doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.05.024

温室穴盘劣质苗负压式螺纹管剔除装置设计与试验

李亚涛[1,2]　赵　瑾[1]　王小琴[1]　陈月锋[3]　蒋焕煜[4]　童俊华[1,5]

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司浙江分公司, 绍兴 312039;
4. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 5. 浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 为解决温室穴盘育苗过程中存在的漏苗、幼苗发育不良的现象,需要对漏种、长势不良的穴孔基质进行剔除、补种作业以提高产量。针对温室穴盘劣质苗剔除难这一问题,本研究设计了一种用于温室 200 孔育苗穴盘的负压式剔除装置。针对劣质苗基质负压剔除易堵塞管道的特点,采取管内旋流防堵的方式,即在末端管处添加螺纹结构,对基质团产生破碎效果来减少堵塞。通过预试验确定末端管结构中影响劣质苗剔除成功率和管道堵塞率的因素有:螺纹内截面形状、螺纹线数。采用 Fluent - EDEM 耦合仿真的方法,研究各因素对劣质苗基质破碎效果的影响。之后采用响应面分析法进行试验验证,选取螺纹内截面形状、螺纹线数、末端管升降速度开展三因素三水平试验,以增大剔除成功率、降低堵塞率为优化目标对各参数进行优化,试验结果表明最优参数组合为:三角形内螺纹截面、螺纹线数 8 圈、升降速度 0.13 m/s。最后使用上述优化后的参数进行劣质苗吸附试验,结果表明剔苗成功率为 99.4%,堵塞率为 0.01%,满足后续补苗作业穴盘要求。

关键词: 温室; 穴盘苗; 负压式; 螺纹管; 剔除装置

中图分类号: S232.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)05-0259-12　　**OSID**:

Design and Test of Negative Pressure Threaded Tube Elimination Device for Greenhouse Low-quality Seedlings in Seedling Trays

LI Yatao[1,2]　ZHAO Jin[1]　WANG Xiaoqin[1]　CHEN Yuefeng[3]　JIANG Huanyu[4]　TONG Junhua[1,5]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Shaoxing* 312039, *China*
4. *College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*
5. *Provincial Key Laboratory of Agricultural Intelligent Sensing and Robotics, Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: During the greenhouse seedling tray cultivation process, phenomena such as missing seedlings and poor seedling development occur, necessitating the elimination and replanting of substrate in cavities with missing seeds or stunted growth to enhance yield. To address the challenge of eliminating low-quality seedlings in greenhouse seedling trays, a negative pressure elimination device was designed based on the physical parameters of the seedling tray substrate. Considering the tendency of low-quality seedling substrate to cause pipeline blockages during negative pressure elimination, a swirling flow anti-clogging method was implemented by incorporating a threaded structure at the end tube. Pre-experiments identified key factors affecting elimination success rate and pipeline blockage rate in the end tube structure: the cross-sectional shape of internal threads and the parameter range of thread turns. A Fluent - EDEM coupled simulation method was employed to investigate the impact of these factors on substrate fragmentation. Response surface analysis was used for experimental validation, with a three-factor, three-level test design focusing on thread cross-sectional shape, number of thread turns, and end tube lifting speed. Optimization targeting elimination success rate and blockage rate revealed the optimal parameter combination: triangular internal thread cross-section, eight thread turns, and a lifting speed of 0.13 m/s.

收稿日期: 2025-06-04　修回日期: 2025-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2000600)和浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2024SNJF069)

作者简介: 李亚涛(1994—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: ytli@zstu.edu.cn

通信作者: 童俊华(1984—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与数字农业技术研究,E-mail: jhtong@zstu.edu.cn

Finally, using the optimized parameters mentioned above, a defective seedling adsorption test was conducted. The results showed a seedling removal success rate of 99.4%, a blockage rate of 0.01%, meeting the requirements of the seedling tray for subsequent replanting operations.

Key words: greenhouse; tray seedling; negative pressure; threaded tube; elimination device

0 引言

温室穴盘育苗具有产量高、效率高、节约土地资源、受自然环境影响小和可配备机械化生产等优势。在穴盘育苗 20 ~ 30 d 之间,为了提高空间利用率、减少病虫害,需要将长势差的幼苗剔除并移栽补种健康的幼苗,需要剔除的劣质幼苗占整个穴盘的 5% ~20%。目前,穴盘苗生产过程中的基质处理、播种、剔苗、移栽等环节多采用人工作业,存在劳动强度大、效率低、劳动力资源短缺等问题,在剔补苗移栽过程这些问题尤为明显。人工剔补苗容易造成幼苗损伤、基质残留等问题,影响移栽效果和质量。因此,设计一款可靠性强、效率高、稳定的自动剔苗装置,实现劣质苗的自动剔除,对提高农业生产效率、缓解土地资源短缺与劳动力短缺具有重要意义。

目前国内外已有学者针对温室穴盘苗剔补苗移栽装置进行研究[1]。童俊华等[2]针对针式末端执行器夹持移栽后穴孔内基质残留较多的问题,设计了一种指铲式末端执行器,通过增大指铲与苗钵基质的接触面积,减少穴孔内基质的残留,当相对含水率为 60% 时,对劣质苗钵穴孔基质的平均剔净率达 70.8%。徐浩[3]研制了一种集图像采集和处理、穴盘输送、种苗剔补的温室辣椒种苗剔补移栽装备,取劣苗基质质量为原质量 70% 以上。董文勋[4]设计一种气缸驱动的插拔式末端执行器,平均基质取净率为 82.15%。司来强[5]设计了一种剔补苗移栽装置,当选用穴孔较小的 32 穴孔时,移栽成功率为 84.08%。王南竹等[6]设计了一种基于并联机构的用于温室穴盘剔补苗的并联机器人,具有作业精准定位、降低移栽失误率、动态性能平稳可靠等一系列优点。目前的温室穴盘剔苗装置多为剔补苗一体式,末端执行器主要以机械式剔除为主,结构多为爪型,实际试验过程中受基质紧实度影响,基质松散时容易造成基质散落、基质残余,影响后续补种。

近年来,国内外已有学者针对以上问题采取气吸的方式进行基质剔除。崔永杰等[7]设计了一种气吸式基质剔除装置,基质剔净率在 90% 以上。王小琴等[8]设计出一种气吸式剔除装置,分析管型、管径、管距和管长 4 种因素对基质剔净率的影响,为温室育苗中劣质钵苗基质气力剔除装备的设计提供参考。负压式剔除能够有效解决机械式剔除末端抓取松散基质时基质散落、基质残余的问题,但是容易造成管内堵塞的问题,目前负压式剔除针对基质堵塞气吸管路的研究还比较少。

气吸式剔除的管内堵塞主要出现在吸气管末端处、连接弯管处,吸气管末端处堵塞可以通过增大负压、增加末端管径的方式解决,弯管处堵塞可以通过优化管路布局,减小弯管弯曲曲率的方式解决。管内堵塞的问题广泛存在于气力输送过程中,如矿产、粮食等运输,国内外已有学者对堵塞机理和预防方式进行了广泛研究[9-21]。

综上,为实现温室穴盘苗劣质苗高效率剔除,针对机械式剔补苗设备容易造成基质残留、现有负压式剔苗装置容易造成管路堵塞的问题,本研究设计了一种劣质苗负压式剔除装置。末端管采用内螺纹结构在负压的作用下产生旋流,使基质颗粒易于分散、防止管路堵塞,并使用 CFD - DEM 耦合的方式对吸气末端管的结构进行仿真分析,并对仿真结果进行试验验证。

1 劣质苗剔除装置结构与工作原理

穴盘苗育苗穴盘为 200 孔,如图 1 所示,穴孔呈 20 行 10 列排布,基质采用体积比为 6∶3∶1 的泥炭、蛭石和珍珠岩混合,穴孔的垂直截面形状为梯形,顶面形状为 23 mm × 23 mm 的方圆形。发育不良、长势不好的劣质苗和漏种的空穴孔需要被剔除,其中发育不良的劣质苗叶片面积通常不到正常发育幼苗叶片的 1/2。



图 1 需要剔除作业的穴孔

Fig. 1 Plug cells requiring seedling elimination operation

1.1 整体结构

负压式基质剔除装置的整体结构由基质分离装置、穴盘输送装置、末端可升降气吸管、管路、阀门组成,如图 2 所示。穴盘输送装置固定在下部机架上,通过链传动将图像识别后的穴盘输送到指定工作位

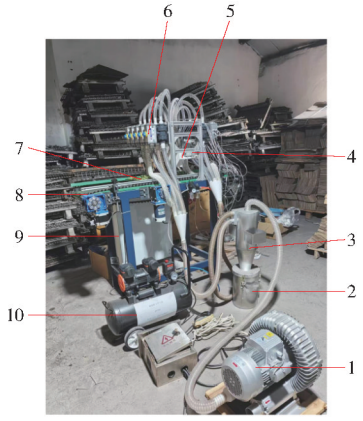


图 2　负压式劣质苗剔除装置

Fig. 2　Negative-pressure substandard seedling elimination device

1. 涡流风机　2. 收集钵　3. 旋风分离器　4. 双轴气缸　5. 末端管　6. 气动球阀　7. 200 孔穴盘　8. 穴盘输送链　9. 电控箱　10. 空气压缩机

置;基质分离装置由涡流风机和旋风分离器组成;旋风分离器进气口管路分成 10 条,分别通过球阀连接到末端气吸管上部;10 个末端气吸管分别通过气缸控制各自升降,10 个气缸并排固定在上部机架上,与各自球阀的进气口通过 PVC 软管相连。

负压式劣质苗剔除装置工作原理如图 2 所示,装置的工作步骤为:①穴盘苗经过前置工序图像识别劣质苗坐标位置后,输送链将穴盘的第 1 行输送至末端气吸管的正下方。②根据识别的坐标位置,对应管路的球阀打开的同时末端气吸管下降至贴合劣质苗穴孔的上部。③吸附完成后,气吸管上升的同时球阀闭合。④输送链运动带动穴盘运动,使穴盘的第 2 排苗运动至气吸管的正下方,重复步骤② ~ ③。⑤整盘剔苗完成作业后,输送链将整盘完成劣质苗剔除的穴盘输送到下一工序,进行补苗和移栽,下一盘识别好的穴盘放入继续剔除作业。

1.2　气固分离装置设计

吸附装置包括涡流风机、旋风分离器、双轴气缸、末端管和若干连接软管组成,涡流风机提供吸力,涡流风机的进气口与旋风分离器的顶部出风口通过软管相连,旋风分离器的进风口与末端管相连,如图 3 所示。

气吸末端管尽可能贴合穴孔上表面,以有效减少负压损失,其升降动作由气缸驱动控制。测量 20 d 鸡冠花幼苗高度,平均高度为 40 mm。为防止吸附过程中对健康苗的损坏,选用行程为 75 mm 的双轴气缸,末端管通过固定件安装在活塞杆上,固定方式简单且不易产生挠度。末端管通过软管连接到球阀的进气口,其外部采用方形截面设计,便于与气缸固定,其底部设有凸出结构,以增强与穴孔的贴合

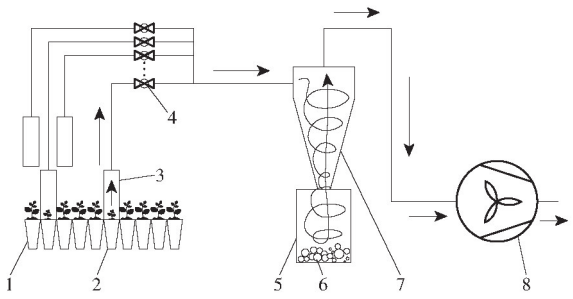


图 3　气固分离装置示意图

Fig. 3　Schematic of gas-solid separation device

1. 健康苗穴孔　2. 劣质苗穴孔　3. 气吸末端管　4. 气动球阀　5. 收集钵　6. 基质和劣质苗　7. 旋风分离器　8. 涡流风机

效果。为防止堵塞,在气吸末端管内壁添加螺纹结构,拟利用螺纹结构产生的旋流防止基质堵塞管路。

2　仿真分析

2.1　模型建立

末端管对准穴孔的精度是影响劣质苗剔净率的重要因素。末端管与穴孔之间密封越好,剔净率越高。因此设计过程中应尽可能提高贴合精度,贴合精度越高,剔净率越高;涡流风机负压越大,剔净率越高、堵塞率越低,但负压过高容易在吸附过程中对健康苗造成损伤,因此负压不宜过高。

2.1.1　数学模型

对于颗粒的黏结,EDEM 的接触力模型主要有 Bonding 模型和 JKR(Johnson - Kendall - Roberts)模型,Bonding 模型主要用于土壤、岩石颗粒的固结,JKR 模型用于湿颗粒的表面黏结。由于基质含水率较高,因此选择带有 JKR 内聚力 F_{JKR} 的赫兹-明德林模型[22],F_{JKR}、重叠度 δ 与相互作用参数、表面能 γ 相关,具体公式为

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*}a^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*}a^3 \tag{1}$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \tag{2}$$

式中　R^*——赫兹-明德林(无滑移)接触模型中定义的等效半径,m

E^*——等效杨氏模量,Pa

a——颗粒接触半径,m

α——接触重叠距离,m

颗粒在流场中受到的力有颗粒自身重力、阻力、Magnus 力、表面接触力、Saffman 升力[23],其受力平衡式为

$$m\frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t} = G + F_d + F_L + F_M + F_C \tag{3}$$

式中　m——颗粒质量,kg

v_p——颗粒速度,m/s

G——重力,N

F_d——颗粒阻力,N

F_L——Saffman 升力,N

F_M——Magnus 升力,N

F_C——表面接触力,N

t——时间,s

湍流模型选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型[23],相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型,更能准确模拟旋流相关流动。

根据式(1)、(2),在 EDEM 软件中计算颗粒间接触变化情况,以观察计算基质块整体的破碎情况。根据 RNG $k-\varepsilon$ 模型,在 Fluent 软件中计算求解颗粒相关运动特性。

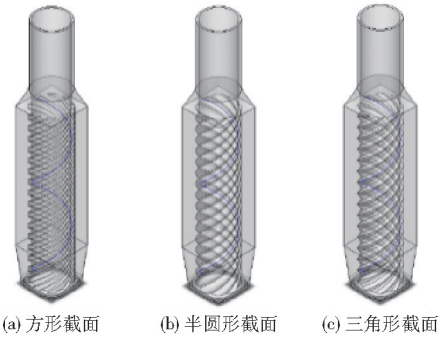
2.1.2 影响因素的确定

通过预试验得出末端端口负压大于等于 7 kPa 时可以将不同含水率的基质和劣质苗完全剔除,吸取过程中容易出现基质块堵塞末端管的问题。因相邻穴孔中心距为 25.2 mm,末端管设计外径上限为 25 mm(避免干涉),且管内截面积增大可降低堵塞概率。末端管上部由于需要与球阀通过软管连接,故软管外径不能超过 25 mm,根据实际布置上部管内径最大为 19 mm,下部末端管内径的设计范围为 19~21 mm,选定下部末端管内径 19 mm(内径小于 19 mm 容易在末端口形成堵塞,内径大于 19 mm 相邻两末端管同时作业时容易发生干涉)。采用螺纹内壁结构可诱导气流形成旋流,减少管内基质沉积。由于末端管直接固定在气缸的固定板上,末端管长度需要与气缸相适应,过长容易在与穴盘接触过程中产生挠度,影响剔苗的精准度,过短则削弱旋流效果,故设定末端管总长度为 152 mm。其中预留 50 mm 上部软管衔接段,管底设置 2 mm 穴孔轮廓凸环保障密封,剩余 100 mm 长度加工螺纹。螺纹导程越大,流动越趋近于平缓,螺纹导程越小越接近环状,越难形成旋流,因此螺纹导程选择 50 mm。拟确定管路堵塞率的关键影响因素包括螺纹截面形态与线数等参数。

2.1.3 耦合仿真方法

设计如图 4 所示方形、半圆形、三角形 3 种内螺牙形状,螺纹深度为 2 mm,螺纹总长度为 100 mm,螺纹导程为 50 mm,螺纹升角为 40°,螺纹线数 n 分别为 4、6、8,螺距分别为 12.4、8.33、6.25 mm,分别对 9 种内螺牙形状进行耦合仿真。

采用 CFD-DEM 耦合的方式对末端管的参数进行仿真试验,以确定吸附管内堵塞率低的管内截面形状。使用 ANSYS Fluent 2022 和 EDEM 2022 进行仿真耦合试验,研究穴孔内基质在末端管吸力作用下的运动特性。



(a) 方形截面 (b) 半圆形截面 (c) 三角形截面

图 4 内螺纹(8 圈)末端管结构图

Fig. 4 Structural diagrams of end pipe with internal threads (eight turns)

由于作业对象为劣质苗,劣质苗的根系相对不发达,根系对团聚体的黏结加固作用会受到根系形态、根表面粗糙度、根毛密度、根系缠绕形态、根系分泌的化学物质等多方面影响,因此仿真模型简化研究穴孔内的基质团,只针对漏播穴孔基质块破碎效果。EDEM 设置颗粒半径为 0.5 mm。基质的主要成分为泥炭土,由于水分作用,颗粒与颗粒之间、颗粒与穴孔壁之间存在黏结,因此颗粒与颗粒之间的接触模型选择 Hertz-Mindlin with JKR 模型和标准滚动摩擦模型。图 5 展示了穴孔颗粒模拟自然状态下基质颗粒的沉降。

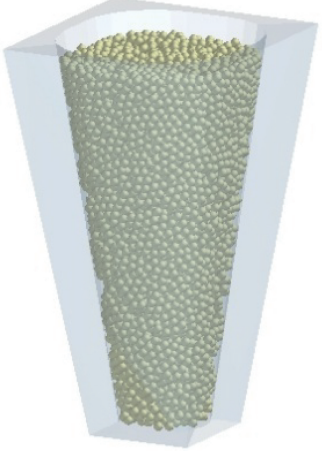


图 5 穴孔颗粒生成沉淀模型

Fig. 5 Sedimentation model of particle accumulation in plug cells

Fluent 设置面网格最大尺寸为 3 mm,最小尺寸为 1 mm,穴孔下部入口设置为压力入口,末端管上部出口设置为压力出口,封闭流体区域,填充体网格类型为 polyhedral 多面体网格,多面体网格是由四面体网格转换而来,减少了网格数量,提高了网格质量。设置末端管入口为标准大气压,出口为压力出口,设置为 -7 kPa。查阅文献[2,24-25],设置参数如表 1 所示。离散相模型选择 Saffman 升力模型和 DEM 碰撞模型。黏性模型选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

表 1　EDEM 仿真参数设置

Tab. 1　EDEM simulation parameter settings

参数	数值
基质泊松比	0.464
基质剪切模量/Pa	2.5×10^{7}
基质密度/(kg·m^{-3})	1 721
PVC 泊松比	0.38
PVC 剪切模量/Pa	8.66×10^{8}
PVC 密度/(kg·m^{-3})	1 400
颗粒-颗粒碰撞恢复系数	0.12
颗粒-颗粒静摩擦因数	0.427
颗粒-颗粒动摩擦因数	0.039
颗粒-颗粒 JKR 表面能/(J·m^{-2})	2.35
PVC -颗粒碰撞恢复系数	0.12
PVC -颗粒静摩擦因数	0.20
PVC -颗粒动摩擦因数	0.02

CDF - DEM 耦合时，由于实际过程中，固体颗粒所占的体积分数大于 10%，因此选择 Eulerian 模型。Fluent 设置时间步长为 0.001 s，时间步数为 100 步。EDEM 设置时间步长为 5×10^{-6} s，保存时间间隔为 0.001 s。耦合接口使用 Eulerian - Eulerian 方法来模拟流体-粒子系统。相关参数如表 2 所示。

表 2　Fluent 仿真参数设置

Tab. 2　Fluent simulation parameters settings

项目	设置
边界层数	3
边界条件	压力出入口
黏性模型	RNG $k-\varepsilon$
流动状态	瞬态
收敛精度	0.000 1
空气密度/(kg·m^{-3})	1.225

2.2　仿真结果分析

2.2.1　末端管螺纹结构参数对基质破碎效果的影响

选取基质颗粒团进入管内破碎状态最明显的时刻，结果如图 6 所示。在 0.5 s 内，几种螺纹管均能将基质完全吸附。

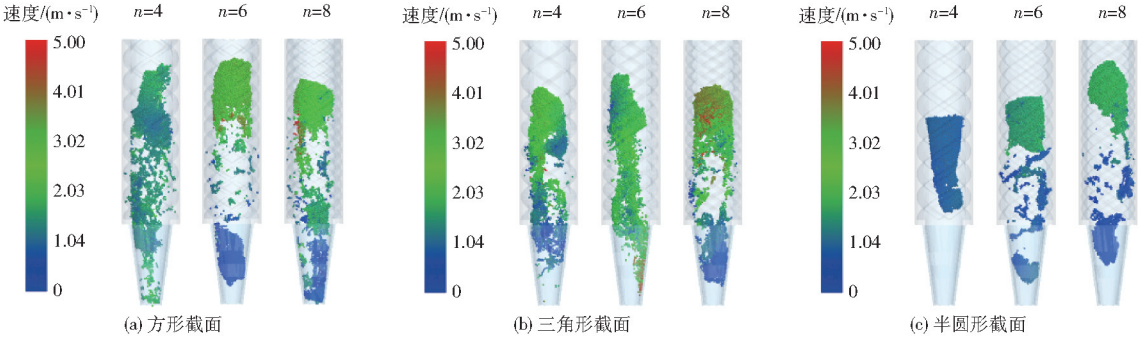


图 6　不同结构末端管基质团破碎情况

Fig. 6　Substrate aggregate fragmentation in end pipes with different structures

为了更直观地显示不同螺纹管结构的破碎效果，统计 9 种螺纹管内不同时刻颗粒接触数量、颗粒数量的变化，如图 7 所示。

根据图 7，结合已经观察到不同时刻管内最大基质块，以从管上部运动出管的最大基质块为未破碎基质，未破碎基质的颗粒间接触数量为 n_1，吸附前穴孔内所有颗粒的颗粒间接触数量 N_1 为 18 533。以不同时刻管内基质残留数量为 n_2，吸附前穴孔内颗粒总数量 N_2 为 7 856，管内基质时刻破碎率 P 计算式为

$$P=\left(1-\frac{n_1N_2}{n_2N_1}\right)\times100\%=\left(1-\frac{7\,856n_1}{18\,533n_2}\right)\times100\% \tag{4}$$

由于 EDEM 后处理统计的是管内基质颗粒数

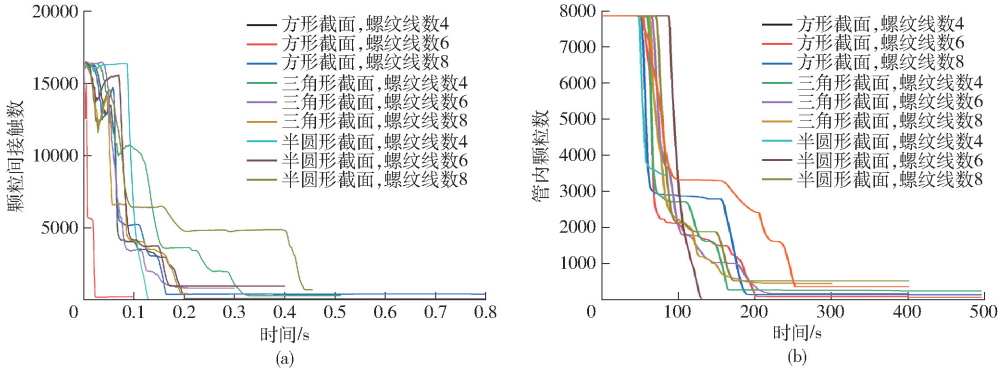


图 7　管内颗粒间接触数、颗粒数变化曲线

Fig. 7　Variation curves of inter-particle contact numbers and particle quantity in pipeline

量动态变化值(颗粒持续被吸出导致存留量波动),颗粒间接触数量也随存留量改变而变化。因此式(4)表示的是不同时刻管内存留动态/静态基质的破碎程度。若以单时刻接触数量变化统计整体基质块破碎率存在偏差,故剔除存留颗粒数小于 1 000 时的破碎率数据,如图 8 所示。因初始阶段的破碎率峰值更能反映整体基质块的破碎特性。

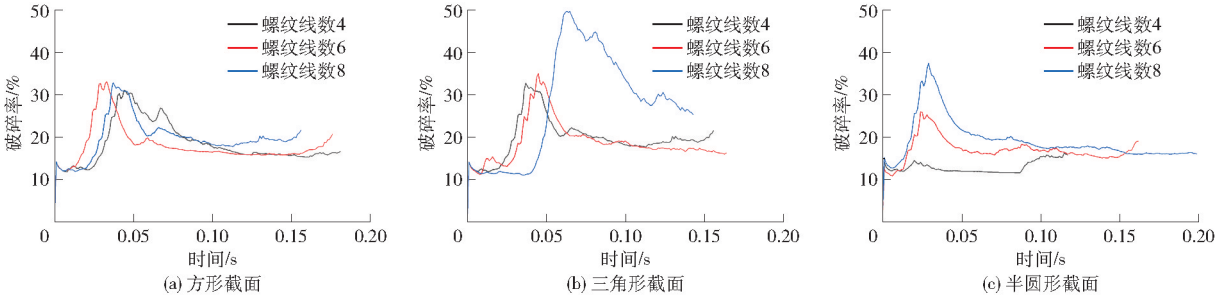


图 8 不同螺纹结构基质破碎率

Fig. 8 Substrate fragmentation rate with different thread structures

图 8 展示了不同螺纹结构基质破碎率,由图 8a 可知,方形截面螺纹管在 0.05 s 内达到最大;由图 8b 可知,0.037 s 时三角形截面 4 圈螺纹管的破碎率达到最大值 32.8%,0.045 s 时三角形截面 6 圈螺纹管的破碎率达到最大值 35.0%,0.063 s 时三角形截面 8 圈螺纹管的破碎率达到最大值 49.7%;由图 8c 可知,0.05 s 内半圆形截面螺纹管 8 圈的破碎率最大为 37.5%,6 圈的破碎率最大值为 25.9%,4 圈的破碎率最大值为 13.5%。因此,随着螺纹线数的增加,三角形截面螺纹管和半圆形截面螺纹管的破碎率明显增加;从 4 圈增加大到 6 圈,方形截面螺纹管的破碎率明显增加,从 6 圈增加到 8 圈,方形截面螺纹管的破碎率变化不明显。当螺纹线数为 8 圈时,破碎率效果由大到小为:三角形截面螺纹管、半圆形截面螺纹管、方形截面螺纹管。当螺纹线数为 4 或 6 圈时,破碎效果由大到小为三角形截面螺纹管、方形截面螺纹管、半圆形截面螺纹管。

2.2.2 末端管螺纹结构参数对管内颗粒运动的影响

选取同一颗粒为研究对象,由图 9 可知,方形截面管螺纹线数为 6 和 8 的情况下,颗粒可以在管内螺旋上升,螺纹线数为 4 的条件下不明显;对于三角形截面管,颗粒均可以螺旋上升,螺纹线数为 6 圈时,螺旋线曲率更大;半圆形截面管只有螺纹线数为 6 的螺纹管的颗粒有螺旋上升现象。这表明,这类螺纹管结构产生的旋流效果与螺纹结构和线数有关。

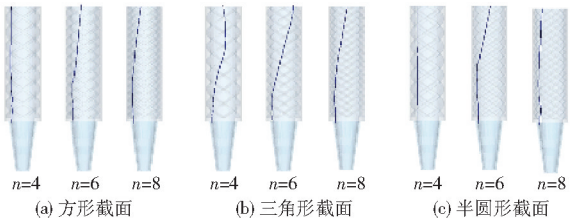


图 9 不同螺纹结构同一颗粒轨迹

Fig. 9 Particle trajectories under different thread structures

以末端管底部为原点,在末端管 y 轴正方向以 10 mm 为间距取 8 个平面,在 Fluent 后处理中分别计算各个平面 x 方向的面积加权平均涡度,如图 10 所示。根据图 10,随着螺纹线数的增加,3 种截面的螺纹管横截面涡度峰值有所增加,距离管底部越远,涡度大小呈下降趋势,距离气流入口 70 mm 以后,涡度大小趋于 0。其中,半圆形截面管涡度从距离入口 20 mm 截面处开始衰减,随着横截面与入口之间的距离增加,衰减趋势明显。三角形截面管涡度大小的峰值要明显大于方形截面螺纹管和半圆形螺纹管。

以螺纹管轴向方向为 y 轴,管径向方向为 x 轴、z 轴,取螺纹管螺纹线中间段横截面 O-xz 平面为观测面,获得管内气流 O-xz 平面速度分量图,如图 11 所示,螺纹结构内的气体存在明显的切向速度。由图 11 可知,切向速度随管壁距离远近的变化而变化,距离管壁越近,切向速度越大。这是由于螺纹结构诱导的螺旋流使得流体速度方向发生持续变化。

以末端管底部为原点,在末端管 y 轴正方向以 10 mm 为间距取 8 个平面,在 Fluent 后处理中分别计算各个平面的面积加权平均切向速度,如图 12 所示。

由图 12 可知,随着横截面离管底部的距离越远,切向速度逐渐减少。距离管底 50 mm 切向速度的衰减趋于稳定,三角形螺纹管的切向速度稳定在 0.1 m/s 附近,高于半圆形截面螺纹管。对于切向速度的峰值,三角形截面螺纹管的峰值出现在截面 1,能达到 1.842 8 m/s,大于方形截面管和半圆形截面管。对于方形截面螺纹管和半圆形截面螺纹管,随着螺纹线数的增加,螺纹内壁的切向速度明显增大。

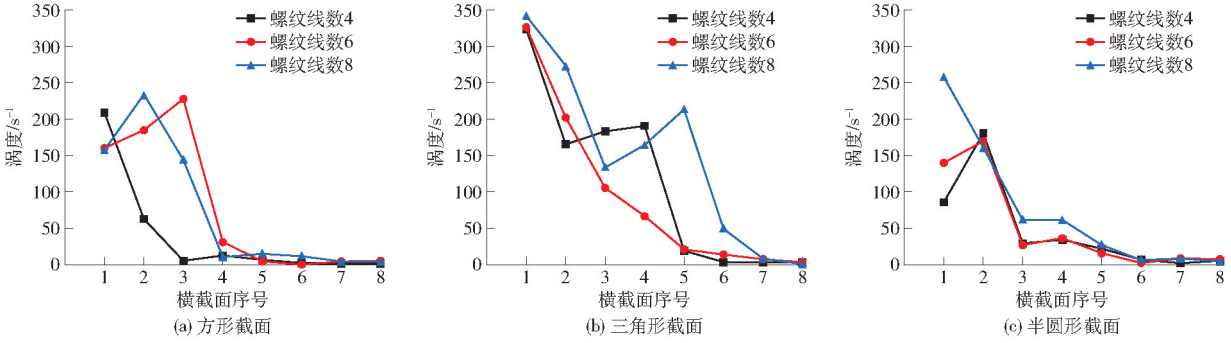


图 10　不同螺纹结构管涡度变化曲线

Fig. 10　Vorticity variations in pipes with different thread structures

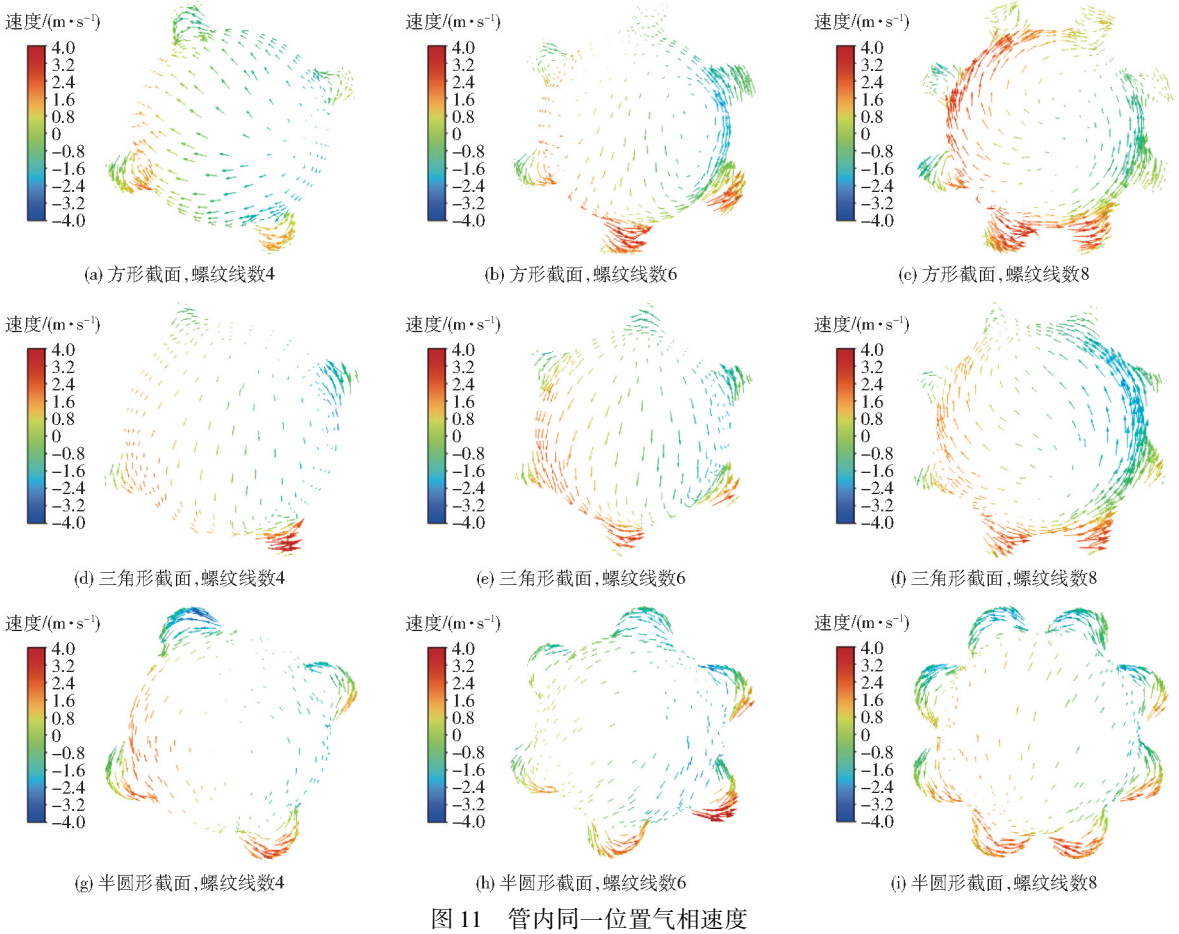


图 11　管内同一位置气相速度

Fig. 11　Gas-phase velocity at the same pipe location

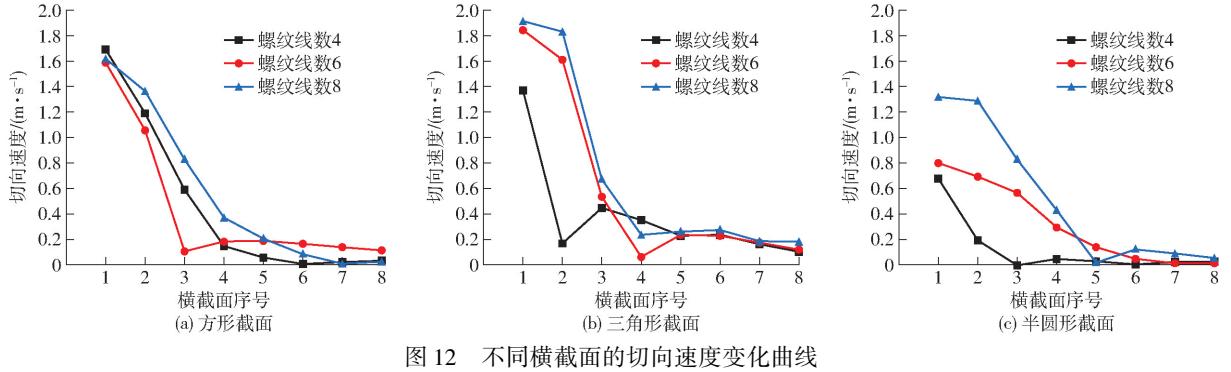


图 12　不同横截面的切向速度变化曲线

Fig. 12　Tangential velocity profiles at different cross-sections

对于管内整体流体,由图 13 可知,靠近螺纹线以及管内壁的流体更容易形成螺旋流动。

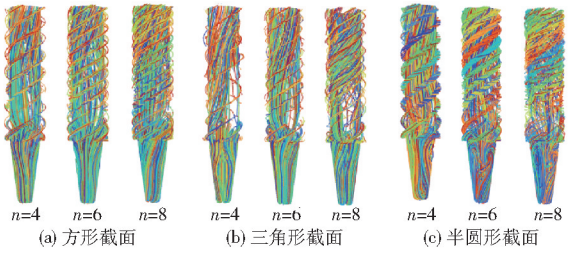


图 13 不同螺纹结构管内流体迹线

Fig. 13 Fluid streamlines in pipes with different thread structures

截取各螺旋管中间段,便于观察最大基质团运动散开过程中相同长度的区域,在 EDEM 后处理中观测基质块破碎过程中颗粒的速度矢量变化。由图 14 可知,对于螺纹线数为 4 的螺纹管,三角形截面螺纹管的颗粒切向速度明显高于方形截面和半形圆截面螺纹管;随着螺纹线数的增加,从 4 圈到 6 圈,各个截面螺纹管内颗粒切向速度略有增加,从 6 圈到 8 圈,管内颗粒切向速度明显增加。随着螺纹线数的增加,管内颗粒的轴向速度明显增加。这是由于随着螺纹线数的增加,流体的切向速度增加,使得管内颗粒的切向速度明显增加。由于螺纹旋流对颗粒产生管截面径向和切向速度分量,使得基质团向上运动的同时横向运动,形成破碎效果。

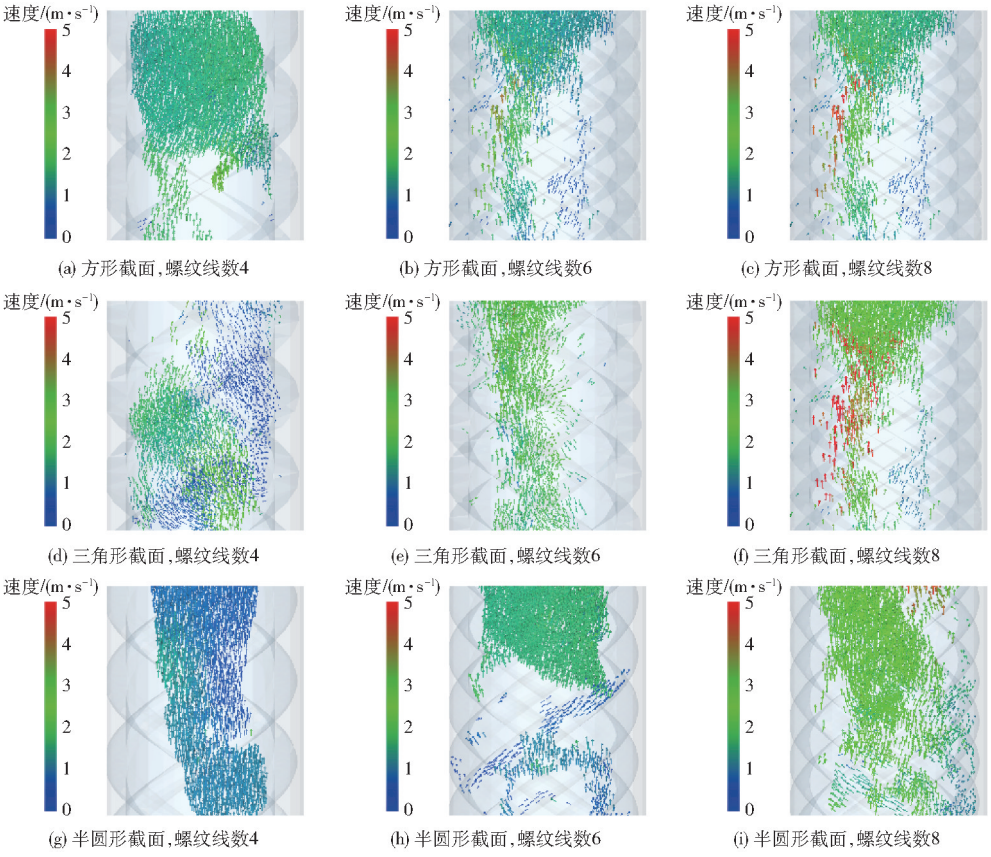


图 14 管内同一位置固相速度

Fig. 14 Solid-phase velocity at the same pipe location

3 试验

3.1 试验材料与设备

试验选用浙江桐信农业科技发展有限公司培育 20 d 的“一串红”幼苗,育苗穴盘为 200 孔,穴盘苗劣质率为 20% ~30%,正常生长状态下基质含水率为 50% ~60%。

涡流风机选用浙江亚士霸电机有限公司 XGB 单叶轮通用旋涡风机,最大负压为 7.6 kPa,采用标智 GM520 型数显负压表实测单管末端口负压为 7 kPa;旋风分离器为定制铝合金双进风口;末端气吸管升降气缸选用亚德客双轴气缸 TR10X75S0,气缸内径为 10 mm;球阀选用 UPVC 气动球阀 AT 款 DN25;气吸末端管采用 SLA 3D 打印,材质为树脂,如图 15 所示,制作上述分析的 9 种末端管。穴盘苗输送装置选用链传动,采用步进电机配合减速器。

3.2 试验方案

使用土壤湿度测量仪测量穴盘苗基质含水率为 50% ~60%。保持含水率在正常范围内进行剔除作业,当测试至管路出现基质沉积到无法进行下一次正常剔除的情况视为管路堵塞,试验 5 次取平均值;分别对多个穴盘的共计 200 个劣质苗穴孔进行剔除



图 15　试验用末端管

Fig. 15　Test end pipe for experimental study

作业，统计剔净率，分别试验 5 次，取平均值。根据预试验，末端管升降速度容易对剔净率和堵塞率产生影响，末端管升降速度需要与实际作业需求和链条传动速度相配合，调节气缸的调速阀，设置升降速度为 0.05、0.10、0.15 m/s 3 个水平。

3.3　试验指标

实际应用过程中，单个穴孔剔苗后内基质残留量小于 20% 可视为剔苗成功，整体穴盘质量为 M，空穴盘质量为 m。取出多个健康钵苗连同基质和劣质苗钵体、无苗穴孔分别称量取平均值，得出劣质苗穴孔平均质量与健康钵苗差值小于 1%，因此使用 $(M-m_0)/200$ 近似表示单个穴孔平均质量。每次剔除后称量穴盘整体质量为 m_2，上次剔除后穴盘整体质量为 m_1。单个穴孔的基质残留率 T 公式为

$$T=\left[1-\frac{200(m_1-m_2)}{M-m_0}\right]\times 100\% \tag{5}$$

对整个穴盘剔苗完成后统计经过剔苗后单个穴孔基质残留量小于 20% 的个数 n_3，所有劣质苗个数 n_4，剔苗成功率 P_1 的计算式为

$$P_1=\frac{n_3}{n_4}\times 100\% \tag{6}$$

试验表明，多次吸附后容易出现末端和管路堵塞的状况，管路堵塞会对剔苗装置剔除效果产生不良影响。本试验采用 $n-1$ 次吸附成功后首次出现堵塞至无法进行吸附作业的吸附次数 n_4，堵塞率 P_2 的计算式为

$$P_2=\frac{1}{n_4}\times 100\% \tag{7}$$

本研究中，试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Experimental factors and codes

编码	因素		
	螺纹内截面形状	螺纹线数/圈	升降速度/(m·s^{-1})
−1	方形截面	4	0.05
0	三角形截面	6	0.10
1	半圆形截面	8	0.15

3.4　结果分析

3.4.1　试验结果与分析

剔苗作业完成后，统计因素下末端管的剔苗成功率和堵塞率如表 4 所示，A、B、C 为因素编码值。

表 4　响应面试验结果

Tab. 4　Response surface methodology (RSM) experimental results

试验组号	因素			剔苗成功率	堵塞率
	A	B	C	P_1/%	P_2/%
1	0	−1	1	96.3	0.43
2	0	0	0	96.5	0.72
3	0	0	0	96.9	0.64
4	0	0	0	96.3	0.39
5	0	1	1	99.1	0.03
6	0	0	0	97.1	0.54
7	0	0	0	95.9	0.71
8	1	1	0	98.4	0.35
9	1	−1	0	96.9	2.67
10	0	1	−1	93.6	0.76
11	0	−1	−1	89.3	3.37
12	−1	0	−1	93.5	2.93
13	−1	1	0	99.1	0.46
14	−1	0	1	98.6	1.21
15	−1	−1	0	95.4	1.57
16	1	0	−1	92.5	3.09
17	1	0	1	98.1	0.68

3.4.2　回归模型建立与检验

根据表 4 的试验数据，导入 Design-Expert 13 软件，建立剔苗成功率和堵塞率的多项式回归模型

$$P_1=96.54-0.0875A+1.54B+2.9C-0.55AB+0.125AC-0.375BC+A^2-0.095B^2-1.87C^2 \tag{8}$$

$$P_2=0.6-0.0775A-0.805B-0.975C+0.3025AB-0.1725AC+0.5525BC+0.7463A^2-0.0838B^2+0.6313C^2 \tag{9}$$

方差分析结果如表 5、6 所示。

表 5　剔苗成功率方差分析

Tab. 5　ANOVA for seedling removal success rate

方差来源	均方	自由度	平方和	P
模型	11.82	9	106.37	<0.0001
A	0.0613	1	0.0613	0.6870
B	18.91	1	18.91	0.0002
C	67.28	1	67.28	<0.0001
AB	1.21	1	1.21	0.1041
AC	0.0625	1	0.0625	0.6840
BC	0.5625	1	0.5625	0.2436
A^2	4.25	1	4.25	0.0100
B^2	0.0380	1	0.038	0.7504
C^2	14.72	1	14.72	0.0003
残差	0.3471	7	2.43	
失拟项	0.5058	3	1.52	0.2284
纯误差	0.2280	4	0.912	
总和		16	108.8	

表 6 堵塞率方差分析

Tab. 6 ANOVA for clogging rate

方差来源	均方	自由度	平方和	P
模型	2.09	9	18.79	<0.000 1
A	0.048 0	1	0.048 0	0.363 1
B	5.18	1	5.18	<0.000 1
C	7.61	1	7.61	<0.000 1
AB	0.366 0	1	0.366 0	0.031 3
AC	0.119 0	1	0.119 0	0.169 6
BC	1.22	1	1.22	0.001 7
A^2	2.34	1	2.34	0.000 3
B^2	0.029 5	1	0.029 5	0.470 6
C^2	1.68	1	1.68	0.000 7
残差	0.050 8	7	0.355 5	
失拟项	0.093 2	3	0.279 7	0.078 9
纯误差	0.018 9	4	0.075 8	
总和		16	19.14	

表 5、6 的分析结果显示,剔除成功率、堵塞率的模型 $P<0.000\ 1$ 表示该模型极显著,失拟项 $P>0.05$,表示失拟项不显著。根据螺纹内截面形状、螺纹线数、升降速度三者的 P 值,可以判定升降速度对剔苗成功率的影响有极显著影响;螺纹线数、升降速度对堵塞率有极显著影响。对剔除成功率的影响由大到小依次为升降速度、螺纹线数、螺纹内截面形状,其中,螺纹内截面形状对剔苗成功率的影响不显著;对堵塞率影响由大到小依次为升降速度、螺纹线数、螺纹内截面形状,其中,升降速度、螺纹线数对堵塞率影响最为明显,螺纹内截面形状对堵塞率有一定影响。剔除成功率的模型决定系数 R^2 为 0.977 7,表示该模型能解释 97.77% 以上的相应变量;堵塞率的模型决定系数 R^2 为 0.981 4,表示该模型能解释 98.14% 以上的相应变量,调整后的 R^2 与预测的 R^2 差值均小于 0.2,表示模型拟合良好。

3.4.3 交互因素对试验指标影响分析

由表 6 可知,螺纹内截面形状、螺纹线数、升降速度对堵塞率存在交互影响。根据表中 P 值,螺纹线圈数、升降速度对堵塞率的影响极显著。使用 Design-Expert 13 绘制各种交互因素的响应面图,如图 16 所示,图 16a 为升降速度为 0.1 m/s 时螺纹内截面形状、螺纹线数交互作用下堵塞率的响应曲面图。可见,螺纹线数较大时,三角形截面的堵塞率最低,方形截面管次之,堵塞率与仿真的破碎程度结果负相关,破碎程度越高,堵塞率越低;当固定螺纹内截面形状为半圆形时,螺纹线数增加,堵塞率显著降低。

图 16b 为螺纹内截面形状为三角形时螺纹线数、升降速度交互作用下堵塞率的响应曲面图。由图 16b 可知,升降速度增加,堵塞率明显减少,螺纹线数增加,堵塞率略微减少。由响应面可知,升降速度和螺纹线数同时增加时,剔苗成功效果显著,堵塞率明显减少。

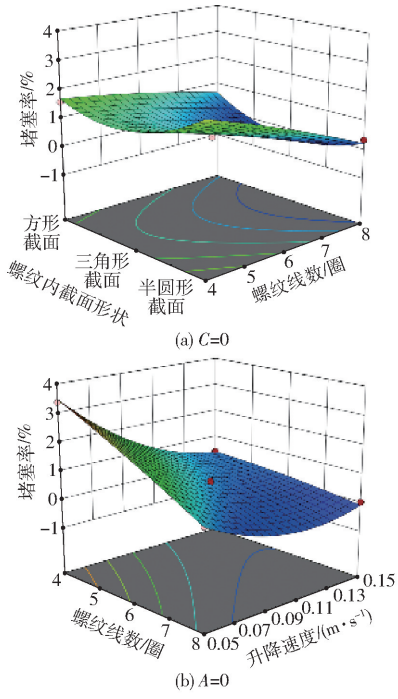


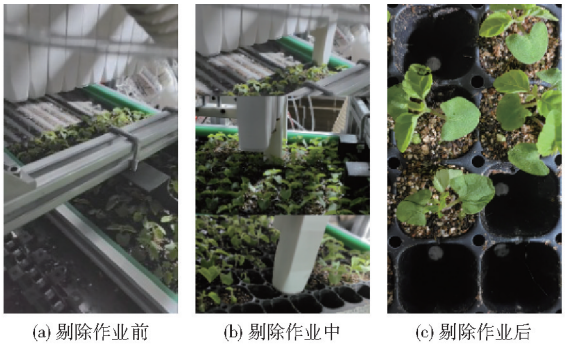
图 16 对堵塞率的交互效应响应曲面

Fig. 16 Response surfaces of interaction effect on blockage rate

3.4.4 参数优化与试验验证

利用 Design-Expert 13 的优化功能,以剔苗成功率最大、堵塞率最低为期望值时,最佳组合为:螺纹内截面形状 $A=0.568\ 782$、螺纹线数 $B=7.962\ 96$、升降速度 $C=0.132\ 417$ m/s,此时剔苗成功率为 99.235 5%,堵塞率为 0.004 380 72%。

将螺纹管的螺纹线数取整为 8 圈,升降速度取 0.13 m/s,分别对无螺纹管、三角形截面螺纹管和半圆形截面螺纹管进行试验,选择每盘 200 孔的一串红幼苗,含水率控制在 50% ~60%,对多个穴盘的共计 200 个劣质苗穴孔进行剔除作业,如图 17 所示,每组末端管试验 10 次,结果如表 7 所示。测得无螺纹管剔苗成功率为 98.86%,堵塞率为 0.53%,



(a) 剔除作业前 (b) 剔除作业中 (c) 剔除作业后

图 17 试验过程和剔除效果

Fig. 17 Testing process and elimination effect

表 7　参数优化试验结果

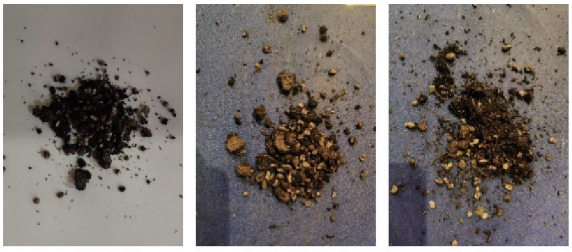
Tab. 7　Experimental results of parameters optimization

%

序号	剔苗成功率 P_1			堵塞率 P_2		
	无螺纹管	三角形截面管	半圆形截面管	无螺纹管	三角形截面管	半圆形截面管
1	99.7	99.5	974	0.13	0	0
2	97.5	99.2	97.7	0.26	0	0.15
3	99.4	98.8	97.4	0.11	0.03	0
4	98.1	99.9	99.7	0.61	0.01	0.01
5	99.8	99.8	98.7	1.19	0	0.06
6	100	100	98.6	0.20	0	0.07
7	96.3	99.1	99.6	0.33	0.04	0
8	98.6	99.4	98.9	1.06	0.02	0
9	100	99.7	97.8	0.78	0	0.06
10	99.2	98.7	100	0.65	0	0.08

三角形截面管剔苗成功率为 99.4%，堵塞率为 0.01%，半圆形截面管为 98.6%，堵塞率为 0.043%，表明优化后的堵塞率明显降低。

每次剔苗作业结束后，分别将收集钵内的无螺纹管、半圆形螺纹管和三角形螺纹管吸附的基质倒出，观察并测量基质团的破碎情况如图 18 所示，以



(a) 无螺纹管　(b) 半圆形螺纹管　(c) 三角形螺纹管

图 18　破碎效果

Fig. 18　Fragmentation effect

其中基质团小于 10 mm 的基质作为破碎后的基质，分别称量单个穴孔内基质团整体质量 M_1 和破碎后基质团的质量 M_2，破碎率 P 计算式为

$$P = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \tag{10}$$

分别统计无螺纹管、半圆形螺纹管和三角形螺纹管的平均破碎率，无螺纹管破碎率为 63.9%，半圆形螺纹管为 78.1%，三角形螺纹管为 84.6%。结果表明，优化后的破碎率得到明显提升，验证了仿真结果的可靠性。

4　结论

(1)为解决穴盘苗基质剔除难、易堵塞的这一难题，本研究设计了一种劣质苗剔除装置并进行试验，通过预试验发现末端管内加螺纹结构，有利于基质块破碎，初步确定影响剔苗成功率和基质堵塞率的因素为螺纹内截面形状、螺纹线数。

(2)利用 Fluent - EDEM 耦合仿真对比了 9 种末端管结构对基质破碎的影响，结果表明螺纹线数对螺旋流强度有明显增强的效果，显著提高基质破碎度；三角形截面螺纹管对基质的破碎效果优于方形截面螺纹管和半圆形截面螺纹管。

(3)利用 Design-Expert 软件，以最大剔苗成功率和最低堵塞率为优化目标，对末端管升降速度、螺纹内截面形状、螺纹线数进行优化，确定优化参数为：升降速度为 0.13 m/s、内截面螺纹形状为三角形截面管、螺纹线数为 8 圈，以此参数进行性能验证试验。试验结果表明该条件下剔苗成功率为 99.4%，堵塞率为 0.01%，满足剔补苗作业需求。

参　考　文　献

[1] 田志伟，马伟，杨其长，等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报，2022，27(5)：22 - 38.
TIAN Zhiwei, MA Wei, YANG Qichang, et al. Research status and problem analysis of plug seedling transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22 - 38. (in Chinese)

[2] 童俊华，石虎峰，武传宇，等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(8)：107 - 116.
TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107 - 116. (in Chinese)

[3] 徐浩. 基于深度学习温室辣椒种苗剔补移栽装备设计与试验[D]. 扬州：扬州大学，2021.
XU Hao. Design and experiment of greenhouse seedlings picking mechanism based on machine vision[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)

[4] 董文勋. 基于 Delta 机器人的穴盘剔补苗技术与试验研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2022.
DONG Wenxun. Technology and experimental research of plug tray picking seedings based on Delta robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[5] 司来强. 蔬菜穴盘苗自动识别及剔补装置设计与试验[D]. 洛阳：河南科技大学，2023.
SI Laiqiang. Design and experiment of automatic identification and picking device for vegetable plug seedlings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[6] 王南竹，朱梦岚，莫吾乙，等. 温室剔补苗并联机器人设计与试验分析[J]. 农业装备技术，2023，49(6)：20 - 25.
WANG Nanzhu, ZHU Menglan, MO Wuyi, et al. The influence of design and experimental analysis of a parallel robot for picking and healing seedlings in greenhouse[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2023, 49(6): 20 - 25. (in Chinese)

[7] 崔永杰,朱玉桃,马利,等. 穴盘缺苗气吸式基质剔除装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):140 - 151.
CUI Yongjie, ZHU Yutao, MA Li, et al. Design and experiment of air-suction substrate removal device for plug lack of seedlings trays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 140 - 151. (in Chinese)
[8] 王小琴,俞高红,刘霓红,等. 劣质钵苗气吸式剔除装置参数优化及试验验证[J]. 农业工程学报,2023,39(16):36 - 43.
WANG Xiaoqin, YU Gaohong, LIU Nihong, et al. Parameter optimization and experimental verification of the air suction removal device for inferior bowl seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 36 - 43. (in Chinese)
[9] 邓金睿,顾晓敏,陈莉,等. 气主导体系集输管道水合物堵塞形成与沉积特性研究综述[J]. 科学技术与工程,2023,23(23): 9755 - 9765.
DENG Jinrui, GU Xiaomin, CHEN Li, et al. Review of the blockage formation and deposition characteristics of natural gas hydrate in gas-dominated gas gathering and transportation pipelines[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 9755 - 9765. (in Chinese)
[10] 侯精明,王梓驿,李东来,等. 管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟[J]. 水科学进展,2025,36(1): 122 - 131.
HOU Jingming, WANG Ziyi, LI Donglai, et al. Simulation of the response of pipe network drainage capacity to gully blockage and pipeline sedimentation[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(1): 122 - 131. (in Chinese)
[11] 李明,马国伟,李航. 某电厂煤粉管道积粉堵塞原因分析及改造方案[J]. 电力勘测设计,2023(11):56 - 60.
LI Ming, MA Guowei, LI Hang. Analysis of the blockage of coal powder pipeline in a power plant and the transformation scheme[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(11): 56 - 60. (in Chinese)
[12] 毛志文,及春宁,许栋,等. 不同粒径比的双组份粗颗粒垂直管道提升堵塞过程和机理[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2023,38(1):34 - 44.
MAO Zhiwen, JI Chunning, XU Dong, et al. Blockage process and mechanism of binary coarse particles with different particle size ratios in vertical pipeline lifting[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2023, 38(1): 34 - 44. (in Chinese)
[13] 李宗国,董金峰,王辉,等. 气力输送在鲁南球团生产线除尘输灰的应用与实践[J]. 矿业工程,2022,20(3):46 - 50.
LI Zongguo, DONG Jinfeng, WANG Hui, et al. Application and practice of pneumatic conveying in Lunan pellet production line[J]. Mining Engineering, 2022, 20(3): 46 - 50. (in Chinese)
[14] LI H,TOMITA Y. Characteristics of swirling flow in a circular pipe[J]. Journal of Fluids Engineering,1994,116(2):370 - 373.
[15] LI H, TOMITA Y. An experimental study of swirling flow pneumatic conveying system in a vertical pipeline[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(1): 200 - 203.
[16] ZHOU J W,DU C L,LIU S Y,et al. Comparison of three types of swirling generators in coarse particle pneumatic conveying using CFD - DEM simulation[J]. Powder Technology,2016,301:1309 - 1320.
[17] ZHOU J W,LIU Y,DU C L,et al. Effect of the particle shape and swirling intensity on the breakage of lump coal particle in pneumatic conveying[J]. Powder Technology,2017,317:438 - 448.
[18] ZHOU J W,HAN X, JING S, et al. Efficiency and stability of lump coal particles swirling flow pneumatic conveying system [J]. Chemical Engineering Research and Design,2020,157:92 - 103.
[19] ZHOU J W,DU C L,MA Z L. Influence of swirling intensity on lump coal particle pickup velocity in pneumatic conveying[J]. Powder Technology,2018,339:470 - 478.
[20] ZHOU J W,LIU Y,DU C,et al. Numerical study of coarse coal particle breakage in pneumatic conveying[J]. Particuology, 2018,38:204 - 214.
[21] JI Y, HAO Y, YI N, et al. Particle flow regime in a swirling pneumatic conveying system[J]. Powder Technology, 2022, 401:117328.
[22] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.
[23] 袁竹林,朱立平,耿凡. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京:东南大学出版社, 2013.
[24] 王小琴,俞高红,刘霓红,等. 温室劣苗基质离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(12):359 - 366.
WANG Xiaoqin,YU Gaohong,LIU Nihong, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for greenhouse inferior seedling substrate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(12):359 - 366. (in Chinese)
[25] 任志端,王卫兵,冯静安,等. 穴盘苗基质力学特性试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(4):169 - 174.
REN Zhiduan, WANG Weibing, FENG Jing'an, et al. Experimental study on mechanical properties of plug seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(4):169 - 174. (in Chinese)