doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.009

基于气固耦合的气筛式马铃薯清选装置参数优化与试验

李晓晖[1]　魏忠彩[1,2]　苏国梁[3,4]　王兴欢[1]　张祥彩[1]　王宪良[1]　程修沛[1]　金诚谦[1,2]

（1.山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255091；2.农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014；
3.山东思代尔农业装备有限公司，德州 253600；4.山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心，德州 253600）

摘要：针对马铃薯联合收获后含杂率高、后续二次清选伤薯破皮严重等问题，对气筛式马铃薯清选装置进行了优化设计，在低损伤的同时保持一定的清选除杂功能，在阐述总体结构及工作原理基础上，结合马铃薯运动学模型和碰撞特性分析，得到影响除杂率和薯块损伤的主要因素，通过 EDEM－Fluent 耦合构建仿真模型，以风机出风口气流速度、摆抖筛摆抖形式、摆抖频率、筛面倾角为试验因素，以马铃薯清选率和洁净率作为评价指标，对清选过程进行了多组仿真，并依据仿真结果进行验证与优化。研究结果表明，清选装置风机出风口气流速度对马铃薯气力清选的可行性起着决定性作用，摆抖筛摆抖形式、摆抖频率和筛面倾角对清选效果影响大，影响由大到小为风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角、摆抖筛摆抖频率，且摆抖筛前后简谐摆抖优于上下摆抖。最优工作参数组合：摆抖筛前后简谐摆抖、摆抖筛筛面倾角为 25°、摆抖频率为 10 Hz、风机出风口气流速度为 60 m/s，此时仿真试验马铃薯清选率为 93.1%，洁净率为 98.7%，台架试验马铃薯清选率为 91.6%，洁净率为 99.2%。研究结果可为马铃薯清选装置设计与优化提供理论依据。

关键词：马铃薯；清选分离装置；薯石分离；气固耦合

中图分类号：S225.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)01-0096-13　　**OSID**：

Parameter Optimization and Experiment of Air-screen Potato-stone Cleaning Device Based on Gas－Solid Coupling

LI Xiaohui[1]　WEI Zhongcai[1,2]　SU Guoliang[3,4]　WANG Xinghuan[1]　ZHANG Xiangcai[1]
WANG Xianliang[1]　CHENG Xiupei[1]　JIN Chengqian[1,2]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255091, *China*
2. *Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
3. *Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou* 253600, *China*
4. *Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou* 253600, *China*)

Abstract: At present, the rate of potato skin breaking after harvest was high and the content of impurities was high in China. In order to solve the problem that the rate of potato skin breaking was high, the content of impurities was high and the high cost of the above two points after the potato harvest, an air-screen type potato cleaning device was designed and optimized. By using the method of EDEM－Fluent coupling simulation, the air velocity at the inlet of the cleaning device, the swinging form of the shaking screen, the swinging frequency and the inclined angle were taken as the experimental factors, and the cleaning and separating rate and the cleanliness rate of the potatoes were taken as the evaluation indexes. Multiple sets of simulation analyses were conducted on the cleaning process, and validation and optimization were conducted on the basis of the simulation results. The simulation results showed that the wind speed at the inlet of the cleaning device played a decisive role in the feasibility of potato pneumatic separation. The order of significance of the impact was as following: the air velocity at the inlet of the cleaning device, the inclined angle of the shaking screen and the shaking frequency of the shaking screen, and the simple harmonic oscillation of the shaking screen was better than the up-down oscillation.

收稿日期：2023－09－25　修回日期：2023－10－25

基金项目：国家自然科学基金项目(52105266)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1332)、中国博士后科学基金面上项目(2021M701801)和南京市博士后科研项目

作者简介：李晓晖(1998—)，男，硕士生，主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究，E-mail：1924383583@qq.com

通信作者：魏忠彩(1990—)，男，副教授，博士，主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究，E-mail：weizc@sdut.edu.cn

The optimal working parameter combination was that the form of the simple harmonic swing of the screen was front and back, the angle of the screen was 25°, the swing frequency was 10 Hz, the wind speed of the fan was 60 m/s. Under the optimal working parameter combination, the potato cleaning and separating rate was 93.1% and the cleanliness rate was 98.7%. The results showed that the application of EDEM – Fluent coupling simulation was helpful to the research of potato cleaning and separating, and the research results could provide a theoretical basis for the design and optimization of potato cleaning device. At the same time, it laid a foundation for the further research on the size and shape of the opening of the shaking sieve. There was little difference between the bench verification experiment and the simulation experiment. The results of the bench verification test and the simulation test were basically the same, which laid a foundation for the follow-up field test.

Key words: potato; cleaning and separating device; separation of potatoes and stones; gas – solid coupling

0　引言

马铃薯是国内广泛种植的粮食作物，中国马铃薯年产量居世界之首[1-2]。但马铃薯收获清选的成本过高导致国内马铃薯种植面积有所下降，无论北方的马铃薯主产区还是丘陵地区的马铃薯种植区，田间往往散布有大小不一、形状各异的非规则石块，粘湿或干硬土块以及团簇秧蔓等。这些杂物仅依靠收获过程中简单的振动激励难以实现良好的破碎和透筛从而导致分离效果不理想，而过度施加振动激励将进一步加重马铃薯损伤和破皮。因此，高效清选分离与低损收获难以兼顾[3-5]，其中碰撞冲击是薯杂清选分离环节造成损伤的主要因素[6-7]。

清选分离过程中，薯杂混合物中的石块和粘湿土块等一般需人工辅助捡拾剔除，耗时较多且劳动强度大、清选精度低，石块、秧蔓等杂质不仅会造成马铃薯破皮损伤，而且也会导致清杂辊和输送机构等关键部件产生故障，影响清选效率和机具可靠性。马铃薯机械化清选涉及石块、秧蔓、土块和马铃薯等多种物料，尤其是收获期的马铃薯含水率高，是一个复杂多变的过程，杂质洁净程度和马铃薯损伤问题，是制约当前马铃薯收获后清选处理的瓶颈难题[3]。

目前，马铃薯清选分离大多采用螺旋辊式、波浪辊式、弹性辊式清选除杂装置和杆条式分离筛，并借助机、电、液一体化控制，应用传感技术调控上料量和作业速度，以实现减损控制和低损增效[8-12]。根据技术原理和结构不同，马铃薯清选机大致分为多段辊式清选机[7]和振动清选机[11-12]，辊式马铃薯清选机一般由多段分级装置，通过辊子与马铃薯表面摩擦实现薯杂分离，振动清选机如德国 GRIMM 公司的 WEBGRADERWG－900 型与 M614－1 型马铃薯分选机，通过橡胶筛振动进行马铃薯除杂[13-14]。目前，马铃薯收获清选机薯土分离、清土除杂等技术取得一定进展，但对于马铃薯联合收获后尚未清选分离彻底的马铃薯–土块–石块–秧蔓的清选仍存不足。

由气流清选和机械振动组合而成的清选分离装置因可靠性高、适应性强而得到良好的应用[15]。气流清选除杂技术一般通过气流作用产生的气流推力减少物料间的碰撞迫使物料进行透筛分离与除杂，如垂直气流清选机通过调控气流速度即可实现对多种谷物的清选除杂[16]；水稻联合收获机清选装置有效利用气流对物料进行吹散分层，以提高水稻籽粒的透筛效率[17]；油菜联合收获机利用“圆盘筛离心初筛＋气流二次清选”的分离工艺，降低损失率和含杂率[18]。因此，优化清选装置性能是各类联合收获机和清选机需要解决的重点和难点，研究筛分物料与清选装置在“输送–分离–清选”过程中的相互作用关系，是设计高效低损清选装置的依据和关键。此外，气流清选除杂方法也可用于土壤残膜分离、玉米收获茎叶除杂和种子筛分清选等领域[19-21]。

为了保证马铃薯高效低损清选，将气流悬浮与摆抖筛分层清选技术引入到减损分离中，借助风力的柔性筛选原理设计一种气筛式马铃薯清选装置，对马铃薯在悬浮清选过程中在摆抖筛筛面上的运动进行力学分析，利用 EDEM－Fluent 气固耦合模型对物料在气流悬浮及摆抖筛耦合作用下的薯–石分离效果进行分析，研究摆抖筛摆抖形式、倾角、摆抖频率、风机出风口气流速度等工艺参数对马铃薯清选率与洁净率的影响规律，对气筛式马铃薯清选装置相关参数进行优化，以期为薯–石清选装置结构改进和参数优化提供支撑。

1　结构与工作原理

1.1　总体结构

气筛式马铃薯清选装置结构如图 1 所示，主要由机架、上料输送带、摆抖筛、集薯装置、风机和气流管道等组成。

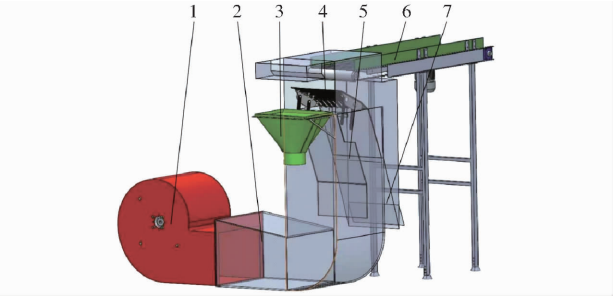


图 1 气筛式马铃薯清选装置结构图

Fig. 1 Structure of air-screen type potato cleaning device

1. 风机 2. 气流管道 3. 集薯区 4. 摆抖筛 5. 导流板 6. 上料输送带 7. 石块落料板

1.2 工作原理

气筛式马铃薯清选装置工作时,上料输送带将物料送入摆抖筛上方,与此同时,风机启动产生气流,气流经过管道、导流板到达摆抖筛上方,由于马铃薯密度小,处于悬浮状态,石块密度大,处于下落状态掉落到摆抖筛随后进入石块掉落区,摆抖筛通过摆抖使马铃薯受力均匀,马铃薯向前运动进入集薯区,从而完成薯杂分离工作。在实际工况下,可调节筛面结构和气流流场,以达到最优的清选效果。气筛式马铃薯清选装置结构参数如表 1 所示。

表 1 气筛式马铃薯清选装置结构参数

Tab. 1 Structure parameters of air-screen type potato cleaning device

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 800×1 200×1 800
整机质量/kg	5 000
风机功率/kW	15
风机转速/(r·min^{-1})	0~1 450
风机风量/(m^3·h^{-1})	54 000
摆抖筛摆动幅度/mm	20
摆抖筛频率/Hz	2~10
输送带速度/(m·s^{-1})	0.6
管道尺寸(长×宽)/(mm×mm)	1 600×800

1.3 马铃薯-石块气力分选可行性分析

由于不同物料密度不同,在运动过程中即使体积相同的不同物料所受的重力也不相同,从而实现按照密度不同进行气流分选,利用重力清选物料的判定公式为[22-23]

$$E=\frac{\rho_2-\rho}{\rho_1-\rho} \tag{1}$$

式中 E——重力清选可选性标准

ρ_1——马铃薯密度,kg/m^3

ρ_2——石块密度,kg/m^3

ρ——空气密度,kg/m^3

可选性标准 E 如表 2 所示[20-21]。

表 2 气流可选性标准

Tab. 2 Air flow selectivity criteria

E	$E\geqslant 2.5$	$2.5>E\geqslant 1.75$	$1.75>E\geqslant 1.5$	$1.5>E\geqslant 1.25$	$0<E<1.25$
难易度	极易选	易选	可选	难选	极难选

其中空气密度为 1.29 kg/m^3,马铃薯密度为 1 048 kg/m^3,石块密度为 2 700 kg/m^3,代入式(1),得 E 为 2.57,由表 2 可知,马铃薯与石块的重力清选可行性极高,可进行气力分选。

2 马铃薯悬浮速度测定与清选影响因素

2.1 物料悬浮速度测定方法

2.1.1 理论计算法

气流作用下马铃薯悬浮状态示意图如图 2 所示,根据牛顿第二定律对其受力分析可知,物料重力与气流推力相等,将物料和气流特性参数代入受力平衡方程并计算悬浮速度,即获取物料悬浮速度理论计算值,计算式为

$$\begin{cases} G=mg=F_t+F_f \\ F_t=PA=\dfrac{1}{2}CA\rho_1 v^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中 F_t——气流推力,N G——马铃薯重力,N

F_f——气流浮力,N

m——马铃薯质量,kg

P——风压,Pa

A——马铃薯迎风面积,m^2

C——物料阻力系数

v——悬浮气流速度,m/s

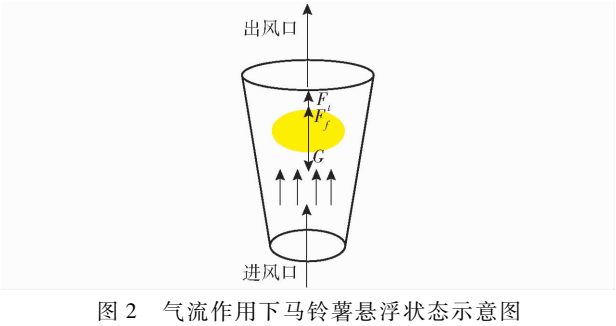


图 2 气流作用下马铃薯悬浮状态示意图

Fig. 2 Schematic of potato suspension state under airflow

整理式(2)得到悬浮气流速度计算式[24-25]为

$$v=\sqrt{\frac{2(G-F_f)}{\rho_1 AC}} \tag{3}$$

其中,马铃薯在空气中受到气流浮力 F_f,相比气流推力与自身重力数量级相差较大,因此在计算过程中可忽略不计。

物料阻力系数 C 反映气流场基本性质,一般将

其分为 3 个区域，即：Stokes 区、Allen 区和 Newton 区。探明马铃薯和石块在气流场中的运动轨迹和运动姿态，需确定马铃薯和石块阻力系数的区域。采用粒径法确定计算因子为[24-25]

$$T=\left[\frac{u^2}{\rho(\rho_1-\rho)^2}\right]^3=6.175\times10^{-2}\ \text{mm} \quad (4)$$

式中　T——计算因子

u——空气动力黏度，取 1.81×10^{-5} Pa·s（20℃）

流体力学中规定，各分区适用粒径分别为 Stokes 区：$d_p\leqslant2.2T$；Allen 区：$2.2T<d_p\leqslant20.4T$；Newton 区：$20.4T<d_p\leqslant1\ 100T$，其中 d_p 为物料粒子粒径。查询文献马铃薯粒径可按 45 mm 计算[8]，由此判断出马铃薯的空气阻力系数落在 Newton 区，阻力系数为常数，$C=0.44$[26]。

在悬浮速度实际计算中，悬浮速度与物料颗粒的直径、密度、阻力系数以及空气密度等有关。通过推导式的演变，在求解非球状物料的悬浮速度时引入修正系数 S。其理论计算式为[26]

$$v=\frac{5.451}{\sqrt{S}}\sqrt{\frac{d_p(\rho_1-\rho)}{\rho_1}} \quad (5)$$

物料修正系数 S 取 1.1。通过式(5)计算得马铃薯悬浮速度为 35 m/s。

2.1.2　试验测定法

试验台如图 3 所示，由机架、风机、上稳流管、下稳流管、风压变送器、测试锥形管、动压检测装置、风速调节装置和人机交互界面等部分组成，测试锥形管采用有机玻璃制作，以便于观察。

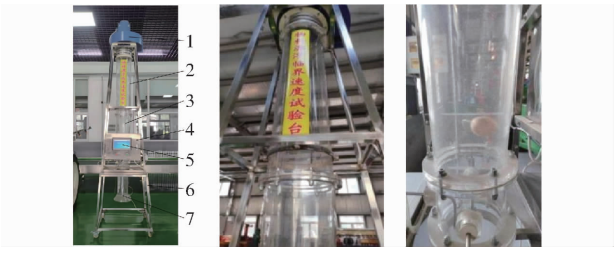


图 3　物料悬浮速度试验台

Fig. 3　Material suspension speed test stand

1. 离心风机　2. 上稳流管　3. 测试锥形管　4. 风速调节装置　5. 人机交互界面　6. 机架　7. 送料口

风机置于试验台架最上方，上下稳流管的横截面均是圆柱形，上下稳流管通过测试锥形管相连，风机的吸风口与上稳流管的一端相连，物料在锥形管中悬浮，下稳流管截面积为锥形管最小截面积，上稳流管截面积为锥形管最大截面积。试验台采用轴流风机负压吸风的形式，通过变频器控制与调整轴流风机的转速、物料在悬浮管道内的风速，明确物料在测试锥形管的不同高度位置。试验台离心风机技术参数如表 3 所示。

表 3　离心风机技术参数

Tab. 3　Basic structure parameters of test bed

参数	数值
离心风机流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	2 890 ~ 4 300
离心风机全压/Pa	580 ~ 730
离心风机转速/($r\cdot min^{-1}$)	1 450
离心风机功率/kW	15
离心风机频率/Hz	50
离心风机电压/V	380

工作原理：给试验台通电，离心风机开始转动，试验台最底端产生向上的气流，流速由风速调节装置控制，缓慢旋转风速调整旋钮，气流流速会逐渐变大，在最底端轻抛物料，当风速达到物料悬浮速度，物料会在锥形管缓慢上升，在人机交互界面设置物料悬浮高度，风速会自动调整到要求的数值，最终物料在锥形管悬浮，在数据处理装置读取数据，得到物料悬浮速度。启动试验台，选取马铃薯放入试验台的最底端，将马铃薯轻抛，在风速逐渐升高的过程中，马铃薯从锥形管上升最后稳定下来，读取马铃薯在锥形管稳定位置的横截面积，根据密封管道中各横截面空气流量相等的原理，得到马铃薯悬浮速度 V_i，计算公式为[27-28]

$$S_1V_1=S_iV_i \quad (6)$$

式中　S_1——锥形观察管小端面积，m^2

V_1——锥形观察管小端风速，m/s

S_i——物料悬浮位置断面面积，m^2

将不同大小马铃薯进行多次试验，悬浮速度由数据控制装置读出，测得马铃薯悬浮速度在 30.7 ~ 39.9 m/s 之间，其悬浮速度与马铃薯的外形和三轴尺寸有一定关系。

2.2　马铃薯悬浮清选过程分析

针对马铃薯在悬浮清选过程中的 2 种状态进行分析，如图 2 和图 4 所示。马铃薯在悬浮清选过程中，存在两种不同的状态：悬浮和跌落。

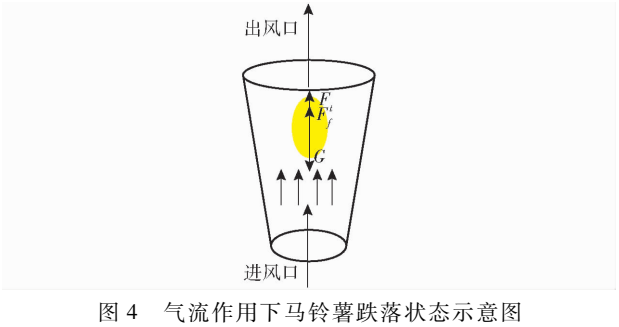


图 4　气流作用下马铃薯跌落状态示意图

Fig. 4　Schematic of potato drop state under airflow

由图 2 可知，当气流推力 F_t 与气流浮力 F_f 之和

等于马铃薯自身的重力 G 时，即当风速达到马铃薯悬浮速度，马铃薯会悬浮而起，此时风速即为马铃薯悬浮速度。如图 4 所示，悬浮清选过程中，马铃薯的状态受气流稳定性和薯块形状等因素影响，当椭球形马铃薯长轴方向趋向于竖直方向时，马铃薯迎风面积变小，马铃薯受到的气流推力减小，使得向上的合力低于马铃薯重力，气流作用不足以让马铃薯维持在恒定的悬浮高度，导致马铃薯会向下跌落，直到恢复到图 2 状态时趋于稳定，马铃薯会出现跌落-悬浮-跌落交替的状态变化。因此借助气流悬浮作用对马铃薯进行分选，不仅要获取马铃薯的悬浮速度，还要考虑悬浮清选过程的稳定性，因此通过摆抖筛筛面的摆抖作用，迫使处于跌落过程的马铃薯恢复到悬浮状态，实现马铃薯与石块的分离。

2.3 马铃薯清选评价指标

按照 GB/T 5667—2008《农业机械生产试验方法》、GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》及 GB/T 5983—2013《种子清选机试验方法》标准设计试验。马铃薯清选率 α 与洁净率 β 为主要评价指标[29-31]，计算公式为

$$\alpha = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\% \tag{7}$$

$$\beta = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \times 100\% \tag{8}$$

式中 Q_1——清选后物料中马铃薯质量，kg

Q_2——物料中马铃薯总质量，kg

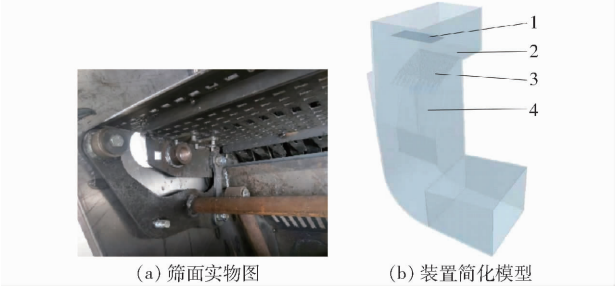
U_1——清选后物料中石块质量，kg

U_2——物料中石块总质量，kg

3 基于 EDEM - Fluent 的薯-石清选效果

3.1 气筛式马铃薯清选过程模型建立

气筛式马铃薯清选装置简化模型如图 5 所示，由集薯区、摆抖筛、石块掉落区、进风口和出风口等组成。气筛式马铃薯清选装置尺寸为 1 800 mm × 900 mm × 1 200 mm，进风口尺寸 694 mm × 540 mm，出风口尺寸 900 mm × 520 mm。石块和薯块在摆抖悬浮过程中摆抖筛主要作用一是使马铃薯受力均匀，二是将“跌落”状态的马铃薯恢复到“悬浮”状态，石块通过自身重力掉落，薯块通过浮力而实现薯石分离，在此过程中，摆抖筛应使薯块尽可能处于平躺状态，增大受力面积，在保证上述条件下，应使薯块受力面积受到风的推力尽可能均匀，以防薯块局部受力引起薯块姿态变化，从而使受力面积减小，影响分离效果，开孔率对薯块的影响就是尽可能使薯块受力均匀。摆抖筛筛孔呈长条形，在理论分析和前期试验的基础上，将摆抖筛相关参数确定为：筛板尺寸 489 mm × 470 mm，开孔尺寸 10 mm × 15 mm，筛面开孔率 56%。



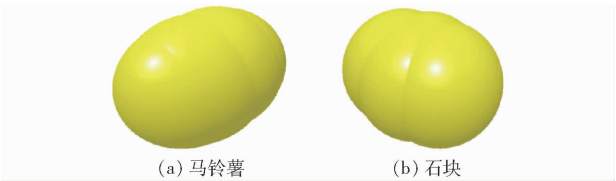
(a) 筛面实物图 (b) 装置简化模型

图 5 气筛式马铃薯清选筛面实物图及装置简化模型

Fig. 5 Physical diagram and simplified model of screen surface and device for screening potato cleaning

1. 落料区 2. 集薯区 3. 摆抖筛 4. 导流板

马铃薯机械化收获过程中，经过联合收获过程的薯土分离、清土除杂等作业过程，基本不存在马铃薯与秧蔓缠绕或连接在一起的情况[32-33]，由于秧蔓密度较小，秧蔓气流清选较易实现，故本文仿真颗粒模型为马铃薯与石块，如图 6 所示。马铃薯颗粒模型如图 6a 所示，两端用两个半径为 28 mm 与中间 2 个半径为 30 mm 的球型在同一轴心聚合而成；石块颗粒模型如图 6b 所示，由 4 个半径为 28 mm 的球形由四面向中心聚合而成；仿真过程中，根据实际上料工况，每 1 s 生成 15 个马铃薯颗粒模型与 5 个石块模型，总共生成 50 个马铃薯模型与 20 个石块模型，3.3 s 内马铃薯生成完毕，物料在输送带上的运动速度为 0.6 m/s，仿真时间为 5 s。



(a) 马铃薯 (b) 石块

图 6 颗粒模型

Fig. 6 Model of potato particle and stone particle

仿真过程中，参照文献[28]，物料与装置物理特性如表 4 所示，各种物质之间的接触系数如表 5 所示。

表 4 材料物理特性参数

Tab. 4 Physical properties of materials

物料	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/Pa
马铃薯	0.5	1 048	1.366×10^6
石块	0.3	2 700	1×10^7
摆抖筛	0.3	7 800	7×10^{10}

使用 Solidworks 建立气筛式马铃薯清选装置三维模型，在 Workbench 将模型进行强制六面体网格划分，建立的网格模型如图 7 所示。蓝色部分表示

表 5　材料之间接触系数

Tab. 5　Contact coefficient between materials

项目	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
马铃薯-石块	0.79	0.452	0.024
马铃薯-摆抖筛	0.525	0.455	0.525
石块-摆抖筛	0.2	0.5	0.01

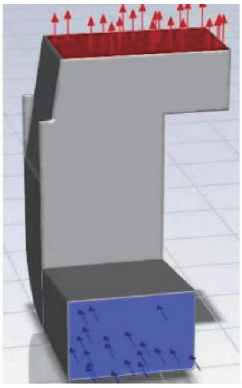


图 7　网格模型

Fig. 7　Grid model

与风机出风口相接的管道进风口，红色部分表示管道的出风口。对于气筛式马铃薯清选装置，结合已有研究[28]，对摆抖筛倾角的选择和摆抖筛开孔率作可行性分析，将气筛式马铃薯清选装置风机出风口气流速度、摆抖筛摆抖频率、摆抖筛筛面倾角与摆抖筛摆抖形式作为优化对象，模拟整体采用有限体积法离散方程，压力求解器使用 COUPLE，采用二阶逆风离散化求解动量、湍流动能与湍流动能耗散，湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 控制方程，近壁面选用标准壁面方程，设置工作环境为 1 个大气压，设定边界条件入口风速分别为 50、55、60、65 m/s，出口设置为压力出口。

3.2　风机出风口气流速度对清选效果的影响

对于气筛式马铃薯清选装置，在密封条件较好的情况下风机出风口的风速对马铃薯的清选有着重要的影响。气筛式清选装置的导流板可改变气流的流向，在实际清选过程中马铃薯受到气流推力 F_t 方向沿着导流板倾斜方向，空气阻力忽略不计，气流推力 F_t 与物料重力反向延长线之间夹角为 30°，计算得出实际马铃薯清选过程中需要的气流速度最小为 49.49 m/s，当使马铃薯脱离摆抖筛筛面悬浮高度达 200 mm 时，摆抖筛筛面位置处的气流速度大于马铃薯悬浮速度，因此风机出风口气流速度设定为 50、55、60、65 m/s，结合前期试验，摆抖筛筛面倾角设定为 25°，摆抖筛摆抖频率为 10 Hz，摆抖筛振幅设为 20 mm，摆抖形式为前后摆抖。风机出风口气流速度对清选效果的影响曲线如图 8 所示。风机出风口气流速度单因素试验清选效果如表 6 所示。

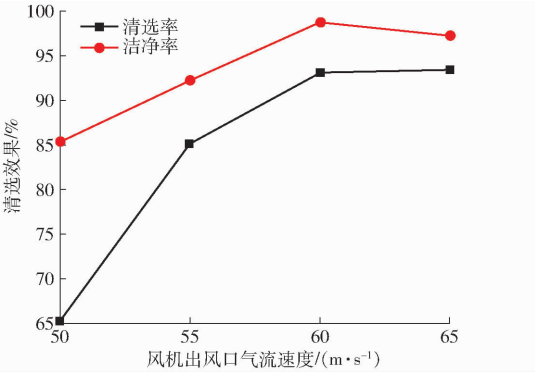


图 8　风机出风口气流速度对清选效果的影响曲线

Fig. 8　Influence curves of air velocity of fan outlet on cleaning effect

表 6　风机出风口气流速度单因素试验清选效果

Tab. 6　Single factor experimental effect of fan wind speed

风机出风口气流速度/(m·s⁻¹)	仿真时间/s				
	1.10	2.04	3.06	4.01	5.00
50					
55					
60					
65					

由图 8 和表 6 可知，风机出风口气流速度为 50 m/s 时，在石块的阻挡作用下大部分马铃薯不能达到悬浮状态，清选率仅为 65.4%，马铃薯在抛落过程中与石块发生碰撞迫使石块落入集薯区，从而导致洁净率仅为 85.4%；风机出风口气流速度为 55 m/s 时，由于风机出风口气流速度的升高，石块对气流的影响作用降低，小部分马铃薯不能达到悬浮状态，薯石混合物呈“薯块在上、石块在下”的分层现象，清选率相比出风口速度为 50 m/s 时提升 19.7 个百分点，洁净率升高 6.8 个百分点；风机出风口气流速度为 60 m/s 时，清选率达到 93.1%，洁净率达到 98.7%，石块的阻挡作用对马铃薯悬浮基本没有影响，清选率和洁净率比风机出风口气流速

度为 55 m/s 时分别提升 7.8 个百分点和 6.5 个百分点,满足薯石清选分离需求;风机出风口气流速度为 65 m/s 时,清选率和洁净率分别为 93.4% 和 97.2%,与风机出风口气流速度为 60 m/s 时差别不大,洁净率反而有所降低,这主要是由于风机出风口气流速度过大,导致部分石块在悬浮薯块的"裹挟"作用下进入集薯区。此外,风机出风口气流速度越大,能耗越高。因此,当风机出风口气流速度为 60 m/s 时,较适宜于薯石分离。

3.3 摆抖筛摆抖形式对清选效果的影响

在马铃薯清选过程中,马铃薯受气流稳定性和薯块形状等因素影响而无法保持悬浮状态,摆抖筛摆抖作用有利于马铃薯保持悬浮状态,通过仿真分析,探究摆抖筛前后简谐摆抖和上下摆抖对马铃薯清选效果的影响。风机出风口气流速度设为 60 m/s,摆抖筛筛面倾角设定为 25°,摆抖筛摆抖频率为 10 Hz,摆抖筛振幅设定为 20 mm。摆抖形式对清选效果的影响如表 7 所示,摆抖形式单因素试验清选效果如表 8 所示。

表 7 摆抖形式对清选效果的影响

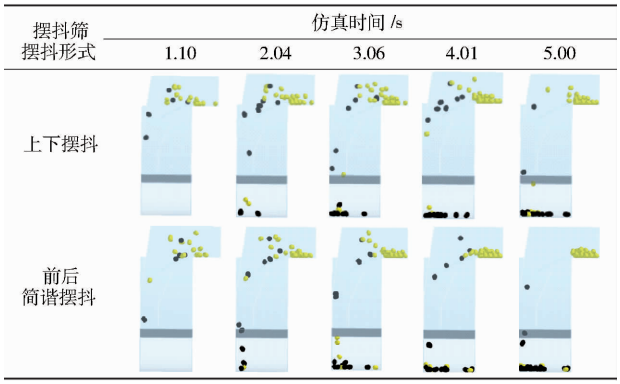
Tab.7 Influence of shaking form on cleaning effect

%

摆抖筛摆抖形式	清选率	洁净率
前后简谐摆抖	93.1	98.7
上下摆抖	89.2	98.9

表 8 摆抖形式单因素试验清选效果

Tab.8 Single factor test cleaning effect of shaking mode



利用 CFD 软件得到两种摆抖形式在仿真时间 2~3 s 时仿真速度云图如图 9、10 所示。由表 7 可得,摆抖筛前后简谐摆抖时,清选率为 93.1%,洁净率达到 98.7%,由图 9、10 可得在物料抛落的区域气流速度满足马铃薯的悬浮条件,且保证石块不被悬浮,因此可实现薯块在气流作用下运行至集薯区,石块向下跌落,马铃薯抛落至摆抖筛筛面中上部,此处的气流速度大于风机出风口气流速度,这是由于密封管道中各横截面空气流量相等、而横截面积减少气流速度

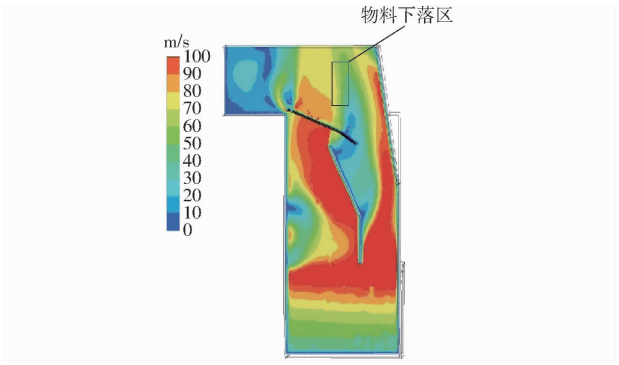


图 9 摆抖筛前后简谐摆抖试验时速度云图

Fig.9 Velocity nephogram of shaking screenbefore and after harmonic shaking test

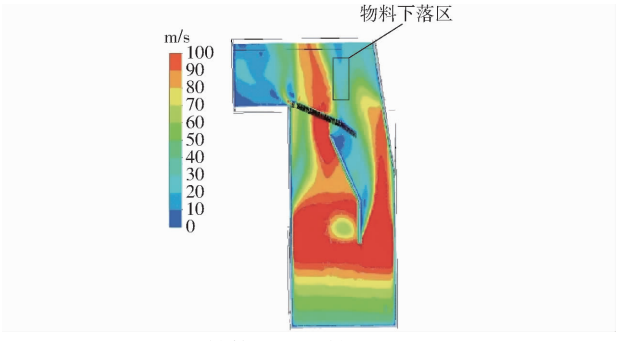


图 10 摆抖筛上下摆抖试验时速度云图

Fig.10 Velocity nephogram of shaking screen during shaking test

有所增加导致的,摆抖筛筛面位置处的气流速度增加,有利于薯-石清选,大部分石块进入摆抖筛筛面中上部前已经跌落,少部分石块进入摆抖筛筛面中上部时仍然达不到悬浮条件;摆抖筛上下摆抖时,洁净率达到 98.9%,但是由于部分马铃薯达不到悬浮的条件,导致部分马铃薯未进入摆抖筛筛面中上部时已经和石块一起跌落,而未进入集薯区,此时的清选率仅为 89.2%。因此摆抖筛前后简谐摆抖形式相比于摆抖筛上下摆抖,更有利于薯-石的分离。

3.4 摆抖筛筛面倾角对清选效果的影响

摆抖筛筛面倾角是影响马铃薯清选效果的主要因素之一。结合气流清选已有研究[28],摆抖筛筛面倾角的选择参考小麦[34-35]、油菜[36-37]、油葵[38]和大豆[39]的气流清选,试验过程中,风机出风口气流速度设为 60 m/s,摆抖筛摆抖频率设定为 10 Hz,摆抖筛振幅设定为 20 mm,摆抖形式为前后简谐摆抖,摆抖筛筛面倾角设为 15°、20°、25°与 30°进行研究。摆抖筛筛面倾角对清选效果的影响曲线如图 11 所示。摆抖筛筛面倾角单因素试验清选效果如表 9 所示。

由图 11 和表 9 可知,摆抖筛筛面倾角为 15°时,由于摆抖筛筛面倾角较小,导致少部分石块不易清选,石块进入集薯区与薯块碰撞频次增加,部分薯块由于石块的阻挡作用无法实现悬浮,故清选率和洁

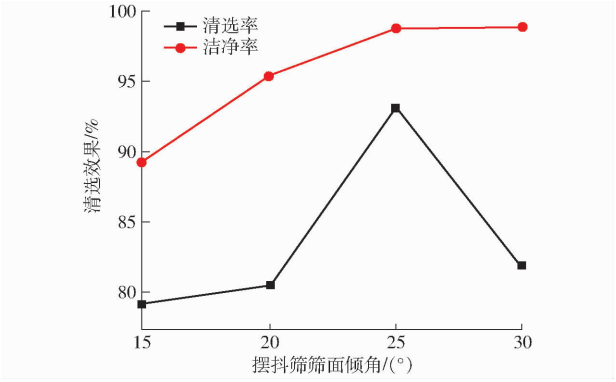


图 11　摆抖筛筛面倾角对清选效果的影响曲线

Fig. 11　Simulation results of tilting angle of shaking screen

表 9　摆抖筛筛面倾角单因素试验清选效果

Tab. 9　Single factor experimental effect of tilt angle of shaking screen

摆抖筛筛面倾角/(°)	仿真时间/s				
	1.10	2.04	3.06	4.01	5.00
15					
20					
25					
30					

净率较低，分别为 79.4% 与 80.6%，摆抖筛筛面倾角为 20°时，由于摆抖筛筛面倾角的增加而有利于石块的下落，进入集薯区的石块减少，洁净率有了一定的提高，相比于摆抖筛筛面倾角为 15°时的洁净率提升 6 个百分点，但仍存在少数石块与薯块碰撞而影响清选率，清选率为 80.6%；摆抖筛筛面倾角为 25°时，石块沿着摆抖筛下滑的效果较好，薯块与石块分层明显，清选率和洁净率相比摆抖筛筛面倾角为 20°时提高 12.5、3.3 个百分点，分别为 93.1% 和 98.7%，满足薯-石清选分离要求；摆抖筛筛面倾角为 30°时，洁净率较高，达到 98.8%，但由于摆抖筛筛面倾角增加，一部分马铃薯在悬浮过程中由于摆抖筛筛面的阻挡作用导致清选率降低，清选率为 82%。因此，摆抖筛筛面倾角为 25°时，较适宜于薯石分离。

3.5　摆抖筛摆抖频率对清选效果的影响

摆抖筛摆抖频率对马铃薯清选效果有着重要的影响，结合查阅文献[31]，在合理频率范围内，试验过程中将摆抖筛摆抖频率依次设定为 6、8、10、12 Hz，风机出风口气流速度设为 60 m/s，摆抖筛振幅设为 20 mm，摆抖形式为前后简谐摆抖，摆抖筛筛面倾角设为 25°，摆抖筛摆抖频率对清选效果的影响曲线如图 12 所示，摆抖筛摆抖频率单因素试验清选效果如表 10 所示。

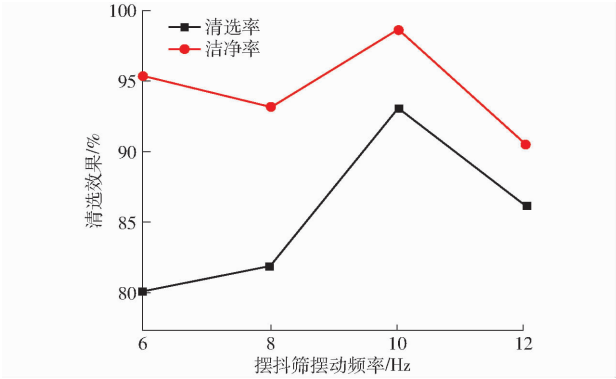


图 12　摆抖筛摆抖频率对清选效果的影响曲线

Fig. 12　Simulation results of shaking frequency of shaking screen

表 10　摆抖筛摆抖频率单因素试验清选效果

Tab. 10　Single factor experimental effect of shaking frequency of shaking screen

摆抖筛摆抖频率/Hz	仿真时间/s				
	1.10	2.04	3.06	4.01	5.00
6					
8					
10					
12					

由图 12 和表 10 可知，摆抖筛摆抖频率为 6、8 Hz 时，由于摆动频率较小，部分马铃薯聚集在一

起,薯石混合物的分散效果较差,薯-薯碰撞阻挡、薯石碰撞阻挡等导致马铃薯在气流的作用下悬浮效果较差,从而导致清选率较低,分别为 80.2% 与 82.0%;另外,尚未悬浮的马铃薯易与石块产生碰撞冲击作用,从而影响洁净率,洁净率分别为 95.4% 与 93.2%。当摆抖筛摆抖频率在 10 Hz 时,马铃薯受力较为均匀,薯石混合物的分散效果较好,清选率达 93.1%,洁净率达 98.7%,比摆抖筛摆抖频率为 8 Hz 时清选率提升 11.1 个百分点,洁净率提升 5.5 个百分点;摆抖筛摆抖频率为 12 Hz 时,由于摆动频率的增加,一部分石块在摆抖筛筛面的快速摆抖作用下被迫受力进入集薯区,同时石块运行过程中容易与薯块产生碰撞冲击作用,导致马铃薯跌落至石块收集处,清选率与洁净率比摆抖筛摆抖频率在 10 Hz 时降低较大,清选率仅为 86.2%,洁净率仅为 90.5%。因此,当摆抖筛摆抖频率为10 Hz 时,较适宜于薯石分离。

4 二次旋转正交组合仿真试验

4.1 试验方案

为了探究风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角与摆抖筛摆抖频率对马铃薯气筛式清选装置清选效率影响的最优组合,以风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角与摆抖筛摆抖频率为试验因素,以清选率 y_1 与洁净率 y_2 作为性能评价指标,开展三因素三水平二次旋转正交组合试验,试验因素编码、试验方案与结果如表 11、12 所示。表中 A、B、C 为编码值。

表 11 试验因素编码

Tab. 11 Factor index of orthogonal test

编码	因素		
	风机出风口气流速度/(m·s^{-1})	摆抖筛筛面倾角/(°)	摆抖筛摆抖频率/Hz
-1	55	20	8
0	60	25	10
1	65	30	12

4.2 回归方程与显著性检验

采用 Box-Behnken 中心组合试验设计原理设计试验[32],通过 Design-Expert 13.0 软件,得到清选率的二次多项式回归模型为

$$y_1 = 92.44 + 4.94A + 1.45B + 0.3875C - 1.52AB + 0.25AC - 0.025BC - 0.97A^2 - 6.54B^2 - 6.71C^2 \quad (9)$$

洁净率的二次多项式回归模型为

$$y_2 = 97.28 + 1.75A + 1.2B - 0.825C - 0.925AB - 0.375AC + 0.225BC - 1.8A^2 - 0.652\,5B^2 - 2.45C^2 \quad (10)$$

由表 13 可知,回归模型的 P 均小于 0.01,表明

表 12 试验方案与试验结果

Tab. 12 Test scheme and results

试验序号	因素			清选率/%	洁净率/%
	A	B	C		
1	-1	-1	0	76.4	90.1
2	1	-1	0	89.4	96.3
3	-1	1	0	83.5	95.2
4	1	1	0	90.4	97.7
5	-1	0	-1	79.4	92.2
6	1	0	-1	88.7	95.6
7	-1	0	1	80.3	91.2
8	1	0	1	90.6	93.1
9	0	-1	-1	78.2	94.4
10	0	1	-1	80.0	95.5
11	0	-1	1	78.4	92.4
12	0	1	1	80.1	94.4
13	0	0	0	91.3	96.2
14	0	0	0	93.1	97.8
15	0	0	0	91.7	96.8
16	0	0	0	93.4	97.2
17	0	0	0	92.7	98.4

表 13 清选率和洁净率方差分析

Tab. 13 Analysis of variance for cleaning rate and cleanliness rate

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	P
清选率	模型	626.03	9	69.56	<0.000 1**
	A	195.03	1	195.03	<0.0001**
	B	16.82	1	16.82	0.004 1**
	C	1.20	1	1.20	0.299 9
	AB	9.30	1	9.30	0.017 0*
	AC	0.25	1	0.25	0.625 3
	BC	0.002 5	1	0.002 5	0.960 7
	A^2	3.96	1	3.96	0.081 5
	B^2	180.37	1	180.37	<0.000 1**
	C^2	190.14	1	190.14	<0.000 1**
	残差	6.71	7	0.958 5	
	失拟项	3.44	3	1.15	0.365 0
	纯误差	3.27	4	0.818 0	
	总和	632.74	16		
洁净率	模型	90.08	9	10.01	0.001 7**
	A	24.50	1	24.50	0.001 0**
	B	11.52	1	11.52	0.007 5**
	C	5.44	1	5.44	0.037 8*
	AB	3.42	1	3.42	0.082 4
	AC	0.562 5	1	0.562 5	0.438 6
	BC	0.202 5	1	0.202 5	0.637 3
	A^2	13.68	1	13.68	0.004 9**
	B^2	1.79	1	1.79	0.186 0
	C^2	25.33	1	25.33	0.000 9**
	残差	5.84	7	0.834 0	
	失拟项	2.91	3	0.970 0	0.383 3
	纯误差	2.93	4	0.732 0	
	总和	95.92	16		

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

回归模型高度显著；模型失拟项 $P>0.05$，说明模型失拟性不显著，回归模型拟合程度高。由风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角、摆抖筛摆抖频率的 P 可判断 3 个试验因素中风机出风口气流速度与摆抖筛筛面倾角对清选率与洁净率有极显著影响，摆抖筛摆抖频率对洁净率有着显著影响，对清选率和洁净率影响从大到小均依次为风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角和摆抖筛摆抖频率；清选率模型决定系数 R^2 为 0.989 4，表明该模型可拟合 98.94% 的试验结果；洁净率模型决定系数 R^2 为 0.939 1，表明该模型可拟合 93.91% 的试验结果。两模型校正决定系数均接近于 1，回归模型具有较高的可靠性。

4.3　交互作用对清选性能影响响应曲面

为直观分析试验因素交互作用对清选率和洁净率的影响规律，得到回归模型的响应曲面图如图 13 和图 14 所示。

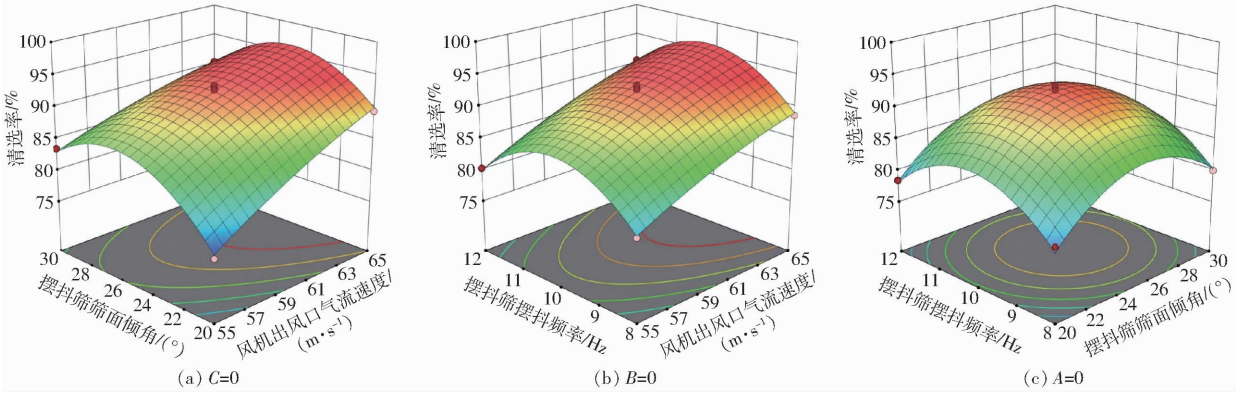


图 13　因素交互作用对清选率的影响

Fig. 13　Effect of interaction of factors on cleaning rate

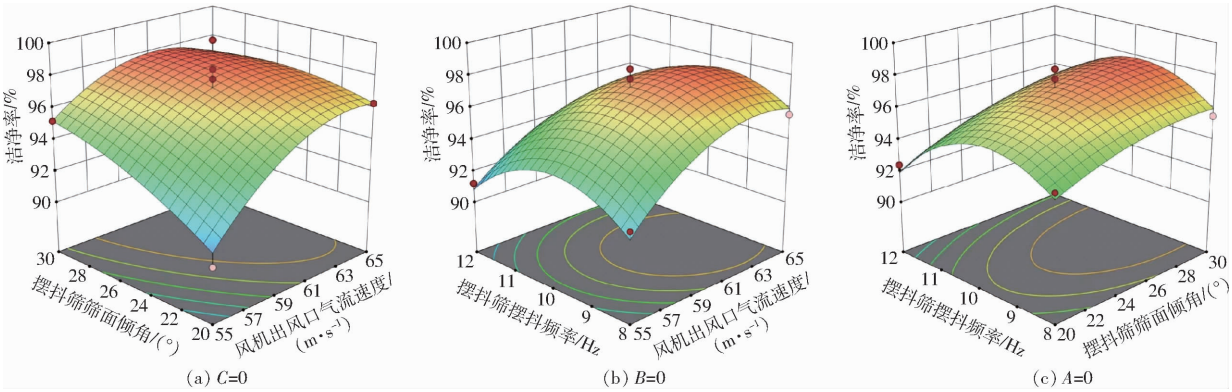


图 14　因素交互作用对洁净率的影响

Fig. 14　Effect of interaction of factors on cleanliness

由图 13 可知，清选率随气流速度增加而快速增加，当风机出风口气流速度大于 59 m/s 时，清选率增加缓慢；清选率随着摆抖筛筛面倾角增加呈逐渐升高又降低的趋势，在 24°附近达到峰值；清选率随着摆抖筛摆抖频率增加呈逐渐升高又降低的趋势，在 10 Hz 附近达到峰值。由图 14 可知，随着风机出风口气流速度增加，洁净率呈逐渐升高又降低的趋势，在风机出风口气流速度为 59 m/s 附近到达峰值；洁净率随着摆抖筛筛面倾角增加呈先逐渐升高又降低的趋势且变化相对缓慢，当摆抖筛筛面倾角在 24°附近时达到峰值；洁净率随着摆抖筛摆抖频率增加呈迅速升高又缓慢降低的趋势，当摆抖筛摆抖频率 10 Hz 附近时达到峰值。

5　验证试验

为验证实际清选效果，在最优参数组合下开展验证试验，图 15 为马铃薯清选试验实物图。



图 15　马铃薯清选试验实物图

Fig. 15　Verification experiment of cleaning

试验共进行 3 次，验证试验结果取平均值。在最优参数组合：摆抖筛前后简谐摆抖、摆抖筛筛面倾角为 25°、摆抖频率为 10 Hz 和风机出口处风速为 60 m/s 时，清选率为 91.6%，洁净率为 99.2%，清选

率相比仿真试验降低 1.5 个百分点,洁净率相比仿真试验上升 0.5 个百分点,其中清选率台架验证试验相比仿真试验降低 1.5 个百分点,是由于装置密封性无法达到 100% 导致马铃薯清选率降低,洁净率台架试验与仿真试验结果趋于一致。

6 结论

(1)针对目前马铃薯-石块清选分离存在的瓶颈问题,设计了气筛式清选装置,主要由机架、上料输送带、摆抖筛、集薯装置、风机和气流管道等组成,通过理论分析和仿真试验得到:对清选率和洁净率影响由大到小为风机出风口气流速度、摆抖筛筛面倾角、摆抖筛摆抖频率。

(2)根据气固耦合模拟,除摆抖形式外控制其他因素不变,对摆抖筛前后简谐摆抖与上下摆抖进行模拟仿真,经过 CFD 速度云图分析可知,摆抖筛前后简谐式摆抖清选效果优于摆抖筛上下摆抖形式。

(3)根据气固耦合模拟,采用控制变量的方法,对风机出口气流速度、摆抖筛摆抖频率、摆抖筛筛面倾角进行多组仿真模拟,当气筛式马铃薯清选装置清选装置风机出风口气流速度为 60 m/s、摆抖筛筛面倾角为 25°、摆抖筛摆抖频率 10 Hz,清选装置清选效果最优,清选率 93.1%,洁净率 98.7%,在仿真最优参数下,台架试验清选率为 91.6%,洁净率为 99.2%,清选率相比仿真试验降低 1.5 个百分点,洁净率相比仿真试验上升 0.5 个百分点,仿真与台架验证试验相比清选率误差率为 1.6%,洁净率误差率为 0.5%。

参 考 文 献

[1] CHANDRASEKARA A, JOSHEPH K T. Roots and tuber crops as functional foods: a review on phytochemical constituents and their potential health benefits[J]. International Journal of Food Science, 2016, 25(1): 1 - 15.

[2] KANG W, FAN M, MA Z, et al. Luxury absorption of potassium by potato plants[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(5): 573 - 578.

[3] 吕金庆,杨晓涵,吕伊宁,等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):103 - 113.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103 - 113. (in Chinese)

[4] KHATER. Effect of some forward speeds of mechanical harvesting on potato damage in south eastern qantara (Egypt)[J]. Journal of Agriculture and Environment for International Development, 2008, 102(4): 357 - 368.

[5] KHEIRALIPOUR K, KHAZAEE Y, HOSAINPOUR A, et al. Development of an algorithm based on image processing technique and sport vector machine to distinct potato from clod and stone[J]. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery, 2019, 8(1): 1 - 11.

[6] 王相友,孙景彬,许英超,等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):316 - 322,279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316 - 322, 279. (in Chinese)

[7] ELGENDY S L A, MORAD M M, ELSHAL H M. Comparative study between some different potato harvesting machines in small holdings[J]. Zagazig Journal of Agricultural Research, 2015, 12(4): 148 - 153.

[8] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):100 - 109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester stem separation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 100 - 109. (in Chinese)

[9] 魏宏安,王蒂,连文香,等. 4UFD - 1400 型马铃薯联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2013,29(1):11 - 17.
WEI Hongan, WANG Di, LIAN Wenxiang, et al. Development of 4UFD - 1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 11 - 17. (in Chinese)

[10] ZAHARAN H, OLANIYI A F, UMEZURUIKE L O. Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits [J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(1): 6 - 18.

[11] GAO M J, GUO W C, HUANG X L, et al. Effect of pressing and impacting bruises on optical properties of kiwifruit flesh[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 172(2): 1 - 11.

[12] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109 - 122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 - 122. (in Chinese)

[13] KEITH S T. Inventions, patents and commercial development from governmentally financed research in Great Britain: the origins of the National research Development Corporation[J]. Minerva, 1981, 19(1): 92 - 122.

[14] 吕金庆, 杜长霖, 刘中原,等. 马铃薯料斗机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(1): 82 - 90, 61.
LÜ Jinqing, DU Changlin, LIU Zhongyuan, et al. Design and test of impurity removal device of potato receiving hopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 82 - 90, 61. (in Chinese)

[15] 杨猛,胡志超,张延化,等. 农业颗粒物料气力清选装置研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):121 - 127.

YANG Meng, HU Zhichao, ZHANG Yanhua, et al. Research status and prospect of pneumatic cleaning device for agricultural particulate materials[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 121 - 127. (in Chinese)

[16] YUAN J B, WU C Y, LI H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154(12): 320 - 329.

[17] 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 Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Analysis and experiment of air flow field in cleaning device of regenerated rice combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84 - 92. (in Chinese)

[18] 任述光,陈赛,吴明亮,等. 小型油菜联合收获机双风道气流清选装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2020,46(4):472 - 479.
REN Shuguang, CHEN Sai, WU Mingliang, et al. Design and test of double air duct air cleaning device for small rape combine harvester[J]. Journal of Hunan Agricultural University Science(Natural Sciences), 2020, 46(4): 472 - 479. (in Chinese)

[19] 戴飞,赵武云,孙伟,等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):64 - 72.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 64 - 72. (in Chinese)

[20] 周福君,魏源,吴昊,等. 鲜食玉米果穗收获机茎叶除杂装置设计[J]. 东北农业大学学报,2019,50(4):79 - 87.
ZHOU Fujun, WEI Yuan, WU Hao, et al. Design of the device for removing impurities from the stems and leaves of fresh corn ear harvester[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(4): 79 - 87. (in Chinese)

[21] 赵漫菲. 紫花苜蓿种子筛分特性研究及其清选设备控制系统优化设计[D]. 北京:中国农业大学,2015.
ZHAO Manfei. Study on the sieving characteristics of alfalfa seeds and optimization design of the control system of its cleaning equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[22] 曾安,周源,余新阳,等. 重力选矿的研究现状与思考[J]. 中国钨业,2015(4):42 - 47.
ZENG An, ZHOU Yuan, YU Xinyang, et al. The ways out and development trends of gravity separation under current position [J]. China Tungsten Industry, 2015(4): 42 - 47. (in Chinese)

[23] 朱志波,朱书全,陈慧昀,等. 浮选动力学模型研究进展及展望[J]. 洁净煤技术,2017,23(2):20 - 24.
ZHU Zhibo, ZHU Shuquan, CHEN Huiyun, et al. Research progress and prospect of flotation kinetic model[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 20 - 24. (in Chinese)

[24] 王维, 王亚妮, 田智辉, 等. 物料悬浮速度测试台的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):44 - 46,78.
WANG Wei, WANG Yani, TIAN Zhihui, et al. Reserach on design an experimental of material suspension velocity test bench [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 44 - 46, 78. (in Chinese)

[25] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):69 - 77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM - Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69 - 77. (in Chinese)

[26] 苏国梁. 马铃薯清选气力悬浮薯石分离技术试验研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.
SU Guoliang. Study on potato separate based on airflow suspension and the technology of separation of potato and stone[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)

[27] 朱占江,康敏,刘奎,等. 核桃及其机械破壳后主要组分悬浮速度理论计算与试验研究[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(4): 610 - 618.
ZHU Zhanjiang, KANG Min, LIU Kui, et al. Theoretical calculation and experimental study on suspension velocity of walnut and its main components after mechanical hulling[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(4): 610 - 618. (in Chinese)

[28] TSUJI Y, ANAKA T, WASHIDA T. Lagrangian numerical imulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe [J]. Powder Technology, 1992, 71(3): 239 - 250.

[29] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 - 118. (in Chinese)

[30] 王相友, 吕丹阳, 任加意,等. 装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 8 - 17.
WANG Xiangyou, LÜ Danyang, REN Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harveste[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(Supp.): 8 - 17. (in Chinese)

[31] 耿端阳,苏国梁,魏忠彩,等. 马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):102 - 110.
GENG Duanyang, SU Guoliang, WEI Zhongcai, et al. Design and experiment of potato-stone separator based on airflow suspension technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 102 - 110. (in Chinese)

[32] 魏忠彩,王兴欢,李学强,等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):95 - 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 - 106. (in Chinese)

[33] 魏忠彩,韩梦,苏国梁,等. 装包卸包型马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):92 - 104.

WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 92 - 104. (in Chinese)

[34] 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 Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, 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. (in Chinese)

[35] 金诚谦,李庆伦,倪有亮,等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10):26 - 34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experimental study on double air outlet multi-ducts cleaning device of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26 - 34. (in Chinese)

[36] 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)

[37] 万星宇,袁佳诚,廖庆喜,等. 油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 159 - 172.
WAN Xingyu, YUAN Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of cyclone separation cleaning device with raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 159 - 172. (in Chinese)

[38] 张学军,张云赫,史增录,等. 油葵联合收获机清选装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):103 - 113.
ZHANG Xuejun, ZHANG Yunhe, SHI Zenglu, et al. Optimization and experiment of oil sunflower combined harvester cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 103 - 113. (in Chinese)

[39] 于涛,刘素梅,雷明准. 基于 CFD - EDEM 大豆风选除尘模拟研究[J]. 包装与食品机械,2023,41(4):46 - 53.
YU Tao, LIU Sumei, LEI Mingzhun. Simulation of soybean dust removal based on CFD - EDEM[J]. Packaging and Food Machinery,2023,41(4):46 - 53. (in Chinese)

(上接第 84 页)

[20] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHANG Zhiqiang. Design and straw movement characteristics of corn straw crushing and spreading machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[21] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):132 - 140.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Bosheng, et al. Discrete element simulation parameter calibration for pellet feed breakage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132 - 140. (in Chinese)

[22] 李萍萍,吴硕,张西良,等. 番茄秸秆与发酵菌种立式螺旋混合设备参数优化[J]. 农业机械学报,2016,47(11):114 - 120.
LI Pingping, WU Shuo, ZHANG Xiliang, et al. Parameter optimization of vertical spiral mixing equipment for tomato straw and fermentation strains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 114 - 120. (in Chinese)

[23] JIA H L, DENG J Y, DENG Y L, et al. Contact parameter analysis and calibration in discrete element simulation of rice straw [J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(4): 72 - 81.

[24] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120 - 127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of physical parameters of corn stalk contact and calibration of discrete element simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120 - 127. (in Chinese)

[25] 贾洪雷,邓佳玉,邓艳玲,等. 水稻秸秆的离散元仿真接触参数分析与标定[J]. 农业工程技术,2022,42(3):96.
JIA Honglei, DENG Jiayu, DENG Yanling, et al. Discrete element simulation contact parameter analysis and calibration of rice straw[J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(3): 96. (in Chinese)

[26] CHEN Zeren, YU Jianqun, XUE Duomei, et al. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[J]. Powder Technology,2018,32:167 - 183.

[27] 张李娴. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Lixian. Discrete element modeling of mechanical properties of corn straw[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[28] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(9):58 - 65.
ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, ZHANG Xuekun, et al. Simulation and experiment of mechanical characteristics of corn stalk during shredding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 58 - 65. (in Chinese)

[29] 黄伟,邓斌,佟荟全,等. 锤片粉碎机对玉米粉碎粒度及粒度分布的影响研究[J]. 饲料研究,2022,45(23):129 - 133.
HUANG Wei, DENG Bin, TONG Huiquan, et al. Study on the effect of hammer crusher on the grain size and distribution of maize[J]. Feed Research, 2022, 45(23): 129 - 133. (in Chinese)