

文章编号：1005-006X(2003)01-0024-03

# 利用三次风再燃降低 NO<sub>x</sub> 排放研究\*

浙江大学 欧大武 方磊 李戈 潘维 池作和

**摘要：**应用分级燃烧降低 NO<sub>x</sub> 原理把三次风浓缩后作为再燃燃料送入炉膛，通过三次风中超细煤粉的燃烧还原 NO<sub>x</sub>，达到大幅度降低 NO<sub>x</sub> 排放的目的。

**关键词：**三次风浓缩；三次风再燃；NO<sub>x</sub> 还原

**中图分类号：**TK229.6 **文献标识码：**A

## Study on Using Condensed Tertiary-Air Coal Reburning Reduction NO<sub>x</sub> Technology

OU Da-wu, FANG Lei, LI Ge, et al.

**Abstract:** The mechanism and method of using condensed tertiary-air coal reburning technology is discussed. The super fine coal is injected into the combustion area to deoxidize the NO<sub>x</sub> created before to reduce NO<sub>x</sub> emission.

**Key words:** condensed tertiary-air; reburning; deoxidization of NO<sub>x</sub>

我国电力工业以燃煤火电机组为主，煤燃烧过程中排放的氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 是引起酸雨、温室效应，破坏臭氧层的主要污染源之一。而环境问题已经成为日益关注的全球问题。我国作为燃煤大国，研究燃煤过程中如何降低 NO<sub>x</sub> 排放具有重要现实意义。

降低燃烧过程中的 NO<sub>x</sub> 排放有两类方法：一是抑制燃烧中 NO<sub>x</sub> 的形成；另一类是还原已形成的 NO<sub>x</sub>。在还原已形成的 NO<sub>x</sub> 方法中，燃料分级燃烧是目前最有效的方法之一。它是针对性地在缺氧环境中加入燃料，形成还原性气氛使 NO<sub>x</sub> 分解为 N<sub>2</sub>。在燃料再燃技术中，最早使用再燃燃料是天然气 (CH<sub>4</sub>)。最近的研究表明，主燃料煤粉特别是超细化煤粉也是一种甚至比甲烷更好的再燃燃料，可以在很大程度上降低电站锅炉 NO<sub>x</sub> 的排放<sup>[1,2]</sup>。

### 1 基本思路及其机理

目前,我国 200 MW 以下锅炉普遍采用中间贮仓式热风送粉系统，作为磨煤乏气和干燥剂的三次风，含有部分还原能力强的细煤粉 (含粉量约为 10%~20%)，故将其浓缩后可以作为优质再燃燃料，喷入再燃区形成还原性气氛，还原主燃烧区生成的 NO<sub>x</sub>，从而降低 NO<sub>x</sub> 的排放。再燃降低 NO<sub>x</sub> 排放的具体组织过程见图 1。

将 80%~85% 的燃料 (称为一次燃料) 送入第一级燃料区 (主燃烧区)，在  $\lambda > 1$  的条件下燃烧并生成 NO<sub>x</sub>。其余 15%~20% 的燃料 (称为二次燃料、再燃燃料) 则在主燃烧器的上部送入二级燃烧区 (再燃区)，在  $\lambda < 1$  的条件下形成很强的还原性气氛，由于已生成的 NO 在遇到烃根 CH<sub>i</sub> 和未完全燃烧产物 CO、H<sub>2</sub>、C 和 C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> 时，会发生 NO 还原反应，这些反应的总反应方程式为：

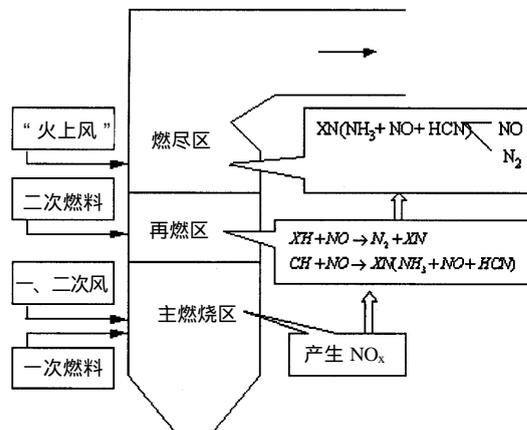
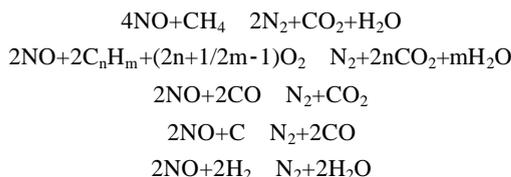


图 1 再燃原理示意图



这样就把主燃区产生的 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub>。再燃区不仅能使已生成的 NO<sub>x</sub> 得到还原，同时还抑制了新的 NO<sub>x</sub> 生成，可使 NO<sub>x</sub> 的排放浓度进一步降低。此外，再燃区的上面还需布置“火上风”喷口以形成第三级燃烧区 (即燃尽区)，以保证在再燃区中生成的未完全燃烧产物的燃尽。

### 2 三次风再燃基础研究

再燃燃料的物理特性对 NO<sub>x</sub> 的还原起重要作用<sup>[3,4]</sup>，物理特性是决定煤粉颗粒中质量、热量传递速率与反应表面积的重要因素，对燃烧过程影响很大。众多学者对常规煤粉的物理特性及其对燃烧特性的影响进行了比较深入的研究<sup>[5,6]</sup>，而对三次风煤粉这类超细煤粉的研究很少。为了研究其再燃对降低 NO<sub>x</sub> 排放的影响，必须首先对三次风煤粉的物理特性和燃烧特性进行研究。本文采用 LS230 激光分析仪

收稿日期: 2002-04-01

欧大武 (1972-), 男, 硕士。热能工程研究所, 310027

\*国家重点研究发展规划项目 (G1999022204-03)

全国优秀博士论文专项基金资助

和压汞仪分别测定长兴烟煤一、三次风煤粉的粒度和孔隙率及比表面积，最后用 TGD-5000RH 型差式热天平对其进行热解实验。下表为长兴电厂燃用烟煤的物理特性。

表 长兴电厂燃用烟煤一、三次风煤粉试样物理特性对比

物理特性	一次风煤粉	三次风煤粉
平均粒径/μm	28.61	13.61
孔隙率/%	45.483 8	31.297 5
比表面积/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	15.530 8	24.236 9

图 2 显示三次风煤粉主要分布在 5~30 μm 范围之内，平均粒径为 13.61 μm；而一次风煤粉则主要分布在 15~60 μm 范围之内，平均粒径为 28.61 μm，因而三次风煤粉的粒度远远小于一次风煤粉。由表可知长兴燃用烟煤三次风煤粉的孔隙率比一次风煤粉小，而三次风煤粉比表面积却比一次风煤粉大得多。因此，对于同等质量的煤粉，三次风煤粉比表面积比一次风煤粉大很多。由图 3 热解曲线还可以看出，三次风煤粉的挥发分析出速率要比一次风煤粉的挥发分析出速率略高。挥发分的析出速率正比于燃烧速率，因此三次风煤粉的燃烧速率比一次风煤粉要大。大量的研究结果<sup>[7,8]</sup>表明，对于单颗粒煤粉来说，在比表面积、粒径和孔隙率等因素中，比表面积对煤粒的着火影响最大，比表面积越大，煤粒越容易着火；而对煤粒燃尽程度影响最大的是粒径。粒径越小，煤粒越容易燃烧完全。所以三次风煤粉颗粒半径较小且均匀，燃烧面积大而热阻小，化学反应速度快，有利于挥发分析出、煤粉着火和煤焦的燃尽。三次风煤粉作为再燃燃料，不仅着火容易，而且易燃尽。因此三次风煤粉是很理想的再燃燃料。

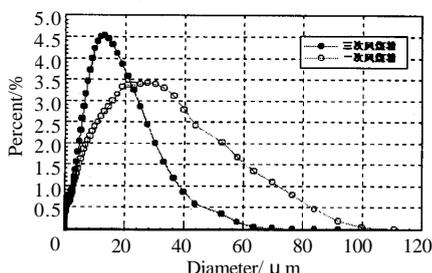


图 2 长兴电厂燃用烟煤一、三次风煤粉粒径比较

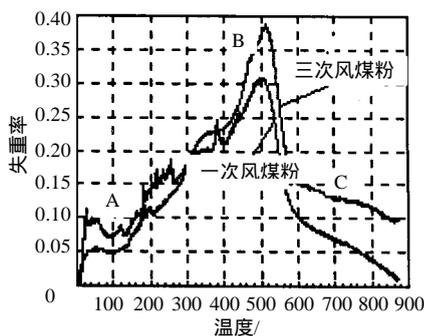


图 3 长兴电厂燃用烟煤热解 DTA 曲线

### 3 三次风再燃技术初步方案

从研究结果看，三次风煤粉粒径小，比表面积大，粒度均匀，着火性能好，是很好的再燃燃料，把其送入再燃区燃烧可以降低 NO<sub>x</sub> 排放。本文对某台 420 t/h 锅炉进行了燃烧

器改造的初步方案研究。

#### 3.1 三次风浓缩方法

三次风虽然是一种理想的再燃燃料，但三次风的含粉率是比较低的。常规三次风的风煤比（当量比为 1.2~2.4）是无法满足再燃技术要求的，必须对三次风进行浓缩。只有将浓缩后的三次风喷入炉膛，形成富燃料的二次燃烧区（即再燃区），才能生成大量 CH 基团的还原性气氛，这些基团与主燃烧区生成的 NO<sub>x</sub> 发生还原反应，最终生成 N<sub>2</sub>。浓缩示意图见图 4。将原来三次风经过一个三通管分为上下两股，上面一股三次风通过分离效率为 95% 的低阻布袋浓缩器将三次风中含有的粒度极小的煤粉分离浓缩后进入一小型集粉器，另一股三次风经文丘里管并引射集粉器中的煤粉进入炉膛作为再燃燃料，在再燃区还原主燃烧区生成的 NO<sub>x</sub>，原来的二次风一股上移，布置在燃烧器顶层，作为燃尽风。当磨煤机停运，没有三次风的时候，燃尽风可以实现空气分级燃烧，控制 NO<sub>x</sub> 的排放量。

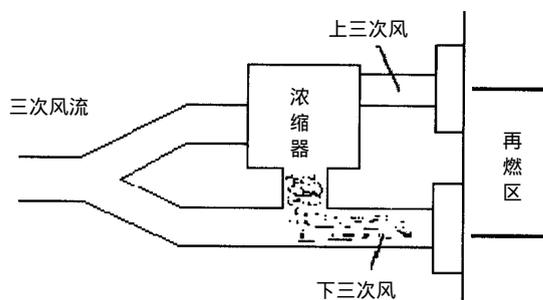
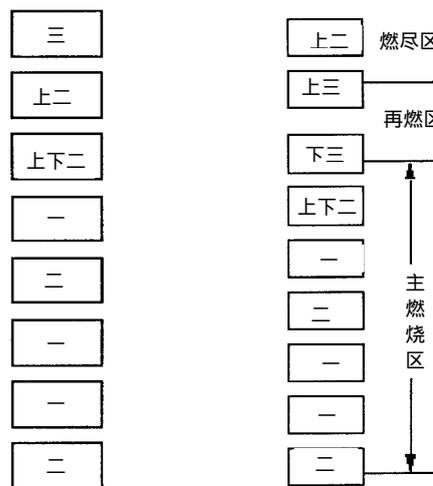


图 4 三次风浓缩示意图

因为三次风煤粉粒度为 15 μm 左右，用传统的机械式分离方法无法满足要求，初步考虑用布袋除尘器来进行煤粉的收集。布袋除尘器收集煤粉的效率往往达到 99%，可以将几乎所有的三次风煤粉分离出来作为再燃燃料，但是布袋除尘器阻力太大，排粉风机压头往往不足以克服，使系统改造费用增加。因此，开发一种低阻且有一定分离效率的浓缩器是本技术的关键。本工作正在进一步深入研究之中。



(a) 传统方式布置 (b) 改造后的布置方式（磨煤机启用时）

图 5 分级配风燃烧器喷口布置示意图

#### 3.2 燃烧器改造方案

某 420 t/h 锅炉燃烧器结构见图 5a, 根据三次风再燃特点, 提出了图 5b 的燃烧器改造方案。

当系统磨煤机运行时, 将浓缩后的三次风送入炉膛, 在三次风和主燃烧区之间形成一个过量空气系数  $\lambda < 1$  的具有还原性气氛的再燃区, 该区域内的未完全燃烧产物  $C_nH_m$  与主燃烧区生成的  $NO_x$  发生反应, 最终生成  $N_2$ , 从而降低  $NO_x$  的排放量。

磨煤机停用时, 三次风为零, 此时依靠空气分级燃烧来控制  $NO_x$  的排放。原来的二次风一股上移布置在整个燃烧器的上方作为燃尽风。通过运行的调整, 将 80% 左右的理论空气量送入主燃烧区, 使燃料在缺氧的富燃料条件下燃烧, 降低了燃烧区内的燃烧速度和温度水平, 在燃烧器出口和燃烧中心区还造成适度的还原气氛, 自然抑制了  $NO_x$  的生成。完全燃烧所需的其余空气通过增设在主燃烧器上方的二次风喷口送入炉膛, 与主燃烧器区缺氧条件下产生的烟气混合, 在  $\lambda > 1$  的条件下完全燃烧, 以保证机组经济运行。

由此可见, 改造后无论磨煤机启用与否, 机组都具有有效的降低  $NO_x$  排放的措施。

#### 4 结 论

(1) 通过实验研究, 三次风煤粉粒径小, 比表面积大, 粒度均匀。不仅容易着火且易燃尽, 因此是很好的再燃燃料。

(2) 把三次风煤粉浓缩后喷入炉膛, 在再燃区形成富燃料的还原性气氛, 还原主燃烧区形成的  $NO_x$ , 降低  $NO_x$  的

排放。

(3) 针对一台 420 t/h 的锅炉, 提出了三次风再燃降低  $NO_x$  排放的燃烧器改造初步方案, 此方案很有实际应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen W Y, Ma L Importance of Heterogeneous Mechanism during Reburning of Nitrogen Oxide [M]. The proceedings 3rd International Symposium on Coal Combustion. Beijing, 1995: 594 ~ 601.
- [2] Nakamura M, Takash K, Kuwahara M, et al. Demonstration test and practical studies on combustion technologies of micro-pulverized coal [A]. International Conference on Power Engineering 97 [C]. Tokyo, 1997: 453 ~ 458.
- [3] 钟北京, 傅维标. 煤再燃过程中燃料特性对  $NO$  还原的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(2): 115 ~ 119.
- [4] 张强, 许晋元, 等. 再燃烧技术中再燃燃料的选取原则[J]. 工业炉, 1999, 21(3): 9 ~ 11.
- [5] 陈昌国, 鲜学福, 等. 煤结构的研究及其发展[J]. 煤碳转化, 1998, 21(2): 7 ~ 13.
- [6] 张小可, 陈鸿, 孙学信, 等. 用无形孔模型研究影响煤粉燃烧的因素[J]. 煤碳转化, 1996, 19(3): 69 ~ 75.
- [7] 姜秀民, 李巨斌, 等. 超细煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国机电工程学报, 2000, 20(6): 71 ~ 74.
- [8] 姜秀民, 李巨斌, 等. 煤粉颗粒粒度对煤质分析特性与燃烧特性的影响[J]. 煤碳学报, 1999, 24(6): 643 ~ 647.

编辑: 闻 章

(上接第 23 页)

(3) 锅炉每一给料口配备一台柱塞泵和管路, 在炉膛入口采用压缩空气将洗煤泥喷入炉膛, 保证了煤泥的均匀给料, 系统可控性大大提高, 有利于实现锅炉的燃烧自动控制。

(4) 考虑到管道的磨损和停运时洗煤泥在管道中沉积堵塞的可能, 设计中管路采用  $114.3 \times 7.1$  的厚壁管, 通过法兰连接, 管材为 52 号钢, 最大管内工作压力 10 MPa。在煤泥仓、管路等可能沉积煤泥的地方均配有冲洗水装置。

(5) 整个煤泥系统采用 PLC 控制, 煤泥螺旋给料装置、柱塞泵的煤泥输送量可根据锅炉负荷连续可调, 液压驱动装置可输出和接受电厂 DCS 系统的控制信号, 并且其控制信号与煤泥量呈线性关系, 从而可直接参与锅炉的燃烧自动控制, 基本可实现无人值守。

不足之处主要是设备投资大, 运行费用较高。

#### 4 小 结

对于柱塞泵输送洗煤泥用于锅炉燃烧国内的有关研究尚不多见, 就燃烧来说, 希望洗煤泥水分尽可能低; 而对输送来说, 要求其具有良好的流动性, 以减少动力消耗和提高可泵性。要解决好这一矛盾就必须从燃烧、煤泥制备、输送等方面统筹考虑, 仅片面追求洗煤泥的低水分, 会对煤泥制备、输送造成极大困难, 不仅会增加动力消耗、运行成本和维护费用, 甚至会造成无法正常运行。因此, 在方案设计中虽兼顾了低水分煤泥的输送, 但在实际运行中应尽可能保证

洗煤泥水分在 30% 以上 (针对南屯矿洗煤泥), 以保证系统的安全、经济、稳定运行, 这也是今后需要重点研究、摸索的课题。

柱塞泵 (活塞泵) 因泵压高、容量大, 在许多方面有广泛的应用前景, 如煤炭的水里输送、矿山开采的矿浆输送、增压流化床煤水混合物输送、给料、江河清淤的污泥输送、混凝土的输送等。因此, 该种泵送形式在我国应积极开展研究并推广应用。

南屯电厂三期工程 220 t/h 流化床锅炉是目前国内第一台利用煤泥、煤矸石混烧的大型流化床锅炉, 其煤泥泵送系统采用柱塞泵的形式在国内也是首例, 它的建成投产将对我国发展大型燃用洗煤泥的循环流化床锅炉、提高大型煤矿洗煤泥、煤矸石综合利用水平具有重要的示范意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨家林, 等. 永川洗煤泥流变特性和泵送参数选择[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2).
- [2] 杨家林, 等. 芦岭电厂煤泥泵送系统的设计及运行[J]. 煤矿机械, 2001(7): 43 ~ 45.
- [3] 翟爱林. 流化床锅炉掺烧高水高灰煤泥浆须注意的几个关键性问题[J]. 节能, 1999(3): 36 ~ 37.
- [4] 岑可法, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 岑可法, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 浙江大学出版社, 1997.

编辑: 霄 珉