

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.013

小型可调间隙饲料制粒机设计与试验

彭飞 王红英 康宏彬 孔丹丹

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要:为实现小批量颗粒饲料生产,设计一种小型可调间隙饲料制粒机,包括环模及配套部件、压辊及配套部件、传动机构等。该制粒机特征为:压辊调节部件位于制粒机外部,能够在不停机的状态下实时调节模辊间隙,保证颗粒饲料的连续生产。同时设计了与该制粒机配套的控制系統。基于弹性理论,采用有限元分析软件 Abaqus 内置的 Drucker-Prager Cap 本构模型对制粒机模辊挤压过程进行了数值模拟,模拟结果表明,模辊间隙的设置应与物料的摩擦系数相匹配,适当提高物料的摩擦系数能够避免物料内部滑移耗能,有利于提高颗粒饲料的产量和质量。制造样机并进行了生产试验,以某配方乳猪料为原料,进行制粒机作业性能指标的测定,结果表明:该制粒机生产的颗粒饲料成品含水率为 13.53%,直径为 3 mm,颗粒含粉率为 3.27%,颗粒耐久度(PDI)为 94.34%,颗粒硬度为 176.03 N,生产率约为 42 kg/h,各项指标均达到设计要求,满足小批量颗粒生产的要求。

关键词:小型饲料制粒机;可调间隙;数值模拟;试验

中图分类号: S817.12*4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0103-08

Design and Experiment on Small-scale Adjustable Clearance Pellet Feed Mill

PENG Fei WANG Hongying KANG Hongbin KONG Dandan

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

Abstract: Small-scale pellet mill has many advantages, such as small mass production, less energy and raw materials consumption and low costs. Recently many researches were focused on the pelleting experiments, but the lack of small-scale pellet feed machine had become a problem of the influence of different formulas and processing conditions on pellet feed quality. To solve the problem, a structure of small-scale pellet mill was designed, which consisted of ring die and its matching components, roller and its matching components, transmission mechanism, etc. The prototype was manufactured and the production experiment was conducted. The adjusting mechanism for the roller was located outside the chamber, so the gap between roller and ring die could be real-time adjusted when the production was in process. The structure could ensure that the production of pellet feed would be non-stop. Based on elastic-plastic theory and continuum mechanics, the software Abaqus and its built-in Drucker-Prager Cap material model were used for the numerical simulation and analysis of the pelleting process. The simulation results showed that the gap between roller and ring die should be adjusted with the friction coefficient of raw materials; proper increase of raw materials' friction coefficient could avoid internal sliding and energy consumption, which could help to improve the yield and quality of pellet feed. Some suckling pig feed formula was taken as raw material to be produced, and the performance indicators of the pelleting mill were determined. The experiment results showed that the moisture content was 13.53%, diameter of the pellet feed was 3 mm, pellet durability index was 94.34%, hardness of pellet feed was 176.03 N, and productivity of the pelleting mill was about 42 kg/h. All the indexes met the design requirements, which could meet the production need of small-scale pellet mill. The design of the pelleting mill and experiment research provided reference for the pelleting technology and development of the similar equipments.

Key words: small-scale feed pellet mill; adjustable clearance; numerical simulation; experiment

收稿日期: 2016-08-10 修回日期: 2016-08-29

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203015)

作者简介: 彭飞(1989—),男,博士生,主要从事饲料加工装备研究,E-mail: feipeng2012zhn@163.com

通信作者: 王红英(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事饲料加工工艺与装备研究,E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

引言

颗粒饲料具有广泛的适用性,与粉状饲料相比,具有避免动物挑食,饲料报酬率高,贮存运输和管理方便,杀灭有害菌等优点^[1-3]。制粒机作为颗粒饲料生产的主机,是典型的以模辊结构为工作原理的挤压成型设备,其作业过程为:饲料原料经过水热调质,通过机械压缩并强制通过环模孔而聚合成型,形成具有一定密度和强度的颗粒。

常用的制粒机分为环模和平模两种基本类型;根据运动特征,可分为动辊式和动模式;根据模辊的组合形式,可分为三辊、二辊、大小辊和双环模式;根据传动方式,可分为齿轮传动式、单电动机三角带、双电动机三角带、双电动机同步齿形带—二级传动等^[4]。模辊式制粒机由于具有生产率高、能耗低、原料适应性强等优点,是当前研究的热点^[5-9]。国内外现有的制粒机产量较大,一般每小时在数吨到数十吨之间。小型制粒机具有样品用料小、电能消耗少、作业成本低等特点^[10],在小批量饲料生产特别是研究不同配方和加工工艺条件对颗粒饲料质量的影响规律方面,具有独特的优势。目前,国内对小型制粒机的设计与研究刚刚起步,文献[11-12]提出了两种小型制粒机的构想,目前处于专利形式,不够深入,设备设计与加工的可行性,作业过程的可靠性和稳定性,均未得到验证。因此,本文设计一种小型可调间隙式制粒机结构,以满足小批量饲料生产的需要,同时设计该机的压辊调节部件位于制粒机外侧,在不停机状态下以实现对模辊间隙的调节,保证颗粒饲料生产过程的连续性和产品质量的一致性。

制粒机作业过程的本质是粉体挤压成型过程,粉体具有一定的黏弹性和塑变性,因此成型过程复杂多变^[13-14],用传统数学解析的方法分析这一过程具有局限性;同时,制粒机的作业过程是在相对封闭的空间内进行的,且工作时模辊处于高速旋转状态,很难用仪器进行直接测定。计算机和数值模拟技术的发展,为深入研究粉体成型机理提供了新的研究方法^[15-17]。本文用数值模拟的方法对制粒挤压过程进行建模与仿真。

1 总体结构与工作原理

1.1 整机结构

如图1所示,小型环模制粒机主要由环模及配套部件、压辊及配套部件、传动机构组成。其中,环模及配套部件主要由环模、环模安装盘、制粒机门盖、制粒机壳体等组成;压辊及配套部件主要由压

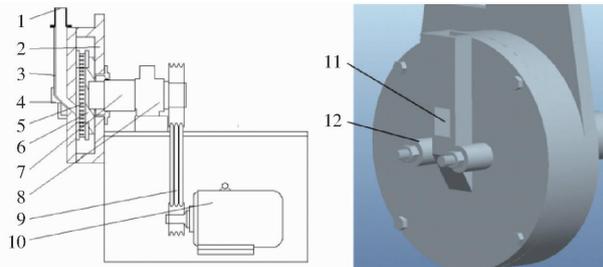


图1 制粒机结构图

Fig. 1 Structure diagram of pellet mill

1. 进料口 2. 制粒机壳体 3. 门盖 4. 压辊安装套筒 5. 环模 6. 环模安装盘 7. 制粒机主轴 8. 轴承支座 9. 减速带 10. 电动机 11. 作业观察孔 12. 压辊安装套筒

辊、压辊轴、安装套筒、锁紧螺母等组成;传动机构由电动机、减速器、轴承、制粒机主轴等组成。

1.2 工作原理

变频器驱动电动机,通过传动轮、传动带,传递动力到制粒机主轴上。当制粒机因堵机等原因导致主轴扭矩过大时,主轴会与传动带产生摩擦打滑,从而避免因扭矩过大而破坏电动机。制粒机主轴与环模安装盘固定连接,环模和环模密封环均通过特制螺母与环模安装盘固接;制粒机主轴带动环模安装盘、环模、环模密封一起旋转;调质后松散的饲料原料进入环模和压辊间的空隙,在环模和压辊的挤压作用下,经环模孔挤出,由位于环模外沿的切刀切成一定长度的颗粒饲料。刮刀安装在制粒机门盖上,当物料进入制粒机后,刮刀起到推料和均匀布料的作用。

2 关键部件设计

2.1 环模

环模的工作面积是指环模压制饲料的面积,即环模与压辊的接触面积^[3]。该面积越大,表明制粒产量相对越高。其计算方法为

$$A = \pi DB \quad (1)$$

式中 A ——环模的工作面积, mm^2

D ——环模内径, mm

B ——压带宽度, mm

环模开孔率对制粒机生产率影响很大。通常,模孔的直径范围为 $1.5 \sim 20 \text{ mm}$,对应的开孔率范围为 $20\% \sim 35\%$,由文献[3-4],设计环模开孔率为 20% 。模孔个数、开孔率、环模工作面积之间关系为

$$K = \frac{\pi d_1^2 t}{4A} \times 100\% \quad (2)$$

式中 K ——环模开孔率, $\%$

d_1 ——环模孔径, mm

t ——环模总孔数

环模角速度计算公式为

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3)$$

式中 ω ——环模角速度, rad/s

r ——环模半径, m

v ——环模线速度, m/s

基于文献[3,18]中常见的环模尺寸设计,结合本机产量,同时为了零件加工方便以及其配件选型标准化,设计环模内径为 180 mm;环模线速度为 3.5 ~ 8.5 m/s,假定取 4.5 m/s。将 $v = 4.5$ m/s、 $r = 0.09$ m 代入式(3),可得 $\omega = 50$ rad/s。

制粒机单位时间产量计算式为

$$Q = \frac{ZK[r^2 - (r-h)^2]B\rho\omega}{2} \times 10^9 \quad (4)$$

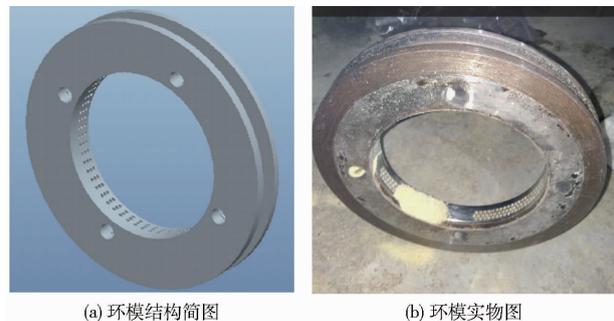
式中 Q ——制粒机生产能力, t/h

Z ——压辊个数

h ——挤压料层高度, m

ρ ——原料的密度, kg/m³

由文献[4,19],假定挤压料层高度为 10 mm,将 $Q = 0.05$ t/h、 $Z = 2$ 、 $K = 20\%$ 、 $r = 90$ mm、 $h = 0.01$ m、 $\omega \approx 50$ rad/s、 $\rho = 500$ kg/m³ 代入式(4),求得环模有效宽度 $B \approx 7.27$ mm,适当放大环模宽度,设计为 15 mm,图2为环模部件结构图。



(a) 环模结构简图

(b) 环模实物图

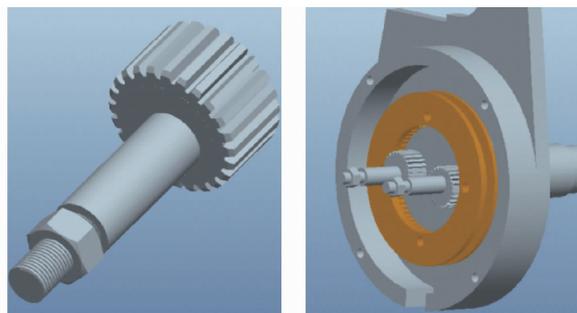
图2 环模结构

Fig.2 Structure of ring die

2.2 压辊及偏心轴设计与装配

如图3所示,压辊部件主要由压辊及压辊轴组成,通过转动压辊轴来调节压辊与环模的间隙,使不同配方的饲料原料均能获得理想的压制效果。与传统压辊制粒机不同,本文设计的压辊轴一端与压辊偏心安装,另一端经制粒机门盖上的压辊安装套筒伸出到制粒机门盖外,再由锁紧螺母固定。操作人员可以通过转动制粒机门盖外侧的压辊轴来调整模辊间隙,从而可以在不停机的状态下实时调节,保证制粒机连续不间断工作,提高作业效率。

环模与压辊间隙直接影响颗粒饲料的产量和质量。模辊间隙一般为 0.1 ~ 0.4 mm^[20];环模制粒机压辊一般为 2 或 3 个,考虑到本制粒机体积较小,故



(a) 压辊及压辊轴结构

(b) 压辊的安装方式

图3 压辊设计与安装

Fig.3 Design and installation of roller

设计压辊数为 2 个;设计压辊直径为 70 mm,压辊轴与压辊重心偏心安装的距离为 5 mm;这种设计既便于压辊的安装,又能在较大的范围内调节模辊间隙。

2.3 电动机选型

小型可调间隙制粒机作业功率主要包括:挤压物料需要的功率和克服阻力矩所需要的功率。因此,通过计算以上两部分所需的功率来确定电动机。挤压物料需要的功率^[4-5]

$$P_1 = \frac{QNK}{7.2\rho\varphi} \quad (5)$$

式中 P_1 ——制粒机电机驱动功率, kW

φ ——电动机效率,一般为 0.8 ~ 0.9

N ——制粒机所需要的挤压工作压力, MPa

将 $Q = 0.05$ t/h、 $\rho = 0.5$ t/m³、 $\varphi = 0.8$ 、 $K = 60\%$ 、 $N = 60$ MPa 代入式(5),求得 $P_1 \approx 0.52$ kW。

克服阻力矩需要的功率

$$P_2 = T\omega \quad (6)$$

式中 T ——扭矩

根据式(6)计算求得 $P_2 = 0.63$ kW。

初步估算整机功率: $P = P_1 + P_2 = 1.15$ kW。考虑到传动带和轴承摩擦等损失,选用 3 kW 的电动机,该电动机型号为 Y2-100L2-4。其具体参数:额定转速 1 430 r/min,额定电压 380 V,额定电流 6.8 A,额定效率 0.825,功率因数 0.81。

2.4 控制系统设计

小型可调间隙制粒机与喂料器、调质器、控制系统共同组成了颗粒饲料制粒平台,其中控制系统是该制粒平台的重要组成部分,具有喂料量调控、调质器转速调控、物料温度监测、制粒机转速调控、制粒机电流监测等功能。为此,将控制系统从功能上划分为喂料器监控、调质器监控、物料温度监测、制粒机转速监控、制粒机电流监测模块 5 个功能模块,其结构框图如图 4 所示。控制柜为控制系统的载体,设计其外形尺寸(长×宽×高)为 700 mm×400 mm×1 600 mm,工作电压为 380 V,整体控制结构如图 5 所示。

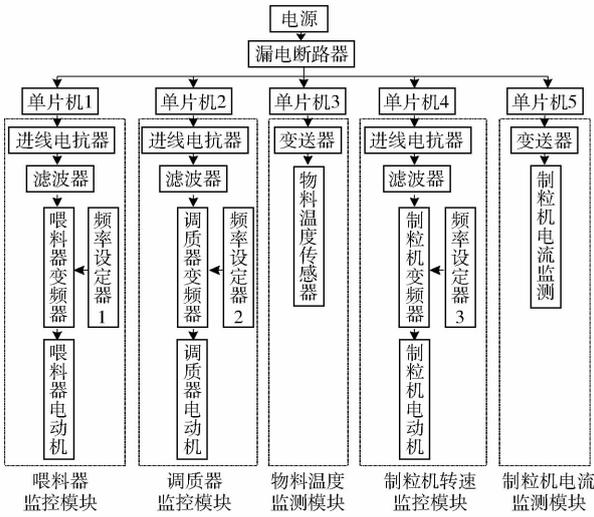


图4 控制系统结构框图

Fig.4 Structural diagram of control system



图5 控制系统实物图

Fig.5 Design of control system

3 制粒挤压过程建模与仿真

3.1 Drucker - Prager Cap 模型

Drucker - Prager Cap 是一种表征弹塑性和体积硬化的物性模型,适用于模拟摩擦材料、压缩屈服强度大于拉伸屈服强度的材料。其特点是允许材料各向同性硬化、软化,同时允许塑性体积变化和塑性剪切变化,该模型在粉体物料的挤压过程研究中应用广泛^[21-22]。

3.1.1 屈服面

模型由 Drucker - Prager 模型和 Cap 模型组成;其中,Drucker - Prager 模型给出剪切破坏面,用于控制物料在剪切作用下流动,模型表达式为

$$F_s = q - p \tan \beta - d_2 = 0 \quad (7)$$

式中 q ——Mises 应力,MPa

p ——静水压力,MPa

β ——材料的摩擦角, ($^\circ$)

d_2 ——材料的粘聚力,MPa

Cap 模型引入压缩产生的屈服,控制材料在剪切作用下无限的剪胀现象^[23],模型表达式为

$$F_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left(\frac{Rq}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos \beta}} \right)^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (8)$$

式中 R ——控制 Cap 模型形状的参数,取值范围为 0.000 1 ~ 1 000

α ——用于定义过渡区屈服面的参数,通常为 0.01 ~ 0.05

p_a ——Cap 曲面与过渡曲面交点对应的静水压力,MPa

过渡曲面用于平滑地连接 Drucker - Prager 面和 Cap 面,模型表达式为

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[q - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos \beta} \right) (d + p_a \tan \beta) \right]^2} - \alpha(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (9)$$

构成 Drucker - Prager Cap 模型的这 3 个屈服面的关系及其参数的物理意义如图 6 所示。

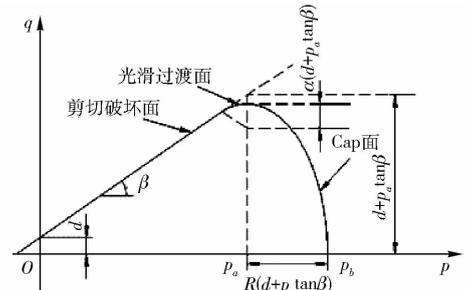


图6 Drucker - Prager Cap 模型

Fig.6 Model of Drucker - Prager Cap

3.1.2 塑性势面

塑性流动由流动潜能来定义,它与 Cap 模型相关联,与 Drucker - Prager 模型和过渡区非关联。Cap 模型流动潜能由 Cap 模型的椭圆部分决定,与 Cap 屈服面函数相同,表达式为

$$G_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left(\frac{Rq}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos \beta}} \right)^2} \quad (10)$$

剪切破坏面和过渡区决定模型非相关流动部分,表达式为

$$G_s = \sqrt{\left[(p_a - p) \tan \beta \right]^2 + \left(\frac{q}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{\cos \beta}} \right)^2} \quad (11)$$

3.2 问题分析与模型建立

3.2.1 制粒挤压过程分析

本文对粉状物料挤压成型过程主要作以下假设与简化:作业过程主要考虑粉状物料的流动和应力应变情况,且物料的刚度相对于环模和压辊较小,因此可以将环模和压辊视作刚性体,将粉体物料看成

均匀连续介质;假设挤压过程中物料沿环模轴向分布均匀,可以将物料挤压过程简化为二维平面应力应变分析。建立二维数值模拟模型,如图7所示。

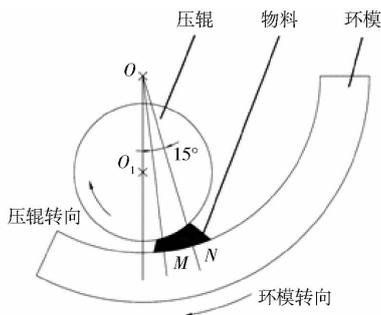


图7 二维数值模拟模型

Fig.7 Two-dimensional numerical simulation model

物料转动方向如图7所示,选取MN路径上物料和环模接触面之间的等效应力,MN弧对应的角度为 15° ,弧长为23.57 mm。采用Abaqus软件内置的Drucker-Prager Cap模型构建粉体物料特性,采

用Abaqus-Explicit显示求解器求解和分析。

3.2.2 模型的建立

基于样机结构和参数,设计建立仿真模型。环模内径180 mm,压辊直径70 mm,物料厚度20 mm,模辊间隙0.4 mm,摩擦因数0.8。由于研究制粒挤压过程中普遍性的规律,因此模拟时可选用与饲料原料特性类似的微晶纤维素,该材料Drucker-Prager Cap参数和盖帽硬化特性分别如表1和表2所示^[24]。

表1 Drucker-Prager Cap模型参数

Tab.1 Parameters of DPC model

| 参数 | 数值 |
|---------------------|-------|
| 弹性模量 E/MPa | 2 207 |
| 泊松比 ν | 0.14 |
| 粘聚力 d/MPa | 2.7 |
| 内摩擦角 $\psi/(\circ)$ | 64 |
| 盖帽偏心参数 | 0.402 |

表2 盖帽硬化特性

Tab.2 Cap hardening characteristics

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 静水压力/MPa | 1.087 5 | 1.122 | 1.61 | 2.59 | 4.08 | 6.87 | 12.00 | 16.80 | 23.70 | 31.80 | 42.30 | 56.60 | 79.60 | 119.00 | 143.00 |
| 塑性体积应变 | 0 | 0.124 | 0.257 | 0.374 | 0.478 | 0.572 | 0.662 | 0.742 | 0.814 | 0.884 | 0.950 | 1.010 | 1.070 | 1.120 | 1.140 |

3.2.3 参数设置与求解

(1)在Part模块中创建环模、压辊、物料这3个部件,分别将环模和压辊的圆心设置为刚性参考点。

(2)进入Property模块,参照表2和表3设置物料的材料属性;进入Assembly模块,装配该3个部件。

(3)进入Mesh模块,使用线性缩减积分中的CPE4R单元对物料网格划分,该网格可以保证网格扭曲变形时载荷类型精度不降低。

(4)进入Step模块,设置2个分析步:第1个分析步将压辊下压以使得环模和压辊达到设定的间隙;第2个分析步分别定义模辊的旋转。

(5)定义接触:进入Interaction模块,分别设置压辊、环模与物料的接触属性。

(6)定义边界条件:在压辊参考点处施加下压位移载荷,在环模参考点处施加旋转载荷。设置环模旋转0.26 rad,设置压辊旋转0.67 rad,模拟环模带动压辊旋转的过程。

3.3 制粒挤压过程的影响因素与分析

由文献[3-4, 25]可知,物料与模辊的摩擦因数、模辊间隙、模辊直径比都会对制粒过程产生影响。对于某一型号和产量的制粒机,与其匹配的环模外形尺寸基本固定,因此,本文通过改变物料和模辊的摩擦因数、模辊间隙这2个因素,研究其对挤压过程的影响规律。

3.3.1 应力应变和位移分析

模拟结果如图8所示,分析可知,随着物料不断攫取进入模辊内,物料和环模接触区域的等效应力先是较缓慢增大,接着是较快速增大,最后达到一个相对平稳的状态。在变形压紧区的开始阶段,物料以克服自身的空隙为主,在较小的压力作用下也会产生较大的变形,因此体积减小较快,且此时内部应力还较小;随着模辊继续转动,在变形压紧区的结束阶段,物料颗粒间的空隙基本被克服,物料主要发生不可逆的塑性变形,应力分布不断增大;当物料进一步进入到挤压成型区后,模辊间隙基本不再减小,故此处物料的应力和应变逐渐趋向平稳。该结论与文献[3-4]中有关制粒原理研究是一致的。以接触弧度MN段为分析路径,提取该处接触点上的等效应力,分析模辊间隙、物料摩擦因数对挤压应力的影响。

3.3.2 摩擦因数对制粒挤压过程的影响

摩擦因数对物料受力、运动情况和成型特性等影响较大,主要由物料特性、制粒机加工工艺参数、模辊材质等决定,是研究物料挤压成型过程中数学计算、计算机模拟和试验测定的基础。选取4组不同的摩擦因数进行模拟,分别为0.6、0.7、0.8、0.9,结果如图9所示。

由图9分析可知,随着摩擦因数逐渐增大,物料与环模接触区域等效应力呈逐渐增大趋势;挤压时

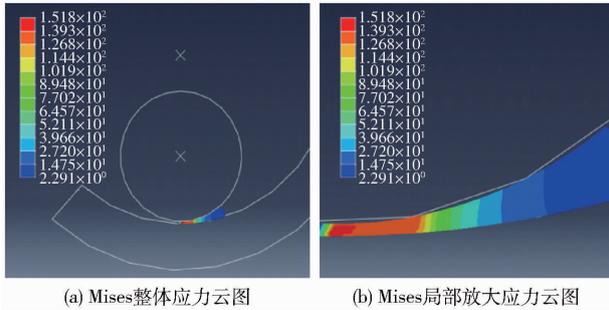


图8 Mises 应力云图

Fig. 8 Mises stress contours

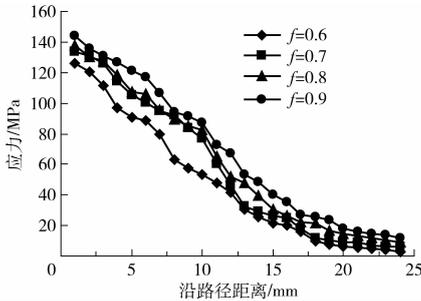


图9 不同摩擦因数下的 Mises 应力

Fig. 9 Mises stress under different friction coefficients

摩擦因数越大,物料和模辊之间的滑移作用就越弱,空载打滑耗能越少,更多的能量会用于物料的压实变形。研究表明摩擦因数和攫取角成正比关系^[26-27],在制粒能力范围内,摩擦因数越大,物料攫取角就越大,攫取层物层高度就相应越大,单位时间内攫取进入模辊间隙中的物料就越多。因此,适当增大物料和模辊间的摩擦因数,有利于提高颗粒饲料的产量和质量。同时,摩擦因数增大,物料对模辊的磨损也会相对增加。

3.3.3 模辊间隙对制粒挤压过程的影响

合理的模辊间隙是保证制粒机效率和颗粒饲料质量的重要因素^[3-4]。为使模拟收敛性较好,对模辊间隙适当放大,取4组模辊间隙进行模拟,分别为1.0、1.2、1.4、1.6 mm。摩擦因数选用0.8,模拟结果如图10所示。

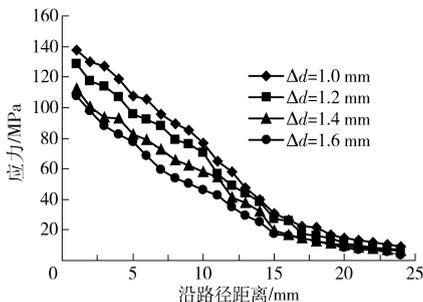


图10 不同模辊间隙下的 Mises 应力

Fig. 10 Mises stress under different die-roller gaps

由图10分析可知,随着模辊间隙不断增大,物料与环模接触区域等效应力呈减小趋势。这与文

献[27]的研究结果一致。随着间隙增大,模辊楔形空间攫取饲料的能力下降,模辊作用于饲料的挤压力减小,因此可能会造成饲料颗粒成型率低、硬度小、含粉率高、颗粒表面粗糙等缺陷;如果间隙过大,当压力小于模孔内壁对饲料的摩擦阻力时,会导致压辊打滑、制粒机堵机等现象,进而降低颗粒饲料的产量和质量。因此,在合理的范围内,适当减小模辊间隙,有助于提高颗粒饲料的质量。

4 试验

4.1 试验指标测定

4.1.1 生产率

制粒机工作稳定后,统计一段时间内生产的颗粒饲料质量,生产率理论计算公式为

$$q_1 = \frac{M}{t_1} \quad (12)$$

式中 q_1 ——生产率,kg/h

M ——接料质量,kg

t_1 ——接料时间,h

4.1.2 物料含水率

采用 ASAE S269.4 标准测定含水率,具体操作为:将洁净空铝盒在 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的电热干燥箱中干燥 1 h 取出,在干燥器中冷却 30 min,采用分析天平称量(精确至 0.000 1 g);再次在电热干燥箱中干燥 0.5 h,同样冷却并称量,直至前后两次称量之差小于 0.000 5 g,计算公式为

$$m = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中 m_1 —— 105°C 干燥前试样及称样铝盒质量,g

m_2 —— 105°C 干燥后试样及称样铝盒质量,g

m_0 ——洁净空铝盒质量,g

4.1.3 硬度

调用质构仪内 Feed Hardness 程序,测定颗粒饲料硬度。压缩试样的速度为 10 mm/min,试验结束限制条件位移为 1.5 mm。由压缩测试结果可得到压缩载荷值,进而求得颗粒饲料的硬度。

4.1.4 含粉率

含粉率是指颗粒饲料样品所含粉料的质量(过 14 目筛的筛下物)占其总质量的百分比^[28]。其测定方法为:按 GB/T 6003.1—2007 规定将一定质量的颗粒饲料(计为 m_2)放置于标准试验筛中筛分测定,称取筛上物(计为 m_3)。含粉率 y 计算公式为^[29]

$$y = \left(1 - \frac{m_3}{m_2}\right) \times 100\% \quad (14)$$

4.1.5 PDI

PDI是衡量颗粒饲料成品在输送和搬运过程中抗破碎的相对能力(计为*I*)。将生产的颗粒饲料冷却至室温,采用14层标准试验筛(GB/T 6003.1—1997,新乡市同心机械有限责任公司)进行筛分测定,具体测定方法为:称取500 g完整颗粒饲料(计为*s*₀)放入PDI箱体内;启动机器,运行10 min后,取出所有料并筛分,称量筛上颗粒饲料质量(计为*s*₁)^[29]。则PDI为

$$I = \frac{s_1}{s_0} \times 100\% \quad (15)$$

4.2 试验结果分析

为测定小型可调间隙制粒机的各项指标,对样

机进行作业性能试验研究。样机的环模孔径为3 mm,压缩比为1:6。饲料原料采用某乳猪料配方,具体成分和比例见表3;摩擦因数和休止角是物料重要的物理指标,通过自主设计与研制的休止角测定装置、斜面仪装置^[30](图11、12),测得原料休止角为46°,摩擦因数为0.93,其他物理指标良好。试验过程如图13所示,试验结果表明,生产的颗粒饲料成品含水率为13.53%,直径为3 mm,颗粒含粉率为3.27%,颗粒耐久度(PDI)为94.34%,颗粒硬度为176.03 N,生产率约为42 kg/h,该制粒机各项指标均达到设计要求,能够满足小批量颗粒饲料的生产需要。

表3 乳猪料配方组成成分与比例

Tab.3 Composition and proportion of piglet feed formula

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|------|----|-----|-----|------|------|-----|-------|-----|
| 组成成分 | 膨化玉米 | 豆粕 | 棉籽粕 | 菜籽粕 | 碳酸氢钙 | 石粉 | 食盐 | 赖氨酸盐酸 | 预混料 |
| 比例/% | 60 | 34 | 2 | 0.6 | 1.44 | 0.89 | 0.3 | 0.32 | 0.5 |

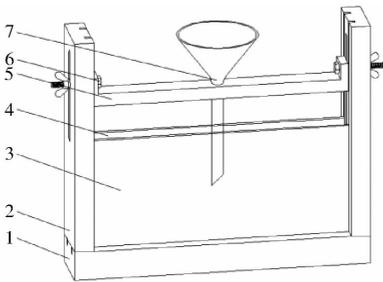


图11 休止角测定装置原理图

Fig.11 Principle diagram of measuring device for repose angle

- 1.底梁 2.侧梁 3.前有机玻璃 4.后有机玻璃 5.上梁
- 6.调节螺栓 7.漏斗

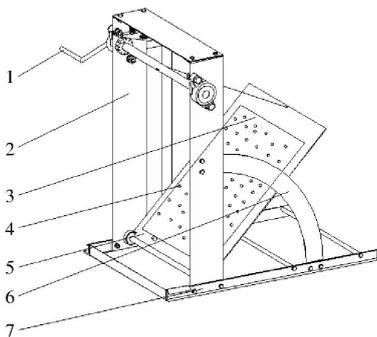


图12 斜面仪装置原理图

Fig.12 Principle diagram of bevel instrument

- 1.摇杆 2.侧板 3.被测板件 4.饲料原料 5.可调节板
- 6.圆弧尺 7.侧梁

5 结论

(1)提出了一种压辊调节外置的小型可调间隙制粒机结构,据此设计并制造了样机,并配置了控制



图13 样机车间试验

Fig.13 Prototype working experiment in workshop

系统;通过试验验证了该结构的可行性,为小批量颗粒饲料生产提供了设备平台。

(2)基于该样机结构和尺寸参数,建立制粒机模辊挤压仿真模型,采用Abaqus软件对粉体挤压过程进行了有限元分析。模拟结果表明,适当增大粉料的摩擦因数,能够减少打滑耗能;适当减小模辊间隙,可以增大模辊对物料的挤压应力,有助于提高颗粒饲料的产量和质量。

(3)以某乳猪料配方为原料,在环模孔径为3 mm,压缩比为1:6的参数下进行颗粒饲料加工性能试验。结果表明,生产的颗粒饲料成品含水率为13.53%,直径为3 mm,颗粒含粉率3.27%,颗粒耐久度94.34%,颗粒硬度176.03 N,生产率约42 kg/h,各项指标均达到设计要求。且该制粒机能在不停机的状态下对压辊实时调节,保证了生产过程的连续性。

参考文献

- 1 ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, SVIHUS B. Pelleting of broiler diets: an overview with emphasis on pellet quality and nutritional value[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 179(1): 1-23.
- 2 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.
- 3 曹康,金征宇. 现代饲料加工技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2003.
- 4 曹康,郝波. 中国现代饲料工程学[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2014.
- 5 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. 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.
- 6 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. (in Chinese)
- 7 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.
- 8 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)
- 7 庞利沙,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): 166-172.
- 8 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): 166-172. (in Chinese)
- 8 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.
- 9 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)
- 9 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.
- 10 OUYANG Shuangping, HOU Shulin, ZHAO Lixin, et al. The research progress in biomass annular mould forming for fuel technology[J]. *Renewable Energy*, 2011, 29(1): 14-18. (in Chinese)
- 10 彭飞,李腾飞,康宏彬,等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 51-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.007.
- 11 PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 51-58. (in Chinese)
- 11 中国农业大学. 一种自密封小型环模制粒机:中国,104923126A [P]. 2015-09-23.
- 12 中国农业大学. 动辊式环模制粒机:中国,102631866A [P]. 2012-08-15.
- 13 周继承,黄伯云. 粉末挤压成型的进展[J]. *材料导报*, 1997, 11(6): 13-15.
- 14 ZHOU Jicheng, HUANG Boyun. Development of powder extrusion molding[J]. *Materials Review*, 1997, 11(6): 13-15. (in Chinese)
- 14 魏诗榴. 粉体科学与工程[M]. 广州:华南理工大学出版社,2006.
- 15 KHOEI A R, KESHAVARZ S, KHALOO A R. Modeling of large deformation frictional contact in powder compaction processes [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 32(5): 775-801.
- 16 ROSSI R, ALVES M K, AL-QURESHI H A. A model for the simulation of powder compaction processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182(1): 286-296.
- 17 武凯,孙宇,彭斌彬,等. 环模制粒粉体旋转挤压成型扭矩模型构建及试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 33-39.
- 18 WU Kai, SUN Yu, PENG Binbin, et al. Modeling and experiment on rotary extrusion torque in ring-die pelleting process[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(24): 33-39. (in Chinese)
- 18 杨毅. 环模的制造工艺研究[D]. 无锡:江南大学,2009.
- 19 YANG Yi. Manufacturing process research of die[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- 19 陈炳伟. 环模制粒机高效制粒机理与性能分析[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- 20 CHEN Bingwei. Mechanism and performance analysis of high efficiency granulation of ring-shape pellet mill [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 20 杨慧明. 颗粒饲料压制机模辊间隙的探讨[J]. *现代农业装备*, 1996(1): 12-15.
- 21 YANG Huiming. Discussion about the gap between the roller and ring die of feed pelleting machine[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 1996(1): 12-15. (in Chinese)
- 21 HAN L H, ELLIOTT J A, BENTHAM A C. A modified Drucker - Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(10): 3088-3106.
- 22 王以龙. 高稳定、低能耗环模制粒关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- 23 WANG Yilong. Study on key technology of high stability and low energy consumption ring-shape pellet mill [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 23 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- 24 SINHA T, BHARADWAJ R, CURTIS J S, et al. Finite element analysis of pharmaceutical tablet compaction using a density dependent material plasticity model[J]. *Powder Technology*, 2010, 202(1): 46-54.
- 25 朱飞龙. 环模制粒机绿色化技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- 26 ZHU Feilong. Research on green technology of ring-shape pellet mill [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 26 薛冰. 生物质成型机环模结构参数对其寿命和成型质量影响研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014.
- 27 XUE Bing. Study on the influence of ring mold structure parameters on life and forming quality of biomass molding machine [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- 27 范文海,范天铭,王祥,等. 环模制粒机生产率理论计算及其影响因素分析[J]. *粮食与饲料工业*, 2011(6): 34-36.
- 28 FAN Wenhai, FAN Tianming, WANG Xiang, et al. Productivity calculation and analysis of influence factors of ring-die pellet mill[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2011(6): 34-36. (in Chinese)
- 28 盛亚白,程宏典. 畜禽颗粒饲料加工质量指标的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 1994(8): 19-22.
- 29 SHENG Yabai, CHENG Hongdian. Research on the indexes of pellet feed quality[J]. *Cereal and Feed Industry*, 1994(8): 19-22. (in Chinese)
- 29 GB/T 16765-1997 颗粒饲料通用技术条件[S]. 1997.
- 30 彭飞,杨洁,王红英,等. 小麦粉摩擦特性的试验研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(8): 7-12.
- 31 PENG Fei, YANG Jie, WANG Hongying, et al. Experimental research on friction characteristics of wheat meal[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(8): 7-12. (in Chinese)