

基于 EDEM - Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验

温翔宇^{1,2} 贾洪雷^{1,2} 张胜伟^{1,2} 袁洪方^{1,2} 王刚^{1,2} 陈天佑^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 为提供气力施肥装置的设计参考依据,以大颗粒尿素、磷酸二铵和硫酸钾 3 种颗粒状化肥为试验对象,通过计算流体动力学和离散元法耦合的方法对物料悬浮速度进行数值模拟,采用 Lagrangian 模型进行气固两相流耦合仿真,试验结果表明,大颗粒尿素悬浮速度 7.21 ~ 12.97 m/s,磷酸二铵悬浮速度 7.68 ~ 12.48 m/s,硫酸钾悬浮速度 11.09 ~ 18.15 m/s。通过台架试验测定大颗粒尿素悬浮速度 6.68 ~ 12.48 m/s、磷酸二铵悬浮速度 7.22 ~ 11.96 m/s、硫酸钾悬浮速度 9.46 ~ 17.81 m/s,相对误差分别为 5.3%、5.1%、7.2%。在颗粒肥料体积分数 1.0%、3.5%、6.0%、8.5% 时,分别测定肥料颗粒群的悬浮速度,结果表明,颗粒群悬浮速度随着体积分数的增加而减小,在不同颗粒肥料体积分数下,仿真结果与试验结果相对误差近似为常数,其原因为颗粒球形度对悬浮速度的影响,标定得出大颗粒尿素悬浮速度修正系数 0.90、磷酸二铵悬浮速度修正系数 0.96、硫酸钾悬浮速度修正系数 0.84。基于流固耦合的颗粒悬浮速度仿真具有较高的准确度,验证了基于 EDEM - Fluent 气固两相流耦合仿真测定物料悬浮速度方法的可行性。

关键词: 颗粒肥料; 悬浮速度; 数值模拟; 气固耦合; 离散元法; 计算流体动力学

中图分类号: S145.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)03-0069-09

OSID:



Test of Suspension Velocity of Granular Fertilizer Based on EDEM - Fluent Coupling

WEN Xiangyu^{1,2} JIA Honglei^{1,2} ZHANG Shengwei^{1,2} YUAN Hongfang^{1,2} WANG Gang^{1,2} CHEN Tianyou^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Suspension velocity is one of the main aerodynamic characteristics of materials, and it is an important basic data for the design of pneumatic conveying system. A reference for the design of pneumatic fertilization device was provided, and three kinds of granular fertilizers of large granular urea, diammonium phosphate and potassium sulfate were taken as test objects. The suspension velocity of materials was simulated by the coupling method of computational fluid dynamics and discrete element method. The Lagrangian model was used to simulate the gas-solid two-phase flow. The experimental results showed that the suspension velocity of large granular urea was 7.21 ~ 12.97 m/s, the suspension velocity of diammonium phosphate was 7.68 ~ 12.48 m/s, and the suspension velocity of potassium sulfate was 11.09 ~ 18.15 m/s. Through the bench test, the suspension velocity of large granular urea was 6.68 ~ 12.48 m/s, diammonium phosphate was 7.22 ~ 11.96 m/s, potassium sulfate was 9.46 ~ 17.81 m/s, the relative errors were 5.3%, 5.1% and 7.2%, respectively. When the volume fraction of granular fertilizer was 1.0%, 3.5%, 6.0% and 8.5%, the suspension speed of granular fertilizer group was measured. The suspension speed of granular fertilizer group was decreased with the increase of volume fraction. Under different volume fractions of granular fertilizer, the ratio of simulation test results to real test results was approximately constant, which was supposed to be due to the influence of particle sphericity on suspension speed. The results showed that the correction coefficient of the suspension velocity of large granular urea was 0.90, that of diammonium phosphate was 0.96, and that of potassium

收稿日期: 2019-11-13 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700904)、国家自然科学基金项目(51705191)和吉林省科技发展计划项目(20180414074GH)

作者简介: 温翔宇(1992—),男,博士生,主要从事农业机械研究,E-mail: 505311404@qq.com

通信作者: 袁洪方(1984—),男,副教授,主要从事保护性耕作技术与农业机械优化设计研究,E-mail: yhf1984828@163.com

sulfate was 0.84. Therefore, the simulation test of particle suspension velocity through fluid solid coupling simulation had a high accuracy, which verified the feasibility of the method of measuring the suspension velocity of materials based on EDEM – Fluent gas-solid two-phase flow coupling simulation, and provided a new method for measuring the suspension velocity of agricultural materials.

Key words: granular fertilizer; suspension velocity; numerical simulation; gas-solid coupling; discrete element method; computational fluid dynamics

0 引言

随着农业现代化进程的迅速推进,我国农业机械化水平不断提高,农机具正逐步向智能、高效的方向发展^[1],气力输送开始广泛运用于播种机械、施肥机械以及收获机械等多种农业装备中^[2-4]。由于田间地况复杂多变,农机具单体部件会配置仿形机构,与传统的机械输送相比,气力输送具有空间布置灵活、结构简单的特点^[5-7],与农机具的适配性更高。

在农业机械气力输送系统设计过程中,过低的输送气速会导致农业物料在管道中阻塞,过高的输送气速不仅会增加能耗,还会增加物料与输送管道间的磨损^[8-9]。农业物料的悬浮速度是气力输送系统设计的基础,是设定合理输送气速的重要依据^[10-12],通常采用2种方法获得悬浮速度。一种是根据经验公式计算获得,即利用物料在空气中的浮重与空气阻力的力学平衡方程推导求出,因球形物料的空气阻力不受气流方向的影响,公式计算方法更适用于球形物料,而对于非球状的颗粒物料需要根据体积换算成当量球体,将当量球体的直径代入公式计算悬浮速度,并引入修正系数进行修正计算。文献[13]给出了圆柱体、半圆球、正方体等几种常见形状的修正系数,而农业物料种类繁多,且多为不规则形状,同一种物料也存在大小不一的情况,公式计算的结果趋于理想化,在实际应用中存在一定的误差。另一种是通过试验测量获得,应用物料悬浮速度测定试验台可以直接测定物料的悬浮速度所属范围。侯华铭等^[14]设计了一种竖直吹气式的农业物料悬浮速度试验装置,并设计分段悬浮试验,测量了收获期谷子、荞麦、燕麦经稻麦联合收获机收获后的待清选脱出物各组分的悬浮速度,为农业物料机械清选技术及装置的研发提供了参考。王维等^[15]针对目前物料悬浮速度测试方法存在计算量大、操作复杂、造价昂贵、数据误差大等缺点,设计了一种改变频率控制风速、利用管道风速仪直接读取物料悬浮速度的测试装置,该装置可简单、快速测出不规则形状物料颗粒的悬浮速度。

随着计算机数字化模拟技术的普及,EDEM 离散元仿真软件与 Fluent 流体动力学仿真软件被广泛

应用于农业机械设计领域中^[16-19],基于 EDEM – Fluent 气固两相流耦合仿真为农业物料的悬浮速度测定提供了新方法。利用 EDEM 软件进行仿真试验前,需要设定各个材料间的接触参数(碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数),目前,物料间的接触参数还没有系统的测试方法,很难通过真实试验直接获得^[20-22],一般通过真实试验与虚拟试验相结合进行参数标定^[23],但由于农业物料个体差异大、形状不规则,影响标定参数的准确性,从而导致仿真结果与试验结果存在一定的误差。在进行农业物料的悬浮速度测定试验时,气固两相流中固体颗粒体积分数通常小于总体积分数 10%,物料间的接触参数和物料与壁面间的接触参数不会对悬浮速度的测定产生显著影响。因此,基于 EDEM – Fluent 气固两相流耦合模拟预测农业物料的悬浮速度具有较高的准确度,对分析颗粒肥料动力学特性和施肥装置的研究具有理论价值和实际应用意义,可以提高研发效率,节约研发成本^[24]。

本文以大颗粒尿素、磷酸二铵和硫酸钾 3 种颗粒状化肥为试验对象,分别进行理论计算、耦合仿真和试验研究,并对结果进行比较,以验证基于 EDEM – Fluent 气固两相流耦合仿真测定物料悬浮速度方法的可行性,并以试验研究为准,对 3 种颗粒肥料的悬浮速度理论计算公式和数值模拟结果进行修正。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用肥料选用 N 质量分数 46% 的大颗粒尿素,磷肥选用 N 质量分数 18%、 P_2O_5 质量分数 46% 的磷酸二铵,钾肥选用 K_2O 质量分数 50% 的圆粒硫酸钾,用干燥法测定得出大颗粒尿素含水率为 0.37%、磷酸二铵含水率 0.28%、硫酸钾含水率 0.11%。PS-20 型农业物料悬浮速度测试试验台锥形观察管的内壁为硬质 PVC 材料,通过查阅资料确定所选材料的泊松比、弹性模量,计算物料的剪切模量,用天平、量筒通过排液法测定 3 种颗粒肥料的密度,用精度 0.01 mm 的游标卡尺测定肥料颗粒的粒径,计算颗粒球形率。材料基本参数如表 1 所示。

表 1 材料基本参数
Tab.1 Basic material parameters

材料	参数	数值
大颗粒尿素	泊松比	0.25 ~ 0.51 ^[25-27]
	弹性模量/Pa	8.20 × 10 ⁷ ~ 8.90 × 10 ⁷ ^[28]
	剪切模量/Pa	2.30 × 10 ⁷ ~ 3.56 × 10 ⁷ ^[29]
	密度/(kg·m ⁻³)	1 337
	球形率/%	85 ~ 96
	粒径/mm	1.60 ~ 5.00
磷酸二铵	泊松比	0.25
	弹性模量/Pa	1.68 × 10 ⁷ ~ 2.75 × 10 ⁷
	剪切模量/Pa	6.70 × 10 ⁶ ~ 1.10 × 10 ⁷ ^[30]
	密度/(kg·m ⁻³)	1 485
	球形率/%	86 ~ 92
	粒径/mm	1.60 ~ 4.00
硫酸钾	泊松比	0.25 ~ 0.49
	弹性模量/Pa	2.87 × 10 ⁶ ~ 3.96 × 10 ⁷
	剪切模量/Pa	9.63 × 10 ⁶ ~ 1.58 × 10 ⁷
	密度/(kg·m ⁻³)	2 419
	球形率/%	73 ~ 88
	粒径/mm	2.00 ~ 5.60
硬质 PVC	泊松比	0.32 ~ 0.47
	弹性模量/Pa	4.41 × 10 ⁹ ~ 1.03 × 10 ¹⁰
	剪切模量/Pa	1.50 × 10 ⁹ ~ 3.92 × 10 ⁹
	密度/(kg·m ⁻³)	1 418

1.2 试验方法

通过肥料颗粒悬浮状态下的浮重与空气阻力的力学平衡式推导肥料颗粒的自由悬浮速度公式,采用分区悬浮速度公式及其适用粒径法,根据待测物料的颗粒等效直径所在范围确定阻力系数,将其代入颗粒的自由悬浮速度公式求得物料悬浮速度理论值。基于 EDEM - Fluent 气固两相流耦合仿真模拟待测肥料颗粒在 PS - 20 型农业物料悬浮速度测试试验台中进行物料悬浮试验,得出肥料颗粒悬浮速度预测值。随机抽取 200 g 肥料颗粒,将其置于 PS - 20 型农业物料悬浮速度测试试验台中(图 1),通过风量调节装置缓慢增加风速,待物料稳定悬浮在锥形观察管处,计算物料所在位置的横截面积,并读取皮托管实时风速,根据密封管路各断面流量相等可知,悬浮速度计算式为

$$S_1 v_1 = S_i v_i \tag{1}$$

式中 S_1 ——锥形观察管小端面积,m²
 v_1 ——锥形观察管小端风速,m/s
 S_i ——物料悬浮位置断面面积,m²
 v_i ——物料悬浮位置风速,m/s

2 肥料颗粒悬浮速度理论计算与数值模拟

2.1 理论计算

物料悬浮速度是物料主要的空气动力学特性参

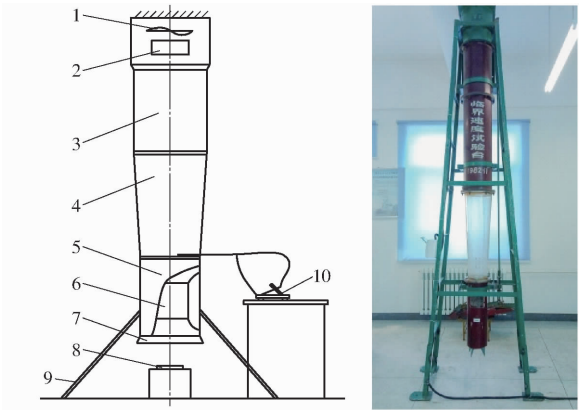


图 1 PS - 20 型农业物料悬浮速度测试试验台
Fig.1 PS - 20 agricultural material suspension speed test-bed
1. 风量调节装置 2. 轴流风机 3. 上稳流管 4. 锥形观察管 5. 下稳流管 6. 稳流器 7. 集流罩 8. 物料盘 9. 支撑架 10. 皮托管

数之一,是气力分选、气力输送、气力播种等装置设计的重要参考数据。根据肥料颗粒悬浮状态下的浮重与空气阻力的力学平衡式

$$C \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho \frac{v_0^2}{2} = \frac{\pi}{6} d_s^3 (\rho_s - \rho) g \tag{2}$$

可推导出肥料颗粒的自由悬浮速度公式为

$$v_0 = \sqrt{\frac{4g d_s (\rho_s - \rho)}{3 C \rho}} \tag{3}$$

式中 v_0 ——颗粒自由悬浮速度,m/s
 d_s ——颗粒等效直径,m
 ρ_s ——颗粒密度,kg/m³
 ρ ——空气密度,kg/m³
 C ——阻力系数
 g ——重力加速度,取 9.81 m/s²

由于阻力系数 C 是颗粒雷诺数 Re 的函数,均未知,不能直接求出颗粒的悬浮速度,因此采用分区悬浮速度公式及其适用粒径法,根据待测物料的颗粒等效直径所在范围确定阻力系数

$$C =$$

$$\begin{cases} \frac{24}{Re} & \left(d_s \leq 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \right) \\ \frac{10}{\sqrt{Re}} & \left(2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} < d_s \leq 20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \right) \\ 0.44 & \left(20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} < d_s \leq 1100 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \right) \end{cases} \tag{4}$$

其中 $Re = \frac{v_0 d_s \rho}{\mu} \tag{5}$

式中 μ ——空气动力粘度系数,Pa·s
已知大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾肥料密度分

别为 1 337、1 485、2 419 kg/m³,肥料颗粒等效直径分别为 1.6 ~ 5.0 mm、1.6 ~ 4.0 mm、2.0 ~ 5.6 mm,分别将 3 种颗粒肥料密度 ρ_s 、空气密度 $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、空气动力粘度 $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 代入式(4)中,得出对应阻力系数 C 的颗粒等效直径范围。经计算,3 种化肥真实的颗粒等效直径均在式(4)其一范围,因此将阻力系数 $C = 0.44$ 代入式(3)计算得:大颗粒尿素悬浮速度 7.28 ~ 12.86 m/s、磷酸二铵悬浮速度 7.67 ~ 12.13 m/s、硫酸钾悬浮速度 10.95 ~ 18.31 m/s。

2.2 数值模拟

在气固两相流耦合仿真中,基于离散元仿真软件 EDEM 2.7 分析肥料颗粒运动,基于 ANSYS Fluent 16.0 软件计算流体动力学。

在 EDEM 软件中进行仿真设置,肥料颗粒表面几乎无粘附力,颗粒与颗粒间、颗粒与壁面间均采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,并设置重力加速度方向。仿真试验中输入待测肥料颗粒与接触材料的本征参数,肥料颗粒间、颗粒与壁面间的接触参数根据文献[31]提出的参数标定方法进行标定,结果如表 2 所示。

表 2 仿真参数		
Tab.2 Parameters used in simulation		
类型	参数	数值
尿素-PVC	碰撞恢复系数	0.36
	静摩擦因数	0.41
	滚动摩擦因数	0.04
磷酸二铵-PVC	碰撞恢复系数	0.32
	静摩擦因数	0.39
	滚动摩擦因数	0.04
硫酸钾-PVC	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦因数	0.42
	滚动摩擦因数	0.05
尿素-尿素	碰撞恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.36
	滚动摩擦因数	0.15
磷酸二铵-磷酸二铵	碰撞恢复系数	0.19
	静摩擦因数	0.30
	滚动摩擦因数	0.17
硫酸钾-硫酸钾	碰撞恢复系数	0.18
	静摩擦因数	0.39
	滚动摩擦因数	0.20

EDEM 软件提供的固定粒径、平均分布、正态分布 3 种粒径分布方式,通过预试验发现本次试验所选的肥料样本粒径呈正态分布,但磷酸二铵、硫酸钾颗粒粒径不完全服从正态分布,因此,采用正态分布参数设置进行分段拟合,建立 2 种粒径的颗粒模型,参数设置如表 3 所示。

表 3 EDEM 软件中肥料样本粒径正态分布参数				
Tab.3 Parameter of fertilizer sample size normal distribution in EDEM software				
颗粒	参数	尿素	磷酸二铵	硫酸钾
颗粒群 1	基准半径/mm	1.6	1.5	2.2
	平均半径/倍	0.5	1	1
	标准差/mm	0.40	0.07	0.10
	半径下限/倍	0.5	1	0.727 3
	半径上限/倍	1.562 5	1.333 3	1.272 7
	质量/g	200	103	178
颗粒群 2	基准半径/mm		1.2	1.6
	平均半径/倍		1	1
	标准差/mm		0.2	0.6
	半径下限/倍		0.666 6	0.625
	半径上限/倍		1.25	1
	质量/g		97	22

按 PS-20 型农业物料悬浮速度测试试验台结构参数(表 4)建立试验台模型,简化试验台模型并导入 EDEM 软件中(图 2),设置模型材料为硬质 PVC。

表 4 悬浮试验台参数			
Tab.4 Parameters of suspension test bed			
区域	直径/mm	高度/mm	锥角/(°)
下稳流管	180	800	0
锥形观察管	180 ~ 300	949	3.6
上稳流管	300	700	0

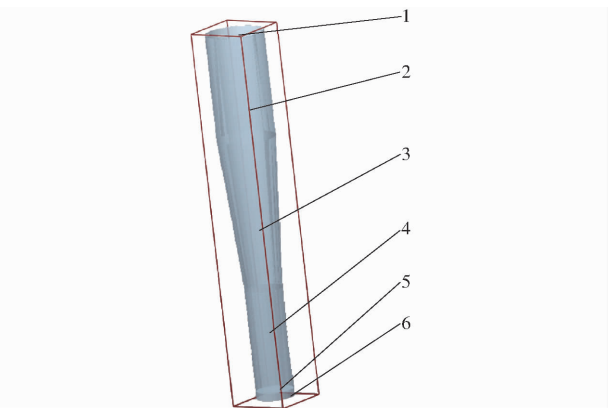


图 2 悬浮试验台仿真模型

Fig.2 Simulation model of suspension test-bed

1. 出口 2. 上稳流管 3. 锥形观察管 4. 下稳流管 5. 物料盘 6. 气流入口

对流体域采用结构化网格进行划分(图 3),模拟气吸式悬浮试验台,设置风机所在位置的出口为流场的速度出口,空气以恒定速度流出流体域,设置气流入口进气方式为自由流入,将流体域网格导入 Fluent 软件中进行仿真参数设置。湍流模型选择 Standard $k-\varepsilon$ 模型。

本试验进行 EDEM - Fluent 耦合模拟,耦合模



图 3 流体域网格图

Fig. 3 Fluid domain grid diagram

型包括 Lagrangian 模型和 Eulerian 模型，其中 Eulerian 模型采用多相流框架求解，流体方程加入了体积分数项，Lagrangian 模型为单相流框架，不考虑颗粒对流场的影响，适用于两相流中固相颗粒体积分数小于总体积分数 10% 的情况下，在悬浮试验台测定物料悬浮速度时，物料体积一般不超过锥形观察管体积的 10%，所以两相流耦合采用 Lagrangian 模型^[32]，气流对肥料颗粒的主要影响为曳力，选择 Free – stream 曳力模型。

按 EDEM 软件与 Fluent 软件耦合计算的数据传递需要，Fluent 软件中时间步长需设置为 EDEM 中时间步长的整数倍^[33]，大颗粒尿素、磷酸二铵和硫酸钾 3 种颗粒肥料在两个软件中仿真时间步长匹配如表 5 所示。

耦合仿真中，风速设定过大会使颗粒群直接从出流口飞出，风速过小会使颗粒群静止在料台而无

表 5 时间步长的匹配

Tab. 5 Matching time steps

软件	大颗粒尿素	磷酸二铵	硫酸钾
EDEM	5×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Fluent	2×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}

法上升通过稳流段，因此，以 3 种颗粒肥料悬浮速度理论计算值为参考依据，进行预试验，当大颗粒尿素以出流口风速 5.0 m/s 初始化仿真模型、磷酸二铵出流口风速初始值为 5.0 m/s、硫酸钾出流口风速初始值为 7.0 m/s 时，全部粒径范围内的肥料颗粒可以从下稳流管上升至锥形观察管内，试验发现此时肥料颗粒在气流作用下全部依附在锥形观察管管壁内侧，呈稳定悬浮状态，且颗粒按粒径大小由下至上有序排列（图 4a、4c、4e），当出流口风速增大时，粒径较大的颗粒仍然依附在管壁上稳定悬浮，而粒径较小的颗粒在一定区域内上下浮动（图 4b、4d、4f），随着风速增加，依附在管壁的颗粒数量逐渐减少，而上下浮动的颗粒数量逐渐增加。

利用 Fluent 软件模拟气吸式悬浮试验台中流场速度云图如图 5 所示，下稳流管空气入口处空气流速较低，随着气流上升，下稳流管空气流速逐渐稳定，当气流经过锥形观察管，由于管径不断变化，空气流速随着位置升高而不断减小，并且在锥形观察管的任一横截面，空气流速从管道中心至管壁逐渐减小，因此，颗粒表面会产生压力差，气流在推动颗粒上升的同时，也会推动颗粒向管壁方向移动，当靠近管壁位置的气流速度小于肥料颗粒的悬浮速度时，颗粒产生下落的趋势，沿着锥形观察管倾斜的管壁向下滑落，产生向管道中心的水平加速度，当颗粒

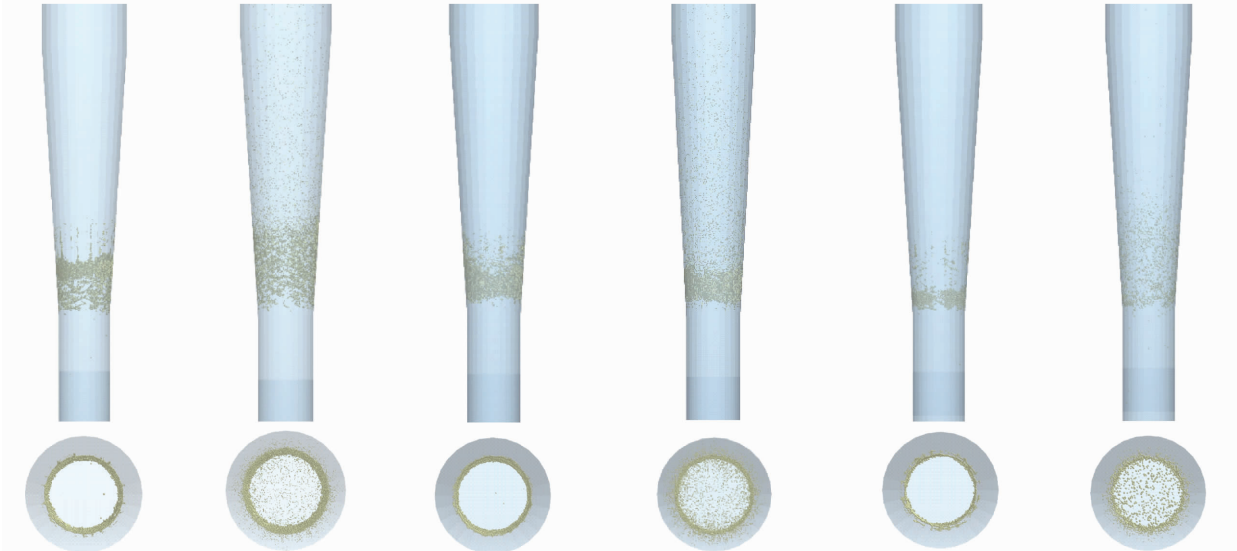


图 4 不同初始风速肥料颗粒群悬浮位置

Fig. 4 Suspension positions of fertilizer particles at different initial wind speeds

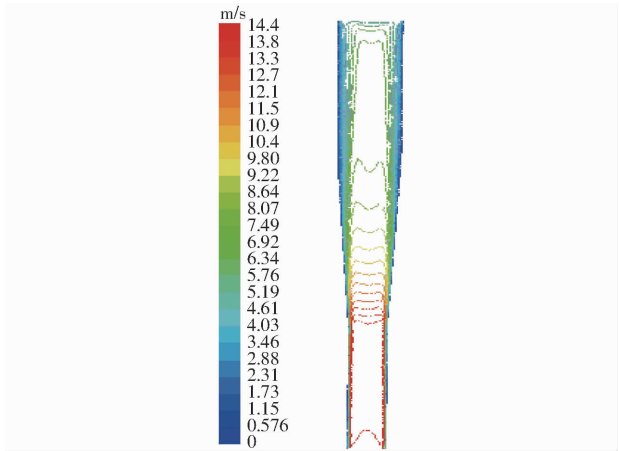


图 5 流场速度云图

Fig.5 Velocity nephogram of flow field

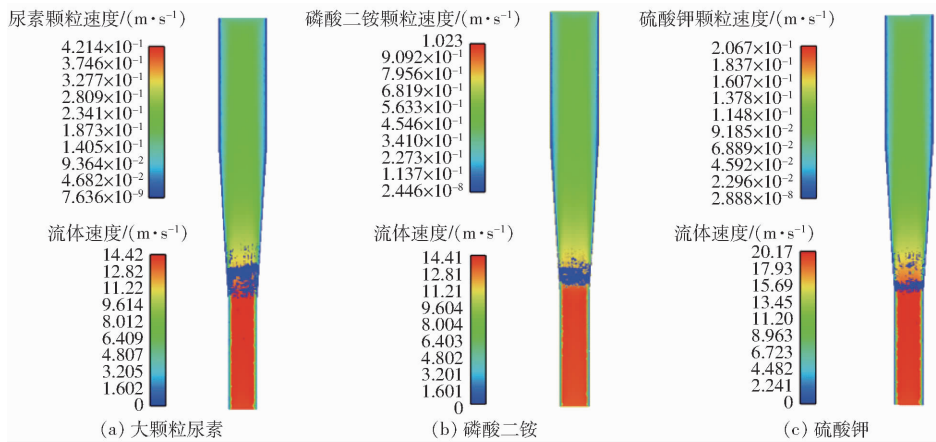


图 6 不同肥料颗粒群悬浮位置与速度流场分布

Fig.6 Distributions of suspended position and velocity flow field in different fertilizer particle groups

坐标,查出对应位置处的空气流速,大颗粒尿素悬浮速度 7.21 ~ 12.97 m/s,磷酸二铵悬浮速度 7.68 ~ 12.48 m/s,硫酸钾悬浮速度 11.09 ~ 18.15 m/s。

3 肥料颗粒悬浮速度测定试验

采用 PS-20 型农业物料悬浮速度测试试验台进行试验,预试验发现气流受肥料颗粒影响较大,肥料颗粒上下波动范围大,易从试验台滑落,因此,将通过筛分法分组的肥料颗粒分别放入试验台中,测定不同粒径范围下肥料的悬浮速度,大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾不同粒径的悬浮速度见表 6。

经试验台测试得出,大颗粒尿素悬浮速度 6.68 ~ 12.48 m/s,磷酸二铵悬浮速度 7.22 ~ 11.96 m/s,硫酸钾悬浮速度 9.46 ~ 17.81 m/s。试验发现大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾悬浮速度范围均小于仿真试验模拟的颗粒悬浮速度范围,因为试验中,肥料颗粒并不都是规则球体,颗粒在流场的作用下不停地自转,颗粒的迎风面积不断变化,所受风力时刻变化,所以颗粒不会呈稳定悬浮状态,而是在一定区域内上下浮动,浮动范围相较于球形颗粒浮动范围大,当

滑落至气流速度大于其悬浮速度的区域时,颗粒再次上升,依次循环,最终依附在管壁。从速度云图可以看出,在气流经过锥形观察管区域,随着气流上升,气流速率变化越小,因此,当初始风速增加,试验台内满足肥料颗粒悬浮速度区域逐渐扩大,上下浮动的颗粒数量逐渐增多。

当颗粒群在试验台中呈稳定悬浮状态时,将 Fluent 计算的流场速度和 EDEM 软件的颗粒速度导入 EnSight 10.1 后处理软件进行气固耦合流场分析,试验台中 3 种肥料颗粒群悬浮位置与速度流场分布如图 6 所示。

由图 6 可以看出,颗粒群中大部分颗粒呈蓝色,基本处于悬浮状态,根据颗粒在试验台的悬浮位置

表 6 不同粒径下肥料颗粒悬浮速度

Tab.6 Suspension velocity of fertilizer particles under different particle sizes

粒径/mm	大颗粒尿素	磷酸二铵	硫酸钾
1.6 ~ 2.0	6.68 ~ 8.02	7.22 ~ 8.38	
2.0 ~ 2.5	7.47 ~ 8.89	7.78 ~ 9.37	9.46 ~ 12.04
2.5 ~ 3.0	8.32 ~ 9.86	8.86 ~ 10.34	10.52 ~ 13.27
3.0 ~ 3.2	9.07 ~ 10.24	9.66 ~ 10.75	11.40 ~ 13.66
3.2 ~ 4.0	9.54 ~ 11.33	10.07 ~ 11.96	12.11 ~ 15.35
4.0 ~ 5.0	10.42 ~ 12.48		13.27 ~ 17.11
5.0 ~ 5.6			14.88 ~ 17.81

不规则颗粒的迎风面积大于当量球体的迎风面积时,同等风速下,不规则颗粒的悬浮位置更高,导致测量计算的颗粒悬浮速度更小。

大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾 3 种肥料悬浮速度理论计算、数值模拟、台架试验结果见表 7。

由于肥料颗粒悬浮速度是范围值,采用悬浮速度范围中心值进行相对误差计算,相对误差计算式为

$$\varepsilon = \frac{v_m - v_n}{v_n} \times 100\%$$

(6)

表 7 颗粒悬浮速度对比

Tab.7 Particle suspension velocity comparison

肥料	参数	m/s		
		理论计算值	仿真结果	台架试验
大颗粒尿素	最小粒径	7.28	7.21	6.68
	最大粒径	12.86	12.97	12.48
磷酸二铵	最小粒径	7.67	7.68	7.22
	最大粒径	12.13	12.48	11.96
硫酸钾	最小粒径	10.95	11.09	9.46
	最大粒径	18.31	18.15	17.81

式中 v_m ——仿真试验悬浮速度中心值, m/s
 v_n ——台架试验悬浮速度中心值, m/s
 ε ——相对误差, %

计算得大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾仿真试验与台架试验相对误差分别为 5.3%、5.1%、7.2%。
考虑不同体积分数的肥料颗粒对悬浮速度的影响,分别测定大颗粒尿素、磷酸二铵、硫酸钾 3 种肥料在体积分数为 1.0%、3.5%、6.0%、8.5% 时,肥料颗粒群的悬浮速度,试验结果见表 8。

表 8 不同体积分数下肥料悬浮速度

Tab.8 Suspension velocity of fertilizer at different volume fractions

体积 分数/ %	参数	大颗粒 尿素	磷酸 二铵	硫酸钾
1.0	仿真试验/(m·s ⁻¹)	7.12 ~ 12.88	7.42 ~ 12.17	10.85 ~ 18.17
	台架试验/(m·s ⁻¹)	6.52 ~ 12.33	7.09 ~ 11.92	9.15 ~ 17.43
	相对误差/%	6.1	3.1	9.2
3.5	仿真试验/(m·s ⁻¹)	6.68 ~ 12.12	6.91 ~ 11.45	10.19 ~ 17.18
	台架试验/(m·s ⁻¹)	5.96 ~ 11.67	6.66 ~ 11.23	8.58 ~ 16.56
	相对误差/%	6.6	2.6	8.9
6.0	仿真试验/(m·s ⁻¹)	6.25 ~ 11.37	6.52 ~ 10.74	9.64 ~ 16.26
	台架试验/(m·s ⁻¹)	5.58 ~ 11.06	6.23 ~ 10.52	8.12 ~ 15.74
	相对误差/%	5.8	3.0	8.5
8.5	仿真试验/(m·s ⁻¹)	5.84 ~ 10.25	6.10 ~ 10.07	9.11 ~ 15.25
	台架试验/(m·s ⁻¹)	5.23 ~ 9.87	5.83 ~ 9.86	7.69 ~ 14.82
	相对误差/%	6.5	3.1	8.2

试验结果表明,颗粒群悬浮速度随着体积分数的增加而减小,肥料颗粒群的悬浮速度与 Euler – Lagrangian 模型仿真结果误差逐渐增大。因此,为考虑颗粒肥料体积分数对气流的影响,两相流耦合采用 Eulerian – Eulerian 模型,通过仿真试验分析可以看出,随着颗粒体积分数的增加,管道内颗粒占据了流场部分空间,阻碍了空气流动,在风机提供稳定的空气流量下,颗粒占据的空气的流通面积,造成局部空气流速增加,使颗粒能在较小的初始风速下悬浮。
由不同颗粒体积分数下仿真试验与台架试验结果可知,3 种肥料样本的悬浮速度上限与仿真结果

接近,而肥料悬浮速度下限与仿真结果相差较大,其中磷酸二铵仿真结果与台架试验结果误差最小,其次为大颗粒尿素,硫酸钾仿真结果与台架试验误差最大,因为颗粒球形度对悬浮速度的影响,肥料样本中颗粒球形度有差异,当不规则颗粒的迎风面积大于当量球体的迎风面积时,较小的风速即可使肥料颗粒悬浮,所以肥料悬浮速度下限值与球形颗粒仿真结果差异较大。通过公式计算相对误差,发现误差近似为常数,因此可通过肥料颗粒不规则形状修正系数对仿真结果进行修正,修正系数计算公式为

$$c = \frac{\bar{v}_p}{v_s} \tag{7}$$

式中 $\bar{v}_p$ ——台架试验悬浮速度下限均值, m/s
 $\bar{v}_s$ ——仿真试验悬浮速度下限均值, m/s
 c ——修正系数

标定出大颗粒尿素悬浮速度修正系数 0.90、磷酸二铵悬浮速度修正系数 0.96、硫酸钾悬浮速度修正系数 0.84。

4 结论

(1)从理论上对大颗粒尿素、磷酸二铵和硫酸钾 3 种颗粒状化肥进行悬浮速度计算,利用物料在空气中的浮重与空气阻力的力学平衡方程,推导肥料颗粒的自由悬浮速度公式,结合适用粒径法求得:大颗粒尿素悬浮速度 7.28 ~ 12.86 m/s,磷酸二铵悬浮速度 7.67 ~ 12.13 m/s,硫酸钾悬浮速度 10.95 ~ 18.31 m/s。
(2)基于 EDEM – Fluent 耦合进行肥料悬浮速度仿真,采用 Euler – Lagrangian 模型进行两相流耦合,得悬浮速度仿真结果为:大颗粒尿素悬浮速度 7.21 ~ 12.97 m/s、磷酸二铵悬浮速度 7.68 ~ 12.48 m/s、硫酸钾悬浮速度 11.09 ~ 18.15 m/s。通过台架试验,测定大颗粒尿素悬浮速度 6.68 ~ 12.48 m/s,磷酸二铵悬浮速度 7.22 ~ 11.96 m/s,硫酸钾悬浮速度 9.46 ~ 17.81 m/s,相对误差分别为 5.3%、5.1%、7.2%。
(3)考虑颗粒肥料体积分数对气流的影响,采用 Eulerian – Eulerian 模型进行两相流耦合,通过仿真试验可以看出,颗粒群悬浮速度随着体积分数的增加而减小,在不同的颗粒肥料体积分数下,仿真与试验结果误差近似常数,其原因为颗粒球形度对悬浮速度的影响,标定得出大颗粒尿素悬浮速度修正系数 0.90、磷酸二铵悬浮速度修正系数 0.96、硫酸钾悬浮速度修正系数 0.84。基于流固耦合的颗粒悬浮速度仿真具有较高的准确度,验证了基于 EDEM – Fluent 气固两相流耦合仿真测定物料悬浮速度方法的可行性。

参考文献

- [1] 董胜,袁朝辉,谷超,等.基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J].农业工程学报,2017,33(8):1-11. DONG Sheng, YUAN Zhao hui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8):1-11. (in Chinese)
- [2] 邢赫,臧英,王在满,等.水稻气力式播量可调排种器设计与参数优化[J].农业工程学报,2019,35(4):20-28. XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and parameter optimization of rice pneumatic seeding metering device with adjustable seeding rate[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4):20-28. (in Chinese)
- [3] 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):20-26,316. QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice product[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6):20-26,316. (in Chinese)
- [4] 王立军,李洋,梁昌,等.贯流风筛精选装置内玉米脱出物运动规律研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):122-127. WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):122-127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018. (in Chinese)
- [5] 魏海,谢焕雄,胡志超,等.花生荚果气力输送设备参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(2):6-12. WEI Hai, XIE Huanxiong, HU Zhichao, et al. Parameter optimization and test of pneumatic conveying equipment for peanut pods[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):6-12. (in Chinese)
- [6] 钱东平,程庆会,李国防,等.降低气力输送小麦能耗的试验研究[J].农业工程学报,2003,19(3):108-111. QIAN Dongping, CHENG Qinghui, LI Guofang, et al. Experimental research on reducing power consumption of pneumatic conveying of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3):108-111. (in Chinese)
- [7] 高连兴,杜鑫,张文,等.双滚筒气力循环式花生脱壳机设计[J].农业机械学报,2011,42(10):68-73. GAO Lianxing, DU Xin, ZHANG Wen, et al. Double-roller peanut sheller with pneumatic circulating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):68-73. (in Chinese)
- [8] 左兴健,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 on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3):14-21. (in Chinese)
- [9] 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. WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WENG Wuxiong, et al. Design 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180611&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.011. (in Chinese)
- [10] 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?file_no=201803007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [11] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等.气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):141-148. YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):141-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s019&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 杨伦,谢一华.气力输送工程[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [14] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等.气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(16):43-49. HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16):43-49. (in Chinese)
- [15] 王维,王亚妮,田智辉,等.物料悬浮速度测试台的设计与试验研究[J].中国农机化学报,2016,37(6):44-46,78. WANG Wei, WANG Yani, TIAN Zhihui, et al. Research on design and experimental of material suspension velocity bench[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6):44-46,78. (in Chinese)
- [16] 马征,李耀明,徐立章.农业工程领域颗粒运动研究综述[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):22-29. MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):22-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.005. (in Chinese)
- [17] 高筱钧,徐杨,杨丽,等.基于DEM-CFD耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J/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?file_no=2018s013&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 013. (in Chinese)
- [18] 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?file_no=20190809&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 08. 009. (in Chinese)
- [19] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 171 - 180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 171 - 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s023&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 023. (in Chinese)
- [20] MARTINA C L, BOUVARDA D, SHIMAB S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(4): 667 - 693.
- [21] CLEARY P W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods[J]. Minerals Engineering, 1998, 11(11): 1061 - 1080.
- [22] 徐泳, 李红艳, 黄文彬. 耕作土壤动力学的三维离散元建模和仿真方案策划[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 34 - 38.
XU Yong, LI Hongyan, HUANG Wenbin. Modeling and methodological strategy of discrete element method simulation for tillage soil dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 34 - 38. (in Chinese)
- [23] 龚明. 材料物料特性参数标定[R]. 北京: EDEM 用户大会报告, 2013.
- [24] 付宏, 王常瑞, 靳聪, 等. 农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 开发[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 1 - 9.
FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform AgriDEM for agricultural machinery parts [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 1 - 9. (in Chinese)
- [25] 王云霞, 梁志杰, 崔涛, 等. 玉米分层施肥器结构设计 with 试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 163 - 169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 163 - 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s025&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. S0. 025. (in Chinese)
- [26] 周韦, 王金峰, 王金武, 等. 基于 EDEM 的水田深施肥机构螺旋钢丝的数值模拟与分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 27 - 30.
ZHOU Wei, WANG Jinfeng, WANG Jinwu, et al. Numerical simulation and analysis of a fertilizer can on fertilizer spreader based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2015, 37(1): 27 - 30. (in Chinese)
- [27] 王金峰, 高观保, 王金武, 等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 68 - 76.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WANG Jinwu, et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 68 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180308&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 008. (in Chinese)
- [28] 王金峰, 鞠金艳, 尹大庆. 尿素颗粒弹性模量的测试与分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11626 - 11628.
WANG Jinfeng, JU Jinyan, YIN Daqing. Test and analysis of elastic modulus of urea particle[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2014, 42(33): 11626 - 11628. (in Chinese)
- [29] WANG Jinfeng, ZOU Detang, WANG Jinwu, et al. Testing and analysis of the shear modulus of urea granules[J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2013, 7(1): 137 - 144.
- [30] 李凯. 变量施肥系统的设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
LI Kai. Design and research of variable rate fertilization system[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [31] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115 - 122.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 - 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002013&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 02. 013. (in Chinese)
- [32] 刘立意, 郝世杨, 张萌, 等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27 - 32, 158.
LIU Liyi, HAO Shiyang, ZHANG Meng, et al. Numerical simulation and experiment on paddy ventilation resistance based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27 - 32, 158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=201508005&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 08. 005. (in Chinese)
- [33] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.