

高温预热煤粉的无焰燃烧特性

刘 稳^{1,2}, 欧阳子区², 曹晓阳², 马洪洲^{1,2}

(1. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要:为减少煤粉燃烧中的 NO_x 排放,提出采用预热燃烧工艺,实现煤粉的无焰燃烧,在30 kW煤粉无焰燃烧实验台上以神木烟煤粉为燃料进行相关研究,探讨煤粉的预热特性及无焰燃烧中烟气成分的变化规律。结果表明:神木烟煤在预热燃烧器中可以被预热至800℃以上,预热后产生的高温煤气为强还原性气体,其主要成分为 CO 、 H_2 、 CH_4 、 N_2 和 CO_2 ;预热燃料在下行燃烧室中能够实现稳定无焰燃烧,且燃烧室内温度分布均匀,峰值温度低; NO_x 在燃料喷口附近生成,在主燃烧区被大量还原,最终 NO_x 排放为107.64 mg/m³(@6% O_2),尾部烟气成分以体积分数为6%的 O_2 为基准),通过合理组织燃烧,能有效控制 NO_x 生成,减少 NO_x 排放。

关键词:氮氧化物;预热;无焰燃烧;煤粉

中图分类号:TU7

文献标志码:A

Flameless combustion of high preheated pulverized coal

LIU Wen^{1,2}, OUYANG Ziqu², CAO Xiaoyang², MA Hongzhou^{1,2}

(1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A fuel preheating technique was proposed to achieve coal flameless combustion and de- NO_x emissions. Experimental research was carried out with Shenmu bitumite, and coal preheated characteristic and variation law of flue gas compositions in flameless combustion were discussed. The results show that Shenmu bitumite can be preheated up to above 800℃, and the high-temperature coal gas generated by coal preheating has strong reducing action, which contains mainly CO , H_2 , CH_4 , N_2 and CO_2 . Stable flameless combustion can be achieved with preheated fuels in down-fired combustor, and the temperature distribution is uniform and the peak temperature is low in combustor. NO_x is generated near the fuel nozzle and reduced mainly in the main combustion zone, and the final NO_x emission value is 107.64 mg/Nm³(@6% O_2). The generation of NO can be controlled and NO_x yield can be reduced by rational combustion organization.

Keywords: NO_x ; preheat; flameless combustion; coal

我国的能源结构以煤炭为主,主要的利用方式为燃烧发电或供热。作为传统化石能源,煤的燃烧会生成大量的污染物,其中包括 NO_x 。 NO_x 是造成酸雨的主要物质之一,同时也是光化学烟雾的元凶,对人类的生存环境危害极大^[1]。如何有效控制 NO_x 生成,实现煤的低 NO_x 燃烧,是一个亟需解决

的问题。

近年来低 NO_x 燃烧技术发展迅速, NO_x 排放得到了有效地控制。随着国家最新环保标准的实施, NO_x 的排放要求更加苛刻,现有的燃烧技术已无法完全满足减少 NO_x 排放的要求,锅炉的脱硝负荷加重。

收稿日期:2018-08-29,修回日期:2018-10-16。

基金项目:国家重点研发计划项目,编号:2017YFB0602001。

第一作者简介:刘稳(1993—),男,博士研究生,研究方向为煤粉无焰燃烧技术。E-mail:liuwen@iet.cn。

通信作者简介:欧阳子区(1987—),男,博士,副研究员,研究方向为洁净煤燃烧技术。E-mail:ouyangziqu@iet.cn。

无焰燃烧技术是一种新型低 NO_x 燃烧技术,与常规燃烧技术相比,可以有效控制 NO_x 排放^[2-3]。无焰燃烧中燃烧区域温度分布均匀且峰值温度低,没有明显的火焰锋面,噪音小且 NO_x 排放少^[4-5]。随着无焰燃烧技术的发展,其研究对象从最初的气体燃料^[2,6]拓展至固体燃料^[7-8]。无焰燃烧又称为高温低氧燃烧,实现无焰燃烧一般需要满足以下条件:1)氧化剂在反应之前被预热到一定的高温或者炉膛被充分预热使得燃烧时炉内任意处的温度均大于燃料的自燃点;2)燃料或氧化剂应进行高速射流,以使燃料和氧化剂被高温烟气充分稀释;3)燃烧反应区中氧气的体积分数小于 15%^[9]。现阶段固体燃料无焰燃烧的实现方式主要为高温空气燃烧,即利用燃气燃烧或者蓄热体产生的高温低氧空气^[10-11]作为助燃空气,或者利用常温空气高速射流卷吸高温烟气来实现无焰燃烧^[7,12],但对于通过燃料预热实现无焰燃烧的方式却鲜有报道。全俄热工研究院(All-Russian Thermal Engineering Institute)曾对煤粉预热技术有过深入的研究,证实该技术高效而稳定^[13-14]。中科院工程热物理研究所提出基于循环流化床的新型预热燃烧技术,并进行了大量的实验,表明该技术运行稳定且能将燃料预热至 800 ℃ 以上,超过燃料的着火点^[15-17]。本文中在前期研究基础上,利用预热燃烧技术来实现煤粉的无焰燃烧,并对燃料预热无焰燃烧技术中的预热、燃烧及排放特性进行探讨,旨在探索实现固体燃料燃烧中低 NO_x 排放的新途径。

1 实验

1.1 原料

本研究中以陕西神木煤矿产烟煤为燃料,其工业及元素分析收到基(ar)成分见表1。燃料的粒径分布范围为 0~100 μm ,其中 50% 切割粒径 d_{50} 为 18.38 μm ,90% 的切割粒径 d_{90} 为 47.93 μm ,其具体粒径分布见图1。

表1 神木烟煤工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analyses of Shenmu anthracite

质量分数/%				质量分数/%					
M_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
11.81	30.57	47.81	9.82	62.94	3.88	10.18	0.98	0.41	

1.2 装置及过程

本研究中的实验装置为自行设计搭建的 30 kW 煤粉无焰燃烧实验台,其由预热燃烧器、下行燃烧室

及其他辅助系统组成。实验系统的具体工艺流程见图2。

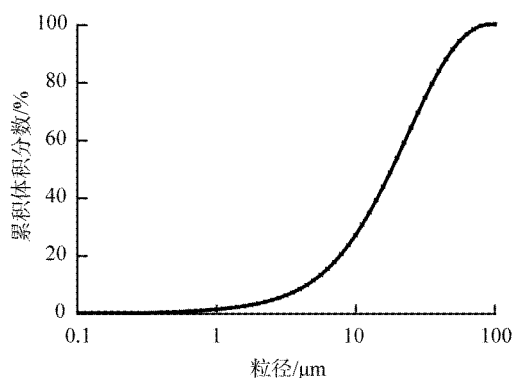
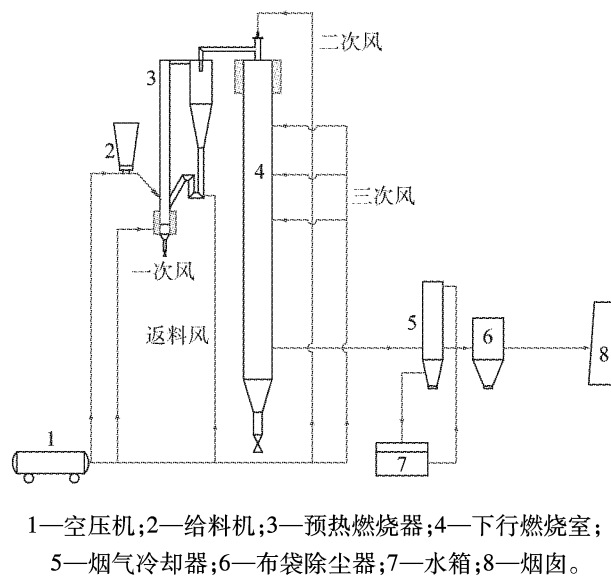


图1 神木烟煤粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of Shenmu anthracite



1—空压机;2—给料机;3—预热燃烧器;4—下行燃烧室;
5—烟气冷却器;6—布袋除尘器;7—水箱;8—烟囱。

图2 30 kW 煤粉无焰燃烧实验台系统流程

Fig.2 Schematic of 30 kW coal preheating combustion test rig

预热燃烧器以循环流化床为设计原型,其由 $\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{20}$ 制成,并由提升管、旋风分离器、返料器等部件组成。提升管内径为 90 mm,高度 1 500 mm。一次风从提升管底部供入,风量约为理论空气量的 30%。燃料进入预热燃烧器后,在高温床料的作用下迅速着火并部分燃烧,将自身加热至 800 ℃ 以上。煤粉经过预热燃烧器后生成高温预热固体燃料和煤气,统称为预热燃料,并从旋风分离器出口进入下行燃烧室。

下行燃烧室内径 300 mm,高度为 3 500 mm,其顶部布置有燃料喷口和二次风喷口。喷口结构见图3,其中预热燃料喷口内径为 36 mm,位于燃烧室中心;二次风喷口内径为 7 mm,为中心对称布置,位于燃料喷口的两侧。在距离下行燃烧室顶部 500、

1 000、1 500 mm 处布置有 3 层三次风喷口,每层均有单独的阀门和流量计,可根据实验情况进行控制。

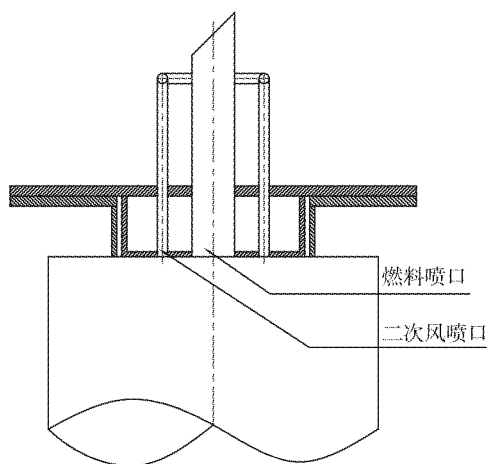


图3 下行燃烧室顶部喷口结构

Fig.3 Schematic of nozzles

1.3 取样分析

预热燃烧器内布置有 5 支 K 型热电偶,分别位于提升管底部、中部、顶部,以及返料器和出口处;下行燃烧室内沿轴线方向合理布置了 10 支 S 型热电偶。在预热燃烧器出口处以及在距下行燃烧室顶部 150、400、900、1 400、2 400、3 400 mm 处设置有烟气取样口。其中预热燃烧器出口气体成分通过气袋收集并由 GC7800 气相色谱仪(安捷伦科技有限公司)进行分析;下行燃烧室烟气成分则由 Gasmet FTIR DX4000 烟气分析仪(芬兰 GASMET 公司)进行在线分析;烟气冷却器出口氧含量由 Testo 烟气分析仪(德国德图公司)进行在线监测。在烟气冷却器出口进行飞灰取样并分析含碳量,用以计算燃烧效率。下行燃烧室轴向方向共布置了 6 层观火窗,分别位于下行燃烧室顶部 80、250、600、900、1 200、1 600 mm 处,其中最上的 2 层观火窗为 15 mm × 150 mm 的方形结构,下面 4 层则为内径 63 mm 的圆形结构。实验过程中利用 Canon G7X 相机(日本佳能株式会社)拍摄燃烧室内的火焰燃烧状况,相机参数统一调整为光圈 F4,快门速度 1/250 s,感光 ISO 200。实验过程中的所有取样分析均在系统运行稳定 1.5 h 后进行,取样过程中系统各测点的温度波动在 ± 4 °C 以内。

1.4 工况

本实验研究中的具体运行工况参数见表 2。其中,预热燃烧器空气过量空气系数、二次风过量空气系数分别为通入预热燃烧器的风量及二次风量与煤粉完全燃烧所需理论空气量的比值,预热温度为预

热燃烧器出口处的温度。

表2 实验工况参数

Tab.2 Experimental conditions

参数	工况
输入热功率/kW	31.9
给粉量/(kg·h ⁻¹)	4.68
预热燃烧器空气量/(m ³ ·h ⁻¹)	11
预热燃烧器过量空气系数	0.37
预热温度(T_p)/°C	833
二次风量/(m ³ ·h ⁻¹)	7.74
二次风过量空气系数(λ_2)	0.26
三次风喷口位置/mm	1 000
总风量/(m ³ ·h ⁻¹)	33
总过量空气系数	1.12

2 结果及分析

2.1 预热燃烧器运行特性

预热燃烧器内温度分布随时间变化曲线见图 4,其中 T1—T4 分别是提升管底部、中部、顶部和返料器立管处的温度,T5 为预热燃烧器出口处温度。预热燃烧器运行稳定,提升管密相区温度最高,为 903 °C,预热燃烧器出口温度最低,为 833 °C。

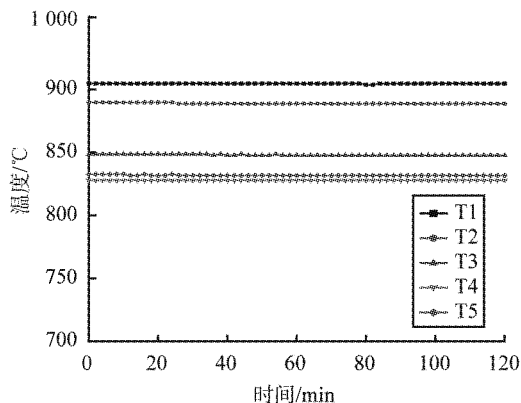


图4 预热燃烧器各温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature variations over Time in preheating burner

实验过程中在预热燃烧器出口处对预热后的煤气成分取样并通过气相色谱仪进行分析,其分析结果见表 3。由表可知,神木烟煤粉预热后的煤气成分主要为 N_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 等,另有少量的 CH_4 ,没有检测到 O_2 及 NO_x 。结果表明,煤气具有强还原性,对 NO_x 的生成有很好的抑制作用。在预热燃烧器出口处对预热后的固体燃料取样并进行工业分析,

结果表明挥发分为 12.17%,灰分为 20.78%。根据灰平衡原理对神木烟煤粉预热过程中的各组分转化率进行计算^[18]:

$$X \text{ 组分剩余率} = \text{样品 } X \text{ 含量} * \text{原煤灰含量} / \text{样品灰含量} / \text{原煤 } X \text{ 含量},$$

$$X \text{ 组分转化率} = 1 - X \text{ 组分剩余率}.$$

计算结果表明,经过预热,燃料中挥发分转化率为 81.2%,可燃物转化率为 52.3%,燃料中的挥发分大部分析出。

表 3 煤气主要成分体积分数
Tab. 3 Compositions of coal gas

组分	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂
体积分数/%	64.26	0.96	11.37	18.55	4.86

2.2 无焰燃烧

下行燃烧室沿轴向的温度分布曲线见图 5,其中,三次风由距顶部 1 000 mm 处喷入。由图可知,下行燃烧室温度最高点位于 600 mm 处,为 1 086 °C,处于二次风喷口与三次风喷口之间。定义二次风喷口至下行燃烧室 1 200 mm 处为主燃烧区,该区域温度分布均匀,最大温差仅 73 °C。

二次风冷态流速为 27.93 m/s,此时雷诺数为 9 400,为湍流状态。由于二次风为高速射流,卷吸下游烟气和三次风,使得主燃烧区内氧化剂与燃料混合均匀,因此导致较为均匀的温度分布,峰值温度也较低。在主燃烧区内,由于预热燃料的强还原性,因此靠近燃料喷口的区域为强还原区,而在其他区域,则是高温低氧弥散反应区。在主燃烧区以外,温度沿着下行燃烧室轴向方向均匀下降,其分布曲线近乎为直线。分析认为,燃烧主要反应发生在主燃烧区,在该区域内,温度空间分布由燃烧放热及系统对外散热共同控制,两者达到平衡,温度分布较为平缓。在主燃烧区以外,由于燃烧反应已经很弱,温度分布受制于系统散热,没有热量补充,因此温度沿轴线稳步下降。

定义 T_{mean} 为燃烧区内的空间平均温度, T' 为均方根温度波动^[20],

$$T_{\text{mean}} = \frac{\int T dV}{\int dV}, \quad (1)$$

$$T' = \left(\frac{\int \left(\frac{T - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}} \right)^2 dV}{\int dV} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

经计算得出,下行燃烧室平均温度为 964 °C,均方根温度波动为 10.65%。主燃烧区平均温度为 1 063 °C,均方根温度波动为 2.18%。Kumar 等^[19]认为反应器内温度归一化之后空间温度变化在 15% 以内的燃烧可以定义为无焰燃烧。本实验中,燃烧室均方根温度波动小于 15%,尤其在主燃烧区内,均方根温度波动甚至低于 3%,满足 Kumar 对无焰燃烧的定义。

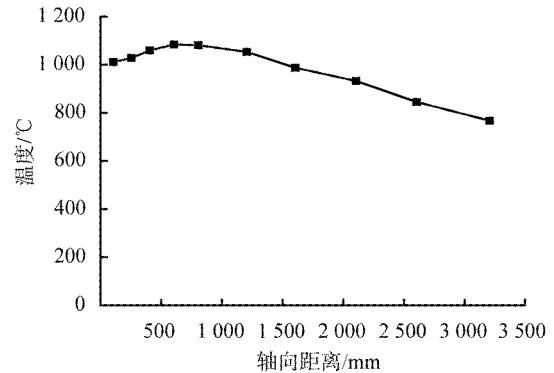


图 5 下行燃烧室轴向温度分布

Fig. 5 Temperature profile of down-fired combustor

下行燃烧室内沿轴线方向的火焰燃烧图像见图 6,其中最上层观火窗紧贴燃烧室顶部。由图可见,

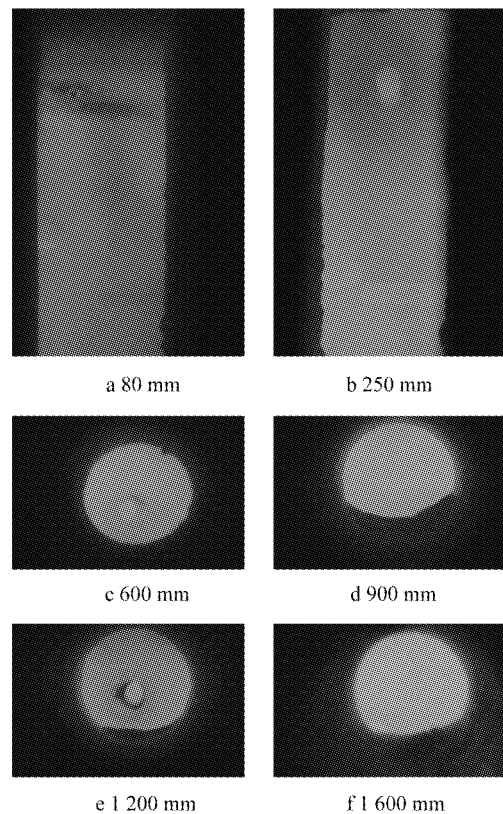


图 6 沿轴线方向的火焰燃烧图像

Fig. 6 Flame images of down-fired combustor

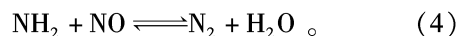
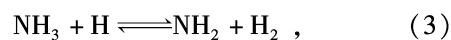
下行燃烧室内部比较通透,整体呈现暗红色,没有明显的火焰锋面。图 6a 可以清晰地看到燃烧室顶部的燃料喷口和两边对称布置的二次风喷口,证实此为典型的无焰燃烧状况。烟气冷却器出口处飞灰含碳量为 9.77%,计算燃烧效率高达 98.5%。

2.3 NO_x 及其前驱物

NH_3 和 HCN 是 NO_x 的主要前驱物,对 NO_x 的生成与转化具有重要的影响。下行燃烧室沿程烟气中的 NH_3 、 HCN 及 NO_x 质量浓度变化曲线如图 7 所示。由图可知, NH_3 、 HCN 及 NO_x 质量浓度沿轴线方

向变化趋势相同,在主燃烧区内浓度快速下降,在主燃烧区外则基本保持不变。

NH_3 和 HCN 在高温下不稳定,其在富氧条件下易转化为 NO_x ,而在贫氧条件下更易向 N_2 转化^[20]。在主燃烧区内,由于氧气弥散分布且浓度较低,因此可认为 NH_3 和 HCN 主要向 N_2 方向转化。图中显示, NH_3 在预热燃料喷入下行燃烧室后浓度急剧下降至 0。 NH_3 浓度下降速度明显快于 HCN ,可知, NH_3 的反应活性更大。在低氧浓度的主燃烧区内, NH_3 具有一定的还原性,可以促进 NO_x 还原为 N_2 ,其参与的主要还原反应^[21]为



燃料燃烧中生成的 NO_x 主要有 3 类,即燃料型 NO_x 、快速型 NO_x 和热力型 NO_x 。快速型 NO_x 是由空气中的 N_2 与燃料中的自由基反应生成,其主要存在于气体燃料的燃烧过程,在固体燃料的燃烧中生成量极少^[22]。热力型 NO_x 是由空气中的 N_2 直接被氧化生成,其在燃烧温度超过 1 300 °C 时才会大量生成^[7]。在本研究中,下行燃烧室最高温度为 1 086 °C,远低于 1 300 °C,故热力型 NO_x 的生成量可忽略不计,因此本实验研究中所生成的 NO_x 主要为燃料型 NO_x 。

预热过程中生成的高温煤气具有强还原性,其成分中不含有 NO_x ,但在下行燃烧室 150 mm 处 NO_x 的质量浓度达 530 mg/m^3 ,可知 NO_x 在燃料喷口附近生成。分析认为,预热燃料刚喷入下行燃烧室时与二次风相遇,燃料氮转化为 NO_x ,但由于燃料喷口附近是强还原区, NO_x 的生成受到抑制,因此 NO_x 并没有大量生成,这对 NO_x 的最终排放影响重大。在主燃烧区的弥散反应区内,由于氧浓度偏低, NO_x 逐步被还原。主燃烧区以外,燃烧反应减弱, NO_x 基本不再变化。 NO_x 最终排放质量浓度为 134.55 mg/m^3 ,换算成标准值为 107.64 mg/m^3 (@6% O_2)。

2.4 CO 对 NO 和 NO_2 的影响其前驱物

沿程烟气中的 CO、NO 及 NO_2 沿下行燃烧室轴线方向的浓度变化见图 8。下行燃烧室入口处 CO 体积分数为 11.37% (142 125 mg/m^3),并在燃烧开始时急剧下降,在下行燃烧室 400 mm 以后基本保持平稳。 NO_2 质量浓度变化趋势与 CO 相同,从下行燃烧室 150 mm 处到 400 mm 区域质量浓度直接由 258 mg/m^3 下降至 0,之后不再生成。NO 在 150 ~ 400 mm 范围内质量浓度有略微上升,之后快速下降。

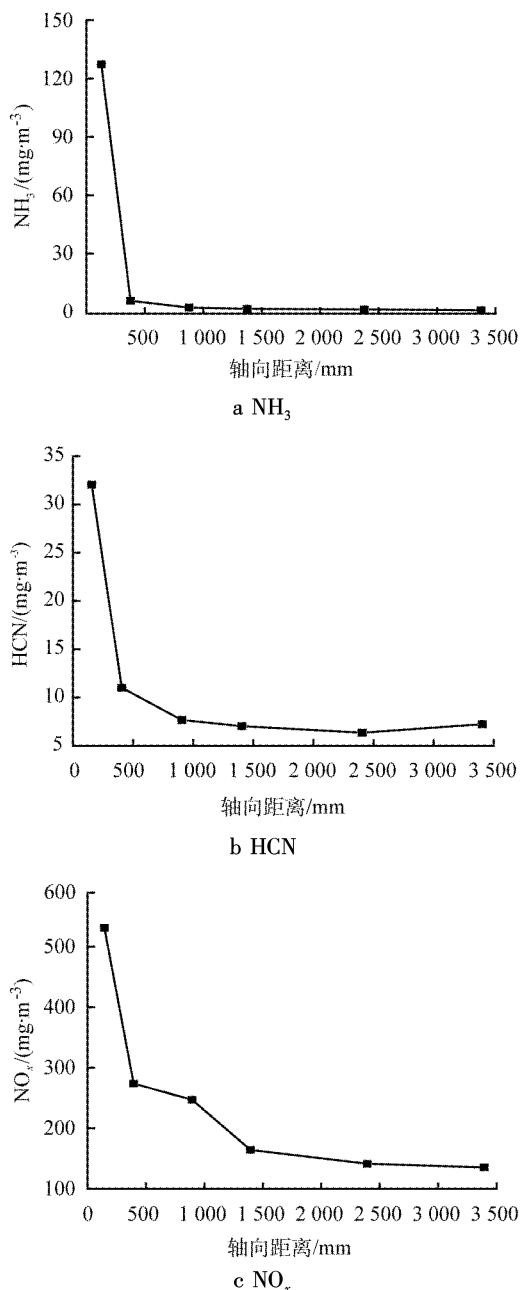


图 7 下行燃烧室轴线方向 3 种气体质量浓度变化曲线

Fig. 7 Concentrations of gases along axis of down-fired combustor

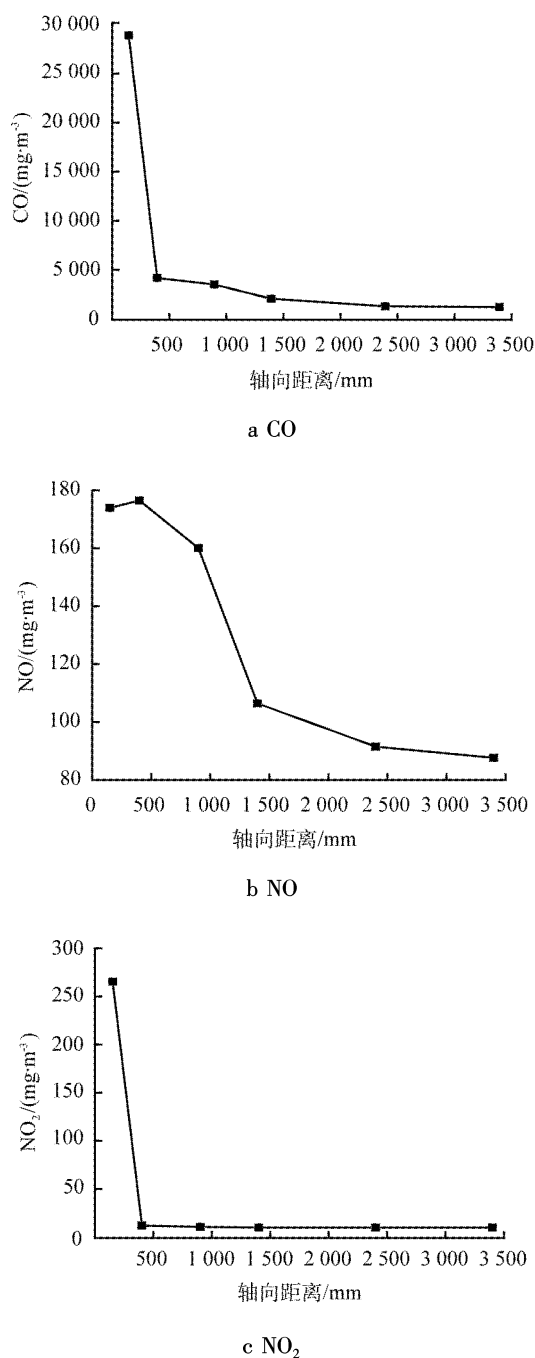


图8 下行燃烧室轴线方向3种气体质量浓度变化曲线

Fig. 8 Concentrations of 3 gases along axis of down-fired combustor

三者的浓度在主燃烧区外变化不大,可见大部分的燃烧和还原反应均发生在主燃烧区内。从图中可看出,NO的变化曲线相对NO₂较缓,故可知NO的稳定性比NO₂好,在大部分的NO_x排放中,NO是主要物质。在燃料喷口附近,NO生成量明显比NO₂少,分析认为,预热燃料喷入下行燃烧室后立即与充分的氧化剂接触,此时CO被大量氧化,燃料氮也被迅速氧化为NO₂,但由于燃料喷口处CO浓

度仍旧较高,是强还原性气氛,NO₂并未大量生成,且部分NO₂被还原为NO。在下行燃烧室150 mm以后,NO₂的还原反应开始占主导,其大量被还原,其中仍有少量NO₂被还原为NO,使得NO浓度略有升高。当NO₂被消耗殆尽时,NO才开始逐步被还原。尾部烟气中CO浓度为264 mg/m³,此时NO仍有87.75 mg/m³存在。可以认为,相较于NO,NO₂容易生成,也容易被消耗,在NO₂大量存在的情况下,其优先被还原。故可知,为了实现低NO_x排放,首先应在源头控制NO大量生成,其次在燃烧区下游也应尽可能多地促进NO还原。本实验中,由于燃料喷口附近是强还原区,NO和NO₂生成量有限,在主燃烧区下游是低氧弥散反应区,有效地促进了NO的还原,因此最终NO排放偏少。

3 结论

本文中采用燃料预热的方法,在30 kW煤粉无焰燃烧实验台上进行了神木烟煤的预热无焰燃烧实验,并对燃烧过程中烟气成分的变化规律展开研究,结论如下。

1) 预热燃烧器运行稳定,神木烟煤经过预热燃烧器后可以被稳定地预热至800℃以上,且预热后的煤气以N₂、CO及CO₂等为主,不含有O₂和NO_x,预热过程中燃料大部分挥发分析出。

2) 预热燃料进入下行燃烧室满足无焰燃烧的条件,可以实现稳定的无焰燃烧。燃烧区域温度分布均匀,峰值温度低,温度梯度小,且均方根温度波动小,没有明显的火焰锋面,燃烧效率高达98.5%。

3) NH₃和HCN是NO_x的主要前驱物,其主燃烧区内主要向N₂转化,有效遏制了NO_x的大量生成。NO_x在燃料喷口附近开始生成,并在主燃烧区内显著下降,在主燃烧区以外,NO_x基本变化不大,其最终排放数值为107.64 mg/m³(@6% O₂)。

4) NO₂稳定性差,易生成,也易消耗。NO相对稳定,通过抑制源头NO的生成,并严格控制下游反应区氧浓度含量,可以有效减少NO_x排放,实现低NO_x燃烧目的。

参考文献(References):

- [1] BAUKAL C E, SCHWARTZ R. The John Zink combustion handbook [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [2] WÜNNING J A, WÜNNING J G. Flameless oxidation to reduce thermal no-formation [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [3] RISTIC D, SCHUSTER A, SCHEFFKNECHT G. On the potential of

- flameless oxidation to reduce NO_x emissions from pulverized coal combustion[J]. *IFRF Combustion Journal*, 2010; 1–16.
- [4] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COSTA M. Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 44(44): 75–81.
- [5] STADLER H, TOPOROV D, FÖRSTER M, et al. On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion[J]. *Combustion & Flame*, 2009, 156(9): 1755–1763.
- [6] KATSUKI M, HASEGAWA T. The science and technology of combustion in highly preheated air[J]. *Symposium on Combustion*, 1998, 27(2): 3135–3146.
- [7] LIN Q, WANG B, XING X. Structure of reaction zone of normal temperature air flameless combustion in a 2 ton/h coal-fired boiler furnace[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, 221(4): 473–480.
- [8] STADLER H, RISTIC D, FÖRSTER M, et al. NO_x -emissions from flameless coal combustion in air, Ar/O_2 and CO_2/O_2 [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 3131–3138.
- [9] 艾元方, 蒋绍坚, 周才民, 等. 高温无焰燃烧及其火焰特性的实验研究[J]. *热能动力工程*, 2001, 16(96): 615–617.
- [10] WEBER R, SMART J P, KAMP W V. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2623–2629.
- [11] SCHAFFEL-MANCINI N, MANCINI M, SZLEK A, et al. Novel conceptual design of a supercritical pulverized coal boiler utilizing high temperature air combustion (HTAC) technology[J]. *Energy*, 2010, 35(7): 2752–2760.
- [12] DALLY B B, SHIM S H, CRAIG R A, et al. On the burning of sawdust in a MILD combustion furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(6): 3462–3470.
- [13] BRYAN B, RABOVITSER J, NESTER S, et al. Methane de- NO_x for utility PC boilers[J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, Institute of Gas Technology (United States), 2002.
- [14] RABOVITSER J, BRYAN B, KNIGHT R, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal-fired boilers [C]//*Proceedings of AWMA Mega Symposium*, Washington DC, 2004.
- [15] LU Q, ZHU J, NIU T, et al. Pulverized coal combustion and NO_x emissions in high temperature air from circulating fluidized bed[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(11): 1186–1192.
- [16] OUYANG Z, ZHU J, LU Q. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. *Fuel*, 2013, 113: 122–127.
- [17] YAO Y, ZHU J, LU Q, et al. Experimental study on preheated combustion of pulverized semi-coke[J]. *Journal of Thermal Science*, 2015, 24(4): 370–377.
- [18] 欧阳子区. 无烟煤粉预热及其燃烧和污染物生成特性实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [19] KUMAR S, PAUL P J, MUKUNDA H S. Studies on a new high-intensity low-emission burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1131–1137.
- [20] MITCHELL J W, TARBELL J M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion[J]. *Aiche Journal*, 1982, 28(2): 302–311.
- [21] HAN X, WEI X, SCHNELL U, et al. Detailed modeling of hybrid reburn/SNCR processes for NO_x reduction in coal-fired furnaces[J]. *Combustion & Flame*, 2003, 132(3): 374–386.
- [22] HAYHURST A N, VINCE I M. Nitric oxide formation from N_2 in flames: the importance of “prompt” NO[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 1980, 6(1): 35–51.