

文章编号：1005-006X(2003)02-0019-03

不同煤种高温燃烧时 NO_x 排放特性的沿程分析*

浙江大学 王正华 周 昊 池作和 蒋 啸 岑可法

摘 要：在一维沉降炉上进行了煤粉高温燃烧时 NO_x 排放特性的沿程分析，系统考察了煤粉高温燃烧时 NO_x 排放的影响因素。试验表明，NO_x 生成和径向分布与炉内温度、煤粉细度、给粉量、煤种、二次风温、一二次风比值及过量空气系数等有密切关系。通过 NO_x 排放的沿程分析研究，对采取低 NO_x 燃烧技术的电站锅炉选取合适的运行参数有一定的指导意义。

关键词：燃烧；NO_x

中图分类号：TK224.1^{†1} 文献标识码：A

Study on the Formation of NO_x Along Boiler with Different Coal in HT Combustion WANG Zheng-hua, ZHOU Hao, CHI Zuo-he, et al.

Abstract: The study of NO_x emission of coal powder along boiler in high temperature combustion is carried out in one-dimension subsiding furnace. The factors influencing formation and distributing of NO_x are discussed. Experiments show that the amount and the distributing of NO_x emanation depend intimately on the furnace temperature, the quantity of coal powder, coal category, the temperature of the secondary air, the ratio of primary air and secondary air, excess air factor etc. There is some action on selecting appropriate parameters of some boiler with NO_x control technology.

Key words: combustion; NO_x

研究表明^[1]，煤中氮一般为有机氮，主要以吡咯氮、吡啶氮和胺盐的形式存在。煤粉在燃烧过程中生成的 NO_x 有 3 个来源：热力 NO_x、燃料 NO_x 和快速 NO_x。在温度不太高时，由于燃料氮以 N-C 或 N-H 键存在，它们比氮分子中的 N-N 键能弱，更容易氧化断裂生成 NO，所以燃料型 NO 比热力型 NO 更容易形成。一些基础燃烧试验数据表明^[2]，在一级反应器内当空燃比为 0.41、温度小于 1350 时，燃料 NO_x 几乎占 100%。因此对煤粉燃烧时 NO_x 生成的研究主要着眼于燃料 NO_x。但在锅炉实际运行中，对 NO_x 生成的影响因素较多，NO_x 形成机理变得尤为复杂。研究者们往往都是通过对燃料 NO_x 破坏机理的认识提出很多降低 NO_x 排放的技术方案，诸如空气分级燃烧、燃料分级燃烧以及低 NO_x 燃烧器等^[3]。实际上这些技术方案在实际电站锅炉中采用时仍然离不开对 NO_x 生成影响因素的全面考虑，特别是适合的送气和送料喷口位置的选择。本文在对 NO_x 排放影响因素试验的基础上，考察了 NO_x 在炉膛内的径向分布，为实际锅炉的运行提供了一定的指导，同时为采用低 NO_x 燃烧技术的电站锅炉选择合适的参数提供一定的参考。

1 试 验

试验在一维沉降炉上进行（图 1）。图中 AB 界面为炉膛上平面，CD 界面为炉膛底平面。炉膛高度为 85 cm，刚玉管内径为 45 mm，有效加热段为 80 cm。试验用的 4 种煤煤质参数分析见表。沿程烟气通过烟气采集器连接到 Abgas-Analysegerat 烟气分析仪测得 NO_x 的瞬时浓度，结果中气体的浓度都折算成 6% 剩余氧量所对应的浓度。

收稿日期：2002-06-14

王正华（1976-），男，工学硕士。热能工程研究所，310027

*国家重点基础研究专项经费资助（G1999022204）

表 煤的分析数据

样品	工业分析			
	M _{ad} /%	A _{ad} /%	V _{ad} /%	FC _{ad} /%
义马煤	0.93	20.52	16.28	62.27
淮南煤	0.69	29.65	25.45	44.21
郑州煤	0.56	23.65	14.11	61.68
晋城煤	0.52	22.16	7.32	70.00

样品	元素分析				
	C _{ad} /%	H _{ad} /%	N _{ad} /%	S _{t,ad} /%	O _{ad} /%
义马煤	68.02	4.18	1.24	1.63	3.48
淮南煤	60.74	3.82	1.13	0.35	3.62
郑州煤	67.00	3.86	1.30	0.72	2.91
晋城煤	68.98	3.02	1.09	0.43	3.80

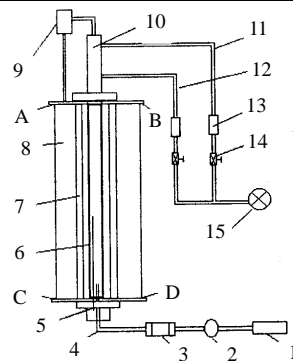


图 1 实验炉示意图

1. 分析仪
2. 抽气泵
3. 固体取样盒
4. 取样管
5. 热电偶
6. 刚玉管
7. 硅碳管
8. 保护层和炉膛
9. 给粉器
10. 混合段
11. 一次风管
12. 二次风管
13. 流量计
14. 调节阀
15. 空压机

2 试验结果及分析

2.1 温度的影响

图 2 为 NO_x 浓度随温度变化曲线（试验工况为：郑州煤细度为 80 μm，二次风温 300，给粉量 2 g/min，一二次风比值为 2，过量空气系数为 1.2）。从中看出：在炉

膛火焰中心区 NO_x 浓度对温度的变化不是很敏感, NO_x 浓度稍有增加的原因主要表现在热力 NO_x 的生成, 并随着温度的升高而增大。这和其它文献报道相吻合^[4]。 NO_x 在炉膛内径向分布先增加, 到炉膛中心区出现峰值, 然后再降低, 近炉膛底面时 NO_x 浓度又有所增加。温度越高, NO_x 浓度曲线波动越小。依照本实验炉的尺寸, 随着温度的升高, NO_x 稳定的峰值区域径向长为 $20\text{ cm} < 30\text{ cm} < 50\text{ cm}$ 。 NO_x 浓度偏离炉膛火焰中心区时有所降低, 在近炉膛底面处由于上端口一次风量不断送入, NO_x 向炉膛底面烟气出口处漂移以及尾部烟气出口压力略有增加导致 NO_x 瞬时浓度增加。

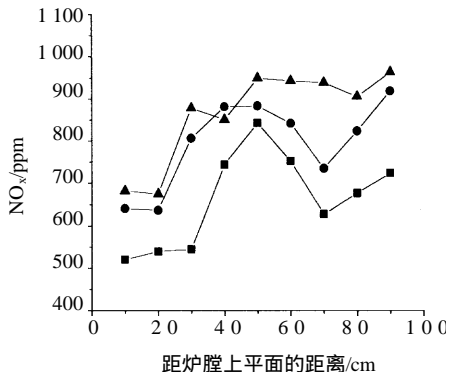


图2 炉温的影响

—1100 —1200 —1300

2.2 过量空气系数的影响

图3为 NO_x 浓度随过量空气系数 的变化曲线 (试验工况为: 郑州煤细度为 $80\ \mu\text{m}$, 二次风温 300°C , 给粉量 2 g/min , 一二次风比值为 2 , 炉膛温度为 1300°C)。可看出: 过量空气系数对 NO_x 生成的影响较为明显。 NO_x 浓度随着过量空气系数的增加而增加。 $\alpha = 1$ 时, NO_x 浓度沿径向稳定增长; $\alpha < 1$ 时 NO_x 浓度在火焰中心区域尾部急剧下降, 原因是氧含量不足, 大量 NO_x 被过量燃料还原成 N_2 。

2.3 二次风风温的影响

图4是 NO_x 浓度随二次风温的变化曲线 (试验工况为: 郑州煤细度为 $80\ \mu\text{m}$, 过量空气系数 $\alpha = 1.2$, 给粉量 2 g/min , 一二次风比值为 2 , 炉膛温度为 1300°C)。从中看出: 二次风温的改变对 NO_x 生成的影响不明显。二次风温越高, 对煤粉燃烧区域温度影响越小, 热力 NO_x 相对略有增大, 所以图中 NO_x 生成量随着二次风温增加而略有增加。二次风温的变化对 NO_x 浓度的径向分布影响很小。

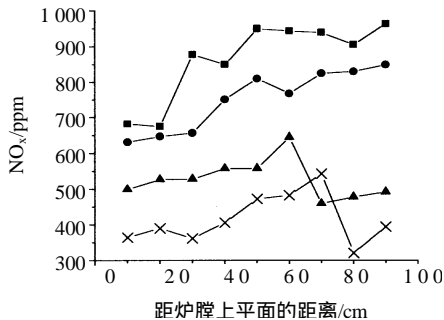


图3 过量空气系数的影响

— $\alpha = 1.2$ — $\alpha = 1$ — $\alpha = 0.8$ × — $\alpha = 0.6$

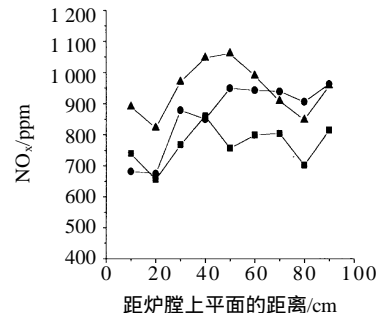


图4 二次风温的影响

—200 —300 —400

2.4 一二次风比值的影响

图5是 NO_x 浓度随一二次风比值 变化曲线 (试验工况为: 郑州煤细度为 $80\ \mu\text{m}$, 过量空气系数为 1.2 , 给粉量 2 g/min , 二次风风温为 300°C , 炉膛温度为 1300°C)。从中看出: NO_x 浓度对一二次风比值比较敏感。随着一二次风比值增加, 煤粉从富燃料燃烧转为富氧燃烧, 由于氧含量逐渐增多, 煤中氮转变为 NO_x 程度在逐渐增加, 如图中所示 NO_x 浓度随着一二次风比值的增加而逐渐增大。随着一二次风比值的的增长, NO_x 浓度沿炉膛径向分布越平缓。

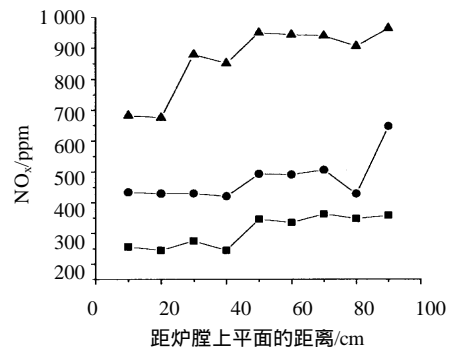


图5 一二次风比值 的影响

— $\alpha = 0.5$ — $\alpha = 1$ — $\alpha = 2$

2.5 给粉量的影响

图6是 NO_x 浓度随给粉量的变化曲线 (试验工况为: 郑州煤细度为 $80\ \mu\text{m}$, 过量空气系数 为 1 , 一二次风比值为 2 , 二次风风温为 300°C , 炉膛温度为 1300°C)。从中看出: 在过量空气系数为 1 , 给粉量大于 1 g/min 时由于富燃料燃烧, NO_x 浓度随着给粉量的增多反而下降。当给粉量小于 1 g/min 时, NO_x 浓度沿炉膛径向分布波动较大。在燃烧火焰中心区虽然富氧燃烧, 但由于给粉量较低, NO_x 生成量较低, 到火焰中心尾部如图中距炉膛上平面 70 cm 处开始急剧上升, 此时由于煤粉在充足的氧环境中燃尽率较大, 煤中 N 析出并转化为 NO_x 量增加。

2.6 煤粉细度的影响

图7是 NO_x 浓度随煤粉细度的变化曲线 (试验工况为: 过量空气系数 为 1.2 , 一二次风比值为 2 , 给粉量为 2 g/min , 二次风风温为 300°C , 炉膛温度为 1300°C)。从图中可以看出: 煤粉细度变化对 NO_x 浓度沿炉膛的径向分布影响较小。 NO_x 浓度随着煤粉细度的减小而降低。这和低温下 NO_x 析出特性有些雷同^[5]。同样是因为随着 (下转第 23 页)

在弯管处受到离心力的作用造成弯管半径大处煤粉浓度大，半径小处煤粉浓度小。煤粉浓度大，造成与气流的跟随性差，速度小。反之，煤粉的浓度小，跟随性较好，速度也高。

3 结 论

(1) 光学与煤粉浓度分布的测量研究是合理的、成功的。实验结果令人满意，对工程应用有重要的指导意义。

(2) 煤粉管道煤粉浓度场的分布在管内沿直径方向并不是均匀的，而是出现了一定的高、低浓度场，高、低浓度区的出现是由于弯头存在，使气流产生离心力的分布不同，高、低浓度场随着磨煤机给粉量的增加而趋向平缓。

(3) 煤粉管内两相流的速度分布呈现抛物线状，但随着颗粒浓度的增加，速度逐渐减小，速度的变化也趋向平缓。

(4) 煤粉管道内煤粉浓度增加，造成与气流的跟随性变

差，两相流的速度减小；反之，浓度减小，速度增加。

参 考 文 献

- [1] Ali Yilmaz, Edward K Levy. Roping phenomena in pulverized coal conveying lines [J]. Powder Technology, 1998,95: 43 ~ 48.
- [2] 王凯, 赵海生, 陈增宏. 煤粉浓度监测系统[J]. 动力工程, 1994, 14(3): 45 ~ 48.
- [3] Renate Dmowska, Barry Saltzman. Advance in Geophysics[M]. Academic Press Inc, 1993.
- [4] 蔡小舒, 潘咏志, 吴伟亮, 等. 电厂煤粉粒径、速度和浓度的在线测量技术研究[J]. 动力工程, 1999(6): 466~469.
- [5] 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [6] 岑可法, 樊建人. 燃烧流体力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.

编辑：闻 彰

(上接第 20 页) 粒径的减小，煤粉燃烧速率显著提高，由于 O₂ 的加速消耗，颗粒表面附近 O₂ 分压力降低很快，从而生成了大量的 CO 气体。正因为如此，在燃烧过程中碳颗粒表面的还原气氛加强，从而使得部分的焦炭氮形式 (C-N) 析出的燃料 NO_x 被还原成较稳定的气体 N₂。

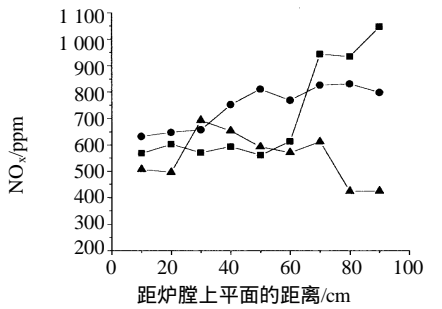


图 6 给粉量的影响

—0.5 g/min —1 g/min —2 g/min

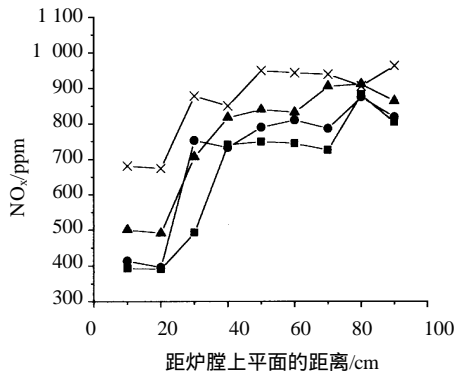


图 7 煤粉细度的影响

—20 μm —40 μm —60 μm x—80 μm

2.7 不同煤种的影响

图 8 是 NO_x 浓度随煤种的变化曲线 (试验工况为：4 种煤平均细度为 80 μm，过量空气系数为 1.2，给粉量为 2 g/min，一二次风比值为 2，二次风风温为 300，炉膛温度为 1300)。从表中可以看出：NO_x 生成量大小顺序和煤种含氮量相吻合。从表中可知 4 种煤中氮含量依次是郑州煤 (1.3%) > 义马煤 (1.24%) > 淮南煤 (1.13%) > 晋

城煤 (1.09%)，图 8 中所示同工况下 NO_x 生成量同样是郑州煤 > 义马煤 > 淮南煤 > 晋城煤。不同煤种 NO_x 浓度沿炉膛径向分布不同，烟煤淮南煤和义马煤在炉膛中心都有明显的峰值区，呈先增加后减小的趋势；对于贫煤郑州煤来说，先增大到中心火焰区后变化幅度较小，而无烟煤晋城煤沿炉膛径向一直呈增长趋势。

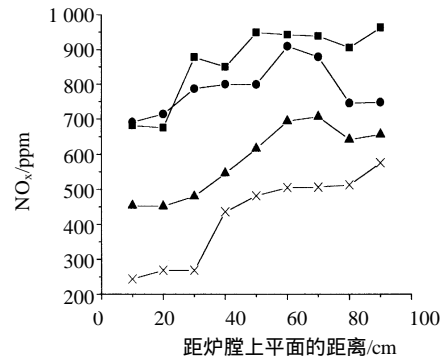


图 8 不同煤种的影响

—郑州煤 —义马煤 —淮南煤 x—晋城煤

3 结 论

煤粉高温燃烧时 NO_x 生成和径向分布的主要影响因素有：炉内温度、煤粉细度、给粉量、煤种、二次风温、一二次风比值及过量空气系数等。可以通过选取合适的运行参数有效地控制 NO_x 生成。

参 考 文 献

- [1] 赵宗彬, 等. 煤燃烧过程中 NO_x 的生成和还原[J]. 煤炭转化, 1999(4).
- [2] 郑楚光. 洁净煤技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社.
- [3] 毕玉森, 等. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. 热力发电, 2000(2).
- [4] 姚洪, 周建平, 等. 炉内喷钙脱硫实验研究及其影响[J]. 发电设备, 1997(6).
- [5] 姜秀民, 等. 超细化煤粉低温燃烧的 NO_x、SO₂ 生成特性研究[J]. 环境科学学报, 2000(4): 431 ~ 434.

编辑：霄 珉