

立式柱塞冲压生物质成型机设计与试验

蔡红珍^{1,2} 刘建彪^{1,2} 程卫东¹ 易维明^{1,2} 姜戌雅^{1,2} 高 锋³

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东省清洁能源工程技术研究中心, 淄博 255049;
3. 淄博能源研究院, 淄博 255049)

摘要: 针对目前生物质固化成型机多为生产生物质成型颗粒且成型颗粒质量不高、成型机高能耗等问题,提出了一种新型立式柱塞冲压的生物质固化成型方式,并制造了样机。样机以开关磁阻电机为动力源,驱动飞轮并转化为成型柱塞的上下往返直线运动,实现对模具内生物质原料的冲压成型,从而形成生物质成型块。该样机利用飞轮可积蓄能量的特性,有效降低了成型作业时的能耗。成型模具采用组合式结构设计,提高了原料适应性。以典型生物质原料玉米秸秆、松木屑为原料,在10%左右含水率、室温条件下进行了试验,结果表明该成型方法可行,且整机运行情况良好;生产的成型块密度大于等于 1.2 g/cm^3 ,抗跌碎性指数高于95%;样机能耗为 $36.51\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,各项指标均达到了相关标准的要求。该成型方法的提出和研究结果可为生物质成型机的发展提供借鉴与参考。

关键词: 生物质; 成型机; 立式; 柱塞; 冲压; 成型块

中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0435-07

Design and Experiment on Vertical Ram Compression Molding Machine

CAI Hongzhen^{1,2} LIU Jianbiao^{1,2} CHENG Weidong¹ YI Weiming^{1,2} JIANG Xuya^{1,2} GAO Feng³

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China
2. Shandong Research Center of Engineering and Technology for Clean Energy, Zibo 255049, China
3. Zibo Energy Research Institute, Zibo 255049, China)

Abstract: Biomass briquette is one of the most common energy fuels in some countries. It is essential to achieve the high-quality biomass briquette, since the quality has a direct influence on the efficiency of utilization. For the purpose to improve biomass pellet quality, a method of ram compression molding machine on the basis of the numerical control pressure device was conducted. The machine adopted a switched reluctance motor which had high starting torque and can stop/start frequent as a power source. It drove the flywheel by belt drive, then converted the rotary motion of flywheel into the up and down reciprocating motion of the plunger through the screw mechanism. The machine also took the property that flywheel can accumulate energy. The die consisted of three parts, with a structure of "straight - cone - straight". Any part with different size parameters can be replaced, which can suit for different biomass raw materials. Meanwhile, the lower end of the plunger always reciprocated in the die below the lower edge of the discharge port of the screw feeding device. At the moment, due to the discharge port was blocked, the biomass raw material was pre-compressed by the continuously screwing helical blade, which improved the subsequent molding efficiency. While working, the plunger would accelerate downwards based on the energy accumulated during the upward and the gravitational potential energy of the slider. Then, the biomass raw materials were compacted and squeezed out. Experiments were carried out with typical biomass raw materials, including corn stalks and sawdust. The results indicated that the molding method had a well feasibility. The briquette was 60 mm in diameter and different lengths. All the density of the briquettes was 1.2 g/cm^3 approximately, the drop resistance index was higher than 95%, and the power consumption was $36.51\text{ kW}\cdot\text{h/t}$. All indicators met the requirements of the relevant standards. The proposal of the forming machine can provide reference for the development of biomass densification technology.

Key words: biomass; molding machine; vertical; plunger; compression; briquette

0 引言

随着全球能源需求不断增加,能源在给人类发展带来便利的同时,随之也产生了诸多问题。一方面,煤、石油等传统化石能源的大量使用,使得其含量逐年降低;另一方面,大量使用化石能源带来了严重的气候变化问题。因此,无论是从能源的可持续使用还是环境安全,急需寻求一种资源量大、可再生、对环境友好的新能源。生物质能因其资源量大、可再生性以及低成本等优势,逐渐受到世界各国的重视。生物质能主要以农业废弃物和林业废弃物为主,此外还包括有畜禽粪便、城市生活垃圾和能源植物等^[1]。我国生物质资源丰富,资源化利用潜力巨大,每年的生物质资源总量约为 4.6×10^8 t 标准煤^[2-3]。但因其密度小、运输和储存成本高,很大一部分都被丢弃在田间地头或者就地焚烧,既造成了资源的浪费,也对环境造成了污染^[4-5]。基于此,生物质固化成型技术便应运而生。

生物质固化成型技术是将生物质原料经干燥、粉碎后,在一定的压力、温度、含水率等条件下,加工成具有一定形状、密度高、热值高的生物质成型燃料的过程。现阶段,生物质成型燃料的生产设备主要有螺旋挤压式、压辊式以及活塞冲压式3种形式^[6-9]。但是它们存在着以下问题:关键部件的磨损使得其使用寿命大大降低^[10-13],生物质原料物化特性的不同使得成型设备的适用性较低^[14-15],此外还存在能耗高、成型率和生产率低等问题^[16-20],这些因素都限制着成型设备的发展以及生产高品质的成型燃料。此外,现有的成型设备多是生产成型颗粒燃料,而对于大直径成型块及其生产装备的研究相对较少。

基于此,本文提出将数控压力装置用于生物质固化成型,生产大直径生物质成型块的成型方法,并制造样机,进行成型试验,以期为生物质成型设备的发展提供参考与借鉴。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

立式柱塞冲压生物质成型机总体结构如图1所示,由固定支撑部分、动力部分、传动部分、成型部分以及喂料部分等组成。其中,固定支撑部分主要由固定底座、基座以及立柱组成,地脚螺栓穿过固定底座并固定整机。动力部分主要由开关磁阻电机组成,开关磁阻电机具有起动转矩大、起动电流小的特点,能够满足频繁换向、快速制动等的要求。传动部分主要由带轮、传送带、飞轮、螺杆以及滑块组成,带

轮通过键连接的方式固接于电机输出轴上,螺杆是上下两段不连续的螺纹构造。螺杆上端通过花键与飞轮连接,中部与位于横梁内的螺母构成螺旋副连接,下端与滑块内的螺母构成螺旋副连接。成型部分主要由成型柱塞、成型模具组成,成型柱塞与滑块通过螺栓固定在一起,成型模具位于成型柱塞正下方,通过螺栓固定在工作平台上。成型模具为组合式结构设计,由直-锥-直3段构成,可根据不同的生物质原料更换某段。喂料部分主要由喂料电机、螺旋轴、进料口等组成。

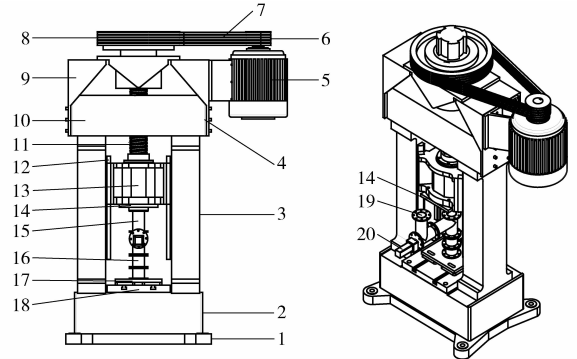


图1 立式柱塞冲压生物质成型机整机结构图

Fig.1 Structure diagram of molding machine

1. 固定底座 2. 基座 3. 立柱 4. 电机支架 5. 电机 6. 带轮
7. 传送带 8. 飞轮 9. 支架 10. 横梁 11. 螺杆 12. 滑轨
13. 滑块 14. 柱塞板 15. 成型柱塞 16. 成型模具 17. 模具底板
18. 模具固定底座 19. 喂料口 20. 喂料电机

1.2 工作原理

作业时,电机启动,经由带传动带动飞轮和螺杆转动,在螺母的作用下,螺杆的旋转运动转化为成型柱塞的上下往复运动,从而不断地冲压位于成型模具的生物质原料。向上行程时,电机带动下飞轮旋转积蓄能量。向下行程时,成型柱塞依靠向上行程积蓄的能量和滑块的重力势能加速向下。如图2所示,每次作业初始时,成型柱塞的下端面位于上止点位置。开始作业后,成型模具下端面由初始位置运动至下止点位置,将较为松散的生物质原料进行压缩,之后的作业中,成型柱塞的下端面往返运动于中止点和下止点之间,达到设置的打击次数后,被提起至初始位置,完成成型作业。在成型柱塞往返的过程中,喂料出料口一直处于被成型柱塞堵住的状态,而在此过程里,螺旋喂料装置一直处于工作状态。由于出料口被堵住,不断旋进的螺旋叶片将松散的生物质原料进行初步压缩。作业完成,成型柱塞被提起至上止点后,初步压缩的生物质原料被送入模具内,完成后续成型。

综合上述分析可以得出,该设计的优点在于:将数控压力装置用于生物质固化成型,实现了成型压

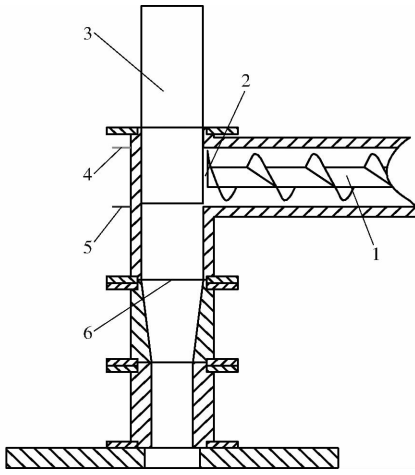


图 2 成型原理图

Fig. 2 Principle of molding

- 1. 螺旋轴 2. 喂料出料口 3. 成型柱塞 4. 上止点 5. 中止点
- 6. 下止点

力和冲压次数的精确控制;利用飞轮可积蓄能量的特性,向下冲压时充分利用上行时积蓄的能量,有效降低了作业能耗;组合式结构设计的模具,可适用于多种生物质原料,有效提高了成型机原料适应性。

2 关键部件分析与设计

2.1 模具

成型作业主要依靠成型压力、生物质原料与成型模具间的摩擦阻力以及锥形成型腔形成的向中间的挤压力等多方面因素实现。而这些力中,除了成型压力外,均与成型模具的结构参数有着很大的关系。因此,为了确定成型模具的结构参数,对成型模具进行受力分析就很有必要。

成型模具的受力分析如图 3 所示,主要包括成型压力 F 和物料与模具壁间的摩擦力 F_1 、 F_2 和 F_3 。

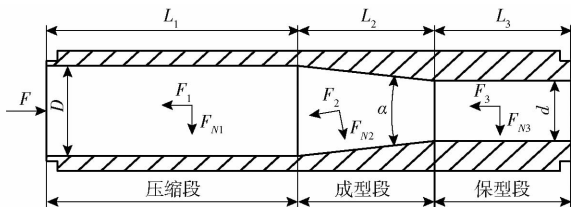


图 3 成型模具受力分析

Fig. 3 Force analysis of forming mold

松散的生物质原料经由成型柱塞打击,形成生物质成型块,并从出料口落下。成型块从出料口顺利落下,则应有

$$F \geq F_1 + F_{N2} \sin \frac{\alpha}{2} + F_2 \cos \frac{\alpha}{2} + F_3 \quad (1)$$

式中 F_1 ——模具压缩段内壁对生物质原料的摩擦力, N

F_2 ——模具成型段内壁对生物质原料的摩擦力, N

α ——模具锥角, ($^\circ$)

F_3 ——模具保型段内壁对生物质原料的摩擦力, N

F_{N2} ——生物质原料对模具成型段内壁的正压力, N

取临界状态, 即

$$F = F_1 + F_{N2} \sin \frac{\alpha}{2} + F_2 \cos \frac{\alpha}{2} + F_3 \quad (2)$$

$$\text{即 } F = \mu_1 F_{N1} + F_{N2} \sin \frac{\alpha}{2} + \mu_2 F_{N2} \cos \frac{\alpha}{2} + \mu_3 F_{N3} \quad (3)$$

式中 μ_1 ——生物质原料与模具压缩段间的摩擦因数

μ_2 ——生物质原料与模具成型段间的摩擦因数

μ_3 ——生物质原料与模具保型段间的摩擦因数

F_{N1} ——生物质原料对模具压缩段内壁的正压力, N

F_{N3} ——生物质原料对模具保型段内壁的正压力, N

又因为压强等于所受压力与受力面积之比, 即有

$$F_{N1} = p_1 A_1 \quad (4)$$

$$F_{N2} = p_2 A_2 \quad (5)$$

$$F_{N3} = p_3 A_3 \quad (6)$$

其中

$$A_1 = \pi D L_1 \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{\pi(D+d)L_2}{2} \quad (8)$$

$$A_3 = \pi d L_3 \quad (9)$$

式中 p_1 ——模具压缩段内壁所受压强, Pa

p_2 ——模具成型段内壁所受压强, Pa

p_3 ——模具保型段内壁所受压强, Pa

A_1 ——模具压缩段面积, mm^2

A_2 ——模具成型段面积, mm^2

A_3 ——模具保型段面积, mm^2

D ——压缩段内径, mm

d ——保型段内径, mm

L_1 ——模具压缩段长度, mm

L_2 ——模具成型段长度, mm

L_3 ——模具保型段长度, mm

代入式(3), 有

$$F = \mu_1 \pi D L_1 p_1 + \frac{1}{2} \pi (D+d) L_2 p_2 \left(\mu_2 \cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} \right) + \mu_3 \pi d L_3 p_3 \quad (10)$$

现假设:

(1) 模具内摩擦因数处处相等, 即

$$\mu = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

(2) 模具内压强处处相等, 即

$$p = p_1 = p_2 = p_3$$

则式(10)可简化为

$$F = \mu \pi p (DL_1 + dL_3) + \frac{1}{2} \pi p L_2 (D + d) \left(\sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) \quad (11)$$

由式(11)可以看出,对于每次成型作业,其成型压力 F 一定的情况下,成型块的品质与模具的结构尺寸参数等有着密切的关系。

基于经验,通过计算,该样机试验模具设计参数如下:保型段内径为 60 mm,长度为 120 mm,成型段长度为 130 mm,锥角为 4° ,压缩段长度为 230 mm,内径为 90 mm。

2.2 喂料装置

在对比分析现有喂料装置的基础上^[21-24],结合试验用料的理化特性,该成型机喂料装置选用螺旋输送装置,其结构如图4所示。

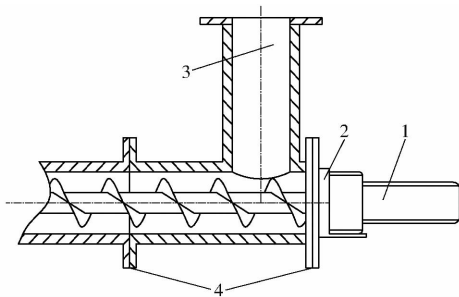


图4 喂料装置结构图

Fig.4 Structure diagram of feeding device

1. 喂料电机 2. 电机固定架 3. 喂料口 4. 连接法兰盘

2.2.1 螺旋叶片直径确定

螺旋叶片直径主要决定于输送量和被送物料的理化特性,计算公式为^[25]

$$D_1 \geq K \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\varphi \rho C}} \quad (12)$$

式中 D_1 ——螺旋叶片直径,mm

Q ——物料设计输送量,t/h

ρ ——物料堆积体积质量,t/m³

φ ——输送时物料在输送装置内的填充系数,取 0.3

K ——物料的综合特性因数,取 0.049

C ——校正系数,取 1

2.2.2 螺旋轴转速确定

螺旋轴转速通常是由输送量、螺旋叶片直径和被送物料的特性决定。一般情况下,螺旋轴转速不宜过高,以免物料受到过大的切向力而被抛起,从而无法完成输送;同时,转速过高也会加重磨损。

螺旋轴的最大许可转速的计算公式为

$$n \leq \frac{A}{\sqrt{D_1}} \quad (13)$$

式中 n ——螺旋轴允许最大转速,r/min

A ——输送物料综合特性因数,取 50

2.2.3 功率计算与驱动装置选择

电动机的功率主要是由喂料装置在运转过程中所产生的阻力决定。这些阻力主要包括:物料与输送装置外壳之间的摩擦阻力;物料与螺旋面之间的摩擦阻力;轴承装置内的摩擦阻力;物料被搅拌、撕碎以及堆积所产生的附加阻力。

对于功率的计算,一般采用经验公式的方法,计算公式为

$$P = kmg(\omega_0 L \pm H) \quad (14)$$

式中 P ——功率,W

k ——功率备用因数,取 1.2 ~ 1.4

m ——质量输送量,kg/s

g ——重力加速度,m/s²

ω_0 ——物料总阻力系数,取 1.2

L ——喂料装置水平投影长度,mm

H ——喂料装置垂直投影高度,mm

3 试验

3.1 试验原料与仪器

玉米秸秆取自山东省淄博市,松木屑取自山东省潍坊市。新鲜原料自然风干晾晒 7 d 后,使用 WN-300A 型粉碎机(广州旭朗机械有限公司)进行粉碎,之后密封保存在通风干燥处备用。

每种原料取出一小部分,依据 GB/T 28731—2012《固体生物质燃料工业分析方法》对其进行工业分析,并使用自动元素分析仪进行元素分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 原料的工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of raw materials

原料种类	工业分析(质量分数)				元素分析(质量分数)				
	水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	O	N	S
玉米秸秆	10.2	66.2	8.8	14.8	41.97	5.80	42.21	1.12	0.06
松木屑	8.8	79.2	0.6	11.4	47.52	6.34	45.39	0.14	0

注:O 元素质量分数通过差减法获得。

3.2 试验方法

成型试验在室温条件下进行,试验原料含水率

10%左右。主要对成型块的密度、耐久性等特性进行研究^[26-30]。

3.2.1 成型块密度

密度的测定方法参考标准 NY/T 1881.7—2010。

随机选取成型块作为样品,先用天平称量,之后用蜡涂封,通过测定成型块在空气中的质量与在随后液体中测定质量的差值来测定浮力,再计算出蜡燃料样品的体积,减去蜡的体积后,即为成型块的体积。成型块密度的计算公式为

$$\rho_1 = \frac{m_c}{V} \quad (15)$$

式中 ρ_1 ——密度, g/cm^3

m_c ——质量, g

V ——体积, cm^3

3.2.2 耐久性

耐久性主要体现在成型块的使用性能和储藏性能方面。耐久性一般分为抗变形性、抗跌碎性、抗滚碎性、抗渗水性以及抗吸湿性等^[31]。基于试验条件和试验设备以及成型块的使用性能,本试验只对成型块的抗变形性、抗跌碎性进行研究分析。

(1) 抗变形性

在成型过程中,生物质原料受到的成型压力来自于轴向,所以成型块的轴向抗压力要明显强于径向抗压力。因此,以成型块径向所能承受的最大压力作为成型块的抗压强度。试验随机选取样品进行测试,每次测定 3 个样品,取平均值作为最后的结果。

(2) 抗跌碎性

由于生物质成型燃料抗跌碎性的测定尚未有统一的标准,抗跌碎性的测定方法借鉴煤的落下强度测定方法(GB/T 15459—2006)。随机选取生物质成型块,从 2 m 高处自由落到厚度不小于 15 mm 的钢板上,然后将下落到钢板上的成型块再次落下,共落下 3 次。在每次成型块落下前,都应对钢板进行打扫,保证钢板上清洁无杂物。

抗跌碎性指数计算公式为

$$S = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (16)$$

式中 S ——成型块的抗跌碎性指数, %

m_1 ——3 次落下试验后成型块的质量, g

m_2 ——落下试验前成型块的质量, g

3.3 结果与分析

成型块外观形貌如图 5 所示,各项试验结果如表 2 所示。

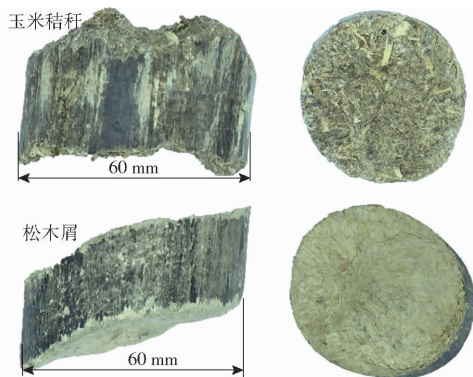


图 5 成型块外观形貌

Fig. 5 Morphology of biomass briquette

表 2 成型块测试结果

Tab. 2 Testing results of biomass briquette

原料种类	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强 度/ kN	抗跌碎性 指数/%	能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$)
玉米秸秆	1.27	3.58	99.3	36.51
松木屑	1.20	2.39	98.2	36.51

结合图 5 和表 2 可以看出,在成型机整机运行情况良好的情况下,生产的成型块较为紧实,直径在 60 mm 左右,密度可达到 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$,抗跌碎性指数高于 95%,各项指标均达到了相关标准的要求。样机能耗为 $36.51 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$,同传统环模生物质成型机 ($50.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$) 和平模生物质成型机 ($38 \sim 49 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$) 相比,能耗大大降低^[8,14]。

4 结论

(1) 提出了将数控压力装置用于生物质固化成型的成型方法,并制造了样机,通过试验验证了此成型方法的可行性。

(2) 成型模具采用组合式结构设计,由 3 段不同尺寸参数的模具段组成,提高了原料适应性。

(3) 生产的成型块直径均在 60 mm 左右,密度大于等于 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$,抗跌碎性指数大于 95%,各项指标均达到了相关标准的规定值。样机能耗为 $36.51 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$,低于其他类型生物质成型机。

参 考 文 献

[1] MCKENDRY P. Energy production from biomass (Part 1): overview of biomass[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(1):37-46.
 [2] 国家能源局. 生物质能发展“十三五”规划[EB/OL]. 2016. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/06/content_5143612.htm.
 [3] 毋高峰,刘云鹏,吕风朝,等. 活塞冲压式棒状生物质成型机成型筒的优化设计[J]. 河南农业大学学报,2017,51(3):341-347,369.
 WU Gaofeng, LIU Yunpeng, LÜ Fengchao, et al. Optimum design of the molding drum of the piston punch biomass briquetting machine[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(3):341-347,369. (in Chinese)

- [4] 方放,李想,石祖梁,等.黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J].农业工程学报,2015,31(2):228-234. FANG Fang, LI Xiang, SHI Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 228-234. (in Chinese)
- [5] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 139-143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.025. (in Chinese)
- [6] TUMULURU J, WRIGHT C, HESS J, et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application[J]. Biofuels Bioproducts & Biorefining, 2011, 5(6):683-707.
- [7] ZHOU Y, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. A comprehensive review on densified solid biofuel industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54:1412-1428.
- [8] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):220-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150531&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.031. (in Chinese)
- [9] DILPREET S, TYLER P, NEETA S, et al. A review of densified solid biomass for energy production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 96:296-305.
- [10] 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)
- [11] 刘圣勇,杨国峰,杨群发,等.螺杆挤压式生物质成型机优化设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(7):96-100. LIU Shengyong, YANG Guofeng, YANG Qunfa, et al. Optimal design and experiment of screw briquetting biomass fuel machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):96-100. (in Chinese)
- [12] 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):32-39. 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):32-39. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 郝彦辉,姚宗路,赵立欣,等.平模式成型机关键部件设计及秸秆类原料适应性试验[J].可再生能源,2019,37(4):495-500. HAO Yanhui, YAO Zonglu, ZHAO Lixin, et al. Design of the key components of flat die forming machine and the adaptability test of straw raw materials[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4):495-500. (in Chinese)
- [15] 付敏,韩立志,张水,等.对辊式生物质压块机的设计与试验[J].可再生能源,2017,35(5):645-652. FU Min, HAN Lizhi, ZHANG Shui, et al. Design and experiment of the double-roll biomass briquetting machine[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(5):645-652. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 刘平义,骆海敏,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)
- [18] 董磊,盖超,董玉平.生物质液压成型影响因素分析[J].农业机械学报,2011,42(7):139-143. DONG Lei, GAI Chao, DONG Yuping. Numerical study on process and influencing factors of biomass hydraulic briquetting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):139-143. (in Chinese)
- [19] PHANI A, GREG S, LOPE T, et al. Compression of fractionated sun-cured and dehydrated alfalfa chops into cubes—specific energy models[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(1):38-45.
- [20] 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)
- [21] 冯莉,李天舒,徐凯宏.生物质燃料粉碎成型机螺旋运输装置设计[J].森林工程,2015,31(3):101-105. FENG Li, LI Tianshu, XU Kaihong. Design of screw conveyor device for biomass crushing and molding machine[J]. Forest Engineering, 2015, 31(3):101-105. (in Chinese)
- [22] 张德高,陆永光,谢焕雄.农业颗粒物料气力输送技术概况与发展[J].食品工业,2016,37(10):200-203. ZHANG Degao, LU Yongguang, XIE Huanxiong. Overview and development of agriculture particle pneumatic conveying

- technology[J]. The Food Industry, 2016, 37(10):200-203. (in Chinese)
- [23] 乌兰图雅,王春光.螺旋输送装置的研究现状及未来发展[J].农机化研究,2014,36(11):244-248.
Wulantuya, WANG Chunguang. Present situation and future development of screw conveyor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11):244-248. (in Chinese)
- [24] 白晓虎,李芳,张祖立,等.秸秆螺旋喂料装置工作性能的试验研究[J].农机化研究,2007,29(2):162-163,181.
BAI Xiaohu, LI Fang, ZHANG Zuli, et al. Working performance of screw feeding device for straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(2):162-163,181. (in Chinese)
- [25] 柳善建,王帅超,李永军,等.防回火农林生物质碎料燃烧机设计与燃烧特性试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(7):346-354.
LIU Shanjian, WANG Shuaichao, LI Yongjun, et al. Design and combustion characteristics experiment of biomass crushed aggregates burner for anti-tempering maize straw and wood chips[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):346-354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200739&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.039. (in Chinese)
- [26] 李伟振,姜洋,饶曙,等.玉米秸秆和木屑及木钠混配成型工艺参数优化[J].农业工程学报,2018,34(1):198-203.
LI Weizhen, JIANG Yang, RAO Shu, et al. Parameter optimization of corn stover blended with sawdust and sodium lignosulphonate compression experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):198-203. (in Chinese)
- [27] XIA X, ZHANG K, XIAO H, et al. Effects of additives and hydrothermal pretreatment on the pelleting process of rice straw: energy consumption and pellets quality[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 133(2):178-184.
- [28] 姜洋,李伟振,蒋恩臣,等.成型参数对桉树加工剩余物成型颗粒品质影响的实验研究[J].太阳能学报,2017,38(4):900-905.
JIANG Yang, LI Weizhen, JIANG Enchen, et al. Experimental research of effect of molding parameters on quality of eucalyptus residue pellets[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(4):900-905. (in Chinese)
- [29] 姚云隆,张守玉,吴顺延,等.成型工艺参数对生物质热压成型燃料理化特性的影响研究[J].太阳能学报,2018,39(7):1917-1923.
YAO Yunlong, ZHANG Shouyu, WU Shunyan, et al. Effect of briquetting process parameters on properties of briquette prepared from biomass[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(7):1917-1923. (in Chinese)
- [30] NOHA S, MAHMOUD M, ANGELA G, et al. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 138:56-64.
- [31] 盛奎川,吴杰.生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J].农业工程学报,2004,20(2):242-245.
SHENG Kuichuan, WU Jie. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):242-245. (in Chinese)

(上接第 434 页)

- [18] TONG X, HONG S W, ZHAO L. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162:281-299.
- [19] HAN H, SHIN C Y, LEE I B, et al. Tracer gas experiment for local mean ages of air from individual supply inlets in a space with multiple inlets[J]. Building and Environment, 2011, 46(12):2462-2471.
- [20] LI H, RONG L, ZHANG G. Reliability of turbulence models and mesh types for CFD simulations of a mechanically ventilated pig house containing animals[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161:37-52.
- [21] LI H, RONG L, ZHANG G. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house[C]//CIGR/AgEgen2016/CFD Symposium, 2016:1-20.
- [22] WANG X S, ZHANG G Q, CHOI C Y. Effect of airflow speed and direction on convective heat transfer of standing and reclining cows[J]. Biosystems Engineering, 2018, 167:87-98.
- [23] LI H, RONG L, ZHANG G Q. Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:203-210.
- [24] LI H, RONG L, ZONG C, et al. A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150:151-159.
- [25] LI H, RONG L, ZHANG G Q. CFD prediction of convective heat transfer and pressure drop of pigs in group using virtual wind tunnels: influence of grid resolution and turbulence modelling[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184:69-80.
- [26] 中国农业大学.一种用于畜禽舍环境的风速监测系统:201821682880.5[P].2018-10-17.