

DOI: 10.13733/j.cam.issn.2095-5553.2024.12.001

郑嘉鑫, 郭海宇, 胡池, 等. 气吸式黄精种子精密排种器设计与仿真[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 01-08

Zheng Jiaxin, Guo Haiyu, Hu Chi, et al. Design and simulation of air-suction type precision seed metering device for Polygonatum seeds [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 01-08

气吸式黄精种子精密排种器设计与仿真^{*}

郑嘉鑫^{1,2}, 郭海宇¹, 胡池¹, 周国栋¹, 方鹏程¹, 杨文彩¹

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明市, 650201;

2. 云南省高校高原特色现代农业装备工程研究中心, 昆明市, 650201)

摘要:人工播种黄精种子的效率低、成本高,现有黄精播种机多采用机械式排种器,存在卡种现象明显、种子损伤率高等问题。针对这些问题,设计一款对不同尺寸黄精种子通用性强,且满足其密植农艺要求的气吸式精密排种器。对黄精种子的种植技术及物理特性进行分析,得到黄精种子是千粒重为 35.60 g、球形度为 89.95%、等效粒径为 3.57 mm 的中小粒径种子;对排种器整体结构及工作原理进行阐述,并将排种器工作过程分为 3 个区域:充种区、携种区、投种区;根据黄精种子农艺要求,对排种器主要部件进行形状结构和尺寸参数设计。利用离散元法(DEM)分析黄精种子充种过程,求解无负压状态下种子运动规律;利用计算流体力学法(CFD)分析排种器内部流场,求解负压室流场压力及流速情况;利用 EDEM-FLUENT 耦合分析排种器排种性能,求解负压状态下种子运动规律并分析排种器充种性能、携种性能以及投种性能。仿真结果表明:当排种盘转速为 30 r/min、气压管负压为 3.5 kPa 时,设计的排种器排种合格率为 90.5%,重播率为 6%,漏播率为 3.5%,排种性能良好。

关键词:黄精;气吸式排种器;离散元法;流体力学法;EDEM-FLUENT 耦合

中图分类号:S223.26 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2024)12-0001-08

Design and simulation of air-suction type precision seed metering device for Polygonatum seeds

Zheng Jiaxin^{1,2}, Guo Haiyu¹, Hu Chi¹, Zhou Guodong¹, Fang Pengcheng¹, Yang Wencai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming, 650201, China;

2. Yunnan Provincial University Modern Agricultural Equipment Engineering Research Centre with Highland Characteristics, Kunming, 650201, China)

Abstract: The efficiency of manually sowing Polygonatum sibiricum seeds is low and the cost is high, besides the existing Polygonatum seeders mostly use mechanical seeders, resulting in obvious seed jamming and a high rate of seed damage. In response to the above issues, an air-suction precision seeding apparatus has been designed with strong universality for different sizes of Polygonatum seeds and meets the requirements of dense planting agronomy. Firstly, the planting technology and physical characteristics of Polygonatum seeds were analyzed, and it was found that Polygonatum seeds were small and medium-sized seeds with 1 000-grain weight of 35.60 g, sphericity of 89.95% and equivalent particle size of 3.57 mm. Secondly, the overall structure and working principle of the seeding apparatus were explained, and the working process of the seeder was divided into three areas: seed filling area, seed carrying area, and seed dropping area. Thirdly, according to the agronomic requirements of Polygonatum sibiricum seeds, the shape structure and size parameters of the main components of the seed metering device were designed. Finally, the Discrete Element Method (DEM) was used to analyze the seed filling process of Polygonatum sibiricum, and solved the motion law of the seed without negative pressure, the Computational Fluid Dynamics (CFD) method was used to analyze the internal flow field of the metering device, and solved the pressure and flow rate of flow field at the negative pressure chamber, the EDEM-FLUENT coupling was used to analyze the seeding performance of the seeding

收稿日期:2023年6月22日 修回日期:2023年8月25日

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(31260425);云南省重大科技专项(202102AE090042-06-04);云南省重大科技专项(202102AA310048)

第一作者:郑嘉鑫,女,1988年生,吉林吉林人,副教授,硕导;研究方向为高原特色农业全程机械化及仿生智能农业装备。E-mail: zhengjiaxin_0628@126.com

通讯作者:杨文彩,女,1973年生,昆明人,教授,博导;研究方向为智能精密播种技术、农业机械化与智能装备工程等。E-mail: yangwencai2005@126.com

apparatus, solved the seed movement law under negative pressure, and analyzed the filling performance, carrying performance and throwing performance of the seed metering device. The simulation results indicate that when the speed of seed discharging disk is 30 r/min, the negative pressure of pneumatic tube is 3.5 kPa, the qualified rate is 90.5%, the reseeding rate is 6%, the leakage rate is 3.5%, the performance of seed discharging is good.

Keywords: Polygonatum; air-suction metering device; discrete element method; CFD; EDEM-FLUENT coupling

0 引言

黄精是我国传统中药材,作为经典的食药两用植物,具有延缓衰老、健脾、滋阴润肺等功效,主治脾胃虚弱、消渴、肺虚咳嗽等症状^[1]。近年来,因其卓越的药用价值及国民保健意识的增强,黄精的市场需求大幅增长^[2]。人工栽培主要采用育苗移栽的形式,育苗播种的株距和行距多为5~10 cm。目前针对黄精种子精量播种的机器类型较少,并且由于黄精种子的品种较多,同一品种之间存在尺寸及农艺要求的差异,一般机械式排种器易出现卡种、播种质量差、损伤率高等问题。

排种器作为播种机的关键元件,其排种性能直接决定着播种的效率及质量^[3]。气吸式排种器主要依靠调整风机的气压实现精密点播,具有不损伤种子、适应性强、对种子外形尺寸要求较低等优点,现已被广泛用于农业生产中。颜丙新等^[4]设计了一种排种盘和负压腔室同步旋转的气吸式排种器,通过固定连接排种盘与负压腔室,使其在作业时同步旋转达到高排种精度和低气压损失的效果。张开兴等^[5]设计了一种变粒径双圆盘气吸式精量排种器,可在无需更换圆盘情况下,实现不同粒径种子的精量播种。贾洪雷等^[6]设计了一种在排种盘上同时设有导种槽、取种槽和吸孔3种种子拾取装置的气吸机械复合式大豆精密排种器,解决了现气吸式精密排种器遇负压骤降时易发生大量漏播的问题。Zhang等^[7]设计了一种基于小粒径蔬菜种子物理特性的气吸式精密排种器,解决了目前小粒径蔬菜种子气吸式精密排种器合格率低,结构复杂等问题。

上述研究虽在排种器结构和排种方式上有所创新,但缺少针对黄精种子特性及密植农艺需求的气吸式排种器。本文参考黄精播种的农艺要求,结合田间实际生产,设计一款针对黄精种子形状尺寸特点及满足其农艺要求的小型气吸式精密排种器,并通过仿真验证所设计排种器的合理性。

1 黄精种子农艺要求及物理特性

1.1 黄精种子农艺要求

针对云南地区,黄精种植多采用育苗移栽形式,其黄精播种的农艺要求如下。(1)选地整地:黄精适合种植在比较湿润肥沃的地方。通常,畦面的宽度为1.2 m(图1),

长度取决整个土地的面积。畦面高出地平面10~15 cm^[8],在畦内要施足一定的底肥。(2)株距:云南地区土地大多为高原红壤,株距5~8 cm,行距5~8 cm。(3)播深:根据云南地域特点和土壤性质,为使种子得到充分的水分,种子播种深度在3~5 cm。

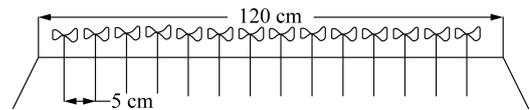


图1 黄精种子垄上种植示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Polygonatum seeds planting on the ridge

1.2 黄精种子物理特性

黄精种子的物理特性决定排种器相关部件的设计要求,如图2所示,在黄精种子中以“黄皮种子”为试验材料,黄皮种子来自成熟的种球,大多呈不规则椭球型。



图2 黄皮黄精种子

Fig. 2 Yellow skinned Polygonatum seeds

1.2.1 千粒重的测定

千粒重表示1000粒种子的重量,以克为单位,是反映种子大小和饱满程度的重要指标,也是检查种子品质和生产设计的主要内容。在对黄精种球进行处理后,随机取3份黄精种子,每份1000粒,分别进行称重,取平均值,求出黄精种子的千粒重为35.60 g。

1.2.2 三轴尺寸及等效粒径的测定

因黄精种子尺寸较小,采用轴向尺寸法。试验选取黄精种子1000粒,使用精度为0.01 mm的数显游标卡尺,对每粒种子的三轴尺寸进行测量与记录。表1为所测种子三轴尺寸的统计表。

表1 黄精种子三轴尺寸

Tab. 1 Three axis dimensions of Polygonatum seed mm

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
长 a	4.19	3.78	3.99	0.19
宽 b	4.00	3.38	3.69	0.16
厚 c	3.47	2.80	3.13	0.18

上述已获得黄精种子三轴尺寸的平均值,可采用调和平均粒径公式(1)求得等效直径。

$$d = 3 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)^{-1} \quad (1)$$

将黄精种子的三轴平均尺寸代入式(1)可得种子的等效粒径 $d = 3.57 \text{ mm}$ 。

1.2.3 球形度的测定

球形度表示种子实际形状与球体之间差异程度的指标^[9], 计算如式(2)所示。

$$S_p = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} \quad (2)$$

将黄精种子的三轴平均数据代入式(2)可得 $S_p = 89.95\%$ 。结果表明, 黄精种子粒径较小, 种子形状近似为球形, 因此为降低对种子形状尺寸的要求, 应采用气吸式排种器。

2 排种器整体结构及工作原理

2.1 整体结构

根据云南的地形地貌和耕地类型, 在播种时需使用中小型播种机。设计的播种机一次能完成 15 行播种, 一个排种器单体可以播一行, 共有 15 个排种器。排种器在播种机上均匀平行分布, 左端为种箱, 播种机风机通过气管连接排种器右端的气压管, 实现负压进行吸种。

设计的气吸式黄精种子精密排种器, 整体结构如图 3 所示, 主要由种箱、排种器盖、推种轮、连接盘、搅种盘、排种盘、轴承、负压室、排种器壳和气压管等组成。

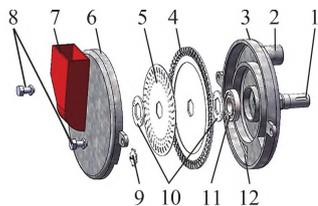


图 3 排种器整体结构

Fig. 3 Overall structure of seed metering device

1. 传动轴 2. 气压管 3. 排种器壳 4. 排种盘 5. 搅种盘 6. 排种器盖
7. 种箱 8. 螺栓 9. 推种轮 10. 连接盘 11. 轴承 12. 负压室

2.2 工作原理

如图 4 所示, 排种器从功能上可分为 3 个工作区域, 分别为充种区域 I, 携种区域 II, 投种区域 III。排种器工作时, 种子由种箱口连续进入到排种盘的充种区域, 传动轴带动排种盘及搅种盘顺时针方向旋转, 同时播种机上的风机通过气管连接气压管, 并将风压传至负压室, 使种子吸附在吸孔上。

当排种盘转动到 I 区域时, 种子在自身重力、种间作用力和搅种盘的作用下进入导种槽, 导种槽对种子存在引导推动作用, 形成规则运动的种子流(一般有 2~3 粒种子进入导种槽), 使种子有序地沿着导种槽进入型孔槽。当第 1 颗种子进入型孔槽(只能容纳 1 粒黄

精种子)后, 种子与底部的吸孔接触, 并在负压室所提供的负压气流作用下, 种子被逐一吸附, 并随排种盘转动携带至投种区域。

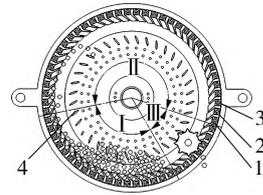


图 4 排种器工作区域

Fig. 4 Seeding device working area

1. 导种槽 2. 型孔槽 3. 吸孔 4. 黄精种子

当排种盘转动到 II 区域时, 导种槽中的种子随排种盘的转动及其自身的重力作用从导种槽掉落, 并重新进入充种区域。而在型孔槽中的种子全程采用气吸进行携种, 则不受影响。该区域内排种器自动清除“重播”的种子, 实现清种及携种功能。

当排种盘转动到 III 区域时, 负压吸附不起作用, 种子就会在离心力及自身重力的共同作用下掉落。为保证种子掉落的连贯性和稳定性, 并减小投种时对种子造成的损伤, 该排种器增添了推种轮装置。推种轮从动转动, 利用其与型孔槽的啮合, 进而将种子推出, 进行辅助排种, 实现投种功能。

排种环如此往复循环通过 I—III 区域, 实现排种器的充种、清种、携种、投种四个功能。

3 排种器重要部件设计

3.1 排种器安装的设计

如图 5 所示, 为满足黄精种子农艺要求, 单个排种器总宽应小于 50 mm, 本文选取排种器壳宽度为 18 mm, 其直径能够密封排种盘; 排种器盖和种箱宽度均为 10 mm; 气压管长度为 8 mm; 单个排种器总宽度为 46 mm, 能够实现多排同时播种。

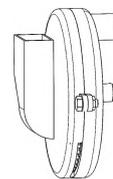


图 5 气吸式黄精种子排种器

Fig. 5 Air-suction type seeding apparatus for Polygonatum seeds

3.2 排种盘尺寸

排种盘直径是排种器的基础参数, 其对排种轮的运行性能、吸孔数量及排种器总体尺寸都有重要意义。参考《农业机械设计手册》, 一般排种盘直径范围为 140~260 mm。根据黄精种子为中等尺寸的圆粒种子, 并结合气吸式排种器的整体尺寸, 选取排种盘直径 d_1 为 160 mm, 由 3 mm 不锈钢板冲压而成。为保证排种器的

气密性,排种盘在安装时需部分内嵌入排种器壳。

3.3 排种盘型孔

以成熟黄精种球的黄皮种子为对象,将其平均宽度 $d = 3.696 \pm 0.312$ mm 代入吸孔直径公式(3),计算得出吸孔直径范围为 2.165 76~2.645 28 mm。结合加工实际,经过圆整后的吸孔直径为 2.5 mm。

$$d_{sh} = (0.64 \sim 0.66)d \quad (3)$$

查阅文献[7],选取吸孔类型为 60° 锥角的倒角型吸孔,倒角高度为 0.5 mm,如图 6 所示。当同类籽粒的不同品种在尺寸差异不大的情况下,依然可采用该排种盘。若差距大,可更换排种盘,然后再进行播种^[10]。

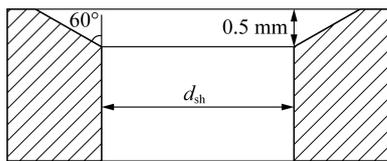


图 6 吸孔形状

Fig. 6 Suction pore shape

排种盘型孔个数是排种盘最重要的结构参数之一,在吸孔直径和播种速度一定的情况下,型孔数越多,排种盘转速越低,排种器工作过程中充种时间就越长,更利于提高充种率、降低种子破损率,但型孔个数过多也会增大对吸种负压的要求。排种圆盘的型孔数量计算如式(4)所示。

$$M = \frac{\pi D_w v_c (1 + \delta)}{v_1 k} \quad (4)$$

式中: D_w ——圆盘直径, $D_w = d_1 = 160$ mm;

v_c ——播种机作业速度, m/s;

δ ——地轮滑移率,一般为 0.05~0.12;

v_1 ——种子脱落时的线速度, m/s;

k ——株距, m。

通常排种器的线速度应小于 0.35 m/s^[5, 11],取 0.25 m/s;考虑黄精的特性,黄精常生长在潮湿的环境,因此地轮滑移率取 0.1;播种机作业速度在 $4 \sim 8$ km/h 时,其株距合格率可以达到 80% 以上,当播种机作业速度达到 $11 \sim 12$ km/h 时,其株距合格率就会降低到 60% 以下^[12]。以黄精种子为例,播种机作业速度取 6 km/h,即 1.67 m/s。一般黄精种植的株距为 $0.05 \sim 0.08$ m,则 $46.15 \leq M \leq 73.87$ 。为使型孔分布紧凑、均匀,并考虑充种的有效性,故排种器型孔的周向数量 M 设为 60 个。

设置导种槽是为了扰动充种区域的种子,并在负压吸力的双重作用下引导种子进入型孔槽,缩短充种时间,提高取种性能。如图 7 所示,设计的导种槽为平行四边形槽,上平面相切于直径为 d_3 的圆,随着排种盘的转动,种子更易进入导种槽;底面存在一个斜坡,引导种

子从排种盘表面进入型孔槽中;查阅参考文献[6],选取导种槽沿着型孔槽的对称平面偏移 45° 。

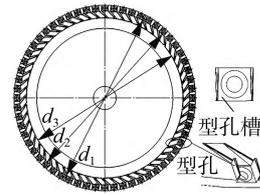


图 7 排种盘型孔

Fig. 7 Type hole of seeding tray

种子进入型孔槽后,其内壁对种子具有一定的扶持功能,并在负压吸附作用下,随排种盘转动携带至投种区域。如图 7 所示,型孔槽为梯形槽,底部存在吸孔,槽的上底为 5 mm,下底略长于上底,种子更易在投种区域投种,提高排种率,并根据黄精种子的三维尺寸,在设计时使型孔槽只能容纳 1 粒种子。

综上所述,由于型孔槽及吸孔的限制,设计的排种器可容纳平均粒径为 $2.5 \sim 5$ mm 的黄精种子。因此可在不替换排种盘的情况下,实现三种不同类型的黄精种子排种要求。

3.4 排种盘转速

排种盘转速对排种器工作性能影响较大,因此在排种器工作时,需根据田间实际情况,选择合适的播种机前进速度,进而确定排种盘工作转速。排种盘转速 n 与播种机前进速度 v 关系如式(5)所示。

$$n = \frac{v \times 10^3}{60 \times l \times p} \quad (5)$$

式中: n ——排种盘转速, r/min;

v ——前进速度, km/h;

l ——株距, m;

p ——排种盘吸孔数。

为保证株距具有较高的合格率,选择播种机前进速度为 $4 \sim 8$ km/h,株距为 $0.05 \sim 0.08$ m,则排种盘理想转速 n 为 $13.88 \sim 44.44$ r/min。

3.5 搅种盘的设计

在传统的充种室中,种子不易被吸附到吸孔上^[13]。因此在排种盘上安装一个直径为 120 mm 的搅种盘,其内嵌排种盘并通过连接盘固接。该装置在旋转时会对种群产生扰动力,使种子呈现浮动状态,提高种子的流动性和充种效率。

3.6 推种轮的设计

推种轮置于排种器的投种区域内,在投种过程中,推种轮是随排种盘从动转动,推种轮的轮齿与排种盘型孔依次连续内啮合,因此两轮的轮齿运动关系为纯滚动。如图 8 所示,为确保两轮能够有效啮合,在圆弧方向上,推种轮和排种轮的型孔间距应相同^[14]。

$$\frac{2\pi R}{M} = \frac{2\pi r}{m} \quad (6)$$

$$r = \frac{mR}{M} \quad (7)$$

式中： R ——排种盘型孔内半径， $R = d_2/2 = 75 \text{ mm}$ ；

M ——型孔数，60 个；

r ——推种轮基圆半径，mm；

m ——推种轮齿数。

本文取 $m = 8$ ，则 $r = 10 \text{ mm}$ 。

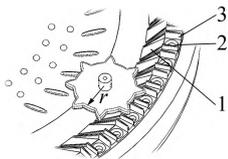


图 8 投种区排种器局部视图

Fig. 8 Partial view of the seeds dropping area of the seeding apparatus

1. 导种槽 2. 吸孔 3. 型孔槽

4 模拟仿真与结果分析

4.1 排种器充种过程仿真试验

在充种过程中，种子之间以及排种器与种群之间存在相互作用力，因此有必要对黄精种子充种过程中种子的运动状态进行仿真分析。利用离散元法 (DEM)^[15]，使用 EDEM 仿真种子在零负压条件下的充种过程，得到黄精种子的运动状态，并分析种子的运动规律。为简化颗粒模型，选取种子等效粒径 $d = 3.57 \text{ mm}$ 的球状模型来进行仿真分析^[16]。

4.1.1 EDEM 参数设置

利用 SolidWorks 对气吸式黄精种子精密排种器进行三维建模。在 EDEM 中，导入排种器模型，调整种子和排种器的属性参数，包括种子之间以及种子与排种器之间的接触模式，使用等效直径为 3.57 mm ，尺寸分布为正态分布的种子颗粒；将排种盘绕其圆心顺时针旋转，转速调节至 25 r/min ；创建一个虚拟平面，并添加一个颗粒工厂，以产生种子；将时间步长设为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ ，仿真时间调节至 10 s ，以便获得更准确的结果。将网格尺寸调整至 $3R_{\min}$ ，最终形成 33 120 个独立的网格单元。运行 EDEM 求解器，对排种器进行充种仿真，充种过程如图 9 所示。

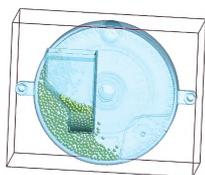


图 9 排种器充种仿真视图

Fig. 9 Seed filling simulation view of seeding apparatus

4.1.2 充种仿真试验结果分析

1) 排种器充种阶段。如图 10 黄精种子充种仿真矢量图所示，充种过程可分为 3 个阶段，I 阶段：种子生产，做自由落体运动，速度快速增加；II 阶段：种子与种箱底、排种器壳发生接触，产生堆积，速度快速下降到几乎为零；III 阶段：在排种盘及搅种盘的转动下，种子进入型孔，速度缓慢上升到与排种器转速同速。

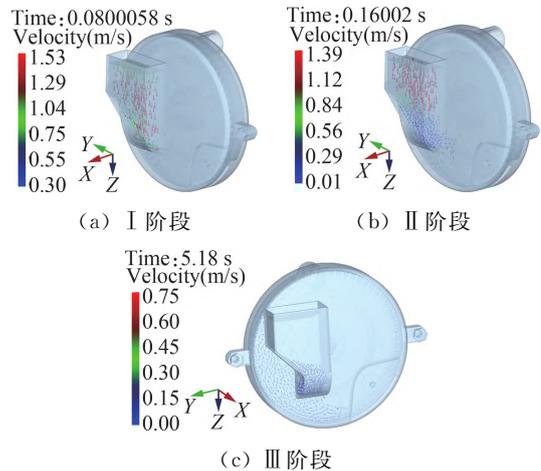


图 10 充种阶段仿真矢量图

Fig. 10 Simulation vector diagram of seed filling stage

2) 无负压状态充种性能。型孔槽内有种子即为充种成功，反之，没有种子则为漏充，会导致排种器出现漏播现象^[17]。因此，排种器的充种情况，会严重影响其排种性能。如图 11 所示，在无负压作用和排种盘离开种群时，设计的排种器仍能够在多个型孔处保留 1~2 粒种子，保证排种器具有优良的充种性能。

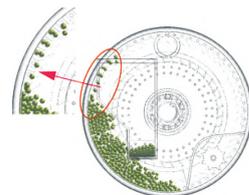


图 11 无负压充种情况

Fig. 11 Seed filling situation of non-negative pressure

EDEM 后处理器 (Analyst) 具有强大的后处理能力，通过后处理器生成黄精种子平均速度变化曲线，如图 12 所示。可以看出，其结论与上述一致。因此，在充种区域内，黄精种子能够顺利进入型孔，并跟随排种盘转动。

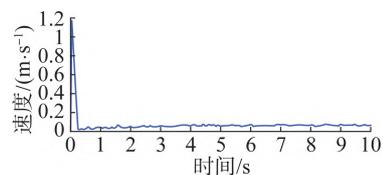


图 12 黄精种子平均速度曲线

Fig. 12 Average velocity curve of Polygonatum seeds

4.2 排种器内部流场仿真试验

气吸式排种器是通过风机将排种器内部的空气吸走,整个负压室就会处于一个负压环境,种子则随着排种盘转动,经过负压室区域,被吸附在型孔上;当种子到达投种区,在自身重力及推种轮的作用下,完成投种。在整个排种过程,排种器内部存在流场变化,因此需对排种器内部流场进行分析,得到排种器内部流场变化的规律。

利用计算流体力学法(CFD)^[18],使用 FLUENT 软件仿真排种器在负压气室内部的流场分布情况,求解不同排种盘转速下(15 r/min、25 r/min、35 r/min 作为对比试验)的整个负压室与排种盘型孔内的流场情况。

4.2.1 FLUENT 参数设置

利用 ANSYS 中 FLUENT 分析系统模块,在 Spaceclaim 中导入并简化模型;填充流体仿真区域,选择并重命名 wall、inlet、outlet。用 MESH 将该气流场划分成网格面,并检查网格情况,避免出现负体积网格。

在 SETUP 中,选择湍流模型,并设置排种盘转速、旋转中心及转向;接着设置负压室出入口压力,入口压力值设为 0 Pa,出口负压设为 3.5 kPa;最后选择求解算法为简单,压力差值方式为标准,设定迭代次数为 5 000 次进行迭

代计算。流场气流的矢量图如图 13 所示。

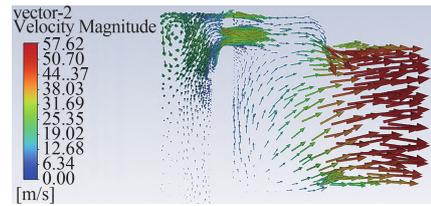


图 13 气压管处吸孔流速

Fig. 13 Suction hole velocity at the air pressure pipe

4.2.2 流场仿真试验结果分析

1) 流场压力分析。由图 14~图 16 可知,气流从气压管(环状负压室上部中心位置)进入负压室后,在此处附近出现较高负压,然后向四周缓慢递减,并蔓延至剩余位置;由于右边负压区大于左边负压区,气流进入到右边底部区域时间更长,因此该区域呈现出吸孔外的区域压力稍低,但所有吸孔处的压力值几乎一致;由于吸孔靠近排种盘边缘,其压力相比于内侧部分稍小,但由于型孔槽的扶持,及倒角型吸孔的支撑作用,排种盘在转动时不需要过大的负压压力。因此,在同一转速下,随着排种盘的转动,负压室压力分布变化较大,由此可说明排种器的转动对流场压力分布影响较大。

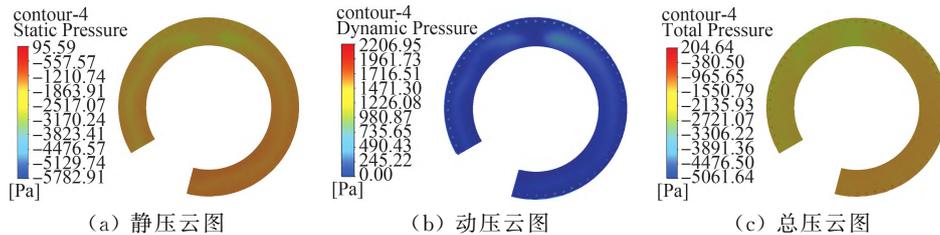


图 14 转速为 15 r/min 时,负压室流场压力

Fig. 14 Negative pressure chamber flow field pressure when the speed is 15 r/min

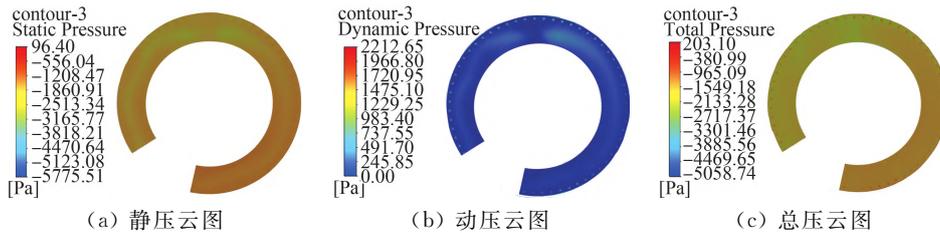


图 15 转速为 25 r/min 时,负压室流场压力

Fig. 15 Negative pressure chamber flow field pressure when the speed is 25 r/min

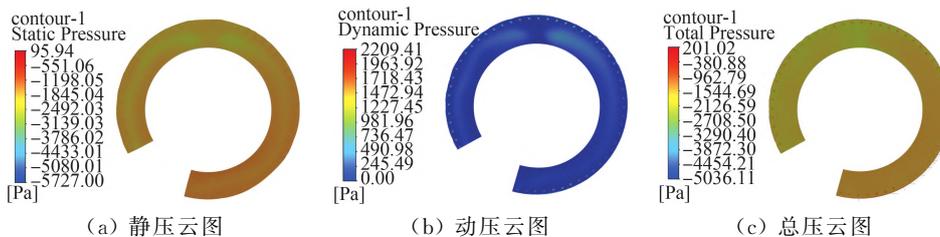


图 16 转速为 35 r/min 时,负压室流场压力

Fig. 16 Negative pressure chamber flow field pressure when the speed is 35 r/min

当排种盘在正常作业的转速范围内,同一时刻不同转速情况下的流场压力分布变化不大,由此可说明

排种盘转速对气负压室流场压力分布变化影响较小。

2) 流场速度分析。流场速度分析如图 17、图 18 所

示,流速最大部位均处于型孔处,并且靠近气压管处的流速较大,呈现出向两侧逐渐减小的现象。在吸孔局部云图中,因吸孔类型为 60° 锥形的倒角型吸孔,气流

流道(外大内小)发生了改变,最大流速发生在吸孔最小直径处,倒角处流速相对较小,高速气流能将种子牢牢吸附在型孔内。因此,该排种器利于吸种。

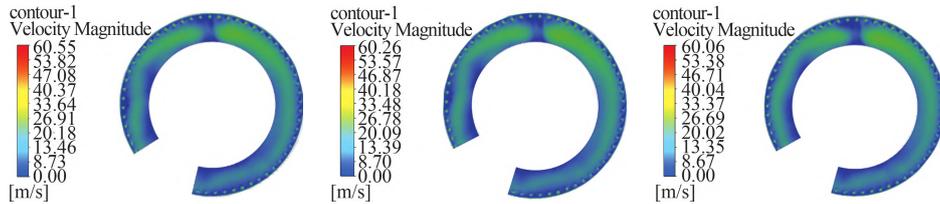


图 17 负压室流场速度云图

Fig. 17 Velocity cloud image of flow field in negative pressure chamber

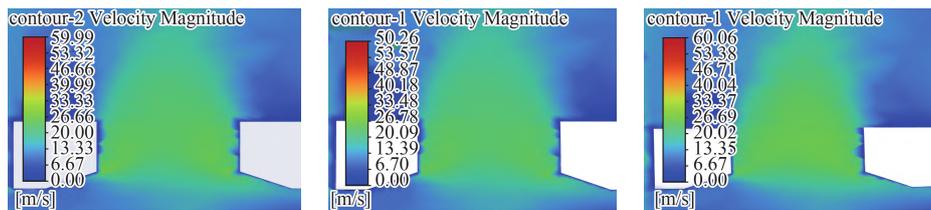


图 18 排种盘最低处吸孔局部云图

Fig. 18 Local cloud view of the suction hole at the lowest part of the seed tray

4.3 排种器排种性能仿真试验

气吸式排种器工作时,其内部既存在单粒种子及种群间运动,又存在流场压力和流速变化,且种子的运动会受到气流的曳力作用。因此,为探究种子在流场作用下所设计排种器的排种性能(包括充种性能、携种性能及投种性能),在排种盘转速为 30 r/min ,气压管负压为 3.5 kPa 情况下,采用 EDEM-FLUENT 耦合的方式分析排种器的整个排种过程。

4.3.1 耦合参数设置

耦合连接:在 EDEM 中,打开耦合服务;在 FLUENT 中,加载耦合 UDF 文件,并在 Models-EDEM Coupling 中,点击 Connect 创建与 EDEM 的连接。

参数修改:在进行仿真耦合时,EDEM 和 FLUENT 各自的参数设置可参考前两节进行调整。在 FLUENT 中,改用瞬态计算,选用湍流模型并点击 Dispersed,并在 Discrete Phase 中选择 Gidaspow 曳力模型^[19],接着,选择所有区域进行标准初始化,最后,将时间步长改为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$,进行仿真计算。

4.3.2 排种器排种性能仿真试验结果分析

1) 负压作用下单粒种子运动分析。在流场负压作用时,单粒种子的运动轨迹如图 19 所示。种子首先从种箱口掉落,然后在种群间相互作用力及搅种盘扰动力作用下到达充种区域,接着在导种槽引流及流场负压作用下进入型孔,并跟随排种盘到达投种区域,最后由于转速较快,种子在离心力及自身重力下就完成投种。

2) 排种盘排种性能分析。对处于排种盘最高处的种子进行统计,定义型孔处单粒为合格,多粒为重

播,未吸附为漏播。统计结果显示,该排种器在总颗粒数为 200 颗、排种盘转速为 30 r/min 、气压管负压为 3.5 kPa 时,合格率为 90.5% ,重播率为 6% ,漏播率为 3.5% 。查阅单粒(精密)播种机技术条件^[11],确定播种作业合格条件为:粒距合格率 $\geq 60\%$,重播率 $\leq 30\%$,漏播率 $\leq 15\%$,具有良好的充种与携种性能。

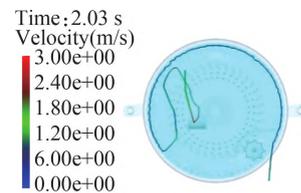


图 19 单粒种子运动轨迹

Fig. 19 Motion trajectory of single seed

由于推种轮轮齿与排种盘型孔槽连续紧密内啮合,因此只要该排种盘成功充种并携种到投种区域,种子就能在自身重力和推种轮强制推种作用下实现投种,因此该排种盘具有良好的投种性能。

综上所述,该排种器能在搅种盘扰动作用、导种槽引流作用下顺利进入型孔实现充种功能;在吸孔处的高速气流以及型孔的辅助挟持下实现负压携种功能;在种子自身重力、离心力和推种轮的辅助投种作用下实现投种功能。因此,该排种器具有良好的充种性能、携种性能以及投种性能,并能够满足黄精种植的农艺要求。

5 结论

1) 通过对黄精种子种植技术及物理特性的分析,得到云南地区黄精种子种植的农艺要求为:株距、行距为 $5 \sim 8 \text{ cm}$,播深为 $3 \sim 5 \text{ cm}$,以及黄精种子是千粒重

为 35.60 g、球形度为 89.95%、等效粒径为 3.57 mm 的中小粒径种子。

2) 设计一种气吸式黄精种子精密排种器, 阐释排种器的整体结构及工作原理, 将排种器的整个工作区域分为了充种区、清种及携种区、投种区。然后, 对排种器主要部件进行形状结构和尺寸参数设计, 使其可容纳平均粒径为 2.5~5 mm 的黄精种子。

3) 利用离散元法 (DEM) 分析黄精种子充种过程, 求解黄精种子在排种器内部的运动规律, 验证所设计排种器具有优良的充种性能; 利用计算流体力学法 (CFD) 分析排种器内部流场情况, 得到在不同转速下, 排种器内部流场压力及流速分布规律。

4) 通过使用 EDEM-FLUENT 耦合分析排种器的排种性能, 得到负压作用下单粒种子运动规律, 并统计排种器在特定条件下的合格率、重播率及漏播率分别为 90.5%、6%、3.5%。仿真试验验证所设计气吸式黄精种子精密排种器具有良好的排种性能, 满足黄精种子精密播种的农艺要求。

参 考 文 献

- [1] 徐宇琳, 王元忠, 杨美权, 等. 黄精的本草考证及民族用法[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(17): 237-250.
- [2] 张红瑞, 孟盼盼, 王茜, 等. 不同着生部位黄精种子的生理及萌发特性[J]. 河南农业科学, 2021, 50(12): 56-67. Zhang Hongrui, Meng Panpan, Wang Xi, et al. Study on physiological and germination characteristics of polygonatum sibiricum seeds at different positions [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(12): 56-67.
- [3] 章鑫鹏, 郑乐, 张富贵. 国内气力式精密排种器研究综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(9): 93-97, 113. Zhang Xinpeng, Zheng Le, Zhang Fugui. Review of domestic pneumatic precision seed disperser research [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(9): 93-97, 113.
- [4] 颜丙新, 张东兴, 崔涛, 等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 15-23. Yan Bingxin, Zhang Dongxing, Cui Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 15-23.
- [5] 张开兴, 李金凤, 宋正河, 等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52-63. Zhang Kaixin, Li Jinfeng, Song Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52-63.
- [6] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 75-86, 139. Jia Honglei, Chen Yulong, Zhao Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86, 139.
- [7] Zhang K, Guoliang M A, Jingfeng L I, et al. Material characteristics of vegetable seeds with small grain size and design of seed metering device [J]. Inmateh-Agricultural Engineering, 2022, 68(3): 789-797.
- [8] 鲍康阜. 九华黄精的 GAP 栽培技术规程[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 43-44, 52. Bao K F. Regulations of GAP cultivation technique of Polygonatum cyrtoneura Hua [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(4): 43-52.
- [9] 王浩屹, 孙新平, 陈曦, 等. 气吸式小青菜精密排种器设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(6): 51-57. Wang Haoyi, Sun Xinping, Chen Xi, et al. Design and test of air suction precision seed metering device for Brassica Chinensis [J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization, 2022, 43(6): 51-57.
- [10] 李金凤. 小粒径蔬菜种子气吸式精密排种器的设计与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. Li Jinfeng. Design and experimental research of small-size vegetable seeds air suction precision seeder [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [11] 林静, 宫元娟, 李国臣. 浅谈精密播种机的发展优势与前景[J]. 农业机械, 2004(4): 43-44.
- [12] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [13] 陈美舟, 刁培松, 张银平, 等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 8-16. Chen Meizhou, Diao Peisong, Zhang Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 8-16.
- [14] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 37-46. Ding Li, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37-46.
- [15] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [16] 郭敬山. 组合玉米和组合超球颗粒模型的三维离散元算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [17] 周仁义. 气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [18] 孙舒畅. 基于 DEM-CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [19] 纪海春. 基于 DEM-CFD 耦合的气吸式排种器工作过程仿真分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.