doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.023

基于有限元瞬态结构仿真的嫁接夹渐进式上夹方法

陈　珊[1]　张　骞[2]　赵春江[2]　姜　凯[1]

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097；2.北京市农林科学院信息技术研究中心，北京 100097)

摘要：自动上夹是机械嫁接过程中的关键环节。针对目前瓜类嫁接夹力学参数不明确、夹子瞬间释放易对幼嫩苗茎造成冲击损伤的问题，本文通过有限元瞬态结构仿真模拟自动上夹全过程，分析嫁接夹动态力学特性，明确了嫁接夹结构参数对苗茎夹持过程中瞬时冲击力及稳定夹持力的影响规律。构建了以不同钢圈直径下嫁接夹夹臂完全闭合时的夹口位移、夹口张开角度为结构参数，以瞬时夹持力和稳定夹持力为评价指标的五因素数学模型，实现了对任意苗茎直径条件下夹持力的理论计算。依托自主研制的嫁接机及其渐进式上夹机构，进行了嫁接夹指定角度渐进式释放与传统夹口张至最大瞬间释放两种方式对比试验。结果表明，在嫁接夹指定角度渐进式释放过程中，当钢圈直径为 0.7 mm 时，嫁接苗表面瞬时冲击力为 5.29 N，小于接穗安全压缩力，上夹成功率达 94%，苗茎表面未出现明显机械损伤，满足机械嫁接上夹环节对安全性和稳定性的要求。研究结果可为嫁接机器人自动上夹机构设计与优化提供理论支撑和参考依据。

关键词：嫁接夹；有限元仿真；瞬态结构；苗茎损伤；渐进式上夹

中图分类号：S233.74　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0245-09　　**OSID**：

Gradual Clamping Method for Grafting Clips Based on Transient Structural Finite Element Simulation

CHEN Shan[1]　ZHANG Qian[2]　ZHAO Chunjiang[2]　JIANG Kai[1]

(1. *Intelligent Equipment Technology Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *Information Technology Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Automatic clamping is a critical step in mechanical grafting processes. To address the issues of unclear mechanical parameters of grafting clips for cucurbits and the potential impact damage caused to tender seedlings by instantaneous release, the complete clamping process was simulated by using transient structural finite element analysis. The dynamic mechanical characteristics of the grafting clip were analyzed to clarify how structural parameters affected the instantaneous impact force and stable clamping force on seedling stems during the clamping operation. A mathematical model with five factors was developed, using the clamp mouth displacement and opening angle at full closure of the grafting clip arms under varying steel ring diameters as structural parameters, and instantaneous and stable clamping forces as evaluation criteria. This enabled the theoretical calculation of clamping force for seedlings of arbitrary diameters. Utilizing a self-developed grafting machine with a progressive clamping mechanism, comparative experiments were conducted between gradual-release clamping at specified angles and traditional instantaneous release at maximum opening. Results showed that during the gradual-release clamping process at a specified angle, when the steel ring diameter was 0.7 mm, the instantaneous impact force on the seedling surface was 5.29 N, below the safe compression limit for scions. This resulted in a 94% successful clamping rate without significant mechanical damage to seedling surfaces, thus satisfying safety and stability requirements for mechanical grafting clamping. The research result can

收稿日期：2025-03-24　修回日期：2025-05-15

基金项目：国家自然科学基金面上项目(32171898)、国家重点研发计划项目(2024YFD2000604-1)、2025 年度农业智能装备技术北京市重点实验室建设项目(PT2025-44)和国家西甜产业技术体系项目(CARS-25-07)

作者简介：陈珊(1998—)，女，博士生，主要从事设施园艺智能装备技术研究，E-mail：2282070400@qq.com

通信作者：姜凯(1982—)，男，正高级工程师，博士，主要从事设施园艺智能装备技术研究，E-mail：jiangk@nercita.org.cn

provide theoretical support and references for the design and optimization of automated clamping mechanisms in grafting robots.

Key words: grafting clip; finite element simulation; transient structure; stem damage; gradual clamping

0 引言

2023 年中国蔬菜播种面积达 $2.288\ 4 \times 10^7$ hm^2,总产量达 8.28×10^8 t,较 2022 年分别增长 4.394×10^5 hm^2和 $2.870\ 89 \times 10^7$ t[1]。随着现代设施农业的快速发展,蔬菜育苗规模持续扩大,年需蔬菜种苗数量约 7×10^{11} 株[2]。嫁接能增强蔬菜作物抗逆性并提高产量,尤其在连作障碍和病虫害问题日益严重的背景下显示出其独特优势[3-5]。随着对蔬菜需求的持续增长,育苗企业嫁接苗产量也在逐年上升[6-9]。在这种形势下,机械化嫁接成为提高瓜类种苗嫁接效率及实现标准化嫁接生产的有效手段[10-12]。自动上夹是机械嫁接的关键一步。通常贴接法嫁接需嫁接夹固定切削好的砧木与接穗苗茎切口[13-15],在此过程中,确保砧穗上夹部位的安全与稳定性是保证嫁接成功的关键。

目前,关于嫁接机自动上夹研究主要集中在两方面:①嫁接夹定向排序、输送以及夹持固定嫁接苗的机构设计等。田素博等[16]提出了一种精确单夹输出机构,通过振动盘和推送气缸协同工作,实现了嫁接夹自动排序和供夹。王家胜等[17]、李军等[18]设计了一种多通道嫁接夹输送装置,同样通过振动盘定向输出嫁接夹,实现在一个工作循环中同时输送多个嫁接夹并固定一排嫁接苗的功能。②上夹过程中嫁接夹的精准定位。赵晖等[19]提出了一种结合机器视觉的嫁接夹定位识别方法,该方法能实现嫁接夹抓取点及旋转角度的精确定位,初步实现了自动上夹操作。然而,对于直接作用于苗茎的嫁接夹动态力学特性的深入研究相对缺乏,生产中多凭经验选择夹子型号,导致苗茎损伤现象时有发生。现阶段,钢圈直径是嫁接夹选择的唯一参考依据和标准,明确嫁接夹力学特性参数和相关理论分析方法,对提高嫁接生产效率和质量至关重要。

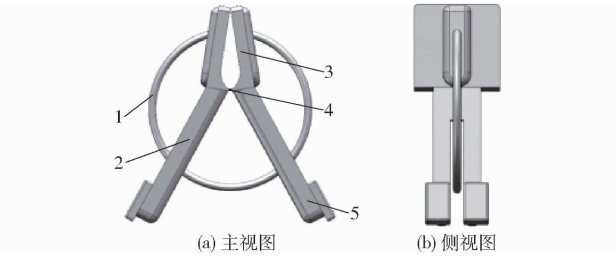
仿真是探明上夹过程嫁接苗与嫁接夹互作关系必不可少的重要手段。现有的仿真研究采用静态分析[20],能模拟钢圈拉开动作及拉开不同位移的受力情况,却忽略了夹体在快速、动态载荷下的非线性响应和夹尾瞬间释放时的冲击效应。虽然夹体是在钢圈作用下动作,但直接作用于嫁接苗的是夹体,因此,需模拟真实的嫁接夹上夹过程,即初始状态下,在钢圈预紧力作用下闭合的夹口,在对夹尾施加主动力时,夹口在克服钢圈作用力下被打开,撤去该力后夹口在钢圈弹性恢复力作用下主动闭合夹持苗茎的过程。非线性瞬态结构分析在处理材料较大变形和接触力学行为以及非线性响应方面表现出色[21-22],能获得更真实的嫁接夹缓慢张开与瞬间闭合的力学响应仿真结果。

针对上述不足,本研究提出嫁接夹结构非线性瞬态动态分析方法,区别于以往仅考虑静态特性的分析方法,模拟嫁接夹在实际使用中从张开到瞬间闭合夹持苗茎的完整动态过程,明确嫁接夹结构参数与动态力学特性间的定量关系,以有效解决传统夹持方式带来的苗茎损伤问题,显著提高机械嫁接生产的稳定性与安全性,为嫁接机器人渐进式自动上夹机构设计开发提供重要理论基础和实践指导。

1 嫁接夹结构与上夹过程

1.1 嫁接夹结构

选取 2TJGQ-800 型蔬菜嫁接机专用嫁接夹,其结构由夹体和钢圈组成,夹体由左右两部分构成(图 1a),采用聚丙烯(PP)材料注塑成型制成,钢圈由不锈钢材质制成[23-24]。两端夹尾有缝隙,以便钢圈能够穿过(图 1b)。钢圈上设有豁口,通过将豁口向相反方向拉开一定距离,然后释放,钢圈上下豁口便会卡入夹体两端凹槽中。因此,在初始自然状态下,夹口能够闭合是因为钢圈具有一定预紧力,该力作用于夹尾,使得钢圈能克服其弹性力(即恢复形变所需的力),从而驱动夹口开启。



(a) 主视图 (b) 侧视图

图 1 嫁接夹结构图

Fig. 1 Structural composition of grafting clip

1. 钢圈 2. 夹体 3. 夹口 4. 连接点 5. 夹尾

1.2 上夹过程

瓜类贴接法嫁接过程如图 2 所示。要求将砧木的 1 片子叶与真叶切除形成 30°切面,接穗下胚轴苗茎 1.0~1.5 mm 处切削时同样形成 30°切面,将砧木与接穗两切面中心点对接贴合,使嫁接夹夹口打开后夹持固定住二者切面接合部位,完成瓜类种苗贴接嫁接过程[25]。

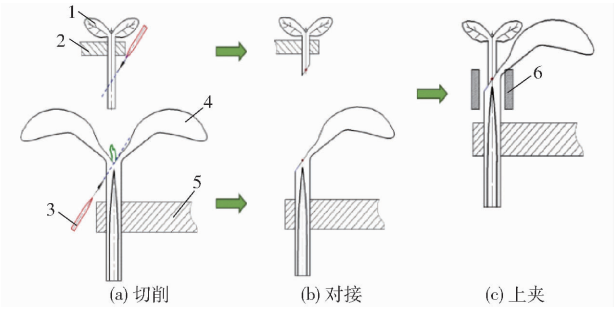


图 2　瓜类贴接法嫁接示意图

Fig. 2　Schematics of melon splicing grafting

1. 接穗幼苗　2. 接穗夹持手　3. 切刀　4. 砧木幼苗　5. 砧木夹持手　6. 嫁接夹

2　嫁接夹动力学仿真

嫁接夹在实际上夹过程为瞬间动作且过程复杂，真实环境下对夹持瞬时冲击力和动态响应的精确测量难度大、成本高。利用有限元仿真能高效地分析复杂动态载荷下嫁接夹的结构响应，并通过参数化分析明确不同因素的影响规律。因此，仿真不仅经济高效，而且能提供深入的力学行为分析，为嫁接机参数优化与验证试验提供理论支撑。

2.1　参数分析

嫁接夹输出结构参数如图 3 所示。结构参数包括：钢圈截面直径 d、上下夹臂旋转角度 θ_1 和 θ_2（下文输出结果统一用 θ 表示）、夹口位移 z，z 通过仿真后处理定向变形输出值求得，为钢圈上下豁口法线与上下夹口内表面交点间距离，这 2 个交点分别与苗茎外轮廓相切。力学参数（评价指标）包括：瞬时夹持力 F_1，为夹尾瞬间释放时，夹口刚接触苗茎表面最大的力，此时夹口速度达到峰值；稳定夹持力 F_2，为夹口静止时稳定夹持苗茎表面的力，此时夹口速度为 0。F_1 和 F_2 通过仿真后处理“力反应”输出结果。

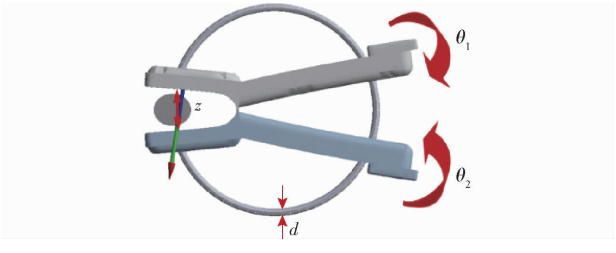


图 3　嫁接夹输出结构参数示意图

Fig. 3　Graft clip output structure parameters

2.2　接触设置与网格划分

嫁接夹非线性动态仿真采用 ANSYS Workbench 2021 R1 中的“瞬态结构”（Transient structural）模块。首先，建立嫁接夹和苗茎几何模型，导入 ANSYS Workbench 仿真平台，确保模型几何准确性和细节完整。然后在 ANSYS Workbench 材料库进行材料属性选择，仿真模型采用材料属性为：夹体（聚丙烯，PP）密度为 8.9×10^{-7} kg/mm^3，杨氏模量取 1 500 MPa，剪切模量取 535.71 MPa，泊松比为 0.42，拉伸屈服强度为 35 MPa；钢圈（不锈钢）密度为 7.75×10^{-6} kg/mm^3，杨氏模量取 1.93×10^5 MPa，剪切模量取 73 664 MPa，泊松比为 0.31，拉伸屈服强度为 205 MPa。苗茎材料采用自定义参数，密度为 1.05×10^{-6} kg/mm^3，杨氏模量取 200 MPa，剪切模量取 0.5 MPa，泊松比为 0.4，拉伸屈服强度为 3 MPa，数据来源于前期试验测量。接触设置包括钢圈豁口与夹口凹槽的绑定接触、上下夹体与销钉的转动副设置、以及上下夹口内表面与苗茎间的摩擦接触，如图 4 所示。

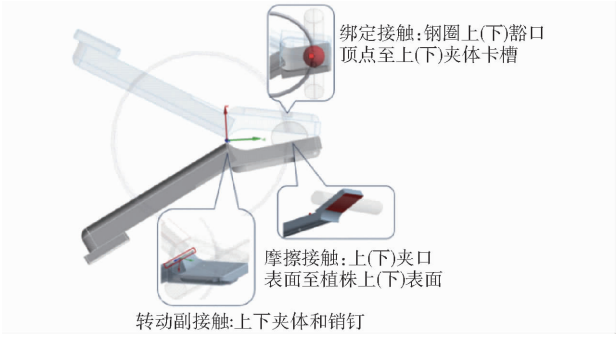


图 4　接触设置示意图

Fig. 4　Diagram of contact setup

网格划分采用全局统一尺寸，并在接触和受力区域进行细化。全局网格尺寸为 0.8 mm，上下夹口内表面与苗茎区域网格尺寸为 0.4 mm，上下夹体卡槽区域网格尺寸为 0.2 mm，而上下夹体与销钉连接部位网格则细化至 0.05 mm，如图 5 所示。

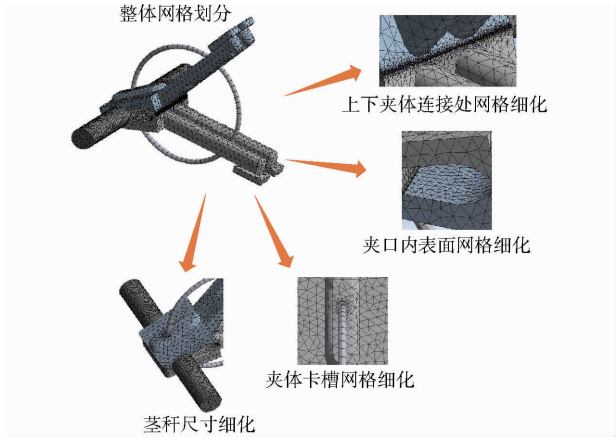


图 5　整体网格划分与局部网格细化

Fig. 5　Overall mesh division and local mesh refinement

2.3　动态载荷步控制与边界条件设定

完成嫁接夹基本参数设置后，进行嫁接夹边界条件和载荷施加，以模拟嫁接夹张开与闭合过程及其夹持苗茎行为。施加边界条件包括“位移 3”和

“固定支撑”,见表 1(表中“+”和“-”表示运动方向,“-”表示沿坐标轴负方向),分别用于钢圈 Z 轴方向约束和销钉 1 全约束,边界条件为全时段设定。施加载荷包括“位移 1”、“位移 2”、“远程位移 1”和“远程位移 2”,分别用于模拟钢圈上下豁口拉开、上夹体尾部和下夹体尾部旋转。

表 1 边界条件与施加载荷

Tab. 1 Boundary conditions and applied loads

边界条件与载荷	用途	数值	方向	载荷步激活时刻/s
位移 1	钢圈上豁口拉开	1.7 mm	竖直向上	0 ~ 1
位移 2	钢圈下豁口拉开	-1.7 mm	竖直向下	0 ~ 1
远程位移 1	上夹尾旋转	$+\theta$	沿 Z 轴正方向	1 ~ 2
远程位移 2	下夹尾旋转	$-\theta$	沿 Z 轴负方向	1 ~ 2
位移 3	钢圈约束	Z 轴分量为 0 mm	X、Y 方向	0 ~ 2.02
固定支撑	销钉约束		XYZ 三轴固定	0 ~ 2.02

“位移 1”和“位移 2”设置原理如下:坐标系位于钢圈中心,分别在钢圈上下豁口施加竖直方向的拉力,钢圈上下豁口分别拉开 1.7 mm 和 -1.7 mm,如图 6a 所示。载荷“位移 1”和“位移 2”在 0 ~ 1 s 期间激活,目的是通过钢圈预紧力使夹口闭合,为夹持苗茎提供初步夹持力。在此阶段,夹体保持静止,钢圈被拉开至夹体凹槽内。“远程位移 1”和“远程位移 2”则用于通过在夹尾施加力矩,实现旋转动作。在上下夹尾分别施加力 F,作用方向为垂直夹尾,垂直于力 F 的 2 个力相交点即为远程位移坐标系中心,上下夹尾分别相对旋转一定角度 $+\theta$、$-\theta$,夹口对应张开一定角度,方向沿苗茎方向,符合右手定则,如图 6b 所示。“远程位移 1”和“远程位移 2”在 1 ~ 2 s 激活,模拟夹口的进一步打开。

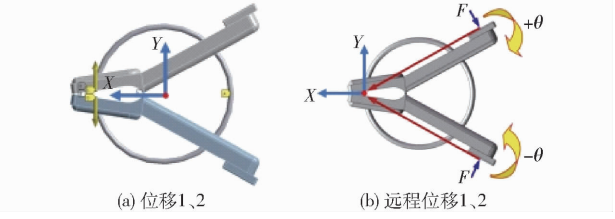


图 6 施加载荷原理图

Fig. 6 Load application principle

钢圈与夹体运动通过载荷步骤实现,整个过程分为 3 个阶段:①载荷步骤 1(0.2 ~ 1 s)。在钢圈两端豁口施加相向的力,上下豁口被拉开 1.7 mm 位移(图 7),此阶段激活“位移 1”和“位移 2”(表 1)。将拉开后的钢圈卡至上下夹体卡槽中,同时保持夹体静止。此阶段激活绑定连接(图 4),钢圈与夹体形成整体。②载荷步骤 2(1 ~ 2 s)。在夹体尾端施加外力,驱动上下夹体在钢圈作用下张开,夹体绕旋转轴分别旋转 28.56°至最大张开状态(图 7)。此阶段激活“远程位移 1”和“位移 2”,抑制“位移 1”和“远程位移 2”(表 1)。③载荷步骤 3(2 ~ 2.02 s)。撤除施加在夹体尾端的外力,钢圈通过自身形变力驱动夹体迅速闭合(图 7)。为模拟夹体旋转至自由闭合状态,设置一个小于 28.56°的反向旋转角度。此阶段激活“远程位移 1”和“位移 2”(表 1),同时激活夹口与茎秆表面的摩擦接触(图 4)。图 7 中,灰色钢圈表示钢圈原始状态,彩色钢圈表示在外力影响下钢圈的真实变形状态。

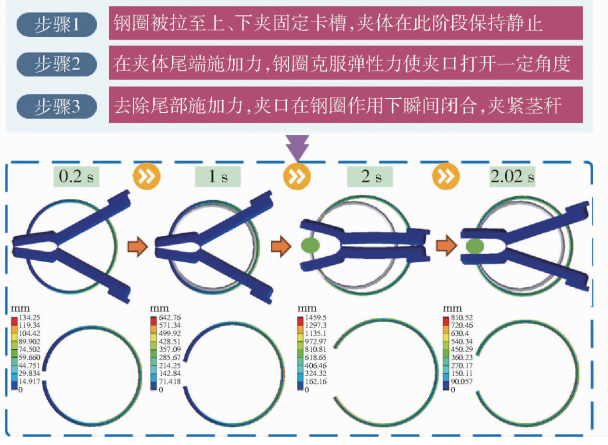


图 7 嫁接夹夹持固定苗茎过程

Fig. 7 Seedling stem clamping process by grafting clip

3 仿真结果与分析

3.1 嫁接夹非线性响应分析

在实际工况中,夹口张至最大瞬间释放至茎秆表面,会对茎秆表面造成冲击损伤。但在嫁接过程中苗茎并非理想化的竖直生长状态,因此,需上夹时夹口首先张至最大,确保将苗茎包围其中,然后再释放至接近苗茎时的张开角度(指定角度),最后释放至苗茎夹持固定。钢圈直径 0.3 ~ 1.0 mm 的嫁接夹夹口张至最大(即夹尾贴合)仿真效果如图 8 所示。

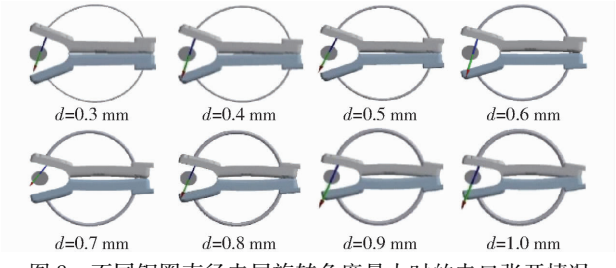


图 8 不同钢圈直径夹尾旋转角度最大时的夹口张开情况

Fig. 8 Clip opening at maximum rotation angle of clip tail for different ring diameters

钢圈直径从 0.6 mm 至 1.0 mm,夹口张至最大

时夹尾变形量也逐渐变大。表明在不同钢圈直径下，受钢圈弹性恢复力的影响，夹口张至最大需越来越大的力。当钢圈直径为 1.0 mm 时，夹尾贴合需最大力，夹尾变形也最严重。因此，渐进式上夹是嫁接夹非线性变形过程，为明确渐进式上夹在不同时刻下不同钢圈直径 d、不同夹口张开角度 θ、不同夹口位移 z 因素下的评价指标：瞬时夹持力 F_1 和稳定夹持力 F_2，需构建影响因素与评价指标的数学方程。

3.2　仿真评价指标数学模型构建

构建夹口缓慢张开至最大过程中，不同钢圈直径 d，在不同夹口张开至角度 θ 下的夹口位移 z、瞬时夹持力 F_1 和稳定夹持力 F_2 的数学方程，对应关系的相关性热图如图 9 所示。

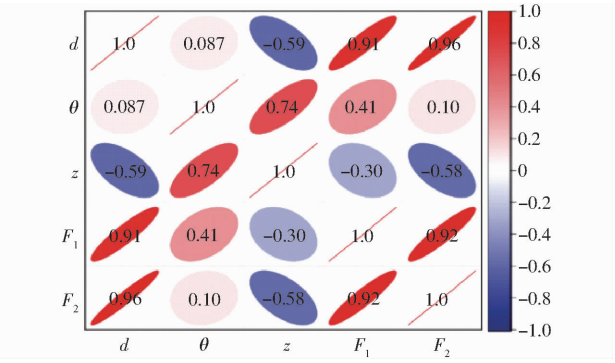


图 9　5 因素相关性热图

Fig. 9　Heat map of five-factor correlation

图 9 中，热图椭圆中数值表示 2 个变量间的相关系数，数值接近 1 或 −1，表示变量间存在强烈的正相关或负相关；数值越接近 0，表示变量间相关性越弱。

夹口位移 z 与钢圈直径 d 呈中等负相关性，相关系数为 −0.59，表明钢圈直径增大时，用相同的力打开夹尾，夹口位移减小；瞬时夹持力 F_1、稳定夹持力 F_2 均与 d 呈强正相关性，相关系数分别为 0.91 和 0.96，表明钢圈直径增大时，瞬时夹持力与稳定夹持力也随之增大。这是因为钢圈越粗，夹口张至最大后瞬间释放时，其形变恢复力越大，与茎秆表面的瞬时接触力越大，同样地，夹口夹持茎秆表面静止时的稳定夹持力也越大。夹口位移 z 与夹口角度 θ 呈强正相关性，相关系数为 0.74，夹口角度越大，夹口张开位移越大；F_1 与 θ 呈中等正相关性，相关系数为 0.41，F_2 与 z 呈中等负相关性，相关系数为 −0.58；表明夹口角度和夹口张开位移对嫁接夹作用于苗茎表面的瞬时夹持力和稳定夹持力无明显影响，主要还是受钢圈直径的影响。F_1 与 F_2 呈强正相关性，相关系数为 0.92，表明 F_1 增大时，F_2 也增大。其余两两因素间均呈弱相关性或非常弱的相关性。

综上可得，钢圈直径 d 增大时，夹口位移 z 减小，夹口角度 θ 减小，瞬时夹持力 F_1 增大时，稳定夹持力 F_2 也增大。

当 d 为 0.3 ~ 1.0 mm 时，使用最小二乘法拟合夹尾旋转角度 θ 与夹口位移 z 的线性通用模型为

$$z = a(d)\theta + b(d) \tag{1}$$

式中　$a(d)$、$b(d)$——θ 的斜率和截距

不同 d 下 θ 与 z 关系如图 10 所示，z 的线性方程如表 2 所示。

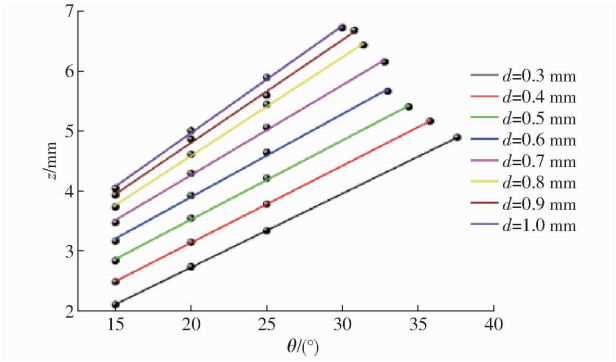


图 10　不同钢圈直径 d 下夹尾旋转角度 θ 与夹口位移 z 变化关系

Fig. 10　Variation of pinch tail rotation angle θ versus nip displacement z for different ring diameters d

表 2　不同钢圈直径下 z 线性方程

Tab. 2　Linear equations of z for different ring diameters

d/mm	z 线性方程	调整后决定系数 R^2_{adj}
0.3	$z = 0.178\,60\theta + 1.404$	0.998 4
0.4	$z = 0.171\,50\theta + 1.381$	0.996 6
0.5	$z = 0.164\,50\theta + 1.305$	0.998 6
0.6	$z = 0.150\,20\theta + 1.268$	0.997 8
0.7	$z = 0.138\,60\theta + 1.133$	0.997 2
0.8	$z = 0.132\,00\theta + 0.889$	0.998 9
0.9	$z = 0.128\,60\theta + 0.569$	0.999 9
1.0	$z = 0.123\,20\theta + 0.265$	1.000 0

使用 d 为 0.3 ~ 1.0 mm 时的 $a(d)$ 和 $b(d)$ 与对应 d 进行多项式拟合，得到多项式系数为

$$a(d) = -0.75d^4 + 2.17d^3 - 2.19d^2 + 0.82d + 0.08 \tag{2}$$

$$b(d) = 12.83d^4 - 34.87d^3 + 30.89d^2 - 11.50d + 2.92 \tag{3}$$

$a(d)$ 和 $b(d)$ 的 R^2_{adj} 分别为 0.996 7 和 0.992 3，表明模型精度高。因此，z 具体表达式可写为

$$a = (-0.75d^4 + 2.17d^3 - 2.19d^2 + 0.82d + 0.08)\theta + 12.83d^4 - 34.87d^3 + 30.89d^2 - 11.50d + 2.92 \tag{4}$$

式(4)适用于苗茎短轴直径为 2 ~ 4 mm、生长苗龄 7 ~ 15 d 的西瓜及类似瓜类幼苗，其他苗龄或苗茎直径超出上述范围的瓜类作物需进一步的参数修正与验证。

式中，z 取值范围为 2.11 ~ 6.73 mm，d 取值范围为 0.3 ~ 1.0 mm，θ 取值范围依据 d 和 z 取值而定。可以根据式(4)，由直径 d 和夹口位移 z 计算角度 θ。

由图 11 可知，F_1 在 d 不同取值时，其值分布在一个区间内，即一旦确定了 F_1 区间，便可以将其映射到对应的 d 值。

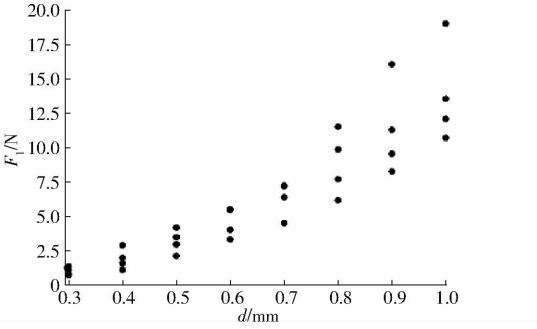


图 11 F_1 与 d 散点分布

Fig. 11 Scatter distribution of F_1 *vs.* d

图 11 各 d 值及其对应的 F_1 范围分别为：d = 0.3 mm，F_1 为[0.661，1.313] N；d = 0.4 mm，F_1 为[1.056，2.848] N；d = 0.5 mm，F_1 为[2.078，4.152] N；d = 0.6 mm，F_1 为[3.276，5.483] N；d = 0.7 mm，F_1 为[4.478，7.197] N；d = 0.8 mm，F_1 为[6.143，11.510] N；d = 0.9 mm，F_1 为[8.249，16.057] N；d = 1.0 mm，F_1 为[10.689，19.026] N。

F_2 与 d 曲线拟合方程如图 12 所示。由图 12 可知，当 d 为 0.3 ~ 1.0 mm 时，相同钢圈直径 d 下，θ 的不同取值时，F_2 取值十分接近，R^2_{adj} 为 0.998 7，说明方程拟合精度极高。综上所述，对一批次嫁接苗进行渐进式上夹时，首先通过测量砧木茎秆短轴径设定一个接近夹口位移 z 的值，再根据砧木与接穗茎秆短轴压缩试验，获取砧木、接穗茎秆压缩力更小一方的临界安全压缩力 F_1 值，根据映射关系，确定 d 取值，进而根据式(4)、图 12 中 F_2 和 d 的曲线拟合方程分别计算出 F_2 和 θ。

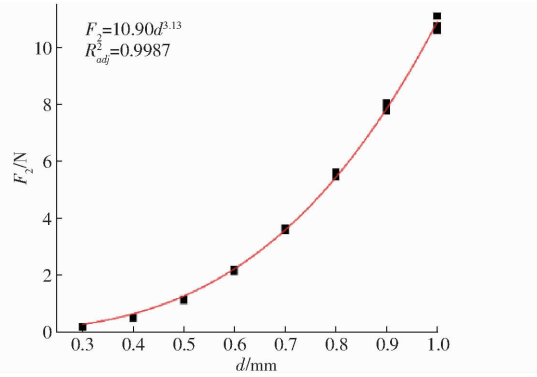


图 12 F_2 与 d 曲线拟合方程

Fig. 12 Curve fitting of F_2 *vs.* d

4 试验

4.1 嫁接夹参数确定

西瓜嫁接苗苗茎幼嫩，对夹持力敏感性较高，较为典型且广泛应用于机械化嫁接[26-27]。另外，西瓜苗与黄瓜、甜瓜等苗茎类似，本研究选取西瓜嫁接苗作为试验对象，所获得的力学参数和夹持方法理论上具有较好的推广价值。选用砧木苗(京欣砧 2 号白籽南瓜)和接穗苗(京美西瓜)配对嫁接。将砧木培育至两子叶展开后的第 3 天“两叶一芯”时期，接穗苗两子叶展平。

使用万能材料试验机进行苗茎压缩试验[28-30]，测定砧木茎秆 50 株，长轴长度(3.46 ± 0.16) mm，短轴长度为(3.02 ± 0.12) mm；接穗茎秆 50 株，长轴长度为(2.29 ± 0.08) mm，短轴长度为(1.84 ± 0.06) mm。压缩力学试验结果如图 13 所示。由图 13 可知，砧木与接穗平均弹性极限值为 8.50、6.79 N(即压缩力大于该值苗茎发生永久性损伤)。接穗苗茎比砧木苗茎更柔嫩易损，因此，嫁接夹瞬时夹持力主要以不损伤接穗苗茎为前提。

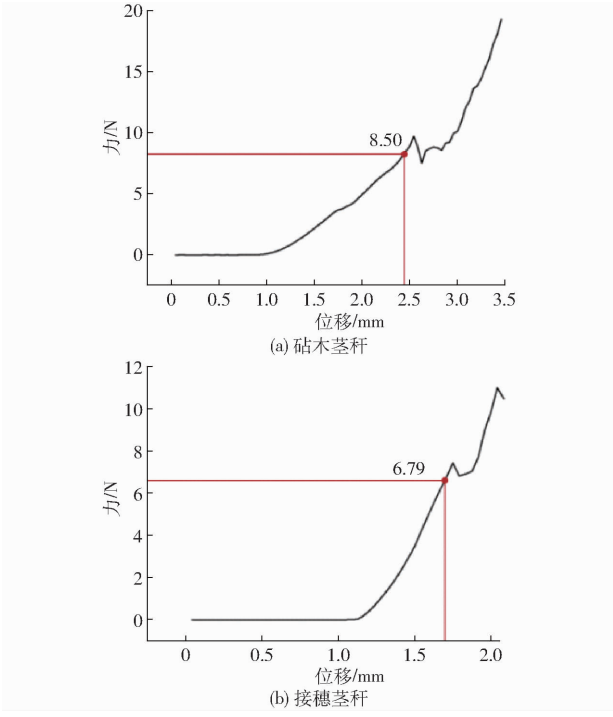


图 13 砧木与接穗压缩力-位移曲线

Fig. 13 Compression force − displacement curves of seedlings

由于砧木苗茎短轴长度为(3.02 ± 0.12) mm，夹口位移 z 设定为 3.5 mm，根据砧木与接穗压缩力-位移曲线，接穗平均弹性极限值为 6.79 N，嫁接夹瞬时夹持力 F_1 应小于该值。根据 F_1 与钢圈直径 d 的映射关系，该值在[4.478，7.197] N 区间内，因此，d 为 0.7 mm(钢圈直径 d 最大值取 0.7 mm)，根

据稳定夹持力 F_2 与钢圈直径 d 的曲线拟合方程可得 F_2 为 3.57 N；由表 2 中 d 为 0.7 mm 时 z 线性方程，计算出此时夹口张开角 θ 为 17.08°。根据瞬时夹持力 F_1 与钢圈直径 d 的映射关系，F_1 为 5.29 N，在［4.478，7.197］N 的区间内，证实了 F_1 与 d 取值的正确性。

此时，保持钢圈直径相同，夹口张至最大 θ 为 28.56°时，对应夹口位移 z 为 5.45 mm，从夹口张至最大状态瞬间释放，苗茎表面所受瞬间冲击力 F_1 为 6.57 N，稳定后夹持力 F_2 为 3.61 N，指定角度渐进式释放与夹口张至最大瞬间释放两种上夹方式的上夹性能验证结果如表 3 所示。

表 3　上夹过程嫁接夹参数

Tab.3　Clip parameters during application process

上夹方式	d/mm	θ/(°)	F_1/N	F_2/N	z/mm
指定角度渐进式释放	0.7	17.08	5.29	3.57	3.50
夹口张至最大瞬间释放	0.7	28.56	6.57	3.61	5.45

4.2　试验方法

渐进式上夹机构安装于 2TJGQ－800 型蔬菜嫁接机，如图 14 所示。采用对比试验法，通过定量评估嫁接成功率和定性分析夹持损伤率，对比普通上夹与渐进式上夹两种方式的性能差异。



图 14　嫁接机实物图

Fig. 14　Physical prototype of grafting machine

两组试验各完成西瓜嫁接苗 50 株，以对接部位形态保持完整、无明显压痕为标准，判定为夹持效果较佳，否则判定为伤苗。为进一步明确普通上夹与渐进式上夹对嫁接苗的损伤程度，使用微距相机（MV－EM120C 型）拍摄嫁接苗夹持部位，获取高分辨率图像，对比分析普通上夹和渐进式上夹对嫁接苗表面挤压的影响。仿真确定的参数仅作为试验初始设置，真实力学参数准确获取需通过试验验证进行进一步修正或校准。分别进行指定角度渐进式释放的渐进式上夹与夹口张至最大瞬间释放普通上夹验证试验，上夹过程如图 15 所示。

4.3　试验结果

两种上夹方式试验结果见表 4。

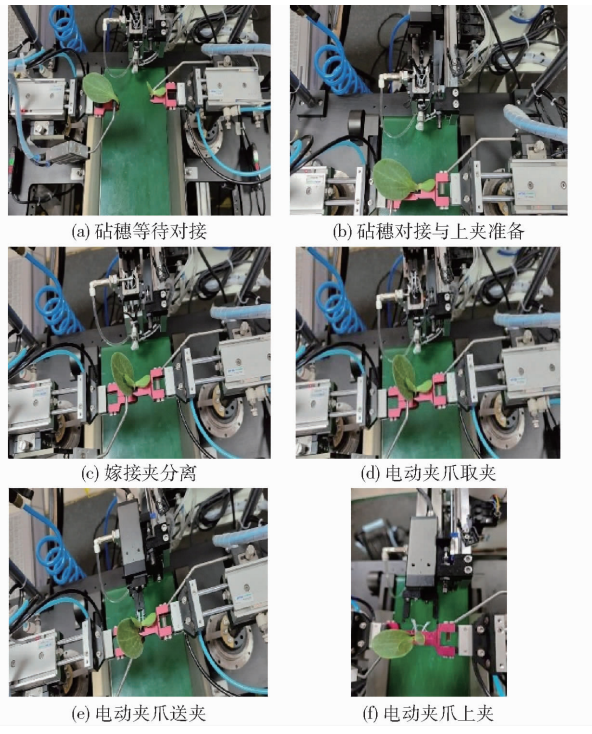


图 15　渐进式上夹过程

Fig. 15　Gradual clamping process

表 4　对比试验结果

Tab.4　Comparative test results

上夹方式	样本量/株	夹伤发生率/%	夹持成功数/株	夹持成功率/%
指定角度渐进式释放	50	6	47	94
夹口张至最大瞬间释放	50	16	42	84

普通上夹张至最大瞬间释放的嫁接部位因接穗与夹口直接接触，出现明显夹伤现象，如图 16a 所示。表明接穗弹性极限值 6.79 N 与张至最大瞬间释放的瞬时夹持力 6.57 N 非常接近。此外，由于接穗在物理力学特性上的个体差异（如苗茎粗细及柔嫩程度），较细且柔嫩的接穗苗茎更容易发生夹伤。而被夹伤的接穗可能影响砧木对其的营养物质输送，从而降低嫁接成活率。相比之下，渐进式上夹指定角度渐进式释放的夹持效果更为理想，接穗形态未产生明显影响，如图 16b 所示，嫁接部位机械损伤

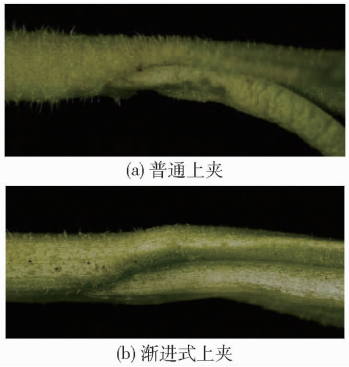


图 16　嫁接苗上夹部位效果

Fig. 16　Clip application effects on grafted seedlings

显著降低。尤其是当直径 0.7 mm 钢圈嫁接夹夹口张至 17.08°时,其夹持固定效果优于普通上夹机构,进一步证明渐进式上夹机构在嫁接过程中具有明显优势。

渐进式上夹试验成功嫁接苗如图 17 所示。渐进式上夹相较普通上夹在实施过程中速度略有降低,但渐进式上夹显著减少了伤苗率,提升了嫁接成活率和质量,经济效益优势明显。



图 17 试验成功嫁接苗

Fig. 17 Successfully grafted seedlings

后续将进一步针对其他瓜类作物开展验证试验,明确其普适性和适用边界。未来实际推广中可能遇到苗茎直径差异较大、夹持机构长时间运行的疲劳磨损以及柔性上夹机构复杂性增加所带来的维护保养问题。下一步研究将重点关注夹持参数的自适应调节技术、机构耐久性优化设计及控制系统简化,以提升实际应用的可靠性和可维护性。

5 结论

(1)通过有限元瞬态结构仿真,模拟了嫁接夹上夹过程中的非线性动态行为。通过接触步骤与时间步骤动态载荷,分 3 段分别进行钢圈打开、夹尾施力与夹口闭合过程的精准控制。确定嫁接夹结构参数与作用于嫁接苗表面的力学参数。

(2)分析了渐进式上夹过程中嫁接夹的非线性变形,明确嫁接夹结构参数与力学参数数学模型构建的必要性。开展钢圈直径 d、夹口张开角度 θ、夹口位移 z、瞬时夹持力 F_1 和稳定夹持力 F_2 的五因素相关性分析,构建强相关因素间的数学方程,实现对任意苗龄嫁接苗的渐进式上夹与夹持力可控。

(3)进行嫁接苗压缩试验,确定特定时期砧穗安全抗压力,通过数学方程进行嫁接夹结构参数与力学参数计算,验证指定角度渐进式释放与夹口张至最大瞬间释放的上夹成功率与伤苗率,结果表明,指定角度渐进式释放上夹成功率为 94%,高于夹口张至最大瞬间释放的 84%,伤苗率为 6%,低于夹口张至最大瞬间释放的 16%。

参 考 文 献

[1] 安民,曹姗姗,孙伟,等. 我国蔬菜产业市场运行态势研究[J]. 中国蔬菜,2024(2):6 – 13.
AN Min, CAO Shanshan, SUN Wei, et al. Research on the market operation situation of China's vegetable industry[J]. China Vegetables, 2024(2): 6 – 13. (in Chinese)

[2] CHEN S, FENG Q, KAN Z, et al. Achieving optimal cutting results for melon rootstock: precision linear cutting and parameter simulation optimization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109883.

[3] LEE J M, KUBOTA C, TSAO S J, et al. Current status of vegetable grafting: diffusion, grafting techniques, automation[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 127(2): 93 – 105.

[4] LEE J M. Cultivation of grafted vegetables I. Current status, grafting methods and benefits[J]. HortScience, 1994, 29(4): 235 – 239.

[5] YU J L, ZHAO Y L, XU B Y, et al. Double grafting: a synthesis of applications and future research horizons[J]. Horticulturae, 2025, 11(04), 366.

[6] 王家胜, 李洋鹏, 高春风, 等. 对称式蔬菜单株自动嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 141 – 150.
WANG Jiasheng, LI Yangpeng, GAO Chunfeng, et al. Design and test of symmetrical structure vegetable grafting robot for single plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 141 – 150. (in Chinese)

[7] 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(增刊 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(Supp. 2): 63 – 71. (in Chinese)

[8] DEVI P, LUKAS S, MILES C. Advances in watermelon grafting to increase efficiency and automation[J]. Horticulturae, 2020, 6(4): 88.

[9] MOHAMED F, EL-HAMED K, ELWAN M, et al. Impact of grafting on watermelon growth, fruit yield and quality[J]. Veget. Crops Res. Bull., 2012, 76: 99 – 118.

[10] 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. Research progress on vegetable grafting robots abroad[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(4): 10 – 17. (in Chinese)

[11] CHEN L, JIANG K, ZHANG Q, et al. Design and experiment on scion cutting mechanism of grafting robot for cucurbit[J].

International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2020, 13(5): 99 – 107.

[12] JIANG K, WANG J, LI C. Design and test of melon grafting device based on splice grafting[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(3): 65 – 74.

[13] XU P Y, ZHANG T, CHEN L P, et al. Study on the method of matched splice grafting for melon seedlings based on visual image[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 929.

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

[15] CHEN S, LIANG H, ZHANG Q, et al. Melon robotic grafting: a study on the precision cutting mechanism and experimental validation[J]. Agriculture, 2023, 13(11): 2139.

[16] 田素博, 杨继峰, 王瑞丽, 等. 蔬菜嫁接机嫁接夹振动排序装置工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 9 – 16.
TIAN Subo, YANG Jifeng, WANG Ruili, et al. Optimization experiment of operating parameters on vibration sorting-clip device for vegetable grafting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 9 – 16. (in Chinese)

[17] 王家胜, 张梅, 高春风, 等. 茄科蔬菜多株同步自动嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 38 – 45.
WANG Jiasheng, ZHANG Mei, GAO Chunfeng, et al. Design and test of key components of vegetable grafting robot for plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 38 – 45. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 赵晖, 贾靖, 周磊, 等. 基于机器视觉的嫁接夹定位识别方法[J]. 热带农业工程, 2019, 43(2): 79 – 85.
ZHAO Hui, JIA Jing, ZHOU Lei, et al. Research on location recognition method of grafting clip based on machine vision[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2019, 43(2): 79 – 85. (in Chinese)

[20] JIANG Kai, GUO Wenzhong, CHEN Liping, et al. Design and experiment of automatic clip-feeding mechanism for vegetable-grafting robot[J]. Agriculture,2022,12(3):346.

[21] SUN Baoyin, ZHANG Yantai, DAI Denghui, et al. Seismic fragility analysis of a large-scale frame structure with local nonlinearities using an efficient reduced-order Newton-Raphson method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164, 107559.

[22] SUN Baoyin, ZENG Zhenrui, WANG Kai, et al. Dual-reduction order parallel simulation of large-scale problems with local material nonlinearities[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 182: 108721.

[23] LIANG Huan, ZHU Juhong, GE Mihong, et al. A comparative analysis of the grafting efficiency of watermelon with a grafting machine[J]. Horticulturae, 2023, 9(5): 600.

[24] JIANG Kai, WANG Jinwu, ZHANG Qian, et al. Mechanical characteristics analysis and test of a spring-loaded grafting clip [J]. Int. Agric. Eng. J., 2018, 27: 61 – 72.

[25] 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)

[26] ERTLE J, KUBOTA C. Watermelon seedling quality, growth, and development as affected by grafting and chilling exposure during simulated transportation[J]. HortScience, 2022(8): 57.

[27] DEVI P, PERKINS-VEAZIE P, MILES C. Impact of grafting on watermelon fruit maturity and quality[J]. Horticulturae, 2020, 6(4): 97.

[28] 牟英辉, 辜松, 马稚昱. 瓜类嫁接苗生物力学特性的试验分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 15 – 20.
MOU Yinghui, GU Song, MA Zhiyu. Experimental analysis on biomechanical properties of cucurbits grafted seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 15 – 20. (in Chinese)

[29] 姜凯. 瓜类贴接式机械嫁接机理及装置试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
JIANG Kai. Study on mechanism and experimental device of splice mechanical grafting of cucurbit[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[30] 张秀芳,徐淑彦,宋玉秋.黄瓜与南瓜嫁接苗物理及静力特性研究[J].农机化研究, 2007, 29(6): 117 – 119.
ZHANG Xiufang, XU Shuyan, SONG Yuqiu. Study on physical and static properties of cucumber and pumpkin seedlings for grafting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(6): 117 – 119. (in Chinese)