

柯双链,陈红,周建飞,等.香菇菌棒在架注水机的设计与试验[J].华中农业大学学报,2024,43(2):227-233.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.025

## 香菇菌棒在架注水机的设计与试验

柯双链<sup>1</sup>,陈红<sup>1,2</sup>,周建飞<sup>1</sup>,李孝贤<sup>1</sup>,周燃<sup>1</sup>,李超<sup>1</sup>

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.湖北省食用菌工程技术研究中心,武汉 430043

**摘要** 针对香菇菌棒在出菇环节需要多次对多层菌架上的菌棒逐一进行补水操作时传统人工补水劳动强度大、效率低且无法精准控制注水量的问题,设计了一种香菇菌棒在架注水机,该机主要由夹持装置、注水装置、升降装置、旋转装置、驱动装置和定位装置六部分组成,由夹持装置和注水装置组成注水单元,一次可同时完成3层共15个菌棒的夹持注水工作,在升降装置带动下实现多层菌棒的补水作业,再通过旋转装置完成另一侧菌架的菌棒在架补水作业。理论计算结果显示,夹持装置的最大加持力 $F_{jmax}$ 为4 750 N,注水装置的最小推力 $F_{tmin}$ 为2 455 N,旋转装置需先加速2 s后再匀速旋转3.5 s。样机试验结果显示,补水后菌棒的破损率为0,平均质量比为84.8%,平均工作效率为230个/h。

**关键词** 香菇; 菌棒补水; 注水单元; 在架注水; 精准注水

**中图分类号** S233.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0227-07

据统计,2021年我国食用菌总产量达4 200万t,其中香菇产量约为1 255.4万t,占总产量的29.9%<sup>[1-3]</sup>。目前,我国香菇生产主要以菌棒栽培为主<sup>[4]</sup>,采用袋装菌棒养菌后转移到出菇棚培养出菇的栽培模式。在出菇环节中,每个菌棒需补水4~5次<sup>[5]</sup>。我国大多数地区采用注水针以人工注水的形式进行补水,不仅操作繁琐、劳动强度大,而且补水量难以控制。

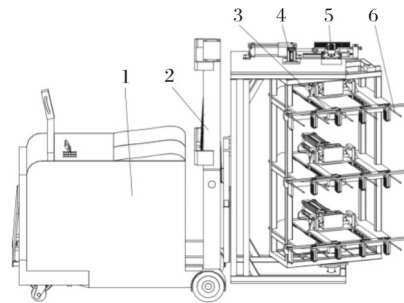
目前,菌棒补水主要有注水法、浸泡法、直接喷淋法。国内现有的注水机大多采用注水针扎入菌棒的方式进行补水<sup>[6-8]</sup>。易琼<sup>[9]</sup>研制了一种组合称量式菌棒注水机,实现了菌棒的定量注水,解决了注水量的问题,相对于人工作业效率更高,但其结构复杂、实用性差、难以推广。张沛<sup>[10]</sup>设计了一种香菇菌棒自动注水机,需将菌棒放置设备中,在封闭空间内实现对菌棒补水,确保了水资源的回收利用。徐殿文<sup>[11]</sup>设计了一种泡水车,采用真空负压使菌棒膨胀水分进入菌棒,补水均匀,补水效果好。上述3种注水方式解决了注水量一致的问题,但都需要通过人工将菌棒从菌架上搬移到注水机中,补水后再逐一搬回原处,导致了劳动强度的增加,降低了整体工作效率。针对该问题,本研究设计了一种香菇菌棒在

架注水机<sup>[12]</sup>,并通过样机试验对香菇菌棒在架注水机的工作性能进行检验,旨在进一步提高香菇生产效率以及为香菇菌棒注水机研制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 整机结构与工作原理

香菇菌棒在架注水机主要由夹持装置、注水装置、升降装置、旋转装置、驱动装置和定位装置六部分组成,如图1所示。菌棒的直径约为100 mm,菌架



1. 驱动装置 Driving device; 2. 升降装置 Lifting device; 3. 夹持装置 Clamping device; 4. 定位装置 Positioning device; 5. 旋转装置 Rotating device; 6. 注水装置 Water injection device.

图1 香菇菌棒在架注水机结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of mushroom stick on shelf water injection machine

收稿日期:2022-12-13

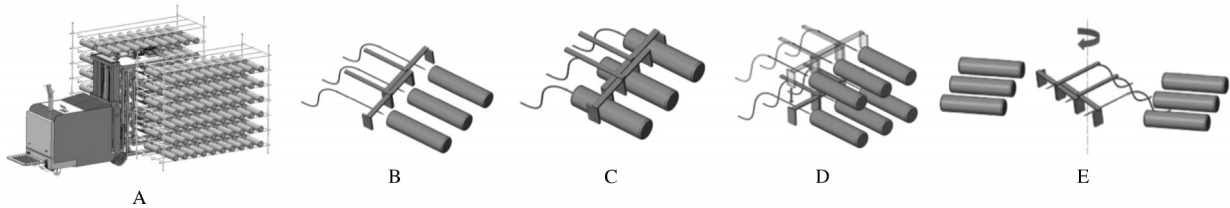
基金项目:湖北省重点研发计划项目(2020BBA040)

柯双链,E-mail:2502530064@qq.com

通信作者:陈红,E-mail:chenhong@mail.hzau.edu.cn

共有6层,每层可放10个菌棒,一共可放60个,同层菌棒的间距为200 mm。为实现菌棒的定位,相邻列菌棒之间设有细线,可避免菌棒的滚动,实现夹持注水。注水工艺流程如图2所示,在驱动装置作用下注水机行驶至预补水的菌架旁,调整升降装置,使注水装置正对菌架上的第1、3、5层菌棒,夹持装置夹紧菌棒后注水装置推动注水针插入菌棒总长的3/4,对菌棒进行补水;补水完成后注水装置和夹持装置自动复位,调节升降装置带动注水装置下降,当触碰到行程开关时停止,此时注水装置正对菌架上的第2、4、6

层菌棒;重复上述注水工序,直至巷道一侧的菌棒全部完成补水。启动旋转装置,待注水单元旋转180°时,定位装置将注水装置锁死,继续完成巷道另一侧菌棒的注水。香菇菌棒在架注水机适用于地面较平的菇棚作业,通过调节能够实现对多种不同尺寸的菌棒进行注水。香菇菌棒在架注水机<sup>[13]</sup>的主要技术参数为:配套动力48 kW,在菇棚道路的行驶速度0.5~5 km/h,补水机的补水效率为230棒/h,气管气压为0.5 MPa,水压为0.4 MPa,整机尺寸(长×宽×高)为2.2 m×1.1 m×1.8 m。



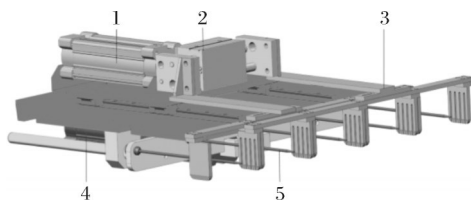
A:注水车正对菌架进行补水 Water injection truck is replenishing the mushroom stick; B:注水单元正对菌棒 Water injection unit is facing the mushroom stick; C:夹紧菌棒并注水 Clamp the mushroom stick and fill with water; D:下降至下一层 Descend to the next level; E:注水单元旋转180° Water injection unit is rotated 180°.

图2 注水单元工艺流程图

Fig.2 Process flow chart of water injection unit

1.2 关键部件设计

1)注水单元的设计。如图3所示,注水单元主要由上方夹持装置和下方注水装置组成,夹持装置由夹持装置推杆气缸、手指气缸和夹爪组成;注水装置由注水装置推杆气缸和注水针组成,可实现对菌架上多个菌棒进行夹持注水。注水装置推杆气缸推动手指气缸,待夹爪完全伸出到达菌棒中间两侧,手指气缸收紧夹爪夹住菌棒,注水针推杆气缸推动注水针插入菌棒,实现对菌棒的注水<sup>[14-15]</sup>。



1. 夹持装置推杆气缸 Clamping device push rod cylinder; 2. 手指气缸 Finger cylinder; 3. 夹爪 Clamping jaw; 4. 注水装置推杆气缸 Water injection device push rod cylinder; 5. 注水针 Water injection needle.

图3 注水单元示意图

Fig.3 Schematic diagram of water injection unit

①夹持装置。如图3部件3所示,夹持装置的夹爪有5对夹板,可同时夹持5个菌棒。为了避免夹爪与菌棒之间产生相对滑动,在夹爪的内侧面加工出深4 mm、宽6 mm的凹槽,以增大菌棒和夹爪的摩擦力。为避免夹持力过大导致菌棒破裂,利用RGM-

3005型电子万能材料机进行夹持试验,研究挤压位移和夹持力之间的关系。图4为9个菌棒的挤压位移与夹持力之间的关系曲线。为确保菌棒在夹取过程不会损坏,应选择夹持力较小的曲线4,当位移量 $\Delta x$ 小于12 mm时,位移与夹持力近似于线性关系,表明在此范围内菌棒发生了弹性变形。当位移量 $\Delta x$ 超过12 mm后,菌棒将发生塑性变形,因此,取12 mm处的挤压力950 N为菌棒所能承受的最大夹紧力 $F_{j\max}$ 。

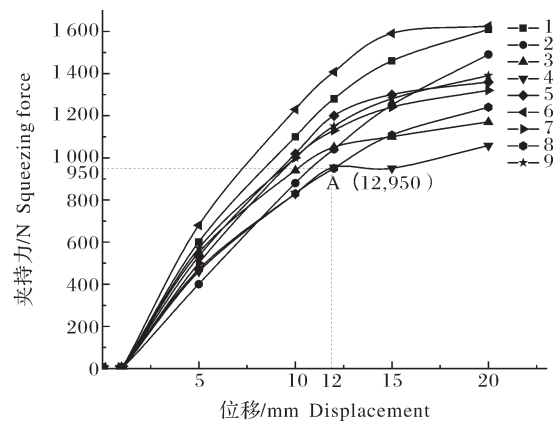


图4 菌棒夹持位移与夹持力的关系

Fig.4 The relationship between the rod clamping displacement and the clamping force

手指气缸最小行程为:

$$L_{\min} = d - \Delta x_{\max} \quad (1)$$

式(1)中,  $d$  为菌棒直径 100 mm,  $\Delta x$  为最大位移量 12 mm, 则最小行程  $L_{\min}$  为 88 mm。由于每个菌棒间的间隔  $D$  为 200 mm, 则手指气缸最大行程为:

$$L_{\max} = 2 \times \frac{D}{2} + d \quad (2)$$

计算出手指气缸最大行程  $L_{\max}$  为 200 mm, 则手指气缸的行程为 88~200 mm。

如图 5 所示, 菌棒受到夹爪的夹持力, 在推力的作用下注水针插入菌棒, 菌棒与夹爪相对静止产生静摩擦力, 用 MXD-02 型摩擦系数仪测得菌棒与夹爪相同材料铝板的静摩擦系数为 2.3<sup>[16]</sup>。由于菌棒含有一定的水分且组织结构较软, 夹爪会破坏菌棒表皮结构, 会产生剪切力<sup>[17-18]</sup>。

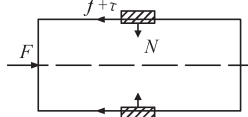


图5 菌棒注水时受力示意图

Fig.5 Stress diagram of bacteria rods during water injection

$$f = \mu N \quad (3)$$

$$F = 2(f + \tau) \quad (4)$$

式(3)~(4)中:  $F$  为注水针施加给菌棒的推力;  $N$  为夹爪对菌棒的正压力;  $\mu$  为夹爪与菌棒间的摩擦系数;  $f$  为夹爪与菌棒间静摩擦力;  $\tau$  为夹爪破坏菌棒表层结构产生的剪切力。由图 4 知, 为避免菌棒被夹持装置所损伤, 单个菌棒夹持力  $N \leq 950$  N, 则最大静摩擦力为 2 185 N, 夹持装置需夹持 5 个菌棒的夹持力不超过 4 750 N。

②注水装置。注水装置主要由注水针和推杆气缸组成, 用于实现多个菌棒的同时注水, 通过控制注水时间实现对菌棒的精准补水。由推杆气缸推动注水针, 注水针插入菌棒进行补水。如图 6 所示, 注水针的直径为 6 mm、针管长 400 mm, 针头长 28 mm、锥度为 5°。针管上每隔 90°分布 1 个排出水孔, 共 4 排, 孔的直径为 2 mm, 同排孔的间距为 40 mm, 相邻排的孔间距为 10 mm 且逐排递增, 能减少因受轴向力



1. 针管 Needle tube; 2. 注水孔 Water injection hole; 3. 锥形针头 Taper needle.

图6 注水针示意图

Fig.6 Schematic diagram of water injection needle

导致的折损。

菌棒的初始含水率为 55%~60%, 在出菇环节菌棒的含水率会随之减小且菌棒会随之变硬, 为确保注水针能够插入菌棒, 进行了推力位移试验。利用高精度土壤监测传感器中的水分电导率传感器测量 9 个预注水菌棒的 5 个均布点位处含水率, 通过 RGM-3005 型电子万能材料机测得注水针插入 300 mm 时的最大推力, 由于试验菌棒内各成分和水分分布不均匀, 菌棒含水率与注水针插入时的推力数值有偏差但总体上呈相反的趋势。为得到含水率 10% 时的注水针最大推力, 将数据进行拟合, 拟合曲线如图 7 所示, 拟合曲线为:

$$y = 675.58 - 18.44x \quad (5)$$

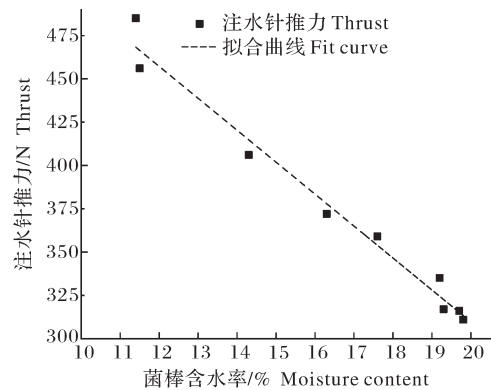
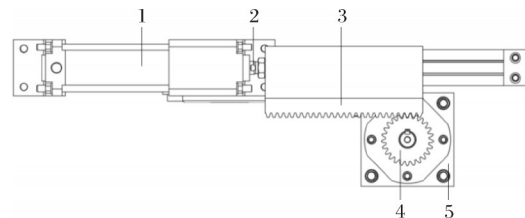


图7 菌棒含水率与注水针插入推力拟合曲线图

Fig.7 Matching curve of water content of rod and insertion thrust of injection needle

预注水菌棒含水率在 10%~20%, 将最小值  $x=10$  代入公式(5)中, 最大推力  $F_{\max}$  约为 491 N。每个注水单元有 5 个注水针, 则推杆气缸的推力应不小于  $5F_{\max}$ , 为 2 455 N, 行程不小于 300 mm。

2) 旋转装置。旋转装置主要由直齿齿轮、齿条组成, 齿轮、齿条的模数为 3 mm, 如图 8 所示, 齿轮与 3 组注水单元相连, 齿条与气缸相连, 气缸推动齿条驱使齿轮带动注水装置水平旋转。当注水机完成巷



1. 气缸 Cylinder; 2. 推杆 Push rod; 3. 齿条 Sensor; 4. 齿轮 Gear; 5. 注水架 Rack.

图8 旋转装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of rotating device

道一侧菌棒的注水后,无需调头,只需旋转装置带动注水单元水平转动 $180^\circ$ ,即可直接对另一侧的菌棒进行补水。该装置节省了注水机在巷道内调头所需要的空间,同时提高了工作效率<sup>[19]</sup>。

为了简化流程提高工作效率,避免因旋转速度过大对注水机造成破坏,注水单元在旋转运动时先做匀加速运动后再做匀速运动。在初始状态下,齿条位于齿轮的左侧,当注水机完成巷道一侧最后1排菌架上菌棒的注水后,气缸中的推杆推动齿条向前运动,齿轮带动注水单元旋转 $180^\circ$ 。当传感器检测到注水单元正对另一侧后,为避免旋转装置撞击另一侧后反向转动,使旋转装置未正对预补水菌棒,会延迟0.5 s待轴向气缸正对注水单元的锁死孔后,发出信号给轴向气缸,轴向气缸的推杆向下运动将注水单元锁死。根据计算推导得出注水装置在推杆作用时的角速度为:

$$\omega_1 = 1800 \times \frac{\pi D^2 P - 4\mu mg}{dm} t_1 \times 10^{-3} \quad (6)$$

用Solidwork对注水装置进行1:1建模,得到其质心位置到旋转轴的距离 $L$ 约为73 mm,则动量为:

$$I = \Delta t F = m \Delta v m \omega_2 L \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \omega_1 t_1 + \omega_2 t_2 \geq \pi \quad (8)$$

式(7)~(8)中: $v$ 为质心速度,m/s; $\omega_1$ 为加速时的角速度,rad/s; $\omega_2$ 为匀速时的角速度,rad/s; $t_1$ 为加速所需时间,s; $t_2$ 为匀速所需时间,s; $d$ 为分度圆直径,mm; $n$ 为齿轮转速,rad/s; $D$ 为气缸内径,mm; $\mu$ 为齿轮齿条间摩擦系数; $m$ 为注水装置质量,kg。由公式(7)可知,在 $\Delta t$ 一定时,注水单元旋转速度越大对注水机的冲量越大,为避免对机械造成损害应尽量使冲量小,为提高工作效率旋转时间不宜过长,带入参数 $D$ 为63 mm、 $d$ 为75 mm、 $P$ 为0.5 MPa、 $\mu$ 为0.15、 $m$ 为300 kg、 $g$ 为 $9.8 \text{ m/s}^2$ 。解出最优解,当 $t_1 = 2 \text{ s}$ 、 $t_2 = 3.5 \text{ s}$ ,此时 $\omega_1 = 0.95 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_2 = 2.45 \text{ rad/s}$ 、 $v = 0.18 \text{ m/s}$ ,此时动量最小 $I_{\min} = 54 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ 。

3)升降装置的设计。升降装置可实现注水单元的上下移动且能够使注水单元沿水平轴摆动。如图9所示,升降装置的竖直液压缸采用简支梁式结构与机身相连,上端与滑轮固定连接,下端与车身水平方向液压缸连接,3组注水单元通过链条与机身相连。注水机对不同层的菌棒进行注水时,通过竖直液压缸可实现注水单元的上下移动。当注水机行驶的地面与水平面存在夹角时,通过水平液压缸能够实现注水单元的摆动,使注水针与菌架上的菌棒处于同

一水平面,确保注水针精确地插入菌棒实现注水。采用可调式行程开关调节升降行程,使升降距离与菌架每层间隔距离一致,实现注水机对不同规格菌架的菌棒进行注水<sup>[20-21]</sup>。

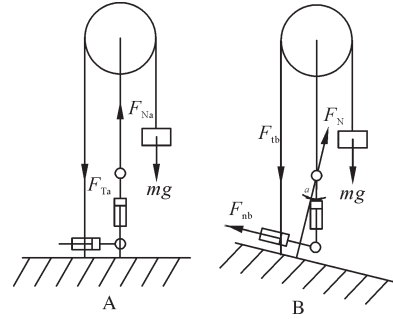


图9 升降装置结构受力分析图

Fig.9 Structural stress analysis diagram of lifting device

当注水车在平地上行驶时忽略滑轮处的摩擦力如图9A所示则有:

$$F_{Ta} = mg \quad (9)$$

$$F_{Na} = F_{Ta} + mg \quad (10)$$

式(9)~(10)中: $F_{Na}$ 为滑轮下方的液压缸提供的支持力,N; $F_{Ta}$ 为钢丝绳的拉力,N; $mg$ 为物体的重力,N。其中 $m$ 为300 kg。求解得出,定滑轮下方液压缸提供的支持力 $F_{Na}$ 为6 000 N。

当注水车在与水平面成 $\alpha$ 地上行驶时忽略滑轮处的摩擦力如图9B所示则有:

$$F_{Tb} = mg \quad (11)$$

$$F_{Nb} \cos \alpha = F_N \sin \alpha \quad (12)$$

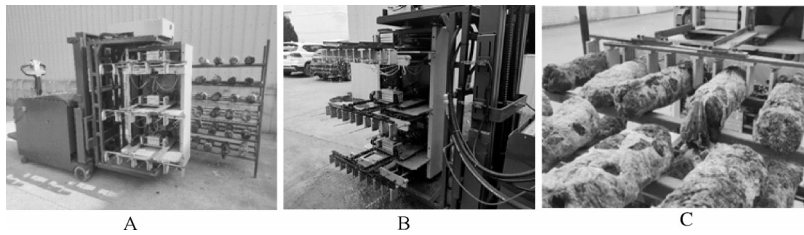
$$F_{Nb} \sin \alpha + F_N \cos \alpha = F_{Tb} + mg \quad (13)$$

式(11)~(13)中: $F_N$ 为滑轮下方的液压缸提供的支持力,N; $F_{Nb}$ 为机身下方的液压缸提供的拉力,N; $F_{Tb}$ 为钢丝绳的拉力,N; $mg$ 为物体的重力,N; $m$ 为300 kg, $\alpha \leq 10^\circ$ 。求解得出,与机身水平方向的液压缸需提供的拉力 $F_{Nb}$ 不大于1 032.7 N,滑轮下方的液压缸提供的支持力 $F_N$ 的取值范围为5 948~6 000 N。

### 1.3 样机试验

样机于2022年10月在菇棚厂房外注水区进行试验,如图10所示。取同一批第一茬出菇后预补水的香菇菌棒为试验材料,分为5组,每组15个,共75个。香菇菌棒直径约为100 mm,长度为400 mm。预试验表明,注水时长为200 s时,菌棒的质量是原出厂质量的85%,将注水时长设为200 s。将每组15个菌棒分3层摆放到菌架上,调整好注水机对菌棒进行补水,观察并记录设备的补水情况<sup>[22]</sup>。

菌棒破损率、补水后菌棒的质量比和工作效率



A:注水机样机 Water injection machine prototype;B:注水机搬移 Water injection machine moving;C:注水后菌棒 Bacterial rod after water injection.

图10 菌棒注水机厂房外注水性能测试

Fig.10 Injection test of bacteria stick water injection machine

是衡量注水机性能的重要指标。其计算公式分别为:

$$Q = \frac{n_0}{n} \times 100\% \quad (14)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{m_1}{m_2} \times 100\%}{n} \quad (15)$$

$$N = \frac{n}{t} \quad (16)$$

式(14)~(15)中: $Q$ 为菌棒破损率,%; $n_0$ 为裂纹超过3 cm菌棒的数量,个; $n$ 为每组菌棒的数量,个; $m_1$ 为补水后菌棒质量,kg; $m_2$ 为制棒时菌

棒的质量,kg; $P$ 为补水后菌棒的质量比; $N$ 为注水机工作效率,个/h; $t$ 为完成每组菌棒补水所需时间,h。

## 2 结果与分析

试验结果如表1所示,菌棒的破损率为0,平均质量比为84.8%,平均工作效率为230个/h。在试验过程中注水机各执行机构运行平稳、协调良好,注水效果良好,并且通过调节参数可以满足不同大小菌棒的补水工作。

表1 注水机样机试验结果

Table 1 Test results of water injection machine prototype

测量组 Measurement group	菌棒数/个 Number of rods	破损数/个 Number of damages	破损率/% Breakage rate	出菇时平均质量/kg Average weight during mushroom roduction	补水后平均质量/kg Average weight after water replenishment	质量比/% Weight ratio	工作效率/(个/h) Work efficiency
1	15	0	0	3.24	2.71	83.6	234
2	15	0	0	3.28	2.77	84.4	221
3	15	0	0	3.36	2.84	84.5	224
4	15	0	0	3.16	2.69	85.2	230
5	15	0	0	3.25	2.80	86.1	240
均值 Mean value	-	0	0	3.26	2.76	84.8	230

## 3 讨论

本研究设计的香菇菌棒在架注水机可实现多个菌棒同时补水,且补水效果好,工作效率高。香菇菌棒补水过程中,由于菌架上的菌棒两端受力中间悬空,补水后菌棒会变软,易断裂,夹持装置的夹持和注水针的插入可能会造成菌棒上出现裂纹,当裂纹超过3 cm时,菌棒在菌架上长时间放置会断裂,称为破损菌棒。一般补水后菌棒上的裂纹超过3 cm的菌棒越多,破损率越大。本研究中菌棒补水后菌棒的破损率为0,表明研制的菌棒注水机在菌棒注水后的破损率较低且满足生产需求。

菌棒的含水率是影响菌棒出菇的关键因素,含水率的变化主要表现为补水前、后的质量比。通常每次补水后菌棒的质量应该为前一次出菇时质量的85%<sup>[5]</sup>,利用电子秤称取补水后菌棒的质量再与前一次出菇时质量相比较即为质量比。菌棒补水后的质量比不同的主要因素为菌棒初始质量和补水时间,而同批菌棒补水时间一致,菌棒在厂房内受环境的影响以及制棒时的质量也会存在一定的偏差,会导致菌棒补水后质量比不同。本研究中菌棒补水后的平均质量比为84.8%,满足补水要求。

本研究采用计时器记录注水机对15个菌棒补水

所需时间,单位时间完成注水菌棒的个数即为工作效率。夹爪的抓取、升降和机械的移动会占用工作时间降低工作效率。本研究补水车为人工操作,虽补水时间一致,但进出巷道补水的过程会存在时间偏差,会使工作效率在一定范围内浮动。样机试验结果显示,研制的香菇菌棒在架注水机平均工作效率为230个/h,满足香菇菌棒的补水要求。

本研究设计的注水单元能同时对菌架上3层菌棒进行补水。样机试验表明,注水机运行稳定、适用范围广,菌棒补水后菌棒的破损率为0,平均质量比为84.8%,平均工作效率为230个/h,结果表明该注水机采用菌棒在架补水的方式提高了工作效率,满足香菇菌棒补水要求。

### 参考文献 References

- [1] 宋卫东,周德欢,任彩红,等.我国食用菌生产装备的发展现状、趋势及建议[J].食药菌用,2021,29(1):1-5.SONG W D, ZHOU D H, REN C H, et al. Development status, trend and suggestion of mushroom production equipment in China [J]. Edible and medicinal mushrooms, 2021, 29(1): 1-5 (in Chinese).
- [2] 余桂平,冯洋,王刚,等.食用菌菌棒套袋装备的发展探究[J].农业开发与装备,2020(6):19-20. YU G P, FENG Y, WANG G, et al. Research on the development of bagging equipment for edible fungi sticks [J]. Agricultural development & equipments, 2020(6):19-20(in Chinese).
- [3] 景全荣,徐名汉,刘天舒,等.袋栽食用菌生产关键装备现状及发展趋势[J].农业工程,2020,10(4):11-15. JING Q R, XU M H, LIU T S, et al. Present situation and development trend of key equipment for bagging edible fungi production [J]. Agricultural engineering, 2020, 10(4): 11-15 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李玉,张振宇,尚晓冬,等.香菇菌棒工厂化生产及其问题浅析[J].食用菌,2017,39(3):3-4. LI Y, ZHANG Z Y, SHANG X D, et al. Industrial production of mushroom sticks and its problems [J]. Edible fungi, 2017, 39(3): 3-4 (in Chinese).
- [5] 任翠君.香菇出菇期菌棒补水技术要点[J].新农业,2021(12):45. REN C J. Key points of water supplement technology of mushroom sticks at the fruiting stage [J]. Modern agriculture, 2021(12):45(in Chinese).
- [6] 党兴仁,南俊锋,党东彪.一种用于香菇菌棒的注水装置:CN210537885U [P]. 2020-05-19. DANG X G, NAN J F, DANG D B. A water injection device for mushroom sticks: CN201921008203. X [P]. 2020-05-19(in Chinese).
- [7] 梁小恩,陈建康.一种智能注水菌棒装置:CN216982880U [P].2022-07-19. LIANG X E, CHEN J K. An intelligent water injection rod device: CN202220737432.0 [P]. 2022-07-19 (in Chinese).
- [8] 孟凡飞,王帅,刘海军,等.香菇菌棒注水装置:CN214508499U [P].2021-10-29. MENG F F, WANG S, LIU H J, et al. Injection device for mushroom sticks: CN214508499U [P]. 2021-10-29 (in Chinese).
- [9] 易琼.一种组合称量式菌棒注水器:CN212786882U [P].2021-03-26. YI Q. A combined weighing rod water injector: CN202021632209.7 [P]. 2021-03-26 (in Chinese).
- [10] 张沛.自动香菇菌棒注水机:CN211020327U [P].2020-07-17. ZHANG P. Automatic mushroom stick water injection machine: CN201921810308.7 [P]. 2020-07-17 (in Chinese).
- [11] 徐殿文.一种用于菌棒注水的装置:CN214853253U [P].2021-11-26. XU D W. A device for injection of bacteria sticks: CN202121399919.4 [P]. 2021-11-26 (in Chinese).
- [12] 陈红,李超,柯双链,等.一种用于在架菌棒补水的自动注水机:CN113711855B [P].2022-07-22. CHEN H, LI C, KE S L, et al. An automatic water injection machine used to replenish water on the rack: CN202111158903.9 [P]. 2021-11-30 (in Chinese).
- [13] 朱新华,李旭东,高翔,等.自走式果园有机肥条铺机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):136-146. ZHU X H, LI X D, GAO X, et al. Design and test of self-propelled orchard organic fertilizer strip-spreader [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(5): 136-146 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨晋,朱学亮,张起樑,等.近恒力输出的锻造操作机夹持装置研究[J].机械工程学报,2017,53(22):50-56. YANG J, ZHU X L, ZHANG Q L, et al. Clamping device study of the approximate constant force output forging manipulator [J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(22): 50-56 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李木山,杨晋.装出料机夹持机构的研究[J].锻压技术,2019,44(9):127-132. LI M S, YANG J. Research on clamping mechanism of loading and unloading machine [J]. Forging & stamping technology, 2019, 44(9): 127-132 (in Chinese with English abstract).
- [16] 周建.新型球形水果网套包装机的研制[D].武汉:华中农业大学,2021. ZHOU J. Development of a new spherical fruit net wrapper [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [17] 朱正波,杨洲,孙健峰,等.香蕉落梳机气动夹持部件参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(4):33-39. ZHU Z B, YANG Z, SUN J F, et al. Parameter optimization and experiment of pneumatic holding part for banana crown cutting [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 33-39 (in Chinese with English abstract).
- [18] PEDERSEN S M, FOUNTAS S, HAVE H, et al. Agricultural robots: system analysis and economic feasibility [J]. Precision agriculture, 2006, 7(4): 295-308.
- [19] 刘九庆,桂康,杨春梅.杨树苗移栽机齿轮齿条式扶苗机构设计与研究[J].北京林业大学学报,2022,44(6):146-155. LIU J Q, GUI K, YANG C M. Design and research on rack and pinion seedling supporting mechanism of poplar seedling trans-

- planter [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44 (6):146-155(in Chinese with English abstract).
- [20] 古乐乐. 红花采收机升降装置与液压传动系统的设计与研究 [D]. 石河子:石河子大学, 2018. GU L L. Study on the design of lifting device and transmission system in the picking device of safflower harvester [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [21] 车畅. 插销爬杆型风电安装船升降装置液压与控制系统设计 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2012. CHE C. The hydraulic and control system's design of the bolt climb rod wind power installation vessel's lifting devices [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈红, 马露畅, 万琛, 等. 宽皮柑橘贮藏用薄膜包装机的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(23):317-323. CHEN H, MA L C, WAN C, et al. Design and experiment of film packaging machine for *Citrus reticulata* [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36 (23) : 317-323 (in Chinese with English abstract).

## Design and test of water injection machine for mushroom sticks on rack

KE Shuanglian<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>1,2</sup>, ZHOU Jianfei<sup>1</sup>, LI Xiaoxian<sup>1</sup>, ZHOU Ran<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Engineering Research Center for Edible Mushrooms, Wuhan 430043, China

**Abstract** It is necessary to replenish water one by one for the mushroom sticks on the multi-layer mushroom rack during the process of mushroom production. A water injection machine for mushroom sticks on rack mainly composed of six parts including a clamping device, a water injection device, a lifting device, a rotating device, a driving device, and a positioning device was designed to solve the problems of high labor intensity, low efficiency, and inability to accurately control the amount of water injected by traditional manual water replenishment. The water injection unit is composed of a clamping device and a water injection device, the clamping and water injection for a total of 15 mushroom sticks on three layers can be completed simultaneously, and the water replenishing operation of multi-layer mushroom sticks can be realized under the driving of the lifting device. The water replenishing operation of the mushroom rack on the other side can be completed by the rotating device. According to theoretical calculation, the maximum holding force  $F_{j\max}$  of the clamping device is 4 750 N, and the minimum thrust  $F_{\min}$  of the water injection device is 2 455 N. The rotating device needs to accelerate for 2 s before rotating at a uniform speed for 3.5 s. According to the structural design and theoretical calculation, this article developed a prototype of a water injection machine for mushroom sticks on rack, and conducted a prototype test. The results showed that the damage rate of the mushroom sticks after water replenishment was 0, with the average weight ratio of 84.8% and the average working efficiency of 230 pieces/h. The water injection machine adopts the method of replenishing water with mushroom sticks on rack, which improves the working efficiency and meets the requirements of replenishing water for mushroom sticks. It will provide a theoretical basis for the development of the water injection machine for mushroom sticks on rack.

**Keywords** mushrooms; mushroom rod rehydration; water injection unit; injecting water on the rack; accurate water injection

(责任编辑:陆文昌)