

基于 EDEM 的组合清理筛筛分仿真和性能分析

张昊晨,张超,曹宪周,刘海芄,高涛

(河南工业大学机电工程学院,郑州 450001)

摘要:为优化平面回转筛的结构和工艺参数,提高组合清理筛的筛分处理量和筛分效率,采用离散元软件 EDEM 对组合清理筛的平面回转筛分过程进行模拟仿真,探究颗粒在筛分过程中的运动规律,并仿真分析了回转半径、回转速度和筛面倾角对组合清理筛筛分处理量和筛分效率的影响。结果表明,提高回转半径、回转速度和筛面倾角均可提高组合清理筛筛分处理量,但会降低筛分效率(物料提取率和除杂率)。在回转速度为 420 r/min 左右、回转半径为 20 mm 左右、筛面倾角为 7° ~ 9° 时,组合清理筛的筛分效率较好,筛分处理量也较大。

关键词:组合清理筛;回转筛分;离散元法;仿真分析

中图分类号:TS210.3;TS203 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)11-0147-06

Screening simulation and performance analysis of the combined cleaning screen based on EDEM

ZHANG Haochen, ZHANG Chao, CAO Xianzhou,
LIU Haipeng, GAO Tao

(College of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to optimize the structure and process parameters of the rotary sieve classifier and improve the screening capacity and screening efficiency of the combined cleaning screen, the discrete element software EDEM was used to simulate the rotary screening process of the combined cleaning screen. The movement pattern of particles in the screening process was explored, and the effects of the radius of rotation, the rotation speed and the inclination angle of the screen surface on the screening capacity and screening efficiency of the combined cleaning screen were simulately analyzed. The results showed that increasing the radius of rotation, rotation speed and inclination angle of the screen surface could increase the screening capacity of the combined cleaning screen, but reduced the screening efficiency (material extraction rate and impurity removal rate). When the rotary speed was about 420 r/min, the radius of rotation was about 20 mm, and the inclination angle of the screen surface was 7° - 9° , the screening efficiency of the combined cleaning screen was better, and the screening capacity was also larger.

Key words: combined cleaning screen; rotary screening; discrete element method; simulation analysis

原粮的清理工作是粮食加工、运输和储藏中的必要环节,原粮的高效、高质清理不仅为粮食的安全储藏提供保障,也是推进节粮减损的有效方法。随着市场对清理设备处理量需求的不断增长,对筛分

效果要求的不断提高,清理设备也在向集成化、高产高效的方向发展。影响物料筛分效果的因素很多,例如筛体的回转速度、回转半径及筛面倾角等,这些因素直接影响物料在筛面上的运动状态(轨迹和速度)。

近年来基于离散元法(DEM)的数值模拟技术快速发展,其针对离散颗粒系统的数值模拟和仿真已经广泛应用于农业、矿山、化工等行业,包括散体物料的输送、破碎、搅拌等工程领域,物料筛分领域

收稿日期:2022-08-30;修回日期:2023-07-26

作者简介:张昊晨(1998),男,硕士研究生,研究方向为粮油加工装备(E-mail)haochen8863@163.com。

通信作者:张超,硕士生导师,博士(E-mail)zcyj@haut.edu.cn。

的仿真应用和研究也在国内外快速开展^[1-4]。Dong等^[5]采用离散元法模拟振动筛的颗粒筛分过程,得到了筛分效率和不同尺寸颗粒的通过率分布;Jafari等^[6]采用离散元法对振动筛进行仿真,研究了不同参数对筛分效率和筛网磨损的影响,建立了碰撞物体之间的接触力模型;郭晟等^[7]使用离散元软件 EDEM 模拟筛面颗粒在组合振动筛筛面上松散与分层的过程,并优化得到使颗粒松散和分层的最佳筛面运动参数;Wang等^[8]提出了实虚边界法建立摇杆筛的几何模型,采用离散元法和多体运动学的耦合模型,模拟得到了大豆颗粒在筛面上的流动和筛分状态;王豪东等^[9]采用离散元软件 EDEM 模拟了小麦在平面回转筛筛分过程中的运动情况,得到了单因素变量下各参数对物料筛分性能的影响程度;侯勇俊等^[10]通过离散元法数值模拟,得到了旋转振动筛在不同运动状态下的物料运动规律、颗粒粒度分布情况、固相筛分效率及颗粒运动速度;Li等^[11]采用流体力学和离散元法(CFD-DEM)耦合建立了脱水筛选过程的仿真模型,并结合物理实验得到了影响脱水筛性能指标和最优参数的重要因素。目前,物料筛分的仿真应用研究大多集中在振动筛分领域,对于回转筛分的研究还有待深入。

粮食清理设备的筛分性能主要参考两方面:筛分处理量和筛分效率。当筛面宽度一定时,筛分处理量与物料流动速度呈正相关,所以提高物料流动速度能保证设备的筛分处理量。而用于全面评定筛分效率的指标包括粮食的提取率和除杂率。提取率(η_1)是评定筛分中粮食损失程度的指标,除杂率(η_2)是评定杂质去除程度的指标(两者计算式见文献[12])。

本文基于 EDEM,对组合清理筛在不同回转速度、回转半径和筛面倾角的情况下进行模拟仿真,分析物料在回转筛分过程中的运动规律,得到了3项参数对筛分性能的影响,为提高组合清理筛的筛分效率和处理量提供参考。

1 组合清理筛结构及模型简化

组合清理筛是以平面回转筛为基础所设计的新的高效、高产量清理筛^[13],其筛分工作原理与回转筛一致,即倾斜筛面做平面回转运动时,在物料受到的离心惯性力与其自身重力在筛面倾斜方向上的分力共同作用下,物料对筛面产生相对运动,并且运动轨迹呈螺旋线。这种运动方式使得物料在筛面上有较长的停留时间,利于颗粒透筛,提高物料提取率。

组合清理筛的结构如图1所示,由风选装置、匀料箱、出料箱、驱动装置、吊挂装置、多层筛体和机架

等组成。组合清理筛的筛体模型如图2所示,多层筛体根据需求可设置4~8层筛格,每层筛格具有两层筛面,即大杂筛面和小杂筛面。原粮由进料斗进入匀料箱后均匀分散到各层筛格上,经过筛面筛分后的大、小杂及净粮分别由大、小杂出口和净粮出口排出。

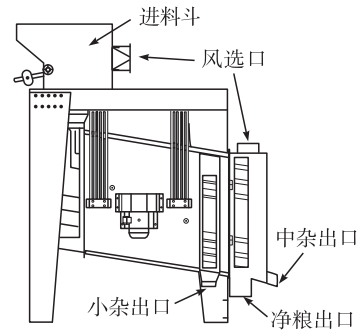


图1 组合清理筛结构

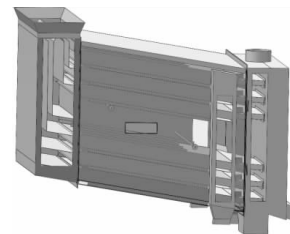


图2 筛体模型

以多层组合清理筛为研究对象,6层筛格设计处理量为100 t/h,为了减少数值模拟的计算量,只进行单层筛格的筛分仿真,筛面宽度取实际筛宽的1/10。如图3所示,建立单层筛格的筛箱简化模型,用于筛分过程的离散元仿真,表1为筛箱模型的具体参数。筛箱的运动形式在 EDEM 中设置为 X 轴正弦平移运动和 Y 轴余弦平移运动叠加所形成的平面回转运动,筛箱的回转速度和回转半径由调节 X 轴正弦运动和 Y 轴余弦运动的频率和振幅来实现。

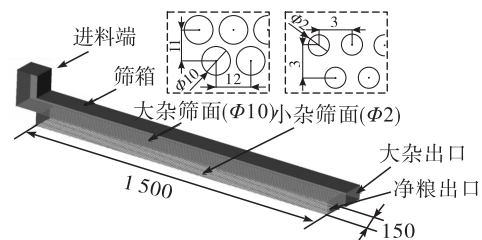


图3 筛箱简化模型

表1 回转筛仿真模型的相关参数

模型参数	数值
筛网长度/mm	1 500
筛网宽度/mm	150
筛网厚度/mm	1.5
筛孔直径/mm	10(上层)/2(下层)
回转轨迹	圆形

续表 1

模型参数	数值
回转半径/mm	10 ~ 30
回转速度/(r/min)	300 ~ 540
筛面倾角/(°)	6 ~ 10
筛分处理量/(g/s)	463

2 离散元仿真物料颗粒接触模型和参数

2.1 颗粒接触模型选择

颗粒的接触模型是离散元法数值模拟的重要基础,其分析计算的方法直接决定了颗粒运动的特性。而对于不同的仿真对象,需要选用不同的接触模型。回转筛筛分的过程包含大量颗粒之间的复杂接触碰撞,本研究采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型^[14],将两个颗粒之间的接触力简化为弹簧(正向刚度 k_n 和切向刚度 k_t)、阻尼器(正向阻尼 d_n 和切向阻尼 d_t)和滑块(摩擦系数 θ),如图 4 所示,在此模型的基础上计算颗粒 - 颗粒和颗粒 - 工作面间的相互作用。根据 Hertz 弹性理论建立法向力分量,由 Mindlin - Deresiewicz 接触理论求解无滑移切向力分量。上述颗粒间接触力的具体计算方法见参考文献[15]。

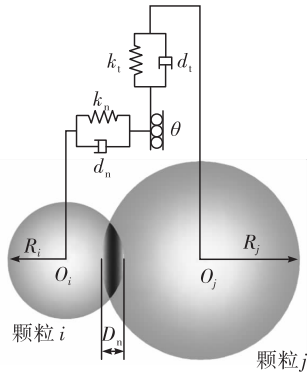


图 4 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型

2.2 参数选择和设置

实测小麦的物理特性参数(小麦品种为郑麦 136),多组测量取均值,数据如下:容重 810 g/L,千粒质量 46.90 g,长径 6.26 mm,中径 3.02 mm,短径 2.93 mm。图 5a 是在 SolidWorks 软件中采用多曲面边界建立的小麦三维模型,将其以 stl 格式导入到 EDEM 中,采用 5 个圆球颗粒拟合成图 5b 所示的小麦籽粒模型,用于小麦的颗粒群筛分仿真。

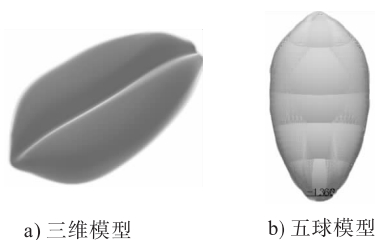


图 5 小麦颗粒模型

原粮清理的对象包括秸秆、麸皮等有机物和砂石、灰尘等无机物,为简化计算,大杂只考虑秸秆,小杂只考虑砂石。如图 6 所示,秸秆的颗粒模型采用 15 个直径 4.00 ~ 8.00 mm 的圆球颗粒纵向排列组成,秸秆长度 40 ~ 80 mm,小杂颗粒模型则采用直径 0.5 ~ 1.0 mm 的圆球,各类颗粒的粒径均设置为正态分布,具体的质量分数和粒径分布见表 2。

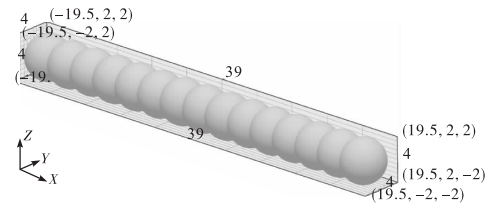


图 6 秸秆的颗粒模型

表 2 颗粒的质量分数和粒径分布

颗粒	质量分数/%	粒径分布/mm
小麦	98	5.60 ~ 7.20
砂石	1	0.5 ~ 1.0
秸秆	1	4.00 ~ 8.00

小麦籽粒、秸秆、砂石以及筛箱的物理参数^[16-18]设置见表 3 和表 4。

表 3 材料物理特性参数

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg/m ³)
小麦	0.40	1.35E+08	1 350
秸秆	0.40	2.0E+07	160
砂石	0.29	1.1E+10	2 090
Q235	0.27	7.9E+10	7 830

表 4 材料接触属性参数

接触属性	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
小麦 - 小麦	0.46	0.58	0.08
小麦 - Q235	0.48	0.80	0.01
小麦 - 砂石	0.50	0.50	0.01
小麦 - 秸秆	0.26	0.34	0.01
秸秆 - 秸秆	0.28	0.38	0.01
秸秆 - 砂石	0.20	0.60	0.01
秸秆 - Q235	0.68	0.32	0.01
砂石 - 砂石	0.70	0.84	0.08
砂石 - Q235	0.75	0.47	0.01

按照表 1 ~ 表 4 中的颗粒参数设置颗粒工厂,颗粒生成速度为 463 g/s,下落速度为 0.2 m/s,生成颗粒时间为 3 s,模拟时长为 6 s。

3 仿真结果与分析

3.1 回转筛分过程

图 7 是回转筛分过程进行到 2.5 s 时的状态,颗粒工厂生成了含有大、小杂(秸秆、砂石)和小麦的原粮。在筛分过程中,原粮从进料口不断产生,仿

真的 0.5 s 左右物料在重力的作用下落至上层筛面, 一组混合颗粒堆积在筛面前端。

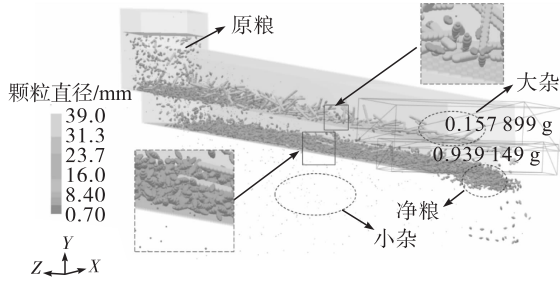


图7 回转筛分过程的离散元仿真

在筛箱回转运动的作用下, 颗粒群内部以及颗粒与筛箱内壁之间发生多次碰撞, 促使物料沿着 X 轴方向流动并通过筛面到达筛箱尾端。上层筛的筛上物为大杂和正在过筛的小麦, 下层筛的筛上物为小麦、部分透筛的大杂和正在过筛的小杂, 过筛的小杂直接溢出计算域, 大杂和净粮分别经出杂口和出料口排出。在筛面尾端的出杂口和出粮口分别建立颗粒质量统计域, 可统计经过该区域各类颗粒质量。

3.2 物料的运动情况

3.2.1 物料的速度变化

以回转速度 420 r/min、回转半径 20 mm、筛面倾角 8° 的筛分仿真为例。物料进入处于回转运动中的筛箱后, 在筛箱的作用下做平面回转运动, 物料沿 X、Y、Z 轴方向的分速度变化情况如图 8 所示。

由图 8 可看出, 在 0 ~ 0.25 s 的进料时间段内, 由于物料具有一定的下落初速度, 物料的速度变化并不稳定, 随后开始呈周期性变化, 并且变化频率与筛箱的回转频率保持一致。因此, 筛箱回转速度的变化会改变物料速度变化的频率, 对物料的运动和筛分效果均有一定的影响。

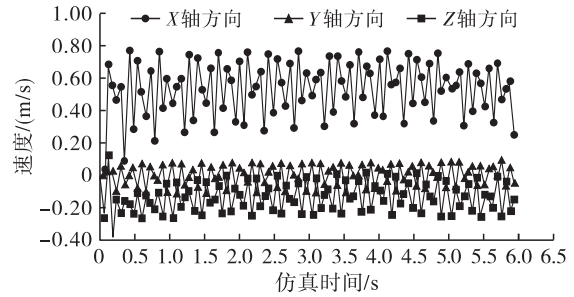


图8 物料各方向的分速度

3.2.2 横向分布

物料的筛分效果与筛面长度直接相关, 足够的筛面长度能够保证物料有充足的筛分时间和最佳的筛分效果, 同时筛面长度又直接决定了筛箱的尺寸, 因此在保证物料筛分效果好和筛箱尺寸小的条件下, 选取合适的筛面长度成为关键。图 9 为统计颗粒横向分布的域。

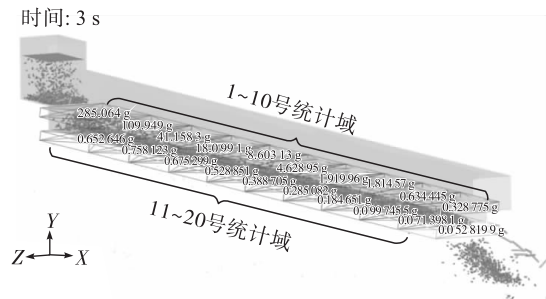


图9 统计颗粒横向分布的域

如图 9 所示, 在 EDEM 后处理功能中设置两组共 20 个颗粒质量统计域, 沿 X 轴横向排列。第一组 1 ~ 10 号统计域位于上层筛面下, 用于统计过筛小麦颗粒的横向分布情况; 第二组 11 ~ 20 号统计域位于下层筛面下, 用于统计过筛小杂颗粒的横向分布情况。

图 10 为在不同的回转半径下物料的横向分布情况。

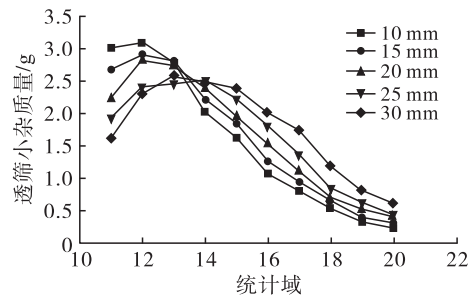
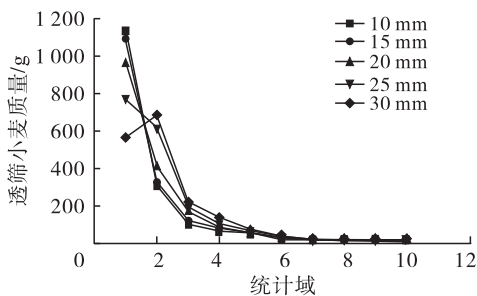


图10 不同回转半径下物料的横向分布

由图 10 可知, 随着回转半径增大, 物料流动速度加快, 在 1 号统计域过筛的小麦减少, 而在 2 ~ 7 号统计域过筛的小麦增多, 在 8 ~ 10 号统计域过筛的小麦质量占比极小, 在 11 ~ 13 号统计域过筛的小

杂减小, 在 14 ~ 20 号统计域过筛的小杂增多(总体上), 说明物料流动速度的加快会导致物料过筛的分布区域后移, 更多的小麦和小杂无法过筛, 导致物料提取率和除杂率下降。根据物料过筛后的横向分

布情况,选取合适的工艺参数可以有效提高筛面长度的利用率,在保证筛分效果的前提下适当缩短筛面长度,实现筛箱的结构优化。

3.3 各参数对筛分性能的影响

3.3.1 回转速度的影响

在回转半径 20 mm、筛面倾角 8° 的基准条件下,回转速度设置为 300、360、420、480、540 r/min,由仿真结果得到回转速度对筛分性能的影响,如图 11 所示。

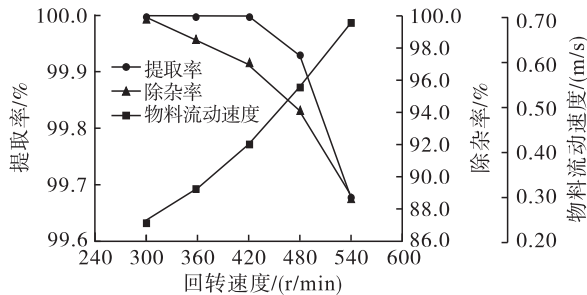


图 11 回转速度对筛分性能的影响

由图 11 可看出:当回转速度处于 300~420 r/min 范围内时,提取率稳定在 100%,筛分过程中没有小麦损失,当回转速度达到 540 r/min 时,提取率下降至 99.68%;除杂率随着回转速度的增大而降低,在回转速度为 300 r/min 时,除杂率达到 98.19%,而当回转速度超过 480 r/min 时,除杂率急剧下降;物料流动速度随着回转速度的增大而增大,即筛分处理量与回转速度呈正相关。可见,随着筛箱回转速度的增大,物料流动速度增大,筛分处理量得到提高,但是杂质和筛面的接触时间缩短,杂质透筛率下降,所以除杂率降低,并且部分小麦颗粒因流动速度过快而来不及穿过上层筛面,导致提取率也降低。

3.3.2 回转半径的影响

在回转速度 540 r/min、筛面倾角 8° 的基准条件下,回转半径设置为 10、15、20、25、30 mm,由仿真结果得到回转半径对筛分性能的影响,如图 12 所示。

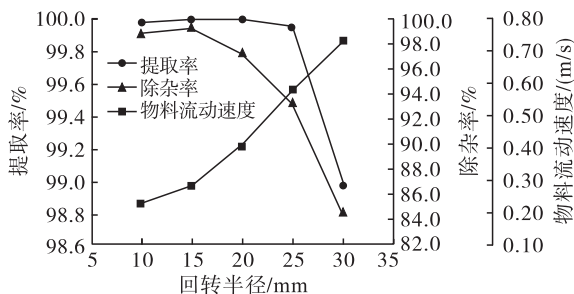


图 12 回转半径对筛分性能的影响

由图 12 可看出:随着回转半径的增大,提取率和除杂率均先升高后降低,在回转半径为 15 mm 时,两者均达到最高,当回转半径超过 25 mm 时,提

取率和除杂率均急剧下降,小麦损失较多,除杂效果也较差;物料流动速度与回转半径呈正相关,即筛分处理量与回转半径呈正相关。可见,筛箱回转半径越大,物料流动速度越大,而回转半径过大会导致提取率和除杂率下降。

3.3.3 筛面倾角的影响

在回转速度 540 r/min、回转半径 20 mm 的基准条件下,筛面倾角设置为 6°、7°、8°、9°、10°,由仿真结果得到筛面倾角对筛分性能的影响,如图 13 所示。

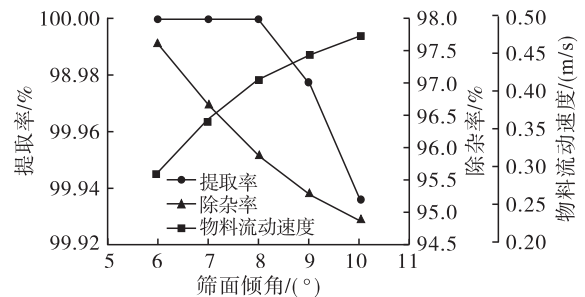


图 13 筛面倾角对筛分性能的影响

由图 13 可看出:当筛面倾角在 6°~8° 时,提取率均为 100%,当筛面倾角为 9° 和 10° 时,提取率有所下降,但小麦的损失率较小;除杂率与筛面倾角呈负相关,而物料流动速度与筛面倾角呈正相关。可见,筛面倾角越大,筛分处理量越大,而提取率和除杂率下降,相比于筛箱回转速度和回转半径,筛面倾角对筛分性能指标的影响程度最小。

4 结论

本文基于 EDEM 对组合清理筛在不同参数条件下的回转筛分过程进行模拟仿真,研究回转速度、回转半径和筛面倾角对物料筛分效率和筛分处理量的影响,经过分析得出以下结论:

(1) 物料流动速度的加快会导致物料过筛的分布区域后移,物料的提取率和除杂率降低,可通过选取合适的工艺参数有效提高筛面长度的利用率。在保证较高提取率和除杂率的条件下,可将原筛面长度 1 500 mm 缩短至 1 200 mm,筛箱尺寸也随之缩小,实现了组合清理筛的结构优化。

(2) 物料的筛分效率和筛分处理量与筛箱的回转速度、回转半径和筛面倾角均有关,提高回转速度、回转半径和筛面倾角都能够加快物料流动速度,从而提高筛分处理量,但同时物料提取率和除杂率也相应下降。综合考虑物料筛分效率和筛分处理量两个方面,选取组合清理筛工艺参数为回转速度 420 r/min 左右、回转半径 20 mm 左右、筛面倾角 7°~9°,此时物料的筛分效率和筛分处理量均达到较高水平。

参考文献:

- [1] TRUMIC M, MAGDALINOVIC N. New model of screening kinetics[J]. Miner Eng, 2011, 24(1): 42-49.
- [2] LIU C S, WANG H, ZHAO Y M, et al. DEM simulation of particle flow on a single deck banana screen[J]. Int J Min Sci Technol, 2013, 23(2): 277-281.
- [3] ZHAO L L, ZHAO Y M, BAO C Y, et al. Laboratory - scale validation of a DEM model of screening processes with circular vibration[J]. Powder Technol, 2016, 303: 269-277.
- [4] 王中营, 任宁, 武文斌, 等. 基于离散元法的往复振动筛筛分效果研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 33-38.
- [5] DONG K J, WANG B, YU A B, et al. Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: from discrete particle simulation to process performance prediction [J]. Ind Eng Chem Res, 2013, 52(33): 11333-11343.
- [6] JAFARI A, NEZHAD V S. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear[J]. Powder Technol, 2016, 297: 126-143.
- [7] 郭晟, 吴永兴, 郭年琴. 组合振动筛筛面颗粒松散与分层仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2018(3): 219-222.
- [8] WANG Y, YU J Q, YU Y J, et al. Validation of a coupled model of discrete element method with multibody kinematics to simulate the screening process of a swing - bar sieve [J]. Powder Technol, 2019, 346: 193-202.
- [9] 王豪东, 阮竞兰, 原富林. 基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 151-157.
- [10] 侯勇俊, 祝敬涛, 李华川, 等. 均衡运动旋转振动筛 DEM 数值模拟[J]. 化工学报, 2021, 72(5): 2706-2717.
- [11] LI Z F, JIA P Y, LI K Y, et al. Study on screening performance and parameter optimization of vibrating - dewatering screen [J/OL]. Adv Mech Eng, 2021, 13(9): 6580 [2022 - 08 - 30]. <https://doi.org/10.1177/16878140211046580>.
- [12] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [13] 张超, 张昊晨, 刘海芃, 等. 粮食并联双体多层组合清理机: CN114273223A [P/OL]. (2022 - 04 - 05) [2022 - 08 - 30]. <https://www.cnipa.gov.cn/col/col1510/index.html>.
- [14] 徐泳, 孙其诚, 张凌. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2): 251-260.
- [15] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
- [17] 刘凡一, 张舰, 陈军. 小麦籽粒振动筛分黏弹塑性接触模型构建及其参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 37-43.
- [18] 孙延新, 王明旭, 张超. 小麦与输送机皮带接触参数的试验标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 113-120.

(上接第 134 页)

打包项目来说,使用全自动装车机的方案能使工厂总体拥有成本更低,能够降低企业整体的资金投入。在较好的经济效益的基础上,全自动装车机更能进一步支撑企业信息化、数字化系统建设,大幅提升企业物流现代化管理水平。此外,随着油脂产品的多样化和市场需求的增长,油脂企业需要提高生产效率和质量,降低生产成本和风险,实现精细化管理和可持续发展。全自动装车机可以实现油脂产品的全自动装车过程,不仅可以节省人力资源和物资消耗,还可以提高装车准确性和安全性,减少货物损耗和污染,提升客户满意度和品牌形象。同时,全自动装车机还可以与其他智能物流设备和系统相结合,实

现油脂产品从生产到仓储到配送的全链条智能化管理和控制,提高油脂企业的核心竞争力和市场占有率。

参考文献:

- [1] 张宏洲, 弯勇, 薛玉君, 等. 在线式袋装水泥智能装车系统介绍[J]. 水泥, 2020(12): 64-67.
- [2] 《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》发布 [EB/OL]. (2021 - 11 - 30) [2022 - 12 - 20]. https://www.miit.gov.cn/gzcy/zbft/art/2021/art_299667fcdad2456f91313a8cd12fd4ee.html.
- [3] 梁施华, 鲁良山. 基于工业机器人智能袋装水泥装车系统[J]. 中国水泥, 2022(9): 89-92.