

对辊柱塞式成型机成型参数优化

宁廷州 俞国胜 皮森淼 陈忠加 袁湘月

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为寻求对辊柱塞式成型机锯末制粒时的最优成型参数,探索成型参数对成型结果的影响规律,以锯末含水率、成型模具长径比和主轴转速为试验因素,以成型颗粒密度和成型机生产率为试验指标,基于 Design - Expert BBD (Box - Behnken Design) 试验设计方法对试验数据进行了处理和分析,建立了试验因素对试验指标的回归方程。结果表明:对辊柱塞式成型机采用锯末为原料制粒时,最优成型参数为:含水率 15.5%、成型模具长径比 5.3、主轴转速 47.25 r/min。在此条件下,成型颗粒密度和成型机生产率分别可达到 1.17 g/cm³、75 kg/h;各试验因素对成型颗粒密度的贡献率从大到小依次为:成型模具长径比、主轴转速、含水率,各试验因素对成型机生产率的贡献率从大到小依次为:含水率、成型模具长径比、主轴转速;成型颗粒密度试验值与预测值最大相对误差为 0.426%,成型机生产率最大相对误差为 2.733%,吻合程度较高。

关键词: 生物质; 锯末; 对辊柱塞式成型机; 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(2016)07-0208-08

Optimization of Forming Parameters on Roller Briquetting Machine with Plungers

Ning Tingzhou Yu Guosheng Pi Senmiao Chen Zhongjia Yuan Xiangyue

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To seek for the optimal forming parameters of the roller briquetting machine with plungers and explore the influence law of the forming parameters on the forming results, sawdust was used as the raw material, the moisture content, the length to diameter ratio of the forming mold and the spindle speed were taken as the experimental factors, while the density of the forming particle and the productivity of the briquetting machine as the experimental indexes, the experimental data was processed and analyzed by the experiment design method of Design - Expert BBD (Box - Behnken Design), and the regression equations of the experimental factors on the experimental indexes were established. The results showed that the optimal results of the moisture content of sawdust, the length to diameter ratio of the forming mold and the spindle speed were 15.5%, 5.3, 47.25 r/min, respectively. On this condition, the density of the forming particle and the productivity of the briquetting machine can reach 1.17 g/cm³, 75 kg/h, respectively. The contribution rate of the experimental factors on the forming particle density in the order from large to small: the length to diameter ratio of the forming mold, the spindle speed, the moisture content, while on the density of the forming particle: the moisture content, the length to diameter ratio of the forming mold, the spindle speed. The maximum relative error is 0.426% between the experimental value and the predicted value of the density of the forming particle, while it's 2.733% on the productivity of the briquetting machine, so there's high consistency.

Key words: biomass; sawdust; roller briquetting machine with plungers; forming parameters; optimization

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-02-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD30B0205)

作者简介: 宁廷州(1988—),男,博士生,主要从事生物质能源转化装备研究, E-mail: ning-tingzhou@163.com

通信作者: 俞国胜(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事林业与园林机械、生物质能源转化装备研究, E-mail: sgyzh@bjfu.edu.cn

引言

生物质能源分布广泛,具有可再生性和低污染性等优点^[1-3]。生物质固化成型技术可以将农林剩余物经过机械压缩加工成具有一定形状和密度的颗粒状、棒状或块状燃料^[4-7]。生物质固化成型燃料燃烧过程具有热值高、无污染等优点^[8]。

模辊式成型机具有原料适应性强、产量高等优点而成为研究和开发的热点^[9-13]。当前,模辊式成型机的研究主要集中于环模成型机和平模成型机,而对辊式成型机的研究较少^[14]。陈树人等^[15]、段建等^[16]、丛宏斌等^[17]、庞丽沙等^[18]以环模秸秆压块机为研究对象,进行了成型参数方面的优化研究。李涛^[19]、胡运龙^[20]则以平模成型机为研究对象,进行了相关方面的优化与试验。虽然对辊式成型机制粒成型参数优化方面的研究未见报道,但环模成型机和平模成型机相关方向的成型参数优化理论和方法为对辊式成型机的参数优化设计提供了借鉴和参考。

本文以对辊柱塞式成型机为研究对象,采用锯末为原料,基于 Design - Expert BBD(Box - Behnken Design)试验设计方法^[21],以锯末含水率、成型模具长径比和主轴转速为试验因素,以成型颗粒密度和成型机生产率为试验指标,探索试验因素对试验指标的影响,为对辊柱塞式成型机成型参数的优化设计提供理论依据和参考。

1 结构与工作原理

对辊柱塞式成型机结构如图 1 所示。工作原理为:电动机由变频器进行控制,其输出的动力经减速器减速以后传递到环模轴上,带动环模旋转,固定在环模轴上的环模齿轮与固定在压辊轴上的压辊齿轮相互啮合,不仅可以实现环模和压辊的反方向转动,还能保证压辊上的柱塞与环模上的模孔正确啮合。生物质松散物料经进料口落到环模体上,由于进料装置底部装有预压辊装置,因此随着环模的旋转,松

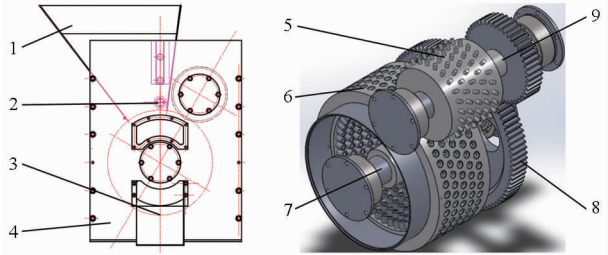


图 1 成型机结构图

Fig. 1 Structure diagram of briquetting machine

1. 进料装置 2. 预压辊装置 3. 出料口 4. 箱体 5. 压辊部件
6. 环模部件 7. 环模轴部件 8. 齿轮传动装置 9. 压辊轴部件

散的生物质物料将被初步压实。随之,压辊上的柱塞逐渐啮合压入相对应的环模模孔,之后又逐渐分离,每转一圈,环模模孔中的物料都要经过填充、柱塞挤压和保型 3 个过程,按此不断循环,松散的生物质物料最终在环模模孔中一层一层致密成型为具有一定密度和长度的颗粒燃料。固定在箱体上的刮料装置则可以及时清除压辊上粘结压实的物料,防止过多的物料进入挤压导致死机。其主要设计参数如表 1 所示。

表 1 成型机主要设计技术参数	
Tab. 1 Main design parameters of forming machine	
参数	数值
生产率/(kg·h ⁻¹)	50 ~ 100
电动机功率/kW	7.5
柱塞数	120
模孔数	240
柱塞直径/mm	10
模孔直径/mm	10
压辊啮合圆直径/mm	225
环模啮合圆直径/mm	450
压辊齿轮齿数	45
环模齿轮齿数	90
齿轮模数/mm	5
燃料截面直径/mm	10
成型率/%	90
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	657.4×524×863
整机质量/kg	1 000

2 试验

2.1 试验原料

试验原料为自然风干的锯末。

2.2 试验设备与仪器

对辊柱塞式成型机、SIEMENS MICROMASTER 440 型变频器、SC69-02 型水分快速测定仪、游标卡尺、DT300A 型电子天平、TCS-100 型不锈钢折叠工业电子台秤等,如图 2 所示。

2.3 试验方法

2.3.1 成型模具长径比的控制

与以往环模不同,该环模采用环模体和成型模具组合的方式,有利于成型模具及时更换。根据试验设计,共加工 3 种规格的成型模具,其长径比分别为 5.0、5.25、5.5。

2.3.2 含水率的控制

根据试验安排,将自然风干后的锯末,根据一定比例添加水分进行调制,将含水率分别控制在 10%、15%、20%,调制后密封静置一周。

利用 DT300A 型电子天平测量 SC69-02 型水分快速测定仪所提供托盘质量为 m_1 ,装载一定量的物料,测量其共同质量为 m_2 。将托盘装入 SC69-



图 2 试验设备与仪器

Fig.2 Experimental equipment and instruments

02 型水分快速测定仪中进行干燥,每间隔 15 min 取出托盘测量其质量,连续 3 次测量质量不变时,记该质量为 m_3 。所以物料含水率为

$$Y = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

(1)

3 种含水率的物料测量后平均值分别为 10.12%、15.08%、19.94%。与所调制的含水率相差最大不超过 1.2%,满足试验要求。

2.3.3 转速控制

试验中,电动机转速的控制采用 SIEMENS MICROMASTER 440 型变频器改变其频率的方式进行,将其频率分别控制在 3 个挡位:10、20、30 Hz,此时电动机转速分别控制在 23.62、47.25、70.87 r/min。

2.4 试验指标

成型机生产率是指在生物质固体成型设备生产工作时间内,单位时间产出的生物质固体成型燃料的质量;成型颗粒燃料密度是指生物质固体成型颗粒的密度。

2.4.1 成型颗粒密度

从样品中随机选取 5 粒,用电子天平测出每个颗粒的质量,游标卡尺测出每个颗粒的长度和直径,分别计算成型颗粒燃料密度 ρ ,最后取其平均值^[22]。

$$\rho = \frac{m_0}{V} = \frac{4m_0}{\pi d^2 l}$$

(2)

式中 m_0 ——颗粒质量,g d ——颗粒直径,cm
 l ——颗粒长度,cm V ——颗粒体积,cm³

2.4.2 成型机生产率

生产过程中,在出料口每 5 min 接取一次颗粒进行称量,成型机生产率计算式为^[23]

$$Q = 3\,600 \frac{m(1-H)}{t(1-0.2)}$$

(3)

式中 Q ——生产率,kg/h
 m ——接取样品质量,kg
 H ——成型颗粒含水率,%
 t ——接取样品时间,s

2.5 试验设计

采用三因素三水平 BBD 试验设计方法,根据相关文献^[24-26]以及试验的可行性,选择锯末含水率

(简称含水率)、成型模具长径比(简称长径比)和主轴转速为试验因素,以成型颗粒密度和成型机生产率为试验指标,并以 -1、0、1 分别代表试验因素水平,如表 2 所示。

表 2 试验因素水平

Tab.2 Levels of experimental factors

水平	因素		
	含水率/%	长径比	主轴转速/(r·min ⁻¹)
-1	10	5.0	23.62
0	15	5.25	47.25
1	20	5.5	70.87

3 试验结果与分析

采用 Design-Expert 8.05b 数据分析软件对试验结果进行处理和分析。试验安排与结果如表 3 所示。 X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示含水率、成型模具长径比和主轴转速编码值; Y_1 、 Y_2 分别表示成型颗粒密度和成型机生产率。

表 3 试验安排与结果

Tab.3 Experimental arrangement and results

试验 序号	含水率 X_1	长径比 X_2	主轴转速 X_3	成型颗粒 密度 Y_1 / (g·cm ⁻³)	成型机生 产率 Y_2 / (kg·h ⁻¹)
1	0	0	0	1.163	75.23
2	0	-1	-1	0.979	58.61
3	-1	1	0	1.132	65.36
4	0	0	0	1.152	74.64
5	0	0	0	1.174	77.33
6	1	0	1	1.009	59.47
7	0	1	1	1.153	60.36
8	1	1	0	1.136	67.93
9	1	0	-1	1.027	62.35
10	0	-1	1	0.963	61.33
11	-1	0	1	1.003	55.72
12	-1	0	-1	1.034	61.78
13	1	-1	0	0.918	70.28
14	-1	-1	0	0.903	68.71
15	0	0	0	1.168	73.94
16	0	0	0	1.145	75.08
17	0	1	-1	1.158	59.60

3.1 回归方程的建立

3.1.1 成型颗粒密度回归方程

成型颗粒密度回归方程为

$$Y_1 = -22.75 + 0.12X_1 + 8.23X_2 + 0.015X_3 - 2.2 \times 10^{-3}X_1X_2 + 4.33 \times 10^{-5}X_1X_3 + 7.33 \times 10^{-4}X_2X_3 - 3.66 \times 10^{-3}X_1^2 - 0.75X_2^2 - 2.25 \times 10^{-4}X_3^2 \quad (4)$$

方差分析结果如表 4 所示。由表 4 可以看出,模型 p 小于 0.000 1,模型回归方程极显著,失拟项 p 等于 0.233 7(大于 0.05)^[27],不显著,且该模型 R^2 修正值为 0.977 1(大于 0.8)^[28],说明该方程与试验拟合良好,试验因素与试验指标之间相关关系显著,拟合程度极好,说明该模型适合用来对对辊柱塞式成型机成型颗粒密度进行预测。

表 4 成型颗粒密度方差分析

Tab.4 Variance analysis of density of forming particle						
来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	0.14	9	0.016	76.85	<0.000 1	极显著
X_1	4.05×10^{-5}	1	4.05×10^{-5}	0.19	0.673 3	
X_2	0.083	1	0.083	397.51	<0.000 1	
X_3	6.125×10^{-4}	1	6.125×10^{-4}	2.93	0.130 9	
X_1X_2	3.025×10^{-5}	1	3.025×10^{-5}	0.14	0.715 1	
X_1X_3	4.225×10^{-5}	1	4.225×10^{-5}	0.20	0.666 9	
X_2X_3	3.025×10^{-5}	1	3.025×10^{-5}	0.14	0.715 1	
X_1^2	0.035	1	0.035	168.63	<0.000 1	
X_2^2	9.134×10^{-3}	1	9.134×10^{-3}	43.62	0.000 3	
X_3^2	0.011	1	0.011	51.44	0.000 2	
残差	1.466×10^{-3}	7	2.094×10^{-4}			
失拟项	9.085×10^{-4}	3	3.028×10^{-4}	2.17	0.233 7	不显著
误差	5.572×10^{-4}	4	1.393×10^{-4}			
总和	0.15	16				

3.1.2 成型机生产率回归方程

成型机生产率回归方程为

$$Y_2 = -1\,607.56 + 3.08X_1 + 590.48X_2 + 5.18X_3 + 0.2X_1X_2 + 0.010\,6X_1X_3 - 0.13X_2X_3 - 0.15X_1^2 - 56.23X_2^2 - 0.05X_3^2 \quad (5)$$

方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知,模型 p 等于 0.000 4,模型回归方程显著,而失拟项 p 等于 0.081(大于 0.05),不显著,同时该模型 R^2 修正值为 0.913 7(大于 0.8),这表明该模型拟合程度良好,试验误差小,该模型是合适的,说明该模型可以用来对对辊柱塞式成型机生产率的预测。

3.2 各试验因素对试验指标影响程度分析

各试验因素对各试验指标的贡献率如表 6 所示。根据 F 检验数值可以判断各试验因素对试验指标的贡献率。各试验因素对成型颗粒密度贡献率从大到小依次为:成型模具长径比、主轴转速、

含水率。各试验因素对成型机生产率贡献率从大到小依次为:含水率、成型模具长径比、主轴转速。

表 5 成型机生产率方差分析

Tab.5 Variance analysis of productivity of forming machine						
来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	760.39	9	84.49	19.83	0.000 4	显著
X_1	8.95	1	8.95	2.10	0.190 6	
X_2	4.03	1	4.03	0.95	0.363 0	
X_3	3.73	1	3.73	0.87	0.380 8	
X_1X_2	0.25	1	0.25	0.059	0.815 5	
X_1X_3	2.53	1	2.53	0.59	0.466 3	
X_2X_3	0.96	1	0.96	0.23	0.649 4	
X_1^2	56.39	1	56.39	13.24	0.008 3	
X_2^2	52.01	1	52.01	12.21	0.010 1	
X_3^2	581.76	1	581.76	136.57	<0.000 1	
残差	29.82	7	4.26			
失拟项	23.38	3	7.79	4.84	0.081 0	不显著
误差	6.44	4	1.61			
总和	790.21	16				

表 6 试验因素对试验指标的贡献率

Tab.6 Contribution rate of experimental factors on experimental indexes				
试验指标	试验因素贡献率			贡献率排序
	X_1	X_2	X_3	
Y_1	0.19	397.51	2.93	$X_2 > X_3 > X_1$
Y_2	2.10	0.95	0.87	$X_1 > X_2 > X_3$

3.3 交互作用对试验指标的影响

基于 Design - Expert 8.05b 数据分析软件做出不同试验因素间的交互作用对试验指标的响应面图,进而可以找出不同试验因素间的交互作用对试验指标的影响规律,为对辊柱塞式成型机成型参数的优化设计提供理论基础。

3.3.1 含水率和长径比对试验指标的影响

由图 3 可以看出,当主轴转速固定在某一水平,随着成型模具长径比的增加,成型颗粒密度也随之增加,成型机生产率先上升后下降,但其趋势较为缓和,说明成型模具长径比对成型颗粒密度影响极为显著,对成型机生产率影响不显著,这与表 4 和表 5 的方差分析结果一致。同时可以看出,随着含水率的增加,成型颗粒密度和成型机生产率呈先上升后下降趋势,含水率对成型颗粒密度的影响大于对成型机生产率的影响。图 3 显示当成型模具长径比大于 5.13,含水率为 11.5% ~ 18.7% 时,成型颗粒密度可达 1.1 g/cm³,成型机生产率可达 72 kg/h。

3.3.2 长径比和主轴转速对试验指标的影响

根据图 4 及其等高线密度可以看出,当物料含

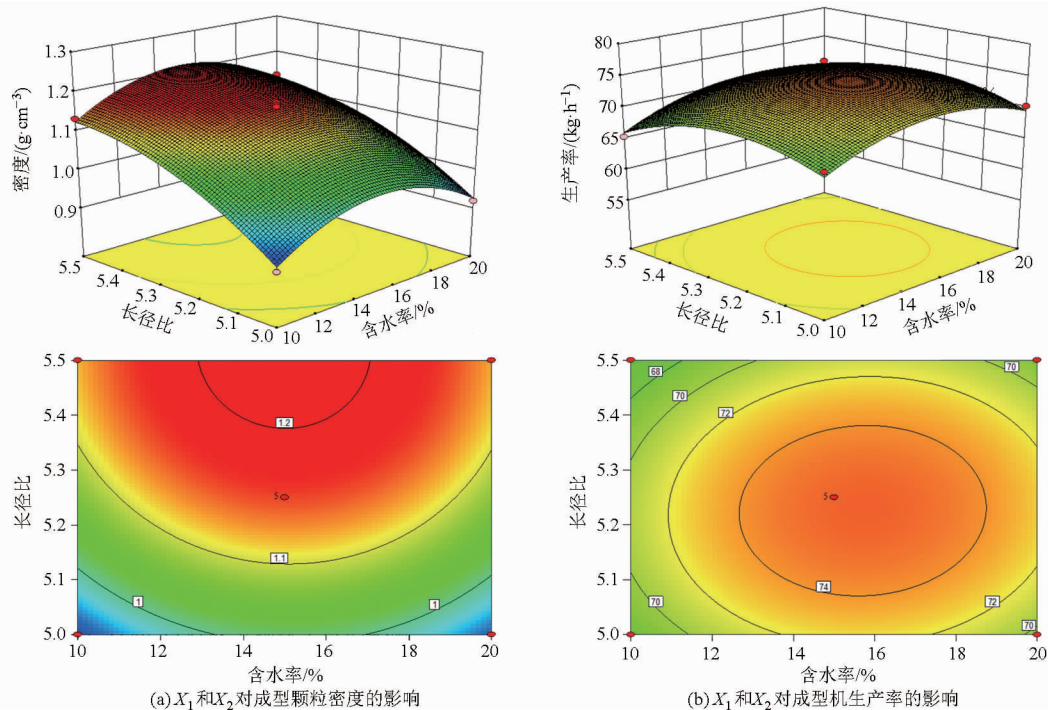


图 3 含水率和长径比对试验指标的影响

Fig. 3 Impact of moisture content and length to diameter ratio on experiment indexes

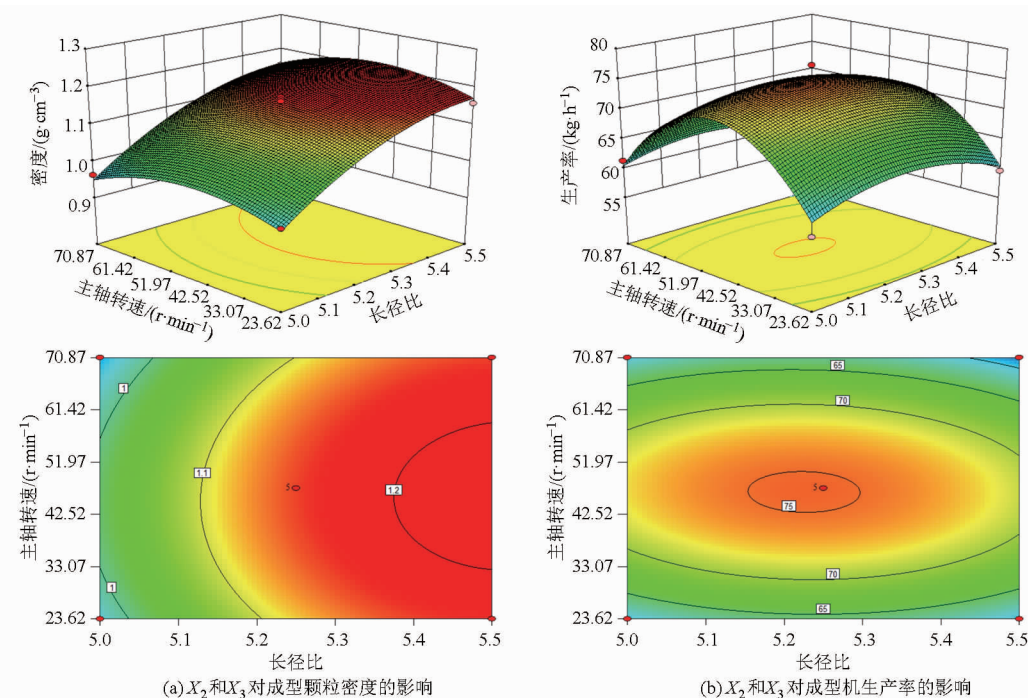


图 4 长径比和主轴转速对试验指标的影响

Fig. 4 Impact of length to diameter ratio and spindle speed on experiment indexes

水率控制在某一水平,成型模具长径比对成型颗粒密度的影响大于主轴转速,主轴转速对成型机生产率的影响大于成型模具长径比。同时可以看出,随着主轴转速的增加,成型颗粒密度变化不大,而成型机生产率呈先上升后下降趋势,这主要是由于主轴转速升高以后,由于离心力的作用,将刚压入环模模孔的物料甩出环模孔导致的。图 4 显示当成型模具长径比大于 5.13 时,主轴转速为 30 ~ 61.42 r min^{-1}

时,成型颗粒密度可达 1.1 g cm^{-3} ,成型机生产率可达 70 kg/h 。

3.3.3 含水率和主轴转速对试验指标的影响

根据图 5 及其等高线密度可以看出,当成型模具长径比固定在某一水平,物料含水率对成型颗粒密度的影响大于主轴转速,主轴转速对成型机生产率的影响大于物料含水率。同时可以看出,物料含水率对成型颗粒密度的影响大于对成型机生产率的

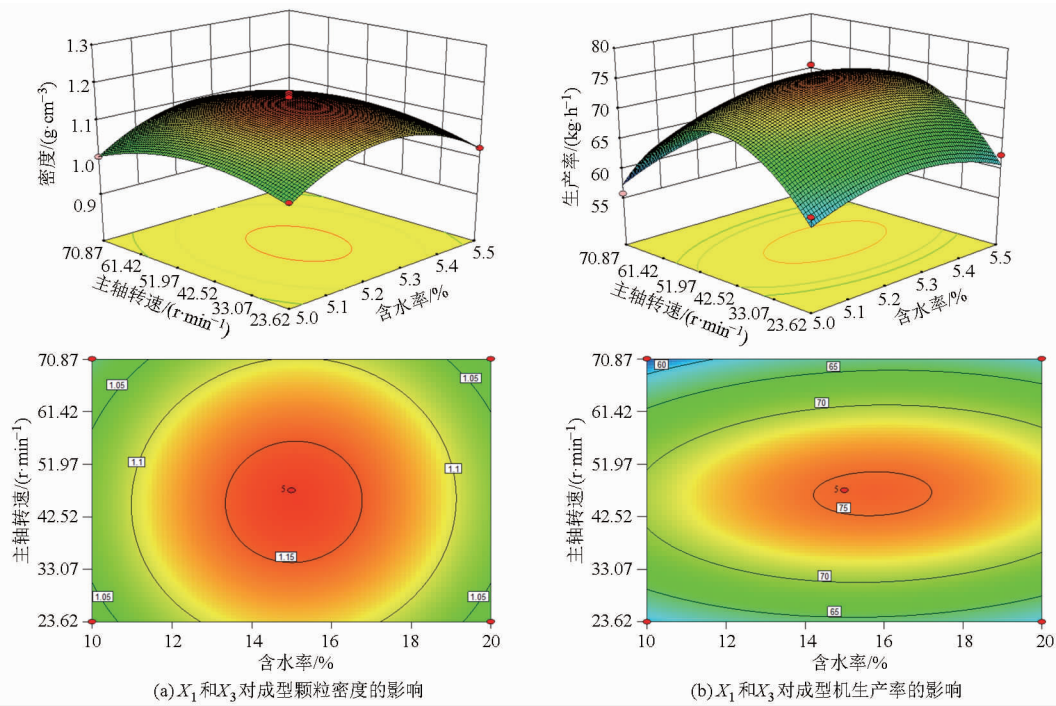


图 5 含水率和主轴转速对试验指标的影响

Fig. 5 Effects of moisture content and spindle speed on experiment indexes

影响,这是由于原料中适当的含水率可以有效充当粘结剂和润滑剂的作用^[29],促进了成型颗粒密度的增加。图 5 显示当主轴转速为 30 ~ 60 r/min,含水率为 11% ~ 19% 时,成型颗粒密度可达 1.1 g/cm³,成型机生产率可达 70 kg/h。

4 成型参数优化

采用 Design - Expert 8. 05b 数据分析软件对成

型参数进行优化。在经过对模型进行拟合和对试验结果进行讨论之后,综合考虑生产过程中成型颗粒的密度和成型机的生产率,在含水率为 10% ~ 20%、成型模具长径比为 5.0 ~ 5.5、主轴转速为 23. 62 ~ 70. 87 r/min 的约束条件下,设定成型颗粒密度和成型机生产率为最大化,优化结果如图 6 所示,成型参数优化结果为:含水率为 15. 51%、成型模具长径比为 5. 29、主轴转速为 46. 48 r/min,此时

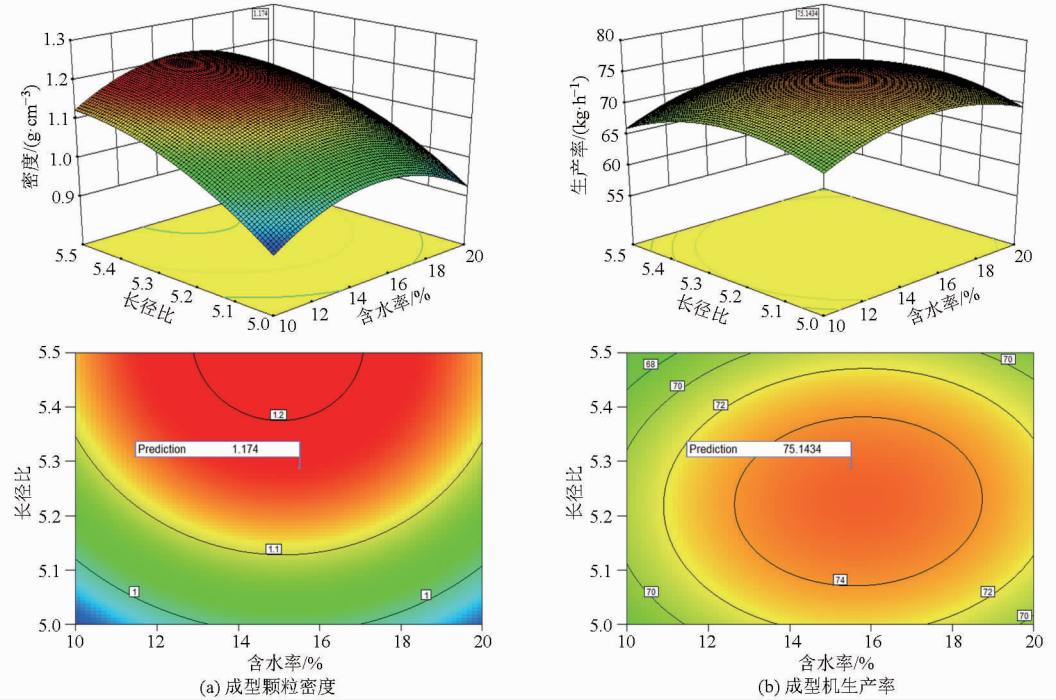


图 6 优化结果

Fig. 6 Optimization results

成型颗粒密度为 1.174 g/cm³,成型机生产率为 75.1434 kg/h。

5 试验验证

考虑到试验的可操作性,将最优成型参数调整为:含水率 15.5%、成型模具长径比 5.3、主轴转速 47.25 r/min。为验证成型参数优化结果的可靠性,采用调整之后的成型参数进行 5 组试验,并通过回归方程进行预测。试验值与预测值结果如表 7 所示。

通过表 7 可以看出,成型颗粒密度最大相对误差为 0.426%,成型机生产率最大相对误差为 2.733%,说明本试验所建立的成型颗粒密度和成型机生产率的回归方程是可靠的,可以通过回归方程对试验结果进行有效预测。

6 结论

(1)对辊柱塞式成型机采用锯末为原料制粒时,最优成型工艺参数为:含水率 15.5%、成型模具

表 7 试验值与预测值比较

Tab.7 Comparison between experimental value and predicted value

成型颗粒密度 $Y_1/(g\cdot cm^{-3})$		Y_1 相对 误差/%	成型机生产率 $Y_2/(kg\cdot h^{-1})$		Y_2 相对 误差/%
试验值	预测值		试验值	预测值	
1.176	1.174	0.170	74.32	75.143 4	1.096
1.171	1.174	0.256	77.05	75.143 4	2.537
1.169	1.174	0.426	75.36	75.143 4	0.288
1.173	1.174	0.085	73.09	75.143 4	2.733
1.170	1.174	0.341	76.84	75.143 4	2.258

长径比 5.3、主轴转速 47.25 r/min。在此条件下,成型颗粒密度和成型机生产率分别可达到 1.17 g/cm³、75 kg/h。建立的回归方程,可用来对对辊柱塞式成型机成型颗粒密度和成型机生产率进行预测。

(2)各试验因素对成型颗粒密度的贡献率从大到小依次为:成型模具长径比、主轴转速、含水率;各试验因素对成型机生产率的贡献率从大到小为:含水率、成型模具长径比、主轴转速。

参 考 文 献

1 KALIYAN N, MOREY R V, WHITE M D, et al. Roll press briquetting and pelleting of corn stover and switchgrass[J]. Transactions of the ASABE,2009,52(2):543-555.

2 XIA Xianfei, SUN Yu, WU Kai, et al. Modeling of a straw ring-die briquetting process[J]. BioResources, 2014,9(4):6316-6328.

3 陆长清,王世芬,刘光华.改进型生物质上吸式固定床气化炉的应用与效益分析[J].江西科学,2014,32(2):212-214,227.

LU Changqing, WANG Shifen, LIU Guanghua. Analysis on application and benefit of the improved biomass up suck fixed bed gasification stove[J]. Jiangxi Science,2014,32(2):212-214,227. (in Chinese)

4 CAO Guoliang, ZHANG Xiaoye, WANG Yaqiang, et al. Estimation of emissions from field burning of crop straw in China[J]. Chinese Science Bulletin,2008,53(5):784-790.

5 KALIYAN N, MOREY R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switch grass[J]. Bioresearch Technology,2010,101(3):1082-1090.

6 姚宗路,赵立欣,田宜水,等.立式环模生物质成型机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(11):139-143.

YAO Zonglu, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Study on biomass briquetting machines with vertical ring die[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):139-143. (in Chinese)

7 王春华,宋超,朱天龙,等.环模秸秆成型机压辊半径的优选与试验[J].农业工程学报,2013,29(15):26-33.

WANG Chunhua, SONG Chao, ZHU Tianlong, et al. Optimization and test of roller radius of ring die straw forming machine[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(15):26-33. (in Chinese)

8 简坤坤,刘石彩.生物质固体成型燃料研究现状及发展前景[J].生物质化学工程,2013,47(2):54-58.

JIAN Xiangkun, LIU Shicai. Research status and development prospect of densified biofuel[J]. Biomass Chemical Engineering, 2013,47(2):54-58. (in Chinese)

9 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.

HUO Lili, TIAN Yishui, MENG Haibo, et al. Parameters experiment of biomass pellet mill performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12):121-125. (in Chinese)

10 郝玲,祖宇,董良杰.模辊式生物质燃料成型技术及设备的研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(1):367-369,372.

HAO Ling, ZU Yu, DONG Liangjie. Research progress of biomass pellet fuel solidification technology and equipment [J]. Journal of Anhui Agriculture Science,2012,40(1):367-369,372. (in Chinese)

11 李震,俞国胜,陈忠加,等.齿辊式环模生物质成型机设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(5):220-225.

LI Zhen, YU Guosheng, CHEN Zhongjia, et al. Development and experiment of gear rolls biomass forming machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):220-225. (in Chinese)

12 MANI S, TABIL L G, SOKHANSANJ S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties

- of biomass pellets from grasses[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, 30(7): 648 – 654.
- 13 武凯, 孙宇, 彭斌彬, 等. 环模制粒粉体旋转挤压成型扭矩模型构建及试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 33 – 39.
WU Kai, SUN Yu, PENG Binbin, et al. Modeling and experiment on rotary extrusion torque in ring-die pelleting process [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(24): 33 – 39. (in Chinese)
- 14 宁廷州, 俞国胜, 陈忠加, 等. 对辊柱塞式成型机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 203 – 210.
Ning Tingzhou, Yu Guosheng, Chen Zhongjia, et al. Design and experiment of roller briquetting machine with plungers[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 203 – 210. (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)
- 16 段建, 陈树人, 姚勇, 等. 环模秸秆压块机吨燃料能耗试验与工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊 1): 149 – 154.
DUAN Jian, CHEN Shuren, YAO Yong, et al. Energy consumption test and process optimization for circular mold briquetting machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 1): 149 – 154. (in Chinese)
- 17 丛宏斌, 赵立欣, 孟海波, 等. 立式环模秸秆压块机成型过程建模与参数优化[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 187 – 193.
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Process modeling and parameter optimization of straw briquetting machine with vertical circular mould[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 187 – 193. (in Chinese)
- 18 庞丽沙, 孟海波, 赵立欣, 等. 立式环模秸秆压块成型机作业参数优化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 165 – 172.
PANG Lisha, MENG Haibo, ZHAO Lixin, et al. Optimization of operating parameters for vertical ring mold straw briquetting machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(23): 165 – 172. (in Chinese)
- 19 李涛. 生物质成型机平模优化设计与试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
LI Tao. Optimization design and experimental study on flat die of biomass briquetting machine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 王灵昭, 邓家权. 微波法提取雨生红球藻中虾青素的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(12): 96 – 100.
WANG Lingzhao, DENG Jiaquan. Study on enzymatic hydrolysis to protein from decapтерus maruadsi[J]. *Food Research and Development*, 2007, 28(12): 96 – 100. (in Chinese)
- 22 王中华, 曾晓琼. 饲料加工工艺与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- 23 NY/T 1883—2010 生物质固体成型燃料成型设备试验方法[S]. 2010.
- 24 刘延春, 张英楠, 刘明, 等. 生物质固化成型技术研究进展[J]. *世界林业研究*, 2008, 21(4): 41 – 47.
LIU Yanchun, ZHANG Yingnan, LIU Ming, et al. Reviews on solidification technology of biomass[J]. *World Forestry Research*, 2008, 21(4): 41 – 47. (in Chinese)
- 25 王野平, 王裕超, 张俊. 生物质燃料平模成型机关键参数分析[J]. *机械设计与研究*, 2011, 27(4): 103 – 106.
WANG Yeping, WANG Yuchao, ZHANG Jun. Key parameters analysis for roller of biomass fuel plane-die briquetting machine [J]. *Machine Design and Research*, 2011, 27(4): 103 – 106. (in Chinese)
- 26 杨星钊, 连萌, 王威立, 等. 生物质成型机成型模具的改进设计[J]. *河南农业大学学报*, 2009, 43(5): 531 – 534.
YANG Xingzhao, LIAN Meng, WANG Weili, et al. Improvement of hydraulic stalk briquette equipment[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(5): 531 – 534. (in Chinese)
- 27 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 Yuxin, XIAO Zhigang, YANG Qingyu, 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)
- 28 袁菊红, 胡绵好. 响应面法优化烧烤竹炭对水中磷的吸附条件[J]. *化工环保*, 2015, 35(2): 116 – 120.
YUAN Juhong, HU Mianhao. Condition optimization for adsorption of phosphate from water onto barbecue bamboo charcoal by response surface methodology[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2015, 35(2): 116 – 120. (in Chinese)
- 29 KALIYAN N, MOREY R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(3): 337 – 359.