

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.12.012

油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验

廖宜涛^{1,2} 王传奇¹ 施彬彬¹ 王磊¹ 廖庆喜^{1,2} 何凯威¹

(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: 针对气送式排种系统在排种量增大时混种装置内易出现种子回流、堵塞等现象, 导致排种系统高速播种作业适应性较差的问题, 设计了一种突扩文丘里结构的高通量混种装置, 通过理论分析确定了输种管直径、混种区长度、进种入口截面长度等关键结构参数; Fluent 气流场仿真结果表明, 当风速为 12、15、18 m/s 时, 文丘里结构的混种装置喉管处负压最小值分别为 -236、-372、-538 Pa, 突扩文丘里结构的混种装置预混区负压最小值分别为 -396、-621、-1 007 Pa, 突扩文丘里结构产生的“文丘里效应”优于普通文丘里结构; DEM - CFD 耦合仿真结果表明, 在混种过程中突扩文丘里结构的混种装置存在约 12% 油菜种子与突扩文丘里结构延伸部分碰撞后弹跳, 碰撞后种子保持向混种区方向运移, 油菜和小麦均未出现回流、堵塞等现象。台架试验结果表明, 传统文丘里结构的混种装置在油菜混种通量大于等于 2.4 g/s 出现种子回流, 小麦混种通量大于等于 60 g/s 时出现种子回流且各行排量一致性变异系数显著增大、混种通量大于等于 100 g/s 时发生堵塞; 突扩文丘里结构的混种装置在油菜混种通量小于等于 4.8 g/s、小麦混种通量小于等于 120 g/s 时未出现种子回流、堵塞等现象, 油菜、小麦各行排量一致性变异系数低于 5.17%、3.29%, 总排量稳定性变异系数低于 1.19%、0.80%, 可满足油菜、小麦播种机速度为 4~12 km/h 的农艺播量要求, 研究结果为气送式排种系统结构优化提供参考。

关键词: 气送式排种系统; 油麦兼用; 高通量; 混种装置

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0134-13

OSID:



Design and Text of High-throughput Seed Mixing Device for Rapeseed and Wheat with Air-fed Seed Discharging System

LIAO Yitao^{1,2} WANG Chuanqi¹ SHI Binbin¹ WANG Lei¹ LIAO Qingxi^{1,2} HE Kaiwei¹

(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: Aiming at the air-fed seed discharging system in the seed discharging volume increases in the seed mixing device is prone to seed reflux, clogging and other phenomena, resulting in the discharge system of high-speed sowing operation of poor adaptability of the problem, the design of a sudden expansion of the Venturi structure of the high-throughput seed mixing device was done, through the theoretical analysis to determine the diameter of the seed tube, the length of the mixing zone, the length of the cross-section of the seed inlet length of the structure of the key parameters. Fluent airflow field simulation results showed that when the wind speed was 12 m/s, 15 m/s and 18 m/s, the minimum negative pressure at the throat of the seed mixing device with Venturi structure was -236 Pa, -372 Pa and -538 Pa, respectively, and the minimum negative pressure at the pre-mixing area of the seed mixing device with abruptly expanding Venturi structure was -396 Pa, -621 Pa and -1 007 Pa, respectively, and the “Venturi effect” produced by abruptly expanding Venturi structure was better than that of ordinary Venturi structure. The results of DEM - CFD coupled simulation showed that about 12% of rape seeds bounced after collision with the extended part of the Venturi structure, and after collision, the seeds kept moving towards the mixing area, and there was no phenomena of reflux and blockage in both rape and wheat. The results of bench test showed that the seed mixing device of traditional Venturi structure

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)、国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)和湖北省农机装备补短板项目(202310)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

showed seed reflux at the seed mixing flux of oilseed rape greater than or equal to 2.4 g/s, seed reflux at the seed mixing flux of wheat greater than or equal to 60 g/s and the coefficient of variation of the consistency of the rows' displacements were increased significantly, and clogging occurred at the seed mixing flux was greater than or equal to 100 g/s; the seed mixing device of the amplified Venturi structure had seed reflux at the mixing flux of oilseed rape smaller than or equal to 4.8 g/s, wheat seed mixing flux less than or equal to 120 g/s did not appear seed reflux, clogging and other phenomena, oilseed rape, wheat rows discharge consistency coefficient of variation was lower than 5.17%, 3.29%, the total discharge stability coefficient of variation was lower than 1.19%, 0.80%, to meet the oilseed rape, wheat seeding machine can be in the speed of 4 ~ 12 km/h agronomic sowing requirements, the results of the study for the air-fed seeding system structure optimization can provide a reference. The results can provide reference for the optimization of the structure of the air-fed seed discharge system.

Key words: air-fed seed discharging system; rapeseed and wheat; high throughput; seed mixing device

0 引言

油菜和小麦是我国重要的粮油作物,其播种工序相似、播期毗邻,开发油菜、小麦兼用的排种技术对于研发兼用型播种机、提高机具利用率、降低机械化成本投入具有重要意义。气送式排种器以高速气流为载体对种子进行输送分配,易实现多行集排、宽幅和高速播种要求,且易满足油菜、小麦等不同籽粒种子播种需求,在国内外得到广泛应用^[1-4]。

混种装置是气送式排种系统内实现种子被气流快速赋能,完成气固耦合种子流输送的关键部件,其中混种通量是衡量混种装置作业性能的关键因素之一,现阶段油麦兼用型气送式播种机作业速度为 3 ~ 6 km/h、播种行数不超过 8 行,排种小麦时最大混种通量一般不超过 50 g/s^[5-6]。随着播种速度、排种行数增加,为保证农艺要求的播量,气送式排种系统集中供种速率增加,单位时间内混种装置中种子流量即过流量相应增加。当播种机达到高速作业工况 9 ~ 12 km/h 时^[7],混种装置内种子过流量提高 2 ~ 4 倍,小麦混种通量超过 100 g/s^[8-9],相较于低速工况下混种装置需完成高通量混种作业。高通量混种工况下,混种装置内种子群密度增加,使得种子群与气流接触时间不一致,易发生种子与种子、种子与落种区域管壁之间的碰撞,导致部分种子未能及时进入输种管道,并出现沿种子下落的反方向运动的现象,影响气送式排种系统作业质量。如对油菜等颗粒小、播量小的种子,反向运动易使得种子出现回流现象;对于小麦等颗粒大、播量大的种子,回流现象严重时甚至发生堵塞。

气送式排种器工作过程为串联环节,各关键部件性能对排种性能均存在影响,研究者对供种、输种、分配等装置进行了深入研究^[9-16];其中文丘里管特有的“文丘里效应”使其成为结构较优的混种装置,通过 DEM - CFD 耦合仿真确定了文丘里喉管处结构尺寸对种子耦合加速效果存在显著影响^[6],

气流加速段收缩角、输种管路形状对种子运动轨迹均存在影响^[17-18];为解决播量增加时混种过程中出现的种子倒流、逆流等问题,实现较大播量范围内稳定混种,在文丘里结构基础上,通过在喉管处设置倾角、添加混合区以优化混种装置内部压力梯度,提高种子通过率^[18-19]。综上,现阶段对气送式排种系统混种装置结构研究较为单一且以文丘里结构为主;随着单位时间内混种量增加,处于文丘里喉管处的种群与气流接触时间不一致,易造成原有稳定的种子流紊乱;简单放大文丘里结构,增加喉管处截面面积可增大种子间距,可减小种子碰撞,但输种管径相应增加,导致输送所需风量呈指数倍增,排种过程功耗增加,未能从结构上解决种子流量增加导致的种子碰撞、回流、堵塞等问题。

针对现有混种装置结构用于高通量混种容易出现回流、堵塞等问题,本文在现有研究基础上,基于突扩管路提出一种突扩文丘里结构的高通量混种装置,利用“突扩吸种”的进种方式、“混种滞后”的结构排布方式以期解决种子流量增大时出现的回流、堵塞等问题。通过 Fluent 软件验证气流场压力梯度变化规律,通过 DEM - CFD 气固耦合方式分析突扩文丘里结构对种子运移轨迹的影响,台架试验利用高速摄影分析设有突扩文丘里结构的混种装置与普通文丘里结构的混种装置之间的工作性能差异,以期对气送式排种系统优化改进提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

油麦兼用气送式高通量排种系统主要由种箱、供种装置、混种装置、分配装置、种箱、电机、输种管道、导种管等组成,总体结构如图 1 所示。

采用的供种装置与分配装置均为课题组前期设计^[6,9,14]。根据实现的功能不同气送式排种系统高通量混种装置工作区域分为气流加速区、预混区、混种区与扩散区,混种装置结构剖视图如图 2 所示。

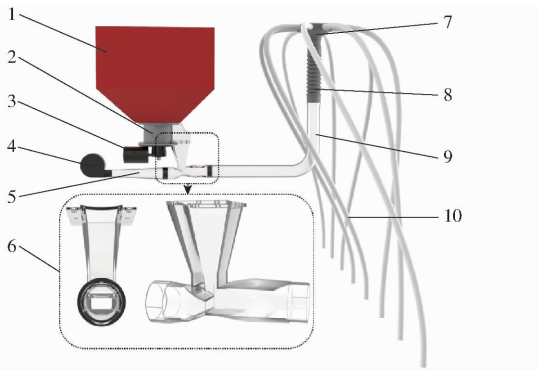


图1 气送式排种系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of air-fed seed discharge system

1. 种箱 2. 供种装置 3. 电机 4. 输风管 5. 风机 6. 混种装置 7. 分配装置 8. 增压管 9. 输种管 10. 导种管

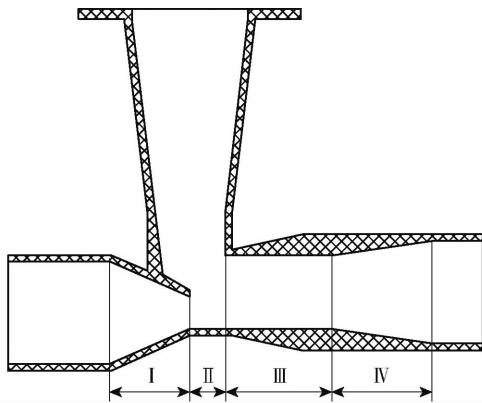


图2 高通量混种装置结构剖视图

Fig.2 Cutaway view of structure of high-throughput seed mixing device

I. 气流加速区 II. 预混区 III. 混种区 IV. 扩散区

1.2 工作原理与工作过程

突扩是指管路中某一截面处截面面积突然增大的结构,如图3所示,在截面增大处易产生低压涡流,造成流体能量损失,其中低压涡流区域压强近似为真空,若将产生低压涡流的区域与外界大气连通,则可在低压涡流区域处形成负压,产生向着混种区方向的吸力^[20-22]。

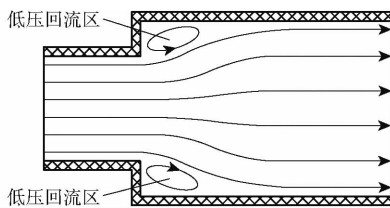


图3 突扩管路结构示意图

Fig.3 Schematic of protruding pipeline structure

气送式排种系统工作时供种装置将种箱内的种子按一定规律不停断地运移至混种装置的预混区上方,种子在自重与离心力作用下流经预混区进入混种区,风机输出气流经气流加速区加速后对流经进入混种区种子赋予动能,并携带种子经导输种管进

入分配装置完成分种后由导种管将种子输送至指定区域,完成排种作业。

风机输送气流经气流加速区加速后空气流速增加,根据伯努利原理可知管路中气流流速大的部分压强小,因混种区截面面积大于气流加速段截面面积,于喉管处形成突扩文丘里结构与大气压之间存在压差产生负压,处于预混区上方的种子在重力与吸力的共同作用下进入后续混种区。在保证种子与气流充分混合的同时,利用突扩结构对种子的引流作用,避免种子在混种区转向停留与种子间碰撞导致的种子回流、堵塞现象,提高气送式排种系统作业质量。

2 高通量混种装置结构设计

2.1 结构设计

2.1.1 输种管路内径

输种管路是保证种子被顺利输送的重要部件,管径决定种子输送质量与排种系统功率。为满足长江中下游地区气送式播种机作业要求,选择整机工作幅宽2.3 m,作业速度可达12 km/h的高速播种平台,小麦播种行数为10行,油菜播种行数为8行^[8]。

根据《小麦全程机械化生产规范》、《油菜农机农艺结合生产技术规程》可得长江中下游地区小麦、油菜播量分别为105~150 kg/hm²、3~6 kg/hm²,结合气送式高速播种机作业速度12 km/h与播种机作业幅宽,确定输种管路单位时间小麦、油菜种子最大质量流量为115、4.6 g/s。参照文献[23-24]确定小麦悬浮速度为8.9~11.5 m/s,油菜悬浮速度为7~10 m/s,由于油菜与小麦种子机械物料特性不同,且田间播种作业中小麦种子输送所需气流流速与种子质量流量均高于油菜种子,以小麦种子单位时间内最大输送量为计算基准,输种管内径计算公式^[17]为

$$D_1 = 1000 \sqrt{\frac{4m_s}{\pi \Psi \rho v_1}} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad v_1 = kv_\alpha \quad (2)$$

式中 D_1 ——输种管路内径,mm

m_s ——单位时间内输送种子质量,kg/s

v_1 ——输种管路气流速度,m/s

Ψ ——种子、气流质量流量比

ρ ——管道流体密度,取1.29 kg/m³

v_α ——种子悬浮速度,m/s

k ——输送气流速度与种子悬浮速度比

气送式排种系统中种子输送采用稀相输送方式,种子与输送气流质量比应小于5,本文取2.5;根据气力输送要求,输送气流速度一般为输送物料悬

浮速度的1.5~2.5倍^[25-26],结合小麦种子最大悬浮速度, k 取1.6代入式(1)、(2)计算得输种管直径为49.7 mm,综合考虑实际加工与功率消耗并满足稀相输送要求,确定输种管内径为50 mm。

2.1.2 混种区结构

混种区截面面积小于输送管路截面,故此区域气流速度高于输送管路,是种子被高速气流赋能加速的重要区域,混种区截面面积影响该区域内气流速度,混种区长度影响种子加速程度,决定种子能否被顺利输送,混种区域结构如图4所示。

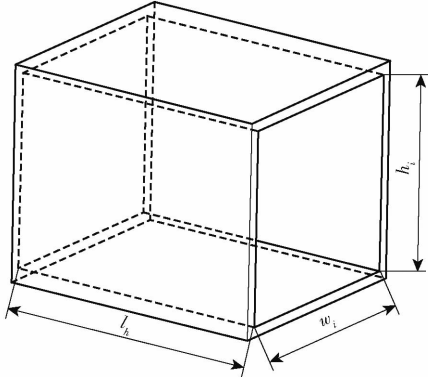


图4 混种区结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of mixed zone

为满足混种区域种子加速所需气流流速, k 取2.3并代入式(2),计算出混种区内气流速度为26.45 m/s,可得方程

$$\begin{cases} A_1 v_1 = A_i v_i \\ D_i = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \\ A_i = w_i h_i \\ A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_i ——混种区气流速度, m/s

A_1 ——输种管路截面面积, mm²

A_i ——混种区截面面积, mm²

D_i ——混种区截面当量直径, mm

w_i ——混种区截面宽度, mm

h_i ——混种区截面高度, mm

结合式(2)、(3)可得,混种区截面当量直径为41.7 mm 截面与扩散段以及输种管路配合关系,确定混种区截面宽度 w_i 为38 mm,混种区截面高度 h_i 为36 mm。

混种区长度计算为

$$l_h = \frac{2v_m^2}{gB} \left(\frac{\ln \left(1 - (1-B) \frac{v_l}{v_i} \right)}{1-B} - \frac{\ln \left(1 - (1+B) \frac{v_l}{v_i} \right)}{1+B} \right) \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad B = 0.9 \frac{v_i}{v_l} - 1 \quad (5)$$

式中 v_l ——混种区始端处种子速度, m/s

v_m ——混种区终端处种子速度, m/s

l_h ——混种区长度, m

g ——重力加速度, m/s²

混种区长度过短会减少气流对种子赋能时间,气流经扩散区管路截面增大后将速度减小^[27],对种子加速作用降低;混种区过长会使混种装置整体结构增加,增加非必要的排种系统整体尺寸。

2.1.3 突扩文丘里结构

突扩文丘里结构由气流加速区、预混区、混种区3部分共同组成,其中混种区截面上端高于气流加速区截面上端,气流经加速后快速通过预混区进入混种区,根据伯努利原理与连续性原理,管道截面改变影响管道中气流速度与气流场压强分布,由于预混区上方无气流流动故初始压强可视为大气压强,有气流快速流经的预混区压强小于外界大气压强,可在预混区上形成负压区域,利用压差可将种子吸入混种区域。突扩文丘里结构可减小种子与气流在喉管处的接触时间以避免流量较大时的种子影响气流场分布,同时通过突扩延伸斜面的导流作用改变种子运动方向,提高混种装置内种子过流量,高通量混种装置中突扩文丘里结构如图5所示。

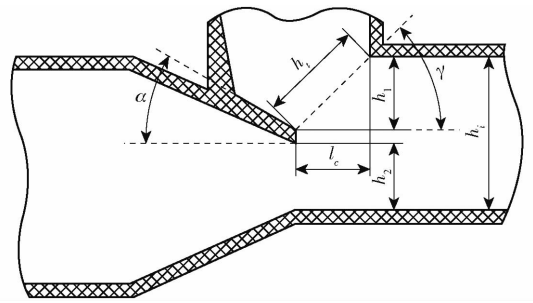


图5 突扩文丘里结构示意图

Fig. 5 Schematic of protrusion of Venturi structure

突扩文丘里结构混种通量与混种截面长度之间的关系^[28]为

$$\begin{cases} Q_v = \frac{Q_m}{\rho_v} \\ Q_{kv} = k_v Q_v \\ Q_{kv} = v_j A_i \\ A_i = w_i h_i \end{cases} \quad (6)$$

式中 Q_v ——种子体积流量, mm³/s

Q_m ——种子质量流量, g/s

Q_{kv} ——运动状态种子体积流量, mm³/s

A_i ——进种入口截面面积, mm²

h_i ——进种截面长度, mm

v_j ——进种入口处种子速度,取 500 mm/s

k_v ——运动状态种子膨胀系数,取 3.2

ρ_v ——种子容积密度,取 8×10^{-4} g/mm³

由于小麦与油菜种子物理特性相差较大,为保证两类种子顺利输送,以播量与体积较大的小麦种子输送参数为基准^[29],满足高速播种作业条件下小麦种子质量流量 Q_m 取 115 g/s,代入式(6)可得进种入口截面长度 h_i 为 24 mm。

受气流加速区渐缩结构的影响,斜面倾角 α 对种子顺利进入混种区域的运动状态存在影响,斜面倾角过小会使种子进入混种区的时间延长,增加种子在预混区滞留时间;斜面倾角过大会使种子流可流经的有效空间减小,降低种子通过率。

进种斜面倾角 α 以无气流通过时种子可在重力作用下顺利进入混种区为临界值,则斜面倾角应满足

$$\begin{cases} \alpha \geq \alpha_y \\ \alpha \geq \alpha_x \end{cases} \quad (7)$$

式中 α_y ——油菜自然休止角, (°)

α_x ——小麦自然休止角, (°)

即斜面倾角大于油菜与小麦种子的自然休止角^[9],结合上述分析确定斜面倾角为 30°。

2.2 混种过程分析

2.2.1 混种过程气流场分析

参照文献[21-22,29-31],确定突扩结构低压回流区域受流体速度与截面变化的共同影响,在气力输送系统中,管道截面变化处流体均匀流被破坏,气流流速分布发生变化,形成涡流区域导致流体能量损失^[32]。对于突扩文丘里结构,输送气流由气流加速区流经至混种区,管路截面增加发生能量损失,此过程气流能量损失将影响种子在混种区的加速与输种管路中的运移,气流场局部损失与预混区入口截面高度之间关系为

$$\begin{cases} H_j = \left(1 - \frac{A_s}{A_i}\right)^2 \frac{v_s^2}{2g} \\ A_s = w_i h_2 \\ v_s A_s = v_i A_i \\ h_i = h_1 + h_2 + X \end{cases} \quad (8)$$

式中 H_j ——气流场局部损失

A_s ——气流加速区出口截面面积, mm²

v_s ——气流加速区出口速度, m/s

h_1 ——预混区入口截面高度, mm

h_2 ——气流加速区出口截面高度, mm

X ——常数

整理式(4)、(8)可得

$$\begin{cases} H_j = \frac{v_i^2}{2g} \left(\frac{h_i}{h_i - h_1 - X} - 1 \right)^2 \\ v_s = \frac{A_i v_i}{w_i (h_i - h_1 - X)} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得,在进种入口截面面积 A_i 不变情况下,进种入口截面高度增加会导致气流场局部损失增加;进种截面高度减小会导致气流加速出口气流速度减小,对处于即将由预混区进入混种区的种子加速程度降低。

预混区内压强与速度之间的关系为

$$\begin{cases} v_i A_i = v_i A_i \\ P_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g h = C \end{cases} \quad (10)$$

式中 P_i ——预混区压强, Pa

v_i ——预混区气流速度, m/s

C ——常数

h ——气流基准位置,取 0

整理式(4)、(10)得

$$P_i + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{v_i h_i}{h_1} \right)^2 + \rho g h = C \quad (11)$$

由式(11)可得,预混区入口截面高度 h_1 影响预混区压强。

2.2.2 混种过程力学分析

突扩文丘里结构因倾斜面会对由预混区进入到混种区的种子运动过程存在一定影响,以处于预混区斜面上的种子为对象,分析种子受力状态,种子受力如图6所示。

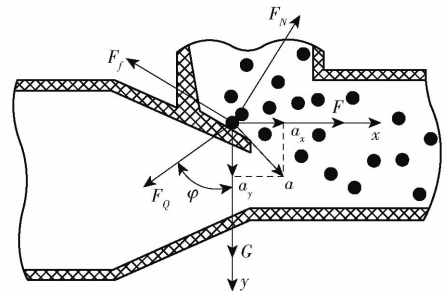


图6 混种过程种子受力分析

Fig. 6 Analysis of forces on seeds during seed mixing

由图6可得

$$\begin{cases} F + F_N \sin \alpha - F_j \cos \alpha - F_Q \sin \phi = m_i a_x \\ G + F_Q \cos \phi - F_j \sin \alpha - F_N \cos \alpha = m_i a_y \\ a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中 F ——种子所受混种区方向负压吸力, N

F_N ——斜面对种子的支撑力, N

G ——种子重力, N

a_x ——水平方向加速度, m/s²

a_y ——垂直方向加速度, m/s²

φ ——种子碰撞受力角, ($^{\circ}$)

F_f ——斜面上种子所受摩擦力, N

F_Q ——种群对种子作用力, N

m_i ——单粒种子质量, g

a ——进种斜面上种子所受加速度, m/s^2

对处于进种斜面上的种子进行受力分析可知, 种子进入混种区的运动趋势由吸力与重力共同作用, 其中吸力与压强的关系为

$$\begin{cases} F = w_i h_i \Delta P \\ \Delta P = P - P_i \\ P_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g h = P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h \\ P_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \rho g h = P_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g h \end{cases} \quad (13)$$

式中 ΔP ——预混区与大气压之间压强差, Pa

P ——大气压强, Pa

P_0 ——气流加速区压强, Pa

v ——空气气流速度, m/s

v_0 ——气流加速区入口速度, m/s

整理式(9)、(12)、(13)后得

$$a = \sqrt{\left\{ \frac{w_i h_i \rho [v_i^2 h_i^2 - v^2 (h_i - h_1)^2]}{2m_i (h_i - h_1)^2} + C_1 \right\}^2 + C_2^2} \quad (14)$$

其中

$$C_2 = \frac{2G + 2F_Q \cos \varphi - F_f - \sqrt{3}F_N}{2m_i}$$

$$C_1 = \frac{w_i h_i H_{i-1}}{2m_i (h_i - h_1)^2} + \frac{2F + 2F_N + \sqrt{3}F_f - 2F_Q \sin \varphi}{2m_i}$$

式中 H_{i-1} ——预混区到混种区气流局部损失

由式(11)、(13)可得气流加速区入口风速一定时, 若进种截面高度增加, 则预混区与大气压之间压强差增大, 处于预混区的种子所受突扩文丘里结构产生的负压吸力增大; 结合式(14)可得进种截面高度增加, 处于预混区内的种子所受加速度将增大, 种子越容易通过预混区进入混种区进行赋能加速。由式(13)可知, 进种截面高度一定时, 气流加速区入口风速改变可影响预混区压强, 为探究风速对预混区压强的影响, 根据油菜与小麦种子悬浮速度与气流输送要求, 将气流加速区入口风速设为 12、15、18 m/s 3 个水平, 探究不同入口风速下, 混种装置内压强分布规律。

通过对混种过程气流场分析与混种过程的种子受力分析, 可得: 突扩混种结构中进种截面高度 h_1 对混种装置内的流场能量局部损失与种子运动状态存在双重影响。预混区入口截面高度 h_1 增加可提高处于预混区种子加速度与气流加速程度, 但同时

会产生更大的气流场局部损失, 减小混种效率。

为减小突扩管路形成的图 3 中低压回流区对预混区上方的影响, 突扩扩散角 γ 应大于 43° , 同时均衡预混区入口截面高度 h_1 对气流场的影响, 取 γ 为 45° 代入

$$\begin{cases} h_1 = h_i \sin \gamma \\ l_c = h_i \cos \gamma \\ T = \frac{h_2}{h_i} \end{cases} \quad (15)$$

式中 T ——突扩比 (≤ 0.5)

并结合进种入口截面长度 h_i 确定预混区入口截面高度 h_1 为 17 mm, 此时预混区入口截面长度 l_c 为 17 mm^[29,33-34]。

基于油菜与小麦物理特性不同, 以小麦种子悬浮速度为参照并结合式(2)可得, 输种管道内气流速度与小麦种子悬浮速度差值最小值为 5.9 m/s , 设种子流经混种区即将进入扩散区种子速度加速 5.9 m/s , 根据

$$\begin{cases} R = \frac{\xi S \rho v_i^2}{2} \\ a_j = \frac{R}{m_i} \\ S = \pi l_a l_b \\ v_i^2 = 2a_j l_c \end{cases} \quad (16)$$

式中 ξ ——无因次曳力系数, 取 0.44

R ——曳力, N

S ——种子在运动方向上投影面积, m^2

l_a ——小麦种子长轴尺寸, m

l_b ——小麦种子短轴尺寸, m

a_j ——预混区种子所受加速度, m/s^2

可知处于混种区始端种子速度最大值 v_i 为 1.5 m/s , 代入式(4)、(5)计算可得混种区长度 l_h 为 49 mm, 综合考虑实际加工情况取混种区长度为 50 mm^[35]。

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

为对比分析突扩文丘里结构与普通文丘里结构对混种装置内气流场压强梯度变化的影响, 验证理论分析, 应用 ANSYS 19.0 软件中 Fluent 模块进行气流场仿真。通过 SW2020 三维建模软件将高通量混种装置模型简化, 采用 ANSYS 19.0 软件 ICMCFD 模块中八叉树方法自动划分生成四面体网格, 最小网格体积为 4.08 mm^3 , 最大网格体积为 113.09 mm^3 。气送式排种器工作过程中混种装置与供种装置之间近似为封闭区域^[19], 气流加速区入口边界条件设为气流速度入口, 输种管垂直段出口边界

条件设置为种子与气流出口,其余边界条件设置为壁面,气流场仿真模型如图7a所示。

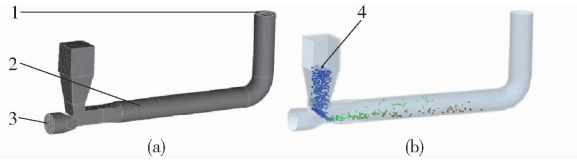


图7 仿真模型

Fig. 7 Simulation models

1. 输送气流与种子出口
2. 气流场流域
3. 输送气入口
4. 颗粒工厂

利用 ANSYS 19.0 与 EDEM 2020 软件开展 DEM-CFD 气固耦合仿真。DEM-CFD 气固耦合仿真模型需在气流场模型的基础上,在 EDEM 软件中混种装置模型进种结构上方设置用于生成种子颗粒工厂,气固耦合仿真模型如图7b所示。

未优化混种装置采用课题组前期所设计文丘里结构混种装置^[6],以输种管路内径为基准等比例放大后得仿真模型结构,输种管路直径为 50 mm,喉管处长、宽、高为 35.7 mm × 21.4 mm × 32.1 mm。

3.2 仿真试验方法

气流场仿真试验中,根据理论分析确定气流加速区入口风速为 12、15、18 m/s 3 个水平值;Fluent 模块仿真步长设为 1×10^{-4} ,总步数设为 60 000。

气固耦合仿真试验中,根据对油菜与小麦实际测量的三轴尺寸,构建仿真颗粒模型的三轴尺寸分别为 2 mm × 2 mm × 2 mm、6.5 mm × 3 mm × 3 mm,种子模型呈正态分布,仿真颗粒与接触模型参数特征参数如表 1 所示^[9]。

表1 仿真颗粒与接触模型特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of simulated particle and contact models

项目	参数	数值
油菜	种子尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	2 × 2 × 2
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
	密度/(kg · m ⁻³)	1 060
小麦	种子尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	6.5 × 3 × 3
	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	5.1×10^7
	密度/(kg · m ⁻³)	1 350
ABS	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^8
	密度/(kg · m ⁻³)	1 060

根据气送式排种系统高通量混种装置实际加工材料将仿真模型中材料设定为 ABS,在 EDEM 离散元软件中,种子与种子、种子与混种装置间采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型,在 DEM-CFD 耦

合仿真中选择欧拉-拉格朗日模型,种子颗粒与仿真模型接触参数如表 2 所示。

表2 种子颗粒与仿真模型接触参数

Tab. 2 Seed particle-simulation model contact parameters

项目	参数	油菜	小麦
种子-种子	碰撞恢复系数	0.60	0.42
	静摩擦因数	0.50	0.35
	动摩擦因数	0.01	0.05
种子-ABS	碰撞恢复系数	0.75	0.60
	静摩擦因数	0.30	0.40
	动摩擦因数	0.01	0.05

为保证油菜与小麦的混种通量满足作业幅宽 2.3 m 的气送式播种机在作业速度 12 km/h 时油菜 6 kg/hm²、小麦 150 kg/hm² 的播量要求,根据油菜、小麦种子千粒质量 4.31、42.82 g^[9],离散元仿真模型颗粒工厂内种子动态生成速率设置为油菜 1 050 粒/s、小麦 3 000 粒/s;油菜、小麦耦合仿真过程中气流加速区入口风速根据气流场压强梯度变化规律确定。实际作业中种子在脱离供种装置到进入混种装置的过程中做加速运动,结合种子脱离供种装置时切向速度与脱离供种装置运动至混种装置的加速,将种子速度设为 0.2 m/s,速度方向与种子重力方向相同。EDEM 仿真步长设置为 4×10^{-6} ,Fluent 仿真步长设置 EDEM 仿真的 25 倍,即 1×10^{-4} 。EDEM 仿真中种子生成时间设为 5 s,仿真总时长设为 6 s。

3.3 仿真结果

3.3.1 气流场仿真结果

对普通文丘里结构与突扩文丘里结构的混种装置进行气流场压强仿真分析得到不同风速下气流场压强梯度分布图,如图 8 所示。

由图 8 可知,相同气流入口风速下,突扩文丘里结构混种装置内预混区、混种区、扩散区压强均低于普通文丘里结构,且因“文丘里效应”形成的负压区域面积大于普通文丘里结构,表明突扩文丘里结构的混种装置内部更易形成负压,处于预混区与混种区负压绝对值越大,对处于预混区上方种子产生的向下方向的负压吸力越强,对种子运动轨迹的影响越大^[18,36],故从压强梯度变化规律角度分析得出突扩文丘里结构更易减小种子回流现象。

为进一步分析两种结构之压强分布规律,以混种区与扩散区横向中心为 x 轴,预混区上方纵向中心线为 y 轴,于 x 轴、 y 轴上各取 10 点,其中 x 轴上突扩文丘里结构取点位置点 1~2 为预混区、点 3~6 为混种区、点 7~10 为扩散区,普通文丘里结构取点位置点 1~5 为喉管混种区、点 6~10 为扩散区; y

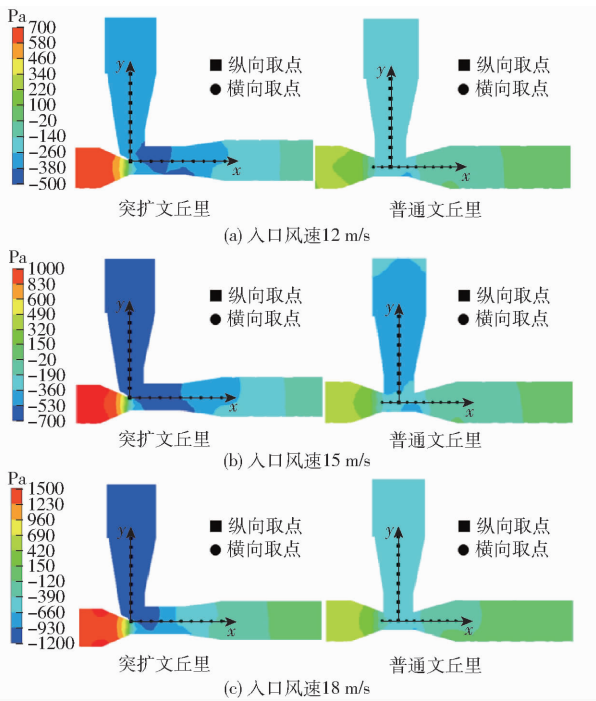


图 8 气流场压强梯度分布图

Fig. 8 Air flow field pressure gradient distributions

轴上点 1~10 分别为预混区上方、喉管混种区上方。利用 CFD-post 19.0 软件导出所取位置压强数据, 并利用 Origin 2022 绘制混种装置内压强随取点位置变化的等高线图, 如图 9 所示。

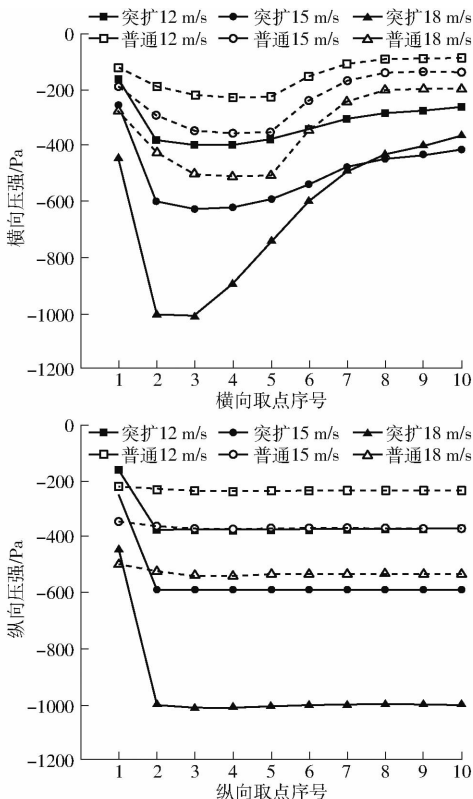


图 9 气流场压强变化曲线

Fig. 9 Changing curves of airflow field pressure

由图 9 可知, 随着气流入口风速的增加, 两种混种装置于水平方向与垂直方向压强梯度变化规律基

本一致, 预混区与混种区内压强均逐渐降低, 其中突扩文丘里结构混种装置内预混区上方、预混区与混种区压强降低幅度随入口风速增加而增大。风速由 12 m/s 升至 15 m/s 时突扩文丘里结构混种装置预混区、预混区上方负压最小值分别降低 225、213 Pa, 普通文丘里混种装置分别降低 128、136 Pa; 风速由 15 m/s 升高至 18 m/s 时突扩文丘里结构混种装置预混区、预混区上方负压最小值分别降低 404、420 Pa, 普通文丘里混种装置分别降低 157、166 Pa, 表明通过改变入口风速, 突扩文丘里结构混种装置更易实现不同质量颗粒的混种作业。

根据油菜、小麦种子机械物理特性与气流场压强分布规律, 确定耦合仿真过程油菜、小麦气流入口风速分别为 15、18 m/s。

3.3.2 突扩文丘里结构对种子运动轨迹的影响

对油菜与小麦混种过程进行气固耦合仿真, 得到两类种子运动轨迹如图 10 所示。由图 10 可知, 在突扩文丘里结构的混种装置油菜、小麦种子混种过程中, 预混区上方均未出现种子回流、堵塞现象, 说明突扩文丘里结构可有效解决气送式排种器在混种过程因种子通量较大时出现的种子回流、堵塞问题。

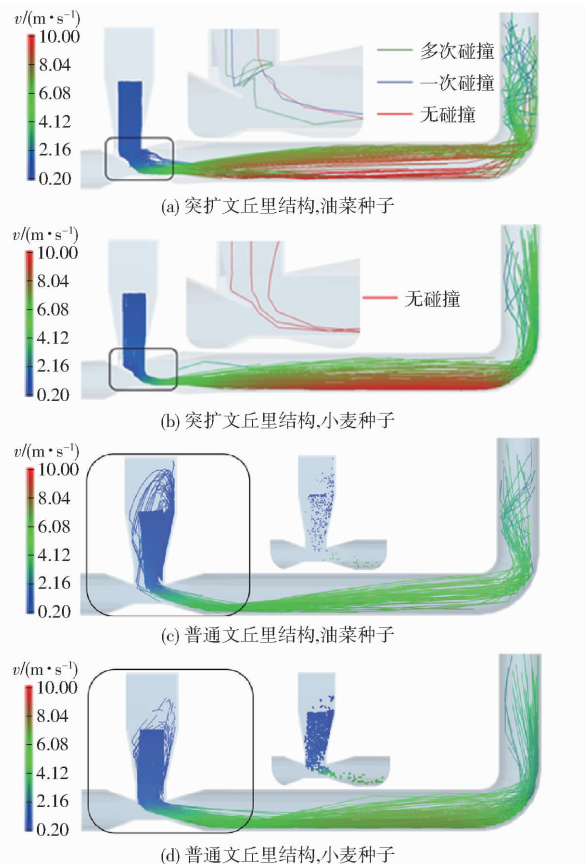


图 10 种子运移轨迹

Fig. 10 Seed transport trajectory

由图 10 可知, 普通文丘里结构的混种装置出现

油菜、小麦种子回流,突扩文丘里结构混种装置未出现种子回流,种子加速效果优于普通文丘里结构。从图 10a 可得,部分油菜种子会与突扩文丘里结构的延伸部分发生碰撞,导致种子运动轨迹发生改变,其中与延伸部分前端发生一次碰撞后种子直接进入混种区,与延伸部分后端发生碰撞后种子回弹至预混区上方的管道壁面后经多次碰撞进入混种区。随机选取突扩文丘里结构 3 种运动轨迹的油菜种子、普通文丘里结构 2 种运动轨迹的油菜与小麦种子各一粒,经 EDEM 软件后处理界面得出种子从颗粒工厂运动至预混区过程中动能变化规律,如图 11、12 所示。

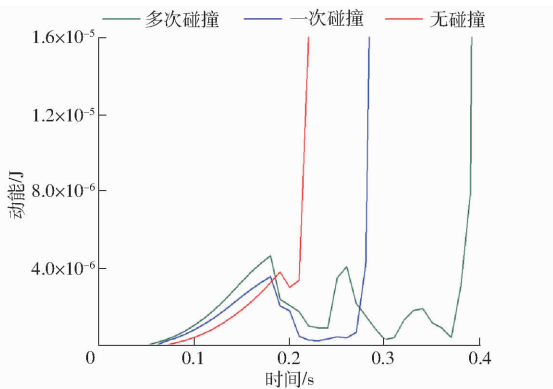


图 11 油菜种子进入混种区前动能变化曲线

Fig. 11 Curves of kinetic energy change of oilseed rape seeds before entering mixing zone

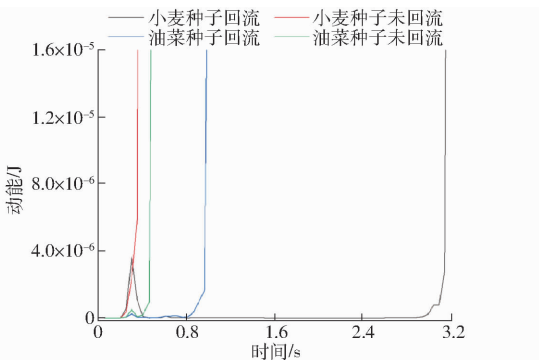


图 12 普通文丘里结构种子动能变化曲线

Fig. 12 Seed kinetic energy change curves for two states of motion of an ordinary Venturi structure

结合图 10a 与图 11 可知,发生一次碰撞的种子在发生碰撞后做回弹运动的过程中种子运动方向与由“文丘里效应”产生的负压吸力方向相反,此时负压吸力对种子做负功,动能逐渐减小,当种子碰撞后所具备的动能减小至趋于零时,种子开始向着负压吸力方向运动,负压吸力对种子做正功,动能迅速增大并在负压吸力作用下进入混种区;发生多次碰撞的种子在发生第 1 次碰撞后,动能变化减小但并未趋于零,说明此时油菜种子存在方向向上的分速度,同时负压吸力做正功,该类型种子向着混种区方向

移动,受垂直方向分速度的影响,运动至预混区上方的管道壁面处并发生第 2 次碰撞,碰撞后运动方向改变、动能减小,此时负压吸力作负功直至再次碰撞延伸部分前端,动能趋于零,在负压作用力下得到改变进入混种区。结合图 10c、10d、12 可知,发生回流的种子在混种装置内运动轨迹紊乱且在混种装置内停留时间较长。

通过对发生碰撞的油菜种子运动轨迹进行分析可得,碰撞后种子在负压吸力的作用下逐渐向着混种区方向运移,仿真轨迹中未出现种子相互影响导致的混种过程紊乱的情况且在预混区停留时间远低于发生回流现象的种子。为分析混种过程中发生碰撞的油菜种子占比,在 EDEM 软件后处理截面建立 2 个颗粒读取框 A、B,如图 13 所示,读取沿 y 轴正方向运动种子数量,结果如表 3 所示。

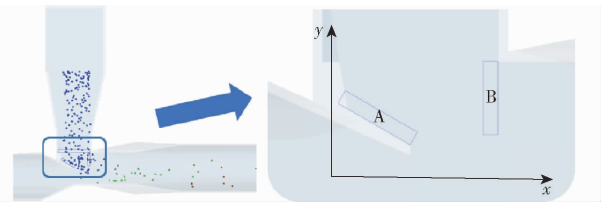


图 13 选择框建立

Fig. 13 Checkbox creation

表 3 发生碰撞种子数量

Tab. 3 Number of seeds in collision

时间/s	区域 A 种子数量	区域 B 种子数量
1 ~ 2	127	70
2 ~ 3	117	73
3 ~ 4	133	80
4 ~ 5	123	77
平均值	125	75

由表 3 可知,油菜种子混种通量为 1 050 粒/s 时,在区域 A 发生碰撞的种子数量占比为 11.9%,一次碰撞直接进入混种区的种子占比为 7.1%,由于多次碰撞的种子会多次经过区域 A,故混种过程中经多次碰撞进入混种区的油菜种子占比低于 4.8%。相比于油菜种子与混种装置之间的碰撞,小麦种子运动轨迹中未出现种子碰撞现象,原因为油菜种子碰撞恢复系数高于小麦种子且单粒种子质量较轻,与突扩文丘里结构延伸部分的碰撞过程更接近于弹性碰撞易发生回弹,但因油菜种子粒径小、质量轻、发生多次碰撞种子数量占比较小,且在混种装置内部发生碰撞后对处于混种过程中其余油菜种子运动轨迹影响较小。

通过对耦合仿真种子运动轨迹分析可得出突扩文丘里结构的混种装置可适用于油菜与小麦播混种通量下混种作业,满足高速播种作业下混种通量要求。

4 台架试验

为验证设有突扩文丘里结构的混种装置工作性能与仿真试验结果的合理性,在华中农业大学排种性能实验室开展台架性能试验。试验材料选择华油杂 62、郑麦 9023,种子含水率分别为 7.18%、10.87%,其余参数与仿真参数相同。

4.1 试验设备

为对比突扩文丘里结构混种装置与普通文丘里结构混种装置之间的混种性能,采用透明树脂材料对两种混种装置进行打印,装置如图 14 所示,并安装至气送式排种系统进行试验。利用高速摄影仪对气送式排种器工作时的混种过程进行摄影记录,试验台架如图 15 所示。

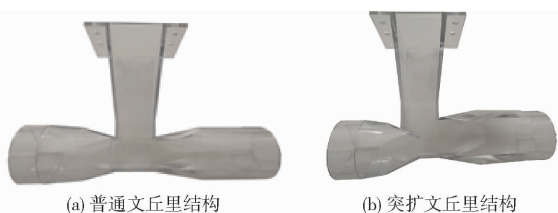


图 14 两种混种装置

Fig. 14 Two types of mixing devices



图 15 试验台架

Fig. 15 Test stands

1. 光源 2. 气送式排种系统 3. 高速摄影仪

4.2 试验方法

参照 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》、GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》,以油菜小麦总排量稳定性变异系数小于等于 1.3%、油菜各行排量一致性变异系数小于等于 7%、小麦各行排列一致性变异系数小于等于 3.9%、油菜小麦破损率小于等于 0.5% 作为气送式排种器性能评价指标,每组试验重复 5 次,取平均值作为试验结果进行记录。为满足幅宽 2.3 m 的气送式播种机高速播种机作业速度 4~12 km/h 下对混种装置内油菜与小麦种子的混种通量要求,以油菜 6 kg/hm²、小麦 150 kg/hm² 的播种量为基准,小麦混种通量 40、60、80、100、120 g/s,油菜混种通量 1.6、2.4、3.2、4.0、4.8 g/s,利用高速摄影仪记录混种过程中种子运动轨迹是否与仿真耦合轨迹一致,对比不同混种通量

下 2 种混种装置工作性能。

为测定混种装置内种子回流率,利用高速摄影仪对处于回流状态的种子进行记录,观察并统计一定时间内发生回流的种子与进入混种区域内种子数量,回流率计算式为

$$k_n = \frac{n_h}{n_h + n_j} \times 100\% \quad (17)$$

式中 k_n ——回流率,%

n_h ——处于回流状态种子数量,粒

n_j ——进入混种区种子数量,粒

4.3 试验结果与分析

试验过程中通过高速摄影仪拍摄记录两种混种装置内种子的运动轨迹,结果如图 16 所示,利用 Origin 2022 绘制各行排量一致性与总排量一致性随混种通量的变化曲线如图 17 所示,试验过程种子回流率如表 4 所示。

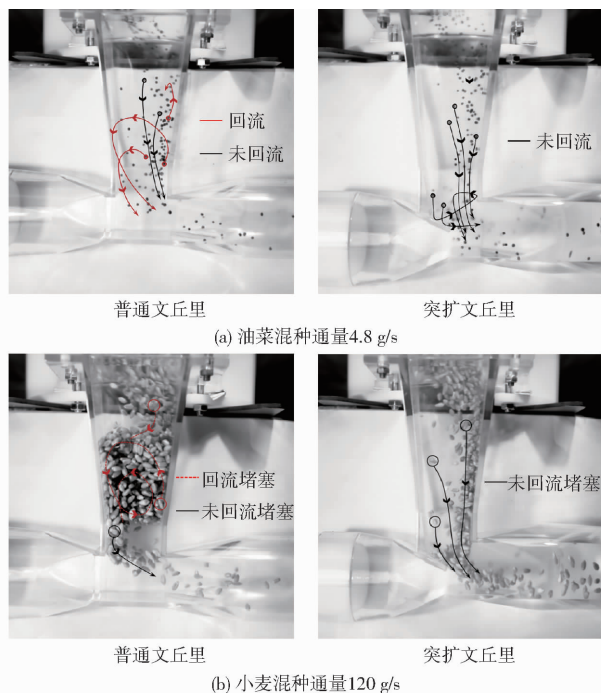


图 16 种子运动轨迹

Fig. 16 Trajectory of seed

结合图 16 与表 4 可知,当油菜混种通量 1.6 g/s、小麦混种通量 40 g/s 时,两种混种装置内均未出现种子回流现象;随着油菜与小麦种子混种通量的增加,普通文丘里结构的混种装置内出现种子回流,油菜种子回流率最高为 19.23%,小麦种子回流率最高为 13.84%,其中当小麦混种通量超过一定值后,混种装置混种速率低于供种装置供种速率,在文丘里喉管上方发生种子堵塞现象,导致气送式排种器无法正常作业;与普通文丘里结构混种装置不同,随着油菜与小麦混种通量增加,突扩文丘里结构混种装置内种子运动轨迹与耦合仿真结果一致,均未出

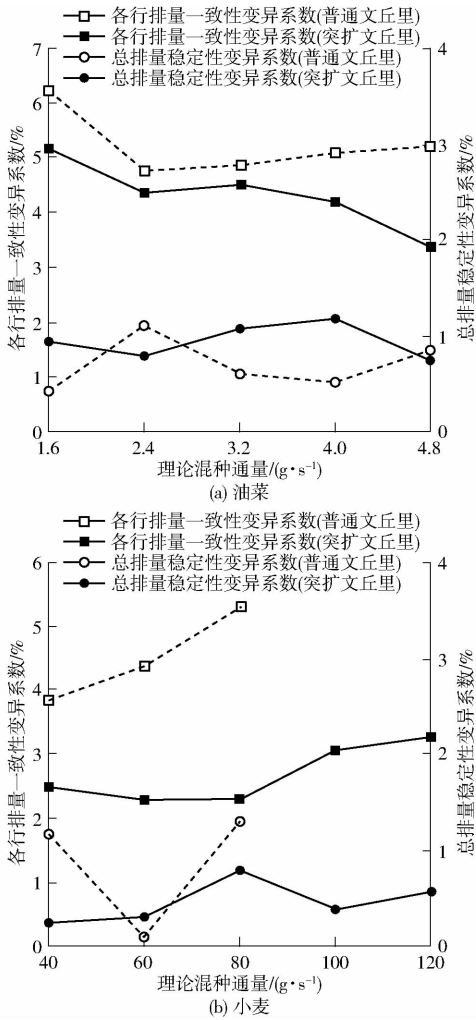


图 17 台架试验结果

Fig. 17 Analysis of bench test results

表 4 气送式排种器排种试验结果

Tab. 4 Seed discharge test results for air-fed seed dischargers

品种	理论混种通量/ ($g \cdot s^{-1}$)	实际混种通量/ ($g \cdot s^{-1}$)	普通文丘里		突扩文丘里	
			回流率/%	种子破损率/%	回流率/%	种子破损率/%
油菜	1.60	1.58	0	0.18	0	0.20
	2.40	2.35	8.33	0.19	0	0.19
	3.20	3.19	12.82	0.23	0	0.26
	4.00	4.13	13.11	0.26	0	0.27
	4.80	4.75	19.23	0.28	0	0.30
小麦	40.0	40.82	0	0.25	0	0.23
	60.0	63.21	7.36	0.31	0	0.29
	80.0	81.54	13.84	0.33	0	0.31
	100.0	97.84	(堵塞)		0	0.37
	120.0	118.80	(堵塞)		0	0.41

现回流与堵塞等现象。

分析对比安装有两种混种装置的气送式排种系统工作性能,结合表 4 与图 17,油菜混种通量为 1.6~4.8 g/s 时,普通文丘里结构各行排量一致性变异系数低于 6.23%,突扩文丘里结构各行排量一

致性变异系数低于 5.17%,两种混种装置总排量稳定性变异系数均低于 1.3%,种子破损率低于 0.5%,总体满足气送式排种系统油菜排种性能要求;小麦混种通量 40 g/s 时,普通文丘里结构各行排量一致性变异系数为 3.87%,未发生种子回流,随着混种通量增加,在混种装置内出现堵塞之前的各行排量一致性变异系数均高于标准值,不满足气送式排种器的小麦排种性能要求,突扩文丘里结构各行排量一致性变异系数最大值出现在混种通量 120 g/s 时,低于 3.29%,总排量稳定性变异系数低于 0.8%,种子破损率低于 0.5%,满足气送式排种系统的小麦排种性能要求。

通过对比可知,在满足排种要求情况下,突扩文丘里结构混种装置小麦混种通量较普通文丘里结构混种装置小麦混种通量提高 3 倍,油菜各行排列一致性变异系数低于普通文丘里结构,安装有突扩文丘里结构混种装置气送式排种系统工作性能优于安装有普通文丘里结构混种装置气送式排种系统。因为在普通文丘里结构的混种装置内出现的种子回流打破原有种子流有序性,导致气送式排种系统后续的分配过程受到影响,从而降低排种质量;高速气流在突扩文丘里结构混种装置内产生的负压引导种子进入混种区可避免种子回流现象的发生。综上所述,突扩文丘里结构混种装置混种通量当油菜种子 1.6~4.8 g/s、小麦种子 40~120 g/s 时,满足气送式播种机高速播种机作业标准,可适用于作业速度 4~12 km/h 下油菜与小麦播种作业。

5 结论

(1) 基于突扩管路设计了一种突扩文丘里结构的高通量混种装置,根据油菜与小麦种子机械物理特性与气力输送要求确定输种管内径为 50 mm,混种区长度为 50 mm、进种入口截面长度为 24 mm;通过分析突扩文丘里结构对气流场、种群受力的影响,确定预混区入口截面高度为 17 mm,预混区入口截面长度为 17 mm。

(2) Fluent 气流场仿真结果表明,随入口风速增加,两种结构混种装置内部压强梯度变化规律一致且突扩文丘里结构的混种装置内压强降低幅度大于普通文丘里结构的混种装置,突扩文丘里结构形成的“文丘里效应”优于普通文丘里结构;DEM-CFD 耦合仿真结果表明,油菜种子会与突扩结构延伸部分碰撞后弹跳,发生一次碰撞种子占比 7.1%、二次碰撞种子占比低于 4.8%,发生碰撞后均向混种区方向移动,弹跳现象造成混种过程中种子紊乱,突扩文丘里结构的混种装置内油菜与小麦的运动轨迹均

未出现种子回流与堵塞现象。

(3)台架试验表明,突扩文丘里结构的混种装置内种子运动轨迹与耦合仿真结果一致;普通文丘里结构混种装置作业过程中,油菜混种通量大于等于2.4 g/s、小麦混种通量大于等于60 g/s时发生回流并在小麦混种通量高于100 g/s时发生堵塞;突扩

文丘里结构的混种装置在作业过程中油菜与小麦种子均无回流,各行一致性变异系数分别低于5.17%、3.29%,总排量稳定性变异系数低于1.19%、0.80%,作业效果优于普通文丘里结构的混种装置,可满足气送式播种机在作业速度4~12 km/h下的油菜与小麦的混种通量要求。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)
- [3] 戴亿政,罗锡文,王在满,等.气力集排式水稻分种器设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(24):36-42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36-42. (in Chinese)
- [4] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166: 1-12.
- [5] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等.种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J].农业工程学报,2016,32(6):11-19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11-19. (in Chinese)
- [6] LEI X, LIAO Y, LIAO Q, et al. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29-39.
- [7] 王立宗,廖庆喜,张子龙,等.油菜高速直播机开畦沟装置刀组优化与试验[J].农业工程学报,2024,40(3):37-49.
WANG Lizong, LIAO Qingxi, ZHANG Zilong, et al. Optimization and experiments of the blade group of ditching devices in rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 37-49. (in Chinese)
- [8] 施彬彬,郑娟,王磊,等.小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(8):30-41.
SHI Binbin, ZHENG Juan, WANG Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30-41. (in Chinese)
- [9] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等.油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(9):102-115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 102-115. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 雷小龙,廖宜涛,王磊,等.油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J].农业工程学报,2017,33(19):67-75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas - solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67-75. (in Chinese)
- [12] 张晓辉,王永振,仇利,等.小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(3):59-67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. (in Chinese)
- [13] 付作立,李贵川,李海宇,等.荞麦播种机气力集排系统螺旋式增压管设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(12):37-45,69.
FU Zuoli, LI Guichuan, LI Haiyu, et al. Design and test of spiral booster pipe for pneumatic collecting and discharging system of buckwheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 37-45, 69. (in Chinese)
- [14] LEI X, LIAO Y, ZHANG Q, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98-109.
- [15] HU H, ZHOU Z, WU W, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD - DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246-259.
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68-79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)
- [19] HE S, QIAN C, JIANG Y, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.
- [20] 李君宁, 彭勇, 张建民, 等. 微淹没圆形射流空化特性减压试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 594-601.
LI Junning, PENG Yong, ZHANG Jianmin, et al. Experimental study on cavitation characteristics of round jet with slight submerged outlet by decompression test[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 594-601. (in Chinese)
- [21] LAYEK G C, MIDYA C, MUKHOPADHYAY S. Effects of suction and blowing on flow separation in a symmetric sudden expanded channel[J]. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, 2008, 13(4): 451-465.
- [22] 宋恒, 刘玉治, 王欣尧, 等. 限制域形状对分层火焰和燃烧不稳定性影响[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 215-224.
SONG Heng, LIU Yuzhi, WANG Xinyao, et al. Effects of confinement shapes on stratified flames and combustion instabilities[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 215-224. (in Chinese)
- [23] 舒彩霞, 杨佳, 廖庆喜, 等. 油菜联合收获导流式双筒旋风分离清选装置设计及试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(6): 1807-1820.
SHU Caixia, YANG Jia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of diversion type double-cylinder cyclone separation system for rapeseed combine harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1807-1820. (in Chinese)
- [24] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 43-53.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43-53. (in Chinese)
- [25] 胡克吉. 气力输送系统文丘里供料器的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
HU Keji. The research on Venturi feeder in pneumatic conveying system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [26] 黄标. 气力输送[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [27] 李诗久, 周晓君. 气力输送理论与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [28] 巩伦昆, 陈雄, 周省长, 等. 结构尺寸对固体燃料冲压发动机燃速影响的仿真研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 798-807.
GONG Lunkun, CHEN Xiong, ZHOU Changsheng, et al. Numerical investigation on effect of solid fuel ramjet geometry on solid fuel regression rate[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(5): 798-807. (in Chinese)
- [29] 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 56-59, 76.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 56-59, 76. (in Chinese)
- [30] 张钊, 宋文艳, 郑旭阳. 一种新型布局方式的冲压发动机燃烧室[J]. 推进技术, 2022, 43(4): 157-167.
ZHANG Zhao, SONG Wenyan, ZHENG Xuyang. A kind of combustor chamber with new layout for ramjet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(4): 157-167. (in Chinese)
- [31] 冯留海, 王江云, 毛羽, 等. 突扩突缩管内液-固冲蚀的数值模拟[J]. 石油学报(石油加工), 2014, 30(6): 1080-1085.
FENG Liuhai, WANG Jiangyun, MAO Yu, et al. Numerical simulation of liquid - solid erosion in sudden expansion and contraction tube[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2014, 30(6): 1080-1085. (in Chinese)
- [32] 蒋新生. 工程流体力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017.
- [33] 徐永国, 付金波, 李秀香, 等. 突扩流道内单相流动的数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(3): 205-207.
XU Yongguo, FU Jinbo, LI Xiuxiang, et al. Numerical simulation on flow in a sudden pipe expansion[J]. Turbine Technology, 2010, 52(3): 205-207. (in Chinese)
- [34] 朱宇, 张群, 徐华胜, 等. 轴向旋流器几何对回流区的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2684-2693.
ZHU Yu, ZHANG Qun, XU Huasheng, et al. Effects of geometry on characteristics of central toroidal recirculation zone generated by an axial swirler[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2684-2693. (in Chinese)
- [35] 王湛. 化工原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [36] 穆永航, 李莉, 孟繁佳, 等. 复合式施肥装置结构设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 280-284.
MU Yonghang, LI Li, MENG Fanjia, et al. Structure design and performance test of combined fertilizer absorption device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 280-284. (in Chinese)