

油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验

王磊^{1,2} 廖宜涛^{1,2} 万星宇^{1,2} 王宝山^{1,2} 胡乔磊^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油麦兼用型气送式集排器排种过程中混种部件内压力梯度变化方向与种子输送方向不匹配,造成种子倒流和逆流,降低集排器各行排量一致性的问题,设计了一种基于文丘里原理的混种部件,确定了文丘里混种室和输种管的主要结构及关键参数,分析了输送气流速度、种子速度、混种部件结构对总压力损失的影响。应用 DEM - CFD 耦合仿真对比分析了 3 种输种管与 2 种文丘里混种室组合的 6 种结构混种部件对种子迁移轨迹、输送气流压力分布及输种性能的影响,结果表明:加速混合段的文丘里混种室与弯管接头的输种管组合的混种部件输种性能较优,输种管垂直管段内油菜和小麦各区域种量一致性变异系数分别为 9.63% 和 13.43%。利用智能种植机械测试平台开展较优组合的混种部件对排种性能影响试验,结果表明:油菜种子倒流率低于 3.2%,无种子逆流,小麦种子无倒流和逆流;油菜和小麦各行排量一致性变异系数分别低于 5% 和 3.9%,总排量稳定性变异系数分别低于 1.15% 和 1.35%,满足油菜和小麦排种性能要求,可为气送式集排器混种部件的结构改进提供参考。

关键词: 油麦兼用; 气送式集排器; 混种部件; 文丘里混种室; DEM - CFD

中图分类号: S223.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0068-12 OSID: 

Design and Test on Mixing Component of Air-assisted Centralized Metering Device for Rapeseed and Wheat

WANG Lei^{1,2} LIAO Yitao^{1,2} WAN Xingyu^{1,2} WANG Baoshan^{1,2} HU Qiaolei^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problem that the pressure gradient change direction in mixing component does not match with seed conveying direction during seeding process, causing backflow and counterflow of seeds, which leads to each row seeding uniformity of centralized metering lower, a prototype of mixing component based on Venturi principle was developed. The main structure and key parameters of the Venturi mixing seed chamber and conveying seed tube were determined. The effects of airflow velocity, seed velocity, and structure of mixing component on total pressure loss were analyzed. The DEM - CFD coupled simulation was used to compare and analyze the effects of three kinds of conveying seed tube and two kinds of Venturi mixing seed chamber on seed migration trajectory, airflow pressure distribution and conveying seed performance. The simulation results showed that the combination of Venturi mixing seed chamber with accelerating mixing section and the conveying seed tube with elbow joint had better conveying seed performance, and the variation coefficient of seed quantity consistency of each area for rapeseed and wheat in the vertical section of conveying seed tube was 9.63% and 13.43%, respectively. The intelligent test platform for planting machines was used to carry out the test of the effect of better combination of mixing component on the seeding performance. The bench test results indicated that the backflow rate of rapeseed was less than 3.2%, there was no counterflow of rapeseed, and backflow and counterflow of wheat seed. The uniformity variation coefficient of seeding quality of rapeseed and wheat was less than 5% and 3.9%, respectively. The stability variation coefficient of total seeding quality of

收稿日期: 2021 - 03 - 05 修回日期: 2021 - 04 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229)、财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系项目(CARS - 12)、湖北省科技厅农业科技自主创新行动项目和中国博士后科学基金项目(2021M701340)

作者简介: 王磊(1988—),男,博士后,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail: wangchong12356@126.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

rapeseed and wheat was less than 1.15% and 1.35%, respectively, which met the performance requirements of rapeseed and wheat seeding. The research can provide a reference for the structure improvement of the mixing component of air-assisted centralized metering device.

Key words: rapeseed and wheat; air-assisted centralized metering device; mixing component; Venturi mixing seed chamber; DEM – CFD

0 引言

气送式排种技术适应作物种类多,可高速、高效排种^[1-2],提高宽幅作业时各行排量一致性,已成为国内外大型播种机排种技术发展趋势^[3-5]。长江中下游及新疆地区油菜及小麦播期毗邻,机械化播种工序相似^[6-7],应用气送式播种机可提高生产效率,降低作业成本。不同种植区域、播期及作业速度下油菜和小麦播种量变化显著,油菜和小麦种子尺度差异明显,且种箱、供种装置及混种部件间区域不与外界大气压联通,导致气送式串联排种系统中混种部件内因压力梯度变化方向与种子输送方向不匹配,易产生堵塞,种子滞留、倒流及逆向进入进气段中的问题^[8],影响输种管中种子分布规律^[9],降低气送式集排器排种一致性和稳定性。

气送式排种系统通过多串并联环节组合实现连续、稳定、有序种子流与气流混合及输送,国内外学者为提高气送式排种系统排种性能,对排种过程串并联环节开展了多维度深入研究。为探究风机压力和流速对气送式排种系统压损和排种性能的影响,通过分析排种系统中气流与种子的互作关系,建立压损对排种过程各串联环节影响的预测模型^[10];设计倾斜抛物线形型孔^[11]、外切圆弧形型孔、锥柱形型孔^[12],增加错排搅种部件,提高供种装置供种稳定性,并运用 EDEM 仿真分析侧向与前后倾斜对供种稳定性的影响^[13];应用 DEM – CFD 耦合仿真分析输种管道直径、长度、横纵管道长度对种子运动特性和气流场分布的影响^[14],开展波纹管、褶皱增压管的长度、气流压力、流速对分配均匀性影响的分析^[15-16];对比分析分配装置不同腔室结构、分配盖形式、排种口直径对各行排量一致性及输送气流速度的影响^[17];探究输送气流速度、导种管材料与结构、排种口堵塞对排种稳定性的影响^[18]。综上,针对不同作业工况对气送式排种系统排种性能的影响及气送式排种系统的结构改进优化开展了深入的研究,但针对文丘里混种室结构,以及文丘里混种室与输种管组合对种子迁移轨迹和种子分布一致性影响的研究较少,制约了气送式排种系统排种性能的提高。

针对油麦兼用型气送式集排器排种过程中混种部件内压力梯度变化方向与种子输送方向不匹配,

造成种子倒流和逆流,降低集排器各行排量一致性的问题,设计一种基于文丘里原理的混种部件。应用 DEM – CFD 耦合对比分析不同文丘里混种室与输种管组合的 6 种混种部件对种子和输送气流分布规律的影响,通过仿真和台架试验确定较优的文丘里混种室与输种管组合,为气送式集排器混种部件的结构改进提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

气送式排种系统主要由风机、种箱、供种装置、混种部件、分配装置、排种口、导种管、播种开沟器等组成,结构如图 1 所示。

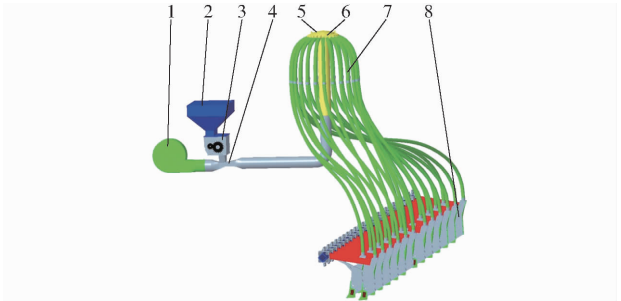


图 1 气送式排种系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of air-assisted metering system

1. 风机 2. 种箱 3. 供种装置 4. 混种部件 5. 分配装置 6. 排种口 7. 导种管 8. 播种开沟器

混种部件主要由文丘里混种室和输种管组成,文丘里混种室主要由进气段、渐缩段、进种段、混合段、延伸段、扩散段等组成,混种部件装置结构如图 2 所示。

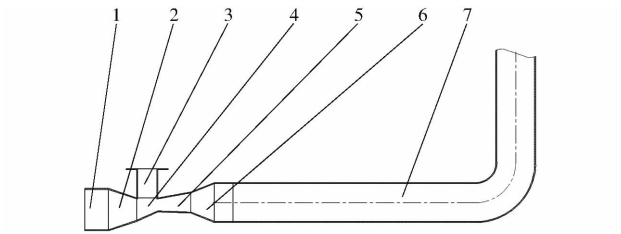


图 2 混种部件结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of mixing component

1. 进气段 2. 渐缩段 3. 进种段 4. 混合段 5. 延伸段 6. 扩散段 7. 输种管

1.2 工作过程及工作原理

气送式排种系统排种过程中,种子由种箱经供种装置、进种段进入混合段,风机产生的输送气流经

进气段、渐缩段与种子在混合段混合,种子和高速气流在延伸段内进一步混合均匀后流向扩散段,经水平输种管段由弯管接头在垂直输种管段中螺旋上升运动,两相流通过分配装置由排种口经导种管排出进入播种开沟器,完成排种过程。

根据伯努利定律,风机产生的输送气流通过渐缩段时,由于渐缩段截面不断减小,输送气流的静压转变为空气的动压,空气速度不断增加;高速输送气流进入混合段后,混合段压力降低,种子在自身重力和负压吸力作用下进入混合段,在输送气流的作用下种子速度由垂直方向转变为水平方向,气流裹挟种子经延伸段进入扩散段,基于延伸段、扩散段截面逐渐增大,输送气流速度逐渐降低,静压升高,种子在水平输种管段中输送气流作用下速度不断增加至稳定运动,经弯管接头速度变为垂直方向加速运动至速度稳定。由于种箱、供种装置、混种部件间的形成区域不与外界大气压联通,易造成进种段压力低于混合段压力,导致种子滞留、倒流入供种装置及逆向进入进气段中的问题。

2 混种部件设计与分析

2.1 输种管

输种管是保证种子与输送气流两相流在气送式串联排种系统中稳定连续输送的重要部件,可影响输送气流的压力分布和压力损失,并影响种子在混种部件中的分布规律。根据油麦兼用型气送式免耕播种机作业效率要求,播种机作业幅宽为 4.8 m、作业速度为 6~12 km/h,播种行数为 24。结合长江中下游及新疆地区油菜和小麦种植农艺要求,输种管中单位时间内油菜和小麦输送质量分别为 3~12 g/s、120~360 g/s,输种管内种子相对浓度计算式为

$$m_i = \frac{4q}{\pi D^2 \rho_a v_i} \tag{1}$$

式中 D ——输种管内径,mm
 m_i ——输种管内种子相对浓度
 q ——输种管中单位时间种子输送质量,g/s
 ρ_a ——输送气流密度,取 1.29 kg/m³
 v_i ——输种管内输送气流速度,m/s
由式(1)可得输种管内径计算式为

$$D = 2 \left(\frac{q}{\pi m_i \rho_a v_i} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

根据式(2)可知,输种管内径与单位时间种子输送质量成正比,与种子相对浓度、输送气流密度、输送气流速度成反比。基于气送式排种系统种子输送特性,采用低压稀相输送方式,种子相对浓度应小于 10^[19]。实际田间播种作业,输种管中单位时间

小麦种子输送质量及所需输送气流速度高于油菜种子输送,以小麦高速播种时单位时间最大种子输送质量为 360 g/s,小麦种子输送气流速度为 18~30 m/s,种子相对浓度取 3,代入式(2)计算得输种管内径应大于 80.42 mm。

综合考虑输种管的实际加工及与进气段的匹配关系,并满足低压稀相输送要求,确定输种管内径为 81 mm。

为对比分析 3 种不同结构输种管对种子迁移轨迹的影响,设计弯管接头、折弯管接头、倾斜弯管接头的输种管,结构如图 3 所示。种子低压稀相输送过程中,输种管长度一般不超过 2 m,结合播种机整体结构布局,确定 3 种结构输种管中水平管段入口至垂直管段中心的距离 h_i 均取 675 mm,输种管中垂直管段出口至水平管段中心的距离 l_i 均取 650 mm,弯曲段的弯曲半径 R_i 均取 85 mm,以满足在相同水平管段和垂直管段距离、弯曲段半径下对比分析不同结构输种管对输种性能的影响。

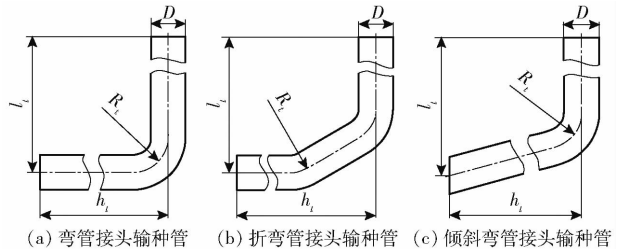


图 3 3 种输种管结构示意图

Fig. 3 Structural diagrams of conveying tube

2.2 渐缩段

渐缩段的截面结构影响输送气流的速度、压力及流量变化,渐缩段截面不断减小,提高了输送气流速度,为混合段内种子的有效输送提供气动力,渐缩段结构如图 4 所示。

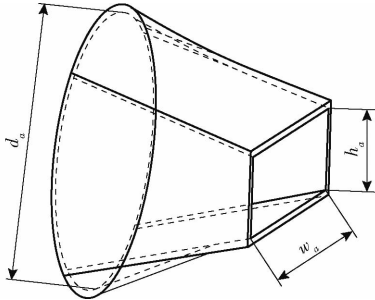


图 4 渐缩段结构示意图

Fig. 4 Sketch of tapered section

为保证输送气流经文丘里混种室后两相流速度的稳定性,渐缩段入口内径 d_a 应大于输种管内径。综合考虑渐缩段与风机管道及进气段内径的匹配性,确定渐缩段入口直径为 85 mm,则渐缩段入口处输送气流浓度为

$$m_a = \frac{\pi d_a^2 \rho_a v_a}{4} \quad (3)$$

式中 m_a ——渐缩段入口输送气流浓度, kg/s

v_a ——渐缩段入口输送气流速度, 18 ~ 30 m/s

由式(3)可得渐缩段入口输送气流浓度为 0.13 ~ 0.22 kg/s。

渐缩段出口结构根据文丘里混种室中输送气流速度及种子粒径范围确定为收缩式, 渐缩段出口当量内径计算式^[20]为

$$d_i = 640 \sqrt{\frac{m_a}{\pi \sqrt{\frac{2\gamma p_a \rho_a}{\gamma - 1} \left(\frac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}}} \quad (4)$$

式中 d_i ——渐缩段出口当量内径, mm

p_a ——渐缩段入口压力, kPa

p_b ——渐缩段出口压力, 取 101.33 kPa

γ ——气体常数, 取 1.4

由式(4)可知, 渐缩段出口当量内径与输送气流速度、渐缩段入口与出口压力相关。为满足宽幅高速播种作业中油麦兼用排种要求, 选用奥迪博田 Terrasem C4 Fertilizer 型风机, 渐缩段入口压力为 58 kPa, 代入式(4)可得渐缩段出口当量内径为 37.3 ~ 48.49 mm。

为提高混种部件内种子分布均匀性, 减少种子输送过程中仅沿混种部件壁面运动, 渐缩段出口截面确定为矩形。以渐缩段圆形出口截面和矩形出口截面输送气流速度和摩擦阻力相等为依据, 渐缩段出口截面的宽度和高度与当量内径的关系方程为

$$d_i = \frac{2w_a h_a}{w_a + h_a} \quad (5)$$

式中 w_a ——渐缩段出口截面宽度, mm

h_a ——渐缩段出口截面高度, mm

结合式(4)、(5)可得渐缩段出口截面的宽度为 60 ~ 72 mm、高度为 26 ~ 46 mm 时, 满足渐缩段出口截面当量内径要求。

渐缩段长度影响输送气流速度和压力梯度变化, 渐缩段长度与渐缩段入口、出口截面的关系式为

$$6(d_a - d_i) \leq l_a \leq 7(d_a - d_i) \quad (6)$$

由式(6)可得渐缩段长度为 54.9 ~ 327.74 mm, 综合考虑渐缩段结构、压损及文丘里混种室总体结构, 确定渐缩段长度为 60 mm。

2.3 混合段

混合段结构主要影响种子的迁移轨迹, 为对比分析不同结构混合段对种子倒流及逆向进入进气段中的影响, 设计 2 种结构混合段, 如图 5 所示。

根据混合段与渐缩段、进种段的连接关系, 采用

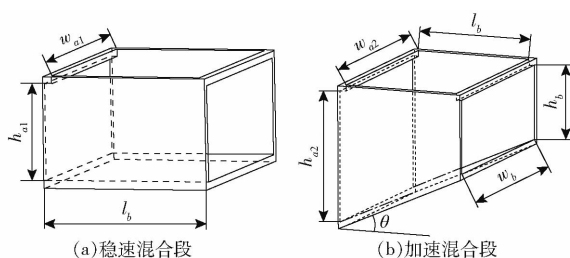


图 5 混合段结构示意图

Fig. 5 Structural diagrams of mixing section

稳速混合段时, 输送气流速度在渐缩段出口达到最大值, 且在稳速混合段内保持最大速度与种子混合; 采用加速混合段时, 输送气流在混合段内保持加速状态与种子混合, 2 种混合段中种子速度均由垂直于输送气流速度方向改变为与输送气流速度同向。

为满足低压稀相输送方式, 且提高混合段内输送气流速度, 在满足渐缩段出口处当量内径要求下, 结合式(1)、(5)确定稳速混合段的宽度 w_{a1} 为渐缩段出口截面宽度范围的中间值, 取 66 mm, 以实现输送气流的平稳过渡, 高度 h_{a1} 为渐缩段出口截面高度的最小值, 取 26 mm, 以提高输送速度及输送能力; 加速混合段入口宽度 w_{a2} 为渐缩段出口截面宽度范围的中间值, 取 66 mm, 高度 h_{a2} 为渐缩段出口截面高度的最大值, 取 46 mm, 出口高度 h_b 为渐缩段出口截面高度的最小值, 取 26 mm, 以实现加速混合段速度梯度变化最大。

加速混合段的输送气流加速梯形角影响输送气流的速度、压力及输送气流与种子混合区域范围, 为减少种子速度方向变换时对混合段壁面的碰撞, 输送气流加速梯形角应大于 23° ^[21], 则加速混合段长度约束方程为

$$l_b \leq \frac{h_{a2} - h_b}{\tan \theta} \quad (7)$$

式中 l_b ——加速混合段长度, mm

θ ——加速梯形角, ($^\circ$)

由式(7)可得加速混合段长度应小于 47.18 mm。综合考虑文丘里混种室与供种装置安装匹配性, 并保证种子与输送气流有效混合长度, 确定稳速混合段和加速混合段长度均为 45 mm。

2.4 延伸段

输送气流与种子在延伸段内进一步混合, 气固两相流的动能降低, 压力升高, 以克服混种部件中的阻力。影响延伸段的主要结构为延伸段的长度和延伸角, 延伸段结构如图 6 所示。

为降低气固两相流动能转化为压力能损失, 延伸段的延伸角一般取 $2^\circ \sim 10^\circ$ ^[22]。气送式排种系统气固两相流输送过程由水平输送转变为垂直输送时根据气固两相流输送特性, 水平输送过程中种子主

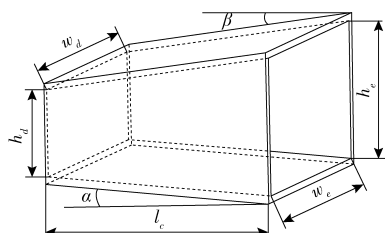


图6 延伸段结构示意图

Fig.6 Structural diagram of extension section

要在输种管底部运动。为提高输送过程中种子分布的均匀性,延伸段上延伸角 β 应大于下延伸角 α ,且延伸段延伸角应小于渐缩段收缩角,以提高输种管中种子分布均匀性,综合考虑延伸角的约束条件,确定上延伸角为 10° 、下延伸角为 2° 。

延伸段的长度主要由延伸角及延伸段出口当量内径确定,延伸段长度关系方程为

$$\begin{cases} 6(d_c - d_b) \leq l_c \leq 8.5(d_c - d_b) \\ d_i \leq d_c \leq D \\ d_c = \frac{2w_e h_e}{w_e + h_e} \\ d_b = \frac{2w_d h_d}{w_d + h_d} \\ h_e = h_d + l_c(\tan\alpha + \tan\beta) \end{cases} \quad (8)$$

式中 l_c ——延伸段长度,mm

d_c ——延伸段出口当量内径,mm

d_b ——延伸段入口当量内径,mm

w_d ——延伸段入口宽度,mm

h_d ——延伸段入口高度,mm

w_e ——延伸段出口宽度,mm

h_e ——延伸段出口高度,mm

由式(8)可得延伸段长度为

$$6 \left\{ \frac{2w_e [h_d + l_c(\tan\alpha + \tan\beta)]}{w_e + h_d + l_c(\tan\alpha + \tan\beta)} - \frac{2w_d h_d}{w_d + h_d} \right\} \leq l_c \leq 8.5 \left\{ \frac{2w_e [h_d + l_c(\tan\alpha + \tan\beta)]}{w_e + h_d + l_c(\tan\alpha + \tan\beta)} - \frac{2w_d h_d}{w_d + h_d} \right\} \quad (9)$$

由式(9)可知,延伸段长度主要与延伸段入口的宽度和高度、延伸段出口的宽度和高度、延伸段的上延伸角和下延伸角相关。延伸段出口当量内径应小于输种管内径,当延伸段出口宽度与入口宽度相同时,延伸段出口高度为26~81 mm,结合式(8)、(9),根据延伸段长度与出口高度的约束条件,确定延伸段长度为70 mm、出口高度为40 mm。

2.5 进种段及扩散段

进种段连接供种装置与混合段,结构如图7所示。进种段结构由供种装置和混合段确定,根据供种装置结构,确定进种段入口长度 l_m 和宽度 w_m 分别为160、41 mm;基于混合段与进种段出口连接尺寸,

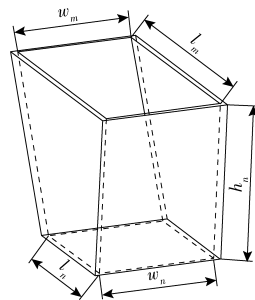


图7 进种段结构示意图

Fig.7 Structural diagram of importing section

确定进种段出口长度 l_n 和宽度 w_n 分别为66、41 mm。进种段高度影响进种段中的压力分布和种子垂直下落的速度。进种段高度越大,种子下落的垂直速度越大,输送气流输送种子的压力损失越大;若进种段高度偏小,进种段中压力分布不均,易造成种子倒流,综合考虑种子迁移轨迹和压力损失,确定进种段高度为60 mm。

扩散段可提高气固两相流的均匀混合,实现气固两相流的速度和压力平稳渐变,扩散段入口结构尺寸与延伸段出口结构尺寸相同,扩散段出口直径与输种管内径相同,扩散段长度取50 mm。

2.6 混种部件结构对关键参数的影响

混种部件结构主要影响输送气流的压力损失,混种部件压力损失主要由文丘里混种室压力损失、水平输种管段压力损失、垂直输种管段压力损失、水平输种管段与垂直输种管段弯管连接处压力损失组成。

2.6.1 文丘里混种室对总压损的影响

以混合段为加速混合段的文丘里混种室为例,输送气流速度、压力及种子速度变化如图8所示。

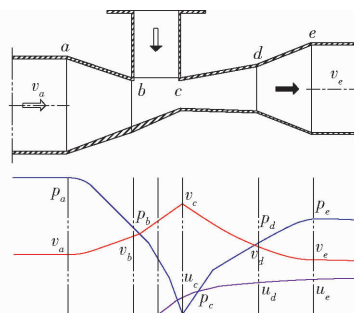


图8 输送气流速度和压力变化示意图

Fig.8 Change of velocity and pressure of conveying airflow

根据伯努利方程,可得渐缩段、混合段、延伸段、扩散段各截面间的压力降方程。

渐缩段入口与出口间压力降方程^[23]为

$$\begin{cases} \Delta p_{ab} = p_a - p_b \\ p_a + \frac{\rho_a v_a^2}{2} = p_b + \frac{\rho_b v_b^2}{2} + \zeta_{ab} \frac{\rho_a v_a^2}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 Δp_{ab} ——渐缩段入口与出口间压力降,Pa

v_b ——渐缩段出口输送气流速度, m/s

ζ_{ab} ——渐缩段的压损系数

由式(10)可得输送气流经渐缩段的压力降为

$$\Delta p_{ab} = \frac{\rho_a (v_b^2 - v_a^2)}{2} + \zeta_{ab} \frac{\rho_a v_a^2}{2} \quad (11)$$

混合段入口与出口间压力降方程为

$$\begin{cases} \Delta p_{bc} = p_b - p_c \\ p_b + \frac{\rho_a v_b^2}{2} = p_c + \frac{\rho_a v_c^2}{2} + \zeta_{bc} \frac{\rho_a v_b^2}{2} + \Delta p_{sc} \\ \Delta p_{sc} = \lambda_c \rho_a u_c v_b \end{cases} \quad (12)$$

式中 Δp_{bc} ——混合段入口与出口间压力降, Pa

p_c ——混合段出口压力, Pa

v_c ——混合段出口输送气流速度, m/s

ζ_{bc} ——混合段的压损系数

Δp_{sc} ——混合段内种子流动的加速压损, Pa

λ_c ——混合段内种子与输送气流的流量比

u_c ——混合段出口种子速度, m/s

由式(12)可得输送气流经混合段的压力降为

$$\Delta p_{bc} = \frac{\rho_a (v_c^2 - v_b^2)}{2} + \zeta_{bc} \frac{\rho_a v_b^2}{2} + \lambda_c \rho_a u_c v_b \quad (13)$$

延伸段入口与出口间压力降方程为

$$\begin{cases} \Delta p_{cd} = p_d - p_c \\ p_c + \frac{\rho_a v_c^2}{2} = p_d + \frac{\rho_a v_d^2}{2} + \zeta_{cd} \frac{\rho_a v_c^2}{2} + \Delta p_{sd} \\ \Delta p_{sd} = \lambda_d \rho_a u_d v_c \end{cases} \quad (14)$$

式中 Δp_{cd} ——延伸段入口与出口间压力降, Pa

p_d ——延伸段出口压力, Pa

v_d ——延伸段出口输送气流速度, m/s

ζ_{cd} ——延伸段的压损系数

Δp_{sd} ——延伸段内种子流动的加速压损, Pa

λ_d ——延伸段内种子与输送气流的流量比

u_d ——延伸段出口种子速度, m/s

由式(14)可得输送气流经延伸段的压力降为

$$\Delta p_{cd} = \frac{\rho_a (v_d^2 - v_c^2)}{2} + \zeta_{cd} \frac{\rho_a v_c^2}{2} + \lambda_d \rho_a u_d v_c \quad (15)$$

扩散段入口与出口间压力降方程为

$$\begin{cases} \Delta p_{de} = p_e - p_d \\ p_d + \frac{\rho_a v_d^2}{2} = p_e + \frac{\rho_a v_e^2}{2} + \zeta_{de} \frac{\rho_a v_d^2}{2} + \Delta p_{se} \\ \Delta p_{se} = \lambda_e \rho_a u_e v_d \end{cases} \quad (16)$$

式中 Δp_{de} ——扩散段入口与出口间压力降, Pa

p_e ——扩散段出口压力, Pa

v_e ——扩散段出口输送气流速度, m/s

ζ_{de} ——扩散段的压损系数

Δp_{se} ——扩散段内种子流动的加速压损, Pa

λ_e ——扩散段内种子与输送气流的流量比

u_e ——扩散段出口种子速度, m/s

由式(16)可得输送气流经扩散段的压力降为

$$\Delta p_{de} = \frac{\rho_a (v_e^2 - v_d^2)}{2} + \zeta_{de} \frac{\rho_a v_d^2}{2} + \lambda_e \rho_a u_e v_d \quad (17)$$

结合式(10)~(17)可得文丘里混种室中的总压损为

$$\Delta p_{ae} = \frac{\rho_a (v_e^2 - v_a^2 + \zeta_{ab} v_a^2 + \zeta_{bc} v_b^2 + \zeta_{cd} v_c^2 + \zeta_{de} v_d^2)}{2} + \rho_a (\lambda_c u_c v_b + \lambda_d u_d v_c + \lambda_e u_e v_d) \quad (18)$$

式中 Δp_{ae} ——文丘里混种室的总压损, Pa

由式(18)可知,文丘里混种室的总压损与各部件的压损系数、种子与输送气流的流量比、出口的输送气流及种子速度正相关,与渐缩段入口输送气流速度负相关;文丘里混种室结构一定时,种子与输送气流的流量比越大,文丘里混种室的总压损越大,表明输送种子的量越大,对气送式排种系统风机的气压和输送气流速度要求越高。

2.6.2 输种管对总压损的影响

根据低压稀相输送中种子与输送气流的分布特性,输种管中直管段的总压损方程^[24]为

$$\Delta p_{ji} = \frac{\rho_a (v_i^2 - v_j^2)}{2} + \frac{\rho_a (u_i^2 - u_j^2)}{2} + \Delta p_g + \Delta p_f + \Delta p_s + \Delta p_k \quad (19)$$

式中 Δp_{ji} ——直管段的总压损, Pa

v_i ——直管段入口输送气流速度, m/s

v_j ——直管段出口输送气流速度, m/s

ρ_a ——直管段内种子密度, kg/m³

u_i ——直管段入口种子速度, m/s

u_j ——直管段出口种子速度, m/s

Δp_g ——种子重力引起的压损, Pa

Δp_f ——种子与管壁冲击和摩擦的压损, Pa

Δp_s ——种子间的摩擦和碰撞的压损, Pa

Δp_k ——输送气流流动的压损, Pa

由式(19)可知,输种管中直管段的总压损主要与输送气流加速引起的动能增量、种子加速引起的动能总量、物料运动引起的附加压损、输送气流流动压损有关。输种管中直管段,动能增量压损占系统压损的比例较小,输送气流流动压损一般为固定值,则种子运动引起的附加压损为直管段的主要压损。

为实现输种管的输送功能,输种管中两相流由水平输送变为垂直输送过程中需经弯管输送,弯管的总压损计算式为

$$\Delta p_w = \frac{\pi R_t \lambda_w \rho_a v_w^2 (\varepsilon_a + \varepsilon_s + \varepsilon_g)}{4D} \quad (20)$$

式中 Δp_w ——弯管段的总压损, Pa

λ_w ——弯管内种子与输送气流的流量比

ε_a ——弯管内种子加速压损系数
 ε_s ——弯管内种子对管壁冲击和摩擦的压损系数
 ε_g ——弯管内重力压损系数
 v_w ——弯管内输送气流速度,m/s

由式(20)可知,输种管中弯管段的总压损与弯管的弯曲半径、弯管内种子与输送气流的流量比、弯管内种子加速压损系数、弯管内种子对管壁冲击和摩擦的压损系数、弯管内重力压损系数、弯管内输送气流速度正相关,与弯管的内径负相关。弯管结构一定时,种子与输送气流的流量比越大,弯管的总压损越大。

基于对输种管总压损的分析,表明输种管的结构、输送气流的速度、输送种子的流量、种子品类均会对输种管的总压损造成影响。

3 仿真试验

为对比分析不同结构混种部件对种子和输送气流分布规律的影响,应用 DEM – CFD 耦合仿真分析混合段分别为稳速混合段、加速混合段的文丘里混种室与弯管接头、折弯管接头、倾斜弯管接头的输种管组成的混种部件对输送气流压力梯度、种子分布一致性及迁移轨迹的影响。

3.1 模型建立

应用 EDEM 2018 和 ANSYS Fluent 17.0 软件开展混种部件中输送气流和种子耦合仿真,采用四面体非结构化方法自动划分混种部件网格,仿真与接触参数如表 1 所示。气送式排种系统排种过程中供种装置为密封结构,进种段入口不与外界大气相通,仿真模型中根据供种装置结构,在进种段上端连接简化的供种装置气流场,进种段入口设置为种子入口,进气段入口设为输送气流入口,输种管中垂直管段出口设置为输送气流和种子出口,仿真模型如图 9 所示。

3.2 试验方法

基于油菜和小麦种子不同机械物理特性参数和悬浮速度,设置油菜和小麦种子入口输送气流速度分别为 20、24 m/s^[25]。实际播种作业中,种子由供种装置的型孔中脱离落入进种段过程中,种子垂直方向为匀加速运动,结合种子脱离型孔的切向速度及种子脱离型孔运动至进种口的距离,设置种子初速度方向为垂直向下,速度为 0.12 m/s。

为保证混种部件内油菜及小麦种子流量满足油菜兼用型气送式免耕播种机实际播量需求,计算确定进种段入口生成油菜及小麦种子分别为 1 000、3 000 粒/s,种子生成时间为 8 s,总仿真时长为 10 s,

表 1 仿真与接触参数

Tab.1 Parameters of simulation and contact		
项目	参数	数值
EDEM	油菜仿真时间步长/s	5×10^{-6}
	小麦仿真时间步长/s	2×10^{-6}
	保存间隔时间/s	0.01
	重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.81
CFD	时间步长/s	1×10^{-4}
	保存间隔时间/s	0.1
	输送气流密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.29
	输送气流粘性系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	1.7894×10^{-5}
油菜种子	油菜种子粒径/mm	2
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 060
小麦种子	小麦种子尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	$6 \times 3 \times 3$
	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	5.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 350
混种部件 (ABS)	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
油菜种子-	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 060
	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.50
油菜种子	动摩擦因数	0.01
小麦种子-	恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.35
小麦种子	动摩擦因数	0.015
油菜种子-	恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.30
混种部件	动摩擦因数	0.01
小麦种子-	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.40
混种部件	动摩擦因数	0.05



图 9 混种部件仿真模型

Fig.9 Simulation model of mixing component

1. 输送气流入口 2. 供种装置气流场 3. 种子入口 4. 输送气流和种子出口

观测混种部件中倒流回进种段及逆流入进气段的种量,计算种子倒流及逆流率。截取仿真时间为 3、4、5、6、7 s 时,输种管中距离垂直管段出口为 50 mm、高度为 250 mm 内的种子,将种子分布图截面分成 4 个区域,计算输种管垂直管段内各区域种量一致性变异系数;分别统计仿真时间为 3、4、5、6、7 s 时,截面高度内的种子数量,计算输种管垂直管段内各时

刻输种稳定性变异系数。

种子倒流率计算式为

$$k_q = \frac{m_q}{n_q} \times 100\% \tag{21}$$

式中 m_q ——倒流回进种段和供种装置流场中的种子质量, g

n_q ——仿真时段生成的种子质量, g

种子逆流率计算式为

$$k_e = \frac{m_e}{n_q} \times 100\% \tag{22}$$

式中 m_e ——逆流进入渐缩段中的种子质量, g

各区域种量一致性变异系数计算式为

$$V_q = \frac{S_q}{X_q} \times 100\% \tag{23}$$

式中 S_q ——各区域种量标准差, g

X_q ——各区域种量平均值, g

各时刻输种稳定性变异系数计算式为

$$V_e = \frac{S_e}{X_e} \times 100\% \tag{24}$$

式中 S_e ——各时刻种量标准差, g

X_e ——各时刻种量平均值, g

3.3 结果分析

根据 DEM - CFD 气固耦合仿真中 2 种混合段和 3 种输种管组成的 6 种结构混种部件输出的种子迁移轨迹和输送气流分布规律, 可得油菜和小麦种子在混种部件中的流线如图 10、11 所示, 输送气流气压分布如图 12、13 所示。

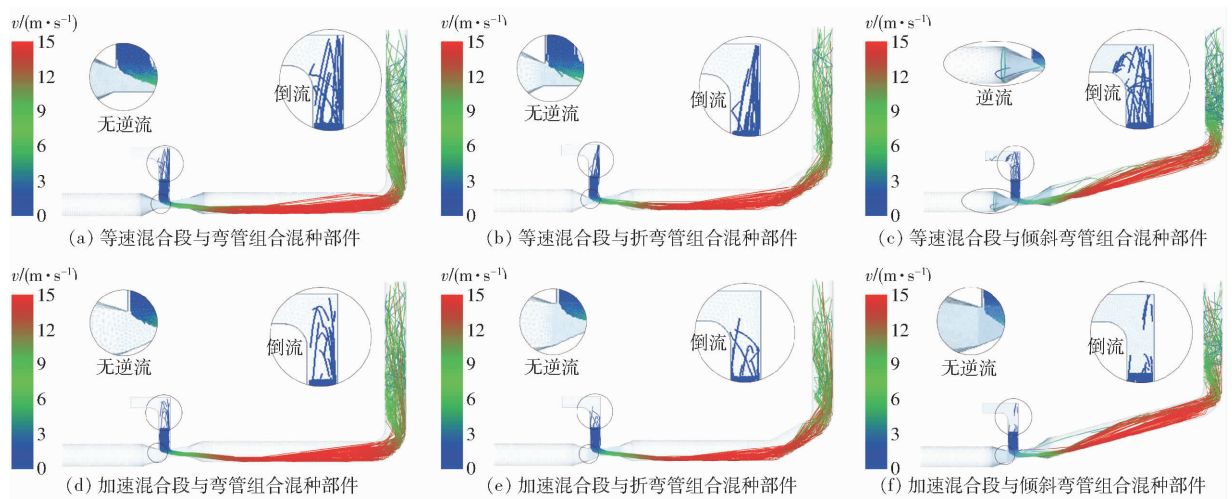


图 10 6 种结构混种部件内油菜种子流线图

Fig. 10 Diagrams of rapeseed streamline in mixing component

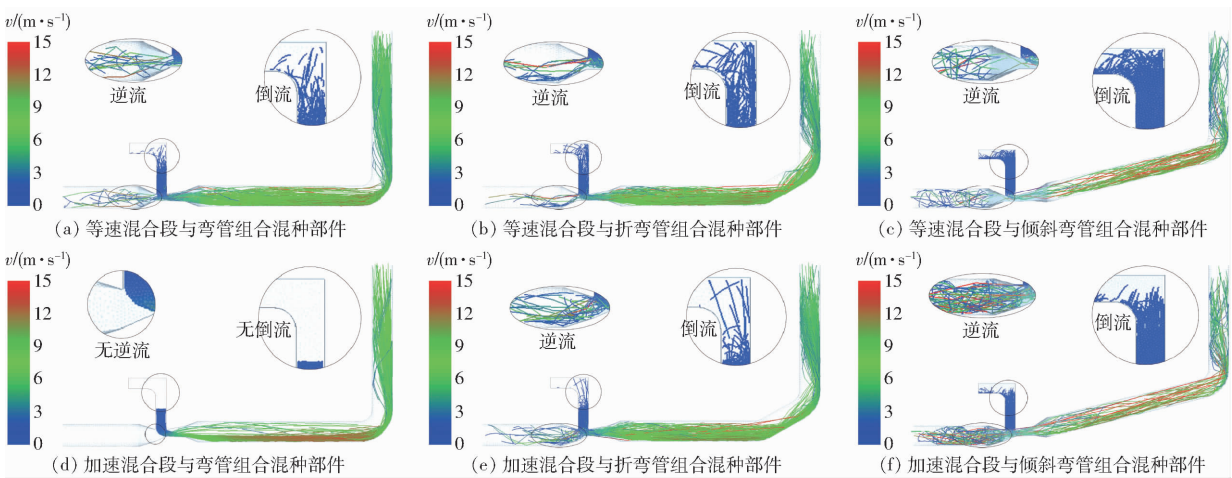


图 11 6 种结构混种部件内小麦种子流线图

Fig. 11 Diagrams of wheat seed streamline in mixing component

3.3.1 混种部件结构对种子迁移轨迹的影响

由图 10、11 可知, 油菜输送过程中, 不同混种部件内均有少量种子倒流回进种段和供种装置流场中, 且等速混合段与倾斜弯管组合混种部件内有少

量种子逆流进入进气段中。小麦种子输送过程中, 混种部件混合段为加速混合段, 输种管接头为弯管时, 混合段内无种子倒流和逆流现象。基于 6 种结构混种部件中种子迁移轨迹分析, 当输种管的弯管

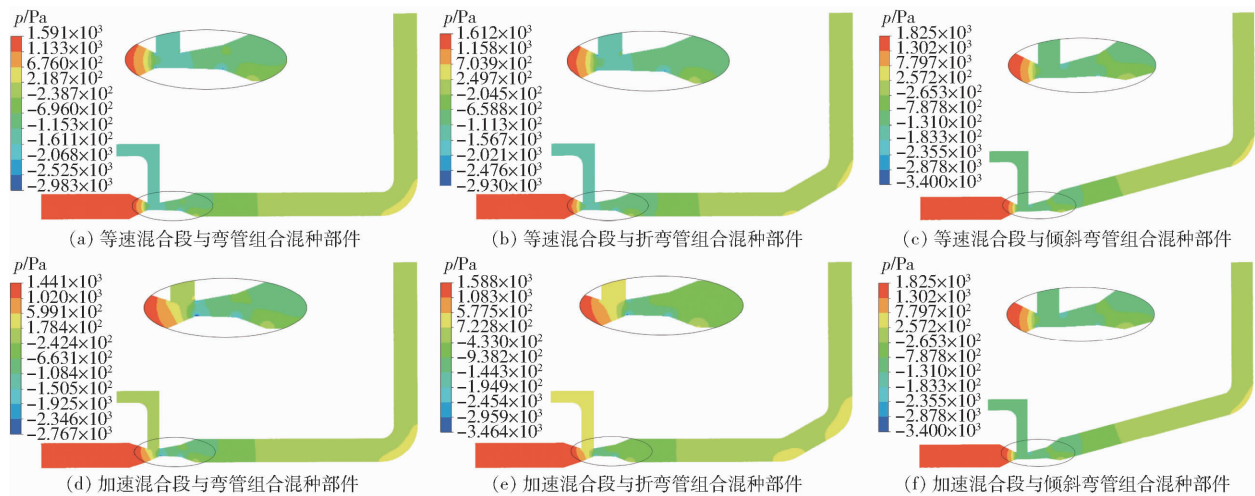


图 12 6 种结构混种部件内油菜输种时输送气流气压分布图

Fig. 12 Diagrams of conveying airflow distribution in mixing component using for conveying rapeseed

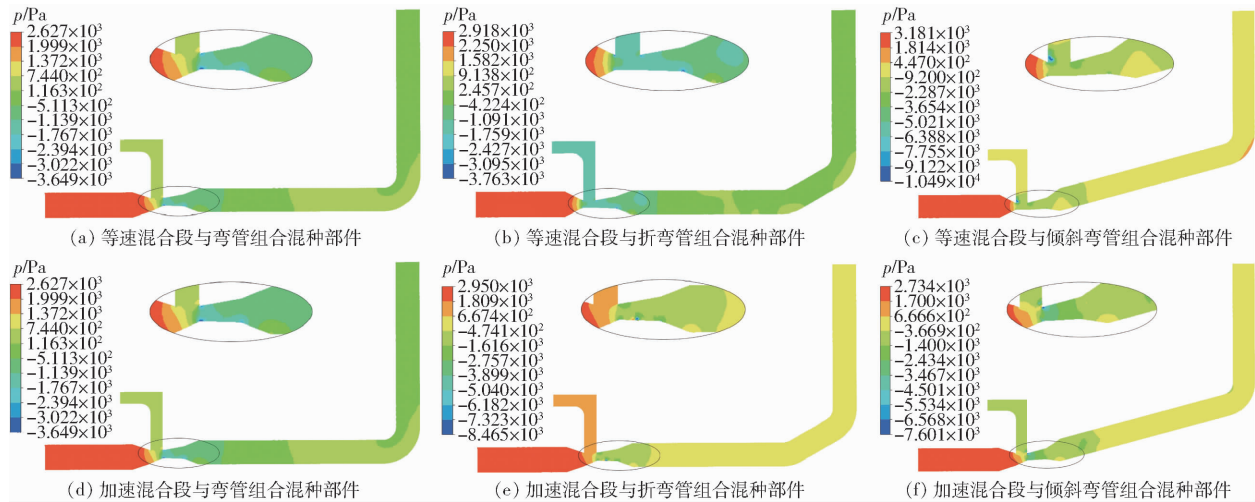


图 13 6 种结构混种部件内小麦输种时输送气流气压分布图

Fig. 13 Diagrams of conveying airflow distribution in mixing component using for conveying wheat seed

接头相同时,油菜和小麦种子经由 2 种结构混合段输送过程中,种子在输种管中的速度和迁移轨迹总体趋于一致,且由于油菜种子质量小于小麦种子,油菜种子比小麦种子达到最大速度时的输送距离小。

3.3.2 混种部件结构对输送气流压力分布的影响

由图 12、13 可知,混种部件结构相同时,输送油菜和小麦种子时输送气流气压分布规律总体趋于一致。结合式(18)~(20)可知输送小麦比输送油菜的压损高,且小麦种子输送过程中速度变化率低于油菜种子速度变化率。种子输送过程中,混种部件混合段结构相同时,输种管接头为折弯管和倾斜弯管比输种管接头为弯管的输送气流气压梯度变化和压损大。采用等速混合段的混种部件,进种段和供种装置流场中的负压值大于混合段和延伸段中的负压值,种子易被吸入进种段和供种装置流场中,且由于种子倒流过程中会碰撞文丘里混种室壁面,易造成种子逆流现象;采用加速混合段的混种部件,进种段和供种装置流场中的负压值小于混合段和延伸段

中的负压值,种子易吸入混合段和延伸段中,可减少种子倒流和逆流。采用加速混合段的混种部件输送小麦过程中,接头为折弯管和倾斜弯管的输种管内低压区范围小于接头为弯管的输种管,接头为倾斜弯管的输种管气压分布不均且气压突变明显,则接头为弯管、折弯管、倾斜弯管的输种管内倒流和逆流种量逐渐增加,表明图 12、13 中 6 种结构混种部件内输送气流气压分布规律是影响图 10、11 中种子迁移轨迹的主要原因。

结合混种部件内种子迁移轨迹和输送气流气压分布规律可知,混合段为加速混合段的文丘里混种室与接头为弯管的输种管组成的混种部件内气流分布易于降低种子倒流和逆流。

3.3.3 混种部件结构对输种性能的影响

混种部件输种性能如表 2 所示,以小麦输送过程中截取输种管垂直管段的种子分布为例,种子投影到平面内的种子分布如图 14 所示。结合表 2 和图 14 可知混种部件结构对输种性能的影响。小麦

输送过程中,混种部件倒流及逆流种量越低,各区域种量一致性变异系数和各时刻输种稳定性变异系数总体越小,加速混合段与弯管组合混种部件输种性能较优,输种管垂直管段内各区域种量一致性变异系数为 13.43%、各时刻输种稳定性变异系数为 0.74%。油菜输送过程中,输种管接头为弯管结构

时,各区域种量一致性变异系数较低;各时刻输种稳定性变异系数变化规律与种子倒流及逆流种量的变化规律相同,加速混合段与弯管组合混种部件输种性能较优,输种管垂直管段内各区域种量一致性变异系数为 9.63%、各时刻输种稳定性变异系数为 0.85%。

表 2 混种部件输种性能
Tab.2 Conveying seed performance of mixing component

品种	混种部件结构	各区域种量 平均值/g	各区域种量一致 性变异系数/%	各时刻供种量 平均值/g	各时刻输种稳定 性变异系数/%	种子倒流 率/%	种子逆流 率/%
油菜	等速混合段与弯管组合	9.70	10.31	38.80	1.08	3.31	0
	等速混合段与折弯管组合	9.65	11.18	38.60	1.13	3.19	0
	等速混合段与倾斜弯管组合	9.35	14.33	37.40	1.16	4.87	0.81
	加速混合段与弯管组合	9.85	9.63	39.40	0.85	3.03	0
	加速混合段与折弯管组合	9.55	10.57	38.20	0.95	3.17	0
	加速混合段与倾斜弯管组合	9.20	13.21	36.80	1.05	3.21	0
小麦	等速混合段与弯管组合	26.40	15.13	105.60	2.02	4.32	5.52
	等速混合段与折弯管组合	25.85	15.79	103.40	2.16	6.93	5.18
	等速混合段与倾斜弯管组合	17.05	18.41	68.20	7.59	19.84	17.03
	加速混合段与弯管组合	30.10	13.43	120.40	0.74	0	0
	加速混合段与折弯管组合	26.90	15.62	107.60	1.97	3.68	5.23
	加速混合段与倾斜弯管组合	18.35	18.23	73.40	6.31	13.65	21.85

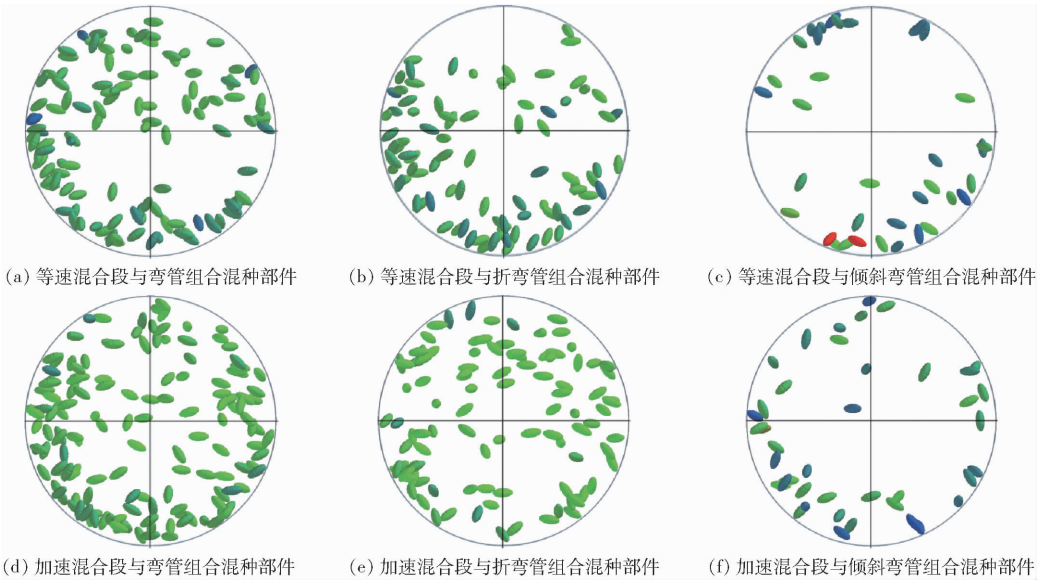


图 14 6 种结构混种部件内小麦种子分布图

Fig.14 Diagrams of wheat seed distribution in mixing component

结合图 10~14,对比 6 种结构混种部件的各区域种量一致性变异系数、各时刻输种稳定性变异系数、种子倒流率及逆流率,加速混合段与弯管组合的混种部件输种性能较优,输送油菜过程中文丘里混种室内种子倒流率为 3.03%,且无种子逆流,输送小麦过程中无种子逆流和倒流。混种部件输种性能受种子迁移轨迹影响,且混合段和输种管结构对小麦种子迁移轨迹和输种性能影响较大;输送油菜过程主要受种子倒流影响,输送小麦过程受倒流和逆

流影响。

4 验证试验

4.1 试验设备

为验证仿真试验的合理性,应用透明材料 3D 打印混合段为加速混合段的文丘里混种室,将混合段为加速混合段和接头为弯管接头的混种部件安装于油麦兼用型气送式免耕播种机,利用智能种植机械测试平台开展安装有加速混合段和弯管接头混种

部件的气送式集排器排种性能试验,试验设备如图 15 所示。该平台通过液压系统控制风机及供种装置的转速,以满足油菜和小麦排种过程中对输送气流速度及种子流量的需求。

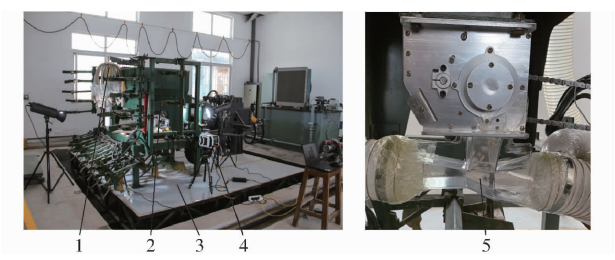


图 15 试验设备

Fig. 15 Test equipment

1. 气送式集排器 2. 油菜兼用型免耕播种机 3. 智能种植机械测试平台 4. 高速摄影仪 5. 混种部件

4.2 试验方案

试验选取油菜品种为华油杂 62,千粒质量为 4.67 g;小麦品种为郑麦 9023,千粒质量为 44.87 g。为满足播种机宽幅高速播种作业时对混种部件内油菜及小麦种子流量的要求,设置供种装置转速为 20~50 r/min,每个水平间隔为 10 r/min,试验过程中供种装置传动轴分别安装 4 和 6 个交错排布型孔轮,试验重复 10 次。每次试验利用高速摄影仪(美

国 Vision Research 公司,型号 Phantom v2640,400 万像素)观测文丘里混种室内是否有种子倒流和逆流现象,文丘里混种室内油菜和小麦种子迁移轨迹如图 16 所示;试验 30s 结束后同时停止风机和供种装置转动,统计导种管中种量并观测文丘里混种室内种子残留量;再次启动风机持续提供输送气流 30 s,观测文丘里混种室内是否仍残留种子,统计再次启动风机 30 s 内输种管中排出种量,计算种子倒流率和逆流率。每次试验统计油菜及小麦种子质量、破损率、各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数,试验结果如表 3 所示。

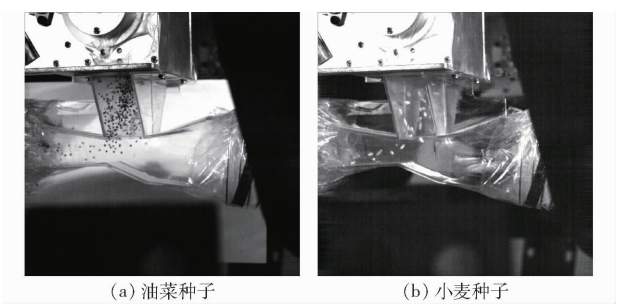


图 16 文丘里混种室内种子迁移轨迹

Fig. 16 Migration trajectory of seeds in Venturi mixing seed chamber

表 3 气送式集排器排种性能试验结果

Tab. 3 Seeding performance test results of air-assisted centralized metering device										
品种	转速/ (r·min ⁻¹)	4 个型孔轮 各行平 均排量/g	6 个型孔轮 各行平 均排量/g	4 个型孔轮各 行排量一致性 变异系数/%	6 个型孔轮各 行排量一致性 变异系数/%	4 个型孔轮总 排量稳定性 变异系数/%	6 个型孔轮总 排量稳定性 变异系数/%	平均 破损 率/%	种子 倒流 率/%	种子 逆流 率/%
油菜	20	3.68	5.63	4.81	4.87	1.05	0.95	0.03	2.95	0
	30	5.84	8.69	4.92	4.73	1.12	1.03	0.02	3.18	0
	40	7.72	11.88	4.96	4.86	0.99	0.98	0.03	3.12	0
	50	10.01	15.67	4.89	4.95	1.02	1.09	0.04	3.05	0
小麦	20	126.95	191.32	3.74	3.82	1.17	1.25	0.01	0	0
	30	198.34	298.15	3.87	3.81	1.29	1.32	0.03	0	0
	40	264.93	397.17	3.64	3.75	1.25	1.19	0.04	0	0
	50	343.02	513.32	3.77	3.69	1.34	1.28	0.04	0	0

4.3 试验结果与分析

由表 3 可知,转速为 20~50 r/min 时,油菜各行排量一致性变异系数均低于 5%、总排量稳定性变异系数均低于 1.15%,小麦各行排量一致性变异系数均低于 3.9%、总排量稳定性变异系数均低于 1.35%,破损率均低于 0.05%,台架试验中油菜和小麦种子总排量稳定性变异系数均高于仿真试验中各时刻输种稳定性变异系数,是由于台架试验中总排量稳定性受供种装置供种稳定性和混种部件输种稳定性共同影响。

通过高速摄影仪观测未见油菜和小麦排种试验中有种子逆流进入进气段内的现象,试验 30 s 结束后同

时停止风机和供种装置转动,文丘里混种室内有少量油菜种子残留,表明排种过程中有油菜种子倒流;再次启动风机持续提供输送气流 30 s,观测文丘里混种室内无种子残留,计算可得油菜排种试验中种子倒流率为 2.95%~3.18%。台架试验油菜种子倒流率与仿真试验种子倒流率的偏差率低于 4.95%,表明仿真试验结果合理可信。综合油菜和小麦排种性能、种子倒流率、逆流率可知,采用加速混合段和弯管接头组合混种部件可满足气送式集排器排种性能要求。

5 结论

(1)设计了一种基于文丘里原理的混种部件,

确定了 6 种混种部件的文丘里混种室和输种管的关键参数,分析确定输种管内径为 81 mm;混种装置结构一定时,种子与输送气流的流量比越大,混种装置的总压损越大,表明输送种子的量越大,对气送式排种系统风机的气压和输送气流速度要求越高。

(2)应用 DEM - CFD 耦合仿真对比分析了 6 种结构混种部件对种子迁移轨迹、输送气流压力分布及输种性能的影响,结果表明:加速混合段的文丘里混种室与弯管的输种管组合的混种部件输种性能较优,输送油菜过程中文丘里混种室内种子倒流率为 3.03%,且无种子逆流,输送小麦过程中无种子逆流

和倒流;输种管垂直管段内油菜和小麦种子各区域种量一致性变异系数分别为 9.63%、13.43%,油菜和小麦种子各时刻输种稳定性变异系数分别为 0.85% 和 0.74%。

(3)利用智能种植机械测试平台开展加速混合段的文丘里混种室与弯管的输种管组合的混种部件对排种性能影响试验,结果表明:供种装置转速为 20 ~ 50 r/min,油菜种子倒流率低于 3.2%,且无种子逆流,小麦种子无倒流和逆流;油菜和小麦种子各行排量一致性变异系数分别低于 5% 和 3.9%、总排量稳定性变异系数分别低于 1.15% 和 1.35%,破损率均低于 0.05%。

参 考 文 献

[1] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):58-67. LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58-67. (in Chinese)

[2] YANG B, MELIKOV A K, KABANSH A, et al. A review of advanced air distribution methods-theory, practice, limitations and solutions[J]. Energy and Buildings, 2019, 202(11): 1-27.

[3] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J]. 农业机械学报,2019,50(11):63-73. WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63-73. (in Chinese)

[4] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "air-seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2020, 168(1): 1-7.

[5] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(13):1-10. YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1-10. (in Chinese)

[6] 王英博,李洪文,王庆杰,等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):73-84. WANG Yingbo, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 73-84. (in Chinese)

[7] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1-14. LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1-14. (in Chinese)

[8] 高筱钧,徐杨,杨丽,等. 基于 DEM - CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):92-100. GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of Venturi feeding tube based on DEM - CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 92-100. (in Chinese)

[9] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9): 120-134.

[10] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1-12.

[11] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):116-124. LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116-124. (in Chinese)

[12] 邢鹤琛. 油麦兼用型槽孔轮式集排系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2019. XING Hechen. Design and experiment on slot wheeled centralized metering system for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[13] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油菜集排器供种装置侧向倾斜排种性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2020,36(19):1-10. WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Experiments and analysis on seeding performance of seed feeding device of rapeseed centralized metering device under lateral tilt[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 1-10. (in Chinese)

[14] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):57-68. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57-68. (in Chinese)