

# 煤粉高压着火特性及影响因素

傅培舫, 龚雪琦, 张 斌, 刘 洋, 龚宇森, 许天瑶

(华中科技大学 能源与动力工程学院 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 高压气化炉内煤粉的着火特性对煤粉烧嘴和气化室的设计与运行调控具有重要意义。笔者采用加压热重分析法对 3 个煤样的着火特性进行研究, 根据升温过程中的能量守恒原理和谢苗诺夫着火理论提出了一种新的处理 PTG 曲线求取着火温度的拐点法, 并传统经验切线法进行对比; 讨论了压力、氧气体积分数、升温速率、挥发分和颗粒粒径对着火温度的影响。研究表明, 煤粉着火温度区间为从初始着火温度( $T_i$ )到极限着火温度( $T_{ig}$ ), 环境换热条件所决定的切点位置是唯一解条件, 高温工业炉高加热速率对应的为极限着火温度; 与常压条件下相比, 加压下固定床煤粉的着火为异相着火, 着火温度随挥发分的增加而略有增加; 在 0.1~1.0 MPa 和 3~5 MPa 的压力范围内, 随压力的升高, 着火温度下降, 且比常压下低很多, 虽然在 1~3 MPa 的着火温度略有增加; 氧气体积分数对着火温度的影响规律与常压的类似, 随氧气体积分数的增加, 着火温度降低; 虽然加压条件下煤粉的快速反应, 拐点法与切线法得到的着火温度相近, 但切线法无法响应环境条件的变化, 且常压下, 经验的切线法无法给出令人满意的结果。

**关键词:** 煤粉燃烧; 着火特性; 加压燃烧; 高压气化炉

中图分类号: TQ536

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)01-0059-06

## Ignition characteristics and influence factors of pulverized coal under pressurized combustion

FU Peifang, GONG Xueqi, ZHANG Bin, LIU Yang, GONG Yusen, XU Tianyao

(State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** It is very important to study the ignition characteristics of pulverized coal for the design and operation of nozzle and chamber in a pressurized gasifier. In this paper, the ignition characteristics of three types of coal sample were studied by using pressurized thermogravimetry. According to the principle of energy conservation in the process of heating up and Semenov's TET theory, a novel method by processing PTG curve and obtaining ignition temperature, namely the inflection point method was proposed, which was compared with the empirical tangent method. The influences of pressure, oxygen concentration, heating rate, volatile content and particle sizes were discussed. The results show that the ignition temperature range of pulverized coal is from the initial ignition temperature ( $T_i$ ) to the ultimate ignition temperature ( $T_{ig}$ ), and the location of tangential point determined by the environmental heat transfer conditions is the only definite condition. The high heating rate of high-temperature industrial furnaces corresponds to the ultimate ignition temperature; during the pressurized combustion of pulverized coal in fixed bed, heterogeneous ignition occurs, and the ignition temperature increases slightly with the increase of volatile content; in the pressure ranges of 0.1-1.0 MPa and 3-5 MPa, the ignition temperature decreases with the increase of pressure, which is much lower than that under atmospheric combustion, but increases slightly at the pressure range of 1-3 MPa. The effect of oxygen volume fraction on ignition temperature is similar to that of atmospheric pressure. With the increase of oxygen volume fraction, the ignition temperature decreases. Although the quick oxidation of pulverized coal under pressure and the ignition temperature obtained by the inflection point method is close to that obtained by the empirical tangent method, the tangent method cannot respond to the change of environmental conditions, and the empirical tangent method cannot give satisfactory results under normal pressure.

收稿日期: 2020-01-13; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20011301

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576082); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604100-2)

作者简介: 傅培舫(1964—), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为燃烧反应机理与装置。E-mail: pffu@hust.edu.cn

引用格式: 傅培舫, 龚雪琦, 张斌, 等. 煤粉高压着火特性及影响因素[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 59-64.

FU Peifang, GONG Xueqi, ZHANG Bin, et al. Ignition characteristics and influence factors of pulverized coal under pressurized combustion[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 59-64.



移动阅读

**Key words:** Pulverized coal combustion; ignition characteristics; pressurized combustion; pressurized gasifier

## 0 引言

在相当长的时间内,煤炭在我国能源结构中的主导地位不会动摇。在能源动力生产、煤化工、水泥炉窑和冶金等燃煤行业中,煤粉的着火特性对于煤粉燃烧器及其转化设备的设计和运行具有重要影响。前人对常压条件下的煤粉着火燃烧特性研究较多,主要集中在如何判定煤粉的着火温度。煤粉着火温度的判定大多为经验方法:①动力学曲线法,通过电加热层流载流反应器测得煤粉燃烧浓度-时间动力学曲线、一阶导数得到着火温度<sup>[1]</sup>;②光谱强度法,通过层流滴管炉煤粉燃烧的光谱强度的变化梯度得到着火温度,该值较高<sup>[2]</sup>;③闪光法,根据电加热载流反应器着火煤粉颗粒光闪强度或光闪数概率来判断着火<sup>[3-5]</sup>;④温度法,通过测定单颗粒煤焦在给定环境条件下温度时间变化曲线,结果受环境温度的影响较大<sup>[6]</sup>;⑤切线法,根据热重分析得到的TG-DTG热重曲线最大速率点的切线求着火温度<sup>[7]</sup>,常压下结果通常比炉内试验结果低100℃以上。这些判据主要依赖于试验观测,受试验条件的限制较大。建立在着火理论基础上的热流法,是根据热重差示扫描量热(TG-DSC)曲线,并考虑加热速率的影响,求极限着火温度,与管式炉的试验结果接近<sup>[8]</sup>,目前这种方法还未应用到加压燃烧条件下的着火特性研究。

加压下煤粉着火特性研究相对较少,且大部分研究是在富氧燃烧气氛下进行的高压下煤粉燃尽度、燃尽时间等<sup>[9-12]</sup>。Liu等<sup>[9]</sup>模拟表征了加压情况下煤粉燃烧火焰的化学结构并进行试验研究,发现随着压力的增加,火焰的稳定性变差。吴莹<sup>[10]</sup>选取烟煤与无烟煤的试样,进行富氧条件下的加压热重试验(PTG),结果表明,在O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛条件下,高压下煤粉燃烧的着火机制发生转变,2 MPa时,其着火机制由常压下的非均相着火转变为高压下的均相着火;且随压力的增大,煤样的燃点、最大燃烧速率点、燃尽点温度逐渐降低;根据着火理论,分析该试验中煤粉着火机制发生转变的根本原因为:高压促使煤中挥发分加速析出,使煤粉颗粒单位面积上的氧气浓度升高。应芝等<sup>[11]</sup>研究了O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛、高压下,煤种、压力、氧气浓度和煤焦结构等对2种煤样(大同烟煤和神火无烟煤)着火特性的影响,其加压热重试验结果表明,当燃烧压力从0.1 MPa升至2 MPa时,煤粉的着火温度先降后升,1 MPa下的着

火温度最低,且在高压下,较高的氧气浓度会使煤样的着火模式发生转变,着火温度也明显降低;利用扫描电镜对该反应过程中的煤样进行分析,发现加压促进了煤粉颗粒在脱挥发分过程中的破碎,提高了碳氧反应速率,从而降低了着火温度。雷鸣等<sup>[12]</sup>研究表明,1~3 MPa时,着火温度有所上升,但相差不大。傅培舫等<sup>[13]</sup>为了研究煤粉在加压燃烧过程中的影响因素,从氧气可达比表面积着手,以煤粉燃烧SCT模型为基础,进行了不同煤种的加压热重试验和不同燃尽度下煤焦N<sub>2</sub>BET比表面积测试,结果表明,在煤粉加压燃烧过程中,煤粉颗粒的平均孔径大于2 nm时,累积比表面积和氧气可达比表面积随燃尽度的增加而增加;常压下的煤焦氧气可达比表面积是高压下的1.5~2倍,即煤粉的加压反应速率不可能与压力等倍数增加。目前加压燃烧试验仍存在诸多瓶颈问题,如加压热天平大样量由于质量传递的限制,导致多峰燃烧<sup>[12]</sup>或以热解为主低速扩散氧化等严重的着火延迟<sup>[11]</sup>;加压管式炉又很难取得理论上的着火温度,通常只有经验判断值。

热重分析技术作为一种研究煤粉燃烧特性的常用方法,操作简便,有一定的可重复性,已得到广泛应用。本文通过3个煤样加压热重试验数据探究加压条件下煤粉的着火燃烧特性;根据谢苗诺夫着火理论提出了一种求取着火温度的拐点法,并与传统的切线法所得结果进行比对,分析2种着火温度求取方法的差异;进一步探讨压力和组分对煤粉着火温度的影响。

## 1 加压热重试验

### 1.1 试验仪器

加压热重试验(PTG)指在加压条件下,将煤样置于炉内,以适当流量通入反应气,通过程序控温装置控制升温速率和终温,利用热分析天平连续记录煤样质量和温度的变化。

该试验采用TherMax500热重分析仪,其主要技术指标:测量范围,100 g;测量精度,1 μg;压力范围,1.33×10<sup>-2</sup>~1.03×10<sup>7</sup> Pa;温度范围,0~1 100℃。

### 1.2 试验样品

试验选取金西矿贫煤(JWY)、张村烟煤(ZCY)和鄂电1号烟煤(EP)3个煤种,其工业分析和元素分析见表1。

### 1.3 试验方法

对选取的3个煤种进行研磨,将磨碎后的煤粉

表1 3个煤样的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of three coal samples

煤种	工业分析				元素分析				
	$M_{ar}$	$V_{daf}$	$A_{ar}$	$FC_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$
金西矿贫煤	1.1	12.2	14.7	73.9	74.3	3.4	3.1	2.6	0.8
张村烟煤	7.3	24.9	22.9	52.4	61.8	3.4	2.1	1.2	1.3
鄂电1号烟煤	8.6	39.0	44.0	28.9	41.6	2.1	1.9	0.7	1.1

用  $74\ \mu\text{m}$  的筛子进行筛分,所得煤样颗粒粒径小于  $74\ \mu\text{m}$ ,制得煤样。利用加压热重分析仪对3个煤样进行分析。根据文献[8],在不同加热速率下,煤粉燃烧的拐点温度值趋于一个极限,因此,本试验在室温下由压缩气瓶供给空气,气体流量为  $1\ \text{L}/\text{min}$ ,在压力  $1.5\ \text{MPa}$  下使每个煤样以同一升温速率  $5\ \text{K}/\text{min}$  升到终温后停止反应。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 着火理论

根据谢苗洛夫着火理论,得到煤粉着火过程中的热平衡表达式<sup>[8]</sup>如下:

$$[c_{\text{ash}}\eta_{\text{ash}} + (1 - \eta_{\text{ash}})(1 - \alpha)c_{\text{cm}}]\dot{\theta} = \dot{q}_{\text{ox}} - \dot{q}_{\text{pyr}} - \dot{q}_{\text{ev}} - k_{\text{h}}(T_{\text{s}} - T_{\text{r}}) \quad (1)$$

式中, $c_{\text{ash}}$ 为灰的比热容; $c_{\text{cm}}$ 为碳的比热容; $\eta_{\text{ash}}$ 为灰的质量分数; $\alpha$ 为煤焦的燃尽度; $\dot{\theta}$ 为升温速率; $\dot{q}_{\text{ox}}$ 、 $\dot{q}_{\text{pyr}}$ 、 $\dot{q}_{\text{ev}}$ 分别为单位时间内的氧化热、热解热和气化潜热; $k_{\text{h}}$ 为换热系数; $T_{\text{s}}$ 为煤样温度; $T_{\text{r}}$ 为环境温度。

根据式(1)分析着火条件为

$$\dot{\theta} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

根据煤粉燃烧本征动力学表达式,有

$$\dot{q}_{\text{ox}} = k_1 (1 - \alpha)^n x (\text{O}_2) e^{-E/RT} \quad (4)$$

其中, $k_1$ 为指前因子; $n$ 为反应指数(取  $0 \sim 1$ ),与煤种有关; $E$ 为活化能。活化函数及反应指数  $n$  的求解方法参照文献[17]。

$\dot{q}_2$ 为煤粉与环境的对流换热热量,即

$$\dot{q}_2 = k_{\text{h}}(T_{\text{s}} - T_{\text{r}}) \quad (5)$$

式中, $k_{\text{h}}$ 为换热系数。

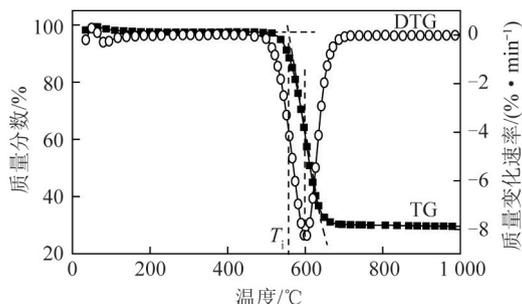
只有当煤粉氧化释放的热量大于环境交换的热量时,煤粉才会着火并持续燃烧,即  $\dot{q}_2$  (图1中  $\dot{q}_{\text{en},2}$ ) 与  $\dot{q}_{\text{ox}}$  相切时,切点处两者相等,此时煤粉才可

能发生着火;当  $\dot{q}_{\text{ox}}$  曲线在  $\dot{q}_{\text{en},2}$  上方时,煤粉着火后才能持续燃烧,如图1(b)所示。

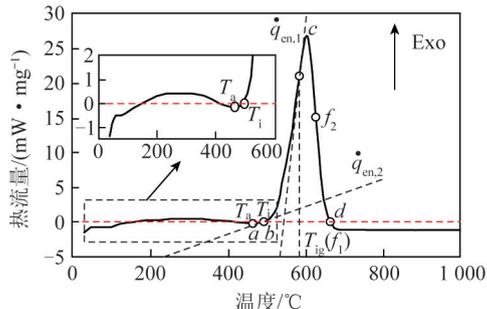
### 2.2 着火温度

#### 2.2.1 切线法

对试验所得的 TG 曲线进行分析,采用切线法确定着火温度:在温度为横轴的 TG-DTG 曲线图中,过 DTG 曲线的最大质量变化速率作横轴垂线,与 TG 曲线交于一点,过该点作 TG 曲线切线,该切线与试样开始失重时平行线的交点所对应的温度即为着火温度,如图1(a)所示。



(a) 切线法



(b) 拐点法

图1 TG-DSC 曲线上着火温度的确定方法<sup>[8]</sup>Fig.1 Determination of ignition temperature on TG-DSC curves<sup>[8]</sup>

#### 2.2.2 拐点法

图1(b)中,根据谢苗洛夫着火理论<sup>[8]</sup>,  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 、

$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0$  时,煤粉着火,此时温度为图1(b)中 DSC 热

流曲线上的拐点温度  $T_{\text{ig}}$ 。根据 TG-DSC 原理,在热分析的正常升温速率范围内,能够保证样品和参考样处于热平衡状态,则图1(b)中 DSC 曲线上的拐点温度与图1(a)中 DTG 曲线的拐点温度一致,说明通过 TG-DTG 曲线的拐点即可快速准确地获得煤粉的着火温度。

### 2.3 PTG 试验

图2(a)为金西矿贫煤在加压  $1.5\ \text{MPa}$  条件下以  $5\ \text{K}/\text{min}$  的升温速率升至终温时,得到的 PTG 曲线。通过求导得到 DTG 曲线,再用切线法得到经验着火温度为  $203\ ^\circ\text{C}$ ;根据 2.2.2 节的拐点法,通过对

DTG 曲线求导可得到拐点(图 2(b))和拐点温度 204 °C。

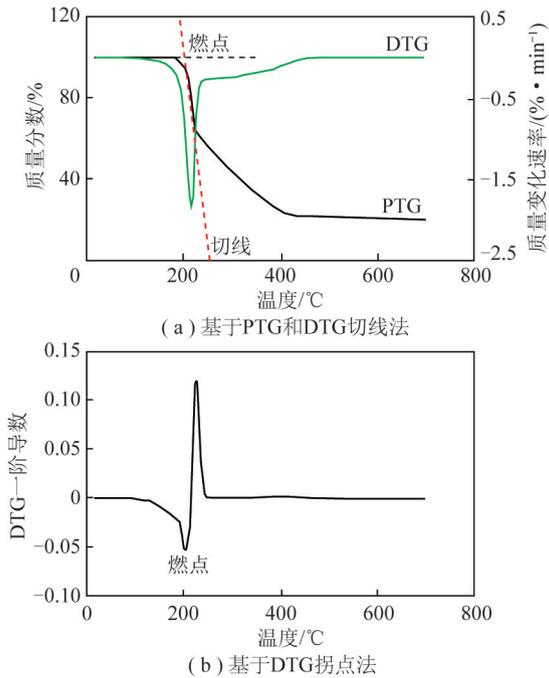


图2 高压下金西矿贫煤的着火温度

Fig.2 Ignition temperature of Jinxi poor coal under pressurized combustion

同样试验条件下得到张村烟煤和鄂电1号烟煤的PTG曲线如图3(a)和4(a)所示。通过求导得到DTG曲线,采用切线法得到经验着火温度,根据拐点法,通过对DTG曲线求导得到拐点(图3(b)、4(b)),拐点温度见表2。对比2种方法所得的同一煤样的着火温度,可知,在加压燃烧条件下,拐点法所得的着火温度与经验的切线法所得结果相近,但在常压下切线法的结果与实际着火温度相差甚远<sup>[8]</sup>,主要原因在于高压下着火温度区间内,反应速率较常压条件下提升了数倍<sup>[13]</sup>,导致放热切线的斜率与传统经验法切线斜率的差减小;但拐点法源于理论分析,能给出着火温度范围,更加简便、准确可靠。

表2 煤样的着火温度

Table 2 Ignition temperature of coal samples °C

方法	金西矿贫煤	张村烟煤	鄂电1号烟煤
切线法	203	205	218
拐点法	204	210	214

比较图2~4可知,金西矿贫煤、张村烟煤和鄂电1号烟煤在加压1.5 MPa条件下的着火温度相差不大,且随着挥发分增加,着火温度升高。其主要作用机制为:煤的氧化起始温度低于着火温度,由于高挥发性的煤通常含有易氧化的OH和C=O基

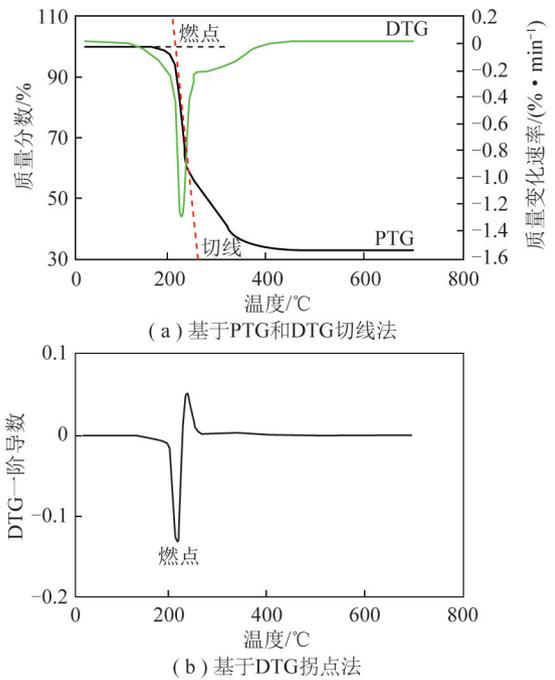


图3 高压下张村烟煤的着火温度

Fig.3 Ignition temperature of Zhangcun bituminous coal under pressurized combustion

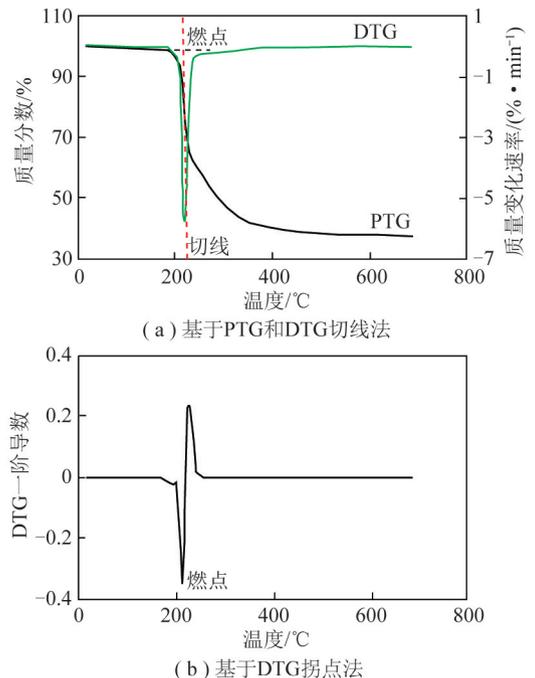


图4 高压下鄂电1号烟煤着火温度

Fig.4 Ignition temperature of EP bituminous coal under pressurized combustion

团<sup>[18-19]</sup>,其氧化产物H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>在高压下不易及时从孔隙中排出,抑制了氧气进入的通道,因此需要更高温度使内压增大,打破该平衡关系,加速颗粒的破碎和反应,可以推断这种着火为异相着火<sup>[20]</sup>。

## 2.4 煤粉着火温度的影响因素

煤粉的着火温度取决于煤的燃烧释热特性和燃

烧环境热交换条件,一个燃烧过程的发生和燃料的氧化放热及其与环境的热交换同时进行,是保证燃烧过程持续进行的最低条件要求,这时应该对应最低稳燃负荷。大部分运行工况均高于这一最低环境条件要求,此时应更多关注着火延迟时间及其对燃尽的影响。煤的燃烧速率或释热速率 $\dot{q}_{\text{ox}}$ 可用DSC曲线表示;煤焦可用PTG曲线的一阶导数DTG曲线表示,需乘以发热量。

煤粉着火温度主要取决于煤的种类、粒径分布和组分以及环境条件(包括压力、温度、组分和升温速率)。图1中 $\dot{q}_{\text{en},2}$ 的变化,使煤粉的着火温度在 $T_i$ (图1(b)中*b*点)和极限着火温度 $T_{\text{ig}}$ 之间变化, $\dot{q}_{\text{en},2}$ 所决定的切点位置,唯一地决定了着火温度大小;煤的低温氧化自燃可试验得到 $T_i$ 的下限条件,而对炉内燃烧的快速加热通常对应极限着火温度。煤粉着火温度的主要影响因素有:

1) 压力。对于烟煤和无烟煤,压力在0.1~1.5 MPa<sup>[14]</sup>(更多的试验支持0.1~1.0 MPa<sup>[11,15-16]</sup>),着火温度不断下降;压力在3~5 MPa时,着火温度也下降;1~3 MPa时,烟煤的着火温度略升高<sup>[15-16]</sup>。

2) 氧气体积分数。压力为0.1~0.5 MPa、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛中,随氧气体积分数的增加,着火温度下降;在相同氧气体积分数下,空气气氛比O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛的着火温度低<sup>[11,14]</sup>。

3) 颗粒粒径。通常粒径<100 μm时,发生异相着火<sup>[20]</sup>;高挥发分的煤种,粒径增大,对载流煤粉升温速率较快时,会有足够浓度的挥发分释放,以支持均相着火。压力增加可使异相着火的煤种范围扩大,较大的颗粒粒径更易发生异相着火。

4) 升温速率。由于煤粉燃烧速率和传热速率的限制,煤粉的拐点着火温度存在极限值<sup>[8]</sup>,如图5所示。温度对时间的二阶导数,根据能量守恒式(1)转化为氧化速率式(4),即图5(a)热流曲线对温度求一阶导数,得到图5(b)的热加速度 $a_h$ ,而图5(a)拐点对应的温度 $T_{\text{ig}}$ 是放热速率(式(5))切线达到的边界最大点;当升温速率增加时, $T_{\text{ig}}$ 趋于极限值,此时 $T_{\text{ig}}$ 不受升温速率的影响,因此,极限 $T_{\text{ig}}$ 值即为高加热速率下的着火温度,超过这一温度,煤粉一定能着火燃烧。

极限着火温度的计算模型为

$$\frac{T_{\text{ig},\theta_i} - T_{\text{ig},\theta_0}}{T_{\text{ig},\theta_{\text{max}}} - T_{\text{ig},\theta_0}} = 1 - e^{-\varepsilon(\theta_i/\theta_0 - 1)} \quad (i=0,1,2) \quad (6)$$

式中, $T_{\text{ig},\theta_i}$ 为加热速率为 $\theta_i$ 时的拐点温度(或称强着火温度);下标*i*=0,1,2,分别对应3个不同加热

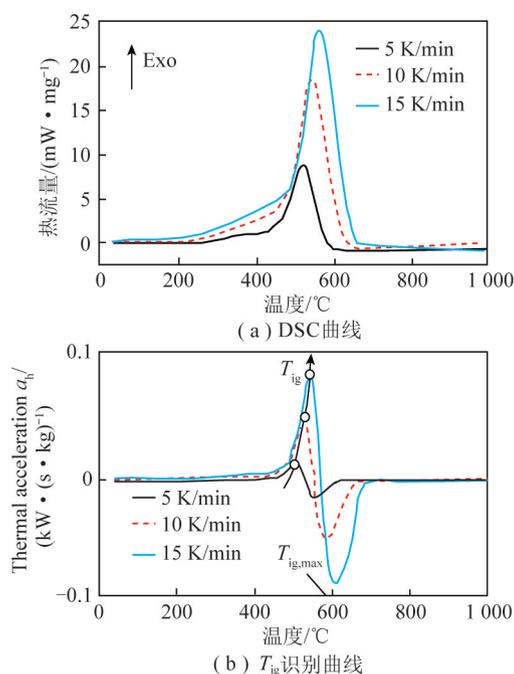


图5 不同升温速率的DSC热流曲线极限着火温度的变化趋势

Fig.5 Change trend of limit ignition temperature of DSC heat flow curves with different heating rate

速率;下标max为极限加热速率; $\varepsilon$ 为与煤种有关的特征因子。

从模拟计算可知,炉内高温环境对煤粉着火过程加热的最大升温速率在10<sup>3</sup> K/s量级,远超热分析中的极限升温速率,可认为这种数量级差异的升温速率对极限着火温度不会产生本质上的影响。

5) 挥发分。挥发分决定煤的种类。在管式炉试验中,通常高挥发分煤中的挥发分集中释放,表现为均相着火<sup>[5]</sup>;但在高压下,由于传热速率增加和单位体积的氧摩尔数增加,导致着火温度下降,通常挥发分还未来得及释放就发生了着火,因此高压下异相着火的几率更大。

### 3 结 论

1) 煤粉着火温度区间为从初始着火温度( $T_i$ )到极限着火温度( $T_{\text{ig}}$ ),环境换热条件所决定的切点位置是唯一解条件,高温工业炉高加热速率对应的是极限着火温度。

2) 与常压下煤粉的着火特性不同,在1.5 MPa加压条件下,随着挥发分的增高,着火温度有所上升;并表现出表面官能团氧化的显著异相着火特征。

3) 同一煤样在高压燃烧条件下,DTG曲线拐点法与切线法求得的着火温度相差不大,主要是由于加压着火燃烧速率成倍增加所致。

4) 在0.1~1.0、3~5 MPa条件下,随着压力增

加,煤粉的着火温度降低;在1~3 MPa时,着火温度随压力的增加略有上升。

5) 加压条件下,氧气浓度分压的增加,着火温度下降。

### 参考文献(References):

- [1] FAÚNDEZ J, ARENILLAS A, RUBIERA F, et al. Ignition behaviour of different rank coals in an entrained flow reactor [J]. *Fuel*, 2005, 84: 2172-2177.
- [2] RIAZA J, KHATAMI R, LEVENDIS YA, et al. Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions [J]. *Combust. Flame*, 2014, 161: 1096-1108.
- [3] SUPRIYA B, DEBDAS B. Prediction of ignition temperature of a single coal particle [J]. *Combustion and Flame*, 1972, 18(3): 411-415.
- [4] GUPTA R P, GURURAJAN V S, LUCAS J A, et al. Ignition temperature of pulverized coal particles: Experimental techniques and coal-related influences [J]. *Combust. Flame*, 1990, 79: 333-339.
- [5] ZHANG D K, WALL T F, HARRIS D J, et al. Experimental studies of ignition behaviour and combustion reactivity of pulverized fuel particles [J]. *Fuel*, 1992, 71: 1239-1246.
- [6] PONZIO A, SENTHOORSELVAN S, YANG W, et al. Ignition of single coal particles in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations [J]. *Fuel*, 2008, 87: 974-987.
- [7] LI QZ, ZHAO CS, CHEN XP, et al. Comparison of pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures by thermo-gravimetric analysis [J]. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 2009, 85: 521-528.
- [8] ZHANG Bin, FU Peifang, LIU Yang, et al. Investigation on the ignition, thermal acceleration and characteristic temperatures of coal char combustion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 1303-1312.
- [9] LIU Guisu, NIKSA Stephen. Pulverized coal flame structures at elevated pressures, Part 1. Detailed operating conditions [J]. *Fuel*, 2005, 84: 1563-1574.
- [10] 吴莹. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛下煤粉加压燃烧特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- WU Ying. Study on combustion characteristics of pressurized coal at oxygen enriched condition [J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [11] 应芝, 张彦威, 葛立超, 等. 加压 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤粉着火特性的试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(8): 44-49.
- YING Zhi, ZHANG Yanwei, GE Lichao, et al. Experimental research on ignition characteristics of pulverized coal under pressurized O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2013, 33(8): 44-49.
- [12] 雷鸣, 王春波, 阎维平, 等. 大同烟煤增压富氧燃烧的热重试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 33(5): 21-26.
- LEI Ming, WANG Chunbo, YAN Weiping, et al. Thermogravimetric research on pressurized oxy-fuel combustion of Datong bituminous coal [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2012, 33(5): 21-26.
- [13] 傅培舫, 余娜, 周怀春. 煤粉加压燃烧过程中氧气可达比表面积的研究 [J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(9): 1617-1619.
- [14] FU Peifang, YU Na, ZHOU Huaichun. Experimental study on oxygen accessible specific surface area of pulverized coal combustion in PTGA [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(9): 1617-1619.
- [15] 胡海华, 段伦博, 陈晓平, 等. 增压 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下煤燃烧特性试验研究 [J]. *燃料化学学报*, 2014, 42(4): 408-413.
- HU Haihua, DUAN Lunbo, CHEN Xiaoping, et al. Experimental investigation on pressurized coal combustion characteristics under O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42(4): 408-413.
- [16] 王春波, 雷鸣, 阎维平, 等. 煤粉的增压富氧燃烧特性及煤灰矿物演变 [J]. *燃料化学学报*, 2012, 40(7): 790-794.
- WANG Chunbo, LEI Ming, YAN Weiping, et al. Combustion characteristics of pulverized coal and mineral conversion under pressurized oxy-fuel condition [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2012, 40(7): 790-794.
- [17] YING Zhi, ZHENG Xiaoyuan, CUI Guomin. Pressurized oxy-fuel combustion performance of pulverized coal for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 411-418.
- [18] LIU Yang, FU Peifang, YUE Fang, et al. A surface activation function method to determine the intrinsic reactivity of coal char oxy-fuel conversion [J]. *Fuel*, 2019, 239: 1061-1071.
- [19] 苗树伟, 傅培舫, 刘洋, 等. 褐煤热解过程中含氧官能团的演化 [J]. *热力发电*, 2018, 47(8): 16-21.
- MIAO Shuwei, FU Peifang, LIU Yang, et al. Evolution of oxygen functional groups during lignite pyrolysis process [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(8): 16-21.
- [20] 苗树伟, 傅培舫. 褐煤氧化过程中含氧官能团的演化 [J]. *冶金能源*, 2018, 37(1): 36-38, 45.
- MIAO Shuwei, FU Peifang. Transition of oxygenic functional groups in lignite during the process of oxidation [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2018, 37(1): 36-38, 45.
- [21] ESSENHIGH R H, MISRA M K, SHOW D W. Ignition of coal particles: A review [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 97: 3-30.