

神木烟煤流态化预热中煤气生成特性

张震^{1,2}, 朱建国^{2,3}, 师永帅^{2,3}, 王婷婷^{2,3}

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 预热燃烧具有燃料适应性广、负荷调节快及污染物排放低等优势, 是一种新型的高效清洁燃烧技术。其中, 煤粉流态化预热后产生的预热煤气既能反映预热过程中煤粉的改性程度, 又对后续燃烧效率及 NO_x 排放有重要影响。因此, 煤粉流态化预热后产生的预热煤气是控制燃料转化及低 NO_x 排放的关键。基于煤粉流态化预热转化过程, 在温度可控的千瓦级煤粉预热燃烧试验平台上, 研究了预热温度、循环流化床空气当量比、煤粉粒径对预热煤气生成特性的影响。结果表明, $850 \sim 950\text{ }^\circ\text{C}$, 随预热温度升高, 热解反应及气化反应增强, 煤气中 CO_2 体积分数下降, CO 体积分数增加, H_2 体积分数先增加后不变, CH_4 体积分数则先增加后减小, 煤气品质改善, 热值由 2.86 MJ/m^3 增至 3.61 MJ/m^3 ; 循环流化床空气当量比从 0.3 增至 0.5 时, 氧化反应增强, 煤气中 CO_2 体积分数增加, CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数降低, 煤气热值由 3.44 MJ/m^3 降至 2.04 MJ/m^3 ; 随煤粉粒径增加, 煤粉在提升管内停留时间延长, 气化反应增强, 煤气中 CO_2 体积分数降低, CO 、 H_2 体积分数增加, CH_4 体积分数先增加后减小, 煤气热值由 2.30 MJ/m^3 增至 3.63 MJ/m^3 。

关键词: 煤气生成特性; 预热温度; 循环流化床; 空气当量比; 粒径

中图分类号: TQ534 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2023)02-0149-06

Gas generation characteristics of Shenmu bituminous coal
in fluidized preheatingZHANG Zhen^{1,2}, ZHU Jianguo^{2,3}, SHI Yongshuai^{2,3}, WANG Tingting^{2,3}

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Institute of Engineering

Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The preheating combustion is a novel effective and clean combustion technology with the technical advantages of wide fuel adaptability, high load adjustment and low pollutant emission. The preheating coal gas generated after the pulverized coal fluidization preheating can not only reflect the modification degree of the pulverized coal in a preheating process, but also play an important role in subsequent combustion efficiency and NO_x emission as well. Therefore, the preheating coal gas generated after the pulverized coal fluidization preheating is a key for controlling fuel conversion and low NO_x emission. Based on the pulverized coal fluidized preheating conversion process, the effects of preheating temperature, air equivalence ratio of CFB, and pulverized coal particle size on the preheated gas generation characteristics were investigated in this paper on a kW-stage pulverized coal preheating combustion experimental platform with controllable temperature. The results show that the pyrolysis and gasification reaction are enhanced with the increase of preheating temperature in the range of $850 \sim 950\text{ }^\circ\text{C}$. The volume fraction of CO_2 in the gas decreases, the volume fraction of CO increases, the volume fraction of H_2 increases firstly and then remains unchanged, while the volume fraction of CH_4 increases firstly and then decreases. The gas quality is improved and the heat value increases from 2.86 MJ/m^3 to 3.61 MJ/m^3 . When the air equivalent ratio of CFB increases from 0.3 to 0.5, the oxidation reaction is enhanced, the volume fraction of CO_2 in the gas increases, the volume fractions of CO , H_2 and CH_4 decreases, and the heat value of gas decreases from 3.44 MJ/m^3 to 2.04 MJ/m^3 . With the increase of pulverized coal particle size, the residence time

收稿日期: 2021-11-13; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21113001

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA21040100)

作者简介: 张震(1997—), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生。E-mail: zhangzhen@iet.cn

通讯作者: 朱建国(1977—), 男, 山东巨野人, 正高级工程师, 硕士生导师, 博士。E-mail: zhujianguo@iet.cn

引用格式: 张震, 朱建国, 师永帅, 等. 神木烟煤流态化预热中煤气生成特性[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(2): 149-154.

ZHANG Zhen, ZHU Jianguo, SHI Yongshuai, et al. Gas generation characteristics of Shenmu bituminous coal in fluidized preheating[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(2): 149-154.



移动阅读

of pulverized coal in the riser is prolonged and the gasification reaction is enhanced. The volume fraction of CO_2 in the gas decreases, the volume fraction of CO and H_2 increases, the volume fraction of CH_4 increases first and then decreases, and the heat value of gas increases from 2.30 MJ/m^3 to 3.63 MJ/m^3 .

Key words: gas generation characteristics; preheating temperature; circulating fluidized bed; air equivalence ratio; particle size

0 引言

目前,煤炭在我国能源消费结构中仍占据主导地位,煤炭燃烧利用占煤炭消费量比重超过80%^[1]。煤炭燃烧过程中会产生 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等污染物,危害生态环境。因此,煤炭高效清洁利用是国家重要发展战略。常规煤粉低 NO_x 燃烧技术主要包括空气分级、燃料分级和烟气再循环等技术,在降低 NO_x 排放方面取得较大成就,但难以满足 NO_x 质量浓度 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ 的环保要求。近年来,为进一步降低煤燃烧 NO_x 排放水平,国际上普遍采用基于煤粉预处理的燃烧技术,即煤粉进入炉膛前先预热或预燃。全俄热能研究院(All-Russian Thermal Engineering Institute)提出了气体燃烧预热煤粉工艺,后经美国燃气技术研究院(Gas Technology Institute)发展完善^[2-3],通过甲烷燃烧对煤粉预热,预热后的高温煤粉喷入炉膛后结合炉内空气分级有效降低了 NO_x 排放;西安交通大学设计了35 kW煤粉两段燃烧试验台,通过丙烷燃烧预热煤粉,预热后煤粉燃烧的 NO_x 排放最高降低74%^[4-6]。XIONG等^[7]和NIU等^[8]在两级下降管式炉内模拟预热燃烧,并探讨了预热温度、停留时间等因素对 NO_x 排放的影响;清华大学提出了煤粉浓缩预热燃烧器,通过卷吸高温烟气对煤粉进行预热,在12 MW试验台上实现了无烟煤和石油焦的稳定燃烧,实现 NO_x 较低排放^[9-10]。可见,相较常规煤粉直接入炉燃烧技术,煤粉预处理后再燃烧具有明显优势。

中国科学院工程热物理研究所提出了煤粉流态化自预热燃烧工艺和技术^[11],即煤粉在高于 800°C 循环流化床中自预热,再将高温预热燃料送入炉膛与氧化剂接触后燃烧放热。在30 kW预热燃烧试验台上,实现了烟煤^[12]、无烟煤^[13]、半焦^[14]等燃料

的稳定燃烧及低 NO_x 排放。其中,煤粉预热后产生的高温预热煤气既能反映预热过程中煤粉的改性程度,又对后续燃烧效率及 NO_x 排放有重要影响。因此,煤粉流态化预热后的预热煤气成分分析是控制燃料转化及低 NO_x 排放的关键。ZHANG等^[15]研究了 O_2/C 比对神木烟煤预热过程中煤气特性的影响,结果表明随 O_2/C 比增加,预热温度升高,但煤气中可燃成分 CO 、 H_2 、 CH_4 含量下降,煤气热值随之减小;欧阳子区^[16]研究了预热温度、循环流化床空气当量比对无烟煤预热特性的影响,结果表明随预热温度升高,预热煤气中 H_2 含量升高, CO 和 CH_4 含量降低,而随循环流化床空气当量比增加,预热煤气中 H_2 含量降低, CH_4 含量升高, CO 含量先减小后增加。然而,原有试验研究中,难以保持变量单一变化,如研究预热温度对煤气成分的影响,需依靠调节当量比或给煤量实现预热温度变化,而当量比和预热温度均影响预热特性,原有研究无法精准分析预热温度单一变量对预热过程的影响规律。

笔者基于循环流化床预热技术,在温度可控的千瓦级煤粉预热燃烧试验平台上,通过电炉控温等方法,研究神木烟煤预热过程中预热温度、循环流化床空气当量比、煤粉粒径对煤向煤气转化特性的影响,以精准解析煤粉预热过程的煤转化特性,支撑预热燃烧技术发展和应用。

1 试验

1.1 试验原料

试验原料为神木烟煤,神木烟煤工业分析及元素分析见表1。试验开始前向提升管内加入石英砂作为床料。煤粒径分别为 $0\sim 0.180$ 、 $0\sim 0.355$ 、 $0\sim 0.500 \text{ mm}$,石英砂粒径为 $0.1\sim 0.5 \text{ mm}$,煤粉及石英砂粒径分布如图1、2所示。

表1 神木烟煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate and analysis of Shenmu bituminous coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
9.50	5.48	30.81	54.21	68.89	3.88	10.78	0.97	0.50	26.62

1.2 试验装置

千瓦级煤粉预热燃烧试验平台流程如图3所示,包括预热燃烧器(预热燃烧室和高温气固燃料

喷口)、卧式燃烧室及辅助系统(给料系统、烟气冷却系统、布袋除尘系统、电辅热系统、测控系统等)。

预热燃烧室即循环流化床,由提升管、旋风分离

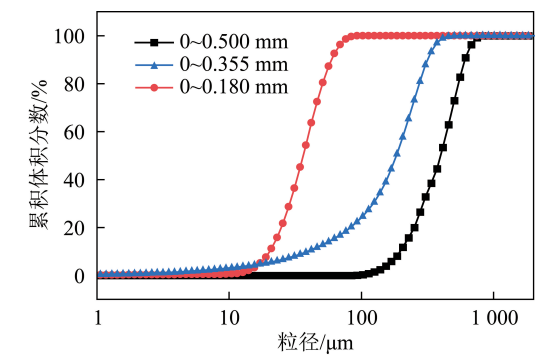


图 1 神木烟煤粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of Shenmu bituminous coal

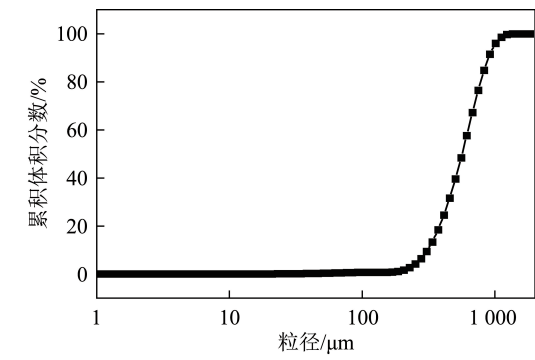


图 2 石英砂粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of quartz sand

器及返料器组成,其中提升管内径为 81 mm,高度为 1 500 mm。预热燃烧室采用电炉辅热形式,电炉沿提升管高度方向分为上下两端,用于调整控制预热温度。预热燃烧室共装有 5 个 K 型热电偶温度测点,提升管布置 3 个温度测点,分别位于距提升管底部 200、500、1 450 mm 高度处,旋风分离器出口和返料器底部各有一个温度测点,用于监测预热燃烧室温度分布情况。卧式燃烧室为方形结构,内截面为 500 mm×500 mm,燃烧室长度为 2 115 mm。

1.3 试验工况

试验工况见表 2,工况 1~4 主要研究相同空气当量比下,预热温度对烟煤预热过程中煤向煤气转化特性的影响,预热温度通过电炉调整控制。工况 3、5、6 主要研究相同预热温度下空气当量比对烟煤预热过程中煤向煤气转化特性的影响。工况 3、7、8 主要研究相同预热温度和空气当量比下,粒径对烟煤预热过程中煤向煤气转化特性的影响。循环流化床空气量和循环流化床空气当量比计算公式为

$$F_{CFB} = F_{Pr} + F_{Re} + F_{Ca}, \quad (1)$$

$$\lambda_{CFB} = F_{CFB} / F_{Stoic}, \quad (2)$$

式中, F_{CFB} 为循环流化床空气量, m^3/h ; F_{Pr} 为一次风空气量, m^3/h ; F_{Re} 为返料风空气量, m^3/h ; F_{Ca} 为播煤

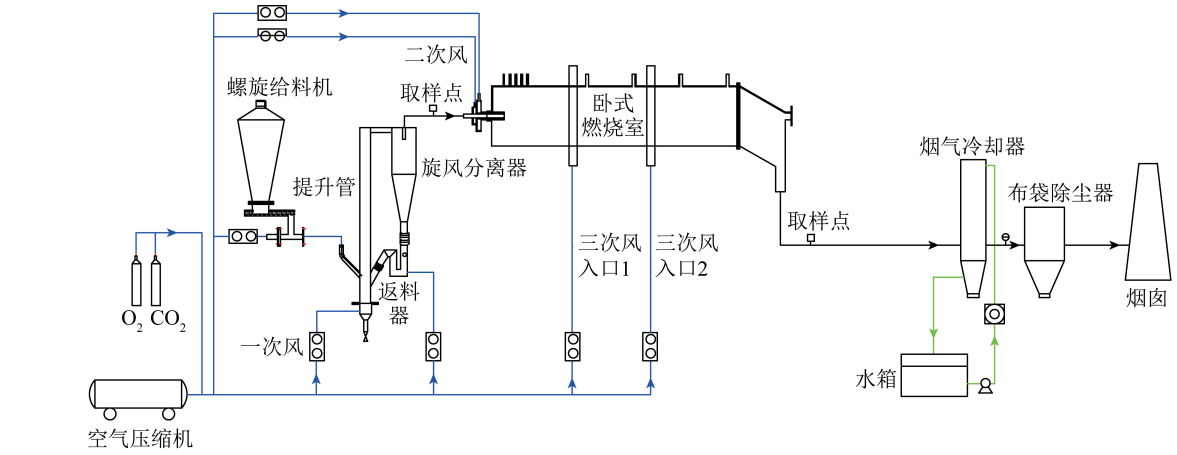


图 3 千瓦级煤粉预热燃烧试验平台

Fig.3 Kilowatt-stage pulverized coal preheating combustion experimental platform

风空气量, m^3/h ; λ_{CFB} 为循环流化床空气当量比; F_{Stoic} 为煤粉完全燃烧所需理论空气量, m^3/h 。

表 2 试验工况

Table 2 Experiment conditions

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
给煤量/($kg \cdot h^{-1}$)	3.37	3.31	3.30	3.30	3.28	3.31	3.29	3.35
粒径/mm	0~0.355	0~0.355	0~0.355	0~0.355	0~0.355	0~0.355	0~0.180	0~0.500
$F_{CFB}/(m^3 \cdot h^{-1})$	6.9	6.9	6.9	6.9	9.0	11.1	6.9	6.9
λ_{CFB}	0.301	0.306	0.307	0.307	0.403	0.492	0.308	0.302
预热温度/ $^{\circ}C$	850	880	910	950	910	910	910	910

1.4 试验方法

试验前,向提升管内加入 2.5 kg 石英砂作为床料,一次风由提升管底部布风板给入,返料器处开启返料风以保证床料流化。同时开启提升管和卧式燃烧室电炉为提升管和燃烧室加热升温,待提升管底部温度达 500 ℃ 左右时,启动螺旋给料机,以小给煤量给煤使提升管继续升温。待提升管平均温度升高至 800 ℃ 时,开启二次风、三次风,加大给煤量和一次风,将预热燃烧室切换至气化状态。不断调节给煤量及风量向预定试验工况靠近,待提升管温度和卧式燃烧室温度达到稳定时,开始稳定工况测量和数据采集。

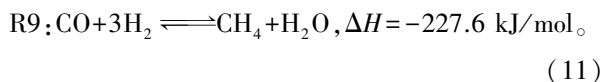
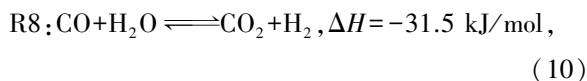
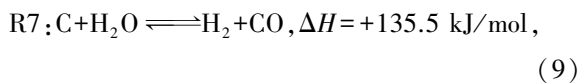
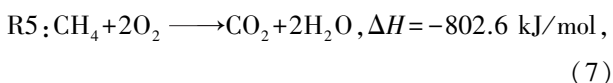
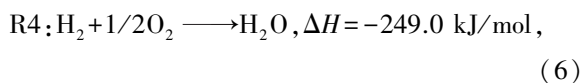
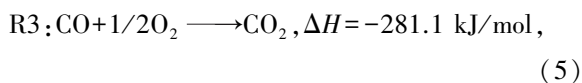
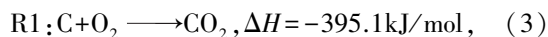
切换工况时,保持循环流化床内风量和给煤量不变,通过调节提升管电炉温度调节提升管预热温度,研究预热温度对神木烟煤预热煤气特性的影响;保持给煤量不变,改变循环流化床内风量,再通过调节提升管电炉温度保持预热温度不变,研究循环流化床空气当量比对神木烟煤预热煤气特性的影响;保持给煤量及循环流化床空气当量比不变,改变煤粉粒径,同时调节电炉温度保持预热温度不变,研究煤粉粒径对神木烟煤预热煤气特性的影响。

试验过程中在旋风分离器出口抽取高温煤气,经水洗、活性炭吸附处理后由气袋收集,其主要成分(CO_2 、 N_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2)由气相色谱分析仪(Agilent GC 3000)分析,测量精度为 $\pm 2\%$,对每个气样测量3次取平均值为最后测量结果。

2 结果与分析

2.1 预热温度对预热煤气特性的影响

由于给入提升管的空气量不足,因此神木烟煤预热过程中会经历热解及部分气化反应。热解过程中,煤粉挥发分在极短时间内析出并裂解生成 CO 、 H_2 和 CH_4 等小分子气相产物;气化反应主要为预热煤焦与气化剂或气相(中间)产物的非均相反应及气化剂与气相(中间)产物的均相反应(ΔH 为焓变),主要反应^[17-18]为



预热温度对预热煤气成分及热值的影响如图4所示。可知随预热温度升高,煤气中 CO_2 体积分数降低, CO 体积分数增加, H_2 体积分数先增加后保持不变, CH_4 体积分数先增加后减小。

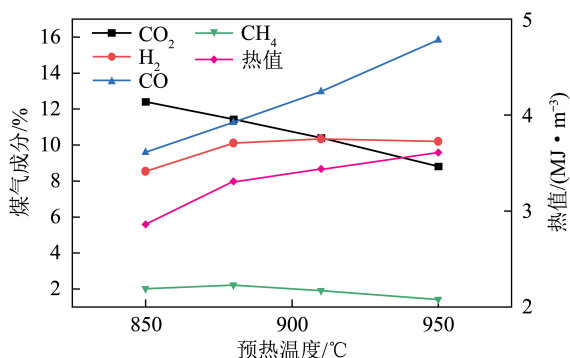


图4 不同预热温度下煤气成分及热值

Fig.4 Gas composition and heat value at different preheating temperatures

预热温度由 850 ℃ 升至 950 ℃ 时, Boudouard 反应 R6 和水煤气反应 R7 反应速率不断提高, 同时反应平衡也向正方向移动, 导致预热煤气中 CO_2 体积分数由 12.41% 降至 8.82%, CO 体积分数由 9.6% 增至 15.84%; 预热煤气中 H_2 主要来源于煤中芳香环的缩聚反应^[19] 及水煤气反应 R7, 预热温度由 850 ℃ 升高至 880 ℃ 时, 水煤气反应 R7 及热解反应的增强促进了 H_2 生成, H_2 体积分数由 8.54% 增至 10.11%。但水煤气反应受煤中 H_2O 限制, 且随预热温度进一步增加, H_2 氧化反应 R4 随之增强, 同时水煤气变换反应 R8 向逆方向偏移, H_2 生成与转化反应达到平衡, 导致 880 ℃ 后 H_2 体积分数基本保持在 10%; CH_4 体积分数随预热温度的升高先增加后减小, 且 CH_4 体积分数始终维持在较低水平。这是由于预热过程中, CH_4 主要来源于煤中挥发分热解^[20-21], 预热温度由 850 ℃ 升至 880 ℃ 时, 热解反应加强, CH_4 释放量增加^[22], 而 R5 反应速率较慢, 因此 CH_4 体积分数增加。预热温度进一步增加时, R5 反应速率进一步增加, 占据主导, CH_4 体积分数下降。

预热温度由 850 ℃ 升高至 950 ℃ 时, 煤气中有

效组分($\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4$)体积分数由 20.16% 升高至 27.45%, 煤气品质明显改善, 煤气热值则从 $2.86 \text{ MJ}/\text{m}^3$ (标况下,下同)增至 $3.61 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 。

2.2 循环流化床空气当量比对预热煤气特性的影响

循环流化床空气当量比对煤气成分和热值的影响如图 5 所示。可知循环流化床空气当量比由 0.3 增至 0.5, 煤气中 CO_2 体积分数增加, 而 CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数降低。

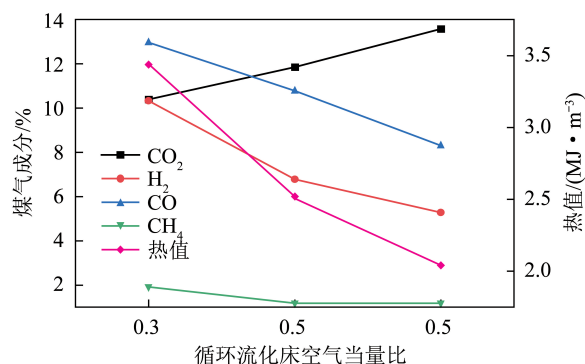


图 5 不同 λ_{CFB} 下煤气成分和热值

Fig.5 Gas composition and heat value at different λ_{CFB}

给煤量及预热温度不变, 增大循环流化床空气当量比, 反应中 O_2 量增多, 氧/煤比增加, 有利于放热反应 R1 及 CO 氧化反应 R3 进行, 导致煤气中 CO_2 体积分数由 10.41% 增至 13.60%, CO 体积分数由 12.98% 降至 8.32%; 循环流化床空气量由 $6.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $11.1 \text{ m}^3/\text{h}$, 提升管内流化风速由 1.50 m/s 升高至 2.42 m/s , 因此煤粉在提升管内停留时间由 1 s 降至 0.62 s, 导致煤粉热解反应减弱, 使热解产生的 H_2 、 CH_4 及 CO 含量减小, O_2 量增多使部分 H_2 和 CH_4 发生氧化反应 R4 和 R5, 导致煤气中 H_2 体积分数由 10.34% 降至 5.28%, CH_4 体积分数由 1.91% 降至 1.18%。流化风速 v 计算公式为

$$v = \frac{F_{\text{CFB}} \times (273 + T)}{3.14r^2(273 + T_0) \times 3600}, \quad (12)$$

式中, T 为预热温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为初始空气温度, 取 $20 \text{ }^\circ\text{C}$; r 为提升管半径, m 。

图 5 试验结果与 ZHANG 等^[15] 研究结果一致, 与 MAN 等^[23] 研究结果相反, 主要是由于前者改变 O_2/C 时, 预热温度变化较小, 此时氧化反应占主导, 使煤气中 CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数下降; 而后者变换一次风当量比时, 预热温度变化较大, 由 $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $940 \text{ }^\circ\text{C}$, 预热温度升高导致热解反应及气化反应占主导, 煤气中 CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数上升。

循环流化床空气当量比由 0.3 增至 0.5 时, 煤气

中有效组分($\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4$)体积分数由 25.23% 降至 14.78%, 热值由 $3.44 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 降至 $2.04 \text{ MJ}/\text{m}^3$, 煤气品质明显下降。

2.3 煤粉粒径对预热煤气特性的影响

煤粉粒径对预热煤气成分和热值的影响如图 6 所示。给煤量、预热温度、循环流化床空气当量比、提升管内流化风速不变, 随煤粉粒径增大, 煤粉在提升管内停留时间增加。煤粉粒径由 $0 \sim 0.180 \text{ mm}$ 增至 $0 \sim 0.355 \text{ mm}$ 时, 煤气中 CO_2 体积分数由 14.20% 降至 10.41%, CO 体积分数由 7.49% 增至 12.98%, H_2 体积分数由 6.42% 增至 10.34%, CH_4 体积分数由 1.83% 增至 1.91%。这是由于煤粉在提升管内停留时间增加使更多 C 元素与 CO_2 、 H_2O 反应, 即 Boudouard 反应 R6 和水煤气变换反应 R7 加强, 另一方面煤粉在提升管内停留时间增加也使煤粉热解反应加强, 释放出更多 CO 、 H_2 及 CH_4 气体; 而煤粉粒径进一步增至 $0 \sim 0.5 \text{ mm}$ 时, 此时煤气中 CO_2 体积分数由 10.41% 降至 9.63%, CO 体积分数由 12.98% 增至 16.6%, H_2 体积分数基本不变, CH_4 体积分数则迅速下降。可见煤粉粒径进一步增加, 气化反应进一步加强, 而水煤气反应 R7 受煤中 H_2O 限制, 同时氧化反应 R4、R5 增强, 使煤气中 H_2 体积分数基本不变, 主要由煤粉热解产生的 CH_4 体积分数由 1.91% 降至 1.03%。图 6 结果与 DING 等^[24] 研究结果不一致, 主要是由于试验过程中煤粉粒径变化导致预热温度变化, 影响煤气成分。

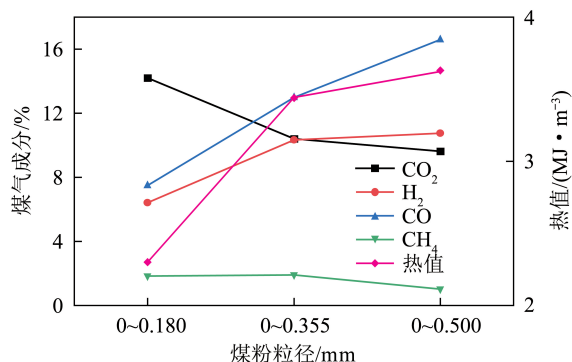


图 6 不同煤粉粒径下煤气成分和热值

Fig.6 Gas composition and heat value at different coal particle sizes

煤粉粒径由 $0 \sim 0.180 \text{ mm}$ 增至 $0 \sim 0.500 \text{ mm}$, 煤气中可燃物成分 $\text{CO}+\text{H}_2+\text{CH}_4$ 不断上升, 煤气热值由 $2.30 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 增至 $3.63 \text{ MJ}/\text{m}^3$, 粒径对煤气成分和热值影响较大。

3 结 论

1) 循环流化床空气当量比为 0.3 时, 随预热温

度升高,煤粉热解反应、Boudouard 反应 R6 及水煤气反应 R7 增强,促使煤气中 CO_2 体积分数下降、 CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数上升,但 $880\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时由于 H_2O 限制及氧化反应增强,导致煤气中 H_2 体积分数基本不变, CH_4 体积分数下降。预热温度由 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 时,煤气热值从 2.86 MJ/m^3 增至 3.61 MJ/m^3 。

2) 预热温度为 $910\text{ }^\circ\text{C}$ 时,循环流化床空气当量比由 0.3 增至 0.5 时,氧化反应 R3、R4、R5 增强,煤气中 CO 、 H_2 、 CH_4 体积分数均下降, CO_2 体积分数上升,煤气热值由 3.44 MJ/m^3 降至 2.04 MJ/m^3 。

3) 预热温度和空气当量比不变时,煤粉粒径由 $0\sim 0.180\text{ mm}$ 增至 $0\sim 0.500\text{ mm}$ 时, CO_2 体积分数下降, CO 、 H_2 体积分数上升,煤气热值由 2.30 MJ/m^3 增至 3.63 MJ/m^3 ,粒径对煤粉预热过程煤向煤气转化特性的影响较显著。

参考文献 (References):

- [1] 吕清刚,李诗媛,黄粲然. 工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 392-400.
LYU Qinggang, LI Shiyuan, HUANG Canran. Current situation and development suggestions of coal clean and efficient combustion technology in industry field [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 392-400.
- [2] BRYAN B, NESTER S, RABOVITSER J, et al. Methane de- NO_x for utility PC boilers [R]. [S. l.]: Institute of Gas Technology, 2005.
- [3] 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[J]. Gas Separation and Purification, 2003, 1(2): 4-8.
- [4] LIU C C, HUI S, ZHANG X L, et al. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 278-286.
- [5] LIU C C, HUI S E, PAN S, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction [J]. Fuel, 2015, 139: 206-212.
- [6] LIU C C, HUI S E, PAN S, et al. Experimental investigation on NO_x reduction potential of gas-fired coal preheating technology [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 6089-6097.
- [7] XIONG X H, LYU Z M, YU S L, et al. Coke preheating combustion study on NO_x and SO_2 emission [J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 97: 131-137.
- [8] NIU Y Q, SHANG T, ZENG J, et al. Effect of pulverized coal preheating on NO_x reduction during combustion[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(4): 4436-4444.
- [9] 张海,贾臻,毛健雄,等. 通过煤粉浓缩预热低 NO_x 燃烧器实现高温空气燃烧技术的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 36-39, 107.
- [10] ZHANG H, JIA Zhen, MAO Jianxiong, et al. Research on high temperature air combustion technology via primary air enrichment and preheating burner[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 36-39, 107.
- [11] ZHANG H, YUE G, LU J, et al. Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 2779-2785.
- [12] 吕清刚,朱建国,牛天钰,等. 煤粉高温预热方法:CN101158468[P]. 2008-04-09.
- [13] ZHANG Y, ZHU J G, LYU Q G, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating [J]. Fuel, 2020, 277: 118050.
- [14] OUYANG Z, ZHU J, LU Q. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal [J]. Fuel, 2013, 113: 122-127.
- [15] YAO Y, ZHU J G, LU Q G, et al. Experimental study on preheated combustion of pulverized semi-coke [J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(4): 370-377.
- [16] ZHANG H, ZHANG Y, ZHU Z, et al. Circulating fluidized bed gasification of low rank coal: Influence of O_2/C molar ratio on gasification performance and sulphur transformation [J]. Journal of Thermal Science, 2016, 25(4): 363-371.
- [17] 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: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.
- [18] IM-ORB K, SIMASATTITKUL L, ARPORNWICHANOP A. Analysis of synthesis gas production with a flexible H_2/CO ratio from rice straw gasification [J]. Fuel, 2016, 164: 361-373.
- [19] LIU J P, ZHU Z P, JIANG H B, et al. Gasification of bituminous coal in a dual-bed system at different air/coal ratios [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(2): 496-500.
- [20] 李超. 烟煤流化床热解机理以及挥发产物组分分布特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [21] VALIN S, BEDEL L, GUILLAUMEAU J, et al. CO_2 as a substitute of steam or inert transport gas in a fluidized bed for biomass gasification [J]. Fuel, 2016, 177: 288-295.
- [22] LEE W J, KIM S D, SONG B H. Steam gasification of an Australian bituminous coal in a fluidized bed[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2002, 19(6): 1091-1096.
- [23] 石振,成帅,陈兆辉,等. 神木烟煤热解产物分布及主要元素的迁移规律 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(5): 802-811.
- [24] SHI Zhen, CHENG Shuai, CHEN Zhaohui, et al. Distribution of products and migration of main elements during pyrolysis of Shenmu bituminous coal [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(5): 802-811.
- [25] MAN C, ZHU J, OUYANG Z, et al. Experimental study on combustion characteristics of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 172: 72-78.
- [26] DING H L, OUYANG Z Q, ZHANG X Y, et al. The effects of particle size on flameless combustion characteristics and NO_x emissions of semi-coke with coal [J]. Fuel, 2021, 297: 120758.