网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.018

谷子风筛式清选装置流场仿真与性能试验

毛欣[1],李帅霏[1],张卫国[2],张东明[1],张紫恒[1],王泽铭[1]
(1 黑龙江八一农垦大学 工程学院,黑龙江 大庆 163319;2 西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】设计适合谷子清选的风筛式清选装置,为提高我国谷子的机械化收获水平提供支持。【方法】以编织筛和冲孔筛为研究对象,测定"龙谷 31 号"谷子脱出物的主要物料特性,采用 Fluent 仿真分析对上、下筛网分别为编织筛+编织筛、冲孔筛+冲孔筛、编织筛+冲孔筛的清选装置进行流场仿真模拟,利用自制谷子风筛式清选试验台测定上、下筛均为编织筛的振动筛面的风速,以籽粒含杂率和清选损失率为评价指标,对曲柄转速、风机转速、风机倾角进行三因素五水平正交试验并建立回归模型,再采用多目标变量优化方法,运用 Design-Expert 8.0.6 对回归模型进行优化求解,确定最优结构参数组合,然后以圆整后的最优曲柄转速、风机转速、风机倾角进行台架验证试验。【结果】Fluent 仿真分析表明,当上、下筛网均为编织筛时,气流的透筛率较好,气流能够贯穿筛网且无涡流,后段气流被有效导出清选装置并维持较高流速。台架试验表明,筛面高度 90 mm 处风速低于 60 mm 处,有利于脱出物分散;筛面高度 60 mm 处风速高于 30 mm 处,对脱出物分离起催化作用;筛面风速最高为 4.22 m/s,大于杂余悬浮速度,足够分离谷子籽粒中的轻杂余,上、下筛均为编织筛合理可靠。多因素正交试验表明,风筛式清选装置的最优作业参数为:曲柄转速 239.8 r/min,风机转速 920.23 r/min,风机倾角 25.98°,理论籽粒含杂率为 2.89%,清选损失率为 1.78%。利用圆整值(曲柄转速 240 r/min、风机转速 920 r/min、风机倾角 26°)进行台架验证试验,实际籽粒含杂率为 2.95%,清选损失率为 1.81%。【结论】台架验证试验的籽粒含杂率和清选损失率与理论优化结果的相对误差分别为 2.08% 和 1.69%,均小于 5%,表明所设计的风筛式谷子清选装置结构可靠,满足谷子清选作业的工作需求。

[关键词] 谷子;清选装置;风筛式清选;Fluent 仿真
[中图分类号] S226.5 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0171-10

Flow field simulation and performance test of millet air-screen cleaning device

MAO Xin[1], LI Shuaifei[1], ZHANG Weiguo[2], ZHANG Dongming[1], ZHANG Ziheng[1], WANG Zeming[1]
(1 *College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang* 163319, *China*; 2 *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to design an air-screen cleaning device for millet cleaning, enhancing the mechanization level of millet harvesting in China. 【Method】 Taking the woven sieve and perforated sieve as the research objects, the main material characteristics of threshed materials from 'Longgu 31' millet were determined. Fluent simulation analysis was used to simulate the flow field of the cleaning device with upper and lower sieves as woven sieve+woven sieve, perforated sieve+perforated sieve and woven sieve+perforated sieve, respectively. Wind speed on the vibrating screen surface with upper and lower sieves being woven sieves was measured using the self-made millet air-screen cleaning test bench. Taking

[收稿日期] 2024-10-25 [修回日期] 2025-01-02
[基金项目] 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2024E103)
[作者简介] 毛欣(1978—),女,浙江宁波人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事农业机械化与收获技术装备研究。E-mail:mx1631@163.com

the impurity rate of grains and the cleaning loss rate as the evaluation indices, a three-factor, five-level orthogonal test was conducted on the crank speed, fan speed and fan inclination angle, and a regression model was established. Subsequently, the multi-objective variable optimization method was utilized to optimize the regression model by Design-Expert 8.0.6, and the optimal structural parameter combination was determined. Finally, a bench verification test was carried out with the rounded optimal values of crank speed, fan speed and fan inclination angle.【Result】Fluent simulation analysis showed that when woven sieves were used for both upper and lower screens, airflow exhibited optimal penetration through the screens without vortex formation. The rear-section airflow maintained high velocity while being efficiently exhausted from the cleaning device. Bench test revealed that wind speed at a sieve-surface height of 90 mm was lower than that at 60 mm, which was conducive to the dispersion of the threshed materials. The wind speed at a sieve surface height of 60 mm was higher than that of 30 mm, promoting the separation of the threshed materials. The maximum wind speed on the screen surface was 4.22 m/s, which exceeded the residue suspension speed, making it sufficient to separate the light impurities from the millet grains. This validates the reliability of using weaving sieves for both the upper and lower screens. The multi-factor test demonstrated that the optimal operating parameters for the air-screen cleaning device were as follows: crank speed of 239.8 r/min, fan speed of 920.23 r/min, fan inclination angle of 25.98°, theoretical grain impurity rate of 2.89%, and cleaning loss rate of 1.78%. A bench verification test was carried out using the round values (crank speed 240 r/min, fan speed 920 r/min, and fan inclination angle 26°). The actual grain impurity rate was found to be 2.95%, and the cleaning loss rate was 1.81%.【Conclusion】The relative errors of grain impurity rate and cleaning loss rate between the bench verification test and the theoretical optimization results were 2.08% and 1.69%, respectively. Both errors were less than 5%, indicating that the designed air-sieve millet cleaning device had a reliable structure and met the operational requirements of millet cleaning operation.

Key words: millet; cleaning device; air-screen cleaning; Fluent simulation

谷子是发展绿色农业和维持农业可持续发展的重要杂粮类经济作物，随着人们对谷子营养价值认识的提高，谷子种植面积逐年增加[1-2]。清选装置是联合收获机的“消化系统”，是影响整机作业性能的核心工作部件，目前联合收获机的清选装置主要有振动、气流、滚筒等多种筛分形式[3-4]，而振动式风筛是目前谷子联合收获机的主流清选装置，但存在脱出物在抖动板处局部堆积、清选气流流速不均等问题[5-7]。

国内外学者关于清选装置的研究大多是针对玉米、小麦和水稻等大籽粒作物[8-10]，且主要是围绕振动筛、风机等关键工作部件的改进优化，而谷子清选装置研究尚处于起步阶段，但已取得了一些成果。如 DONG 等[11]采用离散单元法对振动筛上的颗粒运动情况进行了仿真模拟，通过试验验证表明 DEM 数值模拟准确有效。ElSKAMP 等[12]通过离散元法研究了颗粒物理特性参数以及振动筛运行参数在数值模拟中的准确性。ZHANG 等[13-14]运用格子玻尔兹曼方法设计了气流监测系统，通过仿真得出平纹方孔筛动态流场分布及清选装置的最优参数组合。孟亚娟[15]自主研发了一种新型的旨在降低谷子风筛式清选试验台籽粒含杂率和清选损失率的清选装置。侯华铭等[16]以谷子联合收获机的清选风速、风向、振动筛的振幅为试验因素，获得了降低谷子联合收获过程中清选损失率的最优参数组合。李心平等[17]设计了辊搓圆筒筛式谷子清选装置，并通过正交试验获得了最佳参数组合。鉴于目前谷子清选装置研究的不足，本研究利用 Fluent 仿真技术对上、下筛分别为编织筛＋编织筛、冲孔筛＋冲孔筛、编织筛＋冲孔筛的清选装置进行了流场仿真模拟，确定最佳清选筛并利用自制的风筛式谷子清选试验台对最佳振动筛筛面风速进行测定验证，然后结合试验优化和回归分析等方法，探究清选筛参数对谷子清选装置作业质量的影响，以期解决谷子清选作业时脱出物在抖动板处局部堆积、清选气流流速不均等问题，进而为谷子清选装置的改进提供参考。

1 谷子风筛式清选装置的结构与工作原理

1.1 结构组成

谷子风筛式清选装置主要由振动筛、贯流风机、

复脱收集装置、运粮装置组成，如图 1 所示，其中振动筛由抖动板、传动结构及振动上、下筛组成；贯流风机由风机转子、叶片、分风板组成；复脱收集与运粮装置主体均由螺旋推料器构成。

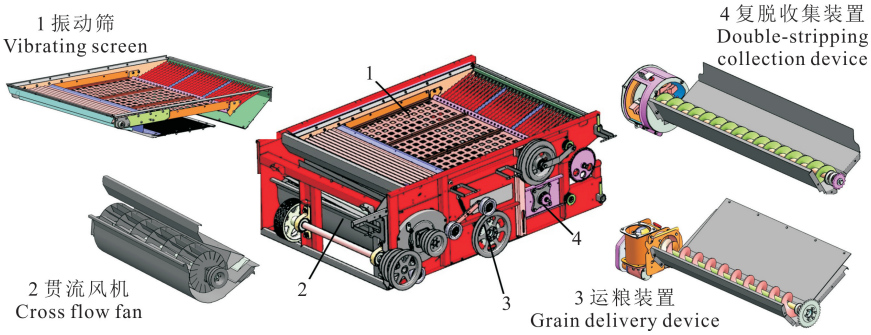
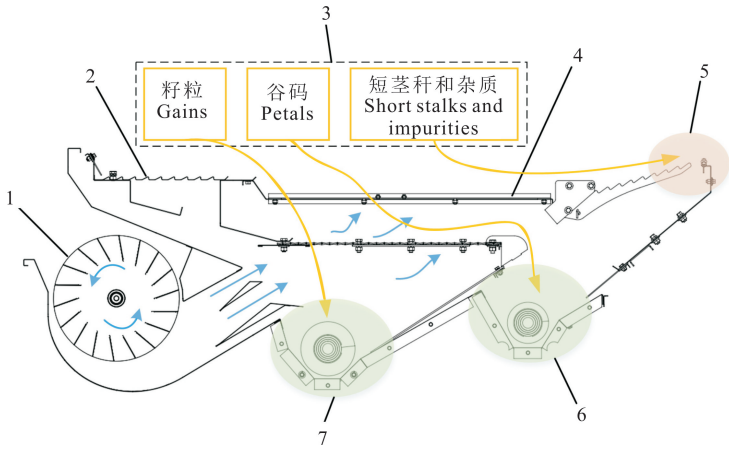


图 1　谷子风筛式清选装置三维结构简图

Fig. 1　Schematic diagram of three-dimensional structure for millet air-screen cleaning device

1.2　工作原理

谷子风筛式清选装置主要利用脱出物中各成分的几何尺寸差异对籽粒进行筛选，同时结合脱出物中各成分的悬浮特性差异进行风选，将风选和筛选有机结合完成谷子的清选，其工作过程及原理如图 2 所示。



1. 风机；2. 抖动板；3. 脱出物；4. 清选筛；5. 排出口；6. 复脱收集装置；7. 运粮装置。

1. Fan; 2. Shaking board; 3. Threshed materials; 4. Cleaning sieve; 5. Discharge outlet; 6. Re-threshing collector; 7. Grain delivery device.

图 2　谷子风筛式清选装置工作过程及原理

Fig. 2　Working principle and process diagram of millet air-screen cleaning device

工作时，振动筛在电机带动下通过四连杆机构驱动抖动板抖动，实现振动筛振动。脱出物首先落入振动筛筛面上，在抖动板作用下一部分物料轴向运移与分散，到达后端清选筛上，一部分物料向后抛扬，在风机气流的作用下将较强漂浮性的杂余物吹散后实现第一次清选。余下的物料在自身重力作用下落到下筛面上，通过进一步振动分层实现第二次清选。最后剩余部分籽粒落入籽粒绞龙内，谷码进入复脱收集装置被运移至脱粒分离装置进行再次脱粒，短茎秆及杂质在装置尾端排出清选装置。

2　谷子物料特性

选择谷子品种为“龙谷 31 号”，其脱出物主要包括籽粒、谷码、短茎秆和杂余[18]，其中杂余主要由刺毛和颖壳等组成。各部分脱出物的物料特性对风筛式分离清选装置的清选效果影响显著，是仿真建模的关键对象[19]。

2.1　谷子植株草谷比测定

草谷比是指作物在收获时切割线以上部分茎叶质量与籽粒质量间的比值。根据 GB/T 5262－2008《农业机械试验条件：测定方法的一般规定》[20]，在谷子种植地随机割取 10 株植株进行测定。测定结果表明，谷子植株的草谷比为 1.14～2.10，均值为 1.61。

2.2　谷子籽粒基本参数测定

从谷子脱出物中随机取出 20 粒谷子籽粒，用游标卡尺测定谷子籽粒的长、宽、高，重复测量 5 组，最终获得谷子籽粒长、宽、高的平均值分别为 1.57，

1.48 和 1.51 mm。用量筒随机量取 50 mL 谷子籽粒,置于电子天平上称取籽粒的质量,采用容积法,重复 5 次得到谷子籽粒体积质量的平均值为 820 g/L。随机选取 1 000 粒籽粒并称量,重复 10 次测得谷子籽粒的千粒质量为 3.23 g。

2.3 物料颗粒悬浮速度的测定

当物料颗粒全部处于上升气流中的某一水平面并悬浮其中时,该上升气流的速度被称为物料的悬浮速度[21]。采用 PS-20 气吹式悬浮速度测量装置,对脱出物中籽粒、谷码、茎秆、杂余的悬浮速度进行测定,得到各组物料的悬浮速度如表 1 所示。由表 1 可知,籽粒的最小悬浮速度为 4.45 m/s,大于杂余的最大悬浮速度 3.05 m/s,但籽粒与谷码、茎秆悬浮速度的数值区间存在小范围重叠,籽粒与谷码悬浮速度的重叠范围为 4.45～5.40 m/s,籽粒与茎秆悬浮速度的重叠范围为 4.45～6.24 m/s。

表 1 谷子脱出物中籽粒、谷码、茎秆、杂余的悬浮速度

Table 1 Suspension velocity of grain, chaff, stem and impurity in threshed millet m/s

组分 Component	悬浮速度 Suspension speed	组分 Component	悬浮速度 Floating speed
籽粒 Grain	4.45～11.22	茎秆 Stalk	1.68～6.24
谷码 Chaff	1.18～5.40	杂余 Impurity	0.85～3.05

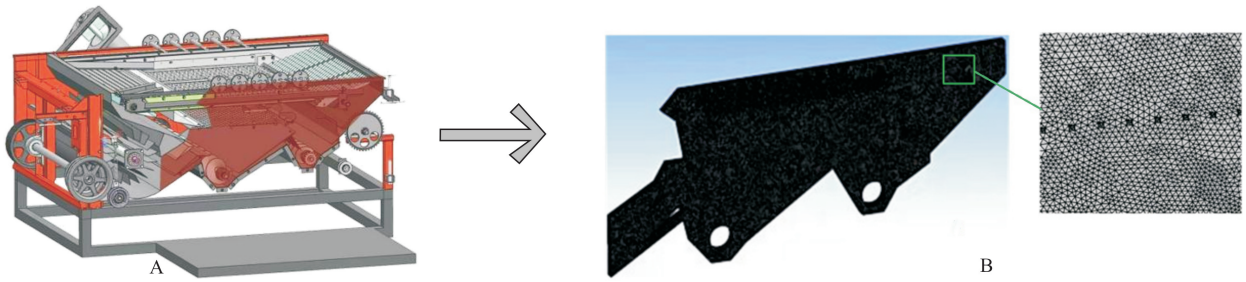
3 基于 Fluent 的流场仿真分析与试验

Fluent 主要用于模拟计算不同气流的流动状态、传热和化学反应等[22-23]。以常用的编织筛和冲孔筛为研究对象,在上、下筛分别为编织筛+编织筛、冲孔筛+冲孔筛、编织筛+冲孔筛的条件下,利用 Fluent 对清选装置进行流场仿真分析。

3.1 基于 Fluent 的流场仿真设置

3.1.1 清选筛腔体结构模型的构建及网格划分

使用 NX 12.0 软件建立清选筛腔体结构空腔三维模型如图 3-A 所示。由于清选筛腔体结构模型左右对称,为减少计算量且不会对内部气流造成影响,将清选室上部气流出口处适当延长,模型宽度在整体结构合理范围内选取一部分,可观察出口处气流的瞬时运动轨迹,取整体结构的 1/6 作为模型宽度,如图 3-B 所示。为保证 Orthogonal Quality(正交质量)达到 0.8 以上,基础网格尺寸大小设置为 2 mm。编织筛和冲孔筛的三维模型如图 4 所示。

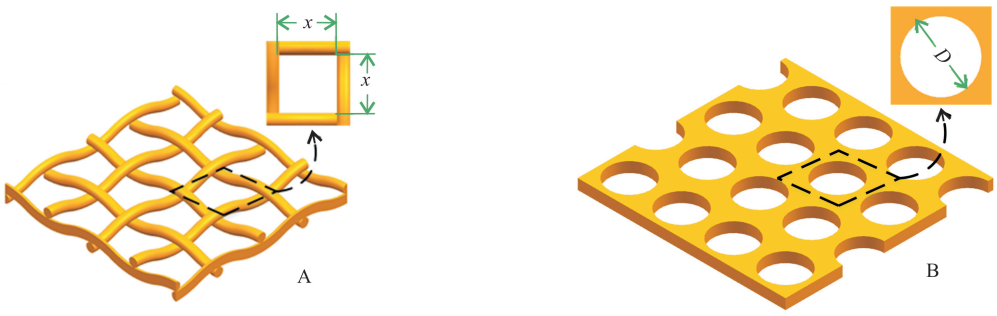


A. 清选筛腔体结构三维模型;B. 清选筛腔体网格划分。

A. Three-dimensional model of cleaning sieve cavity structure; B. Cleaning screen cavity grid division.

图 3 谷子风筛式清选装置清选筛腔体结构三维模型及网格划分

Fig. 3 Three-dimensional model and mesh generation of cleaning screen cavity structure of millet air-screen cleaning device



A. 编织筛;B. 冲孔筛。A. Woven sieve; B. Perforated sieve.

图 4 谷子风筛式清选装置筛网的三维模型

Fig. 4 Three-dimensional models of the screen mesh of millet air-screen cleaning device

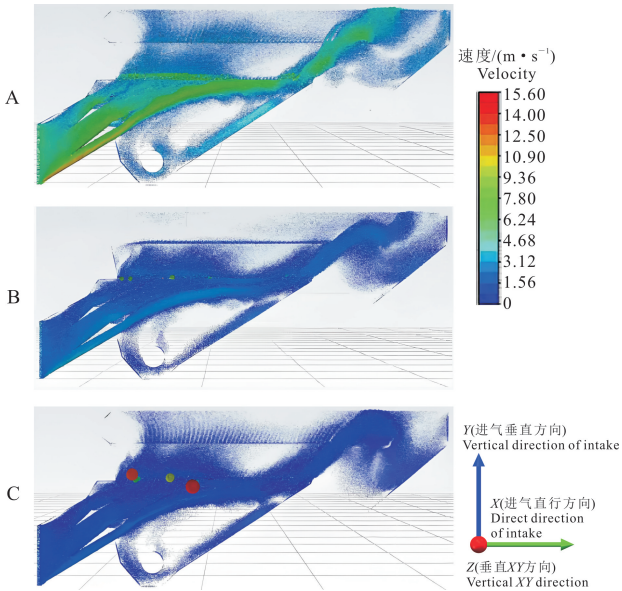
3.1.2　参数、算法及测量面设置　基于清选筛腔体内实际气流条件，采用标准 $k-\varepsilon$ 模型，选择 SIMPLE 算法，迭代步数设为 1 000 步。将清选装置入口设置为气流速度入口(velocity-inlet)，入口速度设定为 5 m/s，出口设置为出流边界(outflow)。

3.2　数值模拟结果与分析

不同筛网组合下谷子风筛式清选装置的气流分布如图 5 所示。当振动上、下筛均为编织筛(图 5-A)时，气流的透筛率较好，能够贯穿筛网且无涡流，后段气流被有效导出试验装置，并维持在较高流速；当振动上、下筛均为冲孔筛(图 5-B)时，冲孔筛沿 X 轴(进气方向)后半段及 Z 轴(垂直进气方向)出现杂乱的气体流线，整体流线速度相比上下筛均为编织筛慢，部分高速气流受到阻碍而从筛网下方及上、下筛之间流向尾部；当振动上筛为编织筛下筛为冲孔筛(图 5-C)时，整体流线速度较图 5-A 慢，与图 5-B 相比有更多气流通过上筛，造成下筛沿 Z 轴(垂直进气方向)方向前半段气体流线混乱。综上所述，振动上、下筛均为编织筛时气流更加稳定，气流的透筛率较好，能满足谷子清选对气流的要求。

3.3　清选装置流场试验

3.3.1　试验条件与方法　根据流场仿真结果，在上下筛网均为编织筛、风机风速为 5 m/s 条件下，利用谷子风筛式清选试验台，采用布点法，根据谷子风筛式清选试验台结构参数[24]，以振动上筛筛网前端中点且距筛面 30 mm 高处为原点，取进气方向为 x 轴，清选试验台径向为 y 轴，垂直筛面方向为 z 轴。沿 z 轴 30，60 和 90 mm 高度处设定 3 个测量面，对应脱出物下落过程的 3 个阶段，每个测量面上均匀分布 10 个测量点位，分别布置在沿 x 轴为 0，200，400，600 和 800 mm 处，每处对称放置 2 个风速传感器，具体风速监测系统如图 6 所示。

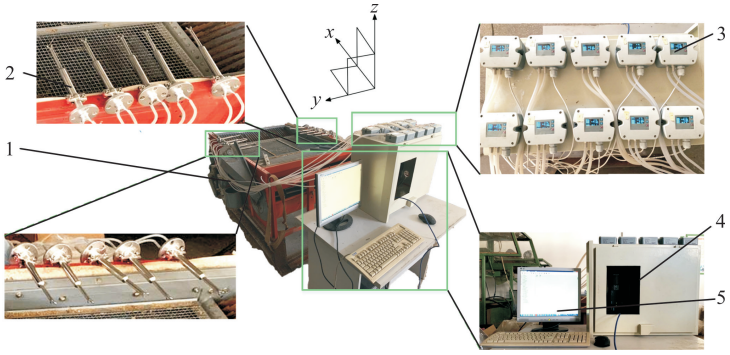


A. 上、下筛均为编织筛；B. 上、下筛均为冲孔筛；C. 上筛为编织筛，下筛为冲孔筛。

A. Both the upper and lower sieves are woven sieves; B. Both the upper and lower sieves are punching sieves; C. The upper sieve is a woven sieve and the lower sieve is a punching sieve.

图 5　不同筛网组合下谷子风筛式清选装置的气流分布

Fig. 5　Air flow distribution of millet air-screen cleaning device under different screen combinations



1. 探头；2. 谷子风筛式清选试验台；3 风速传感器；4. PLC 控制系统；5. 计算机监测软件系统。

1. Probe; 2. Millet air screen cleaning test-bench; 3. Wind speed sensor; 4. PLC control system; 5. Monitoring software system.

图 6　谷子风筛式清选试验台的风速监测系统

Fig. 6　Wind speed monitoring system for millet air-screen cleaning test bench

3.3.2　试验结果　谷子风筛式清选装置不同筛面高度处的风速分布如图 7 所示。由图 7 可知，筛面高度 90 mm 处的风速低于 60 mm 处，有利于脱出物分散；而筛面高度 60 mm 的风速高于 30 mm 处，对脱出物分离起催化作用；距离中心点 400 mm 内，筛面风速为 1.5～3.11 m/s，而距离中心点 400～800 mm 处的筛面风速最高为 4.22 m/s，大于杂余最大悬浮速度 3.05 m/s，有助于将杂余从脱出物中

分离出去,因此上下筛均采用编织筛满足谷子清选要求,设置较为合理。

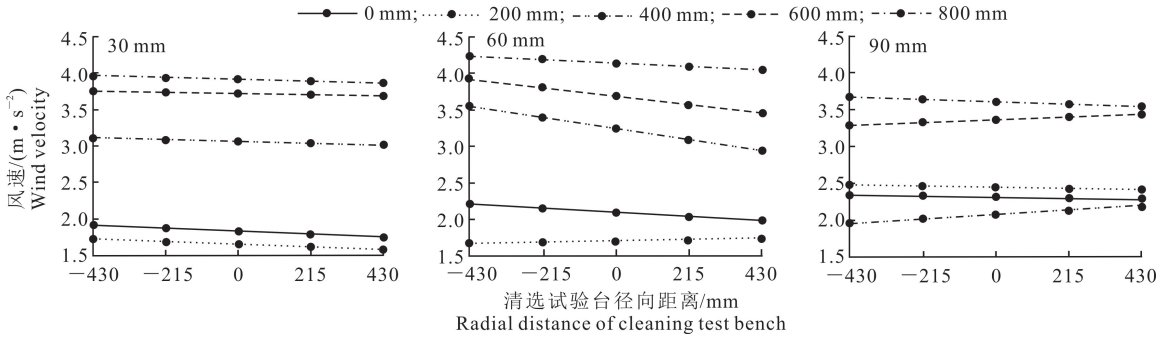


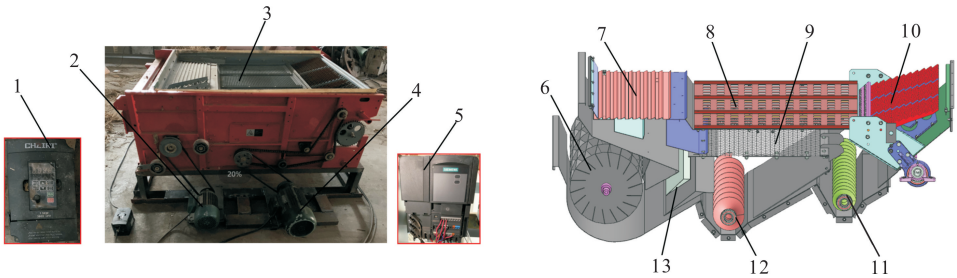
图 7 谷子风筛式清选装置筛面高度 30～90 mm 处风速的分布

Fig. 7 Wind speed distribution at 30－90 mm height of sieve surface of millet air sieve cleaning device

4 谷子风筛式清选装置的多因素试验

4.1 试验方法

试验于 2023 年 10 月 15 日在黑龙江八一农垦大学收获实验室内进行。“龙谷 31 号”谷子经人工收割后,再利用自制谷子脱粒试验台获取试验所用的谷子脱出物,其含水率控制在 35%～40%。试验设备为图 8 所示的谷子风筛式清选试验台。



1. 风机电机控制器;2. 风机电机;3. 清选装置;4. 振动筛电机;5. 振动筛电机控制器;6. 风机;7. 抖动板;8. 上振动筛;9. 下振动筛;10. 尾筛;11. 复脱机构搅龙;12. 运粮机构搅龙;13. 分风板。

1. Fan motor controller;2. Fan motor;3. Cleaning device;4. Vibrating screen motor;5. Vibrating screen motor controller;6. Fan;7. Shaking board;8. Upper vibrating screen;9. Lower vibrating screen;10. Tail sieve;11. Rethreshing screw feeder mechanism;12. Grain conveying screw feeder mechanism;13. Wind deflectors.

图 8 谷子风筛式清选试验台

Fig. 8 Millet air-screen cleaning test bench

参照 GB/T 5262－2008《农业机械试验条件:测定方法一般规定》[20],对谷子清选装置性能进行试验验证。试验开始前,首先准备谷子脱出物 90 kg,然后通过电机控制器控制电机转速,进而控制曲柄、风机转速,通过风向调节扳手调节风机倾角,最后对振动筛倾斜角度、筛网间隙等尺寸进行校核。试验开始时首先启动装置,待机器运转稳定后,以 3 kg/s 的速度向振动板上落入谷子脱出物。当试验进行到不再有籽粒进入集料装置后,等待 10 s,使用精度 0.01 g 的电子秤称量集料袋中的籽粒和杂质,收集清选装置出风口及装置外部散落的籽粒并称质量,完成 1 次试验。每次试验重复 3 次,取平均值。

4.2 主要评价指标

参照 GB/T 5983－2013《种子清选机试验方法》[25],将籽粒含杂率、清选损失率作为谷子脱粒清选试验的评价指标,其计算公式为:

$$y_1=\frac{m_1}{m_2}, \tag{1}$$

$$y_2=1-\frac{m_2-m_1}{m_3}。 \tag{2}$$

式中:y_1 为籽粒含杂率,%;y_2 为清选损失率,%;m_1 为清选作业完成后籽粒输出搅龙内所含杂余质量,g;m_2 为清选作业完成后籽粒输出搅龙内所接样品总质量,g;m_3 为喂入籽粒总质量,g。

4.3 多因素试验结果与分析

4.3.1 试验方案与结果 根据流场仿真结果,设置上、下筛网均为编织筛,在喂入量为 3 kg/s、振动筛振幅为 20 mm、振动筛倾角为 0°时,利用谷子风筛式清选试验台,以曲柄转速、风机转速、风机倾角为变量进行单因素试验,得到其较佳变化范围分别为

150～350 r/min、700～1 000 r/min、20°～40°。因此选取曲柄转速(x_1)、风机转速(x_2)、风机倾角(x_3)为试验因素，以籽粒含杂率(y_1)和清选损失率(y_2)为评价指标，利用三因素五水平正交试验设计方法，确定因素水平编码表如表 2 所示，试验方案及其结果如表 3 所示。

表 2　谷子风筛式清选装置三因素五水平正交试验的因素与水平

Table 2　Factors and levels of three-factor, five-level orthogonal experiment of millet air-screen cleaning device

水平 Level	因素 Factor		
	曲柄转速(x_1)/(r·min^{-1}) Crank speed	风机转速(x_2)/(r·min^{-1}) Fan speed	风机倾角(x_3)/(°) Fan inclination angle
1.628	350	1 100	40
1	309.46≈310	1 018.92≈1 019	35.95≈36
0	250	900	30
−1	190.54≈190	781.08≈781	24.05≈24
−1.628	150	700	20

表 3　谷子风筛式清选装置参数三因素五水平正交试验方案及结果

Table 3　Three-factor, five-level orthogonal experiment scheme and results of millet air-screen cleaning device parameters

试验序号 Test number	试验因素 Experimental factors			籽粒含杂率(y_1)/% Impurity rate of grain	清选损失率(y_2)/% Loss rate of cleaning
	曲柄转速(x_1)/(r·min^{-1}) Crank speed	风机转速(x_2)/(r·min^{-1}) Fan speed	风机倾角(x_3)/(°) Fan inclination angle		
1	190	781	24	4.43	1.40
2	310	781	24	4.48	1.49
3	190	1 019	24	2.48	2.65
4	310	1 019	24	3.04	3.44
5	190	781	36	5.42	1.50
6	310	781	36	4.43	1.45
7	190	1 019	36	4.14	2.84
8	310	1 019	36	3.81	4.51
9	150	900	30	5.21	1.68
10	350	900	30	3.61	2.44
11	250	700	30	3.52	2.04
12	250	1 100	30	2.41	3.79
13	250	900	20	3.03	1.87
14	250	900	40	4.56	2.84
15	250	900	30	3.24	1.41
16	250	900	30	2.69	1.65
17	250	900	30	3.33	1.53
18	250	900	30	3.11	1.67
19	250	900	30	2.72	2.18
20	250	900	30	3.06	1.52
21	250	900	30	3.13	1.48
22	250	900	30	3.07	1.56
22	250	900	30	3.58	1.84

4.3.2　试验结果分析　运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析，再对籽粒含杂率和清选损失率进行多元回归拟合[24]，并进行显著性检验，具体结果如表 4 所示。

表 4　谷子风筛式清选试验台籽粒含杂率和清选损失率回归模型的方差分析

Table 4　Variance analysis for regression models of grain impurity and cleaning loss rates of millet air-screen cleaning test bench

指标 Indicators	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P	显著性 Significance
籽粒含杂率(y_1)/% Impurity rate of grain	模型 Modelling	13.370	9	1.490	10.530	0.000	**
	x_1	0.847	1	0.847	6.000	0.029	*
	x_2	3.750	1	3.750	26.580	0.000	**
	x_3	2.590	1	2.590	18.330	0.001	**
	x_1x_2	0.171	1	0.171	1.210	0.291	
	x_1x_3	0.466	1	0.466	3.300	0.092	
	x_2x_3	0.278	1	0.278	1.970	0.184	

表 4(续) Table 4(continued)

指标 Indicators	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P	显著性 Significance
籽粒含杂率(y_1)/% Impurity rate of grain	x_1^2	4.010	1	4.010	28.420	0.000	**
	x_2^2	0.001	1	0.001	0.008	0.929	
	x_3^2	1.290	1	1.290	9.140	0.009	**
	残差 Residual	1.830	13	0.141			
	失拟性 Lack of fit	1.100	5	0.220	2.400	0.130	不显著 No significance
	误差 Error	0.734	8	0.092			
	总和 Total	15.200	22				
清选损失率(y_2)/% Loss rate of cleaning	模型 Modelling	14.480	9	1.610	15.25	0.000	**
	x_1	1.050	1	1.050	9.91	0.007	**
	x_2	8.140	1	8.140	77.17	0.000	**
	x_3	0.638	1	0.638	6.05	0.028	*
	x_1x_2	0.732	1	0.732	6.94	0.020	*
	x_1x_3	0.069	1	0.069	0.65	0.435	
	x_2x_3	0.180	1	0.180	1.71	0.214	
	x_1^2	0.205	1	0.205	1.95	0.186	
	x_2^2	2.750	1	2.750	26.10	0.000	**
	x_3^2	0.755	1	0.755	7.16	0.019	*
	残差 Residual	1.370	13	0.106			
	失拟性 Lack of fit	0.837	5	0.167	2.51	0.119	不显著 No significance
	误差 Error	0.534	8	0.067			
	总和 Total	15.85	22				

注:* 表示显著($P<0.05$);** 表示极显著($P<0.01$)。

Note: * indicates significant($P<0.05$); ** indicates highly significant ($P<0.01$).

(1)籽粒含杂率回归模型的建立与显著性分析。由表 4 可知,模型 $P=0.000$ 小于 0.05,表明籽粒含杂率回归模型显著。其中 x_2、x_3、x_1^2、x_3^2 对籽粒含杂率影响极显著($P<0.01$),x_1 对籽粒含杂率影响显著($P<0.05$);x_1x_2、x_2x_3、x_1x_3、x_2^2 对籽粒含杂率影响不显著($P>0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,得到各因素对籽粒含杂率影响的回归方程为:

$$y_1=3.14-0.25x_1-0.52x_2+0.44x_3+0.50x_1^2+0.28x_3^2。\quad(3)$$

对回归方程(3)进行失拟检验,得到失拟项 $P=0.130>0.1$,影响不显著,证明回归方程拟合结果合格,且不存在其他影响评价指标的主要因素。评价指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。使用贡献率法得到各因素对籽粒含杂率影响的显著性由大到小依次为风机倾角、曲柄转速和风机转速。

(2)清选损失率回归模型建立与显著性分析。由表 4 可知,模型 $P=0.000$ 小于 0.05,表明清选损失率回归模型显著,x_1、x_2、x_2^2 对清选损失率影响极显著($P<0.01$),x_3、x_1x_2、x_3^2 对清选损失率影响显著($P<0.05$),x_1x_3、x_2x_3、x_1^2 影响不显著。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,得到各因素对清选损失率影响的回归方程为:

$$y_2=1.69+0.28x_1+0.77x_2+0.22x_3+0.30x_1x_2+0.42x_2^2+0.22x_3^2。\quad(4)$$

对回归方程(4)进行失拟检验,得到失拟项 $P=0.119>0.1$,影响不显著,证明回归方程拟合结果合格,且不存在其他影响评价指标的主要因素。评价指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。使用贡献率法得到各因素对清选损失率影响的显著性由大到小依次为风机转速、风机倾角和曲柄转速。

4.3.3 性能指标的优化 采用多目标变量优化方法,运用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化功能,对两个回归模型进行优化求解。遵循降低含杂率与清选损失率的原则,结合各试验因素的边界条件,构建的非线性规划参数模型为:

$$\begin{cases}\min\ y_1(x_1,x_2,x_3);\\ \min\ y_2(x_1,x_2,x_3);\\ 150\ \text{r/min}\leqslant x_1\leqslant 350\ \text{r/min};\\ 700\ \text{r/min}\leqslant x_2\leqslant 1\ 100\ \text{r/min};\\ 20^\circ\leqslant x_3\leqslant 40^\circ。\end{cases}\quad(5)$$

通过优化求解,可知当曲柄转速为 239.8 r/min、风机转速为 920.23 r/min、风机倾角为 25.98°时,谷子风筛式清选装置的清选性能达到最

优，在此最优参数组合下籽粒含杂率为 2.89%，清选损失率为 1.78%。

4.4　验证试验

在与上述试验相同条件下，根据优化结果进行 3 次重复验证试验，综合考虑实际作业情况。对优化的参数进行圆整[25]后，取曲柄转速为 240 r/min，风机转速为 920 r/min，风机倾角为 26°进行试验验证，结果见表 5。由表 5 可知，验证试验的籽粒含杂率、清选损失率与理论优化结果的相对误差分别为 2.08%和 1.69%，均小于 5%，表明回归模型有较好的可靠性。

表 5　籽粒含杂率、清选损失率理论优化值与验证试验结果的对比

Table 5　Comparison between the theoretical optimization values and verification test results of grain impurity rate and cleaning loss rate　%

项目 Item	籽粒含杂率 Impurity rate of grain	清选损失率 Loss rate of cleaning
理论优化值 Theoretically optimized value	2.89	1.78
验证结果 Verification result	2.95	1.81
相对误差 Relative error	2.08	1.69

5　结　论

1）以“龙谷 31 号”谷子为试验对象，基于谷子脱出物的物料特性，采用 Fluent 仿真分析方法，对上、下筛网分别为编织筛＋编织筛、冲孔筛＋冲孔筛、编织筛＋冲孔筛的清选装置内部的气流场进行了仿真模拟，结果表明，当振动上、下筛网均为编织筛时，气流的透筛率较好，能够贯穿筛网，且筛网之间无涡流，后段气流可被有效导出试验装置并维持在较高流速，性能优于其他两种组合，因此确定振动筛的上、下筛均为编织筛。

2）利用风压风速监测系统，通过台架试验对上、下筛网均为编织筛的清选装置进行验证。台架试验结果表明，筛面高度 90 mm 处风速低于 60 mm 处，有利于脱出物分散；而筛面高度 60 mm 处风速高于 30 mm 处，对脱出物分离起催化作用；筛面的最高风速可达 4.22 m/s，大于杂余悬浮速度，足够将杂余从谷子籽粒中分离出去，因此振动上、下筛网均为编织筛满足清选需求，设置较为合理。

3）以籽粒含杂率和清选损失率为评价指标，对曲柄转速、风机转速、风机倾角进行三因素五水平正交台架试验，结果表明：风筛式清选装置最优作业参数为曲柄转速 239.8 r/min，风机转速 920.23 r/min，风机倾角为 25.98°。利用圆整值（曲柄转速 240 r/min，风机转速 920 r/min，风机倾角 26°）进行验证试验，得到实际的籽粒含杂率为 2.95%，清选损失率为 1.81%，与理论优化结果的相对误差分别为 2.08%和 1.69%，均小于 5%。参考谷物收获行业标准，即清选损失率≤3.5%，籽粒含杂率≤7%。表明验证试验台可以实现谷子清选的目标，所设计的风筛式谷子清选装置结构可靠，能够满足谷子清选作业的工作需求。

[参考文献]

[1] 许洪峰. 谷子机械化生产现状及发展趋势[J]. 农业技术与装备，2014(17)：38-39.
XU H F. Mechanization of millet production status and development trend[J]. Agricultural Technology & Equipment，2014(17)：38-39.

[2] 李顺国，刘斐，刘猛，等. 新时期中国谷子产业发展技术需求与展望[J]. 农学学报，2018，8(6)：96-100.
LI S G，LIU F，LIU M，et al. Technology need and prospect of foxtail millet industry development in China in the new era[J]. Journal of Agriculture，2018，8(6)：96-100.

[3] 侯杰，谢方平，刘大为，等. 联合收获机风筛式清选装置研究进展[J]. 农业工程与装备，2020，47(3)：12-17.
HOU J，XIE F P，LIU D W，et al. Research progress on air-and-screen cleaning device for combined harvester[J]. Agricultural Engineering and Equipment，2020，47(3)：12-17.

[4] 李鸿信，李耀明，马征. 联合收获机中清选风机的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究，2020，42(9)：1-5.
LI H X，LI Y M，MA Z. Research status and development trend of cleaning fans in combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(9)：1-5.

[5] 侯华铭，崔清亮，郭玉明. 全喂入谷子联合收获机脱出物含水率对其悬浮特性的影响[J]. 农业工程学报，2018，34(24)：29-35.
HOU H M，CUI Q L，GUO Y M. Effects of moisture contents of threshed materials from whole-feeding combine for foxtail millet on their suspension characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(24)：29-35.

[6] ZHANG D M，YI S J，ZHANG J H，et al. Establishment of millet threshing and separating model and optimization of harvester parameters[J]. Alexandria Engineering Journal，2022，61(12)：11251-11265.

[7] 段延平. 谷子机械化生产存在问题和对策[J]. 农业技术与装备，2014(18)：12-13.
DUAN Y P. Millet presence mechanized production problems and countermeasures[J]. Agricultural Technology & Equipment，2014(18)：12-13.

[8] 徐立章，李洋，李耀明，等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：1-16.
XU L Z，LI Y，LI Y M，et al. Research progress on cleaning

technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):1-16.

[9] 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.

[10] 黄颖石,张卫国,冯松科,等.基于EDEM-Fluent的荞麦旋风分离清选装置研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(10):128-140.
HUANG Y S,ZHANG W G,FENG S K,et al. Buck wheat cyclone separation and cleaning device based on EDEM-Fluent[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed),2023,51(10):128-140.

[11] DONG K J,YU A B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination[J]. Minerals Engineering,2012,31:2-9.

[12] ELSKAMP F,KRUGGEL-EMDEN H. Review and bench marking of process models for batch screening based on discrete element simulations[J]. Advanced Powder Technology,2015,26(3):679-697.

[13] ZHANG D M,YI S J,LI H Y,et al. Optimization of millet axial flow threshing and separation device based on discrete element method[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette,2021,28(6):1877-1884.

[14] ZHANG D M,YI S J,LIU J M,et al. Effect of threshing and separation stress law on millet threshing performance[J]. International Agricultural Engineering Journal,2020,29(4):269-277.

[15] 孟亚娟.谷子清选装置的设计与试验[S].河南洛阳:河南科技大学,2019.
MENG Y J. Design and performance test study of roller-type fan mill type mill sorting device[S]. Luoyang,Henan:Henan University of Science and Technology,2019.

[16] 侯华铭,崔清亮,陈益胜,等.谷子收获机风筛式清选装置试验[J].农业工程,2022,12(8):93-98.
HOU H M,CUI Q L,CHEN Y S,et al. Experiment on air and screen cleaning device of foxtail millet combine harvester[J]. Agricultural Engineering,2022,12(8):93-98.

[17] 李心平,孟亚娟,张家亮,等.辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(10):92-102,136.
LI X P,MENG Y J,ZHANG J L,et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):92-102,136.

[18] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等.北方谷子物料特性的试验研究[J].中国农机化学报,2021,42(5):75-80.
CHEN T,YI S J,LI Y F,et al. Experimental study on the material characteristics of northern millet[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(5):75-80.

[19] 李骅,张美娜,尹文庆,等.基于CFD的风筛式清选装置气流场优化[J].农业机械学报,2013,44(S2):12-16.
LI H,ZHANG M N,YIN W Q,et al. Optimization of airflow field on air-and-screen cleaning device based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(S2):12-16.

[20] 农业部农业机械试验鉴定总站.农业机械试验条件:测定方法的一般规定:GB/T 5262-2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
Agricultural Mmachinery Test and Appraisal Station of Ministry of Agriculture. Measuring methods for agricultural machinery testing conditions:General rules:GB/T 5262-2008[S]. Beijing:China Standards Publishing House,2009.

[21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.牧草种子悬浮速度测定方法:JB/T 7290-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Method for determination of suspension velocity of forage seeds:JB/T 7290-2007[S]. Beijing:China Standards Publishing House,2007.

[22] 赵学观,徐丽明,高连兴,等.基于Fluent的大豆脱粒机旋风分离器模拟与优化[J].农业机械学报,2014,45(S1):80-87.
ZHAO X G,XU L M,GAO L X,et al. Simulation of soybean shresher cyclone separating and cleaning system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(S1):80-87.

[23] 王晗昊,李耀明,徐立章,等.再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(20):84-92.
WANG H H,LI Y M,XU L Z,et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(20):84-92.

[24] 张紫恒,陶桂香,衣淑娟,等.谷子风筛式清选装置设计与试验[J].中国农机化学报,2024,45(6):119-127.
ZHANG Z H,TAO G X,YI S J,et al. Design and experimental of a wind sieve type cleaning device for cereals[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(6):119-127.

[25] 中国国家标准化管理委员会.种子清选机试验方法:GB/T 5983-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
Standardization Adiminstration of China. Test method of seed cleaning machine:GB/T 5983-2013[S]. Beijing:China Standards Publishing House,2013.

(责任编辑:温晓平)