

基于 EDEM 的沙棘冻浆果振动清选 装置参数优化与分析

张强林¹, 胡靖明¹, 杨梅¹, 杨金发¹,
李沫若¹, 王清泽¹, 张文洁¹, 毕阳²

(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: 针对沙棘冻浆果清选加工中存在清洁率低, 筛网易堵塞的问题, 采用离散元 EDEM 软件对振动清选装置的结构和运动参数进行优化。以速冻沙棘枝条果机械脱果后的冻浆果、枝条和果梗等颗粒为试验物料, 测定物料的尺寸特征, 进行振动清选装置动力学分析和筛上颗粒受力分析。分析筛网不同形状以及尺寸的筛孔组合对振动清选装置清洁率和透筛概率的影响, 确定筛网设计参数为第一层筛网为圆孔、孔径为 11 mm, 第二层筛网为圆孔、孔径为 9 mm, 第三层筛网为长孔、孔径为 5 mm×25 mm。单因素试验结果表明: 振幅的改变未显著影响洁净率和透筛率, 在保证高清洁率时选取筛体振幅为 6 mm。选取振动频率, 振动方向角, 筛面倾角为试验因素, 清洁率和透筛概率为试验指标, 设计二次正交旋转组合试验, 建立各因素与指标间的数学模型, 优化结果最优组合为: 振动频率为 17.52 Hz、振动方向角为 44.7°、筛面倾角为 1.56°时, 振动清选装置清洁率为 99.62%、透筛概率为 33.42%。通过台架试验和仿真试验对最优参数组合进行验证, 结果表明: 台架试验和仿真试验结果基本一致, 清洁率的相对误差为 1.13%, 颗粒透筛数量的相对误差为 1.68%。该研究可为沙棘冻浆果振动清选装置的优化设计提供理论依据。

关键词: 沙棘; 振动筛; 离散元; 透筛概率; 清洁率

中图分类号: S226.5 **文献标志码:** A

Optimization and analysis of parameters of sea buckthorn frozen fruit vibrating cleaning device based on EDEM

ZHANG Qianglin¹, HU Jingming¹, YANG Mei¹, YANG Jinfa¹,
LI Moruo¹, WANG Qingze¹, ZHANG Wenjie¹, BI Yang²

(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: Aiming at solving problems of low cleanliness rate and easy clogging of screens in the cleaning and processing of sea buckthorn frozen berries, this study used EDEM software to optimize the structural and motion parameters of the vibrating cleaning device. Using frozen berries, branches, and fruit stems from mechanical dehulling of quick-frozen sea buckthorn branches and fruits as experimental materials to measure the size characteristics of the materials and carry out the dynamic analysis of the vibration cleaning device and the force analysis of the particles on the sieve. Based on the analysis of the influence of different shapes and sizes of screen mesh combinations on the cleaning rate and penetration probability of the vibration cleaning device, the design parameters of the screen mesh were determined as follows: the first layer of screen mesh was a circular hole with a diameter of 11 mm, the second layer of screen mesh was a circular hole with a diameter of 9 mm, and the third layer of screen mesh was a long hole with a diameter of 5 mm × 25 mm. The single factor test results showed that the change of amplitude did not significantly affect the cleanliness rate and penetration probability, and the amplitude of the sieve body was selected

as 6 mm to ensure the high cleanliness rate. The vibration frequency, vibration direction angle, and screen surface inclination angle as the test factors, the cleanliness rate and the penetration probability as the test indicators were selected to design the quadratic orthogonal rotation combination test and establish the mathematical model between each factor and the index. The optimal combination of the optimization results was as follows: when the vibration frequency was 17.52 Hz, the vibration direction angle was 44.7° , and the screen surface inclination angle was 1.56° , the cleanliness rate of the vibrating cleaning device was 99.62%, and the screening probability was 33.42%. The optimal parameter combination was verified by bench test and simulation test, and the results showed that the results of bench test and simulation test were basically consistent with a relative error of 1.13% for cleaning and 1.68% for particle screening quantity. This study can provide a theoretical basis for the optimization design of the vibration cleaning device for sea buckthorn frozen berries.

Keywords: sea buckthorn; vibrating screen; discrete element; penetration probability, cleanliness rate

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L)是胡颓子科的灌木,具有极高的营养和药用价值,主要分布在中国、蒙古和俄罗斯等国^[1]。我国沙棘资源丰富,约占世界沙棘总面积的 90%,其中中国沙棘(亚种)在全国分布最广,是我国特有沙棘种类,年加工利用沙棘果实 8~10 万 t^[2]。生产中通过人工剪枝采收成熟期沙棘枝条果,枝条果在速冻库经 -30°C 、40 min 的速冻后机械脱果,脱果加工得到的沙棘冻浆果、细小枝条和果梗等混和物料,经振动筛清选后获得沙棘纯冻果。振动清选作为获取沙棘纯冻果的关键工序,需要将冻浆果从枝条、果梗等杂质中分离出来,研究沙棘脱果后冻浆果、果梗等颗粒的分层和透筛对冻浆果的清选具有重要意义。

清选是物料分级的重要组成部分,王立军等^[3-5]研究振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响,证明颗粒非线性理论的正确性,通过 EDEM 数值模拟软件研究物料在筛面的运动,分析玉米收获机不同筛体组合对筛分效率的影响。Ning 等^[6]采用 EDEM 研究了摆动筛筛分过程颗粒运动的基本规律,分析不同振动参数对颗粒分层和透筛的影响。李洪昌等^[7-8]利用 EDEM 软件对振动筛上的颗粒分离过程进行数值模拟,研究振幅和频率对透筛效率和筛面处理量的影响。杨金发等^[9]对沙棘冻浆果筛分装置进行数值模拟,采用综合评分法对振动筛参数进行优化,发现振动方向角对筛分效率影响较大。焦红光等^[10]基于粒群透筛概率模型对概率筛面的参数进行优化,分析筛面长度、筛面倾角、筛孔大小对颗粒筛分效率的影响。Cleary 等^[11]研究发现颗粒的形状在仿真过程中起重要影响,建立准确的模型形状是仿真准确的关键。姜海深等^[12]研究了三种形状的颗粒在圆孔筛和方孔筛上的筛分效率,发现球形颗粒筛分效果最佳。王成军等^[13-14]研究颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律,

揭示多维振动筛筛面物料运动规律和透筛机理,得到振动频率和振幅的提高有利于提高筛分机的筛分效率。Zhao 等^[15]基于田口正交试验,对球形颗粒和非球形颗粒进行数值模拟,分析振动筛振幅、频率和倾角对颗粒平均速度和筛分效率的影响。王晓月^[16]对建立的球形及形状逐渐变化的非球形颗粒进行数值模拟,揭示了颗粒形状对筛分效率的影响。

目前沙棘冻浆果清选过程中存在清洁率和透筛率低的问题,本研究通过理论分析,研究筛面颗粒受振动清选装置运动参数的影响,通过离散元法对振动清选装置筛网的不同形状、尺寸的筛孔组合进行优化,利用单因素法获得各参数对振动清选装置清洁率和透筛概率影响的最优区间范围。采用二次正交旋转组合试验,对清选装置进行参数优化,以期提高沙棘冻浆果振动清选装置清洁率和筛网透筛概率。

1 振动清选装置组成与工作原理

振动清选装置主要由机架、振动电机、筛箱、隔振弹簧、筛网等组成,如图 1 所示。偏心距相等的两组偏心块由两台同步电机驱动。当振动电机内部偏心块高速旋转时,产生的激振力通过振动筛质心,使振动清选装置在振动方向作近似往复近直线运动。颗粒与筛面接触时,在激振力的作用下使颗粒在筛面做抛掷运动、滑行运动、筛面保持相对静止,实现筛上颗粒的分层、透筛和运输。

1.1 振动清选装置动力学分析

振动清选装置是连续弹性体系统,为方便计算,在建立动力学模型时需要简化振动筛结构。将激振器作为刚体,通过结合系数将筛上物料简化为结合质量,隔振弹簧是振动筛的主要阻尼,对筛箱受到摩擦力各个构件连接处受到的碰撞冲击力全

部简化为等效线性阻尼^[17]。当振动电机高速旋转时,由于偏心块初始相位和旋转方向相反,因此振动电机的偏心块所产生的激振力在旋转平面内相互叠加。

如图 2 所示,在任意时刻,作用在振动筛质心上的力包括机体惯性力、阻尼力、弹性力和激振力。两振动电机偏心块产生的合成相对惯性力(绕其轴回转运动的惯性力):

$$F(t_r) = 2m_0\omega^2 r \sin\omega t \quad (1)$$

偏心块绝对运动的惯性力是相对运动惯性力和牵连运动惯性力(轴线随机体一起振动的惯性力)的和,偏心块绝对惯性力为:

$$F(t_a) = -2m_0(\ddot{s} - \omega^2 r \sin\omega t) \quad (2)$$

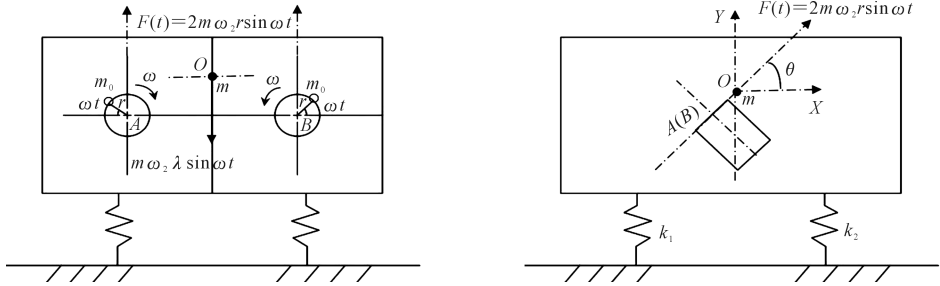


图 2 振动清选装置动力学模型

Fig.2 Dynamic model of the vibrating cleaning device

将(2)式分解得到 X 方向和 Y 方向的偏心块绝对惯性力:

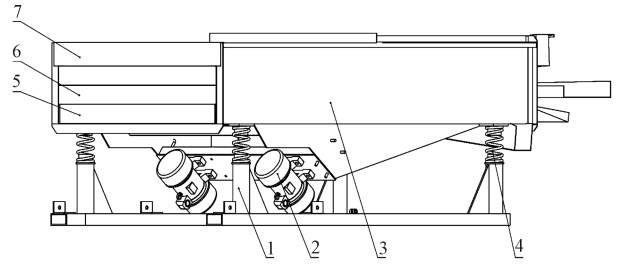
$$\begin{cases} F_y(t_a) = -2m_0(\ddot{y} - \omega^2 r \sin\theta \sin\omega t) \\ F_x(t_a) = -2m_0(\ddot{x} - \omega^2 r \cos\theta \sin\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

由达朗贝尔原理,作用在振动质体上的合力为零,振动方程为:

$$\begin{cases} (m + 2m_0)\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 2m_0\omega^2 r \sin\theta \sin\omega t \\ (m + 2m_0)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 2m_0\omega^2 r \cos\theta \sin\omega t \end{cases} \quad (4)$$

$$m = m_p + k_m m_m \quad (5)$$

式中, m_0 为激振器偏心块质量总和 (kg); m 为振动筛机体的计算质量 (kg); r 为偏心块的质心至回转轴线的距离 (m); m_p 为振动筛机体的实际质量 (kg); m_m 为物料的质量 (kg); k_m 为物料结合系数 (一般取 0.2); c 为等效阻尼系数; k 为隔振弹簧中心方向上的刚度总和 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); ω 为激振器回转角速度 ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$); θ 为合成惯性力作用线与水平的夹角 ($^\circ$); y 、 \dot{y} 和 \ddot{y} 分别为振动机体在 Y 方向上的位移 (m)、速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为振动机体在 X 方向上的位移 (m)、速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).



1. 机架; 2. 振动电机; 3. 筛箱; 4. 隔振弹簧;
5. 第三层筛网; 6. 第二层筛网; 7. 第一层筛网
1. Frame; 2. Vibration motor; 3. Screen box;
4. Vibration isolation spring; 5. Third layer screen;
6. Second layer of screen; 7. First layer on the screen

图 1 振动清选装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the vibrating cleaning device structure

1.2 筛面颗粒物料分析

筛面颗粒运动轨迹与筛面的运动形式联系密切,直线振动筛偏心块高速旋转过程中,产生的激振力通过振动筛质心,使振动筛做近似直线运动。物料在筛面的运动状态受振动频率、振动方向角、振幅和筛面倾角的影响,在不同的运动参数下,振动筛可使物料在筛面上呈现滑行运动和抛掷运动形式^[18]。为保证振动筛具有较高的产量和工作质量,大多数振动筛采用中速抛掷运动形式。

对单个颗粒在振动筛面上进行受力分析(图 3, 见 280 页),要使颗粒在筛面上抛起必须满足^[19]:

$$m_k \omega^2 A \sin\theta \sin\omega t > g m_k \cos\alpha \quad (6)$$

式中, m_k 为物料颗粒质量 (kg); A 为筛面振幅 (m); α 为筛面倾角 ($^\circ$); g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

取 $\sin\omega t$ 最大值为 1, 满足:

$$K_v = \frac{(2f\pi)^2 A \sin\theta}{g \cos\alpha} > 1 \quad (7)$$

式中, f 为振动筛振动频率 (Hz); K_v 为振动筛的抛射强度。

抛掷强度表示振动筛加速度的幅值与重力加速度在法向(垂直筛面方向)分量的比值。当 $K_v > 1$

时,筛面物料被抛起,抛射强度大小决定筛面物料做滑行运动和抛掷运动^[20]。筛面上颗粒不断被抛起,使得物料变;得松散和分层,获得更多机会透过筛孔^[21]。

2 振动筛网参数仿真优化

在沙棘清选过程中常用的筛体为圆孔筛和长孔筛搭配使用,一般采用三层筛网清选冻浆果,筛网第一层为圆孔筛主要用来分离脱果机滚筒筛网未分离的柱状沙棘枝条,第二层振动筛网用来减缓第三层沙棘浆果的筛分压力,将部分大颗粒沙棘颗粒分离,第三层振动筛网主要用来分离沙棘果梗。第二层筛网和第三层筛网采用圆孔筛或者长孔筛,为使沙棘振动筛达到理想的筛分效果,通过 EDEM 软件对其不同大小孔径,筛网形状组合和振动参数(筛面倾角,振幅,频率,振动方向角)对振动筛清选过程模拟仿真,对其结果和工作参数进行优化。

2.1 振动筛网模型

根据国家标准,建立圆孔筛和长孔筛模型,如图 4 所示,圆孔筛和长孔筛属于冲孔筛,其分选能力好,长孔筛比圆孔筛开孔率高^[22]。现有沙棘加工企业为获得更高清洁率冻浆果,经常将圆孔筛和长孔筛组合使用,由文献[9]可知,在对冻浆果和杂质统计分析的基础上选用多层筛网进行清选。

2.2 清选效果评价指标

清洁率是评价清选效果的重要参数,沙棘清选

装置保持较高清洁率对于沙棘浆果后续加工具有重要作用,沙棘清洁率由式(8)计算:

$$\phi = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中, ϕ 为清洁率(%); m_1 为出料口混合物质量(kg); m_2 为出料口处沙棘冻浆果质量(kg)。

透筛概率是评价振动筛筛分效果的重要指标。在模拟筛分过程中,颗粒需要 5.5 s 的时间才移动到筛面末端,在本研究中透筛概率定义在 5.5 s 到 8 s 的时间内穿透筛板颗粒的质量与所有碰撞颗粒总质量之比,如图 3 所示,两虚线之间的颗粒为各颗粒与筛面的有效碰撞颗粒,筛面与各虚线之间的距离为不同颗粒的最大直径^[23-24]。颗粒的透筛概率由公式(9)计算:

$$\rho_F = \frac{N_s}{N_T} \times 100\% \quad (9)$$

式中, ρ_F 为颗粒的透筛概率(%); N_s 为透过筛网的颗粒数(颗); N_T 为有效碰撞粒子的数量(颗)。

2.3 物料模型

随机取脱果机滚筒筛下沙棘物料 1 000 g,将杂质和浆果分类。利用电子天平称其质量,统计分析得筛下物料主要有沙棘浆果、沙棘枝条、果梗,其质量比例分别为 50.11%、14.22%、35.67%,重复 5 次试验。其中沙棘枝条主要包括柱状枝条和锥状枝条,占总物料的比例分别为 7.51%和 6.71%。测得结果如表 1 所示。

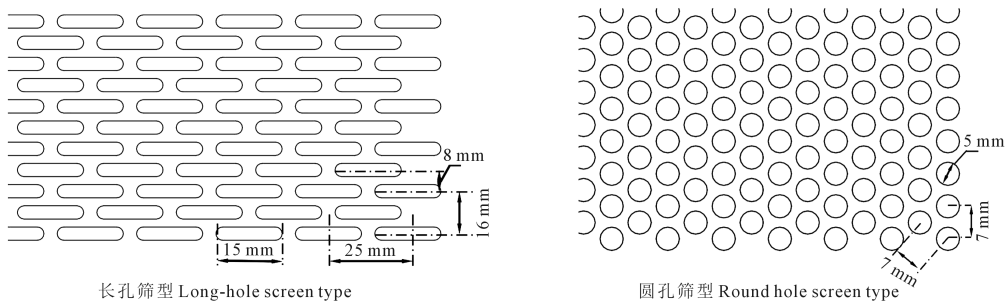


图 4 振动清选装置筛体形状

Fig.4 Shape of the screen body of the vibrating cleaning device

表 1 物料质量比例
Table 1 Material mass ratio

组号 Number	物料 Material/g			
	浆果 Berry	果梗 Fruit stem	柱状枝条 Cylindrical branches	锥状枝条 Conical branch
1	499.82	349.73	70.33	80.10
2	504.71	353.46	82.23	59.58
3	490.49	364.34	75.34	69.84
4	500.38	358.33	73.12	68.17
5	510.22	357.66	74.47	57.67
平均值 Average	501.13	357.70	75.10	67.07

随机取 4 种物料各 50 个,采用数显式游标卡尺(精度 0.02 mm)进行三轴尺寸测定,物料的三轴尺寸 L (长) $\times W$ (宽) $\times T$ (厚)如图 5 所示,统计测量结果,冻浆果 L 、 W 、 T 均值分别为 6.5、6.7、6.6 mm,柱状枝条 L 、 W 、 T 均值分别为 35、2、2 mm,针状枝条 L 、 W 、 T 均值分别为 34、2、2 mm,果梗颗粒 L 、 W 、 T 均值分别为 5、3、2 mm。为了使仿真试验与台架试验更接近,通过所测三轴尺寸,得到沙棘浆果为近似椭圆,枝条近似呈现圆柱或圆锥,果梗等杂质近似呈

现圆锥状。沙棘脱果后筛下物料模型如图 5 所示。通过积分方式计算出所测物料的体积并统计,如图 6 所示,发现物料整体呈现正态分布,沙棘冻浆果体积分布值为 $106.90 \pm 4.77 \text{ mm}^3$,沙棘柱状枝条体积分布值为 $139.69 \pm 7.96 \text{ mm}^3$,沙棘锥状枝条体积分布值为 $40.29 \pm 4.31 \text{ mm}^3$,杂质颗粒的体积分布值为 $13.25 \pm 0.40 \text{ mm}^3$ 。通过所测数据,利用 Solidworks 软件对沙棘冻浆果、果梗和枝条进行实体建模,将三维模型导入 EDEM 软件,用多球体重叠方法建立沙棘枝条和杂质模型^[25-26]。

2.4 颗粒接触模型

本研究选取 Hertz - Mindlin (no-slip) 接触模型^[27],模型中法向力和切向力存在阻尼力,其中阻尼系数与恢复系数有关^[28],切向力满足库伦定理^[29]。

Hertz-Mindlin (no-slip) 接触模型中法向力 F_n ,切向力 F_t ,法向阻尼力 F_n^d ,切向阻尼力 F_t^d ,由以下公式计算:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{(3/2)} \quad (10)$$

$$F_n^d = - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n M^*} V_n^{rel} \quad (11)$$

$$F_t = - S_t \delta_t \quad (12)$$

$$F_t^d = - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t M^*} V_t^{rel} \quad (13)$$

式中, E^* 为等效杨氏模量 (Pa); R^* 为等效半径 (m); δ_n 为法向重叠量 (m); β 、 S_n 为法向刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); M^* 为等效质量 (Kg); V_t^{rel} 为相对切向速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

2.5 仿真参数设定

采用离散元法,研究脱果滚筒筛下物料在清选装置采用不同筛体结构和运动参数下颗粒的运动状态对物料透筛概率和清洁率的影响^[30-31]。设置物料力学特性和各材料接触属性如表 2、3 所示^[9],采用 Hertz-Mindlin (no-slip) 模型,将振动筛模型在三维软件中进行简化,将模型设置为 step 文件格式导入到 EDEM 中进行仿真,根据课题组前期试验研究和生产中经验数据,设定振动筛的振动方向角为 45° ,振幅为 5 mm,振动频率为 18 Hz,筛面倾角为 0° ,仿真时间设定为 8 s,颗粒的掉落量为 $0.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

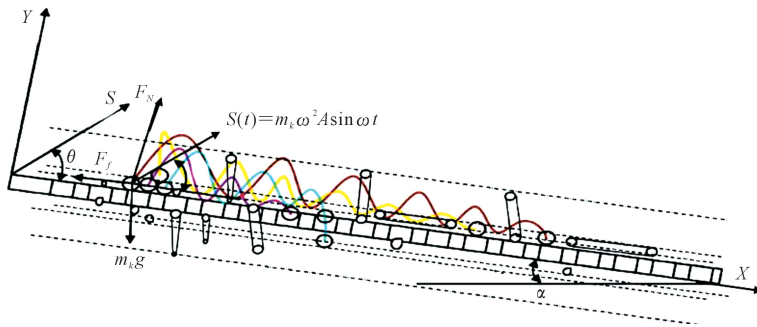


图 3 筛分过程运动学模型

Fig.3 Kinematic modelling of the screening process

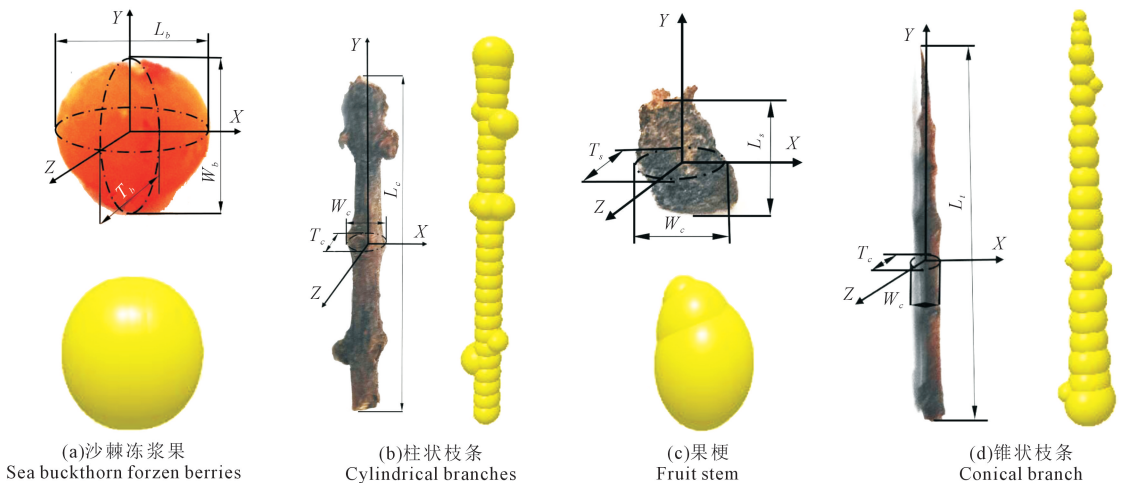


图 5 物料的三轴方向和模型

Fig.5 Three-axis direction and model of material

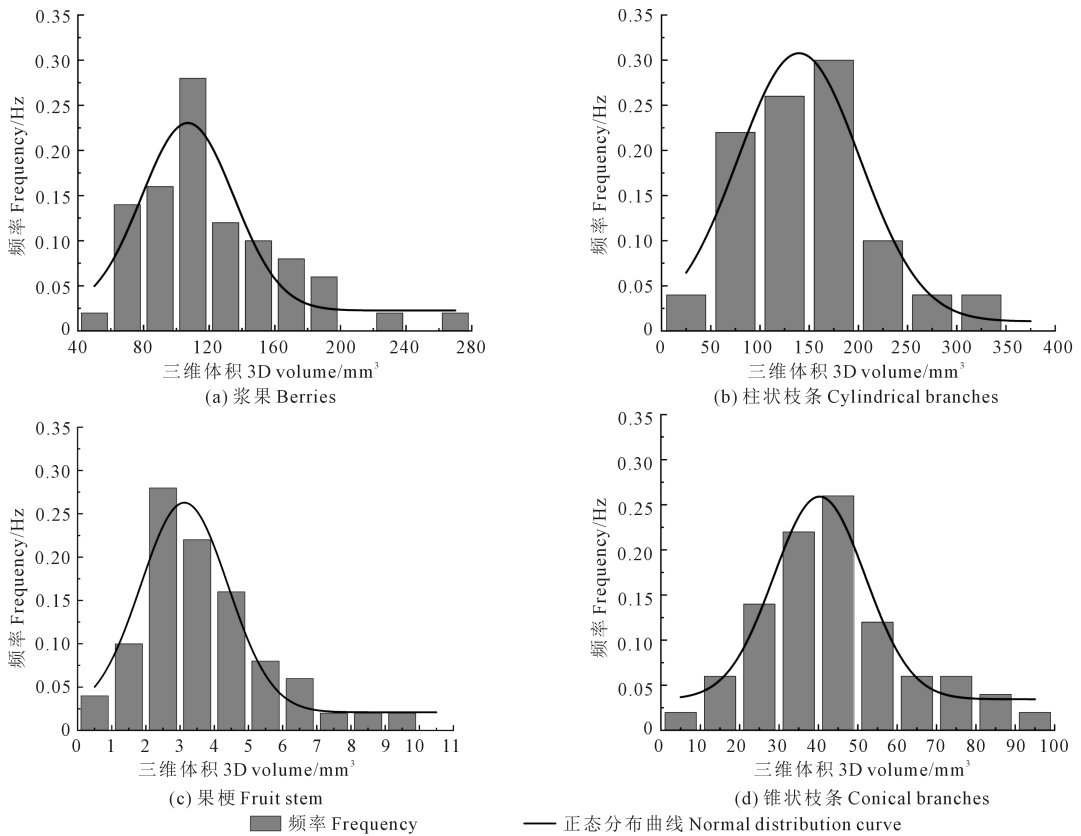


图 6 脱果后沙棘物料体积分布图

Fig.6 Volume distribution diagram of sea buckthorn material after fruit removal

表 2 材料力学特性参数

Table 2 Mechanical properties of materials

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量/MPa Shear modulus	密度 Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
浆果 Berries	0.41	2.79	1.07×10^3
枝条 Ranches	0.50	3.43	0.93×10^3
果梗 Fruit stem	0.43	7.22	0.22×10^3
筛面 Screen surface	0.29	2.05×10^5	7.93×10^3

表 3 物料间接触属性参数

Table 3 Interaction properties of different materials

接触参数 Material of contact	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
枝条与果梗 Between branches and fruit stem	0.543	0.316	0.031
枝条与筛面 Between branches and screen surface	0.268	0.373	0.065
浆果与浆果 Between the berries	0.584	0.316	0.076
浆果与果梗 Between berries and fruit stem	0.483	0.266	0.031
浆果与筛面 Between berries and screen surface	0.242	0.212	0.023
果梗与果梗 Between fruit stem and fruit stem	0.440	0.322	0.075
果梗与筛面 Between fruit stem and screen surface	0.259	0.436	0.075

2.6 仿真结果分析

2.6.1 不同大小筛孔时物料透筛效果影响 沙棘冻浆果的清选是沙棘加工中重要工序,为获得更高清洁率的沙棘冻浆果,生产中常用多层筛网的振动式清选装置获得较高清洁率的沙棘冻浆果。在筛分过程中需将沙棘冻浆果与枝条,果梗等杂质颗粒进行分离,在分离过程中发现多数柱状枝条经振动筛上层筛网分离到达出料口,少数柱状枝条透过筛网。多数锥状枝条,果梗等杂质与浆果混合在一起掉入下层筛网。依照现行沙棘国家标准和振动筛设计标准^[32-33]。如图 7 所示,研究上层筛网孔径分别为 12、11、10、9 mm,孔间距 16 mm 时,沙棘物料在筛分 8 s 内不同大小孔径对各物料透筛效果影响。通

过对比不同大小筛网孔径下沙棘物料的透筛情况可知,随着筛网孔径的增大,物料的透筛概率逐渐增加,颗粒越小获得透筛的机会越多,枝条的透筛概率随着孔径的增大而增大。

2.6.2 不同筛体组合对筛分效果的影响 为获得清洁率高的冻浆果,振动筛第二层和第三层筛网的结构参数选择至关重要。第二层筛网主要用来减缓第三层筛网的筛分压力,分离第一层筛网上掉落的柱状枝条和部分锥状枝条,第三层筛网主要作用是获得洁净冻浆果。通过研究第二层和第三层筛网在不同筛体组合下,得到高清洁率的沙棘冻浆果。第二层筛网参数分别为:圆孔筛筛孔直径 \times 孔间距为 $9\text{ mm} \times 14\text{ mm}$,方孔筛筛孔宽度 \times 筛孔长度 \times 横向孔距 \times 纵向孔距为 $9\text{ mm} \times 32\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 38\text{ mm}$,第三层筛网参数圆孔筛筛孔直径 \times 孔间距为 $5\text{ mm} \times 7\text{ mm}$,长孔筛筛孔宽度 \times 筛孔长度 \times 横向孔距 \times 纵向孔距为 $5\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。在不同筛网形状组合下清选装置第三层筛上浆果的清洁率和杂质的透筛概率如表 4 所示。仿真结果表明,第二层筛网为圆孔,第三层筛网为长孔时振动筛的透筛概率和清洁率分别达到 32.4% 和 99.37%。

2.6.3 筛分过程分析 图 8(见 285 页)为振动筛振幅 5 mm、振动频率 18 Hz、筛面倾角 0° 、振动方向角 45° 条件下 3.5 s、5.5 s 和 7.5 s 时沙棘混合物从喂入口到出料口的筛分仿真过程。筛上物料颗粒在振动筛的作用下颗粒发生分层、透筛,向出料口方向移动。果梗杂质尺寸远远小于筛网孔径,在进料端果梗等杂质大部分落下,柱状枝条在筛面上做斜抛运动,锥状颗粒做平抛,翻转,部分锥状颗粒掉落到筛下,浆果在筛面上做斜抛,旋转运动。颗粒物料发生透筛主要发生在颗粒群下层和筛面接触部分,5.5 s 时沙棘浆果到达出料端,筛面达到稳定筛分状态。

2.6.4 不同运动参数对筛分效果的影响 研究发现,振动筛的振动频率、振动方向角、振幅和筛面倾角等影响筛面物料筛分性能^[34],选取表 4 中最佳筛网孔组合,通过研究清选装置在不同运动参数条件下对沙棘物料的透筛概率和清洁率的影响。表 5 为振动筛分过程数值试验设计表。

振幅决定物料被抛起的高度,振幅越大,物料被抛起的越高,筛网堵塞的概率减小,当振幅增加时,清选装置连接处断裂破坏增加,图 9 为振幅对振动清选装置透筛概率和清洁率影响,其他参数固定时,随着振幅的增加,透筛概率和清洁率呈现先增大后减小的运动趋势,最优振幅区间为 5~6 mm 时获得最大清洁率和透筛概率。图 10 为振动频率对振动清选装置透筛概率和清洁率的影响,随着振动频率的增加清洁率呈现先增大后减小再增加的趋势,随着振动频率的增加透筛概率先增后减小,适当增加清选装置的振动频率,可以使颗粒与筛面的接触机会增加,有利于增加颗粒的透筛。图 11 为振动方向角对清选装置透筛概率和清洁率的影响,随着振动方向角的增加清洁率持续降低,透筛概率先增大后减小。振动方向角影响颗粒被抛起时运动的距离,振动方向角越大,颗粒在筛面停留的时间越长,导致上层枝条不能及时去除,枝条掉落至下层筛面,从而导致清洁率降低。图 12 为筛面倾角对清选装置透筛概率和清洁率的影响,随着筛面倾角的增大颗粒清洁率降低,随着筛面倾角的增大透筛概率先缓慢增加再下降。

表 4 不同筛体组合第三层筛分效果

Table 4 Screening effect of the third deck with different combinations of sieve bodies

指标 Index	圆孔-方孔 Round hole- square hole	圆孔-圆孔 Round hole- round hole	方孔-圆孔 Square hole- round hole	方孔-方孔 Square hole- square hole
透筛概率/% Penetration probability	32.4	20.8	22	30.5
清洁率/% Cleanliness rate	99.37	99.24	97	97.5

表 5 振动参数数值试验设计表

Table 5 Numerical test design table for vibration parameters

序号 Number	因素 Factor	水平 Level	条件 Conditions
1-4	A, 振幅/mm Amplitude	4 5 6 7	$\theta = 45^\circ$, $\alpha = 0, F = 18$
5-8	θ , 振动方向角/ $^\circ$ Vibration direction angle	40 45 50 55	$\alpha = 0, A = 5,$ $F = 18$
9-12	F, 振动频率/Hz Vibration frequency	14 16 18 20	$\theta = 45, A = 5,$ $\alpha = 0$
13-16	α , 筛面倾角/ $^\circ$ Screen inclination angle	0 2 4 6	$\theta = 45, A = 5,$ $F = 18$

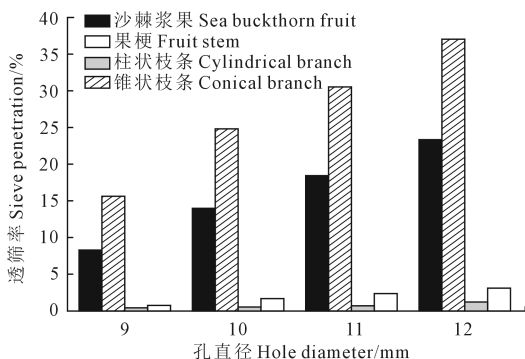


图 7 第一层筛面颗粒透筛概率

Fig.7 Transmission rate of particles on the first sieve surface

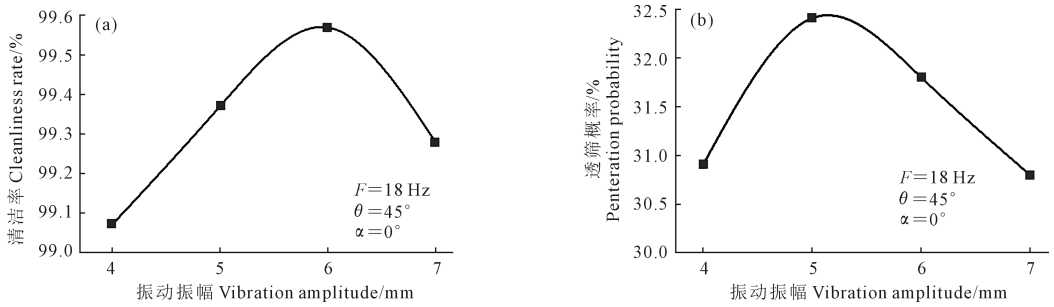


图 9 振幅对清选装置清洁率和透筛概率的影响

Fig.9 Effect of amplitude on cleanliness rate and penetration probability of cleaning device

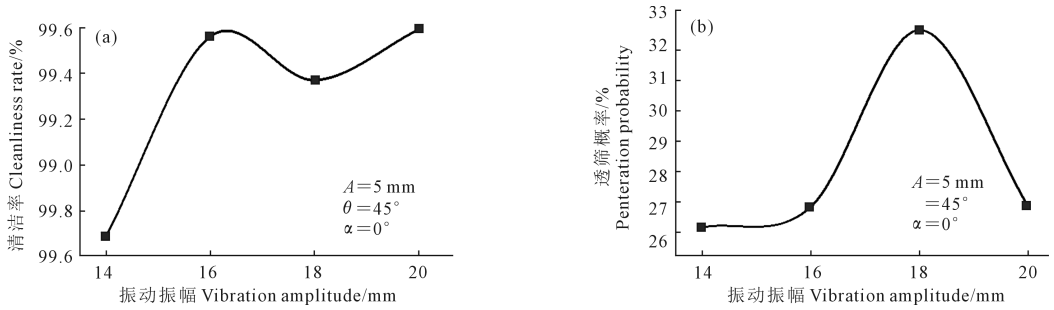


图 10 振动频率对清选装置清洁率和透筛概率的影响

Fig.10 Effect of vibration frequency on cleanliness rate and penetration probability of cleaning device

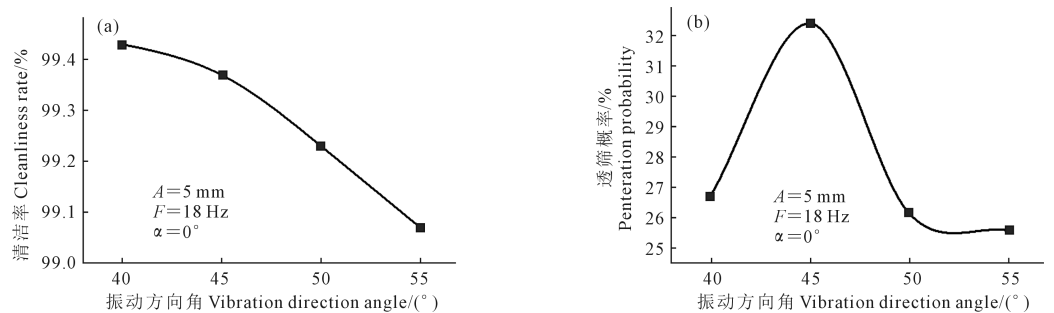


图 11 振动方向角对清选装置清洁率和透筛概率的影响

Fig.11 Effect of vibration direction angle on cleanliness rate and penetration probability of cleaning device

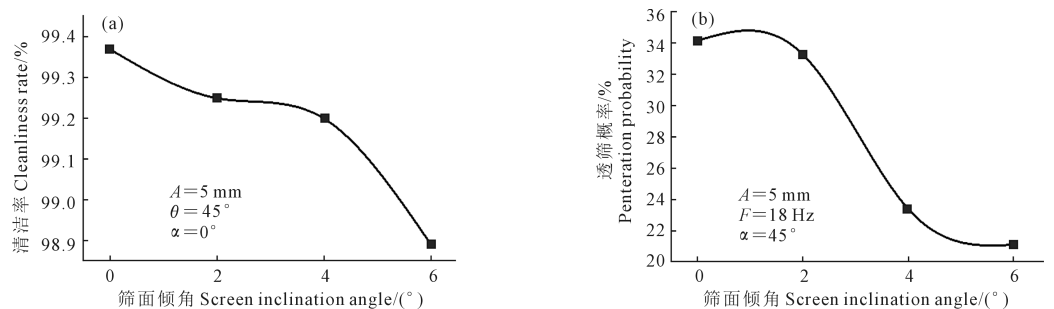


图 12 筛面倾角对清选装置清洁率和透筛概率的影响

Fig.12 Effect of screen inclination on cleanliness rate and penetration probability of cleaning device

3 清选过程参数仿真试验优化

3.1 三因素三水平试验

为确定清选装置的工作参数,通过前文对清选装置振幅、振动频率、振动方向角和筛面倾角进行

单因素试验分析,得出影响清选装置清洁率和透筛概率的主要因素为振动频率、振动方向角和筛面倾角。将清选装置的振动频率、振动方向角和筛面倾角为试验指标,清洁率和透筛概率作为评价指标,设计三因素三水平试验,试验因素编码表如表 6 所示。

3.2 试验结果与方差分析

振动清选装置仿真结果如表 7 所示,运用 Design-Expert 软件处理试验数据,获得清选装置清洁率 Y_1 和透筛概率 Y_2 的回归方程,进行显著性检验。

(1)清选装置清洁率。通过分析和拟合数据可知:模型显著性检验 $F=20.55, P<0.5$, 该模型显著;失拟项 $p=0.5747>0.05$, 残差项不显著,说明该回归数学模型与实际结果拟合良好。对清选装置清洁率影响的主次顺序为:振动频率、筛面倾角、振动方向角。各因素对清选装置清洁率的回归数学模型为:

$$Y_1 = 99.57 - 0.1625F - 0.0213\theta - 0.0787\alpha + 0.115F\theta - 0.1508F^2 - 0.2882\theta^2 - 0.0482\alpha^2 \quad (R^2 = 0.9488)$$

表 6 试验因素编码

Table 6 Experimental factors and levels

水平 Level	因素 Factor		
	F , 振动频率 Vibration frequency/Hz	θ , 振动方向角 Vibration direction angle/(°)	A , 筛面倾角 Screen inclination angle/(°)
-1	16	40	0
0	18	45	2
1	20	50	4

表 7 试验设计结果

Table 7 Results of experimental design

试验序号 Test number	F /Hz	θ /(°)	α /(°)	Y_1 /%	Y_2 /%
1	16	40	2	99.40	27.05
2	20	40	2	98.83	27.42
3	16	50	2	99.21	26.86
4	20	50	2	99.10	26.54
5	16	45	0	99.56	28.50
6	20	45	0	99.32	26.64
7	16	45	4	99.50	24.78
8	20	45	4	99.12	26.08
9	18	40	0	99.43	26.70
10	18	50	0	99.23	26.13
11	18	40	4	99.17	25.37
12	18	50	4	99.12	25.18
13	18	45	2	99.63	32.33
14	18	45	2	99.67	32.38
15	18	45	2	99.47	33.22
16	18	45	2	99.55	32.07
17	18	45	2	99.55	32.44

交互因素对清选装置清洁率影响的响应曲面如图 13 所示。当清选装置振动方向角不变时,沙棘冻浆果清洁率随着振动频率的增加而增大。当清选装置振动频率不变时,沙棘冻浆果清洁率随着振动方向角的增大而增大。

(2)清选装置透筛概率。同理分析可知:模型显著性检验 $F=123.09, P<0.5$, 该模型显著;失拟项 $p=0.6311>0.05$, 残差项不显著,说明该回归数学模型与实际结果拟合良好,对清选装置透筛概率影响的主次顺序为:筛面倾角、振动方向角、振动频率。各因素对清选装置透筛概率的回归数学模型为:

$$Y_2 = 32.49 - 0.0637F - 0.2287\theta - 0.82\alpha + 0.79F\alpha - 2.43F^2 - 3.09\theta^2 - 3.56\alpha^2 \quad (R^2 = 0.9897)$$

交互因素对清选装置透筛概率影响的响应曲面如图 14 所示,清选装置透筛概率随着筛面倾角的增加呈现先缓慢增加再迅速下降。当清选装置筛面倾角不变时,清选装置透筛概率随着振动频率的增加呈现先增大后减小趋势。

3.3 参数优化

为寻求约束条件范围内清选装置各因素的最优参数组合,利用 Design-Expert 软件对试验参数进行优化,以振动频率,振动方向角,筛面倾角为优化变量,分别以最大清洁率和最大透筛率为目标进行参数优化,据此选取目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(F, \theta, \alpha) \\ \max Y_2(F, \theta, \alpha) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 16 \leq F \leq 20 \\ 40 \leq \theta \leq 50 \\ 0 \leq \alpha \leq 4 \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

优化结果为:当清选装置振动频率为 17.52 Hz, 振动方向角为 44.7°, 筛面倾角为 1.56° 时,清选装置清洁率为 99.62%, 透筛概率为 33.42%。

4 台架验证试验

为验证沙棘振动清选装置离散元仿真试验对振动筛运动参数和筛面形状的优化结果,根据优化结果试制振动清选装置,在甘肃山丹县某沙棘加工企业进行试验,试验物料喂入量为 $0.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。采用优化所得最佳参数组合:振动频率为 17.52 Hz, 振动方向角为 44.7°, 筛面倾角为 1.56° 进行仿真试验和台架试验,试验重复 5 次取其平均值。因碰撞颗粒无法统计,在验证试验时待振动筛筛面稳定时统计第三层筛网下透筛颗粒数与仿真试验透筛颗粒数进行比较,振动清选装置台架试验如图 15 所示。

如表 8 所示,沙棘振动清选机仿真结果平均透

筛颗粒数为 1 526 粒,清洁率为 99.63%,台架试验平均透筛颗粒数为 1 552 粒,清洁率为 98.49%。对比仿真试验和台架试验结果,两者第三层筛网颗粒透筛数量的相对误差为 1.68%,清洁率的相对误差为 1.13%。仿真结果与台架试验结果基本一致,筛分后清洁率均符合 GB/T 23234-2009《中国沙棘果实质量等级》中“一等果”条件。

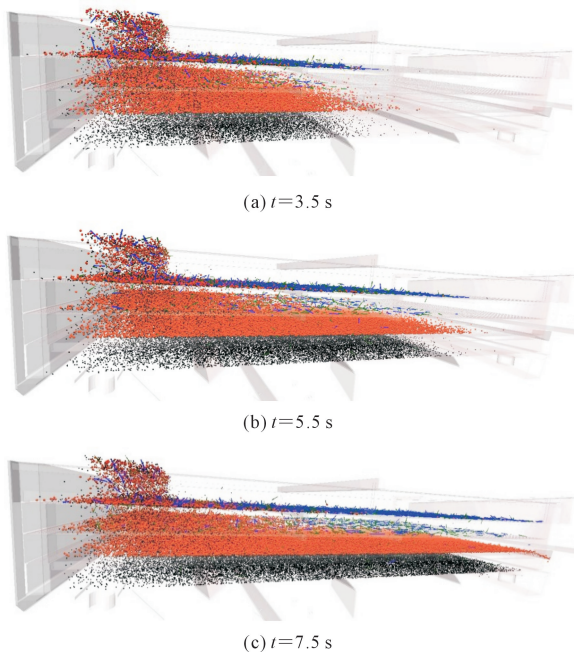


图 8 沙棘物料筛分过程仿真结果

Fig.8 Simulation results of sieving process of sea buckthorn material

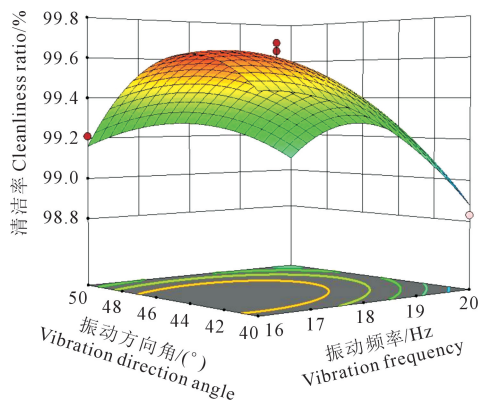


图 13 F 和 θ 对清洁率影响的响应曲面

Fig.13 Response surfaces of F and θ to the effect of cleanliness rate

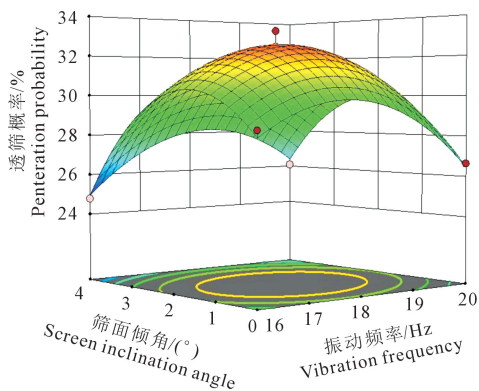


图 14 F 和 α 对透筛概率影响的响应曲面

Fig.14 Response surface of the influence of F and α on the penetration probability



图 15 清选装置台架试验

Fig.15 Bench test of the cleaning device

5 结 论

1)通过筛面运动方程和筛上颗粒受力分析,得出颗粒运动状态与抛掷强度之间的关系。分析了脱果后物料的组成成分及物料特性,得到各物料的体积分布规律,并构建了四种脱果后物料模型。

2)通过 EDEM 仿真试验优化冻结沙棘浆果振动清选装置关键参数,通过单因素试验分析了筛网孔径大小,筛网形状,不同运动参数条件对颗粒的筛分效果的影响,得到筛网孔径越大,颗粒透筛概率越大,第二层筛网和第三层筛网为圆孔筛和长孔筛组合时颗粒透筛概率和清洁率达到最大值,分别为 32.4%和 99.37%。

表 8 台架试验结果

Table 8 Results of bench test

序号 Number	透筛颗粒数/粒 Number of particles through sieve		清洁率/% Missed seeding rate	
	仿真试验 Simulation test	台架试验 Bench test	仿真试验 Simulation test	台架试验 Bench test
	1	1497	1567	99.65
2	1413	1493	99.59	97.71
3	1622	1688	99.46	98.47
4	1411	1454	99.67	99.19
5	1592	1558	99.76	98.29
平均值 Average value	1526	1552	99.626	98.49

3)建立了振动清选装置主要参数与透筛概率和清洁率的回归模型,获得振动清选装置最优参数组合为:振动频率为 17.52 Hz,振动方向角为 44.7°,筛面倾角为 1.56°,此时振动清选装置的清洁率为 99.62%,透筛概率为 33.42%。清洁率的相对误差为 0.95%,颗粒透筛数量的相对误差为 1.68%,台架试验验证了仿真试验结果的可靠性。

参考文献:

- [1] LI T S C, SCHROEDER W R. Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): a multipurpose plant[J]. HortTechnology, 1996, 6(4): 370-380.
- [2] 明悦.《全国沙棘资源本底调查报告》发布[J]. 绿色中国, 2022, (13): 58-59.
MING Y. "National seabuckthorn resources background investigation report" released[J]. Green China, 2022, (13): 58-59.
- [3] 王立军, 崔友强, 郑招辉, 等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 119-129.
WANG L J, CUI Y Q, ZHENG Z H, et al. Effects of different motion forms of vibrating screen on particle cluster screening[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 119-129.
- [4] 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 108-114.
WANG L J, ZHANG C G, DING Z J. Optimisation of the structure of corn harvester clearing sieve body [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108-114.
- [5] 王立军, 李义博, 郑招辉, 等. 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 124-136.
WANG L J, LI Y B, ZHENG Z H, et al. Design and test of stray residue thrower in corn harvester clearing device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 124-136.
- [6] NING S G, XIAO J Z, WANG G F, et al. Study on the particle stratification and penetration of a swing vibrating screen by using DEM[J]. Engineering Computations, 2020, 37(3): 881-894.
- [7] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
LI H C, LI Y M, TANG Z, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 117-121.
- [8] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 79-84.
LI H C, LI Y M, TANG Z, et al. Numerical simulation of material

- motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79-84.
- [9] 杨金发, 胡靖明, 杨梅, 等. 沙棘冻果筛分装置设计与仿真分析[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 276-285.
YANG J F, HU J M, YANG M, et al. Design and simulation analysis of frozen sea buckthorn sieving device[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 276-285.
 - [10] 焦红光, 赵跃民, 骆振福, 等. 概率筛面的参数优化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 384-388.
JIAO H G, ZHAO Y M, LUO Z F, et al. Parameters optimization of probability screen plane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 384-388.
 - [11] CLEARY P W. DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills [J]. Powder Technology, 2000, 109(1/3): 83-104.
 - [12] 江海深, 赵跃民, 张博, 等. 基于 DEM 的筛面与物料特性在筛分过程中协同作用的研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(1): 83-87.
JIANG H S, ZHAO Y M, ZHANG B, et al. Research on the synergistic effect of screen surface and material properties in screening process based on DEM[J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(1): 83-87.
 - [13] 王成军, 刘琼, 马履中, 等. 棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 49-56.
WANG C J, LIU Q, MA L Z, et al. Motion law of cottonseed particles on the surface of a three-degree-of-freedom mixed-link vibrating screen [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 49-56.
 - [14] 王成军, 李耀明, 马履中. 基于并联机构的多维振动筛分试验台设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 70-74, 112.
WANG C J, LI Y M, MA L Z. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 70-74, 112.
 - [15] 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.
 - [16] 王晓月. 颗粒形状对振动筛分数值模拟影响规律的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
WANG X Y. Research on the influence law of particle shape on the numerical simulation of vibratory sieving[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
 - [17] 苏荣华, 彭晨宇. 振动筛结构随机动力学分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012: 47-50.
SU R H, PENG C Y. Stochastic dynamic analysis of vibrating screen structure[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2012: 47-50.
 - [18] 闻邦椿, 刘树英. 现代振动筛分技术及设备设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 94-132.
WEN B C, LIU S Y. Modern vibrating screening technology and equipment design[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 94-132.
 - [19] 姚恒申, 杜坚, 张明洪. 固相颗粒在钻井液振动筛筛面上的抛掷运动规律研究[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(6): 583-587.
YAO H S, DU J, ZHANG M H. Research of regularity of throwing movement for solid particle on the shaker's screen[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23(6): 583-587.