

秸秆制粒过程仿真及环模结构参数优化

刘 龙¹, 高爱民¹, 程志新², 刘凤军², 王红松¹, 任 伟¹, 王昌德¹

(1. 甘肃农业大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 酒泉市铸锻机械制造有限公司, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 为提高制粒效率,对秸秆的本征参数进行测定,利用离散元软件 EDEM 和有限元软件 ANSYS 对制粒过程进行仿真,研究颗粒的速度和所受外力随时间的变化规律,以及颗粒接触数量随时间的变化情况;分析模孔孔径、模孔锥角和颗粒粒径对制粒效果的影响,优化环模结构参数。结果表明:模拟仿真的制粒过程与实际制粒机的颗粒成型过程基本一致,颗粒的速度和所受外力呈现出周期性的波动状态,颗粒的接触数量呈现周期性的、逐渐减小的趋势,秸秆制粒过程表现为周期性的循环挤压过程;当环模孔径为 5 mm、模孔锥角为 75°、粉料粒径为 0.6 mm 时,环模表面的磨损变形较轻,制粒质量和制粒效率最佳。

关键词: 秸秆; 制粒过程; 环模结构; 参数优化; 仿真模拟

中图分类号: S226.9

文献标志码: A

Simulation of straw granulating process and optimization of ring die structure parameters

LIU Long¹, GAO Aimin¹, CHENG Zhixin², LIU Fengjun², WANG Hongsong¹, REN Wei¹, WANG Changde¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Jiuquan Zhulong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiuquan 735000, China)

Abstract: In order to improve granulating efficiency, the intrinsic parameters of straw were measured and the granulating process was simulated by using discrete element software EDEM and finite element software ANSYS. The changes of external force number with time, as well as the changes of particle contact number with time were studied. The influence of die hole aperture, die hole cone angle and powder particle size on the granulating effects were analyzed and the structural parameters of ring die were optimized. The results show that simulated granulation process is basically the same as the actual granulation process. The particle velocity and external force show a periodic fluctuation state. The particle contact number has a periodic and gradually decreasing trend. The straw granulating process is a periodic cyclic extrusion process. When the die hole aperture is 5 mm, the die hole cone angle is 75° and the powder particle size is 0.6 mm, the wear deformation of ring die surface is slight and the granulation quality and efficiency are the best.

Keywords: straw; granulating process; ring die structure; parameter optimization; simulation

我国秸秆资源丰富,目前,仍有许多地方的秸秆被就地焚烧,不仅污染环境,还容易引发火灾。秸秆生物质的能源化、饲料化和肥料化是秸秆开发利用的主要方式。将秸秆制成颗粒不仅能够改善大气环境,减缓能源供应紧张,还能提高农村经济收入,实现秸秆资源价值的最大化^[1]。

环模制粒机为常用的秸秆粉料的制粒设备,效率高,能耗低^[2]。针对环模制粒机的工作原理、制粒质量、工作效率和生产能耗等问题,国内外学者进行了一系列研究。Holm 等^[3]建立粉体物料通过模孔的挤压力学模型,对生物质粉体物料在制粒成型过程中的受力情况进行分析。Agar 等^[4]基于离散单元

收稿日期: 2022-06-21,修回日期:2022-11-02。

基金项目:甘肃省自然科学基金项目,编号:21JR7RA817;甘肃省教育厅产业支撑计划项目,编号:2021CYZC-39。

第一作者简介:刘龙(1998—),男,硕士研究生,研究方向为农业工程技术与装备。E-mail: 872529933@qq.com。

通信作者简介:高爱民(1981—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为农业工程技术与装备。E-mail: gaoaimin@gsau.edu.cn。

法建立生物质颗粒物料的参数模型,对颗粒物料微观力学特性进行模拟分析。Mazor等^[5]利用有限元和离散元动态仿真相结合的方法,分析粉料在颗粒机中的运行状态。丁宁等^[6]发现一种多级压辊制粒机在制造秸秆粉料的挤压过程中存在塑化现象。刘德军等^[7]研究制粒机在生物质秸秆粉料通过模孔时的受力过程,探索了秸秆压缩成型机理,提高制粒机的工作效率。蒋清海等^[8]建立单模孔旋转挤压成型的驱动模型和能耗模型,研究粉体物料在环模和压辊之间的受力情况。李永奎等^[9]利用离散单元法建立玉米秸秆粉料模型,研究单孔制粒成型过程。目前国内外针对环模和压辊之间的间隙、环模的内径和厚度等因素对环模制粒机制得的颗粒性能影响展开研究,大部分都是将制粒机简化为单模孔开展试验^[10-13]。

基于国内外研究现状,本文中以藜麦秸秆作为研究对象,首先测定藜麦秸秆的本征参数;其次,利用离散元软件 EDEM 对秸秆粉料制粒成型过程进行仿真,研究秸秆制粒成型机理和模孔的受力情况;最后,将仿真结果导入有限元软件 ANSYS 中,分析模孔孔径、模孔锥角、粉料粒径 3 种因素对环模磨损变形的影响,优化制粒机的工艺参数。

1 秸秆制粒过程的仿真

1.1 环模制粒的工作原理

环模制粒机主要由喂料器、调制器、传动机构和制粒器等组成。喂料器和调制器一般安装在环模制粒机的外部机架上,传动机构结构简单且运行稳定,这 3 个部件属于辅助设备。制粒器包含环模、压辊、刮刀及切刀等零件。生物质秸秆粉料由喂料器送入调制器进行调质,调质好的物料进入制粒器进行制粒过程。

在制粒器中,旋转拨料刀将环模内壁上的颗粒物料搅拌均匀,在环模和压辊的挤压下,具有一定密度和黏结力的颗粒物料被压实而被挤入环模孔中,成型后不断向外端挤出;然后由切刀将成型颗粒切成一定的长度,最后将成型颗粒排出机外。

环模和压辊是制粒器中最易磨损的关键零部件,其结构参数、质量和性能直接影响环模制粒机的制粒质量、制粒效率、使用寿命以及秸秆制粒成型的加工成本^[14]。制粒器中环模和压辊的工作原理及结构参数简图如图 1 所示。由图可见,在制粒器中,环模和压辊之间形成了供料区、变形压紧区和挤压成形区 3 个区域;借助环模旋转产生的离心力,物料颗粒进入制粒器后紧贴在环模内壁,被挤入环模与 2 个压辊组成的变形压紧区;在环模和压辊的共同挤压下,颗粒物料从环模孔中成型后不断向外端挤出。

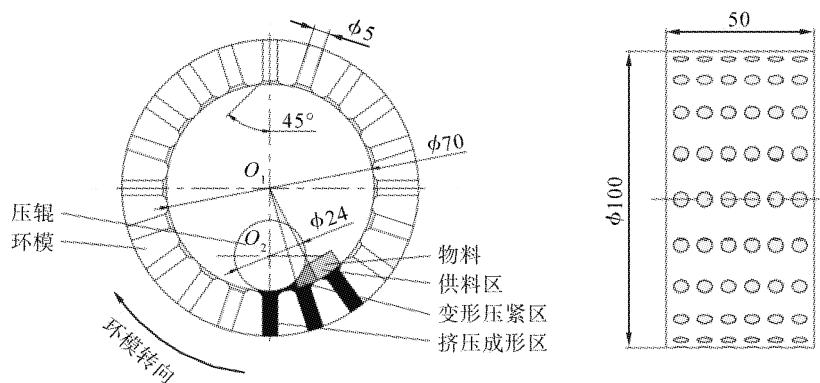


图 1 环模和压辊的工作原理及结构参数简图

Fig. 1 Working principle and structural parameters of ring die and press roll

1.2 颗粒模型

以藜麦秸秆粉料为研究对象,藜麦秸秆粉料在用环模制粒机制粒时,经测定其粒径为 0.3 ~ 1.8 mm。在用离散单元法 EDEM 模拟秸秆粉料制粒成型过程时,离散元模型的计算量和计算精度受粉料颗粒的

数量和粒径影响,秸秆粉料颗粒粒径太大会使计算机仿真模拟时的作用力波动较大,而粒径过小则会导致颗粒工厂生成的颗粒数量过多,使计算机仿真计算量过大,导致计算机仿真系统崩溃^[15]。为防止计算机仿真系统崩溃,减小计算机仿真误差,通过不断的测试计算,选取球形颗粒来模拟藜麦秸秆粉料,颗粒物料粒径取值为 0.5 ~ 1.0 mm。

生物质藜麦秸秆由有机物、矿物质和水构成,其粉料中含有纤维素、木质素,制粒过程中模辊挤压力造成纤维素和木质素的软化,使秸秆粉料颗粒产生一定的黏聚力,颗粒间出现黏附现象^[16-17]。Hertz-Mindlin with JKR 模型适用于模拟土壤、农作物等湿润颗粒,颗粒间因水分、静电等原因易发生黏结,因此选用 Hertz-Mindlin with JKR 模型作为秸秆粉料的接触模型。

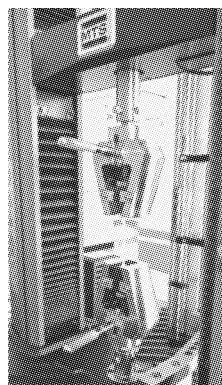
1.3 仿真模型参数设置

运用 EDEM 2020 软件建立环模制粒仿真模型,结合国内外文献对秸秆粉料制粒成型的研究成果^[18-19],JKR 表面能为 0.1 ~ 0.4 J/m²。接触参数设置如表 1 所示。

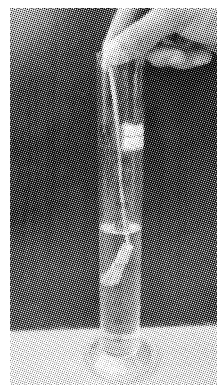
表 1 接触参数的设置
Tab. 1 Settings of contact parameters

	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
粉料-粉料	0.20	0.45	0.05
粉料-不锈钢板	0.34	0.54	0.03

藜麦秸秆的密度、泊松比、剪切模量由物理试验测定,藜麦秸秆本征参数的测定如图 2 所示。由图可见,采用 CMT5305 微机控制式万能试验机(深圳 SANS 公司)对藜麦秸秆进行拉伸、剪切试验,测得藜麦秸秆的泊松比和剪切模量;利用浮力法使用容量为 200 mL 的量筒测得藜麦秸秆的密度;藜麦秸秆颗粒的密度为 $5.3 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.4,剪切模量为 $2.89 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。同样,测得不锈钢板的密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,剪切模量为 $6.73 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 。



(a) 泊松比和剪切模量



(b) 密度

图 2 藜麦秸秆本征参数的测定

Fig. 2 Determination of intrinsic parameters of quinoa straw

材料设置完成后,导入 IGS 格式的环境模型。在 EDEM 中添加圆柱体作为环模制粒机压辊的几何模型,设置尺寸及位置参数,使 2 个压辊相互平行并分别相切于环模内表面。重力加速度的方向设为沿 -Z 轴,取值为 9.81 m/s^2 。环境边界与环模之间保留一定距离,有利于观察成型的秸秆颗粒。

在环模型腔内建立一个虚拟面颗粒工厂,颗粒的产生位置与方位设为随机模式。同时,为控制成型效果,设置颗粒尺寸分布为固定模式,颗粒生成方式为动态(Dynamic),生成速率设为 $5\,000 \text{ s}^{-1}$,生成数量设为 50 000,仿真时间设为 2.0 s。藜麦秸秆粉料颗粒的离散元仿真简化模型采用球形颗粒,粒径设置为 0.6 mm。待颗粒生成完毕并处于稳定状态后将其导出,再利用 EDEM 导出模型文件。根据实际制粒过程和仿真效率的要求对制粒模型进行运动设置,环模绕轴心设为以 10 rad/s 的转速顺时针旋转,双压辊设为以 10 rad/s 的转速绕轴心逆时针旋转。

1.4 制粒过程的仿真结果

秸秆粉料的制粒过程如图3所示。由图可见,颗粒工厂生成的颗粒模型落入环模与压辊形成的制粒室内,秸秆颗粒物料进入楔形挤压区之前,颗粒物料基本呈现不受挤压力的状态;随着环模和压辊的不断转动,部分颗粒物料被压入模孔,在环模、压辊及接触颗粒的共同作用下,秸秆颗粒物料不断地被挤入环模孔中;环模孔中的颗粒物料堆积到极限后发生塑性变形,产生聚合作用而制粒成型;随着持续的挤压过程,颗粒物料制粒成型被挤出模孔。

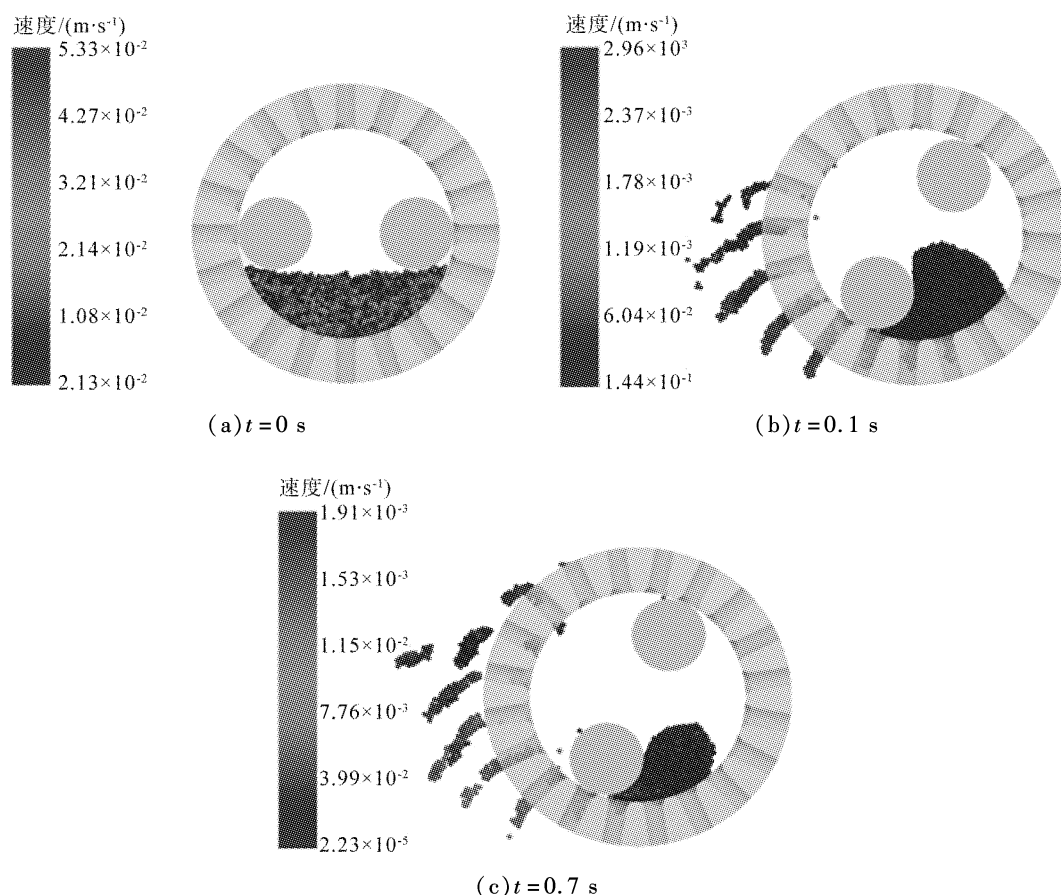


图3 秸秆粉料的制粒过程

Fig. 3 Granulating process of straw powder

秸秆颗粒物料在环模制粒仿真过程中速度和所受外力随时间的变化规律如图4所示。由图可知,当颗粒物料经过变形压紧区时,颗粒的速度和所受外力随着时间的增加而增大;当颗粒经过模辊间隙时,颗粒的速度和所受外力瞬间减小;随着制粒过程的持续进行,颗粒的速度和所受外力呈现出周期性的波动状态,秸秆制粒成型过程表现为周期性的循环挤压过程。

在环模制粒仿真过程中颗粒接触数量随时间的变化情况如图5所示。由图可知,在初始阶段,由于瞬时填充完成时颗粒相互接触碰撞,发生挤压回弹现象,颗粒接触数量快速增大并出现峰值;随着制粒过程的持续进行,颗粒的接触数量呈现周期性减小的趋势; $t = 0.4$ s时,压辊旋转到环模上方时产生间隙,秸秆颗粒模型受压后发生挤压回弹现象,接触数量大幅下降。

综上所述,环模制粒过程仿真基本还原了实际的制粒过程,模拟出制粒过程中颗粒的速度和所受外力随时间的变化规律,以及颗粒接触数量随时间的变化情况。在环模、压辊及接触颗粒的共同作用下,秸秆颗粒物料不断地被挤入环模孔中,环模孔中的颗粒物料堆积到极限后发生塑性变形,产生聚合作用而制粒成型,与现实中制粒机的颗粒成型过程一致,证明了离散元仿真环模制粒成型的可靠性。

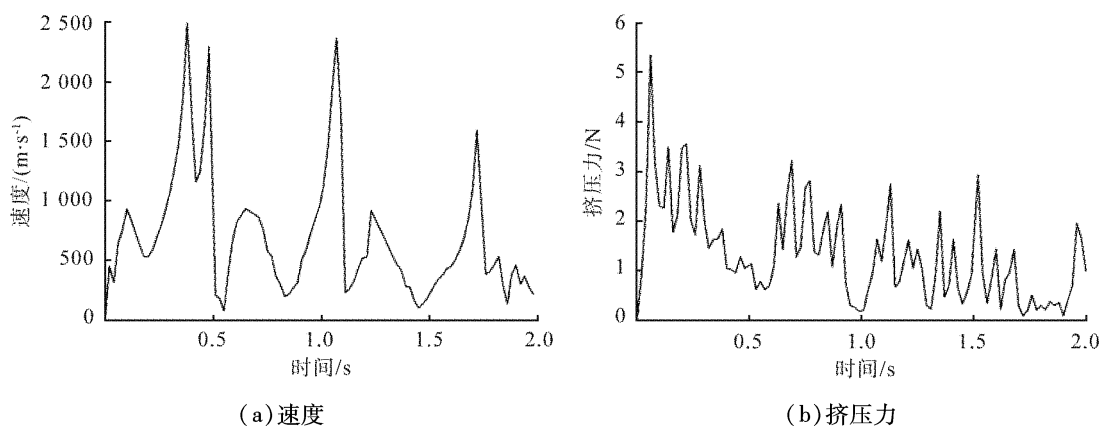


图4 环模制粒过程中颗粒速度和所受外力随时间的变化规律

Fig.4 Variation of particle velocity and external force with time during granulating process of ring die

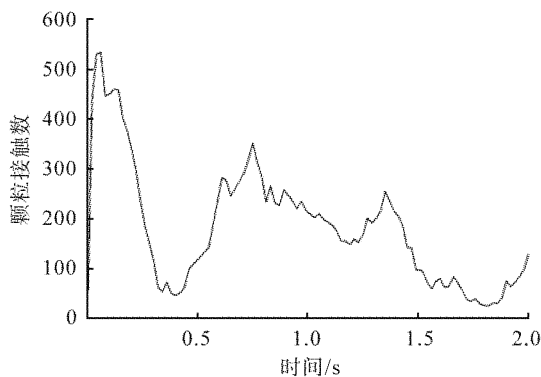


图5 颗粒接触数随时间的变化规律

Fig.5 Changes law of particle overlap and contact with time

2 环模结构的参数优化

环模是环模制粒机的关键零件。在实际生产过程中,周期性接触力作用在环模表面产生应力应变,导致环模容易发生疲劳磨损,成为环模失效变形的根本原因^[20]。模孔孔径、模孔锥角、粉料粒径是环模的3个关键参数,因此,利用 EDEM 和 ANSYS Workbench 联合仿真模拟试验研究关键参数对环模疲劳磨损的影响。将离散元软件 EDEM 对环模的受力分析结果导入 ANSYS Workbench 中,可以清晰地观察到制粒成型过程中不同时刻的环模受力变形云图。不同时刻环模表面的变形量如图 6 所示。由图可见,随着时间的增加,环模表面的变形量逐渐增大,但是环模工作表面及模孔内壁的变形量的分布并不均匀。环模表面及模孔内壁受压引起的变形会影响制粒的质量和效率。

2.1 模孔孔径

环模的孔径过大会导致颗粒松散,影响颗粒的成型质量;环模孔径过小,易造成粉料堵塞,导致工作效率下降,缩短使用寿命,增加生产成本,因此,合理的模孔孔径是保证制粒质量和制粒效率的前提。在实际生产中,环模的孔径以 3~8 mm 为宜,因此,在利用 ANSYS Workbench 后处理功能进行的仿真模拟试验中,环模孔径分别设为 5、6、7 mm,环模孔径对制粒过程中的颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响如表 2 所示。由表可知,随着环模孔径的增大,环模表面的最大变形量、最大应力、最大应变都相应增大,环模的磨损变形情况也随之严重,挤压区颗粒物料的相互挤压作用也随之减弱^[21];当环模孔径为 5 mm 时,制粒效果最好。

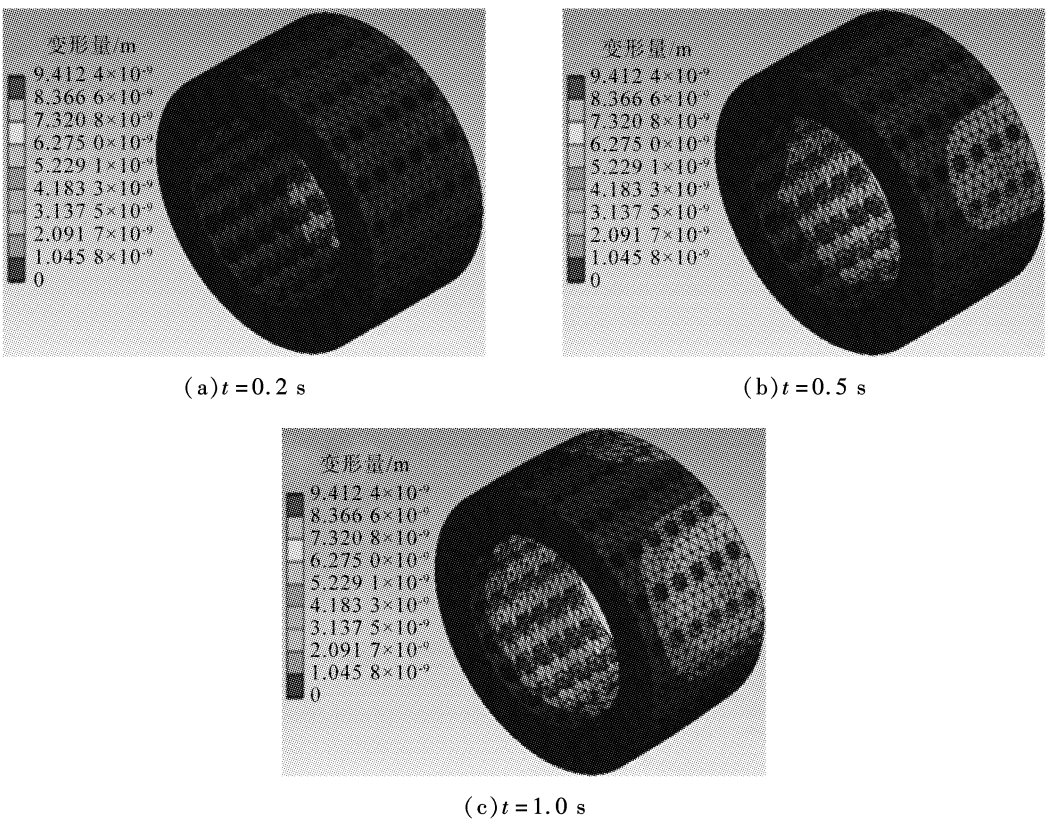


图6 不同时刻环模表面的变形量
Fig.6 Deformation of ring die surface at different times

表2 环模孔径对颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响
Tab.2 Influence of die hole aperture on the maximum deformation, the maximum stress and the maximum strain of particles

模孔孔径/mm	最大变形量/mm	最大应力/kPa	最大应变
5	1.882×10^{-7}	1.455	3.011×10^{-8}
6	1.259×10^{-6}	4.117	8.356×10^{-8}
7	2.406×10^{-6}	4.196	8.317×10^{-7}

2.2 模孔锥角

环模的模孔锥角对颗粒的输入、挤压等过程存在一定的影响^[22],因此,合理的模孔锥角是保证制粒质量和效率的前提。在仿真模拟试验中,将模孔锥角设为45°、60°、75°,模孔锥角对颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响如表3所示。由表可知,与模孔锥角为60°、75°时相比,模孔锥角为45°时环模的最大变形量、最大应力、最大应变最大;随着模孔锥角的增大,环模的磨损变形情况也随之好转;当模孔锥角为75°时,制粒效果最好。

2.3 粉料粒径

秸秆粉料粒径过大时,粉料颗粒与环模的接触应力则会更大,增大了环模表面产生塑性变形的可能性,导致环模表面形成磨损。根据已有的粉体颗粒压缩试验研究结果^[23],秸秆粉料粒径分别设置为0.6、0.8、1.0 mm,粉料粒径对颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响如表4所示。由表可知,与粉料粒径为0.6、0.8 mm时相比,粉料粒径为1.0 mm时颗粒的最大变形量、最大应力、最大应变均处于最大值,发生的磨损变形也最严重;当粉料粒径为0.6 mm时,环模表面的磨损变形较轻微,更适合制粒。

表3 模孔锥角对颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响

Tab.3 Influence of die hole cone angle on the maximum deformation, the maximum stress and the maximum strain of particles

模孔锥角/(°)	变形量最大值/mm	应力最大值/kPa	应变最大值
45	1.214×10^{-5}	7.114	1.385×10^{-6}
60	1.882×10^{-6}	1.455	3.001×10^{-7}
75	3.910×10^{-6}	5.884	1.259×10^{-7}

表4 粉料粒径对颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变的影响

Tab.4 Influence of power particle size on the maximum deformation, the maximum stress and the maximum strain of particles

颗粒粒径/mm	变形量最大值/mm	应力最大值/Pa	应变最大值
0.6	1.475×10^{-6}	407.0	5.446×10^{-8}
0.8	1.546×10^{-6}	302.5	5.852×10^{-8}
1.0	1.910×10^{-6}	560.5	1.089×10^{-7}

综上可知,模孔孔径、模孔锥角、粉料粒径是环模结构的3个关键参数,影响颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变。当环模孔径为5 mm、模孔锥角为75°、粉料粒径为0.6 mm时,环模表面的磨损变形较轻微,制粒质量和制粒效率最佳。

3 结论

环模制粒过程仿真基本还原了实际的制粒过程,揭示了颗粒的速度和所受外力随时间的变化规律,反映了颗粒接触数量随时间的变化情况。在环模、压辊及接触颗粒的共同作用下,秸秆颗粒物料不断地被挤入环模孔中,颗粒物料堆积到极限后发生塑性变形,产生聚合作用而制粒成型,模拟仿真的制粒过程与实际制粒机的颗粒成型过程基本一致,验证了使用离散元软件仿真环模制粒成型过程的可靠性。

1)当颗粒物料经过变形压紧区时,颗粒的速度和所受挤压力随着时间的增加而增大;当颗粒经过模辊间隙时,颗粒的速度和所受挤压力瞬间减小;随着制粒过程的持续进行,颗粒的速度和所受挤压力呈现出周期性的波动状态,秸秆制粒成型过程表现为周期性的循环挤压过程。

2)在制粒过程的初始阶段,由于瞬时填充完成时颗粒相互接触碰撞,发生挤压回弹现象,颗粒接触数量快速增大并出现峰值;随着制粒过程的持续进行,颗粒的接触数量呈现周期性减小的趋势; $t=0.4$ s时,压辊旋转到环模上方时产生间隙,秸秆颗粒模型受压后发生挤压回弹现象,接触数量大幅下降。

3)模孔孔径、模孔锥角、粉料粒径是环模的关键结构参数,影响颗粒的最大变形量、最大应力和最大应变。当环模孔径为5 mm、模孔锥角为75°、粉料粒径为0.6 mm时,环模表面的磨损变形较轻微,制粒质量和制粒效率最佳。

参考文献(References):

- [1]霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等. 秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359.
- [2]肖宏儒,梅松,宋志禹,等. 生物质成型燃料加工关键技术及装备研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 217-221.
- [3]HOLM J K, STELTE W, POSSELT D, et al. Optimization of a multiparameter model for biomass pelletization to investigate temperature dependence and to facilitate fast testing of pelletization behavior[J]. Energy and Fuels, 2011, 25(8): 3706-3711.
- [4]AGAR D A, RUDOLFSSON M, KALEN G, et al. A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 180: 47-55.

- [5] MAZOR A, OREFICE L, MICHRAFY A, et al. A combined DEM & FEM approach for modelling roll compaction process[J]. Powder Technology, 2018, 337: 3–16.
- [6] 丁宁, 李海涛, 闫安, 等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 196–202, 290.
- [7] 刘德军, 高翔, 邱硕, 等. 玉米秸秆制板剩余物压缩成型试验[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 333–341.
- [8] 蒋清海, 孙宇, 肖宏儒, 等. 旋转挤压成型机理分析与建模[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(6): 11–16.
- [9] 李永奎, 孙月铢, 白雪卫. 玉米秸秆粉料单模孔致密成型过程离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 212–217.
- [10] 王伟伟, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 127–134.
- [11] XIA X, SUN Y, WU K, et al. Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and grey correlation analysis method[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 152: 303–309.
- [12] DE X, ZHANG J, YANG Y, et al. Fractal prediction of frictional force against the interior surface of forming channel coupled with temperature in a ring die pellet machine[J]. BioResources, 2021, 16(3): 4780.
- [13] LARSSON S H, AGAR D A, RUDOLFSSON M, et al. Using the macromolecular composition to predict process settings that give high pellet durability in ring-die biomass pellet production[J]. Fuel, 2021, 283: 119267.
- [14] PENG F, XIANG R, FANG F, et al. Analysis of feed pelleting characteristics based on a single pellet press device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(4): 65–70.
- [15] 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.
- [16] CHEN S, DING H, TANG Z, et al. Influence of rice straw forming factors on ring die wear and improved wear prediction model during briquetting[J]. Biosystems Engineering, 2022, 214: 122–137.
- [17] 王咏梅, 黄晓鹏, 吴劲锋. 不同工艺参数下苜蓿草粉环模制粒机流场的模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 267–274.
- [18] CIOLKOSZ D E, HILTON R, SWACKHAMER C, et al. Farm-scale biomass pelletizer performance for switchgrass pellet production[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(4): 559–567.
- [19] 范方宇, 李晗, 邢献军. 温度对玉米秸秆成型颗粒烘焙制备生物炭及其特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 220–226.
- [20] NA R, LIU J, CEN H. Random dynamic analysis of ring die pellet mill[J]. International Journal of Performability Engineering, 2019, 15(2): 362.
- [21] 赵辉, 郭东新, 田河. 环模结构对颗粒料质量和动物生产性能的影响[J]. 饲料研究, 2017(3): 39–42.
- [22] 周亮, 孙宇, 武凯, 等. 环模式秸秆压块机模具有限元分析及锥角优化[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 224–227, 232.
- [23] 霍枫, 常颖, 陆晓霞, 等. 粉体颗粒离心压缩仿真及分析[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(2): 34–43.

(责任编辑:刘鲁宁)