

基于离散元的黑木耳菌棒刺孔与摆场下落过程分析与试验

姜程杰¹, 杜小强^{1,2,3,4}, 杨振华⁵, 洪方伟¹, 赵威¹, 张国凤^{1,2,3,4}, 陈洪立^{1*}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018; 3. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310018; 4. 浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室, 杭州 310018; 5. 龙泉市菇源自动化设备有限公司, 丽水 323700)

摘要: 针对黑木耳菌棒在刺孔和摆场作业时内部菌料运动难以观测的问题, 同时为实现准确模拟菌料受载情况和运动规律, 该研究基于离散元法对菌棒内不同尺寸菌料的本征参数与接触参数进行标定, 通过测定菌料参数, 基于堆积角最优参数组合, 进行菌棒刺孔仿真与实验, 仿真与试验结果的孔深相对误差和孔径相对误差分别为 3.6% 和 4.5%, 验证了仿真的有效性。为了评估落地冲击对菌棒出耳孔变形的影响, 模拟半自动摆场机工作时菌棒下落的过程, 得到相较于顶端出耳孔, 底端出耳孔孔径和孔深分别减小 12.3% 和 14.3%, 表明落地冲击使菌棒不同高度部位出耳孔变形呈现出自下而上逐渐减弱, 底端出耳孔的变形最大。仿真得到孔径和孔深最小值分别为 3.2 和 32.5 mm, 满足发耳要求。

关键词: 离散元; 仿真; 参数标定; 菌棒; 刺孔; 黑木耳

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406077

中图分类号: S3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-24-0030-09

姜程杰, 杜小强, 杨振华, 等. 基于离散元的黑木耳菌棒刺孔与摆场下落过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(24): 30-38. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406077 <http://www.tcsae.org>
JIANG Chengjie, DU Xiaoqiang, YANG Zhenhua, et al. Analysis and test of black fungus stick piercing and laying falling process based on discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(24): 30-38. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406077 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是世界第一大黑木耳生产国, 产量占世界总产量的 90% 以上^[1]。目前, 黑木耳产业已从规模型向质量型转变, 迫切需要在现有生产条件下提高产业效益^[2]。但目前国内黑木耳刺孔装置在刺孔深度和孔径合格率方面仍存在不足, 这对出耳特性、产量指标、木耳品质及采收时期均有较大影响^[3]。此外, 机械化菌棒摆场技术尚不成熟, 摆场机作业时菌棒受到挤压、剪切、冲击和摩擦等力学作用, 导致出耳孔发生变形, 不仅影响木耳的产量, 还会降低成品木耳的质量, 从而降低经济效益。因此, 研究菌棒在刺孔和摆场过程中的力学特性, 成为开发适宜菌棒配套机器的关键所在。

菌棒在刺孔和摆场过程中的冲击变形持续时间极短, 这给试验设备完全捕捉菌料颗粒间的接触行为带来了巨大的挑战。DEM (discrete element method) 能够考虑单个粒子的形状、性质以及作用在其上的力^[4-5], 从而在微观尺度上展现颗粒运动行为^[6]。DAI 等^[7]采用三维逆向仿真工程技术建立了百合球茎离散元模型, 以百合球茎的堆积角为响应值, 对碰撞恢复系数、滚动摩擦系数和静摩擦系数进行校准。WANG 等^[8]采用离散元法模拟振

动耕作, 发现振动齿相较于刚性齿能够更长时间地扰动土壤颗粒, 从而实现更好的土壤断裂效果。ZENG 等^[9]进行幼苗穴盘自由落体冲击试验, 借助 EDEM 软件建立穴盘落体冲击仿真模型, 为后续移栽操作模拟提供参考。CUI 等^[10]探讨了移栽机、插秧、土壤和穴盘损伤机制之间相互作用的模型, 并对模拟参数进行分析, 建立穴盘离散元模型, 揭示穴盘在移栽过程中不同位置时的运动规律, 以及穴盘与播种机或土壤发生碰撞时的内部结构松动和破裂情况, 为后续播种机的优化设计奠定了基础。然而, 上述研究仅使用单一尺寸颗粒进行建模, 无法全面反映实际的颗粒尺寸分布。

为此, 本文对不同形状菌料的本征参数进行测量, 采用物理试验和仿真试验相结合, 以朗氏法自然堆积角试验测得的堆积角为响应值, 通过 Plackett-Burman、最陡爬坡和 Box-Behnke 试验得到最优参数。建立菌棒离散元模型, 模拟刺孔和摆场作业时内部菌料的运动规律, 以出耳孔变形量为试验指标, 将仿真结果与刺孔和摆场试验进行比较分析, 验证模型的准确性。

1 黑木耳菌料参数测定

试验以浙江省丽水市龙泉市(北纬 27°, 东经 118°)生产栽培的黑木耳菌棒(黑山 15 号)为研究对象^[11], 抽取同批生产的菌棒, 使用游标卡尺对菌棒外形尺寸测量, 平均直径 11.0 cm, 高度 22 cm。菌料配比为: 主料阔叶木屑 91% (颗粒大小 0.8~9.0 mm, 多数为块状、片状), 辅料麸皮 8% (0.2~1.3 mm, 多数为粒状), 石灰 1%, 符合 NY5099-2002^[12] 要求, 含水率 55%~60%。

收稿日期: 2024-06-21 修订日期: 2024-08-12

基金项目: 浙江省农业“双强”重点突破试点项目

作者简介: 姜程杰, 研究方向为农业机械设计。

Email: 1183984504@qq.com

*通信作者: 陈洪立, 博士, 副教授, 研究方向为机电一体化技术。

Email: chenhlid@zstu.edu.cn

选用 11.0 cm×22.0 cm×0.1 cm 的聚乙烯筒袋，填充密度约为 600 kg/m³，单个菌棒质量（湿）为 1.2~1.3 kg。

1.1 含水率

含水率影响粘附力、内聚力的大小，继而造成堆积角的不同，需对菌料进行含水率测量^[13]。用电子天平（量程 0~300.0 g；精度 0.1 g）称取铝盒质量 m ，取部分新鲜菌料置于铝盒内，称取总质量 M_s 。将样品放入 100 °C 恒温干燥箱中烘干 5 h 后每隔 1 h 称一次，直至质量不再改变，称取质量 M ，含水率 v 计算如下：

$$v = \frac{M_s - M}{M_s - m} \times 100\% \quad (1)$$

共取 5 份菌料进行测量，得到平均含水率为 58.76%。

1.2 外形尺寸

由于菌棒内菌料尺寸差异较大，为了准确构建菌料的离散元仿真模型，对菌料外形特征进行分类。如图 1 所示，将菌料外形特征分为块状、片状和粒状^[14]。为确定各类菌料的特征尺寸，随机选取 10 份 100 g 菌料，使用游标卡尺（精度 0.1 mm）测量每种形状颗粒特征尺寸。同时，通过筛网统计每种形状菌料颗粒的质量占比，结果如表 1，由于粒状菌料的尺寸细小且湿度较大，颗粒之间易发生粘结，因此难以准确测量其尺寸分布。

由表 1 可知，块状菌料和片状菌料占比较大，因此后续建立菌料模型时以这两种菌料为主。根据测试结果，块状菌料和片状菌料尺寸峰值为 7 mm×6 mm×2 mm 和 5 mm×1.7 mm×1.5 mm，对于难以测量的粒状菌料，其峰值尺寸用均值 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm 表示。



图 1 菌料形状示意图
Fig.1 Schematic diagram of fungal material shape

表 1 菌料特征尺寸

Table 1 Fungal material characteristic size

菌料形状 Fungal material shape	特征尺寸 Characteristic size/mm	质量占比 Quality percentage/%
块状 Bulk	长 L_k	5.9~8.3
	厚 T_k	1.4~2.7
	宽 W_k	4.8~7.2
片状 Sliced	长 L_p	3.3~6.7
	厚 T_p	0.9~2.1
	宽 W_p	1.4~2.0
粒状 Granular	长 L_l	0.2~1.0
	厚 T_l	0.2~1.1
	宽 W_l	0.2~1.0

1.3 密度

菌料属于散装小颗粒物料，测定标准以 GB/T4472-2011 中固体密度容积方法为准。电子天平称取 50.0 g 菌料，倒入量筒中，并用玻璃棒进行按压确保菌料不存在间隙，记录菌料体积，重复测量 10 组，计算得出菌料平均密度为 435.1 kg/m³。

1.4 泊松比和弹性模量

由于菌料长宽尺寸较为规整，采用万能试验机对菌料进行单轴压缩试验^[15]，随机抽取 10 份菌料，测量菌料

初始长度 L 和宽度 H 。

将菌料置于试验台面上，设置加载速度 5 mm/min，沿长度方向加载 30.0 s 后停止，测量长度变形量 ΔL 和宽度变形量 ΔW ，共测 10 份。通过式（2）计算得出菌料泊松比 μ_0 为 0.298，本文取 0.3。

$$\mu_0 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\Delta W/W}{\Delta L/L} \quad (2)$$

式中 ε_1 为横向应变； ε_2 为纵向应变； W 为试验前菌料厚度，mm；

压缩探头在试验结束后自动复位，重复试验 10 次，利用式（3）~（4）计算得到菌料弹性模量均值为 1.3 GPa，剪切模量均值为 0.54 GPa。

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

式中 E 为弹性模量，MPa； F 为探头施加菌料的轴向载荷，N； A 为接触面积，m²； G 为剪切模量，MPa。

1.5 堆积角

堆积角直观反映颗粒物的运动和摩擦特性。当散粒体物质在某个特定的高度受到重力的影响而自由下落时，会在母线和水平面之间形成一个特殊的夹角，即堆积角^[16]。从漏斗顶部匀速倒入 100 g 菌料。菌料在重力作用下自然下落，并堆积在铁板上，如图 2 所示，使用 Matlab 对图像进行灰度处理、二值化处理，由于二值化处理完的图像内部空白间隙较多，影响边缘点检测的结果，对图像进行离群点处理和 Canny 边缘检测，并使用最小二乘法拟合图像。共测试 10 组，得到菌料堆积角（AOR）均值为 42.52°。

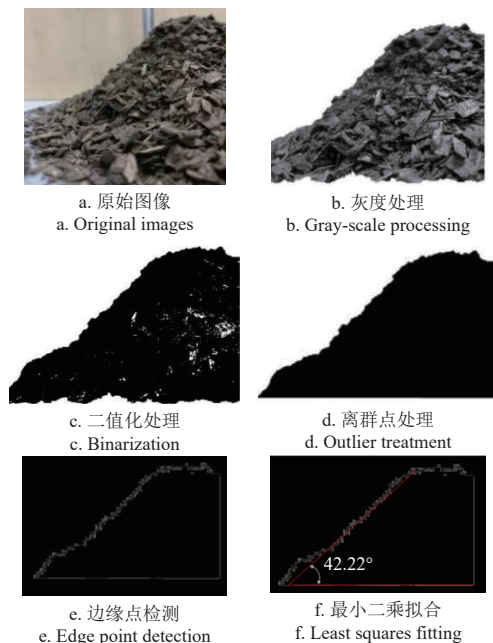


图 2 堆积角值的测量与分析过程

Fig.2 Test and analysis process of angle of repose (AOR) value

1.6 摩擦系数

如图 3a 所示，自制斜面测量仪测量菌料-不锈钢板间的静摩擦系数^[17]，将菌料水平铺撒在试验台面上，斜

面一侧与水平试验台面始终固定,电机缓慢拉紧钢丝,通过滑轮匀速抬升钢板另一侧,倾角缓慢增大,当被测物质沿斜面发生位移或有移动趋势时,停止转动并记录水平仪显示倾角 θ ^[18] (范围: $0^\circ \sim 360^\circ$, 精度: 0.05°)。重复 5 次试验,由式 (5) 计算得到菌料-不锈钢板静摩擦系数平均为 0.468, 平均倾斜角度值为 24.443° 。

$$\mu = \frac{mg \sin \theta}{mg \cos \theta} = \tan \theta \quad (5)$$

式中 μ 为测试材料的静摩擦系数; m 为菌料的质量, kg; g 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。

菌料间静摩擦的方向性取决于材料特性和接触面状况。例如,菌料表面的纤维方向、颗粒形状都会导致摩擦力在不同方向上呈现差异,为选取部分菌料紧密粘附在钢板上表面,如图 3b 所示,在已粘附的菌料表面继续铺撒菌料,测量 3 组后,替换底部菌料,重复上述试验过程,确保每组菌料样本接触面的纤维方向和颗粒形状均不相同,以符合菌料在堆积过程中相互间的摩擦作用,5 组试验倾斜角均值分别为 42.95° , 43.10° , 42.85° , 43.15° , 42.90° , 说明菌料间的方向性对静摩擦因数影响较小,由此确定菌料间静摩擦系数均值为 0.932。

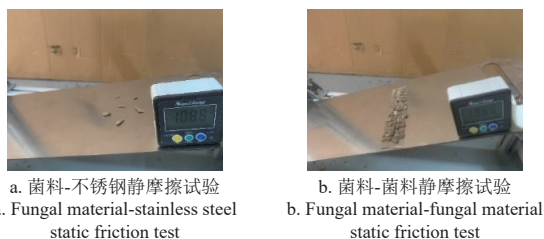


图 3 静摩擦系数测试
Fig.3 Test of static friction coefficient

2 黑木耳菌料离散元参数标定试验

2.1 离散元模型建立

2.1.1 菌料模型

为提高离散元仿真真实性,需构建准确的颗粒模型^[19]。

使用 Solidworks 软件对菌料进行建模,使用 ANSYS 中 mesh 模块进行网格划分,将保存的 .msh 模型导入 Fluent,使用 userdefine 模块读取并编译 CalcRadius.c,执行 CalcRadius Volume,获取信息坐标。在 EDEM 完成坐标导入,在保持模型形状和接触面大小前提下,通过增加颗粒尺寸和减少颗粒数量来填充模型,采用 0.5 和 0.4 mm 的球形颗粒进行填充,得到菌料离散元模型,如图 4 所示。根据 EDEM Statis 数据可得块状菌料、片状菌料和粒状菌料填充颗粒数分别为 114、92 和 7。

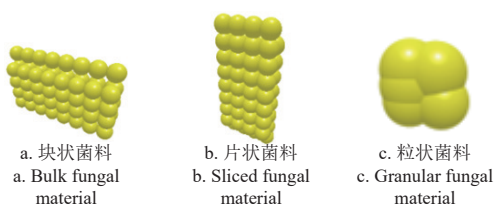


图 4 菌料离散元模型
Fig.4 Fungal material discrete element model

2.1.2 接触模型

合适的接触模型能确保仿真结果的可靠性,由于菌料含水率为 60% 左右,具有粘附力和内聚力^[9],选取 EDEM 中 Hertz-Mindlin with JKR。考虑材料结构特性及其在碰撞和冲击过程中的运动响应,采用非线性接触模型还原离散单元处理的球形颗粒之间的相互作用。

2.2 菌料静摩擦仿真试验

为减少试验误差^[20],将滚动摩擦系数设置为 0,碰撞恢复系数统一设置为 0.2。由于碰撞恢复系数未进行标定,需要延长仿真时间以确保菌料静止在试验台上。菌料开始滑动后记录倾角,经过实际测量,取菌料-不锈钢静摩擦系数 m_1 为 0.3~0.6。

每组进行 5 次仿真试验,结果取均值,如表 2 所示。

表 2 静摩擦系数仿真试验方案与结果
Table 2 Static friction coefficient simulation test scheme and results

序号 No.	静摩擦系数 Static friction coefficient m_1	倾角 Inclined angle/($^\circ$)
1	0.30	16.812
2	0.35	19.771 6
3	0.40	22.322 6
4	0.45	24.534 3
5	0.50	26.181 8
6	0.55	28.462
7	0.60	30.824 8

对表 2 中的数据进行曲线拟合,如图 5 所示。

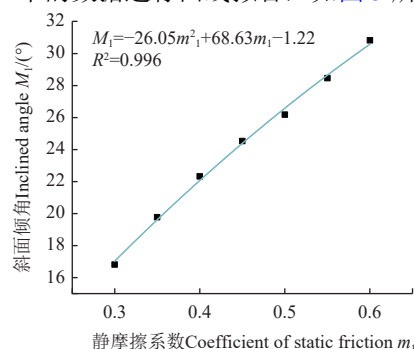


图 5 静摩擦系数仿真试验拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of static friction coefficient simulation test

将物理试验得到的静摩擦参数 0.932 代入多项式,得到 $m_1=0.443$,通过 EDEM 进行 3 组试验,得到的平均斜面倾角为 24.871° ,与实际测量结果的相对误差为 1.76%,说明标定后的仿真结果与实际物理试验相符的^[14,24],因此确定菌料-不锈钢静摩擦系数为 0.443。

2.3 堆积角仿真试验

仿真参数根据 EDEM 中的 GEMM 材料库和相关文献^[21]确定,如表 3 所示。

在 EDEM 软件中,导入一个漏斗模型(内径 40 mm,长 260 mm),在漏斗口正下方 50 mm 处搭建圆盘,漏斗内建立虚拟平面生成粒子。

由于菌料粒径不同,需动态生成粒子,块状、片状及粒状菌料的生成速度设置分别为 0.35、0.25 s 和 0.05 kg/s,生成菌料总质量为 0.55 kg。总模拟时间为 2 s,步长 0.05 s,菌料沿漏斗下落至圆盘逐步堆积直至形成料堆。

堆积结束后,在堆积菌料添加 Y 方向的横切面,对切面图像进行处理得到堆积角值,同时对 X 方向横切面的堆积角测定,如图 6 所示,将两者均值作为仿真堆积角的最终结果。

表 3 EDEM 仿真参数
Table 3 Simulation parameters of EDEM

仿真参数 Simulation parameter	数值 Value
菌料泊松比	0.3
不锈钢板泊松比	0.28
菌料剪切模量/Pa	5.4×10^8
不锈钢剪切模量/Pa	8.2×10^{10}
菌料密度/(kg·m ⁻³)	420
不锈钢密度/(kg·m ⁻³)	7 850
菌料-菌料碰撞恢复系数	0.1~0.3
菌料-菌料静摩擦系数	0.8~1.1
菌料-菌料滚动摩擦系数	0.01~0.15
菌料-不锈钢碰撞恢复系数	0.1~0.3
菌料-不锈钢静摩擦系数	0.443
菌料-不锈钢滚动摩擦系数	0.01~0.1
菌料表面能/J	2~14

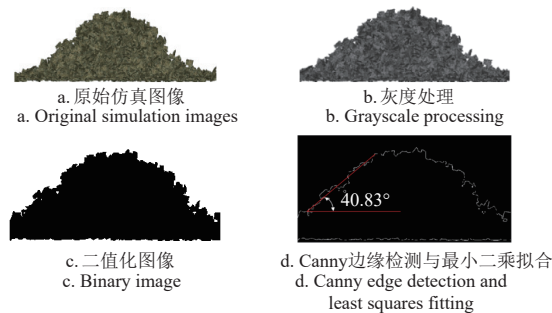


图 6 堆积角仿真测试
Fig.6 Stacking angle simulation test

2.4 Plackett-Burman 检验

以物理堆积角为响应值进行模型参数标定。由于仿真过程需要设定的未知参数过多，在试验前通过 Plackett-Burman 试验进行检验^[22]，筛选出对试验有显著影响的因子。本文采用 Design-Expert 13 软件选取影响朗氏堆积角试验参数的 6 个因素进行检验。表 4 为各仿真参数的取值范围。表 5 为 Plackett-Burman 试验的 12 组测试结果，检测结果的方差分析如表 6 所示。

表 4 Plackett-Burman 试验参数
Table 4 Plackett-Burman test parameters

参数 Parameter	低水平 Low level	高水平 High level
菌料-菌料碰撞恢复因数 X_1	0.2	0.3
菌料-菌料静摩擦因数 X_2	0.8	1.0
菌料-菌料滚动摩擦因数 X_3	0.01	0.2
菌料-不锈钢板碰撞恢复因数 X_4	0.01	0.3
菌料-不锈钢板滚动摩擦因数 X_5	0.01	0.05
菌料表面能 X_6 /J	2	14

表 5 Plackett-Burman 试验方案与结果
Table 5 Plackett-Burman test scheme and results

序号 No.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	堆积角 Stacking angle/(°)
1	0.3	0.8	0.20	0.30	0.01	14	59.98
2	0.3	1.0	0.20	0.30	0.05	2	43.29
3	0.2	0.8	0.20	0.01	0.05	14	70.15
4	0.3	1.0	0.01	0.01	0.01	14	52.48
5	0.3	0.8	0.01	0.01	0.05	2	29.68
6	0.3	1.0	0.01	0.30	0.05	14	37.29
7	0.2	1.0	0.20	0.30	0.01	2	44.75
8	0.2	0.8	0.01	0.30	0.01	14	50.95
9	0.2	0.8	0.01	0.01	0.01	2	33.12
10	0.2	1.0	0.01	0.30	0.05	2	27.61
11	0.3	1.0	0.20	0.01	0.01	2	45.97
12	0.2	1.0	0.20	0.01	0.05	14	75.05

由表 6 可知模型显著性指标 $P<0.05$ ，决定因数为 $R^2=0.965\ 4$ ，模型显著，可预测各参数的影响趋势。此外， X_3 和 X_6 的 $P<0.01$ ，表明 X_3 和 X_6 对堆积角有极显著影响； X_4 的 $P<0.05$ ，表明 X_4 对堆积角有显著影响。

表 6 Plackett-Burman 试验中参数显著性分析
Table 6 Parameter significance analysis in Plackett-Burman test

来源 Sources	标准化效应 Standardized effect	平方和 Sum of squares	贡献率 Contribution rate	F	P
模型	—	12.980	—	23.28	0.001 7
X_1	-0.296	0.265	1.950	2.85	0.152 3
X_2	-0.018	0.001	0.007	0.011	0.919 9
X_3	1.346	5.436	40.179	58.51	0.000 6**
X_4	-0.427	0.547	4.044	5.89	0.049 6*
X_5	-0.122	0.044	0.330	0.48	0.518 2
X_6	1.492	6.684	49.400	71.94	0.000 4**

注：**表示极显著 ($P<0.01$)，*表示显著 ($0.01<P<0.05$)。下同。
Note: **means extremely significant ($P<0.01$), *means significant ($0.01<P<0.05$), The same as below.

在最陡爬坡试验和 Box-Bennken 试验中，只对影响显著的 3 个因素进行分析， X_6 和 X_3 标准化效应值大于 0，说明 X_6 、 X_3 对菌料堆积角影响为正效应，而 X_4 的效应值小于 0， X_4 对堆积角的影响为负效应。

2.5 最陡爬坡试验模拟结果分析

通过 Plackett-Burman 检验筛选出影响显著的参数，根据其影响程度，对仿真堆积角影响不显著的参数值设置为 Plackett-Burman 试验的中间水平^[23]。其中， $X_1=0.25$ ， $X_5=0.03$ ， $X_2=0.90$ ，物理测试得出的堆积角 θ_0 与仿真模拟的堆积角 θ_1 之间的相对误差 R 由式 (6) 计算得到。

$$R = \frac{|\theta_0 - \theta_1|}{\theta_0} \times 100\% \tag{6}$$

最陡爬坡试验方案和结果如表 7 所示。表 7 结果表明，随着 3 个因子的改变，仿真堆积角与物理堆积角的相对误差在第 3 组试验时最小，因此，后续试验以第 3 组试验的参数作为中心点，以第 2 组和第 4 组试验的参数分别作为响应面设计的低水平和高水平，在此区间进行 Box-Behnken 试验分析^[24]。

表 7 最陡爬坡试验方案和结果
Table 7 The steepest climbing test scheme and results

序号 No.	X_6	X_3	X_4	堆积角 Stacking angle/(°)	误差 Error/%
1	2	0.01	0.30	18.17	56.76
2	4	0.04	0.25	33.24	20.89
3	6	0.07	0.20	40.09	4.59
4	8	0.10	0.15	52.84	25.75
5	10	0.13	0.10	59.46	41.50
6	12	0.16	0.05	65.05	54.81
7	14	0.20	0.01	71.95	71.23

2.6 Box-Behnken 试验结果与分析

2.6.1 Box-Behnken 试验结果

Box-Behnken 试验方案和结果如表 8 所示。使用 Design-Expert13 对 Box-Behnken 试验结果进行多元回归模型分析，堆积角 θ 计算如式 (7) 所示。

$$\theta = 39.08 + 6.90x_6 + 4.71x_3 - 0.913\ 7x_4 + 0.580\ 0x_6x_3 + 2.09x_6x_4 - 2.45x_3x_4 - 1.94x_6^2 + 13.74x_3^2 + 4.67x_4^2 \tag{7}$$

Box-Behnken 试验方差分析结果如表 9 所示。模型的 $P<0.000\ 1$ ，模型显著；失拟项 $P>0.05$ ，表明模型不存在失拟因子，相关性较高，决定系数 $R^2=0.986\ 9$ ，调整决定系数为 0.970 1，两者均接近于 1，说明预测值与实际值吻合良好，变异系数为 3.64%，信噪比大于 4，

受外界干扰因素较小, 模型可信度较高。残差诊断结果如图 7 所示, 可知大部分残差数值均接近于求解线, 证明试验参数对堆积角的影响关系, 残差随机分布, 堆积角实际值与预测值的相差较小。综上, 该回归模型能够准确反映实际堆积角, 可进一步用于预测堆积角。

表 8 Box-Behnken 试验方案与结果
Table 8 Box-Behnken test scheme and results

序号 No.	X_6	X_3	X_4	堆积角 Stacking angle/(°)
1	6	0.07	0.20	37.02
2	4	0.07	0.15	33.34
3	8	0.07	0.25	45.97
4	8	0.07	0.15	49.67
5	6	0.07	0.20	37.98
6	6	0.04	0.15	53.52
7	6	0.10	0.15	58.16
8	4	0.10	0.20	47.14
9	6	0.07	0.20	41.41
10	6	0.07	0.20	39.13
11	8	0.04	0.20	53.32
12	4	0.07	0.25	38.01
13	6	0.07	0.20	39.54
14	6	0.04	0.25	51.79
15	8	0.10	0.20	63.77
16	4	0.04	0.20	39.01
17	6	0.10	0.25	66.23

表 9 Box-Behnken 检验二次模型的方差分析
Table 9 Analysis of variance of Box-Behnken test quadratic model

源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P
模型	1 529.10	9	169.89	58.76	<0.000 1**
X_6	381.29	1	381.29	131.87	<0.000 1**
X_3	177.28	1	177.28	61.31	0.000 1**
X_4	6.68	1	6.68	2.31	0.172 3
X_6X_3	1.35	1	1.35	0.47	0.516 2
X_6X_4	17.51	1	17.51	6.06	0.043 4*
X_4X_3	24.01	1	24.01	8.30	0.023 6*
X_6^2	15.88	1	15.88	5.49	0.051 6
X_3^2	794.40	1	794.40	274.75	<0.000 1**
X_4^2	91.95	1	91.95	31.80	0.000 8**
残差	20.24	7	2.89		
失拟项	9.16	3	3.05	1.1	0.445 3
纯误差	11.08	4	2.77		
总计	1 549.30	16			

2.6.2 交互项响应模型分析

使用 Design-Expert 对试验数据进行多元回归拟合, 生成响应面图, 进一步分析各影响因素对响应值的交互作用。图 8a 显示, 与 X_4 相比, X_6 的响应面曲线更陡, 说明其对堆积角有更显著的影响; 当 X_3 恒定时, 堆积角会随其他影响因子的增加而变得突出, 图 8b 显示, 相较于 X_4 , X_3 对堆积角影响更显著。

2.6.3 最优参数组合确定和仿真试验结果测试

将菌料物理试验堆积角作为优化目标, 以 X_6 、 X_3 、 X_4 作为优化对象, 使用 Design-Expert 13 的优化模块^[25], 对回归方程式 (7) 求最优解。 X_6 、 X_3 、 X_4 限制区间分别为 4~8、0.04~0.10 和 0.15~0.25。如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} \text{AOR}(X_6, X_3, X_4) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 4 < X_6 < 8 \\ 0.04 < X_3 < 0.10 \\ 0.15 < X_4 < 0.25 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

经求解, 3 个影响因数最优值分别为 $X_6=5.33$ 、 $X_3=0.086$ 、 $X_4=0.21$, 将 EDEM 仿真参数设置为上述优化参数组合, 进行 5 组仿真试验, 模拟堆积角分别为 42.87°、43.32°、42.88°、42.64°、42.82°, 结果均值为 42.92°, 与物理堆积角相对误差为 0.97%。证实了参数校准的可靠性, 从而证实离散元仿真对菌棒成型、刺孔、下落冲击过程的分析模拟参数定义的适用性。

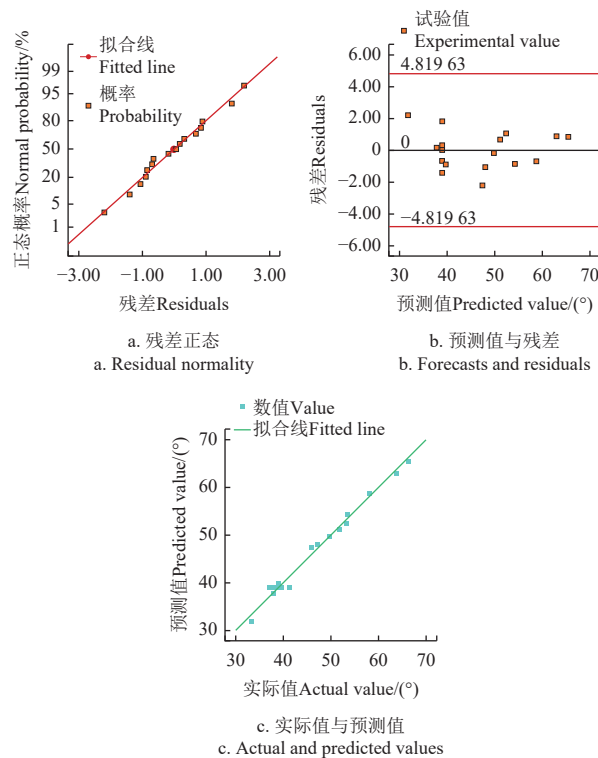


图 7 残差诊断图

Fig.7 Residual diagnosis diagram

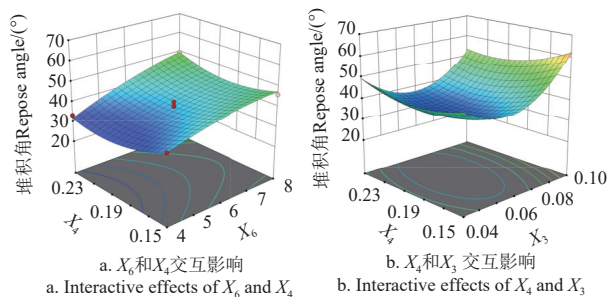


图 8 交互项对堆积角的影响

Fig.8 Influence of interaction term on accumulation angle

3 黑木耳菌棒刺孔和下落冲击仿真

3.1 黑木耳菌棒刺孔仿真

在菌棒刺孔时, 若出耳孔口径小, 耳芽难以诱导, 而出耳孔口径大时, 孔口易干燥, 不利形成耳芽, 且耳根大; 若出耳孔深度过深, 菌丝愈合速度和耳芽生长时间变长。根据实际调研结果, 刺孔示意如图 9a, 当孔径大于 2.5 mm, 孔深超过 30 mm 且孔中心距约为 18 mm 时, 能够满足黑木耳的出耳需求, 此外周向需分布 16 列刺孔, 图 9b 为实际刺孔菌棒。

如图 10a 所示, 根据前文所得的菌料本征参数和接

触参数进行菌棒堆料，为模拟真实情况，需动态生成块状、片状及粒状菌料粒子^[26-27]，生成速度分别为 0.16、0.108 和 0.032 kg/s，生成菌料总质量为 1.200 kg，总模拟时间为 6 s，时间步长为 0.05 s，仿真进行至 3 s 时，在菌棒正上方搭建一个 120 mm×120 mm×4 mm 的方形 Box，并设置下压运动（Motion），对顶部菌料施加向下压力，从而达到压实效果。顶部不再生成菌料时，将 Box 重新设定为虚拟，使其不再对菌料施加任何影响，由内部菌料自然扩充直至填补完毕。

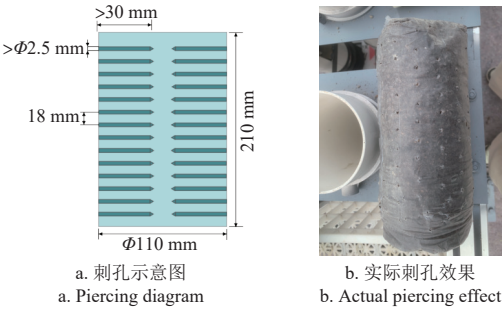


图 9 菌棒刺孔
Fig.9 Piercing hole of fungus stick

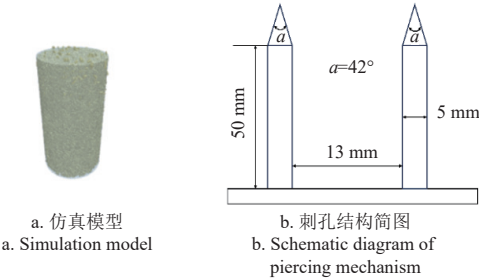


图 10 菌棒仿真模型及刺孔结构简图
Fig.10 Simulation of fungus stick and schematic diagram of piercing structure

由于全自动刺孔装置结构复杂，仿真计算量较大，在能够复现刺孔效果的前提下，将刺孔结构进行简化，如图 10b 所示。刺孔装置为不锈钢材质，菌料与不锈钢接触参数与仿真试验一致，薄膜与菌料接触参数如表 10 所示，刺孔过程如图 11a 所示，刺孔后出耳孔断面图如图 11b 所示。当针体入侵颗粒介质时，菌棒颗粒发生动态响应，刺孔钢针前端周围的菌料颗粒获得部分能量，将能量传递到周围颗粒上，导致颗粒介质获得速度而向四周偏移。图 11c 为菌料颗粒的速度分布。

表 10 EDEM 薄膜仿真参数设置
Table 10 Film simulation parameter settings in EDEM

参数 Parameter	值 Value
聚乙烯薄膜泊松比	0.49
薄膜密度/(kg·m ⁻³)	1 050
薄膜剪切模量/Pa	6×10 ⁶
菌料-薄膜碰撞恢复因数	0.3
菌料-薄膜静摩擦因数	0.42
菌料-薄膜滚动摩擦因数	0.34

当刺孔装置与菌料接触时，颗粒间会发生挤压和摩擦，内部稳定的粒子结构会发生断裂和重组，导致菌棒内部菌料发生明显偏移。这种变形通常是由颗粒材料滑动、滚动发生的摩擦和体积变化引起的。分析 3 种菌料

模型仿真刺孔过程，如图 12a 所示，颗粒受载峰值随着时间推移逐渐减小，块状菌料最大负载为 143.7 N，片状菌料最大负载为 127.5 N，粒状菌料最大负载力为 17.1 N。数据结果表明，粒径大小与颗粒受载大小呈正比关系，菌料粒径越大，其负载的冲击能量也随之增加。

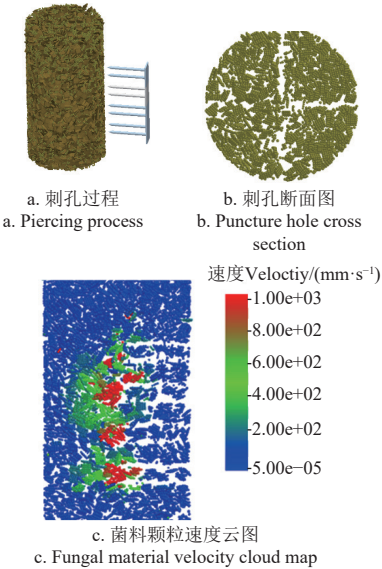


图 11 EDEM 模拟刺孔过程
Fig.11 Piercing process simulation in EDEM

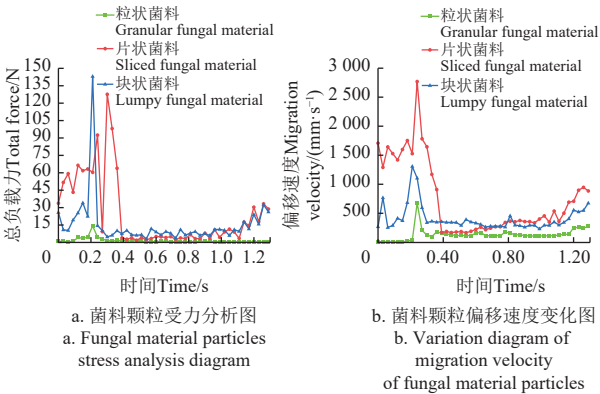


图 12 菌料颗粒后处理分析
Fig.12 Analysis of post-treatment of fungal particles

如图 12b 所示，相较于块状菌料和粒状菌料，片状菌料偏移速度最大，达到 2 671 mm/s。仿真试验结果表明，片状菌料由于厚度较小、受力面积大，在外力作用下更易发生偏移。综上所述，变菌料粒径尺寸可增加刺孔装置与菌料的接触半径，从而提高能量转移效率，增强刺孔效果。

进行 5 组 EDEM 刺孔试验，通过后处理 Ruler 工具模块量取孔径、孔深和间距，得到平均孔径 4.2 mm，平均孔深 34.8 mm，间距 18 mm。对实际菌棒进行刺孔后用深度尺（精度 0.1 mm）测得平均孔深为 36.1 mm，游标卡尺（精度 0.1 mm）测得菌棒表层平均孔径 4.3 mm。仿真与实际测量的孔深相对误差 3.6%，孔径相对误差 4.5%。对周向、纵向中部、纵向底端的仿真刺孔与实际菌棒刺孔尺寸进行对比分析，如图 13a~13b 所示。结果表明，同一高度刺孔的孔径、孔深同比相差 2.4%，而纵向不同高度刺孔的孔径、孔深相差较大，底端刺孔的孔径、孔深比中段刺孔小，平均相差 6.7%。

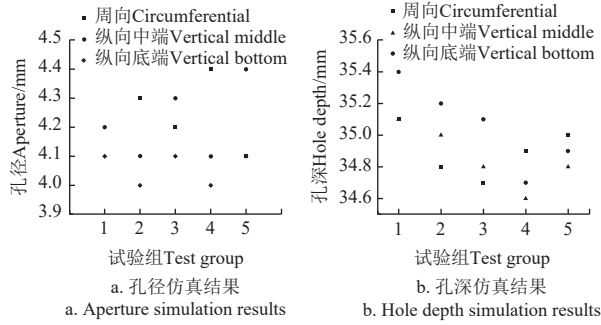
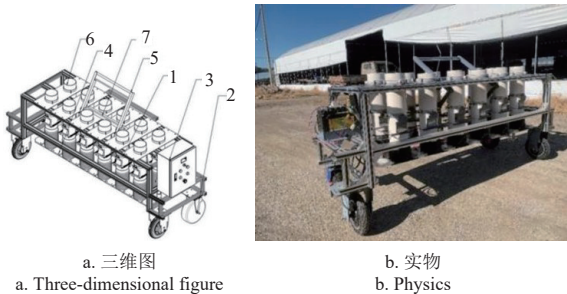


图 13 刺孔尺寸仿真结果

Fig.13 Simulation results of piercing hole size

3.2 黑木耳菌棒摆场下落冲击仿真

菌棒在刺孔后需摆放在田垄上,由自制半自动菌棒摆场机进行田间摆场作业,如图 14a 所示,半自动摆场机工作原理:初始状态下,支撑板 4 位于最上端位置处,各摆放机构 6 的伸缩管均处于收缩状态。首先控制器控制各轮毂电机驱动各车轮 2 带动机架 1、支撑板 4、升降机构 5 和各摆放机构 6 移动至菌棒摆场位置;松开锁紧机构 7,接着升降机构 5 和驱动支撑板 4 向下移动,支撑板 4 带动各伸缩管拉伸,直至支撑板 4 移动至最下端位置处,然后在每个 PVC 圆管内投放一个菌棒,菌棒在自身重力作用下从 PVC 圆管落至伸缩管内,再从伸缩管穿过,并直立立在垄面;最后升降机构 5 驱动支撑板 4 向上移动,支撑板 4 带动各伸缩管压缩,直至支撑板 4 回复至初始位置,再由锁紧机构 7 卡死,各菌棒上端脱离相应的伸缩管,完成菌棒摆放,实物如图 14b 所示。



1. 机架 2. 车轮 3. 电控箱 4. 支撑板 5. 升降机构 6. 摆放机构 7. 锁紧机构
1. Frame 2. Wheels 3. Electric control box 4. Support plate 5. Lifting mechanism 6. Placing mechanism 7. Locking mechanism

图 14 半自动菌棒摆场机整机结构图

Fig.14 Semi-automatic fungus stick placing machine

根据摆场机摆放菌棒原理设定菌棒的初始下落高度 320 mm,设置相关 EDEM 仿真参数,进行菌棒摆场下落仿真试验。菌棒摆场机下落仿真试验主要针对菌棒受地面冲击后孔深与孔径的变化进行分析。由于冲击持续时间非常短,因此冲击对颗粒床的影响是有限的。为减少计算时间成本,设置一个有限的颗粒床,参考文献 [16-17],除上表面外,其他所有表面均设置为非反射边界以此消除边界效应。堆积土壤床模型尺寸为 300 mm×300 mm×100 mm。如图 15a 所示,将菌棒固定在 320 mm 的离地高度后释放,触地过程中由于颗粒之间的摩擦和碰撞,机械能逐渐转化为其他形式的能量。如图 15b 所示,颗粒介质发生明显位移,导致出耳孔发生变化,这是由于在冲击过程中局部产生的高应力会导致颗粒往径向、周向偏移。图 15c 为不同高度刺孔处出耳孔颗粒位

移速度情况,结果显示距离顶部 40 mm 处出耳孔周围的菌料颗粒位移速度为 441 mm/s,离顶部 100 mm 处出耳孔颗粒速度为 621 mm/s,而离顶部 160 mm 处出耳孔颗粒速度达到了 1 115 mm/s,说明菌棒在落地受冲击后,不同高度出耳孔处颗粒的运动速度自下而上逐渐减弱,最底端出耳孔周围菌料颗粒的速度最大。

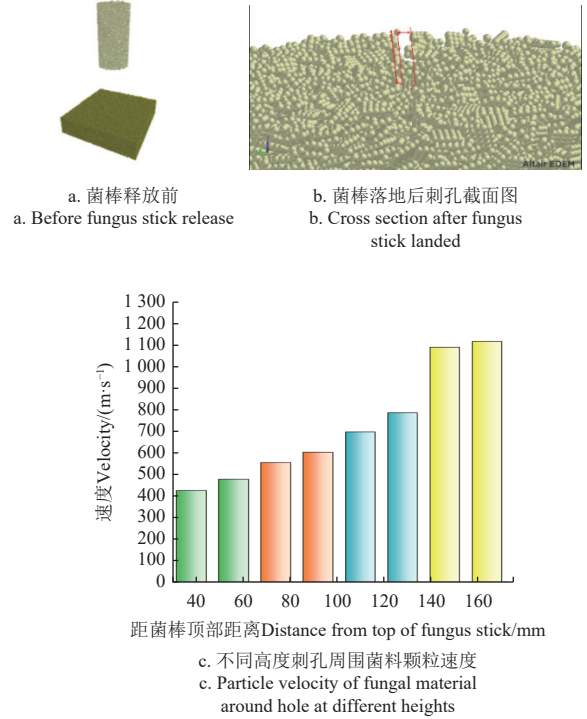


图 15 菌棒下落过程仿真结果

Fig.15 Simulation results during fungus stick falling process

使用 Ruler 工具对出耳孔进行测量,通过 5 组仿真试验得到不同高度出耳孔的孔径和孔深变化[28]。对比分析最顶端、中间和最底端 3 个高度的孔径和孔深。如图 16a 所示,仿真试验得到的最顶端出耳孔孔径均值为 3.74 mm,中部孔径均值为 3.44 mm,比顶端小 8%,底端孔径均值为 3.28 mm,比顶端小 12.3%;如图 16b 所示,仿真试验得到顶端孔深均值为 38.4 mm,中部孔深为 36.2 mm,比顶端小 5.7%,底端孔深均值为 32.9 mm,比顶端小 14.3%。结果表明下落冲击对菌棒不同高度处出耳孔变形的影响呈现自下而上逐渐减弱的趋势,对底端孔径和孔深的影响最大,根据菌棒出耳农艺的要求调研,所有高度出耳孔变形量均能满足发耳需求,自制半自动摆场机在摆场作业过程中不会损伤菌棒。

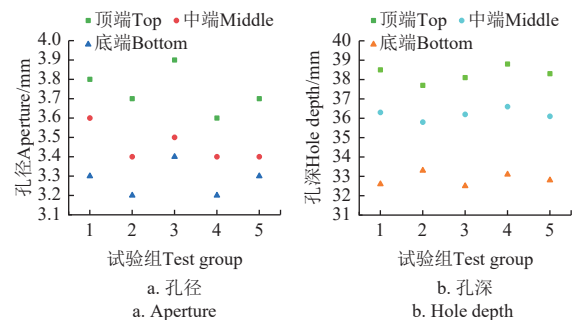


图 16 孔尺寸变化

Fig.16 Hole size change

4 结 论

本文针对黑木耳菌棒刺孔和摆场过程中出耳孔的变形进行了分析, 通过建立基于黏附性模型的菌棒离散元模型模拟菌料间的接触特性, 通过离散元仿真试验, 验证模型中接触参数的准确性, 将难以观测的菌棒内部现象可视化, 主要结论如下:

1) 通过物理试验测定菌料的本征参数, 并基于物理试验和相关研究的仿真参数, 开展菌料离散元参数标定的仿真试验, 筛选出显著影响堆积角的参数并建立二阶回归模型, 以物理试验中的堆积角作为响应值, 确定最优参数组合: 菌料表面能为 5.33 J, 菌料间滚动摩擦系数为 0.086, 菌料与不锈钢碰撞恢复系数为 0.21。仿真堆积角试验与物理试验结果的相对误差为 0.97%, 证实了参数校准的可靠性。

2) 通过仿真试验模拟刺孔过程中颗粒沿刺孔面向内凹陷的现象, 试验结果表明, 菌料尺寸大小与菌料受载大小、菌料偏移速度大小呈正比关系, 表明菌料尺寸越大, 其承载的冲击能量越大。因此, 增加刺孔装置与菌料接触半径有利于能量转移。对比仿真与实际刺孔结果, 得到仿真平均孔径、孔深均值分别为 4.2 和 34.8 mm, 测量实际平均孔径、孔深均值分别为 4.3 和 36.1 mm, 孔径相对误差 4.5%、孔深相对误差为 3.6%, 验证了菌棒离散元模型的准确性, 对比同一高度与不同高度刺孔的孔径、孔深变化, 得到不同高度孔径, 孔深的变化规律。

3) 仿真试验得出: 在菌棒落地冲击过程中, 最顶端出耳孔周围的菌料颗粒位移速度为 441 mm/s, 中部出耳孔颗粒速度为 621 mm/s, 最底端出耳孔颗粒速度达到 1 115 mm/s, 底端出耳孔孔径和孔深变化量相较于顶端出耳孔分别小 12.3% 和 14.3%, 表明冲击对菌棒出耳孔变形的影响呈现自下而上逐渐减弱的趋势。仿真得到出耳孔孔径和孔深最小值分别为 3.28 和 32.9 mm, 大于黑木耳出耳所需孔径和孔深, 自制摆场机满足实际作业需求。

【参 考 文 献】

- [1] 李文枫, 毕洪文, 黄峰华, 等. 我国黑木耳产业发展现状及对策建议[J]. 北方园艺, 2021 (7): 142-147.
LI Wenfeng, BI Hongwen, HUANG Fenghua, et al. Present situation and countermeasures and recommendations of development of *Auricularia auricula* industry in China[J]. Northern Horticulture, 2021, (7): 142-147. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郑焕春, 付静, 杨燕超, 等. 黑木耳产业标准化现状及高质量发展对策[J]. 北方园艺, 2024(4): 121-128.
ZHENG Huanchun, FU Jing, YANG Yanchao, et al. Standardization status and high-quality development strategy of *auricularia heimuer* industry[J]. Northern Horticulture, 2024(4): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- [3] 耿新军, 冯继虎, 杨建杰, 等. 袋栽黑木耳不同品种与刺孔数量对出耳的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2 (12): 1126-1132.
GENG Xinjun, FENG Jihu, YANG Jianjie, et al. Effects of different varieties and puncture hole numbers on the emergence of *auricularia auricula* in bag cultivation[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2023, 2(12): 1126-1132. (in Chinese with English abstract)
- [4] PENG D, WANG LG, LIN YQ, et al. Oblique impact breakage unification of nonspherical particles using discrete element method[J]. Particuology, 2024, 3(90): 61-71.
- [5] ZENG Y, JIA F G, XIAO Y W, et al. Discrete element method modeling of impact breakage of ellipsoidal agglomerate[J]. Powder Technology, 2019, 3(46): 57-69.
- [6] SALMAN A D, REYNOLD G K, FU J S, et al. Descriptive classification of the impact failure modes of spherical particles[J]. Powder Technology, 2004, 2(32): 19-30.
- [7] DAI Z W, WU M L, FANG Z C, et al. Calibration and verification test of lily bulb simulation parameters based on discrete element method[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 10749.
- [8] WANG Y, ZHANG D, YANG T, et al. Modeling the interaction of soil and a vibrating subsoiler using the discrete element method[J]. Computers and electronics in Agriculture, 2020, 18: 174.
- [9] ZENG F, CUI, LI X, et al. Establishment of the interaction simulation model between plug seedlings and soil[J]. Agronomy, 2024, 14: 4-6.
- [10] CUI J, LI X, ZENG F, et al. Parameter calibration and optimization of a discrete element model of plug seedling pots based on a collision impact force[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 62-78.
- [11] 盛立柱, 何建芬, 吴志鹏, 等. 黑木耳‘黑山’菌株在龙泉市栽培的表现与技术要点[J]. 食药菌, 2022, 30(1): 75-77.
SHENG Lizhu, HE Jianfen, WU Zhipeng, et al. Cultivation performance and key points of cultivation techniques of *Auricularia auricularia* ‘heishan’ strain in Longquan city[J]. Edible and Medicinal Mushroom, 2022, 30(1): 75-77. (in Chinese with English abstract)
- [12] 中华人民共和国农业部. 无公害食品 食用菌栽培基质安全技术要求: NY 5099-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] HORABIK J, MOLEND A M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 2(147): 206-225.
- [14] 张兆国, 徐红伟, 薛浩田, 等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(11): 61-70, 91.
ZHANG Zhaoquo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of panax notoginseng stem[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(11): 61-70, 91. (in Chinese with English abstract)
- [15] IM D G, LEE H, KIM J, et al. Bucket size optimization for metering device in garlic planter using discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13(6): 1199.
- [16] CHEN Z R, XUE D M, GUAN J B, et al. Performance optimization of a spoon precision seed metering device based on a maize seed assembly model and discrete element method[J]. *Processes*, 2023, 11(11): 3076.
- [17] LI D D, WANG R Y, ZHU Y P, et al. Calibration of simulation parameters for fresh tea leaves based on the discrete element method[J]. *Agriculture*, 2024, 14(1): 148.
- [18] ZHOU L, LAN Y B, YU J Q, et al. Validation and calibration of soil parameters based on the EEPA contact model[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2023, 10: 1295-1307.
- [19] CHEN X L, GU F W, HU Z T, et al. The calibration of soil simulation parameters for wheat grown after rice in the yangtze river basin of China[J]. Sustainability, 2023, 15(11): 71-79.
- [20] 李蒙良, 王立宗, 廖庆喜, 等. 油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 10-19.
- [21] LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(20): 10-19. (in Chinese with English abstract)
- [22] RACKL M, TOP F, MOLHOEC C, et al. Feeding system for wood chips: A DEM study to improve equipment performance[J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 2(98): 43-52.
- [22] 崔涛, 荆茂盛, 张东兴, 等. 玉米果穗离散元模型构建与

- 脱粒仿真验证[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 33-46.
- CUI Tao, JING Maosheng, ZHANG Dongxing, et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(24): 33-46. (in Chinese with English abstract)
- [23] 宋刚, 张鹏, 连文伟, 等. 基于离散元的双齿辊农村厨余垃圾粉碎性能仿真研究[J]. 农业工程学报, 2023, 13(11): 93-97.
- SONG Gang, ZHANG Peng, LIAN Wenwei, et al. Performance simulation study of rural kitchen waste crusher with double-toothed rollers based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 13(11): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵智豪, 吴明亮, 谢双鹏, 等. 土壤-水稻前茬离散元仿真参数标定及其旋耕轨迹分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 72-82.
- ZHAO Zhihao, WU Mingliang, XIE Shuangpeng, et al. Parameter calibration for the discrete element simulation of soil-preceding rice stubble and its rotary tillage trajectory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(7): 72-82. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张彪, 杨鑫三, 王京云, 等. 基于甘蔗耕地黏土离散元参数标定的流变模型构建[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 36-44.
- ZHANG Biao, YANG Xinsan, WANG Jingyun, et al. Construction of a rheological model based on discrete element parameters calibration of clay from sugarcane cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(13): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [26] 周华, 车海龙, 耿端阳, 等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 49-60.
- ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 49-60. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李旭东, 臧家俊, 高翔, 等. 果园秸秆覆盖机宽幅覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 70-78.
- LI Xudong, ZANG Jiajun, GAO Xiang, et al. Design and test of broad soil-covering device for orchard straw mulching machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 70-78. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 58-69.
- CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and Analysis of seeding parameters of cyperus esculentus seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 58-69. (in Chinese with English abstract)

Analysis and test of black fungus stick piercing and laying falling process based on discrete element

JIANG Chengjie¹, DU Xiaoqiang^{1,2,3,4}, YANG Zhenhua⁵, HONG Fangwei¹, ZHAO Wei¹,
ZHANG Guofeng^{1,2,3,4}, CHEN Hongli^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China; 4. Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou 310018, China; 5. Longquan Guyuan Automation Equipment Co., Ltd., Lishui 323700, China)

Abstract: This study aims to observe and simulate the internal movement of fungal material substrate during the piercing and laying of black fungal sticks using the discrete element method (DEM). The contact parameters of fungi were calibrated on the different sizes within the cultivation sticks. Key parameters, such as particle stiffness, friction coefficients, and damping factors, were adjusted to replicate the interactions among fungal particles. DEM simulations were used to accurately reflect real-world mechanical behavior. Both physical experiments and DEM simulations were conducted on piercing after calibration. The physical experiments were conducted to measure the key substrate parameters, particularly for the influences of repose angle on the substrate settles. The DEM simulations were fine-tuned to closely match the real-life scenarios after measurements. In simulations, virtual tools were inserted into the modeled fungal sticks, in order to observe substrate behavior under controlled conditions. The comparison was performed on the depth and diameter of the holes created during piercing, in order to validate the accuracy of the DEM model. The simulation results were compared with experimental data obtained from a fully automatic piercing machine. The relative errors between the simulation and experimental data were 3.6% for the hole depth and 4.5% for the hole diameter. The low error margins confirmed that the high accuracy of the model was achieved to replicate the real-world conditions, providing for the reliability of the DEM model in the subsequent simulations. In addition to the piercing simulations, a systematic investigation was also made to explore the impact of landing shock on the deformation of fruiting holes within the fungal sticks. The falling behavior of fungal sticks was simulated in a semi-automatic laying machine. Displacement velocities of substrate particles around the ear holes were measured at three positions along the fungal stick: the top, middle, and bottom. The velocities were recorded as 441, 621, and 1 115 mm/s, respectively. There was the most significant deformation at the bottom of the stick and then decreased towards the top. The diameter and depth of the bottom ear holes were 12.3% and 14.3% smaller, respectively, compared with the top ones. The minimum aperture diameter and depth were 3.28 and 32.9 mm after simulation, respectively, fully meeting the requirements for ear production. Therefore, the fungal sticks remained suitable for agricultural use, even after deformation under landing shock. The semi-automatic laying machine was effective with the acceptable deformation for practical agricultural production. In conclusion, the DEM model was validated to accurately simulate the piercing and laying in the internal movement of fungal material within black fungal sticks. The insights were gained on the deformation caused by landing shock. The findings can greatly contribute to the design and operation of machinery in mushroom cultivation. The quality and functionality of fungal sticks were maintained throughout the production. The DEM model can be expected to improve agricultural practices in mushroom cultivation.

Keywords: discrete element method; simulation; parameter calibration; fungal stick; piercing; black fungus