

秸秆多级辊压成型原理与装置设计

刘平义 骆龙敏 李海涛 韩鲁佳 魏文军 张绍英

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 基于不封闭状态下的秸秆辊压成型原理及理论,提出了多级辊压秸秆冷成型技术方案。进行了秸秆多级辊压成型关键性能参数和技术可行性试验研究,以不同含水率9%~23%、粒度0~12 mm的玉米秸秆为对象,研究在不封闭状态下秸秆物料的压缩成型特性,发现压缩过程存在屈服现象,压缩过程可划分为松散、压紧、屈服和成型4个阶段,在一定粒度下,秸秆物料的压缩屈服极限随着含水率的增加而减小;测试含水率9%的秸秆在不同压缩阶段的秸秆成型块厚度且计算各级压缩比,验证了不封闭状态下的秸秆辊压成型原理可行且为秸秆多级辊压成型装置提供设计依据。最后,依据秸秆多级辊压秸秆成型原理及秸秆物料压缩过程,设计多级辊压秸秆成型装置,以满足生物质秸秆成型的产地高效工业化生产技术要求。

关键词: 玉米秸秆; 压缩特性; 屈服极限; 辊压成型

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0317-07

Theory and Device Design of Multi-stage Roller Forming for Straw

Liu Pingyi Luo Longmin Li Haitao Han Lujia Wei Wenjun Zhang Shaoying

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The burning of crop straws polluted environment due to lack of high efficient and rapid industrialization processing measures for straws in the producing area. Based on roller forming principle and theory for straw with no mold, a technical solution was put forward, including roller rolling, high pressure and cold forming. During the experiment of key performance parameters on the multi-roller forming for straws, corn straws with different moisture contents from 9% to 23% and size of no more than 12 mm were used to study their compression properties by an universal testing machine with neither a mold nor a closed state. The curves of compression properties were obtained. Yielding phenomenon was found during the compression procession and the compression process can be divided into four stages which were the loose stage, pressed stage, yielding stage and forming stage. Meanwhile, the compression yield limit of corn straws was decreased with the increase of moisture content. Briquette thickness test of straw with moisture content of 9% at various compression levels verified the roller forming principle, and it also provided design basis about the compression ratio for multi-stage roller forming device. Finally, based on the principle of roller rolling and forming and the compression properties of straws, a multi-stage roller forming device for straw by using feed rollers, compression rollers and forming rollers was designed, which can meet the requirements of efficient and industrial production technology in the producing area.

Key words: corn straw; compression properties; yield limit; roller forming

引言

我国是农作物生产大国,秸秆年产出量 7 亿 t

左右,大部分秸秆尚未得到合理利用^[1-2]。由于生物质秸秆分布分散、季节性强、结构疏松,且需要短时间内快速处理等特点,在运输、储存和生产过程中

存在运输体积大、贮藏费用高,以及缺少高效、快速的工业化秸秆成型处理手段,造成了秸秆焚烧屡禁不止等问题^[3]。

目前,国内外研究者主要从“开式”压缩和“闭式”压缩 2 种角度研究秸秆压缩特性^[4-8],两者都是利用模具压缩。在成型技术方面,生物质成型主要分为模辊式、螺旋式、柱塞式等方式,实际应用中以模辊式成型机具为主^[9-12],但这些成型设备普遍存在功率消耗大、可靠性差、生产率低和单位产品成本过大等问题^[13-15]。

本文研究在不封闭状态下的秸秆辊压成型原理及理论,提出一种多级辊压秸秆成型的技术方案;进行秸秆多级辊压成型关键性能参数和技术可行性试验研究,基于多级辊压秸秆成型原理^[16],设计一种连续多级辊压成型装置以实现致密冷成型,减少能耗、降低成本,实现生物质成型工业化高效生产。

1 秸秆多级辊压成型原理及理论分析

1.1 秸秆辊压成型原理

秸秆物料经过粉碎之后是一种松散离散粒状介质,原料由一些弱连接或不连接的单独颗粒或团粒组成,内部存在大量的空隙,在一定压力压缩过程中,秸秆颗粒之间相互移动靠近并在成型状态下相互定位。秸秆辊压成型原理如图 1 所示,根据秸秆颗粒实际辊压过程中所处的压缩状态不同,将位于 2 个对辊间的颗粒划分为 3 个区域,其中,A 区为物料自由流动区,B 区为喂入区,C 区为辊压区。A 区的秸秆颗粒在自身重力、强制喂入外力以及压辊摩擦力的共同作用下,连续不断向处于压紧状态下的压辊之间运动,秸秆原料颗粒间隙减小,相互靠拢、重排,甚至产生大变形及破裂,相互咬合、镶嵌、缠绕,最终辊压成一定成型密度、强度和形状的板、带状成型块。

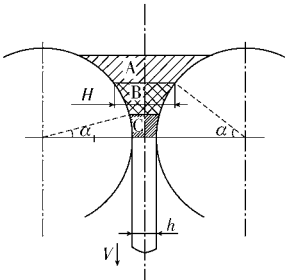


图 1 秸秆辊压成型示意图

Fig. 1 Sketch of multi-stage roller forming for straw

1.2 秸秆辊压过程理论分析

1.2.1 咬入角

喂入区起始处与压辊圆心的连线和对辊圆心水平连线的夹角,为咬入角 α 。颗粒单元体受力情况,

如图 2 所示。

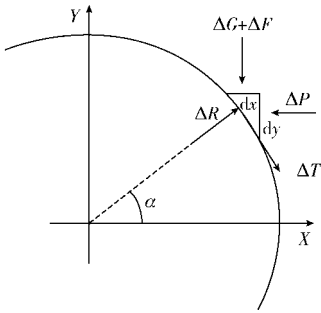


图 2 秸秆颗粒受力分析图

Fig. 2 Sketch of straw pellet force analysis

根据颗粒单元受力分析,颗粒单元顺利被咬入辊缝间,需满足

$$\Delta T \cos \alpha + \Delta G + \Delta F > \Delta R \sin \alpha \tag{1}$$

其中

$$\Delta T = \mu \Delta R$$

式中

- ΔF ——喂入外力
- ΔT ——压辊与秸秆颗粒间摩擦力
- ΔG ——秸秆颗粒单元自身重力
- ΔR ——压辊径向压力
- μ ——颗粒与压辊表面的外摩擦因数

将 μ 代入式(1)可得

$$\tan \alpha < \mu + \frac{\Delta G + \Delta F}{\Delta R \cos \alpha} \tag{2}$$

定义 $\xi = \frac{\Delta G + \Delta F}{\Delta R \cos \alpha}$ 为侧压系数,可得

$$\tan \alpha < \mu + \xi \tag{3}$$

μ 与颗粒自身表面结构状态、压辊表面光滑度以及压辊转速有关。 ξ 主要取决于喂入外力以及颗粒的弹塑性、粒度、成型温度和原料含水率等因素,不容易测量,与 μ 相比较, ξ 可忽略。

1.2.2 秸秆辊压关键参数

秸秆辊压成型时秸秆成型块厚度和密度是秸秆辊压成型工艺的 2 个重要参数指标,为简化分析计算,构建辊压成型理论模型时假设:辊压时原料损失忽略不记,秸秆颗粒与压辊间不打滑,辊压过程连续;辊压装置参数固定,辊压过程可重复,辊压后秸秆成型块密度均匀;相对于辊压后秸秆成型块宽度,秸秆颗粒沿压辊轴线方向的变形量可忽略不计,即:忽略展宽,辊压过程中喂入物料宽度和成型块宽度相等。

遵循物料辊压前后质量守恒原理得

$$HB\rho_p v_{in} = hb\rho_s v_{out} \tag{4}$$

式中

- H ——咬入时喂料厚度
- h ——辊压后秸秆成型块厚度
- B ——咬入时喂料宽度
- b ——辊压后秸秆成型块宽度

ρ_p ——辊压前颗粒堆积密度
 ρ_s ——辊压后秸秆成型块密度
 v_{in} ——颗粒进料速度
 v_{out} ——秸秆成型块出料速度

由于辊压过程中喂入物料宽度和成型块宽度相等,即 $B=b$,根据式(4)得

$$\frac{H}{h} = \frac{v_{out}}{v_{in}} \frac{\rho_s}{\rho_p} \tag{5}$$

令 $\frac{H}{h} = Y$ 为压制系数; $\frac{v_{out}}{v_{in}} = S$ 为延展系数; $\frac{\rho_s}{\rho_p} = Z$ 为压缩系数。

由式(5)得出

$$Y = SZ \tag{6}$$

设压辊直径为 $D=2R$,根据图 1 得

$$H = D(1 - \cos\alpha) + h \tag{7}$$

由式(5)~(7)以及 Y 、 S 和 Z 的定义,可得

$$h = \frac{D(1 - \cos\alpha)}{SZ - 1} \tag{8}$$

$$\rho_s = \frac{\rho_p}{S} \left[1 + \frac{D(1 - \cos\alpha)}{h} \right] \tag{9}$$

1.3 多级辊压秸秆成型装置分析设计

由式(3) $\tan\alpha < \mu$ (侧压系数 ξ 已忽略)可得:增大外摩擦因数 μ 和减小咬入角 α 可提高咬入性能和辊压效率。外摩擦因数与物料特性、压辊有关。通过在压辊表面加工一些凹槽或点焊凸起块,或在秸秆物料预处理时进行揉搓提高物料表面粗糙度等方案可以增大外摩擦因数。根据式(7)、式(8)可知,压辊直径或秸秆成型块厚度减小时,咬入角会相应减小。但压辊直径过小,会导致辊压过程中压辊产生应力变形,刚度和强度不能满足设计要求。

因此提出一种多级辊压秸秆成型的技术方案,原理如图 3 所示,主要由料斗、喂入辊、压缩辊、成型辊等组成。秸秆多级辊压也可以看成是在不封闭状态下的颗粒连续压制过程,秸秆物料通过料斗连续喂入辊间,并被对辊碾压达到一定成型密度、强度、形状;成型秸秆性能变化较大,由松散状态变为具有一定抗压、抗拉强度的高密度生物质成型体。

2 秸秆多级辊压成型关键性能参数和技术可行性试验

2.1 试验方案

与现有大多数成型方式不同,在不封闭、没有模具限制物料运动的压缩条件下,秸秆多级辊压成型技术的物料表现出不同的压缩成型特性。为研究辊压成型时秸秆的压缩成型特性,且考虑到秸秆多级辊压成型装置设备制作周期较长、成本较高,采用现有设备进行模拟试验。借用 XWW-20 型万能材料

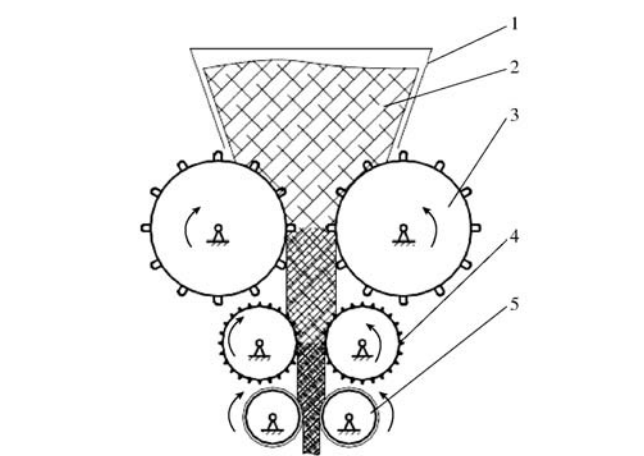


图 3 多级辊压秸秆成型装置原理图
Fig. 3 Schematic diagram of multi-stage roller forming machine for straw
1. 料斗 2. 秸秆物料 3. 喂入辊 4. 压缩辊 5. 成型辊

试验机,改多级辊压成型的纵向垂直喂料方式为横向水平喂料,研究不封闭状态下秸秆不同阶段压缩成型过程的压缩成型特性,并对不封闭状态下秸秆不同阶段压缩成型可行性效果进行验证,为秸秆多级辊压成型装置提供设计依据。

2.2 试验条件

试验原料:当年收获的整株玉米秸秆,经揉切粉碎使其粒度符合压缩要求(粒度 $0 \sim 12\text{ mm}$)。主要试验设备包括:9ZP-0.4 型风送式动力铡草机、1HP 桌上型高速粉碎机(荣聪精密科技有限公司)、DHG-9246A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)、T-1000 型电子天平(感量 0.1 g)、自制预压装置(图 4)、XWW-20 型万能材料试验机(承德金建检测仪器有限公司)、干燥器、称量皿、游标卡尺等。



图 4 预压缩装置实物
Fig. 4 Mock-ups of pre-compression device

2.3 秸秆的辊压成型特性试验

在一定粒度下,测定不同含水率对秸秆压缩成型特性的影响规律。

2.3.1 不同含水率物料制备

经过铡草机粗切、粉碎机破碎后,在干燥温度 105°C 、干燥时间 10 h 的条件下,使用干燥箱干燥玉米秸秆物料,去除游离水后使物料达到绝干状态,然后冷却至常温,密封保存备用。称取一定质量的绝

干物料,根据所需含水率计算需要喷洒水量并均匀地喷洒在绝干物料上,并用密封袋密封保存 10 d,使袋中物料的含水率达到均衡。本次试验所需含水率分别取 9%、11%、13%、15%、17%、19%、21%、23%。

2.3.2 预压缩成型块制备

自然状态下物料为蓬松状,无法直接测定压缩屈服极限,需进行预压缩。称取不同含水率的物料各 30 g,将其填充于自制预压装置中,并固定在万能材料试验机上,试验机向下匀速运动开始加压,当压力达到预定值 4 MPa 时停止,减压卸载得到长×宽×高分别约为 200 mm×25 mm×20 mm 的成型块,其预压缩秸秆成型块如图 5 所示。

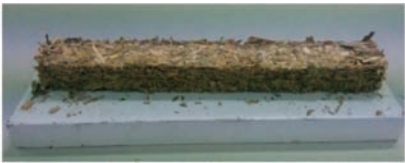


图5 预压缩秸秆成型块

Fig. 5 Molding block of pre-compressed straw

2.3.3 秸秆辊压特性模拟

将所得的预压缩秸秆成型块放置在压缩台上,利用万能材料试验机进行加压(图 6),最大压力 20 kN,压缩速度 10 mm/min,压头直径 16 mm。为减

小误差,在每一含水率长条状成型块的长度方向等距进行 3 次试验,压缩结束后,去除压头四周的物料,以含水率 13% 为例,得到厚度约为 3 mm 的片状秸秆成型块,如图 7 所示。



图6 压缩屈服极限测定

Fig. 6 Determination of compressive yield limit



图7 片状秸秆成型块

Fig. 7 Straw molding block of flake

2.3.4 试验结果与分析

由万能材料试验机加压测得不同含水率秸秆的压缩成型特性如图 8 所示。

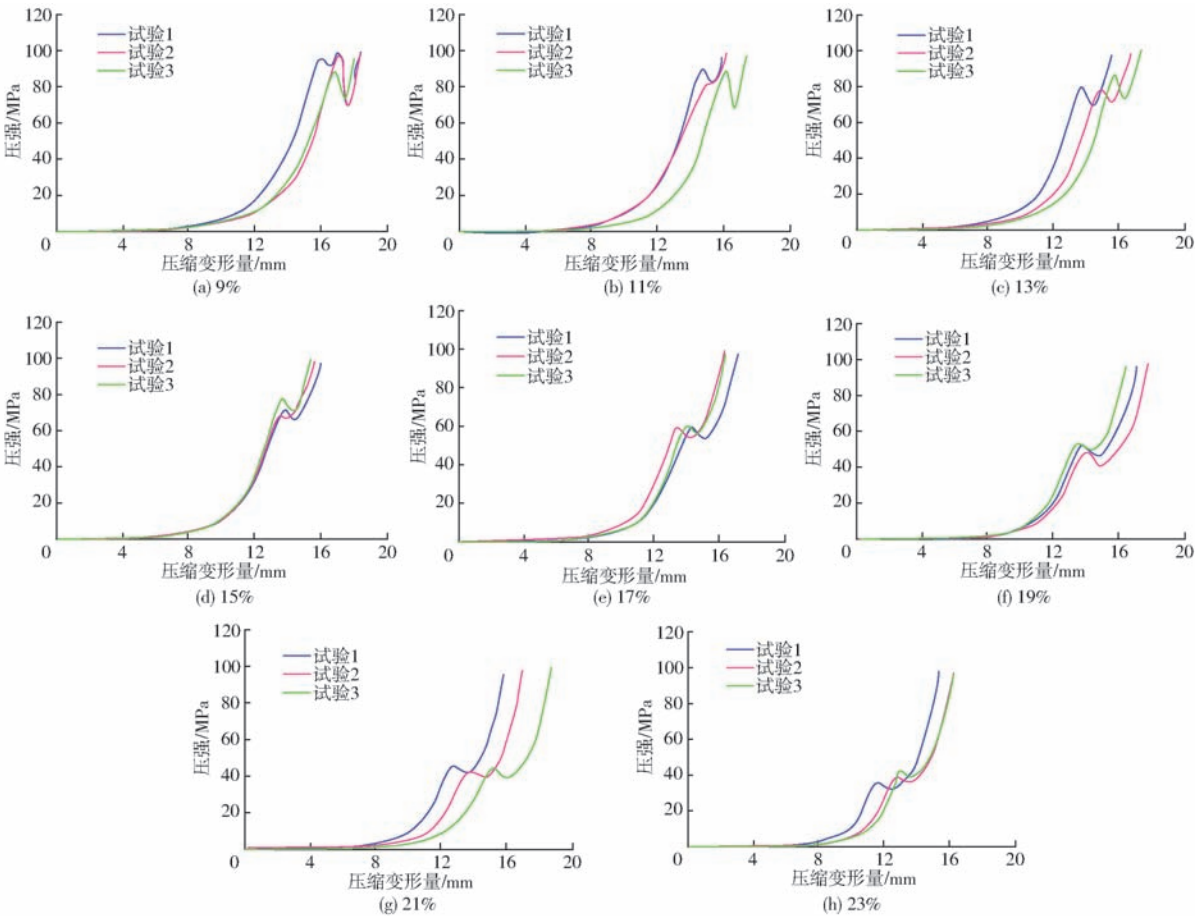


图8 不同含水率玉米秸秆压缩成型特性曲线

Fig. 8 Curves of compression properties for corn stalks with different moisture contents

由图 8 可得,与现有利用模具压缩成型过程明显不同,在不封闭状态压缩过程中所有压缩成型特性曲线出现不增加负荷仍继续发生明显塑性变形的现象,即存在屈服极限且变化规律相同;将不封闭状态下压缩成型过程划分为松散、压紧、屈服和成型 4 个阶段,如图 9 中①~④所示。松散阶段,较小压力就可以获得较大压缩变形量^[5],该阶段压力小于 5 MPa;压紧阶段,物料颗粒间隙越来越小,大物料会发生破碎而变成小颗粒,颗粒不断运动,颗粒之间和颗粒内部空隙基本被填补完成^[6],该阶段压力小于屈服下限压力;屈服阶段,物料主要发生塑性变形,相互更加紧密填充,牢固地啮合,形成结构紧密、形态稳定和具有一定强度的成型秸秆块^[7-8];成型阶段,越过屈服点后进一步增大压力,密度有所提高,但压力迅速上升,该阶段压力大于屈服上限压力。

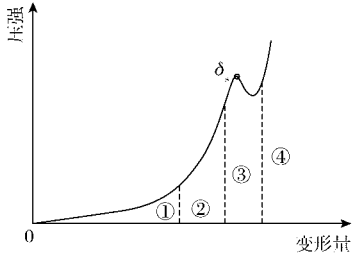


图 9 秸秆压缩成型特性曲线

Fig. 9 Curve of straw compression properties

考虑到提高成型率,将秸秆物料屈服上限点 δ 定义为物料屈服极限,得到不同含水率秸秆压缩屈服极限,如表 1 所示。含水率单因素方差分析,取 $\delta=0.05$,结果如表 2 所示, $F=96.894, P<0.0001$,表明因变量与自变量间有极显著的相关关系,含水率对秸秆压缩特性有非常显著的影响。将秸秆含水率与屈服极限的平均值之间的关系曲线进行三次多项式拟合(图 10),其决定系数 $R^2=0.9965$,拟合水平较高,说明模型可用于不封闭状态压缩时不同含

表 1 不同含水率玉米秸秆屈服极限

Tab. 1 Yield limit of corn stalks with different moisture contents

MPa					
含水率/%	试验 1	试验 2	试验 3	平均值	方差
9	96.174	97.652	89.363	94.396	13.031
11	90.099	81.385	89.464	86.983	15.734
13	79.901	78.356	87.101	81.786	14.522
15	71.889	68.526	77.468	72.628	13.599
17	58.831	58.94	59.268	59.013	0.034
19	52.559	48.664	53.533	51.585	4.425
21	45.933	42.305	43.515	43.918	2.275
23	36.545	39.622	42.838	39.668	6.601

表 2 含水率方差分析

Tab. 2 Variance analysis of moisture content

来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	F 临界值
组间	8 930.538	7	1 275.791	96.894	<0.0001**	2.657 197
组内	210.669	16	13.167			
总计	9 141.208	23				

注:**为极显著。

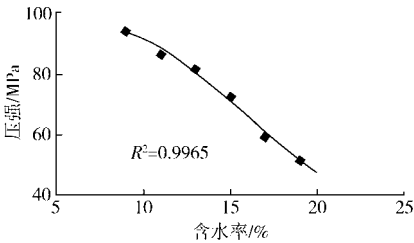


图 10 屈服极限变化曲线

Fig. 10 Curve of yield limit

水率秸秆屈服极限的预测,即在一定粒度下,秸秆物料的压缩屈服极限随着含水率增加而减小,屈服极限与含水率的回归方程为

$$y=0.0267x^3-1.2636x^2+14.786x+43.582$$

2.4 秸秆多级辊压成型关键技术可行性验证及装置关键设计参数

在不封闭、没有模具限制物料运动的压缩条件下,秸秆物料的压缩成型特性表明:存在屈服极限且秸秆物料的压缩屈服极限随着含水率的增加而减小;不同含水率的秸秆压缩成型过程曲线变化规律相同,都包含松散、压紧、屈服和成型 4 个阶段,辊压成型技术具有可行性。

参照含水率 9% 的秸秆压缩成型过程曲线及松散、压紧、屈服和成型 4 个阶段关键性能参数为秸秆多级辊压成型装置提供了设计依据:试验时 30 g 含水率 9% 的秸秆在自制预压缩装置内厚度平均为 48.74 mm,松散阶段压缩完成后厚度平均为 10.82 mm,压紧阶段压缩完成后厚度平均为 4.97 mm,屈服阶段压缩完成后厚度平均为 2.95 mm。秸秆多级辊压成型装置喂入辊、压缩辊、成型辊半径分别为 $r_1、r_2、r_3$,角速度为 $\omega_1、\omega_2、\omega_3$,对称安装中心距为 $a_1、a_2、a_3$,应满足下列设计条件:各辊的表面圆周线速度 $v_3=r_3\omega_3、v_2=r_2\omega_2=1.05v_3、v_1=r_1\omega_1=1.05v_2$;喂入辊间距 $h_1=a_1-2r_1$ 、压缩辊间距 $h_2=a_2-2r_2$ 、成型辊间距 $h_3=a_3-2r_3$,设定秸秆喂入厚度为 h_0 ,各级压缩比依据含水率 9% 玉米秸秆试验测得的辊压后秸秆成型块厚度确定,压缩比分别为:一级压缩比 $h_0/h_1=4.50$,二级压缩比 $h_1/h_2=2.18$,三级压缩比 $h_2/h_3=1.68$,实现整机压缩比 $h_0/h_3=16.67$ 。

3 秸秆多级辊压成型装置设计

3.1 秸秆多级辊压成型装置关键部件设计

3.1.1 喂入辊设计

为实现物料快速均匀喂入,消除物料间的大间隙,完成松散阶段压缩,喂入辊身带有交错排布的钉齿,三维图如图 11 所示。

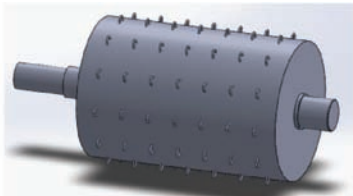


图 11 喂入辊三维图

Fig. 11 Three-dimensional diagram of feeding roller

3.1.2 压缩辊设计

为承受较大压力,完成压紧阶段压缩,压缩辊身带有平行轴线方向的凸起筋,三维图如图 12 所示。

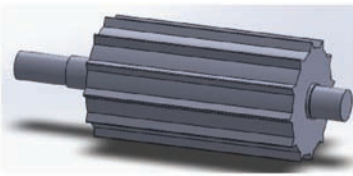


图 12 压缩辊三维图

Fig. 12 Three-dimensional diagram of compression roller

3.1.3 成型辊设计

为实现秸秆高压致密成型,完成屈服阶段的压缩,压力超过秸秆屈服极限,辊身带有沿轴线等距排列的环形凸起筋,由压缩成型特性曲线可知当压力超过屈服极限一定量后,会破坏成型,环形凸起筋结构对物料能起限制作用,防止物料轴向滑移,成型辊三维图如图 13 所示。

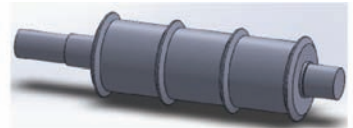


图 13 成型辊三维图

Fig. 13 Three-dimensional diagram of forming roller

3.2 整体结构布置

多级辊压秸秆成型装置结构示意图如图 14 所示,主要由料斗、固定板、支撑板、喂入辊、压缩辊、成型辊、台架、齿轮箱等组成。整机的主要技术参数如表 3 所示。

成型秸秆板的宽度是由辊身长确定,成型秸秆条的厚度是由成型辊对辊间距 h_3 确定,当达到预设长度时切断为成型秸秆板,可用于农用建筑材料、大棚保温材料或燃料等,该装置可安装在拖车上,用作

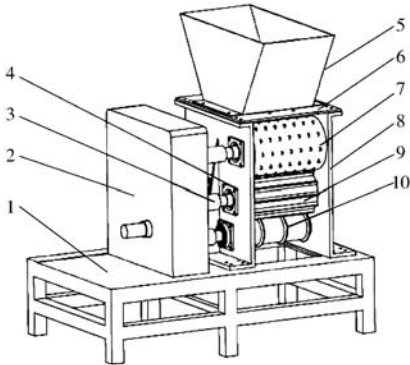


图 14 多级辊压秸秆成型装置结构示意图

Fig. 14 Structure diagram of multistage roll forming machine for straw

1. 台架 2. 齿轮箱 3. 联轴器 4. 轴承座 5. 料斗 6. 固定板
7. 喂入辊 8. 支撑板 9. 压缩辊 10. 成型辊

表 3 多级辊压秸秆成型装置主要技术参数

Tab. 3 Technical parameters of multi-stage roll forming machine for straw

参数	数值	参数	数值
喂入辊直径/mm	800	成型辊转速/($r \cdot \min^{-1}$)	4
压缩辊直径/mm	600	每级辊打滑率/%	5
成型辊直径/mm	400	整机压缩比	16.67
辊身长/mm	1 200	理论生产率/($t \cdot h^{-1}$)	18
喂入辊间隙/mm	183.12	压缩辊间隙/mm	84
成型辊间距/mm	50	成型板尺寸/($mm \times mm \times mm$)	$2\,000 \times 1\,200 \times 50$

产地秸秆移动压缩处理设备。

4 结论

(1) 基于不封闭状态下的秸秆辊压成型原理及理论,提出一种多级辊压秸秆致密冷成型的技术方案,为生物质不封闭、高压、致密成型奠定了理论基础。

(2) 进行了秸秆多级辊压成型关键性能参数和技术可行性试验研究,分析不封闭状态下秸秆不同阶段压缩成型过程的压缩成型特性,发现压缩过程存在屈服极限,成型过程由松散、压紧、屈服和成型 4 个阶段组成,在一定粒度下、秸秆物料的压缩屈服极限随着含水率的增加而减小;测试不封闭状态下秸秆不同压缩阶段的秸秆成型块厚度关键参数,不仅验证了不封闭状态下的秸秆辊压成型原理可行且为秸秆多级辊压成型装置提供设计依据。

(3) 依据秸秆多级辊压成型原理及选定秸秆物料的试验分级压缩比参数,设计一种多级辊压秸秆成型装置,以满足生物质秸秆成型的产地高效工业化生产。

参 考 文 献

- 1 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211-217.
BI Yuyun,GAO Chunyu,WANG Yajing,et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(12): 211-217. (in Chinese)
- 2 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1852-1859.
WANG Yajing,BI Yuyun,GAO Chunyu. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(9): 1852-1859. (in Chinese)
- 3 丁翔文,张树阁,李吉,等. 黄淮海地区小麦玉米农作物秸秆能源化利用收加储运模式实验研究[J]. 中国农机化,2010(4): 14-19.
DING Xiangwen,ZHANG Shuge,LI Ji,et al. Experimental study on energy utilization and collection storage and transportation models of main crop straw resources in Huang-Huai-Hai region[J]. Chinese Agricultural Mechanization,2010(4): 14-19. (in Chinese)
- 4 廖娜,韩鲁佳,陈龙健,等. 秸秆压缩特性及成型技术研究进展[C]//纪念中国农业工程学会成立30周年暨中国农业工程学会2009年学术年会(CSAE 2009)论文集,2009.
- 5 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, 2006, 30(7):648-654.
- 6 SHAW M D, TABIL L G. Compression, relaxation, and adhesion properties of selected biomass grinds [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2007,9(4000):1-16.
- 7 胡建军,雷廷宙,何晓峰,等. 小麦秸秆颗粒燃料冷态压缩成型参数实验研究[J]. 太阳能学报,2008,29(2):241-245.
HU Jianjun,LEI Tingzhou,HE Xiaofeng,et al. Experimental research on the compressing molding parameter under cold condition for wheat straw pellet fuel[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(2):241-245. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 霍丽丽,侯书林,赵立欣,等. 生物质固体成型燃料技术及设备研究进展[J]. 安全与环境学报,2009(12):27-31.
HUO Lili,HOU Shulin,ZHAO Lixin,et al. Overview of the research advancements of solid biofuel-preparation technology and the corresponding facilities needed[J]. Journal of Safety and Environment,2009(12):27-31. (in Chinese)
- 10 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)
- 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]. 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)
- 12 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)
- 13 JHA S K, SINGH A, KUMAR A. Physical characteristics of compressed cotton stalks[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2):205-210.
- 14 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.
- 15 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11): 144-149. (in Chinese)
- 16 刘平义,骆龙敏,李海涛,等. 多级辊压秸秆成型装置: 中国,104786542A[P]. 2015-07-22.