

# 基于响应面法的玉米秸秆成型工艺优化

王功亮<sup>1,2</sup>, 姜洋<sup>1,3\*</sup>, 李伟振<sup>1</sup>, 阴秀丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642)

**摘要:** 为了研究玉米秸秆成型过程中各参数之间的交互作用, 获得最佳的工艺参数, 该文采用 5 因素的响应面法试验设计研究了原料水分(8%~24%)、温度(50~150 ℃)、压缩速度(10~50 mm/min)、压力(51.0~127.4 MPa)、保压时间(10~50 s) 5 个成型参数对玉米秸秆成型颗粒的松弛密度、Meyer 强度以及压缩比能耗 3 个成型技术指标的影响, 建立了响应面模型, 结合成型燃料标准, 获得了最佳的工艺参数, 并对优化后的试验参数进行了试验验证。试验结果表明: 在选取试验参数范围内, 温度、原料水分、压力均会对技术指标产生较大影响; 而压缩速度和保压时间所产生的影响相对较小。最优化的工艺参数(压力、温度、水分)为: 4 kN(51.0 MPa)、110.8 ℃、17%, 在该参数组合下的验证试验结果为: 松弛密度为 1031 kg/m<sup>3</sup>, Meyer 强度为 27.1 N/m<sup>2</sup>, 比能耗为 10.03 kJ/kg。该研究可为秸秆生物质成型燃料制备产业提供参考。

**关键词:** 秸秆; 优化; 燃料; 压缩成型; Meyer 强度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.032

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-13-0223-05

王功亮, 姜洋, 李伟振, 阴秀丽. 基于响应面法的玉米秸秆成型工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 223-227.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.032 http://www.tcsae.org

Wang Gongliang, Jiang Yang, Li Weizhen, Yin Xiuli. Process optimization of corn stover compression molding experiments based on response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(13): 223-227. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.032 http://www.tcsae.org

## 0 引言

目前, 生物质成型燃料产业虽有了一定规模, 但成型过程能耗高、产品质量差依然是制约其发展的瓶颈, 有待深入研究。Pak Yiu Lam 发现成型温度和压力会影响杉木成型颗粒的密度和机械性能, 相比成型压力, 成型温度和保压时间对比能耗影响较小<sup>[1]</sup>。Stelte Wolfgang 等研究麦秸发现成型温度高于玻璃态转化温度时颗粒的抗压强度和密度有较大提高, 麦秸中的提取物在成型过程中起润滑作用, 但其存在会降低颗粒的机械性能, 并采用扫描电镜和 ATR-FTIR 对木质素和提取物的作用机理进行了分析<sup>[2]</sup>。Castellano 等对比研究发现生物质的组分是影响成型质量的关键因素, 木质素含量高、提取物含量低的生物质颗粒具有更好的机械耐久性<sup>[3]</sup>。吕东慧发现添加粗甘油、膨润土、木质素磺酸钠能降低麦秸的成型能耗, 同时增大成型颗粒的密度<sup>[4]</sup>。涂德浴发现稻秆和木屑混合原料成型颗粒的综合性能优于稻秆单独成型, 并针对不同的技术指标, 获得了各自优化的工艺参数<sup>[5]</sup>。目前, 国内成型燃料产品耐久性主要根据农业部标准 NY-T 1881.8-2010 进行<sup>[6]</sup>。而在实验室条件的单颗粒成型试验中, 由于受样品数量的

限制, 这种方法给测试评价带来了很大的不便。Meyer 强度是一个重要的强度指标, 它反映了固体抵抗变形的能力, 因此, 采用 Meyer 强度来表征耐久性。为了研究成型参数(原料水分、温度、压缩速度、压力、保压时间)之间的交互作用, 并获得最佳的工艺参数, 本文采用 5 因素响应面法试验设计方法, 通过对玉米秸秆松弛密度、比能耗以及 Meyer 强度影响的研究, 建立了响应面模型, 并在满足成型燃料相关标准的前提下, 实现不同参数的优化组合, 达到比能耗最小化, 并通过试验验证了优化结果的可靠性。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

玉米秸秆原料取自广东佛山地区。秸秆经自然风干、粉碎和筛分后粒径在 16~100 目之间。然后置于 105 ℃烘箱至恒质量后, 掺加一定质量的去离子水, 混合均匀后获得水分含量为 8%、16%、24% 的样品, 密封后放置阴凉干燥处保存。试验采用 5 因素的响应面(BBD)设计, 试验变量及取值如表 1 所示。

表 1 试验变量的标识, 参数范围和编码值

Table 1 Experimental variable identification, actual and coded values

试验变量 Variable	水平 Levels		
	-1	0	1
温度 Temperature A/℃	50	100	150
原料水分 Moisture B/%	8	16	24
压缩速度 Velocity C/(mm·min <sup>-1</sup> )	10	30	50
压力 Pressure D/kN	4	7	10
保压时间 Holding time E/s	10	30	50

收稿日期: 2015-11-11 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目(2012B090400025); 广东省省级科技根本计划项目(2013A090100008)

作者简介: 王功亮, 男, 湖北黄冈人, 主要从事生物质成型方面的研究。广州, 中国科学院广州能源研究所, 510640。Email: wanggl@ms.giec.ac.cn

\*通信作者: 姜洋, 男, 辽宁营口人, 副研究员, 主要从事生物质能利用技术研究。广州, 中国科学院广州能源研究所, 510640。Email: jiangyang@ms.giec.ac.cn

压缩试验在 WD-100KE 型电子万能试验机上进行, 试验模具如图 1 所示。压力机压杆直径 10.0 mm, 模具直径 10.2 mm。试验过程中, 温度采用加热带、热电偶和温控仪进行加热和控制, 待温度达到设定温度并保持稳定后, 向模具中加入 1.5 g 原料, 然后调用压缩程序(设定压缩速度、目标压力值、保压时间)对原料压缩成型, 完毕后将颗粒挤出。

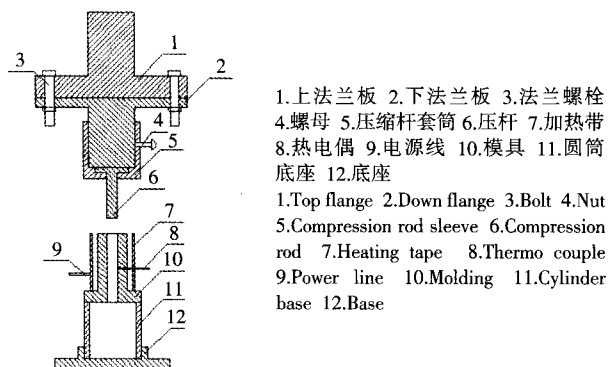


图 1 成型试验模具图

Fig.1 Assembly drawing of compression molding experiment

## 1.2 成型技术指标的测试方法

### 1.2.1 比能耗 SEC

根据压缩成型过程中压力-位移曲线计算颗粒压缩过程的比能耗。计算公式如下

$$SEC = \frac{W}{m} = \frac{\int f \cdot ds}{m} \quad (1)$$

式中 SEC 为压缩过程比能耗, kJ/kg;  $W, m, f, s$  分别为压缩过程的总能耗(J)、颗粒质量(g)、压力(kN)、位移(mm)。

### 1.2.2 松弛密度 RDS

将颗粒挤出后密封保存, 两周后测量直径、长度和质量, 计算颗粒的密度, 此密度即为松弛密度。计算公式如下

$$RDS = \frac{4m}{\pi d^2 l} \quad (2)$$

式中 RDS 为颗粒的松弛密度, kg/m<sup>3</sup>;  $m, d, l$  分别为颗粒的质量(kg)、直径(m)和长度(m)。

### 1.2.3 Meyer 强度 $H_m$

将储存两周的颗粒水平放置在压杆下端, 使压杆正对颗粒中心位置, 调用 Meyer 强度测试程序。压杆下行时压力-位移曲线中压力快速升高后突然下降的点对应颗粒的破碎点。下行速度设定为 5 mm/min。Meyer 强度定义为压碎颗粒时, 单位压痕面积上的作用力<sup>[7-9]</sup>。计算公式如下

$$H_m = \frac{F}{\pi h(D-h)} = \frac{F}{\pi(x_2-x_1)(D-x_2+x_1)} \quad (3)$$

式中  $H_m$  为颗粒的 Meyer 强度, N/mm<sup>2</sup>;  $F, h(h=x_2-x_1), D, x_2, x_1$  分别为颗粒破碎时的压力(N)、压杆压入的深度(mm)、压杆的直径(mm)、颗粒破碎时压杆的位移(mm)、曲线中压力由 0 开始上升时压杆的位移(mm)。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 响应面试验结果

试验参数和相应的响应值如表 2 所示。在选取的参数范

围内, 松弛密度的变化范围为 560.8~1254 kg/m<sup>3</sup>; Meyer 强度的变化范围为 0.41~93.41 N/mm<sup>2</sup>; 比能耗的变化范围为 7.36~34.46 kJ/kg。试验制取的部分颗粒样品实物如图 2 所示。

表 2 BBD 试验设计的试验变量和响应的平均值

Table 2 Average of BBD experiment design variables and response

编号 No	A/ °C	B/ %	C/ (mm·min <sup>-1</sup> )	D/ kN	E/ s	松弛密度 Relaxed density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	Meyer 强度 Meyerhardness/ (N·mm <sup>-2</sup> )	比能耗 Specific energy consumption/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	50	16	50	7	30	910	14.22	30.47
2	50	16	30	4	30	817	7.38	24.39
3	50	16	30	10	30	928	13.96	34.46
4	50	16	30	7	50	901	13.97	27.98
5	50	16	30	7	10	889	9.38	31.74
6	50	16	10	7	30	896	12.41	31.36
7	50	8	30	7	30	929	8.07	32.64
8	50	24	30	7	30	561	0.41	17.64
9	100	24	30	10	30	780	7.74	13.23
10	100	24	30	7	10	749	6.48	11.06
11	100	8	30	7	10	1 130	45.54	16.23
12	100	16	10	7	10	1 055	36.64	14.09
13	100	16	30	7	30	1 035	31.06	13.8
14	100	16	50	10	30	1 055	36.4	14.37
15	100	16	30	10	10	1 062	35.56	14.09
16	100	24	50	7	30	745	6.20	12.02
17	100	16	10	7	50	1 052	29.08	13.14
18	100	16	30	4	50	1 038	30.74	10.40
19	100	24	30	4	30	771	5.33	7.36
20	100	8	50	7	30	1 153	43.68	16.79
21	100	8	30	4	30	1 084	44.78	12.81
22	100	16	50	7	10	1 053	34.13	12.82
23	100	8	30	10	30	1 146	61.19	19.74
24	100	16	30	7	30	1 013	25.78	13.32
25	100	16	30	7	30	982	28.21	11.15
26	100	8	30	7	50	1 145	54.49	18.56
27	100	24	10	7	30	724	5.42	9.54
28	100	16	10	4	30	959	20.01	8.74
29	100	8	10	7	30	1 130	50.8	17.08
30	100	16	30	7	30	994	26.40	10.80
31	100	16	30	7	30	995	25.57	11.27
32	100	16	50	7	50	994	20.11	10.50
33	100	24	30	7	50	772	5.51	10.29
34	100	16	30	10	50	983	23.00	12.06
35	100	16	30	4	10	952	16.98	9.30
36	100	16	50	4	30	958	17.12	10.69
37	100	16	10	10	30	972	26.64	11.95
38	100	16	30	7	30	970	27.20	10.46
39	150	16	30	7	50	1 188	84.26	22.42
40	150	16	30	10	30	1 254	82.6	25.00
41	150	24	30	7	30	1 200	67.22	24.03
42	150	16	10	7	30	1 218	93.41	22.46
43	150	16	30	7	10	1 189	80.25	21.93
44	150	8	30	7	30	1 167	56.79	26.16
45	150	16	30	4	30	1 131	66.87	18.98
46	150	16	50	7	30	1 211	75.96	25.27

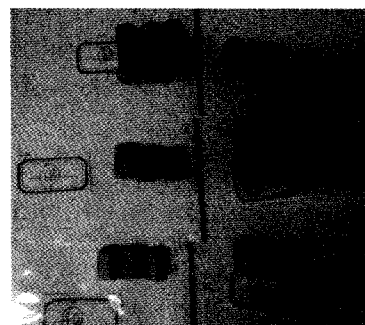


图 2 部分成型颗粒的实物图

Fig.2 Portion pictures of corn stover pellet

## 1) 松弛密度

从表 2 中可看出温度由 50 ℃ 提高到 150 ℃ 时, 松弛密度增加(26%、35%、114%); 水分由 8% 提高到 24% 时, 松弛密度减小(29%、34%、40%); 压力由 4 kN(51.0 MPa) 提高到 10 kN(127.3 MPa) 时, 松弛密度增大(1%、6%、14%); 压缩速度由 10 mm/min 增大到 50 mm/min 和保压时间由 10 s 增大到 50 s 时, 松弛密度变化趋势不明显且变化率相对较小。这说明温度、水分和压力对松弛密度影响较大, 而压缩速度和保压时间影响相对较小。

## 2) Meyer 强度

温度由 50 ℃ 提高到 150 ℃ 时, Meyer 强度增加(434%、503%、806%); 水分由 8% 提高到 24% 时, Meyer 强度减小(86%、90%、95%); 压力由 4 kN 提高到 10 kN, Meyer 强度增大(24%、45%、113%); 压缩速度由 10 mm/min 增大到 50 mm/min 和保压时间由 10 s 增大到 50 s 时(松弛密度变化率相对较小且变化趋势不明显。这说明温度、水分和压力对 Meyer 强度影响较大, 而压缩速度和保压时间影响相对较小。

## 3) 压缩比能耗

温度由 50 ℃ 提高到 100 ℃ 时, 比能耗减小(46%、49%、64%), 温度由 100 ℃ 提高到 150 ℃ 时, 比能耗增加(56%、74%、152%); 水分由 8% 提高到 24% 时, 比能耗减小(8%、33%、46%); 压力由 4 kN 提高到 10 kN 时, 比能耗提高(16%、54%、80%); 压缩速度由 10 mm/min 增大到 50 mm/min 和保压时间由 10 s 增大到 50 s 时, 比能耗变化率相对较小且变化趋势不明显。

## 2.2 模型与方差分析

首先对数据进行回归分析, 选择最优模型, 然后进行逐步回归分析, 剔除不显著项, 得到最终模型。对于方差分析的结果评价遵从以下规则: 调整  $R^2$  及预测  $R^2$  值均接近 1, 且二者的差值均在 0.2 以内的模型较好。各响应变量选择的模型及方差分析的结果如表 3 所示, 从其数值可知模型拟合较好<sup>[10-11]</sup>。

表 3 响应变量的方差分析

Table 3 ANOVA of response variables

响应变量 Response variable	选择的模型 Selected model	$R^2$	Adj $R^2$	Predicted $R^2$	充足性精度 Adeq precision
松弛密度 Relaxed density	改进二次模型	0.933 8	0.921 6	0.831 9	38.700
Meyer 强度 Meyer hardness	简化四次模型	0.885 1	0.873 9	0.839 4	33.954
比能耗 Specific energy consumption	改进二次模型	0.940 3	0.932 8	0.896 8	41.453

表 4 是逐步回归后各响应变量的方差分析结果。从中可以看出, 各个模型的  $P$  值均小于 0.05, 这表明模型是显著的。模型的失拟检验  $P$  值大于 0.05, 在统计上不显著, 不显著的失拟检验  $P$  值表明模型与数据一致相符。基于这些结果可以看出, 模型能够充分的描述 3 个响应变量, 响应面模型的预测和优化是合理的。最终的回归模型(公式中剔除了不显著项, 因为不显著项对响应变量有影响的概率小)以编码值作为自变量的公式如(4)、(5)、(6)所示。

$$RDS=1\ 008.84+170.45A-161.38B+29.44D+100.33AB+32.41A^2-67.81B^2. \quad (4)$$

$$H_m=27.59+34.34A-21.98B+4.87D+4.52AB-4.82AC-6.58DE+18.63A^2+22.68A^2B-5.45AB^2-5.40C^2E-13.10A^2B^2. \quad (5)$$

$$SEC=12.59-2.78A-3.43B+2.64D+3.22AB+13.47A^2. \quad (6)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别代表温度、原料水分、压缩速度、压力和保压时间, 其数值都采用编码值。

表 4 松弛密度、比能耗和 Meyer 强度方差分析

Table 4 ANOVA of RDS, SEC and Meyer

参数 Parameters	松弛密度 Relaxed density		比能耗 Specific energy consumption		Meyer 强度 Meyer hardness	
	$F$ 值	$P$ 值	$F$ 值	$P$ 值	$F$ 值	$P$ 值
模型 Model	83.21	<0.000 1	126.01	<0.000 1	147.38	<0.000 1
$A$	231.74	<0.000 1	32.98	<0.000 1	846.23	<0.000 1
$B$	207.73	<0.000 1	50.24	<0.000 1	346.88	<0.000 1
$D$	6.91	0.012 2	29.79	<0.000 1	22.68	<0.000 1
$AB$	20.07	<0.000 1	11.07	0.001 9	4.89	0.0338
$AC$	-	-	-	-	5.55	0.0244
$DE$	-	-	-	-	10.36	0.0028
$A^2$	5.34	0.026 2	505.98	<0.000 1	177.93	<0.000 1
$B^2$	23.38	<0.000 1	-	-	-	-
$A^2B$	-	-	-	-	92.27	<0.000 1
$AB^2$	-	-	-	-	5.34	0.027 1
$C^2E$	-	-	-	-	6.96	0.012 5
$A^2B^2$	-	-	-	-	30.79	<0.000 1
失拟检验 Lack of fit	4.16	0.0582	2.04	0.2193	4.48	0.050 4

## 2.3 试验参数的交互作用分析

根据表 4 可知, 在模型的交叉项中只有  $AB$  是 3 个响应值的显著性影响项( $P<0.05$ ), 故只对温度和水分的作用予以讨论。由回归方程(4)、(5)、(6) 利用 Design-expert 绘制响应面图。当其他变量处于中间值时, 温度和水分两因素影响的云图如图 3 所示。

从图 3a 和 3b 看出, 水分含量和温度同时提高时, 能够保持松弛密度和 Meyer 强度不变, 这是因为水分和温度之间存在相互作用, 对于成型来说, 存在合适的水分含量。水分是天然的黏结剂, 水分能增大范德华力和形成氢键, 促进成型, 但是水分含量较高时, 多余的水分分布于粒子层之间, 使得粒子层间不能紧密贴合<sup>[12-13]</sup>。木质素的融化温度约为 140 ℃<sup>[14-15]</sup>, 提高温度除了有助于生物质软化、融化, 增加木质素的黏性, 并在压力的作用下在粒子间流动, 起到黏结剂的作用, 促进粒子间的粘合, 冷却后颗粒强度增加, 同时也有助于蒸发多余的水分, 使水分保持在合适的范围<sup>[2,16-17]</sup>。

从图 3c 可以看出, 温度低于 100 ℃ 时, 水分含量减少和温度提高, 能够保持比能耗不变; 温度高于 100 ℃ 时, 水分含量和温度同时提高, 能够保持比能耗不变。这是因为生物质成型主要利用木质素的软化粘结作用, 而水分含量影响木质素的软化温度, 适当的水分含量能够促进木质素的软化<sup>[18]</sup>。此外, 水分本身可起到润滑剂的作用, 使粒子间的内摩擦变小, 使原料和模具间摩擦阻力减小, 流动性增强, 促进粒子相互嵌合<sup>[19]</sup>。另外, 多余的水分还可促进原料中果胶质和糖类及油类等物质的析出, 与这类物质

共同形成润滑剂。在 100 °C 以前,随着温度的升高,木质素的软化粘合作用增强,水分含量的降低能够保持木质素软化过程中适当的水分含量,从而达到比能耗不变;在

100 °C 以后,木质素的软化粘合作用已经达到最大,随着温度的升高,水分蒸发作用增强,因此,需要水分含量的提高来保持比能耗不变。

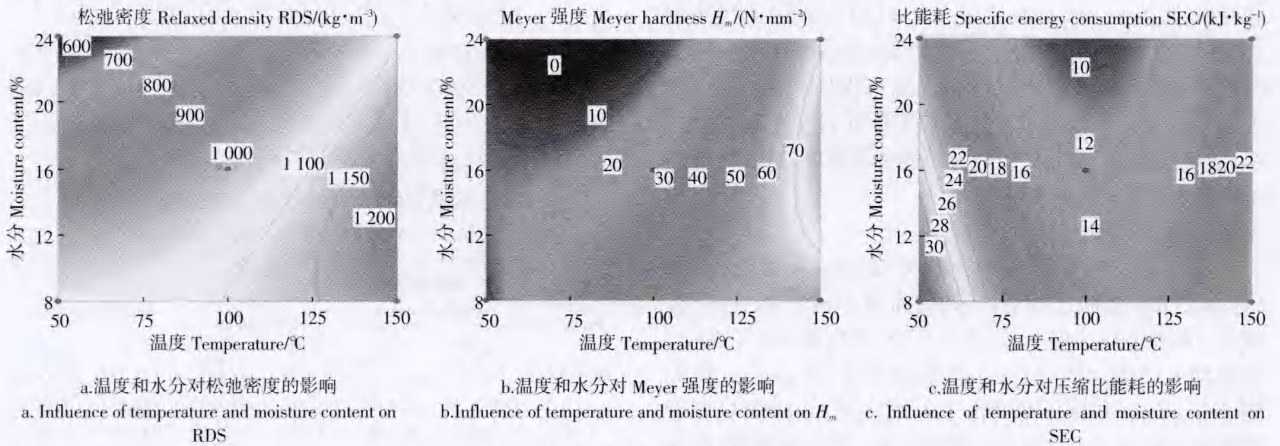


图3 温度和水分对成型的影响

Fig.3 Influence of temperature and moisture on molding

2.4 工艺参数最优化与验证试验

考虑到成型颗粒密度和比能耗不能同时达到最优值,根据国内的成型燃料标准<sup>[20]</sup>,其中要求颗粒的松弛密度不小于 1 000 kg/m<sup>3</sup>。而颗粒的 Meyer 强度与松弛密度间存在一定的相关关系,此时机械强度基本能满足使用要求。故将优化的条件设定为:松弛密度不小于 1 000 kg/m<sup>3</sup>,比能耗最小。使用 Design Expert 8 基于此优化条件进行工艺参数最优化。通过计算得出最佳的工艺参数为:压力为 4 kN (51.0 MPa),温度为 110.8 °C,水分为 17%,压缩速度 10~50 mm/min,保压时间 10~50 s。此时比能耗为 9.65 kJ/kg, Meyer 强度值为 28.6 N/mm<sup>2</sup>。

为了验证模型预测结果的可靠性,采用模型优化的工艺参数进行试验,设置 8 次重复试验,结果如表 5 所示。从表中可以看出,压缩速度和保压时间对最优化的结果影响小,松弛密度、Meyer 强度、比能耗实测值与预测值的相对误差依次为 3.01%、5.54%、3.79%。预测值和实测值吻合良好,模型拟合度较好。

表 5 验证试验结果

Table 5 Experiment data for test validation

参数 Parameter	松弛密度 Relaxed density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	Meyer 强度 Meyer hardness/ (N·mm <sup>-2</sup> )	比能耗 Specific energy consumption/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
试验平均值 Mean of test	1031	27.1	10.03
预测值 Predicted value	1000	28.6	9.65
相对误差 Relative error/%	3.01	5.54	3.79

注:速度=30 mm·min<sup>-1</sup>,压力=7 kN,保压时间=30 s。

Note: Velocity is 30 mm·min<sup>-1</sup>; Pressure is 7 kN; Holding time is 30 s.

3 结论

本文选取颗粒的松弛密度、Meyer 强度、压缩过程比能耗作为成型的 3 个技术指标,研究了温度、原料水分含量、压缩速度、压力大小、保压时间 5 个参数对技术指标的影响,建立了响应面模型,并获得了最优的工艺参数。

1) 在所选取的参数范围内,温度、原料水分、压力大小均会对上述 3 个成型技术指标产生显著影响;而压缩速度和保压时间所产生的影响相对较小。

2) 在松弛密度满足成型燃料标准,成型比能耗最小的条件下,成型的最佳工艺参数组合为:压力为 4 kN (51.0 MPa)、温度为 110.8 °C、水分为 17%,在该工况下,松弛密度为 1 031 kg/m<sup>3</sup>, Meyer 强度为 27.1 N/m<sup>2</sup>,比能耗为 10.03 kJ/kg。

[参考文献]

[1] Lam P Y, Lam P S, Sokhansanj S, et al. Effects of pelletization conditions on breaking strength and dimensional stability of Douglas fir pellet[J]. Fuel, 2014, 117: 1085-1092.

[2] Stelte W, Clemons C, Holm J K, et al. Fuel pellets from wheat straw: The effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties[J]. Bioenergy Research, 2012, 5(2): 450-458.

[3] Castellano J M, Gomez M, Fernandez M, et al. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses[R]. Fuel, 2015: 629-636.

[4] Lu D, Tabil L G, Wang D, et al. Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 69: 287-296.

[5] 涂德洽, 李安心, 何贵生. 水稻秸秆与木屑混合原料热压成型试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 205-211.

Tu Deyu, Li Anxin, He Guisheng. Hot pressing forming experiment of the rice straw and sawdust mixed material [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 205-211. (in Chinese with English abstract)

[6] 农业部规划设计研究院, 北京盛昌绿能科技有限公司, 江苏正昌集团公司. 生物质固体成型燃料试验方法第 8 部分: 机械耐久性[R]. 行业标准-农业, 2010.

[7] Li H, Liu X H, Legros R, et al. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets[J]. Applied Energy, 2012, 93: 680-685.

[8] Peng J H, Bi H T, Lim C J, et al. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(2): 967-974.

[9] Lam P S, Sokhansanj S, Bi X T, et al. Energy input and quality of pPellets made from steam-exploded douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(4): 1521-1528.

[10] Zafari A, Kianmehr M H. Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost[J]. Environmental Technology,

- 2014, 35(4): 478–486.
- [11] Tumuluru J S, Tabil L G, Song Y, et al. Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes[J]. *Bioenergy Research*, 2015, 8(1): 388–401.
- [12] 谢启强. 生物质成型燃料物理性能和燃烧特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- Xie Qiqiang. Studies on the Physical Performance and Combustion Characteristic of the Biomass Densification Briquetting Fuel[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [13] Carone M T, Pantaleo A, Pellerano A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(1): 402–410.
- [14] 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 & Bioenergy*, 2006, 30(7): 648–654.
- [15] Van Dam J E G, Van Den Oever M J A, Teunissen W, et al. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk-Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, 19(3): 207–216.
- [16] Kaliyan N, Morey R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 1082–1090.
- [17] Thomas M, Van Vliet T, Van Der Poel A F B. Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1998, 70(1/2): 59–78.
- [18] Irvine G M. The Glass Transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential Thermal-Analysis[J]. *Tappi Journal*, 1984, 67(5): 118–121.
- [19] 张静, 郭玉明, 负慧星. 原料含水率对生物质固体燃料成型效果的影响[J]. *山西农业科学*, 2012(1): 65–67.
- [20] 生物质成型燃料——北京市地方标准[C]/2009 第三届中国民用炉具研讨会暨产品展示会、2009 生物质成型燃料加工设备及技术交流会, 2009.

## Process optimization of corn stover compression molding experiments based on response surface method

Wang Gongliang<sup>1,2</sup>, Jiang Yang<sup>1,3\*</sup>, Li Weizhen<sup>1</sup>, Yin Xiuli<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou, 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The compression process parameters (preheating temperature, raw material moisture content, compression speed, compression force, and the holding time etc.) have great influence on the energy consumption and product quality of biomass pellet. Choosing the optimal parameters can improve the pellet quality, as well as reduce energy consumption of molding. Meyer hardness is an important strength index, it reflects the solid's ability to resist deformation. Meyer strength is used to characterize the durability because it's difficult to measure durability in a single pellet formation experiment with standard method. Response surface method is an effective method of parameter optimization. In this research, we used a five-factor BBD experimental design to determine the effects of the raw material moisture content (8%–24%), the preheating temperature (50–150 °C), compression speed (10–50 mm/min), compression force (51.0–127.4 MPa), the holding time (10–50 s) to the three technical indicators (pellet relaxed density, Meyer hardness, and specific energy consumption). The result showed that within the scope of selected experimental parameters, preheating temperature, material moisture content, and compression force had a larger influence on the three technical indicators, while the impact of compression speed and the holding time was relatively small. With preheating temperature going up from 50 °C to 150 °C, pellet relaxed density and Meyer hardness increased obviously. When preheating temperature was less than 100 °C, specific energy consumption reduced with preheating temperature increasing. While preheating temperature was more than 100 °C, with increase of the preheating temperature, specific energy consumption rose. With raw material moisture content going up from 8% to 24%, pellet relaxed density, Meyer hardness and specific energy consumption decreased rapidly. With compression force going up from 51.0 to 127.4 MPa, pellet relaxed density, Meyer hardness and specific energy consumption increased clearly. ANOVA analysis was done with the original data, the model was optimized, and a response surface model was established. Relaxed density was fitted with improved quadratic model. Meyer hardness was fitted with simplified quartic model, and specific energy consumption was fitted with another improved quadratic model. Relaxed density, Meyer hardness and specific energy consumption can be calculated through process parameters with the established model, which was used to predict the experimental result. From the model, we concluded that preheating temperature interacted with raw material moisture content. With preheating temperature and raw material moisture content going up, relaxed density and Meyer hardness can remain the same. When preheating temperature was below 100 °C, preheating temperature went up and raw material moisture content went down. Specific energy consumption can remain the same. When preheating temperature was above 100 °C, preheating temperature and raw material moisture content went up, specific energy consumption remained the same. And that was consistent with bonding mechanism of moisture and lignin. Considering the existing biomass pellet fuel standard, the relaxed density shouldn't be less than 1000 kg/m<sup>3</sup>. In the meantime, Meyer hardness can meet the practical requirements. So the requirement of optimization was set as: relaxed density not less than 1000 kg/m<sup>3</sup>, minimize specific energy consumption. The optimal process parameters were obtained from the model with Design Expert 8.0. The optimal process parameters were: 4 kN (51.0 MPa) for pressure, 110.8 °C for temperature and 17% for moisture content. The compression speed and the holding time had little effect on optimization results. Experiment was performed with the optimal process parameters to validate the optimization of process parameters prediction. For relaxed density, Meyer hardness and specific energy consumption relative error between measured and predicted, was 3.01%, 3.79%, 5.54%, respectively. Prediction result was reliable and the model was validated.

**Keywords:** straw; optimization; fuels; compression; Meyer hardness