

玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验

王立军 马 杨 冯 鑫 宋良来 柴 进

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对目前玉米籽粒收获机籽粒清洁率和损失率不能满足国家标准要求的问题,设计了一种分段式振动圆孔筛清选装置。利用 CFD-DEM 耦合技术对传统双层往复振动筛清选装置内气固两相运动进行仿真,根据上筛纵向区域内籽粒透筛规律和上筛长度,确定合适的分段式振动筛前筛长度,并设计分段式振动筛后筛,使玉米脱出物在前筛尾部下落到后筛之前可以被前筛上下混合气流继续分散、分层,以提高籽粒清洁率,降低籽粒损失率。在保证分段式振动筛前筛清选性能不变的条件下,以后筛频率、后筛振幅、前后筛垂直间距、前后筛水平间距为试验因素,以籽粒的清洁率和损失率为评价指标,设计二次正交旋转中心组合试验,建立各因素与指标之间的回归数学模型。利用 Design-Expert 8.0.6 软件的多目标优化算法获得最佳参数组合:后筛频率为 4.44 Hz、后筛振幅为 15.65 mm、前后筛垂直间距为 114 mm、前后筛水平间距为 18.53 mm。在清选装置入口气流速度为 12.8 m/s、气流方向角为 25°、清选装置入口玉米脱出物喂入量为 5 kg/s 时,分段式振动筛清选装置使籽粒清洁率提高到 98.34%,籽粒损失率降至 1.45%,籽粒清洁率比传统双层往复振动筛清选装置提高 1.26 个百分点,损失率降低 0.81 个百分点,满足国家筛分质量评价技术规范要求。

关键词: 玉米籽粒收获机; 清选装置; 分段式振动筛; 参数优化

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)09-0089-12

OSID:



Design and Experiment of Segmented Vibrating Screen in Cleaning Device of Maize Grain Harvester

WANG Lijun MA Yang FENG Xin SONG Lianglai CHAI Jin

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In view of the fact that the cleaning rate and loss rate of maize grain could not meet the requirements of national standards for maize grain harvester, a cleaning device with segmented vibrating screens whose holes were round was designed. The CFD-DEM coupled method was used to simulate the gas-solid two-phase motion in cleaning device with traditional reciprocating vibrating double screens. Based on the law of grain penetration along the longitudinal area of the upper screen and the length of the upper screen, the suitable length of the front screen was determined and the rear screen was designed. The maize mixture could be dispersed and layered by the combination air from the upper and lower of the front screen before they fell on the rear screen from the end of the front screen. The cleaning rate of the grains could be increased and the loss rate of the grains could be decreased. Under the condition that the cleaning performance of the front screen remained constant, the frequency, amplitude of the rear screen, the vertical and horizontal distances between the front and rear screens were taken as the experimental factors. The cleaning rate and loss rate of the maize grains were taken as the performance indexes. The quadratic orthogonal rotational-combinational simulation tests were designed. The regression mathematical models between factors and indexes were founded. The optimal parameter combination was obtained by using the multi-objective optimization algorithm of Design-Expert 8.0.6 software. The best combination of parameters were the frequency of rear screen of 4.44 Hz, the amplitude of rear screen of 15.65 mm, the vertical distance between the front and rear screens of 114 mm, horizontal distance between the front and rear screens of 18.53 mm. Under the condition of inlet air velocity of 12.8 m/s and the air direction angle of 25°, when the feed rate of maize mixture at the inlet of the cleaning device was 5 kg/s, the

收稿日期: 2019-12-10 修回日期: 2020-02-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(E2017004)、国家重点研发计划项目(2018YFD0300103)和国家自然科学基金项目(51475090)

作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获机械研究,E-mail: wljszf@163.com

cleaning rate of maize grain was 98.34% and the loss rate of maize grain was 1.45%. Compared cleaning device with traditional reciprocating vibrating double screens, the cleaning rate of maize grain of the cleaning device with segmented vibrating screens was increased by 1.26 percentage points and the loss rate of maize grain was decreased by 0.81 percentage points, which could meet the requirements of technical specification for quality evaluation of screening in China.

Key words: maize grain harvester; cleaning device; segmented vibrating screen; parameter optimization

0 引言

清选装置是玉米籽粒联合收获机的关键部件,其结构和性能直接影响玉米籽粒的清选效果,其中风筛式清选装置应用最为广泛。风筛式清选装置利用风机产生的气流场使玉米混合物分散,并带走部分轻杂余,其余混合物在筛面振动作用下分散、分层,使玉米籽粒透筛而杂余排出。

在清选装置设计方面,学者们进行了诸多研究,取得了大量成果,通过设计多种清选装置提高了联合收获机的清选性能^[1-15]。在这些清选装置中,多层筛面运动参数相同,但是对于物料在筛过程中被具有不同运动参数的筛面连续筛分的研究却鲜有报道。

本课题组前期对国产玉米籽粒收获机进行了田间试验,结果表明,收获机清选装置的籽粒损失率为3.71%,籽粒清洁率为95.34%。针对玉米籽粒联合收获机籽粒清洁率较低、损失率高的问题,本文基于CFD-DEM耦合技术对传统双层往复振动筛清选装置内气固两相运动进行仿真,设计一种分段式振动筛清选装置,通过改变上筛结构来改变其后部气流场的分布、籽粒分布及透筛性,由仿真试验确定分段式振动筛最佳的结构参数和工作参数组合,并进行台架试验,验证分段式振动筛清选装置的性能。

1 结构与工作原理

1.1 整体结构

分段式振动筛清选装置主要由风机、抖动板、前筛、后筛、尾筛、下筛、驱动轴、双向摇杆、机架等组成,如图1所示。

抖动板安装在清选装置前部。分段式振动筛清选系统中的风机为单风道贯流风机,风机安装在抖动板的下部,清选装置的前部,如图2所示。上筛是由前、后两个长度不同的筛体组成,前、后筛平行安装。前筛由前置吊杆铰接悬挂在机架的上部,通过由前筛驱动轴上的偏心轮、摇臂、双向摇杆组成的曲柄摇杆机构,实现前筛的往复摆动,完成对玉米脱出物的初次筛选;后筛由后置吊杆悬挂在机架的后部,与前筛运动形式相同,通过后筛驱动轴驱动的曲柄摇杆机构实现后筛的往复摆动,完成对玉米脱出物

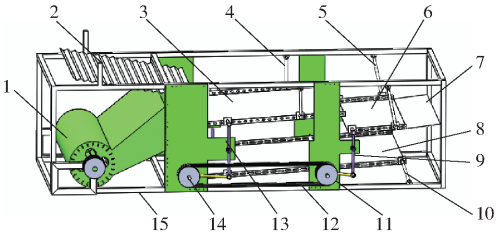


图1 分段式振动筛清选装置结构图

Fig. 1 Cleaning device with segmented vibrating screens

1. 风机 2. 抖动板 3. 前筛 4. 前置吊杆 5. 后置吊杆 6. 后筛 7. 尾筛 8. 下筛 9. 后置双向摇杆 10. 支撑摇杆 11. 后筛驱动轴 12. 传动带 13. 前置双向摇杆 14. 带轮 15. 机架

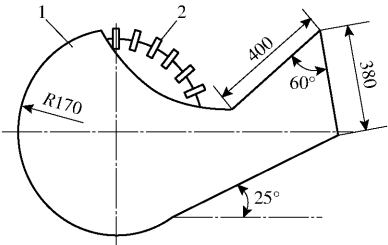


图2 单风道贯流风机示意图

Fig. 2 Schematic of single duct cross flow fan

1. 风机外壳 2. 风筛叶片

中籽粒的持续筛选;前、后筛驱动轴之间由传动带进行动力传递,通过设计带轮之间的传动比实现后筛频率的改变,设计的后筛摇杆长度可以实现后筛振幅的改变。下筛前端与前置双向摇杆铰接,后端由支撑摇杆支撑,随着前置双向摇杆往复摆动,对前、后筛下落的物料进行再次筛选。

1.2 工作原理

玉米脱出物是指玉米经玉米籽粒收获机摘穗、脱粒后最终落入清选装置内的混合物,其中包括玉米籽粒、茎秆、芯和轻质杂余。风机产生的气流可使玉米脱出物在抖动板下落过程中初步分层、分散,部分轻质杂余被直接吹出清选装置外;落到前筛的玉米脱出物通过筛面的振动和风机产生气流的协同作用,使大部分玉米籽粒在前筛完成透筛,部分籽粒受玉米茎秆、玉米芯等夹带落到后筛。在前筛尾部与后筛前端之间存在一定的垂直间距,前筛清选后的玉米脱出物在此处受到气流的影响使未透筛的籽粒和杂余再次分层、分散,经后筛筛分使玉米脱出物完成持续清选,玉米脱出物筛分如图3所示。此装置相对于传统双层往复振动筛清选装置,提高了清选装

置对气流的利用率,继而提高了整个装置的工作性能。

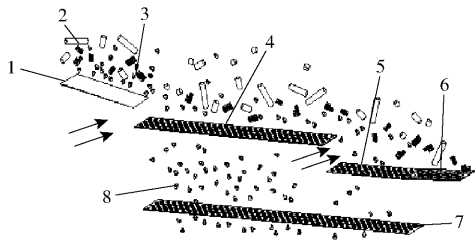


图3 分段式振动筛清选装置筛分玉米脱出物示意图

Fig.3 Screening of maize mixture in cleaning device with segmented vibrating screens

1. 抖动板 2. 玉米茎秆 3. 玉米芯 4. 前筛 5. 后筛 6. 尾筛
7. 下筛 8. 玉米籽粒

2 颗粒在前筛下落后运动分析

当玉米脱出物从前筛尾部落到后筛时具有一定的速度 v , 如图4所示。

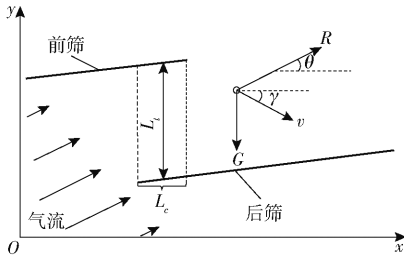


图4 颗粒在前筛下落后的受力分析

Fig.4 Force on particles after falling from front screen

颗粒在前筛下落时会受到气流的作用,在水平方向和竖直方向运动方程式为

$$\begin{cases} v_x = v \cos \gamma + a_x t \\ v_y = v \sin \gamma + a_y t \\ L_x = v \cos \gamma t + \frac{1}{2} a_x t^2 \\ L_t = v \sin \gamma t + \frac{1}{2} a_y t^2 \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 v ——颗粒离开前筛时速度, m/s
 v_x ——颗粒沿水平方向分速度, m/s
 v_y ——颗粒沿垂直方向分速度, m/s
 γ ——颗粒速度与水平方向夹角, $(^\circ)$
 L_x ——颗粒运动水平位移, mm
 L_t ——前后筛垂直距离, mm
 a_x ——颗粒在水平方向上加速度, m^2/s
 a_y ——颗粒在垂直方向上加速度, m^2/s
 t ——颗粒从前筛落到后筛的时间, s

颗粒在水平及垂直方向上的加速度为

$$\begin{cases} a_x = \frac{R \cos \theta}{m} \\ a_y = \frac{R \sin \theta - G}{m} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $G = mg$ (3)

- 式中 R ——风力, N
 θ ——气流方向角, $(^\circ)$
 G ——颗粒重力, N
 m ——颗粒质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2

联立式(1)~(3)可得

$$\begin{cases} L_x = v \cos \gamma t + \frac{t^2 R \cos \theta}{2m} \\ L_t = v \sin \gamma t + \frac{t^2 (R \sin \theta - mg)}{2m} \\ R = K_p \mu u^2 \\ u = \frac{Q}{A} \end{cases} \quad (4)$$

- 式中 K_p ——风力系数, mm^{-1}
 u ——气流平均速度, m/s
 Q ——气流流量, m^3/s
 A ——管道截面面积, m^2

当前后筛垂直间距一定,前后筛的水平间距 L_c (水平重合量为前后筛之间重合的距离,记水平间距为负值)增大(或水平重合量减少),即后筛长度减小时,原后筛下部被阻挡的气流进入前后筛中间部位,使得此处进风量 Q 随着前后筛水平间距的增大而增大,而与气流垂直的管道截面 A 面积不变,如图5所示。

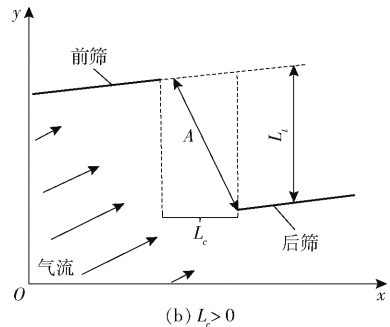
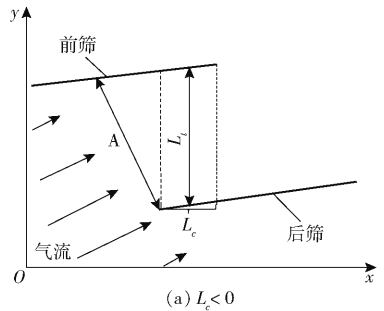


图5 气流随前后筛水平间距的变化

Fig.5 Changes of air flow with horizontal distance between front and rear screens

由公式(4)可知,气流的平均速度 u 变大,进而风力 R 会增大。由此,设定风力与前后筛水平间距

L_c 的关系式为 $R=f(L_c)$,可得

$$\begin{cases} L_x=v\cos\gamma t+\frac{t^2f(L_c)\cos\theta}{2m} \\ L_t=v\sin\gamma t+\frac{t^2}{2}\left(\frac{f(L_c)\sin\theta}{m}-g\right) \end{cases} \quad (5)$$

由公式(5)可知,当前后筛面的垂直间距 L_t 增大时,颗粒的下落时间 t 会随之增加,由此设定颗粒的下落时间 t 和垂直间距 L_t 的关系式为 $t=f(L_t)$,颗粒从前筛落到后筛过程中的水平位移 L_x 为

$$L_x=f(L_t)v\cos\gamma+\frac{f^2(L_t)f(L_c)\cos\theta}{2m} \quad (6)$$

颗粒落到后筛的位置会影响颗粒的筛分,由此可知前后筛的垂直间距 L_t 和前后筛面的水平间距 L_c 对后筛的清选性能有一定的影响。

3 前筛长度仿真试验

3.1 仿真模型及参数设定

3.1.1 清选装置模型

6 行玉米籽粒联合收获机中的传统双层往复振动筛清选装置结构是分段式振动筛清选装置设计的基础。鉴于尾筛为贝壳筛,其主要作用是将杂余排出,将上筛等距划分^[16],通过仿真分析上筛纵向区域的籽粒透筛规律,从而设计分段式振动筛清选装置前后筛的长度及后筛与前筛的相对位置。仿真时选定模型宽度为 100 mm^[17],运用 SolidWorks 建立清选装置简化三维模型,如图 6 所示,模型参数如表 1 所示。将清选装置模型保存为 STEP 格式并导入到 Gambit 中进行网格划分,局部网格重构法作为动网格(Moving mesh)的更新计算方法。

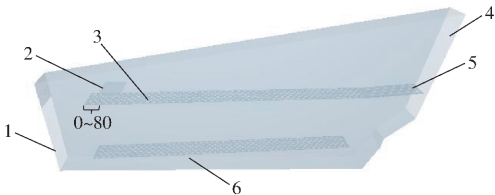


图 6 传统双层往复振动筛清选装置模型
Fig.6 Model of cleaning device with traditional reciprocating vibrating double screens

1. 气流入口 2. 抖动板 3. 上筛 4. 杂余出口 5. 尾筛 6. 下筛

3.1.2 玉米脱出物模型

试验玉米品种选用德美亚 1 号,通过田间试验确定玉米脱出物组成成分及各成分质量百分比,并通过东北农业大学激光扫描试验台对玉米脱出物进行扫描。利用 SolidWorks 软件将颗粒模型云点图转换为 STEP 格式文件,导入到 EDEM 中进行小球填充。玉米籽粒联合收获机清选装置的喂入量逐年增大,国产玉米籽粒收获机的喂入量一般为 5 kg/s,

表 1 模型参数

Tab.1 Parameters of model

部件	参数	数值
清选装置	长度/mm	1 850
	高度/mm	925
	宽度/mm	100
上、下筛	筛面长度/mm	1 360
	筛面宽度/mm	1 100
	圆孔筛孔径/mm	15
	相邻孔间距/mm	30
	筛面厚度/mm	2
	安装倾角/(°)	3.5
	上筛与下筛间距/mm	340
尾筛(贝壳筛)	安装倾角/(°)	7
	长度/mm	280

因此本次仿真试验中设定玉米脱出物喂入量为 5 kg/s,在上筛前端以 0 m/s 初速度喂入,各成分模型、质量百分比及仿真颗粒数目如表 2 所示。

表 2 玉米脱出物各成分模型、质量百分比及仿真颗粒数目

Tab.2 Models, quality percentage and number of simulated components in maize mixture

种类	实物	模型	类别	类别所占百分比/%	仿真数目/个	仿真颗粒总数/个
玉米籽粒			矩形	15.8	90	988
			锥形	74.1	765	
			球形	10.1	133	
茎秆			长28 mm	13.9	137	513
			长36 mm	32.2	189	
			长44 mm	30.0	112	
			长52 mm	23.9	75	
玉米芯			1/4圆	50.0	128	440
			1/2圆	20.7	181	
			整圆	29.3	131	

3.1.3 仿真参数设定

分段式振动筛清选装置涉及气体-颗粒两相流动,使用 CFD-DEM 耦合计算,其中气相由 Fluent 12.0 求解,颗粒相由 EDEM 2.2 求解^[18]。

在 Fluent 中选定标准 $k-\varepsilon$ 模型,求解器类型选定为压力基非稳态。作业时,风机的入口气流速度为 9.6 ~ 16 m/s,单因素试验是在此气流速度范围内进行,气流速度选取范围中间值 $u=12.8$ m/s。依据风机下壳体的角度,确定气流方向角为 25°。设定湍流强度为 3.15%,速度入口水力直径为 158.68 mm。

玉米脱出物在清选装置内运动,脱出物颗粒之间、脱出物与筛面和壁面会发生接触碰撞,在 EDEM 中选用 Hertz-Mindlin(no-slip)模型,各材料的力学特性和各材料间的接触属性如表 3、4 所示^[19-21]。设定上、下筛振幅为 19 mm,频率为 5.15 Hz,上筛的

表 3 材料的力学特性参数

Tab.3 Mechanical properties of materials				
参数	玉米籽粒	玉米芯	玉米茎秆	筛面(钢)
泊松比	0.40	0.45	0.42	0.30
剪切模量/MPa	127	109	100	700
密度/(g·cm ⁻³)	1.197	0.330	0.112	7.800

表 4 材料间接触属性参数

Tab.4 Interaction properties of materials									
参数	玉米籽粒-玉米籽粒	玉米籽粒-玉米茎秆	玉米籽粒-玉米芯	玉米籽粒-筛面(钢)	玉米茎秆-玉米茎秆	玉米茎秆-玉米芯	玉米茎秆-筛面(钢)	玉米芯-玉米芯	玉米芯-筛面(钢)
	玉米籽粒	玉米茎秆	玉米芯	筛面(钢)	玉米茎秆	玉米芯	筛面(钢)	玉米芯	筛面(钢)
碰撞恢复系数	0.31	0.27	0.25	0.54	0.21	0.22	0.29	0.22	0.33
静摩擦因数	0.79	0.71	0.68	0.48	0.65	0.68	0.62	0.78	0.70
滚动摩擦因数	0.060 7	0.010 0	0.010 0	0.031 1	0.010 0	0.010 0	0.010 0	0.010 0	0.010 0

筛面的作业性能达到最佳,需确定合适的分段式振动筛前筛长度。为此,采用统计颗粒 ID 的方法对传统双层往复振动筛上筛筛面纵向区域内的玉米籽粒透筛率进行统计并分析,试验结果如图 7 所示。

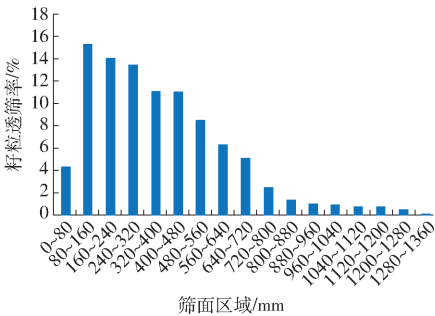


图 7 筛面纵向区域的籽粒透筛率

Fig.7 Penetration rate of grains along screen

玉米籽粒的透筛主要集中在上筛的前中部。由于玉米脱出物从抖动板落到筛面的主要区域为 80 ~ 640 mm,玉米脱出物堆积,并受到筛面的振动作用分散。从抖动板下落的过程中,气流会对玉米脱出物进行初次清选,杂余与籽粒分离且向上筛后部运动,仅有部分籽粒落到 0 ~ 80 mm 区域内,使得此区域内的籽粒透筛比例较低;在 80 ~ 960 mm 区域内,经由气流清选后的脱出物不断落下,筛面上部的气流速度变小,脱出物被推送到筛尾的能力变弱,使得筛面上籽粒与杂余的碰撞减少。脱出物在筛面的作用下,籽粒向下运动,杂余向上运动,使得籽粒在此区域内透筛比例较高,在上筛筛面 0 ~ 960 mm 内透筛籽粒占总籽粒的 95.06%;在上筛 960 ~ 1 360 mm 的区域内,脱出物中的籽粒明显减少,杂余对籽粒的影响更为明显,部分玉米芯透过筛面,而籽粒透筛受到影响,导致此区域内的籽粒透筛比例减少,同时导致籽粒清洁率降低。由此确定分段式振动筛清选装置前筛的长度为 960 mm。

振动方向角为 136.6°,下筛的振动方向角为 43.4°。EDEM 中时间步长是 Rayleigh 步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

3.2 仿真结果

3.2.1 前筛长度的确定

为保证分段式振动筛前筛的清选性能,使前后

3.2.2 气固两相运动规律分析

在《农业机械设计手册》^[22]中清选装置设计指出,清选装置的双层筛面间距为 100 ~ 150 mm,抖动板尾部高出筛面约 100 mm。前筛可以对籽粒进行筛选,又可以像抖动板一样将未清选的玉米脱出物向后推送落到后筛,且沿清选装置纵向方向前筛与后筛又是上下两层筛面,因此选取前后筛垂直间距为 100 mm。为了初次探究前后筛之间气流对玉米脱出物持续清选的作用,应保证分段式振动筛前后筛面的总长与传统双层往复振动筛上筛的长度相同,筛面的运动参数与传统双层往复振动筛的运动参数相同。因此确定分段式振动筛前后筛水平间距为 0 mm,根据玉米籽粒的透筛比例确定前筛长度为 960 mm,后筛的长度即为 400 mm,模型如图 8 所示。对分段式振动筛清选装置内物料运动进行耦合仿真,材料及参数设定如表 1 ~ 4,并与传统双层往复振动筛清选装置对比。

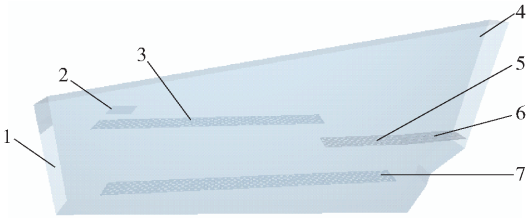


图 8 分段式振动筛清选装置仿真模型

Fig.8 Model of cleaning device with segmented vibrating screens

1. 气流入口 2. 抖动板 3. 前筛 4. 杂余出口 5. 后筛 6. 尾筛 7. 下筛

(1) 气流场分布

鉴于筛上的气流对于玉米脱出物的清选起着至关重要的作用,因此对清选装置中各区域内的气流速度进行提取。如图 9b 所示,在传统双层往复振动筛上,气流速度从前到后先减小后增大,沿上筛垂直

方向从上至下逐渐减小。在上筛前部的气流速度最大为 12.1 m/s,可以将抖动板上下落的玉米脱出物中的籽粒与杂余分散并向后吹送;筛面的中部气流速度最小为 6.6 m/s。

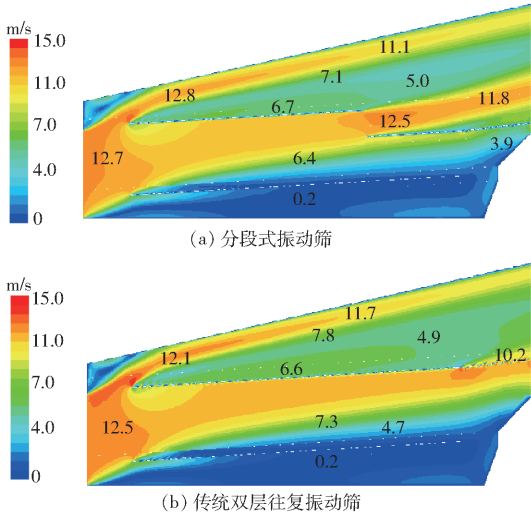


图 9 不同清选装置的气流场分布
Fig.9 Distribution of air flow field in different cleaning devices

通过对比气流场可知,传统双层往复振动筛与分段式振动筛清选装置的气流场在前部和中部区域无明显区别。在后部区域,传统式振动筛上筛面的气流速度沿筛面明显减小,此处气流对脱出物的推送作用减弱;分段式振动筛中,后筛前部与前筛后部之间会产生较大速度的气流,气流速度最大为 12.5 m/s,其竖直方向的分速度为 9.6 m/s。在实验室测得收获时的玉米籽粒悬浮速度最高为 12.2 m/s;玉米芯的悬浮速度最高为 4.97 m/s;玉米茎秆的悬浮速度最高为 3.22 m/s。气流在垂直方向上的分速度大于玉米芯和茎秆的悬浮速度,小于籽粒的悬浮速度,可以使玉米籽粒与杂余更好地分离,更有利于杂余的排出和玉米籽粒的透筛。后筛上部气流速度为传统双层往复振动筛相同位置筛面上气流速度的 1~3 倍(在传统双层往复振动筛上筛后部区域筛面上部气流速度为 4.9~6.6 m/s,分段式振动筛中后筛上部气流速度为 5.0~12.5 m/s)。

(2)颗粒运动轨迹

由于传统双层往复振动筛清选装置和分段式振动筛清选装置的结构前中部相同,玉米脱出物的运动轨迹基本一致,如图 10 所示。通过对比可知,在清选装置后部,传统双层往复振动筛上筛筛面上的玉米脱出物无明显分离,籽粒被杂余夹带。籽粒不能有效地筛分而部分杂余透过筛面,导致了籽粒损失率过高,清洁率低;在分段式振动筛清选装置中,经由前筛清选后的玉米脱出物在落入后筛的过程中

受气流的影响,籽粒与杂余再次分离,杂余向后部吹送,籽粒落到后筛的前部可以更有效地筛分。

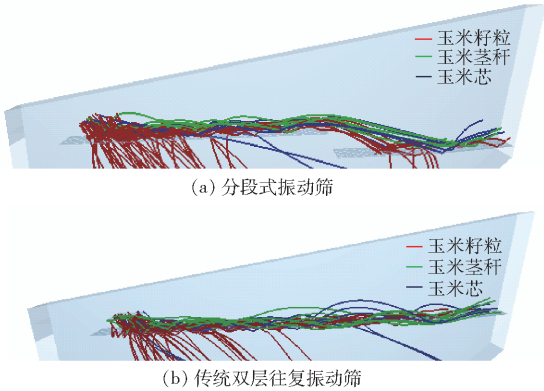


图 10 不同清选装置内的玉米脱出物运动轨迹
Fig.10 Movement of maize mixture in different cleaning devices

为获得分段式振动筛清选装置的最佳结构和运动参数,对清选装置进行仿真试验。

4 仿真试验结果与分析

4.1 单因素试验

以后筛频率、后筛振幅、前后筛的垂直间距和水平间距为因素,以玉米籽粒的清洁率和损失率为清选性能指标进行单因素试验,寻求各因素对分段式振动筛清选装置清选性能的影响规律。单因素试验是只对一个因素进行试验,其他因素保持固定不变。当对清选装置的结构参数进行试验时,对分段式振动筛清选装置进行重新建模和仿真,完成清选装置结构参数的单因素试验;当对清选装置的运动参数进行试验时,在 EDEM 中设置不同的运动参数,完成清选装置运动参数的单因素试验。以预试验结果为依据,各因素水平如表 5 所示。

表 5 单因素试验因素水平
Tab.5 Experimental factors and levels in single-factor tests

水平	因素			
	后筛频率/ Hz	后筛振幅/ mm	前后筛垂直 间距/mm	前后筛水平 间距/mm
1	3.05	11.0	50.0	-160.0
2	3.75	13.7	66.7	-106.6
3	4.45	16.3	83.3	-53.3
4	5.15	19.0	100.0	0
5	5.85	21.7	116.7	53.3
6	6.55	24.3	133.3	106.6
7	7.25	27.0	150.0	160.0

(1)后筛频率对清选性能的影响

当后筛频率在 3.05~7.25 Hz 范围内,清洁率呈现先增加后减少的趋势,籽粒的损失率呈现先减

少后增加的趋势,试验结果如图 11 所示。当后筛频率为 3.05 Hz 时,玉米脱出物贴附于筛面上,籽粒与筛面接触受到一定的影响,部分杂余透过筛面导致此时籽粒的高损失率、低清洁率^[23]。当筛面频率为 3.75 Hz 时,玉米籽粒的损失率最低,玉米籽粒清洁率继续增加;当后筛频率增大到一定程度时,玉米脱出物在筛面的跳动过于显著。由于经前筛筛分后的玉米脱出物中含有的籽粒较少,杂余对籽粒的碰撞也随之增加,籽粒与后筛的接触受到一定的影响,透筛减少,造成了玉米籽粒损失率的增加。杂余碰撞后再次落到后筛,造成了籽粒清洁率的降低。当后筛频率过高时,籽粒的清洁率下降,损失率过高,因此,选取后筛频率 3.05 ~ 6.25 Hz 作为多因素试验范围。

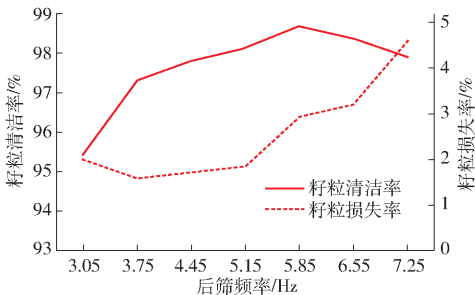


图 11 不同后筛频率时的清选性能曲线
Fig. 11 Effect of frequency of rear screen on cleaning performance

(2) 后筛振幅对清选性能的影响

筛面振幅是筛面运动的一个重要参数,其直接影响筛面上颗粒的抛起高度,试验结果如图 12 所示。当后筛振幅在 11 ~ 27 mm 范围内,籽粒的损失率呈现先减小后增加的趋势,籽粒的清洁率呈现先增加后减小的趋势。当后筛振幅较低时,籽粒的损失率较高,此时的振幅不能使玉米脱出物中籽粒与杂余均匀散开,籽粒混杂在杂余之中,减少了脱出物中籽粒与筛面的接触;随着筛面振幅的增大,玉米籽粒与杂余的跳动越明显,其抛起高度也随之增加。颗粒抛起的高度越高,到达筛面的时间越长,导致颗粒沿水平方向向杂余出口的位移增加,后筛的有效筛分面积减小。同时弹起的高度越高,籽粒与杂余的碰撞次数越多,使得玉米籽粒的透筛率减小,损失率增加。当后筛振幅为 19 mm 时,籽粒的清洁率最高。当后筛振幅继续增大时,杂余对籽粒的影响效果更明显,造成籽粒的损失率过高,杂余透过筛面,籽粒的清洁率降低。因此,选取后筛振幅 11 ~ 19 mm 作为多因素试验范围。

(3) 前后筛垂直间距对清选性能的影响

前后筛平行安装时会存在一个垂直间距,前后筛垂直间距是影响玉米脱出物从前筛落到后筛位置的直接因素,试验结果如图 13 所示。当前后筛垂直

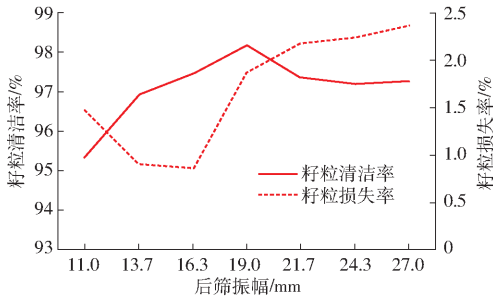


图 12 不同后筛振幅时的清选性能曲线
Fig. 12 Effect of amplitude of rear screen on cleaning performance

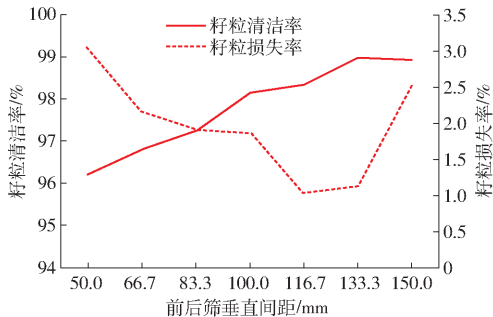


图 13 不同前后筛垂直间距时的清选性能曲线
Fig. 13 Effect of vertical interval of screens on cleaning performance

间距在 50 ~ 150 mm 范围内,籽粒的清洁率随着前后筛垂直间距的增加逐渐增加,籽粒的损失率呈现先减少后增加的趋势。当前后筛垂直间距为 50 mm 时,由于垂直间距最短,玉米脱出物在从前筛落到后筛时间最短,气流对籽粒与杂余分离的作用最小,导致籽粒与杂余未能很好地分离,造成了此时的籽粒损失率偏高,清洁率过低;随着前后筛垂直间距的增大,玉米脱出物从前筛落到后筛的时间逐渐增加,气流对籽粒与杂余分离的作用逐渐增强,籽粒与杂余的分离效果也更加明显,籽粒的清洁率提高,损失率降低;当前后筛垂直间距继续增大时,玉米脱出物落到后筛筛面的时间更长,杂余和籽粒落到后筛的位置靠近筛尾,后筛筛面的有效筛分面积变小,这是导致籽粒损失率增加的一个原因。另一个原因是当前后筛面的垂直间距过大时,经前筛筛孔落下的籽粒沿着气流方向向后运动到后筛继续筛分,使得籽粒损失率偏高。由于前后筛垂直间距过小时会使籽粒的损失率过高,清洁率过低;前后筛垂直间距过大时籽粒的损失率偏高,因此,确定前后筛的垂直间距为 60 ~ 132 mm。

(4) 前后筛水平间距(水平重合量)对清选性能的影响

前后筛水平间距也是影响前后筛之间气流大小的一个重要因素。由图 14 可知,当前后筛水平间距在 -160 ~ 160 mm 范围内,籽粒的清洁率呈现先增

加后减少的趋势,损失率逐渐降低。当前后筛的水平间距在 $-160 \sim 0$ mm 时,即前后筛之间存在水平重合量时,前筛筛选后的玉米籽粒会再次落到后筛筛面,并且籽粒的数目会随着水平重合量增大而增多,造成了此时籽粒损失率的较高,且水平重合量的存在使得前后筛之间气流速度的减小,使得气流对籽粒和杂余的分离作用减弱,清洁率随着水平重合量的减小而增高;当前后筛水平间距在 $0 \sim 160$ mm 时,玉米脱出物在由前筛下落时,会有部分玉米芯等杂余在前筛后部与后筛前部之间的空隙落到精选装置中,造成籽粒的清洁率低;由于前后筛之间存有空隙,会有较多的气流对玉米脱出物进行精选,籽粒与杂余的分散效果较好。当前后筛水平间距较小时,籽粒的清洁率较高;当前后筛水平间距较大时,籽粒的损失率较低。由此确定前后筛的水平间距为 $-160 \sim 160$ mm。

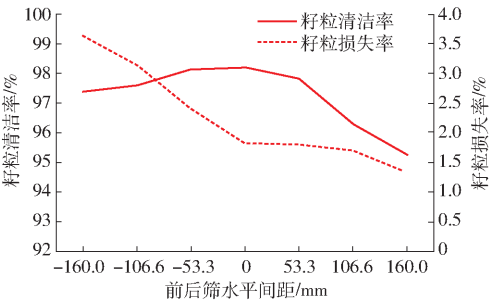


图 14 不同前后筛水平间距时的精选性能曲线
Fig. 14 Effect of horizontal distance of screens on cleaning performance

4.2 多因素试验

4.2.1 二次正交旋转中心组合试验设计

依据单因素试验结果确定分段式振动筛后筛频率 x_1 、后筛振幅 x_2 、前后筛垂直间距 x_3 、前后筛水平间距 x_4 的范围;参照玉米收获机质量评价技术规范 and 国家标准 GB/T 21962—2008,选定玉米籽粒清洁率 y_1 、玉米籽粒损失率 y_2 为精选性能评价指标。采用四因素五水平二次正交旋转中心组合安排试验,利用 Design-Expert 8.0.6 软件生成试验表,其中参数的调整、喂入量及气流场参数设置参照单因素试验方法,每组试验重复 3 次。试验因素编码如表 6 所示。

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Experimental factors and codes

编码	因素			
	后筛频率 x_1 /Hz	后筛振幅 x_2 /mm	前后筛垂直 间距 x_3 /mm	前后筛水平 间距 x_4 /mm
-2	3.05	11	60	-160
-1	3.85	13	78	-80
0	4.65	15	96	0
1	5.45	17	114	80
2	6.25	19	132	160

4.2.2 结果分析

使用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,得到籽粒清洁率 y_1 与籽粒损失率 y_2 的回归方程,并进行显著性检验。

(1) 籽粒清洁率

经分析可知:模型显著性检验 F 为 33.57, P 小于 0.000 1,该模型极显著;失拟项 $P = 0.276 9 > 0.05$,残差项不显著,该回归模型成立。交互项 x_1x_3 、 x_2x_3 、 x_3x_4 对指标影响均显著,其余交互项不显著。各因素对籽粒清洁率影响的主次顺序为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。各因素对籽粒清洁率的回归数学模型为

$$y_1 = 56.24 + 6.7x_1 + 1.6x_2 + 0.15x_3 - 0.03x_4 - 0.02x_1x_3 + 6.13 \times 10^{-3}x_2x_3 + 2.11 \times 10^{-4}x_3x_4 - 0.45x_1^2 - 0.06x_2^2 - 7.11 \times 10^{-4}x_3^2 - 10^{-4}x_4^2 \quad (7)$$

各因素对籽粒清洁率的响应曲面如图 15 所示。由图 15a 可知,当后筛振幅为 15 mm,前后筛水平间距为 0 mm 时,在后筛频率一定的条件下,籽粒的清洁率随着前后筛垂直间距的增大而增大。这是因为当前后筛垂直间距较小时,精选后的玉米脱出物由前筛落到后筛的时间短,气流对籽粒与杂余分离的作用较弱,杂余和籽粒分离效果较差,杂余所占比例偏高且部分杂余沿筛面透筛,导致了此时籽粒的清洁率较低;随着前后筛垂直间距的增加,脱出物由前筛落到后筛的时间增长,气流对籽粒与杂余分离的作用增强,脱出物落到后筛的位置逐渐向筛后靠近,籽粒与杂余的分离效果逐渐改善,因此籽粒的清洁率随着前后筛垂直间距的增大而增加。

由图 15b 可知,当后筛频率为 4.65 Hz,前后筛水平间距为 0 mm 时,在前后筛垂直间距一定的条件下,籽粒的清洁率随着后筛振幅的增加而增加。当后筛振幅较小时,杂余夹带籽粒在筛面跳动不明显,使得籽粒与杂余未能很好的分离且部分杂余透筛,导致了此时籽粒的清洁率较低。随着后筛振幅的增加,杂余和籽粒在后筛的跳动越明显,在气流的作用下,杂余和籽粒分离效果越明显,使得籽粒的清洁率随着后筛振幅的增加而增加。

由图 15c 可知,当后筛频率为 4.65 Hz,后筛振幅为 15 mm 时,在前后筛垂直间距一定的条件下,籽粒的清洁率随着前后筛水平间距的增大呈现先增加后减小的趋势。当前后筛面之间存在水平间距时,玉米脱出物由前筛落到后筛的过程中,部分杂余在前后筛空隙处落入精选装置下部,导致了籽粒的清洁率较低;随着前后筛水平间距的减小,从空隙处落入精选装置底部的杂余减小,前后筛之间的风速相对减少,此时籽粒与杂余的分离效果较好,籽粒的清洁率逐渐增加;当前后筛水平间距逐渐减小变为

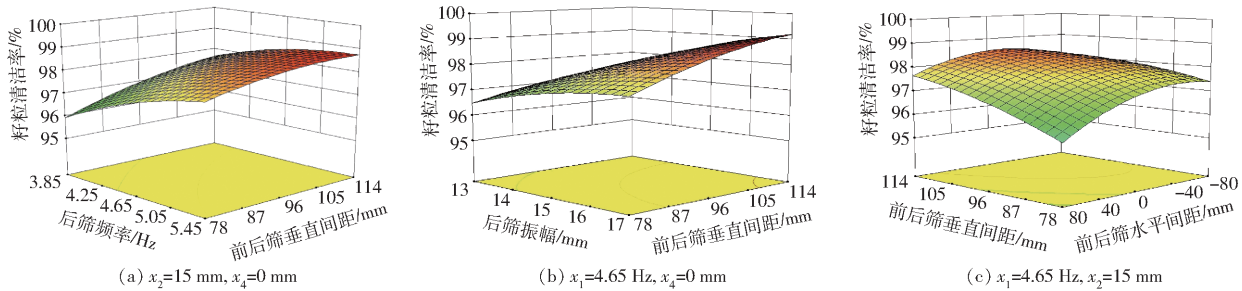


图 15 各因素对籽粒清洁率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of different factors to cleaning rate of maize grains

水平重合量时,气流对于玉米脱出物的分离作用减弱,籽粒与杂余不能很好地分离,部分杂余和籽粒在后筛进行透筛,导致了籽粒的清洁率降低。

(2) 籽粒损失率

经分析可知:模型显著性检验 F 为 15.26, P 小于 0.000 1, 该模型极显著; 失拟项 $P = 0.069\ 8 > 0.05$, 残差项不显著, 该回归模型成立。交互项 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_2x_4 对指标影响均显著, 其余交互项不显著。各因素对籽粒清洁率影响的主次顺序为: x_3 、 x_1 、 x_4 、 x_2 。各因素对籽粒损失率的回归数学模型为

$$y_2 = 10.95 - 1.86x_1 - 0.43x_2 - 0.05x_3 + 8.36 \times 10^{-3}x_4 - 0.1x_1x_2 + 8.52 \times 10^{-3}x_1x_3 - 6.91 \times 10^{-4}x_2x_4 + 0.3x_1^2 + 0.03x_2^2 + 1.38 \times 10^{-5}x_4^2 \quad (8)$$

各因素对籽粒损失率的响应曲面如图 16 所示。如图 16a 所示,当前后筛垂直距离为 96 mm,前后筛水平间距为 0 mm 时,在后筛频率一定的条件下,籽粒的损失率随着后筛振幅的增大而增大。随着后筛振幅的增加,籽粒与杂余在筛面的跳动越明显,弹起的高度也随之增加。在气流的作用下,杂余和籽粒向后筛的位移也随之增大,使得杂余和籽粒与筛面的接触减少,使得籽粒的损失率升高。当后筛的振幅过大时,杂余与籽粒之间的碰撞更明显,使得籽粒的损失率进一步增大。

如图 16b 所示,当后筛振幅为 15 mm,前后筛水平间距为 0 mm 时,在前后筛垂直间距一定的条件下,籽粒的损失率随着后筛频率的增大而增大。在一定

的后筛频率范围内,杂余和籽粒的跳动明显,籽粒与杂余的分离效果好,籽粒的透筛率提高,损失率减少。当前后筛频率增大时,籽粒与杂余之间的碰撞越明显,从而影响籽粒透筛,造成籽粒损失率的升高。

如图 16c 所示,当前后筛频率为 4.65 Hz,前后筛垂直间距为 96 mm 时,在后筛振幅一定的条件下,籽粒的损失率随着前后筛水平间距的增大而降低。当前后筛水平重合量逐渐增大变为水平间距时,前筛清选后再次落到后筛的籽粒减少,与后筛上的脱出物继续筛分时,籽粒与杂余互相干扰减弱使得损失率降低;当前后筛水平间距从零开始逐渐增加时,在前后筛之间气流速度增加,籽粒与杂余的分离效果增强,造成了此时的籽粒损失率降低。

4.2.3 参数优化

为获得振动筛最佳清选性能,根据清选装置实际工作条件及筛分性能要求选定参数优化的约束条件。利用 Design-Expert 8.0.6 软件的多目标优化算法进行参数优化。目标及约束函数为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 3.85\text{ Hz} \leq x_1 \leq 5.45\text{ Hz} \\ 11\text{ mm} \leq x_2 \leq 17\text{ mm} \\ 78\text{ mm} \leq x_3 \leq 114\text{ mm} \\ -80\text{ mm} \leq x_4 \leq 80\text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

优化结果为:当前后筛频率为 4.44 Hz、后筛振幅为 15.65 mm、前后筛垂直间距为 114 mm、前后筛水平间距为 18.53 mm 时,振动筛籽粒清洁率为

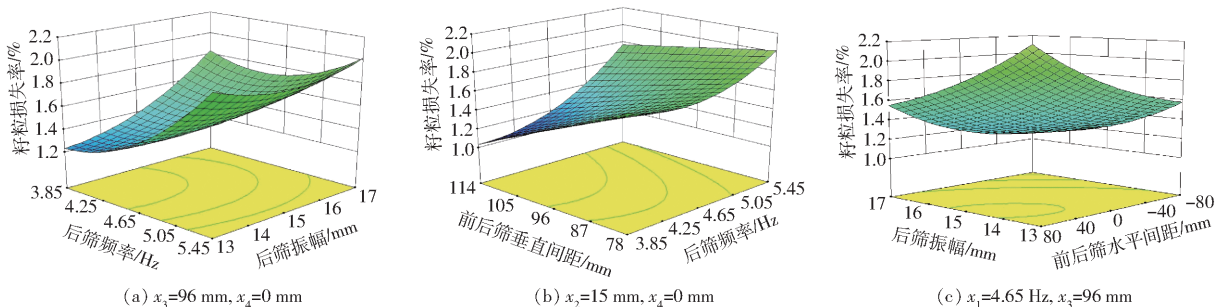


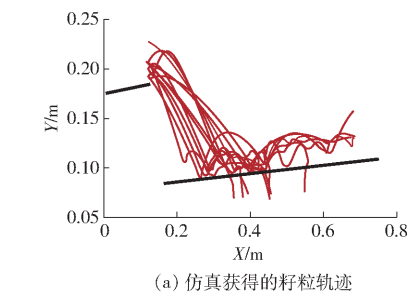
图 16 各因素对籽粒损失率影响的响应曲面

Fig. 16 Response surfaces of different factors to loss rate of maize grains

98.53%, 籽粒损失率为 1.16%。

5 台架验证试验

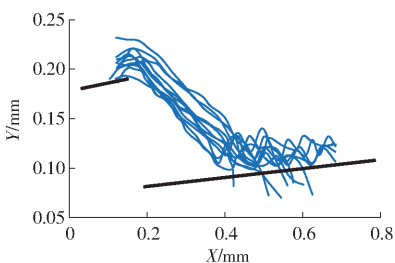
为验证仿真试验优化结果准确性,依据优化结果加工分段式振动筛清选装置。通过设计偏心轮、连杆、摇杆、前后带轮的传动比,调节振动筛、贯流风机的变频器、风机角度调节板,使其后筛频率为 4.44 Hz、后筛振幅为 15.65 mm、前后筛垂直间距为 114 mm、前后筛水平间距为 18.53 mm,与优化结果保持一致。玉米脱出物喂入量为 5 kg/s,玉米混合物的喂入量各成分及比例如表 2 所示,玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆的质量百分比分别约为 73%、9%、18%。依据玉米脱出物各成分比例,称量玉米脱出物各成分然后均匀混合,前期预试验将 20 kg 玉米脱出物均匀铺放在抖动板上不同区域内,通过计时器计时 4 s,重复多次试验确定 20 kg 玉米脱出物 4 s 时从抖动板完全下落的铺放区域。试验时将 20 kg 玉米脱出物均匀放置在抖动板的确定区域内,4 s 全部落下,以保证清选装置入口脱出物量为 5 kg/s。每次试验将玉米混合物重新按比例混合进行试验。分段式振动筛清选装置如图 17 所示。



(a) 仿真获得的籽粒轨迹



(b) 混合物运动



(c) 高速摄像提取的籽粒轨迹

图 18 玉米籽粒运动轨迹

Fig. 18 Motion tracks of maize grains

在传统双层往复振动筛清选装置上筛后部的籽粒受到杂余的夹带作用而影响透筛。分段式振动筛中,玉米籽粒由前筛落到后筛的过程中受到风力的作用与杂余分离。由玉米籽粒的仿真轨迹可知,部分籽粒会在后筛的前部透筛。后筛籽粒的实际透筛规律与仿真透筛规律基本一致,如图 18a、18c 所示。由于后筛的频率和振幅均小于前筛的频率和振幅,经分离后落到后筛的籽粒跳动减弱,使得籽粒的透筛率提高。

5.2 筛分性能验证

试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》进行试验,每组试验重复 5 次,并与传统双层往复振动筛清选装置试验结果进行对比^[25],试验结果见表 7。

由试验结果可知,传统双层往复振动筛清选装置的籽粒清洁率均值为 97.08%,籽粒的损失率均

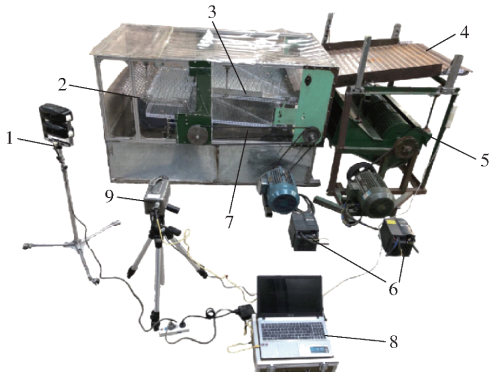


图 17 分段式振动筛清选装置试验台

Fig. 17 Test bed of cleaning device with segmented vibrating screens

1. 照明灯 2. 后筛 3. 前筛 4. 抖动板 5. 风机 6. 变频器
7. 下筛 8. 计算机 9. 高速摄像机

5.1 工作机理验证

在清选装置入口气流速度为 12.8 m/s、气流方向角为 25°、清选装置入口玉米脱出物喂入量为 5 kg/s 条件下,按照优化结果对分段式振动筛清选装置进行仿真试验,提取玉米籽粒在前筛下落后的轨迹。同时通过高速摄像机对前筛落到后筛的混合物中的籽粒进行跟踪^[24],结果如图 18 所示。

表 7 台架试验结果				
Tab. 7 Results of tests				%
序号	传统双层往复振动筛清选装置		分段式振动筛清选装置	
	清洁率	损失率	清洁率	损失率
1	97.00	2.35	98.53	1.92
2	96.64	1.99	99.03	1.28
3	97.32	2.25	97.89	1.62
4	97.66	2.54	98.25	1.33
5	96.79	2.16	98.01	1.10
均值	97.08	2.26	98.34	1.45
标准差	0.37	0.18	0.40	0.29

值为 2.26%;分段式振动筛清选装置的籽粒清洁率均值为 98.34%,籽粒损失率的均值为 1.45%。与传统双层往复振动筛清选装置相比,分段式振动筛清选装置的籽粒清洁率提高 1.26 个百分点,损失率降低 0.81 个百分点,分段式振动筛清选装置的清选

性能得到提升。

6 结论

(1)基于传统双层往复振动筛上筛籽粒的透筛情况,确定上筛960~1360 mm的纵向区域是导致籽粒损失率高、清洁率低的主要区域。设计一种分段式振动筛清选装置,在分段式振动筛清选装置后部的气流可以使玉米脱出物进行再次分离。后筛上部气流速度为传统双层往复振动筛相同位置筛上气流速度的1~3倍,使籽粒的清洁率得到

提高。

(2)基于CFD-DEM耦合仿真试验,建立清选装置不同因素与指标间的回归数学模型,通过参数优化确定分段式清选装置最佳参数组合:后筛频率为4.44 Hz、后筛振幅为15.65 mm、前后筛垂直间距为114 mm、前后筛水平间距为18.53 mm。

(3)在清选装置入口气流速度为12.8 m/s、气流方向角为25°、清选装置入口玉米脱出物喂入量为5 kg/s时,分段式振动筛清选装置使籽粒清洁率提高到98.34%,籽粒的损失率降至1.45%。

参 考 文 献

- [1] 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):92-102,136. LI Xinping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):92-102,136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181011&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.011. (in Chinese)
- [2] 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&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.016. (in Chinese)
- [3] 李瑞. 双层不平行振动筛设计及试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019. LI Rui. Design and test of double layer non parallel vibrating screen [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [4] 程超,付君,陈志,等. 玉米籽粒收获机清选装置参数优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):151-158. CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization experiment on cleaning device parameters of corn kernel harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):151-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190715&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.015. (in Chinese)
- [5] 王立军,彭博,宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛分性能仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):90-96. WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):90-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180711&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)
- [6] 王卓,车东,白晓平,等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):100-108. WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):100-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181212&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012. (in Chinese)
- [7] 孙伟,那明君,冯江,等. 割前摘脱收获机立式离心分离复脱清选装置优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):73-81. SUN Wei, NA Mingjun, FENG Jiang, et al. Optimization of centrifugal separating-rethreshing-cleaning apparatus for stripper combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):73-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180709&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.009. (in Chinese)
- [8] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):239-248. FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):239-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s032&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.032. (in Chinese)
- [9] 邸志峰,崔中凯,张华,等. 4YL-4型自走式玉米籽粒联合收获机设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(1):116-121. DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and test of 4YL-4 self-propelled corn grain combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1):116-121. (in Chinese)

- [10] 王启阳,吴文福,朱浩天.玉米螺旋式清选装置的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(20):12-19.
WANG Qiyang, WU Wenfu, ZHU Haotian. Design and test of screw cleaning mechanism for corn [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20):12-19. (in Chinese)
- [11] 徐立章,于丽娟,李耀明,等.双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J/OL].农业机械学报,2014,45(10):78-86.
XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):78-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141013&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013. (in Chinese)
- [12] KRZYSIAK Z, SAMOCIUK W, SKIC A, et al. Effect of sieve drum inclination angle on wheat grain cleaning in a novel rotary cleaning device[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(5):1751-1758.
- [13] 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/OL].农业机械学报,2019,50(10):1-16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191001&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [14] 李菊,王增彪,沈惠平,等.凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J].机械设计与研究,2016,32(1):150-154,158.
LI Ju, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating screen with convex column screen surface on grain screen[J]. Machine Design and Research, 2016, 32(1):150-154,158. (in Chinese)
- [15] 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?file_no=20190210&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.010. (in Chinese)
- [16] DONG K, ESFANDIARY A H, YU A. Discrete particle simulation of particle flow and separation on a vibrating screen: effect of aperture shape[J]. Powder Technology, 2017, 314(6):195-202.
- [17] 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/OL].农业机械学报,2012,43(2):79-84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120217&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
- [18] 迟媛,李蒙福,杨月斌,等.禽蛋壳膜旋风式气流清选装置研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(8):339-350.
CHI Yuan, LI Mengfu, YANG Yuebin, et al. Cyclone device collecting eggshell membranes and eggshells separately from eggshells mixture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):339-350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190837&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.037. (in Chinese)
- [19] COŞKUN M B, İBRAHİM Y, ÖZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4):523-528.
- [20] WANG Lijun, LI Rui, WU Baoxin, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology, 2018, 38(6):185-195.
- [21] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhenjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions [J]. Powder Technology, 2015, 284:187-194.
- [22] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [23] 李占福.平动与摆动复合振动筛分理论的研究与参数优化[D].厦门:华侨大学,2016.
LI Zhanfu. Research on screening theory and parameter optimization of translational and oscillating composite vibration [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016. (in Chinese)
- [24] 张文斌,李耀明,徐立章,等.应用高速摄像技术研究清选筛面上物料的运动[J].农机化研究,2008,30(5):21-24.
ZHANG Wenbin, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Application of high-speed camera technology to study the movement of materials on the cleaning screen [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(5):21-24. (in Chinese)
- [25] 王立军,李义博,郑招辉,等.玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):124-136.
WANG Lijun, LI Yibo, ZHENG Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):124-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190414&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.014. (in Chinese)