

# 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验

霍丽丽<sup>1,2</sup>, 孟海波<sup>2</sup>, 田宜水<sup>2</sup>, 赵立欣<sup>2</sup>, 侯书林<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京100083; 2. 农业部规划设计研究院, 北京100125)

**摘要:** 为分析秸秆类生物质原料的物理特性, 该文选取自然晾晒后(全水分8%左右)的6种不同地区玉米秸秆和5种不同种类秸秆, 细粉(粒度0~10mm)后进行物理特性研究。结果表明, 粉碎秸秆的自然和振实堆积密度范围分别在37.43~140和48.40~200kg/m<sup>3</sup>之间, 静态和动态堆积角分别在44°~51°和17°~31°之间, 与金属、橡胶材料的最大静摩擦系数分别在0.45~0.55和0.51~0.62之间, 内摩擦系数在0.53~0.73之间。不同地区玉米秸秆和不同种类秸秆的堆积密度和堆积角均不同, 秸秆品种和原料的均匀度对堆积密度有影响, 不同种类秸秆堆积密度差异较大。原料的全水分越高, 堆积角越大。摩擦特性和流动特性无明显差异。这说明在秸秆原料的压缩、输送、储存等相关装备及工艺路线的设计中, 应充分考虑不同地区、不同种类的秸秆原料堆积特性的差异性。该研究为秸秆类生物质原料的利用提供基础数据支撑。

## 0引言

中国的秸秆资源十分丰富, 据相关调查研究显示, 2006年全国主要农作物秸秆的理论资源量为4.33亿t。其中, 可利用资源量约1.76亿t<sup>[1]</sup>。如何将农作物秸秆有效利用已成为一项重要研究课题。目前, 秸秆的能源化、饲料化、基料化和肥料化等利用方式是研究热点<sup>[2-6]</sup>, 而这些都离不开秸秆的基本物理特性, 其为秸秆类生物质原料的加工、储存、输送等提供必需的基础数据。

目前, 秸秆类生物质原料绝大多数都是将其粉碎预处理后再进行利用, 不同利用方式其粉碎粒度差别较大, 本研究主要针对秸秆类生物质颗粒燃料(颗粒直径6~10mm), 原料的粉碎粒度小于等于10mm。粉碎后的秸秆类生物质原料属于松散原料。国内外对松散原料物理特性的研究中, 针对农业粮食作物种子和谷粒研究较多, 如小麦、玉米、大豆等作物<sup>[7-10]</sup>。

。还有针对木屑的研究

, 如木质散碎物料研究得出物料的水分对堆积密度和堆积角有一定影响<sup>[11-13]</sup>

。关于秸秆, 孟海波、孙占峰等

对整根秸秆的压缩、弯曲和剪切等力学特性进行分析<sup>[14-15]</sup>

, 为收获机械和粉碎机械等提供基础参数; 饶应昌给出外摩擦系数参考数值, 内容只分粗细2种秸秆原料, 并没有给出具体粒度<sup>[16]</sup>

; 隋美丽获得粒度在10~30mm范围内玉米秸秆的粒度与堆积角、内摩擦角和滑动摩擦角的变化规律, 以及静堆积角、内摩擦系数、滑动摩擦系数的范围<sup>[17]</sup>

; 李永军发现陶瓷

颗粒和玉米秸秆粉混合物和斜管的滑

动摩擦系数与各成分的体积系数呈线性关系<sup>[18]</sup>

。田宜水对粒度为5~30mm的切碎秸秆进行了理化特性研究<sup>[19]</sup>。现有的研究十分有限, 且内容不够具体。

本试验选取5种不同种类秸秆和6个不同地区的玉米秸秆作为研究对象, 分别对堆积密度、堆积角、原料与外界物的外摩擦系数、原料内部之间的内摩擦系数、流动特性等物理特性进行试验研究, 为秸秆类生物质原料的压缩、输送、储存等系统设计、设备设计和选型提供基础性参考数据, 对实现生物质原料的规模化应用具有重要意义。

## 1材料与方法

### 1.1仪器设备

93QS-16.0型铡草机(固安县双桥农牧机械厂)、HLP粉碎机(筛孔径10mm, 北京环亚天元机械有限公司)、101-1A型电热鼓风干燥箱(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、PL2002/01型电子天平(精度0.01g, 瑞士梅特勒-托利多公司)、BSA223S-CW型分析天平(精度0.0001g, 赛多利斯科学仪器有限公司)、GZS-1自动标准振筛机(河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、标准样品分析筛(方孔, 筛孔尺寸分别为0.45, 0.6, 1, 3.3, 6, 10mm, 河南省鹤壁市天弘仪器有限公司)、堆积密度测量仪(容积为5L, 自制, 有效直径为167mm, 有效高度为228mm)、堆积角测量仪(自

制，>40L）、HZJ型振动平台（新乡伟达振动设备有限公司）、外摩擦系数测定仪（自制，350mm×650mm×1000mm）、集料框、角度尺、试验用平板（规格300mm×600mm×6mm）、ZJ-2型等应变直剪仪、游标卡尺、钢板尺、百分表、角度尺、计时器、托盘等。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验原料

本试验选取内蒙古、黑龙江、河北、河南、山东、安徽6个地区的玉米秸，以及河北地区的玉米秸、小麦秸、大豆秸、棉秸和花生壳5大类生物质原料作为研究对象。

将采集的各类秸秆自然晾晒达到水分平衡后，首先用铡草机粗粉（>2kg），再用细粉机细粉，然后取约500g秸秆原料测试全水分（见表1）和粉碎后的原料粒度，其余保留作为其他物理特性测试样品。粒度筛分用自动筛分机，振动30s后，采用一系列不同尺寸的分析筛进行筛选，称质量，并对原料粒度分布进行分析，并计算均匀度，试验重复3次取平均值，原料粒度分布，如表2，原料的均匀度由原料60%通过的筛孔宽度与10%通过的筛孔宽度之比计算，数值越小，均匀度越好。

**表 1 不同秸秆原料全水分测定**

**Table 1 Total moisture of different crop straws material**

| 原料种类 | 地区    | 全水分/% |
|------|-------|-------|
| 玉米秸  | 黑龙江双城 | 7.94  |
| 玉米秸  | 内蒙古赤峰 | 7.70  |
| 玉米秸  | 河北廊坊  | 8.28  |
| 玉米秸  | 河南鹤壁  | 7.56  |
| 玉米秸  | 山东青岛  | 7.49  |
| 玉米秸  | 安徽合肥  | 8.01  |
| 小麦秸  | 河北廊坊  | 7.33  |
| 大豆秸  | 河北廊坊  | 8.21  |
| 棉秸   | 河北廊坊  | 9.13  |
| 花生壳  | 河北廊坊  | 8.44  |

**表 2 不同秸秆原料的粒度分布**

**Table 2 Granularity distribution of different crop straws material**

| 地区     | 小于该粒度质量百分比/% |      |      |      |      |      |       | 均匀度  |
|--------|--------------|------|------|------|------|------|-------|------|
|        | 0.45         | 0.6  | 1.0  | 3.3  | 6.0  | 10.0 | >10.0 |      |
| 内蒙玉米秸  | 4.4          | 6.4  | 13.0 | 30.5 | 51.3 | 100  | 100   | 11.7 |
| 黑龙江玉米秸 | 5.8          | 10.0 | 15.9 | 39.1 | 63.5 | 100  | 100   | 9.7  |
| 河北玉米秸  | 6.7          | 11.9 | 19.0 | 42.8 | 67.0 | 100  | 100   | 8.3  |
| 河南玉米秸  | 9.0          | 14.8 | 19.1 | 30.8 | 78.3 | 100  | 100   | 11.1 |
| 山东玉米秸  | 4.2          | 8.0  | 12.7 | 28.2 | 42.8 | 100  | 100   | 10.0 |
| 安徽玉米秸  | 10.1         | 17.5 | 25.4 | 53.9 | 73.3 | 100  | 100   | 10.7 |
| 河北小麦秸  | 2.2          | 3.3  | 4.0  | 11.5 | 21.3 | 80   | 100   | 2.4  |
| 河北豆秸   | 3.5          | 5.0  | 7.3  | 20.3 | 37.4 | 100  | 100   | 9.0  |
| 河北棉秸   | 5.5          | 8.6  | 12.4 | 28.9 | 49.0 | 70   | 100   | 10.0 |
| 河北花生壳  | 4.0          | 7.7  | 14.2 | 22.8 | 37.5 | 65   | 100   | 9.5  |

#### 1.2.2 相关指标测定方法与参照标准

- 1) 《NY/T 1881.2-2010 生物质固体成型燃料试验方法第2部分：全水分》
- 2) 《JB/T 9014.3-1999 连续输送设备散粒物料粒度和颗粒组成的测定》

- 3) 《NY/T 1881.6-2010生物质固体成型燃料试验方法第6部分：堆积密度》
- 4) 《JB/T 9014.7-1999连续输送设备散粒物料堆积角的测定》
- 5) 《JB/T 9014.9-1999连续输送设备散装物料外摩擦系数的测定》
- 6) 《JB/T 9014.8-1999连续输送设备散粒物料抗剪强度的测定》
- 7) 流动特性评价方法

流动特性表征原料的流动性，分为剪切类和流动类。剪切类主要测原料的内摩擦系数。流动类最常用的方法Carr流动性指数法，采用堆积角（静态）、压缩率、板勺角、均匀度4个指标来评价原料的流动性能，满分为100分，4项指标分别为25分，具体评分参见文献[21]。其中静态堆积角度数评价流动特性等级见表3<sup>[20]</sup>

。压缩率是原料自然堆积时和振实后的体积变化率，通常用自然堆积密度与振实堆积密度来表示，由（1）式计算得出。板勺角是将埋在原料里的板勺垂直向上提起，在板勺上原料堆积，测其底角即为板勺角。其值用板勺提起后的角度和板勺受到冲击落料后的角度平均值来表示，见公式（2）。

$$K = \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中， $K$  为压缩率，%； $\rho_b$  为振实堆积密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\rho_s$  为自然堆积密度， $\text{kg/m}^3$ 。

$$\theta_s = \frac{\theta_{s1} - \theta_{s2}}{2} \quad (2)$$

式中， $\theta_{s1}$  为板勺提起后的角度，(°)； $\theta_{s2}$  为板勺受冲击落料后的角度，(°)。

**表 3 静态堆积角对流动性评价**

Table 3 Flow property evaluation on accumulated angle

| 静态堆积角/(°) | 对流动性评价 |
|-----------|--------|
| 25~30     | 优      |
| 31~35     | 良      |
| 36~40     | 一般     |
| 41~45     | 差      |
| >46       | 极差     |

流动性指数为 4 个指标评分总和，从 0~100，分 7 个等级，由低到高表示原料流动性的好坏<sup>[21]</sup>，见表 4。

**表 4 流动性评价指标**

Table 4 Flow property evaluation

| 流动性指数  | 对流动性评价 |
|--------|--------|
| 90~100 | 最好     |
| 80~89  | 好      |
| 70~79  |        |
| 60~69  | 一般     |
| 40~59  | 差      |
| 20~39  |        |
| 0~19   | 最差     |

## 2结果与分析

### 2.1不同地区玉米秸秆物理特性

不同地区粉碎后玉米秸秆数据分析见表5。自然、振实堆积密度和动态堆积角有一定差异，其他指标无显著差异。

表 5 不同地区粉碎后玉米秸秆数据分析  
Table 5 Analysis of corn straw from different area

| 指标                                     | 算术平<br>均值 $\bar{u}$ | 方差 $s^2$ | 算术平均<br>误差 $\Delta$ | 极差 $R$ | $F$ 值 | 显著性 |
|--|---------------------|----------|---------------------|--------|-------|-----|
| $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 80.80               | 158.9183 | 9.90                | 31.23  | 9.74  | *   |
| $\rho_b/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 92.80               | 245.0832 | 12.37               | 41.72  | 11.38 | *   |
| $\Phi_s/(\text{°})$                    | 49.67               | 1.4667   | 1.00                | 3.00   | 0.24  |     |
| $\Phi_d/(\text{°})$                    | 26.00               | 28.000   | 4.00                | 14.00  | 16.57 | *   |
| $\mu_{s1}$                             | 0.52                | 0.0007   | 0.02                | 0.07   | 1.08  |     |
| $\mu_{k1}$                             | 0.45                | 0.0001   | 0.01                | 0.03   | 0.24  |     |
| $\mu_{s2}$                             | 0.60                | 0.0001   | 0.01                | 0.02   | 0.10  |     |
| $\mu_{k2}$                             | 0.49                | 0.0011   | 0.02                | 0.10   | 1.88  |     |
| $\tan\Phi$                             | 0.67                | 0.0015   | 0.03                | 0.10   | 1.34  |     |

注：经查表参照值  $F_{0.05}=3.11$ ； $\rho_s$ 、 $\rho_b$ 分别为原料的自然和振实堆积密度； $\Phi_s$ 、 $\Phi_d$ 分别为原料的静态和动态堆积角； $\mu_{s1}$ 、 $\mu_{k1}$ 分别为原料与金属材料的最大静摩擦系数和滑动摩擦系数， $\mu_{s2}$ 、 $\mu_{k2}$ 分别为原料与橡胶材料的最大静摩擦系数和滑动摩擦系数； $\Phi$ 为原料的内摩擦角/(°)， $\tan\Phi$ 为原料的内摩擦系数，下同。

### 2.1.1 堆积密度特性测试

为消除水分对堆积密度的影响，将堆积密度数值换算为干物质堆积密度。粉碎后玉米秸秆的自然堆积密度在63.24 ~ 94.47kg/m<sup>3</sup>之间，振实堆积密度在69.20 ~ 110.93kg/m<sup>3</sup>之间。据表2分析，用同一粉碎机粉碎不同地区玉米秸秆原料，堆积密度存在显著差异。内蒙古和河南地区玉米秸秆堆积密度最小，山东和安徽地区其次，黑龙江和河北地区最大，如图1所示。

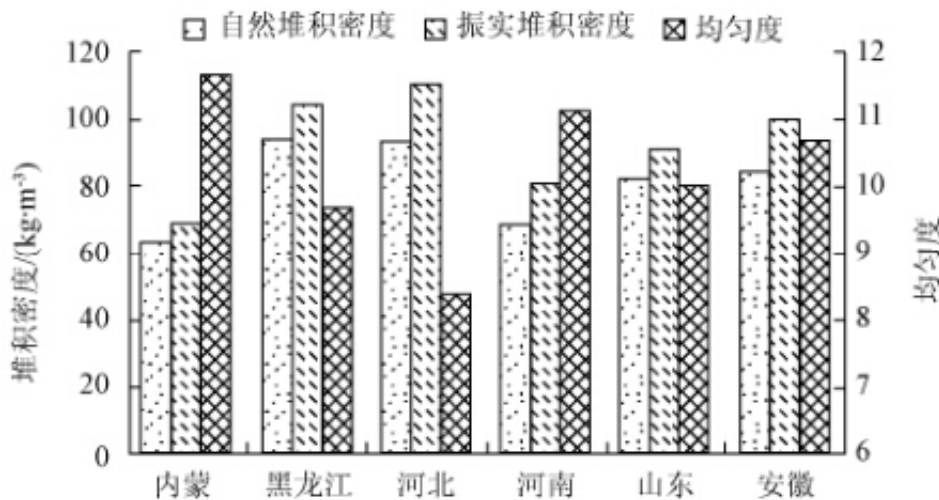


图 1 不同地区玉米秸秆的堆积密度

Fig.1 Bulk density of corn straw from different area

对于同一种类秸秆，均匀度对堆积密度有较大影响。由表2可知，同一粉碎机粉碎不同地区玉米秸秆，粉碎后的原料存在一定的粒度差异，黑龙江、河北玉米秸均匀度较好，均小于10，粉碎原料较均匀，内蒙、河南玉米秸秆均匀度较差，均大于11。

均匀度越好的原料，堆积密度越大，如图1所示。因为，粉碎的玉米秸秆粒度越均匀，原料粒子之间的间隙越少，排列越紧密，堆积密度越大。

堆积密度对原料的仓储设计具有直接参考价值，不同地区玉米秸秆原料仓储和输送设备的设计中应充分考虑到地区性差异，内蒙古、河南地区的相应设备尺寸应加大，以适应原料的空间需求。

### 2.1.2 堆积角特性测试

不同地区粉碎后玉米秸秆的静态堆积角在 $48^{\circ} \sim 51^{\circ}$ 之间，差异不显著 ( $P > 0.05$ )，且均大于 $46^{\circ}$ ，属于流动性极差的原料。粉碎玉米秸秆属于轻质疏松原料，极容易堆积。

动态堆积角在 $17^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 之间，存在一定差异 ( $P < 0.05$ )，内蒙地区的玉米秸秆动态堆积角比其他地区略小。这是由于内蒙玉米秸秆的均匀度差，振动时，原料较大粒径的粒子更容易滑落。

对于不同地区粉碎后玉米秸秆，原料的全水分直接影响静态和动态堆积角的变化，如图2所示。随着全水分增大，动态堆积角越大。原因是含水量增大，原料颗粒之间黏聚力增大，导致堆积角随湿度增加而增大。

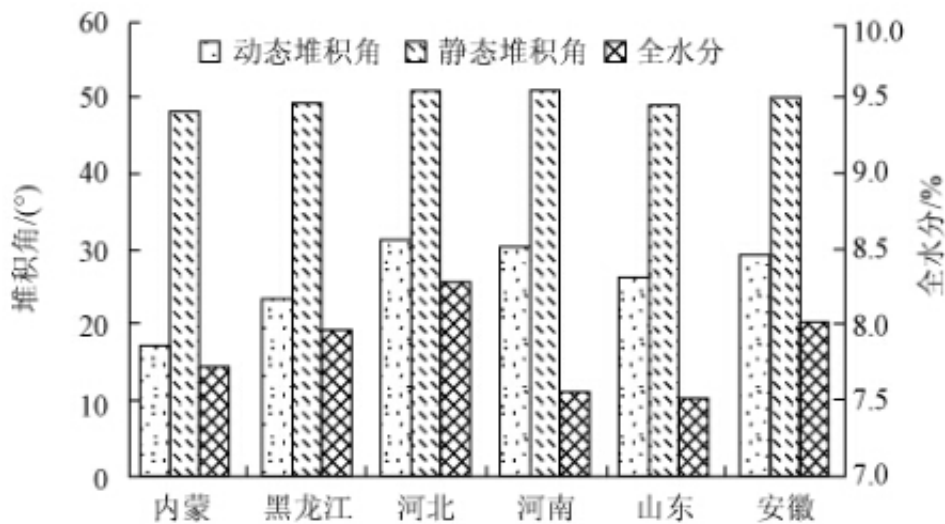


图2 不同地区玉米秸秆的堆积角

Fig.2 Accumulated angle of corn straw from different area

### 2.1.3 摩擦系数特性测试

不同地区粉碎后玉米秸秆的内外摩擦系数变化均不显著 ( $P > 0.05$ )，见表5，不同地区玉米秸秆与金属的最大静摩擦系数  $\mu_{s1}$  在 $0.49 \sim 0.55$ 之间，滑动摩擦系数  $\mu_{k1}$  在 $0.43 \sim 0.47$ 之间；与橡胶的最大静摩擦系数  $\mu_{s2}$  在 $0.58 \sim 0.60$ 之间，滑动摩擦系数  $\mu_{k2}$  在 $0.45 \sim 0.56$ 之间；原料的内摩擦系数  $\tan \phi$  在 $0.62 \sim 0.73$ 之间。玉米秸秆的内摩擦系数大于原料与橡胶材料的摩擦系数，大于原料与金属材料的摩擦系数，如图3所示。

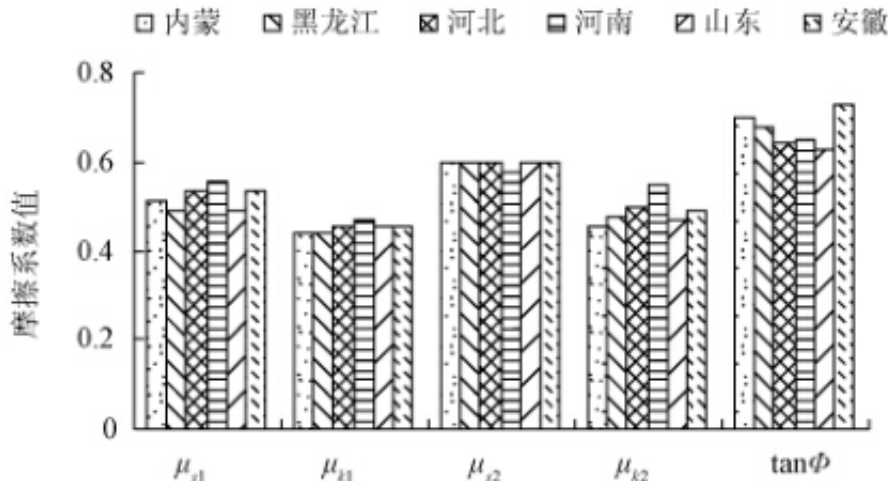


图3 不同地区玉米秸秆的摩擦系数

Fig.3 Friction coefficient of corn straw from different area

外摩擦系数对确定秸秆原料加工设备的动力功率、摩擦副材料的选用，对摩擦表面加工工艺的确定，对摩擦磨损机理的研究等都有参考价值。不同地区的粉碎后玉米秸秆的内外摩擦特性基本一致，这简化了秸秆类压缩机具的设计，可将同一型号的秸秆压缩机具适应不同地区的玉米秸秆，只需根据不同地区玉米秸秆的堆积密度不同，调节进料量，以满足压缩机具的生产率要求即可。

静态堆积角和内摩擦角都能反映出原料的内摩擦特性。静态堆积角表示单粒物料在物料堆上滚落能力，是内摩擦特性的外观表现。内摩擦角反映散粒物料层与层间的摩擦特性。数值上堆积角始终大于内摩擦角，对无黏聚力的散粒物料，堆积角等于内摩擦角。粉碎后玉米秸秆的内摩擦角在 $31^\circ \sim 36^\circ$ 之间，比静态堆积角小，可见，玉米秸秆原料自身存在一定的黏聚力。

#### 2.1.4 流动特性测试

不同地区粉碎后玉米秸秆的流动性差异不大，采用静态堆积角判断玉米秸秆的流动特性极差，如前所述。不同地区玉米秸秆的内摩擦系数在 $0.62 \sim 0.73$ 之间，摩擦系数较大，属于不易流动原料，这与堆积角评价流动性相吻合。而采用Carr指数法评分后，流动性指数范围在 $63 \sim 68$ 之间，流动性能为一般，如图4所示，与堆积角评价流动性有差异，原因是Carr指数法中的4个指标中，压缩率指标评分较高。秸秆原料属于极松散原料，振实后原料仍然疏松，存在较大的空隙，使得压缩率对流动性指数的评分值较高，从而流动性指数法评价流动性为一般，建议适当降低Carr指数法评价流动性级别，以便更好评价松散原料的流动特性。



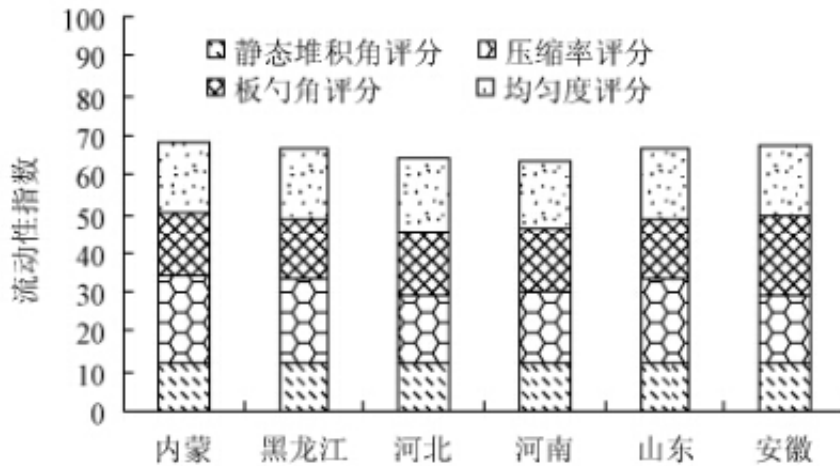


图4 不同地区玉米秸秆的流动性指数

Fig.4 Flow property of corn straw from different area

2.2同一地区不同种类秸秆

不同种类粉碎后秸秆测试数据分析见表6。自然堆积密度和振动堆积密度有很大差异，静态、动态堆积角以及滑动摩擦系数差异显著，其他指标无显著差异。

表6 不同种类秸秆原料的数据分析  
Table 6 Analysis of different crop straws

| 指标                                     | 算术平均值 $\bar{u}$ | 方差 $s^2$ | 算术平均误差 $\Delta$ | 极差 $R$ | $F$ 值 | 显著性 |
|--|-----------------|----------|-----------------|--------|-------|-----|
| $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 107.74          | 1940.81  | 34.00           | 105.03 | 66.8  | **  |
| $\rho_b/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 142.49          | 4058.27  | 50.26           | 150.47 | 80.0  | **  |
| $\Phi_j/(\text{°})$                    | 47.60           | 12.30    | 2.88            | 7.00   | 6.03  | *   |
| $\Phi_d/(\text{°})$                    | 25.40           | 18.30    | 3.68            | 9.00   | 11.3  | *   |
| $\mu_{s1}$                             | 0.49            | 0.0010   | 0.02            | 0.09   | 1.69  |     |
| $\mu_{k1}$                             | 0.43            | 0.0008   | 0.02            | 0.07   | 1.78  |     |
| $\mu_{s2}$                             | 0.57            | 0.0020   | 0.03            | 0.12   | 2.39  |     |
| $\mu_{k2}$                             | 0.47            | 0.0034   | 0.05            | 0.13   | 4.25  | *   |
| $\tan\Phi$                             | 0.60            | 0.0022   | 0.03            | 0.12   | 2.36  |     |

注：经查表参照值  $F_{0.05}=3.36$ 。

2.2.1堆积密度特性测试

不同种类粉碎后的秸秆，堆积密度存在显著差异 ( $P<0.05$ )，见表6。小麦秸秆的堆积密度最小，自然和振实堆积密度分别为37.43和48.40 $\text{kg}/\text{m}^3$

。大豆秸秆和棉秸的堆积密度最大，自然堆积密度约为140 $\text{kg}/\text{m}^3$ ，振实堆积密度可达200 $\text{kg}/\text{m}^3$ 左右，如图5所示。

采用同一粉碎机粉碎秸秆，不同种类秸秆的均匀度相差较大，粉碎后小麦秸的均匀度最好，但堆积密度最小。这是因为小麦秸秆为空心茎，仅由外部表皮构成，内部中空，且表皮本身密度较小，使得小麦秸秆的堆积密度比其他秸秆要小得多。玉米秸秆由表皮和髓构成，髓部所占空间较大，且髓质地疏松，孔隙多，致使玉米秸秆本身密度较小，堆积密度也较小。大豆秸秆、棉秸均为实心茎，本身结构较密实，其堆积密度也较大。可见，仅关注均匀度对不同种

类秸秆的堆积密度影响是不够的。不同种类秸秆的堆积密度与秸秆自身组成结构直接相关。

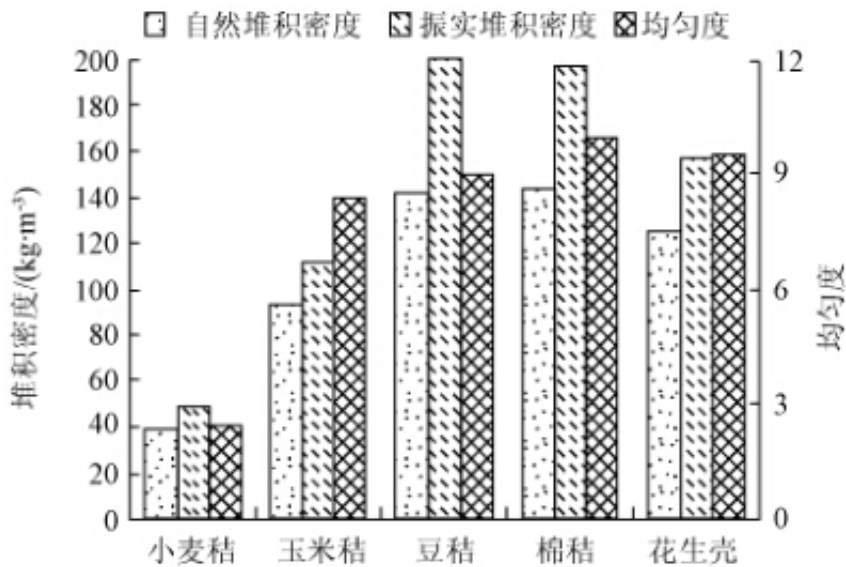


图5 不同种类秸秆的堆积密度

Fig.5 Bulk density of different crop straws

据图5分析可知，堆积相同质量的不同种类原料，花生壳、玉米秸秆、小麦秸秆所需体积分别是大豆秸秆和棉秸的1.15倍、1.5倍和近4倍，因此，为避免玉米和小麦秸秆等原料占用空间大的问题，储存时应考虑将其预压处理。

### 2.2.2堆积角特性测试

不同种类粉碎后的秸秆，静态堆积角在44°~51°之间，存在一定差异 (P<0.05)。小麦和花生壳静态堆积角小于46°，属于流动性差的原料，而玉米秸、大豆秸秆和棉秸属于流动性极差的原料。动态堆积角在22°~31°之间，存在差异 (P<0.05)。玉米秸秆的动态堆积角最大，小麦秸秆最小。

全水分对静态堆积角和动态堆积角均有一定影响，如图6所示。除小麦秸秆外，其他秸秆全水分越高，堆积角也较大，这与原料粒子间的黏聚力有关，水分增高，黏聚力增大，越不易流动。

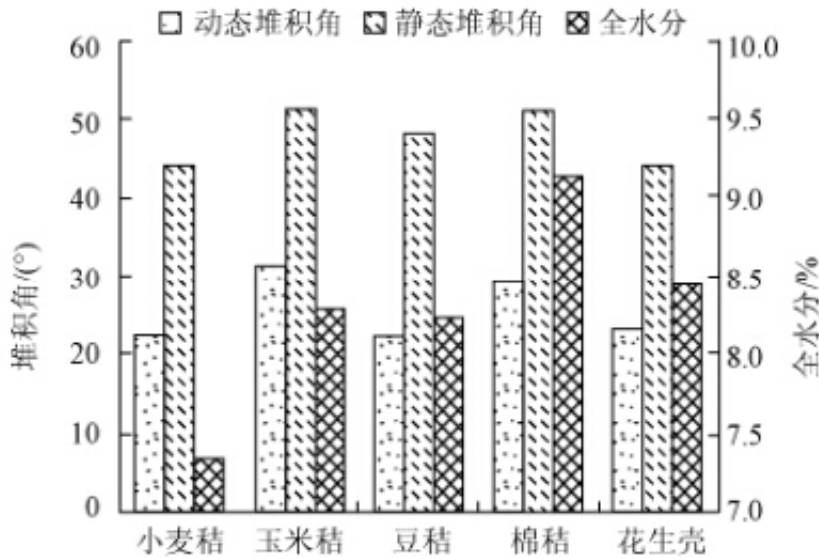


图 6 不同种类秸秆的堆积角

Fig.6 Accumulated angle of different crop straws

### 2.2.3 摩擦系数特性测试

对于外摩擦系数，秸秆类粉碎后原料与金属的最大静摩擦系数  $\mu_{s1}$  在 0.45 ~ 0.53 之间，滑动摩擦系数  $\mu_{k1}$  在 0.40 ~ 0.47 之间，不同种类粉碎后秸秆原料差异不显著 ( $P > 0.05$ )。秸秆类粉碎后原料与橡胶材料的最大静摩擦系数  $\mu_{s2}$  在 0.51 ~ 0.62 之间，滑动摩擦系数  $\mu_{k2}$  在 0.41 ~ 0.54 之间，不同种类粉碎后秸秆原料略有差异 ( $P < 0.05$ )，小麦秸秆的滑动摩擦系数最低。不同种类秸秆的内摩擦系数  $\tan \phi$  在 0.53 ~ 0.65 之间，无明显差异。同种秸秆原料的内摩擦系数均大于其与外界材料的摩擦系数，如图 7 所示。

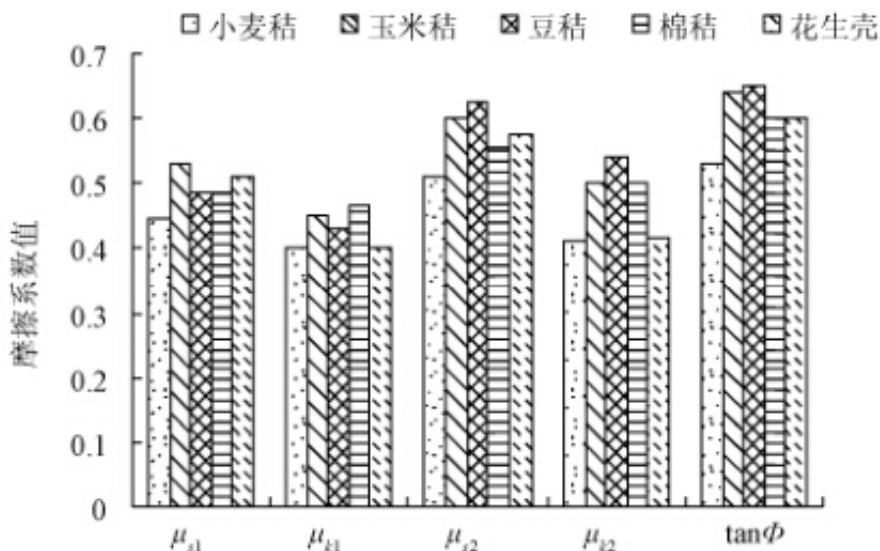


图 7 不同种类秸秆的摩擦系数

Fig.7 Friction coefficient of different crop straws

不同种类粉碎后秸秆原料的摩擦特性对相应的生物质压缩成型机具的设计具有重要的参考价值。如秸秆原料与金属材料的摩擦系数数值的测定可直接为环模式生物质固体燃料成型机的关键部件环模和压辊的材料及热处理方式选择提供参考依据，以保证关键部件的耐磨性和硬度，延长使用寿命。

采用橡胶类皮带输送设备输送秸秆类原料时，不同地区的玉米秸秆与橡胶材料的摩擦系数变化不大，为保证原料的输送量，可设计同一材质的皮带输送设备，只需考虑原料的堆积密度不同，所需输送空间不同即可。

而不同种类的秸秆为保证输送量，不仅考虑原料的堆积密度，还需考虑与输送皮带材料的摩擦作用，小麦和花生壳可归为一类，设计相同材质皮带。玉米秸、大豆秸秆和棉秸为另一类。

粉碎后不同种类秸秆的内摩擦角在 $28^{\circ} \sim 33^{\circ}$ 之间，比静态堆积角小。可见，不同种类的秸秆原料自身均存在较大的黏聚力。全水分最小的小麦秸秆，其堆积角最小，内摩擦角也最小。

#### 2.2.4 流动特性测试

粉碎后秸秆类原料的流动性指数在59~72之间，如图8所示。不同种类秸秆的流动特性有所不同，大豆秸秆和棉秸的流动性指数分别为61和59，流动性能较差；其次为花生壳，流动性指数70；小麦流动特性指数为72，流动性能较好，从内摩擦系数也可看出，小麦的内摩擦系数最小，流动性能相对较好。

采用Carr指数法评价级别比堆积角对流动特性评价级别高，如前所述。对于秸秆类轻质松散原料，建议将流动特性指数对应的评价降低一级，以便更好地反映出秸秆原料的流动特性。

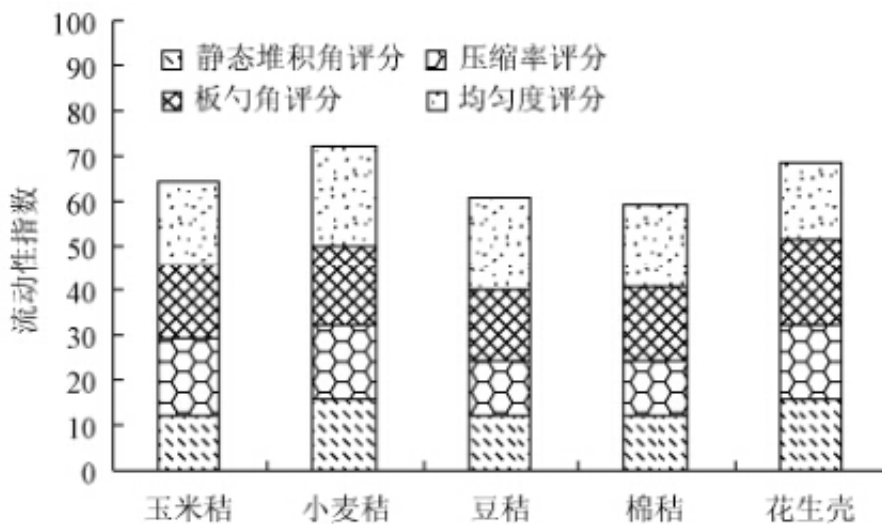


图8 不同种类秸秆的流动性指数

Fig.8 Flow property of different crop straws

设计秸秆类原料输送和仓储装备时，应考虑不同种类秸秆流动的差异性，根据不同原料设计与之适应的相关设备。

### 3 讨论

不同地区的玉米秸秆的各指标中堆积密度和动态堆积角有差异，原因可能与玉米种植品种有关，不同品种的秸秆粉碎后原料的均匀度有一定差异。内蒙古地区玉米秸秆粉碎后的均匀度最差，堆积密度最小，河南、山东和安徽地区其次，黑龙江和河北地区玉米秸秆粉碎后的均匀度最好，导致堆积密度最大。粉碎后原料的均匀度不同，也对动态堆积角产生了一定影响。不同地区的玉米秸秆的摩擦特性和流动特性均无显著差别。

同一地区的不同种类秸秆的各指标中堆积密度、堆积角、流动特性以及与橡胶的滑动摩擦系数有一定差异 ( $P > 0.05$ )，特别是堆积密度差异非常大，玉米秸秆、花生壳、大豆秸秆和棉秸的自然堆积密度分别约为小麦秸秆的2.5倍、3.3倍、3.8倍和近4倍，这不仅与秸秆的粉碎均匀度相关，而且与秸秆本身的结构组织更为密切相关，小麦秸秆茎秆中空，只有外表皮层，因此堆积后孔隙较多，堆积密度最小。玉米秸秆虽然含有中间层，但中间为髓质部分，质地较轻，堆积密度也不高，花生壳自身的组织致密程度也不及棉秸和大豆秸秆，棉秸和大豆秸秆的组织结构最密实，堆积密度相应最高。由于粉碎的均匀度和全水分影响，小麦秸秆的动态堆积角最小。秸秆类原料均属于流动性差的范畴，小麦和花生壳流动性差，玉米秸、大豆秸秆和棉秸流动性极差。原因是与秸秆自身的结构组织相关，秸秆类原料不如沙石、土或粮食种子等其他散粒体结构密实，秸秆原料属于松散类原料，这可能是导致其流动性差的根源。

## 4结论

1) 粉碎秸秆的自然和振实堆积密度分别为37.43 ~ 140和48.40 ~ 200kg/m<sup>3</sup>之间，静态和动态堆积角分别在44° ~ 51°和17° ~ 31°之间。不同秸秆原料，堆积密度差异显著，内蒙古和河南玉米秸秆堆积密度较小。秸秆品种和均匀度对堆积密度影响较大，秸秆品种远大于均匀度对堆积密度的影响。玉米秸秆、花生壳、大豆秸秆和棉秸的自然堆积密度分别约为小麦秸秆的2.5倍、3.3倍、3.8倍和近4倍。均匀度好的原料，堆积密度较大。不同地区玉米秸秆动态堆积角有一定差异，河北、河南两地的玉米秸秆最大。不同种类秸秆堆积角不同，玉米秸秆最大，小麦秸秆最小。同种原料的堆积角随原料全水分的增加而增大。

2) 摩擦特性中，与金属、橡胶材料的最大静摩擦系数范围分别为0.45 ~ 0.55和0.51 ~ 0.62，内摩擦系数为0.53 ~ 0.73，不同地区粉碎玉米秸秆和不同种类粉碎秸秆的最大静摩擦系数差异均不大。秸秆类粉碎原料属于流动性差的原料，不同地区玉米秸秆差异不大，大豆秸秆和棉秸的流动性能较差，小麦秸秆的流动性能略好。

3) 秸秆原料的压缩、输送、储存等相关装备及工艺路线的设计中，应充分考虑不同地区、不同种类粉碎秸秆原料之间物理特性的差异性，特别是堆积密度和堆积角差异较大。

4) 流动特性缺少相应的测试方法，该文用堆积角、内摩擦系数及Carr指数法分别对流动特性进行评价，表明对秸秆松散类原料，不同的评价方法对流动特性的评价级别存在一定差异，建议降低Carr指数评价级别，以便更好反映出粉碎秸秆的流动特性。

本试验只针对粉碎后粒度小于10mm的秸秆类原料进行分析，建议下一步针对不同粉碎粒度的秸秆类原料物理特性进行对比研究，为秸秆的能源化、饲料化、基料化等多种利用方式提供更加全面的基础参考依据。

### [参考文献]

- [1]崔明，赵立欣，田宜水，等.中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J].农业工程学报，2008，24(12)：291 - 296.
- [2]霍丽丽，孟海波，田宜水，等.秸秆固体成型燃料与颗粒饲料的对比[J].中国农学通报，2011，27(8)：328 - 333.
- [3]田宜水，赵立欣，孙丽英，等.农业生物质能资源分析与评价[J].中国工程科学，2011，13(2)：24 - 28.
- [4]杨中平，郭康权，朱新华，等.秸秆资源工业化利用产业及模式[J].农业工程学报，2011，17(1)：27 - 31.
- [5]管小冬.农作物秸秆资源利用浅析[J].农业工程学报，2006，22(增刊1)：104 - 106.
- [6]冯伟，黄力程，李文才.我国农作物秸秆资源化利用的经济分析：一个理论框架[J].生态经济，2011(2)：94 - 96.
- [7]Molenda M，Thompson S A，Ross L J.Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces[J].Journal of Agricultural Engineering Research，2000，77(2)：209 - 219.
- [8]Shinoj Subramanian，R Viswanathan.Bulk density and friction coefficients of selected minor millet grains and flours[J].Journal of Food Engineering，2007，81(1)：118 - 126.
- [9]Sjnght T K，Goswami.Mechanical properties of cumin seed (Cuminum cyminum Linn.) under compressive loading[J].Journal of Food Engineering，1998，36(3)：311 - 321.
- [10]Rosentrater K A，Richard T L，Bern C J，et al.Economic simulation modeling of reprocessing alternatives for corn mesa byproducts[J].Resources，Conservation and Recycling，2003，39(4)：341 - 367.
- [11]Ragland K W，Aerts D J，Baker A J.Properties of wood for combustion analysis[J].Bio-resource Technology，1991,37(2)：161 - 168.
- [12]Haykm-Acma H.Combustion characteristics of different biomass materials[J].Energy Convers Manage，2003，44(1)：155 - 162.

- [13]周捍东,徐长妍,丁沪闽.木材散碎物料基本堆积特性的研究[J].木材加工机械,2002(6):7-17.
- [14]孟海波,韩鲁佳.秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景[J].中国农业大学学报,2003,8(6):38-41.
- [15]孙占峰,蒋恩臣.稻草秸秆力学特性研究[J].东北农业大学学报,2007,38(5):660-664.
- [16]饶应昌.饲料加工工艺与设备[M].北京:农业出版社,2010,6.
- [17]隋美丽.秸秆压块饲料机匀料充型区的物流分析与计算机仿真[D].保定:河北农业大学,2005:11-14.
- [18]李永军,何芳,柏雪源,等.颗粒和粉体混合物沿斜滑道的滑动摩擦系数[J].山东理工大学学报自然科学版,2003,17(4):10-12.
- [19]田宜水,姚宗路,欧阳双平,等.切碎农作物秸秆理化特性试验[J].农业机械学报,2011,42(9):124-128.
- [20]Nunthanid J, Launctana A M, Sriamorn-sak P, et al.Characterization of chitosan acetate as a binder for sustained release tablets[J].J Controlled Release, 2004, 99(1):15-26.
- [21]张鹏.卡尔指数法在评价煤粉粉体特征中的应用[J].中国粉体技术,2000,6(5):33-36.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/111859.html>