

气流引导式果园注肥机设计与试验

陈相安¹ 张学敏¹ 侯秀宁¹ 王杰¹ 刘思瑶¹ 倪志明²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 盐城市新明悦机械制造有限公司, 盐城 224000)

摘要: 针对目前果园液态肥注肥作业存在易伤果树根系、肥料利用率低、注肥不均匀等问题,为实现果园液态肥高利用率、横向均匀扩散施用,设计了一款气流引导式果园注肥机,以高压气流疏松土壤引导液肥扩散。分析了果树注肥作业要求及气流引导注肥作业原理,对注肥装置、注肥气液管路、注肥下压装置进行理论分析及设计。通过气流引导参数注肥参数交互试验进行分析,确定了最优的参数组合为:通气压力 0.8 MPa,注肥压力 1.5 MPa。基于虚拟样机技术完成气流引导式果园注肥机的建模并完成样机的试制,在果园进行了田间试验。试验结果表明,注肥机作业效果稳定,无液肥上溢现象,液肥纵向扩散范围 264 ~ 320 mm,横向扩散范围 250 ~ 270 mm,作业效率 0.10 ~ 0.12 hm²/h,满足果园液态肥作业要求。

关键词: 果园; 注肥机械; 气流引导

中图分类号: S255.2⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0108-10 OSID: 

Design and Test of Air Guided Orchard Fertilizer Injection Machine

CHEN Xiang'an¹ ZHANG Xuemin¹ HOU Xiuning¹ WANG Jie¹ LIU Siyao¹ NI Zhiming²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Yancheng Xin Ming Yue Machinery Manufacture Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract: Aiming at the problems of easy injury to tree roots, low fertilizer utilization rate and uneven fertilization in orchard liquid fertilizer application, an air flow guided orchard fertilizer injection machine was developed to realize the mechanized application of orchard liquid fertilizer. A nested fertilizer injection device was designed for the air guided fertilizer injection method. The influence of the outlet hole parameters of the fertilizer injection device on the ventilation and fertilizer injection effect was studied by using Fluent fluid simulation software. It was determined that the number of vent holes and fertilizer injection holes was 4 and the diameter was 2 mm. According to the actual operation of the fertilizer injection machine, the fertilizer injection gas-liquid pipeline and fertilizer injection down pressure device of the fertilizer injection machine were designed and analyzed. It was determined that the volume of the gas tank was 80 L, the stroke of hydraulic cylinder was 450 mm, the cylinder diameter was 40 mm and the rod diameter was 28 mm, which met the operation requirements. Through the interaction test of air flow guidance parameters and fertilizer injection parameters, the influence law of air flow guidance pressure and liquid fertilizer injection pressure on liquid fertilizer diffusion was explored. When the ventilation pressure was 0.8 MPa and the fertilizer injection pressure was 1.5 MPa, it was the optimal parameter combination. Based on virtual prototype technology, the modeling of air guided orchard fertilizer injection machine was completed, and the prototype was trial produced. Field tests were carried out in Yancheng, Jiangsu Province and Pinggu, Beijing. The field test results showed that the fertilizer injection machine had stable operation effect, and there was no liquid fertilizer overflow. The longitudinal diffusion range of liquid fertilizer was 264 ~ 320 mm, the transverse diffusion range was 250 ~ 270 mm, the operation efficiency was 0.10 ~ 0.12 hm²/h, which met the operation requirements of liquid fertilizer in orchards.

Key words: orchards; fertilizer injection machine; airflow guidance

收稿日期: 2021-11-19 修回日期: 2022-01-10

基金项目: 科技部创新方法工作专项(2016IM030200)

作者简介: 陈相安(1995—),男,博士生,主要从事智能农业装备研究, E-mail: 447857934@qq.com

通信作者: 张学敏(1975—),男,副教授,博士生导师,主要从事车辆节能环保与新能源技术研究, E-mail: xueminzh@cau.edu.cn

次打开,高压气流对土壤进行疏松,形成注肥引导层,通气结束后,依次打开两侧的肥路高压电磁阀,此时高压注肥泵自动开启开始注肥,注肥完成后高压电磁阀关闭,高压注肥泵停机,液压缸上升将注肥装置提起,完成注肥。

气流引导式注肥解决了传统果树液肥施用过程中对土壤扰动大、损伤根系严重、液肥上溢等问题,气流引导原理如图 3 所示,在气流的作用下产生土壤疏松的注肥引导层,位于气流道上方未被冲击的土壤形成水肥隔离层,气流引导后,土壤与果树根系交织成的复合体结构被改变,土壤疏松度变大,高压水肥经注肥装置送入土壤,沿气流引导层水平扩展,有效防止高压注肥过程中高压肥液对土壤急速高压充盈造成土壤的撕裂而导致根系断裂,达到保护根系的目的。相对于传统的注肥方式,引导层的存在可防止注肥装置上出口被堵塞,使注肥完成后存留在注肥装置腔体内的肥液得以释放,按照单次注肥 1.5 L 计算,肥液利用率提高 14%。气流引导式注肥以较小的土壤扰动扩大肥液的扩散范围,形成的隔离层可有效阻止肥液上溢,提高了肥料利用率。

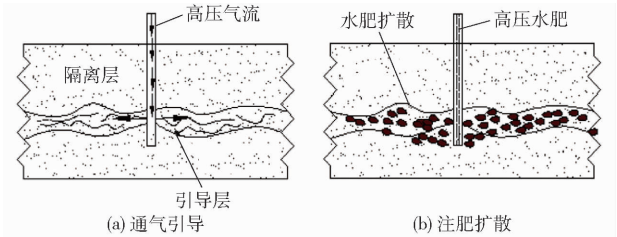


图 3 气流引导注肥示意图

Fig.3 Schematics of airflow guided fertilizer injection

1.4 主要技术参数

果树的种植农艺与田间管理相适应,为了便于疏花疏果、果树修剪、采摘等作业,目前果园多采用低矮种植模式,根据盐城市龙岗镇现代化梨园示范基地及北京市平谷区大华山镇标准化桃园实地调研可知,果树的行距为 4 m,株距在 3~4 m 之间,树杈点距离地面高度为 60 cm,主干距离地面约为 120 cm,树形多修剪为疏散分层形。为避免注肥机在果园中对枝杆造成损伤,保证作业顺利进行,设计的气流引导式果园注肥机主要技术参数如表 1 所示。

2 关键部件设计

2.1 注肥装置

注肥装置是气流引导式注肥能否满足作业要求的关键,果树的吸收根是果树吸收水肥的重要部位,吸收根是生长在主根距地表 200~400 mm 的侧生

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 495×1 300×1 440
配套动力/kW	6.6
肥箱容积/L	250
最大注肥深度/mm	400
引导通气压力/MPa	0.6~0.8
注肥压力/MPa	1.5
注肥装置数量/个	8(两侧)

根^[18]。从气流引导注肥工作原理可以看出,通气引导和高压注肥是两个独立的过程,为避免多次下压对土壤扰动过大导致根系破坏,将注肥装置设计为气、肥两道嵌套式,内径为 10 mm 的液肥腔体镶套在内径为 25 mm 的气道腔内,如图 4 所示,两者可独立工作,互不干涉。根据将水肥送到吸收根系部位的农艺要求,注肥装置设计总长度为 450 mm,通气口距离地面最大插入深度 L_1 为 300 mm,高压注肥口位于通气口的下方,距离地面最大插入深度 L_2 为 350 mm,两口直径为 2 mm,相距 50 mm 有利于适应呼吸根在纵向维度上的分布状况,扩大肥液在呼吸根附近扩散的范围,也为引导层发挥扩大横向扩展范围作用提供了有利条件。

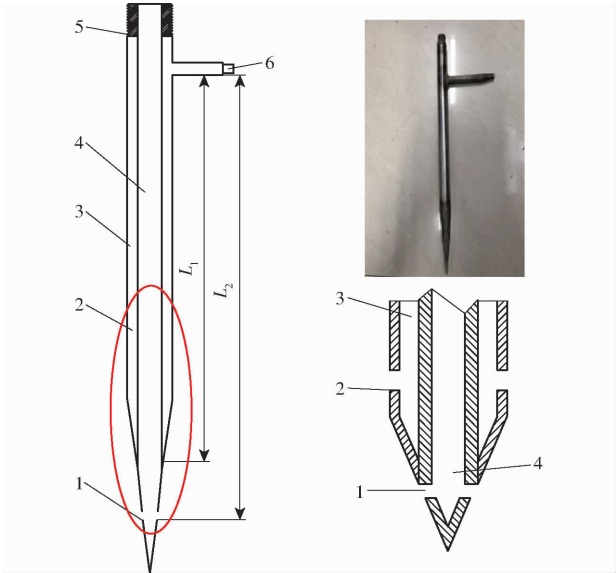


图 4 注肥装置

Fig.4 Fertilizer injection device

1. 注肥口 2. 通气口 3. 高压气道 4. 液肥腔 5. 肥管接头
6. 气管接头

为进一步确定出流口设计参数,需要对出流效果进行分析,管道进出口压力差与孔道出流速度直接相关,压力差越大,则出流速度也越大。流量、孔道截面积、进出口压力差及出流孔数量之间关系为

$$Q = C_e A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

$$n\pi\left(\frac{\Phi}{2}\right)^2\leq A\tag{2}$$

式中 Q ——流量, m^3/s
 C_v ——流量系数
 A ——出流孔截面积, m^2
 Δp ——进出口压力差, Pa
 ρ ——流体密度, kg/m^3
 n ——孔道个数 Φ ——孔径, m

在流量 Q 与压力差 Δp 一定的情况下,孔道截

面积确定,根据公式(1)、(2)容易确定孔道个数与单个孔直径,为确保每个孔最大喷射出流覆盖域尽可能广,以通气口为例用 Fluent 流体仿真软件对通气口数量分别为 3、4、5、6 个进行仿真分析。
为简化模型,采用 2D 平面,外流场边界范围为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,注肥枪外径为 28 mm ,通气口均分于注肥枪外壁,为保证单一变量,通气进流气压为 0.8 MPa 。仿真计算完成后,得到不同通气口数量下出流外流场速度分布矢量图,如图 5 所示。

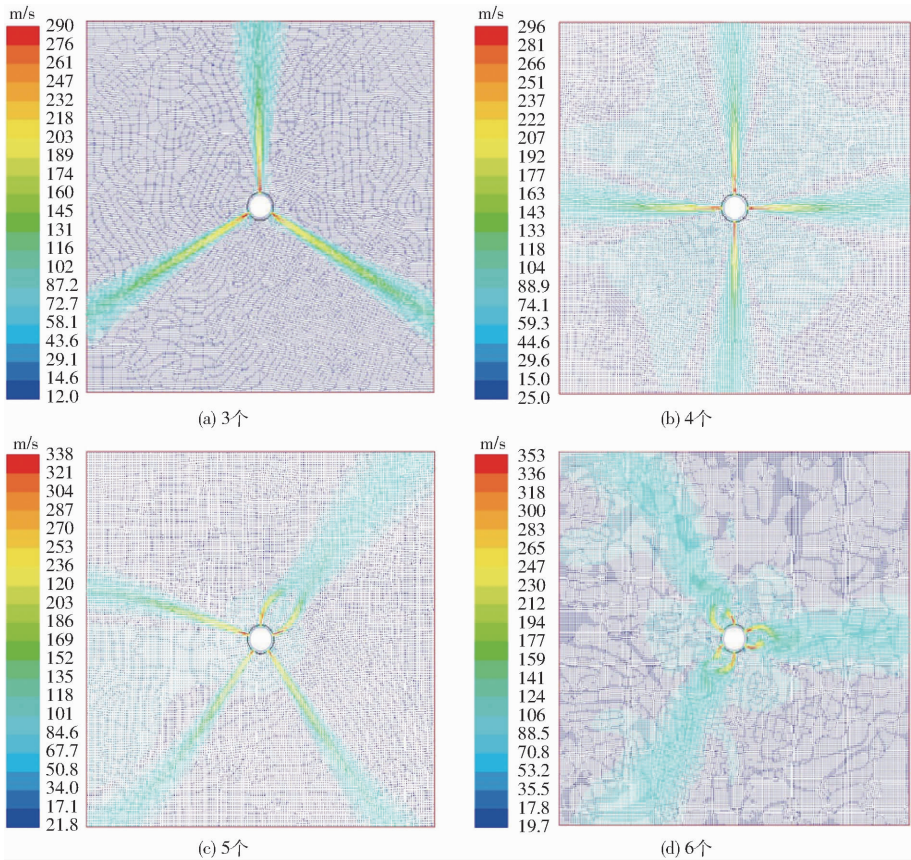


图 5 不同通气口数量的外流场速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector diagrams of outflow field with different numbers of vents

根据图 5 可知,3 个通气口气流的出流分布较均匀,但高压气流经通气口后在空间分布的离散度较低,其流速分布辐射范围较小,主要集中在通气口附近,未能在外流场中产生较大范围的气流辐射;4 个通气口气流的出流分布相比 3 个通气口更加均匀,高压气流经通气口后在空间分布的离散度好,在相邻两口间的气流速度分布范围广泛,整体流速分布辐射范围呈现对称式分布;5 个通气口和 6 个通气口均出现两口气流重叠干扰,导致气流分布出现不均匀情况,空间分布离散度较差,但 6 个通气口流速辐射范围和空间分布离散度较 5 个通气口好,比 4 个通气口均匀性差。综合各仿真结果来看,通气口数为 4 个时气流分布辐射范围更广且均匀,形成的引导层更有利于液肥的扩散。

2.2 注肥气液管路设计

气流引导式注肥机气路和液路是两个独立的工作系统,在工作过程中两侧的注肥装置既可单独亦可同时作业。高压注肥系统主要由肥料箱、高压肥泵、蓄能器、高压电磁阀、高压肥管等部件组成。气流引导系统主要由空气压缩机、气罐、电磁阀、通气管等组成。整机的气液管路布置如图 6 所示。空气压缩机加压后形成的高压空气储存在气罐内,气罐上安装两个高压气出口分别接左、右电磁阀,经气管分配至左右两侧的注肥装置上,当工作开始时,左、右两侧的电磁阀按需开启,气路被导通,完成气压松土、气流引导作业。液肥储存在肥料箱内,经高压肥泵加压后的高压液肥储放在蓄能器及左、右两高压电磁阀之前的液肥管道内,蓄能器装有压力传感器

与高压肥泵构成闭环反馈控制,可调节高压肥的注肥压力,当注肥作业时,根据需要开启高压电磁阀,高压液肥经高压肥管、注肥装置进入土壤。

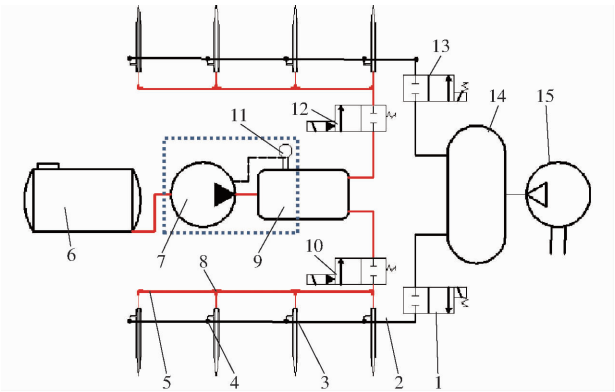


图 6 气路和液路布置图

Fig. 6 Gas liquid piping layout

1. 右电磁阀 2. 气管 3. 注肥装置 4. 气道快速接头 5. 高压肥管 6. 肥料箱 7. 高压肥泵 8. 肥路三通 9. 蓄能器 10. 右高压电磁阀 11. 压力传感器 12. 左高压电磁阀 13. 左电磁阀 14. 气罐 15. 空气压缩机

在注肥作业过程中,气流引导是影响注肥效果的关键,设定引导气压为 0.6 ~ 0.8 MPa 可调,通过试验可知在不同气压下,通气量为 40 L 时引导层的结构趋于稳定,为保证在通气引导过程中有持续稳定的气压输出,需要为气流引导系统配备合适的气罐,本文选用的气泵排气压力为 0.8 MPa,标准状态下排气量为 500 L/min,由于空气压缩机达到预定压力时会自动停机,因此在气流引导过程中气压维持状态分为两种情况:空压机停止供气,仅靠气罐贮存的压缩空气维持工作;空气压缩机和气罐同时维持压力,但用气量大于空气压缩机的排气量。气罐容积取满足以上两种供气状态下的较大者。

在第 1 种气压维持状态下,气罐容积满足

$$V \geq \frac{p_a q t}{60(p_1 - p_2)}$$

(3)

式中 p_a ——大气压力,MPa
 p_1 ——气罐内初始压力,MPa
 p_2 ——系统允许工作最低压力,MPa
 q ——最大耗气量,L/min
 t ——维持工作时间,s

根据实验和计算可得 q 为 640 L/min,初始压力为 0.8 MPa,允许工作最低压力为 0.6 MPa,此时得 $V \geq 80$ L。

当空气压缩机和气罐同时为气流引导供气时,确定气罐容积为

$$V \geq \frac{q_v - q_v}{p + 0.102} \frac{t}{6000}$$

(4)

式中 q_v ——系统耗气量,L/min

q_v ——空气压缩机气量,L/min
 p ——使用压力,MPa

在此状态下 p 取 0.8 MPa,由于空压机的补给作用,此状态下计算得 $V \geq 3.88$ L。综合分析两种气压维持状态下匹配的气罐容积,取气罐容积为 80 L。

高压注肥系统主要功用是将低压液态肥加压到预定压力,通过高压肥路经注肥装置注射到土壤里。在肥液流动过程中,液体与肥路管道壁之间的摩擦及管道截面的变化会造成肥压的损失,其压力损失可分为沿程压力损失和局部压力损失两部分,沿程压力损失计算公式为

$$\Delta p_\lambda = \lambda \frac{l}{d_n} \frac{\rho v^2}{2}$$

(5)

式中 λ ——沿程阻力系数
 l ——管长,mm d_n ——管径,mm
 v ——流速,mm/s

沿程压力损失经验公式为

$$\Delta p_\xi = \xi \frac{\rho v^2}{2}$$

(6)

式中 ξ ——沿程阻力系数

本文选取三缸柱塞式高压肥泵,压力范围为 1 ~ 3.5 MPa,水泵流量为 26 L/min,肥液为无机盐的水溶液,稀释倍数为 300 ~ 500,因此在水肥损失压力计算过程水肥的物理性质等同于水,肥路采用 $d_n = 10$ mm 的高压橡胶软管,总长度 $l = 2\,000$ mm,其沿程阻力系数 $\lambda = 80/Re$,由于管道变小造成的局部阻力系数 $\xi = 0.5$,计算可得沿程压力损失 $\Delta p_\lambda = 1.12 \times 10^5$ Pa,局部压力损失 $\Delta p_\xi = 7.62 \times 10^3$ Pa,两者相比,局部压力忽略不计,因此在设定注肥压力时要消除沿程压力损失的影响。

2.3 注肥下压装置

注肥下压装置是注肥机重要的执行机构,完成注肥装置扎土、注肥深度调节等作业。注肥下压装置主要包括:升降装置(液压缸、滑块、滑轨)、支撑装置(承载板、横梁、支座)、平行折叠挂接机构(折叠臂、加强筋、收缩杆等)、锁止装置(套筒、锁止销)和注肥装置,如图 7 所示。液压缸缸体固定在车架上,液压杆与固定板铰接;承载板后端安装有滑块,可沿滑轨上下移动;承载板前端固定有横梁及支座,其中横梁用来避免固定板受力变形;折叠臂通过套筒以及销固定在支座上,可绕支座转动,套筒上安装有锁止销,可实现注肥装置伸出或收缩时的锁止。

果园作业环境狭窄,液肥注射点在距离树干 80 ~ 120 cm 的范围内,注肥机采用在行间行走两侧注肥的工作方式,为兼顾机动灵活性和注肥农艺要求,设计了平行折叠注肥装置挂接机构。当进行注

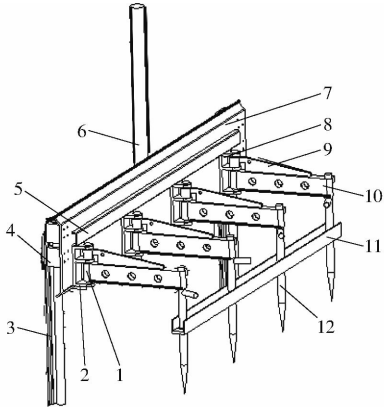


图 7 注肥下压装置结构图

Fig. 7 Structure diagram of fertilizer injection and pressing device

1. 套筒 2. 锁止销 3. 滑轨 4. 滑块 5. 横梁 6. 液压缸 7. 承载板 8. 支座 9. 加强筋 10. 折叠臂 11. 收缩连杆 12. 注肥装置

肥作业时,两侧的折叠臂打开并由锁止销锁住,满足果园注肥位置要求,当注肥机械在果园转弯、调头或转移地块过程中,两侧的注肥装置通过折叠臂与机架紧贴,缩小了整机尺寸。本文设计注肥机车架宽度为 1 200 mm,基于此折叠臂设计长度为 400 mm,支座套筒安装中心距承载板为 50 mm。

注肥装置的下压力来源于液压系统,主要部件为液压泵、液压缸及控制阀,为满足注肥下压要求,对下压负载及液压参数进行分析。当液压系统驱动注肥装置下压时,主要负载来源于注肥装置与土壤的相互作用力,其受力状况如图 8 所示。

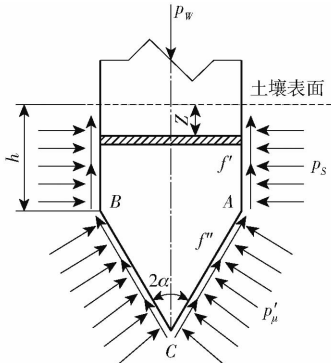


图 8 注肥装置入土受力状况

Fig. 8 Force condition of fertilizer injection device in soil

注肥装置进入土壤到达注肥一定深度位置其受力可分为 3 部分:土壤作用在尖端锥面的正压力、土壤与尖端锥面的摩擦力、土壤与注肥装置腔体的摩擦力^[19]。

尖端锥面所受的正压力 p'_μ 可表示为

$$p'_\mu = \frac{1 + 2 \tan \varphi \tan \alpha - \tan^2 \varphi}{1 - \mu \tan \varphi} N_q q + \left(\frac{1 + 2 \tan \varphi \tan \alpha - \tan^2 \varphi}{1 - \mu \tan \varphi} N_c + \frac{2 \tan \alpha - \tan \varphi}{1 - \mu \tan \varphi} \right) C \quad (7)$$

式中 φ ——土壤内摩擦角, (°)
 α ——尖端锥角, (°)
 q ——土壤的均布载荷, MPa
 C ——土壤自重载荷, kPa
 N_q, N_c ——土壤承载系数
 μ ——相对滑动摩擦因数
土壤给尖端锥面的摩擦力 F_μ 可表示为

$$F_\mu = \mu p'_\mu \frac{\pi R^2}{\sin \alpha} \quad (8)$$

式中 R ——注肥装置外表面圆柱半径

注肥装置表面所受的摩擦力 f , 利用微元法在入土深度 h 上积分, 其摩擦力表示为

$$f = \int_0^h df = 2 \mu \pi R K_0 \gamma \int_0^h Z dz = \mu \pi R K_0 \gamma h^2 \quad (9)$$

式中 K_0 ——静止土压力系数

γ ——土体重度, kN/m³

Z ——注肥装置入土深度, m

注肥装置顺利压入土壤应满足公式

$$p_w > \mu \pi R K_0 \gamma h^2 + \pi R^2 (1 + \mu \cot \alpha) p'_\mu \quad (10)$$

式中 p_w ——单个注肥装置入土需要的压力

从公式(10)可以看出,当注肥深度及作业环境确定时,入土阻力是注肥装置尖端锥角 α 的函数,求解公式(10)的最小值,当 $\alpha = 30.026^\circ$ 时阻力最小,结合作业土壤各项参数^[20-21](表 2),计算得此时单个注肥装置入土阻力为 0.725 kN。

表 2 土壤属性参数

Tab. 2 Soil attribute parameters

参数	数值
土壤承载力系数 N_q	3.37
土壤承载力系数 N_c	5.50
土壤粘聚力 c /kPa	42.00
土壤重度 γ /(kN·m ⁻³)	20.47
土壤自重载荷 C /kPa	10.14
土壤内摩擦角 φ /(°)	24.00
注肥枪与土壤的相对滑动摩擦因数 μ	0.50
静止土压力系数 K_0	1.00

本文选用 CBN-E308 型液压泵,额定压力为 10 MPa,为留有储备功率初选液压缸的工作压力为 3 MPa,选用的液压缸为单出杆活塞缸,为满足注肥深度,液压缸行程取 450 mm,单出杆液压缸的主要参数为缸内径 D 及活塞杆直径 d 。根据注肥机的工作需求,当注肥装置下压时无杆腔为工作腔,注肥装置回收时有杆腔为进液端。液压缸缸径 D 表示为

$$D = \sqrt{\frac{\frac{4F_1}{\eta}}{\pi(p_A - p_B)} - \frac{d^2 p^2}{p_3 - p_4}} \quad (11)$$

式中 F_1 ——液压负载,N
 η ——机械效率
 p_A ——下压工作压力,Pa
 p_B ——下压液压缸背压,Pa
 p_3 ——回收工作压力,Pa
 p_4 ——回收液压缸背压,Pa

当注肥装置回收时,为提高工作效率,设计回收与下压速比 β 为2,则液压缸杆径 d 与缸径 D 的关系可表示为

$$d=D\sqrt{\frac{\beta-1}{\beta}}$$

(12)

根据公式(7)~(10)计算得到入土阻力,当4个注肥装置同时扎入土壤时,其阻力为2 900 N,机械效率为90%,液压缸背压忽略不计,经计算得 $D=36.98\text{ mm}$,根据GB/T 2348—1993(ISO3320)选 $D=40\text{ mm}$, $d=28\text{ mm}$ 。

3 气流引导参数与注肥参数交互试验

为探究通气压力和注肥压力对注肥效果的综合影响,进行土壤注肥扩散交互试验,为注肥机最优注肥参数设定提供理论依据。试验设计如下:考虑到通气压力和注肥压力对注肥效果影响较大,先进行单因素预试验,根据预试验结果选定交互试验因素水平,再进行交互试验探究多因素和注肥效果的关系,为控制试验变量,减少试验测量误差,试验中设置单次通气量为40 L,注肥量为1.5 L。试验过程分为3个步骤:①为模拟果园土壤环境,采用砂土制备试验土箱,将土壤压实至坚实度为4.0 MPa,初始土壤含水率为22%。②将注肥装置从土箱几何中心压入土壤内300 mm后,设定试验参数,依次进行通气引导和高压注肥,完成气流引导注肥。③测量不同深度、距注肥中心不同位置的含水率来探究液肥扩散分布情况,如图9所示。

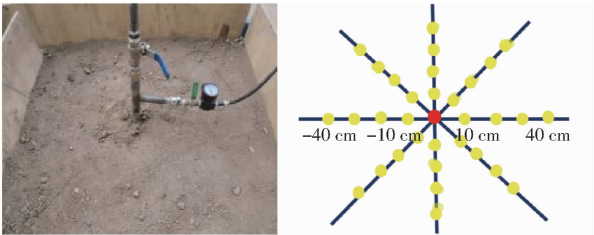


图9 试验过程
Fig.9 Test process

在通气压力预试验中,通气压力从0.1 MPa开始每次增加0.1 MPa,通过对试验结果观察和统计发现,当通气压力低于0.4 MPa时,由于通气压力对土壤扰动小在注肥过程出现水肥上溢,随着通气压

力增加,水肥扩散半径呈现上升趋势,当通气压力超过0.8 MPa时,土壤出现“爆炸”现象,土壤扰动过大不利于引导层形成。注肥压力单因素试验中,注肥压力从0.6 MPa开始每次增加0.3 MPa,经试验发现,当注肥压力低于0.9 MPa时水肥扩散出现明显不均匀现象,说明注肥压力不足,注肥孔被土壤堵塞,随着注肥压力升高,水肥扩散趋势明显向好,扩散半径逐渐增大,当注肥压力超过2.1 MPa时,对土壤冲击过大、冲刷严重。结合实际作业条件和预试验结果,取通气压力与注肥压力的交互试验因素水平如表3所示。

表3 交互试验因素水平
Tab.3 Interactive test factors and levels MPa

水平	因素	
	通气压力	注肥压力
1	0.4	1.0
2	0.6	1.5
3	0.8	2.0

为直观分析通气压力和注肥压力对注肥效果的影响,根据试验结果绘制土壤含水率等值线图^[22],依据含水率的等值线图,以液肥扩散均匀性、扩散深度和含水率分布情况综合评价液肥扩散效果,其中液肥扩散均匀性是指液肥扩散范围以注肥中心对称横向扩展,不出现单侧含水率集中区域。

在气压0.4 MPa条件下,土壤含水率等值线如图10所示(横向坐标40 cm时为施肥中心),土壤的含水率明显呈现两侧不均匀现象,液肥扩散集中于注肥中心左侧,右侧扩散较差。从扩散深度和高含水率分布分析,注肥压力为1.0 MPa时(图10a),在距注肥中心15 cm左右,土层深度30 cm左右的含水率最高,高含水率区域较为集中,但主要分布在土壤一侧。注肥压力为1.5 MPa(图10b)和2.0 MPa(图10c)时,高含水率区域分布广,对应的土层深度为15~25 cm,分布区域逐渐趋于土体表面,有肥液溢出的情况发生。

在气压0.6 MPa条件下,土壤含水率等值线如图11所示,土壤的含水率在土层中的分布不均匀情况得到改善,出现了较为对称的高含水率区域(图11a),随着注肥压力的增大,液肥扩散出现紊乱,图11c尤其明显,高含水率区域关于注肥中心两侧对称性差,液肥扩散不均匀。从扩散深度和高含水率分布分析,在注肥压力为1.0 MPa(图11a)时,在距离注肥中心15 cm左右,土层深度为10~25 cm处出现了高含水率分布,但液肥扩散域距离土表较近,有较大液肥溢出趋势。如图11b所示,在注肥压力为1.5 MPa时,高含水率区域得到扩大,主要集中

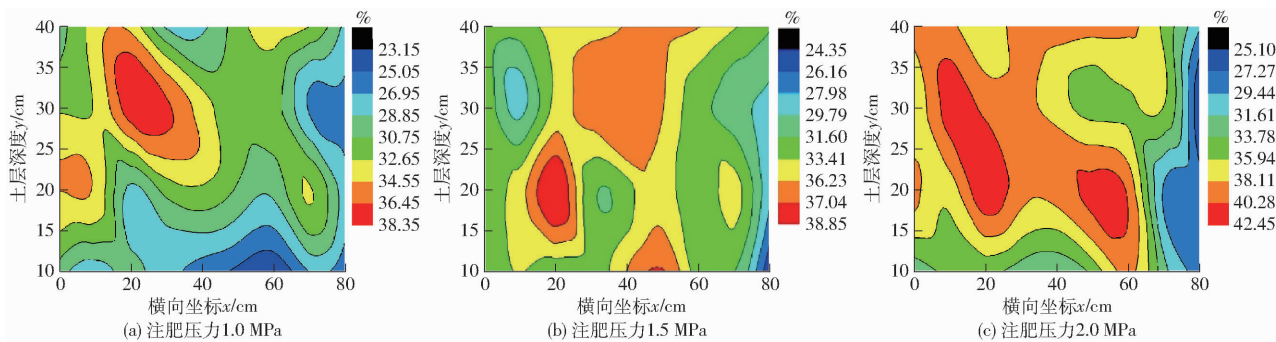


图 10 通气压力 0.4 MPa 下土壤含水率等值线

Fig. 10 Isogram of soil water content under ventilation pressure of 0.4 MPa

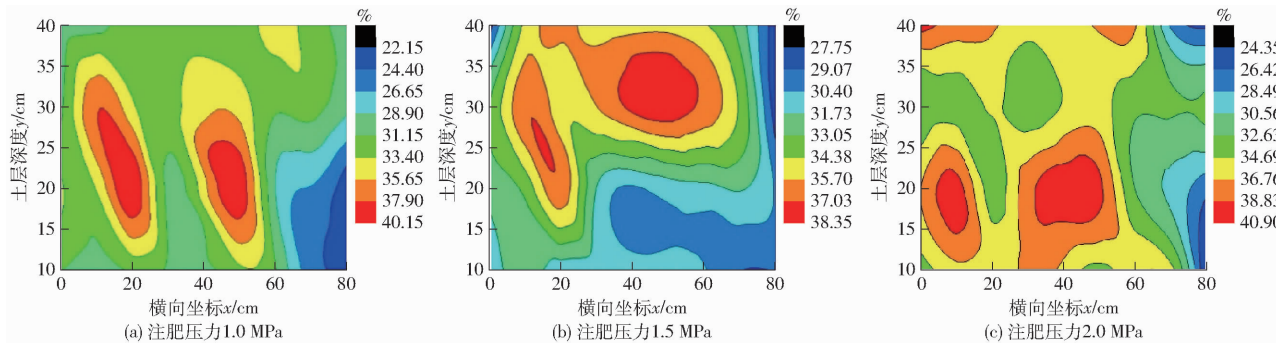


图 11 通气压力 0.6 MPa 下土壤含水率等值线

Fig. 11 Isogram of soil water content under ventilation pressure of 0.6 MPa

在距注肥中心 20 cm, 土层深度为 25 ~ 40 cm 之间, 但其高含水率区域在土体中分布差异明显。如图 11c 所示, 在注肥压力为 2.0 MPa 时, 高含水率区域出现在土体深度为 10 ~ 20 cm 的表层附近, 在试验过程中出现了肥液溢出现象。

在气压 0.8 MPa 条件下, 土壤含水率等值线如图 12 所示, 液肥扩散均匀性与气压为 0.6 MPa 时类似, 在注肥压力为 1.0、1.5 MPa 时出现了较对称的高含水率分布域, 当注肥压力为 2.0 MPa 时液肥扩散分布较乱, 高含水率区域集中注肥中心左侧分布, 液肥扩散均匀性差。从扩散深度和高含水率分布分析, 在注肥压力为 1.0 MPa (图 12a) 时, 在距注肥中心 30 cm 左右出现了高含水率区域, 但在距注肥中心 10 ~ 15 cm、深度为 30 ~ 35 cm 处出现了肥液扩散盲区。如图 12b 所示, 在注肥

压力为 1.5 MPa 时, 高含水率区域对应注肥中心距离在 30 cm 左右, 在土层深度为 25 ~ 40 cm 之间区域的含水率梯度分布明显, 在靠近土体表层的 10 ~ 20 cm 处含水率较低, 试验过程中未出现肥液溢出情况, 是较为理想的液肥扩散情况。如图 12c 所示, 当注肥压力为 2.0 MPa 时, 高含水率区域分布不均, 在土体表面附近含水率普遍较高, 液肥扩散情况较差, 且在试验中出现了肥液溢出情况。

综合分析不同通气压力和注肥压力下各标定点含水率情况得到的土壤含水率等值线图, 以及不同通气压力和注肥压力对液肥在土体中最大扩散范围影响的分析, 在该试验土壤条件下, 确定当通气压力为 0.8 MPa、注肥压力为 1.5 MPa 时能够达到较为理想的果树注肥效果。

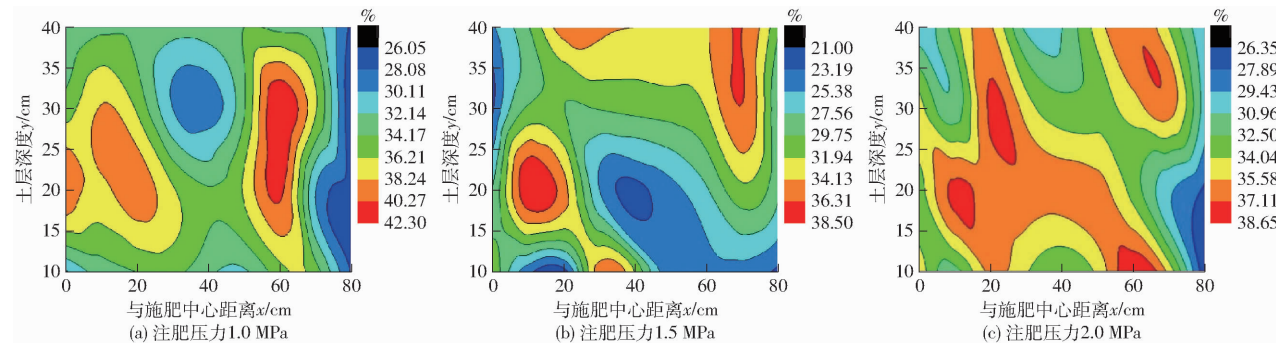


图 12 通气压力 0.8 MPa 下土壤含水率等值线

Fig. 12 Isogram of soil water content under ventilation pressure of 0.8 MPa

4 田间验证试验

为了验证注肥机的作业效果,分别于 2020 年 8 月在江苏省亭湖区龙岗镇的梨园,2021 年 5 月在北京市平谷区大华山镇桃园进行注肥机的田间试验。田间试验现场如图 13 所示。



图 13 试验现场
Fig. 13 Test site

试验用肥为稀释 400 倍的无机肥水溶液,每次作业单根注肥枪注肥量为 1.5 L,注肥深度为 35 cm,气流引导气压为 0.8 MPa,注肥压力为 1.5 MPa。注肥完成后沿注肥孔中心剖开,测量液肥扩散后距离地面最小深度 h_1 ,距离地面最大深度 h_2 ,以及液肥的横向扩散距离 D_s ,如图 14 所示。重复多次试验,结果取均值,试验结果如表 4 所示。

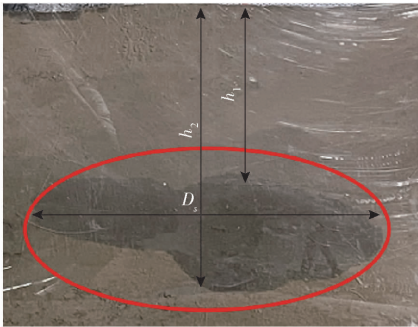


图 14 试验结果
Fig. 14 Test result

从表 4 可以看出,注肥机田间作业效果良好,在不同的果园区性能稳定,由于北京试验田的土壤紧

表 4 田间试验结果
Tab. 4 Results of field test

试验地点	深度 h_1 / mm	深度 h_2 / mm	扩散距离 D_s / mm	作业效率 / ($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
江苏省	264	320	270	0.12
北京市	270	305	250	0.10

实度高于江苏试验田,所以在江苏作业效果优于北京。分析试验结果可知,肥液扩散范围集中在距离地面 260 ~ 320 mm 之间,距离地面小于 260 mm 的土壤中无明显液肥扩散迹象,与前文交互试验得到的结果吻合,说明气流引导形成的引导层及隔离层能较好控制液肥在土壤的扩散趋势,达到预期效果。在做剖切土壤过程中未见明显土壤裂隙及因气流或高压肥冲击形成的空腔,表明在作业过程中对土壤的扰动小,未对根系造成伤害。

5 结论

(1)基于果树注肥农艺,提出了气流引导注肥方法,采用混合动力方案设计了气流引导式果园注肥机。注肥机主要由注肥下压装置、注肥气液管路、电气系统和电动履带底盘等组成。

(2)对气流引导式注肥机的关键部件进行设计。通过仿真和计算,设计了气、肥各 4 个出流孔,孔径为 2 mm 的嵌套式注肥装置;对注肥气液管路进行分析并设计,确定气罐容积为 80 L,计算出液路压力损失为 1.12×10^5 Pa;基于土壤属性计算下压载荷,确定注肥下压装置液压缸行程为 450 mm,缸径 $D = 40$ mm,杆径 $d = 28$ mm,保证注肥装置顺畅入土。

(3)通过试验表明,最优气流引导注肥参数组合为引导气压 0.8 MPa、注肥压力 1.5 MPa;气流引导式注肥机田间作业液肥纵向扩散范围为 264 ~ 320 mm,横向扩散范围为 250 ~ 270 mm,满足果园液态肥注射的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 陈倩,刘照霞,邢玥,等. 有机无机肥分次配施对嘎啦苹果生长、¹⁵N-尿素吸收利用及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019,30(4):1367-1372.
CHEN Qian, LIU Zhaoxia, XING Yue, et al. Effects of split combined application of organic-inorganic fertilizers on plant growth, ¹⁵N-absorption, utilization and loss of Gala apple tree[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1367-1372. (in Chinese)

[2] 康建明,李树君,杨学军,等. 密植果园开沟注肥机开沟刀片设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 68-74.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of ditching blade installed in close planting orchard ditching machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 68-74. (in Chinese)

[3] 刘双喜,徐春保,张宏建,等. 果园基肥注肥装备研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 99-108.
LI Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Research status and development analysis of base-fertilizer application equipment of orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 2): 99-108. (in Chinese)

- [4] 康建明,李树君,杨学军,等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报,2017,48(1): 57–63.
KANG Jianming,LI Shujun,YANG Xuejun,et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):57–63. (in Chinese)
- [5] NYORD T,SOGAARD H T,HANSEN M N,et al. Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops[J]. Biosystems Engineering,2008,100(2):235–244.
- [6] 陈相安,王晓燕,潘敏睿,等. 果园注肥机技术研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2021,43(9):7–12.
CHEN Xiang'an,WANG Xiaoyan,PAN Minrui,et al. Research status and prospect of orchard fertilizer injection technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(9):7–12. (in Chinese)
- [7] MIN J,ZHANG H L,SHI W M. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2012, 111: 53–59.
- [8] SHIRGURE P S. Yield and fruit quality of Nagpur mandarin(*Citrus reticulata* Blanco) as influenced by evaporation based drip irrigation schedules[J]. Journal Crop Science, 2013, 2(2): 28–35.
- [9] 陈国文. 手动式高效快速液体注肥器:98217901.4[P]. 1999–11–17.
- [10] 郑建国. 快速注肥器:98219471.4[P]. 2000–02–02.
- [11] 王洪强,林涛,鞠传波,等. 注肥新器械—液体注肥枪[J]. 烟台果树, 2005(1):28–29.
- [12] 赵春江,王秀,马伟,等. 移动式注肥喷药一体装置: CN101138291[P]. 2008–03–12.
- [13] 郑传刚,王志民. 一种果园深层土壤输氧松土注肥机及其使用方法:201510392179.4[P]. 2015–07–03.
- [14] 奚小波,张瑞宏,单翔,等. 3SFBQ–500 型果园气爆松土注肥机的优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(24): 35–43.
XI Xiaobo,ZHANG Ruihong,SHAN Xiang,et al. Optimal design and experiment of 3SFBQ–500 type orchard gas explosion subsoiling and fertilizer injection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(24):35–43. (in Chinese)
- [15] 朱苏敏. 果树注肥技术[J]. 河北果树,2020(2):28–29.
- [16] 王贵芳,姚元涛,魏树伟,等. 果树营养与肥料高效利用技术研究进展[J]. 安徽农业科学,2020,48(5):14–17.
WANG Guifang,YAO Yuantao,WEI Shuwei,et al. Research progress on fruit tree nutrition and fertilizer efficient utilization technology[J]. Journal of Anhui Agricultural Science,2020,48(5):14–17. (in Chinese)
- [17] 李六林,张盼飞,宋宇琴,等. 果树根系水分吸收与传导研究进展[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 331–336.
LI Liulin,ZHANG Panfei,SONG Yuqin,et al. Research progress of water absorption and conduction in tree roots[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2015, 35(3):331–336. (in Chinese)
- [18] 王晨冰,赵秀梅,常毅,等. 垄膜保墒集雨栽培对旱地桃树根系分布的影响[J]. 甘肃农业科技,2013(6):9–11.
WANG Chenbing,ZHAO Xiumei,CHANG Yi,et al. Effect of soil moisture conservation rainfull collection in ridge film on peach roots distribution of dryland[J]. Gansu Agricultural Science and Technology,2013(6):9–11. (in Chinese)
- [19] 袁聚云,钱建国,张宏鸣,等. 土质学与土力学[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [20] 余友泰,蒋建鹏. 土壤、作物种实和各种脱出物对钢板、铸铁、和木板等的摩擦系数的测定[J]. 东北农学院学报,1957(1):1–11.
- [21] 孙晓东,王丹. 土的粘聚力取值分析[J]. 辽宁建材,2010(3):39–41.
- [22] 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.