

循环流化床燃烧 NO_x 排放特性分析

王耀昕

(哈尔滨电气国际工程有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要: 日益严格的污染物排放标准对循环流化床固有的 NO_x 排放低的优势受到挑战,为进一步了解 CFB(循环流化床锅炉) NO_x 的排放规律及其影响因素,以便有针对性地进行设计优化和运行调整,有效地降低 NO_x 原始排放浓度,则有可能取消炉外脱硝设备或降低其运行成本,以利于电厂的经济建设和运行。为此,本研究在一台带有外置式换热器的 300 MW 循环流化床锅炉上进行了相应的测试分析,得到了 NO_x 排放浓度和氮转化率随煤种、燃烧温度和氧量的变化规律,供锅炉设计、运行和调试时参考。

关键词: 循环流化床; NO_x 排放浓度; N 转化率; 炉膛温度; 氧量

中图分类号: TH137 文献标识码: B
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.02.021

引言

循环流化床锅炉技术商业化过程中显示出其优良的环境排放特性,由于其低温燃烧和分级送风,使得原始氮氧化物排放浓度低成为其天然优势。然而随着我国环保问题的日益严峻,国家环保部要求于 2012 年 1 月 1 日起执行火力发电厂新的环保排放标准,对于新建循环流化床机组, NO_x 排放浓度应低于 $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$,该标准的排放限值已低于美国、欧洲和日本等发达国家,成为世界上最严格的环保排放标准。目前,环境污染问题越来越受到广泛关注,对于经济比较发达地区,对火电厂的 NO_x 排放限值在新标准的基础上进一步降低。上述相关的政策法规,对循环流化床燃烧技术固有的污染物控制手段提出新的挑战。

为满足相应的标准要求,相当一部分已投运循环流化床锅炉增设了炉外脱硝设备,新建机组几乎全部同时建设炉外脱硝。其中大部分采用 SNCR(选择性非催化还原反应)进行脱硝,也有个别机组采用 SCR(选择性催化还原反应)进行脱硝,这无疑

增加了设备的初投资和电厂的运行成本。如果我们能更好地了解循环流化床燃烧 NO_x 排放规律及其影响因素,从而有针对性地进行锅炉的优化设计和运行调整,则可以尽可能地降低 NO_x 的原始排放浓度,使得炉外脱硝设备取消或由于对炉外脱硝效率的要求降低从而减小脱硝设备的运行费用。

本研究在一台带有外置式换热器的 300 MW 循环流化床锅炉上,通过燃用不同燃料、不同氧量和不同燃烧温度下进行了相应的测试分析,从而获得了 NO_x 的排放浓度和氮转化率随煤种、燃烧温度和氧量的变化规律,供锅炉设计、调试和运行时参考。

1 循环流化床锅炉 NO_x 生成机理

在以煤为燃料的燃烧设备中, NO_x 的生成主要有两种形式,一种是热力型 NO_x ,一种是燃料型 NO_x 。热力型 NO_x 是空气中的 N_2 在高温下与 O_2 反应生成的 NO_x ,其生成条件是燃烧温度需达到 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,而循环流化床锅炉燃烧温度区间一般为 $850\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,对于极个别情况,燃用低挥发分难燃煤种时,为保证一定的燃烧效率,也会出现燃烧温度达到 $910\text{--}920 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况,尽管如此,仍然远低于热力型 NO_x 生成所需的温度。因此,循环流化床燃烧不具备热力型 NO_x 生成的条件,烟气中的 NO_x 为燃料型 NO_x ,这也是循环流化床锅炉 NO_x 原始排放浓度低的主要原因。煤中的 N 一般以 N 原子的形态与各种 CH 化合物结合,形成氮的环状或链状化合物,燃料中氮化合物经过热解和氧化反应而生成的 NO_x 为燃料型 NO_x 。

煤中 N 含量一般在 $0.5\%\text{--}3\%$ 之间。煤颗粒进入炉膛后,随即在高温下发生脱挥发分过程, $60\%\text{--}80\%$ 的含 N 化合物随挥发分析出,称之为挥发分

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2015-07-16

作者简介: 王耀昕(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨电气国际工程有限公司高级工程师。

N, 而存留在焦炭中的部分称为焦炭 N, 挥发分 N 在高温环境中的化学活性很高, 迅速分解为 NH₃、HCN 等小分子化合物, 并在氧气存在的条件下, 经 NH₂、NH、NCO 基团被氧化为 N₂、NO、N₂O 等。同时, 生成的 NO 也会被 NH₃ 等中间产物以及焦炭等重新还原为 N₂, 因此最终的 NO 生成量取决于正逆反应相减后的净生成量^[1]。焦炭 N 也会被氧化生成 NO, 同时焦炭本身具有还原性而产生的抑制作用也不容忽视, 图 1 为循环流化床锅炉 NO_x 生成路径示意图^[2]。

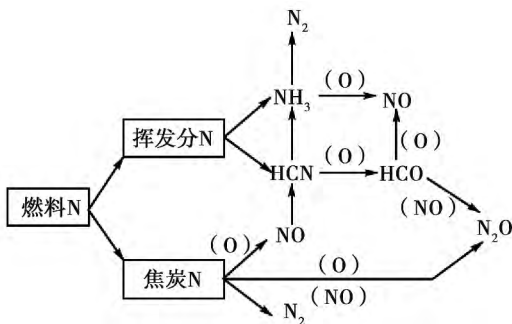


图 1 CFB 锅炉 NO_x 生成路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nitrogen oxide formation paths in CFB boiler

2 循环流化床锅炉 NO_x 排放特点

中国电力企业联合会统计了循环流化床锅炉和煤粉锅炉燃用不同燃料时的 NO_x 排放数据^[3] 如图 2 所示, 从图中可以看出, 燃用相同燃料时, 循环流化床锅炉 NO_x 的原始排放浓度低于煤粉锅炉, 且随着燃料中挥发分含量的增加, NO_x 排放值呈现上升的趋势。这主要是由于循环流化床锅炉燃烧温度较低, N 的氧化物中不包含热力型 NO_x, 且低温燃烧导致炉膛内 CO 体积份额和未燃尽焦炭的浓度增加, 对已经生成的 NO_x 起到了很好的还原作用。随着燃料中挥发分含量的增加, 燃料反应活性相应增强, 燃烧速率加快, 炉膛上部 CO 和未燃尽焦炭的浓度降低, 对已生成 NO_x 的还原作用减弱, 从而导致 NO_x 排放浓度增加。

在锅炉设计过程中通常情况下, 会根据锅炉的燃料特性, 给出干烟气, 含氧量 6% 时 NO_x 排放的

预测值, 具体计算方法如下:

$$NO_x = 10000 \times \frac{46}{14} \times \frac{N}{V} \times \alpha \times \frac{21-6}{21} \quad (1)$$

式中: NO_x—氮氧化物排放浓度, mg/Nm³; N—燃料中的收到基氮含量, %; V—实际干烟气量, Nm³/kg; α—燃料中氮的转化率, %。

可见, 我们只要确定出不同燃料的 N 转化率就可以合理预测出锅炉运行过程中 NO_x 的原始排放浓度。

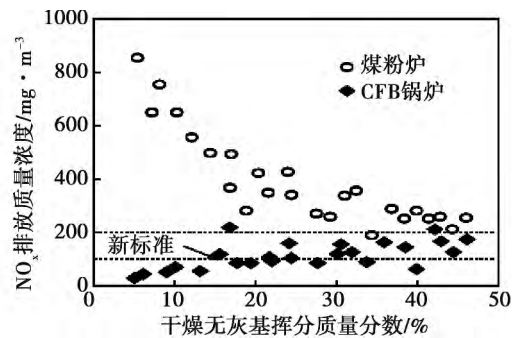


图 2 CFB 锅炉与 PC 锅炉 NO_x 排放浓度

Fig. 2 NO_x emission concentrations in CFB boiler and PC boiler

3 影响循环流化床锅炉 NO_x 排放的因素

影响循环流化床锅炉 NO_x 排放的因素主要有温度和氧量(过量空气系数)。当然已有相关研究表明, 随着锅炉石灰石投入量的增加, NO_x 的排放值有所增加, 这是因为石灰石在炉内煅烧后形成多孔疏松 CaO, 而这种金属氧化物对燃料中挥发分氮向 NO_x 转化起到了良好的催化作用。在锅炉设计时, 一般在折算硫份低于 1.5% 的情况下, 可以忽略石灰石投入量对 NO_x 生成的影响。

3.1 燃烧温度对 NO_x 排放浓度的影响

为了获得不同炉膛温度下 NO_x 的排放规律, 本研究选择了一台带有外置式换热器的 300 MW 循环流化床锅炉为测试对象, 以方便炉膛温度的有效控制。在该锅炉上燃用了 3 种循环流化床锅炉常用煤质, 分别为矸石、褐煤和无烟煤, 煤质分析分别见表 1、表 2 和表 3。在过量空气系数相同, 均为 1.2 的

情况下, 测得 NO_x 排放浓度随温度的变化情况如图 3 所示。NO_x 排放浓度数值均来自于电厂 DCS 系

统数据。

表 1 矽石燃料元素分析

Tab.1 Elemental analysis of coal Gangue fuel

碳	氢	氧	氮	硫	灰分	水份	挥发份	热值
C _{ar} /%	H _{ar} /%	O _{ar} /%	N _{ar} /%	S _{ar} /%	A _{ar} /%	W _{ar} /%	V _{daf} /%	Q _{net} /kJ · kg ⁻¹
32.99	2.66	6.95	0.56	0.31	43.88	12.65	43.82	12350

表 2 褐煤燃料元素分析

Tab.2 Elemental analysis of brown fuel

碳	氢	氧	氮	硫	灰分	水份	挥发份	热值
C _{ar} /%	H _{ar} /%	O _{ar} /%	N _{ar} /%	S _{ar} /%	A _{ar} /%	W _{ar} /%	V _{daf} /%	Q _{net} /kJ · kg ⁻¹
36.72	1.87	12.59	1.01	1.66	11.45	34.7	52.70	12435

表 3 无烟煤燃料元素分析

Tab.3 Elemental analysis of anthracite coal

碳	氢	氧	氮	硫	灰分	水份	挥发份	热值
C _{ar} /%	H _{ar} /%	O _{ar} /%	N _{ar} /%	S _{ar} /%	A _{ar} /%	W _{ar} /%	V _{daf} /%	Q _{net} /kJ · kg ⁻¹
57.28	1.16	1.02	0.56	0.98	30	9	3.8	20 680

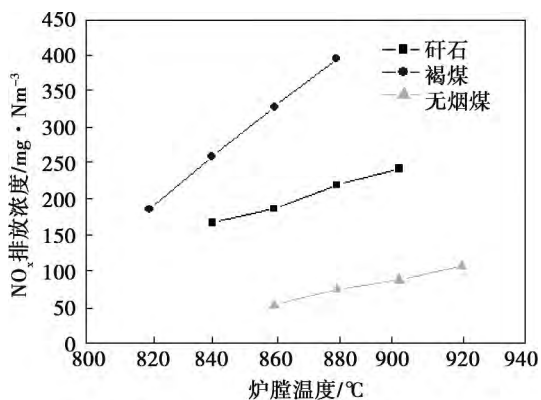


图 3 NO_x 排放浓度随炉膛温度的变化

Fig.3 Variation of NO_x emission concentration with furnace temperature

从图 3 和图 4 可以看出, 在相同炉膛温度和相同氧量(过量空气系数)的情况下, 褐煤 NO_x 排放浓度最高, 无烟煤 NO_x 排放浓度最低, 燃用矽石燃料的循环流化床锅炉 NO_x 排放浓度介于两者之间, 当炉膛温度为 880 °C, 过量空气系数为 1.2, 燃用褐煤时, NO_x 排放浓度为 398 mg/Nm³, 燃用矽石时, NO_x 排放浓度为 223 mg/Nm³, 燃用无烟煤时, NO_x

排放浓度为 78 mg/Nm³。此外, 对于同种燃料, 随着炉膛温度的提高, NO_x 的排放浓度增加, 以燃用矽石为例, 当燃烧温度分别为 840 °C、860 °C、880 °C 和 900 °C 时, NO_x 排放浓度分别为 170 mg/Nm³, 190 mg/Nm³, 218 mg/Nm³ 和 245 mg/Nm³。由公式(1)可知, 燃料的 N 转化率同 NO_x 排放浓度呈现正相关的变化规律。

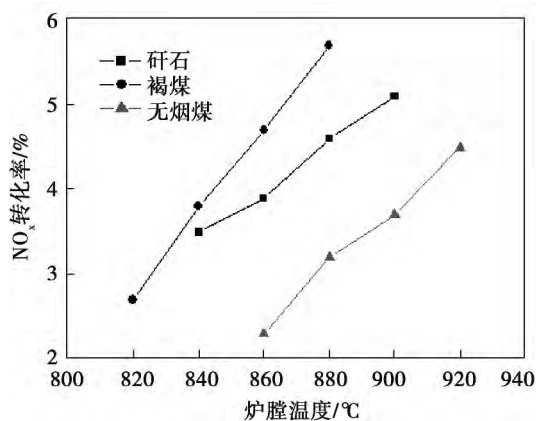


图 4 N 转化率随炉膛温度的变化

Fig.4 Variation of nitrogen conversion rate with furnace temperature

对 NO_x 及燃料 N 转化率的随温度的变化规律解释为: 随着燃料反应活性的增加, 炉膛上部 CO 体积分数和未燃尽焦炭颗粒的浓度随之减小, 对炉膛下部已经生成的 NO_x 还原能力减弱, 导致 NO_x 排放值及 N 转化率增加。此外, 对于相同燃料, 随着燃烧温度的提高, 燃料燃尽程度得以改善, 从而降低了炉膛上部 CO 体积分数和未燃尽焦炭颗粒的浓度, 削弱了对已经生成的氮氧化物的还原能力, 因此同样导致 NO_x 排放值及 N 转化率增加。从上述分析可知, 低温有利于 NO_x 排放值的降低, 但在锅炉设计和运行过程中, 合理的温度选取同时还应兼顾燃烧效率和脱硫反应对温度的要求。

3.2 氧量对 NO_x 排放浓度和氮转化率的影响

本研究在上述 300 MW 循环流化床锅炉上进行了相应的测试分析, 以矸石燃料为例, 在床温维持 880 °C 不变的情况下, 改变锅炉氧量, 得出对 NO_x 排放和 N 转化率随氧量的变化关系, 分别见图 5 和图 6。

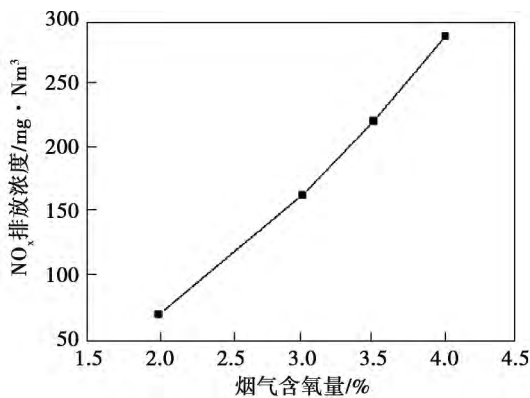


图 5 NO_x 排放浓度随锅炉氧量的变化

Fig. 5 Variation of NO_x emission concentration with oxygen content in boiler

从煤燃烧过程中 NO_x 的生成机理可知, 无论是挥发分 N 还是焦炭 N, 只有在氧存在的条件下, 才能被氧化, 因此燃料燃烧过程中随着氧量的增加, NO_x 排放值增加。对比图 3 和图 5 可以发现, 氧量变化对 NO_x 排放浓度的影响比温度影响更显著。较低的氧量可有效控制 NO_x 排放值, 但氧量的高低同时还会影响锅炉的燃烧效率和锅炉排烟热损失, 所以合理的氧量设定应在综合考虑上述因素的基础上进行。

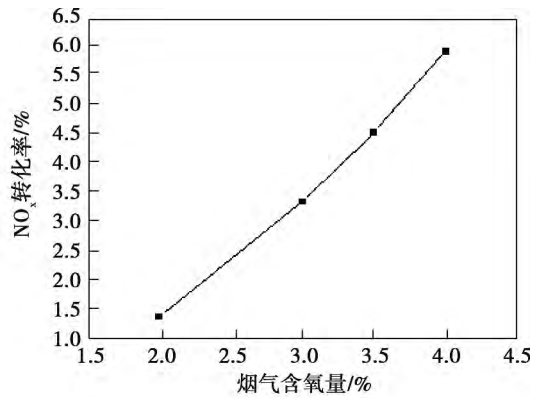


图 6 N 转化率随锅炉氧量的变化

Fig. 6 Variation of nitrogen conversion rate with oxygen content in boiler

4 结 论

基于循环流化床燃烧 NO_x 的生成机理, 在一台带有外置式换热的 300 MW 循环流化床锅炉上进行了相关的测试, 获得了循环流化床锅炉 NO_x 排放浓度和 N 转化率随燃用煤种、燃烧温度和锅炉氧量的变化规律, 即: 随着燃料反应活性的增强(挥发分含量增加)、炉膛温度的升高和炉膛氧量的增加, NO_x 排放浓度和氮转化率随之增加, 根据国内比较典型的循环流化床锅炉常用燃料(矸石、褐煤和无烟煤)的具体测试结果可知, 氧量对 NO_x 排放浓度的影响比燃烧温度更显著。

参考文献:

[1] 张 磊, 杨学民, 谢建军, 等. 循环流化床燃煤过程 NO_2 和 N_2O 产生-控制研究进展 [J]. 过程工程学报, 2006, 6(6): 1004-1010.
ZHANG Lei, YANG Xue-min, XIE Jian-jun, et al. Investigation progress on release and control of NO_x and N_2O during coal combustion in circulating fluidized bed combustor [J]. Journal of process engineering, 2006, 6(6): 1004-1010.

[2] Armesto L, Boecrigter H, Bahillo A, et al. N_2O emission from fluidized bed combustion [J]. fuel, 2003, 82(15/16/17): 1845-1850.

[3] 中国电力企业联合会. 2011 中国电力年鉴 [R]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
China Electric Power Enterprise Confederation. 2011 China Electric Power Yearbook [R]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

(姜雪梅 编辑)

蒸汽供热技术在湿法合成革干燥部的应用研究 = **Applied Research on Steam Supply Technology in the Drying Section of Wet Synthetic Leather Making Process** [刊, 汉] TANG Wei, ZHANG Yi-zhen, YU Dong-wei (College of Light Industry and Energy, Industrial Automation Institute, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code: 710021), MA Xing-yuan (College of Resource and Environment, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi, , Post Code: 710021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -264-269

To improve the traditional drying technology of wet synthetic leather, a new drying scheme of combining cylinder drying and hot air drying in the wet synthetic leather was put forward. This scheme uses the steam generated from the combined heat and power (CHP) in functional industrial park to replace the heat conducting oil in the hot air heating process. It not only makes full use of steam produced from CHP, but also reduces the drying cost and improves the safety of synthetic leather process. In this paper, the steam flow for the fabric based on the new drying scheme, general control strategy for steam supply system, feedforward and feedback controls, selective control and PID control algorithms were presented in detail, followed by the DCS control system based on S7-300 PLC. This presented control system is especially suitable for the production line of wet synthetic leather using CHP in the functional industrial park which is vigorously promoted by the current government, and has broad application prospects. **Key words:** wet synthetic leather, cylinder drying, steam supply control system, combined heat and power

循环流化床燃烧 NO_x 排放特性分析 = **Analysis of NO_x Emission Characteristics in Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] Wang Yao-xin (Harbin Electric International Company Limited, Harbin, China, Post Code: 150028) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -270-272

The advantage of Low NO_x emissions inherent to the circulating fluidized bed (CFB) is being challenged because the pollution emission standard is increasingly stringent. Better understanding on the principle and influencing factors of NO_x emission in CFB boiler is expected to result in optimizations of design and operation that further decrease NO_x emissions, and possibilities of denitration equipment removal and operation cost reduction. For these reasons, experimental test and analysis were performed by using a 300 MW CFB boiler with an external heat exchanger. The trends of NO_x emission concentration and nitrogen conversion rate with the coal type, combustion temperature and oxygen content were obtained. The results can be used as references for boiler design, operation and commissioning. **Key words:** circulating fluidized bed, NO_x emission, nitrogen conversion rate, furnace temperature, oxygen content