doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.010

对行挖掘式玉米根茬清土机设计与试验

周　华[1,2]　车海龙[1,3]　李衍军[4]　耿端阳[1,2]　张银平[1,2]　李　宁[5]

(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255049;2.山东理工大学现代农业装备研究院,淄博 255049;
3.山东省大田作物智慧农业技术与智能农机装备重点实验室,淄博 255049;
4.潍坊学院机械与自动化学院,潍坊 261061;5.淄博市农业机械研究所,淄博 255086)

摘要:针对玉米根茬与土壤形成的根土复合体影响保护性耕作条件下免耕播种的问题,提出了一种“对行挖掘-挤压破碎-振动清土”的玉米根茬处理模式,设计了一种对行挖掘式玉米根茬清土机,主要由双圆盘挖掘铲、拨茬机构、凹板-滚筒式根土分离机构、抖动式杆条输送机构等组成,可一次性完成玉米根土复合体挖掘、捡拾、根土分离等作业。对其关键部件结构进行了设计与运动分析,分析了双圆盘挖掘铲受力和运动,确定了其主要结构参数和作业参数;分析了根土复合体在根土分离各阶段输送状态及受力状况,确定了拨茬机构、凹板-滚筒式根土分离机构、抖动式杆条输送机构主要结构参数和运动参数,保证了根土复合体能逐步实现根土分离。双圆盘挖掘铲田间试验结果表明,玉米根土复合体挖净率可达 100%。整机土槽试验结果表明,根土分离率为 97.4%,分离效果较好,所设计的对行挖掘式玉米根茬清土机具备有效的根茬挖掘及根土分离能力。

关键词:玉米根茬;对行挖掘清土机;双圆盘挖掘铲;根土复合体

中图分类号:S222.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0107-11　　**OSID**:

Design and Test of Soil Cleaning Machine for Corn Stubble with Row-digging

ZHOU Hua[1,2]　CHE Hailong[1,3]　LI Yanjun[4]　GENG Duanyang[1,2]　ZHANG Yinping[1,2]　LI Ning[5]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
2. *Institute of Modern Agricultural Equipment, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
3. *Key Laboratory of Smart Agriculture Technology and Intelligent Agricultural Machinery Equipment for Field Crops in Shandong Province, Zibo* 255049, *China*
4. *School of Machinery and Automation, Weifang University, Weifang* 261061, *China*
5. *Institute of Zibo Agricultural Machinery, Zibo* 255086, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of no-till seeding under conservation tillage conditions affected by the root-soil complex formed by corn stubble and soil, a corn stubble treatment mode of “row digging - extrusion crushing - vibration soil removal” was proposed, and a soil cleaning machine for corn stubble with row-digging was designed. It mainly consisted of double disc digging shovels, stubble conveying mechanism, concave plate-roller type root soil separation mechanism, shake type rod conveyor mechanism, etc. It can complete the digging, picking, root and soil separation of corn root-soil complex in one go. The structural design and kinematic analysis of its key components were conducted. The force and motion of the double disc digging shovel were analyzed, leading to the determination of its main structural and working parameters. The transportation and force conditions of the root-soil complex in each stage of root soil separation were analyzed, leading to the determination of main structural parameters and motion parameters of the stubble conveying mechanism, concave plate-roller type root soil separation mechanism and shake type rod conveyor mechanism. This ensured that the root-soil complex can gradually achieve the goal of root and soil separation. The field test results of the double disc digging shovel showed that the digging rate of the corn root-soil complex can reach 100%. The soil bin test

收稿日期:2024-10-26　修回日期:2024-12-08

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022QE150)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2024TSGC0271)和国家重点研发计划项目(2021YFD2000401-2)

作者简介:周华(1991—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail:zhouhua688@163.com

通信作者:张银平(1989—),女,副教授,博士,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail:zhangyinping929@163.com

results of the whole machine showed that the root and soil separation rate was 97.4%, and the root and soil separation rate was relatively high. The designed corn stubble digging and soil cleaning machine had effective stubble digging and root and soil separation capabilities.

Key words: corn stubble; row-digging soil cleaning machine; double disc digging shovel; root-soil complex

0 引言

随着畜牧业的发展和对粮食需求量的增加,玉米成为我国种植面积和总产量最高的农作物,包括东北在内的北方地区是玉米主产区[1]。玉米根茬作为玉米种植业的副产物也逐年增加。玉米根茬含有丰富的有机质和微量元素,同时也具有较高热值,既可用作有机肥料,又可作为生物质能源的原料[2-5]。随着保护性耕作的广泛实施,玉米根茬的处理方式主要为直接免耕,或是将其粉碎后还于田中,以增加土壤有机质含量[6-10]。由于玉米根茬在生长过程中与土壤结合紧密,形成较为复杂的根土复合体[11-12],利用旋耕机作业破碎效果差,利用秸秆粉碎还田机只能打碎地上部分,而残留的较大块根茬对后茬作物的播种过程和播种质量产生不利影响。因此,研制一种集玉米根茬有效挖掘和根土高效分离机具,为后续秸秆粉碎机直接粉碎或收集作为生物质能源原料具有重要意义。

玉米根土复合体若要处理成为含土率较低的根茬,需经过挖掘和根土分离两个重要步骤。在这一领域,国内外研究人员针对不同作物的特性,在挖掘方法与根土分离技术方面进行了深入探索,开发了多种多样的机构[13-16]。对于挖掘方法,着重于挖净率和挖掘过程中的减阻,如利用仿生、振动等方式[17-19]。ZHANG 等[20]针对生姜挖掘阻力大和土壤含量高的特点,研究了一种生姜摇采装置,获得了较低的正向阻力和含土率。张兆国等[21]为降低三七收获过程中的挖掘阻力,设计了一种仿生挖掘铲,取得了较好的减阻效果。对于根土分离技术,则着重于降低损伤率和提升根土分离效率,如利用振动、柔性分离等方式[22-24]。CHEN 等[25]针对马铃薯-土分离效果差和损伤率较高的问题,提出了一种转子振动马铃薯-土壤分离装置,获得了较高的分离率和较低的损伤率。杨然兵等[26]针对甘薯两段式收获设计了一种高低间隔式二级输送分离装置,取得了较低的伤薯率。WANG 等[27]研究了一种弹齿式花生捡拾装置,降低了花生的掉落损失,提高了捡拾质量。陶桂香等[28]针对板蓝根收获机作业根土分离率低、根茎伤损率高等问题,设计了组合摆动式板蓝根根土分离装置,证明了筛条-筛板组合式筛面根土分离性能优于全筛条式筛面和全筛板式筛面。玉米根茬的挖掘和根土分离虽与上述方式类似,但也因其根土复合体包裹更紧密,根土分离过程中不需着重考虑根茬损伤率等情况,表现出不同的特点。

针对玉米根茬与土壤形成的根土复合体影响后续播种作业的问题,本文提出一种“对行挖掘-挤压破碎-振动清土”的玉米根茬处理模式,设计一种对行挖掘的玉米根茬挖掘清土机。采用双圆盘挖掘铲进行玉米根土复合体的对行挖掘,继而通过两级拨茬机构初步击打根土复合体并将其向后方抛送,再通过凹板-滚筒式根土分离机构挤压搓擦碎土并去除大部分土壤,最后由抖动式杆条输送机构完成根土分离。通过对关键结构进行理论分析,确定参数范围,最后通过田间试验和土槽试验进行验证,以期为包括东北地区在内的北方玉米主产区玉米根茬高质量处理提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

对行挖掘式玉米根茬清土机整机结构示意图如图 1 所示。主要由双圆盘挖掘铲、拨茬机构、凹板-滚筒式根土分离机构、抖动式杆条输送机构、限深轮等组成。整机主要技术参数如表 1 所示。

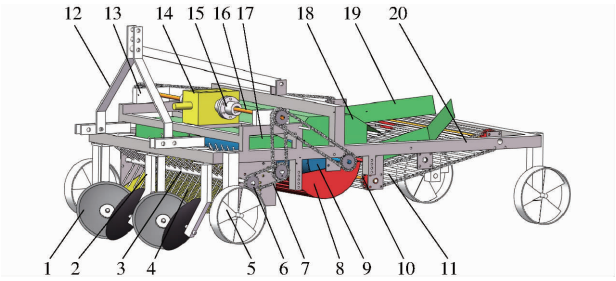


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure

1. 双圆盘挖掘铲 2. 铲柄 3. 拨茬辊 4. 拨茬栅板 5. 限深轮 6. 链轮 7. 链条 8. 凹板 9. 碾压滚筒 10. 杆条输送轴 11. 杆条 12. 三点悬挂装置 13. 轴承座 14. 变速箱 15. 联轴器 16. 传动轴 17. 拨茬上板 18. 滚筒上板 19. 输送挡板 20. 机架

1.2 工作原理

该机挖掘部分由牵引机提供动力,根土分离部分由动力输出轴提供动力。作业时,首先利用双圆盘挖掘铲进行对行挖掘,将埋藏于土壤中的玉米根

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 000×1 530×1 100
整机质量/kg	430
配套动力/kW	30
运输方式	悬挂式
动力输入轴转速/(r·min^{-1})	540～900
拨茬辊转速/(r·min^{-1})	120～240
碾压滚筒转速/(r·min^{-1})	120～240
杆条输送链线速度/(m·s^{-1})	0.45～0.90
激振辊转速/(r·min^{-1})	250～400
工作幅宽/m	1.1
挖掘行数	2
挖掘深度/mm	100

土复合体完整挖出并向后抛送。拨茬机构通过拨齿的转动,将根土复合体向后方拨动并进行初步击打。凹板-滚筒式根土分离机构接收到根土复合体,对其进行挤压搓擦碎土,实现基本的根土分离,大部分土壤因重力作用通过凹板间隙自然回落至地面,根茬携少量土壤向后方抛送。最后由抖动式杆条输送机构上激振辊振动作用促进根土分离。其作业过程如图 2 所示。

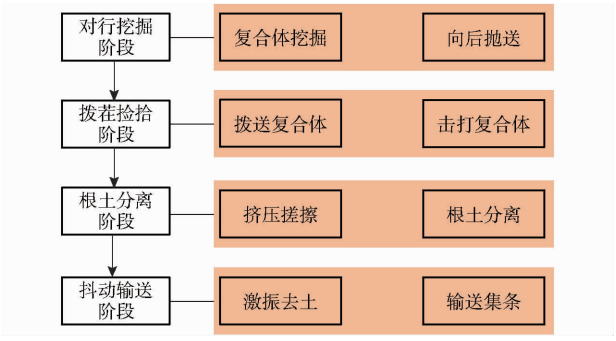


图 2　作业过程

Fig. 2　Working process

1.3　动力传递方式

整机动力传递方式如图 3 所示。牵引机通过动力输出轴将动力输送到变速箱,变速箱一输出端与前驱动双排链轮连接,另一端与后驱动链轮连接。前驱动双排链轮将减速器的动力传递至二级拨茬辊链轮和滚筒链轮,二级拨茬辊链轮进一步将动力传递至一级拨茬辊链轮。后驱动链轮通过链条连接换向链轮,将动力输出到激振辊链轮和杆条输送机构链轮。

2　关键部件设计

2.1　双圆盘挖掘铲

2.1.1　主要结构与参数

双圆盘挖掘铲通过铲柄和紧固机构安装在机具

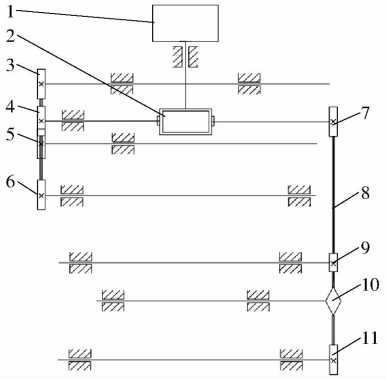


图 3　动力传递结构图

Fig. 3　Structure diagram of power transmission

1. 牵引机动力输出轴　2. 变速箱　3. 一级拨茬辊链轮　4. 前驱动双排链轮　5. 二级拨茬辊链轮　6. 滚筒链轮　7. 后驱动链轮　8. 链条　9. 激振辊链轮　10. 换向链轮　11. 杆条输送机构链轮

上,如图 4 所示。双圆盘挖掘机构采用滚动式挖掘原理,由 2 个对称凹面圆盘组成,两圆盘之间具有一定的水平偏角、垂直偏角和间距。其作业方式属于被动式挖掘,通过拖拉机牵引实现动力传递,与圆盘耙作业过程类似[29]。通过圆盘滚动对土壤和根茬进行切割、挖掘、挤压和提升,以实现玉米根土复合体整体有效挖掘。

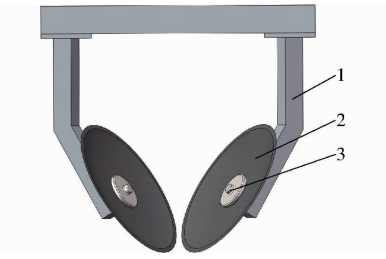


图 4　双圆盘挖掘铲结构图

Fig. 4　Structural diagram of double disc digging shovel

1. 铲柄　2. 圆盘挖掘铲　3. 紧固机构

圆盘半径直接影响动土量和作业阻力,圆盘半径越大,动土量越多,作业阻力越大;半径过小,挖掘效果和根茬提升高度不足,影响后续拨茬。在选择径深比系数 K 时,一般取 3.0～3.5[30],圆盘半径 R_d 计算式为

$$R_d = \frac{KD_d}{2} \tag{1}$$

式中　D_d——挖掘深度,mm

挖掘深度设定为 100 mm,径深比系数 K 取 3,则圆盘半径 R_d 为 150 mm。

圆盘厚度 W 由经验公式确定[30],计算式为

$$W = (0.008 \sim 0.02) \times 2R_d + 1 \tag{2}$$

将圆盘半径代入,得厚度范围为 3.4～7.0 mm,取圆盘厚度为 5 mm。

双圆盘挖掘铲圆盘曲面为空间球面结构,工作面曲率为常数,凸面周边磨刃,其入土、碎土能力增

强,对土壤的作用与铧式犁相比,具有挖掘量小和阻力小的特点。以其中 1 个圆盘与其回转中心的交点为坐标原点,前进方向为 X 轴,两圆盘圆心连线为 Y 轴,Z 轴垂直向上,建立空间坐标系 $O-XYZ$,如图 5a 所示。其中 α 为圆盘水平偏角,影响切削后土壤的侧推效果;β 为圆盘垂直偏角,决定翻土效果;ε 为 2 个圆盘所在平面的张角(即二面角),决定双圆盘挖掘铲的张口尺寸;γ 为通过 2 个挖掘圆盘的二面角的平面与垂直面的偏离角,决定 2 个圆盘边缘最小距离处的空间位置。圆盘挖掘参数如图 5b 所示。各个参数关系为

$$\begin{cases} L_c = \dfrac{s_a - s_c}{\sin\alpha} \\ L_c^2 = 4\left(2\dfrac{R_d D_d}{\cos\beta} - \dfrac{D_d^2}{\cos^2\beta}\right) \\ \sin\varepsilon = \dfrac{c_{\max} - c_{\min}}{4R_d} \end{cases} \tag{3}$$

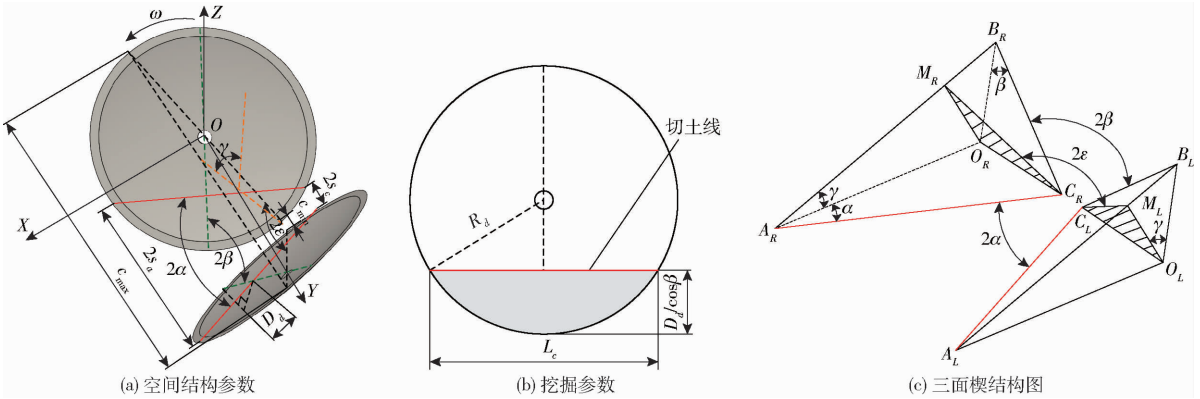
式中 L_c——切土线长度,mm

s_a——2 条切土线最大距离的 1/2,mm

s_c——2 条切土线最小距离的 1/2,mm

$c_{\max}$——圆盘边缘最大距离,mm

$c_{\min}$——圆盘边缘最小距离,mm



(a) 空间结构参数 (b) 挖掘参数 (c) 三面楔结构图

图 5 双圆盘挖掘铲工作参数示意图

Fig. 5 Schematics of working parameters of double disc digging shovel

为提高挖掘效果,2 个圆盘的 s_c 和 s_a 主要由根茬尺寸决定。其中,切土线最大距离 $2s_a$ 满足

$$2s_a \geqslant B_{\max} + 2m_B \tag{4}$$

式中 $B_{\max}$——根茬最大直径,mm

m_B——圆盘相对于中心线的平均偏差,mm

在挖掘过程中,被双圆盘挖掘铲切下的含有玉米根茬的土垡沿着圆盘面向上移动,其效果与切削角相同的偏置挖掘铲类似。因此,双圆盘挖掘铲与土壤相互作用可简化为三面楔结构(图 5c)。

各角度满足关系

$$\begin{cases} \tan\beta = \tan\varepsilon\cos\gamma \\ \tan\alpha = \tan\varepsilon\sin\gamma \\ \tan\gamma = \tan\alpha/\tan\beta \end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可知,当 ε 为常量时,α、β 可以由 γ 确定。当 γ 增大时,α 增大,则土垡变形加剧,使得土壤质点正向移动增加,但容易造成挖掘过程中阻力增加和根土复合体正向位移增加。同时,γ 增大时,β 减小,可导致土壤垂直移动能力减弱,增加土壤和根土复合体提升难度,容易发生堵塞。通过前期试验表明,随着 γ 增大,土垡输送性能变差,当超过 50°~55°时,挖掘部件容易出现堵塞。结合式(3)~(5),经优化后圆整,取水平偏角为 31°、垂直偏角为 27°、两圆盘最小距离为 5 mm。

2.1.2 挖掘铲运动与受力分析

由双圆盘挖掘铲工作原理可知,挖掘圆盘刃口运动轨迹决定玉米根土复合体被双圆盘挖掘铲夹持后的运动状态,影响玉米根土复合体提升和输送效果。圆盘运动形式为直线前进和旋转运动合成[31]。综合双圆盘挖掘铲结构特征,当双圆盘挖掘铲前进速度为 v_t 时,圆盘刃口上任一点 $P(x,y,z)$ 绝对运动轨迹为

$$\begin{cases} x(t) = R_d(\cos\gamma\cos(\omega t) - \sin\gamma\cos\varepsilon\sin(\omega t)) + v_t t \\ y(t) = -R_d\sin\varepsilon\sin(\omega t) \\ z(t) = -R_d(\sin\gamma\cos(\omega t) - \cos\gamma\cos\varepsilon\sin(\omega t)) \end{cases} \tag{6}$$

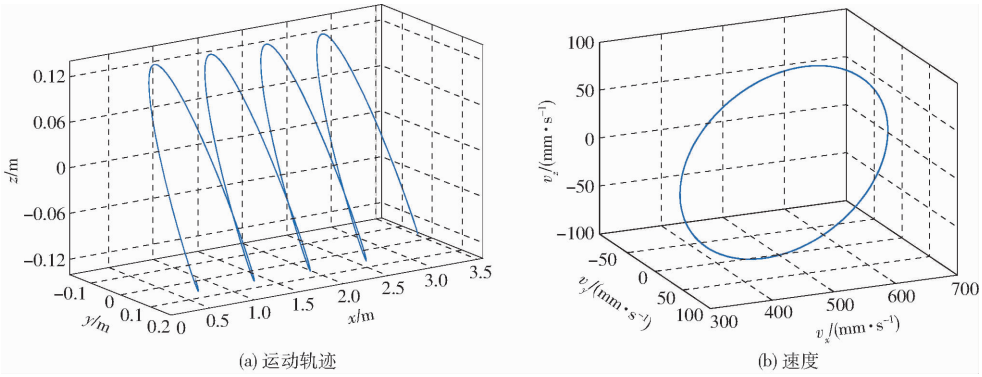
绝对速度为

$$\begin{cases} v_x = \dot{x}(t) = -\omega R_d(\cos\gamma\sin(\omega t) + \sin\gamma\cos\varepsilon\cos(\omega t)) + v_t \\ v_y = \dot{y}(t) = -\omega R_d\sin\varepsilon\cos(\omega t) \\ v_z = \dot{z}(t) = \omega R_d(\sin\gamma\sin(\omega t) + \cos\gamma\cos\varepsilon\cos(\omega t)) \end{cases} \tag{7}$$

式中 ω——圆盘角速度,rad/s t——时间,s

v_x、v_y、v_z——圆盘刃口上任一点 P 在 X、Y、Z 轴上速度分量,mm/s

假设圆盘做纯滚动,且无滑移现象,利用 Matlab 软件绘制圆盘刃口上点 P 绝对轨迹及绝对速度,如图 6 所示。



(a) 运动轨迹　　(b) 速度

图 6　圆盘刃口运动轨迹和速度

Fig. 6　Motion trajectory and velocity of disc blade edge

双圆盘挖掘铲受力由圆盘凹面阻力和凸面阻力组成。其中，圆盘凹面受力方向垂直于圆盘与地平面的交弦，其大小受圆盘的水平偏角影响较大，圆盘凸面与未耕土壤有一定的挤压和摩擦作用。

假设土壤对圆盘凹面的碰撞为非弹性碰撞，土壤在破裂面上的剪应力满足摩尔-库伦公式。圆盘凹面的受力如图 7a 所示。结合圆盘结构，依据土壤阻力计算理论，圆盘凹面阻力为

$$R_a = (\gamma_i D_d^2 N_r + C D_d N_c + C_a D_d N_a + q D_d N_q) S_l \tag{8}$$

其中

$$\begin{cases} q = (R_d - D_d)\gamma_f \sin\alpha \\ S_l = L_c \sin\alpha = 2\sqrt{\dfrac{2R_d D_d}{\cos\beta} - \dfrac{D_d^2}{\cos^2\beta}} \sin\alpha \end{cases} \tag{9}$$

式中　R_a——土壤对圆盘凹面阻力，N

γ_i——耕作前土壤重度，N/cm³

C——土壤凝聚系数，N/cm²

C_a——土壤-圆盘切向粘附力系数，N/cm²

q——均匀地面载荷，N/cm²

N_r、N_c、N_a、N_q——圆盘入土部分承载力（土壤自重、内聚力、附着力和附加载荷）系数

S_l——圆盘切土有效宽度，mm

γ_f——挖掘后土壤重度，N/cm³

由图 7a 得

$$F_a = H_R \sin\alpha = R_a \sin(\lambda + \theta)\sin\alpha \tag{10}$$

式中　F_a——圆盘凹面牵引力，N

H_R——圆盘凹面阻力水平分量，N

λ——圆盘平均后隙角，(°)

θ——圆盘外摩擦角，(°)

双圆盘挖掘铲的圆盘凸面主要受到土壤内聚力、内摩擦角、挖掘深度等因素的影响。依据土力学公式，可得圆盘最大铅垂应力为

$$q' = CN_c' + qN_q' + \frac{1}{2}\gamma_j b N_r' \tag{11}$$

式中　q'——最大铅垂应力，N/cm²

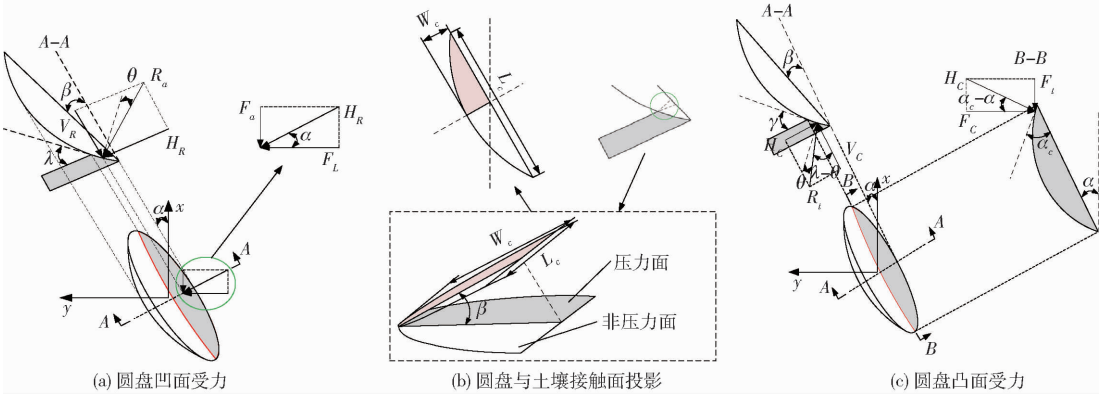
γ_j——圆盘底面以上土壤重度，N/cm³

b——圆盘宽度，mm

N_r'、N_c'、N_q'——圆盘入土部分承载力系数

圆盘与土壤接触面投影如图 7b 所示，最大接触面投影面积 A 满足

$$A \approx \frac{L_c}{2}\frac{W_c}{2}\frac{1}{\cos\beta} = \frac{\sqrt{\dfrac{2R_d D_d}{\cos\beta} - \dfrac{D_d^2}{\cos^2\beta}}\left[\sqrt{\rho^2 - \left(R_d - \dfrac{D_d}{\cos\beta}\right)^2} - \sqrt{\rho^2 - R_d^2}\right]}{2\cos\beta} \tag{12}$$



(a) 圆盘凹面受力　　(b) 圆盘与土壤接触面投影　　(c) 圆盘凸面受力

图 7　挖掘过程中圆盘受力分析

Fig. 7　Force analysis of disc during digging process

式中 W_c——切土线位置对应圆盘厚度,mm

ρ——圆盘所在球面曲率半径,mm

在作业过程中,圆盘凸面与土壤间产生的刮擦力随着圆盘水平偏角的增大而减小,水平偏角为 0°时刮擦力最大,$\alpha \geqslant \alpha_c$时为 0。因此,可得到圆盘铅垂承载力为

$$V_C = \begin{cases} q'A\sin\dfrac{\pi(\alpha_c - \alpha)}{2\alpha_c} & (\alpha < \alpha_c) \\ 0 & (\alpha \geqslant \alpha_c) \end{cases} \tag{13}$$

式中 V_C——铅垂承载力,N

α_c——临界水平偏角,(°)

圆盘凸面受力情况如图 7c 所示,圆盘凸面受力满足

$$F_t = H_C\sin(\alpha_c - \alpha) = V_C\tan(\lambda - \theta)\sin(\alpha_c - \alpha) \tag{14}$$

式中 H_C——圆盘凸面阻力水平分量,N

F_t——圆盘凸面牵引力,N

综上所述,单圆盘所受牵引力 F_q 为

$$F_q = F_a + F_t = R_a\sin(\lambda + \theta)\sin\alpha + V_C\tan(\lambda - \theta)\sin(\alpha_c - \alpha) \tag{15}$$

2.2 拨茬机构

2.2.1 拨茬机构结构与主要参数

拨茬机构是承载被挖掘后玉米根土复合体向后输送的关键部件,由一级拨茬辊、二级拨茬辊、拨茬栅板、拨茬上挡板等组成,如图 8 所示。

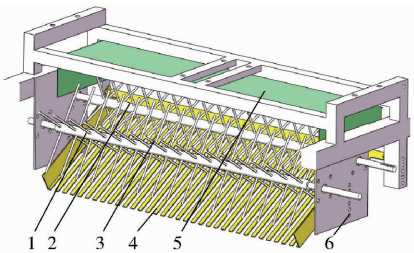


图 8 拨茬机构结构图

Fig. 8 Structure diagram of stubble poking mechanism

1. 一级拨茬辊 2. 二级拨茬辊 3. 拨齿 4. 拨茬栅板 5. 拨茬上挡板 6. 拨茬栅板角度调节孔

拨茬辊与栅板之间形成对玉米根土复合体的承载空间,根土复合体在此空间内受到拨齿的拨动作用,产生滑动、滚动等运动,散碎土壤沿斜面滑落或由栅板间隙落回地面。通过分析拨茬辊运动可知,同一回转面内拨茬辊齿数必须大于 2,方可保证运动的连续性,并且在相同转速下,随着齿数增加,拨齿拨动根土复合体的频率也会增加,为提高输送效率,本设计中拨齿数取 4。经实际测量,玉米根土复合体最小直径为 115 mm 左右,为保证拨茬辊能够顺利向后运输根土复合体,最终确定拨齿轴向间距为 60 mm,一级拨茬辊半径为 180 mm,二级拨茬辊半径为 130 mm;为确保两拨茬辊不产生干扰且能协同作用,拨茬辊齿交叉排列,一级拨茬辊和二级拨茬辊间距为 220 mm;为提高通过性,拨茬栅板角度可调。

2.2.2 拨茬过程与受力分析

为保证根土复合体能够顺利向后拨送,对其在拨茬机构上的受力状况进行分析,如图 9 所示。

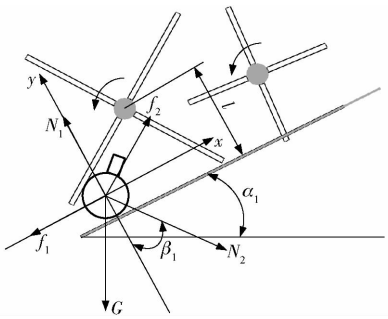


图 9 拨茬机构对玉米根土复合体作用力分析

Fig. 9 Force exerted by stubble poking mechanism on corn root-soil complex

当拨茬机构开始接触根土复合体时,根土复合体受到拨齿和栅板作用,此时根土复合体主要受到拨齿对其的正压力和摩擦力、栅板对其的支持力和摩擦力及自身重力。实际作业中,根土复合体在每级拨辊组旋转拨动作用下引起的离心力较小,故忽略。根土复合体能被拨茬辊拨动向后输送应满足运动方向上合力大于 0,同时应保持垂直栅板方向上受力平衡,即

$$\begin{cases} N_2\sin\beta_1 + f_2\cos\beta_1 - f_1 - G\sin\alpha_1 > 0 \\ N_1 + f_2\sin\beta_1 = G\cos\alpha_1 + N_2\cos\beta_1 \\ f_1 = \mu N_1 \\ f_2 = \mu N_2 \end{cases} \tag{16}$$

式中 N_1——栅板对根土复合体的支持力,N

N_2——拨齿对根土复合体的正压力,N

G——根土复合体自身重力,N

f_1——栅板对根土复合体的摩擦力,N

f_2——拨齿对根土复合体的摩擦力,N

μ——根土复合体与钢的摩擦因数

α_1——栅板与水平面夹角,(°)

β_1——拨齿摩擦力与栅板夹角,(°)

拨茬辊回转中心与栅板间距离决定根土复合体通过性。距离过大,拨茬辊齿无法拨到根土复合体;距离过小,无法满足运动方向上合力大于 0。由结构几何关系可知

$$d\cos\beta_1 + R\sin\beta_1 \leqslant l \leqslant d + R \tag{17}$$

式中 R——拨茬辊半径,mm

d——根土复合体直径,mm

l——拨茬辊回转中心与栅板间距离,mm

综合考虑根土复合体运动状况，取一级拨茬辊回转中心和二级拨茬辊回转中心与栅板间距离分别为 210 mm 和 150 mm。

2.3　凹板-滚筒式根土分离机构

2.3.1　凹板-滚筒结构

凹板-滚筒式根土分离机构是玉米根土复合体根土分离的关键部件，主要由凹板筛（棱角型栅条、侧板）、滚筒（包含钉齿）、上挡板、斜挡板等组成，如图 10 所示。

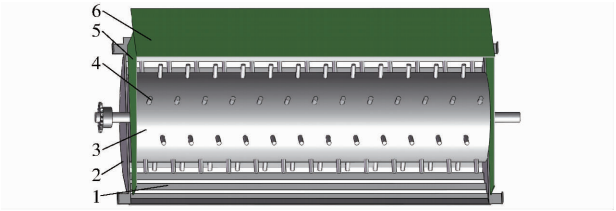


图 10　凹板-滚筒式根土分离机构结构图

Fig. 10　Structural diagram of concave plate - roller type root soil separation mechanism

1. 棱角型栅条　2. 侧板　3. 滚筒　4. 钉齿　5. 上挡板（已剖开）　6. 斜挡板

凹板-滚筒式根土分离机构接收拨茬机构输送的玉米根土复合体，并在滚筒与凹板筛的共同作用下对其进行挤压搓擦碎土，实现基本的根土分离。滚筒直径是影响根土分离效果和效率的重要因素。滚筒直径过小，根土分离作业行程短，根土分离不彻底；滚筒直径过大，装置体积和重量大、整机尺寸大、功耗高。滚筒直径 D 需满足[32]

$$D \geqslant \frac{1.5d}{\pi} \tag{18}$$

取根土复合体最大直径为 200 mm，由式（18）计算可知，滚筒直径应大于 96 mm。在满足整机尺寸设计要求的前提下，应选择较大直径以保证根土分离时间，经过分析，选择滚筒直径为 260 mm。为保持整机协调运行，滚筒长度设计与拨茬辊长度一致。

钉齿焊接在滚筒上，交错排列的布局方式可充分发挥钉齿对根土复合体的破碎作用，钉齿沿中轴线交错分布，其排列方式展开如图 11 所示。最终确定钉齿数量为 100 个，长度为 60 mm，轴向排列间距为 80 mm，弧向排列间距为 102 mm。

凹板筛主要作用是配合滚筒完成根土复合体根土分离，破碎土壤由其棱角型栅条间隙漏下。普通平面型和弧面型凹板筛的碎土效果不佳，为此，本设计采用一种棱角型凹板筛，增加凹板筛对根土复合体的摩擦和挤压效果，提高根土分离效率。

轧距 δ 为碾压间隙高度（钉齿与凹板之间的最小距离），是影响根土复合体根土分离效果的重要因素，轧距越小，根土复合体挤压率越高[4]。挤压

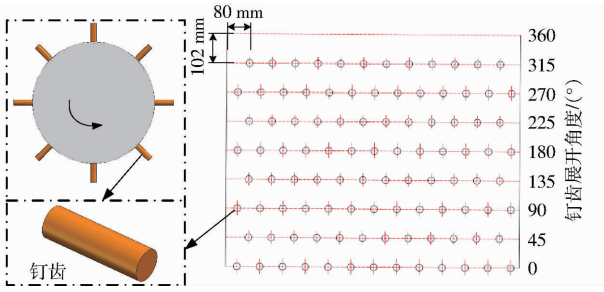


图 11　钉齿排列方式

Fig. 11　Arrangement of teeth

率 P 定义为

$$P = \frac{d-\delta}{d} \times 100\% \tag{19}$$

统计测得挖出的根土复合体直径 d 为 115 ~ 200 mm，本装置中，δ 可在 30 ~ 100 mm 范围内调整，在处理不同品种玉米根茬时可根据根土复合体直径选取合适的轧距。

2.3.2　根土分离过程与受力分析

玉米根土复合体在凹板-滚筒式根土分离机构中的受力状况如图 12 所示。

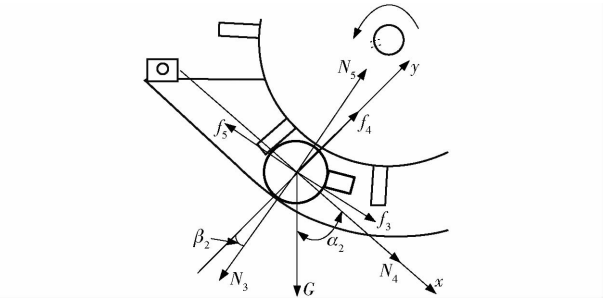


图 12　凹板-滚筒对根土复合体作用力分析

Fig. 12　Force exerted by concave plate-roller on corn root-soil complex

根土复合体受到滚筒与凹板筛联合作用力，受力方程为

$$\begin{cases} N_4 + G\cos\alpha_2 + N_3\sin\beta_2 + f_3\cos\beta_2 - N_5\sin\beta_2 - f_5\cos\beta_2 > 0 \\ N_3\cos\beta_2 + G\sin\alpha_2 + f_5\sin\beta_2 - f_4 - f_3\sin\beta_2 - N_5\cos\beta_2 = 0 \\ f_3 = \mu N_3 \\ f_4 = \mu N_4 \\ f_5 = \mu N_5 \end{cases} \tag{20}$$

式中　N_3——滚筒对玉米根土复合体的压力，N

N_4——钉齿对玉米根土复合体的拨动力，N

N_5——凹板对玉米根土复合体的支持力，N

f_3——滚筒对根土复合体的摩擦力，N

f_4——钉齿对根土复合体的摩擦力，N

f_5——凹板对根土复合体的摩擦力，N

α_2——滚筒压力作用角，(°)

β_2——拨茬辊齿反作用夹角，(°)

在滚筒钉齿和凹板筛作用下,根土复合体可以边挤压搓擦碎土边向后输送,直至脱离凹板筛向后抛送(此后根土复合体已基本完成破碎,仅剩携少量碎土的根茬,后称根茬),继而碰撞斜挡板落至抖动式杆条输送机构。斜挡板角度影响根茬抛送位置,角度过大(θ_l)时,玉米根茬抛出后碰到挡板沿线路 1 返回(图 13);角度过小(θ_s)时,玉米根茬在离心力作用下沿线路 2 抛出较远,影响后续振动清土;在合适角度(θ_m)时,玉米根茬可沿线路 3 顺利抛出。

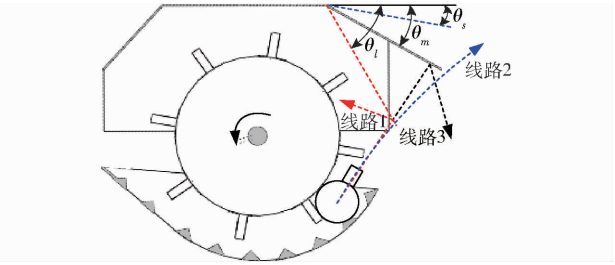


图 13 根茬抛出示意图

Fig. 13 Schematic of stubble throwing

为使玉米根茬能够顺利抛出,需满足

$$\theta_s \leqslant \theta_m \leqslant \theta_l \tag{21}$$

综合考虑,最终设计斜挡板角度 θ_m 为 30°。

2.4 抖动式杆条输送机构

2.4.1 主要结构与参数

抖动式杆条输送机构是玉米根茬最后振动清土、输送、集条的关键部件,主要由链轮、动力轴、链条、杆条、侧挡板、激振辊等组成,如图 14 所示。

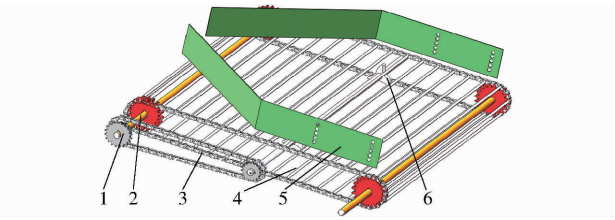


图 14 抖动式杆条输送机构结构图

Fig. 14 Structural diagram of shake type rod conveyor mechanism

1. 链轮 2. 动力轴 3. 链条 4. 杆条 5. 侧挡板 6. 激振辊

抖动式杆条输送机构接收凹板-滚筒式根土分离机构传递的根茬,此时,根茬上还有部分松散土壤残留,通过激振辊的振动作用,进一步促进根茬上土壤的破碎与分离,最终实现根土有效分离。

杆条抖动频率和振幅直接影响根土分离效果,其应保持在合理范围之内。经调试,确定激振辊带动杆条振动频率为 15 Hz,转动时激振辊基圆半径为 40 mm,振幅设计为 15 mm。为确保输送过程中根茬不从杆条间隙漏下,最终确定杆条直径为 8 mm,长度为 1 020 mm,两杆条间距为 50 mm。

2.4.2 输送过程与受力分析

玉米根茬在抖动式杆条输送机构中的受力状况如图 15 所示。

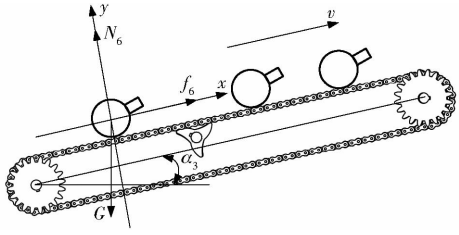


图 15 抖动式杆条输送机构对根茬作用力分析

Fig. 15 Force exerted by shake type rod conveyor mechanism on stubble

假设输送机构带动根茬做匀速运动,则此时根茬受力方程为

$$\begin{cases} N_6 - G\cos\alpha_3 = 0 \\ f_6 - G\sin\alpha_3 = 0 \\ f_6 = \mu_0 N_6 \end{cases} \tag{22}$$

式中 N_6——杆条对根茬的支持力,N

f_6——杆条对根茬的摩擦力,N

μ_0——杆条与根茬的摩擦因数

α_3——输送机构与水平面夹角,(°)

显然,夹角 α_3 对根茬向后输送的过程有显著影响,公式化简后得 $\mu_0 = \tan\alpha_3$,因此若要保证玉米根茬不滑落,夹角 α_3 应小于根茬与杆条的摩擦角,根茬与钢摩擦角为 25°~40°,故设定夹角 α_3 为 20°。

3 试验验证

通过设计相关试验,分别对挖掘机构的实际挖掘性能以及整机的根土分离效果进行验证。利用田间挖掘试验得到玉米根土复合体的挖净率、竖直方向上的位移(即纵向位移,影响后续拨茬机构作业)、牵引力,利用整机土槽试验得到根土分离率。

3.1 试验指标

样机设计指标为:根茬挖净率大于等于 90%、根土分离率大于等于 85%。

根茬挖净率 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = \frac{n_2}{n_1} \times 100\% \tag{23}$$

式中 n_1——区域内玉米根土复合体总数量

n_2——挖出的玉米根土复合体数量

其中,玉米根土复合体整体完全离开地表,无根系连接地面视为被完全挖出。

根土分离率 Y_2 计算公式为

$$Y_2 = \frac{m_q - m_h}{m_q - m_g} \times 100\% \tag{24}$$

式中 m_q——根土复合体根土分离前质量,g

m_h——根土复合体根土分离后质量，g

m_g——根茬质量，g

3.2　双圆盘挖掘铲田间试验

3.2.1　试验方法

双圆盘挖掘铲田间试验于 2024 年 10 月 13 日在山东省淄博市张店区西吕村试验田(36.881 1°N，118.003 9°E)进行，试验分析了不同作业速度(0.32、0.53、0.74、0.95、1.16 m/s)对挖掘铲挖掘性能的影响，其中前进速度由拖拉机挡位和手动油门在空载时进行标定。试验时间为玉米收获后 3 d，玉米平均留茬高度为 80 mm。该地区土壤质地为壤土，试验田长度为 50 m，取中间 20 m 为稳定作业区，其中包含 60～70 株玉米根茬。主要设备包括拖拉机、双圆盘挖掘铲、牵引力传感器、数据采集箱、高速摄像机、带数据采集软件的计算机等，传感器可实时测量前进方向牵引力，纵向位移则通过高速摄像机进行捕捉，对比机架上的标尺进行测量。试验前对玉米根茬进行编号，以便记录数据，田间试验如图 16 所示。

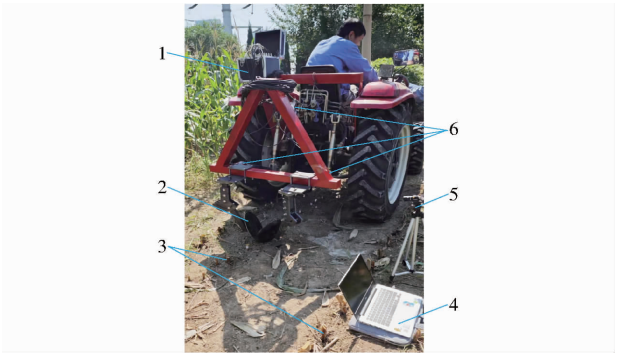


图 16　田间试验

Fig. 16　Field experiment

1. 数据采集箱　2. 双圆盘挖掘铲　3. 玉米根土复合体　4. 计算机　5. 高速摄像机　6. 牵引力传感器

3.2.2　试验结果与分析

挖掘试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，在拖拉机不偏行情况下，根茬挖净率均为 100%，说明双圆盘挖掘铲能够较好地实现根土复合体对行挖掘。随着前进速度增大，纵向位移呈现增大趋势，这是因为双圆盘挖掘铲运动为直线运动和旋转运动的复合，作业速度越大，圆盘旋转线速度增大，抛送能力也会有所提升。随着作业速度增大，牵引力呈先减小后增大趋势。作业速度为 0.74 m/s 时，牵引力最小，为 341.6 N。在低速作业时，圆盘转速较慢，土壤和根土复合体不能及时向后抛出，使得两圆盘间土壤堆积量增加，因此牵引力偏大。随着作业速度增大，挖掘后土壤和根土复合体在圆盘转动下均匀后抛，从而导致牵引力减小。后面随着速度增加，牵引力显著增大，这与其他耕作机具类似。

表 2　田间挖掘试验结果

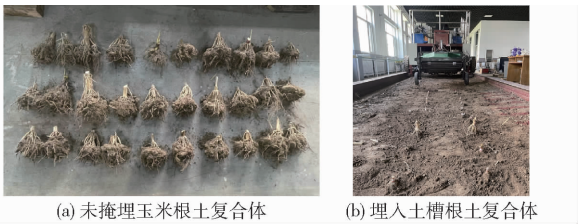
Tab. 2　Results of field digging test

序号	前进速度/(m·s^{-1})	根茬挖净率/%	纵向位移/mm	牵引力/N
1	0.32	100	136	513.2
2	0.53	100	158	475.1
3	0.74	100	177	341.6
4	0.95	100	162	675.2
5	1.16	100	193	1 089.5

3.3　整机土槽试验

3.3.1　试验材料与仪器

整机性能试验于山东理工大学现代农业装备实验室的室内土槽开展。土槽尺寸为 60 m(长)×3 m(宽)×0.8 m(深)，土壤质地为壤土，土质均匀，机械结构稳定可靠，可进行重复试验。主要设备有对行挖掘式玉米根茬清土机和 TCC 电力四驱土槽试验台车，试验材料为山东省淄博市张店区西吕村试验田挖取的玉米根土复合体，未掩埋玉米根土复合体如图 17a 所示，埋入土槽玉米根土复合体如图 17b 所示。



(a) 未掩埋玉米根土复合体　(b) 埋入土槽根土复合体

图 17　土槽试验

Fig. 17　Soil bin tests

3.3.2　试验方法

试验区选择中间 20 m，试验前先对土壤进行浇水、旋耕，用土壤水分测定仪测量含水率，通过调整，使土壤含水率达到与玉米田耕层土壤相当的水平，此时土壤平均含水率为 16.72%。用土槽试验车刮平铲和镇压辊将旋耕后土壤进行刮平、镇压等，并借助土壤硬度计进行测量，确保土壤硬度达到与玉米田耕层土壤相当的水平，最终测得平均土壤硬度为 412 kPa。沿前进方向，按照玉米种植的农艺要求每隔 30 cm 株距挖出一个可以完整放入玉米根土复合体的坑，每次将 20 个完整的玉米根土复合体放入相应坑中压实，并进行编号，以便记录数据。

将整机悬挂在土槽车的后三点悬挂系统上，启动电源后，开启数据采集系统确保其稳定运行。随后启动土槽车，在缓冲区使挖掘铲顺利入土，操纵液压系统调整挖掘铲至合适挖掘深度，设置土槽车运行速度为 0.74 m/s，开始试验，试验重复 3 次，试验前后根土复合体质量如图 18 所示。



(a) 根土分离前质量 (b) 根土分离后质量

图 18 根土复合体根土分离前后质量

Fig. 18 Weight of root-soil complex before and after separation of root and soil

3.3.3 试验结果与分析

整机土槽试验结果如表 3 所示。

表 3 土槽试验结果

Tab. 3 Soil bin test results %

序号	根茬挖净率	根土分离率
1	100	97.1
2	100	98.7
3	100	96.4
平均值	100	97.4

由表 3 可知,在土槽试验中,整机同样可以将根土复合体完全挖出,根土分离率平均值达到 97.4%(未脱净的土壤主要为黏附在根茬底部复杂根茎处),实现了较好的根土分离效果。从整体上看,该机具有良好的挖掘及根土分离效果,可实现保护性耕作中玉米根茬的处理作业,适用于包括东北地区在内的北方玉米种植区。

4 结论

(1)针对玉米根茬影响播种作业质量的问题,提出了一种“对行挖掘-挤压破碎-振动清土”的玉米根茬处理模式,设计了一种对行挖掘式玉米根茬清土机,可一次性完成玉米根土复合体的挖掘、捡拾、根土分离等作业环节。

(2)对玉米根茬挖掘清土机关键部件结构进行了设计与运动分析。分析了双圆盘挖掘铲的受力和运动,确定了其主要结构参数和作业参数;分析了根土复合体在根土分离各阶段的输送状态及受力状况,确定了拨茬机构、凹板-滚筒式根土分离机构、抖动式杆条输送机构的主要结构参数和运动参数,保证了根土复合体能逐步实现根土分离。

(3)双圆盘挖掘铲田间试验结果表明,玉米根土复合体能够被全部挖出。整机土槽试验结果表明,根土分离率平均值达到 97.4%,根土分离率较高,所设计的对行挖掘式玉米根茬清土机具备有效的根茬挖掘及根土分离能力。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 国家统计局关于 2024 年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2024-12-13) https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213_1957744.html.

[2] 马南, 安婷婷, 张久明, 等. 添加玉米秸秆和根茬对不同肥力黑土微生物残体碳氮的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(4):686-696.
MA Nan, AN Tingting, ZHANG Jiuming, et al. Effects of maize straw and root residues added on microbial residue carbon and nitrogen in different fertility levels of black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(4): 686-696. (in Chinese)

[3] 王莉,周涛,刘婷,等. 玉米大豆根茬混合后的腐解特性[J]. 中国生态农业学报,2018,26(8):1190-1196.
WANG Li, ZHOU Tao, LIU Ting, et al. Decomposition characteristics of mixed maize and soybean root residues[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1190-1196. (in Chinese)

[4] 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. Roots-soil separating device of corn stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 133-139. (in Chinese)

[5] ABAIL Z, WHALEN J K. Corn residue inputs influence earthworm population dynamics in a no-till corn-soybean rotation[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 127: 120-128.

[6] ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, GAO Xiaojun, et al. Evaluating the influence of straight-plain types of rotary tiller blades with various edge curves on maize residue using DEM[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 49-61.

[7] 张仕林,黄玉祥,赵宏波,等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):40-52.
ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 40-52. (in Chinese)

[8] 赵佳乐,贾洪雷,郭明卓,等. 免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(10):18-28.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of supported roll-cutting anti-blocking mechanism with for no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 18-28. (in Chinese)

[9] 王加一,赵淑红,杨智杰,等. 玉米条带少耕作业驱动式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):51-61.
WANG Jiayi, ZHAO Shuhong, YANG Zhijie, et al. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less

tillage operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 51 - 61. (in Chinese)
[10] 林静,吕洲翼,李宏哲,等. 垄作免耕播种机被动式防缠绕破茬清垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(6): 19 - 27.
LIN Jing, LÜ Zhouyi, LI Hongzhe, et al. Design and experiment of passive anti-winding stubble breaking and ridge cleaning device for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 19 - 27. (in Chinese)
[11] ZHANG Shilin, ZHAO Hongbo, WANG Xuezhen, et al. Discrete element modeling and shear properties of the maize stubble-soil complex[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107519.
[12] 武涛,江立凯,赖远宏,等. 玉米根茬根土分离过程数值模拟[J]. 河南农业科学,2016,45(7):132 - 136.
WU Tao, JIANG Likai, LAI Yuanhong, et al. Numerical simulation of roots-soil separation process of corn stubble[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(7): 132 - 136. (in Chinese)
[13] 李三平,包纹全,吴立国. 平贝母收获挖掘设备研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 201 - 209.
LI Sanping, BAO Wenquan, WU Liguo. Research status and development trend of harvesting and digging equipment for *Fritillaria ussuriensis*[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 201 - 209. (in Chinese)
[14] 申海洋,罗伟文,吴峰,等. 花生机械化收获装备与技术研究进展[J]. 农业机械学报,2024,55(8):21 - 38.
SHEN Haiyang, LUO Weiwen, WU Feng, et al. Research progress on mechanized harvesting equipment and technology for peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 21 - 38. (in Chinese)
[15] 王法安,倪畅,张兆国,等. 基于穿山甲前足的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊2):10 - 19.
WANG Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic digging shovel based on front foot of pangolin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 10 - 19. (in Chinese)
[16] 陈中玉,高连兴,CHEN Charles,等. 中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(4):1 - 21.
CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1 - 21. (in Chinese)
[17] LI Junwei, LI Xiangyu, HU Bin, et al. Analysis of the resistance reduction mechanism of potato bionic digging shovels in clay and heavy soil conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108315.
[18] AWUAH E, ZHOU Jun, LIANG Zian, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of Jerusalem artichoke vibrating digging shovel using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105344.
[19] ZOU Liangliang, YAN Dawei, NIU Ziru, 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.
[20] ZHANG Pengcheng, LI Fenggang, WANG Fangyan. Optimization and test of ginger-shaking and harvesting device based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108257.
[21] 张兆国,薛浩田,王一驰,等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):100 - 111.
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100 - 111. (in Chinese)
[22] 曲永波,方志超,柳亚峰,等. 振动和拨辊推送式藠头收获机研制[J]. 农业工程学报,2022,38(19):51 - 59.
QU Yongbo, FANG Zhichao, LIU Yafeng, et al. Development of a vibrating and roller pushing type *Allium chinense* harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 51 - 59. (in Chinese)
[23] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 - 118. (in Chinese)
[24] 何晓宁,张方焱,尚书旗,等. 油莎豆联合收获机合页筛片式升运装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):148 - 157.
HE Xiaoning, ZHANG Fangyan, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of hinge lifting device of *Cyperus esculentus* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 148 - 157. (in Chinese)
[25] CHEN Mingdong, LIU Xiaotong, HU Pengxiang, 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.
[26] 杨然兵,张建,尚书旗,等. 甘薯联合收获机二级输送分离装置的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2024, 54(9):2708 - 2722.
YANG Ranbing, ZHANG Jian, SHANG Shuqi, et al. Design and test of secondary conveyor separator device for sweet potato combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(9): 2708 - 2722. (in Chinese)
[27] WANG Shenying, HU Zhichao, YAO Lijun, et al. Simulation and parameter optimisation of pickup device for full-feed peanut combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106602.

(下转第 128 页)

GUO Qian. Experimental research on the cutting mechanism and performance of rattan straw [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[22] 宗继尧. 树枝破碎机设计与结构分析的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
ZONG Jiyao. Twig chipper design and the structure analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[23] 王庆杰,李洪文,何进,等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6):109 - 113.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on twist type ridge-clear device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 109 - 113. (in Chinese)

[24] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28 - 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28 - 36. (in Chinese)

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[26] 董瑞. 青贮玉米收获割台切割过程仿真及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
DONG Rui. Simulation and experimental study on cutting process of silage corn harvesting header[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)

[27] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):68 - 79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip straw cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 68 - 79. (in Chinese)

[28] 仝振伟,李洪文,卢彩云,等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):83 - 95.
TONG Zhenwei, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Design and experiment of direct-injection straw picking and crushing deep burying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 83 - 95. (in Chinese)

[29] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 - 85. (in Chinese)

[30] LIU Lei, WANG Xianliang, ZHANG Xiangcai, et al. Determination and verification of parameters for the discrete element modelling of single disc covering of flexible straw with soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 151 - 167.

[31] LIU Lei, WANG Xianliang, ZHANG Xiangcai, et al. The impact of 'T'-shaped furrow opener of no-tillage seeder on straw and soil based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108278.

[32] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):45 - 54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45 - 54. (in Chinese)

[33] 张李娴. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Lixian. Research on the discrete element modeling method of corn stalk's mechanical characteristics[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[34] 雷廷宙,沈胜强,吴创之,等. 玉米秸秆干燥特性的试验研究[J]. 太阳能学报,2005,26(2):224 - 227.
LEI Tingzhou, SHEN Shengqiang, WU Chuangzhi, et al. Experimental study on the drying characteristics of maize straw[J]. Acta Energiae Solaris Sinicae, 2005, 26(2): 224 - 227. (in Chinese)

(上接第 117 页)

[28] 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, et al. Design and test of combined swing *Radix isatidi* root-soil separation device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 109 - 119. (in Chinese)

[29] UPADHYAY G, RAHEMAN H. Specific draft estimation model for offset disc harrows[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 75 - 84.

[30] 吕金庆,张璇,竹筱歆,等. 大垄双行马铃薯覆膜机关键部件设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2023,54(8):88 - 96.
LÜ Jinqing, ZHANG Xuan, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of key components of large monopoly double row potato mulching device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(8): 88 - 96. (in Chinese)

[31] CELIK A, ALTIKAT S. The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105202.

[32] 郝建军,魏文波,秦家辉,等. 切流式油葵脱粒筛分机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):139 - 148.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, QIN Jiahui, et al. Design and test of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 139 - 148. (in Chinese)