

基于离散元法的往复振动筛运动参数优化

Motion parameter optimization of reciprocating vibrating screen based on discrete element method

任 宁 王中营 白晓丽 武文斌

REN Ning WANG Zhong-ying BAI Xiao-li WU Wen-bin

(河南工业大学, 河南 郑州 450001)

(Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:明确往复振动筛运动参数与筛分效率间的精确量化关系,确定具有最优筛分效率的运动参数组合。方法:利用 Rocky 精确模拟小麦籽粒和茎秆在筛分过程中的运动行为,设计多因素正交旋转组合数值模拟试验研究振动频率、振幅、振动方向角和筛面倾角对筛分效率的影响。结果:小麦在筛分过程中的运动行为与理论吻合,验证了利用 Rocky 进行数值模拟的正确性和可行性;频率、振幅、振动方向角和筛面倾角对筛分效率有显著影响,且存在显著的交互作用;最优运动参数为振动频率 10 Hz、振幅 2 mm、振动方向角 45°、筛面倾角 0°。结论:建立了反映往复振动筛运动参数与筛分效率间量化关系的回归模型,并获得了最优的往复振动筛的运动参数组合。

关键词:离散元法;散体颗粒;振动筛分;数值模拟;正交试验

Abstract: **Objective:** To determine the precise quantitative relationship between screening efficiency and motion parameters for reciprocating vibrating screen, and to obtain the movement parameters with the optimal screening efficiency. **Methods:** Rocky was adopted to accurately simulate the movement behavior for wheat grain and wheat stem in the screening process, many factors orthogonal simulation test was used to investigate the effect of vibration frequency, amplitude, vibrating direction angle and screen surface inclination angle on screening efficiency. **Results:** The movement behaviors of wheat in the screening process was consistent with the theory analysis, which verified the correctness and feasibility of numerical simulation using Rocky. The vibration frequency, amplitude, vibrating direction

angle and screen surface inclination angle have significant influence on the screening efficiency, and there is significant interaction between these motion parameters. The optimal motion parameter combination was the vibration frequency of 10 Hz, the amplitude of 2 mm, the vibration direction angle of 45° and the screen surface inclination angle of 0°. **Conclusion:** A regression model reflecting the quantitative relationship between motion parameters of and screening efficiency for reciprocating vibrating screen was established, and the optimal motion parameter combination of reciprocating vibrating screen was obtained.

Keywords: discrete element method; loose particles; vibration separation; numerical simulation; orthogonal test

由振动电机驱动的往复振动筛是谷物清理作业中应用最广泛的筛分除杂设备,主要用于清除谷物中的大、中、小杂质^[1-2]。筛分效率是衡量往复振动筛筛分效果的关键性能指标,直接决定后续设备的有效工作和产品质量^[3]。往复振动筛筛面上物料的运动状态直接影响筛分效率,而物料的运动状态主要取决于往复振动筛的振动频率、振幅、振动方向角和筛面倾角等运动参数^[4]。通过研究不同运动参数组合下筛面上物料的运动规律,可获得满足筛分效率要求的最佳运动参数,从而为往复振动筛的优化改进提供理论依据。

谷物属于散体颗粒物料(简称散粒物料),散粒物料在振动筛分过程中的运动情况非常复杂,难以采用试验方法直接测定或观察其微观运动情况^[5]。采用连续介质力学方法如有限单元法(Finite Element Method, FEM)研究散粒物料的运动时,通常会忽略物料中各个颗粒的运动过程以及颗粒间的交互作用^[6]。离散元法(Discrete Element Method, DEM)是一种求解与分析复杂离散系统运动规律和力学特性的高度非线性数值方法^[7-8],已被应用于岩土工程和采矿工程等散粒物料工程技术处理领域^[9-10]。目前,采用 DEM 研究往复振动筛的物料筛分过

基金项目:河南省“揭榜挂帅”科技项目(编号:211110110500);小麦和玉米深加工国家工程实验室开放课题(编号:NL2016006)

作者简介:任宁(1981—),女,河南工业大学讲师,博士。

E-mail: ningren001@126.com

收稿日期:2022-05-26 **改回日期:**2022-11-01

程逐渐成为国内外学者的研究热点^[11-14]。如李永祥等^[14]基于 EDEM 对往复振动筛的筛分过程进行数值模拟,分析了振幅、振动频率、振动方向角和筛面倾角对筛分效率的影响。

在 DEM 数值模拟中,学者^[15]普遍采用单一球型和多球组合模型来模拟散粒物料。然而,谷物类散粒物料如小麦通常具有复杂的轮廓外形,采用简单规则的球型颗粒模拟非规则颗粒的运动特性时,极易造成较大误差^[16]。

Rocky 是由 ESSS 公司开发的 DEM 软件,可用于模拟和分析散粒物料的力学行为及其对物料处理设备的影响。不同于其他商业 DEM 软件只能将非球形颗粒简化为球形或黏合球形,Rocky 支持真实颗粒形状的导入,使模拟的非球形颗粒形状更接近现实^[17]。

研究拟以 TQLZ 型往复振动筛以及筛面上的小麦籽粒和茎秆为研究对象,利用 Rocky 软件创建能真实模拟小麦籽粒和茎秆形状的离散元模型,以更加精确地模拟其在筛分过程中的运动行为;在此基础上,采用多因素正交旋转组合试验,确定往复振动筛运动参数与筛分效率间的精确量化关系,并获得最优的往复振动筛运动参数,旨在为后续往复振动筛筛分效率分析和运动参数设定提供依据。

1 离散单元法计算流程

1.1 接触模型的建立

接触模型是 DEM 的基础,直接影响 DEM 数值模拟结果的分析精度^[18]。研究以小麦籽粒和茎秆作为筛分对象,不考虑其他的杂余。由于小麦籽粒、茎秆和筛体三者存在交互作用,且在交互作用过程中满足瞬时接触和接触后没有显著塑性变形的条件,因此选择硬球接触模型。在 Rocky 中分别选择 Hertzian spring-dashpot model 和 Coulomb limit model 描述接触模型中的法向力和切向力^[19]。

法向力可表示为:

$$F_n = \bar{K}_H s_n^{3/2} + \bar{C}_H s_n^{1/4} \dot{s}_n, \quad (1)$$

式中:

$\bar{K}_H$ ——刚度系数;

$\bar{C}_H$ ——阻尼系数;

s_n ——接触重叠量, m;

$\dot{s}_n$ —— s_n 的时间导数。

切向力可表示为:

$$F_t = -\mu F_n \frac{\dot{s}_t}{|\dot{s}_t|}, \quad (2)$$

式中:

μ ——摩擦系数;

$\dot{s}_t$ ——相对速度的切向分量, m/s。

1.2 离散元模型的建立

1.2.1 往复振动筛的三维几何模型

析往复振动筛筛面上物料的运动时,在合理简化的基础上,基于 Workbench 平台在三维实体直接建模软件 SpaceClaim 中建立如图 1 所示往复振动筛的三维几何模型。

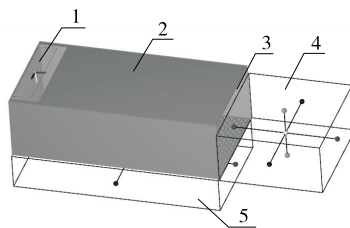


图 1 往复振动筛三维几何模型

Figure 1 Three-dimensional geometry model of reciprocating vibrating screen

1.2.2 小麦籽粒和茎秆的离散元模型 在 DEM 数值模拟中,颗粒的形状和尺寸是建立离散元模型的基础。考虑到小麦籽粒为椭球形,采用三轴尺寸来描述其形状和尺寸,设置长为 6.2 mm、宽为 3 mm、厚为 3 mm^[20]。小麦茎秆为空心圆柱体,长为 30 mm,外径为 4.5 mm,内径为 4.0 mm。为创建能真实模拟小麦籽粒和茎秆形状的离散元模型,先基于以上数据在 SpaceClaim 软件中建立小麦籽粒和茎秆的三维几何模型,经网格化处理获得 .stl 格式的文件,然后导入 Rocky 形成如图 2 所示小麦籽粒和茎秆的离散元模型。



(a) 小麦籽粒

(b) 小麦茎秆

图 2 小麦籽粒和茎秆的离散元模型

Figure 2 DEM model of wheat grain and wheat stem

1.3 其他参数的确定

在数值模拟之前需要定义往复振动筛、小麦籽粒和茎秆的材料属性参数,并且籽粒—往复振动筛、茎秆—往复振动筛、籽粒—籽粒、籽粒—茎秆、茎秆—茎秆相互之间存在交互作用,因此需要定义其交互作用的接触参数。按照表 1 和表 2 对 Rocky 中相关参数进行设置^[20]。

表 1 材料属性

Table 1 Material property

材料	密度/(kg · m ⁻³)	剪切模量/Pa	泊松比
Q235(振动筛)	7 830	5.35E+10	0.274
籽粒	1 350	3.78E+06	0.400
茎秆	160	2.80E+06	0.400

表 2 接触属性参数

Table 2 Parameters for contact property

相互作用	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数
籽粒—振动筛	0.8	0.08	0.5
茎秆—振动筛	0.8	0.01	0.5
籽粒—籽粒	1.0	0.08	0.6
籽粒—茎秆	0.8	0.01	0.2
茎秆—茎秆	0.8	0.01	0.2

运动方式设置:通过指定振动频率、振幅和振动方向来设置往复振动筛的振动运动。

设置总进料小麦颗粒数量为 7 992 个,其中籽粒 7 599 个,茎秆 393 个,设置进料速度为籽粒 1 t/h,茎秆 0.05 t/h。

1.4 多因素正交旋转组合试验设计

为确定往复振动筛运动参数与筛分效率间的精确量化关系,以振动频率、振动方向角、振幅和筛面倾角为试验因素,以筛分效率为试验指标,设计四因素三水平正交旋转组合试验;经离散元数值模拟试验后,获取不同试验条件下的筛分效率,并对筛分效率进行回归分析,最终得到往复振动筛的最优运动参数组合。其中,筛分效率为小麦籽粒统计域中小麦籽粒的质量和给料中所含小麦籽粒质量的比值。

2 结果与分析

2.1 物料在筛面上的运动分析

数值模拟试验表明,所有试验中颗粒群的运动趋势大体相同。因此,以运动参数中振动频率为 15 Hz,振动方向角为 22.5°,振幅为 4 mm,筛面倾角为 6°时的颗粒群运动为例进行分析。

由图 3 可知,随着时间的增加,颗粒群的纵向(沿筛体长度方向)平均速度逐渐增加,而横向(沿筛体宽度方向)平均速度几乎一直为零,表明颗粒群在整个筛分过程中进行直线运动,与理论一致^[21],表明数值模拟试验的相关参数设置合理。

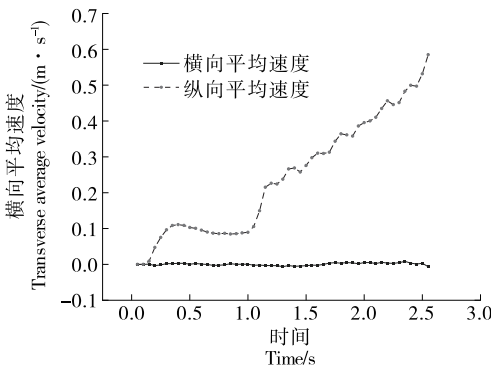


图 3 筛分过程中颗粒群平均速度
Figure 3 Average velocity of particle swarm during screening

由图 4 可知,0~1 s 内,小麦籽粒和茎秆颗粒群在重力作用下自由下落后平铺在筛面上,并由于筛面倾角的存在而沿筛体纵向向出料口方向推进,此时直径小于筛孔尺寸的小麦籽粒通过筛孔落到小麦籽粒统计域中;1 s 后,随着筛体往复运动,颗粒群继续沿筛体纵向向出料口方向推进,同时随着直径小于筛孔尺寸的小麦籽粒通过筛孔落到小麦籽粒统计域中,导致颗粒群厚度逐渐变薄。在整个筛分过程中,除少数茎秆以直立或近似直立的方式通过筛孔落到小麦籽粒统计域中,大部分茎秆留在筛面上并沿筛面逐渐从高处滑至低处,集中到出料口进入茎秆统计域;同时,可以观察到少数比筛孔小的小麦籽粒由于与筛面碰撞、弹跳或被茎秆颗粒群裹挟经出料口进入茎秆统计域。

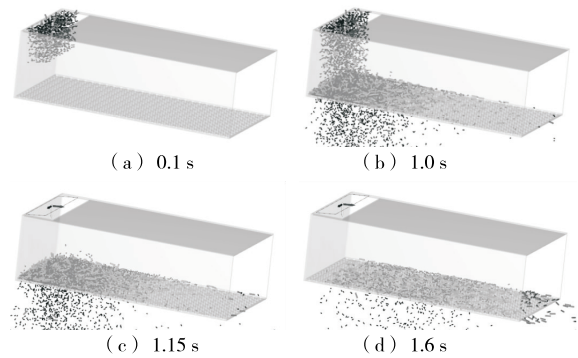


图 4 筛分过程中颗粒群的运动
Figure 4 Motion of particle swarm during screening

2.2 多因素正交旋转组合试验结果分析

根据设计的多因素正交旋转组合试验进行数值模拟,试验因素水平见表 3,试验结果见表 4。

根据表 4,得到筛分效率的二次多项式回归模型为:

$$y = 80.15 + 1.30X_1 + 0.63X_2 + 5.72X_3 + 2.13X_4 - 0.03X_1X_2 - 0.24X_1X_3 - 0.07X_1X_4 - 0.07X_2X_3 - 0.03X_2X_4 - 0.19X_3X_4 - 0.01X_1^2 - 0.37X_3^2 - 0.13X_4^2. \quad (3)$$

由表 5 可知,回归模型 P 值 < 0.01 ,极显著。各因素对筛分效率有极显著影响 ($P < 0.01$),影响大小依次为筛面倾角 $>$ 振幅 $>$ 振动方向角 $>$ 频率;交互项中 X_2X_3 对筛分效率影响显著 ($P < 0.05$), X_1X_2 、 X_2X_4 对筛分效率影响

表 3 试验因素水平编码表

Table 3 Factors and levels of simulation test

水平	X_1 振动频率/Hz	X_2 振动方向角/(°)	X_3 振幅/mm	X_4 筛面倾角/(°)
-1	10	0.0	2	0
0	15	22.5	4	6
1	20	45.0	6	12

极显著($P<0.01$)。此外,模型的决定系数 R^2 与校正决定系数均接近 1,精密密度为 21.021 2,说明筛分效率拟合回归模型具有较高的可靠性。

由图 5(a)可知,当振动方向角由 45° 降至 0° 时,筛面

表 4 多因素正交旋转组合试验结果
Table 4 Design and results of orthogonal test

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	筛分效率/%
1	1	1	-1	-1	73.05
2	0	0	0	0	90.71
3	-1	-1	-1	1	99.82
4	-1	-1	1	1	86.74
5	0	0	0	0	71.15
6	-1	-1	-1	-1	99.79
7	1	1	0	1	77.46
8	0	0	-1.546 7	0	97.93
9	1	-1	-1	-1	92.92
10	1	1	1	-1	96.93
11	-1	1	1	1	40.18
12	0	0	0	-1.546 7	99.68
13	0	-1.546 7	0	0	97.96
14	-1	1	-1	1	91.17
15	0	0	0	0	87.50
16	0	0	0	-1.546 7	99.05
17	1	-1	1	-1	99.87
18	1	-1	1	1	98.43
19	0	0	-1.546 7	0	96.78
20	-1	1	-1	-1	80.76
21	-1	-1	1	-1	74.64
22	-1.546 7	0	0	0	92.92
23	-1	1	1	-1	57.36
24	-1.546 7	0	0	0	98.50
25	0	-1.546 7	0	0	92.81
26	1	-1	-1	1	65.75
27	1	1	-1	1	98.50

倾角越小,筛分效率越大;筛面倾角越大,筛分效率增幅越大;筛面倾角越小,筛分效率增幅相对较少。由图 5(b)可知,当频率由 20 Hz 降至 10 Hz 时,振动方向角越小,筛分效率越大;振动方向角越大,筛分效率增幅越大;振动方向角越小,筛分效率增幅相对较少。由图 5(c)可知,当振动方向角由 45° 降至 0° 时,振幅越小,筛分效率越大;振幅越大,筛分效率增幅越大;振幅越小,筛分效率增幅相对较少。基于交互效应分析可知,当振动方向角与筛面倾角、频率与振动方向角、振动方向角与振幅同时减少时,筛分效率会提高。

为获得往复振动筛的最佳运动参数,根据往复振动

表 5 回归模型方差分析[†]
Table 5 ANOVA of regression mode

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	6 185.58	14	441.83	22.91	<0.000 1 **
X ₁	639.75	1	639.75	33.17	<0.000 1 **
X ₂	882.41	1	882.41	45.75	<0.000 1 **
X ₃	1 044.52	1	1 044.52	54.15	<0.000 1 **
X ₄	2 481.51	1	2 481.51	128.65	<0.000 1 **
X ₁ X ₂	211.05	1	211.05	10.94	0.006 2 **
X ₁ X ₃	91.35	1	91.35	4.74	0.050 2
X ₁ X ₄	64.76	1	64.76	3.36	0.091 8
X ₂ X ₃	164.42	1	164.42	8.52	0.012 9 *
X ₂ X ₄	256.72	1	256.72	13.31	0.003 3 **
X ₃ X ₄	82.13	1	82.13	4.26	0.061 4
X ₁ ²	0.82	1	0.82	0.04	0.839 9
X ₂ ²	1.05	1	1.05	0.05	0.819 6
X ₃ ²	24.80	1	24.80	1.29	0.279 0
X ₄ ²	240.30	1	240.30	12.46	0.004 1
总和	6 417.05	26			

[†] * 表示显著($P<0.05$); ** 表示极显著($P<0.01$); $R^2=0.96$; $R^2_{adj}=0.92$ 。

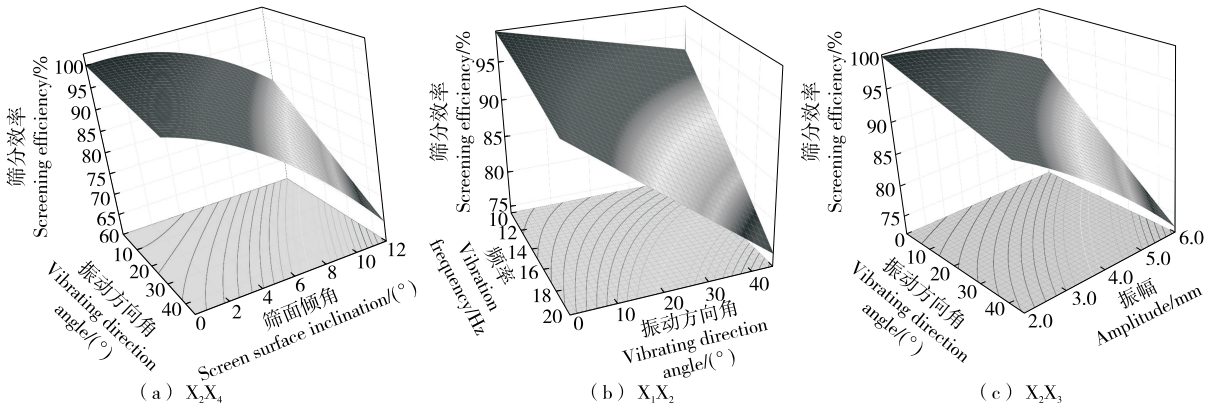


图 5 3D 响应曲面图

Figure 5 3D response surface map

筛的实际工作条件及筛分性能要求选定运动参数优化的约束条件,以筛分效率最大为目标,确定目标及约束函数为:

$$\begin{cases} \max & y \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 10 \text{ Hz} \leq X_1 \leq 20 \text{ Hz} \\ 0^\circ \leq X_2 \leq 45^\circ \\ 2 \text{ mm} \leq X_3 \leq 6 \text{ mm} \\ 0^\circ \leq X_4 \leq 12^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

针对筛分效率的回归模型,运用 Design-Expert 13 软件中的优化算法进行参数优化,得到最优运动参数为振动频率 10 Hz、振幅 2 mm、振动方向角 45°、筛面倾角 0°。

3 结论

在 Workbench 平台下,利用 SpaceClaim 软件建立往复振动筛的三维几何模型,利用 Rocky 软件精确模拟小麦籽粒和茎秆在筛分过程中的运动行为。结果表明,小麦颗粒群进行直线运动,验证了利用 Rocky 进行离散元数值模拟的正确性和可行性;振动频率、振幅、振动方向角和筛面倾角对筛分效率有显著影响($P < 0.05$),且筛面倾角和振幅对筛分效率的影响最大;振动方向角与筛面倾角、频率与振动方向角以及振动方向角与振幅间的交互作用对筛分效率具有显著影响($P < 0.05$);最优运动参数为振动频率 10 Hz、振幅 2 mm、振动方向角 45°、筛面倾角 0°。后续将进行充分的实验验证。

参考文献

- [1] 朱珊珊, 武文斌, 贾华波, 等. 国外粮食清理往复直线振动筛的技术现状及发展[J]. 粮食加工, 2016, 41(1): 47-49.
ZHU S S, WU W B, JIA H B, et al. The technical status and development of reciprocating linear vibrating screen for grain cleaning abroad[J]. Grain Processing, 2016, 41(1): 47-49.
- [2] 李文静, 刘引, 侯守峰, 等. TQLZ 自衡振动筛疲劳分析[J]. 粮食加工, 2018, 43(3): 57-60.
LI W J, LIU Y, HOU S F, et al. Fatigue analysis of TQLZ self-balancing vibrating screen[J]. Grain Processing, 2018, 43(3): 57-60.
- [3] 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.
WANG Z Y, REN N, WU W B, et al. Research on screening results of reciprocating vibration screen based on discrete element method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 33-38.
- [4] 易启伟. 往复振动筛物料运动参数的计算仿真[J]. 武汉工业学院学报, 2005, 24(4): 50-52.
YI Q W. Program calculation and simulation of materials movement of a vibrating screen[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2005, 24(4): 50-52.
- [5] 王秉. 基于 DEM 离散元技术的玉米直线振动筛仿真分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 89-92.
WANG B. Analysis and simulation of corn vibrating screen based on DEM[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 89-92.
- [6] 于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005(5): 1-6.
YU J Q, FU H, LI H, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(5): 1-6.
- [7] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 1-17.
WANG L J, SONG L L, FENG X, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1-17.
- [8] IWASHITA K, ODA M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method [J]. Powder Technology, 1999, 109(1): 192-205.
- [9] 朱晓蒙, 蔡晓兰, 周蕾, 等. 离散元软件 EDEM 在矿冶工程中的应用与研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(12): 93-98.
ZHU X M, CAI X L, ZHOU L, et al. Application and research of discrete element software EDEM in mining and metallurgical engineering[J]. Software Guide, 2021, 20(12): 93-98.
- [10] 李云峰, 李云聪. 基于 Rocky DEM 的矿用刮板输送机的调直方法[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 148-152.
LI Y F, LI Y C. The straightening method of scraper conveyor based on Rocky DEM [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 148-152.
- [11] 曾乙伦, 甯尤军. 直线振动筛筛分过程与效果的动力学模拟分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(2): 163-168.
ZENG Y L, NING Y J. Dynamics simulation analysis of screening process and effect of linear vibrating screen[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(2): 163-168.
- [12] XIA H H, TONG X, LI Z F, et al. DEM-FEM coupling simulations of the interactions between particles and screen surface of vibrating screen[J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2017, 8(3): 250-263.
- [13] MA Z, LI Y M, XU L Z, et al. Dispersion and migration of agricultural particles in a variable-amplitude screen box based on the discrete element method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 173-180.
- [14] 李永祥, 李阳, 王明旭, 等. 基于 EDEM 的大产量原粮振动清理筛筛分效果分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 157-160.
LI Y X, LI Y, WANG M X, et al. Screening effect of large production raw grain vibration cleaning sieve based on EDEM[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(5): 157-160.
- [15] 张舰. 基于离散元法的曲柄连杆机构振动筛筛分模拟与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 39-41.
ZHANG J. Numerical simulation and experiment of crank link organization vibration screener based on discrete element method [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018: 39-41.

(下转第 80 页)

- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60: 102280.
- [12] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-245.
- DUAN X, ZHANG M, REN G Y, et al. Drying models and quality changes of rose subjected to infrared assisted spouted bed drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 238-245.
- [13] 周四晴. 基于红外干燥的益生菌浸渍怀山药休闲食品制备技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020: 5-7.
- ZHOU S Q. Study on preparation technology of probiotic impregnated Chinese yam (*Dioscorea spp.*) leisure food based on infrared drying [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020: 5-7.
- [14] 马立, 段续, 任广跃, 等. 红外—喷动床联合干燥设备研制与分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 119-124.
- MA L, DUAN X, REN G Y, et al. Development and analysis of infrared spouted bed combined drying equipment [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 119-124.
- [15] 柳鹏飞. 二维及三维矩形喷动床中大颗粒流场特性数值研究 [D]. 西安: 西北大学, 2019: 1-3.
- LIU P F. Numerical study on large particle flow field characteristics in 2D and 3D rectangular spouted bed [D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 1-3.
- [16] MILTNER M, JORDAN C, HARASEK M. CFD simulation of straight and slightly swirling turbulent free jets using different RANS-turbulence models[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 117-126.
- [17] SHIVES M, CRAWFORD C. Adapted two-equation turbulence closures for actuator disk RANS simulations of wind & tidal turbine wakes[J]. Renewable Energy, 2016, 92: 273-292.
- [18] 于晓丽, 王树杰, 袁鹏, 等. 两种湍流模型在潮流能水轮机数值模拟中的适用性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 114-120.
- YU X L, WANG S J, YUAN P, et al. Study on the applicability of two turbulence models in numerical simulation of tidal current turbine[J]. Journal of China Ocean University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 114-120.
- [19] 李东耀. 基于 Fluent 软件的流化床的气固两相流模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 18-19.
- LI D Y. Study on gas-solid flow model of fluidized bed based on fluent software[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 18-19.
- [20] 王敬哲. 气流—喷动床气固两相流动与干燥特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 55-58.
- WANG J Z. Study on gas solid two phase flow and drying characteristics in spouted bed with gas stream [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 55-58.
- [21] WU Z H, ARUN S M. Simulation of the hydrodynamics and drying in a spouted bed dryer[J]. Drying Technology, 2007, 25(1): 62-63.
- [22] ZHOU L, HAN C, BAI L, et al. CFD-DEM bidirectional coupling simulation and experimental investigation of particle ejections and energy conversion in a spouted bed[J]. Energy, 2020, 211: 118672.
- [23] 谭朝尹. 喷射环流反应器的数值模拟 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012: 15-19.
- TAN Z Y. Numerical simulation on the jet loop reactor [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012: 15-19.
- [24] ANSYS, Inc. ANSYS fluent theory guide [EB/OL]. (2018-08-01) [2022-05-22]. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/prod_page.html?pn=Fluent&prodver=4&lang=en.
- [25] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [26] MUSA O, ZHOU C, CHEN X, et al. Prediction of swirling cold flow in a solid-fuel ramjet engine with a modified rotation/curvature correction SST turbulence model[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 737-754.
- (上接第 67 页)
- [16] FENG Y, YUAN Z R. Discrete element method modeling of granular flow characteristics transition in mixed flow [J]. Computational Particle Mechanics, 2020, 8(6): 21-34.
- [17] Rocky DEM: Themost powerful particle simulation software [EB/OL]. [2022-08-11]. <https://rocky.esss.co/>.
- [18] 王宪良, 钟晓康, 耿元乐, 等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 100-107.
- WANG X L, ZHONG X K, GENG Y L, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 100-107.
- [19] 金钊. 玉米秸秆捡拾制粒机输送除土装置的仿真与试验 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021: 25-27.
- JIN Z. Simulation and experiment of the conveying and removing device on corn stalk granulator [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021: 25-27.
- [20] 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.
- WANG H D, RUAN J L, YUAN F L. Discrete element analysis of EDEM-based rotary combined multi-layer sieve screening process [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 151-157.
- [21] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 14.
- RUAN J L, WU W B. Principles and application of grain processing machine [M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 14.