

核桃壳仁混合物风选机工作参数优化与试验

Optimization and experiments on working parameters of winnowing machine for walnut shell and kernel mixture

胡国玉 陈旭东 董娅兰 刘广 周建平

HU Guo-yu CHEN Xu-dong DONG Ya-lan LIU Guang ZHOU Jian-ping

(新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830017, China)

摘要:目的:提高核桃壳仁混合物清选效率,减少损失。

方法:研制了一款小型负压式核桃壳仁风选机。基于清选率与损失率 2 个分离效果指标,采用单因素试验和响应曲面法优化风选机的工作参数。**结果:**对于 1/2 壳仁、1/4 壳仁、1/8 壳仁、1/16 壳仁物料的最优工作参数:喂料速度分别为 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 kg/min; 风机频率分别为 40, 35, 30, 30 Hz; 进料口高度分别为 400, 400, 300, 300 mm。从不同等级的核桃壳仁物料分离效果可以看出, 1/2 壳仁物料, 1/4 壳仁物料的分离效果最佳, 但对于 1/8 和 1/16 较小壳仁物料其悬浮速度重合区间大。**结论:**通过控制风选机的工作参数可以有效地实现壳仁分离, 但较小颗粒的壳仁物料悬浮速度重合区间大, 分离难度大。

关键词:核桃; 壳仁分离; 负压式风选机; 工作参数; 优化方法

Abstract: Objectives: To meet the requirements of high cleaning rate and low loss rate. **Methods:** A small negative pressure winnowing machine for walnut shell and kernel mixtures was developed. Single factor test and response surface optimization method were used to analyze the working parameters of winnowing machine based on such two separation effect indicators as cleaning rate and loss rate. **Results:** For 1/2 shell kernel, 1/4 shell kernel, 1/8 shell kernel and 1/16 shell kernel materials, the optimal feeding rates were 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 kg/min, the fan frequencies were 40, 35, 30, 30 Hz, the feeding inlet heights were 400, 400, 300, 300 mm, respectively. It was seen from the separation effect of different grades of walnut shell materials that 1/2 and 1/4 shell kernel materials had the best separation effect. **Conclusion:** Shell and kernel separation can be effectively realized

by controlling the working parameters of winnowing machine. It is difficult to separate 1/8 and 1/16 shell kernel materials for the overlapping range of suspension speed of shell and kernel materials.

Keywords: walnut; shell kernel separation; negative pressure winnowing machine; working parameters; optimization method

核桃是世界上主要的坚果和木本粮油树种,其营养价值与药用价值已被广泛认可^[1-2]。近年来,随着核桃产业的发展,核桃精深加工产品如核桃坚果、核桃露、核桃油胶囊等需求增加,因此对核桃精深加工产业配套的加工设备的设计与制造提出了严格的要求。核桃初、深加工前的工序主要包括核桃去青皮、烘干、破壳、壳仁混合物分级、壳仁分离以及核桃仁色选等。其中破壳后核桃壳仁分级与壳仁分离工序是获得干净核桃仁的关键环节,选择合适的核桃壳仁分离方法,减少加工成本,增加核桃精深加工产品的附加值对核桃产业发展具有重大意义。在核桃精深加工过程中,核桃经过破壳、分级,得到 1/2 壳仁混合物料、1/4 壳仁混合物料、1/8 壳仁混合物料以及 1/16 壳仁物料与碎料等^[3-5],实现核桃壳仁混合物的分离是获取核桃仁的关键环节。气流壳仁分离法是根据核桃壳与仁悬浮速度的差异实现核桃壳仁分离。董远德等^[6]设计了核桃壳仁分离装置,采用正交试验确定了最优参数,对新新 2 和扎 343 等不同品种核桃进行了验证,均达到了指标;牛浩^[7]设计了正压送风式的核桃壳仁分离装置,探究了各工作参数对壳仁分离效果的影响,最后得到了最佳工作参数组合。李忠新等^[8-9]对核桃壳仁分离加工的成套设备的运行参数进行了研究,利用单因素法确定了各影响因素的优化区间,然后利用正交试验确定了不同等级的核桃壳仁的工作运行参数,并进行了验证。

在前期研究^[10]的基础上,拟设计一款小型负压式风

基金项目:新疆维吾尔自治区创新团队项目(编号:2022D14002)

作者简介:胡国玉(1977—),女,新疆大学副教授,博士。

E-mail: xjhuguoyu@xju.edu.cn

收稿日期:2022-08-22 **改回日期:**2023-03-13

选核桃壳仁分离设备,并对该设备的工作参数进行优化,以期为其他农业类物料精选设备的工作参数优化提供参考。

1 核桃壳仁混合物风选原理

核桃壳仁混合物负压风选装置如图 1 所示,核桃壳仁混合物负压风选装置主要由进料口、出仁口、分离腔、负压风机、支架、沉降箱、卸料箱等部分组成。分离腔主要由核桃仁沉降区、壳仁分离区和气流稳定区三部分组成,沉降箱端安装有负压吸风式风机与卸料器,卸料箱内部设置有挡料调风板。核桃壳仁混合物从进料口落入分离腔内,由于核桃壳与仁之间悬浮速度的差异,核桃仁所受的浮力小于自身重力,从分离腔内落下,核桃壳所受浮力大于自身重力,在风力的作用下进入流动区,流入卸料箱,由于卸料箱空间面积的急剧扩大,所受浮力减小,落入卸料箱底部,由星型卸料器收集。

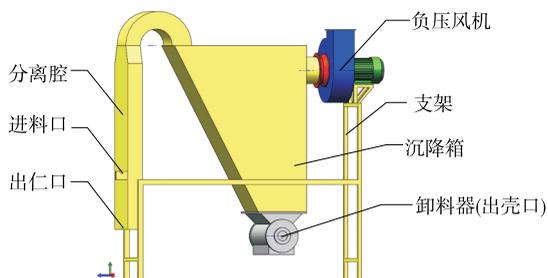


图 1 风选机模型图

Figure 1 The model of winnowing machine

2 试验方案与结果分析

2.1 试验材料与设备

核桃壳仁混合物负压风选机由物料输送系统与壳仁分离系统组成。原核桃物料经过一次破壳、二次破壳、振动分级等工序得到不同等级的核桃壳仁混合物,如图 2 所示。试验物料等级选用 1/2 核桃壳仁物料。

2.2 试验指标

为了检测设计的核桃壳仁混合物负压风选装置的工作性能,采用核桃仁清选率 y_1 与损失率 y_2 作为试验指



图 2 核桃壳仁混合物组成

Figure 2 The walnut shell kernel mixture

标,其计算公式:

$$y_1 = \frac{m_{1r}}{m_{1总}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{m_{2r}}{m_{r总}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

y_1 ——核桃仁清选率, %;

y_2 ——损失率, %;

m_{1r} ——出仁口收集的核桃仁质量, kg;

$m_{1总}$ ——出仁口收集的所有物料之和, kg;

m_{2r} ——出壳口收集到的核桃仁质量, kg;

$m_{r总}$ ——试样中核桃仁的总量, kg。

2.3 单因素试验结果与分析

选定风选机核桃壳仁混合物的喂料速度、风机频率和进料口高度 3 个因素,以核桃仁清选率和损失率作为核桃壳仁混合物分离效果指标,进行单因素试验。

2.3.1 喂料速度对壳仁分离效果的影响 采用控制物料传送带的转速从而达到控制喂料速度的大小。在风机频率为 40 Hz,测得进风口 1 的风速为 11.4 m/s,进风口 2 的风速为 10.1 m/s,进料口高度为 300 mm 的条件下进行单因素试验,试验结果如图 3(a)所示。随着单位时间内喂料速度的增加,核桃壳仁混合物的清选率呈下降趋势,而损失率呈上升趋势。当喂料速度为 4~6 kg/min 时,清选率有缓慢的下降,损失率也有一定的增加,但趋势相对平缓。综合考虑,喂料速度的优选范围为 4~6 kg/min。

2.3.2 风机频率对壳仁分离效果的影响 采用调速器对离心风机实现变频调速,在喂料速度为 5 kg/min,进料口高度为 300 mm 的条件下进行风速单因素试验,结果如图 3(b)所示。随着频率的增加,风机转速增加,风速增加,壳仁清选率与损失率都有一定程度的增加,当频率为 40 Hz 时,清选率达到最大,且损失率也保持在 1%之内,所以选定风机频率范围为 30~40 Hz。

2.3.3 进料口高度对壳仁分离效果的影响 通过设计的调高装置来调整进料口高度,在喂料速度为 5 kg/min,风机频率为 40 Hz 时对进料口高度进行单因素试验,试验结果如图 3(c)所示。随着进料口高度的增加,壳仁清选率与损失率呈先增长后减小的趋势,总体影响效果不明显。主要原因是随着进料口高度的增加,气流在分离腔分布更加均匀,所以清选率有一定的增加,但是趋势相对平缓。综合考虑,进料口高度的优选范围为 300~400 mm。

2.4 响应面试验

2.4.1 试验设计 采用 Design-Expert 13 软件完成三因素三水平和两类响应指标的响应面法试验设计、数据处理和统计分析^[11],试验因素与水平如表 1 所示。

2.4.2 试验结果 试验的设计方案与结果如表 2 所示。

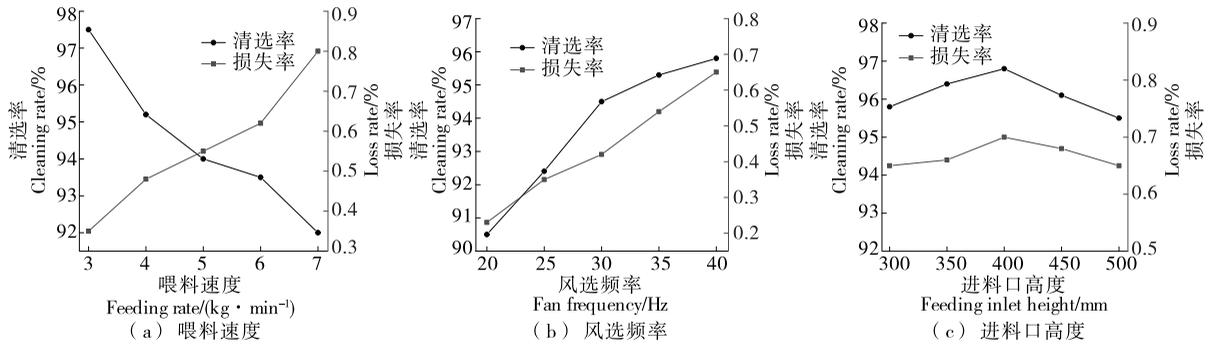


图3 各因素性能指标的影响

Figure 3 The influence of various factors on performance indicators

表1 响应面试验因素与水平

Table 1 Response surface test factors and level

水平	X ₁ 喂料速度/ (kg · min ⁻¹)	X ₂ 风机频率/ Hz	X ₃ 进料口高度/ mm
-1	4	30	300
0	5	35	350
1	6	40	400

2.4.3 回归模型建立与显著性分析 通过 Design-Expert 13 软件对表 2 中的试验数据进行分析计算并构建二次多项式响应面回归模型:

$$Y_1 = 81.3285 + 4.1575X_1 - 0.1747X_2 - 0.00003X_3 - 0.0350X_1X_2 - 0.0030X_1X_3 - 0.00048X_2X_3 - 0.2240X_1^2 + 0.00304X_2^2 + 0.000056X_3^2, \quad (3)$$

$$Y_2 = -2.71525 + 0.49625X_1 + 0.025450X_2 + 0.0072X_3 - 0.0075X_1X_2 - 0.0008X_1X_3 - 0.00008X_2X_3 + 0.01225X_1^2 + 0.00069X_2^2 - 0.00001X_3^2. \quad (4)$$

由表 3 可知,清选率、损失率响应面模型的 P 值均小于 0.01,表明该模型极显著。清选率、损失率响应面失拟

项的 P 值分别为 0.352,0.389,均大于 0.05,说明失拟项不显著,表明回归模型在试验范围内拟合程度高;清选率、损失率两个模型的相关系数 R^2 值分别为 95.59%, 95.22%,表明 95% 以上的响应值均可以使用该模型解释。因此,该模型可以预测分析核桃壳仁风选机的工作参数。

清选率响应面模型中的 X_1 、 X_2 、 X_3 对模型影响极显著, X_1X_2 、 X_1^2 对模型影响显著;损失率响应面模型中的 X_1 、 X_2 对模型影响极显著, X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 对模型影响显著。在保证模型 $P < 0.01$,失拟项 $P > 0.05$ 的基础上,剔除对模型影响不显著的其他回归项,对回归模型进行优化,如式(5)、式(6)所示。

$$Y_1 = 81.3285 + 4.1575X_1 - 0.1747X_2 - 0.00003X_3 - 0.0350X_1X_2 - 0.2240X_1^2, \quad (5)$$

$$Y_2 = -2.71525 + 0.49625X_1 + 0.025450X_2 + 0.0072X_3 - 0.0075X_1X_2 - 0.0008X_1X_3. \quad (6)$$

2.4.4 各因素对清选率与损失率影响效应分析 由表 3 中的 F 值可知,各因素对清选率的贡献率大小顺序为进料口高度>喂料速度>风机频率,各因素对损失率的贡献率大小顺序为喂料速度>风机频率>进料口高度。

表2 响应面试验因素与水平

Table 2 Response surface test factors and level

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	清选率 Y ₁ /%	损失率 Y ₂ /%	试验号	X ₁	X ₂	X ₃	清选率 Y ₁ /%	损失率 Y ₂ /%
1	-1	0	1	96.71	0.65	10	0	0	0	95.91	0.62
2	1	-1	0	95.48	0.75	11	-1	-1	0	95.86	0.50
3	1	1	0	95.49	0.78	12	0	0	0	95.86	0.65
4	0	-1	1	96.54	0.68	13	1	0	-1	95.42	0.75
5	0	-1	-1	95.36	0.59	14	1	0	1	95.71	0.70
6	0	1	-1	96.13	0.69	15	0	0	0	96.04	0.63
7	-1	0	-1	95.82	0.54	16	0	0	0	96.20	0.68
8	-1	1	0	96.57	0.68	17	0	1	1	96.83	0.70
9	0	0	0	95.98	0.66						

表 3 回归方程方差分析[†]

Table 3 Regression equation analysis of variance

方差来源	清选率				损失率			
	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值
模型	3.160 0	9	16.87	0.000 6**	0.078 9	9	13.63	0.001 2**
X ₁	1.020 0	1	49.08	0.000 2**	0.046 5	1	80.61	<0.000 1**
X ₂	0.396 1	1	19.01	0.003 3**	0.013 6	1	27.58	0.002 5**
X ₃	1.170 0	1	56.18	0.000 1**	0.003 2	1	6.37	0.039 6*
X ₁ X ₂	0.122 5	1	5.88	0.045 8*	0.005 6	1	9.68	0.021 2*
X ₁ X ₃	0.090 0	1	4.32	0.076 3	0.006 4	1	10.75	0.016 1*
X ₂ X ₃	0.057 6	1	2.76	0.140 3	0.001 6	1	2.49	0.158 9
X ₁ ²	0.211 3	1	10.14	0.015 4*	0.000 6	1	0.46	0.354 8
X ₂ ²	0.024 3	1	1.17	0.315 8	0.001 3	1	1.31	0.205 6
X ₃ ²	0.083 7	1	4.02	0.085 0	0.000 1	1	0.05	0.984 4
残差	0.145 8	3			0.004 5	7		
失拟	0.076 1	3	1.46	0.352 2	0.002 2	3	1.23	0.438 7
误差	0.069 7	4			0.002 3	4		
总和	3.310 0	16			0.083 4	16		

[†] P<0.01(极显著**);P<0.05(显著*).

2.4.5 交互因素对性能影响规律分析 根据回归方程分析结果,分析喂料速度、风机频率、进料口高度交互因素对清选率、损失率性能指标的影响。

(1) 多因素对清选率的影响效应分析:如图 4(a)所示,当进料口高度位于中心水平(350 mm)时,清选率同喂料速度、风机频率呈非线性变化,增大风机频率和减少喂料速度有利于提高清选率。喂料速度为 4 kg/min,随着风机频率的增加,清选率呈增长趋势,当风机频率达到 40 Hz 时,核桃壳仁清选率达到峰值。如图 4(b)所示,当风机频率位于中心水平(35 Hz)且喂料速度一定时,随着进料口高度的增加,壳仁清选有明显的提高,主要原因是进料口高度增加,分离腔内部流场分布更加均匀,壳仁风选效果更好。如图 4(c)所示,当喂料速度位于中心水平(5 kg/min)且风机频率一定时,随着进料口高度的增加,

核桃壳仁清选率增加,但响应曲面图总体趋于平稳。

总体来看,喂料速度越小,风机频率增加,风速越高,进料口高度增加,则清选率越高。其原因是当喂料速度减少时,壳仁颗粒间隙增大,气流流速增大,增加了清选率;当风机频率增加时,分离腔内风速增加,核桃壳受到的风速超过其悬浮速度,因此清选率增加;当进料口高度增加时,分离腔内气流分布均匀性增加,颗粒受到气流的作用力更加稳定,因此清选率更高。

(2) 多因素损失率的影响效应分析:如图 5(a)所示,当进料口高度位于中心水平(350 mm)时,损失率同喂料速度、风机频率呈非线性变化,降低风机频率和减少喂料速度有利于降低损失率,当喂料速度为 4 kg/min,随着风机频率的增加,损失率呈增长趋势,当风机频率达到 40 Hz 时,随着喂料速度的增加,核桃仁损失率有缓慢增

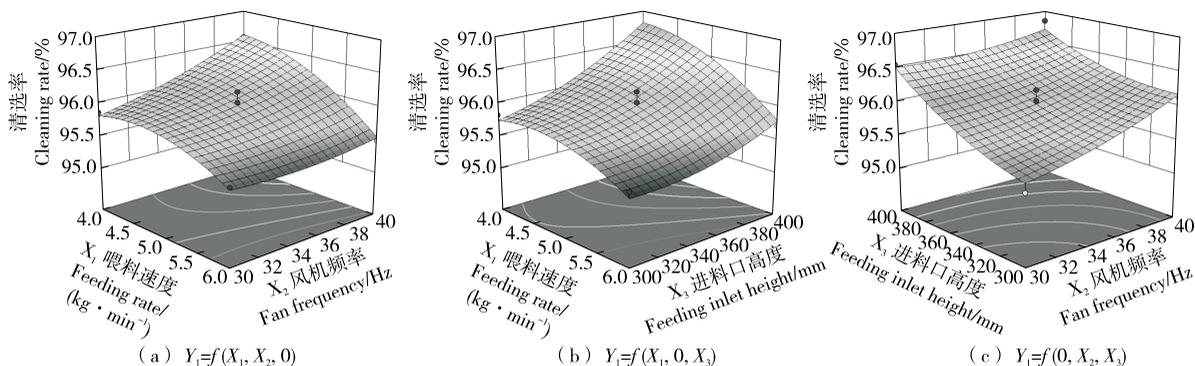


图 4 交互因素对清选率的影响

Figure 4 The influence of interaction factors on the cleaning rate

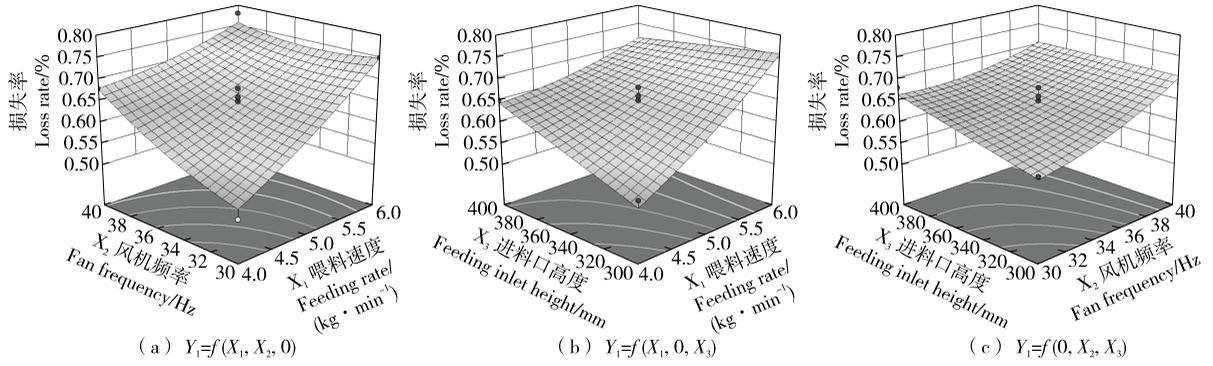


图5 交互因素对损失率的影响

Figure 5 The influence of interaction factors on the loss rate

加趋势。如图 5(b) 所示,当风机频率位于中心水平(35 Hz)且喂料速度为 4 kg/min 时,随着进料口高度的增加,损失率有缓慢增加趋势,而喂料速度为 6 kg/min 时,随着进料口高度的增加,损失率有减少趋势。如图 5(c) 所示,当喂料速度位于中心水平(5 kg/min)且风机频率一定时,随着进料口高度的增加,核桃仁损失率变化效果不明显,有缓慢的增长趋势,响应曲面图总体趋于平稳。

2.5 参数优化与验证

2.5.1 参数优化 针对核桃壳仁的清选率高、损失率小的要求,通过 Design-Expert 13 软件针对 1/2 壳仁物料进行核桃壳仁风选机工作参数优化。当喂料速度为 4 kg/min,风机频率为 40 Hz,进料口高度为 400 mm 时,其清选率为 96.60%、损失率为 0.60%,试验指标达到最优工作参数值。

2.5.2 验证实验 为验证响应面模型和优化后的工作参数可靠性,将上述优化后的工作参数进行修正,喂料速度为 4 kg/min,风机频率为 40 Hz,进料口高度为 400 mm。试验优化前的机器一般调试参数为对照组:喂料速度为 6 kg/min,风机频率为 40 Hz,进料口高度为 350 mm。在核桃壳仁风选机试验平台进行 3 次重复验证实验,结果如表 4 所示。

经验证,清选率和损失率的验证值与预测值相对误差较小,分别为 0.32% 和 0.08%,则响应面优化模型可靠,试验效果较为理想。同对照组相比,清选率提升 0.79%,损失率降低 0.06%。最终工作优化参数为喂料速度 4 kg/min,风机频率 40 Hz,进料口高度 400 mm。

参照 1/2 壳仁物料试验,采用相同的方法确定其他等级的壳仁混合物的最优工作参数。通过试验,1/4 壳仁、1/8 壳仁、1/16 壳仁物料的优化工作参数:喂料速度分别为 3.5, 3.0, 2.5 kg/min; 风机频率分别为 35, 30, 30 Hz; 进料口高度分别为 400, 300, 300 mm。其中 1/16 壳仁分离效果提升效果不明显。

从不同等级的核桃壳仁物料分离效果可以看出,1/2

表 4 各等级壳仁风选效果

Table 4 Regression equation analysis of variance

试验材料	清选率/%			损失率/%		
	预测值	验证值	对照值	预测值	验证值	对照值
1/2 壳仁	96.60	96.28	95.49	0.60	0.68	0.74
1/4 壳仁	95.58	96.50	95.26	0.79	0.73	0.92
1/8 壳仁	96.20	94.78	94.33	0.86	0.83	0.98
1/16 壳仁	93.88	93.46	93.22	0.99	1.19	1.26

壳仁物料,1/4 壳仁物料的分选效果最佳,其主要原因是较大颗粒的壳仁物料悬浮速度差异较大,通过控制风选机的工作参数可以有效地实现 1/2 和 1/4 壳仁物料的分选,但对于 1/8 和 1/16 较小壳仁物料其悬浮速度重合区间大,分离难度增加,从而影响分选效果。

3 结论

研究设计了一种小型负压垂直气流风选机,并针对分级后的 1/2 壳仁、1/4 壳仁、1/8 壳仁以及 1/16 壳仁物料采用单因素试验分析了喂料速度、风机频率和进料口高度 3 个工作参数对壳仁分离效果的影响,并运用响应曲面试验优化风选机的工作参数。结果表明,1/2 壳仁、1/4 壳仁、1/8 壳仁、1/16 壳仁物料的优化工作参数:喂料速度分别为 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 kg/min; 风机频率分别为 40, 35, 30, 30 Hz; 进料口高度分别为 400, 400, 300, 300 mm。通过控制风选机的工作参数可以有效地实现壳仁分离,但较小颗粒的壳仁物料悬浮速度重合区间大,分离难度大。

目前该风选机针对单一品种分级后的壳仁混合物有较好的分选效果,但是对于多品种、不同等级壳仁混合物的分选效果存在适应性差、自动化及智能化水平低等问题。后续需要根据风选机自动控制要求分析不同品种、不同等级的核桃壳仁物理和流场特性,进一步对影响壳仁分离效果的控制参数进行分析,确定控制参数范围,实现自动化控制。

参考文献

- [1] 王力荣. 我国桃产业现状与发展建议[J]. 中国果树, 2021(10): 1-5.
WANG L R. Current situation and development suggestions of peach industry in China[J]. China Fruits, 2021(10): 1-5.
- [2] 邓金龙. 我国核桃生产现状及发展策略[J]. 林产工业, 2016, 43(10): 56-58.
DENG J L. Current situation and development strategy of walnut industry in China[J]. China Forest Products Industry, 2016, 43(10): 56-58.
- [3] 刘明政, 李长河, 曹成茂, 等. 核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术与装置研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 294-310.
LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Research progress of key technology and device for size-grading shell-breaking and shell-kernel separation of walnut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 294-310.
- [4] 马佳乐, 唐玉荣, 张永成, 等. 坚果壳仁分离的研究现状与分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(2): 263-268.
MA J L, TANG Y R, ZHANG Y C, et al. Research status and analysis of nut shell and kernel separation [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2): 263-268.
- [5] 刘佳, 沈晓贺, 杨莉玲, 等. 核桃破壳技术与装备研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 223-227, 232.
LIU J, SHEN X H, YANG L L, et al. Research progress of walnut hulling technology and equipment[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 223-227, 232.
- [6] 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.
DONG Y D, ZHANG X J, SHI J X. Design and experimental study of walnut shell kernel wind separator [J]. Farm Machinery, 2012(24): 156-158.
- [7] 牛浩. 核桃壳仁分离装置设计及试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020: 1-10.
NIU H. Experimental study and design of separation device of walnut shell and kernel[D]. Aral: Tarim University, 2020: 1-10.
- [8] 李忠新, 杨军, 杨莉玲, 等. 核桃破壳、壳仁分离生产线的研发[J]. 新疆农机化, 2010(4): 16-17.
LI Z X, YANG J, YANG L L, et al. Research and development of walnut shell breaking and shell kernel separation production line[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2010(4): 16-17.
- [9] 朱占江, 康敏, 刘奎, 等. 核桃壳仁混合物料气流分离系统的试验研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(3): 137-142.
ZHU Z J, KANG M, LIU K, et al. Experimental study on airflow separation system of walnut shell and kernel mixed materials[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(3): 137-142.
- [10] 陈旭东, 胡国玉, 赵腾飞, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的核桃壳仁混合物负压风选仿真研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1 017-1 027.
CHEN X D, HU G Y, ZHAO T F, et al. Simulation study on negative pressure winnowing of walnut kernel mixture based on CFD-DEM coupling [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(6): 1 017-1 027.
- [11] 张德高, 谢焕雄, 胡志超, 等. 花生色选机工作参数优化与试验[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 218-222.
ZHANG D G, XIE H X, HU Z C, et al. Peanut color sorter working parameter optimization and test[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(18): 218-222.
- [12] 顾强, 田建平, 黄丹, 等. 回转式多工位压曲机设计参数的研究[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 211-215.
GU Q, TIAN J P, HUANG D, et al. Study on design parameters of rotary multi position press[J]. The Food Industry, 2019, 40(2): 211-215.
- [13] 王虹艳, 李永康, 廉自生, 等. 基于凸轮曲线的阀配流柱塞泵输出特性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 32-37.
WANG H Y, LI Y K, LIAN Z S, et al. Analysis of output characteristics of valve-distribution piston pump based on cam curve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 32-37.
- [14] 高剑, 田建平, 王开铸, 等. 多工位压曲机压制大曲成型工艺优化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 172-179.
GAO J, TIAN J P, WANG K Z, et al. Optimization of molding process of Daqu's multi position press[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 172-179.
- [15] 顾强, 田建平, 杨海粟, 等. 多工位柔性压曲机锤头设计与压曲过程仿真分析[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 246-250.
GU Q, TIAN J P, YANG H L, et al. Multi-station flexible bending press hammer design and simulation analysis of buckling process [J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 246-250.
- [16] 刘昌祺, 刘庆立, 蔡昌蔚. 自动机械凸轮机构实用设计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LIU C Q, LIU Q L, CAI C W. Practical design manual of automatic mechanical cam mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [17] 王鹏, 赵永杰, 禹潇钰, 等. 金属桶生产线中凸轮运动规律曲线的优化设计[J/OL]. 计算机集成制造系统. (2022-06-21) [2022-06-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220620.1755.004.html>.
WANG P, ZHAO Y J, YU X Y, et al. Optimal design of the cam motion curves in metal bucket production line[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems. (2022-06-21) [2022-06-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220620.1755.004.html>.

(上接第 82 页)