

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.013

# 斜插式蔬菜嫁接机穗木气吸吸头优化设计\*

楼建忠<sup>1,2</sup> 李建平<sup>1</sup> 朱盘安<sup>3</sup> 吕谷来<sup>1</sup> 王萌<sup>1</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程学系, 杭州 310029; 2. 浙江机电职业技术学院机械工程学院, 杭州 310053;

3. 温州科技职业学院, 温州 325006)

**摘要:**为解决嫁接过程中穗木苗夹持困难及夹持易损伤的问题,以西瓜苗为试验对象,设计了利用气吸方式对穗木苗进行定位和固定的穗木气吸机构。通过建立三维有限元模型,在给定边界约束条件下利用CFD软件对吸头内部流体进行动力学仿真,获得了内部流体的流场分布及各因素对穗木苗吸附力的影响,采用正交试验法对吸头结构进行优化设计。结果表明,吸头各因素对试验结果的重要性次序为嘴型、真空度和沉孔深度,当吸头设计参数为真空度3 kPa、沉孔深度1 mm的H型吸嘴时,吸头具有较好的吸附能力。试验表明在该参数下吸头的吸附率约为97.8%,无伤苗现象,穗木插入已去除生长点砧木的成功率为85.6%。综合得出,所设计的穗木气吸机构是可行的,该气吸机构具有结构简单、成本较低的特点,为解决蔬菜嫁接穗木苗的夹持问题提供了设计依据。

**关键词:** 嫁接机 蔬菜穗木 斜插 吸头 CFD 优化设计

中图分类号: S233.74; S606.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0063-06

## Optimization of Suction Head of Scion Clamping Mechanism for Vegetable Grafting Machine

Lou Jianzhong<sup>1,2</sup> Li Jianping<sup>1</sup> Zhu Pan'an<sup>3</sup> Lü Gulai<sup>1</sup> Wang Meng<sup>1</sup>

(1. Department of Biological Systems Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical &amp; Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China

3. Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of scion seeding difficult to clamp in traditional vegetable grafting machine and easily be injured, an air-suction mechanism was developed with vacuum suction head adsorption for scion, which based on the analysis of structural parameters and mechanical properties of suction seeding. A computational fluid dynamic (CFD) simulation of a 3-D model was developed in the given boundary conditions to investigate the fluid flow features and the effect of adsorption ability caused by various factors. The orthogonal test was adopted in this experiment to optimize the design of the structure of the vacuum suction head. The result showed that the important sequence was determined as follows: shape of the suction head, vacuum degree and the depth of counterboring. Experiment results showed that the feature of the proposed air-suction mechanism was safe and reliable. The success rate of the proposed scion clamping mechanism reached to 97.8%, no scion was injured, and the success rate of insert into stocks reached to 85.6%. Thus, it indicated that the proposed scion clamping mechanism could satisfy the requirements of location and clamping for vegetable grafting.

**Key words:** Grafting machine Vegetable scion Inclined insert Suction head CFD Optimization design

收稿日期: 2012-08-15 修回日期: 2012-12-26

\* 浙江省科技厅重大科技专项资助项目(2008C02006-4)和浙江省教育厅科研资助项目(Y201121718)

作者简介: 楼建忠, 博士生, 浙江机电职业技术学院讲师, 主要从事蔬菜嫁接机器人研究, E-mail: loujz160@163.com

通讯作者: 李建平, 教授, 主要从事农业机器人研究, E-mail: jpli@zju.edu.cn

## 引言

蔬菜嫁接栽培技术可有效防治土传病害,保证蔬菜品质<sup>[1-2]</sup>。目前手工作业方式存在嫁接效率低、成活率低和出苗不均匀等问题,严重制约了蔬菜嫁接育苗技术的推广与应用<sup>[3]</sup>。蔬菜嫁接机能在极短的时间内,把砧木和穗木嫁接为一体,大幅度提高嫁接速度,减轻劳动强度和提高了生产率<sup>[4-6]</sup>。在嫁接方法中,斜插法<sup>[7]</sup>能较好地避免直插法<sup>[8]</sup>将穗木直接插入砧木髓腔而产生自生根<sup>[9]</sup>的现象,嫁接后植株成活率较高。

穗木的定位和夹持是嫁接机设计需要解决的关键问题之一。当前穗木苗夹持大都采用机械手爪夹持的方式,但是穗木苗被切下后留下可抓取的部分高度只有10 mm左右,用机械手抓取穗木苗难度较大,而且机械手爪刚性较大,易损伤较嫩的穗木苗,使成活率受到影响<sup>[10-15]</sup>。

本文设计一种斜插式蔬菜嫁接机,采用V型气吸吸头<sup>[16]</sup>对穗木苗进行定位和固定,以期解决嫁接机穗木苗难夹持、夹持易损伤的问题。

## 1 接穗气吸机构设计

### 1.1 接穗气吸机构结构及工作原理

斜插式嫁接机穗木气吸机构结构如图1所示,该机构主要由气缸、水平调节螺母、角度调整块、电动机、齿轮对、吸头、垂直调节螺母和机架等构成。其工作顺序为:将穗木放置于穗木架上,通气,使气缸伸出;电动机通电,通过齿轮对及齿轮齿条带动吸头下降,从而完成一个作业流程。吸头的空间位置通过穗木气吸机构的水平调节螺母和垂直调节螺母进行调节,吸头与水平面的角度通过角度调整块进行调节。

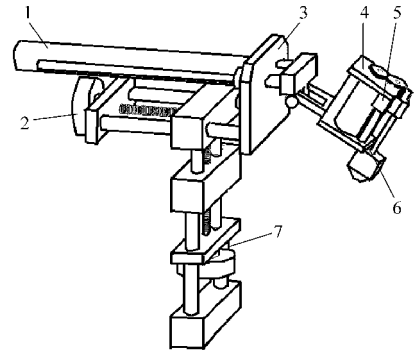


图1 穗木气吸机构图

Fig. 1 Air-suction mechanism for scion

1. 气缸 2. 水平调节螺母 3. 角度调整块 4. 电动机 5. 齿轮对 6. 吸头 7. 垂直调节螺母

### 1.2 吸头设计

选用我国南方冬季温室和大棚普遍栽培的京欣1号西瓜作为穗木苗,根据试验,西瓜苗在30℃温度下培育10 d左右,茎部细小纤细,不利于嫁接,而后逐渐变得粗大,所以西瓜苗适合嫁接期一般为10~15 d。

嫁接用西瓜苗如图2所示,需要测量参数:子叶伸展跨度 $l$ 、叶长 $c$ 、叶宽 $d_1$ 和子叶张开角 $\theta$ 。同时为了使穗木苗气吸固定具有足够的可靠性且不伤苗,还需测定穗木苗子叶压缩时屈服点压力 $P$ 。西瓜苗的外形参数和压缩特性测量结果如表1所示。

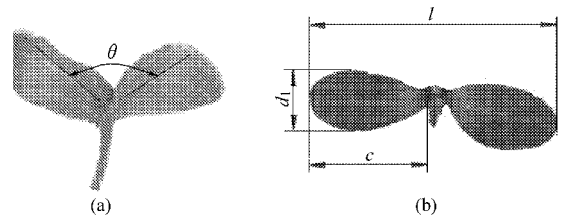


图2 嫁接用苗结构

Fig. 2 Structure of stock seedlings

(a) 侧视图 (b) 俯视图

表1 西瓜苗参数和压缩特性测量结果

Tab. 1 Parameters and pressure characteristics of watermelon seedlings

参数	叶跨度 $l$ /mm	叶长 $c$ /mm	叶宽 $d_1$ /mm	张开角 $\theta$ /( $^\circ$ )	长宽比 $\zeta$	苗重力 $G$ /N	子叶屈服点压力 $P$ /kPa
平均值	65.33	28.73	19.34	78.40	1.29	$4.34 \times 10^{-3}$	1.10
标准差	1.462	0.564	0.813	0.264	0.507	$1.367 \times 10^{-3}$	2.830

注:西瓜苗育苗时间为10 d,样本数为30。

吸头结构及吸苗工作状态如图3所示。通过对西瓜苗外形参数的测定,将吸头一端设计为V字型,为了准确固定穗木苗,吸头头部夹角 $\alpha$ 略大于西瓜苗自然状态张开角 $\theta$ ,同时考虑加工方便,V型口夹角 $\alpha$ 设计为 $90^\circ$ ;吸头尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ ,两斜面上分别开有垂直于斜面的小孔,小孔中心到底面中心的距离 $e$ 为15 mm,吸头螺纹连接

口端与真空泵相连。

图4为3种不同类型的吸口形状,沉孔形状分别为Y型、H型和U型,沉孔大端直径为 $D$ ,小端直径为 $d$ ,深度为 $h$ ,孔的结构与参数根据仿真及试验结果确定。

### 1.3 穗木苗受力计算

穗木苗在气流场中的受力决定了吸头吸附能

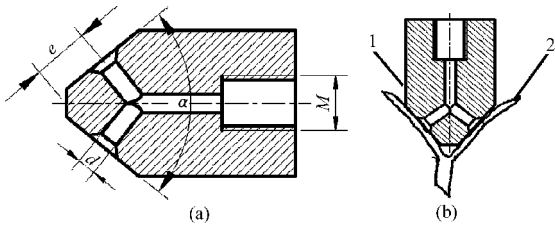


图 3 真空吸头结构及工作状态图

Fig. 3 Structure and working state of vacuum suction head

(a) 吸头结构 (b) 吸头工作状态图

1. 真空吸头 2. 被吸附的穗木

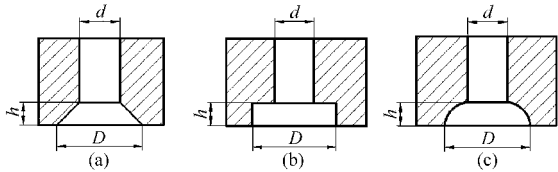


图 4 不同结构吸口

Fig. 4 Suction head with different structures

(a) Y 型 (b) H 型 (c) U 型

力<sup>[17]</sup>。穗木苗被吸附时的受力情况如图 5 所示。图中  $F$  为吸头产生的吸附力。

要使穗木苗能被吸头吸住,则理论上

$$2F \sin \frac{\theta}{2} \geq G \quad (1)$$

即 
$$F \geq \frac{G}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

同时,要防止穗木苗因吸头吸力过大而被吸破,则

$$F \leq Q \quad (3)$$

其中 
$$Q = PS_s \quad (4)$$

$$S_s = \frac{\pi d^2}{4}$$

式中  $Q$ ——穗木苗被吸破时的屈服点压力, N

$S_s$ ——吸附面积,  $m^2$

由式(2)~(4)可得

$$\frac{G}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \leq F \leq \frac{\pi P d^2}{4} \quad (5)$$

吸附力主要取决于吸口平均流速与吸附面积。其吸力  $F$  为<sup>[18]</sup>

$$F = 0.5 \rho C_d S_s v^2 \quad (6)$$

即 
$$F = \frac{\pi C_d \rho d^2 v^2}{8} \quad (7)$$

式中  $\rho$ ——空气密度, 为  $1.29 \text{ kg/m}^3$

$C_d$ ——无因次系数(阻力系数), 取 1.0

$v$ ——受力平衡气流场平均速度,  $m/s$

## 2 模型建立

### 2.1 三维模型建立及网格生成

利用 UG 6.0 建立真空吸头内流体的三维几何模型, 采用前处理软件 Gambit 用六面体单元进行网格划分, 网格单元长度为  $0.1 \text{ mm}$ 。

### 2.2 数学模型建立

在计算时, 将吸头内流体看作连续相, 则必须满足质量守恒定律和动量守恒定律, 其方程式为<sup>[19]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\mu$ ——动力粘度  $t$ ——时间

$p$ ——流体微元体上的压力

$u, v, w$ ——速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $x, y, z$  方向的矢量

$S_u, S_v, S_w$ ——动量守恒方程的广义源项

为了使方程组封闭, 采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对吸苗工作过程中气吸吸头内流体流动进行数值模拟<sup>[19~20]</sup>, 即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

其中  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$   $G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad Y_M = 2\rho \varepsilon Ma^2$$

式中  $G_k$ ——平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项

$G_b$ ——浮力产生湍动能  $k$  的产生项

$\mu_t$ ——湍流粘度  $\beta$ ——热膨胀系数

$Y_M$ ——可压缩湍流中脉动扩张的贡献

$Pr$ ——湍动 Prandtl 数  $\varepsilon$ ——耗散率

$Ma$ ——马赫数  $S_k, S_\varepsilon$ ——源项

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——经验常数, 取  $C_{1\varepsilon}$  为 1.44,  $C_{2\varepsilon}$  为 1.92,  $C_{3\varepsilon}$  为 1

### 2.3 边界条件

进口条件: 真空吸头进口设为压力进口, 压力通

过调节阀在 0~3 kPa 范围内可调。

出口条件:出口边界选自由流动出口,环境压力为  $1.01 \times 10^5$  Pa,密度  $\rho$  为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ,操作温度  $25^\circ\text{C}$ ,动力粘度  $\mu$  为  $1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

壁面条件:设为无滑移壁面条件。吸头结构尺寸很小,需要考虑边界层影响,本文采用标准壁面函数处理。

### 3 气吸吸头结构优化

#### 3.1 流场分布

取 Y 型吸口沉孔深度为 2 mm,图 6 为吸头流道速度场分布图,可以看出,速度在直管段流场比较均匀,靠近吸口处出现了紊流,通过仿真计算可以获得吸口流场的平均流速  $v$ ,根据式(7)可得到吸附穗木苗所产生的吸力  $F$ 。该吸力必须满足式(5)才能保证穗木苗被准确吸附并不会被吸破。

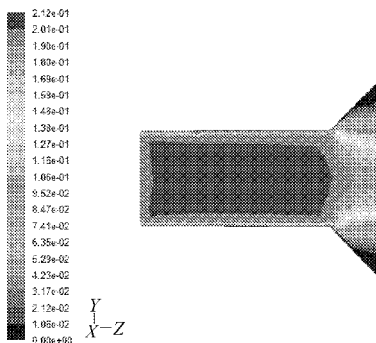


图 6 吸头流道速度场分布图

Fig. 6 Velocity distribution in suction head

#### 3.2 吸头形状对吸附能力的影响

在常温下 ( $T = 300 \text{ K}$ ,密度  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ),取吸头沉孔小端孔径为 2 mm,大端孔径为 4 mm,沉孔深度为 1 mm。在相同进口压力下,选择 Y、H 和 U 型 3 种不同形状吸口的吸头(图 4)。

图 7 为 3 种不同结构吸口对穗木苗吸附产生的受力影响图,可以看出,不同形状吸口处穗木苗的吸力不同,H 型沉孔吸头吸力最大,U 型沉孔吸头吸力其次,Y 型沉孔吸头吸力最小。

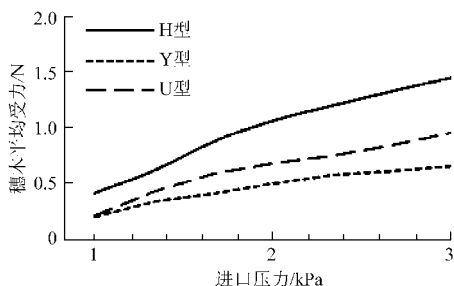


图 7 不同结构吸口对穗木受力的影响 ( $h = 1 \text{ mm}$ )

Fig. 7 Force of scion in all suction head with different structures

#### 3.3 沉孔深度对吸附能力的影响

在相同工况条件下,选择 H 型吸口的吸头进行仿真,改变沉孔深度。不同沉孔深度的吸头对穗木受力的影响如图 8 所示,从图中可以看出,不同深度的吸头对穗木的吸力不同,沉孔深度  $h = 2 \text{ mm}$  时吸头对穗木的吸附力最大, $h = 3 \text{ mm}$  时其次, $h = 1 \text{ mm}$  时吸头所产生的吸附力最小。

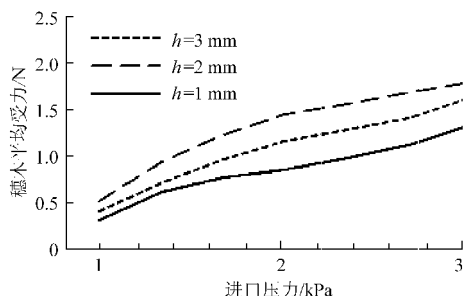


图 8 不同沉孔深度对穗木受力的影响

Fig. 8 Force of scion in all suction head with different depths

#### 3.4 吸头结构优化设计

如表 2 所示,试验采用 3 水平 3 因素,各因素间没有交互作用,选用  $L_9(3^3)$  可使试验次数最少。真空度水平依据气源所达到的真空绝对压力范围来定;孔径的水平依据自主研发的斜插式蔬菜嫁接机穗木气吸装置吸头相关经验参数范围来确定;嘴型利用 UG 6.0 建立模型(图 9)。试验根据各因素不

表 2 吸头正交试验因素水平

Tab. 2 Orthogonal test factor and level of suction nozzle

水平	因素		
	真空度 A/kPa	沉孔深度 B/mm	嘴型 C
1	1	1	Y
2	2	2	H
3	3	3	U

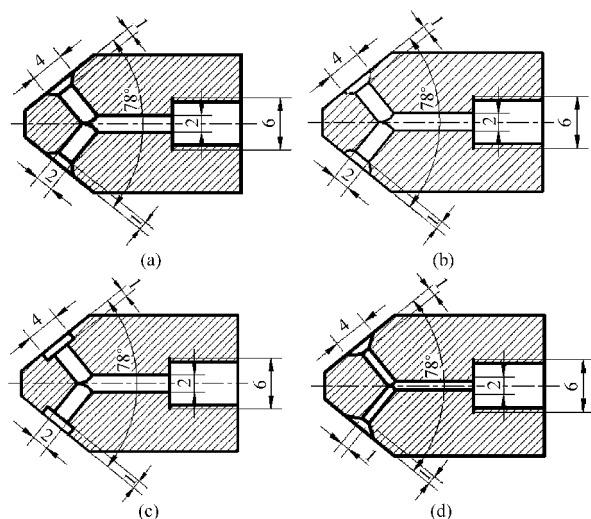


图 9 各种吸头模型

Fig. 9 Model of all kinds of suction head

(a)  $d = 2 \text{ mm}$ , Y 型口,  $h = 1 \text{ mm}$  (b)  $d = 2 \text{ mm}$ , U 型口,  $h = 1 \text{ mm}$   
(c)  $d = 2 \text{ mm}$ , H 型口,  $h = 1 \text{ mm}$  (d)  $d = 1 \text{ mm}$ , Y 型口,  $h = 1 \text{ mm}$

同的水平组合更改模型进行有限元计算。计算结果为吸嘴口吸力大小,在一定范围内,吸力越大,则吸嘴吸附穗木性能越好。试验设计方案与仿真计算结果如表3所示。

表3 试验方案与结果

Tab.3 Test scheme and numerical simulation results

序号	因素			吸力/N
	真空度 A/kPa	沉孔深度 B/mm	嘴型 C	
1	1	1	Y	0.203 4
2	1	2	H	0.525 3
3	1	3	U	0.495 0
4	2	1	U	0.720 4
5	2	2	Y	0.217 8
6	2	3	H	0.910 3
7	3	1	H	1.022 3
8	3	2	U	1.055 2
9	3	3	Y	0.074 5

因素第  $i$  个水平的均值为<sup>[21]</sup>

$$k_i = \frac{K_i}{N} \quad (12)$$

式中  $K_i$ ——与该因素第  $i$  个水平有关的试验结果之和

$N$ ——水平  $i$  的试验次数

极差  $R = \max_{i \neq j} |k_i - k_j| \quad (13)$

由极差分析结果(表4)可得:

(1)当沉孔大端直径  $D$  为 4 mm 时,由式(4)可得穗木苗被吸破时的屈服点压力为  $Q = 1.382 3$  N,表3得到的试验结果均未超过屈服点压力。

(2)极差反映了各因素对指标的影响,由  $R^B < R^A < R^C$  知,对穗木吸力的影响重要性由大到小次序为嘴型  $C$ 、真空度  $A$ 、沉孔深度  $B$ 。

(3)由于  $k_1^A < k_2^A < k_3^A$ 、 $k_3^B < k_2^B < k_1^B$ 、 $k_1^C < k_3^C < k_2^C$ ,各因素水平对吸力影响由大到小的顺序是: $A_3$ 、 $A_2$ 、 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_1$ ,所以最佳方案为  $A_3B_1C_2$ ,即真空度为 3 kPa、沉孔深度为 1 mm 和 H 型吸嘴。

表4 极差分析结果

Tab.4 Results of range analysis

指标	真空度 A	沉孔深度 B	嘴型 C
均值 $k_1$	0.407 9	0.648 7	0.165 2
均值 $k_2$	0.616 2	0.599 4	0.819 3
均值 $k_3$	0.717 3	0.493 3	0.756 9
极差 $R$	0.309 4	0.155 4	0.654 1

## 4 试验

### 4.1 试验目的

气吸机构完成苗木气吸固定时,既要保证具有一定的吸附力,又要防止穗木苗被吸破而受到损伤,

同时为了穗木苗准确插入砧木苗,吸附固定后的穗木苗定位必须精确。吸附的成功与否将直接影响整台嫁接机的生产效率和嫁接成功率。本试验主要检验所设计穗木气吸机构的可行性,考察砧木气吸机构的作业成功率及伤苗率。

### 4.2 试验方法

试验时首先将气吸机构复位至起点,将穗木苗手动放于穗木架上,接通气路,将苗吸附于吸头上,穗木苗的吸附状态如图10a所示,用断根机构切除穗木苗根部,将断根的穗木苗送至已去除生长点的砧木处。

为保证穗木苗准确插入砧木苗,穗木苗与砧木苗对接时由导向机构对穗木苗进行引导,防止穗木苗插入砧木苗时发生偏斜,导向机构引导穗木苗如图10b所示。

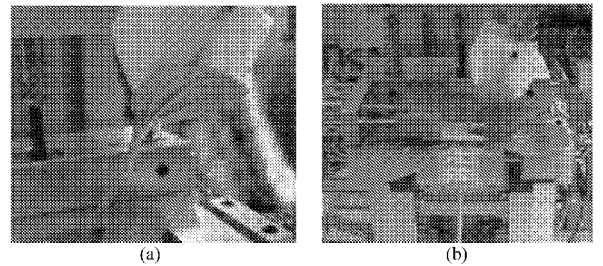


图10 斜插式蔬菜嫁接机穗木苗吸附试验

Fig.10 Testing of inclined insert type grafting machine

(a) 穗木苗吸附状态 (b) 导向机构引导穗木苗插入

### 4.3 试验结果

选取3组适龄的穗木苗,每组30株,在30℃温度下培育10~15 d。气吸吸头选择H型吸嘴,沉孔深度为1 mm,真空度设为3 kPa,在设计斜插式蔬菜嫁接机上进行吸头气吸试验,测试气吸机构吸附穗木苗的的吸附成功率  $m$ 、伤苗率  $n$  和穗木苗插入砧木的成功率  $s$  为

$$m = \frac{E}{F} \times 100\% \quad (14)$$

$$n = \frac{G}{F} \times 100\% \quad (15)$$

$$s = \frac{H}{F} \times 100\% \quad (16)$$

式中  $E$ ——能准确固定于气吸机构上苗的数目

$F$ ——用于试验总的穗木苗数目

$G$ ——被损伤的穗木苗数目

$H$ ——准确插入砧木的穗木苗数目

试验结果如表5所示。

通过试验可知,新型穗木气吸机构在设定的工况下吸附成功率达到97.8%,效果显著,无伤苗现象,满足了设计要求。吸附失败的主要原因是穗木苗子叶畸变较严重,无法正常吸附。由于导向机构

表5 穗木气吸机构作业试验结果

Tab.5 Test data of scion clamping mechanism

组别	样本数 /株	吸附成功率	伤苗率	插入成功率
		m/%	n/%	s/%
1	30	96.7	0	86.7
2	30	100	0	93.3
3	30	96.7	0	76.7
平均值	30	97.8	0	85.6

对穗木苗的引导作用,穗木苗插入砧木苗成功率达到85.6%,穗木苗插入失败的主要原因是配套的辅助机构尚未完善以及穗木苗本身生长状态的差异性,有些穗木苗茎部扭曲较厉害。

## 5 结论

(1)设计了一种斜插式蔬菜嫁接机的穗木气吸机构,该机构以气吸的方式实现对穗木苗的固定;V型吸头对穗木苗具有较好的定位作用,从而减小了

穗木气吸吸头对穗木苗的生长状态的要求,该气吸吸头结构简单,制作方便。

(2)通过对穗木西瓜苗结构参数和压缩特性的测定,确定了吸头的基本尺寸和小孔的位置,V型吸头角度 $\alpha = 90^\circ$ ,子叶屈服点压力为1.1 kPa。

(3)利用有限元分析方法,对吸孔内流体进行动力学仿真分析,采用正交试验方法,对吸孔结构进行优化,结果显示当进口压力控制在3 kPa,H型沉孔深度1 mm,气吸效果最佳。同时利用模拟仿真的方法缩短了结构设计周期。

(4)通过选取3组,每组30株适龄的穗木苗进行气吸试验,在给定工况下,吸附成功率达到97.8%,无伤苗现象。吸头的V型结构设计提高了穗木苗的定位精度,通过导向机构引导穗木苗插入砧木苗,使得穗木插入率达到85.6%。有效地解决了嫁接过程中穗木苗夹持困难和夹持过程中易损伤的问题。

## 参 考 文 献

- 1 韩世栋,宋桂言. 蔬菜嫁接简明技术[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- 2 孙光闻,陈日远,刘厚诚. 设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊2):184~188.
- 3 尹博,吕为娟,申发臣,等. 自动化嫁接技术和蔬菜嫁接机[J]. 山东农机化,2003(8):31.
- 4 赵匀,武传宇,胡旭东,等. 农业机械人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报,2003,19(1):20~24.
- 5 Kondo N, Ting K C. Robotics for bio-production systems [M]. St Joseph, HI: ASAE Publisher, 1998.
- 6 Amada H, Buno S, Koga H, et al. Development of a grafting robot[C]//Proceedings of International Symposium on Automation and Robotics in Bio-production and Processing: 1995;241~248.
- 7 李建平. 斜插式蔬菜嫁接装置:中国,201010151585.9[P]. 2010-04-20.  
Li Jianping. Inclined inserted vegetable grafting device: CN, 201010151585.9[P]. 2010-04-20. (in Chinese)
- 8 项伟灿,张路,吴传宇,等. 直插式自动嫁接机控制系统的设计[J]. 机电工程,2009,26(10):52~54.  
Xiang Weican, Zhang Lu, Wu Chuanyu, et al. Design of control system to direct insert type automatic grafting machine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009,26(10):52~54. (in Chinese)
- 9 鹿令军. 黄瓜嫁接苗与自根苗生长状况的比较研究[J]. 现代农业科技,2011(12):107~108.
- 10 杨丽,刘长青,张铁中. 双臂蔬菜嫁接机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(9):175~181.  
Yang Li, Liu Changqing, Zhang Tiezhong. Design and experiment of vegetable grafting machine with double manipulators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):175~181. (in Chinese)
- 11 辜松,刘宝伟,王希英,等. 2JC-500型自动嫁接机西瓜苗嫁接效果生产试验[J]. 农业工程学报,2008,24(12):84~87.
- 12 刘宝伟,辜松. 2JC-500型自动嫁接机接穗夹持与切削机构[J]. 农机化研究,2008(2):119~120.
- 13 姜凯,辜松,刘立意. 2JC-500型自动嫁接机砧木夹持机构[J]. 农机化研究,2008(2):116~118.
- 14 赵燕平,张铁中,王红英. 树苗自动嫁接机砧木切削机构研究[J]. 农业工程学报,2008,24(9):79~83.  
Zhao Yanping, Zhang Tiezhong, Wang Hongying. Cutting mechanism of root parental stock in automatic machine [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9):79~83. (in Chinese)
- 15 赵颖,孙群,张铁中. 营养钵茄苗嫁接机器人机械系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2007,38(9):94~97.
- 16 李建平. 气吸式接穗夹持插入机构:中国,ZL201010151597.1[P]. 2010-04-20.  
Li Jianping. Suction scion gripping insertion mechanism: CN, ZL201010151597.1 [P]. 2010-04-20. (in Chinese)
- 17 郭烈锦. 两相流与多相流动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- 18 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(10):95~99.
- 19 Cullivan J C, Williams R A, Cross C R. Understanding the hydrocyclone separator through computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering Research and Design,2003,81(4):455~466.
- 20 Gimbin J, Chuah T G, Thomas S Y, et al. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics,2005,6(3):161~168.
- 21 Wang Junye. Modeling of strongly swirling flows in a complex geometry using unstructured meshes[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow,2006,16(8):910~926.