

# 核桃物料空气动力学特性研究与壳仁风选设备优化

渠述贺<sup>1</sup>,朱占江<sup>1,2</sup>,毛吾兰<sup>2</sup>,祝兆帅<sup>2</sup>,买合木江·巴吐尔<sup>2</sup>,孙丽娜<sup>2</sup>

(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:**壳仁分选是核桃破壳取仁的重要环节,是核桃进行精深加工的基础。为探索风选技术在核桃壳仁分选领域的可行性,通过理论计算与试验研究对核桃物料的空气动力学特性进行了研究,并在此基础上设计了一种核桃壳仁风选设备,运用单因素试验和响应面试验对该设备的工作参数进行优化。结果表明:核桃壳仁混合物料中仅有碎仁与1/2壳的悬浮速度范围有少量重叠区域,同等级核桃壳、仁具有不同的悬浮速度范围,通过控制气流速度可实现核桃壳仁分离;核桃壳仁风选设备的工作参数对清选率的影响由大到小依次为入料口高度、喂料速度、风机频率,最佳工作参数组合为喂料速度5 kg/min、风机频率46 Hz、入料口高度34 mm,在此条件下清选率为99.32%,损失率为1.03%。综上,运用风选法进行核桃壳仁分离具有可行性,通过参数优化可提升风选设备的分选效果。

**关键词:**核桃;悬浮速度;壳仁分选;风选法

中图分类号:TS223.2;TS203 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)10-0145-08

## Research on aerodynamic characteristics of walnut materials and optimization of shell - kernel air separation device

QU Shuhe<sup>1</sup>, ZHU Zhanjiang<sup>1,2</sup>, MAO Wulan<sup>2</sup>,  
ZHU Zhaoshuai<sup>2</sup>, MAIHEMUJIANG · Batuer<sup>2</sup>, SUN Lina<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Shell - kernel sorting constitutes an essential link in the process of cracking walnuts to retrieve the kernels and serves as the foundation for the in - depth processing of walnuts. To investigate the feasibility of air separation technology in the domain of walnut shell - kernel sorting, the aerodynamic characteristics of walnut materials was explored by theoretical calculations and experimental research, and on this foundation, a walnut shell - kernel air separation device was designed. The working parameters of this device were optimized by single factor experiment and response surface methodology. The results indicated that within the mixed material of walnut shells and kernels, there was only a minor overlap in the suspension speed range between crushed kernels and 1/2 shells. Walnut kernels and shells of the same grade exhibited varying ranges of suspension speeds. By regulating the airflow speed, separation of walnut kernels from shells could be achieved. The influence of the operational parameters of the walnut

收稿日期:2024-02-05;修回日期:2024-07-02

基金项目:新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金(2022D01E61);新疆维吾尔自治区科技援疆计划项目(2020E02114);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02048);国家自然科学基金(51865059)

作者简介:渠述贺(1999),男,硕士研究生,研究方向为农业机械化装备(E-mail)2744497457@qq.com。

通信作者:朱占江,研究员(E-mail)807305760@qq.com。

shell - kernel air separation device on the cleaning rate was ranked in descending order as follows: height of the input port, feed rate, and fan frequency. The optimal operational parameter combination was obtained as follows: feed rate 5 kg/min, fan frequency 46 Hz, and input port height 34 mm. Under these conditions, the cleaning rate and the loss rate were 99.32% and

1.03%, respectively. In conclusion, using the air separation method for walnut shell and kernel separation is feasible, and the sorting efficiency of the air separation device can be enhanced by optimizing parameters.

**Key words:** walnut; suspension speed; shell – kernel sorting; air separation method

核桃,与扁桃、腰果、榛子并称为“世界四大干果”,具有较高的营养价值和药用价值<sup>[1-2]</sup>。随着我国人民生活水平的逐渐提高,核桃的需求量日益增加,这极大地促进了核桃加工产业的发展。核桃加工可分为初加工和深加工两部分,初加工依次有去青皮、分级、破壳和壳仁分选4个流程,深加工则是将初加工后的核桃进一步加工为核桃油、核桃粉、核桃乳等产品<sup>[3]</sup>。其中,壳仁分选作为衔接初加工与深加工的关键环节,对核桃产品的质量有着重要影响。目前市场上核桃壳仁分选的方法主要有智能分选法、风选法、浮选法和筛分法<sup>[4-7]</sup>,其中风选法是当前使用最多的核桃壳仁分选方法。

风选法的工作原理是利用混合物料之间不同的空气动力学特性达到分离的目的。目前,已有关于核桃物料空气动力学特性研究及核桃壳仁分选设备设计的研究。王维等<sup>[8]</sup>测定了核桃破壳后不同物料的悬浮速度,结果表明,物料之间的悬浮速度差异与物料平均质量差和迎风面积差有关。曹成茂等<sup>[9]</sup>对山核桃物料的空气动力学特性进行了研究,结果发现,通过改变山核桃壳和山核桃仁的含水率可以加大壳仁之间的悬浮速度差异,从而提高混合物料的风选效果。朱占江等<sup>[10]</sup>通过理论计算和试验获得了核桃及其破壳后主要成分壳、仁和分心木的悬浮速度,验证了核桃及其破壳后各主要成分适宜气力分选,同时进一步对核桃各物料颗粒群进行了空气动力学研究,发现核桃各物料颗粒群悬浮速度与颗粒数量呈三次拟合函数关系,各物料分离风速为对应轻物料空瘪核桃或核桃壳悬浮速度均值的1.1~1.2倍。牛浩<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法分析了风选管道内气流分布和核桃混合物料颗粒运动规律,设计了一种倾斜式风选设备,该设备机身包含振动装置,避免了作业时物料在风选管道内淤积。李昊<sup>[12]</sup>运用计算机辅助工程(CAE)技术对核桃风选工况进行了数值模拟,获得核桃物料仿真悬浮速度,验证了计算流体动力学-离散元(CFD-DEM)耦合方法应用于核桃混合物料气动分选领域研究的可行性。董远德等<sup>[13]</sup>设计了一种核桃壳仁风选设备,通过正交试验优化了该设备的作业参数,优化后仁中含壳率小于3%,壳中含仁率小于7%,高路仁损

失率小于5%。胡国玉等<sup>[14]</sup>设计了一种小型负压垂直气流风选设备,并采用不同等级的核桃壳仁混合物料进行了试验研究,结果表明,通过控制风选设备工作参数能显著提高分选效果。以上研究为核桃壳仁风选设备设计优化提供了重要参考。

本研究通过理论计算与试验研究获取核桃机械破壳后物料悬浮速度并进行研究分析,进一步拓展核桃经机械破壳后各物料特性基础数据,同时研发适宜小型企业、合作社生产需要的核桃壳仁气力分选设备,并开展单因素试验与响应面优化试验,获取壳仁物料风选优选参数,以期推进壳仁风选技术的应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用产自新疆阿克苏的185号核桃,该原料储存于冷库中,取出后静置10h,通过6PH-600型锥篮式核桃破壳机进行机械破壳获得核桃混合物料<sup>[15]</sup>。核桃混合物料由核桃壳、核桃仁、分心木和细小碎料组成,核桃壳和核桃仁细分为1/2仁、1/4仁、1/8仁、碎仁和1/2壳、1/4壳、1/8壳、碎壳,如图1所示。细小碎料经筛分后用于榨油,后续研究不作讨论。

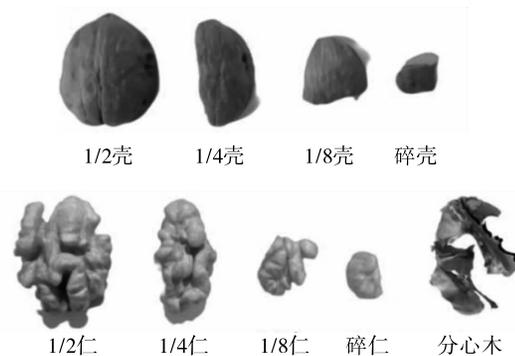
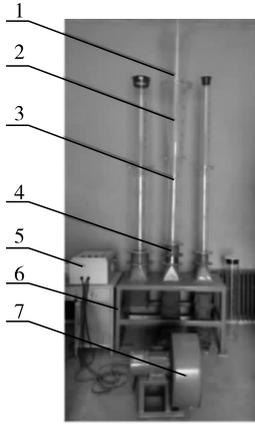


图1 核桃混合物料各成分

Fig. 1 Each component of the walnut mixture

YD120C 电子密度计(精度为 $0.01 \text{ g/cm}^3$ );XY-100MW 卤素水分测定仪(精度为 $0.01 \text{ g}$ );YP20002B 电子天平(精度为 $0.01 \text{ g}$ );核桃物料悬浮速度测定试验装置,如图2所示,该装置由3个测试系统组成,左侧为管径较大的测试系统,右侧为管径较小的测试系统,每个测试系统均包含喂料管、稳流管和锥形测试管。为了便于测量管径内的气流速

度,稳流管和锥形测试管沿管壁侧面均设有竖排测试孔,配有 SEN6825-1 L 型皮托管风速风压风量仪(精度为 0.01 m/s),用于装置内部风速测定。



注:1. 上稳流管; 2. 锥形测试管; 3. 下稳流管; 4. 喂料管; 5. 变频器控制柜; 6. 机架; 7. 风机

Note: 1. Upper flow tube; 2. Conical test tube; 3. Lower flow tube; 4. Feed pipe; 5. Frequency converter control cabinet; 6. Frame; 7. Fan

图2 悬浮速度测定试验装置

Fig. 2 Experimental device for suspension speed determination

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 核桃物料物理参数测定

物料的空气动力学特性与含水率、密度、质量等参数有关<sup>[16-17]</sup>,进行核桃物料悬浮速度理论计算需对其相关物理参数进行测定。试验开始前,先对机械破壳后的核桃混合物料进行人工分拣,按不同的物料成分进行分组,随机从分组后的物料中抽取物料颗粒作为试验样本。

使用电子密度计对各核桃物料密度进行测定,测试5次取均值;使用卤素水分测定仪对核桃物料含水率进行测定,为保证试验结果的准确性,将核桃仁切成薄片、核桃壳制成碎片后进行测定,测试5次取均值,试验结果用干基含水率表示;使用电子天平对核桃物料质量进行测定,随机选取各等级核桃壳、核桃仁和分心木物料颗粒各20颗并编号,称其质量并取均值,测量后的试验物料留存妥当,用于后续悬浮速度试验研究。

### 1.2.2 核桃物料悬浮速度的理论计算

研究发现,物料颗粒在垂直管道内进行气力输送时受管壁条件和自身绕重心旋转的影响,会存在一定的阻力,因此计算悬浮速度时需考虑阻力系数。悬浮速度和阻力系数计算分别见公式(1)和公式(2)<sup>[18]</sup>。

$$v = 3.62 \sqrt{\frac{d_{\text{当}}(\gamma_{\text{物}} - \gamma_{\text{气}})}{\gamma_{\text{气}} C}} \left[ 1 - \left( \frac{d_{\text{当}}}{D} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$C = 0.5 + 0.363 \left( \frac{d_{\text{当}}}{D} \right) \quad (2)$$

式中: $v$ 为修正前的悬浮速度; $C$ 为物料颗粒阻力系数; $\gamma_{\text{气}}$ 为空气重度; $\gamma_{\text{物}}$ 为物料颗粒重度; $d_{\text{当}}$ 为物料颗粒当量直径; $D$ 为管道直径,经测量  $D = 0.15 \text{ m}$ 。

式(1)简化后可得下式<sup>[12]</sup>。

$$v = 3.62 \sqrt{\frac{d_{\text{当}}(\rho_{\text{物}} - \rho_{\text{气}})}{\rho_{\text{气}} C}} \left[ 1 - \left( \frac{d_{\text{当}}}{D} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: $\rho_{\text{物}}$ 为物料颗粒密度; $\rho_{\text{气}}$ 为空气密度,常温标准大气压下的  $\rho_{\text{气}}$  为  $1.025 \text{ kg/m}^3$ 。

物料颗粒当量直径计算见公式(4)。

$$d_{\text{当}} = 1.24 \sqrt[3]{\frac{m_{\text{物}}}{\rho_{\text{物}}}} \quad (4)$$

式中: $m_{\text{物}}$ 为物料颗粒质量。

考虑到物料颗粒为非球形颗粒,需要对计算后的悬浮速度按公式(5)进行修正。

$$v_{\text{悬}} = \frac{v}{\sqrt{K_{\text{形}}}} \quad (5)$$

式中: $v_{\text{悬}}$ 为悬浮速度; $K_{\text{形}}$ 为非球形颗粒形状修正系数<sup>[19]</sup>。1/2仁、1/4仁按椭圆柱体计算, $K_{\text{形}}$ 取值为3;1/8仁按表面不光滑的近似球体计算, $K_{\text{形}}$ 取值为2.25;碎仁按棱形体计算, $K_{\text{形}}$ 取值为1.76;1/2壳、碎壳、分心木按圆板片计算, $K_{\text{形}}$ 取值为5;1/4壳、1/8壳按方板片计算, $K_{\text{形}}$ 取值为5。

### 1.2.3 核桃物料悬浮速度试验

研究发现物料颗粒易在锥形测试管与下稳流管结合部位处于相对稳定的悬浮状态。因此,在测定过程中,选取锥形测试管最下端测试孔(见图3)进行核桃物料颗粒悬浮速度测量。同时,试验中发现,当物料颗粒在气流场中稳定时通常贴于气流管内壁,测试点1和测试点2(见图4)可以作为物料颗粒的悬浮速度测定位置。L型皮托管风速风压风量仪测量截面位于测试孔下部,其直径为152 mm,由于物料颗粒处于悬浮状态时通常紧贴管道内壁,测试点1至测试孔下端管道内壁的距离  $c_1$  由物料颗粒半径决定,测试点2至测试孔下端管道内壁的距离  $c_2$  则可通过管道直径减去物料半径计算得到,如图5所示。为了便于试验过程中风速的测量,计算出测试点至管道内壁的距离后,可在L型皮托管风速风压风量仪上进行位置标记。

物料颗粒的悬浮速度具体测定过程如下:将物料颗粒放置于喂料管下端的金属网上,通过调节变频器改变风机频率进而控制测试装置管道内的气流速度,在气流的作用下物料颗粒缓缓上升,当处于相

对稳定的悬浮状态时,记录此时风机频率,随后降低风机频率使物料落到金属网上,取出物料颗粒,将风机频率调至前述频率,用 L 型皮托管风速风压风量

仪在锥形管第一测试孔(图 3 中从下往上第一个孔)进行风速测量,此时测得的测试点 1 和测试点 2 的气流速度均值即为物料颗粒的悬浮速度。

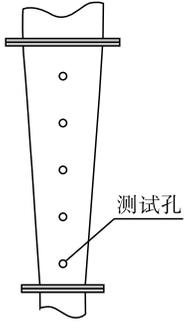


图 3 测试孔位置

Fig. 3 Location of the test holes

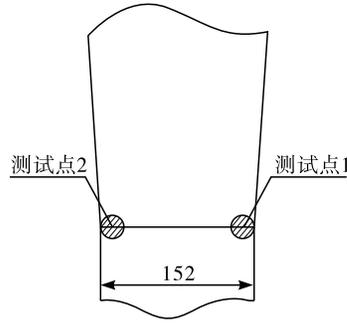


图 4 测试点位置

Fig. 4 Location of the test points

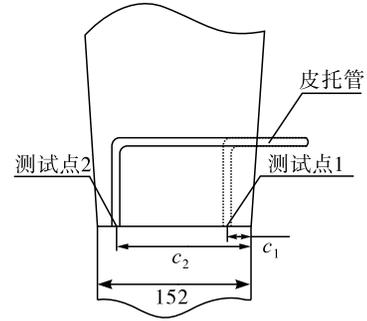


图 5 悬浮速度测试图

Fig. 5 Suspension speed test diagram

1.2.4 核桃壳仁风选设备设计与工作参数优化

1.2.4.1 核桃壳仁风选设备设计

根据悬浮速度研究结果,并结合前期研究,设计了一种核桃壳仁混合物料负压风选设备并对风机进行选型。

1.2.4.2 核桃壳仁风选设备参数优化

试验材料选用冷库储存的 185 号核桃。原果核桃经前述破壳机破壳后获得核桃壳仁混合物,由于混合物料中碎仁占比极低,仅为 1.3%,结合前述悬浮速度研究结果,破壳后的核桃混合物料可直接用于风选设备优化试验研究。

利用电子天平称取核桃混合物料,采用核桃壳仁混合物料负压风选设备在一定的喂料速度、风机频率和入料口高度条件下进行核桃壳仁风选试验,每次试验取样 30 s。为了减少试验过程中的干扰因素,每组试验重复 3 次,试验结果取平均值。为了检验核桃壳仁风选设备的工作性能,选择清选率( $P$ )和损失率( $Q$ )作为指标,其计算分别见公式(6)和公式(7)。

$$P = \frac{m_k}{m_t} \times 100\% \quad (6)$$

$$Q = \frac{m_{ko}}{m_{kt}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $m_k$  为从出仁口流出的仁质量(手选去物料中壳),kg; $m_t$  为从出仁口流出的物料总质量,kg; $m_{ko}$  为出壳口流出的仁质量,kg; $m_{kt}$  为样本物料中仁的总质量,kg。

2 结果与分析

2.1 核桃物料物理参数测定

测定过程中发现种皮对核桃仁的密度影响较大,经研究 1/2 仁和 1/4 仁、1/8 仁和碎仁外表面种皮包裹面积占比相近,故 1/2 仁和 1/4 仁采用同一密度,1/8 仁和碎仁采用同一密度,各等级核桃壳密

度无明显差异,故不作区分。核桃物料密度、含水率及质量测定结果分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 核桃物料密度

Table 1 Material density of walnut g/cm<sup>3</sup>

样本	范围	均值
1/2 仁、1/4 仁	0.93 ~ 0.96	0.95
1/8 仁、碎仁	0.95 ~ 0.98	0.97
核桃壳	0.82 ~ 0.92	0.88
分心木	0.52 ~ 0.68	0.59

表 2 核桃物料含水率

Table 2 Water content of walnut materials %

样本	范围	均值
核桃仁	3.75 ~ 4.28	3.93
核桃壳	7.46 ~ 8.13	7.84
分心木	11.26 ~ 12.06	11.64

表 3 核桃物料质量

Table 3 Mass of walnut materials g

样本	范围	均值
1/2 仁	3.02 ~ 5.97	4.44
1/4 仁	1.44 ~ 3.04	2.20
1/8 仁	0.36 ~ 1.56	0.76
碎仁	0.13 ~ 0.39	0.24
1/2 壳	1.27 ~ 2.67	2.03
1/4 壳	0.88 ~ 1.70	1.20
1/8 壳	0.33 ~ 0.97	0.64
碎壳	0.15 ~ 0.59	0.35
分心木	0.05 ~ 0.41	0.22

2.2 核桃物料悬浮速度理论计算

将测得的核桃物料物理参数代入悬浮速度计算公式,得到各等级核桃物料悬浮速度理论值,如表 4 所示。

表4 各等级核桃仁、壳悬浮速度理论值

Table 4 Theoretical value of suspension speed of walnut kernel and shell of each grade m/s

样本	分布区间	均值
1/2 仁	10.56 ~ 11.61	11.12
1/4 仁	9.47 ~ 10.57	10.05
1/8 仁	8.90 ~ 10.56	9.71
碎仁	8.52 ~ 10.17	9.39
1/2 壳	7.03 ~ 7.84	7.51
1/4 壳	6.64 ~ 7.34	6.96
1/8 壳	5.71 ~ 6.75	6.29
碎壳	5.03 ~ 6.25	5.71
分心木	3.69 ~ 5.15	4.57

由表4可知,核桃破壳后混合物料中1/2仁、1/4仁、1/8仁、碎仁、1/2壳、1/4壳、1/8壳、碎壳和分心木的悬浮速度理论值范围分别为10.56~11.61、9.47~10.57、8.90~10.56、8.52~10.17、7.03~7.84、6.64~7.34、5.71~6.75、5.03~6.25、3.69~5.15 m/s,破壳后的核桃混合物料中核桃仁的悬浮速度大于核桃壳的悬浮速度,说明核桃破壳后的混合物料适宜气力分选。

### 2.3 核桃物料悬浮速度试验结果

由于核桃物料为非球形颗粒,物料颗粒半径取其三轴几何平均径的1/2,核桃物料的三轴几何平均径测定值如表5所示。核桃悬浮速度试验结果如表6所示。

表5 各等级核桃仁、壳三轴几何平均径

Table 5 Three-axis geometric average diameter of walnut kernel and shell of each grade mm

样本	分布区间	均值
1/2 仁	22.53 ~ 28.45	25.45
1/4 仁	17.98 ~ 23.49	20.59
1/8 仁	9.61 ~ 15.22	12.18
碎仁	6.76 ~ 11.90	9.24
1/2 壳	25.51 ~ 31.53	29.04
1/4 壳	21.45 ~ 28.73	25.29
1/8 壳	13.94 ~ 22.53	18.95
碎壳	7.98 ~ 19.52	15.12
分心木	8.95 ~ 26.65	17.87

由表6可知,核桃物料中1/2仁、1/4仁、1/8仁、碎仁、1/2壳、1/4壳、1/8壳、碎壳、分心木的悬浮速度试验值范围分别为10.95~11.90、9.83~11.47、9.49~11.11、8.94~10.33、7.19~9.04、6.45~8.27、5.77~7.85、5.32~6.83、2.58~5.77 m/s。其中仅有碎仁与1/2壳悬浮速度有少量重叠区域,因此在破壳后产生碎仁较少的情况下,混合物

料可以不用分级直接进行壳仁风选,从而避免核桃分级过程中造成的物料损伤。

表6 各等级核桃仁、壳悬浮速度试验结果

Table 6 Experimental results on the suspension speed of walnut kernel and shell of each grade m/s

样本	分布区间	均值
1/2 仁	10.95 ~ 11.90	11.49
1/4 仁	9.83 ~ 11.47	10.57
1/8 仁	9.49 ~ 11.11	10.29
碎仁	8.94 ~ 10.33	9.54
1/2 壳	7.19 ~ 9.04	8.13
1/4 壳	6.45 ~ 8.27	7.41
1/8 壳	5.77 ~ 7.85	6.83
碎壳	5.32 ~ 6.83	5.94
分心木	2.58 ~ 5.77	4.50

对比表4、表6可知,核桃物料中除分心木理论值与试验值极其接近外,其余各等级核桃壳仁悬浮速度理论值均小于试验值,归因于核桃壳仁物料颗粒外形特征均为不规则形状颗粒,引入的形状修正系数存在一定误差,通过将试验获得的悬浮速度值代入公式(5)得到纠正后的核桃物料形状修正系数(见表7),该修正系数可为后续核桃物料悬浮速度研究人员提供参考。

表7 纠正后的各等级核桃仁、壳形状修正系数

Table 7 Shape correction coefficient of walnut kernel and shell after correction

样本	形状修正系数
1/2 仁	2.82
1/4 仁	2.71
1/8 仁	2.02
碎仁	1.72
1/2 壳	4.34
1/4 壳	4.48
1/8 壳	4.31
碎壳	4.67
分心木	6.17

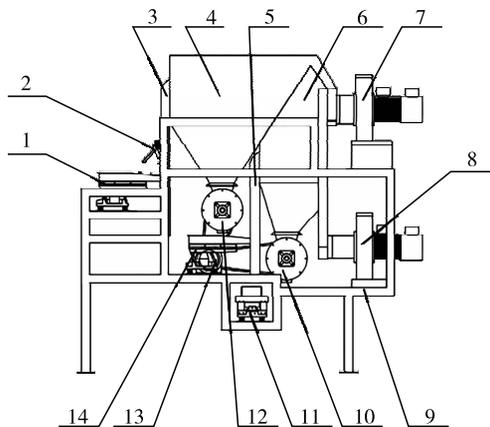
理论计算与试验得到的核桃物料悬浮速度与已有研究<sup>[8-9]</sup>存在一定差异,可能有以下原因:首先,用于研究的核桃品种不同,不同品种核桃之间具有不同的密度、几何尺寸和含水率等物理特性,上述因素又影响着核桃物料悬浮速度的大小;其次,破壳方式的不同也会使破壳后的核桃物料存在一定的形体差异,进而影响核桃物料的空气动力学特性;再次,选取的悬浮速度计算公式和形状修正系数不同,也会对核桃物料悬浮速度计算结果产生影响;最后,采用的悬浮速度测定试验装置和风速测试方法与已有

研究不同,也会产生不同的试验结果。

## 2.4 核桃壳仁风选设备设计及工作参数优化

### 2.4.1 核桃壳仁风选设备设计

在前期研究的基础上设计了核桃壳仁混合物料负压风选设备,如图6所示。



注:1. 振动喂料装置 I; 2. 调节机构; 3. 分离腔 I; 4. 沉积箱 I; 5. 分离腔 II; 6. 沉积箱 II; 7. 变频风机 I; 8. 变频风机 II; 9. 机架; 10. 闭风器 II; 11. 振动出壳装置; 12. 闭风器 I; 13. 电机; 14. 振动喂料装置 II

Note: 1. Vibration feeding device I; 2. Regulating mechanism; 3. Separation chamber I; 4. Deposit chamber I; 5. Separation chamber II; 6. Deposit chamber II; 7. Frequency conversion fan I; 8. Frequency conversion fan II; 9. Frame; 10. Closed fan II; 11. Vibration shell device; 12. Closed fan I; 13. Motor; 14. Vibration feeding device II

图6 核桃壳仁风选设备结构

Fig. 6 Structure of walnut shell-kernel air separation device

核桃壳仁风选设备由振动喂料装置 I、振动喂料装置 II、机架、第一风选系统、第二风选系统、振动出壳装置、电机等组成。第一、第二风选系统均包含分离腔、沉积箱、闭风器和变频风机,分离腔 I 上有调节机构可以控制入料口高度。本设备通过调节风机频率来改变第一、第二风选系统分离腔内的气流速度,以便让核桃混合物料在第一风选系统中将核桃仁选出,在第二风选系统内完成余下的核桃壳和分心木的分离。具体工作流程如下:将破壳后的核桃混合物料置于振动喂料装置 I 上,在振动作用下物料达到松散状态落入分离腔 I 内,由于核桃仁、核桃壳和分心木之间的悬浮速度差异,核桃仁所受气流速度小于其悬浮速度,因此核桃仁下降从分离腔底部落下收集,核桃壳和分心木所受气流速度大于其悬浮速度,在风力的作用下被吸入沉积箱 I 中,由于沉积箱 I 的体积急剧变大,核桃壳和分心木所受气流骤然减小,造成二者下降并经闭风器 I 落到振动喂料装置 II 上,在振动作用下被送入分离腔 II 内,

分离腔 II 气流速度小于壳的悬浮速度而大于分心木的悬浮速度,故核桃壳经分离腔 II 底部由振动出壳装置送出收集,分心木则被吸入沉积箱 II 中,最终从闭风器 II 落下收集。

风选设备内部气流由负压风机提供,风机选型对核桃壳仁风选设备分选效果尤为重要。按照结构不同,风机类型主要有离心式风机、轴流式风机、混流式风机和横流式风机 4 种。农作物清选分离一般选用离心式风机,其由叶轮、风阀、电机、出风口和进风口等构成<sup>[20]</sup>。根据核桃物料的空气动力学研究结果,分离腔内风速达到核桃壳的最大悬浮速度即 9.04 m/s 以上时,可实现核桃壳仁分离。当分离腔内气流速度一定时,通过流场模拟分析法,可以大致判断风选设备所需的风机风速,进而完成风机选型。经流场仿真分析发现,当设定风机出风口截面气流速度为 13.9 m/s 时,分离腔内壳仁分离区域速度为 9 m/s 左右,符合核桃壳仁风选分离要求。通过公式  $Q = 60VS$  ( $Q$  为风机流量,  $m^3/min$ ;  $V$  为风机风速,  $m/s$ ;  $S$  为风机出风口截面积,  $m^2$ ) 计算得到实现核桃壳仁分离所需的风机流量设计参数为 19.84  $m^3/min$ 。提高风机转速,风速增加,风机压力会降低,因此在选择风机时,额定参数至少要大于设计参数的 20%,从而保证风机的稳定运行。结合核桃物料空气动力学特性以及风选设备结构特征,选择离心式风机型号为 CX-100U/BP,功率 1.5 kW,流量 28  $m^3/min$ ,风机全压 2.05 kPa。

### 2.4.2 工作参数优化的单因素试验

通过改变喂料装置振动频率进而控制喂料速度,在风机频率 46 Hz、入料口高度 37 mm 条件下进行喂料速度的单因素试验;通过变频器实现对离心风机的变频调速,在喂料速度 5 kg/min、入料口高度 37 mm 条件下进行风机频率的单因素试验;通过风选设备调节机构对分离腔入料口高度进行调整,在喂料速度 5 kg/min、风机频率 46 Hz 条件下进行入料口高度的单因素试验,结果如图 7 所示。

由图 7 可知:随着喂料速度的增加,清选率呈下降趋势,损失率呈上升趋势,考虑到物料在清选过程中应同时兼顾工作效率和分选效果,喂料速度的优选范围为 4~6 kg/min;随着风机频率的增大,清选率和损失率均呈上升趋势,同时风机频率过大会导致能耗增加,综合考虑,风机频率的优选范围为 45~47 Hz;随着入料口高度的增加,清选率和损失率下降,且变化趋势略大于喂料速度和风机频率对清选率和损失率的影响,说明入料口高度对风选设备的

工作效果影响较大,为兼顾较好清选效果和较低物料损失,入料口高度的优选范围为34~40 mm。本试验设备为中小型分选机器,由于在各因素优选范

围内,损失率较低且均处于可接受范围内,因此在响应面试验中不再考虑损失率这一指标。

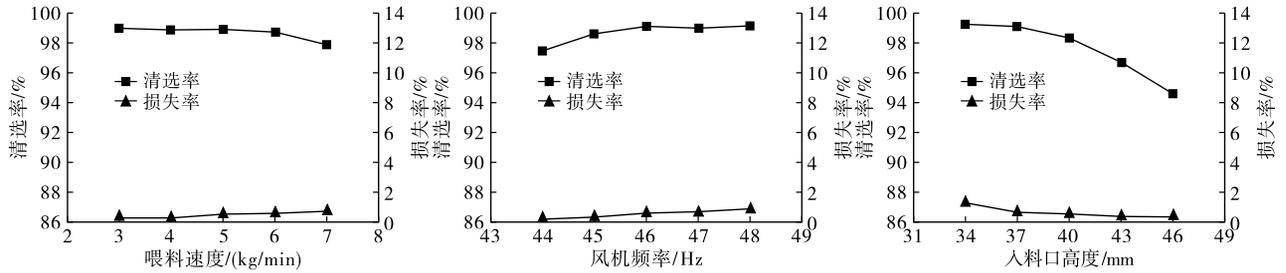


图7 单因素试验结果

Fig. 7 Results of the single factor test

2.4.3 工作参数优化的响应面试验

结合单因素试验结果,选取喂料速度、风机频率和入料口高度为因素,清选率( $P$ )为响应值,运用 Design - Expert 10.0 软件进行三因素三水平响应面试验设计<sup>[20]</sup>,响应面试验因素水平如表8所示,响应面试验设计及结果如表9所示,方差分析如表10所示。

表8 响应面试验因素水平

水平	A 喂料速度/ (kg/min)	B 风机 频率/Hz	C 入料口 高度/mm
-1	4	45	34
0	5	46	37
1	6	47	40

表9 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	清选率/%
1	0	0	0	99.07
2	0	-1	1	97.05
3	0	1	1	96.97
4	0	0	0	98.99
5	1	0	-1	99.12
6	-1	-1	0	97.98
7	0	0	0	98.89
8	1	1	0	97.94
9	1	-1	0	97.09
10	1	0	1	96.28
11	0	0	0	99.28
12	-1	0	-1	98.94
13	0	-1	-1	98.73
14	-1	0	1	97.88
15	-1	1	0	98.27
16	0	0	0	98.94
17	0	1	-1	99.04

表10 方差分析

Table 10 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	13.66	9	1.52	51.91	< 0.000 1
A	0.87	1	0.87	29.80	0.000 9
B	0.23	1	0.23	8.03	0.025 3
C	7.32	1	7.32	250.22	< 0.000 1
AB	0.08	1	0.08	2.68	0.145 5
AC	0.79	1	0.79	27.09	0.001 2
BC	0.04	1	0.04	1.30	0.291 6
A <sup>2</sup>	1.29	1	1.29	44.08	0.000 3
B <sup>2</sup>	1.84	1	1.84	62.88	< 0.000 1
C <sup>2</sup>	0.76	1	0.76	26.11	0.001 4
残差	0.20	7	0.03		
失拟项	0.11	3	0.04	1.59	0.324 3
误差	0.09	4	0.02		
总和	13.86	16			

运用 Design - Expert 10.0 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合,得到回归方程:  $P = 98.46 - 0.33A + 0.17B - 0.96C + 0.14AB - 0.45AC - 0.10BC - 0.55A^2 - 0.66B^2 - 0.43C^2$ 。

由表10可知,模型  $p$  值小于 0.01,说明清选率回归模型极显著,失拟项的  $p$  值大于 0.05,说明失拟项不显著,回归模型在试验范围内拟合程度高。模型的相关系数 ( $R^2$ ) 为 0.985 2,表明该模型具有较高的可靠性,能解释 98% 以上的响应值变化。因此,该模型可以用于工作参数优化。比较各因素  $F$  值大小可知,对清选率影响最大的因素是入料口高度,其次为喂料速度,风机频率影响最小。方差来源中 A、C、AC、A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>、C<sup>2</sup> 对回归模型影响极显著 ( $p < 0.01$ ),B 影响显著 ( $p < 0.05$ ),其余项影响不显著。剔除影响不显著的回归项对回归模型进行优化,得到简化后的回归方程:  $P = 98.46 - 0.33A + 0.17B - 0.96C - 0.45AC - 0.55A^2 - 0.66B^2 - 0.43C^2$ 。

使用 Design - Expert 10.0 软件优化求解功能,得到试验水平范围内的最佳工作参数组合为喂料速度 4.50 kg/min、风机频率 46.07 Hz、入料口高度 34.50 mm,此参数下的预测清选率为 99.39%。为保证最优工作参数的可行性,将工作参数修正为喂料速度 5 kg/min、风机频率 46 Hz、入料口高度 34 mm,使用同品种、同批次破壳的核桃作为试验样本进行 3 次重复试验,得到清选率平均值为 99.32%,损失率平均值为 1.03%,验证值与预测值相对误差较小,说明响应面模型可靠,试验结果较为理想。

### 3 结 论

(1)破壳后的核桃混合物料中核桃仁、核桃壳和分心木的平均含水率分别为 3.93%、7.84% 和 11.64%,核桃仁的密度大于核桃壳的密度,远大于分心木的密度,同等级核桃仁的质量大于核桃壳的质量。

(2)核桃混合物料中 1/2 仁、1/4 仁、1/8 仁、碎仁、1/2 壳、1/4 壳、1/8 壳、碎壳、分心木的悬浮速度理论值变化范围分别为 10.56 ~ 11.61、9.47 ~ 10.57、8.90 ~ 10.56、8.52 ~ 10.17、7.03 ~ 7.84、6.64 ~ 7.34、5.71 ~ 6.75、5.03 ~ 6.25、3.69 ~ 5.15 m/s,试验值的变化范围分别为 10.95 ~ 11.90、9.83 ~ 11.47、9.49 ~ 11.11、8.94 ~ 10.33、7.19 ~ 9.04、6.45 ~ 8.27、5.77 ~ 7.85、5.32 ~ 6.83、2.58 ~ 5.77 m/s。其中仅有碎仁与 1/2 壳悬浮速度有少量重叠区域,因此在破壳后产生碎仁较少的情况下,混合物料可以不用分级直接进行壳仁风选,从而避免核桃分级过程中造成的物料损伤。

(3)依据核桃物料悬浮速度设计了核桃壳仁风选设备,通过单因素试验和响应面试验优化得到该风选设备的最佳工作参数组合为喂料速度 5 kg/min、风机频率 46 Hz、入料口高度 34 mm,在此条件下清选率为 99.32%,损失率为 1.03%。

### 参考文献:

[1] 曹亚龙. 新时期我国核桃产业发展现状、问题及对策 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.

[2] MIR G M, NISAR O, IQBAL U. Scientific processing of walnuts necessary for amazing health benefits[J]. J Chem Chem Sci, 2016, 6: 783 - 793.

[3] 王冰, 裴新民, 李忠新, 等. 我国核桃初加工现状及发展前景的分析研究[J]. 中国农机化, 2010, 31(5): 43 -

45, 49.

[4] 张旋, 孟佳, 史宣明, 等. 核桃壳仁分离技术的应用现状[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 137 - 140.

[5] LI H C, LI Y M, GAO F, et al. CFD - DEM simulation of material motion in air - and - screen cleaning device[J]. Comput Electron Agric, 2012, 88:111 - 119.

[6] ROMBERG F B. Process and apparatus for separating nut meats and shells;US2216050[P]. 1938 - 09 - 24.

[7] 张永成, 马佳乐, 唐玉荣, 等. 一种集干燥一体的核桃破壳机: CN111955754B[P]. 2021 - 05 - 07.

[8] 王维, 王亚妮, 卢军党, 等. 核桃破壳后各级物料悬浮速度的试验研究[J]. 农业技术与装备, 2020(11): 5 - 6, 8.

[9] 曹成茂, 罗坤, 彭美乐, 等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 105 - 112.

[10] 朱占江, 康敏, 刘奎, 等. 核桃及其机械破壳后主要组分悬浮速度理论计算与试验研究[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(4): 610 - 618.

[11] 牛浩. 核桃壳仁分离装置设计及试验研究[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2020.

[12] 李昊. 基于 CFD - DEM 耦合的核桃风选研究[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2022.

[13] 董远德, 张学军, 史建新. 核桃壳仁风选机的设计与试验研究[J]. 农业机械, 2012(24): 156 - 158.

[14] 胡国玉, 陈旭东, 董娅兰, 等. 核桃壳仁混合物风选机工作参数优化与试验[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 83 - 88.

[15] 李忠新, 刘奎, 杨莉玲, 等. 锥篮式核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 146 - 152.

[16] KARA M, BASTABAN S, ÖZTÜRK I, et al. Moisture - dependent frictional and aerodynamic properties of safflower seeds[J]. Int Agrophys, 2012, 26(2): 203 - 205.

[17] 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.

[18] 上海海运学院起重运输机械教研组气力运输小组. 气力输送中悬浮速度的理论与实践[J]. 化学工程, 1977, 5(6): 1 - 18.

[19] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[20] LIANG Z, XU L, DE BAERDEMAEKER J, et al. Optimisation of a multi - duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments [J]. Biosyst Eng, 2020, 190: 25 - 40.