

定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机设计与试验

王相友¹ 祝 珊¹ 李学强^{2,3} 李腾训¹ 王琳琳¹ 胡周勋^{2,3}

(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. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600)

摘要: 针对马铃薯种薯需求量大以及人工切种工作量大、劳动强度高、切种效率较低等问题,设计了一种定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机,可同时进行马铃薯种薯清土除杂、大小分选、种薯排列、切块、薯块杀菌消毒、薯种碎片清选和集薯输送等多种作业。该种薯切块机包括种薯分选装置、定向排列装置、纵切装置和横切装置,采用纵刀和横刀组合切块工艺,可有效提高种薯切块效率,降低劳动强度。以中间电机Ⅱ转速、上下胶皮辊中心距和薯刀梳子安装角为试验因素,以薯块合格率、薯块盲眼率和种薯损耗率为试验指标,进行了响应曲面试验,采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析,得出最优参数组合为:中间电机Ⅱ转速为 965.76 r/min,上下胶皮辊中心距为 315 mm,薯刀梳子安装角为 104.61°,最优参数组合条件下薯块合格率 94.86%,薯块盲眼率 1.84%,种薯损耗率 9.72%。在最优参数组合条件下进行了验证试验,结果表明,薯块合格率为 92.13%,薯块盲眼率为 1.91%,种薯损耗率为 10.21%,与预测值相比,薯块合格率、薯块盲眼率及种薯损耗率的相对误差分别为 2.88%、3.80%、5.04%,满足马铃薯种薯切块要求。

关键词: 马铃薯种薯; 定向排列; 纵横切分

中图分类号: S223.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0334-12 OSID: 

Design and Experiment of Directional Arrangement Vertical and Horizontal Cutting of Seed Potato Cutter

WANG Xiangyou¹ ZHU Shan¹ LI Xueqiang^{2,3} LI Tengxun¹ WANG Linlin¹ HU Zhouxun^{2,3}

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

2. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China

3. Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253600, China)

Abstract: In view of the large demand for seed potatoes, the large amount of manual cutting, high labor intensity and low cutting efficiency, on the basis of adapting to the planting pattern and agronomic requirements, a directional arrangement of longitudinal and transverse cutting seed potato cutter was developed, which can simultaneously complete the tasks of seed potato cleaning, impurity removal, size sorting, directional arrangement of seed potatoes, slicing, potato block sterilization, seed fragments cleaning and collecting and transporting. The seed potato cutting machine performed the cutting operation under the motor drive. The key components included the seed potato sorting device, directional aligning device, longitudinal slicing device and transverse slicing device. The seed potato cutting machine adopted a combination of a longitudinal knife and a transverse knife to cut the block process, which can effectively improve the cutting efficiency of the seed potato and reduce the labor intensity. Taking the intermediate motor Ⅱ speed, the central distance between upper and lower rubber rollers and installation angle of potato knife comb as test factors, the response surface test was carried out with the qualified rate, blind rate and loss rate of seed potato as test indicators. The test data was analyzed by Design-Expert 8.0.6 software. To explore the correlation between seed cutting performance and various influencing factors and the interaction law, the optimal parameter combination was as follows: the intermediate motor Ⅱ speed was 965.76 r/min, the center distance between upper and lower rubber rollers was 315 mm, the

收稿日期: 2020-02-18 修回日期: 2020-03-12

基金项目: 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)和山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF020-03)

作者简介: 王相友(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: wxy@sdut.edu.cn

installation angle of potato knife comb was 104.61° , under the optimal combination condition, the qualified rate was 94.86%, the blind rate was 1.84%, and the loss rate was 9.72%, and the verification test was carried out. The test result showed that the qualification rate was 92.13%, the blind rate was 1.91%, and the loss rate of seed potato was 10.21%. Compared with the optimized value, the relative errors of qualified rate, blind rate and loss rate were not more than 5.04%, which met the requirements of seed potato cutting. The research result can provide theoretical and technical reference for the development and improvement of seed potato cutter.

Key words: seed potato; directional arrangement; vertical and horizontal cutting

0 引言

马铃薯是中国第四大主粮,每年种植面积超过600万hm²。马铃薯种薯需求逐年增多,而我国种薯制备仍然采用人工按芽切种、人工切刀消毒和人工背负式喷药的传统切块模式^[1-4]。人工切种耗费大量劳动力,同时存在消毒不严格、切块大小不一、用种量大、出苗率难以控制等问题,严重制约了大面积种植效率,是马铃薯全程机械化种植的瓶颈之一^[5-6]。

国外对马铃薯种薯切块机的研究起步较早,美国 All Star Manufacturing 公司、Milestone 公司以及 BORGMANN^[7] 研制的双层马铃薯种薯自动化切块机集分选、切种、喷药、清选和输送于一体,液控和电控相结合,可以实现不同等级种薯的精确切分,但其机型体积庞大、结构复杂,且造价昂贵,不适合我国国情。近年来,国内相关专家学者对马铃薯种薯切块进行了研究。其中,东北农业大学^[8] 研制了一款犁刀式马铃薯切块机,该机为双层结构,采用犁刀刀片将整薯切块,但该机型缺少犁刀和薯块的杀菌消毒装置,切后的薯块需要人工再次喷药;周树林^[9] 发明了一款舀勺定刀式马铃薯种薯切块机,可对不同等级的种薯分别切块,所切薯块大小相对均一,但机械化作业时需要3种型号的切种机同时工作,成本较高,实际作业时占地面积大;文献^[10] 设计了一款小型马铃薯种薯切块机模型,采用组合刀片将不同等级的种薯可变等分切块,但该机结构较为复杂,至少需要3台电动机,且工作过程中有多次暂停,切块效率较低。

目前,国内对于马铃薯种薯切块机的研究大多是理论分析和仿真设计,市场定型产品少。本文借鉴国外相关技术,在适应我国种植模式的基础上,设计一种定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机,其分选装置可对种薯清土除杂、大小分选,定向排列装置可实现种薯位姿调整,纵刀与横刀配合对种薯进行二次切分,喷药装置实时对薯块杀菌消毒,清选输送装置将薯块输送至拌种位置。对该机进行切块性能试验,得到马铃薯种薯切块机最优工作参数和结构参数。

1 总体设计及工作原理

1.1 结构及工作原理

针对我国马铃薯主产区机械化切种水平较低的问题^[11],参考人工切种的农艺流程,研制的集分选、切块、杀菌消毒和清选一体的马铃薯种薯切块机如图1a所示。该马铃薯种薯切块机主要由机架、上料装置、分选装置、定向排列装置、纵切装置、横切装置、喷药装置、薯种碎片清选装置和集薯输送装置等组成。

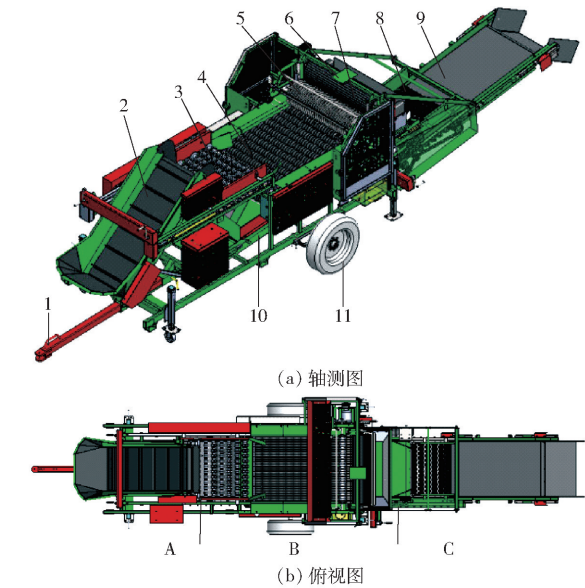


图1 马铃薯种薯切块机结构简图

Fig.1 Diagrams of seed potato cutting machine

- 1.牵引装置 2.上料装置 3.分选装置 4.定向排列装置
- 5.纵切装置 6.喷药装置 7.横切装置 8.薯种碎片清选装置
- 9.集薯输送装置 10.中间下输送装置 11.地轮

马铃薯种薯切块机全程工作划分为3个阶段,如图1b所示,A阶段为种薯的上料;B阶段为种薯的输送、切块及杀菌消毒;C阶段为成品薯块的清选及输送。工作时首先将种薯倒入上料斗,由上料装置的输送带提升至B阶段分选装置,较小的种薯(质量小于50g,宽度10~45mm)从分选辊间隙漏下,用于直接播种,尺寸大于分选辊间隙的种薯(宽度45~80mm)则进入定向排列装置,种薯在定向排列装置中调整重心位置,排列整齐,依次进入纵切装

置和横切装置,切分后薯块长 30 ~ 45 mm,宽 30 ~ 40 mm,厚 20 ~ 30 mm,质量 35 ~ 65 g,经过喷药消毒后落入 C 阶段薯种碎片清选装置,薯块经过筛选,被运至出口处。

1.2 动力传递路线

上料装置由电机 I 驱动,电机 I 与减速电机连接,减速电机输出轴与链传动连接,驱动上料装置的输送带转动;中间电机 II 驱动小带轮,经一级带轮减速及两级链轮减速后,分路传动,一路驱动定向排列装置及分选装置作业,一路驱动纵切装置及横切装置作业;电机 III 输出轴连接减速电机,减速后经链传动带动清选装置与集薯输送装置作业,完成薯块的清选及输运工作。其中,B 阶段传动路线为整机的核心路线,其简图如图 2(图中 i 表示传动比)所示。

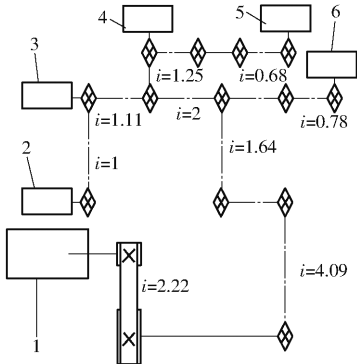


图 2 B 阶段传动路线简图

Fig. 2 B-stage transmission route diagram

1. 中间电机 II 2. 下胶皮辊 3. 上胶皮辊 4. 定向排列装置
5. 分选装置 6. 纵切装置

1.3 主要技术参数

定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 马铃薯种薯切块机主要技术参数	
Tab. 1 Main technical parameters of seed potato cutter	
参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	9 070 × 2 283 × 2 009
整机质量/kg	4 800
配套动力/kW	1.5 ~ 2.2
所切整薯质量/g	50 ~ 300
所切薯块质量/g	35 ~ 65
纯工作小时生产率/(t·h ⁻¹)	5
圆盘切刀直径/mm	341
分选装置有效分选长度/mm	910
定向排列装置有效长度/mm	1 480
清选装置总长度/mm	791
集薯输送装置总长度/mm	2 210

2 关键部件设计

2.1 定向排列装置

定向排列装置主体部件为滚筛,滚筛由滚筛主动

轴、滚筛从动轴、胶轮辊链条、自转链条和滚筛辊子组成,其主要作用是排列种薯、调整种薯的入刀状态,以方便切刀切分种薯。滚筛结构简图如图 3 所示。

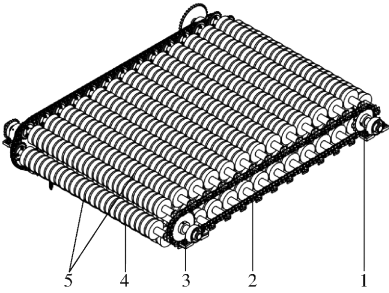


图 3 滚筛结构简图

Fig. 3 Structural diagram of rolling screen

1. 滚筛主动轴 2. 胶轮辊链条 3. 滚筛从动轴 4. 圆台橡胶轮
5. 滚筛辊子

2.1.1 圆台橡胶轮尺寸确定

滚筛的核心部件为圆台橡胶轮,其结构特点会影响种薯定向排列的效果。通过统计种薯尺寸参数,得到种薯长度范围为 60 ~ 180 mm,宽度范围为 45 ~ 80 mm,厚度范围为 30 ~ 55 mm。所设计的圆台橡胶轮应仿形种薯形状和人工切块工艺,因此确定圆台橡胶轮顶端直径 $d_1 = 115$ mm,底端直径 $d_2 = 122$ mm,橡胶轮厚度 $b_1 = 30$ mm,锥度 $\varepsilon = 12^\circ$,两相邻圆台橡胶轮之间间距 $b_2 = 10$ mm,作为圆盘切刀的通过位置。圆台橡胶轮的锥度设计使得相邻橡胶轮之间形成菱形空间,有利于种薯调整位姿,如图 4 所示。

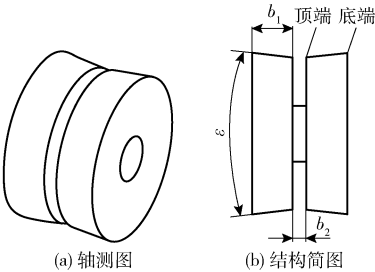


图 4 圆台橡胶轮结构简图

Fig. 4 Structure diagrams of round rubber wheel

2.1.2 圆台橡胶轮运动学分析

对于单一圆台橡胶轮,橡胶轮圆弧上任一点的运动轨迹取决于该点转动的线速度 v_1 (圆台橡胶轮上作用点相对橡胶辊轴的切向速度) 与滚筛输送速度 v_0 的比值,圆台橡胶轮上任意一点的运动轨迹为螺旋线,以圆台橡胶轮中心为原点、种薯输送方向为 x 轴、垂直方向为 y 轴建立坐标系,如图 5 所示。

图 5 中,沿 x 轴正方向顺时针旋转,圆台橡胶轮圆周上任意一点 $Q(x, y)$ 经过时间 t 的坐标方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t + r_1 \cos(\omega_1 t) \\ y = r_1 \sin(\omega_1 t) \end{cases} \quad (1)$$

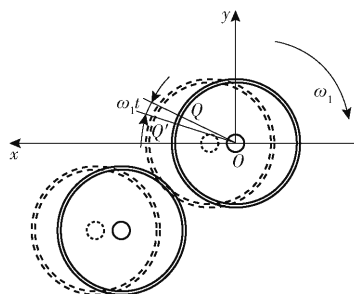


图5 圆台橡胶轮运动轨迹

Fig.5 Moving trail of round rubber wheel

式中 ω_1 ——圆台橡胶轮转动角速度,rad/s
 r_1 ——圆台橡胶轮平均半径,mm
 v_0 ——滚筛输送速度,m/s

将 $\omega_1 = 2\pi n$ 代入式(1)得

$$\begin{cases} x = v_0 t + r_1 \cos(2\pi n t) \\ y = r_1 \sin(2\pi n t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 n ——圆台橡胶轮转速,r/min

将式(2)对 t 求一阶导数得到点 Q 的速度方程

$$\begin{cases} v_x = v_0 - 2\pi n r_1 \sin(2\pi n t) \\ v_y = 2\pi n r_1 \cos(2\pi n t) \end{cases} \tag{3}$$

圆台橡胶轮推送种薯向前输送的条件为 $v_x > 0$,
即

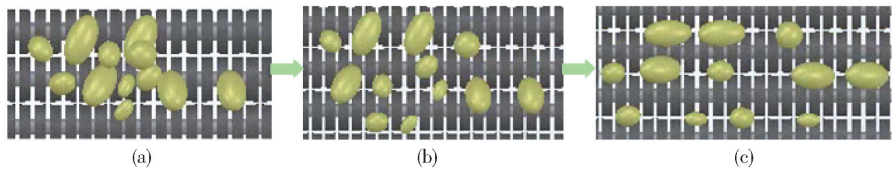


图6 种薯定向排列状态简图

Fig.6 Diagrams of seed potato orientation state

2.1.3 滚筛组数与转速

滚筛的主要作用是通过辊子转动将种薯定向排列和向前输送,滚筛辊子组数和转速对种薯定向排列有重要影响。综合考虑种薯切块机分选装置的最佳分选转速、配套中间电机Ⅱ功率、传动比分配以及圆台橡胶轮尺寸等因素,试验得知当滚筛辊子转速为25~40 r/min 时,可有效保证种薯定向排列。滚筛为环状带式滚动筛,滚筛辊子组数为28组,每组26个圆台橡胶轮,相邻两辊子中心距132 mm,可增加种薯调整重心的行程,减小机组结构体积。

2.2 纵切装置

2.2.1 结构及工作原理

纵切装置是将定向排列装置输送过来的种薯等间距切分成段状薯块。纵切装置主要由支架、拉簧、行程开关、圆盘切刀、圆盘切刀调节机构、磨刀机构和链传动等组成。圆盘切刀铅垂、等距排在切刀轴上,圆盘切刀调节机构可调整切刀轴前后安装位置,磨刀机构及行程开关可延长刀具寿命,保护刀具。作业时,圆盘切刀转动,沿垂直于种薯长轴方向

$$v_x = v_0 - 2\pi n r_1 \sin(2\pi n t) > 0 \tag{4}$$

由上述圆台橡胶轮的运动学分析可知,圆台橡胶轮圆周上任意一点的运动位移和运动速度,主要受滚筛输送速度、圆台橡胶轮平均半径和圆台橡胶轮转速的影响。滚筛输送速度主要由中间电机Ⅱ控制,且其转速便于调整,故选择中间电机Ⅱ转速为试验因素,由上述理论分析及前期预试验确定中间电机Ⅱ转速范围为800~1 200 r/min;圆台橡胶轮运动轨迹简图如图5所示。

种薯排列过程如图6所示。种薯输送到滚筛前段时种薯易堆叠,种薯位姿出现倾斜,如图6a所示;随着圆台橡胶轮顺时针自转,种薯开始转动,堆叠的种薯进一步离散,种薯重心不断调整,位姿开始有序改变,滚筛中段种薯排列状态如图6b所示;由于前后及左右相邻4个圆台橡胶轮之间形成内凹的菱形空间,种薯在转动过程中开始进入菱形空间,1个种薯占据1~2个菱形空间,并以侧躺这种相对稳定的状态被滚筛向前输送,进入下一阶段被切分,滚筛后段种薯排列状态如图6c所示。圆台橡胶轮自转方向与滚筛输送方向相反,既增加种薯调整位姿时间,且有利于种薯进入切刀。

纵切种薯,切好的段状薯块被输送至下一阶段。纵切装置结构如图7所示。

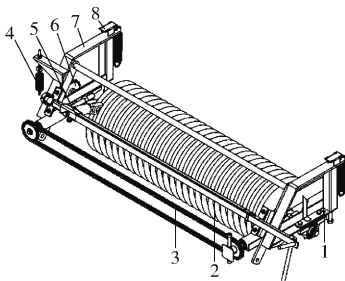


图7 纵切装置结构简图

Fig.7 Structure diagram of longitudinal slitting device

- 1. 右支架 2. 圆盘切刀组件 3. 圆盘切刀调节机构 4. 拉簧
- 5. 磨刀机构 6. 链轮 7. 左支架 8. 行程开关

2.2.2 圆盘切刀的设计及力学分析

圆盘切刀是纵切装置的核心部件,圆盘切刀的设计直接关系到切种的质量。对圆盘切刀的设计主要满足尺寸参数和结构参数。

(1)种薯切分过程的力学分析

圆盘切刀作业时,圆盘切刀切入种薯一定深度,

切刀两侧受到种薯的挤压力、种薯附着力以及其他种薯力的作用,圆盘切刀切入越深受到的阻力越大,所以在满足作业要求的情况下,圆盘切刀下陷越浅,所受阻力越小,而圆盘切刀直径太小,则在同等压力下,可能导致圆盘切刀下陷过深而无法正常工作,对切薯深度造成影响,导致切薯深度过深,圆盘切刀直径太大则增大整机质量,而且整机结构也不允许圆盘切刀直径过大^[12-13]。

种薯切分过程中受力分析如图8所示,种薯受到相邻圆台橡胶轮的支持力 N_1 、 N_2 和摩擦力 f_1 、 f_2 ,圆盘切刀对种薯的支持力 N_3 和摩擦力 f_3 , mg 为种薯所受重力,圆盘切刀对种薯的压力角为 θ ,圆盘切刀下陷深度即圆盘切刀切入圆台橡胶轮深度为 h ,圆盘切刀直径为 D ,种薯中心截面平均直径为 c , ω_2 为圆盘切刀的角速度, v 为种薯输送速度。

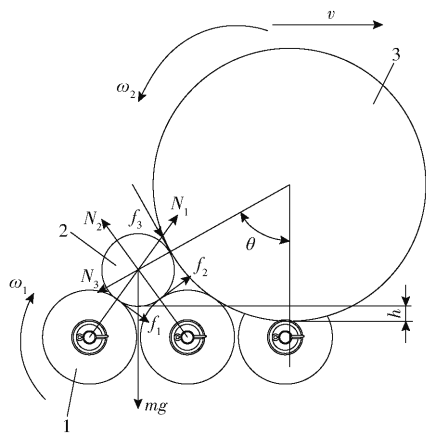


图8 种薯切分受力位置示意图

Fig. 8 Schematic of force location of seed potato cutting

1. 圆台橡胶轮 2. 种薯 3. 圆盘切刀

对图8简化得图9, N_0 为 N_1 、 N_2 的合力, f_0 为 f_1 、 f_2 的合力。

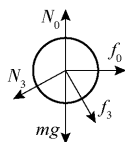


图9 种薯切分简化受力图

Fig. 9 Simplified force diagram of seed potato slicing

竖直方向的平衡条件为

$$N_0 = N_3 \cos \theta + f_3 \sin \theta + mg \quad (5)$$

种薯被完全切分开的条件为

$$f_0 + f_3 \cos \theta \geq N_3 \sin \theta \quad (6)$$

其中

$$f_3 = N_3 \tan \theta_1 \quad (7)$$

$$f_0 = N_0 \tan \theta_0 \quad (8)$$

式中 θ_0 ——种薯与圆盘切刀的摩擦角, ($^\circ$)

θ_1 ——种薯与圆台橡胶轮的摩擦角, ($^\circ$)

将式(7)、(8)代入式(6)得

$$\theta \leq \theta_0 + \theta_1 \quad (9)$$

由图8中位置关系得

$$\cos \theta = \frac{D - 2h - c}{D + c} = 1 - \frac{2h + 2c}{D + c} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得

$$\arccos \left(1 - \frac{2h + 2c}{D + c} \right) \leq \theta_0 + \theta_1 \quad (11)$$

在式(10)中种薯中心截面平均直径 c 为常数,取值为50 mm,圆盘切刀切入圆台橡胶轮深度 h 为20 mm,种薯与圆盘切刀、圆台橡胶轮的摩擦角范围分别为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和 $15^\circ \sim 20^\circ$,各取其上限值 30° 和 20° 计算^[14-17],则由式(11)得,圆盘切刀直径 D 不小于341 mm,考虑到圆盘切刀直径不宜过大^[18],本文取341 mm。

(2)种薯与圆盘切刀接触点的力学分析

由Hertz理论可知,种薯与圆盘切刀的初始接触点为种薯截面上的一个椭圆区域,如图10所示。

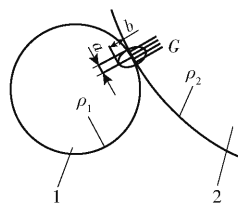


图10 种薯与圆盘切刀接触示意图

Fig. 10 Schematic of contact between seed potato and disc cutter

1. 种薯 2. 圆盘切刀

接触区的等效接触半径 C 为

$$C = \sqrt[3]{\frac{3G}{4} \frac{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}} \quad (12)$$

式中 μ_1 、 μ_2 ——种薯、圆盘切刀的泊松比

E_1 、 E_2 ——种薯、圆盘切刀的弹性模量, MPa

ρ_1 、 ρ_2 ——种薯、圆盘切刀的曲率半径, mm

综合曲率半径为

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (13)$$

综合弹性模量为

$$E = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (14)$$

最大接触应力为

$$G_{\max} = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{6G \frac{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}} \quad (15)$$

总载荷为

$$G = \frac{2}{3} G_{\max} \pi ab \quad (16)$$

式中 a 、 b ——椭圆接触区的长、短半轴长度, mm

种薯与圆盘切刀接触区的压缩量 δ 为

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9}{16}G^2\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right)\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)} \quad (17)$$

对圆盘切刀与种薯接触点分析,得到接触区的最大压缩量和最大接触应力,可指导圆盘切刀的选材以及尺寸参数选择。经计算,圆盘切刀选用 2Cr13 不锈钢,2Cr13 不锈钢淬火状态下硬度高,耐腐蚀性良好,圆盘切刀厚度为 3 mm,开刀宽度为 30 mm,开刀角 7.89°,满足本文设计的圆盘切刀要求。考虑到种薯的长度范围为 60 ~ 180 mm,圆台橡胶轮为 26 个,每两个圆台橡胶轮之间安装一片圆盘切刀,两端各安装一片圆盘切刀,防止漏切,故圆盘切刀数量共计为 27 个,相邻两圆盘切刀间距为 41 mm,即种薯在长度方向每隔 41 mm 被切分成两段。

2.3 横切装置

2.3.1 结构及工作原理

横切装置由胶皮辊、横刀和薯刀梳子等组成。上、下胶皮辊相互对称通过轴承座固定于机架上,横刀安装于上、下胶皮辊之间,薯刀梳子位于横刀前方。横切装置的主要功能是将纵切装置切分的段状薯块沿薯块中心水平切分。作业时,段状薯块由薯刀梳子及胶皮辊引导进入横刀,横刀将薯块水平切分,种薯经过纵切装置和横切装置的二次切分后,输送至下一阶段。横切装置结构如图 11 所示。

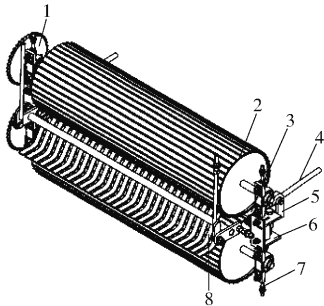


图 11 横切装置结构简图

Fig. 11 Structure diagram of transverse slitting device

1. 链轮 2. 胶皮辊 3. 横刀组 4. 锁紧偏心手柄 5. 右微调座 6. 右夹刀座 7. 轴承座调整螺栓 8. 薯刀梳子

2.3.2 胶皮辊、薯刀梳子设计及参数选择

考虑到整机结构以及种薯的压缩特性,胶皮辊的主体圆筒采用 Q235 - A 普通碳素结构钢,圆筒半径 R 为 100 mm,胶皮辊圆筒外壁依次包裹海绵层和铸胶层,综合材料特性以及整机尺寸,海绵层厚度 h_1 设为 30 mm,铸胶层厚度 h_2 设为 15 mm,二者对薯块均有良好的缓冲作用,铸胶层外均布胶层凸起,凸起半径 r 为 5 mm,以增加对薯块的抓握力。胶皮辊组件剖视图如图 12 所示。

上下胶皮辊关于横刀对称,两胶皮辊中心距 H

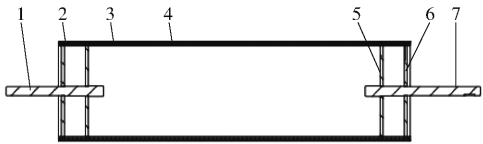


图 12 胶皮辊组件剖视图

Fig. 12 Sectional view of rubber roll assembly

1. 左侧轴头 2. 铸胶层 3. 海绵层 4. 圆筒 5. 内连接板 6. 外连接板 7. 右侧传动轴头

可由胶皮辊左、右轴承座调整螺栓调整。上下胶皮辊位置简图如图 13 所示。

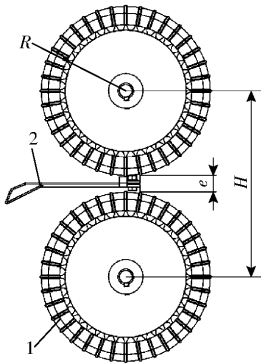


图 13 上下胶皮辊位置简图

Fig. 13 Position diagram of upper and lower rubber rolls

1. 胶皮辊 2. 横刀

上、下胶皮辊中心距 H 为

$$H = 2R + 2h_1 + 2h_2 + 2r + e \quad (18)$$

式中 e ——上、下胶皮辊胶层凸起间距,mm

根据种薯厚度 30 ~ 55 mm,薯块厚度 20 ~ 30 mm,若上下胶皮辊胶层凸起间距 e 过大,则易导致薯块未被切分而通过间隙,薯块漏切,若上下胶皮辊胶层凸起间距 e 过小,则被横刀切分后的薯块不能通过间隙,导致薯块拥堵,影响薯块合格率、薯块盲眼率及种薯损失率。综合考虑胶皮辊材料特性, e 的取值范围设为 15 ~ 35 mm,相应 H 范围为 315 ~ 335 mm。

薯刀梳子的主要作用是将粘在圆盘切刀上的薯块拨下,防止粘刀,引导薯块进入上下胶皮辊间隙。薯刀梳子安装角 γ 过大或过小都不能有效拨下粘刀的薯块,降低薯块合格率,增加种薯损耗率,严重时会造成圆盘切刀停转,影响切块作业。薯刀梳子调节杆的作用是调节薯刀梳子安装角,使其达到最佳的作业效果。薯刀梳子有效安装角范围为 100° ~ 110°。薯刀梳子侧视图如图 14 所示。

2.3.3 横刀切分薯块过程分析

横刀切分薯块过程如图 15 所示。图 15a 中横刀的刀刃与薯块的接触为点接触,当刀刃切入薯块时,刀刃与薯块的接触由点变线,接触范围逐渐增大,最后,薯块被横刀完全切分开,薯块开始离开横刀刀片。在薯块被横刀切分过程中,薯块与横刀相

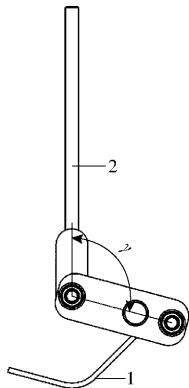


图 14 薯刀梳子侧视图

Fig. 14 Side view of potato knife comb

1. 梳齿 2. 薯刀梳子调节杆

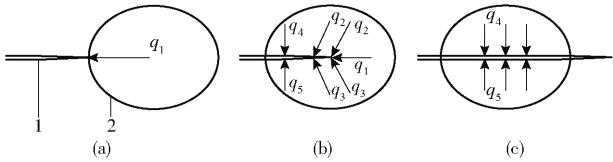


图 15 横刀切分薯块受力分析图

Fig. 15 Stress analysis diagrams of sliced potato block with horizontal knife

1. 横刀 2. 薯块

对位置不同,横刀刀片与薯块的接触长度不断变化。将横刀刀部断面设计为楔形,楔形断面的顶部即为刃口,横刀在切分薯块时,对薯块的作用既有刃口作用也有楔面作用,横刀对薯块的作用力主要为接触应力。横刀所受切分阻力总载荷 $F_q(x)$ 为切分阻应力 $q(x)$ 在切分薯块时刀片与薯块接触长度的积分^[19],即

$$F_q(x) = \int_{l_1} q_1(x) dl_1 + \int_{l_2} q_2(x) dl_2 + \int_{l_3} q_3(x) dl_3 + \int_{l_4} q_4(x) dl_4 + \int_{l_5} q_5(x) dl_5 \quad (19)$$

- 式中 $q_1(x)$ ——薯块对横刀刀部顶端阻应力, N/mm
 $q_2(x)$ ——薯块对横刀刀部楔形上表面的阻应力, N/mm
 $q_3(x)$ ——薯块对横刀刀部楔形下表面的阻应力, N/mm
 $q_4(x)$ ——薯块对横刀上表面的阻应力, N/mm
 $q_5(x)$ ——薯块对横刀下表面的阻应力, N/mm
 l_1 ——薯块与横刀刀部顶端的接触长度, mm
 l_2 ——薯块与横刀刀部侧端上表面的接触长度, mm
 l_3 ——薯块与横刀刀部侧端下表面的接触长度, mm
 l_4 ——薯块与横刀上表面的接触长度, mm
 l_5 ——薯块与横刀下表面的接触长度, mm
 x ——横刀切分薯块的位移, mm

由于刀片与薯块不同的相对位置,刀刃切分薯块时的接触长度在不断变化,使得 $F_q(x)$ 呈现一个波动过程。在初始切分阶段,刀片所受薯块的切割阻力上升较快,薯块内部组织抵抗挤压应力与剪切应力比较强烈,薯块在刀刃的作用下,保持着薯块被压缩与薯块的抵抗压缩力之间的正比关系,即薯块做弹性变形,超过这个极限,当刃口继续压入薯块时,薯块开始出现塑性变形,当切割力超过薯块塑性变形极限后薯块即被切开。由于薯块切割过程很短,在薯块被切分开的瞬间,薯块被分成两部分,被分开的薯块由上、下胶皮辊转动分别带出横刀,薯块沿胶皮辊切线速度方向移动,落入清选装置,继而被输送至下一阶段。

3 样机试验与结果分析

3.1 试验材料与参数指标

3.1.1 试验材料

2019 年 5 月,在山东思代尔农业装备有限公司的试验基地进行种薯切分试验。选取荷兰 15 号一级良种为试验材料,其形状为长椭圆形,经测量长度范围为 60 ~ 180 mm,宽度范围为 45 ~ 80 mm,厚度范围为 30 ~ 55 mm,单个种薯质量范围 20 ~ 300 g,含水率 81% ~ 85%,该品种种薯芽眼分布大致呈现种薯顶部及尾部芽眼稀、侧芽较多的规律。试验所用仪器包括电子秤、游标卡尺等。

3.1.2 试验参数及指标

通过前述切块过程的力学分析和运动学分析,确定影响马铃薯种薯切块机性能的主要因素有滚筛辊子转速、上下胶皮辊中心距以及薯刀梳子安装角。由于滚筛辊子转速由中间电机Ⅱ控制,且其转速便于调整,故选择中间电机Ⅱ转速、上下胶皮辊中心距以及薯刀梳子安装角为试验因素。由预试验确定各因素取值范围:中间电机Ⅱ转速 800 ~ 1 200 r/min、上下胶皮辊中心距 315 ~ 335 mm 以及薯刀梳子安装角 100° ~ 110°。中间电机Ⅱ转速可通过变频器调节,上下胶皮辊中心距可由轴承座调整螺栓调节,薯刀梳子安装角可由薯刀梳子调节杆调整。

马铃薯种薯切块机评价指标目前尚无国家和行业标准。本试验依据山东思代尔农业装备有限公司的企业标准,以薯块合格率、薯块盲眼率以及种薯损耗率为试验指标,考察中间电机Ⅱ转速、上下胶皮辊中心距以及薯刀梳子安装角对试验指标的影响,分析各因素对种薯切分性能的影响规律。每组试验选取 100 个马铃薯种薯,由种薯切块机切分后统计薯块数量,称量种薯质量。

薯块合格率 W_1 指薯块质量 35 ~ 65 g 的薯块数量占薯块总数量的百分比,即

$$W_1 = \frac{n_1}{n_0} \times 100\%$$

(20)

式中 n_1 ——质量在 35 ~65 g 范围内的薯块数量,块
 n_0 ——薯块总数量,块

薯块盲眼率 W_2 指无芽眼的薯块数量占薯块总数量的百分比,即

$$W_2 = \frac{s_1}{n_0} \times 100\%$$

(21)

式中 s_1 ——无芽眼的薯块数量,块

种薯损耗率 W_3 指由清选装置清选下来的种薯碎片的质量占种薯总质量的百分比,即

$$W_3 = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$

(22)

式中 m_0 ——种薯总质量,kg

m_1 ——清选下来的种薯碎片质量,kg

3.2 试验方案及结果分析

3.2.1 试验方案及结果

在前期单因素试验的基础上,采用 Box - Behnken 响应面试验法建立中间电机Ⅱ转速、上下胶皮辊中心距和薯刀梳子安装角与薯块合格率 W_1 、薯块盲眼率 W_2 、种薯损耗率 W_3 之间的数学模型。通过响应曲面法求出最优因素组合^[20-21]。

采用 Design-Expert 8.0.6 软件 Box - Behnken 组合设计法,设计的三因素三水平试验方案如表 2 所示,其中,中心点试验重复 5 次,共进行 17 次试验。表 3 为响应面试验方案及结果^[22-23], X_1 、 X_2 、 X_3 为中间电机Ⅱ转速、上下胶皮辊中心距、薯刀梳子安装角的编码值。

表 2 试验因素与编码

Tab.2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	中间电机Ⅱ转速/	上下胶皮辊中心距/	薯刀梳子安装角/
	(r·min ⁻¹)	mm	(°)
-1	800	315	100
0	1 000	325	105
1	1 200	335	110

3.2.2 试验结果分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 3 的试验结果进行回归拟合分析,得到薯块合格率 W_1 、薯块盲眼率 W_2 和种薯损耗率 W_3 的回归方程,并进行显著性检验^[24-25]。

(1)薯块合格率 W_1 的回归模型

对薯块合格率 W_1 的回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,其结果如表 4 所示。薯块合格率 W_1 的回归模型 P 值(0.013 8)小于 0.05,显著,失拟项的 P 值(0.115 9)大于 0.05,即失拟,不显

表 3 响应面试验方案及结果

Tab.3 Response surface test protocol and results

序号	X_1	X_2	X_3	合格率/ %	盲眼率/ %	损耗率/ %
1	0	0	0	95.25	2.86	9.87
2	1	-1	0	92.32	2.56	15.02
3	1	0	-1	83.49	3.13	13.46
4	-1	0	-1	78.56	2.42	10.66
5	-1	0	1	74.56	2.46	10.21
6	-1	1	0	71.23	3.95	9.62
7	0	0	0	90.21	2.13	9.81
8	0	0	0	91.16	3.02	9.56
9	0	1	1	81.31	3.64	10.21
10	1	0	1	81.23	4.08	13.28
11	-1	-1	0	89.23	1.37	9.57
12	0	-1	-1	87.26	1.98	10.06
13	0	1	-1	83.59	5.89	10.58
14	0	0	0	94.56	2.96	10.03
15	0	-1	1	86.93	2.63	9.25
16	1	1	0	78.26	5.88	13.29
17	0	0	0	90.28	2.46	10.89

表 4 薯块合格率方差分析

Tab.4 Variance analysis of qualified rate of potato block

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	696.16	9	77.35	6.00	0.013 8 *
X_1	59.08	1	59.08	4.58	0.069 6
X_2	213.73	1	213.73	19.57	0.004 7 **
X_3	9.79	1	9.79	0.76	0.412 5
X_1X_2	3.88	1	3.88	0.30	0.600 4
X_1X_3	0.74	1	0.74	0.057	0.817 6
X_2X_3	0.95	1	0.95	0.074	0.793 9
X_1^2	232.11	1	232.11	17.99	0.003 8 **
X_2^2	18.70	1	18.70	1.45	0.267 7
X_3^2	123.34	1	123.34	9.56	0.017 5 *
残差	90.30	7	12.90		
失拟项	66.74	3	22.25	3.78	0.115 9
误差	23.56	4	5.89		
总和	789.45	16			

注:**表示差异极显著($P < 0.01$),*表示差异显著($P < 0.05$),下同。

著,表明薯块合格率 W_1 的回归模型与实际相符。薯块合格率 W_1 的回归方程为

$$W_1 = 92.29 + 2.72X_1 - 5.17X_2 - 1.11X_3 + 0.98X_1X_2 + 0.43X_1X_3 - 0.49X_2X_3 - 7.42X_1^2 + 2.11X_2^2 - 5.41X_3^2$$

(23)

进一步分析该回归方程的各回归项,回归项 X_2 和 X_1^2 对薯块合格率 W_1 的影响极显著($P < 0.01$), X_3^2 对薯块合格率 W_1 的影响显著($P < 0.05$);其他因子影响不显著。

(2)薯块盲眼率 W_2 的回归模型

对薯块盲眼率 W_2 的回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,其结果如表 5 所示。薯块盲眼率 W_2 的回归模型 P 值(0.002 3)小于 0.01,极显著,失拟项的 P 值(0.209 0)大于 0.05,即失拟,不显著,表明盲眼率 W_2 的回归模型与实际相符。薯块盲眼率 W_2 的回归方程模型为

$$W_2 = 2.69 + 0.68X_1 - 1.35X_2 - 0.076X_3 + 0.18X_1X_2 + 0.23X_1X_3 - 0.72X_2X_3 + 0.12X_1^2 + 0.36X_2^2 + 0.22X_3^2$$

(24)

表 5 薯块盲眼率方差分析

Tab.5 Variance analysis of blind rate of potato block					
方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	22.91	9	2.55	11.04	0.002 3 **
X_1	3.71	1	3.71	16.11	0.005 1 **
X_2	14.63	1	14.63	63.48	<0.000 1 **
X_3	0.047	1	0.047	0.20	0.666 9
X_1X_2	0.14	1	0.14	0.59	0.466 1
X_1X_3	0.21	1	0.21	0.90	0.374 9
X_2X_3	2.10	1	2.10	9.12	0.019 4 *
X_1^2	0.061	1	0.061	0.27	0.621 7
X_2^2	1.69	1	1.69	7.32	0.030 4 *
X_3^2	0.20	1	0.20	0.85	0.387 2
残差	1.61	7	0.23		
失拟项	1.04	3	0.35	2.39	0.209 0
误差	0.58	4	0.14		
总和	24.52	16			

进一步分析该回归方程的各回归项,回归项 X_1 和 X_2 对薯块盲眼率 W_2 的影响极显著($P < 0.01$); X_2X_3 和 X_2^2 对薯块盲眼率 W_2 的影响显著($P < 0.05$); 其他因子影响不显著。

(3)种薯损耗率 W_3 的回归模型

对种薯损耗率 W_3 的回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,其结果如表 6 所示。种薯损耗率 W_3 的回归模型 P 值(0.003 7)小于 0.01,极显著,失拟项的 P 值(0.136 2)大于 0.05,即失拟,不显著,表明种薯损耗率 W_3 的回归模型与实际相符。种薯损耗率 W_3 的回归方程模型为

$$W_3 = 10.03 + 1.87X_1 - 0.025X_2 - 0.23X_3 + 0.44X_1X_2 + 0.067X_1X_3 - 0.11X_2X_3 + 1.86X_1^2 + 0.017X_2^2 + 0.010X_3^2$$

(25)

表 6 种薯损耗率方差分析

Tab.6 Variance analysis of seed potato loss rate					
方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	44.01	9	4.89	9.40	0.003 7 **
X_1	28.09	1	28.09	54.00	0.000 2 **
X_2	5.000×10^{-3}	1	5.000×10^{-3}	9.613×10^{-3}	0.924 6
X_3	0.41	1	0.41	0.79	0.404 4
X_1X_2	0.79	1	0.79	1.52	0.257 0
X_1X_3	0.018	1	0.018	0.035	0.856 8
X_2X_3	0.048	1	0.048	0.093	0.769 2
X_1^2	14.57	1	14.57	28.01	0.001 1 **
X_2^2	1.253×10^{-3}	1	1.253×10^{-3}	2.409×10^{-3}	0.962 2
X_3^2	4.424×10^{-4}	1	4.424×10^{-4}	8.505×10^{-4}	0.977 5
残差	3.64	7	0.52		
失拟项	2.61	3	0.87	3.36	0.136 2
误差	1.03	4	0.26		
总和	47.65	16			

进一步分析该回归方程的各回归项,回归项 X_1 和 X_1^2 的 P 值均小于 0.01,对薯损耗率 W_3 的影响极显著,其他因子影响不显著。

由方差分析可得,三因素对薯块合格率 W_1 的影响由大到小依次为 X_2 、 X_1 、 X_3 ;对薯块盲眼率 W_2 的影响由大到小依次为 X_2 、 X_1 、 X_3 ;对种薯损耗率 W_3 影响由大到小依次为 X_1 、 X_3 、 X_2 。

3.2.3 响应曲面分析

(1)对薯块合格率 W_1 的影响规律

对薯块合格率应用响应曲面法分析,结果如图 16 所示。由式(23)和表 4 可知,在各因素中,上下胶皮辊中心距对薯块合格率影响最大,其次是中间电机Ⅱ转速,薯刀梳子安装角影响最小,各因素交互作用不显著。由图 16a 可知,薯块合格率随着中间电机Ⅱ转速增加先升后降,随着上下胶皮辊中心距的加大而降低。由图 16b 可知,薯块合格率随着中间电机Ⅱ转速增加先升后降,随着薯刀梳子安装角的加大先升高后降低。由图 16c 可知,薯块合格

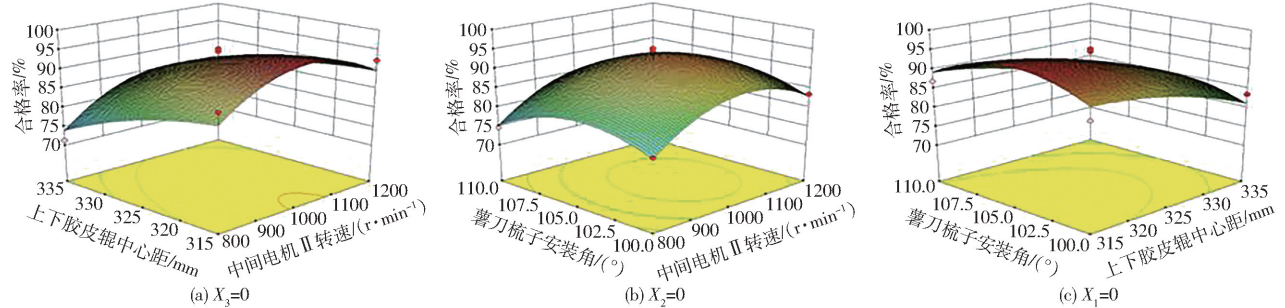


图 16 各因素对薯块合格率的影响

Fig. 16 Influence of various factors on qualified rate of potato lumps

率随着上下胶皮辊中心距增加先升后降,随着薯刀梳子安装角的加大而降低。

(2)对薯块盲眼率 W_2 的影响规律

对薯块盲眼率应用响应曲面法分析,结果如图 17 所示。由式(24)和表 5 可知,在各因素中,上下胶皮辊中心距对薯块盲眼率影响最大,其次是中间电机Ⅱ转速,薯刀梳子安装角影响最小,上下胶皮辊中心

距和薯刀梳子安装角交互作用影响显著。由图 17a 可知,随着上下胶皮辊中心距减小,中间电机Ⅱ转速降低,薯块盲眼率逐渐减小。由图 17b 可知,薯块合格率随着中间电机Ⅱ转速增加先升后降,随着薯刀梳子安装角的加大先升高后降低。由图 17c 可知,随着薯刀梳子安装角的增加,薯块盲眼率的变化不大,随着上下胶皮辊中心距的增加,薯块盲眼率明显上升。

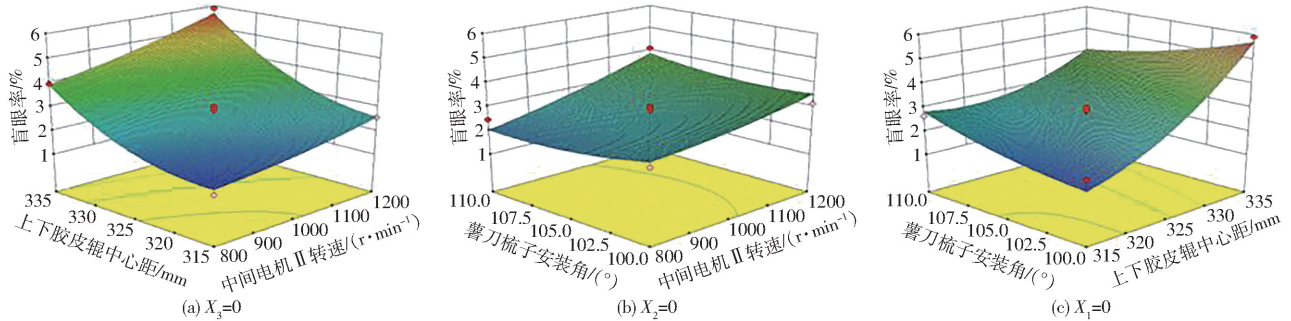


图 17 各因素对薯块盲眼率的影响
Fig. 17 Influence of various factors on blind rate of potato block

(3)对种薯损耗率 W_3 的影响规律

对薯块损耗率应用响应曲面法分析,结果如图 18 所示。由式(25)和表 6 可知,在各因素中,中间电机Ⅱ转速对薯块损耗率影响最大,其次是薯刀梳子安装角,上下胶皮辊中心距影响最小,各因素交互作用不显著。由图 18a 可知,种薯损耗率随着中

间电机Ⅱ转速增加而升高,随着上下胶皮辊中心距的加大损耗率变化不大。由图 18b 可知,种薯损耗率随着中间电机Ⅱ转速增加而升高,随着薯刀梳子安装角的加大升高。由图 18c 可知,随着上下胶皮辊中心距和薯刀梳子安装角的变化,种薯损耗率的变化不明显。

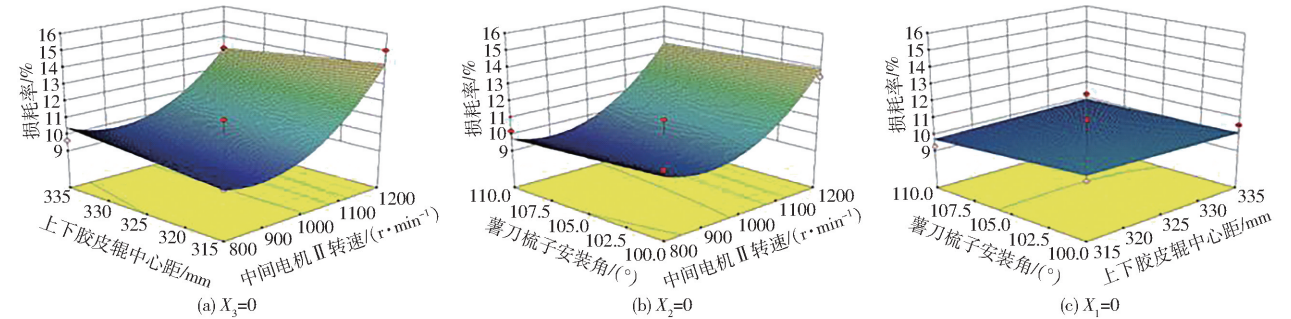


图 18 各因素对种薯损耗率的影响
Fig. 18 Influence of various factors on loss rate of seed potato

3.2.4 最佳参数优化分析

在本试验中,由于种薯切块性能指标受到多因素影响,为实现所切薯块的合格率较高、盲眼率较低以及种薯损耗率尽可能低的目的,采用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化功能求该切块机的最佳参数组合。

构建多目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max W_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min W_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min W_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases}$$

优化结果为中间电机Ⅱ转速 965.76 r/min、上下胶皮辊中心距 315 mm、薯刀梳子安装角 104.61° 时,薯块合格率 94.86%,薯块盲眼率 1.84%,种薯损耗率 9.72%。

3.3 验证试验

2019 年 5 月中旬,在山东思代尔农业装备有限公司进行 3 次重复验证试验。采用荷兰 15 号种薯,按照最优参数组合试验。对 3 次试验结果取平均值,试验结果见表 7。

由表 7 可知,薯块合格率、薯块盲眼率及种薯损耗率与优化值相比,其相对误差均不大于 5.04%,切分后薯块长 30~45 mm,宽 30~40 mm,厚 20~30 mm,质量范围 35~65 g,满足马铃薯种薯切块要

求。马铃薯种薯切块机种薯切块过程如图 19 所示。

表 7 试验结果			
Tab. 7 Test result			%
参数	合格率	盲眼率	损耗率
预测值	94. 86	1. 84	9. 72
试验值	92. 13	1. 91	10. 21
相对误差	2. 88	3. 80	5. 04



图 19 马铃薯种薯切块机切分前后工作场景
Fig. 19 Working scenarios of seed potatoes before and after cutting machine

4 结论

(1) 针对马铃薯种薯需求量大、切种效率低等

问题,设计了一种适用于机械化规模作业的定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机。该机可一次完成种薯分选、种薯排列等种薯切块前期作业和二次切块、薯块喷药、薯块清选等多种作业,满足种薯切块的农艺要求,较传统人工切块省时、省力。

(2) 通过对马铃薯种薯切块机关键部件进行理论分析及运动学分析,确定了相关结构参数及作业参数,得出影响马铃薯种薯切块机作业性能的主要因素取值范围:中间电机Ⅱ转速 800 ~ 1 200 r/min、上下胶皮辊中心距 315 ~ 335 mm 以及薯刀梳子安装角 100° ~ 110°。

(3) 多因素响应曲面试验表明:上下胶皮辊中心距对薯块合格率及薯块盲眼率的影响显著,影响由大到小依次为上下胶皮辊中心距、中间电机Ⅱ转速、薯刀梳子安装角;中间电机Ⅱ转速对种薯损耗率影响显著,影响由大到小依次为中间电机Ⅱ转速、薯刀梳子安装角、上下胶皮辊中心距。通过优化求解并进行了验证试验,结果表明,当中间电机Ⅱ转速为 965. 76 r/min、上下胶皮辊中心距为 315 mm、薯刀梳子安装角为 104. 61° 的最优参数组合时,薯块合格率为 92. 13%,薯块盲眼率为 1. 91%,种薯损耗率为 10. 21%,与预测值相比,薯块合格率、薯块盲眼率及种薯损耗率的相对误差分别为 2. 88%、3. 80%、5. 04%,均能满足种薯切块作业要求。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] KOGA N, KAJIYAMA T, SENDA K, et al. Energy efficiency of potato production practices for bioethanol feedstock in Northern Japan[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 44:1-8.

[3] 杨炳南, 张小燕, 赵凤敏, 等. 不同马铃薯品种的不同加工产品适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20):301-308. YANG Bingnan, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Fengmin, et al. Suitability evaluation of different potato cultivars for processing products[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 301-308. (in Chinese)

[4] 李紫辉, 温信宇, 吕金庆, 等. 马铃薯种植机械化关键技术研究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)

[5] 许英超, 王相友, 印祥, 等. 基于多元非线性回归分析的马铃薯加工品质特性预测[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):366-373. XU Yingchao, WANG Xiangyou, YIN Xiang, et al. Potato processing quality characteristics prediction based on multivariate nonlinear regression analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):366-373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180443&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.043. (in Chinese)

[6] 魏忠彩, 李学强, 张宇帆, 等. 马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J]. 农机化研究, 2017, 39(9):1-6. WEI Zhongcai, LI Xueqiang, ZHANG Yufan, et al. Reviews on technology and equipment of potato production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9):1-6. (in Chinese)

[7] BORGMANN R. Seed potato cutting system with blade positioning mechanism: US201715407190[P]. 2018-07-19.

[8] 东北农业大学. 犁刀式马铃薯切块机:201820577977.3[P]. 2018-12-18.

[9] 周树林. 舀勺定刀式马铃薯种薯切块机:2015101801213[P]. 2015-08-12.

- [10] 山东农业大学. 一种马铃薯种薯自动切块机:201810434813X[P]. 2018-08-24.
- [11] 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.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, 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. 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)
- [12] 田忠恩. 马铃薯挖掘机防堵系统的设计与性能试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
TIAN Zhongen. Design and performance test of anti blocking system of potato excavator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [13] 吕彬. 大豆免耕播种机圆盘刀性能分析与开沟器设计及试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
LÜ Bin. Performance analysis of disc cutter and design and experimental research of trencher for soybean no till planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [14] 华正雨. 挠性圆盘式蔓越莓移栽机设计与仿真分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
HUA Zhengyu. Design and simulation analysis of flexible disc cranberry transplanter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [15] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):125-135, 142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):125-135, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180514&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.014. (in Chinese)
- [16] 王泽明. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
WANG Zeming. Design and experimental research on seed metering device of spoon potato seeder[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [17] 冯斌. 收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2018.
FENG Bin. Study on the physical characteristics and damage mechanism of potato tuber during harvest[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 张守德. 2BQM-6型免耕播种机结构设计及开沟器的有限元分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
ZHANG Shoude. Structural design of 2BQM-6 no till planter and finite element analysis of ditcher[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 初旭宏. 马铃薯秧茎切割收集关键部件设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
CHU Xuhong. Design and experimental research on key components of potato seedling cutting and collection[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [20] 李锋. 鲜香菇菇柄切除设备试验研究[D]. 南京:南京农业机械化研究所, 2018.
LI Feng. Experimental study on the removal equipment of fresh mushroom stalk[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural Mechanization Research Institute, 2018. (in Chinese)
- [21] 陈军, 赵健, 陈云, 等. 振刷式枸杞采收机设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1):152-161.
CHEN Jun, ZHAO Jian, CHEN Yun, et al. Design and experiment on vibrating and comb brushing harvester for *Lycium barbarum*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):152-161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.016. (in Chinese)
- [22] 林静, 张桐嘉, 陈彬, 等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2):28-39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):28-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.004. (in Chinese)
- [23] 耿端阳, 王骞, 鹿秀凤, 等. 基于激振理论的玉米多棱摘穗辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):124-132.
GENG Duanyang, WANG Qian, LU Xiufeng, et al. Design and experiment on vertical polygonal poller snapping ears of corn harvester based on excitation theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):124-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190514&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.014. (in Chinese)
- [24] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- [25] 葛宜元. 梁秋艳, 王桂莲. 试验设计与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2015.