燃烧器^[7]、三井-Babcock 公司的 LNASB 燃烧器^[8]、德国 Steinmuller 公司的 MSM 燃烧器^[9]、美国 CE 公司的 WR 燃烧器^[10]、德国 SAACKE 公司的 SSB 燃烧器、日本三菱公司的 PM 燃烧器^[11] 和 SGR 燃烧器^[12] 等。同时,我国科研人员开发的低 NO_x 燃烧器如哈尔滨工业大学的径向浓淡旋流燃烧器^[13]、东南大学的花瓣式旋流燃烧器^[14]、浙江大学的文丘里浓淡燃烧器^[15]、清华大学的富集型浓淡燃烧器^[16] 等也得到了规模应用。

空气分级一般是将总风量的5%~20%以燃尽风(OFA)的方式送入炉膛,使主燃区的过量空气系数接近或小于1,呈现低氧或还原性气氛^[17-19]。煤粉进入炉膛后快速热解,释放的挥发分中含有大量HCN和NH₃等氮的中间产物,这些含氮化合物会与O₂和NO进行竞争反应。采用空气分级后,主燃区氧气浓度下降,HCN和NH₃等中间产物和O₂发生反应的概率降低,和NO反应生成N₂的概率增加,从而抑制NO_x的生成。根据燃尽风与主燃区的相对距离可以将燃尽风分为紧凑型燃尽风(CCOFA)和分离型燃尽风(SOFA)^[20]。Daood等^[21]在热功率50 kW的沉降燃烧试验系统上研究煤粉的燃烧特性,发现沿炉膛方向的空气分级燃烧使得NO_x生成量明显下降。Wang等^[22]研究了空气分级燃烧技术对煤粉燃烧NO_x排放特性的影响,结果表明NO_x排放量随着燃尽空气喷口位置和煤粉燃烧器喷嘴之间距离的增加而减少。Fan等^[23]利用一维电加热沉降炉进行了煤粉燃烧空气分级试验,结果显示随着空气分级程度的增加,NO_x排放值的降低量增大,且具有适当燃尽空气位置的空气分级燃烧对锅炉整体燃烧效率几乎没有影响。

作为低NO_x燃烧技术的代表之一,煤粉预燃技术近几年得到了快速发展。煤粉进入燃烧器前,先经过由外热源加热的预燃室。由于一次风携带的氧气含量低于煤粉完全燃烧所需氧气量,预燃室内呈现还原性气氛。煤粉在预燃室内受热快速分解,释放出大量挥发分,同时伴随大量含氮化合物以气态形式析出。挥发分部分燃烧,为预燃室提供热量。在还原性气氛下,HCN、NH₃等含氮中间产物可以将NO还原成N₂,显著降低NO_x生成^[24]。Zhu等^[25]研究了循环流化床预燃后的煤粉燃烧NO_x排放特性,结果发现预燃阶段煤粉中N元素有41.4%转化为N₂,显著降低了炉内NO_x生成。Liu等^[26]通过燃气加热预燃煤粉的方式研究了NO_x生成,结果显示燃烧器结构特性和配风方式对预燃产物在炉膛内的燃烧有重要影响。Ouyang等^[27]在0.2 MW预燃燃烧试验台上研究了煤粉燃烧的NO_x排放特性,结果表明在合理配置三次风喷嘴的条件下,预燃产物在炉内燃烧生成的NO_x得到进一步控制。

然而,常规的煤粉预燃需在燃烧器前单独设置通过外部热源加热的预燃室,锅炉负荷较低时,需要燃烧外部燃料或使用换热器为预燃室加热来维持系统正常运行,使整个燃烧系统变得复杂;同时,常规的低NO_x燃烧器与空气分级技术对NO_x生成的抑制作用有限,在不进行炉膛空气分级的条件下,NO_x原

始排放通常在380 mg/m³以上^[28]。因此,本文提出了一种新型低NO_x燃烧器,该燃烧器带有煤粉预燃室,在燃烧器空气分级条件下,预燃室内部呈现还原性气氛,在煤粉热解过程中可以有效抑制NO_x生成。通过改变燃烧系统的配风布置,将煤粉预燃与燃烧器空气分级、炉膛空气分级进行耦合发挥协同脱硝效应,研究其对NO_x排放特性的影响。

1 试验

1.1 试验系统

试验在热功率29 MW的煤粉蒸汽锅炉上进行,试验系统如图1所示。整个系统由试验炉本体、给粉系统、送风系统、给水系统和点火系统等5个子系统组成。单只新型低NO_x旋流燃烧器安装在试验炉炉膛前部,给粉系统和鼓引风系统提供燃烧所需煤粉和空气,给水系统保证试验过程中连续稳定的蒸发量,点火系统保障试验正常点火和稳定燃烧。炉膛中部左右两侧墙分别对称开设有2个燃尽风喷口,4个燃尽风喷口靠近炉膛截面的4个交角处对称分布并形成相应入射角度,使燃尽风以四角切圆方式沿炉膛截面射入,切圆旋转方向与燃烧器旋流风同向。烟气成分测点位于对流受热面出口水平烟道,同时,在对流受热面出口水平烟道对烟气中的飞灰进行在线取样,分析飞灰可燃物含量。

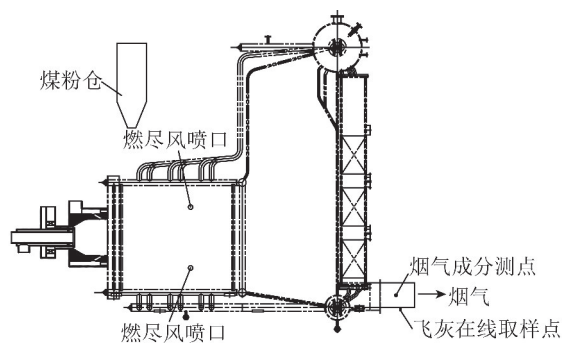


图1 试验系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

1.2 燃烧器结构

新型低NO_x旋流燃烧器结构如图2所示。燃烧器旋流内二次风套筒外围连接有预燃室,预燃室壳体外侧连接有外二次风套筒,预燃室壳体末端内侧及外缘沿燃烧器出口轴线周向分别对称开设有若干外二次风内部喷口及端面喷口。预燃室入口处由内至外依次为中心管、一次风套筒、直流内二次风套筒和旋流内二次风套筒。一次风套筒靠近喷口处的内壁上有煤粉浓缩环,喷口处有齿型稳焰器,直流内二次风喷口处有扩口,旋流内二次风通道内有切向旋

流叶片。

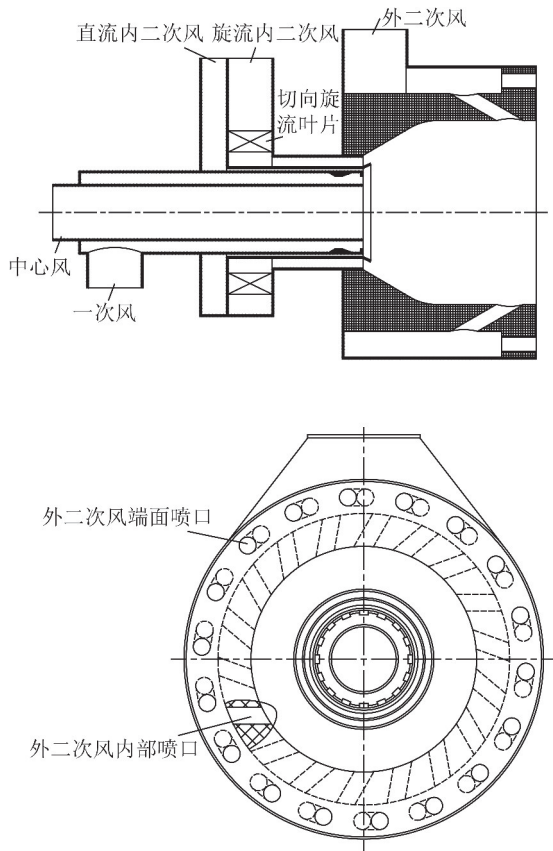


图 2 新型低 NO_x 旋流燃烧器结构

Fig.2 Diagram of the novel low-NO_x swirl burner structure

燃烧器内外二次风和燃尽风通过鼓风机送风,沿主空气管道从上游至下游依次连接燃尽风管道、内二次风管道和外二次风管道。循环烟气经循环风管道注入主空气通道内,注入位置位于燃尽风管道下游,内外二次风管道上游,故循环风同时掺入内二次风和外二次风中。试验过程中,锅炉实际热功率为 12.5 MW,燃烧反应的过量空气系数保持在 1.2 左右,NO_x 排放值在 9% 氧气浓度基础上进行计算。试验用煤的元素分析及工业分析见表 1。

表 1 煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}	N_{daf}	S_{daf}
4.26	9.22	33.86	52.66	81.18	5.16	11.74	1.05	0.87

1.3 试验工况

试验各工况的参数见表 2。试验研究了一次风率、内外二次风率比、外二次风入射方式、循环风率和燃尽风率对 NO_x 排放的影响,并对每种工况下的飞灰可燃物含量进行测试分析,通过对比找到新型低 NO_x 旋流燃烧器的最佳运行参数。

表 2 试验工况

Table 2 List of the experimental cases

工况	一次风率/%	内外二次风率比	内部入射/端面入射风率比	循环风率/%	燃尽风率/%
1	15.4	0.41	1.00	0	0
2	19.6	0.41	1.00	0	0
3	22.9	0.41	1.00	0	0
4	28.7	0.41	1.00	0	0
5	22.4	0.46	4.56	0	0
6	22.4	0.72	4.56	0	0
7	22.4	1.00	4.56	0	0
8	22.4	1.4	4.56	0	0
9	22.4	0.46	0	0	0
10	22.4	0.46	0.25	0	0
11	22.4	0.46	1.00	0	0
12	22.4	0.46	1.00	9.5	0
13	22.4	0.46	1.00	23.0	0
14	22.4	0.46	1.00	30.6	0
15	24.5	0.68	1.00	0	0
16	24.5	0.68	1.00	0	9.6
17	24.5	0.68	1.00	0	19.6
18	24.5	0.68	1.00	0	29.0

2 结果与分析

2.1 一次风率对 NO_x 排放的影响

工况 1~4 研究了燃烧器一次风率对 NO_x 排放的影响,结果如图 3 所示。当一次风率分别为 15.4%、19.6%、22.9% 和 28.7% 时,对应的 NO_x 排放浓度分别为 284.4、298.5、316.8 和 326.7 mg/m³,飞灰可燃物含量分别为 20.3%、13.6%、11.2% 和 10.6%。

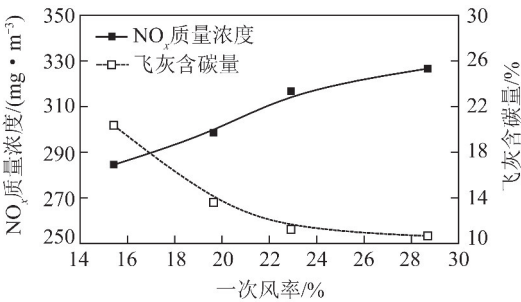


图 3 一次风率对 NO_x 排放的影响

Fig.3 Effect of primary air rate on NO_x emissions

一次风率较低时,预燃室内空气当量比较小,还原性气氛较强,有利于抑制着火初期 NO 的形成,此时 NO_x 排放值相对较低;煤粉着火相对推迟,焦炭燃烧反应速率较小,飞灰含碳量较高。随着一次风率

提高,一次风动量提高,预燃室内氧气浓度增大,一次风携带的氧气可直接将煤粉热解释放挥发分中的含氮化合物 HCN、NH₃ 等中的 N 氧化为 NO, 导致 NO_x 排放浓度升高;煤粉着火提前,焦炭燃烧反应速率增大,飞灰含碳量下降。

2.2 内外二次风率比对 NO_x 排放的影响

为获得燃烧器内外二次风率比对 NO_x 排放的影响,进行了工况 5~8 的试验研究,结果如图 4 所示。在试验条件下,直流内二次风通道阀门关闭,内二次风均由旋流内二次风通道进入,为旋转射流;外二次风为预燃室内部射流。在保持总风量一定的条件下,燃烧器内二次风量逐渐增大时,相应的外二次风量逐渐减小,内外二次风量的比值逐渐变大。当内外二次风率比分别为 0.46、0.72、1.00 和 1.40 时,NO_x 排放浓度分别为 305.6、235.2、211.2 和 219.7 mg/m³;飞灰可燃物含量分别为 17.1%、12.3%、16.0% 和 23.5%。当外二次风率最大,内二次风率最小时,外二次风动量扩散能力强,湍动强度大,提高了主燃区混合能力,有利于 NO 的生成,此时 NO_x 排放值相对较高;煤粉着火相对推迟,焦炭燃烧反应时间相对较短,飞灰含碳量较高。

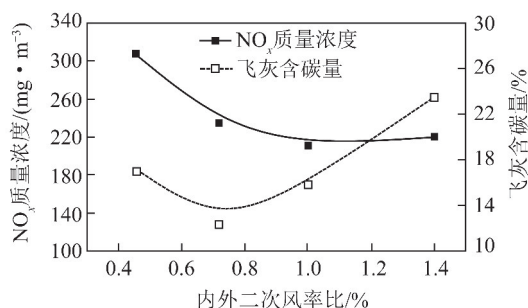


图4 内外二次风率比对 NO_x 排放的影响

Fig.4 Effect of inner and outer secondary air ratio on NO_x emissions

随着外二次风率降低,内二次风率增加,煤粉在主燃区湍动强度减弱,HCN、NH₃ 等含氮化合物中的 N 迁移形成 N₂ 的概率增加,NO_x 浓度降低;煤粉释放出的挥发分反应速率加快,煤粉着火提前,焦炭燃烧反应时间变长,飞灰含碳量有所下降。当外二次风率进一步降低,内二次风率进一步增大时,内二次风动量扩散能力强,湍动强度大,提高了预燃室内的混合能力,同时预燃室氧气浓度增大,HCN、NH₃ 等含氮化合物中的 N 会迁移形成 NO, 导致 NO_x 生成量的增加;煤粉在主燃区湍动强度减弱,使得焦炭燃烧反应速率降低,飞灰含碳量增大。

2.3 外二次风入射方式对 NO_x 排放的影响

工况 5 与工况 9~11 进行了燃烧器外二次风入

射方式对 NO_x 排放影响的研究,试验结果如图 5 所示。试验过程中,预燃室内部射流占总外二次风比率分别为 0、20%、50% 和 82% 时,相应的预燃室端面射流占总外二次风比率依次为 100%、80%、50% 和 18%;外二次风内部、端面射流风率比分别为 0、0.25、1.00 和 4.56。此时 NO_x 排放浓度分别为 252.1、230.9、250.7 和 305.6 mg/m³;飞灰可燃物含量分别为 23.1%、25.0%、27.7% 和 17.1%。

当外二次风均由端面入射时,空气射流边界较长,主燃区相对较大,燃烧整体较为均衡,有利于将 NO 生成控制在较低水平,同时飞灰含碳量较低。随着外二次风内部入射量增加,端面入射量下降,煤粉在预燃室出口的湍动强度提高,在还原性气氛下,有利于挥发分中 HCN、NH₃ 等含氮化合物中的 N 迁移形成 N₂;然而,主燃区范围缩小,使得飞灰含碳量增大。

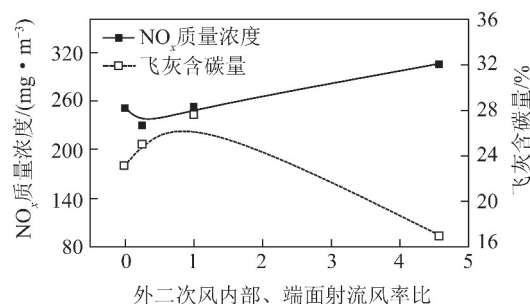


图5 外二次风入射方式对 NO_x 排放的影响

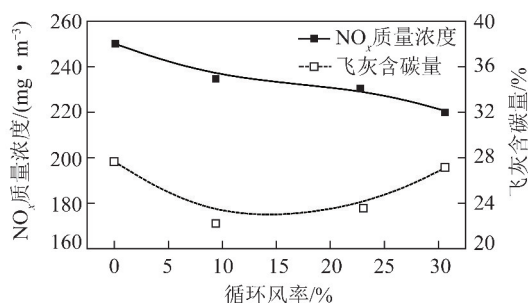
Fig.5 Effect of injection method of outer secondary air on NO_x emissions

外二次风内部入射量进一步增加,端面入射量进一步下降时,预燃室中的气粉混合物进入炉膛与外二次风强烈而快速混合,在局部氧气浓度较高的环境中发生燃烧反应,HCN、NH₃ 等含氮化合物中的 N 会迁移形成 NO, 使得 NO_x 排放值升高;煤粉在主燃区湍动强度增大,焦炭燃烧反应速率提高,飞灰含碳量减小。

2.4 循环风率对 NO_x 排放的影响

为研究燃烧器循环风率对 NO_x 排放的影响,进行了工况 11~14 的试验,结果如图 6 所示。由于循环烟气在主空气通道注入,注入位置位于内外二次风通道上游,故循环风同时注入内二次风和外二次风。由图 6 可知,循环风率分别为 0、9.5%、23.0% 和 30.6% 时,对应的 NO_x 排放浓度分别为 250.7、235.2、230.9 和 221.1 mg/m³;飞灰可燃物含量分别为 27.7%、22.3%、23.6% 和 27.2%。

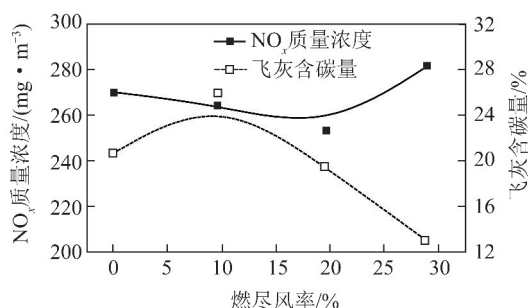
当循环烟气未被通入时,预燃室和主燃区氧气浓度相对较高,HCN、NH₃ 等含氮化合物中的 N 迁移

图 6 循环风率对 NO_x 排放的影响Fig.6 Effect of recirculating flue gas rate on NO_x emissions

形成 NO 的概率较大, NO_x 排放值相对较高; 煤粉在主燃区湍动强度相对较弱, 焦炭燃烧反应速率较小, 飞灰含碳量较高。循环风投入使用后, 随着循环风率的提高, 内外二次风中氧气浓度降低, 进而预燃室和炉膛主燃区氧气浓度有所下降, 煤粉热解释放挥发分中的含氮化合物 HCN 、 NH_3 等中的 N 迁移形成 N_2 的概率增加, 这时 NO_x 排放值降低; 内外二次风喷口入射气体量增大, 内外二次风湍动强度增强, 提高了主燃区混合能力, 焦炭燃烧反应速率提高, 飞灰含碳量减小。随着循环风率进一步提高, 主燃区氧气浓度进一步下降, 反应温度降低, 使得焦炭燃烧反应速率降低, 飞灰含碳量增大。

2.5 燃尽风率对 NO_x 排放的影响

工况 15~18 研究了燃烧器燃尽风率对 NO_x 排放的影响, 结果如图 7 所示。燃尽风喷口靠近炉膛截面的 4 个交角处并形成相应入射角度, 使燃尽风以四角切圆方式沿炉膛截面射入, 切圆旋转方向与燃烧器旋流风同向。当燃尽风率分别为 0、9.6%、19.6% 和 29.0% 时, NO_x 排放浓度分别为 270.4、264.7、253.5 和 281.6 mg/m^3 ; 飞灰可燃物含量分别为 20.7%、25.9%、19.5% 和 13.0%。

图 7 燃尽风率对 NO_x 排放的影响Fig.7 Effect of OFA rate on NO_x emissions

当燃尽风率为 0 时, 二次风率最大, 气粉混合物在炉膛中会与二次风提供的相当数量氧气发生燃烧化学反应, 这时除碳氢化合物、 CO 、 H_2 、碳烟等可燃气体或颗粒发生燃烧反应外, 还有一部分氧气会与

HCN 、 NH_3 等含氮化合物发生化学反应, N 会迁移形成 NO , 使 NO_x 排放值较高; 此时煤粉在主燃区湍动强度较强, 焦炭燃烧反应速率较大, 飞灰含碳量相对较低。随着燃尽风率的提高, 二次风率降低, 内外二次风动量扩散能力减弱, 湍动强度减小, 削弱了主燃区混合能力, 同时主燃区还原性气氛增强, 使得 HCN 、 NH_3 等含氮化合物中的 N 迁移形成 N_2 的概率增加, NO_x 排放量下降; 焦炭燃烧反应速率降低, 飞灰含碳量增大。当燃尽风率进一步提高时, 主燃区氧量不足, 大量焦炭和含氮化合物不能发生有效转化, 燃尽区氧化性气氛较强, 使得 HCN 、 NH_3 等含氮化合物中的 N 迁移形成 NO , 导致 NO_x 生成量增加; 燃尽风以四角切圆方式射入, 湍动强度较大, 提高了燃尽区混合能力, 焦炭燃烧反应速率增大, 飞灰含碳量减小。炉膛燃尽风未投入使用时, 通过煤粉预燃与燃烧器空气分级协同作用, NO_x 原始排放浓度在 $300 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下, 低于典型常规煤粉燃烧器未进行炉膛空气分级燃烧下的 NO_x 排放^[29]。

试验工况下, 炉膛运行负荷低于锅炉额定负荷, 炉内燃烧反应温度相比额定负荷有所下降, 可能导致飞灰可燃物含量偏高。研究发现, 外二次风大量由预燃室内部入射时, 主燃区湍动强度增大使得焦炭燃烧反应速率提高, 飞灰可燃物含量有效降低, 但此时 NO_x 排放与外二次风由预燃室端面入射相比较。因此, 可将燃烧器预燃室端面外二次风喷口的切向偏转角度增大, 使端面入射的外二次风旋流强度增大, 提高主燃区的湍动混合强度; 同时可将预燃室端面外二次风喷口截面积减小, 提高外二次风进入炉膛的射流速度, 在高速射流的作用下卷吸更多高温烟气回流, 促进焦炭燃烧反应的进行, 实现控制 NO_x 生成的同时, 降低飞灰可燃物含量。在现有燃尽风位置靠近主燃区方向增设一级燃尽风供给, 形成 CCOFA 与 SOFA 两级炉膛空气分级, 在维持主燃区还原性气氛进行燃烧反应的前提下, 提前燃尽风进入炉膛的时间与空间尺度; 同时, 增大 CCOFA 和 SOFA 两级燃尽风入射的切圆混合能力, 进一步提升燃尽区的局部湍动强度, 使焦炭燃烧更加充分, 降低飞灰可燃物含量, 并将 NO_x 控制在较低水平。在燃烧器和炉膛空气分级的基础上, 通过合理的空气配比, 保证 NO_x 生成量较少的同时, 有效控制飞灰可燃物含量, 保证较高的锅炉热效率。

3 结 论

本文提出了一种新型低 NO_x 旋流燃烧器, 该燃烧器带有预燃室结构, 预燃室将煤粉热解释放挥发

分的时空尺度延长,在燃烧器多尺度空气分级的协同作用下,可在煤粉热解着火初期有效控制 NO_x 生成。燃烧器外二次风旋转射流使燃烧区域实现较大尺度湍动燃烧,燃烧器对煤种适应性较强,低负荷稳燃能力较强。通过改变燃烧系统的配风方式,将煤粉预燃与燃烧器空气分级、炉膛空气分级进行耦合脱硝,研究其对 NO_x 排放特性的影响。结果表明:

1)随着一次风率提高, NO_x 生成量逐渐增大,一次风率的合理区间为17%~19%;随着内外二次风率比增大, NO_x 排放浓度先下降后上升,内外二次风率比的合理区间为0.8~1.0。

2)随着外二次风内部入射风量与端面入射风量比值由0增大到4.56, NO_x 生成浓度先下降后上升;相比于从预燃室内部入射,外二次风由预燃室端面入射可更好地抑制 NO_x 生成。

3)随着循环风率增大, NO_x 排放量逐渐下降,循环风率的合理区间为15%~20%;随着燃尽风率提高, NO_x 生成量先降低后升高,燃尽风率的合理区间为19%~22%。

4)在燃烧系统合理的配风区间内, NO_x 排放值为212~231 mg/m^3 ,相比于试验工况下最大 NO_x 排放量降低29%~35%。

参考文献(References):

- [1] 毛洪钧,李悦宁,林应超,等.生物质锅炉氮氧化物排放控制技术进展[J].工程科学学报,2019,41(1):1-11.
MAO Hongjun, LI Yuening, LIN Yingchao, et al. Overview of advances in emission control technologies for nitric oxides from biomass boilers[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(1): 1-11.
- [2] 周勇.找准致霾根本原因实现低成本快速精准治霾的路径与对策[J].科学与管理,2019(3):1-9.
ZHOU Yong. Find the primary cause for haze, deal with the haze in an economic, fast, accurate way[J]. Science and Management, 2019(3): 1-9.
- [3] 吕清刚,李诗媛,黄聚然.工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议[J].中国科学院院刊,2019,34(4):392-400.
LYU Qinggang, LI Shiyuan, HUANG Canran. Current situation and development suggestions of coal clean and efficient combustion technology in industry field[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 392-400.
- [4] 张敏敏,李国强,曲立晟,等.石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺在工程的应用[J].环境与生活,2014(18):182.
ZHANG Minmin, LI Guoqiang, QU Lisheng, et al. Application of limestone-gypsum wet flue gas desulfurization process in engineering[J]. Green Living, 2014(18): 182.
- [5] 张海,吕俊复,崔凯,等.旋流煤粉燃烧器低 NO_x 排放的设计分析[J].热力发电,2010,39(11):32-36.
ZHANG Hai, LYU Junfu, CUI Kai, et al. Analysis of design for swirling pulverized coal burners with low NO_x emission[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(11): 32-36.
- [6] TSUMURA T, OKAZAKI H, DERNJATIN P, et al. Reducing the minimum load and NO_x emissions for lignite-fired boiler by applying a stable-flame concept[J]. Applied Energy, 2003, 74(3): 415-424.
- [7] 周俊虎,赵玉晓,刘建忠,等.低 NO_x 煤粉燃烧器技术的研究进展与前景展望[J].热力发电,2005,34(8):1-6,67.
ZHOU Junhu, ZHAO Yuxiao, LIU Jianzhong, et al. Research advancement and future prospect of low NO_x burners for pulverized coal[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(8): 1-6, 67.
- [8] ZENG L, LI Z, ZHAO G, et al. The influence of swirl burner structure on the gas/particle flow characteristics[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2011, 36(10): 6184-6194.
- [9] 吴碧君,刘晓勤.燃煤锅炉低 NO_x 燃烧器的类型及其发展[J].电力环境保护,2004,20(3):24-27.
WU Bijun, LIU Xiaoqin. The types and development of low- NO_x coal fired burner[J]. Electric Power Environmental Protection, 2004, 20(3): 24-27.
- [10] 白月娟,王永英.低 NO_x 煤粉燃烧器技术研究进展[J].煤质技术,2018(2):42-47.
BAI Yuejuan, WANG Yongying. Research development of typical low NO_x burners for pulverized coal[J]. Coal Quality Technology, 2018(2): 42-47.
- [11] UKEGUCHI Y, SAKAI K, KOKURYO S, et al. Mitsubishihitachi power systems ltd. boiler business and technology development[J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, 52(2): 55-63.
- [12] 唐家毅,卢啸风,刘汉周,等.国外低 NO_x 煤粉燃烧器的研究进展及发展趋势[J].热力发电,2008,37(2):13-18.
TANG Jiayi, LU Xiaofeng, LIU Hanzhou, et al. Research advancement and developing trend of low NO_x burners for pulverized coal at abroad[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(2): 13-18.
- [13] CHEN Z, LI Z, WANG F, et al. Gas/particle flow characteristics of a centrally fuel rich swirl coal combustion burner[J]. Fuel, 2008, 87(10/11): 2102-2110.
- [14] ZHAO L, ZHOU Q, ZHAO C. Flame characteristics in a novel petal swirl burner[J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1/2): 277-288.
- [15] 周志军,林震,苟湘,等.文丘里浓淡煤粉燃烧器的分离特性和阻力特性研究[J].热力发电,2006,35(11):11-13,75.
ZHOU Zhijun, LIN Zhen, GOU Xiang, et al. Study on separation and resistance properties of venturi rich/lean pulverized coal burners[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(11): 11-13, 75.
- [16] 杨定华,吕俊复,张海,等.富集型燃烧器的原理与应用[J].动力工程,2008,28(1):45-49.
YANG Dinghua, LYU Junfu, ZHANG Hai, et al. Principle and application of the concentrated pulverized coal burner[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 45-49.
- [17] SRIVASTAVA R K, HALL R E, KHAN S, et al. Nitrogenoxides emission control options for coal-fired electric utility boilers[J].

- Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, 55 (9): 1367-1388.
- [18] LI S, XU T, HUI S, et al. NO_x emission and thermal efficiency of a 300 MWe utility boiler retrofitted by air staging[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1797-1803.
- [19] MAN C K, GIBBINS J R, WITKAMP J G, et al. Coal characterisation for NO_x prediction in air-staged combustion of pulverised coals[J]. Fuel, 2005, 84(17): 2190-2195.
- [20] LIU C, HUI S, PAN S, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction[J]. Fuel, 2015, 139: 206-212.
- [21] DAOOD S S, JAVED M T, RIZVI A H, et al. Combustion of pakistani lignite(thar coal) in a pilot-scale pulverized fuel down-fired combustion test facility[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1541-1547.
- [22] WANG J, FAN W, LI Y, et al. The effect of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion[J]. Energy, 2012, 37(1): 725-736.
- [23] FAN W D, LIN Z C, KUANG J G, et al. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(6): 625-634.
- [24] LIU C, HUI S, PAN S, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction[J]. Fuel, 2015, 139: 206-212.
- [25] ZHU S, LYU Q, ZHU J, et al. Experimental study on NO_x emissions of pulverized bituminous coal combustion preheated by a circulating fluidized bed[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 247-256.
- [26] LIU C, HUI S, ZHANG X, et al. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 278-286.
- [27] OUYANG Z, LIU W, MAN C, et al. Experimental study on combustion, flame and NO_x emission of pulverized coal preheated by a preheating burner[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 179: 197-202.
- [28] 程晓磊. 低氮燃烧技术在煤粉工业锅炉上的应用[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4): 109-113.
CHENG Xiaolei. Application of low- NO_x combustion technology on pulverized coal industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 109-113.
- [29] 王鹏涛, 王乃继, 程晓磊, 等. 煤粉工业锅炉空气深度分级数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 68-76.
WANG Pengtao, WANG Naiji, CHENG Xiaolei, et al. Numerical simulation of deep air-staged technology in pulverized coal industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 68-76.