doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.038

颗粒饲料粉化率检测系统粉化单元设计与试验

孔宪锐[1,2]　郝亚博[1,2]　王　贺[1,2]　刘　静[1,2]　牛智有[1,2]

(1.华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2.农业农村部智慧养殖技术重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对目前颗粒饲料粉化率检测方法存在检测程序繁琐、设备清洁维护复杂、无法实现在线自动测量等问题,本研究基于单次冲击破碎原理,设计了一款离心式粉化率检测系统,阐述了系统的整体结构和工作原理。以粉化单元为研究对象,开展关键零部件结构设计,对叶轮和环形碰撞板内颗粒饲料的运动特性进行理论分析。采用离散元法构建颗粒饲料仿真模型,以叶片类型、叶片数量和叶片长度为试验因素,开展单因素试验和正交试验,结果表明,叶片类型对速度分布均值影响极显著,确定了叶轮形状为 V 型、叶片数量为 8 片、叶片长度为 100 mm;以碰撞板倾斜角度为变量,以能量损失率为评价指标,开展单因素试验,确定碰撞板倾斜角度为 75°。搭建试验台架,以回转箱式和气动式测定仪作为对照组,开展颗粒饲料粉化率测量结果关联性分析,结果表明,离心式测定仪与回转箱式测定仪、气动式测定仪间存在较强的相关性,其相关系数大于 0.96,这表明离心式粉化率检测装置测量结果可以反映颗粒饲料加工质量;以粉化率标准值为目标值,以叶轮转速为变量,开展参数优化,建立颗粒饲料粉化率与叶轮转速间的二次回归模型,确定测定仪工作转速为 840 r/min,通过验证试验表明,粉化率测量结果变异系数小于 3.11%,且该转速下粉化率测量结果与标准值间可以通过斜率为 1 的直线进行拟合,决定系数为 0.968 4。本研究可为颗粒饲料粉化率在线自动检测装置的开发提供理论方法和技术支撑。

关键词: 颗粒饲料; 粉化率; 粉化单元; 仿真; 台架试验

中图分类号: S816.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)23-0406-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Pulverization Unit in Detection System for Pulverization Rate of Pellet Feed

Kong Xianrui[1,2]　Hao Yabo[1,2]　Wang He[1,2]　Liu Jing[1,2]　Niu Zhiyou[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*

2. *Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Aiming to address the existing challenges in pulverization rate tester of pellet feed, including complex detection procedures, difficult equipment cleaning and maintenance, and the lack of online automatic measurement, an in-line detection system of pulverization rate was designed based on the principle of single impact crushing, and the overall structure and working principle of the device were described. Taking the pulverization unit as the research object, the structural design of key components was carried out, and the motion characteristics of pellet feed in impeller and annular collision plate were analyzed theoretically. The discrete element method was employed to develop a simulation model for pellet feed. Considering blade type, blade number, and blade length as experimental factors, single-factor experiments and orthogonal experiments were conducted. The results indicated that the blade type significantly affected the mean values of centrifugal speed. According to the mean values and the variation coefficients for centrifugal velocity, the impeller shape was determined as V-shaped, with eight blades and a blade length of 100 mm. Taking the inclination angle of the collision plate as the variable and the energy loss rate as the evaluation index, the single factor test was carried out to determine the inclination angle of the collision plate as 75°. The test bench of the device was built, and the tumbler tester and pneumatic tester were used as the control group to carry out the correlation analysis of the measurement results of the pulverization rate of pellet feed. The results showed that there was a strong correlation

收稿日期: 2025-08-25　修回日期: 2025-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1300300)

作者简介: 孔宪锐(1998—),男,博士生,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: kxr@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 牛智有(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: nzhy@mail.hzau.edu.cn

between centrifugal tester and control group, with correlation coefficient greater than 0.96, which indicated that the measurement results of the centrifugal pulverization rate detection device could reflect the quality of pellet feed. Taking the standard value of pulverization rate of pellet feed as the target value and the impeller speed as the variable, the parameter optimization was carried out, and the quadratic regression models of pellet feed were established. The impeller speed was determined to be 840 r/min. The verification test showed that the variation coefficient of measurement results of pulverization rate was less than 3.11%, and the pulverization rate measurement results at this speed could be fitted with the standard value by a line with a slope of 1 with determination coefficient of 0.968 4. The research result can provide theoretical methods and technical support for the development of inline automatic detection device for pulverization rate of pellet feed.

Key words: pellet feed; pulverization rate; pulverization unit; simulation; bench test

0　引言

颗粒饲料由于具有营养均衡、易于储存和运输、可避免动物选择性进食、消化率高等特点[1]，已被养殖业广泛使用。在储存、运输与使用过程中，颗粒饲料易产生破碎。为了减少颗粒破碎对牲畜饲喂造成的影响，需要在生产阶段及时评估其加工质量。粉化率是评价颗粒饲料加工质量的一项重要指标，表示颗粒饲料在振动、撞击、摩擦和挤压等外力作用下产生小颗粒和粉末的比例[2-3]。若颗粒饲料粉化率过高，不仅直接影响颗粒饲料本身的优势，降低饲料的利用效率，还会影响牲畜健康和环境质量[4-6]。若粉化率过低，表明其硬度过大，不利于牲畜进食，并且会导致加工成本增加。因此，在生产阶段及时对颗粒饲料成品的粉化率进行检测不仅可以优化饲料生产工艺，降低生产成本，还能够提高养殖效益，有利于养殖业的绿色发展[7-8]。

目前，国内外研究学者针对颗粒物料粉化率测定开展了大量研究，研究内容主要集中于新型检测设备和新型评价方法的建立。根据作用原理不同，粉化率检测方法可分为机械拍打式和气动冲击式。机械拍打式检测方法通常采用回转箱测定颗粒饲料粉化率，其测试原理为颗粒饲料受到回转箱内部角钢击打从而产生粉末。这一方法已被应用于木屑[9]、餐厨剩余物[10]等压缩成型颗粒加工质量的检测与评估，并且相关研究人员在此基础上进行了改进，如采用振动筛代替回转箱、增加回转箱数量、在回转箱上增加筛网等[11-14]。气动冲击式检测方法采用高压气流对颗粒饲料进行测定，其测试原理为颗粒饲料受到气流作用与壳体内壁进行碰撞从而产生粉末，常见设备为 Holmen 系列 NHP 测试仪。这一方法多用于评估颗粒物料在气力输送过程中的破碎状态[15-16]。

然而，机械拍打式检测方法以封闭的箱体作为颗粒粉化主体，存在检测程序繁琐、设备清洁维护较为复杂、人工干预多等问题，且无法实现在线检测。已有研究主要集中于颗粒粉化腔室结构的改变，对检测流程自动化的提升程度有限。气动冲击式检测方法仅局限于气力输送工况，无法评估颗粒在储存、散料运输等工况下的破碎状态[17]，且检测成本高昂。因此，亟需设计一款自动化程度高、检测效果好、成本低的粉化率检测设备。

在颗粒破碎机理方面，已有学者针对玉米、小麦、颗粒饲料在单次冲击和重复冲击下的破碎情况进行研究，结果表明，颗粒饲料冲击能量与破碎概率之间的关系可以通过同一函数来表征[18-20]，这表明可以使用高速度单次冲击的破碎结果预测低速度连续冲击的破碎结果。为了完善颗粒饲料粉化率测定方法、提高粉化率测定自动化程度，本研究设计一款颗粒饲料粉化率检测系统，针对粉化单元开展参数设计与分析，对颗粒饲料的运动情况进行理论分析；采用离散元仿真技术，构建颗粒饲料仿真模型，对叶轮结构参数和环形碰撞板倾斜角度进行仿真优化；搭建试验台架，与目前常规的回转箱式和气动式测定仪测试结果进行比较分析，确定不同作用原理对粉化率测量结果的影响；采用回归分析确定装置运行转速，并对该转速测量结果进行验证。

1　粉化率检测系统结构及参数设计

1.1　整体结构

本研究设计一款可用于在线测量的离心式粉化率检测系统，主要包括溜管、取样器、三通装置、粉化单元、振动筛和称量单元等，其结构如图 1 所示。该系统的工作流程为：在接收到取样指令后，电动推杆驱动取样器进入溜管内部进行取样操作。当电动推杆复位时，取样器所采集的颗粒饲料样品在重力作用下自然下落，进入三通装置。经三通装置导向后，颗粒饲料样品通过管道直接进入颗粒饲料粉化单元。在粉化单元中，颗粒饲料产生粉末并进入振动筛。在直线振动器的振动作用下，颗粒饲料在振动

筛上进行筛分,分离出大颗粒和粉末。筛分后的颗粒和粉末分别落入称量单元,完成颗粒和粉末的称量计算并获得粉化率。测量结束后,颗粒和粉末经卸料口排出。

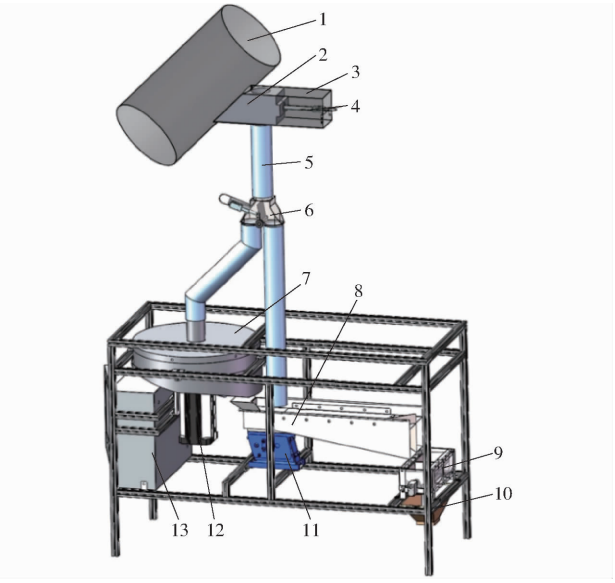


图 1 离心式颗粒饲料粉化率检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of centrifugal detection system of pulverization rate for feed pellet

1. 溜管 2. 取样器 3. 取样器外壳 4. 电动推杆 5. 输送管道 6. 三通装置 7. 粉化单元 8. 振动筛 9. 称量单元 10. 卸料口 11. 直线电磁振动器 12. 电机 13. 电控箱

其中,粉化单元是检测系统的核心单元,如图 2 所示。粉化单元主要由叶轮、环形碰撞板和壳体等组成。当取样指令结束后,电机控制离心式叶轮旋转,经自动取样单元获得的颗粒饲料样品经管道输送沿盖板上方进入粉化单元,颗粒饲料在叶轮作用下获得一定的速度并与环形碰撞板发生碰撞,产生粉末。振动电机带动下壳体振动,粉化后的颗粒饲料沿下壳体流出。该单元结构参数与运行参数将直接决定颗粒饲料的粉化情况。因此,本研究聚焦于叶轮和环形碰撞板的参数设计与优化,为后续检测系统的搭建提供参数依据。

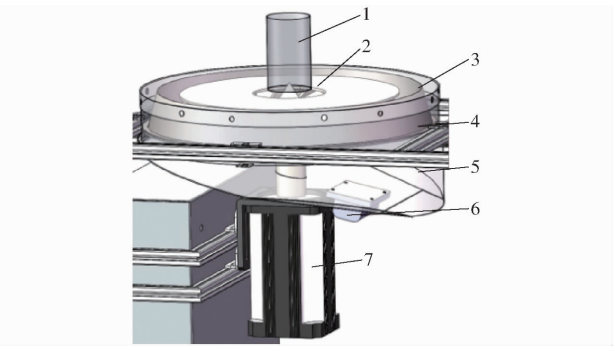


图 2 粉化单元结构示意图

Fig. 2 Schematic of pulverization unit

1. 盖板 2. 叶轮 3. 环形碰撞板 4. 上壳体 5. 下壳体 6. 振动电机 7. 电机

1.2 粉化单元关键零部件设计与分析

1.2.1 叶轮设计

叶轮三维结构如图 3 所示,材质为白色树脂。其中,D_0为叶轮轴直径,D_1为上挡板空心直径,D_2为叶轮直径,H 为叶片高度。叶片均匀分布于圆周上,各个叶片间夹角相同。

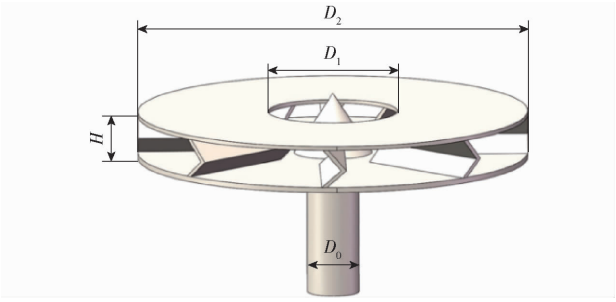


图 3 叶轮三维结构示意图

Fig. 3 Three-dimensional structure diagram of impeller

在设计叶轮轴时,需保证其在旋转过程中不产生断裂。在测定过程中,叶轮主轴只承受扭矩作用,按照扭转强度条件进行设计计算[21],计算公式为

$$D_0 \geqslant \sqrt[3]{\frac{9\,550P}{0.2[\tau_T]n}} \tag{1}$$

式中 P——轴传递功率,取 300 W

$[\tau_T]$——许用扭转切应力,根据白色树脂材料特性,取 24.5 MPa

n——电机转速,由于转速越低轴所承受扭矩越高,取 100 r/min

经计算可得叶轮轴所需最小直径为 18.02 mm。叶轮与电机轴采用轴套连接方式,为了保证连接处的强度,将叶轮轴直径设计为 40 mm。参照文献[19]中颗粒饲料冲击破碎速度区间,将叶轮直径 D_2设计为 300 mm,上挡板空心直径 D_1设计为 100 mm,叶片高度 H 设计为 30 mm。

(1)叶片形状设计

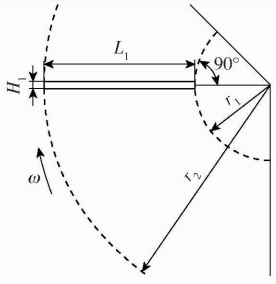
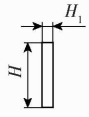
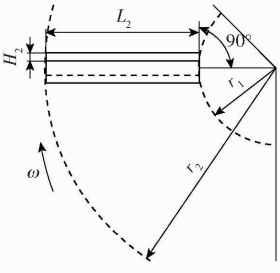
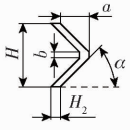
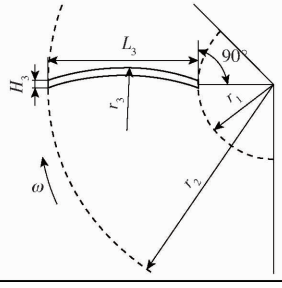
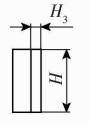
叶片形状会直接影响颗粒饲料的运动方式。为探究不同叶片结构对颗粒饲料运动的影响,本研究设计了 3 种叶片结构,包括直型叶片、V 型叶片和弧型叶片,如表 1 所示。参照文献[22 - 23]对叶轮参数进行设计,其中,r_1、r_2为叶轮上挡板空心半径和叶轮半径,分别为 50 mm 和 150 mm;L_1、L_2、L_3为叶片长度,均为 100 mm;H_1、H_2、H_3为叶片厚度,均为 5 mm;a、b 和 α 分别为 V 型叶片形状决定参数,分别取 15、0 mm 和 45°;r_3为圆弧形状决定参数,取 150 mm。

颗粒饲料在 3 种叶片中的受力情况如图 4 所示,分析过程中忽略颗粒饲料间的作用力、叶片厚度、颗粒厚度以及颗粒自旋效果。其中,ϕ 为颗粒饲料质心

和圆心连线与接触点法向的夹角；F_C为颗粒饲料受到的科氏力，N；F_f为颗粒饲料与叶片间的摩擦力，N；F_X为颗粒饲料在运动过程中受到的离心力，N。

表 1　叶片结构设计汇总

Tab. 1　Structural design of blades

叶片类型	尺寸示意图	截面图
直型叶片		
V型叶片		
弧型叶片		

假设颗粒饲料是质量为 m 的刚性颗粒，当颗粒饲料在直型叶片和 V 型叶片上运动时，受力分析可以看作径向导轨问题，其运动学特性可由微分方程表征，即

$$m\ddot{S} - mr\omega^2 - \mu(mg + 2m\omega\dot{S}) = 0 \tag{2}$$

式中　S——颗粒饲料沿叶片运动的位移，mm

ω——角速度，rad/s

m——颗粒饲料质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

μ——颗粒饲料与叶片的摩擦因数

r——颗粒饲料离叶轮中心的距离，mm

其中 $r = S + r_1$，则式(2)可以改写为

$$m\ddot{S} - m(S + r_1)\omega^2 - \mu(mg + 2m\omega\dot{S}) = 0 \tag{3}$$

当颗粒饲料在弧型叶片上运动时，其运动学特性可由微分方程表征，即

$$m\ddot{S} + \mu(mg + m\omega^2 r\sin\alpha + 2m\omega\dot{S} - m\dot{S}^2/r_3) - m\omega^2 r\cos\alpha = 0 \tag{4}$$

其中

$$r\sin\alpha = r_4\cos\phi - r_3 \tag{5}$$

$$r\cos\alpha = r_4\sin\phi \tag{6}$$

$$r_4 = \sqrt{\left(r_1 + \frac{L_3}{2}\right)^2 + \left(r_3\cos\frac{S}{r_3}\right)^2} \tag{7}$$

$$\phi = \arctan\frac{2r_1 + L_3}{2r_3\cos(S/r_3)} - \arctan\frac{L_3}{2r_3\cos(S/r_3)} + \frac{S}{r_3} \tag{8}$$

整理得

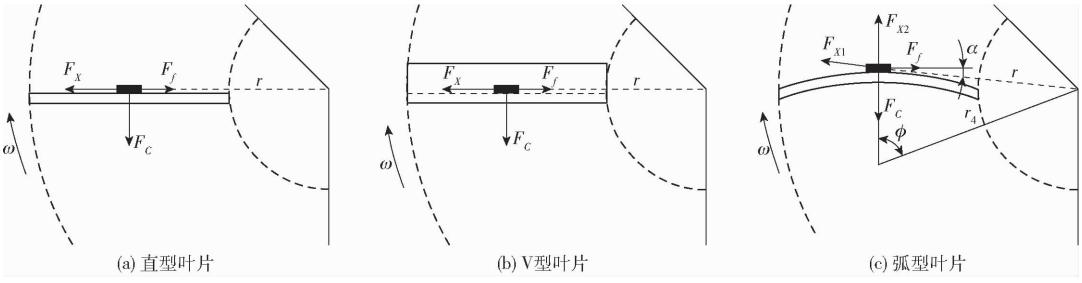


图 4　颗粒饲料在不同叶片上的受力分析

Fig. 4　Force analysis of pellet feed on different blades

$$m\ddot{S} + \mu\left[mg + m\omega^2\left(\sqrt{\left(r_1 + \frac{L_3}{2}\right)^2 + \left(r_3\cos\frac{S}{r_3}\right)^2}\cdot\cos\phi - r_3\right) + 2m\omega\dot{S} - m\dot{S}^2/r_3\right] - m\omega^2\sqrt{\left(r_1 + \frac{L_3}{2}\right)^2 + \left(r_3\cos\frac{S}{r_3}\right)^2}\sin\phi = 0 \tag{9}$$

从式(9)可以看出，叶轮的转速和叶片结构影响颗粒饲料飞出叶轮的速度大小和方向。因此，后续将通过仿真分析选取较优的叶片类型与结构参数。

(2)叶片数量设计

参照文献[24]，叶片数量的计算公式为

$$Z = K\frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1}\sin\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \tag{10}$$

式中　Z——叶片数量

K——经验系数，取 3.75

α_1、α_2——入口角、出口角，均取 90°

经计算可得，叶片数量为 7.5，圆整后取 8。

1.2.2　环形碰撞板设计

环形碰撞板三维结构如图 5 所示，材质为 45 号

钢。根据叶轮尺寸,将环形碰撞板底端直径 D_3 设计为 390 mm,高度 H_4 设计为 40 mm,厚度设计为 1 mm,其底部设计了宽度为 10 mm 的边缘。为了防止单个颗粒饲料与环形碰撞板碰撞产生二次碰撞现象,环形碰撞板需具备一定的倾斜角度,后续将通过仿真分析确定。当颗粒饲料与环形碰撞板发生碰撞时,针对其速度特性开展理论分析。

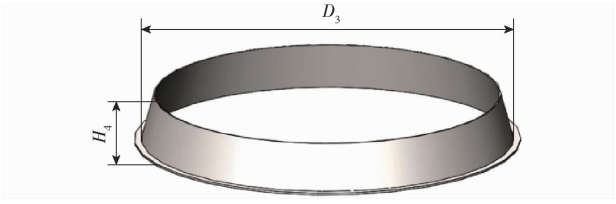


图 5 环形碰撞板三维结构示意图

Fig. 5 Three-dimensional structure diagram of annular collision plate

颗粒饲料离开叶轮时,其速度包含 2 部分:第 1 部分为沿叶片方向的相对速度,该速度为颗粒饲料提供冲击动能;第 2 部分为随叶轮转动的切向速度,这一速度分量促使颗粒绕碰撞板做圆周运动。因此,颗粒饲料的轨迹为弧型。颗粒饲料与壁面产生碰撞的过程如图 6 所示,其中 v_p 为颗粒速度,v_{pn}、v_{pt} 分别为颗粒饲料速度的法向分量和切向分量,ω_p 为颗粒饲料的角速度,θ 为冲击角度,碰撞前和碰撞后的速度分别通过上角标 0 和 1 进行区分[25]。

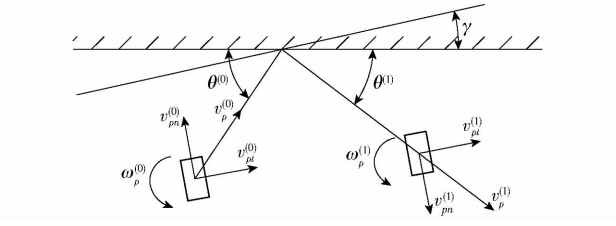


图 6 颗粒饲料碰撞过程速度分析

Fig. 6 Velocity analysis of pellet feed during collision

颗粒饲料与环形碰撞板发生碰撞时,由于材料的阻尼作用,颗粒饲料的速度和角速度会产生损失,因此,本研究采用碰撞恢复系数来表征颗粒饲料的速度损失。角速度碰撞恢复系数 e_ω、切向碰撞恢复系数 e_t 和法向碰撞恢复系数 e_n 的定义为

$$\begin{cases} e_w = \dfrac{\omega_p^{(1)}}{\omega_p^{(0)}} \\ e_n = \dfrac{v_{pn}^{(1)}}{v_{pn}^{(0)}} \\ e_t = \dfrac{v_{pt}^{(1)}}{v_{pt}^{(0)}} \end{cases} \tag{11}$$

式中 $\omega_p^{(0)}$、$\omega_p^{(1)}$——颗粒饲料角速度,rad/s

$v_{pn}^{(0)}$、$v_{pn}^{(1)}$——颗粒饲料法向速度,m/s

$v_{pt}^{(0)}$、$v_{pt}^{(1)}$——颗粒饲料切向速度,m/s

由于颗粒饲料的形状为柱形,其在与环形碰撞板碰撞时冲击角度会产生偏转,因此,需要对碰撞过程进行修正。本研究假定颗粒饲料在碰撞过程中偏转角为 γ,由此可以获得颗粒饲料的法向分量和切向分量表达式为

$$\begin{cases} v_{pt}^{(0)} = v_p^{(0)} \cos(\theta^{(0)} - \gamma) \\ v_{pn}^{(0)} = v_p^{(0)} \sin(\theta^{(0)} - \gamma) \end{cases} \tag{12}$$

根据颗粒饲料在碰撞过程中是否产生滑移,可以将碰撞过程区分为无滑移碰撞和滑移碰撞。若为无滑移碰撞,则需满足碰撞后颗粒饲料与壁面接触点切向相对速度为 0。根据动量守恒定律,颗粒饲料进行无滑移碰撞后,其速度分量可以表示为

$$\begin{cases} v_{pt}^{(1)} = \dfrac{1}{4}(3v_{pt}^{(0)} + r_p\omega_p^{(0)}) \\ v_{pn}^{(1)} = -e_n v_{pn}^{(0)} \\ \omega_p^{(1)} = -\dfrac{v_{pt}^{(1)}}{r_p} \end{cases} \tag{13}$$

式中 r_p——颗粒饲料质心到碰撞板轴心的距离

若颗粒饲料发生滑移碰撞,切向速度受动摩擦力影响,则根据动量守恒定律,可以获得颗粒饲料的速度分量为

$$\begin{cases} v_{pt}^{(1)} = v_{pt}^{(0)} - \mu(1+e_n)v_{pn}^{(0)} \\ v_{pn}^{(1)} = -e_n v_{pn}^{(0)} \\ \omega_p^{(1)} = \omega_p^{(0)} + \dfrac{3\mu(1+e_n)v_{pn}^{(0)}}{r_p} \end{cases} \tag{14}$$

根据上述分析,颗粒饲料不与环形碰撞板产生二次碰撞所需满足的条件为

$$\frac{g(D_3 - D_2)^2}{2(v_p^{(0)})^2} > H_1 \tag{15}$$

2 仿真分析与优化

2.1 仿真模型构建

本研究采取多球模型建立颗粒饲料离散元模型,综合考虑形状拟合和颗粒数量两个因素,采用 17 个直径为 4.16 mm 的球体相互拼接,形成如图 7 所示的颗粒模型。参照文献[26-32],标定后获得颗粒饲料仿真相关参数如表 2 所示。材料本征参数参照文献[33-34]进行设定。



图 7 颗粒饲料多球模型

Fig. 7 Multi-particle model of pellet feed

在粉化单元中,对颗粒饲料产生加速作用的主体单元为叶轮,产生粉化作用的主体单元为环形碰撞板,因此,在仿真过程中仅需对叶轮、环形碰撞板及外壳进行建模。叶轮材料设置为树脂,环形碰撞

表 2　颗粒饲料仿真参数

Tab. 2　Simulation parameters of pellet feed

参数	数值
颗粒饲料密度/(kg·m^{-3})	1 093. 28
泊松比	0. 34
杨氏模量/MPa	259
颗粒间碰撞恢复系数	0. 57
颗粒间静摩擦因数	0. 33
颗粒间动摩擦因数	0. 17
颗粒与树脂间碰撞恢复系数	0. 64
颗粒与树脂间静摩擦因数	0. 29
颗粒与树脂间动摩擦因数	0. 12
颗粒与钢板间碰撞恢复系数	0. 79
颗粒与钢板间静摩擦因数	0. 26
颗粒与钢板间动摩擦因数	0. 12

板及外壳材料设置为低碳钢板。在外壳上方建立直径为 60 mm 的圆形颗粒工厂用于生成颗粒饲料，生成质量为 150 g。仿真过程中，叶轮转速设置为 1 000 r/min，时间步长设置为 4. 43 × 10^{-6} s，保存时间步长设置为 0. 01 s，仿真总时长设置为 0. 50 s，仿真模型如图 8 所示。

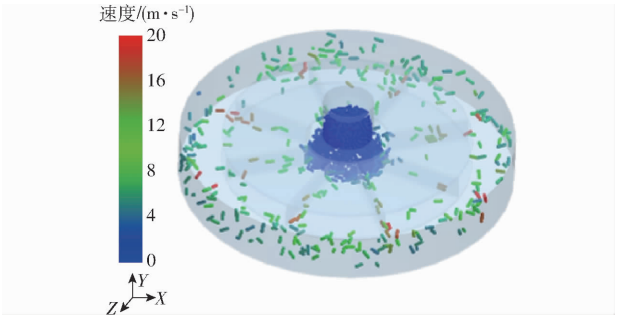


图 8　粉化单元仿真模型

Fig. 8　Simulation model of pulverization unit

2. 2　粉化过程仿真分析

为了获取颗粒饲料在粉化单元内部的运动特性，以直型叶片为例，统计了颗粒饲料在 0. 50 s 内颗粒速度矢量图，如图 9 所示。从图中可以看出，颗粒饲料经导料锥分散后在叶轮内部产生加速，此时，颗粒饲料受到离心力、科氏力和摩擦力的综合作用，其运动轨迹呈弧线；当颗粒饲料与环形碰撞板发生非弹性碰撞，其法向速度分量在碰撞瞬间急速衰减，其切向速度分量保持稳定。碰撞后颗粒饲料的运动方向改变，主要沿外壳内壁做圆周运动，直至动能全部耗散。

分别统计 0. 50 s 内所有颗粒受力的平均值和最大值，并通过 EDEM 后处理功能随机选择一个颗粒，提取其在整个运行过程中的受力情况，如图 10 所示。从图中可以看出，颗粒饲料受力的最大值随时间变化呈现波动趋势，且远高于颗粒饲料受力的平均值和单个颗粒受力值，这种波动现象主要源于

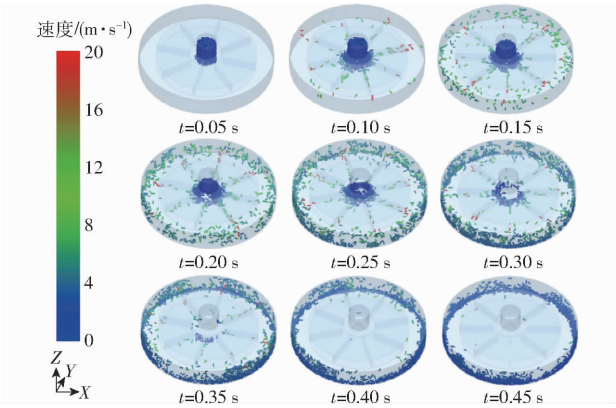


图 9　粉化单元内颗粒饲料速度矢量图

Fig. 9　Particle movement in pulverization unit

颗粒饲料与环形碰撞板的间歇性碰撞，碰撞瞬间产生的冲击力导致受力峰值显著升高，当运行时间为 0. 13、0. 19、0. 21、0. 23、0. 27 s 时，颗粒饲料受力最大值为 40. 18、28. 95、38. 36、57. 82、64. 93 N。这表明颗粒饲料与环形碰撞板产生了点接触，导致局部应力集中，从而受力情况显著提升。因此，颗粒饲料与环形碰撞板的碰撞是颗粒饲料破碎和粉化的主要原因，颗粒饲料的碰撞速度决定了粉化程度，其速度分布范围则决定了检测结果的稳定性。

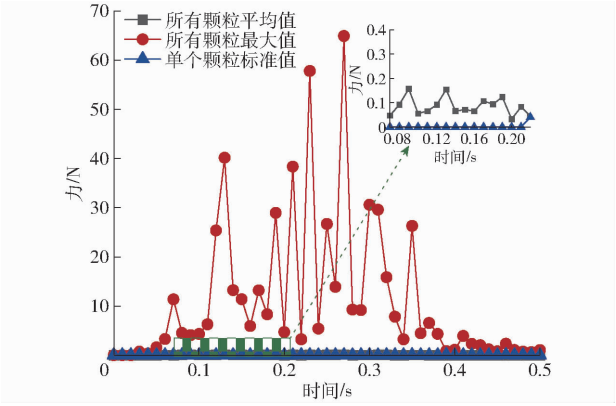


图 10　颗粒受力随时间变化曲线

Fig. 10　Variation of compressive force for pellet feed with time

2. 3　叶轮结构参数优化

构建不同叶片类型、叶片数量和叶片长度对应的叶轮仿真模型，仿真参数设置同 2. 1 节所示。为了统计不同叶轮结构参数下颗粒饲料离开叶轮时速度分布情况，在叶轮外围创建空心圆柱形网格区域，如图 11 所示。若组内测量结果变异系数越小，则表明颗粒饲料冲击破碎装置的稳定性越高。

2. 3. 1　单因素试验

(1)叶片类型

分别统计了 0. 50 s 内颗粒在直型叶片、V 型叶片和弧型叶片 3 种叶片形式下的速度分布，如图 12 所示。从图中可以看出，颗粒饲料在 3 种叶片类型

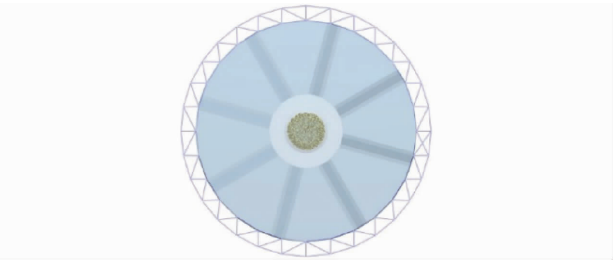


图 11 叶轮网格区域

Fig. 11 Grid bin area of impeller

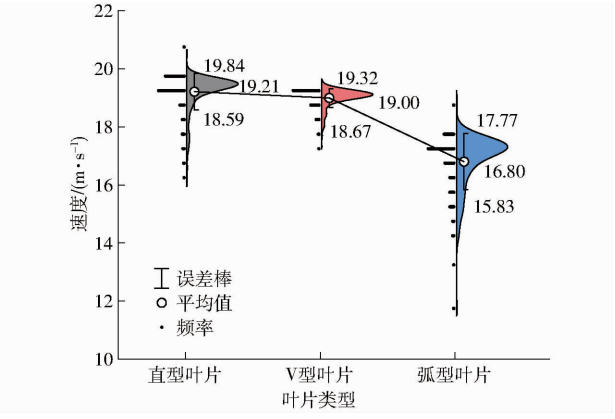


图 12 不同叶片类型下颗粒饲料速度分布

Fig. 12 Velocity distribution of pellet feed under different blade types

下的速度分布均值分别为 19.21、19.00、16.80 m/s，标准差分别为 0.63、0.32、0.97 m/s，由此可计算出变异系数分别为 3.28%、1.68%、5.77%。随着叶片结构变化，速度分布均值呈现出单调递减的趋势。其中，V 型叶片对应的速度分布比其他两种叶片更集中，变异系数最小。这可能是由于 V 型叶片可以使柱状颗粒沿着长轴方向加速，该结果与文献[23]结果一致。由于 V 型叶片变异系数最小，后续试验中叶轮叶片的类型均为 V 型。

(2)叶片数量

为了探究叶片数量对颗粒饲料运动特性的影响，以叶片数量为变量开展单因素仿真分析，叶片数量取值范围为 4 ~ 10 片[35-36]。分别统计 0.50 s 内颗粒在不同叶片数量下的速度和动能分布，如图 13 所示。从图中可以看出，颗粒饲料在不同叶片数量下速度分布均值分别为 18.78、18.85、19.00、18.99 m/s，标准差分别为 0.58、0.55、0.32、0.40 m/s，由此可计算出变异系数分别为 3.09%、2.92%、1.68%、2.11%。随着叶片数量变化，速度分布均值呈现出先增加后降低的趋势。当叶片数量为 8 时，速度分布的变异系数最小。

(3)叶片长度

为了探究叶片长度对颗粒饲料运动的影响，分别选取 80、85、90、95、100 mm 共 5 种叶片长度开展

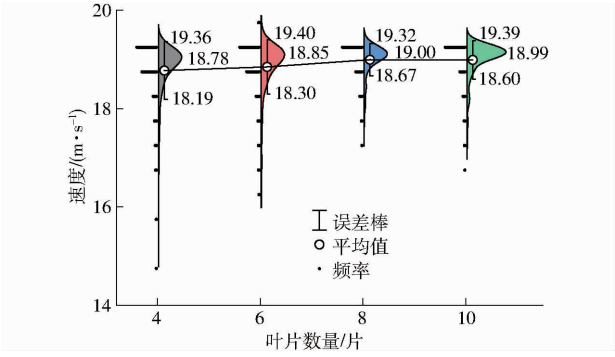


图 13 不同叶片数量下颗粒饲料速度分布

Fig. 13 Velocity distribution of pellet feed under different blade numbers

单因素仿真试验。分别统计 0.50 s 内颗粒在不同叶片长度下的速度和动能分布情况，试验结果如图 14 所示。从图中可以看出，颗粒饲料在不同叶片长度下速度分布均值分别为 18.34、18.50、18.65、18.81、19.00 m/s，标准差分别为 0.69、0.60、0.64、0.50、0.32 m/s，由此可计算出变异系数分别为 3.76%、3.24%、3.43%、2.66%、1.68%。随着叶片长度的变化，速度分布均值单调递增，其变异系数呈现降低的趋势。由于叶轮尺寸限制，当叶片长度为 100 mm 时，速度分布变异系数最小。

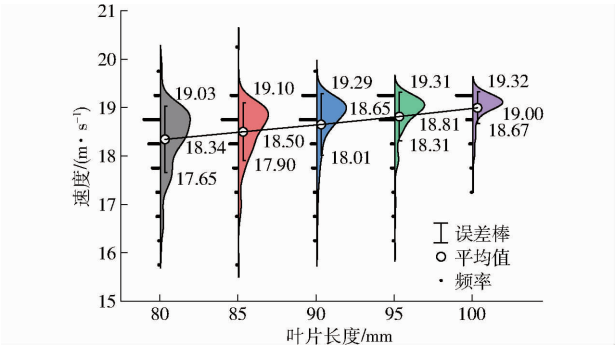


图 14 不同叶片长度下颗粒饲料速度分布

Fig. 14 Velocity distribution of pellet feed under different blade lengths

2.3.2 正交试验

为了获取较优的叶轮结构参数组合，在单因素试验的基础上开展三因素三水平正交试验。试验因素和水平设置如表 3 所示，试验设计与极差分析结果如表 4 所示。

表 3 试验因素水平

Tab. 3 Test factors and levels

水平	叶片类型	叶片数量/片	叶片长度/mm
1	直型	6	90
2	V 型	8	95
3	弧型	10	100

对上述结果进行方差分析，如表 5 所示。叶片类型对速度分布均值影响极显著，叶片数量和叶片

表 4　试验设计及速度分布结果分析

Tab. 4　Experimental design and analysis of velocity distribution

序号	因素水平				速度平均值/(m·s^{-1})	变异系数/%
	叶片类型	叶片数量	叶片长度	空列		
1	1	1	1	1	18.769 9	6.388 4
2	1	2	2	2	18.998 8	5.136 1
3	1	3	3	3	19.002 1	12.660 0
4	2	1	2	3	18.776 0	2.838 0
5	2	2	3	1	18.995 3	1.719 9
6	2	3	1	2	18.788 6	2.407 7
7	3	1	3	2	20.583 7	3.173 7
8	3	2	1	3	20.263 2	3.700 8
9	3	3	2	1	20.510 2	3.487 7
K_1	56.770 9	58.129 6	57.821 7	58.275 4		
K_2	56.559 8	58.257 3	58.284 9	58.371 1		
K_3	61.357 1	58.300 9	58.581 1	58.041 3		
k_1	18.923 6	19.376 5	19.273 9	19.425 1		
k_2	18.853 3	19.419 1	19.428 3	19.457 0		
k_3	20.452 4	19.433 6	19.527 0	19.347 1		
R	1.599 1	0.057 1	0.253 1	0.110 0		

表 5　正交试验方差分析结果

Tab. 5　Variance analysis of orthogonal test

方差来源	离差平方和	自由度	F	p
叶片类型	4.899	2	255.265 0	0.004 **
叶片数量	0.005	2	0.275 0	0.784
叶片长度	0.098	2	5.089 0	0.164
误差	0.019	2		

注：** 表示影响极显著($p<0.01$)。

长度对速度分布均值影响不显著。结合表 4 可知，在同一叶轮转速下，直型叶片对颗粒饲料加速作用高于 V 型叶片和弧型叶片，与单因素试验结果一致。然而，V 型叶片对应的变异系数小于直型叶片和弧型叶片对应的变异系数。结合颗粒饲料粉化率检测装置设计要求、单因素试验与正交试验结果，最终选择参数组合为：叶片类型为 V 型，叶片数量为 8 片，叶片长度为 100 mm。

2.4　倾斜角度优化

由于二次回弹现象是单颗粒运动特性，而非粒子群运动特性，本文采用能量损失率来评估颗粒碰撞时运动特性。其定义为颗粒饲料离开叶轮后的能量和碰撞后颗粒饲料的能量之比，该值越大表明颗粒在碰撞过程中能量损失越大。构建不同倾斜角度下的仿真模型，如图 15 所示。将叶轮转速分别设置为 700、850、1 000、1 150、1 300 r/min，其余参数不变，开展倾斜角度优化试验。

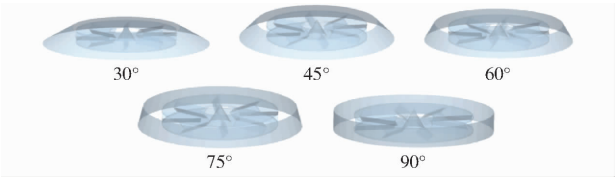


图 15　不同倾斜角度碰撞板仿真模型

Fig. 15　Simulation model of annular collision plate with different inclination angles

在 EDEM 中随机选取 20 个颗粒，分别统计其在不同叶轮转速、不同倾斜角度下的能量变化情况，计算获得其能量损失情况，如图 16 所示。从图中可以看出，在固定的叶轮转速下，颗粒饲料能量损失率随倾斜角度增加呈现先增加后降低的趋势，当倾斜角度为 75°时，其能量损失率最高；当倾斜角度小于 75°时，高转速叶轮对应的能量损失率高于低转速叶轮对应的能量损失率。这表明颗粒饲料与倾斜角度为 75°的碰撞板产生碰撞时会产生较高的能量损失，这将导致回弹能量的减少，从而降低二次碰撞概率。此外，其能量损失增加会导致粉化程度增加，较多的动能会转化为破碎能，有利于检测装置能耗的降低。因此，本文选定环形碰撞板倾斜角度为 75°。

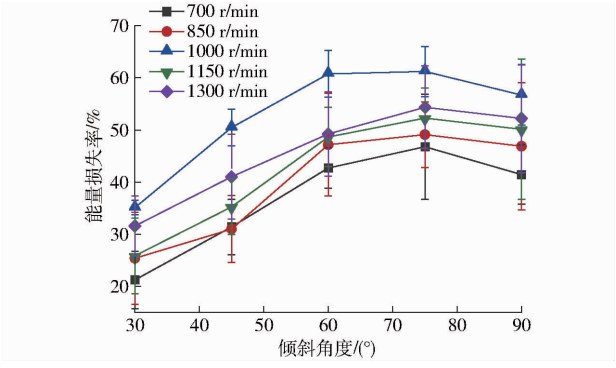


图 16　颗粒饲料能量损失率变化曲线

Fig. 16　Energy loss rate of feed pellet under different inclination angles

3　检测系统性能试验

3.1　试验材料与方法

3.1.1　试验样品

采用不同厂家生产的畜禽颗粒饲料样品进行试验，如图 17 所示。参考相关标准[37-39]，分别采用游标卡尺、烘箱、量杯等仪器测定颗粒饲料样品的粒度、含水率和堆积密度，如表 6 所示。

3.1.2　试验装置

搭建试验台架，如图 18 所示。参照 ASAE S269.5 和相关研究[9]，本文对照试验采用回转箱式粉化率测定仪(ST136)和气动式粉化率测定仪(参照 NHP100 搭建)进行。



(a) 生长育肥猪前期配合饲料-样品1 (b) 哺乳母猪配合饲料-样品2 (c) 仔猪后期配合饲料-样品3 (d) 肉用仔鸭中期配合饲料-样品4 (e) 肉种鸽生产期配合饲料-样品5

图 17 试验样品

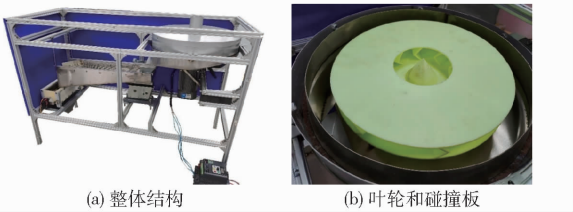
Fig. 17 Test samples

表 6 试验样品物理参数

Tab. 6 Physical parameters of test samples

样品序号	直径/mm	长度区间/mm	含水率/%	堆积密度/(kg·m^{-3})
1	4.16 ± 0.10	4.92 ~ 16.57	11.64 ± 0.05	590.33 ± 5.19
2	4.11 ± 0.09	4.23 ~ 14.87	11.77 ± 0.05	623.67 ± 4.92
3	4.05 ± 0.14	4.23 ~ 15.64	12.21 ± 0.02	577.67 ± 2.87
4	4.74 ± 0.11	6.14 ~ 15.62	10.53 ± 0.01	651.33 ± 6.18
5	3.63 ± 0.19	4.98 ~ 14.45	10.91 ± 0.04	679.67 ± 9.03

注:数据表达形式为“平均值 ± 标准差”。



(a) 整体结构 (b) 叶轮和碰撞板

图 18 粉化率测定装置试验台架

Fig. 18 Test bench of detection apparatus for pulverization rate

3.1.3 粉化率定义

根据 ASAE S269.5 规定,颗粒饲料粉化率计算公式为

$$P_R = \frac{m_t - m_1}{m_t} \times 100\% \tag{16}$$

式中 P_R——颗粒饲料粉化率,%

m_t——检测样品总质量,g

m_1——筛网上方颗粒质量,g

其中,筛网孔径的选择与颗粒直径有关,一般选取 0.8 倍颗粒粒径作为筛网孔径[3]。

3.1.4 试验方法

(1)关联性分析

为了确定各检测装置测量结果的关联性,分别采用离心式粉化率测定仪和两种常用粉化率测定装置进行试验,其中,离心式测定仪叶轮转速分别设定为 700、850、1 000 r/min,样品质量为 150 g;回转箱式测定仪运行时间为 10 min,样品质量为 500 g;气动式测定仪运行时间为 120 s,样品质量为 100 g。经测定仪检测后,采用标准筛进行筛分,并采用皮尔逊相关性分析对检测结果进行对比分析。每组试验重复 3 次,取平均值。

(2)工作转速优化

为了确定合适的工作转速,分别将叶轮转速设定为 700、850、1 000、1 150、1 300 r/min,针对不同品种颗粒饲料进行测试,测试完成后采用标准筛进行筛分,分别获得不同转速对应的粉化率,以粉化率标准值为目标值(ASAE S269.5),通过回归分析确定合适的转速,并对结果进行验证。每组试验重复 5 次。

3.2 结果与分析

3.2.1 不同测量结果关联性分析

统计不同测量装置对试验样品的检测结果,如表 7 所示。从表中可以看出,不同外力作用形式下,颗粒饲料粉化情况不同,其中,回转箱式测定仪作用形式为低速低频碰撞,气动式测定仪作用形式为低速高频碰撞,离心式测定仪作用形式为高速单次碰撞。相较于低速低频碰撞结果,低速高频碰撞获得的结果数值更高;高速单次碰撞获得的结果直接与叶轮转速有关。采用 Pearson 相关性分析对不同粉化率测定结果进行评估,结果显示,不同转速下离心式测定仪与回转箱式测定仪之间相关系数分别为 0.985 4、0.969 8 和 0.988 8,不同转速下离心式测定仪与气动式测定仪之间相关系数分别为 0.984 2、0.978 5 和 0.983 4。

表 7 不同测量条件下颗粒饲料粉化率

Tab. 7 Pulverization rate of pellet feed under different conditions %

样品序号	回转箱式	气动式	离心式-700	离心式-850	离心式-1000
1	4.20	7.20	2.55	4.01	7.67
2	3.03	4.86	1.89	2.67	5.13
3	3.47	6.55	2.36	3.77	6.78
4	2.15	2.65	1.44	2.29	3.91
5	1.48	1.74	0.83	1.50	1.99

注:离心式-700、离心式-850、离心式-1000 分别表示叶轮转速为 700、850、1 000 r/min 下的测量结果。

结合颗粒饲料在不同检测装置内的粉化率情况可知,同一颗粒饲料在不同检测设备中表现的破碎

趋势不同，这主要是由于颗粒饲料在不同检测设备中受力情况和能量损失情况不同，当颗粒饲料在单次冲击或撞击中受力超过其破碎临界值时，将产生整体破碎，这与文献[19]结论一致；当颗粒饲料在单次冲击或撞击中受力低于其破碎临界值时，则主要表现为颗粒边缘的局部损伤。尽管不同检测设备间存在作用机制差异，但通过相关性分析发现各设备检测结果间呈现显著的正相关关系，这表明离心式粉化率测定仪测量结果可以反映颗粒饲料加工质量。

3.2.2　叶轮转速的确定与验证

颗粒饲料粉化率平均值随叶轮转速的变化情况如图 19 所示。从图中可以看出，颗粒饲料粉化率随叶轮转速增加呈现单调增加的趋势。当转速较低时，粉化率增加较慢；当转速较高时，粉化率增加较快。采用二次函数拟合试验值与叶轮转速的关系，获得不同样品对应的回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = 4.469\,4 - 0.016\,2x + 1.893\,9\times10^{-5}x^2 & (R^2 = 0.993\,3) \\ y_2 = 2.269\,9 - 0.009\,8x + 1.247\,6\times10^{-5}x^2 & (R^2 = 0.989\,4) \\ y_3 = 1.369\,9 - 0.010\,8x + 1.628\,6\times10^{-5}x^2 & (R^2 = 0.998\,5) \\ y_4 = 6.350\,6 - 0.018\,2x + 1.595\,0\times10^{-5}x^2 & (R^2 = 0.998\,1) \\ y_5 = 1.950\,1 - 0.006\,1x + 6.508\times10^{-6}x^2 & (R^2 = 0.979\,3) \end{cases} \tag{17}$$

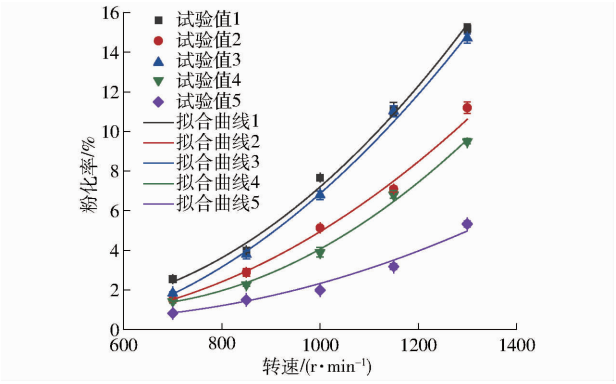


图 19　不同叶轮转速下颗粒饲料粉化率变化曲线

Fig. 19　Pulverization rate curves of feed pellet at different impeller velocities

将粉化率标准值 4.20%、3.03%、3.47%、2.15%、1.48%代入回归方程，获得叶轮转速分别为 838.41、856.63、820.34、819.83、852.58 r/min，因此，叶轮转速范围为 820 ~ 860 r/min，取平均值 840 r/min。

将离心式粉化率测定仪的工作转速设定为 840 r/min，进行验证试验，获得 5 种颗粒饲料测量结果，如图 20 所示。通过计算测量值的均值和标准差，获得粉化率测量值变异系数不超过 3.11%。使用斜率为 1 的一次函数对结果进行拟合，其决定系数 R^2 为 0.968 4。结果表明，本研究设计的粉化率测定装置具有较好的测量效果，能够准确反映颗粒饲料的加工质量。

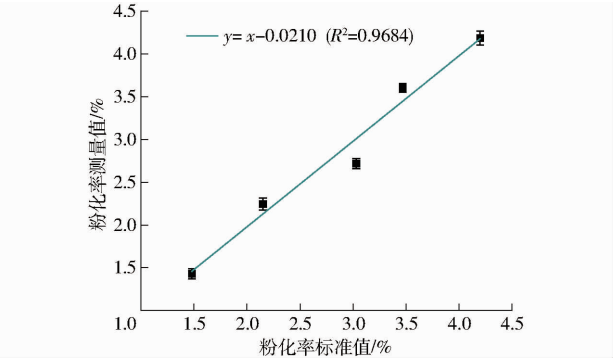


图 20　粉化率检测效果图

Fig. 20　Detection effect of pulverization rate

4　结论

(1)根据颗粒饲料加工质量检测需求，本研究基于单次冲击破碎原理，设计了一款离心式颗粒饲料粉化率检测系统，以粉化单元为研究目标，构建了颗粒饲料在不同规格叶片上的动力学模型，分析了叶轮结构参数对颗粒饲料运动的影响；此外，对颗粒饲料在碰撞时的运动特性进行理论分析。

(2)采用离散元法建立了颗粒饲料仿真模型，以叶轮结构参数为试验因素，开展单因素试验和正交试验，结果表明，叶片类型对速度分布均值影响极显著，叶片数量和叶片长度对速度分布均值影响不显著。综合考虑速度和变异系数，选取叶片类型为 V 型、叶片数量为 8 片、叶片长度为 100 mm；以环形碰撞板倾斜角度为变量，以能量损失率为评价指标，开展单因素试验，确定了环形碰撞板倾斜角度为 75°。

(3)搭建试验台架，以回转箱式和气动式测定仪为对照组，对各装置测量结果开展关联性分析，结果表明，不同转速下离心式测定仪与回转箱式测定仪之间相关系数分别为 0.985 4、0.969 8 和 0.988 8，不同转速下离心式测定仪与气动式测定仪之间相关系数分别为 0.984 2、0.978 5 和 0.983 4。这表明离心式粉化率检测装置测量结果可以反映颗粒饲料加工质量。

(4)建立颗粒饲料粉化率与叶轮转速间的二次回归模型，以粉化率标准值为目标值，确定叶轮转速为 840 r/min。开展验证试验，结果表明，粉化率测量值变异系数不超过 3.11%。使用斜率为 1 的一次函数对粉化率测量值与标准值进行拟合，其决定系数 R^2 为 0.968 4。

参 考 文 献

[1] Behnke K C. Feed manufacturing technology: current issues and challenges[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 62(1): 49 - 57.

[2] Halstensen M, Ihunegbo F N, Ratnayake C, et al. Online acoustic chemometric monitoring of fish feed pellet velocity in a pneumatic conveying system[J]. Powder Technology, 2014, 263: 104 - 111.

[3] Thomas M, Vanderpoel A F B. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 61(1 - 4): 89 - 112.

[4] Chang C M, Fang W, Jao R C, et al. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32(2): 343 - 353.

[5] Vukmirovic D, Colovic R, Rakita S, et al. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition: a review[J]. Animal Feed Science and Technology, 2017, 233: 133 - 144.

[6] García M A, Barceló A M, Nadeu C B, et al. Respiratory diseases in guinea pigs, chinchillas and degus[J]. The Veterinary Clinics of North America Exotic Animal Practice, 2021, 24(2): 419 - 457.

[7] Briggs J L, Maier D E, Watkins B A, et al. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality[J]. Poultry Science, 1999, 78(10): 1464 - 1471.

[8] Amerah A M, Ravindran V, Lentle R G, et al. Feed particle size: implications on the digestion and performance of poultry[J]. Worlds Poultry Science Journal, 2007, 63(3): 439 - 455.

[9] Abdulmumini M M, Zigan S, Bradley M S A, et al. Fuel pellet breakage in pneumatic transport and durability tests[J]. Renewable Energy, 2020, 157: 911 - 919.

[10] Ghasemi A, Chayjan R A, Najafabadi H J. Optimization of granular waste production based on mechanical properties[J]. Waste Management, 2018, 75: 82 - 93.

[11] 高蕊,李倪薇,康宏彬,等. 一种颗粒饲料 PDI 测试方法的研究[J]. 饲料工业, 2013,34(19):53 - 57.
Gao Rui, Li Niwei, Kang Hongbin, et al. One method of PDI evaluation for pellet feed[J]. Feed Industry, 2013, 34(19): 53 - 57. (in Chinese)

[12] Schilling C, Wöhler M, Yazdanpanah F, et al. Development of a novel wood pellet durability tester for small samples[C]// Proceedings of the 2015 World Sustainable Energy Days-Energy Efficiency & Biomass, World Sustainable Energy Days, 2015: 1 - 10.

[13] 李春雷. 颗粒饲料粉化率检测装置设计与试验[D]. 武汉:武汉轻工大学,2021.
Li Chunlei. Design and test of the testing device for pellet feed powdering rate[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021. (in Chinese)

[14] Abbas B A, Jasim A A, Bander L K. Manufacturing and testing a double action feed pellet durability measuring device[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1259: 012126.

[15] Wolska J, Holst O, Adlercreutz P, et al. Standardized method for the Holmen pellet tester (NHP100) as a tool for evaluating the physical quality of fish feed[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(6): 1790 - 1796.

[16] Larsson S H, Samuelsson R. Prediction of ISO 17831 - 1:2015 mechanical biofuel pellet durability from single pellet characterization[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 163: 8 - 15.

[17] Temmerman M, Rabier F, Jensen P D, et al. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes[J]. Biomass & Bioenergy, 2006, 30(11): 964 - 972.

[18] Chen Z, Wassgren C, Ambrose R P K. Measured damage resistance of corn and wheat kernels to compression, friction, and repeated impacts[J]. Powder Technology, 2021, 380: 638 - 648.

[19] Kong X, Cao Q, Zhao Z, et al. Breakage probability of feed pellet under repeated compression and impacts[J]. Granular Matter, 2023, 25(3): 47.

[20] Kong X, Cao Q, Niu Z. Experimental research on breakage characteristics of feed pellets under different loading methods[J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1401.

[21] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 8 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[22] Su Y, Xu Y, Cui T, et al. A combined experimental and DEM approach to optimize the centrifugal maize breakage tester [J]. Powder Technology, 2022, 397: 117008.

[23] Li A, Jia F, Chu Y, et al. Simulation of the movement of rice grains in a centrifugal huller by discrete element method and the influence of blade shape[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 54 - 70.

[24] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

[25] 周锋. 煤炭大颗粒气力输送关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.
Zhou Feng. Study on key technology of pneumatic conveying for large coal particles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[26] Caulkin R, Tian W, Pasha M, et al. Impact of shape representation schemes used in discrete element modelling of particle

packing[J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 76: 160 – 169.

[27] 闫银发,孟德兴,宋占华,等. 槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊 1):249 – 253.
Yan Yinfa, Meng Dexing, Song Zhanhua, et al. Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 249 – 253. (in Chinese)

[28] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(4):140 – 147.
Peng Fei, Wang Hongying, Fang Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140 – 147. (in Chinese)

[29] 廖宜涛,王在腾,廖庆喜,等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1): 236 – 243.
Liao Yitao, Wang Zaiteng, Liao Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 236 – 243. (in Chinese)

[30] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73 – 82.
Liao Yitao, Liao Qingxi, Zhou Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73 – 82. (in Chinese)

[31] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):132 – 140,207.
Niu Zhiyou, Kong Xianrui, Shen Bosheng, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132 – 140, 207. (in Chinese)

[32] 牛智有,江善晨,孔宪锐,等. 膨化颗粒饲料碰撞破碎特性分析与离散元模拟仿真[J]. 农业机械学报,2023,54(8): 371 – 380.
Niu Zhiyou, Jiang Shanchen, Kong Xianrui, et al. Impact breakage characteristics and discrete element simulation of extruded pellet feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 371 – 380. (in Chinese)

[33] 张伟健,江善晨,孔宪锐,等. 基于离散元法的粉碎机筛网冲击特性与粉碎颗粒接触参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2025,56(4):501 – 511.
Zhang Weijian, Jiang Shanchen, Kong Xianrui, et al. Analysis of impact characteristics of hammermill screen based on discrete element method and calibration of contact parameters of crushed particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 501 – 511. (in Chinese)

[34] 贾洪雷,谭贺文,温翔宇,等. 气力集排式精量配混施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):109 – 119.
Jia Honglei, Tan Hewen, Wen Xiangyu, et al. Design and experiment of pneumatic aggregate and discharge precision fertilizer mixing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S2): 109 – 119. (in Chinese)

[35] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):62 – 72, 97.
Wang Lei, Xi Rijing, Liao Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62 – 72, 97. (in Chinese)

[36] 姚露,廖庆喜,沈文惠,等. 基于 Bezier 曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7): 56 – 66,83.
Yao Lu, Liao Qingxi, Shen Wenhui, et al. Design and experiment of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed based on Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 56 – 66, 83. (in Chinese)

[37] GB/T 5498—2013　粮油检验 容重测定[S].

[38] GB/T 6435—2014　饲料中水分的测定[S].

[39] GB/T 40944—2021　饲料粒度测定 几何平均粒度法[S].