

多子芋收获机离心回转式根土分离装置设计与试验

刘婉茹*, 张国忠*, 刘浩蓬, 周 勇, 王洪昌, 裴 蕾, 李子涵

(华中农业大学工学院, 武汉 430070; 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 针对芋头采挖过程中传统栅条式筛分装置存在土壤破碎质量差、根土分离效果不佳等问题, 该研究结合多子芋生长特点, 设计了一种离心回转式根土分离装置。构建芋头根土复合体碰撞力学模型和土块冲击破碎力学模型, 明晰了影响根土分离效果的主要因素为弹齿倾角、回转筛转速和柔性拨指长径比, 并确定取值范围。采用 EDEM-RecurDyn 耦合方法开展仿真试验, 探究芋头根土复合体在筛分过程中经历平衡、失稳、土壤破碎、碰撞翻滚和土壤脱落等全过程动态变化规律, 单因素试验确定柔性拨指直径 14 mm, 长度 45 mm; 以弹齿倾角、回转筛转速和土壤喂入量为影响因素。以根土分离率和芋头最大冲击力为评价指标, 开展二次回归正交旋转组合试验, 求解最优参数组合为弹齿倾角 16.00°、回转筛转速 110.00 r/min、土壤喂入量 14.00 kg/s 时, 根土分离率最优为 93.36%, 芋头碰撞冲击力峰值最小为 150.73 N。田间试验结果表明多子芋收获机根土分离率为 92.06%, 破损率为 4.86%, 与回归模型预测结果相差 1.39%, 相较传统栅条式根茎类收获机根土分离率提升了 8.61%, 满足多子芋根土分离要求。研究结果可为根土复合体破碎分离特性及根茎类作物高效低损采收装备设计提供参考。

关键词: 农业机械; 仿真; 根土复合体; 多子芋; 根土分离; 试验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406052

中图分类号: S225.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0014-13

刘婉茹, 张国忠, 刘浩蓬, 等. 多子芋收获机离心回转式根土分离装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 14-26. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406052 <http://www.tcsae.org>

LIU Wanru, ZHANG Guozhong, LIU Haopeng, et al. Design and experiment of the centrifugal rotary root-soil separation device for a multiple taro harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 14-26. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406052 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

芋属天南星科多年生块茎植物, 2022 年世界芋头收获面积 179.37 万 hm^2 , 总产量 1 239.45 万 t, 中国是世界最大的芋头出口国, 单产是世界平均水平的 2.75 倍^[1-2], 主产区为长江流域、珠江流域和台湾省等地, 在推进乡村振兴中发挥重要促进作用。芋头生产机械化中收获环节主要以人工为主, 缺少专用采收装备。芋头收获时, 其根系与土壤粘附、裹挟、缠绕, 形成以芋头块茎为基体、根系为增强纤维的“根土复合体”结构^[3], 致使采用传统栅条式筛分装置采挖芋头时, 存在土壤破碎质量差、根土分离效率低等实际生产问题^[4], 研发芋头根土复合体分离装置、提高根茎类作物高效低损采收装备需求迫切。

国内外相关专家学者基于根茎类作物采收需求, 对根土分离技术与装置开展了深入研究, 德国 Holmer 公司研发了 Vario Cleaner 输送分离系统, 通过无级调控反转辊个数和转速, 实现甜菜块根与土壤的高效分离和低损

收获; GRIMME 公司研发了多级除杂分离装置, 柔性分离辊对马铃薯不同土壤条件均具有适应性^[5]; 美国 Kelley Manufacturing 公司结合振动筛和可调节气流, 实现了花生土壤高效分离^[6]; 杨然兵等^[7]设计了一种左右螺旋对称式去土辊与光辊组合的马铃薯收获机输送分离装置; 马旭等^[8]设计了一种滑梳式辊指虎杖根土分离装置, 减缓了辊指与根系的冲击; 武涛^[9]采用双辊碾压脱土机构和柔性飞锤击打脱土机构进行了玉米根茬土壤分离; 王春光等^[10]探究了土块在升运链上受冲击、分散、剪切等作用实现薯土分离的过程; 陶桂香等^[11]试验发现筛条-筛板组合式筛面根土分离性能优于全筛条或全筛板式筛面。综上所述, 目前芋头根土分离装备及结构形式国内外研究较少, 相关作物常采用振动、揉搓和滑梳等结构形式^[12-13]实现根土分离, 但冲击力过大或冲击时间过长易导致芋头损伤。

计算机仿真技术是当前探究土壤破碎和根土分离的有效手段, 戴靖沛等^[14]通过仿真分析植物根系土壤复合体三轴压缩作用下的变形破碎规律, 发现根系加固致使根土复合体承受应力增强; 解开婷^[15]建立三七根土复合体离散元模型, 探究了根土复合体的振动分离碰撞特性; 魏忠彩等^[16]采用 EDEM-RecurDyn 耦合仿真方法分析了马铃薯土壤混合物的破碎分离过程; 杨然兵等^[17]建立了块茎-根系-土壤离散元模型, 分析了马铃薯根系的挖掘过程和输送过程。芋头有槟榔芋以及多子芋等多个品种, 其中多子芋根系密集发达, 其根系与土壤粘附、裹挟、

收稿日期: 2024-06-07 修订日期: 2024-08-05

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项资助项目 (CARS-24-D-02);

湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201934)

作者简介: 刘婉茹, 博士生, 研究方向为农业机械设计与方法。

Email: liuwanru@webmail.hzau.edu.cn

※通信作者: 张国忠, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

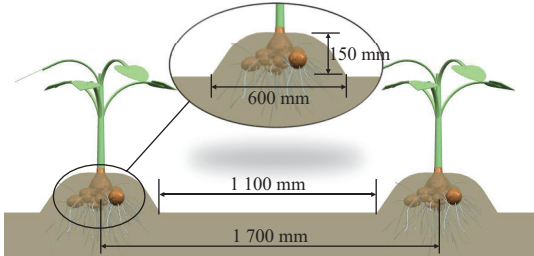
缠绕，形成的网络加筋固土结构导致土壤破碎和根土分离难度增加，结合计算机仿真技术建立多子芋块茎-根系-土壤复合体离散元模型，可为探究根土分离装置的工作性能提供重要依据。

为此，本文以湖北省种植面积最大的多子芋为研究对象，参考朱术云等^[18]通过离心力提供冲击力以此来调控采矿过程中原岩压力的方法，结合课题组根茎类收获相关研究经验^[13,19]，提出一种离心回转式根土分离技术，设计一种离心回转式根土分离装置，采用 DEM-MFBD 耦合方法开展仿真试验，分析关键部件结构与工作参数对根土分离性能的影响，并进行田间验证，以期解决上述问题，并冀期为根土复合体破碎分离特性分析及根茎类作物高效低损采收装备设计提供参考。

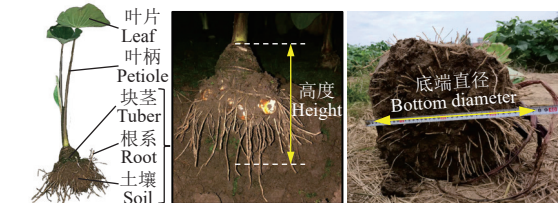
1 多子芋种植农艺与尺寸参数

湖北省汉川市杨林沟镇为多子芋优势产区，品种以乌梗粘为主，种植模式为单行宽垄，收获期垄宽 600 mm，垄高 150~200 mm，垄形尺寸如图 1a 所示。

2022 年 9 月开展现场调查，发现收获期芋头根系与土壤粘附、裹挟、缠绕，形成以芋头块茎为基体、根系为增强纤维的复合体结构，为此，提出定义芋头块茎-根系-土壤形成的团聚体称为“芋头根土复合体”。芋头根土复合体呈锥球状，随机选取健康无病害个体样本 25 个，测量其尺寸，经统计分析得到底端最大处直径约 250~350 mm，沿底端最大值处向上至主茎根部高度约 180~200 mm，芋头根土复合体生长特征及测量如图 1b 所示。



a. 多子芋收获期垄形尺寸
a. Ridge size of multiple taro during harvest



b. 多子芋植株和根土复合体
b. Multiple taro plant and root-soil composite

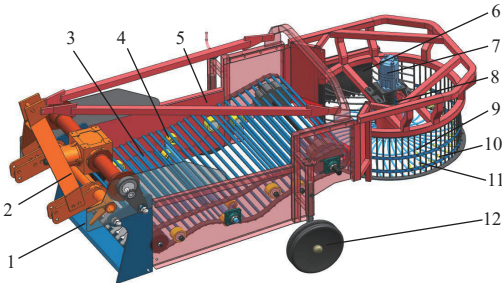
图 1 多子芋垄形及根土复合体特征
Fig.1 Ridge and root-soil composite characteristics of multiple taro

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

结合收获农艺要求，设计了一种多子芋收获机，主

要由传统栅条式筛分装置和根土分离装置组成，其中栅条式筛分装置包括三点悬挂机构、振动挖掘铲、栅条式筛面、传动系统和限深轮等组成，离心回转式根土分离装置是芋头根土分离的核心部件，由离心回转筛、碰撞导流筛、柔性拨指、霍尔传感器、液压马达、橡胶挡帘等组成，如图 2 所示。



1. 振动挖掘铲 2. 三点悬挂机构 3. 栅条式筛分装置 4. 抖动轮 5. 机架
6. 橡胶挡帘 7. 液压马达 8. 霍尔传感器 9. 离心回转筛 10. 柔性拨指
11. 碰撞导流筛 12. 限深轮
1. Vibrating excavator 2. Three-point suspension mechanism 3. Grating
type screening device 4. Shaking wheel 5. Frame 6. Rubber curtain
7. Hydraulic motor 8. Hall sensor 9. Centrifugal rotary screen 10. Flexible
finger 11. Collision guide screen 12. Depth limiting wheel

图 2 多子芋收获机结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of multiple taro harvester structure

2.2 工作原理

该机三点悬挂于拖拉机尾部，动力输出轴将动力传递至振动挖掘铲和栅条式筛分装置，通过液压系统调节离心回转筛转速，霍尔传感器实时监测转速值，通过限深轮调节挖掘铲入土深度。作业时，振动挖掘铲将芋头及周围土壤一并挖出，在栅条式筛分装置抖动作用下筛分一部分土壤，并将芋头根土复合体输送至离心回转式根土分离装置，在离心回转筛作用下根土复合体与碰撞导流筛侧壁的柔性拨指发生碰撞，受离心力和冲击力共同作用，进一步实现土壤破碎与根土分离，分离后的芋头侧向抛送至垄沟，完成收获。

栅条式筛分装置作用是将芋头根土复合体输送至离心回转式根土分离装置中，离心回转式根土分离装置的结构参数与工作参数对土壤破碎与根土分离的影响作为本研究重点，多子芋收获机技术参数及栅条式筛分装置工作参数如表 1 所示。

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters		
参数 Parameter	数值 Values	
整机尺寸 (长×宽×高)/mm	2 230×900×800	
配套动力/kW	≥50	
整机质量/kg	420	
作业幅宽/mm	900	
挖掘深度/mm	0~350	
栅条式筛面倾角/(°)	18	
抖动轮频率/Hz	2	
抖动轮振幅/mm	30	
筛分装置驱动轮转速/(r·min ⁻¹)	180	

3 关键部件设计

3.1 离心回转筛

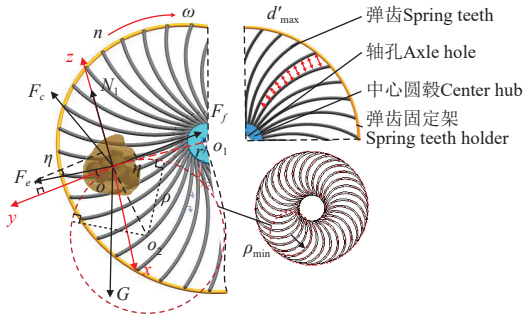
为提升土壤破碎性能，延长筛分路径，提出使用离

心力提供动力,对根土复合体产生周期性碰撞冲击,并使其不断翻滚实现根土分离,依据此原理设计离心回转筛。由于离心回转筛半径和转速影响碰撞冲击力,弹齿曲率半径和弹齿倾角影响碰撞轨迹,因此,对离心回转筛半径、转速、弹齿曲率半径和弹齿倾角进行计算分析。

3.1.1 离心回转筛半径

离心回转筛由弹齿、中心圆毂和弹齿固定架组成,如图3所示。 o_1 为离心回转筛中心, o 为根土复合体质心, o_3 为弹齿圆弧中心,为保证芋头在筛面上的顺利输送,回转筛半径最小值 d_{min} 应大于芋头根土复合体直径最大值 D_{max} ,即:

$$d_{min} \geq D_{max} \quad (1)$$



注: ω 为根土复合体的旋转角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为离心回转筛转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$; N_1 为弹齿对根土复合体的支持力, N; F_c 为弹齿对根土复合体的科氏力, N; F_g 为根土复合体所受离心力, N; G 为根土复合体重力, N; F_f 为弹齿对根土复合体的摩擦力, N; ρ_{min} 为离心回转筛弹齿最小曲率半径, mm; d'_{max} 为最大弹齿间隙, mm; η 为节距角, $^\circ$; r 为根土复合体质心距旋转中心的距离, mm; ρ 为弹齿曲率半径, mm。

Note: ω is the rotation angular velocity of the taro root-soil composite, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. n is the rotating speed of the centrifugal rotary screen, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$; N_1 was the support force of elastic teeth on taro root-soil composite, N; F_c is the coriolis force of elastic teeth on the taro root-soil composite, N; F_g is the centrifugal force of the taro root-soil composite, N; G is the gravity of root-soil composite, N; F_f is the friction force of elastic teeth on taro root-soil composite, N; ρ_{min} is the minimum radius of curvature of the elastic teeth of the centrifugal rotary screen, mm; d'_{max} is the maximum elastomer gap, mm; η is the pitch angle, $^\circ$; r is the radius of the centroid position of the taro root-soil composite, mm; ρ is the curvature radius of the elastic tooth, mm.

图3 根土复合体在离心回转筛上的受力分析

Fig.3 Force analysis of root-soil composite on centrifugal rotary screen

离心回转筛半径越大,筛分路径越长,线速度越大,提供的冲击力越大,增大冲击力度、增加碰撞冲击时间或者延长回转筛面均有利于土壤的脱落,但过大的冲击力会导致土壤破碎能量浪费,也易造成芋头块茎损伤。

芋头根土复合体受离心力作用紧贴导流筛内壁作业时,此时筛分路径最大值 L_{max} 为

$$L_{max} = 2\pi d_{max} \quad (2)$$

当2个及以上芋头根土复合体同时在筛面上时,靠近旋转主轴的根土复合体因线速度较小,受到的碰撞冲击力越小,根土分离效果变差。因此,设计离心回转筛半径最大值限定条件为允许不超过2个芋头根土复合体在回转筛通道内作业,最大回转筛半径 d_{max} 与根土复合体直径最小值 D_{min} 应满足:

$$d_{max} \leq 2D_{min} \quad (3)$$

经测量统计芋头根土复合体底端直径 $D=250\sim 350\text{ mm}$, $D_{max}=350\text{ mm}$,高度 $H=180\sim 200\text{ mm}$,由式(1)和式(3)计算离心回转筛最小半径 $d_{min}=350\text{ mm}$,最大半径 $d_{max}=500\text{ mm}$,整机作业幅宽 900 mm ,设计回转筛半径 $d=450\text{ mm}$,圆毂半径 60 mm ,旋转轴半径 17.5 mm 。

3.1.2 弹齿曲率半径

离心回转筛在传统直栅条基础上增加了离心力和弹齿切向力,弹齿切向力由弹齿曲率半径决定。以离心回转筛上处于稳定输送阶段的芋头根土复合体为研究对象开展受力分析,如图3所示,以质心位置为坐标原点 o ,建立 oxy 空间坐标系, z 轴垂直于离心回转筛面, x 轴垂直于质心所处的弹齿切线方向, y 轴平行于弹齿切线方向。

在 oxy 和 oxz 平面,根据牛顿第二定律有:

$$\begin{cases} F_x = F_c - F_e \sin \eta \\ F_y = F_e \cos \eta - F_f \end{cases} \quad (4)$$

$$F_f = \mu N_1 \quad (5)$$

$$F_e = m\omega v \quad (6)$$

$$F_c = -2m\omega v \quad (7)$$

式中 m 为芋头根土复合体质量, kg; F_x 为沿 x 轴方向的合力, N; F_y 为沿 y 轴方向的合力, N; g 为重力加速度, m^2/s^2 ; μ 为根土复合体与筛面的摩擦系数; v 为根土复合体在筛面上的线速度, m/s 。

离心回转筛弹齿曲率半径 ρ 与曲率 s 满足:

$$\rho = \frac{1}{s} \quad (8)$$

$$s = \frac{|\beta|}{|l|} \quad (9)$$

式中 β 为芋头根土复合体质心切线方向角, $^\circ$; l 为弹齿弧长, $^\circ$ 。

结合三角形定理:

$$\tan(90^\circ - 2\eta) = \frac{r}{\rho - r \cos(90^\circ - \eta)} \quad (10)$$

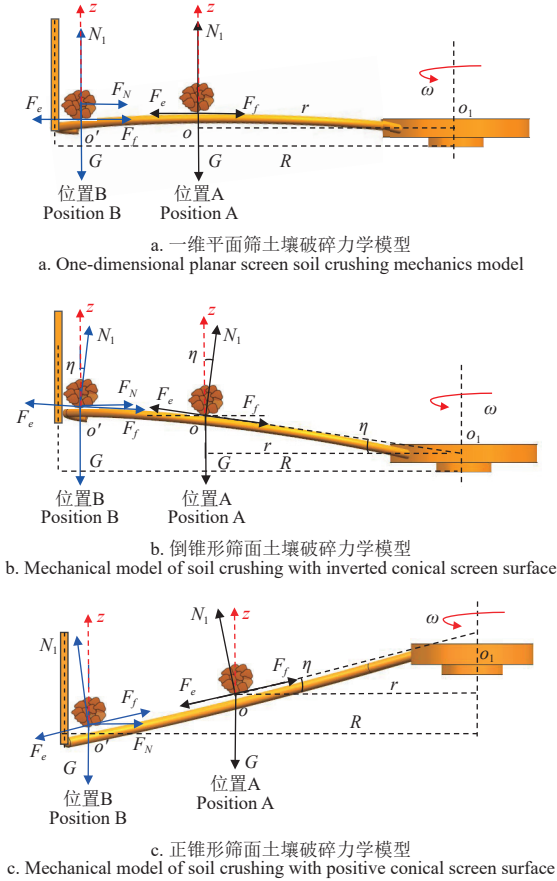
则可得曲率半径 ρ 为

$$\rho = \frac{r(-4F_f m \omega v - 4F_f^2 m \omega v_c - 2m^2 \omega^2 v^2)}{2F_f^2 - m^2 \omega^2 v^2} \quad (11)$$

实际测量统计芋头根土复合体平均质量 m 约 $3.73 \pm 0.12\text{ kg}$,根土复合体与弹齿间最大摩擦角 $\psi=13.6^\circ$,摩擦系数 $\mu=0.24^{[20-21]}$,结合3.1.1节分析,离心回转筛底端直径 $D=900\text{ mm}$,参考马铃薯与65Mn钢临界损伤碰撞速度 $2.344\text{ m/s}^{[10]}$,由式(11)计算弹齿曲率半径最大值 $\rho_{max}=435\text{ mm}$ 。最大弹齿间隙 d'_{max} 决定了芋头能否顺利收集,田间统计采收芋头最小尺寸为 30 mm ,为减小筛分损失,设计弹齿直径 10 mm ,弹齿数量36个,节距角 $\eta=10^\circ$,弹齿最大间隙 $d'_{max}=28.76\text{ mm}$,能够保证最小尺寸芋头不掉落。为使弹齿最外侧不发生干涉,计算弹齿曲率半径最小值为 270 mm 。弹齿曲率半径范围为 $270\sim 435\text{ mm}$,弹齿曲率半径取 350 mm 。

3.1.3 弹齿倾角

结合 3.1.2 节分析, 在 o_1oz 平面, 弹齿具有一定倾斜角度, 可延长筛分路径。定义弹齿倾角 α 为弹齿横截面与水平面之间的夹角, 以土壤为对象, 如图 4 所示, 取弹齿中间 (位置 A) 和弹齿最外侧与导流筛碰撞 (位置 B) 两个位置, 建立土壤在一维平面筛、倒锥形筛面和正锥形筛面上的力学模型, 分析弹齿倾斜方向和倾斜角度对碰撞冲击力的影响。



注: F_N 为碰撞导流筛对土壤的碰撞冲击力; N ; α 为弹齿横截面与水平面之间的夹角, ($^\circ$); R 为回转筛半径, m。
Note: F_N is the impact force of collision diversion screen on soil; N ; α is the angle between the cross section of the elastic tooth and the horizontal plane, ($^\circ$); R is the radius of the rotary screen, m.

图 4 不同筛面弹齿倾角对土壤的作用力分析

Fig.4 Analysis of the effects of different screen tooth inclination angles on soil stress

如图 4a, 在 o_1oz 平面, 对位置 A 的土壤有:

$$\begin{cases} F_e - F_f = 0 \\ G - N_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

土壤在位置 B 处与导流筛碰撞冲击, 在 $o_1o'z$ 平面内:

$$F_e - F_f - F_N = 0 \quad (13)$$

如图 4b, 在 o_1oz 平面, 对位置 A 的土壤有:

$$\begin{cases} G + F_f \sin \alpha - F_e \sin \alpha - N_1 \cos \alpha = 0 \\ F_e \cos \alpha - F_f \cos \alpha - N_1 \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (14)$$

土壤在位置 B 处与导流筛碰撞冲击, 在 $o_1o'z$ 平面内有:

$$F_e \cos \alpha - F_f \cos \alpha - N_1 \sin \alpha - F_N = 0 \quad (15)$$

如图 4c, 在 o_1oz 平面, 对位置 A 的土壤有:

$$\begin{cases} G - F_f \sin \alpha + F_e \sin \alpha - N_1 \cos \alpha = 0 \\ F_e \cos \alpha - F_f \cos \alpha + N_1 \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (16)$$

土壤在位置 B 处与导流筛碰撞冲击, 在 $o_1o'z$ 平面内有:

$$F_e \cos \alpha - F_f \cos \alpha + N_1 \sin \alpha - F_N = 0 \quad (17)$$

分析可知, 正锥形筛面上的土壤有向弹齿外侧滑移的趋势, 在相同角速度作用下, 受自身重力影响, 土壤团聚体与碰撞导流筛产生的冲击力大小顺序为正锥形筛面、一维平面筛、倒锥形筛面, 因此筛面设计为正锥形。

联立式 (5) ~ (6) 和式 (16) ~ (17), 计算碰撞导流筛对土壤的碰撞冲击力 F_N 为

$$F_N = \frac{m\omega v + G(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \quad (18)$$

结合实际测量和文献 [21], 崩解根土复合体且不压溃芋头的临界力为 477.83~831.19 N, 已知离心回转筛底端直径 $D=900$ mm, 参考马铃薯与 65Mn 钢临界损伤碰撞速度 2.344 m/s^[10], 摩擦系数 $\mu=0.24$ ^[20], 由式 (18) 计算弹齿倾角范围值 11.7°~20.8°, 后文将结合仿真试验确定具体值。

3.2 碰撞导流筛

3.2.1 土壤与导流筛的碰撞分析

结合图 5a 分析可知, 在回转筛弹齿碰撞、摩擦作用下, 土壤团聚体在 yo_1z 平面绕 x 轴产生 360° 旋转; 回转筛弹齿具有一定的倾斜角度, 使土壤团聚体在 xoz 平面绕 y 轴产生 360° 旋转; 与导流筛碰撞时, 土壤团聚体在 xoy 平面绕 z 轴产生 360° 旋转; 芋头根土复合体在分离装置中通过碰撞会不断产生翻滚, 从而实现根土分离。

碰撞导流筛高度需保证芋头不被抛出, 已知芋头底端直径 250~350 mm, 高度 180~200 mm, 导流筛高度设计 400 mm。栅条竖直布置可有效增加碰撞次数, 栅条间距越大, 芋头易从间隙掉落, 间距越小, 土壤筛分效果越差, 由 3.1.3 节可知, 采收芋头最小尺寸为 30 mm, 为保证最小尺寸芋头不掉落, 设计栅条间隙为 20 mm。

3.2.2 芋头侧向抛送运动学分析

完成筛分的芋头与出口导流板碰撞后侧向抛至垄沟, 出口导流板对芋头的碰撞冲击力 F_j 的大小和方向是决定其能否顺利脱离回转筛的关键因素, 需满足:

$$\begin{cases} F_e + F_j \sin \eta - F_f \cos \eta > 0 \\ F_f \cos \eta - F_j \sin \eta > 0 \end{cases} \quad (19)$$

如图 5b, 芋头脱离回转筛瞬间的运动学方程为

$$v_t^2 - v_0^2 = ma \quad (20)$$

式中 a 为芋头质心瞬时加速度, m/s²;

联立式 (19) ~ (20), 可得

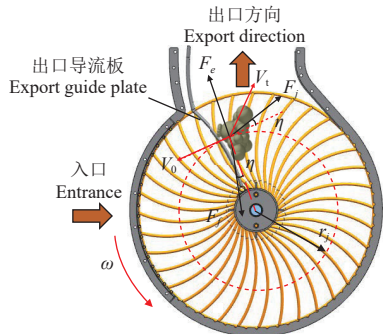
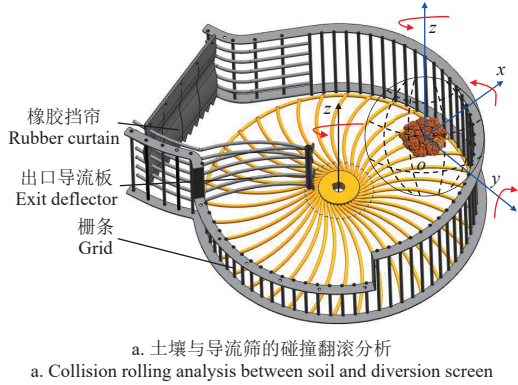
$$F_j > \frac{m \sin \eta \cdot v_0^2 \cdot r_j}{d_1^2 (\cos^2 \eta - \sin^2 \eta)} \quad (21)$$

由式 (21) 可知, 芋头在回转筛上的转动半径 r 越大, 线速度 v_0 越大, 回转筛上芋头的动能相应越大, 与

出口导流板接触时, 碰撞冲击力 F_j 越大。已知 $d=450$ mm, $m=3.73\pm 0.12$ kg, $\eta\leq\pi/4$, $\cos^2\eta-\sin^2\eta>0$, 节距角 $\eta=10^\circ$ ^[10], 崩解根土复合体且不压溃芋头的临界力范围值约为 477.83~831.19 N^[21]。因此, 计算可得芋头顺利抛送至垄沟又不损伤芋头的转速范围为

$$6\ 899.04\geq\frac{v_0^2}{r_j}\geq 3\ 966.08 \quad (22)$$

已知芋头在回转筛上转动半径 r_j 的最大值为 450 mm, 由式 (22) 计算出回转筛转速 v_0 的取值范围为 93.88~123.82 r/min。



注: v_j 为芋头抛离回转筛弹齿后的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; r_j 为芋头转动半径, m 。
Note: v_j is the speed of taro after throwing off the rotating sieve teeth, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; r_j is the rotation radius of the taro, m .

图 5 根土复合体碰撞力学模型和翻滚过程分析

Fig.5 Collision force model and rolling process analysis of root-soil composite

3.3 柔性拨指

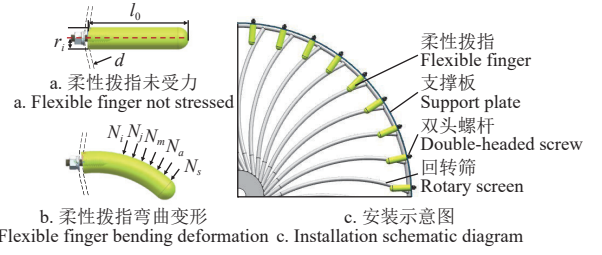
3.3.1 柔性拨指安装

为提升离心回转筛面上的土壤破碎能力, 减小芋头与侧向导流筛接触的应力集中, 设计柔性拨指。柔性拨指安装于导流筛内侧, 使用双头螺杆一端旋入柔性拨指, 一端通过螺栓与侧向导流筛固定。柔性材料主要包括橡胶、聚氨酯、硅胶等, 本文选择耐磨性好、回弹性强的聚氨酯材质^[22], 如图 6a 是柔性拨指未受力状态, 图 6b 是柔性拨指弯曲变形状态。

3.3.2 柔性拨指碰撞形变分析

柔性拨指与芋头根土复合体接触时的变形可等效为悬臂梁结构^[23], 以柔性拨指在导流筛上的固定点 O 为原点, 碰撞作用点为 A , OA 为变形前的柔性拨指, OA' 为

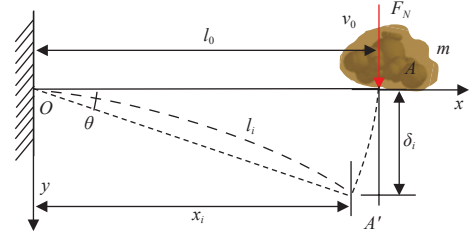
发生形变后的柔性拨指, 建立如图 7 所示的坐标系。



注: N_i 为分散在接触面上的压力, N ; l_0 为柔性拨指的长度, m ; r_i 为柔性拨指的半径, m ; d 为离心回转筛直径, m 。
Note: N_i is the pressure dispersed on the contact surface, N ; l_0 is the length of the flexible finger, m ; r_i is the radius of the flexible finger, m ; and d is the diameter of the centrifugal rotary screen, m .

图 6 柔性拨指结构与分布

Fig.6 Flexible finger structure and installation distribution



注: x_i 为柔性拨指形变后在 x 轴方向的距离, m ; δ_i 为柔性拨指挠度, m ; l_0 为柔性拨指长度, m ; l_i 为柔性拨指形变后的长度, m ; m 为根土复合体质量, kg ; θ 为柔性拨指碰撞偏移角度, $(^\circ)$ 。

l_0 为柔性拨指长度, m ;
Note: x_i is the distance in the x -axis direction after the flexible finger is deformed, m ; δ_i is the flexible fingertip deflection, m ; l_0 is the length of the flexible finger, m ; l_i is the length of the flexible fingertip after deformation, m ; m is the mass of the root-soil complex, kg ; θ is the deviation angle after collision of the flexible finger, $(^\circ)$.

图 7 柔性拨指碰撞形变分析

Fig.7 Analysis of collision deformation of flexible fingertips

OA 相对于旋转点 O 的挠曲线方程为

$$\delta_i = \frac{F_N x_i^2}{6E_i I_i} (3l_0 - x_i) \quad (23)$$

式中 E_i 为柔性拨指弹性模量, MPa , I_i 为柔性拨指截面惯性矩, m^4 。

柔性拨指主要受径向冲击力, 变形前后 l_i 不变^[24]:

$$l_i = \int_0^{x_i} \sqrt{1 + \frac{4F_N^2 x_i^4 (3l_0 - x_i)^2}{9\pi^2 r_i^8}} dx_i = l_0 \quad (24)$$

根据能量守恒定律, 当柔性拨指达到最大形变时, 获得的弹性应变能 U 为

$$U = \frac{1}{2} F_N \delta_i = \frac{1}{2} K \delta_i^2 = \frac{1}{2} m g \frac{\delta_i^2}{\delta_j} \quad (25)$$

柔性拨指刚度系数 K 为

$$K = \frac{F_N}{\delta_i} = \frac{m g}{\delta_j} \quad (26)$$

联立式 (23) ~ 式 (26), 求得:

$$\delta_i = \delta_j \left(1 + \sqrt{1 + 2 \frac{h}{\delta_j}} \right) = \delta_j \left(1 + \sqrt{1 + \frac{v_0^2}{g \delta_j}} \right) \quad (27)$$

分析式 (23)、式 (25) 和式 (27) 可知, 材质、长度、半径、碰撞冲击力均影响柔性拨指的形变程度。

当拨指半径 r_i 相同时, 长度 l_0 越长, 挠度 δ_i 越大, 吸收的弹性应变能 U 越大, 形变程度越高; 当拨指长度 l_0 相同时, 直径 r 越大, 挠度 δ_i 越小, 吸收的弹性应变能 U 越少, 形变程度越低; 当挠度接近于 0 时, 等效于刚体碰撞, 产生的短暂冲击力易造成芋头破皮或损伤。

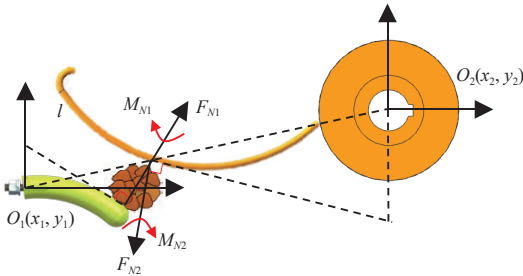
为保证柔性拨指与侧向导流筛安装紧固性, 选择长度 30 mm, 直径 6 mm 的双头螺栓, 其中 15 mm 旋入柔性拨指; 为保证拨指柔性变形, 最小直径设计为 8 mm, 最短长度设计为 25 mm, 最大直径应小于导流筛杆条间隙 20 mm, 因此, 柔性拨指直径范围为 8~20 mm。为保证根土复合体在回转筛上的通过性, 柔性拨指最大长度满足:

$$l_0 \leq \frac{d-d_1}{\cos \alpha} - D_{\max} \quad (28)$$

已知 $E_i=174 \sim 240 \text{ MPa}$ ^[25], 回转筛半径 $d=450 \text{ mm}$, 中心轴半径 $d_1=60 \text{ mm}$, 芋头根土复合体底端直径 $D_{\max}=350 \text{ mm}$, $\alpha=11.7^\circ \sim 20.8^\circ$, 当弹齿倾角最大为 20.8° 时, 柔性拨指长度 l_0 最大为 67.2 mm, 柔性拨指长度范围为 25~67.2 mm。根据柔性拨指直径和长度范围, 拨指直径取 8、11、14、17 和 20 mm 时, 对应的长度分别为 25、35、45、55 和 65 mm; 计算长径比分别为 3.125, 3.182, 3.214, 3.235 和 3.250, 后文将结合仿真试验确定最佳长径比。

3.3.3 柔性拨指形变阻力矩分析

以柔性拨指固定点为原点 O_1 , 回转筛中心为坐标原点 O_2 , M_{N1} 在柔性拨指轴心平面上, M_{N2} 在回转筛平面上, 二者在重力方向上存在高度差, 弹齿和柔性拨指共同作用形成阻力矩 M , 如图 8 所示。



注: F_{N1} 为柔性拨指与土壤接触产生作用力, N; F_{N2} 为弹齿与土壤接触产生作用力, N; M_{N1} 为柔性拨指与土壤接触的力矩, N·m; M_{N2} 为弹齿与土壤接触的力矩, N·m; l 为离心回转筛弹齿弧长, m。

Note: F_{N1} is the force generated by the contact between the flexible finger and the soil, N; F_{N2} is the force produced by the contact between the elastic teeth and the soil, N; M_{N1} is the moment of contact between the flexible finger and the soil, N·m; M_{N2} is the moment of contact between elastic teeth and soil, N·m; l is the arc length of the elastic teeth of the centrifugal rotary screen, m.

图 8 柔性拨指与回转筛弹齿对土壤的受力分析

Fig.8 Analysis of force exerted on soil by flexible fingers and rotary screen tines

柔性拨指对土壤的力矩 M_{N1} 为

$$M_{N1} = F_{N1} \cdot \sqrt{x_i^2 + \delta_i^2} = F_{N1} \cdot \sqrt{x_i^2 + \frac{F_0^2 x_i^4 (3l_0 - x_i)^2}{36E_i^2 l_i^2}} \quad (29)$$

回转筛弹齿对土壤的力矩 M_{N2} 为

$$M_{N2} = F_{N2} \cdot \frac{180 \cdot l}{n \cdot \pi} \quad (30)$$

分析可知, 柔性拨指与回转筛弹齿对根土复合体形成的阻力矩 M , 可有效增加土壤破碎和根土分离, 因此, 柔性拨指布置时, 应从重力方向考虑土块质心和根土复合体质心。经田间统计, 从栅条式筛分装置输出的大土块直径约 80~120 mm, 根土复合体底端直径 250~350 mm, 根土复合体高度 180~200 mm, 质心高度约 90~175 mm, 因此, 柔性拨指分 2 层布置, 下层拨指距回转筛弹齿 60 mm, 用于破碎大土块, 上层拨指距回转筛弹齿 132.5 mm, 用于去除根土复合体夹杂的土壤。

柔性拨指安装密度影响土块和根土复合体的碰撞冲击轨迹。已知侧向导流筛杆条间隙为 20 mm, 下层拨指安装数量为 27 个, 间隙设置为 60 mm, 上层拨指安装数量约 13 个, 间隙约 153 mm。根土复合体进入回转筛入口时, 线速度从 0 逐渐增加, 入口位置线速度小, 易产生堵塞现象, 因此, 入口位置不安装柔性拨指。

4 DEM-MFBD 耦合仿真试验

采用 EDEM-RecurDyn 耦合方法开展仿真试验, 通过 EDEM 软件建立芋头块茎-根系-土壤三元混合物离散元模型, 分析土壤受碰撞冲击作用实现破碎的过程; 通过 RecurDyn 软件建立栅条式输送筛和柔性拨指的动力学模型, 分析柔性拨指非线性形变和碰撞冲击共同作用实现根土分离的过程, 进一步优化各关键参数。

4.1 仿真模型建立

4.1.1 根土复合体离散元模型

以“乌梗粘”多子芋为对象, 采用 SHINING 3D 扫描仪采集芋头块茎三维点云数据, 试验现场如图 9a 所示; 根系多生长在芋头块茎底部及其夹缝中, 测量并统计根系尺寸, 结果见表 2, 平均总根数为 72 根; 采用 NX12.0 三维绘图软件在芋头块茎底部及其夹缝中建立直径分别为 1.4、1.8 和 2.4 mm 的根系, 数量分别为 21、39 和 12 根。

表 2 多子芋根系直径和长度统计结果

参数 Parameters	值 Value	占比 Proportion/%
根系直径 Root diameter/mm	$\leq 1.7 \text{ mm}$	29.70
	1.7~2.2 mm	54.70
	2.2~2.7 mm	15.60
根系长度 Root length/mm	$\leq 90 \text{ mm}$	48.44
	90~176 mm	42.14
	176~240 mm	9.42

将芋头块茎-根系三维模型 stl 格式文件导入 EDEM, 采用半径 2 mm 的颗粒填充芋头块茎, 半径为 0.7、0.9 和 1.2 mm 的颗粒分别填充根系, 待所有颗粒速度稳定后, 在块茎间、根系间、块茎-根系间分别添加 Hertz Mindlin with Bonding 接触模型^[3]。胡国明指出颗粒粘结半径是触发接触的判定条件^[26], 粘结半径的临界值为颗粒半径的 1~1.732 倍, 设置块茎颗粒的粘结半径为 3 mm, 根系半径分别为 0.7、0.9 和 1.2 mm 的粘结半径分别为 1.05、1.35 和 1.8 mm, 完成芋头块茎-根系离散元模型的构建, 如图 9b 所示。

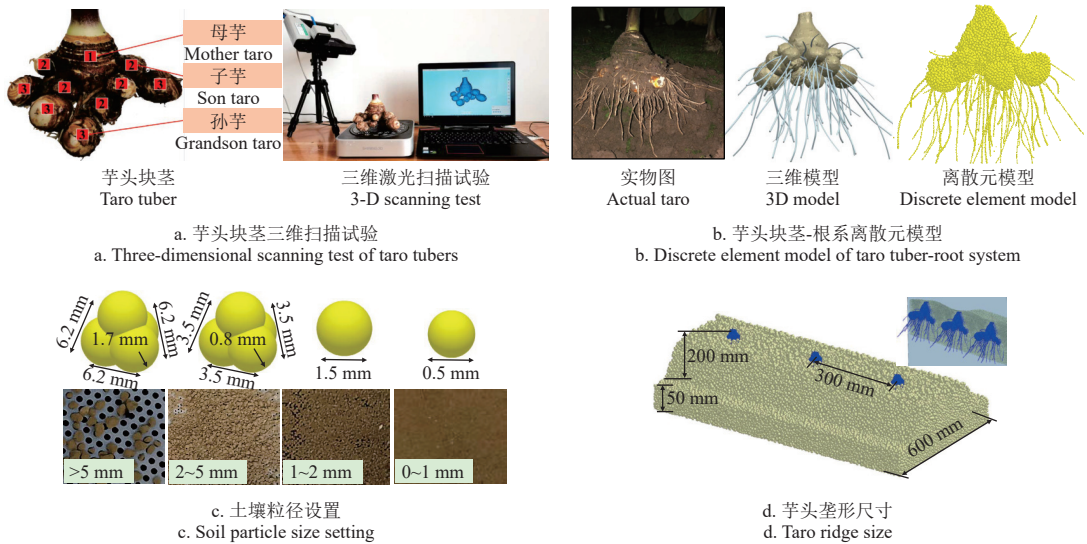


图9 多子芋根土复合体离散元仿真模型
Fig.9 Multiple taro root-soil composite discrete element simulation model

参照 GB/T 6003.1-2012《试验筛技术要求和检验》，采用标准土壤筛统计多子芋生长土壤粒径分布，测得黏粒（<0.002 mm）、粉粒（0.02~0.002 mm）和砂粒（2~0.02 mm）质量分数分别为（17.41±1.42）%、（16.82±2.54）%和（65.77±1.63）%，根据国际土壤质地分类，确定为砂质黏壤土^[27]。为简化模型，提高仿真速率，建立直径分别为 6.2、3.5、1.5 和 0.5 mm 的土壤颗粒，以此表征粒径>5 mm，2~5 mm，1~2 mm 和 0~1 mm 的土壤，如图 9c 所示，采用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型模拟湿粘土壤颗粒团聚现象，设置土壤颗粒间、土壤-块茎/根系间表面能分别为 12.56 和 18.43 J/m²^[20]。根据收获期田间垄形尺寸，建立长×宽×高分别为 900 mm×600 mm×250 mm 的根土复合体离散元模型，如图 9d 所示，结合课题组前期研究和参考相关文献^[27-28]，芋头块茎、根系和土壤的本征参数、接触参数和粘结参数如表 3、表 4 和表 5。

表 3 材料本征参数 Table 3 Material intrinsic parameters					
参数 Parameters	块茎 Tuber	根系 Root	土壤 Soil	钢 Steel	聚氨酯 polyurethane
泊松比	0.25	0.30	0.38	0.3	0.28
密度/(kg·m ⁻³)	1 540	1 210	2 600	7 865	1 400
弹性模量 /MPa	5.3	0.896	75	2.05×10 ⁵	2.07×10 ²

表 4 接触参数 Table 4 Contact parameters					
参数 Parameters	块茎-块茎 Tuber-tuber	块茎-钢 Tuber-steel	块茎-土壤 Tuber-soil	土壤-土壤 Soil-soil	土壤-钢 Soil-steel
恢复系数	0.33	0.58	0.23	0.12	0.28
静摩擦系数	0.76	0.25	0.45	0.39	0.60
滚动摩擦系数	0.62	0.34	0.29	0.27	0.10

表 5 Bonding 参数 Table 5 Bonding parameters				
材料 Material	法向粘结刚度 Normal bond stiffness / ×10 ⁶ (N·m ³)	切向粘结刚度 Tangential bond stiffness / ×10 ⁶ (N·m ³)	法向临界应力 Normal critical stress/×10 ¹⁰ Pa	切向临界应力 Tangential critical stress/×10 ¹⁰ Pa
块茎-块茎	90.00	90.00	5.00	5.00
根系-根系	5.11	5.11	0.50	0.50
块茎-根系	90.63	40.78	5.00	5.00

4.1.2 多柔性体动力学模型

将栅条式筛分装置和离心回转式根土分离装置的三维模型转化为 stp 格式，并导入 RecurDyn 中建立动力学模型，几何体材料为 Steel，柔性拨指属性为聚氨酯， $\rho=1.4\times10^3\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为 174~240 MPa，抗拉强度为 10~50 MPa^[24]。使用 Flexible 模块对柔性拨指进行网格划分，选用四面体单元网格，划分网格节点数为 307、单元个数为 1 106，定义接触、约束和驱动，分别导出栅条式筛分装置和柔性拨指 wall 文件，开启 RecurDyn 与 EDEM 的双向耦合接口，实现数据交换和存储。

耦合仿真过程如图 10 所示，分析芋头收获过程中根土复合体动态变化规律发现：作业前，根土复合体呈现相对平衡状态；随着土壤喂入，根土复合体出现失稳现象；在栅条式筛分装置中，栅条抖动导致团聚的土壤发生破碎；在离心回转式根土分离装置中，受回转筛弹齿和柔性拨指阻力矩共同作用，根土复合体与侧向导流筛柔性拨指碰撞，产生碰撞翻滚效应；破碎的土壤从弹齿间隙及碰撞导流筛间隙中脱落，实现根土有效分离，仿真结果与第 3 节理论分析基本一致。

4.2 仿真试验指标

参考虎杖根土分离装置的评价标准^[29]，计算根土分离率 δ 和土壤筛分率 ε ：

$$\delta = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \tag{31}$$

$$\varepsilon = \frac{m_a}{m_b} \times 100\% \tag{32}$$

式中 m_1 为根土复合体初始质量，kg； m_2 为筛分后的根土复合体质量，kg； m_3 为芋头的质量，kg； m_a 为从筛分出口输出的土壤质量，kg； m_b 为土壤的初始质量，kg。

仿真结束后，通过 EDEM 后处理导出 m_1 和 m_2 ，在根土分离装置出口设置接料盒，实时监测接料盒内土壤质量 m_a ，根据式（31）~（32）计算 δ 和 ε 。通过后处理导出芋头碰撞冲击力 F ，用于衡量芋头的碰撞损伤， F 值越大，越不利于存储和运输。

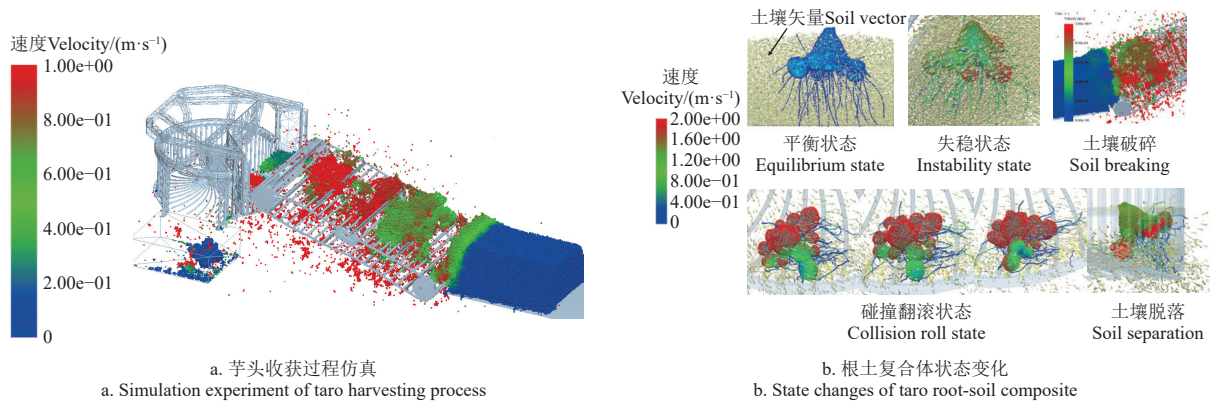


图 10 EDEM-RecurDyn 耦合仿真过程
Fig.10 EDEM-RecurDyn coupling simulation process

4.3 单因素仿真试验

为进一步优化第 3 节计算的弹齿倾角、回转筛转速和柔性拨指长径比,以根土分离率 δ 、土壤筛分率 ε 和芋头碰撞冲击力 F 为试验指标,开展单因素试验,总时间为 5s, EDEM 时间步长为 10^{-6} s, RecurDyn 时间步长为 10^{-3} s。

4.3.1 弹齿倾角

根据 3.1.3 节计算弹齿倾斜角度约 $11.7^{\circ} \sim 20.8^{\circ}$,以回转筛转速 110 r/min、柔性拨指长径比 3.214、土壤喂入速度 0.25 m/s 为固定值,分析弹齿倾角分别为 12° 、 14° 、 16° 、 18° 和 20° 时对 δ 、 ε 和 F 的影响,结果如图 11a

和 11d。分析可知,随着弹齿倾角的增加,根土分离率和土壤筛分率整体呈先增大后减小的趋势,芋头碰撞冲击力呈逐渐增大的趋势。

分析其原因,弹齿具有一定的倾角能够有效延长筛面长度,筛分面积增大使根土分离率和土壤筛分率增大;但弹齿倾角过大,根土复合体在筛面上滚动速度增加,在筛面上停留的时间反而缩短,土壤不易从弹齿间掉落,降低了根土分离率,且弹齿倾角越大,滚落至碰撞导流筛的作用力越强,碰撞冲击力越大。因此,为保证 δ 和 ε 均最大, F 值最小,弹齿倾角优化为 $14^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 。

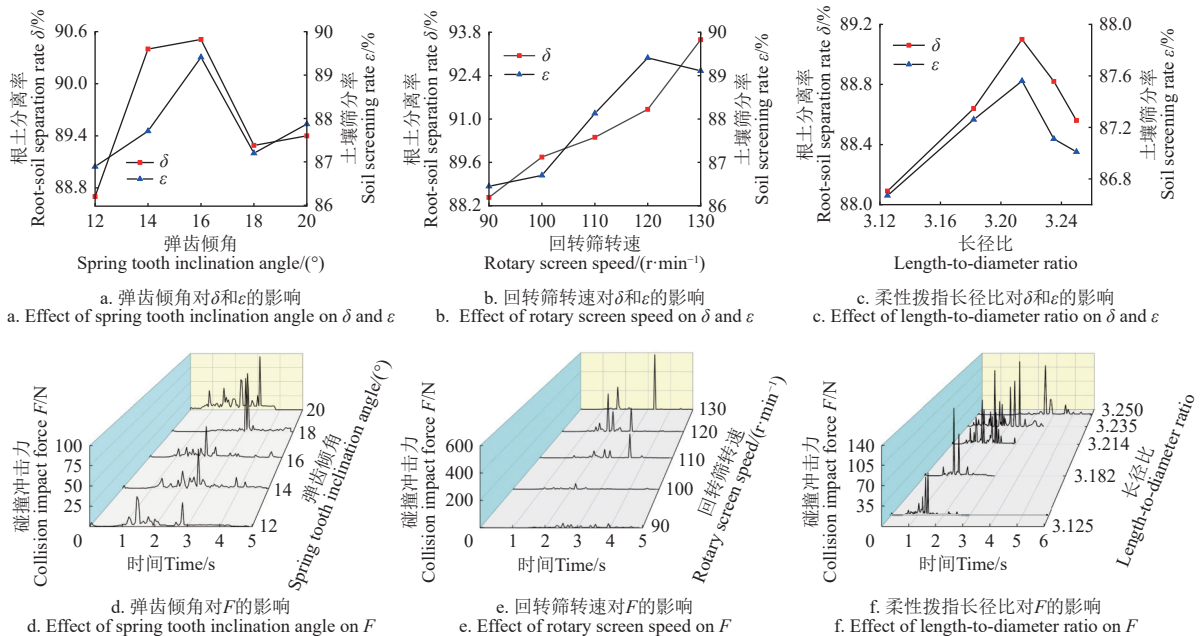


图 11 单因素试验结果
Fig.11 Single factor experiment result

4.3.2 回转筛转速

前文分析回转筛转速 $93.88 \sim 123.82$ r/min,以弹齿倾角 16° 、柔性拨指长径比 3.214、土壤喂入速度 0.25 m/s 为固定值,分析回转筛转速分别为 90、100、110、120 和 130 r/min 时对 δ 、 ε 和 F 的影响,结果如图 11b 和 11e 所示。分析可知,随着回转筛转速的增加, δ 和 ε 均呈逐

渐增大的趋势, F 也呈逐渐增加的趋势。分析其原因,回转筛转速越大,芋头旋转角速度越大,离心力越大,根土复合体受到碰撞导流筛的冲击力越大,冲击力增大有利于根土分离和土壤破碎,但碰撞冲击力过大易导致芋头破损,由图 11e 可知,当回转筛转速为 130 r/min 时,芋头最大碰撞冲击力为 580.96 N,田间作业中该冲击力

会导致芋头破损^[16]。因此, 为保证 δ 和 ε 均最大, F 值最小, 回转筛转速优化为 100~120 r/min。

4.3.3 柔性拨指长径比

前文分析柔性拨指长径比范围 3.125~3.250, 以弹齿倾角 16°, 回转筛转速 110 r/min、土壤喂入速度 0.25 m/s 为固定值, 分析柔性拨指长径比分别为 3.125, 3.182, 3.214, 3.235 和 3.250 时对 δ 、 ε 和 F 的影响, 结果如图 11c 和 11f 所示。分析可知, 随着柔性拨指长径比的增加, δ 和 ε 均呈先增大后减小的趋势。分析其原因, 柔性拨指长径比越小, 挠度越小, 形变程度越低, 对芋头的碰撞冲击力越大, 拨指直径小导致与根土复合体的碰撞概率降低, 根土分离率和土壤筛分率随之降低; 柔性拨指长径比越大, 挠度越大, 形变程度越大, 拨指长度较长, 易导致根土复合体堆积堵塞, 不利于输送。因此, 为保证 δ 和 ε 均最大, F 值最小, 长径比确定为 3.235, 柔性拨指直径 14 mm, 长度 45 mm。

4.4 二次回归正交旋转组合试验

4.4.1 试验因素与方案

土壤喂入量是影响根土分离的重要因素, 根据收获期垄形尺寸, 计算单位时间进入机器的土壤体积 Q 为

$$Q = \frac{l_1 + l_2}{2} \times h + (L - h) \times L_0 \quad (33)$$

式中 l_1 为垄顶宽, m; l_2 为垄底宽, m; h 为垄高, m; L 为实际挖深, m; L_0 为作业幅宽, m。

已知 $L_0=900$ mm, $h=200$ mm, $l_1=400$ mm, $l_2=600$ mm, $L=250$ mm, 前进速度参考马铃薯收获机 0.3~0.5 m/s, 土壤密度 2.60×10^3 kg/m³^[30], 计算喂入量为 11.31~18.85 kg/s。

为进一步研究弹齿倾角、回转筛转速和土壤喂入量对根土分离率和芋头碰撞冲击力的影响, 基于单因素试验得到的参数范围, 开展二次回归正交旋转组合试验, 试验因素编码如表 6 所示。

表 6 仿真试验因素编码

Table 6 Simulation test factor coding

水平 Level	弹齿倾角 Spring tooth inclination angle $x_1/ (^{\circ})$	回转筛转速 Rotary screen speed $x_2/ (r \cdot \min^{-1})$	土壤喂入量 Soil feeding amount $x_3/ (kg \cdot s^{-1})$
-1.682	14	100	11.31
-1	14.81	104.06	12.84
0	16	110	15.08
1	17.19	115.95	16.61
1.682	18	120	18.85

4.4.2 试验结果与分析

试验方案与结果如表 7 所示, 利用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行方差分析, 方差分析结果如表 8 和表 9 所示, 根土分离率回归模型 $P<0.01$, 说明模型极显著, 各因素对根土分离率影响由大到小为回转筛转速、土壤喂入量、弹齿倾角, 失拟项 $P=0.82$, 失拟不显著; 芋头碰撞冲击力峰值回归模型 $P<0.01$, 说明模型极显著, 各因素对芋头最大碰撞力影响由大到小为回转筛转速、弹齿倾角、土壤喂入量, 失拟项 $P=0.71$, 失拟不显著。

表 7 试验方案与结果

Table 7 Test plan and results

试验号 Test No.	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	Y_2/N
1	-1	-1	-1	81.54	194.78
2	1	-1	-1	93.51	195.67
3	-1	1	-1	88.22	298.52
4	1	1	-1	93.56	197.93
5	-1	-1	1	74.41	175.78
6	1	-1	1	81.25	165.96
7	-1	1	1	91.69	375.41
8	1	1	1	89.99	286.40
9	-1.682	0	0	82.21	256.33
10	1.682	0	0	89.64	202.03
11	0	-1.682	0	80.56	150.69
12	0	1.682	0	92.06	350.96
13	0	0	-1.682	96.52	156.85
14	0	0	1.682	84.45	210.22
15	0	0	0	90.15	155.66
16	0	0	0	93.05	145.78
17	0	0	0	92.56	174.63
18	0	0	0	92.86	190.55
19	0	0	0	95.77	165.62

注: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 x_1 、 x_2 和 x_3 的编码值; Y_1 为根土分离率, %; Y_2 为芋头碰撞冲击力峰值, N。

Note: X_1 , X_2 and X_3 are the coded values of x_1 , x_2 and x_3 , respectively; Y_1 is the root-soil separation rate, %; and Y_2 is the peak impact force of taro collision, N

表 8 Y_1 方差分析

Table 8 Variance analysis for Y_1

指标 Index	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Dedree of freedom	均方 mean square	F	P
Y_1	模型	647.24	9	71.92	26.72	0.000 1**
	X_1	89.42	1	89.42	33.23	0.000 3**
	X_2	198.69	1	198.69	73.83	0.000 1**
	X_3	115.93	1	115.93	43.08	0.000 1**
	$X_1 X_2$	28.77	1	28.77	10.69	0.009 7**
	$X_1 X_3$	18.51	1	18.51	6.88	0.027 7*
	$X_2 X_3$	46.51	1	46.51	17.28	0.002 5**
	X_1^2	89.50	1	89.50	33.26	0.000 3**
	X_2^2	80.24	1	80.24	29.82	0.000 4**
	X_3^2	12.28	1	12.28	4.56	0.061 4
	残差	24.22	9	2.69		
	失拟项	8.28	5	1.66	0.42	0.82
	纯误差	15.94	4	3.98		
	总和	671.46	18			
Y_2	模型	81 552.06	9	9 061.34	39.12	0.000 1**
	X_1	6 151.77	1	6 151.77	26.56	0.000 6**
	X_2	42 615.23	1	42 615.23	183.98	0.000 1**
	X_3	3 119.60	1	3 119.60	13.47	0.005 2**
	$X_1 X_2$	4 080.21	1	4 080.21	17.62	0.002 3**
	$X_1 X_3$	0.094 6	1	0.094 6	0.000 4	0.984 3
	$X_2 X_3$	5 728.25	1	5 728.25	24.73	0.000 8**
	X_1^2	8 325.48	1	8 325.48	35.94	0.000 2**
	X_2^2	14 284.49	1	14 284.49	61.67	0.000 1**
	X_3^2	999.86	1	999.86	4.32	0.067 5
	残差	2 084.67	9	231.63		
	失拟项	892.58	5	178.52	0.599 0	0.71
	纯误差	1 192.08	4	298.02		
	总和	83 636.73	18			

注: **为极显著, $P<0.01$; *为显著, $P<0.05$ 。

Note: ** indicates that the impact is extremely significant, $P<0.01$; * indicates that the impact is significant, $P<0.05$.

利用 Design-Expert 13.0 软件对根土分离率的交互因素进行响应曲面分析, $x_1 x_2$ 、 $x_2 x_3$ 和 $x_1 x_3$ 之间存在交互作用。如图 12a 可知, 当弹齿倾角一定时, 根土分离率随回转筛转速的增加呈现逐渐增大的趋势; 当回转筛转速一定时, 根土分离率随弹齿倾角的增加呈先增大后减小的趋势。

如图 12b 可知, 当弹齿倾角一定时, 根土分离率随

土壤喂入量的增加呈现逐渐降低的趋势；当土壤喂入量一定时，根土分离率随弹齿倾角的增加呈先增大后减小的趋势；如图 12c 可知，当回转筛转速一定时，根土分

离率随土壤喂入量的增加呈现逐渐降低的趋势；当土壤喂入量一定时，根土分离率随回转筛转速的增加呈现逐渐增大的趋势。

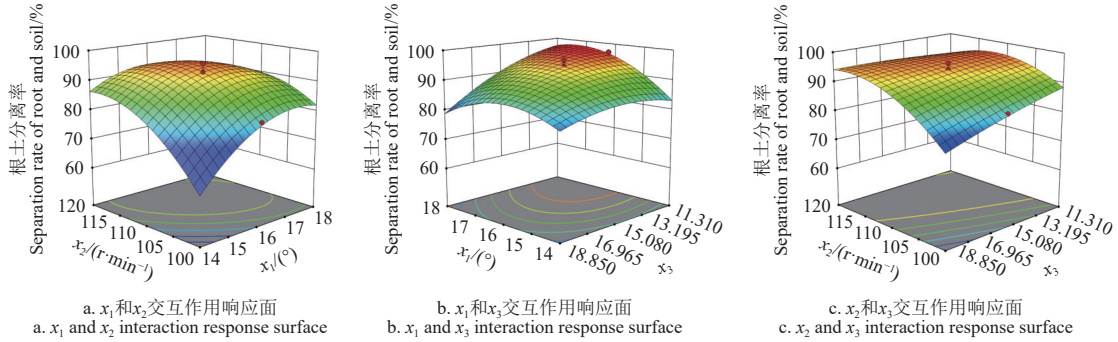


图 12 各因素交互作用对根土分离率的响应曲面

Fig.12 Response surface of the interaction of various factors on root-soil separation rate

4.4.3 参数优化

以根土分离率 Y_1 最大，芋头碰撞冲击力峰值 Y_2 最小为目标，结合实际机器田间作业条件，确定最优参数组合：当弹齿倾角为 16.00° 、回转筛转速为 110 r/min ，土壤喂入量为 14.00 kg/s 时，根土分离率最优为 93.36% ，芋头碰撞冲击力峰值最小为 150.73 N 。

5 田间试验验证

5.1 试验条件

为验证最优参数组合下多子芋收获机筛分性能，并与传统栅条式根茎类收获机进行对比，2023 年 9 月至 2024 年 1 月在湖北省汉川市杨林沟镇芋头种植基地开展田间收获性能试验，栅条式输送筛面倾角设定为 16.00° ，品种为乌梗粘，土壤质地为砂质黏壤土，含水率为 21.74% 。

5.2 试验方法

试验参照《NY/T 648-2002 马铃薯收获机质量评价技术规范》进行^[18-19]，试验前人工去除芋头茎秆，使用标识牌规划 5 组长×宽为 $8 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ 的收获作业区域，芋头收获机前进动力由雷沃 904 马力拖拉机提供，通过三点悬挂调节挖掘深度至 250 mm 。根据第 4 节响应面优化结果，土壤喂入量为 14.00 kg/s ，根据式 (33) 计算出机器前进速度 0.36 m/s ；回转筛转速设置为 110 r/min ，由霍尔传感器监测，并实时传输至电子数显表，试验现场如图 13a 和 13b 所示。

根土分离率和破损率是评价芋头收获作业性能和根土分离效果的重要指标。根据式 (31) 计算根土分离率。

芋头破损指机器作业过程中，芋头表面损伤、裂口和破皮等损伤，子母芋连接处分离、根系的断裂不计入破损，芋头破损率 T_2 计算式为

$$T_2 = \frac{M_1}{M_a} \times 100\% \quad (34)$$

式中 M_1 为有明显破损、裂口损伤的芋头质量， kg ； M_a 为挖掘出来的不带土芋头根茎总质量， kg 。



1. 霍尔传感器电子数显表 2. 液压马达 3. 离心圆盘式根土分离装置 4. 侧向抛送橡胶帘 5. 振动挖掘铲 6. 栅条式筛分装置 7. 三点悬挂机构
1. Hall sensor electronic digital display 2. Hydraulic motor 3. Centrifugal disc type root and soil separation device 4. Lateral throwing rubber curtain 5. Vibrating excavation shovel 6. Grating type screening device 7. Three point suspension mechanism

a. 多子芋收获机田间试验
a. Field test of multiple taro harvester



b. 传统栅条式根茎类收获机对比试验
b. Comparative test of traditional grid type root harvester

图 13 田间试验

Fig.13 Field test

5.3 试验结果与分析

5.3.1 验证试验

多子芋收获机性能试验结果如表 9，5 次田间试验根土分离率均值为 92.06% ，与回归模型预测结果相差 1.39% ，破损率为 4.86% ，收获机田间通过性能良好，根土分离效果满足设计要求。

表 9 收获性能试验结果

Table 9 Taro harvest performance test results

试验号 Test No.	多子芋收获机 Multiple taro harvester		传统栅条式根茎类收获机 Traditional grid type root harvester	
	根土分离率 Root soil separation rate /%	破损率 damage rate /%	根土分离率 Root soil separation rate /%	破损率 damage rate /%
1	90.73	6.13	85.66	3.92
2	93.24	4.12	86.91	3.88
3	94.50	4.54	80.13	3.83
4	89.56	5.33	84.28	3.76
5	92.28	4.17	80.25	3.97
平均 Average	92.06	4.86	83.45	3.87

5.3.2 对比试验

使用多子芋收获机与传统栅条式根茎类收获机进行芋头采收性能对比试验, 试验各重复 5 次, 步骤与方法同上。对比表 9 结果可知, 相同作业条件下, 传统栅条式根茎类收获机根土分离率均值为 83.45%, 破损率为 3.87%, 多子芋收获机根土分离率提升了 8.61 个百分点, 芋头破损率提升了 0.99 个百分点, 根土分离效果优于传统栅条式根茎类收获机。

筛分对比效果如图 14 所示, 初始状态的芋头受根系加筋作用周围被土壤包裹; 传统栅条式根茎类收获机筛分后, 部分土壤仍留存在根系夹缝中, 呈大块状根土复合体形式; 多子芋收获机筛分后, 根系夹缝中的土壤被去除, 根土分离效果明显。

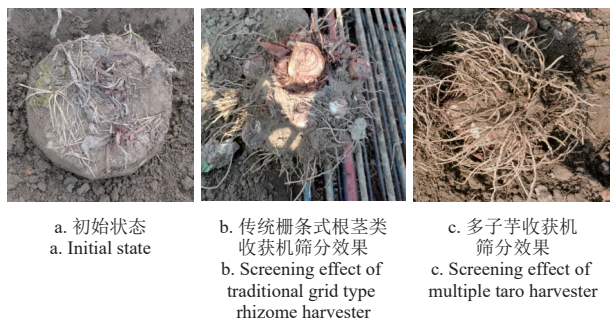


图 14 芋头根土复合体筛分效果

Fig. 14 Screening effects of taro root soil composite

6 结 论

1) 设计了一种离心回转式根土分离装置, 通过构建芋头根土复合体碰撞力学模型和土块冲击破碎力学模型, 明晰了影响根土分离效果的主要因素为弹齿倾角、回转筛转速和柔性拨指长径比, 并确定取值范围。

2) 阐明了芋头根土复合体在筛分过程中经历平衡、失稳、土壤破碎、碰撞翻滚和土壤脱落等全过程动态变化规律; 通过单因素试验确定柔性拨指直径 14 mm, 长度 45 mm; 通过二次回归正交旋转组合试验求解最优参数组合为弹齿倾角 16.00°、回转筛转速 110 r/min, 土壤喂入量 14.00 kg/s 时, 根土分离率最优为 93.36%, 芋头碰撞冲击力峰值最小为 150.73N。

3) 田间试验结果表明, 多子芋收获机根土分离率为 92.06%, 破损率为 4.86%, 相较传统栅条式根茎类收获机根土分离率提升了 8.61 个百分点, 破损率提升 0.99 个

百分点, 其中根土分离率与回归模型预测结果相差 1.39%, 满足多子芋根土分离要求, 筛分性能优于传统栅条式根茎类收获机。

[参 考 文 献]

- [1] 李柏文, 宗义湘, 吴曼. 世界芋头生产贸易形势分析[J]. 中国蔬菜, 2022(6): 1-6.
- [2] LIU W R, ZHANG G Z, ZHOU Y, et al. Establishment of discrete element flexible model of the tiller taro plant and clamping and pulling experiment[J]. *Frontiers in plant science*, 2022, 13: 1019017.
- [3] 曾百功, 李敏, 姚亮华, 等. 基于图像重建的黄连根系-土壤复合体力学特性仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(19): 75-84.
ZENG Baigong, LI Min, YAO Lianghua, et al. Simulation and experiment on the mechanical properties of Coptis chinensis root soil composites based on image reconstruction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(19): 75-84. (in Chinese with English abstract)
- [4] ZOU L L, YAN D W, NIU Z R, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023, 212: 108138.
- [5] CHEN M D, LIU X T, HU P X, et al. Study on rotor vibration potato-soil separation device for potato harvester using DEM-MBD coupling simulation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024, 218: 108638.
- [6] WANG S Y, HU Z C, YAO L J, et al. Simulation and parameter optimisation of pickup device for full-feed peanut combine harvester[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022, 192: 106602.
- [7] 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的设计与试验[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 with English abstract)
- [8] 陈学深, 马旭, 武涛, 等. 虎杖根系脱土滑梳式辊指的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 48-55.
CHEN Xueshen, MA Xu, WU Tao, et al. Design and experiment of slide-combing roller finger for Polygonum cuspidatum root-soil separation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(5): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- [9] 武涛, 马旭, 齐龙, 等. 玉米根茬根土分离装置[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 133-139.
WU Tao, MA Xu, QI Long, et al. Root-soil separating device of corn stubble[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 133-139. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚, 等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 156-164.

- XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156-164. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陶桂香, 张紫恒, 衣淑娟, 等. 板蓝根收获机组合筛面摆动式根土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 109-119.
- TAO Guixiang, ZHANG Ziheng, YI Shujuan, XIA Chunlong, MA Yongcai. Design and test of combined swing radix isatidis root-soil separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 109-119. (in Chinese with English abstract)
- [12] 万里鹏程, 李永磊, 赵虎, 等. 根茎类作物单摆铲栅收获装置渐变抛掷特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 9-21.
- Wan Lipengcheng, Li Yonglei, Zhao Hu, et al. Gradient throwing characteristics of oscillating slat shovel for rhizome crop harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(24): 9-21. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张国忠, 张清洪, 刘婉茹, 等. 荸荠收获机弹簧辊式泥果分离装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 164-175.
- ZHANG Guozhong, ZHANG Qinghong, LIU Wanru, et al. Spring roller device for soil-corm separation for a water chestnut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 164-175. (in Chinese with English abstract)
- [14] 戴靖沛, 黄建坤, 陈丽华, 等. 基于均匀化理论的根土复合体三维本构关系[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 76-83.
- DAI Jingpei, HUANG Jiankun, CHEN Lihua, et al. Three-dimensional constitutive relation of the root-soil composite using homogenization theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 76-83. (in Chinese with English abstract)
- [15] 解开婷. 三七根土复合体分离机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- XIE Kaiting. Study on Separation Mechanism of Panax Notoginseng Soil Complex[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [16] 魏忠彩, 王业伟, 李学强, 等. 弹性揉搓式马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 60-69.
- WEI Zhongcai, WANG Yewei, LI Xueqiang, et al. Design and experiments of the potato combine harvester with elastic rubbing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 60-69. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨然兵, 王伟静, 潘志国, 等. 育种马铃薯单株收获根系稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 25-35.
- YANG Ranbing, WANG Weijing, PAN Zhiguo, et al. Analysis and experiment of the root stability of breeding potato single plant harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(13): 25-35. (in Chinese with English abstract)
- [18] 朱术云, 刘德乾, 孙强, 等. 深部开采煤层顶板聚压规律的离心试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 36-41.
- ZHU Shuyun, LIU Deqian, SUN Qiang, et al. Research on the law of underground pressure accumulation of complete roof in deep mining coal seam by centrifuge test[J]. Journal of China coal society, 2011, 36(S1): 36-41. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴泽栋, 刘浩蓬, 张国忠, 等. 振动挤压式荸荠收获机的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 205-214.
- WU Zeidong, LIU Haopeng, ZHANG Guozhong, et al. Design and test of vibration extrusion type water chestnut harvester[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 205-214. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王宏波. 振动铲掘夹拔式芋头挖掘机设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- WANG Hongbo. Design and Experiment of Vibrating Shovel Digger and Pinch Type Taro Excavator[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [21] 张梦月, 周勇, 张国忠, 等. 芋头压缩和剪切特性试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 206-212.
- ZHANG Mengyue, ZHOU Yong, ZHANG Guozhong, et al. Mechanical properties of compression and shear of taro[J]. Journal of gansu agricultural university, 2020, 55(3): 206-212. (in Chinese with English abstract)
- [22] ZHAO J L, ZHAO H N, TANG H, et al. Bionic threshing component optimized based on MBD-DEM coupling simulation significantly improves corn kernel harvesting rate. [J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2023, 212: 108075.
- [23] 刘天湖, 刘伟, 曾霆俊, 等. 多柔性指滚筒菠萝采收机构工作原理及设计[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 21-26.
- LIU Tianhu, LIU Wei, ZENG Tingjun, et al. Working principle and design of the multi-flexible fingered roller pineapple harvesting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [24] LIU T, LIU W, ZENG T, et al. A multi-flexible-fingered roller pineapple harvesting mechanism[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1175-1194.
- [25] 谢方平, 罗锡文, 卢向阳, 等. 柔性杆齿滚筒脱粒机理[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 110-114.
- XIE Fangping, LUO Xiwen, LU Xiangyang, et al. Threshing principle of flexible pole-teeth roller for paddy rice[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 110-114. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [27] LIU W R, ZHANG G Z, WANG H C, et al. Microscopic deformation and fragmentation energy consumption characteristics of soils with various moisture contents using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research. 2024, 241: 106131.
- [28] 周俊, 孙文涛, 梁子安. 收获期菊芋根-块茎离散元柔性模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 124-132.
- ZHOU Jun, SUN Wentao, LIANG Zian. Construction of discrete element flexible model for jerusalem artichoke root -

- tuber at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 124-132. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈学深. 虎杖根土分离机理及关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- CHEN Xueshen. Study on Separation Mechanism and Key Technology of Rhizome and Soil of Polygonum Cuspidatum[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [30] ADAM K, ROSTISLAV C, MILOSLAV L, et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 209: 125-138.

Design and experiment of the centrifugal rotary root-soil separation device for a multiple taro harvester

LIU Wanru, ZHANG Guozhong^{*}, LIU Haopeng, ZHOU Yong, WANG Hongchang, PEI Lei, LI Zihan

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; Engineering Technology Research Center of Hubei Province for Modern Agricultural Equipment, Wuhan 430070, China)

Abstract: Taro (*Colocasia esculenta*) is one of the perennial tuberous plants in the Araceae family. The global area of taro harvesting has reached 1.793 7 million hectares in 2022, with a total output of 12.394 5 million tons. The yield per unit area in China has been 2.75 times the world average in the world. The main production regions are situated in the Yangtze River Basin, the Pearl River Basin, and Taiwan Province. Taro can play a crucial role in the process of rural revitalization. However, manual harvesting has been predominant in recent years. It is still lacking in the specialized harvesting equipment for the mechanized production of taro. In a previous study, the bar-type screening device was employed to conduct taro harvesting experiments. The taro root system and the soil have also been adhered, wrapped, and entangled to form a "root-soil composite" structure during operation. This complex matrix can serve as the taro tubers to reinforce the fibers for the roots. Nevertheless, some challenges remain in actual production, including suboptimal soil crushing quality, ineffective root-soil separation, and elevated screening power consumption during mechanized harvesting. Furthermore, the existing bar-type screening device was unable to fulfill the requirement of taro root-soil separation requirements. In this study, the centrifugal rotary root-soil separation device was developed to fully meet the agronomic and harvesting requirements of multi-seed taro. A collision mechanics model of taro root-soil composite was developed for an impact crushing mechanics model of soil blocks. A systematic analysis revealed that the primary influencing factors on the efficacy of root-soil separation were ranked in the descending order of the spring tooth inclination angle, the rotational speed of the screen, and the aspect ratio of the flexible finger. The range of values was determined for the influencing factors after measurement. A discrete element model (DEM) of taro corm-root-soil composite was established using EDEM software, in order to analyze the process of soil fragmentation under impact collisions. The simulation experiment was conducted to couple the EDEM-Recur Dyn platform. A systematic analysis was made to determine the dynamic change of the taro root-soil composite during screening. There were the balance, instability, soil crushing, collision tumbling, and soil shedding. The single-factor test showed that the diameter and length of flexible fingers were 14, and 45 mm, respectively. A quadratic regression orthogonal test was conducted to identify the optimal combination of spring tooth inclination angle, rotary screen speed, and soil feed amount, with the root-soil separation rate and the maximum impact force of taro as the evaluation indices. The optimal combination of parameters was determined using the Design-Expert software. A high root-soil separation rate of 93.36% was achieved in the rotary screen speed of 110.00 r/min and a soil feed amount of 14.00 kg/s at an inclination angle of 16.00°. A series of field tests were conducted to validate the optimal parameters under identical operational conditions. The results indicated that the root-soil separation rate was 92.06%, which differed by 1.39% from the prediction of a regression model. At the same time, the taro damage rate was 4.86%. Five performance tests were conducted using the multiple taro harvester and the traditional bar-type rhizome harvester. The root-soil separation rate of the multiple taro harvester increased by 8.61 percentage points under identical operational conditions, while the damage rate increased by 0.99 percentage points. The centrifugal rotary device of root-soil separation fully met the requirements of root-soil separation of taro. The screening performance was better than the traditional grid-type screening device. The findings can serve as the sound foundation to design efficient and low-loss harvesting equipment in the crushing and separation of root-soil composite for root and tuber crops.

Keywords: agricultural machinery; simulation; root-soil composite; multiple taro; root-soil separation; experiments