

# 纤维素单独成型及燃烧特性研究

蒋恩臣<sup>1</sup>, 高忠志<sup>1</sup>, 秦丽元<sup>1</sup>, 姜洋<sup>2,3</sup>, 王明峰<sup>2</sup>, 韩平<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642;

3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510642)

**摘要:** 以纤维素为成型原料, 利用万能试验机进行纤维素成型试验, 研究物料含水率、成型温度及成型压力对成型颗粒品质影响, 利用扫描电镜观察纤维素成型颗粒内部结构, 热重分析仪分析纤维素粉末及成型后颗粒燃烧特性。结果表明, 一定范围内增加纤维素含水率、成型压力及成型温度, 可提高颗粒品质, 含水率为14%~29%、成型压力为3~4 kN、成型温度为100 °C时效果最好; 纤维素粉末及纤维素颗粒主要失重部分在挥发分燃烧阶段, 纤维素成型后会升高燃烧反应起始温度, 提高燃烧最大速度时温度。建立燃烧动力学模型, 结果表明, 纤维素活化能较低, 且遵循动力学一级和二级规律。

**关键词:** 纤维素; 成型; 微观结构; 燃烧

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1005-9369(2016)05-0106-07

蒋恩臣, 高忠志, 秦丽元, 等. 纤维素单独成型及燃烧特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 106-112.

Jiang Enchen, Gao Zhongzhi, Qin Liyuan, et al. Study on separate molding and burning characteristic of cellulose[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(5): 106-112. (in Chinese with English abstract)

**Study on separate molding and burning characteristic of cellulose/**JIANG Enchen<sup>1</sup>, GAO Zhongzhi<sup>1</sup>, QIN Liyuan<sup>1</sup>, JIANG Yang<sup>2,3</sup>, WANG Mingfeng<sup>2</sup>, HAN Ping<sup>1</sup>(1. School of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Cellulose as the molding material, universal testing machine for cellulose forming experiment was carried out, the material moisture content, forming temperature and pressure on the quality of molding, cellulose internal structure was observed using scanning electron microscope, the combustion characteristic of cellulose powder and forming particles was analysed using thermogravimetric analyzer. The results showed that increasing the moisture content of cellulose, the molding pressure and molding temperature within a certain range could improve the quality of grain, The effect was best that the moisture content was 14%-29%, the molding pressure of 3-4 kN, molding temperature was 100 °C; Weightlessness part of cellulose and cellulose powder particles mainly in volatile combustion phase, cellulose forming particles could rise the initial temperature of the combustion reaction, and improved the combustion temperature at the maximum speed. Combustion dynamics model was

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家科技支撑项目(2014BAD06B04); 黑龙江省青年科学基金(QC2015049); 中国博士后科学基金(2012M520698); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531002); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z12031); 东北农业大学博士启动基金(2012RCB97); 东北农业大学青年才俊项目(14QC35)

作者简介: 蒋恩臣(1960-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为生物质能源转化和利用。E-mail: ecjiang@sina.com

established, and the result showed that the cellulose activation energy was lower, and followed the kinetics law of primary and secondary.

**Key words:** cellulose molding; microstructure; burning

生物质能源是清洁可再生能源, 生物质固化成型技术作为生物质能源主要利用技术之一发展潜力较大<sup>[1-2]</sup>。相比于松散的生物质材料, 生物质成型燃料具有较高密度, 便于储备与运输, 燃烧过程产生的有害气体小于化石燃料燃烧。生物质颗粒燃料替代煤作燃料, 对实现能源可持续发展、降低温室气体及污染物排放具有重要作用<sup>[1,3]</sup>。

按照成型工艺可将生物质压缩成型分为4种: 常温成型、冷压态成型、热压成型、炭化成型<sup>[4-6]</sup>。国内外学者对生物质成型展开大量研究, 而关于纤维素、半纤维素和木质素三组分对生物质成型单独影响和对燃烧过程影响则鲜见报道。张霞曾探讨生物质成型燃料的致密成型机理, 为加快我国生物质成型燃料技术发展和标准规范制定提供理论依据<sup>[7]</sup>。蒋恩臣等对生物质炭基尿素颗粒径向抗压强度展开研究<sup>[8]</sup>。李虎研究木质纤维成型机理及其影响因素, 探讨木质原材料种类、压制温度、压缩力、含水率等对木质纤维成型影响<sup>[9]</sup>。孟海波研究秸秆原料微观组织形貌<sup>[10]</sup>。刘建禹研究生物质燃料燃烧特性<sup>[11]</sup>。蒋绍坚研究生物质成型燃料热重及动力学特性, 发现采用2组分动力学模型可表征生物质在空气中失重特性, 与试验结果高度吻合<sup>[12]</sup>。Vamvuka等研究发现纤维素、半纤维素和木质素热解遵循一级动力学规律<sup>[13]</sup>。生物质是一种复杂高聚物, 主要由纤维素、木质素、半纤维素三个部分组成<sup>[14]</sup>。对大多数生物质而言, 这3种组分占其总质量90%以上<sup>[14]</sup>, 对生物质成型起主导作用。生物质燃烧特性可认为是3种主要组分燃烧特性综合表现<sup>[15]</sup>。本文以纤维素粉末为原材料, 研究纤维素含水率、成型温度、成型压力对成型颗粒密度、比能耗、径向抗压强度影响, 通过SEM研究纤维素颗粒微观结构, 燃烧试验研究纤维素颗粒燃烧特性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

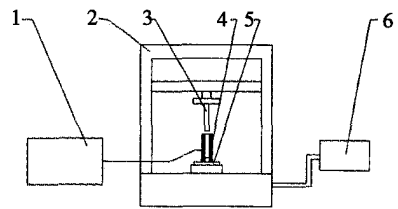
试验材料为纤维素(90 μm), 纤维素工业分析为水分6.57, 灰分0, 挥发分83.79%, 固定碳9.64%; 元素分析为C 41.6%, H 6.45%, O

51.91%, N 0.02%, S 0.01%; 热值17.31 MJ·kg<sup>-1</sup>。

纤维素粉末经70℃电热恒温干燥箱内烘干24 h, 加入定量纯水, 将纤维素含水率调为4%、9%、14%、19%、24%、29%、34%, 分别装入密封容器中待成型。

### 1.2 设备

微观结构观察采用日本Hitachi的S-4800冷场发射扫描电子显微镜, 热重分析采用德国NETZSCH的STA 449 C热重分析仪, 成型设备由WD-100KE型电子万能试验机、自制成型模具以及温度控制器三部分组成(见图1)。万能试验机为成型提供动力, 在万能试验机操作平台上设定试验所需压力、压缩速度、保压时间等参数, 成型模具为纤维素提供成型环境, 温度控制器控制成型温度。



1-温度控制器; 2-万能试验机; 3-压杆; 4-模具;  
5-底座; 6-控制系统

1-Temperature controller; 2-Universal testing machine;  
3-Pressure bar; 4-Molds; 5-Base; 6-Control system

图1 成型设备

Fig. 1 Forming model for experiment

### 1.3 方法

#### 1.3.1 成型试验

采用单因素试验, 分别研究成型压力、成型温度、物料含水率对成型颗粒密度、比能耗、径向抗压强度影响规律。先通过温度控制器将成型模具温度升到试验所需成型温度, 将调好水分纤维素粉末加入成型模具中, 由万能试验机挤压, 待压力达到要求值后, 保压30 s, 将纤维素成型颗粒挤出成型模具, 得到成型纤维素颗粒。每个试验重复3次, 取平均值。

#### 1.3.2 纤维素成型颗粒微观研究试验

将纤维素颗粒切成平整薄片放置到粘有导电胶带载物台上, 喷金处理, 处理好样品放入仪器内待

观察。通过仪器操作系统调节载物台在仪器内位置，定位原料，通过操作控制按钮观察原料。

### 1.3.3 纤维素粉末及纤维素成型颗粒燃烧性能测试

将 10~15 mg 样品装入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚后于热重分析仪内燃烧试验。燃烧试验升温速率为 20 K·min<sup>-1</sup>，从室温升至 900 ℃，气氛为氮气与空气，气体流速 20 mL·min<sup>-1</sup>，得到 TG 曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 成型因素对成型颗粒品质影响

#### 2.1.1 含水率对成型性能影响

分别对含水率为 4%、9%、14%、19%、24%、29%、34% 纤维素进行成型试验，研究含水率对成型颗粒品质影响，如图 2。纤维素成型颗粒

挤出密度与松弛密度变化趋势基本相同，但纤维素成型颗粒松弛密度始终小于挤出密度，且随纤维素含水量增大两者差值逐渐增大。随纤维素含水率增加，纤维素颗粒挤出密度与松弛密度均先增后减，当原料含水量在 24% 时达最大值；径向抗压强度也先增后减，原料含水量为 14% 时径向抗压强度达最大。由于水分在成型过程中起润滑作用，成型过程能耗随水分提高而不断降低。生物质体内结合水和自由水是一种润滑剂，使粒子间摩擦变小，降低所需成型加热温度<sup>[16-17]</sup>，但含水率过高，则使物料间结合趋于松散状态，同时挤压过程中物料水分受热蒸发，大量水汽通过成型筒迅速排放，使物料难以成型<sup>[18]</sup>，故纤维素含水率控制在一定范围内可使纤维素更易成型且颗粒品质高。

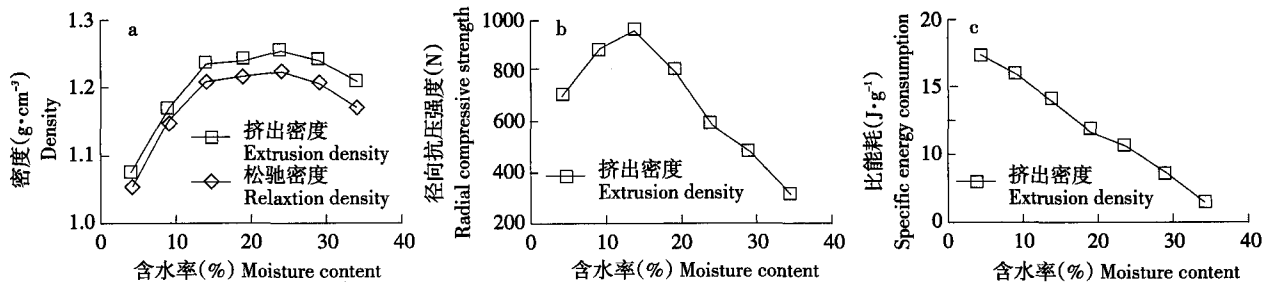


图 2 含水率对成型颗粒品质影响(成型压力为 4 kN, 成型温度为 100 ℃)

Fig. 2 Grain quality of different moistures (Molding pressure is 4 kN, molding temperatures is 100 ℃)

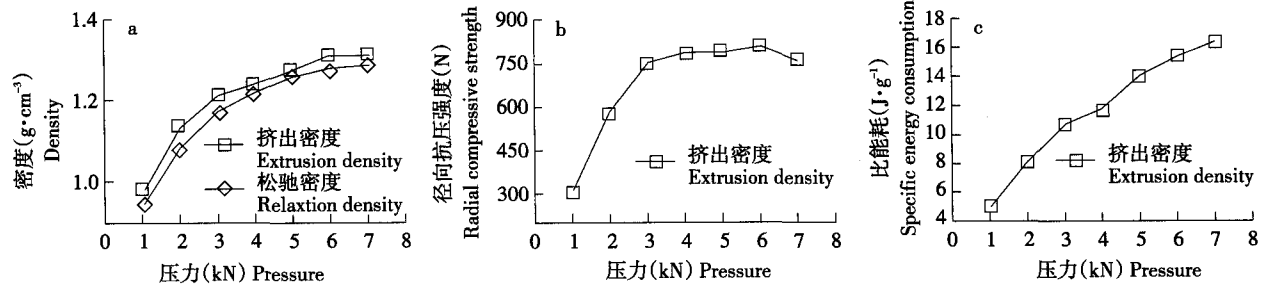


图 3 成型压力对成型品质影响(成型温度为 100 ℃, 含水量为 20%)

Fig. 3 Grain quality of different pressure (Molding temperatures is 100 ℃, moisture content is 20%)

#### 2.1.2 成型压力对成型性能影响

分别设定成型压力为 1、2、3、4、5、6、7 kN 纤维素粉末成型试验，研究成型压力对纤维素颗粒品质影响，如图 3。

图 3a 所示，纤维素成型颗粒挤出密度、松弛密度均随成型压力增大而增大。这是由于压力增大，使生物质间隙发生紧密填充，密度提高。图 3c 所示，比能耗也随成型压力增加而增大。图 3b 所示，随成型压力增加，纤维素颗粒径向抗压强度

曲线在开始阶段增加较快，而后随成型压力继续增加其径向抗压强度变化不显著。

#### 2.1.3 成型温度对成型性能影响

分析成型温度 40、60、80、100、120、140、160 ℃ 下纤维素。由图 4 可知，随成型温度升高，纤维素颗粒挤出密度、松弛密度先增后降，大约 80 ℃ 时密度达最大值；径向抗压强度也随温度增加而先增后降，大约 100 ℃ 时径向抗压强度达最大值；比能耗则随温度增加而先减后增，在 100 ℃ 时

成型能量最低。综合考虑密度、能耗和颗粒径向抗压强度，当成型温度取80~100℃时纤维素成型颗粒品质较优。

### 2.2 纤维素成型颗粒微观结构观察

扫描电镜对纤维素成型颗粒结构分别放大

600、1 000、5 000倍后内部结构见图5，纤维素颗粒内部纤维处于相互镶嵌缠绕状态，且随成型压力增加，相互镶嵌缠绕更加明显，使纤维素永久保持颗粒形态。可见纤维素成型主要依靠纤维素相互缠绕达到成型效果。

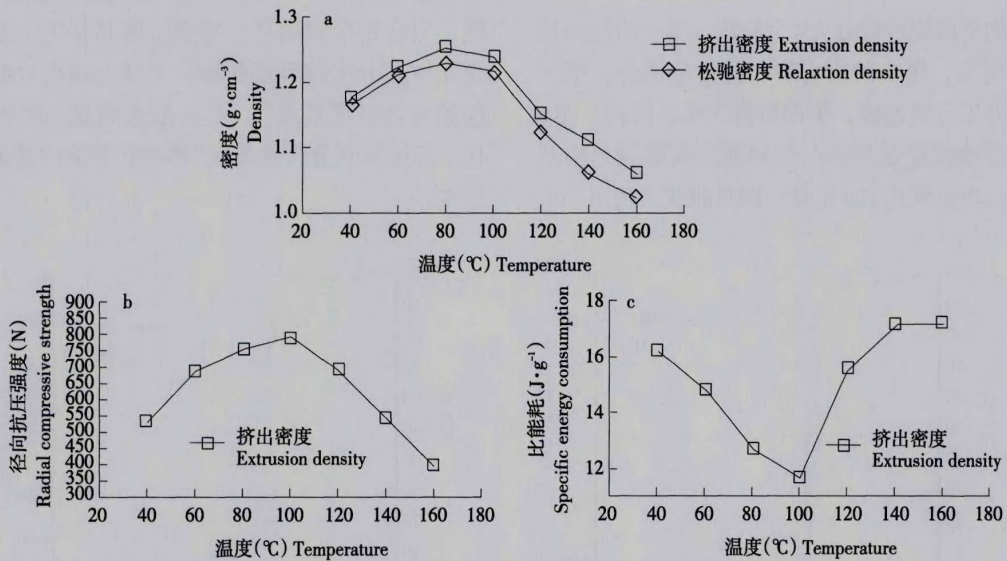


图4 成型温度对成型品质的影响(成型压力为4 kN, 含水率为20%)

Fig. 4 Grain quality of different temperature (Molding pressure is 4 kN, moisture content is 20%)

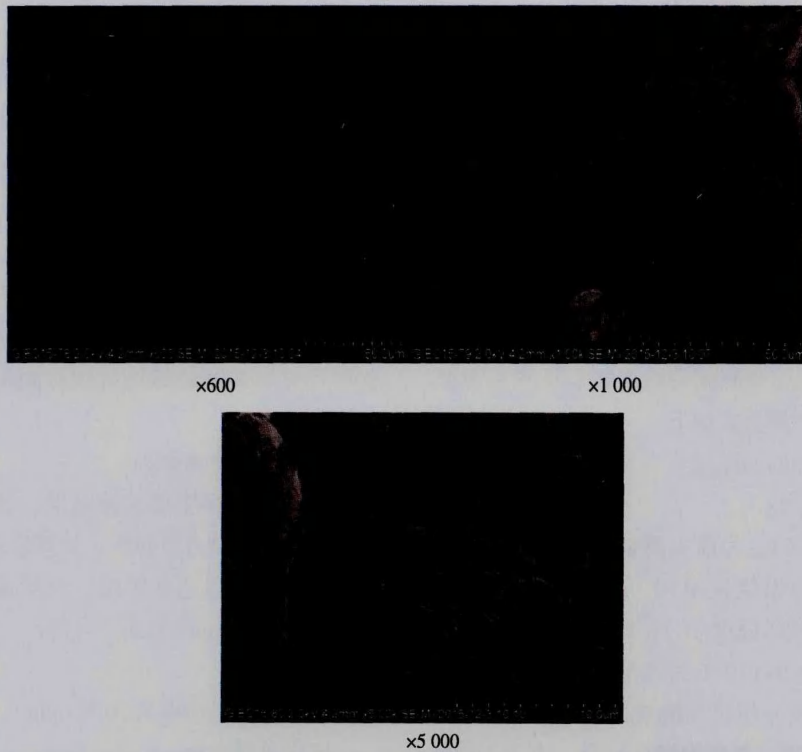


图5 扫描电镜分析结果

Fig. 5 SEM of cellulose particles

### 2.3 纤维素粉末及纤维素成型颗粒燃烧性能

通过热重分析仪对纤维素粉末以及纤维素成型颗粒进行燃烧特性试验，得到纤维素粉末以及纤维素成型颗粒的燃烧TG曲线，对TG曲线求导得到DTG曲线，如图6所示。

#### 2.3.1 热重曲线分析

生物质燃烧过程分为4个阶段，第一阶段为物料水分析出，第二阶段为物料挥发分燃烧，第三个阶段为固定炭燃烧，第四阶段为燃尽阶段。图6所示，纤维素燃烧趋势与生物质原料燃烧趋势基本相同，当温度达100℃时，DTG曲线出现第一个

峰值，此时纤维素中水分析出速度最大；当温度达350℃时，DTG曲线出现峰值，此时为纤维素中挥发分燃烧速度最大时刻；当燃烧温度达到510℃时，纤维素中固定碳燃烧速度最大；在620℃时，燃烧停止。与木聚糖和木质素相比，纤维素起始燃烧温度最高，纤维素高分子链较为规整，无侧链，只在每个吡喃环上均连接羧基基团，因此首先发生高分子链解聚断链，宏观上表现为纤维素起始失重温度最高<sup>[14]</sup>。与一般生物质原料燃烧相比，纤维素灰分含量为0，燃烧后干锅内残余物质量少。

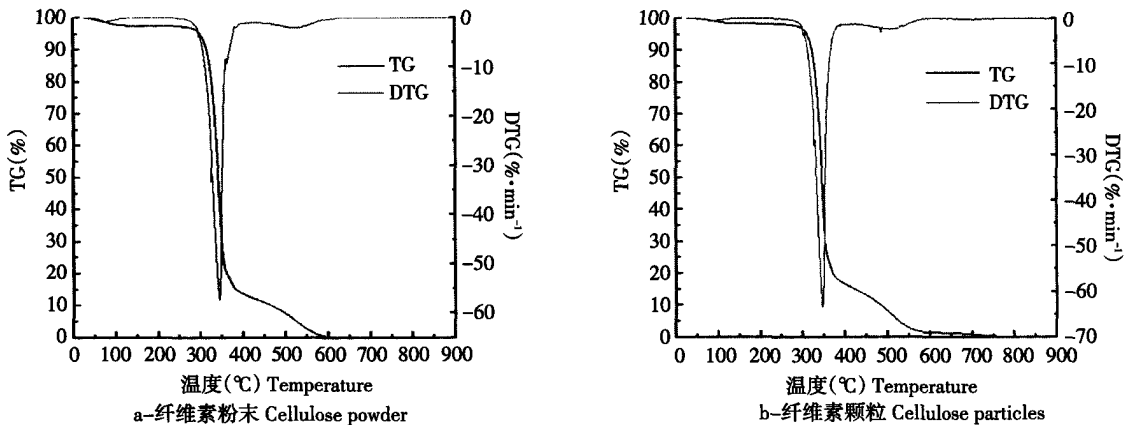


图6 纤维素粉末与纤维素成型颗粒燃烧曲线

Fig. 6 TG and DTG curves of cellulose powder and cellulose particles

#### 2.3.2 燃烧特性分析

本研究采用TG-DTG定义法分析纤维素着火温度，如图7所示，过DTG曲线峰值点A做垂线交TG曲线于点B，通过点B做TG曲线切线交TG曲线起始失重平行线与点C，C点对应温度即纤维素着火温度(如DTG曲线有多个峰值，选用第一个峰值来确定)<sup>[19]</sup>。采用综合燃烧特性指数 $S_N$ 纤维素燃烧特性分析<sup>[20]</sup>， $S_N$ 计算公式如下：

$$S_N = \frac{(dm/dt)_{max}(dm/dt)_{mean}}{T_1^2 T_2} \quad (1)$$

式中， $(dm/dt)_{max}$ 为最大燃烧速率( $\% \cdot \text{min}^{-1}$ )； $(dm/dt)_{mean}$ 为平均燃烧速率( $\% \cdot \text{min}^{-1}$ )； $T_1$ 为着火温度( $^{\circ}\text{C}$ )； $T_2$ 为燃尽温度( $^{\circ}\text{C}$ )；纤维素粉末与成型后纤维素颗粒在0~170℃为水分析出蒸发阶段，170~380℃为挥发分析出与燃烧阶段，380~600℃为固定炭燃烧阶段，之后为燃尽阶段。由表1可知纤维素成型颗粒失水峰值低于纤维素粉末，外推

起始反应温度纤维素颗粒要高于纤维素粉末，由于纤维素在成型过程中，纤维素颗粒间间隙减小，纤维素成型颗粒较难点火；纤维素颗粒燃烧最大速度高于纤维素粉末，说明成型后纤维素高温时燃烧剧烈，产热量大；从燃烧反应终止温度上看，纤维素颗粒与纤维素粉末基本相同，说明成型后纤维素颗粒燃烧持续时间与纤维素粉末基本一致。

#### 2.3.3 动力学特性分析

根据纤维素热重试验结果，计算活化能与频率因子等燃烧动力学参数。计算公式如下<sup>[20-23]</sup>：

本试验升温速率恒定，反应速率常数与温度关系遵循 Arrhenius 公式，可得：

$$\beta = dT/dt \quad (2)$$

本试验升温速率为  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

反应速度常数：

$$K e^{E/RT} = A \quad (3)$$

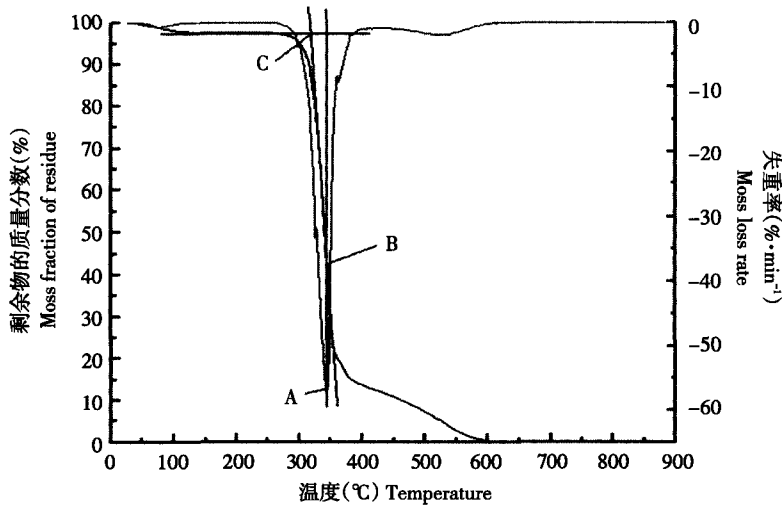


图7 纤维素着火温度定义

Fig. 7 Definition of the ignition temperature of cellulose

表1 纤维素及纤维素颗粒燃烧特性参数

Table 1 Combustion characteristic parameters of cellulose powder and cellulose particles

项目 Items	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	(dm/dt) <sub>max</sub> (%·min <sup>-1</sup> )	(dm/dt) <sub>max</sub> (%·min <sup>-1</sup> )	S <sub>N</sub>
纤维素粉末 Cellulose powder	321.5	353.8	55.77	15.57	2.37×10 <sup>-5</sup>
纤维素成型颗粒 Cellulose particles	326.9	351.9	63.73	17.81	3.02×10 <sup>-5</sup>

试验过程中纤维素重量变化率对反应时间导数为：

$$\frac{da}{dt} e^{E/RT} = \frac{A}{\beta} (1-a)^n \quad (4)$$

纤维素燃烧重量变化率 a 可由 TG 曲线求得：

$$a = (W_t - W_0) / (W_\infty - W_0) \quad (5)$$

式中，W<sub>0</sub>-纤维素初始质量(kg)；W<sub>t</sub>-纤维素温度为 T 时质量(kg)；W<sub>∞</sub>-纤维素反应终止时残余质量(kg)；t-反应时间(min)；T-反应温度(K)；A 为频率因子(min<sup>-1</sup>)。E-活化能(kJ·mol<sup>-1</sup>)；R-气体常数，8.31 kJ·mol<sup>-1</sup>。

若令 f(a)=(1-a)<sup>n</sup>，n-反应级数则(4)积分后得：

$$1 - (1-a)^{1+n} = \frac{A(1-n)}{\beta} \int_0^T e^{-ERT} dT \quad (6)$$

对(6)化简得到：

$$[1 - (1-a)^{1+n}] e^{ERT} = \frac{A(1-n)RT^2}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \quad (7)$$

因为(1 -  $\frac{2RT}{E}$ )近似于1，所以对(7)两边去对数得：

n=1 时得

$$\frac{E}{RT} = \ln \frac{AR}{\beta E} - \ln \left[ \frac{-\ln(1-a)}{T^2} \right] \quad (8)$$

n≠1 时得

$$\frac{E}{RT} = \ln \frac{AR}{\beta E} - \ln \left[ \frac{1 - (1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] \quad (9)$$

当 n=1 与 n≠1 时，通过(8)(9)分别对 1/T 作图，分别得到坐标轴上直线，直线斜率均为 -E/R。确定反应级数 n 后，求出活化能 E。

一般在研究生物质成型燃料燃烧反应动力学时，当 n≠1 情况下确定 n 值较复杂，因此只将燃烧反应视作一级既 n=1，而对级数不等于 1 的情况不作讨论<sup>[24-25]</sup>。在(8)中，令 b=E/R、

$$y = \left[ -\frac{\ln(1-a)}{T^2} \right], \quad x = \frac{1}{T}, \quad a = \ln \left[ \frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right]$$

对(8)化简得：

$$y = a + bx \quad (10)$$

在热重曲线上取点带入(10)中，通过回归性分析可以得到 a、b 值，求出活化能与频率因子。计算出纤维素成型燃料动力学参数如表 2。

表3 纤维素燃烧动力学参数

Table 3 Combustion kinetic parameters of cellulose

项目 Items	温度段(°C) Temperature	频率因子(min <sup>-1</sup> ) Frequency factor	活化能(kJ·mol <sup>-1</sup> ) Activity energy	相关系数 Coefficient
纤维素粉末 Cellulose powder	283.975~381.975	8.54738×10 <sup>11</sup>	143.95691	0.9822
纤维素成型颗粒 Cellulose particles	296.185~378.185	2.64186×10 <sup>14</sup>	174.186614	0.9810

### 3 结 论

a. 本试验结果表明, 含水率在20%时, 纤维素颗粒密度、径向抗压强度及比能耗效果较好, 含水率过低密度及径向抗压强度较小, 含水率过低密度及径向抗压强度下降, 在挤压成型阶段出现水分溢出; 成型压力增大可减小纤维颗粒简单距离, 提高颗粒密度和力学性能, 但随成型压力增大, 成型过程能耗增加, 综合分析挤压力为3~4 kN时较好; 温度在100 °C时, 纤维素颗粒密度、径向抗压强度以及比能耗呈现较好效果。温度可改变物料含水率及本身物理性质, 间接影响成型效果。

b. 通过扫描电镜观察, 颗粒物料纤维素间相互镶嵌和缠绕, 是纤维素成型主要原因, 随温度和成型压力提高, 镶嵌和缠绕现象更加明显, 使纤维素颗粒密度和强度进一步提高。

c. 纤维素粉末以及纤维素颗粒燃烧主要发生在挥发分析出燃烧阶段, 纤维素粉末较纤维素成型颗粒更易点火。通过燃烧动力学建模结果分析表明, 纤维素活化能较低, 遵循动力学一级和二级规律。

#### [ 参 考 文 献 ]

- 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.
- 田宜水. 中国生物质固体成型燃料产业发展分析[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2009(2): 13-17.
- 姚向君, 田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 何元斌. 生物质压缩成型燃料及成型技术(一)[J]. 农村能源, 1995(5): 12-14.
- 李美华, 俞国胜. 生物质燃料成型技术研究现状[J]. 木材加工机械, 2005(2): 36-40.
- 徐志惠, 王维新, 吴杰. 棉秆燃料成型压缩技术的研究[J]. 农业与技术, 2005, 25(2): 97-98.
- 张震, 蔡宗寿, 陈丽红, 等. 生物质成型燃料致密成型机理及品质评价指标[J]. 可再生能源, 2014, 32(12): 1917-1921.
- 蒋恩臣, 张伟, 秦丽元, 等. 粒状生物质炭基尿素肥效制备及其性能研究[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(11): 89-94.
- 李虎, 孙奇. 木质纤维成型机理及其成型因素分析[J]. 木工机床, 2014(3): 10-13.
- 孟海波. 秸秆切割破碎与揉切机刀片耐用性试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- 刘建禹, 翟国勋, 陈荣耀. 生物质燃料直接燃烧过程特性的分析[J]. 东北农业大学学报, 2001, 32(3): 290-294.
- 蒋绍坚, 黄靓云, 彭好义, 等. 生物质成型燃料的热重分析及动力学研究[J]. 新能源进展, 2015(2): 81-87.
- Vamvuka D, Kakaras E, Kastanaki E, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite[J]. Fuel, 2003, 82(15): 1949-1960.
- 卢洪波, 戴惠玉, 马玉鑫. 生物质三组分燃烧特性及动力学分析[J]. 农业工程学报, 2012, 9: 186-191.
- 王泉斌, 姚洪, 戴立, 等. 纤维素、木质素对生物质与煤混烧特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(增2): 205-208.
- 盛奎川, 吴杰. 生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 242-245.
- Paivi Lehtikannas. Storage effects on pelletised saw dust, logging residues and bark[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 287-293.
- 郭康权, 赵东. 植物秸秆模压成型流变特性的试验研究[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 11-15.
- 马爱玲, 谌伦建, 黄光许, 等. 生物质与煤混烧燃烧特性研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(1): 55-59.
- 李余增. 热分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- 裘正千. 热分析[M]. 北京: 人民教育出版社, 1993.
- 蒲舸, 张力, 等. 王草的热解和燃烧试验室研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 65-69.
- 刘豪, 邱建荣. 生物质与煤混烧的燃烧特性研究[J]. 热能动力工程, 2002, 101(17): 320-324.
- Ayhan Demirbas. Combustion characteristics of different biomass fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30: 219-230.
- 金保升, 董长青, 等. 废物衍生燃料(RDF)加压热解特性及其动力学研究[J]. 热能动力工程, 2001, 94(16): 367-340.