

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.038

# 桉树热解产物热物性参数演变特性研究

王明峰<sup>1</sup> 陈志文<sup>1</sup> 蒋恩臣<sup>1</sup> 任永志<sup>1</sup> 王东海<sup>2</sup> 王微<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642; 2. 堪萨斯州立大学生物与农业工程学院, 曼哈顿 66506)

**摘要:** 在自行设计的生物质固定床热解装置上,进行了150~850℃温度范围内,每隔100℃的桉树芯材木屑的固定床热解实验,并进行固态产物的热物性参数测试。结果表明:随着温度的升高,桉树芯材热解炭的固态产率逐渐减小,低位热值逐渐增大,450℃热解炭的热值比木屑原料提高了95.53%;堆积密度先减小后增大,体积能量密度持续增大,750℃热解炭的体积能量密度比原料增大了63.21%;热解炭的比热容和导热系数与热解炭内部的含水率、骨架结构,即孔道开度和密度有密切的关系。随着热解温度的升高,热解炭的比热容呈U字型趋势先减小而后增大,导热系数先轻微减小后以指数形式大幅增大,得到比热容和导热系数随温度的变化曲线方程,拟合度分别为0.9320和0.9953。

**关键词:** 桉树; 热解; 热物性参数; 演变特性

**中图分类号:** S216; TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0317-05

## Thermal Parameters Properties Evolution of Eucalyptus Pyrolysis Bio-char

WANG Mingfeng<sup>1</sup> CHEN Zhiwen<sup>1</sup> JIANG Enchen<sup>1</sup> REN Yongzhi<sup>1</sup> WANG Donghai<sup>2</sup> WANG Wei<sup>1</sup>

(1. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Kansas State University, Manhattan 66506, USA)

**Abstract:** In recent years, with the growth of population and shortage of fossil energy, the environmental pollution problem has become more severe. Eucalyptus planted in south China is a kind of biomass resource with large quantity and high quality. The thermochemical conversion of biomass (pyrolysis, gasification, or combustion) is one of the most promising non-nuclear forms of future energy. It is a renewable source of energy and has many advantages from the ecological point of view. Pyrolysis of wood is a very complicated physical and chemical process which can transform biomass into useful fuel, such as bio-char, bio-oil and gas. Studying its thermo-physical properties is of great significance for the design of the equipment, control of process parameters and quality of the product. In the self-designed fixed bed pyrolysis device, the eucalyptus wood chips were paralyzed in the temperature range of 150~850℃. The remaining bio-char proceeds to be tested for the thermal parameters, including solid yield, bulk density, volume energy density, specific heat and heat conductivity coefficient. The results showed that with the increase of temperature, the solid yield was decreased and the weight loss rate in temperature range of 150~350℃ was up to 31.40% per 100℃; the lower heating value (LHV) of samples was increased gradually. The LHV of bio-char at 750℃ was 95.53% higher than that of the raw eucalyptus. Bulk density was decreased first and then increased while the volume energy density (VED) was increased in the whole experimental temperature range. The VED of bio-char at 750℃ was up to 63.21% more intensive than the raw material. The specific heat and heat conductivity coefficient were closely related to the moisture content and pores structure in bio-char. With the increase of treated temperature, the specific heat of sample presented a U-shaped tendency which was decreased firstly and then increased significantly. The heat conductivity coefficient was increased according to exponential growth after slight decrease. The fitting equations of specific heat  $C_p$  and heat conductivity coefficient  $\lambda$  with temperature were obtained and the fitting degrees  $R^2$  were 0.9320 and 0.9953, respectively.

**Key words:** eucalyptus; pyrolysis; thermal parameters; evolution properties

收稿日期: 2017-11-11 修回日期: 2017-12-21

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51706074)、科技部农业科技成果转化资金项目(20150237)、广州市科技计划项目(201607010138)和广东省科技计划项目(20160221)

**作者简介:** 王明峰(1982—),男,讲师,主要从事生物质能利用工程研究,E-mail: wangmingfeng@scau.edu.cn

**通信作者:** 蒋恩臣(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质能利用工程研究,E-mail: ecjiang@scau.edu.cn

## 0 引言

随着人口增长,化石能源短缺和环境污染问题的日益严重<sup>[1-2]</sup>,可再生能源,如生物质能源、太阳能、风能和潮汐能等的开发利用,逐渐成为近年研究的热点,同时也事关国家的能源安全和长远发展<sup>[3-4]</sup>。

热解是在高温和缺氧环境下,将生物质转化为固、液、气三态产物,三态产物的产率和性质可根据热解工况调节,因此,热解技术被认为是一种极具前景的热化学转化利用技术<sup>[5-7]</sup>。然而,热解是一个十分复杂的物理、化学过程,研究生物质热物性参数对于热解传热特性研究、热解装置设计、工艺参数优化和产物品质调控具有实际意义<sup>[8]</sup>。国内外研究人员通过热解过程中的生物质传热特性的研究,建立了多种热解传热传质模型,为设计热解装置和控制实验过程提供了理论指导<sup>[9-13]</sup>。

目前,已建立的热解传热模型所用的如密度、比热容或导热系数等热物性参数一般为固定值,而这些参数均是随热解温度而变的,因此,这类模型主要适用于小颗粒、少量或薄层类生物质热解。例如 BABU 等<sup>[14]</sup>在描述单颗粒的热解传热模型时,将生物质的热解反应热和表面对流换热系数分别视为恒定的  $-255\ 000\ \text{J/kg}$  和  $8.40\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 郭飞宏等<sup>[15]</sup>在研究流化床内柱型生物质与石英砂的流动传热过程时,将生物质柱型颗粒的导热系数视为恒定的  $0.15\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; DINH 等<sup>[16]</sup>在建立流化床快速热解传热模型时,使用不变的生物质密度、对流传热系数和导热系数。

在生物质热解过程中,热解原料的理化性质将随温度的变化而发生巨大变化,对于尺寸较大或大量堆积的生物质热解,由于内部温度分布不均、热解进程不一,采用恒定的热物性参数必然影响模型的准确性。因此,深入研究热解过程中生物质的热物性参数演变特性,对于准确模拟热解传热传质过程、描述热解进程具有重要意义。

本文研究桉树芯材木屑在热解过程的热物性参数演变特性,获得生物质热解过程中较宽温度范围内的动态热物理特性参数,包括堆积密度、比热容、导热系数等,旨在为相关传热问题的研究提供建模基础参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

以广东省梅州市某木材加工厂提供的桉树芯材为生物质原料,桉树芯材经粉碎和过 20 目筛处理,

在  $50\text{℃}$  恒温干燥箱内干燥 24 h 备用,基于 GB/T 28731—2012《固体生物质燃料工业分析方法》进行工业分析,测得其含水率为 5.39%,灰分质量分数为 0.71%,挥发分质量分数为 77.50%,固定碳质量分数为 16.40%,基于 GB/T 212—2008 测得其低位热值为  $14.833\ \text{MJ/kg}$ 。

### 1.2 热解装置

利用自制固定床热解装置处理桉树芯材木屑,装置如图 1 所示,处理方法如下:在  $150\sim 850\text{℃}$  的温度范围内,每隔  $100\text{℃}$  进行桉树芯材木屑热解,室温 ( $25\text{℃}$ ) 至实验温度的升温速率为  $10\text{℃}/\text{min}$ ,热解时间为 4 h,热解过程中通入 99.99% 的氮气作为载气,流量为  $50\ \text{mL}/\text{min}$ ,每个温度下的热解实验重复 3 次,将所得固态产物装入密封袋混匀。得到的固态产物用于固态产率、低位热值、堆积密度、导热系数和比热容的测定,每个参数测定 3 次取平均值。实验过程中热解挥发物经冷凝管冷凝后点燃,不做收集和分析。

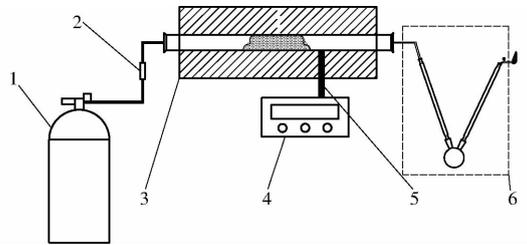


图 1 固定床热解装置示意图

Fig. 1 Schematic of fixed bed pyrolysis device

1. 氮气瓶 2. 气阀 3. 热解电阻炉 4. 温度控制器 5. 温度传感器 6. 挥发物冷凝模块

### 1.3 热物性测定

堆积密度由量筒(容量  $25\ \text{mL}$ )和分析天平(精度  $0.0001\ \text{g}$ )测定,测试过程中,物料从固定高度的锥形漏斗流入到下方的量筒中,以此减小外力或实验操作对试样压实程度的影响。堆积密度的计算公式为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

式中  $\rho$ ——堆积密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$M$ ——样品质量,  $\text{kg}$

$V$ ——量筒容量,  $\text{m}^3$

固态产物的体积能量密度的计算公式为

$$E_v = H_{LHV} \rho \quad (2)$$

式中  $E_v$ ——体积能量密度,  $\text{MJ}/\text{m}^3$

$H_{LHV}$ ——样品的低位热值,  $\text{MJ}/\text{kg}$

比热容表征单位物质的热容量,即单位质量物体改变单位温度时吸收和释放的内能。样品的比热容在 NETZSCH STA 449 C 型同步热分析仪上利用 TG-DSC 联用法进行测定。在实验的温度范围内,

压力的影响可以忽略,即所测比热容可视为等压比热容,比热容的计算公式为<sup>[17-19]</sup>

$$C_p = \frac{m_{std}}{m_s} \frac{D_s - D_{bl}}{D_{std} - D_{bl}} C_{p, std} \quad (3)$$

式中  $C_p$ ——样品在温度  $T$  时的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$C_{p, std}$ ——标准样品的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$m_{std}$ ——标准样品的质量,  $\text{mg}$

$m_s$ ——样品的质量,  $\text{mg}$

$D_s$ ——样品曲线 DSC 信号值,  $\text{V}$

$D_{std}$ ——标准样品 DSC 信号值,  $\text{V}$

$D_{bl}$ ——基线 DSC 信号值,  $\text{V}$

导热系数计算公式为<sup>[20]</sup>

$$\lambda = aC_p\rho K \quad (4)$$

式中  $a$ ——修正常数,取  $5.8548 \times 10^{-5}$

$\lambda$ ——材料导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$K$ ——材料的热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

## 2 结果与讨论

### 2.1 热解炭热值分析

不同温度下桉树芯材热解炭的固态产率和低位热值如图2所示。随着热解温度的增加,炭的固态产率逐渐减小。热解温度较低时,产率降低主要是由易于析出的水分和轻质碳氢化合物逸散引起的,而温度较高时,生物质已向稳定生物炭转变,可挥发的有机组分较少且更难裂解析出,导致固态产率并未随热解温度增加而显著降低;在  $150 \sim 350^\circ\text{C}$  区间,木屑的失重最大,产率由  $150^\circ\text{C}$  的  $93.52\%$  降为  $350^\circ\text{C}$  的  $30.73\%$ 。

随着水分和低位热值轻质成分的逸散,固态产物炭的低位热值随着温度的升高而增大,最终趋近于稳定。在  $450^\circ\text{C}$  时,炭的低位热值比木屑原料提高了  $95.53\%$ ,且热值趋近稳定的温度点与失重趋于稳定的温度点相同。因此,生物质热解能有效提高生物质作为燃料的质量能量密度,促进生物质的进一步利用。

### 2.2 热物性参数

#### 2.2.1 堆积密度与体积能量密度

不同温度下桉树芯材热解炭的体积能量密度如

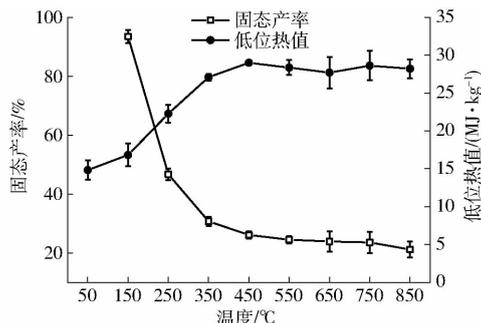


图2 不同温度下桉树芯材热解炭的固态产率与低位热值  
Fig. 2 Solid yield and lower heating value of eucalyptus pyrolysis bio-char at different temperatures

图3所示。随着热解温度的升高,堆积密度经历了先减小、稳定、而后增大的过程。堆积密度由原料的  $201.16 \text{ kg}/\text{m}^3$  减小为  $350^\circ\text{C}$  的  $137.12 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; 在  $350 \sim 650^\circ\text{C}$  温度区间内无显著变化;此后由  $650^\circ\text{C}$  的  $142.26 \text{ kg}/\text{m}^3$  增大为  $850^\circ\text{C}$  的  $172.08 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

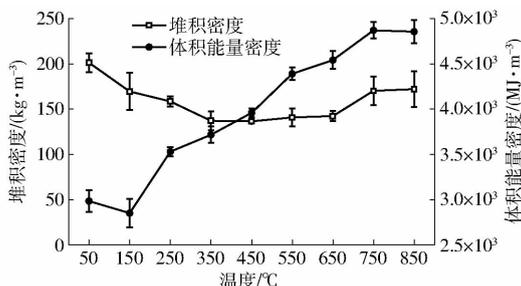


图3 不同温度下桉树芯材热解炭的堆积密度与体积能量密度

Fig. 3 Bulk density and volume energy density of eucalyptus pyrolysis bio-char at different temperatures

$50^\circ\text{C}$  干燥处理的原料与  $450^\circ\text{C}$  处理的热解炭电子扫描电镜图像如图4所示,结果表明:随着温度的升高,材料中的轻质物质逸散,内部的孔道开度和密度都增大,导致堆积密度减小;  $450^\circ\text{C}$  和  $850^\circ\text{C}$  的热解炭扫描电镜表明:随着温度的继续升高,热解炭发生了明显的收缩现象,当温度达到一定值时,热解炭的结构遭到破坏,部分炭结构崩塌,因此密度相应地增加。

从图3看出,固态产物的体积能量密度随着温度的升高而逐渐增大,体积能量密度的增大有利于减少能源储运成本。当温度为  $150^\circ\text{C}$  时,固态产物的堆积密度较原料小,其体积能量密度小于原料的

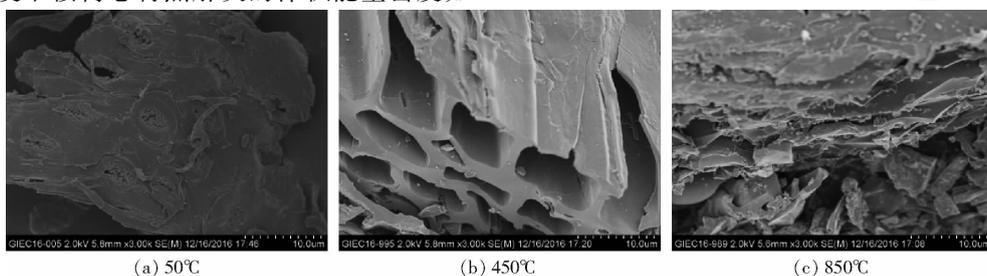


图4 原料与热解炭的电子扫描电镜图像

Fig. 4 SEM of raw eucalyptus and pyrolysis bio-char

能量密度。这是由于在 150℃ 之前,样品骨架结构未发生明显改变,水分和轻质物质的逸散导致堆积密度快速下降,而热值的增加并不大,从而导致体积能量密度下降。当温度升到 750℃,体积能量密度下降,是由于 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等热值较高的挥发性物质逸出,导致热解炭的体积能量密度降低。

### 2.2.2 比热容

不同温度下桉树芯材热解炭的比热容如图 5 所示,固态产物的比热容随着温度的增加呈现先减小后增加的 U 字型趋势,在 350 ~ 450℃ 的温度范围内最低,为 350.56 ~ 367.43 J/(kg·K)。通过 OriginPro 数据处理软件拟合数据得到比热容与温度的关系为

$$C_p = 2149.62 - 8.52T + 0.011T^2 \quad (5)$$

拟合程度为  $R^2 = 0.9320$ 。水的比热容大于木材,约为 4200 J/(kg·K),因此在 105℃ 之前,由于水分随着温度的升高而逸散,样品的比热容逐渐减小;随着温度的继续升高,样品中越来越多的水分开始蒸发,由于水汽化潜热较大,使样品的比热容增大,且温度越高水分蒸发量越大,样品的比热容增大速度也越快,因此 150 ~ 250℃ 样品的比热容呈现轻微的增大。随着样品骨架结构的迅速改变和孔道的迅速增大和增多,样品内部的孔道中充满了热空气,热空气的比热容很小,所以样品的比热容呈现较快速度的减小;当温度继续升高超过 450℃,样品的比热容随着温度的升高逐渐增大,这是因为木材本身骨架的比热容随着温度的升高而升高,且由于高温带来的孔道坍塌,使得孔道内热空气量减少,因此较高温和高温段样品的比热容呈现增大趋势。

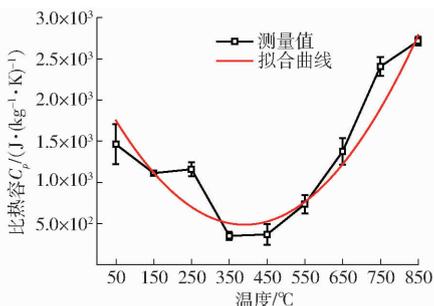


图 5 不同温度下桉树芯材热解炭的比热容

Fig. 5 Specific heat of eucalyptus pyrolysis bio-char at different temperatures

### 2.2.3 导热系数

不同温度下桉树芯材热解炭的导热系数如图 6 所示,样品的导热系数随着温度的升高,首先呈现轻微下降,而后迅速增大。通过 OriginPro 数据处理软件拟合数据得到导热系数与温度的关系为

$$\lambda = \exp(-3.2484 - 0.0026T + 4.6541 \times 10^{-6}T^2) \quad (6)$$

拟合程度  $R^2 = 0.9953$ 。已有木材导热系数研究表明<sup>[21]</sup>,在 100℃ 之前,木材的导热系数随着温度的升高先增大后减小,在 80℃ 左右达到峰值,超过 80℃ 后木材的导热系数开始减小,这与本文研究结果相符。低温时以木材导热为主,随着温度的升高,木材固体分子和所含自由水分子热运动增加,孔隙中空气的导热和孔壁间辐射换热也增强,导致木材的导热系数随着温度升高而增大。但由于木材的多孔性和含水性,随着温度的升高,木材的气孔受热膨胀气体体积所占比重增大以及自由水受热蒸发变成水蒸气,都造成木材导热能力减小,所以随着温度继续升高到 80℃,自由水变成水蒸气后,气体导热逐渐占优势,木材综合导热能力呈减小趋势。但随着温度达到较高的 450℃ 之后,孔道的坍塌带来气体导热逐渐失去优势,木材的导热逐渐占据优势,因此木材综合导热能力呈现增大趋势。

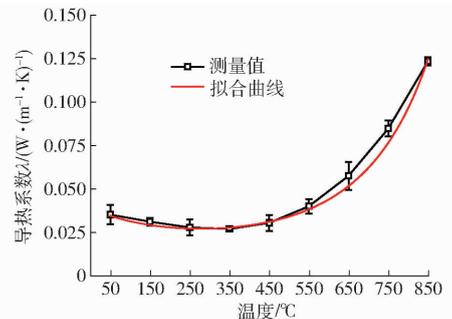


图 6 不同温度下桉树芯材热解炭的导热系数

Fig. 6 Heat conductive coefficient of eucalyptus pyrolysis bio-char at different temperatures

## 3 结论

(1) 随着温度的升高,桉树芯材热解炭固态产率逐渐下降并趋于稳定,在 150 ~ 350℃ 区间,固态产率由 93.52% 降为 30.73%;低位热值逐渐增大并趋于稳定,在 450℃ 时,相比原料提高了 95.53%。桉树木屑热解炭固态产率和低位热值趋于稳定的温度点相同。

(2) 桉树芯材热解炭的堆积密度随着热解温度的升高先减小后增大,体积能量密度随着温度的升高而逐渐增大。桉树芯材热解炭的堆积密度和体积能量密度与热解炭中的水分和骨架结构有密切的关系。

(3) 随着温度的升高,样品的比热容呈 U 字型趋势,先减小而后大幅增大,拟合得到比热容  $C_p$  随温度  $T$  的变化方程为  $C_p = 2149.62 - 8.52T + 0.011T^2$ ;导热系数先轻微减小后大幅增大,随温度  $T$  的变化方程为  $\lambda = \exp(-3.2484 - 0.0026T + 4.6541 \times 10^{-6}T^2)$ ,两个方程的拟合程度  $R^2$  分别为 0.9320 和 0.9953。

## 参 考 文 献

- 1 LINK S, ARVELAKIS S, PAIST A, et al. Effect of leaching pretreatment on the gasification of wine and vine (residue) biomass [J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 1–5.
- 2 KHAN T M Y, ATABANI A E, BADRUDDIN I A, et al. Recent scenario and technologies to utilize non-edible oils for biodiesel production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37: 840–851.
- 3 TURNER T L, KIM H, KONG I I, et al. Engineering and evolution of *saccharomyces cerevisiae* to produce biofuels and chemicals [J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2018, 162: 175–215.
- 4 TRIPATHI L, MISHRA A K, DUBEY A K, et al. Renewable energy: an overview on its contribution in current energy scenario of India [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 226–233.
- 5 MAKELA M, KWONG C W, BROSTROM M, et al. Hydrothermal treatment of grape marc for solid fuel applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 145: 371–377.
- 6 MALINS K. Production of bio-oil via hydrothermal liquefaction of birch sawdust [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 144: 243–251.
- 7 SOLAR J, HERNANDEZ A, LOPEA-URIONABARRENECHEA A, et al. From woody biomass waste to biocoke: influence of the proportion of different tree components [J]. *European Journal of Wood and Wood Production*, 2017, 75(4): 485–497.
- 8 杨洲, 罗锡文, 李长友. 稻谷热特性参数的试验测定[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(4): 76–78.  
YANG Zhou, LUO Xiwen, LI Changyou. Measurement of thermal properties of rough rice [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(4): 76–78. (in Chinese)
- 9 李志合, 崔喜彬, 柏雪源, 等. 固体热载体与生物质颗粒之间的传热研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(增刊): 128–132.  
LI Zhihe, CUI Xibin, BO Xueyuan, et al. Study on the heat transfer mechanism between the solid heat carrier and biomass particles [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(Supp.): 128–132. (in Chinese)
- 10 胡国新, 田伟学, 许伟, 等. 大颗粒煤在移动床中的热解模型[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(5): 733–736.  
HU Guoxin, TIAN Weixue, XU Wei, et al. Devolatilization model of large coal particles in moving bed [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2001, 35(5): 733–736. (in Chinese)
- 11 赵建辉. 生物质快速热裂解液化传热模型与试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
ZHAO Jianhui. Heat transfer model and experimental research on biomass fast pyrolysis and liquefaction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- 12 景亮晶. 木材热解过程中单颗粒内部传热模型的建立与研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.  
JING Liangjing. Heat transfer modeling and study in a single wood particle during the pyrolysis process [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 13 刘训良, 曹欢, 王淦, 等. 煤颗粒热解的传热传质分析[J]. *计算物理*, 2014(1): 59–66.  
LIU Xunliang, CAO Huan, WANG Gan, et al. Numerical analysis of heat and mass transfer during pyrolysis of coal particles [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2014(1): 59–66. (in Chinese)
- 14 BABU B V, CHAURASIA A S. Modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(14): 2251–2275.
- 15 郭飞宏, 王泽宇, 仲兆平. 柱形生物质和石英砂传热实验与模拟研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 272–279.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171034&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171034&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.034.  
GUO Feihong, WANG Zeyu, ZHONG Zhaoping. Experiment and improved simulation on heat transfer for cylindrical biomass and quartz sand [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 272–279. (in Chinese)
- 16 DINH C, LIAO C, HSIAU S. Numerical study of hydrodynamics with surface heat transfer in a bubbling fluidized-bed reactor applied to fast pyrolysis of rice husk [J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(2): 419–429.
- 17 杨长生, 马沛生, 夏淑倩. DSC法测定醋酸-水溶液的比热[J]. *高校化学工程学报*, 2002, 16(5): 479–483.  
YANG Changsheng, MA Peisheng, XIA Shuqian. The specific heats of aqueous mixtures of acetic acid with water measured with DSC [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2002, 16(5): 479–483. (in Chinese)
- 18 王红英, 李倪薇, 高蕊, 等. 不同前处理对饲料玉米比热的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 269–276.  
WANG Hongying, LI Niwei, GAO Rui, et al. Effects of different pretreatments on specific heat of forage maize [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(14): 269–276. (in Chinese)
- 19 WANG S, JIANG X M, WANG Q, et al. Research of specific heat capacities of three large seaweed biomass [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 115(3): 2071–2077.
- 20 张忠进, 金文桂. 探针法测量农副产品导热系数的研究[J]. *农业机械学报*, 1997, 28(1): 95–98.  
ZHANG Zhongjin, JIN Wengui. Study on determining thermal conductivity of farm and side-line products by heat-probe method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1997, 28(1): 95–98. (in Chinese)
- 21 俞自涛, 胡亚才, 沈荣华, 等. 温度和热流方向对木材传热特性的影响[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(1): 123–126.  
YU Zitao, HU Yacai, SHEN Ronghua, et al. Influence of temperature and heat flux direction on wood heat transfer performance [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(1): 123–126. (in Chinese)