doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.005

# 四槽轮配肥器肥料颗粒碰撞掺混离散元分析与优化设计

闫银发[1,2]　赵庆吉[1]　王瑞雪[3]　韩守强[1]　宋占华[1,2]　田富洋[1,4]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东省园艺机械与装备重点实验室,泰安 271018;
3.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;4.山东省农业装备智能化工程实验室,泰安 271018)

**摘要**:为解决精准施肥过程中变比配肥施肥机械搅拌掺混效率低、掺混均匀度一致性差等问题,设计了一种带有二次碰撞掺混锥形体的四槽轮变比配肥器,可根据 4 种肥料的需肥量控制 4 个槽轮以不同转速排肥,二次碰撞掺混腔实现变比配肥的非机械搅拌均匀掺混。测定了 4 种肥料颗粒的物料特性及在不同含水率条件下的破碎力和粘附力。采用离散元法,选用 Hertz－Mindlin 无滑动接触模型,分析 4 种肥料排料运动和碰撞掺混规律。通过正交试验和方差分析,发现槽轮转速在 20～80 r/min 范围内时,转速对掺混偏离度标准差影响不显著,四槽轮变比配肥器可以实现变比配肥均匀掺混;优化设计二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔内最优高度为 12.1 mm,在此高度下二次碰撞掺混锥形体锥角为 57.9°。利用力链分析肥料颗粒在槽轮排肥器工作时受力分布,解算 4 种肥料颗粒所受到的挤压力均小于其破碎力,变比配肥时不会造成肥料颗粒破碎。另外,利用高速摄影分析不同频率、振幅的振动对肥料颗粒碰撞掺混的影响,发现振动对碰撞掺混均匀度影响很小;进行变比配肥碰撞掺混试验,试验结果表明,各组配肥掺混均匀度基本一致,实现了多种肥料的变比配肥和非机械搅拌均匀掺混。

**关键词**:变比配肥施肥机;四槽轮施肥器;离散元;碰撞掺混;掺混均匀度

**中图分类号**:S224.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)03-0049-11　　**OSID**:

# Discrete Element Analysis and Optimization Design of Collision Blending for Four Flute-wheels Fertilizer

YAN Yinfa[1,2]　ZHAO Qingji[1]　WANG Ruixue[3]　HAN Shouqiang[1]　SONG Zhanhua[1,2]　TIAN Fuyang[1,4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment*, *Taian* 271018, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
4. *Shandong Provincal Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Taian* 271018, *China*)

**Abstract**: To solve the problems of low blending efficiency and poor consistency of blending uniformity in the precision fertilization process, four flute-wheels variable rate fertilization distributor with the secondary collision blending device was designed. It could change the speed of four flute-wheels to variable rate fertilization according to the fertilizer demand. And the secondary collision blending device could uniform blend of different rates of fertilizer without mechanical. The hygroscopic saturated moisture content, adhesive force and breaking force were measured under different moisture contents. Hertz－Mindlin no slip particle contact model of discrete element was used to analyze the regularity of four kinds of fertilizer particles in collision blending process. By means of orthogonal test and analysis of variance, the results showed that there was no significant effect on the standard deviation of blending when the speed of flute wheel was in the range of 20～80 r/min and the four flute-wheels fertilizer distributor could blend four kinds of fertilizer evenly. The optimal height of the cone in secondary collision blending device was 12.1 mm. Under this condition the cone angle of the cone was 57.9°. When working it was found that the pressure on the fertilizer particles was less than the break force compared with the force distribution of the fertilizer particles calculated by the force chain, fertilizer particles would not be broken in collision

收稿日期:2022－04－26　修回日期:2022－05－28

**基金项目**:山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ014)、山东省重点研发计划(公益类专项)项目(2017GNC12104)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS－18－ZJ0402)和山东省蚕桑产业技术体系建设项目(SDAIT1806)

**作者简介**:闫银发(1976—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:yanyinfa@sdau.edu.cn

**通信作者**:田富洋(1979—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:fytian@sdau.edu.cn

blending process. Besides, The high-speed photography were used to analyze the influence of vibration with different frequencies and amplitudes on the collision blending performance of four flute-wheels fertilizer distributor. It was found that vibration had little influence on working process. The collision blending test was carried out, the test results showed that the blending uniformity was basically the same, and the designed fertilizer distributor could achieve variable rate fertilizer blending and non-mechanical blending of four kinds of fertilizers.

**Key words**: variable rate blending fertilizer; four flute-wheels fertilizer; discrete element; collision blending; blending uniformity

## 0 引言

目前我国掺混复合肥的配方相对固定,氮、磷、钾等肥料的掺混比例不能根据作物需求规律和土壤供肥能力实现在线精准施肥,导致肥料养分不平衡。另外,配方颗粒肥容易产生离析和类聚现象,使肥料的掺混均匀度降低,不能保证播撒到作物根部的养分均衡。因此颗粒掺混肥料的分布不均匀严重影响了精准施肥的按需平衡施肥。多肥料变比配肥碰撞掺混技术[1]不但可以实现精准施肥中按需配肥,同时,可解决均匀掺混平衡施肥问题。

为解决精准施肥过程中变比配肥和均匀掺混的问题,国内外学者进行了大量的研究工作。MISERQU 等[2]对两种不同颗粒尺寸、密度和形状的掺混肥料进行离析研究,发现在撒播过程中肥料颗粒尺寸和密度对离析现象的影响较大,而颗粒的形状影响较小。VAN LIEDEKERKE 等[3]采用离散元方法分析了颗粒物理特性对颗粒流的影响,发现颗粒的球形度越高对颗粒流速的影响越小,颗粒流的速度越大,壁与颗粒间的摩擦力越大。JONATHAN[4]采用离散元方法分析了有机颗粒肥粒径分布和静摩擦力对颗粒抛撒路径的影响,得到影响肥料分布均匀的规律。为研究颗粒的混合特性,研究人员在单颗粒动力学分析的基础上,采用离散元模拟仿真了颗粒混合过程中宏观混合规律及局部混合特征,开展了颗粒性质、机械搅拌混合器形状、搅拌速度等因素对颗粒混合特性影响的研究[5-8]。伟利国等[9]研制了 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机,采用称重法对氮、磷、钾 3 种肥料进行变量配肥施肥,根据 GPS 信息和施肥处方图实现了精准施肥,但没有进行配肥掺混及掺混均匀性研究。苑进等[10]分析了排肥管高度和落肥管三角波纹形状对肥料颗粒运动的影响,并指出排肥管高度越大,肥料颗粒与掺混腔壁面碰撞后形成的散布面积越大,肥料混合均匀性越好。闫银发等[11]根据颗粒动力学,采用离散元方法研究了四槽轮排料器的排料特性,数值模拟了槽轮转动时颗粒群的速度分布和运动规律,定性描述槽轮转速对颗粒速度分布、带动层厚度的影响,初步进行了排料掺混试验。金丽丽等[12]采用离散元方法研究了变量施肥机连续混合装置中肥料颗粒的混合特性,仿真了混合装置内部结构、主轴转速对肥料颗粒混合特性的影响。

综上所述,国内外对配方肥料的掺混一般采用机械搅拌方式,利用颗粒流的自然流动碰撞进行即时均匀掺混研究较少。本文在已完成槽轮式颗粒肥料掺混装置[13]的基础上,设计带有二次碰撞掺混锥形体的四槽轮变比配肥器,通过控制槽轮的转速控制肥料掺混比例,设计二次碰撞掺混腔实现 4 种肥料均匀掺混。

## 1 四槽轮配肥器设计

### 1.1 四槽轮变比配肥碰撞掺混系统工作原理

四槽轮变比配肥碰撞掺混系统结构如图 1 所示,主要由肥料仓、步进电机、槽轮排肥器、一次碰撞掺混漏斗、二次碰撞掺混腔、二次碰撞掺混锥形体、机架、集料仓及变比配肥控制器等组成。4 个肥料仓分别装氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料,变比配肥控制器根据 4 种肥料不同需求量,发送不同频率的 PWM 脉冲驱动 4 个步进电机,步进电机带动 4 个槽轮排肥器中槽轮以不同转速旋转,进而实现变比配肥。肥料排出后,在重力作用下,4 种肥料在一次碰

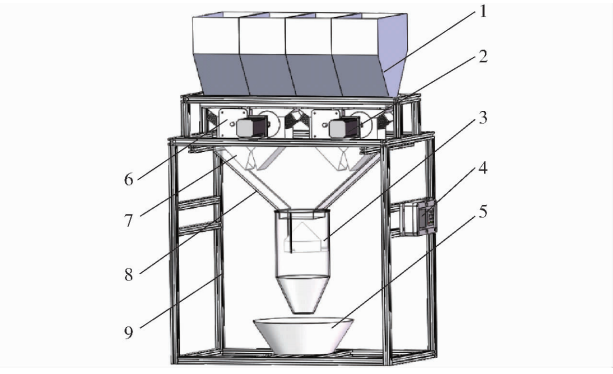



图 1 四槽轮变比配肥碰撞掺混系统示意图

Fig. 1 Schematic of system of four flute-wheels variable proportion fertilization and collision blending

1. 肥料仓 2. 步进电机 3. 二次碰撞掺混腔 4. 变比配肥控制器 5. 集料仓 6. 槽轮排肥器 7. 一次排肥口 8. 一次碰撞掺混漏斗 9. 机架

撞掺混漏斗壁两两碰撞掺混并沿壁面快速流动，当滑落到二次碰撞掺混腔后，在二次碰撞掺混锥形体的顶部进行第 2 次碰撞掺混，碰撞掺混的 4 种肥料颗粒沿锥形体表面散落并最终收集到集料仓内，完成碰撞均匀掺混。

### 1.2　槽轮排肥器设计

槽轮排肥器实现按需变比配肥，主要由肥料仓、槽轮、排肥轴、毛刷、排肥口组成，其结构如图 2a 所示。为了颗粒肥料流动时更充分碰撞，排肥口设计为倾角为 45°的长方形，排肥口两两相对安装。槽轮排肥时会因为相邻两个槽之间跨度过大出现排肥不连续现象，为减小这种现象对掺混造成影响，根据 JB/T 9783—2013 对外槽轮排种（肥）器的设计要求并查阅《农业机械设计手册》[14]，设计槽轮为锥形圆弧凹槽，槽数为 12 个，槽轮直径为 31.8 mm，工作长度为 64.2 mm，锥形圆弧凹槽半径为 5 mm，如图 2b 所示，槽轮单转排肥量为

$$q = \pi dL\sigma\left(\frac{\psi zA}{\pi d} + \lambda\right) \tag{1}$$

其中

$$A = \frac{d^2}{8}\alpha + \frac{r_3^2}{2}(\pi - \alpha) - (r_2 + r_3)^2 \sin\frac{\alpha}{2} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{z} \tag{3}$$

$$r_2 = \frac{d}{4} \tag{4}$$

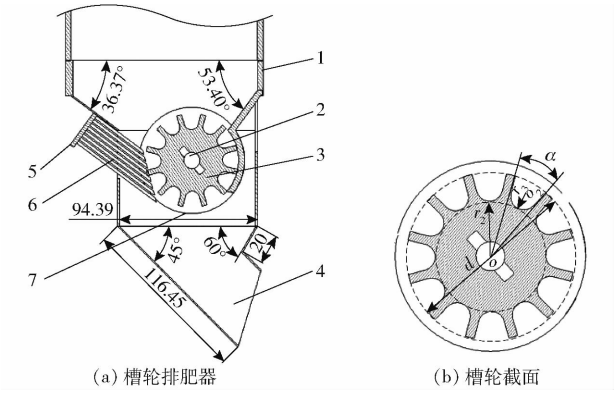
$$r_3 = \frac{d\sin\dfrac{\alpha}{2}}{4\left(1 - \sin\dfrac{\alpha}{2}\right)} \tag{5}$$

式中　$q$——槽轮每转排肥量，kg/r

$A$——槽轮锥形圆弧凹槽横截面积，$mm^2$

$L$——槽轮工作长度，mm

$\sigma$——肥料容重，$kg/mm^3$




(a) 槽轮排肥器　　(b) 槽轮截面

图 2　槽轮排肥器及槽轮截面示意图

Fig. 2　Schematics of flute-wheel discharger and flute-wheel section

1. 肥料仓　2. 排肥轴　3. 槽轮　4. 一次排肥口　5. 毛刷固定板　6. 毛刷　7. 槽轮固定盘

$d$——槽轮直径，mm　　$\psi$——填充系数

$z$——槽轮锥形圆弧凹槽数

$\lambda$——带动层特性系数

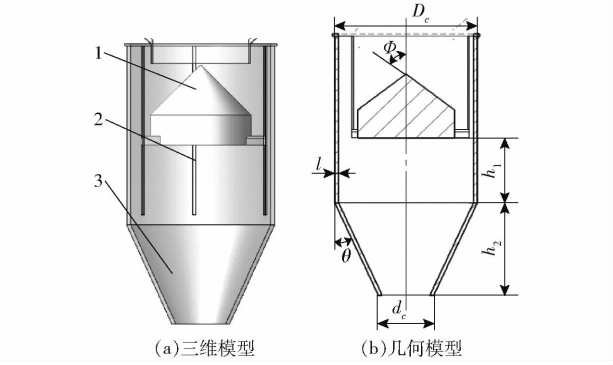
$\alpha$——相邻锥形圆弧凹槽之间截距角，rad

$r_2$——锥形圆弧凹槽根圆半径，mm

$r_3$——锥形圆弧凹槽半径，mm

### 1.3　二次碰撞掺混腔设计

二次碰撞掺混腔完成氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料颗粒碰撞均匀掺混，主要由二次碰撞掺混锥形体、圆柱形掺混腔和收料口 3 部分组成，如图 3a 所示。




(a)三维模型　　(b)几何模型

图 3　二次碰撞掺混腔结构示意图

Fig. 3　Schematics of the secondary collision blending device

1. 二次碰撞掺混锥形体　2. 圆柱形掺混腔　3. 收料口

二次碰撞掺混腔几何模型如图 3b 所示，图中 $D_c$ 为圆柱形掺混腔外径，$d_c$ 为收料口下端外径，$h_1$ 为二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度，$\Phi$ 为锥体角度，$l$ 为壁厚，$\theta$ 为保持肥料颗粒整体流的最大半顶角，$h_2$ 为收料口高度。根据四槽轮变比配肥器总体高度设计圆柱形掺混腔高度 $H$ 为 180 mm，为保证肥料颗粒能够全部落入二次碰撞掺混腔进行碰撞掺混，设计圆柱形掺混腔外径 $D_c$ 为 150 mm，壁厚 $l$ 为 5 mm。圆柱形掺混腔内壁有 3 个凹槽，凹槽宽为 3 mm，凹槽深为 3 mm，长度为 110 mm，每两组凹槽间的角度均为 120°，二次碰撞掺混锥形体底部有 3 个宽度为 3 mm 的连接翼片，凹槽与翼片配合将二次碰撞掺混锥形体装配到圆柱形掺混腔内。根据碰撞掺混后肥料颗粒整体流动方式设计收料口为漏斗形状。根据肥料颗粒与掺混腔内部摩擦角和颗粒间的内摩擦角可得

$$\theta = \frac{1}{2}(180 - \gamma_x) - \frac{1}{2}\left(\arccos\frac{1 - \sin\gamma_e}{2\sin\gamma_e} + \arcsin\frac{\sin\gamma_x}{\sin\gamma_e}\right) \tag{6}$$

式中　$\gamma_x$——肥料颗粒与掺混腔内壁摩擦角，rad

$\gamma_e$——肥料颗粒间内摩擦角，rad

计算得 $\theta$ 为 26.6°，根据 $\theta$ 设计收料口，其高度 $h_2$ 为 100 mm，下端外径 $d_c$ 为 50 mm。

## 2 试验材料

试验用的 4 种肥料分别是江苏晋煤恒盛化工股份有限公司生产的尿素(氮肥)、江苏美乐肥料有限公司生产的过磷酸钙(磷肥)、浙江农资集团有限公司经销(原产国:加拿大)的氯化钾(钾肥)和江苏中农肥业有限公司生产的有机肥。对 4 种肥料颗粒的物料特性参数进行测量和标定,4 种肥料颗粒的物料特性参数如表 1 所示。

**表 1 肥料颗粒物料特性参数**

**Tab. 1 Characteristic parameters of fertilizer particles**

| 参数 | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 有机肥 |
|---|---|---|---|---|
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 184 | 2 083 | 2 291 | 1 447 |
| 等效直径/mm | 2.143 | 3.084 | 4.195 | 3.874 |
| 球形率 | 0.970 | 0.906 | 0.735 | 0.978 |
| 泊松比 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| 剪切模量/Pa | $1.0\times10^7$ | $1.0\times10^7$ | $1.0\times10^7$ | $1.0\times10^7$ |
| 颗粒间恢复系数 | 0.100 | 0.144 | 0.188 | 0.212 |
| 颗粒间静摩擦因数 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 颗粒间动摩擦因数 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |
| 颗粒与壁恢复系数 | 0.468 | 0.336 | 0.216 | 0.477 |
| 颗粒与壁静摩擦因数 | 0.447 | 0.474 | 0.400 | 0.394 |
| 颗粒与壁动摩擦因数 | 0.339 | 0.278 | 0.219 | 0.257 |

在 LHS-80HC-II 型恒温恒湿箱(上海一恒科学仪器有限公司)内进行肥料颗粒常温(25℃)吸湿性试验,随机选取不同吸湿状态的氮、钾、磷和有机肥 4 种肥料颗粒各 10 粒,利用 WDW-5E 型万能试验机(济南试金集团有限公司)测定每粒肥料颗粒的破碎力并求平均值。由于氮肥具有易挥发的特殊性质,利用真空干燥法测定吸湿氮肥含水率,利用 ZTXY-101 型水分测定仪(常州市幸运电子设备有限公司)测定吸湿磷、钾和有机肥含水率,测得氮、磷、钾和有机肥吸湿饱和含水率分别为 0.69%、2.07%、3.10% 和 15.6%,不同含水率下肥料颗粒平均破碎力如表 2 所示,氮肥、钾肥和有机肥颗粒含水率越高,平均破碎力越小,磷肥颗粒平均破碎力随含水率增加呈现先增加后减小的趋势。

水分是造成细粒物料粘附的主要因素,水分覆在颗粒表面形成水膜,水膜的表面张力和毛细管力使肥料颗粒具有粘附力。利用 ZJ-1 型等应变直剪仪(南京土壤仪器厂)测定阴凉储存的肥料颗粒剪切破坏时所需要的剪应力,绘制抗剪强度曲线,当横纵坐标的比例相同时,此强度曲线与纵坐标的截距即为颗粒肥料的粘附力,得到 4 种肥料颗粒的粘附力如表 3 所示,从表中可以看出 4 种肥料颗粒的粘附力都较小,所以可忽略肥料颗粒粘附力的影响。

**表 2 不同含水率肥料颗粒平均破碎力**

**Tab. 2 Average breaking force of fertilizer particles with different moisture contents**

| 肥料 | 含水率/% | 平均破碎力/N |
|---|---|---|
| 氮肥 | 0.08±0.02 | 8.41±3.38 |
| | 0.43±0.07 | 5.10±1.73 |
| | 0.69±0.09 | 4.84±0.75 |
| 磷肥 | 0.59±0.08 | 80.25±30.01 |
| | 1.84±0.19 | 115.20±19.81 |
| | 2.07±0.15 | 109.82±13.99 |
| 钾肥 | 0.33±0.03 | 40.06±16.64 |
| | 2.81±0.16 | 24.51±6.88 |
| | 3.10±0.18 | 18.05±5.23 |
| 有机肥 | 0.98±0.10 | 63.84±18.92 |
| | 7.93±0.08 | 37.13±9.46 |
| | 15.60±0.14 | 18.79±5.48 |

**表 3 肥料颗粒粘附力**

**Tab. 3 Adhesion force between fertilizer particles and particles**

| 参数 | 载荷/kPa | 肥料 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 有机肥 |
| 剪应力/kPa | 50 | 38.6 | 24.7 | 21.6 | 27.8 |
| | 100 | 50.9 | 32.4 | 43.2 | 52.5 |
| | 150 | 89.5 | 58.7 | 72.6 | 74.1 |
| | 200 | 121.9 | 80.3 | 86.4 | 104.9 |
| 粘附力/MPa | | $3.1\times10^{-3}$ | $8\times10^{-4}$ | $7\times10^{-15}$ | $1.5\times10^{-3}$ |

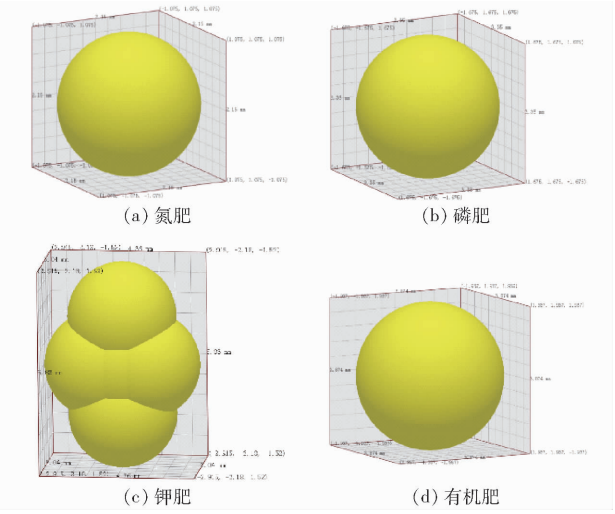
## 3 肥料颗粒碰撞掺混离散元分析

### 3.1 肥料颗粒离散元模型建立

从表 1 可以看出,氮肥、磷肥和有机肥的球形率很高,在离散元仿真中可以直接采用球形模型,如图 4a、4b、4d 所示。钾肥形状不规则,球形率较低,对于不规则颗粒或非球形颗粒通过多球面填充组合的方式建立仿真模型[15],试验测得钾肥长、宽、高平均值分别为 5.768、4.314、3.036 mm,建立的钾肥颗粒模型如图 4c 所示。

### 3.2 肥料颗粒碰撞掺混离散元仿真

为研究肥料颗粒在流动过程中的碰撞掺混规律,用离散元法仿真分析 4 种肥料颗粒的碰撞掺混过程。肥料颗粒之间是常规颗粒的接触力作用,离散元仿真选用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型[16-19]。当槽轮排肥器转速在 20~80 r/min 范围内时,槽轮排料精度较高[11],因此仿真设置槽轮转速范围 20~80 r/min,时间步长为 0.01 s,仿真时间为 6 s。为更清晰地显示掺混过程,氮、磷、钾和有机肥颗粒分别用白、绿、红和黑 4 种颜色渲染。槽轮转动时,4 种肥料颗粒从肥料仓内排出,在一次排肥口处完成氮肥与钾肥、磷肥与有机肥颗粒的一次碰撞

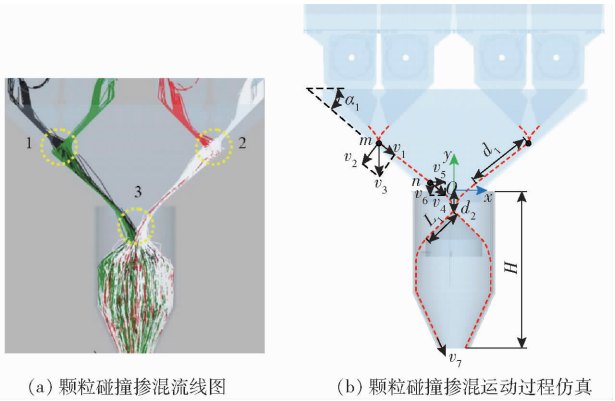


(a) 氮肥　(b) 磷肥　(c) 钾肥　(d) 有机肥

图 4　肥料颗粒离散元仿真模型

Fig. 4　Discrete element simulation model of fertilizer particles

掺混,如图 5a 中 1 号和 2 号黄色圆圈标注,两两相对的排肥口颗粒流一次碰撞时,两个颗粒流水平方向的速度分量方向相反,因此,颗粒流碰撞时,颗粒间相互碰撞、挤压和剪切,水平方向速度分量相互抵消,碰撞后颗粒流向下流动接触到掺混漏斗导流板时,颗粒间、颗粒与掺混漏斗壁间发生碰撞、挤压和剪切[20],颗粒流呈现出复杂的运动状态,但最终沿着掺混漏斗壁流动。两两掺混的肥料颗粒流流出掺混漏斗导流板后,在二次碰撞掺混锥形体顶部进行二次碰撞掺混,如图 5a 中 3 号黄色圆圈标注,肥料颗粒在二次碰撞掺混锥形体顶部碰撞掺混后沿二次碰撞掺混锥形体锥面分散滑落,利用颗粒流碰撞完成 4 种肥料颗粒的非机械搅拌均匀掺混,然后收料口将分散的肥料颗粒进行收束,落入集料仓。离散元仿真排肥碰撞掺混发现,肥料颗粒流流动过程中,颗粒速度逐渐增加,并逐渐趋于平缓,与下落颗粒流流场特性的研究结果相符[21-22],说明肥料颗粒碰撞掺混过程中颗粒流动受槽轮排肥转速的影响较小。




(a) 颗粒碰撞掺混流线图　(b) 颗粒碰撞掺混运动过程仿真

图 5　颗粒碰撞掺混离散元仿真

Fig. 5　DEM simulation of collision blending of fertilizer particles

颗粒碰撞掺混运动过程如图 5b 所示,红色虚线表示肥料颗粒的运动轨迹。肥料颗粒在点 $m$ 完成一次碰撞掺混后的速度为 $v_3$,速度 $v_3$ 在一次碰撞掺混漏斗壁面上的投影 $v_1$ 为肥料颗粒在一次碰撞掺混漏斗上的流动速度,肥料颗粒流出一次碰撞掺混漏斗时的速度 $v_4$ 为

$$\begin{cases} v_4 = \sqrt{2ad_1 + v_1^2} \\ v_1 = v_3 \sin\alpha_1 \\ a = g\sin\alpha_1 - \mu_1 \cos\alpha_1 \end{cases} \tag{7}$$

式中　$a$——肥料颗粒在导流板上的加速度,m/s$^2$

$\alpha_1$——一次碰撞掺混漏斗倾角,rad

$\mu_1$——肥料颗粒与一次碰撞掺混漏斗的摩擦因数,取 0.26

$d_1$——肥料颗粒沿一次碰撞掺混漏斗移动距离,m

$g$——重力加速度,m/s$^2$

一次碰撞掺混后的肥料颗粒流从点 $n$ 流出后做类平抛运动,下落高度 $d_2$ 后在二次碰撞掺混锥形体顶部进行二次碰撞掺混,$d_2$ 为

$$d_2 = \left(v_6 + \frac{g}{2}\frac{v_5 m}{6\pi\eta R_1}\right)\frac{v_5 m}{6\pi\eta R_1} \tag{8}$$

其中　$v_5 = v_4\cos\alpha_1$　　$v_6 = v_4\sin\alpha_1$

式中　$v_5$——类平抛运动沿 $x$ 轴速度分量,m/s

$v_6$——类平抛运动沿 $y$ 轴速度分量,m/s

$\eta$——空气阻力系数,取 0.5

$R_1$——肥料颗粒直径,m

$m$——肥料颗粒质量,kg

在锥形体顶部完成碰撞掺混后,继续沿锥面流动,最终流出碰撞掺混腔时的速度 $v_7$ 为

$$v_7 = \sqrt{2g\left(H - \mu_1 L_1 \sin\Phi - \frac{\mu_1 h_2}{\cos\theta}\sin\theta\right) + v_4^2} \tag{9}$$

式中　$L_1$——二次碰撞掺混锥形体母线长,m

### 3.3　掺混效果衡量指标

物料混合度的定量评价指标可以通过 Lacy 指数[23]、混合熵[24]和颗粒接触数[25]等参数进行分析,实际试验中很难准确获得这些参数[26]。借助离散元仿真进行掺混效果分析,将集料仓内的肥料颗粒划分成 9×9×6 个网格,每个网格大小为 20 mm×20 mm×14 mm,如图 6 所示。统计每个网格内氮、磷、钾和有机肥的颗粒数,分别记为 $N_i$、$P_i$、$K_i$ 和 $O_i$,其中 $i$ 表示第 $i$ 个网格,第 $i$ 个网格内每种肥料颗粒的占比表示为

$$x_{F_i} = \frac{F_i}{N_i + P_i + K_i + O_i} \tag{10}$$

式中下角标 $F_i$ 表示 $N_i$、$P_i$、$K_i$ 或 $O_i$。

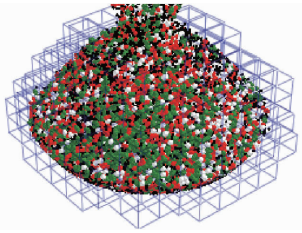


图 6 肥料颗粒掺混网格划分

Fig. 6 Blending fertilizer meshing

每种肥料颗粒的占比表示为

$$X_F = \frac{F}{\sum_{i=1}^{n}(N_i + P_i + K_i + O_i)} \tag{11}$$

式中 $F$ 表示 $\sum_{i=1}^{n}N_i$、$\sum_{i=1}^{n}P_i$、$\sum_{i=1}^{n}K_i$ 或 $\sum_{i=1}^{n}O_i$。

每种肥料颗粒在某个网格中掺混偏离度可表示为

$$B_{F_i} = \frac{x_{F_i}}{X_F} \tag{12}$$

计算氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料颗粒所有单元网格的掺混偏离度平均值和标准差，得到氮、磷、钾和有机肥的掺混偏离度平均值和标准差分别为 $\overline{B}_{F_i}$ 和 $\sigma_N$、$\sigma_K$、$\sigma_P$、$\sigma_O$。掺混偏离度平均值表示每种肥料总体掺混的均匀程度，其值越接近 1 表示掺混越均匀，掺混偏离度标准差表示各单元格下肥料颗粒掺混均匀度与总体掺混均匀度偏离程度，其值越小表明肥料颗粒掺混波动越小，掺混效果越好。

### 3.4 变比配肥碰撞掺混系统参数仿真优化

离散元仿真分析发现，槽轮排肥精度、二次碰撞掺混锥形体锥角和锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度是影响肥料掺混均匀的重要因素。谭援强等[27]通过对简仓内改流体进行研究，提出了锥形改流体的设计标准，根据其研究方法及理论，选取二次碰撞掺混锥形体锥角（锥体角）为 45°～60°。通过对颗粒碰撞掺混运动过程分析，并对式(8)求解后发现 $d_2$ 为 10～70 mm 时，能够保证肥料的二次碰撞掺混点位于二次碰撞掺混锥形体顶部，因此选取二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度（位置高度）为 10～70 mm，以掺混偏离度标准差为衡量掺混效果指标，进行六因素三水平正交试验，试验因素编码如表 4 所示。优化设计二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度、槽轮转速和二次碰撞掺混锥形体锥角，试验方案及结果如表 5 所示，$X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$、$X_5$、$X_6$ 为位置高度、氮肥槽轮转速、磷肥槽轮转速、钾肥槽轮转速、有机肥槽轮转速、锥角的编码值，因为 4 种肥料颗粒掺混偏离度标准差相差较小，本文选用氮肥掺混偏离度标准差进行正交试验优化和方差分析。

表 4 正交试验因素编码

Tab. 4 Experimental factors and encodes of orthogonal test

| 编码 | 因素 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 位置高度/mm | 氮肥槽轮转速/(r·min$^{-1}$) | 磷肥槽轮转速/(r·min$^{-1}$) | 钾肥槽轮转速/(r·min$^{-1}$) | 有机肥槽轮转速/(r·min$^{-1}$) | 锥角/(°) |
| 1 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 | 60.0 |
| 0 | 40 | 50 | 50 | 50 | 50 | 52.5 |
| -1 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 | 45.0 |

表 5 正交试验方案与结果

Tab. 5 Orthogonal test plan and results

| 试验序号 | 因素 | | | | | | 掺混偏离度标准差 $Y$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | |
| 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.204 260 |
| 2 | 1 | 0 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0.158 331 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0.375 556 |
| 4 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0.419 147 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 1 | 0.308 346 |
| 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0.206 442 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0.155 870 |
| 8 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 0.254 314 |
| 9 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.194 334 |
| 10 | 1 | 1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0.132 041 |
| 11 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0.272 311 |
| 12 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0.290 646 |
| 13 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.382 026 |
| 14 | 1 | 0 | -1 | 1 | 1 | 0 | 0.103 488 |
| 15 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | -1 | 0.386 013 |
| 16 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0.163 867 |
| 17 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.159 399 |
| 18 | 0 | 0 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0.254 852 |
| 19 | 0 | 0 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0.178 844 |
| 20 | 1 | -1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.417 609 |
| 21 | 0 | -1 | 0 | 1 | -1 | 0 | 0.164 355 |
| 22 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0.311 479 |
| 23 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 | 0.211 020 |
| 24 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.137 369 |
| 25 | 1 | -1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0.411 587 |
| 26 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 0.252 972 |
| 27 | 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0.164 889 |

利用 Design-Expert 软件对表 5 试验数据进行多元回归拟合，建立掺混偏离度标准差与影响因素之间的二次多项回归模型，并进行方差分析，结果如表 6 所示，从表中可知二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度 $P$ 为 0.047 1，小于 0.05，说明位置高度对掺混偏离度标准差的影响显著，槽轮转速和锥角对掺混偏离度标准差的影响不显著，说明槽轮在 20～80 r/min 范围内可以进行变比配肥掺混。

采用 Design-Expert 8.0.6 Trial 进行多元回归拟

表 6　方差分析

Tab. 6　Analysis of variance

| 来源 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|
| 模型 | 3.57 | 0.045 9 |
| $X_1$ | 5.78 | 0.047 1 |
| $X_2$ | 0.40 | 0.546 1 |
| $X_3$ | 0.27 | 0.618 8 |
| $X_4$ | 1.38 | 0.279 1 |
| $X_5$ | 3.78 | 0.092 9 |
| $X_6$ | 0.94 | 0.364 8 |
| $X_1X_2$ | 1.40 | 0.275 1 |
| $X_1X_3$ | 12.51 | 0.009 5 |
| $X_1X_4$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_1X_5$ | 3.84 | 0.090 7 |
| $X_1X_6$ | 2.73 | 0.142 4 |
| $X_2X_3$ | 2.08 | 0.192 2 |
| $X_2X_4$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_2X_5$ | 7.86 | 0.026 4 |
| $X_2X_6$ | 0.72 | 0.425 6 |
| $X_3X_4$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_3X_5$ | 0.056 | 0.819 5 |
| $X_3X_6$ | 1.14 | 0.321 0 |
| $X_4X_5$ | 0.33 | 0.582 4 |
| $X_4X_6$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_5X_6$ | 1.49 | 0.261 8 |
| $X_1^2$ | 4.80 | 0.064 5 |
| $X_2^2$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_3^2$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_4^2$ | 0 | <0.000 1 |
| $X_5^2$ | 0.013 | 3.77 |
| $X_6^2$ | 0 | <0.000 1 |
| $R^2$ | 0.906 5 | |
| 变异系数 | 0.235 2 | |

合，得到掺混偏离度标准差二次多项回归模型

$$Y = 0.35 + 0.089X_1 + 0.017X_2 - 0.014X_3 + 0.043X_4 + 0.06X_5 - 0.027X_6 - 0.056X_1X_2 + 0.17X_1X_3 - 0.093X_1X_5 + 0.091X_1X_6 + 0.059X_2X_3 - 0.061X_2X_5 + 0.023X_2X_6 - 5.132\times10^{-3}X_3X_5 + 0.029X_3X_6 - 0.017X_4X_5 + 0.067X_5X_6 - 0.091X_1^2 - 0.07X_5^2 \quad (13)$$

式(13)中各项系数绝对值直接反映各因素对掺混偏离度标准差的影响程度，系数的正、负反映影响的方向。从表 6 可以看出，二次多项回归模型的 $F$ 为 3.57，$P$ 为 0.045 9，小于 0.05，说明二次多项回归模型显著，$R^2$ =0.906 5，说明预测值与实际值之间具有良好的相关性，可以用该模型对影响掺混偏离度标准差的因素进行分析和预测。以掺混偏离度标准差最小为目标，进行正交试验优化，得到最优二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度为 12.1 mm，在此条件下二次碰撞掺混锥形体锥角为 57.9°。

### 3.5　掺混效果数值分析

对最优参数条件下的四槽轮变比配肥碰撞掺混系统进行离散元仿真，分析掺混效果。以配比 1∶2∶2∶2、1∶3∶1∶2、2∶4∶1∶1为横坐标，掺混偏离度平均值为纵坐标，掺混偏离度标准差为误差棒，氮、磷、钾和有机肥掺混偏离度平均值如图 7 所示，图中配比偏离度平均值等于 1 时为红色水平线。由图 7 可以看出，在 3 种配比下，氮、磷和有机肥颗粒的掺混偏离度平均值都接近 1，说明 3 种肥料配肥掺混均匀。钾肥的掺混偏离度平均值较高，是因为钾肥的球形率低，在二次碰撞掺混锥形体锥面分散时受到较大的摩擦力，分散不充分。综合来看 4 种肥料在不同配比下掺混偏离度平均值和掺混偏离度标准差相差较小，说明设计的四槽轮变比配肥器可以进行变比配肥均匀掺混。

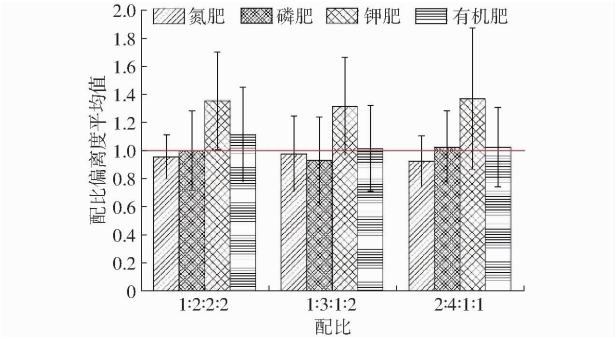



图 7　肥料掺混偏离度平均值

Fig. 7　Histogram of average of blending uniformity

### 3.6　肥料颗粒破碎性分析

肥料仓内的肥料颗粒之间、肥料颗粒与肥料仓壁之间、肥料颗粒与槽轮之间存在接触压力和摩擦力，槽轮排肥器排肥时，4 种肥料颗粒的力链分布图如图 8 所示。氮、磷、钾和有机肥颗粒等效直径不同导致力链疏密度不同，从图 8 可以看出，槽轮转动时，肥料颗粒受到挤压力和摩擦力，并沿力链向周围颗粒辐射衰减，槽轮与毛刷接触区的肥料颗粒受力最大。通过离散元动力学分析，槽轮转速为 20、50、80 r/min 时，解算 4 种肥料颗粒的最大受力如表 7 所示，随着槽轮转速增加氮、磷、钾和有机肥 4 种肥料颗粒最大受力增大。对比表 2 和表 7，4 种肥料颗粒在变比配肥碰撞掺混过程中最大受力均小于肥料颗粒的平均破碎力，因此肥料颗粒在变比配肥碰撞掺混过程中不会破碎。

## 4　振动台架试验

农用机具田间作业时产生的振动会影响关键作业部件的性能，为研究振动对四槽轮变比配肥器可靠性的影响，通过 NOTUS 振动试验台(Symétrie 公

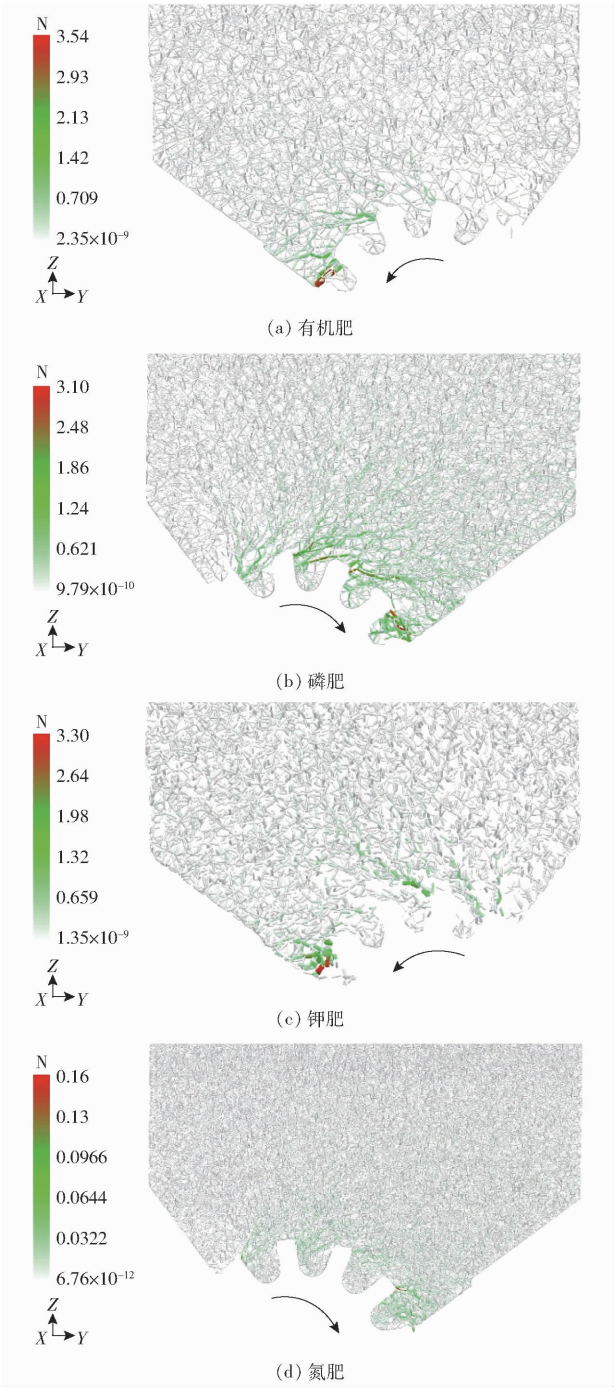



图 8 排肥时肥料颗粒力链分布图

Fig. 8 Force chain diagrams of fertilizer particles during discharging

**表 7 肥料颗粒最大受力**

**Tab. 7 Maximum force on fertilizer particles** N

| 转速/(r·min⁻¹) | 肥料 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 有机肥 |
| 20 | 0.08 | 1.67 | 1.02 | 2.82 |
| 50 | 0.16 | 3.30 | 3.10 | 3.54 |
| 80 | 0.54 | 5.31 | 8.46 | 6.72 |

司)模拟田间工作时的作业振动,使用 Phantom VEO-E 410L型高速摄影仪分别记录无振动和振动作用影响下二次碰撞掺混腔内的肥料颗粒流动情况。四槽轮变比配肥器固定在振动试验台上,台架振动试验系统如图 9 所示。

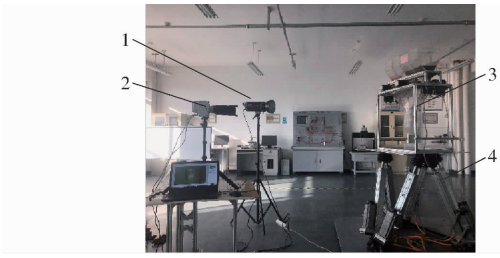



图 9 振动碰撞掺混试验平台

Fig. 9 Vibratory test platform of collision blending

1. 光源 2. 高速摄影仪 3. 四槽轮变比配肥器 4. NOTUS 振动试验台

高志朋等[28]研究履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动情况,测试并分析了整机 12 个测点处的振动。本文设计的四槽轮配肥掺混机构主要应用于果园桑园变量配肥施肥机,一般选用体积紧凑、接地比压小、牵引力大和行走平稳的橡胶履带式底盘[29]。根据四槽轮变比配肥器在履带动力机组的安装位置和田间工作环境,设置振动试验台振幅峰值及振动频率如表 8,振动试验台振动频率谱如图 10 所示。为防止 NOTUS 振动试验台因启停造成损坏,振动频率图谱开始后和结束前设置 5 s 渐入时间,振动时间为 60 s。

**表 8 测点振动加速度及振动频率**

**Tab. 8 Vibration acceleration and vibration frequency of measuring points**

| 序号 | x 轴方向 | | y 轴方向 | | z 轴方向 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 振动加速度/(m·s⁻²) | 振动频率/Hz | 振动加速度/(m·s⁻²) | 振动频率/Hz | 振动加速度/(m·s⁻²) | 振动频率/Hz |
| 1 | 1.51 | 0.73 | 1.98 | 0.73 | 1.79 | 0.24 |
| 2 | 1.11 | 22.95 | 1.91 | 0.24 | 1.79 | 0.73 |
| 3 | 1.03 | 55.42 | 1.30 | 22.95 | 1.39 | 22.95 |
| 4 | 0.99 | 22.46 | 1.27 | 2.20 | 1.21 | 1.95 |

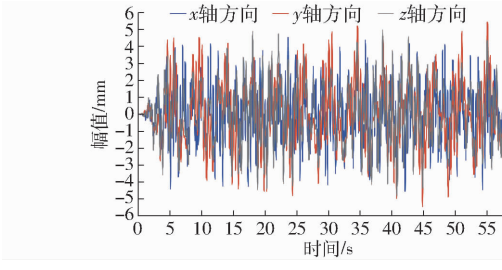



图 10 振动频率图谱

Fig. 10 Diagram of vibration frequency

高速摄影仪设置分辨率 1 280 像素 ×800 像素,采样频率为 5 200 f/s,曝光时间为 190 μs,记录时间为 6 s。设置四槽轮变比配肥碰撞掺混系统中槽轮转速为 20 ~ 80 r/min,掺混时间为 6 s,高速摄影仪记

录掺混过程中肥料颗粒流动情况如图 11 所示。图中可以看出无振动时，4 种肥料颗粒在二次碰撞掺混锥形体锥面均匀掺混、分散，振动时 4 种肥料颗粒掺混情况与无振动时掺混情况一致，没有显著差异。振动台架试验结果表明，田间作业时的振动对肥料颗粒二次碰撞掺混及流动没有显著影响。

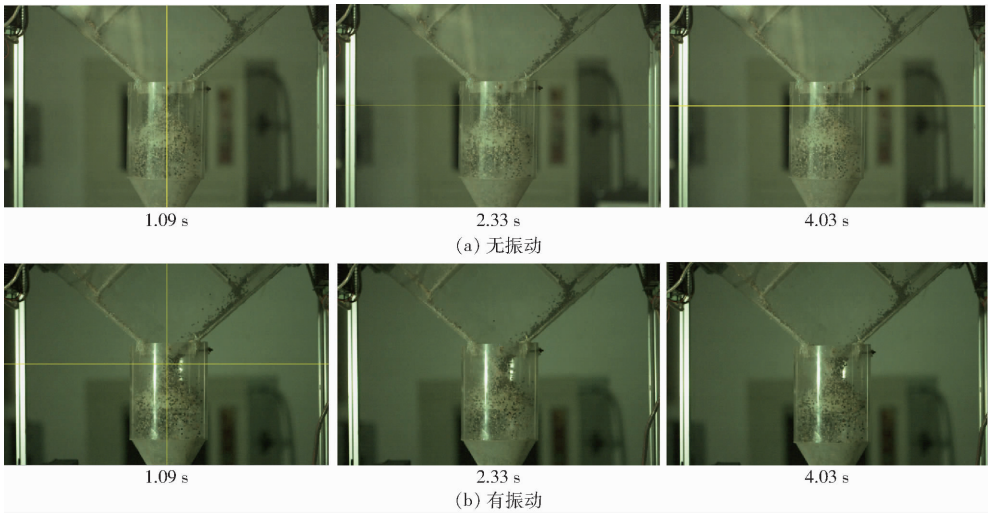



图 11　碰撞掺混高速摄影图像

Fig. 11　High speed photography of collision blending

无振动和有振动时，4 种颗粒肥料的变比配肥碰撞掺混效果如图 12 所示，可以看出 4 种颗粒肥料掺混均匀，且肥料颗粒没有破碎。

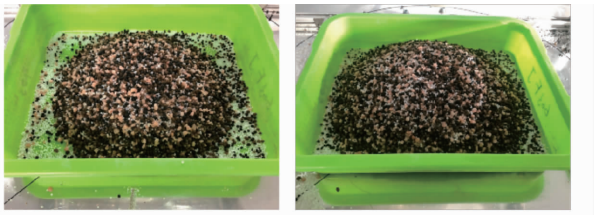



图 12　碰撞掺混效果

Fig. 12　Collision blending effects

## 5　变比配肥碰撞掺混试验

根据桑园不同时期需肥特性，设置 4 个槽轮以不同的转速进行 5 种施肥配方变比配肥碰撞掺混试验，借助 JPS－12 型计算机视觉排种器试验台对变比配肥掺混均匀度进行试验验证，如图 13 所示。

设置传送带速度为 0.3 m/s，四槽轮变比配肥器工作时长为 10 s，变比配肥结束后选取一段长度为 1 m 的区域，划分成 20 个 10 cm×5 cm 网格，如图 14 所示。从中随机选取 10 个网格，计算掺混偏离度标准差，结果如表 9 所示，从表 9 中可以看出钾肥的掺混偏离度标准差较氮、磷、有机肥大，是因为钾肥球形率低，沿二次碰撞掺混锥形体锥面分散时受到较大摩擦力导致分散不充分。四槽轮变比配肥器在进行变比配肥碰撞掺混时，4 种肥料颗粒掺混均匀，且在不同配比时均匀度基本一致，说明槽轮转速对掺混偏离度标准差的影响不显著，与正交试验方差分析结果一致。另外，结果也表明四槽轮变比配肥器作业过程中存在的脉动现象对肥料颗粒掺混均匀度无显著影响，设计的四槽轮变比配肥碰撞掺混系统



图 13　变比配肥碰撞掺混台架试验

Fig. 13　Bench test of variable proportion fertilization and collision blending



图 14　试验抽样区域及网格划分

Fig. 14　Test sampling area and meshing

能够实现变比配肥均匀掺混。

表 9 不同配比掺混偏离度标准差

Tab. 9 Standard deviation of different formulations

| 肥料比例 | 掺混偏离度标准差 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 氮肥 | 磷肥 | 钾肥 | 有机肥 |
| 1∶2∶2∶2 | 0.24 | 0.23 | 0.27 | 0.18 |
| 1∶3∶1∶2 | 0.20 | 0.20 | 0.24 | 0.22 |
| 2∶4∶1∶1 | 0.19 | 0.26 | 0.30 | 0.27 |
| 3∶2∶3∶1 | 0.24 | 0.24 | 0.25 | 0.23 |
| 1∶2∶4∶1 | 0.19 | 0.27 | 0.34 | 0.24 |

## 6 结论

(1)设计了四槽轮变比配肥碰撞掺混系统,解决了配肥施肥机械实时机械搅拌掺混效率低、掺混均匀度一致性差等问题。

(2)试验测定不同含水率肥料颗粒的平均破碎力,离散元动力学分析数据后处理解算 4 种肥料颗粒的最大受力,对比平均破碎力和颗粒最大受力,肥料颗粒在配肥掺混过程中不会破碎。

(3)通过离散元仿真试验、正交试验和方差分析,发现二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度对掺混偏离度标准差的影响显著,槽轮转速和二次碰撞掺混锥形体锥角对掺混偏离度标准差的影响不显著。优化设计二次碰撞掺混锥形体在圆柱形掺混腔的位置高度为 12.1 mm,二次碰撞掺混锥形体锥角为 57.9°,此条件下四槽轮变比配肥器掺混效果最好。

(4)通过振动台架试验和高速摄影进行试验验证,发现振动对肥料二次碰撞掺混过程没有显著影响。通过变比配肥碰撞掺混试验,验证了变比配肥时掺混均匀度基本一致,设计的四槽轮变比配肥碰撞掺混系统能够实现 4 种肥料的变比配肥和非机械搅拌均匀掺混。

## 参 考 文 献


[1] 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 配比变量施肥中多肥料掺混模拟与掺混腔结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 125 - 132.
YUAN Jin, LIU Qinhua, LIU Xuemei, et al. Simulation of multi-fertilizers blending process and optimization of blending cavity structure in nutrient proportion of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 125 - 132. (in Chinese)

[2] MISERQU E O, PIRARD E, SCHENKEL Y, et al. Spreading segregation of blended fertilizers: influence of particles properties [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(2): 137 - 144.

[3] VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, RAMON H. Discrete element simulations of the influence of fertilizer physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(4): 392 - 405.

[4] JONATHAN H. Using discrete element modeling to evaluate material distribution using spinner-disc spreaders[D]. Auburn: Auburn University, 2012.

[5] 闫明,段文山,陈琼,等. 不同形状混合器中二元颗粒的分聚与混合研究[J]. 力学学报, 2016, 48(1): 64 - 75.
YAN Ming, DUAN Wenshan, CHEN Qiong, et al. The segregation and mixing of binary granular systems in rotating mixer with different cross-sections[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied, 2016, 48(1): 64 - 75. (in Chinese)

[6] 刘扬,韩燕龙,贾富国,等. 椭球颗粒搅拌运动及混合特性的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2015, 64(11): 114501.
LIU Yang, HAN Yanlong, JIA Fuguo, et al. Numerical simulation on stirring motion and mixing characteristics of ellipsoid particles[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(11): 114501. (in Chinese)

[7] 刘宏新,相斌斌,安晶玉,等. 机械式固态肥在线均质混合系统设计与混合机理分析[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(11): 88 - 96.
LIU Hongxin, XIANG Binbin, AN Jingyu, et al. Design and mixing mechanism analysis of on-line homogeneous mixing system for mechanical solid fertilizer[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(11):88 - 96. (in Chinese)

[8] YASSINE D, HOCINE B M, MOHAMMED L, et al. Surface particle motions in rotating cylinders: validation and similarity for an industrial scale kiln[J]. Powder Technology, 2012, 224: 260 - 272.

[9] 伟利国,张小超,苑严伟,等. 2F - 6 - BP1 型变量配肥施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14 - 18.
WEI Liguo, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of 2F - 6 - BP1 variable rate assorted fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 14 - 18. (in Chinese)

[10] 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 81 - 87.
YUAN Jin, LIU Qinhua, LIU Xuemei, et al. Granular multi-flows fertilization process simulation and tube structure optimization in nutrient proportion of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 81 - 87. (in Chinese)

[11] 闫银发,孟德兴,宋占华,等. 槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 249 - 253.
YAN Yinfa, MENG Dexing, SONG Zhanhua, et al. Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 249 - 253. (in Chinese)

[12] 金丽丽,姬长英,方会敏,等. 变量施肥机连续混合装置中肥料颗粒运动的数值分析[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(2): 261 - 265.

JIN Lili, JI Changying, FANG Huimin, et al. Numerical simulation of mixing process of fertilizer particles in continuous mixer of variable[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensi, 2015, 27(2): 261 – 265. (in Chinese)

[13] 闫银发,孟德兴,李法德,等. 一种槽轮式颗粒肥料变量排肥掺混装置: 201620680453.8[P]. 2016 – 11 – 30.

[14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2007.

[15] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62 – 69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)

[16] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J].农业机械学报, 2014,45(2): 109 – 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109 – 114. (in Chinese)

[17] ISTVAN K, LASZLO K, ISTVAN O, et al. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer[J]. Advanced Poweder Technology, 2012, 23(6): 824 – 834.

[18] FABIAN W, JOCHEN M. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particuology, 2014, 12: 33 – 39.

[19] 吴迪平,李星祥,秦勤,等. 离散颗粒层被横向推移过程中的力学行为研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 098201.
WU Diping, LI Xingxiang, QIN Qin, et al. Study on mechanical behavior of the transverse processing on a granular matter layer[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 098201. (in Chinese)

[20] 薛旭东. 小麦脱皮机转子的轻量化及流场分析[D]. 西安:陕西理工大学, 2021.
XUE Xudong. Lightweight design and flow field analysis of wheat peeling machine rotor[D]. Xi'an: Shaanxi University of Technology, 2021. (in Chinese)

[21] 王怡,樊航,任晓芬. 自由下落非均一粒径颗粒流的流场特性[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3):418 – 422.
WANG Yi, FAN Hang, REN Xiaofen. Flow characteristics of free-fall particles with non-uniform particle diameter[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015,47(3):418 – 422. (in Chinese)

[22] 初宗坤. 斜面出流下落颗粒流颗粒运动特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
CHU Zongkun. Study on movement characteristics of the falling particle stream of sloping outflow[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2016. (in Chinese)

[23] LIU P Y, YANG R Y, YU A B. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 86: 99 – 107.

[24] FINNIE G J, KRUYT N P, YE M. Longitudinal and transverse mixing in rotary kilns: an element method approach[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(15): 4083 – 4091.

[25] VAN PUYVELDE D R. Comparison of discrete elemental modeling to experimental data regarding mixing of solids in the transverse direction of a rotating kiln[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(13): 4462 – 4465.

[26] 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 208 – 213.
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208 – 213. (in Chinese)

[27] 谭援强,肖湘武,郑军辉,等. 锥形改流体下部孔径对筒仓卸料流态的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 82 – 87.
TAN Yuanqiang, XIAO Xiangwu, ZHENG Junhui, et al. Effect of outlet diameter of cone-in-cone insert on silo flow pattern [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 82 – 87. (in Chinese)

[28] 高志朋,徐立章,李耀明,等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报,2017, 33(20): 48 – 55.
GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in-field harvesting condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 48 – 55. (in Chinese)

[29] 刘莫尘,赵庆吉,韩守强,等. 桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(增刊 2):120 – 130,140.
LIU Mochen, ZHAO Qingji, HAN Shouqiang, et al. Development and test of self-walking mulberry garden interated machine with variable proportion and directional disperse fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp. 2):120 – 130,140. (in Chinese)