

秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验

丁宁¹ 李海涛^{1,2} 闫安¹ 刘平义¹ 韩鲁佳¹ 魏文军¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为得到秸秆多级辊压成型机压缩较低含水率玉米秸秆时的最优成型参数,探索成型参数对成型结果的影响规律,基于 Design-Expert BBD(Box – Behnken Design) 试验设计方法及原理,以玉米秸秆含水率、玉米秸秆破碎长度和成型机末级辊转速为试验因素,以成型块回弹率、密度和成型能耗为试验指标,采用三因素三水平响应面分析方法,分别建立了各因素与成型块回弹率、密度、成型能耗之间的数学模型,并分析了各因素显著交互作用对试验指标的影响规律。结果表明:成型机在压缩玉米秸秆时,各试验因素对成型块回弹率的贡献率从大到小依次为:末级辊转速、破碎长度、含水率;各试验因素对成型块密度的贡献率从大到小依次为:破碎长度、末级辊转速、含水率;各试验因素对成型能耗的贡献率从大到小依次为:末级辊转速、破碎长度、含水率。在末级辊转速为 1.07 r/min,含水率为 21.5% ~ 25.0%,破碎长度为 64 ~ 108 mm 时,可获得成型块回弹率小于 7.0%,成型块密度大于 350 kg/m³,成型能耗小于 16.0 kW·h/t;参数优化得到最优成型参数为:含水率 24.26%、破碎长度 73.25 mm、末级辊转速 1.07 r/min,此时成型块回弹率为 6.32%,成型块密度为 375.6 kg/m³,成型能耗为 15.89 kW·h/t。研究结果可为秸秆多级连续冷辊压成型提供理论依据和技术支撑。

关键词: 玉米秸秆; 多级辊压成型机; 多级连续冷辊压成型; 参数优化

中图分类号: S216.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)10-0196-07

OSID:



Optimization and Experiment on Straw Multi-stage Continuous Cold Roll Forming for Molding Parameters

DING Ning¹ LI Haitao^{1,2} YAN An¹ LIU Pingyi¹ HAN Lujia¹ WEI Wenjun¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment Optimization, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to obtain the optimal molding parameters of the straw multi-stage roll forming machine when compressing corn stalks with lower moisture content, and explore the influence of molding parameters on molding results, based on the Design-Expert Box – Behnken Design (BBD) experimental design method and principle. Taking the moisture content, crushing length and the final roller speed of the forming machine as experimental factors, and the rebound rate, density and the molding energy consumption as the test indicators, using the three-factor and three-level response surface analysis method, the mathematical models between each factor and the rebound rate, density and the molding energy consumption were established respectively. The influence of the significant interaction of various factors on the test indicators was analyzed. The results showed that when the forming machine compressed corn stalks, the contribution rate of each test factor to the rebound rate from large to small was: the final roller speed, the crushing length, and the moisture content; the contribution rate of each test factor to the density from large to small was: the crushing length, the final roller speed, and the moisture content; the contribution rate of each test factor to the molding energy consumption from large to small was: the final roller speed, the crushing length, and the moisture content. When the final roller speed was 1.07 r/min, the moisture content was 21.5% ~ 25.0%, and the crushing length was 64 ~ 108 mm, the rebound rate was less than 7.0%, the density was greater than 350 kg/m³, and the molding energy consumption was

收稿日期: 2020-11-28 修回日期: 2020-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701300)

作者简介: 丁宁(1993—),男,博士生,主要从事生物质压缩成型装备研究,E-mail: n_ding@sina.cn

通信作者: 李海涛(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事机械设计及理论研究,E-mail: h.li@cau.edu.cn

less than 16.0 kW·h/t; the optimal molding parameters obtained by parameter optimization were: the moisture content was 24.26%, the crushing length was 73.25 mm, the final roller speed was 1.07 r/min, at this time, the rebound rate was 6.32%, and the density was 375.6 kg/m³, the molding energy consumption was 15.89 kW·h/t. This research can provide a theoretical basis and technical support for multi-stage continuous cold roll forming of straw.

Key words: corn stalk; multi-stage roller forming machine; multi-stage continuous cold roll forming; parameter optimization

0 引言

中国农作物秸秆产量大,分布广泛,是优质的生物质资源,但由于收获后的秸秆形状尺寸不规则、堆积密度低,难以直接处理、运输、储存和利用^[1-4]。因此秸秆资源高效利用的关键是依靠生物质致密成型技术减小体积、提高密度,其中机械压实是最有效的方法^[5-6]。

当前,生物质致密技术研究主要集中于打捆技术及模辊式成型技术。其中打捆技术主要分为方捆式、圆捆式。马春晓^[7]、戚得众等^[8]对打捆机捡拾器进行了优化设计与研究。付乾坤等^[9]、GUERRIERI 等^[10]在不同工况下进行了试验,对方捆打捆机除土去杂能力等进行了优化试验研究。王德福等^[11]、李叶龙等^[12]、雷军乐等^[13]分别对钢辊式圆捆机捆绳机构、辊盘式卷捆机构及旋转草芯形成因素等进行了优化研究,但打捆技术普遍存在工作模式复杂、打捆密度低等问题,圆捆打捆机还存在作业过程不连续、圆捆密度不均匀等缺点。模辊式成型技术主要分为平模、环模及对辊式。胡运龙^[14]对平模成型机压辊进行了优化试验研究。陈树人等^[15]、丛宏斌等^[16]对环模成型机成型参数进行了优化试验研究。宁廷州等^[17]针对对辊柱塞式成型机成型参数进行了优化试验研究,但目前模辊式成型技术普遍存在成型能耗高、关键部件磨损快、维修成本高等问题。为了实现秸秆连续压缩成型,减小能耗,提升效率,笔者团队提出一种秸秆多级连续冷辊压成型方法,并进行了可行性相关试验研究^[18-21],目前针对此成型方法及成型机参数优化方面的研究未见报道。

本文以玉米秸秆为原料,以秸秆多级辊压成型机为研究对象,基于 Design-Expert BBD (Box - Behnken design) 试验设计方法,以物料处理工艺参数:玉米秸秆含水率、玉米秸秆破碎长度,成型机工作参数:末级辊转速为试验因素,以成型块回弹率、密度和成型能耗为试验指标,通过响应面分析研究各因素及其交互作用对试验指标的影响规律,获取成型机工作参数的最优变量组合,以期达到对玉米秸秆多级连续冷辊压成型作业的最佳效果。

1 秸秆多级辊压成型原理与样机

1.1 秸秆多级辊压成型原理

秸秆多级辊压成型原理如图 1a 所示:破碎后的秸秆从一端喂入,经过多级对布压缩辊连续压缩后从一端出料, $p_1 \sim p_5$ 分别表示秸秆物料在压缩过程中各压缩阶段所受的压力,各级压缩辊转动角速度分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$, 转动方向如图所示。连续辊压成型可提高压缩成型生产率;压缩辊在工作过程中与秸秆物料作用方式为滚动摩擦,同时秸秆物料为冷压缩成型,可减少成型能耗;对称布置压缩辊可抵消轴向力,提高设备运行的稳定性,减小各工作部件磨损,提高整机寿命。

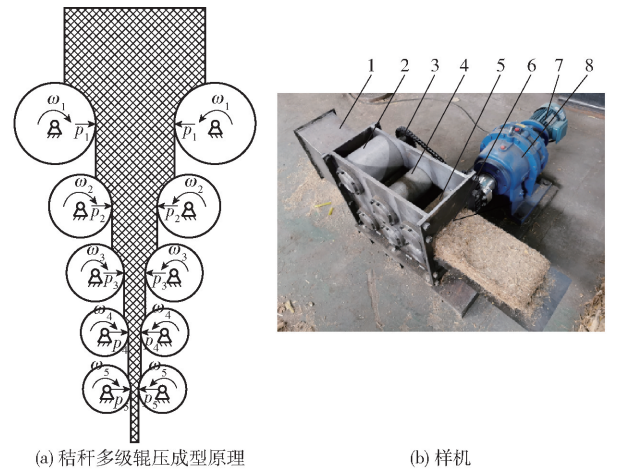


图 1 秸秆多级辊压成型原理及样机
Fig. 1 Principle and prototype of multi-stage roller forming machine for straw

1. 喂料口 2. 一级压缩辊 3. 传动系统 4. 二级压缩辊 5. 三级压缩辊 6. 出料口 7. 电动机 8. 减速机

1.2 秸秆多级辊压成型机样机

为了减小试验样机尺寸,样机只试制后三级压缩成型部分,前端的喂料、预压缩部分由预压缩装置完成^[21]。如图 1b 所示,秸秆多级辊压成型机样机主要由喂料口、一级压缩辊、传动系统、二级压缩辊、三级压缩辊、电动机、减速机、出料口等组成。

成型机主要参数如表 1 所示^[21]。

2 试验

于 2020 年 9 月在河北农乐新能源科技有限公

表 1 秸秆多级辊压成型机参数

Tab. 1 Parameters of multi-stage roller forming machine for straw

参数	数值
压缩级数	3
一级压缩辊进入物料厚度/mm	200
三级压缩辊压出物料厚度/mm	20
一级压缩辊直径/mm	180
二级压缩辊直径/mm	125
三级压缩辊直径/mm	100
一级压缩辊喂入角/(°)	63. 61
二级压缩辊喂入角/(°)	53. 13
三级压缩辊喂入角/(°)	45. 57
总辊压比	10
一级压缩比	2
二级压缩比	2
三级压缩比	2. 5

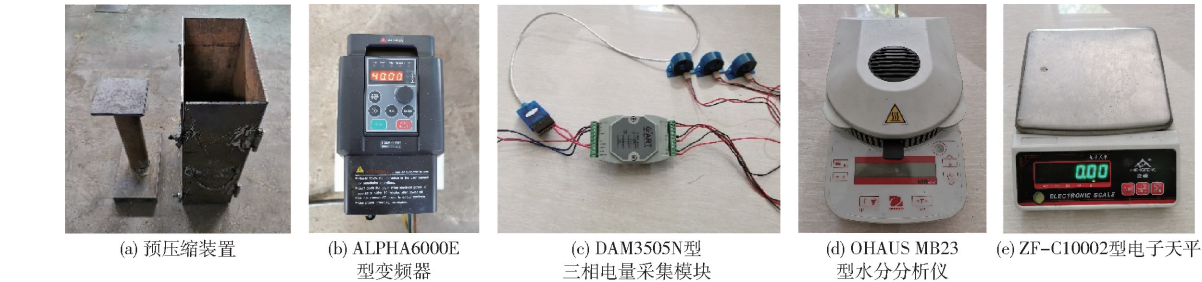


图 2 主要试验装置与仪器

Fig. 2 Main experimental equipments and instruments

到玉米秸秆储存平衡含水率实际要求^[22],选取含水率分别为 15%、20%、25%,利用 OHAUS MB23 型水分分析仪测量玉米秸秆初始含水率,根据初始含水率决定含水率水平确定方式,为了更接近实际情况,通过自然晾晒方式降低含水率,调高含水率时计算出加水质量,用喷水壶均匀喷洒,并在塑料密封袋中保存 24 h 后使用。随机在各样品中选取 3 组,通过 OHAUS MB23 型水分分析仪进行测量,控制调制含水率平均值与目标含水率误差在 2% 以内。

(2) 秸秆破碎长度:根据文献[21]研究结果及实际情况,为了有效防止压缩过程中漏料并节省功耗,确定物料破碎方式为揉搓破碎,破碎长度水平分别为 50、80、110 mm。

(3) 末级辊转速:保压时间越长,秸秆压缩成型块品质越高^[23],因此,相应提高保压时间,在保证生产率的同时,降低各级压缩辊转速。试验中,末级辊转速采用 ALPHA6000E 型变频器改变电动机频率的方式加以控制,将其频率分别控制在 30、40、50 Hz,此时成型辊转速水平分别为 0. 87、1. 16、1. 45 r/min。

2. 2. 2 试验指标

试验指标包括成型块回弹率、密度及成型能耗,各指标具体测算方法如下。

司进行试验。目的是通过响应面优化分析方法,探索玉米秸秆含水率、玉米秸秆破碎长度、成型机末级辊转速对成型块回弹率、密度和成型能耗等指标的影响规律,获得成型参数的最优变量组合。

2. 1 试验原料与设备

试验原料为玉米秸秆,2019 年 10 月收获于河北省石家庄市藁城区。试验设备与仪器主要包括秸秆多级辊压成型机(图 1a)、预压缩装置、ALPHA6000E 型变频器、DAM3505N 型三相电量采集模块、OHAUS MB23 型水分分析仪、ZF-C10002 型电子天平、3 000 mL 烧杯、塑料密封袋、喷水壶、刻度尺等。主要试验装置与仪器如图 2 所示。

2. 2 试验因素与指标

2. 2. 1 试验因素

(1) 含水率:根据文献[21]研究结果,同时考虑

(1) 回弹率:成型机正常运行时,在成型机出口处随机选取压缩结束后的 3 组成型块,每 5 min 检测一次成型块厚度,直到成型块厚度不再变化时结束检测,计算回弹率并求其平均值,计算式为

$$\lambda = \frac{s'' - s'}{s'} \times 100\%$$

(1)

式中 λ——秸秆压缩成型块回弹率,%
s''——回弹结束后成型块厚度,mm
s'——压缩结束后成型块厚度,mm

(2) 密度:成型机正常运行时,随机选取 3 组回弹稳定的成型块,对其进行边角修剪,留取密度均匀部分进行称量,同时测量其长、宽、高并计算体积,然后计算其密度并求平均值,计算式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(2)

式中 ρ——秸秆压缩成型块密度,kg/m³
m——成型块样品质量,kg
V——成型块样品体积,m³

(3) 成型能耗:为了更好地表达成型过程能效转换效率,引入成型能耗。此处的能耗为整个压缩过程总能耗,单位为 kW·h/t。成型机正常运行时,依次进行 3 组试验,每组试验时互感线圈将检测到的

电信号传输给 DAM3505N 型三相电量采集模块,模块通过 USB-485 转换线与计算机相连,然后利用 DAM-3000M (V6.130) 测试系统将检测到的瞬时功率等数据进行采集、保存,由于本次压缩试验非连续进行,因此在检测瞬时功率过程中当某一阶段到达相对本次试验的最大值阶段时即为所有压缩辊共同作用时,也就是成型机正常工作时的功率,提取此阶段的瞬时功率并求取平均值即为本次试验的成型机功率,同时称取单位时间内的秸秆压缩成型块质量,计算成型能耗并求其平均值,计算式为

$$N=k\frac{\sum_{i=1}^qP_i}{Qq}$$

(3)

式中 N ——成型能耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$
 Q ——单位时间秸秆压缩成型质量, t/h
 q ——成型机正常工作时采集模块采集数据次数
 P_i ——第 i 次采集到的成型机工作瞬时功率, kW
 k ——综合系数,考虑预压缩等过程的能耗,
 $1.2 < k < 1.5$, 本试验 k 取 1.45

2.3 试验设计

采用三因素三水平 BBD 试验设计方法,选择玉米秸秆含水率、破碎长度和末级辊转速为试验因素,以成型块回弹率、密度及成型能耗为试验指标,因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	含水率/	破碎长度/	末级辊转速/
	%	mm	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
-1	15	50	0.87
0	20	80	1.16
1	25	110	1.45

3 试验结果与分析

采用 Design-Expert 10 数据分析软件对试验结果进行处理和分析,主要进行回归分析和利用响应面分析法对因素间显著交互作用影响进行分析。试验设计与结果如表 3 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示含水率、破碎长度和末级辊转速编码值; Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别表示成型块回弹率、成型块密度和成型能耗。

3.1 回归模型建立与检验分析

3.1.1 成型块回弹率回归模型建立与显著性检验

成型块回弹率方差分析结果如表 4 所示,由表 4 可知,模型 $F=47.07$, $p<0.01$, 表明模型回归

表 3 试验设计与结果

Tab.3 Experimental design and results

试验 序号	因素			$Y_1/$	$Y_2/$	$Y_3/$
	X_1	X_2	X_3	%	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$)
1	0	0	0	5.88	364.01	16.41
2	0	0	0	5.71	365.55	16.26
3	1	0	-1	5.98	379.65	16.95
4	-1	1	0	9.42	350.13	16.01
5	-1	-1	0	9.11	379.05	17.30
6	0	-1	1	7.31	371.72	15.83
7	1	0	1	7.46	364.69	13.00
8	1	1	0	9.06	358.96	13.69
9	-1	0	1	8.52	363.11	14.96
10	0	-1	-1	5.88	388.23	19.84
11	0	0	0	5.61	366.78	16.41
12	0	0	0	5.29	368.59	16.00
13	0	0	0	5.75	365.45	16.45
14	-1	0	-1	6.36	377.83	17.49
15	0	1	-1	6.11	350.83	17.24
16	1	-1	0	8.94	384.14	15.85
17	0	1	1	8.94	343.37	14.31

表 4 成型块回弹率方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation for rebound rate

来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	36.61	9	4.07	47.07	$<0.0001^{**}$
X_1	0.49	1	0.49	5.61	0.0496^*
X_2	0.66	1	0.66	7.59	0.0283^*
X_3	7.80	1	7.80	90.28	$<0.0001^{**}$
X_1X_2	9.03×10^{-3}	1	9.03×10^{-3}	0.10	0.756
X_1X_3	0.12	1	0.12	1.34	0.2854
X_2X_3	0.49	1	0.49	5.67	0.0488^*
X_1^2	12.93	1	12.93	149.62	$<0.0001^{**}$
X_2^2	12.63	1	12.63	146.22	$<0.0001^{**}$
X_3^2	0.43	1	0.43	5	0.0605
残差	0.60	7	0.086		
失拟	0.41	3	0.14	2.75	0.1769
误差	0.20	4	0.049		
总和	37.21	16			

注: ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$); * 表示差异显著 ($0.01 \leq p < 0.05$)。下同。

方程自变量和因变量之间有极显著相关关系,失拟项 $p=0.1769$ (大于 0.05), 不显著,且该模型 R^2 修正值为 0.9837 (大于 0.8), 体现出回归方程与试验值整体上拟合程度较高,说明该模型适用于对成型块的回弹率进行预测。但是 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_3^2 的 p 值均大于 0.05, 说明其对成型块回弹率的影响不显著,采用 Design-Expert 10 软件对试验数据进行多元回归拟合,同时剔除不显著项后^[24], 得到成型块回弹率 Y_1 与各因素编码值的回归模型为

$$Y_1 = 5.51 - 0.25X_1 + 0.29X_2 + 0.99X_3 + 0.35X_2X_3 + 1.74X_1^2 + 1.72X_2^2 \quad (4)$$

3.1.2 成型块密度回归模型建立与显著性检验

成型块密度方差分析结果如表 5 所示,由表 5 可知,模型 $F = 39.16, p < 0.01$,表明模型回归方程自变量和因变量之间有极显著相关关系,失拟项 $p = 0.1086$ (大于 0.05),不显著,且该模型 R^2 修正值为 0.9805(大于 0.8),体现出回归方程与试验值整体上拟合程度较高,说明该模型适用于对成型块密度进行预测。对试验数据进行多元回归拟合,同时剔除不显著项后,得到成型块密度 Y_2 与各因素编码值的回归模型为

$$Y_2 = 364.95 + 2.17X_1 - 14.98X_2 - 6.71X_3 + 4.75X_1^2 \quad (5)$$

表 5 成型块密度方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression equation for density

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
模型	2 347.67	9	260.85	39.16	<0.000 1 **
X_1	37.5	1	37.5	5.63	0.049 4 *
X_2	1 795.5	1	1 795.5	269.55	<0.000 1 **
X_3	359.79	1	359.79	54.01	0.000 2 **
X_1X_2	3.5	1	3.5	0.52	0.492 2
X_1X_3	0.014	1	0.014	2.16×10^{-3}	0.964 2
X_2X_3	20.48	1	20.48	3.07	0.123
X_1^2	100.61	1	100.61	15.1	0.006 **
X_2^2	35.27	1	35.27	5.29	0.054 9
X_3^2	0.53	1	0.53	0.08	0.785 5
残差	46.63	7	6.66		
失拟	34.87	3	11.62	3.96	0.108 6
误差	11.75	4	2.94		
总和	2 394.3	16			

3.1.3 成型能耗回归模型建立与显著性检验

成型能耗方差分析结果如表 6 所示,由表 6 可知,模型 $F = 72.51, p < 0.01$,表明模型回归方程自变量和因变量之间有极显著相关关系,失拟项 $p = 0.1772$ (大于 0.05),不显著,且该模型 R^2 修正值为 0.9894(大于 0.8),体现出回归方程与试验值整体上拟合程度较高,说明该模型适用于对成型过程能耗进行预测。对试验数据进行多元回归拟合,同时剔除不显著项后,得到成型能耗 Y_3 与各因素编码值的回归模型为

$$Y_3 = 16.39 - 0.78X_1 - 0.95X_2 - 1.68X_3 - 0.36X_1X_3 - 0.89X_1^2 + 0.32X_2^2 \quad (6)$$

3.2 各试验因素对试验指标影响程度分析

通过对式(4)~(6)的回归系数分别检验得,各因素对成型块回弹率贡献率由大到小依次为末级辊转速、破碎长度、含水率,其中破碎长度和含水率

表 6 成型能耗方差分析

Tab.6 Variance analysis of regression equation for forming energy consumption

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
模型	39.37	9	4.37	72.51	<0.000 1 **
X_1	4.91	1	4.91	81.46	<0.000 1 **
X_2	7.16	1	7.16	118.74	<0.000 1 **
X_3	22.51	1	22.51	373.16	<0.000 1 **
X_1X_2	0.19	1	0.19	3.14	0.119 9
X_1X_3	0.50	1	0.50	8.36	0.023 3 *
X_2X_3	0.29	1	0.29	4.83	0.063 9
X_1^2	3.40	1	3.40	56.44	0.000 1 **
X_2^2	0.39	1	0.39	6.52	0.037 9 *
X_3^2	0.16	1	0.16	2.61	0.150 5
残差	0.42	7	0.06		
失拟	0.28	3	0.095	2.74	0.177 2
误差	0.14	4	0.035		
总和	39.79	16			

的贡献率相差不大;各因素对成型块密度贡献率由大到小依次为破碎长度、末级辊转速、含水率;各因素对成型过程能耗贡献率由大到小依次为末级辊转速、破碎长度、含水率。

3.3 各因素交互作用对试验指标的影响

通过分析软件 Design-Expert 10 做出不同试验因素交互作用下试验指标的响应曲面,分析含水率、破碎长度、末级辊转速之间显著交互作用对试验指标的影响,为成型机的优化升级提供理论参考。

3.3.1 破碎长度和末级辊转速对成型块回弹率的影响

图 3 为含水率为 20%(中心水平值)时,物料破碎长度和末级辊转速交互作用对成型块回弹率影响的响应曲面。由图 3 可知,当末级辊转速一定,压缩成型块的回弹率随着破碎长度的升高先降低后升高,说明本压缩方法试验的秸秆破碎长度不宜过长或者过短,物料破碎过长,秸秆喂料过程不易均匀,导致压缩过程中秸秆物料受力不均,成型块回弹率会变大,而物料破碎太短,不易促使秸秆物料之间的交叉缠绕粘结,成型块回弹率也会变大;当破碎长度一定,压缩成型块的回弹率随着末级辊转速的升高而升高,因为越长的压缩作业时间越能促进秸秆物料之间的交叉铆固和粘结,进而降低回弹率,前期的试验已验证此现象;因此当含水率为中心水平值 20%时,破碎长度在 65~96 mm 之间,末级辊转速在 0.87~1.00 r/min 之间,本试验可以得到相对较小的回弹率。

3.3.2 含水率和末级辊转速对成型能耗的影响

图 4 为破碎长度为 80 mm(中心水平值)时,物料含水率和末级辊转速交互作用对成型能耗影响的

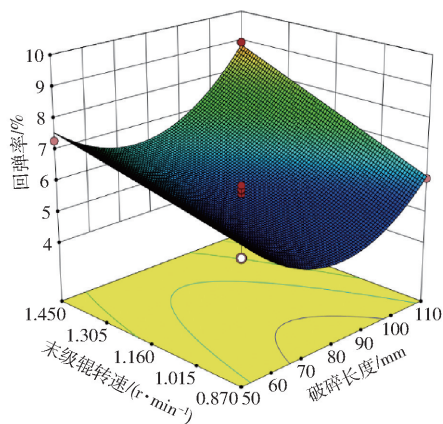


图 3 破碎长度和末级辊转速对回弹率影响的响应曲面
Fig. 3 Effect of crushing length and final roller speed on rebound rate

响应曲面。由图可知,当末级辊转速一定,含水率在 15% ~ 20% 之间时,成型能耗变化不大,而当含水率在 20% ~ 25% 之间时,成型能耗随着含水率的升高而降低,说明含水率在某一阶段的升高可以减小秸秆物料之间的摩擦力,起到润滑剂的作用,辅助秸秆物料在压力作用下相互填充和嵌合,使得秸秆物料更容易被压缩成型^[25];当含水率一定,压缩过程能耗随着末级辊转速的增加而降低,说明即使末级辊转速增加会使电机功率增加,但此时成型机的生产率也会有很大程度的提升,最终会导致成型能耗降低;因此当破碎长度为中心水平值 80 mm 时,含水率在 18.2% ~ 25% 之间,末级辊转速在 1.12 ~ 1.45 r/min 之间,本试验可以得到相对较小的成型能耗。

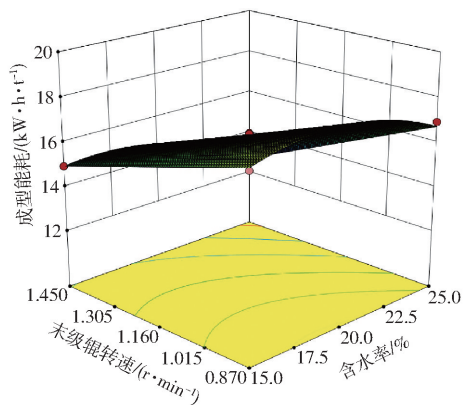


图 4 含水率和末级辊转速对成型能耗影响的响应曲面
Fig. 4 Effect of moisture content and final roller speed on forming energy consumption

4 参数优化与试验验证

4.1 参数优化

应用 Design-Expert 10 软件中 Optimization 模块对试验的各参数进行优化。在前期试验及分析的基础上,综合考虑各试验指标及应用可行性,在含水率 15% ~ 25%、破碎长度 50 ~ 110 mm、末级辊转速

0.87 ~ 1.45 r/min 的约束条件下,设定目标函数满足回弹率小于 7.0%,密度大于 350 kg/m³,成型能耗小于 16.0 kW·h/t,使得满足条件解相交于阴影区域,如图 5 所示(末级辊转速为 1.07 r/min)。

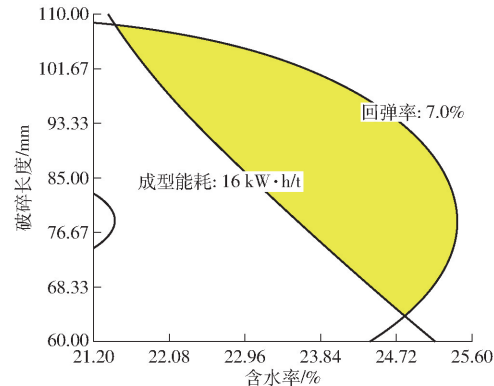


图 5 满足试验指标条件较优解分布区域
Fig. 5 Area of better solution satisfying experimental indexes

由图 5 可知,在末级辊转速为 1.07 r/min 时,黄色区域为参数优化区域,即含水率为 21.5% ~ 25%,破碎长度为 64 ~ 108 mm 时,可获得成型块回弹率小于 7.0%,密度大于 350 kg/m³,成型能耗小于 16.0 kW·h/t。

依据上述分析结果,为了进一步提升成型机各项性能参数,在试验因素水平约束下,将成型块回弹率及成型能耗的最小值、成型块密度的最大值设定为优化目标,进行目标优化和最优参数确定,优化目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

对其参数进行求解,得到各项性能最优时对应的参数组合为:含水率 24.26%、破碎长度 73.25 mm、末级辊转速 1.07 r/min,此时成型块回弹率为 6.32%,成型块密度为 375.6 kg/m³,成型能耗为 15.89 kW·h/t。

4.2 试验验证

为了验证成型块回弹率、密度和成型能耗的回归方程及各试验参数优化结果的可靠性,使用最优解参数组合条件进行 5 组试验,试验材料和方法与本文正交试验一致,分别通过回归方程对各指标值进行预测,对 5 组试验结果进行统计,将试验值与预测值进行对比得出,成型块回弹率、密度及成型能耗试验值与预测值之间的误差分别为 0.4%、1.32% 和 1.96%,说明各指标的回归方程的预测值与试验

值比较接近,在最优试验组合条件下,各指标均能达到较优值。证明本试验所建立的成型块回弹率、密度和成型能耗回归方程可靠,可以通过回归方程对试验结果进行有效预测。

5 结论

(1)各因素对成型块回弹率贡献率大小依次为末级辊转速、破碎长度、含水率,其中破碎长度和含水率的贡献率相差不大;各因素对成型块密度贡献率大小依次为破碎长度、末级辊转速、含水率;各因素对成型过程能耗贡献率大小依次为末级辊转速、

破碎长度、含水率。

(2)当末级辊转速为 1.07 r/min,含水率为 21.5%~25%,破碎长度为 64~108 mm 时,本试验可获得玉米秸秆成型块回弹率小于 7.0%,密度大于 350 kg/m³,成型能耗小于 16.0 kW·h/t;各项指标性能最优时对应的参数组合为:含水率 24.26%、破碎长度 73.25 mm、末级辊转速 1.07 r/min,此时成型块回弹率为 6.32%,成型块密度为 375.6 kg/m³,成型能耗为 15.89 kW·h/t。建立的成型块回弹率、密度和成型能耗回归方程可以对试验结果进行有效预测。

参 考 文 献

- [1] TAN F R, HE L, ZHU Q L, et al. Characterization of different types of agricultural biomass and assessment of their potential for energy production in China[J]. *BioResources*, 2019, 14(3): 6447–6464.
- [2] 李胜男,纪雄辉,邓凯,等. 区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 221–228.
LI Shengnan, JI Xionghui, DENG Kai, et al. Analysis of regional distribution patterns and full utilization potential of crop straw resources[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(12): 221–228. (in Chinese)
- [3] KALIYAN N, MOREY R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33(3): 337–359.
- [4] 司耀辉. 秸秆类生物质成型燃料品质提升及粘结机理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
SI Yaohui. Study on the quality promotion and bonding mechanism of agricultural residues pellets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] TUMULURU J S, WRIGHT C T, HESS J R, et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application[J]. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, 2011, 5(6): 683–707.
- [6] GUO L, WANG D C, TABIL L G, et al. Compression and relaxation properties of selected biomass for briquetting[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 148: 101–110.
- [7] 马春晓. 打捆机捡拾和喂入机构的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
MA Chunxiao. Optimal design and experiment on the collecting and feeding mechanism of the baling machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [8] 戚得众,雷亚阔,陈源,等. 打捆机捡拾器多目标优化研究与设计[J]. *机械设计与制造*, 2018(10): 153–156.
QI Dezhong, LEI Yakuo, CHEN Yuan, et al. Research and design of baler pickup mechanism based on multi-objective optimization[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(10): 153–156. (in Chinese)
- [9] 付乾坤,付君,陈志,等. 秸秆捡拾打捆机振动去土作业参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 26–33.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization of working parameters on soil removal of stover pickup baler by vibration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(8): 26–33. (in Chinese)
- [10] GUERRIERI A S, ANIFANTIS A S, SANTORO F, et al. Study of a large square baler with innovative technological systems that optimize the baling effectiveness[J]. *Agriculture*, 2019, 9(5): 86.
- [11] 王德福,张全超,杨星,等. 秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 55–61.
WANG Defu, ZHANG Quanchao, YANG Xing, et al. Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round balers[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(14): 55–61. (in Chinese)
- [12] 李叶龙,王德福,王沫,等. 稻秆圆捆机辊盘式卷捆机构的设计及参数优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 27–34.
LI Yelong, WANG Defu, WANG Mo, et al. Design and parameters optimization of roll-disk baling mechanism for rice straw round baler[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(6): 27–34. (in Chinese)
- [13] 雷军乐,王德福,李东红,等. 钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 18–25.
LEI Junle, WANG Defu, LI Donghong, et al. Influence factors analysis and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 18–25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151203&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.003. (in Chinese)
- [14] 胡运龙. 生物质平模成型机压辊的优化设计研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
HU Yunlong. Optimization design and experimental study on press roller of biomass flat molding[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 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 Shuren, DUAN Jian, YAO Yong, et al. Optimization of technique parameters of annular mould briquetting machine for straw briquette compressing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(22): 32–41. (in Chinese)