

大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究

王立军 刘伟腾 李懿航 于鲲鹏

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为满足玉米籽粒收获机对大喂入量玉米脱出物的清选要求,设计了一种使玉米脱出物在进入清选装置时分流的双层筛孔式抖动板。对玉米脱出物离开抖动板到达振动筛前的运动进行了分析,确定了上、下抖动板相对于振动筛的位置,并参考圆孔筛确定了上抖动板筛孔的分布和尺寸。以抖动板的安装倾角、振幅和频率作为试验因素,以振动筛筛分玉米脱出物时间、清选系统收集籽粒的清洁率和损失率为性能评价指标,基于 CFD-DEM 耦合仿真方法确定各试验因素对性能指标的影响,并设计了二次正交旋转中心组合试验,建立了各因素与指标之间的回归数学模型。在清选系统入口气流速度、气流方向角和玉米脱出物喂入量分别为 12.8 m/s、25° 和 7 kg/s 的条件下,获得最优参数组合:抖动板安装倾角、抖动板频率、抖动板振幅分别为 -3.85°、5.62 Hz、44.77 mm,此时清选系统收集的籽粒清洁率为 98.36%,籽粒损失率为 1.45%,振动筛筛分玉米脱出物时间为 6.74 s,并通过台架试验验证了仿真结果的准确性,相比于带有单层抖动板的清选系统,籽粒清洁率提高了 1.72 个百分点,损失率降低了 0.84 个百分点,振动筛筛分玉米脱出物时间缩短了 0.57 s。

关键词: 玉米籽粒收获机; 清选系统; 大喂入量; 双层抖动板; 参数优化

中图分类号: S225.5+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)07-0092-11

OSID:



Research on Double-layer Jitter Plates with Holes in Large-feeding Mass Cleaning System of Maize Grain Harvester

WANG Lijun LIU Weiteng LI Yihang YU Kunmeng

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

Abstract: To meet the requirements of maize grain harvester for cleaning large feeding mass of maize mixture, the double-layer jitter plates with holes were designed to shunt the maize mixture when they entered the cleaning device. The movement of particles after leaving jitter plates before arriving at vibrating screen was analyzed. The position of the upper and lower jitter plates relative to the vibrating screen, the distribution and size of the sieve holes on the upper jitter plate were determined. The angles of the jitter plates installed, the amplitude and the frequency of the jitter plates were chosen as the experimental factors. The time of cleaning maize mixture by the screens, the cleaning rate and the loss rate of the maize grains were chosen as the performance indexes. The CFD-DEM coupled method was used. The effect of test factors on performance indexes was determined. The quadratic orthogonal rotational-combinational simulation tests were designed. The regression mathematical models between factors and indexes were founded. When the inlet velocity of airflow was 12.8 m/s, the direction angle of airflow was 25°, the feeding mass was 7 kg/s, the best combination of parameters were that the angle of the jitter plates installed was -3.85°, that the frequency of the jitter plates was 5.62 Hz and the amplitude of jitter plates was 44.77 mm. The cleaning and loss rate of maize grain and the time of cleaning maize mixture by the screens were 98.36%, 1.45% and 6.74 s, respectively. Compared with the cleaning system with single-layer jitter plate, the cleaning rate of maize grain was reduced by 1.72 percentage points, the loss rate of maize grain was reduced by 0.84 percentage points and the time of cleaning maize mixture was shortened by 0.57 s. The performance tests were done in the laboratory to verify the accuracy of the simulation results.

Key words: maize grain harvester; cleaning system; large feeding mass; double-layer jitter plates; parameter optimization

收稿日期: 2021-06-23 修回日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090、52075091)

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

0 引言

风筛式清选装置具有高清选效率、高籽粒清洁率的优点,被广泛应用于玉米籽粒联合收获机中。随着现代农业机械的发展,玉米籽粒联合收获也朝着高效率、大喂入量的方向发展。课题组对黑龙江省北安市赵光镇北胜合作社进行农场调研,确定了德美亚一号玉米品种的平均产量为 6 146 kg/hm²,常发佳联 CF808 型 6 行玉米籽粒收获机作业幅宽为 4 m,以常规速度 1.5 m/s 作业时清选装置中玉米脱出物的喂入量约为 5.05 kg/s^[1],收获时为“争抢农时”,需提高玉米联合收获机作业效率,随着玉米单产的增加以及玉米联合收获机作业速度的提高,导致清选装置内的玉米脱出物的喂入量逐年增加^[2-3],已经高达 7 kg/s。然而现有的清选装置在处理 7 kg/s 大喂入量的玉米脱出物时,物料会在振动筛前端堆积,影响玉米脱出物清选效果。

为提高清选装置在大喂入量条件下的性能,许多专家学者对清选装置内风机、辅助装置、筛体结构、筛体驱动机构等进行了研究^[4-9];在抖动板的研究方面,汤庆等^[10]利用离散元法对抖动板的性能进行了研究,结果表明物料在安装的双隔板抖动板作用下较安装单隔板抖动板更加均匀,更加有利于筛分;付威等^[11]为了解决联合收获机中物料在抖动板上的堆积,通过分析曲柄理论转速和实际转速之间的关系,确定了物料被抛离抖动板时曲柄的实际转速,为抖动板的改进提供理论依据;John Deere 公司^[12]生产的 C440 型联合收获机,采用了 4 层振动筛与 2 个无筛孔抖动板的结构,2 个抖动板前后布置,分别承接横、纵轴流滚筒落下的玉米脱出物,并将玉米脱出物连续均匀地输送到清选室,4 层振动筛可显著增加筛分面积,能够对大喂入量物料进行清选。程超等^[13]为解决水稻收获机械抖动板表面极细小湿黏物料粘附的问题,利用界面加热实现金属抖动板减粘脱附,揭示了金属抖动板表面加热对粘附界面的脱附作用机理。李耀明等^[14]为解决脱出物在凹板下沿轴向分布不均、清选筛上纵向分布不均的情况,抖动板由 3 块不同角度的波纹板构成,实现物料能够沿筛面纵向和横向运动,有利于筛上物料均匀分布;何康陵等^[15]设计了一种抖动板分层预清选装置,能够对玉米脱出物进行分段清选,降低了清选负荷,提高了清选效率。张建宗等^[16]针对大喂入量谷物联合收获时清选筛面上谷物堆积的问题,将上抖动板与下抖动板前后错位布置,上抖动板末端落下的物料可落到清选筛中段,下抖动板末端落下的物料可落到清选筛前段,实现了玉米脱出物

在双层抖动板上的分段输送。为满足大喂入量玉米脱出物清选的要求,专家学者多从抖动板结构以及多层抖动板配置进行研究,而关于双层筛孔式抖动板的研究尚未见报道。

课题组通过农场调研发现,现有联合收获机多采用双层筛体配置,并且多层抖动板将玉米脱出物只喂入至上筛,然而在常规喂入量条件下,上筛通常可满足农户对收获后玉米籽粒的质量要求,为了降低机具的功率消耗,减少收获成本,农户通常将下筛拆除,致使实际生产收获中清选系统内下筛使用率不高。当玉米脱出物的喂入量增加,会使上筛的筛分压力增加,影响清选装置性能。

本文基于常发佳联 CF808 型 6 行玉米联合收获机清选装置,设计一种双层筛孔式抖动板,拟通过双层筛孔式抖动板实现玉米脱出物进入清选装置前的分流和初步清选。利用 CFD-DEM 耦合方法研究双层筛孔式抖动板参数,通过台架试验验证优化结果正确性,并与带有单层抖动板的清选系统的清选性能进行对比,以期提高清选系统对大喂入量玉米脱出物的处理能力。

1 清选系统整体结构及工作原理

1.1 清选系统整体结构

带有双层筛孔式抖动板的清选系统主要由上抖动板、下抖动板、上筛、下筛、吊杆、双向摇杆、机架等组成,如图 1 所示。上层抖动板尾端通过吊杆铰接悬挂在机架的上部,下层抖动板尾端通过支撑杆铰接在机架下部,驱动轴上的偏心轮、摇臂、双向摇杆组成抖动板曲柄摇杆机构,上、下抖动板前端通过连接轴与曲柄连杆机构连接,抖动板处带轮经传动带将动力传递到振动筛带轮,通过偏心轮、摇臂、双向

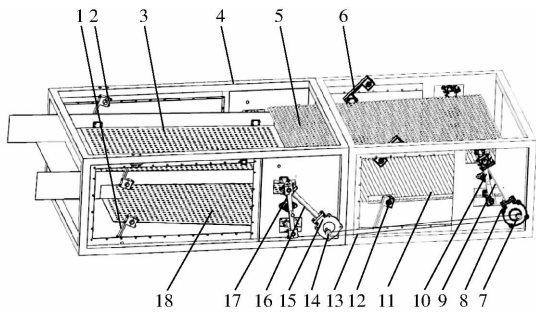


图 1 带有双层筛孔式抖动板的清选系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of cleaning system with double-layer jitter plates with holes

- 1. 下筛吊杆 2. 上筛吊杆 3. 上筛 4. 机架 5. 上抖动板 6. 上抖动板吊杆 7. 抖动板处曲柄 8. 抖动板处带轮 9. 抖动板处连杆 10. 前置双向摇杆 11. 下抖动板 12. 下抖动板吊杆 13. 传动带 14. 振动筛处带轮 15. 振动筛处曲柄 16. 振动筛处连杆 17. 后置双向摇杆 18. 下筛

摇杆组成的振动筛曲柄摇杆机构带动上、下筛往复摆动。

1.2 工作原理

经过脱粒装置脱粒分离后的脱出物落到带有筛孔的上层抖动板,运动时一部分由上抖动板的筛孔落到下抖动板,通过下抖动板的连续运移落到下筛;剩余的玉米脱出物经上抖动板输送至上筛,玉米脱出物在抖动板上实现了初步筛分,清选系统的工作原理如图 2 所示。

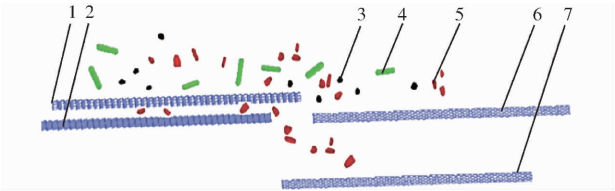


图 2 清选系统工作原理图

Fig.2 Working principle of cleaning system

1. 上抖动板 2. 下抖动板 3. 玉米芯 4. 玉米茎秆 5. 玉米籽粒 6. 上筛 7. 下筛

2 双层筛孔式抖动板位置确定与设计

2.1 双层筛孔式抖动板位置确定

对离开抖动板到达振动筛前端气流场中的玉米脱出物进行受力分析,如图 3 所示。

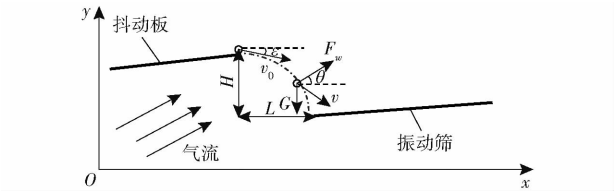


图 3 脱出物离开抖动板到达振动筛前受力分析

Fig.3 Analysis diagram of forces on particle after

leaving jitter plates before arriving at vibrating screen

设玉米脱出物以初始速度 v_0 离开抖动板^[5],到达振动筛前,其在水平和竖直方向的运动方程为

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \varepsilon \\ v_{0y} = -v_0 \sin \varepsilon \\ L = v_0 t \cos \varepsilon + \frac{1}{2} a_x t^2 \\ H = -v_0 t \sin \varepsilon - \frac{1}{2} a_y t^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_{0x} 、 v_{0y} ——玉米脱出物离开抖动板时水平和竖直方向分速度, m/s

ε ——玉米脱出物离开抖动板时速度方向角, (°)

L 、 H ——玉米脱出物水平和竖直方向的位移, mm

t ——玉米脱出物离开抖动板的时间, s

a_x 、 a_y ——玉米脱出物水平和竖直方向加速度, m/s²

玉米脱出物在水平和竖直方向的加速度为

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

其中

$$G = mg \quad (3)$$

$$F_w = k_p \mu u^2 \quad (4)$$

$$k_p = \frac{\rho \mu S}{m} \quad (5)$$

式中 F_w ——风力, N

G ——重力, N

m ——玉米脱出物颗粒质量, kg

θ ——气流方向角, (°)

g ——重力加速度, m/s²

k_p ——漂浮系数, m⁻¹

u ——气流速度, m/s

S ——管道截面面积, m²

ρ ——密度, kg/m³

μ ——空气阻力系数

整理公式(1)~(5)得

$$\begin{cases} L = v_0 t \cos \varepsilon + \frac{F_w \cos \theta t^2}{2m} \\ H = -v_0 t \sin \varepsilon - \frac{(G - F_w \sin \theta) t^2}{2m} \end{cases} \quad (6)$$

则玉米脱出物颗粒从离开抖动板至到达振动筛的时间为

$$t = \frac{-v_0 \sin \varepsilon + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \varepsilon - 2H(g - k_p u^2)}}{g - k_p u^2} \quad (7)$$

通过测量佳联 CF808 型 6 行玉米联合收获机清选装置尺寸,确定抖动板与风机垂直距离为 130 mm,现有的双层抖动板多为上抖动板与下抖动板前后错位布置,上抖动板末端落下的物料可落到上筛中段,下抖动板末端落下的物料可落到上筛前段,实现了玉米脱出物在双层抖动板上的分段输送,参考其尺寸,确定上、下抖动板的垂直距离为 88 mm^[16],根据《农业机械设计手册》^[17]确定上抖动板与上筛的垂直距离为 100 mm,根据课题组前期研究,确定上、下筛的垂直距离为 340 mm^[5],因此可以确定下抖动板与下筛的垂直距离为 352 mm。

根据公式(6)可知,玉米脱出物离开抖动板到达振动筛前的水平位移与其初始速度有关,根据文献[1]可知,玉米脱出物离开抖动板时竖直方向速度小于 0.1 m/s,水平速度为 0.1~0.7 m/s,并且在气流速度、气流方向角、抖动板振幅分别为 12.8 m/s、

25°、38 mm 时,基于公式(6)确定玉米脱出物离开上抖动板到达上筛前水平最大和最小位移分别为 171 mm 和 145 mm,为了保证玉米脱出物能够落到上筛,确定上抖动板与上筛的水平距离为 145 mm;同理分析可得玉米脱出物离开下抖动板到达下筛前最大和最小水平位移分别为 557 mm 和 503 mm,在保证玉米脱出物能够落到下筛,同时考虑清选系统中抖动板处的安装空间及上抖动板与上筛间的水平距离,确定下抖动板与下筛的水平距离为 145 mm。抖动板与振动筛相对位置如图 4 所示。

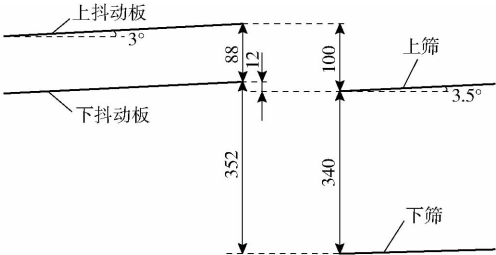


图 4 抖动板与振动筛相对位置示意图
Fig. 4 Sketch of relative position of jitter plates and vibrating screens

2.2 双层筛孔式抖动板结构设计

双层筛孔式抖动板与振动筛相对位置示意图如图 5 所示。为保证清选过程中杂余能够顺利排出清选室,需缩短下抖动板以减弱其对气流的阻挡,其长度需结合后文清选系统内气流分布确定。抖动板主要由踏板和阶两部分组成,如图 5 所示,踏板长度为 36.7 mm,阶长度为 7.7 mm,踏板与水平面夹角为 15°,阶与垂直面夹角 12°,抖动板由 42 组踏板-阶构成。

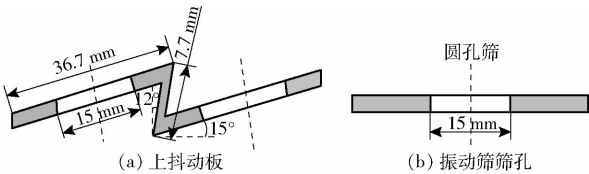


图 5 上抖动板和振动筛筛孔结构示意图
Fig. 5 Diagrams of upper jitter plates and hole with vibrating screen

参考圆孔筛的尺寸,确定筛孔直径为 15 mm,考虑到实际加工情况,确定沿踏板横向开有一个圆孔,通过预试验分析了踏板上筛孔圆心的不同位置对清选系统性能的影响,结果表明筛孔圆心的横、纵位置对清选系统性能影响不大,因此为了方便加工,确定筛孔圆心横向位置位于踏板横向的中点处,参考圆孔筛确定圆孔的纵向距离为 30 mm^[18]。

3 仿真试验

3.1 清选系统模型

以佳联 CF808 型 6 行玉米联合收获机清选装

置为参考进行三维建模。为了保证由脱粒滚筒落下的玉米脱出物能够被抖动板承接,根据脱粒滚筒长度确定上、下抖动板长度、厚度和安装倾角均分别为 1 350 mm、2 mm 和 3°。上、下筛长度、厚度和安装倾角均分别为 1 360 mm、2 mm 和 3.5°。考虑到计算机运算能力,设定筛面宽度为 100 mm,运用 NX. 10. 0 软件对清选系统进行三维建模,将三维模型导入到 Gambit 软件中进行网格划分,模型如图 6 所示。

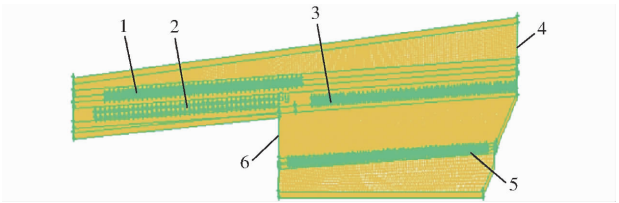


图 6 带有双层筛孔式抖动板的清选系统网格模型
Fig. 6 Mesh model of cleaning system with double-layer jitter plates with holes

1. 上抖动板 2. 下抖动板 3. 上筛 4. 杂余出口 5. 下筛 6. 气
流入口

3.2 玉米脱出物颗粒模型

以德美亚一号玉米为试验材料,利用 NX. 10. 0 三维软件对玉米脱出物中各组分进行三维建模,并将模型导入 EDEM 软件进行小球填充,玉米脱出物各成分模型如图 7 所示,各成分质量分数如表 1 所示^[19]。

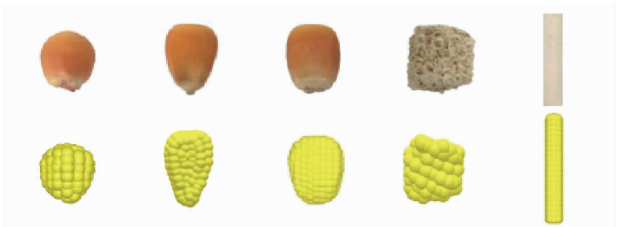


图 7 玉米脱出物各成分模型

Fig. 7 Models of maize grain, cob and stalk

表 1 玉米脱出物各成分质量分数
Tab. 1 Mass coefficient of maize mixture

种类	类别	质量分数/%
玉米籽粒	矩形	7. 6
	球形	11. 1
	锥形	54. 6
茎秆	28 mm	2. 4
	36 mm	5. 7
	44 mm	5. 3
	52 mm	4. 2
	1/4 圆柱	4. 4
玉米芯	1/2 圆柱	1. 8
	整个圆柱	2. 5
杂质		0. 4

3.3 仿真参数设定

玉米脱出物的力学特性参数以及各材料间接触属性参数取值参照文献[19],如表 2、3 所示。

表 2 力学特性参数

Tab.2 Parameters of mechanical properties				
参数	玉米籽粒	玉米芯	玉米茎秆	筛面(钢)
泊松比	0.400	0.450	0.420	0.300
剪切模量/MPa	127	109	100	7 000
密度/(g·cm ⁻³)	1.197	0.330	0.112	7.800

表 3 接触属性参数

Tab.3 Parameters of interaction properties			
材料	碰撞恢复	静摩擦	滚动摩擦
	系数	因数	因数
玉米籽粒-玉米籽粒	0.310 0	0.790 0	0.060 7
玉米籽粒-玉米茎秆	0.270 0	0.710 0	0.010 0
玉米籽粒-玉米芯	0.250 0	0.680 0	0.010 0
玉米籽粒-筛面(钢)	0.540 0	0.480 0	0.031 1
玉米茎秆-玉米茎秆	0.210 0	0.650 0	0.010 0
玉米茎秆-玉米芯	0.220 0	0.680 0	0.010 0
玉米茎秆-筛面(钢)	0.290 0	0.620 0	0.010 0
玉米芯-玉米芯	0.220 0	0.780 0	0.010 0
玉米芯-筛面(钢)	0.330 0	0.700 0	0.010 0

在 EDEM 中选用 Hertz - Mindlin 无滑动模型,设定上、下抖动板振幅和振动频率均分别为 38 mm 和 5.38 Hz,上层抖动板振动方向角为 155.43°,下层抖动板的振动方向角为 24.57°。上、下振动筛的振幅和振动频率分别为 19 mm 和 5.15 Hz,上筛的振动方向角为 136.6°,下筛的振动方向角为 43.4°,设定 EDEM 中时间步长是 Rayleigh 步长的 20%。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^[20]。清选装置入口气流速度为 9.6 ~ 16 m/s,本研究选取其中心值 12.8 m/s,风机入口导风板角度为 25°。为探究玉米脱出物大喂入量时带有双层筛孔式抖动板的清选系统的性能,在仿真试验时,在 1 s 内生成 7 kg 玉米脱出物并连续喂入,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍^[21]。

3.4 单因素仿真试验

选取抖动板安装倾角、振幅和频率为试验因素,选取振动筛筛分玉米脱出物时间、籽粒清洁率、损失率作为性能指标进行单因素仿真试验。参考文献[17]和预试验结果确定各因素的水平,如表 4 所示。

表 4 单因素试验水平

水平	因素		
	安装倾角/(°)	振幅/mm	频率/Hz
1	-11	28	3.38
2	-7	33	4.38
3	-3	38	5.38
4	1	43	6.38
5	5	48	7.38

以玉米脱出物进入振动筛开始到振动筛上玉米脱出物完全筛分所经历的时间作为振动筛筛分玉米脱出物时间,籽粒清洁率 η_1 和籽粒损失率 η_2 计算公式为

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1}\right) \times 100\%$$
 (8)

$$\eta_2 = \frac{m_3 - m_2}{m_3} \times 100\%$$
 (9)

式中 m_1 ——筛分后装置底部玉米脱出物质量,g
 m_2 ——筛分后装置底部玉米籽粒的质量,g
 m_3 ——喂入物料中玉米籽粒的质量,g

3.4.1 确定下抖动板长度的仿真试验

对带有不同长度的下抖动板清选系统内气流分布进行仿真,其结果如图 8 所示。图中 l 为下抖动板缩短长度。

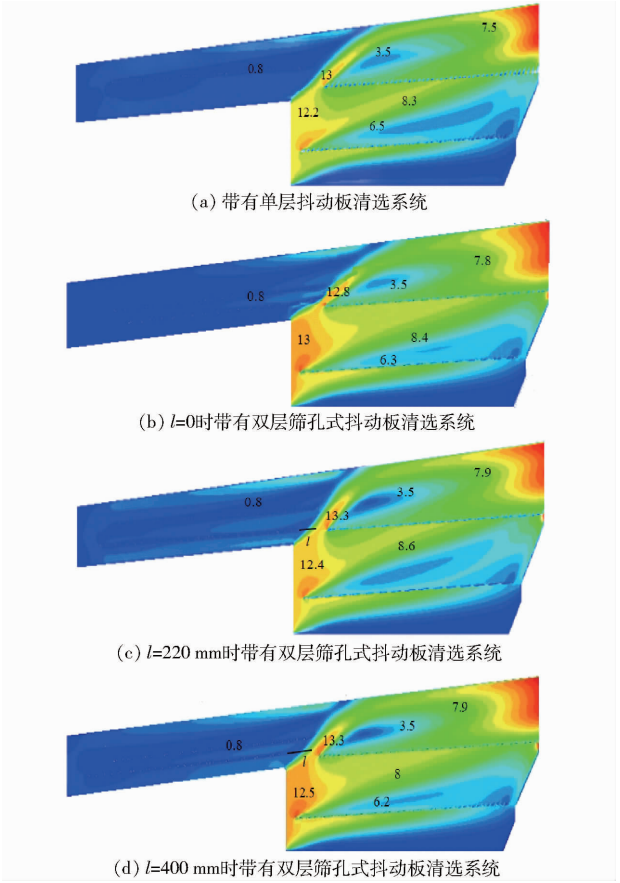


图 8 不同清选系统内气流场

Fig. 8 Air flow fields in different cleaning systems

分析可知,在带有单层抖动板的清选系统中上筛前部的气流速度最大为 13 m/s,而在带有双层筛孔式抖动板的清选系统中,当上、下抖动板长度一致时,气流受到下抖动板的阻挡作用较大,此时上筛体前端气流速度相比于单层抖动板的清选系统小了 0.2 m/s,同时上抖动板与上筛间气流带速度范围为 7.8 ~ 12.8 m/s 且区域范围较窄,会出现物料由下抖动板直接落到上筛的情况,与玉米脱出物在抖动

板处实现分流的预期目标不符；当下抖动板缩短长度 l 大于 220 mm 时，上筛体前端气流速度为 13.3 m/s，相比于单层抖动板的清选系统大了 0.3 m/s，同时在上抖动板与上筛前端之间具有较宽的气流带，其为 7.9 ~ 13.3 m/s，相同位置气流速度提高了 0.5 m/s，更有利于有上抖动板喂入的玉米脱出物的吹散和分离，同时考虑下筛对下抖动板喂入的物料顺利承接，下抖动板缩短距离应与下筛伸长距离一致，且由于清选装置内部空间有限，下抖动板缩短长度不宜过大，因此综合考虑确定下抖动板缩短长度为 220 mm，此时下筛前端伸长 220 mm。

3.4.2 抖动板安装倾角对清选性能的影响

为了分析抖动板安装倾角对物料分流的影响，在抖动板将玉米脱出物全部输送到清选室后，统计由下抖动板进入清选室的玉米脱出物质量，并计算各成分与总喂入物料的质量分数。

由图 9 可知，玉米脱出物在双层抖动板的作用下能够被输送至振动筛，随着抖动板安装倾角的增大，落到下抖动板的玉米脱出物质量减小。原因为随着抖动板安装角度的增大，玉米脱出物运移速度逐渐加快，籽粒和小杂余的透筛概率降低，落到下抖动板的籽粒和小杂余质量较小。

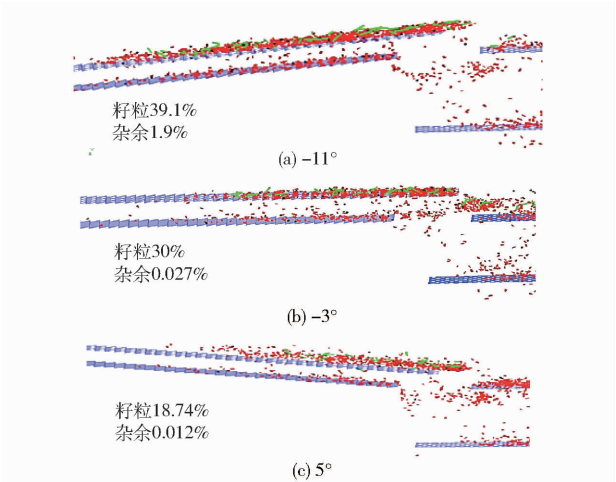


图 9 不同抖动板安装倾角时玉米脱出物的分流现象
Fig.9 Shunt phenomenon of maize mixture at different angles of jitter plates installed

由图 10 可知，随着抖动板安装倾角的增大，振动筛筛分玉米脱出物的时间增加。原因为随着抖动板安装角度的增大，落到下抖动板的籽粒和小杂余质量减小，导致输送至下筛的籽粒和小杂余质量减小，落到上抖动板进而落到上筛的玉米脱出物质量增大，振动筛筛分玉米脱出物的时间增加。

随着抖动板安装倾角增大，籽粒清洁率和损失率均呈现先增大后减小的趋势，结果如图 11 所示，选取 $-11^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 作为多因素试验中安装倾角的范围。

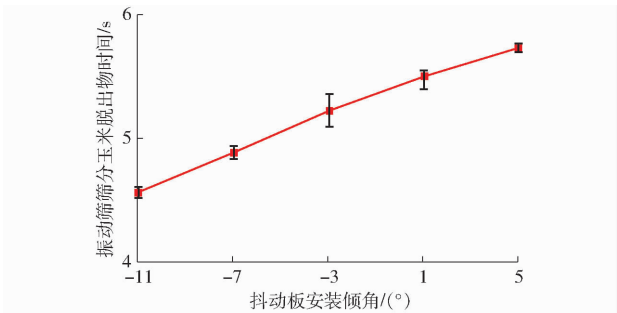


图 10 抖动板安装倾角对振动筛筛分玉米脱出物时间的影响

Fig.10 Effect of angle of jitter plates installed on time of cleaning maize mixture by screens

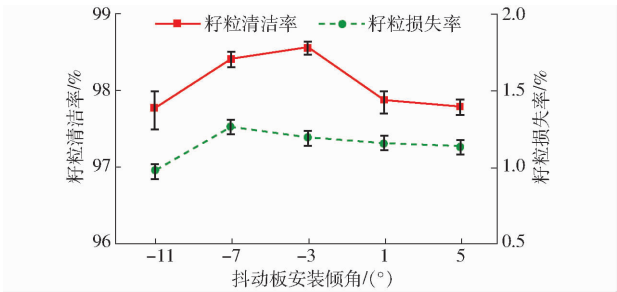


图 11 抖动板安装倾角对清选性能的影响

Fig.11 Effect of angle of jitter plates installed on cleaning performance

随着抖动板安装倾角的增大，抖动板上的籽粒和杂余透筛概率增加，落到上筛的籽粒相对较少，杂余对籽粒的夹带作用增强，籽粒清洁率、损失率升高；抖动板安装倾角继续增大，抖动板上籽粒和杂余碰撞次数增加，导致茎秆落到下筛，籽粒清洁率减小，同时杂余对籽粒夹带作用减弱，籽粒损失率降低；抖动板安装倾角过大时，籽粒清洁率、损失率变化不明显。

3.4.3 抖动板振动频率对清选性能的影响

为了分析抖动板频率对物料分流的影响，在 1.5 s 时，观察玉米脱出物在双层筛孔式抖动板上的运动状态。

如图 12 所示，随着抖动板振动频率的增大，落到下抖动板玉米脱出物质量逐渐减小。随着抖动板频率的增大，玉米脱出物运移速度加快，籽粒和杂余的透筛几率降低，落到下抖动板的籽粒和杂余质量减小。

由图 13 可知，随着抖动板频率的增大，振动筛筛分玉米脱出物时间增加。随着抖动板频率的增大，由下抖动板落到下筛的籽粒和小杂余数量减小，落到上抖动板进而落到上筛的玉米脱出物数量增加，导致振动筛筛分玉米脱出物的时间增加。

随着抖动板振动频率的增大，籽粒清洁率呈现增加的趋势，籽粒损失率呈现先增大后减小再增加

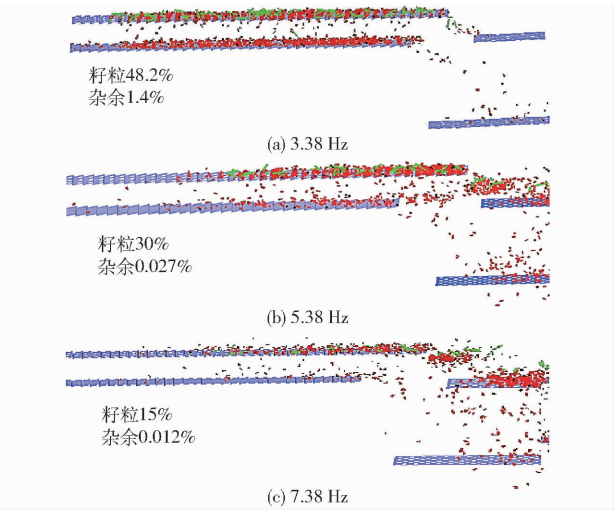


图 12 不同抖动板频率时玉米脱出物的分流现象
Fig. 12 Shunt phenomenon of maize mixture at different frequencies

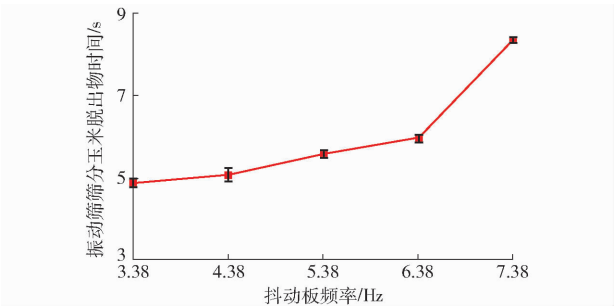


图 13 抖动板频率对振动筛筛分玉米脱出物时间的影响
Fig. 13 Effect of frequency of jitter plates on time of cleaning maize mixture by screens

的趋势,结果如图 14 所示。当前,佳联 CF808 型 6 行玉米联合收获机清选装置中,抖动板的振动频率为 5.38 Hz,为探寻抖动板的振动频率对清选性能的影响,适当的扩大因素选取范围,本文选取抖动板振动频率 3.38 ~ 7.38 Hz 为多因素试验范围。

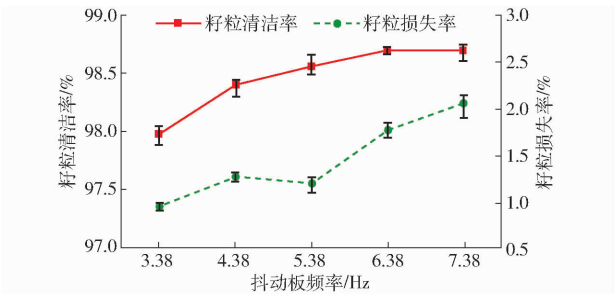


图 14 抖动板振动频率对清选性能的影响
Fig. 14 Effect of frequency of jitter plates on cleaning performance

随着抖动板频率的增大,抖动板上杂余和玉米籽粒在气流作用下分离效果明显,籽粒清洁率增大;抖动板频率为 4.38 Hz 时,抖动板上籽粒和杂余透筛概率减小,落到上筛的玉米脱出物增加,上筛籽粒的透筛率减小,籽粒损失率增大;抖动板频率为

5.38 Hz 时,抖动板上籽粒透筛概率增大,落到上筛的籽粒数量减小,杂余顺利排出,籽粒损失率降低;但当抖动板振动频率过大时,筛上籽粒跳动次数减少,籽粒透筛几率降低,导致籽粒损失率增大。

3.4.4 抖动板振幅对清选性能的影响

如图 15 所示,随着抖动板振幅的增大落到下抖动板的玉米脱出物逐渐减少。原因为抖动板振幅增大,玉米脱出物运移速度加快,影响了颗粒透筛,导致玉米脱出物的运移速度加快,籽粒和杂余透筛概率降低,落到下抖动板的籽粒和杂余较少。

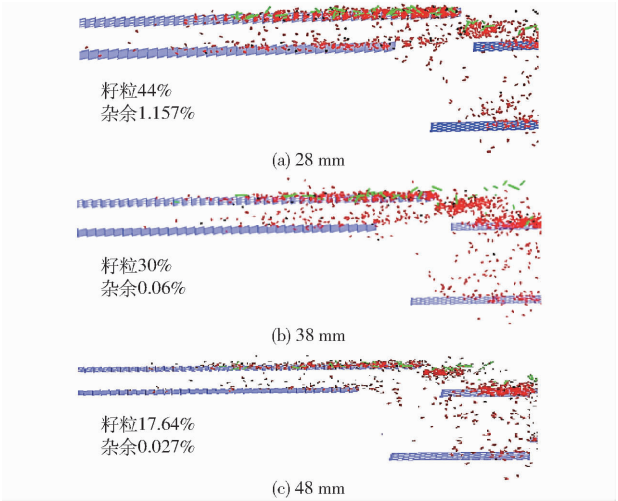


图 15 不同抖动板振幅时玉米脱出物的分流现象
Fig. 15 Shunt phenomenon of maize mixture at different amplitudes of jitter plates

由图 16 可知,随着抖动板振幅增大振动筛筛分玉米脱出物的时间增加。原因为抖动板振幅增加,导致抖动板上玉米脱出物运移速度加快,影响了颗粒透筛,落到下抖动板的籽粒和小杂余的质量逐渐减小,落到上抖动板进而落到上筛的玉米脱出物质量增加,导致振动筛筛分玉米脱出物的时间增加。

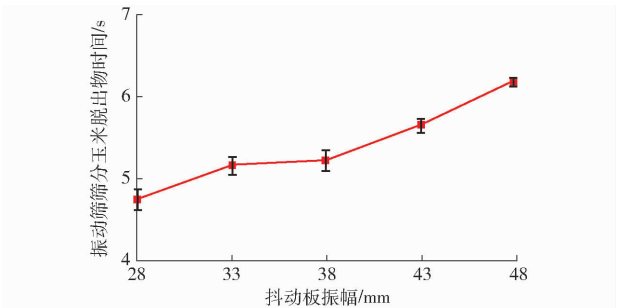


图 16 抖动板振幅对振动筛筛分玉米脱出物时间的影响
Fig. 16 Effect of amplitude of jitter plates on time of cleaning maize mixture by screens

随着抖动板振幅的增大,籽粒清洁率和损失率均呈现先增大后减小的趋势,如图 17 所示,选取抖动板振幅 33 ~ 48 mm 为多因素试验范围。

随着抖动板振幅的增大,抖动板上的籽粒与杂

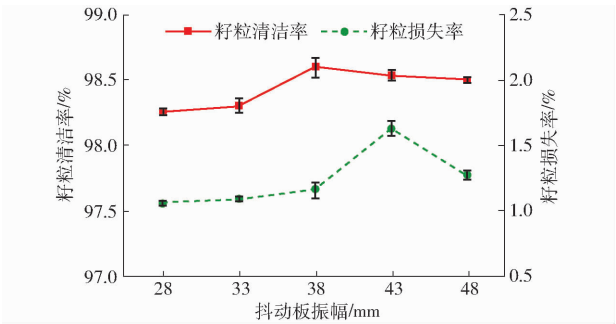


图 17 抖动板振幅对清选性能的影响

Fig. 17 Effect of amplitude of jitter plates on cleaning performance

余被抛起的高度增加,降低了杂余与抖动板的接触概率,由下抖动板落到下筛的杂余减少,杂余和籽粒向筛后的位移也随之增大,籽粒与筛面的接触次数减少,籽粒清洁率、损失率均升高;当抖动板振幅过大时,玉米脱出物在抖动板的作用下运移速度增大,杂余与籽粒在上筛前端堆积,杂余透筛概率增加,杂余对玉米籽粒的夹带作用减弱,籽粒清洁率、损失率降低。

3.5 多因素试验

3.5.1 二次正交旋转中心组合试验设计

根据单因素试验所确定抖动板安装倾角 x_1 、频率 x_2 、振幅 x_3 的水平范围,选定振动筛筛分玉米脱出物时间 y_1 、籽粒的清洁率 y_2 和损失率 y_3 为清选性能评价指标。采用三因素五水平二次正交旋转中心组合安排试验,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。试验因素编码如表 5 所示。安装倾角、频率、振幅的偏码值为 X_1 、 X_2 、 X_3 。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Experimental factors and codes

编码	因素		
	安装倾角 $x_1/(^{\circ})$	频率 x_2/Hz	振幅 x_3/mm
-1.682	-11.0	3.38	33.0
-1	-8.6	4.18	36.0
0	-5.0	5.38	40.5
1	-1.4	6.58	45.0
1.682	1.0	7.38	48.0

3.5.2 试验结果及分析

使用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,得到振动筛筛分玉米脱出物时间 y_1 、籽粒清洁率 y_2 和损失率 y_3 的回归方程。

(1) 振动筛筛分玉米脱出物时间

经过试验数据分析及拟合后可知:模型显著性检验 F 值为 26.24, $p < 0.0001$,该模型极显著;失拟项 $p = 0.0897 > 0.05$,残差项不显著,该回归模型成立。交互项 X_2X_3 对指标影响显著,其余交互项影响

不显著。各因素对振动筛筛分玉米脱出物时间的影响从大到小依次为: X_2 、 X_3 、 X_1 。将不显著交互项去除,各因素对振动筛筛分玉米脱出物时间 y_1 的回归方程为

$$y_1 = 7.14 - 0.20X_1 - 0.90X_2 - 0.31X_3 + 0.27X_2X_3 + 0.50X_2^2 \quad (R^2 = 0.9478) \quad (10)$$

如图 18 所示,当抖动板安装倾角为 -5° 时,随着抖动板振幅和振动频率的增加,振动筛筛分玉米脱出物的时间逐渐缩短。

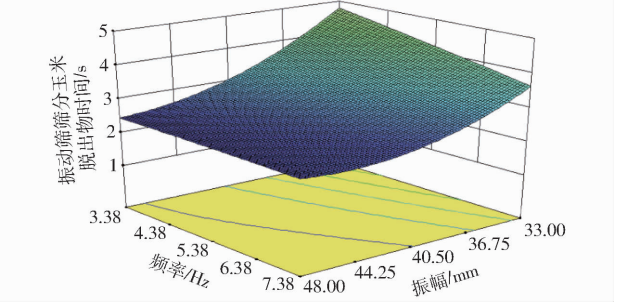


图 18 因素的交互作用对振动筛筛分玉米脱出物时间影响的响应曲面

Fig. 18 Response surface of interaction of various factors on time of cleaning maize mixture of cleaning device

(2) 籽粒清洁率

经过试验数据分析及拟合后可知:模型显著性检验 F 值为 16.97, $p < 0.0001$,该模型极显著;失拟项 $p = 0.7727 > 0.05$,残差项不显著,该回归模型成立。交互项 X_1X_2 、 X_2X_3 对指标影响显著,其余交互项影响不显著,各因素对籽粒清洁率的影响从大到小依次为: X_2 、 X_3 、 X_1 。将不显著交互项去除,各因素对籽粒清洁率 y_2 的回归方程为

$$y_2 = 98.22 - 0.075X_1 + 0.31X_2 + 0.11X_3 + 0.11X_1X_2 - 0.16X_2X_3 - 0.1X_2^2 + 0.071X_3^2 \quad (R^2 = 0.9216) \quad (11)$$

如图 19 所示,在抖动板频率为 5.38 Hz 时,在振幅处于高水平条件下,随着安装倾角的增大清洁率呈增加趋势,在振幅处于低水平条件下,随着安装倾角的增大清洁率呈减小趋势;当抖动板安装倾角一定时,随着抖动板振幅的增大,籽粒清洁率增大。

在抖动板安装倾角为 -5° 时,当振幅处于低水平条件下,随着频率的增大,籽粒清洁率逐渐提高;当振幅处于高水平条件下,随着频率的增大,籽粒清洁率呈降低趋势;当抖动板频率一定时,随着抖动板振幅增加籽粒清洁率升高。

(3) 籽粒损失率

经过试验数据分析及拟合后可知:模型显著性检验 F 值为 13.80, $p < 0.0001$,该模型极显著;失拟项 $p = 0.1398 > 0.05$,残差项不显著,该回归模型成

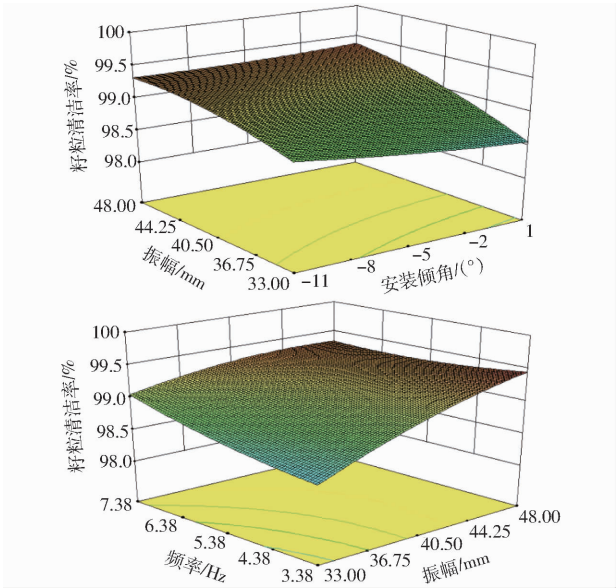


图 19 因素的交互作用对籽粒清洁率影响的响应曲面
Fig. 19 Response surfaces of interaction of factors on cleaning rate of maize grain

立。交互项 X_1X_3 、 X_2X_3 对指标影响显著,其余交互项影响不显著,各因素对籽粒损失率的影响从大到小依次为: X_3 、 X_1 、 X_2 。将不显著交互项去除,各因素对籽粒损失率 y_3 的回归方程为

$$y_3 = 1.43 - 0.027X_1 + 0.026X_2 - 0.033X_3 + 0.029X_1X_3 + 0.036X_2X_3 + 0.021X_1^2 + 0.026X_2^2 + 0.076X_3^2$$

$(R^2 = 0.9053)$ (12)

如图 20 所示,当抖动板振幅为 40.50 mm 时,在安装倾角一定的条件下,随着频率的增大,籽粒损失率先减小后增大;当抖动板频率一定时,随着抖动板安装倾角增大籽粒损失率减小。当抖动板安装倾角为 -5° 时,在抖动板振动频率处于低水平条件下,随着振幅增大,籽粒损失率降低,在抖动板振动频率处于高水平条件下,随着振幅的增大籽粒损失率增加。

3.5.3 参数优化

为获得带有双层筛孔式抖动板的清选系统最佳清选性能参数,根据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

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \max y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

优化结果为:当抖动板安装倾角为 -3.85° 、频率为 5.62 Hz、振幅为 44.77 mm 时,落到下抖动板的

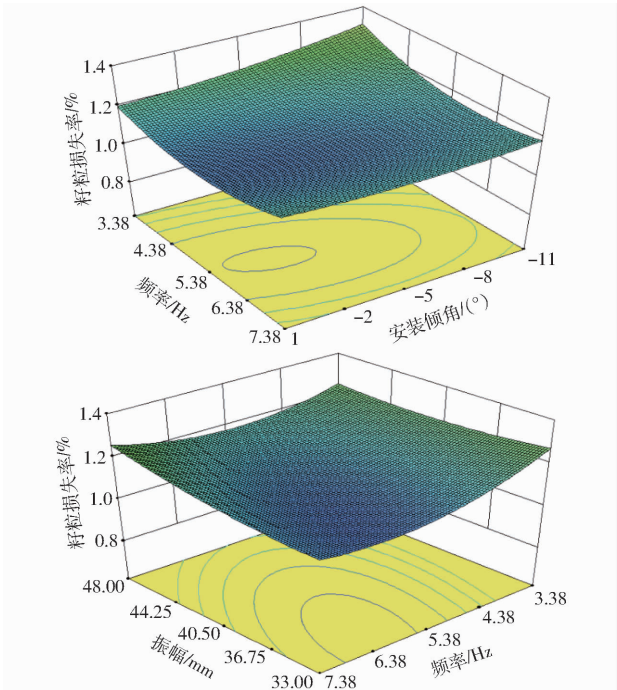


图 20 因素的交互作用对籽粒损失率影响的响应曲面
Fig. 20 Response surfaces of interaction of various factors on loss rate of maize grain

玉米脱出物与总喂入玉米脱出物的质量百分比为 30%,轻杂余质量与总喂入玉米脱出物的质量百分比为 0.06%,双层筛孔式抖动板有较好的分流效果,此时,振动筛筛分玉米脱出物时间为 6.74 s,筛分后籽粒的清洁率和损失率分别为 98.36% 和 1.45%,带有双层筛孔式抖动板的清选性能符合 GB/T 21961—2008(籽粒清洁率大于 97%,籽粒损失率小于 2%)要求。

4 台架试验

4.1 试验条件与指标

基于多因素试验结果,加工带有筛孔的上抖动板以及未开孔的下抖动板,改进贯流式风筛清选装置试验台架,使其与常发佳联 CF808 型 6 行玉米收获机中清选装置保持一致,如图 21 所示。

将从田间收集的玉米脱出物分类为玉米籽粒、玉米茎秆、玉米芯、轻质杂余并称量,利用电热鼓风干燥箱测量玉米脱出物中各成分的含水率,每组试验重复 5 次,得到玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆含水率分别为 24.7%、47.5%、63.5%。将收集的玉米脱出物搅拌均匀,从中随机选取 7 kg,对玉米籽粒、茎秆、玉米芯进行分类并称量,重复 5 次确定玉米脱出物中各成分平均质量分数依次为:玉米籽粒 73.3%、玉米茎秆 17.6%、玉米芯 8.7%、轻质杂余 0.4%,据此称量出玉米脱出物各成分的质量然后均匀混合,物料均匀铺设于抖动板前端的喂料板上,试

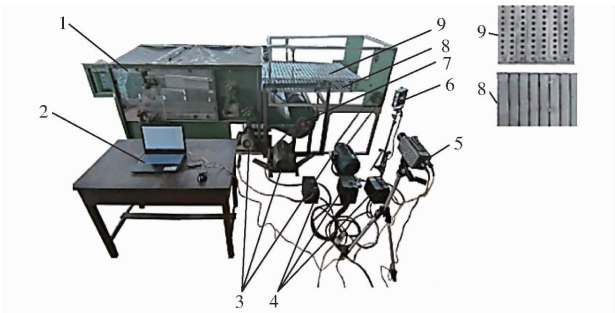


图 21 试验台架

Fig. 21 Test bench

1. 振动筛 2. 计算机 3、7. 贯流风机 4. 变频器 5. 高速摄像机
6. 照明灯 8. 下抖动板 9. 上抖动板

验用玉米脱出物通过振动电机驱动喂料板,通过改变振动电机的激振力可以调节喂料板的喂入量。试验前对喂料板上玉米脱出物的喂入量进行标定。当振动电机的激振力分别为 2.3 kN 和 3 kN 时,抖动板的喂入量分别为 7 kg/s 和 8 kg/s。每组试验在 5 s 内分别喂入 35 kg 和 40 kg 玉米脱出物,以保证喂入量为 7 kg/s 和 8 kg/s^[21]。

根据课题组前期研究^[5],确定清选装置风速和变频器频率的关系,以及振动筛、抖动板频率和变频器频率的关系,分别调整变频器的频率控制清选装置风速、振动筛和抖动板的频率,以振动筛筛分玉米脱出物时间、籽粒清洁率、籽粒损失率为试验指标进行台架试验,同时考虑到实际试验条件,对多因素试验取得的最优解,保留小数点后一位进行试验。

参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》进行筛分性能验证试验,并与带有单层抖动板的清选系统的试验结果进行对比,对数据进行均值化处理,台架试验结果如表 6 所示。

4.2 试验结果

由台架试验结果可知,带有单层抖动板的清选系统在处理大喂入量的玉米脱出物时,不能满足当前的清选要求(籽粒清洁率大于 97%,籽粒损失率小于 2%)。当玉米喂入量为 7 kg/s 时,带有双层筛孔式抖动板的清选系统中籽粒清洁率为 98.25%,籽粒损失率为 1.56%,振动筛筛分玉米脱出物时间为 6.95 s,其与仿真优化结果基本一致,相比于带有单层抖动板的清选系统,籽粒清洁率提高了 1.72 个百分点,损失率降低了 0.84 个百分点,振动筛筛分玉米脱出物时间缩短了 0.57 s,带有双层筛孔式抖动板的清选系统的清选性能满足玉米清选的国家标准。当玉米脱出物喂入量为 8 kg/s 时,带有双层筛孔式抖动板的清选系统的籽粒清洁率为 97.72%,籽粒损失率为 1.96%,振动筛筛分玉米脱出物时间

表 6 台架试验结果							
Tab. 6 Results of tests							
喂入量/ (kg·s ⁻¹)	序号	带有单层抖动板的 清选系统			带有双层筛孔式抖 动板的清选系统		
		清洁 率/%	损失 率/%	振动筛筛 分玉米脱 出物时间/s	清洁 率/%	损失 率/%	振动筛筛 分玉米脱 出物时间/s
7	1	96.21	2.26	7.66	98.45	1.62	7.21
	2	95.93	2.75	7.58	97.85	1.65	6.85
	3	96.59	2.34	7.55	98.12	1.51	6.91
	4	96.61	2.58	7.47	98.48	1.43	6.98
	5	97.31	2.07	7.34	98.45	1.59	6.80
均值		96.53	2.40	7.52	98.25	1.56	6.95
标准差		0.46	0.24	0.11	0.24	0.08	0.14
8	1	96.65	2.69	8.12	97.46	2.21	7.49
	2	95.4	2.76	8.29	98.32	1.79	7.76
	3	95.98	2.58	8.42	97.35	1.80	7.67
	4	96.75	2.67	8.31	96.87	1.89	7.82
	5	95.97	2.55	8.11	98.6	2.11	7.51
均值		96.15	2.65	8.25	97.72	1.96	7.65
标准差		0.50	0.08	0.12	0.64	0.17	0.13

为 7.65 s,相比于带有单层抖动板的清选系统,籽粒清洁率提高了 1.57 个百分点,损失率降低了 0.69 个百分点,振动筛筛分玉米脱出物时间缩短了 0.6 s,带有双层筛孔式抖动板的清选系统的清选性能满足国家标准。

5 结论

(1)通过理论分析设计了具有分流功能的双层筛孔式抖动板,玉米脱出物在上抖动板实现初步筛分,能够实现玉米脱出物进入清选装置前的分流,一部分籽粒和少部分轻杂余由下抖动板落到下筛,能够减轻上筛的筛分压力,提高了双层筛的利用率。

(2)基于 CFD-DEM 耦合仿真试验,探究了抖动板安装倾角、振幅、频率对振动筛筛分玉米脱出物时间、清选系统收集的籽粒清洁率和损失率的影响规律,通过参数优化确定双层筛孔式抖动板的最优参数组合为:抖动板安装倾角为 -3.85°、频率为 5.62 Hz、振幅为 44.77 mm。

(3)由台架试验结果可知,当入口气流速度为 12.8 m/s、气流方向角为 25°,玉米喂入量为 7 kg/s 时,带有双层筛孔式抖动板的清选系统籽粒清洁率为 98.25%,籽粒损失率为 1.56%,振动筛筛分玉米脱出物时间为 6.95 s,相比于带有单层抖动板的清选系统籽粒清洁率提高了 1.72 个百分点,损失率降低了 0.84 个百分点,振动筛筛分玉米脱出物时间缩短了 0.57 s,满足玉米清选的国家标准要求。

参 考 文 献

- [1] 王立军,张传根,丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J]. 农业机械学报,2016,47(9):108-114.
WANG Lijun, ZHANG Chuan'gen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):108-114. (in Chinese)
- [2] 魏纯才,李耀明,徐立章,等. 大喂入量水稻联合收获机脱粒清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(8):70-74.
WEI Chuncai, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Design and experimental study of large feed quantity crawler full feeding rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8):70-74. (in Chinese)
- [3] 陈庆文,韩增德,崔俊伟,等. 自走式谷物联合收割机发展现状及趋势分析[J]. 中国农业科技导报,2015,17(1):109-114.
CHEN Qingwen, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Development status and trend current situation of self-propelled combine harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(1):109-114. (in Chinese)
- [4] LIANG Zhenwei, LI Yaoming, DE BAERDEMAEKER J, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182(8):95-106.
- [5] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):124-136. (in Chinese)
- [6] 童水光,沈强,唐宁,等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):135-142.
TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field on longitudinal axial flow cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):135-142. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118:92-99.
- [9] 周璇,王志明,陈霓,等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):91-100.
ZHOU Xuan, WANG Zhiming, CHEN Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):91-100. (in Chinese)
- [10] 汤庆,吴崇友,伍德林,等. 基于 DEM 的谷物联合收割机抖动板性能研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(1):208-210.
- [11] 付威,杨立东,何荣,等. 谷物联合收割机抖动板的改进及分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2012,30(2):249-251.
FU Wei, YANG Lidong, HE Rong, et al. Analysis and improvement of oscillating plate of grain combine harvester[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2012, 30(2):249-251. (in Chinese)
- [12] 谷物收获机械/联合收割机/c440 联合收割机[EB/OL][2021-01-20]. <https://www.deere.com.cn/zh/谷物收获机械/联合收割机/C440联合收割机>
- [13] 程超,付君,唐心龙,等. 水稻收获机械抖动板加热脱附试验研究[J]. 农业机械学报,2019,50(6):110-118.
CHENG Chao, FU Jun, TANG Xinlong, et al. Heating anti-adhesion experiments of jitter plate of rice harvesting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):110-118. (in Chinese)
- [14] 李耀明,徐立章,马朝兴. 振动清选筛:200610038961.7[P]. 2006-03-21.
- [15] 何康陵,樊再刚. 收割机抖动板分层预清选装置:CN201839637U[P]. 2011-05-25.
- [16] 张建宗,赵子龙,葛志伟,等. 一种联合收割机用分段式清选装置:200910066109.4[P]. 2009-09-10.
- [17] 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.
- [18] 江海深,赵跃民,张博,等. 基于 DEM 的筛面与物料特性在筛分过程中协同作用的研究[J]. 矿山机械,2014,42(1):83-87.
JIANG Haishen, ZHAO Yuemin, ZHANG Bo, et al. Study on cooperative effects of screening surface and material characteristics during screening process based on DEM[J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(1):83-87. (in Chinese)
- [19] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):122-127. (in Chinese)
- [20] 王立军,冯鑫,武振超,等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):115-123.
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):115-123. (in Chinese)
- [21] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):89-100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):89-100. (in Chinese)