

径向浓淡旋流煤粉燃烧器直流二次风对流场及 NO_x 排放的影响^{*}

孙 锐 李争起 孙绍增 陈力哲 吴少华 秦裕琨

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘要 针对径向浓淡旋流煤粉燃烧器直流二次风对出口冷态流动特性的影响进行了试验研究,并在一台 220 t/h 锅炉和一台 670 t/h 锅炉上进行了工业性试验.冷模试验表明,直流二次风对旋流燃烧器出口气流的流动和混合特性有重要影响,它可改变气流的旋流强度、中心回流区的大小,调节一、二次风之间混合的强弱.热态工业性试验研究了直流二次风对燃烧器出口区域的气氛场的影响,得出了直流二次风开度对燃烧器区 NO_x、锅炉排烟中 NO_x 及燃烧效率的影响规律.

关键词 旋流煤粉燃烧器;浓淡燃烧;空气动力特性;NO_x 控制.

Effects of the non-swirl secondary air jet on the flow properties and NO_x emission of radial bias combustion swirl burner

SUN Rui , LI Zhengqi , SUN Shaozeng , CHEN Lizhe , WU Shaohua , QIN Yukun (School of Energy Science and Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001)

Abstract The isothermal experiments and pilot tests have been conducted to study the effects of the non-swirl secondary air on the characters of the new type swirl burner-radial bias combustion (RBC) swirl pulverized coal burner. The isothermal experiments show that the non-swirl jet had great influence on the flow pattern and mixing characters of the flow issuing from the swirl burner. Pilot tests also showed that the formation of a large amount of NO_x was related to the oxygen condition in the start stage of combustion. The increasing non-swirl second air created a reducing condition downstream the burner inlet ,so the emission of NO_x was abated. In addition ,as the mixing among jets was intense in the downstream ,higher combustion efficiency was maintained.

Keywords swirl pulverized coal burner ,off-stoichiometric combustion ,aerodynamic properties ,NO_x control.

在我国电站锅炉中,多采用煤粉燃烧方式,燃用的煤质多为劣质煤,而且煤质经常变动,所以现在电力工业的一个重要任务就是保证煤粉燃烧的高效和稳定.另外,氮氧化物(NO_x)是锅炉排入大气中的有害污染物之一,降低发电厂排烟中的 NO_x 是减轻大气污染的重要任务.

研究表明,煤燃烧过程中形成的 NO_x 有以下 3 种:燃料型 NO_x (Fuel NO_x)、热力型 NO_x (Thermal NO_x)、快速型 NO_x (Prompt NO_x). 其中,快速型 NO_x 所占比例很小,燃烧型 NO_x 约占 75% 以上,热力型 NO_x 约占 25% 以下^[1]. 热力型 NO_x 主要与烟气温度的降低,热力型 NO_x 生成量减小,氧浓度(化学当量比)对它影响很小. 燃料型 NO_x 主要与氧浓度有关,在很大的范围内几乎与温度无关,当火焰中的气氛处于缺氧条件下,含氮的基团和 NO、H 反应生成分子 N₂,燃料型 NO_x 的生成量将降低. 因而,减少燃料型氮氧化物排放的主

* 本课题为“九五”国家重点科技攻关资助项目

要措施是降低火焰中的氧浓度,增强还原性气氛,延长含氮基团在还原性气氛中的停留时间,从而降低燃料氮向燃料型 NO_x 的转化率.

旋流煤粉燃烧器卷吸周围的流体形成中心回流区,利用回流的高温烟气加热、引燃风粉混合物,具有很强的火焰稳定能力;同时气粉分离(或煤粉浓缩)和二次风分级配风技术,可以使燃烧过程得以稳定和强化,并同时实现低 NO_x 排放^[2].文献[3]提出了将煤粉气流分成浓淡两股的径向浓淡旋流煤粉燃烧器,结构见图 1.由于新型旋流燃烧器同时具有稳燃、高效、防结渣、低 NO_x 排放等优良性能,日益得到广泛应用^[4],文献[5—7]研究了喷口结构、配风条件对新型旋流燃烧器流动及燃烧特性的影响.直流二次风对燃烧器出口空气动力特性的作用直接影响到一次风风粉混合物的着火、燃尽及污染物的排放,所以本文针对直流二次风与旋流二次风的不同配比条件下,对燃烧器的出口冷态流场及热态 NO_x 排放特性进行了综合试验研究.

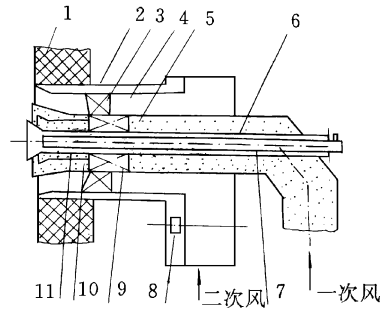


图 1 径向浓淡旋流煤粉燃烧器简图

- 1. 炉墙 2. 直流二次风通道 3. 旋流器 4. 旋流二次风通道 5. 一次风通道 6. 中心管 7. 点火装置 8. 直流二次风挡板 9. 煤粉浓缩器 10. 淡一次风通道 11. 浓一次风通道

Fig. 1 Diagram of the radial bias combustion swirl (RBC) burner

1 冷态试验

1.1 冷态试验设备和方法

试验用燃烧器模型是按原型燃烧器的 1/5 制成(模型燃烧器直径 $d = 200$ mm),采用了弯头五孔球型测针对燃烧器出口旋转射流的时均速度进行测量.试验中保证一、二次风和浓、淡一次风出口动量比及总风量不变,调整直流、旋流二次风的风量分配来改变直流二次风风率.试验工况参数见表 1.

表 1 不同直流二次风率下冷态试验参数

Table 1 Test Parameters at the different non-swirling secondary air ratios

| 工况 | 直流二次风 | 浓一次风喷口 | 淡一次风喷口 | 旋流二次风 | 直流二次风 |
|----|--------------|---------|---------|-----------|-----------|
| | 风率 Q_z , % | 风速, m/s | 风速, m/s | 喷口风速, m/s | 喷口风速, m/s |
| 1 | 0 | 10 | 8.8 | 11.7 | 0 |
| 2 | 15 | 10 | 8.8 | 9.9 | 7.2 |
| 3 | 30 | 10 | 8.8 | 8.2 | 14.3 |
| 4 | 40 | 10 | 8.8 | 7.0 | 19.1 |

注: Q_z ——直流二次风风量占总二次风风量的百分比

1.2 旋转射流的流动特性

工况 1、3 燃烧器出口速度和静压分布的测量结果见图 2.在直流二次风风率很小($Q_z = 0$)的工况下,二次风出口截面位置($r = 67 \sim 101$ mm)轴向速度剖面呈比较光滑的抛物线分布,并存在轴向速度最大值,轴向出口速度的另一峰值恰好位于一次风出口($r = 36 \sim 67$ mm)位置,数值是二次风出口最大速度的一半左右.出口截面处的切向速度近似呈朗肯涡结构,最大切向速度处于二次风环形喷口中心位置.可见对于整个射流出口截面的流动结构起主导作用的是二次风环形射流.在射流出口中心线附近可测量到轴向反向流动的回流区,其边界位置存在较

大的速度梯度,具有较强的湍流输运能力,有利于一次风气流与回流区内的流体及二次风气流之间进行热质交换.直流二次风风率较大($Q_z = 30\%$)时,二次风出口截面轴向速度剖面出现超过平均速度两倍以上速度峰值,速度峰值的位置恰是直流二次风喷口的位置($r = 92 \sim 100 \text{ mm}$),这是由于较大的直流二次风动量引起的,这一股直流气流减小了射流的旋转动量,使射流的旋流强度^[8]降低,限制了射流的扩展,将射流向中心压缩,使中心回流区减小并很快封闭.随直流二次风率的增加,回流区尺寸迅速减小,回流区长度由工况 1 的 400 mm 缩小到工况 4 的 200 mm,最大直径从 280 mm 减小到 160 mm,射流扩展角由 74.0 变到 56.3°.

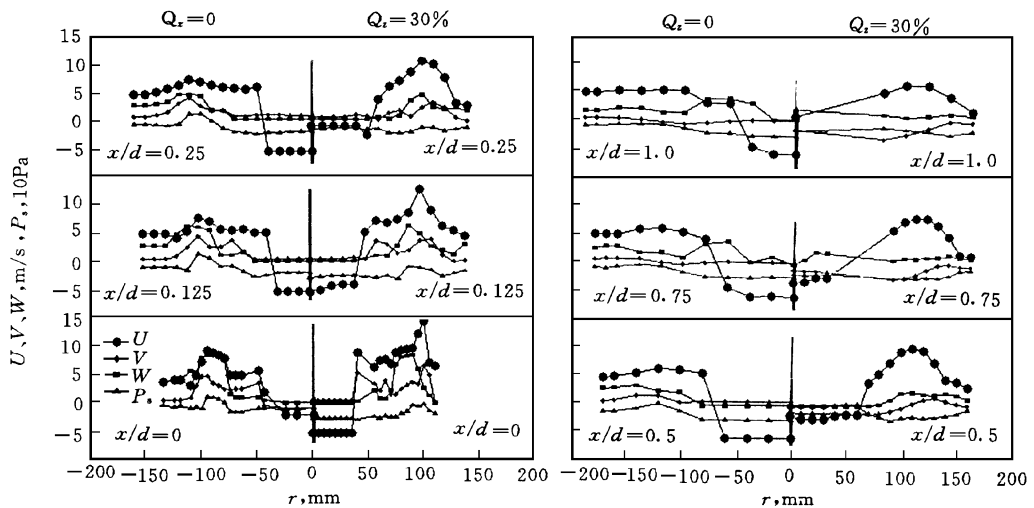


图 2 工况 1 和工况 3 出口气流的轴向、径向和切向速度 (u, v, w) 及静压 (P_s) 分布

(x ——燃烧器轴线方向距离, r ——燃烧器半径方向距离)

Fig. 2 Profiles of axial, radial, tangential velocity and static pressure of the jets of test 1 and test 3

1.3 直流二次风对一、二次风混合的影响

直流二次风风率加大时,一、二次风气流前期混合减弱,混合速度有所降低,使浓缩后煤粉气流保持在较高浓度下,有利于在煤粉气流着火的前期形成富燃料的还原性气氛,减少燃料型 NO_x 的生成;同时由于燃烧器扩口的作用和气流的旋转特性,使一、二次风后期的均匀混合并没有受到影响,直流二次风与旋流二次风的相互作用使湍流脉动加强,促进了气流的后期混合,保证了高的燃烧效率^[5].

2 热态工业性试验

2.1 试验锅炉

新华电厂 1 号锅炉是在 220 t/h 燃油锅炉的基础上改造成燃煤锅炉 (HG-220/9.8-YM 型),8 只新型旋流燃烧器在前墙分上下两层布置,两台中速磨煤机分别为上、下层燃烧器供粉.旋流二次风及直流二次风风道入口处分别装有调节挡板,可调节旋流、直流二次风风量比率.清河发电厂 6 号炉为 E-670/140 型锅炉,16 只旋流燃烧器分上、下两层在两侧墙对冲布置,仅将下层 8 只燃烧器改为新型燃烧器,其余 8 只仍为原有燃烧器.

2.2 测试仪器和试验方法

NO_x 浓度测量采用的德国 MSI 电子公司 MSF Compact 型气体分析仪,NO 浓度的量程为 0—2000 ppm,NO₂ 浓度的量程为 0—200 ppm,NO_x 体积浓度的测量结果取 NO 和 NO₂ 体积浓度之和,并折算至 O₂ 浓度为 6% 条件下.CO 浓度的量程为 0—4000 ppm,NO_x、CO 仪器分辨率为 1 ppm,O₂ 浓度的分辨率为 0.1%. 尾部烟气取样是从锅炉尾部烟道中抽取,按 GB10184-88《电站锅炉性能试验规程》的规定,在烟道内采用 6 点取样,经混合器混合后再抽入气体分析仪进行测量. 燃烧器区的烟气样通过一水冷枪取出.

新华 1 号炉试验机组负荷为 50 MW,直流二次风挡板开度分别为 0、50%、100%. 清河 6 号炉试验机组负荷稳定在 140 MW,直流二次风挡板开度分别为 0、100%. 试验时燃用煤的煤质分析见表 2,两种试验煤样均为挥发份较高的烟煤.

表 2 试验时煤样工业分析及元素分析

Table 2 The Proximate and ultimate analysis of tested coals

| | 全水分, % | 干燥无灰基 挥发分, % | 收到基灰 分, % | 收到基碳, % | 收到基氢, % | 收到基氮, % | 收到基硫, % | 收到基氧, % | 低位发热 量, kJ/kg |
|--------|-----------|-----------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| 新华电厂煤样 | 3.2 | 33.83 | 36.38 | 52.55 | 3.16 | 0.60 | 0.50 | 3.62 | 19881 |
| 清河电厂煤样 | 14.76 | 42.54 | 35.51 | 35.42 | 2.30 | 0.53 | 1.28 | 7.20 | 13650 |

2.3 热态试验结果

2.3.1 新华 1 号炉热态试验 在旋流二次风风门全开、直流二次风风门全关的情况下,沿 2 号燃烧器中心线轴线方向(O₂、CO、NO_x) 气氛分布如图 3,测量的位置正处于中心回流区内,因为旋流燃烧器早期混合强烈,特别是回流区内的烟气成份基本分布均匀,所以测量的结果能够反应煤粉气流着火和燃烧初期的情况. 在燃烧器出口附近,由于煤粉气流还没有着火及中心风管仍通有一定的冷却风,使氧保持在接近空气中氧浓度的高水平. 随着气流发展,煤粉气流受热析出挥发份开始燃烧,在 0.2D—0.5D 区域是挥发份大量析出并强烈燃烧的位置,氧由于挥发份的燃烧迅速消耗,导致回流区内的氧浓度在 0.4D 处达到最低点,氧浓度最低点的位置反映了煤粉气流着火点的远近. 同时在 0.2D—0.5D 区域内随挥发分析出的含氮基团与含氧化合物反应大量生成燃料型 NO_x,NO_x 的生成量迅速增加,浓度在 0.4D 处达到最大值,并在其下游基本保持不变. 由于旋转射流混合作用强烈,挥发份能得到充足的氧进行反应,CO 处于较低水平. 随着气流向下游发展,由于二次风的混入,氧浓度有所提高,这为焦炭后期充分燃尽提供了保证. 图 4、5、6 是直流二次风风门在不同开度下燃烧器轴线方向的气氛分布. 由冷态试验可知,随着直流二次风风量的增大,旋流强度减弱,一次风与外层气流混合推迟,所以直流二次风风门开大混合进入到射流中心的氧将减小,燃烧器中心线氧浓度降低(图 4). 新型旋流燃烧器采用不旋转的一次风,随着旋流强度的减小,将有更多的煤粉颗粒进入回流区. 较高的煤粉浓度能保证着火稳定,使燃烧器出口处回流区内保持较高温度水平,挥发份处于富燃料状态下燃烧. 同时焦炭也是在较低的氧浓度、富燃料状态下燃烧,回流区内的还原性气氛得以加强,这由 CO 浓度大幅度增加得到证实(见图 5). 同时随着直流二次风风率的增大,由于还原性气氛加强,减少了含氮基团与含氧基团反应的机会,燃料型 NO_x 的生成量减小,对于热力型 NO_x,中心回流区直径减小,回流量减小,燃烧器区温度有所下降^[4],使热力型 NO_x 生成量也减小,所以在煤粉气流着火、燃烧强烈区域 NO_x 的生成量明显减小(见图 6).

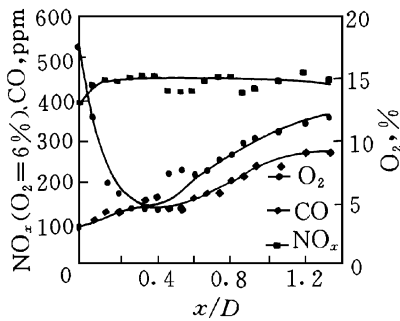


图 3 2号燃烧器沿中心线方向烟气中 NO_x、CO、O₂ 浓度分布

(D——实际燃烧器直径,740 mm)

Fig. 3 Axial profiles of NO_x、NO、O₂ concentration of No. 2 burner

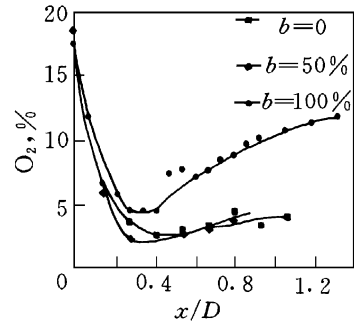


图 4 不同直流二次风风门开度下,2号燃烧器沿中心线方向烟气中 O₂ 浓度的分布

(b——直流二次风风门开度)

Fig. 4 Axial profiles of O₂ concentration of No. 2 burner at different positions of non-swirling secondary air damper

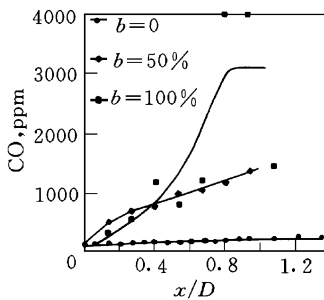


图 5 不同直流二次风风门开度下,2号燃烧器沿中心线方向烟气中 CO 浓度的分布

Fig. 5 Axial profiles of CO concentration of No. 2 burner at different positions of non-swirling secondary air damper

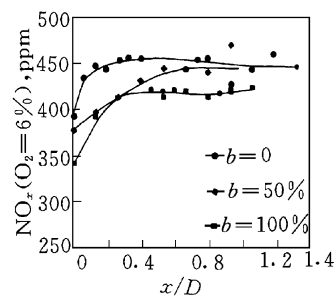


图 6 不同直流二次风风门开度下,2号燃烧器沿中心线方向烟气中 NO_x 浓度的分布

Fig. 6 Axial profiles of NO_x concentration of No. 2 burner at different positions of non-swirling secondary air damper

表 3 直流二次风对 220t/h 锅炉 NO_x 排放及锅炉固体不完全燃烧损失的影响

Table 3 The Effects on the NO_x emission and burnout of the 220t/h boiler

| 直流二次风风门开度, % | 0 | 50 | 100 |
|---|------|------|------|
| 省煤器后氧量, % | 3.5 | 3.5 | 4.0 |
| NO _x (折至 O ₂ = 6%), ppm | 359 | 337 | 331 |
| 固体不完全燃烧损失, % | 2.98 | 1.96 | 2.03 |

直流二次风风门的开度对尾部排烟中的 NO_x 的影响及对固体不完全燃烧损失的影响见表 3,由省煤器出口氧量可以看出,燃烧器直流二次风风门开度的增大对尾部烟气中含氧量影响很小,说明其开度对整个锅炉的一二次风配风比率影响不大.由于燃烧器出口处还原性气氛的增强,减少了煤粉气流着火初期的燃料型 NO_x 的生成量,尾部 NO_x 的排放量因之下降,由 359 ppm 下降至 331 ppm,下降了近 10%;尾部烟气中 CO 的含量平均为 18.7 ppm,气体不完全燃烧热损失可以忽略不计.由于浓煤粉气流良好的稳燃作用,煤粉气流的着火位置没有明显推后,直流二次风风率的增加加强了气流的后混合,使煤粉颗粒更充

分的燃尽,固体不完全燃烧损失由 2.98% 下降至 2.03%,下降约 1%,燃烧效率得到提高。

2.3.2 清河 6 号炉热态试验 虽然锅炉在低负荷下运行(电负荷为 14 MW,约为 67% 额定负荷),但炉内火焰依然明亮,测量下层燃烧器区的烟气温度达 1100℃,飞灰及炉渣可燃物含量分别为 1.35%、4.9%,排烟中 CO 含量为 21 ppm,燃烧效率达 98.47%。尾部烟气取样分析结果如表 4,燃烧器直流二次风挡板由 0 开至 100%,甲、乙侧氧量波动不大,其 NO_x 排放量由 234 ppm 降至 190 ppm,下降近 20%。

新华电厂 1 号炉是由油炉改成,炉膛体积小,炉膛容积和截面热负荷均较高,燃烧器区温度高,有利于热力型 NO_x 的生成,锅炉尾部排烟中 NO_x 排放量平均为 342.3 ppm (701.8 mg/m³,折 O₂ = 6%),较之清河 6 号炉排烟中 NO_x 平均 211.4 ppm (433.4 mg/m³,折 O₂ = 6%) 的排放量有所增加。但两台锅炉由于改装了径向浓淡旋流煤粉燃烧器,在保证高的燃烧效率下,NO_x 的排放量均大大低于我国普通旋流煤粉燃烧器 NO_x 排放水平。

表 4 直流二次风对 670 t/h 锅炉 NO_x 排放的影响

Table 4 The effects on the NO_x emission of the 670 t/h boiler

| 直流二次风挡板开度, % | | 0 | 100 |
|--|----|-------|-------|
| 预热器后 O ₂ , % | 甲侧 | 8.6 | 7.45 |
| | 乙侧 | 10.3 | 9.70 |
| | 平均 | 9.45 | 8.58 |
| 预热器后 CO, ppm | 甲侧 | 18 | 35.5 |
| | 乙侧 | 14 | 16.0 |
| | 平均 | 16 | 25.8 |
| 预热器后 NO _x , ppm (折至 O ₂ = 6%) | 甲侧 | 233.5 | 174.0 |
| | 乙侧 | 232.5 | 205.5 |
| | 平均 | 233.0 | 189.8 |

3 结论

(1) 在喷口结构不变的情况下,直流二次风对旋流燃烧器的出口气流特性有很强的影响。随着直流二次风风率的增加,旋流强度减小,射流被向内侧压缩,中心回流区范围有所减小。
(2) 随着直流二次风的增加,有利于在煤粉燃烧的初期形成还原性气氛,在试验的煤种和锅炉负荷条件下,直流二次风风门由全关到全开,煤粉气流着火初期 NO_x 的生成量降低,尾部排烟中的氮氧化物含量降低。同时,由于后期混合的加强,固体不完全燃烧损失下降,燃烧效率得到提高。
(3) 径向浓淡旋流煤粉燃烧器由于在煤粉着火初期保持了较高的煤粉浓度,可以大幅度降低锅炉排烟中 NO_x 的含量,减小锅炉排烟对大气的污染。

致谢:山东工业大学李京同志参加了冷态试验和部分热态试验的工作,在此表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- 1 Pershing D W, Wendt J O L. Pulverized coal combustion: The influence of flame temperature and coal composition on thermal and fuel NO_x, sixteenth symposium (international) on combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1976. 389—399
- 2 韩才元. 高浓度煤粉燃烧理论和技术发展现状. 电站系统工程, 1993, 9(4): 40—45
- 3 孙绍增等. 一种径向浓淡旋流煤粉燃烧器. 专利号: ZL 93 2 44359. 1, 1993
- 4 李争起等. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器的工业性试验研究. 动力工程, 1998, 18(4): 63—67
- 5 马春元等. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器的冷态试验研究. 动力工程, 1997, 17(1): 10—15
- 6 孙 锐等. 旋流燃烧器喷口结构对出口气流特性影响的冷态试验研究. 中国工程热物理学会燃烧学术会议论文集. 宜昌: 中国工程热物理学会, 1995. —50—55
- 7 李争起等. 配风方式对旋流煤粉燃烧器 NO_x 的排放及煤粉燃尽的影响. 动力工程, 1997, 17(2): 27—31
- 8 岑可法等. 燃烧流体力学. 北京: 水利电力出版社, 1991

1997-09-09 收到原稿
1998-01-12 收到修改稿