

# 煤粉气流床气化炉预热燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放试验研究

谭厚章, 王肖肖, 周必茂, 周上坤, 王毅斌, 王学斌

(西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**煤粉预热燃烧技术已被证明是一种清洁高效的燃烧技术。针对大型燃煤机组四周空间及承重受限, 提出采用结构紧凑的对冲气流床气化炉预热解煤粉并耦合燃烧的技术与系统, 搭建了新型气流床气化炉预热燃烧实验台, 对煤粉在气化炉内预热特性和预热燃料在燃烧室内燃烧特性进行研究, 探索煤中氮元素在预热燃烧过程中的迁移和转化规律。结果表明, 新型气流床气化炉预热燃烧实验系统能够自维持稳定运行, 系统压力和温度波动很小; 气化炉内温度梯度较大, 高温区位于烧嘴平面附近, 最高温度可达 1 115 °C, 而出口温度降至 850 °C。气流床气化炉能够为下行燃烧室稳定提供高温煤气和预热半焦; 高温煤气中 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 质量分数(干基)分别可达 13.15%、8.72%、0.78%; 预热半焦颗粒相比于原煤颗粒粒径减小, 原煤 50% 切割粒径  $d_{50}=43 \mu\text{m}$ , 而预热半焦颗粒  $d_{50}=24 \mu\text{m}$ , 预热的颗粒比表面积从 4.05 m<sup>2</sup>/g 增到 216.44 m<sup>2</sup>/g, 同时, 孔容积也增大, 颗粒燃烧特性得到改善; 预热过程中 96.33% 的挥发分和 40.23% 的固定碳释放到高温煤气中; 同时, 转化到气相中的煤 N 达 69.74%, 其中 47.67% 转化为 N<sub>2</sub>, 其余转化为 NH<sub>3</sub> 和 HCN。预热燃料进入下行燃烧室后能够稳定燃烧, 不存在着火延迟, 温度分布均匀; 主燃区预热燃料中的 NH<sub>3</sub> 和 HCN, 以及焦炭中析出的氮大部分转化为 N<sub>2</sub>, 主燃区内没有 NO 生成。实验台燃烧室出口 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放质量浓度分别为 143.02 mg/Nm<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>) 和 8.17 mg/Nm<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>), 燃烧效率高达 99.75%。煤粉经过新型气流床气化炉预热的燃烧, 煤 N 仅有 4.69% 转化为 NO。

**关键词:**煤粉; 预热燃烧; NO<sub>x</sub> 排放; 气流床气化炉

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)11-4192-13

## Experimental study on preheating combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission of pulverized coal based on an entrained-flow gasifier

TAN Houzhang, WANG Xiaoxiao, ZHOU Bimao, ZHOU Shangkun, WANG Yibin, WANG Xuebin

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Pulverized coal preheating combustion technology has been proven to be a clean and efficient combustion technology. In view of the limited space and load-bearing capacity around the large coal-fired boiler, a novel technology and system with a compact entrained-flow gasifier to preheat pulverized coal is proposed for the first time. The preheating characteristics in the gasifier and the combustion characteristics of the preheated fuel in the down-fire combustor (DFC) are studied on the novel self-built preheating combustion test rig. The migration and transformation of coal nitrogen during the preheating combustion are investigated. The results show that the experiment system can operate continuously and

收稿日期: 2023-02-28 修回日期: 2023-03-29 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0269

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4100500)

作者简介: 谭厚章 (1965—), 男, 江西永新人, 教授, 博士生导师。E-mail: hzt@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 谭厚章, 王肖肖, 周必茂, 等. 煤粉气流床气化炉预热燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4192-4204.

TAN Houzhang, WANG Xiaoxiao, ZHOU Bimao, et al. Experimental study on preheating combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission of pulverized coal based on an entrained-flow gasifier[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4192-4204.



移动阅读

steadily with small fluctuations in pressure and temperature. The temperature gradient in the gasifier is large, and the high temperature zone is located near the burner plane. The maximum temperature can reach 1 115 °C, while the outlet temperature of the gasifier decreases to 850 °C. The high temperature coal gas and char produced by the entrained-flow gasifier are provided to the DFC continuously and steadily. The volume fractions (dry basis) of CO, H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in high temperature coal gas are 13.15%, 8.72% and 0.78%, respectively. Compared to the raw coal, the size of the preheated char decreases. The 50% cut particle size of raw coal is 43 μm, while the preheated semi-coke is 24 μm. The specific surface area increases from 4.05 m<sup>2</sup>/g to 216.44 m<sup>2</sup>/g after preheating. At the same time, the pore volume of the char particles increases, and the combustion characteristics are improved. During the preheating process, 96.33% of volatile matter and 40.23% of fixed carbon are released into high temperature coal gas. Also, 69.74% of coal nitrogen is transformed in the gas phase, and 47.67% is converted into N<sub>2</sub>, the rest into NH<sub>3</sub> and HCN. Stable combustion could be achieved with preheated fuels in the DFC with no ignition delay and a uniform temperature distribution. Most of the NH<sub>3</sub> and HCN and the nitrogen released from char are converted into N<sub>2</sub> in the main combustion zone. There is no NO generation in the main combustion zone. The CO and NO<sub>x</sub> emissions at the outlet of the DFC are 8.17 mg/Nm<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>) and 143.02 mg/Nm<sup>3</sup> (6% O<sub>2</sub>), respectively. The combustion efficiency is 99.75%. After the pulverized coal is preheated by the new entrained-flow gasifier and burn in the DFC, only 4.69% of coal N is converted into NO.

**Key words:** pulverized coal; preheating combustion; NO<sub>x</sub> emission; entrained-flow gasifier

在“双碳”目标下,火电所占份额正逐渐减小,新能源发电逐步崛起。然而以煤炭为主的能源禀赋决定了在未来很长一段时间内我国仍离不开煤电<sup>[1-2]</sup>,煤炭直接燃烧会造成严重的环境污染,其中 NO<sub>x</sub> 是最难处理的污染物之一<sup>[3]</sup>。同时,为有效配合新能源,火电厂未来需要发挥灵活调峰作用,要求调峰负荷降至 20% 以下,低负荷下稳燃是最大问题。煤粉预热燃烧技术是一种变革性清洁、高效燃烧技术,具有燃料适应性强、燃烧效率高、NO<sub>x</sub> 排放低、负荷调节灵活等优点<sup>[4]</sup>。与传统燃烧方式相比,预热燃烧技术特点为:煤粉首先在预热室中与少量空气发生热解、部分燃烧和气化,将自身预热至高温,高温预热燃料进入炉膛后遇到氧气后会立即着火,这可解决低负荷稳燃问题;同时,在预热室内煤中大部分挥发分氮和部分焦炭氮释放到气相中,在强还原性气氛下大部分转化为 N<sub>2</sub>,少量转化为含氮中间产物(HCN、NH<sub>3</sub>),从而降低燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成;预热燃料进入燃烧室燃烧,通过合理的配风方式,控制气固混合强度和燃烧温度,实现高效燃烧与低 NO<sub>x</sub> 排放协同<sup>[5-6]</sup>。

20 世纪 80 年代,全俄热工院首先提出了天然气辅热煤粉预热燃烧技术,美国燃气技术研究所 0.88 MW 测试炉上进一步完善,研究结果表明没有燃烧后处理的条件下,NO<sub>x</sub> 排放质量浓度可降至 154 mg/Nm<sup>3</sup><sup>[7-8]</sup>。LIU 等<sup>[9-11]</sup>开发了煤粉低温预热燃烧系统,并研究了煤种、烧嘴结构、空气分级等因素对 NO<sub>x</sub> 排放的影响,但实验中仍需要燃气辅热。燃气辅热会对该技术大规模工程化应用经济性造成影响。吕清刚等<sup>[12]</sup>提出了循环流化床预热燃烧技术,其特点

是预热过程不需要辅热,并在 35 kW 实验台上开展研究。随后又建立了 0.2、2 MW 等一系列中试预热燃烧实验平台<sup>[4]</sup>。欧阳子区等<sup>[13-14]</sup>在 35 kW 实验台上探讨了预热温度、循环流化床空气当量比、下行燃烧室配风等因素对煤粉预热和燃烧特性以及 NO<sub>x</sub> 排放影响。LIU 等<sup>[15]</sup>研究了无焰燃烧模式下预热燃料在下行燃烧室燃烧特性和 NO<sub>x</sub> 排放特性。ZHU 等<sup>[16]</sup>研究了煤种、预热温度、粒径对 NO<sub>x</sub> 排放的影响。以上研究均证明预热燃烧技术具有良好降氮效果。

虽然循环流化床预热燃烧技术在预热过程不需辅热,但在其工程化过程中也存在一些缺点,如体积大、造价高、结构复杂、压降大等<sup>[17]</sup>。同时,受限于流化床自身特点,预热温度未超过 1 000 °C。已有研究<sup>[18-19]</sup>表明,煤热解过程温度越高,挥发分析出越多,氮析出越多。在两段电炉串联组成的沉降炉试验系统上,吕钊敏等<sup>[20]</sup>研究了更高预热温度(> 1 000 °C)下半焦预热燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性,结果表明提高预热温度(> 1 000 °C)能够进一步降低 NO<sub>x</sub> 排放。王帅等<sup>[21]</sup>研究表明,提高预热区温度和停留时间,有利于煤 N 在预热阶段析出,从而降低 NO<sub>x</sub> 排放。气流床气化炉气固混合强烈,传热传质效果好,通过特殊流场,气固能够达到较长停留时间<sup>[22-26]</sup>,具有结构简单、体积小、压降小等优点。若预热燃烧技术应用到现有大型煤粉锅炉,需增加预热带气化炉及输送高温煤焦管道,现有大型煤粉锅炉四周空间很小及附加承重有限,难以安装尺寸大及质量大的流化床气化炉或其他气化装置,相比而言,笔者提出的新型对冲气流床气化炉的预期结构尺寸及设备质量均具有较大优势。为了

加速预热燃烧技术工程应用并减少  $\text{NO}_x$  排放,在自行搭建的新型气流床气化炉预热燃烧实验台上开展了烟煤预热燃烧实验,分析实验系统稳定性和可靠性,研究了煤粉在气流床气化炉高温预热特性和预热燃料在下行燃烧室的燃烧特性,探究了煤中氮元素在高温预热和燃烧过程中的迁移规律。

## 1 实 验

### 1.1 实验系统

煤粉气流床气化炉高温预热燃烧系统如图1所示。该系统由用于煤粉预热的气流床气化炉、用于预热燃料燃烧的下行燃烧室以及辅助系统(包括点火系统、给粉系统、给气系统、高温烟气冷却和除尘系统、烟气在线分析系统等)等3部分组成。气化炉炉膛为莫来石,外侧包裹250 mm保温棉,以最大限度减少热损失。顶部安装一个点火燃烧器和一个视窗,分别用于开工点火和观察炉内燃烧状态,点火燃烧器在煤粉着火稳定后关闭。在气化炉中上部位间隔 $90^\circ$ 布置4

个烧嘴,每个烧嘴有2个通道,中心通道通入煤粉和气化炉一次风,间隙通入气化炉二次风,如图2(a)所示。气化炉总空气量占煤粉完全燃烧所需空气量的25%~50%,提供煤粉热解、部分燃烧和气化所需空气,释放的热量将煤粉快速预热至高温,同时保证气化炉温度稳定。气化炉出口为高温半焦和含有可燃气体的烟气( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ 等)组成的高温气固混合物,称为预热燃料。预热燃料通过燃烧室燃烧器喷入下行燃烧室燃烧。下行燃烧室直径340 mm,高3500 mm,炉胆材质为莫来石,外侧包裹200 mm保温棉。下行燃烧室顶部布置一个燃烧器,如图2(b)所示。燃烧器内二次风在燃烧器腔体与预热燃料直接混合,外二次风有2种方式喷入:一种是通过燃烧器间隙通道喷入,另一种是通过燃烧室顶盖均匀布置的4个喷口喷入(图2(b))。燃烧室炉体沿侧壁安装5层三次风喷口,第1层安装在距离顶部300 mm处,其余间隔300 mm均匀布置,每层三次风喷口间隔 $90^\circ$ 布置4个喷口,研究空气分级对预热燃料燃烧特性的

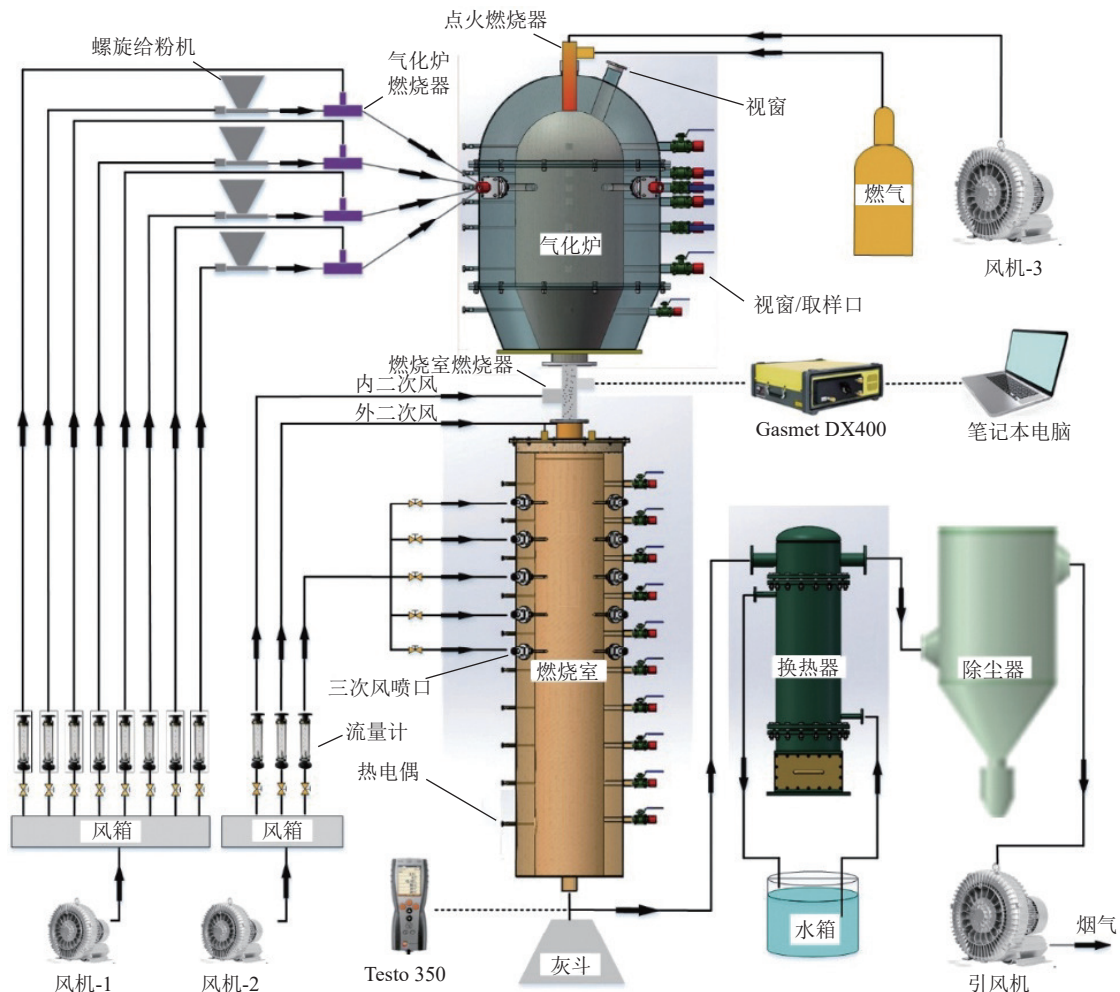


图1 气流床气化炉高温预热燃烧工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of the high-temperature preheating combustion of the entrained-flow gasifier

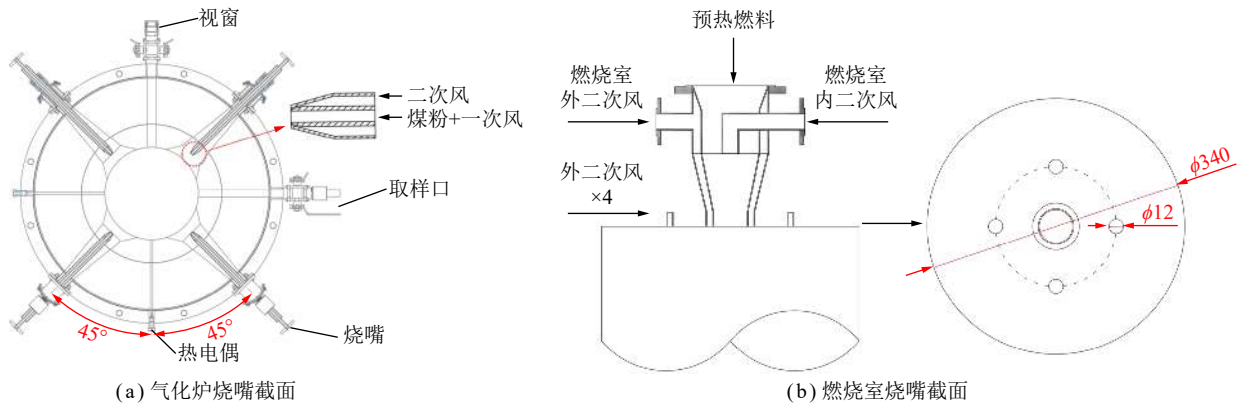


图 2 气化炉烧嘴和下行燃烧室燃烧器结构

Fig.2 Burner structure of the gasifier and the DFC

影响。燃烧后的烟气和煤灰混合物在燃烧室底部排出,经水冷换热器冷却至 150 ℃ 以下后进入布袋除尘器除尘,排入大气。

气化炉上垂直布置 7 层测点,每层有 2 个温度测点、1 个取样口和 1 个探火孔,布置方式如图 2(a) 所示。测点距气化炉顶部距离分别为 120、290、370、450、620、920、1 220 mm,分别命名为 T<sub>g1</sub>、T<sub>g2</sub>、⋯、T<sub>g7</sub>。在气化炉和下行燃烧室中间连接段分别布置 1 个热电偶和 1 个预热燃料取样口,命名为 T<sub>g-c</sub>,用于分析气化后的高温半焦和煤气。下行燃烧室布置 10 层测点,每层对置布置 1 个温度测点和 1 个取样口,第 1 测点距离燃烧室顶部 150 mm,其余测点间隔 300 mm 轴向布置,分别命名为 T<sub>c1</sub>、T<sub>c2</sub>、⋯、T<sub>c10</sub>。燃烧室的每个取样口均可切换成探火孔。下行燃烧室底部出口布置 1 个热电偶测点和 1 个飞灰取样口,用于分析燃烧后烟气成分和燃尽率。

1.2 煤质和实验工况

实验所用煤样为神木烟煤,其工业分析和元素分析见表 1,其氮元素质量分数为 0.87%,挥发分为 33.54%,煤粉粒径分布如图 3 所示,粒径为 1~140 μm,煤粉颗粒累计占比 10%、50% 和 90% 的粒径分别为 12、43、101 μm。实验工况见表 2,给煤量为 6 kg/h,一次风率为 0.39,总过空气系数为 1.07。实验中气化炉 4 只烧嘴均向同侧偏转 3°,气化炉内空气均由气化炉烧嘴中间一次风喷口喷入。燃烧室二次风由燃烧室顶部 4 个等间距布置喷嘴喷入,燃烧室三次风由距燃烧室顶部 1 500 mm 的第 5 层三次风喷入。实验过程中煤中各元素转化率通过灰平衡法计算得出<sup>[15,17,27]</sup>,某组分转化率 C<sub>x</sub> 为

$$C_x = 1 - \frac{A_1 X_2}{A_2 X_1} \quad (1)$$

式中, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 分别为原煤和预热半焦灰的质量分数; X<sub>1</sub> 和 X<sub>2</sub> 分别为原煤和预热半焦中组分 X 的质量分数。

表 1 煤粉工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of the pulverized coal

工业分析/%				元素分析/%					Q <sub>net,ar</sub> / (MJ · kg <sup>-1</sup> )
M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	FC <sub>ar</sub>	C <sub>d</sub>	H <sub>d</sub>	O <sub>d</sub> <sup>a</sup>	N <sub>d</sub>	S <sub>d</sub>	
4.65	7.44	33.54	54.37	73.93	4.52	12.45	0.87	0.43	27.19

注: a表示差减法。

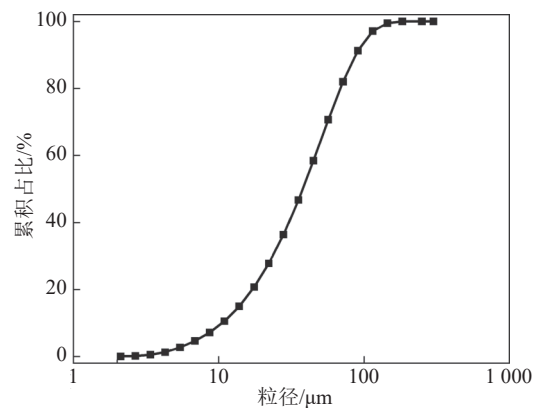


图 3 试验所用煤粉粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of the pulverized coal

表 2 实验条件

Table 2 Operating condition of the experiment

参数	数值
给煤量/(kg · h <sup>-1</sup> )	6
气化炉总风量λ <sub>1</sub> /(Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	4.1×4
气化炉空气当量比	0.39
燃烧室外二次风量λ <sub>2</sub> /(Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	17.69
燃烧室外二次风当量比	0.42
燃烧室三次风量λ <sub>3</sub> /(Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	10.95
三次风喷入位置/mm	1 500
总过空气系数	1.07

## 2 实验结果与分析

### 2.1 系统运行特性

图4为气化炉和下行燃烧室正常运行时压力和温度随时间的变化。从图4(a)可以看出,工况稳定时,气化炉内压力为-40 Pa左右,燃烧室内压力为-75 Pa左右,压差仅35 Pa,且气化炉和燃烧室压力随时间的波动均很小,不超过10 Pa,说明气化炉可为燃烧室提供稳定流量的预热燃料。循环流化床预热气化过程压降较大,一般可达1~2 kPa<sup>[14]</sup>。从图4(b)可以看出,在系统运行过程中气化炉和燃烧室内典型位置的温度稳定性均较高,温度波动不超过10℃。说明气流床气化炉预热燃烧系统可持续稳定运行,本实验设计的气流床气化炉可将煤粉在低空气当量比下预热至高温,为燃烧室持续稳定地提供高温预热燃料,预热燃料可在下行燃烧室稳定燃烧。

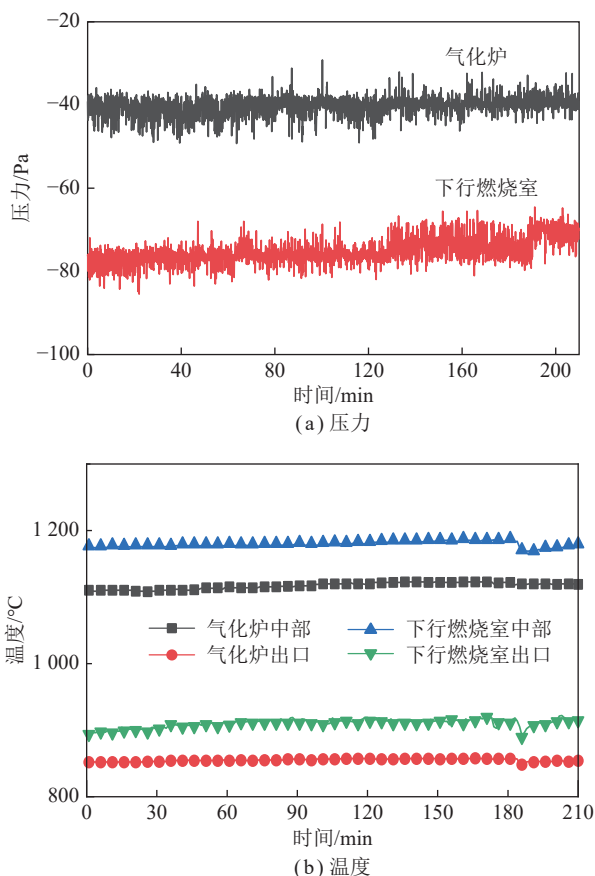


图4 压力和温度随时间变化

Fig.4 Pressure and temperature drop variations with time

### 2.2 预热后燃料特性

图5为气体温度沿气化炉轴线分布,其中轴线距离为1500 mm处代表气化炉和燃烧室连接段位置( $T_{g-c}$ ),即气化炉出口温度。气化炉内高温区主要集中在烧嘴平面附近,气流沿烧嘴平面向上或向下温度均

逐渐降低。热电偶测得气化炉内沿轴线最高温度为1115℃( $T_{g3}$ ),位于4股空气射流汇聚的烧嘴平面中心,但气化炉内最高温度可能高于此温度,因为最高温度区应位于氧气消耗的燃烧区,即烧嘴射流区。这主要是因为一次风中 $O_2$ 射流进入炉膛后迅速与射流卷吸的 $CO$ 、 $H_2$ 、 $CH_4$ 以及析出的挥发分、焦炭迅速燃烧,释放大热量<sup>[26]</sup>。此外,实验过程中沿气化炉中心轴线均未检测到 $O_2$ ,说明气化炉内 $O_2$ 消耗很快,一方面是由于燃烧反应时间在2~4 ms<sup>[28]</sup>,远小于组分混合时间(~0.1 s)<sup>[29]</sup>;另一方面 $O_2$ 快速消耗得益于气化炉4个烧嘴独立偏转3°布置,其优点在于单个烧嘴喷入的 $O_2$ 发生氧化反应时不但可为其他烧嘴射流提供加热冷空气和煤粉所需热量,而且还可提供大量自由基催化氧化反应发生<sup>[26,30]</sup>。此外,4股射流相互撞击可为均相和非均相反应提供强烈湍动和混合。由于气化反应持续发生,烧嘴平面向上向下温度均逐渐降低, $T_{g2}$ 和 $T_{g3}$ 、 $T_{g1}$ 和 $T_{g5}$ 位置与烧嘴平面距离相同,但 $T_{g1}$ 和 $T_{g2}$ 温度分别高于 $T_{g3}$ 和 $T_{g4}$ ,这主要是由于在重力作用下烧嘴平面下方焦炭颗粒质量浓度相对较高, $C(s)$ 与 $H_2O$ 、 $CO_2$ 发生气化反应吸收热量<sup>[31]</sup>。由图5还可以看出,气化炉出口温度可达850℃,这与循环流化床预热工艺相同,即2者均可在低空气当量比下为燃烧室持续稳定地提供高温预热燃料,2者不同之处在于循环流化床内温度分布均匀,没有明显的温度梯度<sup>[13,15-16]</sup>,而气流床气化炉内温度梯度较大。

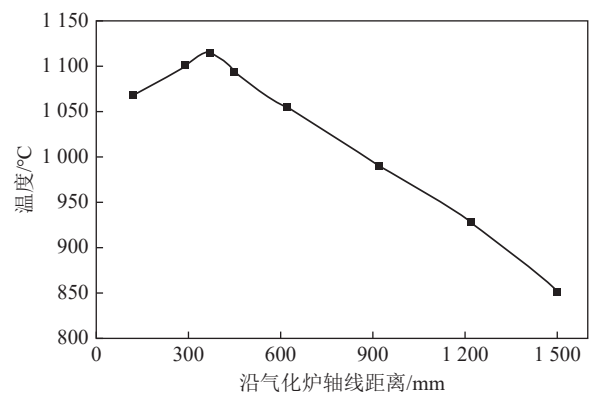


图5 气化炉内温度分布

Fig.5 Temperature profiles along the axis of the gasifier chamber

图6为气化炉内沿着轴线 $CO$ 、 $H_2$ 、 $CH_4$ 的体积分数分布。气化炉内 $CO$ 体积分数达12%以上, $H_2$ 体积分数达8%以上,2种组分在烧嘴平面附近体积分数最低,随着气化反应的进行,体积分数沿轴线逐渐升高,而 $CH_4$ 体积分数在烧嘴平面达到最高,这主要是因为 $CH_4$ 主要来自煤挥发分析出,气化反应 $C+2H_2 \rightarrow CH_4$ 速率很低<sup>[25]</sup>。

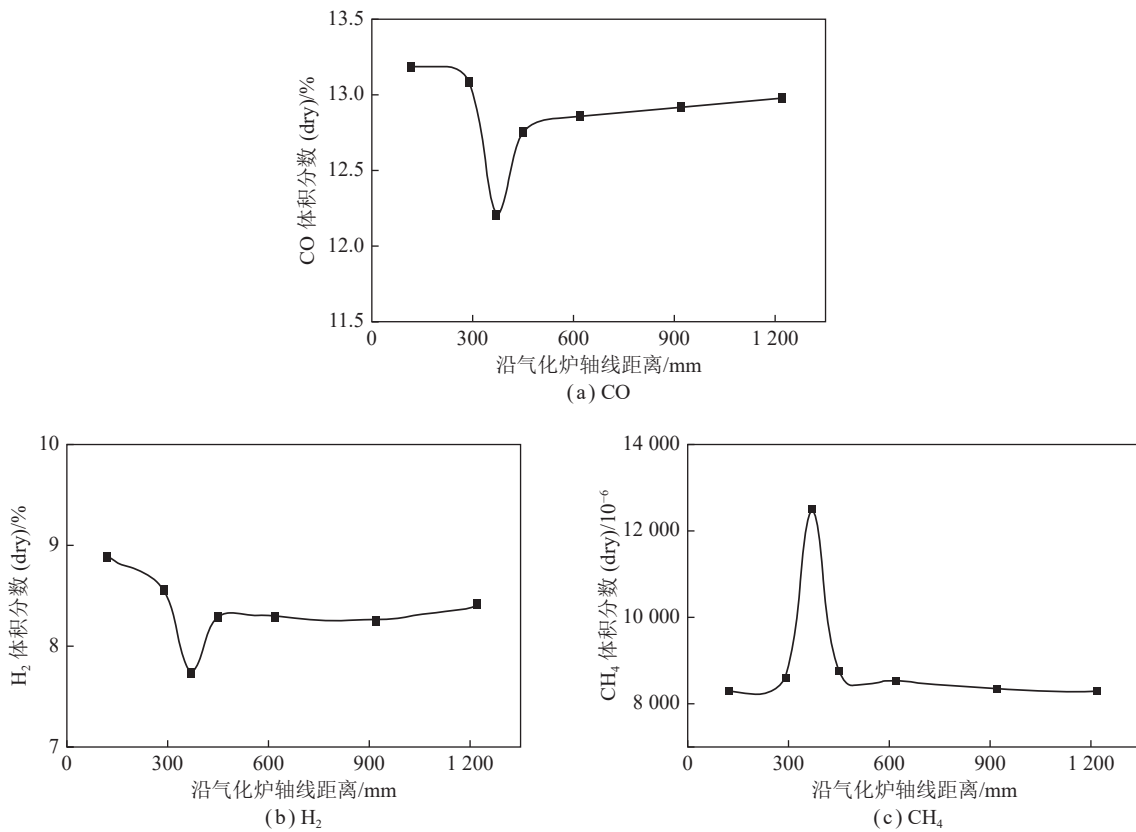


图 6 气化炉内主要组分沿轴线分布

Fig.6 Main gas components profile along the axis of the gasifier chamber

图 7 为气化炉内主要含 N 气相组分沿轴线分布。煤中氮元素主要以芳香氮形式存在,脱挥发分过程中重碳氢化合物、芳香族化合物和大部分挥发性氮会同时释放出<sup>[28]</sup>。由于气化炉烧嘴平面温度较高,使挥发分 N 迅速从煤中释放,杂环 N 迅速裂解成为—CN 和—N,并与—H、—C、—O 等自由基结合,反应生成大量 HCN、NH<sub>3</sub>、NO 等。但沿气化炉轴线未检测到 NO,这主要由于气化炉内的强还原性气氛使 NO 生成后会被迅速还原。NH<sub>3</sub> 体积分数在烧嘴平面最低,HCN 则在烧嘴平面浓度最高。图 8 为 Smoot 和 Haynes 提出的煤 N 转化机制<sup>[28-29]</sup>,早期热解时先生

成 HCN,而烧嘴平面区域剧烈的燃烧、气化反应会生成大量的 OH 和 H 自由基,可将 HCN 转化为 NH<sub>3</sub>,NH<sub>3</sub> 进一步被氧化为 NO 和 N<sub>2</sub>,在贫氧条件下 NO 可被 Char 还原为 N<sub>2</sub>,这与本实验结果吻合。

表 3 为气化炉出口高温半焦的工业分析和元素分析,各组分转化率通过式 (1) 计算得到。经预热后,原煤中 96.33% 的挥发分和 40.23% 的固定碳转化到气相高温煤气中,表明几乎全部挥发分在预热阶段得到转化。一方面气化炉主反应区烧嘴平面温度较高,有利于挥发分析出和气化反应发生;另一方面 4 个烧嘴偏转 3° 布置,炉内会形成回流区,有利于延长颗粒

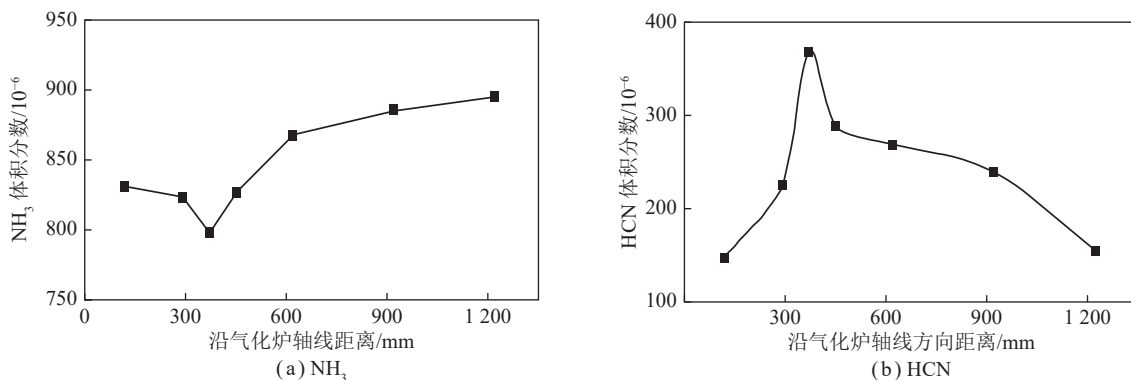


图 7 气化炉内含 N 组分沿轴线分布

Fig.7 Distributions of N-containing components along the axis of the gasifier chamber

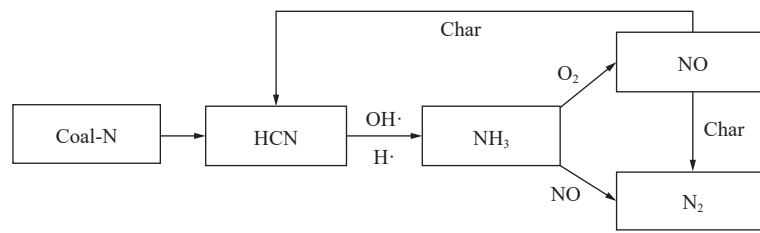


图 8 煤 N 转化机制

Fig.8 Coal N conversion mechanism

停留时间。由表 3 还可以看出,经气化炉预热后煤 N 转化率可达 69.74%,仅有 30.26% 的 N 元素保留在剩余半焦中,由于挥发分几乎全部转化,说明剩余 N 元素在燃烧室内主要以焦炭 N 形式释放。此外, H 和 O 元素转化率均高达 96% 以上,几乎全部转化。

表 4 为气化炉出口高温煤气的主要可燃成分, CO 和  $H_2$  干基体积分数分别高达 13.15% 和 8.72%,

有利于预热燃料进入燃烧室后迅速着火并稳定燃烧,改善预热燃料着火。气化炉出口未检测到 NO 和  $NO_2$ , 主要含 N 组分为  $N_2$ 、 $NH_3$  和 HCN, 与 OUYANG<sup>[13]</sup> 和 ZHU<sup>[16]</sup> 等采用循环流化床预热煤粉的研究结果相似。表 4 中  $NH_3$  和 HCN 质量浓度分别为 629.91、131.38  $mg/Nm^3$ , 说明预热过程中大部分煤 N 转化为  $N_2$ , 这有利于控制系统  $NO_x$  排放。

表 3 高温半焦工业分析和元素分析以及各组分转化率

Table 3 Proximate and ultimate analysis of high temperature char and the conversion rate of each component

组分	水分	灰分	挥发分	固定碳	$C_d$	$H_d$	$O_d$	$N_d$	$S_d$
质量分数/%	0.76	17.93	2.97	78.34	79.46	0.41	1.02	0.61	0.43
转化率/%			96.33	40.23	53.30	96.06	96.45	69.74	57.00

注:水分、灰分、挥发分、固定碳的基准为ad。

表 4 气化炉出口煤气成分分析(干基)

Table 4 Coal gas compositions at the outlet of the gasifier (dry)

体积分数/%				质量浓度/( $mg \cdot Nm^{-3}$ )	
CO	$H_2$	$CH_4$	$CO_2$	$NH_3$	HCN
13.15	8.72	0.78	10.17	629.91	131.38

煤粉在气流床气化炉高温环境下快速预热,释放大量挥发分,发生部分燃烧、气化反应,引起煤粉颗粒膨胀、破碎和孔隙结构、孔径和反应活性等变化。因此,对原煤和预热半焦进行粒径分布、非等温热重分析、BET 比表面积分析,研究气流床气化炉快速预热对煤粉颗粒特性的影响。由图 9 可以看出,预热半焦颗粒粒径明显小于原煤,原煤 50% 切割粒径  $d_{50}$  为 43  $\mu m$ , 而预热半焦颗粒  $d_{50}$  为 24  $\mu m$ , 主要是由于原煤在气化炉内高温下迅速升温,发生挥发分析出、燃烧和气化反应过程中产生较大热应力,导致原煤颗粒发生热破碎。欧阳子区等<sup>[13]</sup>采用循环流化床预热无烟煤也得到了类似结果。

利用热重分析仪,分别对原煤和预热半焦进行燃烧动力学分析,如图 10 所示。热重实验反应升温速率为 20  $^{\circ}C/min$ , 终温为 1 000  $^{\circ}C$ 。由图 10 可知,原煤和半焦燃尽时间分别为 21.25 min 和 15.55 min, 而燃尽温度分别为 725  $^{\circ}C$  和 692  $^{\circ}C$ 。采用 TG-DTG 方

法<sup>[32]</sup>求得着火温度,原煤着火温度为 439  $^{\circ}C$ , 而预热半焦着火温度为 492  $^{\circ}C$ , 虽然原煤预热过程挥发分几乎全部析出,但半焦着火温度比原煤仅高 53  $^{\circ}C$ 。从图 5 可知,预热后半焦温度为 850  $^{\circ}C$ , 明显高于其着

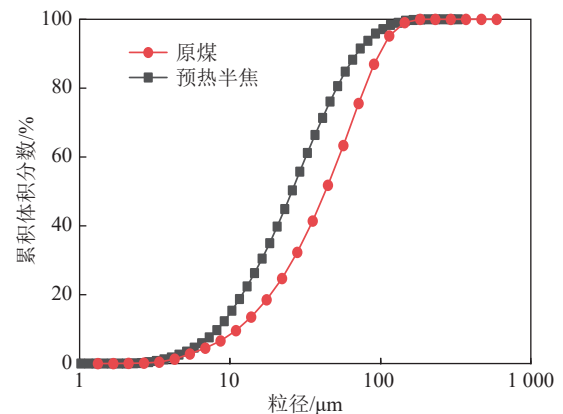


图 9 原煤和预热半焦粒径分布

Fig.9 Particle size distributions of raw coal and preheated char

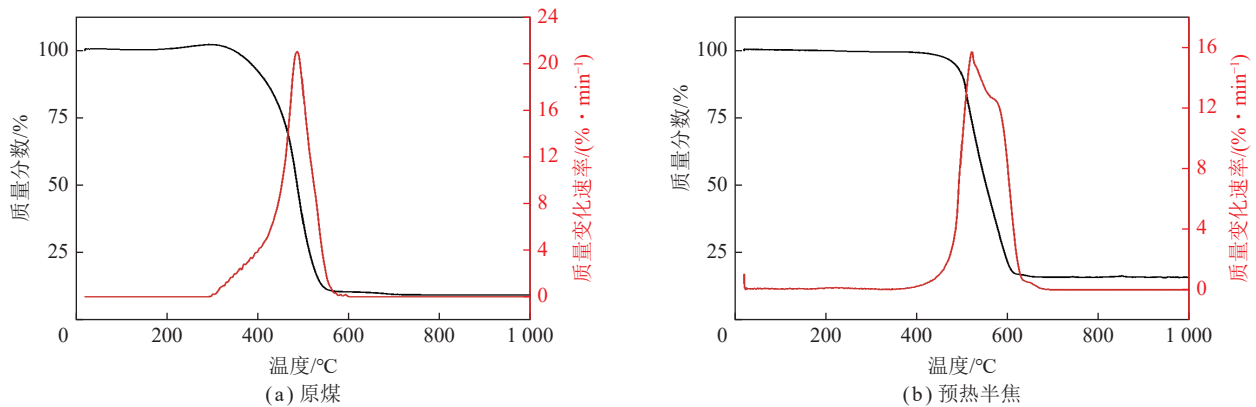


图 10 原煤和预热半焦热重分析

Fig.10 TG and DTG analysis of raw coal and preheated char

火温度,说明半焦进入燃烧室遇到氧气后可立即着火。

表 5 为原煤和预热半焦颗粒特性对比,原煤 BET 比表面积仅为 4.05 m<sup>2</sup>/g,而预热半焦比表面积可达 216.44 m<sup>2</sup>/g,为原煤的 53.44 倍。这主要是因为煤粉在气化炉中大量挥发分从孔隙析出,造成颗粒内部和表面出现较多孔洞。由表 5 还可以看出,经预热后颗

粒总孔体积大幅度增加,平均孔径和最可几孔径减小,说明预热后颗粒微孔增多,气固反应接触面积增大,利于燃烧过程中焦炭表面产生更多可还原 NO 的自由基。结合预热前后颗粒比表面积、孔容积、燃尽时间和燃尽温度的变化,说明经气化炉预热后颗粒燃烧特性得到改善。

表 5 原煤和预热半焦颗粒特性对比

Table 5 Comparison of particle characteristics between raw coal and preheated char

样品	比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔体积/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm	最可几孔径/nm
原煤	4.05	0.023	14.52	3.50
预热半焦	216.44	0.171	3.16	2.18

### 2.3 预热燃料燃烧特性

图 11 为下行燃烧室温度分布。燃烧室内无明显升温过程,距燃烧室顶部 150 mm 处第 1 个测点温度高达 1 250 °C,说明高温预热燃料与二次风相遇后迅速燃烧释放了大量热,这主要是因为高温预热燃料中含有大量 CO、H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>,与 O<sub>2</sub> 的燃烧反应属于均相反应,相对于异相反应更易进行,且反应速率快。从图 12 也可以看出,CO、H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 进入燃烧室后迅速被消耗,至三次风喷入前 H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 几乎被消耗完,而 CO 还剩余 2.8 %,说明三次风喷入前燃烧室内为强还原性气氛,不利于 NO 生成。燃烧室最高温度为 1 283 °C,低于 1 500 °C,热力型 NO<sub>x</sub> 可忽略,而快速型 NO<sub>x</sub> 在煤燃烧中几乎不存在<sup>[33]</sup>,可以推断燃烧室 NO<sub>x</sub> 主要为 Char-N 释放和煤气中含 N 气相组分 NH<sub>3</sub>、HCN 转化。KUMAR 等<sup>[34]</sup>将温度波动低于 15% 的燃烧模式定义为无焰燃烧,一般通过高速射流空气或高温预热燃料实现,其特点为温度分布均匀、无明显火焰锋面、燃烧效率高且 NO<sub>x</sub> 排放低<sup>[15]</sup>。定义燃烧室顶部和三次风喷入位置之间为主燃区,计算可知主燃区温度波动仅为 11.54%,可判断本实验过程燃烧室主燃区实现了高温预热燃料无焰燃烧。

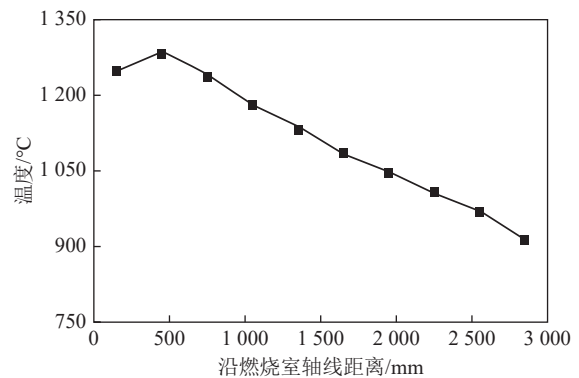


图 11 下行燃烧室温度分布

Fig.11 Temperature profiles along the axis of the DFC

图 13 为燃烧室内沿轴线主要含 N 气相组分分布。由图 13(a) 可以看出,高温预热燃料中 NH<sub>3</sub> 初始质量浓度较高 (629.91 mg/Nm<sup>3</sup>),但进入燃烧室后迅速降低。NH<sub>3</sub> 中 N 在氧化性气氛下最终与 O 结合生成 NO(式 (2)~(4))<sup>[14]</sup>;在还原性气氛下会转化为 N<sub>2</sub>(式 (5))<sup>[16]</sup>。由于主燃区内为还原性气氛,且温度很高,可推断进入下行燃烧室 NH<sub>3</sub> 中的 N 元素转化产物为 N<sub>2</sub>,NH<sub>3</sub> 首先会转化为 NH<sub>2</sub>。三次风喷入后 NH<sub>3</sub> 体积分数接



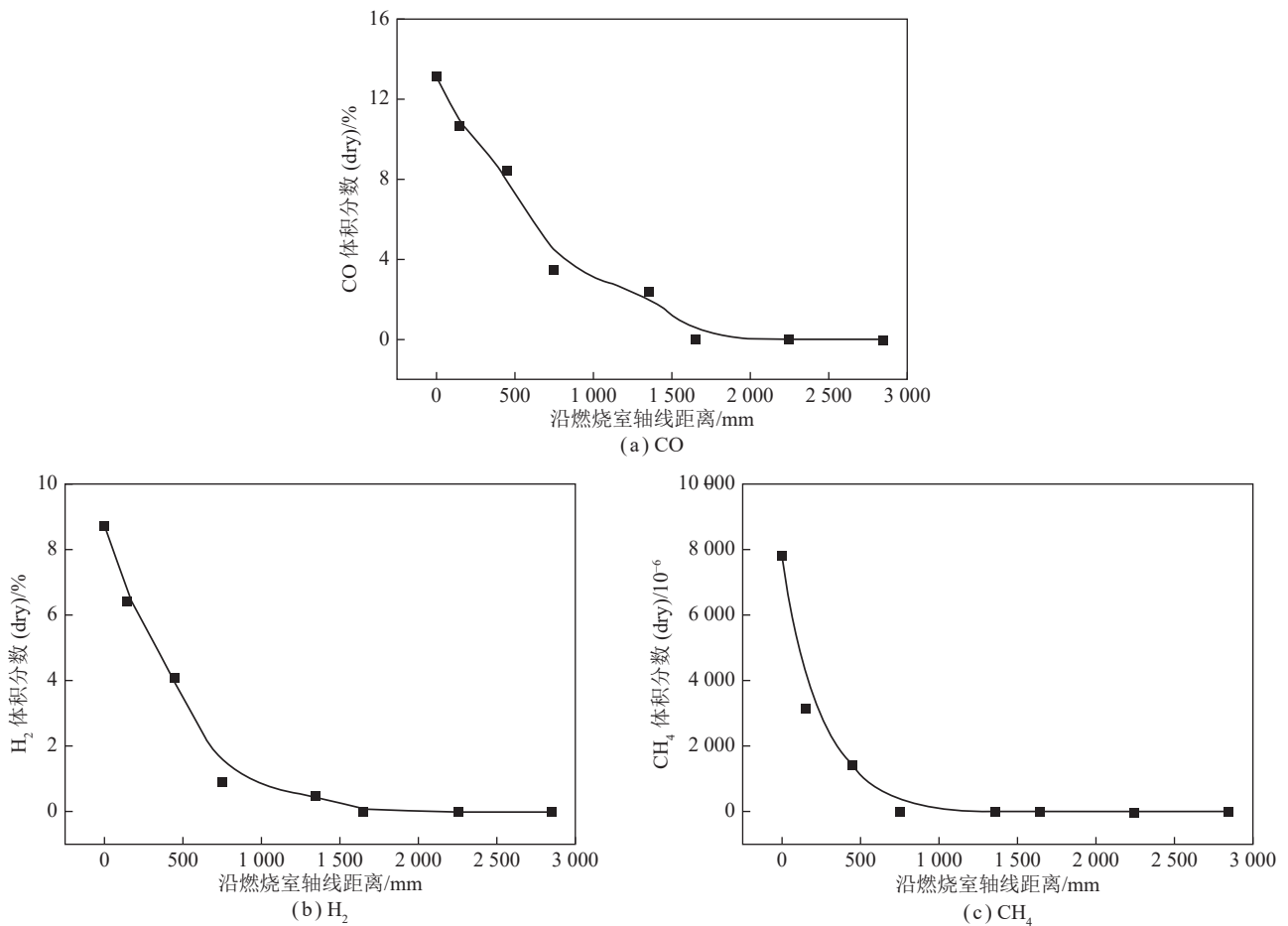
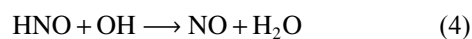
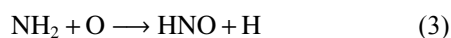
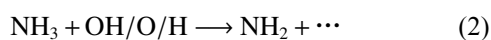


图 12 下行燃烧室可燃气体分布

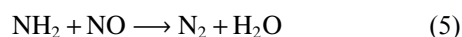
Fig.12 Main gas components profile along the axis of the DFC

近 0, 且之后不再增加, 说明燃烧室内 Char-N 析出后不向 NH<sub>3</sub> 转化。

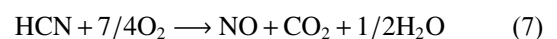
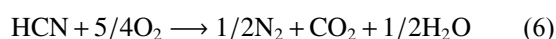
氧化性气氛:



还原性气氛:

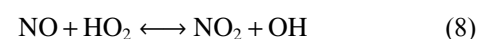


高温条件下 HCN 不稳定, 其反应机理复杂, 一般认为, 在还原性气氛下可被氧化成 N<sub>2</sub>、在氧化性气氛下可被氧化成 NO(式 (6)、(7))。高温预热燃料中 HCN 质量浓度为 131.38 mg/Nm<sup>3</sup>, 图 13(b) 显示 HCN 进入燃烧室后迅速被消耗完, 可推断 HCN 中 N 的主要转化产物为 N<sub>2</sub>。随后 HCN 体积分数略有增加, 主要是因为高温下预热燃料中 Char-N 析出后少量转化, 三次风喷入后又被消耗完。



由图 13(c) 可以看出, 在喷口附近大量 N<sub>2</sub>O 生成, 这与 LIU 等<sup>[15]</sup>研究结果类似。N<sub>2</sub>O 可通过均相或非均相反应生成, 均相反应为 NH<sub>3</sub> 和 HCN 与二次风中 O<sub>2</sub> 反应生成的自由基 OH、O 等结合形成; SOETE<sup>[35]</sup>认为, N<sub>2</sub>O 非均相反应主要是焦炭表面吸附 O 形成 C(NO), C(NO) 进一步与 C(N) 或 NO 反应生成 N<sub>2</sub>O。在燃烧室 1 200 °C 以上高温条件下 N<sub>2</sub>O 极不稳定, 易分解, 因此从第 2 个测点后几乎未检测到 N<sub>2</sub>O。

由图 13(d) 可以看出, 预热燃料进入燃烧室后, 与二次风反应过程中有少量 NO<sub>2</sub> 生成(式 (8)), 这主要与主燃区存在一些较强的活性自由基 HO<sub>2</sub>、H 等有关, HO<sub>2</sub> 对 NO<sub>2</sub> 的生成有重要作用。



由于气化炉内强还原性气氛, 进入燃烧室的预热燃料中不含 NO。由图 13(e) 可以看出, 在三次风喷入前, 无 NO 生成, 说明预热燃料中 NH<sub>3</sub> 和 HCN 在主燃区的转化产物为 N<sub>2</sub>。这主要是因为经气化炉预热后高温预热燃料中含有大量 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等还原性组分, 同时焦炭颗粒具有发达的孔隙结构和较大的比表

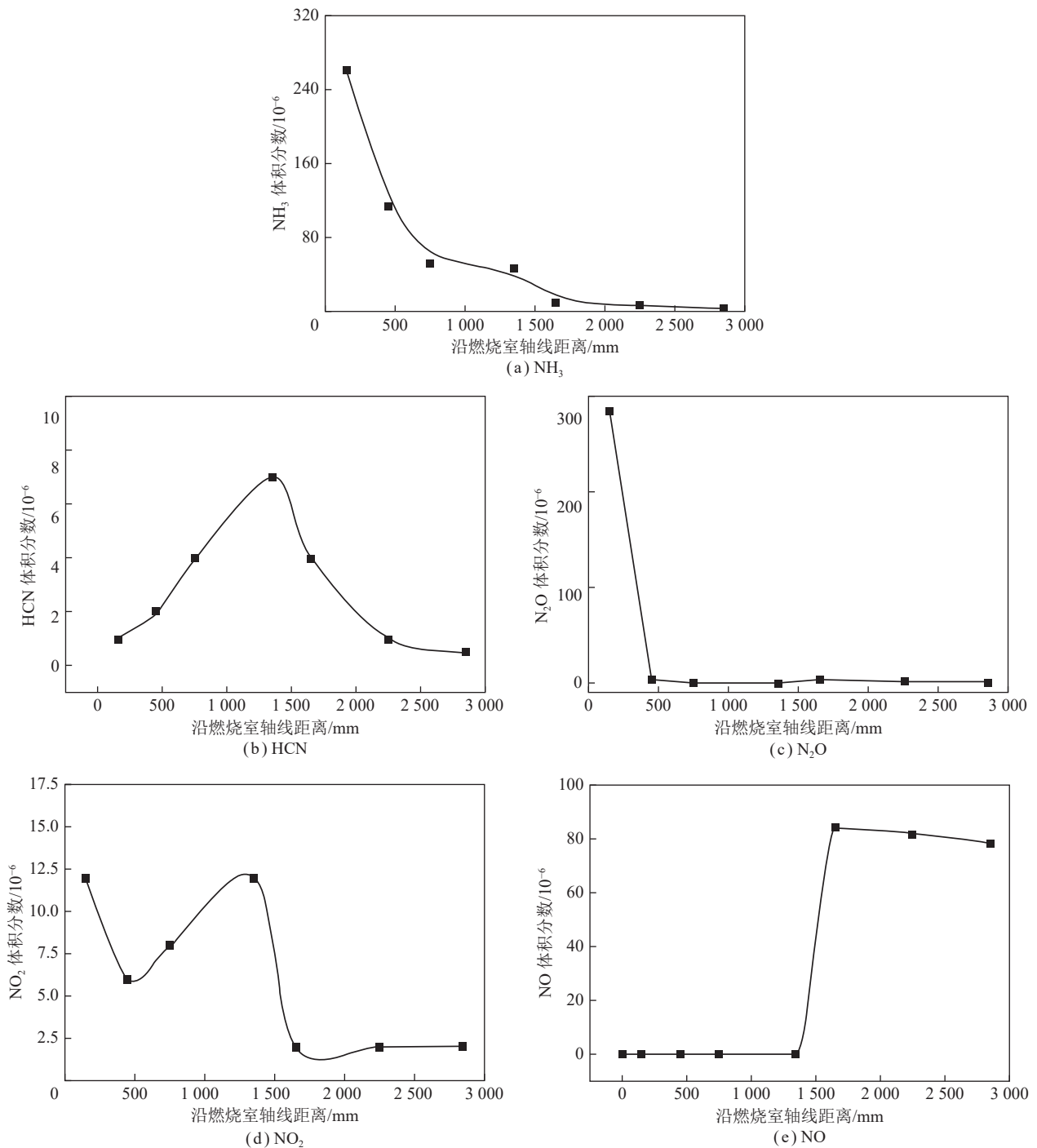
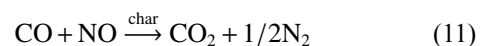
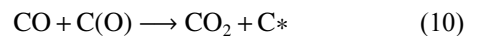
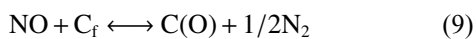


图 13 下行燃烧室含 N 组分沿轴线分布

Fig.13 Distributions of N-containing components along the axis of the DFC

面积,焦炭与 O<sub>2</sub> 接触后会产生大量活性基 C<sub>f</sub>。高温预热燃料与 O<sub>2</sub> 接触后,优先发生均相燃烧反应,而焦炭与 O<sub>2</sub> 的异相反应相对缓慢,研究表明焦炭对 NO 的异相还原占主导地位<sup>[14, 36]</sup>,CO 的存在显著改善 NO 还原动力学<sup>[37]</sup>。燃烧室主燃区存在大量 CO,因此预热燃料中 N 与 O<sub>2</sub> 生成的 NO 会被迅速还原为 N<sub>2</sub> (式 (9)~(11))。



式中, C\* 为活性基点。

三次风喷入后 NO 体积分数迅速达到最大值,之后小幅减小,说明生成的 NO 主要来自 Char-N 的转化。焦炭中剩余 N 向 NO<sub>x</sub> 转化过程非常复杂, WINTER 等<sup>[38]</sup>认为 Char-N 首先以 HCN 或 CN 形式释放,之后转化为 NO。THOMAS 等<sup>[39]</sup>给出了含氮官

能团的异相氧化过程(式(12)~(13))。

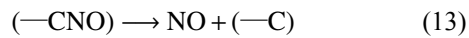
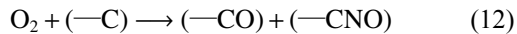


表 6 为燃烧室出口排放情况和燃烧效率。由于燃烧室温度较高,燃烧室出口  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  排放质量浓度分别为  $8.17 \text{ mg/Nm}^3$  (6%  $\text{O}_2$ ) 和  $143.02 \text{ mg/Nm}^3$  (6%  $\text{O}_2$ )。燃烧室出口飞灰含碳量为 2.7%, 计算得出本实验燃烧效率为 99.75%。这是因为经气化炉高温预热后,原煤中固定碳和挥发分转化率分别高达 96.33% 和 40.23%, 根据灰平衡法(式(1)) 计算得到进入燃烧室焦炭质量为  $2.47 \text{ kg/h}$ , 且温度高于半焦着火点, 说明进入

燃烧室的高温半焦与  $\text{O}_2$  接触立即燃烧, 这区别于存在煤粉加热、水分蒸发、挥发分脱除、焦炭燃烧的常规煤粉燃烧。同时高温煤气中含有大量可燃组分  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$ , 气相燃烧速率极快, 迅速释放大热量, 同时生成的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  可作为焦炭气化反应的气化剂。由图 11 可知, 燃烧室还原区温度分布均匀, 最高温度可达  $1283 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在还原区高温会进一步促进焦炭燃烧 ( $\text{C} + \text{O}_2$ ) 和气化反应 ( $\text{C} + \text{H}_2\text{O}$  和  $\text{C} + \text{CO}_2$ ), 实验测得  $T_{c5}$  位置焦炭中固定碳转化率达 89.80%, 说明喷入三次风前大部分固相可燃物已转化到气相中。另一方面由于燃烧室整体温度较高,  $T_{c10}$  温度高达  $913 \text{ }^\circ\text{C}$ , 有利于烟气中几乎全部  $\text{CO}$  与剩余  $\text{O}_2$  反应。

表 6 燃烧室出口排放情况

Table 6 DFC outlet emissions

参数	$\text{CO}$ 质量浓度 / ( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )(6% $\text{O}_2$ )	$\text{NO}_x$ 质量浓度 / ( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )(6% $\text{O}_2$ )	飞灰含碳量/%	燃烧效率/%
数值	8.17	143.02	2.70	99.75

根据灰平衡法(式(1)) 计算得到经气化炉预热后原煤转化到气相的质量为  $3.53 \text{ kg/h}$ , 可得气化炉出口总气体质量为  $24.22 \text{ kg/h}$ , 根据表 3 中 N 元素转化率和气化炉出口  $\text{NH}_3$  和  $\text{HCN}$  体积分数计算得到煤 N 经预热后转化产物分布, 根据燃烧室出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和总烟气流计算得到原煤中氮元素向  $\text{NO}_x$  的转化率。

煤中氮元素在气流床气化炉预热燃烧过程中的迁移路径如图 14 所示。预热过程 69.74% 煤 N 释放, 47.67% 的煤 N 在预热阶段转化为  $\text{N}_2$ , 19.51% 转化为  $\text{NH}_3$ , 2.56% 转化为  $\text{HCN}$ , 说明气化炉预热过程大部分煤 N 析出, 释放的煤 N 大部分转化为  $\text{N}_2$ , 这对于这燃烧过程中控制  $\text{NO}_x$  排放至关重要。仅有 30.26% 煤 N 留在高温半焦中, 这部分 N 是高温预热燃料在燃烧室燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的主要来源。最终煤粉经气化炉预热燃烧后煤 N 仅有 4.69% 转化为  $\text{NO}$ 。

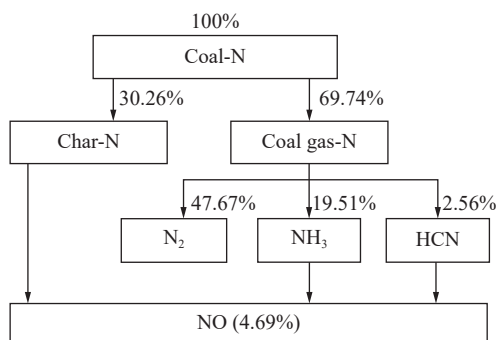


图 14 煤中 N 元素在气流床气化炉预热燃烧过程中迁移路径  
Fig.14 Migration and transformation paths of coal-N during the preheating combustion of the entrained-flow gasifier

### 3 结 论

(1) 新型气流床气化炉预热燃烧实验系统运行稳定, 气化炉和下行燃烧室内压力和温度波动很小, 气化炉能够为下行燃烧室持续稳定地提供高温预热燃料。

(2) 煤粉经气化炉预热后转化为富含可燃气体  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等的高温煤气和预热半焦。预热半焦颗粒粒径和孔径减小, 比表面积和孔容增大, 燃烧特性相比于原煤得到改善, 反应活性提升。在预热过程中有 96.33% 的挥发分和 40.23% 的固定碳转化到煤气中。煤 N 转化率达 69.74%, 大部分转化为  $\text{N}_2$ , 有利于抑制  $\text{NO}_x$  生成。

(3) 预热燃料在下行燃烧室内迅速着火, 不存在着火延迟, 燃烧稳定, 最高温度为  $1283 \text{ }^\circ\text{C}$ , 主燃区能够实现稳定无焰燃烧。主燃区内预热燃料中绝大部分  $\text{NH}_3$ 、 $\text{HCN}$  以及部分焦炭 N 均向  $\text{N}_2$  转化, 三次风喷入前无  $\text{NO}$  生成, 煤 N 不向  $\text{NO}$  转化。

(4) 最终燃烧室出口  $\text{NO}_x$  排放质量浓度为  $143.02 \text{ mg/Nm}^3$  (6%  $\text{O}_2$ ), 煤 N 向  $\text{NO}$  转化率仅为 4.69%, 燃烧效率高达 99.75%。

### 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J].

- Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [2] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 1949–1960.  
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [3] 顾晨, 赵瑜. 中国燃煤电厂大气污染物排放研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4352–4361.  
GU Chen, ZHAO Yu. Research progress of air pollutant emissions of Chinese coal-fired power plants[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4352–4361.
- [4] 吕清刚, 朱书骏, 朱建国, 等. 煤粉预热燃烧技术研发进展[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6535–6543.  
LÜ Qinggang, ZHU Shujun, ZHU Jianguo, et al. Research and development on preheated combustion of pulverized coal[J]. 2022, 42(18): 6535–6543.
- [5] LÜ Zhaomin, XIONG Xiaohe, YU Shilin, et al. Experimental investigation on NO emission of semi-coke under high temperature preheating combustion technology[J]. *Fuel*, 2021, 283: 467–480.
- [6] 王帅, 刘洋, 刘愿武, 等. 煤粉预热低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(4): 33–41.  
WANG Shuai, LIU Yang, LIU Yuanwu, et al. A review of preheating-low NO<sub>x</sub> combustion coupling technology of pulverized coal[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(4): 33–41.
- [7] RABOVITSER Joseph, BRYAN Bruce, KNIGHT Richard, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO<sub>x</sub> reduction from pulverized coal-fired boilers[J]. *Gas*, 2003, 1(2): 4–8.
- [8] BRYAN Bruce, RABOVITSER Joseph, NESTER Serguei, et al. Methane de-NO<sub>x</sub> for utility PC boilers[R]. Pittsburgh: DOE, 2005.
- [9] LIU Changchun, HUI Shien, PAN Su, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction[J]. *Fuel*, 2015, 139: 206–212.
- [10] LIU Changchun, HUI Shien, PAN Su, et al. Experimental investigation on NO<sub>x</sub> reduction potential of gas-fired coal preheating technology[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(9): 6089–6097.
- [11] LIU Changchun, HUI Shien, ZHANG Xiaolu, et al. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 85: 278–286.
- [12] 吕清刚, 牛天钰, 朱建国, 等. 高温煤基燃料的燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(23): 81–86.  
LÜ Qinggang, NIU Tianyu, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on combustion and NO<sub>x</sub> emissions of high temperature preheated coal-based fuel[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(23): 81–86.
- [13] OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, LÜ Qinggang. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. *Fuel*, 2013, 113: 122–127.
- [14] 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: 38–96.  
OUYANG Ziqu. Experimental study on preheating and combustion characteristics and pollutants emission of pulverized anthracite[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014: 38–96.
- [15] LIU Wen, OUYANG Ziqu, CAO Xiaoyang, et al. Experimental research on flameless combustion with coal preheating technology[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(6): 7132–7141.
- [16] ZHU Jianguo, OUYANG Ziqu, LÜ Qinggang. An Experimental study on NO<sub>x</sub> emissions in combustion of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(12): 7724–7729.
- [17] OUYANG Ziqu, SONG Wenhao, LI Shuyuan, et al. Experiment study on NO<sub>x</sub> emission characteristics of the ultra-low volatile fuel in a 2 MW novel pulverized fuel self-sustained preheating combustor[J]. *Energy*, 2020, 209: 118448.
- [18] WU Zhiheng, OHTSUKA Yasuo. Nitrogen distribution in a fixed bed pyrolysis of coals with different ranks; Formation and source of N<sub>2</sub>[J]. *Energy & Fuels*, 1997, 11(2): 477–482.
- [19] GLARBORG P, JENSEN A, JOHNSON J. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29(2): 89–113.
- [20] 吕钊敏, 熊小鹤, 于世林, 等. 预热燃烧模式下半焦 NO 排放和燃尽特性实验研究[J]. *燃料化学学报*, 2020, 48(5): 543–550.  
LÜ Zhaomin, XIONG Xiaohe, YU Shilin, et al. Experimental study on NO emission and burnout characteristics during semi-coke preheating combustion[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2020, 48(5): 543–550.
- [21] 王帅, 龚彦豪, 牛艳青, 等. 煤粉预热燃烧耦合过程中 NO 生成研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2951–2958.  
WANG Shuai, GONG Yanhao, NIU Yanqing, et al. Study on NO formation during preheating-combustion coupling of pulverized coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2951–2958.
- [22] XU Shisen, REN Yongqiang, WANG Baomin, et al. Development of a novel 2-stage entrained flow coal dry powder gasifier[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 318–323.
- [23] WANG Fuchen, ZHOU Zhijie, DAI Zhenhua, et al. Development and demonstration plant operation of an opposed multi-burner coal-water slurry gasification technology[J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering*, 2007, 1(3): 251–258.
- [24] FANG Neng, ZENG Lingyan, ZHANG Bin, et al. Numerical simulation of flow and gasification characteristics with different swirl vane angles in a 2 000 t/d GSP gasifier[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 791–799.
- [25] WANG Xiaoxiao, XU Shisen, WANG Yibin, et al. Numerical simulation on the effect of burner bias angles on the performance of a

- two-stage entrained-flow gasifier[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(8): 6640–6654.
- [26] WANG Xiaoxiao, ZHOU Bimao, XU Shisen, et al. Numerical analysis of coal size influencing the performance and slag flow characteristics of gasifier based on a comprehensive model[J]. *Fuel*, 2023, 332: 2378–2392.
- [27] OUYANG Ziqu, DING Hongliang, LIU Wen, et al. Effect of the staged secondary air on NO emission of pulverized semi-coke flameless combustion with coal preheating technology[J]. *Fuel*, 2021, 291: 489–497.
- [28] SMOOT L Douglas, SMITH Philp J. Coal combustion and gasification[M]. New York: Plenum Press, 1985: 375–380.
- [29] HAYNES B. Reactions of ammonia and nitric oxide in the burnt gases of fuel-rich hydrocarbon-air flames[J]. *Combustion and Flame*, 1977, 28: 81–91.
- [30] BI Dapeng, GUAN Qingliang, XUAN Weiwei, et al. Numerical simulation of GSP gasifier under different swirl angles[J]. *Fuel*, 2015, 155: 155–163.
- [31] XU Jianliang, ZHAO Hui, DAI Zhenghua, et al. Numerical simulation of opposed multi-burner gasifier under different coal loading ratio[J]. *Fuel*, 2016, 174: 97–106.
- [32] 王擎, 王引, 贾春霞, 等. 三种印尼油砂燃烧特性研究[J]. *中国电机工程学报* 2012;32(26): 23–30.
- WANG Qing, WANG Yin, JIA Chunxia, et al. Study on combustion characteristics of three indonesia oil sands[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(26): 23–30.
- [33] KATSUKI M, HASEGAWA T. The science and technology of combustion in highly preheated air[C]//Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute. 1998: 3135–3146.
- [34] KUMAR Sudarshan, 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.
- [35] SOETE G G DE. Heterogeneous N<sub>2</sub>O and NO formation from bound nitrogen atoms during coal char combustion[C]//Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute. 1990: 1257–1264.
- [36] WARGADALAM V J, LOFFLER F W, WINTER F. Homogeneous formation of NO and N<sub>2</sub>O from the oxidation of HCN and NH<sub>3</sub> at 600–1 000 °C[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 120: 465–478.
- [37] AARNA Indrek, SUUBERG Eric. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. *Fuel*, 1997, 76(6): 475–491.
- [38] WINTER Franz, LOFFLER Gerhard, WARTHA Christian, et al. The NO and N<sub>2</sub>O formation mechanism under circulating fluidized bed combustor conditions: From the single particle to the pilot-scale[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1999, 77: 275–283.
- [39] THOMAS Mark, GRANT Ken, TATE Kirsty. Nitrogen-doped carbon-13 materials as models for the release of NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O during coal char combustion[J]. *Fuel*, 1992, 72(7): 941–947.