

生物质燃料致密成型方式的发展现状与展望

白阳, 闫文刚, 刘志刚

(内蒙古工业大学机械工程学院, 内蒙古呼和浩特010051)

摘要：介绍了生物质燃料成型机主要成型方式，以及几种生物质成型机的工作方式并对其性能进行对比，针对现有的成型方式进行分析，将开式成型和闭式成型进行比较，并提出希望在未来成型机的设计中应多使用闭式成型方式，以及结合闭式成型的优势对生物质成型燃料的市场化提出一些见解。

随着科学技术的迅速发展，能源一直是各国关心的重要问题。煤和石油等化石能源，虽然为人类提供着高效、便捷的能源输出，但是过多的开采和使用传统化石能源的弊端正在逐渐显露^[1]。

由于化石能源是不可再生的，随着人们不断的开采，必定会枯竭，而且近些年来我国北方地区严重的雾霾天气，也促使着人们去寻找其他可以替代传统化石燃料的有效能源。

生物质能源

就是一种可再生的清洁能源

，其中使生物质成型燃料代替燃煤是目前的主要研究方向之一^[2]。

由于近些年环境污染的日益严重，为了保护生态环境、保障人们的身体健康，国家相继出台了相关规定，如禁止燃烧农作物秸秆以减少空气污染。但是，将秸秆加工成生物质成型燃料，体积能缩小七成以上，能量密度是原材料的10倍左右，发热量可达3500~5000kcal/kg，且贮存、运输方便，显著的特点是燃烧稳定，燃烧持续时间延长，热效率利用高，生物质成型燃料还具有灰分含量低，硫含量低等有利于环境保护的特点，而且成本低可再生，原材料在我国分布广泛，便于利用^[3-6]。所以，对生物质成型燃料领域的研究和发展体现了我国可持续性发展的战略思路。

1成型原理的应用的现状

通过查阅资料，我国的生物质成型燃料在总体性能上要低于国际领先水平，这主要是因为原材料成分组成的不同，我国成型燃料普遍使用的是秸秆类的农作物原料，其在物理特性上就不及欧洲广泛使用的木质原料。但是其加工成型的生物质燃料的堆积密度、机械耐久性等物理特性方面却非常优异，这表明我国已经在秸秆型成型燃料成型技术中达到国际水平^[7]。

生物质成型燃料具有运输方便、清洁卫生、燃烧效率高、符合碳循环的理念等优点，是一种理想的可再生能源，并且近些年在我国得到了快速发展^[8]。

现在主要的生物质成型技术可分为压辊成型、螺杆致密成型和柱塞致密成型^[9-10]。

其中压辊成型多采用冷压成型工艺，这种成型方式主要以生产生物质成型颗粒为主，具有生产效率高、成型率高、生产连续性好等优点，但在生产过程中容易出现模具成型孔堵塞的情况，且是利用摩擦方式进行加工，所以成型部件的磨损比较严重。螺杆致密成型多采用热压成型工艺，该成型方式具有运行稳定、生产连续性好、可加工原材料的范围广泛，但这种设备的主要缺陷是磨损严重和能耗较高。柱塞冲压成型也多以热压成型为主，其克服了螺杆式磨损严重的缺陷，且加工得到的成型燃料品质较好，但具有生产连续性差的缺点，这也是其生产率较低的原因^[11]。

所以，近些年我国相关高校及企业，结合以上每种成型方式的特点，针对生物质成型机的工作原理提出了多种设计方案。

1.1对辊式成型机

对辊柱塞式

成型机，该设计是结合了柱

塞式和压辊式的特点，提出了一种外啮合的对辊柱塞式成型机^[12-13]。

，如图1所示。这种成型机是在普通压辊上均布有柱塞结构，这样在成型机工作时，压辊上的柱塞就会与环模上的模

孔相啮合，有效的降低了传统压辊式成型机靠挤压和摩擦原料进行工作对部件产生的磨损，不仅提高了成型机的工作寿命还降低了生产能耗，而且在原料含水率15%的情况下，可以达到较好的生产标准。

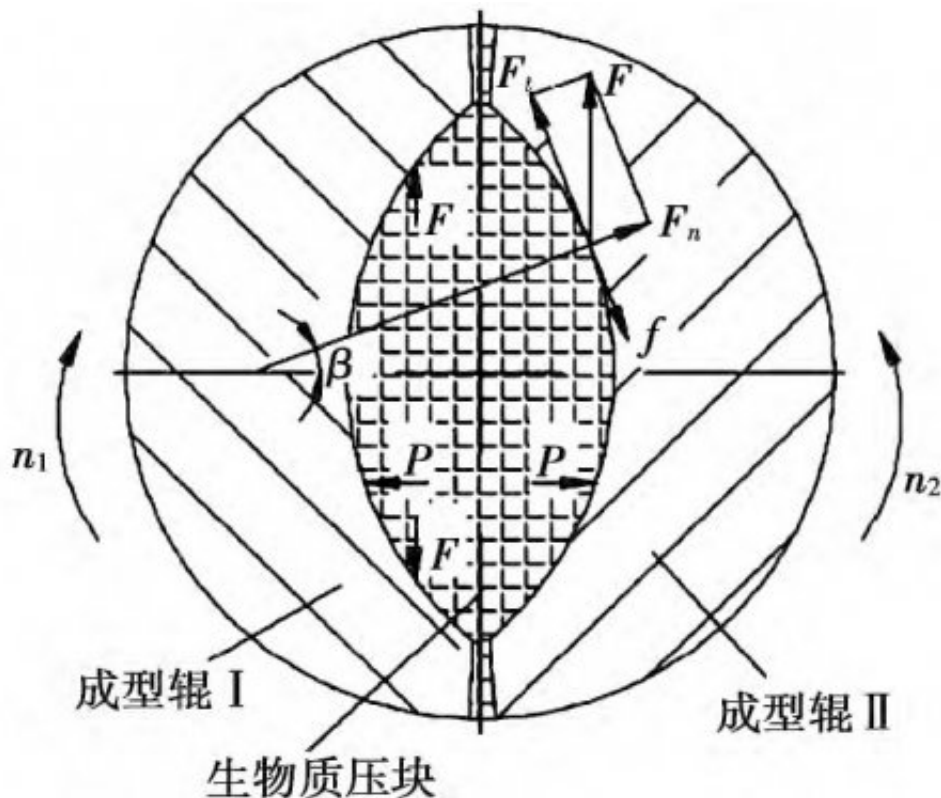


图1 对辊式生物质压块机成型方式示意图

GSR800型生物质燃料成型机^[14]

，对传统的压辊式成型机进行改进，弥补了传统压辊的不足，提出并设计了压辊行星轮系及分体式环模结构。利用行星轮机构使压辊不仅随主轴公转，并且自身也在压辊齿轮的作用下进行自转工作，从而有效的降低了工作时的能耗，显著提高了成型燃料的产品质量。

立式双层孔环模生物质成型机^[15]

，基于环模式成型机，为提高成型率及生产率，创新性的提出并设计实现了双层模孔结构环模，且立式环模主要采用分体式环模模块，这种设计不仅有效的增加生物质成型机成型孔同时工作的数量，提高生产率，还缩小了设备体积，降低能耗，对该成型机样机各项性能测试皆证明了这种成型机性能的优异性。

压辊式成型机的对比分析见表1。

表1 压辊式成型机对比分析

成型机类型	成型颗粒密度	吨料能耗
	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$W/\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$
对辊柱塞式成型机	1.15	56
GSR800 型生物质燃料成型机	1.20	65
立式双层孔环模成型机	上层 1.13	55.86
	下层 1.22	

关于在不封闭环境下的压辊成型，刘平义[16]提出了多级式的压辊成型方式。将原料从松散状态通过逐级的压缩、屈服，最终达到成型的效果。先通过喂入辊将原料进行初步压缩，再通过压缩辊进一步致密并使原料中的纤维屈服，最后通过成型辊压缩成预定密度的燃料，为在不封闭条件下进行生物质致密成型技术提供了理论基础。

付敏^[17]

设计实验的对辊式生物质压块机，采用的是现有成型机很少采用的闭式成型的方式。其工艺流程是由对原料进行压缩、增压、成型三步构成，其成型模具的成型槽设计为半椭球的凹槽，与另一个同样设计的压辊同步工作，可将初步压缩过的原料加工成椭球状的成型燃料，因为采用闭式成型的方式，所以加工过程中的摩擦阻力要低于其他压辊式的成型机，从而有效降低能耗，生产每吨成型燃料的能耗约为 $38.8\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ，明显低于上述开式的压辊成型方式。

1.2 柱塞式成型机

三柱塞式生物质燃料成型机，采用传统的柱塞式成型方式，对驱动部件进行了相应的改进，可有效利用能源，且提高了生产效率及稳定性[18]。其主要的创新结构为偏心盘，三个偏心盘通过主轴连接在电动机上，每个偏心盘各连接一个柱塞，这样的设计不仅节约了工作时的能耗，还可以平衡振动，有效提高成型机的工作寿命，并且在通过虚拟样机及物理样机的分析后，确定了该设计方案的合理性及可靠性。

类似的设计方案还有使用在主轴两侧的安装方式，通过凸轮机构驱动两端的柱塞进行工作，也可以达到相同的加工效果^[19]。

斜盘柱塞式成型机^[20-21]

，基于柱塞式成型机的设计思路，设计了将柱塞与平模相结合的成型方式，在工作时，柱塞外部安装有弹簧，并且按圆周均布安装，斜盘设计为厚度不均匀的圆盘，作用类似于凸轮，主轴带动斜盘的转动将下方的柱塞压下，对原料进行致密成型，随后柱塞在弹簧的作用下恢复原位，进入下一循环开始工作。

柱塞式成型机对比分析见表2。

表2 柱塞式成型机对比分析

成型机类型	成型颗粒密度	吨料能耗
	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$W / (\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1})$
三柱塞式生物质燃料成型机	1.13	31.2
斜盘柱塞式成型机	1.24	32.8

1.3 螺杆挤压式成型机

对于螺杆挤压式的生物质成型机，其成型方式较前两种比较固定，所以对螺杆挤压式的成型机的研究方向主要集中在提高性能及降低能耗上。由于其存在磨损严重的缺陷，刘圣勇等人^[22]

在对成型燃料的受力和运动进行分析后，通过将整体螺杆分拆为螺杆头和螺杆主体，成型套筒拆分为成型活套和保型套筒的方式进行实验，得出可以由可替换件代替传统的一体式部件来提高使用寿命，并有效提高生产率。

另有专家提出多螺杆式的成型结构，对于双螺杆结构，针对两个螺杆[23]的旋向进行分析研究，提出了与传统方式不同的反向螺旋的方式，解决了双螺杆运行不平稳的情况。对不同的螺杆元件在加工过程中的作用以及用于进一步混合物料的捏合块进行实验分析，得出了捏合块的错位角为和时效果最佳^[24]

。三螺杆的成型方式，姜南[25]对三个螺杆的位置及旋转方向进行研究，得出了三螺杆可以有效增加啮合区域，从而提高生产效率的结论。

其他创新性的成型机设计方案：

低成本手动式生物质成型机^[26]

，这种成型机的设计理念是，利用人力来代替电力工作，且结构简单，各零部件加工替换方便，在工作方式上，由转动模具盘和柱塞挤压结构两部分组成，这两部分需要使用者两只手同时操作完成，一只手将模具盘的成型孔转到柱塞下方，另一只手来进行柱塞冲压，进而完成成型燃料的加工，然后重复工作循环，这样的设计理念，不仅减少了成型机的制造成本，而且更适合投放到农村地区使用，既降低了运输成本，还能减少农村地区直接在田中燃烧秸秆造成的空气污染。

蜂窝状生物质燃料^[27]

，蜂窝状生物质成型燃料成型密度高，燃烧更充分，与农村地区常用的煤炉契合度更高，且蜂窝状的设计可以提高与空气的接触面积，充分燃烧，能够满足广大农村地区日常生活的需要。

2 目前研究中普遍存在的问题

通过对近些年的生物质燃料成型机进行分类研究，发现现阶段的研究内容几乎抛弃了闭式成型的加工模式，大部分的研究都是建立在以开式成型方式的基础上，进而对开式的变径成型孔进行深入的分析实验。最为常见的就是变径式的成型孔^[28-29]。

压辊式的成型孔如图2所示，其中P为成型孔对原料的轴向压力，F为成型孔内壁对原料的摩擦力，P1、P2为成型孔内壁对原料的压力，从图中可以看出A区域中的成型孔是梯形区域，原料的受力关系应满足： $P \geq P1 \cdot \sin \theta + P1 \cdot \cos \theta \cdot \mu$ ，式中： μ 为原料与成型孔壁之间的摩擦系数；B区域为圆柱形区域，原料在此区域中应满足的受力关系为： $P \geq P2 \cdot \mu$ ，图3所示为柱塞式和螺杆式的成型孔^[30]

，两者在对原料进行加工时的作用相近，都是利用成型孔的变径部分对原料的挤压来进行致密成型。所以经过虚拟样

[31]。

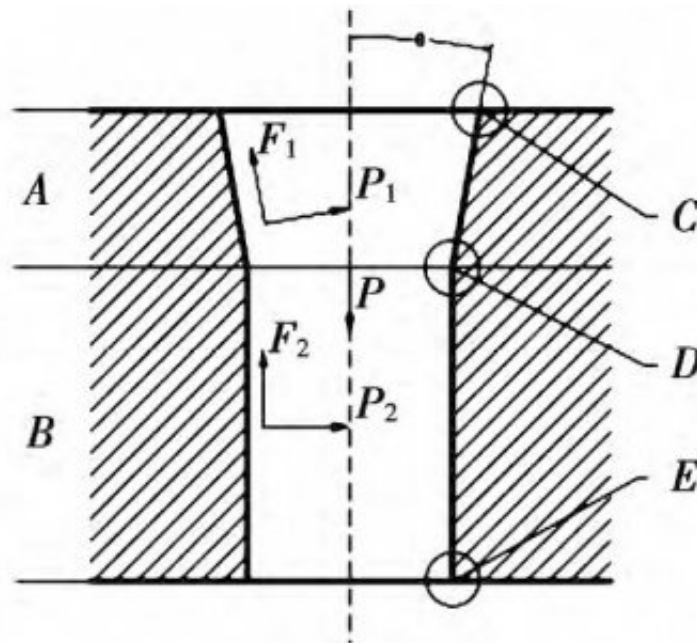


图2 压辊式成型孔

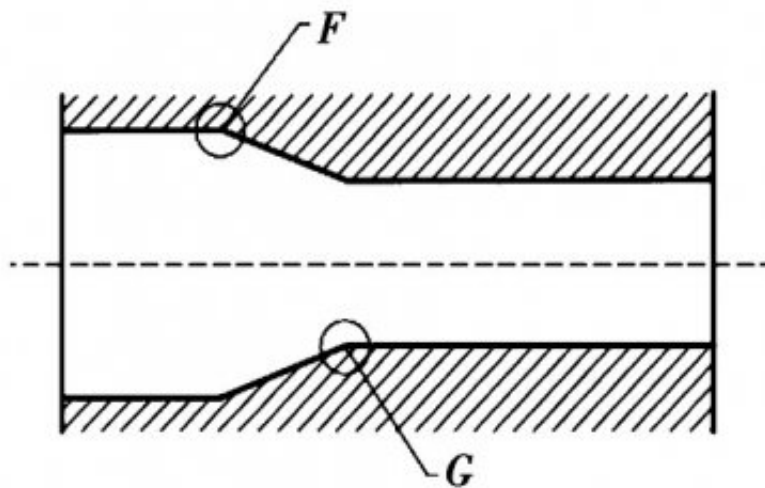


图3 柱塞式和螺杆式成型孔

可以明显看出原料在两个成型区域受力不同，且被压缩的原料不能视为固体，而更倾向于密度不均匀的流体，再加上由于秸秆等原材料中木质纤维的影响，在成型过程中原料任意位置的弹性模量也各不相同，所以应力松弛的过程也会随之改变，尤其在出料口E处，会由于弹性回复导致原料内部应力不均，进而导致加工的成型燃料的开裂，影响成型品质。

关于闭式成型的方式，虽然有着加工不连续而影响生产效率的缺陷，但是其优点也是显而易见的^[32-33]

，闭式成型的加工方式如图4所示。压缩过程中原料的受力关系为： $P=F+P_2$ ，在保型过程中，受力关系为： $P=P_2$ ，可

以明显看出原料受到各方向均衡的力, 不同于开式成型只有对原料径向的保型, 闭式成型更符合麦克斯韦 ([M][N]) 应力松弛^[34-35]模型如图5所示。其表达式为:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{T_{si}}} + E_e \right) = \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} e^{-t/\left(\frac{\eta_i}{E_i}\right)} + \sigma_e \quad (1)$$

式中: $\sigma(t)$ 为任意 t 时刻的应力; ε_0 为初始的形变也就是保型过程开始时原料的应变; E_i 为各麦克斯韦模型的弹性模量; E_e 为无法完全松弛的应力的弹性模量; η_i 为个麦克斯韦模型的粘度系数。

从式 (1) 中可以看出不同弹性模量和粘度的模型的应力松弛时间不同, 这种闭式的成型方式有助于在保型过程中原料的弹性恢复, 有可能使被加工的原料的内部应力在这一阶段减少到最低, 在成型燃料被推出成型仓后不会因为残余的内部应力而松散开裂, 成品率会有所提高, 也是成型燃料外形美观进而市场化的关键。

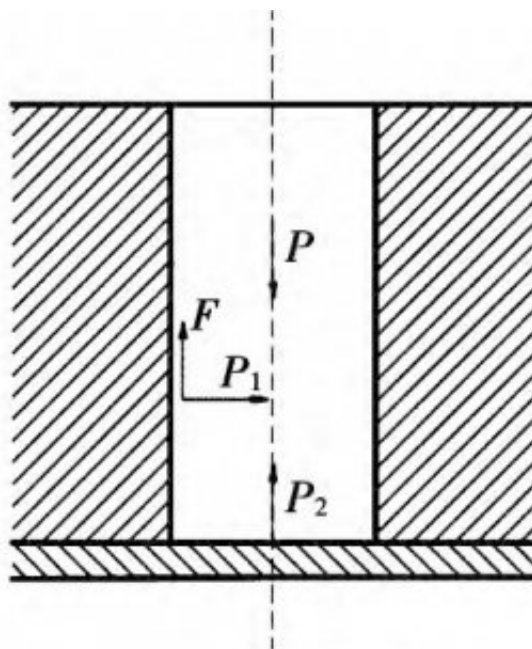


图4 闭式成型的加工方式

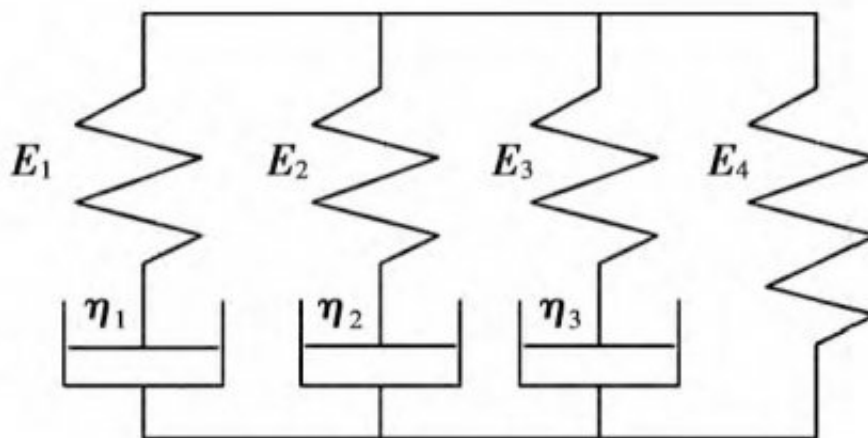


图5 麦克斯韦应力松弛模型

2.1主要工作部件的失效

无论是压辊式的环境，还是螺杆挤压式的螺杆头及成型套筒抑或是柱塞式的变径成型孔，都是实际生产过程中，最容易因磨损导致失效的部件，且这些部件在行业内没有较为统一的生产制造规范，如果损坏，替换成本会很高，从而失去了通过生产生物质燃料达到节能的意义，所以在保证生产效率的基础上，也要提高成型机的使用寿命。

2.2标准化程度不够

我国是农业大国，所以成型燃料的原料多以各种农产品的废弃物为主，以在生物质燃料成型中使用最广泛的秸秆为例，不同地区、不同种类的植物秸秆的物理特性多有不同，所以成型方式和成型机理都不能一概而论，我国当前还没有一套标准的成型机的制造规范。

2.3 市场化程度低

本文中提到的这些生物质成型方式，足以证明我国生物质燃料的成型技术已经有了很大的发展，无论基于哪种成型方式去设计成型机都具有一定的生产价值，且

生物质燃料有显著的经济效益^[36-37]

。但是，成型燃料的市场化及商品化的普及并不十分广泛，且目前的成型燃料，无论是颗粒还是块状从外观上不能被广大消费者接受，便很难在日常领域推广，这也在一定程度上阻碍着成型燃料的市场化。

3 结束语

随着科技进步，经济的发展以及人们环保意识的提高，生物质成型燃料的作用也越来越重要，生物质固化成型技术的开发和研究也越来越成熟。目前，成型机工作部件的磨损依旧是影响其发展的主因，同时现在需要的是一系列的行业内的规范，因为我国成型燃料多以农业废弃物为原料，然而我国地域辽阔、南北环境差异较大，各地农作物秸秆等原料的水分、纤维素、木质素含量都各有不同，这些因素都影响着成型方式及成型燃料的燃烧效果，因此应该根据各地的实际情况对每种生物质成型机进行测试评估，选择出最为适合当地原料特性的成型方式作为研究重点进行优化和研究。

不仅是成型机，对于成型燃料本身，也要有规范化的标准，要对不同原料的生物质燃料的含水率、密度、耐久性等影响燃烧效率的物理特性设定标准，也有助于成型机的规范化，而且根据上面的分析，通过闭式成型加工的成型燃料不仅性能稳定，外表更加整齐美观，更能被消费者接受，这样对成型燃料的商品化及市场化有一定的促进作用，如果实现生物质成型燃料的市场化，不仅会带动农村地区的经济发展，还能够让人们在不断接触这种商品的过程中提高自身的环保意识。

参考文献：

- [1] 易其国,张再杰. 农业生物质能利用探究 [J]. 农村经济与科技, 2017,28(19):26-27.
- [2] 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考 [J]. 农业机械学报,2009,40(1):91-99.
- [3] 周媛,郑丽凤,周新年,等. 基于采伐剩余物的生物质固体燃料生态效益分析 [J]. 森林工程,2018,34(1):24-29+40.
- [4] 金实,俞国胜,陈忠加,等. 外啮合柱塞式生物质颗粒燃料成型机的设计 [J]. 林业机械与木工设备,2017,45(1):12-17.
- [5] 宗煜翔,万芳新,蒲军,等. 生物质制粒成型机理的研究现状 [J]. 林业机械与木工设备,2016,44(7):4-6.
- [6] 吴艳聪. 生物质成型燃料推广应用的探究 [J]. 厦门科技, 2017(5):28-31.
- [7] 李研宁. 生物质燃料的特性分析及前景展望 [J]. 煤炭与化工, 2017(10):21-22.
- [8] 姚宗路,赵立欣,Ronnback M,等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析 [J]. 农业机械学报,2010,41(10):97-102.
- [9] 庞利沙,田宜水,侯书林,等. 生物质颗粒成型设备发展现状与展望 [J]. 农机化研究,2012(9):237-241.
- [10] 孔祥印,樊庆斌,田玉智,等. 生物质秸秆致密成型关键技术研究 [J]. 能源与节能,2016(4):84-86.
- [11] 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.
- [12] 宁廷州,侯书林. 对辊柱塞式成型机仿真分析 [J]. 农机化研究,2017(8):58-61.
- [13] 宁廷州,俞国胜,陈忠加,等. 对辊柱塞式成型机设计与试验 [J]. 农业机械学报,2016,47(5):203-210.
- [14] 于洪亮,林海,曾光,等. GSR800 型固化生物质燃料成型机设计制造技术 [J]. 林业机械与木工设备,2013(12):35-37.
- [15] 姚宗路,张妍,赵立欣,等. 立式双层孔环模生物质压块机设计与试验 [J]. 农业工程学报,2016,32(s1):8-12.
- [16] 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]. 农业机械学报,2016,47(s1):317-323.
- [17] 付敏,韩立志,张水,等. 对辊柱塞式生物质压块机的设计与实验 [J]. 可再生能源,2017(5):645-652.
- [18] 李媛,张泽宇,马亮. 三柱塞式生物质成型机理论及实验研究 [J]. 农机化研究,2012(12):223-226.
- [19] 李游. 五柱塞秸秆燃烧成型机虚拟设计及仿真分析 [D]. 鞍山:辽宁科技大学,2013.
- [20] 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.
- [21] 王青宇,蓝保桢,俞洋,等. 斜盘柱塞式生物质燃料成型机的设计 [J]. 木材加工机械,2014(5):48-50.
- [22] 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.

- [23] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(s1): 317 - 323.
- [24] 张波, 魏益民, Wolfgang Sietze, 等. 双螺杆挤压机螺杆元件类型对扭矩和压力的影响 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 71 - 74.
- [25] 姜南, 邢应生, 闫宝瑞, 等. 食品加工用三螺杆挤压机 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 151 - 154.
- [26] 刘兆旭. 低成本手动生物质燃料成型机的设计方案 [J]. 山东工业技术, 2016(15): 37 - 35.
- [27] 何勋, 张志鹏, 王德福, 等. 蜂窝状生物质燃料柱塞式成型机模具优化设计 [J]. 农机化研究, 2015(6): 247 - 250.
- [28] 付敏, 韩立志, 梁栋, 等. 模辊式生物质压块成型模孔受力分析机参数影响研究 [J]. 可再生能源, 2016(6): 341 - 347.
- [29] 韩盛林. 环模生物质成型机的研究与设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [30] 李震, 曲迪. 生物质液压成型机的双锥度模具 [J]. 林业科学, 2013(9), 136 - 139.
- [31] 毋高峰, 刘云鹏, 吕风朝, 等. 柱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(6): 341 - 347.
- [32] Jens K. Holm, Ulrik B. Henriksen, Kim Wand. Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single PelleterUnit [J]. Energy Fuels, 2007(21): 2446 - 2449.
- [33] MariaPuig-Arnavat, JesperAhrenfeldt, Ulrik B. Henriksen. Validation of a Multiparameter Model To Investigate Torrefied Biomass PelletizationBehavior [J]. Energy Fuels, 2017(31): 1644 - 1649.
- [34] 施英乔, 丁来保, 盘爱享, 等. 生物质能产业与林产化工 [J]. 林产工业, 2016, 43(1): 9 - 11.
- [35] 杨明韶. 农业物流变学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [36] 狄恩仓, 王振成, 郑路, 等. 农用生物质成型机生产线经济效益分析 [J]. 中州大学学报, 2012, 9(3): 101 - 104.
- [37] 刘沙沙, 张健, 马楠, 等. 竹柳颗粒燃料燃烧性能实验研究 [J]. 林产工业, 2017, 44(7): 40 - 43.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/161735.html>