

对辊柱塞式成型机设计与试验

宁廷州¹ 俞国胜¹ 陈忠加¹ 袁湘月¹ 刘文广^{1,2} 皮森淼¹

(1.北京林业大学工学院,北京 100083;2.内蒙古科技大学机械工程学院,包头 014010)

摘要: 基于生物质固化成型领域活塞冲压式成型机能耗低、生产率低和模辊式成型机生产率高、能耗高的特点,提出一种新型对辊式成型方式,并设计和制造了样机。该成型机压辊圆周上均布了一系列柱塞,运行过程中压辊柱塞与环模模孔相互啮合,避免了成型孔之外的物料受到压辊的挤压与摩擦。为测试该成型机的性能,进行了正交试验研究,结果表明,该成型机的较优成型参数为:含水率 15%,成型模具长径比 5.25,主轴转速 47.25 r/min。以木屑为原料,在较优成型参数的条件下进行了成型机性能指标的测试,结果表明,该成型机生产的成型颗粒直径为 10 mm,成型颗粒密度为 1.15 g/cm³,机械耐久性为 96.28%,生产率为 75 kg/h,能耗为 56 kW·h/t,成型率为 95%,工作噪声为 79 dB,各项指标均达到设计要求,实现了连续稳定生产。

关键词: 生物质;成型机;对辊;柱塞;颗粒燃料

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0203-08

Design and Experiment of Roller Briquetting Machine with Plungers

Ning Tingzhou¹ Yu Guosheng¹ Chen Zhongjia¹ Yuan Xiangyue¹ Liu Wenguang^{1,2} Pi Senmiao¹

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The characteristics of both the piston stamping forming machine and the die roller briquetting machine were combined. The piston stamping forming machine has low energy consumption and low productivity while the die roller briquetting machine has high productivity and high energy consumption, a new kind of roller briquetting method was put forward, and the prototype was designed and manufactured. Compared with other same type briquetting machine, a series of plungers distributed on the roller mesh into the ring die holes in the briquetting process, which could avoid the loss of energy consumption and the serious wear problem in the process of biomass materials squeezed outside ring die holes. In order to test the property of this briquetting machine, the orthogonal experiment was preceded. Results showed that the optimal processing parameters for the roll briquetting machine with plungers: the length to diameter ratio of forming mould is 5.25, the spindle speed is 47.25 r/min, and the moisture content of raw material is 15%. Under the optimal processing parameters, sawdust was used as raw material for the briquetting test. Experimental results showed that the diameter of the forming particle is 10 mm, the density of forming particle is 1.15 g/cm³, the mechanical durability is 96.28%, the productivity of the briquetting machine is 75 kg/h, the energy consumption is 56 kW·h/t, the forming rate is 95%, and the working noise is 79 dB. All the indexes meet the design requirements, and realize continuous and stable production. This has a certain role in promoting the development of biomass curing technology, and the briquetting method put forward in this paper provides the reference for the biomass densification technology and the development of the same kind equipment.

Key words: biomass; briquetting machine; double-roll; plunger; pellet fuel

收稿日期: 2016-02-04 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

模辊式成型机具有原料适应性强、生产率高等优点,是固化成型设备研究和开发的热点^[1-7]。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^[8-10]。根据现有文献可知,当前对辊式成型技术主要存在以下问题:①大多数对辊式成型机处于专利形式,并未真正进行试制和生产,其实用性和可行性尚未得到验证。②个别对辊式成型机虽已投入生产,但其并不能实现生物质物料的有效压缩成型。③无论专利形式的对辊式成型机和已投入生产的对辊式成型机,大多是利用模辊的外曲面进行挤压,因此存在能耗较高^[11-12]和关键零部件磨损严重^[13-15]的问题。

基于以上问题,本文综合活塞冲压式成型机和模辊式成型机特点(活塞冲压式成型机能耗较低,但生产率也较低;模辊式成型机生产率较高,但能耗也较高^[16]),设计一种新型对辊式成型机。该成型机在压辊的圆周上均布一系列柱塞,旋转的过程中压辊柱塞与环模模孔相互啮合,有效避免成型孔外的生物质物料受到压辊的挤压与摩擦,以解决其他同类型成型机利用模辊的外曲面将生物质物料挤出环模孔外而导致的关键部件磨损严重及能耗损失问题^[17]。

1 结构与工作原理

1.1 结构

如图 1 所示,对辊柱塞式成型机主要由环模部件、环模轴部件、压辊部件、压辊轴部件、齿轮传动装置、预压辊装置、进料装置、出料口、箱体等组成。其中,环模部件由环模、成型模具等组成;环模轴部件由环模轴、环模齿轮等组成;压辊部件由压辊和压辊柱塞组成;压辊轴部件由压辊轴、压辊齿轮等组成。

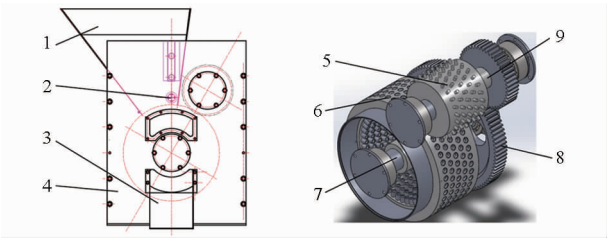


图 1 成型机结构图

Fig. 1 Structure diagram of forming 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

1.2 工作原理

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。工作原理图如图 2 所示。

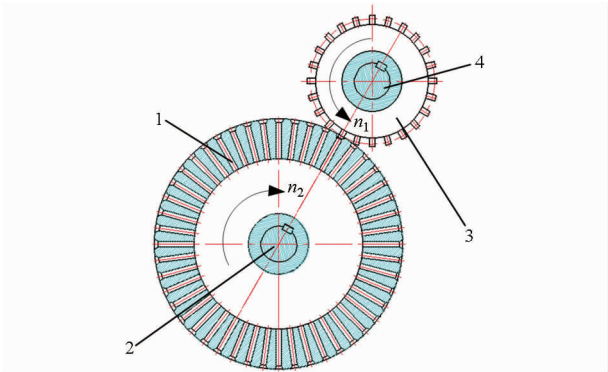


图 2 工作原理图

Fig. 2 Diagram of working principle

1. 环模 2. 环模轴 3. 压辊 4. 压辊轴

1.3 技术要求

根据设计要求,对辊柱塞式成型机成型机构应满足

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{1}$$

- 式中 n_1 ——压辊转速, r/min
 n_2 ——环模转速(主轴转速), r/min
 d_1 ——压辊啮合圆直径, mm
 d_2 ——环模啮合圆直径, mm
 z_1 ——压辊齿轮齿数
 z_2 ——环模齿轮齿数
 N_1 ——压辊柱塞数
 N_2 ——环模模孔数

根据关系式(1)得到成型机的主要设计技术参数,如表 1 所示。

2 运动干涉分析

对辊柱塞式成型机运行过程中,必须保证压辊柱塞与环模模孔不发生干涉^[18]。根据表 1 中的结构参数,在 SolidWorks 中构建对辊柱塞式成型机构

表 1 成型机主要设计技术参数

Tab.1 Main design parameters of forming machine	
技术参数	设计值
生产率 $Q/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	50 ~ 100
电动机功率 P/kW	7.5
压辊柱塞数 N_1	120
环模模孔数 N_2	240
柱塞直径/mm	10
模孔直径/mm	10
压辊啮合圆直径 d_1/mm	225
环模啮合圆直径 d_2/mm	450
压辊齿轮齿数 z_1	45
环模齿轮齿数 z_2	90
齿轮模数 m/mm	5
成型燃料截面直径/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

单排实体模型,按 337.5 mm 的对辊中心距(由于环模啮合圆与压辊啮合圆直径分别等于大小齿轮分度圆直径,故环模和压辊的中心距 $a = \frac{m}{2}(z_1 + z_2) = 337.5\text{ mm}$)进行虚拟装配,调整初始位置,使其在啮合成型区正确配对。在 Motion 模块中添加运动分析算例,对该成型机压辊柱塞和环模模孔关键部位运行取点,为压辊和环模添加转速比为 2 的旋转马达,进行运动轨迹追踪。经仿真分析发现,压辊柱塞能够与环模模孔很好地啮合工作,而未发生干涉,运动轨迹如图 3 所示。

3 成型机构受力分析

如图 4a 所示,柱塞式压辊在主动力矩 M 的作用下,以 n_1 转速旋转。压辊柱塞(压辊柱塞长度 $L = 15\text{ mm}$)旋转到 A 位置时开始与环模模孔啮合,并与环模模孔内的物料接触挤压,当旋转到 B 位置处时,压辊柱塞与环模模孔达到最大啮合深度 $H(H = 5\text{ mm})$,随着柱塞式压辊的继续旋转,压辊柱塞又逐渐退出环模模孔。压辊柱塞实际受力为 F_β ,可分解为径向分力 F_r 和切向分力 F_t ,其实际变化规律如图 4b 中的曲线 a_1 所示,由于压辊柱塞在啮合成型区 AB 停留的时间很短,故可以将其受力过程近似为一个稳态情况进行分析^[19]。图 4a 中,实线为奇数排压辊柱塞,虚线为偶数排压辊柱塞; R_1 为柱塞式压辊啮合圆半径, R_2 为环模啮合圆半径; β 为压辊柱塞实际受力与其径向分力 F_r 的夹角, β_0 为其最大值。

由于压辊柱塞受力 F_β 实际变化规律曲线 a_1 无法精量化,为便于分析,将其简化为线性增长规律,

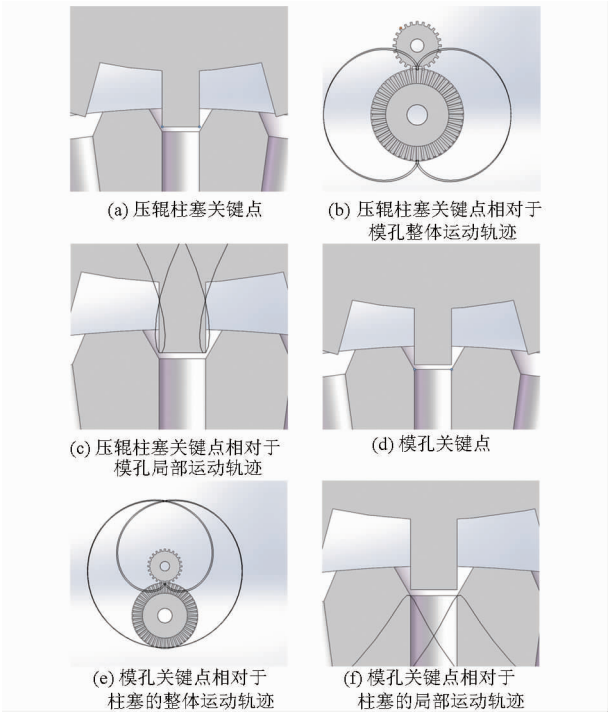


图 3 运动轨迹
Fig.3 Motion trajectory

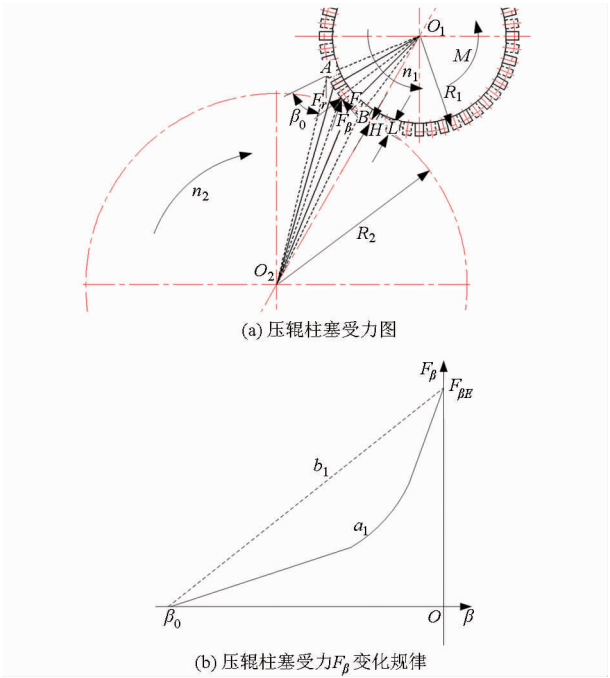


图 4 成型机构受力分析图
Fig.4 Stress analysis diagram of forming mechanism

如图 4b 中的直线 b_1 所示,由此可以得到

$$F_\beta = F_{\beta E} - \frac{F_{\beta E}}{\beta_0}\beta$$

(2)

其中 $\beta_0 = 180^\circ - \arccos \frac{L_{O_1A}^2 + L_{O_2A}^2 - L_{O_1O_2}^2}{2L_{O_1A}L_{O_2A}}$

$$F_{\beta E} = p_0 \frac{\pi d_h^2}{4}$$

式中 p_0 ——压辊柱塞最大挤压力,取 40 MPa

d_h ——环模模孔直径,取 10 mm

压辊柱塞体受力 F_β 可分解为径向分力 F_r 和切向分力 F_t ,计算公式为

$$\begin{cases} F_t = F_\beta \sin\beta \\ F_r = F_\beta \cos\beta \end{cases} \quad (3)$$

切向分力 F_t 对柱塞式压辊产生的阻力矩为

$$T = N_a(R_1 + H)F_{\beta_1}\sin\beta_1 + N_b(R_1 + H)F_{\beta_2}\sin\beta_2 + N_a(R_1 + H)F_{\beta_3}\sin\beta_3 + N_b(R_1 + H)F_{\beta_4}\sin\beta_4 \quad (4)$$

其中 $R_1 = 112.5\text{ mm}$ $H = 5\text{ mm}$

式中 N_a ——奇数排数,取 3

N_b ——偶数排数,取 2

根据测算, $\beta_0 = 53.82^\circ$, $\beta_1 = 43.99^\circ$, $\beta_2 = 33.61^\circ$, $\beta_3 = 22.73^\circ$, $\beta_4 = 11.47^\circ$ 。

整个压辊在工作过程中受到的径向合力 R_a 计算式为

$$R_a = N_a F_{\beta_1} \cos\beta_1 + N_b F_{\beta_2} \cos\beta_2 + N_a F_{\beta_3} \cos\beta_3 + N_b F_{\beta_4} \cos\beta_4 + N_a F_{\beta_E}$$
 (5)

4 关键零部件选取与设计

4.1 电动机的选择

对辊柱塞式成型机运行过程中的功率主要消耗在压辊在挤压变形区和压紧成型区对物料所做的功。因此,需计算挤压变形区压辊克服物料阻力矩消耗的功率和压紧成型区压辊柱塞对物料的挤压所消耗的功率^[20]。

压辊在挤压变形区克服阻力矩所需要的功率

$$P_1 = T\omega \quad (6)$$

式中 ω ——柱塞式压辊角速度,取 $3\pi\text{ rad/s}$,则转速 $n = 90\text{ r/min}$

根据式(6)计算得到 $P_1 = 6.19\text{ kW}$ 。

压辊柱塞对物料的挤压所消耗的功率

$$P_2 = \frac{Nd_h^2\pi Hp_0}{4t_1} \quad (7)$$

式中 N ——同时参与挤压的压辊柱塞个数,取 5

t_1 ——柱塞式压辊每转一圈所需时间,s

由于转速为 90 r/min ,则 $t_1 = 60/90\text{ s}$,根据式(7)计算可得 $P_2 = 0.12\text{ kW}$ 。

初步估算整机功率

$$P = P_1 + P_2 = 6.31\text{ kW} \quad (8)$$

考虑到传动链和轴承等的功率损失,选择 7.5 kW 的电动机。电动机型号为 DY2-132M-4,其具体参数:额定转速 1460 r/min ;额定效率 88.7% ;额定功率 7.5 kW ;额定电压 380 V ;额定电流 15.3 A ;额定频率 50 Hz ;功率因数 0.83 。

4.2 减速器的选择

减速器是连接原动机和工作机的传动装置,其

主要作用是降低转速和增大转矩,从而满足工作的需要。由于生物质颗粒成型机工作环境较为恶劣,因此,要求减速器输出足够的扭矩^[21],减速器型号为 R67/D132M4/0°,其具体参数:减速比 12.7;输出扭矩 $635\text{ N}\cdot\text{m}$;输出转速 113 r/min 。

4.3 环模部件

图 5 所示为环模部件结构图。鉴于生物质原料不同和成型模具长径比不同的情况,为便于成型模具的更换,该环模部件采用环模体和成型模具组合的方式。为提高成型孔的强度,增加成型孔的厚度,环模模孔布局方式为对称交叉分布^[22]。由于直孔结构加工工艺简单、成本低,长径比保持在一定范围内,可以实现物料的较好成型,特别适合孔径小而数量多的环模模具。本设计中,环模成型孔为直孔结构,其数量为 240 个,内径为 10 mm 。同时,为避免压辊柱塞与环模模孔不发生干涉,便于物料进入环模模孔,环模模孔内表面均设有 60° 倒角。

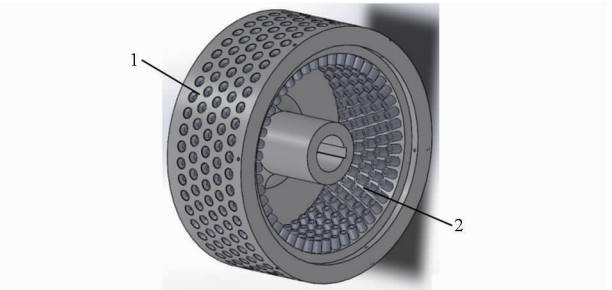


图 5 环模部件

Fig.5 Ring die components

1. 环模体 2. 成型模具

对辊柱塞式成型机类似于很多个小的柱塞挤压式成型机对物料进行挤压,欲使得物料能够从环模模孔中挤出,压辊柱塞对物料的挤压力必须克服物料与环模模孔壁的摩擦力,环模模孔长径比越大,物料与模孔壁的摩擦阻力也就越大,当压辊柱塞的挤压力无法克服物料与环模模孔孔壁的摩擦力时,物料就无法再压入成型。因此,成型模具的长径比必须保证在一定范围内。根据实际生产和文献[23]可知,不同生物质物料,其成型模具(图 6)长径比也

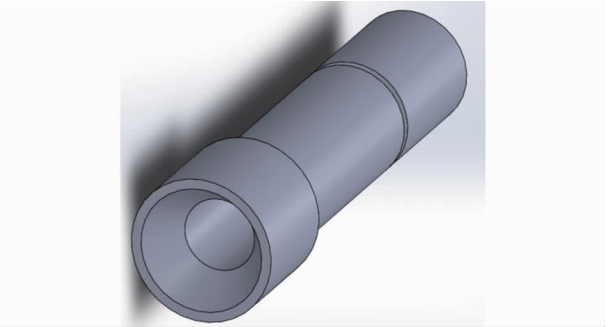


图 6 成型模具

Fig.6 Forming mold

不一样。

4.4 压辊部件

图 7 所示为压辊部件结构图,主要由压辊体和柱塞组成。与传统对辊式成型机不同,对辊柱塞式成型机压辊的外表面上均布了一系列柱塞,为保证压辊柱塞能够和环模模孔正确啮合,其分布方式与环模模孔分布方式一致。压辊柱塞与压辊孔为基孔制过盈配合。

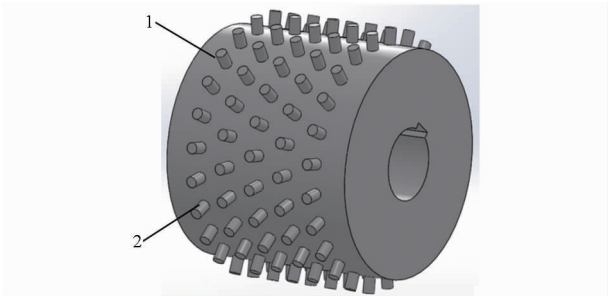


图 7 压辊部件
Fig.7 Roller components
1. 压辊体 2. 柱塞

5 样机试验

为测试对辊柱塞式成型机的各项性能,进行了样机试验,如图 8 所示。



图 8 样机试验
Fig. 8 Prototype test

5.1 试验原料与仪器

试验采用木屑为原料。
试验设备与仪器:对辊柱塞式成型机、游标卡尺、TCS-100 型不锈钢折叠工业电子台秤、DJYC 型电动机经济运行测试仪、DT300A 型电子天平、筛网、KER-2400 型转鼓试验机、ND2 型精密声级计倍频程滤波器等。

5.2 正交试验

5.2.1 正交试验方案

本研究选用三因素三水平正交试验设计方案,因数与水平如表 2 所示。

5.2.2 试验指标

(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 m_1 ,游标卡尺测出每个颗粒的长度,分别计算颗粒密度,取其平

均值。

表 2 试验因素与水平
Tab.2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	含水率/%	成型模具长径比	主轴转速/(r·min ⁻¹)
1	10	5	23.62
2	15	5.25	47.25
3	20	5.5	70.87

$$\rho = \frac{m_1}{v} = \frac{4m_1}{\pi d_k^2 l} \tag{9}$$

式中 d_k ——成型颗粒直径,cm
 ρ ——成型颗粒密度,g/cm³
 l ——成型颗粒长度,cm
 v ——成型颗粒体积

(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

$$Q = 3\,600 \frac{m_2(1-S)}{t_2(1-0.2)} \tag{10}$$

式中 Q ——生产率,kg/h
 m_2 ——接取样品质量,kg
 S ——成型颗粒含水率,%
 t_2 ——接取样品时间,s

5.2.3 正交试验结果

正交试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果
Tab.3 Test results of the orthogonal experiment

序号	A	B	C	生产率 Q / (kg·h ⁻¹)	密度 ρ / (g·cm ⁻³)
1	1	1	1	66.08	0.905
2	1	2	2	68.91	0.962
3	1	3	3	64.36	1.049
4	2	1	2	79.68	0.936
5	2	2	3	65.07	1.059
6	2	3	1	59.60	1.083
7	3	1	3	64.02	0.904
8	3	2	1	61.78	1.024
9	3	3	2	65.36	1.118

注:A 为含水率编码值;B 为成型模具长径比编码值;C 为主轴转速编码值。下同。

5.2.4 结果分析

采用极差分析法对正交试验结果进行分析和分

析,如表 4 所示。
由表 4 可以看出,成型颗粒密度和成型机生产率均在含水率为 15%、主轴转速为 47.25 r/min 情况下最优。成型颗粒密度随着成型模具长径比的增加而增加,成型机生产率随着成型模具长径比的增加而减小,为保证一定的成型颗粒密度和成型机生

产率,成型模具长径比取 5.25 为宜。因此,对辊柱塞式成型机的较优成型参数为:含水率 15%,成型模具长径比 5.25,主轴转速 47.25 r/min。

表 4 极差分析结果
Tab.4 Results of direct analysis

指标		A	B	C
生产率 $Q/(kg \cdot h^{-1})$	k_1	66.450	69.927	62.487
	k_2	68.117	65.253	71.317
	k_3	63.720	63.107	64.483
	优水平	A_2	B_1	C_2
	极差 R	4.397	6.820	8.830
	主次顺序	$C、B、A$		
密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	k_1	0.972	0.915	1.004
	k_2	1.026	1.015	1.005
	k_3	1.015	1.083	1.004
	优水平	A_2	B_3	C_2
	极差 R	0.054	0.168	0.001
	主次顺序	$B、A、C$		

5.3 其他试验指标与测试方法

根据 5.2 节正交试验可知,对辊柱塞式成型机较优成型参数为:含水率 15%,成型模具长径比 5.25,主轴转速 47.25 r/min。在此试验条件下,参照文献[24-29]进行其他试验指标的测试。

(1)能耗:成型机吨能耗计算式为

$$W=1\,000\frac{P_a}{Q}$$

(11)

式中 W ——成型机吨能耗, $kW \cdot h/t$

P_a ——成型机运行过程中的平均功率, kW

(2)成型率:用筛网对接取的成型颗粒进行筛分称量,成型率计算式为

$$X=\frac{m_a}{m_b} \times 100\%$$

(12)

式中 X ——成型率, %

m_a ——筛网上颗粒质量, kg

m_b ——总质量, kg

(3)机械耐久性:将 1 kg 成型颗粒倒入转鼓试验机,定向连续旋转 500 转之后再次对成型颗粒进行筛分,计算机械耐久性 C ,其计算方法同成型率。

5.4 性能测试结果

性能测试结果如表 5 所示。

以上试验结果表明,对辊柱塞式成型机的各项指标均达到生物质颗粒燃料的标准要求,表明该成型机能够满足生产需要,实现了连续稳定生产。

5.5 磨损和能耗分析

传统生物质成型机的挤压能耗是真正有效的做

表 5 测试参数与结果
Tab.5 Test items and results

测试参数	测试结果	设计值
成型颗粒直径/mm	10	10
成型颗粒密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.15	大于 0.8
机械耐久性 $C/\%$	96.28	大于 95
生产率 $Q/(kg \cdot h^{-1})$	75	50~100
能耗 $W/(kW \cdot h \cdot t^{-1})$	56	小于 85
成型率 $X/\%$	95	大于 90
工作噪声/dB	79	小于 90

功部分,不管是物料在环模孔内的挤压过程还是辊压过程,其挤压力产生的根本原因是由于物料与环模、压辊之间存在摩擦。因此,物料在环模孔内的摩擦以及在辊压过程的摩擦产生的挤压能量耗损是不可避免的^[30]。

传统生物质成型机环模的开孔率严重地影响着成型过程中的能耗,虽然部分物料经过强高压之后能够挤出环模孔外,但是环模与压辊之间仍有部分物料处于强高压状态而未被挤出环模孔外,这部分物料较大地消耗着生物质成型机的能耗。

对辊柱塞式成型机运行过程中,压辊柱塞仅对进入环模成型孔的物料进行挤压,避免了环模成型孔之外未开孔部分的物料受到压辊的挤压与摩擦,从而有效降低磨损和能耗。经过 3~4 个月的试验发现,关键零部件并无明显的磨损痕迹。该成型机吨能耗为 56 $kW \cdot h/t$,小于同类型成型机^[31]。

6 结论

(1)提出一种对辊式成型方式,并据此设计和制造了样机,通过试验验证了该成型方式的可行性,为生物质常温致密成型技术及其设备的研发提供了借鉴和参考。

(2)以含水率为 15% 的木屑为原料,在成型模具长径比为 5.25,主轴转速为 47.25 r/min 的情况下进行了成型机性能试验。试验结果表明,该成型机的成型颗粒直径为 10 mm,成型颗粒密度为 1.15 g/cm^3 ,机械耐久性为 96.28%,生产率为 75 kg/h ,能耗为 56 $kW \cdot h/t$,成型率为 95%,工作噪声为 79 dB,各项指标均达到生物质颗粒燃料的标准要求,实现了连续稳定生产。

(3)提出的生物质常温致密成型方法,对降低传统生物质成型机的能耗和减小成型机关键零部件的磨损具有一定的启示。

参 考 文 献

- 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)
- 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)
- 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.
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. (in Chinese)
- MANI S, TABI 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.
- 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)
- 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.
- 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)
- 尹玉婷. 生物质成型影响因素及对辊式成型机设计研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
YIN Yuting. Study on influence factors to the biomass briquette and the design of bi-roller briquetting machine[D]. Shenyang: Northeastern University,2011. (in Chinese)
- 贾孟立. 球形生物质成型机的设计研究[D]. 郑州:河南农业大学,2006.
JIA Mengli. The design and study for the biomass spherical briquetting machine[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 朱德文,陈永生,钟成义. 多功能空心对辊式生物质颗粒成型机的研制[J]. 农机化研究,2007,29(5):91-94.
ZHU Dewen, CHEN Yongsheng, ZHONG Chengyi. Research of multifunctional hollow opposite roller type-biomass particles moulding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(5):91-94. (in Chinese)
- 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 plunger[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(19):31-38. (in Chinese)
- XIA Xianfei, SUN Yu, WU Kai, et al. Modeling of a straw ring-die briquetting process[J]. BioResources,2014,9(4):6316-6328.
- 蒋清海,武凯,孙宇,等. 生物质制粒机环模的磨损机理分析[J]. 农业工程学报,2013,29(22):42-49.
JIANG Qinghai, WU Kai, SUN Yu, et al. Wear mechanism analysis of ring die of pellet mill [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(22):42-49. (in Chinese)
- 夏先飞,孙宇,武凯,等. 秸秆压块机组合环模的磨损机理[J]. 农业工程学报,2014,30(4):32-38.
XIA Xianfei, SUN Yu, WU Kai, et al. Wear mechanism of ring die for straw briquetting machine [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(4):32-38. (in Chinese)
- 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 CSAE,2010,26(7):102-106. (in Chinese)
- 王九龙. 立式双滚道环模生物质致密成型机设计与研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.
WANG Jiulong. Design and research of the vertical clouble raceway ring-die biomass densification molding machine[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015. (in Chinese)
- 袁大龙,俞国胜. 基于 Pro/Mechanica 的新型生物质颗粒成型机箱体结构分析及优化[J]. 林业与木工机械,2013,41(10):21-25.
YUAN Dalong, YU Guosheng. Structure analysis and optimization of support body of a new biomass pellet forming machine[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2013,41(10):21-25. (in Chinese)
- 俞洋,俞国胜,德雪红,等. 基于 ADAMS 的柱塞式环模成型装置的轨迹仿真研究[J]. 北京林业大学学报,2014,36(3):1-5.
YU Yang, YU Guosheng, DE Xuehong, et al. Trajectory simulation of the internal cylinder meshing forming device based on ADAMS method[J]. Journal of Beijing Forestry University,2014,36(3):1-5. (in Chinese)
- 袁大龙. 生物质常温柱塞式环模颗粒成型机研究及设计[D]. 北京:北京林业大学,2014.

YUAN Dalong. The research and design of biomass pellet maker with plunger-ram die at normal temperature[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014. (in Chinese)

20 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)

21 朱海涛. 生物质燃料颗粒成型机的研究与试验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
ZHU Haitao. Test and research on the biomass solidifying machine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)

22 谷志新. 生物质致密成型过程模孔力学及参数优化研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.
GU Zhixin. Research on mechanics and parameter optimization of die hole in the process of biomass briquetting[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)

23 黄逢龙,刘大椿,邓欲,等. 林业剩余物颗粒燃料成型工艺[J]. 林业科技开发,2014,28(3):115–118.
HUANG Fenglong, LIU Dachun, DENG Yu, et al. Pelletisation process of forest residues as biofuel[J]. China Forestry Science and Technology,2014,28(3):115–118. (in Chinese)

24 NY/T 1883—2010 生物质固体成型燃料成型设备试验方法[S]. 2010.

25 NY/T 1878—2010 生物质固体成型燃料技术条件[S]. 2010.

26 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)

27 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)

28 张喜瑞,王俊霖,李粤,等. 香蕉秸秆颗粒燃料固体成型机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11):22–26.
ZHANG Xirui, WANG Junlin, LI Yue, et al. Design and experiment on biomass pellet densifying machine for banana stem[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(11):22–26. (in Chinese)

29 张喜瑞,甘声豹,李粤,等. 行星轮式内外锥辊固体燃料平模成型机研制与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(22):10–20.
ZHANG Xirui, GAN Shengbao, LI Yue, et al. Development and experiment on solid forming machine with planetary wheel style internal and external taper roller flat die[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(22):10–20. (in Chinese)

30 王明友,宋卫东,闵建兴,等. 菌渣颗粒燃料固化成型机的设计与试验[J]. 农机化研究,2014, 36(7):236–240.
WANG Mingyou, SONG Weidong, MIN Jianxing, et al. Design and experiment on biomass pellet densifying machine for residue[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(7):236–240. (in Chinese)

31 宁廷州,马阿娟,俞洋,等. 生物质环模颗粒成型存在的问题及对策分析[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):272–276.
NING Tingzhou, MA Ajuan, YU Yang, et al. Problems and countermeasure analysis on biomass ring die pellet formation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(1):272–276. (in Chinese)

32 景年盛. 固态生物质燃料颗粒成型设备与技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
JING Niansheng. Research on solid biomass fuel particles briquetting equipment and technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2012. (in Chinese)