doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.021

茄果类种苗嫁接整盘预切割装置设计与试验

周海丽[1,2]　熊　宵[1]　陈佳峰[3]　章飞杰[4]　童俊华[1,2]　李浩卿[1]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018;
3.杭州赛得林智能装备有限公司,杭州 311418;4.杭州市富阳区农业技术推广中心,杭州 311400)

摘要:针对茄果类种苗嫁接前通过人工预切割效率低的问题,提出采用整盘机械式预切割的方法,以利于后续盘上嫁接作业空间增大和工作效率的提高。设计了一种高度可调节的种苗整盘预切割装置,能够适应不同砧、穗苗品种。采用 ANSYS 建立基于显微镜成像的番茄种苗、辣椒种苗和茄子种苗组织结构模型和不同刃角切刀的模型,进行不同刃角切刀切苗效果仿真,结果显示采用 30°刃角切刀切割后苗截面最平整;以整盘番茄种苗、辣椒种苗和茄子种苗为预切割对象,基于 Design-Expert 开展四因素三水平响应面分析试验。试验结果表明,当传送带速度 0.3 m/s、切割速率 0.633 m/s(电机转速 3 500 r/min)、气吹角度 140°、气流压强 0.5 MPa 时,预切割效果最佳,平均成功率 98.9%,预切割效率为 600 盘/h(72 穴规格)。

关键词:茄果类种苗;嫁接;预切割装置

中图分类号:S223.1;S616　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0231-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Pre-cutting Device for Entire Trays of Solanaceae Seedlings

ZHOU Haili[1,2]　XIONG Xiao[1]　CHEN Jiafeng[3]　ZHANG Feijie[4]　TONG Junhua[1,2]　LI Haoqing[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Sensing and Robotics, Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Hangzhou Saidelin Intelligent Equipment Co., Ltd., Hangzhou* 311418, *China*
4. *Fuyang District Agricultural Technology Extension Center, Hangzhou* 311400, *China*)

Abstract: Aiming at the low efficiency and inconsistent quality in manual pre-cutting of solanaceous crop seedlings before grafting, a whole-tray mechanical pre-cutting method was proposed to expand the operational space for subsequent on-tray grafting and improve work efficiency. A novel whole-tray pre-cutting device for solanaceous seedlings was designed, featuring a tilted tray conveyor system and a height-adjustable cutting mechanism. The designed device can adapt to different rootstock and scion varieties. Establishing tissue structure models of tomato, pepper, and eggplant seedlings based on microscopic imaging, as well as models of different blade angles by ANSYS, and simulate the cutting effects of different blade angles on seedlings. The simulation results showed that a cutter with a 30° blade angle produces the smoothest seedling cross-sections. To further validate the device's performance, entire trays of tomato, pepper, and eggplant seedlings were subjected to a four-factor, three-level response surface analysis experiment by using Design-Expert. The experimental results indicated that the best pre-cutting effect was achieved under the parameters of conveyor speed at 0.3 m/s, cutting rate at 0.633 m/s (motor speed: 3 500 r/min), air-blowing angle at 140°, and air pressure at 0.5 MPa. The average success rate of pre-cutting is 98.9%, and the processing efficiency is 600 trays per hour (for 72-cell trays). This study can provide certain technical and experimental bases for the research and development of the pre-cutting device of the grafting machine.

Key words: solanaceae seedlings; grafting; pre-cutting device

收稿日期:2024-11-13　修回日期:2024-12-03

基金项目:中央农机研发制造推广应用一体化试点项目和浙江理工大学科研业务费专项资金项目(24242118-Y)

作者简介:周海丽(1989—),女,副教授,博士,主要从事农业机器人技术研究,E-mail:zhouhl@zstu.edu.cn

通信作者:童俊华(1984—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与数字农业技术研究,E-mail:jhtong@zstu.edu.cn

0 引言

嫁接种苗预切割是提前去除砧木苗切割点上方的茎叶部分和接穗苗切割点下方的根茎部分,为后续的取苗、夹持和对接腾出更多操作空间,减少嫁接过程中的物理干扰和操作难度,从而提升嫁接苗的准确性和效率。目前人工嫁接过程中,手持刀片逐株预切割,带钵的砧木苗仍保留在穴盘中,接穗苗则储存在塑料袋中备用;若采用机器嫁接,预切割将降低机械手在高密度穴盘夹取定位砧木和接穗的难度[1-2]。由于不同品种和不同培养周期的嫁接苗高度不一,预切割的高度也需要做出相应调整。因而,高度可调节的种苗预切割装置可提高后续人工或者自动化嫁接作业的效率。

国外对茄果类、瓜类等不同品种嫁接机研发较早,并取得了一定进展[3-4]。日本和韩国嫁接机如 AG1000、AFGR-800CS[5],采用视觉识别,能获取种苗切割位置和切面图像,提升砧、穗苗对接精度,省略了预切割步骤,提升了效率。然而,这些带检测反馈技术的设备成本较高导致推广应用受限。荷兰在 2010 年推出的 Graft 1200 型自动嫁接机,可以对砧木进行机器预切割处理,接穗则通过人工切割并放入机器与砧木对接。西班牙推出的 EMP 300 型半自动嫁接机同样依赖人工预切割,嫁接成功率达到 98%,单机生产效率为 300~400 株/h,与人工作业效率相比不占优势。国外嫁接机研发起步早、品类多,较多嫁接机采用预切割后的苗在机器上作业,达到标准化嫁接的目的。

国内对嫁接技术的研究起步稍晚,华南农业大学辜松等[6]设计的 2JC-M 型和 2JP-M 型手动嫁接切削器,以及冯捷等[7]开发的茄果类嫁接苗手动切削器,使切削作业标准化。田素博等[8]、楼建忠等[9]、CHEN 等[10]开发了系列嫁接苗切削机构,但研发的切削及嫁接作业主要以单株为作业单元,工作效率受到制约,尚未实现规模化作业。柏宗春等[11]提出一种切削输送装置配合人工嫁接的新型嫁接模式,通过往复式切削刀具快速切断蔬菜苗,并利用拨苗片将切断的接穗输送至接穗收集装置,切削效率达到 37 000 株/h,但水平传送带在收集上苗茎较软的种苗时,容易产生漏切,成功率为 90.3%。山东安信[12]和合肥佳富特[13]等企业也对预切割设备进行了研发,目前还处于内测阶段。总体而言,自动预切割的研究落后于自动嫁接装置的研究,二者不匹配,未能形成高效嫁接的模式[14]。

针对种苗预切割依赖人工、自动化程度低的问题,本文设计一种穴盘传送带斜置、高度可调的茄果类种苗预切割装置。采用 ANSYS 建立基于显微镜成像的番茄苗、辣椒苗和茄子苗组织结构模型,并对不同刃角切刀切苗效果进行仿真,以验证预切割装置可靠性和切割性能;利用 Design-Expert 软件开展四因素三水平响应面试验,对影响预切割效果的主要因素进行优化,确定预切割的最佳作业参数组合,提升嫁接效率、机器自动化程度和节省人力成本。

1 整机结构与原理

1.1 高度可调式预切机构原理

针对现有半自动和全自动茄果类嫁接机预切割需求和人工预切割的特点,本文设计可调式预切割装置如图 1 所示,主要由传送带、气吹机构、可调式切割机构、可调式收集机构组成,作业流程为:

(1)以“爱好砧木”预切割为例,机器启动前,转动收集槽高度调节滑块的旋钮和手动微调螺杆的调节旋钮,如图 2 所示,将收集槽和切刀调节至垂直距离传送带 110 mm 处,启动预切割装置,并调节传送带和切刀电机调速器至最佳转速。

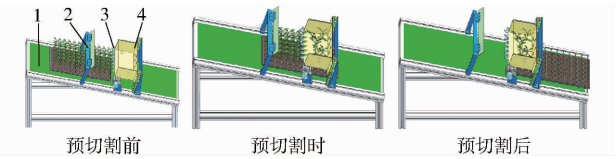

图 1 可调式预切割装置作业流程图

Fig. 1 Adjustable pre-cutting device operation flowchart

1. 传送带 2. 气吹机构 3. 可调式切割机构 4. 可调式收集机构

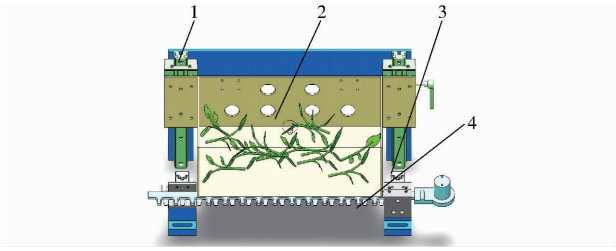

图 2 高度调节机构

Fig. 2 Height regulating mechanism

1. 收集槽高度调节滑块(两侧各 1 个) 2. 收集槽 3. 手动微调螺杆(两侧各 1 个) 4. 切刀

(2)气流旋转板与固定板两端用阻尼合页连接,如图 3 所示,转动气流旋转板到合适位置,打开气泵并调节空气开关达到合适气压,气流旋转板与固定板之间的角度范围为 60°~180°。

(3)操作人员将一盘砧木放在传送带起始位置,气流使苗株沿传送带前进方向倒伏,当穴盘到达可调式切割机构时,切刀快速往复运动将苗株切断,切断后基质和茎秆部分保留在原穴盘中,其余茎叶部分在重力和气流的作用下进入收集槽内,直至整

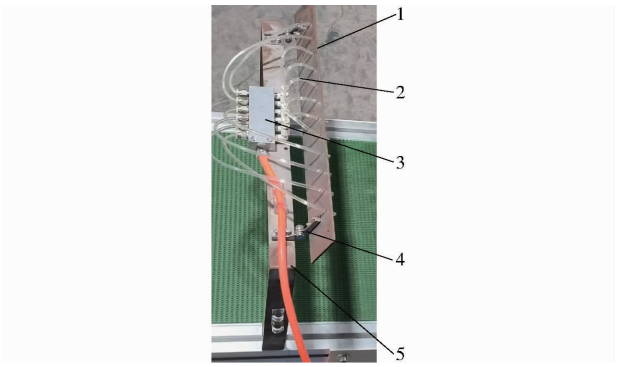

图 3　气吹机构

Fig. 3　Air-blowing mechanism

1. 气流旋转板　2. 气管　3. 分流器　4. 阻尼合页(两侧各 1 个)　5. 固定板

盘苗全部切割和收集完毕,此时操作人员放置第 2 盘待切割苗,并将第 1 盘预切割好的苗取走待嫁接。

(4)预切割其他品种苗株前,将收集槽和切刀调节至指定高度后重复上述操作。

1.2　种苗物理力学特性

在种苗生长发育过程中,不同品种间常出现长势不均的现象。本试验选用室内 72 孔穴盘育苗(530 mm × 270 mm),试验品种如图 4 所示。育苗期间为种苗提供均匀的生长环境以减少差异,每日光照 12 ~ 14 h 防止徒长;白天温度 20 ~ 25℃,夜间稍低,以增强苗木茎干硬度;定期浇水保持适度湿润;施用平衡的氮磷钾肥避免过量。每个品种选 2 盘(144 株)符合嫁接要求的苗株进行测量,剔除未发芽、漏播等穴孔,苗龄及物理参数如表 1 所示。种苗预切割的高度根据嫁接农艺要求,取值为真叶和子叶的中间高度。

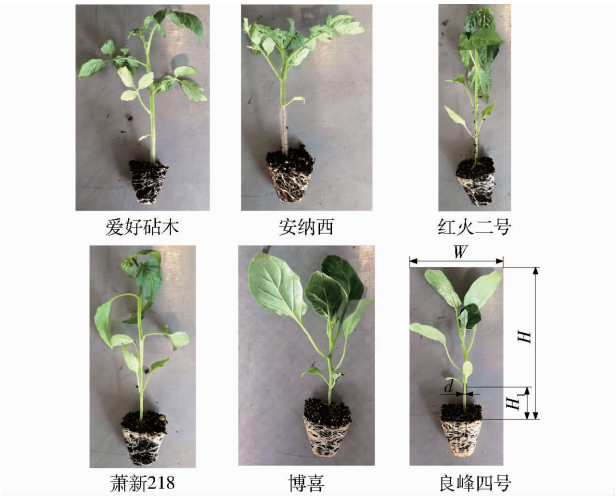

图 4　茄果类种苗试验品种

Fig. 4　Experimental cultivars of solanum seedlings

表 1　苗龄及物理参数

Tab. 1　Seedling age and physical parameters

种苗	品种	苗龄/d	株高 H/mm	预切割高度 H_1/mm	蓬面宽度 W/mm	茎粗 d/mm
番茄苗	爱好砧木(砧木)	27	145 ± 15	70	125 ± 15	3.9 ± 1.0
	安纳西(接穗)	27	105 ± 20	40	117 ± 9	3.75 ± 1.95
辣椒苗	红火二号(砧木)	30	140 ± 15	60	109 ± 8	3.7 ± 0.9
	萧新 218(接穗)	30	110 ± 20	45	101 ± 8	3.55 ± 0.95
茄子苗	博喜(砧木)	40	120 ± 10	50	137 ± 22	3.85 ± 0.95
	良峰四号(接穗)	40	105 ± 15	40	135 ± 25	3.75 ± 0.95

番茄苗通常直径较粗,但茎秆质地较软,因此容易切断[15];相比之下,辣椒苗茎秆直径较小,但质地较硬[16],需要的剪切力较大,茄子苗硬度介于番茄苗与辣椒苗之间。本文使用万能试验机分别对 50 株番茄苗、50 株辣椒苗和 50 株茄子苗进行剪切力测试,试验结果如图 5 所示。由图可知,番茄、辣椒和茄子的剪切力与茎粗无显著关联,番茄苗剪切力集中在 2.2 ~ 3.5 N,辣椒苗集中在 2.8 ~ 3.6 N,茄子苗集中在 2.4 ~ 3.3 N。

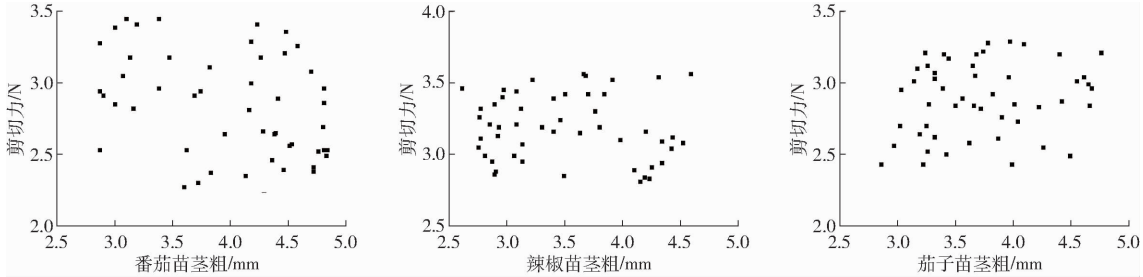

图 5　剪切力学特性测试结果

Fig. 5　Test results of shear mechanical properties

2　关键部件分析与优化

2.1　往复式切刀分析与计算

目前半自动和全自动嫁接机常采用“一刀一株”[2]和“一刀多株”[1]的切割方式,然而预切割装

置切割空间有限且对效率要求较高,这两种方式难以满足预切割装置设计需求。因此采用往复切割的形式,在种苗持续输送时,切刀高速往复剪切,实现整盘苗的快速预切割,如图 6 所示,刀片齿数 13,刀柄长 530 mm,切割覆盖宽 282 mm 的整排苗。

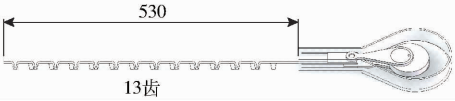

图 6 切刀结构图

Fig. 6 Cutter structure diagram

往复式切刀动力机构包括小齿轮、旋转片、轴承、特制大齿轮和滑块(图 7),通过双曲柄滑块机构实现上下刀片往复剪切,大齿轮上下各有一个偏心凸台,偏心凸台的偏心点与大齿轮中心点重合,上凸台圆心、下凸台圆心与大齿轮中心在同一直线,偏心距离为曲柄长度,轴承内圈与凸台固定,外圈安装“水滴形”旋转片,旋转片另一端与滑块连接,滑块带动刀片沿直线运动。动力系统采用齿轮传动,小齿轮与电机转轴连接,齿数为 9,大齿轮齿数 46,电机额定电压 12 V,额定转速 3 500 r/min,额定功率 30 W。

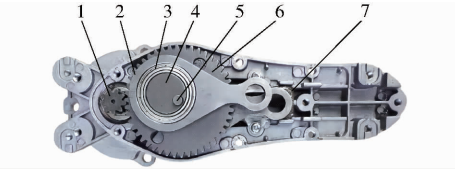

图 7 切刀刀头构成图

Fig. 7 Cutter head configuration diagram

1. 小齿轮 2. 旋转片 3. 轴承 4. 上凸台 5. 中心轴 6. 特制大齿轮 7. 滑块

往复式切刀速度过慢会导致苗未切断前被传送带输送走或者苗株卡在刀齿间被传送带拖拽离开穴孔,上述情况均会影响后续切割。因此需要计算不同电机转速下的切割速率,并通过试验获得满足成功率需求的最佳切割速率。绘制可调式切割机构中曲柄滑块机构简图,以大齿轮圆心 O 为原点,如图 8 所示。

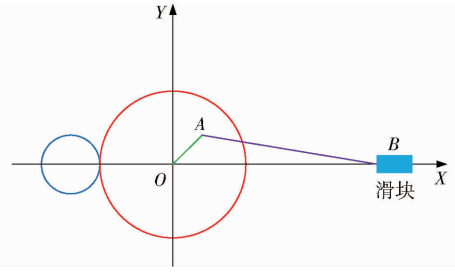

图 8 曲柄滑块机构简图

Fig. 8 Crank slider mechanism schematic

在 2 ~ 10 挡位调节电机调速器,通过 Matlab 计算对应平均速率为:0.127、0.190、0.253、0.316、0.380、0.443、0.506、0.569、0.633 m/s。

为了保证整盘苗都顺利切割,每当一穴盘格经过切割点时,切刀应至少完成 2 次往复运动。因此,传送带速度与切割速率间的关系应该满足

$$\begin{cases} t_1 = \dfrac{l_1}{v_1} \\ \dfrac{v_2 t_1}{\Delta s} \geqslant 2 \end{cases} \tag{1}$$

式中 t_1——一穴盘格通过切割点所需时间,s

l_1——一穴盘格长度,mm

v_1——传送带速度,m/s

v_2——切割速率,m/s

Δs——切刀往复运动距离,mm

通过式(1)可知传送带速度与切割速率之间的关系式为

$$\frac{v_2}{v_1} \geqslant 1.3 \tag{2}$$

2.2 不同刃角切刀切割效果仿真

根据前期试验和文献[17 - 18]选取刃角 20°、30°和 40°作为切刀模拟参数,如图 9 所示,这 3 种角度能够覆盖常用切割角度范围,且在苗茎剪切中表现出较大差异。为了对种苗精准建模,使用共聚焦显微镜和扫描电子显微镜(SEM)观察番茄苗、辣椒苗和茄子苗茎秆切断后的横截面。

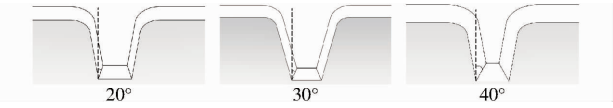

图 9 不同刃角切刀示意图

Fig. 9 Different edge angles of cutter

图 10a 展示了番茄苗茎秆截面组织结构,其茎秆结构从内到外依次为苗芯、韧皮层和表皮层,直径分别为 1.2、3、4.4 mm。外表皮较薄(约 0.7 mm),内部细胞排列稀疏、间隙大,维管束分布松散。由于高水分含量(约占茎秆质量 80% 以上),番茄苗茎秆较为柔软,易受外力影响发生弯曲。

图 10b 展示了辣椒苗茎秆的横截面组织结构。辣椒苗的茎秆从内到外也分为苗芯、韧皮层和表皮层,直径分别为 1.4、2.45、3.5 mm,维管束的密度较高,细胞排列紧密,内部含水率适中(约为 70%)。这种结构特性使其茎秆具有较高的结构强度和支撑力,在外力作用下不易变形或断裂。相比番茄苗,辣椒苗的茎秆在切割过程中需要施加更多的力。

图 10c 展示了茄子苗茎秆的横截面组织结构。茄子苗的茎秆由 4 层组成,分别为苗芯、中间层、韧皮层和表皮层,直径分别为 1.4、2.3、3.4、3.8 mm。

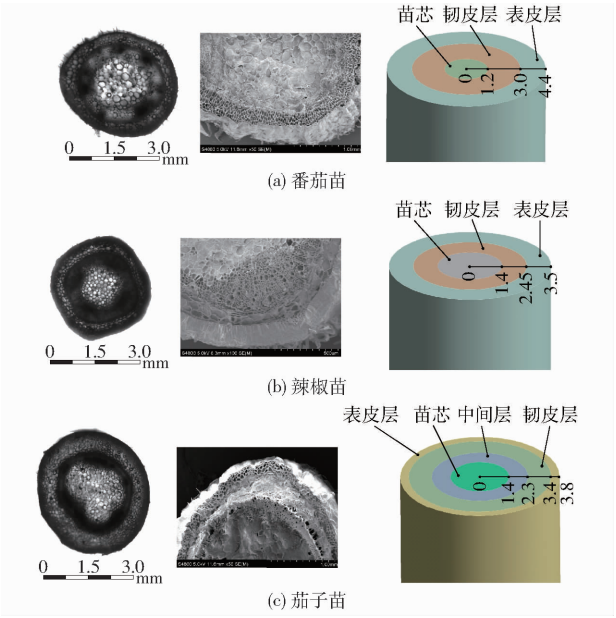

图 10　种苗茎秆截面组织结构图

Fig. 10　Seedling stem cross section organization structure chart

茄子苗表皮细胞排列紧密，内部维管束的密度较高，提供了良好的结构支撑。但茎秆含水率相对较低（约为 65%），细胞间隙介于番茄苗和辣椒苗之间，刚性较强。这使得茄子苗在切割难度介于番茄苗和辣椒苗之间。

基于上述 SEM 分析结果，采用复合材料建模方法，建立苗和切刀数值模型（图 11），切刀材质选用 Cr12mov，采用 WH－200 型电子式万能试验机进行苗茎物理属性测试，试验机最大拉力 200 N，精度 0.02% FS。压缩、拉伸、弯曲试验标准分别采用 GB/T 10410—2008、GB/T 228.1—2021、GB/T 9341—2008，结果如表 2 所示，切刀材料属性如表 3 所示。

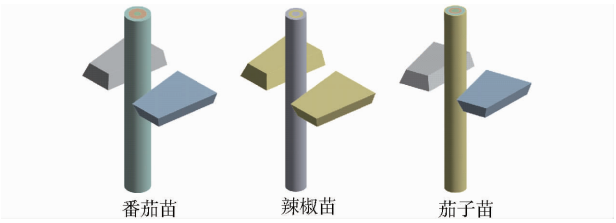

图 11　切苗仿真模型

Fig. 11　Cutting seedling simulation models

表 2　种苗材料属性参数

Tab. 2　Seed and seedling material attribute parameters

参数	表皮层	韧皮层	中间层	苗芯
密度/(kg·m^{-3})	1 300	1 500	1 500	1 300
杨氏模量/MPa	60	100	100	140
泊松比	0.42	0.39	0.38	0.38
屈服强度/MPa	25	35	65	45
切线模量/MPa	45	65	95	72
失效应变	0.15	0.12	0.12	0.10

表 3　切刀材料属性参数

Tab. 3　Cutter material property parameters

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	7 850
杨氏模量/GPa	200
泊松比	0.3
屈服强度/MPa	725
切线模量/GPa	100

使用 LS-dyna 软件进行不同刃角切刀切苗效果仿真，设定苗的行进速度为 0.3 m/s，切刀频率为 11 Hz，行程为 28 mm，切割速度呈正弦曲线变化。为确保模拟准确性，在总体模拟前进行网格无关性验证，选择 0.4、0.3、0.2 mm 3 种网格尺寸，结果如图 12 所示，3 种网格均能较好模拟苗茎切断后的断面形态，且随网格密度增加，断面细节更清晰。综合考虑计算效率和结果准确性，选择网格尺寸 0.3 mm 进行后续模拟。

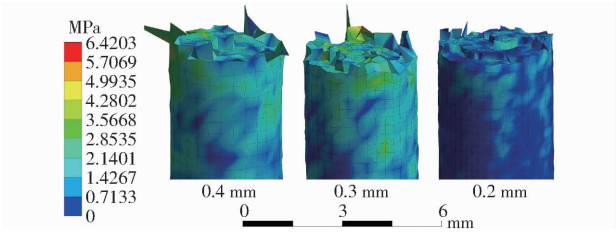

图 12　不同尺寸网格模型

Fig. 12　Different size grid models

种苗切割后伤口平整度直接影响嫁接成活率，仿真结果表明，不同刃角切刀切苗效果差异显著。图 13 显示，30°刃角切刀切割后组织凸起少，伤口平整度最高，相比之下，20°和 40°刃角切刀切割后存在表皮粘连及不规则凸起。此外，切割过程中刃角 20°切刀应力最大（49.893 MPa），随着刃角增大，应力逐渐减小（图 13d），对 Cr12MoV 材质的切刀而言，该应力不会造成磨损。

3　整机试验

3.1　试验设备与材料

试验设备为高度可调式预切割装置样机（图 14），采用光电式高精度测速计测量不同传送带电机转速下传送带的速度。试验对象为爱好砧木、安纳西、红火二号、萧新 218、博喜和良峰四号。

3.2　试验评价指标

以预切割后嫁接种苗在切割点位置被切断，苗株未脱离穴孔，被切割掉的部分全部储存在收集槽中为试验成功。预切割成功率 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = \frac{N_0 - N_1 - N_2 - N_3 - N_4}{N_0} \times 100\% \qquad (3)$$

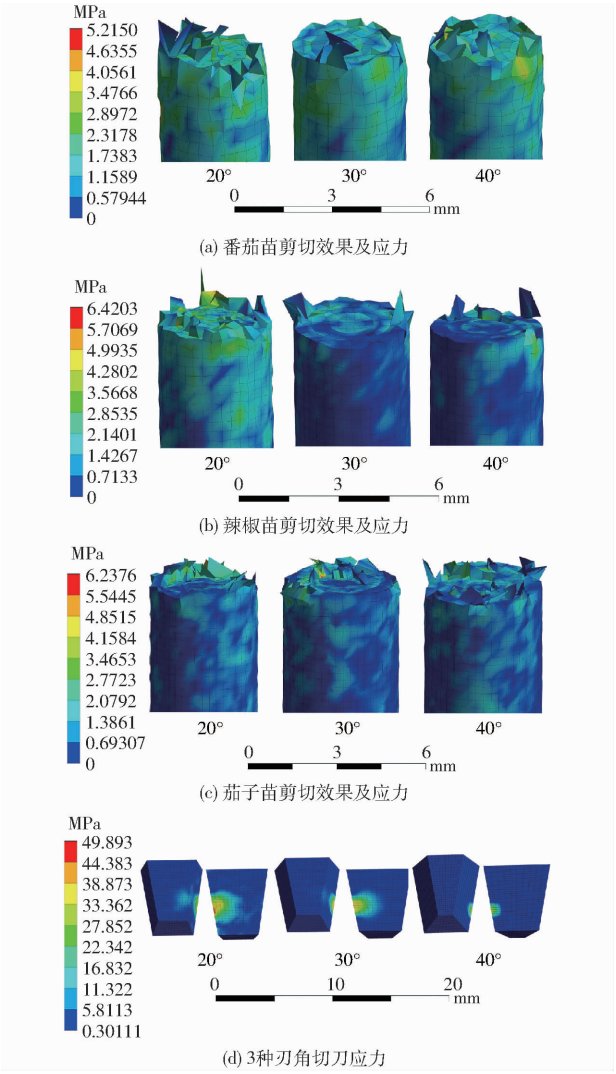

图 13 模型计算结果

Fig. 13 Model calculation results

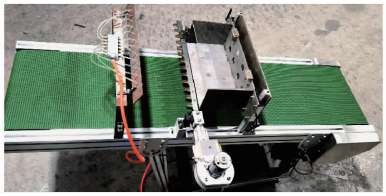

图 14 试验样机

Fig. 14 Diagram of test prototype

式中 N_0——被切割种苗总数量，株

N_1——未被切断种苗数量，株

N_2——切割过程中被拖离穴孔种苗数量，株

N_3——被损坏苗株数量，株

N_4——切割后真叶未进入收集槽苗株数量，株

为了验证样机适用性能，将预切割效率与人工预切割效率进行对比，预切割效率计算公式为

$$Q = \frac{3\,600}{U_1 + U_2 + U_3} N \tag{4}$$

式中 Q——切割效率，株/h

U_1——从放置整盘苗到输送至切割点所耗时间，s

U_2——切割整盘苗所需时间，s

U_3——切完后输送至底部被人工取走所需时间，s

N——一盘苗总苗株数量，株

3.3 单因素试验设计与结果

通过多次试验发现，传送带速度和切割速率的改变，直接影响种苗能否被成功切割，气吹角度和气流压强决定切割后茎叶能否顺利进入收集槽。这些因素对预切割成功率至关重要，需分别分析参数范围以筛选最优值。

首先，使用高精度测速计测量传送带速度，初步选取传送带速度为 0.06、0.14、0.22、0.3、0.38、0.46 m/s；根据 2.1 节中不同电机转速下的切割速率计算结果，初步选取切割速率为 0.253、0.316、0.380、0.443、0.506、0.569、0.633 m/s；结合设计和实际需求，初步选取气吹角度为 120°、135°、150°、165°，气流压强为 0.3、0.4、0.5、0.6 MPa。先选取切割速率为 0.506 m/s、气吹角度为 135°、气流压强为 0.4 MPa，比较传送带速度对预切割成功率的影响；保持传送带速度为 0.23 m/s、气吹角度为 135°、气流压强为 0.4 MPa，比较切割速率对预切割成功率的影响；将传送带速度固定为 0.23 m/s、切割速率为 0.506 m/s、气流压强为 0.4 MPa，比较气吹角度对预切割成功率的影响；保持传送带速度、切割速率、气吹角度不变，比较气流压强对预切割成功率的影响。

单因素试验结果如图 15 所示，从图中可以看出，传送带速度对预切割成功率的影响较大，通过试验观察，当传送带速度接近 0.3 m/s 时，机器预切割的成功率最高，且设备运行稳定。当传送带速度超过 0.3 m/s 时，种苗在切割点停留时间不足影响预切割质量；当传送带速度低于 0.3 m/s 时，虽然成功率仍较高，但预切割效率明显下降。因此优选传送带速度为 0.3 m/s。

当切割速率低于 0.443 m/s（即电机转速为 2 450 r/min）时，切刀的往复运动频率较低，导致切割失败。随着切割速率的提升，预切割成功率逐步提升，并在切割速率为 0.633 m/s（即电机转速为 3 500 r/min）时成功率达到峰值。因此，将切割速率的优选值初步确定为 0.443 m/s（对应电机转速 2 450 r/min）。

气吹角度和气流压强对预切割成功率影响相对较小，气吹角度在 120°～135°范围内，比在 135°～150°范围内的变化趋势缓慢，因此初步选取气吹角度为 135°；当气流压强为 0.5 MPa 时，预切割成功率最高，因此将其作为优选值进行进一步分析。

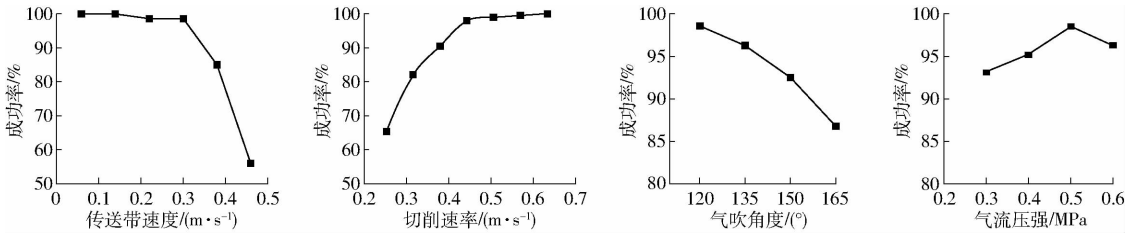

图 15　单因素试验结果

Fig. 15　Single factor test results

3.4　多因素响应面试验设计

单因素试验筛选出了传送带速度、切割速率、气吹角度和气流压强的大致优选范围，但无法确定最佳组合，故而需要进行响应面分析试验。根据单因素试验的初选值范围设计响应面分析，统计预切割成功率最高条件下的参数组合，并综合考虑成功率和效率，优化得到最佳参数组合。

为提高试验效率并保证结果的科学性，先选用番茄种苗（爱好砧木和安纳西）进行试验，以获得适用于番茄的最佳参数组合。选择番茄作为试验的初始种类原因为：①番茄苗茎秆较为柔软，在气流、切割力等因素作用下更易受力变形，优先对番茄种苗进行试验，可以更准确地评估参数组合在柔软种苗上的适用性，确保预切割效果的稳定性。适用于番茄的参数组合更易满足辣椒和茄子等结构坚韧种苗的需求，因此，柔软度较高的番茄种苗能够作为“严苛条件”的测试基准。②番茄种苗对气流更敏感，优先试验有助于优化气流参数，减少茎秆弯曲导致的切割高度不整齐问题，确定番茄的最佳气流参数后，可直接适用于其他种苗，从而减少额外的试验调整需求。③根据 2.2 节仿真结果，番茄茎秆在 Cr12MoV 刀齿切割下应力较小，能够满足预切割要求。在确定番茄种苗预切割的最佳参数后，将其应用于辣椒（红火二号、萧新 218）和茄子（博喜、良峰四号）种苗的试验中，以评估该参数组合的普适性和成功率。如果该参数组合在辣椒和茄子种苗上也能达到预期效果，则表明优化结果具有较好的适用性。

以传送带速度、切割速率、气吹角度及气流压强为自变量，基于单因素试验初步筛选出的各变量优选值，根据 Box－Benhnken 中心组合试验设计原理，进行四因素三水平响应面分析试验，对预切割性能进行分析，各因素编码如表 4 所示。

3.5　多因素响应面试验结果与分析

每组试验选取爱好砧木和安纳西各 1 盘（72 株），得出相关响应面试验结果如表 5 所示，X_1、X_2、X_3、X_4为因素编码值。根据表 5 中试验结果，对预切割成功率进行方差分析，结果如表 6 所示。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Factors coding

编码	因素			
	传送带速度/(m·s⁻¹)	切割速率/(m·s⁻¹)	气吹角度/(°)	气流压强/MPa
－1	0.22	0.253	120	0.4
0	0.30	0.443	135	0.5
1	0.38	0.633	150	0.6

注：切割速率为 0.253、0.443、0.633 m/s 时对应的电机转速分别为 1 400、2 450、3 500 r/min。

表 5　响应面试验结果

Tab. 5　Response surface test results

序号	因素				Y_1/%
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	0	0	－1	－1	88.9
2	0	－1	0	1	74.6
3	1	0	1	0	86.7
4	0	1	－1	0	100
5	0	0	0	0	91.9
6	0	－1	0	－1	76.5
7	－1	0	－1	0	94.4
8	－1	0	0	1	95.6
9	－1	－1	0	0	82.7
10	0	0	1	1	84.7
11	0	0	0	0	92.8
12	1	0	0	1	81.4
13	1	1	0	0	96.8
14	－1	0	0	－1	93.5
15	0	1	0	1	99.5
16	0	0	1	－1	89.3
17	0	1	1	0	98.3
18	0	－1	－1	0	73.8
19	0	－1	1	0	80.1
20	0	0	0	0	94.4
21	1	－1	0	0	66.7
22	1	0	－1	0	83.6
23	0	0	0	0	93.2
24	－1	0	1	0	96.1
25	0	0	－1	1	83.3
26	－1	1	0	0	100
27	0	1	0	－1	97.2
28	0	0	0	0	90.3
29	1	0	0	－1	82.8

表 6 方差分析

Tab. 6 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 114.90	14	151.06	38.93	<0.000 1 **
X_1	344.54	1	344.54	88.79	<0.000 1 **
X_2	1 573.23	1	1 573.23	405.44	<0.000 1 **
X_3	10.45	1	10.45	2.69	0.123 0
X_4	6.90	1	6.90	1.78	0.203 6
X_1X_2	40.96	1	40.96	10.56	0.005 8 **
X_1X_3	0.49	1	0.49	0.126 3	0.727 6
X_1X_4	3.06	1	3.06	0.789 2	0.389 3
X_2X_3	16.00	1	16.00	4.12	0.061 7
X_2X_4	4.41	1	4.41	1.14	0.304 4
X_3X_4	0.25	1	0.25	0.064 4	0.803 3
X_1^2	14.47	1	14.47	3.73	0.074 0
X_2^2	68.76	1	68.76	17.72	0.000 9 **
X_3^2	17.25	1	17.25	4.45	0.053 5
X_4^2	63.07	1	63.07	16.26	0.001 2 **
残差	54.32	14	3.88		
失拟	44.94	10	4.49	1.91	0.278 1
误差	9.39	4	2.35		
总和	2 169.23	28			

注：** 表示极显著（$P<0.01$）。

回归模型 F 值为 38.93，证明回归方程拟合程度较好，说明试验可信度和准确度很高；失拟项不显著（$P=0.278\ 1$），说明试验可靠。对模型进行进一步分析可知，对种苗预切割成功率影响极显著（$P<0.01$）的是 X_1、X_2、X_1X_2、X_2^2、X_4^2，对预切割成功率分析结果进行 F 检验，得到二次回归方程为

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & 92.52 - 5.36X_1 + 11.45X_2 + \\ & 0.933X_3 - 0.758X_4 + 3.20X_1X_2 + \\ & 0.35X_1X_3 - 0.875X_1X_4 - 2.00X_2X_3 + \\ & 1.05X_2X_4 + 0.25X_3X_4 - 1.49X_1^2 - \\ & 3.26X_2^2 - 1.63X_3^2 - 3.12X_4^2 \end{aligned} \tag{5}$$

当气吹角度为 135°、气流压强为 0.5 MPa 时，绘制传送带速度和切割速率交互作用对种苗预切割成功率影响的响应曲面。从图 16 中可以看出，当传送带速度较快，切割速率较低时，预切割成功率较低；随着传送带速度的降低和切割速率的增加，预切割成功率逐渐提升。这表明成功率的提升是两者共同作用的结果。在中等传送带速度下，提高切割速率可以显著提升成功率，部分弥补传送带速度的影响。同时，平滑的过渡曲面显示，传送带速度和切割速率在一定范围内的微小变化不会显著影响成功率。

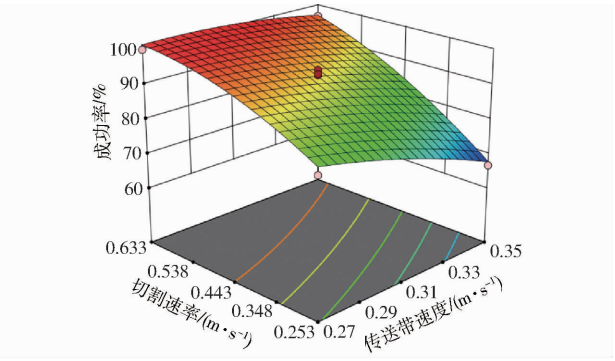

图 16 切割速率和传送带速度交互作用响应曲面

Fig. 16 Cutting rate and conveyor speed interact with response surfaces

通过 Design-Expert 13.0 软件分析得出，最佳参数组合为：传送带速度 0.300 8 m/s、切割速率 0.628 7 m/s、气吹角度 140.749°、气流压强 0.544 9 MPa。为满足电机调速比例和实际设计需求，将参数取整并规范为：传送带速度 0.3 m/s、切割速率 0.633 m/s（3 500 r/min）、气吹角度 140°、气流压强 0.5 MPa。建立参数组合优化模型

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_4 \leqslant 1 \end{cases} \tag{6}$$

在最佳参数组合下，分别对红火二号、萧新 218、博喜和良峰四号进行预切割试验，样本数量均为 2 盘（144 株），成功率见表 7。

表 7 最优参数下其余品种预切割试验成功率

Tab. 7 Success rate of pre-cutting test of other varieties under optimal parameters

品种	次序	成功率/%	品种	次序	成功率/%
红火二号	1	100	博喜	1	100
	2	99.3		2	100
	3	100		3	98.6
萧新 218	1	100	良峰四号	1	100
	2	99.3		2	99.3
	3	99.3		3	100

试验结果表明，红火二号、萧新 218、博喜和良峰四号 4 个品种在 3 组试验中均达到接近 100% 的高成功率，验证了该参数组合在不同品种中的良好适用性。部分试验中出现 99.3% 和 98.6% 的略低成功率，这是因为辣椒、茄子茎秆相对较硬，切割时对气流压强需求更大。整体上试验的适用性较强，说明番茄种苗所得到的最佳参数组合能够在较严苛的切割条件下适用。因此，该参数组合可以作为不同茄果类作物切割试验的通用最佳参数，有助于提高实际应用中的操作效率和质量控制。

3.6 优化参数试验验证

将单因素试验初步筛选的传送带速度 0.3 m/s、切割速率 0.443 m/s、气吹角度 135° 及气流压强 0.5 MPa 作为优化前参数；选用具有代表性的番茄

苗进行试验，每组试验样本数量为一盘爱好砧木和一盘安纳西。优化前后预切割成功率如表 8 所示，优化后预切割成功率显著提升，平均达到 98.9%，优化效果平均提高 2.87 个百分点。传送带长度为 1.5 m，输送预切割完整盘苗的时间约为 6 s，装置的切割速率达 600 盘/h。预切割仍存在失败率是因为部分穴盘外侧存在长势极为弯曲的种苗，影响切割且茎叶部分掉落在传送带上。试验过程如图 17 所示，将传送带速度和切割速率数值代入公式(2)进行验证，切割速率与传送带速度比值为 2.11，符合切割要求。

表 8　优化参数验证试验结果

Tab. 8　Optimization parameter validation experiment

%

试验序号	成功率	
	优化前	优化后
1	95.8	99.3
2	98.3	98.7
3	97.2	100
4	96.4	97.2
5	94.7	98.8
6	95.5	100
7	97.2	99.3
8	96.1	98.2
9	94.0	100
10	96.6	97.9

4　结论

(1)设计了一种往复式自动切刀，对不同刃角切刀进行切苗效果仿真和切割机构动力学分析，仿真表明切刀刃角为 30°时，切割效果最佳，切刀在传送带匀速输送条件下能高效切断整盘不同品种的种苗。

(2)选用番茄苗进行响应面分析试验，得出最佳预切割参数组合，在该组合下进行辣椒苗和茄子苗预切割试验，验证平均成功率均大于 99.5%，满足预期要求。

(3)对预切割装置进行参数优化得出最佳组合为：传送带速度 0.3 m/s、切割速率 0.633 m/s(电机转速 3 500 r/min)、气吹角度 140°、气流压强 0.5 MPa。在该参数组合下，预切割平均成功率达 98.9%，预切割效率达 600 盘/h(72 穴规格)，实现了对茄果类种苗高效预切割操作。



图 17　样机试验

Fig. 17　Development test

参　考　文　献

[1] 李军，张铁中，褚佳，等. 全自动整排蔬菜嫁接机嫁接夹输送机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(1)：14－20.
LI Jun, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. Design and experiment of grafting-clip transporting mechanism of full automatic grafting machine for whole-row vegetable seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 14－20. (in Chinese)

[2] 童俊华，喻擎苍，泮金辉，等. 双断根嫁接机自动搬运与回栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(10)：59－66.
TONG Junhua, YU Qingcang, PAN Jinhui, et al. Design and experiment of automatic carrying and replanting device for both-root-cut grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 59－66. (in Chinese)

[3] 李兴. 针接式蔬菜嫁接机的研究[D]. 杭州：浙江大学，2013.
LI Xing. Study on pin-grafting machine for vegetable[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

[4] LEE J M, KUBOTA C, TSAO S J, et al. Current status of vegetable grafting: diffusion, grafting techniques, automation[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 127: 93－105.

[5] 姜凯，冯青春，王秀，等. 国外蔬菜嫁接机器人研究动态[J]. 农业工程技术，2020，40(4)：10－17.
JIANG Kai, FENG Qingchun, WANG Xiu, et al. Dynamics of vegetable grafting robot research in foreign countries[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(4): 10－17. (in Chinese)

[6] 辜松，李恺，初麒，等. 2JX－M 系列蔬菜嫁接切削器作业试验[J]. 农业工程学报，2012，28(10)：27－32.
GU Song, LI Kai, CHU Qi, et al. Experiment of 2JX－M series vegetable cutting devices for grafting[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 27－32. (in Chinese)

[7] 冯捷，李恺，杨艳丽，等. 2JT－M－2014 型茄果类蔬菜嫁接切削器的研制[J]. 农机化研究，2015，37(8)：107－111.

FENG Jie, LI Kai, YANG Yanli, et al. A development of 2JT - M - 2014 cutter for solanaceous vegetables' grafting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 107 - 111. (in Chinese)

[8] 田素博,宋传程,董嵩,等. 甜瓜贴接嫁接机切削装置工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(22):86 - 92.
TIAN Subo, SONG Chuancheng, DONG Song, et al. Parameter optimization and experiment for cutting device of muskmelon grafting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 86 - 92. (in Chinese)

[9] 楼建忠,李建平,朱盘安. 瓜类蔬菜嫁接砧木生长点去除机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(23):64 - 69.
LOU Jianzhong, LI Jianping, ZHU Pan'an. Design and test on growing point removal mechanism of melon vegetable grafting stock[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 64 - 69. (in Chinese)

[10] CHEN S, JIANG K, ZHENG W, et al. Adaptive precision cutting method for rootstock grafting of melons: modeling, analysis, and validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108655.

[11] 柏宗春,吕晓兰,夏礼如. 蔬菜嫁接苗高速切削装置设计[J]. 农业工程学报,2019,35(17):35 - 42.
BAI Zongchun, LÜ Xiaolan, XIA Liru. Design of high-speed cutting device for grafting vegetable seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 35 - 42. (in Chinese)

[12] 韩吉书,宋甲斌,高中强,等. 山东安信种苗针对蔬菜种苗机械化嫁接育苗关键技术的开发与应用[J]. 农业工程技术,2020,40(4):25 - 28.
HAN Jishu, SONG Jiabin, GAO Zhongqiang, et al. Development and application of key technologies for mechanized grafting and seedling cultivation of vegetable seedlings by Shandong Anxin seedling technology[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(4): 25 - 28. (in Chinese)

[13] 合肥佳富特机器人科技有限责任公司[EB/OL]. [2024 - 10 - 31]. https://www.hfgraft.com/.

[14] 姜凯,陈立平,张骞,等. 蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):63 - 71.
JIANG Kai, CHEN Liping, ZHANG Qian, et al. Design and experiment on flexible clamping and conveying mechanism of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 63 - 71. (in Chinese)

[15] ZHANG X, GUO Q, XU Y, et al. Mechanical testing of tomato plant stem in relation to structural composition[J]. Agricultural Research, 2016, 5(3): 236 - 245.

[16] 胡双燕, 胡敏娟, 张文毅, 等. 辣椒穴盘苗茎秆力学特性试验与仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 9 - 18.
HU Shuangyan, HU Minjuan, ZHANG Wenyi, et al. Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 9 - 18. (in Chinese)

[17] 陈建能,李杭,刘林敏,等. 分体刀具式名优茶采摘末端执行器设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2024,55(1):39 - 46,195.
CHEN Jianneng, LI Hang, LIU Linmin, et al. Design and experimental optimization of end effector for picking famous tea with split-cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 39 - 46, 195. (in Chinese)

[18] 张议囡,于晓琳,黄树涛,等. 刀具几何参数对 GFRP 复合材料切削力的影响仿真研究[J]. 工具技术,2024,58(7): 119 - 124.
ZHANG Yi'nan, YU Xiaolin, HUANG Shutao, et al. Simulation study on influence of tool geometry parameters on cutting force of glass fiber reinforced composite materials[J]. Tool Engineering, 2024, 58(7): 119 - 124. (in Chinese)

(上接第 185 页)

[35] 史乃煜,陈海涛,叶俊宏,等. 华东稻麦轮作区立旋自走电驱动式定角度清秸机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 127 - 137.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, YE Junhong, et al. Design and experiment of vertical rotating self-propelled fixed-angle straw cleaning machine in east China rice and wheat crop rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 127 - 137. (in Chinese)

[36] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 111 - 122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111 - 122. (in Chinese)

[37] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41 - 51, 217. (in Chinese)