

秸秆多级连续冷辊压成型试验研究

丁宁¹ 李海涛^{1,2} 闫安¹ 李守忠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: 为了研究秸秆多级连续冷辊压成型方法的可行性,设计并试制了样机,采用正交试验方法,以玉米秸秆含水率、秸秆破碎方式、破碎长度、喂料方式为试验因素,以成型块回弹率、密度、坚实度为试验指标,进行了四因素三水平正交试验研究,研究试验因素对试验指标的影响。试验表明,交叉铆固的喂料方式最能限制成型块的回弹;成型块密度主要受破碎方式的影响,受破碎长度的影响较小;成型块坚实度主要受破碎方式的影响,受含水率的影响较小。通过综合分析确定该成型机的较优成型参数为:秸秆含水率 20%,破碎方式为揉搓破碎,破碎长度 80 mm,喂料方式为交叉铆固。在较优成型参数下进行试验,测试秸秆多级辊压成型机的性能指标,结果表明,该成型机生产的玉米秸秆成型块的回弹率为 7.26%,成型密度为 363.28 kg/m³,坚实度为 90.23%。本研究可为生物质常温致密成型技术及其设备的研发提供参考。

关键词: 玉米秸秆; 多级辊压成型机; 冷压成型; 正交试验

中图分类号: S216.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0279-07 OSID: 

Experiment on Multi-stage Continuous Cold Roll Forming of Straw

DING Ning¹ LI Haitao^{1,2} YAN An¹ LI Shouzhong¹ 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: In order to explore the feasibility of the straw multi-stage continuous cold roll forming method, a prototype was designed and tested. Orthogonal test method was used to test the four-factor three-level orthogonal test with the moisture content, crushing method, crushing length and feeding method of corn straw as the test factors, and the rebound rate, density and firmness of the formed blocks as the test indicators. The influence of experimental factors on experimental indicators was researched. The test results showed that the cross-riveted feeding method can most restrict the rebound of the shaped block; the density of the shaped block was mainly affected by the crushing method, followed by the length of the crushing; the solidity of the shaped block was mainly affected by the crushing method, and the moisture content was the second of it. Comprehensive analysis determined that the preferred forming parameters of the molding machine were: moisture content of 20%, crushing method by rubbing and crushing, crushing length of 80 mm, feeding method by cross riveting. The experiment was carried out under the conditions of better molding parameters, and the performance indicators of the molding machine were tested. The results showed that the rebound rate of corn straw molding block produced by the molding machine was 7.26%, the molding density was 363.28 kg/m³, and the firmness was 90.23%. The research results provided a reference for the research and development of biomass compression molding technology and equipment at normal temperature.

Key words: corn straw; multi-stage roller forming machine; cold press forming; orthogonal test

0 引言

我国农作物秸秆产量大,秸秆资源丰富。但由于存在秸秆资源分散及秸秆容重小、储运不方便等

缺点,严重制约了大规模应用,导致秸秆资源浪

费^[1-4]。机械压实是缩小生物质秸秆体积最有效的

收稿日期: 2020-06-25 修回日期: 2020-08-10
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

方法^[5-6]。密度提高、体积减小使压实的生物质秸秆在运输和储存方面具有很大优势^[7-8]。

成型技术包括高密度成型、中低密度成型和低密度成型。模辊式生物质材料压缩成型属于高密度成型,但目前此种压缩成型模式普遍存在能耗高、关键部件磨损快等问题^[9-13]。方捆打捆机属于中低密度成型,其活塞往复冲压影响效率,且设备投资成本高。圆捆打捆机属于低密度成型,其间歇式作业导致生产率低,且圆捆密度均匀性差^[14-15]。为了实现秸秆连续压缩成型,并降低能耗、提升效率、降低成本,基于连续辊压方法及秸秆压缩成型原理^[16-18],提出一种秸秆多级连续冷辊压成型方法,该方法属于中密度成型^[19-20]。

为了研究秸秆多级连续冷辊压成型方法的可行性,本文设计并试制样机,采用四因素三水平正交试验方法,研究玉米秸秆含水率、破碎方式、破碎长度、喂料方式四因素对成型块回弹率、密度、坚实度等指标的影响,以得到较优成型参数,为生物质秸秆产地高效工业化生产利用提供理论依据。

1 秸秆多级辊压成型机设计与理论分析

1.1 秸秆多级辊压成型原理

为了解决活塞冲压式成型机等大尺寸成型稳定性差、压缩不连续的问题,实现秸秆物料高效率、中密度成型,探索秸秆物料单向压缩,板、条式连续压缩成型原理,提出秸秆多级连续冷辊压成型方法。在该成型方法中,假设成型块质量不变,使成型物料在受压方向尺寸大幅度减小,保证物料在压缩过程中各个部分受力均匀,获得较高的成型压力,图 1 所示为秸秆多级辊压成型机工作原理图(以 3 级压缩为例),秸秆从一端的喂料口喂入,经过多级对称布置的压缩辊连续辊压后从另一端出料口出料,对破碎后的玉米秸秆进行连续辊压成型,提高压缩成型生产率,实现玉米秸秆的高效连续压缩成型;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,可减少机器的能耗;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。

1.2 秸秆多级辊压成型理论分析

1.2.1 单级压缩条件

如图 2,以第 i 级($i \geq 1$)压缩为例,确定设计过程中的部分参数。

其中,第 i 级压缩辊进入物料厚度为 s_{i-1} ,压出物料厚度为 s_i ,压缩比为 ε_i ,压缩辊直径为 d_i ,压缩辊半径为 r_i ,其中 $r_i = d_i/2$,压缩辊喂入角为 α_i ,其中

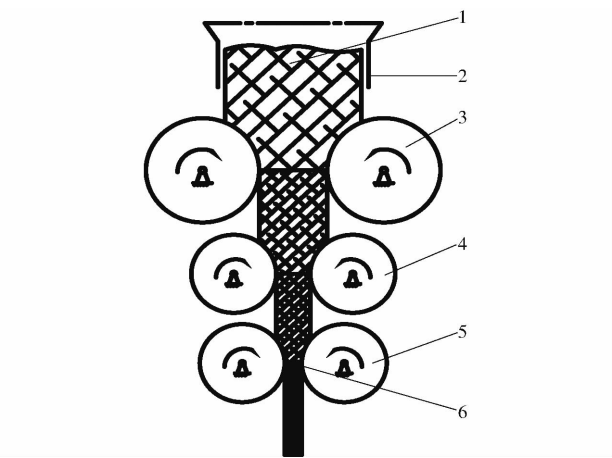


图 1 秸秆多级辊压成型机工作原理图
Fig.1 Schematic of multi-stage roller forming machine's working principle for straw

1. 秸秆物料 2. 喂料口 3. 第 1 级压缩辊 4. 第 2 级压缩辊
5. 第 3 级压缩辊 6. 出料口

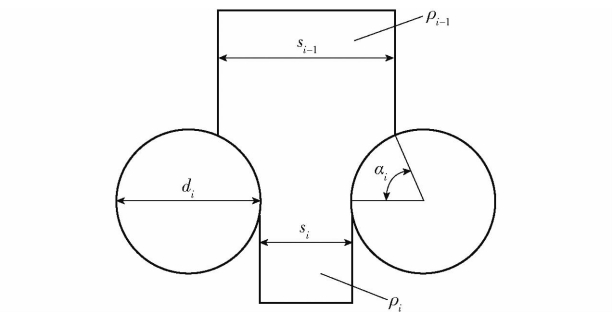


图 2 第 i 级压缩参数示意图
Fig.2 Schematic of level i compression parameter

喂入角是指物料开始接触压缩辊处与压缩辊圆心连线和物料离开压缩辊处与压缩辊圆心连线之间的夹角,压强为 p_i ,密度为 ρ_i ,第 i 级压缩辊采用对称布置安装,两压缩辊长度、直径、喂入角及承受压强等均相等。

根据图 2 可知,第 i 级压缩存在几何关系

$$s_{i-1} = s_i + 2r_i(1 - \cos\alpha_i) \tag{1}$$

同时,根据质量守恒定律,压缩辊进入物料质量等于挤出物料质量,假设压缩过程连续,物料流动速度为 v ,则可以得到

$$\rho_{i-1}s_{i-1}bvt = \rho_i s_i bvt \tag{2}$$

式中 b ——物料宽度,mm

t ——物料流动时间,s

根据式(2)得出

$$\frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} = \frac{s_{i-1}}{s_i} \tag{3}$$

根据以上分析可得出

$$\varepsilon_i = \frac{s_{i-1}}{s_i} = \frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} = \frac{p_i}{p_{i-1}} \tag{4}$$

根据式(1)、(4)可得到第 i 级压缩辊中各个参数之间关系的通用公式为

$$\varepsilon_i = \frac{s_i + 2r_i(1 - \cos\alpha_i)}{s_i} \tag{5}$$

$$r_i = \frac{s_i(\varepsilon_i - 1)}{2(1 - \cos\alpha_i)} \tag{6}$$

根据式(4)、(5)可得第*i*级压缩辊压出物料所受压强 p_i 的通用公式为

$$p_i = \varepsilon_i p_{i-1} = \frac{s_i + 2r_i(1 - \cos\alpha_i)}{s_i} p_{i-1} \tag{7}$$

1.2.2 总辊压比与压缩级数、压缩辊半径关系

假设辊压成型机总辊压比为 ε ,压缩级数为 n ($n \geq 1$),易知

$$\varepsilon = \frac{s_0}{s_n} = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i = \frac{p_n}{p_0} \tag{8}$$

根据式(1)可得

$$s_0 = s_n + 2 \sum_{i=1}^n r_i(1 - \cos\alpha_i) \tag{9}$$

由式(8)、(9)可得

$$\varepsilon = \frac{s_0}{s_n} = \frac{s_n + 2 \sum_{i=1}^n r_i(1 - \cos\alpha_i)}{s_n} \tag{10}$$

假设各级压缩辊半径均为 r ,各级喂入角相等并取临界喂入角 $\alpha_0 = 26.6^\circ$ ^[21],根据式(10)用Matlab 6.0 数值模拟方式可分别得到总辊压比 ε 、压缩级数 n 和压缩辊半径 r 三者之间的关系,如图3所示。

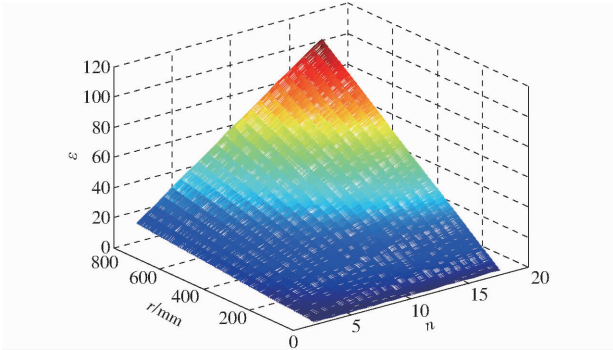


图3 秸秆多级辊压成型总辊压比与压缩级数、压缩辊半径关系曲面

Fig.3 Surface of relation among total roll pressure ratio, compression series and compression roll radius of multi-stage roller forming for straw

当末级出口处物料厚度 s_n 一定,各级压缩辊半径相等、各级喂入角相等并取为临界喂入角的情况下,总辊压比 ε 和压缩级数 n 呈线性关系,并且总辊压比 ε 随着压缩级数 n 的增加而增加;在末级出口处物料厚度 s_n 一定,整机辊压比一定,各级喂入角相等并取为临界喂入角 α_0 的情况下,压缩辊半径 r 和压缩级数 n 呈反比关系,压缩辊半径 r 随着压缩级数 n 的增加而减小;在取各级压缩辊半径相等,喂入

角相等并取为临界喂入角 α_0 的情况下,压缩辊半径 r 和总辊压比 ε 呈线性关系,总辊压比 ε 随着压缩辊半径 r 的增加而增加。

在设计过程中要综合考虑三者之间关系,使各参数满足设计功能要求。

2 试验样机

2.1 参数确定

根据总辊压比 ε 、压缩级数 n 和压缩辊半径 r 三者关系,遵循玉米秸秆辊压成型原理及特性^[20-21]、玉米秸秆开式压缩特性^[22-24],同时参考轧钢机械设计方法^[16],验证试验样机在满足总辊压比的前提下,为了节省试验样机耗材,减小试验样机尺寸,方便试验,样机只试制3级压缩成型,前端的喂料、预压缩部分由预压缩装置完成,本试验用成型机参数如表1所示。

表1 秸秆多级辊压成型机参数
Tab.1 Parameter of multi-stage roller forming machine for straw

参数	数值
压缩级数	3
第1级压缩辊进入物料厚度/mm	200
第3级压缩辊压出物料厚度/mm	20
第1级压缩辊直径/mm	180
第2级压缩辊直径/mm	125
第3级压缩辊直径/mm	100
总辊压比	10
第1级压缩比	2
第2级压缩比	2
第3级压缩比	2.5
第1级压缩辊喂入角/(°)	63.61
第2级压缩辊喂入角/(°)	53.13
第3级压缩辊喂入角/(°)	45.57

根据文献[21],当各级压缩辊喂入角大于临界喂入角时,可以通过提高外摩擦因数的方式提高喂入能力,因此为了保证喂料顺畅,在各压缩辊表面进行了机加工压纹处理,以增大外摩擦因数抵消喂入角过大对喂料的影响,保证压缩过程喂料顺畅。

2.2 样机试制

根据秸秆多级辊压成型原理设计压缩装置,在SolidWorks 中对压缩辊等主要零部件进行建模,并完成虚拟装配;确定传动方式,选择减速机及电动机,电动机选用四级交流异步电机,且研究发现在非超高压条件下,成型时间对成型产品质量有较大影响^[25],同时根据文献[20]仿真计算分析方法及结果,确定本试验样机的总扭矩,选配减速机减速比为

1:1 000,电动机功率为 1 500 W,最终完成各零部件加工生产,样机装配试制,如图 4 所示。

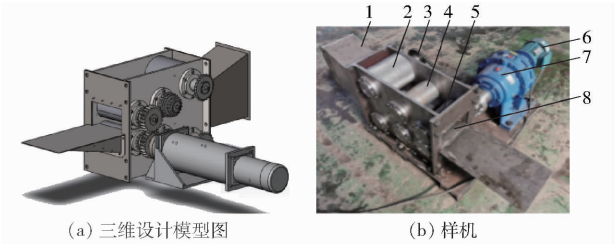


图 4 秸秆多级辊压成型机装配图及样机

Fig.4 Assembly drawing and prototype of multi-stage roller forming machine for straw

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

3 试验

为了验证秸秆多级连续冷辊压成型方法的可行性,同时为了得到适应成型机的较优成型参数,进行了样机试验,如图 5 所示。



图 5 样机试验
Fig.5 Prototype test

3.1 试验原料与仪器

试验于 2020 年 5 月在河北农乐新能源科技有限公司进行。

试验原料为玉米秸秆,2019 年 9 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、预压缩装置、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。

通过秸秆多级辊压成型机工作原理可知,为了保证压缩成型块品质,需要保证成型时秸秆物料受到足够压力,因此喂料装置需连续供应足够秸秆物料供其压缩^[26]。为了节约成本,同时保证样机试验顺利进行,设计并制作了预压缩装置,对秸秆物料进行预压缩初步定型,目的是代替连续喂料装置及前端的预压缩工作,提供短时间内的连续喂料过程,预压缩装置如图 6 所示。

3.2 试验设计

选用四因素三水平正交试验设计方案,试验因素水平如表 2 所示。

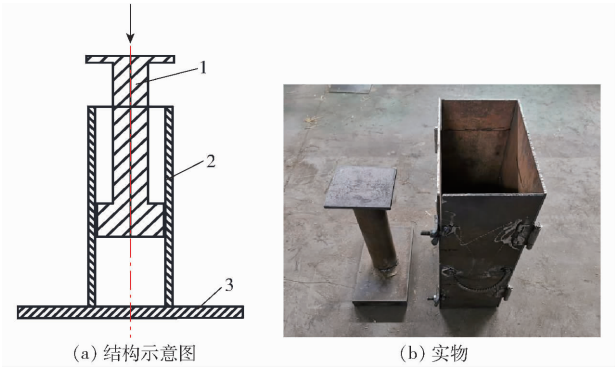


图 6 预压缩装置

Fig.6 Pre-compression unit

1. 预压缩柱塞 2. 预压缩模具 3. 底座

表 2 试验因素水平

Tab.2 Experimental factors and levels

水平	因素			
	含水率/%	破碎方式	破碎长度/mm	喂料方式
1	10	切段	20	自然排序
2	15	破碎	50	交叉铆固
3	20	揉搓	80	横纵编排

除含水率、破碎方式、破碎长度影响成型外,喂料方式同样影响成型,故设置自然排序、交叉铆固、横纵编排 3 水平^[27-28],在预压缩时对秸秆物料进行相应处理,其中交叉铆固、横纵编排处理方式及效果如图 7 所示。

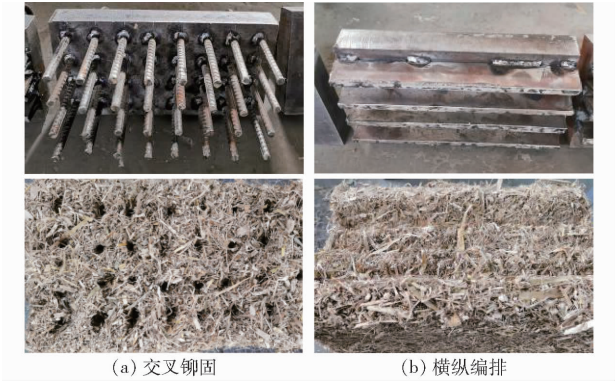


图 7 喂料方式与处理效果

Fig.7 Feeding way and treatment effect

考虑玉米秸秆压缩成型块品质评价标准,同时解决玉米秸秆快速离田、运输等问题,本试验研究目的为验证多级连续冷辊压成型方法的可行性,因此暂不考虑功耗指标。确定考核试验指标如下:

回弹率:成型块的回弹对运输影响较大,压缩成型机正常运行时,在成型机出口处随机选取 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结束检测,回弹率计算式为

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

(11)

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
密度:压缩成型机正常运行时,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、高进行体积计算,密度计算式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$
(12)

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

坚实度:压缩成型机正常运行时,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,使成型块从 1 m 高处自由下落,重复 3 次,坚实度计算式为

$$X = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$
(13)

式中 X ——秸秆压缩成型块坚实度,%
 m_1 ——落地后成型块样品质量,kg
 m_0 ——落地前成型块样品质量,kg

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

图 8 为不同破碎方式、破碎长度玉米秸秆原料及 9 组正交试验压缩结束回弹稳定后样品。

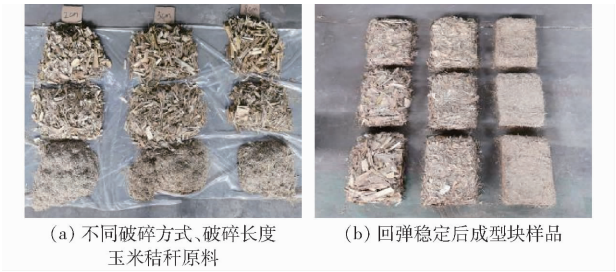


图 8 玉米秸秆原料及各正交组压缩成型块样品
Fig.8 Corn straw raw material and each orthogonal group compression molding block sample

正交试验设计与结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 、 D 为各因素水平值。

表 3 正交试验结果

Tab.3 Test results of orthogonal experiment

序号	因素				回弹率/ %	密度/ (kg·m ⁻³)	坚实度/ %
	A	B	C	D			
1	1	1	1	2	9.76	200.43	40.00
2	1	2	2	1	22.50	174.32	46.34
3	1	3	3	3	12.31	302.28	84.97
4	2	1	2	3	10.11	148.55	41.82
5	2	2	3	2	7.95	161.75	54.54
6	2	3	1	1	8.65	390.88	68.96
7	3	1	3	1	15.00	138.91	57.51
8	3	2	1	3	5.26	206.25	75.00
9	3	3	2	2	7.14	373.27	94.83

3.3.2 结果分析

由表 4 可知,秸秆物料含水率、破碎方式、破碎长度、喂料方式对压缩成型块的回弹率、密度及坚实度均有不同程度的影响。极差反映各因素对指标影响,由极差分析可知,各因素在各种水平下,喂料方式对压缩成型块回弹率影响显著,秸秆物料破碎方式对压缩成型块密度和坚实度均有显著影响。利用极差分析法分析四因素对压缩成型块回弹率、密度及坚实度指标的影响。

表 4 极差分析结果

Tab.4 Results of range analysis

指标		A	B	C	D
成型块	k_1	14.857	11.623	7.890	8.283
	k_2	8.903	11.903	13.250	15.383
	k_3	9.133	9.367	11.753	9.227
回弹率	优水平	A_1	B_2	C_2	D_2
	极差 R	5.954	2.536	5.360	7.100
	主次顺序	D、A、C、B			
成型块	k_1	225.677	162.630	265.853	245.150
	k_2	233.727	180.773	232.047	234.703
	k_3	239.477	355.477	200.980	219.027
密度	优水平	A_3	B_3	C_1	D_1
	极差 R	13.800	192.847	64.873	26.123
	主次顺序	B、C、D、A			
坚实度	k_1	60.110	45.597	60.500	63.123
	k_2	55.803	58.547	62.433	58.890
	k_3	73.417	85.187	66.397	67.317
坚实度	优水平	A_3	B_3	C_3	D_3
	极差 R	17.614	39.590	5.897	8.427
	主次顺序	B、A、D、C			

由表 4 中回弹率的极差可以看出,喂料方式对压缩成型块回弹率的影响最大;秸秆物料含水率的影响次之;然后是物料破碎长度;破碎方式影响最小。获得最低回弹率的工艺条件为 $A_1B_2C_2D_2$ 。

由表 4 中密度的极差可以看出,破碎方式对压缩成型块密度的影响最大;秸秆物料破碎长度的影响次之;然后是喂料方式;含水率影响最小。获得最高密度的工艺条件为 $A_3B_3C_1D_1$ 。

由表 4 中坚实度的极差可以看出,破碎方式对压缩成型块坚实度的影响最大;秸秆物料含水率的影响次之;然后是喂料方式;破碎长度影响最小。获得最高坚实度的工艺条件为 $A_3B_3C_3D_3$ 。

3.3.3 较优成型参数确定

密度是玉米秸秆机械压缩利用最重要指标,针对本秸秆多级辊压成型机,揉搓破碎可最大限度提升成型块密度,因此破碎方式因素确定为揉搓破碎,即 B_3 。当破碎方式确定后,破碎长度对密度影响不大,但试验过程中发现,物料破碎长度越大,其在辊

压过程中越顺利,不会发生物料在辊间“滞留”现象,初步分析原因,物料长度越大越能建立起上下级压缩辊之间的“推拉作用”,同时为了节约破碎成本,综合选取破碎长度为 80 mm,即 C_3 。

坚实度是考量秸秆压缩成型的重要指标,揉搓破碎的秸秆物料可获得最高的坚实度,因此破碎方式因素水平确定为揉搓破碎,即 B_3 ,同时含水率对坚实度影响较大,含水率确定为 20%,即 A_3 。通过结果分析还发现,纵横编排布置的玉米秸秆原料压缩成型后有较高的坚实度,稳定性更强。

回弹率指标主要影响玉米秸秆离田运输过程,交叉铆固的喂料方式最能限制成型块回弹,原因是此种处理方式可以使秸秆物料之间发生物理编织、铆接,此原理已被研究证实,因此喂料方式选取为交叉铆固,即 D_2 。

综上,秸秆多级辊压成型机在预设条件下的较优成型工艺条件为 $A_3B_3C_3D_2$,即成型参数为:含水率 20%,破碎方式为揉搓破碎,破碎长度 80 mm,喂料方式为交叉铆固。

3.4 较优成型参数下成型块各性能指标

为了验证分析结果的可靠性,在较优成型工艺条件组合下进行压缩试验,自然堆积状态下密度为 50.15 kg/m^3 ,成型后回弹率为 7.26%,密度为 363.28 kg/m^3 ,坚实度为 90.23%。

4 结论

(1)设计并试制了秸秆多级辊压成型样机,研究了秸秆多级连续冷辊压成型方法的可行性,为生物质常温致密成型技术及其设备的研发提供了参考。

(2)试验表明,交叉铆固的喂料方式最能限制成型块的回弹;成型块密度主要受破碎方式的影响,受破碎长度的影响较小;成型块坚实度主要受破碎方式影响,受秸秆含水率的影响较小。

(3)在较优成型参数下,即玉米秸秆含水率 20%,揉搓破碎方式,破碎长度 80 mm,采用交叉铆固的喂料方式,成型块回弹率可达 7.26%,成型密度达 363.28 kg/m^3 ,同时坚实度达 90.23%。

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] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报,2019,35(22):132-140. CONG Hongbin, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22):132-140. (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] 吴娟娟,霍丽丽,赵立欣,等. 玉米秸秆安全存储平衡水分试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(11):73-77. WU Juanjuan, HUO Lili, ZHAO Lixin, et al. Experiment research on maize straw equilibrium moisture for secure storage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11):73-77. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 盛凯,冉毅,艾平,等. 不同压缩比和青贮时间下玉米秸秆厌氧发酵性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):338-345. SHENG Kai, RAN Yi, AI Ping, et al. Anaerobic digestion performance of corn stalk under different compression ratio and silage time[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):338-345. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200738&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.038. (in Chinese)
- [7] GRANADA E, GONZÁLEZ L M L, MÍGUEZ J L, et al. Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study[J]. Renewable Energy, 2002, 27(4):561-573.
- [8] JOHNSON P, CENKOWSKI S, PALIWAL J. Compaction and relaxation characteristics of single compacts produced from distiller's spent grain[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2):260-266.
- [9] 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, 2005, 30(7):648-654.
- [10] 陈忠加,俞国胜,王青宇,等. 柱塞式平模生物质成型机设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(19):31-38. CHEN Zhongjia, YU Guosheng, WANG Qingyu, et al. Design and experiment of flat die pellet mill with plunge[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19):31-38. (in Chinese)
- [11] XIA Xianfei, SUN Yu, WU Kai, et al. Modeling of a straw ring-die briquetting process[J]. BioResources, 2014, 9(4):6316-6328.
- [12] 宁廷州,俞国胜,陈忠加,等. 对辊柱塞式成型机设计与试验[J/OL]. 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/

- OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 203 – 210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160528&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.028. (in Chinese)
- [13] 宁廷州, 刘鹏, 侯书林. 生物质固化成型设备及其成型影响因素分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(1): 135 – 140. NING Tingzhou, LIU Peng, HOU Shulin. The biomass curing equipment and the analysis of its forming influence factors[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(1): 135 – 140. (in Chinese)
- [14] 郭博, 贺敬良, 王德成, 等. 秸秆打捆机研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 264 – 268. GUO Bo, HE Jingliang, WANG Decheng, et al. The research situation and development tendency of straw baling machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 264 – 268. (in Chinese)
- [15] 谢伟, 李旭, 方志超, 等. 水稻秸秆收集与连续打捆复式作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 19 – 25. XIE Wei, LI Xu, FANG Zhichao, et al. Design of compound machine for rice straw collecting and continuous baling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 19 – 25. (in Chinese)
- [16] 黄庆学, 孙斌煜. 轧钢机械设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [17] 郭磊. 秸秆压块成型因素与压模腔体的优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. GUO Lei. Effects of straw characteristics and research of compression die on briquetting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 黄吴量. 闭式生物质成型力学特性及工艺参数研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. HUANG Wuliang. Research on mechanical properties and technologic parameters of enclosed biomass briquetting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] 刘平义, 骆龙敏, 李海涛, 等. 秸秆多级辊压成型原理与装置设计[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 317 – 323. LIU Pingyi, LUO Longmin, LI Haitao, et al. Theory and device design of multi-stage roller forming for straw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 317 – 323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s049&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.049. (in Chinese)
- [20] 丁宁. 秸秆压缩成型技术与装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. DING Ning. Research of compression molding technology and equipment for straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 骆龙敏. 秸秆多级辊压成型装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. LUO Longmin. Research of multistage roll molding device for straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 刘富强, 李景彬, 坎杂, 等. 粉碎玉米秸秆压缩特性试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 169 – 173, 179. LIU Fuqiang, LI Jingbin, KAN Za, et al. Experimental study on compression characteristics of corn straw smashed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 169 – 173, 179. (in Chinese)
- [23] 王瑞丽, 魏楷峰, 刘洋, 等. 饲料用秸秆丝化多频快速压缩成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 277 – 281. WANG Ruili, WEI Kaifeng, LIU Yang, et al. Optimization of process parameters for multi-frequency rapid compression molding of corn stalk silk used for forage[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 277 – 281. (in Chinese)
- [24] 王功亮, 姜洋, 李伟振, 等. 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. WANG Gongliang, JIANG Yang, LI Weizhen, et al. Process optimization of corn stover compression molding experiments based on response surface method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 223 – 227. (in Chinese)
- [25] 雷廷宙, 何晓峰, 王志伟, 等. 生物质固体成型燃料生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [26] 中国农业大学. 多级辊压秸秆成型机供料机构: 201810069398.2[P]. 2018-09-28.
- [27] 中国农业大学. 一种秸秆层间交叉铆固压捆方法及压板结构: 200910088114.5[P]. 2009-12-09.
- [28] 王磊. 高密度玉米秸秆捆压缩成型机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012. WANG Lei. A study on compression formation mechanism of high-density corn straw bundle[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)