

# 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化\*

苑进<sup>1,2</sup> 刘勤华<sup>1</sup> 刘雪美<sup>1,2</sup> 张疼<sup>1</sup> 张晓辉<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要:** 变比变量施肥中,排肥管和落肥管结构对多种肥料的掺混性能和排肥滞后有重要影响。在已完成掺混腔结构优选的基础上,使用离散元法对变比变量施肥和撒播过程加以仿真,分析不同排肥管高度与落肥管三角波纹形状对颗粒运动的影响,依据提出的性能评价指标,优化排肥管和落肥管结构。计算结果及机理分析表明:排肥管高度越大,颗粒在下落、碰撞及混合各阶段的速度越大,颗粒与掺混腔壁面碰撞后形成的散布面积越大,颗粒混合均匀性越好,颗粒混合配比标准差越小;落肥管三角波纹高度在4~6 mm范围内,相对于无波纹情况,可增加颗粒与落肥管间和颗粒间的碰撞次数进而促进颗粒均匀掺混,但高度过大会延缓与其接触的颗粒下落。当落肥管三角波纹高度约为2 mm时,即为肥料颗粒直径的40%~60%,最有利于促进肥料颗粒之间的混合,同时三角波纹对颗粒下落的滞后影响较小。

**关键词:** 变比变量施肥 离散元法 排肥管 落肥管 结构优化

**中图分类号:** S147.35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0081-07

## 引言

变量施肥技术是精细农业的组成部分,对现代农业发展有重要意义<sup>[1-2]</sup>。现有变量施肥技术<sup>[3-6]</sup>仅能在线调整一种复合肥或单元肥的施肥量,养分配比受肥料种类限制,常造成某些养分过剩,而其他养分不足,导致肥效差、利用率不高<sup>[7]</sup>。相应地施肥决策也只能采用“优化模型”生成配比固定的施肥处方<sup>[8]</sup>。新型变比变量施肥技术<sup>[9]</sup>不仅能够调整单元田块的施肥量,更重要的是能在线调整多种肥料的施肥配比,实现氮磷钾等养分的真正按需变量和平衡施肥。在多种肥料颗粒的排肥、掺混和撒播过程中,颗粒物料的掺混容易导致离析现象<sup>[10]</sup>,使播撒到作物根部的肥料不均匀,如何保证撒播到土壤中的不同肥料的掺混均匀度成为变量施肥的关键问题。

近年来国内外学者开始应用离散元法研究颗粒物料与农机工作部件的交互作用<sup>[11-13]</sup>。Miserque等<sup>[14]</sup>研究了物性参数对撒播过程中离析现象的影响,并指出颗粒尺度和密度的影响最大。Jonathan<sup>[15]</sup>采用离散元法模拟并分析了撒播颗粒肥料的分布均匀性。van Liedekerke等<sup>[16]</sup>采用离散元方法对肥料颗粒的旋转式撒播方式做了敏感性分析,

并指出颗粒类型、摩擦因数等物理参数对肥料散度分布行为有较大影响。赵湛等<sup>[17]</sup>利用离散元法数值计算了籽粒与检测传感器碰撞过程的力学特性。

本文在已完成掺混腔结构优选的基础上<sup>[18]</sup>,应用散粒体离散元法研究不同高度排肥管及落肥管三角波纹大小对颗粒运动的影响,揭示肥料颗粒在该结构下的运动特性及掺混性能,依据给出的撒播肥料的均匀性评价,优选排肥管及落肥管结构,为配比变量施肥装置相关部件的设计及优化提供依据。

## 1 变比变量施肥模型与施肥性能评价

### 1.1 变比变量施肥系统模型与仿真过程

变比变量施肥装置包括肥箱、排肥器、排肥管、掺混腔和落肥管,其装置示意图如图1所示。除掺混腔<sup>[18]</sup>外,排肥管和落肥管结构也是影响多种肥料均匀掺混的重要因素。本文通过改变排肥管高度和落肥管三角波纹大小,研究不同设计参数对多种肥料颗粒行为及掺混性能的影响。

首先测定颗粒肥料的物料特性以确定仿真参数<sup>[18]</sup>。从氮肥、磷肥、钾肥颗粒中随机取样各100粒,用螺旋测微器测量肥料颗粒的三维尺寸,测定氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硝酸钾)的等效直径分别为4.046 mm、4.722 mm和4.306 mm,其球

收稿日期:2013-12-16 修回日期:2014-02-07

\* 国家自然科学基金资助项目(31101461)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2012CM035)、山东科技发展计划资助项目(2013GNC11203)和山东现代农业产业技术体系棉花创新团队资助项目(SDAIT0701110)

作者简介:苑进,副教授,博士,主要从事智能农业装备技术研究,E-mail:jyuan@sdau.edu.cn

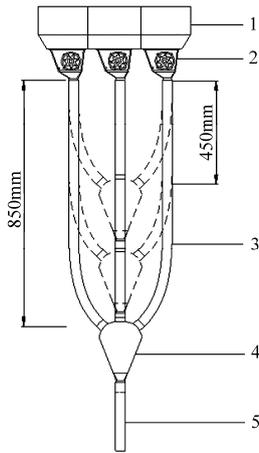


图1 变比变量施肥装置示意图

Fig.1 New proportion and full variable fertilizing device

1. 肥箱 2. 排肥器 3. 排肥管 4. 掺混腔 5. 落肥管

形率均大于 0.91, 因此仿真使用球型模型, 并依据各等效直径分布进行参数设置。

为仿真肥料经掺混装置排到大田的效果, 设置一长为 1 000 mm、宽为 300 mm 的长方体模拟地面。仿真时排肥装置的壁面材质设置为有机玻璃, 地面设置为土壤, 肥料颗粒间的碰撞恢复系数为 0.08 ~ 0.11, 肥料与装置壁面间的碰撞恢复系数为 0.41 ~ 0.50, 肥料颗粒与地面间的碰撞恢复系数为 0.01 ~ 0.03。肥料颗粒间的动、静摩擦因数分别为 0.21 ~ 0.29 和 0.28 ~ 0.32, 肥料与装置壁面间的动、静摩擦因数分别为 0.18 ~ 0.22 和 0.26 ~ 0.33, 肥料颗粒与地面间的动、静摩擦因数分别为 1.22 ~ 1.26 和 1.23 ~ 1.28。

在每个结构参数和工况下将变比变量施肥的仿真总时间设定为 3.5 s, 肥料颗粒装入肥箱后, 1.3 s 时排肥轮绕各自排肥轴以给定的转速进行排肥, 地面从 2 s 开始以 0.6 m/s 的速度相对排肥装置反方向直线运动, 以模拟施肥机在大田的排肥工况, 仿真计算结束后统计颗粒的运动轨迹等特性, 用于掺混和排肥均匀度评价。

### 1.2 肥料排施的均匀度评价方法

为评价颗粒排施后的掺混均匀度, 选取地面颗粒分布范围作为抽样区域, 按 4 行、20 列划分网格, 单元网格尺寸为 30 mm × 35 mm。统计各单元网格中各单元肥的颗粒数, 计算配比偏离度作为肥料排施的均匀度评价。

各种肥料在当前单元网格中的配比为

$$\varphi_{(N,P,K)} = \frac{n_{(N,P,K)}}{n_z} \quad (1)$$

各种肥料的目标配比为

$$\psi_{(N,P,K)} = \frac{N_{(N,P,K)}}{N_z} \quad (2)$$

而肥料在当前单元格中的配比偏离度为

$$\lambda_{(N,P,K)} = \frac{\varphi_{(N,P,K)}}{\psi_{(N,P,K)}} \quad (3)$$

式中, 各单元网格中总颗粒数目为  $n_z$ , 该单元格中的氮肥、磷肥、钾肥的颗粒数目为  $n_N$ 、 $n_P$ 、 $n_K$ 。整个抽样区域中的全部颗粒数目表示为  $N_z$ , 氮肥、磷肥、钾肥的颗粒总数分别为  $N_N$ 、 $N_P$ 、 $N_K$ 。

将各个肥料相对应的所有配比偏离度数据取标准差, 得到氮肥、磷肥、钾肥的配比标准差分别为  $\sigma_N$ 、 $\sigma_P$ 、 $\sigma_K$ 。该标准差表示各单元格肥料配比偏离度与目标配比的总体偏离程度, 配比标准差越小说明肥料的掺混及播撒的肥料分布越均匀。

## 2 排肥管高度优化

### 2.1 实验设计及仿真结果

考虑到变比变量施肥机整体高度及部件设计的合理性, 排肥管高度应在 450 ~ 850 mm 范围为宜。分别设置排肥管高度为 850、750、650、550、450 mm, 对变比变量施肥装置进行仿真。仿真时排肥器均设置在 360°/s 的转速下进行。对每组高度多次仿真, 记录并处理相关数据, 对其求取平均值后得到颗粒配比标准差仿真结果如图 2 所示。

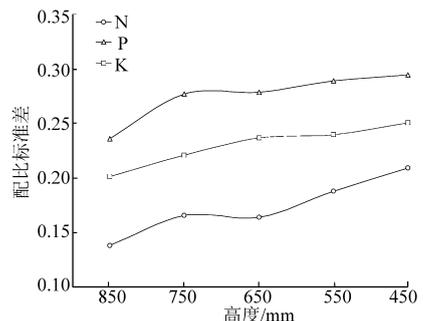


图2 不同排肥管高度下的掺混均匀度仿真结果

Fig.2 Simulations of blending uniformity with height varied fertilizing tube

由图 2 可知, 在相同排肥轴转速下, 肥料配比标准差随排肥管高度减小而增大, 即 3 种肥料颗粒经过较高排肥管并在掺混腔中碰撞后, 排到地面的肥料混合均匀性要优于高度较小的排肥管。

### 2.2 排肥管高度对掺混均匀度的影响机理分析

图 3 为排肥管高度分别为 850、650、450 mm 时掺混腔中的仿真视图。观察并对比 5 组仿真过程, 可以看到由于排肥管与掺混腔的连接部分曲率大体相近, 肥料颗粒脱离排肥管进入掺混腔的运动轨迹非常相近。排肥管高度越大, 颗粒的速度越大, 经碰撞后氮肥及钾肥颗粒在掺混腔中的散布面积就越大。

综合颗粒运动特点并对其抽象后得到运动轨迹筒图(图 4), 可更清晰地显示粒子的运动轨迹及碰

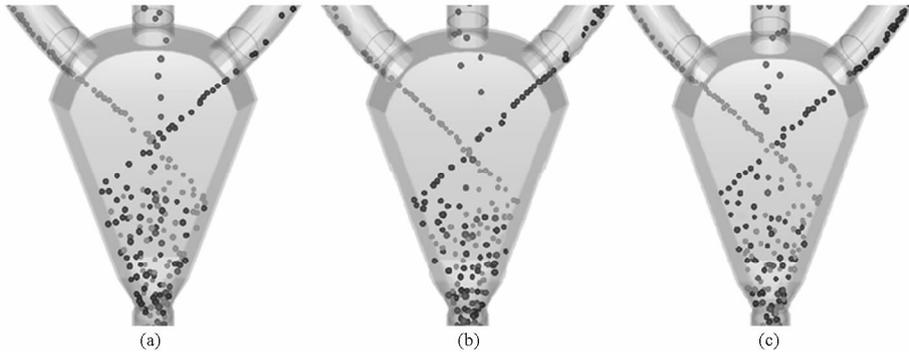


图 3 不同排肥管高度下肥料在掺混腔中混合过程的仿真结果

Fig. 3 Fertilizer mixing process in the blending cavity with varied height of fertilizing tube

(a) 排肥管高度 850 mm (b) 排肥管高度 650 mm (c) 排肥管高度 450 mm

撞后粒子的散布特点。氮、磷、钾颗粒在排肥管中加速下落后进入掺混腔,经过交汇区后氮肥及钾肥颗粒与掺混腔发生碰撞。由于颗粒入射角度相同,粒子经碰撞后的反弹角度也相同,因此影响氮肥及钾肥颗粒碰撞后散布面积大小的因素为颗粒入射的速度。

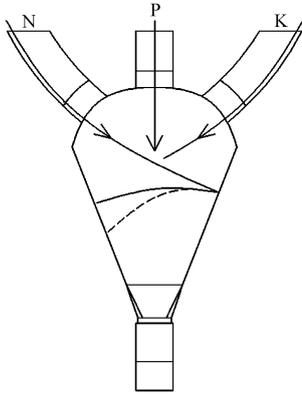


图 4 肥料颗粒在掺混腔中的运动轨迹简图

Fig. 4 Fertilizer particles trajectory in the blending cavity

图 4 以氮肥颗粒来说明颗粒散布面积与排肥管高度之间的关系,由于结构具有对称性,钾肥颗粒运动轨迹与氮肥相似。图中实线代表氮肥颗粒经较高排肥管下落,在掺混腔中碰撞后的轨迹上界,该轨迹与掺混腔下部空间包围而成的面积,即为氮肥颗粒的散布面积。虚线则代表经较低排肥管下落并碰撞后的情形。颗粒在碰撞后形成的分散面积占掺混腔碰撞区总面积的百分比越大,则颗粒之间的交叉区域及碰撞概率也就越大,颗粒的混合均匀性也就越好。

为通过相关数据解释排肥管高度越大,肥料掺混效果越好的原因,在 5 组不同排肥管高度仿真下,分别标记选取相同时间节点即 1.89 s 处刚出排肥器时的 15 个颗粒,输出各颗粒在 1.56 ~ 2.85 s 时间段内的速度变化情况并求取平均值。所得氮肥、磷肥及钾肥颗粒速度随时间变化的曲线如图 5 ~ 7。

观察同组仿真过程中颗粒的运动特征,以排肥管高度 850 mm 为例进行说明。如图 5 ~ 7 分别将

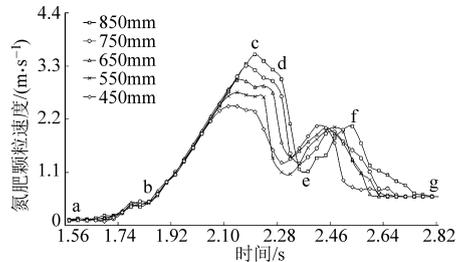


图 5 不同排肥管高度下氮肥颗粒速度随时间变化曲线

Fig. 5 N fertilizer particle velocity versus time curve with varied height of fertilizing tube

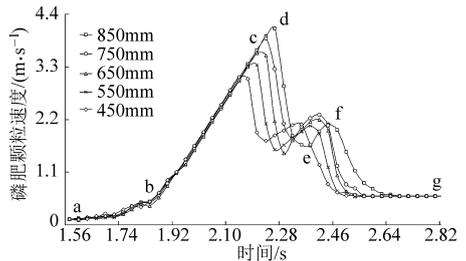


图 6 不同排肥管高度下磷肥颗粒速度随时间变化曲线

Fig. 6 P fertilizer particle velocity versus time curve with varied height of fertilizing tube

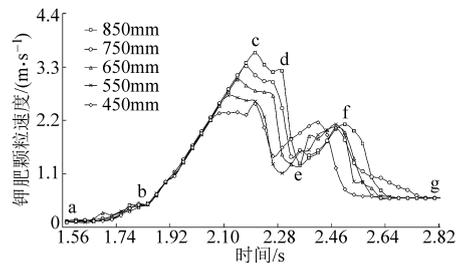


图 7 不同排肥管高度下钾肥颗粒速度随时间变化曲线

Fig. 7 K fertilizer particle velocity versus time curve with varied height of fertilizing tube

氮、磷、钾颗粒速度曲线划分为 a ~ g 7 个相同的时间节点。从 a 点(1.56s)至 b 点(1.89 s),颗粒由肥箱中静止状态进入排肥器,随排肥轴转动。该时间段内,排肥轴转速不大且相同,3 种颗粒速度较小且变化基本相同。从 b 点(1.89 s)至 c 点(2.23 s),为颗粒经排肥器进入排肥管的加速阶段。比较氮肥与

钾肥颗粒速度,由于这两种颗粒经过的落肥管完全对称,颗粒加速后的最大值基本相同,大致在 $3.55\text{ m/s}$ 。对于磷肥颗粒,虽然排肥管总长度小于氮肥及钾肥颗粒所经过的排肥管长度,但是由于磷肥排肥管为竖直放置,不存在氮肥及钾肥颗粒经排肥管折弯处的摩擦减速问题,最终磷肥颗粒在c点速度为 $3.85\text{ m/s}$ 。从c点(2.23 s)至d点(2.28 s),颗粒进入掺混腔交汇区。在该区域内颗粒之间存在少数碰撞,其中氮肥及钾肥颗粒所受影响较突出,颗粒速度明显下降。磷肥颗粒竖直下落后快速经过该区域,因此所受影响较小,大多数颗粒仍处于加速阶段,最终磷肥颗粒速度达到最大值 $4.10\text{ m/s}$ 。从d点(2.28 s)至e点(2.35 s),颗粒进入掺混腔碰撞区域。氮肥及钾肥颗粒与掺混腔壁面碰撞后动能损失速度下降。而后氮肥及钾肥颗粒反弹,3种颗粒在碰撞区再次发生碰撞,造成氮肥及钾肥颗粒速度的继续降低,磷肥颗粒速度受碰撞影响也急速下降。e点(2.28 s)至f点(2.53 s),为颗粒完成碰撞并进入落肥管上部的时间段,颗粒在该阶段汇流且速度有所增加。从2.53 s以后,颗粒进一步汇聚流入落肥管下部弯管阶段,该阶段颗粒速度下降最终流出落肥管落向地面。

对比不同组次颗粒运动特征可以看到,随着排肥管高度的降低,除a、b两时间节点不变外,其他时间节点相应提前。且颗粒由排肥器落下,经过较高排肥管后其速度在各阶段相对于经过较低排肥管后的颗粒速度要高。而氮肥及钾肥颗粒在以相同入射角进入掺混腔并在碰撞后有相同反弹角的前提下,颗粒速度影响其碰撞后的散布面积,散布面积越大,氮、磷、钾颗粒之间混合时再次碰撞的几率便越大,混合均匀性也就越好。

综上,颗粒经较高排肥管落下后,获得的速度更大,碰撞后的散布面积更大,更有利于颗粒之间的混合,所得颗粒配比标准差也就越小。

### 3 落肥管波纹形状优化

混合好的肥料颗粒流出掺混腔后进入落肥管,为避免在落肥过程中出现颗粒的离析等现象,选择波纹管作为落肥管,一方面可以减小颗粒的下落速度,减少肥料在土壤中的反弹现象,另一方面可以增加颗粒在落肥管中的碰撞,避免不同肥料的离析。在已选出掺混腔最优结构及确定排肥管最佳高度后,本节主要研究落肥管不同三角波纹大小对肥料颗粒混合均匀度的影响。

#### 3.1 实验设计及仿真结果

所选落肥管结构如图8所示。与掺混腔下部出

口相接的落肥管外径为 $45\text{ mm}$ ,其波纹轴向截面为三角形波浪纹,落肥管公称直径不变,三角纹高度 $h$ 越大,波纹管的内径越小。选取落肥管三角纹高度为0、2、4、6、8 mm,即落肥管内径 $\phi$ 分别为44、42、40、38、36 mm时研究落肥管内径对排肥掺混均匀度的影响。

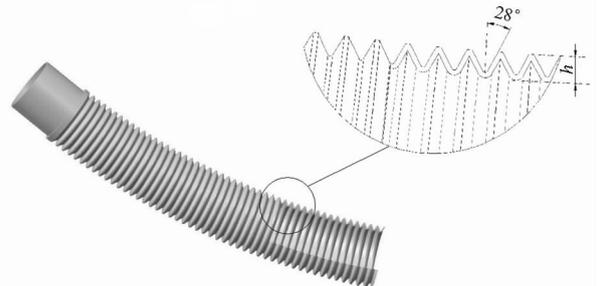


图8 波纹管形状及参数

Fig. 8 Bellows shape and parameters

仿真过程中,首先进行排肥轴 $300^\circ/\text{s}$ 相同转速下依次改变落肥管内径的仿真。仿真相关设置与前述仿真相同,即仿真总时间为3.5 s,颗粒装入肥箱后,1.3 s时排肥轴绕其中心轴以一定转速进行排肥,地面从2 s开始以 $0.6\text{ m/s}$ 的速度相对排肥装置反方向直线运动。多次仿真,记录并处理数据得相应颗粒配比标准差 $\sigma$ 。然后其他条件不变,改变排肥轴转速为 $360^\circ/\text{s}$ 和 $420^\circ/\text{s}$ 再次进行仿真试验。3组仿真试验最终结果如图9~11所示。

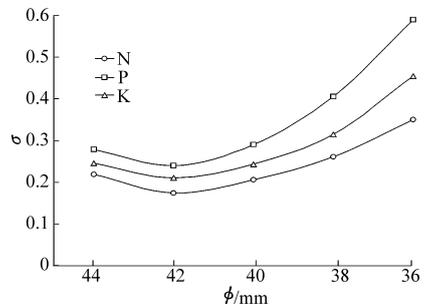


图9 排肥轴转速 $300^\circ/\text{s}$ 时不同波纹管径下肥料配比标准差曲线

Fig. 9 Standard deviation of fertilizing with varied diameter of bellows and with speed at  $300^\circ/\text{s}$  of fertilizer-metering device

由图9~11可知,不同排肥轴转速下,不同落肥管内径仿真后所得肥料配比标准差结果有相同的变化趋势,下面分两部分说明这种趋势。第一部分:对比落肥管内径44 mm(即波纹管三角波纹高度为0 mm)与42 mm(即落肥管三角波纹高度为2 mm)时仿真结果,所得各肥料配比标准差前者均大于后者,而肥料配比标准差越小说明肥料混合均匀性越好,因此落肥管三角波纹高度为2 mm时比没有波纹情况下更有利于肥料掺混。第二部分:对比落肥

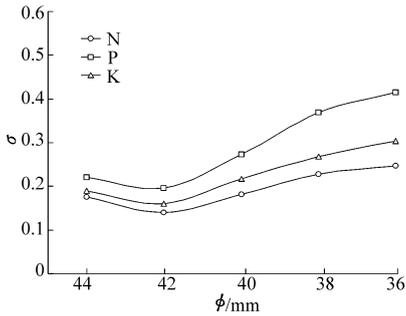


图 10 排肥轴转速 360°/s 时不同波纹管径下肥料配比标准差曲线

Fig. 10 Standard deviation of fertilizing with varied diameter of bellows and with speed at 360°/s of fertilizer-metering device

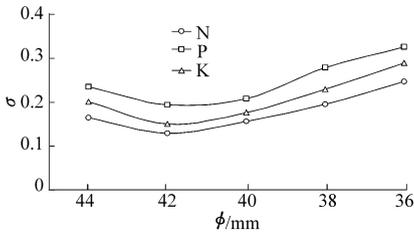


图 11 排肥轴转速 420°/s 时不同波纹管径下肥料配比标准差曲线

Fig. 11 Standard deviation of fertilizing with varied diameter of bellows and with speed at 420°/s of fertilizer-metering devices

管内径分别为 42、40、38、36 mm(即落肥管三角波纹高度分别为 2、4、6、8 mm)时的仿真结果。如图所示,随着落肥管三角波纹高度变大,所得肥料配比标准差的值也越来越大,即肥料掺混随落肥管三角波纹高度变大效果变差。

### 3.2 落肥管内径对排肥均匀度的影响机理分析

以排肥轴转速为 360°/s 时不同落肥管内径下的仿真过程为例,分析落肥管内径对肥料掺混的影

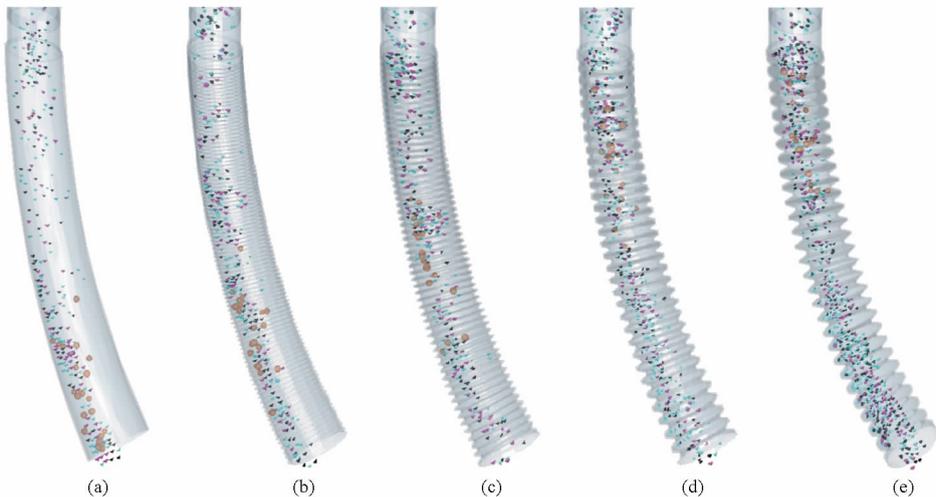


图 13 标记颗粒在波纹管中的滞后现象(仿真节点 3.1 s)

Fig. 13 Lagging of marked particles in bellows(simulation time of 3.1 s)

(a)  $\phi = 44 \text{ mm}$  (b)  $\phi = 42 \text{ mm}$  (c)  $\phi = 40 \text{ mm}$  (d)  $\phi = 38 \text{ mm}$  (e)  $\phi = 36 \text{ mm}$

响。为得到颗粒在落肥管内的运动及碰撞情况,在 5 组不同内径的落肥管仿真中,分别选取并标记相同时间节点(2.96 s)处到达落肥管上端的 20 个颗粒,输出各颗粒在 2.96 ~ 3.50 s 时间段内的碰撞次数。颗粒与落肥管碰撞次数随时间变化的曲线如图 12 所示。

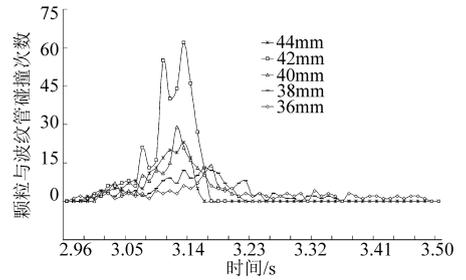


图 12 排肥轴转速 360°/s 下,颗粒与波纹管碰撞次数随时间变化曲线

Fig. 12 Time-varying relationship of collision times between particles and bellows with fertilizing shaft speed at 360°/s

经过统计,当落肥管内径分别为 44、42、40、38、36 mm(即落肥管三角波纹高度分别为 0、2、4、6、8 mm)时对应颗粒与落肥管的碰撞总次数分别为 166、375、200、171、140 次。

由上述数据可知,当落肥管内壁三角波纹高度在一定范围(该仿真中当三角纹高度分别为 2、4 mm)的情况,颗粒与落肥管的碰撞次数前者大于后者;当落肥管内壁含有三角波纹且其高度以 2 mm 为梯度值从 2 mm 变为 8 mm 时,随着三角波纹数目的减少,颗粒与落肥管之间的碰撞次数相应减少;图 13 为在时间节点 2.96 s 处选取标记的颗粒,经下落一段时间后,在 3.1 s 时位于波纹管位置(图中大斑点)的示意图。由该图可知,当落肥管内径分

别为44、42、40、38、36 mm(即落肥管三角波纹高度分别为0、2、4、6、8 mm)时,颗粒与落肥管出现集中碰撞的时间段具有延后趋势,同时颗粒与落肥管结束碰撞的时间相应延后,相应碰撞结束的时间点分别为3.15、3.18、3.22、3.36、3.49 s。

结合仿真结果及上述分析,对比落肥管内径44、42 mm(即落肥管内壁光滑与内壁三角波纹高度分别为2 mm)的情况,可以看出落肥管内壁三角波纹可增加颗粒在下落过程中与落肥管的碰撞次数,从而进一步促进了颗粒之间的碰撞混合,提高了肥料的掺混均匀性;对比落肥管内径分别为42、40、38、36 mm(即落肥管三角波纹高度分别为2、4、6、8 mm)的几种情况,可以看到当三角波纹高度过大,特别是落肥管内壁三角波纹高度大于颗粒直径时,三角波纹对粒子运动又显现出阻碍的作用,过大的三角波纹高度使粒子的下落出现比较严重的滞后,使原本在同一时间节点处下落的颗粒在进入落肥管后速度出现较大的不同,因而与管壁接触的颗粒无法更好地参与混合,使肥料的混合均匀性随三角波纹的变大反而逐渐降低。

综上,三角波纹在一定高度范围(2~6 mm)内可增加颗粒与落肥管的碰撞进而促进颗粒混合的同时,随着其高度的增大又存在延缓与内壁接触的颗粒下落的特性,该两种相反的影响相互结合必定会在某一点处存在促进颗粒混合的最优值。通过仿真分析可以得出,当落肥管内壁三角波纹高度为2 mm左右即其高度为肥料颗粒直径的40%~60%时,最有利于促进肥料颗粒之间的混合。在该值下,数量

较多的三角波纹使颗粒与落肥管之间可以出现较多的碰撞次数,同时较小的三角波纹高度又对颗粒的下落阻碍不致于产生较大影响,因此肥料的掺混均匀性也就最好。

## 4 结论

(1) 排肥管与掺混腔上端交界处曲率相同条件下,颗粒经过不同落肥管下落进入掺混腔的角度相同,与掺混腔壁面碰撞后的反弹角度基本相同。

(2) 排肥管高度影响颗粒进入掺混腔的速度。排肥管高度越大,颗粒在下落、碰撞及混合各阶段的速度也越大,颗粒速度进而影响与掺混腔壁面碰撞后的颗粒散布面积。颗粒速度越大,碰撞后形成的散布面积越大,颗粒混合均匀性越好,得到的颗粒配比标准差也就越小。

(3) 落肥管三角波纹高度在4~6 mm范围内,相对于无波纹情况,可增加颗粒与落肥管间和颗粒间的碰撞次数,有利于提高肥料的掺混均匀性。但当三角波纹高度过大,特别是大于颗粒直径时,与落肥管内壁接触的颗粒出现落肥滞后现象,导致颗粒无法充分参与混合,从而使肥料的混合均匀性逐渐降低。

(4) 当落肥管的波纹高度约为2 mm时,即为肥料颗粒直径的40%~60%,最有利于促进肥料颗粒之间的混合。此时,数量较多的三角波纹使颗粒与落肥管壁之间的碰撞次数较多,同时三角波纹对颗粒下落的滞后影响较小,因此肥料的掺混均匀性也就最好。

## 参 考 文 献

- Zhang Naiqian, Wang Maohua, Wang Ning, Precision agriculture—a worldwide overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2/3): 113-132.
- McBratney Alex, Brett Whelan, Tihornir Ancev, et al. Future directions of precision agriculture[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(1): 7-23.
- 张书慧,马成林,吴才聪,等.一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J].农业工程学报,2003,19(1):129-131.  
Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precision agricultural[J]. Transactions of the CASE, 2003, 19(1):129-131. (in Chinese)
- 刘阳春,张小超,伟利国,等.一种变量施肥技术的实现及其架架试验[J].农业机械学报,2010,41(9):159-162.  
Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Liguog, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):159-162. (in Chinese)
- Yuan Jin, Liu Chengliang, Li Yanming, et al. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 33-41.
- 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 CASE, 2004, 20(5): 114-117. (in Chinese)
- Torbett J C, Roberts R K, Larson J A, et al. Perceived improvements in nitrogen fertilizer efficiency from cotton precision farming [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 140-148.
- Ortega R A, Muñoz R E, Acosta L E, et al. Optimization model for variable rate application in extensive crops in Chile: the effects of fertilizer distribution within the field[C]//Proceedings of the 7th European Federation for Information Technology in Agriculture Conference, 2009: 489-495.
- 苑进,刘雪美,张晓辉. 肥量配比全变量施肥装置及其控制方法:中国201110385031. X[P].2011-11-29.

- 10 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 22-29.  
Ma Zheng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Summarize of particle movement research in agricultural engineering realm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22-29. (in Chinese)
- 11 于建群,王刚,心男,等. 型孔轮式排种器工作过程与性能仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 83-87.  
Yu Jianqun, Wang Gang, Xin Nan, et al. Simulation analysis of working process and performance of cell wheel metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 83-87. (in Chinese)
- 12 胡建平,周春健,侯冲,等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 94-98.  
Hu Jianping, Zhou Chunjian, Hou Chong, et al. Simulation analysis of seed-filling performance of magnetic plate seed-metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94-98. (in Chinese)
- 13 于亚军,于建群,陈仲,等. 三维离散元法边界建模软件设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 99-103.  
Yu Yajun, Yu Jianqun, Chen Zhong, et al. Design of 3-D DEM boundary modeling software[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 99-103. (in Chinese)
- 14 Miserque O, Pirard E, Schenkel Y, et al. Spreading segregation of blended fertilizers: influence of the particles properties[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(2): 137-144.
- 15 Jonathan H. Using discrete element modeling to evaluate material distribution using spinner-disc spreaders[D]. Auburn: Auburn University, 2012.
- 16 van Liedekerke P, Tijssens E, Ramon H. Discrete element simulations of the influence of fertiliser physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(4): 392-405.
- 17 赵湛,李耀明,陈义,等. 水稻籽粒碰撞力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 88-92.  
Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 88-92. (in Chinese)
- 18 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 配比变量施肥中多肥料掺混过程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)

## Granular Multi-flows Fertilization Process Simulation and Tube Structure Optimization in Nutrient Proportion of Variable Rate Fertilization

Yuan Jin<sup>1,2</sup> Liu Qinhua<sup>1</sup> Liu Xuemei<sup>1,2</sup> Zhang Teng<sup>1</sup> Zhang Xiaohui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

**Abstract:** The structures of fertilizer tube and fertilizer falling tube have an important impact on the granular multi-fertilizer flows blending and fertilizing hysteresis performance in the nutrient proportion of variable rate technology (NPVRT). On the basis of the optimal structure of the blending cavity structure, the granular multi-fertilizer variable rate fertilizing process was simulated by discrete element method in this paper, and the impact on particles motion under varied height of fertilizing tube and varied diameter of triangular shape of the bellows was analyzed. According to the proposed performance evaluation indexes, the structures of fertilizing tube and bellows were optimized. The computing and mechanism analysis results show that: first, the greater height of fertilizer tube was, the higher particles speed in falling, collision, mixing and the various stages were. Second, the greater the spread area after the particles colliding with the blending cavity was, the better the particles blending was, and the smaller the standard deviation of particle blending ratio was. Then, the height of triangular shape of the bellows for fertilizer dropping was in range of 4~6 mm, relative to the non-bellows one, that could raise the number of collisions among the particles and bellows, thus improving the uniformity of particles blending. However, excessive height slowed down the dropping particles contacted with bellows. If the height of triangular shape of the bellows was about 2 mm, that was approximately 40% to 60% the diameter of fertilizer particle, the uniformity blending of particles could be promoted, and triangular shape had smaller effect on time-lagging of particles.

**Key words:** Nutrient proportion of variable rate technology Discrete element method Fertilizing tube Fertilizer falling tube Structure optimization