

## 基于离散元的施肥机肥料块破碎装置参数的优化

宋学锋<sup>1</sup>, 张锋伟<sup>1</sup>, 戴飞<sup>1\*</sup>, 赵武云<sup>1</sup>, 杨杰<sup>2</sup>, 张雪坤<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2.中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:**为解决 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机作业因肥料结块而排肥不顺的问题, 设计了一种由箱体和辊轮组成的肥料块破碎装置。在离散元软件 EDEM 中建立肥料块离散元模型, 按照 3 因素 3 水平正交试验方案对肥料块破碎装置工作过程进行虚拟试验。结果表明: 影响肥料块破碎率的因素由大到小依次为辊轮间距、辊轮转速、辊轮齿数。当辊轮间距为 6 mm、辊轮转速为 150 r/min、辊轮齿数 60 个时, 肥料块破碎率为 98.8%(最高值)。对仿真结果进行试验验证, 结果肥料块破碎率为 94.4%。

**关键词:** 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机; 肥料结块破碎装置; 离散元; 参数优化; 数值模拟  
中图分类号: S224.22 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2017)02-0206-06

## Parameter optimization for fertilizer block crushing device of fertilizer machine based on discrete element method

SONG Xuefeng<sup>1</sup>, ZHANG Fengwei<sup>1</sup>, DAI Fei<sup>1\*</sup>, ZHAO Wuyun<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, ZHANG Xuekun<sup>1</sup>

(1.College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that 2BF-02 type of corn fertilizer machine with pricking hole under whole plastic-film on double ridges can't discharge fertilizer block smoothly, a fertilizer block crushing device was designed, which consisted of shell and wheels. The discrete element model of fertilizer block was generated by EDEM software to carry out the numerical simulation according to the 3-factor and 3-level orthogonal experiment. The results showed that factors affected crushing rate in descending order were wheel distance, wheel speed and wheel tooth, respectively. When the wheel distance was 6 mm with 60 the wheel tooth under the wheel speed of 150 r/min was, the crushing rate of fertilizer block was 98.8% (maximum value). In order to verify the validity of simulation results, the experimental test was conducted and obtained the crushing rate of fertilizer block was 94.4%.

**Keywords:** 2BF-02 type of corn fertilizer machine with pricking hole under whole plastic-film on double ridges ; fertilizer block crushing device; discrete element method; parameter optimization; numerical simulation

旱地全膜双垄沟播技术, 集覆盖抑蒸、膜面集雨、垄沟种植技术为一体, 可最大限度实现集雨、保墒、抗旱、增产<sup>[1]</sup>, 所配套使用的全膜双垄沟直插式精量穴播机<sup>[2-3]</sup>、双垄耕作施肥喷药覆膜机<sup>[4-5]</sup>、全膜双垄沟气推直插式玉米精密穴播机<sup>[5]</sup>、全膜双垄沟废膜捡拾打捆机<sup>[6]</sup>、全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机<sup>[7]</sup>一系列作业机械的研究已经取得较大进展, 但膜下

施肥机具及相关装置的研究尚处于滞后状态。

旱作膜下施肥机所施用的固态肥料, 吸水性强, 极易结成块状<sup>[8]</sup>, 施肥机采用外槽轮式排肥器作为关键部件, 因槽轮结构不能对固态块状肥料产生破坏作用, 易造成肥箱内肥料积聚, 堵塞排肥器管道, 导致田间作业中肥料漏施现象发生。

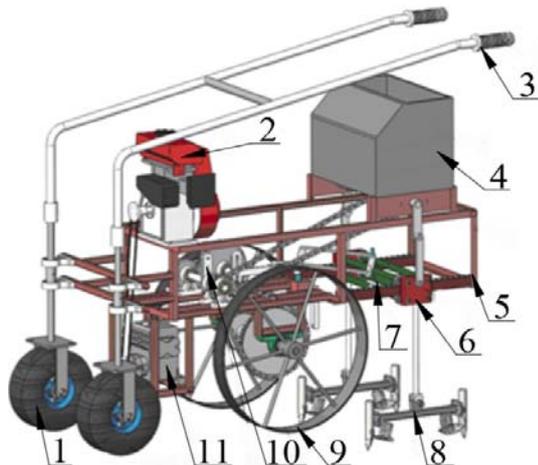
笔者针对由甘肃农业大学工学院与酒泉铸陇

机械制造有限责任公司联合研制的 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机，设计了一种肥料块破碎装置。在离散元软件 EDEM 中利用 3 因素 3 水平正交试验方案对其进行参数优化，寻找辊轮转速、辊轮表面法向间距(辊轮间距)、辊轮表面齿数(辊轮齿数)与肥料块破碎率之间的关系，探究最优工作参数组合，并对分析得到的结果进行试验验证，以期为进一步改善膜下扎穴施肥机性能提供理论参考。

## 1 施肥机及肥料块破碎装置的结构

### 1.1 整机结构

2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机主要由机架、近等速补偿机构、肥箱、曲柄-连杆机构、放大机构、扎穴施肥器、传动系统、动力机、行走轮、减速器、地轮和操作扶手组成，如图 1 所示。



1 行走轮；2 动力机；3 操作手柄；4 肥箱；5 机架；6 曲柄-连杆机构；7 放大机构；8 扎穴施肥器；9 地轮；10 近等速补偿机构；11 变速箱。

图 1 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机的结构

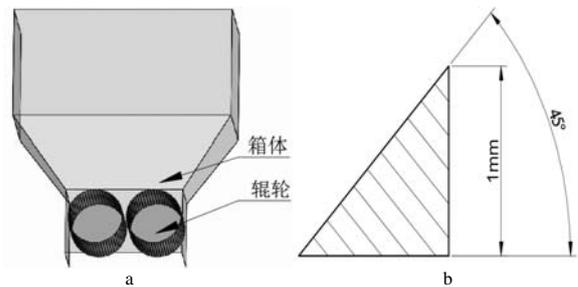
Fig.1 Structure diagram of 2BF-02 corn fertilizer machine with pricking hole under whole plastic-film on double ridges

肥箱排肥器选用外槽轮式排肥器，动力机为小型风冷式柴油机，减速器选用蜗轮蜗杆减速器；近等速补偿机构主要由主动杆、传动齿轮、导杆、平移杆组成。由于肥料在存放过程中易受潮结块，导致大块团聚肥料颗粒在外槽轮式排肥器中发生堵塞而无法正常排肥。

### 1.2 肥料块破碎装置

为 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机设计加装的肥料块破碎装置主要由箱体和辊轮组成，如

图 2-a 所示。箱体上端口为边长 302 mm 的正方形，从喂入口至肥料颗粒出口端垂直高度为 330 mm。辊轮为长 148 mm，直径 75 mm 的圆柱体，辊轮齿齿高 1 mm，齿形角 45°(图 2-b)。块状肥料从上端口喂入，在箱体内部受到壁面与辊轮的冲击作用，以及辊轮表面齿形对其的破坏作用而发生破碎。同时，2 只辊轮绕自身轴线方向具有相对的旋转运动，在实际工作中会加剧肥料块的破碎，从而形成单个肥料颗粒从对辊间隙落下。



a 肥料块破碎箱模型；b 辊轮齿剖视图。

图 2 肥料块破碎装置的结构

Fig.2 Sketch map of fertilizer block crushing device

## 2 肥料块离散元模型的建立

在 EDEM 中要获得具有稳定粘结作用的肥料块模型，需设置准确的肥料颗粒物性、接触参数，并且空间颗粒团有良好的相互接触，以便给颗粒间添加粘结接触模型(bonded particle model, BPM)。

### 2.1 肥料物性、接触参数的选取

选取甘肃刘化(集团)有限责任公司生产的精品尿素为试材，肥料颗粒球形率 90% 以上<sup>[9]</sup>，因此在离散元法仿真分析时，肥料采用球形颗粒建模，直径选取 4 mm。肥料颗粒与箱体、辊轮之间的接触作用属于经典力学接触，采用 Hertz-Mindlin(no-slip)接触模型。肥料和装置的物性参数列于表 1。颗粒之间恢复系数为 0.2，颗粒与辊轮、箱体之间的为 0.2；颗粒之间静摩擦系数为 0.5，颗粒与辊轮、箱体之间的为 0.3；颗粒之间动摩擦系数为 0.01，颗粒与辊轮、箱体之间的为 0.01<sup>[10-13]</sup>。

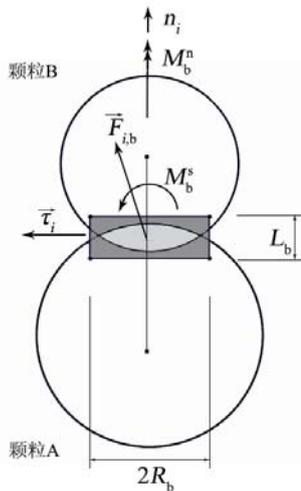
表 1 物性参数

Table 1 Parameters of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
肥料颗粒	0.3	1.0×10 <sup>6</sup>	1 630
辊轮、箱体	0.2	7.0×10 <sup>10</sup>	7 800

### 2.2 离散元法中的颗粒粘结模型

在 BPM 接触模型<sup>[14]</sup>(图 3)中, 2 颗粒之间通过并行粘结方式发生粘结, 每一个并行键可以被看作是一组排列整齐的分布在 2 颗粒间接触面上的弹簧, 其可以传递力  $\vec{F}_i$  和力矩  $\vec{M}_i$ , 且其长度  $L_b$  接近于 0, 作用效果等同于 1 种易破坏的弹性粘结力连接, 因此, 1 个并行键的存在并不能防止颗粒间发生滑动。当 2 颗粒在接触面上不存在并行粘结时, 颗粒间只能传递力, 而不能传递力矩, 其接触作用便受 Hertz-mindlin(no-slip)<sup>[14-15]</sup>模型的约束。在仿真过程中, 当肥料块颗粒受到旋转辊轮的作用力大于最大法向和切向应力值时, 粘结键被破坏, 肥料块便发生破碎。



$\vec{F}_{ib}$  是颗粒 A 作用于颗粒 B 上的单位法向和切向的合力;  $M_b^n$ 、 $M_b^s$  分别为法向、切向力矩;  $\vec{\tau}_i$ 、 $\vec{n}_i$  分别为切向和法向分量;  $L_b$  为颗粒 A 与颗粒 B 的重叠量;  $R_b$  是粘结键半径。

图 3 BPM 接触模型  
Fig.3 BPM contact model

### 2.3 肥料块模型的获取

#### 2.3.1 肥料块颗粒坐标获取

为真实反映实际作业中肥料块具有不规则形状的特性, 在 Solidworks 中建立高 68 mm、宽 70 mm 的多平面、曲面的肥料颗粒结块几何模型, 另存为 stp 格式后, 导入 EDEM 中, 在 Geometry 面板建立直径 100 mm、高 110 mm 的圆柱体, 包围肥料块(图 4-a)。同时, 在圆柱体内部建立颗粒工厂, 采用静态生成颗粒方式<sup>[16]</sup>使颗粒完全覆盖肥料块几何体(图 4-b), 再利用材料“虚实变换方法”使肥料块几何体中

充满颗粒, 继续仿真并使颗粒达到静止, 以便为颗粒稳定粘结做准备(图 4-c)。最后在后处理模块导出肥料块模型内所有颗粒坐标信息, 作为 Particle\_Cluster\_Data.txt(API 文件)预读取文件使用。

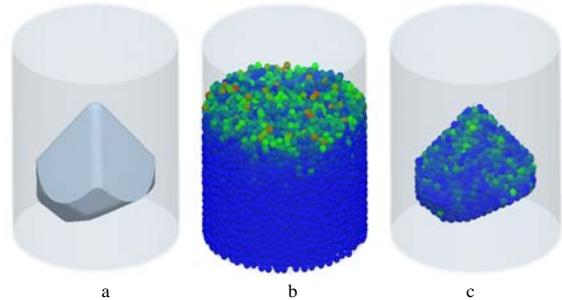


图 4 EDEM 中肥料块填充过程  
Fig.4 Filled process of fertilizer block in EDEM

#### 2.3.2 生成肥料块粘结模型

在 EDEM 中除了设置接触参数外, 还要设置粘结参数(表 2), 即单位法向刚度、单位切向刚度、临界法向应力、临界切向应力、粘结半径, 用来对颗粒群进行粘结。

表 2 颗粒粘结参数

Table 2 Particle bonding parameter		
名称	参数	数值
肥料颗粒	单位法向刚度/(N·m <sup>-3</sup> )	1.0×10 <sup>6</sup>
	单位切向刚度/(N·m <sup>-3</sup> )	5.0×10 <sup>6</sup>
	临界法向应力/Pa	4.0×10 <sup>4</sup>
	临界切向应力/Pa	2.5×10 <sup>4</sup>
	粘结半径/mm	2.5

图 5 为稳定粘结的肥料块 BPM 模型。仿真过程中由颗粒工厂平面生成 3 个直径为 50 mm 的大颗粒后, 利用 API 颗粒替换插件 ParticleReplacement\_v2.dll 在  $t=0.1$  s(用户自行设定)时移走 3 个大颗粒, 生成 3 个小颗粒群(每个颗粒群包含 1 996 个小颗粒), 在  $t=0.101$  s 时刻对颗粒与颗粒之间添加 BPM 粘结力作用, 小颗粒便可以通过并行粘结键粘结在一起, 形成一个颗粒群。颗粒群可以承受切向和法向的位移, 当外界作用力达到临界法向和切向剪切应力时, 粘结键断裂, 颗粒群便发生破碎。

仿真过程中, 如果时间步长过大, 则会导致单个颗粒穿透几何体壁面或者已粘结模型中颗粒飞溅情况发生, 因此, 兼顾计算的精度及稳定性要求,

设定固定时间步长为  $3.48 \times 10^{-5}$  s，为瑞利时间步的 12.5%。稳定粘结后共生成 25 423 个粘结键，平均一个颗粒群包含 8 474 个粘结键，每个颗粒周围有 4.2 个粘结键，该模型粘结充分。

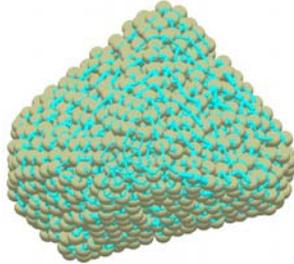


图 5 肥料块 BPM 模型

Fig.5 BPM model of fertilizer block

### 3 仿真试验与分析

仿真过程中利用 API 插件将计算域内生成的大颗粒替换为包含很多个小颗粒的颗粒群，之后在 BPM 接触模型作用下发生粘结，形成与真实肥料块物理特性接近的离散元模型。仿真结束后借助 EDEM 后处理 Analyst 模块中 Grid Bin Group 功能来统计出整个过程中粘结键破碎数量。

肥料结块破碎仿真过程共进行  $t=3$  s。图 6 为  $t=0.001 \sim 2.120$  s 时仿真作业过程，该过程各因素对应的水平值分别为辊轮转速 100 r/min、辊轮间距 10 mm、辊轮表面齿数 80 个。如图 6-a 所示，当  $t=0.001$  s

时，颗粒工厂(200 mm×200 mm 平面)开始随机生成 3 个初速度为 0、直径 50 mm 的大颗粒。在  $t=0.1$  s 时，3 个大颗粒在一个无穷大的颗粒体积力(API 插件)作用下移出计算域，并利用 Particle\_Cluster\_Data.txt 文件所记录的坐标信息在被移走位置生成肥料颗粒团(图 6-a)。当  $t=0.101$  s 时，肥料颗粒团开始在 BPM 接触模型作用下发生粘结，形成肥料块，共产生 25 423 个粘结键(图 6-b)。 $t=0.190$  s 时，肥料块整体下落速度为 1.2 m/s，第 1 个肥料块开始与箱体壁面撞击接触，颗粒间粘结键受到破坏(图 6-c)。 $t=0.210$  s 时，3 个肥料块与壁面及辊轮发生碰撞，接触区域的肥料块发生破碎，计算域内粘结键数量开始急剧下降(图 6-d)。 $t=0.280$  s 时，因辊轮与肥料块作用剧烈，造成肥料块大面积破碎，靠近肥料块几何中心附近的粘结颗粒由于外层颗粒保护并未受到破坏(图 6-e)。 $t=0.480$  s 时，计算域内粘结键数量在 7 500 个左右，粘结键被破坏的颗粒在具有相向转速的辊轮带动下从间隙处落下，并离开计算域(图 6-f)。当  $t=0.850$  s 时，未被破坏的粘结键数量为 4 500 个左右(图 6-g)。在  $t=2.120$  s 时，右侧辊轮上还有未破碎颗粒团，包含 700 个左右粘结键(图 6-h)。至仿真结束时间  $t=3$  s 时，计算域内粘结键数量接近 0，破碎基本完全。

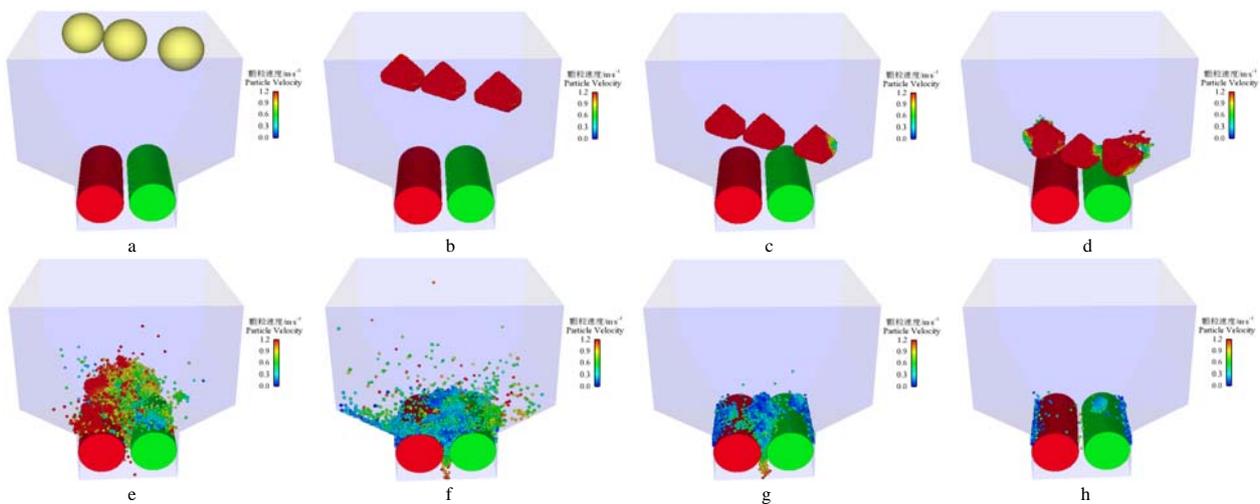


图 6 肥料块的破碎仿真过程

Fig.6 Simulation process of fertilizer block crushing

图 7 为仿真过程中计算域内粘结键数量随时间变化过程， $t=0.101 \sim 0.190$  s 时，肥料块稳定粘

结，颗粒间作用力达到平衡状态，无粘结键破坏。

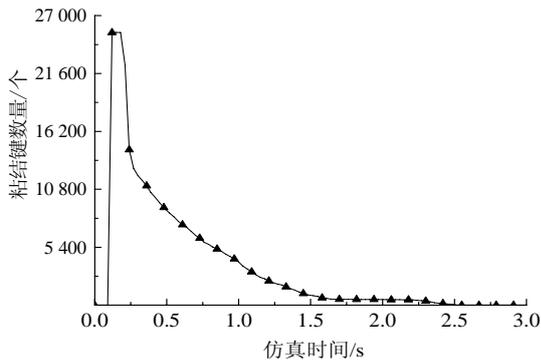


图7 计算域内粘结键数量

Fig.7 Bond quantity-time curve in computational domain

对 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机肥料块破碎装置几何模型的工作参数进行修改,对辊轮转速  $A$ 、辊轮间距  $B$ 、辊轮齿数  $C$  进行仿真试验,每个因素对应 3 个水平(表 3)。

表 3 虚拟试验因素及水平

Table 3 Factors and levels of virtual experiment

水平	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/\text{mm}$	$C/\text{个}$
1	100	6	40
2	120	8	60
3	150	10	80

在不考虑因素间交互作用的情况下,选择正交表  $L_9(3^4)^{[17]}$  安排试验,试验方案及结果见表 4。

以肥料块破碎率  $M$  作指标  $M=(N-n)/n \times 100\%$ , 式中:  $N$  为破碎前计算域内颗粒粘结键总数;  $n$  为仿真结束时计算域内颗粒粘结键总数。在仿真结束时计算域内粘结键数量越少越好。

表 4 正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal experiment

试验号	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/\text{mm}$	$C/\text{个}$	空白	$M/\%$
1	100	6	40	1	0.981
2	100	8	60	2	0.964
3	100	10	80	3	0.939
4	120	6	60	3	0.984
5	120	8	80	1	0.959
6	120	10	40	2	0.949
7	150	6	80	2	0.984
8	150	8	40	3	0.973
9	150	10	60	1	0.969
$k_1$	0.961	0.983	0.968	0.978	
$k_2$	0.964	0.965	0.972	0.966	
$k_3$	0.975	0.952	0.961	0.965	
$R$	0.014	0.031	0.011	0.013	

各因素间无交互作用的情况下,优选方案选择

各因素最大  $k_i(i=1, 2, 3)$  值所对应的水平,即  $A_3B_1C_2$ 。方差分析结果表明,辊轮间距对肥料块破碎率的影响极显著,辊轮转速的影响显著,辊轮齿数的影响不显著。各因素的影响主次顺序为  $B$ 、 $A$ 、 $C$ ,最优工作参数组合为  $B_1A_3C_2$ ,即当辊轮法向间距为 6 mm、辊轮转速 150 mm、辊轮表面齿数 60 个时,作业效果最佳。

表 5 肥料块破碎率的方差分析结果

Table 5 Variance analysis of crushing rate

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	$F$ 值	显著性
$A$	$3.310 \times 10^{-4}$	2	$1.658 \times 10^{-4}$	9.503	*
$B$	$1.420 \times 10^{-3}$	2	$7.108 \times 10^{-4}$	40.745	**
$C$	$2.068 \times 10^{-4}$	2	$1.034 \times 10^{-4}$	5.930	
误差	$3.489 \times 10^{-5}$	2	$1.744 \times 10^{-5}$		

“\*”表示显著;“\*\*”表示极显著。

按照最优工作参数组合进行仿真,得到肥料块破碎率为 98.8%。

#### 4 试验验证

对 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机肥料块破碎装置进行独立台架试验,试验在甘肃农业大学进行。试验前将甘肃刘化(集团)有限责任公司生产的精品尿素颗粒装入 3 个与仿真块状模型大小、形状相似的镂空模具中,在室温下采用 Bear JSQ-A40A2 加湿器对密闭环境加湿,利用逸品博洋牌 HTC-1 湿度计测得密闭环境相对湿度为 75%,放置 72 h,待其受潮结块。调整装置工作参数为最优(辊轮法向间距为 6 mm,辊轮转速 150 r/min,辊轮表面齿数 60 个)。为方便试验后数据统计,同时防止辊轮间隙中落下的未破碎肥料块在地面上产生二次冲击破碎,在箱体下出口位置悬空放置网状收集平面(网孔直径小于肥料颗粒直径),用以收集破碎后的肥料颗粒。试验前对已结块肥料称重,其质量为 115 g(不包括模具质量),待装置空载工作 1 min 后,将 3 个模具在箱体上边缘同一高度位置同时打开,肥料块以初速度 0 m/s 作自由落体运动。在  $t=3$  s 时刻暂停破碎装置工作,对破碎后肥料颗粒进行称重。未被破碎成单个颗粒的肥料总质量为 6.4 g,破碎率为 94.4%。说明经过仿真得到肥料块破碎装置的最优工作参数可行。

## 5 结论

在 2BF-02 型玉米全膜双垄沟扎穴施肥机上设计加装肥料块破碎装置,借助 Solidworks 三维建模软件建立肥料块破碎装置及肥料块几何模型,基于离散元法建立了单个肥料颗粒球形模型,通过 EDEM 中静态生成颗粒法填充几何模型获得肥料块内所有颗粒坐标信息。仿真过程中利用 API 插件移走大颗粒并读取小颗粒坐标信息,实现多颗粒替换。最后在颗粒之间添加 BPM 粘结接触,成功构建肥料颗粒受潮结块模型。待粘结稳定后单个肥料块内包含 8 474 个粘结键,粘结充分。

根据正交试验设计原理,采用 3 因素 3 水平试验方案进行 9 次仿真试验,对影响肥料块破碎率的因素进行方差分析,仿真试验结果表明:影响肥料块破碎率的因素由大到小依次为辊轮间距、辊轮转速、辊轮齿数。最优作业参数为辊轮间距 6 mm、辊轮转速 150 mm、辊轮齿数 60 个。

根据正交试验得到的最优工作参数进行仿真试验,破碎率为 98.8%。经过台架试验验证,肥料块破碎装置在最优工作参数下破碎率为 94.4%,证明该工作参数的优化方法对改进 2BF-02 型全膜双垄沟扎穴施肥机肥料块破碎装置具有一定可行性。

### 参考文献:

- [1] 戴飞,赵武云,张锋伟,等.西北旱区玉米全膜双垄沟机械化播种技术与装备研究进展[J].中国农机化学报,2016,36(8):217-222.
- [2] 杨杰,赵武云,戴飞.旱地全膜双垄沟玉米精量播种机的设计与试验[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):262-268.
- [3] 赵武云,戴飞,杨杰,等.玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(11):

91-97.

- [4] 戴飞,赵武云,马明义,等.双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J].农业机械学报,2016,47(1):83-90.
- [5] 王松林.全膜双垄沟气推直插式玉米精密穴播机的研究与设计[D].兰州:甘肃农业大学,2015.
- [6] 郭笑欢,戴飞,赵武云,等.全膜双垄沟废膜捡拾打捆机的设计[J].中国农机化学报,2016,37(9):32-36.
- [7] 史增录,赵武云,马海军,等.全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机的研制[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):169-174.
- [8] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [9] 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.
- [10] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等.基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,34(7):36-42.
- [11] 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等.茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J].农业机械学报,2016,47(5):77-82.
- [12] 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.
- [13] 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(1):27-30.
- [14] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8):1329-1364.
- [15] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(7):997-1010.
- [16] DEM-Solutions. EDEM 2.7 User Guide[M]. Edinburgh, UK: DEM-Solutions, 2015.
- [17] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立