

文章编号: 0253-9993(2007)09-0984-05

锅炉结构和型式对氮氧化物排放浓度影响的试验

王学栋^{1,2}, 栾涛¹, 程林¹

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院热能所, 山东 济南 250002)

摘要: 利用不同炉型和燃烧器型式锅炉 NO_x 排放浓度测量数据, 分析了锅炉结构和燃烧器型式对 NO_x 排放浓度的影响。 “W” 火焰锅炉 NO_x 排放浓度最高, 其次是四角切圆直流燃烧器锅炉; 采用低 NO_x 燃烧技术的旋流燃烧器锅炉其 NO_x 排放浓度低于四角切圆燃烧锅炉; 循环流化床锅炉由于燃烧温度低, 其 NO_x 排放浓度最低; 烧烟煤的四角切圆燃烧锅炉的 NO_x 排放浓度低于贫煤锅炉。 对现有锅炉燃烧器进行改造, 可以同时实现锅炉稳燃, 提高燃烧效率, 降低 NO_x 排放的目的。

关键词: 燃煤锅炉; 锅炉结构; 氮氧化物; 燃烧器型式; 污染物排放

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

Experimental of effects of boiler structures and burner models on NO_x emission from coal-fired boiler

WANG Xue-dong^{1,2}, LUAN Tao¹, CHENG Lin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Thermal Energy Department, Shandong Electric Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: The emissions of boilers with different furnace forms and burners were measured to analyze the effect of boiler structures and burner models on NO_x emission. Analysis results show that the NO_x emission of W-flame boiler is the highest. The boiler of quadrilateral tangential combustion fashion with direct-current burner is the second. The NO_x emission of boiler with revolving combustion burner using low-NO_x technology is more lower. The NO_x emission of CFB boiler is the lowest, because of its low combustion temperature. The boiler with quadrilateral tangential combustion fashion burning bituminous coal emits less NO_x than the boiler burning lean coal. Burner retrofitting on two existing boilers gives positive results on combustion stability, combustion efficiency increase, and NO_x emission reduction.

Key words: coal-fired boiler; boiler structure; nitric oxides; burner model; pollution emission

燃煤对环境的主要污染有烟尘污染、有害气体 (NO_x, SO₂, CO 等) 污染、CO₂ 及热污染等, NO_x 污染是其中的一个主要污染项目^[1,2]。我国大气污染物中 NO_x 有 60% 来自于煤的燃烧, 火电厂发电用煤占了全国燃煤的近 60%^[3], 随着经济的稳定快速发展和电力工业燃煤量的增加, NO_x 排放量越来越大。我国正逐步加大对火力发电锅炉排放 NO_x 的控制和治理力度, 于 1996 年 8 月开始实施电站锅炉 NO_x 排放浓

收稿日期: 2006-11-07 责任编辑: 柳玉柏

基金项目: 国际科技合作重点资助项目 (2004DFA07700)

作者简介: 王学栋 (1966-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 高级工程师。Tel: 0531-82999310, E-mail: wxdrns@sina.com

度不大于 650 mg/m^3 的排放指标规定, 2003 年重新修订后的标准进行分时段控制, 对氮氧化物排放又提出了更严格的要求。

根据 NO_x 生成机理, 其生成量受燃烧过程和燃煤锅炉运行参数的影响。对于电站燃煤锅炉, 影响 NO_x 生成的因素非常复杂, 其中锅炉结构和燃烧器型式对炉内燃烧过程有重要影响, 因此对 NO_x 排放起着重要作用^[4]。本试验针对不同燃烧器、不同炉型的锅炉, 通过测量其 NO_x 排放浓度, 探讨锅炉结构和燃烧器型式对 NO_x 排放的影响, 并对燃烧器进行改造, 以达到稳定燃烧, 提高燃烧效率, 降低 NO_x 排放的目的。

1 典型结构型式锅炉的 NO_x 排放浓度测试

目前, 我国采用低 NO_x 燃烧技术的锅炉燃烧器大都属于初期的低 NO_x 燃烧器, 或比较简单的 NO_x 燃烧技术, 即主要实现分级送风助燃或煤粉浓淡分离燃烧。山东电网从 20 世纪 80 年代中期开始, 逐步投运了采用低 NO_x 燃烧技术的 300 MW 机组锅炉, 但测量数据表明, 山东电网燃煤锅炉的 NO_x 排放量仍处在较高的水平上。

对十几台典型燃煤锅炉 NO_x 排放浓度进行了测试, 测试机组单机容量为 110 ~ 660 MW, 锅炉型式包括墙式燃烧锅炉、四角切圆燃烧锅炉、“W”火焰锅炉、循环流化床锅炉等; 燃烧煤种包括无烟煤、贫煤、烟煤和褐煤各类煤种; 燃烧器型式包括旋流燃烧器和直流燃烧器。测试数据基本上代表了同类型锅炉的排放状况, 由测试数据分析炉膛结构和燃烧器型式, 以及所采用低氮燃烧技术对 NO_x 排放浓度的影响。

1.1 试验方法

试验依据 GB1084 - 88 《电站锅炉性能试验规程》, 试验中采用 KM9106 烟气分析仪进行 NO_x 排放浓度的测试。在空预器出口烟道采用网格法进行烟气取样, 样品经混合器后进入烟气分析仪, 对 O_2 , NO_x 的排放浓度进行测量, 每一个试验工况取 4 ~ 5 组数据平均, 并根据 GB13223 - 2003 《火电厂大气污染物排放标准》将含氧量修正到 6% 或过量空气系数 α 修正到 1.4。

1.2 燃煤锅炉 NO_x 排放浓度测试数据

为了分析锅炉结构和燃烧器型式对 NO_x 排放浓度的影响, 测试了十几台具有不同炉膛结构、燃烧器型式、燃烧不同煤种锅炉的 NO_x 排放浓度, 测试数据见表 1。

2 锅炉 NO_x 排放浓度测试数据分析

由表 1 可知, 不同炉型和燃烧器型式的锅炉, 其 NO_x 排放浓度差别很大。锅炉结构形式即炉型是由燃烧方式决定的, 炉型对 NO_x 排放的影响实质上是炉膛温度和温度分布方式的影响, 测量数据表明, NO_x 排放浓度随锅炉炉膛平均温度的升高而升高, 尤其是燃烧器附近煤粉气流着火阶段的温度对 NO_x 排放浓度影响最大。

“W”火焰锅炉炉膛下部着火区域几乎全部由耐火材料覆盖形成绝热层, 炉膛最高温度接近煤的理论燃烧温度, 温度往往在 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 目的是保证难燃烧的无烟煤稳定着火燃烧^[5], 同时为提高煤粉燃尽性能, 运行中又控制较高的省煤器出口氧量 (4% ~ 5%), 较高的炉膛温度和过多的空气量造成 NO_x 排放浓度高达 1500 mg/m^3 。聊城 2027 t/h 锅炉 BMCR 工况下 NO_x 排放浓度为 1100 mg/m^3 ; 而菏泽 1025 t/h 锅炉实际排放浓度约 1500 mg/m^3 , 远超过保证值 1100 mg/m^3 。“W”火焰锅炉燃烧温度高, 除了燃料型 NO_x 受很高的燃烧温度影响而大量生成外, 热力型 NO_x 也在急剧增加的区域, 最终导致了 NO_x 排放浓度居高不下, 目前“W”火焰锅炉 NO_x 排放浓度最高。

直流燃烧器、燃烧贫煤的四角切圆燃烧锅炉, 采用比较落后的燃烧器和低 NO_x 燃烧技术, 为了燃烧充分, 锅炉设计采用的过量空气系数、截面热强度和容积热强度较高, 燃烧区域的燃烧温度也比较高, 因此 NO_x 排放浓度也较高, 仅次于“W”火焰锅炉。

表 1 典型结构形式锅炉 NO_x 排放浓度测量数据Table 1 Test data of NO_x emission concentration of boilers with representative frame and form

机组参数和锅炉形式	测试负荷/MW	NO _x 排放浓度测量值/mg · m ⁻³
华能德州 2 200 t/h 锅炉, 双旋风低 NO _x 旋流燃烧器, 贫煤和无烟煤混烧	BMC R	~650
邹县 2 020 t/h 锅炉, 双调风低 NO _x 旋流燃烧器, 烟煤	BMC R	~520
聊城 2 027 t/h “W” 火焰锅炉, 平衡通风, 直吹式制粉系统, 无烟煤和贫瘦煤混合煤	TMC R	1 020 ~ 1 100
黄台 1 025 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 直吹式制粉系统, 上下浓淡低 NO _x 燃烧器, 贫煤	240	~1 030
潍坊 1 025 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 仓储式制粉系统, 贫煤	300	~1 080
青岛 1 025 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 水平浓淡低 NO _x 燃烧器, 仓储式制粉系统, 贫煤	300	~770
莱城 1 025 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 直吹式制粉系统, 一次风采用同心反切技术, WR 喷嘴, 高挥发分烟煤	270	~600
菏泽 1 025 t/h “W” 火焰锅炉, 平衡通风, 正压直吹式制粉系统, 低挥发分贫煤	290	~1 500
黄岛 670 t/h 墙式燃烧锅炉, 平衡通风, 仓储式制粉系统, 浓淡旋流燃烧器, 贫煤	220	500 ~ 600
黄岛 400 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 仓储式制粉系统, 燃烧器下排浓淡型, 上、中排直流加钝体, 贫煤	125	~850
莱芜 400 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 直流式燃烧器, 直吹式制粉系统, 烟煤	135	~1 100
烟台 480 t/h 四角切圆燃烧锅炉, 平衡通风, 直吹式制粉系统, 高挥发分烟煤、褐煤	~140	650 ~ 800
南定 465 t/h 循环流化床锅炉, 平衡通风, 贫煤	145	~200
烟台 410 t/h 锅炉, 水平浓淡型燃烧器六角布置, 平衡通风, 直吹式制粉系统, 高挥发分烟煤、褐煤	~100	~700

注: 表中 NO_x 浓度都为折算到标准工况下 (含氧量为 6%) 的浓度。

几台燃烧烟煤和褐煤的锅炉也采用直流燃烧器, 四角切圆燃烧, 但 NO_x 排放浓度较低, 一方面是燃料特性的影响, 燃煤挥发分在 40% 以上, 锅炉设计时选取较低的炉膛温度, 同时由于煤的着火性能好, 燃烧过程中采用较低的过量空气系数, 这两个因素都显著降低了燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 的生成量; 另一方面由于设计原因和燃煤高灰分、高水分的影响, 炉膛温度水平也较低, 同时制粉过程中掺入烟气形成低氧一次风, 抑制了煤粉着火过程中 NO_x 的生成量, 与采用相同燃烧技术的贫煤锅炉相比, NO_x 排放浓度降低了 200 ~ 300 mg/m³。

循环流化床锅炉燃烧温度较低 (850 ~ 900 °C), 这决定了热力型 NO_x 的生成量大大减少; 燃烧用风分级送入燃烧室, 一次风从布风板送入, 二次风从燃烧室下部锥段部分引入, 降低了燃料型 NO_x 的生成量; 同时流化床锅炉密相区内存在一定浓度的 NH₃, CO, H₂ 以及未燃焦炭颗粒, 使已经生成的 NO 发生还原反应, 降低了最终 NO_x 排放浓度。测量容量基本相同, 分别烧烟煤和贫煤的 4 台循环流化床锅炉, 其 NO_x 排放浓度都小于 200 mg/m³, 远小于其他型式的锅炉, 这充分证明了燃烧温度对 NO_x 生成的影响。

总之, 锅炉炉型对 NO_x 排放浓度的影响实质上主要是炉膛燃烧热强度和温度分布状态的影响。NO_x 排放浓度随炉膛温度的升高而升高, 燃烧器区域温度高将导致燃料型 NO_x 的增加, 炉膛平均温度高不但提高了燃料型 NO_x 的生成, 也增加了热力型 NO_x 的生成。

从表 1 可知, 采用不同形式旋流燃烧器的华德 2 200 t/h、邹县 2 020 t/h、黄岛 670 t/h 锅炉, 其 NO_x 排放浓度都较低, 仅高于循环流化床锅炉, 说明燃烧器型式对锅炉 NO_x 排放有着重要的影响。

用于燃烧煤粉的燃烧器有直流燃烧器和旋流燃烧器 2 种, 分别用于切圆燃烧锅炉和墙式燃烧锅炉。四角切圆燃烧方式, 应用初级低 NO_x 燃烧技术, 其 NO_x 排放浓度较高。对于传统旋流燃烧器, 射流的强烈旋转使一、二次风流进入炉膛后立即强烈混合, 卷吸大量已着火的高温烟气, 在着火段形成氧气过量的燃烧区域和局部的火焰峰值区。所以传统的旋流燃烧器比四角直流燃烧器的 NO_x 排放量高。但新型旋流燃烧器经过技术改造, 实现沿射流轴向的分级燃烧过程, 避免形成高温、富氧的局部环境, 降低了 NO_x 排放。

现不同形式的低 NO_x 排放旋流燃烧器主要以双调风旋流燃烧器为主, 双调风旋流燃烧器的特点是在

燃烧器的出口实现空气逐渐混入煤粉空气气流,合理地控制燃烧器区域空气与燃料的混合过程,以阻止燃料氮转化为 NO_x 和热力型 NO_x 的生成,同时又保证较高的燃烧效率.表1中所测量锅炉的旋流燃烧器有双调风低 NO_x 旋流燃烧器、浓淡旋流燃烧器,其 NO_x 排放仅高于循环流化床锅炉,远低于采用初期低 NO_x 燃烧技术的四角切圆燃烧锅炉和“W”火焰锅炉,而旋流燃烧器锅炉又以邹县电厂、华能德州电厂采用双调风低 NO_x 旋流燃烧器锅炉的 NO_x 排放浓度最低.

华能德州电厂2 200 t/h 锅炉采用双调风低 NO_x 旋流燃烧器前后墙对冲布置,设计贫煤和无烟煤混烧,煤种的着火稳燃性能较差,为了稳定燃烧,炉膛水冷壁上盖有一定数量的卫燃带以提高炉膛温度,运行中常常因为炉内温度过高而结焦.由燃烧温度分析,该炉型的 NO_x 排放浓度应该高于同煤种 NO_x 排放浓度,但实际测量值较小,小于其他贫煤锅炉许多,这主要是由于双调风低 NO_x 旋流燃烧器较好地控制了燃烧器区域空气与燃料的混合过程,降低了燃料型 NO_x 的生成量,因而具有较好的降低 NO_x 排放浓度的作用.

3 燃烧器改造对 NO_x 排放浓度的影响

目前,由于煤质不稳定,当机组燃烧劣质煤,低负荷运行时,许多锅炉原有的燃烧器低负荷稳燃能力不足,严重影响机组的安全经济运行;环保方面对锅炉 NO_x 排放也提出了越来越严格的要求,因此应用和推广新型燃烧器设计技术、新型的低 NO_x 燃烧装置和技术,以及采用以上技术对老型燃烧器进行改造,可以达到提高稳燃能力、提高燃烧效率、降低 NO_x 排放的目的.

3.1 黄台电厂1 025 t/h 锅炉燃烧器改造

黄台电厂1 025 t/h 锅炉是亚临界参数,四角切圆燃烧锅炉,设计燃烧山西贫煤,采用RP863中速磨直吹式制粉系统.燃烧器为较早时期的上下浓淡低 NO_x 燃烧器,其煤粉浓缩器是针对燃烧挥发分较高($V_{ad} \geq 14$)的贫煤.由于煤质不稳定,当燃烧低挥发分($V_{ad} \leq 12$)高灰分的劣质贫煤时,燃烧稳定性不足,因此对燃烧器进行改造,改造措施如下:

(1) 对浓淡燃烧器的煤粉分离器进行结构优化,进一步提高浓淡比,调整浓、淡煤粉喷嘴的空气流量比例,达到更合理的一次风速.

(2) 完善燃烧器二次风配风控制装置,实现一次风、各层二次风的准确控制,改变一、二次风配比,并减少一次风喷口的周界风,实现煤粉浓淡燃烧.

(3) 调整燃烧器一、二次风射流的假想切圆,增加炉膛内的火球直径,提高煤粉气流着火初期的环境温度.燃烧器改造后,最低稳燃负荷比原来下降了20 MW以上,并由于浓缩器提高了浓煤粉喷口的煤粉浓度,降低了燃烧区域的氧浓度,降低了 NO_x 排放量.

在机组负荷、入炉煤工业分析、炉膛氧量和磨煤机运行方式基本一致的情况下,燃烧器改造后的 NO_x 排放浓度比改造前下降了 80 mg/m^3 .燃烧器改造前、后测试数据见表2.

3.2 黄岛电厂670 t/h 锅炉燃烧器改造

黄岛电厂4号炉,额定蒸发量为670 t/h,双炉膛T型布置,固态排渣煤粉炉,平衡通风.原配套16只蜗壳-可调叶片直叶片型旋流燃烧器,分上、下两层两侧墙对冲布置,每层每侧共4只燃烧器.因该燃烧器低负荷稳燃能力差,运行一段时间后全部改为浓淡旋流燃烧器.以后,喷燃器又进行过多次更换和改造,1, 2, 5, 6, 7, 8号燃烧器改造为其他形式的非浓淡旋流燃

表2 黄台1 025 t/h 锅炉燃烧器改造前、后 NO_x 排放浓度
Table 2 Test data of NO_x emission concentration of 1 025 t/h boiler before and after burner alteration

项 目	改进前	改进后
负荷/MW	288	290
炉膛出口氧量/%	4.4	4.5
排烟氧量/%	5.1	4.9
一次风温度/℃	344	336
二次风温度/℃	321	318
磨煤机	A/B/C/D	A/B/C/D
入炉煤空干基水分/%	1.2	1.2
入炉煤空干基灰分/%	27.6	30.3
入炉煤空干基挥发分/%	12.2	11.9
入炉煤低位发热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	22 064	21 485
锅炉排烟 NO_x 平均浓度(实测值,修正到含氧量6%) / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	758.6	670.4

烧器.

由于目前锅炉燃用煤质极不稳定,经常燃烧混煤和各种低挥发分贫煤,锅炉燃烧不稳定,燃烧效率降低.因此对燃烧器进行改造,将1,2,5,6,7,8号燃烧器换成新型浓淡旋流燃烧器.燃烧器改造后,锅炉低负荷稳燃能力得到了增强,燃烧相同煤种时,锅炉效率得到了提高,并且在负荷相同、燃烧温度提高的前提下, NO_x 排放降低了.表3列出了燃烧器改造前、后有关数据对比.

由表3可知,燃烧器经改造后,炉膛燃烧温度提高约 $180\text{ }^\circ\text{C}$,锅炉效率平均提高了 1.315% ,而 NO_x 排放浓度平均降低了 82.165 mg/m^3 ,约占初始排放的 14.4% ,燃烧器改造效果比较明显.

4 结 论

在十几台具有不同炉膛结构、燃烧器型式、燃烧不同煤种的典型锅炉尾部烟道测量 NO_x 排放浓度,测试时机组负荷都在 80% 以上,由测试数据分析了锅炉结构和燃烧器型式对氮氧化物排放浓度的影响.分析结果表明: NO_x 排放浓度与锅炉结构和燃烧器型式关系密切,“W”火焰锅炉燃烧贫煤、燃烧温度高、过量空气系数大,因此 NO_x 排放浓度最高;其次是四角切圆直流燃烧器锅炉;燃用相同煤种时,采用低 NO_x 燃烧技术的旋流燃烧器锅炉其 NO_x 排放浓度低于四角切圆燃烧锅炉;循环流化床锅炉由于燃烧温度低,其 NO_x 排放浓度最低,一般不超过 200 mg/m^3 ;烧烟煤的四角切圆燃烧锅炉的 NO_x 排放浓度低于贫煤锅炉.对采用初级低 NO_x 燃烧技术的燃烧器进行改造,可以同时实现锅炉稳燃,提高燃烧效率,降低 NO_x 排放的目的.

参考文献:

- [1] 岑可法,姚强,骆仲泱,等.燃烧理论与污染控制[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 姚强,陈超.洁净煤技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 胡秀莲.中国电力生产及环境问题[J].中国能源,2005,27(11):11~17.
- [4] 刘志超.燃煤锅炉 NO_x 排放浓度影响因素的试验和分析[J].电站系统工程,2005,21(5):30~34.
- [5] 苗长信,刘志超.1025 t/h“W”火焰锅炉燃烧特性试验研究[J].热能动力工程,2002,17(11):599~602.

表3 黄岛电厂4号炉燃烧器改造前、后试验数据

Table 3 Test data of No. 4 boiler in Huangdao Power Plant before and after burner alteration

项 目	改造前工况		改造后工况	
锅炉蒸发量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	681	527	680	527
煤的工业分析				
$M_{\text{ar}}/\%$	6.1	6.1	6.0	6.0
$M_{\text{af}}/\%$	1.43	1.21	1.96	1.96
$V_{\text{af}}/\%$	15.55	14.91	12.80	12.80
$A_{\text{ar}}/\%$	28.03	30.18	36.73	36.73
$S_{\text{t,af}}/\%$	1.38	1.32	0.93	0.93
$Q_{\text{net,ar}}/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	21 250	21 380	18 820	18 820
排烟温度/ $^\circ\text{C}$	153.87	146.64	156.02	140.87
空预器出口氧量/ $\%$	6.80	7.80	4.63	4.99
锅炉效率/ $\%$	88.18	86.45	88.34	88.92
炉膛平均温度/ $^\circ\text{C}$	1 229.7	1 221.2	1 408.7	1 397.5
NO_x 排放浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	581.94	562.32	493.42	486.51