

基于 DEM 的回转筛分数值模拟和效果研究

张昊晨, 张超, 曹宪周, 刘海芃, 高涛

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 在粮食储藏和加工过程中, 平面回转筛是重要的粮食筛分清理设备。研究各项筛分处理参数对回转筛筛分性能的影响, 并寻找回转筛的最优筛分参数。**方法** 基于离散元法 (DEM) 对回转筛在不同参数条件下的回转筛分过程进行数值模拟, 以筛分流量、回转速度、回转半径和筛面倾角为 4 项变量依次进行单因素分析, 得出各参数对筛分性能指标 (筛分效率、除杂效率和物料流动速度) 的影响规律, 再以此选取各因素的较优水平范围进行多因素正交试验, 并采用矩阵分析方法对试验结果进行权重排序。**结果** 得到了综合各项性能评价指标较优的参数组合: 筛分流量为 3.0 t/h, 回转速度为 465 r/min, 回转半径为 24 mm, 筛面倾角为 9°。**结论** 研究结果表明, 寻求更优的筛分效率必然会降低除杂效率和物料流动速度, 即物料在筛面上停留时间越长就越能增大其通过筛孔机会, 同时杂质通过筛孔的概率也在增大。

关键词: 粮食筛理; 离散元法; 筛分性能; 数值模拟

中图分类号: TS210.3; TS211.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)07-0241-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.027

Numerical Simulation and Effect of Rotary Screening Based on DEM

ZHANG Hao-chen, ZHANG Chao, CAO Xian-zhou, LIU Hai-peng, GAO Tao

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

ABSTRACT: Flat rotary screen is an important grain screening and cleaning device during grain storage and processing. The work aims to study the effect of the various screening parameters on the screening performance of rotary screen, and find out the optimal screening parameters. Based on the Discrete Element Method (DEM), numerical simulation was carried out to the rotary screening under different parameters. Four variables of screening flow, rotation speed, rotation radius and screen inclination were adopted in turn to conduct single factor analysis. Then, the effect law of each parameter on screening performance indexes of screening efficiency, impurity removal efficiency and material flow speed was obtained, and the optimal level range of each factor was selected for multi-factor orthogonal test. Finally, the test results were weighted by matrix analysis method. The better parameter combination of comprehensive performance evaluation indexes was obtained: screening flow of 3.0 t/h, rotation speed of 465 r/min, rotation radius of 24 mm, and screen inclination of 9°. Seeking better screening efficiency will inevitably reduce the impurity removal efficiency and material flow speed, that is, the longer retention time on the screening surface can increase the chance for materials to pass through the screen. Therefore, the probability of impurities passing through the screen is also increasing.

KEY WORDS: grain screening; Discrete Element Method (DEM); screening performance; numerical simulation

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0401101); 河南省教育厅高等学校重点科研项目 (22B460006); 河南工业大学高层次人才基金 (2019BS016)

作者简介: 张昊晨 (1998—), 男, 硕士生, 主攻粮油加工装备。

通信作者: 张超 (1991—), 男, 博士, 讲师, 硕导, 主要研究方向为流体机械、粮油加工装备。

粮食清理是粮食安全中重要的一环,也是粮食储藏、加工和运输中的一个重要环节,我国粮食机械化收割比例日益增加,粮食的含杂率也相应增加,这对粮食产后清理的要求越来越高。寻求更有效的清理方法、研发更高效的清理设备,对维护国家粮食安全,推进优质粮食工程,以及节粮减损、节能减排都具有重要意义。平面回转筛做为粮食清理成套设备中的重要装备,其工作性能直接影响整个粮食清理流程的工作效率^[1]。

近年来,高性能计算和超算平台的高速发展^[2],使数值模拟仿真的可行性和准确性大大提高,为“仿真指导试验,试验验证仿真”的现代化、数字化设计方法提供了技术支撑^[3]。通过离散元方法对粮食清理设备进行数值模拟和虚拟仿真的体系也已经逐步发展起来,在虚拟试验中直观多维地观察并统计颗粒群的运动情况,探究影响筛分性能的因素及其规律,能大大减少制造样机进行试验的时间和成本^[4]。基于此,国内外许多学者进行了一系列针对筛分设备的数值模拟研究。国外的 Cleary 等^[5]首先应用离散元软件对香蕉型振动筛的颗粒流动进行了 DEM 仿真,模拟颗粒在不同加速度下的运动情况; Trumic 等^[6]以不同密度、体积、粒度分布和形状的颗粒进行了筛选过程的仿真和试验验证; Elskamp 等^[7]应用球形和非球形颗粒的 DEM 模拟对不同运动参数下的筛选过程进行基准测试,结果表明筛机运动参数和颗粒形状对筛分结果均极具相关性。国内的王中营等^[8]采用离散元软件 PFC3D 研究了往复振动筛的振幅、振动频率、振动方向角和筛面倾角对筛分效率和筛上物输送量的影响规律; Li 等^[9]以 5 个筛体运动参数为变量进行定量分析,研究了其对不同粒径颗粒筛分效率的影响; Wang 等^[10]对不同形状颗粒的振动筛分进行模拟,发现颗粒形状对筛分效率的影响趋势是一致的; 张舰等^[11]进行谷物振动筛分过程的 DEM 模拟,研究不同筛面开孔率、筛孔形状及物料的形状对筛分效率的影响; 王豪东等^[12]通过 EDEM 软件模拟了小麦在平面回转筛筛选过程中的运动情况,从单因素角度分析各参数对物料筛分性能的影响; 陈智权等^[13]采用离散元法与有限元法 (DEM-FEM) 的耦合算法,对椭圆振动筛的筛分过程进行了数值模拟,探究不同运动参数下的筛分结果和物料对筛面的碰撞影响。通过数值模拟仿真和相应的物理试验对比,验证 DEM 仿真结果的准确性和可靠性,采用田口正交方法设计试验或仿真以寻求设备的最优工艺参数^[14],这一系列的研究方法也被广泛使用。

目前,对粮食清理设备的离散元数值模拟和筛分机理研究大多集中在振动筛上,而针对回转筛筛理过程的数值模拟分析还未深入,有关回转筛筛分性能影响因素的机理研究还停留在理论阶段。本文将通过离散元数值模拟对平面回转筛筛理过程进行仿真分析,在单因素和多因素正交试验中分析回转筛的筛分参数对筛分性能指标的影响,并基于矩阵分析法快速优化筛分参数。

1 回转筛的筛体模型

以 TQLM 平面回转筛为研究对象,如图 1 所示,针对上层大杂筛面,经过简化在 SolidWorks 软件中建立回转筛筛箱的三维模型,然后以 stl 格式导入离散元软件中用于大杂筛分过程的数值模拟,表 1 为筛箱模型的具体参数。筛箱的坐标系方向设置:以筛体中心为原点,沿筛面长为 x 轴方向,沿筛面宽为 y 轴方向,沿筛箱高为 z 轴方向。筛箱的运动形式设置为 x 轴正弦运动与 y 轴余弦运动叠加所形成的平面圆回转运动,筛箱的回转速度和回转半径分别通过调节 x 轴正弦运动、 y 轴余弦运动的频率和振幅实现。

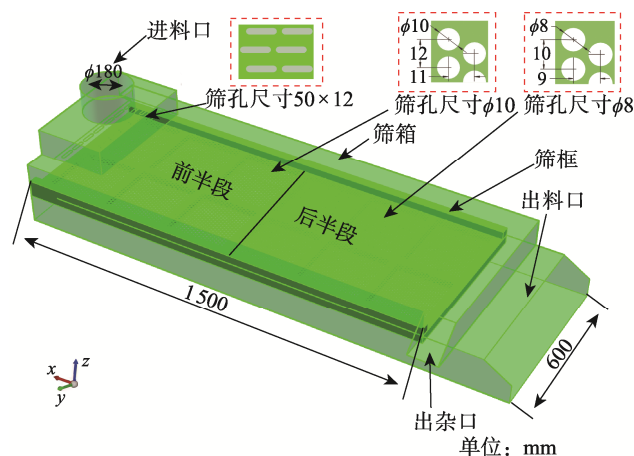


图 1 回转筛筛箱简化几何模型
Fig.1 Simplified geometric model of the rotary screen box

表 1 回转筛仿真模型的相关参数
Tab.1 Relative parameters of the rotary screen simulation model

模型参数	数值
筛网长度/mm	1 500
筛网宽度/mm	600
筛网厚度/mm	2
筛孔直径/mm	10 (前段) / 8 (后段)
回转轨迹	圆形
回转半径 r /mm	10 ~ 30
回转速度 n /(r·min ⁻¹)	300 ~ 540
筛面倾角 α /(°)	4 ~ 12

2 筛分过程的数值模拟

在筛分过程的仿真中,小麦籽粒采用椭球颗粒,如图 2 所示。为简化计算只考虑茎秆和石子做为除杂对象,在颗粒几何体类型中设置多面体作为石子颗粒模型,以柱状体纤维作为茎秆颗粒模型,各颗粒的粒径分布采用正态分布,质量分数和粒径分布见表 2。

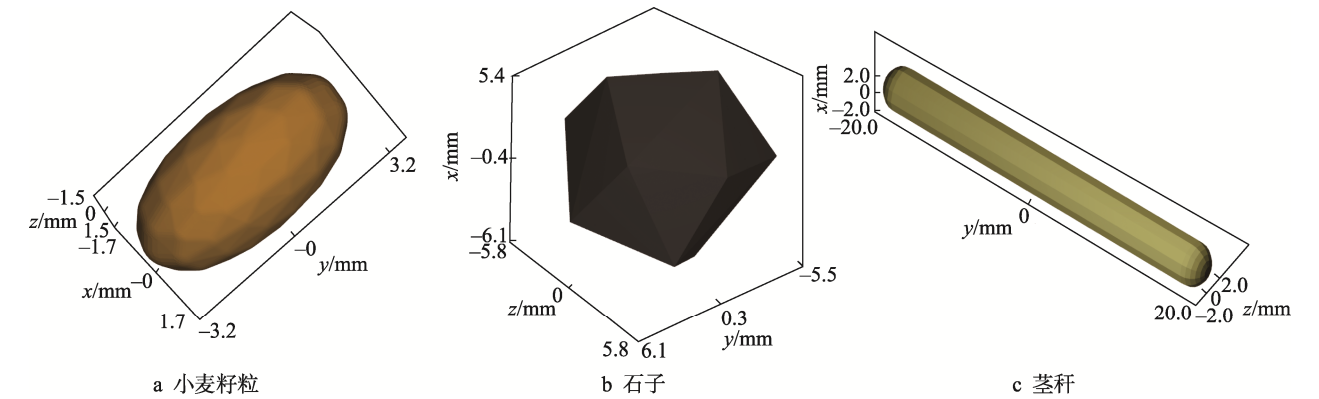


图 2 颗粒模型
Fig.2 Particle model

回转筛筛分的过程包含大量颗粒之间的复杂接触碰撞, 颗粒间的接触模型选取 Hertz–Mindlin 无滑动接触模型^[15]。小麦籽粒、茎秆、石子以及筛箱的物理参数^[16-19]设置见表 3、表 4。

表 2 颗粒的质量分数和粒径分布
Tab.2 Mass fraction and size distribution of the particles

颗粒	质量分数/%	粒径分布/mm
小麦	95	5.60 ~ 7.20
石子	2	10.00 ~ 15.00
秸秆	3	4.00 ~ 10.00

表 3 材料物理特性参数
Tab.3 Physical property parameters of materials

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)
小麦	0.40	0.135	1 350
茎秆	0.40	0.02	160
石子	0.29	11	2 090
Q235	0.27	79	7 830

表 4 材料接触属性参数
Tab.4 Material contact property parameters

材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
小麦–小麦	0.46	0.58	0.08
小麦–Q235	0.48	0.80	0.01
小麦–石子	0.50	0.50	0.01
小麦–茎秆	0.26	0.34	0.01
茎秆–茎秆	0.28	0.38	0.01
茎秆–石子	0.20	0.60	0.01
茎秆–Q235	0.68	0.32	0.01
石子–石子	0.70	0.84	0.08
石子–Q235	0.75	0.47	0.01

如图 3 所示, 在进料口处设置颗粒工厂 (跟随筛体运动), 生成含有大杂 (秸秆、石子) 和小麦的原粮颗粒, 筛下物为过筛的小麦以及部分秸秆, 筛上物为大杂和正在过筛的小麦。在筛分过程中, 原粮从进料口不断产生, 并在重力的作用下向筛面下落。在每组试验的前 1 s 左右物料下落至筛面, 开始时一组混合无序的颗粒堆积在筛面前端, 然后在筛箱回转运动

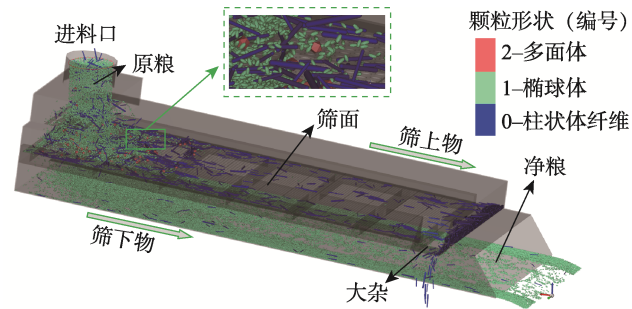


图 3 回转筛分过程的数值模拟
Fig.3 Numerical simulation of the rotary screening process

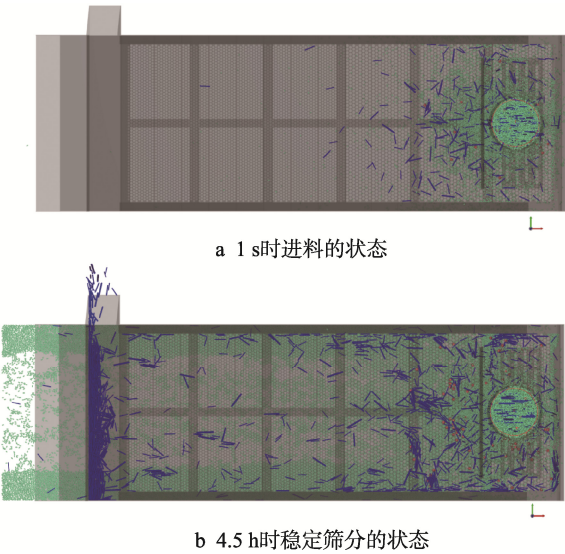


图 4 回转筛分的过程
Fig.4 Rotary screening process

的影响下,沿着筛面长度方向逐渐扩散、分层和移动。颗粒在经历与其他颗粒和筛箱内壁的多次碰撞后,通过筛面到达筛箱尾端,分别经出杂口和出料口排出,最后溢出计算域。

3 数值模拟结果分析

3.1 评价指标

1) 指标 1。筛分效率是评定可筛过物颗粒分离程度的指标,除杂效率是用于评定杂质分离程度的指标。粮食的筛分效率定义:筛分后所得筛过物质量与筛分原料中所含可筛过物质量的比值。为了便于试验统计,根据物料流量平衡原理,可导出其计算公式见式(1)。

$$\eta = \frac{\omega_x - \omega_y}{\omega_x (1 - \omega_y)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω_x 为原粮中可筛过物的质量分数,%; ω_y 为筛上物中可筛过物的质量分数, %。

2) 指标 2。除杂效率定义为粮食筛分清理前后含杂率的变化率与原粮含杂率的比值。其计算公式见式(2)。

$$\eta' = \frac{\omega_a - \omega_b}{\omega_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ω_a 为粮食清理前含杂率,%; ω_b 为粮食清理后含杂率, %。

根据实际,仿真模拟设定原粮中可筛过物质量分数 ω_x 为 95%,那么粮食清理前含杂率 ω_a 为 5%,根据式(1)和式(2),只需统计每组仿真筛上物中可筛过物的质量分数 ω_y 和粮食清理后的含杂率 ω_b 即可得到筛分效率和除杂效率 2 个指标值。考虑到进料阶段筛面上的物料流量还未达到稳定平衡,所以计算 η 和 η' 时只统计稳态筛分过程的 ω_y 和 ω_b ,如图 5 所示,该组模拟中的稳态筛分时间段为 2.75~5 s。

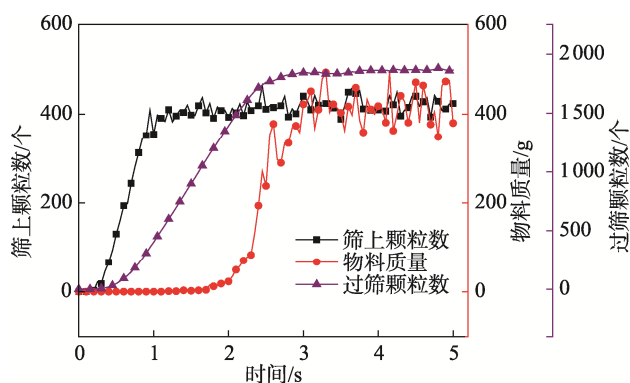


图 5 物料的流量变化
Fig.5 Variation in material flow

3) 指标 3。筛分物料的流动速度是以地面为参考系,物料从进料口经过筛面运动到出料口的速度即为筛面长度 l 与物料在筛面上滞留时间 t 的比,物料流动速度对筛分过程有很大的影响。物料流动速度过

大,颗粒将越过筛孔不能过筛,会影响物料的筛分效率和除杂效率;物料流动速度过小,则又影响筛分工序的生产率,因此,物料流动速度也是评定回转筛性能的一个重要指标。如图 6 所示,物料的滞留时间在筛分 4.5 s 后达到稳定,根据统计物料在筛面上达到稳定后的滞留时间 t ,即可得到物料流动速度 v 。

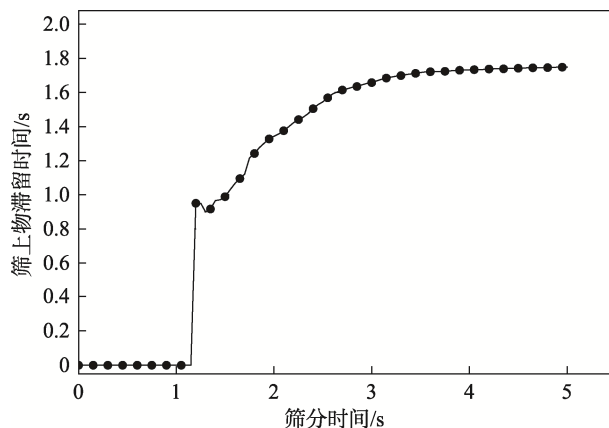


图 6 物料滞留时间的变化
Fig.6 Change in material retention time

3.2 单因素分析

为了研究筛分参数对平面回转筛性能指标(筛分效率、除杂效率和物料推进速度)的影响规律和机理,对各参数进行了单变量试验。初始基准条件:回转半径 $r=20$ mm,回转速度 $n=420$ r/min,筛分流量 $Q=4.0$ t/h,筛面倾角 $\alpha=6^\circ$ 。单个参数值可调节,而其他参数值在单变量试验中保持不变。以此设计 4 组单变量试验,每组 5 个对照试验。

第 1 组试验以物料的筛分流量 Q 为变量,分别设置为 3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 t/h,其余参数保持不变。由数值模拟结果计算出筛分效率、除杂效率和物料流动速度对筛分性能指标的影响,如图 7 所示。由图 7 可分析出,筛分流量主要影响回转筛的筛分效率和除杂效率,对物料的流动速度影响甚微。显然筛分流量与料层厚度成正比,物料流量越大,料层越厚,小麦颗粒在筛面上的分散程度越低,因此,小麦颗粒能够通过筛的概率就越小,筛分效率和除杂效率随之降低。

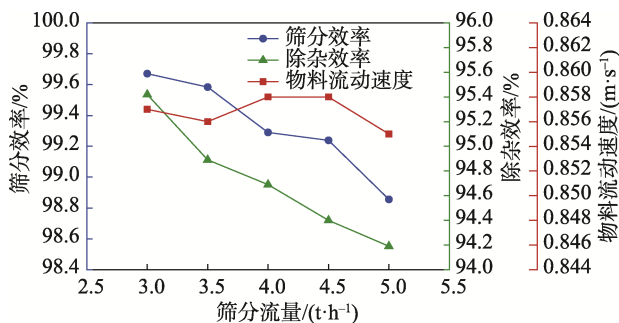


图 7 筛分流量变化下的试验结果
Fig.7 Test results under the change of screening flow

第 2 组试验以回转速度 n 为变量, 分别设置为 300、360、420、480、540 r/min, 其余参数保持不变。由数值模拟结果得到回转速度对筛分性能指标的影响, 如图 8 所示。由图 8 可看出, 随着筛箱回转速度的增大, 筛分效率先小幅度提高后大幅降低, 物料流动速度和除杂效率则是一直增大, 且当 $n=480$ r/min 时, 筛分效率达到最高值。由此得出, 筛体回转速度变大, 物料向四周分散和流动的速度也增大, 大杂和筛面接触的机会减小, 就会减少筛下物中的大杂含量, 因此除杂效率随着回转速度的增大不断提高, 但是过快的流动速度会导致小麦颗粒来不及过筛, 从而使得筛分效率降低。

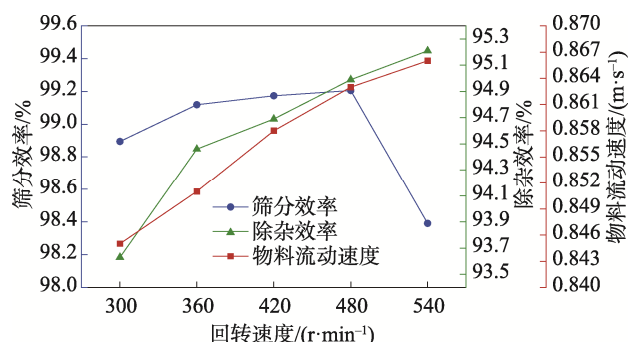


图 8 回转速度变化下的试验结果

Fig.8 Test results under the change of rotation speed

第 3 组试验以回转半径 r 为变量, 分别设置为 10、15、20、25、30 mm, 其对筛分性能指标的影响如图 9 所示。由图 9 可看出, 随着筛箱回转半径的增大, 筛分效率和除杂效率不断降低, 物料流动速度则是一直增大, 且当 $r=15$ mm 时, 除杂效率基本不再变化。由此分析出, 筛箱回转半径越大, 物料流动速度越大, 小麦颗粒过筛率降低, 筛分效率和除杂效率下降。

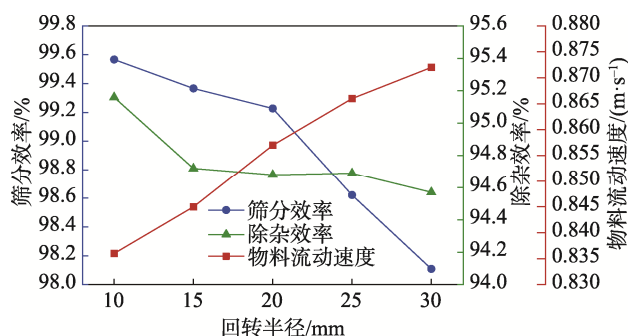


图 9 回转半径变化下的试验结果

Fig.9 Test results under the change of rotation radius

第 4 组试验以筛面倾角 α 为变量, 分别设置为 4°、6°、8°、10°、12°, 其对筛分性能指标的影响如图 10 所示。由图 10 可看出, 随着筛面倾斜角度的增大, 筛分效率急剧降低, 但物料流动速度和除杂效率急剧增大。由此分析出, 筛面倾斜角度的增大, 使物料受筛面沿向筛面尾端方向的推动力变大, 下滑的速度不

断增大, 同时小麦颗粒在筛面上停留时间减短, 过筛概率急剧下滑, 导致筛分效率降低。对于除杂效率, 考虑到能过筛的大杂只有茎秆, 仿真中发现能穿过筛孔的茎秆大都处于垂直或者接近垂直的下落状态, 即茎秆过筛的概率与其下落时与筛面的夹角有关, 夹角越大越容易过筛。筛面倾角的适当增大, 使得茎秆与筛面间的夹角相应变小, 茎秆过筛的概率也变小, 筛下物中大杂含量降低, 随之除杂效率提高。为了加快物料流动速度, 提高筛分产量, 同时又要保证筛分效率和除杂效率, 则可以适当加大筛面倾角。

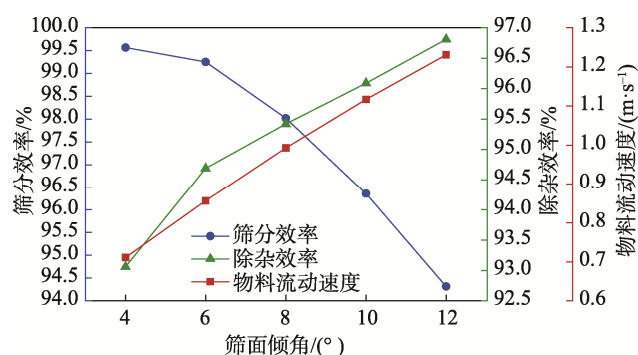


图 10 筛面倾角变化下的试验结果

Fig.10 Test results under the change of screen inclination

3.3 多因素分析

上文通过单因素分析得到了影响 3 项筛分性能指标的规律以及各因素的较优水平范围, 但是回转筛分的各个筛分参数都是影响筛分性能的因素, 且各参数之间相互联系、相互制约。为了更快速可靠地掌握试验对象之间的相互影响关系, 比较各因素对指标的影响程度, 完成参数优化, 本文采用田口正交试验法, 设计一组四因素四水平正交试验。选用 $L_{16}(4^4)$ 正交表, 以回转筛的筛分流量 A 、回转速度 B 、回转半径 C 和筛面倾角 D 为 4 项试验因素, 根据各因素的较优水平范围设计每个因素的 4 个水平, 进行多因素多指标的数值模拟试验, 具体的各因素和水平及模拟结果见表 5、表 6。对模拟结果进行极差分析, 以评价筛分参数对 3 项性能指标的影响相关性, 结果见图 11。

图 11a 直观地显示了筛分效率的极差对比, 筛选效率随着回转半径、回转速度、筛面倾角的增加而降低, 但随着筛分流量的增大筛分效率略有提高, 根据极差对比, 4 个影响因素与筛分效率的相关性从大到小排序为 α 、 n 、 r 、 Q , 倾角对筛分效率的影响最大, 对筛分流量的影响最小。

图 11b 显示了除杂效率的极差对比, 除杂效率随着回转速度和筛面倾角的增大而提高, 随着筛分流量的增大而降低。根据极差对比, 4 个影响因素对除杂效率的相关性从大到小排序为 α 、 Q 、 n 、 r , 倾角对筛分效率影响最大, 对回转半径的影响最小。

表 5 正交试验的因素水平
Tab.5 Factor level for orthogonal tests

水平	因素			
	$Q(A)/(t \cdot h^{-1})$	$n(B)/(r \cdot \min^{-1})$	$r(C)/mm$	$\alpha(D)/(^{\circ})$
1	3.0	465	18	6
2	3.2	480	20	7
3	3.4	495	22	8
4	3.6	510	24	9

表 6 正交试验的数值模拟结果和极差分析
Tab.6 Numerical simulation results and extreme analysis of orthogonal tests

编号	因素				指标值		
	$A/(t \cdot h^{-1})$	$B/(r \cdot \min^{-1})$	C/mm	$D/(^{\circ})$	$\eta/\%$	$\eta'/%$	$v/(m \cdot s^{-1})$
1	3	465	18	6	99.66	95.63	0.855
2	3	480	20	7	98.86	95.95	0.933
3	3	495	22	8	97.75	96.31	1.003
4	3	510	24	9	96.52	96.75	1.071
5	3.2	465	20	8	98.08	95.94	0.996
6	3.2	480	18	9	97.15	96.37	1.049
7	3.2	495	24	6	98.99	95.31	0.873
8	3.2	510	22	7	98.33	95.94	0.94
9	3.4	465	22	9	97.03	96.12	1.063
10	3.4	480	24	8	97.76	95.86	1.007
11	3.4	495	18	7	98.81	95.67	0.928
12	3.4	510	20	6	99.08	95.41	0.861
13	3.6	465	24	7	98.77	95.35	0.941
14	3.6	480	22	6	99.32	95.08	0.864
15	3.6	495	20	9	96.97	96.09	1.065
16	3.6	510	18	8	97.81	95.79	0.994
k_{11}	98.2	98.38	98.36	99.26			
k_{12}	98.14	98.27	98.25	98.69			
k_{13}	98.17	98.13	98.11	97.85			
k_{14}	98.22	97.94	98.01	96.92	筛分效率直观分析		
R_1	0.08	0.45	0.35	2.34			
最优水平	A_4	B_1	C_1	D_1			
k_{21}	96.16	95.76	95.87	95.36			
k_{22}	95.89	95.81	95.85	95.73			
k_{23}	95.77	95.84	95.86	95.98			
k_{24}	95.58	95.97	95.82	96.33	除杂效率直观分析		
R_2	0.58	0.21	0.05	0.98			
最优水平	A_1	B_4	C_2	D_4			
k_{31}	0.966	0.964	0.957	0.863			
k_{32}	0.965	0.963	0.964	0.936			
k_{33}	0.965	0.967	0.968	1	物料流动速度直观分析		
k_{34}	0.966	0.967	0.973	1.062			
R_3	0.002	0.004	0.017	0.199			
最优水平	A_4	B_3	C_4	D_4			

图 11c 显示了物料流动速度的极差对比, 物料流动速度随着回转速度、回转半径和筛面倾角的增大而提高, 根据极差对比, 4 个影响因素对物料流动速度的相关性从大到小排序为 α 、 r 、 n 、 Q , 筛面倾角对物料流动速度影响最大, 筛分流量最小。

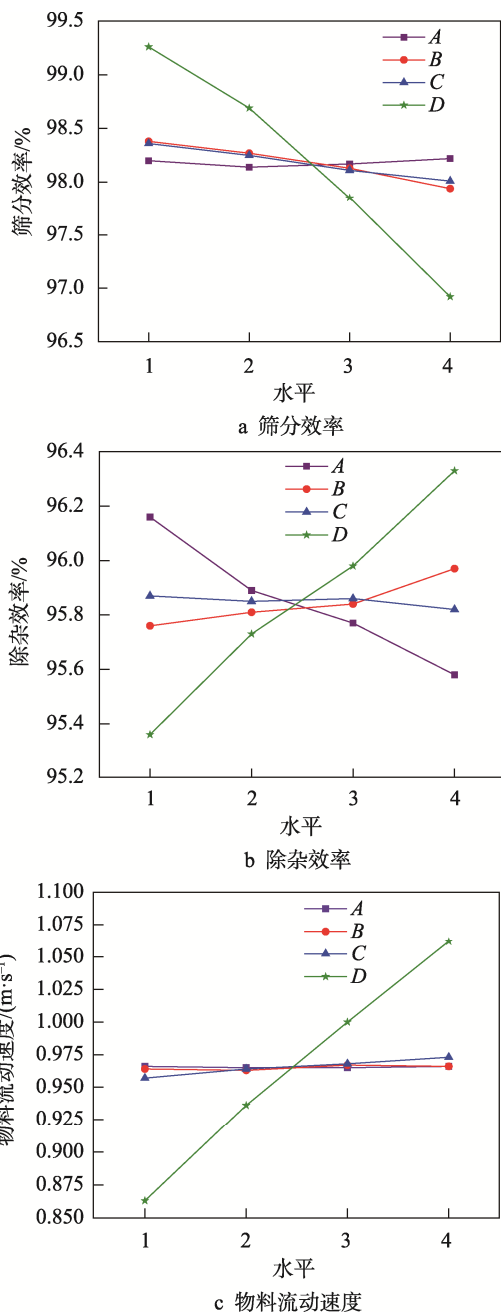


图 11 正交试验结果的极差分析
Fig.11 Range analysis of the orthogonal test results

由表 6 得到的正交试验结果和极差分析可知, 对于筛分效率, 最优参数组合为 $A_4B_1C_1D_1$, 即筛分流量取最高水平, 回转速度、回转半径、筛面倾角均取最低水平; 对于除杂效率, 最优参数组合为 $A_1B_4C_2D_4$, 即筛分流量取最低水平, 回转速度、筛面倾角均取最低水平, 回转半径取第 2 水平; 对于物料流动速度,

最优参数组合为 $A_4B_3C_4D_4$, 即筛分流量、回转半径、筛面倾角均取最高水平, 回转速度取第 3 水平。

3.4 矩阵分析评定

由于影响 3 项评价指标的最优方案不一致, 在

单指标分析的基础上, 采用矩阵分析法对 3 项指标进行综合权重后选取最优方案, 以此解决回转筛运动参数的优化配置问题。根据表 5 中正交试验的数值结果可得到 3 项试验指标值的权重矩阵^[14], 计算方法如下。

$$M_1 = \begin{bmatrix} 98.20 & 0 & 0 & 0 \\ 98.14 & 0 & 0 & 0 \\ 98.17 & 0 & 0 & 0 \\ 98.22 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 98.38 & 0 & 0 \\ 0 & 98.27 & 0 & 0 \\ 0 & 98.13 & 0 & 0 \\ 0 & 97.94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 98.36 & 0 \\ 0 & 0 & 98.25 & 0 \\ 0 & 0 & 98.11 & 0 \\ 0 & 0 & 98.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 99.26 \\ 0 & 0 & 0 & 98.69 \\ 0 & 0 & 0 & 97.85 \\ 0 & 0 & 0 & 96.92 \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{392.7} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{392.7} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \frac{1}{392.7} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{392.7} \end{bmatrix}, S_1 = \begin{bmatrix} 0.08 \\ 3.22 \\ 0.45 \\ 3.22 \\ 0.35 \\ 3.22 \\ 2.34 \\ 3.22 \end{bmatrix}, W_1 = M_1 \cdot T_1 \cdot S_1 = \begin{bmatrix} 0.006 & 212 \\ 0.006 & 208 \\ 0.006 & 210 \\ 0.006 & 214 \\ 0.035 & 008 \\ 0.034 & 969 \\ 0.034 & 919 \\ 0.034 & 852 \\ 0.027 & 223 \\ 0.027 & 193 \\ 0.027 & 154 \\ 0.027 & 126 \\ 0.183 & 671 \\ 0.182 & 616 \\ 0.181 & 062 \\ 0.179 & 341 \end{bmatrix} \quad (3)$$

M_i 为试验指标层矩阵; T_i 为因素层矩阵; S_i 为水平层矩阵; W_i 为指标值的权重矩阵, 以 W_1 的计算方法式 (3) 为例, 同理可得到 W_2

和 W_3 , 计算结果见式 (4)。此正交试验评价指标的总权重矩阵为 3 个指标权重矩阵的平均值, 即:

$$W = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3} = \frac{1}{3} \times \left\{ \begin{bmatrix} 0.006 & 212 \\ 0.006 & 208 \\ 0.006 & 210 \\ 0.006 & 214 \\ 0.035 & 008 \\ 0.034 & 969 \\ 0.034 & 919 \\ 0.034 & 852 \\ 0.027 & 223 \\ 0.027 & 193 \\ 0.027 & 154 \\ 0.027 & 126 \\ 0.183 & 671 \\ 0.182 & 616 \\ 0.181 & 062 \\ 0.179 & 341 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.079 & 928 \\ 0.079 & 704 \\ 0.079 & 604 \\ 0.079 & 446 \\ 0.028 & 819 \\ 0.028 & 834 \\ 0.028 & 843 \\ 0.028 & 882 \\ 0.006 & 870 \\ 0.006 & 868 \\ 0.006 & 869 \\ 0.006 & 866 \\ 0.133 & 927 \\ 0.134 & 447 \\ 0.134 & 798 \\ 0.135 & 290 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.001 & 554 \\ 0.001 & 552 \\ 0.001 & 552 \\ 0.001 & 602 \\ 0.003 & 101 \\ 0.003 & 098 \\ 0.003 & 110 \\ 0.003 & 107 \\ 0.013 & 083 \\ 0.013 & 178 \\ 0.013 & 233 \\ 0.013 & 301 \\ 0.138 & 101 \\ 0.149 & 782 \\ 0.160 & 024 \\ 0.169 & 945 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0.029 & 231 \\ 0.029 & 155 \\ 0.029 & 122 \\ 0.029 & 087 \\ 0.022 & 309 \\ 0.022 & 300 \\ 0.022 & 291 \\ 0.022 & 280 \\ 0.015 & 725 \\ 0.015 & 746 \\ 0.015 & 752 \\ 0.015 & 764 \\ 0.151 & 900 \\ 0.155 & 615 \\ 0.158 & 628 \\ 0.161 & 525 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式 (4) 中权重矩阵的结果分析得到了各参数对评价指标的综合影响程度从大到小排序为 D 、 A 、 B 、 C , 即筛面倾角、筛分流量、回转速度、回转半径。其中因素 A 在四水平下对 3 项评价指标的影响总权重

分别为 $A_1=0.029\ 231$ 、 $A_2=0.029\ 155$ 、 $A_3=0.029\ 122$ 、 $A_4=0.029\ 087$, 显然 A_1 总权重最大; 同理, 因素 B 中 B_1 的总权重最大, 因素 C 中 C_4 的总权重最大, 因素 D 中 D_4 的总权重最大。由总权重选取的回转筛最优

参数组合方案为 $A_1B_1C_4D_4$, 即筛分流量 $Q=3.0$ t/h, 回转速度 $n=465$ r/min, 回转半径 $r=24$ mm, 筛面倾角 $\alpha=9^\circ$ 。根据此最优参数组合方案再进行数值模拟, 得出筛分效率为 97.36%, 除杂效率为 96.48%, 物料流动速度为 1.046 m/s。与正交试验的数值模拟结果对比, 其中除杂效率和物料流动速度这 2 项指标都处于较高值, 而筛分效率处于较低水平。这也说明回转筛的各项筛分性能指标无法同时达到最佳效果, 在追求较高筛分效率的同时就会降低除杂效率和处理量。

4 结 语

文中基于 DEM 对平面回转筛在不同参数条件下的回转筛分过程进行了数值模拟, 以筛分流量、回转速度、回转半径和筛面倾角为 4 个变量, 以筛分效率、除杂效率和物料流动速度为 3 项筛分性能评价指标, 进行单因素对比和多因素正交分析, 从研究内容中得出以下结论:

1) 单因素分析结果显示, 平面回转筛的各项筛分处理参数对筛分性能均有影响, 选择合适的参数能够保证较高的筛分效率和除杂效率, 并提高物料流动速度。

2) 分析正交试验结果得出, 各参数对性能评价指标的综合影响程度从大到小依次为筛面倾角、筛分流量、回转速度、回转半径, 即筛面倾角是影响筛分性能的最重要因素, 并且远大于筛分流量、回转速度和回转半径。因此, 在选取筛分参数时首先要确定合适的筛面倾角。

3) 筛分效率、除杂效率和物料流动速度 3 个性能指标互相制约, 寻求更优的筛分效率必然会降低除杂效率和物料流动速度, 即物料在筛面上停留时间越长就越能增大物料通过筛孔的概率, 同时杂质通过筛孔的概率也在增大。因此, 经过权重矩阵综合评定的较优参数组合方案为 $Q=3.0$ t/h、 $n=465$ r/min、 $r=24$ mm、 $\alpha=9^\circ$ 。

参考文献:

- [1] 原富林, 王凤成, 聂运强, 等. HZXZ 系列回转旋振筛的设计和應用[J]. 粮食与食品工业, 2015, 22(1): 68-71.
YUAN Fu-lin, WANG Feng-cheng, NIE Yun-qiang, et al. The Design and Application on HZXZ Series of Rotary Separator[J]. Cereal & Food Industry, 2015, 22(1): 68-71.
- [2] 董晓亮, 宋长青, 李俊清, 等. 高等农业院校高性能计算平台的建设与实践[J]. 中国现代教育装备, 2021(17): 5-7.
DONG Xiao-liang, SONG Chang-qing, LI Jun-qing, et

al. Construction and Application of the High Performance Computing Platform in the Agricultural University[J]. China Modern Educational Equipment, 2021 (17): 5-7.

- [3] 谢兴勇, 谭飞, 黄启益. 基于高性能计算的仿真平台建设运维策略探讨[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(9): 98-102.
XIE Xing-yong, TAN Fei, HUANG Qi-yi. Discussions on the Design Strategies of Numeric Simulation Platform Based on the High Performance Computing[J]. Digital Technology and Application, 2021, 39(9): 98-102.
- [4] 夏绪辉, 荆为民, 张泽琳, 等. 振动筛仿真研究、应用现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2689-2706.
XIA Xu-hui, JING Wei-min, ZHANG Ze-lin, et al. Simulation Research, Application Status and Development Trend of Vibrating Screen[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2689-2706.
- [5] CLEARY P W. DEM Prediction of Industrial and Geophysical Particle Flows[J]. Particuology, 2010, 8(2): 106-118.
- [6] TRUMIC M, MAGDALINOVIC N. New Model of Screening Kinetics[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(1): 42-49.
- [7] ELSKAMP F, KRUGGEL E H, HENNING M, et al. Benchmarking of Process Models for Continuous Screening Based on Discrete Element Simulations[J]. Minerals engineering, 2015, 83: 78-96.
- [8] 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 Zhong-ying, REN Ning, WU Wen-bin, 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.
- [9] LI Zhan-fu, TONG Xin, QIU Yun-fei. The Research of Particle Sieving under a Creative Mode of Vibration[J]. Journal of Vibroengineering, 2018, 19: 4172-4184.
- [10] WANG Xiao-yue, LI Zhan-fu, TONG Xin, et al. The Influence of Particle Shape on Screening: Case Studies Regarding DEM Simulations[J]. Engineering computations. 2018, 35: 1512-1527.
- [11] 张舰, 刘凡一, 陈军. 基于 DEM 的谷物清选筛振动筛分虚拟试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 187-191.

- ZHANG Jian, LIU Fan-yi, CHEN Jun. Virtual Vibration Screening Experiments of Grain Cleaning Sieve Based on DEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 187-191.
- [12] 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 Hao-dong, RUAN Jing-lan, YUAN Fu-lin. Discrete Element Analysis of EDEM-Based Rotary Combined Multi-Layer Sieve Screening Process[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 151-157.
- [13] CHEN Zhi-quan, TONG Xin, LI Zhan-fu. Numerical Investigation on the Sieving Performance of Elliptical Vibrating Screen[J]. Processes, 2020, 8(9): 1151-1175.
- [14] 伍毅. 基于矩阵分析法的回转清理筛运动参数仿真优化[J]. 粮食加工, 2020, 45(6): 47-51.
- WU Yi. Simulation and Optimization of Motion Parameters of Rotary Cleaning Screen Based on Matrix Analysis[J]. Grain Processing, 2020, 45(6): 47-51.
- [15] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. Introduction to Granular Material Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 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.
- LIU Fan-yi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of Parameters of Wheat Required in Discrete Element Method Simulation Based on Repose Angle of Particle Heap[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 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.
- LIU Fan-yi, ZHANG Jian, CHEN Jun. Construction of Visco-Elasto-Plasticity Contact Model of Vibratory Screening and Its Parameters Calibration for Wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 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.
- SUN Yan-xin, WANG Ming-xu, ZHANG Chao. Experiment Calibration of Contact Parameters between Wheat and Conveyor Belt[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 113-120.
- [19] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 基于 EDEM 的收获期小麦植株离散元参数标定[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 64-72.
- WANG Wan-zhang, LIU Wan-ru, YUAN Ling-he, et al. Calibration of Discrete Element Parameters of Wheat Plants at Harvest Period Based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 64-72.

责任编辑: 曾钰婵