

# 生物质颗粒成型的精准式上料装置研究

孙启新<sup>1</sup>, 陈书法<sup>1</sup>, 董玉平<sup>2</sup>

(1.222005江苏省连云港市淮海工学院机械工程学院; 2.250061山东省济南市山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室)

**[摘要]**：生物质固化成型是解决其收集、运输和储藏的关键技术。平模碾压是常用的生物质颗粒生产方式，通过碾压产生的热量可使木质素软化，为生物质固化提供内部粘聚力。试验发现布料厚度对生物质成型率和能耗有很大影响。通过响应曲面法和多目标优化设计获得最优物料厚度及成型条件。在此基础上设计了精准式布料装置，该装置采用气压输送实现上料布料，通过对气压进行调整，便可对上料速度进行控制，实现了均匀布料，保证物料在平模上被充分碾压。该装置所设布料管可随碾压辊一起旋转，实现边布料边碾压。通过试验与普通上料装置比较，该装置可进一步提高生物质成型率4%左右，降低能耗6%左右。减小压辊的径向受力的波动，提高设备使用寿命。

## 0引言

生物质在地球上分布广泛，取之不尽，用之不竭。我国农作物秸秆年产量约7.2亿t，这是一笔巨大的能源储备，但其有效利用率却不足30%。生物质作为能源，存在能量密度小，形态各异，运输不便，使用过程不能方便、洁净地实现能量转换，储存和使用占用空间大等缺点，成为制约生物质规模化利用的“瓶颈”。生物质成型技术是解决这一“瓶颈”的有效方法。生物质成型就是将松散的生物质加工成具有一定密度、形状的颗粒<sup>[1]</sup>。成型颗粒可替代石化能源，用于日常生活和工业生产中。

目前国内外生物质固化成型技术及设备的研究发展主要有<sup>[2]</sup>

：日本开发的螺旋挤压方式生产的棒状成型技术、欧洲各国开发的活塞式挤压条状成型技术、美国研发的内压滚筒颗粒状成型技术。螺旋挤压式和曲柄活塞冲压成型物密度稍低，容易松散，且不能连续生产，上述两种设备能耗大，主件易磨损，寿命较低，平均寿命60~80h，大大增加了生物质固化成型的成本。

我国多采用环模辊碾压和平模碾压生产方法。此两种方法连续性挤压成型，生效率较高。但现有设备上料靠人工，布料量难以精确控制。随意布料造成原料的厚度不均匀，无法对生物质进行充分碾压，同时严重影响碾压辊运动平稳性，造成设备损坏。人工上料，一次会上很多的料到成型内，而物料成型在生产过程中是作旋转运动的，这又加剧了能源的损耗。所以传统颗粒成型机的产品制造成本较高、生产率低。

本文针对生物质微粒布料问题，设计一种适用于平模式生物质颗粒成型机的精确上料布料装置，确保原料均匀平铺在平模上，使生物质被充分碾压，颗粒成型更均匀。同时进一步提高生产效率，降低能耗。

## 1物料厚度对成型性能的影响

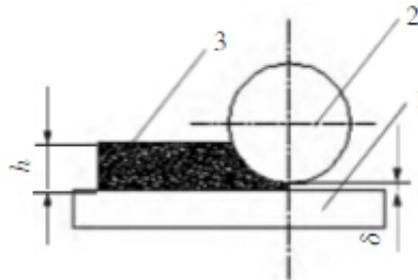
[3-4]

。纤维被粉碎后形成颗粒状，在压缩成型过程中，颗粒进一步破裂成微小颗粒，同时颗粒发生剪切流动对颗粒间的间隙进行填充，剪切填充进一步引起颗粒的破裂，而破裂进一步引起剪切填充流，直到整体致密。微小颗粒的剪切和填充运动会产生大量的摩擦力，从而产生大量的热量。这些热量和填充压力给了木质素活化的能量，促使木质素软化和塑化，此时木质素具有较好的粘结性，木质素的这一变化为纤维颗粒的团聚提供了粘聚力，随着材料的硬化，小颗粒永久地粘结在一起。对木质素进行充分摩擦碾压，激活木质素的活化性能，是提高生物质颗粒成型率的关键因素。

### 1.1物料厚度成型性能的影响

平模式碾压可实现生物质在碾压辊和平模之间的碾压和摩擦。图1所示为平模式碾压原理图。模辊间隙是颗粒成型的关键。间隙过大时，碾压辊对原料的挤压力变小，原料无法从成型孔流出，使原料堆积在成型室内，最终导致成型机被堵死。间隙过小，喂入原料量少，生产率低，能耗高<sup>[5-6]</sup>。

根据不同的模辊间隙，物料在辊道上的平铺厚度 $h$ 也会严重影响生物质成型。 $h$ 过小造成生产率低，过大同样也会造成堵模死机。



1.平模 2.碾压机 3.物料

图1 平模碾压式原理图

Fig.1 Schematic diagram of flat-die compaction

研究物料厚度对生物质成型过程的影响，本文选取玉米秸秆、小麦秸秆、花生壳和油菜秸秆进行实验。模辊间隙为0.3mm，主轴转速为120r/min，平模上成型孔直径为8mm<sup>[7-8]</sup>。将物料厚度与每吨颗粒能耗、成型率的关系绘成图2和图3的曲线。

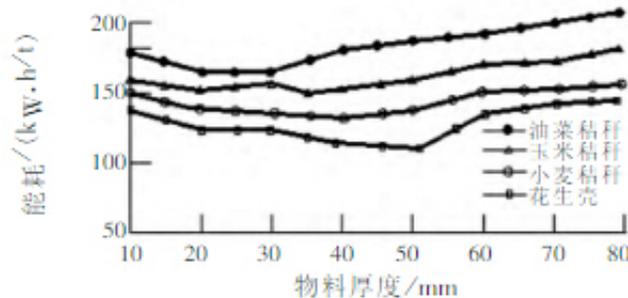


图2 物料厚度对能耗的影响

Fig.2 Influence of material thickness on energy consumption

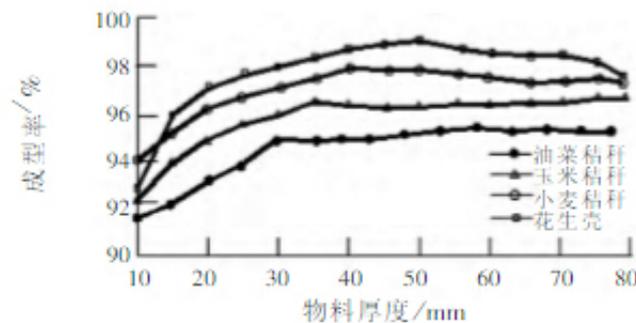


图3 物料厚度对成型率的影响

Fig.3 Influence of material thickness on forming rate

图2显示，能耗随物料厚度增加而减小，到达一定值后又向相反方向变化。每一种物料各有一个与能耗最小值对应的物料厚度。相同厚度的各种物料能耗相比较，油菜秸秆的最大，花生壳的最小。其原因是花生壳的木质素含量最大，而油菜秸秆的木质素含量最小。

图3显示，成型率随物料厚度的增加先增大后减小。由于模辊间隙是固定的，当物料较少时碾压力会很小，不利于物料从平模底部成型孔中流出。随着物料量的增加，碾压力增大，成型率上升。物料增加到一定量时，处于厚度中间部位的材料无法得到充分碾压，所以成型率出现了下降。由于花生壳的木质素含量最大，在碾压过程中，花生壳木质素软化后提供的内部粘结力会大一些，成型相对会容易一些，其成型率相对较高。

从图2、图3得出，充分发挥木质素的粘结性是提高生物质成型性能的关键。要促使木质素活化，必须对物料进行充分碾压。物料厚度过小或过大都不利于生物质的成型。

## 2.2 物料厚度优化

以吨能耗 $Q/kW$ 和成型率 $\mu/\%$ 为优化目标，以物料厚度 $h/mm$ 、模辊间隙 $\delta/mm$ 、模辊转速 $n/(r/min)$ 和木质素含量 $\phi/\%$ 为设计变量，设 $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)=(h, \delta, n, \phi)$ 。优化目标与设计变量之间关系模糊，至今没有明确的函数公式来表达。优化目标函数采用如下形式：

$$\begin{aligned}
 Q &= \min |f_1(h, \delta, n, \phi)| \\
 \mu &= \max |f_2(h, \delta, n, \phi)| \\
 \text{s.t.} \\
 20 &\leq h \leq 50 \\
 0.1 &\leq \delta \leq 1 \\
 100 &\leq n \leq 300 \\
 10 &\leq \phi \leq 35
 \end{aligned} \tag{1}$$

响应曲面法能够构造目标和变量之间的近似数学方程，以便于进行下一步的优化求解。该方法依靠正交试验提供的试验点进行初始化，然后在各试验点进行重复试验以拟合响应曲面。二阶响应面多项式模型如下<sup>[9-10]</sup>：

$$\begin{aligned}
 y &= b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_1 x_2 + b_6 x_1 x_3 + b_7 x_2 x_3 \\
 &\quad + b_8 x_1 x_4 + b_9 x_2 x_4 + b_{10} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_2^2 + b_{13} x_3^2 + b_{14} x_4^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中： $b_0, \dots, b_{14}$ ——多项式系数； $X$ ——设计变量。

采用最小二乘法确定多项式系数

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{3}$$

根据生物质成型特点，设计安排了三因素四水平的正交试验，试验因素与水平见表1所示。运用正交试验获得实验数据如表2所示

表 1 试验因素和水平

Tab.1 The factors and levels of orthogonal test

水平	因素 A $h/mm$	因素 B $\delta/mm$	因素 C $n/(r/min)$	因素 D $\phi/\%$
1	20	0.20	80	10
2	35	0.40	120	20
3	50	0.60	160	30

表 2 正交试验方案与结果

Tab.2 The design and results of orthogonal test

试验号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	试验结果	
					$Q$	$\eta$
1	1(20)	1(0.20)	1(80)	2(20)	201	91
2	1(20)	2(0.40)	2(120)	3(30)	198	93
3	1(20)	3(0.60)	3(160)	1(10)	128	92
4	1(20)	1(0.20)	3(160)	2(20)	160	97
5	2(35)	2(0.40)	1(80)	3(30)	186	98
6	2(35)	3(0.60)	2(120)	1(10)	160	94
7	2(35)	1(0.20)	2(120)	2(20)	136	98

(续表)

试验号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	试验结果	
					$Q$	$\eta$
8	2(35)	2(0.40)	3(160)	3(30)	100	97
9	3(50)	3(0.60)	1(80)	1(10)	180	93
10	3(50)	1(0.20)	2(120)	2(20)	159	95
11	3(50)	2(0.40)	3(160)	3(30)	140	96
12	3(50)	3(0.60)	1(80)	1(10)	180	92

采用遗传算法最终得最优物料厚度值,如表 3。

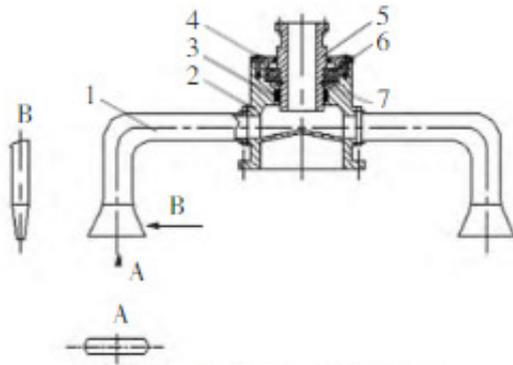
表 3 最优物料厚度值

Tab.3 The optimal value of material thickness

种类	模辊转速/(r/min)	模辊间隙/mm	布料厚度/mm
玉米秸秆	160	0.40	50
小麦秸秆	140	0.30	40
油菜秸秆	160	0.40	50
花生壳	100	0.30	35

### 3变量式布料装置

为精确控制布料厚度,本文设计的一种新型料布料装置,结构如图4所示。

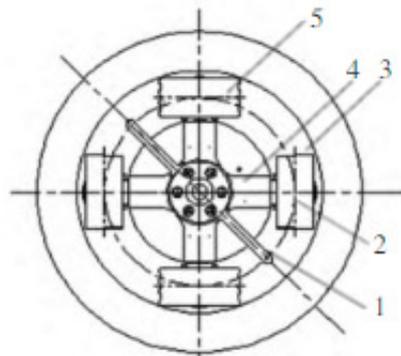


1.布料管 2.连接座 3.陶瓷密封  
4.上盖 5.静止接头 6.轴承 7.挡圈  
图4 上料布料装置的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of feeding device

连接座2通过螺纹连接固定在成型机旋转座上，随压辊一起旋转，其内部设计为锥形，便于物料从其内部流出。布料管1末端做成鸭嘴状，随连接座做圆周旋转，在旋转过程中将物料均匀地平铺在滚压道上。静止接头5通过轴承6与连接座连接，当连接座旋转时，静止接头固定不动，这样可与上料管可靠连接，完成原料输送。静止接头5通过输料管与气动物料输送泵相连接。为保护固定轴承，上方加一上盖4，下部加一陶瓷密封3，同时防止物料泄露。

该布料装置在平面内布置如图5所示。两根布料管交错间隔设置在碾压辊的正前方。物料平铺到辊道上，碾压辊和二次碾压辊随后顺序对生物质进行碾压成型。在生产过程中可根据碾压情况随时调整布料厚度和速度。



1.布料管 2.碾压辊 3.平模 4.旋转轴 5.二次碾压辊  
图5 布料管位置分布图

Fig.5 Distribution of feeding pipe

与现有技术相比，本装置设计合理，其优点：实现物料均匀地平铺在平模辊道上，便于生物质的充分碾压；实现即时上料，减少平模上方及顶部料斗内的物料，节省能源消耗；物料均匀布置，保证碾压辊所受径向力和摩擦力的均匀，防止旋转轴剪切折断，提高设备使用寿命；采用气动物料输送泵，减小设备顶部的料仓，输送泵放置在地上完成地面物料的输送，减少了设备的整体高度；通过操控阀控制物料输送速度、出口压力和输送量，可实现间歇式或连续式送料。

设平模滚环形道内外半径为  $R_1/mm$ 、 $R_2/mm$ ，布料管水平旋转速度为  $n/(r/min)$ ，物料流动速度为  $q/(m^3/min)$ ，布料厚度为  $h/mm$ 。根据布料管每旋转一周，所布物料体积与所输送物料体积相等，可得

$$\pi(R_1^2 - R_2^2)h \times 10^{-9} = \frac{1}{n} \times q \quad (4)$$

整理可得到计算所需物料流量的公式，

$$q = 10^{-9} \pi(R_1^2 - R_2^2)hn \quad (5)$$

流量  $q$  通过气动物料输送泵进行设置，从而实现精准布料。

以玉米秸秆为例，在普通平模碾压成型机加上该布料装置后进行吨能耗和成型率试验。图6是每吨生物质成型颗粒所产生的能耗，从图6中看到，不论碾压辊转速为多少，使用精准均匀布料方式吨能耗下降了5%~6%。图7为颗粒成型率，使用可控式均匀布料方式成型率提高了3%~4%。

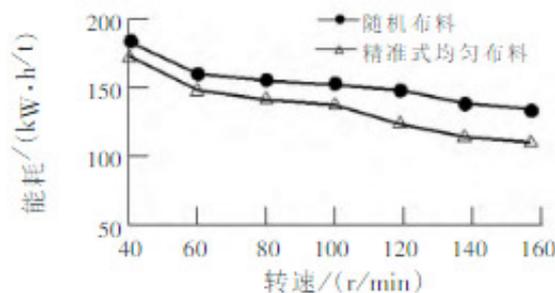


图6 每吨成型颗粒的能耗

Fig.6 Energy consumption per ton solid biofuel

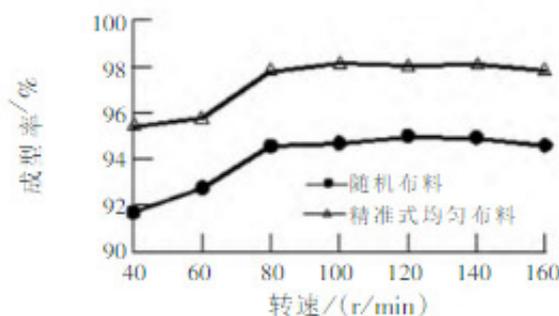


图7 生物质成型率的变化曲线

#### 4结论

生物质成型过程是填隙流和剪切流的混合，会产生大量热量，而木质素在这一温度变化过程中被软化，木质素的软化为生物质微粒的团聚提供了粘接力，充分激活木质素的活化性是提高颗粒成型率的一个关键。对物料进行充分的碾压可产生大量热能，进一步提高木质素的粘性。

本文研究设计的精准布料装置通过气压输送和布料管的旋转运动，可实现均匀精准布料，保证了物料被充分碾压。可进一步提高生物质成型率4%左右，降低能耗6%左右。同时减小压辊的径向受力的波动，提高设备使用寿命。

#### 参考文献

- [1]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.
- [2]汪建文.可再生能源[M].北京:机械工业出版社, 2011.
- [3]陈立祥, 章怀云.木质素生物降解及其应用研究进展[J].中南林学院学报, 2003, 23(1):79-85.
- [4]路瑶, 魏贤勇, 宗志敏, 等.木质素的结构研究与应用[J].化学进展, 2013, 25(5):838-858.
- [5]罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等.生物质颗粒燃料燃烧设备的研究进展[J].可再生能源, 2009(12):90 - 95.
- [6]霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等.模辊式生物质颗粒燃料成型机性能试验[J].农业机械学报, , 2010, 41(12):121-125.
- [7]杜红光, 董玉平, 王慧, 等.生物质冷压成型模具摩擦热分析[J].农业工程学报, 2011, 27(9):58-62.
- [8]孙清, 白红春, 谷士艳, 等.水稻秆颗粒冷压成型工艺条件优化[J].农业机械学报, 2009, 40(8):100-104.
- [9]李汝莘, 耿爱军, 赵何, 等.碎玉米秸秆卷压过程的流变行为试验[J].农业工程学报, 2012, 28(18):30-35.
- [10]王刚, 万敏, 刘虎, 等.粒子群优化模糊系统的铣削力建模方法[J].机械工程学报, 2011, 47(3):121-130

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/100408.html>