

人工林珍贵树种柚木和楸木的热解特性及动力学

李路明¹, 闵德秀², 翁淇臻³, 陈志林¹, 卢金汉¹, 姜鹏¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 山东新港企业集团有限公司, 山东临沂 276000;

3. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 木材阻燃体系的选择应考虑其热解特性, 选取人工林珍贵树种柚木、楸木和速生材杉木、辐射松为研究对象, 通过化学成分和热重(TG)分析试验, 研究热解特性、热解动力学模型和参数, 为阻燃体系选择提供理论依据。结果表明: 四种木材的热解过程均可分为失水、过渡、剧烈降解和成炭等四个阶段; 柚木、楸木的最大热解速率温度、活化能和活化因子均低于杉木和辐射松, 适用于热解温度相对较低的阻燃体系。

关键词: 柚木; 楸木; 热解特性; 热解动力学; 阻燃体系

中图分类号: S781.37; TS67 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 06-0005-06

Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Wood from Teak and Catalpa Plantations

LI Lu-ming¹, MIN De-xiu², WENG Qi-zhen³, CHEN Zhi-lin¹, LU Jin-han¹, JIANG Peng¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Shandong Xingang Enterprise Group Co. Ltd.,

Linyi 276000, Shandong, China; 3. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The selection of a wood flame retardant system is closely related to its pyrolysis characteristics. To provide theoretical bases for thermal degradation and flame retardant system selection, the chemical composition and thermo gravimetric (TG) analysis experiments were conducted on the wood of teak (*Tectona grandis*) and catalpa (*Catalpa bungei*) from plantations, as well as using wood samples of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) and radiata pine (*Pinus radiata*) as control groups. The pyrolysis characteristics, thermal degradation kinetic models and parameters were explored. The results showed that: 1) the pyrolysis process of the four wood species could be divided into four stages: water loss, transition, severe degradation and char-forming; 2) the temperature under maximum decomposition rate, activation energy and activation factor of teak and catalpa were lower than those of Chinese fir and radiata pine. The teak and catalpa wood are suitable for a flame retardant system with relatively lower thermal decomposition temperature.

Key words: teak (*Tectona grandis*); catalpa (*Catalpa bungei*); pyrolysis characteristics; pyrolysis kinetics; flame retardant system

收稿日期: 2019-11-18; 修改日期: 2020-10-20

基金项目: 国家重点研发计划“珍贵树种木门增值加工技术集成与示范研究”(2017YFD0601106); 山东省重大科技创新工程“高性能生物基建材制备技术的集成创新及产业化”(2019JZZY010305)。

作者简介: 李路明(1986—), 男, 博士研究生。Email: liluming@caf.ac.cn

通讯作者: 姜鹏, 男, 助理研究员, 博士。Email: jiangpeng@caf.ac.cn

木材作为传统的建筑、家具用材,广泛应用于室内装饰、装修和家居制品制作。GB 50222—2017《建筑内部装修设计防火规范》的修订实施,对材料阻燃性能提出了更高的要求,木材的易燃属性使其应用受到了一定的局限,研究和提高木材的阻燃性能具有重要的现实意义^[1-2]。热解是木材燃烧的前期阶段,热解产物为木材后续燃烧提供了燃料,因此木材热解特性的研究是高效阻燃体系选择、燃烧等级提高及木材燃烧机理阐明的基础^[3]。热解动力学可通过研究热解反应的机制来确定热解反应过程和速度,从而揭示材料燃烧的本质,能更有效地去控制燃烧^[4]。研究人员针对木质材料的热解条件、过程和模型开展了研究,通过对落叶松(*Larix gmelinii*)^[5]的热解数据分析,建立了热解模型并求出动力学参数,发现实木部分的热转化率大于树皮;通过计算木粉、纤维素和木质素的动力学参数,求出活化能,为木材着火和火蔓延提供了研究数据^[6];通过秸秆、木材剩余物、竹材的热失重过程的研究发现,不同生物质的热解与燃烧规律基本一致,且木基材料和竹基材料的热解动力学机理函数可以通用^[4,7-9]。

珍贵树种木材因其优异的品质和美学价值,主要用于高档家具、乐器等实木制品制作及高端装饰、装修。然而我国珍贵用材树种资源严重不足,随着人们日益增长的美好生活需要,社会对珍贵用材的需求量越来越大,珍贵用材树种资源已经成为重要的战略资源。人工林珍贵树种培育是缓解我国木材战略安全的重要手段^[10]。研究人工林珍贵树种木材的性能,将为其应用提供理论数据支撑。

笔者以人工林珍贵树种柚木(*Tectona grandis*)和楸木(*Catalpa bungei*)为研究对象,以人工林速生材杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和辐射松(*Pinus radiata*)为参照,通过对四种试材进行化学成分分析、热重分析和热解动力学研究,分析了热解特性和及动力学特性,探究了两种人工林珍贵树种木材的热解机理,旨在为后期选择高效的阻燃体系,提供基础理论数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

人工林珍贵树种木材:柚木,树龄20年,采集

于云南;楸木,树龄30年,采集于河南。

人工林速生材:杉木,树龄20年,采集于四川;辐射松,树龄20年,自新西兰进口。

在树干1.3米处木质部取样,制成试件尺寸为50 mm×50 mm×20 mm,将样品置于103℃烘箱中干燥至绝干状态,在实验室温湿度条件下(温度25℃±3℃,相对湿度40%±5%)放置14天重新达到平衡状态后,将样品粉碎至粒径80~100目备用。

1.2 试验仪器

热重分析仪(TGA 209 F1 Libra)、马弗炉、高压灭菌锅、台式低速离心机、UV2300紫外-可见分光光度计、高效液相色谱仪HPLC。

1.3 试验方法

1.3.1 木材化学成分分析 纤维素、戊聚糖、木质素和灰分含量的测定,采用NREL美国可再生能源实验室方法^[11-12];抽提物测定依据GB/T 35816—2018《林业生物质原料分析方法抽提物含量的测定》。各成分测定试验重复5次,取平均值。

1.3.2 热重分析(thermo gravimetry, TG) TG是在程序控制温度下测量物质的质量与温度关系的一种技术,是分析热解行为的最有效方法^[13],可以连续记录质量与温度的函数关系(TG曲线),其中质量 m 对时间 t 进行一次微商即得微商热重(differential thermogravimetry, DTG)曲线。本研究选取四种升温速率^[14-15]:5、10、15、20℃/min;采用氮气气体氛围,流量为20 mL/min;热解温度区间为40℃~800℃;样品用量为9~12 mg。

2 结果与分析

2.1 样品热解特性分析

木材各化学成分热解温度及含量的不同,是其具有不同热解特性的原因之一。木材主要化学成分纤维素、戊聚糖和木质素的热分解温度区间分别是:315~400、220~350和160~900℃^[16]。四个树种的木材主要化学成分含量测试结果列于表1。

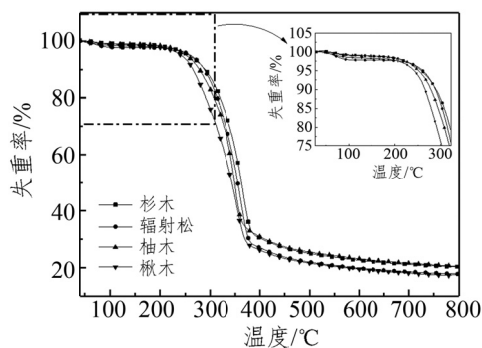
由表1可知,辐射松和杉木的纤维素和戊聚糖(半纤维素中以木糖基为主链的一种高聚糖)的含量明显高于柚木和楸木;辐射松和楸木的木质素含量低于杉木和柚木;对比抽提物含量,辐射松最低,楸木样品最高。

表1 四种试材主要化学成分含量

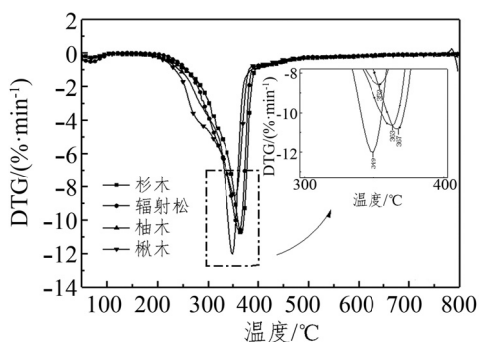
Tab.1 The main chemical composition of four wood species

树种	纤维素	戊聚糖	木质素	苯醇抽提物	灰分
柚木	37.91	11.16	37.04	5.93	0.86
楸木	36.85	14.98	30.67	8.15	2.06
杉木	40.45	15.07	37.37	6.65	0.76
辐射松	41.42	21.48	30.17	1.01	1.59

已有研究表明, 10 °C/min 为研究木材热解动力学常选的升温速率^[17]。四个树种在升温速率 10 °C/min 时 TG 和 DTG 曲线如图 1 所示。从图 1a TG 曲线可以看出, 四种木材的热解趋势相似, 其热解过程均主要分为四个阶段, 特征温度点分别为 T_1 (第一阶段终止温度即第二阶段起始温度)、 T_2 (第二阶段终止温度即第三阶段起始温度) 和 T_3 (第三阶段终止温度即第四阶段开始温度)。



a. TG 曲线



b. DTG 曲线

图1 四种木材热解 TG 和 DTG 曲线 (升温速率 10 °C/min)
Fig.1 TGA and DTG curves of pyrolysis characteristics of four wood species at a heating rate of 10 °C/min

第一阶段 (40 °C~ T_1) 为失水阶段。样品绝干处理后置于 (25±3) °C, 40%±5%相对湿度条件下, 使样品重新达到一致的平衡状态, 此失重阶段为样品在吸湿后受热失水过程^[18], 该阶段的质量损失在

5%以内。温度升高至 T_1 (110~120 °C) 后, 失重趋于平缓。

第二阶段 (T_1 ~ T_2) 为过渡阶段。该阶段温度区间 110~180 °C, 木质素开始逐渐分解, 但失重率非常小, 重量基本保持不变, 在图 1a 中表现为一段相对较平的直线。

第三阶段 (T_2 ~ T_3) 为主要热解阶段, 大量半纤维素、纤维素及少量木质素分解。该阶段样品质量明显下降, 同时热解速率出现峰值, 图 1b 曲线显示, 柚木、楸木的最大热解速率温度分别为 349、352 °C, 均低于辐射松、杉木的最大热解速率温度 363、367 °C。由此可知, 相较于杉木和辐射松, 柚木、楸木在低的温度条件下即可达到最大热解速率, 表明柚木、楸木的热稳定性略低于杉木和辐射松。

第四阶段 (T_3 ~800 °C) 为成炭阶段, 剩余物缓慢分解直至结束, 随着温度升高, 失重逐渐趋于稳定。800 °C 时柚木和杉木的残炭量为 20.31% 和 20.18%, 楸木和辐射松的残炭量为 17.33% 和 17.72%, 差异与木质素含量有关。由于木质素的含碳量比纤维素和半纤维素都高, 热解后产生更多的残炭^[19-20]。从表 1 可知, 柚木和杉木木质素含量分别为 37.04% 和 37.37%, 均高于楸木 30.67% 和辐射松 30.17%, 因此柚木和杉木热解后的残炭量较高。

2.2 升温速率对热解特性的影响

火灾场景中木材的燃烧存在各种不确定因素, 自身接触火源或其他燃烧物引起木材温度升高均可造成木材起火, 因此升温速率是影响木材热解的重要参数, 改变升温速率可在一定程度上模拟木材在不同的起火过程中的热解行为。表 2 列出了不同升温速率下四种木材的各热解特征温度点 T_1 、 T_2 、 T_3 对应值和相应的残炭量。

从表 2 中可以看出, 四种木材在热解第一阶段, 随着升温速率的提高, T_1 呈逐渐增大趋势; 在第二阶段随着升温速率的升高, T_2 逐渐降低, 这主要是由于 T_1 至 T_2 为过渡阶段, 此阶段吸收热量, 但只有少量木质素逐渐开始分解, 升温速率加快导致试材受热反应时间缩短, 使反应还未进行完全便进入到更高的温度条件, 从而产生了滞后现象^[21]。四种木材的第三阶段终止温度 (T_3) 均向高温区偏移, 说明随着升温速率越大, 温度升高过快, 样品颗粒来不

及吸收热量,导致 T_3 向高温侧移动。升温速率为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,杉木在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的残炭量异常升高 (33.34%),这可能是于升温速率过快,导致杉木木材热解不彻底^[22]。快速升温条件下发生的燃烧滞后现象,为阻燃剂的选择提供了基础数据。选择热解速率高于木材的阻燃剂,在木材发生燃烧滞后现象时阻燃剂开始分解,可以更好地起到保护作用。

表2 不同升温速率的热解特征温度及残炭量

Tab.2 Characteristic temperatures and char yields of thermal decomposition at different heating rates

树种	升温速率/ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	T_1 / $^{\circ}\text{C}$	残炭 量 $T_1/\%$	T_2 / $^{\circ}\text{C}$	残炭 量 $T_2/\%$	T_3 / $^{\circ}\text{C}$	残炭 量 $T_3/\%$	残炭量 (800°C)/%
柚木	5	92	99.35	182	99.15	485	26.57	21.41
	10	123	98.92	171	98.76	500	25.48	20.31
	15	110	99.09	165	98.79	515	19.60	14.89
	20	119	99.34	151	99.23	539	21.17	17.61
楸木	5	100	98.43	177	98.23	535	22.79	19.11
	10	119	98.40	169	98.08	541	20.53	17.33
	15	120	98.64	167	98.20	556	24.58	21.38
	20	125	98.96	164	98.71	561	22.65	19.82
辐射松	5	92	96.99	184	96.94	523	29.72	25.84
	10	109	97.80	178	97.76	530	21.15	17.72
	15	117	98.93	176	98.55	539	26.67	22.03
	20	123	97.61	174	97.44	541	25.32	22.08
杉木	5	97	98.02	179	97.30	386	33.80	17.21
	10	107	99.11	176	98.67	520	24.83	20.18
	15	112	98.27	174	97.65	524	25.45	21.43
	20	118	98.99	173	98.62	574	35.67	33.34

2.3 热解动力学分析

研究四种木材的热解机理,需要建立热解动力学模型,分析热解反应的3个动力学基本要素:动力学机理函数、活化能 E 和活化因子 A 。通过动力学机理函数构建动力学模型,求解活化能和活化因子;活化能 E 的大小反映了氧化反应所需要的最小能量;活化因子 A 与单位时间、单位体积内反应物分子碰撞次数有关,代表反应中物质分子碰撞的频率, A 越高,说明反应越激烈。活化能和活化因子可反映试材的热稳定性,因此对研究木材阻燃机理,选择适合的阻燃剂具有参考意义。

活化能 E 和活化因子 A 的计算依赖于机理函数的正确选择。根据 Slopiecka 等人在杨木热解动力学方面的研究^[23],采用 Coats-Redfern 法计算活化能 E

和活化因子 A , 方程式为:

$$\ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left(\frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT} \quad (1)$$

其中: α —热解转化率,即质量损失率,%; T —热解时间, min; R —摩尔气体常量, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; A —活化因子, s^{-1} ; E —活化能, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; β —加热速率, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

2.3.1 最佳机理函数确定

最佳机理函数采用 Malek 法,由试验曲线和标准曲线的拟合度来确定。然后根据由 Coats-Redfern 法得到的线性回归拟合优度,进一步验证机理函数的正确性。由上述 Coats-Redfern 积分方程可以得到:

$$G(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{ART^2}{\beta E} e^{-\frac{E}{RT}} = \frac{RT^2}{\beta E} \frac{d\alpha}{dt} \frac{1}{f(\alpha)} \quad (2)$$

$$\text{当 } \alpha = 0.5 \text{ 时, 可得: } G(0.5) = \frac{RT_{0.5}^2}{\beta E} \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5} \frac{1}{f(0.5)};$$

其中, $T_{0.5}$ 为 $\alpha = 0.5$ 时的温度, $\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}$ 为 $\alpha = 0.5$ 时的反应速率。

$G(\alpha)$ 除以 $G(0.5)$ 经变形可得:

$$\frac{f(\alpha)G(\alpha)}{f(0.5)G(0.5)} = \left(\frac{T}{T_{0.5}} \right)^2 \frac{\frac{d\alpha}{dt}}{\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}} \quad (3)$$

其中左边为标准式,定义 $Y(\alpha) = \frac{f(\alpha)G(\alpha)}{f(0.5)G(0.5)}$; 右边为

试验式,定义 $y(\alpha) = \left(\frac{T}{T_{0.5}} \right)^2 \frac{\frac{d\alpha}{dt}}{\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}}$ 。

常见的 25 种动力学机理函数列于表 3。根据表 3 中 25 个机理函数计算公式 3 标准式,得到 25 条标准曲线。

因不同升温速率对木材的热解影响较小,故依然选择 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的热解现象为研究对象,分别向公式 3 代入四种木材在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率条件下的热解数据,得到每个树种对应的试验曲线 $y(\alpha) \sim \alpha$ 。在 25 个标准曲线中最接近试验曲线的 7 条标准曲线(分别为函数号 3、5、8、9、18、23、24)与四种木材的试验曲线对比如图 2 所示。

从图中可以看出,24 号函数对应的标准曲线与试验曲线相似度最高,因此选择热解阶段的最佳机理函数的积分形式为:

$$G(\alpha) = -[(1 - (1 - \alpha)^{-1})] \quad (4)$$

表3 选择的动力学机理函数
Tab.3 Selected kinetic mechanism functions

编号	函数名称	$G(\alpha)$
1	抛物线法则	α^2
2	Valensi 方程	$\alpha + (1 - \alpha)\ln(1 - \alpha)$
3	Jander 方程(2D, $n=1/2$)	$[(1 - (1 - \alpha)^{1/2})]^{1/2}$
4	Jander 方程(2D, $n=2$)	$[(1 - (1 - \alpha)^{1/2})]^2$
5	Jander 方程(3D, $n=1/2$)	$[(1 - (1 - \alpha)^{1/3})]^{1/2}$
6	Jander 方程(3D, $n=2$)	$[(1 - (1 - \alpha)^{1/3})]^2$
7	G-B 方程	$1 - 2/3\alpha - (1 - \alpha)^{2/3}$
8	反 Jander 方程	$[(1 + \alpha)^{1/3} - 1]^2$
9	Zhuralev, Lesokin 和 TemPelman 方程	$[(1 - \alpha)^{-1/3} - 1]^2$
10	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$
11	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$
12	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^{2/5}$
13	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$
14	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^2$
15	Avrami-Erofeev 方程	$[-\ln(1 - \alpha)]^4$
16	Mamle 单行法则, 一级	$-\ln(1 - \alpha)$
17	Mamle Power 法则	$\alpha^{1/3}$
18	Mamle Power 法则	$\alpha^{1/2}$
19	Mamle Power 法则	α
20	Mamle Power 法则	$\alpha^{3/2}$
21	Mamle Power 法则	α^2
22	反应级数, $n=1/2$	$2[(1 - (1 - \alpha)^{1/2})]$
23	反应级数, $n=3/2$	$-2[(1 - (1 - \alpha)^{-1/2})]$
24	反应级数, $n=2$	$-[(1 - (1 - \alpha)^{-1})]$
25	反应级数, $n=3$	$-[(1 - (1 - \alpha)^{-2})/2]$

2.3.2 动力学分析及参数计算

通过确定最佳机理函数, 根据公式 1, 由

$\ln \left[\frac{G(\alpha)}{T^2} \right] \sim \frac{1}{T}$ 的直线关系, 通过 Coats-Redfern 法线性

回归得到拟合曲线的斜率 k 和截距 b , 其中 $k = -\frac{E}{R}$,

$b = \ln \left(\frac{AR}{\beta E} \right)$, 得出表观活化能 $E = -kR$, 活化因子

$A = \frac{\beta e^b E}{R} = -k\beta e^b$ 。因此, 通过计算获得的动力学

参数 E 和 A , 可确定最佳机理函数。从而建立起数学模型为柚木、楸木选择阻燃剂、预测其阻燃处理后热解反应速率及与阻燃剂在燃烧前期反应难易程度等方面提供数据支撑, 为增值加工利用提供理论基础。四种木材在主要热解阶段 ($T_2 \sim T_3$ 温度范围) 的表观活化能 E , 活化因子 A , 计算结果见表 4。

表4 四种试材热解阶段的动力学参数

Tab.4 Kinetic parameters of four wood species during pyrolysis

试材 树种	拟合曲线	热解温度 范围/℃	活化能 E / ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	活化因子 A / ($10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	拟合 优度 R
杉木	$y=4.184-10910x$	176~520	90.71	3.38×10^6	0.9887
辐射松	$y=5.125-11340x$	178~530	94.28	9.00×10^6	0.9933
柚木	$y=3.103-10030x$	171~500	83.39	1.05×10^6	0.9810
楸木	$y=0.646-8321x$	169~541	69.18	7.49×10^4	0.9951

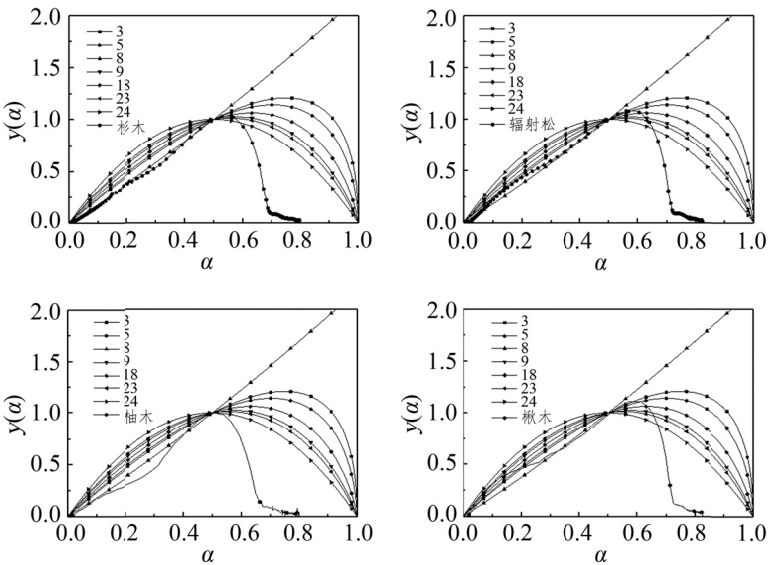


图2 标准曲线与四种木材的 $y(\alpha) \sim \alpha$ 曲线

Fig.2 $y(\alpha) \sim \alpha$ curves of four wood species and standard curves

由表 4 可看出, 试材的拟合优度 R 均接近于 1, 证明所选的机理函数符合实际。杉木、辐射松的活化能和活化因子均高于柚木、楸木, 可知柚木、楸木的热稳定性相对较差, 也与 TG 分析的数据结果一致。说明在使用人工林珍贵树种柚木、楸木时, 更应注意使用环境温度限制和实施阻燃处理, 阻燃处理更适合选择分解温度较低的阻燃体系。

3 结论

1) 人工林珍贵树种木材柚木、楸木与速生材杉木、辐射松的热解过程一致, 均可分为四个阶段: 失水阶段、过渡阶段、剧烈分解阶段和成炭阶段。柚木、楸木的

最大热解速率温度低于杉木、辐射松；木质素含量较高的柚木和杉木，成炭性相对辐射松和楸木较好。

2) 采用 Coats-Redfern 法建立了四个树种的热解动力学模型，热解反应机理函数为： $G(\alpha) = -[(1 - (1 - \alpha)^{-1})]$ ，该函数可为研究其热化学利用、预测其热解反应速率和与阻燃剂在燃烧前期的反应难易程度提供理论模型。

3) 通过计算得到了四个树种木材的热解动力学参数，柚木、楸木的活化能和活化因子均低于杉木、辐射松，在阻燃处理中，柚木和楸木更适合选择热解温度相对较低的阻燃体系。

参考文献:

- [1] 姜鹏, 陈志林, 梁善庆, 等. 阻燃脲醛树脂制备刨花板的燃烧性能及成炭机理[J]. 木材工业, 2019, 33(5): 1-6.
JIANG P, CHEN Z L, LIANG S Q, et al. Combustion behavior and charring mechanism of particleboards manufactured with modified fire-retardant urea formaldehyde resins[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 1-6.
- [2] 王灵燕, 聂玉静, 陈争骥, 等. 我国木材阻燃研究现状及发展趋势[J]. 浙江林业科技, 2016, 36(5): 82-88.
WANG L Y, NIE Y J, CHEN Z J, et al. Researches on fire-retardanting of wood in China [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2016, 36(5): 82-88.
- [3] 胡云楚, 陈茜文, 周培疆, 等. 木材热分解动力学研究[J]. 林产化学与工业, 1995, 15(4): 45-49.
HU Y C, CHEN Q W, ZHOU P J, et al. The thermokinetic study of wood pyrolysis[J]. Chemistry & Industry of Forest Products, 1995, 15(4): 45-49.
- [4] 傅深渊, 程书娜, 赵广杰, 等. 阻燃型竹丝成形材燃烧动力学和燃烧性能[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 767-773.
FU S Y, CHENG S N, ZHAO G J, et al. Kinetic and combustion properties from a combustion reaction of bamboo strips soaked by fire-retardant material [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 767-773.
- [5] 杜洪双, 常建民, 李瑞, 等. 落叶松木材的热解特性[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(12): 25-29.
DU H S, CHANG J M, LI R, et al. Pyrolysis characteristics of larch wood [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(12): 25-29.
- [6] 阎昊鹏, 陆熙娟, 秦特夫. 热重法研究木材热解反应动力学[J]. 木材工业, 1997, 11(2): 13-17.
YAN H P, LU X X, QIN T F. Study on chemical kinetics of wood pyrolysis by thermogravimetric analysis [J]. China Wood Industry, 1997, 11(2): 13-17.
- [7] 刘郁珏, 张涵斌, 张歆然. 秸秆热解·燃烧特性及动力学研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(4): 12-17, 21.
LIU Y J, ZHANG H B, ZHANG X R. Study on dynamics and character of straw pyrogenic decomposition and combustion [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(4): 12-17, 21.
- [8] 马孝琴. 生物质燃烧动力学特性试验研究[J]. 可再生能源, 2004(6): 18-22.
MA X Q. Study on kinetic characteristics in combustion process of biomass [J]. Renewable Energy, 2004(6): 18-22.
- [9] 辛颖, 薛伟, 侯卫萍, 等. 木材剩余物热解试验与动力学研究[J]. 试验室研究与探索, 2014, 33(7): 39-43.
XIN Y, XUE W, HOU W P, et al. On kinetic analysis and pyrolysis experiment of wood residue [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(7): 39-43.
- [10] 中国主要栽培珍贵树种参考名录(2017年版) [EB/OL] (2017-11-09) [2020-11-05].
<http://www.forestry.gov.cn/main/3954/20171109/1045203.html>.
- [11] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass[J]. Laboratory Analytical Procedure, 2012 (TP-510-42618).
- [12] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of ash in biomass[R]. Technical Report NREL/TP-510-42622. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2008.
- [13] Ninan K N. Kinetics of solid state thermal decomposition reactions[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(4): 1267-1278.
- [14] 孙珂, 漆楚生, 汪莉君, 等. 杉木纤维素的热稳定性及热分解动力学参数[J]. 林产工业, 2018, 45(4): 38-42.
SUN K, QI C S, WANG L J, et al. Thermal stability and decomposition kinetics parameters of Chinese fir cellulose[J]. China Forest Products Industry, 2018, 45(4): 38-42.
- [15] 孙云娟, 蒋剑春, 王燕杰, 等. Coats-Redfern积分法研究生物质与煤单独热解和共热解动力学特性[J]. 林产化学与工业, 2014(5): 8-14.
SUN Y J, JIANG J C, WANG Y J, et al. Kinetic analysis of biomass and coal mono-pyrolysis as well as co-pyrolysis by coats-redfern[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2014(5): 8-14.
- [16] YANG H, YAN R, CHEN H, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis[J]. Fuel, 2007, 86(12-13): 1781-1788.
- [17] 胡云楚, 刘元. 酚类阻燃剂处理杉木热解过程的热动力学研究[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 116-120.
HU Y C, LIU Y. Thermodynamics study on fire retardant wood with phenol flame-retardants[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(3): 116-120.
- [18] 王慧, 贾娜, 辛颖. 木材的热重分析试验及动力学分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(9): 1209-1212.
WANG H, JIA N, XIN Y. Thermogravimetric analysis experiment and kinetic analysis of wood [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(9): 1209-1212.
- [19] Cordero T, Rodriguez-Maroto J M, Rodriguez-Mirasol J, et al. On the kinetics of thermal decomposition of wood and wood components[J]. Thermochimica Acta, 1990, 164: 135-144.
- [20] 宋彦彦, 金森, 汪兆洋. 4种草本可燃物的热解特性和动力学研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 32(11): 51-55.
SONG Y Y, JIN S, WANG Z Y. Studies on pyrolysis and kinetics characteristics of four herbaceous fuels [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 32(11): 51-55.
- [21] 宿磊. 木塑复合材料热解动力学研究[D]. 保定: 河北大学, 2010.
- [22] 王景巍, 张曼玲, 薛伟. 李子和梨树枝条的热解特性及动力学分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 341-344.
WANG J W, ZHANG M L, XUE W. Pyrolysis characteristics and dynamics analysis of branches of pear trees and plum trees [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(3): 341-344.
- [23] Slopiecka K, P Bartocci, F Fantozzi. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis[J]. Applied Energy, 2012, 97: 491-497.

(本文编校 张鹏、向琴)