doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.043

内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机设计与试验

德雪红[1]　吴桂芳[1]　李南丁[1]　张建超[1]　郭文斌[1]　李　震[2]
(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010)

摘要: 针对传统环模生物质成型机能耗高、磨损严重的问题,提出了一种环模生物质致密成型方法,并设计了内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机样机。该样机通过压辊轴上柱塞凸模与环模体上成型孔之间的类齿轮啮合运动,实现柱塞凸模对环模体成型孔内物料的挤压压缩,使松散物料形成一定密度的颗粒状物料。为适应不同的生物质物料,环模体成型孔的长径比可以进行调整。以颗粒度为 1 ~ 3 mm 的木屑为物料,在物料含水率为 15%、压辊轴转速为 60 r/min、室温条件下进行了试验。结果表明:内啮合行星轮柱塞式环模生物质成型方法可行,该样机生产率为 115 kg/h、颗粒成型率 96.2%、成型密度 1.05 g/cm^3、机械耐久性指数 97.5%、能耗约为 45 kW·h/t,各项指标均达到设计要求;比其他同规格传统环模成型机能耗降低了 25.4%,比螺旋挤压成型机能耗降低了 50%;样机关键部件磨损降低,使用寿命得到提高。

关键词: 生物质; 行星轮柱塞式; 环模成型机
中图分类号: S216　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0379-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Epicyclic Train Structured Biomass Ring-die Briquetting Machine with Plunger Roller

DE Xuehong[1]　WU Guifang[1]　LI Nanding[1]　ZHANG Jianchao[1]　GUO Wenbin[1]　LI Zhen[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010020, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Inner Mongolia University of Science and Technology*, *Baotou* 014010, *China*)

Abstract: Targeting on the problems of high energy consumption and severe abrasion for conventional ring-die briquetting machine, a new method was put forward to densify the biomass materials and also a prototype machine of epicyclic gear train structured ring-die briquetting machine with plunger roller was designed. The prototype machine can effectively compress loose materials into pellets of certain density through pressing movement of plungers of roller into the forming channels of ring-die, which altogether resemble a mating pair of gears: the plungers of roller fitting into the channels of ring-die as a pair of gears meshing with each other. For a good adjustment to diverse biomass materials, the ratio of length to diameter of forming channels can be altered. Experiments were conducted upon the prototype machine with materials (sawdust) of particle size of 1 ~ 3 mm and 15% of moisture content at room temperature and 60 r/min of roller rotational speed. The test results with productivity of 115 kg/h, briquetting rate of 96.2%, bulk density of 1.05 g/cm^3, mechanical durability of 97.5% and an overall power consumption of 45 kW·h/t all met the design requirements and hence the machine was proved to be satisfactorily workable, and at the same time, the energy consumption was reduced by 25.4% compared with that of the common ring-die press with similar specifications, while a 50% reduction of energy consumption was observed compared with the screw extrusion type briquetting machine. Furthermore, the wear of key components were considerably diminished and thus prolonged service life could be affirmatively expected. The biomass briquetting method can strongly support as a reference for the optimization of design and application of ring-die briquetting machine.

Key words: biomass; plunger roller epicyclic train structure; ring-die briquetting machine

收稿日期: 2020-07-10　修回日期: 2020-08-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51766016、51666016、31960365)和内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY20045)
作者简介: 德雪红(1977—),女,副教授,博士,主要从事机械设计和生物质能加工利用装备研究,E-mail: dexuehong@126.com
通信作者: 吴桂芳(1972—),女,教授,博士,主要从事农牧业装备智能化研究,E-mail: wgfsara@126.com

0 引言

生物质能作为仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源,因具备低污染、可再生性、分布广泛且储备量大等诸多优点,其开发与利用受到世界各国的广泛关注[1-3]。生物质常温固化成型技术可以将农林剩余物经过机械压缩方法加工成具有一定形状和密度的块状、棒状或颗粒状燃料,这些颗粒燃料热值高、无污染、储运方便,已成为国内外生物质固化成型的研究热点[4-5]。目前,生物质成型设备主要分为活塞冲压式、螺旋挤压式和辊压式等,而辊压式成型机的研究主要集中于环模成型机和平模成型机[6-8],此类成型机原料适应性强、生产效率较高,是固化成型设备研究与开发的热点。

根据国内外相关研究[9-22]可知,环模成型主要存在的技术问题包括:部分投入生产的环模成型机有效压缩成型率低;传统环模成型机采用模辊外曲面挤压形式,其成本高、能耗大及关键零部件磨损严重。

基于上述问题,本文设计一种内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机。该成型机在压辊周向布有数列与其轴心呈一夹角的压缩凸模,使其在旋转过程中实现压缩凸模与环模成型孔的位置啮合,在完成物料高效压缩同时,可有效避免成型孔外物料所受的压辊挤压与摩擦,以解决同类型成型机关键部件磨损严重、能耗大的问题。

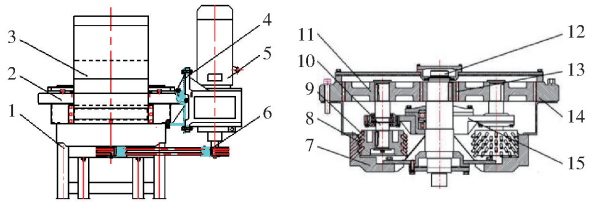
1 结构与工作原理

1.1 成型机结构

如图 1a 所示,内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机主要由主机支架、主机装置、加料漏斗、动力支架、动力源、带轮等组成。其中主机装置是设计核心,为回转体式结构,如图 1b 所示,包括主轴、环模体、压缩凸模、压辊体、压辊轴、联轴座、直齿圆柱内齿轮、压辊轴齿轮、主轴齿轮等。

1.2 工作原理

本设计所选动力源为 YE3 - 180L - 6 型电动机,其参数包括:额定转矩 146.9 N·m、额定转速 975 r/min、额定功率 15 kW、额定电压 380 V、额定频率 50 Hz。工作时,通过减速器将动力输出经窄 V 带传动传递至主轴上,带动主轴齿轮和 2 个压辊轴齿轮在内啮合直齿圆柱齿轮内旋转,构成行星轮结构,如图 1b 所示。其中主轴齿轮为太阳轮,而压辊轴齿轮为行星轮,内啮合圆柱齿轮通过螺栓固定在支架上。2 个压辊轴齿轮对称布置于主轴两侧,带动压辊轴及压辊体自转并围绕主轴在环模体内旋转。压辊上均布一系列 45°柱塞,可与环模体上均布的模孔正确位置啮合。



(a) 总体结构图 (b) 主机装置剖视图

图 1 成型机装配示意图

Fig. 1 Assembly diagrams of briquetting machine

1. 主机支架 2. 主机装置 3. 加料漏斗 4. 动力支架 5. 动力源 6. 带轮 7. 环模体 8. 压缩凸模 9. 压辊体 10. 压辊轴 11. 压辊轴齿轮 12. 主轴 13. 主轴齿轮 14. 直齿圆柱内齿轮 15. 联轴座

此时,物料经加料漏斗被送入滚压区域,并进入环模体和压辊体之间,在物料与环模体和物料与压辊体之间摩擦力的作用下,部分物料被压入成型孔中。与此同时,压辊体上的压缩凸模逐渐和与之相对应的环模成型孔进行位置啮合而压入成型孔中,此时物料继续被凸模压入成型孔,之后凸模又逐渐分离。压辊体每转一圈,环模成型孔中的物料都要经过填充、凸模挤压的过程,生物质松散物料最终在成型孔中一层一层致密成型,最后成为具有一定密度和长度的颗粒型燃料,并被挤出成型孔外。其关键部件工作原理图如图 2 所示。

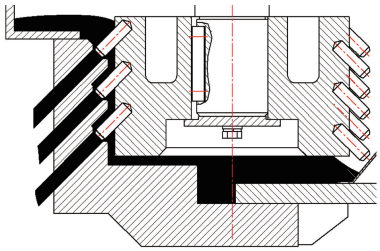


图 2 工作原理图

Fig. 2 Diagram of working principle

设置压缩凸模的目的,是利用类似内齿轮啮合原理,使压缩凸模在啮合力的作用下产生推挤力来推送物料入成型孔(图 2),使物料在成型过程中,降低压辊体和环模体之间的摩擦磨损、降低成本并提高成型效率。从工作原理可以看出,本设计优点为:利用压辊体和环模体间严格的相位关系来实现压缩凸模和成型孔之间的位置啮合来推挤物料成型,降低了压辊体和环模体间的磨损,以提高其寿命;由压辊体为主要磨损件转化为压缩凸模为主要磨损体,因压缩凸模制造成本低,从而降低了整体成本;利用啮合机理产生的推送力成型方式大大降低了能量损耗,效率也大大提高,同时实现高效和节能。

1.3　技术要求

根据设计要求，内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机构应满足定比关系

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

式中　N_1——压辊压缩凸模个数

N_2——环模成型孔个数

z_1——压辊轴齿轮齿数

z_2——直齿圆柱内齿轮齿数

n_1——压辊转速，r/min

n_2——环模转速，r/min

根据式(1)得到成型机的主要设计技术参数，如表 1 所示。

表 1　成型机主要设计技术参数

Tab. 1　Main design parameters of briquetting machine

参数	数值
电动机功率/kW	15
柱塞数	72
成型孔数	228
压缩凸模直径/mm	8
成型孔直径/mm	8
成型物料截面直径/mm	8
压辊凸模啮合圆直径/mm	160
环模成型孔啮合圆直径/mm	540
直齿圆柱内齿轮齿数	160
压辊轴齿轮齿数	65
齿轮模数/mm	3
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.12×1.0×1.07
整机质量/kg	1 450

2　关键部件运动干涉分析

环模成型机运行过程中的关键技术点是保证压辊体压缩凸模与环模成型孔不出现干涉现象。根据表 1 中的结构参数，在 SolidWorks 中构建成型机构实体模型，如图 3 所示，按行星轮齿轮啮合机理进行虚拟装配，调整初始位置，使其在成型区啮合。在 Motion 模块中添加运动分析算例，对该成型机压缩凸模和环模成型孔关键部位运行取点，为压辊体和环模体添加转速比为 1 的旋转马达，进行运动轨迹追踪。经仿真分析发现，压辊凸模能够与环模成型孔很好地啮合工作，无干涉，运动啮合瞬时状态如图 4(图 4a～4c 表示运动顺序，即瞬时状态(1 号凸横)，图 4d、4e 表示运动顺序(2 号凸横)，图中 1、2 表示啮合瞬时的不同行的凸模)所示。

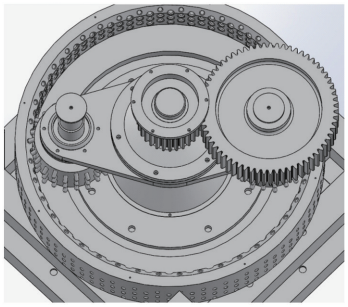


图 3　实体模型

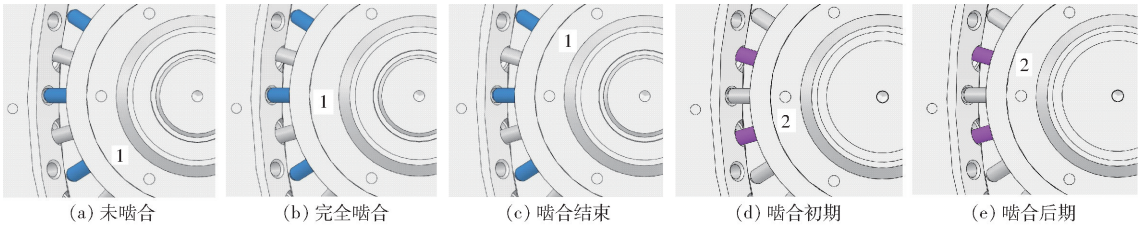
Fig. 3　3-D assembly model

3　关键部件受力分析

3.1　环模关键部件

如图 5 所示，柱塞式压辊在旋转力矩 M 的作用下，以 n_1 转速旋转。压缩凸模(长度 $L=25$ mm)旋转到 p_1(靠近)和 p_3(远离)位置时只与环模成型孔周围及压辊和环模体之间的物料接触挤压，但此时挤压力非常小，可忽略不计；当压缩凸模旋转到 p_2 处时，与环模成型孔边的物料接触，产生一定的摩擦和挤压，并利用旋转作用卷起并推送部分物料；当其旋转到 p_1 处位置时，压缩凸模开始与成型孔啮合，此时物料被部分推入环模成型孔处；当其到达 p_2 处位置时实现完全啮合，进入深度 H_0($H_0=6$ mm)，此时，物料在啮合瞬时被压缩凸模压入环模成型孔深处；随后，柱塞式压辊继续旋转，压缩凸模继而到达 p_3 处位置，即逐渐退出环模成型孔，完成一次啮合。压缩凸模实际受力为空间综合力 F_z，如图 5a 所示。为了方便分析，可将其分解为径向分力 F_r、轴向分力 F_t 以及切向分力 F_f，如图 5b 所示，F_t 与 F_r 之合力记为 F_s，即压缩凸模所受沿中心轴向力。

根据齿轮啮合机理知，在 p_1～p_3 点成型区内，压缩凸模与成型孔啮合瞬时完成，停留时间极短，故可将其受力过程近似为一个稳态情况进行分



(a) 未啮合　(b) 完全啮合　(c) 啮合结束　(d) 啮合初期　(e) 啮合后期

图 4　运动瞬时啮合状态图

Fig. 4　Instantaneous states of meshing

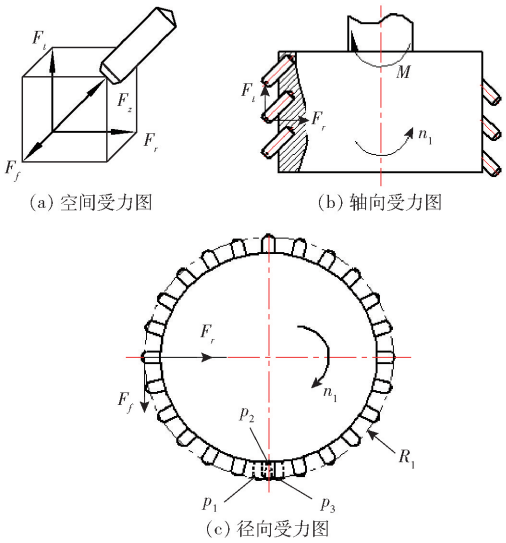


图 5 压缩凸模受力分析图

Fig. 5 Force analysis of compression punch

析。R_1为柱塞式压辊体压缩凸模啮合圆半径,R_2为环模体成型孔啮合圆半径。则有

$$\begin{cases} F_z = \sqrt{F_s^2 + F_f^2} = \sqrt{F_r^2 + F_t^2 + F_f^2} \\ F_r = F_s \sin\beta \\ F_t = F_s \cos\beta \end{cases} \tag{2}$$

式中 β——压缩凸模 F_s 与 F_t 夹角,取 45°

压辊体在旋转过程中压缩凸模(图 4b 及图 5c)受到的切向分力 F_f 对压辊体产生的阻力矩为

$$T = mn(F_{fp1} + F_{fp2} + F_{fp3})\left(R_1 + H + \frac{x}{2}\right) \tag{3}$$

式中 T——压缩凸模所受切向分力 F_f 的阻力矩,N·m

m——啮合瞬时参与啮合压缩凸模行数,取 3

n——压辊体个数,取 2

F_{fp1}——某列压缩凸模进入啮合区并实现初步啮合时受到的切向分力,N

F_{fp2}——某列正在位置啮合处完全啮合时压缩凸模受到的切向分力,N

F_{fp3}——某列压缩凸模在啮合区并准备离开啮合处时受到的切向分力,N

x——环模体外表面和压辊体外表面在啮合处之间的直线距离,m

H——物料被挤出长度,m

整个压辊体在工作过程中受到的径向力合力 F_{rz} 计算式为

$$F_{rz} = mn(F_{rp1} + F_{rp2} + F_{rp3}) \tag{4}$$

式中 F_{rp1}——某列压缩凸模进入啮合区并实现初步啮合时受到的径向分力,N

F_{rp2}——某列正在位置啮合处完全啮合时压缩凸模受到的径向分力,N

F_{rp3}——某列压缩凸模在啮合区并准备离开啮合处时受到的径向分力,N

整个压辊体在工作过程中受到的轴向力合力 F_{tz} 计算式为

$$F_{tz} = mn(F_{tp1} + F_{tp2} + F_{tp3}) \tag{5}$$

式中 F_{tp1}——某列压缩凸模进入啮合区并实现初步啮合时受到的轴向分力,N

F_{tp2}——某列正在位置啮合处完全啮合时压缩凸模受到的轴向分力,N

F_{tp3}——某列压缩凸模在啮合区并准备离开啮合处时受到的轴向分力,N

压缩凸模所受力 F_z 在内齿轮啮合过程中实际上是变化的,变化规律服从齿轮啮合受力过程规律,但由于啮合速度快而使变化时间极短,为便于分析,将其简化为在完全啮合即压缩凸模轴线与成型孔轴线重合瞬时所受力峰值为恒定力,由此可得压辊体压缩凸模最大单位挤压力 p_0 取 80 MPa[23-24]。

3.2 传动装置关键部件

3.2.1 压辊轴

压辊轴受力状态如图 6 所示,压辊轴承受来自压辊体的外力,在压辊体上的压缩凸模与环模体上的成型孔实现位置啮合的过程中,单个成型孔中的物料给压缩凸模反作用力 F'_s,也同时作用在压辊轴上,则有

$$F'_{sz} = mF'_s = m\sqrt{F_t^2 + F_r^2} = \sqrt{F_{tz}^2 + F_{rz}^2} \tag{6}$$

$$T_1 = \sum_{i=1}^{m} F_{rz} L_i \tag{7}$$

式中 T_1——压辊轴所受转矩,N·m

F'_{sz}——压辊轴沿45°轴向力合力,N

L_i——压辊轴某行压缩凸模距离联轴器支撑处长度,m

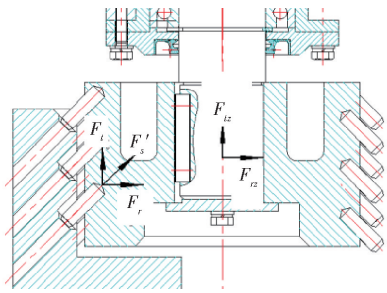


图 6 压辊轴受力分析图

Fig. 6 Force analysis of plunger roller axis

3.2.2 环模轴

环模轴受力状态如图 7 所示,环模轴主要受力于联轴座和主轴齿轮:受联轴座所传压缩凸模径向合力 F_{rz} 和向上轴向合力 F_{tz} 作用,受主轴齿轮所传环模体的径向反作用合力 F'_{rz} 和向下反作用合力 F'_{tz} 以及力矩 M_1 作用。在本设计中环模体内 180°对称

布置了 2 个压辊体，压辊体通过压辊轴及压辊轴齿轮与主轴齿轮及主轴相连。故环模轴在压缩物料过程中水平方向上所受径向力 F_r 及竖直方向上 F_t 相互抵消，且所受力矩也相互抵消。

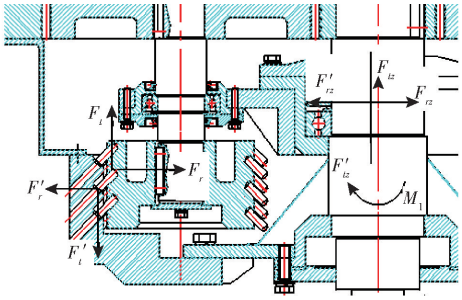


图 7　环模轴受力分析图

Fig. 7　Force analysis of spindle

4　关键零部件选取与设计

4.1　柱塞式压辊部件

内啮合行星轮柱塞式生物质环模成型机运行过程中的功率主要消耗在压辊体在物料挤压区和压缩凸模在压紧成型区对物料所做的功。故压缩凸模在压紧成型区对物料挤压所消耗功率 P_1 和挤压区压辊体克服物料阻力矩消耗功率 P_2 是关键。压缩凸模对物料挤压所消耗功率 P_1 为

$$P_1 = knmp_0Av = \frac{\pi knmp_0d^2H}{4t} \tag{8}$$

式中　t——压辊体每转一圈所需时间，s

k——压辊凸模啮合过程中同时参与系数，取 1.3

v——压缩凸模线速度，m/s

A——单个压缩凸模横截面积，m^2

d——单个压缩凸模直径，m

压辊体在物料挤压变形区克服阻力矩所需要的功率 P_2 为

$$P_2 = T\omega = 2\pi n_1 T \tag{9}$$

式中　ω——柱塞式压辊角速度

根据式(8)、(9)综合分析，柱塞式压辊结构可实现大大降低能耗的目标，图 8 所示即为柱塞式压辊部件结构图，主要由压辊体和压缩凸模等组成。柱塞式压辊部件轴线垂直设置，与环模体轴线平行，其上设置有数列与压辊体轴线呈 45°角的压缩凸模，压缩凸模在压辊体外表面周向均匀布置。为保证压缩凸模与环模成型孔正确位置啮合关系，布局方式沿环模体周向均匀布置，共计 6 列且每列布置 12 个孔，总共 72 个成型孔且对称交叉错位排列。其中，压缩凸模与压辊体安装孔为基孔制过盈配合；压缩凸模与环模成型部件上的成型孔可以实现位置啮合。

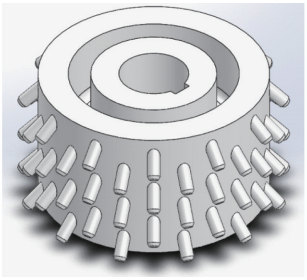


图 8　柱塞式压辊部件结构图

Fig. 8　Structure diagram of plunger roller

4.2　环模成型部件

图 9 所示为环模部件结构图。回转体式环模成型部件轴线垂直设置，其上设置有数列与环模成型部件轴线呈 45°角的成型孔；鉴于生物质原料不同和成型模具长径比不同的情况，可设计 2 种规格环模体部件。环模成型孔为 Φ8 圆直孔结构，加工工艺简单、成本低，布局方式沿环模体周向均匀布置，共计 6 列且每列布置 38 个孔，总共 228 个成型孔且对称交叉错位排列。同时，为避免压缩凸模与环模成型孔发生干涉，便于物料进入环模成型孔，环模成型孔内表面均设有 45° ×6 mm 的入料大倒角。

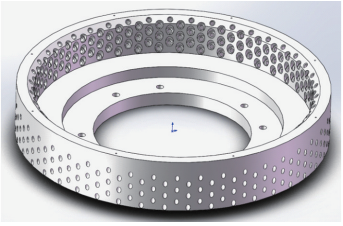


图 9　环模部件结构图

Fig. 9　Structure diagram of ring-die

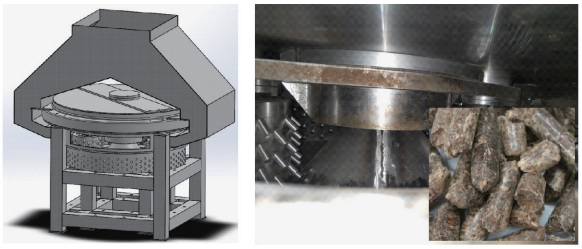
本文所述成型机利用压缩凸模与成型孔在类似齿轮啮合的过程中，使压缩凸模对成型孔处的松散物料产生挤压推力。物料在推挤过程中被压缩，密度不断增大，达到一定密度后形成块状，并被推出环模成型孔外。压缩凸模对物料的挤压推力必须克服物料与环模成型孔内壁的摩擦力。环模成型孔长径比越大，物料与成型孔内壁的摩擦阻力越大。而当压缩凸模的挤压推力无法克服物料与环模成型孔孔壁的摩擦力时，物料就无法再压入成型[25-26]。因此，成型孔的长径比需要保证在一定范围内。根据经验[6,11-13]，在此设计了 2 种规格的环模体部件，其长径比分别为 4.75∶1 和 5∶1。

5　样机运行试验

本文就所设计的内啮合行星轮柱塞式环模成型机(图 10)在 DS SolidWorks 软件中进行了设计和装配，并对其进行了初步物料成型运行试验。

参数设置：环模成型孔长径比为 4.75∶1，压辊

轴转速为 60 r/min。



(a) 模型 (b) 实体设备

图 10 环模成型机样机

Fig. 10 Model of ring-die briquetting machine

5.1 试验条件

选用 2020 年内蒙古自治区呼和浩特市周边黄河少村当年产的白杨树等混合木屑物料作为试验对象,要求其颗粒度为 1 ~ 3 mm;调节物料水分,使其含水率达 15%。

关键测试仪器:网孔直径 3 mm 的标准检验筛(GB/T 6003.1—1997)、DHS - 16A 型快速水分测定仪、JAEIHAENE 型电子秤(精度 0.01 g)、100 mL 量筒(精度 1 mL)、游标卡尺和秒表(精度 0.01 s)。

5.2 试验方法

本文对内啮合行星轮柱塞式环模生物质成型机的生产率、颗粒密度、成型率和机械耐久性进行了测试[27-31]。

5.2.1 生产率

在本成型机稳定运行过程中,每 10 min 接取 1 次颗粒样品,每次接取 60 s,共接取 5 次,分别称量,并取平均值作为称得的质量 m_o。平均生产率计算公式为

$$Q_0 = 3\,600 m_o / t_0 \tag{10}$$

式中 Q_0——实测平均生产率,kg/h

t_0——接取样品时间,s

5.2.2 成型颗粒密度

取若干成型颗粒,端面磨平后通过游标卡尺测出颗粒的直径与长度,再称得样本质量,最后计算得到颗粒密度。

5.2.3 物料堆积密度

将筛分后的物料通过漏斗倒入量筒内,使物料与 100 mL 刻度线水平。称得量筒原料质量,测量 5 次,取平均值,最后算得物料堆积密度。

5.2.4 成型率

采用筛孔孔径为 3 mm 的标准筛进行筛分,并进行称量,成型率计算公式为

$$X = m_s / m_z \times 100\% \tag{11}$$

式中 m_s——筛上质量,g m_z——样品总质量,g

5.2.5 机械耐久性

取筛分后的颗粒 300 g 放入试验筛内进行大幅度振荡 100 次,然后再筛分,成型颗粒机械耐久性指数计算公式为

$$C = m_2 / m_1 \times 100\% \tag{12}$$

式中 m_1——所取样品质量,g

m_2——筛分后筛上颗粒质量,g

5.3 试验结果与分析

试验条件为室温环境,柱塞凸模伸入环模成型孔部分距离为 6 mm(此距离可调)。试验结果:物料堆积密度约 0.25 g/cm^3,最大挤压压力为 79.60 MPa,颗粒密度达到 1.05 g/cm^3,成型率为 96.2%,生产率达到 115 kg/h,机械耐久性指数达到 97.5%。

上述试验结果表明木屑物料堆积密度为 0.25 g/cm^3,结合生产率可得出,采用新型内啮合行星轮柱塞式环模成型方法制取颗粒时,其生产率可达 115 kg/h。

从对颗粒密度、颗粒成型率和颗粒机械耐久性的测定结果可得出:温度为室温,压辊转速为 60 r/min 的条件下,测得颗粒燃料的平均密度为 1.05 g/cm^3,成型率接近 96.2%,机械耐久性指数达到 97.5%,已经达到生物质颗粒燃料标准。

由于试验样机主要用于成型方法的可行性验证,通过测得单个柱塞在挤压过程中的最大挤压压强 79.6 MPa,并计算得到耗电率,在压缩锯末颗粒密度达到 1.05 g/cm^{3}时,求得其能耗为 45 kW·h/t。

经过 28 d 试验,设备运行正常,柱塞凸模及环模成型孔未出现明显的磨损痕迹。根据该成型机的原理(图 10),与传统环模成型设备相比,柱塞凸模与环模体间的物料产生的压力大大降低,从而降低环模体的磨损;柱塞凸模仅对环模模孔正上方的物料挤压,因此实现了降低能耗与磨损。

5.4 样机优势分析

本成型机生产率达到 115 kg/h,大大高于传统环模成型机生产效率[7,10]。本设计采用齿轮啮合机理成型,即环模体上的成型孔与压缩凸模一一对应布局,可实现在局部区域集中较大压力压缩物料成型,且采用对称行星轮结构,受力均衡,大大提高了生物质物料成型速度,较之传统无压缩凸模的压辊体结构成型机,生产效率高出数倍。

本成型机能耗为 45 kW·h/t,与传统环模成型机(能耗 60.3 kW·h/t)和螺旋挤压成型机(能耗 90 kW·h/t)比较,压辊成型机降低了近 25.4% 和 50%,大大降低了能耗[7,9-10,32]。这是因为环模体及压辊体内啮合以及 45°角的柱塞式机构的卧式布局设计,可以使物料均匀分布于压辊和环模体之间;当压缩凸模与环模成型孔实现位置啮合时,分布在压缩凸模周围的与环模体及压辊体接触的物料均匀

且分布量很少，故可以实现压缩凸模在压缩区受到的切向分力 F_f 大大降低的目标，压辊体在物料挤压变形区克服阻力矩 T 也大大降低；即本环模成型机构大大降低整机功率 P，从而降低能耗，节约成本。

根据本成型机经过 28 d 试验结果，发现磨损不明显，这是由于实现了压缩凸模所受切向分力 F_f 的大大降低，且由于此力是摩擦磨损的重要参数，使得压辊体和环模体内表面单位时间的摩擦磨损量降低，可实现提高压辊体和环模体寿命的目标[4,6]。

6　结论

（1）提出内啮合行星轮柱塞式环模成型方法，并据此设计和制造了样机，通过试验验证了该成型方法的可行性。

（2）以一定颗粒度的锯末为原料，在压辊轴转速 60 r/min、物料含水率 15%、室温条件下，进行了样机试验。在成型模具孔长径比 4.75∶1 情况下，制得成型颗粒直径 8 mm，颗粒成型率为 96.2%，密度为 1.05 g/cm^3，机械耐久性指数为 97.5%，根据挤压成型力计算得到该成型设备的能耗为 45 kW·h/t，生产率为 115 kg/h，各项指标均满足生物质颗粒燃料的标准要求，实现了连续稳定生产。

（3）该样机的压缩凸模与环模成型孔采用类齿轮啮合原理设计，通过调整环模成型孔的长径比可满足不同种类生物质物料的成型要求。

参　考　文　献

[1] 丛宏斌，赵立欣，姚宗路，等. 生物质环模制粒机产能与能耗分析[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(11)：144－149.
CONG Hongbin，ZHAO Lixin，YAO Zonglu，et al. Analysis on capacity and energy consumption of biomass circular mould granulator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(11)：144－149. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx？file_no=20131126&flag=1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.026.（in Chinese）

[2] 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）

[3] 霍丽丽，赵立欣，郝彦辉，等. 国内外生物质成型燃料质量标准现状[J]. 农业工程学报，2020，36(9)：245－254.
HUO Lili，ZHAO Lixin，HAO Yanhui，et al. Quality standard system of densified biomass fuels at home and abroad[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(9)：245－254.（in Chinese）

[4] 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）

[5] 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）

[6] 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）

[7] 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）

[8] MAHALINGAM A，NAGAPPAN B，JAYARAM P，et al. Investigating the physio-chemical properties of densified biomass pellet fuels from fruit and vegetable market waste[J]. Arabian Journal for Science and Engineering，2020，45(1)：563－574.

[9] 王春华，宋超，朱天龙，等. 环模秸秆成型机压辊半径的优选与试验[J]. 农业工程学报，2013，29(15)：26－33.
WANG Chunhua，SONG Chao，ZHU Tianlong，et al. Optimization and test of roller radius of ring die straw forming machine[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(15)：26－33.（in Chinese）

[10] 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 biormass densification molding machie[D]. Harbin：Northeast Forestry University，2015.（in Chinese）

[11] 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？file_no=20131125&flag=1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.025.（in Chinese）

[12] 陈忠加，俞国盛，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）

[13] 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? file_no = 20150531&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.031. (in Chinese)
[14] 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.
[15] CELIK H, YILMAZH S, RENNIE A, et al. Determination of the failure susceptibility of a flat die used in biomass pelletizing machines by means of FEA-based design exploration[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018, 18(5): 1099 - 1110.
[16] 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)
[17] LIU B C, SHANG Y X, XU Y M, et al. Analysis of the ring die of biomass energy molding machine based on ANSYS[J]. Key Engineering Materials, 2013, 561: 417 - 421.
[18] MAGNUS R, SYLVIA H L, TORBJÖRN A L. New tool for improved control of sub-process interactions in rotating ring die pelletizing of torrefied biomass[J]. Applied Energy, 2017, 190: 835 - 840.
[19] 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)
[20] 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 based on Pro/Mechanica[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2013, 41(10): 21 - 25. (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] 崔旭阳,杨俊红,邓磊,等. 生物质颗粒燃料的成型能耗试验研究[J]. 太阳能学报,2020,41(2):27 - 32.
CUI Xuyang, YANG Junhong, DENG Lei, et al. Experimental study on briquetting energy consumption of biomass pellet fuel [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(2): 27 - 32. (in Chinese)
[23] 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)
[24] 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)
[25] 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? file_no = 20160528&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.028. (in Chinese)
[26] 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)
[27] 李震,王鹏,刘彭,等. 基于流固耦合的环模成型机关键部件疲劳寿命分析[J]. 林业工程学报,2020,5(1): 122 - 128.
LI Zhen, WANG Peng, LIU Peng, et al. Fatigue life analysis of key components of ring molding machine based on fluid-solid coupling[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(1): 122 - 128. (in Chinese)
[28] 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)
[29] 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)
[30] 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)
[31] 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)
[32] 闫文刚. 生物质常温开模致密成型研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
YAN Wen'gang. Research of biomass shaping with open mold in natural temperature[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)