

文章编号:0253-9993(2013)03-0466-07

水蒸气对 O_2/CO_2 气氛下煤焦燃烧特性的影响

姜中孝,段伦博,陈晓平

(东南大学 能源与环境学院 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

摘要:在热重分析仪上进行 $O_2/CO_2/H_2O$ 气氛下淮北烟煤煤焦与内蒙古褐煤煤焦的燃烧实验,分析水蒸气浓度、氧气浓度等参数对煤焦燃烧特性的影响,并对其进行燃烧动力学分析。结果表明,在相同氧浓度下,水蒸气的存在使煤焦的 DTG 曲线峰值向低温区偏移,着火温度、燃尽温度降低。褐煤煤焦综合燃烧特性指数升高,但烟煤焦综合燃烧特性指数先降低后升高,这主要是由水蒸气的低摩尔比热容及水蒸气与煤焦的气化反应共同决定的。在相同水蒸气浓度下,烟煤焦与褐煤焦综合燃烧指数随氧浓度的升高而增大,着火温度、燃尽温度均降低,表明提高氧浓度可改善 $O_2/CO_2/H_2O$ 气氛下煤焦的燃烧特性。

关键词: O_2/CO_2 气氛;水蒸气;热重分析;燃烧特性

中图分类号: TQ534, X511 **文献标志码:** A

Effect of steam on char combustion characteristics under a O_2/CO_2 atmosphere

JIANG Zhong-xiao, DUAN Lun-bo, CHEN Xiao-ping

(Key Laboratory for Energy Thermal Conversion and Control of the Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A thermogravimetric analyzer (TGA) was employed to evaluate the combustion behaviors of Huaibei bituminous coal char and Inner Mongolia lignite char in different $O_2/CO_2/H_2O$ atmospheres. The effects of steam and O_2 concentration on combustion characteristics was analyzed and the combustion kinetics were calculated. The results show that as the steam content increases while the oxygen concentration is maintained at the same level, the peak of the DTG curve moves to low temperature zone as well as the ignition and burnout temperature decrease. The presence of steam can raise the lignite char combustion characteristic index, but the combustion characteristic index of bituminous coal char decreases at first, and then increases. This is mainly determined by smaller heat capacity of steam and the gasification effect between steam and char. As the oxygen content increases while steam concentration stays stable, the ignition temperature and burnout temperature decrease, and the combustion characteristic index of both chars increase.

Key words: O_2/CO_2 atmosphere; steam; thermogravimetric analysis; combustion characteristics

O_2/CO_2 燃烧技术是一种既能直接获得高浓度 CO_2 , 又能综合控制燃煤污染物排放的新一代燃烧技术, 近些年已引起学术界和技术界的高度关注^[1-6]。 O_2/CO_2 燃烧根据烟气循环方式可分为干烟气循环和湿烟气循环。湿烟气循环无需将烟气冷却至露点以下, 热效率较高, 而且设备简单, 因此湿烟气循环更具

应用前景。 O_2/CO_2 燃烧湿烟气循环中, 水蒸气和 CO_2 均为燃烧气氛中的主要组分, 根据燃料不同, 水蒸气在炉内的富集浓度最高可达 45% 以上, 其与 N_2 , CO_2 在物理化学性质上存在显著差异, 会对煤的燃烧产生重要影响。前人对 O_2/CO_2 燃烧机理的研究中, 绝大多数从 CO_2 取代 N_2 对燃烧的影响入手, 研究

收稿日期: 2012-03-05 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206023); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB707301)

作者简介: 姜中孝(1988—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生。E-mail: jiangzx2000@163.com。通讯作者: 段伦博(1982—), 男, 副教授, 博士。Tel: 025-83790147, E-mail: duanlunbo@seu.edu.cn

CO₂ 取代 N₂ 对着火特性、燃烧速率、火焰传播速度、燃烧稳定性及燃烬特性的影响^[7-10],但是忽略了水蒸气的影响。

Riaza 等^[11]在滴管炉上研究了 O₂/CO₂ 气氛下水蒸气浓度对无烟煤和烟煤燃烧特性的影响,结果发现,与无水分相比,21% O₂ 气氛时煤的着火温度比相同氧浓度空气气氛下有所增加,燃烬率差。当氧浓度提升到 30% ~ 35% 时,着火温度比空气气氛下有所下降,燃烬率与空气气氛下相当,但是不同水蒸气的浓度对着火温度影响不大。Gil 等^[12]在热天平上研究了 O₂/CO₂ 气氛下水蒸气对煤、生物质以及煤与生物质混合物燃烧的影响,水蒸气的存在促进了燃烧反应,燃料质量损失率有所增加,燃烬时间缩短,但水蒸气浓度的变化对燃烧反应的影响不明显。贾传凯等^[13]在水煤浆和原煤的燃烧特性对比的基础上,分析了水煤浆中水分对着火特性的影响及水蒸气对传热的影响,认为水蒸气的存在会促使 CO 的氧化反应加快,使挥发物更易逸出和燃烧。

近年来,热分析技术已成为研究煤反应性能的重要工具^[14-15],具有实验样品少,易于配置和调控,数据处理简单且精度高等优点。本文借助热重分析仪研究 O₂/CO₂ 气氛下水蒸气对煤焦的燃烧反应特性的影响,并进行反应动力学分析,有助于理解真实复杂的气氛下煤焦的 O₂/CO₂ 燃烧特性。

1 实验设备及样品

实验在美国 Thermo Cahn 公司生产的 TherMax 500 型加压热重-差热分析仪上进行。仪器温度范围为室温 ~ 1 600 °C,温度精度 ± 2 °C,升温速率范围为 0.01 ~ 99.99 °C/min。热分析程序:升温速率为 20 °C/min,从室温升至 900 °C,样品质量约为 15 mg,反应气氛为 O₂/CO₂ 及 O₂/CO₂/H₂O 的混合气体,总气量为 200 mL/min。选用两种不同品质的煤样,分别为淮北烟煤和内蒙古褐煤,其元素分析和工业分析见表 1。煤样通过马弗炉在 900 °C 下隔绝空气恒温 7 min,脱除挥发分,制成煤焦试样,经研磨筛分至 0 ~ 75 μm。

表 1 煤样的元素分析和工业分析

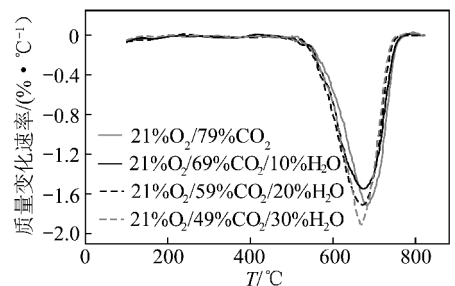
Table 1 Proximate and ultimate analyses of coal samples

煤样	工业分析				元素分析				
	FC _{ad}	V _{daf}	A _{ad}	M _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
烟煤	51.80	23.81	21.96	2.43	65.18	3.40	4.01	1.02	2.00
褐煤	51.05	34.00	5.59	9.36	68.03	5.28	10.40	0.81	0.53

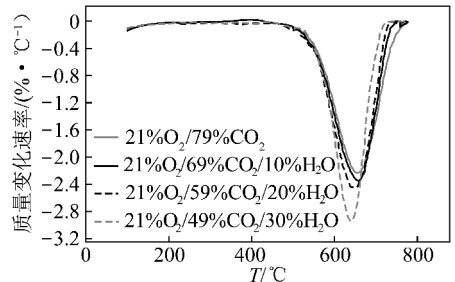
2 实验结果及分析

2.1 O₂/CO₂/H₂O 气氛下燃烧失重曲线分析

图 1 为 21% O₂ 下淮北烟煤煤焦和内蒙古褐煤煤焦的 DTG 曲线。从图 1 可以看出,烟煤煤焦与褐煤煤焦在不同气氛下的 DTG 曲线外形相似,均存在一个最大失重峰。在相同的 O₂ 浓度下,随着水蒸气浓度的增加,烟煤煤焦与褐煤煤焦失重峰对应时间提前。烟煤煤焦峰值随着水蒸气浓度的增加呈现先减小后增大的趋势,褐煤煤焦峰值一直增大。这是由于多种因素决定的,水蒸气的摩尔比热容比 CO₂ 低,水蒸气的存在改善了反应气氛,提高了煤焦温度,加强了煤焦燃烧的传热,促进了煤焦的燃烧反应,有利于煤焦的着火与燃烬。同时,水蒸气与煤焦发生气化反应,导致燃烧温度降低,对煤焦的燃烧与燃烬产生负面影响,气化产物又促进了燃烧反应碳向气相的转化,而且在相同的体积分数和温度等操作条件下,水蒸气和煤焦的气化速率比 CO₂ 和煤焦的气化速率快^[16]。烟煤煤焦燃烧过程中,气化反应的吸热过程



(a) 烟煤煤焦



(b) 褐煤煤焦

图 1 烟煤煤焦和褐煤煤焦在 21% O₂ 下的 DTG 曲线

Fig. 1 DTG curves of bituminous coal char and lignite char at 21% O₂

在水蒸气浓度较小时起主导作用,DTG 曲线峰值减小,燃烧速率下降。随着水蒸气浓度的增加,水蒸气对燃烧气氛的改善以及气化产物对燃烧的促进占主导地位,煤焦的燃烧特性得到改善,峰值渐渐增加。褐煤煤焦燃烧过程中,不同水蒸气浓度下燃烧气氛的改善对燃烧的促进效果都大于气化反应的抑制作用。不同煤种的反应过程表明,水蒸气与烟煤煤焦的气化反应比与褐煤煤焦反应剧烈。

图 2 为 30% O₂ 浓度下淮北烟煤煤焦和内蒙古褐煤煤焦的 DTG 曲线。实验所得曲线与 21% O₂ 浓度下相似。

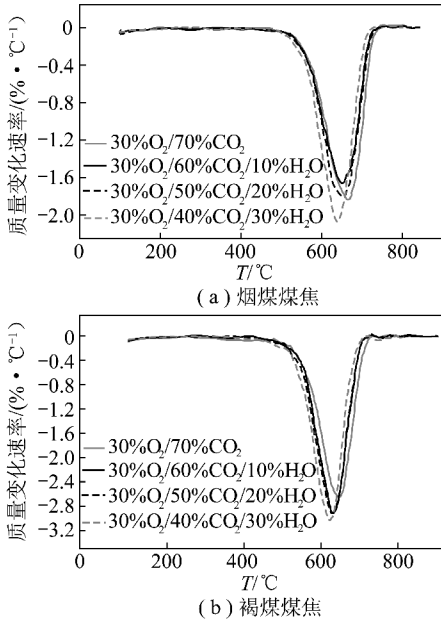


图 2 烟煤煤焦与褐煤煤焦在 30% O₂ 下的 DTG 曲线

Fig. 2 DTG curves of bituminous coal char and lignite char at 30% O₂

图 3 为 20% H₂O 浓度下提高 O₂ 分压淮北烟煤煤焦和内蒙古褐煤煤焦的 DTG 曲线。实验结果表明,在相同水蒸气浓度下,随着 O₂ 浓度的增加,烟煤煤焦与褐煤煤焦的 DTG 曲线向低温区发生明显偏移,且对应峰值显著增大,这说明提高 O₂ 浓度改善了煤焦的燃烧速率,降低了着火时间,缩短了从着火到燃烬所需的时间,使煤的反应活性得到改善^[17]。

2.2 煤焦的着火温度、燃烬温度分析

着火温度与燃烬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重要的指导意义;燃烬温度是煤样基本燃烬时的温度,燃烬温度越低,表明燃烬时间越短,煤样越容易燃烬^[18]。

本文采用常用的 TG-DTG 法确定燃料的着火温度^[18],即在 DTG 曲线上过峰值作垂线交 TG 曲线于

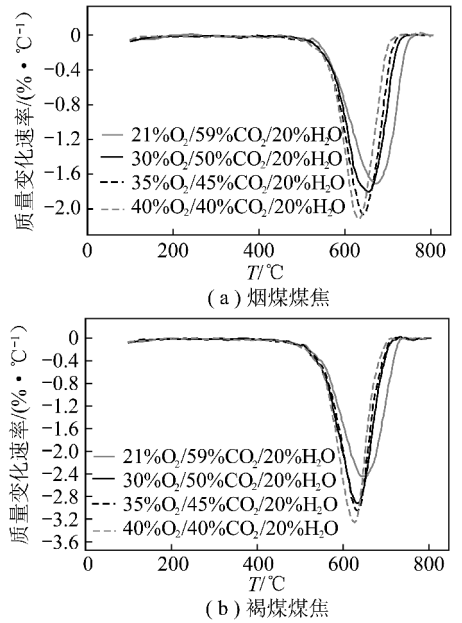


图 3 烟煤煤焦与褐煤煤焦在 20% H₂O 下的 DTG 曲线

Fig. 3 DTG curves of bituminous coal char and lignite char at 20% H₂O

点 A,过 A 点作 TG 曲线的切线,该切线交 TG 曲线上开始失重时的水平直线于点 B,则 B 点对应的温度定义为着火温度 T_i。燃烬温度 T_b,定义为试样失重占总失重 99% 时对应的温度。

图 4 为煤焦在 O₂/CO₂ 及 O₂/CO₂/H₂O 气氛下,着火温度、燃烬温度随水蒸气浓度变化的曲线。可以看出,相同 O₂ 浓度下,两种不同品质的煤焦在燃烧过

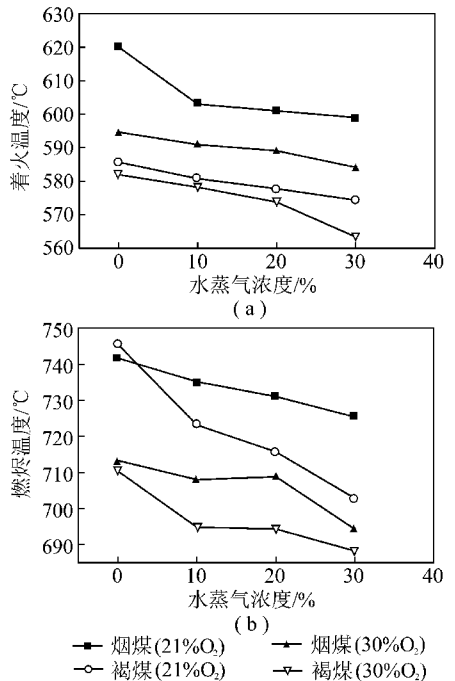


图 4 水蒸气浓度对两种煤焦着火温度和燃烬温度的影响

Fig. 4 Relationship between T_i, T_b and steam content

程中的着火温度与燃烬温度都随着水蒸气浓度的增加而减小。与水蒸气浓度在 10% ~ 20% 的着火温度变化相比,水蒸气浓度在 0 ~ 10% 和 20% ~ 30% 的着火温度降低的程度略大,燃烬温度也显示出相似的变化。相对于烟煤而言,褐煤煤焦燃烬温度的降低幅度明显高于烟煤煤焦。这是由于水蒸气与烟煤气化反应更加剧烈,气化反应的吸热效果阻碍了燃烧的进行。实验结果表明,在相同 O₂ 浓度下,水蒸气的存在对煤焦着火特性具有一定的改善作用,促进了煤焦的燃烧及燃烬。

图 5 为相同水蒸气浓度下,两种不同品质的煤焦随 O₂ 浓度的增加,着火温度与燃烬温度的变化。可以看出,水蒸气浓度一定时,烟煤煤焦与褐煤煤焦的着火温度与燃烬温度都随 O₂ 浓度的增加而减小,减小的程度与 O₂ 浓度的增加量密切相关,说明 O₂ 浓度的增加促进了煤焦的着火与燃烬。

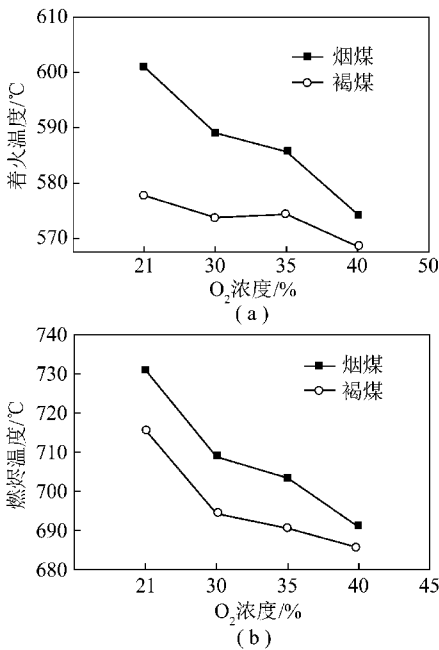


图 5 O₂ 浓度对两种煤焦着火温度和燃烬温度的影响

Fig. 5 Relationship between T_i, T_b and oxygen content

2.3 综合燃烧指数分析

借助综合燃烧特性指数 S 来描述 O₂/CO₂ 气氛下煤焦的综合燃烧性能。

$$S = \frac{R}{E} \frac{d(dW/dt)}{dT} \Big|_{T=T_i} \frac{(dW/dt)_{\max}}{(dW/dt)_{T=T_i}} \frac{(dW/dt)_{\text{mean}}}{T_b} = \frac{(dW/dt)_{\max} (dW/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b}$$

其中, R 为气体反应常数,取 $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; E 为反应活化能, kJ/mol ; $(dW/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速率; $(dW/dt)_{T=T_i}$ 为着火温度下的燃烧速率;

$(dW/dt)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速率,其具体推导见文献^[19]。公式右边可作如下解释: R/E 表示煤的活性, E 值越小,反应能力越高; $\frac{d(dW/dt)}{dT} \Big|_{T=T_i}$ 为燃烧速率在着火点的转化率,其值越大表明着火越猛烈; $\frac{(dW/dt)_{\max}}{(dW/dt)_{T=T_i}}$ 为燃烧速率峰值与着火时的燃烧速率之比; $\frac{(dW/dt)_{\text{mean}}}{T_b}$ 为平均燃烧速率与燃烬温度之比,其值越大,表明燃烬越快。其各项的乘积综合反映了煤的着火与燃烧特性,将其定义为综合燃烧特性指数 S , S 越大表明煤的燃烧特性越佳。

由图 6(a) 可以看出, O₂ 浓度为 21% 与 30% 时, 烟煤煤焦综合燃烧指数都随水蒸气浓度增加呈先减小后增大的趋势, 在水蒸气浓度 20% 左右, 综合燃烧指数与无水状态下相近。这表明水蒸气与烟煤煤焦的气化反应不利于烟煤焦的燃烧, 燃烧特性变差, 综合燃烧指数降低。随着水蒸气浓度的增加, 燃烧气氛得到改善, 有利于燃烧特性增强, 综合燃烧指数增加。褐煤煤焦在相同 O₂ 浓度下随水蒸气浓度增加综合燃烧指数上升, 说明水蒸气与煤焦的气化反应对褐煤煤焦的影响较低, 水蒸气对燃烧气氛的改善起主导作用, 促进了燃烧反应的进行, 综合燃烧指数增加。图 6(b) 为水蒸气浓度均为 20% 下, 烟煤煤焦与褐煤煤焦综合燃烧指数随 O₂ 浓度增加的变化曲线, 可知, 相同水蒸气浓度下, 随着 O₂ 浓度的增加, 两种不同品质

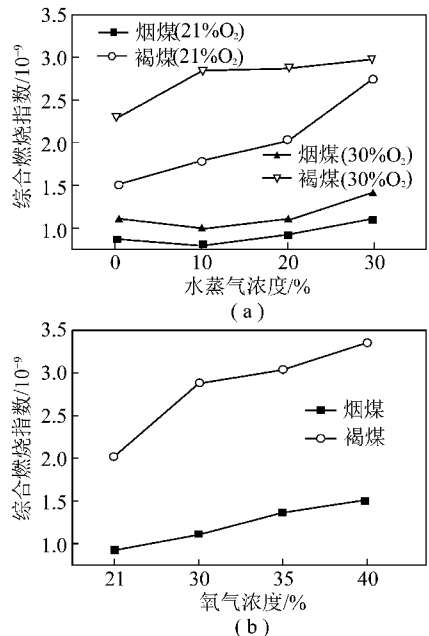


图 6 水蒸气浓度和 O₂ 浓度对两种煤焦综合燃烧指数的影响

Fig. 6 Relationship between combustion characteristic index and steam content, oxygen content

的煤焦综合燃烧指数均呈上升趋势,说明 O₂ 浓度的增加,促进了煤焦中可燃物质的分解与燃烧,燃烧特性得到增强,其中褐煤煤焦燃烧指数增强程度要大于烟煤煤焦。

2.4 燃烧动力学参数计算

根据质量作用定律,其反应动力学方程为

$$\frac{d\alpha}{dt} = Kf(\alpha) \quad (1)$$

式中, α 为转化率; K 为反应速率常数; $f(\alpha)$ 为反应机理函数,取 $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$, n 为反应级数。

反应速率常数 K 由 Arrhenius 定律确定。

$$K = A \exp[-E/(RT)] \quad (2)$$

其中, A 为指前因子, min^{-1} ; 本实验采用升温速率为 30 °C/min, 即升温速率 $\beta = \frac{dT}{dt}$ 为常数。试样的转化率 α 可由 TG 曲线求得。

$$\alpha = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_\infty} \times 100\% \quad (3)$$

由此可得:

$$\frac{d\alpha}{dT} = (1 - \alpha)^n \frac{A}{\beta} \exp[-E/(RT)] \quad (4)$$

采用 Coats-Redfern 积分法,利用 P 函数的近似展开式可得

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (n \neq 1) \quad (5)$$

$$\ln \left[\frac{-\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (n = 1) \quad (6)$$

选取不同的反应级数 n , 令式(5), (6) 等号左边为 Y 、右边 $1/T$ 为 X 作图, 直至所取的 n 值得到的图像接近直线, 此时的 n 值即为所求的反应级数。根据最小二乘法回归所得直线的斜率和截距可求得活化能 E 和指前因子 A ^[20]。

以相关系数为评价指标, 淮北烟煤焦与内蒙古褐煤焦在其主要反应温度区间内均为一级反应, 说明气氛的变化对煤焦燃烧的反应级数没有构成根本的影响。具体计算结果见表 2, 在分析过程中将该燃烧阶段分为两个区, 即低温段 I: 从着火温度到最大失重温度; 高温段 II: 从最大失重温度到燃尽温度。

表 2 烟煤煤焦与褐煤煤焦的燃烧反应动力学参数

Table 2 Combustion kinetic parameters for bituminous coal char and lignite char

条件	煤样	$T/^\circ\text{C}$	$Y=A+BX$	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A/s^{-1}	R
21% O ₂ /79% CO ₂	烟煤	620 ~ 682	$Y=21.8475-209.39X$	174.099 8	2.94×10^9	0.999 50
		682 ~ 742	$Y=26.0081-249.07X$	207.091 9	1.58×10^{11}	0.997 93
	褐煤	586 ~ 655	$Y=22.4270-209.68X$	174.342 4	5.24×10^9	0.999 54
		655 ~ 746	$Y=19.4756-182.65X$	151.871 2	3.14×10^8	0.998 95
21% O ₂ /69% CO ₂ /10% H ₂ O	烟煤	603 ~ 672	$Y=21.8778-207.64X$	172.648 2	3.06×10^9	0.998 01
		672 ~ 735	$Y=25.7466-245.04X$	203.739 7	1.24×10^{11}	0.995 87
	褐煤	581 ~ 657	$Y=20.7641-193.35X$	160.765 8	1.08×10^9	0.999 49
		657 ~ 723	$Y=22.9203-213.43X$	177.458 0	8.43×10^9	0.999 30
21% O ₂ /59% CO ₂ /20% H ₂ O	烟煤	601 ~ 671	$Y=22.4458-212.18X$	176.425 2	5.28×10^9	0.999 73
		671 ~ 731	$Y=28.1365-266.90X$	221.922 2	1.24×10^{12}	0.983 96
	褐煤	577 ~ 647	$Y=21.9023-202.58X$	168.439 5	3.21×10^9	0.999 64
		647 ~ 715	$Y=22.8733-211.69X$	176.015 4	8.11×10^9	0.999 07
21% O ₂ /49% CO ₂ /30% H ₂ O	烟煤	599 ~ 668	$Y=23.6936-224.24X$	186.450 7	1.74×10^{10}	0.999 06
		668 ~ 725	$Y=26.7073-252.51X$	209.951 6	3.14×10^{11}	0.997 32
	褐煤	574 ~ 640	$Y=25.3648-232.94X$	193.679 1	8.90×10^{10}	0.999 30
		640 ~ 703	$Y=25.5069-233.91X$	194.489 2	1.02×10^{11}	0.999 70
30% O ₂ /70% CO ₂	烟煤	595 ~ 666	$Y=24.6999-230.88X$	191.971 6	4.62×10^{10}	0.998 89
		666 ~ 713	$Y=28.9827-271.62X$	225.838 8	2.85×10^{12}	0.996 88
	褐煤	582 ~ 648	$Y=22.3384-205.69X$	171.023 1	4.89×10^9	0.998 99
		648 ~ 710	$Y=23.9489-220.34X$	183.202 4	2.28×10^{10}	0.999 23

续表

条件	煤样	T/°C	Y=A+BX	E/(kJ·mol ⁻¹)	A/s ⁻¹	R
30% O ₂ /60% CO ₂ /10% H ₂ O	烟煤	591 ~ 651	Y=24.697 4-228 71X	190.161 7	4.65×10 ¹⁰	0.999 34
		651 ~ 708	Y=27.747 3-257 76X	214.319 3	8.72×10 ¹¹	0.997 19
	褐煤	578 ~ 633	Y=25.810 4-235 29X	195.639 1	1.38×10 ¹¹	0.998 77
		633 ~ 695	Y=25.046 1-228 06X	189.622 1	6.61×10 ¹⁰	0.998 82
30% O ₂ /50% CO ₂ /20% H ₂ O	烟煤	589 ~ 652	Y=25.790 3-238 19X	198.047 7	1.33×10 ¹¹	0.998 93
		652 ~ 709	Y=26.959 1-250 02X	207.880 7	4.09×10 ¹¹	0.996 51
	褐煤	574 ~ 630	Y=24.900 2-225 98X	187.899 2	5.77×10 ¹⁰	0.998 99
		630 ~ 694	Y=23.664 9-214 53X	178.376 4	1.77×10 ¹⁰	0.999 31
30% O ₂ /40% CO ₂ /30% H ₂ O	烟煤	584 ~ 638	Y=27.823 1-254 82X	211.874 0	9.51×10 ¹¹	0.999 23
		638 ~ 694	Y=27.307 0-250 60X	208.366 5	5.77×10 ¹¹	0.997 33
	褐煤	563 ~ 623	Y=23.723 9-213 54X	177.551 7	1.88×10 ¹⁰	0.998 43
		623 ~ 688	Y=23.035 2-206 59X	171.777 3	9.77×10 ⁹	0.997 54
35% O ₂ /45% CO ₂ /20% H ₂ O	烟煤	586 ~ 643	Y=26.366 8-242 52X	201.646 8	2.33×10 ¹¹	0.998 46
		643 ~ 703	Y=27.771 2-255 62X	212.537 6	9.00×10 ¹¹	0.998 50
	褐煤	574 ~ 635	Y=26.014 4-235 70X	195.980 9	1.68×10 ¹¹	0.998 63
		635 ~ 691	Y=24.072 5-217 63X	180.950 9	2.62×10 ¹⁰	0.997 72
40% O ₂ /40% CO ₂ /20% H ₂ O	烟煤	574 ~ 632	Y=28.901 2-262 59X	218.333 4	2.71×10 ¹²	0.998 64
		632 ~ 691	Y=27.671 7-251 57X	209.175 4	8.28×10 ¹¹	0.999 00
	褐煤	568 ~ 627	Y=27.525 4-247 44X	205.738 5	7.27×10 ¹¹	0.998 74
		627 ~ 686	Y=23.259 2-208 07X	173.002 0	1.21×10 ¹⁰	0.998 06

由表2可知,相同气氛下褐煤焦的活化能比烟煤焦的要小。低温段烟煤焦活化能及指前因子均随着水蒸气浓度的增加先减小后增大,高温段没有很好的规律性。褐煤焦活化能与指前因子在低温段及高温段均随水蒸气浓度的增加而增大。

3 结 论

(1)水蒸气的存在对 O₂/CO₂ 气氛下煤焦燃烧特性有一定影响。21% O₂ 与 30% O₂ 浓度下,两种煤焦反应规律相似。相同氧浓度下,随着水蒸气浓度的增加,两种煤焦着火温度、燃烬温度均降低。水蒸气的加入促使褐煤焦综合燃烧特性指数升高,但烟煤焦综合燃烧特性指数先降低后升高。

(2)相同水蒸气浓度下,随着氧气浓度的升高,两种煤焦的着火温度和燃烬温度均降低,综合燃烧指数上升,表明 O₂ 浓度的增加加速了煤焦的燃烧。

(3)水蒸气的存在不改变 O₂/CO₂ 气氛燃煤的反应级数。低温段烟煤焦活化能及指前因子均随着水蒸气浓度的增加先减小后增大,高温段没有很好的规律性。褐煤焦的活化能与指前因子在低温段及高温段均随水蒸气浓度的增加而增大。

参考文献:

- [1] Goldthorpe S H, Cross P J I, Davison J E. System studies on CO₂ abatement from power plant [J]. Energy Convers. Management, 1992, 33(5-8): 459-466.
- [2] Nakayama S, Noguchi Y. Pulverized coal combustion in O₂/CO₂ mixtures on a power plant for CO₂ recovery [J]. Energy Convers. Management, 1992, 33(5-8): 379-386.
- [3] Yamadea T, Kiga T, Okaua M. Characteristics of pulverized-coal combustion in CO₂ recovery power plant applied O₂/CO₂ [J]. JSME International Journal, 1998, 41(4): 1017-1022.
- [4] 王 贲, 苏 胜, 孙路石, 等. O₂/CO₂ 条件下煤焦 NO 生成特性的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1743-1748.
Wang Ben, Su Sheng, Sun Lushi, et al. NO forming rules in O₂/CO₂ atmosphere of pulverized coal and char with low oxygen concentrations [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1743-1748.
- [5] Liu H, Yuan Y, Yao H, et al. Factors affecting NO reduction during O₂/CO₂ combustion [J]. Energy Fuels, 2011, 25(6): 2487-2492.
- [6] Watanabe H, Marumo T, Okazaki K. Effect of CO₂ reactivity on NO_x formation and reduction mechanisms in O₂/CO₂ combustion [J]. Energy Fuels, 2012, 26(2): 938-951.
- [7] Molina A, Shaddix C. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 1905-1912.

- [8] Kiga T, Takano S, Kimura N, et al. Characteristic of pulverized coal combustion in the system of oxygen/recycled flue gas combustion [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(S): 129-134.
- [9] Toshiyuki S, Katsumi M, Junichi S, et al. Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion [J]. *Fuel*, 2007, 66(12-13): 2008-2015.
- [10] Scala F, Chirone R. Fluidized bed combustion of single coal char particles at high CO₂ concentration [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165(3): 902-906.
- [11] Riaza J, Álvarez L, Gil M V, et al. Effect of oxy-fuel combustion with steam addition on coal ignition and burnout in an entrained flow reactor [J]. *Energy*, 2011, 36(8): 5314 - 5319.
- [12] Gil M V, Riaza J, Lvarez L A, et al. A study of oxy-coal combustion with steam addition and biomass blending by thermogravimetric analysis [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 109(1): 49-55.
- [13] 贾传凯. 水煤浆水分对锅炉燃烧的影响 [J]. *工业锅炉*, 2008(6): 5-7.
Jia Chuankai. Effect of moisture content in coal water mixture on boiler combustion [J]. *Industrial Boiler*, 2008(6): 5-7.
- [14] 姜秀民, 李巨斌, 邱健荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(6): 71-74.
Jiang Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(6): 71-74.
- [15] 刘彦, 周俊虎, 方磊, 等. O₂/CO₂ 气氛煤粉燃烧及固硫特性研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 224-228.
Liu Yan, Zhou Junhu, Fang Lei, et al. A study on coal combustion and desulfurization characteristics in atmosphere containing O₂/CO₂ [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 224-228.
- [16] Irfan M F, Usman M R, Kusakabe K. Coal gasification in CO₂ atmosphere and its kinetics since 1948; a brief review [J]. *Energy*, 2011, 36(1): 12-40.
- [17] 许晋源, 徐通模. 燃烧学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
Xu Jinyuan, Xu Tongmo. *Combustion theory*. [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1990.
- [18] 李庆钊, 赵长遂. O₂/CO₂ 气氛煤粉燃烧特性试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(35): 39-43.
Li Qingzhao, Zhao Changsui. Investigation on characteristics of pulverized coal combustion in O₂/CO₂ combustion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(35): 39-43.
- [19] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 80-81.
Sun Xuexin. *Combustion test technology and method of coal-fired boiler* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 80-81.
- [20] 段伦博, 赵长遂, 李庆钊, 等. O₂/CO₂ 气氛下煤焦燃烧实验研究 [J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(6): 654-658.
Duan Lunbo, Zhao Changsui, Li Qingzhao. Experimental investigation on coal and char combustion in O₂/CO₂ mixture [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(6): 654-658.