

玉米秸秆复合颗粒饲料致密成型特性的离散元仿真

那日苏, 李 帅, 李 鑫, 贾开发, 张伟国

(内蒙古工业大学 机械工程学院 内蒙古自治区液压传动与控制工程技术研究中心,
内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 为研究玉米秸秆复合颗粒饲料成型过程的特性与影响因素, 通过离散元软件 EDEM, 基于 Hysteretic Spring 接触模型, 对玉米秸秆复合颗粒饲料致密成型过程进行模拟, 分析了不同因素(锥口角度、粒径大小和压制速度)对成型质量与能耗的影响, 对压制过程中物料的流动状态进行了追踪, 并开展压缩实验对仿真数据与实验数据进行对比和验证。结果表明: 成型饲料的品质随着锥口角度的增大而提高, 同时比能耗更大; 增大粒径, 可以降低成型过程的比能耗, 但是成型饲料的品质会随之降低; 随着压制速度的增大, 成型饲料的质量变差, 比能耗变大。成型过程中, 物料间的相对流动性较差, 应提高饲料压制前的均匀程度。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下, 仿真数据与实验数据间无显著性差异, 验证了仿真的准确性与可行性。仿真结果可为玉米秸秆等复合颗粒饲料致密成型技术的发展提供数据参考。

关键词: 致密成型; 颗粒饲料; 成型质量; 比能耗; 离散元

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.022

中图分类号: S963.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0162-08

Discrete element simulation on dense forming characteristics for corn straw mixture pellet feed

Na Risu, Li Shuai, Li Xin, Jia Kaifa, Zhang Weiguo

(Engineering Technology Research Center for Hydraulic Transmission and Control in Inner Mongolia Autonomous Region,
School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010010, China)

Abstract: In order to study characteristics and influence factors of corn straw mixture pellet feed forming process, the dense forming process of corn straw mixture pellet feed was simulated by discrete element software EDEM based on contact model Hysteretic Spring, and the influences of different factors such as cone angle, particle size and pressing speed on forming quality and energy consumption were analyzed. Then, the flow state of materials in the pressing process was tracked, and the compression experiment was conducted to compare and verify between simulation data and experimental data. The results show that the quality of the formed feed increases with the increasing of the cone angle, and the specific energy consumption is higher at the same time. Increasing the particle size reduces, the specific energy consumption decreases in the forming process, but the quality of the formed feed reduces too. With the increasing of the pressing speed, the quality of the formed feed becomes worse, and the specific energy consumption becomes higher. In the forming process, the relative fluidity between materials is poor, and the uniformity of the feed before pressing should be improved. Under the condition of significance level $\alpha=0.05$, there is no obvious difference between simulation data and experimental data, which verifies the accuracy and feasibility of the simulation method. Thus, the simulation results can provide data reference for the development of dense forming technology for mixture pellet feed such as corn straw.

Key words: dense forming; pellet feed; forming quality; specific energy consumption; discrete element

近年来, 我国的农业增长取得了显著的成就,

但存在许多资源浪费的现象, 例如农业生产过程中会丢弃大量秸秆, 以秸秆作为可再生资源的用途非常广泛, 获取渠道较为便捷, 而且成本偏低, 可以作为商业化再利用的良好农作物资源。不仅如此, 回收秸秆废料并有效利用还能帮助农村地区提高经济收入, 使资源价值最大化, 更能实现农业生产的合理转变^[1-2]。

收稿日期: 2021-05-26; 修订日期: 2021-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52065050)

作者简介: 那日苏 (1976-), 女, 博士, 副教授

E-mail: nrs3000@163.com

通信作者: 李 帅 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1003240927@qq.com

我国主要粮食作物秸秆的年产量超过 7.8 亿吨,其中玉米秸秆的年产量约为 3.9 亿吨,居各类农作物秸秆产量之首^[3],玉米秸秆中含有大量的营养物质,包括氮、磷、钾、钙、镁等有机元素和矿物质,若能进行科学合理的利用,其可成为一种品质优良的饲料原料^[4]。玉米秸秆复合颗粒饲料加工技术是将玉米秸秆粉碎或揉搓丝化之后,根据一定的配方,与其他农副产品及饲料添加剂混合搭配,再制成颗粒状混合饲料的技术。其不仅具有良好的适口性,而且有利于牲畜的消化吸收,能够有效替代传统的饲料产品^[5-6]。基于此,本文应用离散元软件 EDEM 对玉米秸秆复合颗粒饲料的成型过程进行了模拟,分析不同因素下对颗粒成型以及能耗的影响,为饲料成型技术和成型设备的结构设计提供参考。

1 理论基础

离散单元法 (Discrete Element Method, DEM) 是由美国学者 Cundall P A 博士^[7]于 20 世纪 70 年代初首次提出的。离散单元法将介质视为一个个离散的颗粒单元,每个颗粒单元具有自身的物理与化学性质,通过对所有单元的受力与位移进行迭代计算,进而求得整体的运动与力学特性。软球模型是离散单元法中常用的模型,它允许在一对接触点处出现重叠部分。在单位时间步长内,直接基于颗粒的速度、加速度来更新颗粒的位置,并基于颗粒的位置计算颗粒的受力,从而得到颗粒的速度、加速度,之后在下一个时间步长内再次更新颗粒的位置^[8]。

Hysteretic Spring 接触模型的基本思想基于 Walton-Braun 理论^[9-10],该模型的特点是允许将塑性变形行为加入接触力学方程中,颗粒的弹性行为由预定义的值来表现,当接触力超过预定的应力时,颗粒表现出不可恢复的塑性变形,在不加载过度的情况下达到大的重叠量,从而表征材料的可压缩性。图 1 显示了模型中法向力与法向重叠量之间的关系。

法向力 F_n 的计算公式为:

$$F_n = \begin{cases} K_1 \delta_n & \text{加载, } K_1 \delta_n < K_2 (\delta_n - \delta_0) \\ K_1 (\delta_n - \delta_0) & \text{卸载/重新加载, } \delta_n > \delta_0 \\ 0 & \text{卸载, } \delta_n \leq \delta_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_1 为加载刚度; δ_n 为法向重叠量; K_2 为卸

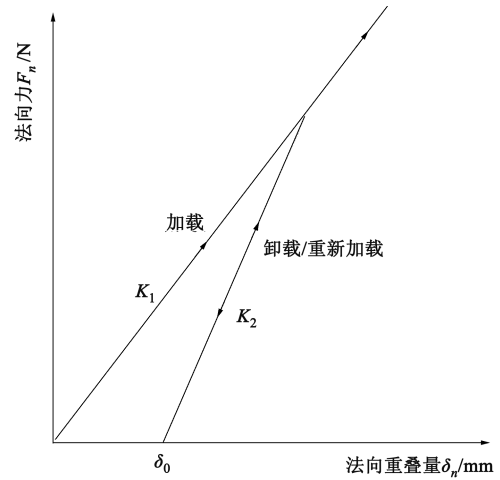


图 1 Hysteretic Spring 接触模型中法向力-法向重叠量关系原理图

Fig. 1 Principle diagram of normal force-normal overlap relationship for Hysteretic Spring contact model

载刚度; δ_0 为残余重叠量。

加载刚度 K_1 与参与接触的每种材料的屈服强度 Y_1 和 Y_2 相关,如式 (2) 所示:

$$K_1 = 5R^* \cdot \min(Y_1, Y_2) \quad (2)$$

式中: R^* 为参与接触的两个颗粒的等效半径。

由恢复系数 e 的表达式,可确定 K_2 :

$$e = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \quad (3)$$

每个时间步中残余重叠量的更新遵循下述规则:

$$\delta_0 = \begin{cases} \delta_n \left(1 - \frac{K_1}{K_2}\right) & \text{加载, } K_1 \delta_n < K_2 (\delta_n - \delta_0) \\ \delta_0 & \text{卸载/重新加载, } \delta_n > \delta_0 \\ \delta_n & \text{卸载, } \delta_n \leq \delta_0 \end{cases} \quad (4)$$

法向阻尼力 F_n^d 的计算公式为:

$$F_n^d = -b_n \cdot \sqrt{\frac{4m^* k}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \cdot \vec{v}_n^{\text{rel}} \quad (5)$$

式中: b_n 为法向阻尼系数; k 为 K_1 或 K_2 ; \vec{v}_n^{rel} 为碰撞速度法向分量; m^* 为当量质量。

切向力 F_t 与刚度系数有关,如式 (6) 所示:

$$F_t = -\min(\gamma_t K_1 \delta_t + F_t^d, \mu F_n) \quad (6)$$

式中: γ_t 为刚度系数; δ_t 为切向重叠量; F_t^d 为切向阻尼力; μ 为摩擦因数。

切向阻尼力 F_t^d 的计算公式为:

$$F_t^d = - \sqrt{\frac{4m^* \gamma_t k}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \cdot v_t^{\text{rel}} \quad (7)$$

式中: v_t^{rel} 为碰撞速度切向分量。

2 压缩实验

2.1 模具设计

根据实验需求自制的压缩模具如图2所示。其中, 模孔直径 $d = \Phi 10$ mm, 长径比选为 $6:1$ ^[11], 即成型腔的长度 $h_1 = 60$ mm; 对直径大于 $\Phi 10$ mm 的孔径, 锥口的压缩比 D^2/d^2 通常取 1.56 以上, 其中 D 为进料口直径^[12], 本次实验中压缩比取 2 , 则 $D = \Phi 14.142$ mm; 储料仓的长度 h_2 为 40 mm; 锥口角度 θ 取为 45° 。

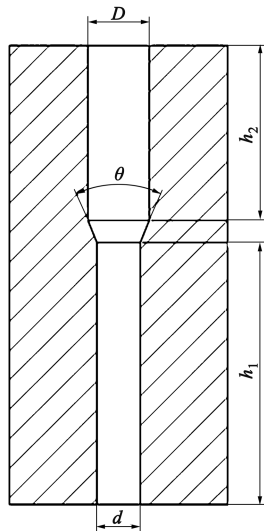


图2 模孔结构图

Fig. 2 Structure diagram of mold hole

2.2 实验材料

由于颗粒饲料的物料组分复杂, 难以对所有成分进行仿真, 实验选取具有代表性、所占比例较大的物料进行实验, 分别为玉米秸秆、玉米面与豆粕, 经粉碎处理后, 采用标准筛对物料进行筛分, 选取粒径范围为 $\Phi 1.6 \sim \Phi 2.0$ mm 的玉米秸秆和豆粕与粒径范围为 $\Phi 0.6 \sim \Phi 0.8$ mm 的玉米面作为实验材料, 材料的含水率控制为 13% 。材料的配比为玉米秸秆: 玉米面: 豆粕 = $12:5:3$ 。

2.3 实验设备与方法

实验系统如图3所示, 进行压缩实验时先将模具平稳地放置在万能实验机的实验台上, 压杆的上

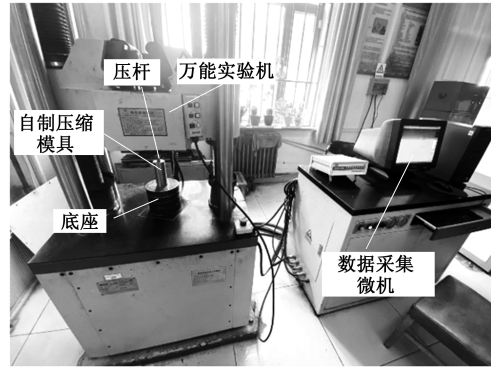


图3 压缩实验系统

Fig. 3 Compression test system

端固定于万能实验机的上夹具孔内, 调整好模具的位置后, 手动进行空载压缩 $3 \sim 5$ 次, 确保压杆在压缩时不会与模孔发生干涉, 对心性良好。调整完毕后, 将配好的物料填入模孔直至充满储料仓, 将压杆底端面与模具上端面调至平齐, 在控制与数据记录软件中将此刻位移与力的值清零后开始实验。实验中, 压杆的下压速度为 $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 行程达到 40 mm 时停止下压, 进入应力松弛状态, 保型 10 s 后压缩过程结束。同等条件下重复实验 5 次^[13], 测取压缩力等数据, 并与离散元仿真数据进行对比分析。

3 离散元仿真

3.1 离散元三维模型

根据图2中模具的几何尺寸与约束条件建立的离散元三维模型如图4所示, 由柱塞、储料仓、进料锥口、成型腔与底部挡板5个部分组成。

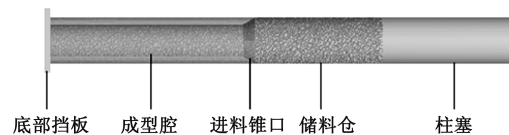


图4 离散元三维模型

Fig. 4 Discrete element 3D model

3.2 颗粒模型与仿真参数

针对3种不同的物料, 在 Particle 模块中利用多球面组合功能创建不同种类的颗粒模型, 初始尺寸的参数设置如图5所示, 其中各颗粒模型的坐标系原点为颗粒中心处。仿真参数包括各种颗粒以及模具的材料参数与接触参数, 如表1和表2所示^[14]。

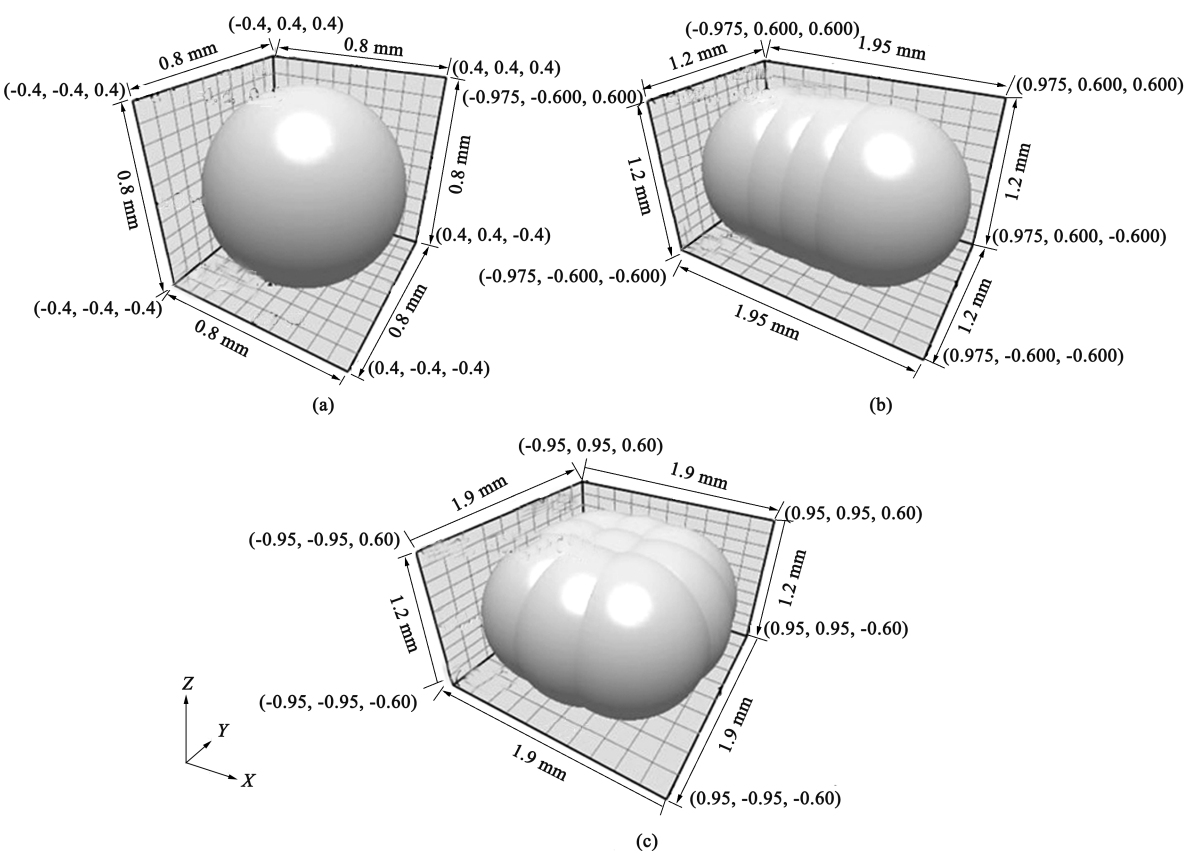


图 5 离散元颗粒模型
(a) 玉米面 (b) 玉米秸秆 (c) 豆粕
Fig. 5 Discrete element pellet models
(a) Corn flour (b) Corn straw (c) Soybean meal

表 1 材料参数				
Table 1 Material parameters				
参数	玉米面	玉米秸秆	豆粕	模具
泊松比	0.4	0.3	0.4	0.3
剪切模量/MPa	137.00	30.00	1.96	70000.00
密度/(kg·m ⁻³)	1250	1233	1076	7850

表 2 接触参数			
Table 2 Contact parameters			
接触面	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
豆粕-模具	0.23	0.51	0.01
豆粕-豆粕	0.31	0.68	0.01
豆粕-玉米秸秆	0.37	0.62	0.01
豆粕-玉米面	0.13	0.70	0.01
玉米秸秆-模具	0.43	0.62	0.01
玉米秸秆-玉米秸秆	0.39	0.65	0.01
玉米秸秆-玉米面	0.13	0.71	0.01
玉米面-模具	0.12	0.43	0.01
玉米面-玉米面	0.06	0.72	0.01

3.3 工作参数与颗粒工厂设置

在成型腔内建立一个虚拟的圆柱形颗粒工厂，根据粗：精粮为 6：4 的比例，设置玉米秸秆颗粒的生长速度为 1.2 g·s⁻¹、玉米面颗粒的生长速度为 0.5 g·s⁻¹、豆粕颗粒的生长速度为 0.3 g·s⁻¹，颗粒的产生位置与方位设为随机，同时考虑到现实情况中颗粒大小的不均匀性，设置随机生成上述颗粒尺寸 0.8~1.0 倍大小的颗粒，重力加速度的方向设为沿-Y 轴，大小为 9.81 m·s⁻²，待颗粒填满模具并达到稳定后，将其输出，再利用 EDEM 打开填充完毕的文件，设置柱塞的压缩速度与时间，仿真时间步长设为 7×10⁻⁷ s，为 Rayleigh 时间步长的 21.71%，Cell Size 设为最小颗粒半径 R_{min} 的 3 倍。数据保存频率设为每 0.01 s 一次。

4 模型有效性验证与仿真结果分析

4.1 模拟与实验结果对比验证

将压缩实验和离散元仿真得到的压缩力数据进

行对比与误差分析,两者间的对比图如图 6 所示,由于颗粒模型与实际情况存在的误差以及人为给定参数的影响,实际成型压缩力曲线与仿真曲线存在一定差异。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件下对两组数据进行单因素方差分析,假设 H_0 代表两组数据的方差相等, H_1 代表两组数据的方差不相等,检验结果如表 3 所示。其中, $P_{\text{valve}} = 0.9109 > 0.0500$, $F = 0.0125 < F_{\text{crit}} = 3.8570$, 故接受 H_0 , 两组数据间无显著性差异。通过分析验证了仿真的准确性与可行性,运用离散元仿真代替物理实验,节约了实验成本,并且通过 EDEM 软件中丰富的后处理模块,可以更好地观察颗粒内部微观的力学行为与成型机理。

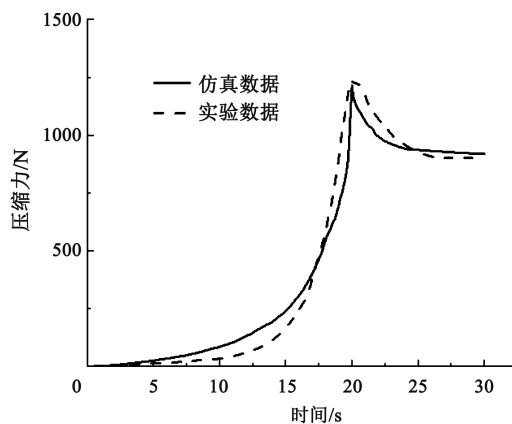


图 6 实验与仿真数据对比

Fig. 6 Comparison of experimental and simulation data

表 3 模拟与实验数据的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of simulation and experimental data

差异源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	检验统计量 F	显著性水平观测值 P_{value}	检验临界值 F_{crit}
组间	2363.5588	1	2363.5588	0.0125	0.9109	3.857
组内	113106658.6455	600	188511.0977			
总计	113109022.2043	601				

4.2 不同锥口角度下成型过程研究

图 7 为不同锥口角度下的压缩力-时间曲线,从图 7 中可以看出,3 种锥口角度下压缩力变化的趋势十分相似,可以分为 3 个阶段。第 1 个阶段为 0.4 s 之前,该阶段颗粒间较为松散、孔隙较大,仅需要较小的压缩力便可以获得较大的压缩变形,压缩力增长缓慢;第 2 个阶段为 0.4~0.8 s,此时进入压制中后期,颗粒间的孔隙被逐渐填满,发生塑性变形,压缩力快速增长;0.8~2.0 s 为应力松弛阶段,此时柱塞不再向下运动,物料进入保型阶段,压缩力逐渐下降,趋于平稳。同时可以观察到,在其他条件相同的情况下,压缩力的大小随着锥口角度的增大而增大,这是由于:随着锥口角度的增大,锥面所受到的正压力加大,从而导致物料与内壁的摩擦力增大,压缩力也随之增大。在松弛时间进行 1.2 s 后,3 种锥口角度由低到高,对应的压缩力衰减的百分比分别为 12.66%、17.68%和 20.48%,松弛量随着锥口角度的增大而增大,说明增大锥口角度有利于成型饲料残余应力的衰减,但残余应力大于更低的锥口角度下的残余应力。较大的锥口角度有助于提高成型饲料的质量,但是成型能耗与磨损的增大、开孔率的减小会影响生产效率,同时容易形成物料挤压死角;相应地,锥口角度较小时,物料压制程度较低时便进入成型腔内,这样得到的成

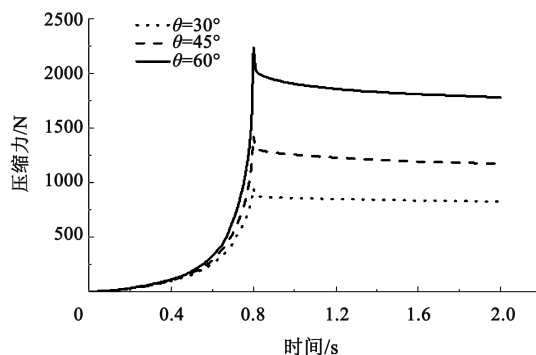


图 7 不同锥口角度下的压缩力-时间曲线

Fig. 7 Compression force-time curves at different taper angles

型饲料的质量差,容易出现松散现象。

在 Analyst 模块中添加一个测量块,提取不同锥口角度下成型饲料的质量与体积,如图 8 所示,可计算得到 3 种锥口角度下成型饲料的密度。同时,提取成型饲料颗粒间接触数目、平均重叠量与平均压缩力数据,结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,成型饲料的密度与内部颗粒之间的各种特征量随着锥口角度的增大而增大,说明锥口角度的提高有助于颗粒受压程度的提高,颗粒之间的接触力更大,颗粒将被挤压得更为紧实,与上文分析吻合。

不同锥口角度下压缩过程中的比能耗情况如表 5 所示,计算公式为:

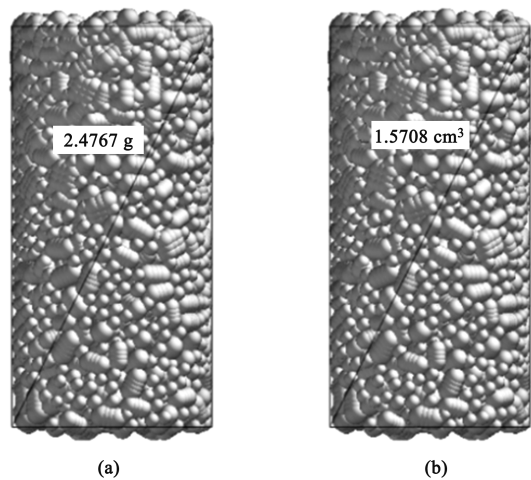


图 8 成型颗粒的质量与体积
(a) 质量 (b) 体积
Fig. 8 Mass and volume of formed pellet
(a) Mass (b) Volume

表 4 不同锥口角度下成型饲料颗粒间相关特征及物理特性
Table 4 Correlation characteristics and physical properties among formed feed pellets under different taper angles

参数	锥口角度 $\theta/(^{\circ})$		
	30	45	60
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1. 5767	1. 8156	2. 029
颗粒间接触数目	24346	29757	36716
平均重叠量/mm	0. 1721	0. 1926	0. 2035
平均压缩力/N	1. 3808	1. 9581	2. 4246

注：平均压缩力为测量块内平均每个颗粒所受到的压缩力，等于测量块内所有颗粒所受压缩力总和除以颗粒个数。

$$\delta = \frac{W}{m} = \int \frac{F(x)}{m} dx$$

(8)

式中： δ 为压缩过程中的比能耗，($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)； W 为压缩过程的总能耗， kJ ； m 为压缩的物料重量， kg ； $F(x)$ 为随位移 x 变化的压缩力， kN 。

表 5 不同锥口角度下压制过程中的比能耗值
Table 5 Specific energy consumption values during pressing process under different taper angles

锥口角度 $\theta/(^{\circ})$	30	45	60
比能耗/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0. 8423	1. 0351	1. 2534

从表 5 中可以看出，锥口角度为 60° 时的比能耗为 $1. 2534 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，高于另外两种锥口角度下的比能耗；锥口角度为 30° 时的比能耗最低，为 $0. 8423 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，因此，致密成型过程的比能耗随着锥口角度的增加而增加。

制粒过程中，物料在模孔内的流动过程十分短暂并处于模具内部，想要检测其流动状态非常困难，在 Analyst 模块中对颗粒进行分层并上色，对压制过程中颗粒的位置进行跟踪，还原颗粒的流动状态，如图 9 所示。可以看到，由于物料外侧受到壁面摩擦阻力的影响，流动性会滞后于内部，滞后性随锥口角度的增大而提高，但在 3 种锥口角度下，压制后的颗粒分布情况均仍保持原有的分层状态，可见压制过程不会大幅度改变颗粒原有的相对位置，所以，为了提高成型质量并保证营养成分的均匀，应尽可能在物料进入制粒室前提高其均匀程度。

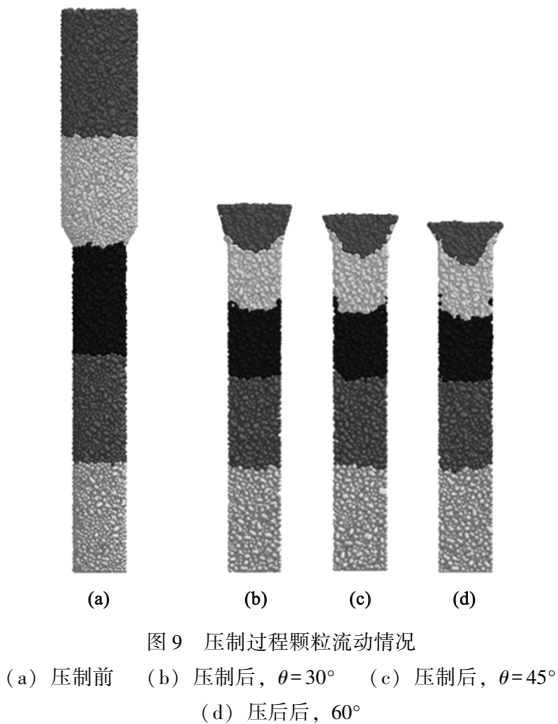


图 9 压制过程颗粒流动情况
(a) 压制前 (b) 压制后， $\theta=30^{\circ}$ (c) 压制后， $\theta=45^{\circ}$
(d) 压后后， 60°
Fig. 9 Particle flow conditions during pressing process
(a) Before pressing (b) After pressing, $\theta=30^{\circ}$
(c) After pressing, $\theta=45^{\circ}$ (b) After pressing $\theta=60^{\circ}$

4.3 不同粒径大小下成型过程研究

将初始模拟的粒径大小分别扩大至 1.5 倍与 2.0 倍再次进行模拟，得到不同粒径下的压缩力-时间曲线，如图 10 所示。结果显示，在其他条件保持一致时，粒径大小对最大压缩力的影响较大，最大压缩力的大小随着粒径的增大而减小，分别为 945. 1498、851. 8478 和 812. 9361 N，而对于松弛时间与松弛时间，粒径的影响并不显著。这说明较小的粒径尺寸有利于提高物料的受压程度与产品质量，但同时会提高模孔的磨损程度与能耗大小。

不同粒径下成型饲料的密度与颗粒间相关特征

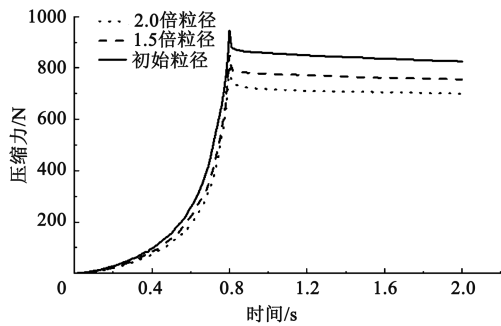


图 10 不同粒径大小下的压缩力-时间曲线
Fig. 10 Compression force-time curves under different particle diameters

如表6所示,从表6中可见,成型饲料的密度随粒径增大而减小,粒径越小,表面积与接触面积越大,同时颗粒间接触数目也更多,排布更加紧密,结构稳定性好,致密程度高。内部颗粒所受压缩力的大小也随着粒径的增大而减小,这表明粒径越小,颗粒间的接触力越大,更不容易发生松散现象。

表 6 不同粒径下成型饲料颗粒间相关特征及物理特性

参数	粒径		
	初始粒径	1.5 倍粒径	2.0 倍粒径
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.5767	1.5433	1.4419
颗粒间接触数目	24346	6945	2227
平均重叠量/mm	0.1721	0.2676	0.3563
总重叠量/mm	4189.9466	1858.482	793.4801
平均压缩力/N	1.3808	2.7746	3.9411
总压缩力/N	4922.552	2810.6698	1564.6167

表 7 为不同粒径下压缩过程中的比能耗情况,从表 7 中可以看出:初始粒径下的比能耗为 $0.8423 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于另外两种粒径大小下的比能耗;2.0 倍粒径下的比能耗最低,为 $0.6790 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,致密成型过程中比能耗随着粒径的增大而减小。

表 7 不同粒径下压制过程中的比能耗值

Table 7 Specific energy consumption values during pressing process under different particle sizes			
粒径	初始粒径	1.5 倍粒径	2.0 倍粒径
比能耗/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.8423	0.7243	0.6790

4.4 不同压制速度下成型过程研究

在不改变其他条件的情况下,将压制速度分别取为 25、50 与 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 进行模拟,得到不同压

制速度下的压缩力-时间曲线,如图 11 所示。可以看到,在压制位移不变的情况下,最大压缩力随着压制速度的提高而提高,分别为 1315.744、1425.832 和 1442.310 N ,这是由于:当压制速度越快时,颗粒间的结合效果越差,所以会产生更大的成型阻力。对应的在松弛时间进行 1.2 s 后,3 种压制速度由低到高,压缩力衰减的百分比分别为 15.58%、17.68% 和 20.15%,松弛量随着压制速度的增大而增大。

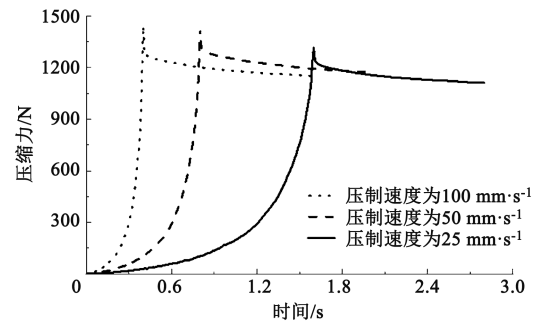


图 11 不同压制速度下的压缩力-时间曲线
Fig. 11 Compression force-time curves under different pressing speeds

不同压制速度下成型饲料的密度与颗粒间相关特征如表 8 所示,从表 8 中数据可以看到:当压制速度为 $25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,成型饲料的密度最大,为 $1.8366 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,高于其他两种压制速度下的密度; $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时成型饲料密度最小,为 $1.8097 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。所以,成型饲料的密度随着压制速度的提高而降低,颗粒间的其他特征量也随着压制速度的升高有一定的下降,这说明虽然提高压制速度可以获得更大的压缩力,但最终成型饲料的质量要低于更慢的压制速度下成型饲料的质量。

表 8 不同压制速度下成型饲料颗粒间相关特征及物理特性

参数	压制速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	25	50	100
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.8366	1.8156	1.8097
颗粒间接触数目	29872	29757	29004
平均重叠量/mm	0.1940	0.1926	0.1922
平均压缩力/N	1.9918	1.9581	1.9044

表 9 为不同压制速度下压缩过程中的比能耗,可以看到致密成型过程中比能耗随着压制速度的增大而增大。

表9 不同压制速度下压制过程中的比能耗值

Table 9 Specific energy consumption values during pressing process under different pressing speeds

压制速度/(mm·s ⁻¹)	25	50	100
比能耗/(kJ·kg ⁻¹)	1.0279	1.0351	1.0674

5 结论

(1) 较大的锥口角度可以使物料受到更大的压制力，成型饲料的密度与质量也更高，但同时压制过程的比能耗更大，实际生产中应尽可能在满足产品质量的情况下使用锥口角度较小的模孔。

(2) 压制过程中颗粒基本保持原有的分层状态，相对位置无较大的变化，为了提高成型饲料的质量与保证营养成分的均匀，应尽可能地提升饲料压制前的均匀程度。

(3) 压制过程中物料受到的压制力随粒径大小的增大而减小，较小的粒径可以使成型饲料获得更高的密度与质量，但能耗也进一步加大，同时粉碎成本更高，对模具的损耗更大，在生产过程中要平衡好这两方面的关系。

(4) 随着压制速度的增大，压制力会变得更加大，但成型饲料的密度与质量并未变得更高，反而低于较低的压制速度下的密度和质量，比能耗也更高，所以，在满足生产效率的情况下，可以尽可能降低压制速度，以保证产品质量并降低能耗。

参考文献：

[1] 张令君. 农作物秸秆的机械化处理形式与再加工技术 [J]. 农机使用与维修, 2020, (12): 33-34.

Zhang L J. Mechanized treatment forms and reprocessing technology of crop straw [J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2020, (12): 33-34.

[2] 候其东, 鞠美庭. 秸秆类生物质资源化技术研究前沿和发展趋势 [J]. 环境保护, 2020, 48 (18): 65-70.

Hou Q D, Ju M T. Research frontiers and development trends of straw-based biomass resource technology [J]. Environmental Protection, 2020, 48 (18): 65-70.

[3] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (11): 2583-2593.

Chai R S, Wang Q Y, Ye X X, et al. Potential of replacing chemical nitrogen fertilizer with straw for major food crops in China [J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2019, 38

(11): 2583-2593.

[4] 孙明, 王艳芹, 仲子文, 等. 农作物秸秆饲料化利用方法 [J]. 中国畜禽种业, 2020, 16 (11): 83.

Sun M, Wang Y Q, Zhong Z W, et al. Methods of crop straw fodder utilization [J]. China Livestock and Poultry Seed Industry, 2020, 16 (11): 83.

[5] 席尚明. 玉米秸秆颗粒饲料的加工技术 [J]. 当代农机, 2020, (4): 64-65.

Xi S M. Processing technology of corn straw pellet feed [J]. Contemporary Agricultural Machinery, 2020, (4): 64-65.

[6] 陈光, 吴卓夫, 张兆业. 秸秆综合利用研究动态及展望 [J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38 (5): 505-510.

Chen G, Wu Z F, Zhang Z Y. Research dynamics and prospects of straw comprehensive utilization [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38 (5): 505-510.

[7] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movement in block rock system [J]. Symposium ISRM, 1971, Proc 2: 129-136.

[8] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.

Wang G Q, Hao W J, Wang J X. Discrete Cell Method and Its Practice on EDEM [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.

[9] Walton O R, Braun R L. Viscosity and temperature calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks [J]. Journal of Rheology, 1986, 30 (5): 949-980.

[10] Walton O R, Braun R L. Stress calculations for assemblies of inelastic speres in uniform shear [J]. Acta Mechanica, 1986, 63: 73-86.

[11] 段海涛, 李军国, 秦玉昌, 等. 调质温度及模孔长径比对颗粒饲料加工质量的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (11): 278-283.

Duan H T, Li J G, Qin Y C, et al. Effect of tempering temperature and die hole aspect ratio on the quality of pellet feed processing [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34 (11): 278-283.

[12] 中国农机研究院. 农业机械设计手册 下 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

Chief of China Agricultural Machinery Research Institute. Manual of Agricultural Machinery Design [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.

[13] Li X B, Yang Y, Xu Y S, et al. Deformation behavior and crack propagation on interface of Al/Cu laminated composites in uniaxial tensile test [J]. Rare Metals, 2020, 39 (3): 296-303.

[14] 李利桥. 滚筒式日粮混合机混合机理分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.

Li L Q. Analysis and Experimental Research on Mixing Mechanism of Drum-type Grain Mixer [D]. Haibin: Northeastern Agricultural University, 2018.