

基于离散元的包膜肥料 Bonding 模型参数标定

都鑫 刘彩玲 姜萌 袁昊 戴磊 李方林

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 包膜肥料是在粒状水溶性肥料表面涂覆半透水性或不透水性物质,养分通过包膜的微孔、缝隙慢慢释放出来,节肥增效作用显著。包膜肥料的养分释放特性与包膜层材料、结构紧密相关,目前常用的排肥器在排施肥料过程中会对肥料颗粒造成不同程度的机械损伤,导致包膜层破坏。为设计适用于包膜肥料无损排施的排肥器,同时缩短研发周期,采用离散元软件中的 Bonding 模型建立肥料颗粒仿真模型。为提高仿真精度,需对 Bonding 模型进行参数标定。首先通过单轴压缩试验得到包膜肥料颗粒的实际极限破碎位移和极限破碎载荷,在离散元软件中以此为目标依次通过 Plackett-Burman 试验、Steepest ascent 试验和 Box-Behnken 试验确定最优的 Bonding 模型参数组合。最优条件下单轴压缩试验表明,极限破碎位移和极限破碎载荷与实际值的相对误差分别为 0.222%、0.554%。借助外槽轮排肥器验证所得标定参数组合的可靠性,以肥料颗粒破碎率为指标,得到实际与仿真中肥料颗粒破碎率相对误差不大于 11.40%,满足施肥机械设计参数优化需求,可为研究包膜肥料颗粒机械破碎机理、优化设计无损排施的新型排肥器提供参考。

关键词: 包膜肥料; Bonding 模型; Plackett-Burman; Steepest ascent; Box-Behnken; 离散元法

中图分类号: S143.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0141-09 OSID: 

Calibration of Bonding Model Parameters for Coated Fertilizers Based on Discrete Element Method

DU Xin LIU Cailing JIANG Meng YUAN Hao DAI Lei LI Fanglin
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fertilizers play an irreplaceable role in agricultural production. In China, the use of chemical fertilizers is large but the fertilizer utilization efficiency is low. In order to ensure the sustainable development of agricultural production, controlled release fertilizers with high nutrient efficiency and environmental friendliness have received widespread attention. The controlled release fertilizers adopt polymer coating, which can quantitatively control the nutrient release amount and release period of the fertilizer, so that the nutrient supply is consistent with the law of fertilizer demand in each growth period of the crop, and the effect of saving fertilizer and increasing efficiency is significant. The nutrient release characteristics of coated fertilizers are closely related to the material and structure of the coating layer. In the process of discharging fertilizers, the discharging device will cause different degrees of mechanical damage to some fertilizers, resulting in damage to the coating layer and affecting the nutrient release characteristics. Therefore, it is of great significance to design a fertilizer discharging device suitable for non-destructive discharging of coated fertilizers. In order to ensure that the numerical simulation truly reflects the crushing of fertilizer particles, it is necessary to calibrate the parameters of the crushing model of coated fertilizer particles. The critical crushing displacement and critical crushing load of the coated fertilizer particles were obtained through uniaxial compression tests. With this as the goal, the Bonding model parameters were systematically calibrated, based on sequential tests (Plackett-Burman test, Steepest ascent test and Box-Behnken test), and finally the optimal parameters combination was optimized. The uniaxial compression test was carried out again under the optimal parameters combination condition. The relative error of the critical crushing displacement and critical crushing load and the actual

收稿日期: 2021-07-29 修回日期: 2021-09-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300907)
作者简介: 都鑫(1993—),男,博士生,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: dx2017on@163.com
通信作者: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: cailingliu@163.com

value were 0.222% and 0.554% , respectively. The observed qualitative and quantitative results of numerical and experimental approaches were in good agreement. Based on these results, comparing the actual and simulated fertilizer particle crushing in the fertilizer discharging process, it was obtained that the fertilizer particle crushing rate in the simulation was slightly higher than that of the actual situation. Overall, DEM modeling better reproduced the damage of fertilizer particles in the fertilizer discharger.

Key words: coated fertilizers; Bonding model; Placket – Burman; Steepest ascent; Box – Behnken; discrete element method

0 引言

肥料在农业生产中有着不可替代的作用,中国化肥使用量大但肥料利用率低^[1]。为保证农业生产的可持续发展,养分效率高、环境友好型的控释肥料得到广泛关注^[2-6]。控释肥料采用聚合物包膜,可定量控制肥料养分释放量和释放期,使养分供应与作物各生育期需肥规律吻合,节肥增效作用显著^[7]。

包膜肥料的养分释放特性与包膜层材料、结构紧密相关^[8],排肥器在排施肥料颗粒过程中会对部分肥料颗粒造成不同程度的机械损伤,导致包膜层破坏进而影响肥料养分释放特性。为设计适用于包膜肥料无损排施的排肥器,考虑包膜肥料与排肥器、包膜肥料间的相互挤压力、摩擦力等因素,改进排肥方式、结构参数等。其中肥料颗粒间的相互作用力难以直接测得,拟采用离散元方法对此过程进行数值模拟^[9]。

自 CUNDALL 等^[10]提出适应于土力学的离散元方法后,该方法已广泛应用于散粒体物料的混料、搅拌、输送、充填、破碎等过程^[11-14]。POTYONDY 等^[15]提出粘合粒子模型(BPM),将许多小颗粒通过 Bond 键粘结形成被破碎的物体,在外力作用下 Bond 键发生形变,当力或力矩达到一定程度时,粘结键断裂,小颗粒互相分开发生破碎。目前物料破碎数值模拟被广泛应用于岩石钻探、土壤挖掘、制沙、磨粉等^[16-20]研究中,但在农业领域中应用较少,尚未见到包膜肥料破碎数值模拟方面的相关报道。

为保证数值模拟可真实反映肥料颗粒挤压破碎情况,需对包膜肥料颗粒破碎模型进行参数标定。王云霞等^[21]通过堆积角试验标定玉米种子的种间静摩擦因素和滚动摩擦因数;鹿芳媛等^[22]基于摩擦角试验标定了不同含水率下的水稻芽种主要接触参数;刘彩玲等^[23]基于休止角试验系统标定了大颗粒尿素的仿真边界参数;袁全春等^[24]基于 JKR 模型标定了有机肥散体颗粒离散元参数;于庆旭等^[25]通过碰撞弹跳试验、斜面滑移试验和斜面滚动试验测定三七种子与 ABS 塑料间接触参数,基于响应面优化

方法得到三七种子间接触参数。

本文在国内外专家学者的研究基础上^[26-30],以包膜肥料颗粒为研究对象,采用单轴压缩试验测得包膜肥料颗粒的极限破碎位移和极限破碎载荷,通过建立与真实试验相同的仿真模型,利用 Placket – Burman 试验、Steepest ascent 试验和 Box – Behnken 试验逐步减少因素数量、缩小因素范围,最终优化得到与真实试验结果最接近的 Bonding 模型参数组合;为进一步验证最优参数组合的正确性,利用外槽轮排肥器排施包膜肥料颗粒,并统计对比仿真和实际条件下肥料颗粒破碎率,以期为研究包膜肥料颗粒机械破碎机理、优化设计无损排施的新型排肥器提供参考。

1 包膜肥料颗粒 Bonding 模型建立

1.1 Bonding 模型

POTYONDY 等^[15]设计了 Bonding 接触模型以模拟物料破碎。在 Bonding 接触模型中,被破碎的物料(颗粒、块体等)由 N 个较小的颗粒构建组合而成,小颗粒之间通过 Bond 键固定在一起。Bond 键具有与有限元方法相近的力学特性,在外力作用下会发生形变(拉伸、压缩、扭转)。当 Bond 键形变产生的力或力矩达到一定程度时,粘结键断裂,小颗粒互相分开发生破碎。Bonding 接触模型假设两个颗粒之间的粘结键是一个虚拟的平板(圆柱),如图 1 所示。

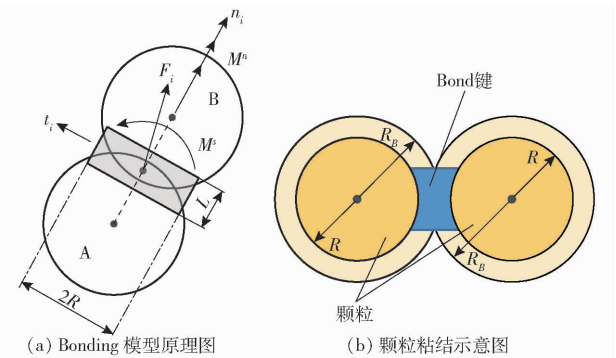


图 1 Bonding 模型原理与颗粒粘结示意图

Fig.1 Bonding model and particle bonding schematic

当两个颗粒发生相对运动时,平板(圆柱)承受拉伸、弯曲和剪切,键产生力的计算公式为

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A \delta t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta t \\ \delta M_n = -\omega_n S_t J \delta t \\ \delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta t \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} A = \pi R_B^2 \\ J = \frac{1}{2} \pi R_B^4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 δF_n ——法向力, N
 δF_t ——切向力, N
 v_n ——法向速度, m/s
 v_t ——切向速度, m/s
 S_n ——法向刚度, N/m
 S_t ——切向刚度, N/m
 δt ——仿真时间步长, s
 A ——颗粒间的接触面积, m^2
 δM_n ——法向力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
 δM_t ——切向力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
 ω_n ——法向角速度, rad/s
 ω_t ——切向角速度, rad/s
 J ——颗粒惯性矩, mm^4
 R_B ——粘结半径, mm

当力和力矩达到极限值或 Fraction 颗粒间的距离大于设定的接触半径时, 粘结键发生断裂, 法向及切向剪切力计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_B \\ \tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J} R_B \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——法向剪切力, N
 $\tau_{\max}$ ——切向剪切力, N

1.2 肥料颗粒离散元建模

选用山东农泱生物科技有限公司生产的贝可施包膜控释肥料(图 2a), 肥料含水率 0.88%, 真实密度 1.46 g/cm^3 , 平均三轴尺寸 $4.08 \text{ mm} \times 3.97 \text{ mm} \times 3.89 \text{ mm}$, 等效直径为 3.98 mm , 球形率为 0.975, 选取长、宽、高与等效直径相近的肥料颗粒建立轮廓模型。为研究肥料颗粒破碎特性, 采用粘接颗粒模型(Bonded particle method, BPM)建立肥料颗粒离散元模型(图 2b), 通过 Bond 键将多个直径相等的小球形填充颗粒粘结成一个大颗粒。

填充颗粒直径越小, 粘结成一个大颗粒所需的颗粒数就越多。如图 3a 所示, 填充的球形颗粒半径为 0.4 mm , 球形颗粒数量为 68, 粘结键个数为 534; 如图 3b 所示, 填充的球形颗粒半径为 0.2 mm , 球形颗粒数量为 582, 粘结键个数为 3 611; 如图 3c 所示,

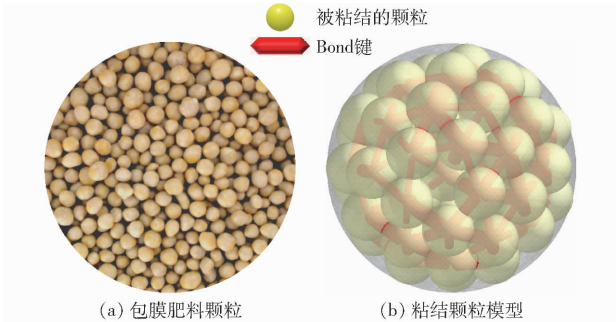


图 2 肥料颗粒及离散元模型

Fig. 2 Fertilizer particles and discrete element model

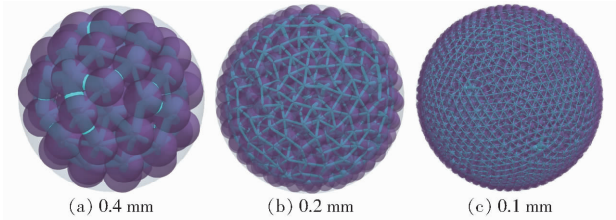


图 3 不同直径球形颗粒填充图

Fig. 3 Diagrams of particles with different diameters

填充的球形颗粒半径为 0.1 mm , 球形颗粒数量为 5 581, 粘结键个数为 39 119。

由于小球形颗粒间彼此相互独立, 在仿真模拟中需要对每个小球形颗粒的受力、运动情况进行计算, 因此, 颗粒数量越多, 仿真计算时间越长, 综合考虑后选取球形颗粒半径为 0.2 mm 的粘结模型进行 Bonding 模型参数标定。

1.3 单轴压缩试验

1.3.1 真实试验

选取直径为 3.98 mm 的肥料颗粒, 采用万能试验机对肥料颗粒进行单轴压缩试验, 以速度 0.1 mm/s 进行加载, 直至试样出现破坏后停止, 单轴压缩试验中试件加载过程如图 4 所示。试验重复 20 次取平均值, 得到肥料颗粒的位移载荷曲线如图 5 所示。



图 4 万能试验机

Fig. 4 Universal tester

1. 压板 2. 底板 3. 控制面板

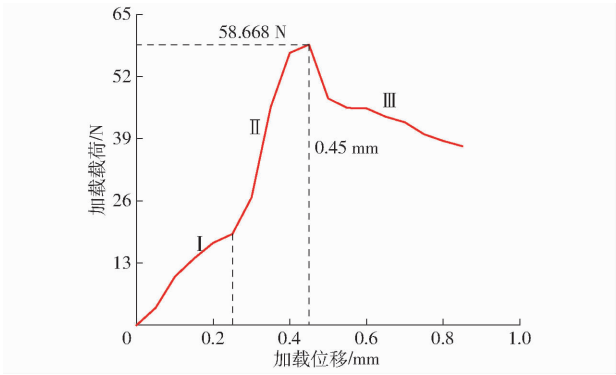


图5 力-位移曲线

Fig.5 Force – displacement curve

由图5可以看出,肥料颗粒力-位移曲线分为3部分,第1部分为试验开始阶段,试样局部发生棱角破坏,但由于肥料颗粒球形度较高,力先快速增大后变缓;第2部分为主体发生破坏的过程,当所施加的载荷超过试样所能承受的极限时,试样主体发生破坏,力达到最大值,此时为破坏点;第3部分随位移增加,力持续降低,试样破碎成块状。肥料颗粒加载位移为0.45 mm时加载应力最大值为58.668 N,即20粒直径为3.98 mm的包膜肥料颗粒平均极限破碎载荷为58.668 N,此时对应的极限破碎位移为0.45 mm。

1.3.2 仿真试验

采用离散元软件 EDEM 2018 建立与实际试验一致的单轴压缩仿真模拟试验,如图6所示。仿真中用到的包膜肥料颗粒本构参数、包膜肥料间和包膜肥料与 ABS 间的接触参数由实验室标定得到,ABS 的本构参数如表1所示^[23]。EDEM 中设置仿真总时间为8 s,时间步长为 7.5×10^{-7} s,每隔0.001 s保存1次数据,网格尺寸取3.5倍最小球形单元尺寸。

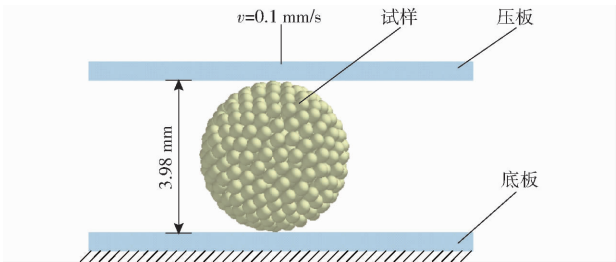


图6 单轴压缩试验仿真图

Fig.6 Simulation diagram of uniaxial compression test

2 Bonding 模型参数标定

2.1 Plackett – Burman 试验

Plackett – Burman 试验通过考察目标响应与各因子间的关系,比较各个因子2水平间的差异性来确定因子显著性。以极限破碎位移 Y_1 和极限破碎

表1 材料物理特性参数

Tab.1 Physical characteristic parameters of material		
项目	参数	数值
肥料	泊松比	0.225
	真实密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2474
	剪切模量/Pa	1.528×10^8
ABS	泊松比	0.394
	真实密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1060
	剪切模量/Pa	8.9×10^8
肥料-肥料	碰撞恢复系数	0.654
	静摩擦因数	0.189
	滚动摩擦因数	0.034
肥料-ABS	碰撞恢复系数	0.47
	静摩擦因数	0.42
	滚动摩擦因数	0.095

载荷 Y_2 为目标,以单位面积法向刚度 X_1 、单位面积切向刚度 X_2 、临界法向应力 X_3 、临界切向应力 X_4 和粘结半径 X_5 为 Plackett – Burman 试验的5个因子,每个因子选取2个水平。试验选用 $N = 11$ 的 Plackett – Burman 设计,预留6个虚拟项作误差分析,试验因素水平如表2所示。

表2 Plackett – Burman 试验因素水平

Tab.2 Plackett – Burman test factors and levels

水平	因素				
	$X_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$X_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	X_3/Pa	X_4/Pa	X_5/mm
1	6.40×10^9	1.28×10^{10}	4.00×10^5	8.00×10^5	0.16
2	9.60×10^9	1.92×10^{10}	6.00×10^5	1.20×10^6	0.24

Plackett – Burman 试验方案与结果如表3所示,利用 Design-Expert 8.0.6 软件对各因素效应分别进行方差分析和 t 检验,结果如表4和图7所示。

由表4和图7可知,各因素对极限破碎位移 Y_1 影响由大到小为 X_5 、 X_2 、 X_1 、 X_4 、 X_3 ,其中 X_5 、 X_2 、 X_1 的 P 值小于0.05,表明因素对目标影响显著,由帕累托图的 t -value 检验也可得出同样结论,且知 X_5 、 X_1 对目标的效应值为正, X_2 对目标的效应值为负。同理,可知各因素对极限破碎载荷 Y_2 影响由大到小为 X_5 、 X_1 、 X_4 、 X_2 、 X_3 ,其中 X_5 、 X_1 、 X_4 的 P 值小于0.05,表明因素对目标影响显著,由 Pareto Chart 的 t -value 检验也可得出同样结论,且知 X_5 、 X_1 、 X_4 对目标的效应值均为正。

各因素与极限破碎位移 Y_1 和极限破碎载荷 Y_2 的模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 0.065952 + 8.745 \times 10^{-12} X_1 - 5.003 \times 10^{-12} X_2 + \\ \quad 3.417 \times 10^{-9} X_3 + 5.004 \times 10^{-8} X_4 + 1.584 X_5 \\ Y_2 = -106.209 + 2.275 \times 10^{-9} X_1 + 4.768 \times 10^{-10} X_2 + \\ \quad 3.629 \times 10^{-6} X_3 + 1.733 \times 10^{-5} X_4 + 633.862 X_5 \end{cases}$$

(4)

表 3 Plackett – Burman 试验结果

Tab.3 Plackett – Burman test results

序号	$X_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$X_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	X_3/Pa	X_4/Pa	X_5/mm	Y_1/mm	Y_2/N
1	9.60×10^9	1.28×10^{10}	6.00×10^5	1.20×10^6	0.16	0.395	37.274
2	9.60×10^9	1.28×10^{10}	4.00×10^5	8.00×10^5	0.24	0.521	85.528
3	6.40×10^9	1.28×10^{10}	4.00×10^5	1.20×10^6	0.16	0.355	31.243
4	9.60×10^9	1.92×10^{10}	6.00×10^5	8.00×10^5	0.16	0.348	39.621
5	9.60×10^9	1.92×10^{10}	4.00×10^5	8.00×10^5	0.16	0.348	39.621
6	6.40×10^9	1.92×10^{10}	6.00×10^5	8.00×10^5	0.24	0.428	75.203
7	6.40×10^9	1.92×10^{10}	6.00×10^5	1.20×10^6	0.16	0.363	40.406
8	9.60×10^9	1.28×10^{10}	6.00×10^5	1.20×10^6	0.24	0.530	97.275
9	6.40×10^9	1.92×10^{10}	4.00×10^5	1.20×10^6	0.24	0.475	91.781
10	6.40×10^9	1.28×10^{10}	4.00×10^5	8.00×10^5	0.16	0.357	31.481
11	6.40×10^9	1.28×10^{10}	6.00×10^5	8.00×10^5	0.24	0.484	79.520
12	9.60×10^9	1.92×10^{10}	4.00×10^5	1.20×10^6	0.24	0.488	94.295

表 4 Plackett – Burman 试验结果显著性分析

Tab.4 Analysis of significance of parameters in Plackett – Burman test

方差来源	Y_1					Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.055	5	0.011	42.07	0.000 1 *	8 046.936	5	1 609.387	73.06	<0.000 1 *
X_1	0.002	1	0.002	9.02	0.023 9 *	159.034	1	159.034	7.22	0.036 2 *
X_2	0.003	1	0.003	11.81	0.013 9 *	27.941	1	27.941	1.27	0.303 1
X_3	0.000	1	0	0.01	0.943 9	1.581	1	1.581	0.07	0.797 8
X_4	0.001	1	0.001	4.62	0.075 3	144.188	1	144.188	6.55	0.043 0 *
X_5	0.048	1	0.048	184.92	<0.000 1 *	7 714.192	1	7 714.192	350.17	<0.000 1 *
残差	0.002	6	0			132.178	6	22.030		
总和	0.056	11				8 179.114	11			

注：* 表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。

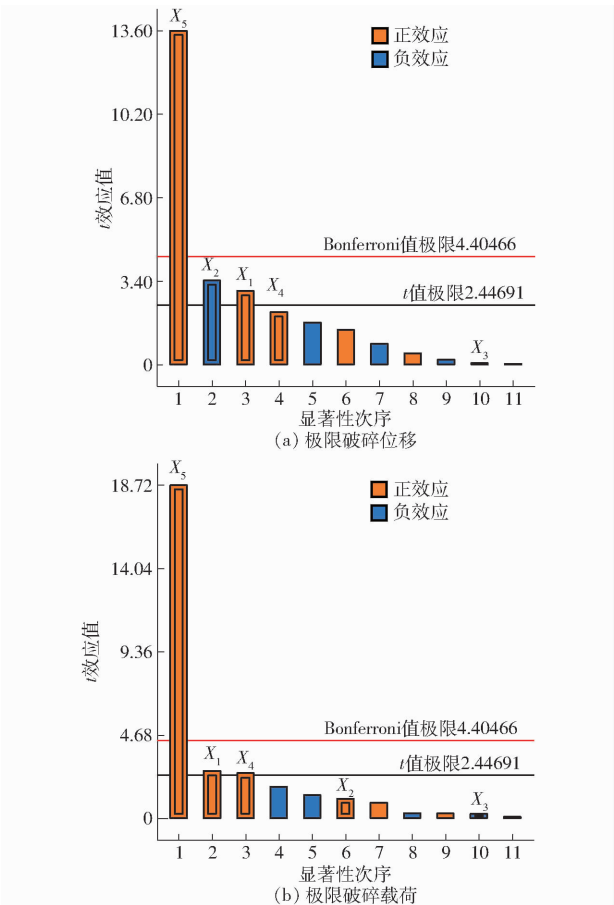


图 7 帕累托图

Fig.7 Pareto Charts

2.2 Steepest ascent 试验

根据 Plackett – Burman 试验结果, X_3 对结果影响不显著, 因此将 X_3 取为 $5\times10^5\text{ Pa}$ 。选取因素 X_1, X_2, X_4, X_5 初值分别为 $6.40\times10^9\text{ N/m}^3, 1.92\times10^{10}\text{ N/m}^3, 8.00\times10^5\text{ Pa}, 0.16\text{ mm}$, 步长分别为 $1.60\times10^9\text{ N/m}^3, -3.20\times10^9\text{ N/m}^3, 2.00\times10^5\text{ Pa}, 0.02\text{ mm}$, 进行 Steepest ascent 试验, 以进一步找到逼近真实值的参数组合, Steepest ascent 试验方案和结果如表 5 所示。

表 5 最速上升试验方案及结果

Tab.5 Steepest ascent test program and results

序号	$X_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$X_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	X_4/Pa	X_5/mm	Y_1/mm	Y_2/N
1	6.40×10^9	1.92×10^{10}	8.00×10^5	0.16	0.338	34.978
2	8.00×10^9	1.60×10^{10}	1.00×10^6	0.18	0.409	52.517
3	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.446	63.534
4	1.12×10^{10}	9.60×10^9	1.40×10^6	0.22	0.510	78.411
5	1.28×10^{10}	6.40×10^9	1.60×10^6	0.24	0.596	87.509
6	1.44×10^{10}	3.20×10^9	1.80×10^6	0.26	0.778	91.178

由 1.3.1 节可知, 肥料颗粒实际单轴压缩极限破碎位移和极限破碎位移载荷分别为 0.45 mm 、 58.668 N , 由表 5 可知, 仿真试验中极限破碎位移和载荷与真实值间的误差先减小后增大, 第 3 组试验的极限破碎位移 Y_1 和极限破碎载荷 Y_2 与真实值最接近。

2.3 Box – Behnken 试验

为得到最接近真实值的极限破碎位移 Y_1 和载荷 Y_2 , 根据 Steepest ascent 试验结果, 选取第 2 和第 4 组试验的因素组合为 BBD 试验的高低水平, 试验方案及结果如表 6 所示, 方差分析结果如表 7 所示。

由表 7 可知, Y_1 和 Y_2 的二次回归模型均高度显著, 且失拟项不显著, 表明模型精度高。 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 均显著且对 Y_1 的影响由大到小为 X_5 、 X_1 、 X_2 、 X_4 。 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 均显著且对 Y_2 的影响由大到小为 X_5 、 X_2 、 X_1 、 X_4 。

为准确求得各因素最优参数组合, 需尽量缩小约束条件范围, 已知 Y_1 和 Y_2 目标值分别为 0.45 mm、58.668 N, 由表 6 可知, 试验方案 2、13、15 和 19 的 Y_1 和 Y_2 最接近实际值, 且 X_5 均为 0.20 mm, 根据方差结果可知 X_4 对 Y_1 和 Y_2 的影响程度最小, 所以设定约束条件范围为

$$\begin{cases} Y_1 = 0.45 \text{ mm} \\ Y_2 = 58.668 \text{ N} \\ 8.00 \times 10^9 \text{ N/m}^3 \leq X_1 \leq 1.12 \times 10^{10} \text{ N/m}^3 \\ 9.60 \times 10^9 \text{ N/m}^3 \leq X_2 \leq 1.60 \times 10^{10} \text{ N/m}^3 \\ X_4 = 1.2 \times 10^6 \text{ Pa} \\ X_5 = 0.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行优化求解, 得到 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 分别为 $9.978\ 25 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、 $1.033\ 75 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ 、 $1.20 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、0.2 mm 时, Y_1 、 Y_2 分别为 0.450 mm、58.668 N, 对优化求解得到的参数组合进行仿真验证, 得到 Y_1 、 Y_2 仿真值分别为 0.451 mm、58.993 N, 与真实值的相对误差分别为

表 6 Box – Behnken 试验方案及结果

Tab.6 Box – Behnken test program and results

序号	$X_1 /$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	$X_2 /$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	X_4 / Pa	$X_5 /$ mm	$Y_1 /$ mm	Y_2 / N
1	8.00×10^9	9.60×10^9	1.20×10^6	0.20	0.429	50.912
2	1.12×10^{10}	9.60×10^9	1.20×10^6	0.20	0.460	59.502
3	8.00×10^9	1.60×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.457	67.451
4	1.12×10^{10}	1.60×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.501	76.627
5	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.00×10^6	0.18	0.426	50.365
6	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.40×10^6	0.18	0.442	49.713
7	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.00×10^6	0.22	0.489	78.101
8	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.40×10^6	0.22	0.501	82.113
9	8.00×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.18	0.417	46.928
10	1.12×10^{10}	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.18	0.438	54.649
11	8.00×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.22	0.473	75.757
12	1.12×10^{10}	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.22	0.502	85.544
13	9.60×10^9	9.60×10^9	1.00×10^6	0.20	0.447	55.659
14	9.60×10^9	1.60×10^{10}	1.00×10^6	0.20	0.474	68.583
15	9.60×10^9	9.60×10^9	1.40×10^6	0.20	0.467	55.823
16	9.60×10^9	1.60×10^{10}	1.40×10^6	0.20	0.497	75.251
17	8.00×10^9	1.28×10^{10}	1.00×10^6	0.20	0.421	57.637
18	1.12×10^{10}	1.28×10^{10}	1.00×10^6	0.20	0.484	69.357
19	8.00×10^9	1.28×10^{10}	1.40×10^6	0.20	0.437	57.564
20	1.12×10^{10}	1.28×10^{10}	1.40×10^6	0.20	0.520	77.509
21	9.60×10^9	9.60×10^9	1.20×10^6	0.18	0.419	43.007
22	9.60×10^9	1.60×10^{10}	1.20×10^6	0.18	0.442	56.567
23	9.60×10^9	9.60×10^9	1.20×10^6	0.22	0.510	73.710
24	9.60×10^9	1.60×10^{10}	1.20×10^6	0.22	0.544	90.897
25	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.452	63.534
26	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.440	63.534
27	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.442	63.534
28	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.455	63.534
29	9.60×10^9	1.28×10^{10}	1.20×10^6	0.20	0.459	63.534

表 7 方差分析

Tab.7 Analysis of variance

方差来源	Y_1					Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.807×10^{-2}	14	2.005×10^{-3}	9.828	<0.000 1 *	4 104.042	14	293.146	69.610	<0.000 1 *
X_1	6.120×10^{-3}	1	6.120×10^{-3}	30.004	<0.000 1 *	373.406	1	373.406	88.669	<0.000 1 *
X_2	2.791×10^{-3}	1	2.791×10^{-3}	13.682	0.002 4 *	780.246	1	780.246	185.277	<0.000 1 *
X_4	1.261×10^{-3}	1	1.261×10^{-3}	6.181	0.026 2 *	27.821	1	27.821	6.606	0.022 2
X_5	1.577×10^{-2}	1	1.577×10^{-2}	77.306	<0.000 1 *	2 848.780	1	2 848.780	676.471	<0.000 1 *
$X_1 X_2$	4.225×10^{-5}	1	4.225×10^{-5}	0.207	0.656 0	0.086	1	0.086	0.020	0.888 7
$X_1 X_4$	1.000×10^{-4}	1	1.000×10^{-4}	0.490	0.495 3	16.912	1	16.912	4.016	0.064 8
$X_1 X_5$	1.600×10^{-5}	1	1.600×10^{-5}	0.078	0.783 5	1.066	1	1.066	0.253	0.622 7
$X_2 X_4$	2.250×10^{-6}	1	2.250×10^{-6}	0.011	0.917 8	10.572	1	10.572	2.510	0.135 4
$X_2 X_5$	3.025×10^{-5}	1	3.025×10^{-5}	0.148	0.706 0	3.289	1	3.289	0.781	0.391 7
$X_4 X_5$	4.000×10^{-6}	1	4.000×10^{-6}	0.020	0.890 6	5.438	1	5.438	1.291	0.274 9
X_1^2	6.926×10^{-6}	1	6.926×10^{-6}	0.034	0.856 4	9.261	1	9.261	2.199	0.160 2
X_2^2	1.370×10^{-3}	1	1.370×10^{-3}	6.717	0.021 3 *	1.713	1	1.713	0.407	0.533 9
X_4^2	5.590×10^{-4}	1	5.590×10^{-4}	2.741	0.120 1	6.164	1	6.164	1.464	0.246 4
X_5^2	5.293×10^{-4}	1	5.293×10^{-4}	2.595	0.129 5	30.947	1	30.947	7.349	0.016 9 *
残差	2.856×10^{-3}	14	2.040×10^{-4}			58.957	14	4.211		
失拟项	2.583×10^{-3}	10	2.583×10^{-4}	3.781	0.105 8	49.891	10	4.989	2.201	0.232 4
总和	3.092×10^{-2}	28				4 162.999	28			

0.222%、0.554%。

3 肥料颗粒破碎率验证试验

3.1 试验条件

为进一步验证优化得到的肥料颗粒 Bonding 模型参数组合的可靠性,选取目前播种机上常用的外槽轮排肥器进行排肥性能试验,试验肥料为前文包膜肥料颗粒并过筛(孔径 3 mm)后备用,如图 8a 所示。每次试验称量 1 500 g 粒径大于 3 mm 的完整肥料颗粒,经外槽轮排肥器完全排出后再次过筛(孔径 3 mm),统计粒径小于 3 mm 的肥料质量,在不同排肥轮转速下进行试验,每组试验重复 3 次取平均值。采用三维软件 SolidWorks 2018 对排肥器进行建模并保存为 .IGS 文件,将模型导入离散元软件 EDEM 2018 中,如图 8b 所示。在与真实试验相同的排肥轮转速、槽轮有效工作长度条件下进行虚拟仿真试验,各条件下肥料颗粒破碎率 η 计算公式为

$$\eta = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$
 (6)

式中 m_1 ——粒径小于 3 mm 的肥料质量,g
 m_0 ——每次试验肥料总质量,取 1 500 g

3.2 试验结果

在排肥轮转速分别为 10、15、20、25、30 r/min 时得到肥料颗粒真实破碎率和仿真破碎率如图 9 所示。由图 9 可以看出,肥料颗粒仿真破碎率与真实情况相比误差为 9.42%~11.40%,说明本文标定得到的 Bonding 模型参数组合准确性高。

肥料颗粒在排肥轮和排肥舌的挤压、摩擦作用下,颗粒间粘结键断裂,整个颗粒从中间破碎为两大块,颗粒破碎仿真过程如图 10 所示。由图 10d~10f 可以看出,在排肥轮和肥料刚接触时,肥料除受挤压

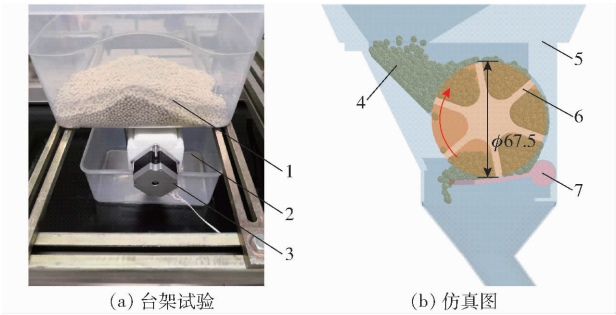


图 8 肥料颗粒破碎试验

Fig. 8 Fertilizer particles crushing test

1. 肥料 2. 接肥盒 3. 步进电机 4. 仿真肥料颗粒 5. 外壳
6. 排肥轮 7. 排肥舌

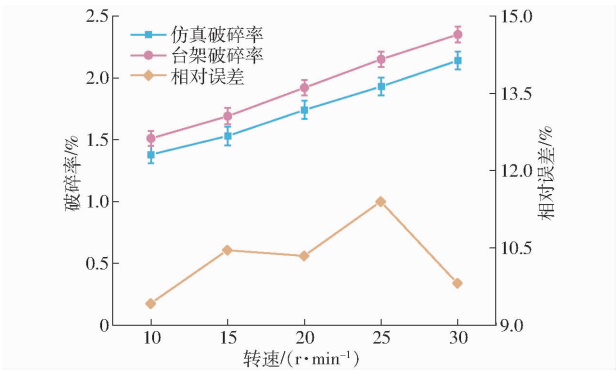


图 9 不同转速下肥料颗粒破碎率

Fig. 9 Fertilizer particles crushing rate at different rotational speeds

力外,还伴随滚动,说明实际情况下肥料颗粒包膜材料还会发生研磨现象,此过程不会破碎肥料颗粒,但在一定程度上破坏包膜结构,进而影响肥料养分释放过程。

4 结论

(1)通过单轴压缩试验得到包膜肥料颗粒的极限破碎位移和极限破碎载荷分别为 0.45 mm、58.668 N。

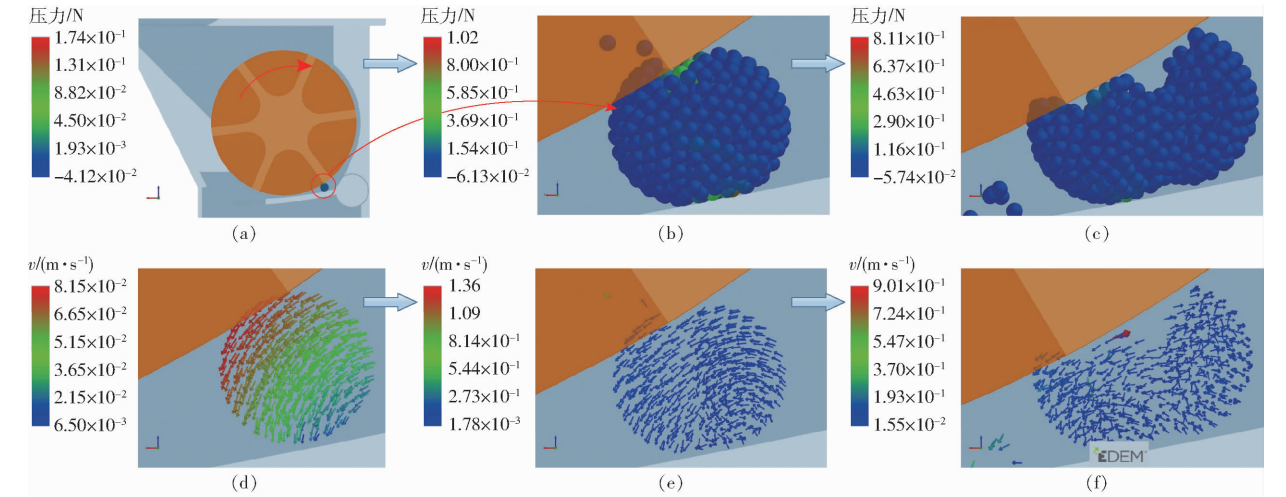


图 10 排肥过程中肥料颗粒破碎仿真过程

Fig. 10 Fertilizer granules crushing simulation

(2) Plackett – Burman 试验结果表明, 粘结半径、单位面积切向刚度和单位面积法向刚度对极限破碎位移影响显著, 粘结半径、单位面积法向刚度和临界切向应力对极限破碎载荷影响显著。

(3) Box – Behnken 试验结果表明, 粘结半径、单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力和粘结半径均对极限破碎位移和极限破碎载荷影响显著。优化求解得到当单位法向刚度、单位面积切向刚度、临界切向应力和粘结半径

分别为 $9.978\ 25 \times 10^9\ \text{N/m}^3$ 、 $1.033\ 75 \times 10^{10}\ \text{N/m}^3$ 、 $1.20 \times 10^6\ \text{Pa}$ 、 $0.2\ \text{mm}$ 时, 极限破碎位移和极限破碎载荷分别为 $0.450\ \text{mm}$ 、 $58.668\ \text{N}$ 。最优参数条件下得到极限破碎位移和极限破碎载荷与真实值的相对误差分别为 0.222% 、 0.554% 。

(4) 外槽轮排肥器排肥结果显示, 在排肥轮转速分别为 10 、 15 、 20 、 25 、 $30\ \text{r/min}$ 时肥料颗粒真实破碎率和仿真破碎率相对误差不大于 11.40% , 说明本文标定得到的 Bonding 模型参数组合准确性高。

参 考 文 献

- [1] CHOJNACKA K, MOUSTAKAS K, WITEK-KROWIAK A. Bio-based fertilizers: a practical approach towards circular economy [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 295: 122223.
- [2] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 1–8.
BAI Youlu. Challenges and opportunities of fertilizer industry in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(1): 1–8. (in Chinese)
- [3] 杨相东, 李娟, 孙明雪, 等. 聚乙烯包膜肥料控释膜层结构特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2032–2043.
YANG Xiangdong, LI Juan, SUN Mingxue, et al. Morphological structure and pore property of polyethylene controlled-release film sprayed on urea [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(12): 2032–2043. (in Chinese)
- [4] XIANG Y, RU X, SHI J, et al. Preparation and properties of a novel semi-IPN slow-release fertilizer with the function of water retention [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(50): 10851–10858.
- [5] CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489.
- [6] MARA H. China's push to add by subtracting fertilizer [J]. *Science*, 2010, 327(5967): 801.
- [7] LI Y, SUN Y, LIAO S, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizer and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity greenhouse tomato [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186: 139–146.
- [8] CHEN S, YANG M, BA C, et al. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615(32): 431–437.
- [9] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 1–20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)
- [10] CUNDALL P A, STRACK O D L G. Discrete numerical model for granular assemblies [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(4): 47–65.
- [11] LU G, THIRD J R, MÜLLER C R. Discrete element models for non-spherical particle systems: from theoretical developments to applications [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 127: 425–465.
- [12] SHEN Z, JIANG M, THORNTON C. DEM simulation of bonded granular material. Part I: contact model and application to cemented sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 75: 192–209.
- [13] GAO F, STEAD D, ELMO D. Numerical simulation of microstructure of brittle rock using a grain-breakable distinct element grain-based model [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 78: 203–217.
- [14] KUDRYAVTSEV O A, SAPOZHNIKOV S B. Numerical simulations of ceramic target subjected to ballistic impact using combined DEM/FEM approach [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 114: 60–70.
- [15] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329–1364.
- [16] YOON J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(6): 871–889.
- [17] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(7): 997–1010.
- [18] ERGENZINGER C, SEIFRIED R, EBERHARD P. A discrete element model predicting the strength of ballast stones [J]. *Computers & Structures*, 2012, 108–109: 3–13.
- [19] HARE C, GHADIRI M, GUILLARD N, et al. Analysis of milling of dry compacted ribbons by distinct element method [J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 149: 204–214.
- [20] COETZEE C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape [J]. *Powder Technology*, 2016, 297(8): 50–70.
- [21] 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 parameters for corn seeds based on EDEM [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(22): 36–42. (in Chinese)
- [22] 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 93–99.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 93–99. (in

Chinese)

[23] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 82 – 89.
LIU Cailing, WEI Dan, SONG Jiannong, et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 82 – 89. (in Chinese)

[24] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21 – 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 21 – 27. (in Chinese)

[25] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123 – 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 – 132. (in Chinese)

[26] 韩树杰,戚江涛,坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 101 – 108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101 – 108. (in Chinese)

[27] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 227 – 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227 – 235. (in Chinese)

[28] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 343 – 350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343 – 350. (in Chinese)

[29] 彭飞,王红英,方芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 140 – 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140 – 147. (in Chinese)

[30] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125 – 135.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 91 页)

[17] YE J, ZHAO X, WANG Y, et al. A novel planar motion generation method based on the synthesis of planetary gear train with non-circular gears[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(2): 4939 – 4949.

[18] 孙良,胡艺翔,邢子勤,等. 基于近似多位姿的轮系式钵苗移栽机构运动综合[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 103 – 111.  
SUN Liang, HU Yixiang, XING Ziqin, et al. Motion synthesis of rotary pot seedling transplanting mechanism based on approximate multi-pose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 103 – 111. (in Chinese)

[19] 吴国环,俞高红,叶秉良,等. 行星轮系水稻钵苗移栽机构正反求设计方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 85 – 93, 102.  
WU Guohuan, YU Gaohong, YE Bingliang, et al. Forward-reverse design method for rice potted-seedling transplanting mechanism with compound planetary gear train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 85 – 93, 102. (in Chinese)

[20] 华瑶. 基于二次不等幅传动比行星轮系取苗机构的研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.  
HUA Yao. Research of planetary gear train seedling pic-up mechanism based on two-unequal-amplitude transmission ratio[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)

[21] MUNDO D. Geometric design of a planetary gear train with non-circular gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(4): 456 – 472.

[22] 谭伟明,梁燕飞,安军,等. 渐开线非圆齿轮的齿廓曲线数学模型[J]. 机械工程学报, 2005, 38(5): 75 – 79.  
TAN Weiming, LIANG Yanfei, AN Jun, et al. Mathematical model for tooth profile of non-circular in volute gears[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 38(5): 75 – 79. (in Chinese)

[23] 刘大伟,任廷志. 由补偿法构建封闭非圆齿轮节曲线[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 147 – 152.  
LIU Dawei, REN Tingzhi. Creating pitch curve of closed non-circular gear by compensation method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 147 – 152. (in Chinese)

[24] CHEN Zaigang, SHAO Yimin. Mesh stiffness of a internal spur gear pair with ring gear rim deformation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 69: 1 – 12.