

沙棘冻果筛分装置设计与仿真分析

杨金发¹,胡靖明¹,杨梅¹,毕阳²,李沫若¹,
张强林¹,向金田¹,孙伟一¹,曲浩¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院,甘肃兰州 730070;2. 甘肃农业大学食品科学与工程学院,甘肃兰州 730070)

摘要:为降低甘肃产区沙棘加工企业沙棘枝条果脱果、筛分除杂后的纯果含杂率,在传统的ZKB型直线振动筛基础上,设计了配置3层筛片的直线振动筛,其中3层筛片筛孔直径分别为12、8、5 mm。使用离散元仿真分析软件,并以振动筛振动方向角、振幅和频率为自变量、振动筛筛分效率和筛分速度为响应值,采用综合评分法设计正交试验,对各个因素及其交互作用进行分析。结果表明:当振动方向角为45°、振幅为2 mm、振动频率为18 Hz时筛分效果最好。在此条件下进行样机试验,下层筛筛分效率、筛分速度分别为85.3%、0.33 m·s⁻¹,上层筛筛分效率、筛分速度分别为85.9%、0.38 m·s⁻¹,该机主要设计指标符合相关国家标准,满足企业对筛分效率的需求。样机实地试验与仿真试验对9组试验数据的4个指标差异、最佳振动参数的研究结果趋于一致。

关键词:沙棘;离散元仿真;筛分效率;筛分速度

中图分类号:S226.5 **文献标志码:**A

Design and simulation analysis of frozen sea buckthorn sieving device

YANG Jinfa¹, HU Jingming¹, YANG Mei¹, BI Yang², LI Moruo¹,
ZHANG Qianglin¹, XIANG Jintian¹, SUN Weiyi¹, QU Hao¹

(1. College of Mechanical and Electrical engineering, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. College of Food Science and engineering, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To reduce the pure-fruit trash content of branch fruit of the quick-frozen sea buckthorn after screening and purification in Gansu production area, a linear vibrating screen with three layers of sieves was designed based on the traditional ZKB type linear vibrating screen with diameters of the three layers' sieves of 12 mm, 8 mm and 5 mm. The discrete element simulation software was used, with the adoption of the vibration direction angle, amplitude and frequency as the independent variables, and the vibrating screen efficiency and sieving speed as the response values. The orthogonal test was designed by applying the comprehensive scoring method to analyze each factor and its interaction. The test results showed that the best screening effect was achieved when the vibration direction angle was 45°, the amplitude was 2 mm and the vibration frequency was 18 Hz. In the prototype test under this condition, the screening efficiency and screening speed of the lower deck screen were 85.3% and 0.33 m·s⁻¹, respectively, and the screening efficiency and screening speed of the upper deck screen were 85.9% and 0.38 m·s⁻¹, respectively. The main design index of the machine conformed to the relevant national standards and met the demand of enterprises for screening efficiency. The results of prototype field test and simulation test on the four index differences and the best vibration parameters of nine sets of test data were consistent.

Keywords: sea buckthorn; discrete element simulation; sieving efficiency; sieving speed

我国沙棘资源广泛分布于 20 多个省、自治区、直辖市的 430 多个县,植株可在 $-43^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 广泛温度区间内生长,具有抗干旱、耐贫瘠特点,是营造防护林的主要树种之一^[1-2]。沙棘浆果富含维生素 C、黄酮等生物活性成分,可作为饮品、保健品及药物的生产原料^[3-5],通过对剪枝采收的枝条果进行速冻、脱果、除杂等工序获得沙棘冻浆果^[6-7]。

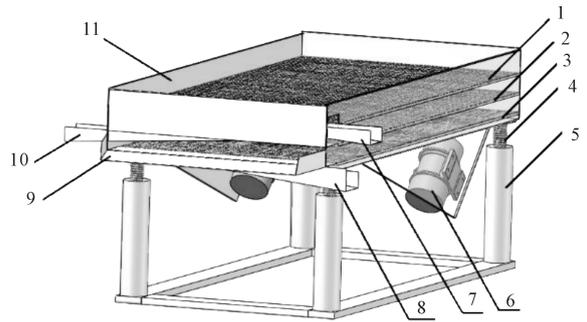
企业借鉴葡萄、樱桃等小浆果除梗机械,研制出沙棘脱果除杂机械,可实现对速冻、预破碎、脱果后的沙棘浆果进行筛分,从而降低沙棘浆果含杂率^[8-10],但生产中使用的脱果除杂一体机所获冻浆果仍达不到除杂标准。目前,企业中常用多层筛网式滚筒筛或曲柄摇杆式平面筛进行沙棘浆果除杂。冯常建等^[11]应用离散元仿真分析软件(EDEM)分析了沙棘速冻枝条果脱果后枝条和果实的分离率,研究了筛孔形状对分离率的影响。胡天亮等^[12]设计了一种三层结构滚筒筛,并以转速和倾角为自变量量化了筛分效率和含杂率。郝心亮^[13]采用正交试验法研究了往复振动平面筛工作参数对大豆筛分效率的影响,得到了平面筛的最佳筛分参数。虽然已有研究在沙棘冻果筛分领域取得丰富成果,但仍存在筛分效果不理想的问题,曲柄连杆式平面振动筛结构简单,但沙棘筛分除杂生产中存在含杂率高、易偏振、摇杆与筛箱连接处易断裂等问题;虽然多层筛网式滚筒筛的筛分效率高,但筛分速度慢。因此,研制效率高且效果好的沙棘除杂机械仍是一项亟需完成的工作。

本研究基于传统的 ZKB 型直线振动筛拟设计配置 3 层筛片的直线振动筛,采用综合评价法设计正交试验,应用离散元软件对筛机工作参数进行研究;最后通过样机实地试验,得出最优筛分参数组合。研究成果可为沙棘浆果高效快速筛分除杂提供一种全新解决方式。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

以传统的 ZKB 直线振动筛为基础,依据国家现行的沙棘筛选质量标准和振动筛设计标准^[14-15]。该机主要由 3 层筛网、2 台振动电机、4 根减振弹簧、筛箱和机架等组成,如图 1 所示。结合现行振动筛设计标准,拟定直线振动筛外形尺寸参数为 2 300 mm×1 400 mm×1 000 mm,整机质量 275 kg,所用筛片尺寸均为 200 mm×100 mm,上、中、下层筛筛孔直径分别为 12、8、5 mm。



1. 上层筛; 2. 中层筛; 3. 下层筛; 4. 减振弹簧; 5. 支撑架;
6. 振动电机; 7. 枝条主出料口; 8. 小杂质出料口;
9. 浆果出料口; 10. 枝条次出料口; 11. 筛箱
1. Upper sieve; 2. Medium sieve; 3. Lower sieve;
4. Vibration damping springs; 5. Support bracket;
6. Vibration motors; 7. Main discharge port for branch strips;
8. Small impurities outlet; 9. Berries outlet;
10. Sub-outlet for branch strips; 11. Sieve box

图 1 直线振动筛结构示意图

Fig.1 Schematic diagram for the structure of a linear vibrating screen

1.2 工作原理

整机与沙棘枝条果脱果机配套使用,脱果滚筒装配于该机上方。工作时,直线振动筛由振动电机提供激振力,做直线筛分运动,掉落到筛面上的混合物料在重力和激励力作用下,不断做分层运动和透筛运动,直径小于上层筛筛孔的浆果和杂质透筛,枝条等难于透筛的杂物被筛体输送到出料口,从而完成清选分离,获得冻纯果。

2 筛片设计

2.1 沙棘外形尺寸

在不含“等外果”^[15]的沙棘果样品中随机取出 30 颗沙棘果并测定 3 维尺寸。由于沙棘浆果呈椭圆形,且各维度直径相差无几,因此在设计筛孔尺寸时,只需对浆果三个维度上的最大直径进行统计分析,30 颗浆果最大直径分别为 6.2、6.6、6.3、5.9、7.2、7.6、7.3、6.3、7.9、7.0、6.8、5.5、6.8、6.5、7.2、7.1、7.3、6.1、6.7、6.5、6.5、5.2、6.8、5.5、8.3、6.3、6.5、6.0、6.5、5.3 mm。

由统计学原理^[16],根据式(1)可计算沙棘浆果最大直径的加权平均数为 6.59 mm。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{30} X_i}{n} \quad (1)$$

式中, \bar{X} 为沙棘浆果最大直径的加权平均数(mm); n 为沙棘浆果总数(颗); X_i 为第*i*颗沙棘浆果最大直

径(mm)。

根据式(2)可计算沙棘浆果平均最大直径的修正均方差为 0.73 mm。

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中, σ_{n-1} 为沙棘浆果平均最大直径的修正均方差(mm)。

以 95.45% 的把握估计沙棘浆果平均直径区间为:

$$\left(\bar{X} - \frac{\lambda \times \sigma_{n-1}}{\sqrt{n-1}}, \bar{X} + \frac{\lambda \times \sigma_{n-1}}{\sqrt{n-1}} \right) \quad (3)$$

式中, λ 为概率度, 当置信区间为 95.45% 时, $\lambda = 2$ 。

由式(3)计算可得, 在 95.45% 的置信区间内, 沙棘浆果平均直径区间为 (6.54, 6.64); 同理, 计算得到枝条的平均直径和长度区间分别为 (3.95, 4.05) 和 (50.3, 52.7)。小杂质形状不规则, 但最长边长度均小于 4 mm。

2.2 筛孔排列方式及直径

为防止枝条透筛, 且沙棘浆果呈椭球形、小杂质的 3 维外形尺寸皆远小于下层筛筛孔直径, 3 层筛片均选取圆孔筛片, 且 3 层筛片筛孔直径均需要大于 3 mm, 故选取 I_a 型筛片, 参考脱果机出料口尺寸, 筛片尺寸设计为 2 000 mm×1 000 mm。

上层筛要保证全部沙棘浆果均能获得透筛机会, 故筛孔直径 Φ_1 应远大于浆果平均最大直径中最大值 d_{\max} , 即 $\Phi_1 \gg d_{\max} = 6.64$ mm, 选取筛孔直径 $\Phi_1 = 12$ mm。为增加筛分面积, 提高筛分效率, 孔间距选择 12 mm 直径筛孔对应的 16 mm、18 mm 两种孔间距中较小的孔间距, 即 $t_1 = 16$ mm。

中层筛的主要作用为减轻下层筛筛分压力, 筛除透筛掉落的枝条和果梗并降低浆果含杂率。当大量浆果和小杂质透过上层筛后, 先经中层筛进行筛分, 暂时保留一部分浆果和杂质在该筛层, 防止下层筛筛面物料堆积过多, 影响小杂质透过下层筛筛孔, 同时, 避免透过上层筛的枝条直接落入浆果筛层, 从浆果出料口排出。故 $d_{\max} < \Phi_2 < \Phi_1$, 选取筛孔直径 $\Phi_2 = 8$ mm, 孔间距 $t_2 = 11$ mm。

下层筛要保证将浆果留在该筛面上, 小杂质透过筛片掉落在筛箱底板上, 在激振力作用下, 浆果和小杂质从各自排料口排出。故 $4 \text{ mm} < \Phi_3 < d_{\min} = 6.54$ mm, 选取 $\Phi_3 = 5$ mm, 孔间距 $t_3 = 6$ mm。

筛片筛孔总面积按式(4)计算:

$$S_i = (S' - S'') \alpha_i \quad (4)$$

式中, S 为筛孔总面积(m^2); S' 为筛片面积(m^2); S''

为筛片支撑梁与筛片接触面积(m^2); α_i 为第 i 层筛片筛分面积百分比^[17], 取 $\alpha_1 = 51\%$ 、 $\alpha_2 = 48\%$ 、 $\alpha_3 = 63\%$ 。计算得到 $S' = 2 \text{ m}^2$, 筛片支撑梁由边长 20 mm 的空心钢管焊接而成, 故 $S'' = 0.2152 \text{ m}^2$ 。由式(4)计算可得, $S_1 = 0.91 \text{ m}^2$, $S_2 = 0.86 \text{ m}^2$, $S_3 = 1.12 \text{ m}^2$, 上层筛和下层筛作为主要筛分层, 中层筛作为下层筛的辅筛分层, 满足本设计对筛片打孔面积的要求。

3 振动筛参数计算

3.1 处理量计算

处理量是衡量振动筛工作能力的重要指标。计算公式如式(5)所示:

$$\begin{cases} B = S' - S'' \\ Q = Bq\gamma K_{X_i} L_{cu} J_X N_k O_{sh} E_f \end{cases} \quad (5)$$

式中, Q 为总处理量($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$); B 为筛面有效筛分面积(m^2); q 为单位筛分面积的平均容积处理量($\text{m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$); γ 为材料的松散密度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); K_{X_i} 、 L_{cu} 、 J_X 、 N_k 、 O_{sh} 、 E_f 均为修正系数^[15]。本研究中, $B = 1.7848 \text{ m}^2$ 、 $q = 21 \text{ m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 、 $\gamma = 0.64 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $K_{X_i} = 0.6$ 、 $L_{cu} = 0.94$ 、 $J_X = 0.7$ 、 $N_k = 1.0$ 、 $O_{sh} = 0.75$ 、 $E_f = 1.0$ 。计算可得 $Q = 7.1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 基于与该振动筛配合生产的脱果机工作能力, 本设计振动筛的处理量为 $0.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 理论处理量满足设计要求。

3.2 振动强度校核

振动强度 K_s 值的大小决定了筛箱的强度, K_s 值越大, 要求筛箱的强度越大。 K_s 值一般为 3 ~ 8, 若 K_s 值过大, 应在调节 A 和 ω 的同时并验算 K_s 值是否符合设计要求^[18]。

$$\begin{cases} K_s = \frac{A\omega^2}{g} = \frac{4A\pi^2 f^2}{g} \\ K_s \leq K \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_s 为振动强度; A 为筛箱振幅(m); ω 为筛箱振动角频率($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度, 取 $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; f 为筛箱振动频率(Hz); K 为许用振动强度, $3 \leq K \leq 8$ 。依据本设计振动筛的初始设计参数, 最大振幅 $A_{\max} = 6 \text{ mm}$ 、最大振动频率 $f_{\max} = 18 \text{ Hz}$ 。由式(6)计算可得 $K_s = 7.83 < 8$, 故振动强度满足设计要求。

3.3 参振质量计算

振动筛在进行物料筛分工作时, 参振部件包含筛体、2 台振动电机、4 个支撑装置的上弹簧座、筛分物料^[19]。

$$M_{\text{总}} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \quad (7)$$

式中, $M_{\text{总}}$ 为总参振质量 (kg); M_1 为筛体质量 (kg); M_2 为振动电机总质量 (kg); M_3 为上弹簧座总质量 (kg); M_4 为筛分物料总质量 (kg)。

应用三维设计软件对筛体、上弹簧座进行材料定义后、预选振动电机质量为 20.6 kg, 测得 $M_1 + M_2 + M_3 = 215$ kg。筛分物料质量与振动筛设计参数有密不可分的关系, 当振动方向角取较小值, 振幅取较大值时, 筛分速度快, 筛分物料质量小。由于单个物料粒子质量小, 结合筛面尺寸、振动筛设计参数及企业生产实况, 取 $M_4 = 5$ kg, 因此, 可计算得 $M_{\text{总}} = 220$ kg。

3.4 弹簧刚度计算

筛分工作过程中减振弹簧为筛箱提供支持力并限制筛箱的振动位移量, 所以减振弹簧要具备一定刚度, 防止在工作过程中损坏。计算如下:

$$\begin{cases} \omega_g = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{7} \right) \omega \\ K_l = \omega_g M_{\text{总}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, ω_g 为系统的固有频率 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); ω 为振动筛振动角频率 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); K_l 为系统中弹簧的总刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)。按最大设计频率并结合式(6) 计算得 $\omega_g = 100.53 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 取 ω 为 0.2, 则 $K_l = 88.41 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由于振动筛整体由 4 根减振弹簧支撑, 故每根弹簧的刚度为 $22.1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

3.5 振动电机选型及安装位置

3.5.1 功率计算 在该机设计中, 采取两侧各放置 1 台振动电机的方式为筛体提供激振力, 筛分系统所需激振力及功率按式(9) 计算^[20]。

$$\begin{cases} F = M_{\text{总}} A \omega^2 \\ P = \frac{C M_{\text{总}} A^2 n^3}{1740480} \end{cases} \quad (9)$$

式中, F 为激振力 (N); P 为振动系统消耗功率 (kW); C 为阻尼系数, 取值范围为 0.15 ~ 0.3, 本研究中取 $C = 0.18$; n 为振动次数, 已知最大振动频率 $f_{\text{max}} = 18 \text{ Hz}$, 则最大振动次数为 $n = 1080 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。由式(9) 计算得激振力 $F = 13.34 \text{ kN}$, 振动系统消耗功率 $P = 1.03 \text{ kW}$ 。选取 XDP - MV 800/3 型振动电机。单台电机激振力为 8 kN、激振功率为 0.55 kW、质量为 20.6 kg, 两台振动电机能够满足需要。

3.5.2 筛箱质心计算及振动器位置选择 振动筛在实际工作过程中, 结构设计和振动电机安装位置不合理, 易导致筛体发生左右偏振和前后摆振等问题, 甚至出现筛体大幅度位移的情况, 最终影响筛分效果。

本研究采用双振动电机为筛体提供激振力, 针对振动电机的安装位置进行分析, 由于振动电机提供的激振力合力需保持在一条直线上^[21-22], 激振力合力作用线应过参振质量质心, 筛体在筛分过程中不会出现偏振、摆振的问题, 并且能够增大振动筛的抛掷指数, 提高振动筛振动强度^[23]。

参照在 SolidWorks 中建立的模型, 如图 2 所示, 在筛箱右下角选取坐标原点, 以图 2 中右向作为 X 轴正向建立笛卡尔坐标系, 可得参振质量质心坐标为 $(X, Y, Z) = (-1064.98, 501.99, -0.12)$, 修正得 $(X, Y, Z) = (-1065, 502, 0)$, 振动电机安装位置如图 2 所示, 激振力的合力作用线经过参振质量质心。

4 基于 EDEM 的振动筛筛分性能仿真分析

4.1 模型建立与参数设置

4.1.1 筛箱模型建立 对所构建的振动筛模型进行简化并导入 EDEM 软件中, 而后按图 2 所示为导入的筛箱模型添加往复直线运动。定义筛箱材料为 SUS201, 密度 $\rho = 7.93 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、弹性模量 $E = 2.03 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 、泊松比 $\mu = 0.29$ 。

4.1.2 物料颗粒模型建立 用不规则颗粒模型代替小杂质, 在浆果和杂质的直径区间及枝条的长度区间内选取 3 个数值建立模型^[24-25]。以直径 4 mm、长度 50.5、51.0 mm 和 51.5 mm 建立 3 种枝条模型, 以直径 6.54、6.60 mm 和 6.64 mm 建立 3 种浆果模型, 以最长边长度 2.0、2.5 mm 和 3.0 mm 建立 3 种小杂质模型。等效模型及相关物性参数如表 1 所示。

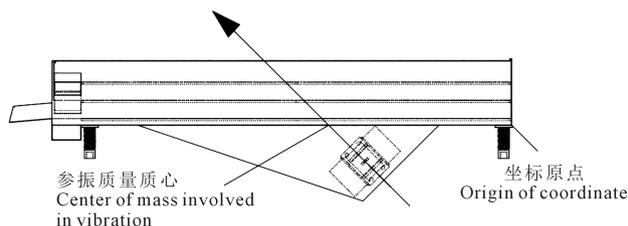


图 2 振动电机安装位置示意图

Fig.2 Vibration motor installation location diagram

表 1 材料物性参数

Table 1 Material physical property parameters

| 物料类型 Type of material | 枝条 Branch strips | 浆果 Berries | 小杂质 Small impurities |
|---|---------------------|---------------|-------------------------|
| 等效模型 Equivalent model | | | |
| 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Density | 1622.8 | 1070.0 | 218.1 |
| 泊松比 Poisson's ratio | 0.50 | 0.41 | 0.43 |
| 剪切模量/MPa Shear modulus | 3.43 | 2.79 | 7.22 |

4.1.3 接触参数设置 根据各物料间、各物料与筛箱间接接触情况,设置接触模型均为 Hertz - Mindlin with JKR 模型^[26-28],该接触模型适用于农作物、泥土等含湿物料颗粒或具有一定黏性、吸附性颗粒的模拟仿真,具体接触参数如表 2 所示。

4.1.4 喂入量确定 为模拟与该振动筛配套使用的脱果机出料口,在距振动筛后端 200 mm、筛箱顶端 100 mm 处定义一个 800 mm×200 mm 的虚拟颗粒工厂位置并添加 9 组颗粒工厂,掉落颗粒按照本文 4.1.2 小节设置。

对脱果机出料口的物料质量比例进行分析得,枝条、浆果、杂质的质量比例分别为 8.2%、85.3%、4.6%,另有 1.9% 的质量损失(实测脱果装置出料口浆果含杂率为 75%~78%)。取 70 g 出料口物料,对枝条、浆果和小杂质进行分拣并计算 3 种物料质量比例,重复 3 次取平均值,可得枝条、浆果、小杂质的喂入量分别为 11.58、120.75、6.56 g·s⁻¹。

4.2 仿真过程及结果分析

4.2.1 仿真过程分析 依据现行振动筛设计标准并基于影响筛分效率的重要振动参数的相关研究^[29-30],本研究设置振幅 4 mm、振动频率 16 Hz、振动方向角 45°,仿真过程如图 3 所示(见 282 页)。在后处理模块中,3 层筛片将筛箱分为 4 层,提取各层仿真数据,例如物料颗粒在筛面上的运动速度和

表 2 物料间接触力学参数

Table 2 Material-to-material contact mechanics parameters

| 接触物料 Contact material | 恢复系数 Coefficient of restitution | 静摩擦系数 Coefficient of static friction | 动摩擦系数 Coefficient of rolling friction |
|---|---------------------------------------|--|---|
| 枝条与枝条 Between the branches | 0.483 | 0.266 | 0.031 |
| 枝条与浆果 Between branches and berries | 0.584 | 0.266 | 0.041 |
| 枝条与小杂质 Between branches and small impurities | 0.543 | 0.316 | 0.031 |
| 枝条与筛箱 Between branches and sieve box | 0.268 | 0.373 | 0.065 |
| 浆果与浆果 Between the berries | 0.584 | 0.316 | 0.076 |
| 浆果与小杂质 Between berries and small impurities | 0.483 | 0.266 | 0.031 |
| 浆果与筛箱 Between berries and sieve box | 0.242 | 0.212 | 0.023 |
| 小杂质与小杂质 Between the small impurities | 0.440 | 0.322 | 0.039 |
| 小杂质与筛箱 Between small impurities and sieve box | 0.259 | 0.436 | 0.075 |

筛上物质量,进而验证筛分仿真是否能够实现动态稳定并分析筛分速度和筛分效率^[31]。

4.2.2 筛分速度分析 振动筛的筛分速度取决于物料颗粒在筛面上运动速度,由于沙棘浆果在速冻条件下进行脱果筛分,快速筛分能够降低物料升温,避免物料黏附、堵塞筛孔。提取仿真试验中各层筛面上物料的运动速度绘制曲线如图 4 所示。

在物料喂入量恒定的情况下,随着仿真时间增加,物料运动速度逐渐趋于动态稳定。取各层物料最后 2 s 筛分时间内的运动速度平均值作为各层物料的稳定运动速度,计算可得上层筛、中层筛、下层筛筛上物料和下层筛筛下物料的运动速度分别为 0.43、0.41、0.32 m·s⁻¹和 0.32 m·s⁻¹。

4.2.3 筛分效率分析 筛分效率是衡量振动筛性能的重要指标,也是困扰沙棘加工企业的重要问题。可按式(10)进行计算^[32]。

$$\eta = \frac{(a-c)(b-a) \times 100}{a(b-c)(1-a)} \times 100\% \quad (10)$$

式中, η 为筛分效率; a 为入料中小于规定粒度的细粒含量(%); b 为筛下物中小于规定粒度的细粒含量(%); c 为筛上物中小于规定粒度的细粒含量(%)。

提取图 3 所示仿真的各层筛面上出料口处各类物料的质量,按照式(10)计算各层筛的筛分效率,其中最上层筛片筛分效率计算过程如图 5 所示,参数 a 为定值,参照本文 4.1.4 小节所述,即浆果及小杂质的质量之和与物料总质量的比值,计算得 $a = 91.66\%$;参数 b 、 c 的变化情况如图 5a、b 所示,筛分效率曲线如图 5c 所示,同理,计算下层筛的筛分效率并绘制曲线如图 5d 所示。如前所述,中层筛的设置主要为减轻下层筛筛分压力,筛除透筛掉落的枝条,降低浆果含杂率,且在当前物料喂入量下,随着筛分时间增加,堆积在中层筛上的浆果和小杂质透筛掉落,出料口排出的筛分物料颗粒数量可忽略不计,因此中层筛的筛分效率不再研究。

依据图 5c、d 对上、下层筛片的筛分效率进行分析,在物料喂入量恒定的情况下,随着仿真时间增加,物料筛分效率逐渐趋于动态稳定。取各层物料最后 3 s 筛分时间内的筛分效率平均值作为各层物料的稳定筛分效率,计算可得上、下层筛的筛分效率分别为 93.20%、98.83%。

4.3 最佳振动参数探究

本试验以筛分速度和筛分效率为指标,通过调节振动频率、振动方向角和振幅 3 个振动参数进行仿真试验,以期获得最佳筛分效果对应的振动参数,通过实地试验进行验证和修正后用于实际生产^[33]。

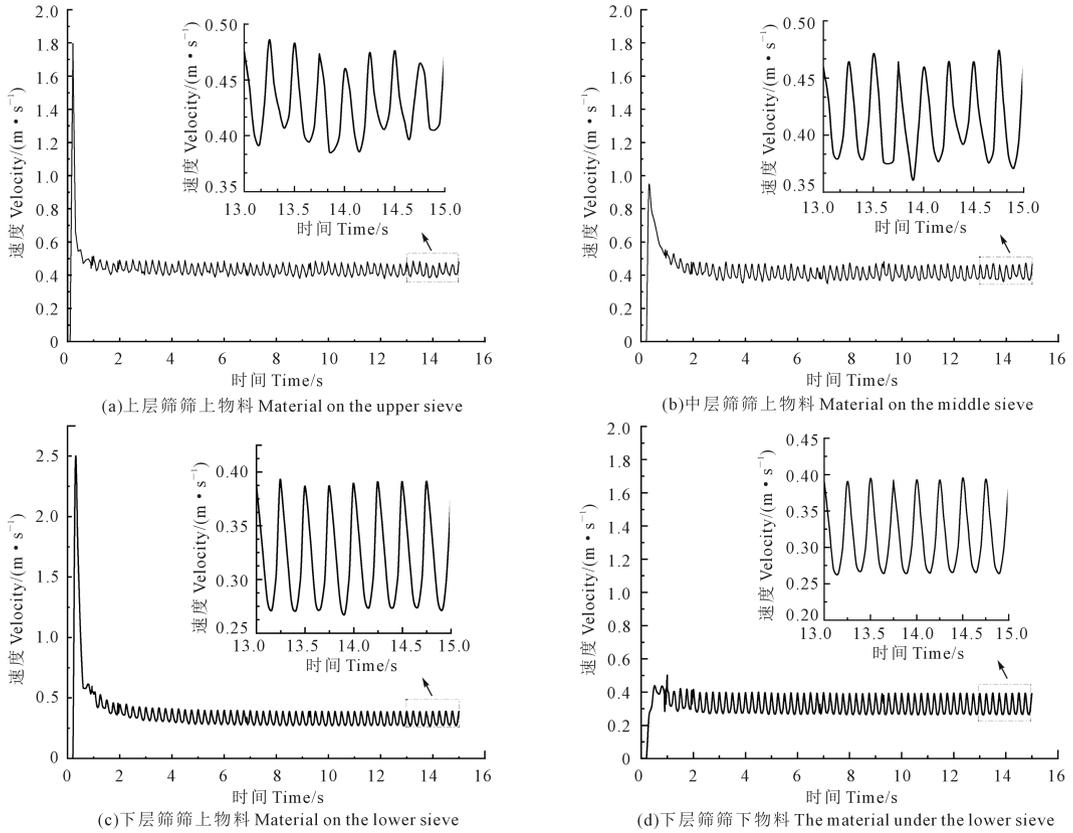


图 4 仿真物料运动速度

Fig.4 Material movement velocity in EDEM software

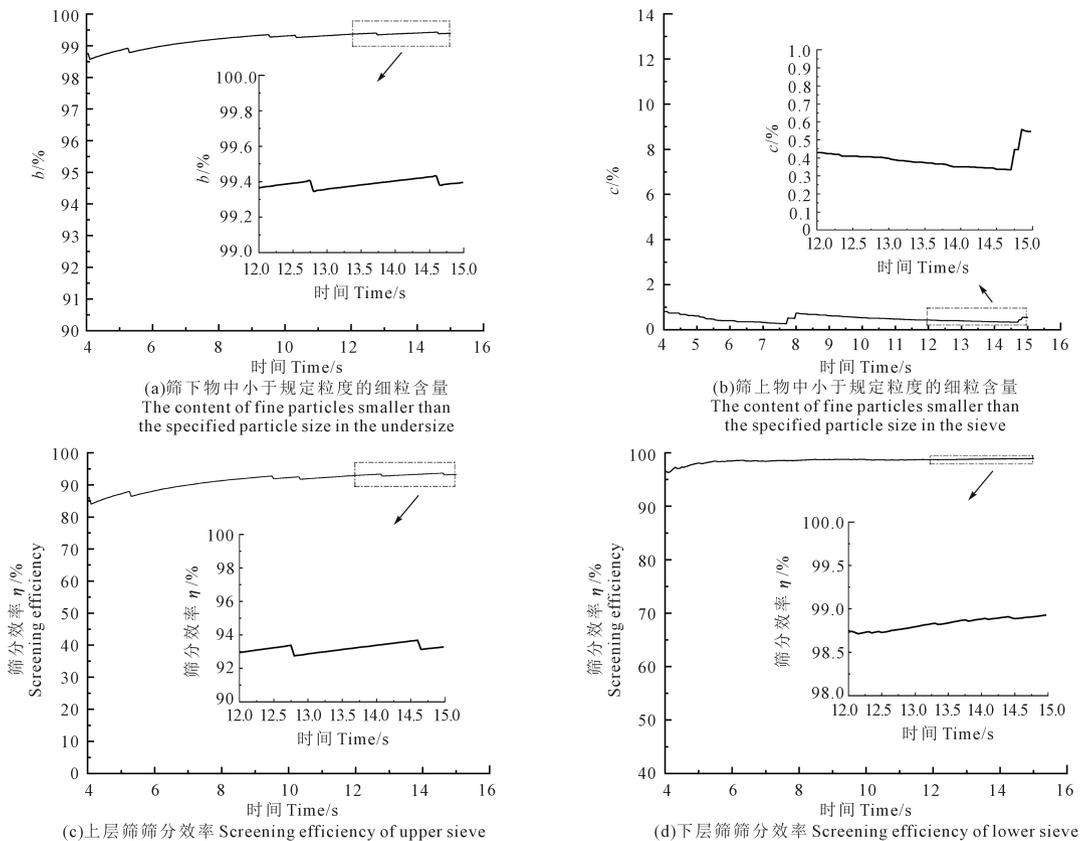


图 5 仿真筛分效率分析

Fig.5 Screening efficiency in EDEM software

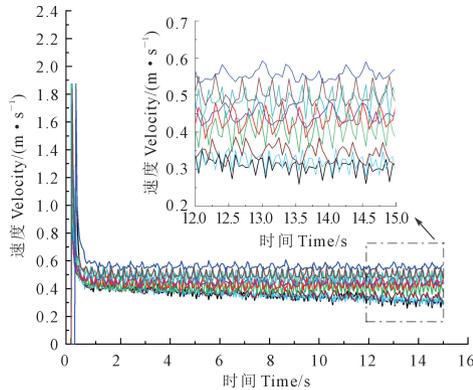
通过分析仿真试验,将振幅(A)、振动频率(B)、振动方向角(C)作为试验因素,将上层筛筛分效率(E)及筛分速度(F)、下层筛筛分效率(G)及筛分速度(H)作为试验指标,按多指标分析方法中综合评分法设计正交试验,试验因素与水平如表 3 所示^[34-35]。

按照 L9 (3⁴) 正交表设计要求,建立试验方案及结果分析表 5,依照试验号设置振动参数进行试验,分析仿真数据绘制筛分速度及筛分效率曲线,如图 6 所示。

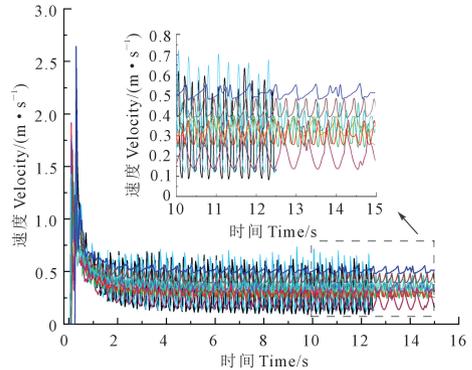
基于各指标对企业生产影响程度,设置试验指标权重比^[36]为下层筛片筛分效率:上层筛片筛分效率:下层筛片筛分速度:上层筛片筛分速度=4:3:2:1,按照该权重比设计表 4。

表 3 试验因素与水平
Table 3 Experimental factors and levels

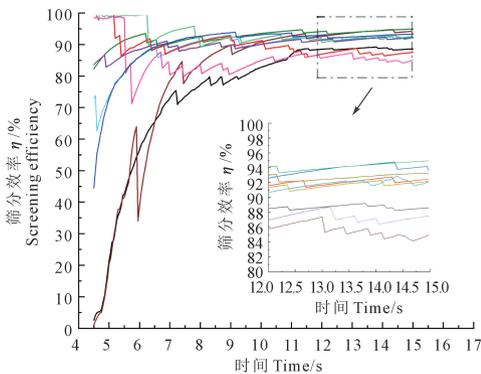
| 水平 Level | 因素 Factor | | |
|-------------|-----------|------|-------|
| | A/mm | B/Hz | C/(°) |
| 1 | 2 | 14 | 40 |
| 2 | 4 | 16 | 45 |
| 3 | 6 | 18 | 50 |



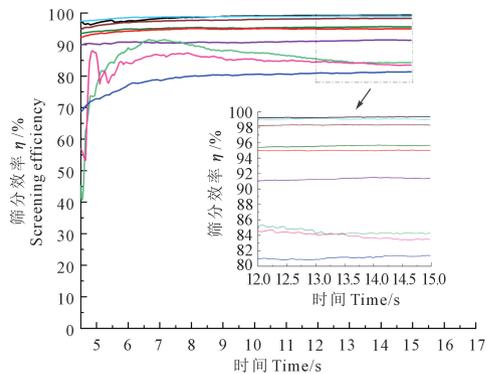
(a)上层筛筛上物料运动
Illustration of material movement on the first layer of sieve



(b)下层筛筛上物料运动
Illustration of material movement on the lowermost layer of sieve



(c)上层筛筛分效率
Illustration of the screening efficiency for the upper screen

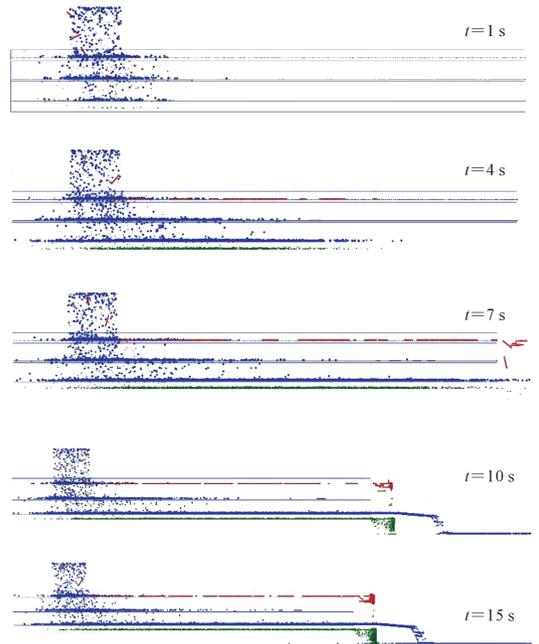


(d)下层筛筛分效率
Illustration of the screening efficiency for the lower screen

- 实验1 Experiment 1
- 实验2 Experiment 2
- 实验3 Experiment 3
- 实验4 Experiment 4
- 实验5 Experiment 5
- 实验6 Experiment 6
- 实验7 Experiment 7
- 实验8 Experiment 8
- 实验9 Experiment 9

图 6 振动筛仿真筛分效率及筛分速度

Fig.6 Vibrating screen simulation screening efficiency and screening speed



注:红色、蓝色、绿色颗粒分别为枝条、浆果、小杂质。
Note: The red, blue and green particles are branch strips, berries and small impurities.

图 3 物料在 EDEM 软件中的筛选过程

Fig.3 Material screening process in EDEM software

取筛分动态平衡后最后 3 s 内的平均值,得平均筛分速度及筛分效率并按照表 4 计算各指标分数^[37],将同一试验计算所得评价分数相加补充至表 5 中该试验综合评价栏。

分析表 5 中极差,3 个振动参数对该振动筛筛分效果影响的大小按次序为:振动方向角(C)、振幅(A)、振动频率(B)。最优设计方案为 C₂ A₁ B₃,即当振动方向角为 45°、振幅为 2 mm、振动频率为 18 Hz 时,振动筛的筛分效果最佳。

5 试验与分析

5.1 材料与方法

在甘肃省庆阳市华池县某沙棘加工企业对该振动筛分装置进行试验,试验材料为速冻后的脱果机出料口物料,喂入量为 0.5 t · h⁻¹,振动参数按照仿

真方案设置,并增加最优振动参数方案组,定义其试验号为 10 号进行试验,分析实际试验最佳振动参数。

5.2 结果与分析

样机实际试验结果见表 6,其制造指标符合 JB/T 9022—1999《振动筛设计规范》,筛分后净果率及破损率均符合 GB/T 23234—2009《中国沙棘果实质量等级》中“一等果”条件。

实际试验的结果表明当振动方向角为 45°、振幅为 2 mm、振动频率为 18 Hz 时,振动筛的筛分效果最佳,与仿真试验结论一致。当振动参数设为仿真最优参数时得试验结果如表 6 中 10 号试验所示,下层筛筛分效率和筛分速度分别为 85.3%和 0.33 m · s⁻¹,上层筛筛分效率和筛分速度分别为 85.9%和 0.38 m · s⁻¹,筛分效果优于其它试验组,且筛分效率与筛分速度满足生产要求。

表 4 指标分数计算参照表

Table 4 Indicator score calculation reference

| 指标 Indicator | G/% | E/% | H/(m · s ⁻¹) | F/(m · s ⁻¹) |
|---|--|-------|--------------------------|--------------------------|
| 试验数据区间 Experimental data interval | 0~100 | 0~100 | 0~1 | 0~1 |
| 满分评价数值 Full evaluation value | 40 | 30 | 20 | 10 |
| 评价分数计算方法 Evaluation score calculation method | $\text{评价分数} = \frac{\text{实际仿真数据值}}{\text{试验数据区间最大值}} \times \text{满分评价数值}$ $\text{Evaluation score} = \frac{\text{Actual simulation value}}{\text{Maximum value of test data interval}} \times \text{Full evaluation value}$ | | | |

表 5 试验方案及结果分析表

Table 5 Experimental protocol and results analysis

| 试验号 Experimental number | 试验因素及试验结果 Experimental factors and results | | | | | | | 综合评价 Overall evaluation |
|----------------------------|---|----------------|----------------|--------|--------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | A | B | C | G/% | E/% | H/(m · s ⁻¹) | F/(m · s ⁻¹) | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 99.279 | 88.687 | 0.278 | 0.309 | 74.968 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 99.034 | 92.104 | 0.310 | 0.322 | 76.665 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 98.275 | 93.851 | 0.211 | 0.344 | 75.125 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 95.563 | 94.203 | 0.300 | 0.407 | 76.556 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 94.982 | 87.393 | 0.305 | 0.434 | 74.651 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 91.303 | 91.691 | 0.337 | 0.447 | 75.239 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 84.481 | 91.832 | 0.368 | 0.482 | 73.522 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 83.947 | 85.607 | 0.425 | 0.500 | 72.761 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 81.095 | 92.733 | 0.510 | 0.555 | 76.008 |
| K ₁ | 226.758 | 225.046 | 222.967 | | | | | |
| K ₂ | 226.445 | 224.076 | 229.229 | | | | | |
| K ₃ | 222.291 | 226.372 | 223.298 | | | | | |
| k ₁ | 75.586 | 75.015 | 74.322 | | | | | |
| k ₂ | 75.482 | 74.692 | 76.410 | | | | | |
| k ₃ | 74.097 | 75.457 | 74.433 | | | | | |
| 极差 Range | 1.489 | 0.765 | 2.087 | | | | | |
| 优化方案 Optimal scheme | A ₁ | B ₃ | C ₂ | | | | | |

表 6 样机实际试验结果

Table 6 Actual test results of the prototype

| 试验号 Experimental number | 实际试验结果 Actual test results | | | |
|-------------------------------|----------------------------|------|------------------------|------------------------|
| | G/% | E/% | H/(m·s ⁻¹) | F/(m·s ⁻¹) |
| 1 | 86.8 | 85.6 | 0.27 | 0.35 |
| 2 | 85.8 | 86.4 | 0.32 | 0.33 |
| 3 | 84.3 | 86.9 | 0.28 | 0.37 |
| 4 | 81.2 | 85.2 | 0.32 | 0.41 |
| 5 | 83.2 | 80.5 | 0.30 | 0.45 |
| 6 | 81.4 | 83.2 | 0.34 | 0.47 |
| 7 | 77.3 | 82.9 | 0.38 | 0.48 |
| 8 | 77.9 | 79.2 | 0.42 | 0.50 |
| 9 | 76.5 | 79.8 | 0.50 | 0.52 |
| 10 | 85.3 | 85.9 | 0.33 | 0.38 |

6 结 论

1) 确定整机结构及主要技术指标,依据沙棘浆果和其它杂质外形参数对筛片进行设计,采用 3 层尺寸为 2 000 mm×1 000 mm 的 I_a型筛片,确定筛孔直径依次为 12、8、5 mm,结合设计要求对主要设计参数进行计算和校核,得参振质量质心坐标 $(X, Y, Z) = (1065, -502, 0)$,筛分最大处理量为 $Q = 7.1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,当实际处理量为 $0.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,振动系统消耗功率 $P = 1.03 \text{ kW}$ 、需提供激振力 $F = 13.34 \text{ kN}$ 、激振力的合力作用线经过参振质量质心。

2) 振动方向角对筛分效果的影响最大,振幅次之,振动频率影响最小,上述条件设置情况下振动筛的筛分效果最佳。实际试验表明,当振动方向角为 45°、振幅为 2 mm、振动频率为 18 Hz 时振动筛的筛分效果最佳,下层筛筛分效率和筛分速度分别为 85.3% 和 $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,上层筛筛分效率和筛分速度分别为 85.9% 和 $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,筛分后净果率及破损率均符合生产要求,实际试验结果与仿真结果趋于一致。

参 考 文 献:

[1] 钟心,尤飞,周振亚,等.我国沙棘产业发展现状与对策建议[J].世界林业研究,2021,34(3):102-106.
ZHONG X, YOU F, ZHOU Z Y, et al. Analysis and suggestions on the seabuckthorn industry development in China[J]. World Forestry Research, 2021, 34(3): 102-106.

[2] 王洪英,杨文文,张学培.晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J].干旱地区农业研究,2005,(6):151-154.
WANG H Y, YANG W W, ZHANG X P. Soil water characteristics of woodlands on slope in loess areas in west Shanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005,(6): 151-154.

[3] 孙国政,钱敏,周芸,等.甘肃地区沙棘叶中黄酮类物质含量测定[J].中国食品工业,2019,(5):60-64.
SUN G Z, QIAN M, ZHOU Y, et al. Determination of flavonoids in seabuckthorn leaves of Gansu[J]. China Food Industry, 2019,(5):

60-64.

[4] 刘洪章.沙棘生物学及化学成分研究[D].长春:吉林农业大学,2003.
LIU H Z. Studies on biology and chemical components of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.)[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2003.

[5] SHAH R K, IDATE A, UGALE V, et al. Comprehensive review on sea buckthorn: biological activity and its potential uses[J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(5): 942-953.

[6] 金敬红,孙晓明,吴素玲.沙棘高效高值综合利用技术的研究[J].中国野生植物资源,2015,34(4):81-86.
JIN J H, SUN X M, WU S L. Study on the efficient high-value comprehensive utilization techniques of sea-buckthorn[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2015, 34(4): 81-86.

[7] 李永海,忻耀年.沙棘产品的研究与开发[J].国际沙棘研究与开发,2008,6(3):4-9.
LI Y H, XIN Y N. Research and development of seabuckthorn products[J]. The Global Seabuckthorn Research and Development, 2008, 6(3): 4-9.

[8] 赵艳杰,胡天亮,胡靖明,等.沙棘预破碎装置设计与有限元分析[J].中国农机化学报,2020,41(7):87-93.
ZHAO Y J, HU T L, HU J M, et al. Design and finite element analysis of sea-buckthorn pre-crushing device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 87-93.

[9] 张建才,石磊,陈立东,等.基于 Pro/E 的小型葡萄除梗破碎机的设计[J].农机化研究,2008,(8):97-99.
ZHANG J C, SHI L, CHEN L D, et al. Design of grape stalk division and crusher based on Pro/E[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,(8): 97-99.

[10] 蔡永国,刘俭.一种沙棘除杂分级一体装置:中国, CN202021886780.1[P].2021-05-04.
CAI Y G, LIU J. One integrated device for removing impurities and grading seabuckthorn: China, CN202021886780.1[P].2021-05-04.

[11] 冯常建,毕阳,胡文威,等.基于 EDEM 数值模拟的沙棘脱果滚筒筛仿真试验[J].林业机械与木工设备,2016,44(6):34-37.
FENG C J, BI Y, HU W W, et al. Simulation test on sea buckthorn defruiting roller screen based on EDEM numerical simulation[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2016, 44(6): 34-37.

[12] 胡天亮,胡靖明,毕阳,等.基于 EDEM 数值模拟的沙棘滚筒筛设计[J].中国农机化学报,2021,42(9):122-129.
HU T L, HU J M, BI Y, et al. Design of sea-buckthorn roller screen based on EDEM numerical[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(9): 122-129.

[13] 郝心亮.往复振动平面筛分选大豆的试验研究[J].农业工程学报,1999,(2):149-152.
HAO X L. Experimental study on soybean cleaning using reciprocating vibration screen[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999,(2): 149-152.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.中国沙棘果实质量等级:GB/T 23234-2009[S].北京:中国标准出版社,2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection of grain and oils-Determination of starch content in maize-Near-infrared method: GB/T 25219-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[15] 国家机械工业局.振动筛设计规范:JB/T 9022-1999[S].北京:机械工业出版社,1999.

- State Bureau of Machine-Building Industry. Design criterion of vibrating screen; JB/T 9022-1999[S]. Beijing: Research Institute of Machinery Standardization, Ministry of Machinery Industry, 1999.
- [16] 李洁明, 祁新娥. 统计学原理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995: 131-136.
- LI J M, QI X E. Principles of statistics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1995: 131-136.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 长圆孔、长方孔和圆孔筛板: GB/T 12620-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Round and elongated apertures with round and square plate screens: GB/T 12620-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [18] 亢炜. 多层直线振动筛的动态仿真与系统参数优化方法探究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- KANG W. The dynamic simulation and research on parameter optimization method of multilayer linear vibrating screen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [19] 姬小娟. 大型直线振动筛的动力学分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- JI X J. The dynamics analysis of large-sized linear vibration screener[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [20] 王春彦, 岳大鑫, 刘鹤. 振动筛振动电机的选取与激振力的调整[J]. 矿山机械, 2007, (7): 74-76.
- WANG C Y, YUE D X, LIU H. Selection of vibration motor for vibration sifter and adjustment to the exciting force[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, (7): 74-76.
- [21] 张玉双, 丁渭渭, 顾秋军. 直线振动筛的动力学分析[J]. 建设机械技术与管理, 2015, 28(7): 85-88.
- ZHANG Y S, DING W W, GU Q J. Kinetic analysis of the linear vibrating screen[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2015, 28(7): 85-88.
- [22] 张红霞. 大型直线振动筛动力学分析与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009.
- ZHANG H X. The dynamics analysis and study of large-sized linear vibration screener[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2009.
- [23] HARZANAGH A A, ORHAN E C, ERGUN S L. Discrete element modelling of vibrating screens[J]. Minerals Engineering, 2018, 121: 107-121.
- [24] DONG K J, ESFANDIARY A H, YU A B. Discrete particle simulation of particle flow and separation on a vibrating screen; effect of aperture shape[J]. Powder Technology, 2017, 314: 195-202.
- [25] 李兴凯, 韩正晟, 戴飞, 等. 基于 EDEM 的小区育种小麦脱粒装置作业参数仿真研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 292-298.
- LI X K, HAN Z S, DAI F, et al. Simulation research on working parameters of threshing device on plot-bred wheat based on EDEM[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 292-298.
- [26] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
- LI Y X, LI F X, XU X M, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 320-327.
- [27] ALIZADEH M, ASACHI M, GHADIRI M, et al. A methodology for calibration of DEM input parameters in simulation of segregation of powder mixtures, a special focus on adhesion[J]. Powder Technology, 2018, 339: 789-800.
- [28] FIGUEROA I, LI H M, MCCARTHY J. Predicting the impact of adhesive forces on particle mixing and segregation[J]. Powder Technology, 2009, 195(3): 203-212.
- [29] CLEARY P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method[J]. Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, 2009, 26(6): 698-743.
- [30] 王娜, 赵俊凯, 李孟红. 振动筛筛分效率的影响因素研究[J]. 粮食加工, 2018, 43(2): 59-62.
- WANG N, ZHAO J K, LI M H. Study on influence factors of sieving efficiency of vibrating screen[J]. Grain Processing, 2018, 43(2): 59-62.
- [31] 谢晗. 基于 DEM 的二氧化铀烧结块的振动筛分过程分析[C]//中国核科学技术进展报告(第七卷)——中国核学会 2021 年学术年会论文集第 3 册(核设备分卷、核材料分卷), 烟台: 中国原子能出版社, 2021: 211-219.
- XIE H. Analysis of vibration screening process of uranium dioxide agglomeration based on DEM[C]//Report on the Progress of China's Nuclear Science and Technology (Volume VII) - Volume 3 of the Proceedings of the 2021 Annual Academic Conference of the Chinese Nuclear Society (Nuclear Equipment Volume, Nuclear Material Volume), Yantai: China Atomic Energy Press, 2021: 211-219.
- [32] 罗安琪, 秦双迎. 新型概率筛防堵结构研究及多层筛分效率计算探讨[J]. 建设机械技术与管理, 2010, 23(9): 104-107.
- LUO A Q, QIN S Y. Research on structure to prevent the new probability screen from jamming and calculation of screening efficiency of the multi-screen[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2010, 23(9): 104-107.
- [33] 闫宏伟, 刘翼, 李健, 等. 基于 EDEM 的煤粉制样装置筛分性能仿真与试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(7): 658-667.
- YAN H W, LIU Y, LI J, et al. Simulation and experiment of screening performance of pulverized coal sample device based on EDEM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(7): 658-667.
- [34] ZHAO L L, ZHAO Y M, BAO C Y, et al. Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design[J]. Powder Technology, 2017, 310: 307-317.
- [35] 冯岩, 孙步功, 张克平, 等. 基于 EDEM 的油菜播种机仿真试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 288-294.
- FENG Y, SUN B G, ZHANG K P, et al. Simulation test for cole seeding machine based on EDEM[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 288-294.
- [36] 雷焕鸣, 吴学诗, 孙若冰. 用多指标正交试验的区间取值(RTV)综合评价法优化泥浆的配制[J]. 数理统计与管理, 1998, (4): 20-24.
- LEI H M, WU X S, SUN R B. Optimization of slush formulation with region taking value comprehensive score method of the multifactor orthogonal test[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 1998, (4): 20-24.
- [37] 陈亚哲, 姚红良, 刘刚. 振动参数对筛分效率影响的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8): 1122-1126.
- CHEN Y Z, YAO H L, LIU G. Experimental study on influence of vibration parameters on screening efficiency[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(8): 1122-1126.