

平房仓仓底余粮清扫装置传送 及收集仿真研究

Simulation research on the transfer and collection part of warehouse bottom surplus grain cleaning device

何颖臻¹ 王明旭^{1,2} 王巍³ 李淑博³

HE Yingzhen¹ WANG Mingxu^{1,2} WANG Wei³ LI Shubo³

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工业大学河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 中央储备粮滨州直属库有限公司, 山东 滨州 256600)

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Grain and Oil Storage Construction and Safety, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Central Reserve Grain Binzhou Direct Warehouse Co., Ltd., Binzhou, Shandong 256600, China)

摘要:目的:验证针对平房仓仓底余粮而设计的清扫装置的传送部分和收集部分结构设计是否合理,并确定装置运行的关键参数,避免造成采购和制造方面的浪费。**方法:**基于离散元法采用 EDEM 仿真软件,对传送部分和收集部分的运行效果进行仿真,以洒落率为评价参数。**结果:**在保证传送部分和收集部分都能满足设计要求的情况下,波纹挡边带的最佳运行速度应控制在 0.6~0.8 m/s。**结论:**该余粮清扫装置传送部分和收集部分的结构符合设计要求。

关键词:余粮;波纹挡边带;EDEM;物料传送

Abstract: Objective: To verify whether the structure design of the conveying part and the collecting part of the cleaning device designed for the surplus grain at the bottom of the cottage warehouse is reasonable, and to determine the key parameters of the device operation, so as to avoid the waste of procurement and manufacturing. **Methods:** Based on discrete element method, EDEM simulation software was used to simulate the operation effect of the transfer part and the collection part, and the drop rate was used as the evaluation parameter. **Results:** Through the

observation and analysis of the simulation results, it was concluded that the optimal running speed of the corrugated flange belt should be controlled between 0.6 m/s and 0.8 m/s under the condition that the transmission and collection parts could meet the design requirements. **Conclusion:** The simulation study verifies that the structure of the transfer part and the collection part of the surplus grain cleaning device meets the design requirements, and can provide a reference for the design of the equipment for the transfer and collection of grain materials.

Keywords: surplus grain; corrugated guard belt; EDEM; material transfer

基金项目:国家重点研发项目(编号:2018YFD0400704);河南省科技厅重点科技攻关项目(编号:182102210096);河南省青年骨干教师(编号:2020GGJS088);河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室开放课题(编号:2021KF-B02)

作者简介:何颖臻,男,河南工业大学在读硕士研究生。

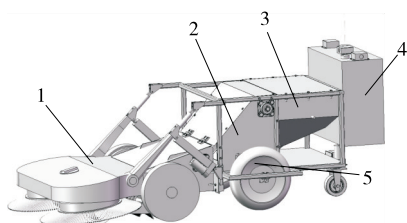
通信作者:王明旭(1980—),男,河南工业大学副教授,博士。

E-mail: wmx20032002@163.com

收稿日期:2023-05-23 **改回日期:**2023-11-17

平房仓储粮为中国最主要的储粮方式,但其结构特点不太适宜散粮的自动化进出,且粮食仓储条件短时间内较难改变。在使用大型出仓设备后,平房仓仓底会剩下薄薄一层粮食,大型设备无法清扫,易造成粮食浪费和影响下一轮粮食入仓。人工清扫需要大量工人、时间,且存在一些不确定因素和安全隐患,不利于当前粮食仓储物流整体实现标准化、智能化、集成化和专业化,影响智慧粮食仓储物流的升级进程。因此,针对平房仓仓底余粮清扫缺乏专业化清扫设备的问题,并充分考虑机械装备在粮库中工作的限制,研究设计了一种针对平房仓仓底余粮的清扫装置。该余粮清扫装置(图1)主要由清扫部分、传送部分、收集部分、控制部分和行走部分组成。

研究主要对余粮清扫装置的传送部分和收集部分进行仿真分析,通过观察仿真结果验证结构设计和关键参数是否满足功能需求。在传送部分仿真中,通过改变波



1. 清扫部分 2. 传送部分 3. 收集部分 4. 控制部分 5. 行走部分

图 1 余粮清扫装置三维设计图

Figure 1 Surplus grain cleaning device 3D design

纹挡边带的运行速度,观察不同运行速度下物料输送情况,从而确定波纹挡边带合理运行速度范围。根据所确定的速度范围指导电机和减速器的选型和购买,以免造成不必要的采购浪费。收集部分仿真的目的主要是确定收粮盒的最大容量,并检验收粮盒设计是否合理。当收粮盒挡片抬起后,收粮盒内粮食物料是否能全部卸出,大约需要多长时间,以为后续的自动控制提供依据。

1 仿真研究方法

1.1 离散元法概述

离散元法自 1979 年被美国 Cundall 教授提出以来,已从散体力学、岩土工程和地质工程等工程应用领域拓展至散状物料、粉体工程等领域^[1-4]。其与有限元法和计算流体力学构成了目前世界上主流的 3 种分析物质系统动力学问题的数值计算方法。离散元法最核心的思想是通过大量的颗粒单元来模拟实际的研究对象,通过求解每一个颗粒的运动状态来反映实体结构或者微观结构的力学行为。离散单元法也将区域划分成单元。但是单元因受节理等不连续面控制,在后续运动过程中,单元节点可以分离,即一个单元与其邻近单元可以接触,也可以分开。

离散元法的一般求解过程为先将求解空间离散为离散元单元阵,并根据实际问题采用多种接触模型将相邻单元连接起来^[5-10]。由于单元间相对位移是基本变量,由力与相对位移的关系可得到单元间法向和切向的作用力。然后对单元在各个方向上与其他单元间的作用力以及其他物理场对单元作用所引起的外力求合力和合力矩,根据牛顿运动第二定律求得单元的加速度。最后对其进行时间积分,得到单元的速度和位移。从而得到所有单元在任意时刻的速度、加速度、角速度、线位移和转角等物理量^[11-13]。

离散元法也有一定局限性。离散元法在数值模拟时通常需要迭代计算至少 10^7 次,使得迭代计算量非常大。且离散元模拟过程中,通常都是赋予颗粒接触参数和接触模型来进行计算,使得其表现出的宏观力学性质和实际材料的宏观力学性质相匹配,而这种堆积模型的宏观力学性质和单元力学参数间的关系是不明确的,需进行

大量的调试实现二者的匹配。现代工程中常常面临多场和多相耦合的问题,如流固耦合、热固耦合,而这些问题在离散单元法中实现的理论还不够完善,一定程度上限制了离散单元法的应用范围。

1.2 离散元软件

研究采用的离散元仿真分析软件为 EDEM (expectation-driven event monitoring),为全世界第一款离散元仿真软件,也是目前中国最常用的,且大量试验已验证了其仿真结果的可靠性。EDEM 软件主要由三大模块组成:模型创建模块、仿真求解模块和数据分析模块。模型创建模块主要负责设定物理模型、重力和材料,定义颗粒特性,定义或导入几何体,设定几何体特征和颗粒工厂参数。仿真求解模块负责设定时间步长、仿真时间和网格属性。最后通过数据分析模块得到所需要颗粒的速度、应力等信息,并分析处理信息、生成图表。

2 离散元仿真参数的确定

在使用离散元软件进行分析前,先要确定被仿真物料的基本参数和物料与物料之间、物料与其他材料之间的接触参数,包括物料的颗粒大小、密度、泊松比和剪切模量,碰撞恢复系数、静摩擦系数和动摩擦系数等接触参数。

通过查找相关粮食颗粒数据,玉米籽粒^[14]、大豆^[15]、糙米^[16]的密度大约为 $1\,197, 1\,228, 1\,800\text{ kg/m}^3$ 。由于玉米籽粒的密度相较于其他粮食物料的低,且单个种子颗粒较大,在相同总质量下拥有更大的体积。玉米籽粒的这些特点有益于检验在极端条件下传送部分和收集部分能否满足设计要求,且玉米籽粒与接触材料橡胶带、有机玻璃和不锈钢的相关接触参数标定和研究较为丰富,便于查找使用且准确性较高。同时较大的颗粒直径能减少仿真计算的颗粒总数,减轻仿真计算硬件压力和节省仿真时间。因此,试验仿真物料的参数将以玉米籽粒为基础。

根据 Zhou 等^[17]对玉米籽粒 DEM 参数标定的研究,玉米籽粒的休止角主要由玉米籽粒之间的动摩擦系数决定,并通过试验证明了玉米籽粒相互之间和玉米籽粒与接触边界之间的接触参数与玉米籽粒形状无关。由于试验仿真主要从宏观现象上验证结构设计的合理性和关键性能参数的确定,且在其他参数确定的情况下,颗粒形状对仿真结果影响较小,为减小仿真计算量,将玉米籽粒简化为球体进行仿真计算。根据文献^[18-19]对玉米籽粒形状尺寸的统计,试验仿真采用直径为 8.23 mm 的球体作为玉米籽粒仿真模型。

试验仿真所需参数包括玉米籽粒、橡胶带、有机玻璃和不锈钢的物料参数及其相互之间的接触参数,通过查阅相关标定文献^[19-25],其主要仿真参数见表 1 和表 2。

表 1 物理参数设置

Table 1 Physical parameter setting

材料	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/Pa
玉米籽粒	0.40	1 197	1.37×10^8
橡胶带	0.48	1 380	1.00×10^9
不锈钢	0.28	8 000	7.50×10^{10}
有机玻璃	0.35	1 200	1.30×10^9

表 2 接触参数设置

Table 2 Contact parameter setting

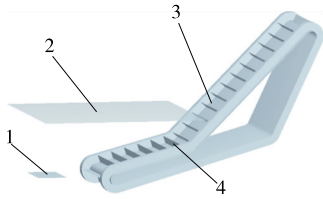
接触材料	碰撞恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
玉米籽粒—玉米籽粒	0.233	0.182	0.051 0
玉米籽粒—橡胶带	0.711	0.784	0.035 0
玉米籽粒—有机玻璃	0.621	0.459	0.093 1
玉米籽粒—不锈钢	0.672	0.334	0.062 4

3 传送部分仿真结果及分析

通过粮库实地调研,平房仓仓底余粮密度范围为 0.55~2.45 kg/m²,且 80% 以上区域的物料量低于 1.30 kg/m²。因此,确定余粮清扫装置前进速度为 0.8 m/s,清扫宽度为 1 m,且假设清扫装置的整体清扫率能达到 100%,通过计算将传送部分仿真生成颗粒的速率定为 1 kg/s 较为合适。同时为验证传送部分在清扫高密度区域后,由于物料量的突然增加,传送部分是否还能满足粮食物料的高效输送和再次恢复到平稳工作状态,在仿真过程中将突然增加输送物料量,将生成颗粒的速率短时间变为 2 kg/s,之后立刻恢复到 1 kg/s,观察仿真结果的变化。

根据对收集部分的收粮盒体积估算,其大约能收集 10 kg 以上物料,因此将仿真过程中物料总质量定为 11 kg。仿真时间设计为 15 s,前 2 s 为波纹挡边带生成时间,使物料落入前形成完整的波纹挡边带结构并以规定速度稳定运行;2 s 后颗粒工厂开始以 1 kg/s 的速度生成质量为 5 kg 的物料;7 s 后颗粒工厂开始以 2 kg/s 的速度生成质量为 1 kg 的物料,用来模拟突然清扫过高密度物料区域;7.5 s 后颗粒生成速度恢复到 1 kg/s,生成质量为 5 kg 的物料,观察在清扫过高密度物料区域后能否恢复到稳定输送状态;最后 2.5 s 将已生成的物料全部输送完成,仿真结束。

传送部分的仿真模型(图 2)主要由 4 个构件组成:清扫出料口、物料挡板、波纹挡边带主体和波纹挡边带挡板。清扫出料口为一个虚拟的平面,其被添加为颗粒工厂,用于模拟余粮清扫系统中旋转滚筒刷扫起的粮食颗粒。由于物料进入旋转滚筒刷的初始状态不同,根据理论估算从旋转滚筒刷扫起的物料水平方向上的速度约为



1. 清扫出料口 2. 物料挡板 3. 波纹挡边带主体 4. 波纹挡边带挡板

图 2 传送部分仿真模型

Figure 2 Send a partial simulation model

0.532~1.242 m/s,垂直方向上的速度约为 1.944~2.245 m/s。所以最终将颗粒工厂生成物料的水平速度设定为 1 m/s、垂直速度为 2 m/s。物料挡板的材料为有机玻璃,作用为减少物料的飞溅,使物料能更集中落入波纹挡边带中。波纹挡边带主体和波纹挡边带挡板的物料参数均采用橡胶带的物料参数,由于 EDEM 软件中挡板按照规定路线移动只能通过单个设置,所以整个波纹挡边带挡板由 40 个单独挡板间隔循环生成,即每次仿真前几秒需等待波纹挡边带生成完整。

传送部分仿真主要从统计整个传送仿真过程中的粮食洒落率和观察各仿真阶段物料输送情况来确定波纹挡边带的运行效果。对于传送部分输送状态的观察主要针对在 9.0、12.5 s 时的仿真状态结果,9.0 s 时主要观察面对较大的物料量,传送部分是否能应对突然加大的物料冲击,而在 12.5 s 时主要观察传送部分在正常情况下能否稳定运行和面对突然加大的物料量后在一段时间内能否恢复正常状态。

传送部分仿真共进行 5 组,将波纹挡边带运行速度分别设定为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m/s。通过 EDEM 的质量传感器,累计统计整个输送过程中粮食洒落的总量,从而通过总输送的质量计算粮食洒落率。仿真结果见表 3。

由表 3 可知,当波纹挡边带运行速度为 0.2 m/s 时,粮食洒落率最高为 10.08%。当运行速度为 0.4 m/s 时,粮食洒落率最低为 3.20%。之后随着波纹挡边带运行速度不断增加,粮食洒落率缓慢上升,且上升幅度越来越大。

表 3 波纹挡边带在不同速度下对粮食洒落率的影响

Table 3 The influence of corrugation on grain sprinkling rate at different speeds

运行速度/(m·s ⁻¹)	洒落物料量/kg	洒落率/%
0.2	1.109 27	10.08
0.4	0.351 82	3.20
0.6	0.360 21	3.27
0.8	0.381 99	3.47
1.0	0.437 76	3.98

通过对仿真结果的观察,造成波纹挡边带运行速度为 0.2 m/s 时粮食洒落率最高的原因是输送物料量太大,而波纹挡边带运行速度过慢,造成波纹挡边带的各个挡板之间被完全装满。在输送过程前段中物料就已高出波纹挡边带边缘,在进入输送过程后段时,由于波纹挡边带变得更加倾斜,每个挡板间能储存的物料减少,溢出的物料从挡板间向前滚落。在输送过程前段和输送过程后段交界处大量堆积,当超过粮食物料最大堆积角时,从波纹挡边带两侧洒出。

由图 3 可知,当波纹挡边带运行速度 ≥ 0.4 m/s 时,由于输送速率过慢造成输送过程前段和后段交界处的物料堆积溢出现象消失,通过对各个运行速度下 9 s 时输送过程后段挡板间物料仿真状态的观察,均未出现长时间大量物料从两侧滑落的现象。

由图 4、图 5 可知,波纹挡边带运行速度从 0.4 m/s 逐渐增加的过程中,粮食洒落率也随之增加,主要是由于输送过程后段飞洒的物料增加造成的。由于物料是通过抛洒进入输送过程前段的,随着波纹挡边带运行速度的增加,物料在输送过程前段停留稳定的时间逐渐缩短,且前端清扫系统抛洒出的物料大多向波纹挡边带凹槽中部集中,停留时间较短,物料还未向凹槽两侧分散填补,导致凹槽中部物料堆积还高于前后挡板就已进入坡度增加的输送过程后段,造成每个凹槽两端还未填满,但凹槽中

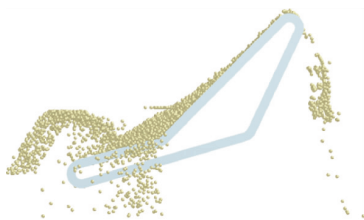


图 3 波纹挡边带以 0.2 m/s 速度运行 9 s 时的运行状态

Figure 3 The running state of the corrugated flange belt at a speed of 0.2 m/s when running at 9 s

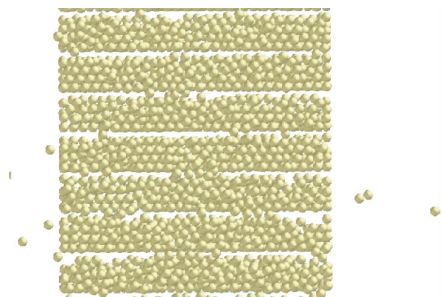


图 4 波纹挡边带以 0.4 m/s 速度运行 9 s 时挡板间的物料状态

Figure 4 Material status between baffles when the corrugated flange belt runs at a speed of 0.4 m/s at 9 s

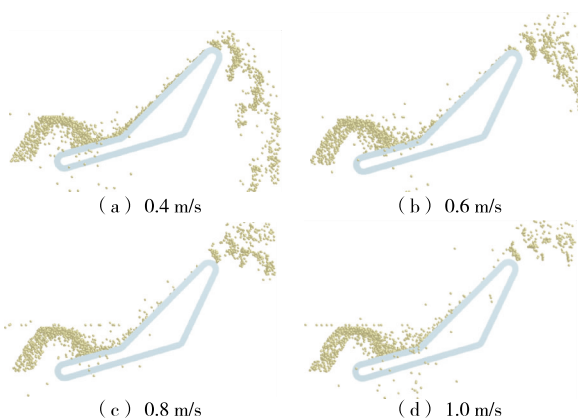


图 5 波纹挡边带以不同速度运行 12.5 s 时的运行状态

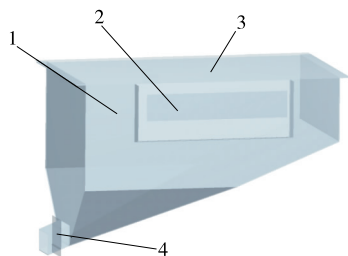
Figure 5 The running state of the corrugated flange belt when running at different speeds at 12.5 s

部物料已出现向下溢出的现象。随着运行速度不断增加,输送过程后段因不稳定而从凹槽中部滚落的物料数量也在增加。由于波纹挡边带凹槽两侧并未完全装满,所以滚落下来的物料并不会在输送过程前段和后段的交界处形成堆积,在运行速度为 0.4 m/s 左右从交界处两侧洒落的物料极少,对整体粮食洒落率的影响较小。但随着运行速度的逐渐增加,从输送过程后段滚落的物料并不会重新回到输送过程交界处,而是被后方快速移动而来的挡板击飞。随着运行速度的增加,输送过程后段不稳定滚落物料数量增加,移动速度更快的挡板将滚落的物料击飞,造成输送过程后段击飞抛洒严重。波纹挡边带运行速度越快,输送过程后段上方空中被击飞的物料数量越多,粮食洒落率越来越大,使得在运行速度为 1.0 m/s 时输送过程后段物料飞洒最为严重,粮食洒落率增加幅度有越来越大的趋势。

通过分析,为保证传送部分的粮食洒落率 $< 3.5\%$,波纹挡边带的运行速度应为 0.4~0.8 m/s,该速度范围内,造成洒落的主要原因是前端清扫部分扫起的物料撞击到物料挡板时,并不能保证物料反弹后都进入到波纹挡边带收集范围内,导致部分物料撞击后直接从两侧飞出。由于带式输送只能从上面输送物料,而未落入输送带上的物料又将重新落回地面,造成粮食洒落率上升。前期的整体方案设计中并未考虑这一点,因此在样机加工环节中,在传送部分两侧支撑板上焊接一对侧边挡板,阻挡粮食物料从两侧洒落,确保物料能尽可能多地收集。

4 收集部分仿真结果及分析

收集部分的仿真模型(图 6)主要由 4 个构件组成:传送出料口、收粮盒、收粮盒盖板和收粮盒挡板。传送出料口用于生成粮食颗粒,模拟从传送部分抛洒出的物料。收粮盒为粮食物料储存的区域,材质为不锈钢。收粮盒



1. 收粮盒 2. 传送出料口 3. 收粮盒盖板 4. 收粮盒挡板

图6 收集部分仿真模型

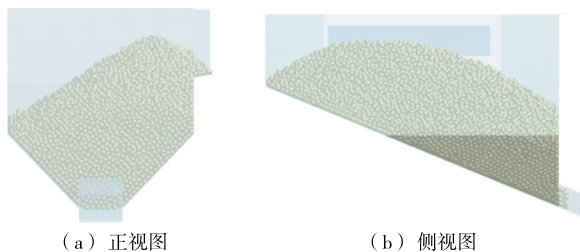
Figure 6 Collect some simulation models

盖板使收粮盒形成一个相对封闭的环境,减少外界对收集粮食的污染和防止传送部分输送物料的抛洒,材质采用有机玻璃,能直接观察收粮盒内物料储存情况。收粮盒挡板为收粮盒的出口,其与电动推杆连接,当收粮盒装满且清扫装置到达指定位置后,挡板上移,收粮盒开始卸料,其材质为不锈钢。

通过分析传送部分仿真结果可知,当波纹挡边带运行速度为 0.4 m/s 时,传送部分的物料洒落率最低,所以收集部分仿真先以此速度作为传送出料口颗粒工厂生成物料的标准参数。使用 EDEM 后处理模块中的速度传感器测得波纹挡边带在运行速度为 0.4 m/s 时,输送过程后段抛洒出的物料水平速度为 0.6257 m/s ,垂直速度为 0.3306 m/s 。设定物料生成速率为 1 kg/s 进行仿真。由图 7 可知,通过后处理模块中质量传感器测出运行速度为 0.4 m/s 时,最大容量为 9.33 kg 。

由图 7(a)可知,靠近传送出料口一侧的物料堆积高度远高于出料口对侧,形成的斜坡使收粮盒无法完全装满,导致后面生成的物料从传送出料口处流出,无法进入收粮盒内部。由图 7(b)可知,由于收粮盒底部卸料坡度的原因,收粮盒出口侧的物料远低于出口对侧。收粮盒储存的物料堆积方式为锥形,内部空间并未充分利用。为增加收粮盒储存能力,应将物料堆积的顶点尽量远离传送出料口一侧,因此需增加传送出料口生成物料的抛射能力,并提高波纹挡边带的运行速度。

当波纹挡边带运行速度为 0.6 m/s 时,抛洒出的物料水平速度为 1.1343 m/s ,垂直速度为 0.7521 m/s 。当波



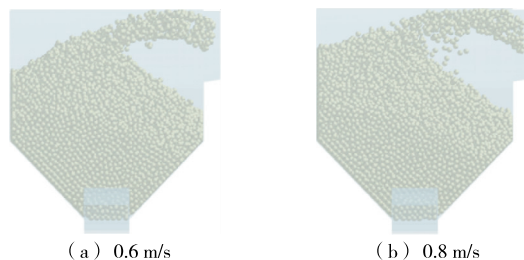
(a) 正视图

(b) 侧视图

图7 运行速度为 0.4 m/s 时收粮盒最大容量仿真结果

Figure 7 Simulation results of the maximum capacity of the box when the running speed at 0.4 m/s

纹挡边带运行速度为 0.8 m/s 时,抛洒出的物料水平速度为 1.2589 m/s ,垂直速度为 0.9316 m/s 。将两组速度代入仿真,生成了如图 8 所示 10 kg 物料时两种速度下的仿真结果。由图 8 可知,由于传送出料口对侧无开口,能堆积出更高的物料堆型,并在形成最大堆积斜坡后,从传送出料口飞出的物料落在已形成的粮食斜面上会发生滚落,填补靠近收粮盒出口侧的空间,使收粮盒空间充分利用。



(a) 0.6 m/s

(b) 0.8 m/s

图8 生成 10 kg 物料时两种速度下的仿真结果

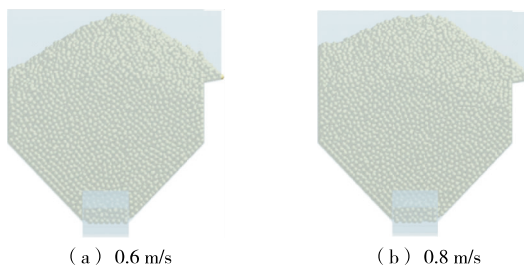
Figure 8 Simulation results at two speeds for generating 10 kg of material

由图 9 可知,通过质量传感器测出运行速度为 0.6 m/s 时,最大容量为 14.83 kg ;当运行速度为 0.8 m/s 时,最大容量为 15.31 kg 。从仿真结果来看,此时已达到收粮盒最大装载能力,且波纹挡边带的运行速度应为 $0.6 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 。

收集物料在收粮盒内相对稳定后开始进行卸料仿真,收粮盒挡板升起,物料从收粮盒出料口卸出。卸料仿真结果如图 10 所示,大约需 60 s 完成卸料。从卸料仿真结果中可以看出收粮盒满足设计要求,收粮盒内物料基本能自动全部卸出,只有极少物料留于盒内拐角处,可通过清扫装置启动运行时产生抖动带出。在控制系统设计中,装置卸完物料后,先启动前进,再下降收粮盒挡板关闭出料口,以排出收粮盒内极少的物料残留。

5 结论

研究主要针对余粮清扫装置的传送部分和收集部分



(a) 0.6 m/s

(b) 0.8 m/s

图9 运行速度为 $0.6, 0.8 \text{ m/s}$ 时收粮盒最大容量仿真结果

Figure 9 Simulation results of the maximum capacity of the grain receiving box when the running speed at $0.6, 0.8 \text{ m/s}$

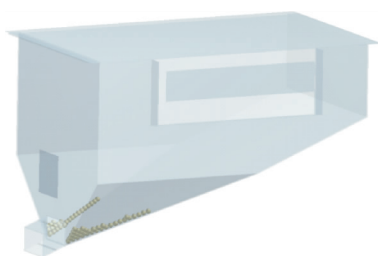


图 10 卸料仿真结果

Figure 10 Unloading simulation results

进行了仿真分析。结果表明,为保证传送部分的洒落率在合理范围内,波纹挡边带的运行速度应为 $0.4\sim 0.8$ m/s;在保证更大收集能力的情况下,最终确定将波纹挡边带运行速度控制在 $0.6\sim 0.8$ m/s;传送部分和收集部分结构符合设计要求。由于研究简化了仿真物料,对仿真结果的适用范围有一定影响,在之后的研究中可以针对不同的物料改变仿真参数,从而得到更为精确的仿真结果。并且同时将清扫部分、传送部分和收集部分的仿真结合为一体,减少各部分仿真误差的堆积,也是将来进一步的仿真方向。

参考文献

- [1] 王华宁, 肖果, 蒋明镜. 深部隧道力学分析的离散元与理论解分区耦合方法初探[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 867-874.
WANG H N, XIAO G, JIANG M J. Preliminary study on the coupling method of discrete element and theoretical solution for mechanical analysis of deep tunnel[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 867-874.
- [2] LI K, STROEVEN P, STROEVEN M, et al. Estimating permeability of cement paste using pore characteristics obtained from DEM-based modelling[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 740-746.
- [3] ZHUANG Y Q, CHEN X M, LUO Z H, et al. CFD-DEM modeling of gas-solid flow and catalytic MTO reaction in a fluidized bed reactor[J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 60(10): 1-16.
- [4] SAIDI M, TABRIZI H B, GRACE J R, et al. Hydrodynamic investigation of gas-solid flow in rectangular spout-fluid bed using CFD-DEM modeling[J]. Powder Technology, 2015, 284: 355-364.
- [5] CHESHOMI A, SHESHDE E A. Determination of uniaxial compressive strength of microcrystalline limestone using single particles load test[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 111: 121-126.
- [6] MISHRA B K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method Part I: Contact mechanics [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71 (1/2/3/4): 73-93.
- [7] RENZO A D, MAIO F P D. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 59(3): 525-541.
- [8] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. J Appl Mech, 1953, 20(3): 327-344.
- [9] JEFFERSON G, HARITOS G K, MCMECKING R M. The elastic response of a cohesive aggregate: A discrete element model with coupled particle interaction [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 50(12): 2 539-2 575.
- [10] LIU X X, CHRISTOPHE L M, GÉRARD D, et al. Elasticity and strength of partially sintered ceramics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2010, 58(6): 829-842.
- [11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete element model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [12] KAZUYOSHI I, MASANOBU O. Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(3): 285-292.
- [13] KAZUYOSHI I, MASANOBU O. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method[J]. Powder Technology, 2000, 109(1): 192-205.
- [14] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 80-84, 103.
WANG M M, WANG W Z, YANG L Q, et al. Research on corn kernel modeling method based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 80-84, 103.
- [15] 池优阳, 阮竞兰. 垂直圆盘管道刮板输送机 EDEM 仿真研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 93-99.
CHI Y Y, RUAN J L. Simulation research on EDEM of vertical disc pipe scraper conveyor[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 93-99.
- [16] 康少波, 宋少云. 基于 EDEM 的谷糙分离仿真初探[J]. 武汉轻工大学学报, 2017, 36(2): 102-105, 113.
KANG S B, SONG S Y. Simulation of grain and rough separation based on EDEM [J]. Journal of Wuhan University of Light Industry, 2017, 36(2): 102-105, 113.
- [17] ZHOU L, YU J Q, LIANG L S, et al. DEM parameter calibration of maize seeds and the effect of rolling friction[J]. Processes, 2021, 9(6): 914.
- [18] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
WANG Y X, LIANG Z J, ZHANG D X, et al. Interspecific contact parameter calibration of maize seed particle model based on discrete elements [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 36-42.
- [19] 金秀南, 张军昌, 薛晶峰, 等. 玉米种子与橡胶带离散元接触参数标定[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 39-43.
JIN X N, ZHANG J C, XUE J F, et al. Contact parameter calibration of discrete elements between corn seed and rubber belt [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 39-43.

(下转第 220 页)

- [30] 孔庆龙. 印度块菌多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 41-46.
- KONG Q L. Isolation and purification, structural characterization and antioxidant properties of polysaccharides from Tuber indicum [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 41-46.
- [31] TEJEDOR-CALVO E, MORALES D, MARCO P, et al. Screening of bioactive compounds in Truffles and evaluation of pressurized liquid extractions (PLE) to obtain fractions with biological activities[J]. Food Research International, 2020, 132: 109054.
- [32] 孙娟, 郑朝辉, 刘磊, 等. 4 种珍稀食用菌粗多糖的抗氧化活性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(3): 404-409.
- SUN J, LIU C H, LIU L, et al. Antioxidant activities of crude polysaccharides from four valuable ediblefung[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2011, 38(3): 404-409.
- [33] WU G H, HU T, LI Z Y, et al. In vitro antioxidant activities of the polysaccharides from Pleurotus tuber-regium (Fr.) Sing[J]. Food Chemistry, 2014, 148: 351-356.
- [34] TAO Y, ZHANG L, CHEUNG P C K. Physicochemical properties and antitumor activities of water-soluble native and sulfated hyperbranched mushroom polysaccharides [J]. Carbohydrate Research, 2006, 341(13): 2 261-2 269.
- [35] ZHAO W, WANG X H, LI H M, et al. Isolation and characterization of polysaccharides with the antitumor activity from Tuber fruiting bodies and fermentation system[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(5): 1 991-2 002.
- [36] ZHANG B, ZHANG X, YAN L, et al. Different maturities drive proteomic and metabolomic changes in Chinese black truffle[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128233.
- [37] 魏鑫悦, 陈克保, 关统伟. 攀枝花黑松露多糖的抗氧化和降血糖活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 1-7.
- WEI X Y, CHEN K B, GUAN T W. Antioxidant and hypoglycemic activity of polysaccharide from Panzhihua black Truffle[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 1-7.
- [38] HUANG H Y, KORIVI M, CHAING Y Y, et al. Pleurotus Tuber-regium polysaccharides attenuate hyperglycemia and oxidative stress in experimental diabetic rats [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2 012: 856381.
- [39] 马宁. 块菌 (Tuber indicum) 干燥技术及块菌多糖抗疲劳作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 83-95.
- MA N. Studies on drying technology of Tuber indicum and its polysaccharide antifatigue mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017: 83-95.
- [40] 李陆. 块菌胞外多糖合成机制和运动抗氧化作用[J]. 中国食用菌, 2020, 39(3): 44-46.
- LI L. The mechanism of extracellular polysaccharide synthesis and exercise antioxidation of Tuber indicum[J]. Chinese Edible Fungi, 2020, 39(3): 44-46.
- [41] 赵玲. 块菌多糖的制备及其免疫调节活性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2013: 62-68.
- ZHAO L. Preparation and immunomodulatory activities of polysaccharide from Tuber [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013: 62-68.
- [42] 胡慧娟, 李佩珍, 林涛, 等. 块菌多糖对小鼠肿瘤及免疫系统的影响[J]. 中国药科大学学报, 1994, 25(5): 289-292.
- HU H J, LI P Z, LIN T, et al. Effects of polysaccharide of Tuber Sinica on tumor and immune system of mice[J]. Journal of China Pharmaceutical University, 1994, 25(5): 289-292.
- [43] 华思宁. 黑松露月饼制作方法及其包装设计[J]. 中国食用菌, 2020, 39(11): 121-124.
- HUA S N. Production method and packaging design of Tuber melanosporum moon cake[J]. Chinese Edible Fungi, 2020, 39(11): 121-124.
- [44] 鲜欣言. 攀西块菌成分分析及产品研发[D]. 成都: 西华大学, 2015: 36.
- XIAN X Y. Analysis of nutritional composition and product research and development in Panxi Truffles[D]. Chengdu: Xihua University, 2015: 36.

(上接第 96 页)

- [20] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41.
- CUI T, LIU J, YANG L, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristics of corn seeds based on high-speed photography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 34-41.
- [21] FEI D, WU Y Z, ZHENG S H, et al. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2 606(781/782/783/784): 799-802.
- [22] COŞKUN M B, YALÇIN I, ÖZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (Zea mays saccharata Sturt.)[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 74(4): 523-528.
- [23] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62-69.
- SHI S, ZHANG D X, YANG L, et al. Simulation and verification of filling performance of pneumatic combination hole seed dispenser based on EDEM software[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 62-69.
- [24] WANG L J, LI R, WU B X, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particology, 2018, 38: 185-195.
- [25] 贾振超, 张宗超, 李寒松, 等. 基于 EDEM 的齿爪粉碎机玉米粉碎仿真分析[J]. 饲料工业, 2020, 41(7): 31-37.
- JIA Z C, ZHANG Z C, LI H S, et al. Simulation analysis of corn crushing with tooth and claw mill based on EDEM [J]. Feed Industry, 2020, 41(7): 31-37.