

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.005

双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验

侯俊铭 任兆坦 朱红杰

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 蓖麻脱出物组分复杂,清选后含杂率高,且没有专用清选装置,清选效率低,为此设计一种双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置。首先对清选装置总体结构进行设计,采用双层风吹式同步振动结构。其次,对装置的振动筛、清选室、出料口等关键部件进行设计。采用离散元法对清选筛结构进行参数优化,以哲蓖4号为试验物料,测定物料离散元参数,通过单因素试验,分析上筛面筛孔排列型式、筛孔直径、筛面倾角对筛分效率和损失率的影响。确定最佳设计参数为U型筛孔排列、筛孔直径14 mm、筛面倾角 8° 。为了获取最优的工作参数,采用离散元法与计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)耦合方法对清选过程进行仿真分析。对单目标函数进行参数优化,当振动筛振幅为8.43 mm、振动筛振频为6.00 Hz、气流横向角为 40.00° 时,蓖麻脱出物的最大筛分效率为98.20%。当振动筛振幅为7.00 mm、振动筛振频为7.76 Hz、气流横向角为 40.81° 时,蓖麻籽粒的最小损失率为2.02%。以振动筛的振幅、振频和气流横向角为试验因素,以筛分效率和损失率为试验指标,设计了正交组合试验,建立各因素与指标间的数学回归模型,并对模型进行参数优化。结果表明,当振动筛振幅9.00 mm、振动筛振频6.16 Hz、气流横向角 40.00° 时,蓖麻清选装置的筛分效率和蓖麻籽粒的损失率最优,分别为97.66%和2.32%。最后,设计出蓖麻清选装置,通过台架试验对最优参数组合进行试验,实际筛分效率与损失率分别为93.15%和6.94%,与预测结果误差在5%以内,同时实际所得到的籽粒含杂率为0.83%,满足使用要求。

关键词: 蓖麻脱出物; 清选装置; 双层倾斜振动风筛; 离散元法

中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S2-0039-13

Design and Test of Double-layer Inclined Vibrating Air-screen Castor Cleaning Device

HOU Junming REN Zhaotan ZHU Hongjie

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Castor effluent has complex components, high impurity content and low efficiency after cleaning. There is no special cleaning device. A double-layer inclined vibrating air-screen castor cleaning device was designed. Firstly, the overall structure of the cleaning device was designed, and the double-layer wind blowing synchronous vibration structure was determined. Secondly, the key components of the device, such as vibrating screen, cleaning chamber and discharge port, were designed. The discrete element method (DEM) was used to optimize the structure of cleaning screen. The ZheBi No.4 varieties was taken as the test material, and then the discrete element parameters of the material were measured. Through the single factor test, the effects of the upper screen hole distribution, the screen hole size and the screen surface inclination on the screening efficiency and loss rate were analyzed. The optimum design parameters were determined as follows: the U-shaped mesh arrangement, the mesh diameter of 14 mm, and the inclination angle of the screen surface of 8° . The parameters of the single objective function were optimized. When the vibration amplitude of the vibrating screen was 8.43 mm, the vibration frequency of the vibrating screen was 6 Hz, and the transverse angle of the air flow was 40° , the maximum screening efficiency of castor effluent was 98.20%. When the vibrating screen amplitude was 7 mm, the vibrating frequency was 7.76 Hz, and the transverse angle of air flow was 40.81° , the minimum loss rate of castor seeds was 2.02%. Through the single factor test, the effects of the

收稿日期: 2022-06-22 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475312)

作者简介: 侯俊铭(1978—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与制造研究, E-mail: syndhjm@syau.edu.cn

distribution form, size and inclination angle of the upper screen surface on the screening efficiency and loss rate were analyzed, and then the best distribution form, size and inclination angle of the screen surface were determined. In order to obtain the optimal working parameters, the coupling method of discrete element method and computational fluid dynamics (CFD) was applied to simulate and analyze the cleaning process. Taking the amplitude, vibration frequency and transverse angle of air flow of vibrating screen as test factors, the screening efficiency and loss rate as test indexes, the ternary quadratic orthogonal combination test was designed. The mathematical regression model between each factor and index was established, and the parameters of the model were optimized. The results showed that when the amplitude of the vibrating screen was 9.00 mm, the vibration frequency of the vibrating screen was 6.16 Hz and the transverse angle of the air flow was 40.00°, the screening efficiency of the castor cleaning device and the loss rate of castor seeds were the best, which were 97.66% and 2.32% respectively. Through the bench test, the optimal parameter combination was tested. The actual efficiency and loss rate were 93.15% and 6.94% respectively, and the error with the predicted results was controlled within 5%. At the same time, the actual grain impurity content was 0.83%, which met the application requirements. The research result can provide a theoretical basis for the design of castor cleaning device.

Key words: castor extract; cleaning device; double-layer inclined vibrating air-screen; DEM

0 引言

蓖麻是重要的特种油料作物,其籽粒含油率高,且蓖麻油具有凝固点低、耐严寒、耐高温等特点,广泛应用于航空航天设备关键部件的润滑,在中国、印度、巴西等多个国家广泛种植。我国是蓖麻的主要消费国之一,蓖麻的衍生产品在我国得到广泛的应用。蓖麻脱壳后,需要经过清选去除杂质,才能进行榨油处理^[1-5]。目前,蓖麻清选设备较少,现有清选装置多由水稻、玉米等物料清选装置改进而来,存在机具适用性差、籽粒损失率大、含杂率高及筛分效率低等问题^[6]。因此,开发蓖麻专用清选设备,提高蓖麻清选水平,是蓖麻产业发展亟待解决的关键问题之一。

近年来,国内外学者对农业物料清选装置设计及清选原理进行了深入研究,取得很多成果。常见的清选方式有气流式清选^[7-10]、筛子式清选^[11-14]和风筛式清选3种^[15-23]。气流式清选装置结构简单,噪声小,但要达到较好的清选效果,对风机的性能有较高的要求;筛子式清选装置的振动筛结构形式需要与清选物料相适应,才能达到理想效果;风筛式清选装置适用性强,清选效率高,是目前清选装置应用最广泛的形式。

综上,本文根据蓖麻脱出物的成分,设计一种双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置,最终筛选出干净的蓖麻籽粒,提高蓖麻脱出物的清选筛分效率,并降低清选损失率。利用离散元法对关键部件进行优化,并运用CFD-DEM耦合的方法对清选过程进行数值模拟,通过Box-Behnken试验对工作参数进行优化,最后通过样机试验来验证装

置的作业效果。

1 清选装置总体结构和工作原理

1.1 总体结构

本研究采用气流振动清选方式对蓖麻脱出物进行清选,其结构如图1所示。

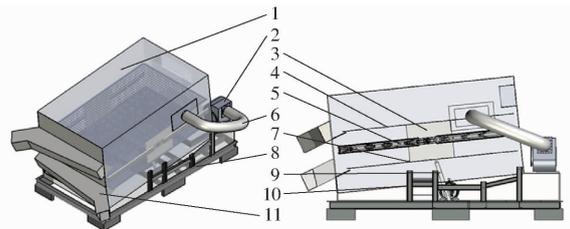


图1 清选装置总体结构示意图

Fig.1 Overall structure diagram of cleaning device

1. 清选室 2. 风机 3. 立板 4. 上振动筛 5. 滑道 6. 风筒
7. 下振动筛 8. 机架 9. 曲柄摇杆机构 10. 电机 11. 出料口

装置主要包括清选室、振动筛、出料口、风机、曲柄摇杆机构、电机和机架等。风口设置在清选室的侧壁上,通过风筒与风机相连。曲柄摇杆机构与下振动筛连接,并由固定在机架上的电机为其提供动力。上下振动筛通过立板连接,立板固定在滑道上。在上下振动筛的尾部各安装一个出料口,并通过焊接方式固定在清选室上。

1.2 工作原理

物料清选时,电机带动曲柄摇杆机构运动,带动下筛进行往复运动,通过立板使上筛同时运动,同时风机通过风筒将气流输送入清选室。蓖麻脱出物进入清选室以后在振动筛和气流的作用下开始分离,尺寸较大的蓖麻蒴果由上筛处出料口流出,籽粒由下筛处出料口流出,蓖麻壳落在清选室最底部,由底部出料口排出。

2 清选装置关键部件设计

2.1 振动筛

一般筛面长度和宽度的比值为 2~3, 由于风机安装在机器的侧壁上, 物料在横向上的运动距离增加, 因此长宽比要低于正常值, 确定为 1.6。由此可得, 清选筛宽度为 600 mm, 清选筛长度为 960 mm。振动筛选用上下两层筛, 两筛间距为 200 mm, 振动筛的筛孔采用圆形冲孔筛。上层筛筛孔的大小和布局对清选效果的影响较大, 需对其进行进一步优化。根据蓖麻籽粒的尺寸, 选择下层筛筛孔直径为 8 mm, 筛孔为直线排列, 如图 2 所示。

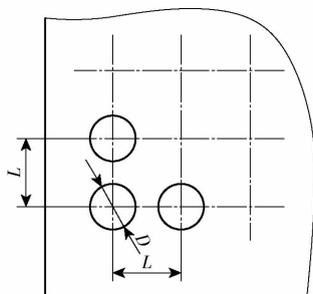


图 2 清选筛筛孔分布

Fig. 2 Hole distribution of cleaning screen

上筛面运动方程为

$$\begin{cases} x = -r\cos(\omega t) \\ v = r\omega\sin(\omega t) \\ a = r\omega^2\cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 x ——筛面位移, m

r ——曲柄半径, m

ω ——曲柄角速度, rad/s

t ——筛面运动时间, s

v ——筛面速度, m/s

a ——筛面加速度, m/s²

物料在筛面上的运动是由筛体与风机共同运动引起的, 筛上颗粒受力分析如图 3 所示。

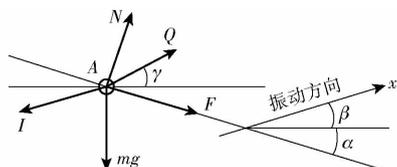


图 3 振动筛运动机构受力分析

Fig. 3 Force analysis of vibrating screen motion mechanism

垂直于筛面方向受力方程为

$$\begin{cases} N = mg\cos\alpha + I\sin(\alpha + \beta) - Q\sin(\alpha + \gamma) \\ I = mr\omega^2\cos(\omega t) \\ Q = k\rho SV^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 N ——筛面法向反力, N

m ——脱出物质量, kg

I ——颗粒受到的惯性力, N

α ——筛面倾角, (°)

γ ——气流方向角, (°)

β ——振动方向角, (°)

Q ——被筛物所受气流力, N

k ——阻力系数

ρ ——气流密度, kg/m³

S ——被筛物在垂直于相对速度方向的最大截面积, m²

V ——筛面气流速度, m/s

要使被筛物离开筛面, $N \leq 0$, 并且 N 越小, 表明颗粒被抛起的程度越大^[24]。此时

$$N = mg\cos\alpha - k\rho AV^2\sin(\alpha + \gamma) + mr\omega^2\cos(\omega t)\sin(\alpha + \beta) \quad (3)$$

本机器的振动方向角 $\beta = 45^\circ$, 筛面气流方向角 $\gamma = 50^\circ$ 。在清选的过程中, 脱出物越蓬松, 越有利于籽粒从筛孔中落下, 因此, 由式(3)可知, 脱出物的分层效果主要由筛面倾角 α 决定。

2.2 清选室

清选室的主要尺寸参数如图 4 所示。根据清选筛尺寸、预留安装尺寸, 得到清选室宽度为 640 mm; 保留振动筛所需的运动空间, 取清选室长度为 1 050 mm, 侧面进风口尺寸为 190 mm × 100 mm, 在其下面留出的摇杆空间为 150 mm × 80 mm。

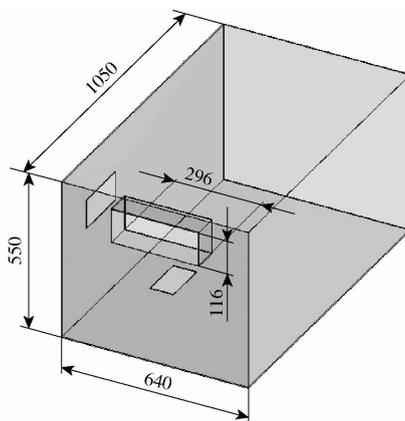


图 4 清选室结构尺寸

Fig. 4 Structural dimension diagram of cleaning room

2.3 出料口

出料口结构如图 5 所示, 考虑到蓖麻壳摩擦因数较大, 且蓖麻蒴果脱壳之后脱出物的体积较大, 容易产生物料堆积, 因此, 出料口的倾角要保证物料可以顺利下滑不产生堆积的情况。

已知蓖麻蒴果与 Q235 结构表面的静摩擦因数为 0.4, 为了保证物料顺利滑落, 由公式

$$\begin{cases} \tan\theta_1 > 0.4 \\ \theta_2 = 90^\circ + \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

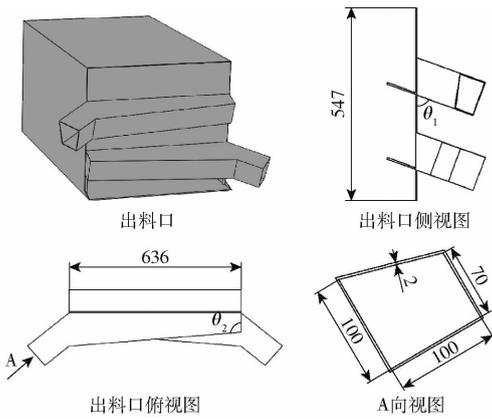


图5 清选筛出料口结构图

Fig. 5 Structure diagram of discharge port of cleaning chamber

式中 θ_1 ——出料口与水平面倾角, ($^\circ$)

θ_2 ——出料口相邻两壁板夹角, ($^\circ$)

得 $\theta_1 > 21.8^\circ, \theta_2 > 111.8^\circ$ 。

根据清选筛出料口尺寸可得出料口处流量 q_v 为

$$q_v = 3\,600Fu \quad (5)$$

式中 F ——出料口截面积, m^2

u ——出料口气流速度, 一般为 $1 \sim 2$ m/s

计算得 $q_v = 0.054$ m^3/s 。

3 清选筛结构参数仿真优化

为了使蓖麻清选装置达到理想的清选效果, 采用离散元仿真分析其清选过程, 并对装置结构进行优化。

3.1 清选筛参数设计

3.1.1 清选筛网关键参数

由于上层筛对清选效果影响较大, 因此设计单因素试验, 分别分析上层筛筛孔不同排列型式、筛孔直径、筛面倾角对清选效果的影响, 并得出较优的结构参数。

(1) 筛孔排列型式

根据国标建立 3 种筛孔排列型式, 如图 6 所示, 其中 D 为筛孔直径, L 为两孔间距。

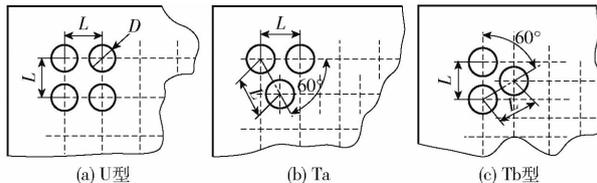


图6 3种筛孔排列型式

Fig. 6 Three kinds of mesh arrangement

(2) 筛孔直径

选用广泛种植典型品种哲蓖 4 号为试验物料, 蓖麻蒴果含水率为 5.09%, 经过脱壳之后的脱出物中, 蓖麻籽粒含量为 89.52%、蓖麻壳含量为 4.91%、两室蓖麻蒴果含量为 5.57%。对脱出物的

各个成分几何尺寸进行测量, 每种成分随机选取 100 个, 利用 0.02 mm 精度的游标卡尺对各成分长度 l 、宽度 b 和高度 h 进行测量。以蓖麻籽粒为例, 如图 7 所示。



图7 蓖麻籽粒测量方位示意图

Fig. 7 Diagram of measuring orientation of castor seeds

测得各组分的尺寸如表 1 所示。

表1 各组分物料几何尺寸统计结果

Tab. 1 Statistical results of geometric dimensions of each component material

| 成分 | 长度 | 宽度 | 高度 |
|--------|-------|------|-------|
| 蓖麻籽粒 | 8.11 | 6.27 | 11.89 |
| 蓖麻壳 | 7.51 | 5.07 | 15.89 |
| 两室蓖麻蒴果 | 15.62 | 9.05 | 16.04 |

根据两室蓖麻蒴果平均尺寸, 确定上层筛孔直径 D 为 14.0 ~ 16.0 mm。

(3) 筛面倾角

在仿真过程中, 通过改变振动筛筛面倾角, 分析振动筛不同筛面倾角对物料清选的影响。确定筛面倾角为 $5^\circ \sim 9^\circ$ 。筛面倾角 α 如图 8 所示。

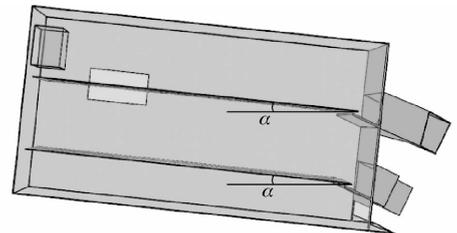


图8 筛面倾角

Fig. 8 Screen surface inclination

3.1.2 清选效果评价指标

由于蓖麻脱出物清选指标没有国标, 根据文献[9]设定筛分效率为 90% 以上、损失率 10% 以下为合格标准。其中, 筛分效率 Y_1 用来表示筛分作业的完成情况, 表达式为

$$Y_1 = \frac{(0.9 - \eta_1)(\eta_2 - 0.9)}{0.09(\eta_2 - \eta_1)} \times 100\% \quad (6)$$

式中 η_1 ——上筛出料口混合物中籽粒所占质量百分比, %

η_2 ——下筛出料口混合物中籽粒所占质量百分比, %

损失率 Y_2 计算公式为

$$Y_2 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中 m_1 ——喂入籽粒总质量, kg
 m_2 ——下筛出料口处籽粒总质量, kg

3.2 离散元仿真参数设置

3.2.1 颗粒模型设置

蓖麻脱出物各主要成分如图 9 所示。由于 EDEM 软件不能识别非球形颗粒物料, 因此将蓖麻脱壳混合物中各成分模型进行颗粒替换。在前处理界面对应的颗粒材料下, 利用 EDEM 的 sample 功能导入建立好的颗粒模板, 进行颗粒填充, 保证填充之后的物料形状接近实物, 替换后的物料模型如图 10 所示。测量得蓖麻壳的厚度在 0.5 ~ 0.8 mm 之间, 为了减少仿真的计算量, 在进行蓖麻壳的建模时, 将蓖麻壳厚度设置为 0.8 mm。



图 9 蓖麻脱出混合物主要成分

Fig. 9 Component model of castor bean hulling mixture

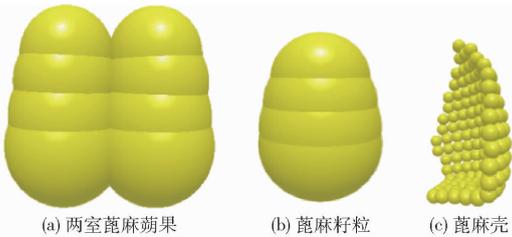


图 10 替换后的物料模型

Fig. 10 Material models after replacement

3.2.2 物料接触参数设置

振动筛材料选择 Q235 钢。由文献 [25] 知, 蓖麻脱出物各成分的力学特性参数如表 2 所示。

表 2 材料力学特性参数

Tab. 2 Material mechanical characteristic parameters

| 成分 | 泊松比 | 弹性模量/MPa | 密度/(kg·m ³) |
|--------|------|----------|-------------------------|
| 蓖麻籽粒 | 0.25 | 42.56 | 1 094.75 |
| 蓖麻壳 | 0.25 | 50.62 | 674.73 |
| 两室蓖麻蒴果 | 0.25 | 44.00 | 1 021.32 |

采用自制的物料板、Q235 钢板与斜面装置进行物料静摩擦因数与动摩擦因数的测定, 如图 11、12 所示。试验重复 10 次, 结果取平均值。

采用跌落试验台以及高速摄影设备对物料碰撞恢复系数进行测定, 如图 13 所示。将蓖麻蒴果、蓖麻籽粒、蓖麻壳分别从固定高度 H_1 跌落到物料板和钢板上, 运用高速摄像机记录物料回弹到最高点的高度 H_2 , 碰撞恢复系数 $e = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$, 试验重复 10 次, 最



图 11 自制试验物料板

Fig. 11 Self-made test material board

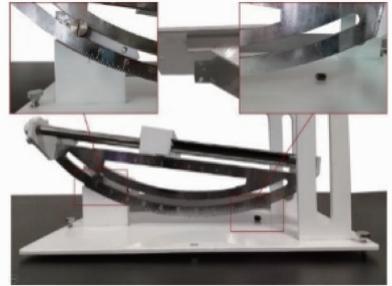


图 12 物料摩擦因数试验装置

Fig. 12 Material friction coefficient test device

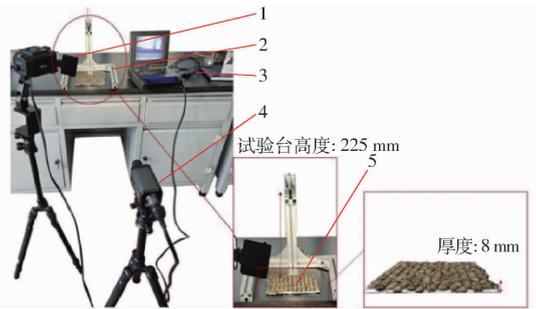


图 13 物料碰撞恢复系数试验设备

Fig. 13 Test of recovery coefficient of material

1. 光源 2. 跌落试验台 3. 主机 4. 高速摄像机 5. 物料板

终结果取平均值。试验测得的物料接触参数如表 3 所示。

表 3 物料接触参数

Tab. 3 Material contact parameters

| 项目 | 静摩擦因数 u_s | 动摩擦因数 u_k | 碰撞恢复系数 e |
|---------------|-------------|-------------|------------|
| 两室蓖麻蒴果-两室蓖麻蒴果 | 0.60 | 0.03 | 0.30 |
| 两室蓖麻蒴果-蓖麻籽粒 | 0.60 | 0.03 | 0.20 |
| 两室蓖麻蒴果-蓖麻壳 | 0.67 | 0.04 | 0.17 |
| 两室蓖麻蒴果-Q235 | 0.40 | 0.02 | 0.43 |
| 蓖麻籽粒-蓖麻籽粒 | 0.35 | 0.02 | 0.19 |
| 蓖麻籽粒-蓖麻壳 | 0.63 | 0.03 | 0.24 |
| 蓖麻籽粒-Q235 | 0.31 | 0.01 | 0.52 |
| 蓖麻壳-蓖麻壳 | 0.74 | 0.05 | 0.25 |
| 蓖麻壳-Q235 | 0.53 | 0.03 | 0.24 |

3.2.3 其他参数设置

把测得的物料接触参数导入系统中, 将清选装置简化为上层振动筛、下层振动筛、出料口以及筛室 4 部分, 并将其保存为“.stl”格式, 如图 14 所示。将清选装置模型导入 EDEM 中, 颗粒工厂置于入料口处, 尺寸设为 300 mm × 100 mm。设置混合物的总质

量为 1.5 kg,将各成分按照混合物的实际质量占比进行设置。颗粒与颗粒间以及颗粒与装置间的模型均选择 Hertz - Mindlin (no slip) 模型。设定振动筛的振动频率为 7 Hz、振幅为 7 mm,仿真时间设置为 10 s。

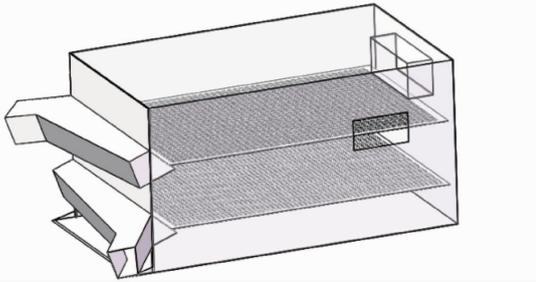


图 14 清选装置简化模型

Fig. 14 Simplified model of cleaning device

3.3 仿真结果分析

3.3.1 清选装置区域划分

为方便分析物料在筛面上的分布情况,对振动筛面进行区域划分,对上层振动筛进行三等分,分为 A、B、C 区,出料口处定义为 D 区,如图 15 所示。其中,红色颗粒代表两室蓖麻蒴果,绿色颗粒代表蓖麻籽粒,蓝色颗粒代表蓖麻壳。

3.3.2 筛孔排列型式对清选效果的影响

筛孔排列型式对筛分效率和损失率的影响如表 4 所示。可知,3 种筛孔排列型式的筛分效率均

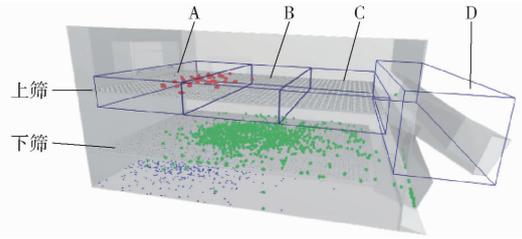


图 15 振动筛面区域划分

Fig. 15 Area division of cleaning device

表 4 不同筛孔排列型式时筛分效果

Tab. 4 Screening effect of different mesh arrangements

| 指标 | U 型 | Ta 型 | Tb 型 |
|------|-------|-------|-------|
| 筛分效率 | 98.23 | 96.70 | 96.71 |
| 损失率 | 2.39 | 2.96 | 2.50 |

大于 90%,损失率均小于 10%,3 种型式均处于较优水平。

为了得出最佳筛孔排列型式,对筛面物料推移能力进行分析。筛选过程中,将物料在筛面的分布作为物料推移能力指标,选 3.0、6.0、10.0 s 3 个时间点对颗粒分布进行对比,如图 16 所示。对两室蓖麻蒴果在上筛面上不同区域的数量进行统计,如图 17 所示。通过对比可得,两室蓖麻蒴果在 Ta 型振动筛筛面上分布更集中,振动筛对物料的推移效果相比其他两种筛型差。

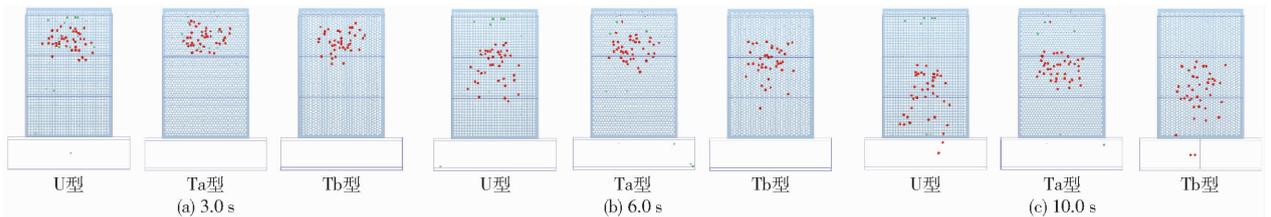


图 16 两室蓖麻蒴果在上筛面分布情况

Fig. 16 Distributions of two compartment castor capsules on upper sieve surface

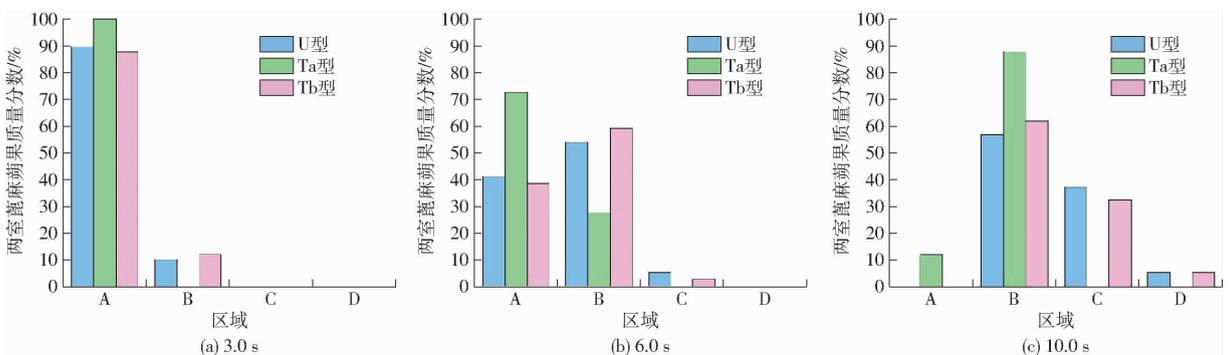


图 17 两室蓖麻蒴果在上筛面分布数据统计结果

Fig. 17 Statistical results of distribution data of castor capsule on upper sieve surface

将脱出物沿筛面流动方向的平均速度 v 作为筛面物料推移能力的另一评价指标,两室蓖麻蒴果的平均速度如图 18 所示。结果表明,0 ~ 1.1 s 为物料生成阶段,在 U 型和 Tb 型上的颗粒平均速度处于

上升趋势,没有明显差别,Ta 型时的颗粒平均速度略高。在 1.1 ~ 10.0 s 内,U 型上的两室蓖麻蒴果平均速度变化趋势较为平缓,Ta 型与 Tb 型上的颗粒平均速度呈现先减小再增大的趋势;但是,Ta 型

上的颗粒平均速度低于 Tb 型上的颗粒速度。综上所述,采用 U 型振动筛,筛面物料推移能力最好。

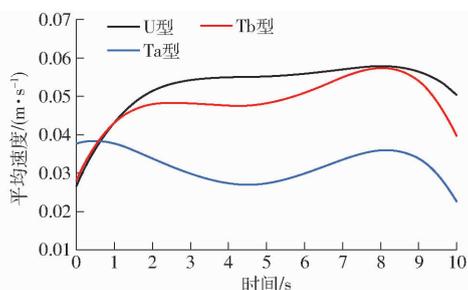


图 18 不同筛型两室蓖麻蒴果平均速度拟合曲线

Fig. 18 Fitting curves of average velocity of two compartment castor capsule with different sieve types

3.3.3 筛孔直径对清选效果的影响

筛孔直径对筛分效率和损失率的影响如表 5 所

表 5 不同筛孔直径时筛分效果

Tab. 5 Screening effect with different mesh diameters

| 指标 | 筛孔直径/mm | | |
|------|---------|-------|-------|
| | 14 | 15 | 16 |
| 筛分效率 | 98.23 | 96.64 | 96.69 |
| 损失率 | 2.39 | 4.32 | 3.41 |

示,仿真时选择筛分效果最好的 U 型筛孔,筛面倾角取 8°。由表 5 可知,筛分效率均大于 90%,损失率均小于 10%。

(1)取 3.0、6.0、10.0 s 3 个时间点进行颗粒分布对比,如图 19 所示,两室蓖麻蒴果在上筛面上不同区域的数量统计结果如图 20 所示。可得,筛孔直径为 14 mm 与 15 mm 时,对蓖麻蒴果有良好的推移效果。

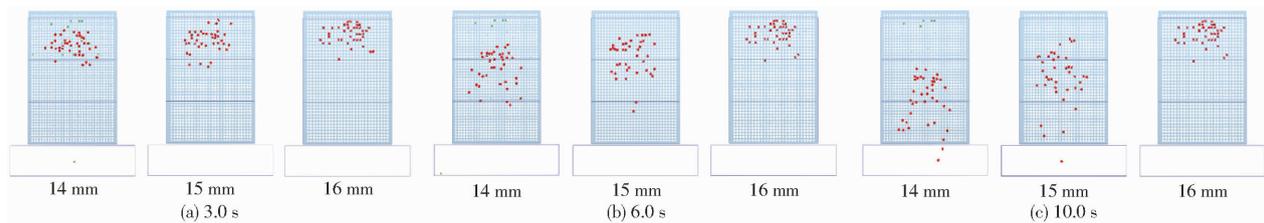


图 19 不同筛孔直径时两室蓖麻蒴果在上筛面分布情况

Fig. 19 Distribution of two compartment castor capsule on upper sieve surface of different sieve diameter

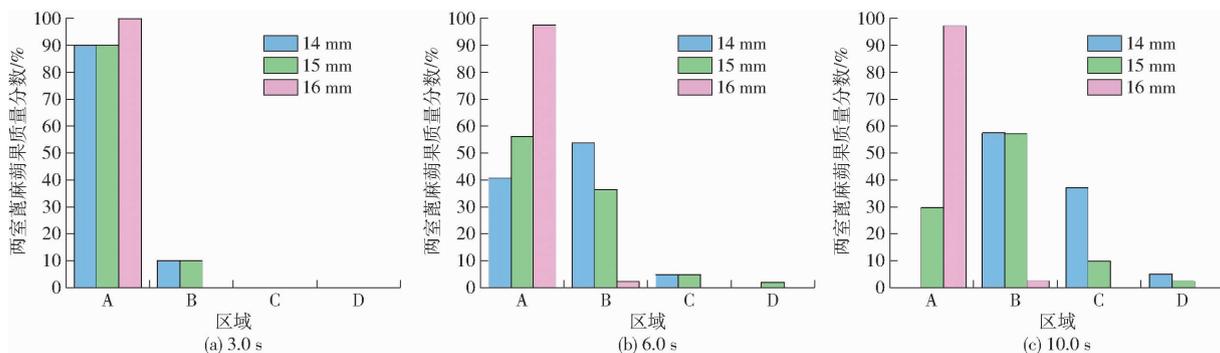


图 20 不同筛孔直径时两室蓖麻蒴果在上筛面分布数据统计结果

Fig. 20 Statistical results of distribution data of castor capsule on upper sieve surface of different sieve diameter

(2)当取不同筛孔直径时,两室蓖麻蒴果沿筛面流动方向的速度如图 21 所示。可知,0 ~ 1.1 s 为物料生成阶段,筛孔直径为 14 mm 的振动筛时,

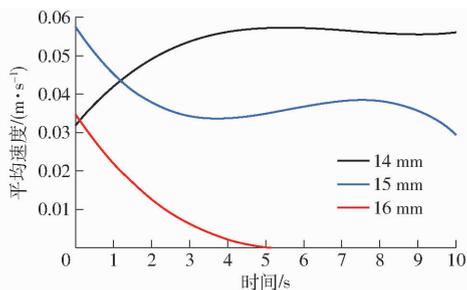


图 21 不同筛孔直径两室蓖麻蒴果平均速度拟合曲线

Fig. 21 Fitting curve of average velocity of two compartment castor capsules of different sieve sizes

两室蓖麻蒴果的平均速度拟合曲线在这一阶段呈逐渐上升趋势,1.1 ~ 10.0 s 速度逐渐平稳。筛孔直径为 15 mm 与 16 mm 时,两室蓖麻蒴果的平均速度拟合曲线整体均呈现下降趋势。综合可得,筛孔直径为 14 mm 时,振动筛对筛面物料推移能力最好。

3.3.4 筛面倾角对清选效果的影响

筛面倾角对筛分效率和损失率的影响如表 6 所示。选择筛分效果最好的 U 型筛孔排列和筛孔直径 14 mm 为参数进行仿真。可知,随着筛面倾角的增大,损失率逐渐降低。筛分效率在 94.0% ~ 99.5%,损失率在 0.5% ~ 3.0%,均处于较优水平。

(1)取清选过程中 3.0、6.0、10.0 s 3 个时间点进行颗粒分布对比,如图 22 所示,两室蓖麻蒴果在

表6 不同筛面倾角时清选效果

Tab.6 Cleaning effect at different screen surface

| 指标 | 筛面倾角/(°) | | | | |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 筛分效率 | 99.08 | 98.23 | 94.96 | 95.89 | 94.30 |
| 损失率 | 2.73 | 2.39 | 1.70 | 1.48 | 0.91 |

上筛面上不同区域的数量统计结果如图23所示。可知,当筛面倾角为 8° 和 9° 时,物料在筛面的分布较分散,不容易造成堆积。

(2)当对筛面不同倾角仿真时,两室蓖麻蒴果沿筛面流动方向的平均速度如图24所示。 $0 \sim 1.1$ s为物料生成阶段,可知,当筛面倾角为 8° 时,该阶段

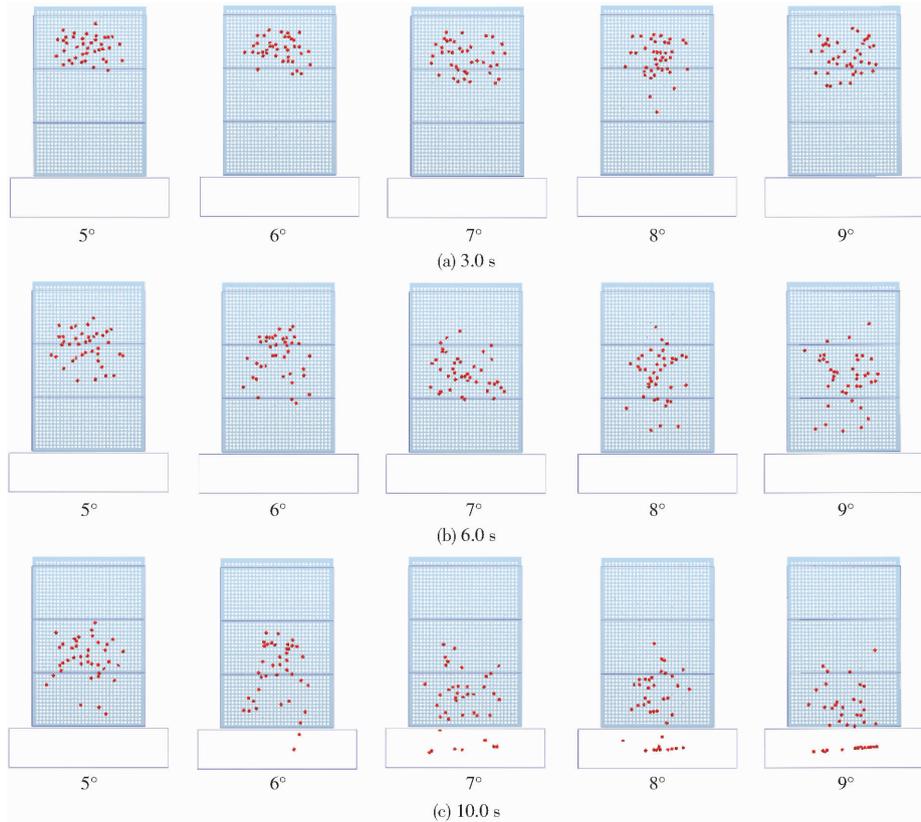


图22 不同筛面倾角时两室蓖麻蒴果在上筛面分布情况

Fig.22 Distributions of two compartment castor capsules on upper sieve surface at different sieve surface angles

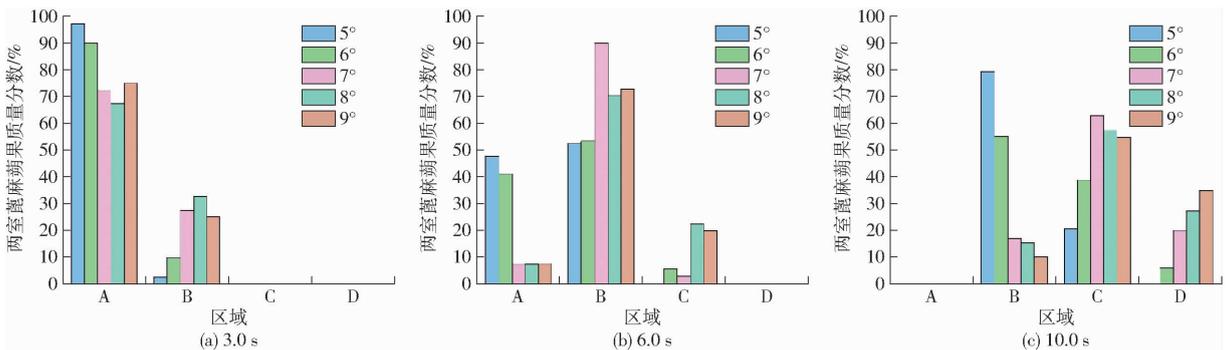


图23 不同筛面倾角时两室蓖麻蒴果在上筛面分布数据统计结果

Fig.23 Statistical results of the distribution data of two compartment castor capsule on the upper sieve surface at different sieve surface angles

的物料沿筛面的平均速度最大,生成的物料不容易出现堆积现象,蓖麻籽粒更容易通过筛孔进入下筛面。当筛面倾角为 9° 时,物料在 $2.0 \sim 9.0$ s时的平均速度最大,但从仿真过程可知,其对物料的分散效果影响不大。综上,确定筛面倾角为 8° ,此时蓖麻脱出物的清选过程如图25所示。

4 清选过程参数仿真试验优化

4.1 试验方案设计

为了确定装置的工作参数,运用CFD-DEM耦合进行仿真试验。前期通过对振动筛振幅、振动筛振频、气流横向角和气流流速进行单因素分析,得出

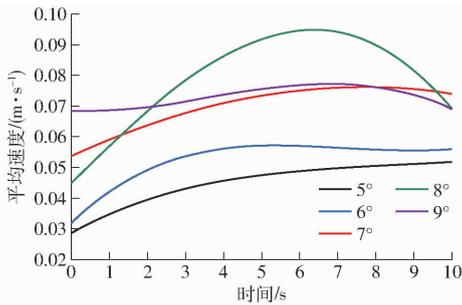


图 24 不同筛面倾角时蓖麻蒴果平均速度拟合曲线

Fig. 24 Fitting curves of average velocity of castor capsule under different inclination angles of sieve surface

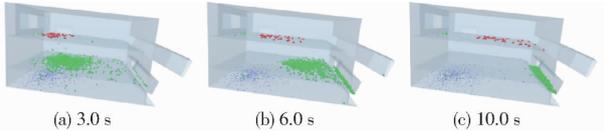


图 25 蓖麻脱出物清选过程仿真结果

Fig. 25 Simulation results of cleaning process of castor extract

影响装置清选效率的因素为振动筛振幅、振动筛振频和气流横向角。因此,为了获得最佳的工作参数,以振动筛振幅、振动筛振频和气流横向角为试验因素,以筛分效率和蓖麻籽粒损失率为试验指标,进行试验设计。蓖麻脱壳混合物清选仿真试验编码如表 7 所示。

表 7 试验编码

Tab. 7 Test code

| 编码 | 因素 | | |
|----|--------------|--------------|-------------------------|
| | 振幅 x_1 /mm | 振频 x_2 /Hz | 横向角 x_3 /($^\circ$) |
| -1 | 7 | 6 | 40 |
| 0 | 8 | 7 | 50 |
| 1 | 9 | 8 | 60 |

运用 Design-Expert 设计 Box - Behnken 试验,共有 17 组不同组合的试验,试验设计与结果如表 8 所示。

4.2 基于 Fluent 的流场建模

采用 SolidWorks 软件将自进气口流入清选室内气流所经过的地方转化为实体模型,建立气流场模型,如图 26 所示。

将模型保存为 Workbench 可识别的“.xt”格式,导入 Workbench 中的 DM 模块中进行边界命名处理,将入风口命名为 inlet,出风口命名为 outlet,其余所有面命名为 wall。将处理好的模型保存为“.agdb”文件导入 mesh 中进行网格划分,划分结果如图 27 所示。A 区部分采用六面体网格,根据模型边角尺寸变化选取不同长度的网格,B 区有薄板、振动筛等尺寸较小的部位,采用边长为 5 mm 的四面体网格,以保证网格质量,C 区模型均为长方体,无

表 8 试验设计与仿真结果

Tab. 8 Test design and simulation results

| 试验序号 | 振幅 x_1 /mm | 振频 x_2 /Hz | 横向角 x_3 /($^\circ$) | 筛分效率 Y_1 /% | 损失率 Y_2 /% |
|------|--------------|--------------|-------------------------|---------------|--------------|
| 1 | 8.00 | 7.00 | 50.00 | 96.96 | 4.22 |
| 2 | 8.00 | 8.00 | 60.00 | 94.53 | 5.48 |
| 3 | 8.00 | 8.00 | 40.00 | 94.87 | 4.11 |
| 4 | 7.00 | 8.00 | 50.00 | 96.48 | 2.03 |
| 5 | 7.00 | 6.00 | 50.00 | 96.11 | 5.84 |
| 6 | 7.00 | 7.00 | 60.00 | 96.21 | 3.05 |
| 7 | 8.00 | 6.00 | 60.00 | 94.98 | 6.92 |
| 8 | 9.00 | 8.00 | 50.00 | 93.65 | 5.67 |
| 9 | 8.00 | 7.00 | 50.00 | 97.11 | 4.87 |
| 10 | 8.00 | 6.00 | 40.00 | 98.51 | 4.94 |
| 11 | 7.00 | 7.00 | 40.00 | 95.93 | 2.51 |
| 12 | 9.00 | 7.00 | 60.00 | 93.14 | 5.98 |
| 13 | 8.00 | 7.00 | 50.00 | 96.46 | 4.16 |
| 14 | 9.00 | 7.00 | 40.00 | 95.65 | 2.59 |
| 15 | 8.00 | 7.00 | 50.00 | 95.82 | 5.13 |
| 16 | 8.00 | 7.00 | 50.00 | 96.87 | 3.24 |
| 17 | 9.00 | 6.00 | 50.00 | 96.17 | 5.57 |

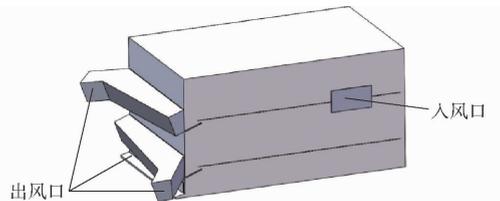


图 26 气流场模型

Fig. 26 Model of gas flow fields

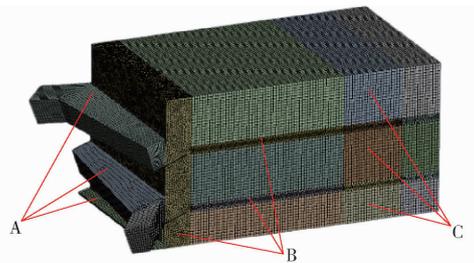


图 27 气流场模型网格划分

Fig. 27 Meshing of airflow field model

尺寸变化区域,采用六面体网格进行划分,最终生成 3 408 260 个网格。

将划分网格后的流场模型导入 Fluent 19.2 软件中,为了加快仿真速度,将气流场模型进行稳态计算,将稳态流场作为初始气流条件进行耦合计算。设置流场参数时,选择瞬态计算,仿真总时长设置为 10 s,设置求解器的时间步长为 0.001 s,时间步数为 10 000,设置每个时间步长的迭代步数为 20 步,进行耦合计算。

4.3 清选结果分析

4.3.1 筛分效率分析

为研究蓖麻脱出物的筛分效率与振幅、振频、气

流横向角之间的关系,对筛分效率进行显著性分析。分析结果如表9所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表9 筛分效率方差分析

Tab.9 Variance analysis of screening efficiency

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P |
|-----------|-------|-----|------|-------|---------|
| 模型 | 25.77 | 9 | 2.86 | 10.39 | 0.002 7 |
| X_1 | 4.68 | 1 | 4.68 | 16.98 | 0.004 5 |
| X_2 | 4.87 | 1 | 4.87 | 17.66 | 0.004 |
| X_3 | 4.65 | 1 | 4.65 | 16.87 | 0.004 5 |
| $X_1 X_2$ | 2.09 | 1 | 2.09 | 7.57 | 0.028 4 |
| $X_1 X_3$ | 1.95 | 1 | 1.95 | 7.06 | 0.032 6 |
| $X_2 X_3$ | 2.54 | 1 | 2.54 | 9.23 | 0.018 9 |
| X_1^2 | 2.47 | 1 | 2.47 | 8.96 | 0.020 1 |
| X_2^2 | 0.32 | 1 | 0.32 | 1.16 | 0.316 9 |
| X_3^2 | 1.76 | 1 | 1.76 | 6.37 | 0.039 6 |
| 残差 | 1.93 | 7 | 0.28 | | |
| 失拟 | 0.85 | 3 | 0.28 | 1.05 | 0.463 2 |
| 纯误差 | 1.08 | 4 | 0.27 | | |
| 总误差 | 27.7 | 16 | | | |

对筛分效率进行方差分析可知,决定系数 $R^2 = 0.930 3$,表明拟合精度较高,回归代理模型 $F = 10.39$, $P < 0.01$,说明该代理模型极显著。其次,对振幅进行显著性分析, $P = 0.004 5 < 0.01$,表明振幅对于筛分效率的影响极显著;对频率进行显著性分析, $P = 0.004 < 0.01$,表明振频对于筛分效率的影响极显著;对横向角进行显著性分析, $P = 0.004 5 < 0.01$,表明横向角对于蓖麻脱出物的筛分效率的影响极显著。

建立筛分效率的回归方程代理模型

$$Y_1 = 96.64 - 0.76X_1 - 0.78X_2 - 0.76X_3 - 0.72X_1X_2 - 0.70X_1X_3 + 0.80X_2X_3 - 0.77X_1^2 - 0.28X_2^2 - 0.65X_3^2 \quad (8)$$

通过对蓖麻脱出物的筛分效率的方差分析可知,3个因素对于筛分效率的影响都极显著。

4.3.2 损失率分析

为研究蓖麻籽粒的损失率与振幅、振频、气流横向角之间的关系,对蓖麻籽粒损失率进行显著性分析。分析结果如表10所示。

对蓖麻籽粒的损失率进行方差分析可知,决定系数 $R^2 = 0.922 0$,拟合精度较高,回归代理模型的 $F = 9.2$, $P < 0.01$,说明该代理模型极显著。其次,对振幅进行显著性分析, $P = 0.006 8 < 0.01$,表明振幅对于蓖麻籽粒损失率的影响极显著;对频率进行显著性分析, $P = 0.009 3 < 0.01$,表明振频对于蓖麻籽粒损失率的影响极显著;对横向角进行显著性分析, $P = 0.003 5 < 0.01$,表明横向角对蓖麻籽粒损失

率的影响极显著。

建立蓖麻籽粒损失率的回归方程模型

$$Y_2 = 4.32 + 0.80X_1 - 0.75X_2 + 0.91X_3 + 0.98X_1X_2 + 0.71X_1X_3 - 0.15X_2X_3 - 0.69X_1^2 + 1.14X_2^2 - 0.10X_3^2 \quad (9)$$

通过对蓖麻籽粒损失率的方差分析可知,3个因素对于蓖麻籽粒损失率的影响都极显著。

表10 蓖麻籽粒损失率方差分析

Tab.10 Variance analysis of castor seed loss rate

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F | P |
|-----------|-------|-----|-------|-------|---------|
| 模型 | 29.31 | 9 | 3.26 | 9.20 | 0.004 |
| X_1 | 5.09 | 1 | 5.09 | 14.37 | 0.006 8 |
| X_2 | 4.47 | 1 | 4.47 | 12.63 | 0.009 3 |
| X_3 | 6.62 | 1 | 6.62 | 18.71 | 0.003 5 |
| $X_1 X_2$ | 3.82 | 1 | 3.82 | 10.8 | 0.013 4 |
| $X_1 X_3$ | 2.03 | 1 | 2.03 | 5.74 | 0.047 8 |
| $X_2 X_3$ | 0.093 | 1 | 0.093 | 0.26 | 0.624 |
| X_1^2 | 1.99 | 1 | 1.99 | 5.63 | 0.049 3 |
| X_2^2 | 5.49 | 1 | 5.49 | 15.51 | 0.005 6 |
| X_3^2 | 0.045 | 1 | 0.045 | 0.13 | 0.732 3 |
| 残差 | 2.48 | 7 | 0.35 | | |
| 失拟 | 0.32 | 3 | 0.11 | 0.2 | 0.894 2 |
| 纯误差 | 2.16 | 4 | 0.54 | | |
| 总误差 | 31.79 | 16 | | | |

4.4 参数优化

4.4.1 单目标参数优化

在蓖麻脱出物的清选过程中,蓖麻脱出物的筛分效率越高、蓖麻籽粒的损失率越小,蓖麻蒴果的清选效果越好。以振动筛振幅、振动筛频率和气流横向角为优化变量,分别以最大筛分效率和最小蓖麻籽粒损失率为目标进行单目标参数优化,优化目标和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

对单目标函数进行参数优化,得到最大蓖麻脱出物的筛分效率组合为:振动筛振幅为8.43 mm、振动筛振频为6.00 Hz、气流横向角为40.00°,蓖麻脱出物的筛分效率为98.20%。得到最小蓖麻籽粒损失率的组合为:振动筛振幅为7.00 mm、振动筛振频为7.76 Hz、气流横向角为40.81°,蓖麻籽粒的损失率为2.02%。

4.4.2 多目标参数优化

以振动筛振幅、振动筛频率和气流横向角为优化变量,以最大筛分效率和最小蓖麻籽粒损失率为优化指标进行混合优化。在 Design-Expert 软件中进行多目标参数优化,优化目标和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

对多目标函数进行参数优化,得到蓖麻脱出物清选效果的最优参数组合:振动筛振幅为 9.00 mm、振动筛频率为 6.16 Hz、气流横向角为 40.00°,蓖麻脱出物的筛分效率为 97.66%、蓖麻籽粒的损失率为 2.32%。

5 试验验证

5.1 试验方法与设备

为验证离散元仿真试验对上筛面的优化结果,根据设计尺寸和优化结果加工出蓖麻清选装置。以振动筛振频、振幅及气流横向角为试验因素,筛分效率、损失率为试验指标,按照最优参数组合进行试验。每组试验开始之前对脱出物进行称量,试验之后对每个出料口的物料及籽粒进行称量。在物料的清选中含杂率也是一个评价清选效果的重要指标,含杂率 Y_3 为

$$Y_3 = \frac{c_2 - c_1}{c_2} \times 100\% \quad (13)$$

式中 c_1 ——籽粒出料口处蓖麻籽粒质量,kg

c_2 ——籽粒出料口处混合物质量,kg



图 30 蓖麻脱出物清选前后物料成分

Fig. 30 Material composition of castor bean explants before and after cleaning

表 11 试验结果

Tab. 11 Experimental results

| 参数组合 | 振幅/mm | 振频/Hz | 横向角/(°) | 筛分效率/% | 损失率/% | 含杂率/% |
|------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|
| 1 | 8.43 | 6.00 | 40.00 | 94.68 | 7.13 | 0.68 |
| 2 | 7.00 | 7.76 | 40.81 | 95.21 | 6.09 | 0.52 |
| 3 | 9.00 | 6.16 | 40.00 | 93.15 | 6.94 | 0.83 |

方面是由装置制造时的误差造成的,另一方面是由

试验材料选取哲蓖 4 号脱壳混合物,试验设备如图 28 所示。

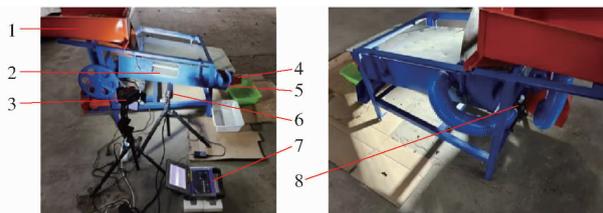


图 28 试验设备

Fig. 28 Test equipment

1. 入料口 2. 观察口 3. 光源 4. 籽粒出料口 5. 两室蓖麻蒴果出料口 6. 摄像头 7. 主机 8. 风机

5.2 试验结果分析

对最大筛分效率组合 1:振幅 8.43 mm、振频 6 Hz 和横向角 40.00°进行试验验证;对最小损失率组合 2:振幅 7.00 mm、振频 7.76 Hz 和横向角 40.81°进行试验验证;对最优清选效果的参数组合 3:振幅 9.00 mm、振频 6.16 Hz 和横向角 40.00°进行试验验证。图 29 为物料的部分清选图,清选前后的物料如图 30 所示。得到筛分效率、损失率和含杂率结果如表 11 所示。



图 29 物料部分清选图

Fig. 29 Material part cleaning drawing

试验筛分效率比仿真筛分效率低,损失率高,一

试验时因素水平精确度的控制影响的。以筛分效率为主要对比指标,仿真结果与试验结果相差在 4% 以内;以损失率为主要对比指标,仿真结果与试验结果相差在 5% 以内;台架试验含杂率分别为 0.68%、0.52% 和 0.83%,满足使用要求。

6 结论

(1)设计了一种双层倾斜振动风筛式蓖麻清选

装置。该装置采用振动与气流组合的方式实现蓖麻脱出物的清选。设计了上、下两层振动筛,振动筛通过立板连接实现同步运动。

(2)利用离散元法优化清选装置关键部件。通过单因素试验分析了上筛面筛孔排列型式、筛孔直径、筛面倾角对筛分效率和损失率的影响,得出最优的设计参数为:U型筛孔排列,筛孔直径14 mm,筛面倾角8°。

(3)采用CFD-DEM耦合方法获得装置最优的工作参数。对单目标函数进行参数优化,得到蓖麻脱出物最大筛分效率组合:振动筛振幅为8.43 mm、振动筛振频为6.00 Hz、气流横向角为40.00°,得到蓖麻脱出物的筛分效率为98.20%。得到蓖麻籽粒

最小损失率的组合为:振动筛振幅为7.00 mm、振动筛振频为7.76 Hz、气流横向角为40.81°,蓖麻籽粒的损失率为2.02%。对最大筛分效率和最小蓖麻籽粒损失率为目标进行混合优化,得出当振动筛振幅为9.00 mm、振动筛振频为6.16 Hz、气流横向角为40.00°时,蓖麻脱出物的筛分效率和蓖麻籽粒的损失率达到最优,分别为97.66%和2.32%。

(4)根据风筛式清选方式设计了蓖麻脱出物清选装置,进行试验验证。将试验结果与仿真结果进行对比,筛分效率相差在5%以内,损失率相差在4%以内。仿真时由于含杂率过低未进行含杂率分析,台架试验计算了蓖麻籽粒含杂率,3个试验结果均在1%以内,满足设备使用要求。

参 考 文 献

- [1] 林岩, 陆建飞, 周桂生. 基于产业链视角的中国蓖麻产业发展的分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 124-127. LIN Yan, LU Jianfei, ZHOU Guisheng. Analysis of castor industry in China based on industrial chain perspective[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(29): 124-127. (in Chinese)
- [2] SEVERINO L S, AULD D L, BALDANZI M, et al. A review on the challenges for increased production of castor[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(4): 853-880.
- [3] MERKOUROPOULOS G, KAPAZOGLU A, DROSOU V, et al. Dwarf hybrids of the bioenergy crop *Ricinus communis* suitable for mechanized harvesting reveal differences in morpho-physiological characteristics and seed metabolic profiles[J]. Euphytica, 2016, 210(2): 207-219.
- [4] GRICHAR W J, DOTRAY P A, TROSTLE C L. Castor (*Ricinus communis* L.) tolerance and weed control with preemergence herbicides[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 76:710-716.
- [5] 孙振钧, 吕丽媛, 伍玉鹏. 蓖麻产业发展: 从种植到利用[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 204-214. SUN Zhenjun, LÜ Liyuan, WU Yupeng. Castor industry development: from cultivation to product exploitation[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 204-214. (in Chinese)
- [6] 姚亮亮, 曹玉华, 李长友, 等. 蓖麻剥壳风筛式清选装置空气动力学特性研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(12): 70-73, 78. YAO Liangliang, CAO Yuhua, LI Changyou, et al. Dynamics property of air-and-screen cleaning mechanism of castor hulling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(12): 70-73, 78. (in Chinese)
- [7] 金鑫, 杜新武, 甘帮兴, 等. 小型联合收获机旋风分离系统清选性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 99-105. JIN Xin, DU Xinwu, GAN Bangxing, et al. Cleaning performance experiment of cyclone separating system in miniature combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 99-105. (in Chinese)
- [8] 孔令军, 陈永成, 马丽, 等. 基于星形轮与气流的线辣椒清选分离装置的研究设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 102-105. KONG Lingjun, CHEN Yongcheng, MA Li, et al. Research and design of line pepper cleaning and separating device based on star wheel and airflow[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(2): 102-105. (in Chinese)
- [9] 陆荣, 刘志侠, 高连兴, 等. 立锥式小区花生脱壳机气吸清选装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 23-30. LU Rong, LIU Zhixia, GAO Lianxing, et al. Development of air suction cleaning device of vertical conical peanut sheller for plot planting[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 23-30. (in Chinese)
- [10] 史高昆, 李景彬, 丁龙朋, 等. 惯性气流式红枣清选系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 167-176. SHI Gaokun, LI Jingbin, DING Longpeng, et al. Design and experiment of inertia pneumatic type cleaner system of jujube fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 167-176. (in Chinese)
- [11] 李菊, 王增彪, 沈惠平, 等. 凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 150-154, 158. LI Ju, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating sieve with convex column screen surface on grain screening[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(1): 150-154, 158. (in Chinese)
- [12] MA L G, CAO S K, WANG H, et al. Discrete element simulation analysis of vibratory cleaning device[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 439(5): 052004.
- [13] 程超, 付君, 陈志, 等. 水稻收获机涂层改性清选筛面设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 94-102. CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Design and experiment on modified sieve with coating of rice harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 94-102. (in Chinese)
- [14] 刘鹏, 金诚谦, 宁新杰, 等. 大豆机收清选筛田间性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 36-43. LIU Peng, JIN Chengqian, NING Xinjie, et al. Field performance test and analysis of the cleaning sieve of soybean harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 36-43. (in Chinese)
- [15] 侯俊铭, 白晶波, 何涛, 等. 双圆台锥式蓖麻脱壳清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 132-140. HOU Junming, BAI Jingbo, HE Tao, et al. Design and experiment of castor dehulling and cleaning device with double curved

- table[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 132 - 140. (in Chinese)
- [16] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 239 - 248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp. 1): 239 - 248. (in Chinese)
- [17] LIANG Z W, XU L Z, BAERDEMAEKER J D, et al. Optimisation of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 25 - 40.
- [18] LIANG Z W, LI Y M, BAERDEMAEKER J D, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 95 - 106.
- [19] 王立军, 于泳涛, 张帅, 等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 158 - 166.
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion characteristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 158 - 166. (in Chinese)
- [20] 王立军, 刘伟腾, 李懿航, 等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 92 - 102.
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research of double-layer jitter plates with holes in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 92 - 102. (in Chinese)
- [21] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27 - 35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27 - 35. (in Chinese)
- [22] 王学农, 边博, 吐鲁洪·吐尔迪, 等. 巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 299 - 306.
WANG Xuenong, BIAN Bo, TUIUHONG·Turdi, et al. Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 299 - 306. (in Chinese)
- [23] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117 - 125, 247.
DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117 - 125, 247. (in Chinese)
- [24] WANG L J, DING Z J, MENG S, et al. Kinematics and dynamics of a particle on a non-simple harmonic vibrating screen[J]. Particuology, 2017, 32: 167 - 177.
- [25] 李金澎. 蓖麻蒴果脱壳过程仿真与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
LI Jinpeng. Simulation and experiment on castor shelling process[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. (in Chinese)

(上接第 27 页)

- [14] 李耀明, 孙朋朋, 庞靖, 等. 联合收获机底盘机架有限元模态分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 38 - 46, 301.
LI Yaoming, SUN Pengpeng, PANG Jing, et al. Finite element mode analysis and experiment of combine harvester chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 38 - 46, 301. (in Chinese)
- [15] 王亚丁. 履带式联合收获机驾驶台振动分析与结构优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [16] 张武. 汽车动力总成悬架系统关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [17] 王芬娥, 曹新惠, 郭维俊, 等. 联合收获机主驾驶座振动强度及其频率结构试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 62 - 65.
WANG Fene, CAO Xinhui, GUO Weijun, et al. Research on vibration strength and frequency structure of main driver seat of the wheat combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 62 - 65. (in Chinese)
- [18] 高志朋, 徐立章, 李耀明, 等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 48 - 55.
GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in field harvesting condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 48 - 55. (in Chinese)
- [19] 赵胜华. 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒喂入量测量系统设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [20] JIANG Y, LIAO Y, QIN C, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY - 2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53 - 60.
- [21] 庞靖. 履带式谷物联合收获机振动源-响应分析与传递主路径辨识[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [22] BANERJEE S, BALAMURUGAN V, KRISHNAKUMAR R. Ride comfort analysis of math ride dynamics model of full tracked vehicle with trailing arm suspension[J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 1110 - 1118.
- [23] BERMEJO M, SANTOS A P, GOICOLEA J M. Development of practical finite element models for collapse of reinforced concrete structures and experimental validation[J]. Shock and Vibration, 2017: 1 - 9.