

# 气化细粉灰预热无焰燃烧煤氮转化与 $\text{NO}_x$ 排放特性

丁鸿亮<sup>1,2</sup>, 欧阳子区<sup>1,2</sup>

(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:**为实现煤化工固废——气化细粉灰的清洁高效利用,采用先进的煤粉自预热燃烧技术,在 30 kW 固体碳基燃料预热无焰燃烧试验平台上,针对不同预热温度、不同预热燃烧器当量比下的烟煤经循环流化床气化后,细粉灰中氮的转化及  $\text{NO}_x$  排放特性进行试验研究。结果表明,气化细粉灰能在该试验系统上实现稳定的无焰燃烧。预热可明显改善气化细粉灰的燃烧特性改善具有重要作用。几乎全部挥发分氮在预热燃烧器内的强还原性气氛下提前脱除,主要向  $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_3$  与  $\text{HCN}$  三种含氮物质转化,焦炭氮为后续燃烧中  $\text{NO}_x$  的主要来源。预热温度对预热过程中煤氮向  $\text{N}_2$  的转化率影响显著,预热燃烧器空气当量比直接关系煤氮向  $\text{N}_2$  和  $\text{NH}_3$  的转化率,且与焦炭氮析出情况密切相关。预热温度和预热燃烧器空气当量比对  $\text{NO}_x$  排放浓度及燃料氮向  $\text{NO}_x$  转化率的影响效果差别明显。在预热温度为 902 °C、预热燃烧器空气当量比为 0.45 的条件下, $\text{NO}_x$  排放浓度和燃料氮向  $\text{NO}_x$  转化率最低,分别为 83.02 mg/m<sup>3</sup> (6%  $\text{O}_2$ ) 和 5.94%。

**关键词:** 气化细粉灰; 循环流化床; 预热; 无焰燃烧; 煤氮转化;  $\text{NO}_x$  排放

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2021)03-0070-11

## Fuel-N transformation and $\text{NO}_x$ emission characteristics of coal gasification fly ash during preheating process in the flameless combustion mode

DING Hongliang<sup>1,2</sup>, OUYANG Ziqu<sup>1,2</sup>

(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:** To achieve the clean and efficient utilization of the coal gasification fly ash, experimental studies which adopted advanced self-preheating combustion technology were carried out on a 30 kW preheating flameless combustion test rig for solid carbon-based fuel. Fuel-N transformation and  $\text{NO}_x$  emission characteristics from fine ash of bituminous coal gasification fly ash under different preheating temperatures and primary air equivalence ratio were discussed. The results show that the coal gasification fly ash can achieve stable flameless combustion on this experimental system. The combustion characteristics of coal gasification fly ash are greatly improved after preheating. Almost all volatile-N is removed in advance under the strong reducing atmosphere in the self-preheated burner, and is mainly converted to three nitrogen-containing substances:  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  and  $\text{HCN}$ . Thus char-N is the main source of  $\text{NO}_x$  emission in subsequent combustion. During the preheating progress, preheating temperature has an obvious effect on the conversion of fuel-N to  $\text{N}_2$ , while the primary air equivalence ratio mainly affects the conversion rate of fuel-N to  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  and the nitrogen precipitation from char-N. The effects of preheating temperature and primary air equivalence ratio of preheated burner on  $\text{NO}_x$  emission concentration and conversion rate of fuel-N to  $\text{NO}_x$  are obviously different. The concentration of  $\text{NO}_x$  emission and conversion rate of fuel-N to  $\text{NO}_x$  both reach the lowest value when the preheating temperature is 902 °C and the primary air equivalence ratio of preheated burner is 0.45, which are 83.02 mg/m<sup>3</sup> (6%  $\text{O}_2$ ) and 5.94%, respectively.

**Key words:** coal gasification fly ash; circulating fluidized bed; preheat; flameless combustion; fuel-N transformation;  $\text{NO}_x$  emission

收稿日期: 2021-02-05; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.SW21020501

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602001); 中国科学院青年创新促进会项目(2019148)

作者简介: 丁鸿亮(1996—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向为煤炭清洁高效利用。E-mail: dinghongliang@iet.cn。

通讯作者: 欧阳子区, 副研究员, 博士, 研究方向为洁净煤燃烧技术。E-mail: ouyangziqu@iet.cn

引用格式: 丁鸿亮, 欧阳子区. 气化细粉灰预热无焰燃烧煤氮转化与  $\text{NO}_x$  排放特性[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 70-80.

DING Hongliang, OUYANG Ziqu. Fuel-N transformation and  $\text{NO}_x$  emission characteristics of coal gasification fly ash during preheating process in the flameless combustion mode[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 70-80.



移动阅读

## 0 引言

我国丰富的煤炭探明储量中,低阶煤占比大<sup>[1-3]</sup>。气化残炭是低阶煤分级分质转化过程中产生的副产品<sup>[4]</sup>,通过对其进一步的燃烧利用可避免直接废弃造成的能源浪费与环境污染等问题,提高煤炭资源的整体利用效率。但由于气化残炭具有挥发分极低、着火和稳定燃烧较难等特点,现有的常规煤粉锅炉通常难以实现深度处理。探索气化残炭的稳定、高效、洁净燃烧技术,为其广泛应用提供新的技术方案和理论支撑,已成为当前亟待解决的难题。

燃煤利用过程中产生的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )会对大气环境造成严重污染<sup>[5-6]</sup>。由于煤粉在实际燃烧过程中产生的  $\text{NO}_x$  化学性质不稳定,且相应的化学反应较复杂,因此对其控制效果不理想<sup>[5]</sup>。研究发现,高浓度的氮氧化物易引发多种大气污染,如光化学烟雾、酸雨等,同时也会对臭氧层造成破坏,加剧温室效应<sup>[6]</sup>。 $\text{NO}_x$  也会危害人类健康,易引发肺部疾病。我国环保部门针对燃煤污染物已陆续出台了多项政策,并发布了相关规范文件, $\text{NO}_x$  减排任务势在必行<sup>[5]</sup>。目前除成熟度较高的脱氮技术<sup>[7-9]</sup>外,无焰燃烧(MILD)作为新型燃烧技术在  $\text{NO}_x$  排放控制上显现巨大潜力<sup>[10-11]</sup>,近 30 年发展迅速。研究结果表明<sup>[12-19]</sup>,在无焰燃烧区域内,燃烧稳定性高,燃烧温度分布均匀且峰值较低,无肉眼可见的火焰锋面, $\text{NO}_x$  排放水平较低。对于固体燃料,其实现无焰燃烧的主要方式是以燃气或蓄热体中的高温低氧空气作助燃气体<sup>[17-18]</sup>,也可利用常温空气高速射流卷吸烟气方式来满足无焰燃烧条件<sup>[19-21]</sup>。Weidmann 等<sup>[22]</sup>在中试试验平台(230 kW<sub>th</sub>)上研究了煤粉的无焰氧化过程,证实了无焰燃烧技术能提高燃料燃烧的均匀性,通过 OH 化学成像和 LDV 表征手段描述了煤粉无焰氧化过程中反应区域拓扑和流场模型,发现富氧工况下较低温度可降低 HCN 的释放和  $\text{NO}_x$  形成。Stadler 等<sup>[15]</sup>研究表明,与火焰燃烧相比,褐煤与烟煤无焰燃烧状态下产生的热力学型  $\text{NO}_x$  含量降低约 50%。Saha 等<sup>[23]</sup>在立式炉上研究了无焰燃烧模式下  $\text{CO}_2$  射流速度对维多利亚褐煤燃烧特性的影响,结果表明,射流雷诺数与煤挥发分释放速率呈正相关,二者增加会造成褐煤总碳消耗速率明显下降。但有关气化细粉灰无焰燃烧模式下的燃料特性、煤氮转化及  $\text{NO}_x$  排放却鲜有报道。

中国科学院工程热物理研究所于 2007 年提出适用于固体燃料高效低氮燃烧的煤粉高温燃烧方法<sup>[23]</sup>,并据此研发出煤粉自预热燃烧工艺<sup>[24]</sup>,打破

了传统燃烧模式下燃料高效燃烧与低  $\text{NO}_x$  排放的相互制约。燃料首先在预热燃烧器中进行部分燃烧与部分气化反应释放热量,实现自身预热,无需外部热源,随后在燃烧过程中结合分级燃烧技术进一步降氮。在 30 kW 煤粉自预热燃烧小试<sup>[25-27]</sup>、MW 级煤粉自预热燃烧中试<sup>[28-29]</sup>等试验装置上实现了多种燃料稳定的预热燃烧,研究结果均证明煤粉自预热燃烧技术具有实现燃料清洁高效燃烧的潜力,揭示了预热促进燃料改性和活化的内在机制。在煤粉自预热燃烧技术工业化应用方面,中国科学院工程热物理研究所开发了 20~60 t/h 的煤粉预热燃烧锅炉,展现出煤种适应性广、负荷调节范围大和  $\text{NO}_x$  排放低等技术优势<sup>[30]</sup>。煤气化的副产物——气化细粉灰,具有挥发分极低、热值小、可燃性差和反应特性差等特点,常规燃烧技术难以利用,且经煤气化处理后,其物理结构和化学特性较原燃料发生很大变化。目前采用煤粉自预热燃烧技术实现气化细粉灰的稳定、高效和清洁燃烧以及预热过程中的煤氮转化和  $\text{NO}_x$  生成特性研究的相关文献较少。

本文在前期研究基础上采用煤粉自预热燃烧技术,在燃烧室内实现了气化细粉灰的无焰燃烧,旨在探索实现气化细粉灰燃烧中低  $\text{NO}_x$  排放的新途径,并对其煤氮转化特性及  $\text{NO}_x$  排放进行深入研究。

## 1 试验

### 1.1 试验装置和试验过程

试验装置为 30 kW 固体碳基燃料预热无焰燃烧试验台,其原理如图 1 所示,主要由预热燃烧器、下行燃烧室及其他辅助系统组成。

预热燃烧器本体采用  $\text{Cr}_{25}\text{Ni}_{20}$  不锈钢材料制成,以循环流化床为设计原型。一部分助燃风(一次风,风量为理论风量的 20%~40%)从提升管底部供入,另一部分燃烧所需空气(二次风和三次风)分别从下行燃烧室顶部喷嘴和侧壁喷嘴引入。试验开始前,向预热燃烧器内加入 4 kg 石英砂作为蓄热床料。燃料进入预热燃烧器后在高温床料作用下发生部分燃烧与部分反应,实现自身预热,产生的高温煤气和高温煤焦(统称为预热燃料)从旋风分离器出口离开,进入下行燃烧室继续燃烧。

下行燃烧室顶部喷口采用高温预热燃料与二次风同轴射流喷口,结构如图 2 所示。高温预热燃料从中心筒喷入,中间一层为内二次风通道,最外侧为外二次风通道。三次风喷口布置在距下行燃烧室顶部 1 000 mm 处。在侧墙上布置 6 层观火窗,其中

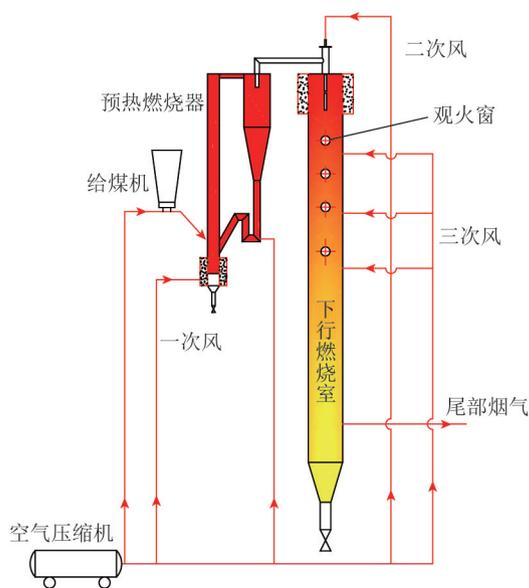


图1 试验工艺流程

Fig.1 Processing flow chart of experimental system

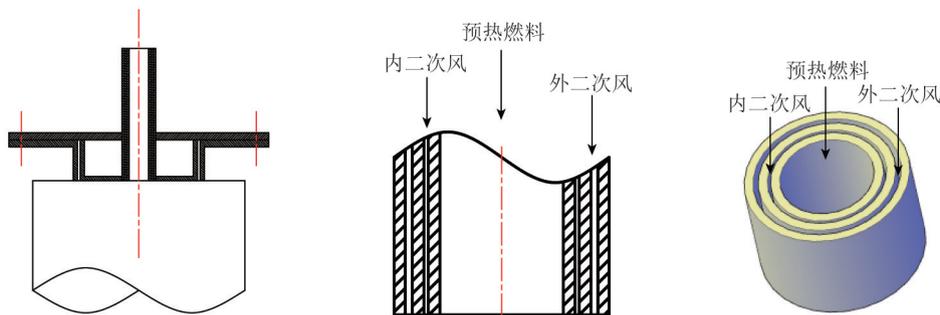


图2 高温预热燃料与二次风同轴射流喷嘴

Fig.2 High temperature preheated fuel and secondary air coaxial jet nozzle

分析仪对高温煤气中  $O_2$ 、 $NO$  和  $NO_2$  进行在线分析；  
③ 利用稀硫酸溶液与氢氧化钠溶液吸收高温煤气中的  $NH_3$  和  $HCN$ ，分别采用纳氏试剂分光光度法和硫氰酸汞分光光度法分析，其详细测量精度见文献 [31]。利用 Gasmet FTIR DX4000 烟气分析仪（芬兰 GASMET 公司）对下行燃烧室沿程各处烟气组分

进行在线分析。利用氧化锆对烟气冷却器出口烟气氧含量实时监测。试验过程中利用 Canon G7XII 相机（光圈 F4，快门速度 1/1 000 s，感光 ISO 1000，色温 6 000 K）拍摄燃烧室内的火焰燃烧状况。试验数据采集与取样工作均在系统已进入工况并稳定运行 2 h 后进行，取样过程各测点温度波动控制在  $\pm 4$  °C 以内。

表1 试验系统热电偶布置

Table 1 Thermocouple arrangement of experimental system

热电偶	预热燃烧器					下行燃烧室									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
距提升管顶部距离/mm	100	500	1 450	返料器	下行燃烧室入口	100	250	400	600	800	1 200	1 600	2 100	2 600	3 200

### 1.3 试验原料

试验原料为产自山东在平的气化细粉灰，挥发分低，稳定燃烧较难，其工业分析及元素分析见表 2，灰成分分析和灰熔融性分析见表 3。气化细粉灰

粒径分布范围为 0~100  $\mu m$ ，其中 50% 切割粒径  $d_{50} = 13.2 \mu m$ ，90% 切割粒径  $d_{90} = 40.93 \mu m$ ，具体粒径分布如图 3 所示。预热燃烧器床料粒径范围为 0.1~0.5 mm。

表 2 在平气化细粉灰工业分析和元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analyses of Chiping gasification fine powder ash

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )
$M_{\text{ar}}$	$V_{\text{ar}}$	$FC_{\text{ar}}$	$A_{\text{ar}}$	$C_{\text{ar}}$	$H_{\text{ar}}$	$O_{\text{ar}}$	$N_{\text{ar}}$	$S_{\text{ar}}$	
0.73	2.16	81.51	15.60	81.88	0.81	0	0.60	0.52	28.81

表 3 在平气化细粉灰灰成分分析和灰熔融性分析

Table 3 Ash composition analysis and ash fusibility analysis of Chiping gasification fine powder ash

灰成分分析/%												灰熔融性(弱还原性)/℃			
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	MnO	DT	ST	HT	FT
49.16	16.44	9.03	12.11	2.17	6.28	0.87	0.37	1.21	0.66	0.40	0.15	1 128	1 147	1 158	1 172

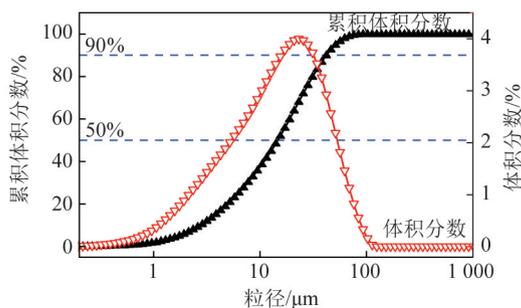


图 3 气化细粉灰粒径分布曲线

Fig.3 Particle size distribution curve of gasification fine powder ash

## 1.4 试验工况

预热温度和预热燃烧器空气当量比是影响气化

细粉灰中煤氮析出和转化的重要因素。由于 2 个变量之间存在相关关系,因此本文在进行单一变量试验时,通过给煤量和配风量之间的协同控制,实现对另一变量的约束,研究不同预热条件下气化细粉灰中氮元素的转化特性,并在下行燃烧室内实现气化细粉灰无焰燃烧模式下的低 NO<sub>x</sub> 排放。试验具体运行工况参数见表 4。其中,预热燃烧器当量比、二次风当量比(内外二次风比为 1:1)、三次风当量比分别为通入预热燃烧器的风量、二次风量以及三次风量与煤粉完全燃烧所需理论空气量的比值,预热温度指预热燃烧器内的最高温度,输入热功率与给煤量呈正相关。

表 4 试验工况参数

Table 4 Experimental conditions

工况	输入功率 $Q/\text{kW}$	给料量 $W/$ (kg · h <sup>-1</sup> )	预热燃烧器 空气量 $M_1/$ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	预热燃烧器 空气当量比 $\lambda_1$	预热温度 $T_{\text{max}}/\text{℃}$	二次风量 $M_2/$ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	二次风 当量比 $\lambda_2$	三次风量 $M_3/$ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	三次风 当量比 $\lambda_3$	总当 量比 $\lambda$
1	37.61	4.70	8.83	0.25	854	14.13	0.40	19.42	0.55	1.20
2	35.29	4.41	8.28	0.25	902	13.25	0.40	18.21	0.55	1.20
3	38.57	4.82	9.05	0.25	950	14.48	0.40	19.91	0.55	1.20
4	40.81	5.10	13.41	0.35	900	15.33	0.40	16.85	0.44	1.19
5	45.06	5.63	19.03	0.45	903	16.92	0.40	13.95	0.33	1.18

## 2 试验结果及分析

### 2.1 预热燃烧器运行特性

以工况 2 为例对预热燃烧器运行稳定性进行研究。图 4 为预热燃烧器内温度随时间变化曲线。试验工况稳定时,提升管内温度分布均匀,最高温度为 902 ℃,位于提升管中部;最低温度为 865 ℃,位于提升管底部,最高温差为 37 ℃,体现了循环流化床温度均匀化的特点。预热燃烧器内温度平稳,基本不随时间推移发生明显变化,说明气化细粉灰在过量空气系数为 0.25 的工况下,可在循环流化床中稳定地进行部分气化和部分燃烧反应,释放热量,将

温度维持在 900 ℃。下行燃烧室入口温度为 725 ℃,这是因为管道较长,保温较差导致热量散失。同时说明预热燃烧器能够连续、稳定地产生温度 725 ℃ 的高温预热燃料。对于其他工况,预热燃烧器床内的温度分布也能保持较高的稳定性和均匀性。

图 5 为预热燃烧器内压力差随时间变化曲线。从滤波后的曲线可以看出,当预热燃烧系统稳定运行时,物料浓度分布基本均匀,各部分压差波动达到稳定状态,再次说明高温预热燃料可稳定、连续地进入下行燃烧室进一步燃烧。因此,利用预热燃烧器对气化细粉灰进行预热的方法可行。

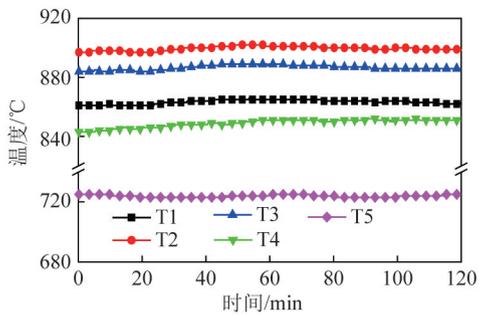


图4 工况2 预热燃烧器内温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature variations over time in preheating burner in case 2

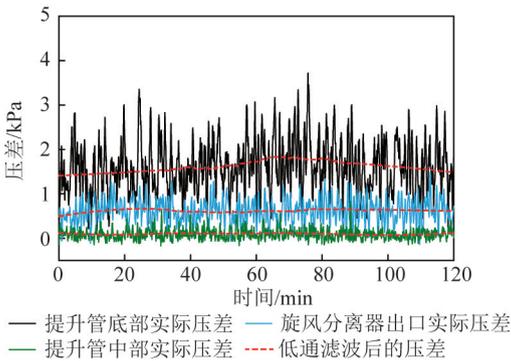


图5 工况2 预热燃烧器内压力差随时间变化曲线

Fig.5 Pressure differences variations over time in preheating burner in case 2

## 2.2 预热温度的影响

研究不同预热温度下的燃料氮转化与  $\text{NO}_x$  排放特性的工况为工况 1、2、3。在调整试验参数至工况稳定的过程中,预热燃烧器内温度随给煤量的增加而减小,随空气量的增加而增加。因此试验过程中通过协同控制给煤量和配风量,在不改变预热燃烧器空气当量比的前提下,实现对预热温度的控制。

### 2.2.1 预热过程燃料氮转化特性

工况稳定后在旋风分离器出口对预热后的高温煤气进行取样,分析结果见表 5。可知,气化细粉灰预热后的煤气成分大部分为  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$ ,另有少量的  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$ 。其中,  $\text{CH}_4$  含量最少,占比不到 0.5%。未检测到  $\text{O}_2$  及  $\text{NO}_x$ ,表明高温煤气具有强还原性,对  $\text{NO}_x$  的生成有很好的抑制作用。气化细粉灰中的部分燃料氮在欠氧的强还原性气氛下提前脱离,主要向  $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_3$  与  $\text{HCN}$  三种含氮物质转化。 $\text{NH}_3$  与  $\text{HCN}$  含量随预热温度的升高略有增加,浓度比接近 1:1。3 种工况下产生的高温煤气均具有较高的低位热值,可见,携带大量化学热、气固显热的预热燃料将稳定进入下行燃烧室燃烧,热量被下行燃烧室有效利用。

表 5 不同预热温度下高温煤气成分(干基)

Table 5 Composition analysis of high temperature coal gas at different preheating temperatures (dry base)

煤气组分	工况 1	工况 2	工况 3
$\text{CO}$ 体积分数/%	2.43	4.48	4.40
$\text{CO}_2$ 体积分数/%	15.41	15.36	16.89
$\text{H}_2$ 体积分数/%	1.26	2.31	3.29
$\text{CH}_4$ 体积分数/%	0.41	0.35	0.34
$\text{N}_2$ 体积分数/%	80.49	77.50	75.08
$\text{O}_2$ 体积分数/%	0	0	0
$\text{NO}$ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0	0	0
$\text{NO}_2$ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0	0	0
$\text{N}_2\text{O}$ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0	0	0
$\text{NH}_3$ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	132	139	145
$\text{HCN}$ 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	138	141	150
$Q_L/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	1.77	1.81	2.09

在旋风分离器出口处对预热后的高温煤焦取样进行工业分析和元素分析,并利用灰平衡假设<sup>[32]</sup>,对气化细粉灰中各元素转化率进行计算,结果如图 6 所示。气化细粉灰各组分的转化率随预热温度的增加而增加。预热温度由 854 °C 增至 902 °C 时,各组分转化率上升明显;而预热温度进一步升高到 950 °C 时,各组分转化率上升幅度减小。其中大部分挥发分在预热过程中析出。根据氮平衡假设<sup>[25]</sup>,预热过程中燃料氮向  $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{HCN}$  的转化率计算结果如图 7 所示。预热温度的变化对煤氮向  $\text{NH}_3$  与  $\text{HCN}$  转化率影响不大,主要影响煤氮向  $\text{N}_2$  的转化率。预热温度由 854 °C 增到 902 °C 时,煤氮向  $\text{N}_2$  的转化率增大且幅度较明显;预热温度进一步增到 950 °C 时,煤氮向  $\text{N}_2$  的转化率增加但幅度明显减小。气化细粉灰在整个预热过程中的氮转化率在 20% 以下,说明有大多数氮仍残留在高温煤焦中。为进一步确定高温煤焦中的氮元素分布,将高温煤焦置于马弗炉中加热,去除水分与挥发分后,进行元素分析,得到的氮元素结果即为高温煤焦中焦炭氮含量。从高温煤焦总氮含量中扣除焦炭氮含量即为挥发分氮含量。高温煤焦含氮分布如图 8 所示。可知,3 种工况下取得的高温煤焦中挥发分氮占比均小于 5%,且随着预热温度的升高逐渐减小。焦炭氮占高温预热煤焦中总氮含量的 95% 以上,说明几乎全部挥发分氮已在预热过程中析出,进入下行燃烧室参与燃烧反应的燃料氮类型主要为焦炭氮,成为后续燃烧中  $\text{NO}_x$  的主要来源。

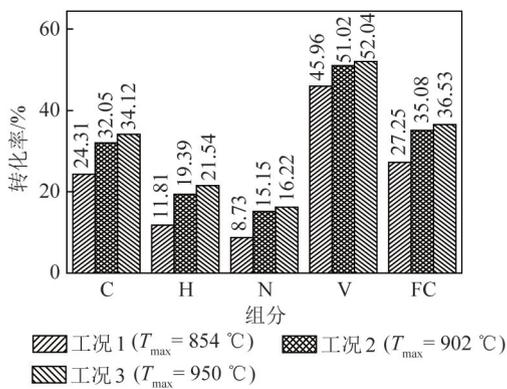


图6 不同预热温度下各组分转化率

Fig.6 Conversion rate of each component at different preheating temperatures

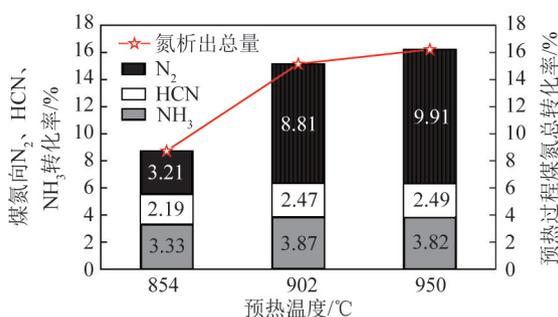


图7 不同预热温度下煤氮向各含氮化合物转化率

Fig.7 Conversion rate of fuel-N to each nitrogen compound at different preheating temperatures

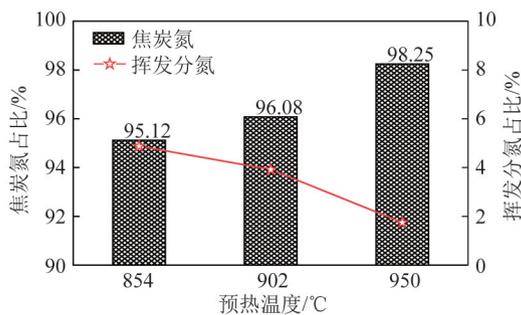


图8 不同预热温度下高温煤焦含氮分布

Fig.8 Nitrogen distribution of high temperature coal char at different preheating temperatures

### 2.2.2 高温预热燃料燃烧特性

图9为下行燃烧室温度沿轴向变化曲线。3条温度曲线的峰值温度均低于1100 $^{\circ}\text{C}$ ,表明热力型NO<sub>x</sub>产出量极低,基本可忽略。在下行燃烧室中,预热后的煤气含有较多的可燃组分,与二次风相遇后能快速着火并燃烧,不存在着火延迟,因此燃烧室顶部靠近二次风喷口区域的燃烧温度较高,均高于950 $^{\circ}\text{C}$ ,3个工况下的最高温度均在距下行燃烧室顶部800mm处达到。在二次风和三次风配比相同的情况下,随着预热温度升高,预热燃料在下行燃烧室的燃烧温度也略有提高,总体燃烧稳定,说明预热可

明显改善气化细粉灰的燃烧特性。

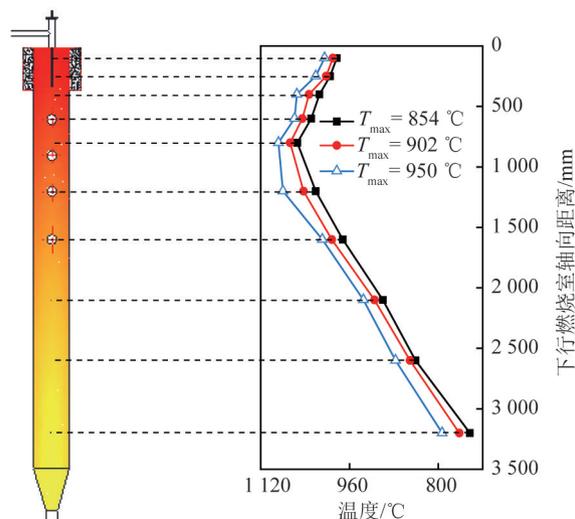


图9 下行燃烧室温度沿轴向变化曲线

Fig.9 Temperature profiles along the axis of down-fired combustor at different preheating temperatures

下行燃烧室沿轴线方向不同位置处火焰照片如图10所示。在下行燃烧室内壁、顶部的预热燃料喷口以及各热电偶探针和取样管,无明显火焰锋面,属于典型的无焰燃烧。随预热温度升高,火焰照片亮度逐渐变亮,在预热温度为950 $^{\circ}\text{C}$ 时亮度达到最大,这与图9中下行燃烧室的温度分布趋势较吻合。在试验台尾部取飞灰进行可燃物测定,根据文献[25]中公式计算燃烧效率。经计算,预热温度为854、902和950 $^{\circ}\text{C}$ 时,燃烧效率分别为91.23%、93.86%和90.72%,表明燃烧效率与燃烧区域温度及火焰亮度并非单纯的成正比关系,而是随预热温度升高先增后减,预热温度为902 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最大。3个工况下,气化细粉灰均在下行燃烧室实现了稳定的无焰燃烧,燃烧效率均较高。

### 2.2.3 NO<sub>x</sub> 排放特性

不同预热温度下,气化细粉灰NO<sub>x</sub>排放量(6% O<sub>2</sub>)和燃料氮向NO<sub>x</sub>的转化率如图11所示。转化率和NO<sub>x</sub>排放浓度随预热温度的变化趋势相同,均随预热温度的升高先减小后增加。902 $^{\circ}\text{C}$ 为本研究气化细粉灰最佳预热温度,NO<sub>x</sub>排放浓度达到最低,为102.31 mg/m<sup>3</sup>,此时燃料氮向NO<sub>x</sub>的转化率达最小值,为6.13%。NO<sub>x</sub>排放浓度随预热温度的变化关系与预热燃料特性有关,研究表明<sup>[33]</sup>,高温煤焦的孔结构对NO<sub>x</sub>的还原有重要作用,预热温度为900 $^{\circ}\text{C}$ 时,高温煤焦的比表面积和孔容积最大,增加了与NO<sub>x</sub>的接触面积,对NO<sub>x</sub>的异相还原最强,更多的NO<sub>x</sub>被煤焦还原成N<sub>2</sub>,从而降低了NO<sub>x</sub>的排放浓度。

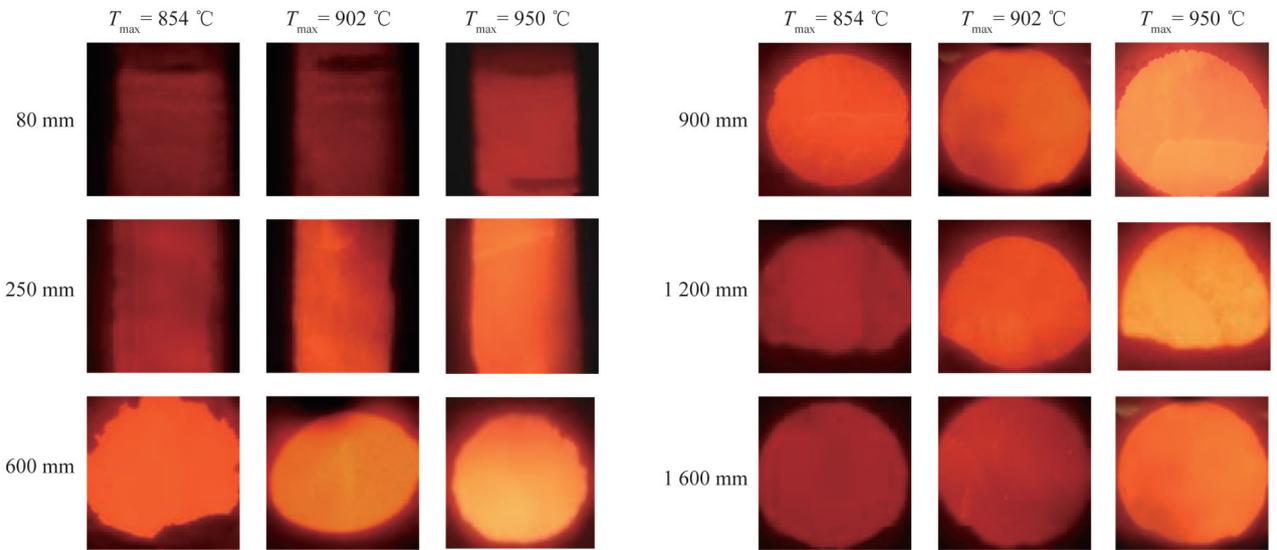
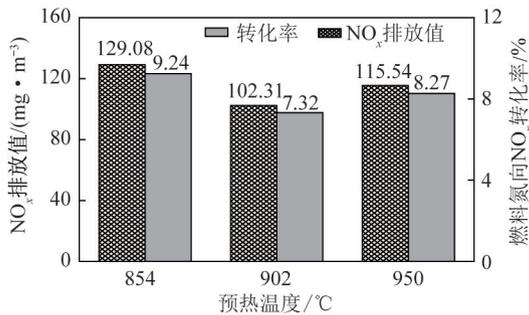


图10 下行燃烧室沿轴线方向不同位置处火焰照片

Fig.10 Flame images along the axis of down-fired combustor at different preheating temperatures

图11 NO<sub>x</sub>排放浓度与燃料氮向NO<sub>x</sub>转化率Fig.11 NO<sub>x</sub> concentration and fuel-N to NO<sub>x</sub> conversion ratio at different preheating temperatures

### 2.3 预热燃烧器空气当量比的影响

研究不同预热器空气当量比下的燃料氮转化与NO<sub>x</sub>排放特性的工况为工况2、4、5。通过改变给煤量和配风量,保证试验系统在预热燃烧器空气当量比变化的条件下,维持预热温度基本不变。

#### 2.3.1 预热过程燃料氮转化特性

表6为不同空气当量比下的高温煤气成分。可以看出,NH<sub>3</sub>含量随着空气当量比的增加明显上升,而HCN含量逐渐减少。文献[34]中指出,HCN主要来源于挥发分,NH<sub>3</sub>主要来源于焦炭。因此推断,随着空气当量比增加,气化细粉灰中将有更多煤氮从焦炭中析出转化为NH<sub>3</sub>。图12为不同预热燃烧器当量比下各组分转化率计算结果。随着空气当量比增大,各组分的转化率增加,但幅度较小。虽然C转化率随着预热燃烧器空气当量比的增长而增大,但煤气中CO和CO<sub>2</sub>含量并非线性变化(表6)。这是由于CO、C与O<sub>2</sub>的燃烧反应及C与CO<sub>2</sub>的气化反应相互竞争的结果。预热燃烧器空气当量比从

0.35增至0.45时,燃烧反应份额增大,因此煤气中CO含量降低,CO<sub>2</sub>含量升高。

表6 不同预热燃烧器空气当量比下高温煤气成分(干基)

Table 6 Composition analysis of high temperature coal gas at different  $\lambda_1$  (dry base)

煤气组分	工况2	工况4	工况5
CO体积分数/%	2.48	3.26	2.83
CO <sub>2</sub> 体积分数/%	15.36	14.27	15.45
H <sub>2</sub> 体积分数/%	1.31	2.42	2.88
CH <sub>4</sub> 体积分数/%	0.35	0.56	0.71
N <sub>2</sub> 体积分数/%	80.50	79.49	78.13
O <sub>2</sub> 体积分数/%	0	0	0
NO浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	0	0	0
NO <sub>2</sub> 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	0	0	0
N <sub>2</sub> O浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	0	0	0
NH <sub>3</sub> 浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	139	258	267
HCN浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	141	90	73
Q <sub>L</sub> /(MJ·m <sup>-3</sup> )	1.85	1.74	1.95

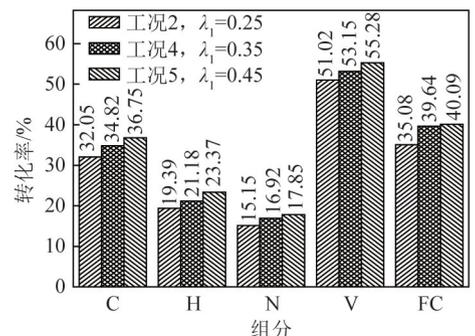


图12 不同预热燃烧器当量比下各组分转化率

Fig.12 Conversion rate of each component at different  $\lambda_1$

不同预热燃烧器当量比下,预热过程中煤氮向 N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>和 HCN 的转化率如图 13 所示。与图 7 结果不同,预热燃烧器当量比的变化对煤氮向 HCN 的转化率影响不大,主要影响煤氮向 N<sub>2</sub>和 NH<sub>3</sub>的转化率。随预热燃烧器当量比增加,煤氮向 N<sub>2</sub>的转化率下降,向 NH<sub>3</sub>的转化率上升,二者趋势正好相反,最终体现在挥发分氮总含量的变化幅度较小。高温煤焦含氮分布如图 14 所示。高温煤焦中焦炭氮含量随预热燃烧器空气当量比的增加而逐渐减小,与 NH<sub>3</sub>、HCN 含量变化情况相符。焦炭氮在高温煤焦总氮中仍占主导地位,是后续燃烧中 NO<sub>x</sub>的主要来源。适当增加预热燃烧器空气当量比,可增加焦炭氮在预热过程中转化为 NH<sub>3</sub>的几率。

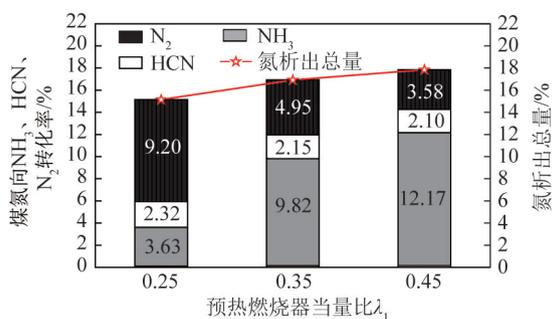


图 13 不同预热器空气当量比下煤氮向各含氮化合物转化率

Fig.13 Conversion rate of fuel-N to each nitrogen compound at different  $\lambda_1$

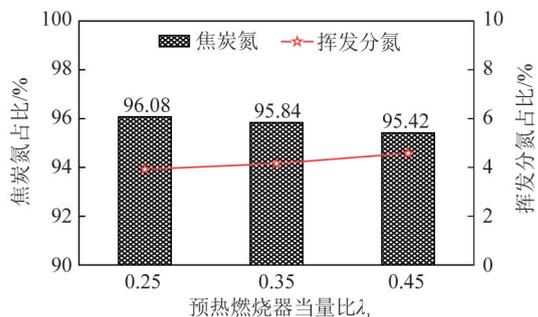


图 14 不同预热燃烧器当量比下高温煤焦含氮分布

Fig.14 Nitrogen distribution of high temperature coal char at different preheating temperatures

### 2.3.2 高温预热燃料燃烧特性

图 15 为下行燃烧室温度沿轴向变化曲线。可知,在二次风和三次风配比相同的情况下,随着预热燃烧器空气当量比增加,预热燃料在下行燃烧室的燃烧温度逐渐降低。在三次风喷口位置以上区域,温度均匀增加,这主要是由烟气回流以及煤气和煤焦的不同燃烧区间造成的。在三次风喷口位置以下区域,烟气为平推流,温度呈下降趋势,近似线性。由于散热条件相同,3 条曲线的温度下降速率相同。下行燃烧室沿轴线方向不同位置处火焰照片如图

16 所示。3 个工况的整体燃烧区域亮度均较均匀,在下行燃烧室 600 和 900 mm 区域,燃烧亮度最亮,可见主要燃烧过程发生在该区域内,在该区域外,燃烧反应较弱。随着预热燃烧器空气当量比增加,预热燃料在下行燃烧室的火焰亮度逐渐变暗,无肉眼可见的火焰锋面,结合下行燃烧室轴向的温度分布,可以判断本组试验同样实现了气化细粉灰稳定的无焰燃烧。经计算,预热燃烧器空气当量比为 0.25、0.35、0.45 时,燃烧效率均在 90% 以上,分别为 93.86%、90.53% 和 90.62%。

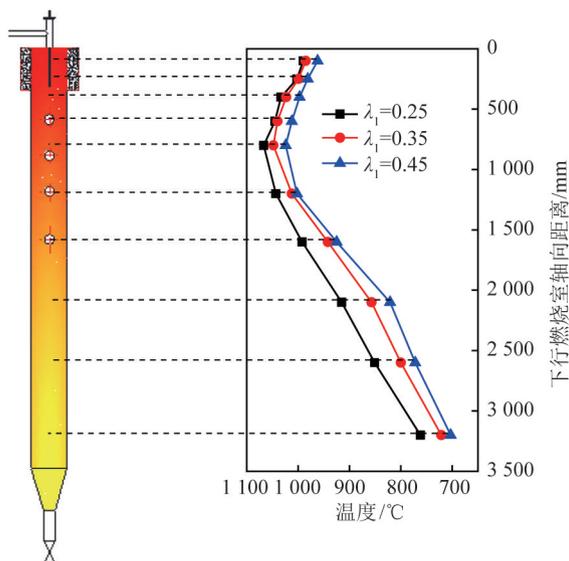


图 15 下行燃烧室温度沿轴向变化曲线

Fig.15 Temperature profiles along the axis of down-fired combustor at different  $\lambda_1$

### 2.3.3 NO<sub>x</sub> 排放特性

不同预热器空气当量比下,气化细粉灰 NO<sub>x</sub> 排放量(6% O<sub>2</sub>)和燃料氮向 NO<sub>x</sub> 的转化率如图 17 所示。可以看出,NO<sub>x</sub> 排放浓度随预热燃烧器空气当量比的增加而减小, $\lambda_1 = 0.45$  时,预热温度为最佳预热温度(表 4),此时 NO<sub>x</sub> 排放浓度达最低,为 83.02 mg/m<sup>3</sup>,燃料氮向 NO<sub>x</sub> 的转化率也达到最小值,为 5.94%。适当增大预热燃烧器空气当量比可大幅降低 NO<sub>x</sub> 排放水平。由图 12 可知,预热燃烧器空气当量比增加,在预热过程中燃料氮的转化率也会增加,有利于 NO<sub>x</sub> 减排。此外,文献[27]表明,预热后高温煤焦的孔隙结构会随预热燃烧器空气当量比的增加更加发达,有利于其进入下行燃烧室继续燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 在焦炭表面的还原。两者综合作用导致预热燃烧器空气当量比越高,最终的转化率和 NO<sub>x</sub> 排放浓度越低。相比于改变预热温度,较多的焦炭氮在预热过程中析出并转化为 NH<sub>3</sub>,因此图 17 中 NO<sub>x</sub> 排放浓度明显小于图 11,再次说明焦炭氮对

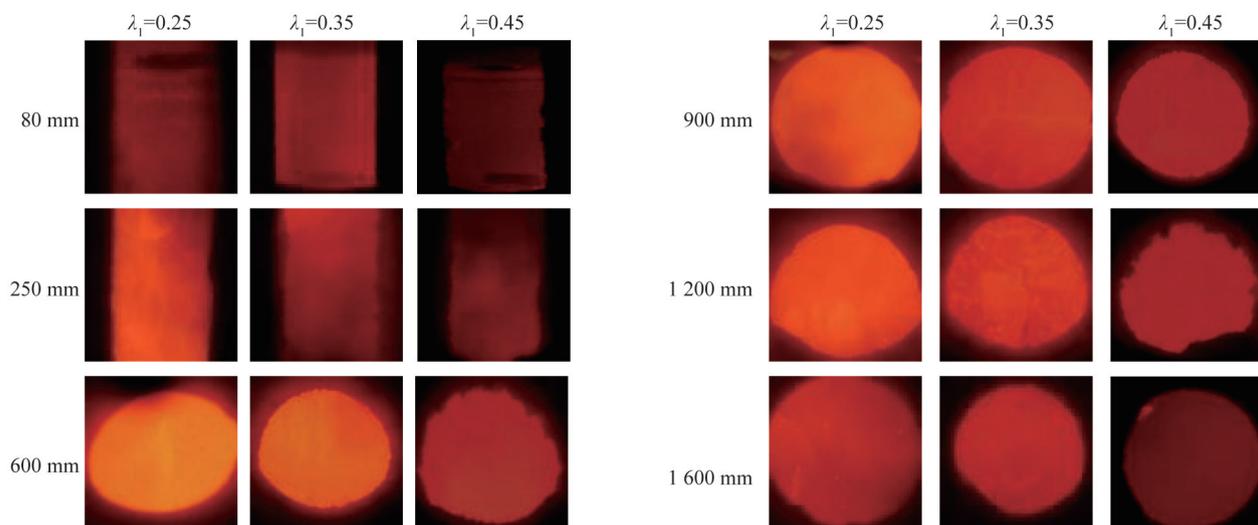
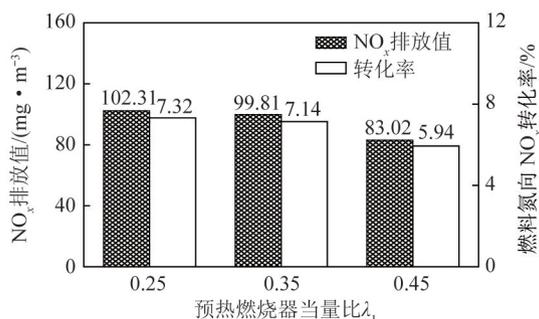


图16 下行燃烧室沿轴线方向不同位置处火焰照片

Fig.16 Flame images along the axis of down-fired combustor at different  $\lambda_1$ 图17 NO<sub>x</sub>排放浓度与燃料氮向NO<sub>x</sub>转化率Fig.17 NO<sub>x</sub> concentration and fuel-N to NO<sub>x</sub> conversion ratio at different  $\lambda_1$ 

于NO<sub>x</sub>排放的重要性。

在工程实际中应重点聚焦于焦炭氮并尽可能使其提前脱除,减少在燃烧过程中向NO<sub>x</sub>的转化,从而实现减排的目的。

### 3 对比分析

综合试验结果,目前现有的固体燃料燃烧装置中直接燃用气化细粉灰与本文的煤粉自预热燃烧技术相比,难以达到理想效果<sup>[27,35-36]</sup>,同时为提高燃烧效率,锅炉的燃烧温度较高,导致更高浓度的NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>等污染物排放<sup>[37-38]</sup>,无法稳定、高效和清洁利用。若要对气化灰渣中的未燃碳进行配煤掺烧利用,其高灰分会影响气化渣作为补充燃料的掺烧量,增大煤灰量,碳、灰相互制约,阻碍了其资源化利用<sup>[39-40]</sup>。与常规煤粉炉相比,循环流化床对多种固体燃料有更广泛的适应性,可直接实现气化细粉灰的稳定燃烧<sup>[41-42]</sup>,但造价较高、成本昂贵、耗电量较大。本文融合了煤粉自预热燃烧、颗粒改性和分级燃烧等技术调整燃料与氧化剂的混合过程,控制燃

料N向NO<sub>x</sub>的转化,实现了气化细粉灰的无焰燃烧,获得了低NO<sub>x</sub>排放的调控参数,为难燃低挥发分煤基固废的工程利用提供了技术支持,证明了煤粉自预热燃烧技术可突破常规的加热、着火和燃烧方式,燃料适应性广,对气化细粉灰类低挥发分煤化工固废仍适用,燃烧稳定性好且排放更低,具有广阔的工程化应用前景。

### 4 结论

1) 预热燃烧技术可燃用低挥发分的气化细粉灰,预热燃烧器内温度平稳,随时间基本不变。产生的高温预热燃料能够连续、稳定地进入下行燃烧室进一步燃烧,无着火延迟。本研究的所有工况均实现了稳定的无焰燃烧,燃烧区域温度分布均匀,峰值温度低,无明显的火焰锋面。

2) 预热对气化细粉灰的燃烧特性改善有重要作用。预热产生的高温煤气具有强还原性,以N<sub>2</sub>及CO<sub>2</sub>等为主,不含O<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>,对NO<sub>x</sub>的生成有很好的抑制作用。部分燃料氮在欠氧的强还原性气氛下提前脱除,主要向N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>与HCN这3种含氮物质转化。气化细粉灰中几乎全部的挥发分氮和大部分挥发分在预热过程中析出,因此进入下行燃烧室参与燃烧反应的燃料氮类型主要为焦炭氮,成为后续燃烧中NO<sub>x</sub>的主要来源。

3) 随预热温度升高,气化细粉灰在预热过程中各组分的转化率增加。相比于预热燃烧器空气当量比,预热温度对预热过程中挥发分氮的释放影响较明显,主要体现在其对煤氮向N<sub>2</sub>转化率的影响。燃烧效率在预热温度为902℃时达到最大,为93.86%。燃料氮向NO<sub>x</sub>转化率和NO<sub>x</sub>排放浓度均随

预热温度的升高先减小后增加,902 ℃ 为本研究中最佳预热温度,此时 NO<sub>x</sub> 排放浓度和燃料氮向 NO<sub>x</sub> 的转化率均达到最小值,分别为 102.31 mg/m<sup>3</sup>(6% O<sub>2</sub>) 和 6.13%。

4) 随预热燃烧器空气当量比的增加,气化细粉灰各组分转化率增加。相比于预热温度,预热燃烧器空气当量比主要影响预热过程中煤氮向 N<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 的转化率,以及焦炭氮的析出。适当增加预热燃烧器空气当量比,有利于气化细粉灰中挥发分及各组分的释放,并增加焦炭氮在预热过程中转化为 NH<sub>3</sub> 的几率。燃料氮向 NO<sub>x</sub> 转化率和 NO<sub>x</sub> 排放浓度均随预热燃烧器空气当量比增加而减小,λ<sub>1</sub> = 0.45 为本文最佳预热燃烧器空气当量比,NO<sub>x</sub> 排放浓度和燃料氮向 NO<sub>x</sub> 的转化率均达最小值,分别为 83.02 mg/m<sup>3</sup>(6% O<sub>2</sub>) 和 5.94%。

## 参考文献 (References):

- [1] 姚德文. 低碳经济模式下的产业发展新路径[J]. 当代经济, 2009(24): 6-7.  
YAO Dewen. The new path of industrial development under the low carbon economic model [J]. Contemporary economics, 2009 (24): 6-7.
- [2] WANG J, FAN W, LI Y, et al. The effect of air staged combustion on NO<sub>x</sub> emissions in dried lignite combustion [J]. Energy, 2012, 37 (1): 725-736.
- [3] NIMMO W, JAVED M T, GIBBS B M. NO<sub>x</sub> control by ammonium carbonate and ammonia with hydrocarbons as additives [J]. Journal of the Energy Institute, 2008, 81(3): 131-134.
- [4] YI L, FENG J, LI W Y. Evaluation on a combined model for low-rank coal pyrolysis [J]. Energy, 2019, 169: 1012-1021.
- [5] 朱书骏. 煤/半焦富氧预热燃烧特性及 NO<sub>x</sub> 排放特性试验研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2019.  
ZHU Shujun. Experimental study on preheating oxy-fuel combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics of coal/char [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2019.
- [6] 李永恒. SAPO-18 分子筛基催化剂选择催化还原脱除 NO<sub>x</sub> 的研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2018.  
LI Yongheng. Study on SAPO-18 zeolite based catalysts for the selectively catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub> [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [7] LI Z Q, WANG Z X, SUN R, et al. Influence of division cone angles between the fuel-rich and the fuel-lean ducts on gas particle flow and combustion near swirl burners [J]. Energy, 2002, 27(12): 1119-1130.
- [8] FAN W, LIN Z, LI Y, et al. Effect of air-staging on anthracite combustion and NO<sub>x</sub> formation [J]. Energy & Fuels, 2009, 23 (1): 111-120.
- [9] COCLA B, KLUGER F, FÖRTSCH D, et al. Coal-nitrogen release and NO<sub>x</sub> evolution in air-staged combustion [J]. Energy & Fuels, 1998, 12(6): 1322-1327.
- [10] RISTIC D, SCHUSTER A, SCHEFFKNECHT G. On the potential of flameless oxidation to reduce NO<sub>x</sub> emissions from pulverized coal combustion [J]. Journal of the International Flame Research Foundation, 2010(4): 1-16.
- [11] WÜNNING A J, WÜNNING G J. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [12] STADLER H, TOPOROV D, FOERSTER M, et al. On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion [J]. Combustion & Flame, 2009, 115 (9): 1755-1763.
- [13] VERÍSSIMO A, ROCHA 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.
- [14] LI P F, MI J C, DALLY B B, et al. Progress and recent trend in MILD combustion [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(2): 255-269.
- [15] STADLER H, RISTIC D, FORSTER M, et al. NO<sub>x</sub> emissions from flameless coal combustion in air, Ar/O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32 (2): 3131-3138.
- [16] WEIDNANN M, HONORÉ D, VERBAERE V, et al. Experimental characterization of pulverized coal MILD flameless combustion from detailed measurements in a pilot-scale facility [J]. Combustion & Flame, 2016, 168: 365-377.
- [17] SCHAFFEL M 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.
- [18] 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.
- [19] DALLY B B, SUNG S H, RICHARD C A, et al. On the burning of sawdust in a MILD combustion furnace [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(6): 3462-3470.
- [20] XING X, WANG B, LIN Q. Structure of reaction zone of normal temperature air flameless combustion in a 2 t/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.
- [22] WEIDMANN M, VERBAERE V, BOUTIN G, et al. Detailed investigation of flameless oxidation of pulverized coal at pilot-scale (230 kW<sub>th</sub>) [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 74: 96-101.
- [23] SAHA M, DALLY B, MEDWELL P, et al. Burning characteristics of Victorian brown coal under MILD combustion conditions [J]. Combustion & Flame, 2016, 172: 252-270.
- [24] 吕清刚, 朱建国, 牛天钰, 等. 煤粉高温预热方法: 200710175526.3 [P]. 2008-04-09.  
LYU Qinggang, ZHU Jianguo, NIU Tianyu, et al. High

- temperature preheating method for pulverized coal; 200710175526.3[P]. 2008-04-09.
- [25] 牛天钰. 高温煤基燃料燃烧和氮氧化物生成特性的试验研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2008.
- NIU Tianyu. Experimental study on combustion and NO<sub>x</sub> emission of high temperature preheated coal-based fuel[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2008.
- [26] 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:中国科学院工程热物理研究所, 2014.
- OUYANG Ziqu. Experimental study on preheating and combustion characteristics and pollutants emission of pulverized anthracite[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2014.
- [27] 么遥. 细粉半焦预热燃烧及 NO<sub>x</sub> 生成特性实验研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2016.
- YAO Yao. Experimental study on preheated combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission of pulverized semi-coke[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2016.
- [28] 刘稳. 低挥发分碳基燃料无焰燃烧及 NO<sub>x</sub> 生成特性实验研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2020.
- LIU Wen. Experimental study on flameless combustion and NO<sub>x</sub> formation characteristics of low volatile carbon-based fuel[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2020.
- [29] 中国科学院工程热物理研究所. 研究所“MW 级超低 NO<sub>x</sub> 煤粉预热燃烧技术”通过科技成果评审[EB/OL]. (2020-12-11). [http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/202012/t20201211\\_5816976.html](http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/202012/t20201211_5816976.html).
- [30] OUYANG Z, SONG W, LI S, 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. 2020, 209.
- [31] 中国科学院工程热物理研究所. 研究所预热燃烧技术突破煤粉锅炉氮氧化物无氨原始排放新纪录[EB/OL]. (2020-06-04). [http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/202006/t20200604\\_5602230.html](http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/202006/t20200604_5602230.html).
- [32] 欧阳子区, 朱建国, 矫维红, 等. 煤气化与燃烧生成烟气中含氮化合物的测试方法[J]. 计测技术, 2013, 33(5): 23-27.
- OUYANG Ziqu, ZHU Jianguo, JIAO Weihong, et al. Analytical methods of nitrogen compounds in coal gasification and combustion generation of flue gas[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(5): 23-27.
- [33] OUYANG Z, ZHU J, LYU Q. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. Fuel, 2013, 113(2): 122-127.
- [34] AARNA I, SUUBERG E M. A Review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.
- [35] LI L, LI C. Formation of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part III. Further discussion on the formation of HCN and NH<sub>3</sub> during pyrolysis[J]. Fuel, 2000, 79(20): 1899-1906.
- [36] 刘嘉鹏. 气流床气化细灰燃烧特性及再利用探讨[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(6): 17-20.
- LIU Jiapeng. Discussion on combustion characteristics and reuse of entrained-flow gasified fine ash[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(6): 17-20.
- [37] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 等. 煤气化渣综合利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 184-193.
- QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, SUN Zhigang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 184-193.
- [38] 邓鸿翔, 任强强, 张玉魁. 循环流化床气化细粉灰熔融特性研究[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(3): 273-282.
- Deng Hongxiang, Ren Qiangqiang, Zhang Yukui. Melting characteristics of fine ash from circulating fluidized bed gasifier[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(3): 273-282.
- [39] 邓鸿翔. 循环流化床气化细粉灰熔融特性试验研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2018.
- DENG Hongxiang. Experimental study on melting characteristics of fine ash from circulating fluidized bed gasifier[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2018.
- [40] WU S, HUANG S, JI L, et al. Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from entrained flow coal gasification slag[J]. Fuel, 2014, 122: 67-75.
- [41] 杜杰, 戴高峰, 李帅帅, 等. 气化细渣基础燃烧特性试验研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 83-88.
- DU Jie, DAI Gaofeng, LI Shuishuai, et al. Experimental study on the fundamental combustion characteristics of fine slag from gasification[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 83-88.
- [42] REN Q, BAO S. Combustion characteristics of ultrafine gasified semi-char in circulating fluidized bed[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2016, 94(9): 1676-1682.