

苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验

马文鹏 尤 泳 王德成 郇晓龙 祝 露
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为提高苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统工作性能,利用 EDEM 软件和 Fluent 软件对气送式集排系统工作过程进行联合仿真,以管道内部流场压力与速度变化情况、种子颗粒速度与受力情况为指标,分析波纹管 and 分配头结构参数对集排系统工作性能的影响,进而优化了其结构参数。以输种弯管弯径比、波纹管长度和分配头锥角为试验因素,以各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数为试验指标,进行 Box - Behnken 响应面分析仿真试验,获取集排系统最优结构参数组合。结果表明,当弯径比为 0.96、波纹管长度为 183 mm、锥角为 123.4°时,各行排量一致性变异系数为 3.06%,总排量稳定性变异系数为 3.17%。样机大田性能试验结果表明,在不同的螺旋输送机输送效率条件下,苇状羊毛种子、固体颗粒肥各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数均小于 5%。

关键词: 苜蓿; 土壤改良; 气送式集排器; DEM - CFD

中图分类号: S223.2⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0070-09 OSID: 

Optimal Design and Experiment of Pneumatic and Pneumatic Collecting and Discharging System of Alfalfa Cut-root Reseeding and Fertilizer Applicator

MA Wenpeng YOU Yong WANG Decheng HUAN Xiaolong ZHU Lu
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the working performance of the air-supplied collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator, the EDEM software and Fluent software were used to co-simulate the working process of the air-carrying collector and distributing device, using the internal flow field pressure and velocity changes in the pipeline, the seed particle velocity and the force as indicators to analyze the impact of configuration parameters of the corrugated pipe and the distribution head on performance of the platoon, and its structural parameters were optimized. Taking the elbow diameter ratio, length of the fold pipe and taper angle of the distribution head as the test factors, and coefficient of variation of the consistency of each row displacement and coefficient of variation of the total displacement as the test indicators, the Box - Behnken response surface analysis simulation set and row test was carried out to obtain the optimal combination of structural parameters of the collection system. The results showed that when the bending diameter ratio was 0.96, the length of the corrugated tube was 183 mm, and the taper angle was 123.4°, at this time, the coefficient of variation of the consistency of each row's displacement was 3.06%, and the coefficient of variation of the total displacement was 3.17%. The field performance test results of the prototype showed that under different conveying efficiency conditions of the screw conveyor, the consistency coefficient of variation of the row of reed wool seeds and solid granular fertilizer and the coefficient of variation of the total discharge were less than 5%.

Key words: alfalfa; soil amelioration; pneumatic collector; DEM - CFD

0 引言

目前制约我国苜蓿产业发展的因素主要有土壤板结、主根老化以及肥力低下等^[1-3]。研究表明,对多年生苜蓿地进行机械化松土、切根、施肥以及补播,可有效增加土壤含水率,增强土壤肥力,改善生物多样性,进而提高牧草产量^[4-6]。排种、排肥器作为苜蓿地改良装备的核心部件,其工作性能直接影响改良效果。气送式集排系统具有适用对象种类多、高速和高效等优点,可满足高宽幅、精量高效的现代化农业作业需求,已成为国内外播种施肥机发展的主要趋势^[7-10]。

气送式集排系统工作过程中气流与颗粒之间、颗粒与颗粒之间以及颗粒与壳体之间相互作用关系复杂,很难通过可视化试验直接观察或通过理论模型进行计算。随着计算机技术的不断完善与发展,DEM-CFD(气固耦合仿真计算)被广泛应用于流场与颗粒间相互作用机理的研究以及农业机械的优化设计之中^[11-16],目前国内学者已针对油菜籽、小麦、水稻及玉米等作物的气力式集排系统结构与工作参数进行了优化研究^[17-20]。

本文基于多年生人工苜蓿地机械化改良需求,设计一种苜蓿切根补播施肥机。采用 EDEM 软件和 Fluent 耦合的方式,对气送式集排系统工作过程进行数值模拟,探究波纹管 and 分配头结构参数对管道内部流场和种子运动特性的影响,进而对其进行优化;以输种弯管弯径比、波纹管长度和分配头锥角为试验因素,以各行排量一致性变异系数和总排量变异系数为试验指标,进行 Box- Behnken 响应面分析试验,获取最优结构参数组合,最后进行整机的田间性能试验。

1 整机结构与工作原理

基于多年生苜蓿地改良工艺要求设计的苜蓿切根补播施肥机,主要由气送式集排系统、自激振式切根松土铲以及智能电控系统组成,可一次性完成松土、切根、施肥以及补播牧草种子等作业,如图 1 所示。

工作时,整机由拖拉机牵引向前运动,双翼式切根松土铲对苜蓿行间土壤进行扰动,在进行松土作业提高土壤透气性的同时,可有效切断苜蓿根茎,促进苜蓿地表茎叶的生长;两套气送式集排系统,可实现禾本科牧草种子的套种以及侧深位施肥,合理提高地上空间利用率,使根系发育达到最佳状态,进而提高牧草年总产量;由旋转编码器和 PLC 等组成的智能电控系统,对种子和肥料的排量进行实时调控,

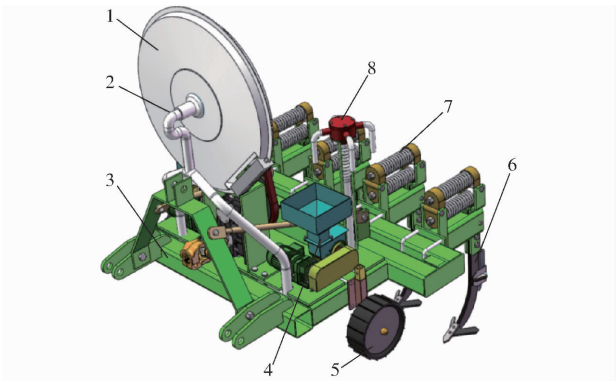


图 1 苜蓿切根补播施肥机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator

1. 风机 2. 气管 3. 机架 4. 供种机构 5. 地轮 6. 松土铲 7. 激振弹簧 8. 气送式集排器

保证其精确性和均匀性。

2 气送式集排系统设计

气送式集排系统主要由文丘里喷射器、输种弯管、波纹管、锥形分配头以及导种管组成,如图 2 所示。工作时,拖拉机动力输出轴带动风机转动,使各管道内部产生稳定的气流场,通过风阀可进行风压调节;向种箱(肥箱)中加入适量的种子(肥料颗粒),接通电机使螺旋输送器和搅种轮转动,轮上的搅种杆对种群进行扰动以提高其流动性,螺旋输送器将种子连续、均匀且定量地排入文丘里喷射器中,种子与气流混合形成气固两相流进入输种弯管;种子流在输种管中进一步混合后到达波纹管,在凹凸结构的扰动作用下,气流速度呈交替升降的状态,种子速度降低,种子与壁面碰撞几率增加,种子在波纹管道中的分布更加离散和均匀,锥形分配头内均匀排列的气道在内外压差作用下将种子流均匀分配,分配后的种子流进入导种管,完成排种作业。

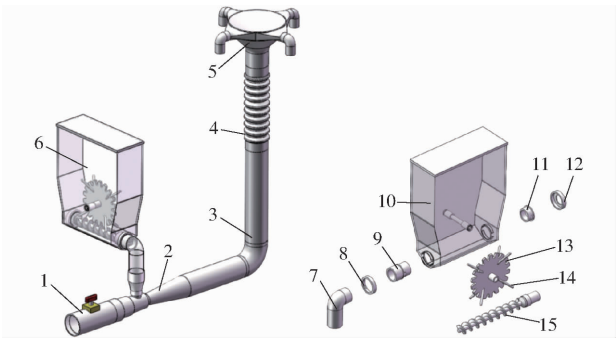


图 2 气送式集排系统机构示意图

Fig. 2 Structure diagram of pneumatic collection system

1. 风阀 2. 文丘里喷射器 3. 输送弯管 4. 波纹管 5. 锥形分配头 6. 水平螺旋输送机 7. 落种口 8. 前端螺盖 9. 前端挡头 10. 种箱 11. 末端挡头 12. 末端螺盖 13. 搅种轮 14. 搅种杆 15. 螺旋输送器

2.1 仿真试验

利用 EDEM 软件和 Fluent 软件对气送式集排器工作过程进行联合仿真,以管道内部流场压力与速度变化情况、种子颗粒速度与受力情况为指标,分析波纹管 and 分配头结构参数对集排器工作性能的影响,进而对其进行优化。

2.1.1 离散元模型建立

根据苜蓿种子的物理特性,在 EDEM 软件中利用球形颗粒组合的方法建立苜蓿种子仿真模型,如图 3 所示,设置颗粒间及颗粒与输送机各部件间接触模型为 Hertz – Mindlin 无滑动模型。为寻求最优苜蓿种子离散元模型接触参数组合,以苜蓿种子休止角和堆积角的实测值与仿真值误差为指标,对苜蓿种子模型参数进行标定^[21],标定后的模型参数见表 1。



图 3 苜蓿种子模型
Fig. 3 Alfalfa seed model

表 1 苜蓿种子离散元模型参数

Tab. 1 Parameters of discrete element model for alfalfa seeds	
参数	数值
种子密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 231
泊松比	0.50
种子-塑料碰撞恢复系数	0.50
种子-塑料静摩擦因数	0.50
种子-塑料滚动摩擦因数	0.25
种间碰撞恢复因数	0.47
种间静摩擦因数	0.24
种间滚动摩擦因数	0.08

2.1.2 波纹管波纹类型优化设计

2.1.2.1 气固耦合仿真试验

首先针对气固耦合分析区域即输种弯管和波纹管内部进行网格划分。采用 ANSYS 软件中的 Meshing 模块对流道进行网格划分,划分所得网格总数为 1 133 519,最大网格边长为 6.85×10^{-3} m,最小网格边长为 6.85×10^{-5} m。选取输种弯管端口为压力入口边界条件,波纹管端部为压力出口边界条件,如图 4 所示。

种子由压力入口处颗粒工厂生成,设置动态生成种子数量为 1 000 颗/s。设置气流入口速度为

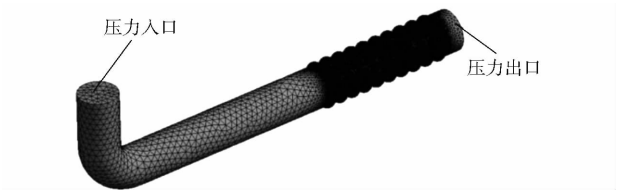


图 4 输种弯管和波纹管内部网格结构图
Fig. 4 Internal grid structure of seed conveying elbow and booster pipe

16 m/s。种子受到高速气流作用经输种弯管进入波纹管,与气流充分混合并减速后经压力出口排出,实现供种。在此过程中 EDEM 软件获取实时颗粒体的位置与接触信息,将获取的信息传递至 Fluent 软件中,Fluent 根据获取的信息模拟计算颗粒体对流场的影响情况,再将所获得的流场信息反馈到 EDEM 中,模拟流场对颗粒体的影响,依次循环,达到双向流固耦合的效果。仿真过程中设置 EDEM 时间步长为 1×10^{-6} s,Fluent 时间步长为 5×10^{-5} s,为 EDEM 的 50 倍;设置 Fluent 步数为 60 000 步,即仿真时间为 3 s;设置每个时间步最多迭代 50 次;为尽可能详细提取颗粒运动信息,在 EDEM 和 Fluent 内,每 0.01 s 保存一次数据。为探究波纹类型对种子颗粒运动特性的影响,揭示波纹管的工作机理,分别对长直圆管(简称 N 型)、U 型波纹管和 V 型波纹管进行数值模拟,如图 5 所示。

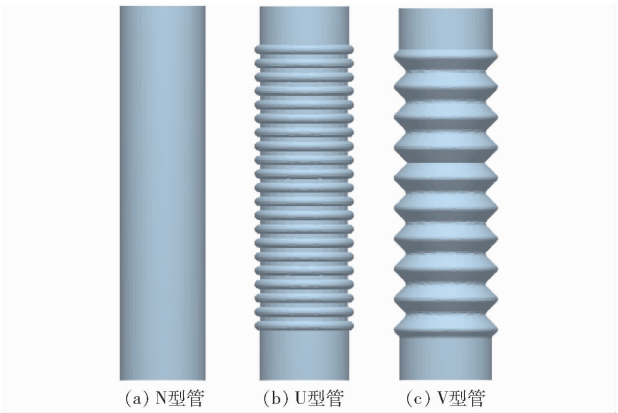


图 5 长直圆管与不同波纹类型波纹管
Fig. 5 Long straight round pipe and different corrugated type booster pipes

2.1.2.2 管道内部流场与颗粒运动状态分析

仿真结果显示,该气固耦合模型的气流结构具有良好的收敛性,在 0.2 s 时流场达到稳定状态。图 6 为不同类型管道内部流场压力云图,由图可知,N 型管道内部气流在经过弯管后产生较大的压力损失,在局部出现真空区,竖直管道内部轴向气流平均压力减小,径向压力分布不均;U 型管道内部气流平均压力呈逐渐降低趋势,轴向压力分布相对均匀,在波纹管阶段,垂直面压力由中心区域沿径向逐渐降

低,在 U 型波纹状壁面处的压力极低;V 型管道内部气流压力整体呈显著降低趋势,波纹管阶段气流压力在管道轴线两侧对称分布,垂直面压力中心区域沿径向显著降低,在 V 型波纹状壁面处的压力极低。

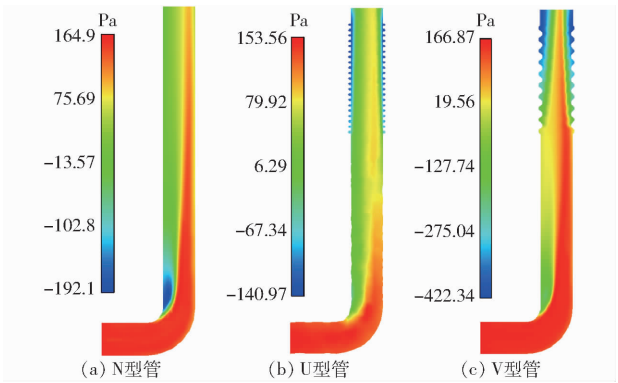


图 6 输送管道内部流场压力分布

Fig. 6 Pressure distributions of flow field in pipeline

图 7 为不同类型管道内部气流速度云图,由图可知,N 型管内部气流速度呈现先增大后减小的趋势,管道入口与出口的流速差值较小,整体分布相对均匀;U 型管内部流场速度沿轴线逐渐增大,沿管道径向向逐渐减小,波纹状壁面附近区域速度为 0,无局部扰流产生;V 型管道内部流场速度在波纹管阶段显著增大,垂直面由中心区域向四周壁面扩散的气流速度逐渐降低,由于波纹管为迭代的波峰、波谷结构,气压损失致使气流速度呈现交替变化趋势,气流场形成扰动较大的湍流,进而实现对种子的减速功能。

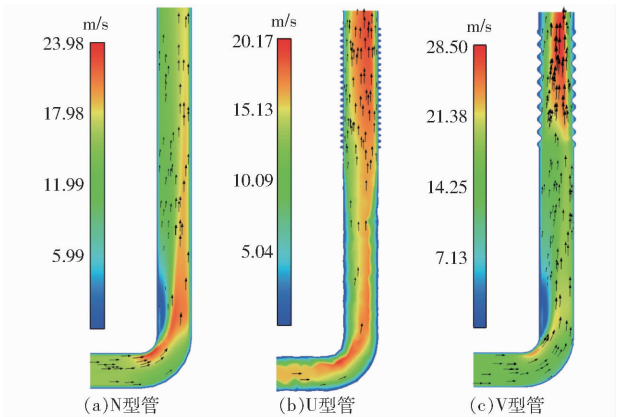


图 7 输送管道内部流场速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of flow field in pipeline

图 8 为不同类型管道内部流场颗粒分布及运动特性情况,由图可知,N 型管道入口区域种子颗粒在气流作用下经输送弯管到达纵向管道,在重力和气流曳力作用下不断加速经上方出口排出,颗粒速度在输送末端达到最大值,颗粒在轴向、径向分布不均,未与气流充分混合,影响集排器最终的排种效率;U 型管道内部颗粒在输送弯管阶段分布及运动状态与 N 型管相似,种子颗粒在进入波纹管道后,

轴线附近的颗粒仍处于加速状态,但处于波纹管壁附近的种子颗粒速度有所减小,颗粒的径向分布相对均匀;V 型波纹管内部种子颗粒在进入波纹管后,颗粒整体速度显著降低,颗粒轴向、径向分布均匀性明显优于 N 型、U 型管,究其原因,V 波纹状结构使气流速度以及种子颗粒所受曳力呈交替升降的状态,从而整体上降低种子颗粒速度,增加种子颗粒与壁面碰撞几率,促使种子颗粒在波纹管中的分布更加离散和均匀。综上所述,将波纹管壁面波纹形状设置为 V 型。

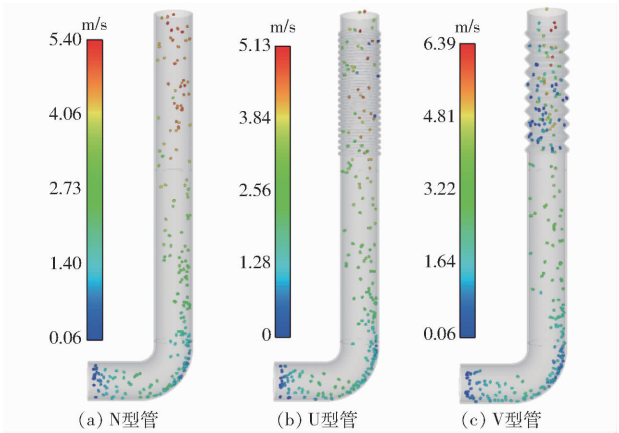


图 8 输送管道内部流场颗粒分布及运动特性

Fig. 8 Particle distribution and motion characteristics of flow field in pipeline

2.1.3 锥形分配头优化设计

2.1.3.1 仿真模型与方法

为探究不同分配头端盖类型对其内部流场特性的影响,将端盖形状设置为平形、凸圆弧形和凹锥形,其对应分配头分别为 P 型分配头、H 型分配头以及 Z 型分配头,分别进行内部流场仿真试验。3 种分配头网格结构如图 9 所示,选取分配头底部端口为压力入口边界条件,4 个导种管端口为压力出口边界条件,设置压力入口气流速度为 16 m/s。

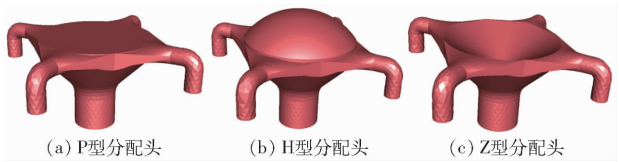


图 9 不同类型分配头网格模型

Fig. 9 Different types of distribution head grid models

2.1.3.2 仿真结果分析

各类型分配头 0.2 s 时内部流场速度云图如图 10 所示,此时流场处于稳定状态。由图 10a、10b 可知,P 型分配头和 H 型分配头内部流场速度呈先减小后增大的趋势,流速变化梯度较大,端盖附近存在较大面积的低速区域,不利于颗粒与气流的充分混合;流场流速分布不均,导种口之间流速差值极

大,存在较多涡流区,易造成气固两相流分配不均的现象,进而影响集排器的排种性能。由图 10c 可知,Z 型分配头内部流场流速整体呈中线对称式分布,流速由入口至出口呈逐渐降低趋势,变化梯度较小,未出现滞流区和涡流区,利于气固两项流的均匀分配。因此,最终确定分配头的端盖形状为凹锥形。

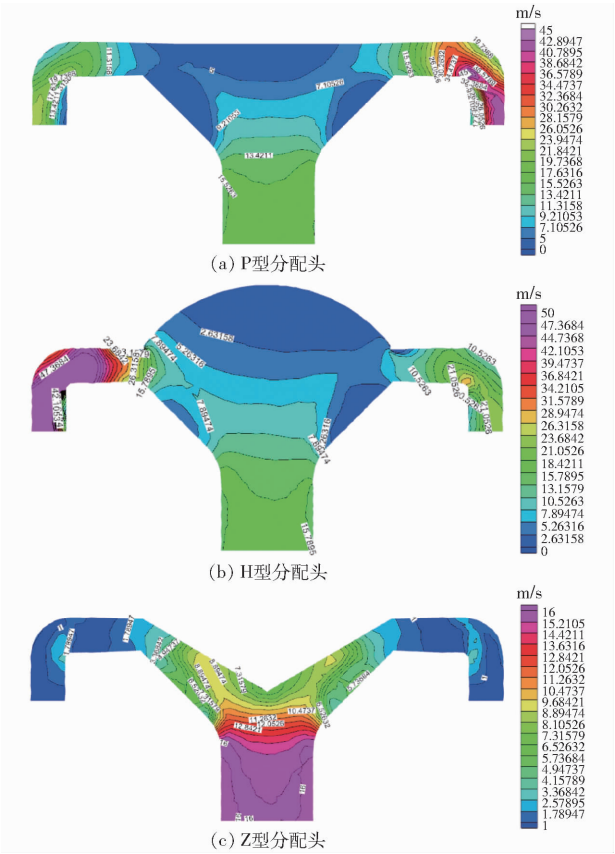


图 10 不同类型分配头内部流场流速云图
Fig. 10 Velocity cloud diagrams of internal flow field of different types of distribution heads

2.1.4 气流集排器结构参数优化设计

2.1.4.1 气固耦合仿真试验

首先建立气流集排器内部管道气固耦合模型,选取风机接口为压力进口边界条件,分配头的 4 个导种口为压力出口边界条件,在进种口处设置颗粒工厂,动态生成种子数量为 1 000 颗/s,气流入口速度为 16 m/s。待集排器内部流场运行稳定后获取其速度分布情况,如图 11 所示,可知气流速度在输种弯管、波纹管以及锥形分配头中具有明显的变化,为探究弯管、波纹管以及分配头结构参数对集排器工作性能的影响,优化结构参数,根据单因素试验结果及相关文献,选取弯径比 ω 、波纹管长度 L_b 以及锥角 θ_z 作为试验因素,各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数作为响应值,进行仿真排种试验,每个因素包括 3 个水平,在水平的选取上包含了单因素试验中每个因素的最佳水平,根据 BBD 设计

原理,三因素三水平响应面设计由 12 个析因点和 5 个中心点组成,共 17 组试验方案,5 个重复的试验是为了减少试验误差而采取的中心试验。取得试验结果后,采用三因素三水平的响应面分析法,得到二次回归方程,并获得最佳结构参数组合。因素编码见表 2,试验方案与结果见表 3,A、B、C 为因素编码值。

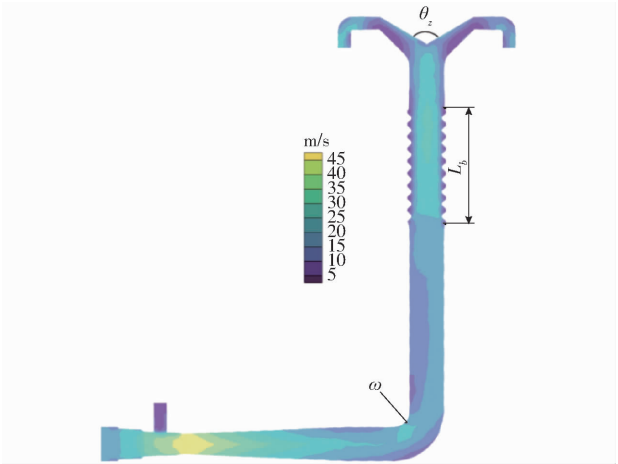


图 11 气流集排器流场速度云图
Fig. 11 Velocity cloud diagram of flow field of airflow collector ear of airflow collector

表 2 Box – Behnken 设计因素编码

Tab. 2 Box – Behnken design factor coding level			
编码	因素		
	弯径比	波纹管长度/mm	锥角/(°)
-1	0.55	140	90
0	0.95	180	120
1	1.35	220	150

表 3 试验方案及结果

Tab. 3 Test plan and results					
序号	因素			各行排量	总排量稳
	A	B	C	一致性变	定性变异
				异系数/%	系数/%
1	0	0	0	3.18	3.64
2	0	-1	1	7.33	8.47
3	0	0	0	2.81	3.32
4	1	-1	0	8.79	6.96
5	-1	0	-1	14.85	12.32
6	1	0	1	10.83	9.93
7	1	1	0	10.71	9.49
8	0	0	0	3.32	3.04
9	-1	0	1	6.95	6.33
10	-1	1	0	7.93	7.16
11	0	1	1	11.66	10.37
12	0	0	0	3.65	3.48
13	0	0	0	2.95	2.82
14	-1	-1	0	14.53	13.55
15	0	-1	-1	14.81	13.47
16	0	1	-1	9.28	7.38
17	1	0	-1	9.03	7.69

为比较经过不同导种口种子颗粒数量,仿真中在每个导种口端部设置统计框,如图 12 所示,每隔 5 s 记录统计框内通过的种子颗粒质量,连续记录 5 次,最终计算各行排量一致性变异系数 η_1 和总排量稳定性变异系数 η_2 。其计算式为

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{1}{i-1} \sum \left(\frac{\sum m_i - \overline{m}}{\overline{m}} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{1}{j-1} \sum \left(\frac{m_j - 4\overline{m}}{4\overline{m}} \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中 m_i ——导种口 i 的排种总质量, $i=1,2,3,4$
 m_j ——4 个导种口第 j 次统计总质量, $j=1,2,3,4,5$
 $\overline{m}$ ——各导种口排种总质量平均值

2.1.4.2 试验结果分析

通过对试验数据进行多元回归拟合,得到各试验因素对各行排量一致性变异系数 η_1 影响的数学回归模型为

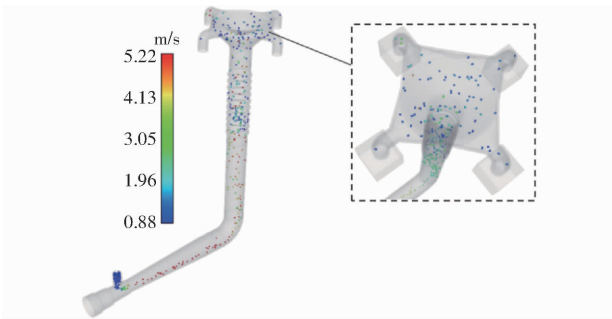


图 12 气流集排器内部颗粒分布情况

Fig. 12 Particle distribution inside airflow collector

$$\eta_1 = 3.182 - 0.613A - 0.735B - 1.400C + 2.130AB + 2.425AC + 2.465BC + 3.477A^2 + 3.832B^2 + 3.757C^2 \quad (3)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示,由表可知,模型具有统计学意义($p<0.0001$)。其中 ω 、 L_b 、 θ_z 、 ωL_b 、 $\omega \theta_z$ 、 $L_b \theta_z$ 、 ω^2 、 L_b^2 以及 θ_z^2 的 p 值均小于 0.05,说明以上各项对各行排量一致性变异系数的影响显著,相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。模型失拟项 F 值为 5.481 2, p 值大于 0.05,不显著,

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

方差来源	各行排量一致性变异系数				总排量稳定性变异系数			
	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p
模型	281.294 4	9	99.486 9	<0.000 1 **	204.320 2	9	74.448 4	<0.000 1 **
A	3.001 3	1	9.553 2	0.017 5 *	3.498 0	1	11.471 2	0.011 6 *
B	4.321 8	1	13.756 6	0.007 6 **	8.100 3	1	26.563 7	0.001 3 **
C	15.680 0	1	49.910 6	0.000 2 **	4.147 2	1	13.600 1	0.007 8 **
AB	18.147 6	1	57.765 2	0.000 1 **	19.891 6	1	65.231 3	<0.000 1 **
AC	23.522 5	1	74.873 9	<0.000 1 **	16.933 2	1	55.529 8	0.000 1 **
BC	24.304 9	1	77.364 4	<0.000 1 **	15.960 0	1	52.338 4	0.000 2 **
A^2	50.888 6	1	161.982 5	<0.000 1 **	28.190 1	1	92.445 1	<0.000 1 **
B^2	61.812 2	1	196.752 9	<0.000 1 **	49.898 1	1	163.633 0	<0.000 1 **
C^2	59.416 0	1	189.125 6	<0.000 1 **	43.656 4	1	143.164 3	<0.000 1 **
残差	2.199 1	7			2.134 6	7		
失拟	1.768 9	3	5.481 2	0.066 9	1.696 2	3	5.158 7	0.073 4
纯误差	0.430 3	4	99.486 9	<0.000 1 **	0.438 4	4		
总离差	283.493 6	16	9.553 2	0.017 5 *	206.454 8	16		

注：* 表示影响显著；** 表示影响极显著。

说明不存在其他影响显著的主要因素。

通过对试验数据进行多元回归拟合,得到各试验因素对总排量变异系数 η_2 影响的数学回归模型 $\eta_2 = 3.260 - 0.661A - 1.006B - 0.720C + 2.230AB + 2.058AC + 1.998BC + 2.588A^2 + 3.443B^2 + 3.220C^2$ (4)

回归方程的显著性检验如表 4 所示,由表可知,模型具有统计学意义($p<0.0001$)。其中 ω 、 L_b 、 θ_z 、 ωL_b 、 $\omega \theta_z$ 、 $L_b \theta_z$ 、 ω^2 、 L_b^2 以及 θ_z^2 的 p 值均小于 0.05,说

明以上各项对总排量稳定性变异系数的影响显著,相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。模型失拟项 F 值为 5.158 7, p 值大于 0.05,不显著,说明不存在其他影响显著的主要因素。

对建立的模型以各行排量标准离差率和总排量标准离差率均最小进行求解,得出最优工作参数组合,即弯径比为 0.96,波纹管长度为 183 mm,锥角为 123.4°,此时各行排量一致性变异系数为 3.06%,总排量稳定性变异系数为 3.17%。

2.2 台架验证试验

为验证获取的最佳参数组合正确性,搭建气送式集排器排种性能试验台,如图 13 所示。试验对象分别为苜蓿种子、苇状羊茅种子、固体颗粒肥。其中,苜蓿种子含水率为 14.79%,苇状羊茅种子含水率为 7.36%,颗粒肥料含水率为 4.21%。试验时,设置入口风速为 16 m/s,根据不同作物、肥料的施放量农艺要求以及机器的前进速度,设置相应的螺旋输送机输送效率,当风压和进种速度稳定时,每隔 5 s 记录收集袋内的颗粒质量,连续记录 5 次,每次试验重复 3 次取平均值,最终计算各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数以及破损率,试验结果见表 5。由表可知,在相同的结构参数、入口风速条件下,气送式集排器针对不同研究对象的各行排量一致性变异系数以及总排量稳定性变异系数均小于 5%,苜蓿种子和苇状羊茅种子破损率均小于 4%。

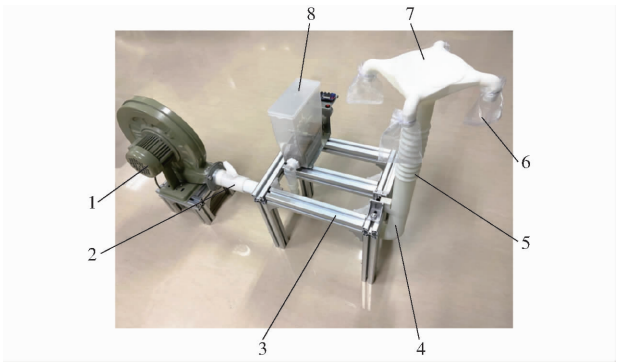


图 13 气送式集排器性能试验台架

Fig. 13 Pneumatic collector performance test bench

1. 风机 2. 风阀 3. 机架 4. 输种弯管 5. 波纹管 6. 收集袋
7. 分配头 8. 螺旋输送机

表 5 气送式集排器性能试验结果

Tab. 5 Pneumatic collector performance test results				
对象	输送效率/ (g·s ⁻¹)	各行排量 一致性变 异系数/%	总排量稳 定性变异 系数/%	破损率/ %
苜蓿种子	5	3.64	2.97	1.57
苇状羊茅种子	7	4.21	3.82	2.85
固体颗粒肥	25	4.38	4.89	6.14

3 整机排种排肥性能试验

基于优化试验确定的关键部件结构参数,完成 2BFQ-4 型多年生苜蓿切根松土补播施肥机的加工试制,并进行排种排肥性能试验。

2BFQ-4 型多年生苜蓿切根松土补播施肥机样机如图 14 所示,其配套动力源为东方红 MG654 型拖拉机,动力输出轴转速为 720 r/min,高压离心风机功率为 1.1 kW。选择河北省石家庄市北苏村农

田作为试验基地,试验田以含水率为 12.3%,坚实度为 45.9 kg/cm² 的沙壤土为主。为便于记录机具排出牧草种子、颗粒肥的质量,避免受到拖拉机振动、地面起伏等因素的影响,在机具静止状态下进行连续排种作业,如图 15 所示。工作时,拖拉机动力输出轴带动风机转动,通过风阀调节管道风压,通过控制水平螺旋输送机转速调节种肥输送效率。测定 2 min 内各导种口、导肥口排出的种子和肥料,计算各行排量一致性变异系数以及总排量稳定性变异系数,试验结果如表 6 所示。



图 14 2BFQ-4 型多年生苜蓿切根松土补播施肥机样机

Fig. 14 2BFQ-4 type perennial alfalfa ground cutting root loosening soil reseeding fertilizer applicator



图 15 整机排种排肥试验

Fig. 15 Seed and fertilizer discharge test of whole machine

表 6 整机排种排肥试验结果

Tab. 6 Test results of whole machine for seeding and fertilizing			
作业对象	输送效率/ (g·s ⁻¹)	各行排量一致性 变异系数/%	总排量稳定性 变异系数/%
苇状羊茅种子	5	2.64	4.67
	7	4.87	2.82
	10	4.34	3.18
固体颗粒肥	18	1.69	3.21
	25	3.25	4.01
	35	2.14	4.73

试验结果表明,在不同的螺旋输送机输送效率条件下,苇状羊毛种子、固体颗粒肥各行排量一致性变异系数和总排量变异系数均小于 5%。与台架试

验排种性能差异较小,表明采用拖拉机动力输出轴带动风机转动可提供较稳定的气流压强,整机排种、排肥性能可满足农艺要求。

4 结论

(1)利用 EDEM 软件和 Fluent 软件对气送式集排器工作过程进行联合仿真,以管道内部流场压力与速度变化情况、种子颗粒速度与受力情况为指标,分析波纹管 and 分配头结构参数对集排器工作性能的影响,进而对其进行优化。结果表明,V 型波纹管内部种子颗粒在进入波纹管后,颗粒整体速度显著降低,颗粒轴向、径向分布均匀性明显优于 N 型、U 型管;凹锥形分配头内部流场流速整体呈中线对称式分布,变化梯度较小,未出现滞流区和涡流区,利于气固两项流的均匀分配。

(2)以输种弯管弯径比、波纹管长度和分配头

锥角为试验因素,以各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数为试验指标,进行 Box - Behnken 响应面分析仿真集排试验,获取集排系统最优结构参数组合。结果表明,当弯径比为 0.96、波纹管长度为 183 mm、锥角为 123.4°时,各行排量一致性变异系数为 3.06%,总排量变异系数为 3.17%。在相同条件下进行实际台架验证试验,气送式集排器针对不同研究对象的各行排量一致性变异系数以及总排量稳定性变异系数均小于 5%,苜蓿种子和苇状羊茅种子破损率均小于 4%。

(3)试制多年生苜蓿切根补播施肥机,并进行大田排种排肥性能试验。试验结果表明,在不同的螺旋输送机输送效率条件下,苇状羊毛种子、固体颗粒肥各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数均小于 5%,多年生苜蓿切根补播施肥机达到了人工苜蓿地改良的技术要求。

参 考 文 献

[1] 高爱民,张雪坤,王咏梅,等. 机械压实对不同类型苜蓿地土壤结构影响的试验研究[J]. 林业机械与木工设备,2019,47(12):53-58.
GAO Aimin, ZHANG Xuekun, WANG Yongmei, et al. Experimental study on effect of mechanical compaction on the soil structure in different types of alfalfa fields[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019,47(12):53-58. (in Chinese)

[2] 雍小华,贾志宽,韩清芳. 不同土层深度苜蓿断根后对其株高生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):85-89.
YONG Xiaohua, JIA Zhikuan, HAN Qingfang. Effect of root pruning in different depth on height of alfalfa growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010,28(2):85-89. (in Chinese)

[3] 张永亮,张丽娟,于铁峰,等. 禾豆组合与间作方式对牧草产量及产量稳定性的影响[J]. 草地学报,2019,27(5):1411-1418.
ZHANG Yongliang, ZHANG Lijuan, YU Tiefeng, et al. Effects of grass-legume combinations and intercropping patterns on the forage yield and yield stability[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019,27(5):1411-1418. (in Chinese)

[4] 刘光瑞. 深松浅旋对退化苜蓿草地生产力、品质及土壤性质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2019.
LIU Guangrui. Effects of subsoiling and shallow plowing on the productivity, quality and soil property of degraded alfalfa grassland[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019. (in Chinese)

[5] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,35(16):1546-1555.
ZHANG Yingjun, ZHOU Jiqiong, YANG Gaowen, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands[J]. Chinese Science Bulletin, 2020,35(16):1546-1555. (in Chinese)

[6] 毕盛楠. 施肥补播对退化苜蓿草地生产性能及牧草品质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2019.
BI Shengnan. Effect of fertilization and reseeding on the production and forage quality of degraded alfalfa grassland[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)

[9] 谢宇峰,许剑平,梁玉成. 高速宽幅气送式集排精量播种施肥机的研制[J]. 农业科技与装备,2013(5):19-21.
XIE Yufeng, XU Jianping, LIANG Yucheng. Design of high-speed broad width pneumatic conveying concentration feeding precision seeding and fertilizing machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2013(5):19-21. (in Chinese)

[10] 雷小龙,李蒙良,张黎骅,等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,

- 34(19):9-18.
- LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(19):9-18. (in Chinese)
- [11] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):92-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.013. (in Chinese)
- [12] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):43-51.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):43-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)
- [13] YANG S, LUO K, ZHANG K, et al. Numerical study of a lab-scale double slot-rectangular spouted bed with the parallel CFD-DEM coupling approach[J]. Powder Technology, 2015(272):85-99.
- [14] LI H C, LI Y M, GAO F. CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88:111-119.
- [15] LIU M L, WEN Y Y, LIU R Z, et al. Investigation of fluidization behavior of high-density particle in spouted bed using CFD-DEM coupling method[J]. Powder Technology, 2015(280):72-82.
- [16] SALIKOV V, ANTONYUK S, HEINRICH S, et al. Characterization and CFD-DEM modelling of aprismatic spouted bed[J]. Powder Technology, 2015(270):622-636.
- [17] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
- LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
- LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaoou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):171-180. (in Chinese)
- [19] 何亚凯,杨学军,翟长远,等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):54-63.
- HE Yakai, YANG Xuejun, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):54-63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.006. (in Chinese)
- [20] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD-DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):81-89.
- YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):81-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [21] 马文鹏,刘泳,王德成,等. 基于 RSM 和 NSGA-II 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(8):136-144.
- MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-II[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):136-144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200815&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.015. (in Chinese)