doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007

油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验

雷小龙　廖宜涛　张闻宇　李姗姗　王　都　廖庆喜
(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为研究种子在油麦兼用气送式集排器输种管道中的迁移规律,运用 EDEM - CFD 耦合仿真方法分析了输种管道直径、长度、横纵管道长度比(k)和接头形式对种子运动特性和气流场的影响;台架试验研究了输种管道结构对排种性能的影响。结果表明:种子在输种管道中受力与速度主要沿管道轴线方向,与气流速度相同,种子迁移的动力主要源自流体阻力。管道出口处种子速度随 k 增加呈先降后升的趋势,输种管道结构显著影响各行平均排种量和各行排量一致性变异系数。当输种管道直径、长度和 k 分别为 42 mm、1.0 m 和 2/3 时,管道出口处种子速度、两相流相对速度和压强损失较小,排种性能较优。接头为弯管的输种管道出口处种子速度明显高于接头为折线形管道,两相流相对速度表现为弯管低于折线形接头;弯管半径 100 mm 的输种管道气流场和种子分布均匀,压强损失较小。供种装置转速为 10 ~ 40 r/min 时,排种油菜、小麦时各行排量一致性变异系数分别低于 4.0% 和 5.0%,总排量稳定性变异系数和种子破损率分别低于 1.0% 和 0.1%。

关键词: 油菜; 小麦; 气送式集排器; 输种管道; 气固两相流; 排种性能
中图分类号: S223.2^{+}3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)03-0057-12

Simulation and Experiment of Gas - Solid Flow in Seed Conveying Tube for Rapeseed and Wheat

LEI Xiaolong　LIAO Yitao　ZHANG Wenyu　LI Shanshan　WANG Du　LIAO Qingxi
(*College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In order to study seed movement law of seed conveying tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat, effects of seed conveying tube's diameter and length, ration of lateral length to longitudinal length (k), and joint's type on seed motion characteristics and airflow field were analyzed with EDEM - CFD coupling approach. Impact of seed conveying tube's structure on seeding performance was studied by bench experiments. The results showed that seed movement direction which was the same as airflow direction in seed conveying tube was in axis direction and seed motion source was the drag force. The seed velocity in seed conveying tube's outlet was increased first and then decreased with the increase of ratio of lateral length to longitudinal length (k). The each row's averaged seeding quantity and apiece row consistency variation coefficient of seeding quantity were affected significantly by seed conveying tube's structure. When seed conveying tube's diameter, length and k was 42 mm, 1.0 m and 2/3, respectively, seed velocity, relative velocity between particle and airflow and seed distribution were good with lower pressure loss and better seeding performance. Seed velocity of conveying tube with bends was larger than that of conveying tube with mansard joint. The relative velocity of conveying tube with bends was lower than that of conveying tube with mansard joint. Airflow field and seed distribution was uniform with larger seed velocity and lower pressure loss in conveying tube with bends of 100 mm of radius. When rotational speed of seed feed device was within the range of 10 ~ 40 r/min, apiece row consistency variation coefficient of seeding quantity of rapeseed and wheat was less than 4.0% and 5.0%, respectively. The stability of full seeding quantity and seed damage rate were no more than 1.0%

收稿日期: 2016-06-30　修回日期: 2016-08-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51575218、51275197)、国家油菜产业体系专项(CARS-13)、湖北省技术创新专项(2016ABA094)和"十二五"国家科技支撑计划项目(2013BAD08B02)
作者简介: 雷小龙(1989—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: leixl1989@163.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生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

and 0.1%, respectively, for both rapeseed and wheat. The results provided the basis for structure optimization of air-assisted centralized metering system and improvement of seeding performance.

Key words: rapeseed; wheat; air-assisted centralized metering device; seed conveying tube; gas-solid flow; seeding performance

引言

精量播种和通用性强是提高油菜、小麦等作物产量和机具利用率的重要途径[1-2],气送式集排器具有适应作物种类多、高速和高效等优点,已成为国内外播种机排种器发展的主要趋势[3]。国外以大型气送式播种机为主,幅宽和工作效率均较高,适应大型农场播种作业和旱区作业,不适应我国当前土地经营方式与水旱轮作种植模式,且价格昂贵。气送式集排器采用机械供种、气流输送分配成行的播种方式[4],其中输种管道影响种子在管道中的分布状态和分配效果。

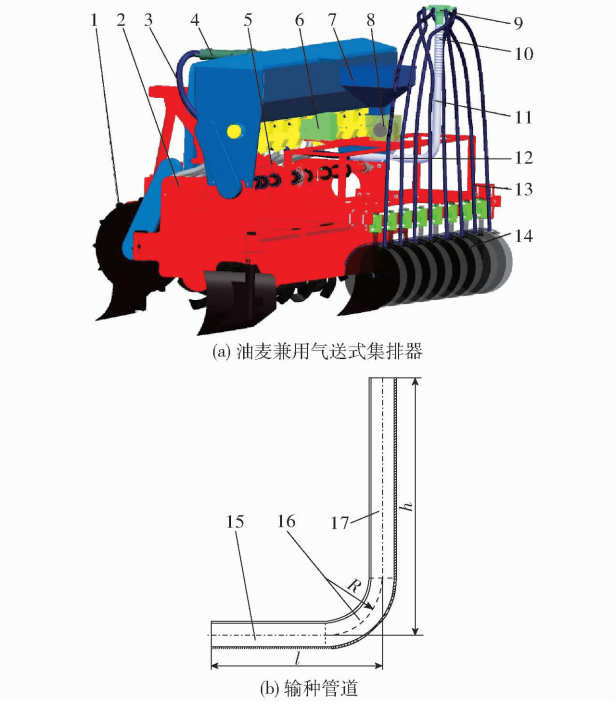
输种管道结构不仅影响种子的运动状态,对播种机的整机结构和压强损失等也会产生影响。常金丽等[5]根据排种系统的整体高度设计了垂直输送管道的长度,并计算了压强损失。相关学者也开展了物料在管道中运动的动力学研究,计算了铅垂管道和弯管的压强损失[6-7]。由于种子在输种管道内形成的气固两相流较复杂,用数学模型难以准确描述种子的运动特性及气流场,需采用辅助软件进行分析。近年来,随着离散单元法(DEM)和计算流体动力学(CFD)的发展,数值模拟技术已成为研究多相流和结构优化的重要工具[8-10]。龚智强等[11]运用 Fluent 软件研究了吸种区域气流场中种子的受力情况,确定了影响种子受力的因素。林达平等[12]利用 Fluent 软件模拟了细颗粒在管道内流动时的运动特性。杜俊等[13]利用 CFD-DEM 方法对气固两相流在带有弯管的气力输送管道内的流动特性进行数值模拟。韩云龙等[14]采用数值模拟方法分析了管道结构形式对颗粒物沉降的影响。气固耦合广泛用于研究颗粒、颗粒与颗粒间和颗粒与壳体间的运动状态及气流场的特征[15-17]。并且,气固耦合在农业工程领域被用于研究颗粒在气流场的分布及优化工作参数[18-19]。

为提高气送式集排器的通用性和排种均匀性,前期已设计一种油麦兼用倾斜锥孔轮式供种装置,可实现油麦兼用及变量供种[20]。鉴于种子在输种管道的运动状态及分布影响集排器的排种均匀性,种子与气流形成的气固两相流又难以通过数学模型描述,本文采用离散元仿真软件 EDEM 与计算流体动力学软件 Fluent 耦合的方法,对种子在输种管道中的迁移过程进行气固两相流模拟。仿真研究输种管道结构对种子运动特性和气流场的影响,并通过试验研究输种管道结构对集排器排种性能的影响,明确较优的管道结构形式。

1 油麦兼用集排器输种管道结构

1.1 油麦兼用集排器结构与工作原理

油麦兼用气送式集排器主要由供种装置、供料装置、分配器、输种管道、增压管、风机和开沟器等组成,如图 1a 所示。播种机工作时,地轮转动驱动中间过渡轴转动,从而带动变速装置与供种装置转动,供种装置根据农艺播种要求提供的均匀种子流与风机产生的高速气流在供料装置中混合形成气固两相流,在输种管道中气固两相流充分混合,同时输送种子流至增压管进入分配器中均匀分配成行,进入导种管至开沟器,完成播种过程。以幅宽为 2 000 mm 的油麦兼用型气送式集排器为研究对象,其主要技术参数如表 1 所示。



(a) 油麦兼用气送式集排器

(b) 输种管道

图 1 油麦兼用气送式集排器与输种管道结构图

Fig. 1 Structure sketches of air-assisted centralized metering device and seed conveying tube for rapeseed and wheat

1. 地轮 2. 播种机机架 3. 供气管道 4. 风机 5. 中间过渡轴 6. 变速装置 7. 种箱 8. 供种装置 9. 分配器 10. 增压管 11. 输种管道 12. 供料装置 13. 导种管 14. 双圆盘开沟器 15. 横向管道 16. 接头 17. 纵向管道

表 1　气送式集排器主要技术参数

Tab. 1　Main parameters of air-assisted centralized metering device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 310×1 902×1 618(高度根据输种管道长度而定)
适用作物类型	油菜、小麦
风机功率/kW	2.2
作业幅宽/m	2.0
作业速度/(km·h^{-1})	2.5～9.0
播种行数	6～8(可选)
行距/mm	150～280(可调)
锥孔轮数量	1～6(可调)
变速装置传动比	0.5～2.0(可调)
供种机构转速/(r·min^{-1})	10～50

输种管道是连接供料装置与增压管的关键部件,影响分配器的安装位置、管道压强损失和种子速度等,进而可能影响排种均匀性等,其结构如图 1b 所示。输种管道包括横向管道、纵向管道和接头 3 部分,横向管道与供料装置连接,纵向管道与增压管连接,横向管道与纵向管道间通过接头连接起来。种子在横向管道(长度为 l)向纵向管道(长度为 h)运动过程中改变种子迁移轨迹,气流与种子相互作用推动种子迁移,将气固两相流送入分配器。

1.2　输种管道主要结构参数与气固耦合模型

种子在输种管道中运动状态主要受输种管道结构参数及工作参数影响,结构参数主要为管道直径、管道长度和接头类型,工作参数主要包括风速与料气输送比。

1.2.1　输种管道主要结构与工作参数

根据颗粒在输种管道的输送理论[5],入口风速可表示为

$$v_g = k_L\sqrt{\rho_p} + k_d L \tag{1}$$

式中　v_g——入口风速,m/s

k_L——物料粒度系数

ρ_p——颗粒密度,Mg/m^3

k_d——物料特性系数

L——管道长度,m

当颗粒的粒径在 1～10 mm 时,k_L 取值为 16～20,由于油菜和小麦的当量直径低于 5 mm,因此取 k_L 为 16。油菜、小麦密度分别为 1 060、1 350 kg/m^3。物料特性系数 k_d 取值为$(2\sim5)\times10^{-5}$,而输种管道长度一般不超过 2 m,研究中忽略物料特性系数对风速的影响。为保证输种管道气流的速度,保留 10% 的冗余时油菜、小麦的输种速度分别为 18.12、20.45 m/s。

料气输送比是衡量种子在气流中的质量比例,可表示为

$$\psi = \frac{G_p}{G_g} \tag{2}$$

其中

$$G_g = \rho_g \frac{\pi D^2}{4} v_g \tag{3}$$

式中　ψ——料气输送比

G_p——单位时间颗粒输送质量,g/s

G_g——单位时间气流输送质量,g/s

ρ_g——空气密度,取 1.205 kg/m^3

D——输种管道直径,m

综合式(1)～(3),得

$$D = \sqrt{\frac{4G_p}{\pi\psi\rho_g v_g}} \tag{4}$$

根据油麦兼用的播种量要求,在前进速度为 3.6 km/h 时,单位时间油菜、小麦的播种量范围分别为 0.63～1.43 g/s 和 10.49～35.98 g/s。由于种子在输种管道中的气固两相流为稀相流,料气输送比 ψ 取值范围为 0.1～1.0,本研究取值为 0.9,得到输种管道直径为 41.96 mm。结合管道实际尺寸,修正输种管道直径为 42 mm。

1.2.2　气固两相流的数学模型

为分析种子在气流场中的运动状态,采用计算流体力学和离散元法分析气固两相流的特性。输种管道内气体流动属于不可压缩湍流运动,颗粒在气流场中的运动遵循牛顿第二定律。

湍流运动严格遵循质量守恒和动量守恒规律,在计算流体力学中对应的方程为连续性方程和 Navier－Stokes 方程[16],表达式为

$$\frac{\partial(\varepsilon_g\rho_g)}{\partial t} + \nabla\cdot(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g)}{\partial t} + \nabla\cdot(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{v}_g\otimes\boldsymbol{v}_g) = -\varepsilon_g\nabla p + \varepsilon_g\nabla\cdot\boldsymbol{\tau} + \varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{g} - R_{gp} \tag{6}$$

其中

$$R_{gp} = \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_{p,i}/\Delta V \tag{7}$$

式中　ε_g——气相体积分数,%

p——气相压强,Pa

$\boldsymbol{\tau}$——粘性应力张量

R_{gp}——单元网格的气固两相流间的动量交换量

g——重力加速度,m/s^2

$\boldsymbol{F}_{p,i}$——作用于颗粒 i 的合力

n——特定网格内的颗粒数量

ΔV——网格的体积

由于颗粒占输种管道中气流体积小于 10%,采用 Lagrangian 方法分析颗粒在输种管道无碰撞的运

动。在气流场中,颗粒受到重力、浮力、流体阻力、Saffman 升力和 Magnus 升力等的作用,即

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{F}_D+\boldsymbol{F}_{GB}+\boldsymbol{F}_{Sa}+\boldsymbol{F}_{Ma} \tag{8}$$

$$I_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=T \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{F}_D$——流体阻力,N

$\boldsymbol{F}_{GB}$——重力与浮力的合力,N

$\boldsymbol{F}_{Sa}$——Saffman 升力,N

$\boldsymbol{F}_{Ma}$——Magnus 升力,N

I_{p}——颗粒转动惯量,kg·m^2

$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{p}}$——颗粒的角速度,rad/s

T——颗粒扭矩,N·m

$\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}$——颗粒速度,m/s

t——时间

作用在颗粒上的流体阻力为

$$\boldsymbol{F}_D=\frac{3}{4}C_{\mathrm{D}}\frac{m_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{g}}(\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}})|\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}|}{\rho_{\mathrm{p}}d_{\mathrm{p}}} \tag{10}$$

式中 C_{D}——阻力系数

阻力系数 C_{D}[21]计算式为

$$C_{\mathrm{D}}=\begin{cases}\dfrac{24}{Re_{\mathrm{p}}} & (Re_{\mathrm{p}}\leqslant 1)\\ \dfrac{24}{Re_{\mathrm{p}}}(1+0.15\,Re_{\mathrm{p}}^{0.687}) & (1<Re_{\mathrm{p}}\leqslant 1\,000)\\ 0.44 & (1\,000<Re_{\mathrm{p}}\leqslant 2\times 10^5)\end{cases} \tag{11}$$

其中

$$Re_{\mathrm{p}}=\frac{\rho_{\mathrm{g}}d_{\mathrm{p}}|\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}|_{\max}}{\mu_{\mathrm{g}}}$$

式中 d_{p}——颗粒直径,m

μ_{g}——气体粘度,Pa·s

Re_{p}——颗粒雷诺数

重力与浮力的合力 $\boldsymbol{F}_{GB}$为

$$\boldsymbol{F}_{GB}=m_{\mathrm{p}}\left(1-\frac{\rho_{\mathrm{g}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)\boldsymbol{g} \tag{12}$$

式中 m_{p}——种子质量,kg

颗粒受到的升力包括 Saffman 升力和 Magnus 升力等作用力,Saffman 升力 $\boldsymbol{F}_{Sa}$又称剪切升力,是由于固体颗粒在有速度梯度的流场中运动时,颗粒两侧流速不同产生的由低速向高速方向的升力;Magnus 升力 $\boldsymbol{F}_{Ma}$是固体颗粒在流场中自身旋转产生一个与流场流动方向垂直的由逆流指向顺流侧方向的力。

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}_{Sa}=1.615d_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{g}}C_{Sa}Re_S^{0.5}[|\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}}|\times\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{g}}]\\ \boldsymbol{F}_{Ma}=\dfrac{\pi}{8}d_{\mathrm{p}}^3\rho_{\mathrm{g}}(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{p}})(\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{v}_{\mathrm{p}})\end{cases} \tag{13}$$

其中

$$Re_S=\frac{\rho_{\mathrm{g}}d_{\mathrm{p}}^2|\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{g}}|}{\mu_{\mathrm{g}}} \tag{14}$$

式中 C_{Sa}——剪切升力系数

Re_S——颗粒的剪切流雷诺数

剪切升力系数为

$$C_{Sa}=\begin{cases}(1-0.3314\gamma^{0.5})\mathrm{e}^{-Re_{\mathrm{p}}/10}+0.3314\gamma^{0.5} & (Re_{\mathrm{p}}\leqslant 40)\\ 0.0524(\gamma Re_{\mathrm{p}})^{0.5} & (Re_{\mathrm{p}}>40)\end{cases} \tag{15}$$

式中 γ——颗粒剪切流雷诺数与颗粒雷诺数比值

$$\gamma=\frac{Re_S}{2Re_{\mathrm{p}}} \tag{16}$$

种子在输种管道的运动包括直线运动与旋转运动 2 种方式,种子运动方向与流体阻力 $\boldsymbol{F}_D$ 方向一致,则种子在横向管道和纵向管道的受力存在差异。因此,横纵管道直径、长度和接头结构对气流场分布、种子运动、种子与管壁间碰撞以及种子迁移轨迹等均会产生影响,导致种子在气流场中的运动特性较复杂,难以通过数学模型准确描述,采用 EDEM - CFD 耦合能较好地阐释种子在气流场中的运动状态。通过理论分析结构与工作参数为构建仿真模型和设置边界条件提供依据,确定了输种管道三维模型和气流进出口初始条件等;气固两相流数学模型为数值模拟选择耦合方法、种子在气流场的受力类型和气流流动参数提供参考。

2 气流场中种子运动状态的数值模拟

2.1 EDEM - CFD 耦合仿真方法

在 EDEM - CFD 耦合仿真中,计算流体力学和离散元法分别采用 Fluent 12.0 和 EDEM 2.2 软件进行仿真。输种管道中的流体视为不可压缩的流体,EDEM - CFD 耦合仿真过程如图 2 所示,气流场由 CFD 求解器进行求解,通过 EDEM - CFD 耦合方法计算作用于颗粒上的流体阻力、重力和浮力等,仿真各个步长内颗粒的运动状态,当仿真时间未到设定值时,不断迭代计算单位步长内的气流场和颗粒运动状态。

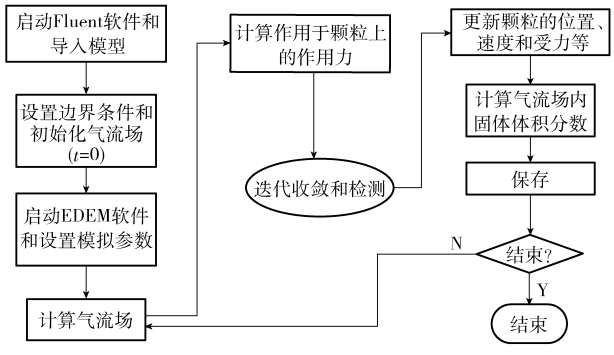


图 2 EDEM - CFD 耦合仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of EDEM - CFD coupling

2.2　仿真模型和仿真参数设置

采用 Workbench 12.0 划分网格，使用分块的四面体结构化网格，结构如图 3 所示。对于气流相，入气口设为气流速度入口；入料口和出料口设为气流速度出口。入料口为种子连续进入供料装置中的通道，入气口为高速气流入口，出料口为种子与气流的气固两相流出口。

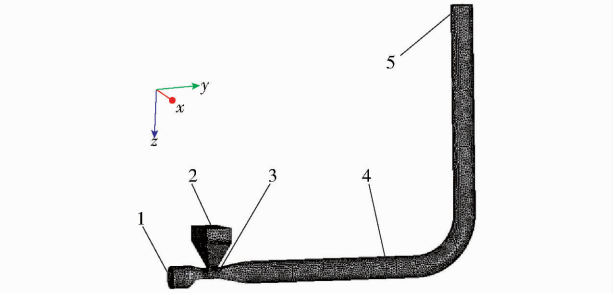


图 3　输种管道网格结构

Fig. 3　Grid structure of seed conveying tube

1. 入气口　2. 入料口　3. 供料装置　4. 输种管道　5. 出料口

由于种子在气流场所占体积分数低于 10%，EDEM－CFD 耦合仿真选用 Eulerian－Lagrangian 方法耦合。根据理论分析，气流作用于颗粒上的力选择 Freestream Equation 流体阻力、Saffman 升力和 Magnus 升力模型。气体流动为湍流运动，连续相的气流场模拟采用 Fluent 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型；EDEM 仿真中选取 Hertz－Mindlin 无滑动接触模型。仿真中模型外壳材料为铝合金，种子和铝合金的材料特性及其相互间的力学特性[22-23]和气流场参数见表 2。由于 EDEM 仿真的时间步长要远低于 CFD，EDEM 和 CFD 的时间步长分别设为 5×10^{-6} s 和 1×10^{-3} s，总仿真时长为 2.0 s。

2.3　仿真方法

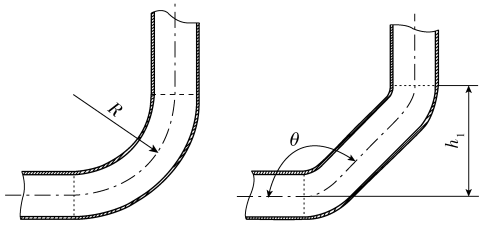
为验证理论分析的合理性和分析输种管道结构对气流场、种子运动特性的影响，开展了输种管道直径 D、输种管道长度 L 和横纵管道长度比 k 对气固两相流影响的仿真研究，L 为横向管道长度 l 与纵向管道长度 h 之和，k 为横向管道长度 l 与纵向管道长度 h 之比。仿真模型中输种管道直径 D 设 36、42、48 mm 3 个水平，输种管道长度 L 设 0.5、1.0、1.5、2.0 m 共 4 个水平，横纵管道长度比设 1/4、2/3、1、3/2、4 共 5 个水平。仿真时通过导入不同的输种管道几何模型，排种油菜、小麦的入口风速分别为 16 m/s 和 20 m/s，接头采用半径 R 为 100 mm 的圆弧形管道。

为获得较优的接头结构，开展接头结构对种子在气流场中运动特性影响的仿真。接头包括弯头和折线型 2 种形式，如图 4 所示。弯头的半径（R）取 50 mm、100 mm 和 150 mm；折线形接头的倾角（θ）设 30°、45°、60°共 3 种形式，高度 h_1 为 100 mm。

表 2　仿真参数

Tab. 2　Computational parameters used in simulations

	参数	油菜种子	小麦种子	铝合金
固相	种子外形尺寸/（mm×mm×mm）	2.00×2.00×2.00（球形）	6.00×3.00×3.00（椭球形）	
	密度/（kg·m^{-3}）	1 060	1 350	2 700
	泊松比	0.25	0.42	0.30
	剪切模量/Pa	1.1×10^{7}	5.1×10^{7}	2.7×10^{10}
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–铝合金	碰撞恢复系数	0.60	0.50	
	静摩擦因数	0.30	0.40	
	动摩擦因数	0.01	0.05	
	EDEM 步长/s	5×10^{-6}		
气相	流体	空气		
	重力加速度/（m·s^{-2}）	9.81		
	密度/（kg·m^{-3}）	1.225		
	粘性系数/（kg·m^{-1}·s^{-1}）	1.7894×10^{-5}		
	CFD 步长/s	1×10^{-3}		
	气流速度/（m·s^{-1}）	16	20	



(a) 弯头　(b) 折线形接头

图 4　输种管道接头结构图

Fig. 4　Joint's structure sketches of seed conveying tube

2.4　仿真结果与分析

2.4.1　管道直径对气流场和种子运动特性的影响

管道出口处种子的合力、合速度、气流速度和两相流相对速度均随管径增加而降低（表 3），压强损失以管径 42 mm 为最低。种子分布随输种管道直径增加呈密集的趋势（图 5）。输种管道直径为 42 mm 条件下，油菜、小麦种子在输种管道分布均较均匀，两相流相对速度和压强损失较小，与理论分析结果一致，能够满足油菜、小麦的输送要求。

2.4.2　管道长度对气流场和种子运动特性的影响

输种管道直径和长度分别为 42 mm 和 0.5 m 时，管道出口处种子的合力和合速度高于其他长度处理（表 4），种子主要沿管壁运动。管道长度在 1.0～2.0 m 范围内出口处种子速度差异较小，种

表 3 输种管道直径对气流场和种子运动特性的影响

Tab. 3 Effects of conveying tube diameter on airflow field and seed motion characteristics

作物种类	输种管道直径/mm	合力/N	气流速度/(m·s⁻¹)	出口种子速度/(m·s⁻¹)	两相流相对速度/(m·s⁻¹)	种子转速/(r·min⁻¹)	压强损失/Pa
油菜	36	1.35×10^{-4}	23.61	10.40	13.21	75 743.50	963.01
	42	6.36×10^{-5}	17.71	8.36	9.35	69 395.70	912.48
	48	2.15×10^{-5}	13.87	7.73	6.13	64 089.90	926.14
小麦	36	1.69×10^{-3}	29.55	7.63	21.92	30 267.90	1 497.37
	42	5.83×10^{-4}	22.14	7.11	15.03	9 737.56	1 420.50
	48	2.79×10^{-4}	17.33	4.88	12.45	8 657.31	1 442.16

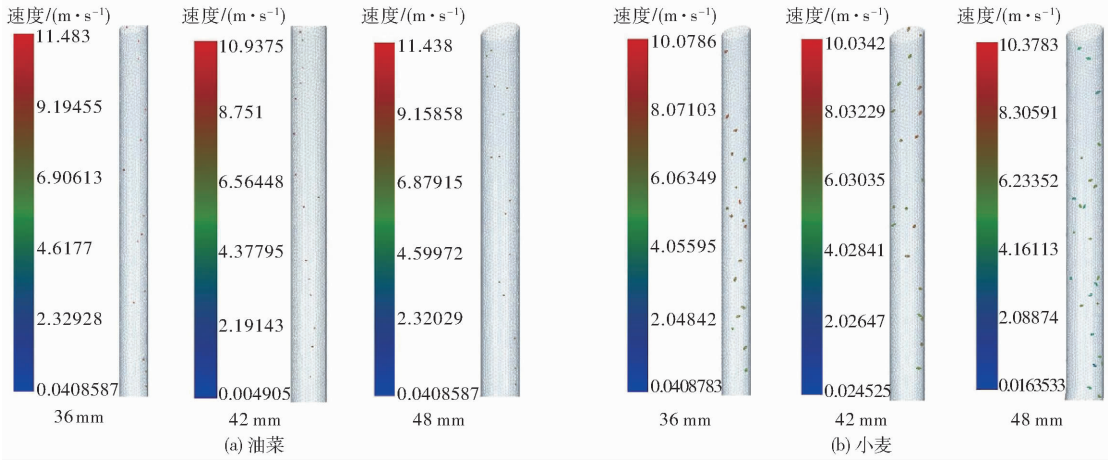


图 5 不同输种管道直径下种子分布状态

Fig. 5 Seed distributions in conveying tube under different tube diameters

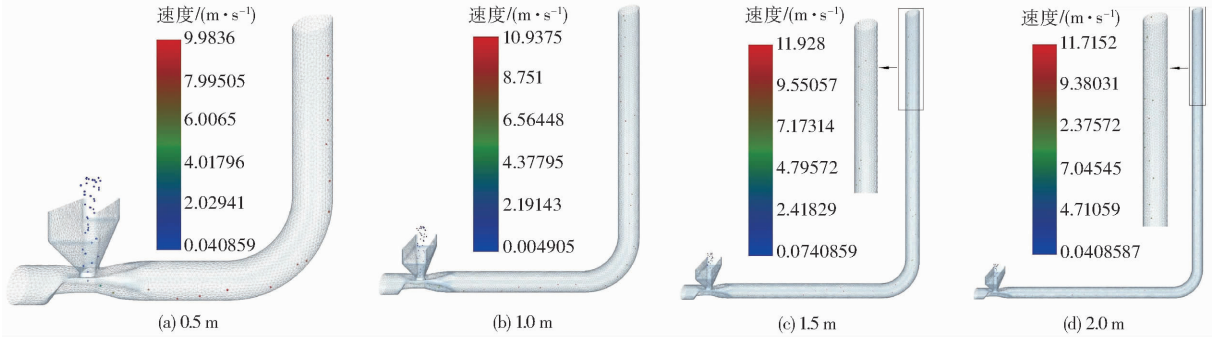
表 4 输种管道长度对气流场和种子运动特性的影响

Tab. 4 Effects of conveying tube length on airflow field and seed motion characteristics

管道长度 L/m	横纵管道长度比 k	合力/N	气流速度/(m·s⁻¹)	出口种子速度/(m·s⁻¹)	两相流相对速度/(m·s⁻¹)	种子转速/(r·min⁻¹)	压强损失/Pa
0.5	1/4	2.28×10^{-4}	18.03	10.11	7.92	81 332.1	910.42
	2/3	2.27×10^{-4}	17.89	9.03	8.86	83 321.7	932.19
	1	2.25×10^{-4}	17.64	9.14	8.49	89 838.8	926.14
	3/2	1.59×10^{-4}	17.71	8.45	9.26	82 561.1	922.88
	4	1.23×10^{-4}	17.94	8.36	9.59	74 284.8	925.93
1.0	1/4	3.20×10^{-5}	18.09	9.55	8.53	70 187.3	926.18
	2/3	6.36×10^{-5}	17.71	8.36	9.35	69 395.7	912.48
	1	5.06×10^{-5}	18.09	7.11	10.97	89 420.2	901.89
	3/2	6.55×10^{-5}	17.92	6.37	11.55	69 309.6	923.28
	4	1.06×10^{-4}	17.93	7.14	10.79	98 980.6	917.25
1.5	1/4	7.21×10^{-5}	18.05	8.35	9.70	59 143.0	929.87
	2/3	8.13×10^{-5}	17.86	7.34	10.53	79 115.3	943.61
	1	1.12×10^{-4}	17.92	7.14	10.77	43 422.5	956.54
	3/2	8.07×10^{-5}	17.71	6.14	11.57	55 767.9	933.45
	4	9.93×10^{-5}	17.81	7.12	10.69	61 515.8	927.51
2.0	1/4	4.06×10^{-5}	18.15	8.75	9.40	61 800.5	950.20
	2/3	1.38×10^{-4}	17.70	7.26	10.44	33 101.7	943.61
	1	1.25×10^{-4}	17.92	7.13	10.78	42 764.2	956.54
	3/2	1.45×10^{-4}	17.82	6.88	10.94	54 586.1	938.86
	4	1.00×10^{-4}	17.84	8.07	9.77	82 843.1	958.50

子最大速度高于出口速度(图 6a),其原因是横向管道较长时,种子速度在横向管道中达到最高。该输种管道长度下种子与气流混合较均匀(图 6),表明当输种管道长度达到 1.0 m 时,种子分布均匀,压强损失较小,因此本研究取输种管道长度为 1.0 m。

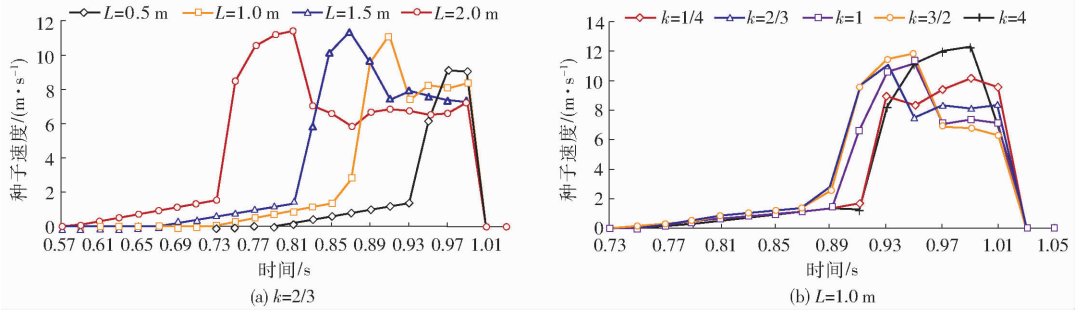
图 7b 表明管道出口处种子速度随 k 增加呈先降后升的趋势。在输种管道长度为 1.0 m 和横纵管道长度比 k 为 2/3、1、3/2 条件下,种子在输种管道的分布均较均匀,种子与气流能充分混合(图 8)。综合考虑两相流相对速度和气固相混合均匀性,本研究选取 k 为 2/3。



(a) 0.5 m　(b) 1.0 m　(c) 1.5 m　(d) 2.0 m

图 6　不同管道长度内油菜种子分布状态

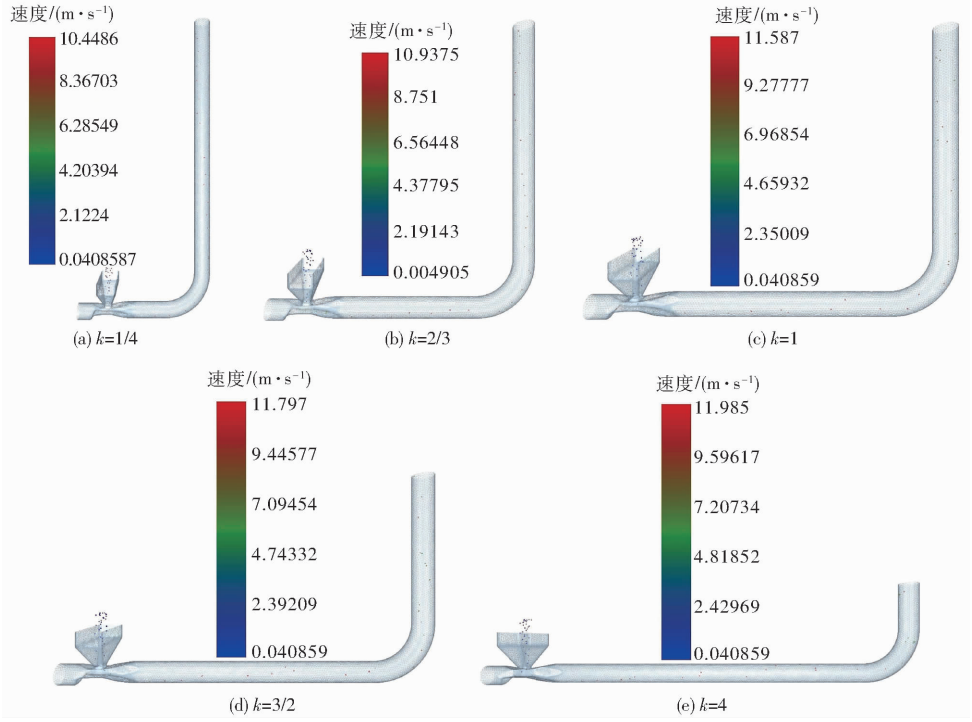
Fig. 6　Seed distributions in conveying tube under different lengths for rapeseed



(a) k=2/3　(b) L=1.0 m

图 7　油菜种子速度在输种管道内的变化趋势

Fig. 7　Changing trends of seed velocity in conveying tube for rapeseed



(a) k=1/4　(b) k=2/3　(c) k=1　(d) k=3/2　(e) k=4

图 8　不同横纵管道长度比条件下管道内油菜种子分布状态

Fig. 8　Seed distributions in conveying tube under different ratios of lateral to longitudinal tube lengths for rapeseed

2.4.3 输种管道接头形式对种子运动特性的影响

由表 5 可知,接头为弯管的输种管道出口处种子速度明显高于接头为折线形管道,两相流相对速度和压强损失表现为弯管低于折线形接头。管道出口处的种子速度随弯管半径增加而增加,而两相流相对速度随之降低,压强损失以弯管半径 100 mm 最低。

弯管内气流速度分布均匀性优于折线形接头(图 9);弯管半径为 100、150 mm 比半径为 50 mm 的气流速度分布更均匀。弯管半径为 100 mm 的弯管入口截面的气流分布均匀,未出现气流涡流区和滞留区。种子在折线形接头的纵向管道中的分布状态更集中(图 10),种子与管壁碰撞加剧。从种子分布状态来看,弯管半径为 50 mm 和 100 mm 的结构与管壁有较多碰撞,弯管半径为 150 mm 的管道中的种子沿管壁运动。综合来看,弯管半径 100 mm 的输种管道气流场和种子分布均匀,压强损失较小。

表 5 输种管道接头形式对气流场和种子运动特性的影响

Tab. 5 Effects of joint's structure on airflow field and seed motion characteristics

输种管接头形式	弯管半径 R/mm	倾角 θ/(°)	合力/N	气流速度/(m·s^{-1})	出口种子速度/(m·s^{-1})	两相流相对速度/(m·s^{-1})	种子转速/(r·min^{-1})	压强损失/Pa
弯管	50		1.44×10^{-4}	17.79	7.07	10.71	57 212.4	40.23
	100		6.36×10^{-5}	17.71	8.36	9.35	69 395.7	21.45
	150		5.99×10^{-5}	17.79	8.52	9.27	85 850.7	21.69
折线形		30	1.99×10^{-4}	17.88	2.56	15.32	18 887.2	45.00
		45	1.70×10^{-4}	17.86	5.76	12.10	24 819.7	43.10
		60	1.20×10^{-4}	17.71	7.44	10.27	63 194.7	48.63

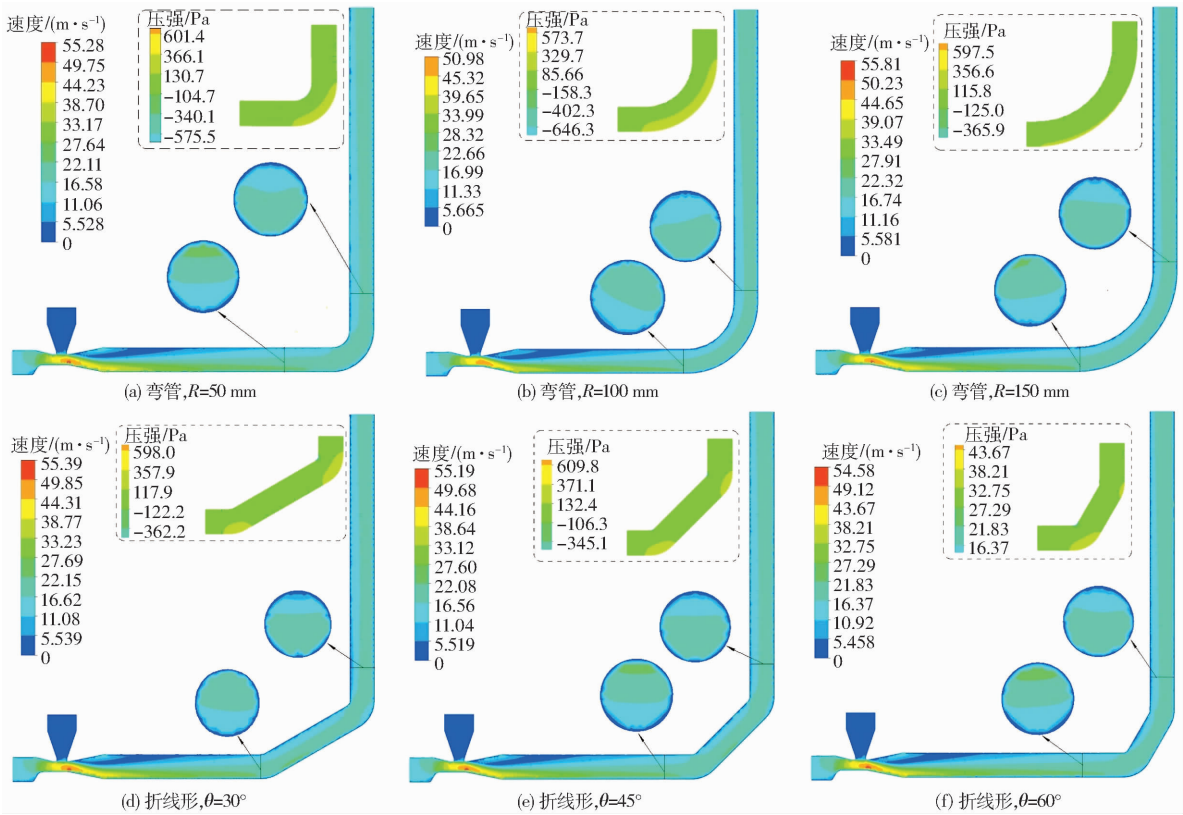


图 9 不同输种管道接头形式的气流分布图

Fig. 9 Airflow distributions under different joint's structures of seed conveying tube

2.4.4 种子在输种管道中迁移过程分析

为分析种子在输种管道中的迁移过程,对种子在输种管道长度为 1.0 m 和 k 为 2/3 的管道中的受力和速度进行分析(图 11)。种子在供料装置种子入口中(OA 段)受重力作用,种子沿 Z 方向运动;种子受到气流的作用沿横向管道运动(AB 段),种子受力达到极大值,主要为 Y 方向受力(即种子运动方向),种子合速度和 Y 方向速度急剧增加,Z 方向速度有所增加。种子沿 Y 方向迁移使种子与气流相对速度减小,种子受力减小,速度增加。当种子通

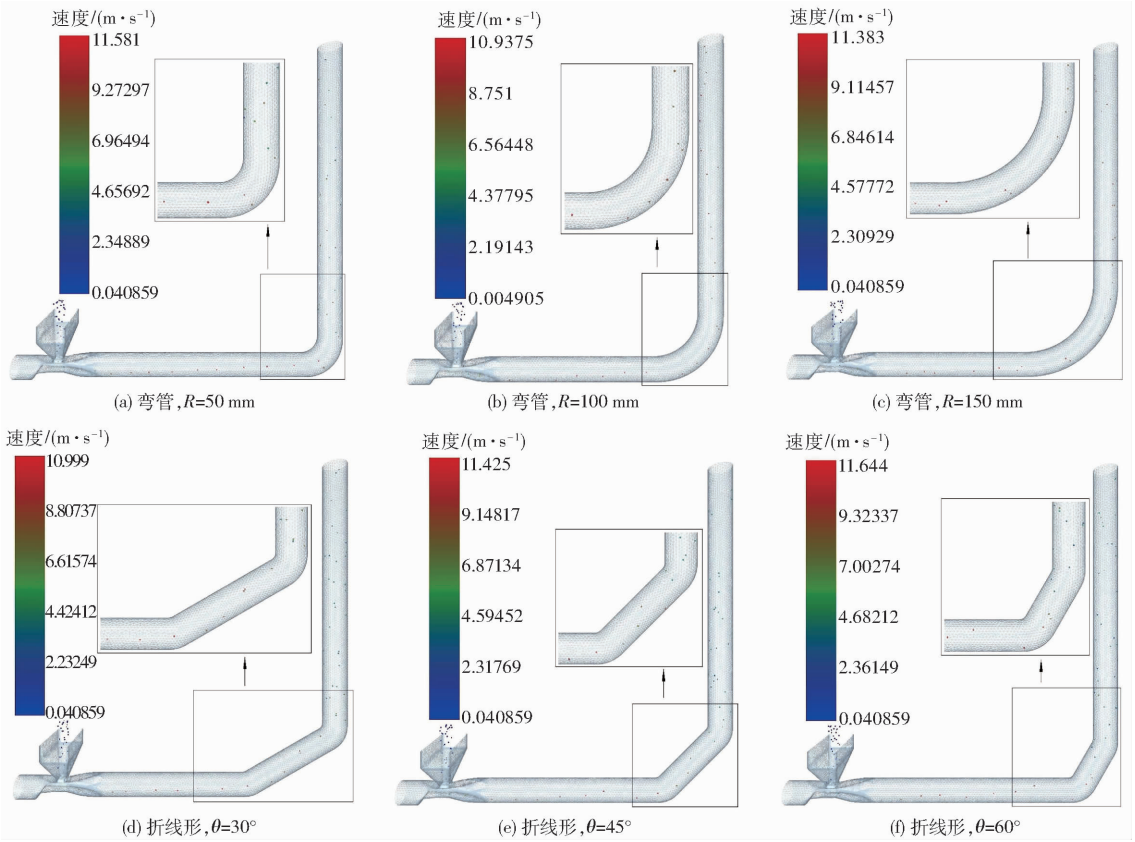


图 10　不同输种管道接头形式油菜种子分布状态

Fig. 10　Seed distributions under different joint's structures of seed conveying tube

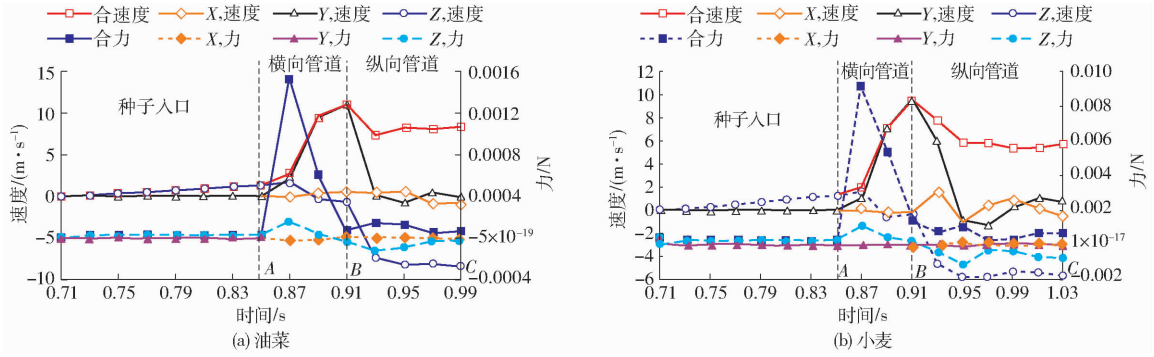


图 11　油菜、小麦种子在输种管道的受力与速度变化曲线

Fig. 11　Changing curves of force and velocity of seed in seed conveying tube for rapeseed and wheat

过弯管进入纵向管道（*BC* 段），种子运动由 *Y* 方向改变为 $-Z$ 方向，$-Z$ 方向受力和速度均快速增加至稳定值。因此，种子在输种管道中受力与速度主要沿管道轴线方向，与气流速度相同；推动种子迁移主要源自于流体阻力。

3　台架试验

3.1　试验材料与方法

以华油杂 62 和郑麦 9023 为试验材料，华油杂 62 的千粒质量为 4.67 g，含水率为 7.15%；郑麦 9023 的千粒质量为 44.87 g，含水率为 8.44%。试验设备及装置如图 12 所示，油麦兼用气送式集排器的增压管长度为 300 mm，分配器均匀将种子流分成 8 行。

为分析管道结构对油麦兼用集排器排种性能的影响，并验证 EDEM－CFD 耦合仿真的合理性，开展了输种管道长度和横纵管道长度比 *k* 2 个因素对排种性能影响的试验。输种管道长度 *L* 设 0.5 m、1.0 m 和 1.5 m 3 个水平，横纵管道长度比 *k* 设 1/4、2/3 和 4 共 3 个水平，输种管道直径和弯管半径分别为 42 mm 和 100 mm，油菜、小麦入口风速分别为 16 m/s 和 20 m/s。为考察供种速率对排种性能的影响，试验中排种油菜、小麦时供种转速为 10～40 r/min，增量为 10 r/min。

试验以 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》为依据，开展输种管道对排种性能影响的试验。

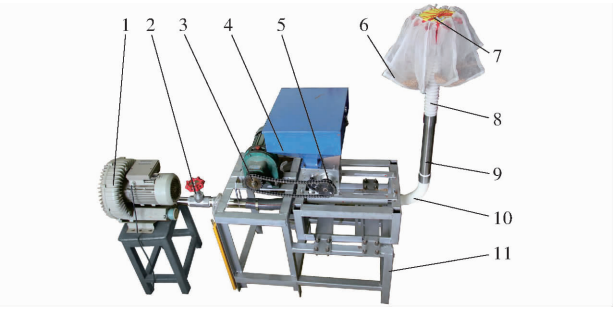


图 12 油麦兼用气送式集排器试验装置实物图

Fig. 12 Platform of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat

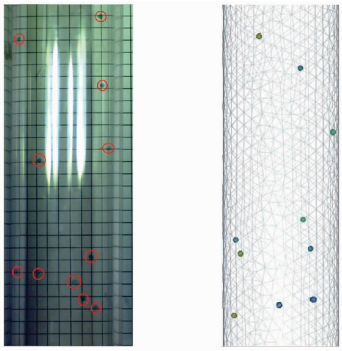
1. 风机 2. 调压阀 3. 减速电动机 4. 种箱 5. 供种装置 6. 种子袋 7. 分配器 8. 增压管 9. 输种管道 10. 弯头 11. 试验台架

用种子袋收集排种管排出的种子,称量净质量,采集时间为 1 min,重复 5 次,计算不同处理下各行排种量、各行排量一致性变异系数、排种速率稳定性变异系数和种子破损率[20,24]。应用 Matlab 软件进行方差分析。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 模型验证

为检验 EDEM – CFD 气固耦合仿真及参数的合理性,对比分析了高速摄像和仿真时种子在输种管道中的分布状态,如图 13 所示。对比试验和仿真时种子的分布状态可知,种子在输种管道中均处于离散状态。由于种子运动轨迹具有随机性,种子在输种管道的分布不完全相同,但趋势一致。文献[22]已验证 EDEM 仿真模型及参数的合理性,综合比较颗粒在管道的分布状态,表明该气固两相流模型与参数选择是合理的。



(a) 高速摄像 (b) 两相流仿真

图 13 高速摄像与仿真中种子状态

Fig. 13 Seed distributions between image using high-speed camera and simulation

3.2.2 输种管道结构对排种性能的影响

表 6 表明,各行平均排种量随输种管长度增加呈降低的趋势。排种油菜时,输种管道长度与横纵管道长度比间交互作用极显著影响各行排量一致性变异系数,当管道长度为 0.5 m 和 1.0 m 时,各行排量一致性变异系数以 k 为 2/3 最低;当管道长度为 1.5 m 时,k 为 1/4 和 4 时的各行排量一致性变异系数均较低。排种小麦时,横纵管道长度比显著影响各行排量一致性变异系数,当 k 为 2/3 时均较低。输种管道结构对总排量稳定性变异系数和种子破损率影响不显著。该研究的油麦兼用气送式集排器幅宽 2.0 m,当输种管道长度和横纵管道长度比分别为 1.0 m 和 2/3 时,排种性能较优,该结果与 EDEM – CFD 气固耦合仿真结果一致。

表 6 输种管道结构对排种性能的影响

Tab. 6 Effects of seed conveying tube structure on seeding performance for rapeseed and wheat

作物种类	输种管道长度 L/m	横纵管道长度比 k	各行平均排种量/(g·min^{-1})	各行排量一致性变异系数/%	总排量稳定性变异系数/%	种子破损率/%
油菜	0.5	1/4	3.955	4.38	0.53	0
	0.5	2/3	3.923	3.72	0.55	0
	0.5	4	3.875	5.88	0.42	0
	1.0	1/4	3.806	6.40	0.59	0
	1.0	2/3	3.795	3.61	0.48	0
	1.0	4	3.800	5.77	0.48	0
	1.5	1/4	3.732	4.36	0.91	0
	1.5	2/3	3.719	6.41	0.38	0
	1.5	4	3.772	4.83	0.76	0
	F	L	168.18**	1.30	1.81	
		k	2.08	2.52	1.26	
		$L\times k$	7.35**	7.91**		
小麦	0.5	1/4	47.963	4.99	0.59	0.003
	0.5	2/3	47.042	5.50	0.92	0.009
	0.5	4	47.399	7.21	0.43	0.013
	1.0	1/4	47.267	5.77	0.44	0.020
	1.0	2/3	46.365	4.44	0.28	0.008
	1.0	4	45.546	5.10	0.68	0.007
	1.5	1/4	45.096	5.28	0.59	0.010
	1.5	2/3	45.136	4.89	0.58	0.009
	1.5	4	45.223	6.62	0.62	0.016
	F	L	225.59**	1.46	0.51	0.31
		k	24.79**	4.48*	0.04	0.22
		$L\times k$	14.48**	1.71		

注:** 和 * 分别表示方差分析在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平上显著。

3.2.3 供种速率对排种性能的影响

当输种管道长度和横纵管道长度比分别为 1.0 m 和 2/3 时,供种装置转速在 10 ~ 40 r/min 范围内的排种性能如表 7 所示。各行平均排种量随供种速率增加而增加,排种油菜、小麦时各行排量一致性变异系数分别低于 4% 和 5%,总排量稳定性变异系数和种子破损率分别不超过 1.0% 和 0.1%。表明在该输种管道结构条件下排种油菜、小麦时能适

表 7　供种速率对排种性能的影响

Tab. 7　Effects of seed feed rate on seeding performance for rapeseed and wheat

作物种类	供种装置转速/(r·min^{-1})	排种量/(g·min^{-1})								各行平均排种量/(g·min^{-1})	各行排量一致性变异系数/%	总排量稳定性变异系数/%	种子破损率/%
		1 行	2 行	3 行	4 行	5 行	6 行	7 行	8 行				
油菜	10	1.853	1.916	1.959	1.942	1.888	1.938	1.935	1.964	1.924	3.75	0.53	0
	20	3.773	3.858	3.831	3.800	3.760	3.734	3.768	3.833	3.795	3.61	0.48	0
	30	5.304	5.507	5.432	5.382	5.309	5.471	5.466	5.382	5.407	3.21	0.79	0
	40	6.815	6.794	6.887	6.776	6.744	6.775	6.863	6.716	6.796	3.30	0.45	0
小麦	10	24.189	23.994	23.746	24.082	24.485	24.449	23.791	24.936	24.209	4.66	0.83	0.006
	20	46.401	45.590	45.621	48.008	46.601	46.916	45.690	46.094	46.365	4.44	0.28	0.021
	30	64.970	69.443	64.961	65.452	67.186	66.715	68.759	66.469	66.744	4.51	0.45	0.008
	40	87.944	85.908	81.886	84.204	85.009	87.989	83.311	83.016	84.908	4.40	0.57	0.006

应不同的供种速率，且排种性能满足 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机 第 1 部分：技术条件》和油麦种植要求。

4　结论

（1）运用 Fluent 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型与 EDEM 离散元气固耦合方法模拟了种子在输种管道中的运动状态。仿真分析了输种管道结构对种子运动特性和气流场的影响。当输种管道长度达到 1.0 m 时，出口处种子速度和压强损失均较小。出口处种子速度随 k 增加呈先降后升的趋势，输种管道直径 D 为 42 mm 和 k 为 2/3 时两相流相对速度和种子分布均匀性较好。

（2）接头为弯管的输种管道出口处种子速度明显高于接头为折线形管道，两相流相对速度表现为弯管低于折线形接头；弯管半径 100 mm 的输种管道气流场和种子分布均匀，压强损失较小，未出现气流涡流区和滞留区。种子在输种管道中受力与速度主要沿管道轴线方向，与气流速度相同，种子迁移的动力主要源自流体阻力。

（3）台架试验研究了输种管道结构对排种性能的影响，得出当输种管道长度和横纵管道长度比分别为 1.0 m 和 2/3 时，排种性能较优。供种装置转速为 10～40 r/min 时，排种油菜、小麦的各行排量一致性变异系数分别低于 4% 和 5%，总排量稳定性变异系数和种子破损率分别低于 1.0% 和 0.1%。

参　考　文　献

1　李宝筏. 农业机械学[M]. 北京：中国农业大学出版社，2003.

2　丛锦玲，余佳佳，曹秀英，等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(1)：46－52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140108&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46－52. (in Chinese)

3　KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81－95.

4　杨慧. 气流输送式排种系统性能试验研究[D]. 北京：中国农业机械化科学研究院，2014.
YANG Hui. Experimental study on performance of pneumatic seeding system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)

5　常金丽，张晓辉. 2BQ－10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J/OL]. 农业工程学报，2011，27(1)：136－141. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20110121&flag=1. DOI：10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.021.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136－141. (in Chinese)

6　沈景新. 2BQ－12 型气流一阶集排式播种机的研究[D]. 泰安：山东农业大学，2013.
SHEN Jingxin. Research of 2BQ－12 airflow first-order centralized metering seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

7　孔爱菊，秦军伟. 气流一阶集中式排种系统中弯管的设计及试验分析[J]. 农机化研究，2007(5)：162－163，16.
KONG Aiju, QIN Junwei. Design and test analysis of elbow in one-step centralized pneumatic seeding system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(5): 162－163, 16. (in Chinese)

8　QIAN F P, HUANG N J, LU J L, et al. CFD－DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic

structure[J]. Computers and Chemical Engineering,2014,71:478 - 488.

9 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.

10 IQBAL N,RAUH C. Coupling of discrete element model (DEM) with computational fluid mechanics (CFD):a validation study[J]. Applied Mathematics and Computation,2016,277:154 - 163.

11 龚智强,陈进,李耀明,等. 吸盘式精密排种装置吸种过程气流场中种子受力研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):92 - 97,117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140615&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.015.
GONG Zhiqiang,CHEN Jin,LI Yaoming,et al. Seed force in airflow field of vacuum tray precision seeder device during suction process of seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):92 - 97,117. (in Chinese)

12 林达平,周涛,李精精,等. 细颗粒在粗糙管壁管道内运动特性的研究[J]. 动力工程学报,2015,35(5):424 - 428.
LIN Daping,ZHOU Tao,LI Jingjing,et al. Research on flow and deposition characteristics of fine particles in rough narrow channels[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2015,35(5):424 - 428. (in Chinese)

13 杜俊,胡国明,方自强,等. 弯管稀相气力输送 CFD - DEM 法数值模拟[J]. 国防科技大学学报,2014,36(4):134 - 139.
DU Jun,HU Guoming,FANG Ziqiang,et al. Simulation of dilute pneumatic conveying with bends by CFD - DEM[J]. Journal of National University of Defense Technology,2014,36(4):134 - 139. (in Chinese)

14 韩云龙,殷传慧,胡永梅. 通风管道结构形式对颗粒物沉积的影响[J]. 过程工程学报,2015,15(1):40 - 44.
HAN Yunlong,YIN Chuanhui,HU Yongmei. Effect of ventilation duct structure on deposition of particles[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2015,15(1):40 - 44. (in Chinese)

15 AKBARZADEH V,HRYMAK A N. Coupled CFD - DEM of particle-laden flows in a turning flow with a moving wall[J]. Computers and Chemical Engineering,2016,86:184 - 191.

16 AKHSHIK S,BEHZAD M,RAJABI M. CFD - DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2015,127:229 - 244.

17 TONG Z B,ZHENG B,YANG R Y,et al. CFD - DEM investigation of the dispersion mechanisms in commercial dry powder inhalers[J]. Powder Technology,2013,240:19 - 24.

18 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.

19 黄震宇,李腾,喻志成,等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):70 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010.
HUANG Zhenyu,LI Teng,YU Zhicheng,et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air-screening machine for vegetable seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):70 - 76. (in Chinese)

20 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/OL]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20152002&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.002.
LEI Xiaolong,LIAO Yitao,LI Zhaodong,et al. Design and experiment of seed feed device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the CSAE,2015,31(20):10 - 18. (in Chinese)

21 SOMMERFELD M. Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel:Part I. Particle transport [J]. International Journal of Multiphase Flow,2003,29:675 - 699.

22 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 filling performance in seed feed device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(6):11 - 19. (in Chinese)

23 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):77 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150911&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on value-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77 - 84. (in Chinese)

24 GB/T 9478—2005 谷物条播机 试验方法[S]. 2005.