doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.013

基于 Bonding V2 模型的蒜种离散元建模与参数标定

李　骅[1]　孟煜柏[2,3]　齐新丹[2]　王永健[1,3]　李玉青[1,3]　李明阳[2,3]

(1.南京农业大学工学院, 南京 210095; 2.南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816;
3.江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 针对利用离散元法进行大蒜精准播种及收获等关键作业过程仿真分析时,蒜种内部黏结参数缺乏的问题,选取邳州白蒜为研究对象,利用 EDEM 软件建立了一种可破碎的蒜种离散元柔性模型,并对其黏结参数进行标定。以处理后不带皮蒜种块临界破碎载荷(105.5 N)及位移(4.7 mm)为参考依据,通过 Plackett－Burman、最陡爬坡试验和 Box－Behnken 试验,对蒜种离散元模型进行显著性筛选和寻优。结果表明:最优参数中单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、法向强度、剪切强度和黏结半径比例分别为 5.115×10^8 N/m^3、2.3×10^7 N/m^3、1.265×10^6 Pa、54 454.594 Pa、1.716。此时,仿真不带皮蒜种块临界破碎载荷和位移分别为 116.6 N、5.13 mm,与前期不带皮蒜种试验误差分别为 9.5%、12.7%,与带皮蒜种试验(临界破碎载荷和位移分别为 107.5 N 和 4.8 mm)误差分别为 7.8%、7.4%,验证了模型的准确性。建立的蒜种离散元模型可为后续振动充种受力分析及姿态调整提供参考。

关键词: 蒜种; 离散元模拟; 参数标定; Bonding V2 模型

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0150-08　　**OSID**:

Discrete Element Modelling Method and Parameter Calibration of Garlic Species Based on Bonding V2 Model

LI Hua[1]　MENG Yubai[2,3]　QI Xindan[2]　WANG Yongjian[1,3]　LI Yuqing[1,3]　LI Mingyang[2,3]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*
2. *College of Mechanical and Power Engineering*, *Nanjing Tech University*, *Nanjing* 211816, *China*
3. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: Aiming at the lack of internal bonding parameters of garlic species when using the discrete element method for the simulation and analysis of garlic precision sowing and harvesting and other key operational processes, Pizhou white garlic was selected as the research object, and a discrete element flexible model of crushable garlic species was established by using the EDEM software, and the bonding parameters of the species were calibrated. Taking the critical crushing load (105.5 N) and displacement (4.7 mm) of the processed garlic species pieces without skin as the reference basis, the significance screening and optimization searching of the discrete element model of garlic species were carried out by Plackett－Burman, the steepest climb test and Box－Behnken test. The results showed that the optimal parameter combinations of normal stiffness per unit area, tangential stiffness, normal strength, shear strength and adhesion radius ratio were 5.115×10^8 N/m^3, 2.3×10^7 N/m^3, 1.265×10^6 Pa, 54 454.594 Pa, and 1.716, respectively. At this time, the critical crushing load and displacement of simulated non-peeled garlic species pieces were 116.6 N and 5.13 mm, with the previous test without skinned garlic species, the error was 9.5% and 12.7%, and with the test with skinned garlic species (critical crushing load and displacement of 107.5 N and 4.8 mm, respectively), the error was 7.8% and 7.4%, which verified the accuracy of the model. The establishment of the discrete element model of garlic species can provide a reference for the subsequent vibratory species filling force analysis and attitude adjustment.

Key words: garlic species; discrete elements simulate; parameter calibration; Bonding V2 mode

收稿日期: 2024－11－20　修回日期: 2024－12－16

基金项目: 江苏省现代农业装备和技术示范推广项目(NJ2021－12、NJ2022－09)和江苏省中晚熟大蒜产业集群子项目

作者简介: 李骅(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事精准种收技术与装备研究,E-mail: lihua@njau.edu.cn

0　引言

中国大蒜种植面积位居世界首位[1]，然而，该产业正遭遇劳动力短缺、生产成本高昂及效率低下等挑战[2]，这为大蒜生产机械化提供了巨大的发展潜力。

排种器作为播种机的核心部件，在播种过程中具有重要作用[3-5]。随着计算机技术的成熟，越来越多学者利用离散元法研究散粒体物料运动特性。目前在相关领域，农作物排种装置一般可分为机械式和气力式[6-7]。机械式排种器对种子的形状特征要求严格，容易出现卡种、漏种等问题[8]；相比之下，气力式排种器对种子外形尺寸具有较高的适应性，容易实现精量播种[9]。

在进行离散元模拟或者离散元与流体力学联合仿真[10]时，对研究对象的物理力学参数进行精确表征[11]必不可少。在传统离散元仿真中，学者常利用多球聚合模型[12]构建研究模型，但这种模型在振动播种[13]过程中无法模拟挤压变形和破碎损坏等现象；限制了其在模拟种群受力上的准确性。王万章等[14]在采用多球面填充法构建刚性茎秆模型基础上，进一步基于 Hertz－Mindlin with Bonding 接触模型构建了小麦柔性茎秆模型，该接触模型可承受一定的法向和切向位移。张佳喜等[15]运用离散元对棉花秸秆接触参数和黏结参数进行仿真试验，以堆积角和弯曲破坏载荷为目标，利用 Design-Expert 软件寻优，得到最佳参数组合。JIANG 等[16]采用 API 建模方法在离散元软件中建立烟条颗粒模型，以休止角为响应值，确定了烟条间的摩擦因数。离散元法在现代农业装备研究中已被广泛运用于建立各类模型。然而，针对蒜种的柔性离散元模型构建及其黏结参数的精确标定，目前尚未有相关研究报道。

为构建大蒜柔性离散元模型[17]，本文以邳州白蒜为研究对象，通过多组单轴压缩与剪切试验，测得临界破碎载荷和位移。利用 EDEM 软件中的 Bonding V2 黏结模型[18]黏结成元颗粒模型，通过建立与物理试验相同的仿真模型，利用筛选设计试验（PBD）、最陡爬升试验、正交响应面试验（BBD）对最佳黏结参数组合进行寻优，得到与物理试验结果最接近的 Bonding 模型参数组合，使得黏结参数组合能够精确反映物理参数。通过单轴压缩试验验证模型可靠性，以期为后续蒜种精准播种与收获过程中仿真分析提供基础参数。

1　蒜种参数测定

1.1　物性参数

选取江苏省徐州市邳州市的邳州白蒜作为研究对象，考虑样本的特殊性和普遍性，按照“蒜形饱满，粒粒相近”原则，挑选出 1 000 粒目标蒜种，利用五点采样法[19]对蒜种进行采集。对其进行基本物性参数测量与统计，结果如表 1 所示。

表 1　蒜种基本物性参数

Tab. 1　Geometric dimensions of garlic species

项目	参数				
	长度 L/mm	宽度 W/mm	厚度 T/mm	含水率/%	千粒质量/g
范围	22.21 ~ 32.79	12.63 ~ 20.95	8.78 ~ 17.89	59.10 ~ 59.60	3 490 ~ 3 780
均值	28.07	16.19	12.82	59.37	3 623
变异系数/%	5.26	11.83	17.58		

1.2　力学参数

由表 1 可知，蒜种含水率为 60% 左右，但蒜种含水率对蒜种的黏聚力、流动函数值并无显著影响，仅对其自身力学物理性质有影响[20]。

为了得到蒜种力学参数，使用 DR－509A 型万能试验机（东莞东日仪器有限公司，位移分解度 0.01 mm，精度 ±0.01%）对蒜种块进行压缩和剪切试验。在蒜种上，随机切割边长为 7 mm 的蒜种块，以速度 0.1 mm/s 进行压剪试验，分别进行 5 次试验。得到最大挤压力 $F_{n,\max}$ 为 109.752 N、最大剪切力 $F_{t,\max}$ 为 2.997 N、最小挤压力 $F_{n,\min}$ 为 86.628 N、最小剪切力 $F_{t,\min}$ 为 1.947 N，及其所对应的位移 $L_{n,\max}$ 为 3.958 mm、$L_{t,\max}$ 为 2.065 mm、$L_{n,\min}$ 为 3.277 mm、$L_{t,\min}$ 为 2.262 mm。

蒜种法向压缩应力-应变曲线如图 1 所示。第 1 阶段为压密阶段，此时应力-应变曲线为上凹型，即应变 ε 随着应力 σ 的增加而减少；蒜种内部结构孔隙率减小，蒜种被压密。第 2 阶段为弹性变形阶段，此时应力-应变曲线呈直线型；若卸载，蒜种块会恢复到初始状态。第 3 阶段为稳定破裂阶段，此时应力-应变曲线开始出现下凹趋势；蒜种块表面开始出现微裂纹。第 4 阶段为非稳定破裂阶段，此时应

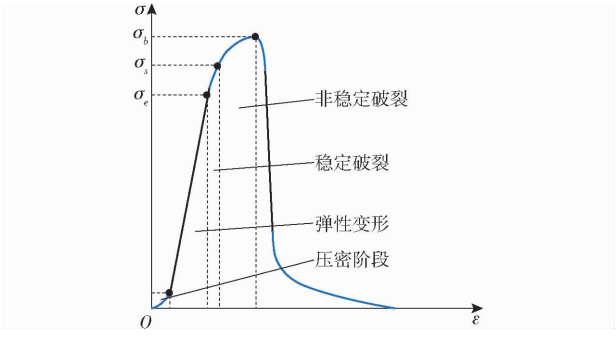


图 1　蒜种法向压缩应力-应变曲线

Fig. 1　Normal compressive stress－strain curve of garlic species

力-应变曲线呈下凹形;蒜种块裂纹快速扩展,即从无序向有序转化,蒜种块整体形态发生显著改变,随着压头下压,达到临界破裂状态,此后随着压头的下压,蒜种块崩溃,压头受力卸载波动归零。

5 次试验的蒜种压缩载荷-位移曲线如图 2 所示。5 次试验取平均值,得到蒜种块受压时临界破碎位移为 4.7 mm,对应载荷为 105.5 N。

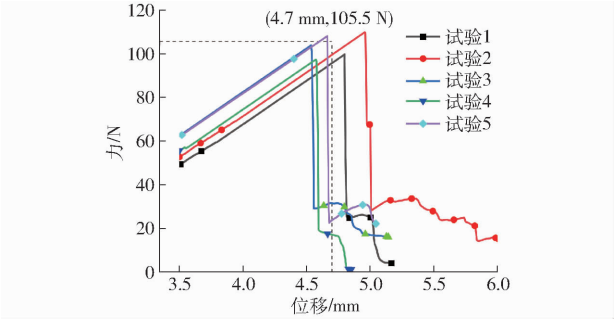


图 2 蒜种法向压缩位移-载荷曲线

Fig. 2 Normal compression displacement - load curves of garlic species

2 离散元仿真试验

2.1 接触破碎模型

离散单元法[21]由美国学者 CUNDALL 在 20 世纪 70 年代初提出。其原理是将不连续体分离为刚性单元体,各单元体满足运动方程,运用迭代方法进行循环迭代计算刚性单元体的运动方程,得到研究对象宏观运动规律。Hertz - Mindlin with Bonding V2 接触模型采用球体之间镶嵌重叠将颗粒组合体连接,球体单元以 Bond 键相互黏结方式构造,黏结点可承受来自外界的切向和法向位移,黏结破碎需满足达到最大法向和切向剪切应力的判断准则。模型示意图如图 3 所示。

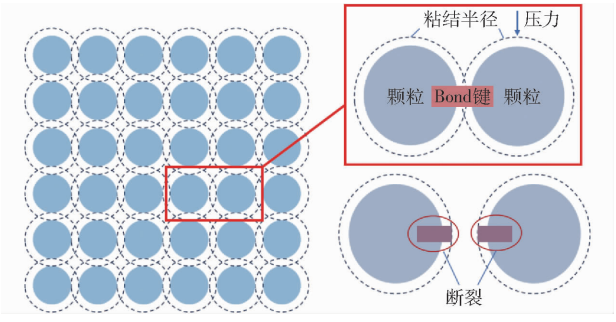


图 3 Bonding 模型示意图

Fig. 3 Schematic of Bonding model

通过以往研究可知[22],Bonding V2 键抵抗破碎的力学属性主要由于单位面积法向刚度 K_n、单位面积剪切刚度 K_t、法向强度 C_n、剪切强度 C_t、黏结半径比例决定。其中,黏接半径比例为仿真虚拟量,无法通过试验得到。而刚度参数可以根据公式计算,计算式为

$$K_n = \frac{F_n}{S_n L_n} \tag{1}$$

$$K_t = \frac{F_t}{S_t L_t} \tag{2}$$

$$C_n = \frac{F_{n,\max}}{S_{n,\max}} \tag{3}$$

$$C_t = \frac{F_{t,\max}}{S_{t,\max}} \tag{4}$$

式中 F_n、F_t——法向挤压力、剪切力,N

L_n、L_t——挤压位移、剪切位移,mm

S_n、S_t——当量挤压接触面积、当量剪切接触面积,mm^2

$S_{n,\max}$、$S_{t,\max}$——挤压、剪切时受力达到最大时的接触面积,mm^2

由式(1)~(4)可知,Bonding V2 键的破碎力学模型为线性模型,其破碎模型示意图如图 4 所示。

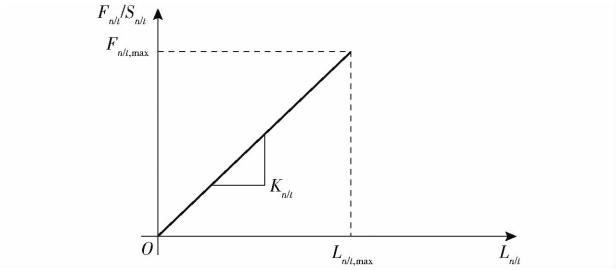


图 4 Bonding V2 键破碎模型示意图

Fig. 4 Schematic of Bonding V2 bonding cleavage model

2.2 试验模型选取

由于蒜种物理属性的不确定性、试验仪器系统误差以及试验数据处理的精度等问题,会导致结果误差大。所以,选择通过模拟仿真的方法进行参数标定。

考虑到以整个蒜种进行参数标定时,由于蒜种外形的变异系数大,使测量具有较大的不确定性,又因为对于单位面积的测量,有难以忽略的测量误差,从而在最终参数计算上会有较大误差;对蒜种不同部分进行 100 倍电镜试验,可以发现,蒜种内部结构较为简单,蒜种组织结构[23]分为外皮层、维管束、芯部和绵连层等,如图 5 所示。综合考虑整体试验的测量误差以及局部代替整体的方法,可以发现后者误差较小。选择局部代替整体的方法进行仿真试验。

2.3 蒜种块离散元模型

构建与前期试验一致的蒜种块,基于 Hertz - Mindlin with Bonding V2 黏结接触模型,设置黏结半径为 0.2 mm、接触半径为 0.3 mm 的填充颗粒,蒜种黏结模型如图 6 所示。

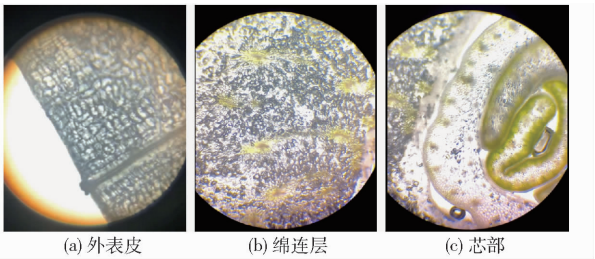


图 5　蒜种组织结构电镜图

Fig. 5　Tissue structure electron micrographs of garlic species

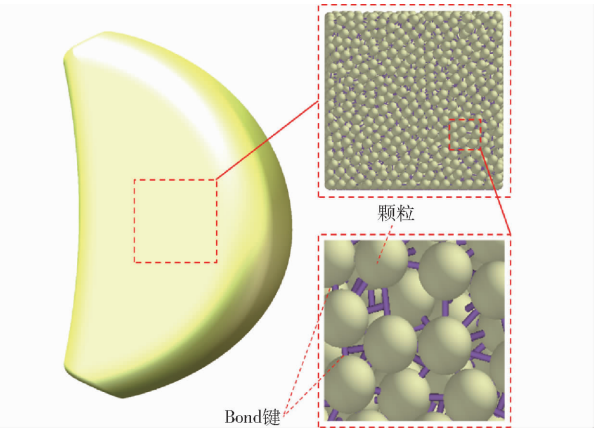


图 6　蒜种块黏结模型

Fig. 6　Garlic species block bonding model

2.4　仿真参数设置

利用离散元仿真软件 EDEM 2022 进行单轴压缩试验，如图 7 所示。构建立方体蒜种块模型，填充颗粒数量为 5 532 个，颗粒间 Bond 键数量为 35 644 个。仿真试验数据保存间隔为 0.01 s，总时长为 20 s，时间步长为 4.501×10^{-7} s[24]，综合考虑计算精度及效率，设置流体网格孔隙率的下限值即网格尺寸为颗粒直径的 3 倍。根据预试验和文献[25]得到仿真参数如表 2 所示。

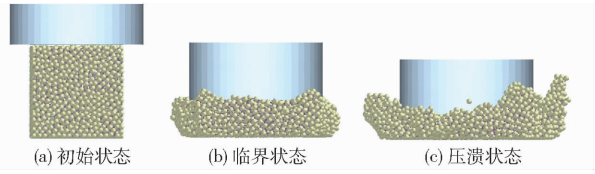


图 7　蒜块挤压数值模拟试验

Fig. 7　Numerical simulation tests of garlic block extrusion

2.5　试验方案设计

Bonding 模型由单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界挤压应力、剪切强度和黏结半径比例 5 个参数共同决定黏结键强度。以法向压缩试验作为数值模拟试验，为探究各参数对其极限位移及载荷影响的显著性，以极限破碎位移 Y_1 和极限破碎载荷 Y_2 为目标，以单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、法向强度、剪切强度和黏结半径比例为变量。为获取对试验结果有显著效应的参数，采用 Plackett－Burman 试验(PBD)方法，观察显著因素 t 值正负效应，确定最陡爬坡试验路径方向，对仿真过程中其余不显著因素取中间值。基于上述 PBD 结果，进行最陡爬坡试验，确定显著仿真因素最佳范围；最后采用 Box－Behnken 试验(BBD)进行响应面优化分析，获取试验仿真最佳参数。

表 2　离散元仿真参数

Tab. 2　Discrete element simulation parameters

材料	参数	数值
蒜种	泊松比	0.25
	密度/(kg·m^{-3})	1 080
	弹性模量/Pa	1.0×10^{8}
钢板	泊松比	0.28
	密度/(kg·m^{-3})	7 800
	弹性模量/Pa	7.9×10^{10}
蒜种–蒜种	碰撞恢复系数	0.487
	静摩擦因数	0.503
	滚动摩擦因数	0.108
蒜种–钢板	碰撞恢复系数	0.500
	静摩擦因数	0.473
	滚动摩擦因数	0.111

3　仿真试验结果与分析

3.1　Plackeet－Burman 试验

Plackett－Burman 试验的 5 个因素为单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、法向强度、剪切强度和黏结半径比例，选用 $N=11$ 的 Plackett－Burman 试验设计，预留 6 个虚拟项进行误差分析，由式(1)～(4)以及临界状态参数，计算得出 5 个试验因素编码值，如表 3 所示。

表 3　Plackeet－Burman 试验因素编码

Tab. 3　Plackeet－Burman test factors and codes

参数	编码	
	−1	1
单位面积法向刚度 x_1/(N·m^{-3})	4.90×10^{8}	5.70×10^{8}
单位面积切向刚度 x_2/(N·m^{-3})	1.70×10^{7}	2.90×10^{7}
法向强度 x_3/Pa	1.13×10^{6}	1.40×10^{6}
剪切强度 x_4/Pa	3.90×10^{4}	6.00×10^{4}
黏结半径比例 x_5	1.60	2.40

Plackett－Burman 试验结果如表 4 所示，A、B、C、D、E 为因素编码值。为了得到各因素显著性效应，利用 Design-Expert 进行方差分析和 t 检验选取影响显著的因素，结果分别如表 5、图 8 所示。

通过表 5 和图 8 可知，对蒜种块挤压试验极限破碎位移 Y_1 的影响由大到小依次为 A、D、E、B、C，影响因素 A、D、E 为显著影响，其中 D 为正效应，A、E 为负效应；同理，对于极限破碎载荷 Y_2 的影响由大

表 4 Plackeet – Burman 试验结果

Tab. 4 Results of Plackeet – Burman test

序号	因素					响应值	
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	Y_1/mm	Y_2/N
1	1	1	–1	–1	–1	4.2	100.74
2	–1	1	1	1	–1	4.7	100.44
3	1	1	–1	1	1	4.2	131.92
4	–1	–1	1	–1	1	4.2	105.19
5	–1	1	–1	1	1	4.8	117.55
6	–1	1	1	–1	1	4.2	131.47
7	–1	–1	–1	1	–1	4.7	95.78
8	1	–1	–1	–1	1	3.7	117.29
9	1	–1	1	1	1	4.1	129.23
10	1	–1	1	1	–1	4.5	97.45
11	–1	–1	–1	–1	–1	4.5	100.59
12	1	1	1	–1	–1	4.4	87.96

到小依次为 E、D、B、A、C，影响因素 E 为显著影响并且为正效应。

各因素对法向挤压试验极限破碎位移 Y_1 与极限破碎载荷 Y_2 的回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 4.35 - 0.166\,7A + 0.066\,7B + 0.000\,1C + \\ \qquad 0.15D - 0.15E \\ Y_2 = 109.63 + 1.13A + 2.05B - 1.01C + 2.43D + \\ \qquad 12.47E \end{cases} \tag{5}$$

3.2 最陡爬坡试验

根据 Plackeet – Burman 试验结果可知，x_2、x_3 对目标值影响不显著，因此 x_2、x_3 取中间值，即 x_2 为 2.3×10^7 N/m^3、x_3 为 1.265×10^6 Pa。选取 x_1、x_4、x_5 初始值分别为 5.7×10^8 N/m^3、4.2×10^4 Pa、2.4。

表 5 Plackeet – Burman 方差分析

Tab. 5 Variance analysis of Plackeet – Burman

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	0.93	5	0.19	7.76	0.013 5	2 015.80	5	403.16	4.490 0	0.047 5
A	0.33	1	0.33	13.95	0.009 7	15.35	1	15.35	0.171 1	0.693 6
B	0.05	1	0.05	2.23	0.185 7	50.23	1	50.23	0.559 8	0.482 6
C	1.11×10^{-16}	1	1.11×10^{-16}	4.65×10^{-15}	1.000 0	12.26	1	12.26	0.136 7	0.724 3
D	0.27	1	0.27	11.3	0.015 2	70.71	1	70.71	0.788 2	0.408 8
E	0.27	1	0.27	11.3	0.015 2	1 867.26	1	1 867.26	20.810 0	0.003 8
残差	0.14	6	0.02			538.28	6	89.71		

注：$0.01\leqslant P<0.05$ 表示差异显著，$P<0.01$ 表示差异极显著。下同。

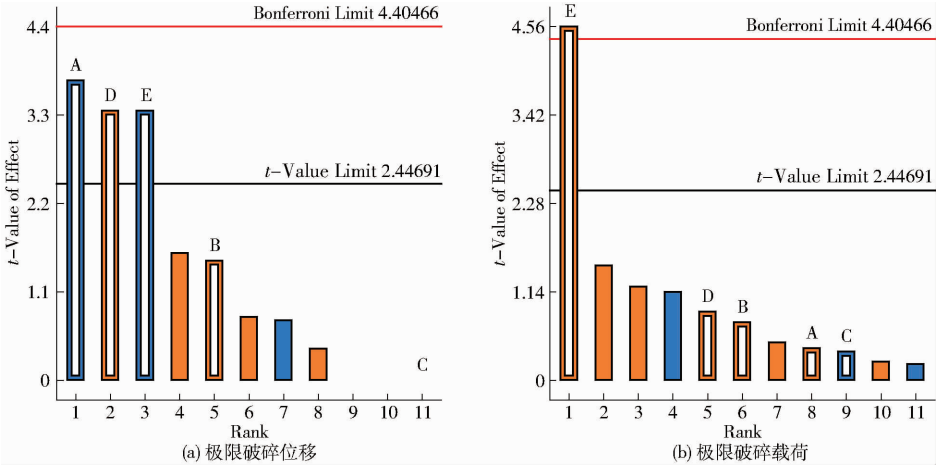


图 8 帕累托图

Fig. 8 Pareto charts

根据 Design-Expert 所拟合的多元一次方程式(5)中各因素的效应系数并结合前期单因素试验结果的经验值来设计爬坡步长，确定 x_1、x_4、x_5 步长分别为 -1.6×10^7 N/m^3、5×10^3 Pa、–0.2 进行最陡爬升试验，为了得到最接近标准值的参数组合，设计最陡爬升试验方案及结果如表 6 所示。通过前期试验可知，蒜种块单轴压缩时极限破碎位移和极限破碎载荷分别为 4.7 mm、105.5 N，表 6 显示：位移载荷与响应值的误差先减后增，其中第 5 组试验结果与响应值误差最小，分别为 3.0%、2.6%，因此最佳参数组合取值范围在试验 5 附近取得。取试验 4、5、6 参数组合分别为低、中、高水平进行后续 Box – Behnken 数值模拟试验。

表 6　最陡爬坡试验方案及结果

Tab. 6　The steepest climb test program and results

序号	因素			Y_1/	Y_1误	Y_2/	Y_2误
	x_1/(N·m^{-3})	x_4/Pa	x_5	mm	差/%	N	差/%
1	5.70×10^8	3.91×10^4	2.4	5.9	25.5	88.1	16.1
2	5.54×10^8	4.32×10^4	2.2	3.6	24.5	115.1	9.6
3	5.38×10^8	4.74×10^4	2.0	3.7	21.5	112.6	7.2
4	5.22×10^8	5.16×10^4	1.8	3.8	18.7	110.2	4.9
5	5.06×10^8	5.58×10^4	1.6	4.5	3.0	102.4	2.6
6	4.80×10^8	6.00×10^4	1.4	5.5	15.7	90.2	14.2

3.3　Box－Behnken 试验

以试验 4、5、6 参数组合分别为低(－1)、中(0)、高水平(1)进行 Box－Behnken 试验，试验因素编码如表 7 所示。试验选取各中心点对试验误差进行评估，试验方案及结果如表 8 所示，G、H、I 为因素 x_1、x_4、x_5 编码值。

表 7　试验因素编码

Tab. 7　Experimental factors and codes

编码	因素		
	x_1/(N·m^{-3})	x_4/Pa	x_5
－1	4.80×10^8	5.16×10^4	1.4
0	5.06×10^8	5.58×10^4	1.6
1	5.22×10^8	6.00×10^4	1.8

表 8　Box－Behnken 试验方案及结果

Tab. 8　Box－Behnken test program and results

序号	因素			响应值	
	G	H	I	Y_1/mm	Y_2/N
1	1	0	－1	5.41	88.50
2	1	－1	0	4.25	103.89
3	0	－1	－1	5.27	90.79
4	0	－1	1	3.94	109.81
5	0	0	0	4.42	102.64
6	0	0	0	4.45	103.32
7	－1	0	－1	5.36	72.11
8	0	0	0	4.40	101.83
9	－1	0	1	4.05	107.31
10	－1	1	0	4.07	106.30
11	1	0	1	3.84	108.44
12	0	1	－1	5.36	88.72
13	－1	－1	0	4.52	100.85
14	0	1	1	4.15	109.25
15	1	1	0	4.60	102.08
16	0	0	0	4.40	102.55
17	0	0	0	4.70	105.40

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析，建立响应值与离散元参数之间的回归关系。对其进行方差分析，如表 9 所示。

响应值 Y_1、Y_2 对应回归模型 $P<0.0001$，说明响应值与所得回归方程的关系极显著；失拟项 $P=0.1564>0.05$，$P=0.3762>0.05$，说明所得回归方程实际拟合中非正常误差比例小，拟合性较好。进行二次回归模型方差分析，Y_1、Y_2 对应回归方程为

$$Y_1=4.47+0.0125G+0.025H-0.6775I+0.2GH-0.065GI+0.03HI-0.0645G^2-0.0495H^2+0.2555I^2 \quad (6)$$

$$Y_2=105.148+2.06375G+0.1475H+11.83625I-1.7725GH-3.815GI+0.3775HI-3.689G^2+1.8635H^2-7.369I^2 \quad (7)$$

表 9　Box－Behnken 试验方差分析

Tab. 9　Box－Behnken test analysis of variance

来源	Y_1		Y_2	
	F	P	F	P
模型	264.46	<0.0001	76.51	<0.0001
G	717.67	<0.0001	1.53	0.2558
H	0.29	0.6081	78.14	<0.0001
I	210.66	<0.0001	50.36	<0.0001
GH	9.18	0.0191	0.56	0.4769
GI	0.97	0.3576	2.62	0.1498
HI	0.21	0.6633	0.03	0.8774
G^2	1.00	0.3495	2.57	0.1526
H^2	0.59	0.4669	0.66	0.4443
I^2	15.77	0.0054	10.27	0.0151
失拟项	3.03	0.1564	1.35	0.3762

响应面坡度越陡说明该因素对于响应值的影响越显著，G、H、I 对 Y_1、Y_2 的交互影响如图 9 所示，其结果与表 9 中交互项 P 值的分析结果一致。

根据 Box－Behnken 试验结果与回归方程，以物理试验所得的极限破碎载荷与位移为目标，利用 Design-Expert 软件的 Numerical 模块对因素 G、H、I 进行最优解分析，以物理试验结果为参考，设定约束寻优条件为

$$\begin{cases}-1\leqslant G\leqslant1\\-1\leqslant H\leqslant1\\-1\leqslant I\leqslant1\end{cases} \quad (8)$$

得到单位面积法向刚度、剪切强度、黏结半径比例分别为 5.115×10^8 N/m^3、54 454.594 Pa、1.716；根据上述试验，单位面积切向刚度和法向强度分别为 2.3×10^7 N/m^3、1.265×10^6 Pa，以此为最优参数进行蒜种内部黏结参数验证试验。

4　试验验证

蒜种块单轴挤压试验分别以带皮蒜种块、不带皮蒜种块作为试验对象，设置压头速度为 0.1 mm/s，多次试验取平均值。在 EDEM 软件中建立与物理试验一致的仿真试验，将优化后的参数代入离散元模型中进行单轴压缩试验，试验过程如图 10 所示。

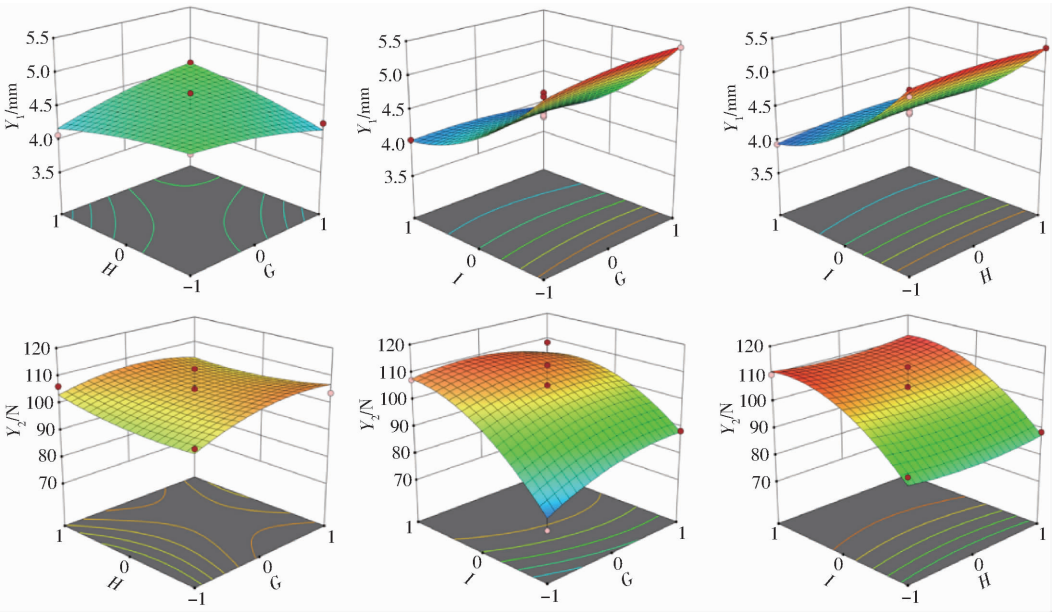


图 9 交互因素响应面图

Fig. 9 Interaction factor response surface diagrams

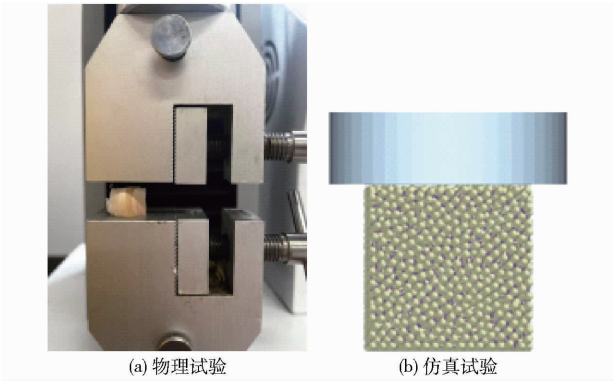


图 10 蒜种块挤压试验

Fig. 10 Garlic species crush tests

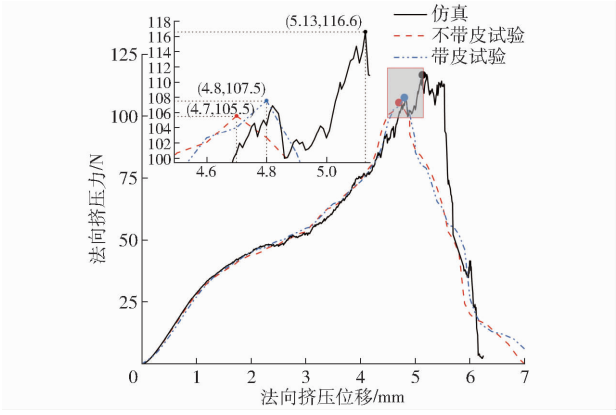


图 11 仿真与试验结果对比

Fig. 11 Comparison of simulation and experiment result

载荷随位移变化曲线,与物理试验进行对比结果如图 11 所示,仿真得到极限破碎位移 Y_1 为 5.13 mm,极限破碎载荷 Y_2 为 116.6 N;与不带皮蒜种块单轴压缩物理试验的极限破碎位移(4.7 mm)、极限破碎载荷(105.5 N)的相对误差分别为 12.7%、9.5%,与带皮蒜种块单轴压缩物理试验的极限破碎位移(4.8 mm)、极限破碎载荷(107.5 N)的相对误差分别为 7.4%、7.8%。误差来源于蒜种含水率以及前期切割处理所产生的挤压变形。带/不带皮蒜种块的力学参数相近,相比之下,在单轴压溃试验中带皮蒜种块与仿真试验结果更接近,误差更小。

5 结论

(1)为测得蒜种的材料力学性能,利用万能试验机对蒜种块进行单轴压缩试验,测得蒜种块极限破碎位移和极限破碎载荷分别为 4.7 mm、105.5 N。

(2)为对所建模型黏结参数进行标定,利用 Placket-Burman 试验找出显著因子,最陡爬坡试验缩小参数区间,Box-Behnken 试验确定最优参数组合。通过优化工具求解得到单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、法向强度、剪切强度、黏结半径比例分别为 5.115×10^8 N/m^3、2.3×10^7 N/m^3、1.265×10^6 Pa、54 454.594 Pa、1.716。

(3)为了验证模型的准确性,利用最佳参数组合进行仿真试验,对比仿真和物理试验结果,不带皮、带皮蒜种的极限破碎位移及载荷的误差分别为 12.7%、9.5% 和 7.4%、7.8%;临界状态前仿真与试验结果相似,证明了蒜种块黏结参数的可靠性,可为蒜种播种与收获等方面的离散元仿真研究提供参考。

参 考 文 献

[1] 祝捍敏. 我国大蒜出口贸易与国际竞争力评价分析[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(10): 111 - 116.
ZHU Hanmin. Evaluation and analysis on China's garlic export trade and international competitiveness[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(10): 111 - 116. (in Chinese)

[2] 田绍华,刘荣国,王萍. 大蒜全程机械化现状及发展趋势[J]. 山东农机化, 2019(6): 25 - 27.

[3] 李玉华,张智龙,李天华,等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 61 - 68.
LI Yuhua, ZHANG Zhilong, LI Tianhua, et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 61 - 68. (in Chinese)

[4] 侯加林,刘威,张万枝,等. 气力托勺式马铃薯精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 18 - 28.
HOU Jialin, LIU Wei, ZHANG Wanzhi, et al. Design of precision pneumatic cup seed-metering device for potato [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 18 - 28. (in Chinese)

[5] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 44 - 53.
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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44 - 53. (in Chinese)

[6] 祁亚卓,相姝楠. 国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 205 - 208.
QI Yazhuo,XIANG Shu'nan. Research status and development trend of vegetables specieser at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 205 - 208. (in Chinese)

[7] 胡童,齐新丹,李骅,等. 国内外蔬菜播种机的应用现状与研究进展[J]. 江西农业学报, 2018, 30(2): 87 - 92.
HU Tong,QI Xindan,LI Hua,et al. Application status and research progress of vegetable seeder in China and foreign countries [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(2): 87 - 92. (in Chinese)

[8] 侯加林,方立志,张海阔,等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 65 - 75, 163.
HOU Jialin, FANG Lizhi, ZHANG Haikuo, et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 65 - 75, 163. (in Chinese)

[9] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 9 - 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxin, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 - 20. (in Chinese)

[10] 尚增强,张开飞,杨东福,等. 基于 DEM - CFD 耦合的气吸式大豆排种器种盘参数优化[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 1 - 8.
SHANG Zengqiang, ZHANG Kaifei, YANG Dongfu, et al. Simulation optimization of seed plate of air suction soybean seed-metering device based on DEM - CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(11): 1 - 8. (in Chinese)

[11] CHEN Z, DUAN A, LIU Y, et al. Discrete element contact model and parameter calibration of sticky particles and agglomerates[J]. Journal of Terramechanics, 2024, 116: 100998.

[12] ZHANG P, LI F, WANG F. Optimization and test of ginger-shaking and harvesting device based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108257.

[13] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108 - 115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108 - 115. (in Chinese)

[14] 王万章,刘婉茹,袁玲合,等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 170 - 180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 170 - 180. (in Chinese)

[15] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 77 - 84.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(1): 77 - 84. (in Chinese)

[16] JIANG W, WANG L, TANG J, et al. Calibration and experimental validation of contact parameters in a discrete element model for tobacco strips[J]. Processes, 2022, 10(5): 998.

(下转第 169 页)

hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(5):158 – 166. (in Chinese)

[22] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(6):80 – 90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):80 – 90. (in Chinese)

[23] 顿国强, 郭娜, 纪欣鑫, 等. 红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(5):77 – 86, 97.
DUN Guoqiang, GUO Na, JI Xinxin, et al. Design and experiment of side-hung seed-rowing spoon type precision seed metering device for radish[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):77 – 86, 97. (in Chinese)

[24] 张佳喜,张彭,张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(1):76 – 84, 108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):76 – 84, 108. (in Chinese)

(上接第 **157** 页)

[17] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 146 – 155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146 – 155. (in Chinese)

[18] LI S, HUAN X, WANG T, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[19] REN J, LIU X, YANG W, et al. Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113650.

[20] 黄振华,陈海涛,房欣,等. 含水率对大豆秸秆流动力学性能的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(5): 847 – 850.
HUANG Zhenhua, CHEN Haitao, FANG Xin, et al. Flowability parameters for chopped soybean stalk[J]. Soybean Science, 2011, 30(5): 847 – 850. (in Chinese)

[21] 徐爽,朱浮声,张俊. 离散元法及其耦合算法的研究综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(1): 8 – 20.
XU Shuang, ZHU Fusheng, ZHANG Jun. A overview of the discrete method and its coupling algorithms[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(1): 8 – 20. (in Chinese)

[22] 李晖,王宝钢,史子昂,等. 基于 EDEM 的膨化饲料离散元参数标定及其破碎机制研究[J]. 中国饲料, 2024(7): 126 – 132.
LI Hui, WANG Baogang, SHI Ziang, et al. Calibration of discrete element parameters of extruded feed based on EDEM and study on its crushing mechanism[J]. China Feed, 2024(7): 126 – 132. (in Chinese)

[23] 郭菊叶,蒋芳玲,吴震,等. 不同品种薹用大蒜花薹发育进程及其形态和解剖学观察[J]. 上海农业学报, 2009, 25(3): 42 – 46.
GUO Juye, JIANG Fangling, WU Zheng, et al. The observation of organ development of different bolting garlic cultivars in morphology and anatomy[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2009, 25(3): 42 – 46. (in Chinese)

[24] 孟杰,孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49 – 51.
MENG Jie, MENG Wenjun. Analysis of influencing factor on results of EDEM simulation[J]. Mechanical Engineering and Aotomation, 2014(6): 49 – 51. (in Chinese)

[25] 文恩杨,李玉华,牛子孺,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 160 – 167.
WANG Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameters calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 160 – 167. (in Chinese)