

# 煤拔头半焦燃烧特性

全晓波<sup>1,2</sup>, 申春梅<sup>3</sup>, 吴少华<sup>3</sup>, 林伟刚<sup>1</sup>, 宋文立<sup>1</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 015001)

**摘要:** 利用喷动载流床模拟煤拔头工艺, 在 550, 650, 750 和 850 °C 温度下对大同烟煤进行热解得到拔头半焦, 采用非等温热分析方法对原煤及拔头半焦的燃烧特性进行了研究. 由热分析实验数据归纳提出了表征煤和半焦着火、燃烧及燃烬性能的无量纲综合燃烧指数  $Z$ .  $Z$  值越大, 煤样综合燃烧性能越佳. 结果显示, 大同烟煤在 2 °C/min 升温速率下  $Z$  值为 0.41; 4 个热解温度(由低到高)下所得拔头半焦的  $Z$  值分别为 0.39, 0.35, 0.31, 0.21, 且拔头半焦的燃烧性能均低于原煤, 但高于阳泉无烟煤, 且随热解温度升高  $Z$  值降低, 燃烧反应性降低.  $Z$  值与着火温度及表观燃烧活化能表现出的反应性一致.

**关键词:** 半焦; 着火温度; 燃烧指数; 动力学参数

**中图分类号:** TQ536.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2009)05-0897-07

## 1 前言

在煤拔头工艺<sup>[1]</sup>条件下对煤进行快速热解, 可得到所需要的油气等目的产物, 同时也会产生大量的固体半焦. 目前拔头半焦的利用方式是直接送入循环流化床锅炉中进行燃烧, 其他用途较少. 如果将煤拔头工艺与电站粉煤燃烧锅炉相结合, 即将煤拔头工艺产生的半焦作为电站粉煤燃烧锅炉的燃料, 则将进一步扩大煤拔头工艺的应用前景. 然而在燃煤机组运行过程中, 燃烧设备与燃料特性相适应非常重要, 因此, 要实现煤拔头技术与电站粉煤锅炉发电技术的联合, 有必要对拔头半焦的燃烧反应特性进行系统的研究.

目前, 国内外研究者在煤炭燃烧方面已做了大量研究工作, 主要是针对煤粉或煤完全热解后所剩煤焦进行的, 而拔头半焦是煤在特定的工艺条件下进行部分热解后的产物, 因此参考现有的研究方法对拔头半焦的燃烧特性展开研究非常必要. 当前根据热天平分析数据已提出了很多用于描述煤或煤焦燃烧特性的指标, 这些指标有的侧重评价煤或焦样的着火性能, 如陈建原等<sup>[2]</sup>提出的挥发分释放特性指数  $D$  和魏兆龙等<sup>[3]</sup>提出的煤种燃烧稳定性判别指数  $G$ ; 有的侧重评价煤或焦样的燃烬性能, 如谢峻林等<sup>[4]</sup>提出的燃烬指标  $D_f$  和方立军等<sup>[5]</sup>提出

的混煤综合判别指数  $H_j$ ; 有的针对着火和燃烬两方面的性能进行综合评价, 如高正阳等<sup>[6]</sup>提出的描述煤样在着火后燃烧速率与燃烬性能的指数  $H_F$ 、韩洪樵等<sup>[7]</sup>提出的评价煤或焦样的燃烧和燃烬性能的综合可燃性指标  $S$ . 只有陈建原等<sup>[2]</sup>提出的综合燃烧指数  $S$  是综合着火、燃烧、燃烬 3 方面性能进行整体评价的, 但该指数非无量纲量, 其数值受单位制的影响, 在数据处理结果上不能很好地表现规律性.

本工作在前人研究<sup>[2]</sup>的基础上, 提出了一个新的无量纲综合燃烧指数  $Z$ , 来综合评价煤或焦样着火、燃烧和燃烬三方面的性能. 该指数是在用热天平分析仪对大同烟煤拔头半焦的燃烧反应特性进行分析、并与大同烟煤与阳泉无烟煤的燃烧反应特性进行对比的过程中总结规律提出的, 可合理表征煤样的综合燃烧情况, 且不受单位制的影响, 适用性更广.

## 2 实验

### 2.1 原料

热解实验所用煤样为大同烟煤(DT). 首先将煤样破碎至 80 目(180  $\mu\text{m}$ )以下, 然后在 105 °C 下干燥 4 h. 为便于研究比较, 将拔头半焦的燃烧特性与无烟煤(阳泉无烟煤, YQ)比较. 2 种煤样的工业和元素分析见表 1.

表 1 煤的工业分析及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coals

Coal	Proximate analysis (% , $\omega$ , dried basis)				Ultimate analysis (% , $\omega$ , dried basis)				
	Water <sup>1)</sup>	Volatile	Ash	Fixed carbon	C	H	N	S	O
Datong bituminous coal (DT)	4.7	29.4	13.8	56.8	73.0	3.7	1.2	0.6	8.4
Yangquan anthracite (YQ)	1.1	8.2	25.8	66.0	66.7	2.4	1.1	1.8	3.2

Note: 1) Air dried basis.

收稿日期: 2009-03-24, 修回日期: 2009-04-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金资助项目(编号: 2006AA06A304); 国家自然科学基金资助项目(编号: 20221603)

作者简介: 全晓波(1982-), 女, 山西省大同市人, 硕士研究生, 化学工程专业; 宋文立, 通讯联系人, Tel: 010-82627078, E-mail: wlsong@home.ipe.ac.cn.

## 2.2 实验装置与分析仪器

### 2.2.1 喷动载流床实验装置

为模拟煤拔头工艺的快速热解条件,采用喷动载流床热解实验台制备拔头半焦.该实验装置主要由给料器、快速热解反应器、旋风分离器、半焦收集器和冷凝器组成,如图1所示.3个控温热电偶放置在每个加热段的中部,3个测温热电偶通过上部的1个保护套管插入反应器的不同高度,以监测反应器内的温度分布.

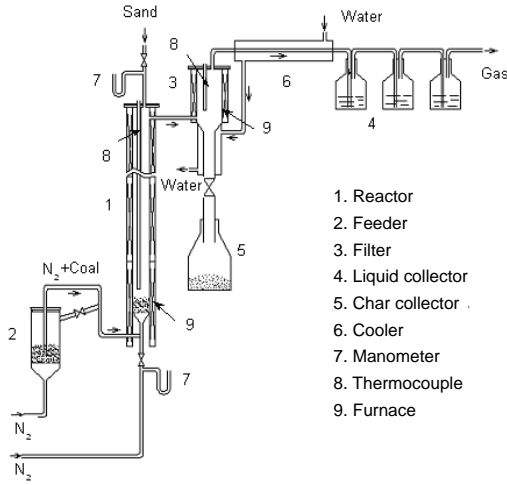


图1 喷动载流床煤快速热解装置图<sup>[8]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of the spouted bed reactor for fast pyrolysis of coal<sup>[8]</sup>

### 2.2.2 热天平

用热天平进行煤及拔头半焦的燃烧实验.热重实验使用 STA-449C 型综合热重分析仪(德国 Netzsch),测定过程中,样品的质量变化信息由计算机实时采集,升温速率可达 50 °C/min.

## 2.3 实验方法

### 2.3.1 大同烟煤的快速热解

如图1所示,干燥后的煤粉颗粒从位于反应器底部的给料器加入,在载气 N<sub>2</sub> 的流化下迅速与处于流化态的热载体石英砂(0.315~0.355 mm)混合,然后进入喷动床反应器内热解;热解后生成的半焦被载气带出反应器,在旋风分离器内与气体分离后落入半焦收集器.

本实验着重考察温度对拔头半焦燃烧反应特性的影响.根据煤拔头工艺对热解温度的要求<sup>[1]</sup>,分别在 550, 650, 750 和 850 °C 四个温度下制备半焦,其中气体在喷动床内的平均停留时间约为 0.8~1.4 s.空塔气速一定时,不同温度下有不同的停留时间,温度越高,停留时间越短.加热速率可达 10<sup>4</sup> °C/s.

### 2.3.2 煤及拔头半焦的燃烧实验

热天平实验条件如下:样品 5 mg,所有实验样品(半焦及原煤)均研磨至粒径小于 200 目(75 μm),终温 900

°C,空气气氛,空气流量 50 mL/min.为使实验结果更具代表性,拔头半焦燃烧实验在 2, 10, 20 °C/min 三个升温速率下进行.

## 2.4 数据分析方法

### 2.4.1 无量纲综合燃烧指数的提出

无量纲综合燃烧指数 Z 的定义过程如下:对于缓慢加热的燃烧过程,燃烧反应初期即着火阶段可认为是动力区,即化学动力学因素控制反应速度<sup>[2]</sup>,并可近似地用阿累尼乌斯定律表达燃烧速率:

$$dw/dt = A \exp[-E_a/(RT)], \quad (1)$$

将式(1)对时间求导并整理,得

$$\frac{R}{\beta E_a} \frac{d}{dt} \left( \frac{dw}{dt} \right) = \frac{dw}{dt} \frac{1}{T^2}, \quad (2)$$

在着火点则有

$$\frac{R}{\beta E_a} \frac{d}{dt} \left( \frac{dw}{dt} \right)_{T=T_i} = \left( \frac{dw}{dt} \right)_{T=T_i} \frac{1}{T_i^2}, \quad (3)$$

整理得

$$\frac{RT_0^2}{\beta E_a} \frac{d(dw/dt)_{T=T_i}/dt}{(dw/dt)_{T=T_i}} \frac{\Delta t_q}{\Delta t_h} = \frac{T_0^2}{T_i^2} \frac{\Delta t_q}{\Delta t_h}, \quad (4)$$

其中, E<sub>a</sub> 是活化能,表示煤或焦样的活性,其值越小,活性越大; [(dw/dt)<sub>T=T<sub>i</sub></sub>/dt]/(dw/dt)<sub>T=T<sub>i</sub></sub> 表示煤或焦样在着火点处的燃烧速率变化率与燃烧速率之比,其值越大,表示煤或焦样着火越猛烈; Δt<sub>q</sub>/Δt<sub>h</sub> 表示煤或焦样前期燃烧所用时间和后期燃烬所用时间的比值,其值越大,说明试样越多的可燃质集中在前期燃烧,越易燃烬.可见,这几项的乘积综合反映了煤或焦样的着火、燃烧和燃烬特性.令

$$Z = \frac{RT_0^2}{\beta E_a} \frac{d(dw/dt)_{T=T_i}/dt}{(dw/dt)_{T=T_i}} \frac{\Delta t_q}{\Delta t_h}, \quad (5)$$

则 Z 可由下式计算:

$$Z = (T_0/T_i)^2 (\Delta t_q/\Delta t_h). \quad (6)$$

由式(6)可看出, Z 为无量纲量.

Z 可综合表征煤或焦样的着火、燃烧和燃烬三方面的特性.其值越大表示煤或焦样的综合燃烧性能越好.

### 2.4.2 着火温度的确定

煤的燃烧特性研究中尤以着火性能的研究最重要,因为煤的着火性能关系着锅炉的安全经济运行.煤的热重分析法已广泛应用于着火性能的评价,特别是煤着火点的确定.采用热天平研究煤粉着火温度时,常用的确定着火温度的方法<sup>[9-11]</sup>包括 TG-DTG 切线法、固定失重

率法、TG 曲线分界点法、DTG 曲线分界点法、TG-DTG 曲线分界点法, 其中 TG-DTG 切线法是目前普遍使用的方法. 本工作采用修正的 TG-DTG 切线法求解着火温度.

(1) 原 TG-DTG 切线法

TG-DTG 切线法原理如图 2 所示, 着火温度采用手工作图法确定: 在温度为横轴的 TG-DTG 曲线图中, 过 DTG 曲线的峰值点  $P$  作温度轴的垂线, 与 TG 曲线交于点  $O$ , 过点  $O$  作 TG 曲线的切线, 与 TG 曲线的初始水平线交于点  $A$ , 点  $A$  对应的温度就是着火温度. 画图作切线有一定程度的随意性, 误差较大.

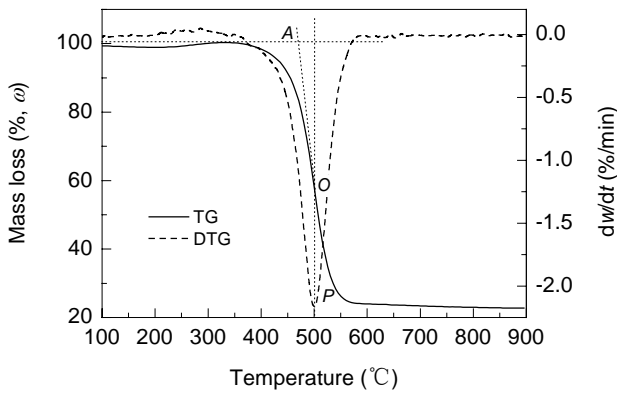
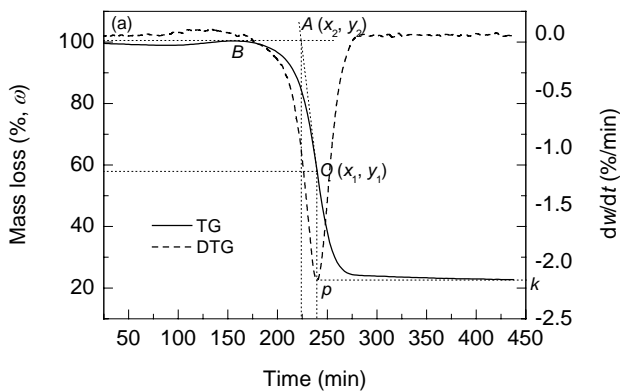


图 2 TG-DTG 切线法  
Fig.2 TG-DTG tangential line method

(2) 修正的 TG-DTG 切线法

修正的 TG-DTG 切线法与原方法有两点不同: 一是采用时间轴而非温度轴作为 TG-DTG 曲线的横轴.



在对数据处理的过程中发现用时间轴和用温度轴作横轴求取的着火温度有很大差异, 由于 DTG 曲线是 TG 曲线对时间的一阶导数, 所以用时间轴作横轴更为合理; 二是利用热重实验曲线结果直接确定  $O$  点的坐标和切线斜率, 并采用解析几何方法确定着火温度. 修正的 TG-DTG 切线法的具体作法如下所述.

直线  $AB$ :

$$y=y_2(\text{TG 曲线初始水平线}). \tag{7}$$

直线  $OA$ :

$$y=k(x-x_1)-y_1, \tag{8}$$

其中,  $k$  为 TG 曲线在  $O$  点处的斜率, 其值等于 DTG 曲线上  $P$  点所对应的  $dw/dt$  值(失重速率峰值),  $x_1, y_1$  是 TG 曲线上的  $O$  点( $x_1, y_1$ )(失重速率峰值对应的  $w, t$  值).  $A$  点的纵横坐标就是式(7)和(8)组成的二元一次方程组的解, 此解的横坐标即为着火点对应的的时间值, 该值确定后, 再由图 3(b)找出该时间值对应的温度值即为所求的着火温度.

2.4.3 动力学参数的确定方法

煤或煤焦燃烧的动力学参数是研究其燃烧特性的重要参数之一, 是对以煤粉为燃料的燃烧设备进行热工计算和数学描述, 以及对煤粉颗粒进行基础理论研究必不可少的重要数据. 目前, 国内外许多学者已经采用各种实验方法对此进行了大量的实验研究工作, 并进行了深入的理论探讨, 形成了燃烧学的一个重要分支—煤粉燃烧动力学. 很多文献<sup>[12-14]</sup>对此进行了综述.

本实验用热重法分析物质燃烧失重过程, 对于恒定

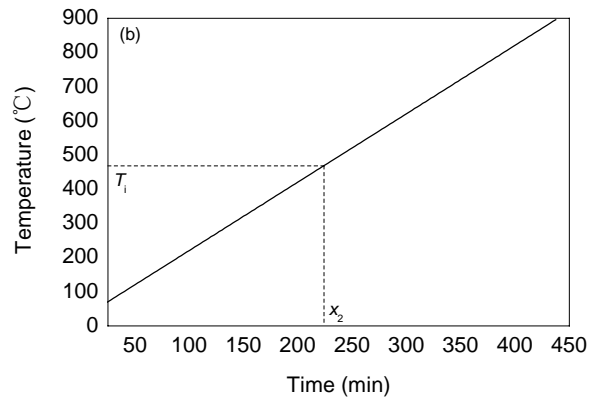


图 3 修正的 TG-DTG 切线法原理图  
Fig.3 Modified TG-DTG tangential line method

空气载气流量和微量煤样的燃烧, 不考虑氧气的变化, 采用下述简单动力学方程模拟其燃烧过程<sup>[15]</sup>:

$$d\alpha/dT=kf(\alpha), \tag{9}$$

式中,  $k$  遵循 Arrhenius 定律:

$$k=A\exp(-E_a/RT).$$

对于一般的固态燃烧失重反应, 在各种动态法实验<sup>[16]</sup>

中,

$$f(\alpha)=(1-\alpha)^n. \quad (10)$$

在非等温燃烧实验中, 试样在恒定的升温速率下降温, 升温速率为 $\beta$ , 则 $T=T_0+\beta t$ ,  $T_0$ 为初始温度. 故

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} [\exp(-E_a/RT)] (1-\alpha)^n. \quad (11)$$

用 Freeman-Carroll 法<sup>[16]</sup>求取反应的表现燃烧活化能和表观反应级数, 计算公式如下:

$$\frac{\Delta \lg(d\alpha/dT)}{\Delta \lg(1-\alpha)} = -\frac{E_a}{4.575} \left[ \frac{\Delta T^{-1}}{\Delta \lg(1-\alpha)} \right] + n, \quad (12)$$

以 $[\Delta \lg(d\alpha/dT)]/[\Delta \lg(1-\alpha)]$ 对 $\Delta T^{-1}/[\Delta \lg(1-\alpha)]$ 作图可得一直线, 根据直线的截距和斜率可求得 $E_a$ 和 $n$ .

### 3 结果与分析

用喷动载流床模拟煤拔头中低温快速热解工艺, 制取了4个热解温度下的拔头半焦(DTC), 其工业分析和元素分析结果见表2.

表2 大同烟煤拔头半焦的工业分析及元素分析

Char	Proximate analysis (% $\omega$ , dried basis)				Ultimate analysis (% $\omega$ , dried basis)			
	Water	Volatile	Ash	Fixed carbon	C	H	N	S+O
DTC1 <sup>1)</sup>	1.3	14.6	17.7	66.4	67.9	3.1	0.74	10.56
DTC2 <sup>2)</sup>	0.8	11.7	19.0	68.5	68.5	2.6	0.72	9.18
DTC3 <sup>3)</sup>	1.1	9.8	17.6	71.5	72.5	2.3	0.77	6.83
DTC4 <sup>4)</sup>	1.0	7.4	18.9	72.7	71.90	1.6	1.05	6.55

Note: 1) Pyrolysis temperature 550 °C; 2) Pyrolysis temperature 650 °C; 3) Pyrolysis temperature 750 °C;

4) Pyrolysis temperature 850 °C.

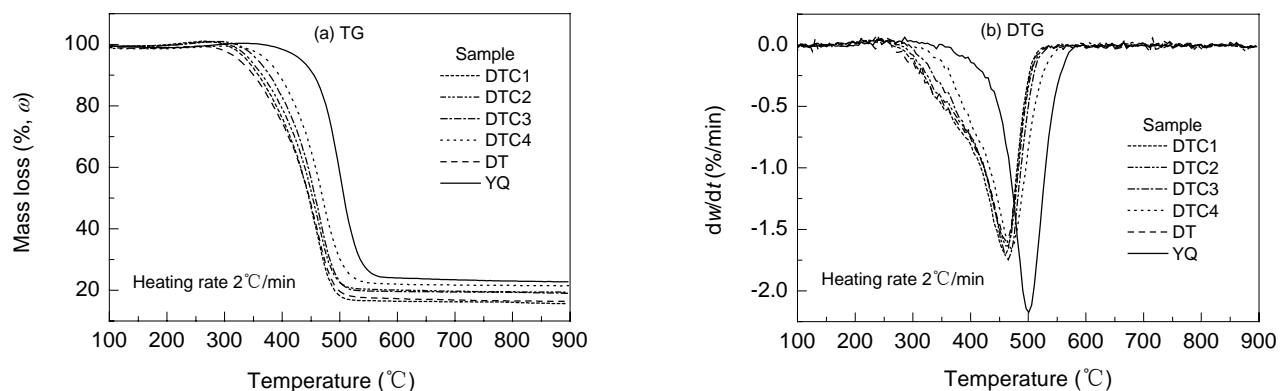


图4 不同煤样的TG与DTG曲线

Fig.4 The TG and DTG results of different coal samples

用天平对拔头半焦的燃烧特性进行了研究, 实验表明, 不同升温速率下的TG与DTG曲线的变化趋势基本相同. 图4为大同烟煤、4种热解半焦和阳泉无烟煤在2 °C/min的升温速率下的燃烧失重曲线.

#### 3.1 着火温度

图5为按修正的TG-DTG切线法求出的大同烟煤、半焦及阳泉无烟煤在3个升温速率下的着火温度. 从图可看出, 此方法求出的着火温度在3种升温速率下具有相同趋势: 大同烟煤系列半焦的着火温度均高于原煤的着火温度, 但都低于阳泉无烟煤. 半焦的着火温度随原煤热解温度升高而升高.

挥发分含量是用来判别煤粉着火性能的一个重要参数. 一般说来, 挥发分含量越高, 试样的着火温度越

低. 从图6可以看出, 拔头半焦的挥发分含量随着热解温度的升高而降低, 拔头半焦的挥发分含量均高于阳泉无烟煤而低于原煤. 因此可以说挥发分含量的变化是影响拔头半焦着火温度变化的原因之一.

#### 3.2 燃烧动力学参数分析

用 Freeman-Carroll 法计算了大同烟煤、4种热解半焦、阳泉无烟煤在3种升温速率下的表现燃烧反应活化能和表观燃烧反应级数, 结果如表3所示.

从表3可看出, 不同升温速率下4种热解半焦的表现燃烧反应活化能均高于原煤, 其值介于原煤和阳泉无烟煤之间, 约为 $(1.7\sim 2.8)\times 10^5$  J/mol; 而且随着原煤热解温度的升高, 拔头半焦的表现燃烧反应活化能也增加, 反应活性变差, 这也是拔头半焦着火温度随热解温度升

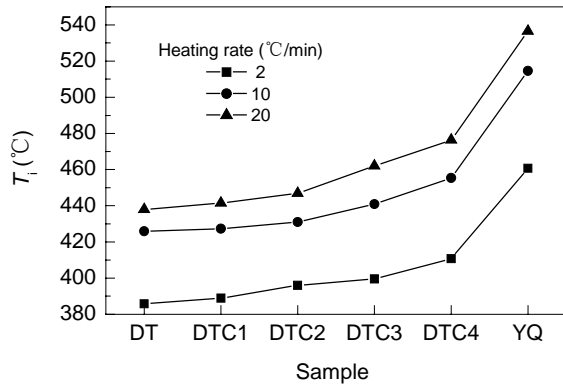


图 5 不同煤样的着火温度  
Fig.5 The ignition temperature,  $T_i$ , of different coal samples

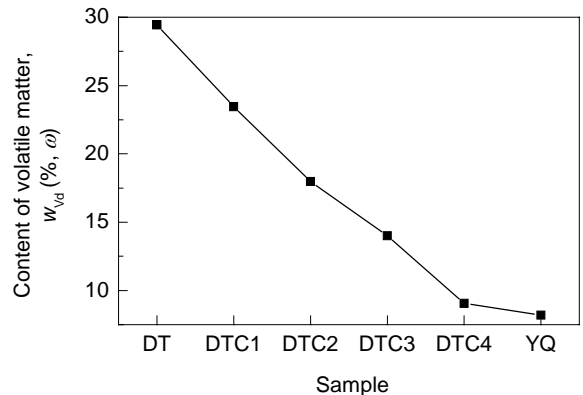


图 6 不同煤样的挥发分含量  
Fig.6 The volatile contents of different coal samples

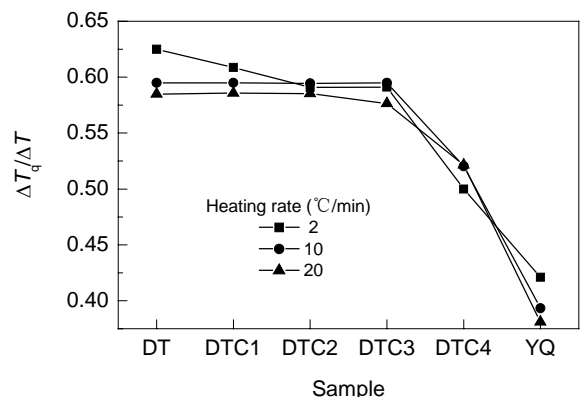
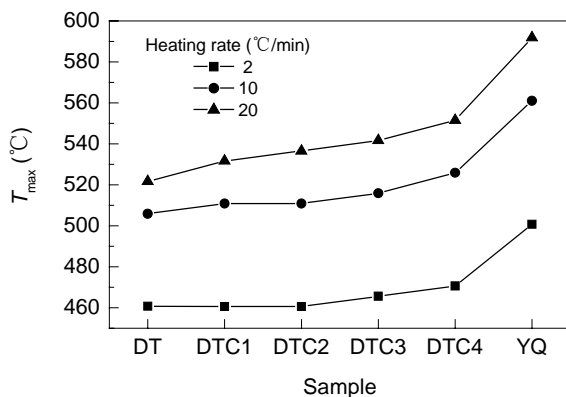


图 7 不同煤样最大燃烧速率对应的温度( $T_{max}$ )和前半峰宽与后半峰宽比值( $\Delta T_q/\Delta T$ )  
Fig.7  $T_{max}$  and  $\Delta T_q/\Delta T$  values for different coal samples

表 3 不同煤样的表观燃烧动力学参数

Table 3 The apparent kinetic parameters of different coal samples

Coal	Heating rate (°C/min)					
	2		10		20	
	$n$	$E_a$ (J/mol)	$n$	$E_a$ (J/mol)	$n$	$E_a$ (J/mol)
DT	0.57	18 414.61	0.57	16 964.22	0.58	16 597.8
DTC1	0.52	19 956.41	0.56	17 416.83	0.63	18 113.27
DTC2	0.59	22 120.14	0.64	21 691.28	0.62	20 431.31
DTC3	0.59	23 861.56	0.61	25 144.99	0.67	21 237.4
DTC4	0.83	27 663.28	0.91	27 051.88	0.79	23 855.55
YQ	1.08	50 609.52	1.21	48 419.99	1.18	46 091.00

高而升高的原因之一. 从表 3 也可看出, 大同烟煤的表观燃烧反应级数约为 0.57, 4 个热解温度下的拔头半焦除 DTC1 在 2 和 10 °C/min 升温速率下计算的反应级数略有降低外, 其他表观燃烧反应级数均介于原煤和阳泉无烟煤之间, 约为 0.6~0.9, 且随原煤热解温度的升高有增加的趋势, 而阳泉无烟煤的表观燃烧反应级数在 1.08~1.21 之间.

### 3.3 拔头半焦燃烧特性分析

根据文献[5], 在燃烧热分析曲线中, 由 DTG 曲线可得到最大燃烧速度( $dw/dt$ )<sub>max</sub> 对应的温度  $T_{max}$ , 最大燃

烧速度( $dw/dt$ )<sub>max</sub> 反映了试样燃烧过程中最大失重率的大小, 其对应的温度  $T_{max}$  越大, 该试样最大失重峰越靠后, 燃烧所需温度越高. 试样的燃烧特性曲线 DTG 前段( $dw/dt$ ) <sub>$T=T_1$</sub>  与 ( $dw/dt$ )<sub>max</sub> 所对应的温度区间  $\Delta T_q$  称为前半峰宽, 后段( $dw/dt$ )<sub>max</sub> 与 ( $dw/dt$ ) <sub>$T=T_h$</sub>  所对应的温度区间  $\Delta T_h$  称为后半峰宽, 令  $\Delta T = \Delta T_q + \Delta T_h$ , 则  $\Delta T_q/\Delta T$  表示试样前期燃烧的集中耗时程度,  $\Delta T_q/\Delta T$  比值越大, 表明越多的可燃质集中在前期燃烧, 试样燃烧性能越好;  $\Delta T_h/\Delta T$  反映焦炭燃烬的集中耗时程度, 其值越小, 表明试样后期固定碳燃烧所用时间越短, 燃烬性越好. 图 7 为大同烟煤、4 种热解半焦、阳泉无烟煤的  $T_{max}$  和  $\Delta T_q/\Delta T$ .

可以看出, 大同烟煤系列拔头半焦在热天平 3 种升温速率下的  $T_{max}$  的变化趋势是一致的. 随着热解温度升高, 最大燃烧失重速率所对应的温度  $T_{max}$  升高, 最大失重峰越靠后, 燃烧所需温度越高, 与着火温度和表观燃烧活化能变化一致; 而 4 种拔头半焦的  $\Delta T_q/\Delta T$  却随着热解温度升高呈下降趋势, 表明随着热解温度的升高, 拔头半焦的燃烧性能逐渐变差, 亦可间接地说明燃烬性能

也变差( $\Delta T_b/\Delta T=1-\Delta T_q/\Delta T$  增加).

### 3.4 无量纲综合燃烧指数分析

本工作对大同烟煤、4种热解半焦、阳泉无烟煤的热重数据做了分析,并根据式(6)分别计算了6种样品的综合燃烧指数  $Z$ , 结果如图8所示.

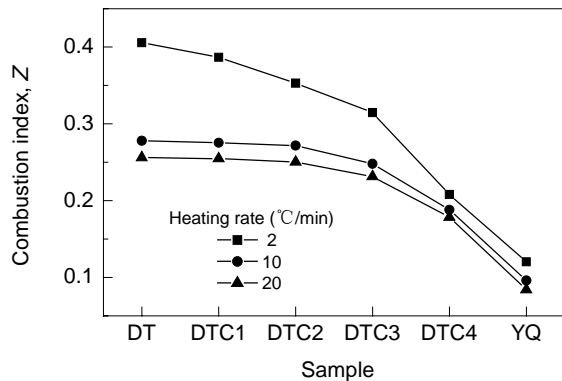


图8 不同煤样在3种升温速率下的综合燃烧指数  $Z$   
Fig.8 The combustion index  $Z$  of different coal samples at 3 heating rates

从图8可以看出,本工作提出的无量纲综合燃烧指数在评价煤或焦样综合燃烧性能时呈现出很好的规律

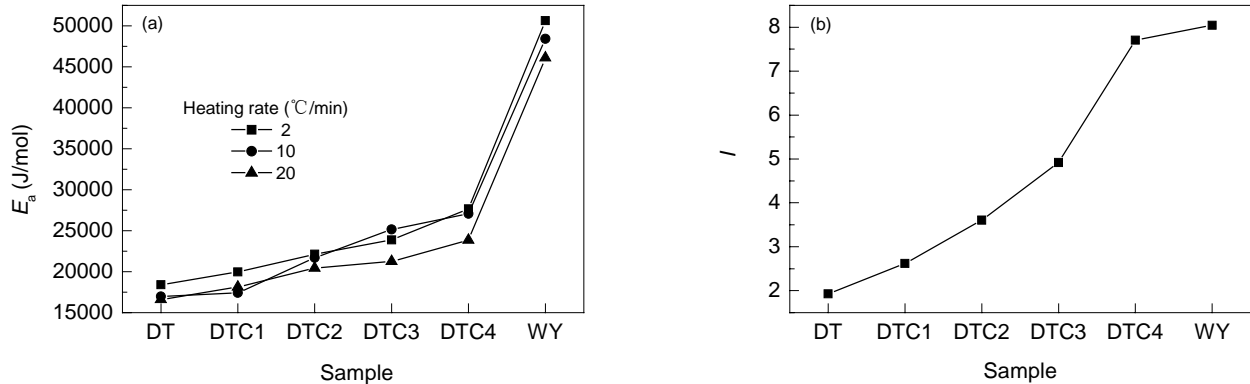


图9 不同煤样在3种升温速率下的表观燃烧活化能( $E_a$ )和燃料比值( $I$ )  
Fig.9 The apparent activated energy,  $E_a$ , and mass ratio of fixed-carbon to volatile matter,  $I$ , of different coal samples at 3 heating rates

## 4 结论

以粒度为小于  $180 \mu\text{m}$  的大同烟煤为原料,用喷动载流床热解实验装置模拟煤拔头工艺条件,制取了拔头半焦,重点考察了热解温度对拔头半焦燃烧反应特性的影响,并用热天平研究了拔头半焦的燃烧反应特性,得出如下结论:

(1) 提出了无量纲综合燃烧指数  $Z$ , 用来表征煤样着火、燃烧和燃烬性能,该指数能较全面地反映煤样整个燃烧过程的特点.  $Z$  值越大,煤样的综合燃烧反应性

越好. 4种热解半焦的综合燃烧指数随原煤热解温度的升高而降低,且均低于原煤而高于无烟煤. 结合着火温度和表观燃烧活化能的变化说明随着原煤热解温度的升高,拔头半焦的综合燃烧性能(着火、燃烧和燃烬性)均下降,且低于原煤而高于无烟煤.

综合燃烧性能的好坏与拔头半焦本身的物理、化学性质有关. 其一,从图9(a)可看出,随着热解温度的升高半焦的表观燃烧活化能是增加的,而表观活化能是衡量半焦反应活性的指标,表观活化能越高表明半焦的反应活性越差,综合燃烧指数越低;其二,图9(b)给出的是大同烟煤及其系列拔头半焦、阳泉无烟煤的燃料比值  $I$ , 将燃料比值定义为固定碳与挥发分比值  $I=w_{\text{FC}}/w_{\text{Vd}}$ . 可以看出随着热解温度的升高,拔头半焦的  $I$  值呈显著增加的趋势,表明拔头半焦在燃烧过程中固定碳燃烧的比重逐渐增加,使半焦越来越不易燃烬,从而综合燃烧指数降低;另外,有研究<sup>[17]</sup>表明原煤热解温度升高会导致“热退火”效应发生,半焦反应活性很大程度上与由升温而发生的半焦内部碳结构重新排列有关,半焦(碳)与  $\text{O}_2$  的反应活性会随着热解温度的升高而降低<sup>[17]</sup>,这也是导致综合燃烧指数降低的一个原因.

能越好. 大同烟煤拔头半焦的综合燃烧反应性能随着原煤热解温度的升高而降低,且均低于原煤而高于阳泉无烟煤. 此结果与燃烧特性分析中  $T_{\text{max}}$  和  $\Delta T_q/\Delta T$  反映出的燃烧过程特点是一致的.

(2) 用修正的 TG-DTG 切线法计算了煤样的着火温度. 大同烟煤拔头半焦的着火温度随热解温度的上升而上升,且均高于原煤,低于挥发分含量更低的阳泉无烟煤.

(3) 用 Freeman-Carroll 法计算了拔头半焦的表观反应动力学参数. 在热天平燃烧条件下,大同烟煤在

550, 650, 750, 850 °C四个温度下热解的拔头半焦的表现反应级数约为0.6~0.9, 表观反应活化能为 $(1.7\sim 2.8)\times 10^5$  J/mol. 随着热解温度升高, 二者均有增加的趋势, 且高于原煤而低于阳泉无烟煤, 这与综合燃烧指数 $Z$ 和着火温度表现出的反应性是一致的.

#### 符号表:

$A$	指前因子
$dw/dt$	燃烧速率 (%/min)
$E_a$	活化能 (J/mol)
$k$	化学反应速率常数
$n$	反应级数
$t$	时间 (min)
$t_h$	燃烬温度对应的时间 (min)
$t_i$	着火温度对应的时间 (min)
$t_{\max}$	最大燃烧速率所对应的时间 (min)
$\Delta t_h$	煤或焦样燃烧后期所用时间 (min)
$\Delta t_q$	煤或焦样燃烧前期所用时间 (min)
$T_h$	燃烬温度 (°C)
$\Delta T_h$	煤或焦样燃烧后期所对应的温度区间 (°C)
$\Delta T_q$	煤或焦样燃烧前期所对应的温度区间 (°C)
$R$	气体常数 [8.314 J/(mol·K)]
$T$	颗粒温度 (K)
$T_0$	热天平初始温度 (30 °C)
$T_i$	着火温度 (°C)
$T_{\max}$	最大燃烧速率对应的温度 (°C)
$w_{FC}$	固定碳的含量 (%、 $\omega$ )
$w_{Vd}$	挥发分的含量 (%、 $\omega$ )
$\alpha$	可燃质的转化率 (%)
$\beta$	升温速率 (°C/min)

#### 参考文献:

[1] 郭幕孙, 姚建中, 林伟刚. 循环流态化碳氢固体燃料的四联产工艺及装置 [P]. 中国专利: ZL01110152.0, 2002-11-06.  
 [2] 陈建原, 孙学信. 煤的挥发分释放特性指数和燃烧特性指数的确定 [J]. 动力工程, 1987, (5): 13-18.

[3] 魏兆龙, 郭朝令. 煤种燃烧稳定性实验研究 [J]. 锅炉技术, 1999, 30(10): 6-9.  
 [4] 谢峻林, 何峰. 水泥分解炉工况下煤焦的燃尽动力学过程研究 [J]. 燃料化学学报, 2002, 30(3): 223-228.  
 [5] 方立军, 高正阳. 利用热天平对电厂混煤燃尽特性的实验研究 [J]. 华北电力技术, 2001, (1): 7-9, 24.  
 [6] 高正阳, 方立军. 混煤燃烧特性的热重实验研究 [J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1764-1767, 1749.  
 [7] 韩洪樵, 王涤非. 用快速加热热天平研究煤的可燃性指标 [J]. 工程热物理学报, 1990, 11(3): 342-345.  
 [8] 崔丽杰. 煤热解过程中产物组成和官能团转化的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005. 40.  
 [9] 喻秋梅, 庞亚军. 煤燃烧实验中着火点确定方法的探讨 [J]. 华北电力技术, 2001, (7): 9-10, 50.  
 [10] 周英彪, 范杜平, 段权鹏. 基于热天平着火温度的新方法 [J]. 电站系统工程, 2007, 23(3): 29-31.  
 [11] 朱群益, 屠建君. 煤燃烧特征点变化规律的研究 [J]. 热能动力工程, 1997, 12(5): 332-334, 357.  
 [12] Loewenberg M, Levendis Y A. Combustion Behavior and Kinetics of Synthetic and Coal-derived Chars: Comparison of Theory and Experiment [J]. Combust. Flame, 1991, 84(1/2): 47-65.  
 [13] Smith I W. The Combustion Rates of Coal Chars: A Review [J]. Symposium (International) on Combustion, 1982, 19(1): 1045-1065.  
 [14] Williams A, Backreedy R, Habib R. Modeling Coal Combustion: The Current Position [J]. Fuel, 2002, 81(5): 605-618.  
 [15] 王擎, 吴吓华, 孙佰仲, 等. 桦甸油页岩半焦燃烧反应动力学研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 29-34.  
 [16] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 100-101.  
 [17] Yu J, Lucas J A, Wall T F. Formation of the Structure of Chars during Devolatilization of Pulverized Coal and Its Thermoproperties: A Review [J]. Prog. Energy Combust. Sci., 2007, 33(2): 135-170.

## Combustion Characteristics of Char from Coal Topping Process

TONG Xiao-bo<sup>1,2</sup>, SHEN Chun-mei<sup>3</sup>, WU Shao-hua<sup>3</sup>, LIN Wei-gang<sup>1</sup>, SONG Wen-li<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Complex System, Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 015001, China)

**Abstract:** Different chars have been prepared from Datong coal with the spouted bed reactor at four pyrolysis temperatures, 550, 650, 750 and 850 °C. The influence of pyrolysis temperature on the combustion characteristics of different chars is studied using a thermo-gravimetric device. A new dimensionless combustion index  $Z$  has been proposed to describe the combustion behavior of coal and char. The higher the  $Z$  value, the better the combustion behavior. Under the condition of 2 °C/min heating rate for example, the  $Z$  value of Datong raw coal is 0.41, that of Yangquan anthracite 0.12, and  $Z$  values of chars at four pyrolysis temperatures, 550, 650, 750 and 850 °C, respectively are 0.39, 0.35, 0.31, 0.21. The combustion reactivity of different chars is lower than that of Datong raw coal, but higher than that of Yangquan anthracite. For different chars, with the increasing of pyrolysis temperature the  $Z$  decreases, the combustion behavior becomes worse, which agrees with the variation of ignition temperature and apparent combustion activation energy.

**Key words:** char; ignition temperature; combustion index; kinetic parameter