doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006

基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验

韩丹丹　张东兴　杨　丽　崔　涛　丁友强　卞晓慧
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对内充气吹式排种器对圆形种子适应性差、排种效果不佳的问题，对内充气吹式排种器进行优化设计，为增强种子充填容积和气流压附力在型孔底部开设不同结构的槽孔。基于离散单元法理论建立玉米籽粒粘结颗粒模型，运用 EDEM - CFD 耦合分析方法，以型孔内种子在排种盘转动过程中所受的曳力值为指标，在入口风速为 30 m/s、前进速度为 8 km/h 的工作条件下对 3 种不同型孔结构排种盘进行圆粒种子排种效果的耦合仿真，分析排种过程中圆粒种子所受曳力的变化情况及清种和压种性能。仿真结果表明：同一排种盘中，因大圆粒种子迎风面积大于小圆粒种子，所受曳力均大于小圆粒，迎风面积大的颗粒更易被清出型孔；径向内开方孔盘型孔内气流对颗粒的曳力及压附力均较大，且增大了型孔对种子在径向方向的充填容积，该盘对圆粒种子及混合种子的工作效果均较好。为验证仿真结果进行台架试验，当前进速度为 8 km/h 时进行 3 种排种盘工作压强的单因素试验，结果表明，径向内开方孔盘合格率随工作压强的增大而增大，当工作压强大于 5.5 kPa 时，合格率超过 95%，明显优于其他 2 个排种盘；对径向内开方孔盘进行前进速度为 4 ~ 12 km/h、工作压强为 4 ~ 8 kPa 的双因素试验，结果表明，合格率随着前进速度和工作压强的增大而增大，针对不同前进速度，当工作压强高于 6 kPa 时，合格率接近 96%，漏播率低于 1%。

关键词：精量排种器；内充气吹式；离散单元法；EDEM - CFD；结构优化
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2017)11-0043-09

Optimization and Experiment of Inside-filling Air-blowing Seed Metering Device Based on EDEM - CFD

HAN Dandan　ZHANG Dongxing　YANG Li　CUI Tao　DING Youqiang　BIAN Xiaohui
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: According to the present situation of the sowing effect of original inside-filling air-blowing seed metering device for flat seeds is better than circles, the phenomenon of drag force greatly affects the cleaning and pressing effect was found through the force analysis of seed in cleaning and pressing process for optimization the sowing effect of circle and mixed seeds. For analyzing the changing of drag force of different seed metering discs in the process of working under the same operational parameter, the bonded particle model was used to model maize based on theory of discrete element method, the coupling analysis method of EDEM - CFD was applied to couple simulation circle seeds with three different hole structures of seed metering discs. The value of drag force of seed in the hole during rotation of seed metering disc was taken as indicator, the changing situation of drag force of seed was analyzed under the operational parameter of inlet air velocity was 30 m/s and forward speed was 8 km/h with different seed metering discs. Simulation results showed that the drag force of big circle seed was larger than that of small circle due to different particle windward areas in the same type seed metering disc under the same working conditions. In other words, large granular seeds were more likely to be cleaned out of holes. Based on cleaning and pressing performance analysis of different seed discs, the drag force and pressing force in the hole of seed disc with block slot were both larger. And due to the volume of seed filling in the holes was

收稿日期：2017 - 03 - 20　修回日期：2017 - 05 - 03
基金项目：国家自然科学基金项目(51375483、51575515)、现代农业产业技术体系建设项目(21226003)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目
作者简介：韩丹丹(1988—)，女，博士生，主要从事农业机械装备与计算机测控研究，E-mail：handd@cau.edu.cn
通信作者：崔涛(1985—)，男，副教授，主要从事农业机械装备与计算机测控研究，E-mail：cuitao850919@163.com

increased compared with other discs, the effect of seed disc with block slot sowing circle and mixed seeds were both better through simulation. The single factor test of working pressure was carried out when forward speed of the different seed discs was 8 km/h, experimental results showed that the qualified rate of seed disc with block slot was increased gradually with the increase of working pressure, which was better than the other two. The full factorial experiments were conducted on the seed disc with block slot forward speed of 4 ~ 12 km/h and working pressure of 4 ~ 8 kPa, experimental results showed that the qualified rate was increased gradually with the increase of forward speed and working pressure, the qualified rate was close to 96% and leakage rate was less than 1% when working pressure was above 6 kPa.

Key words: precision seed metering device; inside-filling air-blowing; discrete element method; EDEM – CFD; structure optimization

引言

内充气吹式排种器采用内充种、组合气嘴高速气流清种的工作原理,具有结构简单、排种均匀、伤种率低的优点。由于采用半盘圆锥孔结构排种盘,在播扁粒玉米种子时效果优于圆粒,崔涛等[1]已分析造成该现象的原因,本文针对这一问题对该排种器进行优化设计。

内充气吹式排种器利用高速气流清种、气压差压种的原理实现单粒化,整个排种器工作空间中同时有流场和颗粒体的运动变化,且两者之间相互影响。因此,需要采用流体仿真、颗粒体仿真以及流场与颗粒双向耦合的方法来进行仿真分析[2]。计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析,通过这种数值分析,可以得到流场内各个位置上基本物理量的分布以及这些物理量随时间的变化情况,该方法对机械结构的研究已成功应用于各个领域[3-4]。离散单元法(Discrete element method, DEM)是 CUNDALL 和 STRACK 于 1979 年提出的基于分子动力学原理研究非连续性颗粒物质结构和运动规律的一种分析方法,该方法基于软球模型,根据颗粒间重叠量来计算接触力,并依次更新每个颗粒的速度和位置,进而确定性地演化整个颗粒系统,具体求解过程采用显示解法的动力学问题求解或动态松弛法的静力学问题求解[5-6]。离散单元法与计算流体动力学的耦合方法已成功应用于气力输送[7]、气流清选[8]和流化床[9-10]等方面的研究。

目前,单一使用离散单元法进行排种器仿真的研究比较广泛[12]。史嵩等[11-12]基于气压组合孔式排种器,采用 EDEM 软件对不同结构排种盘对充种性能的影响进行了模拟,结合试验验证并确定了最佳排种盘结构;赖庆辉等[13-14]采用离散单元法分别对气吸滚筒式和气吸圆盘式排种器关键参数进行数值模拟,并验证了试验效果与仿真结果的一致性;王金武等[15-16]对指夹式玉米精量排种器进行改进设计,并采用 EDEM 软件对排种过程中造成不同尺寸等级籽粒重播、漏播的原因进行分析,试验验证结果与仿真基本相同;鹿芳媛等[17]基于离散元法对 V-T 型振盘在不同振动频率下进行模拟,试验结果表明采用离散单元法模拟该装置的匀种过程具有较高的准确性;雷小龙等[18]采用 EDEM-CFD 耦合仿真方法,研究种子在油麦兼用气送式集排器输种管道中的迁移规律,并通过台架试验验证了输种管道结构对排种性能的影响;文献[19-22]采用离散元法对其他农业机械机构进行了仿真优化设计。

离散单元法已成功应用于农业机械领域的各个行业,而离散单元法与计算流体动力学耦合的分析方法在农业机械领域鲜有报道。本文以设计的内充气吹式排种器为研究载体,借助工程离散元仿真软件(Engineering discrete element method, EDEM)及 CFD 流体仿真软件 FLUENT,进行不同排种盘时玉米籽粒工作效果的分析,通过颗粒-气流耦合仿真及台架试验,探寻不同型孔结构排种盘对玉米圆粒种子及混合种子播种效果的影响。

1 排种器结构与工作原理

1.1 排种器结构

在内充气吹式排种器原有结构的基础上进行改进[1]。改变底壳结构使其在播种机上便于固定;将挡种板改为栅格挡板便于气流通过使种子顺利排出;将气嘴由软管改为 3D 打印以便于固定并有利于气流流通均匀,改进后的结构如图 1 所示,排种器工作过程分为充种、清种-压种、护种和投种。排种器工作时,高速气流充满清种区并流向充种区,种子在自身重力、离心力及气流扰动的共同作用下脱离种群并充填进入型孔,随排种盘转动至清种区,在高速气流的作用下完成清种和压附过程。该排种器结构简单,充种及清种效果较好。

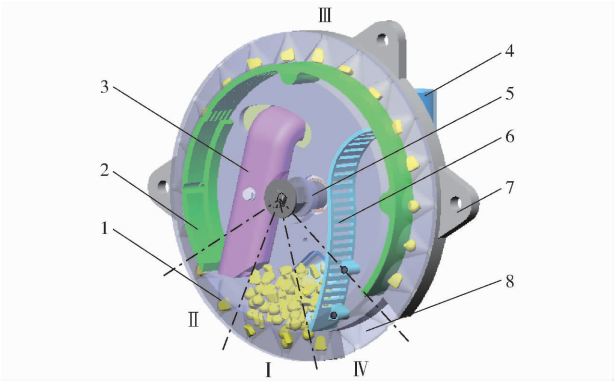


图 1　内充气吹式排种器结构模型

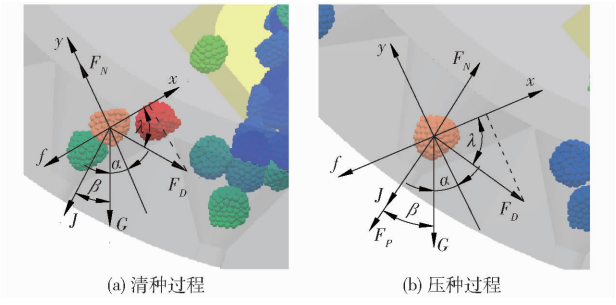
Fig. 1　Structure model of inside-filling air-blowing seed metering device

1. 排种盘　2. 护种板　3. 组合气嘴　4. 进种口　5. 传动轴　6. 挡种板　7. 排种器底壳　8. 投种口　Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 清种-压种区　Ⅲ. 护种区　Ⅳ. 投种区

1.2　工作原理

1.2.1　清种过程

内充气吹式排种器在充种过程完成后，种子随排种盘做匀速圆周运动转至清种区，清种气嘴完成清种过程后，压种气嘴将种子压附在型孔底部并随排种盘转动至护种区。在清种瞬间，将被清出的种子受力情况如图 2a 所示。



(a) 清种过程　　(b) 压种过程

图 2　种子受力分析

Fig. 2　Force analyses of seed

内充气吹式排种器工作过程中，流体与固体颗粒之间有相对运动，当颗粒受到高速气流的作用时，颗粒与流体之间将产生相互作用力，即发生动量传递，速度低的颗粒对速度高的流体有阻力，速度高的流体则对速度低的颗粒有曳力[23]，曳力与颗粒相对运动方向相反。当颗粒受到足够大的曳力时，将被清出型孔外，种子被清出型孔的瞬间，有

$$F_D\cos\lambda \geqslant f + G\sin\alpha + J\sin(\alpha+\beta) \tag{1}$$

$$F_D = \frac{1}{2}\rho_g A C_D |v_g - v_p|(v_g - v_p) \tag{2}$$

式中　F_D——种子受到的曳力，N

f——种子受到的滚动摩擦力，N

G——种子重力，N

J——种子离心力，N

α——型孔右边缘与水平方向的夹角，(°)

β——型孔中心轴线与排种盘竖直方向的夹角，(°)

λ——曳力与型孔右边缘线的夹角，(°)

ρ_g——气体密度，kg/m^3

v_g——气体速度，m/s

v_p——颗粒速度，m/s

A——颗粒的迎风面积，m^2

C_D——曳力系数

由式(1)可知，当种子颗粒所受来自流体的曳力能够克服自身的重力、摩擦力、离心力等作用力的合力时，种子才有可能被清出型孔外。

1.2.2　压附过程

清种过程结束后，种子随排种盘转动至压种区，此时，种子受力情况如图 2b 所示，种子被压附在型孔底部时受力为

$$F_D\cos\lambda + F_N\sin(\alpha+\beta) \leqslant f + G\sin\alpha + (J + F_P)\sin(\alpha+\beta) \tag{3}$$

式中　F_N——型孔壁面对种子的支持力，N

F_P——种子受到的压力梯度力，N

由此可知，在压附过程中，种子所受的压力梯度力、离心力、摩擦力及重力的合力需克服气流对种子颗粒的曳力才能使种子被压附在型孔底部。

综合清种及压种过程分析可知，气流对种子颗粒的曳力作用有助于清种而不利于压种；种子在不同结构型孔内将受到不同的压力梯度力，该力有利于种子在型孔底部的压附作用。本文采用 EDEM－CFD 耦合仿真的方法，通过提取排种器工作过程中种子在型孔内所受曳力及压力梯度力的变化，以此分析在相同工作参数条件下，不同型孔结构排种盘对种子形成的不同清种及压附效果。

2　仿真材料与方法

2.1　颗粒建模

玉米种子根据外形差异可大体分为扁粒和圆粒，仿真颗粒选用应用较为广泛的郑单 958 玉米种子作为建模对象，将种子分为大扁、小扁、大圆、小圆 4 类，在 Solidworks 中进行玉米籽粒的三维模型建立，并在 EDEM 软件中采用粘结颗粒模型(Bonded particle model，BPM)和 API 颗粒替换方法，得到仿真所需的玉米颗粒模型，如图 3 所示，图中从上到下依次为种子的实物图、三维模型图和颗粒粘结模型图。

2.2　几何建模

本文针对现有半盘圆锥孔结构排种盘播扁粒种子工作效果优于圆粒的现状，另设计 2 种不同型孔结构排种盘，以便与之前设计的排种盘进行对比，这

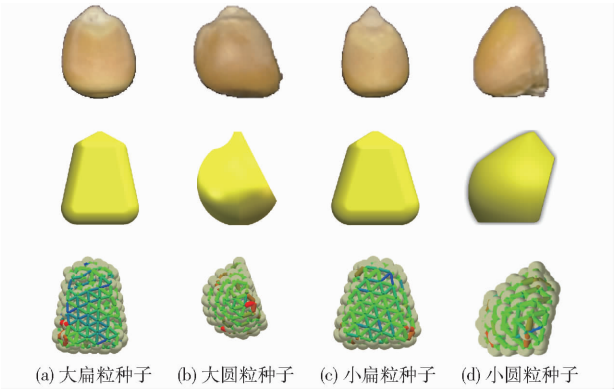


图 3 玉米籽粒仿真模型

Fig. 3 Simulation models of maize grain

3 种排种盘型孔基本结构参数相同[1]。A 盘为圆锥孔基准盘,B 盘、C 盘均以 A 盘为基础,在型孔底部开设不同结构的槽孔,达到增大泄气量的目的。开设槽孔时,既要避免种子卡在型孔内不易排出,又要保证合适的泄气量,经测量,扁粒种子最小宽度为 3.6 mm,型孔底孔半径为 3 mm,因此,在 A 盘的周向方向每个型孔间开宽度为 1 mm 的周向内开圆环盘为 B 盘,该盘增大了气流向型孔周向方向流动的能力,增大了型孔的泄气量;在 A 盘型孔径向方向开有宽度和深度分别为 2 mm 的径向内开方孔盘为 C 盘,该盘同时增大了种子在型孔径向方向的充填容积和型孔底部的开孔面积,增大了单个型孔的泄气量。3 种型孔结构如图 4 所示,图中从上到下依次为排种盘型孔的三维模型图、主视图和侧视图。

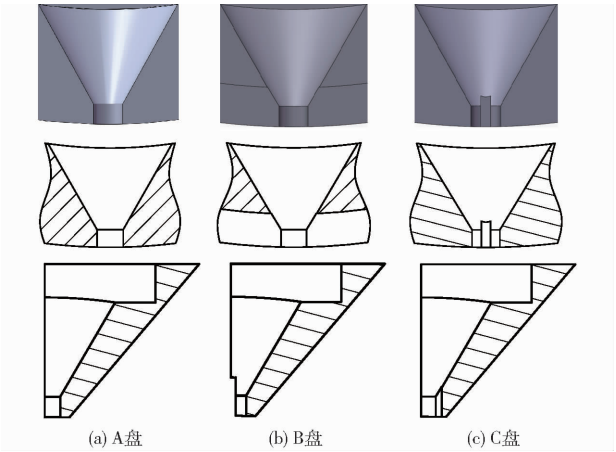


图 4 不同类型的型孔

Fig. 4 Different kinds of holes

将排种器模型简化为排种盘、底壳、组合气嘴、进种管、护种板和挡种板 6 部分并在 Solidworks 中进行几何建模,另存为 Step 格式文件导入 EDEM 中;流体区域网格划分采用滑移网格法(Moving mesh),通过该方法将型孔及各类槽孔划分为动区域,其余结构划分为静区域。内充气吹式排种器在 EDEM 和 CFD 中的仿真模型如图 5a、5b 所示,3 种排种盘型孔部分网格划分结果如图 5c ~ 5e 所示。

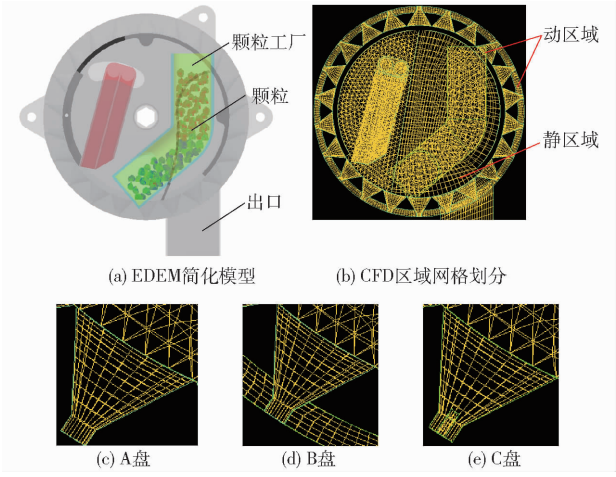


图 5 排种器简化模型及流体区域网格划分

Fig. 5 Simplified structures of seed metering device and CFD mesh region

2.3 仿真参数确定

根据排种器加工所用材料,设定排种盘为有机玻璃,其余部件材料均为铝合金。玉米颗粒、有机玻璃、铝合金的力学性能和相互之间的物理特性如表 1 所示[24]。

表 1 排种器模型参数

Tab. 1 Model parameters of seed-metering device

参数	玉米颗粒	有机玻璃	铝合金
泊松比	0.40	0.50	0.25
剪切模量/Pa	1.37×10^{8}	1.77×10^{8}	2.7×10^{10}
密度/(g·cm^{-3})	1.197	1.180	2.700
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.182	0.709	0.620
静摩擦因数(与颗粒)	0.033 8	0.459 0	0.342 0
动摩擦因数(与颗粒)	0.002 1	0.093 1	0.051 5

3 排种器优化仿真

在前期研究工作过程中,已确定仿真时该排种器最佳入口风速为 30 m/s,且 A 盘对扁粒种子播种效果较好,为更好优化其工作效果,在对 3 种排种盘进行耦合仿真时,对其设置相同的工作参数,如入口风速为 30 m/s,前进速度为 8 km/h。首先在颗粒工厂内生成 140 粒大圆粒和小圆粒种子,提取圆粒种子在工作过程中所受曳力的变化,以此分析相同工作参数条件下,3 种型孔结构对颗粒所受曳力的不同及对圆粒种子的工作效果;再按混合种子比例分别生成大扁粒种子 75 粒,小扁粒种子 30 粒,大圆粒种子 25 粒,小圆粒种子 10 粒,对 3 种盘进行混合种子工作效果的仿真分析。

3.1 充种性能分析

在相同工作参数条件下,充种极限速度可以作

为衡量排种器充种效果的一个重要因素。通过提取颗粒在 3 种排种盘充种过程中的充种极限速度，绘制如图 6 所示的变化趋势，发现充种极限速度变化较小，即不同排种盘的充种效果较为一致。

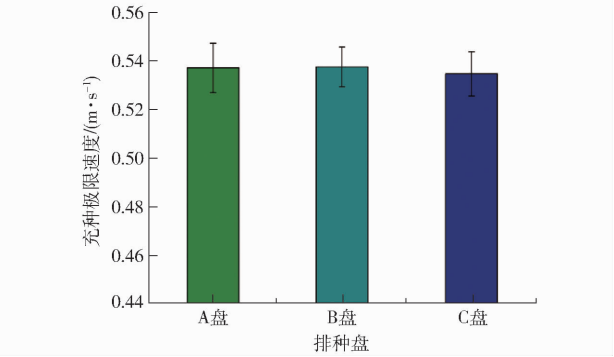


图 6　不同排种盘的充种极限速度

Fig. 6　Limiting velocity of filling with different seeding discs

3.2　清种性能分析

由于气流对种子颗粒的曳力极大地影响着清种及压附效果，而不同的型孔结构会影响气流对颗粒的作用力，即影响种子所受的曳力。因此，本文通过提取相同工作参数条件下，颗粒在不同结构型孔内所受的曳力，作为分析气流对颗粒在不同结构型孔内作用力不同的判别依据。

在分析气流对某个被标记颗粒所受曳力时，为避免其他颗粒运动对气流的扰动，曳力的提取从种子清种结束时刻开始，转过压种区，转至护种区结束，被标记颗粒的压附过程及速度变化如图 7 所示。

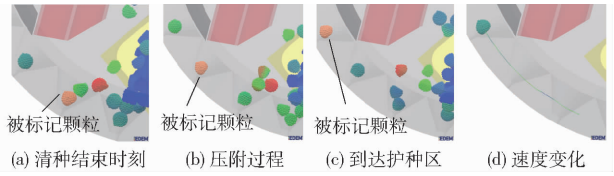


图 7　颗粒在型孔中的压附过程及速度变化

Fig. 7　Process of pressing when seed in hole and changing of velocity

由式(2)知，曳力是颗粒迎风面积、风速及颗粒速度的综合函数，考虑到曳力与颗粒迎风面积有关，本文首先从 A 盘的仿真过程中随机选取一颗大圆粒和小圆粒种子，输出其从清种结束时刻至护种区过程中颗粒受到的曳力及速度随时间的变化曲线，如图 8 所示。仿真选用的郑单 958 玉米杂交种在含水率 12.5% 时千粒质量约为 351 g，即单粒种子重力约为 0.003 4 N，大圆粒颗粒受到的曳力最大值(0.015 9 N，约为重力的 4.68 倍)大于小圆粒颗粒受到的曳力最大值(0.013 7 N)。

在种子压附过程中，型孔逐渐转至组合气嘴下方，型孔与气嘴的相对距离逐渐减小，当型孔转至清种气嘴与压种气嘴的中间位置时，颗粒在型孔内受到最大的气流扰动，颗粒速度突增到最大值，之后只受到压种气嘴的压附作用，压附力主要使颗粒稳定位于型孔底部，因此，在整个过程中，颗粒速度呈现逐渐增大而后趋于平稳的变化趋势。

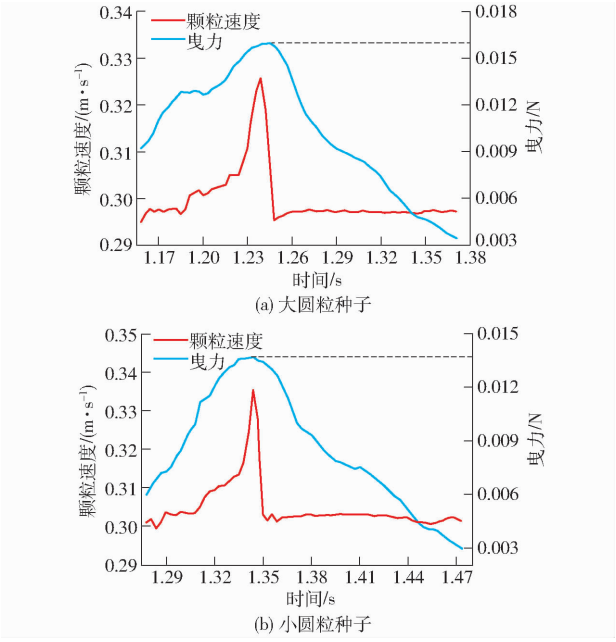


图 8　压附过程中颗粒所受曳力及速度随时间的变化过程

Fig. 8　Changing of drag force and velocity with time of circle seed during process of pressing

曳力的大小不仅与颗粒迎风面积有关，还与风速与颗粒速度的差值有关。型孔转至压种气嘴的过程中，气流在型孔内形成的风速与颗粒速度具有相同的变化趋势，只是在型孔转过压种气嘴至护种区的过程中，型孔与气嘴相对距离逐渐增大，气流在型孔内形成的风速一直减小，因此，在整个压附过程中，气流在型孔内的风速与颗粒速度的差值呈现先增大后一直减小的趋势，颗粒在型孔内受到的曳力值也呈现相同的变化趋势。

由于曳力同时与颗粒的迎风面积有关，因此从各排种盘的仿真过程中，任选 10 颗大圆粒和 10 颗小圆粒，提取每一粒种子在压附过程中所受曳力的最大值，取其均值，结果如图 9 所示，在相同工作参数条件下，即当排种器工作参数入口风速为 30 m/s，前进速度为 8 km/h 时，受颗粒迎风面积的影响，同一排种盘中，大圆粒种子在型孔内受的最大曳力值均大于小圆粒；对 3 种排种盘相同类型种子所受曳力进行对比，由大到小依次为 B 盘、C 盘、A 盘。

在 A 盘的基础上，对排种盘型孔底部开不同类型的槽孔，将影响气流在型孔内的流动形式，进而影响气流对型孔内种子的作用力。由式(1)、(3)可知，气流对颗粒的曳力将同时影响清种及压种效果，

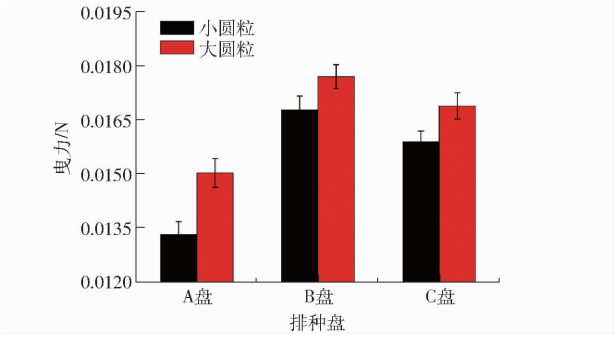


图 9 不同排种盘曳力变化

Fig. 9 Changing of drag force of different seeding discs

曳力越大越有利于清种但不利于压种,易造成漏播,曳力太小又不利于清种易造成重播。

3.3 压种性能分析

对 EDEM 与 Fluent 耦合计算完成后的文件进行后处理,得到 3 种排种盘清种过程结束后同一时刻气流的迹线图如图 10 所示,图中流线代表气流流向及流速。从图中可以明显看出,EDEM 与 Fluent 的耦合仿真是双向的,组合气嘴流出的高速气流在充种区会产生明显的绕流作用,气流在不同结构型孔内的流向也是不同的,如图 10 红色框图所示,型孔内气流遇到颗粒也会改变气流的流向,这种现象完全符合排种器的工作过程。

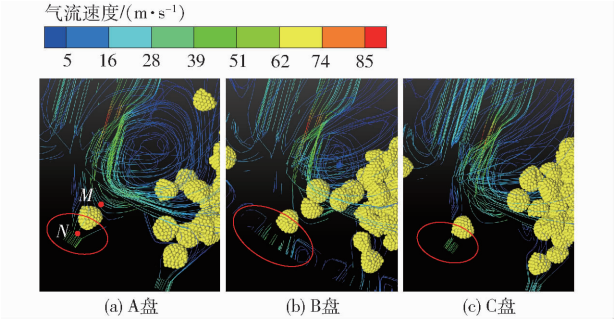


图 10 不同排种盘气流迹线

Fig. 10 Air flow trajectories of three kinds of seeding discs

由于 B 盘、C 盘是在 A 盘型孔的底部开设不同结构的槽孔,这些槽孔会在 A 盘的基础上相应的增大排种盘的泄气量,进而增大型孔内气流对种子的压附力,压附力的大小用种子受到的压强差来表示。对 3 种排种盘选取同一时刻,即当型孔转至气嘴下的同一位置时,分别提取型孔内颗粒上表面及下表面 M、N 两点的压强,如图 10a 所示,得到颗粒在型孔内受到的压强差,如表 2 所示。A 盘型孔内颗粒上下的压差最小,对种子的压附力最小;B 盘和 C 盘都在型孔底部开设槽孔,相对于 A 盘,很大幅度增大了对种子的压附力,整体上,3 种排种盘对颗粒在型孔内受到的压强差由大到小依次为 B 盘、C 盘、A 盘。结合以上分析,型孔底部的开口面积很大程度影响着气流对型孔内种子的曳力及压附力,即型孔底部的开口面积极大地影响着排种器的工作性能。

表 2 不同排种盘型孔内压强差

Tab. 2 Pressure difference in holes of different kinds of discs Pa

参数	A 盘	B 盘	C 盘
M 点压强	2 150.2	2 143.4	2 197.2
N 点压强	1 362.7	532.7	670.4
压强差	787.5	1 610.7	1 526.8

3.4 工作性能分析

当入口风速为 30 m/s、排种器前进速度为 8 km/h 时,3 种排种盘对圆粒种子的排种效果及型孔的局部放大图如图 11 所示,综合前期分析,A 盘对颗粒的曳力和压附力都最小,且 A 盘为半盘圆锥型孔,对圆粒种子的排种效果较差,因此,其漏播最多;B 盘为在排种盘周向方向每个型孔间开有宽度为1 mm 的周向内开圆环盘,虽在型孔底部增大了泄气面积,对种子的曳力及压附力都较大,但是没有改变半盘圆锥型孔的基本结构,没有增大圆粒种子在型孔径向方向的充填容积,因此 B 盘对圆粒种子依然易造成漏播;C 盘对颗粒的曳力及压附力都与 B 盘接近,但由于 C 盘在型孔径向方向开有宽度和深度分别为 2 mm 的块孔槽,增大了型孔在径向方向对圆粒种子的容纳容积,因此,其对圆粒种子的排种效果最好。

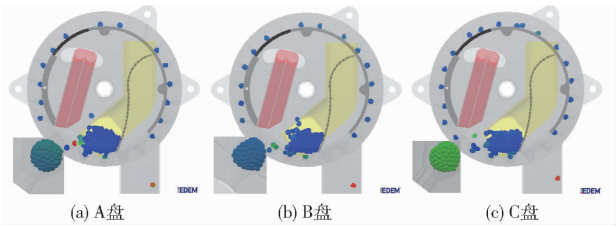


图 11 不同排种盘对圆粒种子仿真效果

Fig. 11 Simulation diagrams of three kinds of discs of sowing circle seeds

在排种器内生成 140 粒混合种子,再次对 3 种排种盘进行 EDEM - CFD 耦合仿真,在入口风速为 30 m/s、前进速度为 8 km/h 时,不同排种盘对混合种子的播种效果如图 12 所示,A 盘在工作时仍出现少量漏播,B 盘和 C 盘由于压附力较大,漏播很少。

4 试验

4.1 材料与方法

加工试制仿真时所用的 3 种排种盘,将其分别安装在内充气吹式排种器上进行试验,为便于观察,排种盘均选为透明有机玻璃材料加工。试验种子选用仿真过程中所用的金博士郑单 958 玉米杂交种,

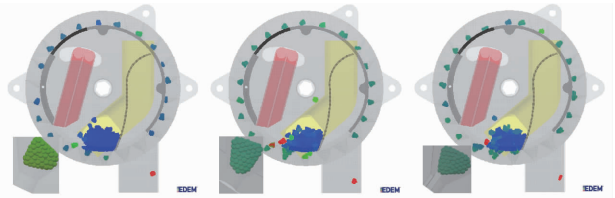


图 12　不同排种盘对混合种子的仿真效果

Fig. 12　Simulation diagrams of different discs of sowing mixed seeds

籽粒黄色，半马齿型，千粒质量 351 g，含水率 12.5%，未分级[12]，试验在 JPS－12 型排种器性能检测台上进行，种床带相对于排种器同向运动，模拟播种机前进运动状态，喷油泵将油喷于种床带上，玉米籽粒从排种口通过导种管落至涂有油层的种床带上，通过摄像处理装置进行实时检测并采集数据，以实现准确测量各项排种性能指标，如图 13 所示。

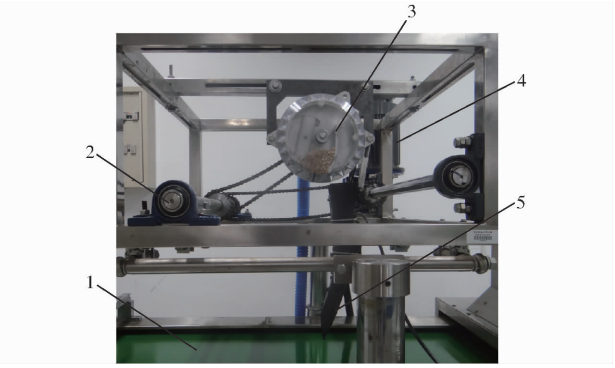


图 13　排种试验台

Fig. 13　Seed metering test platform

1. 种床带　2. 传动系统　3. 内充气吹式排种器　4. 驱动电动机　5. 导种管

4.2　3 种排种盘对比试验

针对 3 种排种盘在前进速度为 8 km/h 时进行工作压强为 4.0～8.0 kPa 的单因素试验，每间隔 0.5 kPa 取一水平，每组试验重复 5 次，每次测定 250 粒种子，按照 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》进行统计，取其均值作为每组试验的最终结果，合格率、重播率和漏播率随工作压强变化趋势如图 14 所示。

3 种排种盘的重播率、漏播率如图 14a、14b 所示，A 盘因型孔底部开孔面积最小，对种子的压附力最小，不易将清种后剩余的单粒种子压附在型孔内，漏播率较高，在气流对种子的曳力作用最小且压附力最小的综合作用下，A 盘的重播率最小；B 盘和 C 盘相对于 A 盘都增大了型孔底部的开孔面积，对种子的压附力都大于 A 盘，重播率较高、漏播率较低，C 盘因增大了种子在型孔径向方向的充填容积，可使种子充填并稳定位于型孔内的各个方向，对种子造成的漏播率低于 B 盘，3 种排种盘的重播率均随着工作压强的增大而减小，漏播率随着工作压强的增大而增大。

综合 3 种盘对排种器工作过程造成重播率和漏播率的分析，A 盘、B 盘和 C 盘在工作压强低于5 kPa 时，工作效果相差较小，随着工作压强的增大，A 盘因漏播率的显著增大其合格率逐渐减小；B 盘和 C 盘随着工作压强的增大，因漏播率增大较小而重播率逐渐降低因而合格率逐渐增大。整体上，C 盘因增大了种子在型孔内的填充面积，其在高压时，合格率最高。

4.3　C 盘双因素试验

对 C 盘进行前进速度为 4～12 km/h、工作压强为 4～8 kPa 的双因素试验，每组试验重复 5 次，取其均值，绘制合格率、重播率和漏播率随前进速度及工作压强的变化趋势如图 15 所示。C 盘在前进速度为 4～6 km/h 各工作压强下，其漏播率都很小，几乎为 0，随着前进速度和工作压强的增大，其漏播率逐渐增大，但是在各工作条件下，其漏播率都低于 1%；综合图 15，影响 C 盘合格率的主要因素为重播，C 盘在各前进速度下，工作压强在 5.5 kPa 以下时，重播率较高，随着工作压强的增大，重播率逐渐减小，在 5.5 kPa 以上时，重播率低于 4%；综合以上分析，C 盘随着前进速度和工作压强的增大，其合格率逐渐增大，C 盘各前进速度在工作压强为 6 kPa 以上时，合格率接近于 96%，漏播率均低于 1%。

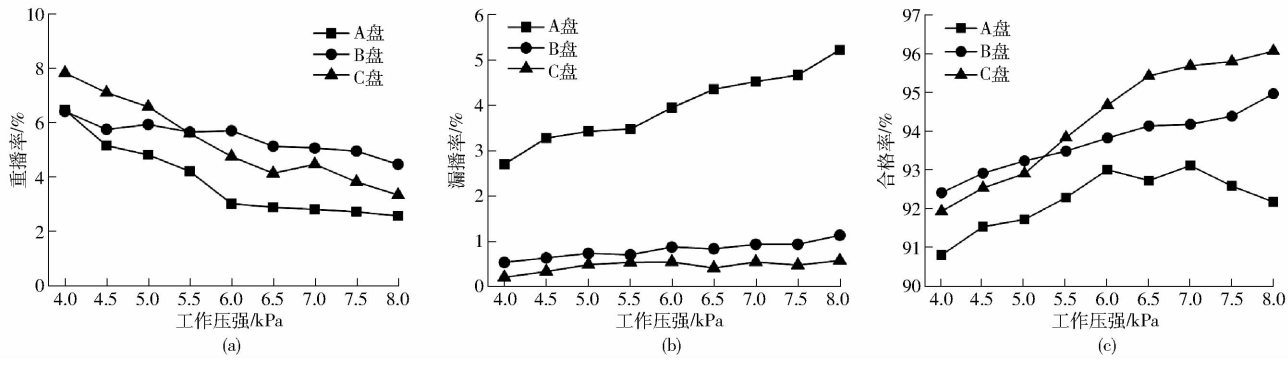


图 14　3 种排种盘性能随工作压强变化曲线

Fig. 14　Changing curves of performance with working pressure of three kinds of discs

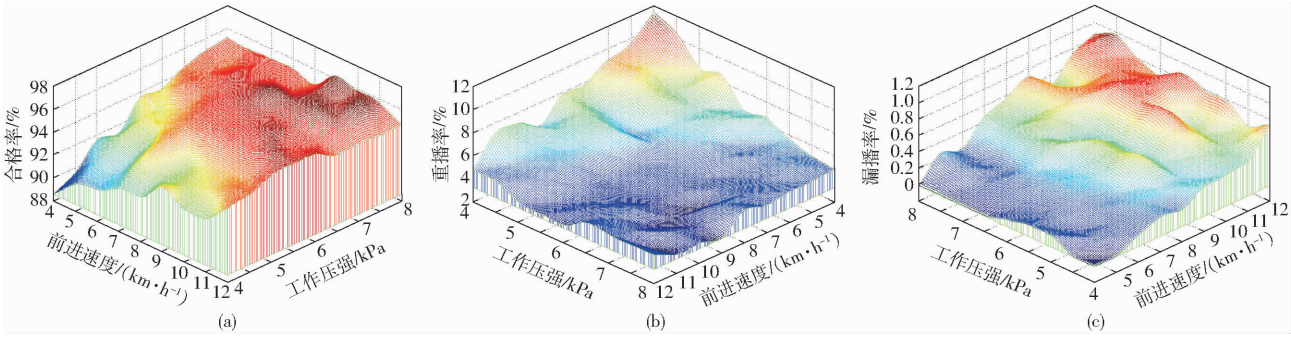


图 15 C 盘播混合种子性能变化曲面

Fig. 15 Performance diagrams of disc C of sowing mixed seeds

5 结论

(1)基于离散单元法理论建立了玉米籽粒粘结颗粒模型,运用 EDEM - CFD 耦合分析方法,对 3 种型孔结构排种盘进行圆粒种子的耦合仿真。当入口风速为 30 m/s,前进速度为 8 km/h 时,同一排种盘中,大圆粒种子所受曳力均大于小圆粒,迎风面积大的颗粒种子更易被清出型孔;对 3 种排种盘进行清种及压种性能分析,径向内开方孔盘型孔内气流对颗粒的曳力及压附力均较大,且该盘增大了型孔在径向方向对种子的充填容积,通过仿真发现,该盘对圆粒种子及混合种子的播种效果都较好。

(2)对 3 种排种盘进行前进速度为 8 km/h 时工作压强的单因素试验,径向内开方孔盘在工作压强低于 5 kPa 时,与其余 2 个盘的合格率相差较小,随着工作压强的增大,该盘的合格率逐渐增大,并明显高于其余 2 个排种盘。对径向内开方孔盘进行前进速度为 4 ~ 12 km/h、工作压强为 4 ~ 8 kPa 的双因素试验,该盘随着前进速度和工作压强的增大,合格率逐渐增大,各前进速度在工作压强为 6 kPa 以上时,合格率接近 96%,漏播率低于 1%。

参 考 文 献

1 崔涛,韩丹丹,殷小伟,等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(1):8 - 16.
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of the inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):8 - 16. (in Chinese)

2 刘佳. 机械气力组合式精密排种器设计研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
LIU Jia. Design and research of the mechanical-pneumatic combined precision seed-metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

3 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

4 殷小伟,杨丽,张东兴,等. 气压式玉米精量播种机均匀低损配气机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(19):9 - 17.
YIN Xiaowei, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of balance and low-loss air allotter in air pressure maize precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19):9 - 17. (in Chinese)

5 仇轶,由长福,祁海鹰,等. 用 DEM 软球模型研究颗粒间的接触力[J]. 工程热物理学报,2002,23(增刊):197 - 120.
QIU Yi, YOU Changfu, QI Haiying, et al. Studying of contact forces among particles with the dem model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(Supp.): 197 - 120. (in Chinese)

6 王国强,郝万民,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

7 MIKIO S, SEIICHI K. Large-scale discrete element modeling in pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64:533 - 539.

8 LI Hongchang, LI Yaoming, GAO Fang, et al. CFD - DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88: 111 - 119.

9 VITALIJ S, SERGIY A, STEFAN H, et al. Characterization and CFD - DEM modelling of a prismatic spouted bed[J]. Powder Technology, 2015, 270: 622 - 636.

10 WEN Qizhong, YUAN Quanxiong, ZHU Linyuan, et al. DEM simulation of gas-solid flow behaviors in spout-fluid bed[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61:1571 - 1584.

11 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)

12 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

13 赖庆辉,高筱钧,张智泓.三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):27－37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160505&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005.
LAI Qinghui, GAO Youjun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed filling performance of pneumatic cylinder seed metering device for *Panax notogiseng*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27－37. (in Chinese)

14 赖庆辉,马文鹏,刘素,等.气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):44－53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170505&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.005.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44－53. (in Chinese)

15 王金武,唐汉,周文琪,等.指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):68－76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68－76. (in Chinese)

16 王金武,唐汉,王奇,等.基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J].农业工程学报,2015,31(21):43－50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43－50. (in Chinese)

17 鹿芳媛,马旭,齐龙,等.基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(10):17－25.
LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10):17－25. (in Chinese)

18 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等.油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):57－68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2017, 48(3):57－68. (in Chinese)

19 陈进,周韩,赵湛,等.基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J].农业机械学报,2011,42(10):79－83,100.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):79－83,100. (in Chinese)

20 郑侃,何进,李洪文,等.基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):62－72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62－72. (in Chinese)

21 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等.基于 CFD－DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(4):117－122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140418&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018.
JIANG Encheng, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD－DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 117－122. (in Chinese)

22 PASHA M, HASSANPOUR A, AHMADIAN H, et al. A comparative analysis of particle tracking in a mixer by discrete element method and positron emission particle tracking[J]. Powder Technology, 2015, 270: 569－574.

23 欧阳洁,李静海,崔俊芝.颗粒轨道模型中相间耦合关系及曳力计算的研究[J].动力工程,2004,24(6):854－859.
OU Yangjie, LI Jinghai, CUI Junzhi. On the coupling relationship between phases and drag calculation in particle-trajectory models[J]. Power Engineering, 2004, 24(6): 854－859. (in Chinese)

24 王云霞,梁志杰,张东兴,等.基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J].农业工程学报,2016,32(22):36－42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameter for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36－42. (in Chinese)