DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.012

黑木耳废菌棒回收机研制与试验

赵威[1], 杨振华[2], 林基清[2], 姜程杰[1], 朱先法[1], 杜小强[1, 3*]

(1. 浙江理工大学机械工程学院,浙江杭州,310018; 2. 龙泉市菇源自动化设备有限公司,浙江龙泉,323700; 3. 浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室,浙江杭州,310018)

摘要:针对黑木耳废菌棒捡拾回收作业人工依赖程度高、作业效率低、劳动强度大等问题,结合废菌棒田间存留特点与回收农艺要求,设计了一种自走式回收机。通过对扎针滚筒、引导板、输送装置等关键部件的设计与分析,实现了废菌棒捡拾回收过程的自动化。为使回收机获得最佳作业性能,以滚筒转速、机具前进速度及滚筒安装高度为试验因素,以废菌棒的收集率与破损率为试验指标,设计并开展了三因素三水平正交试验,分析了各交互因素对捡拾性能指标的影响。结果表明,当前进速度取0.28 m/s、滚筒转速取46 r/min、安装高度取41.3 cm时,回收机捡拾作业收集率为96.4%,破损率为3.77%,满足田间废菌棒捡拾作业要求。研制的自走式废菌棒回收机实现了废菌棒回收过程中,捡拾与传递环节的机械化及自动化,降低了人工需求与处理成本,提升了废菌棒回收利用效率。并且所设计的扎针滚筒机构能在进行捡拾工作时实现扎取和回拨两种不同的拾取动作,在保证废菌棒捡拾成功率的同时又一定程度地减少了废菌棒的破损率,为实现低损伤捡拾田间废菌棒自动化的研究提供了参考。

关键词:黑木耳;废菌棒;捡拾装置;自动捡拾;扎针滚筒

中图分类号:S224.9 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2026)01-0118-11

赵威, 杨振华, 林基清, 姜程杰, 朱先法, 杜小强. 黑木耳废菌棒回收机研制与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 118−128

ZHAO Wei, YANG Zhenhua, LIN Jiqing, JIANG Chengjie, ZHU Xianfa, DU Xiaoqiang. Development and experiment of a recycling machine for waste black fungus sticks [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 118−128

0 引言

我国是世界最大的黑木耳主产国,产量约占世界黑木耳总产量的90%以上[1]。目前我国黑木耳栽培方式主要以袋料栽培为主,即采用塑料袋菌棒栽培模式,其菌棒由装袋机将预制的培养基料封装进塑料袋制成[2-3],在经过多茬木耳采收后便被丢弃而形成废菌棒。废菌棒本身具有较高的回收利用价值,其菌料可用来制备栽培基质、有机肥、饲料、沼气发酵材料、制备生物质炭等,是一种可再生生物质资源,而包裹废菌棒的塑料膜亦可由专业的工厂进行回炉再熔炼来进行二次利用[4-6]。由于黑木耳栽培选址通常在水源附近,且菌棒袋料富含氮、磷有机物而呈酸性,如果处理不及时,不仅会造成生物质资源的浪费,其菌料与塑料膜还会造成水体环境与田间环境的污染[7-8]。

虽然在菌棒制作、木耳采收等环节已经有较成型的机械设备[9-10],但针对田间废菌棒捡拾回收自动化这一环节还缺少相应的研究,主要还是依靠人工进行捡拾,工作效率低、劳动强度大,容易因废菌棒处理不及时而造成资源浪费和环境污染。目前,籽瓜类作物的捡拾工作条件与废菌棒非常相似,其个体均具有一定体积、内外有明显分界、在田间的存留姿态基本一致,田超[11]针对现有大型辊筒类自走式西葫芦收获机在实际工作中,所存在的漏捡、西葫芦不易脱落等问题,对前端捡拾收获台进行了改进与设计;王明闯等[12]基于籽瓜物理特性,研制了一种可实现去秧、送瓜、碎瓜功能的扎齿式籽瓜联合收获机;奥地利Moty公司研发了一款用于捡拾籽用南瓜的KE1800MS型悬挂式捡拾装置,该机具通过可折叠的扎齿滚筒捡拾装置来将南瓜扎起,扎齿呈纵横交错式分布,增大了捡拾装置与南瓜接触时的扎齿数量,能够快速且稳定地将地面的籽用南瓜捡拾。以上几种籽瓜类收获器械均采用扎齿滚

收稿日期:2025-08-23 修回日期:2025-09-26

基金项目:浙江省农业"双强"重点突破试点类项目

第一作者:赵威,男,2000年生,湖南益阳人,硕士研究生;研究方向为农业机械设计。E-mail: 1958543501@qq.com

*通信作者:杜小强,男,1978年生,福建福清人,博士,教授;研究方向为农业机器人、农林装备设计等。E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

筒机构作为捡拾机构，只通过扎齿刺入作业对象表面进行捡拾，扎齿分布越密集其捡拾成功率也越高。但是这些装置的作用对象本就需要破瓜取籽，而对于废菌棒而言，其表面的薄膜不像瓜皮与果肉一样具有较好的支撑和保护作用，密集的扎齿会在薄膜表面造成过多的损伤而导致破损与漏料，因此并不能满足保留其回收利用价值的需求。

综上所述，设计开发一种带扎针滚筒机构的自走式回收机，旨在降低劳动强度与人工成本、提高废菌棒回收利用效率的同时，兼顾废菌棒捡拾成功率与破损率，对黑木耳产业可持续健康发展和全流程机械化、农业增效等方面起到一定的促进作用。

1　废菌棒回收农艺要求

以位于浙江省龙泉市兰巨乡木耳基地的“黑山 15 号”短包废菌棒为研究对象，其新鲜菌棒由制棒机器统一生产，整体外形为规则圆柱体，在末茬木耳采收完毕后，其菌包内的菌丝与水分使其外观形状不会发生太大改变[13]。为最大限度保留废菌棒的回收价值，故对木耳采收完成后，晾晒时间半个月内的废菌棒进行物理特性测定，以便进行回收机的设计工作。废菌棒捡拾回收相关参数如表 1 所示。

表 1　废菌棒基本参数及回收农艺要求

Table 1　Basic parameters of waste fungus sticks and agronomic requirements for recycling

参数	数值	参数与指标	数值
平均直径/mm	104	工作幅宽/mm	1 200
平均长度/mm	204	垄面高度/mm	100
平均质量/kg	0.73	漏捡率/%	≤5
最大剪切力/N	108.4	破损率/%	≤5

农户们在采收完最后一茬木耳后，为了日后方便捡拾会将木耳废菌棒丢至垄面中间，因此绝大部分废菌棒都呈倒伏姿态，黑木耳菌棒在种植时地面会铺有一层毡布，且毡布需要重复使用，这导致许多贴地式的回收机械无法进行废菌棒的收集作业。废菌棒人工捡拾作业需要至少配备 3 名人员，分别负责弯腰捡拾、传递和操作运输机械。为将劳动强度最大的废菌棒捡拾与传递这两个环节实现自动化与机械化，本研究将开展自走式废菌棒回收机的结构设计。

2　整机结构与工作原理

2.1　整机结构

黑木耳废菌棒回收机主要由扎针滚筒捡拾机构、输送装置、引导板、槽型刮板、出料装置和电动底盘组成，整体结构如图 1 所示。

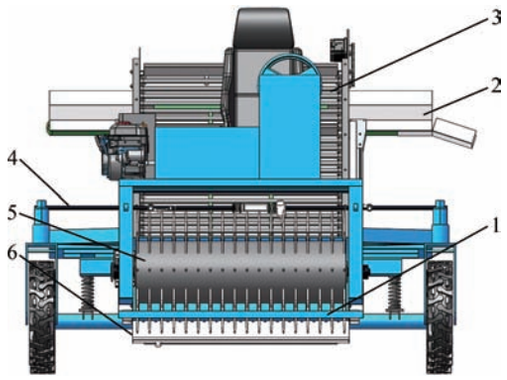


图 1　黑木耳废菌棒回收机整机结构

Figure 1　Overall structure of the recycling machine for waste black fungus sticks

1. 槽型刮板　2. 出料装置　3. 输送装置　4. 电动底盘　5. 扎针滚筒　6. 引导板

2.2　工作原理

废菌棒捡拾作业采用联合收获方式，以废菌棒回收机前进方向为正方向，扎针滚筒捡拾机构、引导板以及槽型刮板等部件通过轴承、螺栓以及焊接的方式安装在电动底盘上，工作时随电动底盘前进，由电机与减速机提供动力，通过链轮传递给捡拾机构使其向正方向旋转，并可通过控制器调节转速。当扎针与废菌棒接触时，如图 2 所示，若扎针延长线与废菌棒截面最外侧相切，则扎针基本对废菌棒做回拨动作，将其回拨推送至引导板斜面最终掉落进输送装置；若扎针延长线与废菌棒截面相交，扎针将刺入废菌棒中连带着运动至引导板，并配合槽型刮板将其刮落至输送装置。随后输送装置将其升运输送至后方出料传送带，最终落入随行收集小车中。当收集完一垄废菌棒后，通过方向盘使车身转弯掉头便可准备进行下一垄废菌棒的回收。

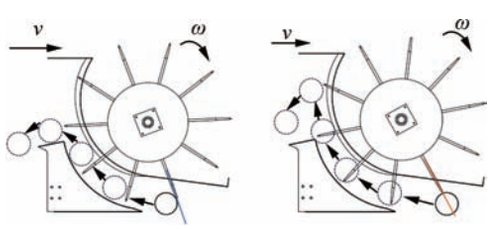


图 2　捡拾原理示意图

Figure 2　Schematic diagram of the picking principle

3　关键部件设计

3.1　捡拾机构

扎针滚筒捡拾机构作为废菌棒回收机实现捡拾功能的核心部件，其整体结构如图 3 所示。主要由滚筒、

扎针、锁紧螺母、滚筒安装轴、带座轴承、齿轮组成。整个扎针滚筒机构通过安装轴和轴承安装在机架上,并由电机与减速器带动齿轮旋转。根据废菌棒回收农艺要求,考虑整机安装空间,取滚筒半径为180 mm,宽度为1 220 mm。

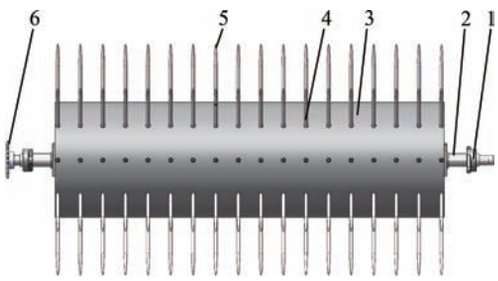


图3 捡拾机构示意图

Figure 3 Schematic diagram of the picking mechanism

1. 带座轴承 2. 滚筒安装轴 3. 滚筒 4. 锁紧螺母 5. 扎针 6. 齿轮

3.1.1 扎针参数设计

扎针过长会导致阻力臂过大而极易弯折,扎针过短则会直接导致有些废菌棒不易被拨动和扎取。考虑到当扎针与废菌棒接触时的作用力与水平方向夹角等于废菌棒与地面之间摩擦角时,废菌棒所受到的剪切力最大,如图4所示,令扎针尖端在与废菌棒最上方接触时,作用力与水平方向夹角等于废菌棒摩擦角,此时为扎针刺入废菌棒最理想位置,并可以在后续的捡拾过程中,减少扎针与废菌棒外侧相切时其作用力与水平夹角等于摩擦角的情况,从而降低捡拾过程中废菌棒的破损率。

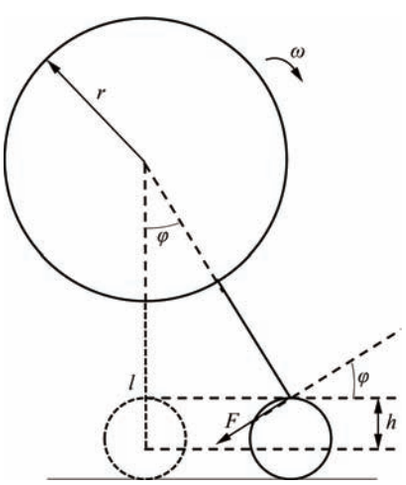


图4 扎针尖端与废菌棒接触示意图

Figure 4 Schematic diagram of the contact between the tip of the needle and the waste black fungus sticks

对于废菌棒实际捡拾作业而言,当扎针刺入深度达到废菌棒直径1/2时,废菌棒便可被扎起向上运动,且最大刺入深度不宜超过废菌棒直径2/3,以减少捡拾过程中与引导板斜面发生剪切以及不易被槽型刮板刮落的情况[14],综上可以得到:

$$\begin{cases} h=(r+l)-(r+l)\cos\varphi \\ \dfrac{D}{2}\leqslant h\leqslant\dfrac{2D}{3} \end{cases} \tag{1}$$

式中:r——滚筒半径,mm;

l——扎针外露长度,mm;

φ——废菌棒与地面毡布摩擦角,(°);

D——废菌棒直径,mm。

通过前期试验与参数测量得知废菌棒与地面毡布的摩擦角最大为34.3°,废菌棒的平均直径为104 mm。将已测得的数据与滚筒半径代入式(1)中,得到扎针外露长度取值范围为118.85~218.47 mm,最终取扎针外露长度为190 mm,为确保扎针强度能够满足作业要求,取扎针直径为10 mm。由于废菌棒回收机田间工作强度较大,扎针可能需要进行不定期的更换,为了避免进行整排扎针的更换,将单根扎针与滚筒连接方式设计为螺纹连接,而M10规格螺栓有效螺纹深度一般为10~12 mm,因此取扎针于滚筒内部安装螺纹深度与外部紧固螺纹深度均为10 mm,以此得到扎针长度为200 mm。为便于废菌棒更容易被扎取和后续与扎针分离,同时也为减小废菌棒表面损伤,扎针形状在普通圆锥型结构的基础上,如图5所示,通过对针体离尖端60 mm处进行再次倒角,以起到一定的锐化效果。



图5 扎针示意图

Figure 5 Schematic diagram of the needle

3.1.2 扎针分布设计

对于大多数扎针滚筒类捡拾机构而言,其扎针分布方式主要有3种:纵横交错式、螺旋交错式、田字分布式[15]。其中前两种主要用于对需破碎籽瓜类的扎取,本研究为实现两种不同捡拾功能,选用多排扎针在滚筒周向上按一定间距排布的田字形分布方式,如图6所示。

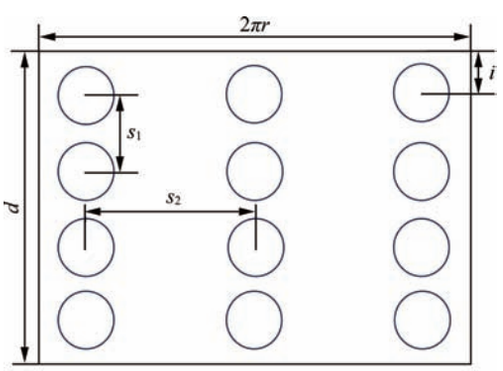


图6 扎针分布示意图

Figure 6 Schematic diagram of needle distribution

在扎针间距方面，为确保能稳定地将废菌棒捡拾，扎针在接触废菌棒时应保证至少有 2 根扎针接触废菌棒，同时为了日后便于更换，其间距也不宜过小；而在扎针排数方面，为避免机构运行过程中两排扎针之间卡住废菌棒，同时也为保证废菌棒单次只由一排扎针捡拾，因此令两排相邻扎针间的最大弦长达到两个废菌棒直径，由此得扎针滚筒扎针间距与排数分布条件如式(2)所示。

$$\begin{cases} L \leqslant 3s_1 + 2d_1 \\ i \leqslant d - (n_1 - 1)s_1 + d_1 \\ 2r\sin(\dfrac{\pi}{n_2}) \geqslant 2D \\ n_2(s_2 + d_1) \leqslant 2\pi r \end{cases} \tag{2}$$

式中：L——废菌棒长度，mm；

s_1——轴向上相邻两扎针间距，mm；

d_1——扎针直径，mm；

d——滚筒宽度，mm；

n_1——单排扎针个数，个；

n_2——扎针排数，排；

s_2——周向上两排扎针间弧长，mm；

i——边缘安全余量，其值取 20 mm。

代入各数据可得轴向上单排扎针个数取最大值为 20.72，扎针排数最大值为 11.01。综合考虑机构加工难度与扎针分布间距的均匀性，取单排扎针个数为 18 个，排数为 10 排。扎针具体安装方法如图 7 所示，滚筒内壁焊好预先加工有螺纹孔的安装钢条，在滚筒进行卷曲成型前，根据所设计扎针排数将钢条均匀排布焊接在滚筒内侧面，尾端带有螺纹的扎针通过安装钢条和锁紧螺母固定在滚筒表面，使得单根扎针均可自由更换，有利于机具进行长期作业。

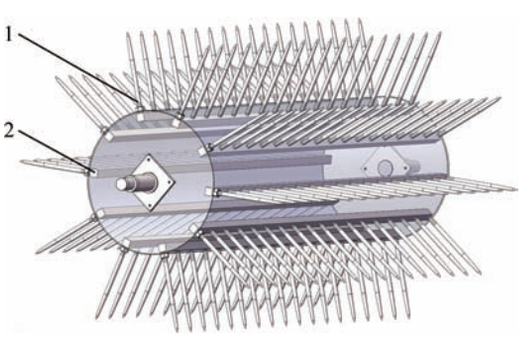


图 7　扎针安装示意图

Figure 7　Schematic diagram of needle installation

1. 内置攻牙钢条　2. 扎针与锁紧螺母

3.2　引导板

3.2.1　引导板参数设计与滚筒安装高度

由扎针滚筒机构捡拾拨送的废菌棒需要由引导板接引，使其沿引导板斜面向上运动，然后掉落至输送装置；而由扎针扎取的废菌棒将会通过槽型刮板将其刮落，且引导板也能防止被扎取的废菌棒在由下往上运动的过程中掉落。确定引导板的形状需要根据扎针滚筒机构的工作方式进行考虑，捡拾过程通过扎针滚筒机构做圆周运动来实现，因此引导板斜面为圆弧形状时废菌棒才能顺利通过，当将引导板与扎针滚筒呈同心布置时，扎针滚筒与引导板位置如图 8 所示。

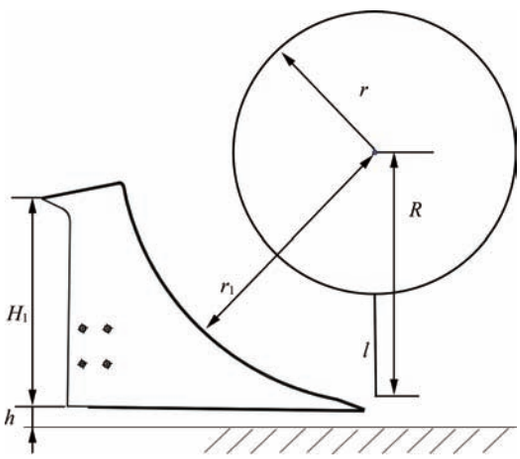


图 8　扎针滚筒与引导板位置示意图

Figure 8　Schematic diagram of the position of the needle roller and the guide plate

为了防止出现漏棒和干涉，针端与斜面保持 10 mm 间隙，即引导板弧形斜面半径为 380 mm。此时废菌棒在沿斜面运动时，为尽量避免废菌棒在斜面末端向竖直方向运动，弧形斜面应具有一定倾角，使其圆弧终点位置低于滚筒圆心位置。考虑到引导板不能与后方输送装置发生干涉，取引导板内侧高度为 280 mm；引导板底部应与地面保持一定安全距离，以免触碰到地面毡布，考虑到距离过高会使引导板与地面间隙过大，从而导致废菌棒易与引导板形成剪切而造成破损和漏捡，因此取引导板底面与垄面距离为 10 mm。综上可得扎针滚筒安装高度最低为 380 mm，安装高度可根据实际情况通过带座轴承进行调节。

3.2.2　引导板斜面倾角与滚筒最大转速

引导板上端因倾角会形成一段斜坡，为了使在某些情况下，如废菌棒被刮落至引导板上方斜坡段时，废菌棒能够更顺利落入输送装置中，即要使废菌棒静止处于斜坡上时能够顺利落下，则圆弧斜面倾角应大于废菌棒与引导板之间的摩擦角。

当废菌棒到达引导板斜面最高点时，由于废菌棒在斜面上一直跟随扎针滚筒做匀速圆周运动，所以在到达最高处时会将废菌棒沿着斜面切线方向上抛一段距离，再向下回落做平抛运动，因此以废菌棒水平运动方向为 X 轴，以竖直向上为 Y 轴，建立坐标系如图 9 所示，可得：

$$\begin{cases}\theta > \varphi_1 \\ V_y = V\cos\theta = gt \\ V_x = V\sin\theta \\ V = \omega R \\ x = V_x t\end{cases} \tag{3}$$

式中:φ_1——废菌棒与引导板间摩擦角;

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2;

ω——扎针滚筒角速度,rad/s;

t——废菌棒在空中运动时间,s;

R——扎针滚筒工作半径;

x——废菌棒水平方向运动距离。

由式(3)可知,捡拾机构圆周角速度越大,废菌棒在斜面上方水平方向上运动的距离越长,沿引导板上抛的高度也越高,从而导致废菌棒直接砸入输送装置中所造成的冲击就越大,影响装置稳定性。但若为此加长斜坡段或增大引导板斜面坡度,则又可能会导致斜坡终点与输送装置中用于提升废菌棒的链挡板发生干涉,因此需选取在合适的斜坡段长度下扎针滚筒的最大转速[16]。

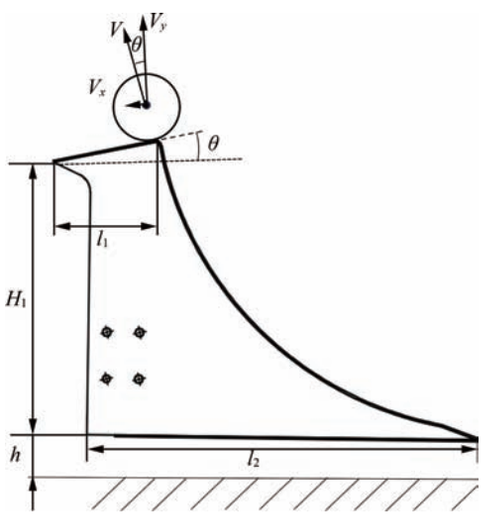


图 9 废菌棒于引导板上运动简图

Figure 19 Simplified diagram of the movement of waste fungus sticks on the guide plate

通过前期试验与参数测量得知废菌棒与引导板之间的摩擦角为 19.64°,因此取引导板斜面倾角为 20°。当取捡拾机构最大角速度为 60 r/min 时,根据式(3)得到废菌棒在引导斜面上方水平方向移动距离为 178 mm。为使废菌棒顺利落入输送装置,取斜坡段水平投影长度为 150 mm,根据计算得到斜坡段长度约为 160 mm,此时斜坡段长度约为 1.5 倍废菌棒直径,可以使引导板上方不会一次性停留 1 排以上废菌棒,在捡拾机构转速较低以及废菌棒被刮落时,能减少一次性落入输送装置水平段废菌棒数量,以此增强整机工作稳定性,综上可得引导板底部长度为 417 mm。

3.3 输送装置

输送装置用于将捡拾装置所收集来的黑木耳废菌棒提升输送至出料传送带,为了能顺利接收从引导斜面拨送上来和被槽型刮板刮落下来的废菌棒,设计了一种呈“L”型的链条链板式输送装置,其整体结构如图 10 所示。在提升面倾角方面,考虑到倾角若太大,不仅导致整体输送难度加大,还会影响转角处废菌棒的通过性;而倾角太小,将会使得车身长度加长,从而使转弯半径加大,不利于机器在田间行走与掉头。综合以上考虑,取输送装置提升面长度为 1 600 mm,与水平面夹角为 60°,根据废菌棒回收农艺要求与前端捡拾机构宽度,取输送面宽度为 1 240 mm。

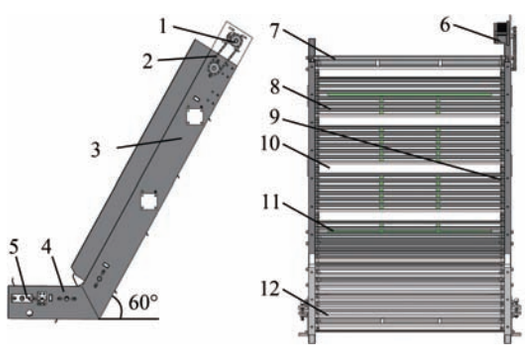


图 10 输送装置示意图

Figure10 Schematic diagram of the conveying device

1. 齿轮 2. 链条 3. 长侧板 4. 短侧板 5. 张紧装置 6. 电机与减速机 7. 主动轴 8. 链板 9. 附件链条 10. 链挡板 11. 支撑方管 12. 从动轴

输送装置水平段部分与引导板衔接位置如图 11 所示,将引导板上方斜坡终点位置与输送机构最右侧切线位置重合,并将水平段上方链挡板垂直于水平面时高度与斜坡终点位置平齐,使链挡板在经过链轮啮合位置时不会与引导板发生干涉。

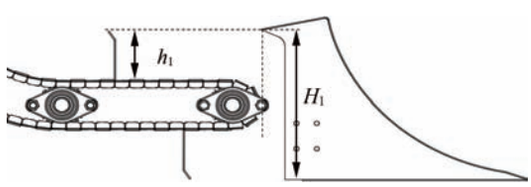


图 11 输送装置水平段与引导板衔接示意图

Figure 11 Schematic diagram of the connection between the horizontal section of the conveying device and the guide plate

为使废菌棒在后续升运过程中其重心始终在链挡板内侧,以及输送机构水平段在运行过程中不与地面发生干涉,则链挡板高度与链轮直径需满足:

$$\begin{cases}h_1 \geqslant D\sin a \\ 2h_1 + d_2 \leqslant H_1 - s\end{cases} \tag{4}$$

式中:a——输送提升面倾斜角度,(°);

h_1——链挡板高度,mm;

d_2——链轮直径，mm；

s——安全余量，值取 10 mm；

H_1——引导板内侧高度。

根据木耳废菌棒尺寸参数以及引导板参数，得链挡板高度最小值为 90.4 mm，因此可取链挡板高度为 91 mm；得到链轮直径最大值为 88 mm，参考链轮选型标准，选择链轮型号为 08B19 齿，其直径为 84 mm。在废菌棒进入输送装置过程中，废菌棒从引导板上方掉落至输送装置水平段这一过程如图 12 所示，废菌棒在越过引导板后继续在水平方向上做平抛运动，此时废菌棒在水平方向上做匀速运动，速度保持不变（忽略空气摩擦）。

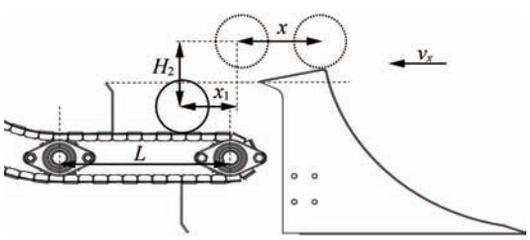


图 12　废菌棒掉落过程示意图

Figure 12　Schematic diagram of the falling process of waste black fungus sticks

取滚筒角速度为 60 r/min，即废菌棒抛出距离最远时进行分析，此时，输送装置水平段长度应大于废菌棒从引导板落入输送装置过程中的水平方向运动距离，因此可得：

$$\begin{cases} x_1 = V_x\sqrt{\dfrac{2H_2}{g}} \\ V_x = \omega R\sin\theta \\ H_2 = h_1 + x\cdot\tan\theta \\ L > x_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中：V_x——废菌棒水平方向运动速度，m/s；

H_2——废菌棒的下落高度，mm；

x_1——废菌棒落入输送装置过程中水平运动距离，mm；

L——输送装置水平段长度，mm。

根据式(4)与式(5)，可得下落高度为 155.79 mm，代入数据得出水平段长度应大于 140.88 mm，为保证废菌棒在进入升运阶段前的输送平稳性，在考虑整体安装空间的前提下，将前端水平输送长度进行适当增长[17]，因此取输送装置水平段长度为 400 mm。

4　田间试验

4.1　试验材料与设备

试验对象为浙江省丽水市龙泉市地区广泛种植的“黑山 15 号”木耳短包废菌棒，所用批次废菌棒在外晾晒时间不超过两周，含水率约为 50%，试验前统一放置在阴干环境中保存。试验采用自制的自走式废菌棒回收机，于 2024 年 5 月在龙泉市兰巨隆欣家庭农场木耳种植基地进行试验，如图 13 所示，每次试验取 50 个废菌棒，每组试验重复 3 次取平均值。



图 13　田间试验示意图

Figure 13　Schematic diagram of field experiment

4.2　试验设计

4.2.1　试验因素

对于一般的自走式带正向旋转类捡拾机构的收获机械而言，只有其捡拾机构圆周线速度与机具前进速度的比值（以下简称速比）。大于 1，即捡拾机构圆周线速度大于机具前进速度，运动轨迹如图 14 所示形成扣环时，捡拾机构才会在捡拾过程中具有水平向后的分速度与作用力，得以进行往后和往上拨送的动作来实现对木耳废菌棒的捡拾作业[18]。速比的大小直接影响轨迹扣环的形状与捡拾性能，同时在进行扎针参数设计时便考虑到扎针与废菌棒接触角度以及扎入深度对废菌棒捡拾作业的影响，综上分析可得知滚筒转速、车身前进速度、滚筒安装高度是决定回收机捡拾性能的关键因素。



图 14　速比大于 1 时捡拾机构运动轨迹

Figure 14　Motion trajectory of the picking mechanism when the speed ratio is greater than 1

一般对于田间作业的农业机械而言，尤其作业对象十分密集的情况下，其最大的前进速度[19]不宜超过 0.5 m/s，且在前文分析中已选定捡拾机构最大转速为 60 r/min，在两者工作速度约束条件下，取最大滚筒转速为 60 r/min，分为 3 个水平，分别为 30 r/min、45 r/min、60 r/min；取最大前进速度为 0.4 m/s，同样分为 0.2 m/s、0.3 m/s 和 0.4 m/s 3 个水平；前文扎针处于理想扎入位置时其安装高度约为 42 cm，因此取安装高度为 40 cm、42 cm、44 cm 3 个水平建立如表 2 所示正交试验因素表。

表 2 试验因素与水平

Table 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	滚筒转速 A /(r·min^{-1})	前进速度 B /(m·s^{-1})	安装高度 C/cm
1	30	0.2	40
2	45	0.3	42
3	60	0.4	44

4.2.2 试验指标

为研究滚筒转速、机具前进速度和滚筒安装高度对所设计废菌棒回收机工作性能的影响,基于前文研究采用二次回归旋转正交组合试验研究回收机最佳工作参数[20-21]。以废菌棒收集率、破损率作为性能指标,其定义与计算方法如下。

收集率:以试验中回收机横向出料传送带所送出废菌棒数量为收集数量,计算其占垄面废菌棒总数量的比率。破损率:废菌棒在回收过程中表面会有所损伤,现将侧面圆周方向划伤长度达到1/3周长或者轴向上划伤长度达到1/3废菌棒高度的废菌棒视为已破损、回收价值低的废菌棒,同样计算其占垄面废菌棒总数量的比率。得收集率与破损率计算公式为:

$$\begin{cases} Y_1 = \dfrac{G_1}{G} \times 100\% \\ Y_2 = \dfrac{G_2}{G} \times 100\% \end{cases} \tag{6}$$

式中:Y_1——废菌棒收集率,%;

Y_2——废菌棒破损率,%;

G_1——废菌棒收集个数,个;

G_2——废菌棒破损个数,个;

G——废菌棒总数,个。

4.3 试验结果分析

4.3.1 试验结果

根据L9(3^3)正交试验表,即三因素三水平正交试验表[22-26],按照计划共做17组试验,每组试验重复三次并取平均值。以废菌棒的收集率与破损率为评价指标,进行正交试验,实验结果如表3所示。

4.3.2 方差分析

收集率与破损率回归模型方差分析结果如表4所示。根据表4结果数据可知,两回归模型的 P 值均在0.000 1以下,表明两回归模型极显著;且模型失拟项的 P 值均大于0.05,说明模型失拟项不显著,回归模型拟合度高。两模型的决定系数 R^2 分别为0.982 2、0.982 9,表明废菌棒收集率与破损率拟合回归模型具有较高的可靠性。

表 3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results

试验组	A/(r·min^{-1})	B/(m·s^{-1})	C/cm	收集率 Y_1/%	破损率 Y_2/%
1	60	0.3	44	90	12
2	60	0.4	42	82	4
3	45	0.3	42	95.3	3.3
4	45	0.3	42	96	4
5	45	0.2	44	92	10
6	45	0.4	44	82	6.7
7	45	0.2	40	88	4
8	30	0.4	42	78	4.7
9	60	0.3	40	91.3	5.3
10	45	0.3	42	96.7	4.7
11	45	0.3	42	94.7	4
12	45	0.3	42	95.3	4
13	30	0.2	42	80	2
14	30	0.3	40	86	4
15	45	0.4	40	86.7	5.3
16	30	0.3	44	78.6	6
17	60	0.2	42	94.7	8

由滚筒转速、机具行进速度、滚筒安装高度的 P 值可判断,滚筒转速 A 与前进速度 B 对收集率有极其显著的影响,滚筒离地高度 C 对收集率有显著的影响,滚筒转速与机身前进速度对废菌棒收集率的影响最大。交互作用 AB、A^2、B^2、C^2 对收集率影响极显著,AC、BC 对收集率影响显著。滚筒转速 A 与滚筒安装高度 C 对破损率有极其显著的影响,车身前进速度 B 对破损率有显著的影响,滚筒转速与滚筒安装高度对废菌棒破损率的影响最大。交互作用 AB、AC、BC、C^2 对破损率影响极显著,A^2 与 B^2 对破损率影响不显著。将不显著因素剔除后,得到收集率与破损率回归模型的二次回归优化方程。

$$\begin{cases} Y_1 = 95.6 + 4.42A - 3.25B - 1.18C - \\ \qquad 2.67AB + 1.53AC - 2.18BC - \\ \qquad 6.31A^2 - 5.61B^2 - 2.81C^2 \\ Y_2 = 4 + 1.57A - 0.41B + 2.01C - \\ \qquad 1.67AB + 1.18AC - 1.15BC + 2.47C^2 \end{cases} \tag{7}$$

根据上述回归方程可得各因素对收集率影响由大到小为滚筒转速 A、前进速度 B、安装高度 C;对破损率影响由大到小为安装高度 C、滚筒转速 A、前进速度 B。通过试验分析软件对试验数据进行处理,进一步分析各因素交互作用对收集率 Y_1 与破损率 Y_2 的影响,其响应面曲线图如图15所示。

表 4　废菌棒收集率与破损率二次多项式模型方差分析

Table 4　ANOVA of the quadratic polynomial model for collection rate and damage rate

	收集率				破损率			
方差来源	平方和	自由度	均方	P值	平方和	自由度	均方	P值
模型	677.17	9	72.24	＜0.000 1**	100.51	9	11.07	＜0.000 1**
A	156.65	1	156.65	＜0.000 1**	19.85	1	19.85	＜0.000 1**
B	84.50	1	84.50	0.000 2**	1.36	1	1.36	0.053*
C	11.04	1	11.04	0.040 6*	32.40	1	32.40	＜0.000 1**
AB	28.62	1	28.62	0.005 0**	11.22	1	11.22	0.000 3**
AC	9.30	1	9.30	0.055 0*	5.52	1	5.52	0.002 2**
BC	18.92	1	18.92	0.013 5*	5.29	1	5.29	0.002 5**
A^2	167.78	1	167.78	＜0.000 1**	1.05	1	1.05	0.079 5
B^2	132.63	1	132.63	＜0.000 1**	0.13	1	0.13	0.496 2
C^2	33.31	1	33.31	0.003 3**	22.76	1	22.76	＜0.000 1**
残差	12.31	7	1.76		1.75	7	0.25	
失拟	9.95	3	3.32	0.064	0.773		0.258	0.295
误差	2.36	4	0.59		0.988		0.245	
总和	689.48	16			102.26			

注：“**”表示该项极显著（P＜0.01）；“*”表示该项显著（P＜0.05）。

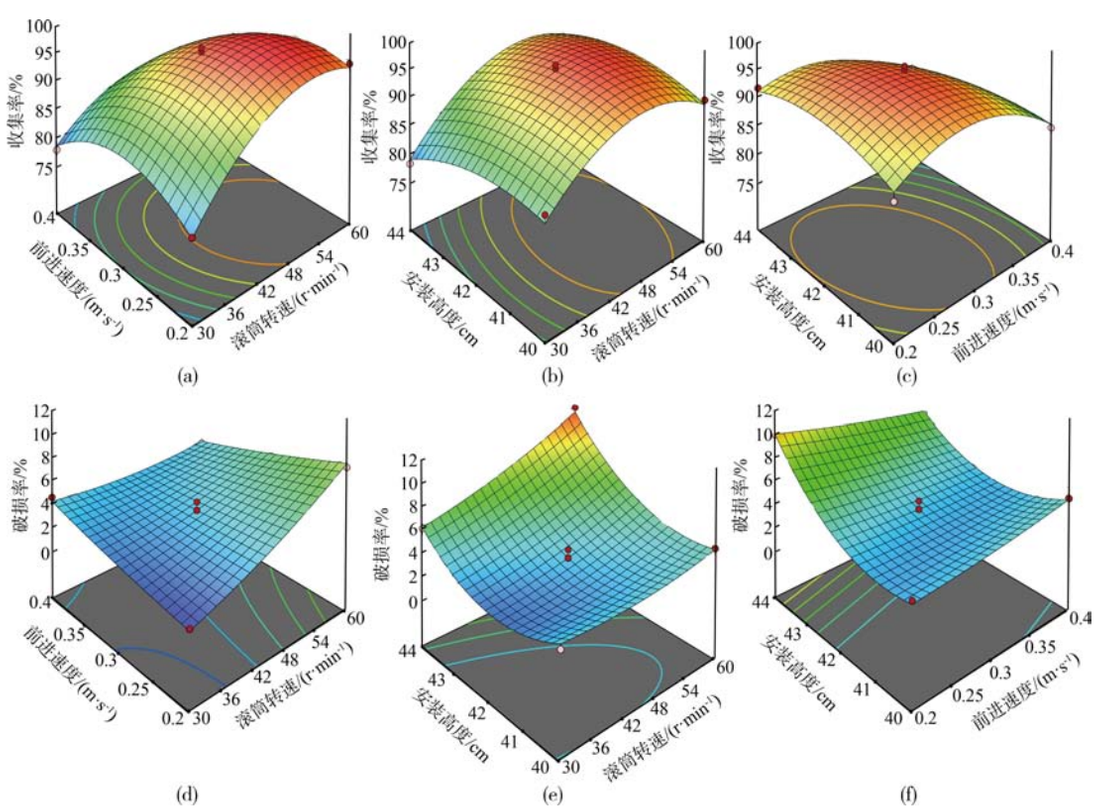


图 15　各因素对收集率与破损率交互作用响应面图

Figure 15　Response surface diagram of the interaction of various factors on collection rate and damage rate

由图 15 可知，在滚筒转速从 30 r/min 到 60 r/min 的变化过程中，废菌棒收集率与破损率都随着转速的增大而增大，但收集率在接近最高转速时反而会减小，这是由于转速较快时不仅加大了废菌棒的破损率，还会使一些破损较严重的废菌棒在进入输送装置时，如图 16 所示，因冲击较大致使废菌棒菌料从链板间隙中

抖落而无法被成功收集。



图 16 菌料在废菌棒破损后被抖落

Figure 16 The fungal material is shaken off after the waste black fungus stick is broken

在前进速度从 0.2 m/s 到 0.4 m/s 的变化过程中，废菌棒收集率先由小增大，随着前进速度的不断加快，当回收机前进至垄面终点时，会有个别废菌棒因被引导板推挤而未被及时捡拾，从而降低了整体的收集率，而破损率在此过程中变化幅度较小。

在安装高度从 40 cm 到 44 cm 的变化过程中，破损率呈先增大后减小的变化，这是因为在安装高度较低时，扎针与废菌棒发生剪切概率较大，同时也使得扎入深度较深，废菌棒因被刮落的不及时在空中被扎针二次击打而划伤，而较高的安装高度则又会直接增大扎针划伤菌包表面的概率；而收集率变化幅度较小，但在破损率的变化过程中，同样会因为一些破损较严重的废菌棒未能被成功输送至出料装置而使收集率随之发生相应的变化，虽然在较高的安装高度下，扎针扎入废菌棒深度达不到其 1/2 直径，但因为有引导板的存在，使得被扎取的废菌棒在其运动过程中不会遗落。

4.3.3 参数优化与验证

为了得到最优参数组合使回收机的作业性能达到最佳，利用 Design-Expert 软件所提供的 Optimization (Numerical)数值最优化功能，以最高收集率和最低破损率为原则，寻求所有影响因素的最佳参数组合，得出的最优解如表 5 所示。

在回收机进行田间工作中设置各工作参数时，滚筒转速与安装高度很难精确到所得理论最优解的具体数值，因此在回收机的工作参数范围内，选取一组与其最接近的参数组合进行验证试验。即选取滚筒转速为 46 r/min、前进速度为 0.28 m/s、安装高度为 41.3 cm，在相同田间环境下进行验证试验。共进行 3 组试验，每组重复 3 次，取平均值后所得结果如表 6 所示。

表 5 最优参数组合

Table 5 Optimal parameter combinations

影响因素	最优解	收集率/%	破损率/%
滚筒转速	46.16 r/min		
前进速度	0.28 m/s	96.2	3.69
安装高度	41.27 cm		

表 6 试验验证结果

Table 6 Test verification results

试验参数	验证数值	收集率/%	破损率/%
滚筒转速	46 r/min		
前进速度	0.28 m/s	96.4	3.77
安装高度	41.3 cm		

3 组试验下得到的平均收集率为 96.4%、平均破损率为 3.77%，与理论最优解所得结果几乎一致，满足废菌棒捡拾农艺需求，因此该参数组合可作为所设计废菌棒回收机的最佳工作参数。

5 结论

1)为解决目前废菌棒回收环节机械化程度低、人工捡拾劳动强度大且成本高的问题，研制了一种自走式废菌棒回收机，该机器包括捡拾部件、输送部件及送料部件，分别实现废菌棒的捡拾、输送、出料，从而实现废菌棒自动捡拾回收。

2)对废菌棒回收机进行田间性能正交试验，以机具前进速度、扎针滚筒转速和滚筒安装高度为试验因素，分析其对两个性能评价指标的影响，并通过数据分析，确定最佳的参数组合。利用试验设计软件 Design-Expert 10.0 对试验数据进行响应面分析与参数优化，并对优化结果进行适当取值后进行验证试验，得到在滚筒转速为 46 r/min、行进速度为 0.28 m/s、滚筒安装高度为 41.3 cm 这一参数组合下，回收机捡拾作业性能达到最优，其收集率为 96.4%，破损率为 3.77%，满足田间废菌棒捡拾作业农艺指标要求。

参 考 文 献

[1] 段庆虎，张应香，竹玮，等. 我国香菇和黑木耳生产时空演化及影响因素分析[J]. 天津农业科学，2024，30(2)：39－46.
DUAN Qinghu，ZHANG Yingxiang，ZHU Wei，et al. Research on spatial temporal agglomeration evolution and influencing factors of *Lentinula edodes* and *Auricularia heimuer* in China [J]. Tianjin Agricultural Science，2024，30(2)：39－46.

[2] 王明友，宋卫东，王帅洋，等．我国黑木耳生产技术研究[J]．中国农机化学报，2022，43(3)：99－103.
WANG Mingyou，SONG Weidong，WANG Shuaiyang，et al. Research on production technology of *Auricularia auricula* in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(3)：99－103.

[3] 叶晓菊．龙泉市黑木耳产业现状及发展建议[J]．食药用菌，2021，29(4)：277－279.

[4] 秦翠兰，赵群喜，王磊元．废弃菌棒生物质资源综合利用现状及其展望[J]．新疆农机化，2022(1)：22－24，39.
QIN Cuilan，ZHAO Qunxi，WANG Leiyuan. Current situation and prospect of the comprehensive utilization of waste mushroom-sticks biomass resources [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization，2022(1)：22－24，39.

[5] LIU J C，DUAN L Y，JIN Z R，et al. Spent mushroom substrates as component of growing media for lettuce seedlings [J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2018，185(1)：012016.

[6] 高鸣．香菇菌棒的制作和废料再利用探讨[J]．现代商贸工业，2021，42(6)：147－148.

[7] 纪燕．食用菌废菌棒综合利用概述[J]．食用菌，2024，46(5)：71－73.

[8] 吴虹玥，周晓兰，李思敏，等．食用菌产业生态可持续发展初探[J]．四川农业科技，2023(1)：101－104.

[9] 王明友，王帅洋，宋卫东，等．我国黑木耳机械化采收现状及展望[J]．中国农机化学报，2022，43(9)：219－223.
WANG Mingyou，WANG Shuaiyang，SONG Weidong，et al. Current status and the prospect of research on mechanized harvesting of *Auricularia auricula* in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(9)：219－223.

[10] 张佰阳．浅谈黑木耳全程机械化情况[J]．农机科技推广，2023(7)：16－17.

[11] 田超．籽用西葫芦捡拾辊部件的改进设计与试验研究[D]．呼和浩特：内蒙古农业大学，2017.
TIAN Chao. Improved design and experimental on pickup roller parts of seed squash [D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2017.

[12] 王明闯，董远德，郭辉，等．自走式籽瓜联合收获机设计与试验[J]．中国农机化学报，2020，41(4)：29－34.
WANG Mingchuang，DONG Yuande，GUO Hui，et al. Design and experiment of self-propelled seed melon harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(4)：29－34.

[13] 王明友，宋卫东，周德欢，等．露地黑木耳机械化生产技术规程[J]．北方园艺，2023(5)：152－156.

[14] 王芳，杨铮，田超．大型辊筒类西葫芦收获机捡拾装置的改进设计[J]．农机化研究，2018，40(12)：106－110.
WANG Fang，YANG Zheng，TIAN Chao. Improved design on picking device of large-scale roller seed squash harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2018，40(12)：106－110.

[15] 沈晓凯，阿力木·买买提吐尔逊，李谦绪，等．辣椒复脱装置设计与试验[J]．中国农机化学报，2023，44(12)：80－86.
SHEN Xiaokai，ALIMU Maimaitituerxun，LI Qianxu，et al. Design and experiment of pepper re-removal device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(12)：80－86.

[16] 纪龙龙．马铃薯干式刷脱清土装置试验与优化[D]．北京：中国农业科学院，2021.
JI Longlong. Experiment and optimization of potato dry-type brush roller cleaning device [D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2021.

[17] 杨德秋，汪昕，刘萌萌，等．自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]．农业机械学报，2024，55(1)：85－95.
YANG Deqiu，WANG Xin，LIU Mengmeng，et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(1)：85－95.

[18] 刘天湖，程一丰，李加仪，等．拨杆喂入式菠萝采收机构设计与试验[J]．农业工程学报，2023，39(19)：27－38.
LIU Tianhu，CHENG Yifeng，LI Jiayi，et al. Feeding-type harvesting mechanism with the rotational lever for pineapple fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(19)：27－38.

[19] 陈志．农业机械设计手册[M]．北京：中国农业科学技术出版社，2007.

[20] 高允颜．正交及回归试验设计方法[M]．北京：冶金工业出版社，1988.

[21] 陈魁．试验设计与分析[M]．北京：清华大学出版社，2006.

[22] 栾宇航，钱宇星，高敏，等．智能贝类播苗设备离散元仿真参数标定[J]．智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(2)：69－78.
LUAN Yuhang，QIAN Yuxing，GAO Min，et al. Discrete element simulation parameter calibration for smart shellfish seeding devices [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2025，6(2)：69－78.

[23] 朱惠斌，李镕东，白丽珍，等．不同含水率下水稻秸秆的离散元参数标定[J]．南京农业大学学报，2025，48(5)：1180－1191.
ZHU Huibin，LI Rongdong，BAI Lizhen，et al. Calibration of discrete meta-parameters of rice straw at

different water contents [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(5): 1180-1191.

[24] 王潇涵, 冉云亮, 葛朝, 等. 旋转包络梳脱式烟叶采收机构设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(3): 210-223.
WANG Xiaohan, RAN Yunliang, GE Chao, et al. Design and test of rotary envelope combing-type tobacco leaf harvesting mechanism [J]. Smart Agriculture, 2025, 7(3): 210-223.

[25] 王延鑫, 汪小昆, 李培艺, 等. 包络式金丝皇菊采摘机械手设计与试验优化[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(3): 671-685.
WANG Yanxin, WANG Xiaochan, LI Peiyi, et al. Design and experimental optimization of an enveloping golden chrysanthemum harvesting manipulator [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(3): 671-685.

[26] 周冉, 宋志禹, 金月, 等. 基于ADAMS的榨菜联合收获机拔取装置动力学仿真分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 88-96.
ZHOU Ran, SONG Zhiyu, JIN Yue, et al. Simulation analysis of mustard combine harvester extraction device based on ADAMS [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 88-96.

Development and experiment of a recycling machine for waste black fungus sticks

ZHAO Wei[1], YANG Zhenhua[2], LIN Jiqing[2], JIANG Chengjie[1], ZHU Xianfa[1], DU Xiaoqiang[1, 3*]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*; 2. *Longquan Guyuan Automation Equipment Co., Ltd., Longquan* 323700, *China*; 3. *Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Sensing and Robotics, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: To address the issues of high labor dependence, low operational efficiency, and high labor intensity in the collection and recycling of waste black fungus sticks, a self-propelled recycling machine was designed based on the characteristics of waste black fungus sticks remaining in the field and the agronomic requirements for recycling. Through the design and analysis of key components such as the needle roller, guide plate, and conveying device, the automation of the collection and recycling process of waste black fungus sticks was realized. In order to optimize the operational performance of the recycling machine, an orthogonal experiment with three factors and three levels was designed and conducted, taking the roller speed, machine forward speed, and roller installation height as the test factors, and the collection rate and breakage rate of waste black fungus sticks as the test indicators. The influence of each interaction factor on the picking performance indicators was analyzed. The results showed that when the forward speed was 0.28 m/s, the roller speed was 46 r/min, and the installation height was 41.3 cm, the collection rate of the recycling machine reached 96.4% and the breakage rate was 3.77%, which met the requirements of field collection operations for waste black fungus sticks. The developed self-propelled waste black fungus stick recycling machine realizes the automation and mechanization of the picking and transfer links in the recycling process of waste black fungus sticks, reduces labor demand and processing costs, and improves the efficiency of recycling and utilization of waste black fungus sticks. Moreover, the designed needle-roller mechanism can realize two different picking actions-piercing and pulling back-during the collection process. While ensuring the success rate of waste black fungus sticks collection, it also reduces the damage rate of waste black fungus sticks to a certain extent, and provides a reference for the research on realizing the automation of low-damage collection of field waste black fungus sticks.

Keywords: black fungus; waste fungus sticks; picking device; automatic picking; needle roller

Foundation items: Key Breakthrough Pilot Projects for the "Technology & Machinery Empowerment" Initiative in Agriculture of Zhejiang Province

First Author: ZHAO Wei, E-mail: 1958543501@qq.com

* **Correspondence Author:** DU Xiaoqiang, E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn