

低氧气氛下煤粉燃烧特性

程晓磊^{1,2,3}

(1. 煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:为研究煤粉低氮燃烧时 CO_2 成分在低氧含量气氛下对燃烧的作用,在热重分析仪上进行了煤粉低氧气氛下的燃烧试验。通过模拟真实燃烧反应中的反应气氛,研究了 O_2/CO_2 混合比例、升温速率对煤粉燃烧特性的影响。结果表明,在 O_2/CO_2 混合气氛下,温度为 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以内均存在着燃烧反应和气化反应的竞争关系。 CO_2 含量高时, CO_2 与煤粉的气化反应对煤粉燃烧反应抑制程度逐渐增加。 O_2/CO_2 比例降低,煤粉的燃尽温度升高幅度明显,煤粉难以燃尽;煤粉的点火温度受 CO_2 含量影响不大;升温速率由 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 对煤粉可燃性和着火稳定性提升明显, $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 $30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 影响不大。

关键词:低氮燃烧;还原气氛;燃烧特性;热重试验;升温速率

中图分类号:TK16;X51

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)03-0071-05

Combustion characteristic of pulverized coal in hypoxic atmosphere

Cheng Xiaolei^{1,2,3}

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to investigate the effect of CO_2 component to combustion in the hypoxic atmosphere, while realizing low NO_x combustion of pulverized coal, experiments of coal combustion in hypoxic atmosphere were conducted on thermogravimetric analyzer. To simulate the real reaction atmosphere, effects of different O_2/CO_2 mixing ratios and heating rates to the combustion characteristic were conducted. The results show that a competitive relation is found between combustion and gasification of coal in the O_2/CO_2 mixing atmosphere, when the reaction temperature is below $1\ 000\ ^\circ\text{C}$. Higher CO_2 content will improve the restriction level of pulverized coal combustion by gasification reaction with coal. Lower O_2/CO_2 mixing ratio will restrain the burnout of coal, while the ignition temperature is hardly impacted by the CO_2 content. A heating rate improvement of $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ to $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ will apparently enhance the ignition and combustion stability of coal, while improvement of $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ to $30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ has no such influence.

Key words: low NO_x combustion; reducing atmosphere; combustion characteristic; thermogravimetric experiment; heating rate

0 引言

我国煤炭资源相对较为丰富,煤的清洁、高效利用对于我国而言意义重大^[1]。随着环保要求的日益严格,通过低氮燃烧技术来控制 NO_x 排放成为燃煤清洁利用的重要方向。不论是采用低氧燃烧还是烟气再循环的措施,均是通过控制主燃烧区保持低

的过量空气系数(即低氧气氛)来实现低氮燃烧的^[2-4]。因此控制主燃烧区内低氧气氛是低氮燃烧的关键,研究低氧气氛下煤粉燃烧特性是实现低氮燃烧的基础。煤粉在还原性气氛中燃烧时,由于 CO_2 的存在,一定条件下会与煤粉发生气化反应。对煤粉在 CO_2 、 CO_2/O_2 等气氛条件下煤粉燃烧/气化反应动力学的研究表明,由于 CO_2/O_2 的混合气

收稿日期:2017-01-18;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.014

基金项目:北京市科技计划重大科技成果转化落地培育资助项目(Z161100004816012);煤炭科学技术研究院科技发展基金资助项目(2016JC04)

作者简介:程晓磊(1986—),男,河北邯郸人,博士研究生,研究方向为煤粉高效清洁利用。E-mail:chengxl328@126.com

引用格式:程晓磊.低氧气氛下煤粉燃烧特性[J].洁净煤技术,2017,23(3):71-75,80.

Cheng Xiaolei. Combustion characteristic of pulverized coal in hypoxic atmosphere[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 71-75, 80.

氛下存在煤粉燃烧和 CO_2 气化的反应,其反应过程中的关键因素有: CO_2 对低氮燃烧的作用^[5-8];还原气氛对着火及燃尽的影响^[9-14]; CO_2 对挥发分析出的影响^[15];反应过程中燃烧与 CO_2 的竞争关系^[16]。

王萌等^[5]、陈洁等^[6]和孙志君等^[7]分别在水平管式炉、热重-傅里叶红外联用(TG-FTIR)和微型流化床反应器上的研究,以及Liu等^[8]的研究一致认为 CO_2 的存在会促进低氮燃烧。

针对还原气氛对着火和燃尽的影响不同学者有较大争议。文献[9-12]的研究认为,在高浓度 CO_2 气氛下,煤粉着火和燃尽要较空气气氛会有较大的延迟,且燃尽率较低。Brix等^[13]、Borrego等^[14]的研究则表明,2种气氛下的燃烧并没有什么不同。

对于 CO_2 气氛对挥发分析出的影响,李庆钊等^[15]在热重分析仪上的试验表明,气氛对煤和煤焦开始脱挥发分的时间影响不明显,但对其燃烧速率和燃尽时间影响很大。对于反应过程中燃烧与 CO_2 气化的竞争关系,李治刚等^[16]的研究表明,煤在高浓度 CO_2 氛围中的燃烧温度在 $360 \sim 1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$;煤在高浓度 CO_2 氛围中的气化温度在 $1\ 100 \sim 1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 。

目前学者主要是基于富氧燃烧开展研究工作,其反应气氛为 CO_2/O_2 的混合物,而实际燃烧过程中多是采用空气燃烧,反应气氛内含有大量氮气。因此,基于烟气再循环低氮燃烧的思路,考虑反应气氛中 N_2 的存在,利用同步热分析仪,进行了煤粉在氧气氛下的热重分析试验,分别分析了反应气氛、升温速率、煤种等条件下的煤粉燃烧特性,可为烟气再

循环系统低氮燃烧的实现提供参考。

1 试 验

试验采用 STA449F3 型同步 TG-DSC 热分析仪,仪器温度 $0 \sim 1\ 500\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率 $0 \sim 50\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。通过图1的配气装置改造,实现3路反应气进气控制,可分别控制进入热分析仪内的 N_2 、 O_2 和 CO_2 的进气量,实现反应气氛的精确控制。由于热分析仪只设置了2路载气作为反应气,为实现3路反应进气,在 O_2 和 CO_2 气路中增加了MFC(气体质量流量控制器),分别控制 O_2 和 CO_2 的进气量, O_2 和 CO_2 在进入热分析仪前在混合器内充分混合,总流量由热分析仪控制,反应气流量控制精确,MFC控制的 O_2 和 CO_2 反应气流量之和与实际热分析仪内反应气流量误差小于2%。

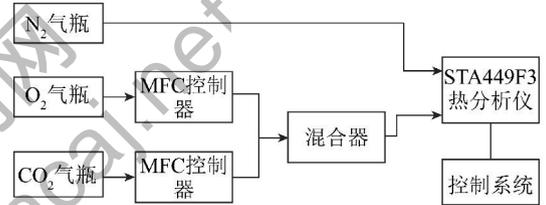


图1 配气系统流程

Fig. 1 Schematic diagram of gas distribution system

以神府东胜煤为试验煤种,其工业分析和元素分析见表1。试验用煤粒径为 $53 \sim 75\ \mu\text{m}$ 的比例超过90%,升温速率为 $10 \sim 30\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,不同工况试验载气总流量不变,为 $200\text{ mL}/\text{min}$,在反应达到设定温度后继续停留 10 min 完成试验过程。

表1 东胜煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Dongsheng coal sample

元素分析/%					工业分析/%			
C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	S_{ad}	N_{ad}	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}
68.98	3.92	11.22	0.50	0.83	5.13	9.42	32.49	52.96

表2为不同反应条件下,煤粉在还原性气氛下的燃烧特性。

2 结果与分析

2.1 典型工况分析

判断煤粉燃烧特性的指标包括:着火温度 T_{ig} ,燃尽温度 T_{b} ,最大反应速率 $(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{max}}$,最大反应速率温度 T_{max} ,平均反应速率 $(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{mean}}$,着火稳定性指数 C_i ,煤粉可燃性指数 C_b ,煤粉燃烧特性综合指

数 S 。其中 C_i 、 C_b 和 S 是综合评价指标^[12,15,17]。

$$C_i = 10^6 \frac{(\frac{\text{d}w}{\text{d}t})_{\text{max}} (\frac{\text{d}w}{\text{d}t})_{\text{mean}}}{T_{\text{ig}}^2} \quad (1)$$

$$C_b = 10^6 \frac{(\frac{\text{d}w}{\text{d}t})_{\text{max}}}{T_{\text{ig}}^2} \quad (2)$$

$$S = 10^6 \frac{(\frac{\text{d}w}{\text{d}t})_{\text{max}} (\frac{\text{d}w}{\text{d}t})_{\text{mean}}}{(T_{\text{ig}} T_{\text{b}})} \quad (3)$$

表2 东胜煤热重试验结果

Table 2 Thermogravimetric results of Dongsheng coal

反应气体流量/(mL·min ⁻¹)			升温速率/ (°C·min ⁻¹)	终温 T _f /°C
N ₂	O ₂	CO ₂		
160	40	0	20	1 000
160	0	40	20	1 000
160	10	30	20	1 000
160	20	20	20	1 000
160	30	10	20	1 000
160	20	20	10	1 000
160	20	20	30	1 000

着火温度和燃尽温度是煤燃烧过程中重要的特征参数,着火温度反映了煤样着火的难易程度,掌握煤种的着火温度对于工程实际中煤的点燃和稳燃具有着重要意义;燃尽温度是煤样基本燃尽时的温度,燃尽温度越低,表明燃尽时间越短,煤样越容易燃尽。

以工况1空气气氛燃烧为例,分析其着火温度和燃尽温度,其TG-DSC曲线如图2所示。煤粉燃烧试验中确定燃点及燃尽点的方法有多种,本文着火温度的确定采用较常用的TG-DTG法。在TG曲线上斜率最大值点A,作TG曲线的切线,该切线交TG曲线上开始失重时的平行线于一点C,C点对应的温度定义为着火温度;该切线与失重结束时的平行线相交于点D,对应温度定义为燃尽温度。

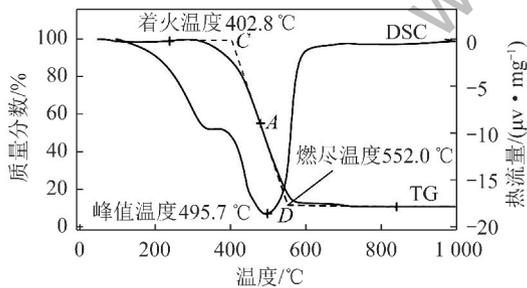


图2 典型工况TG-DSC曲线

Fig. 2 TG-DSC curve of typical condition

着火稳定性指数综合了着火温度和反应速率,指数值越大,着火越稳定;煤粉可燃性指数主要反映煤粉开始燃烧时的可燃性,指数越大,可燃性越好;煤粉燃烧特性综合指数是综合评定标准,其数值越大,煤粉燃烧越好。

对于工况1,煤粉在温度升至136°C前是水分的脱除过程,脱除水分占总质量的1.66%;温度升

至170°C后,热重曲线有一略微升高的过程,这是因为炉内气氛中的氧扩散到煤颗粒表面和内部孔隙,发生物理吸附;煤粉在空气气氛中,292°C挥发分开始析出,着火温度为402.8°C,在495.7°C燃烧速度达到最大值(11.27%/min),煤粉燃尽温度为552°C,煤粉最终剩余质量分数为10.83%,着火稳定性指数95.42,煤粉可燃性指数24.66,煤粉燃烧特性综合指数0.116。差热分析DSC曲线体现了煤粉燃烧过程中的放热情况,与失重曲线结合可反应煤粉燃烧的综合特性。

2.2 反应气氛的影响

控制反应气氛处于还原性气氛,是控制燃烧过程中NO_x生成的关键因素。反应气氛对煤粉燃烧特性影响十分重要,之前学者研究反应气氛的影响主要针对富氧燃烧的理念,研究CO₂/O₂气氛中一般以氧气氛大于20%为主,本文研究以烟气再循环理念控制氮氧化物燃烧为主,烟气再循环回流至反应器后,反应器内氮气仍占80%左右。本文在氮气占总气量为80%的基础上,研究O₂/CO₂的配比分别为0/20%、5%/15%、10%/10%、15%/5%、20%/0的不同工况下的煤粉燃烧特性,如图3所示。

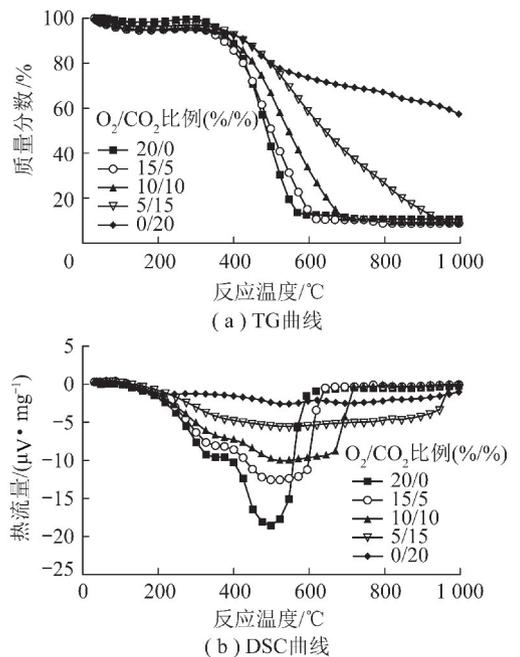


图3 反应气氛对煤粉燃烧特性的影响

Fig. 3 Effect of reaction atmosphere on the coal combustion

如图3(a)所示,对于不同的反应气氛,可明显看出随着反应气氛中CO₂成分的逐渐增加,煤粉燃烧的燃尽温度逐渐滞后,煤粉反应的速率也相应下

降。反应气氛为 80% N₂/20% CO₂ 条件下,由于在低温条件下煤粉与 CO₂ 的气化反应速率较低,在温度达到 1 000 °C 时煤粉残余物仍有 38.98% 未反应。如图 3(b) 所示,随着反应气氛中 CO₂ 含量的逐渐增加,由于煤粉与 CO₂ 生成 CO 的反应是吸热反应,煤粉的燃烧反应与气化反应在混合气氛下产生竞争关系,因此反应的放热量逐渐减少。DSC 曲线的峰值也随着 CO₂ 含量的增加而向高温区偏移,与煤粉燃烧过程相符合。

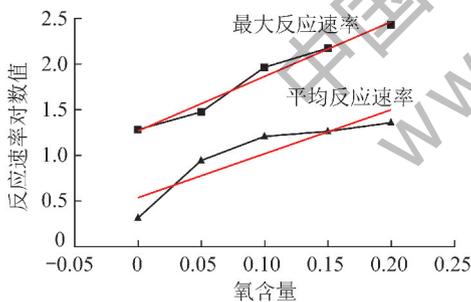
不同反应条件下的煤粉燃烧特性参数见表 3。煤粉的燃尽温度由 20% O₂ 的 552 °C 升高至 5% O₂/15% CO₂ 的 738.3 °C,最大反应速率和平均速率也随着 CO₂ 含量的增加,分别由

-11.27%/min 和 -3.143%/min 降至 -4.35%/min 和 -2.557%/min。即氧含量降低为 1/4 时,最大反应速率和平均速率分别为高氧浓度下的 38.6% 和 81.4%,最大反应速率和平均速率与氧含量呈正相关的关系。如图 4(a) 所示,最大反应速率和平均反应速率分别与氧含量的 5.974 次方和 4.812 次方相关,而此时平均反应速率的相关性不高,主要原因是氧含量为 0 时煤粉主要发生气化反应而未完全燃烧。如图 4(b) 所示,除去氧含量为 0 的工况,最大反应速率和平均速率分别与氧含量的 6.132 次方和 2.594 次方相关,此时最大反应速率与包含氧含量为 0 工况相差不大,而平均反应速率与氧含量的相关性变化明显。

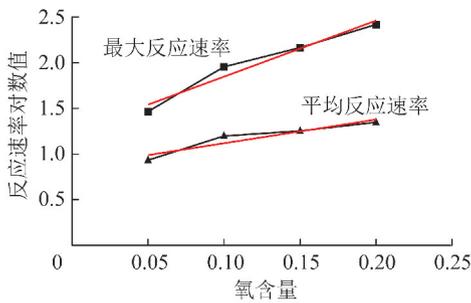
表 3 反应气氛对煤粉燃烧特性指数的影响

Table 3 Effect of reaction atmosphere on the coal combustion index

反应气体流量 (mL · min ⁻¹)			着火温度 T _i /°C	燃尽温度 T _f /°C	最大反应速率/ (% · min ⁻¹)	最大反应速 率温度/°C	平均反应速率/ (% · min ⁻¹)
N ₂	O ₂	CO ₂					
160	0	40	412.9	—	-3.59	456.5	-1.265
160	10	30	412.1	738.3	-4.35	541.6	-2.557
160	20	20	410.7	664.0	-7.10	525.6	-3.335
160	30	10	408.8	593.5	-8.75	519.3	-3.521
160	40	0	402.8	552.0	-11.27	495.7	-3.869



(a) 考虑氧含量为0



(b) 不考虑氧含量为0

图 4 氧含量与反应速率拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of oxygen content and reaction rate

因此,在不同的反应气氛下,燃烧时最大反应速

率受反应气氛中氧含量的影响程度更大,平均反应速率受其影响略小。最大反应速率约与氧含量的 6.13 次方成正比,平均反应速率约与氧含量的 2.60 次方成正比。

图 5 为不同反应气氛下,煤粉着火稳定性指标、可燃性指标和燃烧特性综合指数的变化趋势。三者均与反应气氛氧含量的正相关,近似呈线性关系。

2.3 升温速率的影响

为研究升温速率对煤粉燃烧特性的影响,分别进行升温速率为 10、20 和 30 °C/min 工况条件下的煤粉燃烧特性试验。反应气氛选取 10% CO₂/10% O₂,终温 1 000 °C。

升温速率对煤粉的燃烧特性的影响如图 6 所示,升温速率对煤粉的燃烧特性的影响比较明显。升温速率快,则反应停留时间相对较低,挥发分析出和焦炭燃烧的反应过程相对滞后,则煤粉的着火温度和燃尽温度均有所推迟。3 个升温速率条件下煤粉的着火温度分别为 397.8、410.7 和 427.4 °C,燃尽温度分别为 553.4、664 和 737.2 °C。20 °C/min

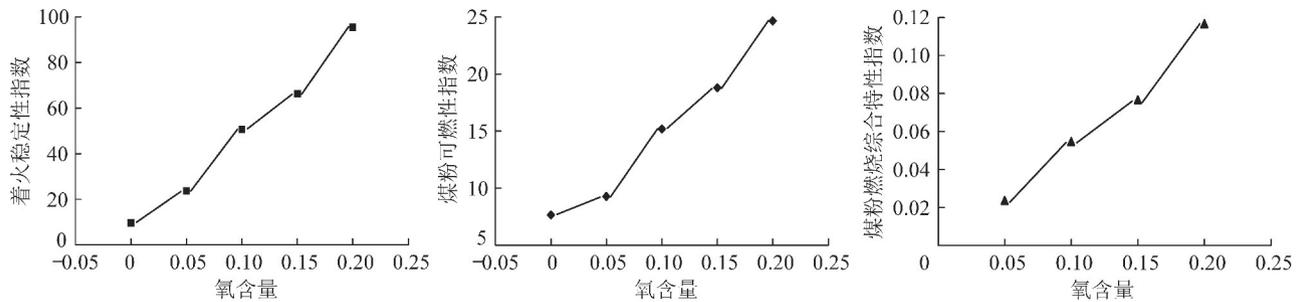


图5 煤粉燃烧特性指数与氧含量关系

Fig. 5 Relationships between coal combustion index and oxygen content

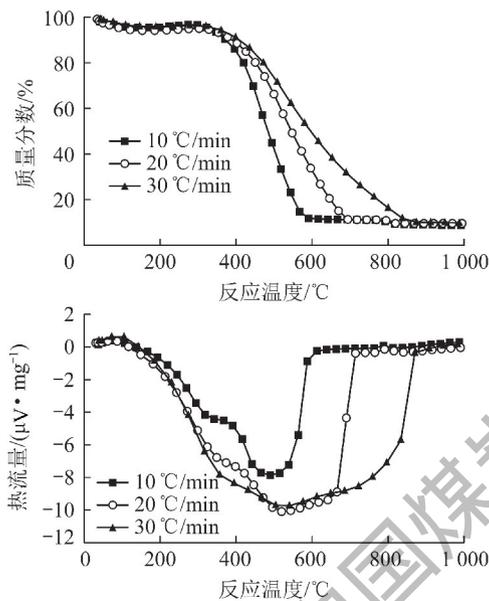


图6 升温速率对煤粉燃烧特性的影响

Fig. 6 Effect of heating rate on the coal combustion

工况相较 10 °C/min 工况在最大反应速率和平均速率上提升明显,且平均反应速率约是 10 °C/min 工况的 2 倍。

3 结 论

1) O_2/CO_2 混合气氛在 1 000 °C 以内存在着燃烧和气化的竞争。

2) O_2/CO_2 配比的增加,对煤粉着火温度影响不大,与燃尽温度呈正相关关系,挥发分的析出在氧含量为 0.15 左右最大。

3) 升温速率由 10 °C/min 升至 20 °C/min 时,对煤粉可燃性和着火稳定性提升明显,而由 20 °C/min 升至 30 °C/min 时影响不大。

参考文献 (References):

[1] Dudley B. B P statistical review of world energy [EB/OL].

(2014-12-20) [2017-01-18]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/2015-in-review.html>

- [2] 徐旭常,周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [3] 杨明,谷红伟,李晓伟,等. 神华煤锅炉低氮燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术,2014,20(4):68-72.
Yang Ming, Gu Hongwei, Li Xiaowei, et al. Combustion characteristics of shenhua coal boiler under low NO_x combustion[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(4):68-72.
- [4] 胡昕. 煤炭分级利用与富氧燃烧技术机理与应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2013:33-43.
- [5] 王萌,吴昊,刘浩,等. O_2/CO_2 气氛下煤粉燃烧 NO 的排放特性[J]. 煤炭学报,2013,38(6):1072-1077.
Wang Meng, Wu Hao, Liu Hao, et al. Characteristics of NO emission during pulverized coal combustion under O_2/CO_2 atmosphere [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6):1072-1077.
- [6] 陈洁,张军,张永春,等. O_2/CO_2 气氛下焦炭氮转化的实验研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(1):145-148.
Chen Jie, Zhang Jun, Zhang Yongchun, et al. Experimental study on char-nitrogen conversion in O_2/CO_2 atmosphere[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1):145-148.
- [7] 孙志君,苏胜,宁星,等. 煤焦 O_2/CO_2 燃烧方式下 NO_x 生成与异相还原特性[J]. 燃烧科学与技术,2014,20(4):517-522.
Sun Zhijun, Su Sheng, Ning Xing, et al. NO_x formation and heterogeneous reduction of coal char combustion under O_2/CO_2 atmosphere [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(6):517-522.
- [8] Liu Jiaxun, Gao Shan, Jiang Xiumin, et al. NO emission characteristics of superfine pulverized coal combustion in the O_2/CO_2 atmosphere [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77(1):349-355.
- [9] Rathnam R K, Elliott L K, Wall T F, et al. Differences in reactivity of pulverised coal in air (O_2/N_2) and oxy-fuel (O_2/CO_2) conditions [J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(6):797-802.
- [10] Kim Y G, Kim J D, Lee B H, et al. Experimental investigation into combustion characteristics of two sub-bituminous coals in O_2/N_2 and O_2/CO_2 environments [J]. Energy and Fuels, 2010, 24(11):6034-6040.

(下转第 80 页)

- Hua Shuangping, Zhang Bo, Song Huaihe, et al. Preparation of mesophase pitch from purified coal tar pitch[J]. Carbon Techniques, 2009, 28(6):6-10.
- [2] 花双平. 煤沥青基中间相沥青的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [3] 崔豫泓, 杨慧君. 中间相沥青的制备与研究[J]. 煤质技术, 2012(3):61-63.
- Cui Yuhong, Yang Huijun. Preparation and study on the mesophase pitch[J]. Coal Quality and Technology, 2012(3):61-63.
- [4] 吕婧, 李铁虎, 赵廷凯, 等. 反应温度和压力对制备中间相沥青的影响[J]. 炭素, 2013(1):40-48.
- Lyu Jing, Li Tiehu, Zhao Tingkai, et al. Effects of temperature and pressure on the preparation of mesophase pitch[J]. Carbon, 2013(1):40-48.
- [5] Yao Yanbo, Chen Jianming, Liu Ling, et al. Tailoring structures and properties of mesophase pitch-based carbon fibers based on isotropic mesophase incompatible blends[J]. Carbon, 2012, 50(12):4459-4469.
- [6] Yuan Guanming, Li Xuanke, Dong Zhijun, et al. Preparation and characterization of highly oriented ribbon shape pitch-based carbon fibers[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(10):1025-1030.
- [7] Lu Yonggen, Li Zhiqiang, Wang Peng, et al. Preparation of mesophase pitch-based carbon foams with supercritical toluene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(1):336-341.
- [8] Ge Min, Shen Zengmin, Chi Weidong, et al. Anisotropy of mesophase pitch-derived carbon foams[J]. Carbon, 2007, 45(1):141-145.
- [9] 冯质壮, 宋淑群, 金俊杰, 等. 煤沥青热聚合研究[J]. 炭素技术, 2013, 32(3):21-24.
- Feng Zhizhuang, Song Shuqun, Jin Junjie, et al. Study on the thermal polymerization of coal tar pitch[J]. Carbon Techniques, 2013, 32(3):21-24.
- [10] 李伏虎, 沈曾民, 迟伟东, 等. 两种不同原料中间相沥青分子结构的研究[J]. 炭素技术, 2009, 28(1):4-8.
- Li Fuhu, Shen Zengmin, Chi Weidong, et al. Molecular structures of mesophase pitches prepared from different raw materials[J]. Carbon Techniques, 2009, 28(1):4-8.
- [11] 李晓炜, 马兆昆, 宋怀河, 等. 低软化点可溶性中间相沥青的制备[J]. 炭素技术, 2014, 33(2):1-4.
- Li Xiaowei, Ma Zhaokun, Song Huaihe, et al. The preparation of soluble mesophase pitch with low softening point[J]. Carbon Techniques, 2014, 33(2):1-4.
- [12] 孙磊, 郑长征, 马丽斯, 等. 煤沥青及其改性后中间相的转化行为研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(1):82-85.
- Sun Lei, Zheng Changzheng, Ma Lisi, et al. Study on the mesophase transformations of coal tar pitch and modified coal tar pitch[J]. Coal Conversion, 2010, 33(1):82-85.

(上接第75页)

- [11] 黄晓宏, 柳朝晖, 刘敬樟, 等. O_2/CO_2 条件下煤粉燃烧火焰特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7):1245-1248.
- Huang Xiaohong, Liu Zhaohui, Liu Jingzhang, et al. Experimental investigation of flame characteristics of pulverized coal combustion under O_2/CO_2 atmosphere[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7):1245-1248.
- [12] 易宝军, 张立麒, 黄芳, 等. 不同粒径煤粉在 O_2/CO_2 气氛下的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3):248-253.
- Yi Baojun, Zhang Liqi, Huang Fang, et al. Combustion characteristics of pulverized coal with different particle sizes in O_2/CO_2 atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3):248-253.
- [13] Brix J, Jensen P A, Jensen A D. Coal devolatilization and char conversion under suspension fired conditions in O_2/N_2 and O_2/CO_2 atmospheres[J]. Fuel, 2010, 89(11):3373-3380.
- [14] Borrego A G, Osorio E, Casal M D, et al. Coal char combustion under a CO_2 -rich atmosphere: Implications for pulverized coal injection in a blast furnace[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(11):1017-1024.
- [15] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. 基于 TG-FTIR 研究 O_2/CO_2 气氛下烟煤的燃烧特性[J]. 东南大学学报, 2007, 37(6):990-995.
- Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, et al. Investigation on characteristics of bituminous coal combustion in O_2/CO_2 mixtures based on TG-FTIR coupled technology[J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(6):990-995.
- [16] 李治刚, 张晓明, 菅井裕一, 等. 煤在高浓度 CO_2 环境下的燃烧、气化及吸附实验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6):1021-1027.
- Li Zhigang, Zhang Xiaoming, Sugai Yuichi, et al. Experimental study on combustion, gasification and adsorption of coal in a CO_2 -rich atmosphere[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6):1021-1027.
- [17] 杨妮, 卿山, 王华, 等. 富氧气氛下升温速率对煤燃烧及动力学的研究[J]. 煤炭转化, 2014, 37(4):50-54.
- Yang Ni, Qing Shan, Wang Hua, et al. Study of the effect of heating rate on combustion and kinetics of pulverized coal in mixed O_2/CO_2 atmosphere[J]. Coal Conversion, 2014, 37(4):50-54.