doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.008

双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机参数优化与试验

戴　飞[1]　赵武云[1]　付秋峰[2]　宋学锋[1]　史瑞杰[1]　李彦伟[2]

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 酒泉奥凯种子机械股份有限公司, 酒泉 735000)

摘要: 为进一步优化提升双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机的工作性能,基于实际试验方法与离散元仿真分析对样机主要工作参数进行了单因素试验,以选取的筛箱振动频率、前风道风量调节挡位和后风道风量调节挡位为自变量,以籽粒含杂率和清选损失率为响应值,按照 Box－Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应曲面分析方法分别建立了各试验因素与籽粒含杂率、清选损失率之间的数学模型,并对各因素及其交互作用进行分析。结果表明:选取的 3 个因素对籽粒含杂率、清选损失率影响的主次顺序均为筛箱振动频率、前风道风量调节挡位、后风道风量调节挡位,作业机最佳工作参数为筛箱振动频率 2 Hz、前风道风量调节挡位 2、后风道风量调节挡位 4.5。验证试验表明,籽粒含杂率均值为 0.98% 、清选损失率均值为 2.66% ,说明通过优化工作参数可降低胡麻脱粒物料在机械化分离清选过程中的含杂与损失,其作业效果较单一气流分离清选方式有显著改善。

关键词: 胡麻脱粒物料; 双风道; 风筛式; 分离清选机; 参数优化

中图分类号: S225.99　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)07-0083-10　　**OSID**:

Parameter Optimization and Experiment on Double Duct System of Air-screen Separating and Cleaning Machine for Flax Threshing Material

DAI Fei[1]　ZHAO Wuyun[1]　FU Qiufeng[2]　SONG Xuefeng[1]　SHI Ruijie[1]　LI Yanwei[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Jiuquan OK Seed Machinery Co., Ltd., Jiuquan* 735000, *China*)

Abstract: Flax is one of the important oil crops in Northwest China, and Gansu Province is one of the main producing areas of flax. To enhance the mechanization level of separating and cleaning of flax threshing materials, a double duct system of air-screen separating and cleaning machine was designed for flax threshing material. For further study of the improved working performance of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material, the single factor parameters obtained with the analysis were determined by practical test method and discrete element simulation, the Box－Behnken experimental design with three factors and three levels was performed, parameters such as vibration frequency of screen box, air volume adjustment gear in front duct and air volume adjustment gear in rear duct were selected as independent variables, which could influence the seed impurity rate and the cleaning loss rate. The mathematical model was established, and then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The test results showed that effects orders of three parameters on the seed impurity rate and the cleaning loss rate were as follows: vibration frequency of screen box, air volume adjustment gear in front duct and air volume adjustment gear in rear duct. The optimal working parameters were as follows: the vibration frequency of screen box was 2 Hz, the front duct air volume control handle in 2 gear and the rear duct air volume control handle in 4.5 gear. Confirmatory tests showed that the average value of the seed impurity rate and the cleaning loss rate were 0.98% and 2.66%, which were dropped significantly compared with that before the optimization, the degree of impurity and loss of flax threshing material in mechanized separation and cleaning could be reduced under the condition of optimizing working parameters, and compared with the single air separation method, the operation effect was significantly promoted.

Key words: flax threshing material; double duct system; air-screen type; separating and cleaning machine; parameters optimization

收稿日期: 2020－08－18　修回日期: 2020－09－16

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS－14－1－28)、甘肃省重点研发计划项目(20YF3WA019)和甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(Gaufx－03Y01)

作者简介: 戴飞(1987—),男,副教授,博士,主要从事小差异混杂特色经济作物收获研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究,E-mail: zhaowy@gsau.edu.cn

0 引言

胡麻,即油用亚麻的俗称,是中国西北地区和华北地区重要的油料作物之一[1-2]。目前,我国胡麻机械化收获主要以分段收获为主,胡麻联合收获仍处于试验研究阶段。胡麻脱粒物料分离清选是其收获过程的关键环节之一,分离清选装置是胡麻联合收获机的重要组成部分,直接影响胡麻收获质量和后续精深加工[3]。胡麻脱粒物料各组分混杂差异较小,采用传统谷物分离清选机作业时,胡麻籽粒不能被有效分离,易随短秸秆、蒴果壳等一同被气流吹出。因此,提高胡麻脱粒物料分离清选机的作业性能是减少胡麻籽粒清选损失、提高清选质量的重要措施。为此,国内相关学者研制了胡麻脱粒物料分离清选机[3]、5TF-45 型胡麻脱粒清选机[4]、亚麻籽脱壳分离设备和双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机等装备,取得了一定研究进展[5-6]。其中,双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机根据胡麻脱粒物料组分尺寸及其空气动力学特性差异,采用不同类型三级振动筛分和双风道气力组合分离清选原理,有效改善了胡麻籽粒分离清选的洁净效果。

相关学者结合不同类型的试验方案进行了样机作业性能试验和工作参数优化研究。师清翔等[7]进行了双扬谷器旋风分离清选系统的试验与参数优化,高连兴等[8]进行了大豆脱粒机气力清选循环装置研制与性能试验,张敏等[9]对风筛选式油菜联合收割机清选机构参数进行了试验研究与优化。上述研究进一步提升和完善了相关样机作业性能。本研究通过单因素试验选取影响双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机作业性能的工作参数,对于不同因素水平组合条件下的籽粒含杂率和清选损失率,采用响应曲面分析法确定各试验因素及其交互作用对籽粒含杂率、清选损失率的影响,获取样机工作参数的最优控制变量组合,以期提升对胡麻脱粒物料分离清选的效果。

1 工作过程解析与关键参数选取

1.1 结构组成及作业过程

如图 1 所示,双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机主要由振动喂料系统、三级振动筛分装置、双风道杂余集料装置、吸杂除尘装置、振动变频控制箱、传动系统、脱粒物料不同组分接料盒、行走轮和机架等部件组成。样机工作时,将机脱后的胡麻脱粒物料由喂料斗加入,在振动喂料系统的间歇振动作用下脱粒物料被均匀输送至三级振动筛分装置,通过调节三级振动筛振动频率与筛面倾角,对胡麻脱粒物料不同组分进行筛分,使得脱粒物料中的部分未脱粒蒴果、不同长度茎秆、蒴果壳通过各自排料通道被分级排出。同时,可通过调整双风道杂余集料装置前后风道风量,首先由前风道对一些悬浮速度明显小于胡麻籽粒的轻杂物质率先吸出,然后再由后风道对三级竖排长腰型冲孔筛分离的洁净胡麻籽粒和少量短茎秆进行气流清选,喂入物料在后风道内呈现出瞬时悬浮状态,饱满的胡麻籽粒受自身重力作用落入胡麻籽粒接料盒内。同时,胡麻脱粒物料中的剩余杂质则在吸杂除尘装置的作用下通过尘杂排料装置排出。

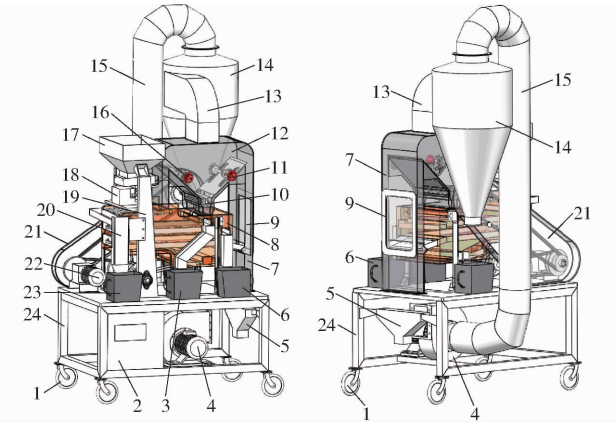


图 1 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机结构图

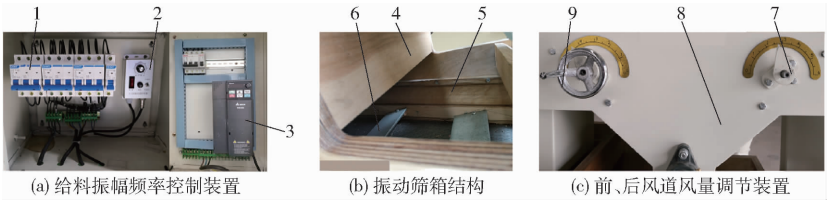
Fig. 1 Structure diagram of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material

1. 行走轮 2. 控制箱 3. 接料盒Ⅲ 4. 离心通风机 5. 胡麻籽粒接料装置 6. 接料盒Ⅱ 7. 后风道 8. 三级振动筛箱体 9. 物料观察窗 10. 避风排杂装置 11. 后风道风量调节手柄 12. 杂余集料室 13. 吸杂管道 14. 旋风除尘器 15. 风机管道 16. 前风道风量调节手柄 17. 喂料斗 18. 振动给料装置 19. 喂料斗支撑架 20. 一级筛排杂通道 21. 传动带Ⅰ 22. 电动机 23. 接料盒Ⅰ 24. 机架

1.2 工作参数分析

如图 2 所示,双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机工作时,可针对胡麻脱粒物料不同净度工况,通过振动变频控制箱对电磁激振器振动幅度、三级振动筛分装置振动频率进行调节;同时根据分离清选效果对三级振动筛分装置筛面倾角和双风道杂余集料装置前后风道风量进行改进。其中,给料振动幅度调节范围为 0~30 mm,筛箱振动调节频率范围为 0~6 Hz,通过改变各筛体底部 V 型支撑架开口角度的方式进行各筛面倾角的调整,筛分装置三级筛面倾角调节范围为 1°~6°,两个风量调节手柄分别水平转动 180°,可经历 7 个挡位,均能够实现对前、后风道风量的完全开启与闭合。

由双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机相关工作参数调节装置可以看出,给料振幅直接关系到



(a) 给料振幅频率控制装置　(b) 振动筛箱结构　(c) 前、后风道风量调节装置

图 2　样机工作参数调节装置

Fig. 2　Working parameter adjusting device of prototype

1. 样机开关　2. 振动幅度控制器　3. 变频器　4. 振动筛箱　5. 筛片盒体滑槽
6. V 型支撑架　7. 后风道风量调节手柄　8. 杂余集料室　9. 前风道风量调节手柄

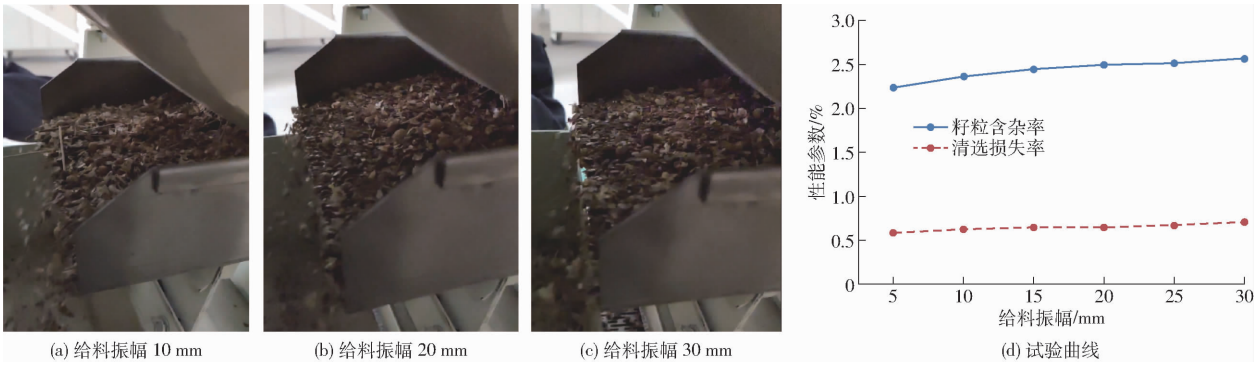
胡麻脱粒物料的喂入松散状况；而筛箱的振动频率与筛面倾角均是决定三级振动筛分装置作业工况的关键因素；同时，双风道杂余集料装置工作性能取决于前风道风量调节挡位和后风道风量调节挡位的协同设置。因此，上述试验因素皆是影响样机作业性能（籽粒含杂率、清选损失率）的主要因素，需要进行进一步试验研究与优化选取[3,10-12]。

2　单因素试验分析

为合理选取胡麻脱粒物料分离清选性能试验中关键单因素参数及其取值范围，结合实际试验方法与离散元仿真分析，对样机给料振幅、三级筛面倾角、筛箱振动频率、前风道风量调节挡位和后风道风量调节挡位进行单因素试验，探讨各试验因素对胡麻籽粒含杂率、清选损失率的影响规律，确定对样机作业性能结果有显著影响的各试验因素取值范围。

2.1　给料振幅

当筛箱振动频率为 3 Hz，筛分装置三级筛面倾角为 6°，前风道风量调节手柄在挡位 2，后风道风量调节手柄在挡位 4，给料振幅在 5 ~ 30 mm 不断递增时（图 3），作业机籽粒含杂率、清选损失率变化趋势如图 3d 所示。



(a) 给料振幅 10 mm　(b) 给料振幅 20 mm　(c) 给料振幅 30 mm　(d) 试验曲线

图 3　不同给料振幅时样机作业性能参数变化曲线

Fig. 3　Variation curves of prototype operating performance parameters with different feed amplitudes

试验研究表明，当给料振幅为 16.5 mm 时，胡麻脱粒物料均能够顺着给料盘进入三级振动筛分装置，单位时间内输送的物料量稳定均匀，且随着给料盘振幅的增加脱粒物料分层效果与离散程度不断提升。随着给料振幅在 5 ~ 30 mm 范围内不断增加，作业机籽粒含杂率（由 2.23% 变化为 2.56%）、清选损失率（由 0.58% 变化为 0.70%）均呈递增趋势，但变化程度相对不大，仅分别增加了 0.33 个百分点和 0.12 个百分点。故此参数不作为影响作业机籽粒含杂率和清选损失率因素进行研究。

2.2　三级筛面倾角

当筛箱振动频率为 3 Hz，给料振幅为 16.5 mm，前风道风量调节手柄在挡位 2，后风道风量调节手柄在挡位 4，筛分装置三级筛面倾角为 1° ~ 6° 不断递增时，作业机籽粒含杂率、清选损失率变化曲线如图 4 所示。

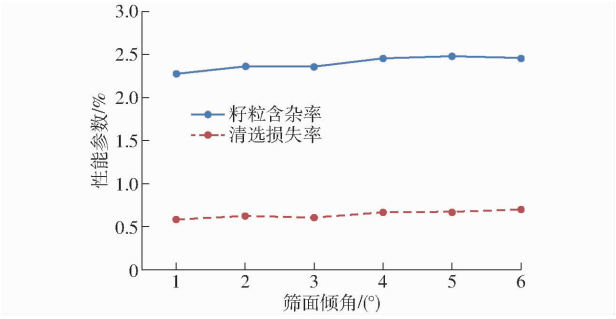


图 4　不同筛分装置三级筛面倾角时样机作业性能参数变化曲线

Fig. 4　Variation curves of prototype operating performance parameters with different dip angles of three-stage vibrating screen

随着筛分装置三级筛面倾角在 1° ~ 6° 不断增

加,作业机籽粒含杂率(由 2.28% 递增为 2.46%)、清选损失率(由 0.59% 递增为 0.69%)基本呈递增趋势,但变化程度相对不明显,仅分别增加了 0.18 个百分点和 0.10 个百分点,表明筛分装置三级筛面倾角对样机作业性能影响不显著,因此该参数不作为影响作业机籽粒含杂率和清选损失率因素进行研究。相关试验表明,当振动筛分装置三级筛面倾角大于 4°时,胡麻脱粒物料在筛面的运动效果较好。

2.3 筛箱振动频率

结合 EDEM 软件数值模拟不同筛箱振动频率(1 ~ 8 Hz)下胡麻脱粒物料在三级振动筛分装置上的运移状态与迁移规律,观察物料层在各筛面上的形态分布,分析筛箱振动频率与籽粒含杂和清选损失之间的关系,并择优选取适宜参数值所对应的参数模型。EDEM 中胡麻脱粒物料属性参数及其设定方法见文献[13 - 16]。

将胡麻脱粒物料分离清选机的喂入量设定为 0.035 kg/s,依据胡麻脱粒物料的谷草比,经换算物料工厂在位于双风道杂余集料装置前风道入口端面 80 mm 处,分别生成胡麻蒴果 500 个/s、籽粒 1 500 个/s、短茎秆 2 000 个/s、蒴果壳 2 000 个/s 和轻质杂物 500 个/s。不同振筛及筛箱在作业中保持相同的运动状态,将仿真中具有相同运动方式的几何体进行合并,设置给料振幅为 16.5 mm,筛箱振动频率每间隔 1 Hz 进行设定,设定范围为 1 ~ 6 Hz。为保证振筛倾角与实际相一致,振动方向与水平面呈 6°夹角,仿真时间步长设置为 1.25×10^{-6} s,每组仿真进行 9 s,共进行 9 组仿真试验。

仿真分析计算中,将 Fluent 中稳定计算得到的流场数据转换成体积力加载到 EDEM 中,该方法可计算的两相间作用力具有局限性,但相间数据交换完全在 EDEM 中完成,可有效提高仿真计算速度。在体积力单向耦合计算中,首先在 Fluent 中计算得到作业过程中避风排杂装置与旋风除尘器的稳定流场数据,将计算得到的稳定流场中 X、Y、Z 3 个方向的速度分量以 CGNS 数据格式保存,然后在 Particle Body Force 中加载 CFielQuery 体积力插件,在 Field Data Manager 中以场数据的形式加载 CGNS 数据。流场对颗粒相曳力及浮力作用通过 CFielQuery. dll 体积力插件计算得到,在 Fluent 中计算时,选择空气为流体介质,密度设置为 1.2 kg/m^3,黏度为 1.8×10^{-5} Pa·s,入口边界风速为 1.60 m/s,出口边界风速为 4.40 m/s。湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 进行瞬态计算。管道壁面为无滑移壁面,采用基于压力的 SIMPLE 算法对速度场和压力场进行耦合求解,动量项采用二阶迎风格式,湍流动能和湍流耗散率采用一阶迎风格式,残差精度为 10^{-3} s。建立的胡麻脱粒物料气固耦合分离清选仿真模型如图 5 所示。

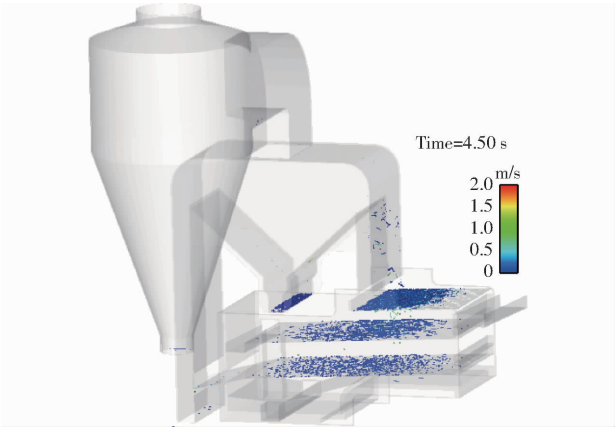


图 5 胡麻脱粒物料气固耦合分离清选仿真模型

Fig. 5 Gas-solid coupling separation and cleaning simulation model of flax threshing material

依照样机筛箱振动频率的调节范围(1 ~ 8 Hz)对仿真模型进行设置,观察胡麻脱粒物料在三级振动筛分装置中各筛面的运移规律,筛选出适宜的筛箱振动频率区间。在数值模拟试验过程中发现,当筛箱振动频率在 2 ~ 6 Hz 时,三级振动筛分装置中各筛面上胡麻脱粒物料分布均匀、透筛效果理想(图 6),胡麻脱粒物料气固耦合分离清选作业性能相对稳定。

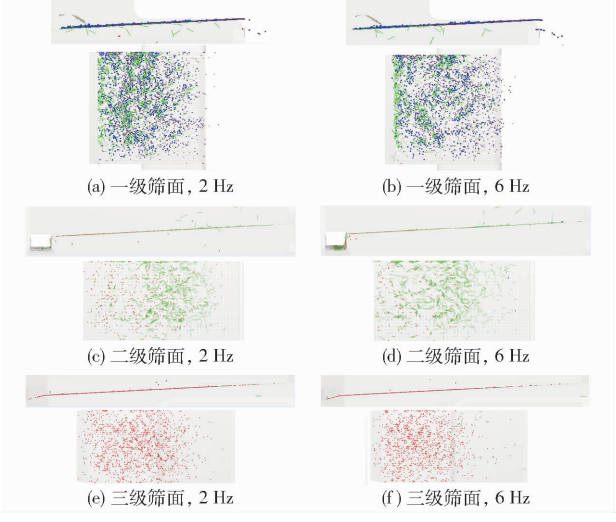


图 6 不同振动频率各筛面胡麻脱粒物料分布与透筛效果仿真结果

Fig. 6 Simulation results of distribution of flax threshing materials on different screen surfaces with different vibration frequencies and effect of through screen

2.4 前风道、后风道风量调节挡位

当筛分装置三级筛面倾角为 6°,筛箱振动频率为 3 Hz,给料振幅为 16.5 mm 时,双风道杂余集料装置前、后风道风量调节手柄挡位在 0 ~ 6 协同调节时,作业机籽粒含杂率、清选损失率变化曲线如图 7

所示。

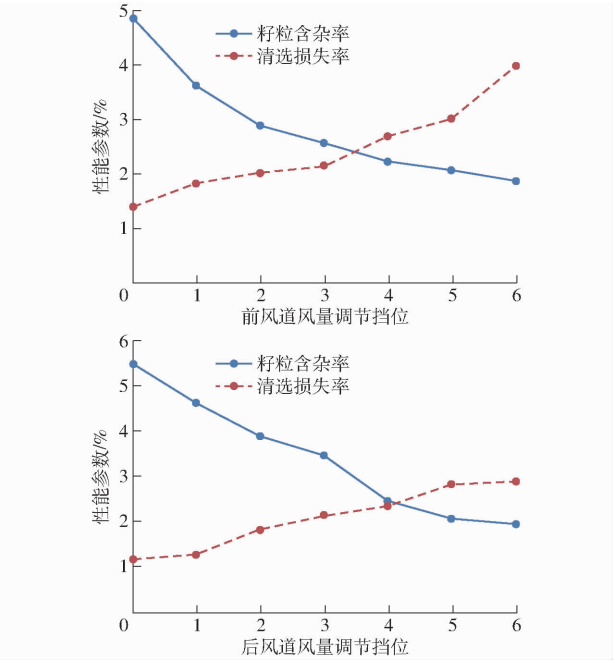


图 7　不同前、后风道风量调节挡位时样机作业性能参数变化曲线

Fig. 7　Variation curves of prototype operating performance parameters with different air volume adjustment gear of front duct and rear duct

由图 7 可以看出，当前风道风量调节手柄处在 2 ~ 4 挡，作业机籽粒含杂率与清选损失率分别为 2.21% ~ 2.85% 和 2.01% ~ 2.67%；当后风道风量调节手柄处在 4 ~ 6 挡时，作业机籽粒含杂率与清选损失率分别为 1.96% ~ 2.45% 和 2.32% ~ 2.88%。两挡下籽粒含杂率与清选损失率相对差异不大，具有较好工作性能。因此，结合胡麻脱粒物料气固耦合分离清选仿真模型，对其前风道、后风道风量进行上述挡位的对应模拟仿真，获得双风道杂余集料装置、旋风除尘器风量的速度矢量分布如图 8 所示[17]。

因此，在后续双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机参数优化试验中，选取试验因素为样机筛箱振动频率(2 ~ 6 Hz)、前风道风量调节挡位(2 ~ 4)和后风道风量调节挡位(4 ~ 6)。

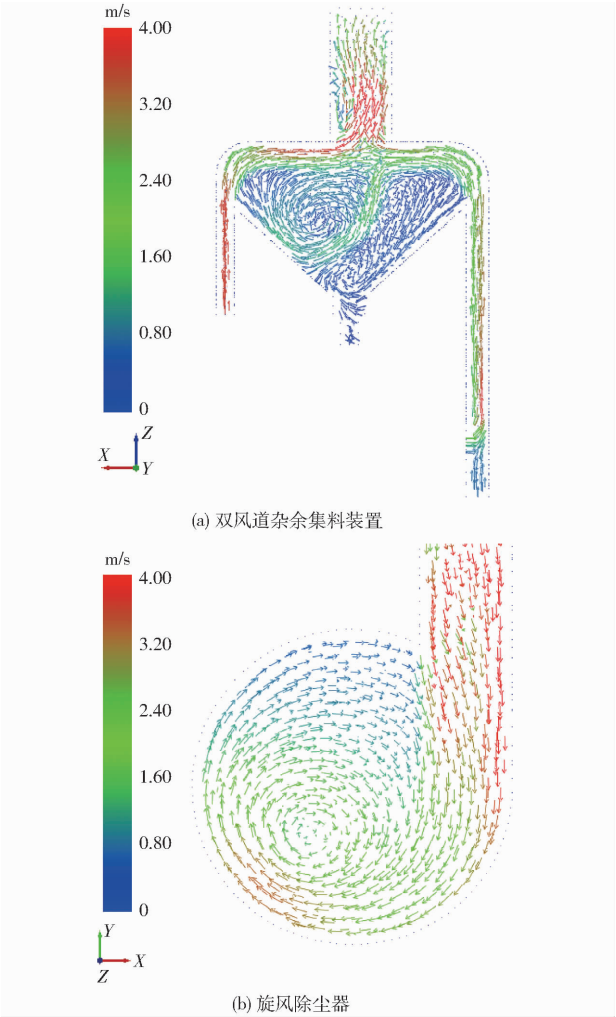


图 8　双风道杂余集料装置和旋风除尘器风量速度矢量分布

Fig. 8　Air volume velocity vector distribution of double duct impurities aggregate device and cyclone dust collector



图 9　样机作业性能试验现场

Fig. 9　Performance test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material

3　作业性能试验

3.1　试验材料与方法

2019 年 8 月，在甘肃农业大学胡麻机械化作业示范基地——甘肃华瑞农业股份有限公司进行了双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机现场操作演示与作业性能试验(如图 9 所示)。试验材料选用陇亚 14 号胡麻收获期脱粒物料，单株平均蒴果数为 24.1 个，蒴果平均粒数为 7.2 个，胡麻籽粒平均千粒质量为 8.1 g，单株产量 0.95 g，脱粒物料含水率为 11.8%[6]。试验前对作业机进行空转运行检查，其中振动喂料系统给料振幅设定为 16.5 mm，三级振动筛分装置筛面倾角为 6°，筛箱振动频率在 2 ~ 6 Hz 之间，双风道杂余集料装置前风道风量调节挡位为 2 ~ 4，后风道风量调节挡位为 4 ~ 6。

待作业机运行稳定后在喂料斗内加入胡麻收获期机械化脱粒物料。通过不断调节筛箱振动频率、前风道风量和后风道风量进行不同试验方案组合,测定作业机籽粒含杂率和清选损失率,同时在试验过程中观察振动喂料系统、三级振动筛分装置、双风道杂余集料装置和吸杂除尘装置的工作运转情况。以 3 次的测定平均值为测试结果,胡麻脱粒物料分离清选籽粒含杂率和清选损失率计算公式为[18-19]

$$Y_1 = \left(1 - \frac{G_1}{G_{Z1}}\right) \times 100\% \tag{1}$$

$$Y_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \times 100\% \tag{2}$$

式中 Y_1——籽粒含杂率,%

Y_2——清选损失率,%

G_1——胡麻籽粒接料盒内籽粒质量,g

G_{Z1}——胡麻籽粒接料盒内物料质量,g

G_2——4 个接料盒内的籽粒质量,g

3.2 响应曲面法试验方案

综合单因素试验的试验结果与分析,采用三因素三水平 Box-Behnken 试验设计原理[20],以筛箱振动频率 x_1、前风道风量调节挡位 x_2 和后风道风量调节挡位 x_3 为自变量,籽粒含杂率 Y_1 和清选损失率 Y_2 为响应值,各试验因素编码如表 1 所示,分别实施 17 组响应面分析试验(如表 2 所示,X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行数据处理分析。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of test factors

编码	因素		
	筛箱振动频率 x_1/Hz	前风道风量调节挡位 x_2	后风道风量调节挡位 x_3
-1	2	2	4
0	4	3	5
1	6	4	6

3.3 性能试验结果与分析

3.3.1 回归模型建立及检验

借助 Design-Expert 8.0.6.1 软件对籽粒含杂率 Y_1 和清选损失率 Y_2 进行回归模型的方差分析,如表 3 所示,分别得到 Y_1 和 Y_2 二次回归模型为

$$\begin{aligned} Y_1 = {} & 2.18 + 0.33X_1 + 0.083X_2 - 0.015X_3 - \\ & 0.50X_1^2 - 0.43X_2^2 - 0.56X_3^2 + \\ & 0.19X_1X_2 - 0.13X_1X_3 - 0.47X_2X_3 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} Y_2 = {} & 2.30 + 1.21X_1 + 0.77X_2 - 0.48X_3 + \\ & 1.40X_1^2 + 0.85X_2^2 + 1.37X_3^2 - \\ & 0.31X_1X_2 - 0.70X_1X_3 + 0.65X_2X_3 \end{aligned} \tag{4}$$

表 2 响应面分析结果

Tab.2 Results of response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	0	0	0	2.08	2.04
2	1	1	0	1.99	6.28
3	0	1	1	0.78	5.67
4	0	1	-1	1.53	5.23
5	1	0	-1	1.65	7.29
6	0	0	0	1.91	2.02
7	0	0	0	2.11	2.18
8	-1	0	1	0.82	4.25
9	1	0	1	1.16	4.83
10	-1	1	0	0.89	4.03
11	-1	-1	0	0.88	2.21
12	0	0	0	2.23	2.64
13	1	-1	0	1.22	5.68
14	0	0	0	2.56	2.62
15	-1	0	-1	0.81	3.92
16	0	-1	-1	0.66	4.68
17	0	-1	1	1.77	2.51

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

试验指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
籽粒含杂率	模型	5.54	9	0.62	9.96	0.003 1**
	X_1	0.86	1	0.86	13.88	0.007 4**
	X_2	0.054	1	0.054	0.88	0.379 1
	X_3	1.08×10^{-3}	1	1.08×10^{-3}	0.029	0.869 3
	X_1X_2	0.14	1	0.14	2.34	0.170 2
	X_1X_3	0.063	1	0.063	1.01	0.348 1
	X_2X_3	0.86	1	0.86	14.00	0.007 3**
	X_1^2	1.07	1	1.07	17.31	0.004 2**
	X_2^2	0.77	1	0.77	12.54	0.009 5**
	X_3^2	1.34	1	1.34	21.67	0.002 3**
	残差	0.43	7	0.062		
	失拟	0.20	3	0.066	1.12	0.438 8
	误差	0.23	4	0.059		
	总和	5.97	16			
清选损失率	模型	43.62	9	4.85	34.00	<0.000 1**
	X_1	11.69	1	11.69	81.98	<0.000 1**
	X_2	4.70	1	4.70	32.94	0.000 7**
	X_3	1.86	1	1.86	13.06	0.008 6**
	X_1X_2	0.37	1	0.37	2.61	0.150 2
	X_1X_3	1.95	1	1.95	13.65	0.007 7**
	X_2X_3	1.70	1	1.70	11.94	0.010 6*
	X_1^2	8.25	1	8.25	57.88	0.000 1**
	X_2^2	3.04	1	3.04	21.34	0.002 4**
	X_3^2	7.93	1	7.93	55.63	0.000 1**
	残差	1.00	7	0.14		
	失拟	0.62	3	0.21	2.18	0.232 6
	误差	0.38	4	0.095		
	总和	44.62	16			

注:** 表示影响极显著($P\leqslant0.01$);* 表示影响显著($0.01<P\leqslant0.05$)。

由表 3 可知，籽粒含杂率二次回归模型 $P=0.003\,1$，表明回归模型极显著；失拟项 $P>0.05$，失拟不显著，说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合，能正确反映籽粒含杂率 Y_1 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系，回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中 X_1、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_2X_3 影响极显著，其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小，可得到各因素对籽粒含杂率的影响主次顺序为：X_1、X_2、X_3，即筛箱振动频率、前风道风量调节挡位、后风道风量调节挡位。

同时，清选损失率二次回归模型 $P<0.000\,1$，表明回归模型极显著；失拟项 $P>0.05$，失拟不显著，也说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合，能正确反映清选损失率 Y_2 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系，回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中 X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_1X_3 影响极显著，X_2X_3 影响显著，其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小，可得到各因素对清选损失率的影响主次顺序为：X_1、X_2、X_3，即筛箱振动频率、前风道风量调节挡位、后风道风量调节挡位。

3.3.2　模型交互项解析

根据建立的回归模型分别获得各因素之间交互作用影响的响应面图。

由图 10 可以看出，当筛箱振动频率为 2 Hz、后风道风量调节挡位为 2 时，籽粒含杂率较低，由等高线密度与响应曲面形状可看出，筛箱振动频率与前风道风量调节挡位的交互作用对作业机籽粒含杂率有一定影响但是并不显著，与方差分析结果相同。

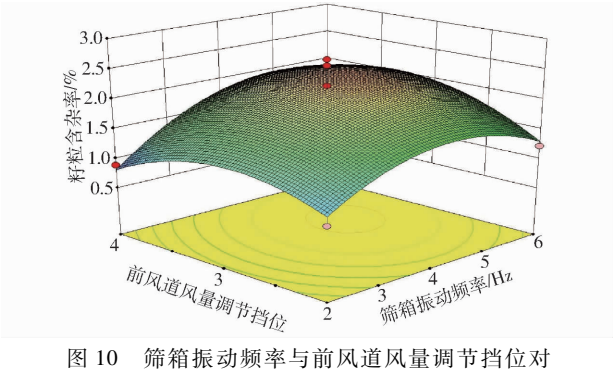


图 10　筛箱振动频率与前风道风量调节挡位对籽粒含杂率影响的响应曲面

Fig. 10　Response surface of seed impurity rate to screen box vibration frequency and air volume adjustment gear in front duct

由图 11 可看出，当筛箱振动频率为 2 Hz、前风道风量调节挡位为 2 时，籽粒含杂率较低，筛箱振动频率对籽粒含杂率的影响明显高于后风道风量调节挡位，但两交互因素形成的响应曲面呈圆形，表明筛箱振动频率与后风道风量调节挡位对作业机籽粒含杂率的交互作用不显著。

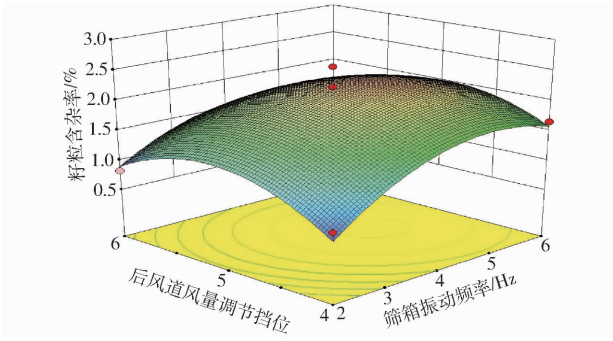


图 11　筛箱振动频率与后风道风量调节挡位对籽粒含杂率影响的响应曲面

Fig. 11　Response surface of seed impurity rate to vibration frequency of screen box and air volume adjustment gear in rear duct

由图 12 可以看出，当后风道风量调节挡位固定在某一水平，前风道风量调节挡位由 2 到 4 时，前风道风量增大，籽粒含杂率呈现出逐渐增大的变化趋势。出现该现象的主要原因是试验初期前风道风量调节到 2 挡时，一些飘浮速度明显小于胡麻籽粒的轻杂物质率先通过双风道杂余集料室前置风道吸出，有效降低了剩余胡麻脱粒物料后续分离清选负荷，籽粒含杂率较低（小于 0.50%）。当离心通风机稳定工作时，吸杂管道内的气流速度与风量恒定，若前风道风量调节挡位由 2 向 4 不断增加时，则前风道风量逐步加大，后风道风量不断下降，致使双风道杂余集料室流场分布紊乱，胡麻脱粒物料中的杂质进入避风排杂装置的通过性较差，后风道吸杂能力弱化，增加了籽粒含杂量，致使籽粒含杂率逐渐增大（在 1.50% ~2.00% 之间）。因此，前风道风量调节挡位与后风道风量调节挡位的交互作用对籽粒含杂率影响非常显著，与方差分析结果一致。

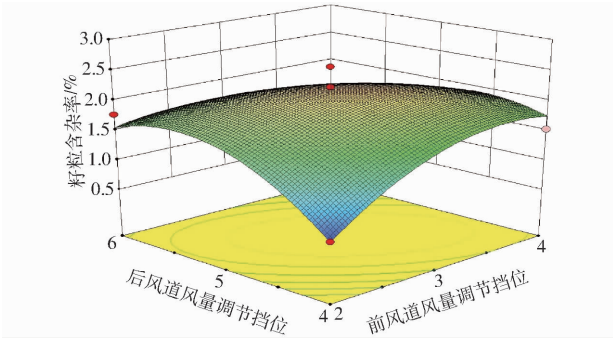


图 12　前风道风量调节挡位与后风道风量调节挡位对籽粒含杂率影响的响应曲面

Fig. 12　Response surface of seed impurity rate to air volume adjustment gear in front duct and air volume adjustment gear in rear duct

由图 13 可知，当筛箱振动频率为 6 Hz、前风道风量调节挡位为 4 时，作业机清选损失率最大。由

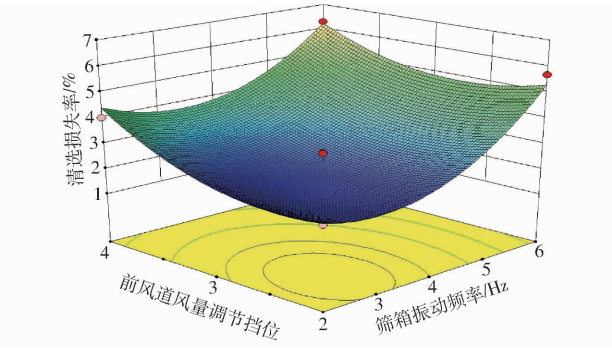


图 13 筛箱振动频率与前风道风量调节挡位对清选损失率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of cleaning loss rate to vibration frequency of screen box and air volume adjustment gear in front duct

等高线密度及响应面形状可以看出,筛箱振动频率与前风道风量调节挡位的交互作用对清选损失率影响不显著,与方差分析结果相同。

由图 14 可知,当后风道风量调节挡位固定在某一水平,筛箱振动频率由 2 Hz 递增至 6 Hz 时,清选损失率呈现逐步上升的变化趋势,在 7.0% ~8.0% 之间。出现该现象的主要原因是当后风道风量调节挡位一定时,后风道分离清选系统的气流速度与流量恒定,当筛箱振动频率不断增加时,进入后风道分离清选系统的胡麻脱粒物料逐渐增多,使得破碎干瘪的胡麻籽粒被吸入到杂余集料室的数量与概率均增大。由响应面形状可以看出,筛箱振动频率与后风道风量调节挡位的交互作用对清选损失率影响极显著。

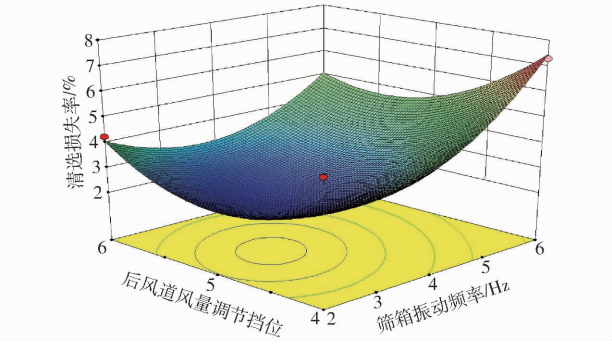


图 14 筛箱振动频率与后风道风量调节挡位对清选损失率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surface of cleaning loss rate to vibration frequency of screen box and air volume adjustment gear in rear duct

由图 15 可以看出,当前风道风量调节挡位固定在某一水平,后风道风量调节挡位由 4 向 6 转变时,清选损失率呈现出先减小、后增大的变化趋势。出现该现象的原因是当离心通风机转速恒定时,吸杂管道的风量保持稳定,当后风道风量调节挡位向 6 挡调节时,后风道风量逐步加大,而前风道风量对应降低,使得大部分干瘪籽粒、未脱净蒴果不随轻质杂物被吸入双风道杂余集料室内,使得清选损失率有所下降。但随着后风道风量进一步增加,提升了由三级竖排长腰型冲孔筛分离的洁净胡麻籽粒和短茎秆进入后风道内的运动速度,超过了碎小胡麻籽粒的悬浮速度而被吸入双风道杂余集料室内,使得清选损失率由 3.9% 上升至 5.8%。由偏回归分析与等高线密度可得,前风道风量调节挡位与后风道风量调节挡位的交互作用对清选损失率影响较为显著。

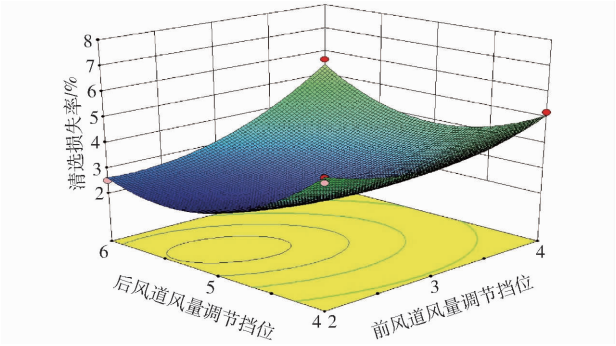


图 15 前风道风量调节挡位与后风道风量调节挡位对清选损失率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface of cleaning loss rate to air volume adjustment gear in front duct and air volume adjustment gear in rear duct

3.3.3 最优工作参数确定与试验验证

依据上述试验结果分析,为进一步提升双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机作业性能,在各试验因素水平约束条件下,将籽粒含杂率和清选损失率取得最小值作为优化指标,建立性能指标全因子二次回归方程,进行目标优化与最优工作参数确定。

$$\begin{cases} \min\ Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min\ Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \tag{5}$$

应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件中的优化求解器对回归方程模型(3)、(4)进行该目标下的优化求解。其中,籽粒含杂率的重要度为 + + + +,清选损失率的重要度为 + + + + +,得到优化试验指标为籽粒含杂率 0.76%、清选损失率 2.58%,最优工作参数组合:筛箱振动频率为 2 Hz、前风道风量调节挡位为 2、后风道风量调节挡位为 4.5。

为了验证所建立回归模型(3)、(4)的可靠性,应用双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机按照上述最优工作参数进行 9 次作业性能试验,试验材料

和方法与 2.1、2.2 节相同，如图 16 所示。9 次试验下胡麻脱粒物料的籽粒含杂率均值为 0.98%、清选损失率均值为 2.66%，表明在优化工作参数条件下能够降低胡麻脱粒物料在机械化分离清选过程中的含杂与损失，较单一气流分离清选方式作业效果有显著改善，因此建立的回归模型是可靠的。

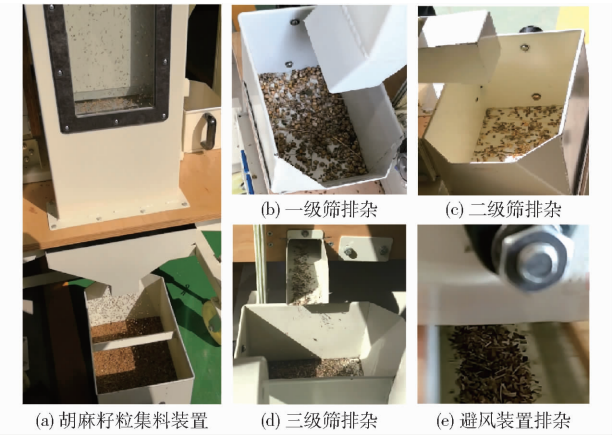


图 16　胡麻脱粒物料分离清选作业验证试验

Fig. 16　Validation test of separating and cleaning flax threshing materials

在试验验证过程中通过物料观察窗发现，由三级筛分离后的洁净胡麻籽粒和极少量短茎秆在双风道杂余集料装置后风道吸杂气流作用下基本呈现出悬浮状（图 16a），随后胡麻籽粒在重力作用下落入胡麻籽粒接料盒。通过对一级筛、二级筛、三级筛及避风装置排杂状况（图 16b～16e）进行分析，设计的三级振动筛分装置和双风道杂余集料装置均满足作业要求。当筛箱振动频率过高时会引起胡麻脱粒物料在筛面上弹跳，使得胡麻脱粒物料在三级振动筛分装置中的透筛分离不充分，这是引起籽粒含杂率升高的关键因素；同时，双风道杂余集料装置前、后风道风量调节挡位不匹配时，引起避风排杂装置中输出物料夹带胡麻籽粒较多，这是使清选损失率增大的又一重要原因。因此，后续研究中需要结合气固耦合理论对双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机关键部件优化参数下的作业流场进行模拟研究。

4　结论

（1）对双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机的作业原理进行解析，基于实际试验方法与离散元仿真分析，对样机主要工作参数进行单因素试验，探讨各试验因素对胡麻籽粒含杂率、清选损失率的影响规律，确定对样机作业性能有影响的相关试验因素与取值范围。

（2）按照 Box－Behnken 试验设计原理，采用三因素三水平响应曲面分析方法，进行双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机工作参数优化，结果表明，影响籽粒含杂率与清选损失率的因素主次顺序由大到小均为筛箱振动频率、前风道风量调节挡位、后风道风量调节挡位。

（3）建立了籽粒含杂率、清选损失率与筛箱振动频率、前风道风量调节挡位、后风道风量调节挡位的二次多项式回归模型。以籽粒含杂率和清选损失率最小为目标，优化得到作业机最佳工作参数：筛箱振动频率为 2 Hz、前风道风量调节挡位为 2、后风道风量调节挡位为 4.5。验证试验表明，籽粒含杂率均值为 0.98%、清选损失率均值为 2.66%，说明通过优化工作参数可降低胡麻脱粒物料在机械化分离清选过程中的含杂与损失，其作业效果较单一气流分离清选方式有显著改善。

参　考　文　献

[1]　王利民，张建平，党照，等. 胡麻两系杂交亲本的配合力及杂种优势分析[J]. 中国农业科学，2016，49(6)：1047－1059.
WANG Limin, ZHANG Jianping, DANG Zhao, et al. The analysis of the parental combining ability and heterosis on two-line hybrid flax[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(6): 1047－1059. (in Chinese)

[2]　戴飞. 胡麻脱粒物料分离清选机理与关键技术研究[D]. 兰州：甘肃农业大学，2020.
DAI Fei. Study on the separating-cleaning mechanism and key technology of flax threshing material[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[3]　戴飞，赵武云，刘国春，等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(8)：140－147.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, LIU Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 140－147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190816&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.016. (in Chinese)

[4]　黄若忱. 5TF－45 型胡麻脱粒机清选风腔流场分析[J]. 农业工程，2016，6(6)：117－119.
HUANG Ruochen. Flow field analysis on cleaning air cavity of 5TF－45 type flax threshing machine[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(6): 117－119. (in Chinese)

[5]　丁进锋. 亚麻籽脱壳分离系统关键技术及设备研究[D]. 北京：中国农业机械化科学研究院，2016.
DING Jinfeng. Study on the critical technology of flax seed dehulling and separation and dehull equipment[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2016. (in Chinese)

[6]　戴飞，付秋锋，赵武云，等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2021，52(4)：117－125，147.

DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117 - 125,147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210412&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.012. (in Chinese)

[7] 师清翔,马萌,闫卫红,等. 双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):124 - 128.
SHI Qingxiang, MA Meng, YAN Weihong, et al. Two-stage winnower cyclone separating cleaning system performance testing and optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 124 - 128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141119&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.019. (in Chinese)

[8] 高连兴,李献奇,关萌,等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):110 - 117.
GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 110 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150316&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.016. (in Chinese)

[9] 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):8 - 15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8 - 15. (in Chinese)

[10] 王立军,武振超,冯鑫,等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):90 - 101.
WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):90 - 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190210&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.010. (in Chinese)

[11] 王立军,冯鑫,郑招辉,等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):104 - 113.
WANG Lijun, FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 104 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190512&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.012. (in Chinese)

[12] 李立君,胡文宇,高自成,等. 曲柄摇杆振动破壳油茶果粗选机运动学分析及试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):28 - 35.
LI Lijun, HU Wenyu, GAO Zicheng, et al. Kinematics analysis and experiment of crank rocker vibrating coarse sorting machine for unshelled oil-tea fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 28 - 35. (in Chinese)

[13] DAI F, SONG X F, ZHAO W Y, et al. Motion simulation and test on threshed grains in tapered threshing and transmission device for plot wheat breeding based on CFD - DEM[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(1): 66 - 73.

[14] 戴飞,赵武云,宋学锋,等. 胡麻脱粒物料分离清选作业机参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7):100 - 108.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Parameter optimization and experiment on separating and cleaning machine for flax threshing material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7):100 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200712&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.012. (in Chinese)

[15] LI Hongchang, LI Yaoming, GAO Fang, et al. CFD - DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88: 111 - 119.

[16] 王立军,李洋,梁昌,等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):122 - 127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 122 - 127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150918&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018. (in Chinese)

[17] 李洋,徐立章,周莹,等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(12):48 - 55.
LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 48 - 55. (in Chinese)

[18] 廖庆喜,万星宇,李海同,等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):24 - 31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):24 - 31. (in Chinese)

[19] GB/T 5262—2008 农业机械试验条件测定方法的一般规定[S]. 2008.

[20] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83 - 90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):83 - 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160112&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)