

拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验

王相友¹ 孙景彬¹ 许英超¹ 李学强² 程鹏飞³

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东希成农业机械科技有限公司, 德州 253600;

3. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000)

摘要: 针对现有马铃薯清选分选机的薯土分离效果差、伤薯率较高、工作效率低等问题,设计了一种拨辊推送式马铃薯清选分选机。对该机器的工作机理进行了阐述,确定了清选装置、分选装置的结构参数,分析了马铃薯在清选分选过程中的力学特性。选取机组的转速、上料量、机组提升角度作为试验因素,伤薯率、分选清洁率为试验性能指标进行正交试验,并对试验结果进行显著性分析。结果表明,各因素对伤薯率影响的主次因素顺序为:机组提升角度、机组转速和上料量;对分选清洁率的影响主次因素顺序为:上料量、机组转速和机组提升角度。按照以马铃薯的伤薯率较低,兼顾分选清洁率较高的原则,确定较优组合,即机组转速为 145 r/min,上料量为 20 t/h,机组提升角度为 12°,并对该参数组合进行了验证试验,结果表明,在该条件下机器伤薯率为 0.773%,分选清洁率为 95.42%,符合基本作业要求。

关键词: 马铃薯; 清选分选机; 拨辊推送式; 力学分析; 正交试验

中图分类号: S226.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0316-07

Design and Experiment of Potato Cleaning and Sorting Machine

WANG Xiangyou¹ SUN Jingbin¹ XU Yingchao¹ LI Xueqiang² CHENG Pengfei³

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Shandong Xicheng Agricultural Machinery Science and Technology Co., Ltd., Dezhou 253600, China

3. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor separation effect, high damage rate and low working efficiency of the existing potato cleaning and sorting machine, a poking roller shoving type potato cleaning and sorting machine was designed. The working mechanism of the potato cleaning machine was described, and the structural parameters of the cleaning device and the sorting device were determined. And the mechanical properties of potato during cleaning and sorting process were analyzed. The orthogonal test was carried out with the unit speed, feeding amount and unit lifting angle as experimental factors, the damaged rate and sorting cleaning rate as experimental indexes. The test results were analyzed by using the data processing software, and it showed that the primary and secondary factors influencing the damaged rate were as follow: unit lifting angle, rotating speed and feeding amount; and the factors affecting the sorting cleaning rate were as follow: feeding amount, unit speed and unit lifting angle. According to the principle of low damage rate and good cleaning rate, the optimum experimental parameters combination were as follow: the unit speed of 145 r/min, the feeding account of 20 t/h, and the unit lifting angle of 12°. And verifying test results were as follows as follow: the damage rate of potato was 0.773% and the sorting cleaning rate was 95.42%, which met the requirement of potato cleaner. The research provided a reference for further reducing the damage rate and optimizing the parameter of potato sorting machine.

Key words: potato; sorting machine; shifting roller; mechanical analysis; orthogonal test

引言

伴随着我国农业产业的结构调整以及马铃薯主

粮化战略的部署,马铃薯的种植面积逐年增加,当前马铃薯的总产量已经稳居世界前列^[1-4]。但是,我国并不是马铃薯的加工和贸易出口强国,很重要的

原因是分选机械相对比较落后,无法实现高质量的清洗分选作业。目前马铃薯的清洗分选作业主要依靠果蔬分级通用机械完成,专用机械比较少,难以根据马铃薯本身的物料特性实现低损伤分级^[5]。国内有关马铃薯清洗分选机械的研究主要有:刘洪义等^[6]设计了马铃薯分级生产线及其关键设备,主要介绍了一种振动筛形式的分级装置。申屠留芳等^[7]设计的马铃薯分选机,主要涉及一种辊轴式分选装置,可有效代替人工分选,提高分级效率。常超等^[8]设计的基于马铃薯联合收获机的分级装置,采用链板式辊轴分级方法实现较为精确的分级。但是,国内集清洗与分选一体的机型研究相对较少。

针对现有马铃薯分选机械存在伤薯率较高、清洗清洁率低的问题,本文设计一种集清洗与分选于一体的拨辊推送式马铃薯清洗分选机。该机型通过多级拨辊连续推动,从而实现薯土的分离、马铃薯大小级别的分选,以有效降低分选过程的伤薯率,提高分选效率和清洁率。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

拨辊推送式马铃薯清洗分选机主要由上料斗、清洗装置、分选装置、薯土分离装置、泥土输送带、小薯输送带及大薯输送带等组成,结构如图 1 所示。

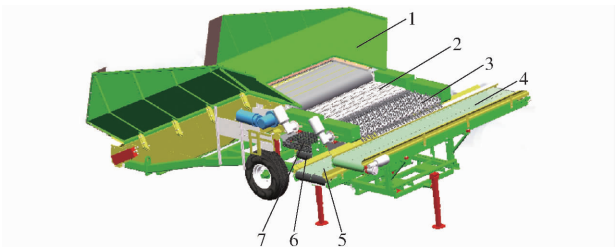


图 1 马铃薯清洗分选机整机结构图

Fig. 1 Structure of potato cleaning and sorting machine

1. 上料斗 2. 清洗装置 3. 分选装置 4. 大薯输送带 5. 中薯输送带 6. 泥土输送带 7. 薯土分离装置

1.2 工作原理

该清洗分选机依靠电动机提供动力,靠清洗辊和分选辊的转动实现清洗和分选作业,工作原理如图 2 所示,图中箭头所指方向为马铃薯的前进方向。机器的上料斗首先将马铃薯输送至清洗装置,该装置上的清洗辊可以将输送来的马铃薯、泥土以及杂草实现分离,较小的马铃薯、泥土及杂草会在清洗辊的间隙中落下,落到下边的薯土分离装置,进而实现小薯和杂质的分离。留在清洗辊上的马铃薯被输送到下一级分选装置,该装置设计 6 根分选辊,分选辊上设计有拨轮,可以使马铃薯在翻滚的过程中进行大小分级,中薯落至分选辊下面的输送带上,大薯落

至分选辊后面的输送带,从而完成马铃薯的整个清洗分选过程。

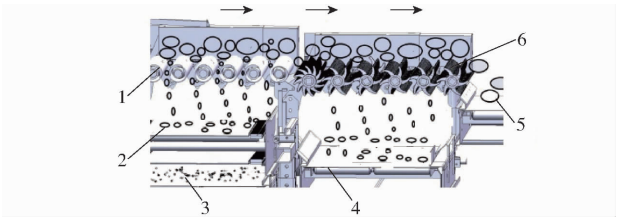


图 2 工作原理图

Fig. 2 Diagram of working principle

1. 清洗辊 2. 小薯 3. 杂质 4. 输送带 5. 大薯 6. 分选辊

2 关键机构设计

2.1 清洗装置

该装置主要由减速电动机、伸缩架、左旋弹簧、右旋弹簧及清洗辊等组成,其结构如图 3 所示。6 条清洗弹簧中,每两条相邻弹簧的旋向是相反的,避免马铃薯在输送过程中被推向一侧,保证了清洗工作的连续性。弹簧的外形设计圆滑,可以有效减轻对马铃薯的损伤。

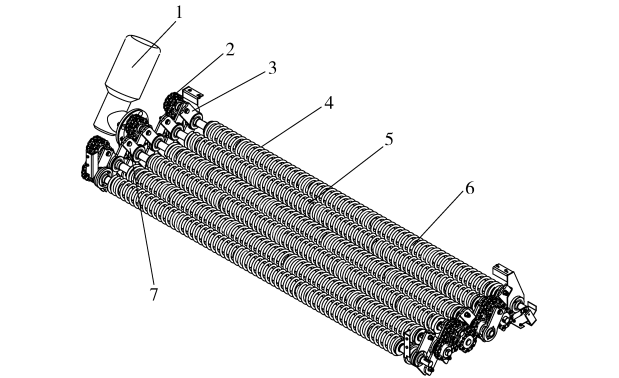


图 3 清洗装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of cleaning device

1. 减速电动机 2. 链条 3. 短连片体 4. 右旋弹簧 5. 左旋弹簧 6. 清洗辊 7. 长连片体

其中伸缩架是由长连片体和短连片体交错叠加而成,如图 4 所示。该伸缩架可以实现清洗辊之间的间距调节。中间交叉铰接 4 对双连片体,两端分别有一对单连片体铰接相连,使得伸缩架整体结构形似 5 个菱形,这样,伸缩架在调节清洗辊轴间距

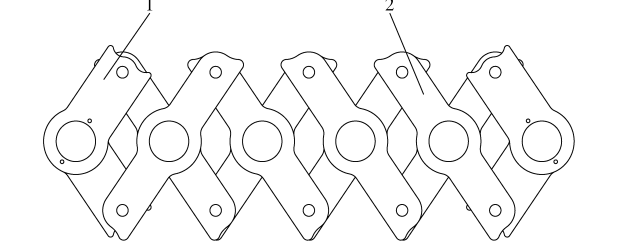


图 4 伸缩架结构图

Fig. 4 Structure diagram of telescopic frame

1. 短连片体 2. 长连片体

时,避免了传动链的张紧调节。

2.2 分选装置

拨辊推送式分选装置主要由减速电动机、链条、长连片体、短连片体、分选辊以及缓冲套管等组成,结构如图 5 所示,其中伸缩架的结构与清选装置中的伸缩架结构相同,分选装置中的分选辊由拨轮、四方拨辊轴、间隔套等组成,其中拨轮有六齿拨轮和十二齿拨轮两种,十二齿拨轮安装于分选装置的首根轴上,起到承接物料的作用,六齿拨轮安装于其余 5 根轴上,起到分选作用。

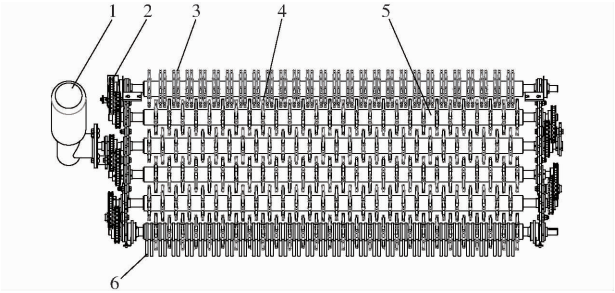


图 5 分选装置结构图

Fig. 5 Structure diagram of sorting device

1. 减速电动机 2. 链条 3. 十二齿拨轮 4. 六齿拨轮 5. 间隔套 6. 缓冲套管

2.3 分选辊

分选辊是拨辊推送式分选装置中的关键零部件,其结构特点对分选效果的影响至关重要。

2.3.1 拨轮齿数的确定

分选装置工作时,马铃薯分布于相邻的分选辊之间,分选辊上的拨轮之间形成持薯空间,拨轮的运动使得马铃薯产生滚动、滑动或跳动^[10]。因此,分选辊的转动应保证拨轮运动的连续性,再根据分选作业的需要,分析得拨轮的轮齿数应多于 4,当输送转速一定时,拨轮齿数的增加会增大马铃薯的转动频率,进而提高马铃薯的分离效果^[10]。不同齿数的拨轮产生的持薯空间如图 6 所示。

由图 6 可知,当拨轮的齿数为 5 时,相邻两拨轮之间形成的持薯空间不相等,即 $S_1 = S_3 \neq S_2$,并且空间 S_2 易造成卡薯损伤;当拨轮的齿数为 6 时,相邻的两拨轮之间形成的持薯空间相等,即 $S_1 = S_2 = S_3$,可以避免因持薯空间不等而造成的马铃薯剪伤或磨伤,因此拨轮采用六齿的结构形式。

2.3.2 拨轮尺寸的确定

拨轮的设计应保证马铃薯实现翻滚、前进的动作,拨轮的结构决定持薯空间的形状,拨轮的尺寸决定持薯空间^[10]。拨轮的尺寸过大,会导致轴径过大、机器笨重且耗能,尺寸过小,无法达到分选的效果且不能保证马铃薯的输送,进而影响分选的效率。

经力学分析,为提高马铃薯的分选效率、有效保

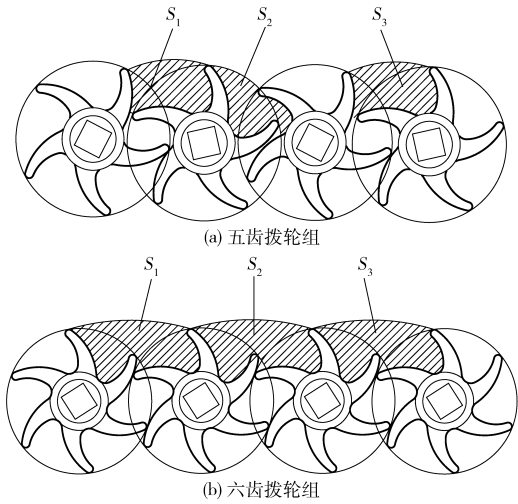


图 6 持薯空间对比图

Fig. 6 Comparison of space for potatoes

证输送,减少伤薯率,将拨轮中的边线 1 (图 7) 设计为内凹形状的圆弧,边线 2 设计为外凸形状的圆弧,进而保证相邻的 2 个拨齿之间形成喇叭口形状的持薯空间^[10]。为减小马铃薯的伤损率,持薯空间应尽可能平滑,且避免出现尖锐的边角。

马铃薯的形状近似为椭球状,根据其形状特点,设计拨轮轮齿的形状如图 7 所示,由 4 段圆弧相切过渡组成,圆弧半径分别为: $R_1 = 5\text{ mm}$; $R_2 = 40\text{ mm}$; $R_3 = 10\text{ mm}$; $R_4 = 70\text{ mm}$ 。此外, $R_5 = 78.5\text{ mm}$; $R_6 = 33.5\text{ mm}$; $R_7 = 25\text{ mm}$ 。

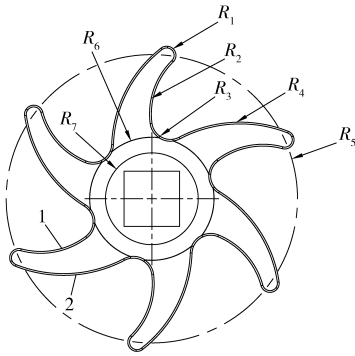


图 7 拨轮结构图

Fig. 7 Structure diagram of poking wheel

2.3.3 分选辊组数的确定

拨辊推送式分选机构主要实现马铃薯的大小分级,若分选辊的组数过少,达不到分级的目的,若分选辊的组数过多,会增加马铃薯在分级装置上的输送行程,极易造成马铃薯薯皮的破损^[10]。对样机进行试验,研究 4、5、6 组分选辊作业时伤薯率,经分析,分选辊的数量为 5 组时,伤薯率最低。

2.3.4 拨轮间距及分选辊间距的确定

马铃薯的大小决定了两相邻分选辊上的拨轮间距。根据实际测量,经清选之后得到马铃薯的平均尺寸:长度为 59 ~ 110 mm,直径为 56 ~ 70 mm。为

保证马铃薯可以在拨轮上的输送而不从其间隙中落下,确定拨轮的间隙为 54 mm。

根据拨轮的半径(83.5 mm)以及马铃薯的平均尺寸,遵循马铃薯的卡伤率最低的原则,确定相邻分选辊的间距为 130 mm,且该间距可以根据清选过后的马铃薯大小进行调节。

3 马铃薯力学特性分析

3.1 清选过程力学特性分析

对马铃薯在清选弹簧上的受力分析如图 8 所示,主要受到两相邻清选弹簧的支持力 N_1 、 N_2 ,摩擦力 N_{f1} 、 N_{f2} 和自身重力 mg 作用。其中, ω_1 为清选弹簧的旋转方向, O 为马铃薯的质心位置, O_1 为马铃薯与清选弹簧的一个接触点, O_2 为另一接触点, θ 为机组的提升角度, θ_1 为支持力 N_1 与水平方向的夹角, θ_2 为支持力 N_2 与水平方向的夹角, α_1 为马铃薯的重力 mg 与 O_2 点法向的夹角, β_1 为支持力 N_1 与 N_2 的夹角, O 到 O_1 的距离为 a , O 到 O_2 的距离为 b 。

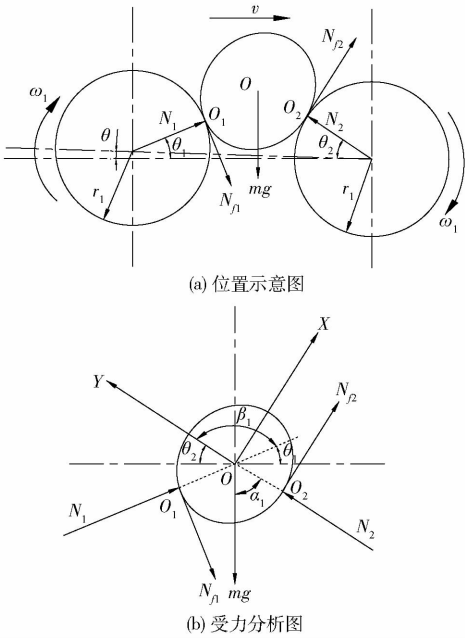


图 8 清选过程受力分析简图

Fig. 8 Stress analysis diagram of cleaning process

由图 8 可得

$$N_{f1} = N_1 f \tag{1}$$

$$N_{f2} = N_2 f \tag{2}$$

式中 f ——摩擦因数

马铃薯在清选过程中,可以忽略清选弹簧所引起的马铃薯的离心力,进而可得作用于马铃薯上的所有力对接触点 O_2 的合力矩为

$$\sum M_{O_2} = N_1 b \sin(180 - \beta_1) - mg b \sin \alpha_1 - N_{f1} (a + b \sin(\beta_1 - 90)) \tag{3}$$

将式(1)代入式(3)得

$$\sum M_{O_2} = N_1 b \sin \beta_1 - mg b \sin \alpha_1 + N_{f1} f (a + b \cos \beta_1) \tag{4}$$

马铃薯在此特定位置能够翻越清选弹簧的临界条件是:对 O_2 点的合力矩大于等于零,即

$$N_1 b (\sin \beta_1 + f \cos \beta_1) + N_{f1} f - mg b \sin \alpha_1 \geq 0 \tag{5}$$

同时应该满足沿着接触点 O_2 切线方向的合力大于等于零,即

$$N_1 \sin(180 - \beta_1) + N_{f2} - N_{f1} \sin(\beta_1 - 90) - mg \sin \alpha_1 \geq 0 \tag{6}$$

化简得

$$N_1 \sin \beta_1 + N_2 f + N_1 f \cos \beta_1 - mg \sin \alpha_1 \geq 0$$

马铃薯在清选过程中,清选弹簧的两作用力 N_1 和 N_2 之间的夹角 β_1 变化较小,但重力 mg 与 Y 轴负方向的夹角 α_1 是时刻变化的,主要受机组提升角度 θ 的影响。并且,马铃薯会受到邻接马铃薯的撞击力,因此,在该过程中的受力比较复杂,机组的转速、上料量以及机组提升角度均是影响马铃薯受力的关键因素,也是影响马铃薯在清选过程中伤损率的重要指标。

3.2 分选过程力学特性分析

对马铃薯在两相邻拨轮上的受力分析如图 9 所示, ω_2 为分选辊的旋转方向。

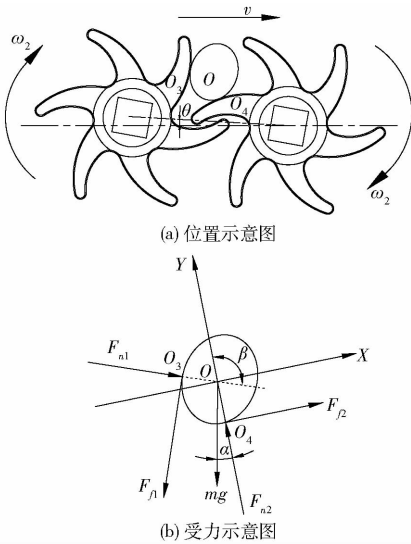


图 9 分选过程受力分析简图

Fig. 9 Stress analysis diagrams of sorting process

在图示位置时,马铃薯主要受到拨轮对其的支持力(即拨动力) F_{n1} 、 F_{n2} ,摩擦力 F_{f1} 、 F_{f2} ,以及自身重力 mg 作用,其中, O 点为马铃薯的质心位置, O_3 为马铃薯与拨轮的一个接触点, O_4 点为另一接触点, α 为马铃薯重力 mg 与 O_4 点法向的夹角, β 为两拨轮支持力的夹角, O 与 O_3 的距离为 c , O 与 O_4 的距离为 d 。

其中

$$F_{f1}=F_{n1}f \tag{7}$$

$$F_{f2}=F_{n2}f \tag{8}$$

忽略拨轮旋转所引起马铃薯的离心力,则作用于马铃薯上的力对接触点 O_4 的合力矩为

$$\sum M_{O_4}=F_{n1}d\sin(180-\beta)-mgdsin\alpha-F_{f1}(c+d\sin(\beta-90)) \tag{9}$$

将式(7)代入式(9)中,化简得

$$\sum M_{O_4}=F_{n1}d\sin\beta-mgdsin\alpha+F_{n1}f(c+d\cos\beta) \tag{10}$$

马铃薯能够被拨轮拨动并且顺利输送到下一拨轮的必要条件为:对 O_4 点的合力矩大于等于零,即

$$F_{n1}d(\sin\beta+f\cos\beta)+F_{n1}fc-mgdsin\alpha\geq 0 \tag{11}$$

同时,应满足马铃薯受到的沿接触点 O_4 切线方向的合力大于等于零,即

$$F_{n1}\sin(180-\beta)+F_{f2}-F_{f1}\sin(\beta-90)-mgsin\alpha\geq 0 \tag{12}$$

化简得

$$F_{n1}\sin\beta+F_{n2}f+F_{n1}f\cos\beta-mgsin\alpha\geq 0$$

根据力学特性的分析可知,马铃薯在拨轮的输送过程中,所受到的支持力 F_{n1} 和 F_{n2} 之间的夹角 β 变化较小,但是,马铃薯的重力 mg 与 Y 轴负方向夹角 α 不断变化,该变化受机组(分选辊、清选辊)提升角度的直接影响。马铃薯在此过程中的受力是比较复杂的,机组的转速、机组的提升角度均会对马铃薯的受力情况产生影响。

4 试验

4.1 试验条件

2016 年 9 月在河北省沽源县希森马铃薯种植基地,以荷兰 15 号马铃薯为分选对象,对样机进行了试验。其中,荷兰 15 号马铃薯为国内广泛种植品种,试验用样机如图 10 所示。



图 10 试验样机
Fig. 10 Experimental prototype

4.2 试验参数和评价指标

根据马铃薯在清选、分选过程中的力学分析结果,确定机组(清选辊、分选辊)转速、上料量、机组(清选辊、分选辊)提升角度为试验研究的 3 个主要参数。

综合样机工作的实际情况,机组的转速变化范

围可调,上料量变化范围一般为 20 ~ 50 t/h,机组的提升角度变化范围为 0° ~ 13°。以马铃薯清选分选过程中的重要评价指标:伤薯率 y_1 、分选清洁率 y_2 作为试验指标。

$$y_1=\frac{n_1}{n_2}\times 100\% \tag{13}$$

$$y_2=\frac{n_2}{N+n_2}\times 100\% \tag{14}$$

式中 n_1 ——机组作业完成后表皮损伤的马铃薯质量
 n_2 ——机组作业处理完成后马铃薯的总质量
 N ——杂物的总质量

4.3 试验方案

综合样机工作的实际情况,对选取的 3 个试验参数进行三因素四水平的正交试验,即选用正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行试验设计与分析,其因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素与水平
Tab. 1 Experimental factors and levels

水平	机组转速/ ($r\cdot min^{-1}$)	上料量/ ($t\cdot h^{-1}$)	机组提升角度/ ($^{\circ}$)
1	70	20	0
2	95	30	4
3	120	40	8
4	145	50	12

4.4 试验结果与分析

根据极差值确定伤薯率、分选清洁率影响因素的主次关系,极差分析结果如表 2 所示。 A 、 B 、 C 为因素水平值。

对试验结果进行方差分析,进而确定试验指标在不同试验因素水平组合下的变化规律。试验结果的方差分析如表 3 所示。

综合极差分析与方差分析的结果可知,机组转速、上料量和机组提升角度对机器分选性能的影响是不相同的。并且,根据方差分析的结果可知,所选试验指标对性能指标均具有显著的影响,因此,这 3 种参数的选取是正确的,是影响该机器性能指标的关键性因素。

在所选的 3 个参数中,机组的转速对伤薯率、分选的清洁率均有显著影响。并且,机组转速越快,单个马铃薯在清选辊上的转动圈数越少,清选辊对马铃薯的摩擦次数减少,进而导致马铃薯的伤薯率降低,反之,伤薯率升高。

上料量对伤薯率的影响不显著,但对分选的清洁率有非常显著的影响,且上料量越大,分选的清洁率越低。原因在于,上料量越大,导致马铃薯的拥挤,部分马铃薯不易接触到清选辊,降低了摩擦的次数,此时伤薯率会降低。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test design scheme and results					
序号	因素			性能指标	
	机组 转速 <i>A</i>	上料量 <i>B</i>	机组提升 角度 <i>C</i>	伤薯率 $y_1/\%$	分选清洁 率 $y_2/\%$
1	1	1	1	1.26	96.7
2	1	2	2	1.18	94.9
3	1	3	3	1.03	94.2
4	1	4	4	0.69	93.9
5	2	1	2	0.86	96.2
6	2	2	1	1.36	95.8
7	2	3	4	0.79	95.1
8	2	4	3	0.93	93.8
9	3	1	3	0.89	95.9
10	3	2	4	0.76	94.6
11	3	3	1	1.09	93.7
12	3	4	2	0.95	93.1
13	4	1	4	0.77	95.4
14	4	2	3	0.79	94.8
15	4	3	2	0.85	94.1
16	4	4	1	0.83	93.9
伤薯率	k_1	1.040	0.945	1.135	
	k_2	0.985	1.023	0.960	
	k_3	0.923	0.940	0.910	
	k_4	0.810	0.850	0.753	
	极差 R	0.230	0.173	0.382	
	较优水平		A_4, B_4, C_4		
	因素主次		C, A, B		
分选清 洁率	较优组合		$C_4 A_4 B_4$		
	k_1	94.925	96.050	95.025	
	k_2	95.225	95.025	94.575	
	k_3	94.325	94.275	94.675	
	k_4	94.550	93.675	94.750	
	极差 R	0.900	2.375	0.450	
	较优水平		A_2, B_1, C_1		
	因素主次		B, A, C		
	较优组合		$B_1 A_2 C_1$		

表 3 分选性能指标方差分析

Tab.3 Variance analysis of machine performance						
试验 指标	差异源	离差 平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
伤薯率	<i>A</i>	0.247	3	0.082	7.759	*
	<i>B</i>	0.064	3	0.021	2.014	
	<i>C</i>	0.364	3	0.121	11.427	**
	误差列	0.064	6	0.011		
分选清洁率	<i>A</i>	2.183	3	0.728	6.281	*
	<i>B</i>	11.828	3	3.943	34.036	**
	<i>C</i>	0.513	3	0.171	1.475	
	误差列	0.695	6	0.116		

注：* 表示显著；* * 表示非常显著。 $F_{0.05}(3,6)=4.757$ ， $F_{0.01}(3,6)=9.780$ 。

机组的提升角度对马铃薯的伤薯率具有非常显

著的影响,原因在于,提升角度增大,会使得马铃薯在分选辊上的转动次数减少,进而导致马铃薯迅速完成整个清选分选过程,受到的摩擦力减少。反之,马铃薯被摩擦的次数增加,导致伤薯率上升。

通过极差和方差分析,综合考虑各试验因素对分选性能指标的影响,对伤薯率影响的主次因素顺序为:机组提升角度、机组转速和上料量;对分选清洁率影响的主次因素顺序为:上料量、机组转速和机组提升角度。按照马铃薯的伤薯率较低,兼顾分选清洁率较高的原则,从而确定了 $A_4 B_1 C_4$ 的较优参数组合,即机组转速为 145 r/min,上料量为 20 t/h,机组提升角度为 12°,并且该参数组合是正交试验过程中的其中一组试验方案,故对该参数组合进行 3 次重复试验研究,而且,由于较优参数组合发生在所选参数取值的边界处,因此进行验证试验,验证试验的结果如表 4 所示。

表 4 验证试验结果

Tab.4 Results of verification test			
试验	试验次序	伤薯率/%	分选清洁率/%
$A_4 B_1 C_4$ 原始正交试验结果	平均值	0.77	95.40
	1	0.785	94.88
$A_4 B_1 C_4$ 3 次重复试验	2	0.759	94.68
	3	0.775	96.71
	平均值	0.773	95.42
1 号验证试验	1	0.758	94.86
	2	0.714	93.74
	3	0.731	94.06
	平均值	0.734	94.22
2 号验证试验	1	0.823	94.44
	2	0.795	95.09
	3	0.827	94.49
	平均值	0.815	94.67
3 号验证试验	1	0.875	95.97
	2	0.879	95.61
	3	0.847	95.13
	平均值	0.867	95.57

根据重复试验结果,在参数组合 $A_4 B_1 C_4$ 下,马铃薯的伤薯率为 0.773%,分选清洁率为 95.42%,与正交试验时的结果基本一致。由 1 号验证试验,保持 $A_4、B_1$ 不变,机组提升角度 C 取值为 13°(最大角度),试验结果伤薯率为 0.734%,分选清洁率为 94.22%,可见伤薯率有所降低,但分选清洁率降低了 1.2 个百分点,故根据分选性能指标的评价原则,判定机组提升角度 12°优于 13°;由 2 号验证试验,保持 $B_1、C_4$ 不变,机组的转速 A 增大至 160 r/min(机组最高转速),试验结果伤薯率为 0.815%,分选清洁率为 94.67%,可见伤薯率有所上升,分选清洁

率有所下降,故机组转速 145 r/min 优于 160 r/min; 由 3 号验证试验,保持 A_4 、 C_4 不变,上料量降低为 18 t/h,此时试验结果伤薯率为 0.867%,分选清洁率为 95.57%,可见伤薯率明显上升,原因在于马铃薯在清选装置、分选装置上的摩擦时间增长,虽然分选清洁率略有上升,但综合考虑机器的作业效率和性能评价原则,上料量 20 t/h 优于 18 t/h。

综上,验证试验表明,在 $A_4B_1C_4$ 这一组合,即机组转速为 145 r/min,上料量为 20 t/h,机组提升角度为 12° 条件下机器的伤薯率最低,分选清洁率最高,为该马铃薯清选分选机的最优作业性能参数组合。

5 结论

(1)阐述了拨辊推送式马铃薯清选分选机的主

要机构参数和工作原理,为马铃薯分选机械的设计研究提供了理论依据。

(2)分析了马铃薯在该机器的清选装置、分选装置上的力学特性,为马铃薯分选机械的改进设计提供了理论参考。

(3)通过正交试验确定了影响机器清选分选性能指标的 3 个因素的主次顺序。影响伤薯率的主次因素顺序为:机组提升角度、机组转速和上料量;影响分选清洁率的主次因素顺序为上料量、机组转速和机组提升角度。

(4)经极差分析和方差分析确定了最优参数组合:机组转速为 145 r/min,上料量为 20 t/h,机组提升角度为 12° ,并且验证试验的结果表明这一组合确实为最优参数组合,在该条件下,机器的伤薯率为 0.773%、分选清洁率为 95.42%。

参 考 文 献

- 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.
- ZHOU K, JENSEN A L, BOCHTIS D D. Simulation model for the sequential in-field machinery operations in a potato production system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116(8): 173 - 186.
- 谢从华. 马铃薯产业的现状与发展[J]. 华中农业大学学报:社会科学版, 2012, 31(1): 1 - 4.
XIE Conghua. Potato industry status and development[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2012, 31(1): 1 - 4. (in Chinese)
- 柳俊. 我国马铃薯产业技术研究现状及展望[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 13 - 18.
LIU Jun. Research status and prospects of potato industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5): 13 - 18. (in Chinese)
- 吕金庆, 田忠恩, 杨颖, 等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 258 - 263.
LV Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258 - 263. (in Chinese)
- 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)
- 申屠留芳, 韦奇, 巩尊国, 等. 马铃薯分选机的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(8): 114 - 117.
SHENTU Liufang, WEI Qi, GONG Zunguo, et al. Design of potato sorter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(8): 114 - 117. (in Chinese)
- 常超, 魏宏安. 基于马铃薯联合收获机的分级装置研究与设计[J]. 农业与技术, 2014, 34(2): 43 - 44.
CHANG Chao, WEI Hongan. Research and design of grading device based on potato combine harvester[J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(2): 43 - 44. (in Chinese)
- 程鹏飞, 于文强, 李学强, 等. 马铃薯输送线动堆积角与输运效率优化分析计算[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 95 - 99.
CHENG Pengfei, YU Wenqiang, LI Xueqiang, et al. The analysis between dynamic pile angle and transportation speed on the transportation equipment of potatoes[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 95 - 99. (in Chinese)
- 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 119 - 126.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160717&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119 - 126. (in Chinese)
- BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 75 - 85.
- 桑永英, 张东兴, 贾晶霞, 等. 马铃薯联合收获机输送臂系统的运动防碰仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 52 - 55.
SANG Yongying, ZHANG Dongxing, JIA Jingxia, et al. Development of virtual prototype of potato harvester elevator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 52 - 55. (in Chinese)
- 孙军, 于文强, 李学强, 等. 马铃薯分选输送线静力学分析与计算方法[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 89 - 92.
SUN Jun, YU Wenqiang, LI Xueqiang, et al. Analysis and calculation method of potato sorting conveyor line statics[J]. Food & Machinery, 2015, 31(5): 89 - 92. (in Chinese)

- 9 刘安源, 刘石. 流化床内颗粒碰撞传热的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 161 – 165.
LIU Anyuan, LIU Shi. Theoretical study on impact heat transfer between particles in fluidized bed [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(3): 161 – 165. (in Chinese)
- 10 REN B, ZHONG W Q, CHEN Y, et al. CFD – DEM simulation of spouting of corn-shaped particles[J]. Particuology, 2012, 10(5): 562 – 572.
- 11 ZHONG W Q, ZHANG Y, JIN B S, et al. Discrete element method simulation of cylinder-shaped particle flow in a gas-solid fluidized bed [J]. Chemical Engineering & Technology, 2009, 32(3): 386 – 391.
- 12 ILIUTA I, LARACHI F, GRANDJEAN B. Pressure drop and liquid holdup in trickle flow reactors: improved Ergun constants and slip correlations for the slit model [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37(12): 4542 – 4550.
- 13 MIANOWSKI A, RADKO T, SIUDYGA T. The reactivity of cokes in Boudouard-Bell reactions in the context of an Ergun model [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 122(2): 1013 – 1021.
- 14 NIVEN R K. Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidized beds [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(3): 527 – 534.
- 15 LETTIERI P, BRANDANI S, YATES J G, et al. A generalization of the Foscolo and Gibilaro particle-bed model to predict the fluid bed stability of some fresh FCC catalysts at elevated temperatures [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(18): 5401 – 5412.
- 16 ZHAO Y, JIANG M, LIU Y, et al. Particle-scale simulation of the flow and heat transfer behaviors in fluidized bed with immersed tube[J]. AIChE Journal, 2009, 55(12): 3109 – 3124.
- 17 DI MAIO F P, DI RENZO A, TREVISAN D. Comparison of heat transfer models in DEM – CFD simulations of fluidized beds with an immersed probe [J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 257 – 265.
- 18 TAVASSOLI H, EAJF P, JAM K. Direct numerical simulation of fluid-particle heat transfer in fixed random arrays of non-spherical particles[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 129: 42 – 48.
- 19 FOTOVAT F, ANSART R, HEMATI M, et al. Sand-assisted fluidization of large cylindrical and spherical biomass particles: experiments and simulation[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 126: 543 – 559.
- 20 李少华, 朱明亮, 张立栋, 等. 回转装置内三组元颗粒径向混合评价方法分析[J]. 化工进展, 2013(6): 1224 – 1229.
LI Shaohua, ZHU Mingliang, ZHANG Lidong, et al. Analysis of three-component radial mixing evaluation methods in rotary retorting [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013(6): 1224 – 1229. (in Chinese)

(上接第 322 页)

- 14 刘少达, 李壮哲, 蔡晓玲, 等. 一种南方马铃薯分级装置的力学分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 48 – 50.
LIU Shaoda, LI Zhuangzhe, CAI Xiaoling, et al. Mechanics analysis of south potatoes classification device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 48 – 50. (in Chinese)
- 15 桑永英, 张东兴, 张梅梅. 马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(1): 81 – 84.
SANG Yongying, ZHANG Dongxing, ZHANG Meimei. Study on bruising damage experiment of potato and finite element analysis [J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(1): 81 – 84. (in Chinese)
- 16 金鑫, 杜新武, 王世光, 等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 82 – 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160312&flag=1&journal_id=jesam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.012.
JIN Xin, DU Xinwu, WANG Shiguang, et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82 – 89. (in Chinese)
- 17 刘海超, 王春光, 顾丽霞. 马铃薯在摆动分离筛上的动力学试验研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 70 – 72.
LIU Haichao, WANG Chunguang, GU Lixia. Experimental study on dynamics of potatoes on the separation of potato harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1): 70 – 72. (in Chinese)
- 18 刘海超. 马铃薯在摆动分离筛上的动力学试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
LIU Haichao. The experimental study on dynamics of potatoes on the separation of potato digger [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 19 吕金庆, 田忠恩, 杨颖, 等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 17 – 24.
LV Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 17 – 24. (in Chinese)
- 20 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 11 – 17. (in Chinese)
- 21 吴建民, 李辉, 孙伟, 等. 拨指轮式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 76 – 79.
WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Design of potato digger in poke finger's wheel type [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 76 – 79. (in Chinese)
- 22 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 圆盘栅式马铃薯挖掘机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 15 – 21.
SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment on potato digger of disc ce-grate type [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(24): 15 – 21. (in Chinese)