

基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟*

廖庆喜 张朋玲 廖宜涛 余佳佳 曹秀英

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 建立了离心式排种器的离散元仿真模型,对离心式排种器工作过程中油菜籽的运动过程进行了仿真分析,确定了油菜籽的运动规律并研究了内锥筒中种量与临界转速的关系、排种器转速与总排量的关系。仿真结果表明:随着内锥筒中的种子质量增多,临界转速呈递减趋势,而随着转速的增加,总排量呈增加趋势。仿真与台架试验验证结果一致,表明采用离散元法分析离心式排种器性能是可行的。

关键词: 离心式排种器 EDEM 数值模拟

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0109-06

引言

离心式排种器属于机械式排种器的一种,具有构造简单、质量轻、排种均匀性好等优点^[1]。目前国内外研究较多的为大粒径种子或化肥的撒播器或条播机,多在排种器中装有导向叶片等辅助装置,种子、肥料用量大,所以这类排种器不适合油菜等质量轻、体积小、播量小的小粒径种子的播种^[2-7]。现阶段关于离心式排种器播种小粒径种子尤其是油菜籽方面的研究较少,廖庆喜等设计了一种一器多行离心式油菜排种器,经田间试验表明,能够满足油菜种植农艺要求^[8]。

离心式排种器排种过程中油菜籽的运动状态直接影排种器的工作性能,研究排种过程中油菜的运动规律,在此基础上寻找排种器的最佳运动参数,可以达到提高工作性能的目的。油菜籽表面光滑、流动性好,其形状一般为球形或椭球形,因此油菜籽可看作是散粒体。离散元法(Discrete element method, DEM)是一种处理非连续介质问题的数值模拟方法,其理论基础是结合不同本构关系的牛顿第二定律,采用动态松弛法求解方程^[9]。20世纪90年代后,一些学者开始应用该方法研究散粒物料与农机工作部件的相互作用及散粒农业物料的流动问题^[10]。van Liedekerke等提出使用离散单元法建立从颗粒流出容器到分别落于水平和倾斜旋转圆盘上的模型,并通过试验验证了该模型,模型结果与试验结果无论定性还是定量都较吻合^[11]。Sakaguchi等

建立了稻谷和糙米的振动分离二维离散元模型,分别使用数值模型和相同条件下的试验对稻谷和糙米的振动分离进行研究,并对比了两者的结果^[12]。

本文运用离散元仿真软件分析离心式油菜排种器工作过程中油菜籽的运动规律,同时对影响排种性能的相关因素进行仿真分析,并进行试验验证。

1 离心式油菜排种器离散元模型

1.1 排种器模型

离心式油菜排种器使用12V直流电动机提供动力依靠离心力实现一器多行排种,排量可调^[13]。排种器的整体结构如图1所示。工作时,油菜籽由种箱经进种口均匀连续地流入内锥筒,驱动轴带动内锥筒旋转,内锥筒中的油菜籽在离心力、重力、内锥筒支持力和种群作用力等综合作用下沿内锥筒壁上升至由盖板控制的高度,经位于盖板下方外锥筒筒壁上的出种孔排出。为便于仿真分析,将油菜籽运动过程中与接触无关的部件去掉。简化后添加油菜籽颗粒模型的效果如图2所示。其中进种口直径为10mm、内锥筒倾角为45°、出种孔的直径为3.2mm、外锥筒顶端内径为184mm、出种管口直径为20mm。

1.2 油菜籽粒模型

农作物种子因流动特性不同分为散粒体和次散粒体,油菜籽表面光滑、流动性好,且形状一般为球形或椭球形,可定义为球形散粒体。油菜籽属于生物材料,个体间物理机械特性呈各向异性,统计上在

收稿日期: 2013-01-13 修回日期: 2013-03-18

* 国家自然科学基金资助项目(51275197)、国家油菜产业技术体系专项资助项目(CARS-13)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAD01B06)和中央高校基本科研业务费资助项目(2011PY021)

作者简介: 廖庆喜,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

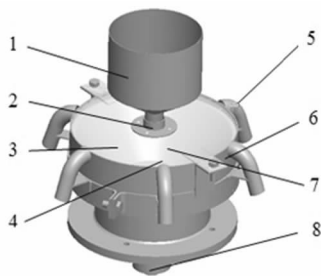


图1 排种器三维模型

Fig.1 3-D model of centrifugal metering device

1. 种箱 2. 进种口 3. 盖板 4. 清种刷 5. 出种管 6. 外锥筒 7. 内锥筒 8. 驱动轴

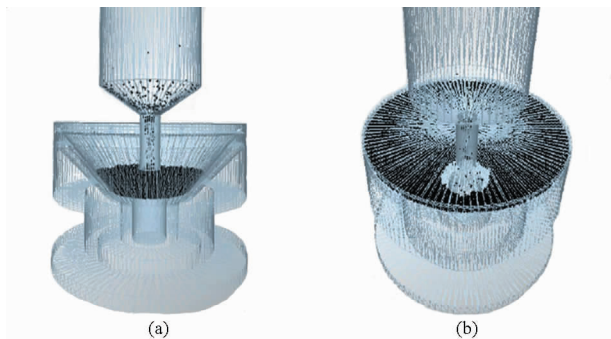


图2 EDEM 中的排种器模型

Fig.2 EDEM model of centrifugal metering device

(a) 充种过程 (b) 排种过程

特定范围内呈正态分布^[14-16]。在仿真模型中将颗粒简化为硬球模型,设置其直径为 2 mm,千粒质量为 4 g,泊松比为 0.25,剪切模量为 1.1×10^7 Pa,密度为 680 kg/m^3 ^[17]。

1.3 接触模型

常用的接触模型有以下 6 种:Hertz - Mindlin 无滑动接触模型、Hertz - Mindlin 黏结接触模型、线性黏附接触模型、运动表面接触模型、线弹性接触模型和摩擦带电接触模型^[18]。由于油菜种子近似球形,颗粒表面没有粘附力,所以选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型作为籽粒与籽粒之间及籽粒与排种器之间的接触模型。籽粒与籽粒以及籽粒与排种器的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数分别为 0.6、0.5、0.01、0.6、0.3、0.01^[19]。

离散单元法假设在一个计算时步内,颗粒受到的力不变,即加速度不变^[20]。如果时间步长选得过大,有可能发生计算错误;如果步长选得过小,又会增加计算机的计算量,导致仿真时间过长^[21],因此选取合适的时间步长非常重要。本模型采用瑞利波法确定时间步长为 $5 \times 10^{-4} \Delta t$ 。

2 仿真

2.1 油菜籽运动过程

设定内锥筒转速为 140 r/min,添加籽粒数量为

15 000 粒,运动时间为 5 s(其中前 1 s 为充种时间,1 s 后内锥筒开始旋转)。籽粒生成后对 15 000 个籽粒进行编号,并选取从出种孔甩出的若干粒种子进行标记,得到整个运动过程中速度及位移随时间变化的关系曲线。

2.2 内锥筒中种量与临界转速关系

临界转速是离心式排种器的重要性能参数之一,若排种轴转速低于临界转速则不能出种,严重影响排种性能。为研究内锥筒中种量对临界转速的影响,分析了内锥筒中加入不同质量的种子时,排种器临界转速的变化。

仿真时,在排种器模型中分别添加籽粒 5 000、15 000、25 000 和 35 000 粒,通过千粒质量换算成质量为 20、60、100 和 140 g,仿真时间为 5 s(前 1 s 为充种时间,1 s 后内锥筒开始旋转)。

2.3 排种器转速与总排种量关系

油菜直播播量为 $2\,500 \sim 3\,750 \text{ g/hm}^2$ ^[22],播量若偏大可能造成幼苗争肥争水,形成高脚苗、弱苗;若偏小,可能形成缺苗,两种情况都会影响油菜产量。为研究内锥筒转速对排种器总排量的影响,分析了不同内锥筒转速下,排种器总排量的变化。

在排种器模型中,添加 15 000 个籽粒(60 g),每次仿真时间为 6 s(前 1 s 为充种时间,1 s 后内锥筒开始旋转)。分别设置内锥筒转速为 130、140、150、160、170、180 和 190 r/min,每次仿真结束后在各个出种孔处设置网格单元组,计算各个出种孔落下的籽粒个数。

3 试验验证

在华中农业大学工学院离心式排种器试验台上进行验证试验,试验台主要由排种部件和机架组成。以华杂 4 号油菜籽为试验材料,试验设备主要有电子天平(称量范围 0 ~ 200 g,精度 0.01 g)、12 V 电瓶、转速控制器、数字式高精度测速仪、秒表、直流电动机(调速范围 0 ~ 200 r/min)。仿真所用软件为 EDEM 2.4 版本。

3.1 内锥筒中的种量与临界转速关系试验

种量与临界转速关系验证试验时内锥筒中依次加入 20、60、100 和 140 g 油菜籽,通过测速仪测出排种器出种管开始有种子排出时内锥筒的转速,每组试验重复 4 次取平均值。

3.2 转速与总排种量关系

总排种量与转速关系验证试验时种箱中加入 60 g 油菜籽,设置内锥筒转速为 130、140、150、160、170、180 和 190 r/min,测 2 min 内每个速度下所有出种孔的总排种量,每组试验重复 4 次并取平均值。

4 结果与分析

4.1 油菜籽运动过程仿真

仿真计算过程中,可以将每个籽粒的运动以流线型显示,用不同的颜色表示不同的运动速度,这样从速度流分布图中可以清晰地看到每个籽粒的运动轨迹。图 3 为模拟排种器工作过程中速度流的分布图,图中的 2 条流线表示排出的 2 颗油菜籽的运动轨迹。由图 3 可以看出,当排种器稳定工作时,内锥筒中油菜籽的速度从内锥筒底部到顶部逐渐增加,在内锥筒上边沿的油菜籽速度反而有所降低。油菜籽从种箱中掉入内锥筒中,受重力加速度作用,速度在到达内锥筒底部时达到最大,与内锥筒碰撞后速度减小。在内锥筒中受到摩擦力、重力、支持力和种群的综合作用,随内锥筒转动,并沿内锥筒内壁上升,油菜籽到达内锥筒上边沿后,在其他油菜籽的相互碰撞、锥筒盖板摩擦力、外锥筒内壁摩擦力和内锥筒摩擦力等的作用下,速度降低。

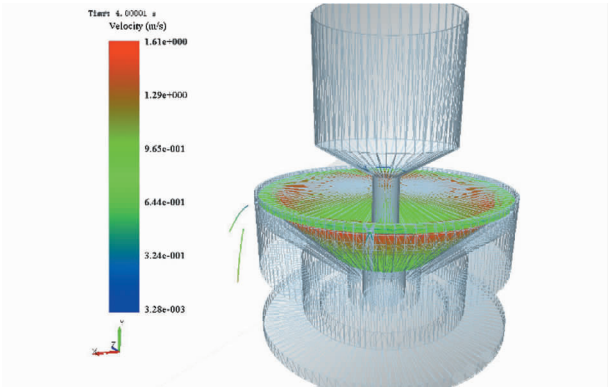


图 3 排种器工作时油菜籽运动仿真

Fig. 3 Dynamic simulation of rapeseeds during working process of metering device

图 4 为全部油菜籽的平均速度、平均位移与时间的关系曲线。以 1 s 为界,前后两段的速度、位移曲线有明显的差异。1 s 前为充种过程,油菜籽颗粒于种箱中生成并在重力作用下落入排种器内锥筒底部,在底部逐渐堆积。1 s 后为排种过程,油菜籽在离心力的作用下沿内锥筒壁上升,平均速度和位移逐渐增大;2.6 s 后速度和位移的增幅明显变小。

在排出的油菜籽籽粒中任选 2 颗,其编号为 1 986 和 7 562,研究其速度、位移与时间的关系。图 5 为编号 1 986 的油菜籽速度、位移与时间的关系曲线。由图 5 可以看出,编号 1 986 的油菜籽于 0.2 s 左右生成,并从种箱开始下落进入内锥筒,1 s 时内锥筒开始旋转,油菜籽速度不断增加,并于 1.5 s 左右达到最高,此刻油菜籽到达内锥筒上边沿,此后在其他油菜籽的相互碰撞及锥筒盖板的摩

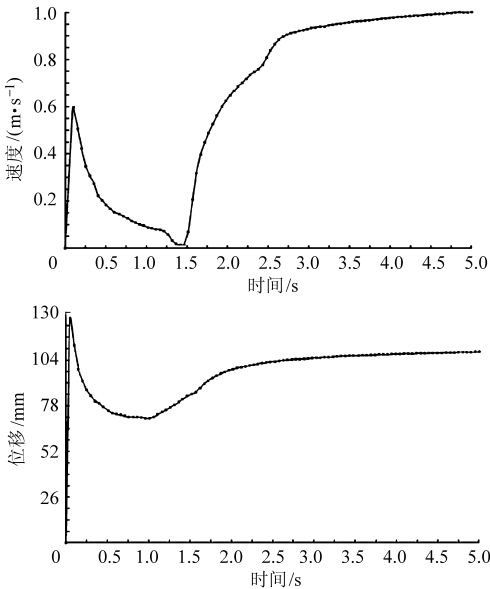


图 4 全部油菜籽平均速度和平均位移与时间的关系曲线

Fig. 4 Relation curve of average velocity and average displacement of all rapeseeds with time

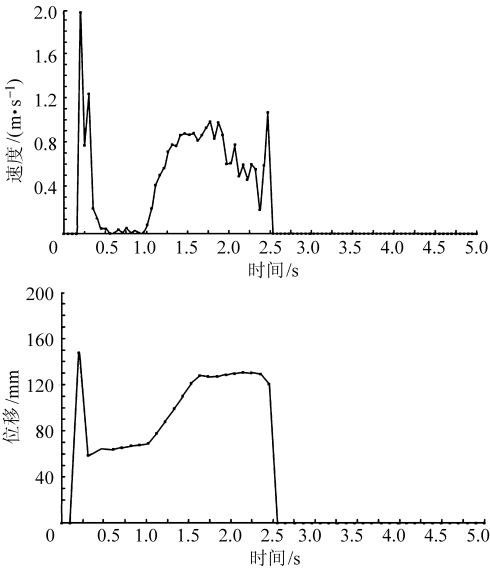


图 5 油菜籽(编号 1 986)速度、位移与时间的关系曲线
Fig. 5 Relation between velocity, displacement and time (No. 1 986)

擦力作用下,速度上下起伏,波动较大;2.3 s 后该油菜籽从出种孔中排出,之后只受重力作用,匀加速下落,并于 2.5 s 之后飞出模型边界。由油菜籽位移-时间关系可以看出,1 s 后内锥筒开始旋转,位移一直处在上升状态,以 2.3 s 为分界点,前后两段运动位移有较明显的差异,由此可推断油菜籽于 2.3 s 左右从出种孔中排出。图 6 为编号 7 562 的油菜籽速度、位移与时间的关系。可以看到,该油菜籽速度与编号为 1 986 的油菜籽在速度、位移随时间变化趋势上基本一致,由于从出种孔排出的顺序不同,时间上有所滞后。

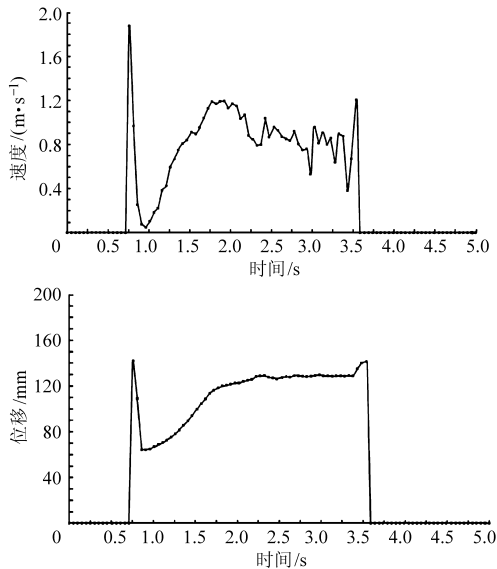


图 6 油菜籽 (编号 7 562) 速度、位移与时间的关系曲线

Fig.6 Relation between velocity, displacement and time (No. 7 562)

4.2 种量与临界转速关系

从模型仿真过程可知,转速达到临界转速的判断标准为:有少量油菜籽开始到达内锥筒上部,受到其他油菜籽的碰撞、锥筒盖板及与锥筒内壁摩擦力的作用下速度减小,此时颗粒颜色显示为绿色。仿真中添加颗粒质量为 20 g 时,临界转速为 128 r/min,同理当颗粒质量分别为 60、100 和 140 g 时临界转速分别为 120、115 和 111 r/min,结果如图 7 所示。图 8 为内锥筒中种量分别为 20、60、100 和 140 g,在 5 s 时处于临界转速状态下油菜籽的运动状态图。

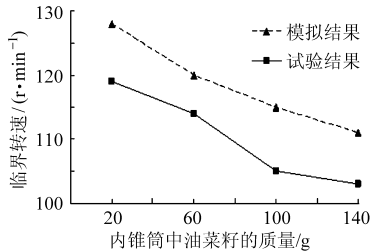


图 7 种量与临界转速的关系曲线

Fig.7 Relationship between seed weight inside device and critical speed

通过验证试验可以得出,随着内锥筒中种子质量增多,临界转速呈递减趋势(图 7)。内锥筒中种量较多时,种子层较高,油菜籽所在位置的内锥筒半径较大,种子更接近出种孔,只需较小的速度就能沿着内锥筒上升到达出种孔,因此临界转速较小。

对比图 7 仿真结果和试验结果两条曲线,可以看出两者规律基本一致,都是随着排种器内种量的增大而临界转速变小,经计算得出两条曲线的相关系数为 0.97,说明利用离散元软件对离心式排种器进行数值模拟是可行的。

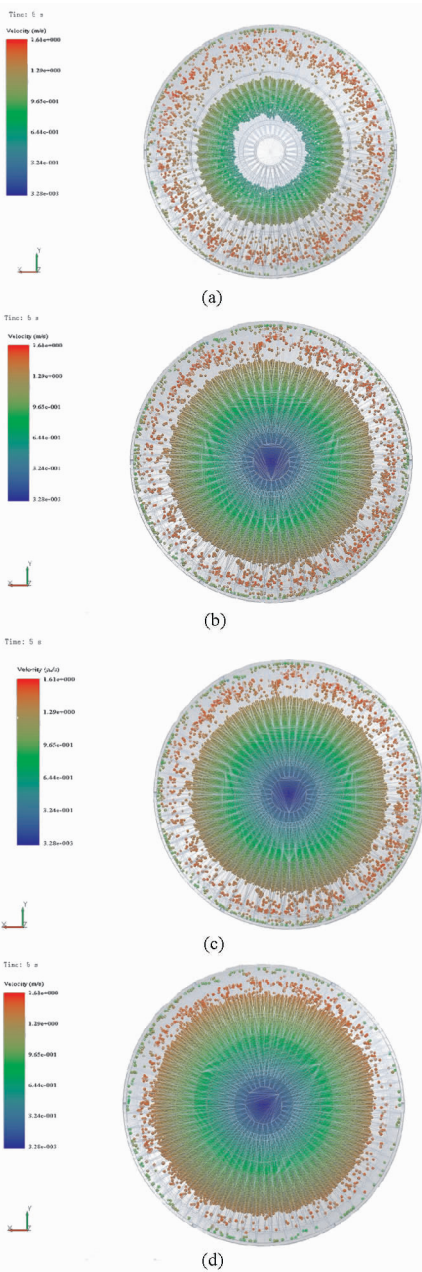


图 8 不同种量下临界转速的状态图

Fig.8 State graph of critical speed under different seeds weight inside device
(a) 20 g (b) 60 g (c) 100 g (d) 140 g

4.3 转速与总排种量关系

图 9 为转速 130 r/min 时,各个出种孔仿真结束后每个网格单元组显示的出种数目。

将转速与总排种量关系仿真结果中 6 s 内排出的颗粒数换算成 2 min 内的排种量,结果如图 10 所示。从图中可以看出,随着转速的增加排种量也越来越大,当转速为 180 r/min 时,达到最大。当转速为 190 r/min 时,排种量有所降低。因为转速过高时,颗粒还没有充入出种孔中就随着高速旋转的颗粒群运动过去,错过出种孔的位置,油菜籽进入出种孔的几率下降,排出颗粒数有所减低。

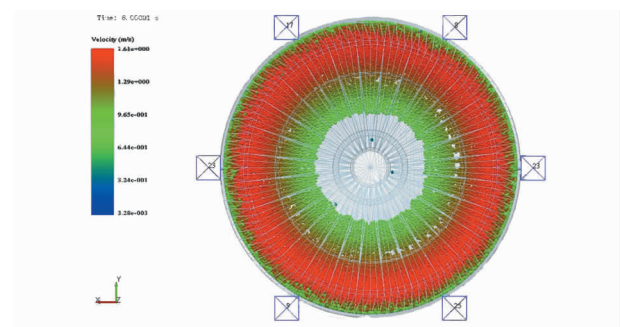


图 9 转速 130 r/min 时的排种量

Fig.9 A piece row of seeding quantity at speed of 130 r/min

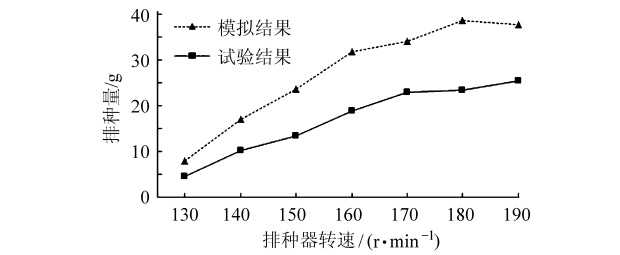


图 10 转速与总排量的关系

Fig. 10 Relationship between rotational speed and

从转速与总排种量关系的验证试验也可得出，在内锥筒转速为 130 ~ 190 r/min 时，排种器总排量随速度增加呈增加趋势(图 10)。仿真结果和验证

试验结果两组数据得出相关系数为 0.99,由此可以得出两者变化较一致,在 130 ~ 170 r/min 时都是随着排种器的转速的增大总排种量也增大,在 170 ~ 190 r/min 时总排量变化趋势较平缓。

5 结论

(1)以离心式排种器为研究对象,采用 Pro/E 和 EDEM 软件分别建立了离心式排种器的三维模型及仿真模型。研究了排种器内锥筒中油菜籽质量对临界转速的影响及排种器内锥筒的转速对总排种量的影响。

(2)模拟得出了油菜籽平均速度和平均位移的曲线图,并阐明了模拟过程中单个颗粒速度、位移随时间的变化关系。

(3)对比内锥筒中种量与临界转速关系的仿真结果和试验结果,得出二者变化基本一致,数值比较相近,均随着内锥筒中种量的增大而临界速度变小。排种器总排种量与转速关系的仿真结果和试验结果也表明两者变化规律一致,得出在排种器转速为 130 ~ 170 r/min 时,排种器的总排种量随转速的增加也呈增加趋势。由此证明了采用离散元法分析排种器性能的正确性和可行性。

参 考 文 献

- 1 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- 2 翁卫国,李建庄. 离心排种器试验研究[J]. 农业机械学报,1991,22(2):28-34.
Weng Weiguo, Li Jianzhuang. Study on centrifugal seed feeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(2):28-34. (in Chinese)
- 3 李飞雄. 对离心式排种器设计参数的探讨[J]. 农业机械学报,1964,7(1):38-48.
Li Feixiong. An investigation on the design parameters of the centrifugal seed feeding apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964, 7(1):38-48. (in Chinese)
- 4 秦军伟,张晓辉,姜忠爱. 探讨集中式排种器的排种机理及其发展[J]. 农业装备技术,2004,30(4):22-23.
Qin Junwei, Zhang Xiaohui, Jiang Zhongai. Research of seeding principles of centralized type seedmeters and its development[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2004, 30(4):22-23. (in Chinese)
- 5 Reumers J, Tijskens E, Ramon H. Experimental characterization of the cylindrical distribution pattern of centrifugal fertiliser spreaders; towards an alternative for spreading hall measurements[J]. Biosystems Engineering 2003, 86(4):431-439.
- 6 魏文军. 离心式种、肥撒播器:中国,92236774.4[P]. 1993-06-30.
- 7 万立明. 离心式精播机:中国, CN 101433143 A[P]. 2009-05-20.
- 8 张宁. 离心集排式油菜精量排种器的设计及试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
Zhang Ning. Design and experiment research on centralized centrifugal precision metering device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 9 李洪昌,李耀明,唐忠. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5):117-121.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):117-121. (in Chinese)
- 10 李红. 精密排种器的数字化设计与工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2004.
Li Hong. Digital design and simulation analysis of working process for the precision seed-metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- 11 van Liedekerke P, Tijskens E, Dintwa E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3):348-360.
- 12 Sakaguchi E, Suzuki M, Favier J F, et al. Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using the discrete element method[J]. Postharvest Technology, 2001, 79(3):307-315.

13 廖庆喜,张宁,张朋玲. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):48-51,95.
Liao Qingxi,Zhang Ning,Zhang Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):48-51,95. (in Chinese)

14 周祖锬. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1994.

15 吴福通. 正负气压组合式油菜籽精量直播排种器的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2007.
Wu Futong. Research on positive and negative pressure combination precision metering device for rape seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2007. (in Chinese)

16 黄吉星. 集中型槽孔轮式油菜精量排种器设计及其破碎率试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2010.
Huang Jixing. Design on centralized slot wheeled preeision metering devicee for rapeseed and experiment on its damaged rate[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2010. (in Chinese)

17 李诗龙. 油菜籽的物理特性浅析[J]. 中国油脂,2005,30(2):17-20.
Li Shilong. Simple analysis of physical property of rapeseed[J]. China Oils and Fats,2005,30(2):17-20. (in Chinese)

18 周韩. 超级稻精密播种机离散元分析与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
Zhou Han. Discrete element analysis and experimental study of precision seeder for super rice[D]. Zhenjiang:Jiangsu University, 2011. (in Chinese)

19 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,2010.

20 王国强,郝万军,王继新,等. 离散元法及其在 EDEM 中的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

21 田秋娟. 基于离散元方法的大型球磨机工作性能研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
Tian Qiujuan. Study on the working performances of large tumbling ball mill based on the discrete element method [D]. Changchun:Jilin University,2011. (in Chinese)

22 孙成和. 油菜机械化直播技术要点[J]. 农机科技推广,2011(2):53-54.

Numerical Simulation on Seeding Performance of Centrifugal
Rape-seed Metering Device Based on EDEM

Liao Qingxi Zhang Pengling Liao Yitao Yu Jiajia Cao Xiuying
(College of Engineering , Huazhong Agricultural University , Wuhan 430070 , China)

Abstract: The discrete element method (DEM) simulation model of centrifugal metering device was established, and the simulation analysis was conducted on the motion processes of rapeseeds during the centrifugal metering device working. The law of rapeseeds movement was determined, and the relationships between rapeseeds weight inside the cone and critical speed, rotational speed and seeding quantity were also studied, respectively. The simulation results showed that with the increase of rapeseeds weight in the cone, the critical speed had a decreasing trend, and the seeding quantity had an increasing trend with the increase of rotational speed. The simulation results were consistent with the test results. It showed that using DEM to analyze the performance of the centrifugal metering device was feasible.

Key words: Centrifugal metering device EDEM Numerical simulation