

移动式稻麦秸秆立式环模压块成型机试验

陈树人¹, 汤明明¹, 丁锁年², 姚勇³

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏镇江212013; 2. 海安匙鸣机械制造有限公司, 江苏海安226600; 3. 镇江禾煜新能源科技有限公司, 江苏镇江212325)

摘要: 针对国内秸秆压块机不能移至田间进行压块成型作业的现状, 设计了利用75kW轮式拖拉机进行牵引的移动式秸秆压块机。以水稻秸秆为原料, 对移动式秸秆压块机进行生产试验研究, 寻求作业参数对压块机压块成型影响规律和最优组合。采用3因素4水平二次正交旋转组合试验方法, 以喂入辊转速、叶轮转速、环模主轴转速为影响因子, 秸秆压块密度及生产率为评价指标, 利用Design-Expert 8.0.6软件, 对试验结果进行方差分析及响应面分析, 建立了3个因子对评价指标影响的数学模型。结果表明: 对秸秆压块密度的影响因素大小顺序为环模主轴转速、叶轮转速、喂入辊转速; 对秸秆压块生产率的影响因素大小顺序为喂入辊转速、环模主轴转速、叶轮转速; 当喂入辊转速为 $125.84\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、叶轮转速为 $776.05\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、环模主轴转速为 $169.16\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 秸秆压块密度与生产率分别为 $1.153\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $1135.87\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 满足秸秆压块成型要求。

我国是农业大国, 秸秆资源丰富, 每年可生产秸秆超过7亿t。据粗略估计, 目前我国秸秆利用率约为30%, 大量秸秆被就地焚烧, 不仅浪费资源, 而且严重污染环境[1]。秸秆固化成型技术是通过机械加压的方法, 将原来松散、无定形的秸秆原料压缩成具有一定形状、密度较大的固体成型燃料[2], 可很好地解决秸秆资源浪费和污染环境等问题。

国外对固化成型技术[3-4]及应用方面研究起步较早, 先后开发生产了大批技术先进、性能优良的秸秆加工机械设备和成套机具, 对于固化成型理论研究较为深入[5-8]。国内虽有不少企业根据我国实际, 生产了多种秸秆压块成型设备, 但主要是固定式的秸秆压块机, 该类设备需要先对秸秆进行收集、运输和存储, 而后用秸秆切碎机将秸秆切碎, 最后才是在固定的场所进行秸秆压块成型作业, 生产成本低, 占用空间大, 工作环节多, 劳动强度大。而且大多数设备技术并不成熟, 性能不高, 生产作业参数缺乏科学试验研究[9]。

文中提出一种用于田间作业的拖拉机牵引式秸秆压块成型机, 无需进行秸秆运输及存储, 具有秸秆喂料、粉碎、输送、布料、固化、出料等于一体的功能, 生产效率高、成本低、作业灵活, 适应于田间移动作业。通过控制喂入辊转速、叶轮转速、环模主轴转速3个因素, 对移动式秸秆压块机的秸秆成型密度与生产率进行试验研究, 建立回归模型与优化模型得到预期的移动式秸秆压块机最优作业参数。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

移动式秸秆压块机的外形尺寸为 $7560\text{mm} \times 2260\text{mm} \times 2450\text{mm}$, 主要由输送喂入装置、碎料风送集成装置、环模压块装置、出料装置以及传动系统组成, 主要包括拖拉机、减速器、输送皮带、喂入辊、蜗壳、叶轮切刀、风送筒、上料斗、大飞轮、环模、压辊、环模主轴、旋转盘、拨料板、出料斗等, 其结构示意图如图1所示。

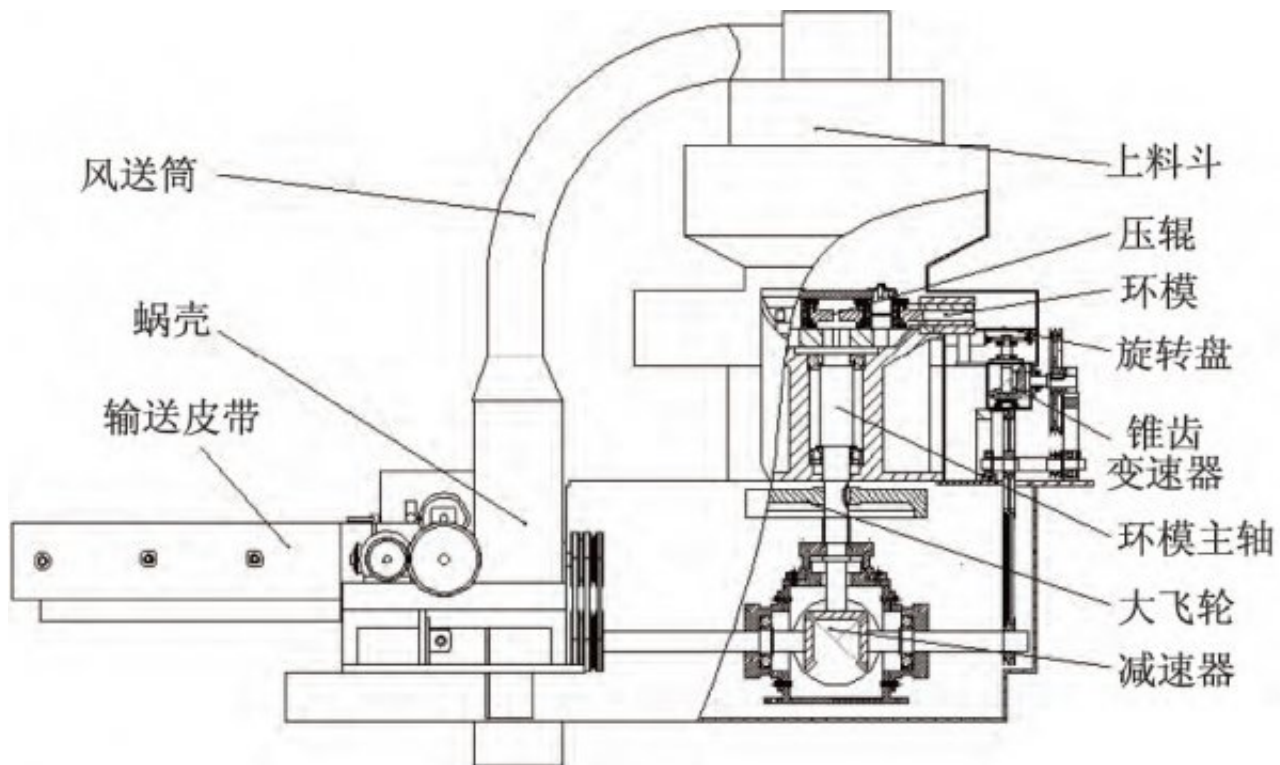


图1 移动式秸秆压块机结构示意图

1.2工作原理

移动式秸秆压块机工作时，通过拖拉机牵引进行田间压块成型作业，同时利用75kW拖拉机动力输出轴带动整个机具工作。工作时，人工将农作物秸秆放上
输送喂入装置，喂入量 $\leq 650\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
，由皮带输送至喂入辊，喂入辊转速为 $85 \sim 145\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
，通过喂入辊将秸秆压紧并喂入碎料风送集成装置，由旋转切刀和定刀将秸秆剪切成颗粒状，叶轮轴转速为 $450 \sim 810\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
，上方安装的叶片数分别设置为3、4和5片，叶轮叶片旋转产生的风场将秸秆颗粒沿风送筒送至上料斗，由上料斗实现秸秆的布料工作。秸秆颗粒从上料斗落下后，被环模压块装置压缩成块并从环模孔中挤出，落在出料装置的旋转盘上，环模主轴转速为 $145 \sim 185\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
，随旋转盘转动至拨料板，受到拨料板的阻挡后沿着出料斗下滑而被收集，整个工作过程连续便捷。

2试验材料、仪器与方法

2.1试验材料和仪器

2017年11月，试验在江苏海安匙鸣机械有限公司进行。试验所用秸秆原料为2017年收获的种植于江苏海安地区的摘穗水稻秸秆，自然风干后堆积。试验时将风干的水稻秸秆充分晾干，含水率在30%左右。试验过程中主要用到的设备和仪器有：9SM-YJ-2000型移动式秸秆压块机（海安匙鸣机械有限公司）；EPU-S系列矢量型变频器（浙江希伯伦科技有限公司）；FD-G2型高频波数字水分仪（上海佳实有限公司）；TASI非接触式转速仪；JA312002电子称（上海双旭电子有限公司），精度0.01g；游标卡尺，精度0.01mm；磅秤；250mL量杯。

2.2试验方法

在9SM-YJ-2000型移动式秸秆压块机上进行压块生产试验，控制喂入辊转速、叶轮转速以及环模主轴转速等生产条件，在秸秆含水率为30%左右、磨辊间隙为3mm的前提下分组完成各试验。为方便控制环模主轴转速，改由电机进行驱动，并由拖拉机牵引至户外进行试验。通过改变喂入辊轴上的链轮大小改变其传动比，实现各组试验所需的喂入辊转速；通过改变叶轮轴上的带轮大小改变其传动比，实现各组试验所需的叶轮转速；通过控制变频器调节电动机转速

大小，得到各组试验所需的环境模主轴转速；其中各轴转速大小通过非接触式转速仪测定。压块生产试验现场如图2所示。



图 2 压块生产试验现场

取得不同条件下生产的圆柱状秸秆压块样品，用小刀均切成长度为20mm，装入密封袋保存。取其中一段进行密度测量，在250mL的量杯中放入一定量的水，记下已有水量的读数V1后，将压块放入已调整好的电子天平测得质量M后，取出放入量杯，记下压块完全浸没水中时水量的读数V2，从而可得压块的密度：

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

正常生产过程中,每隔 5 min 接取成品压块一次,取样时间不少于 3 min,共接取 3 次,分别称量接取的成品压块质量. 秸秆压块的含水率通过高频波数字水分仪测得. 秸秆压块生产率计算式为

$$Q = 3\,600 \frac{m(1-h)}{t(1-0.3)}, \quad (2)$$

式中： Q 为工作生产率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; m 为接取成型秸秆压块的质量, kg ; h 为秸秆压块的含水率, %; t 为接取秸秆压块时间, s.

2.3 试验设计

选择喂入压辊转速 (X_1)、叶轮转速 (X_2)、环模主轴转速 (X_3) 为试验因素,以秸秆压块密度 (Y_1)、生产率 (Y_2) 为试验指标,依据各因素的取值范围,按照二次回归正交旋转试验设计方法,利用 Design-Expert 8.0.6 数据处理软件,进行 3 因素 4 水平二次正交旋转组合试验,建立回归方程和优化模型[10]。设计因素水平编码表如表 1 所示。

表 1 因素水平编码表 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

水平	试验因素		
	喂入压辊 转速 X_1	叶轮转速 X_2	环模主轴 转速 X_3
-2	85	450	145
-1	100	540	15
0	115	630	165
1	130	720	175
2	145	810	185

3 结果与分析

利用Design-Expert 8.0.6软件对试验所得的结果进行方差分析和检验，建立秸秆压块密度和生产率的回归模型，并结合响应面分析法对三因素间的相关性及交互效应进行分析。试验方案和结果如表2所示。

表 2 试验方案及结果

试验号	试验因素			目标函数	
	$X_1 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$X_2 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$X_3 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$Y_1 /$ ($g \cdot \text{cm}^{-3}$)	$Y_2 /$ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	1	1	1	1.086	1 120
2	0	0	0	1.123	1 085
3	0	0	-2	0.925	914
4	0	-2	0	0.864	1 041
5	-1	-1	1	0.896	974
6	0	0	0	1.145	1 095
7	0	0	0	1.128	1 102
8	-1	1	1	0.954	993
9	1	1	-1	1.069	984
10	0	0	0	1.134	1 078
11	2	0	0	1.038	1 029
12	1	-1	-1	0.855	936
13	-2	0	0	0.982	845

续表

试验号	试验因素			目标函数	
	$X_1 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$X_2 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$X_3 /$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$Y_1 /$ ($g \cdot \text{cm}^{-3}$)	$Y_2 /$ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
14	0	0	0	1.119	1 091
15	0	2	0	1.183	1 118
16	1	-1	1	0.883	1 075
17	0	0	2	0.822	1 109
18	-1	-1	-1	1.103	961
19	0	0	0	1.125	1 100
20	-1	1	-1	1.127	990

3.1 回归模型建立及检验

对回归模型中各项回归系数进行F检验和方差分析，经Design-Expert软件处理后，得出秸秆压块密度及生产率方差分析结果如表3所示。

表3 目标函数 Y_1, Y_2 的二次项模型方差分析

方差来源	秸秆压块密度						秸秆压块生产率					
	平方和	自由度	均方和	F_1	P_1	显著性	平方和	自由度	均方和	F_2	P_2	显著性
模型	0.25	9	0.028	30.58	<0.000 1	**	0.000 01	9	12 358.03	21.35	<0.000 1	**
X_1	0.000 35	1	0.000 35	0.38	0.550 1		19 951.56	1	19 951.56	34.47	0.000 2	**
X_2	0.081	1	0.081	87.91	<0.000 1	**	5 439.06	1	5 439.06	9.40	0.011 9	*
X_3	0.018	1	0.018	19.90	0.001 2	**	28 985.06	1	28 985.06	50.08	<0.000 1	**
$X_1 X_2$	0.014	1	0.014	15.26	0.002 9	**	253.13	1	253.13	0.44	0.523 4	
$X_1 X_3$	0.023	1	0.023	24.57	0.000 6	**	8 385.13	1	8 385.13	14.49	0.003 5	**
$X_2 X_3$	0.000 07	1	0.000 07	0.072	0.794 0		21.12	1	21.12	0.036	0.852 3	
X_1^2	0.024	1	0.024	26.08	0.000 5	**	42 382.37	1	42 382.37	73.23	<0.000 1	**
X_2^2	0.019	1	0.019	20.69	0.001 1	**	741.83	1	741.83	1.28	0.284 0	
X_3^2	0.11	1	0.11	115.58	<0.000 1	**	12 651.55	1	12 651.55	21.86	0.000 9	**
残差	0.009 2	10	0.000 9				5 787.77	10	578.78			
失拟项	0.008 8	5	0.001 8	20.18	0.082 5		5 368.93	5	1 073.79	12.82	0.057 1	
纯误差	0.000 43	5	0.000 09				418.83	5	83.77			
总和	0.26	19					0.000 01	19				

对表 3 中的数据进行二次多元回归拟合^[10], 建立秸秆压块密度(Y_1)、生产率(Y_2)与各影响因素间的回归模型, 并剔除不显著项, 得到 Y_1, Y_2 对编码自变量的二次多元回归方程为

$$Y_1 = 1.13 + 0.071X_2 - 0.034X_3 + 0.042X_1X_2 + 0.053X_1X_3 - 0.031X_1^2 - 0.027X_2^2 - 0.065X_3^2, \quad (3)$$

$$Y_2 = 1\,080.93 + 35.31X_1 + 18.44X_2 + 42.56X_3 + 32.38X_1X_3 - 39.89X_1^2 - 21.27X_3^2. \quad (4)$$

秸秆压块密度与生产率回归模型的修正决定系数 R^2 分别为 0.964 7, 0.941 9 (大于 0.800 0)^[11], 代表回归方程中自变量 X 关于因变量 Y 的拟合水平良好, 表明回归方程与试验值整体上符合程度较高, 模型能较好地反映数据. F 检验是用来判断线性方程的显著性水平, 一般来说, $P < 0.05$, 模型均有意义, 而表 3 中所得 $F_1 = 30.58$, $F_2 = 21.35$, P_1 与 $P_2 < 0.000\,1$, 表明自变量和因变量间有极显著的回归关系, 说明模型可用于秸秆压块密度与生产率的预测. 对偏回归系数进行显著性检验分析, 对于目标函数 Y_1 , X_1 和 X_2X_3 系数的 t 检验不显著; 对于目标函数 Y_2 , X_1X_2 , X_2X_3 和 X_2^2 系数的 t 检验不显著, 故可以省略.

3.2 试验因素的重要性分析

采用贡献率法计算各试验因素对响应指标的影响，来判定各个因素的重要性。贡献值计算方法如下[12]：

$$\delta = \begin{cases} 0, & F \leq 1, \\ 1 - \frac{1}{F}, & F \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

分别用 F_j , F_{ij} 和 F_{jj} 表示单因素、不同因素间、同因素间回归系数显著性检验的均方比, 各因素对指标贡献率可表示为

$$\Delta_j = \delta_j + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^m \delta_{ij} + \delta_{jj},$$
$$j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

根据表 3 中均方比 F , 可求得喂入辊转速、叶轮转速、环模主轴转速对秸秆压块密度的贡献率分别为 $\Delta X_1 = 1.909$, $\Delta X_2 = 2.408$, $\Delta X_3 = 2.421$, 可见对秸秆压块密度作用大小依次为环模主轴转速、叶轮转速、喂入辊转速, 其中环模主轴转速、叶轮转速对秸秆压块密度有显著影响, 而喂入辊转速对秸秆压块密度没有显著影响. 各因素对秸秆压块生产率的贡献率分别为 $\Delta X_1 = 2.423$, $\Delta X_2 = 0.894$, $\Delta X_3 = 2.400$, 可见对秸秆压块生产率作用大小依次为喂入辊转速、环模主轴转速、叶轮转速, 且 3 个因素都与秸秆压块生产率呈显著相关性.

3.3 因素对试验指标影响规律分析

由方差分析表3可知,在本试验中X2X3之间的交互作用对秸秆压块密度影响不显著,故只分析X1X2, X1X3之间的交互作用; X1X2和X2X3之间的交互作用对秸秆压块生产率影响不显著,故只分析X1X3之间的交互作用。通过分析因素间交互作用对试验指标的影响得到: 喂入辊

转速X1为115 ~ 130r · min⁻¹, 叶轮转速X2为650 ~ 810r · min⁻¹, 环模主轴转速X3为158 ~ 173r · min⁻¹, 秸秆压块密度可达到较优值1.0g · cm⁻³以上, 秸秆压块生产率可达到较优值1000kg · h⁻¹以上。

喂入辊转速和叶轮转速交互作用对秸秆压块密度影响的响应如图3a所示。由图可见, 随着喂入辊转速和叶轮转速的增加, 秸秆压块密度呈现先增大后减

小的趋势。当喂入辊转速在115 ~ 133r · min⁻¹范围内、叶轮转速在660 ~ 810r · min⁻¹范围内时, 可得到较高的秸秆压块密度。当喂

入辊转速小于122r · min⁻¹, 秸秆压块密度随着喂入辊转速增加而增

大; 当喂入辊转速大于122r · min⁻¹, 秆压块密度随着喂入辊转速增加而减小。当叶轮转速小于720r · min⁻¹

, 秆压块密度随喂入辊转速增加而增大; 当叶轮转速大于720r · min⁻¹

, 秆压块密度随喂入辊转速增加而减小。秸秆颗粒大小是影响秸秆压块成型密度的重要原因, 叶轮转速在660 ~ 810r · min⁻¹范围内的秸秆切碎效果最好, 秸秆颗粒越小越有利于挤压成型, 使秸秆压块密度增大。

喂入辊转速和环模主轴转速交互作用对秸秆压块密度与生产率影响的响应面如图3b, c所示, 由图可见, 随着主轴转速和环模主轴

转速的增加, 秸秆压块密度和生

产率先增大后减小。当喂入辊转速在109 ~ 133r · min⁻¹范围内、环模主轴转速在158 ~ 173r · min⁻¹

范围内时, 可得到较高的秸秆压块密度和生产率。当环模主轴转速小于165r · min⁻¹

, 秸秆压块密度和生产率随

着环模主轴转速增加而增大; 当环模主轴转速大于165r · min⁻¹

, 秸秆压块密度和生产率随着环模主轴转速增加而减小。喂入辊转速太低时, 秸秆喂入量不够大, 使得成型腔内秸秆较少, 秸秆相互挤压力降低, 在成型腔内停留时间变长, 秸秆压块密度及生产率下降; 喂入辊转速太高时, 秸秆喂入量过大, 大量秸秆会堵住环模孔并形成厚厚的秸秆层, 增大了秸秆压缩成型和出料所需的挤压力, 延长了出料时间, 秸秆压块密度及生产率下降, 严重时会导致模孔堵塞, 设备停产。环模主轴转速太低时, 挤压力降低, 秸秆相互挤压作用减弱, 延长成型时间, 秸秆压块密度及生产率下降; 环模主轴转速太高时, 会使得成型腔的原料形成断层, 挤压不连续, 原料在成型腔内停留时间变长, 延长了成型时间, 使得秸秆压块密度及生产率下降[13]。

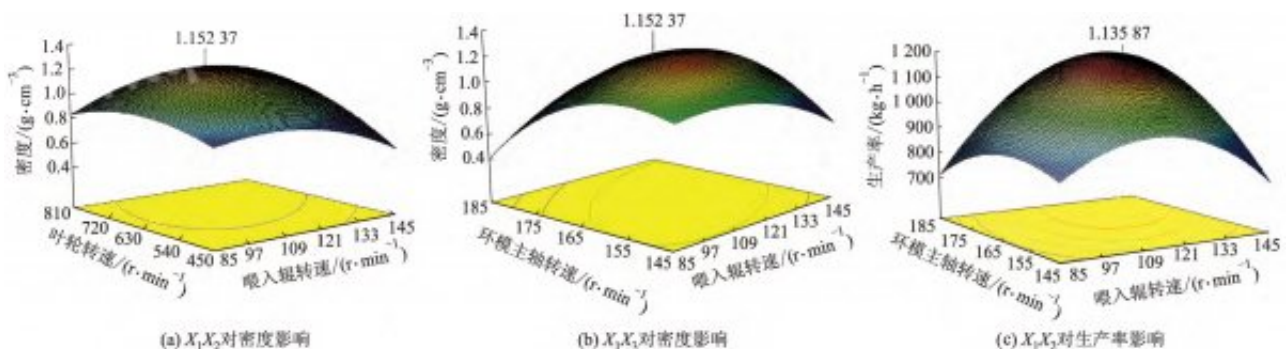


图3 各因素交互作用分别对秸秆压块密度与生产率的影响

3.4 优化分析和试验

利用Design-Expert 8.0.6中的优化功能对试验参数设计优化方案, 即分别获得最佳秸秆压块密度及生产率的情况下, 各影响因素取值的最优方案[9]。在喂入辊转速为85 ~ 1

45r · min⁻¹、叶轮转速为450 ~ 810r · min⁻¹、环模主轴转速为145 ~ 185r · min⁻¹

约束下，设定和调节目标函数满足秸秆压块密度大于 1.0

$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，秸秆生产率大于 $1000\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$

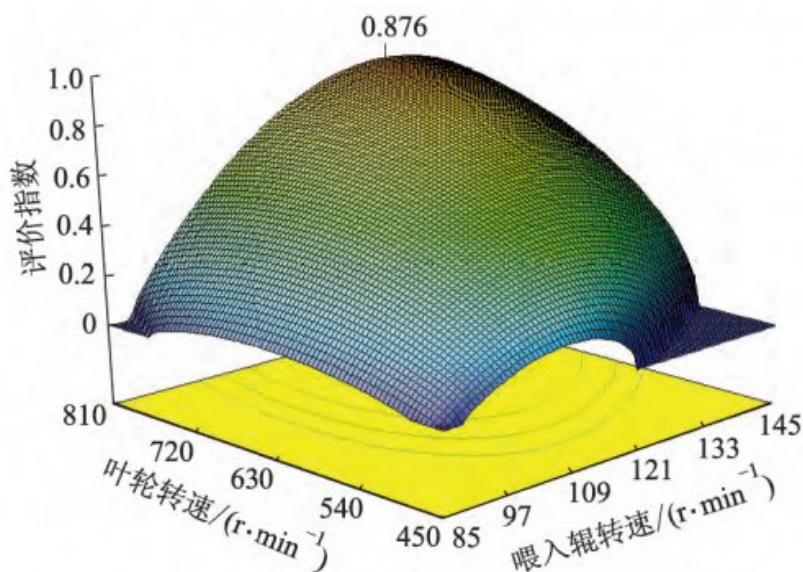
，以目标函数最大值为目标，优化作业参数，得到移动式秸秆压块机最优作业参数组合，优化结果响应面如图4所示

。当喂入辊转速为 $125.84\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，叶轮转速为 $776.05\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

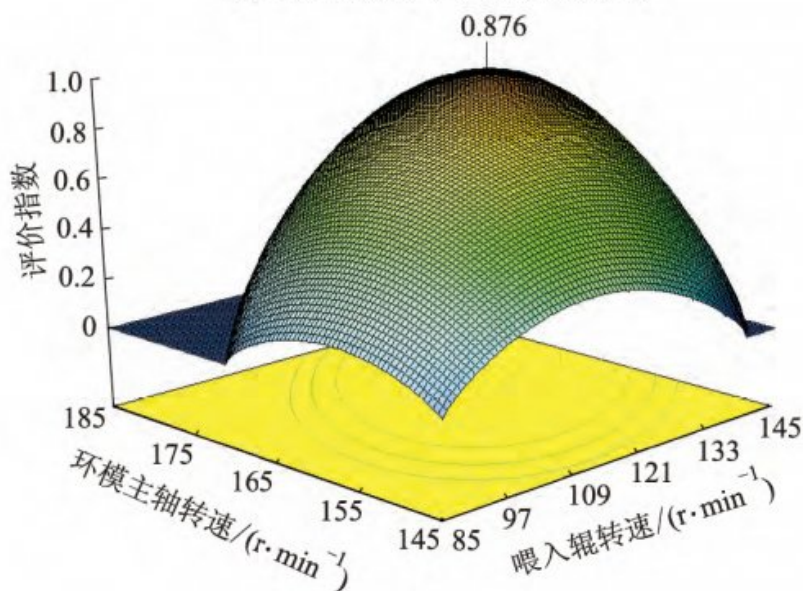
，环模主轴转速为 $169.16\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

时，秸秆压块密度与生产率分别为 $1.153\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ， $1135.87\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ，此时，综合评价指数为 0.876 ，为最优参数组合。

为了验证秸秆压块的密度和生产率回归方程及作业参数优化结果的可靠性，均使用最优结果下所对应的作业参数值进行3组试验，并与回归方程计算所得的秸秆压块密度和生产率预测值进行对比。对这3组试验结果进行统计，压块密度和生产率结果如表4所示。



(a) 喂入辊转速与叶轮转速的影响



(b) 喂入辊转速与环模主轴转速的影响

图4 各因素对秸秆压块密度和生产率的影响

表4 秸秆压块的密度和生产率验证试验结果

压块密度 $Y_1 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$			压块生产率 $Y_2 / (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$		
预测值	实测值	相对误差 / %	预测值	实测值	相对误差 / %
1.153	1.119	3.04	1 135.87	1 098.25	3.43
1.153	1.195	3.64	1 135.87	1 154.68	1.63
1.153	1.140	1.14	1 135.87	1 106.37	2.67
平均值	1.151	2.61	平均值	1 119.77	2.58

由表4可见，秸秆压块的密度和生产率实测值与预测值之间的平均相对误差分别为2.61%和2.58%。误差均在 $\pm 5\%$ 的误差范围内，说明上述回归方程的可信度较高，秸秆压块密度及生产率优化结果与实际匹配度较好。

4结论

1) 提出了一种移动式秸秆压块机，可通过拖拉机牵引进行田间压块成型作业，作业灵活，生产效率高，生产成本及劳动强度低。

2) 通过3因素4水平正交旋转组合试验发现，喂入辊转速、叶轮转速、环模主轴转速对秸秆压块生产率有显著影响，叶轮转速、环模主轴转速对秸秆压块密度有显著影响，而喂入辊转速对秸秆压块密度影响不显著；各因子对秸秆压块密度作用大小依次为环模主轴转速、叶轮转速、喂入辊转速；对秸秆压块生产率作用大小依次为喂入辊转速、环模主轴转速、叶轮转速。

3)

通过Desi

gn-

Expert软件与验证试

验得出移动式秸秆压块机最优的作业参

数组组合分别为喂入辊转速 $125.84\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、叶轮转速 $776.05\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

、环模主轴转速 $169.16\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

，此时，压块密度与生产率分别为 $1.153\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ， $1135.87\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ，满足秸秆压块成型要求。

参考文献 (References)

- [1] 陈树人, 蒋成宠, 姚勇, 等. 水稻秸秆压块热值模型构建及其影响因子相关性分析 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (24) : 200 – 208.
CHEN S R, JIANG C C, YAO Y, et al. Establishment of predicted model of calorific value for rice straw briquetting and analysis of correlation of its influencing factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (24) : 200 – 208. (in Chinese)
- [2] 陈树人, 肖君, 刘超. 9JYK-2000A 秸秆压块机环模摩擦试验 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (1) : 42 – 46.
CHEN S R, XIAO J, LIU C. Friction experiment of 9JYK-2000A straw briquetting machine [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38 (1) : 42 – 46. (in Chinese)
- [3] LARSSON S H, RUDOLFSSON M, THYREL M, et al. Temperature controlled feed layer formation in biofuel pellet production [J]. Fuel, 2012, 94 : 81 – 85.
- [4] MAREK R, PETR T, EVA K, et al. Influence of annealing temperature of straw briquettes on their density and hardness [J]. Applied Energy, 2013, 61 : 1377 – 1382.
- [5] LEI S, NIELS N P K, WOLFGANG S. Lab and bench-scale pelletization of torrefied wood chips: process optimization and pellet quality [J]. Bio Energy Res, 2014, 7 (1) : 87 – 94.
- [6] PUIG-ARNAVAT M, SHANG L, SÁROSSY Z, et al. From a single pellet press to a bench scale pellet mill: pelletizing six different biomass feedstocks [J]. Fuel Processing Technology, 2016, 142 : 27 – 33.
- [7] RUDOLFSSON M, STELTE W, LESTANDER T A. Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel pellet production: a parametric

- study [J]. *Applied Energy*, 2015, 140:378 – 384.
- [8] GILLESPIE G D, EVERARD C D, FAGAN C C, et al. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis [J]. *Fuel*, 2013, 111 (9):771 – 777.
- [9] 段建. 立式环模秸秆压块机设计理论及试验研究 [D]. 镇江:江苏大学, 2015.
- [10] 邱进, 吴明亮, 官春云, 等. 动定刀同轴水稻秸秆切碎还田装置结构设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (10):11 – 19.
QIU J, WU M L, GUAN C Y, et al. Design and experiment of chopping device with dynamic fixed knife coaxial for rice straw [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (10):11 – 19. (in Chinese)
- [11] 刘宇欣, 肖志刚, 杨庆余, 等. 挤压复合酶法制备玉米多孔淀粉工艺参数优化 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44 (4):171 – 178.
LIU Y X, XIAO Z G, YANG Q Y, et al. Optimization of technology parameters of corn porous starch by extrusion enzyme synergistic method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (4):171 – 178. (in Chinese)
- [12] 李升锋, 徐玉娟, 张友胜, 等. 玫瑰茄花青素提取条件优化研究 [J]. *广东农业科学*, 2006 (11):83 – 85.
LI S F, XU Y J, ZHANG Y S, et al. Optimization of extraction conditions of roselle anthocyanin [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006 (11):83 – 85. (in Chinese)
- [13] 陈树人, 段建, 姚勇, 等. 环模式成型机压缩水稻秆成型工艺参数优化 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (22):32 – 41.
CHEN S R, DUAN J, YAO Y, et al. Optimization of technique parameters of annular mould briquetting machine for straw briquette compressing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (22):32 – 41. (in Chinese)

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/167954.html>