

引用格式:

张乐, 刘亚夫, 吴明亮, 吴志立. 基于扩散环的油菜气送式集排器设计与排种性能分析. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 89–96.

ZHANG L, LIU Y F, WU M L, WU Z L. Structure optimization and sowing performance of the air-assisted centralized metering device for rapeseed based on the diffusion ring. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2025, 51(3): 89–96.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于扩散环的油菜气送式集排器设计与排种性能分析

张乐¹, 刘亚夫¹, 吴明亮^{1,2}, 吴志立^{1,2*}

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南现代农业装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 设计一种基于扩散环的油菜气送式集排器, 包括供种装置、输种管、扩散环、分配器、排种管、风泵、种箱等, 同时优化碗式枝状分配器的导流板锥顶角和扩散环位形, 利用DEM-CFD仿真试验研究倾斜 -10° 到 10° 状态下, 导流板锥顶角和扩散环位形对油菜气送式集排器排种均匀性的影响规律, 进而采用中心复合多因素台架试验验证仿真试验结果。仿真试验结果表明, 对于无扩散环的油菜集排器, 当锥顶角为 120° 时, 各行排量一致性变异系数为 $14.11\% \sim 18.96\%$, 当锥顶角为 150° 时, 平均变异系数最小, 为 13.65% , 说明无扩散环的油菜集排器排种均匀性差; 当扩散环位于靠近供气弯头位置(扩散环位形3)时, 集排器具有最佳排种均匀性, 且随着导流板锥顶角增加, 各行排量一致性变异系数随倾斜角的波动迅速减小, 锥顶角为 150° 和 165° 时, 波动范围分别为 $6.51\% \sim 8.11\%$ 和 $6.21\% \sim 7.66\%$ 。多因素台架试验结果表明, 具有扩散环位形3与锥顶角 150° 的集排器具有最佳的排种均匀性, 各行排量一致性变异系数为 $6.03\% \sim 7.03\%$, 与仿真试验结果相近, 两者的相对误差为 $-0.31\% \sim 2.22\%$ 。

关键词: 油菜; 气送式集排器; 扩散环位形; 导流板锥顶角; 变异系数

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)03-0089-08

Structure optimization and sowing performance analysis of the air-assisted centralized metering device for rapeseed based on the diffusion ring

ZHANG Le¹, LIU Yafu¹, WU Mingliang^{1,2}, WU Zhili^{1,2*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: An air-assisted centralized metering device for rapeseed was designed based on diffusion ring, including seed supply device, seed transport pipe, diffusion ring, distributor, seed discharge pipe, air pump, seed box, etc. The top angle of the distributor and the diffusion ring configuration were optimized for the bowl-type branch distributor. The influence of top angle of the distributor and diffusion ring configuration on the seed uniformity of the rapeseed air-assisted centralized metering device under tilted angles from -10° to 10° was investigated by DEM-CFD coupled simulation and verified by the central composite multi-factor bench test. The simulation results showed that the variation coefficient of consistency of row displacement(CV) fluctuated between 14.11% and 18.96% for the rapeseed air-assisted centralized metering without diffusion ring under the top angle of 120° . When the top angle was 150° , the average CV was the smallest, at 13.65% , indicating poor seed discharge uniformity in the rapeseed air-assisted centralized metering device without diffusion ring. When the diffusion ring was located near the air supply elbow(diffusion ring configuration 3), the air-assisted centralized metering device had the best seed distribution uniformity. With the increase of top angle of the distributor, the CV decreased

收稿日期: 2024-05-08

修回日期: 2025-03-08

基金项目: 湖南省农业农村厅农机研发制造推广应用一体化试点项目(2023-08)

作者简介: 张乐(1994—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事农业机械设计与试验研究, 2274425312@qq.com; *通信作者, 吴志立, 博士, 副教授, 主要从事农业机械创新设计研究, zhiliwu@hunau.edu.cn

rapidly with the tilt angle. When the top angle was 150° and 165° , the fluctuation range was 6.51%-8.11% and 6.21%-7.66%, respectively. The multi-factor bench test result showed that the air-assisted centralized metering device with diffusion ring configuration 3 and top angle of 150° had the best seed uniformity with the CV at 6.03%-7.03%, which was close to the simulation test result, with the relative error among -0.31%-2.22%.

Keywords: rapeseed; air-assisted centralized metering device; diffusion ring configuration; top angle of the distributor; variation coefficient

在油菜机械化种植推广过程中,为促进种子在田间的合理分布并提高播种作业的标准化水平,急需发展油菜精量直播技术以较大幅度地减少间苗的工作量^[1-2]。排种器是油菜精量直播机的核心部件,直接影响直播机的播种精度、均匀性、作业速度、制造成本等,按其结构形式和工作原理可分为机械式和气力式两种。机械式排种器结构简单,制造成本低^[3-4];气力式排种器结构复杂,排种精度高,其中,气送式集排器可适应不同特性作物种子的高速、宽幅、精量播种的需求,已在油菜精量播种中广泛应用^[5-8]。

XIAO等^[8]建立了油菜气送集排器直角弯管的DEM-CFD气固耦合仿真模型,分析了波纹型、孔型和普通圆管3种类型直角弯管对油菜种子运动特性的影响规律,发现波纹型、孔型直角弯管产生了近似“正弦波动”的种子流,显著提升了输送均匀性。雷小龙等^[9-14]采用“机械定量供种+气流分配成行”原理设计了油麦兼用型气送式集排器,提出了一种倾斜锥柱状型孔和锥孔轮交错排布结构的供种装置,利用碗式枝状分配器实现种子流均匀分配,基于DEM-CFD气固耦合仿真分析了油菜充种、供种、混合、输送过程中的气流场和种子运动特性,揭示了集排器分配机理,实现了油菜与小麦精量播种。王磊等^[15-18]设计了一种可实现24行排种、具有穹顶状分配装置的油麦兼用型气送式集排器,提出了一种匀种涡轮装置,进一步提升了油麦排种均匀性,随着倾斜角度由 -5° 增加至 5° ,油菜和小麦气送式集排器各行排量一致性变异系数分别在4.99%~14.57%和3.84%~19.32%范围内呈U形分布,表明种子总体具有向倾斜一侧导种口运移的趋势。巫文丞^[19]研究了振动-倾斜耦合工况下的油菜穴播集排器的充种性能和排种性能,随着倾斜角度增加,充种和排种性能明显降低。因此,提升倾斜状态下油菜气送式集排器各行排种均匀性是当前

油菜精量直播技术研究中亟待解决的关键问题。

气送式集排器高速精量排种的关键是实现种子的有序化和稳态运移,形成等时距均匀气固两相流。因此,气流+物料组成的双相流在不同结构排种装置中的运动规律与影响因素是近年来国内外学者和科研机构关注的热点^[2]。GIERZ等^[20-21]引入扩散环替代增压管,并优化分配器导流板结构,提出了一种新型小麦集排器,分析了倾斜状态下扩散环结构对黑麦和燕麦排种均匀性的影响,发现通过优化分配器和扩散环结构可提升种子的速度及均匀性,有效降低输送阻力,进而提高排种均匀性。YATSKUL等^[22]系统研究了法国库恩公司Kuhn TF1500气送式集排器的排种性能,分析了倾斜角度、分配器导流板、输种管长度、排种口堵塞等对小麦排种均匀性的影响,发现调整分配器导流板锥顶角可有效提升倾斜状态下小麦的各行排种均匀性。

综上所述,倾斜状态下种子均匀分配受分配器结构、田间地表形态、机器振动、输种气压等因素影响,且各行输种管道气量精准调配难,无法保证各行排量的一致性。扩散环可提升中小粒径种子-空气混合流在倾斜状态下的稳定性,通过优化分配器结构,尤其是改良导流板形状可有效提升气送式集排器排种均匀性,进而提高排种性能。笔者基于扩散环设计一种具有锥形导流板碗式枝状分配器的油菜气送式集排器,研究其在倾斜状态下分配器导流板锥顶角和扩散环结构及组成对油菜排种均匀性的影响规律,以期实现倾斜状态下的油菜精量均匀排种。

1 油菜气送式集排器结构设计与试验方法

1.1 集排器结构设计与选型

油菜气送式集排器结构如图1所示,包括供种装置、输种管、扩散环、分配器、排种管、风泵、种箱等,由额定风机进行定量风量输送,经过槽轮



1 种箱; 2 供种装置; 3 风泵; 4 横向输种管; 5 弯管; 6 收集袋; 7 扩散环; 8 纵向输种管; 9 倾斜装置; 10 排种管; 11 分配器。

图1 油菜气送式集排器台架试验结构

Fig.1 Bench test structure of the air-assisted centralized metering device for rapeseed

供种装置提供油菜籽, 形成空气-油菜籽气固两相混合流, 通过输种管与扩散环稳定输送至碗式枝状分配器, 均匀分配为8行, 经排种管排种。

分配器采用碗式枝状结构, 其入口直径大, 8个排种口直径小, 如枝桠一样均匀分布在碗状分配器表面, 两者之间采用流线型管道连接, 顶部借鉴小麦集排器分配器结构^[22], 引入锥形导流板, 因锥顶角是影响空气-油菜籽气固两相混合流稳定性的关键参数, 设计导流板锥顶角分别为120°、135°、150°、165°、180°(平面)的5种分配器, 如图2所示。

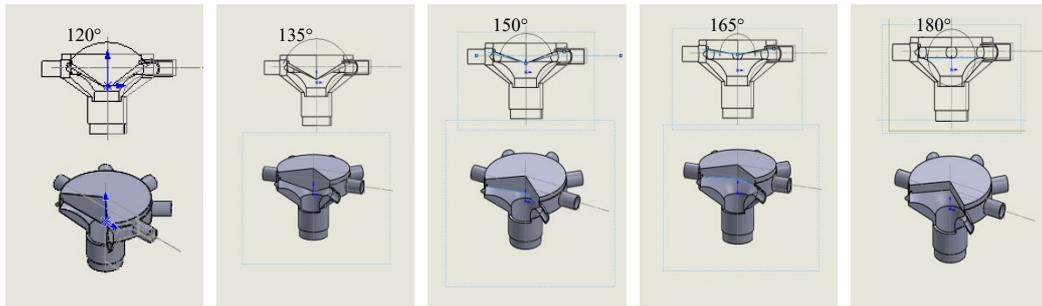


图2 具有不同导流板锥顶角的分配器结构

Fig.2 Structure of the distributor with different deflector's taper angles

扩散环是均匀分配种子流的关键结构, 具有凸环状结构, 为保证气流扰动与种子-气流撞击效率, 参考小麦气力式排种器^[20-22]及油菜联合播种机作业要求^[23], 确定扩散环外径为42 mm, 内径为35 mm, 高度为9 mm, 壁厚为0.87 mm, 肋部外圆角半径为4 mm, R4为外部凹陷, R5为内部凹陷, 如图3所示。采用3个扩散环, 基于扩散环之间间距, 组合为5种位形结构, 如图4所示, 其中, 位形1为对照组, 未添加扩散环。

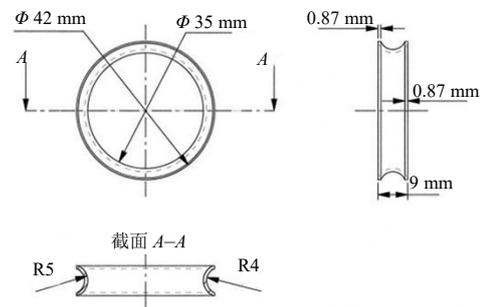
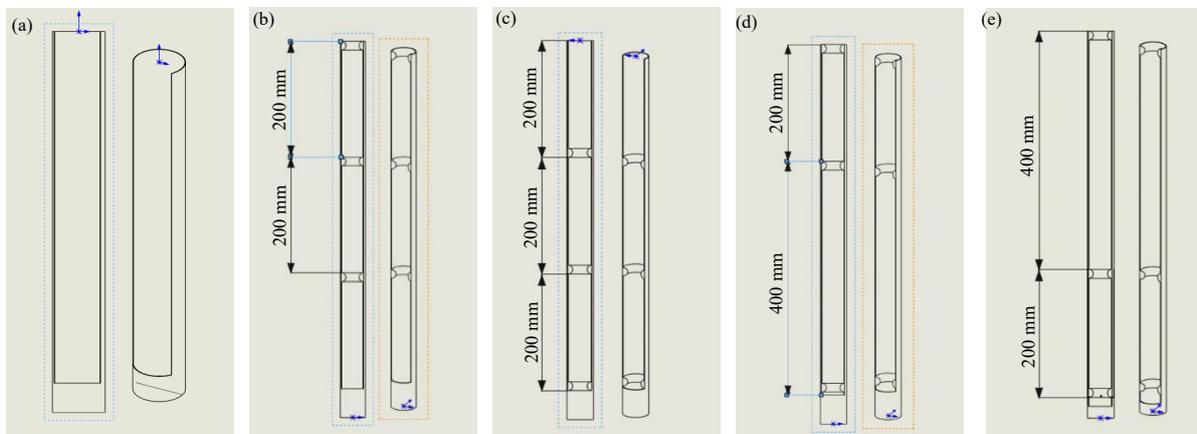


图3 扩散环结构

Fig.3 Structure of the diffusion ring



(a) 位形1; (b) 位形2; (c) 位形3; (d) 位形4; (e) 位形5

图4 扩散环位形结构

Fig.4 Configuration structures of diffusion rings

采用华曙高科Flight 403P型3D打印机制造分配头和扩散环,能量源为光纤激光器,打印材料为FS4200PA-F型尼龙材料,扫描速度10 m/s。

根据颗粒在输种管道的输送理论,入口风速(v_g)可表示为

$$v_g = k_L \sqrt{\rho_p} + k_D L_G \quad (1)$$

式中: k_L 为物料粒度系数; ρ_p 为颗粒密度; k_D 为物料特性系数; L_G 为管道长度。根据油菜的特性,将 k_D 设置为 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$,以确保其与 k_L 之间的相互作用,并且考虑到输种管道的长度通常小于2 m,对 k_D 与 v_g 的关系作出调整。在确定输送油菜的最佳运行状态下,将10%的冗余空间用于调整气流的速率,确定风速为20 m/s。

根据气固两相流管道入口风速和管道直径(D_G),求得风量(Q)为

$$Q = 3\ 600 v_g \frac{\pi D_G^2}{4} \quad (2)$$

通过计算确定风量为104.69 m³/h,故选定CZ001变频风机。

1.2 仿真试验

采用DEM-CFD气固耦合方法^[8,24-26]仿真分析集排器的气流场及油菜籽在集排器中的运动轨迹,解析油菜籽在集排器中的运动过程,进而分析具有扩散环的油菜气送式集排器排种机理。采用基于Eulerian-Lagrangian框架的CFD-DEM耦合方法,利用Fluent 2021(CFD)和EDEM 2020(DEM)软件分别进行流体动力学和离散元法的仿真分析。考虑到试验所用‘湘杂油6’油菜籽外表光滑且无黏附力,含水率为7.01%,发生碰撞时表现的力学行为呈现弹塑性^[27],采用Hertz-Mindlin的无滑动接触模型进行离散元仿真,采用Fluent软件中标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行气流场模拟,选择Freestream Equation流体阻力、Saffman升力和Magnus升力作为气流作用于油菜籽的力。气体流动为湍流运动,分配器材料为尼龙,供试油菜籽和尼龙的材料特性及其相互间的力学特性和气流场参数如表1所示。

选取供种量为4 g/min,风机风速为20 m/s,基于5种扩散环位形和5种导流板锥顶角(120°、135°、

150°、165°、180°),进行交叉组合试验,共125组,每组试验重复3次,共计375次试验。仿真时通过导入由不同分配器和扩散环位形构成的气送式集排器几何模型,采用Workbench 12.0的四面体结构化方法划分网格。根据油菜播种机作业质量要求^[23]和谷物条播机试验方法^[28],计算各行排量一致性变异系数(CV),以其为评价指标分析集排器在倾斜-10°、-5°、0°、5°、10°条件下的排种性能。试验在湖南农业大学农业工程实训中心进行。

表1 DEM-CFD仿真中供试油菜籽与集排器材料特性参数
Table 1 Values of rapeseed and material properties of the distributor used in the DEM-CFD simulation

材料	三轴尺寸/ (mm×mm×mm)	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	剪切模量/Pa	
油菜籽	2.00×2.00×2.00	1 060	0.250	1.10×10 ⁷	
尼龙		1 010	0.394	8.96×10 ⁸	
材料	碰撞恢复 系数	静摩擦 因数	动摩擦 因数	EDEM 步长/s	
油菜籽-油菜籽	0.60	0.50	0.01	5×10 ⁻⁶	
油菜籽-尼龙	0.75	0.30	0.01	5×10 ⁻⁶	
流体	重力加速度/ (m·s ⁻²)	密度/ (kg·m ⁻³)	黏性系数/ (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	CFD 气流速度/ 步长/s	CFD 气流速度/ (m·s ⁻¹)
空气	9.81	1.225	1.789 4×10 ⁻⁵	1×10 ⁻³	16

1.3 台架试验

采用台架试验进一步验证仿真试验的结果,台架试验设备及装置如图1所示。供试油菜籽为‘湘杂油6’,含水率为7.01%。该油菜籽的种子接近球体,测得千粒重为4.0~4.4 g,平均粒径1.6 mm。基于仿真试验结果,采用Design Expert进行中心组合多因素试验设计与方差分析,选取扩散环位形(A)和导流板锥顶角(B)各5个水平,评价指标为各行排量一致性变异系数,试验因素与水平如表2所示。

表2 中心组合多因素试验因素及水平
Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment by central composite designs(CCD)

水平	试验因素	
	扩散环位形(A)	导流板锥顶角(B)/(°)
-1.414	1	120
-1.000	2	135
0	3	150
1.000	4	165
1.414	5	180

2 试验结果与分析

2.1 仿真试验结果

由图5可知, CV随倾斜角变化曲线大多呈U形分布, 随着倾斜角由0°增至10°, CV明显增加, 表明集排器倾斜影响了空气-油菜籽的稳定性, 导致产生较大的排种不均匀性。当集排器采用光滑管(扩散环位形1), 锥顶角为120°时, 排种均匀性较差, CV为 14.11%~18.96%; 随着锥顶角增加, 平均变异系数先减小后增加, 当锥顶角为150°时, 平均变异系数最小, 为13.65%。当扩散环位于靠近供气弯头位置(扩散环位形3), 锥顶角为120°时, CV曲线呈对称U形分布, 随着倾斜角由0°增至10°, CV由9.11%升至13.84%; 随着锥顶角增加, CV曲线逐渐由U形转变为直线, CV随倾斜角的波动迅速减小, 当锥顶角

为 150° 和 165° 时, CV 的变化范围分别为 6.51%~8.11%和6.21%~7.66%, 倾斜条件下依然保持极佳的排种均匀性; 平均变异系数在5种扩散环位形下最低, 当锥顶角大于135°时, 平均变异系数为 6.86%~7.25%, 具有最佳排种均匀性。当扩散环位于远离供气弯头位置(扩散环位形2、4、5), 锥顶角为 120° 时, 随集排器倾斜, CV 在 9.11%~18.15% 范围内随机波动, 位形 2 波动范围最大; 随着锥顶角增加, 平均变异系数先减小后增加, 当锥顶角为 150° 时, 3 种扩散环位形的平均变异系数均最小, 其中, 扩散环位形 4 和位形 5 分别具有该锥顶角下的最小和最大平均变异系数, 分别为 7.27% 和 14.94%。这与燕麦和黑麦种子气送式集排器排种规律一致^[20-21], 表明通过调整导流板锥顶角及扩散环位形, 可降低 CV, 抵消倾斜对排种均匀性的影响。

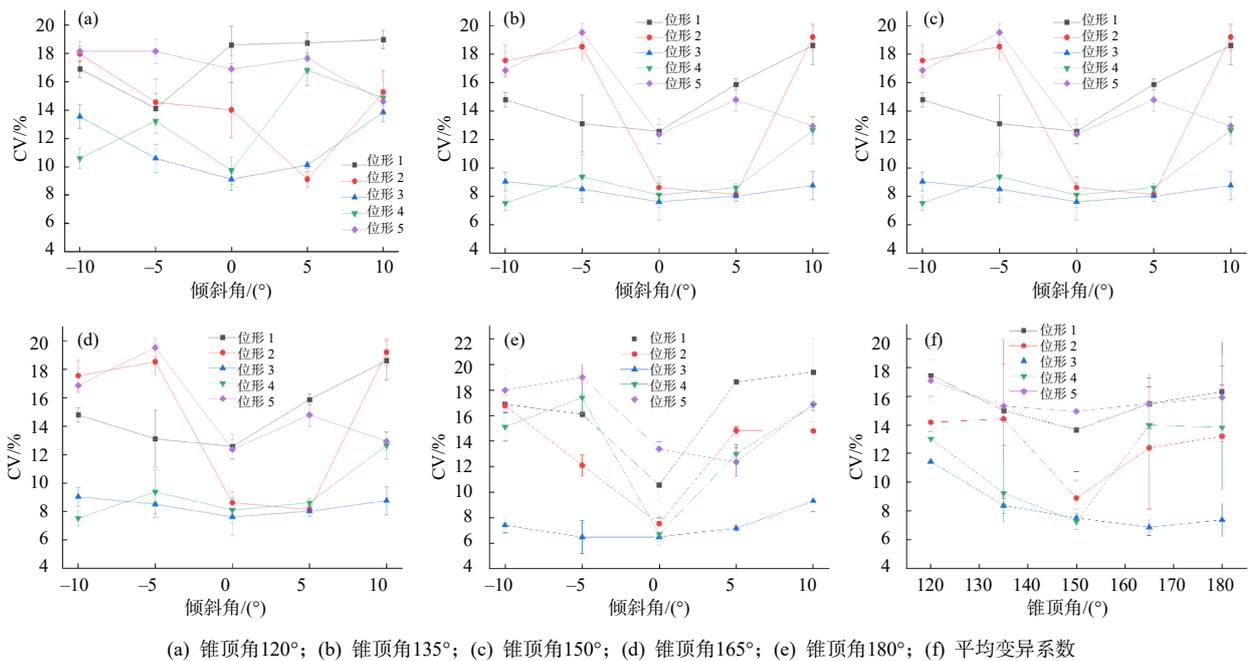


图5 不同扩散环位形和导流板锥顶角下不同倾斜角和平均集排器的各行排量一致性变异系数

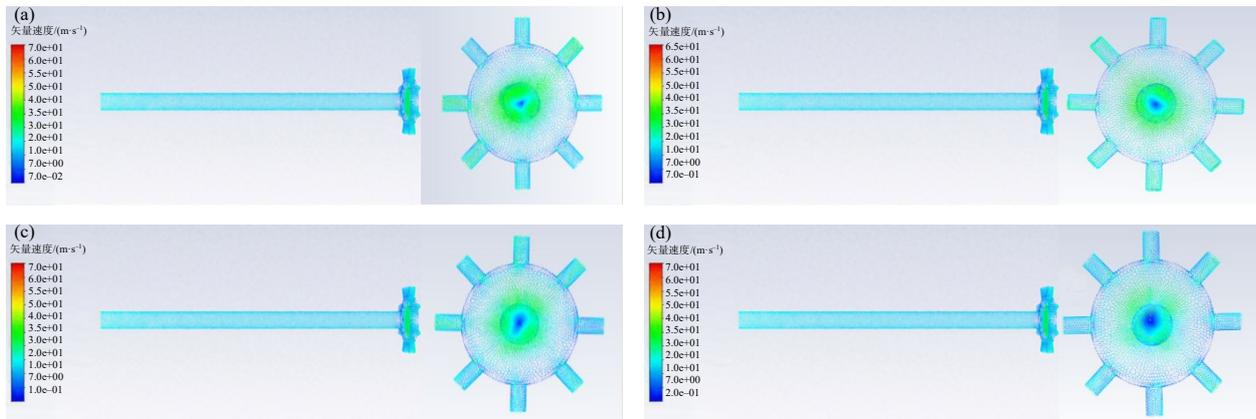
Fig.5 The CV for row-wise discharge uniformity of different tilted angles and average of the air-assisted centralized metering device under various diffusion ring configurations and top angles of the distributor

大量研究^[19-22]表明, 气送式集排器种子流在分配器内分布的均匀性主要受具有环形波纹(扩散环)的垂直扩散管结构以及集排器偏离垂直位置角度的影响, 前者在扩散管的横截面处迫使种子-空气流分散。由图6可知, 由于扩散环尺寸变化, 空气-

油菜籽双相流进入扩散环时速度急剧增加, 油菜籽沿着管壁内扩散并变得离散, 特别是在凹面壁面处, 气流的速度非常高, 交替变化的气流场导致产生较大的湍流, 从而实现对种子的减速和扰乱其运动轨迹的目的, 与V形波纹式增压管对种子流的扰

动分散作用类似^[29]。同时,分配器锥形导流板的存在增加了油菜籽的撞击频率,进而实现了油菜籽的

均匀输送与分配排种。



(a) 倾斜角0°, 扩散环位形1, 锥顶角150°; (b) 倾斜角0°, 扩散环位形3, 锥顶角150°; (c) 倾斜角10°, 扩散环位形1, 锥顶角150°; (d) 倾斜角10°, 扩散环位形3, 锥顶角150°

图6 空气-油菜籽两相流在集排器中的运动速度矢量图

Fig.6 Velocity vector diagram of the air-rapeseed two phase flow in the air-assisted centralized metering device

2.2 台架试验验证结果

从表3可知,在倾斜-5°时,扩散环位形和导流板锥顶角均显著影响CV;在倾斜10°时,扩散环位形显著影响CV,且二者交互作用极显著影响CV;在倾斜-10°和0°时,二者交互作用显著影响CV。

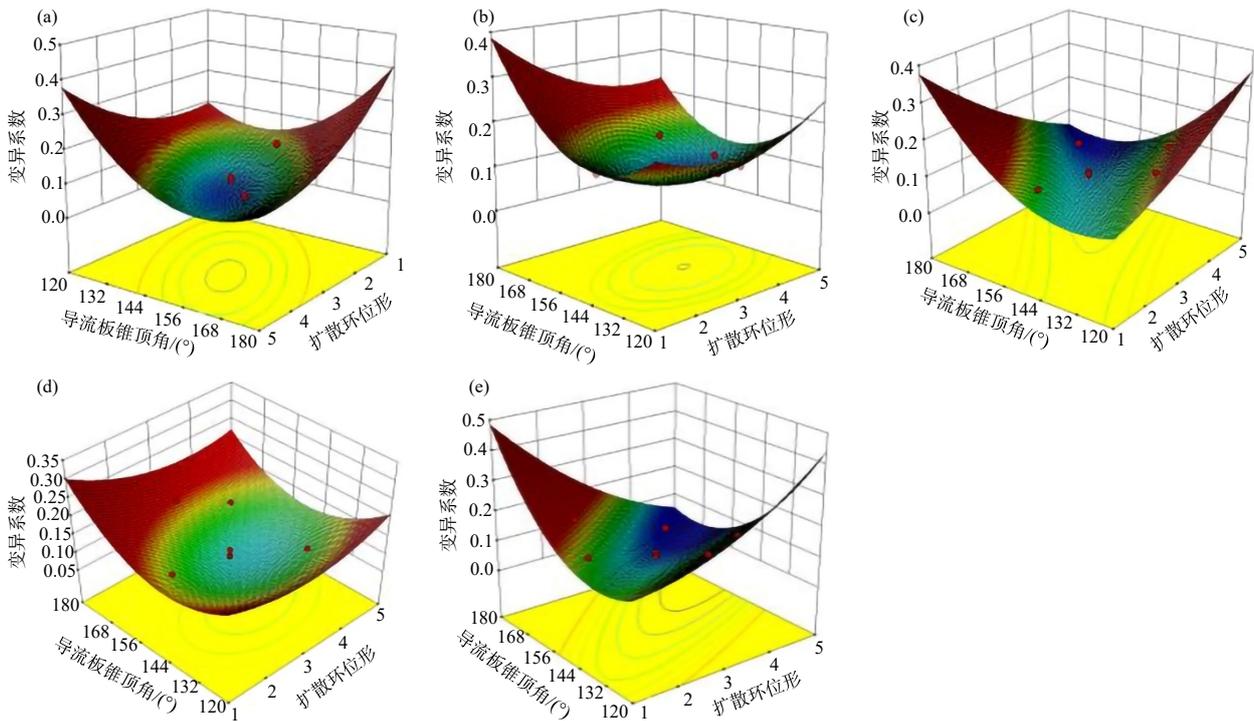
由图7可以看出,不同倾斜角(-10°、-5°、0°、5°、10°)条件下,CV最低点位于扩散环位形3与导流板锥顶角150°组合附近,表明集排器结构为扩散环位形3与锥顶角150°时,具有最佳的排种均匀性,CV随着倾斜角度变化在6.03%~7.03%波动,与仿真试验获得的6.51%~8.11%相近,其相对误差为-0.31%~2.22%,绝对值均在3%以内,表明台架与仿真试验结果一致,扩散环和导流板有助于形成等时距均匀空气-油菜籽两相流,尤其在倾斜状态下,有利于实现油菜籽的有序化和稳态运移,进而提升油菜气送式集排器的排种均匀性,这与小麦气送式集排器研究结果一致^[20-21]。

表3 中心组合多因素试验结果

Table 3 Result of orthogonal experiment by CCD

扩散环位形(A)	锥顶角(B)/(°)	各行排量一致性变异系数/%				
		-10°	-5°	0°	5°	10°
1	150	14.17	12.01	11.57	13.53	13.59
4	135	15.78	10.51	14.69	11.60	16.03
3	120	16.35	12.28	14.33	11.74	16.74
5	150	7.15	9.46	6.51	9.36	6.48
3	180	11.69	16.57	12.02	16.28	12.32
3	150	6.92	8.09	8.95	8.53	6.23
2	135	9.38	11.76	8.09	11.18	9.38
3	150	7.62	9.25	7.44	9.18	7.35
3	150	6.89	7.03	6.20	6.03	6.11
3	150	8.01	10.44	8.63	11.14	8.01
4	165	12.12	13.01	8.45	12.57	7.27
3	150	9.75	7.56	7.96	9.55	8.75
2	165	16.87	19.21	15.74	14.30	18.54
F	A	1.55	7.96*	4.00	2.61	12.62*
	B	0.17	16.71*	0.22	5.56	2.01
	A×B	5.65*	3.19	25.05*	0.46	37.62**

注: *表示P<0.05; **表示P<0.01。



(a) 倾斜角 -10° ; (b) 倾斜角 -5° ; (c) 倾斜角 0° ; (d) 倾斜角 5° ; (e) 倾斜角 10°

图7 中心组合多因素试验的响应曲面

Fig.7 Response surface diagram for orthogonal experiment by CCD

3 结论

1) 基于扩散环设计了一种具有锥形导流板碗式枝状分配器的油菜气送式集排器, 分配器选用8行碗式枝状结构, 引入锥形导流板, 采用凸环状扩散环替代增压管。

2) DEM-CFD耦合仿真分析结果表明, 当扩散环位于靠近供气弯头位置(扩散环位形3)时, 集排器具有最佳排种均匀性, 且随着导流板锥顶角增加, CV随倾斜角的波动迅速减小; 当锥顶角为 150° 和 165° 时, CV波动范围分别为 $6.51\% \sim 8.11\%$ 和 $6.21\% \sim 7.66\%$ 。

3) 台架验证试验表明, 具有扩散环位形3与锥顶角 150° 的集排器表现出良好的排种均匀性, 各行排量一致性变异系数为 $6.03\% \sim 7.03\%$, 与仿真试验结果相近, 两者的相对误差为 $-0.31\% \sim 2.22\%$ 。

参考文献:

- [1] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.
- [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.
- [3] 吴明亮, 官春云, 高晓燕, 等. 偏心轮型孔轮式排种器排种油菜极限转速试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 119-123.
- [4] 刘亚夫, 吴志立, 聂也之, 等. 基于EDEM的双排型孔轮式油菜排种器的排种性能分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 554-559.
- [5] LI Z D, WU J J, DU J H, et al. Experimenting and optimizing design parameters for a pneumatic hill-drop rapeseed metering device[J]. Agronomy, 2023, 13(1): 141.
- [6] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 22-33.
- [7] LEI X L, WU W C, CHANG C, et al. Seeding performance caused by inclination angle in a centralized seed-metering device for rapeseed[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 590.
- [8] XIAO Y, MA Z T, WU M L, et al. Numerical study of pneumatic conveying of rapeseed through a pipe bend by DEM-CFD[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1845.
- [9] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10-18.
- [10] 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.
- [11] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-10.

- 2016, 32(18): 26–34.
- [12] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 16–26.
- [13] 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.
- [14] LEI X L, HU H J, WU W C, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 203: 22–33.
- [15] 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.
- [16] 王磊, 席日晶, 廖宜涛, 等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62–72, 97.
- [17] 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.
- [18] 王磊, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 75–85.
- [19] 巫文丞. 振动-倾斜工况下油菜穴播集排器的排种性能试验与结构优化[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [20] GIERZ Ł, MARKOWSKI P. The effect of the distribution head tilt and diffuser variants on the evenness of sowing rye and oat seeds with a pneumatic seed drill[J]. *Materials*, 2020, 13(13): 3000.
- [21] GIERZ Ł, MARKOWSKI P, CHOSZCZ D J, et al. Effect of using deflector in the distributor head of a pneumatic seed drill on the oat seed sowing unevenness[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 15471.
- [22] YATSKULA, 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: 120–134.
- [23] DB43/T 1439—2018. 油菜联合播种机[S].
- [24] GUZMAN L, CHEN Y, LANDRY H. Coupled CFD-DEM simulation of seed flow in horizontal-vertical tube transition[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 909.
- [25] HU H J, ZHOU Z L, WU W C, 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.
- [26] LI Z D, ZHANG H, XIE R, et al. Evaluation on the performance of airflow distribution device of pneumatic seeder for rapeseed through CFD simulations [J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1781.
- [27] WOJTKOWSKI M, PECEN J, HORABIK J, et al. Rapeseed impact against a flat surface: physical testing and DEM simulation with two contact models[J]. *Powder Technology*, 2010, 198(1): 61–68.
- [28] GB/T 9478—2005. 谷物条播机 试验方法[S].
- [29] 高筱钧, 王世同, 吴晓鹏, 等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 47–56, 75.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正