



基于 DEM-CFD 耦合的气吸式排种器仿真研究

摘要

为提高大白菜等小粒径精密播种机的机械化水平,设计了一种小粒径气吸式排种器。首先利用 JPS-12 排种器性能检测试验台对排种器进行测试,得到不同参数组合下的性能指标与最优参数组合。然后使用计算流体力学方法(CFD),借助 FLUENT 软件分析了吸种器内部流场的分布,得到了吸种器内部压力分布云图和吸种孔截面云图。最后基于离散元法(DEM)建立大白菜种子颗粒模型,对排种器仿真模型进行简化和网格划分,完成了小粒径气吸式排种器 DEM-CFD 耦合仿真实验。对比台架与仿真试验结果,得出如下的结论:当排种盘转速为 20 r/min,真空度为 2.2 kPa 时,排种性能最佳。

关键词

气吸式排种器;小粒径种子;离散元法;流体力学

中图分类号 S223.2

文献标志码 A

收稿日期 2020-07-03

资助项目 国家重点研发计划(2017YFD07012 01-02)

作者简介

张凯,男,博士,教授,研究方向为智能装备研究.zkark@163.com

1 南京信息工程大学 自动化学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

3 青岛普兰泰克机械科技有限公司,青岛,266109

0 引言

为解决大白菜等小颗粒种子选育施肥中机械化程度低、稠度差、播种效率低、机械要求差异性大等问题,研制适合小粒径播种的气吸式精密播种机非常重要^[1]。作为播种机核心部分的气吸式排种器,其工作性能直接影响播种质量。本文采用负压吸种的工作原理,设计了一种气吸式排种器,依靠气吸室的真空度将种子吸附在吸种孔上,因此气吸室的流场压力分布需要均匀。

近年来,DEM(离散元法)-CFD(计算流体力学)耦合仿真在工业、农业方面得到了广泛的运用,国内外主要应用中大型颗粒种子的气吸式排种器上^[2],很少应用于小粒径气吸式排种器。本文首先进行 JPS-12 台架试验,得到不同参数组合下的排种器性能指标与最优参数组合,接着利用 FLUENT 软件分析气吸式排种器内部流场分布,最后利用 EDEM 软件建立大白菜种子颗粒模型,实现小粒径气吸式排种器 DEM-CFD 耦合仿真^[3],对比台架与仿真试验结果,验证了仿真分析的可行性。

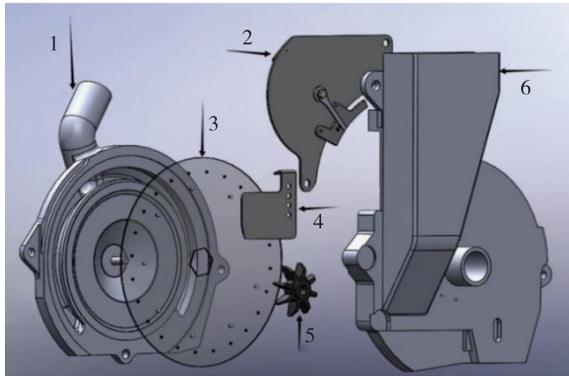
1 排种器的结构与工作原理

气吸式排种器主要由排种盘、壳体、搅拌器、刮种器、泄种量调节插板、气吸室等结构组成,如图 1 所示。采用负压吸种的原理,排种盘垂直放置在排种器中间,一侧与充种室相连,另一侧与气吸室相接^[4]。排种器经由上方的管道与风机连接,工作时由高速风机产生负压,再传送至排种单体的真空室。排种盘在前进作业过程中,种子依靠负压的作用附着在排种盘上并随其一齐转动^[5],当种子从真空室移出时,由于负压的消失,仅靠重力或在刮种器作用下落入沟内,进而完成一次排种过程。

2 试验台试验

2.1 不同转速试验结果分析

为了研究排种盘转速对排种性能的影响,排种盘转速从 10 r/min 到 40 r/min,每 5 r/min 一个水平,共分为 7 个水平,真空度保持为 3 kPa。在种床带运行平稳之后,每个参数试验记录种床带连续分布的 200 粒种子,重复 3 次取平均值作为最终结果,试验结果如图 2 所示。



1.气吸室;2.刮种器;3.排种盘;4.泄种量调节插板;5.搅拌器;6.壳体

图1 气吸式排种器结构分解图

Fig. 1 Structure decomposition diagram of an air suction seed drainer

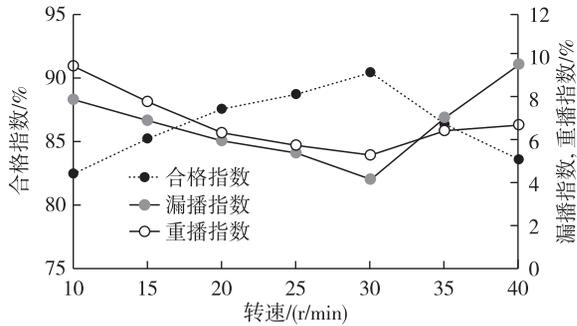


图2 不同转速试验结果

Fig. 2 Test results at different rotating speeds

2.2 不同真空度试验结果分析

在其他工作参数相同的情况下,真空度从 1.5 kPa 到 5 kPa,平均分为 8 个水平,转速保持为 30 r/min,在种床带运行平稳之后,每个参数试验记录种床带连续分布的 200 粒种子,重复 3 次取平均值作为最终结果,试验结果如图 3 所示.

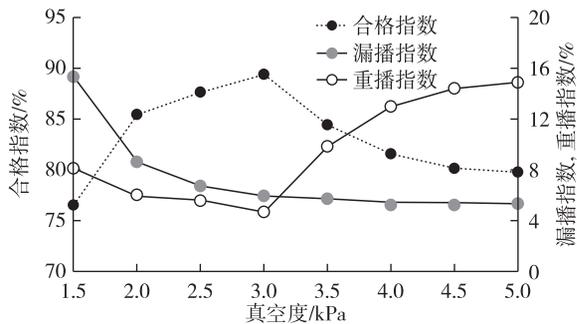


图3 不同真空度试验结果

Fig. 3 Test results under different vacuum degrees

2.3 正交试验

在转速单因素试验中,发现转速在 20~30 r/min

时,播种性能比较好.在真空度单因素试验中,真空度在 2~3.5 kPa 时,播种性能比较好.为了研究转速和真空度对排种性能影响的主次顺序以及最优参数组合,对每个参数取 3 个试验水平,考虑到转速与真空度之间存在相互作用,采用正交表 $L_9(3^4)$ 进行试验台试验,正交试验水平如表 1 所示.每个参数组合试验统计种床带连续分布的 200 粒种子,重复 3 次取平均值作为最终结果,正交实验结果表 2 所示.

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Horizontal table of orthogonal experimental factors

因素水平	转速 $S/(r/min)$	真空度 V/kPa
1	20	2.2
2	24	2.8
3	28	3.4

极差的大小代表着因素对试验指标影响的大小,极差越大,影响越显著.对表 2 的极差进行分析,对于合格指数和漏播指数,转速的影响较显著;对于重播指数,真空度影响较显著.当转速 20 r/min、真空度 2.2 kPa 时,排种性能达到最佳,合格指数为 93.02%,重播指数为 4.41%,漏播指数仅有 2.79%,各项性能均符合国家农作物单粒精量播种质量指标要求.

3 气吸式排种器流场仿真分析

3.1 模型建立与前处理

采用 SolidWorks 软件建立了气吸式排种器的仿真模型,通过观察测量发现实际结构尺寸较为复杂,有必要对模型进行一定程度的简化去杂^[6],如图 4 所示.对简化的模型利用 GAMBIT 进行网格划分,定义空气出入口,定义吸种孔与气吸室及充种室的交界面为 interface,其他面默认为壁面 wall,生成的网格文件如图 5 所示.

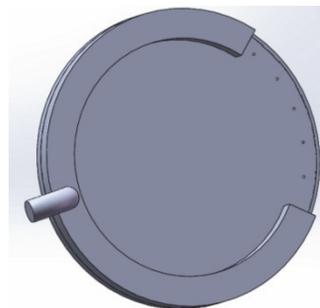


图4 简化的模型

Fig. 4 A simplified model

表 2 正交试验结果与极差分析

Table 2 Orthogonal test results and range analysis

试验序列	转速 $S/$ (r/min)	真空度 $V/$ kPa	交互 $S \times V$	空列 B	合格指数 $Q/\%$	重播指数 $R/\%$	漏播指数 $L/\%$			
1	20	2.2	1	1	93.02	4.41	2.79			
2	20	2.8	2	2	90.88	7.20	2.38			
3	20	3.4	3	3	88.57	8.19	3.12			
4	24	2.2	2	3	83.39	6.67	9.77			
5	24	2.8	3	1	86.18	7.00	6.75			
6	24	3.4	1	2	83.83	6.95	9.14			
7	28	2.2	3	2	81.68	7.41	10.79			
8	28	2.8	1	3	76.49	10.03	13.27			
9	28	3.4	2	1	80.09	7.41	12.38			
Q_1	90.82	86.07	84.45	86.43	$Q_T = 764.18$					
Q_2	84.47	84.52	84.79	85.46						
Q_3	79.42	84.16	85.48	82.82						
极差 R_Q	11.40	1.91	1.03	3.61						
主次因素	$S > V > (S \times V)$									
最佳组合	$S_1 V_1$									
R_1	6.60	6.16	7.13	6.27	$R_T = 65.26$					
R_2	6.87	8.08	7.09	7.19						
R_3	8.28	7.52	7.53	8.30						
极差 R_R	1.68	1.92	0.44	2.03						
主次因素	$V > S > (S \times V)$									
最佳组合	$S_1 V_1$									
L_1	2.76	7.78	8.40	7.31	$L_T = 70.39$					
L_2	8.55	7.47	8.18	7.44						
L_3	12.15	8.21	6.89	8.72						
极差 R_L	9.39	0.74	1.51	1.41						
主次因素	$S > (S \times V) > V$									
最佳组合	$S_1 V_2$									

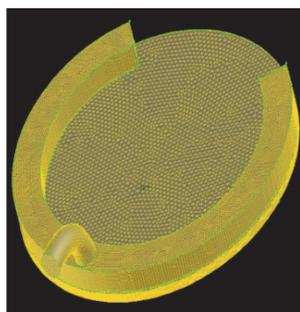


图 5 网格划分
Fig. 5 Grid meshing

3.2 仿真结果分析

3.2.1 不同真空度下流场的变化规律

为了得出真空度影响排种器内部流场分布的变化规律,选择了3种不同真空度条件,设置合适的算

法参数,经过多次迭代计算,当残差曲线收敛时,得到的仿真结果如图6所示.图6a为气吸室流场压力云图,图6b为吸种孔内部速度云图,图6c为不同吸种孔截面速度云图.由图6可知,在不同真空度下,压力大小呈轴对称分布,管道处压力值达到最高(图6a).随着真空度的变化,气吸室的压力分布没有明显变化,说明真空度对气吸室压力分布没有影响,只是改变了压力大小.吸种孔内速度大小受真空度的影响而改变,其区域的速度分布相对一致(图6b);而吸种孔端面的速度大小以管道处为峰值,呈轴对称状分布并向圆环两侧递减(图6c).

3.2.2 改变转速后的流场变化

选择了10 r/min、20 r/min和30 r/min这三种转速条件,真空度保持3 kPa不变.设置适当的算法参数,经过多次计算迭代,当残差曲线收敛时,得到

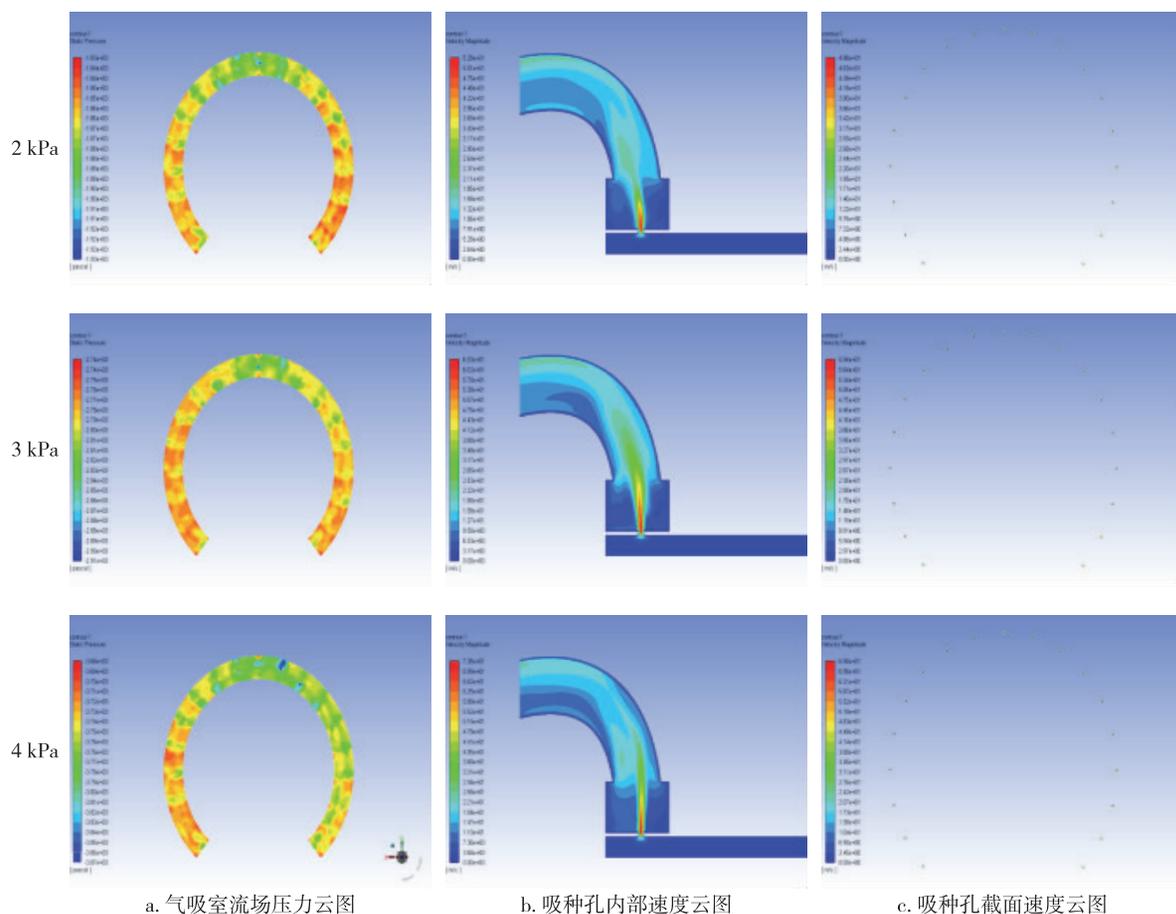


图6 排种器在不同真空度下内部流场

Fig. 6 Flow field inside the air suction chamber under different vacuum degrees

的仿真结果如图7所示.在本研究中,24个锥形吸种孔均匀分布在排种盘上,每两个吸种孔之间间隔 15° ,为此区间选择了4个转动度数: 0° 、 4° 、 8° 、 12° ,如图7所示.

从图7可以看出,同一时间,在不同转速下,气吸室压力分布变化不大,说明气吸室流场压力分布受转速的影响不明显.而在相同转速下,随着排种盘的转动,气吸室的压力分布变化较为明显,说明排种盘的转动对气吸室压力分布有很大影响.

4 气吸式排种器工作过程耦合仿真分析

4.1 建立仿真模型

为构建大白菜种子颗粒模型,需要测量种子的物理特性,测得种子的三径为:长 1.98 mm ,宽 1.95 mm ,高 1.92 mm .为了便于进行仿真,本文特意简化了大白菜种子颗粒模型,采用等效直径为 1.95 mm 的单球模型^[7],如图8所示.

4.2 耦合仿真结果分析

在耦合的模拟仿真试验过程中,可直接观察到排种盘每个吸种孔上的大白菜种子数并手动记录.每次模拟试验统计80个样本,再对数据进行计算得出排种器的性能指标,如表3所示.

表3 台架与仿真试验的排种性能指标(20 r/min)

Table 3 Performance comparison between bench test and simulation result(20 r/min) %			
试验方式	合格指数	重播指数	漏播指数
台架试验	93.02	4.41	2.79
仿真试验	91.30	7.10	2.00

通过对表3中数据的分析,发现重播指数较其他两个指数差距较大,进而推测在现实试验中,因为电机工作振动的影响,吸种孔内的若干种子可能会被抖落掉出.而耦合仿真环境理想,没有干扰因素,所以造成了仿真试验的重播指数略大于台架试验的重播指数.

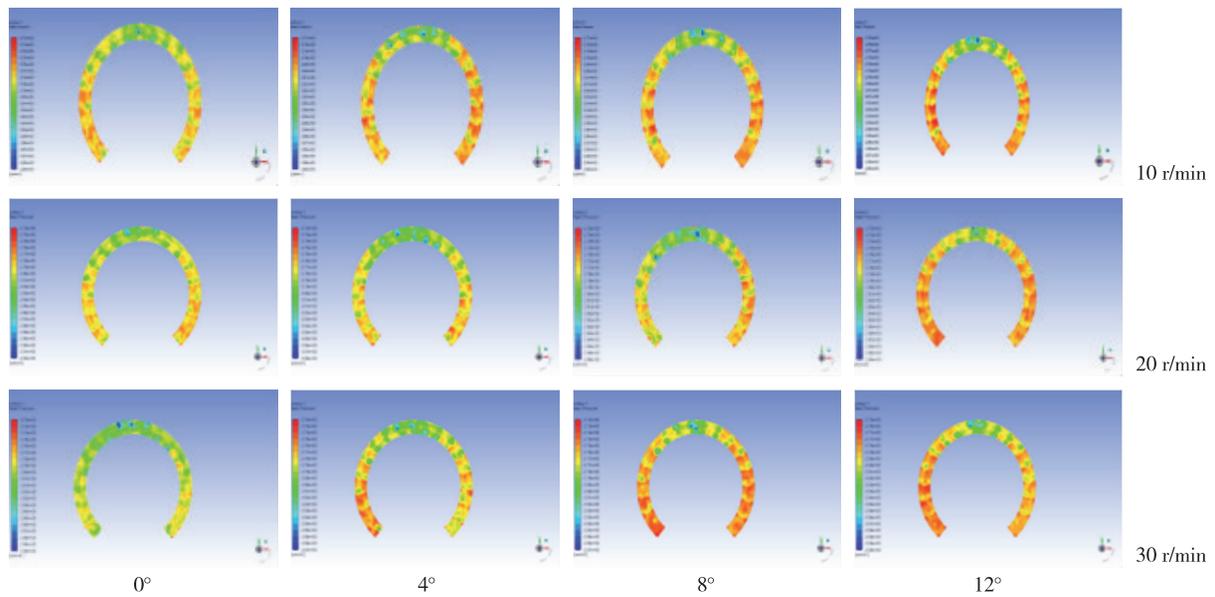


图7 流场在不同转速下的压力云图

Fig. 7 Pressure cloud diagram of flow field under different rotating speeds

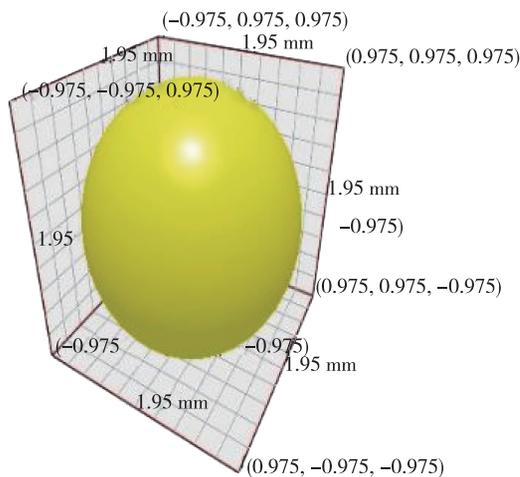


图8 大白菜种子颗粒简化模型

Fig. 8 Simplified Chinese cabbage seed shape model

为了验证真空度和转速在耦合仿真条件下均会对排种器的排种性能造成影响,通过改变转速并观察统计各个吸种孔上的种子数,其中转速参数的设置与之前的台架试验保持一致,实验结果如表4所示。

经过对上述数据的观察和分析,可以发现两次检测的合格、重播和漏播指数这三者的变化趋势是相同的;通过对模拟试验中转速对排种性能影响的显著性分析,发现转速对漏播和合格指数的影响较为显著,对重播指数的影响很小。

表4 台架与仿真试验的性能指标

Table 4 Performance comparison between bench

试验方式	test and simulation result						%
	合格指数		重播指数		漏播指数		
	24 r/min	28 r/min	24 r/min	28 r/min	24 r/min	28 r/min	
台架试验	83.39	81.68	6.67	7.41	9.77	10.79	
仿真试验	86.20	83.10	8.10	8.00	6.00	9.20	

5 结论

针对目前小粒径种子精密播种机机械化程度较低的问题,基于负压吸种的原理设计出一款小粒径气吸式排种器,满足小粒径种子精密播种的需要.对气吸式排种器内部流场进行仿真分析,得到了真空度和转速对流场的作用规律.吸种孔内的速度大小只受真空度的影响,且随着真空度的增大减小成正比关系;转速对气吸室整体的压力分布影响不显著,起主导作用的是吸种孔的转速。

不论是耦合仿真试验还是台架试验,当转速为20 r/min、真空度为2.2 kPa时,排种器的性能最佳.台架试验的合格指数为93.02%,重播指数为4.41%,漏播指数2.79%,耦合仿真试验的合格指数为91%,重播指数为7%,漏播指数为2%.通过对比分析,仿真试验与台架试验的规律是一致的,试验结果较为接近,表明了基于EDEM-FLUENT耦合仿真试验来分析排种器的排种性能是可行而有效的。

参考文献

References

- [1] 霍文国,肖继军,吕钊钦.浅析气力式精密播种机的发展及研究现状[J].山东农机,2003(3):11-12
HUO Wenguo, XIAO Jijun, LÜ Zhaoqin. Development and research status of pneumatic precision seeder [J]. Shandong Agricultural Machinery, 2003(3):11-12
- [2] 陈立东,何堤.论精密排种器的现状及发展方向[J].农机化研究,2006(4):16-18
CHEN Lidong, HE Di. Discussion on the current situation of the planting device and developing direction [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(4):16-18
- [3] 魏海明,杨发展,李建东,等.气吸垂直圆盘式水稻精量排种器设计与试验[J].农业工程,2012,8(11):93-96
WEI Haiming, YANG Fazhan, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction vertical disc precision seed metering device for rice [J]. Agricultural Engineering, 2012,8(11):93-96
- [4] 陈江辉.气吸式排种器排种性能试验研究[J].新疆农机化,2018(3):11-13
CHEN Jianghui. Experimental study on performance of air-suction seeding metering device [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2018(3):11-13
- [5] 池丹丹,杜雄,赵晓顺,等.基于计算机仿真的气吸式谷子精量排种器设计[J].江苏农业科学,2018,46(11):183-187
CHI Dandan, DU Xiong, ZHAO Xiaoshun, et al. Design of air-suction millet precision seed-discharge device based on computer simulation [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(11):183-187
- [6] 刘彩玲,宋建农,王继承,等.吸盘式精密播种装置气力吸种部件流场仿真分析[J].中国农业大学学报,2010,15(1):116-120
LIU Cailing, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Analysis of flow field simulation on vacuum seed-metering components of precision metering device with sucker [J]. Journal of China Agricultural University, 2010,15(1):116-120
- [7] 心男.基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D].长春:吉林大学,2013
XIN Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-FLUENT [D]. Changchun: Jilin University, 2013

Simulation of an air suction seed drainer based on DEM-CFD coupling

ZHANG Kai¹ HONG Yang² XU Zhuxin³

1 School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Qingdao Plantec Machinery Technology Company Limited, Qingdao 266109

Abstract An air suction seed drainer was designed and simulated in order to improve the mechanization level of precision seeders applicable for small size grains such as Chinese cabbage seeds. Firstly, the performance of the seed metering device was acquired through tests using performance test-bench of JPS-12, based on which the optimal parameter combination was obtained. Then, the flow field distribution inside the air suction chamber under different vacuum degrees or rotating speeds was analyzed using computational fluid dynamics (CFD) and FLUENT software, and a seed shape model of Chinese cabbage was established based on discrete element method (DEM). Finally, the seed metering device simulation was carried out by a simplified model and grid meshing. The comparison between bench test and simulation result showed that the air suction seed drainer performed best when the rotating speed of seed metering tray is 20 r/min and the vacuum degree of air suction chamber is 2.2 kPa.

Key words air suction seed metering device; small seeds; discrete element method (DEM); fluid mechanics