

文章编号: 0253-2409(2013)01-0033-07

## 两相流中煤粉的燃烧机理及动力学特征

李振钢, 郭占成, 唐惠庆

(北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 利用微型流化床动力学分析仪研究了两相流条件下无烟煤粉的燃烧反应机理和动力学特征, 并与热重法所得结果进行比较分析。结果表明, 当温度大于 850 °C 时, 煤粉燃烧机理发生了变化, 燃烧气态产物的生成比例也随之改变; 当气速大于 0.10 m/s 时, 气体扩散限制基本被消除, 煤粉燃烧反应速率主要受界面化学反应控制; 煤粉燃烧反应速率随着氧气分压的增大呈幂函数形式增长, 且氧气分压对煤粉静置燃烧的影响更加显著。煤氧两相流燃烧的表观活化能与静置燃烧相比降低了 49 kJ/mol, 相同温度条件下两相流燃烧的界面化学反应阻力也明显小于热重法测试结果。

**关键词:** 两相流; 煤粉; 氧浓度; 燃烧机理; 动力学

**中图分类号:** TQ534 **文献标识码:** A

## Mechanism and kinetic characteristics of pulverized coal combustion in two phase flow

LI Zhen-gang, GUO Zhan-cheng, TANG Hui-qing

(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The combustion reaction mechanism and kinetic characteristics of pulverized anthracite coal in two phase flow were studied by micro fluidized bed kinetic analyzer, and compared with those by thermogravimetry method. The results show that the combustion reaction mechanism of pulverized coal and the composition of combustion gas product change when the temperature exceeds 850 °C. When the flow rate exceeds 0.10 m/s, the effect of gas diffusion is eliminated basically, and the combustion reaction rate of pulverized coal is mainly controlled by the interface reaction. The combustion reaction rate of pulverized coal increases in a power function form with oxygen partial pressure, and the influence of oxygen partial pressure on the static combustion is more remarkable. The apparent activation energy of pulverized coal combustion in two phase flow decreases by 49 kJ/mol compared with that of static combustion, and the interfacial chemical reaction resistance of pulverized coal combustion in two phase flow is also much smaller than the results by thermogravimetry method at the same temperature.

**Key words:** two phase flow; pulverized coal; oxygen concentration; combustion mechanism; kinetics

近年来,由温室效应引起的全球气候变化日益明显,能源和环境的可持续发展面临严峻挑战。因此,如何减少温室气体排放、提高能源利用效率成为世界各国关注的焦点。二氧化碳捕集与封存技术(CCS)<sup>[1,2]</sup>是一项减少大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的有效措施,中国以煤炭为主的能源结构也使该技术呈现出广阔的应用前景,如富氧燃烧发电技术<sup>[3]</sup>、炉顶煤气循环—氧气鼓风高炉炼铁工艺<sup>[4]</sup>等。随着 CCS 技术发展的需求,煤氧燃烧的研究重点也逐渐向富氧和纯氧方向发展。因此,了解不同氧浓度条件下煤粉燃烧过程的变化规律及动力学特征,对 CCS 技术在发电、冶金等领域的应用具有重要的指导意义。目前,煤粉燃烧动力学参数的测定方法主要有热重

分析仪<sup>[5,6]</sup>、丝网反应器<sup>[7]</sup>、滴管炉<sup>[8,9]</sup>等。本实验采用微型流化床动力学分析仪<sup>[10]</sup>,研究氧浓度对无烟煤粉燃烧动力学特征的影响。由于煤氧燃烧反应是在两相流中进行,因此,在一定程度上削弱了气体外扩散的限制,且通过质谱分析可在线检测气态产物浓度,为描述实际煤粉燃烧机理和反应动力学提供了可靠依据。

### 1 实验部分

#### 1.1 实验原料

实验煤样选用内蒙古无烟煤(新兴铸管股份有限公司 2672 厂区用煤),煤样颗粒粒径为 74 ~ 58 μm,其工业分析和元素分析见表 1。

#### 1.2 实验方法

收稿日期: 2012-06-02; 修回日期: 2012-08-08。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划,2012CB720401); 国家科技支撑计划(2011BAC01B02)。

联系作者: 郭占成, Tel: 010-82375042, E-mail: zcguo@metall.ustb.edu.cn。

### 1.2.1 微型流化床实验

采用微型流化床反应动力学分析仪(MFBKA: Micro Fluidized Bed Kinetic Analyzer, 中国科学院过程工程研究所)研究煤粉在气固两相流中的燃烧行为和动力学特征。MFBKA的系统结构示意图见图1,其中,流化床反应器工作段高为135 mm,内径为25 mm。向石英管反应器内装入4 g流化介质(酸洗石英砂,粒径为100~150 μm),静置床层高度为10 mm,然后称取(6±0.1) mg样品置于进样管末端,固定好连接后启动升温,同时由反应器下方通入氩氧混合气,气体流量为600 mL/min,保证石英砂处于流化状态。当混合气经预热并达到设定温度

时,开启气体脉冲阀,使冷态物料瞬时供入流化态的高温石英砂中,反应的气态产物由反应器上方经净化后进入过程质谱仪(LCD-200型,美国AMETEK公司)进行在线检测。

表1 煤样的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal samples

Proximate analysis $w_{ad}/\%$				Ultimate analysis $w_{ad}/\%$				
<i>M</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	FC	C	H	N	S	O
0.45	10.77	11.49	77.29	80.61	3.58	1.28	0.36	2.95

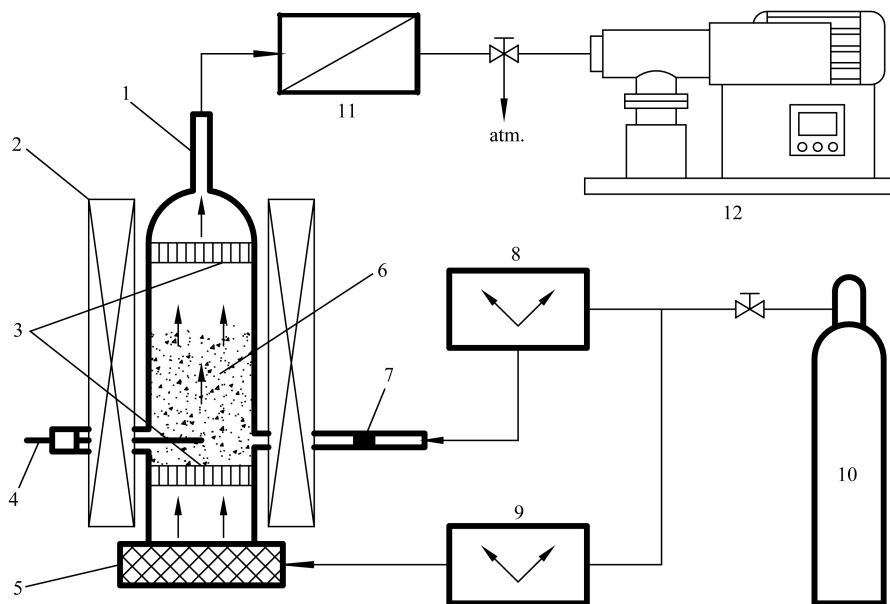


图1 微型流化床动力学分析仪系统结构示意图

Figure 1 Structure schematic diagram of MFBKA system

1: quartz tubular reactor; 2: heating furnace; 3: air distribution plate; 4: thermocouple;  
5: pre-heating of fluidized gas; 6: fluidizing medium (quartz sand); 7: sample;

8: compressed gas controller; 9: mass flow meter; 10: gas cylinder; 11: gas filter; 12: process mass spectrometer

### 1.2.2 热重实验

通过同步热分析仪(STA PT 1600型,德国LINSEIS公司)测定不同氧浓度条件下煤粉燃烧过程的TG曲线。实验样品质量为(15±0.2) mg,反应器内径为30 mm,气体流量为100 mL/min,以20 °C/min的升温速率由室温升至1 000 °C。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤氧两相流燃烧的影响因素

#### 2.1.1 温度对煤粉燃烧反应的影响

图2为纯氧条件下温度对CO和CO<sub>2</sub>浓度变化的影响。由图2可知,随着温度的升高,煤粉燃烧反

应速率不断加快,其中,CO浓度峰值的出现时间明显提前;当温度高于850 °C时,CO<sub>2</sub>的浓度峰值急剧增加,而CO的浓度峰值反而下降,这主要是因为煤粉燃烧机理发生了变化。

根据相关文献<sup>[11]</sup>可知,当温度低于800 °C时,煤粉燃烧反应的化学方程式为:



而当温度为800~1 200 °C时,式(1)反应产生的CO还将进一步与氧气反应生成CO<sub>2</sub>:



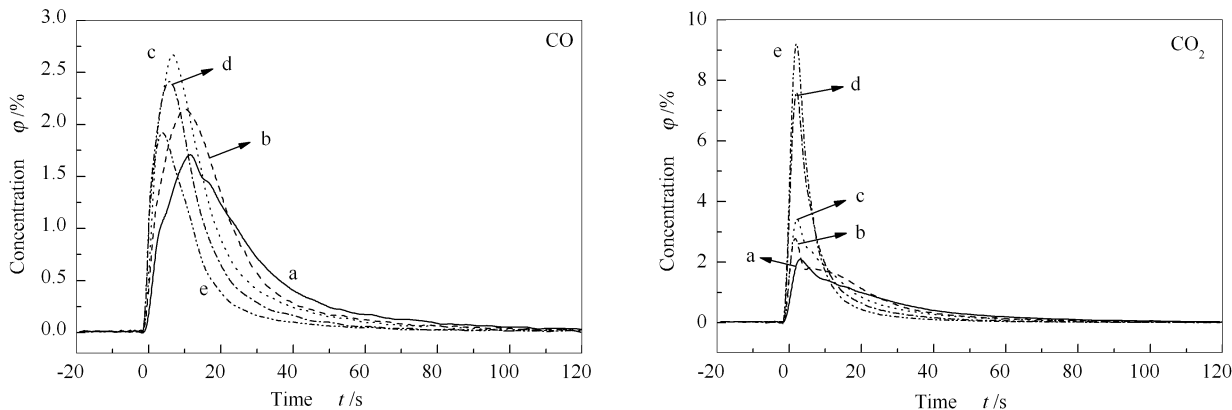


图 2 纯氧条件下温度对 CO 和 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

Figure 2 Effect of temperature on variation of CO and CO<sub>2</sub> concentration at pure oxygen condition  
a: 750 °C; b: 800 °C; c: 850 °C; d: 900 °C; e: 950 °C

图 3 为燃烧气态产物总产量随温度的变化。由图 3 可知,在 750 ~ 850 °C,CO 和 CO<sub>2</sub> 基本按 1:1 比例生成,而当温度高于 850 °C 时,式(2)反应所引起的产物浓度变化逐渐突显,即煤粉燃烧反应更加充分。

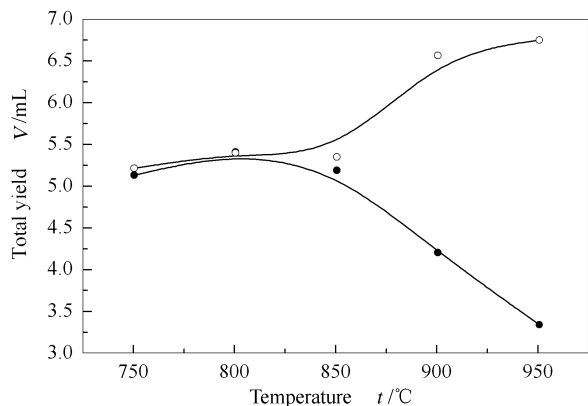


图 3 燃烧气态产物总产量随温度的变化

Figure 3 Variation of the total yield of gaseous combustion products with temperature  
●: CO; ○: CO<sub>2</sub>

### 2.1.2 气速对煤粉燃烧反应的影响

在两相流条件下,一方面,随着气速的增大,氧气向煤粉颗粒界面的扩散速率及燃烧气态产物 CO 和 CO<sub>2</sub> 的排移速率增加,导致燃烧反应速率加快;另一方面,流化气速的增大也会加重石英砂介质对煤粉颗粒的磨蚀,使颗粒表面的灰层脱落,灰层扩散阻力减小,燃烧反应速率加快。但当煤粉粒径较小(小于 74 μm)时,灰层阻力对煤粉燃烧速率的影响可以忽略。图 4 为不同温度条件下燃尽时间随气速的变化。由图 4 可知,随着气速的增大,煤粉燃尽时间逐渐缩短,反应速率不断加快。当气速大于 0.10 m/s 时,各温度下燃尽时间的递减趋势开始减

缓,燃烧反应速率的增幅也不再明显,说明该条件下气体外扩散对煤粉燃烧过程的限制已基本消除。

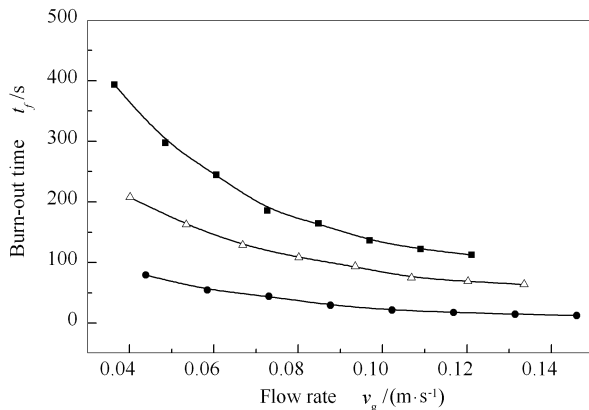


图 4 不同温度条件下燃尽时间随气速的变化  
Figure 4 Variation of burn-out time with flow rate at different temperatures

■: 700 °C; △: 800 °C; ●: 900 °C

### 2.1.3 氧浓度对煤粉燃烧反应的影响

图 5 为 900 °C 时氧浓度对 CO 和 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。由图 5 可知,当氧浓度较低时,CO 和 CO<sub>2</sub> 的浓度曲线均呈现双峰。这是由于实验煤样随脉冲气流进入燃烧室后,煤粉与氧气的瞬时浓度比急剧增大,同时,未燃烧煤粉颗粒周围的 CO 和 CO<sub>2</sub> 浓度迅速升高也使得燃烧反应速率降低。而随着流化气体的持续鼓入以及气态燃烧产物的排移,煤粉颗粒再次与氧气接触并发生燃烧反应。当氧浓度较高时,煤粉与氧气的瞬时浓度比相对较小,燃烧反应更加充分集中,因此,CO 和 CO<sub>2</sub> 的浓度曲线逐渐向单峰发展。

## 2.2 煤氧燃烧动力学分析

### 2.2.1 煤氧两相流燃烧等温动力学分析

定义煤氧两相流燃烧反应转化率<sup>[12]</sup>为:

$$x = \frac{\int_0^t (\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2}) dt}{\int_0^{t_f} (\varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CO}_2}) dt} \quad (3)$$

式中,  $x$  为煤粉燃烧反应转化率;  $t$  和  $t_f$  分别为煤粉燃烧反应的任意时刻和燃尽时刻, s;  $\varphi_{\text{CO}}$  和  $\varphi_{\text{CO}_2}$

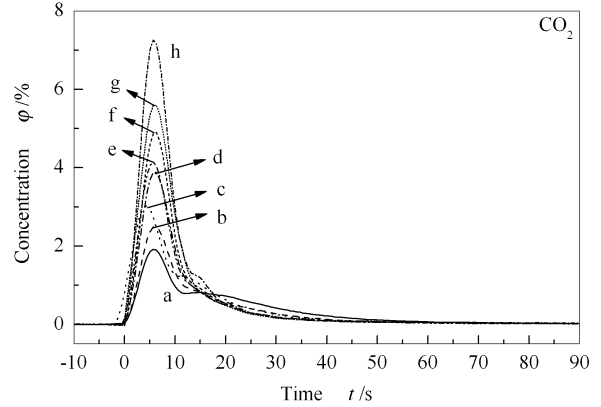
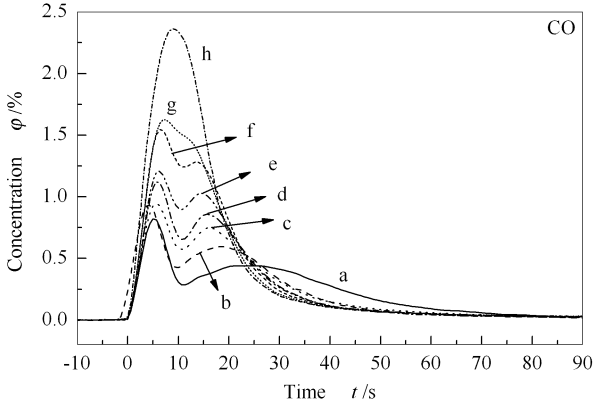


图5 900 °C时氧浓度对CO和CO<sub>2</sub>浓度的影响

Figure 5 Effect of oxygen concentration on variation of CO and CO<sub>2</sub> concentration at temperature 900 °C

a: 21%; b: 30%; c: 40%; d: 50%; e: 60%; f: 70%; g: 80%; h: 100%

式中,  $dx/dt$  为煤粉燃烧反应速率;  $k(T)$  为反应速率常数;  $f(x)$  为反应机理函数, 在求解煤粉燃烧动力学参数时, 通常假设机理函数符合反应级数模型  $f(x) = (1-x)^n$  [13], 而对于无烟煤粉燃烧反应, 可近似看作一级反应 ( $n=1$ );  $f(p_{\text{O}_2})$  为与氧气分压有关的函数;  $A$  为指前因子,  $1/(s \cdot \text{kPa}^m)$ ;  $E_a$  为煤粉燃烧反应表观活化能,  $\text{kJ/mol}$ ;  $R$  为普适气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ 。

根据 Smith 提出的煤焦燃烧反应经典模型 [14] 可知, 在消除传质和孔扩散影响后,  $f(p_{\text{O}_2}) = p_{\text{O}_2}^m$ 。在煤粉燃烧过程中总压  $p_{\text{total}}$  恒定, 则氧气分压  $p_{\text{O}_2}$  与氧气体积分数之间的关系为:

$$p_{\text{O}_2} = \frac{p_{\text{total}} \cdot \varphi_{\text{O}_2}}{100} \quad (5)$$

对式(4)分离变量并积分得:

$$-\ln(1-x) = k(T) \cdot p_{\text{O}_2}^m \cdot t \quad (6)$$

设  $f(T, p_{\text{O}_2}) = k(T) \cdot p_{\text{O}_2}^m$ , 当温度和氧浓度恒定时,  $f(T, p_{\text{O}_2})$  为常数, 则  $-\ln(1-x)$  与  $t$  呈线性关系。对  $-\ln(1-x) \sim t$  进行线性拟合可得不同温度、不同氧浓度条件下的  $f(T, p_{\text{O}_2})$  值。由于指前因子和活化能是物质的一种固有特性, 因此, 在一定温度和氧浓度范围内  $A$  和  $E_a$  为定值。对  $f(T, p_{\text{O}_2}) = k(T) \cdot p_{\text{O}_2}^m$  两边取对数得:

$$\ln f(T, p_{\text{O}_2}) = \ln k(T) + m \ln p_{\text{O}_2} = \ln A - \frac{E_a}{RT} +$$

分别为任意时刻的 CO 和 CO<sub>2</sub> 体积分数, %。在等温条件下, 煤粉燃烧动力学方程可以表示为:

$$\frac{dx}{dt} = k(T) f(x) f(p_{\text{O}_2}) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(x) f(p_{\text{O}_2}) \quad (4)$$

$$m \ln p_{\text{O}_2} \quad (7)$$

将实验数据代入式(7)进行二元一次回归分析 ( $x$  取 0.1 ~ 0.9), 分析结果见表 2。

表2 煤氧两相流燃烧等温动力学参数

Table 2 Isothermal kinetic parameters of pulverized coal combustion in the two phase flow

$A / (s \cdot \text{kPa}^m)^{-1}$	$E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$m$	$R^2$
110.60	85	0.39	0.9679

### 2.2.2 热重法非等温动力学分析

图6为氧浓度对煤粉燃烧反应TG曲线的影响。由图6可知, 随着氧浓度的增加, 煤粉燃烧反应速率加快, 着火温度和燃尽温度逐渐降低, 反应初期由于煤中官能团氧化而引起的增重, 也随着氧浓度的增加而增加。当氧浓度大于60%时, 煤粉燃烧反应后期的失重速率突然降低, 且氧浓度越高, 失重速率降低越明显。这是由于富氧条件下煤粉的成焦过程变得更加剧烈迅速, 致使生成的产物半焦热稳定性增加, 反应性变差。此外, 随着氧浓度的增大, 燃烧半焦产量也逐渐减少。这是因为在剧烈的氧化环境下, 煤中大分子结构的化学键断裂后还未来得及发生缩聚反应, 就先一步与氧分子结合生成了气态产物。

定义煤氧静置燃烧反应转化率 [15] 为:

$$x = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_f} \quad (8)$$



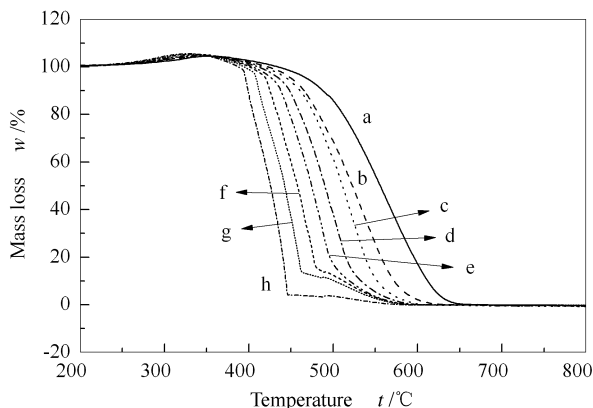


图 6 氧浓度对煤粉燃烧反应 TG 曲线的影响  
Figure 6 Effect of oxygen concentration on TG curve of pulverized coal combustion reaction  
a: 21%; b: 30%; c: 40%; d: 50%;  
e: 60%; f: 70%; g: 80%; h: 100%

式中,  $x$  为煤粉燃烧反应转化率;  $W_0$ 、 $W_f$  和  $W$  分别为初始样品质量、反应结束时样品质量和任意反应时刻样品质量,  $g$ 。在程序升温过程中, 温度随时间的变化关系为:

$$dT = \beta \cdot dt \tag{9}$$

联立式(4)和式(9)可得非等温条件下的煤粉燃烧动力学方程:

$$\frac{dx}{dT} = \frac{1}{\beta} k(T) f(x) f(p_{O_2}) = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot (1-x) \cdot p_{O_2} \tag{10}$$

式中,  $dx/dT$  为煤粉燃烧反应速率;  $\beta$  为升温速率,  $^{\circ}C/s$ 。对式(10)分离变量并积分, 温度积分取 Coats-Redfern 近似<sup>[16]</sup>, 得:

$$\ln\left[\frac{-\ln(1-x)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{E_a}{RT} + m \ln p_{O_2} \tag{11}$$

由于对一般反应温度区和大部分的  $E_a$  值而言,  $E_a/RT \gg 1$ ,  $(1-2RT/E_a) \approx 1$ , 所以方程右端第一项为常数。将实验数据代入式(11)进行二元一次回归分析( $x$  取 0.1 ~ 0.9), 分析结果见表 3。

表 3 热重法煤氧燃烧非等温动力学参数  
Table 3 Non-isothermal kinetic parameters of pulverized coal combustion in TGA

$A / (s \cdot kPa^m)^{-1}$	$E_a / (kJ \cdot mol^{-1})$	$m$	$R^2$
791.98	134	2.45	0.9544

### 2.2.3 微型流化床法和热重法的比较

在两相流条件下, 煤粉颗粒与氧气的相对运动

加速了燃烧反应的传质和传热过程, 气体扩散对反应速率的限制基本被消除。利用微型流化床法测得的表观活化能与热重法相比降低了 49 kJ/mol, 说明在两相流条件下煤粉燃烧反应更容易进行, 所得结果更接近相界面化学反应特征。图 7 为微型流化床法与热重法测得的界面化学反应阻力比较。由图 7 可知, 在整个温度区间内煤样两相流燃烧的界面化学反应阻力均小于热重法测得的结果, 且温度越低两者差距越明显。

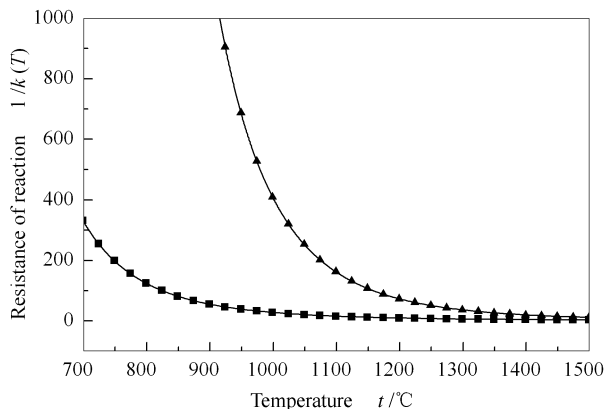


图 7 微型流化床法与热重法测得的界面化学反应阻力比较  
Figure 7 Comparison of the resistance of interfacial chemical reaction measured by MFBKA and TGA  
■: MFBKA ; ▲: TGA

煤粉燃烧反应速率随着氧气分压的增大呈幂函数形式增长, 由热重法非等温动力学测得的  $f(p_{O_2}) = p_{O_2}^{2.45}$ , 且  $d^2f(p_{O_2})/dp_{O_2}^2 > 0$ ; 而由煤氧两相流燃烧等温动力学测得的  $f(p_{O_2}) = p_{O_2}^{0.39}$ ,  $d^2f(p_{O_2})/dp_{O_2}^2 < 0$ , 说明氧气分压的改变对煤氧静置燃烧的影响更加显著。这是因为热重法中煤氧燃烧过程受气体扩散影响严重, 氧气分压的略微增大即可对气态反应物传质产生明显的促进作用。但对煤样两相流燃烧而言, 氧气与煤粉的接触已相当充分, 气态反应物的传质阻力很小, 因而氧气分压对煤粉燃烧反应速率的影响不如煤氧静置燃烧明显。

将表 2 和表 3 数据分别代入式(6)和式(11), 得煤氧两相流燃烧和静置燃烧的反应转化率:

$$x = 1 - \exp\left[-110.60 \exp\left(-\frac{10218.69}{T}\right) \cdot p_{O_2}^{0.39} \cdot t\right] \tag{12}$$

$$x = 1 - \exp\left[-0.147 T^2 \cdot \exp\left(-\frac{16141.06}{T}\right) \cdot p_{O_2}^{2.45}\right] \tag{13}$$

图 8 为不同氧浓度下煤粉燃烧反应转化率随时间变化关系的实验值与计算值比较。由图 8 可知,

煤粉燃烧反应转化率的实验值与计算值较为吻合,说明煤氧两相流燃烧和静置燃烧过程基本满足式

(12)和式(13)规律。

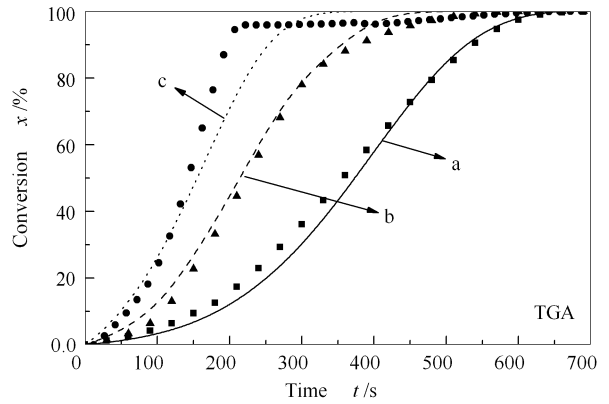
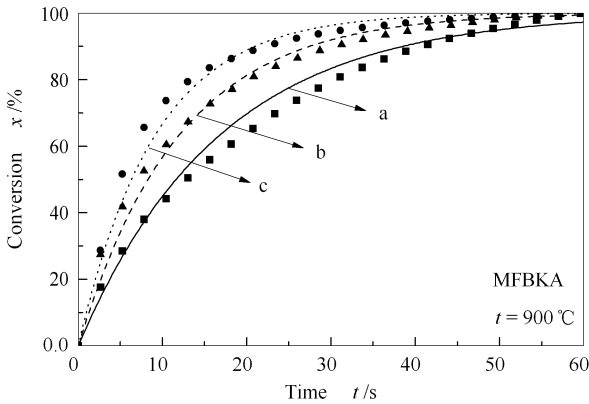


图8 不同氧浓度下煤粉燃烧反应转化率随时间变化关系的实验值与计算值比较

Figure 8 Comparison of experimental and calculated values of combustion reaction conversion of pulverize coal varied with time at different oxygen concentrations  
experimental values: ■: 21%; ▲: 50%; ●: 100%  
calculated values: a: 21%; b: 50%; c: 100%

### 3 结论

随着温度的升高,煤粉燃烧反应速率逐渐加快,燃烧气态产物 CO 和 CO<sub>2</sub> 的释放时间明显缩短,但当温度高于 850 °C 时,由于煤粉燃烧反应机理发生了变化,CO<sub>2</sub> 的浓度峰值急剧增加,而 CO 的浓度峰值反而下降,燃烧反应更加充分。

随着气速的增大,氧气向煤粉颗粒界面的扩散速率及燃烧气态产物 CO 和 CO<sub>2</sub> 的排移速率增加,煤粉完全燃烧所需时间逐渐缩短。当气速大于 0.10 m/s 时,它对燃烧反应速率的促进作用不再明

显,可以认为气体扩散的限制基本被消除。

氧浓度对煤样两相流燃烧和静置燃烧均有明显的促进作用,煤粉燃烧反应速率随着氧气分压的增大呈幂函数形式增长,且氧气分压对煤氧静置燃烧反应速率的影响更加显著。

与煤氧静置燃烧过程相比,煤氧两相流燃烧的表现活化能降低了 49 kJ/mol,相同温度条件下界面化学反应阻力更小,燃烧反应更加迅速、充分,对煤氧燃烧实际情况的描述也更加准确。

### 参考文献

- [1] LI Z, ZHANG D, MA L, LOGAN W, NI W. The necessity of and policy suggestions for implementing a limited number of large scale, fully integrated CCS demonstrations in China[J]. Energy Policy, 2011, **39**(9): 5347-5355.
- [2] 集清尘, 陈文颖. 碳捕获和存储技术综述及对我国的影响[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(3): 291-298. (CHAO Qing-chen, CHEN Wen-ying. The summary of carbon capture and storage technology and its impact on China[J]. Advances in Earth Science, 2006, **21**(3): 291-298.)
- [3] FAVRE E, BOUNACEUR R, ROIZARD D. A hybrid process combining oxygen enriched air combustion and membrane separation for post-combustion carbon dioxide capture[J]. Sep Purif Technol, 2009, **68**(1): 30-36.
- [4] 薛庆国, 韩毅华, 王静松, 孔令坛. 结合 CCS 的炉顶煤气循环—氧气鼓风机高炉 CO<sub>2</sub> 减排分析[J]. 钢铁, 2011, **46**(8): 1-6. (XUE Qing-guo, HAN Yi-hua, WANG Jing-song, KONG Ling-tan. Analysis of CO<sub>2</sub> emission reduction in top gas recycling—oxygen blast furnace combine with CCS[J]. Iron and Steel, 2011, **46**(8): 1-6.)
- [5] QI C-L, ZHANG J-L, LIN X-H, LIU Q-Y, WANG X-L. Investigation on pulverized coal combustion behavior by non-isothermic integral thermogravimetry method[J]. J Iron Steel Int, 2011, **18**(8): 1-8.
- [6] KIZGUT S, YILMAZ S. Characterization and non-isothermal decomposition kinetics of some Turkish bituminous coals by thermal analysis[J]. Fuel Process Technol, 2003, **85**(1/2): 103-111.
- [7] DAMARTZIS T, IOANNIDIS G, ZABANIOTOU A. Simulating the behavior of a wire mesh reactor for olive kernel fast pyrolysis[J]. Chem Eng J, 2008, **136**(2/3): 320-330.
- [8] 张军, 汉春利, 王夕华, 徐益谦. 煤显微组分富集物燃烧特性滴管炉试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2002, **8**(5): 403-406. (ZHANG Jun, HAN Chun-li, WANG Xi-hua, XU Yi-qian. Experimental study of drop-tube furnace on combustion characteristics of maceral concentrates[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, **8**(5): 403-406.)
- [9] CARD J B A, JONES A R. Drop tube furnace study of coal combustion and unburned carbon content using optical techniques[J]. Combust Flame, 1995, **101**(4): 539-547.

- [10] 余剑, 朱剑虹, 岳君容, 孙立鑫, 刘新华, 许光文. 微型流化床反应动力学分析仪的研制与应用[J]. 化工学报, 2009, **60**(10): 2669-2674.  
(YU Jian, ZHU Jian-hong, YUE Jun-rong, SUN Li-xin, LIU Xin-hua, XU Guang-wen. Development and application of micro kinetic analyzer for fluidized bed gas-solid reaction[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2009, **60**(10): 2669-2674.)
- [11] 刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
(LIU Lian-sheng. Combustion theory and technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.)
- [12] 余剑, 朱剑虹, 郭凤, 段正康, 刘云义, 许光文. 生物质在微型流化床中热解动力学与机理[J]. 燃料化学学报, 2010, **38**(6): 666-672.  
(YU Jian, ZHU Jian-hong, GUO Feng, DUAN Zheng-kang, LIU Yun-yi, XU Guang-wen. Reaction kinetics and mechanism of biomass pyrolysis in a micro fluidized bed reactor[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2010, **38**(6): 666-672.)
- [13] 张保生, 刘建忠, 周俊虎, 冯展管, 岑可法. 利用 Popescu 法对煤燃烧反应机理的研究[J]. 中国机电工程学报, 2006, **26**(15): 68-72.  
(ZHANG Bao-sheng, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu, FENG Zhan-guan, CEN Ke-fa. Popescu method for combustion kinetic mechanisms of coals [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, **26**(15): 68-72.)
- [14] SMITH I W. The combustion rates of coal chars; a review [C]//19<sup>th</sup> Symposium on Combustion, 1982: 1045-1065.
- [15] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
(XIE Ke-chang. Coal structure and its reactivity [M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [16] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2001.  
(HU Rong-zu, SHI Qi-zhen. Thermal analysis kinetics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2001.)