

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.07.034

袁浩, 付天昊, 操文武, 等. 基于 EDEM 的搅拌式粮食烘干筒仓搅拌均匀性研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(7): 241-246

Yuan Hao, Fu Tianhao, Cao Wenwu, et al. Research on mixing uniformity of stirred grain drying silo based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7): 241-246

基于 EDEM 的搅拌式粮食烘干筒仓搅拌均匀性研究^{*}

袁浩¹, 付天昊¹, 操文武², 彭旭东², 蔡健荣³, 李政¹

(1. 江苏大学机械工程学院, 江苏镇江, 212013; 2. 常州市智慧仓储系统工程技术研究中心, 江苏常州, 213353; 3. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江, 212013)

摘要: 针对搅拌式粮食烘干筒仓不同设计及运动参数下设备搅拌效果评价成本高、设备研发周期长的问题, 寻找搅拌式粮食烘干筒仓搅拌装置的最佳设计及运动参数, 基于对单个粮食颗粒在螺旋搅拌器作用下的受力和运动的理论研究, 以稻谷颗粒三维尺寸为基础, 采用多球丛聚法建立稻谷颗粒的多球颗粒模型, 利用离散元仿真软件 EDEM 进行螺旋搅拌器转速、螺距对搅拌均匀性单因素离散元仿真分析。仿真结果表明: 螺旋搅拌器转速越高越有利于均匀性的提高, 在一定范围内适当加大螺距可以提高搅拌均匀性。当螺旋搅拌器转速为 30 r/min、螺距为 110 mm 时, 搅拌变异系数最小为 0.1。样机试验表明: 当螺旋搅拌器转速为 30 r/min、螺距为 110 mm 时, 搅拌均匀性较高, 比原始参数组合的烘干效率高 25%。

关键词: 稻谷颗粒; 烘干; 螺旋搅拌器; 搅拌均匀性; 离散单元法; EDEM 软件

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 07-0241-06

Research on mixing uniformity of stirred grain drying silo based on EDEM

Yuan Hao¹, Fu Tianhao¹, Cao Wenwu², Peng Xudong², Cai Jianrong³, Li Zheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China; 2. Changzhou Intelligent Storage System Engineering Technology Research Center, Changzhou, 213353, China; 3. School of Food and Bioengineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost and long research and development period of equipment stirring effect evaluation under different design and movement parameters of stirred grain drying silo, in order to find the best design and motion parameters of the stirred grain drying silo stirring device, based on the theoretical study of the force and motion of a single grain particle under the action of a spiral agitator, the multi-sphere cluster method was used to establish a multi-sphere particle model of rice particles on the basis of the measured three-dimensional dimensions of rice particles, and the single factor discrete element simulation analysis of screw agitator speed and pitch on mixing uniformity was carried out by using the discrete element simulation software EDEM. The results showed that the higher the rotational speed of the spiral agitator, the better the uniformity, and the better the uniformity could be improved by increasing the pitch in a certain range. Comprehensive analysis shows that when the spiral agitator speed is 30 r/min and the pitch is 110 mm, the minimum stirring variation coefficient is 0.1. The accuracy of the simulation results was verified by the prototype test. The results showed that when the screw agitator speed was 30 r/min and the pitch was 110 mm, the stirring uniformity was higher, and the drying efficiency was increased by 25% compared with the original parameter combination.

Keywords: rice particles; dry; spiral agitator; mixing uniformity; discrete element method; EDEM software

0 引言

稻谷是我国主要的粮食作物之一, 播种面积占全

国粮食作物的 1/4。据国家统计局数据, 2024 年我国稻谷产量高达 2.08×10^5 kt。刚收获的稻谷含水率较高, 必须通过干燥处理将其水分降低至安全水分以下

收稿日期: 2023 年 11 月 29 日 修回日期: 2024 年 2 月 4 日

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975259)

第一作者 (通讯作者): 袁浩, 男, 1975 年生, 江苏丰县人, 博士, 副教授; 研究方向为非标自动化、机器视觉。E-mail: 285817681@qq.com

才能进行储藏,若干燥不及时或者干燥后水分达不到要求,就会发芽霉变,造成浪费^[1]。

随着我国农业机械化水平的提高,各类烘干设备不断发展,稻谷的干燥方式也呈现出多样性,包括热风干燥、低温真空干燥、红外辐射干燥等。实际生产中,为满足成本低廉和大批量烘干处理需求,主要的干燥方式仍是热风干燥^[2]。其中,以大型塔式混流粮食烘干机应用最为广泛。

目前,对粮食烘干设备的研究主要集中在大型塔式混流粮食烘干机。段二亚^[3]通过 Fluent 软件分析了粮食干燥介质的温度、速度、湿度和粮食干燥的时间对干燥过程的影响,以及粮食干燥机中角状盒的位置、数量和截面形状对干燥过程的影响。骆恒光等^[4]基于变径角状管,建立了稻谷在干燥段内流动速率比的理论表达。陈正发^[5]采用三维激光扫描技术准确全面地提取稻谷颗粒三维尺寸,通过 EDEM 软件分析得出了稻谷在四向通风干燥段内的流动特性。Nattapol 等^[6]通过试验对稻谷的热风干燥特性进行研究,并论述了缓苏环节的重要作用。Weigler 等^[7, 8]通过 EDEM 软件并结合高速摄影图像处理技术,对稻谷颗粒在粮食干燥机中的流速分布情况及其在各个区域的下落及停留时间等进行分析。

搅拌式粮食烘干筒仓中的搅拌装置可以使上、下层的粮食充分混合,因此搅拌式粮食烘干筒仓能够解决传统塔式混流粮食烘干机稻谷流动换向单一、受热不均和稻谷整体干燥均匀性较差的问题^[9]。在粮食搅拌装置研究方面,张来林等^[10]设计一种用于处理结霜粮层的翻粮机,并重点研究了使用翻粮机对仓储粮品质的影响,结果表明,与人工作业相比,该机能改善粮堆通透性、消除结霜层、提高工作效率。靳航嘉等^[11]建立了搅拌翻粮机的关键参数计算模型,由此计算出适用于不同粮食物料的参数匹配关系。潘爱琼等^[12]针对我国现有翻粮机自动化程度低的问题,设计了一种全自动的履带式翻粮机,并对绞龙翻粮机构的直径、螺距进行了计算。综上,目前对粮食搅拌翻动装置的研究多停留在理论计算与设计上,缺少对搅拌过程中内部粮食颗粒搅拌均匀性的研究。

基于此,本文以稻谷颗粒三维尺寸为基础,通过多球丛聚法建立稻谷颗粒的离散元模型,利用 EDEM 软件对稻谷颗粒在搅拌式烘干筒仓内的搅拌均匀性进行仿真研究,分析探讨螺旋搅拌器的自转速度和螺距对稻谷颗粒混合程度的影响,以为后期搅拌式粮食烘干筒仓搅拌装置的优化设计提供参考,对提高稻谷热风干燥品质及减少粮食损失具有重要意义。

1 搅拌装置结构与工作原理

搅拌装置由斜齿轮减速电机、仓顶连接装置、行走梁、减速电机平衡管、减速电机、大小带轮、固定板、电机安装板、螺旋搅拌器、滚轮等组成,如图 1 所示。

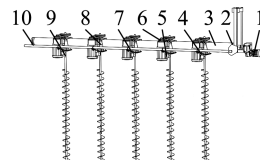


图 1 搅拌装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of mixing device

1. 斜齿轮减速电机 2. 仓顶连接装置 3. 行走梁 4. 减速电机平衡管
5. 减速电机 6. 带轮 7. 稳定臂 8. 电机安装板
9. 螺旋搅拌器 10. 滚轮

搅拌作业过程中,行走梁由斜齿轮减速电机驱动,在末端滚轮的配合下沿筒仓内壁上的环形轨道行走。减速电机插装在电机固定板上,两块电机固定板除自身夹紧固定在行走梁上外,同时依靠底部的稳定臂安装在减速电机平衡管上,防止搅拌过程发生位移。螺旋搅拌器在减速电机的带动下转动,通过大小带轮和皮带改变其转速。谷堆内部的稻谷通过螺旋叶片向上输送至谷堆外部进行搅拌,待鼓风干燥阶段和缓苏阶段完成后,斜齿轮减速电机断电,搅拌装置停止工作。

2 EDEM 仿真模型建立

2.1 搅拌装置仿真模型建立

由于实际搅拌装置中螺旋搅拌器长度较长且计算机算力有限,在有限时间内无法按照实际的螺旋搅拌器长度跟稻谷颗粒装机量完成模拟,因此,截取螺旋搅拌器部分长度进行模拟。在 SolidWorks 中建立螺旋搅拌器的简化三维模型,只保留核心结构。同时,根据所截取螺旋搅拌器的长度和实际外径的大小建立圆柱形开口容器,螺旋搅拌器处于容器中心位置,保存为 igs 格式,导入到 EDEM 软件中。另将导入的螺旋搅拌器螺杆与叶片通过前处理器中的 Merge Geometry 功能合并为一个整体,便于材料属性的设置。

2.2 稻谷三维模型建立

颗粒模型与实物的接近程度是影响仿真效果的重要因素之一,在建模时应尽可能逼近实物的形状与大小。轴向尺寸法是常用的表示农业物料形状与大小的方法之一,该方法适用于尺寸较小的农业物料,如稻谷等。因此,选择用轴向尺寸法通过长、宽、厚 3 个轴向尺寸来表示稻种颗粒的形状和大小^[13]。选用江苏普遍种植的水稻品种“南粳 9108”作为试验样本,随机选取 100 粒去芒粒径均匀的稻谷,利用测量精度为 0.02 mm 的游标卡尺测量稻谷颗粒的三轴尺寸,尺寸

参数如表 1 所示。

表 1 稻谷颗粒的三轴尺寸
Tab. 1 Triaxial dimensions of rice grains mm

参数	最大值	最小值	均值
长度	7.26	5.42	6.36
宽度	3.78	2.94	3.42
厚度	3.62	3.04	3.20

稻谷颗粒可以近似看作椭球体,而 EDEM 软件中颗粒模型的基本单位为圆球,故采用多球丛聚法建立稻谷几何模型,由直径为 0.65~1.5 mm 的 7 个圆球堆积而成,稻谷颗粒模型如图 2 所示^[14]。



图 2 稻谷颗粒模型
Fig. 2 Grain model of rice

2.3 材料接触模型与物料颗粒参数

材料接触模型的选择是进行离散元仿真的关键步骤。考虑到刚收获的稻谷颗粒表面含水量少且颗粒之间没有明显的黏结作用和团聚现象,属于常规的颗粒间接触作用,所以在螺旋搅拌机对稻谷颗粒搅拌的仿真研究中,稻谷颗粒与稻谷颗粒、稻谷颗粒与螺旋搅拌机几何体之间的接触模型均采用 Hertz-Mindlin(no slip)力学接触模型。设置几何体材料为不锈钢 SU304,与实际几何体材料一致,查阅相关文献^[15-17]可得,材料本征参数与材料间接触参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 材料本征参数
Tab. 2 Material intrinsic parameter

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
稻谷	0.3	2×10 ⁶	1 380
不锈钢	0.285	8×10 ¹⁰	7 930

表 3 材料间接触参数
Tab. 3 Contact parameters between materials

参数	泊松比	静摩擦系数	滚动摩擦系数
稻谷—稻谷	0.43	0.75	0.01
稻谷—不锈钢	0.5	0.4	0.02

3 仿真试验与分析

3.1 仿真试验设计

仿真试验开始前,在 SolidWorks 中建立一个外径比圆柱形开口容器内径略小、内径比螺杆直径略大的几何体,保存为 igs 格式后导入 EDEM 软件中,设置于螺旋搅拌机顶端作为颗粒工厂。颗粒大小服从正态分

布,在颗粒工厂中将稻谷颗粒的生成方式设置为动态生成,生成位置随机。为加快稻谷颗粒生成速度,设置颗粒下落的速度为-2 m/s;设置颗粒总数为 170 000 个,颗粒生成速率为 2 575 个/s,当所有颗粒生成完毕后螺旋搅拌机开始旋转。Rayleigh 时间步长为 30%,总仿真时间设置为 160 s。同时,以最小颗粒尺寸的 3 倍为基础网格尺寸,对几何模型整体进行网格划分,共计 1 447 200 个网格。

3.2 仿真试验指标

仿真完成后,在 EDEM 后处理模块中将稻谷颗粒层下层颗粒标记为黄色,上层颗粒标记为红色,设置 Grid Bin Group 网格,将仿真区域划分为 5×5×20 共计 500 个网格体,剔除个数较少的网格,以保证网格的有效性。通过分析计算稻谷颗粒混合的变异系数来反映稻谷颗粒混合均匀与否。变异系数越小,离散程度越高,稻谷颗粒混合越均匀,其计算如式(1)~式(3)所示。

$$C = \frac{S}{\bar{\epsilon}} \times 100\% \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2}{n - 1}} \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n} \tag{3}$$

其中, $\epsilon_i = \frac{a_i}{A}$, $A = \frac{X}{Z}$, $a_i = \frac{x_i}{z_i}$, $z_i = x_i + y_i$, $Z = X + Y$ 。

- 式中: X——黄色稻谷颗粒的总数量;
Y——红色稻谷颗粒的总数量;
Z——稻谷颗粒的总数量;
 x_i ——第 i 个网格内黄色稻谷颗粒的数量;
 y_i ——第 i 个网格内红色稻谷颗粒的数量;
 z_i ——第 i 个网格内稻谷颗粒的总数量;
 a_i ——第 i 个网格中黄色稻谷颗粒所占比例;
A——黄色稻谷颗粒的总数量占稻谷颗粒总数量的比例;
 ϵ_i ——第 i 个网格内的混合均匀度;
 n ——统计网格的数量;
 $\bar{\epsilon}$ ——混合均匀度的平均值;
S——黄色稻谷颗粒的标准差;
C——变异系数。

3.3 搅拌单因素仿真试验与结果分析

对稻谷颗粒的运动产生关键影响作用的因素为螺旋搅拌器的自转速度与叶片螺距^[18]。

3.3.1 螺旋搅拌器转速对搅拌均匀性的影响

为研究螺旋搅拌器转速对搅拌效果的影响,在 65 mm 螺距下,螺旋搅拌器转速为 15 r/min、30 r/min、45 r/min 的搅拌过程进行仿真分析。70~160 s 为螺旋搅拌器的搅拌过程,整个过程持续 90 s,如图 3 所示,分别截取不同转速下,92.5 s、115 s、135.5 s 和 160 s 时刻稻谷颗粒的分布情况。

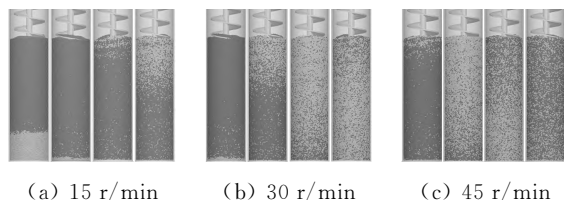


图 3 不同螺旋搅拌器转速下稻谷颗粒的分布图

Fig. 3 Distribution of rice particles at different rotational speeds

图 4 为螺旋搅拌器转速为 15 r/min、30 r/min、45 r/min 时,稻谷颗粒的平均角速度随时间的变化情况。螺旋搅拌器转速为 15 r/min、30 r/min、45 r/min 时对应的平均角速度的平均值分别为 7.4 rad/s、9.3 rad/s、14.6 rad/s,稻谷颗粒的平均角速度以及平均角速度的变化幅度随螺旋搅拌器转速的增大而增大。侧面说明增大转速可以使稻谷颗粒的混合作用增强,搅拌均匀性提高,有利于稻谷颗粒干燥均匀,提高烘干品质^[19]。

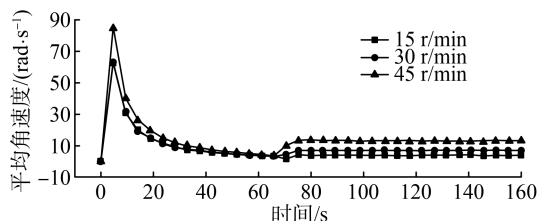


图 4 不同螺旋搅拌器转速下稻谷颗粒平均角速度的变化曲线

Fig. 4 Average angular velocity of rice grains at different rotational speeds curve of change

图 5 为螺旋搅拌器转速为 15 r/min、30 r/min、45 r/min 时,变异系数随时间的变化情况。

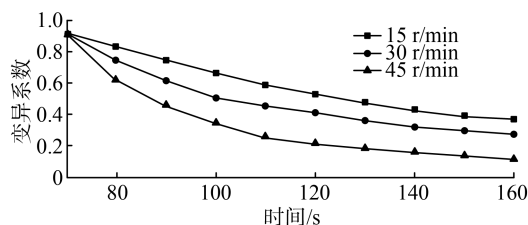


图 5 不同螺旋搅拌器转速下稻谷颗粒变异系数的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of rice particle variation coefficient under different rotational speed

由图 5 可以看出,70 s 时上、下层稻谷颗粒未被搅拌,初始变异系数均为 0.91,搅拌开始后,随着搅拌时间的增加,变异系数先快速下降,且转速越大,变异系

数下降越快,之后下降速率降低。螺旋搅拌器转速为 15 r/min、30 r/min、45 r/min 时,稻谷颗粒的变异系数分别降低至 0.37、0.27、0.11。主要原因:在搅拌初期对流运动起主要作用,颗粒层的不均匀性快速降低,达到宏观上的搅拌均匀;后期对流作用降低,扩散和剪切运动起主要作用,与前者相比,后者作用效果较弱,稻谷颗粒只在小范围内随机移动^[20]。随着螺旋搅拌器转速的提高,螺旋搅拌器对稻谷颗粒扰动性增强,颗粒运动更加剧烈,所以螺旋搅拌器转速越高,搅拌结束时变异系数越低。

3.3.2 螺旋搅拌器螺距对搅拌均匀性的影响

为研究螺旋搅拌器螺距对搅拌效果的影响,在 30 r/min 转速下,螺距为 65 mm、115 mm、155 mm 的螺旋搅拌器的搅拌效果进行仿真分析,如图 6 所示,截取不同螺距下,92.5 s、115 s、135 s 和 160 s 时刻稻谷颗粒的分布情况。

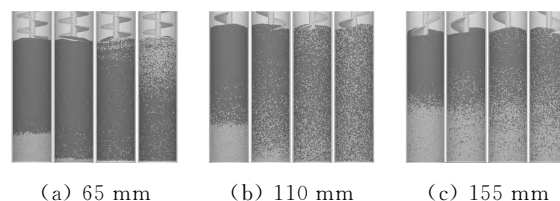


图 6 不同螺距下稻谷颗粒的分布图

Fig. 6 Distribution of rice particles under different pitch

图 7 为螺旋搅拌器螺距为 65 mm、110 mm、155 mm 时,稻谷颗粒的平均角速度随时间的变化情况。螺距为 65 mm、110 mm、155 mm 时对应的平均角速度的平均值分别为 9.3 rad/s、11 rad/s、10.7 rad/s,稻谷颗粒的平均角速度在一定的范围内随螺旋搅拌器螺距的增大而增大,但是当螺距过大时平均角速度有降低的趋势。从侧面说明螺距过大不利于搅拌均匀性的提高。

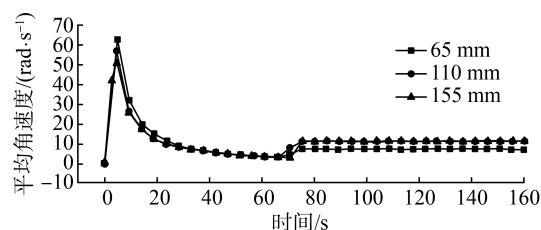


图 7 不同螺距下稻谷颗粒平均角速度的变化曲线

Fig. 7 Average angular velocity of rice grains under different pitch curve of change

图 8 为螺旋搅拌器螺距为 65 mm、110 mm、155 mm 时,变异系数随时间的变化情况。可以看出,70 s 时上、下层稻谷颗粒未被搅拌,初始值均为 0.91,70 s 后变异系数先快速下降,之后下降速率降低,最终,螺距为 65 mm、110 mm、155 mm 时稻谷颗粒的变异系数分别降低至 0.27、0.1、0.34。适当增加螺距,

有利于提高搅拌均匀性,但螺距过大时搅拌均匀性降低。主要原因:螺距过大时,由上、下叶片间的颗粒相向运动而产生的湍流区域数量减少,使得颗粒受到的扰动作用降低,因此搅拌效果不佳^[21]。

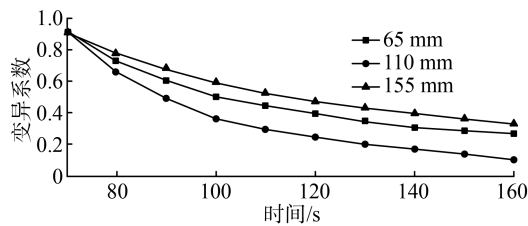


图 8 不同螺距下稻谷颗粒变异系数的变化曲线
Fig. 8 Variation curve of rice grain variation coefficient under different pitch

综上,在确保搅拌均匀性的前提下,综合考虑设备工作时的经济性等其他因素,最终确定螺旋搅拌器的最佳设计及运动参数:转速为 30 r/min、螺距为 110 mm。

4 样机试验与结果分析

由于工况的特殊性,不便对装机量巨大的稻谷层分为上、下层进行染色,同时也无法直接对筒仓内部设置网格统计搅拌的变异系数,而搅拌均匀性是影响烘干效率的关键因素。因此,通过与优化前 15 r/min 转速、65 mm 螺距的参数组合设置对照组,记录分析烘干效率,从侧面验证最佳设计及运动参数的正确性。

2023 年 10 月,在溧阳市某农业公司开展样机试验,以螺距为 110 mm 制造螺旋搅拌器,转速设定为 30 r/min,选用与仿真同品种的“南粳 9108”作为试验样本。图 9(a)为 110 mm 螺距的螺旋搅拌器,图 9(b)为待装配的搅拌装置,具体试验参数设置如表 4 所示。



(a) 螺旋搅拌器 (b) 待装配的搅拌装置

图 9 搅拌均匀性试验
Fig. 9 Mixing uniformity test

表 4 试验参数
Tab. 4 Test parameter

转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	螺距 /mm	入库量 /t	风速 ($m \cdot s^{-1}$)	通风温度 / $^{\circ}C$
15	65	20	10	45
30	110			

记录两次入库前的稻谷水分,每天取仓内适量的稻谷测量仓内稻谷水分含量的变化,如图 10 所示。根

据江苏省粮食和物资储备局 2022 年的指导文件,粳稻安全储藏水分不应高于 15%。由图 10 可知,当螺旋搅拌器转速为 15 r/min、螺距为 65 mm 时,入仓第 8 天稻谷含水率为 14.97%,达到储藏的含水率要求;当螺旋搅拌器转速为 30 r/min、螺距为 110 mm 时,由于搅拌效果更明显,稻谷层更加疏松,间隙率增大,从而增大热风与稻谷的接触面积,在入仓第 6 天稻谷含水率为 14.81%,达到储藏的含水率要求,烘干效率提高 25%。

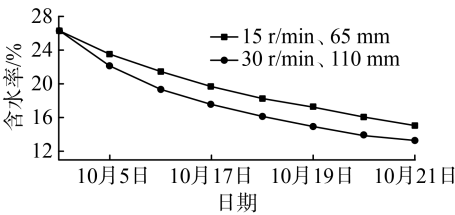


图 10 不同参数组合下稻谷含水率的变化曲线
Fig. 10 Change curve of water content of rice under different parameter combination

综上,采用最佳设计及运动参数作业后,搅拌均匀性提高,稻谷烘干效率明显提高,仿真结果真实可靠。

5 结论

在利用多球丛聚法建立稻谷颗粒多球颗粒模型的基础上,采用离散单元法利用 EDEM 软件构建稻谷颗粒搅拌模型。在不同的螺旋搅拌器转速、螺距条件下,以变异系数为主要评价指标,综合考虑稻谷颗粒的平均角速度,对稻谷颗粒在搅拌过程中的混合情况进行研究。

1) 仿真试验结果表明,当螺旋搅拌器转速为 30 r/min、螺距为 110 mm 时,变异系数为 0.1,稻谷颗粒层搅拌均匀性最好,搅拌装置作业效果最佳。

2) 样机试验结果表明,当螺旋搅拌器转速为 30 r/min、螺距为 110 mm 时,所需要的烘干时间由原来的 8 天缩短至 6 天,烘干效率提高 25%,烘干效率明显提高,仿真结果与结论真实可靠。

参 考 文 献

[1] 毕文雅, 张来林, 郭桂霞. 我国粮食干燥的现状与发展方向[J]. 粮食与饲料业, 2016(7): 12—15.
Bi Wenya, Zhang Lailin, Guo Guixia. Current situation and development direction of grain drying in China [J]. Grain & Feed Industry, 2016(7): 12—15.
[2] 常蕊, 赵毅, 刘育京. 粮食干燥机械化技术发展现状[J]. 农业机械, 2017(10): 81—83.
[3] 段二亚. 粮食干燥过程的数值模拟及实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
[4] 骆恒光, 李长友, 张永博. 5HP—25 型粮食干燥机设计与

- 试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 279—289.
- Luo Hengguang, Li Changyou, Zhang Yongbo. Design and experiment study of 5HP—25 type grain dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 279—289.
- [5] 陈正发. 稻谷四向通风混流干燥段数值模拟与结构优化[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2022.
- [6] Nattapol P, Somchart S, Somkiat P, et al. Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidisation technique [J]. Drying Technology, 2010, 20 (1): 195—210.
- [7] Weigler F, Scaar H, Mellmarn J. Investigation of particle and air flows in a mixed-flow dryer [J]. Drying Technology, 2012, 30(15): 1730—1741.
- [8] Weigler F, Mellmarn J, Franke G, et al. Experimental studies on a newly developed mixed-flow dryer [J]. Drying Technology, 2013, 31(15): 1736—1743.
- [9] 陈武东, 车刚, 温海江, 等. 塔式混流粮食干燥机双向送风交变式干燥段设计[J]. 农业科技与装备, 2017(5): 20—22.
- [10] 张来林, 韩志强, 吕建华, 等. 一种用于处理结露粮层的翻粮机[J]. 粮食储藏, 2012, 41(2): 44—46.
- [11] 靳航嘉, 李永祥, 王明旭. 自动化翻粮机关键参数的设计研究[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(2): 75—78.
- [12] 潘爱琼, 张志永. 履带式翻粮机的结构设计[J]. 成组技术与生产现代化, 2021, 38(3): 34—36.
- [13] 李小利. 勺式取种与活塞扎穴组合式水稻排种器研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [14] 郭柄江. V形槽中稻米和茎秆分离行为的离散元模拟与试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
- [15] 赵磊. 基于 DEM—CFD 耦合的稻米清选模拟研究与试验[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
- [16] 陆宜康. 糯米藕振动式高速自动灌米设备的研发[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [17] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294—300.
- Liu Cailing, Wang Yali, Song Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (15): 294—300.
- [18] 陈明. 基于散体力学的翻麦机关键技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [19] 刘攀笏, 马莉, 曾德望, 等. 基于 EDEM 的双螺旋反应器内物料运动与混合特性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 343—349.
- Liu Panhu, Ma Li, Zeng Dewang, et al. Study on motion and mixing characteristics of material in twin-screw reactor based on EDEM [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(10): 343—349.
- [20] 刘扬, 曹昕昕, 兰海鹏, 等. 搅拌工艺参数对糙米混合特性影响的数值模拟[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15): 214—217.
- [21] 吴硕. 番茄秸秆混料立式螺旋带式混合方法及性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.

(上接第 232 页)

- Li Shuqin, Chen Cong, Zhu Tong, et al. Plant leaf disease identification based on lightweight residual network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 243—250.
- [21] 章权兵, 胡姗姗, 舒文灿, 等. 基于注意力机制金字塔网络的麦穗检测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 253—262.
- Zhang Quanbing, Hu Shanshan, Shu Wencan, et al. Wheat spikes detection method based on Pyramidal Network of attention mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 253—262.
- [22] 陈智超, 焦海宁, 杨杰, 等. 基于改进 MobileNetV2 的垃圾图像分类算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8): 1490—1499.
- Chen Zhichao, Jiao Haining, Yang Jie, et al. Garbage image classification algorithm based on improved MobileNetV2 [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55 (8): 1490—1499.
- [23] Yao L, He S, Su K, et al. Facial expression recognition based on spatial and channel attention mechanisms [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 125 (2): 1483—1500.
- [24] Zhao X, Li K, Li Y, et al. Identification method of vegetable diseases based on transfer learning and attention mechanism [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106703.
- [25] 杨晶晶, 韩闰凯, 吴占福, 等. 基于 CNN 和图像深度特征的雏鸡性别自动鉴别方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 258—263, 92.
- Yang Jingjing, Han Runkai, Wu Zhanfu, et al. Automatic recognition method of chick sex based on convolutional neural network and image depth features [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 258—263, 92.
- [26] 朱明, 张镇府, 黄凰, 等. 基于轻量级神经网络 MobileNetV3—Small 的鲈鱼摄食状态分类[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 165—172.
- Zhu Ming, Zhang Zhenfu, Huang Huang, et al. Classification of perch ingesting condition using lightweight neural network MobileNetV3—Small [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 165—172.