



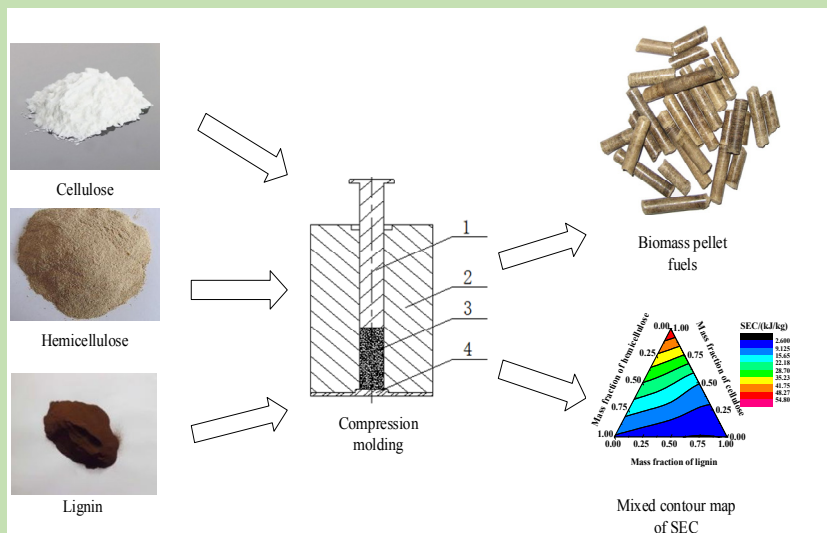
Hybrid molding characteristics of three components of biomass based on SLMD

Haiyun SUN¹, Peiyong MA^{1*}, Yongqiang XING¹, Xianjun XING¹, Mingming CHEN²

1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

2. Anhui Huantai Bioenergy Technology Development Co., Ltd., Xuancheng, Anhui 242200, China

Abstract: In order to study the effects of three components of biomass, cellulose, hemicellulose and lignin, on biomass molding characteristics, the simplex lattice mixing design method (SLMD) in the mixing experiment method was used to optimize the mixing of three components of biomass samples with different mixing ratios, the mathematical regression model of biomass compact molding performance index was established, and the mathematical regression model was verified by experiments. The results showed that the



correlation coefficient of the regression equation of relaxation density and specific energy consumption was more than 0.9998, biomass forming process was not a simple superposition of a single three component compact forming process, there was a certain interaction between the three components in the process of biomass molding, the higher the content of cellulose, the greater the specific energy consumption and the smaller the relaxation density. The higher the lignin content, the smaller the specific energy consumption, but when the lignin content was too high, the energy consumption had a slight upward trend. The higher the content of hemicellulose, the greater the relaxation density, therefore, in order to make biomass had good molding characteristics, that is, relatively low specific energy consumption and relatively high relaxation density, biomass with less cellulose content and higher hemicellulose and lignin contents should be selected as solid fuel. The experimental verification by using cotton straw, bamboo and corn straw showed that the best biomass species for specific energy consumption prediction was corn stalk, and the best biomass species for relaxation density was bamboo, with relative error of 1.54% and 0.8000%, respectively, and the maximum relative error of the regression model of specific energy consumption and relaxation density was 2.64% and 1.0342%, respectively, which indicated that the model had certain prediction effect on actual biomass.

Key words: simplex-lattice mixed design; biomass; biomass compaction molding; specific energy consumption; relaxation density; regression model

收稿: 2018-09-05, 修回: 2018-09-30, 网络发表: 2018-11-19, Received: 2018-09-05, Revised: 2018-09-30, Published online: 2018-11-19

基金项目: 安徽省重大专项基金资助项目(编号: 17030701044)

作者简介: 孙海韵(1996-), 男, 安徽省蚌埠市人, 硕士研究生, 机械设计及理论专业, Tel: 15655139652, E-mail: 907177296@qq.com; 马培勇, 通讯联系人, Tel: 15375385975, E-mail: mapeiyong@163.com.

引用格式: 孙海韵, 马培勇, 邢勇强, 等. 基于 SLMD 预测生物质三组分混合成型特性. 过程工程学报, 2019, 19(3): 575-580.

Sun H Y, Ma P Y, Xing Y Q, et al. Hybrid molding characteristics of three components of biomass based on SLMD (in Chinese).

Chin. J. Process Eng., 2019, 19(3): 575-580, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218274.

基于 SLMD 预测生物质三组分混合成型特性

孙海韵¹, 马培勇^{1*}, 邢勇强¹, 邢献军¹, 陈明明²

1. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009

2. 安徽环态生物能源科技开发有限公司, 安徽 宣城 242200

摘 要: 采用单纯形格子混料设计法(SLMD)建立了生物质三组分致密成型性能指标预测模型, 并进行了实验验证。结果表明, 比能耗和松弛密度回归方程的相关系数均大于 0.9998, 与实验数据的最大相对误差分别为 3.82%和 0.5166%。生物质成型过程中三组分对其有一定的交互作用, 纤维素比例越高, 比能耗越大, 松弛密度越小; 木质素比例越高, 比能耗越小, 但比例过高, 比能耗有略微上升趋势; 半纤维素比例越高, 松弛密度越大。用棉花秸秆、毛竹和玉米秸秆进行实验验证, 比能耗和松弛密度回归模型的最大相对误差分别为 2.64%和 1.0342%, 表明模型对实际生物质有一定的预测效果。

关键词: 单纯形格子混合设计法; 生物质; 生物质致密成型; 比能耗; 松弛密度; 回归模型

中图分类号: TK6

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)03-0575-06

1 前言

纤维素、半纤维素和木质素作为生物质的三种主要组分^[1,2]。且纤维素、半纤维素和木质素含量对生物质颗粒成型的品质存在着重大影响^[3-5]。

到目前为止, 一大批学者就生物质燃料颗粒成型条件对生物质燃料颗粒成型特性的影响展开了深入研究, 但对生物质三组分含量对生物质燃料颗粒成型特性的影响研究较少。如 Mohan 等^[6]研究发现, 生物质原料中的纤维素、半纤维素和木质素对成型燃料的松弛密度和成型颗粒的品质有重要影响, 但未深入分析其对生物质成型的具体影响; Shaw 等^[7]认为成型条件和原料组分在生物质燃料颗粒成型中扮演着举足轻重的作用, 但未定量分析纤维素、半纤维素和木质素对生物质成型特性的影响。为对生物质成型特性进行更系统的研究, 同时促进生物质成型技术的发展, 有必要探究生物质三组分含量对生物质成型特性的影响。

本研究应用混料实验方法^[8]中的单纯形格子混料设计法^[9,10]对采用不同三组分比例制成的生物质进行优化设计, 建立生物质致密成型性能的预测模型, 对模型进行了实验验证, 有助于我们更好地理解生物质燃料颗粒的成型特性。

2 实验

2.1 实验原料

实验中, 用微晶纤维素、木聚糖和碱性木质素来代替生物质中的纤维素、半纤维素和木质素。按单纯形格子混料设计法的复配比例采用多次混合方法均匀混合微晶纤维素、木聚糖和碱性木质素, 得到 10 组混合样品。在安徽某部收集了玉米秸秆、毛竹和棉花秸秆, 其含水率为 10%, 粉碎筛分后取 30~80 目(180~550 μm)的

粉末制成样品, 贮存于 105 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温干燥箱中待用, 其中棉花秸秆、毛竹和玉米秸秆的纤维素:半纤维素:木质素质量比分别为 0.37:0.27:0.20, 0.32:0.26:0.23 和 0.35:0.25:0.20。

2.2 实验装置

实验平台为 WDW-300E 型微机控制电子万能试验机(济南时代试金试验机有限公司), 该万能试验机配备压电传感器, 可用于记录实验压缩过程中生物质燃料颗粒的成型压力以及成型过程中颗粒的位移, 其中该试验机的压力精度为 $\pm 0.5\%$, 位移精度为 $\pm 0.5\%$ 。致密成型实验模具包括压杆、套筒和底座, 根据实验要求自行设计, 其中套筒内径为 12 mm, 长 115 mm, 如图 1 所示。用 FA124 型电子天平(上海舜宇恒平仪器有限公司)称量实验样品, 称量范围为 120 g, 精度 0.1 mg, 重复性为 ± 0.2 mg; 用 SH-20A 含水率测定仪(上海菁海仪器有限公司)测定样品水分含量, 质量精度 1 mg, 水分精度 0.01%, 重复性 0.1%。

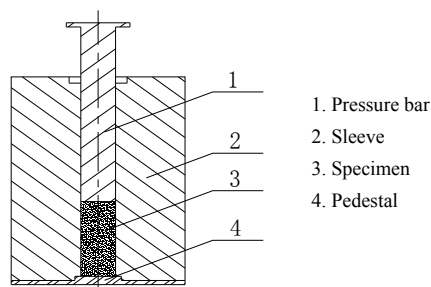


图 1 生物质颗粒致密成型实验模具

Fig.1 Experimental mould of biomass particle compression molding

2.3 实验方案

生物质三组分原料采用混料实验方法的单纯形格子混料设计法(Simplex Lattice Mixing Design Method,

SLMD)进行复配优化, 混料各成分之和为 1, 非常适合生物质三组分混合成型特性研究^[11,12]。

表 1 为单纯形格子混料设计实验方案, 纤维素、半纤维和木质素质量分数分别为 Z_1 , Z_2 和 Z_3 , 设计 10 组混料实验。

表 1 实验方案			
Table 1 Experimental design scheme			
No.	Mass fraction		
	Cellulose, Z_1	Hemicellulose, Z_2	Lignin, Z_3
1	0.00	0.00	1.00
2	0.00	1.00	0.00
3	1.00	0.00	0.00
4	0.50	0.50	0.00
5	0.00	0.50	0.50
6	0.50	0.00	0.50
7	0.67	0.17	0.17
8	0.17	0.67	0.17
9	0.17	0.17	0.67
10	0.33	0.33	0.33

对实验数据进行分析计算, 得到目标响应值比能耗 (Specific Energy Consumption, SEC) 和松弛密度 (Relaxation Density, RD), 对生物质颗粒成型参数 (比能耗和松弛密度) 进行建模分析, 以 Z_1 , Z_2 和 Z_3 为预测回归模型的自变量, 模型如下:

$$Y=a_1Z_1+a_2Z_2+a_3Z_3+a_{12}Z_1Z_2+a_{13}Z_1Z_3+a_{23}Z_2Z_3+a_{123}Z_1Z_2Z_3$$

约束条件: $0\leq Z_i\leq 1 (i=1, 2, 3)$

$$\sum Z_i=1$$

式中, a_1 , a_2 , a_3 为模型的线性项系数, a_{12} , a_{13} , a_{23} , a_{123} 为模型的非线性项系数。

2.4 生物质压缩成型参数

2.4.1 比能耗

比能耗是指在单位时间内生产成型燃料所消耗的能量, 是考察压缩成型工艺设计是否合理的重要性能指标之一^[13]。本文采用成型过程中压力-位移构成的曲线面积计算比能耗, 计算公式如下:

$$SEC=W/m=\int(fds)/m$$

式中, SEC 为比能耗(kJ/kg), W 为总能耗(kJ), m 为生物质颗粒出模后质量(kg), f 为压缩成型过程中的压力(kN), s 为成型过程中压杆的位移(mm)。

2.4.2 松弛密度

松弛密度是衡量成型燃料物理品质好坏的重要指标。首先将压缩成型后的生物质颗粒装入密封袋进行密封保存 24 h, 然后用高精度电子天平测定其质量 m (g), 接着将成型后的生物质颗粒的长度 L (cm)和直径 d (cm)用游标卡尺测量, 每个尺寸测 3 次, 取其平均值, 最后计算颗粒密度即为松弛密度 RD(g/cm³)^[14], 公式如下:

$$RD=4m/(\pi d^2L)$$

3 结果与讨论

3.1 模型及预测分析

按比例将三组分装入成型实验模具中, 采用万能试验机进行致密成型实验, 每组实验重复 3 次, 取平均值, 计算比能耗 SEC 和松弛密度 RD, 见表 2。对表 2 中的数据进行整理并进行数学回归建模, 得出以 Z_1 , Z_2 和 Z_3 为自变量的比能耗和松弛密度的回归方程如下:

$$\begin{aligned} SEC &= 54.69Z_1 + 8.35Z_2 + 2.77Z_3 - 11.40Z_1Z_2 - \\ &\quad 50.57Z_1Z_3 - 9.14Z_2Z_3 + 58.07Z_1Z_2Z_3 \\ RD &= 0.58Z_1 + 1.19Z_2 + 0.94Z_3 + 0.93Z_1Z_2 + \\ &\quad 0.41Z_1Z_3 + 0.35Z_2Z_3 - 0.36Z_1Z_2Z_3 \end{aligned}$$

表 2 生物质三组分混料成型实验结果
Table 2 The results of three-component biomass mixture molding experiment

No.	Mass fraction			Specific energy consumption, SEC/(kJ/kg)	Relaxation density, RD/(g/cm ³)
	Cellulose, Z_1	Hemicellulose, Z_2	Lignin, Z_3		
1	0.00	0.00	1.00	2.88	0.9439
2	0.00	1.00	0.00	8.28	1.1893
3	1.00	0.00	0.00	54.58	0.5800
4	0.50	0.50	0.00	28.49	1.1167
5	0.00	0.50	0.50	3.29	1.1559
6	0.50	0.00	0.50	16.09	0.8651
7	0.67	0.17	0.17	32.68	0.8890
8	0.17	0.67	0.17	12.91	1.1890
9	0.17	0.17	0.67	6.27	1.0249
10	0.33	0.33	0.33	15.92	1.0840

表 3 为 SEC 和 RD 数学回归模型的参数。由表可知 SEC 和 RD 回归模型的相关系数均为 0.9998。从 SEC 回归模型的参数可知该模型的均方误差 MSE、误差平方和 SSE 及均方根误差 RMSE 分别为 0.0501, 0.5013 和

0.2239; 由 RD 回归模型的参数可知其 MSE, SSE 和 RMSE 分别为 8.0818×10^{-6} , 8.0818×10^{-5} 和 0.0028。

综上所述, 回归模型对致密成型参数 SEC 和 RD 的拟合度均良好, 可用于生物质致密成型技术指标的预测

和分析。

表 3 回归模型参数

Performance parameter	Correlation coefficient	Mean squared error, MSE	Square sum of error, SSE	Root-mean-square error, RMSE
Specific energy consumption, SEC/(kJ/kg)	0.9998	0.0501	0.5013	0.2239
Relaxation density, RD/(g/cm ³)	0.9998	8.0818×10 ⁻⁶	8.0818×10 ⁻⁵	0.0028

表 4 生物质三组分混料成型实验的比能耗和松弛密度模型预测值与实验值的误差

Table 4 Relative error of specific energy consumption and relaxation density prediction values with experiment values of three-components of biomass mixture molding experiment									
No.	Biomass component			Specific energy consumption, SEC/(kJ/kg)			Relaxation density, RD/(g/cm ³)		
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Experiment value	Predicted value	Relative error/%	Experiment value	Predicted value	Relative error/%
1	0.00	0.00	1.00	2.88	2.77	3.82	0.9439	0.9436	0.0318
2	0.00	1.00	0.00	8.28	8.37	1.09	1.1893	1.1885	0.0673
3	1.00	0.00	0.00	54.58	54.69	0.20	0.5800	0.5792	0.1379
4	0.50	0.50	0.00	28.49	28.67	0.63	1.1167	1.1152	0.1343
5	0.00	0.50	0.50	3.29	3.28	0.30	1.1559	1.1548	0.0952
6	0.50	0.00	0.50	16.10	16.10	0.00	0.8651	0.8640	0.1272
7	0.67	0.17	0.17	32.68	32.25	1.32	0.8890	0.8931	0.4612
8	0.17	0.67	0.17	12.91	12.54	2.87	1.1890	1.1932	0.3532
9	0.17	0.17	0.67	6.27	6.48	3.35	1.0249	1.0278	0.2830
10	0.33	0.33	0.33	15.92	16.19	1.70	1.0840	1.0784	0.5166

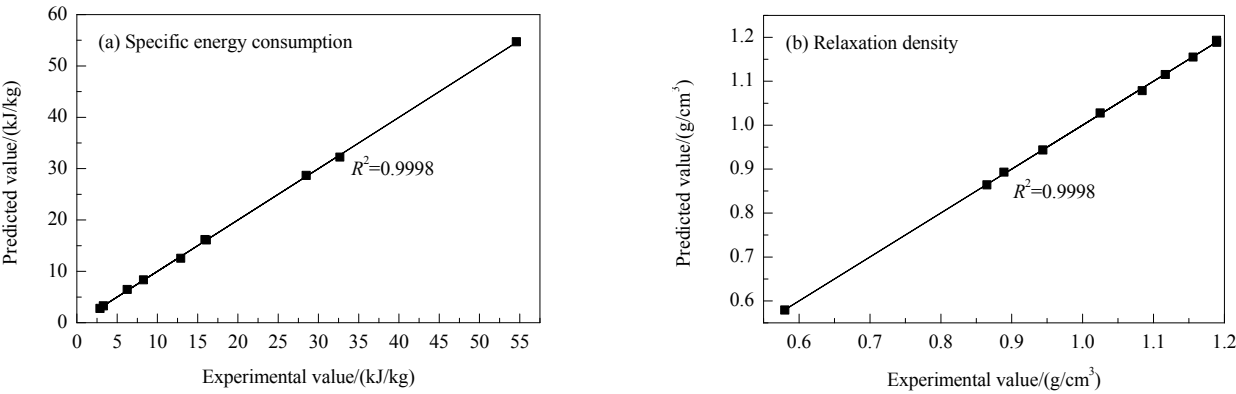


图 2 模型预测值与实验值的对比

Fig.2 Correlation of actual and predicted values of specific energy consumption and relaxation density

3.2 比能耗和松弛密度预测模型误差分析

表 4 为 SEC 和 RD 模型预测值与实验值误差分析。由表可见，模型对比能耗和松弛密度的预测效果较好，最大相对误差分别为 3.82% 和 0.5166%，符合工业要求。

为直观评估回归模型的预测效果，对比了比能耗和松弛密度模型预测值与实验值，如图 2 所示。可看出比能耗和松弛密度的实验值和预测值均呈直线关系且其相关系数 R^2 均为 0.9998，表明二者的实验值和预测值之间的一致性良好，该回归模型预测效果较好。

3.3 生物质三组分对比能耗和松弛密度的影响

通过比能耗 SEC 和松弛密度 RD 的数学回归模型方程，可得到生物质三组分对生物质颗粒压缩成型的 SEC 和 RD 的影响，从而生成了生物质三组分对 SEC 和 RD 影响的三元等值线图 and 响应跟踪图，如图 3 所示。由图 3(a)和 3(c)可见，比能耗和松弛密度的等值线为椭圆状，表明生物质三组分对成型的影响是一个交互作用的影

响，而并不是单一组分压缩成型过程的简单叠加，因为椭圆曲面的斜率不总相同，因此不同组合下对响应值的影响不同。

由图 3(b)比能耗响应跟踪图可知，纤维素的比能耗上升最快，而木质素的比能耗下降从快逐渐变得平缓，因此纤维素比例与生物质致密成型的比能耗存在正相关关系，而木质素比例与生物质致密成型的比能耗存在负相关关系。当木质素和半纤维素比例一定时，随纤维素在混料中的比例增加，比能耗的预测值急剧增加。这是因为纤维素是植物细胞壁主要成分，它使得植物具有一定的弹性和强度，故含较多纤维素的生物质压缩成型所需的能量较高。但当纤维素和半纤维素比例一定时，随木质素在混料中的比例增加，比能耗的预测值逐渐下降，但其比例增加到一定值时，比能耗略有上升。这是由于木质素具有受热塑化粘结的特性，在压缩成型过程中，由于温度逐渐升高，使木质素塑化，存在一定粘性，

从而增加了混料的流动性，所以含较多木质素的生物质致密成型所需能量较低。但当木质素比例过高且达到一定温度时，混料粘性过大，反而阻碍生物质成型，从而增加了比能耗。

从图 3(d)松弛密度响应跟踪图可知，半纤维素比例与松弛密度呈正相关关系。纤维素和木质素比例与松弛密度呈负相关关系，且纤维素对松弛密度影响更大。随半纤维素比例增加，松弛密度的预测值逐渐增加，这是因为成型过程中半纤维素降解并凝聚使其支化度下降，

即松弛时的内耗降低，黏滞性减小，使生物质颗粒尺寸稳定性增强^[15]。随纤维素在混料中比例增加，松弛密度的预测值急剧减小。这是因为纤维素可使生物质成型时的表面粘结性下降，从而使压缩成型的生物质固体燃料易松散。

通过上述分析可知，为使生物质在成型过程中具有良好的成型特性，即比能耗相对较低、松弛密度相对较高，应选择纤维素比例较少、半纤维素和木质素比例较多的生物质作为固体燃料。

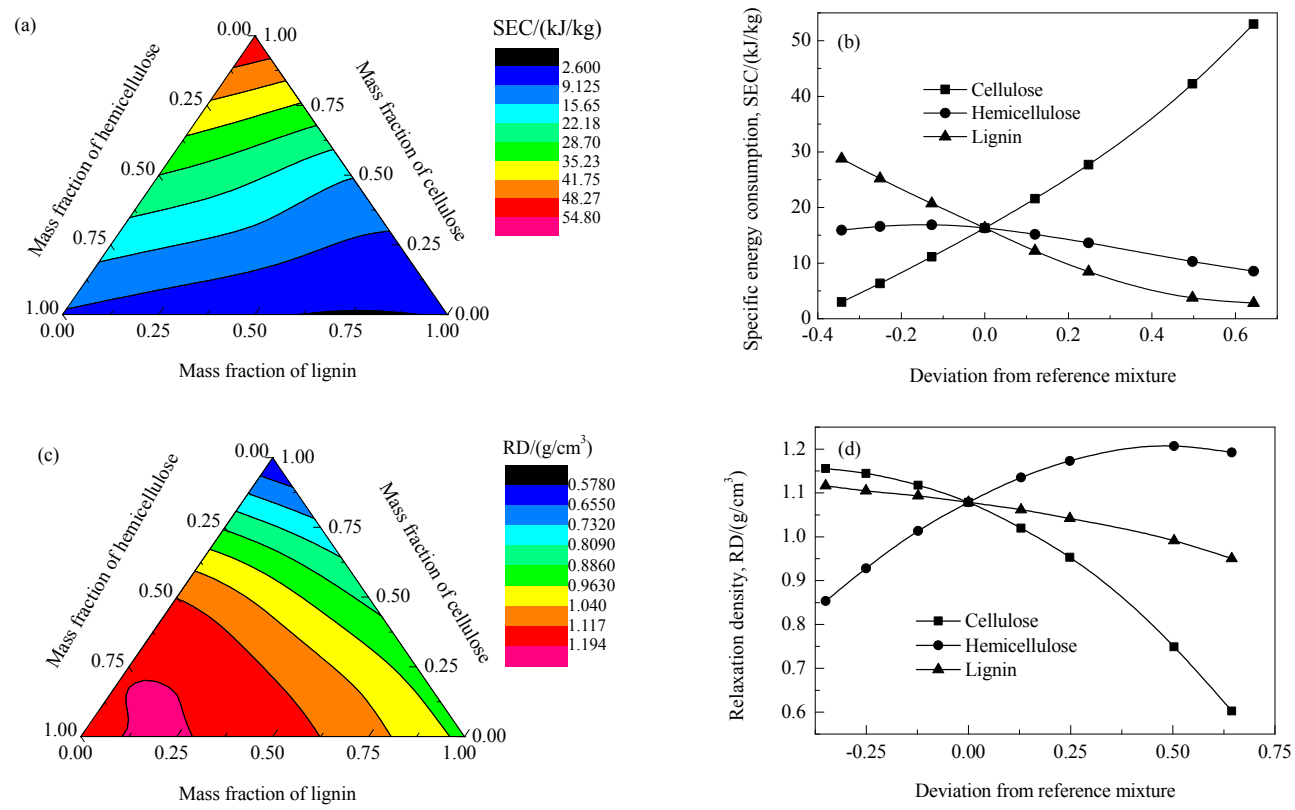


图 3 比能耗、松弛密度的三元等值线图 and 响应跟踪图

Fig.3 Three-dimensional contour map and response tracking map of the specific energy consumption and relaxation density

表 5 不同生物质三组分质量分数下比能耗和松弛密度预测值与实验值的相对误差

Biomass species		Mass fraction	Specific energy consumption, SEC/(kJ/kg)			Relaxation density, RD/(g/cm³)		
			Experiment value	Predicted value	Relative error/%	Experiment value	Predicted value	Relative error/%
Cotton straw		$Z_1=0.37, Z_2=0.27, Z_3=0.20$	18.54	19.03	2.64	0.8799	0.8708	1.0342
Bamboo		$Z_1=0.32, Z_2=0.26, Z_3=0.23$	16.75	16.39	2.15	0.8375	0.8308	0.8000
Maize straw		$Z_1=0.35, Z_2=0.25, Z_3=0.20$	18.22	17.94	1.54	0.8223	0.8142	0.9850

3.4 比能耗、松弛密度回归方程的实验验证

采用由安徽某部收集的玉米秸秆、毛竹和棉花秸秆对 SEC 和 RD 的数学回归模型进行进一步验证。由表 5 可知，模型对 SEC 预测的最大相对误差为 2.64%，对 RD 预测的最大相对误差为 1.0342%。其中对玉米秸秆比能耗预测最好，相对误差为 1.54%，对毛竹松弛密度

预测最好，相对误差为 0.8000%。

4 结 论

基于单纯形格子混料设计法(SLMD)研究了生物质三组分纤维素、半纤维素和木质素比例对生物质成型特性的影响，建立了成型过程中比能耗和松弛密度的预测

模型, 并进行了实验验证, 得出如下结论:

(1) 对实验数据进行建模分析, 得到比能耗和松弛密度的预测方程, 相关系数 $R^2 > 0.9998$, 与实验数据的最大相对误差分别为 3.82% 和 0.5166%, 模型的预测效果较好, 可用于生物质成型指标预测分析。

(2) 三组分对比能耗和松弛密度的影响存在一定交互作用, 纤维素比例越高, 比能耗越大, 松弛密度越小; 木质素比例越高, 比能耗越小, 比例过高时比能耗略有上升; 半纤维素比例越高, 松弛密度越大。

(3) 用生物质作为固体燃料时, 应选择纤维素比例相对较少、且半纤维素和木质素比例相对较高的生物质原料。

(4) 采用棉花秸秆、毛竹和玉米秸秆对回归预测模型进行验证, 模型预测的 SEC 的最大相对误差为 2.64%, RD 的最大相对误差为 1.0342%, 表明模型对实际生物质具有一定的预测效果。

参考文献

- [1] Neville A. New technologies advance biomass for power generation [J]. Power, 2012, 156(7): 62–65.
- [2] Binder J B, Raines R T. Simple chemical transformation of lignocellulosic biomass into furans for fuels and chemicals [J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(5): 1979–1985.
- [3] Stefanidis S D, Kalogiannis K G, Iliopoulou E F. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2014, 105(5): 143–150.
- [4] Wang S R, Guo X J, Wang K G, et al. Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2011, 91(1): 183–189.
- [5] Bocci E, Sisinni M, Moneti M, et al. State of art of small scale biomass gasification power systems: a review of the different typologies [J]. Energy Procedia, 2014, 45: 247–256.
- [6] Mohan D, Pittman C U, Steele P H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review [J]. Energy and Fuels, 2006, 20(3): 848–889.
- [7] Shaw M D. Feedstock and process variables influencing biomass densification [D]. Saskatoon City: Canada University of Saskatchewan, 2008: 62.
- [8] 陈啸. 基于混料设计的原料成分对颗粒饲料产品成型特性的影响 [J]. 饲料工业, 2018, (9): 7–13.
Chen X. Influence of raw material composition based on mixing design on forming characteristics of pellet feed products [J]. Feed Industry, 2018, (9): 7–13.
- [9] 樊永胜, 蔡忆昔, 李小华, 等. 基于 SLMD 的生物质热解动力学预测模型 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 179–184.
Fan Y S, Cai Y X, Li X H, et al. Prediction model of biomass pyrolysis kinetic based on SLMD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 179–184.
- [10] 杨建杰, 张桂香, 杨琴, 等. 不同原料基质栽培平菇的生物学研究 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 170–174.
Yang J J, Zhang G X, Yang Q, et al. Biology research of *Pleurotus ostreatus* cultivated in different raw materials [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 170–174.
- [11] Azevedo S, Cunha L M, Mahajan P V, et al. Application of simplex lattice design for development of moisture absorber for oyster mushrooms [J]. Procedia Food Science, 2011, 1: 184–189.
- [12] Ngun B K, Mohamad H, Katsumata K I, et al. Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating cambodian clays [J]. Applied Clay Science, 2014, 87(4): 97–107.
- [13] 胡建军, 雷廷宙, 沈胜强, 等. 秸秆颗粒冷态压缩成型过程的比能耗回归分析 [J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 29–35.
Hu J J, Lei T Z, Shen S Q, et al. Regression analysis on specific energy consumption in the pelletizing process of straw [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 29–35.
- [14] 孙亮, 孙清, 接鑫, 等. 稻壳热压成型工艺参数试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 96–100.
Sun L, Sun Q, Jie X, et al. Main technological parameters of rice hull hot briquetting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 96–100.
- [15] 赵钟声, 刘一星, 沈隽. 落叶松、杨木热处理材及压缩材热动力学特性分析 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(4): 17–19.
Zhao Z S, Liu Y X, Shen J. Thermodynamic property of heat treated and compressed larch and poplar wood [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(4): 17–19.