

煤粉流态化预热气态组分 CO/CO₂ 生成转化特性研究刘玉华^{1,2}, 刘敬樟¹, 吕清刚^{1,2}, 朱建国^{1,2}, 朱书骏^{1,3}

(1.中国科学院 工程热物理研究所,北京 100190;2.中国科学院大学,北京 100049;3.中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要:基于循环流化床预热的燃烧系统是一种新型的清洁燃烧技术,其流态化预热后煤气中 CO/CO₂ 比值对后续燃烧和排放影响较大,研究正确反映 CO/CO₂ 比值的焦炭燃烧模型有助于进一步了解该流态化预热过程。笔者基于燃料流态化预热转化过程,研究典型的预热空气富氧气氛(O₂/N₂)、富氧气氛(O₂/CO₂)以及燃料种类变化对预热后气态组分中 CO/CO₂ 生成转化特性的影响,分析现有焦炭燃烧模型与流态化预热过程的匹配程度。试验数据和模型预测对比分析表明,空气富氧气氛下,氧气浓度从 21% 增至 28.2% 的过程中,神木半焦流态化预热过程产生的预热气体中 CO₂ 占比减少,CO 占比增多,CO/CO₂ 比值从 0.81 增至 1.45;神木烟煤在该气氛预热时,各参数与神木半焦呈现同样的变化趋势,且随氧气浓度从 21.0% 增至 24.4%,CO/CO₂ 比值从 0.51 增至 0.76。富氧气氛时神木半焦预热产生的 CO 与神木烟煤相比产量更高,CO/CO₂ 比值随氧气浓度增大而增大,但与空气富氧气氛下相比递增幅度较小。神木烟煤预热气体组分 CO/CO₂ 的试验数据与 Tognotti 提出的焦炭燃烧模型预测值吻合度最高,富氧气氛下试验与预测结果误差在 9% 以内。

关键词: 预热燃烧;空气富氧;富氧气氛;CO/CO₂

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)04-0140-07

Study on the formation and conversion characteristics of gaseous component CO/CO₂ with fluidized preheating pulverized coal

LIU Yuhua^{1,2}, LIU Jingzhang¹, LYU Qinggang^{1,2}, ZHU Jianguo^{1,2}, ZHU Shujun^{1,3}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The preheating combustion technology based on circulating fluidized bed proposed is one of the new clean coal combustion technologies. The O₂/CO₂ ratio in the gas after fluidized preheating process has a great influence on the subsequent combustion and emissions. Exploring the coke combustion model that can correctly reflect the O₂/CO₂ ratio will help to further understand the fluidized preheating process. Based on the pulverized coal fluidized preheating conversion process, the typical preheated air-rich atmosphere (O₂/N₂), oxygen-rich atmosphere (O₂/CO₂), and fuel type change were used to study the conversion characteristics of the gaseous component CO/CO₂ after preheating. Moreover, the degree of matching between the existing coke combustion model and the fluidized preheating process was analyzed. The experimental data and model predictions show that in the air-rich oxygen atmosphere, as the oxygen concentration increases from 21% to 28.2%, the proportion of CO₂ in the preheated gas produced by Shenmu semi-coke fluidized preheating process decreases, the proportion of CO increases, and the CO/CO₂ ratio increases from 0.81 to 1.45. When Shenmu bituminous coal is preheated in the same atmosphere, the above-mentioned parameters show the same tendency as Shenmu semi-coke, and the CO/CO₂ ratio increases from 0.51 to 0.76 as the oxygen concentration increases from 21.0% to 24.4%. In the oxygen-rich atmosphere, the CO produced by Shenmu semi-coke preheating is higher than that of Shenmu bituminous coal. The CO/CO₂ ratio also increases with the increase of oxygen concentration, but compared with the air-enriched atmosphere, the increasing degree is smaller. The experimental data of the preheated gas component

收稿日期:2019-11-06;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19110602

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602001);国家自然科学基金资助项目(51876204)

作者简介:刘玉华(1996—),女,山东高密人,博士研究生,研究方向为预热洁净燃烧技术。E-mail:liuyuhua@iet.cn。通讯作者:吕清刚,研究员,博士生导师,研究方向为煤炭洁净燃烧技术。E-mail:qglu@iet.cn。刘敬樟,副研究员,博士,研究方向为煤炭洁净燃烧技术。E-mail:liujingzhang@iet.cn

引用格式:刘玉华,刘敬樟,吕清刚,等.煤粉流态化预热气态组分 CO/CO₂ 生成转化特性研究[J].洁净煤技术,2020,26(4):140-146.LIU Yuhua, LIU Jingzhang, LYU Qinggang, et al. Study on the formation and conversion characteristics of gaseous component CO/CO₂ with fluidized preheating pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 140-146.

移动阅读

CO/CO₂ of Shenmu bituminous coal is the most consistent with the prediction of the coke combustion model proposed by Tognotti, and the error of experiment and prediction results is within 9% under oxygen-rich atmosphere

Key words: preheating combustion; air-rich oxygen; oxygen-rich atmosphere; CO/CO₂

0 引言

目前,煤炭在我国能源分配中仍占主要地位,煤炭燃烧利用占煤炭消费量比重超过 80%^[1]。尽管煤粉锅炉性能已较大提升,仍存在燃料适应性不足、氮氧化物(NO_x)排放高等问题。对此,中国科学院工程热物理研究所提出通过燃料在循环流化床中预热,再将预热后的燃料送入炉内进行高效燃烧,以解决燃料适应性问题并实现深度降氮^[2-4]。在煤粉燃烧工业应用中,除传统的空气气氛燃烧外,富氧燃烧技术作为一种有效的清洁燃烧技术同样受到国内外广泛关注^[5-6],通过在氧气比例高于空气氧气含量(21%)的气体中燃烧,借助烟气再循环等技术实现燃烧效率提高和 NO_x排放降低。富氧燃烧技术涵盖空气富氧燃烧(O₂/N₂)及富氧燃烧(O₂/CO₂)等燃烧类型。

在循环流化床预热系统中,燃料流态化预热后的煤气态组分既反映预热过程的燃料改性强度,又影响后续改性燃料燃烧的燃烧效率和污染物排放水平。因此,燃料流态化预热后的煤气成分分析是控制燃料转化和低 NO_x排放的关键之一。燃料预热后的气态组分主要包括 CO、CO₂、CH₄、H₂、HCN、NH₃、N₂等,其中 CO 与 CO₂为焦炭燃烧的主要产物,其比值能反映预热过程中气化与燃烧反应的相对强度。前人对焦炭燃烧模型开展了诸多理论与试验研究,并得到多种动力学模型及参数^[7-11]。Christopher 等^[7]对碳高温氧化过程中 CO₂/CO 比例进行研究,并构建多孔颗粒燃烧模型,研究表明氧气扩散阻力在温度大于 1 050 K 时变得更加重要。Jakub 等^[9]构建了焦炭颗粒氧化速率的零维数学模型,研究表明碳形态的改变会降低反应性。张志等^[12]对已有焦炭模型进行总结归纳,结果表明,与双膜模型相比,单膜模型精度更高。

本文将焦炭燃烧模型与半工业化试验相结合,基于燃料预热生成的 CO/CO₂特性开展燃烧动力学模型预测,并与试验结果进行对比分析,有助于理解燃料预热气化燃烧过程中部分煤气成分转化特性,并以探讨预热气体组分中 CO 及 CO₂的生成转化特性为主,分析该 2 种气体组分在预热气中转化特性,为进一步调控预热参数以获得后续燃烧的最佳预热气体组分提供依据。以神木烟煤和神木半焦 2 种燃

料为对象,探讨燃料种类、预热气氛(空气富氧气氛 O₂/N₂和富氧气氛 O₂/CO₂) 2 种因素对预热气体组分中 CO、CO₂比例及 CO/CO₂比值的影响,与已有燃烧模型对 CO/CO₂产出预测进行对比分析,探索煤粉预热过程中的气态组分演变规律和焦炭燃烧机理。

1 试验

1.1 试验装置

本文采用的试验装置为基于循环流化床的预热燃烧系统,主要由循环流化床、下行燃烧室、尾部烟气处理系统、测控系统、给料系统以及供风系统组成。试验过程中的供风系统采用 O₂、CO₂、N₂气瓶组,以提供所需空气富氧气氛以及富氧气氛。工艺流程如图 1 所示。

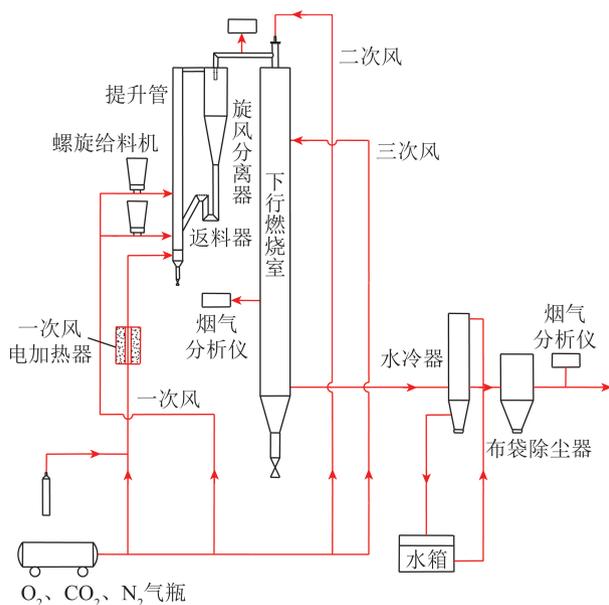


图 1 试验系统工艺流程^[13]

Fig.1 Flow diagram of experimental system process^[13]

循环流化床包括提升管、旋风分离器以及返料器 3 部分。试验所用循环流化床中提升管内径为 78 mm,高 1 500 mm,且内置布风板,有利于气流均匀射入。返料器底部设有返料风与松动风,并按一定比例给人,以保证物料处于流化状态,循环流化床得以稳定运行。选择石英砂作为试验启炉床料,辅以电炉进行启动前升温。燃料通过螺旋给料机送入提升管,在一次风(输入到提升管及返料器中的气体)作用下通过燃料自身的部分燃烧维持循环流化

床温度稳定在 800~950 ℃。预热后气体通过管路输入下行燃烧室中进一步燃烧,预热气体组分取样口位于旋风分离器至下行燃烧室的连接处,预热煤气中的 CO、CO₂、CH₄、H₂、NH₃、HCN 等气体组分由气相色谱仪进行取样测量。

表 1 固体燃料分析^[14]Table 1 Solid fuel analysis^[14]

燃料	工业分析/%				元素分析/%				
	A _{ad}	V _{ad}	FC _{ad}	M _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{1,ad}
神木烟煤	6.24	32.11	54.56	7.09	68.70	4.53	12.29	0.90	0.25
神木半焦	13.97	13.90	68.40	3.73	73.77	1.92	5.54	0.78	0.29

1.3 试验条件

试验工况见表 2,反应温度均为循环流化床提升管距底部布风板 500 mm 处主反应区的温度,主要参数如下:

$$\alpha(\text{O}_2) = \frac{L_1(\text{O}_2)}{A_1}, \quad (1)$$

$$R(\text{O}_2) = \frac{L_1(\text{O}_2)}{[L_1(\text{O}_2) + L_2(\text{O}_2) + L_3(\text{O}_2)]}, \quad (2)$$

式中, $\alpha(\text{O}_2)$ 为一次风氧气浓度,%; $L_1(\text{O}_2)$ 、 $L_2(\text{O}_2)$ 、 $L_3(\text{O}_2)$ 分别为一次风、二次风以及三次风的氧气通入量, L/min; A_1 为一次风气体总量, L/min; $R(\text{O}_2)$ 为一次风氧气比例, %。

表 2 试验条件^[14]Table 2 Experimental conditions^[14]

燃料	预热气氛	一次风氧气比例	一次风氧气浓度/%	反应温度/℃
神木烟煤	O ₂ /N ₂	0.360	21.0	860
			24.4	910
	O ₂ /CO ₂	0.326	23.8	830
			25.3	850
神木半焦	O ₂ /N ₂	0.330	27.1	855
			29.0	857
	O ₂ /CO ₂	0.374	21.0	915
			24.6	950
	O ₂ /CO ₂	0.374	28.2	980
			26.1	838
O ₂ /CO ₂	0.374	27.1	845	
		28.6	845	

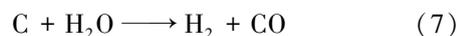
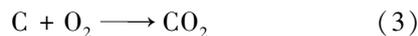
试验将神木烟煤和神木半焦分别置于空气富氧气氛 O₂/N₂ 和富氧气氛 O₂/CO₂ 中,控制一次氧气比例不变,对一次风氧气浓度进行调节,分析不同燃料在不同气氛下产生的预热气体组分随一次风氧气浓度变化的规律。

1.2 试验燃料

试验采用的燃料为神木烟煤和神木半焦^[13],神木半焦为神木烟煤在固定床热解炉底部排水熄焦,燃料粒径均为 0~0.355 mm。2 种固体燃料的工业分析和元素分析见表 1。

2 焦炭燃烧模型

碳基燃料燃烧过程包括加热干燥、挥发分逸出、挥发分着火以及焦炭燃烧 4 个阶段,其中碳与氧的反应是最基本的反应过程,且由于焦炭在碳基燃料各元素及发热值占比较高,对煤的燃烧速率及燃尽情况起决定作用,主要发生的化学反应如下:



低温时碳表面主要化学反应为式(3),同时也发生少量的反应(4),高温下发生反应(5),也会有反应(6)发生,在气相中氧化得到的 CO₂ 一方面向碳表面扩散继续进行表面反应,一方面向外扩散逸入周围环境^[15]。最终 CO 或 CO₂ 的生成量取决于反应条件、反应速率以及温度等参数的综合影响。

研究人员对焦炭燃烧模型进行研究,并得到多种代表性理论模型,本文选择 3 种典型模型进行试验结果和模型预测比对分析。

1) 模型 1

研究人员根据焦炭燃烧产物的生成比例得出 CO₂/CO 比值 ($R(\text{CO}_2/\text{CO})$),满足类似于 Arrhenius 关系的表达式^[16-19,12],即

$$R(\text{CO}_2/\text{CO}) = AP(\text{O}_2)^n e^{b/T}, \quad (8)$$

式中, A 为指前因子; n 、 b 为体现变量影响程度的无量纲参数; $P(\text{O}_2)$ 为氧气分压; T 为热力学温度。

Tognotti 等^[17]给出了 A 、 n 、 b 三个参数的具体数值: $A=0.02$, $n=0.21$, $b=3\ 070$,则表达式为

$$R(\text{CO}_2/\text{CO}) = 0.02P(\text{O}_2)^{0.21} e^{3\ 070/T}, \quad (9)$$

式(9)简称为 Tognotti 模型。

2) 模型 2

Robert Hurt 等^[10]根据数据统计提出模型

$$R(\text{CO}/\text{CO}_2) = A_e e^{-E_e/RT}, \quad (10)$$

式中, $R(\text{CO}/\text{CO}_2)$ 为燃烧产物 CO/CO₂ 的生成比例; A_e 取值 3.10×10^8 ; E_e 为活化能, 取 251.15 kJ/mol; R 为摩尔气体常量, 取 8.314 J/(mol · K)。

式(10)简称为 Robert Hurt 模型。

3) 模型 3

Jakub Bibrzycki 等^[9]认为 CO/CO₂ 比值取决于温度和氧气浓度, 并给出比例模型, 即

$$R(\text{CO}/\text{CO}_2) = 2.512 \exp(-6.244/T), \quad (11)$$

式(11)简称为 Jakub Bibrzycki 模型。

本文采用上述 3 种典型的焦炭燃烧模型来计算预热气体组分, 比较模型所得值与试验值的吻合程度, 通过对比模型预测与试验结果, 获得燃料预热产物生成特性及适应模型。

3 结果与讨论

3.1 模型对比分析

不同预热气氛下预热气体组分 CO/CO₂ 试验结果及模型值如图 2 所示。以同一煤种不同气氛下预热气体组分中 CO/CO₂ 比值作为对照值, 比较对应工况下的 3 种模型数值解与对照值之间吻合程度, 分析模型特性和适应性。

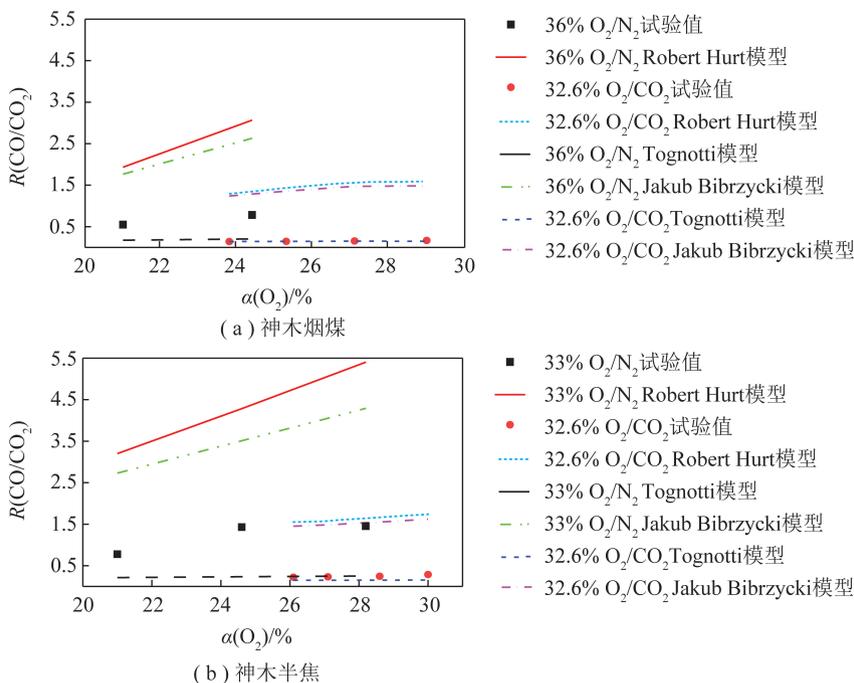


图 2 不同预热气氛下预热气体组分 CO/CO₂ 试验结果及模型值

Fig.2 Experimental results and model values of preheated gas components CO/CO₂ under different preheating atmosphere

由图 2 可知, Tognotti 模型在富氧气氛 (O₂/CO₂) 下, 求得的 CO/CO₂ 比值与试验值吻合程度最高, 数据偏差在 9% 以内, Robert Hurt 模型与 Jakub Bibrzycki 模型偏差较大。2 种气氛下, Jakub Bibrzycki 模型与 Robert Hurt 模型相比更接近试验值。根据神木半焦在 2 种气氛下燃烧结果可知, Tognotti 模型在富氧气氛下吻合程度最高, 但与神木烟煤富氧气氛下结果相比吻合度较差。综合考虑可知 3 种模型按吻合程度高低排序为: Tognotti 模型、Jakub Bibrzycki 模型、Robert Hurt 模型。

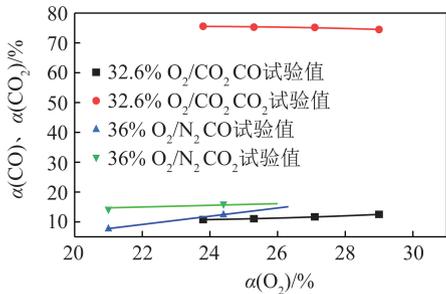
张志等^[12]对比分析煤粉燃烧中焦炭燃烧模型, 发现稀释气体为 CO₂ 时, 由于气相反应被抑制, 忽略气相反应所导致的计算偏差减小, 使单膜模型的计算精度更高。因此, 对比 O₂/N₂ 气氛, 根据 Tognotti

模型所求数值在 O₂/CO₂ 气氛下与试验数值更吻合。Robert Hurt 模型是基于煤中镜质组富集物中 FC_{daf} 达到 60%~90% 的基础上提出, 适应的燃料范围较小。Jakub Bibrzycki 模型则主要适应于氧气浓度低于 21% 的情况, 对富氧工况适应性差。此外, 燃料流态化预热过程中同时进行气化反应与燃烧反应, 反应复杂且试验温度受氧气浓度和稀释气体种类等因素影响, 而 Robert Hurt 模型及 Jakub Bibrzycki 模型表达式仅包含温度这一变量, 其余参数均由试验数据统计所得, 局限性较大, 灵活性较低, 而 Tognotti 模型表达式除温度外, 还包含氧气分压这一变量, 因此与 Robert Hurt 模型、Jakub Bibrzycki 模型相比适应性更好。由于在预热温度范围内, N₂ 比热容小于 CO₂, 空气富氧气氛下预热过程反应温度较同氧气

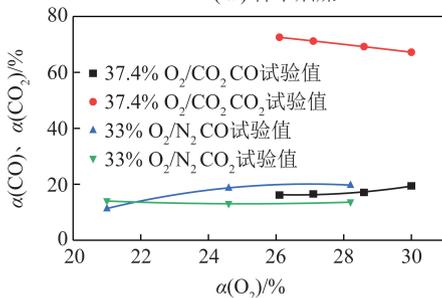
浓度下富氧气氛预热温度高,且3种模型的CO/CO₂比值与温度成正比,因此同一模型在同一氧浓度下,空气富氧气氛下比值高于富氧气氛下。

3.2 预热气氛对预热气体组分的影响

通过分析不同预热氛围对同一煤种的影响,研究预热气氛对预热气体组分的影响规律,试验气氛包括空气富氧气氛(O₂/N₂)和富氧气氛(O₂/CO₂),结果如图3所示($\alpha(\text{CO})$ 、 $\alpha(\text{CO}_2)$ 分别为CO、CO₂浓度)。



(a) 神木烟煤



(b) 神木半焦

图3 不同预热气氛下试验结果

Fig.3 Experimental results under different preheating atmosphere

由图3可知,神木烟煤在O₂/N₂气氛下预热时,随氧气浓度升高,预热气体组分中CO/CO₂比值随

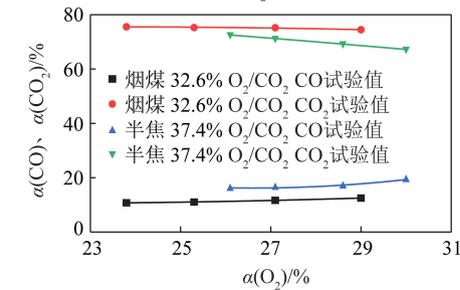
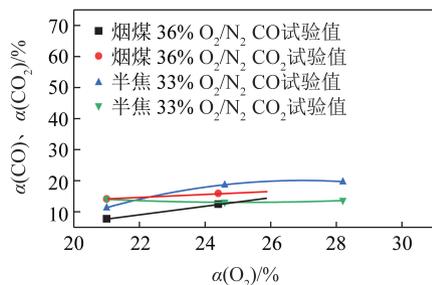
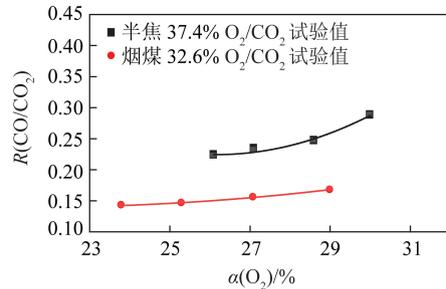
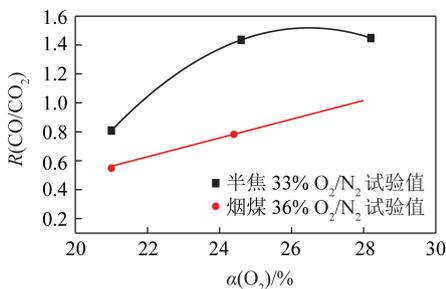


图4 不同燃料的试验结果对比

Fig.4 Comparison of experimental results of different fuels

之递增,CO₂在预热气体组分中占比略有减小,CO占比增加;在O₂/CO₂气氛下预热时,上述参数变化趋势相同,但相比空气富氧气氛CO/CO₂比值递增幅度较小。对比O₂/CO₂气氛,预热气体组分中CO占比在空气富氧气氛下随氧气浓度增大的变化幅度更大,且CO占比逐渐高于O₂/CO₂气氛下预热气体组分,CO₂占比递减幅度较小,有低于CO占比的趋势。神木半焦在O₂/N₂气氛下预热,随氧气浓度升高,预热气体组分中CO/CO₂比值随之递增,CO₂在预热气体组分中占比减小,CO占比增大,氧气浓度较小时CO₂多于CO,氧气浓度较高时则相反。在O₂/CO₂气氛下预热时,随着氧气浓度升高,神木半焦预热气体组分中CO和CO₂的占比及其比值的变化趋势与空气富氧气氛时相同,但各参数变化幅度与空气富氧气氛相比均较小。

神木烟煤与神木半焦在O₂/CO₂气氛下,CO、CO₂随氧气浓度升高而产生的变化量均小于O₂/N₂气氛。由于氧气浓度增大使反应温度随之升高,因此式(5)反应变得更加强烈,部分CO₂在高温下反应生成CO,导致在一定氧气浓度范围内,氧气浓度越高,CO在预热气体组分中占比越高,CO₂越低。此外,由于N₂与CO₂比热容的差异,导致富氧气氛下预热温度较同氧气浓度空气富氧气氛更低,式(5)、(6)反应速率低,CO₂消耗量及CO生成量减小,CO、CO₂占比与空气富氧气氛相比变化量较小。

3.3 燃料种类对预热气体组分的影响

通过分析不同燃料在同一预热气氛下预热的差异,研究燃料种类对预热气体组分的影响,采用燃料为神木烟煤和神木半焦,结果如图4所示。

由图4可知,在空气富氧气氛下,神木烟煤预热气体组分中 CO、CO₂、CO/CO₂的变化趋势与神木半焦预热气体变化趋势基本一致。在一定氧气浓度范围内,随氧气浓度增大,预热过程中气化强度增强,燃料生成的煤气份额增大,燃料碳主要转化为 CH₄、CO 和 CO₂,3 者总浓度增多,CO/CO₂ 比值逐渐增大。根据试验拟合曲线,在同一氧气浓度下的空气富氧气氛中,神木半焦预热生成的 CO 占比以及 CO/CO₂ 比值均高于神木烟煤,CO₂ 占比则较低。2 种燃料预热气体组分中 CO/CO₂ 比值均在低氧气浓度时小于 1,在高氧气浓度时大于 1。与神木半焦相比,神木烟煤预热气体组分中 CO 占比在更大氧气浓度时会超过 CO₂。在富氧气氛下,神木烟煤预热生成的气体组分中 CO₂ 占比远高于 CO,且随着氧气浓度增大 CO₂ 略有减小,CO 略有增多,而神木半焦在预热过程中生成的 CO 多于神木烟煤在相同氧气浓度预热下生成的 CO。富氧气氛下,神木半焦预热气体组分中 CO/CO₂ 比值高于神木烟煤在该气氛下预热气体组分中的 CO/CO₂ 比值。

试验表明燃料种类变化在 2 种预热气氛中对预热气体组成的影响基本一致。在空气富氧气氛和富氧气氛下,由于神木半焦挥发分低、孔隙率结构发达且机械强度低^[20],与蒸汽或氧有更强的反应性,各数值变化与神木烟煤相比幅度更大,且在 CO₂ 浓度较高时,式(4)及式(6)逆反应更为剧烈,因此与神木烟煤相比,产生的 CO 比例更高,CO/CO₂ 比值更大。

4 结 论

本文基于煤粉流态化预热转化过程,对典型的预热空气富氧气氛(O₂/N₂)、富氧气氛(O₂/CO₂)、及燃料种类变化对预热后的气态组分 CO/CO₂ 生成转化特性的影响进行研究,结合 3 种典型的焦炭燃烧理论模型,比较模型预测值与试验值的吻合程度,获得燃料预热气化产物生成特性及燃烧适应模型。得到结论如下:

1) 空气富氧气氛(O₂/N₂) 下燃料预热过程中,随氧气浓度升高,预热气体组分中 CO/CO₂ 递增,且 CO₂ 在预热气体组分中占比减小,CO 占比增大;富氧气氛(O₂/CO₂) 下预热受高浓度 CO₂ 影响,反应温度较低,式(5)、(6)反应速率较小,CO₂ 消耗量及 CO 生成量减小,CO、CO₂ 含量相比空气富氧气氛变化量较小。

2) 燃料种类变化在 2 种预热气氛中对预热气体组成的影响基本一致。富氧气氛下,神木半焦因

挥发分较少、孔隙结构更加发达,且反应性高,与神木烟煤相比产生的 CO 比例更高。

3) 神木烟煤试验结果与 Tognotti 提出的煤粉焦炭燃烧模型吻合程度较高,验证了煤粉在富氧气氛下预热燃烧对该模型的适应性,为后续构建预热气化燃烧模型提供理论基础。

参考文献(References):

- [1] 吕清刚,李诗媛,黄黎然.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] MAN Chengbo, ZHU Jianguo, OUYANG Ziqu, et al. Experimental study on combustion characteristics of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 172: 72-78.
- [3] ZHU Shujun, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. NO emissions under pulverized char combustion in O₂/CO₂/H₂O preheated by a circulating fluidized bed[J]. Fuel, 2019, 252: 512-521.
- [4] 朱书骏,吕清刚,朱建国,等.基于循环流化床预热的半焦燃烧试验研究[J].工程热物理学报,2018,39(4):887-892.
ZHU Shujun, LYU Qinggang, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on pulverized char combustion preheated by a circulating fluidized bed [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 887-892.
- [5] 刘敬樟,李百航,朱建国,等.焦炭颗粒群氧燃烧速率特性[J].中国科学:科学技术,2017,47(12):1265-1272.
LIU Jingzhang, LI Baihang, ZHU Jianguo, et al. Investigation on char cloud burning rates under oxy-combustion [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(12): 1265-1272.
- [6] WALL T, LIU Y, SPERO C, et al. An overview on oxyfuel coal combustion-state of the art research and technology development [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87: 1003-1016.
- [7] CHRISTOPHER R Shaddix, FRANZ Holzleithner, MANFRED Geier, et al. Numerical assessment of Tognotti determination of CO₂/CO production ration during char oxidation [J]. Combustion and Flame, 2013, 160: 1827-1834.
- [8] ARTHOR J A. Reactions between carbon and oxygen [J]. Transactions of the Faraday Society, 1951, 47: 164-178.
- [9] JAKUB Bibrzycki, MARCO Mancini, ANDRZEJ Szlek, et al. A char combustion sub-model for CFD-predictions of fluidized bed combustion-experiments and mathematical modeling [J]. Combustion and Flame, 2016, 163: 188-201.
- [10] ROBERT Hurt, SUN Jiankuan, MELISSA Lunden. A kinetic model of carbon burnout in pulverized coal combustion [J]. Combustion and Flame, 1998, 113: 181-197.
- [11] LIU Jingzhang, LI Baihang, ZHU Jianguo. Investigation on pulverized coal char oxy-combustion behavior at moderate and high temperatures; Experiments and a novel developed kinetics

- modeling [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(36):12264-12277.
- [12] 张志,李振山,蔡宁生.煤粉燃烧中焦炭燃烧模型的分析[J].*燃烧科学与技术*,2014,20(5):393-400.
ZHANG Zhi, LI Zhenshan, CAI Ningsheng. Comparison and analysis of different models of pulverized coal char combustion [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, 20(5):393-400.
- [13] 欧阳子区.基于循环流化床预热的无烟煤粉燃烧及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,2014:50-70.
OUYANG Ziqu. Experimental study on combustion characteristics and pollutants emission of pulverized anthracite preheated by circulating fluidized bed [D]. Beijing: Institute of engineering thermophysics, Chinese academy of sciences, 2014:50-70.
- [14] 朱书骏.煤/半焦富氧预热燃烧特性及 NO_x 排放特性实验研究 [D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2019:28-70.
ZHU Shujun. Experimental study on preheating oxy-fuel combustion and NO_x emission characteristics of coal/char [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2019:28-70.
- [15] 岑可法,姚强,骆仲泐,等.高等燃烧学[M].杭州:浙江大学出版社,2002:372-374.
CEN Kefa, YAO Qiang, LUO Zhongyang, et al. *Advanced combustion* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002:372-374.
- [16] ARTHUR J R. Reactions between carbon and oxygen [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1951, 47:164-178.
- [17] TOGNOTTI L, LONGWELL J P, SAROFIM A F. The products of the high temperature oxidation of a single char particle in an electrodynamic balance [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1990, 23(1):1207-1213.
- [18] OTTERBEIN M, BONNETAIN L. Combustion d'un carbon vitreux sous basses pressions d'oxygene [J]. *Carbon*, 1968, 6(6):877-885.
- [19] PHILLIPS R, VASTOLA F J, WALKER Jr P L. Factors affecting the product ration of the carbon-oxygen reaction (II): Reaction temperature [J]. *Carbon*, 1970, 8(2):205-210.
- [20] 巩志强.低阶煤热解半焦的燃烧特性和 NO_x 排放特性实验研究 [D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2016.
GONG Zhiqiang. Experimental study on combustion and NO_x emission characteristics of char from pyrolysis of low rank coal [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016:28-70.