

无烟煤与贫煤混煤燃烧和 NO_x 排放特性的实验研究方立军¹, 高正阳², 阎维平², 惠世恩¹

(1. 西安交通大学 能源与动力学院, 陕西 西安 710049; 2 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 利用热天平和小型煤粉燃烧实验台对无烟煤、贫煤及其三种配比混煤的燃烧特性、不同配风下 NO_x 的生成规律和燃尽特性进行了实验研究。通过对试验数据的整理和分析, 认为无烟煤与贫煤在燃烧性能上略有差异, 混煤的燃烧特性介于两者之间, 合适的选取过量空气系数可实现不同掺烧比无烟煤与贫煤混煤高效低 NO_x 燃烧。并针对三种掺烧比的混煤提出了其高效低污染燃烧的过量空气系数范围, 为燃用上述混煤的电厂经济清洁运行提供一些参考数据。

关键词: 无烟煤与贫煤混煤, 燃烧特性; NO 排放; 燃尽特性

中图分类号: TQ354; X705 文献标识码: A

1 引言

近年来, 煤燃烧过程中产生的氮氧化物对大气的污染问题越来越引起人们的重视。电站锅炉的 NO_x 排放量占各种燃烧装置 NO_x 排放量总和的一半以上, 而且 80% 左右是由煤粉锅炉排放的^[1~2]。目前, 国内许多大型机组采用设计煤种中贫煤掺烧无烟煤的方式, 这种方式对劣质煤的利用带来了一定的经济效益, 然而国内对该类混煤污染物排放规律的研究还不充分, 因此, 对燃用上述煤种的 NO_x 生成机理开展研究, 提高锅炉的效率、降低 NO_x 排放量是十分重要的。文中结合上述单煤与混煤的燃烧特性, 对混煤的 NO_x 排放规律和燃尽特性进行了分析和研究。

2 试验系统和设备

2.1 热重分析实验系统

试验采用的是 WCT-2 高温型微机差热天平, 该天平可对微量试样同时进行差热分析、热重测量和热重微分测量。

2.2 煤粉燃烧试验台试验系统

煤粉燃烧试验台是模拟电厂锅炉炉内燃烧工况的试验设备。该试验台的额定给粉量为 20 kg/h, 炉膛内径为 300 mm, 高 2 580 mm, 垂直布置, 燃烧器为旋流式。配有数据记录和控制系統、燃烧系統、冷却烟氣系統和旋风分离系統。图 1 为煤粉燃烧试验台的系統示意图。图中 1 号~6 号为沿炉膛纵向自上而下六个测孔。

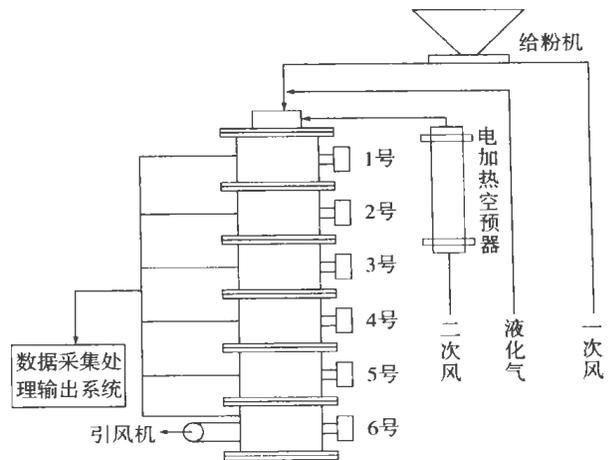


图 1 煤粉燃烧试验台系统示意图

烟氣分析系統采用的为德国 ROSEMONT 公司生产的烟氣分析仪, 该设备可同时对烟氣中 CO 、 CO_2 、 SO_2 、 NO 及 O_2 等五种气体成分进行在线检测。烟氣采集和分析系統如图 2 所示。

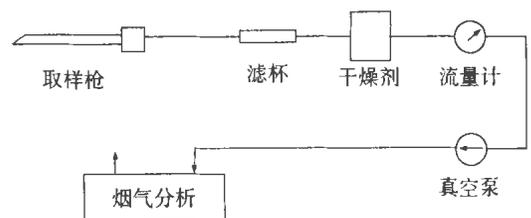


图 2 烟氣采集及分析系統流程图

收稿日期: 2001-11-22; 修订日期: 2002-01-08

作者简介: 方立军(1971-), 男, 四川内江人, 西安交通大学博士研究生。

3 试验工况

3.1 热重分析的试验工况

试验用无烟煤和贫煤的工业分析见表1。无烟煤与贫煤分别按3:1、1:1、1:3的比例进行混配, 简称为混煤(wp31)、混煤(wp11)和混煤(wp13)。为规范实验条件, 试验升温速率为40 °C/min, 煤样在流动空气介质中燃烧, 空气为下进上出方式。

表1 试验煤样的工业分析

煤种	水分 $W_{af}/\%$	灰分 $A_{af}/\%$	挥发分 $V_{af}/\%$	固定碳 $FC_{af}/\%$	高位发热量 $Q_{gs,af}/MJ \cdot kg^{-1}$
无烟煤	0.78	26.19	9.42	63.61	24.84
贫煤	0.79	27.2	14.44	57.57	24.745

3.2 小型煤粉燃烧实验台的试验工况

试验模拟了贫煤、无烟煤及其三种配比混煤在不同工况下的NO排放情况。实验过程中, 控制炉内总的过量空气系数是通过调节一、二次风风量来实现的。具体实验工况见表2。

表2 实验工况

工况	实验煤种	过量空气系数 a	工况	实验煤种	过量空气系数 a
1	贫煤	1.091	18	混煤(wp31)	1.136
2	贫煤	1.133	19	混煤(wp31)	1.149
3	贫煤	1.188	20	混煤(wp31)	1.214
4	贫煤	1.202	21	混煤(wp31)	1.149
5	贫煤	1.27	22	混煤(wp11)	1.06
6	贫煤	1.108	23	混煤(wp11)	1.1
7	贫煤	1.224	24	混煤(wp11)	1.153
8	无烟煤	1.030	25	混煤(wp11)	1.166
9	无烟煤	1.068	26	混煤(wp11)	1.232
10	无烟煤	1.12	27	混煤(wp11)	1.109
11	无烟煤	1.133	28	混煤(wp13)	1.076
12	无烟煤	1.197	29	混煤(wp13)	1.143
13	无烟煤	1.0	30	混煤(wp13)	1.17
14	无烟煤	1.154	31	混煤(wp13)	1.183
15	无烟煤	1.209	32	混煤(wp13)	1.25
16	混煤(wp31)	1.044	33	混煤(wp13)	1.149
17	混煤(wp31)	1.084			

4 试验结果

4.1 单煤及混煤的热重分析曲线

试验煤样的热分析曲线如图3、图4所示。

4.2 单煤及混煤 NO 排放的试验结果

单煤及混煤炉膛出口处NO浓度(6%O₂)分布见图5, 沿炉膛纵向的NO浓度分布见图6~图8。

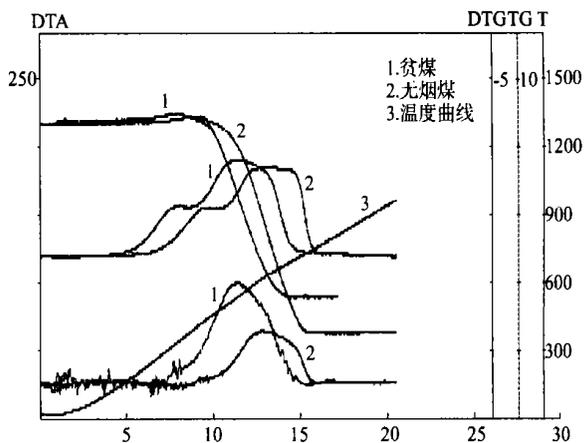


图3 贫煤和无烟煤的热分析曲线

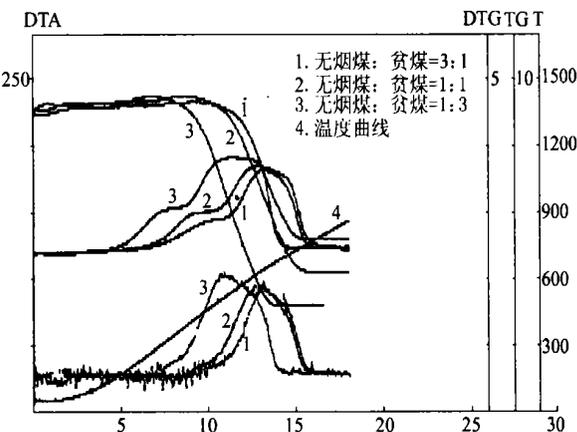


图4 无烟煤与贫煤混煤的热分析曲线

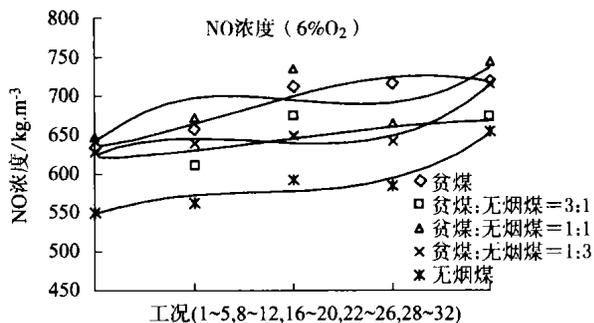


图5 试验煤样炉膛出口处的NO浓度分析

4.3 单煤及混煤的沿程燃尽情况

试验煤种在不同工况下稳定燃烧时, 自炉膛底

部 6 号取样孔取得灰样的燃尽率比较及沿程燃尽率比较见图 9、图 10。灰样的燃尽率由灰份示踪法确定^[3]。

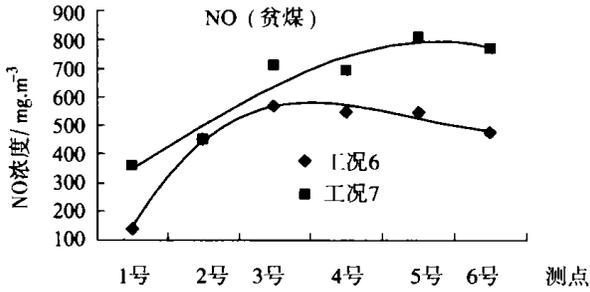


图 6 贫煤沿炉膛纵向的 NO 浓度分布

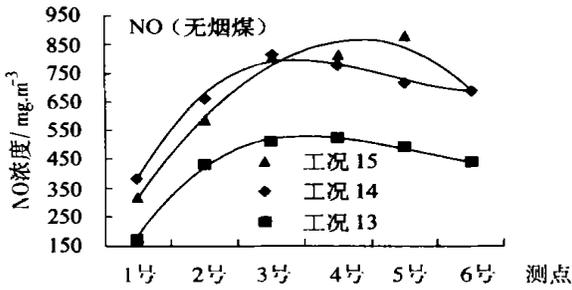


图 7 无烟煤沿炉膛纵向的 NO 浓度分布

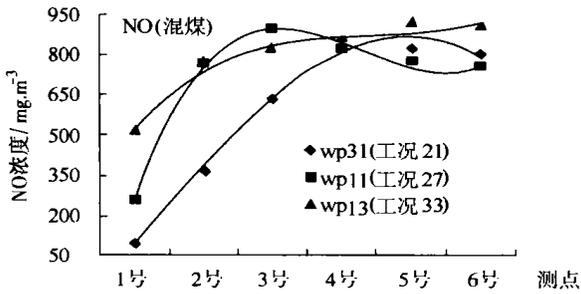


图 8 混煤沿炉膛纵向的 NO 浓度分布

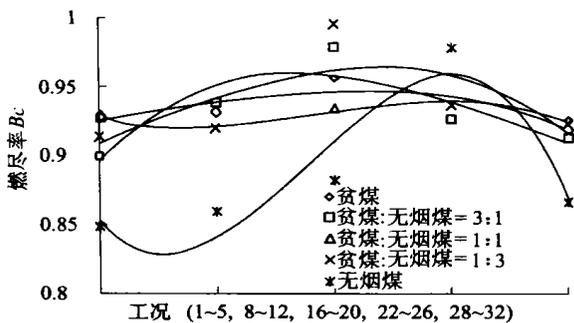


图 9 试验煤样不同工况下的燃尽情况

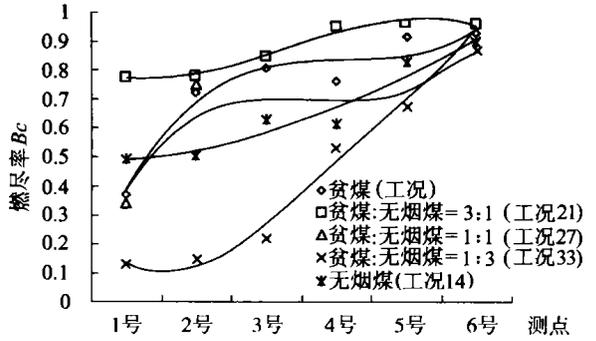


图 10 试验煤样沿炉膛纵向燃尽情况

5 试验结果分析

5.1 单煤及混煤的燃烧特性分析

5.1.1 主要特征参数的得出

通过对图 3 和图 4 中燃烧特性曲线的分析和处理,可以得到煤样的着火温度、最大燃烧速率及其对应温度、燃尽温度等反映煤粉燃烧特性的特征参数,见表 3。

表 3 试验煤样的特征参数

试验煤样	煤粉粒径/ μm	着火温度 $t_i / ^\circ\text{C}$	$\text{DTG}_{\text{max}} / T$ ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} / ^\circ\text{C}$)	燃尽温度 $t_b / ^\circ\text{C}$	活化能 $E / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
无烟煤	< 66	647	1.46/646	693	91 465.61
混煤(wp31)	< 66	630	1.32/647	706	90 038.65
混煤(wp11)	< 66	610	1.43/610	652	88 625.42
混煤(wp13)	< 66	605	1.51/665	698	85 812.07
贫煤	< 66	600	1.13/631	673	84 794.12

5.1.2 活化能的求解^[4]

在燃烧动力学参数中,活化能比着火温度更能从本质上描述煤的着火性能。本文采用积分法求取煤样的活化能,试验煤样的活化能计算数值见表 3。可见在单煤及三种混煤中,贫煤的活化能最低,无烟煤最高,混煤的活化能介于两者之间。

由特征参数可以看出,贫煤中掺烧无烟煤,随掺烧量的增加活化能上升,且燃烧速度和燃尽温度均相应发生变化,可见无烟煤与贫煤在燃烧特性上略有差异,从而这给由两者组成的混煤在着火、燃尽和污染物排放方面带来一定影响。活化能的变化不明显表明单煤与混煤在着火温度上略有变化,这与热重分析得到的着火温度 t_i 略有增加是相一致的;燃烧速度的提高可改善煤粉的燃烧稳定性,可见贫煤中掺烧适量无烟煤可提高燃烧的稳定性。

5.2 单煤及混煤 NO 生成规律

燃煤产生的 NO_x 可分成燃料型 NO_x 、热力型 NO_x 和快速型 NO_x 三种类型,其中燃料型 NO_x 占 75%~90%^[1]。在试验中,炉内最高温度低于 1500℃,因此可认为试验中生成的 NO 主要为燃料型 NO_x 。

不同煤种燃烧过程中 NO 浓度沿炉膛轴向分布曲线(如图 6~图 8)显示出,无烟煤、贫煤及其混煤燃烧过程中在炉膛的上半部 NO 浓度沿炉膛向下迅速增加,这说明在煤粉燃烧的前期 NO 随燃烧的进行迅速生成;在炉膛下半部, NO 浓度沿炉膛向下基本不变或稍有减少,说明在煤粉燃烧的后期 NO 的生成基本停止,甚至有部分 NO 被还原。这表明 NO 主要在燃烧前期生成,在燃烧后期则基本不再生成,甚至被部分还原。因此可将 NO 释放过程分为前期快速生成阶段和后期稳定阶段。这两个阶段内 N 被氧化及 NO_x 被还原决定了炉膛出口烟气内 NO_x 含量。

两煤种混煤的 NO 浓度分布在炉内只有一个峰值,这一情况与以往资料中认为的两煤种混煤 NO 浓度存在两个峰的结论有所不同^[5],我们认为这一方面由于两种煤的挥发分含量较低,挥发分燃烧形成的 NO 量较少;另一方面煤中焦炭是形成 NO 的主要来源,且焦炭 N 在煤粉燃烧前期聚集释放。从试验煤样沿炉膛纵向燃尽情况(如图 10)可见,煤粉前期燃烧过程中(1号~3号孔),部分焦炭已参与燃烧,焦炭的燃烧提高了炉内温度,促进了各反应的反应速度,若此时氧量充分,煤中的 N 物质会迅速释放并被氧化生成 NO 。

不同煤种在不同工况下炉膛出口处的 NO 浓度分布(如图 5)显示出,随过量空气系数的增加,各煤种的 NO 量逐渐增大。可见不论单煤还是混煤,过量空气系数是影响 NO 量高低的一个主要因素。

5.3 单煤及混煤的燃尽特性分析

无烟煤和贫煤随过量空气系数变化其燃尽特性的变化规律不同(如图 9 所示),无烟煤的燃尽特性受过量空气系数变化的影响较为明显,在 α 为 1.133 附近时,燃尽率较高,而 α 为 1.03~1.068 时,燃尽率较低;而贫煤燃尽情况的变化较为平缓,在 α 为 1.188 附近时,燃尽率较高;且无烟煤较贫煤在相同工况下燃尽性能较差。对于由贫煤和无烟煤组成的三种配比的混煤,混煤(wp11)燃尽率的变化随过量空气系数的变化较为平缓,在 α 为 1.166 附近时,燃尽率较高。而混煤(wp31)和混煤(wp13)的波动变化较

大,混煤(wp31)在 α 为 1.084~1.136 时,燃尽率较高;混煤(wp13)在 α 为 1.17~1.183 时燃尽率较高。可见,当单一煤的挥发分较高时,达到较高燃尽率的最佳 α 应较大些;挥发分较低时,则 α 较小。混煤的 α 介于这两种单一煤之间。

同样,对于上述煤种过量空气系数对 NO 的影响也存在着一个波动性变化。如图 5 所示,各煤种的炉膛出口处 NO 浓度变化受不同过量空气系数的变化影响是不同的。混煤(wp11)在 α 为 1.16~1.24 时 NO 浓度相对较低;混煤(wp13)在 α 为 1.17~1.183 时 NO 浓度相对较低;而混煤(wp31) NO 浓度的变化随过量空气系数的变化较为平缓,在 α 为 1.084~1.136 时 NO 浓度相对较低。

因此,通过上述分析可以得出,在一定过量空气系数下,可以使上述混煤达到较高燃尽率和较低 NO 排放量的目的。

6 结论

(1) 无烟煤与贫煤在燃烧特性上略有差异,其混煤的燃烧性能介于两者之间,贫煤中掺烧适量无烟煤可提高燃烧的稳定性。

(2) 无烟煤、贫煤及其混煤在燃烧过程中 NO 的生成可分成两个阶段, NO 主要在燃烧前期生成,而且 NO 峰值位置与单一煤或混煤的挥发分大小有关。挥发分较少时 NO 峰值的位置延迟,表明主要是焦炭生成 NO ;挥发分较多时 NO 峰值提前,表明挥发分生成的 NO 相对较多。

(3) 过量空气系数的选择对由贫煤和无烟煤组成的不同配比的混煤的 NO 排放量及燃尽情况的影响非常重要,合理的选择过量空气系数可以使混煤达到高效低污染燃烧的目的。

参考文献:

- [1] 毛健雄,毛健全,赵树民.煤的清洁燃烧[M].北京:科学出版社,1998.
- [2] 何佩鳌.我国燃煤电厂 NO_x 控制和洁净燃烧技术[J].电站系统工程,1993,9(1):36-48.
- [3] 曾汉才,姚斌,邱建荣,等.无烟煤与烟煤的混合煤燃烧特性与结渣特性研究[J].燃烧科学与技术,1996,2:181-189.
- [4] 郭树才.煤化学工程[M].北京:冶金工业出版社,1991.
- [5] 邱建荣,马毓义,曾汉才,等.混煤氮的热解析出特性及燃料 NO_x 的形成规律[J].工程热物理学报,1995,16(1):115-118.

(辉 编辑)

and transverse speed pulsation of the drag reducing fluid has been conspicuously suppressed. **Key words:** drag-reducing fluid, turbulence structure, surfactant solution, phase Doppler anemometer

220 t/h 电站燃油炉改烧水煤浆炉内传热及排放特性的试验 = **Heat Transfer and Emission Characteristics Tests of a 220 t/h Oil-fired Utility Boiler Retrofitted for Firing Coal-water Slurry** [刊, 汉] / WANG Ling, ZHAO Xiang, CAO Xin-yu, HUANG Zhen-yu, et al (Institute of Thermal Energy Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 589 ~ 591

Heat transfer performance and pollutant emissions were measured and tested for an oil-fired 220 t/h utility boiler being retrofitted to fire coal-water slurry, a new type of clean fuel as a replacement for oil. Measurements were taken of the temperature field, flame emissivity, superheater tube wall temperature, exhaust gas temperature and composition. These data represent some special features of coal-water slurry combustion and may serve as reference data during the design and retrofitting of a boiler for firing coal-water slurry. **Key words:** coal-water slurry, flame emissivity, pollutant emission, boiler

高硫石油焦燃烧污染物排放特性的试验研究 = **Experimental Investigation on Pollutant Emission Characteristics Resulting from the Burning of Petroleum Coke with a High Sulfur Content** [刊, 汉] / YUAN Gui-cheng, LIU Wu-biao, ZHANG Chun-lin, LIU De-chang (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 592 ~ 594, 606

On a hot-state test rig a desulfurization test was conducted for the burning of high-sulfur petroleum coke. On this basis discussed was the influence of such factors as combustion temperature, calcium/sulfur ratio and excess oxygen content on SO₂ and NO_x emissions. As a result, a theoretical and practical basis is provided for the industrial application of petroleum coke with a high sulfur content. **Key words:** petroleum coke with a high sulfur content, combustion test, SO₂ emissions, NO_x emissions

无烟煤与贫煤混煤燃烧和 NO_x 排放特性的实验研究 = **Experimental Research on the Burning of Anthracite Mixed with Lean Coal and Its NO_x Emission Characteristics** [刊, 汉] / FANG Li-jun, HUI Shi-en (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), GAO Zheng-yang, YAN Wei-ping (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 595 ~ 598

By using a thermobalance and a small-sized pulverized-coal combustion test rig an experimental study was conducted for a multitude of test items. The latter include the combustion characteristics of anthracite, lean coal and the blends of the above two coals in three different proportions, NO_x generation mechanism at different combustion-air supply rates, and burn-out characteristics. Through the processing and analysis of the test data it is concluded that there exists some difference in combustion performance between the anthracite and lean coal with the performance of the blends of these two coals exhibiting intermediate characteristics. A proper selection of excess air factor can lead to a high-efficiency combustion of anthracite and lean coal blended in different ratios and to low NO_x emissions. With respect to coals being blended in three different ratios a suitable range of excess-air factor values is proposed to attain a high-efficiency combustion and low pollutant emissions. This may serve as a guide for the cost-effective and clean operation of power plants firing the above coal blends. **Key words:** burning of anthracite mixed with lean coal, combustion characteristics, NO emissions, burn-out characteristics

1025 t/h“W”火焰锅炉燃烧特性试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of a 1025 t/h**