

板材类生物质燃烧及动力学特性热重研究

蒲 舸 雷 强 徐 鹏

(重庆大学动力工程学院低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要 采用非等温升温法研究了4种板材类生物质在空气气氛下的燃烧特性和动力学特性。通过对TG、DTG等曲线的分析,发现4种板材燃烧过程均可分成3个阶段,即水分蒸发阶段、挥发份析出(或燃烧)阶段和固定碳燃烧阶段。综合燃烧特性:松木集成材 > 纤维密度板 > 夹芯胶合板 > 刨花板。4种板材均具有良好的燃烧特性。4种生物质燃烧均存在1个吸热峰和2个放热峰,分别与挥发分析出峰、挥发分燃烧、固定碳燃烧对应。采用Fridman法和Fridman-Carroll法分别对4种板材的动力学参数进行了计算,2种方法得出的结果符合较好。分析得出:由于生物质燃烧与环境换热、挥发分析出吸热、固定碳燃烧放热等因素作用,4种生物质的表观活化能高温区均低于低温区。动力学计算结果表明:松木集成材平均表观活化能最低,燃烧反应能较容易进行。

关键词 板材类生物质 热重 微分热重 燃烧特性 动力学特性

中图分类号 TK62 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)07-2431-06

Thermogravimetric study on combustion and kinetic characteristics of artificial-plates

Pu Ge Lei Qiang Xu Peng

(Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract Combustion and kinetic characteristics of four kinds of artificial plates in air atmosphere were investigated using non-isothermal heating method. According to the analysis on TG/DTG curves, it is shown that the combustion procedures of artificial plates can be divided into three stages, i. e. dehydration, volatile matter releasing (or combustion) and fixed carbon combustion. And synthesized combustion characteristic indexes follow the order: pine glulam (PG) > fiber board (FB) > core board (CB) > particle board (PB). All the four plates have excellent combustion qualities. One endothermic peak and two exothermic peaks are observed in procedure of artificial-plate biomass combustion, which correspond to volatile matter releasing peak, volatile matter combustion and fixed-carbon combustion, respectively. In addition, consistent kinetic parameter of these four kinds of artificial plates are obtained applying Fridman method and Fridman-Carroll method. It is concluded that, for the reason of heat exchange, endothermic characteristic of volatile matter releasing and exothermic characteristic of fixed-carbon combustion, the apparent activation energy of these four biomass in high-temperature zone are lower than that in low-temperature zone. The calculation puts that average activation energy of PG is the lowest, which indicating an easy trend of combustion.

Key words artificial-plate biomass; TG; DTG; combustion characteristics; kinetic characteristics

随着城市化进程大规模推进,城市废弃物中建筑装饰板材的比例大大增加。常见装饰板材有人造板材:刨花板、纤维板、夹芯胶合板,以及集成材:松木集成材、杉木集成材等。人造板材一般由天然木材或植物经过若干加工工艺制成,多用于建筑装饰、家具制作、建筑模板等;而集成材一般由天然木材

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
(CDJZR10140001)

收稿日期:2012-01-20;修回日期:2012-03-13

作者简介:蒲舸(1969~),男,博士,副教授,主要从事燃烧与环境保护、系统节能和清洁能源利用教学和研究工作。

E-mail:pujiayi@163.com

经过优选后切割拼合而成,一般用于家具制造。目前我国垃圾中的这些废弃板材并未得到很好利用,仅有极少部分用做柴薪,绝大部分与生活垃圾一起丢弃于垃圾堆中。由于板材与常规生活垃圾在物理特性上存在不同,板材的丢弃不仅浪费了宝贵的生物质资源,也给垃圾分类处理造成了困难。

板材因其具有较高发热量,不仅可用作锅炉燃料,也具有其他高效利用前景,并开始引起科研工作者关注。施海云等^[1]研究了空气气氛中白松、杉木、三夹板、纤维板在不同升温速率、不同粒径、不同样品量下的热重特性。李爱民等^[2]研究了落叶松、红木和红松样品在不同氧气浓度下的热解和燃烧特性。C. J. Gómez 等^[3]研究了不同的预处理方法对松木等木材和草本类生物质热解产物的影响,并用化学计量学方法对参数进行了计算。Font R. 等^[4]对松针、松果在不同氧气浓度气氛下进行了热重-质谱分析并进行了动力学计算。

目前针对生物质热解或燃烧的研究主要集中在原生天然木材,农、林作物以及生活、工业废弃物上,针对人造板材的研究相对较少。由于人造板材在生产过程中添加了化学粘接剂,与其他生物质存在明显差异,因此要实现规模化、能源化利用很有必要研究它们的燃烧特征和燃烧动力学特性。本文采用热重分析仪着重研究4种常用板材(刨花板、纤维板、夹芯胶合板和松木集成材)的燃烧特征以及燃烧动力学特性。

1 实验部分

实验采用德国耐驰公司生产的 STA409PC 热分析仪。温度范围:最高至 1 550℃。升降温速率最高 50 K/min。TG 最小解析度:0.2 μg。

实验从 40℃ 以 25 K/min 升温速率升至 800℃,其后降至室温。样品质量约为 10 mg,反应气氛为空气气氛,总气量为 100 mL/min。支架选用 DTA 支架。参比物质选用 α-Al₂O₃。

实验材料选用刨花板(partical board, PB)、纤维板(fiber board, FB)、夹芯胶合板(core board, CB)、松木集成材(pine glulam, PG),经过破碎、烘干、粉碎、干燥和筛分等步骤制成样本,粒径选用 120 ~ 150 μm。试样的工业分析见表 1。

表 1 样本的工业分析

样本	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}
刨花板	6.69	81.98	2.24	9.08
纤维密度板	6.66	79.46	0.42	9.13
夹芯胶合板	4.13	83.79	2.71	13.69
松木集成材	5.67	87.29	0.04	7.01

2 实验结果与讨论

2.1 实验结果

类木材型生物质主要由木质素、纤维素和半纤维素等有机高分子化合物构成。一般纤维素可占木材质量的 40%,半纤维素可占到约 20%,木质素可占到约 30%。半纤维素在 225 ~ 350℃ 分解,纤维素在 325 ~ 375℃ 分解,木质素在 310 ~ 400℃ 分解^[5]。在板材类生物质的升温过程中纤维素、半纤维、木质素会发生并行、连续的化学反应,并释放反应产物。4 种生物质燃烧 TG、DTG 曲线如图 1 所示。

图 1 为刨花板、纤维板、夹芯胶合板、松木集成材 TG、DTG 图。对照 TG、DTG 曲线,均可以发现反应过程呈现 3 个阶段:即水分蒸发阶段、挥发份析出(或燃烧)阶段、固定碳燃烧阶段。3 个阶段温度区间分别约为:40 ~ 200℃、200 ~ 400℃ 和 400 ~ 650℃。作为人造板材的 3 种板材和接近原生木材的松木集成材,失重曲线和微分失重曲线均与原生木材基本一致^[6,7]。

随着温度升高,样本内部水分析出,质量略有下降。在水分析出完成后,样本内部发生解聚反应,样本质量基本无变化。其后,随着温度进一步升高,样本不断吸收能量,纤维素、半纤维素、木质素发生系列平行且连续的化学反应并释放 CO₂、CO 等气体^[8]。TG 曲线急剧下降,DTG 曲线上形成析出峰。随着木质素发生热解,样本开始炭化。在固定碳燃烧阶段,炭化过程中形成的碳遇氧气发生猛烈燃烧并放出大量热量。

从图中可以看出,松木集成材固定碳燃烧段失重率曲线先以较快速度下降(失重率快速增大),然后迅速恢复降为零,峰宽比其他 3 种人造板材窄,而其他 3 种板材在这一阶段失重率没有明显的增加,说明松木集成材在固定碳燃烧段燃烧迅速而猛烈。

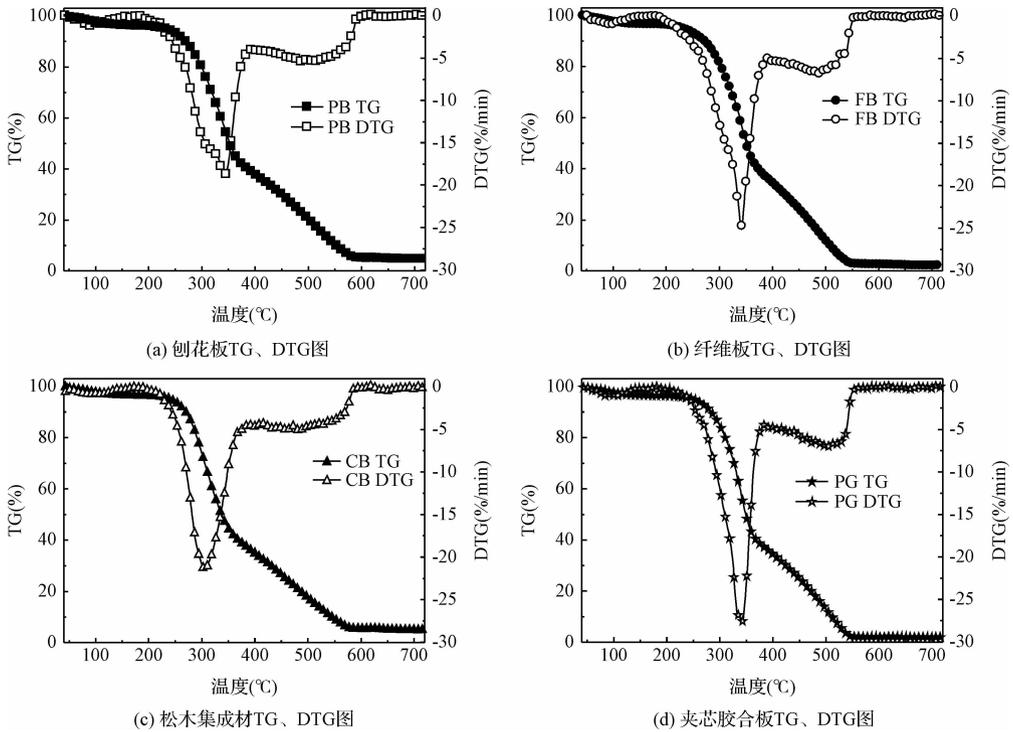


图 1 刨花板/纤维板/夹芯胶合板/松木集成 TG、DTG 曲线

Fig. 1 DG, DTG curves for PB, FB, CB, PG

从图中还可以看,由纤维素分解引起的肩状峰^[6]在刨花板、纤维板中最为明显,在其他两种生物质中不明显。

2.2 燃烧特性分析

2.2.1 特征点及特征参数定义

本文采用 TG-DTG 法^[9]定义着火温度 T_i ,示意图及各特征点定义如图 2 所示燃尽温度 T_b 定义为试样失重占总失重 98% 时对应的温度。

试样从着火温度 T_i 上升到燃尽温度 T_b 所用的时间为燃烧时间 τ 。

采用综合燃烧特性指数 S 来表征样本的综合燃烧性能^[10]。从 S 的推导过程以及从定义式分子、分母组成可看出, S 能全面反映样本的燃烧特性, S 越大表明样本的燃烧特性越好。 S 的定义式为:

$$S = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b}$$

上式中, $(dw/dt)_{\max}$ 为最大失重率,即 C 点(或 G 点)对应失重率, $(dw/dt)_{\text{mean}}$ 为平均失重率(着火温度 T_i 到燃尽温度 T_b 之间的失重率算术平均值)。

2.2.2 燃烧特性对比

对照图 2 和表 2 可以发现夹芯胶合板挥发分析出最为提前,达到析出峰的温度也为最低

(304.9℃),明显低于其他 3 种材料(约低 36℃),这与夹芯胶合板的制作工艺有关。由于在制作过程需要经过胶拼,从而使成品板中含有相当质量的粘接剂,这些粘接剂在升温过程中易受热分解、蒸发,从而使析出峰提前。纤维板和刨花板在生产过程中用胶量明显小于夹芯胶合板,所以析出峰落后夹芯胶合板。

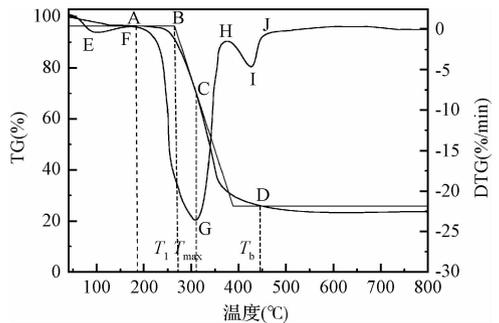


图 2 特征点示意图

Fig. 2 Demonstration of critical points

挥发分析出峰失重率最大的是松木集成材,为 -27.62%/min,最低为刨花板,为 -18.88%/min,两者相差 8.74%/min。人造板材说明松木集成材挥发份析出最剧烈、刨花板最为平缓,两者析出剧烈程度相差相大。

表2 燃烧特征参数

Table 2 Parameters of combustion characteristics

特征参数	刨花板	纤维板	夹芯胶合板	松木集成材	
着火点 C	T_i (°C)	277.9	295.8	268	299.4
	$(dw/dt)_i$ (%/min)	-8.20	-11.26	-8.86	-11.80
挥发分析出峰 G	T_{max} (°C)	343	341.3	304.9	341.6
	$(dw/dt)_{max}$ (%/min)	-18.88	-25.03	-21.35	-27.62
燃烧结束点 D	T_b (°C)	574.8	538.4	568.1	535.7
	$(dw/dt)_b$ (%/min)	-3.56	-4.51	-3.07	-5.78
总体特征	$S \times 10^6$	-5.06	-5.16	-6.23	-5.44
	$(dw/dt)_{mean}$ (%/min)	-7.72	-9.21	-7.92	-9.66
	τ (min)	11.9	9.7	12.0	9.5

在燃烧后期,松木集成材和纤维密度板的 TG 曲线基本重合在一起,燃烧最早结束;燃烧时间两者也最短。刨花板和木工板最后残余质量比密度板大 2% 左右,这与前者比后者工业分析灰分大 2% 左右的数据一致。松木集成材的残余质量在 4 种板材最低,这是因为松木集成材成分十分接近松木原木,而松木原木本身灰分极少,其他几种板材均含有一定质量的不可挥发化学添加剂,如防火涂料等。

综合燃烧特性指数 S : 松木集成材 > 纤维板 > 夹芯胶合板 > 刨花板,说明从燃烧全过程宏观特征来考量,松木集成材的综合燃烧性能最好,纤维板、夹芯胶合板分居第二和第三,刨花板最次。通过对比,4 种生物质综合燃烧特性指数 S 比玉米芯、小麦秆大一个数量级^[11],说明 4 种板材均具有良好的综合燃烧特性。

2.2.3 吸放热及燃烧模式分析

图 3 为 4 种生物质的 DTA、DDTA 曲线。4 种生物质的放热具有基本一致的规律,差别仅在于放热峰值大小和放热峰发生的温度。从图中可以看出:在温度小于 300°C 的区间纤维密度板与其他 3 种生物质明显不同,从 130°C 左右开始有放热现象,在 220°C 左右达到放热峰,经过传热滞后,温度值达到

了一个峰值且明显高于其他 3 种样本。

从 DDTA 曲线可以明显看出:4 种样本各有一个明显的吸热峰、一个次放热峰、一个主放热峰。吸热峰位于 350°C 左右,与 DTG 曲线上挥发分析出峰温度一致,说明挥发析出需要向样本吸收热量,使样本温度低于环境温度。

达到吸热峰后,由于样本温度变化具有滞后性,所以过了一段时间后样本温度达到最低,对应 DTA 曲线上的最小值。

当温度到达 370°C 时,挥发分开始燃烧放热,最后到次放热峰,此时挥发分燃烧最为猛烈(约为 420°C)。随着挥发分以及后来固定碳的着火燃烧,向样本传递热量,样本温度逐渐上升。从图中还可以看出,4 种样本达到主放热峰的温度差异较大:纤维板、松木集成材两者温度一致而且最低,约为 550°C,其余 2 种约为 580°C。4 种样本主放热峰温度与反应终止点温度一致,峰宽按时间计算约 4 min。

主放热峰值纤维板明显大于其他 3 种板材,表现出显著的放热特性,反应结束时温度明显高于其他 3 种样本。

燃料燃烧可分为 2 种极端模式,第 1 种:燃料先析出挥发分和固定碳,随后固定碳发生燃烧反应;第 2 种:挥发分和固定碳同时多相燃烧^[12]。从 DTA、DDTA 曲线可看出,4 种生物质的燃烧模式均处于 2 种极端模式之间:随着温度的升高,挥发分首先析出(并不发生燃烧),达到一定温度后挥发分析出同时发生燃烧,随后固定碳也着火燃烧,挥发分燃烧与固定碳燃烧对应的温度区间部分重叠。

2.3 燃烧动力学计算与分析

燃烧动力学计算是根据燃烧过程中仪器测得的 TG、温度值等数据,再根据基本热化学反应方程式对燃料物征参数进行计算(或推断)。燃烧动力学计算可得出(或验证)表观活化能、反应级数、机理

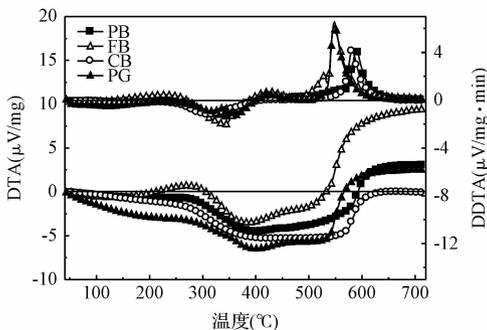


图3 刨花板/纤维板/夹芯胶合板/松木集成材 DTA/DDTA 曲线

Fig. 3 DTA, DDTA curves for PB, FB, CB and PG

函数等燃料内在特征参数(或函数)。在燃烧动力学计算中常用方法有微分法和积分法,每种方法中又各有数十种具体求解方法。本文采用微分法中的 Fridman 方法来计算表观活化能等动力学参数。

非等温反应动力学方程为^[13]:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta}k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

α 为转化率,定义为: $\alpha = (w - w_1)/(w_0 - w_1)$, w 为 τ 时刻固体残余质量, w_0 为初始质量, w_1 为反应最终质量。

k 遵循 Arrhenius 定律,表达式为:

$$k = A\exp(-E/RT) \quad (2)$$

式中, A 、 E 分别为频率因子(min^{-1})、活化能(J/mol), R 为常数 $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ 。联立(1)、(2)可得:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta}A\exp(-E/RT)f(\alpha) \quad (3)$$

对(3)式两边取对数得:

$$\ln \frac{d\alpha}{dT} = \ln\left(\frac{A}{\beta}\right) - \frac{E}{RT} + \ln f(\alpha) \quad (4)$$

对于固体燃烧失重反应,在各种动态法实验中, $f(\alpha)$ 的表达式可选用:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$$

因此,反应过程中的总反应为:

$$\ln \frac{d\alpha}{dT} = \ln\left(\frac{A}{\beta}\right) - \frac{E}{RT} + n\ln(1 - \alpha) \quad (5)$$

令式(5)中 $y = \ln(d\alpha/dT)$, $x_1 = 1/T$, $x_2 = \ln(1 - \alpha)$, $b_0 = \ln(A/\beta)$, $b_1 = -E/R$, $b_2 = n$, 反应方程变为 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ 。采用最小二乘法原理进行二元线性拟合,可得到 b_0 、 b_1 、 b_2 , 进而可求出反应级数 $n(n = b_2)$ 、反应活化能 $E(E = -R \times b_1)$ 和频率因子 $A(A = \beta \times \exp(b_0))$ (Fridman 法^[14], 简称 FM 方法)。

为了验证计算结果,采用 Fridman-Carroll 法^[13] (简称 FC 方法)对同一阶段数据进行计算。

在程序实现上,采取在 Origin 8.5.1 中编制用户自定义函数方式来实现各段线性拟合,温度区间取 $A \sim C$ 、 $H \sim D$,前一段主要为挥发分析出,后一段主要为固定碳燃烧,详细结果见表 3。

表 3 4 种样本燃烧动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of four samples

样本	$T(^{\circ}\text{C})$	$E(\text{kJ/mol})$		$A(\text{min}^{-1})$		n		r	
		FM	FC	FM	FC	FM	FC	FM	FC
刨花板	180.7 ~ 343.0	95.65	98.33	1.43E+08	2.83E+08	3.30	3.7	0.99001	0.99409
	395.6 ~ 574.8	26.45	29.67	6.03E+00	1.11E+01	0.35	0.4	0.98120	0.99658
纤维密度板	170.5 ~ 341.3	93.46	98.34	7.86E+07	2.76E+08	3.24	4.2	0.98109	0.98750
	392.9 ~ 538.4	31.06	32.70	1.65E+01	2.49E+01	0.37	0.4	0.94553	0.99200
夹心胶合板	171.2 ~ 304.9	129.01	132.76	3.88E+11	1.03E+12	4.18	5.1	0.98827	0.99127
	414.5 ~ 568.1	16.88	22.65	1.24E+00	3.64E+00	0.32	0.4	0.94445	0.98335
松木集成材	181.1 ~ 341.6	95.61	99.74	7.02E+07	1.97E+08	1.38	2.1	0.98435	0.98732
	384.8 ~ 535.7	24.89	28.10	4.35E+00	8.05E+00	0.15	0.2	0.97733	0.99113

从表中可以看两种方法在各温度段线性拟合相关系数 r 低温段均在 0.98 以上,线性拟合效果显著,具有较高线性度;高温区相关系数大部分均在 0.97 以上,比低温段略低,但线性度仍比较好。

两种计算方法得出的表观活化能十分接近,说明计算得出的表观活化能等数据具有可信度。

由表 3 可看出,4 种板材低温段的表观活化能和频率因子比高温段高,这与由原生木材生产出的锯末变化趋势一致^[15]。表观活化能高温段较低的原因是由于样本成分复杂、反应过程具有阶段性。挥发分析出比固定碳燃烧先进行。挥发分析出本身为吸热反应,需要向环境吸收热量,所以这一阶段表观活化能较高。

固定碳燃烧具有与气体燃料不同的特性。固定碳燃烧首先需要吸收相当多的热量,这些热量吸收

后被用于克服碳原子之间的键能。在有氧分子被吸附到固定碳表面的条件下,氧原子与碳原子在界面生成“碳-氧”络合物^[16],其后,络合物离解生成二氧化碳、一氧化碳,同时释放大量热量,释放出的热量首先被样本自身吸收,其余释放到环境中。挥发分燃烧释放出的热量和固定碳自身燃烧放热,有相当一部分被固定碳自身吸收,使固定碳燃烧阶段从表现出的宏观效应来看样本只需要吸收较少外部热量燃烧就可以继续进行,所以这一段活化能数值比挥发分释放段要低。

在低温段,夹芯胶合板对应的表观活化能最大,其余 3 种样本的表现活化能较小且基本相等,说明夹芯胶合板挥发分析出需要向外界吸收较多能量才能进行。在高温段,夹芯胶合板表观活化能最小,表明夹芯胶合板中析发分析出后生成的固定碳活性较

高,只需要向环境吸收较少能量便能进行燃烧反应。

松木集成材在2个温度段平均表观活化能为60.25kJ/mol(FM方法),在4种生物质中最低,说明从燃烧反应平均难易度来考量,4种板材中松木集成材最容易燃烧。

3 结 论

(1)4种板材虽然生产工艺不同,但燃烧过程都可分成3个阶段,即水分蒸发阶段、挥发分析出(或燃烧)阶段、固定碳燃烧阶段。挥发分析出峰失重率:松木集成材>纤维板>夹芯胶合板>刨花板,松木板挥发分析出最猛烈。挥发分析出峰值对应温度:刨花板>松木集成材>纤维板>夹芯胶合板。综合燃烧特性:松木集成材>纤维板>夹芯胶合板>刨花板。

(2)4种生物质燃烧过程均存在2个放热峰和一个吸热峰。吸热峰与挥发分析出峰值对应,次放热峰与挥发分燃烧对应,主放热峰与固定碳燃烧对应。随着温度的升高,挥发分首先析出,达到一定温度后挥发分析出同时发生燃烧,随后固定碳着火燃烧。

(3)把温度区间分成高、低2段(对应挥发分析出段和固定碳燃烧段),采用微分法中的Fridman法、Fridman-Carroll法分别对4种生物质在两个温度区间上的动力学参数进行拟合计算。两种计算方法得出的表观活化能符合得较好。4种生物质的表现活化能高温区均低于低温区,这与生物质燃烧与环境换热、低温区挥发分释放吸热、高温区固定碳燃烧放热有关。松木集成材平均表观活化能最低。

参 考 文 献

- [1] 施海云,方梦祥,王树荣,等. 建筑装璜中几种常用板材热解特性及动力学研究. 火灾科学, **2002**, 11(4): 211-214
Shi Haiyun, Fang Mengxiang, Wang Shurong, et al. Kinetic study on the pyrolysis of some wood used in building and decorating. Fire Safety Science, **2002**, 11(4): 211-214 (in Chinese)
- [2] 李爱民,孙兰军,李润东等. 木质装饰板材贫氧条件下燃烧和热解特性研究. 工程热物理学报, **2005**, 26(6): 237-240
Li Aiming, Sun Lanjun, Li Rundong, et al. Characteristics of combustion and pyrolysis for decorative woods in poor-oxygen atmosphere. Journal of Engineering Thermophysics, **2005**, 26(6): 237-240 (in Chinese)
- [3] C. J. Gómez, E. Mészárosb, E. Jakab, et al. Thermogravimetry/mass spectrometry study of woody residues and an herbaceous biomass crop using PCA techniques. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, **2007**, 80(2): 416-426
- [4] Font R., Conesa J. A., Molto J., et al. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and coness. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, **2009**, 85(1-2): 276-286
- [5] K. Raveendran, Anuradda Ganesh, Kartic C. Khilar. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. Fuel, **1996**, 75(8): 987-998
- [6] Marisamy Muthuraman, Tomoaki Namioka, Kunio Yoshikawa. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste. Bioresource Technology, **2010**, 101(7): 2477-2482
- [7] 于娟,章明川,沈轶,等. 生物质热解特性的热重分析. 上海交通大学学报, **2002**, 36(10): 1476-1478
Yu Juan, Zhang Mingchuan, Shen Yi, et al. Thermogravimetric analysis of pyrolysis characteristics of biomass. Journal of Shanghai Jiatong University, **2002**, 36(10): 1476-1478 (in Chinese)
- [8] Bassilakis R., Carangelo R. M., Wojtowicz M. A. TG-FT-IR analysis of biomass pyrolysis. Fuel, **2001**, 80(12): 1765-1786
- [9] Skedras G., Grammelis P., Basiinas P., et al. Pyrolysis and combustion characteristics of biomass and waste-derived feedstock. American Chemical Society, **2006**, 45(11): 3791-3799
- [10] 邹学权,王新红,吴建军,等. 用热重-差热-红外光谱技术研究煤粉的燃烧特性. 煤炭转化, **2003**, 26(1): 71-73
Zou Xuequan, Wang Xinhong, Wu Jianjun, et al. Study on combustion characteristic of coal by means of technology of TG-DSC-FTIR. Coal Conversion, **2003**, 26(1): 71-73 (in Chinese)
- [11] 姜秀民,李巨斌,邱健荣,等. 超细化煤粉燃烧特性的研究. 中国电机工程学报, **2000**, 20(6): 34-74
Jian Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong, et al. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal. Proceeding of the CSEE, **2000**, 20(6): 34-74 (in Chinese)
- [12] 闵凡飞,张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究. 煤炭学报, **2005**, 30(1): 105-107
Min Fanfei, Zhang Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass. Journal of China Coal Society, **2005**, 30(1): 105-107 (in Chinese)
- [13] 胡荣祖,史启祯. 热分析动力学. 北京:科学出版社, **2001**. 99-100, 117-118
- [14] Starink M. J. The determination of activation energy from linear heating rate experiments: A comparison of the accuracy of isoconversion methods. Thermochimica Acta. **2003**, 404(1-2): 163-176
- [15] Wang Gang, Li Wen, Li Baoqing, et al. TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas. Fuel, **2008**, 87(4-5): 552-558
- [16] 刘荣厚,牛卫生,张大雷. 生成质热化学转换技术. 北京:化学工业出版社, **2005**. 45