

马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置设计与试验

耿端阳¹ 苏国梁^{1,2} 魏忠彩^{1,2} 谭德蕾¹ 李学强^{2,3} 刘洋^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091;
2. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600;
3. 山东希成农业机械科技有限公司, 德州 253600)

摘要: 针对以联合收获为主的北方马铃薯主产区,马铃薯收获后薯石分离人工捡拾工作量大、清选效率低,且清选洁净率较低等问题,利用薯块和石块密度不同的特点,采用气力悬浮输送技术设计了马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置,并基于该装置研究了不同参数调整条件下的清选特性。利用高速气流悬浮与振动筛的摆动作用,发挥气力悬浮和振动筛分离的双重优势,使薯块与石块在运动过程中实现自动分离。试验表明:当气流速度为 35 m/s、筛面倾角为 18°和曲柄角速度为 30 rad/s 时,马铃薯选出率均值为 96.71%,清选洁净率均值为 98.34%,各项性能指标均满足马铃薯清选作业要求。

关键词: 马铃薯; 薯石分离; 清选; 气力悬浮

中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0102-09 OSID: 

Design and Experiment of Potato-stone Separator Based on Airflow Suspension Technology

GENG Duanyang¹ SU Guoliang^{1,2} WEI Zhongcai^{1,2} TAN Delei¹ LI Xueqiang^{2,3} LIU Yang^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China
2. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China
3. Shandong Xicheng Agricultural Machinery Science and Technology Co., Ltd., Dezhou 253600, China)

Abstract: In order to solve the problems of potato and stone separation in main potato production areas in northern China, especially in the area of combined harvest operation, which problem is the large workload for farmers to pick up and low cleaning efficiency. The airflow suspension technology was used and combined with shaking and layered separation, potato-stone separator based on airflow suspension technology was developed, and the cleaning characteristics under different parameters based on the separator was studied. The key parts of the potato-stone separator based on airflow suspension technology mainly included centrifugal fan, air pipe, material feeding device, impurity discharge device, shaking device and material falling position switching device. According to the different aerodynamic characteristics of different materials, the potato and stone could be separated automatically in the process of movement with the aid of high-speed airflow suspension and swing action of shaking sieve. The device give full play to the double advantages of airflow suspension technology and shaking separation. Field tests showed that, the impurity removal rate was 98.34%, the potato selection rate was 96.71%, and each performance index reached the industry standard when the wind speed was 35 m/s, sieve angle was 18° and crank angular velocity was 30 rad/s. This device could ensure the potato selection rate and the impurity removal rate, and the cleaning efficiency was improved, the production cost was reduced. It could provide a technical reference for further exploring the technology of potato harvester and potato-stone separator.

Key words: potato; potato-stone separation; separate and clean; airflow suspension

收稿日期: 2020-12-22 修回日期: 2021-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701603-02)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ010)、山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY201615)和山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0219)

作者简介: 耿端阳(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农机装备研究, E-mail: dygxt@sdut.edu.cn

0 引言

在我国北方马铃薯主产区,田间散布有大小不一、形状各异的石块,这给联合收获后的马铃薯清选和分选带来了诸多问题。在马铃薯机械化收获过程中,仅依靠杆条式分离筛难以达到理想的薯石分离效果^[1-2]。在马铃薯清选阶段,联合收获后的物料需辅以人工进行分选,其劳动强度大、耗时较长,难以实现人工分选与机械化收获的协同配合^[3-4]。同时,马铃薯混杂石块还会影响收获机关键部件的工作可靠性。

马铃薯清选机是对联合收获机收获后的薯石混合物进行清选、分离的设备^[5-6],其结构形式多为辊式和网筛式结构,主要根据马铃薯的外形尺寸进行清选分离^[7-8]。吕金庆等^[9]设计了差动式马铃薯分级机,采用改变固定辊和浮动辊间隙的方式实现了马铃薯分级,并确定了分级效果最优的工作参数。宋言明等^[10]设计了滚刷式马铃薯联合收获机,通过毛刷刷刷马铃薯表层,实现土杂与马铃薯的分离。国外对马铃薯清选机研究较早,但主要集中在马铃薯与硬杂物及秧蔓的分离方面^[11-17],如 MISENER 等^[18]对刷筛组合式、电子分离式和冲击辊式薯杂分离装置进行了研究,分析、优化了 3 种装置的作业参数。德国 GRIMME 公司开发了智能马铃薯清选机,该机可实现土石图像识别、定向去杂、机械分选、清洗、输送和包装等功能^[19],但与国内农艺需求贴合度较低,难以适应我国北方地区马铃薯“防冻抢收入库”的生产实际需求。

针对多石工况下马铃薯清选过程中的石块剔除问题,本文设计一种马铃薯气力悬浮薯石分离装置,确定马铃薯气力悬浮和振动分层分离相结合的薯石分离装置的具体结构,以期提高马铃薯的选出率和清选洁净率,并提高清选效率。

1 结构与工作原理

1.1 基本结构

气力悬浮薯石分离装置结构如图 1a 所示,主要包括离心风机、气流管道、喂料装置、排杂装置、振动筛、连杆和落料口开闭装置。其实物如图 1b 所示。

气力悬浮薯石分离装置的振动装置结构如图 2 所示,主要包括偏心轮、连杆、挡料板、振动筛、侧连接板和支臂。落料口通过调整挡料板实现落料口开闭:系统工作时开启,利于石块的顺利排出;非工作时关闭,避免悬浮区残留马铃薯落入排杂装置造成浪费。

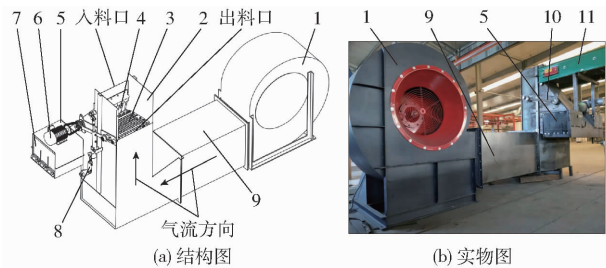


图 1 气力悬浮薯石分离装置
Fig. 1 Potato-stone separator based on airflow suspension technology

1. 离心风机 2. 机架 3. 振动装置 4. 落料口开闭装置 5. 排杂装置 6. 驱动电机 7. 挡杂帘 8. 振动筛角度调整装置 9. 气流管道 10. 连杆 11. 喂料装置

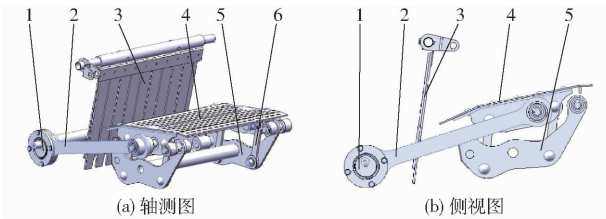


图 2 振动装置结构图

Fig. 2 Structure of shaking device

1. 偏心轮 2. 连杆 3. 挡料板 4. 振动筛 5. 侧连接板 6. 支臂

1.2 工作原理及参数

气力悬浮薯石分离装置作业时,开启离心风机的电机,为薯石分离提供特定速度的气流,喂料装置的输送带向振动筛输送薯石混合物,振动筛在偏心轮驱动下往复摆动,马铃薯和石块在重力作用下落在振动筛面;随着振动筛摆动,马铃薯被抛离筛面并借助气流作用以悬浮状态送至出料端,而石块在重力和振动筛的振动作用下滑落至排杂装置,达到薯石分离的目的。气力悬浮薯石分离装置主要参数如表 1 所示。

表 1 气力悬浮薯石分离装置参数

Tab. 1 Main parameters of potato-stone separator based on airflow suspension technology

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 655×1 210×1 883
整机质量/kg	424
气流管道截面(长×宽)/(mm×mm)	657×575
离心风机功率/kW	15
风机转速/(r·min ⁻¹)	0~1 450
出风口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	495×470
气流速度/(m·s ⁻¹)	15~35
振动装置电机功率/kW	0.75
振动装置电机转速/(r·min ⁻¹)	0~1 400
输送筛宽度/mm	460

2 关键部件参数设计

气力悬浮薯石分离装置采用气力与振动相结合

的方式实现薯石的悬浮分离,其空气动力学特性对参数选择和分离效果有较大的影响。

2.1 薯石空气动力学特性

气力悬浮薯石分离是利用薯石密度差异借助振动筛作用实现薯石分层分布,利用马铃薯与石块悬浮速度差异,借助高速气流作用实现马铃薯的悬浮、输送,达到薯块与石块分离的目的。薯石分离过程的运动分析如图 3 所示,图中 v_p 、 v_s 分别为马铃薯和石块在气力和振动筛的作用下的运动速度。

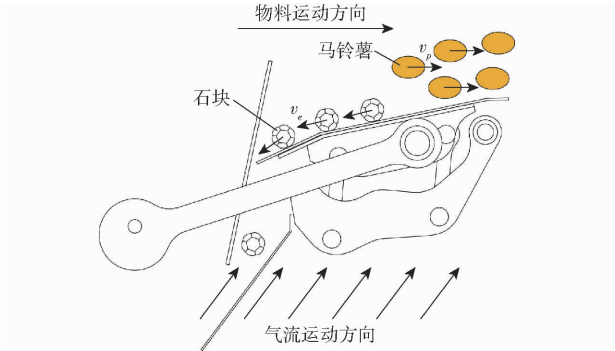


图 3 薯石分离过程薯石运动分析
Fig. 3 Movement analysis of potato and stone in process of separation

当薯石混合物均匀落在振动筛筛面后,随着振动筛的抖动,由于薯石密度差异出现分层趋势;进一步在气流作用下,由于马铃薯悬浮速度小于石块的悬浮速度,处于上层马铃薯借助气流作用脱离筛面,并在气流作用下以悬浮状态向出口运动,且马铃薯气流速度小于石块悬浮速度,处于下层的石块则在抖动过程逐渐向排杂装置运动,最终通过排杂装置排出。根据气固两相流分离理论,气流推力为^[20]

$$F_t = \frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \tag{1}$$

式中 F_t ——气流推力, N
 C ——物料阻力系数
 A ——物料迎风面积, m^2
 ρ_s ——物料密度, kg/m^3
 v_s ——气流速度, m/s

气流场分为 3 个区域:粘性摩擦阻力区、过渡区和牛顿区。不同的区域对应不同的悬浮速度计算公式,为确定计算马铃薯和石块所使用的悬浮速度公式,需首先确定马铃薯和石块阻力系数 C 所属的区域。一般通过比较物料粒径尺寸和计算因子 T 之间关系的方式,即粒径法^[20]来间接确定阻力系数 C 所属的区域,计算因子公式为

$$T = \left[\frac{\mu^2}{\rho_a (\rho_s - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

式中 T ——计算因子, mm
 μ ——空气动力粘度,按 20°C 取 $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

ρ_a ——空气密度, $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$

实测马铃薯密度为 $1\,171 \sim 1\,199 \text{ kg}/\text{m}^3$,取平均值 $1\,185 \text{ kg}/\text{m}^3$,其计算因子 T_a 为 $6.13 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。实测石块密度 $2\,400 \sim 2\,800 \text{ kg}/\text{m}^3$,取平均值 $2\,600 \text{ kg}/\text{m}^3$,其计算因子 T_b 为 $4.72 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 。

由流体力学可知^[20],适用于各流场区域粒径与计算因子 T 的关系分别为:

粘性摩擦阻力区

$$d_p \leq 2.2 T \tag{3}$$

过渡区

$$2.2 T < d_p \leq 20.4 T \tag{4}$$

牛顿区

$$20.4 T < d_p \leq 1\,100 T \tag{5}$$

式中 d_p ——物料粒径, mm

根据北方常见马铃薯的块茎尺寸^[21],以确保所有马铃薯均可达到悬浮状态为目的,此处取马铃薯的平均当量粒径 $d_{pa} = 45 \text{ mm}$ 。由于收获机输送分离筛的尺寸限制^[22],收获后的石块尺寸大于等于 35 mm 。为保证所有石块不脱离振动筛筛面,取石块最小粒径 $d_{pb} = 35 \text{ mm}$,显然马铃薯及石块的阻力系数均处于牛顿区,其悬浮速度公式为^[20]

$$v_p = \frac{3.62}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{d_p (\rho_s - \rho_a)}{C \rho_a}} \tag{6}$$

式中 v_p ——物料悬浮速度, m/s
 S ——物料修正系数

由于马铃薯和石块的阻力系数处于牛顿区,阻力系数为常数,即 $C = 0.44$ ^[20]。

马铃薯形状差别较大,一般呈不规则椭球形,采用不规则椭圆体的形状修正系数代替, $S_a = 1.1$ ^[20]。则计算得马铃薯悬浮速度 $v_{pa} = 34.40 \text{ m}/\text{s}$ 。石块形状非常复杂,但多为不规则的棱形体或类球形体,为简化分析,采用不规则球体的形状修正系数代替, $S_b = 1.2$ ^[20],计算得悬浮速度 $v_{pb} = 43.32 \text{ m}/\text{s}$ 。

由上述分析可知,马铃薯最大悬浮速度小于石块最小悬浮速度,满足气力分离的基本要求。由此确定了系统气流速度即马铃薯和石块的落料口的气流速度,取出料口最大气流速度为 $35 \text{ m}/\text{s}$ 。离心风机具有风力集中、转速上限高和可精确调节转速的优势^[23],更适合该装置频繁的气流速度调节,其全压^[20]为

$$p_{qa} = p_{sa} + p_{da} \tag{7}$$

其中

$$p_{sa} = \frac{1}{2} \varepsilon v_a^2 \rho_a = p_{sf} \tag{8}$$

式中 p_{qa} ——离心风机全压, Pa
 p_{sa} ——离心风机出口处静压, Pa
 p_{da} ——离心风机出口处动压, Pa

p_{sf} ——离心风机静压, Pa
 ε ——管道固有阻力系数
 v_a ——气流速度, m/s

根据伯努利方程得出的气流速度-风压关系, 离心风机的动压为

$$p_{da} = \frac{1}{2} \rho_a v_a^2 \tag{9}$$

气流速度与风量换算关系为

$$q_a = 3\,600 v_a Z \tag{10}$$

式中 q_a ——离心风机风量, m^3/h

Z ——气流管道截面积, m^2

风机出口气流速度 v_a 为 35 m/s, 代入式(9)可得 $p_{da} = 735 \text{ Pa}$; 根据气流管道形状和结构, 管道固有阻力系数为 $\varepsilon = 1.25^{[22]}$, 代入式(8)得 $p_{sa} = 918.75 \text{ Pa}$; 将 p_{sa} 和 p_{da} 代入式(7)得风机全压 $p_{qa} = 1\,653.75 \text{ Pa}$ 。与风机连接的气流管道长度为 1 000 mm, 其截面为 657 mm × 575 mm 的矩形, 则管道截面积 $Z = 0.378 \text{ m}^2$, 将 Z 与 v_a 代入式(10), 计算得离心风机风量 $q_a = 47\,628 \text{ m}^3/\text{h}$ 。选取 4 - 72 NO. 8A 型右旋 0° 的离心风机(德州亿沃特风机有限公司), 并匹配 15 kW 变频调速的三相异步电动机。根据一般变频器的选用需求, 变频器的功率应稍大于电机功率, 选用功率为 18 kW 的变频器。

2.2 振动装置设计

振动装置是薯石悬浮分离机的核心部件, 其结构如图 4 所示。考虑薯石悬浮分离技术是借用薯石悬浮速度差异实现马铃薯悬浮、石块不离筛面的原理进行分离, 所以为了确保马铃薯的悬浮效果, 减小悬浮过程石块等对其造成的影响, 设计了振动装置使薯石混合物自动分层, 即密度较小的马铃薯处于上层, 而密度较大的石块处于下层; 且在石块遮挡筛孔作用下会使气流速度增大, 更有利于马铃薯的悬浮输送。

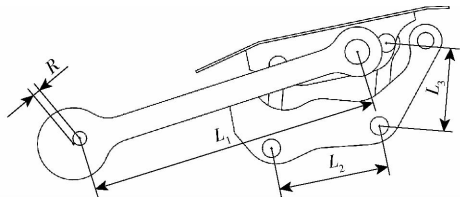


图 4 振动装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of shaking device

振动装置的整体结构为曲柄连杆带动平行四连杆往复运动的形式, 曲柄连杆装置的曲柄长度和曲柄转速会影响振动筛的振幅、频率和振动筛运动的加速度。借鉴谷物收获机中清选装置结构参数的确定方法^[24], 结合薯石混杂物的具体情况, 选取偏心轮偏心距即曲柄半径 $R = 15 \text{ mm}$, 摆动杆长度即连杆长度 $L_1 = 540 \text{ mm}$, 并取支臂间距 $L_2 = 200 \text{ mm}$, 支臂

$L_3 = 150 \text{ mm}$ 。

振动筛对马铃薯与石块分层以及往复运动具有很大的影响, 其外形尺寸尽量与风机风道宽度接近; 筛孔结构选取结构简单的矩形孔, 其尺寸和排列方式如图 5 所示。

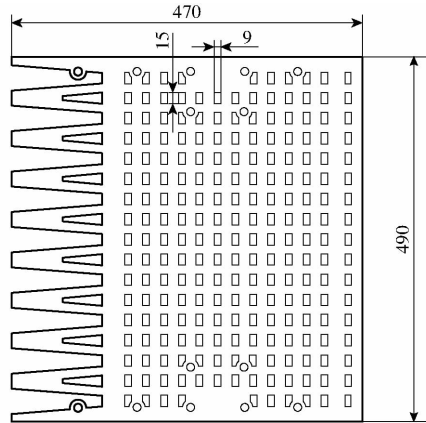


图 5 振动筛外形尺寸图

Fig. 5 Outline diagram of shaking sieve

根据与风机连接的气流管道的截面尺寸和结构设计需求, 确定振动筛的尺寸为 490 mm × 470 mm, 并在筛面上开有 15 mm × 9 mm 的矩形孔。

3 薯石分离过程及运动特性分析

3.1 薯石分离过程分析

薯石混合物进入薯石分离腔后, 并不会瞬间完成分离, 而是首先落于振动筛之上, 在气流的悬浮作用和振动筛的振动组合作用之下, 最终马铃薯沿水平方向朝向出料端运动, 石块在振动筛的振动作用下沿振动筛的方向落入排杂装置。薯石分离过程的 4 个关键状态如图 6 所示。

薯石分离过程可分为: 薯石输送、薯石触筛、薯石分层和薯石分离。分析可知, 马铃薯和石块的混合物在薯石输送和薯石触筛的瞬间其状态均为无序排列; 薯石混合物接触分离筛后, 在振动筛的振动作用下, 马铃薯和石块完成分层, 即呈现出“马铃薯在上, 石块在下”的状态; 马铃薯和石块分层后, 马铃薯被抛离筛面并在气力作用下达到悬浮状态并向出料口方向输送, 石块不会达到悬浮状态, 并在振动筛的振动下, 沿筛面向排杂装置方向滑动, 并最终落入排杂装置, 完成薯石分离。

3.2 薯石分离运动特性分析

薯石混合物进入薯石分离腔后, 薯石混合物到达振动筛并完成分层, 借助振动筛振动和气力的共同作用, 马铃薯被抛离筛面、达到悬浮状态并朝出料口方向运动, 石块沿振动筛方向朝向排杂装置滑动, 最终落入排杂装置。物料在接触振动筛的瞬间受力

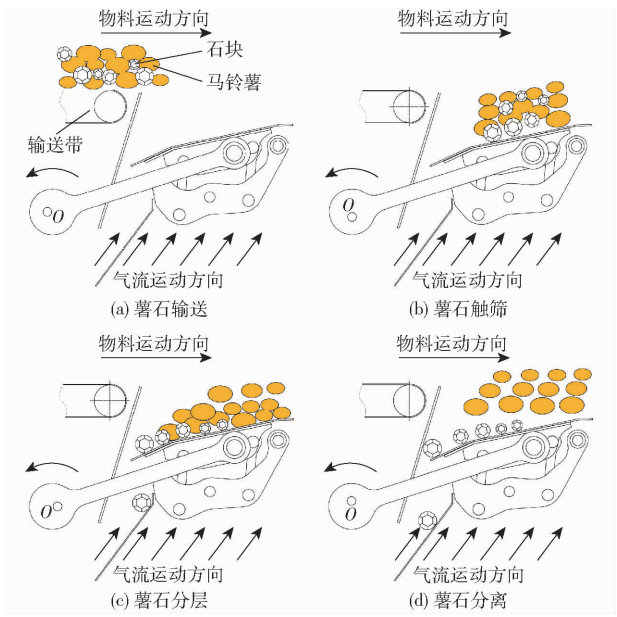


图 6 气力悬浮薯石分层分离过程分析

Fig. 6 Analysis of potato-stone separation process based on airflow suspension technology

分析如图 7 所示。薯石混合物被抛离振动筛的瞬间,其受到的力为物料自身的重力 mg 、气力 f_q 、惯性力 u 、筛面的法向反力 F_N 和摩擦力 f ,因曲柄长度远小于连杆长度,加之筛面是由 4 根等长同相位支臂组成的平行四杆机构支撑,所以筛面运动规律完全相同,即可看作筛面沿 OB 方向做往复直线运动。以 OB 方向为 x 轴,与 OB 垂直的方向为 y 轴建立直角坐标系。则筛面上任意一点的加速度 a 可表示为

$$a = R\omega^2 \cos(\omega t) \quad (11)$$

式中 ω ——曲柄角速度,rad/s

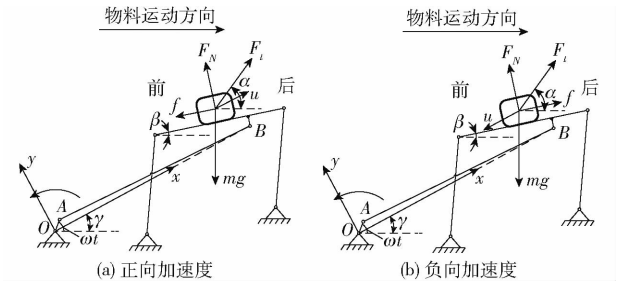


图 7 薯石混合物接触及受力分析

Fig. 7 Contact force analysis of potato-stone mixture

薯石混合物和筛面一起运动,当 ωt 在 $0 \sim \pi/2$ 和 $3\pi/2 \sim 2\pi$ 区间(1、4 象限)时(图 7a),加速度 a 为正,惯性力 u 为负,薯石混合物有沿筛面向后滑动的趋势。当 ωt 在 $\pi/2 \sim 3\pi/2$ 区间(2、3 象限)时(图 7b),加速度 a 为负,惯性力 u 为正,薯石混合物有沿筛面向后滑动的趋势。

对于石块,理想的运动状态是其沿倾斜筛面向后滑落直至落入排杂装置,且在运动过程中不能被抛离筛面。

当加速度为正(图 7a)时,石块可以沿筛面向后滑动的条件为

$$m_e g \sin(\beta - \varphi) + m_e R \omega^2 \cos(\omega t) \cos(\gamma - \beta + \varphi) - \frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \cos(\alpha - \beta + \varphi) \geq 0 \quad (12)$$

式中 m_e ——石块质量,kg

β ——筛面倾角(振动筛与水平方向夹角), $(^\circ)$

γ ——摆动杆与水平方向夹角, $(^\circ)$

α ——气流运动方向与水平方向夹角, $(^\circ)$

φ ——石块与筛面摩擦角, $(^\circ)$

石块不被抛离筛面的条件为

$$\frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \sin(\alpha - \beta) - m_e R \omega^2 \cos(\omega t) \sin(\gamma - \beta) - m_e g \cos \beta < 0 \quad (13)$$

当加速度为负(图 7b)时,石块可以沿筛面向后滑动的条件为

$$m_e g \sin(\beta + \varphi) - m_e R \omega^2 \cos(\omega t) \cos(\gamma - \beta - \varphi) - \frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \cos(\alpha - \beta - \varphi) \geq 0 \quad (14)$$

石块不被抛离筛面的条件为 $F_N > 0$,即

$$\frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \sin(\alpha - \beta) + m_e R \omega^2 \cos(\omega t) \sin(\gamma - \beta) - m_e g \cos \beta < 0 \quad (15)$$

对于马铃薯,理想的运动状态是其接触筛面后被抛离筛面并达到悬浮状态向前输送至出料口。物料抛离筛面的临界条件为 $F_N = 0$,则当加速度为正时(图 7a),马铃薯被抛离筛面的条件为

$$\frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \sin(\alpha - \beta) - m_p R \omega^2 \cos(\omega t) \sin(\gamma - \beta) - m_p g \cos \beta \geq 0 \quad (16)$$

式中 m_p ——马铃薯质量,kg

当加速度为负时(图 7b),马铃薯被抛离筛面的条件为

$$\frac{1}{2} C A \rho_s v_s^2 \sin(\alpha - \beta) + m_p R \omega^2 \cos(\omega t) \sin(\gamma - \beta) - m_p g \cos \beta \geq 0 \quad (17)$$

为最大程度保证马铃薯的清选效果,应尽量减少清选过程中与薯土分离腔中部件机械接触的时间和次数,以防输送过程中与筛面石块的撞伤。当马铃薯悬浮输送最低点与摆动筛往复运动的最高点无运动干涉,马铃薯才不会出现因运动干涉而造成损伤,薯筛碰撞分析如图 8 所示,其中, W_1 为马铃薯抛离筛面前的初始位置, W_2 为马铃薯悬浮输送的最低位置, h 为马铃薯由 W_1 位置悬浮至 W_2 位置的距离,即马铃薯的悬浮高度。根据气固两相流压力损失理论,将马铃薯提升 h 需要克服摩擦压力损失和提升阻力损失^[20],即

其中

$$\Delta p_s = \Delta p_f + \Delta p_c \tag{18}$$
$$\Delta p_f = \frac{\lambda_a h \rho_a v_s^2}{2D} \tag{19}$$
$$\Delta p_c = \frac{n \rho_a g h v_s^2}{2} \tag{20}$$

式中 Δp_s ——提升马铃薯的压力损失, Pa
 Δp_f ——摩擦压力损失, Pa
 Δp_c ——提升阻力损失, Pa
 λ_a ——气体摩擦因数
 D ——管道直径, m
 n ——薯石混合物中薯石质量比

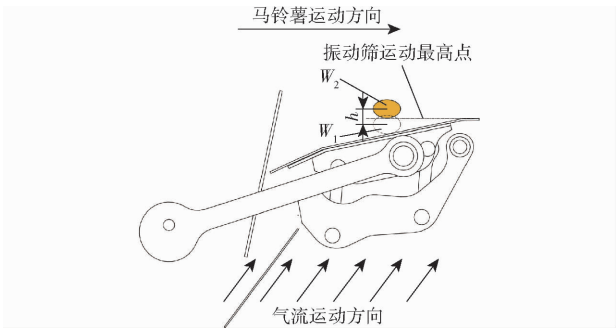


图8 薯筛碰撞特性分析

Fig. 8 Analysis on impact characteristics of potato and sieve

根据式(1)和式(9),气流将马铃薯提升高度 h 后的气流推力损失 ΔF_t 为

$$\Delta F_t = \frac{1}{2} C A \rho_s h v_s^2 \left(\frac{\lambda_a}{D} + n g \right) \tag{21}$$

分析可知,气流推力 F_t 在竖直方向分力 $F_t \sin \alpha$ 不仅要使马铃薯达到悬浮状态,且要使其升至距离筛面高度 h 处进行悬浮输送的条件是: $F_t \sin \alpha$ 不小于马铃薯的重力和气动推力损失之和,故 $F_t \sin \alpha$ 需增大至可以弥补提升马铃薯至高度 h 处的损失,表达式为

$$F_t \sin \alpha - m_p g - \frac{1}{2} \rho_s h v_s^2 \left(\frac{\lambda_a}{D} + n g \right) \geq 0 \tag{22}$$

式(22)即为马铃薯达到悬浮状态并不与振动筛产生二次跌落碰撞的条件。

根据薯石分离工况和分层分离设计需求,取连杆与水平方向夹角 $\gamma = 18^\circ$,为保证马铃薯既可以达到竖直方向上的悬浮效果,又可以在水平输送过程中不产生拥堵和淤积,需确定气力与水平方向夹角 α 的取值,根据前期的单因素试验并结合实际经验,此处取气力与水平方向夹角 $\alpha = 53^\circ$ 。结合前述分析,薯石分离主要受气流速度 v_s 、曲柄角速度 ω 和筛面倾角 β 的影响。

4 试验设计与结果分析

4.1 试验设备及试验条件

采用自制的气力悬浮薯石分离试验台进行试

验。其他主要仪器有:转速仪(广州市速为电子科技有限公司),电子秤(广州市威衡电子有限公司),数字式气流速度表(希玛仪表有限公司)和卷尺。试验在山东希成农业机械科技有限公司进行,试验现场如图9所示。



图9 薯石清选分离试验及效果

Fig. 9 Cleaning separation experiment of potato and stone and effect

4.2 试验参数和评价指标

根据马铃薯清选工艺以及作业损失限制要求,该装置适用的作业工况是联合收获后的待加工的淀粉薯清选,故破皮率不作为评价指标^[25-26],此处定义马铃薯清选的主要评价指标有:马铃薯选出率 Y_1 和清选洁净率 Y_2 ,计算式为

$$Y_1 = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\% \tag{23}$$

式中 Q_1 ——清选后物料中马铃薯质量, kg
 Q_2 ——清选前马铃薯总质量, kg

$$Y_2 = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \times 100\% \tag{24}$$

式中 U_1 ——清选后物料中石块质量, kg
 U_2 ——清选前石块总质量, kg

4.3 试验方法

对薯石清选分离试验用的马铃薯和石块密度采用排水法进行测定,结果分别为 $1\,185$ 、 $2\,600\text{ kg/m}^3$ 。

为验证气流速度 v_s 、筛面倾角 β 和曲柄角速度 ω 对气力悬浮薯石分离过程中马铃薯选出率和清选洁净率的影响规律,获取较优参数组合,采用三因素三水平正交试验方案,在前期单因素试验的基础上,分别开展不同气流速度 ($15 \sim 35\text{ m/s}$)、筛面倾角 ($14^\circ \sim 22^\circ$) 和曲柄角速度 ($10 \sim 30\text{ rad/s}$) 下的马铃薯清选机气力悬浮薯石分离试验。试验中喂料速度 60 t/h ,取薯石质量比为 0.1 。

通过对试验结果进行分析,得出各个因素对试验结果影响的显著性,最终得到各因素较优的水平组合。试验因素水平如表2所示。

4.4 试验结果及分析

正交试验方案及结果如表3所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。对正交试验的结果进行方差与极差分

析,结果如表 4、5 所示。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Experimental factors and codes

水平	因素		
	气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	筛面倾角/ $(^{\circ})$	曲柄角速度/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	15	14	10
2	25	18	20
3	35	22	30

表 3 正交试验方案与结果
Tab.3 Orthogonal test design scheme and results

序号	因素			马铃薯选出	清选洁净
	A	B	C	率/%	率/%
1	1	1	1	76.20	72.7
2	2	2	2	82.46	80.2
3	3	3	3	71.86	100.0
4	1	2	3	70.23	100.0
5	2	3	1	50.25	100.0
6	3	1	2	99.87	53.97
7	1	3	2	45.21	100.0
8	2	1	3	86.58	86.6
9	3	2	1	98.34	60.0

表 4 极差分析结果
Tab.4 Results of range analysis

试验分析项	A	B	C
马铃薯选出率	K_1	191.64	262.65
	K_2	219.29	251.03
	K_3	270.07	167.32
	极差 R	78.43	95.33
	较优组合	$A_3B_1C_3$	
清选洁净率	K_1	272.70	213.27
	K_2	266.80	240.20
	K_3	213.97	300.00
	极差 R	58.73	86.73
	较优组合	$A_1B_3C_3$	

表 5 方差分析结果
Tab.5 Results of variance analysis

试验指标	方差来源	方差	自由度	均方	F	显著性
马铃薯选出率	模型	54 389.94	7	7 769.99	702.00	***
	A	1 054.93	2	527.47	47.66	**
	B	1 803.36	2	901.68	81.47	**
	C	2.66	2	1.33	0.12	
	误差	22.14	2	11.07		
	总和	54 412.08	9			
清选洁净率	模型	65 719.08	7	9 388.44	1 776.02	***
	A	697.23	2	348.61	65.95	**
	B	1 313.71	2	656.85	124.26	***
	C	628.48	2	314.24	59.45	**
	误差	10.57	2	5.29		
	总和	65 729.65	9			

注:显著性判断临界值为 $F_{0.01}(2,2)=99$, $F_{0.05}(2,2)=19$, $F_{0.1}(2,2)=9$; ** 表示影响显著, *** 表示影响极显著。

由方差分析结果可知,该试验中马铃薯选出率和清选洁净率两模型的显著性均为极显著,试验结果可靠。气流速度对马铃薯选出率和清选洁净率均有显著影响;筛面倾角对马铃薯选出率有显著影响,对清选洁净率有极显著影响;曲柄角速度对马铃薯选出率无显著影响,对清选洁净率有显著影响。

根据极差分析结果,马铃薯选出率对应的较优因素水平组合为 $A_3B_1C_3$,清选洁净率对应的较优因素水平组合为 $A_1B_3C_3$ 。

当气流速度为 15、25、35 m/s 时,马铃薯选出率分别为 63.88%、73.10% 和 90.02%,即选出率随气流速度的增大而增大,较优因素水平为 A_3 ;这是因为在气流速度增大时,马铃薯会达到更好的悬浮效果,从而增大了马铃薯选出率。清选洁净率分别为 90.90%、88.93% 和 71.32%,即清选清洁率随气流速度的增大而减小,较优因素水平为 A_1 ;当气流速度增大时,石块受到的气力增大,石块便会有向前滑动和抛离筛面的可能,当气流速度增大到一定数值,石块向前滑动或抛离筛面,清选洁净率降低。但在实际生产中,马铃薯选出率为首要评价指标,这是由于过多的马铃薯和石块一同流向石块输出方向,损失率升高并增加后续处理负担^[4],且由表 4 分析可知气流速度并不是影响清选洁净率的主要因素,因此此处选取 A_3 作为较优因素水平。

当筛面倾角为 14°、18° 和 22° 时,马铃薯选出率分别为 87.55%、83.68% 和 55.77%,即选出率随筛面倾角的增大而减小,较优因素水平为 B_1 ;清选洁净率分别为 71.09%、80.07% 和 100%,随筛面倾角的增大而增大,较优因素水平为 B_3 。当筛面倾角增大时,无论是对于马铃薯还是石块,其重力沿筛面方向的分力均会增大,故马铃薯和石块沿筛面向后滑动的趋势增加,当筛面倾角增大到一定数值时,马铃薯和石块沿筛面向后滑动,导致马铃薯选出率降低,而清选洁净率增大。由表 5 分析可知,筛面倾角对两个指标均有显著影响且对两个指标的影响趋势相反,且马铃薯选出率的较优因素水平为 B_1 ,清选洁净率的较优因素水平 B_3 ,因此选取 B_2 作为较优因素水平。

当曲柄角速度为 10、20、30 rad/s 时,马铃薯选出率分别为 74.93%、75.85% 和 76.22%,即选出率随曲柄角速度的变化无较明显变化,与极差和方差分析结果相符,较优因素水平为 C_3 ;清选洁净率分别为 77.57%、78.06% 和 95.53%,随曲柄角速度的增大而增大,较优因素水平为 C_3 。根据式(11)分析可知,当曲柄角速度增大时,石块沿筛面向后滑动的趋势增加,且石块更加不会被抛离筛面,从而清选洁净率增大,因此选取 C_3 作为较优因素水平。

因此,马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置的较优因素组合为 $A_3B_2C_3$,即气流速度为 35 m/s,筛面倾角为 18°,曲柄角速度为 30 rad/s。

4.5 验证试验

验证试验的试验条件和测试方法与正交试验完全相同,按照较优因素组合 $A_3B_2C_3$ 进行试验,重复 3 次试验取平均值,验证结果如表 6 所示,经过试验得出马铃薯选出率均值为 96.71%,清选洁净率均值

表 6 验证试验结果
Tab.6 Verification test results %

试验序号	马铃薯选出率	清选洁净率
1	98.59	100
2	93.92	98.55
3	97.63	96.48
平均值	96.71	98.34

为 98.34%,证明了较优组合选取的合理性,也满足了马铃薯清选的作业要求。

5 结论

(1)研究了基于气力悬浮、振动分层的薯石分层分离和基于悬浮输送的气力悬浮薯石分离机理,基于气力悬浮薯石分离技术,设计了马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置,并探究不同参数调整条件下的薯石分离清选特性。

(2)进行了气力悬浮薯石分离正交试验,对试验结果进行了极差和方差分析,并进行了验证试验。结果表明:当气流速度为 35 m/s、筛面倾角为 18°、曲柄角速度为 30 rad/s 时,马铃薯选出率均值为 96.71%,清选洁净率均值为 98.34%。该装置满足薯石清选作业的要求,各指标符合相关国家标准要求。

参 考 文 献

[1] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):1-16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)

[2] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):96-109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.009. (in Chinese)

[3] 杨小平,魏宏安,赵武云,等. 4U1600 型集堆式马铃薯挖掘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):83-92.
YANG Xiaoping, WEI Hongan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of 4U1600 set of pile type potato digger [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 83-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.009. (in Chinese)

[4] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):129-140,112.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuazhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129-140, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014. (in Chinese)

[5] 魏忠彩,李学强,孙传祝,等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析[J]. 中国农业科技导报,2017,19(8):63-70.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, SUN Chuazhu, et al. Analysis of potato mechanical damage in harvesting and cleaning and sorting storage [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 63-70. (in Chinese)

[6] 王红军,熊俊涛,黎邹邹,等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. 农业工程学报,2016,32(8):272-277.
WANG Hongjun, XIONG Juntao, LI Zouzou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 272-277. (in Chinese)

[7] 李学强,卢延芳,苏国梁,等. 多功能马铃薯清选输送机的设计[J]. 湖北农业科学,2016,55(7):1832-1835.
LI Xueqiang, LU Yanfang, SU Guoliang, et al. Design on multi-functional potato cleaning conveyor [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(7): 1832-1835. (in Chinese)

[8] 刘洪义,朱晓民,谭海林,等. 马铃薯分级生产线及其关键设备的设计[J]. 农机化研究,2010,32(4):84-86.
LIU Hongyi, ZHU Xiaomin, TAN Hailin, et al. The design of potato grading production line and its key equipment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(4): 84-86. (in Chinese)

- [9] 吕金庆,于佳钰,冯雪,等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):323-332.
LÜ Jinqing,YU Jiayu,FENG Xue,et al. Design and experimient of roller potato grading machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):323-332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190237&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.037. (in Chinese)
- [10] 宋言明,王芬娥. 新型马铃薯联合收获机的总体设计[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(1):157-160.
SONG Yanming,WANG Fene. Overall design of a new potato combine harvester [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2009,44(1):157-160. (in Chinese)
- [11] MCCLURE J E,MORROW C T. Computer-vision sorting of potatoes[C]//ASAE Meeting,1987.
- [12] HEINEMANN P H,PATHARE N P,MORROW C T. An automated inspection station for machine-vision grading of potatoes [J]. Machine Vision and Application,1996,9(1):14-19.
- [13] PATEL K K,KAR A,JHA S N,et al. Machine vision system; a tool for quality inspection of food and agricultural products[J]. Journal of Food Science & Technology,2012,49(2):123-141.
- [14] ELMASRY G,CUBERO S,ENRIQUE M,et al. In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system[J]. Journal of Food Engineering,2012,112(1-2):60-68.
- [15] MARCHANT J A,ONYANGO C M,STREET M J. High speed sorting of potatoes using computer vision[C]//ASAE Meeting,1988.
- [16] TAO Y,MORROW C T,HEINEMANN P H,et al. Fourier-based separation technique for shape grading of potatoes using machine vision[J]. Transactions of the ASAE,1995,38(3):949-957.
- [17] TAO Y,HEINEMANN P H,VARGHESE Z,et al. Machine vision for color inspection of potatoes and apples[J]. Transactions of the ASAE,1995,38(3):1555-1561.
- [18] MISENER G C,MCLEOD C D. Evaluation of potato-stone-cld separation mechanisms [J]. Canadian Agricultural Engineering,1987,29(2):169-171.
- [19] KANG Wenqin,FAN Mingshou,MA Zhong,et al. Luxury absorption of potassium by potato plants[J]. American Journal of Potato Research,2014,91(5):573-578.
- [20] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(16):43-49.
HOU Huaming,CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(16):43-49. (in Chinese)
- [21] 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/OL]. 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 potato stem separation equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):100-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.011. (in Chinese)
- [22] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):1-11.
WEI Zhongcai,LI Hongwen,SU Guoliang,et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(8):1-11. (in Chinese)
- [23] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等. 马铃薯气力精量播种机设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(10):16-24.
LÜ Jinqing,YI Shujuan,TAO Guixiang,et al. Design and experiment of precision air-suction type planter for potato [J]. Transactions of the CSAE,2018,34(10):16-24. (in Chinese)
- [24] 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?flag=1&file_no=20191001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [25] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):109-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.013. (in Chinese)
- [26] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):82-90,61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.009. (in Chinese)