doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023

气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析

李立伟[1]　孟志军[1]　王晓鸥[2]　安晓飞[1]　王　培[1]　武广伟[1]

(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097;2.黑龙江省农垦总局科技信息中心,哈尔滨 150030)

摘要:通过计算流体动力学和离散元法耦合的方法对气送式水稻施肥机的气体肥料混合腔进行气固耦合数值研究。在数值模型中,使用 EDEM 软件模拟肥料颗粒,ANSYS Fluent 软件描述气体相。通过研究混合腔喉部面积、喉部长度、气体入口压力和肥料排出速率的影响,分析气体和肥料的运动规律。模拟结果表明,2 型喉管的气体肥料混合腔断面性能良好,喉部压力损失较小,气流速度最快。喉部面积和气流入口压力主要影响气流出口速度和混合腔轴向方向的肥料颗粒速度,肥料颗粒的移动受混合腔喉部长度和肥料进料速率的影响较小。喉部截面积的增加导致气流速度和压力损失在一定范围内下降。随着气流入口压力的增加,肥料所受合力和肥料颗粒速度均增加,适宜的气流入口压力为 450 ~ 550 Pa。结果表明,CFD - EDM 耦合方法作为理解气流场中肥料颗粒运动规律的分析工具是可靠的,基于 CFD - EDM 耦合方法的肥料颗粒运动的数值模拟可为水稻侧深施肥装置的开发提供理论依据。该研究得到的优化后气体肥料混合腔结构参数及气动参数,对现有气送式水稻施肥机输肥装置的优化改进具有指导意义。

关键词:水稻施肥;气送式施肥机;气体肥料混合腔;气固两相流;气固耦合

中图分类号:S224.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)S0-0171-10

Simulation Analysis of Gas - Solid Two Phase Flow in Pneumatic Conveying Fertilizer Feeder of Rice Fertilizer Applicator

LI Liwei[1]　MENG Zhijun[1]　WANG Xiaoou[2]　AN Xiaofei[1]　WANG Pei[1]　WU Guangwei[1]

(1. *Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*

2. *Science and Technology Information Center*, *General Administration of Agriculture and Reclamation of Heilongjiang*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The computational method of fluid dynamics and discrete element method were used to study the air-solid flow of a fertilizer air mixing chamber in a synchronous deep fertilization unit. In this model, the fertilizer particles were simulated by EDEM software, and the gas phase was demonstrated by ANSYS Fluent software. The movement rule of gas and fertilizer was analyzed by studying the influence of throat area, throat length, gas inlet pressure and fertilizer removal rate. The simulation results showed that the cross-section performance of the gas-fertilizer mixing chamber with type 2 throat was good, the pressure loss in the throat was small, and the air velocity was the fastest. The throat area and the fertilizer particle flow entrance pressure mainly affected the airflow velocity and the axial speed of the mixing chamber. The movement of fertilizer particles was less affected by mixing throat length and feed rate of fertilizer. The increase of throat cross-sectional area led to the decrease of airflow velocity and pressure loss in a certain range. With the increase of air inlet pressure, the resultant force and velocity of fertilizer particles were increased, and the suitable inlet air pressure was from 450 Pa to 550 Pa. The results showed that the CFD - EDM coupling method was reliable as an analytical tool for understanding the movement of fertilizer particles in airflow field, and the numerical simulation of fertilizer particle movement based on CFD - EDM coupling method can provide a theoretical basis for the development of rice lateral deep fertilization device. It had guiding significance for the optimization and improvement of the existing pneumatic rice fertilizer applicator.

Key words: rice fertilization; air supply fertilizer applicator; mixing chamber of gas and fertilizer; gas-solid two-phase flow; gas-solid coupling

收稿日期:2018 - 07 - 12　修回日期:2018 - 08 - 25

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0700305)

作者简介:李立伟(1987—),男,高级工程师,主要从事现代农业装备技术与测控研究,E-mail:lilw@nercita.org.cn

通信作者:武广伟(1981—),男,副研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail:wugw@nercita.org.cn

0 引言

水稻是我国主要粮食作物,水稻生产的施肥环节大多使用人工撒肥方式,这种传统施肥方式既造成了环境污染和化肥利用率低,又在一定程度上制约了农业机械化的发展[1-2]。水田侧深施肥是将肥料施于水稻秧苗的侧位一定深度的位置,并用覆土装置将肥料用泥土覆盖的一种施肥方法。理论和实践均证明,水稻采用侧深施肥的方式可以提高化肥肥效,减小 20% ~30% 的氮肥使用量,减少化肥田间挥发,提高水稻产量[3-7]。

气送式侧深施肥机采用机械排肥、气流输送肥料的排肥方式,其中气体肥料混合腔的结构影响肥料在输送管道中的分布状态和排肥效果。

气体肥料混合腔大多采用文丘里管结构设计,结构参数不仅影响肥料的运动状态,对施肥机的整体压强损失也会产生影响,设计不合理会导致肥料无法顺利排出或者所需压强较大产生能源浪费。相关学者开展了物料在管道中运动的运动学和动力学研究,计算了管道内压强损失。由于肥料颗粒在混合腔中的气固两相流运动较复杂,单纯用数学方法和试验方法难以描述肥料的运动特性和空气速度压力场,需采用离散单元和计算流体动力学相结合的方法[8-9]。龚智强等[10]使用 Flunet 和 EDEM 软件分析了排种器吸种区域种子的运动和受力情况,确定了影响种子运动和受力的因素。王金峰等[11]对水田侧深施肥装置关键部件排肥器和气力输送系统进行了设计与分析,得到了排肥转速、施肥机前进速度、风机风速的最佳参数。JI 等[12]采用文丘里理论研究具有矩形开口的射流管的特性,通过试验和仿真对模型进行改进,为分析射流管内的吸力提供了理论依据。齐兴源等[13]设计了一种外槽轮式排肥、以空气流为肥料输送动力的稻田气力施肥机,对气体肥料混合腔进行了 CFD 仿真,并对施肥机关键零部件进行了仿真和试验,但并未给出肥料颗粒在混合腔中的运动规律。气固耦合仿真被广泛应用于研究颗粒在气体相中的运动规律,在农业领域,被用于研究种子或肥料颗粒在气流场的分布和优化输送管路结构参数[14-15]。

现有的施肥机气送输肥装置存在风机功率过大造成能源浪费、输肥管易堵塞等问题。为提高气送式水稻施肥机的可靠性和排肥稳定性,克服现有施肥器输肥装置易堵塞的缺点,左兴建等[16]已设计了一种气送式侧深施肥样机。其中气体肥料混合腔的喉部面积、喉部长度、气体入口压力和肥料排出速率等都会影响肥料顺利排出及排肥稳定性,气体和肥料形成的气固两相流难以通过数学模型和试验来描述。本文采用离散元和计算流体动力学耦合的方法,对肥料颗粒在气体肥料混合腔中的运动进行气固两相流仿真模拟,研究气体肥料混合腔喉部面积、喉部长度、气流入口压力和肥料排出速率对气体和肥料颗粒运动的影响,得到气体肥料混合腔最优结构参数。

1 气送式侧深施肥装置工作原理

气送式侧深施肥机的结构如图 1 所示,主要由离心风机、主风管、排肥器、气体肥料混合腔、肥箱、输肥管、排肥口等组成。

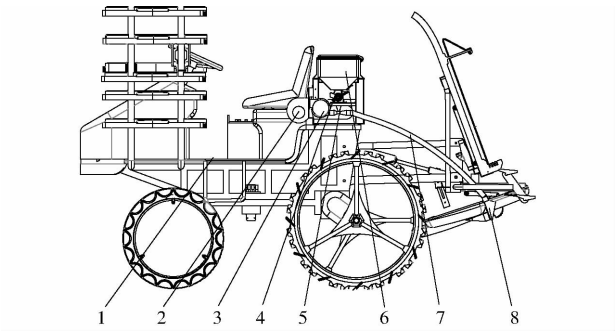


图 1 气送式侧深施肥装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of wind feed side deep fertilization device

1. 插秧机 2. 离心风机 3. 主风管 4. 排肥器 5. 气体肥料混合腔 6. 肥箱 7. 排肥管 8. 排肥口

施肥作业时,离心风机供给高速气流,气流通过主风管分流送到气体肥料混合腔,气流的流量和压力由流量控制阀调节。排肥器具有交错式双外槽排肥轮,可以提供均匀、连续以及可变的肥料流,调节排肥轮的转速可以改变肥料排出量。来自排肥器的肥料颗粒流进入气体肥料混合腔并且与气体流相遇,施肥装置利用高速气体射流的动能来推动肥料颗粒运动并形成气体-颗粒混合流。当空气和肥料在混合腔中接触时,肥料由于高速动力气流的剪切作用而分散。肥料和气体的混合物经过输肥管、排肥口,最后进入水田泥浆中。

应用文丘里原理的气体肥料混合腔是气送侧深施肥系统的关键部件。气体肥料混合腔的结构如图 2 所示,由气体进口管、肥料入口管、喉管和出口管 4 部分组成。气体肥料混合腔在喉管的上壁设有用于肥料下落的矩形开口。气体进口管和出口管的直径均为 d。气体进口管、出口管与喉管之间的发散角为 θ_1、θ_2。喉管为矩形,宽度为 b,高度为 h,长度为 L。作业过程中,高速气流从气体进口管进入喉管,肥料颗粒通过肥料入口管进入喉管。由于喉管特有的结构,在肥料入口管中产生负压,因此肥料

颗粒在重力和气流吸力的作用下进入喉管腔，被喉管中的高速气流带走施于土壤中。两相流出口管包括锥形管和圆管两部分，出口管截面积从喉管到圆管逐渐增加。因此，管内压力逐渐减小，产生压力差的吸入效果。当气固两相流进入出口管时，肥料和空气可以实现沿出口管的扩散、混合和运输。喉管部的气体压力和速度对肥料的输送和混合有重要影响，影响喉管部压力和速度的参数包括气体进口管直径 d、喉管宽度 b、喉管高度 h、入口空气压力 p 和肥料进料速率 q。

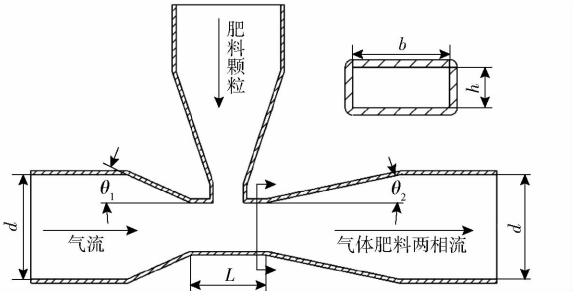


图 2　气体肥料混合腔

Fig. 2　Mixing chamber of gas and fertilizer

2　基本参数和数学模型

2.1　气体肥料混合腔基本参数

根据颗粒的气动输送理论[17]，出口的气流速度可以描述为

$$v = k_L\sqrt{\frac{\rho_P}{1\,000}} + k_d l \tag{1}$$

式中　v——出口气流速度，m/s

k_L——颗粒尺寸系数

ρ_P——颗粒密度，kg/m^3

k_d——颗粒性质系数

l——管道长度，m

当颗粒直径在 1 ~ 10 mm 时，颗粒尺寸系数为 16 ~ 20。由于肥料颗粒直径在 4 mm 以内，颗粒尺寸系数取 16。肥料颗粒密度为 900 ~ 1 400 kg/m^3。颗粒性质系数为 2×10^{-5} ~ 5×10^{-5}，由于风路输送管长度小于 2 m，颗粒性质系数对速度的影响可以忽略不计。水田工况恶劣，加之 30% 的余量，计算可得出口气流的速度为 19.72 ~ 24.61 m/s。

肥料-气体质量比 ψ 通常用于量化气相中颗粒相的相对量，定义为颗粒流率与气体流率的比例

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

其中

$$G_g = \frac{\pi d^2}{4} v\rho_g \tag{3}$$

式中　ψ——肥料-气体质量比

G_P——肥料颗粒流率

G_g——气体流率

ρ_g——空气密度

综合式(1) ~ (3)得

$$d = \sqrt{\frac{4G_P}{\pi\psi\rho_g v}} \tag{4}$$

根据实际农艺要求，每公顷地施肥 300 kg，计算空气出口管直径为 30.5 mm，取整后得气体进口管和出口管的直径为 30 mm。

由于喉管为矩形，喉管的截面积由宽度 b 和高度 h 确定。文丘里效应的原理是，气体在受限流动时，气体的速度和压力随与气流垂直方向截面面积的变化而变化，截面积收窄时，气体流速会随之增加，流速增加又伴随着气压的降低，因此在喉管部产生负压，使其具有吸附作用。喉管部截面积应小于进气口截面积，预设喉部宽度 b 为 30 mm，高度 h 在 10 ~ 20 mm 之间。

2.2　气固两相流数学模型

为了分析气固两相流特性，利用数学模型在理论上解释肥料颗粒进料装置中的气流和颗粒的运动。本文基于计算流体动力学和离散元法，准备了混合腔在各种参数下的三维模型，以分析气流中的肥料流动特性。气体相是基于 Eulerian - Langrangian 方法的不可压缩流体。由于肥料在气体肥料混合腔中占据较小空间，将肥料处理为单个颗粒的集合，肥料颗粒的移动通过牛顿第二定律来控制。

2.2.1　气体相数学方程

气相流从空气入口管输送到喉管，被认为是连续相的气相，严格遵守质量守恒定律和动量守恒定律[18]。不可压缩粘性流体质量和动量守恒的控制方程可表示为

$$\frac{\partial(\boldsymbol{\varepsilon}_g\boldsymbol{\rho}_g)}{\partial t} + \nabla(\boldsymbol{\varepsilon}_g\boldsymbol{\rho}_g\boldsymbol{\nu}_g) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\boldsymbol{\varepsilon}_g\boldsymbol{\rho}_g\boldsymbol{\nu}_g)}{\partial t} + \nabla(\boldsymbol{\varepsilon}_g\boldsymbol{\rho}_g\boldsymbol{\nu}_g\otimes\boldsymbol{\nu}_g) = -\boldsymbol{\varepsilon}_g\nabla P + \boldsymbol{\varepsilon}_g\nabla\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\varepsilon}_g\boldsymbol{\rho}_g\boldsymbol{g} - \boldsymbol{R}_{gp} \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{R}_{gp} = \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_{pi}/\Delta V \tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{\nu}_g$——空气速度，m/s

$\boldsymbol{\varepsilon}_g$——气体体积分数，%

P——气体压力，Pa

$\boldsymbol{\tau}$——粘性应力张量

$\boldsymbol{g}$——重力加速度，m/s^2

$\boldsymbol{R}_{gp}$——单元网格的固体和气相之间的动量交换

$\boldsymbol{F}_{pi}$——作用于肥料颗粒 i 上的合力

n——特定网格的颗粒数量

ΔV——单元的体积

t——时间,s

2.2.2 粒子运动方程

连续的气相和分散的固相在喉管中耦合,使用拉格朗日法对粒子相的运动进行建模,沿着肥料颗粒的轨迹通过稳定的非均匀气场跟踪肥料颗粒的运动。牵引力、重力、浮力、剪切升力(Saffman 力)和旋转升力(Magnus 力)作用于颗粒上,气流场内颗粒的运动由力平衡方程控制。

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

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

式中 m_{p}——肥料颗粒质量,kg

$\boldsymbol{F}_D$——牵引力,N

$\boldsymbol{F}_{GB}$——重力与浮力的合力,N

$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Sa}}$——剪切升力,N

$\boldsymbol{F}_{Ma}$——旋转升力,N

$\boldsymbol{I}_{\mathrm{p}}$——颗粒的惯性力矩,kg·m^2

$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{p}}$——肥料颗粒旋转角速度,rad/s

$\boldsymbol{T}$——颗粒的局部扭矩,N·m

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

肥料颗粒上的牵引力计算公式为

$$\boldsymbol{F}_D=\frac{3}{4}C_D\frac{m_{\mathrm{p}}\rho_g(\boldsymbol{\nu}_g-\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{p}})|\boldsymbol{\nu}_g-\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{p}}|}{\rho_P d_{\mathrm{p}}} \tag{10}$$

式中 C_D——阻力系数

d_{p}——肥料颗粒当量直径,m

颗粒重力和浮力之差为

$$\boldsymbol{F}_{GB}=m_{\mathrm{p}}\left(1-\frac{\rho_g}{\rho_P}\right)\boldsymbol{g} \tag{11}$$

剪切升力和旋转升力垂直于颗粒和气相之间的相对速度的方向。施加在颗粒上的剪切升力计算式为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Sa}}=1.651\,5d_{\mathrm{p}}\mu_g C_{\mathrm{Sa}}Re_{\mathrm{s}}^{0.5}(|\boldsymbol{\nu}_g-\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{p}}|\times\boldsymbol{\omega}_g) \tag{12}$$

其中

$$Re_{\mathrm{s}}=\frac{\rho_g d_{\mathrm{p}}^2|\boldsymbol{\omega}_g|}{\mu_g} \tag{13}$$

式中 μ_g——气体粘度,Pa·s

C_{Sa}——剪切升力系数

Re_{s}——颗粒的剪切力雷诺数

$\boldsymbol{\omega}_g$——气体旋转角速度,rad/s

旋转升力实现了颗粒和气相之间的相对运动,它可以表示为

$$\boldsymbol{F}_{Ma}=\frac{\pi}{8}d_{\mathrm{p}}^3\rho_g(\boldsymbol{\omega}_g-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{p}})\times(\boldsymbol{\nu}_g-\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{p}}) \tag{14}$$

3 CFD-DEM 耦合仿真

3.1 计算条件和参数

在气固耦合模拟中,CFD 计算和粒子运动分析分别基于 ANSYS Fluent 16.0 和 EDEM 2.7 软件。

作为数值模拟的重要依据,气体肥料混合进料装置的三维模型决定了模拟的结果。计算网格如图 3 所示。在边界条件的设置中,对气流的入口和出口应用为压力入口和压力出口,运用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解气相。进气装置壁面为固定的,在 EDEM-CFD 耦合接口中使用拉格朗日耦合方法。在 EDEM 软件中选择球体模型和 Hertz-Mindlin 模型作为肥料颗粒模型和颗粒接触模型。在 DEM-CFD 耦合仿真中使用的主要参数如表 1 所示。

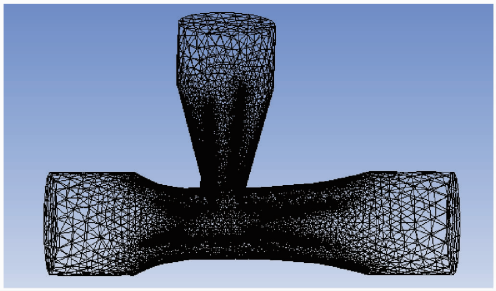


图 3 气体相网格划分

Fig. 3 Meshing of gas phase

3.2 仿真设计

喉管部的截面积影响混合腔管道内气体的流动状态,进而影响肥料颗粒的运动特性。为了获得最优的喉管结构,在模拟中使用了 3 种不同结构参数的气体肥料混合腔模型,3 种气体肥料混合腔喉部截面参数如表 1 所示。在获得最优的喉管截面参数之后,进而研究喉管长度对出口压力和肥料运动的影响。喉管长度分别为 16、20、24、28 mm。入口管与收敛段之间的长度为 26 mm,发散段与出口之间的长度为 26 mm。模拟中使用的入口压力为 450 Pa。

表 1 喉管截面参数

Tab. 1 Cross section parameters of larynx

喉管类型	$b\times h$/(mm×mm)	θ_1/(°)	θ_2/(°)	L/mm
1 型	30×10	30.47	15.52	20
2 型	30×15	23.81	11.77	20
3 型	30×20	16.39	7.91	20

由于气体肥料混合腔的气体进口压力和肥料下落速率对分析肥料颗粒运动有一定影响,因此仿真了不同入口压力和不同肥料进料速率下颗粒的运动。仿真参数设置见表 2。

根据 EDEM 计算的假设条件,肥料颗粒在气体肥料混合腔内的运动过程中颗粒间的碰撞属于软球模型,接触模型取默认的赫兹无滑动接触模型。通

表 2　进气口压力和肥料下落速率的仿真参数

Tab. 2　Parameters of inlet pressure and fertilizer drop rate in simulation

进气口压力/Pa	肥料下落速率/(g·s^{-1})
250	6、8、10
350	6、8、10
450	6、8、10
550	6、8、10

过测量大颗粒水稻专用肥料的三轴尺寸可知，大颗粒水稻专用肥的 3 轴尺寸（长、宽、高）差别不大，其圆球率为 96%，因此仿真中采用球形颗粒。颗粒的具体参数见表 3。

表 3　肥料颗粒及混合腔材料物理特性参数

Tab. 3　Physical properties of fertilizer particles and mixed cavity materials

参数	肥料颗粒	混合腔
密度/(kg·m^{-3})	1 337	1 300
剪切模量/Pa	2.8×10^{7}	3.5×10^{9}
泊松比	0.4	0.25

4　仿真结果和分析

4.1　模型验证

图 4 给出了气体肥料混合腔出口气流速度的数值仿真和试验结果。在 300 ~ 700 Pa 入口压力条件下，使用热阻式空气速度传感器测量混合腔出口气流速度。模拟结果与试验数据的一致性表明，该模型可用于分析气体肥料混合腔气流场中肥料颗粒的运动。

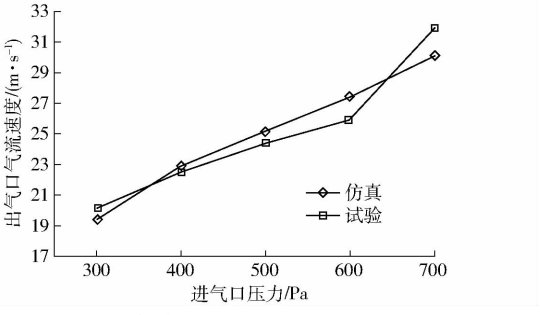


图 4　仿真数据与试验数据对比

Fig. 4　Comparison of simulation and experimental data

4.2　喉管部截面对气流压力和速度的影响

图 5、6 为喉管长度为 20 mm、进气口气体压力为 450 Pa 时，3 种喉管部截面下，混合腔不同部位的气流压力和速度变化曲线。结果表明，在气体肥料混合腔中，喉管部截面对气流压力和速度有很大影响。由于气流在收敛段的加速，收敛段内的压力急剧下降，速度上升。在喉管部，气流速度最大，加之气流和喉管摩擦，压力达到最小值，并且产生低于大气压的负压。分离段气流压力恢复，速度下降到稳定值。在 3 种喉管断面中，1 型混合腔压力损失最大，3 型混合腔喉管部压力损失最小，但是喉管部负压很小，导致喉管部上方进肥口吸入气流小，不利于肥料的加速下落。图 7、8 为 $x=0$ mm 截面上的压力和气流速度分布，在发散段的出口管底部和喉管速度达到最大值，喉部的压力较小，压力低于大气压有利于气体肥料混合腔上方排下的肥料顺利下落。结果表明，2 型喉管部断面性能良好，喉管部压力损失较小，气流速度最大。

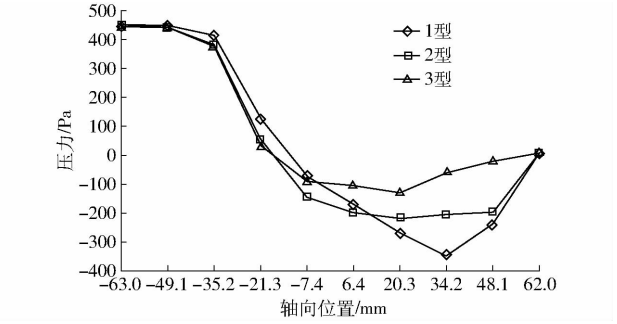


图 5　喉管部截面尺寸对风压的影响

Fig. 5　Influence of throat section size on wind pressure

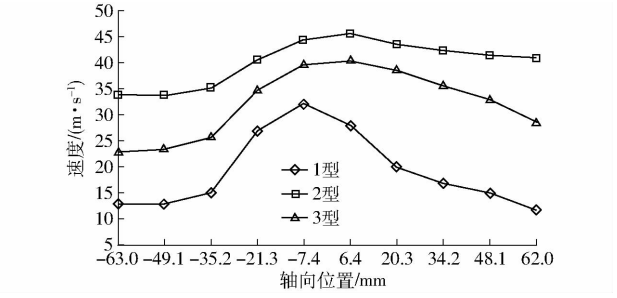


图 6　喉管部截面尺寸对风速的影响

Fig. 6　Influence of throat section size on wind pressure wind speed

肥料颗粒的瞬态分布可以帮助理解气体肥料混合腔气流中的肥料颗粒的运动状态。图 9 显示了在 450 Pa 进气口压力、肥料下落速率 6 g/s 的 3 种类型混合腔中的肥料颗粒运动局部分布。可以看出，肥料入口腔中的肥料流从排肥器落入喉管部，然后沿着 Y 轴方向运动。肥料颗粒最初在肥料入口管中缓慢移动并且由于拖曳力和自身重力而在喉管中加速。肥料颗粒位于较大气流速度的区域中时，肥料颗粒的距离随着喉部截面积的增加而减小。

肥料颗粒所受的平均合力、平均速度和平均转速如表 4 所示。其中 F_{py} 为肥料颗粒所受拖拽力在 Y 方向上的分力，v_{py} 为肥料颗粒速度在 Y 方向上的分速度，F_{pz} 为肥料颗粒所受合力在 Z 轴的分力，v_{pz} 为在 Z 轴上的分速度，n_p 为肥料颗粒转速，n_{px} 为肥料颗粒在 X 轴上的转速。合力和速度主要由 Y 方

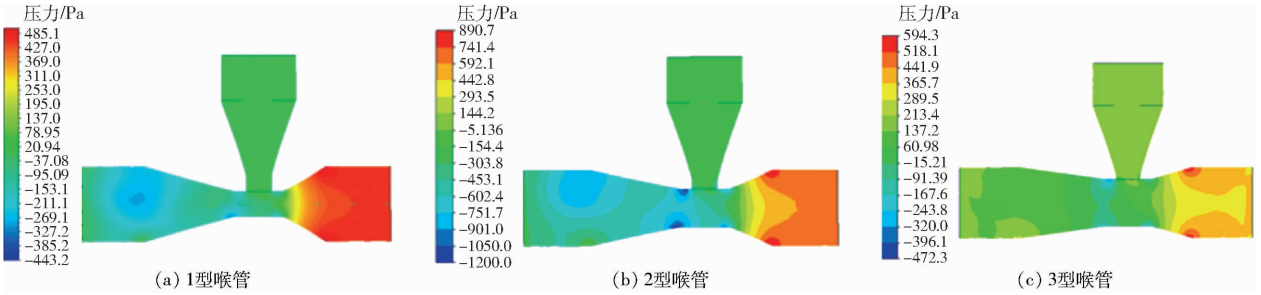


图 7 3 种不同混合腔截面压力云图

Fig. 7 Pressure cloud charts of three different mixed cavity cross sections

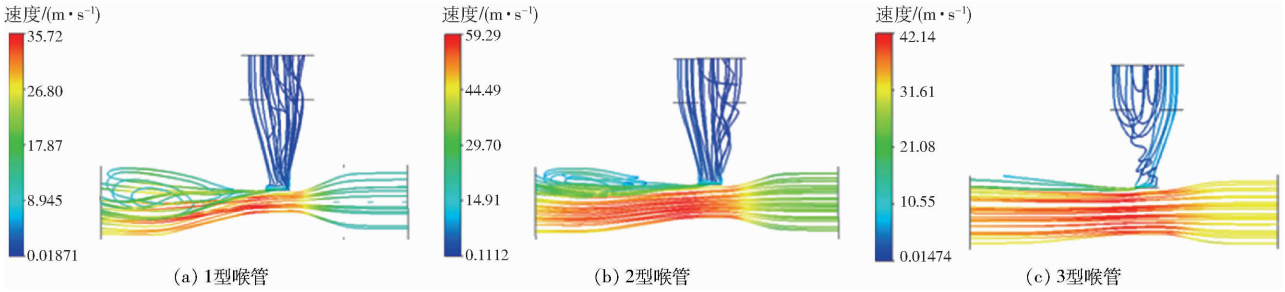


图 8 3 种不同混合腔截面速度分布图

Fig. 8 Velocity distributions of three different mixed cavity cross sections

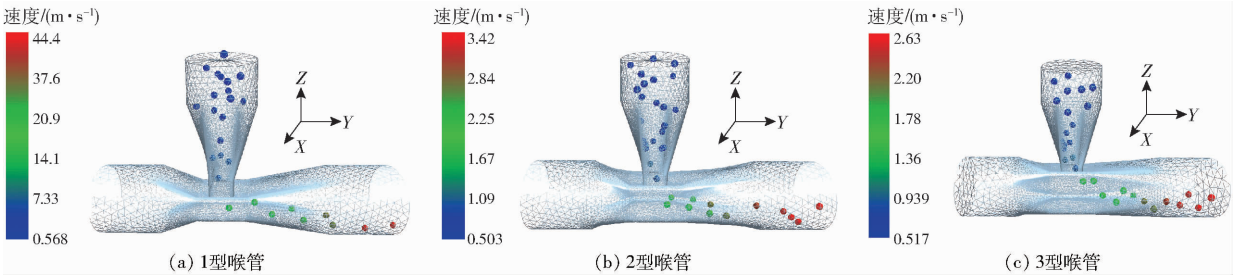


图 9 3 种不同混合腔肥料颗粒分布图

Fig. 9 Distributions of fertilizer particles in three different mixing chambers

向和 Z 方向的分力和分速度组成,每个肥料颗粒主要在 X 轴方向上旋转。肥料颗粒在 2 型混合腔中的 Y 方向速度大于在其他两种类型的混合腔。这是由于 1 型混合腔喉部较窄,颗粒与壁面摩擦碰撞导致速度下降,3 型混合腔风速较低,施加在肥料颗粒上的合力较小,导致肥料颗粒速度小。因此,肥料颗粒以较大的 Y 方向速度均匀地分布在 2 型喉管中。

表 4 肥料颗粒所受平均合力、速度、转速

Tab. 4 Average resultant force and velocity of fertilizer particles

喉管类型	F_p/N	F_{py}/N	F_{pz}/N	v_p/(m·s^{-1})	v_{py}/(m·s^{-1})	v_{pz}/(m·s^{-1})	n_p/(r·min^{-1})	n_{px}/(r·min^{-1})
1 型	2.11×10^{-3}	2.06×10^{-3}	-4.85×10^{-4}	5.58	5.35	-1.59	20 703.59	-20 703.31
2 型	1.15×10^{-3}	1.13×10^{-3}	-1.95×10^{-4}	5.61	5.40	-1.52	16 538.24	-11 520.78
3 型	8.39×10^{-4}	8.33×10^{-4}	-1.04×10^{-4}	4.47	4.24	-1.43	15 620.15	-15 618.78

4.3 喉部长度对气流压力和速度的影响

图 10 为喉部长度对气流压力和速度的影响,仿真的初始条件为:气流进口压力 450 Pa 和肥料颗粒进料速率 6 g/s。仿真所使用的混合腔为 2 型,喉部长度分别为 16、20、24、28 mm。由图 10 可知喉管长度对混合腔中的风压、风速影响较小。随着喉管轴向位置的增加,不同喉部长度的混合腔内气体压力和速度大小趋于一致。将 4 种喉部长度的喉管中肥料颗粒所受拖拽力、速度及转速进行了对比,如表 5 所示,喉管长度为 24 mm 的喉管中,Y 方向速度为 5.83 m/s,大于喉管长为 16、20、28 mm 的混合腔 Y 方向肥料颗粒速度。因此,对于气体肥料混合腔,喉管长度选 24 mm 最为合适。

4.4 入口压力和肥料进给速率对肥料颗粒运动的影响

为了验证气流入口压力和肥料颗粒进给速率对

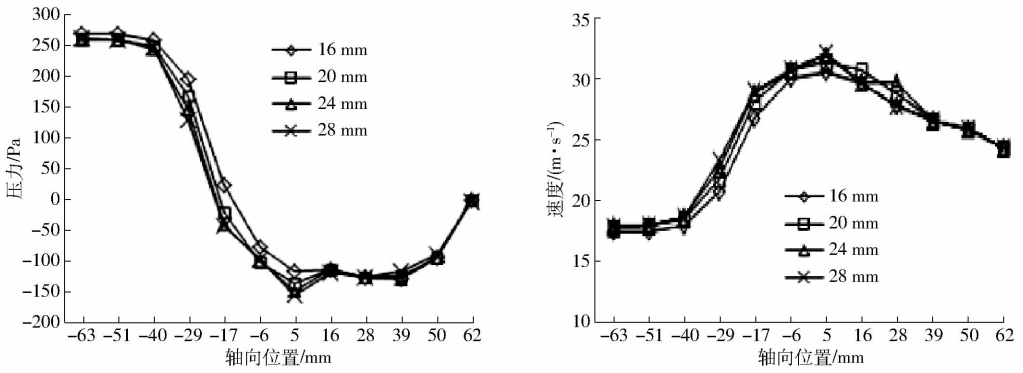


图 10　喉部长度对风压及风速的影响

Fig. 10　Influence of throat length on wind pressure and wind speed

表 5　不同喉管长度的混合腔颗粒所受合力、速度及转速

Tab. 5　Resultant force, velocity and rotation rate of a mixed cavity particle of different length of throat

喉管长度/mm	F_p/N	F_{py}/N	F_{pz}/N	v_p/(m·s^{-1})	v_{py}/(m·s^{-1})	v_{pz}/(m·s^{-1})	n_p/(r·min^{-1})	n_{px}/(r·min^{-1})
16	1.29×10^{-3}	1.26×10^{-3}	-2.54×10^{-4}	4.93	4.74	−1.38	21 311.29	−21 298.28
20	1.15×10^{-3}	1.13×10^{-3}	-1.95×10^{-4}	5.60	5.40	−1.52	16 538.25	−11 520.78
24	1.19×10^{-3}	1.18×10^{-3}	-1.42×10^{-4}	5.98	5.83	−1.37	15 393.65	−15 392.92
28	1.00×10^{-3}	9.92×10^{-4}	-1.27×10^{-4}	5.60	5.45	−1.31	19 433.41	−19 429.23

肥料颗粒运动性能的影响，获得作用于肥料颗粒上的平均力、肥料速度和角速度，进行了 12 组仿真模拟，结果如表 6 所示。作用于肥料颗粒上的合力随着肥料进口压力的增加而增加，Y 方向力的增加主要导致了合力的增加。而 Z 方向的力随着气流入口压力的增加而趋向于稳定，这是由于较大的入口压力导致 Z 方向上阻力的增加。

表 6　不同进口压力及肥料下落速率对肥料颗粒运动状态的影响

Tab. 6　Effect of different inlet pressures and fertilizer drop speeds on movement state of fertilizer particles

进口压力/Pa	肥料下落速率/(g·s^{-1})	F_p/N	F_{py}/N	F_{pz}/N	v_p/(m·s^{-1})	v_{py}/(m·s^{-1})	v_{pz}/(m·s^{-1})	n_p/(r·min^{-1})	n_{px}/(r·min^{-1})	ν_g/(m·s^{-1})	$\nu_g-\nu_p$/(m·s^{-1})
250	6	3.66×10^{-4}	3.55×10^{-4}	-9.23×10^{-5}	2.25	1.79	1.367 1	−4 111.158	−4 109.670	17.27	15.02
	8	3.73×10^{-4}	3.59×10^{-4}	-9.23×10^{-5}	2.64	2.28	1.348 5	−5 576.931	−5 307.138	17.27	14.63
	10	2.89×10^{-4}	2.73×10^{-4}	-9.23×10^{-5}	2.84	2.56	1.236 9	−8 777.712	−7 440.744	17.27	14.43
350	6	7.07×10^{-4}	6.95×10^{-4}	-1.30×10^{-4}	3.85	3.58	1.404 3	−11 388.13	−11 386.36	20.99	17.14
	8	7.41×10^{-4}	7.22×10^{-4}	-1.68×10^{-4}	3.70	3.45	1.329 9	−12 778.48	−12 774.76	20.99	17.29
	10	7.97×10^{-4}	7.78×10^{-4}	-1.72×10^{-4}	4.13	3.91	1.311 3	−13 792.09	−13 752.28	20.99	16.86
450	6	1.22×10^{-3}	1.21×10^{-3}	-1.45×10^{-4}	6.12	5.96	1.404 3	−15 731.97	−15 731.23	22.99	16.87
	8	1.28×10^{-3}	1.26×10^{-3}	-1.63×10^{-4}	5.52	5.33	1.432 2	−19 699.45	−19 527.12	22.99	17.47
	10	1.18×10^{-3}	1.16×10^{-3}	-1.75×10^{-4}	5.12	4.95	1.329 9	−14 106.24	−14 102.8	22.99	17.87
550	6	1.46×10^{-3}	1.44×10^{-3}	-2.53×10^{-4}	6.11	5.89	1.636 8	−10 845.38	−10 841.75	26.75	20.64
	8	1.74×10^{-3}	1.72×10^{-3}	-2.36×10^{-4}	5.12	4.88	1.543 8	−14 626.85	−14 625.46	26.75	21.63
	10	1.58×10^{-3}	1.56×10^{-3}	-1.99×10^{-4}	5.90	5.72	1.432 2	−20 520.45	−20 234.57	26.75	20.85

由表 6 可看出，随着气流入口压力从 250 Pa 增加到 550 Pa，肥料颗粒的平均速度和 Y 方向速度具有增加的趋势。由于本研究中肥料颗粒的体积分数小于 10%，肥料颗粒对气体相的影响可以被忽略。因此，在相同的气体入口压力下，气流出口速度保持稳定。随着气体入口压力的变化，作用于肥料上的合力及肥料颗粒速度的变化趋势对于不同的肥料进料速率是相似的。气流出口速度和肥料颗粒平均速度之间的相对速度随着入口压力的增加而增加。

气流入口压力是影响肥料颗粒运动状态的关键因素。图 11 ~ 14 分别给出了气流入口压力为 250、350、450、550 Pa 条件下，肥料下落速率为 8 g/s 的气流速度场和肥料颗粒在混合腔中分布状态。可以看出，不同进口压力下气流场分布形态相同，气流速度随着进口压力的增加而增加。此外，肥料颗粒流主要集中在气流速度较大的喉管和出口管下部。

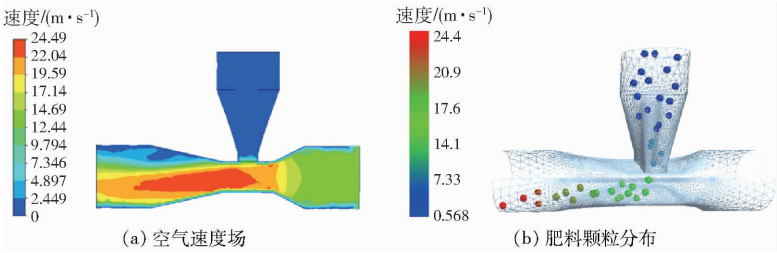


图 11 250 Pa 入口压力下空气速度场与肥料颗粒分布

Fig. 11 Distribution of air velocity field and fertilizer particles at inlet pressure of 250 Pa

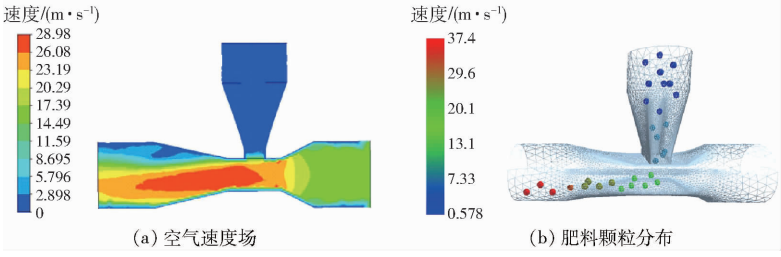


图 12 350 Pa 入口压力下空气速度场与肥料颗粒分布

Fig. 12 Distribution of air velocity field and fertilizer particles at inlet pressure of 350 Pa

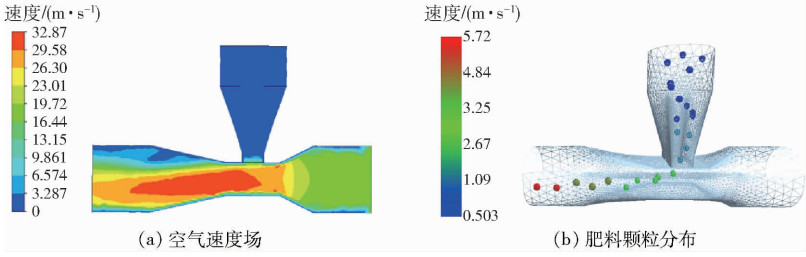


图 13 450 Pa 入口压力下空气速度场与肥料颗粒分布

Fig. 13 Distribution of air velocity field and fertilizer particles at inlet pressure of 450 Pa

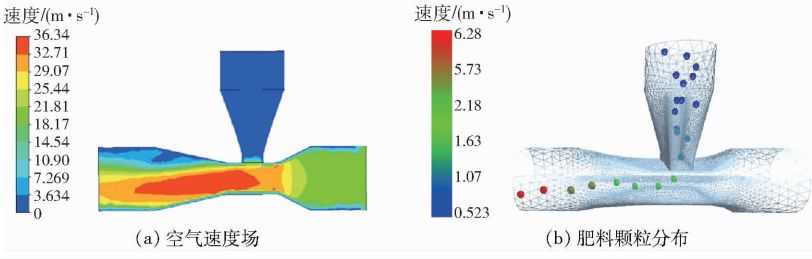


图 14 550 Pa 入口压力下空气速度场与肥料颗粒分布

Fig. 14 Distribution of air velocity field and fertilizer particles at inlet pressure of 550 Pa

当气流入口压力小于等于 250 Pa 时,肥料颗粒在下落到喉管时与混合腔壁面发生碰撞。较低入口压力下的阻力较小,导致肥料颗粒在重力作用下发生弹跳现象。此外,较小的气流入口压力增加了混合腔的固体空气比。由于曳力较小,肥料颗粒移动缓慢。肥料颗粒的沉积现象会最终导致肥料无法排除。当气流进口压力达到 450 Pa 时,肥料颗粒沿 Y 方向的底壁连续均匀地移动。应当注意,气流入口压力的增加导致相邻肥料颗粒距离的增加。显然,气流进口压力在 450 ~ 550 Pa 时,肥料颗粒可以以相同的间隔被排出混合腔,这样更有利于提高施肥的精确性和均匀性。

5 结论

(1)分析了气流和肥料的流动特性以及进料装置中肥料受到的合力。肥料颗粒最初在入口管中缓慢移动,然后由于拖曳力作用在喉管处加速。

(2)喉管处面积显著影响气体肥料混合腔中肥料颗粒的移动和气流速度、压力场的分布。喉管面积的增加导致肥料颗粒速度的减小,并使得喉管中压力损失减少。2 型喉管结构具有较小的压力损失和较高的喉管气流速度,喉管长度对气流场和肥料颗粒运动的影响很小。

(3)气流入口压力对肥料颗粒的作用力、气流

和肥料之间的相对速度影响很大，相反肥料进给速率对气流场的分布影响较小。当进口压力过低时，肥料颗粒移动缓慢，并产生肥料反弹和集中的现象。气流入口压力越大，肥料颗粒所受合力和肥料速度越大，气流入口压力应在 450 ~ 550 Pa 之间。

(4) DEM - CFD 模型已被证明是可靠的，可以作为理解气相中肥料颗粒运动物理现象的工具，并且可以分析差异的来源。基于 DEM - CFD 耦合方法的肥料颗粒运动的数值模拟可以提高肥料进料装置的排肥性能。

参 考 文 献

1 马昕，杨艳明，刘智蕾，等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(4)：1095 - 1103.
MA Xin，YANG Yanming，LIU Zhilei，et al. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2017，23(4)：1095 - 1103. (in Chinese)

2 SHENG Z，SHO S，SHOHEI R，et al. Effect of infiltration rate on nitrogen dynamics in paddy soil after high-load nitrogen application containing ^{15}N tracer[J]. Ecological Engineering，2011，37(5)：685 - 692.

3 PENG X L，YANG Y M，YU C L，et al. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in northeast China [J]. Agronomy Journal，2015，107(5)：1682 - 1690.

4 潘圣刚，莫钊文，罗锡文，等. 机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. 华中农业大学学报，2013，3(2)：1 - 5.
PAN Shenggang，MO Zhaowen，LUO Xiwen，et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2013，32(2)：1 - 5. (in Chinese)

5 毕春辉，陈长海，李明金，等. 浅谈水稻侧深施肥技术[J]. 农业装备技术，2011，37(6)：24 - 25.
BI Chunhui，CHEN Changhai，LI Mingjin，et al. Discussion on side deep fertilization technology of rice[J]. Agricultural Equipment Technology，2011，37(6)：24 - 25. (in Chinese)

6 SHOJI S，DELGADO J，MOSIER A，et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2001，32(7 - 8)：1051 - 1070.

7 BAUTISTA U，KOIKE M，SUMINISTRADO D C. PM-power and machinery：mechanical deep placement of nitrogen in wetland rice [J]. Journal of Agricultural Engineering Research，2001，78(4)：333 - 346.

8 QIAN F P，HUANG N J，LU J L，et al. Design and test analysis of elbow in one-step centralized pneumatic seeding system[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 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. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140615&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. Issn. 1000-1298. 2014. 06. 015.
GONG Zhiqiang，CHEN Jin，LI Yaoming，et al. Study on seed force in suction field of sucker precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(6)：92 - 97. (in Chinese)

11 王金峰，高观保，翁武雄，等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(6)：92 - 104. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20180611&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 06. 011.
WANG Jinfeng，GAO Guanbao，WENG Wuxiong，et al. Dising and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(6)：92 - 104. (in Chinese)

12 JI Dean，ZHANG Minliang，XU Tenggang，et al. Experimental and numerical studies of the jet tube based on venture effect[J]. Vacuum，2015，111：25 - 31.

13 齐兴源，周志艳，杨程，等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016，32(6)：20 - 26.
QI Xingyuan，ZHOU Zhiyan，YANG Cheng，et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(6)：20 - 26. (in Chinese)

14 LI H C，LI Y M，CAO F. CFD - DEM simulation of materal motion in air-and-screen cleaning device [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2012，88：111 - 119.

15 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? file_no = 20160510&flag = 1&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 flow in separating chamber of vegetable seed pneumatic screening machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(5)：70 - 76. (in Chinese)

16 左兴建，武广伟，付卫强，等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016，32(3)：14 - 21.

ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of wind driven rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 14 – 21. (in Chinese)

17 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/OL]. 农业机械学报,2017, 48(3):57 – 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170307&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation analysis and experiment of gas solid two phase flow in gas transmission pipeline with rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):57 – 68. (in Chinese)

18 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.

19 周祖锷. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1994.

20 吕昊. 基于离散元法的排肥器数字化设计方法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
LÜ Hao. Study on digital design method of fertilizer distributor based on discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)

21 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

22 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

23 MISHRA B K. A review of computer simulation of tumbling mill by the discrete element method: part-contact mechanics[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71: 73 – 93.

24 MORRISON R D, SHI F, WHYTE R. Modelling of incremental rock breakage by impact—for use in DEM models [J]. Minerals Engineering, 2007, 20(3): 303 – 309.

25 JJAYASUNDARA C T, YANG R Y, YU A B, et al. Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performances in a horizontal stirred mill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 96(1): 27 – 35.

(上接第 170 页)

19 陈广大,夏凯,陈思睿,等. 基于单片机的电动变量施肥装置控制系统设计[J]. 农机化研究,2012,34(4):106 – 109.
CHEN Guangda, XIA Kai, CHEN Sirui, et al. The design of controlling system for variable rate fertilizer applicater based on microcontroller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 106 – 109. (in Chinese)

20 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2004,20(5):114 – 117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114 – 117. (in Chinese)

21 杨仁全,王纲,周增产,等. 精密施肥机的研究与应用[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊 2):197 – 199.
YANG Renquan, WANG Gang, ZHOU Zengchan, et al. Research and application of precise fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp.2): 197 – 199. (in Chinese)

22 陈书法,张石平,孙星钊,等. 水田高地隙自走式变量撒肥机设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11):16 – 21.
CHEN Shufa, ZHANG Shiping, SUN Xingzhao, et al. Design and experiment of self-propelled high-ground- clearance spreader for paddy variable-rate fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 16 – 21. (in Chinese)

23 耿向宇,李彦明,苗玉彬,等. 基于 GPRS 的变量施肥机系统研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):164 – 167.
GENG Xiangyu, LI Yanming, MIAO Yubin, et al. Development of variable rate fertilizer applicator based on GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 164 – 167. (in Chinese)

24 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键零部件的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):20 – 26.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key components of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20 – 26. (in Chinese)

25 KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(4): 498 – 510.

26 ISHOLA T A, YAHYA A, SHARIFF A R M, et al. A novel variable rate pneumatic fertilizer aapplicator[J]. Instrumentation Science & Technology, 2014, 42(4): 369 – 384.

27 SKRODZKA E, BOLESLAW Bogumił. Comparison of single and dual-phase lock-in amplifiers for photoacoustic spectroscopy[J]. Instrumentation Science & Techonlogy, 2014, 42(4): 469 – 474.

28 林建忠. 流体力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2013.

29 NJ/T 2013—0608 气力式肥料变量播撒系统技术及评价方法[S]. 2013.

30 吴辉. 圆盘式施肥机抛撒试验系统开发与撒肥规律研究[D]. 保定:河北农业大学,2007.
WU Hui. Development and distribution study on the spreading test system for a spinner spreader[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2007. (in Chinese)