

巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化

王学农^{1,2}, 边博¹, 吐鲁洪·吐尔迪², 张丽²

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 为了研究巴旦木壳仁物料的空气动力学特性, 确定较优的壳仁风选参数, 提高清选率, 该研究采用理论计算与试验相结合的方式对巴旦木物料的空气动力学特性进行研究, 根据悬浮速度研究结果设计巴旦木壳仁风选装置并对破壳后的巴旦木壳仁混合物料进行风选试验, 基于响应面法优化求解得出风选装置较优参数组合。巴旦木壳仁混合物料的空气动力学特性试验结果表明, 大壳、中壳、小壳和仁的悬浮速度变化范围分别为: 9.92~11.03、8.86~9.66、8.27~8.85、13.10~13.96 m/s, 控制气流速度在 8.27~11.03 m/s 范围内可较好地分离壳和仁。风选装置流场仿真分析结果表明, 风选装置筛面风速分布呈中心高、四周低的特点。巴旦木壳仁风选试验结果表明, 风选装置工作参数对清选率的影响从大到小排序为: 筛体振动频率、清选风机转速、波纹筛倾角、风选装置喂入量、离心风机转速, 结合壳仁风选试验与软件优化求解得出清选率较高的较优参数组合为: 风选装置喂入量 6 kg/min、清选风机转速 1 160 r/min、筛体振动频率为 47 Hz、波纹筛倾角 3°、离心风机转速 1 275 r/min, 采用优化参数组合进行验证试验, 清选率达 99.144%。研究结果可为巴旦木壳仁风选设备研发与优化提供理论依据。

关键词: 机械化; 优化; 悬浮速度; 壳仁风选; 清选率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.034

中图分类号: S226.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0299-08

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.034 <http://www.tcsae.org>

Wang Xuenong, Bian Bo, TuluHong Turdi, et al. Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 299-306. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

巴旦木一种起源于中亚山区蔷薇科桃属植物, 具有很高的营养价值和药用价值, 是中国新疆喀什地区经济发展的重要支柱产业之一^[1-4]。巴旦木采摘后进行的第一道工序是脱青皮, 然后进行破壳和壳仁分离, 因此在巴旦木的粗加工产业中, 壳仁分离是重要的工序之一。目前市场上农产品物料分离方法有比重法^[5]、风选法^[6]、磁选法^[7]等, 而大多数农产品物料分离设备采用的方法是风选法, 即利用不同物料成分的空气动力学特性不同实现分离效果^[8-9]。

国内外学者对杏核、莲子、大白菜种子、大豆等农产品物料的空气动力学特性及混合物料风选装置做了大量相关研究。国外学者 Shellard 等^[10]通过试验测试了小麦物料成分的悬浮速度, 发现小麦物料的悬浮速度值和物料的长度等物理参数有关。刘鹏等^[11]通过试验优化了大豆清选装置作业参数, 优化工作参数下清选损失率和含杂率分别下降了 0.05%、2.09%。蔺建涛^[5]利用杏核壳仁物料不同成分的空气动力学特性差异, 分析了杏核壳仁在气流与振动作用下的运动规律并设计了杏核壳仁分选机。马秋成等^[12]通过莲子物料空气动力学特性试验, 获

得了适合莲子壳仁物料分离的悬浮速度范围为 7.865~11.230 m/s, 而且设计研发了莲子负压壳仁分离装置。冷峻等^[13]利用有限元软件对谷物联合收获机风选装置的结构进行仿真, 获得筛面风速分布情况并进行结构优化, 清选效果良好。耿令新等^[14]通过大白菜种子脱出物悬浮速度试验, 得到白菜籽粒悬浮速度变化范围为 6.68~7.42 m/s, 发现大白菜种子物料的悬浮速度随着其粒径和含水率的增加而提升, 并通过验证试验得到较优参数组合。高连兴等^[15]通过试验获得了完好豆粒、豆瓣、未脱净豆荚等物料悬浮速度, 并根据此结果设计了气力式清选装置, 提高了大豆脱粒机的性能。Murilo 等^[16]通过破壳后大豆豆荚和豆粒悬浮速度试验, 设计制造了一种大豆风力分离装置并进行性能试验。

为研究巴旦木空气动力学特性, 获得较高清选率, 本文在前人研究的基础上, 针对巴旦木不同物料成分的悬浮速度进行研究, 确定采用风选法对其壳仁物料进行分离, 通过 ANSYS 软件对风选装置核心结构进行流场仿真分析, 结合悬浮速度研究结果设计巴旦木壳仁风选装置, 以清选率为指标, 风选装置喂入量、清选风机转速、筛体振动频率、波纹筛倾角和离心风机转速为因素进行巴旦木壳仁风选试验, 通过计算贡献率以及运用 Design Expert 10.0 软件对试验结果进行响应面分析以得出了 5 个因素对清选指标的影响规律, 根据约束条件求解功能获得巴旦木壳仁风选装置优化工作参数组合, 拟为后续巴旦木壳仁分离设备研发提供理论参考。

收稿日期: 2021-01-20 修订日期: 2021-05-27

基金项目: 自治区自然科学基金(2020D01A66); 国家自然科学基金(5166050285)

作者简介: 王学农, 研究员, 研究方向为农业机械化技术装备。

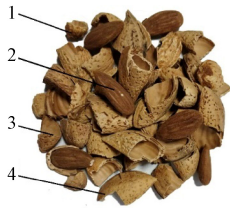
Email: xjwxn2010@sina.com

1 材料与方法

1.1 巴旦木壳仁物料悬浮速度计算

1.1.1 巴旦木物理参数测试

巴旦木品种选择新疆喀什地区广泛种植的莎车 18 号巴旦木, 又名鹰嘴巴旦木, 收获后经脱青皮、晒干、破壳处理产生的混合物料可分为大壳、中壳、小壳和仁 4 部分。如图 1 所示, 其中大壳即尺寸占整壳大小 1/2 以上的壳, 中壳即尺寸占整壳大小大于 1/3~1/2 的壳, 小壳即尺寸占整壳大小大于 1/6~1/3 的壳。



1.小壳 2.仁 3.中壳 4.大壳
1.Small shell 2.Kernel 3.Medium shell 4.Big shell
图 1 巴旦木壳仁混合物料图

Fig.1 Mixed material diagram of almond shell and kernel

农产品物料颗粒的空气动力学特性与其含水率^[17]、密度有关^[18], 进行巴旦木物料密度和含水率的测试试验之前, 从破壳后的物料中随机抽取试验样本, 按不同物料成分分拣分组。

用排水法测试物料密度, 相关测试仪器有电子天平 (HZT-1000A, 精度为 0.01 g, 衡之宝电子秤有限公司), 量筒、滴管以及量杯等。

测定含水率时使用水分测定仪 (PC-16A, 上海浦春计量仪器有限公司), 为保证所得试验结果准确, 试验之前需要用小刀片将仁切成薄片, 将大壳、中壳砸碎, 并检查物料中是否含有杂质颗粒, 试验结果用干基含水率表示。密度与含水率测试结果如表 1 所示。

表 1 巴旦木物料密度与含水率

Table 1 Material density and moisture content of almond

样本 Sample	密度 Density/(kg·m ⁻³)	含水率 Moisture content/%
大壳 Big shell	449	10.22±0.05
中壳 Medium shell	450	10.27±0.05
小壳 Small shell	451	10.18±0.05
仁 Kernel	778	12.45±0.05

1.1.2 阻力系数分区判别

在流体力学中阻力系数分为: Stokes 区、Allen 区、Newton 区, 而这 3 个区的阻力系数的值各不相同。为了研究巴旦木物料在气流场中的运动, 首先需要通过粒径法^[19]判断巴旦木物料阻力系数的分区, 粒径法计算因子 T 公式如下

$$T = \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_s - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} = 6.175 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (1)$$

式中 μ 为空气动力黏度, $\mu = 18.1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; ρ_a 为空气密度, $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$; T 为计算因子, mm; ρ_s 为物料密度, kg/m^3 。

3 个分区中对于物料颗粒的粒径有不同的要求,

Stokes 区、Allen 区、Newton 区中适用的物料粒径依次为: $d_p \leq 2.2T$ 、 $2.2T < d_p \leq 20.4T$ 、 $20.4T < d_p \leq 1100T$ (d_p 为物料粒径, mm)。通过粒径分析可判别巴旦木各物料成分阻力系数分区均为 Newton 区, 阻力系数 C 值为 0.44。

1.1.3 巴旦木物料悬浮速度理论计算

利用风选法分离农产品物料时, 物料受到的最基本的力是重力和气流推力, 而气流推力是物料粒子相对于空气速度的复函数, 不同颗粒以及形状大小不同的同种颗粒受到的气流推力是不同的, 气流推力表达式如下:

$$F_R = \frac{1}{2} C A \rho_s v^2 \quad (2)$$

式中 F_R 为气流推力, N; A 为颗粒迎流截面积, m²; C 为阻力系数; v 为气流相对粒子的速度, m/s。

农产品物料的空气动力学特性可通过其悬浮速度数值表示^[20-22], 通过理论计算的悬浮速度值可以判断不同物料成分在气流中的运动情况, 确定是否适合选用风选法进行壳仁分离, 并且可以根据不同物料成分悬浮速度变化范围确定合适的分离气流速度。因此确定物料颗粒的悬浮速度对于物料壳仁风选装置的设计研发尤为重要。先对巴旦木壳仁物料的悬浮速度进行计算, Newton 区中物料颗粒悬浮速度计算公式^[19]如下:

$$v_p = \frac{5.451}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{d_p(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \quad (3)$$

式中 v_p 为物料颗粒的悬浮速度, m/s; S 为非球形颗粒的形状修正系数。

由于巴旦木物料中壳和仁的形状都是非球形, 按不规则球形物体的形状修正系数 $S = 1.2$ ^[19]进行计算。巴旦木的壳和仁呈不规则形状, 尤其壳的个体差异明显, 所以物料粒径分为不同等级计算。

计算时发现, 有极少数大壳呈薄片形状, 这归因于巴旦木的破壳方式和部分壳独特的力学特性, 不具备进行悬浮速度计算的要求, 因此排除这种形似薄片的大壳物料作为研究对象。计算结果表明, 各物料悬浮速度从大到小依次是仁、大壳、中壳、小壳, 不同物料之间悬浮速度差异明显, 同种壳物料不同等级粒径的悬浮速度接近, 适合选用风选法进行壳仁分离。

1.2 巴旦木物料悬浮速度试验

试验前, 用电子秤对莎车 18 号巴旦木的大壳、中壳、小壳和仁进行称量, 获得足量的试验样本物料。将大壳、中壳、小壳和仁 4 部分的物料进行浸泡、晾晒、烘干, 调节壳含水率为 10.5%, 仁含水率为 12.5%进行试验。

物料的悬浮速度是指在垂直气流场中, 物料粒子受到气流的作用力大于自身重力而保持悬浮状态时气流的速度^[23]。试验时把单粒物料放入悬浮速度测试台观察管下方喂料口中的阻尼网上, 通过调节变频调速器使得风机转速加快进而使风速变快, 在气流作用下物料上升并最终悬浮^[24]在观察管的某一区间范围内, 呈动态平衡状态, 测量并记录此时气流的速度即为物料粒子的悬浮速度, 试验现场如图 2 所示。

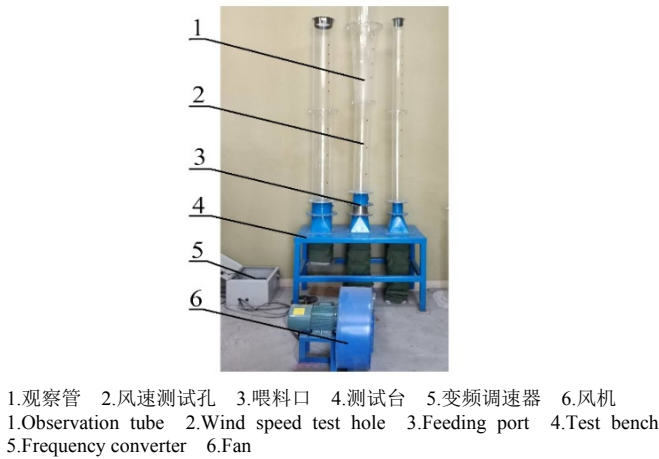


图 2 悬浮速度试验装置
Fig.2 Suspension speed test device

悬浮速度计算与试验结果如表 2 所示，莎车 18 号巴旦木壳仁物料中大壳、中壳、小壳、仁的悬浮速度变化范围分别为 9.92~11.03、8.86~9.66、8.27~8.85、13.10~13.96 m/s。壳和仁的悬浮速度变化范围有较大的区别，因此选用风选法分离巴旦木壳仁会达到比较好的效果，气流速度变化范围可控制在 8.27~11.03 m/s 可以使分离效果达到较佳。另外，巴旦木壳仁物料悬浮速度试验值小于悬浮速度理论计算值，归因于巴旦木壳仁物料的外形尺寸特征，物料的外形尺寸各异，选择球形物体的形状修正系数进行计算存在误差。

表 2 巴旦木壳仁物料悬浮速度理论计算与试验结果
Table 2 Theoretical calculation and experimental results of suspension velocity of almond shell and kernel material

组分名称 Component name	不同等级 粒径均值 size of different grades/mm	悬浮速度理论均值 Theoretical mean value of suspension velocity (m·s ⁻¹)	悬浮速度试验 均值 Test mean value of suspension speed/(m·s ⁻¹)	形状修正 系数 Shape correction coefficient
大壳	16.65	11.975	9.92	1.74
	17.55	12.295	10.17	1.75
	18.45	12.606	10.33	1.79
	19.35	12.910	10.88	1.87
	20.25	13.206	11.03	1.72
中壳	13.15	10.642	8.86	1.73
	13.82	10.910	9.13	1.73
	14.49	11.171	9.40	1.71
	15.16	11.427	9.51	1.75
	15.83	11.677	9.66	1.72
小壳	9.50	9.046	8.27	1.70
	10.00	9.281	8.36	1.69
	10.50	9.510	8.47	1.69
	11.00	9.734	8.76	1.71
	11.50	9.952	8.85	1.70
仁	15.35	15.147	13.10	1.60
	15.90	15.416	13.23	1.63
	16.45	15.681	13.42	1.64
	17.01	15.945	13.78	1.61
	17.55	16.196	13.96	1.62

可以把通过试验获得的悬浮速度值代入式 4，再计算得到修正后的形状系数^[19]，见表 2。结果表明，形状修正系数从小到大依次为仁、小壳、中壳、大壳。原因是大壳物料的形状最不接近球形，断裂面形状各异，系数最大；而仁物料没有断面，表面平整，相对来说最接近球形，所以形状系数比较小。

2 巴旦木壳仁风选装置设计与试验

2.1 壳仁风选装置设计

根据上述内容中悬浮速度参数研究结果，设计如图 3 所示的壳仁风选装置，该装置由离心风机（型号 4-2X79，功率 200 kW，江苏精彩风机制造有限公司）、闭风器（型号 YJD-A，河北九正通明有限公司）、变频调速器（型号 CDI9100，德力西变频器有限公司）、三相异步电动机（型号 YX3-132M-4，功率 7.5 kW，额定转速 1 440 r/min，上海宝格电机有限公司）、传送带、管道、波纹筛等组成。

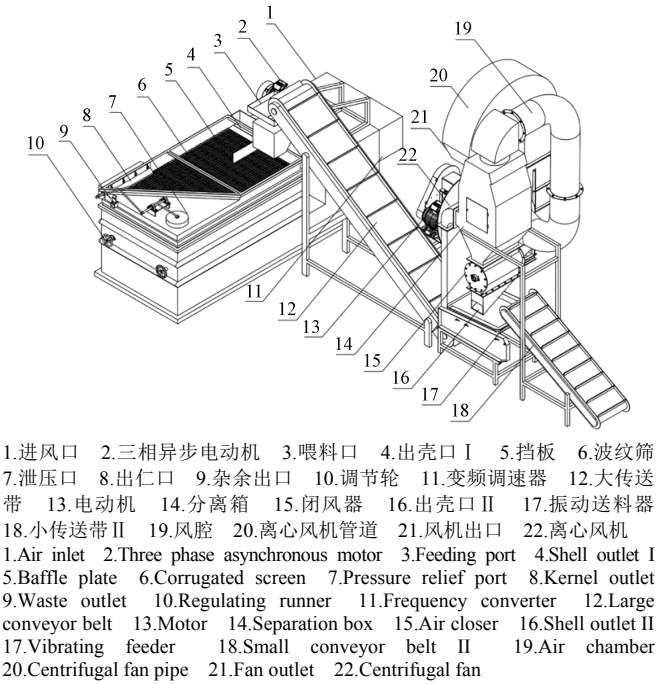


图 3 壳仁风选装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of shell and kernel air separation device

工作原理为小传送带将壳仁混合物料输送至振动送料器上，在振动作用下物料达到松散状态运动至出口，较小的壳和质量较轻的杂余被吸入上方分离箱内，在挡板的作用下壳通过闭风器下端出壳口流出，同时较大的壳以及仁下落到大传送带上经喂料口到达波纹筛上，波纹筛与筛体保持相同的振动频率，由于各物料成分悬浮速度不同且物料受到透过波纹筛孔的气流作用力、重力以及和波纹筛面之间的摩擦力共同作用，在倾斜波纹筛面上物料开始上下分层，密度较大的仁沉在物料下层和波纹筛面接触，在摩擦力和重力的作用下沿筛面上端运动到达出仁口，密度较小的壳受气流作用浮在上层，在气流和摩擦力的作用下沿波纹筛面下端运动至出壳口。

2.2 单因素试验

对风选装置喂入量（A）、清选风机转速（B）、筛体振动频率（C）、波纹筛倾角（D）、离心风机转速（E）进行单因素试验，研究同一因素不同水平对壳风选装置工作效果的影响规律。进行各单因素试验时，该壳仁风选装置的其他因素均保持不变。

试验指标选清选率 $P(\%)$ 、损失率 $Q(\%)$ ^[24]，其定义式如下：

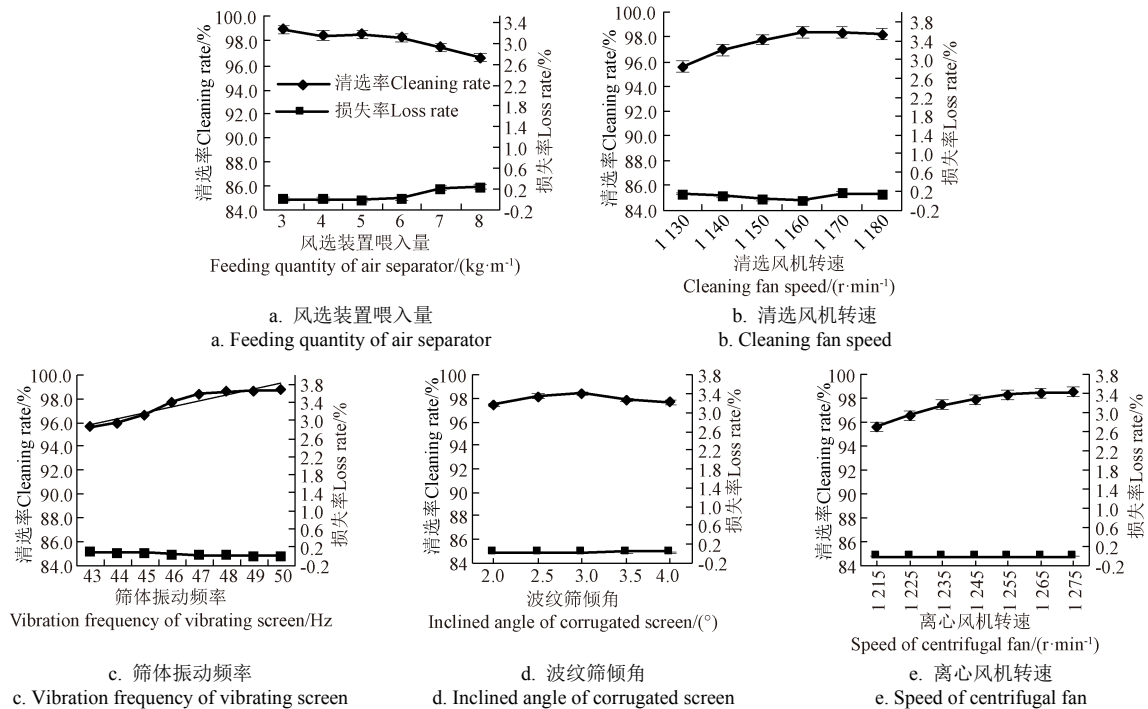
$$P' = \frac{m_k}{m_t} \times 100\% \quad (4)$$

$$Q = \frac{m_{ko}}{m_{kt}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 m_k 为从出仁口流出的仁质量, kg; m_t 为从出仁口流出的物料总质量, kg; m_{ko} 为从出壳口流出的仁质量, kg; m_{kt} 为样本物料中仁的总质量, kg。

如图 4a 所示, 当风选装置喂入量大于 6 kg/min 时清选率下降, 归因于当喂入量过大时筛面单位时间内需要处理的物料增加, 导致物料堆积使清选效果变差; 清选风机转速因素决定了风选气流的大小, 如图 4b 所示, 当

转速从 1 130~1 180 r/min 变化时, 清选率曲线近似二次曲线规律变化, 转速为 1 160 r/min 时达到较佳清选率; 如图 4c 所示, 当筛体振动频率较低时对清选率的影响较大, 振动频率大于 47 Hz 时清选率曲线趋于平缓, 筛体振动频率对损失率影响较小。如图 4d 所示, 清选率曲线基本平稳, 波纹筛倾角为 3.0° 时清选率达到较大值; 如图 4e 所示, 离心风机转速从 1 215 r/min 增加到 1 275 r/min 的过程中, 清选率曲线呈上升趋势, 在 1 255 r/min 时曲线趋于平缓; 当离心风机转速为 1 275 r/min 时清选指标达到最大值, 若离心风机转速超过此值, 将导致损失率增大。各因素下物料的损失率都在可接受的范围内, 因此在正交试验中不考虑损失率这一指标。



注: 固定因素水平: 清选风机转速 1 160 r·min⁻¹, 风选装置喂入量 5 kg·min⁻¹, 筛体振动频率为 47 Hz, 波纹筛倾角 3°, 离心风机转速 1 275 r·min⁻¹。
Note: Fixed factors: the speed of cleaning fan is 1 160 r·min⁻¹, the feeding quantity of air separator is 5 kg·min⁻¹, the vibration frequency of vibrating screen is 47 Hz, the inclination angle of corrugated screen is 3° and the speed of centrifugal fan is 1 275 r·min⁻¹.

图 4 单因素试验结果

Fig.4 Single factor experiment results

2.3 巴旦木壳仁风选优化试验

2.3.1 试验过程

试验时间为 2020 年 9 月 25 日—2020 年 9 月 30 日, 试验地点在新疆喀什果业有限公司。

试验开始前, 在闭风器下端出壳口和风选装置出壳口绑好取样袋收集试验样本用于计算损失率, 试验过程中采用人工定时收集试验样本计算清选率, 每组试验重复 3 次, 每次随机取样 30 s, 依次完成巴旦木壳仁物料风选试验。试验现场取样如图 5 所示。

2.3.2 试验数据统计

按照试验指标计算方法完成巴旦木壳仁物料风选试验清选率的计算统计。依据《LY/T 1750—2008 巴旦木(扁桃)生产技术规程》、巴旦木悬浮速度研究结果以及单因素试验研究结果, 选取清选风机转速中间值为 1 160 r/min、风选装置喂入量中间值为 5 kg/min、筛体振动频率为 47 Hz、波纹筛倾角为 3.0° 和离心风机转速为

1 250 r/min, 为了方便控制和调整, 以巴旦木壳仁物料悬浮速度研究结果为基础, 试验开始之前对清选风机转速和筛面气流速度大小进行标定, 结果如表 3 所示。根据 5 个试验因素的调控范围并结合文献^[25]确定 5 个试验因素的水平如表 4 所示。使用 Design-Expert 10.0 软件中 Box-Behnken 功能设计响应面正交表^[26]如表 5 所示。



a. 壳取样图
a. Shell sampling diagram



b. 仁取样图
b. Kernel sampling diagram

图 5 试验过程取样图

Fig.5 Sampling diagram of test process

表 3 清选风机转速与筛面气流速度标定关系

Table 3 Calibration relationship between cleaning fan speed and screen surface air velocity

清选风机转速 Cleaning fan speed/(r·min ⁻¹)	筛面气流速度 Air velocity of screen surface/(m·s ⁻¹)
1 140	9.035~10.182
1 160	10.343~11.102
1 180	11.417~12.719

表 4 壳仁风选试验各因素水平设计

Table 4 Levels design of factors of shell and kernel separation test

水平 Levels	风选装置喂入量 Feeding quantity of air separator <i>a</i> /(kg·min ⁻¹)	清选风机 转速 Cleaning fan speed <i>b</i> /(r·min ⁻¹)	筛体振动 频率 Vibration frequency of vibrating scree <i>c</i> /Hz	波纹筛倾角 Inclined angle of corrugated screen <i>d</i> / (°)	离心风机 转速 Speed of centrifugal fan <i>e</i> / (r·min ⁻¹)
-1	4	1 140	44	2.0	1 225
0	5	1 160	47	3.0	1 250
1	6	1 180	50	4.0	1 275

表 5 响应面试验结果

Table 5 Response surface test results

组号 Group number	风选装置喂 入量 Feeding quantity of air separator <i>A</i>	清选风机 转速 Cleaning fan speed <i>B</i>	筛体振动 频率 Vibration frequency of vibrating scree <i>C</i>	波纹筛 倾角 Inclined angle of corrugated screen <i>D</i>	离心风机 转速 Speed of centrifugal fan <i>E</i>	清选 率 Cleaning rate/%
1	1	1	0	0	0	98.256
2	0	0	1	0	-1	98.966
3	-1	0	1	0	0	98.719
4	0	-1	0	1	0	97.446
5	0	1	0	-1	0	96.847
6	1	-1	0	0	0	96.536
7	-1	0	0	1	0	98.567
8	0	0	0	-1	-1	97.696
9	0	0	1	0	1	98.725
10	1	0	1	0	0	97.984
11	0	1	-1	0	0	96.745
12	1	0	0	1	0	98.023
13	0	-1	0	0	1	97.607
14	0	0	0	0	0	97.977
15	0	0	1	-1	0	97.867
16	0	-1	0	-1	0	96.998
17	0	1	0	1	0	97.675
18	0	0	0	1	1	98.998
19	0	0	0	0	0	98.201
20	0	0	0	1	-1	97.971
21	-1	0	0	-1	0	97.751
22	1	0	0	-1	0	97.367
23	0	1	1	0	0	97.743
24	0	0	0	0	0	98.918
25	0	-1	1	0	0	96.578
26	0	0	0	0	0	98.446
27	0	0	0	0	0	98.511
28	0	-1	-1	0	0	96.576
29	0	-1	0	0	-1	97.109
30	0	1	0	0	1	98.682
31	0	0	-1	0	1	97.871
32	-1	0	-1	0	0	97.375
33	1	0	-1	0	0	96.879
34	-1	0	0	0	-1	98.495
35	-1	0	0	0	1	98.778
36	0	0	-1	-1	0	97.008
37	0	0	0	0	0	98.711
38	1	0	0	0	1	98.578
39	0	1	0	0	-1	97.849
40	-1	-1	0	0	0	97.546
41	0	0	-1	0	-1	97.192
42	1	0	0	0	-1	97.549
43	0	0	1	1	0	98.001
44	-1	1	0	0	0	98.169
45	0	0	0	-1	1	98.661
46	0	0	-1	1	0	98.242

3 壳仁风选装置工作参数响应面优化分析

3.1 清选率回归模型建立与显著性检验

根据表 5 中的数据对清选率指标进行方差分析，结果如表 6 所示。

表 6 清选率二次多项式模型的方差分析

Table 6 Variance analysis of quadratic polynomial model of the cleaning rate

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型	19.59	20	8.31	<0.000 1
<i>A</i>	1.12	1	9.48	0.005 0
<i>B</i>	1.94	1	16.46	0.000 4
<i>C</i>	2.80	1	23.78	<0.000 1
<i>D</i>	1.40	1	11.86	0.002 0
<i>E</i>	1.61	1	13.65	0.001 1
<i>AB</i>	0.30	1	2.55	0.122 6
<i>AC</i>	0.014	1	0.12	0.730 6
<i>AD</i>	6.4×10 ⁻³	1	0.054	0.817 6
<i>AE</i>	0.14	1	1.18	0.287 5
<i>BC</i>	0.25	1	2.10	0.159 3
<i>BD</i>	0.036	1	0.31	0.584 8
<i>BE</i>	0.028	1	0.24	0.629 8
<i>CD</i>	0.30	1	2.57	0.121 6
<i>CE</i>	0.21	1	1.80	0.192 3
<i>DE</i>	9.61×10 ⁻⁴	1	8.16×10 ⁻³	0.928 8
<i>A</i> ²	0.27	1	2.26	0.144 9
<i>B</i> ²	6.44	1	54.66	<0.000 1
<i>C</i> ²	2.33	1	19.77	0.000 2
<i>D</i> ²	0.76	1	6.49	0.017 4
<i>E</i> ²	0.26	1	2.18	0.152 7
残差	2.95	25		
失拟项	2.37	20	1.03	0.541 6
纯误差	0.58	5		
总和	22.53	45		
<i>R</i> ²	0.8693			

注： $P<0.01$ 表示该项极显著； $P<0.05$ 表示该项显著。
Note: $P<0.01$ means the item is extremely significant; $P<0.05$ means the item is significant.

清选率回归方程为

$$P' = 98.46 - 0.26A + 0.35B + 0.42C + 0.3D + 0.32E + 0.27AB - 0.06AC - 0.04AD + 0.19AE + 0.25BC + 0.095BD + 0.084BE - 0.28CD - 0.23CE + 0.015DE - 0.17A^2 - 0.86B^2 - 0.52C^2 - 0.3D^2 + 0.17E^2 \quad (6)$$

式中 A 为风选装置喂入量， B 为清选风机转速， C 为筛体振动频率， D 为波纹筛倾角， E 为离心风机转速。

分析表 6 可知，清选率模型 $P<0.01$ ，说明清选率回归模型极显著，决定系数 R^2 值为 0.869 3 则说明清选率回归方程拟合效果较好，回归模型能反映出 86.93% 的响应值变化。方差来源中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 五项中 $P<0.01$ ，表明对清选率回归模型影响极显著，其他项 $P>0.05$ ，说明对清选率回归模型影响不显著^[27-30]。

3.2 壳仁风选装置参数优化

巴旦木壳仁风选要求清选率指标越高越好，5 个影响因素均在表 4 所示的水平范围内取值，根据清选率最大的约束条件建立巴旦木风选参数组合优化模型如下：

$$\begin{cases} \max P' \\ 4 \text{ kg/min} \leq a \leq 6 \text{ kg/min} \\ 1140 \text{ r/min} \leq b \leq 1180 \text{ r/min} \\ 44 \text{ Hz} \leq c \leq 50 \text{ Hz} \\ 2^\circ \leq d \leq 4^\circ \\ 1225 \text{ r/min} \leq e \leq 1275 \text{ r/min} \end{cases} \quad (7)$$

使用 Design Expert 10.0 软件中 Optimization 优化求解功能, 在因素水平范围内求解满足上述约束条件的最优参数组合为: 风选装置喂入量 5 kg/min、清选风机转速 1 161.73 r/min、筛体振动频率为 47.32 Hz、波纹筛倾角 3.399°、离心风机转速 1 274.87 r/min, 此参数组合下清选率为 98.928%。

3.3 壳仁风选优化参数组合与试验验证

为保证最优参数组合试验的可靠性, 试验样本取自与试验同品种、同批次破壳的混合物料。根据风选装置模型仿真分析结果, 调节喂料口和出仁口位置。受到设备调节精度限制, 优化参数无法调节精度至小数点后 1 位, 因此将最符合优化参数组合的 1 组参数进行调整, 作为本次验证试验的优化风选参数组合: 风选装置喂入量 5 kg/min、清选风机转速 1 160 r/min、筛体振动频率为 47 Hz、波纹筛倾角 3°、离心风机转速 1 275 r/min。其中, 为了提高该风选装置的处理能力, 将喂入量调整为 6 kg/min, 另外离心风机转速取 1 275 r/min, 一方面是为了解决喂入量调高带来的单位时间内物料堆积现象; 另一方面, 经测验发现当离心风机取 1 275 r/min 时, 吸口风速在 10.55~11.05 m/s 范围以内, 达到了悬浮速度试验得到的分离要求较佳值。进行 5 次优化参数组合验证试验, 分别计算每组试验的清选率, 最后求得平均值为 99.144%。与 3.2 节中软件优化结果进行差值计算, 取绝对值, 得到清选率相对误差为 0.216%, 误差相对较小。

4 结 论

1) 分析计算确定了巴旦木物料阻力分区为 Newton 区, 通过理论计算得到巴旦木壳仁物料各成分悬浮速度变化范围分别为: 大壳为 11.975~13.206 m/s; 中壳为 10.642~11.677 m/s; 小壳为 9.046~9.952 m/s; 仁为 15.147~16.196 m/s。

2) 使用悬浮速度测试装置进行巴旦木壳仁物料悬浮速度试验, 得到大壳、中壳、小壳和仁的悬浮速度变化范围分别为: 9.92~11.03、8.86~9.66、8.27~8.85、13.10~13.96 m/s。结果表明, 巴旦木壳和仁的悬浮速度存在明显差异, 可采用风选法分离巴旦木壳和仁, 风选气流速度控制在 8.27~11.03 m/s 范围内较合适。另外, 使用悬浮速度试验得到的结果对理论计算时选取的形状系数进行了修正。

3) 通过单因素试验, 分析不同因素的不同水平对清选率的影响; 使用 Design Expert 10.0 软件对正交试验进行响应面分析, 结果表明, 筛体振动频率因素对清选率的影响显著性最高; 结合壳仁风选试验及运用软件约束条件优化求解功能得出风选装置参数组合为: 风选装置

喂入量 6 kg/min、清选风机转速 1 160 r/min、筛体振动频率为 47 Hz、波纹筛倾角 3°、离心风机转速 1 275 r/min。对优化后的参数组合以及装置进行验证试验, 得到平均清选率为 99.144%。

【参 考 文 献】

- [1] Gradziel T M. Origin and dissemination of almond[M]. John Wiley. Sons, Inc, 2011.
- [2] 李瑞. 采后巴旦木的射频杀菌技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Li Rui. Study on Radiofrequency Sterilization Technology of Postharvest Almond[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [3] 丁玲, 方玉, 许云章, 等. 薄壳扁桃和厚壳扁桃的品质比较研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 291-293.
Ding Ling, Fang Yu, Xu Yunzhang, et al. Comparative study on the quality of thin shell almond and thick shell almond[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(1): 291-293. (in Chinese with English abstract)
- [4] 韩宏伟, 王建友, 李勇, 等. 引种国外巴旦木品种筛选研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(10): 1830-1839.
Han Hongwei, Wang Jianyou, Li Yong, et al. Selection of introduced foreign almond varieties[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(10): 1830-1839. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蔺建涛. 比重式杏核壳仁风选机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
Lin Jiantao. Design and Experimental Study of Specific Gravity Apricot Kernel Air Separator[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [6] Li H C, Li Y M, Gao F, et al. CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88: 111-119.
- [7] Krishnan P, Berlage A G. Separation of shells from walnut meats using magnetic methods[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(6): 1990-1992.
- [8] Marian P, Pawel S, Jacek M, et al. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 603-608.
- [9] Nalbandi H, Seiedlou S, Ghassemzadeh H R. Aerodynamic properties of Turgenia latifolia seeds and wheat kernels[J]. International Agrophysics, 2010, 24(1): 57-61.
- [10] Shellard J E, Macmillan R H. Aerodynamic properties of threshed wheat materials[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1978, 23(3): 273-281.
- [11] 刘鹏, 金诚谦, 刘政, 等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 35-45.

- Liu Peng, Jin Chengqian, Liu Zheng, et al. Optimization of field cleaning operation parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 35-45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 马秋成, 卢安舸, 高连兴, 等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 297-303.
- Ma Qiucheng, Lu Ange, Gao Lianxing, et al. Experiment on aerodynamics characteristics of lotus seeds and shell kernel separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 297-303. (in Chinese with English abstract)
- [13] 冷峻, 栗晓宇, 杜岳峰, 等. 单纵轴流谷物联合收获机清选装置内部流场分析与优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 39-48.
- Leng Jun, Li Xiaoyu, Du Yuefeng, et al. Internal flow field analysis and optimization of cleaning device of single longitudinal axial flow grain combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 39-48. (in Chinese with English abstract)
- [14] 耿令新, 杨芳, 王升升, 等. 大白菜种子脱出物空气动力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 161-165.
- Geng Lingxin, Yang Fang, Wang Shengsheng, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of Chinese cabbage seed extract[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 161-165. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高连兴, 赵学观, 杨德旭, 等. 大豆脱粒机气力清选循环装置研制与性能试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 22-27.
- Gao Lianxing, Zhao Xueguan, Yang Dexu, et al. Development and performance test of pneumatic cleaning circulation device for soybean thresher[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 22-27. (in Chinese with English abstract)
- [16] Murilo D M, Innocentini, Wellington S, et al. Pneumatic separation of hulls and meats from cracked soybeans[J]. Food and Bioproducts Processing, 2008, 87(4): 237-246.
- [17] Kara M, Bastaban S, Ozturk I, et al. Moisture-dependent frictional and aerodynamic properties of safflower seeds[J]. International Agrophysics, 2012, 26(2): 203-205.
- [18] 邓春香, 陶栋材, 高静萍. 气流清选风车中谷物的动力学特性和影响因素的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 121-125.
- Deng Chunxiang, Tao Dongcai, Gao Jingping. Study on dynamic characteristics and influencing factors of grain in pneumatic cleaning windmill[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(4): 121-125. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [20] Razavi S M A, Rafe A, Akbari R. Terminal velocity of pistachio nut and its kernel as affected by moisture content and variety[J]. African Journal of Agricultural Research, 2008, 2(12): 663-666.
- [21] 陈翠英, 王志华, 李青林. 油菜脱出物在气流中的运动分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 90-93.
- Chen Cuiying, Wang Zhihua, Li Qinglin. Motion analysis of rape outgrowth in airflow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 90-93. (in Chinese with English abstract)
- [22] Mesut Dilmac, Sefa Tarhan, Hakan Polatci. Aerodynamic properties of Faba bean (*Vicia faba* L.) Seeds[J]. Legume Research - An International Journal, 2016, 39(3): 379-384.
- [23] 吴守一. 农业机械学(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [24] 马征, 李耀明, 徐立章. 油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 13-17.
- Ma Zheng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Determination and analysis of floating velocity, friction and wetting characteristics of rape prolapse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [25] 沈强. 纵轴流全喂入收割机清选装置流场的数值模拟与优化分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Shen Qiang. Numerical Simulation and Optimization Analysis of Flow Field in Cleaning Device of Longitudinal Axial Flow Full Feeding Harvester[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [26] Liang Z W, Xu L Z, Josse D B, et al. Optimisation of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 25-40.
- [27] 马塞璞. 高级生物统计[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [28] Di Felice R. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International journal of multiphase flow, 1994, 20(1): 153-159.
- [29] Obi O F. Evaluation and modeling of the aerodynamic characteristics of watermelon seed of different varieties[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(10): 2165-2174.
- [30] Shahbazi F, Valizadeh S, Dowlatshah A. Aerodynamic properties of Makhobeli, triticale and wheat seeds[J]. International Agrophysics, 2014, 28(3): 389-394.

Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device

Wang Xuenong^{1,2}, Bian Bo¹, TuluHong Turdi², Zhang Li²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: This study aims to explore the aerodynamic characteristics of almond shells, thereby optimizing the structure parameters in an air separation device. The finite element (FE) simulation was also performed on ANSYS 16.0-fluent flow field platform. A single-factor orthogonal test was selected to determine the optimal parameters for better performance of air separation and higher index of cleaning rate. Taking the Shache No.18 as the research object, the density and moisture content of almond shells and kernels were measured in a field test. A suspension speed test bed was used to optimize the aerodynamic characteristics of almond shells and kernels at the Agricultural Mechanization Research Institute of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, China. A field test was also performed on the mixture of cracked shell kernels in an air separation device with an optimized structure. A Design Expert 10.0 software was used to calculate for a better parameter combination of the air separation device. The results showed that there was a great variation in the suspension velocities of a large shell, medium shell, small shell and kernel of Shache 18 almond, ranging from 9.92 to 11.03, 8.86 to 9.66, 8.27 to 8.85, and 13.10 to 13.96 m/s, respectively. The flow field simulation showed that the distribution of air velocity was higher on the vibrating screen surface of the air separation device, particularly in the center and low around. Subsequently, a systematic optimization was made on the feeding and discharging ports of the air separation device after the simulation. The single factor test showed that there was a great influence of feed rate and cleaning fan speed on the loss rate of the material. Additionally, since the loss rate of the material under each factor was within the acceptable range during the test, the orthogonal test did not consider the loss rate so far. Correspondingly, the orthogonal test demonstrated that the influence of working parameters on the cleaning rate was ranked in order from large to small: screen vibration frequency, cleaning fan speed, corrugated screen inclination angle, and feeding amount in the air separation device. Consequently, an optimal parameter combination of high cleaning rate was also calculated as follows: the feeding amount of 6 kg/min, cleaning fan speed of 1 160 r/min, screen vibration frequency of 47 Hz, inclination angle of 3° for the vibrating screen, and the speed of centrifugal fan was 1 275 r/min, particularly combining with the orthogonal test and optimization function of shell kernels in an air separation device. A verification test was then conducted to calculate the average of parameters in the optimal combination under the same test environment and conditions. It was found that the cleaning rate reached 99.144%. The findings can provide sound theoretical support to the development and optimization of air separation equipment for the shell and kernel of almond.

Keywords: mechanization; optimization; suspension velocity; shell and kernel air separation; cleaning rate