

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.016

有机基质臭氧消毒设备设计与试验

乔晓东¹ 贾海遥^{1,2} 王晨健^{1,2} 王琨琦² 颜丙新¹ 郭文忠¹

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 西安工业大学机电工程学院, 西安 710021)

摘要: 为实现有机基质的绿色、高效消毒, 设计了有机基质臭氧消毒设备。基于离散元软件 EDEM 建立了有机基质颗粒模型, 根据有机质物料输送及抛撒动力学特性与臭氧消毒工艺流程, 利用 SolidWorks 软件构建了有机基质臭氧消毒设备结构模型, 并对两种模型进行接触参数标定。以有机基质倾角为评价指标, 以抄板弯折角、转筒转速、填充率为试验因素, 进行了三因素五水平正交旋转组合仿真试验。根据仿真结果, 利用 Design-Expert 软件回归分析法建立倾角回归数学模型, 对有机基质臭氧消毒设备模型中的抄板弯折角、转筒转速、填充率进行了参数优化与试验验证。结果表明, 在各因素取值范围内, 抄板弯折角对有机基质倾角影响极显著, 转筒转速对倾角影响显著, 填充率对倾角影响不显著; 有机基质臭氧消毒装置最优作业参数组合为: 抄板弯折角 124.23°、转筒转速 6.29 r/min, 此时物料倾角仿真值为 89.3°。臭氧消毒灭菌性能试验验证结果为: 臭氧初始质量浓度 64.2 mg/m³, 消毒 60 min 后, 细菌灭菌率 88.9%, 真菌灭菌率 97.9%, 能够满足有机基质消毒生产要求。

关键词: 有机基质; 臭氧消毒; 转筒; 离散元

中图分类号: S317; [S19]

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)07-0138-08

OSID:



Design and Experiment of Ozone Sterilizer Device for Organic Matrix

QIAO Xiaodong¹ JIA Haiyao^{1,2} WANG Chenjian^{1,2} WANG Kunqi² YAN Bingxin¹ GUO Wenzhong¹

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Organic matrix cultivation is one of the main forms of soilless cultivation in facility agriculture. In the process of repeated utilization of organic matrix, continuous cultivation obstacles need to be disinfected, etc. Based on the analysis of the current disinfection technology and disinfection equipment, the ozone disinfection technology was proposed to solve the problem. Combining with rotating barrel research status, the rotary drum of ozone disinfection equipment parameters, the main structure and key operation parameters for the theoretical analysis and preliminary specified were designed, due to the dynamics and kinematics of organic matrix in the rotating barrel was complex, the EDEM software was adopted for organic matrix particle modeling and SolidWorks for rotating barrel with lifting board and screw conveyers cover, selecting Hertz - Mindlin contact model. The EDEM software was used with organic substrate bending angle as the evaluation index, lifting board bending angle, rotating barrel rotational speed and fill rates as test factors. Numerical simulation of three factors and five levels of orthogonal rotation was carried out. By using the regression analysis method of the Design-Expert software, a regression mathematical model of bending angle was established to optimize and verify the parameters. The results showed that the lifting board angle and rotating barrel rotational speed had significant influence on the bending angle, but the filling rate was not significant in the range of 10% ~ 30%. The optimal structure parameters and working conditions of the organic matrix ozone disinfection device were: lifting board bending angle was 124.23° and drum rotational speed was 6.29 r/min, the organic substrate bending angle was 89.3°. According to theoretical analysis and simulation results, the development of ozone disinfection equipment rotating barrel diameter was 1 000 mm, the length was 1 000 mm, and eight lifting boards were distributed in the rotating board radial uniformly, and its height

收稿日期: 2019-10-12 修回日期: 2019-12-17

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6184039)和陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-149)

作者简介: 乔晓东(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: qiaoxd@nrcita.org.cn

通信作者: 郭文忠(1970—),男,研究员,博士,主要从事设施园艺工程与智能装备研究, E-mail: guowz@nrcita.org.cn

was 170 mm, and bending angle was 124°. The screw conveyers outside diameter was 160 mm, the screw conveyers inside diameter was 60 mm, the pitch was 160 mm, and screw conveyers opening angle was 60°. Validation results showed that, in the disinfection stage, an effective “material curtain” and second collision with screw conveyers cover of the organic matrix was formed. In the unloading stage, the organic matrix can fall back to the inside of the screw conveyers cover. After the ozone disinfection equipment was sterilized for 60 minutes, the sterilization performance test showed that the number of bacteria was 31 CFU/mL, the number of fungi was 3 CFU/mL, the sterilization rate of bacteria was 88.9%, and the sterilization rate of fungi was 97.9%, which met the actual production needs.

Key words: organic matrix; ozone disinfection; rotating barrel; EDEM

0 引言

有机基质栽培是设施农业无土栽培主要形式之一。有机基质除了能够支撑、固定植株根系外,还可以为作物根系所需的水、肥、气、热等生长条件提供缓冲作用,即外来水分和养分可以暂时储存于有机基质中,供植物根系按需选择吸收^[1]。基质作为栽培的核心,既是决定植物根系生长的最主要因素,也是病虫害传播的媒介和繁殖场所。一方面,由于连作后自毒产物增多、抵抗力下降,加剧了病菌传播;另一方面,基质本身含有害虫和杂草种子,使作物产量降低、品质下降,严重时会影响后茬作物的生长,造成大面积的病菌、病毒、线虫以及虫卵传播,甚至导致整个种植过程的失败^[2-3]。因此,基质消毒是设施栽培中非常重要的作业环节。

为全面推进农业废弃物的资源化利用,提高有机基质重复利用率,研究者对栽培介质消毒方法进行了大量尝试与探索,常规的消毒方法主要包括化学消毒和太阳能、蒸汽、微波等物理高温消毒^[4]。其中,化学消毒主要利用嗅甲烷、氯化物、甲醛、高锰酸钾、漂白剂等药剂对基质进行消毒,方法比较简单,但不容易杀灭基质中的杂草种子,且药剂会造成环境污染,因而此方法将逐渐被淘汰;太阳能消毒需要光照,受气候与天气等自然条件限制,消毒周期长^[5],蒸汽、微波高温消毒通过加热流动空气杀灭基质中的病菌与杂草,是目前基质消毒的研究热点^[6-11]。

臭氧消毒除应用于医疗、水处理及农产品杀菌外,在作物栽培中同样具有灭菌增产效果^[12-14]。本文针对有机基质消毒方法与技术装备现状,根据有机质物料输送及抛撒动力学特性与臭氧消毒工艺流程,设计一种转筒式有机基质臭氧消毒设备,采用螺旋输送机推送有机基质,实现有机基质连续进出,升举抄板抛撒有机基质与臭氧气体形成对流,以提高消毒效率。

1 总体结构和工作原理

1.1 总体结构

根据有机基质臭氧消毒技术需求及工艺流程,

臭氧消毒设备结构如图1所示,主要由臭氧发生器、出料口、回转轴承、螺旋输送机罩壳、升举抄板、螺旋输送机、进料口、螺旋输送机电机、变频器、螺旋输送机罩壳电机、转筒托辊、托辊电机、转筒、机架等组成。臭氧发生器与转筒通过快速旋转接头联结,进料口与出料口分别配置于转筒左右两侧,螺旋输送机罩壳与转筒采用回转轴承实现相对转动,螺旋输送机电机、螺旋输送机罩壳电机、托辊电机与变频器驱动螺旋输送机转动、罩壳翻转与转筒转动。螺旋输送机与螺旋输送机罩壳实现有机基质转筒进料与卸料,转筒内部升举抄板在消毒阶段抛撒有机基质形成“物料帘”与臭氧气体充分接触,卸料阶段抛撒至螺旋输送机罩壳内,在螺旋输送机作用下,完成有机基质输送与卸料作业。根据设计要求确定的臭氧消毒设备主要技术参数如表1所示。

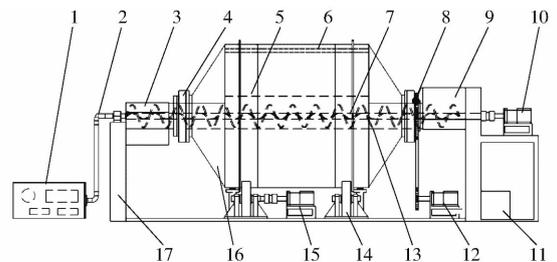


图1 有机基质臭氧消毒设备结构示意图

Fig. 1 Ozone disinfection equipment structure diagram drawing for organic matrix

1. 臭氧发生器 2. 快速旋转接头 3. 出料口 4. 回转轴承 5. 螺旋输送机罩壳 6. 升举抄板 7. 螺旋输送机轴 8. 螺旋输送机罩壳链传动 9. 进料口 10. 螺旋输送机电机 11. 变频器 12. 螺旋输送机罩壳电机 13. 螺旋输送机 14. 转筒托辊 15. 托辊电机 16. 转筒 17. 机架

1.2 工作原理

首先臭氧发生器产生的臭氧气体依次通过快速旋转接头、中空输送轴通气孔进入转筒,当消毒转筒内的臭氧气体达到指定浓度时,关闭臭氧发生器;接着开启输送机电机,在罩壳作用下,有机基质从进料口向出料口轴向移动,当有机基质接近出料口时,开启罩壳电机,翻转罩壳,有机基质撒落至转筒底部,回转罩壳继续进料;然后启动托辊电机,托辊摩擦力驱动托辊转动,在转筒、升举抄板、重力等的联合作

表1 臭氧消毒设备主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of ozone disinfection equipment

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 000×1 000×1 230
托辊/螺旋输送机/螺旋输送机罩壳电机	2.2/0.75/0.75
额定功率/kW	
臭氧发生器尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	640×320×250
臭氧发生器额定功率/kW	0.23
臭氧产量/(g·h ⁻¹)	20
转筒尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 500×1 000×1 000
设备结构质量/kg	418
转筒容积/m ³	0.785
转筒转速/(r·min ⁻¹)	1~8
抄板数/个	8

用下,有机基质依次实现升举、抛撒以及与螺旋输送机罩底部发生二次碰撞等运动,并与臭氧气体充分接触,实现有机基质臭氧消毒;臭氧消毒完成后,罩壳回正,再次开启输送,有机基质抛撒至罩壳内,在输送机螺旋推送作用下,经出料口完成卸料作业。

2 关键部件设计

2.1 转筒与抄板

在消毒和卸料关键作业阶段,有机基质随转筒转动过程中受到转筒径向、大小与有机基质颗粒质量、质心至转筒圆心距离、转筒转速的平方成正比离心力 F ,垂直于抄板表面支承力 N 、平行于抄板表面摩擦力 f 、垂直向下重力 G 合力作用,去除有机基质颗粒与转筒及颗粒间碰撞接触力、阻尼力后受力分析如图2所示。

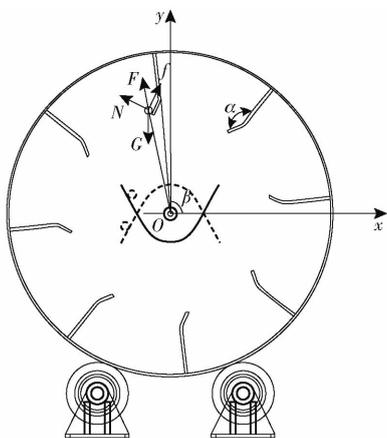


图2 有机基质受力分析示意图

Fig.2 Mechanical analysis of organic matrix

另外为了满足臭氧消毒工艺流程,在消毒阶段,有机基质需与转筒底部发生二次碰撞,增加接触面积,在卸料阶段,有机基质尽量全部倾撒于螺旋输送机罩壳内,提高卸料效率。转筒容积与消毒能力直

接相关,根据设计要求,有机基质消毒设备一次可消毒质量 m 为 50 kg,试验所用的有机基质密度 ρ 为 299.3 kg/m³,为保证良好的消毒效果,假设有机基质填充率 γ 为 20%^[15],转动轴向长度 L 为 1 000 mm,滚筒半径 r 计算式为

$$r = \sqrt{\frac{m}{\gamma\rho\pi L}} \quad (1)$$

将已知参数代入式(1)取整后, r 为 500 mm,由于臭氧气体具有强氧化性,转筒的筒体采用 304 不锈钢,厚度 4 mm。

转筒内部设置抄板有利于提高有机基质倾撒效果^[16],使有机基质在转筒的整个横截面上均匀分布,保证物料与臭氧气体有良好的接触,提高消毒效果与转筒的填充率。抄板的布置形式分为升举式、均布式、扇形式、蜂巢式和翻动式等^[17],升举式抄板加工制作方便,便于安装,对有机基质的适用性较为广泛。抄板数量一般取筒体直径的 6~10 倍^[7,17],抄板的径向高度和长度可以根据抄板的有机基质持有量和筒体实际空间布置来确定,初步设计抄板的径向高度为 170 mm,长度为 1 000 mm,抄板材料同样采用 304 不锈钢,厚度 4 mm,结合筒体的空间布置,在筒体横截面布置了 8 个抄板,抄板在滚筒内的布置如图3所示。

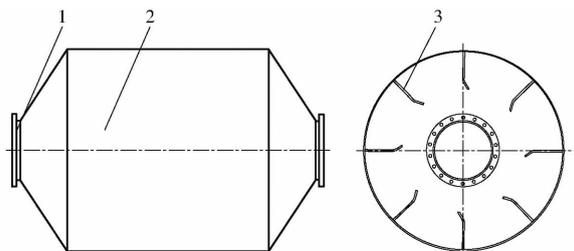


图3 转筒与升举抄板结构示意图

Fig.3 Schematic of rotating barrel and lifting board

1. 连接法兰 2. 转筒 3. 升举抄板

2.2 螺旋输送机

常用的输送装置有螺旋输送机、刮板式输送器与抛扔式输送器^[15]。本文选用结构简单,转速可在较大范围内变化的螺旋输送机。螺旋输送机结构参数主要包括叶片外直径 D 、叶片内直径 d 、叶片螺距 p 、转速 n ,螺旋输送机结构如图4所示。

螺旋输送器的生产率(推送量)与螺旋输送机

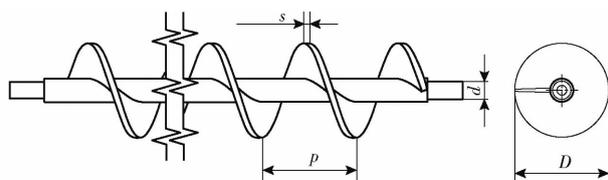


图4 螺旋输送机结构示意图

Fig.4 Schematic of screw conveyers

叶片外直径、叶片内直径、叶片螺距、叶片与外壳间隙、螺旋输送机转速、有机基质物料特性及螺旋输送机布置形式有关,计算式为^[15]

$$Q = \frac{\pi}{24} [(D - 2\lambda)^2 - d^2] \varphi \rho n p C \times 10^{-10} \quad (2)$$

式中 Q ——螺旋输送机生产率(输送量), kg/s

λ ——螺旋输送机叶片与罩壳间隙,一般为 5 ~ 8 mm, 取 5 mm

φ ——输送有机基质的充满系数,一般为 0.3 ~ 0.4, 取 0.35

C ——螺旋输送机倾斜输送系数,水平布置为 1

根据实际生产需求,为提高有机基质生产率,结合《农业机械设计手册》中螺旋输送机叶片外直径选取表, D 选取 160 mm, 叶片厚度 s 为 3 mm。

螺旋输送机输送轴直径一般计算公式为^[18]

$$d = (0.2 \sim 0.35) D \quad (3)$$

因此,螺旋输送机轴直径 d 取值为 32 ~ 56 mm, 螺旋输送机轴采用空心轴设计,且轴上有通气孔,用于向转筒内部通入臭氧气体,适当扩大轴径, d 选取 60 mm, 螺旋输送机轴选用 304 不锈钢管,壁厚 17 mm。

螺距不仅决定螺旋的升角,也决定物料运行的滑移面,螺距直接影响物料的输送过程,计算公式为^[19-20]

$$p = K_1 D \quad (4)$$

式中 K_1 ——螺距系数,当水平布置时,取 0.8 ~ 1.0

因此,螺旋输送机叶片螺距为 128 ~ 160 mm,考虑到有机基质流动性较好且螺距适当增大有助于提高螺旋输送器的输送能力,所以螺旋输送机叶片采用 304 不锈钢,螺距 p 为 160 mm。

螺旋输送机转速对输送量有很大的影响。一般来说,螺旋输送机转速越大,输送量越高,但由于螺旋输送机罩壳选用开口设计,当转速超过极限速度后,有机基质会在螺旋输送机垂直输送方向产生跳动或者因为离心力过大而向外抛出,影响物料输送,因此需对螺旋输送机转速 n 进行一定的限定。可根据螺旋输送机最大转速公式进行计算^[21],即

$$n_{\max} = A / \sqrt{D} \quad (5)$$

式中 n_{\max} ——螺旋输送机最大转速, r/min

A ——有机基质综合特征系数,为 28

因此,计算求得 n_{\max} 为 70 r/min,即在满足输送量要求的前提下,螺旋转速不允许超过它的临界转速,即

$$n < n_{\max} \quad (6)$$

联合公式(2) ~ (6) 计算可得,螺旋输送机生产率 Q 为 0.29 kg/s,效率满足实际生产需求。

2.3 螺旋输送机罩壳

在进料和卸料阶段螺旋输送机罩壳配合螺旋输送机进行有机质轴向推送,在消毒阶段,螺旋输送机罩壳开口向下,在有机基质抛撒下落过程中与有机基质“物料帘”发生二次碰撞,增加有机基质与臭氧气体接触机率,提高消毒效率,在卸料阶段,螺旋输送机罩壳开口向上,有机基质回落至螺旋输送机罩壳,配合螺旋输送机完成卸料作业。因此,螺旋输送机罩壳既要保证与“物料帘”发生二次碰撞后顺利回弹至转筒底部,又要满足卸料阶段有机基质完全回落至螺旋输送机罩壳内,综合考虑有机基质摩擦角与倾撒特性,罩壳开口角设计为 60°,并与底部半圆相切,螺旋输送机罩壳结构如图 5 所示。

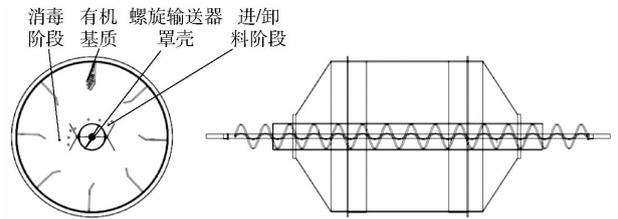


图5 螺旋输送机罩壳结构示意图

Fig. 5 Schematic of screw conveyers cover

3 数值模拟

在消毒和卸料过程中,有机基质除受到转筒作用力、抄板作用力、重力、离心力之外,还受到包括有机基质颗粒-颗粒、颗粒-转筒之间接触力作用,有机基质与消毒设备之间运动学与动力学过程理论分析与试验验证较复杂,为有效分析优化设备参数,以有机基质抄板角(如图 2 中 β ,抄板水平为 0°,逆时针为正)为评价目标,以抄板弯折角、转筒转速、有机基质转筒填充率为影响因素,采用离散元分析软件 EDEM 建立颗粒模型,与设备模型进行数值模拟,分析有机基质在设备内部运动过程,求取设备最优工况。

3.1 接触模型

考虑到有机基质颗粒在含水率低的情况下,表面几乎没有黏附力,故选取 Hertz - Mindlin 接触模型^[22-24]。该模型属于常规的颗粒接触模型,模型中将每个颗粒的碰撞接触力及阻尼分解为法向和切向方向^[25-26]。

3.2 参数设置

选取上海森农环保科技有限公司生产的有机基质为研究对象,有机基质包括椰糠、草炭和有机肥等。为提高计算效率,将物料简化为球状,设置球状

粒径为 1 ~ 3 mm, 尺寸随机分布。在 SolidWorks 中对消毒设备进行实体建模(比例 1:1), 将装配体保存为 igs 格式并导入 EDEM 软件中, 为减小计算量, 去除了对仿真影响不大的结构, 如螺旋输送机、传动装置等, 如图 3 所示。

通过有机基质物料特性试验并参考文献[27-29], 得到有机基质与转筒抄板之间的力学特性和相互之间的接触参数如表 2 所示。

表 2 EDEM 中材料参数设置

Tab.2 Material parameter setting of EDEM

类型	参数	数值
有机基质	剪切模量/MPa	1
	泊松比	0.4
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	299.3
不锈钢 304	剪切模量/MPa	70 000
	泊松比	0.3
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 930
有机基质颗粒间接触	恢复系数	0.1
	静摩擦因数	0.65
	滚动摩擦因数	0.01
有机基质与不锈钢 304 接触	恢复系数	0.1
	静摩擦因数	0.80
	滚动摩擦因数	0.01

4 试验设计与结果分析

4.1 试验设计和指标测定

有机基质臭氧消毒主要分为消毒和卸料两个阶段, 倾尽角是指有机基质完全从抄板表面滑落时抄板基准面与水平面的夹角, 倾尽角不仅可以反映有机基质抛撒“物料帘”的特性, 同时可以表征物料回落螺旋输送机罩壳状态, 因此将倾尽角作为评价指标。根据有机基质物料特性与消毒设备动力学参数不确定性, 采用二次回归正交试验设计。结合实际工艺流程与生产需求, 确定各因素的取值范围: 抄板弯折角为 $90^\circ \sim 180^\circ$, 转筒转速为 $2 \sim 14 \text{ r/min}$, 有机基质填充率为 $10\% \sim 30\%$ 。以抄板弯折角 X_1 、转筒转速 X_2 和填充率 X_3 为试验变量, 基于二次正交旋转组合试验原理, 建立因素编码表, 如表 3 所示。

通过 EDEM 软件后处理模块中的量角器功能对物料倾尽角进行测量。

4.2 回归模型建立

离散元模型中时间步长设定为 $2.4 \times 10^{-5} \text{ s}$, 瑞利步长设定为 20%, 保存时间为 0.01 s。抄板弯折角为 120° 、转筒转速为 6 r/min 、填充率为 13% 时, 有机基质消毒阶段与卸料阶段仿真结果如图 6、7 所示。在以上条件下, 图 6 显示有机基质颗粒消毒阶

表 3 二次回归正交试验设计因素编码

Tab.3 Factors and codes of quadratic regression orthogonal rotating experiment design

编码	因素		
	抄板弯折角 $X_1/(^\circ)$	转筒转速 $X_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	填充率 $X_3/\%$
-1.682	90	2.00	10.00
-1	108	4.43	14.05
0	135	8.00	20.00
1	162	11.57	25.95
1.682	180	14.00	30.00

段可有效形成“物料帘”, 并与螺旋输送机罩壳底部发生二次碰撞, 图 7 显示有机基质颗粒在卸料阶段基本上可以一次全部倾倒于螺旋输送机罩壳内部, 此时测定倾尽角为 87.1° 。该模拟过程可以很好地模拟消毒装置有机基质颗粒分布与运动状况。

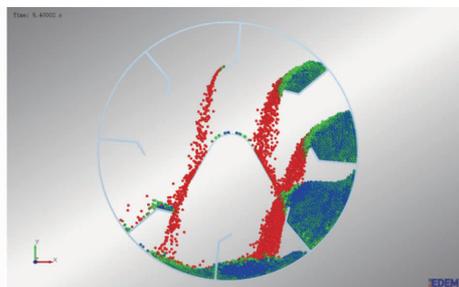


图 6 有机基质消毒阶段仿真结果

Fig.6 Simulation results of organic matrix disinfection stage

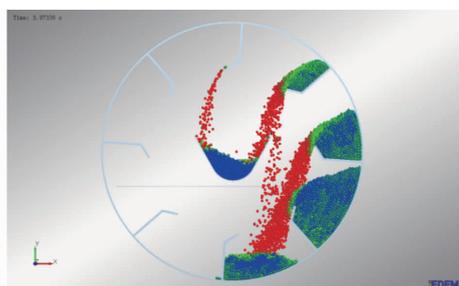


图 7 有机基质卸料阶段仿真结果

Fig.7 Simulation results of organic matrix unloading stage

依据二次回归正交旋转组合试验设置不同试验组的参数模型, 以仿真结果得到的物料倾尽角 Y 为评价指标, 以各影响因素为自变量, 基于 EDEM 仿真试验, 得到结果如表 4 所示。

将表 4 数据导入 Design-Expert 8.0.6 软件进行方差分析, 结果如表 5 所示。 P 作为方差分析的指标, 越小说明分析结果的可靠性越高。该模型的 F 为 19.19, 且 $P < 0.0001$, 说明该模型合理且显著。失拟项 $P = 0.7735 > 0.05$, 表明二次正交回归方程与实际拟合中非正常误差所占比例小, 拟合性较好。决定系数 $R^2 = 0.93$, 校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.9015$, 说明该回归方程可靠性较高, 可以采用该方程对试验

表4 二次回归正交旋转组合试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and result of quadratic regression orthogonal rotating test

试验序号	$X_1/(^\circ)$	$X_2/(r \cdot \min^{-1})$	$X_3/\%$	$Y/(^\circ)$
1	162	11.57	25.95	77.9
2	162	11.57	14.05	76.8
3	162	4.43	25.95	75.1
4	162	4.43	14.05	53.3
5	108	11.57	25.95	123.2
6	108	11.57	14.05	122.1
7	108	4.43	25.95	102.0
8	108	4.43	14.05	101.5
9	180	8.00	20.00	48.2
10	90	8.00	20.00	125.5
11	135	14.00	20.00	112.4
12	135	2.00	20.00	73.4
13	135	8.00	30.00	94.6
14	135	8.00	10.00	95.7
15	135	8.00	20.00	100.3
16	135	8.00	20.00	99.7
17	135	8.00	20.00	96.3
18	135	8.00	20.00	97.4
19	135	8.00	20.00	98.0
20	135	8.00	20.00	100.9
21	135	8.00	20.00	103.2
22	135	8.00	20.00	102.0
23	135	8.00	20.00	96.9

表5 试验结果方差分析

Tab.5 Variance analysis of material inclination angle

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.46	9	0.27	19.19	<0.000 1
X_1	1.95	1	1.95	136.63	<0.000 1
X_2	0.40	1	0.40	27.94	0.000 1
X_3	0.012	1	0.012	0.81	0.385 6
X_1X_2	9.112×10^{-3}	1	9.112×10^{-3}	0.64	0.438 6
X_1X_3	0.017	1	0.017	1.20	0.293 4
X_2X_3	0.015	1	0.015	1.07	0.319 2
X_1^2	0.055	1	0.055	3.86	0.071 2
X_2^2	7.52×10^{-3}	1	7.52×10^{-3}	0.53	0.480 8
X_3^2	9.208×10^{-4}	1	9.208×10^{-4}	0.065	0.803 5
残差	0.19	13	0.014		
失拟	0.044	5	8.747×10^{-3}	0.49	0.773 5
纯误差	0.14	8	0.018		
总离差	2.65	22			

结果加以分析。由回归方程 P 值可知, X_1 对物料倾角 Y 的影响极显著, X_2 对 Y 的影响显著, X_3 对 Y 的影响不显著。

在保证模型显著、失拟项不显著的条件下,剔除影响不显著项,优化后的回归模型方差分析如表6所示,可得优化后的模型各项均达到理想水平。失拟项 $P = 0.6837 > 0.05$, 决定系数 $R^2 = 0.8862$,

校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.8748$, 两者均接近1, 表明拟合方程可靠性高; 精确度从17.230增大到28.653, 模型精确度较优化前提高, 优化后的回归方程为

$$Y = 173.58 - 0.8023X_1 + 2.4488X_2 \quad (7)$$

表6 优化模型方差分析结果

Tab.6 Variance analysis results of optimization model

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.36	2	1.17	77.85	<0.000 1
X_1	1.95	1	1.95	129.27	<0.000 1
X_2	0.40	1	0.40	26.43	<0.000 1
残差	0.30	20	0.015		
失拟	0.16	12	0.013	0.75	0.683 7
纯误差	0.14	8	0.018		
总离差	2.65	22			

4.3 最优参数组合确定

基于响应面法,应用 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块进行参数优化,为在消毒阶段使有机基质形成有效的“物料帘”并与螺旋输送机罩壳发生二次碰撞,提高臭氧消毒效率,在卸料阶段有机基质可以完全回落至螺旋输送机罩壳,设置倾角取值范围为 $75^\circ \leq Y \leq 95^\circ$, 在 $90^\circ \leq X_1 \leq 180^\circ$, $2 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 14 \text{ r/min}$ 的条件下对各参数进一步寻优,获得最优作业参数组合为: $X_1 = 124.23^\circ$, $X_2 = 6.29 \text{ r/min}$, 此时可获得 Y 的最优目标值为 89.3° 。

5 验证试验

为验证模拟试验结果与臭氧消毒灭菌效果,在参数优化和样机试制完成后,于2019年6月在北京市农林科学院进行了有机基质臭氧消毒、卸料阶段性能试验和灭菌性能验证试验。

5.1 试验条件

根据有机基质与消毒设备仿真结果,研制了整套有机基质臭氧消毒设备,如图8所示。有机基质臭氧发生器型号 FH-CYJ1520A-Y, 额定功率 0.23 kW, 臭氧产量 20 g/h, 抄板弯折角 124° , 选取 CH 型卧式三相异步减速电机配合 SK1600-0D75G-1 型变频器、托辊等总成驱动, 转筒转速 6 r/min, 有机基质转筒填充率约 13%。

选取上海森农环保科技有限公司生产的有机基质为研究对象,有机基质包括椰糠、草炭和有机肥等。转筒内臭氧气体初始质量浓度为 64.2 mg/m^3 , 消毒时间 60 min。臭氧消毒前后分别提取有机基质悬液,制成样品匀液,稀释,分别采用 LB 培养基和 YPD 培养基,计数,消毒试验前测得有机基质中细菌菌落总数为 281 CFU/mL, 真菌菌落总数为 144 CFU/mL。



图8 臭氧消毒设备生产试验

Fig.8 Production test of ozone disinfection equipment



图10 有机基质卸料试验

Fig.10 Organic matrix unloading test



图9 有机基质臭氧消毒试验

Fig.9 Ozone disinfection test of organic matrix

5.2 试验结果

臭氧消毒转筒内部抛撒情况如图9所示,有机基质回落至螺旋输送机罩壳内部效果如图10所示。消毒阶段有机基质可以形成有效的“物料帘”并与螺旋输送机罩壳发生二次碰撞,卸料阶段有机基质可以回落至螺旋输送机罩壳内部,有机基质倾角与仿真结果基本类似,试验结果说明,仿真结果与实际试验效果拟合性较好,Hertz-Mindlin接触模型及参数设置适用于有机基质与消毒设备转筒离散元仿真。消毒60 min后,经灭菌性能试验:细菌菌落总数为31 CFU/mL,真菌菌落总数为3 CFU/mL,细

菌灭菌率为88.9%,真菌灭菌率为97.9%,满足实际生产需要。

6 结论

(1)臭氧消毒设备转筒直径1000 mm、长度1000 mm,转筒径向均布8个升举抄板,升举抄板径向高度170 mm、弯折角 124° ,螺旋输送机叶片外直径160 mm、叶片内直径60 mm、螺距160 mm,螺旋输送机罩壳开口角 60° 。

(2)采用EDEM建立有机基质颗粒模型,并进行参数标定,选取Hertz-Mindlin接触模型与设备模型进行数值模拟,分析有机基质在设备内部运动过程,得到最优作业参数组合为:抄板弯折角 124.23° 、转筒转速6.29 r/min,此时有机基质倾角为 89.3° 。

(3)消毒阶段与卸料阶段试验效果与仿真试验拟合性较好,可以实现预定有机基质“物料帘”的形成及与螺旋输送机发生的二次碰撞,作业完成后回落至螺旋输送机罩壳内。经灭菌性能检测,消毒60 min后,细菌灭菌率为88.9%,真菌灭菌率为97.9%,能够满足实际生产需求。

参 考 文 献

- [1] 刘伟,余宏军,蒋卫杰.我国蔬菜无土栽培基质研究与应用进展[J].中国生态农业学报,2006,14(3):4-7. LIU Wei, YU Hongjun, JIANG Weijie. Review on research progress and application of growing media for vegetable production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 4-7. (in Chinese)
- [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):184-188. SUN Guangwen, CHEN Riyuan, LIU Houcheng. Causes and control measures for continuous cropping obstacles in protected vegetable cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.): 184-188. (in Chinese)
- [3] 何志刚,娄春荣,董环,等.秸秆还田与高温闷棚对设施连作土壤微生境及番茄生长发育的影响[J].河南农业科学,2018,47(10):87-91. HE Zhigang, LOU Chunrong, DONG Huan, et al. Effects of corn straw returning and high-temperature sealing treatment on soil microhabitats and tomato growth[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(10): 87-91. (in Chinese)
- [4] 宋修超,罗佳,马艳,等.加热消毒设备处理西瓜重茬基质工艺优化及栽培效果[J].农业工程学报,2019,35(11):167-174. SONG Xiuchao, LUO Jia, MA Yan, et al. Parameter optimization of heating disinfection machine handling watermelon continuous cultivation substrate and cultivation effect[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 167-174. (in Chinese)
- [5] 常泽辉,贾柠泽,侯静,等.聚光回热式太阳能土壤灭虫除菌装置光热性能[J].农业工程学报,2017,33(9):211-217. CHANG Zehui, JIA Ningze, HOU Jing, et al. Performance on concentrating regeneration type solar soil deinfestation and sterilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 211-217. (in Chinese)
- [6] 欧长劲,单绍芝,丁建波.基于CFD的栽培基质消毒传热过程研究[J].农机化研究,2011,33(1):79-83. OU Changjin, SHAN Shaozhi, DING Jianbo. Research on sterilization heat transfer process of cultivated medium based on CFD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 79-83. (in Chinese)
- [7] 郑子军,单绍芝,欧长劲.基于FLUENT的消毒设备结构优化仿真[J].浙江工商职业技术学院学报,2013,12(2):88-90. ZHENG Zijun, SHAN Shaozhi, OU Changjin. Simulation and optimization of disinfection equipment structure based on FLUENT

- [J]. Journal of Zhejiang Business Technology Institute, 2013, 12(2): 88-90. (in Chinese)
- [8] 卓杰强, 陈立振, 周增产, 等. 无土栽培基质蒸汽消毒机研究与应用[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 95-98. ZHUO Jieqiang, CHEN Lizhen, ZHOU Zengchan, et al. Research and application of soilless cultivation matrix steam disinfection machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(9): 95-98. (in Chinese)
- [9] 周雪青, 张晓文, 邹岚, 等. 基质微波消毒设备设计[J]. 农业工程, 2016, 6(5): 100-104. ZHOU Xueqing, ZHANG Xiaowen, ZOU Lan, et al. Design on substrate microwave disinfection machine[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(5): 100-104. (in Chinese)
- [10] 喻自荣, 朱加繁, 彭继文, 等. 桁架式温室育苗槽基质蒸汽消毒机设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 154-157, 161. YU Zirong, ZHU Jiafan, PENG Jiwen, et al. Design of matrix steam sterilization machine for truss type greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 154-157, 161. (in Chinese)
- [11] 朱加繁, 张汝坤, 杨陆强, 等. 自走式温室育苗槽基质蒸汽消毒机的设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 78-82, 87. ZHU Jiafan, ZHANG Rukun, YANG Luqiang, et al. Design of a self-propelled greenhouse nursery substrates steam sterilization machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 78-82, 87. (in Chinese)
- [12] WANG Tiecheng, QU Guangzhou, LI Jie, et al. Transport characteristics of gas phase ozone in soil during soil remediation by pulsed discharge plasma[J]. Vacuum, 2014, 101: 86-91.
- [13] TAKAYAMA M, EBIHARA K, STRYCZEWSKA H, et al. Ozone generation by dielectric barrier discharge for soil sterilization[J]. Thin Solid Films, 2005, 506: 396-399.
- [14] 刘楠, 王琨琦, 余礼根, 等. 基于臭氧的水培空心菜促生装置及初步试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 92-95. LIU Nan, WANG Kunqi, YU Ligen, et al. The growth device and preliminary test for hydroponic spinach based on ozone concentration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 92-95. (in Chinese)
- [15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [16] KOTESWARA R S, FABIAN H, ECHEHARD S, et al. Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum[J]. Powder Technology, 2013, 234: 107-116.
- [17] 高扬. 生物质干燥设备设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013. GAO Yang. Design and experimental study on biomass dry equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [18] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [19] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 137-145. JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 137-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190415&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.015. (in Chinese)
- [20] 张秀丽, 刘云鹏, 李连豪, 等. 有机肥生产中的多段式搅龙设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 49-56. ZHANG Xiuli, LIU Yunpeng, LI Lianhao, et al. Design and performance experiment of multi-segment type auger in process of organic fertilizer production[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 49-56. (in Chinese)
- [21] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术, 2010(1): 29-33. XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyor[J]. Cement Technology, 2010(1): 29-33. (in Chinese)
- [22] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板式三七种苗分离装置结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121-129. LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121-129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180414&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.014. (in Chinese)
- [23] 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65-72. LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160710&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010. (in Chinese)
- [24] 李恒, 李腾飞, 高扬, 等. 基于离散元法的多层刮板式清粪机仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 131-137. LI Heng, LI Tengfei, GAO Yang, et al. Simulation optimization of multilayer manure cleaning system based on discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl. 1): 131-137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s124&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.024. (in Chinese)
- [25] 鹏飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 140-147. PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [26] 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83, 100. CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83, 100. (in Chinese)
- [27] 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189-195. HUO Lili, MENG Haibo, TIAN Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 189-195. (in Chinese)
- [28] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21-27. YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21-27. (in Chinese)
- [29] 杨玉婉, 佟金, 马云海, 等. 基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土刀片设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 122-128. YANG Yuwan, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Design and experiment of bionic soil-cutting blade based on multi-claw combination of mole rat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 122-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181215&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.015. (in Chinese)