

# 甜高粱秸秆热物性研究

侯春旭<sup>1</sup> 冯俊小<sup>2</sup> 陈昊<sup>1</sup> 陈宋璇<sup>1</sup> 王云<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

**[摘要]** 甜高粱秸秆是一种生物燃料,常采用回转筒固态发酵工艺生产乙醇,但回转式固态发酵工艺中易出现积热导致发酵效率低的问题。本文通过实验测量秸秆的热物性,分析在秸秆不同堆积密度(孔隙率)、温度和含水率条件下热导率和比热容的变化,为后续研究回转筒内杆状颗粒的运动特性提供基础数据。实验结果表明,秸秆孔隙率与堆积密度成线性关系,随着堆积密度增加,孔隙率降低;含水秸秆密度与含水率成线性关系,随着含水率增加,密度增加。随着温度、含水率和密度三个参数增加,秸秆热导率增加,且它们的影响顺序为:温度>含水率>密度。在本文中,随含水量与堆积密度的增加,秸秆的比热容几乎保持不变;随着温度增加,比热容增大。

**[关键词]** 生物质燃料; 热物性; 混合传热; 热导率; 比热容; 堆积密度; 水率

**[中图分类号]** TK6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2023)06-0086-07

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.06.016

## 0 前言

高粱秸秆是一种主要的生物质能源,主要采用固态发酵方式生产乙醇<sup>[1]</sup>。固态发酵具有废水少、设备简单、能耗低、糖利用率高、预处理及后处理工艺简单等优点,但存在微生物生长受营养扩散的限制,易出现代谢热积累导致的过热现象,发酵过程的自动化控制难度稍高,技术开发经验少等问题。秸秆碎料在回转式固态发酵生产乙醇过程中,由于回转筒转速较慢,料层下部的秸秆料厌氧条件好,发酵产生的代谢热在料层内积累,存在散热条件不利的问题,热量无法有效传导,导致底层料温度远高于表层料温度,上、下料层发酵条件均匀性差,杀死发酵菌导致发酵效率降低。

关于回转式固态发酵器生产乙醇工艺中的积热问题,目前研究较少。为了更好地解决发酵过程积热导致发酵菌效率降低的问题,需研究发酵物(秸秆)的热物性。本文利用杆状、颗粒状秸秆碎料,根据堆积实验标定颗粒参数,分析不同的堆积密度

(孔隙率)、温度和含水率条件下热导率和比热容的变化,为后续研究回转筒内杆状颗粒的运动特性提供基础数据<sup>[2]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验台的搭建

本文采用一维稳态传热过程求解秸秆颗粒的热导率。实验台主要组成包括:温度控制器、秸秆储藏箱、热电偶、电子温度数据采集仪(图1)。



图1 实验台整体构造图

秸秆储藏箱如图2所示,由热导率极低的无机玻璃组装而成,长为20 cm,宽为10 cm,高为10 cm,其外表包裹着绝热材料,目的是营造一个完全绝热的外部环境,同时储藏箱四周密封,防止物料受热导致其中的水分蒸发。秸秆储藏箱内的底部安置了加热板,用于给秸秆加热。储藏箱内安置一个调节板,其材质的热导率很高,其温度可以达到外部环境温度,并可以通过滑动调节板压缩秸秆从而调节秸秆的密度。此外,在另一侧的玻璃壁上每隔1 cm安置一个热电偶,共安装10个,用于测量秸秆的温度<sup>[3]</sup>。

**[收稿日期]** 2023-10-24

**[基金项目]** 2019YFC1904605(多源固废协同利用技术、模式与集成示范)

**[作者简介]** 侯春旭(1989—),男,工程师,硕士,主要从事固废环保板块设计及研究工作。

**[引用格式]** 侯春旭,冯俊小,陈昊,等.甜高粱秸秆热物性研究[J].绿色矿冶,2023,39(6):86-92.

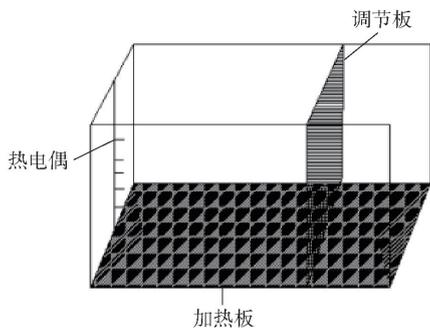


图2 秸秆储藏箱结构图

在实验过程中,电子温度数据采集仪从始至终收集每个热电偶的数据,并绘制温度变化曲线。

## 1.2 甜高粱秆导热率与比热容的测量原理

### 1.2.1 热导率的测量原理

上述实验设备储藏箱体底部平壁贴了一个加热板,整个加热板以恒定的功率(30 W)加热,经过一段时间,储藏箱内秸秆的温度将会上升达到比较稳定状态<sup>[4]</sup>。根据傅里叶定律一维稳态传热原理(式(1)),可得热导率的计算式(式(2))。

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

$$\lambda = -\frac{\Phi}{A \frac{dt}{dx}} = \frac{3}{x\Delta T} \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为导热率,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\Phi$  为单位时间内通过横截面的热量,  $W$ ;  $A$  为横截面面积,  $m^2$ ;  $x$  为两相邻热电偶之间的距离,  $m$ ;  $\Delta T$  为导热温差,  $^{\circ}C$  或  $K$ 。

### 1.2.2 比热容率的测量原理

比热容计算公式见式(3)。

$$C = Q/\Delta TM \quad (3)$$

式中: $C$  为比热容,  $J/kg \cdot K$ ;  $Q$  为吸收(或放出)的热量,  $J$ ;  $\Delta T$  为吸热(或放热)后温度的变化量,  $^{\circ}C$  或  $K$ ;  $M$  为物体的质量,  $g$ 。

根据克里舍测量原理,当长、宽与厚度之比大于5时,可以满足一维稳态传热的假设,本文所使用的实验台满足此要求,即长与宽分别为20 cm和10 cm,每两个热电偶之间的距离为1 cm<sup>[5]</sup>。

此时,比热容计算公式可化简为式(4)。

$$C = \frac{q}{\rho\delta} \times \frac{t}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

式中: $q$  为加热板单位面积加热功率,  $W$ ;  $T_1$  为加热板加热温度,  $^{\circ}C$  或  $K$ ;  $T_2$  为秸秆颗粒堆内部温度,  $^{\circ}C$  或  $K$ ;  $t$  为秸秆内部温度从  $T_2$  加热到  $T_1$  所需的时

间,  $s$ ;  $\rho$  为秸秆堆的密度,  $kg/m^3$ ;  $\delta$  为秸秆颗粒堆的厚度,  $m$ 。

## 1.3 实验步骤

### 1.3.1 秸秆的孔隙率测量

实验采用容重法测定秸秆常温下的孔隙率,并分析高粱秸秆在含水率为0时其密度(干密度)与孔隙率的关系。首先,采用加热法脱去秸秆中的水分,待继续延长加热时间而秸秆的质量不变时,将秸秆放入一定量容器内,填满、称重以确定总容积和秸秆质量。用带孔的木板盖住容器,通过小孔向容器内缓慢注水直到注满,并标定注水容积,将注水容积除以总容积即为秸秆的孔隙率。同一质量的秸秆测量10次,取其平均值。

### 1.3.2 秸秆的物性测定方法及步骤

#### 1.3.2.1 含水率测量方法

在常温下测量秸秆热导率时,首先准备完全干燥的秸秆样本以测定其干密度,再根据所需含水率要求,用喷雾器将水均匀喷洒在样品上,然后将样品放入密封袋内并尽量均匀压实,使秸秆中水分不会蒸发以保证实验的精确性。同一个实验要进行多次取平均值,如图3所示。



图3 秸秆颗粒加湿图

#### 1.3.2.2 堆积密度测量方法

首先选取含水率已经调节好的秸秆(满足实验要求),采用天平称其质量,接着将秸秆放置在秸秆储藏箱内。因为箱内部宽与高是定值,都是10 cm,当推动调节板,则可控制秸秆堆的长度( $c$ ),可求得秸秆体积 =  $10 \times 10 \times c$ ,从而可求出秸秆的堆积密度。需要注意的是必须保证秸秆颗粒分布的均匀性,以减小误差。

#### 1.3.2.3 温度的测定方法

对于秸秆的温度,本实验求取的是平均值。为了提高实验的精度,尽量采集最近的两个热电偶的温度  $T_1$  与  $T_2$ ,则两个热电偶之间的秸秆温度( $T$ )为  $(T_1 + T_2)/2$ 。同一处样品重复测定6次,取其平均值。

### 1.3.2.4 比热容的测定方法

测量比热容时,把低热导率的秸秆颗粒做成薄片,紧贴在加热片上。对试样的四周进行绝热保护,使其长度与宽度尺寸足够大,满足一维稳态。经过一段时间,试样内部温度会出现准稳态,其内部温度分布变化类似抛物线,再通过公式(4)进行比热容计算。

### 1.3.3 实验设置

#### 1.3.3.1 实验一(含水率、密度与热导率相关性)

实验一,在常温条件下,分别取含水率  $w$  为 5.098%、10.197%、12.901%、15.902%、20.09% 的秸秆 5 份,每份各 75 g。推动储藏箱的调节杆使秸秆的密度( $\rho$ ) 在每种含水率条件下分别达到 63.2 kg/m<sup>3</sup>、82 kg/m<sup>3</sup>、117.4 kg/m<sup>3</sup>、130.1 kg/m<sup>3</sup>。当满足上述条件时,开启加热板对秸秆加热,在每个条件下各取 10 组数据,求取均值,得到温度差值,代入公式(2)中得到热导率。

#### 1.3.3.2 实验二(温度、密度与热导率相关性)

实验二,在常温条件下,分别取温度  $T$  为 40 ℃、60 ℃、80 ℃、100 ℃ 的秸秆 4 份,每份各 75 g。推动调节杆在人为干预下使秸秆的密度( $\rho$ ) 在每种温度条件下达到 63.2 kg/m<sup>3</sup>、82 kg/m<sup>3</sup>、117.4 kg/m<sup>3</sup>、130.1 kg/m<sup>3</sup>。满足上述条件时,开启加热板对秸秆加热,在每个条件下各取 10 组数据,求取均值,得到温度差值,代入公式(2)中得到热导率。

#### 1.3.3.3 实验三(温度与比热容相关性)

实验三,在自由堆积条件下,分别取温度  $T$  为 20 ℃、30 ℃、40 ℃、50 ℃、60 ℃、70 ℃ 的秸秆 6 份,每份各 75 g。满足上述条件时,开启加热板对秸秆加热,各取 10 组数据,求取均值,即获得加热时间、加热板加热温度与秸秆颗粒堆内部温度,代入公式(4)中可得到比热容。

#### 1.3.3.4 实验四(密度与比热容相关性)

实验四,在常温条件下,分推动调节杆使秸秆密度( $\rho$ ) 达到 63.2 kg/m<sup>3</sup>、82 kg/m<sup>3</sup>、117.4 kg/m<sup>3</sup>、130.1 kg/m<sup>3</sup> 4 份,每份各 75 g。满足上述条件时,开启加热板对秸秆加热,在每个条件下各取 10 组数据,求取均值,即获得加热时间、加热板加热温度与秸秆颗粒堆内部温度,代入公式(4)中可得到比热容。

#### 1.3.3.5 实验五(含水率与比热容相关性)

实验五,分别取绝干秸秆 4 份,每份各 75 g。在常温、秸秆自由堆积条件下,分别给秸秆颗粒加入水

达到一定含水率。满足上述条件时,开启加热板对秸秆加热,在每个条件下各取 10 组数据,求取均值。即获得加热时间、加热板加热温度与秸秆颗粒堆内部温度,代入公式(4)中可得到比热容。

## 2 实验结果分析

### 2.1 堆积密度与孔隙率的关系

如表 1 所示,在两种体积下分别进行 5 组实验,将其结果求取平均,得到秸秆在没有外力作用下的堆积密度为  $\rho = 96.05 \text{ kg/m}^3$ ,以此状态秸秆的堆积密度为起点,推动储藏箱调节板,调节秸秆堆积密度,截至无法手动调节为止,测量不同堆积密度条件下的秸秆孔隙率,实验结果如图 4 所示。

表 1 秸秆的堆积密度测量

序号	体积/m <sup>3</sup>	重量/kg	密度/kg·m <sup>-3</sup>
1	0.000 1	0.096 5	96.5
2	0.000 1	0.095 9	95.9
3	0.000 1	0.096 2	96.2
4	0.000 1	0.096 4	96.4
5	0.000 1	0.095 7	95.7
6	0.000 05	0.047 9	95.8
7	0.000 05	0.048 1	96.2
8	0.000 05	0.048 1	96.2
9	0.000 05	0.048	96.0
10	0.000 05	0.047 8	95.6

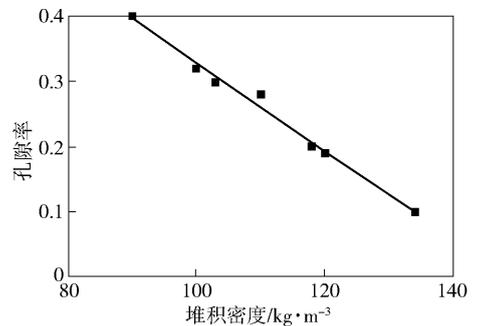


图 4 孔隙率与密度变化曲线

由图 4 可知,随着秸秆堆积密度增加,其孔隙率降低,两者变化规律接近线性关系。

从图 4 可得到秸秆堆积密度与孔隙率的关系,见式(5)。

$$\varepsilon = -0.0068\rho_1 + 1.012 \quad (5)$$

式中: $\varepsilon$  为秸秆的孔隙率; $\rho_1$  为秸秆的绝干密度, kg/m<sup>3</sup>。

含水秸秆的密度按照式(6)计算。

$$\rho = \rho_1 + \rho_w w \quad (6)$$

式中: $\rho_w$ 为水的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $w$ 为含水率。

## 2.2 秸秆含水率对热导率的影响

在常温条件下,秸秆热导率随着含水量变化的结果如图5所示。

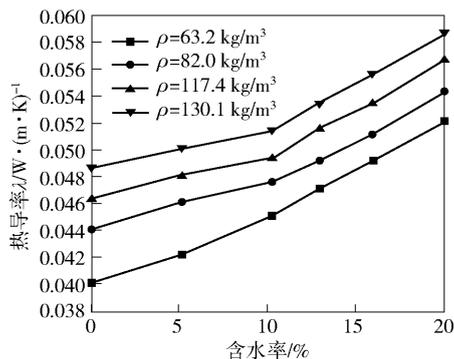


图5 秸秆热导率随含水率变化的关系曲线

从图5可知,随着含水量增加,热导率逐渐增加。当含水率为0%~15%,秸秆的热导率呈现线性增加;当含水率大于15%,秸秆的热导率陡然增加。这是因为含水率为0%~15%时,秸秆本身内部纤维组织吸收水分,所以 $\lambda$ 呈线性变化。当秸秆含水率大于15%时,秸秆本身已经达到饱和,多余的水分溢在秸秆之间的空隙中,由于水的导热系数大于秸秆的热导率,所以水导热占主要的地位,导致整体热导率陡然增加。

## 2.3 甜高粱杆堆积密度对热导率的影响

如图6所示,在常温条件下,不同含水率的秸秆热导率随密度增加呈线性增加。这是因为随着密度增加,秸秆孔隙率减小,秸秆本身基质逐渐占据孔隙内的气体体积。空气的热导率为 $0.025 \text{ kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,秸秆内部基质热导率为 $0.050 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,因此随着基质的增多、空气量的减少,秸秆整体的热导率增加。

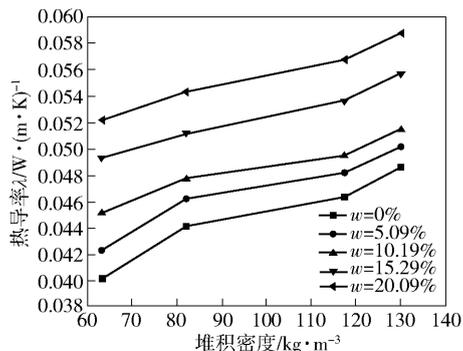


图6 秸秆热导率随堆积密度变化的关系曲线

## 2.4 秸秆温度对热导率的影响

在秸秆绝干条件下,秸秆的热导率随着秸秆温度的变化如图7所示。

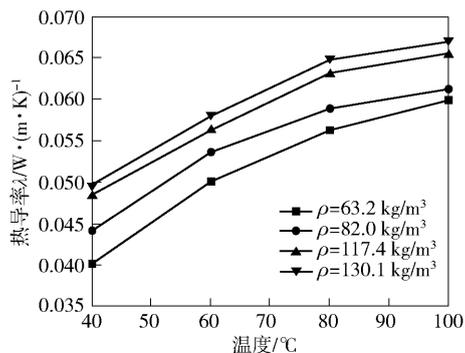


图7 秸秆热导率随温度变化的关系曲线

如图7所示,热导率随着温度增加呈线性增加。在温度 $80^\circ\text{C}$ 之后,热导率逐渐趋于平缓。按照固体理论,当温度不太高时,组成固体的微粒(分子、原子或离子等)在其平衡位置附近作谐振动,微粒成为谐振子具有一定的能量,所以固体具有热容量。作热振动的微粒具有一定的振幅,可以对邻近微粒施加周期性的作用力,微粒间相互作用,导致微粒间能量发生转移,形成固体的热传导。当温度增加时,固体自身能量增加,振幅增大,作热振动的微粒之间的相互作用力随之增强。此时秸秆内的孔隙率极值会伴随着整体的温度升高逐渐提高。秸秆基质孔隙中的空气也会加强传热,在两种传热方式的综合影响下,秸秆整体热导率随温度的上升而增加。随着秸秆温度进一步上升,秸秆内部孔隙间的气体分子热运动逐渐增强,并且范围越来越大,因此空气导热逐渐占据主导地位,而气体的热导率小于固体的热导率。因此温度达到 $80^\circ\text{C}$ 之后,秸秆的热导率逐渐趋于平稳。

## 3 热导率对比实验

为了确保上述实验结果精确,需进行不同温度条件下的秸秆热导率对比实验。在不同温度( $20^\circ\text{C}$ 与 $40^\circ\text{C}$ )条件下,秸秆热导率随含水率的变化如图8所示。由图8可知,不同温度的秸秆热导率随含水率变化趋势基本一致,只是在同一含水率条件下,不同温度秸秆热导率绝对值有所区别,即温度越高,热导率越高,可得实验的准确性。

一般情况下,秸秆堆由大量不规则的小秸秆颗粒组成,但是小秸秆的横竖分布是随机的,由于秸秆的内部结构特殊性,其横竖分布可能影响秸秆堆的热导率。为此研究本文秸秆放置方式对热导率的影

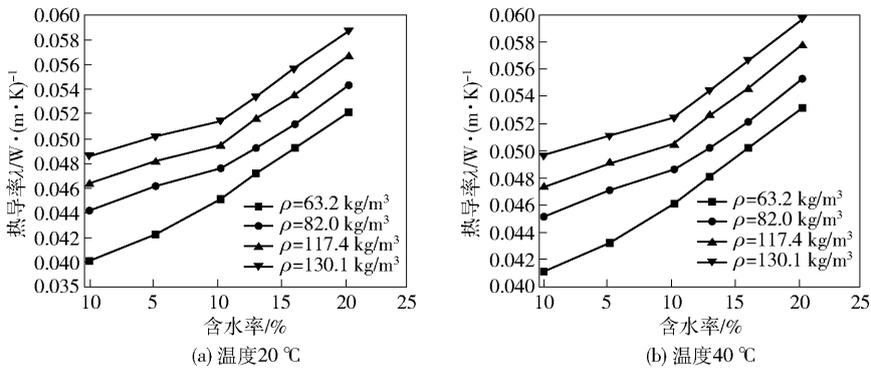


图8 在不同温度条件下秸秆热导率随含水率的变化

响,秸秆横向分布设为与热流平行,竖向分布设为与热流方向垂直,相互交叉设为秸秆随机分布。实验结果如图9所示。

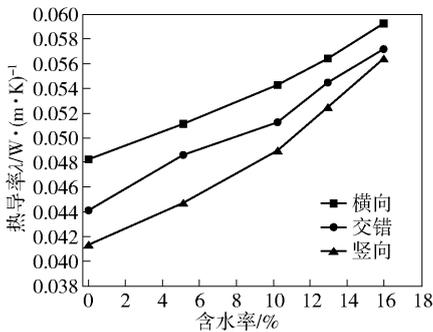


图9 秸秆热导率随放置变化的关系曲线

如图9所示,秸秆放置的方式对秸秆热导率有很大的影响。在温度相同、含水率比较低的条件下,当秸秆横向分布时,秸秆孔隙的方向平行于热流方向,其热导率大于秸秆竖向分布时的热导率。这与秸秆内部的细胞壁内分子链结构有关。秸秆的细胞壁是微纤维束以长链型分子聚合物形式排列而成,而这些微纤维绝大部分分布在细胞的径向轴线上,可促进传热。当含水率达到15%时,各种排列的秸秆热导率基本一致,这是因为此时秸秆本身已经达到饱和,多余的水分溢在秸秆之间的空隙处,主要为外部水导热。但实际上各种排列的秸秆热导率并未呈现此趋势,其原因是在加热状态下,平行热流方向的秸秆的毛细管现象加剧,即产生一定对流换热增大热导率。因此进行实验时秸秆放置应尽量随机化,以减小误差。

#### 4 热导率正交实验

本文采用正交实验确定影响秸秆热导率的主要因素,参数组合设计采用正交实验思路,三因素四水平,选择 $L_{16}(3^4)$ 正交表<sup>[6]</sup>。正交实验因素水平设

置见表2。

表2 秸秆碎料不同工况下有效热导率正交分析

	含水率/ %	堆积密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	物料温度/ $^{\circ}\text{C}$	实验结果
实验1	1(0)	1(63.2)	1(40)	0.038 49
实验2	1(0)	2(82.0)	2(60)	0.050 62
实验3	1(0)	3(117.4)	3(80)	0.065 24
实验4	1(0)	4(130.1)	4(100)	0.071 91
实验5	2(5.09)	1(63.2)	2(60)	0.053 34
实验6	2(5.09)	2(82.0)	1(40)	0.046 81
实验7	2(5.09)	3(117.4)	4(100)	0.066 12
实验8	2(5.09)	4(130.1)	3(80)	0.065 13
实验9	3(10.19)	1(63.2)	3(80)	0.059 63
实验10	3(10.19)	2(82.0)	4(100)	0.063 21
实验11	3(10.19)	3(117.4)	1(40)	0.050 42
实验12	3(10.19)	4(130.1)	2(60)	0.060 51
实验13	4(15.29)	1(63.2)	4(100)	0.063 11
实验14	4(15.29)	2(82.0)	3(80)	0.061 94
实验15	4(15.29)	3(117.4)	2(60)	0.059 31
实验16	4(15.29)	4(130.1)	1(40)	0.053 52
K1	0.038 49	0.039 53	0.041 21	
K2	0.050 62	0.055 71	0.059 86	
K3	0.065 24	0.075 32	0.085 61	
极差	0.009	0.002	0.018	

一般来说,在温度变化不大的情况下,固体、液体和气体的热导率与温度近似呈正比关系,利用现有的实验数据整理出秸秆热导率与密度、含水率及温度的线性关系式,见式(7)。

$$\lambda = 0.0213 + 1.82w \times 10^{-4} + 1.344\rho \times 10^{-4} + 3.167 \times 10^{-4} \quad (7)$$

式中: $\lambda$ 为秸秆的热导率, $\text{kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $w$ 为秸秆含

水率, %;  $\rho$  为秸秆的堆积密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$  为秸秆的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

由上述公式所得, 秸秆热导率与密度、含水率和温度成指数关系, 随着上述三个参数增加, 秸秆热导率增加, 且影响效果顺序为: 温度 > 含水率 > 密度。

对于实际秸秆, 一般只有密度可以直接测出。计算前需先将秸秆完全晒干或烤干, 测出其干密度, 由公式(6)反算出含水率  $w$ , 再由式(7)算出热导率  $\lambda$  值。

如图 10 所示, 实际值与拟合值的对比如图 10 所示。由图 10 可知, 最大正向相对偏差为 5.4%, 最大负向相对偏差为 3.4%, 这说明拟合值的准确性比较高。

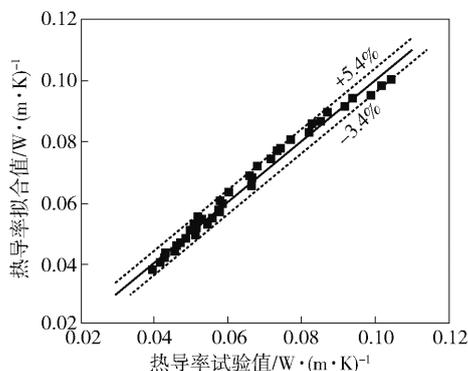


图 10 热导率试验值与拟合值比较

## 5 甜高粱秆颗粒的比热容分析

秸秆颗粒的比热容随秸秆颗粒的堆积密度、含水率以及温度的变化而产生变化。实验测量的具体结果如图 11 ~ 图 13 所示。

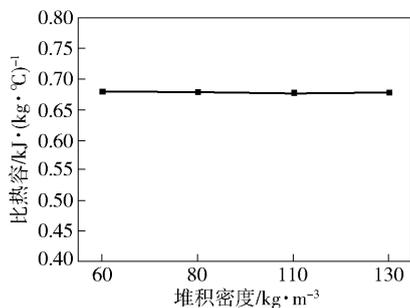


图 11 比热容随堆积密度的变化

由图 11 可知, 在常温或者一定温度条件下, 随着秸秆的堆积密度增加, 比热容几乎不变, 进而对其进行方差分析, 分析结果为不显著。因此可以说明在一定的范围之内, 堆积密度对秸秆的比热容影响很小。

如图 12 所示, 在常温或者一定温度条件下, 随

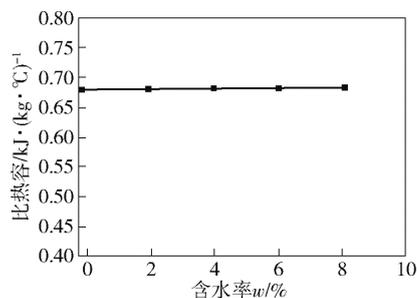


图 12 比热容随含水率变化的关系曲线

随着秸秆含水率的增加, 比热容几乎不变, 进而对其进行方差分析, 分析结果也为不显著。因此可以说在一定的范围内, 含水率对秸秆比热容的影响很小。

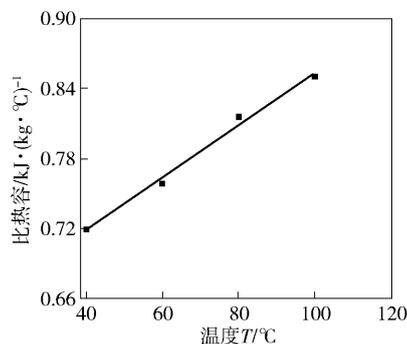


图 13 比热容随温度的变化

如图 13 所示, 在秸秆绝干密度和堆积密度一定的条件下, 随着的秸秆温度增加, 比热容呈线性增长, 进而对其拟合公式, 得到颗粒的比热容与温度的线性回归方程, 见式(8)。

$$C = 0.665 + 0.0018T \quad (8)$$

式中:  $C$  为秸秆的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $T$  为秸秆的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 6 结论

本文主要以实验的方法测量了秸秆的热物性, 为进一步处理秸秆碎料在发酵工艺过程中的积热问题提供基础数据。经过一系列的研究, 得到以下结论。

1) 本文中的秸秆堆积密度与孔隙率的关系公式总结为:  $\varepsilon = -0.0068\rho_1 + 1.012$ , 秸秆孔隙率与堆积密度成线性关系, 随着堆积密度增加, 孔隙率降低。

含水秸秆的密度公式为:  $\rho = \rho_1 + \rho_w w$ , 含水秸秆密度与含水率成线性关系, 随着含水率增加, 密度增加。

秸秆热导率与密度、含水率和温度的线性关系式为:  $\lambda = 0.0213 + 1.82w \times 10^{-4} + 1.344\rho \times 10^{-4} +$

3.  $16T \times 10^{-4}$ , 随着密度、含水率和温度的增加, 热导率增加。

2) 秸秆热导率受秸秆的放置方式影响很大, 因此在做实验一定保持放置秸秆的随机化。

3) 在本课题的范围内, 随秸秆颗粒堆含水量与堆积密度的增加, 比热容几乎保持不变, 其影响可以忽略不计。颗粒的比热容与温度的线性回归方程为:  $C = 0.665 + 0.0018T$ 。随着温度增加, 比热容增大。

#### [参考文献]

[1] 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.

[2] 孙永明, 袁振宏, 孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源, 2006(2): 78 - 82.

[3] 陆坤权, 刘寄星. 软物质物理学导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006, 7: 647.

[4] 韩冰, 王莉, 李十中, 等. 先进固体发酵技术(ASSF)生产甜高粱乙醇[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 966 - 973.

[5] 耿欣, 李天成, 李十中, 等. 甜高粱茎秆固态发酵制取燃料乙醇过程分析与中试研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(2): 257 - 262.

[6] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189 - 195.

## Study on Thermal Properties of Sweet Sorghum Straw

HOU Chunxu, FENG Junxiao, CHEN Hao, CHEN Songxuan, WANG Yun

**Abstract:** Sweet sorghum straw is a kind of biofuel. Rotary cylinder solid-state fermentation is often used to produce ethanol, but heat accumulation is easy to occur in the rotary solid-state fermentation process, resulting in low fermentation efficiency. In this paper, the thermal properties of straw were measured experimentally, and the changes of thermal conductivity and specific heat capacity under different bulk density (porosity), temperature and moisture content of straw were analyzed, which provided basic data for the subsequent study of the motion characteristics of rod-shaped particles in rotary cylinder. The results shows that there is a linear relationship between the porosity of straw and the bulk density. With the increase of bulk density, the porosity decreases. The density of water-bearing straw has a linear relationship with water content, and the density increases with the increase of water content. With the increase of temperature, moisture content and density, the thermal conductivity of straw increases, and the order of influence is: temperature > moisture content > density. In this paper, the specific heat capacity of straw particle pile remains almost unchanged with the increase of water content and bulk density. As the temperature increases, the specific heat capacity increases.

**Key words:** biomass fuel; thermal properties; mixed heat transfer; thermal conductivity; specific heat capacity; bulk density; moisture content