

# 倾斜式模孔环模成型机能耗与成型密度分析

曹永全<sup>1~3</sup>, 孙 姣<sup>1~3</sup>, 于飞跃<sup>1~3</sup>, 陈文义<sup>1~3</sup>, 王序然<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学过程装备与控制工程系, 天津 300130; 2. 河北工业大学工程流动与过程强化研究中心, 天津 300130;

3. 河北序然秸秆能源技术有限公司, 衡水 253800)

**摘 要:** 针对当前环模成型机成型密度低的问题, 提出一种倾斜式模孔结构, 推导出倾斜式模孔挤压能耗和成型密度模型, 并分析各参数对倾斜式模孔成型性能的影响。结果表明: 随着模孔倾斜角度从 $0^\circ$ 增加到 $20^\circ$ , 模孔挤压能耗增加43.6%, 但成型密度提高75.5%; 在倾斜式模孔中, 挤压能耗随物料与孔壁间摩擦系数、物料泊松比及孔长的增大而增加, 随物料与环模内壁间摩擦系数的增大而降低, 随孔径的减小呈先减后增的趋势; 成型密度则随各参数的增大而增大, 且其增幅远大于能耗。

**关键词:** 生物质压块; 受力分析; 能耗; 成型密度; 倾斜角

**中图分类号:** TK6

**文献标识码:** A

## 0 引 言

生物质成型设备主要有活塞冲压式、螺杆挤压式、模辊挤压式3种。相比于另外2种, 模辊式具有更好的原料适应性和运行稳定性, 可实现连续生产。其中环模成型机相对于平模具有更高的产能, 应用最广<sup>[1]</sup>。国内外学者就环模成型机成型品质问题开展了一系列研究, Kaliyan等<sup>[2]</sup>研究了原料生物组分、粒度及含水率对成型品质的影响; Veronica<sup>[3]</sup>对不同粒度的木屑、稻草及玉米秆进行压缩试验, 总结了不同原料的最佳压缩粒度; Larsson等<sup>[4]</sup>在不同原料含水率和蒸汽添加量的条件下进行成型试验, 得到生产高质量成型燃料的最佳参数; 毛华明等<sup>[5]</sup>研究了不同种类化学处理剂对成型密度、能耗的影响, 找到了适宜的化学添加剂; 应 婧等<sup>[6]</sup>研究了秸秆成型密度与环模结构、入孔角度和环模转速的关系并得出一般规律。但以上研究均针对物料本身的特性及成型过程, 很少有通过改变环模结构来提高成型品质的。

本文从模孔结构出发, 提出将模孔以一定倾斜角嵌入环模。通过对模孔内和模孔入口处物料的受力分析, 建立成型机挤压各向异性物料的力学模

型; 推导倾斜式模孔的挤压能耗和成型密度公式, 并与传统模孔对比; 分析不同参数对倾斜模孔能耗和成型密度的影响, 以得到成型机的合适参数, 在牺牲较小能耗的前提下得到更高的成型品质。

## 1 倾斜式模孔力学模型

### 1.1 环模成型机挤压成型原理

生物质秸秆压缩成型实质上是秸秆原料在高压高温环境下, 物料颗粒相互镶嵌、相互黏结的过程。环模压缩一般分为送料区、变形区、成型区3个区。物料在送料区与环模同向旋转, 处于松散状态, 在离心力和自身重力的作用下被甩入变形区; 在变形区内, 随着模辊间隙的逐渐减小, 物料颗粒之间及物料颗粒内部的间隙逐渐减小, 物料发生塑性变形, 密度开始增大; 进入成型区后, 由于模辊间隙急剧减小, 挤压力迅速增大, 物料内部温度升高, 纤维素、木质素开始软化, 物料内部粘滞力增加, 物料颗粒开始黏结, 密度进一步增大。当挤压力增大到足以克服物料与模孔内壁的摩擦力时, 物料被挤入模孔, 进而被挤出。

在环模成型机中, 生物质原料的压实主要依靠

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(11572357; 11602077); 河北省科技计划(16824316D); 河北省科技型中小企业创新英才(169A76334H); 河北省科技支撑计划(11230909D-5)

通信作者: 陈文义(1963—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事秸秆生物质能综合利用方面的研究。cw63@126.com

压辊与环模之间极小间隙下的极大压力和模孔内壁对物料的正压力。前者压力主要来源于压辊,增大压辊尺寸,相对物料的压力会相应增大,进而提高成型密度;后者压力的影响因素主要为模孔的长径比及结构。增大模孔长度或减小模孔孔径均可增加孔壁对物料的压力,提高成型品质。但这些方法无疑都会造成成型能耗的增加,尤其是模孔长度的增加,根据刘璐等<sup>[7]</sup>推导的环模成型机能耗公式可看出,会导致成型能耗呈指数增长。而对于生产规定尺寸成型燃料的要求下,改变孔径显然也无法实施,只能从模孔其他结构上加以改变。

为了实现在增加较小能耗的前提下大幅提升成型密度,本文提出倾斜式模孔环模,如图1。传统环模成型机为方便将物料压入模孔,一般都在模孔入口位置增加一段锥段。但锥、直两段交接位置会发生明显的应力集中,在长时间高温、高压、高摩擦的工作环境下,极易产生裂纹并不断延伸至整个模孔,不仅严重影响成型品质,最终还会导致环模失效。而通过将模孔以一定的倾斜角度嵌入环模的方式,不仅可增加模孔中物料受到的挤压力,提高成型密度,还可避免因锥段的存在而导致的一系列问题。

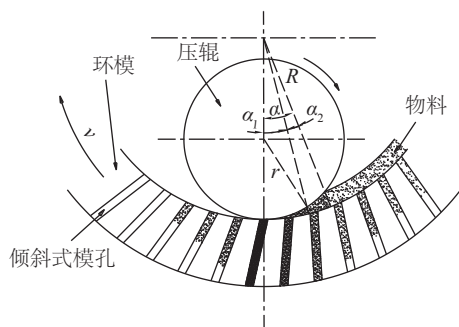


图1 倾斜式模孔环模成型机工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of incline-channel ring moulding machine

## 1.2 倾斜式模孔成型机力学模型

物料在模孔入口处主要受到来自压辊的正压力、摩擦力和自身重力。如图2所示,物料在此处受到的摩擦力和由于后续物料自重而带来的推力合计为 $F_0$ 。在倾斜式模孔中, $F_0$ 可分解为沿模孔方向的 $F_t$ 以及垂直于孔壁方向的 $F_n$ 两个分力。 $F_t$

一方面可将物料顺利挤入模孔,同时也增加了模孔内物料的推力,使物料能被顺利挤出模孔,在一定程度上可减少出模能耗。此外,在传统直模孔环模成型机中,物料的致密过程主要依靠压辊和孔壁的正压力,而大多数生物质原料对力的传导性都特别差,将其压缩至一定密度往往需要很大的压力,这也是环模成型机能耗大的一个原因。在倾斜式模孔中,分力 $F_n$ 对模孔内的物料存在一定的剪切作用,可使物料的纤维素分子团发生错位、延展、变形,在一定压力下实现物料内部颗粒相互嵌合、层层相叠、严密包裹<sup>[8]</sup>,从而提高成型品质。

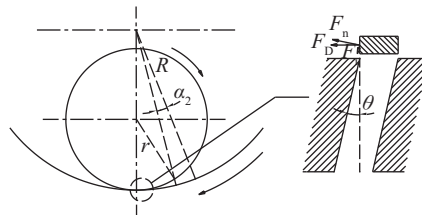


图2 倾斜式模孔入口位置物料受力示意图

Fig. 2 Schematic drawing of forces exerted on material at entrance of incline-channel

生物质环模成型机加工的材料主要是秸秆类农作物及木材,它们都是正交各向异性材料,在挤压成型过程中只考虑物料的弹性变形,遵循胡克定律<sup>[9]</sup>。模孔内物料受力示意图如图3,在倾斜式模孔中,物料受到的压紧力除模孔内壁外,还有来自压辊正压力的分力,且随倾斜角度的增大而增大。

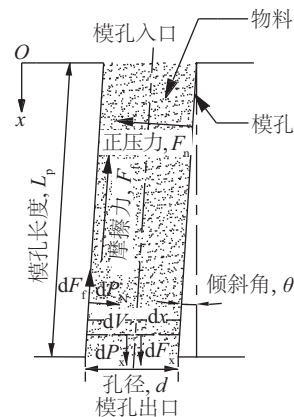


图3 倾斜式模孔内物料受力示意图

Fig. 3 Schematic drawing of forces exerted on material in incline-die channel

根据胡克定律及泊松比的定义,可得到如下

关系:

$$\frac{p_L}{p_R} = \frac{F_L}{A_L} \bigg/ \frac{F_R}{A_R} = \frac{E_L}{E_R} \times \frac{dx/du}{dr/dv} = G\mu_{RL} \quad (1)$$

式中,  $p_L$ 、 $p_R$ ——导致模孔内物料发生纵向应变和径向应变的径向压强和纵向压强。

由于模孔具有一定的倾斜度,  $p_L$  与  $p_R$  的来源与传统直模孔相比有所改变。此时, 为满足物料能被顺利挤出模孔, 至少应满足:

$$dF_x \cos \theta = dF_f \quad (2)$$

式中,  $F_x$ ——物料受到压辊的压力, N;  $\theta$ ——模孔倾斜角度, ( $^\circ$ );  $F_f$ ——物料与孔壁间的摩擦力, N。

通过积分可最终推导出倾斜模孔内物料所受轴向挤压压强  $p_x$  为:

$$p_x = \frac{p_{N0}}{\sin \theta + \mu_{LR} \cos \theta + \mu_{LR} f_2 \sin \theta \cos^2 \theta} \times \left[ e^{\frac{2f_1(\sin \theta + \mu_{LR} \cos \theta + \mu_{LR} f_2 \sin \theta \cos^2 \theta)x}{r_h \cos^2 \theta}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中,  $p_{N0}$ ——预应力, Pa;  $\mu_{LR}$ ——物料泊松比;  $f_1$ ——物料与模孔内壁摩擦系数;  $f_2$ ——物料与环模内壁摩擦系数;  $r_h$ ——模孔半径, m;  $x$ ——模孔任意位置距模孔出口长度, m。

## 2 倾斜式模孔成型能耗与成型密度分析

以 9JYK-2000A 环模压块机的参数为例, 对倾斜式模孔和传统竖直模孔的能耗和成型密度进行对比分析。其结构参数为: 环模半径  $R=360$  mm, 宽度  $B=90$  mm, 模孔长度  $L=165$  mm, 孔径  $r=14$  mm, 模孔数量为 60 个, 压辊数量 2 个, 电机效率和传动效率分别为 0.92、0.98, 物料与模孔内壁摩擦系数  $f_1$  为 0.12, 物料与环模内壁摩擦系数  $f_2$  为 0.30。物料泊松比取 0.35。

### 2.1 成型密度计算模型

环模成型机的成型密度受多种因素影响, 吴劲锋等<sup>[10]</sup>通过制粒模拟实验得到了一定含水率下, 不同粒径的物料在不同挤压力下所能达到的密度, 如式, 对于不同的原料粒度, 其系数如表 1<sup>[10]</sup>所示。

$$F = kF_w e^{-\frac{1}{\rho}} \quad (4)$$

式中,  $F$ ——挤压力;  $k$ 、 $\iota$ ——力密系数和粒密系数。

表 1 不同原料粒度下的密度计算参数值

Table 1 Parameter value for density calculation under different granularity of material

原料粒度/mm	$kF_w$	$\iota$
4	72.02	3.124
6	39.70	2.352
8	33.10	3.072

以粒度 4 mm 为例, 可得出倾斜式模孔的成型密度为:

$$\rho = -\frac{3.124}{\ln(p_x \times \pi r_h^2 / 72.02)} \quad (5)$$

### 2.2 模孔成型能耗计算模型

通过积分可得到倾斜式模孔的挤压消耗功为:

$$W = \frac{(1 - f_2 \sin \theta) p_{N0} \pi r_h^2}{\sin \theta + \mu_{LR} \cos \theta + \mu_{LR} f_2 \sin \theta \cos^2 \theta} \times \left\{ \frac{r \cos^2 \theta}{2f_1(\sin \theta + \mu_{LR} \cos \theta + \mu_{LR} f_2 \sin \theta \cos^2 \theta)} \times \left[ e^{\frac{2f_1(\sin \theta + \mu_{LR} \cos \theta + \mu_{LR} f_2 \sin \theta \cos^2 \theta)L}{r \cos \theta}} - 1 \right] - L \cos \theta \right\} \quad (6)$$

根据成型机产能与模孔挤压消耗功的关系<sup>[7]</sup>, 倾斜式模孔挤压能耗可表示为:

$$W_E = \frac{NW}{Q\varphi_1\varphi_2} \quad (7)$$

式中,  $W_E$ ——模孔挤压能耗, kJ/t;  $N$ ——压辊数目;  $Q$ ——成型机单位时间产量, t/h;  $\varphi_1$ ——电机效率;  $\varphi_2$ ——传动效率。

### 2.3 倾斜式模孔与传统模孔对比分析

忽略锥段对能耗和成型密度的影响, 根据刘璐等<sup>[7]</sup>的推导, 传统环模成型机模孔轴向挤压压强为:

$$p_x' = \frac{p_{N0}}{\mu_{LR}} \left( e^{\frac{2f_1\mu_{LR}x}{r_h}} - 1 \right) \quad (8)$$

模孔挤压消耗功为:

$$W' = \frac{p_{N0} \pi r_h^2}{\mu_{LR}} \left[ \frac{r}{2f_1\mu_{LR}} \left( e^{\frac{2f_1\mu_{LR}L}{r_h}} - 1 \right) - L \right] \quad (9)$$

根据上述挤压力与压缩密度的关系, 同样可得到相同条件下传统环模成型机的成型密度:

$$\rho' = -\frac{3.124}{\ln(p_x' \times \pi r_h^2 / 72.02)} \quad (10)$$

环模成型机单位时间产量与模孔倾斜角度无

关,因此在相同设备为计算依据下,可通过比较模孔挤压消耗功得出挤压能耗的规律。

倾斜式模孔挤压消耗功  $W$  及其与传统模孔的挤压消耗功  $W'$  的对比如图 4 所示。显然,将模孔倾斜一定角度后会导致挤压能耗增加。随着倾斜角从  $0^\circ$  增加到  $20^\circ$ ,模孔挤压能耗从  $0.78 \text{ kJ}$  增加到  $1.12 \text{ kJ}$ ,与传统模孔相比,增加了  $43.6\%$ 。

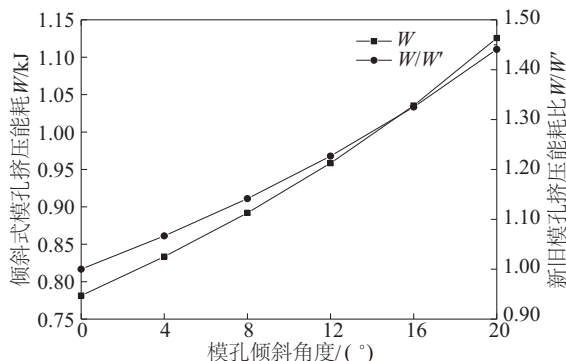


图4 模孔挤压能耗随模孔倾斜角度的变化规律

Fig. 4 Varying law of energy consumption in incline-channel under different inclination angles

另一方面,就来源于压辊的挤压力  $p_x$  而言,在倾斜式模孔中,一部分压力  $p_x \cos \theta$  用于将物料挤出模孔,另一部分压力  $p_x \sin \theta$  则作用于孔内物料,提升物料压缩密度。如图 5 所示,随着模孔倾斜角度从  $0^\circ$  增加到  $20^\circ$ ,物料成型密度从  $1.652 \text{ g/cm}^3$  提高到  $2.900 \text{ g/cm}^3$ ,与传统模孔相比,最大增幅达到  $75.5\%$ 。在实际生产中,倾斜式模孔的成型密度应大于理论计算,因为在成型密度计算过程中只考虑挤压力的作用。而正如前述,由于模孔具有一定的倾斜度,模孔中的物料除受到压辊及孔内壁的挤压

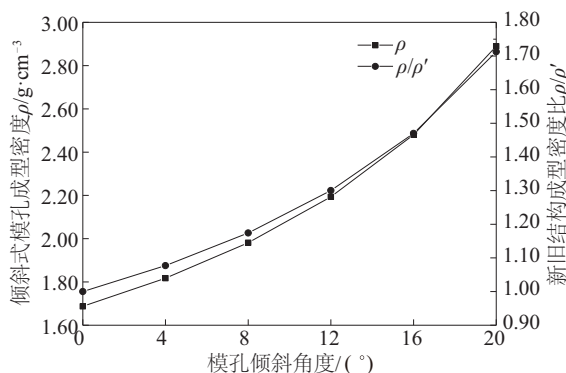


图5 物料成型密度随模孔倾斜角度的变化规律

Fig. 5 Varying law of compaction density in incline-channel under different inclination angle

力外,还会受到剪切力的作用,使物料内部颗粒结合更加紧密。

### 3 倾斜式模孔挤压能耗和成型密度影响因素分析

在实际生产中,影响环模成型机能耗和成型密度的因素有很多,本文就模孔内的挤压过程进行讨论,以模孔倾斜角  $20^\circ$  为例,分析物料泊松比  $\mu_{\text{LR}}$ 、物料与模孔内壁和物料与环模内壁间的摩擦系数  $f_1$ 、 $f_2$  及模孔长径比对倾斜式模孔成型机挤压能耗和成型密度的影响。

#### 3.1 物料泊松比

图 6 为物料泊松比在  $0.12\sim 0.60$  之间变化时,模孔挤压能耗和成型密度的变化情况。不同泊松比的物料所对应的物料初始容重各不相同,进而影响环模成型机的成型能耗和成型质量。与传统环模相同,二者都随泊松比的增加而增大,但在倾斜式模孔中,成型密度的增幅远大于挤压能耗。显然,将倾斜式模孔用于对泊松比较大的物料的成型更有优势。

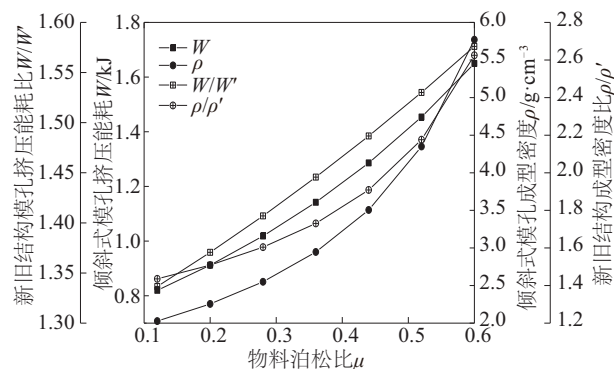


图6 物料泊松比对模孔挤压能耗和成型密度的影响

Fig. 6 Energy consumption and compaction density analysis under different Poisson's ratio of material

#### 3.2 摩擦因数

图 7 分别为物料与模孔内壁及物料与环模内壁间的摩擦系数对成型能耗和成型密度的影响。由图 7a 及式(5)、式(6)可见,  $f_1$  对二者的影响与传统环模成型机相似,成型能耗与密度都随  $f_1$  的增大而增大。不同的是,倾斜式模孔成型密度及其与传统模孔的比值都呈指数倍增长,远远大于成型能耗的增幅。显然,物料与模孔内壁间摩擦系数在倾斜



式模孔中对成型性能的影响更为显著。

物料与环模内壁间摩擦系数  $f_2$  对能耗和成型密度的影响不同于  $f_1$ , 如图 7b, 随着  $f_2$  从 0.26 增加到 0.36, 模孔挤压能耗逐渐降低, 而成型密度逐渐增大, 但二者的变化范围都相对较小。从另一个角度考虑, 在倾斜式模孔中, 虽然增大  $f_1$  和  $f_2$  有利于生产高品质颗粒燃料, 但二者的增大会对环模结构强度产生一定影响, 尤其是  $f_1$  的增加, 会造成环模承受的压力成倍增加, 因此还需综合考虑各因素来选取合适的摩擦系数, 达到最优的效果。

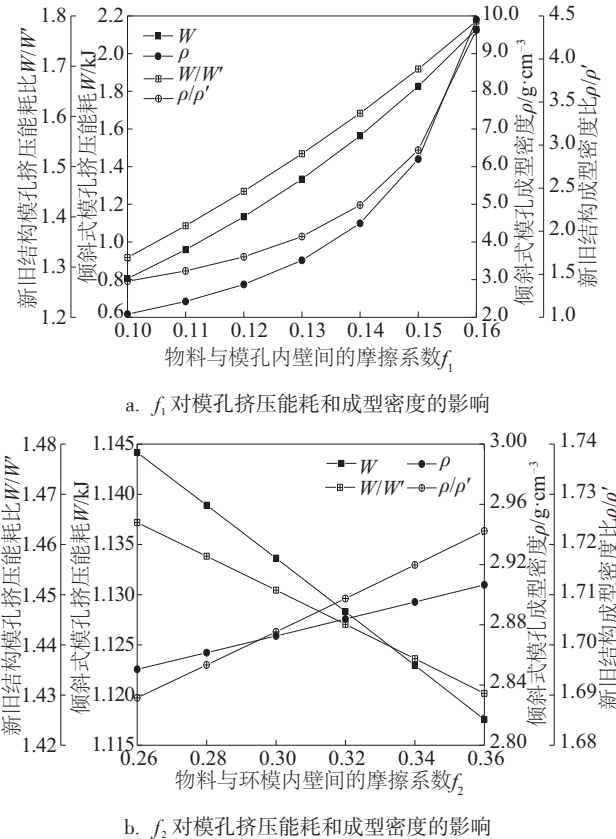


图 7 摩擦系数对挤压能耗和成型密度的影响  
Fig. 7 Energy consumption and compaction density analysis under different friction coefficients

3.3 模孔长径比

环模成型机模孔孔径和长度对挤压能耗及成型密度具有重要影响, 选择合适的模孔长径比有利于在最小的能耗下生产高质量的成型燃料, 实现生产最优化。

固定模孔长度 165 mm, 将模孔孔径由 32 mm 减小至 20 mm, 结果如图 8a 所示, 随着孔径(即长径

比)的增大, 倾斜式模孔挤压能耗呈先减小后增大的趋势, 但整体变化幅度较小, 而成型密度随孔径的减小持续增大。挤压能耗出现减小的趋势主要是因为孔径较大时, 由于模孔具有倾斜度, 其入口位置物料的推力作用 ( $F_1$ ) 较明显, 可降低挤压能耗。但随着孔径的逐渐减小, 能耗呈指数增大, 推力作用愈发不明显, 因此出现先减小后增大的趋势。

保持倾斜式模孔孔径 28 mm, 将模孔长度从 128 mm 增加到 230 mm, 模孔挤压能耗和成型密度都呈增大趋势, 如图 8b, 但成型密度的增幅远远大于挤压能耗, 尤其是当模孔长度大于 190 mm 时, 成型密度的增长率会突然增大。另一方面, 模孔长度的增大也意味着环模厚度随之增加, 这会导致成型过程中其他能耗的大幅增加。

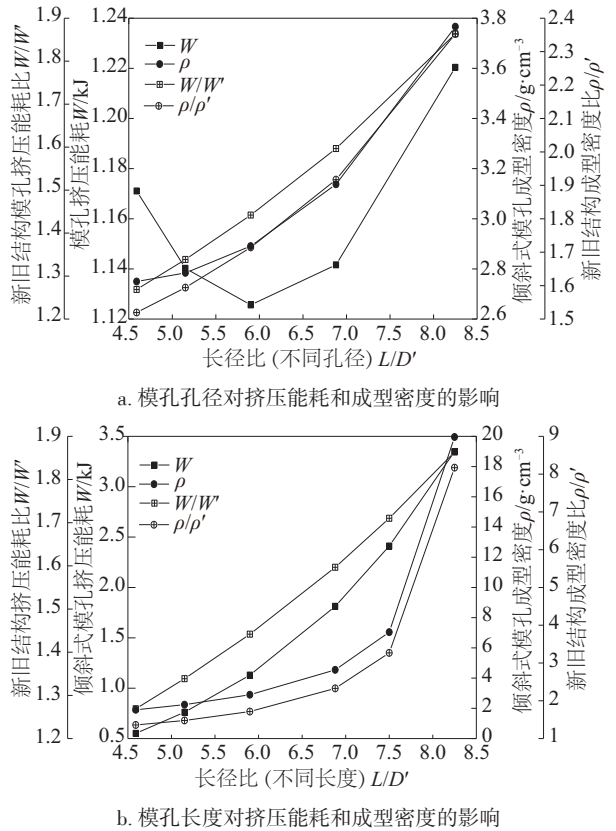


图 8 模孔长径比对模孔挤压能耗和成型密度的影响  
Fig. 8 Energy consumption and compaction density analysis under different length-diameter ratios of die channel

4 结 论

本文提出一种倾斜式模孔的环模成型机, 并对

其成型过程进行受力分析,建立倾斜式模孔挤压过程力学模型,推导出模孔挤压能耗和成型密度的计算公式,并以此为基础与传统环模进行对比分析,得出主要结论如下:

1)在倾斜式模孔中,孔入口位置处的物料对孔内的物料有2个作用:一是物料所受摩擦力和后续物料的推力沿模孔方向的分力 $F_t$ 对模孔内物料具有助推效果,可减小模孔挤压能耗;二是垂直于模孔内壁的分力 $F_n$ 对孔内物料具有剪切作用,有助于提高成型品质。

2)通过对倾斜式模孔挤压能耗及成型密度模型的推导可发现,在相同条件下,相比于传统的垂直模孔,模孔倾斜角度从 $0^\circ$ 增加到 $20^\circ$ ,孔内挤压能耗增加43.6%,但其成型密度相比传统模孔增大75.5%。在运行生产中可根据实际需求选择合适的倾斜角度来平衡挤压能耗和成型密度。

3)在倾斜式模孔中,孔内挤压能耗随物料和孔壁的摩擦系数 $f_1$ 、物料泊松比 $\mu$ 及模孔长度 $L$ 的增大而增大,随物料与环模内壁间摩擦系数 $f_2$ 的增大而减小,随孔径的减小呈先减小后增大的趋势。而成型密度随摩擦系数、模孔长径比及物料泊松比的增大而增大。

4)随着模孔及物料各参数的增大或减小,成型密度的变化幅度均远大于模孔挤压能耗的变化幅度;而且二者在倾斜式模孔中的变化幅度也均远大于传统垂直模孔,尤其是成型密度的变化。因此,在保证倾斜式模孔环模整体结构强度的情况下,选择合适的模孔结构参数及物料类型显然有利于生产更高品质的成型燃料。

#### [参考文献]

- [1] 欧阳双平, 侯书林, 赵立欣, 等. 生物质固体成型燃料环模成型技术研究进展[J]. 可再生能源, 2011, 29(1): 14—18.
- [1] Ouyang Shuangping, Hou Shulin, Zhao Lixin, et al. The research progress in progress annular mould forming for fuel technology [J]. Renewable Energy, 2011, 29(1): 14—18.
- [2] Kaliyan N, Morey R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass & Bioenergy, 2009, 33(3): 337—359.
- [3] Veronica O Y. Assessment of the effect of particle size and briquette type on the bulk density and resistance to humidity of some solid biomass briquettes [J]. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2016, 5(11): 234—238.
- [4] Larsson S H, Thyrel M, Geladi P, et al. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7176—7182.
- [5] 毛华明, 邓卫东, 冯仰廉. 秸秆复合化学处理与成型加工对颗粒密度、粒度和耗电量影响的研究[J]. 饲料工业, 1999, 20(2): 8—10.
- [5] Mao Huaming, Deng Weidong, Feng Yanglian. Study on the effect of compound chemical treatment and processing technology of straw on the compaction density, particle size and energy consumption [J]. Feed Industry, 1999, 20(2): 8—10.
- [6] 应 婧, 虞洪章, 熊昌国, 等. 秸秆环模成型率和燃料密度试验研究[J]. 现代农业科技, 2016, (2): 201—203.
- [6] Ying Jing, Tuo Hongzhang, Xiong Changguo, et al. Experimental study on ratio of briquetting of straw annular mould forming fuel and fuel density [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (2): 201—203.
- [7] 刘 璐, 孙 姣, 张 旭, 等. 环模成型机产率与能耗建模及影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3426—3432.
- [7] Liu Lu, Sun Jiao, Zhang Xu, et al. Modeling and influence factor analysis on productivity and energy consumption of circular mould briquetting machine [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(12): 3426—3432.
- [8] 王 慧. 基于生物质碾压成型机理的成型能耗影响因素研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [8] Wang Hui. Research on factors affecting forming energy consumption based on biomass rolling forming mechanism [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011.
- [9] Jens K H, Ulrik B H, Johan E H, et al. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production [J]. Energy & Fuels, 2006, 20(6): 2686—2694.
- [10] 吴劲锋, 黄建龙, 张维果, 等. 苜蓿草粉制粒密度与挤出力模拟试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 68—71.

- [10] Wu Jinfeng, Huang Jianlong, Zhang Weiguo, et al. Simulated experiment and model of pelletizing density and extruding force for alfalfa powder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 68—71.

## ENERGY CONSUMPTION AND COMPACTION DENSITY ANALYSIS IN AN INCLINE-CHANNEL RING MOLDING MACHINE

Cao Yongquan<sup>1-3</sup>, Sun Jiao<sup>1-3</sup>, Yu Feiyue<sup>1-3</sup>, Chen Wenyi<sup>1-3</sup>, Wang Xuran<sup>3</sup>

(1. Department of Process Equipment and Control Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Research Center of Engineering Fluid and Process Enhancement, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

3. Hebei Xuran Straw Energy Technology Co., Ltd., Hengshui 253800, China)

**Abstract:** In view of the problem of low compaction density of the ring-matrix molding equipment, a new type of incline-channel matrix for biomass compressing was proposed. Through the mechanical analysis of raw material during the briquetting process in die channel, the model of compaction density and energy consumption was established. The influence of various parameters on the energy consumption and the compaction density in the incline-channel matrix were investigated. The results show with increasing the inclination angle of channel axis from  $0^\circ$  to  $20^\circ$ , the energy consumption for material compressing in channel grows 43.6%, while the molding density increased by 75.5%. In the inclined die channel, the extrusion energy consumption increases with the rise of the friction coefficient between the material and the channel wall, the Poisson's ratio of material and the length of the channel when the friction coefficient between the material and the inner wall of the ring die increases, the extrusion energy consumption decreases with the decrease of the channel size, it showed a tendency to increase first and then decrease. The compaction density is enhanced with the rise of various parameters, and the enhancement is much larger than the energy consumption.

**Keywords:** briquetting; stress analysis; energy consumption; compaction density; inclination angle