

立式环模秸秆压块成型机作业参数优化

庞利沙^{1,2}, 孟海波¹, 赵立欣¹, 姚宗路^{1*}, 田宜水¹, 侯书林²

(1. 农业部规划设计研究院, 农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;

2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 针对秸秆压块成型燃料生产过程中, 由于作业参数不当造成的生产率低、成型燃料质量低、能耗高等问题, 以玉米秸秆为原料, 通过正交试验, 研究原料的粒度、含水率及压块机模辊间隙 3 种工艺参数的不同组合对生产率、压块燃料成型率、密度、机械耐久性及吨产品能耗的影响。结果表明: 从提高成型燃料质量方面来考虑, 最佳工艺参数组合为原料粒度为 10~20 mm、含水率为 15%、模辊间隙为 2 mm, 从提高生产率和降低吨产品能耗方面来考虑, 最佳工艺参数组合为原料粒度为 10~20 mm、含水率为 20%、模辊间隙为 2 mm。在实际使用中, 根据压块燃料成型率、密度和机械耐久性的质量要求, 在能达到使用要求的情况下, 可在含水率 10%~20% 的范围内, 适当提高含水率, 有利于提高生产率和降低吨产品能耗。

关键词: 秸秆, 燃料, 优化, 秸秆压块成型机, 成型燃料, 粒度, 含水率, 模辊间隙

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.023

中图分类号: S216.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0166-08

庞利沙, 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): 166—172.

Pang Lisha, Meng Haibo, Zhao Lixin, et al. Optimization of operating parameters for vertical ring mold straw briquetting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 166—172. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国是农业大国, 具有丰富的农作物秸秆资源^[1-3], 据统计, 年产量可达 6 亿 t 左右^[1,4-5], 充分利用这些资源, 既可缓解能源紧张问题, 又有益于环境保护^[6-8]。生物质成型燃料技术是将松散的农作物秸秆在一定压力作用下压缩成具有一定形状的成型燃料, 具有密度高、体积小、便于储存和运输等优点^[9], 近年来发展迅速, 日益受到人们的广泛关注, 也是今后生物质能利用的主要发展方向之一^[10]。

目前生物质固体成型燃料包括颗粒燃料和压块燃料, 生物质压块燃料因其具有燃烧性能好、产品价格低、生产率高等优点, 而具有较强的市场竞争力^[11-13]。其中用于生产压块燃料的立式环模成型机因其具有生产率较高、能耗较低、环模寿命较长等优点, 已经逐渐成为主流机型^[14-15]。现阶段, 生物质成型燃料技术研究热点和难点在于如何降低

生产过程的能耗、提高成型燃料的生产率与成品质量、延长成型设备使用寿命等^[16]。国内外模辊式成型机成型工艺的研究, 或为仅针对生物质原料的种类、粒度、含水率等工艺参数^[17-21], 或为仅针对成型机的压辊转速、模辊间隙等工艺参数, 且多为针对颗粒燃料成型机的^[22], 对于以玉米秸秆为原料的模辊式压块成型机的原料工艺参数和成型机工艺参数共同考虑的对成型影响的研究较少。

本文以玉米秸秆为原料, 对原料工艺参数(原料粒度、含水率)和成型机的主要工艺参数(模辊间隙)进行试验, 研究 3 种工艺参数相互作用下的不同组合对成型的生产率、成型燃料吨产品能耗、成型率、机械耐久性和密度等指标的影响规律, 为提高生产率、成型燃料质量、降低能耗等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选择山东省泰安市 2012 年度的玉米秸秆为原料, 主要通过对原料的粒度和含水率的调节, 将试验原料分 3 批粉碎, 分别粉碎至粒度为 10~20、20~30 和 30~40 mm 3 种, 对照正交试验表, 将不同粒度的原料, 分别调节至相应含水率, 堆放至少 4 m 高度, 回性 48 h 后进行试验。

收稿日期: 2013-04-02 修订日期: 2013-10-25

基金项目: “十二五” 国家科技计划课题 (2012BAD30B0201)

作者简介: 庞利沙 (1988—), 女, 河南安阳人, 主要从事生物质资源开发利用方面研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

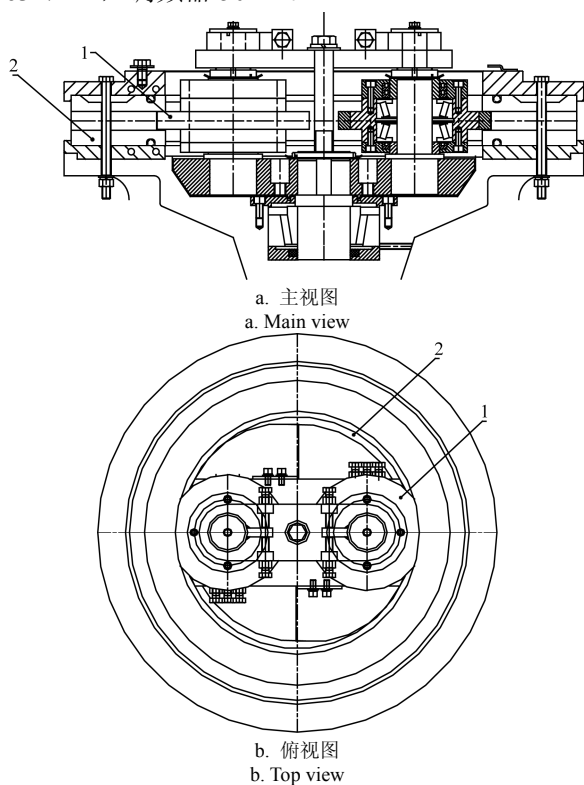
Email: pls010@yahoo.cn

*通信作者: 姚宗路 (1980—), 男, 山东临沂人, 博士, 主要从事生物质资源开发利用方面研究。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: yaozonglu@163.com

1.2 试验设备

本试验所采用的成型机是立式环模秸秆压块成型机，其主要工作部件是 2 个圆环压辊和与其配合的环模，如图 1 所示。工作时主电机带动 2 个压辊转动，考虑到磨损的因素，压辊公转的同时还通过与物料之间的摩擦力绕压辊轴自转，将原料压入环模孔当中，环模孔中的原料越来越多，密度越来越大，随着后续原料的进入，方形的成型块从环模孔当中被不断挤出，在自身重力作用下，折断成一定长度的成型燃料，其生产出的成型燃料如图 2 所示，试验用立式环模秸秆压块成型机的模块出口尺寸为 32 mm×32 mm。在试验过程中，需要控制进料速度，防止因进料量过多，而导致堵塞、闷机。试验用成型机的额定生产率为 1 200~1 500 kg/h，主机额定功率为 60 kW，模辊间隙可调，主轴转速 163 r/min，调频器 50 Hz。



1. 压辊 Compression roller 2. 环模 Circular mould
图 1 立式环模秸秆压块成型机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of vertical ring mold biomass briquette forming machine



图 2 生物质压块成型燃料
Fig.2 Biomass briquetting fuel

其他试验设备与仪器包括粉碎机、秒表、弹簧秤（精度 10 g）、游标卡尺、101 1A 型电热鼓风干燥箱、PL2002/01 型电子天平（精度 0.01 g）、KEW6310 电能质量分析仪、BSA223S CW 型分析天平（赛多利斯，精度 0.1 mg）、KER2400 型转鼓试验机、游标卡尺、喷雾器、边长为 25.6 mm 的铁丝筛网等。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

本试验主要针对涉及压块作业时，可调节的原料粒度、含水率和立式环模秸秆压块成型机的模辊间隙共 3 个作业参数，进行正交试验，考察其对成型机的生产率、成型燃料的成型率、密度、机械耐久性和吨产品能耗的影响。前期研究已经有单独针对模辊间隙、粒度、含水率的单因素试验，得 3 个因素的较佳取值范围，本试验目的在于找出 3 种因素不同组合情况下对成型机及成型燃料性能的影响，所以选择模辊间隙 1~2 mm，为使所选因素水平具有代表性，选一个最大值 2 mm，一个最小值 1 mm，间隔 0.5 mm，取中间值 1.5 mm；同理，粒度分别为 10~20、20~30 和 30~40 mm，含水率分别为 10%、15%和 20%进行正交试验，测量不同工艺参数组合情况下的生产率、成型燃料的成型率、密度、机械耐久性和吨产品能耗，3 因素的各水平取值及正交试验表分别见表 1、表 2^[23]。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平 Levels	含水率 A Moisture content/%	粒度 B Particle size/mm	模辊间隙 C Clearances between die and rolls/mm
1	10	10~20	1
2	15	20~30	1.5
3	20	30~40	2

表 2 正交试验表 L9 (3⁴)

Table 2 Orthogonal table L9 (3⁴)

试验号 Test No.	列号 Column number			
	含水率 A Moisture content/%	粒度 B Particle size/mm	模辊间隙 C Clearances between die and rolls/mm	空列 Blank group
1	1 (10)	1 (10~20)	1 (1)	1
2	1 (10)	2 (20~30)	2 (1.5)	2
3	1 (10)	3 (30~40)	3 (2)	3
4	2 (15)	1 (10~20)	2 (1.5)	3
5	2 (15)	2 (20~30)	3 (2)	1
6	2 (15)	3 (30~40)	1 (1)	2
7	3 (20)	1 (10~20)	3 (2)	2
8	3 (20)	2 (20~30)	1 (1)	3
9	3 (20)	3 (30~40)	2 (1.5)	1

1.3.2 试验指标及测定方法

1) 生产率

确认成型设备工作稳定后,在样机出料口处接取样品,每次接取样品时间不得少于 1 min,接取样品质量不得少于 20 kg,磅秤称量,并用秒表记录接取样品时间。重复试验 5 次,每次时间间隔不少于 5 min。计算小时生产率公式如下

$$Q = 3600 \frac{m(1-H)}{t(1-0.2)} \quad (1)$$

式中, Q 为工作小时生产率, kg/h; m 为每次接取的样品质量, g; H 为成型燃料含水率, %; t 为每次接取样品时间, s。

取 5 次重复测定的算术平均值。

2) 压块燃料成型率

在样机出料口处用接斗接取 2 kg 样品,空气冷却至样品温度不高于环境温度 8℃时,按照成型燃料规格用边长为 25.6 mm 的方孔筛筛分,然后用盘秤称量筛上物质量,重复测定 3 次。计算公式如下

$$X = \frac{m_a}{m_b} \times 100\% \quad (2)$$

式中, X 为成型率, %; m_a 为冷却样品筛分后筛上物质量, g; m_b 为冷却样品筛上物总质量, g。

取 3 次重复测定的算术平均值。

3) 压块燃料密度

由于本试验所生产的压块燃料规格较大,可直接测量其体积和质量,所以用立体体积估算法可以测出压块燃料密度,具体计算公式如下

$$\rho = \frac{m}{a_1 \times a_2 \times l} \quad (3)$$

式中, ρ 为压块燃料密度, g/cm³; m 为单个压块燃料质量, g; a_1 、 a_2 分别为压块燃料方形断面的 2 个底边长度, mm; l 为压块燃料长度, mm。

4) 压块燃料机械耐久性

将制备 (1±0.1) kg 的样品放入转鼓以 (40±1) r/min 的速度旋转 (500±1) 转,然后将样品通过试验筛,筛网孔径约等于压块直径(或对角线)的 2/3,约为 Φ30 mm,根据 ISO 3310-1 在 Φ16~45 mm 孔径范围选择 Φ30 mm 的试验筛,人工振动一段时间进行筛分,保证压块间完全分离,计算公式为

$$DU = \frac{m_A}{m_B} \times 100 \quad (4)$$

式中, DU 表示压块燃料机械强度, %; m_B 为转鼓处理前未筛分的样品质量, g; m_A 为转鼓处理后筛分过的筛上样品质量, g。

重复进行 2 次试验,计算结果的平均值。

5) 吨产品能耗

指立式环模秸秆压块成型机生产 1 t 燃料所消耗的电量,计算公式如下

$$W = 1000 \frac{P}{Q} \quad (5)$$

式中, W 为吨燃料能耗, (kW·h)/t; P 为每小时消耗的电能, kW·h。

刚生产出的压块燃料温度很高,可达 80~120℃,需放置一段时间,进行冷却除湿,等成型燃料温度不高于室温 80℃时,方可对其进行测量。

2 结果与分析

正交试验结果如表 3。

2.1 各因素对生产率的影响

实际生产中,为了提高经济效益,人们希望生产压块燃料的生产率越高越好。不同工艺参数组合情况下的生产率情况见表 3,对生产率的方差分析见表 4,表 4 表明,影响生产率的 3 个因素主次顺序为:含水率 A>模辊间隙 C>粒度 B。且通过分析表 3 中不同因素对生产率的影响情况可以得出影响生产率的最优组合为 A₃B₁C₃,即含水率为 20%、粒度为 10~20 mm、模辊间隙为 2 mm 时,生产压块燃料的生产率为最高。

2.2 各因素对压块燃料成型率的影响

农业行业标准中^[24]要求,压块燃料的成型率不得小于 90%,由表 3 可见,各组试验中,压块燃料成型率虽均能达到标准要求,但成型率最高为试验 5 的 98.29%,最低为试验 9 的 92.65%,说明不同工艺参数组合对压块燃料成型率影响较大。由表 5 可知,影响成型率的 3 个因素主次顺序为含水率 A>模辊间隙 C>粒度 B,且通过分析表 3 中不同因素对成型率的影响情况可以得出影响成型率的最优组合为 A₁B₂C₃,即含水率为 10%,模辊间隙为 2 mm,原料粒度对成型率的影响不显著,取值可以照顾生产率而取值 B₁,所以取粒度为 10~20 mm,即影响成型率的最优组合为 A₁B₁C₃。

2.3 各因素对压块燃料密度的影响

农业行业标准中^[25],压块燃料的基本性能要求其密度≥0.8 g/cm³,由表 3 可知,不同工艺参数组合情况下,压块燃料密度最小为 0.904 g/cm³,均满足压块燃料基本性能要求,但是由表 6 可知,不同工艺参数对压块燃料密度影响的主次顺序为含水率 A>模辊间隙 C>原料粒度 B,且通过分析表 3 中不同因素对压块燃料密度的影响可知,不同工艺参数的最优组合为 A₁B₁C₃,即含水率为 10%、粒度为 10~20 mm、模辊间隙为 2 mm。

2.4 各因素对压块燃料机械耐久性的影响

压块燃料的基本性能要求其机械耐久性≥95%,但是,由表 3 可见,试验 8 的工艺参数组合情况下压块燃料机械耐久性为 92.44%,而最高机械耐久性

可达 98.78%，说明不同工艺参数组合对压块燃料机械耐久性影响较大，由表 7 可知，不同工艺参数对压块燃料机械耐久性的影响主次顺序为含水率 $A >$ 模辊间隙 $C >$ 原料粒度 B ，通过分析表 3 中压块燃料机械耐久性受不同工艺参数组合的影响情况可知，

影响成型率的最优组合为 A_1BC_3 ，即含水率为 10%，模辊间隙为 2 mm，原料粒度对成型率的影响不显著，取值可以根据生产率的取值 B_1 ，所以取粒度为 10~20 mm，即影响成型率的最优组合为 $A_1B_1C_3$ ，与成型率受不同工艺参数组合的影响规律相同。

表 3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal test results

试验号 Test No.	因素 Factor					试验指标 Test Indicators				
	含水率 A Moisture content/%	粒度 B Particle size /mm	模辊间隙 C Clearances between die and rolls /mm	空列 D Blank		生产率 Q Productivity/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	成型率 X Molding rate/%	密度 ρ Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	机械耐久性 DU Mechanical durability/%	吨产品能耗 W Energy consumption per ton of product /(kW·h·t ⁻¹)
1	1	1	1	1		852.31	94.74	1.173	97.53	46.53
2	1	2	2	2		875.18	98.02	1.055	98.15	45.72
3	1	3	3	3		940.20	96.70	1.185	98.78	41.52
4	2	1	2	3		976.08	95.54	1.021	96.78	42.61
5	2	2	3	1		1060.29	98.29	1.045	97.39	41.37
6	2	3	1	2		884.16	95.12	0.947	96.02	44.97
7	3	1	3	2		1143.40	95.52	1.137	95.51	35.16
8	3	2	1	3		1016.81	93.48	1.008	92.44	38.74
9	3	3	2	1		1037.05	92.65	0.904	94.60	34.83
生产率 Productivity	k_1	889.23	990.60	917.76	983.22					
	k_2	973.51	984.09	962.77	967.58					
	k_3	1065.76	953.80	1047.96	977.70					
	R	176.52	36.79	130.20	15.64					
成型率 Molding rate	k_1	96.49	95.26	94.45	95.22					
	k_2	96.31	96.59	95.40	96.22					
	k_3	93.88	94.82	96.84	95.24					
	R	2.61	1.77	2.39	1.00					
密度 Density	k_1	1.14	1.11	1.04	1.04					
	k_2	1.00	1.04	0.99	1.05					
	k_3	1.02	1.01	1.12	1.07					
	R	0.13	0.10	0.13	0.03					
机械耐久性 Mechanical durability	k_1	98.15	96.61	95.33	96.51					
	k_2	96.73	96.00	96.51	96.56					
	k_3	94.18	96.47	97.23	96.00					
	R	3.97	0.61	1.90	0.56					
吨产品能耗 Energy consumption per ton of product	k_1	44.59	41.44	43.41	40.91					
	k_2	42.98	41.94	41.05	41.95					
	k_3	36.24	40.44	39.35	40.96					
	R	8.35	1.50	4.07	1.04					

注： k_1 、 k_2 、 k_3 分别为对应列 1 水平对应的 3 个试验数据相加的平均值； R ：对应列的 k_1 、 k_2 、 k_3 中最大值与最小值的差。

Note: k_1 , k_2 , k_3 is the average of sum which corresponding to one horizontal row of three test data, respectively; R : the difference between the maximum and minimum values, which corresponding column k_1 , k_2 , k_3 .

表 4 方差分析表（生产率）

Table 4 Analysis of variance table (productivity)

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	F_{α}	显著性 Significance	优方案 Gifted program
A	2	23386.588	123.9512	$F_{0.05(2,2)}=19$	**	A_3
B	2	1156.7324	6.1307	$F_{0.01(2,2)}=99$	N	B_1
C	2	13118.581	69.5298	$F_{0.1(2,2)}=9$	*	C_3
e	2	188.67578		$F_{0.2(2,2)}=4$	N	
总和	8				N	

注：**表示极显著，*表示显著，N 表示不显著，下同。

Note: ** mean is highly significant, * mean is significant, N mean is not significant, the same as below.

表 5 方差分析表（成型率）
Table 5 Analysis of variance table (molding rate)

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	显著性 Significance	优方案 Gifted program
A	2	6.3674847	6.5286	<i>F</i> 0.05(2,2)=19	N	A ₁
B	2	2.552123	2.6167	<i>F</i> 0.01(2,2)=99	N	
C	2	4.3320562	4.4417	<i>F</i> 0.1(2,2)=9	N	C ₃
<i>e</i>	2	0.9753114		<i>F</i> 0.2(2,2)=4	N	
总和	8				N	

表 6 方差分析表（密度）
Table 6 Analysis of variance table (density)

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	显著性 Significance	优方案 Gifted program
A	2	0.0164267	20.3462	<i>F</i> 0.05(2,2)=19	*	A ₁
B	2	0.0078988	9.78350	<i>F</i> 0.01(2,2)=99	N	B ₁
C	2	0.0127011	15.7316	<i>F</i> 0.1(2,2)=9	N	C ₃
<i>e</i>	2	0.0008074		<i>F</i> 0.2(2,2)=4	N	
总和	8					

表 7 方差分析表（机械耐久性）
Table 7 Analysis of variance table (mechanical durability)

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	显著性 Significance	优方案 Gifted program
A	2	12.12336	42.4747	<i>F</i> 0.05(2,2)=19	*	A ₁
B	2	0.3056068	1.07071	<i>F</i> 0.01(2,2)=99	N	
C	2	2.7531094	9.6456	<i>F</i> 0.1(2,2)=9	N	C ₃
<i>e</i>	2	0.2854256		<i>F</i> 0.2(2,2)=4	N	
总和	8					

2.5 不同因素对压块燃料吨产品能耗的影响

对于吨产品能耗，由表 3 看出，不同工艺参数组合情况下吨产品能耗相差较大，最高为试验 1 的 46.53 (kW·h)/t，最低为试验 9 的 34.83(kW·h)/t，两者相差 33.6%，说明不同工艺参数组合对压块燃料吨产品能耗影响较大，由表 8 可知，不同工艺参数对压块燃料吨产品能耗的影响主次顺序为含水率 A>模辊间隙 C>原料粒度

B，通过分析表 3 中不同工艺参数组合对压块燃料吨产品能耗的影响情况可知，不同工艺参数的最优组合为 A₃B₃C₃，即含水率为 20%、模辊间隙为 2 mm，原料粒度对压块燃料吨产品能耗影响不显著，取值可以根据生产率的取值 B₁，所以取粒度为 10~20 mm，即影响压块燃料吨产品能耗的最优组合为 A₃B₁C₃，与生产率受不同工艺参数组合的影响规律相同。

表 8 方差分析表（吨产品能耗）
Table 8 Analysis of variance table (energy consumption per ton of product)

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>F</i> _α	显著性 Significance	优方案 Gifted program
A	2	58.88406	57.00936	<i>F</i> 0.05(2,2)=19	*	A ₃
B	2	1.7542637	1.698413	<i>F</i> 0.01(2,2)=99	N	
C	2	12.501354	12.10335	<i>F</i> 0.1(2,2)=9	N	C ₃
<i>e</i>	2	1.0328841		<i>F</i> 0.2(2,2)=4	N	
总和	8					

2.6 最佳工艺参数的确定

在以上的分析中可以看到，模辊间隙这一工艺参数无论对于 5 个指标当中的哪一个，都是 C₃ 为最佳取值，所以模辊间隙的最佳值就定位 2 mm。原料粒度只对生产率和密度有影响，而试验中无论哪个组合，均满足压块燃料对密度的要求，所以，原料粒度的取值决定于其对生产率的影响，取值为 10~20 mm。

含水率对试验中 5 个指标中的生产率、密度、机械耐久性、吨产品能耗的影响都达到了显著水平，对成型率有一定影响，从生产率方面考虑，含水率

为 20%时，生产率最高；从吨产品能耗方面考虑，含水率为 20%时，生产压块燃料有水分作为润滑剂，使得能耗最低，单从这两方面考虑，含水率 20%为最佳，但是，从压块燃料密度、成型率、机械耐久性方面考虑，含水率为 20%时，会使密度、成型率、机械耐久性均下降，即压块燃料的品质下降，由于水分在环模块中会受热蒸发，使压块燃料膨胀，进而导致密度降低，成型率、机械耐久性降低。因为实际生产中，要尽量做到生产率高而又能耗低，而对于密度、机械耐久性、成型率，可以灵活选择，

所以, 在 5 个指标当中, 生产率和吨产品能耗占的权重比较大。生产过程中, 可以针对不同的用户调节不同的工艺参数组合, 生产不同密度的压块燃料, 以达到最利于用户使用的目标, 例如, 普通农户使用, 可以适当降低压块燃料密度, 使燃料在户用炉具中更充分地燃烧, 提高能源利用率; 而电厂使用, 就可以适当提高压块燃料密度, 使燃料在炉具中更耐烧。同样, 对于机械耐久性, 也可以根据不同情况选择不同工艺参数组合, 生产出不同机械耐久性的压块燃料。机械耐久性主要影响燃料的运输, 根据不同的输送距离, 选择生产不同机械耐久性的燃料, 运输距离近的, 可以结合吨产品能耗和生产率, 选择机械耐久性低一点的工艺参数组合进行生产, 相反, 要选择机械耐久性高的工艺参数组合进行生产。所以, 在对压块燃料的密度、机械耐久性要求不高的时候, 就要尽量满足生产率和吨产品能耗的要求, 含水率取最高值 20%, 但是, 在对密度、机械耐久性要求较高时, 就只能在生产率和吨产品能耗上降低要求, 过低的含水率虽然使压块燃料的密度、机械耐久性较高, 但会对生产率及吨产品能耗产生较大影响, 故选择含水率取较小值 15%。

通过以上每一个因素对压块燃料各指标影响的综合分析, 得出不同情况下生产压块燃料的最佳工艺参数组合, 从提高生产率和降低能耗方面来考虑, 最佳工艺参数组合为 $A_3B_1C_3$, 即含水率 20%、原料粒度 10~20 mm、模辊间隙 2 mm; 从提高成型燃料质量方面考虑, 最佳工艺参数组合为 $A_2B_1C_3$, 即含水率 15%、原料粒度 10~20 mm、模辊间隙 2 mm。

2.7 验证试验

针对不同情况的 2 个最佳工艺参数组合进行验证试验, 含水率 20%、原料粒度 10~20 mm、模辊间隙 2 mm 时, 其 5 个指标分别为生产率 1 227.57 kg/h、成型率 98.86%、密度 1.159 g/cm³、机械耐久性 98.26%、吨产品能耗 35.97 (kW·h)/t; 含水率 15%、原料粒度 10~20 mm、模辊间隙 2 mm 时, 其 5 个指标分别为生产率 1 126.35 kg/h、成型率 99.02%、密度 1.224 g/cm³、机械耐久性 99.13%、吨产品能耗 37.14 (kW·h)/t, 综合分析, 验证试验中所得各指标综合结果优于正交试验中单个试验的综合结果, 即综合考虑生产率、吨产品能耗和压块燃料质量 (包括压块燃料成型率、密度、机械耐久性), 说明工艺参数组合优化可靠。

3 结 论

1) 正交试验结果表明: 原料粒度为 10~20 mm、模辊间隙为 2 mm 的情况为最佳。

2) 含水率从成型率较高的角度来说, 15% 最佳; 但对含水率进行分析可知, 含水率升高, 润滑性好,

有利于生产率的提高及吨产品能耗降低, 但因挤出容易, 会影响压块燃料密度, 使压块燃料成型率、密度、机械耐久性有所降低, 故使用中含水率宜在 10%~20% 范围内, 根据压块燃料成型率、密度和机械耐久性的质量, 在能达到使用要求的情况下, 适当提高生产率有利于生产率的提高和减少能量消耗。

[参 考 文 献]

- [1] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291—296.
Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 291—296. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈彦宏, 武佩, 田雪艳, 等. 生物质致密成型燃料制造技术研究现状[J]. 农机化研究, 2010(1): 206—211.
Chen Yanhong, Wu Pei, Tian Xueyan, et al. The state of the art on densifying technologies of biomass briquette[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(1): 206—211. (in Chinese with English abstract)
- [3] 田宜水, 孟海波, 孙丽英 等. 秸秆能源化技术与工程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [4] 田宜水, 孟海波, 孙丽英, 等. 秸秆能源化技术与工程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [5] 《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》, 国家发展改革委、农业部、财政部, 2011.
- [6] 刘向东, 常同立, 王述洋. 北方秸秆燃料高效应用分析及固化成型技术[J]. 能源研究与信息, 2010, 26(1): 21—28.
Liu Xiangdong, Chang Tongli, Wang Shuyang. Analysis of high-efficiency utilization of straw and the biomass-fuel briquetting technology[J]. Energy Research and Information, 2010, 26(1): 21—28. (in Chinese with English abstract)
- [7] Margaret K Mann Pamela L Spath. Life Cycle Assessment of a Biomass Gasification Combined 2 Cycle Power System[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [8] Pallav Purohit, Arun Kumar Tripathi, Tara Chandra Kandpal. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues[J]. Energy, 2006, 31(6): 1321—1331.
- [9] 欧阳双平, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质固体成型燃料环模成型技术研究进展[J]. 可再生能源, 2011, 29(1): 14—18.
Ouyang Shuangping, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress of annular ring technology for densified biofuel[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(1): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [10] 田宜水. 中国生物质固体成型燃料产业发展分析[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2009, 2: 13—17.
- [11] 何元斌. 生物质压缩成型燃料及成型技术[J]. 农村能源, 1995(5): 12—14.
He Yuanbin. Biomass compression molding fuel and molding technology[J]. Rural Energy, 1995(5): 12—14. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵立欣, 田宜水, 农村绿色能源技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007: 113—118.
- [13] Nalladurai Kaliyana, R. Vance Morey. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337—359.
- [14] Sylvia Larsson. Fuel Pellet Production from Reed Canary Grass[D]. Sweden: Doctoral Thesis of Swedish University of Agricultural Sciences, 2008: 16—21.

- [15] 中华人民共和国农业部. 农业和农村节能减排十大技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [16] 常同立, 刘洋. 固化成型加工秸秆燃料受力分析[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(2): 43—45.
Chang Tongli, Liu Yang. Force analysis of straw stem during the briquetting process[J]. Development and Innovation of Machinery and Electrical Products, 2012, 25(2): 43—45. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙清, 白红春, 谷士艳, 等. 水稻秆颗粒冷压成型工艺条件优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 100—104.
Sun Qing, Bai Hongchun, Gu Shiyun, et al. Optimization of the technology for straw briquette cold press process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李在峰, 雷廷宙, 何晓峰, 等. 玉米秸秆颗粒燃料致密成型电耗测试[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 1): 117—119.
Li Zaifeng, Lei Tingzhou, He Xiaofeng, et al. Analysis one lectricity cost of cornstalk granule compression molding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2006, 22(Supp.1): 117—119. (in Chinese with English abstract)
- [19] Bhattacharya S C, Augustus Leon M, Md. Mizanur Rahman. A study on improved biomass briquetting[J]. Energy for Sustainable Development, 2002, 6(2): 67—71.
- [20] 刘宝军, 李旭英, 沈永雷, 等. 秸秆含水率对压块机功耗的影响[J]. 农机化研究, 2009(9): 179—182.
Liu Baojun, Li Xuying, Shen Yonglei, et al. Cube formation machine parameters of their productivity and machine power trial study[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(9): 179—182. (in Chinese with English abstract)
- [21] 阳向军. 卧式环模制粒机环模失效原因浅析[J]. 饲料工业, 2003, 24(9): 9—10.
Yang Xiangjun. Failure analysis of ring die on horizontal ring die pellet mill[J]. Feed Industry, 2003, 24(9): 9—10. (in Chinese with English abstract)
- [22] 霍丽丽, 侯书林, 田宜水, 等. 生物质固体燃料成型机压辊磨损失效分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 102—106.
Huo Lili, Hou Shulin, Tian Yishui, et al. Wear failure analysis on roller assembly of biomass pellet mill[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 102—106. (in Chinese with English abstract)
- [23] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 化学工业出版社, 2012.
- [24] NY/T 1882-2010, 生物质固体成型燃料成型设备技术条件[S].
- [25] NY/T 1878-2010, 生物质固体成型燃料技术条件[S].

Optimization of operating parameters for vertical ring mold straw briquetting machine

Pang Lisha^{1,2}, Meng Haibo¹, Zhao Lixin¹, Yao Zonglu^{1*}, Tian Yishui¹, Hou Shulin²

(1. Key Laboratory of the Ministry of Agriculture, Energy Utilization of Agricultural Waste, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China; 2. College of Engineer, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Corn straw was used as raw material based on the low productivity, low quality of briquette and high energy consumption due to the operating parameters in the straw briquette production process. We identified raw material particle size, moisture content, molding machine clearances between die and rolls as three factors for the corn straw. The impacts of each factor were divided into three levels. Different combinations of the three process parameters on the productivity, briquetting fuel molding rate, density, mechanical durability and energy consumption per ton of product were studied in accordance with the biomass solid fuel test method. The test results were analyzed with variance analysis of orthogonal test. To ensure the test results can be used for real world production guidance, the orthogonal test results were verified. The results showed that the optimal combination of process parameters is the raw material particle size of 20-30 mm, the moisture content of 15% and the clearances between die and rolls of 2 mm for the briquette quality. To increase productivity and reduce energy consumption per ton of product, the best combinations of process parameters was the raw material particle size of 20-30 mm, the moisture content of 20% and the clearances between die and rolls of 2 mm. Appropriate combination of process parameters depend on the environment. When forming fuel needs long-range transport, it requires high mechanical durability. The process parameter combinations were achieved as raw material particle size of 10-20mm, moisture content of 15% and clearances between die and rolls of 2 mm. When there are no special requirements, the process parameter combinations were treated with particle size of 10-20mm, moisture content of 20% and clearances between die and rolls of 2 mm. According to quality requirements of briquetting fuel molding rate, density and mechanical durability, the moisture content of 10% to 20% range, an appropriate increase in moisture content, were required to improve productivity and reduce energy consumption per ton of product.

Key words: straw, fuels, optimization, straw briquetting machine, granularity, moisture content, clearances between die and rolls

(责任编辑: 刘丽英)