

# O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛煤粉燃烧特性试验研究

李庆钊, 赵长遂

(洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室(东南大学), 江苏省南京市 210096)

## Investigation on Characteristics of Pulverized Coal Combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Mixtures

LI Qing-zhao, ZHAO Chang-sui

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology(Southeast University),  
Ministry of Education, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Coal combustion in the mixture of oxygen and carbon dioxide is one of new method to tackle CO<sub>2</sub> emission with low pollutants emission reductions. The chemical kinetic of coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixture is significant different from traditional coal combustion process in air conditions. Combustion characteristics of pulverized coal in different ranks were studied using thermo-gravimetric analyzer for four oxygen volume contents ( $\varphi(\text{O}_2)=21\%, 30\%, 40\%$  and  $80\%$ ). The combustion characteristic parameters were marked and the characteristic index were calculated and analyzed. Results show that the DTG curve of coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere is different from that in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> condition. In the O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixture, coal burning rate is lower and burning time is longer. With the oxygen content increases, DTG curve of pulverized coal moves to low temperature zone and the ignition and burnout temperature decrease. In addition, the burnout time of coal is shortened and the combustion characteristic index increases with oxygen content. Conclusion can be drawn is that the O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion characteristics can be improved by enriching oxygen content.

**KEY WORDS:** O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere; combustion characteristics; thermo-gravimetric analysis; oxygen volume content

**摘要:** O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧技术是一种可分离回收CO<sub>2</sub>的新型燃烧技术,其燃烧机理与常规空气气氛燃烧存在着较大的差异。为此,该文在热重分析仪上进行了模拟空气气氛及不同O<sub>2</sub>浓度( $\varphi(\text{O}_2)=21\%、30\%、40\%、80\%$ )的O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下3种不同品质煤粉(龙岩无烟煤、贵州烟煤、元宝山褐煤)的燃烧特性试验,确定了3种煤粉的燃烧特征参数及综合燃烧性

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划基金项目(2006CB705806); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX07B\_091Z); 东南大学优秀博士学位论文基金项目。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2006CB705806).

能指数。试验结果表明, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉的燃烧分布曲线与O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>气氛下有明显不同,相同O<sub>2</sub>浓度的条件下, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉燃烧速率低,燃尽时间长。在O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下随着O<sub>2</sub>浓度的增加,燃烧DTG曲线向低温区偏移,着火温度及燃尽温度降低,燃尽时间缩短,煤粉综合燃烧特性指数增大,表明提高O<sub>2</sub>浓度可改善O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉的燃烧特性。

**关键词:** O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛; 燃烧特性; 热重分析; 氧浓度

## 0 引言

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧技术是一种既能直接获得高浓度CO<sub>2</sub>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<sup>[1-6]</sup>。该方法利用空气分离获得的O<sub>2</sub>和部分循环烟气的混合物来代替空气并与燃料组织燃烧,从而提高排烟中CO<sub>2</sub>的浓度。其原理示意图如图1所示。

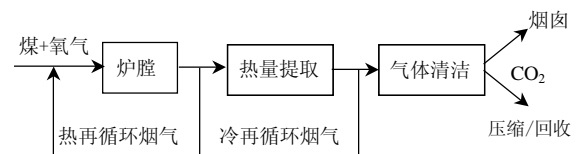


图1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion technology

在O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉燃烧受环境气氛的影响较大, KIMURA.N<sup>[7]</sup>用小型试验台研究发现O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉火焰不稳定且颜色发黑,与空气气氛下燃烧相比, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉燃烧未燃尽碳含量较高。为了研究O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉的燃烧特性, Kiga.T<sup>[8]</sup>在微重力燃烧试验台上进行了煤粉火焰传播速度的测试,发现O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下火焰的传播速度

明显低于在O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>/Ar气氛下,提高O<sub>2</sub>浓度可使其有所改善。Liu H<sup>[9-10]</sup>及Klas A<sup>[11]</sup>等研究发现将氧体积浓度提高至30%左右可获得与空气气氛下相当的燃烧特性。因此,深入了解和掌握O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉的燃烧特性,将成为燃烧设备的设计以及改善燃烧过程的必要前提。

近年来,热分析技术已成为研究煤反应性能的重要工具<sup>[12-15]</sup>。本文借助热重分析仪研究了O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉的燃烧特性,确定了其燃烧特性指数并分析了氧浓度对不同煤种着火及燃尽的影响。

## 1 试验设备及样品

试验采用法国SETARAM公司生产的TGA92型常压热重-差热分析仪。仪器温度范围:室温~1600℃,温度精度±2℃,升温速率范围:0.01~99.99℃/min。

热分析程序为:升温速率为30℃/min,从室温升温至1100℃,样品重量约为10mg,炉内气氛为O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>及O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>的混合气体,总气量为80mL/min。

试验选用3种不同品质的煤样,分别为龙岩无烟煤、贵州烟煤和元宝山褐煤,粒径<135μm,煤质分析结果见表1。

表1 煤样的元素分析与工业分析

Tab. 1 Ultimate and proximate analysis of coal samples

煤种	元素分析 w/%					工业分析 w/%				
	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	V <sub>daf</sub>	A <sub>ad</sub>	M <sub>ad</sub>	
龙岩无烟煤	55.65	1.31	0.23	0.52	2.74	54.43	9.96	38.23	1.32	
贵州烟煤	61.46	3.57	3.04	0.70	4.26	49.68	31.95	25.52	1.46	
元宝山褐煤	33.57	2.51	10.03	0.23	2.15	25.62	47.16	46.27	5.25	

## 2 试验结果及分析

### 2.1 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下燃烧失重曲线分析

TG曲线反映了试样在升温过程中试样质量随温度(时间)变化的情况,而DTG曲线则是由TG曲线计算得出的试样的瞬时失重率,反映了试验煤样在某一时刻发生分解、燃烧而导致失重的剧烈程度。

图2、图3及图4为3种煤样的DTG曲线。从图中可以看出,煤样的失重基本可分为:水分的析出、挥发分析出燃烧、残焦的燃烧及燃尽4个阶段。表2为不同O<sub>2</sub>浓度下的各煤样的燃烧特征参数。从中可以看出,与模拟空气气氛相比,在相同O<sub>2</sub>浓度的O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下,煤样挥发分及残焦的燃烧明显滞后于前者,试样在各时刻的失重率及最大失重率均小于O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>气氛下,燃尽温度升高,燃尽时间明显延

长,这说明高浓度CO<sub>2</sub>的存在改变了煤焦的燃烧特性,仅仅用CO<sub>2</sub>取代N<sub>2</sub>不利于煤焦的燃烧及燃尽<sup>[7-8]</sup>。

从试验结果可以看出,在O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下,随着O<sub>2</sub>浓度的增加,DTG曲线向低温区发生明显的偏移,且煤样燃烧最大失重率显著加快,这说明提高O<sub>2</sub>浓度可改善煤中易燃物质在O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下的整体分解及燃烧速率,缩短煤样从开始着火到燃尽所需的时间,使煤的反应活性得到改善<sup>[16]</sup>。

在模拟空气气氛及较低O<sub>2</sub>浓度的O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下,挥发分含量较低的无烟煤和烟煤的燃烧过程中,挥发分的燃烧过程与残焦的燃烧具有明显的分界,表现为DTG曲线上存在2个不同的失重峰。但随着O<sub>2</sub>浓度增加,残焦的燃烧与挥发分燃烧阶段的分界逐渐变的模糊。其主要在于高浓度的氧气使得煤中易燃物质的分解燃烧更加剧烈,为残焦的燃烧提供了良好的着火及燃烧条件。

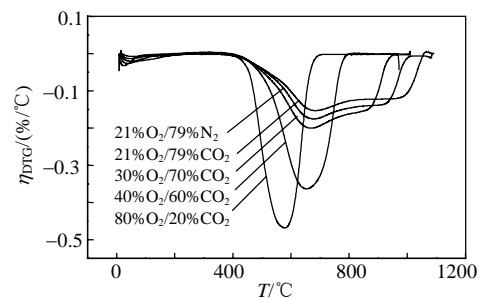


图2 龙岩无烟煤在不同氧体积浓度下的DTG曲线  
Fig. 2 DTG curves of Longyan anthracite coal

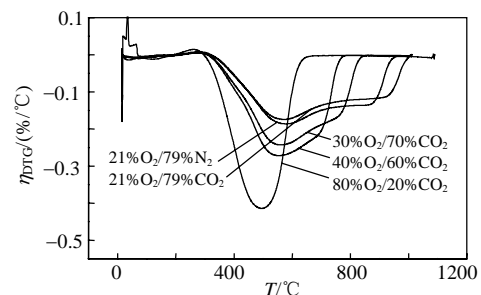


图3 贵州烟煤在不同氧体积浓度下的DTG曲线  
Fig. 3 DTG curves of Guizhou bituminous coal

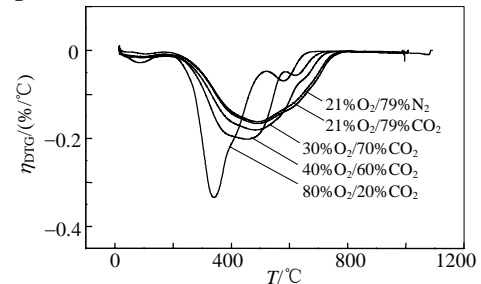


图4 元宝山褐煤在不同氧体积浓度下的DTG曲线  
Fig. 4 DTG curves of Yuanbaoshan lignite coal

表 2 煤样燃烧特征参数

Tab. 2 Combustion characteristic parameters of coal

燃烧特征参数	煤种	21% $O_2$ /79% $N_2$	21% $O_2$ /79% $CO_2$	30% $O_2$ /70% $CO_2$	40% $O_2$ /60% $CO_2$	80% $O_2$ /20% $CO_2$
最大失重率/ (%/°C)	龙岩无烟煤	-0.175 6	-0.153 4	-0.200 1	-0.363 3	-0.468 6
	贵州烟煤	-0.186 6	-0.174 3	-0.242 9	-0.271 9	-0.414 1
	元宝山褐煤	-0.166 1	-0.161 8	-0.180 8	-0.201 2	-0.334 2
最大失重 温度/°C	龙岩无烟煤	678.13	683.4	670.67	654.4	577.97
	贵州烟煤	578.57	570.73	560.13	551.33	495.17
	元宝山褐煤	489.5	489.6	481.77	448.53	341.93
平均失重率/ (%/°C)	龙岩无烟煤	0.077 46	0.065 56	0.086 68	0.153 72	0.205 95
	贵州烟煤	0.080 02	0.070 97	0.104 18	0.120 65	0.170 86
	元宝山褐煤	0.065 69	0.063 62	0.069 03	0.064 38	0.078 46

### 2.2 氧浓度对 $O_2/CO_2$ 气氛下煤粉着火温度及燃尽温度的影响

着火温度、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有着重要的指导意义；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。

煤粉燃烧试验中确定着火点及燃尽点的方法有多种<sup>[17]</sup>，本文着火温度的确定采用较常用的 TG-DTG 法，如图 5 所示，即在 DTG 曲线上过峰值作垂线交 TG 曲线于一点 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平直线于一点 C，则 C 点对应的温度定义为着火温度  $T_i$ 。而燃尽温度  $T_b$  定义为试样失重占总失重 99% 时对应的温度。

图 6、图 7 为煤样在  $O_2/N_2$  气氛和  $O_2/CO_2$  气氛下的着火温度和燃尽温度随  $O_2$  浓度的变化曲线。从图中可以看出，3 种不同品质的煤样的燃烧过程中，21%  $O_2/79\%CO_2$  气氛下的着火温度与 21%  $O_2/79\%N_2$  气氛下着火温度基本相当，而在  $O_2/CO_2$  气氛下燃尽温度明显高于后者。试验结果表明以  $CO_2$  取代  $N_2$  参与燃烧过程对煤样挥发分的初始析出及着火影响较小，但高浓度  $CO_2$  的存在将导致试样燃尽温度大为提高，不利于煤焦的燃烧及燃尽。

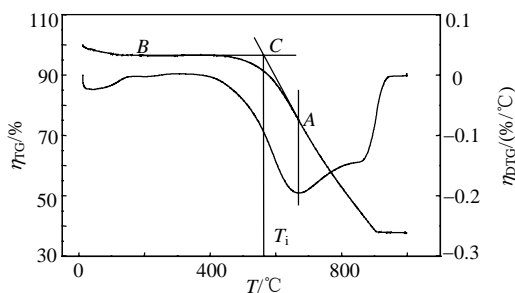


图 5 着火温度的确定  
Fig. 5 Determine of  $T_i$

在  $O_2/CO_2$  气氛下，随着  $O_2$  浓度的增加，3 种煤

样的着火温度、燃尽温度均呈现下降趋势，但着火温度的降低较为平缓，而燃尽温度存在较大幅度的下降。该结果表明  $O_2$  浓度的变化对  $O_2/CO_2$  气氛下挥发分的初始析出及着火燃烧影响较小<sup>[18]</sup>，但随着  $O_2$  浓度的增加可大大降低残焦的燃尽温度，使得煤样的燃烧过程可在较低的温度区域内完成，其将有利于残焦的燃烧及燃尽，即高  $O_2$  浓度存在的  $O_2/CO_2$  条件下，相对较低的温度即可达到煤粉稳定燃烧的条件<sup>[9-11]</sup>。

图 8 为煤样的燃尽时间随  $O_2$  浓度的变化曲线。从图 7 和 8 可以看出，在  $O_2$  体积浓度为 21%~40% 的范围内，随着  $O_2$  浓度的增加，龙岩无烟煤、贵州烟煤的燃尽温度明显降低，燃尽时间大为缩短，

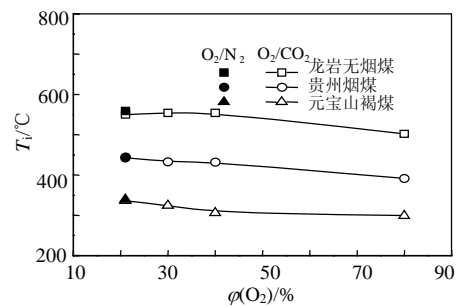


图 6 氧浓度对 3 种煤着火温度的影响  
Fig. 6 Relation between  $T_i$  with oxygen content for the coal

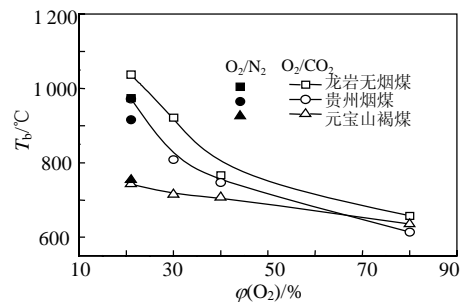


图 7 氧浓度对 3 种煤燃尽温度的影响  
Fig. 7 Relation between  $T_b$  with oxygen content for the coal

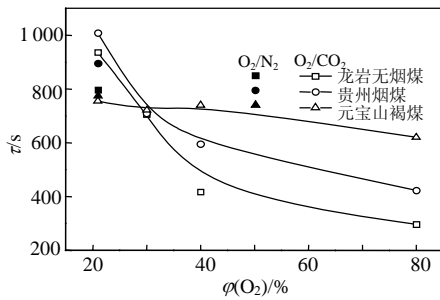


图8 氧浓度对3种煤燃尽时间的影响  
Fig. 8 Relation between burning out time with oxygen content for the coal

其后则随着 $O_2$ 浓度的变化趋于平缓。说明 $O_2$ 浓度的增加改善了 $O_2/CO_2$ 气氛下煤样的燃烧过程，整体燃烧速率提高，燃尽时间降低。元宝山褐煤由于挥发分含量较高，煤样整体燃烧速率受试样中易燃物质化学动力控制较大，在满足化学反应当量的条件下，提高 $O_2$ 浓度对整体反应的影响较小，燃尽时间的变化趋于平缓。

以上试验可知， $O_2/CO_2$ 气氛下煤焦的燃烧及燃尽过程与 $O_2/N_2$ 气氛下有明显不同。煤焦的燃烧速率以 $n$ 级Arrhenius模型可表示为

$$q = k_s (T_p)^n P_{O_2, s}^n \quad (1)$$

式中： $k_s$ 为反应速率常数，即 $k_s(T_p) = A \exp(-E/RT_p)$ ； $n$ 为反应级数； $T_p$ 为颗粒温度； $A$ 为指前因子， $\text{min}^{-1}$ ； $E$ 为活化能， $\text{kJ/mol}$ ； $R$ 为气体反应常数， $8.314 \times 10^{-3} \text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

通常，颗粒燃烧进展的快慢受可燃物的活性、燃烧热的释放及环境气氛热容等的影响，由于 $CO_2$ 气体本身的特性致使 $O_2/CO_2$ 气氛的密度、比热、辐射特性及物质的传输较 $O_2/N_2$ 气氛下有显著的差别。在 $O_2/CO_2$ 气氛下，颗粒的燃烧温度、挥发分析出及产物的扩散速率较 $O_2/N_2$ 气氛下燃烧时明显降低。由煤焦的燃烧速率公式可知， $O_2/CO_2$ 气氛下较低的颗粒温度导致了其燃烧速率较 $O_2/N_2$ 气氛下燃烧时缓慢，燃烧时间延长，但该影响在随着 $O_2$ 浓度的提高可有所缓解( $O_2$ 的质量比热容与 $N_2$ 较为接近)<sup>[18-19]</sup>。

另外， $O_2/CO_2$ 气氛煤粉燃烧的主要代价在于空分制氧成本上的消耗，提高 $O_2$ 浓度虽然可以大幅度改善煤的燃烧过程，降低燃尽温度、缩短燃尽时间和提高残焦的燃尽率，但过高的 $O_2$ 浓度将使得 $O_2/CO_2$ 气氛燃煤电站的运行成本大大增加，因此，不少研究者提出的工程实际中以30% $O_2$ 浓度来改善 $O_2/CO_2$ 气氛下煤粉的燃烧过程是合理的<sup>[9-11]</sup>。

### 2.3 氧浓度对 $O_2/CO_2$ 气氛下煤粉综合燃烧指数的影响

定义燃料燃烧特性的方法有多种，为全面评价煤粉的燃烧特性，本文采用文献[17]提出的煤粉燃烧特性的综合判别指标 $S$ 对试样的燃烧进行了描述。

$$S = \frac{R}{E} \cdot \frac{d}{dT} \left( \frac{dW}{dt} \right)_{T=T_i} \cdot \frac{(dW/dt)_{\max}}{(dW/dt)_{T=T_i}} \cdot \frac{(dW/dt)_{\text{mean}}}{T_b} = \frac{(dW/dt)_{\max} (dW/dt)_{\text{mean}}}{T_1^2 T_b} \quad (2)$$

式中： $(dW/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速度； $(dW/dt)_{T=T_i}$ 为着火温度下的燃烧速度； $(dW/dt)_{\text{mean}}$ 为平均燃烧速度； $T_b$ 为燃尽温度； $T_1$ 为着火温度。

式(2)右侧可作如下解释： $R/E$ 表示煤的活性， $E$ 值越小反应能力越高； $(d/dT)(dW/dt)_{T=T_i}$ 为燃烧速度在着火点的转化率，其值越大表明着火越猛烈； $[(dW/dt)_{\max}]/[(dW/dt)_{T=T_i}]$ 为燃烧速度峰值与着火时的燃烧速度之比； $(dW/dt)_{\text{mean}}/T_b$ 为平均燃烧速度与燃尽温度之比，其值越大表明燃尽越快。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。

图9为根据本试验数据求出的3种煤的综合燃烧特性指数 $S$ 随燃烧气氛及气氛中 $O_2$ 浓度的变化关系。由图可知，21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下的燃烧特性指数较相同 $O_2$ 浓度的 $O_2/N_2$ 气氛下的燃烧特性指数低，但随着 $O_2$ 浓度的提高，3种煤在 $O_2/CO_2$ 气氛下的燃烧特性指数均有不同程度的增加，其中以无烟煤和烟煤的增加较为显著，主要为高的 $O_2$ 浓度改善了残焦的燃烧过程。

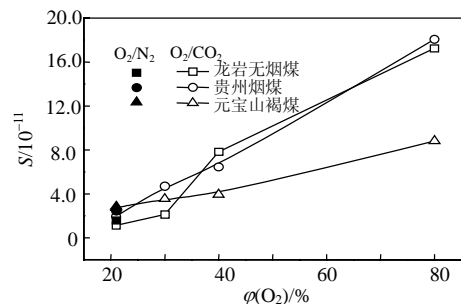


图9 氧浓度对综合燃烧特性指数的影响  
Fig. 9 Relation between combustion characteristic index with oxygen content

### 3 结论

(1) O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉的燃烧过程与 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 气氛下的燃烧过程存在较为明显的差异, 相同 O<sub>2</sub> 浓度的 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉着火及燃尽延迟, 燃烧速率较低, 燃尽温度高, 综合燃烧指数低。

(2) 在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下, 随着 O<sub>2</sub> 浓度的增加, 煤粉的着火和燃尽温度均降低。其中, 着火温度变化平缓, 燃尽温度下降较为显著, 表明提高 O<sub>2</sub> 浓度对 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉的燃烧特性的影响主要表现在对残焦燃尽过程的改善, 使煤样整体燃烧速率加快, 燃尽过程缩短, 但 O<sub>2</sub> 浓度超过 40% 后对残焦燃尽过程的改善趋于缓慢。考虑成本, 30% 的 O<sub>2</sub> 浓度较适于工程实际。

(3) 随着 O<sub>2</sub> 浓度的增加, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉综合燃烧特性指数均提高, 但不同煤种的增加程度有所不同。由于提高 O<sub>2</sub> 浓度对煤焦燃尽的改善较为明显, 故无烟煤和烟煤的燃烧特性指数随 O<sub>2</sub> 浓度的变化较为显著。

## 参考文献

- [1] Goldthorpe S H, Cross P J, Davison J E. System studies on CO<sub>2</sub> abatement from power plant[J]. *Energy Convers Mgmt*, 1992, 33(5-8): 459-466.
- [2] Nakayama S, Noguchi Y. Pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures on a power plant for CO<sub>2</sub> recovery[J]. *Energy Convers Mgmt*, 1992, 33(5-8): 379-386.
- [3] Yamada T, Kiga T, Okawa M. Characteristics of pulverized-coal combustion in CO<sub>2</sub> recovery power plant applied O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> [J]. *JSME International Journal*, 1998, 41(4): 1017-1022.
- [4] Tan Yewen, Croiset E, Douglas Mark A, et al. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas [J]. *Fuel*, 2006, 85(4): 507-512.
- [5] Klas A, Filip J. Process evaluation of an 865MWe lignite fired O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> power plant [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(18-19): 3487-3498.
- [6] Chen Jyherng, Liu Zhenshu, Huang Jiansheng. Emission characteristics of coal combustion in different O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/RFG atmosphere[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(1-2): 266-271.
- [7] Kimura N, Omata K, Kiga T, et al. The characteristics of pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures for CO<sub>2</sub> recovery [J]. *Energy Convers Mgmt*, 1995, 36(6-9): 805-808.
- [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 Convers Mgmt*, 1997, 38(Suppl): 129-134.
- [9] Liu H, Ramlan Z, Bernard M G. Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>[J]. *Fuel*, 2005, 84(7-8): 833-840.
- [10] Liu H, Ramlan Z, Bernard M G. Pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures with NO<sub>x</sub> recycle[J]. *Fuel*, 2005, 84(16): 2109-2115.
- [11] Klas A, Filip J. Flame and radiation characteristics of gas-fired O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> combustion [J]. *Fuel*, 2007, 86(5-6): 656-668.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 煤粉颗粒粒度对燃烧特性影响热分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(12): 142-145.  
Jiang Xiumin, Yang Haiping, Liu Hui, et al. Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(12): 142-145(in Chinese).
- [14] 刘彦, 周俊虎, 方磊, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 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 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 224-228(in Chinese).
- [15] 樊越胜, 邹峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(24): 118-121.  
Fan Yueheng, Zou Zheng, Gao Jubao, et al. Study of oxygen content on combustion characteristics of pulverized coal[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(24): 118-121(in Chinese).
- [16] 许晋源, 徐通模. 燃烧学[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [17] 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.
- [18] Molina A, Shaddix C R. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 21(2): 1905-1912.
- [19] Murphy J, Shaddix C R. Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(4): 710-729.

收稿日期: 2007-06-03。

作者简介:

李庆钊(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 煤燃烧及污染物控制方面的研究, qingzhaolee@sohu.com;

赵长遂(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤燃烧、气化及燃煤大气污染防治方面的研究。

(编辑 王庆霞)