浙江理工大学学报,第53卷,第5期,2025年9月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University
DOI:10.3969/j.issn.1673-3851(n).2025.05.013

蒜薹接触物理参数测定与离散元仿真标定

石　岩[1a],赵　雄[1a,1b],傅鸿妃[2],马行潇[1a,1b],陈建能[1a,1b]
(1.浙江理工大学,a.机械工程学院;b.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018;
2.杭州市农业科学研究院蔬菜研究所,杭州 310024)

摘　要:针对目前蒜薹收获机具缺少准确可靠的离散元仿真参数的问题,以红帽蒜薹为研究对象,采用接触物理参数测定和仿真试验相结合的方法,对蒜薹的各项碰撞恢复系数、摩擦因数进行标定。首先通过物理试验,对蒜薹本征参数以及蒜薹-蒜薹、蒜薹-PVC传送带之间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数进行测定,确定其取值范围;然后通过EDEM软件建立蒜薹的离散元仿真模型,以蒜薹仿真堆积角为响应值设计Plackett-Burman试验,筛选出对蒜薹仿真堆积角有极显著影响的参数;最后对极显著性参数进行中心组合设计试验,获得最优的参数取值。结果表明:对蒜薹仿真堆积角有极显著影响的参数是蒜薹-蒜薹静摩擦因数和蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数;当蒜薹-蒜薹静摩擦因数为0.914,蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数为0.018时,测得蒜薹仿真堆积角为35.12°,与所获得的物理堆积角(36.35°)的误差为3.3%,表明标定所得蒜薹离散元仿真参数与实际情况相符合。该研究获得的离散元仿真参数可为蒜薹收获机具的后续研究提供参考。

关键词:蒜薹;离散元仿真;堆积角;参数优化;标定
中图分类号:S225.92　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1673-3851(2025)09-0709-11
引文格式:石岩,赵雄,傅鸿妃,等.蒜薹接触物理参数测定与离散元仿真标定[J].浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(5):709-719.
Reference Format: SHI Yan, ZHAO Xiong, FU Hongfei, et al. Measurement of physical parameters of garlic sprout contact and discrete element simulation calibration[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(5): 709-719.

Measurement of physical parameters of garlic sprout contact and discrete element simulation calibration

SHI Yan[1a], *ZHAO Xiong*[1a,1b], *FU Hongfei*[2], *MA Xingxiao*[1a,1b], *CHEN Jianneng*[1a,1b]
(1a. School of Mechanical Engineering; 1b. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Vegetable Research Institute, Hangzhou Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: In response to the current lack of accurate and reliable discrete element simulation parameters for garlic sprout harvesting equipment, this study focuses on the red-top garlic sprouts and uses a combination of contact physical parameter measurement and simulation experiments to calibrate the various collision recovery coefficients and friction coefficients of the garlic sprouts. Firstly, through physical experiments, the intrinsic parameters of garlic sprouts and the static friction coefficient, rolling friction coefficient, and collision recovery coefficient between garlic sprouts, and between garlic sprouts and PVC conveyor belts were measured to determine their value ranges. Then, a discrete element simulation model of garlic sprouts was established using EDEM software, and Plackett-Burman

收稿日期:2024-12-20　　网络出版日期:2025-04-01
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001800);国家自然科学基金项目(32071909)
作者简介:石　岩(1997—　),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要从事农业机械设计方面的研究。
通信作者:赵　雄,E-mail:zhaoxiong@zstu.edu.cn

experiments were designed with the simulated repose angle of garlic sprouts as the response value to screen out parameters that have a significant impact on the simulated repose angle of garlic sprouts. Finally, a central combination design experiment was conducted on the highly significant parameters to obtain the optimal parameter values. The results indicate that the parameters that have a significant impact on the simulated repose angle of garlic sprouts are the static friction coefficient between garlic sprouts and the rolling friction coefficient between garlic sprouts; when the static friction coefficient between garlic sprouts is 0.914 and the rolling friction coefficient between garlic sprouts is 0.018, the simulated repose angle of garlic sprouts is measured to be 35.12°, with an error of 3.3% compared to the obtained physical repose angle (36.35°), indicating that the calibrated discrete element simulation parameters of garlic sprouts are consistent with the actual situation. The discrete element simulation parameters obtained in this study can provide reference for the subsequent research of garlic sprout harvesting equipment.

Key words: garlic sprout; discrete element simulation; repose angle; parameter optimization; calibration

0 引 言

蒜薹(Garlic sprout),又名蒜苔或蒜毫,是从大蒜中抽出的花茎,由蒜薹苞和蒜薹梗两部分组成[1-2],为中国贮藏供应期最长的优质蔬菜品种之一[3]。目前,关于蒜薹收获机具的研究还处于起步阶段[4-6],屈哲等[7]研制的电驱式蒜薹收获机、耿令新等[8-9]设计的自走式蒜薹收获机,填补了中国蒜薹收获机具的空白。然而,蒜薹收获机具在收获过程中相关的仿真参数的缺失,限制了蒜薹收获机具的进一步研制。获取蒜薹与收获机具之间的仿真参数,是加速推进蒜薹收获机具设计工作的关键,对于蒜薹收获机具的进一步发展具有重要意义,因此亟需开展关于蒜薹离散元仿真参数标定的研究。

近年来,以分子动力学理论为参考的离散元法在农业机械设计以及农业物料的堆积研究领域应用越来越广泛[10-12]。通过建立不同秸秆或作物的EDEM仿真模型,可以模拟收获过程,设计收获机具的参数、材料,从而降低田间试验成本,极大地提高收获机具的研发效率[13-16]。王小勇等[17]利用EDEM软件建立了炒青绿茶离散元模型,通过物理试验测定了仿真所需的各项参数,虚拟仿真试验与物理试验的对比结果验证了炒青绿茶模型和仿真参数的准确性,为后续炒青茶精制设备的设计提供了技术支撑;谢伟等[18-19]以油菜薹夹段茎秆为研究对象,系统测定了油菜薹的本征参数和表面接触参数,采取物理试验与仿真试验相结合的方法,对难以实际获取的表面接触参数和粘结参数进行了标定和验证,结果表明离散元法对于油菜薹采收阶段的研究具有可行性;Zhang 等[20]先通过物理试验确定了红花材料的本征参数,再通过 EDEM 软件建立了红花的离散元模型,并选用了 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型获取红花的仿真参数,为研究红花的生物力学特征和模拟红花收获过程提供了理论依据。目前对于谷物籽粒的离散元仿真参数标定较多,而茎秆类作物的实际情况更加复杂,相应研究较少[21-22],对蒜薹以及类似材料的离散元仿真和标定鲜有研究。综上所述,离散元法在茎秆类作物仿真分析和收获机械设计领域具有可行性,在离散元模型的建立、接触模型的选用以及仿真参数的优化方面也为本文蒜薹接触物理参数的测定方法和蒜薹仿真模型的创建提供了思路。

本文以红帽蒜薹为研究对象,通过物理试验获取蒜薹与蒜薹、蒜薹与 PVC 传送带间接触物理参数的取值范围;采用 EDEM 仿真软件,选用 Hertz Mindlin(no slip)接触类型建立了蒜薹的仿真模型,并通过设计堆积角试验、最佳爬坡试验和中心组合设计试验对关键参数进行显著性分析和优化,最终以物理堆积角与仿真堆积角误差为指标对优化后的蒜薹离散元仿真参数进行了验证。本文研究结果可为蒜薹物理特性和低损收获技术研究提供理论数据,并为其他茎秆类作物的仿真参数标定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用浙江省杭州市南兴村农户自主种植的红帽蒜薹,在选取过程中遵循一致性和随机性原则:首先在同一标准大小(5 m×5 m)田块上选取蒜薹,保证所取用的蒜薹种植条件一致;其次在该田块上随机选取两条垄上种植的全部蒜薹,保证所取用样本的随机性。

采摘后新鲜蒜薹照片如图 1(a)所示,单株蒜薹

外形分布如图 1(b)所示。将采摘下的新鲜蒜薹用保鲜袋打包,带回到实验室保鲜存放。因为蒜薹顶端的蒜薹苞无食用价值,不影响对蒜薹整体收获质量的评估,所以本文研究对象主要为蒜薹梗部分(以下"蒜薹"特指蒜薹梗部分)。使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量样品的直径和长度,为保证测量的准确性,将蒜薹由下往上分为根部、中部、颈部分别测量。蒜薹根部平均直径为 5.20 mm,长度为 110.00 mm;蒜薹中部平均直径为 5.10 mm,长度为 100.00 mm;蒜薹颈部平均直径为 5.00 mm,长度为 110.00 mm。由此可见,蒜薹的直径沿着根部、中部、颈部依次减小,但变化程度较小。

(a) 采摘后新鲜蒜薹照片　　(b) 单株蒜薹外形分布照片

图 1　试验材料照片

1.2　蒜薹本征参数测定

使用排水法对蒜薹的密度进行测量,重复多组试验后求均值,测得蒜薹的密度为 955 kg/m^3。泊松比参数 μ 是反映蒜薹横向变形的弹性指数。测量时沿横向方向对蒜薹样品段施加压力直至蒜薹样品横向不再变形,记录此时蒜薹样品的横向变形量和纵向变形量,根据式(1)计算泊松比:

$$\mu=\left|\frac{s_1}{s_2}\right|=\frac{T_1-T_2}{W_1-W_2} \tag{1}$$

其中:s_1 为蒜薹样品横向变形量,mm;s_2 为蒜薹样品纵向变形量,mm;T_1 为蒜薹样品压缩前的横向尺寸,mm;T_2 为蒜薹样品压缩后的横向尺寸,mm;W_1 为蒜薹样品压缩前的纵向尺寸,mm;W_2 为蒜薹样品压缩后的纵向尺寸,mm。

蒜薹样品段压缩试验在 WDW-1000 电子万能试验机(济南兰博试验仪器有限公司,测量范围 0～100 kN,测量精度 0.5%)上进行。对不同部位的蒜薹样品段重复试验 10 次,得到蒜薹泊松比平均值,其中:蒜薹根部为 0.43;蒜薹中部为 0.44;蒜薹颈部为 0.44。蒜薹各段泊松比相差较小,为方便后续计算,蒜薹泊松比平均值统一取为 0.44。

通过对蒜薹样品段的压缩试验可获取蒜薹的弹性模量 E 和剪切模量 G,计算公式为:

$$E=\frac{FL}{S\Delta L} \tag{2}$$

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \tag{3}$$

其中:F 为蒜薹样品段弹性变形阶段能承受的最大力,N;L 为蒜薹样品段初始长度,mm;S 为蒜薹样品段横截面积,mm^2;ΔL 为蒜薹样品段压缩前后的长度差值,mm。

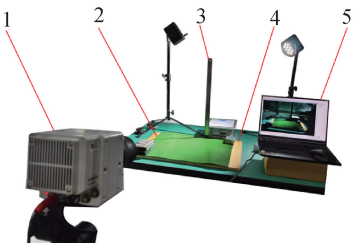
使用万能试验机对蒜薹小段进行多次压缩试验,设置压缩速度为 2 mm/s,重复试验 10 次后求均值,得到蒜薹样品段的剪切模量为 5.58×10^6 Pa,弹性模量为 7.61×10^6 Pa。

2　接触物理参数的测定

2.1　蒜薹-蒜薹和蒜薹-PVC 碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数可定义为两物体沿着接触处法线方向上的分离速度与接近速度的比值,与碰撞速度和角度均无关,只与碰撞物体的材料属性相关。本文通过自由落体法测量蒜薹-蒜薹、蒜薹-PVC 传送带之间的碰撞恢复系数,测量所用的装置如图 2 所示,由高速相机(型号为 Phantom VEO640,分辨率为 2560×1600 像素,帧率为 1400 帧/s)、刻度尺(量程为 0～500 mm)、PVC 传送带(厚度为 3 mm)、木板和笔记本电脑组成。

考虑到整株蒜薹过长,弹起的高度不能够直观获取,选取了共计 20 株长势接近的蒜薹,蒜薹每 100.00 mm 分为 1 段,每株蒜薹分为 3 段,共计 60 个样品段进行试验。试验原理示意图如图 3 所示,先将待测样品段从高度 H 处以静止状态自由下落,待样品段与 PVC 传送带接触后反弹,通过高速相机记录落下到弹起的过程,保持高度不变并进行重复试验。



1. 高速相机;2. PVC 传送带;3. 刻度尺;4. 木板;5. 笔记本电脑

图 2 碰撞恢复系数试验的装置照片

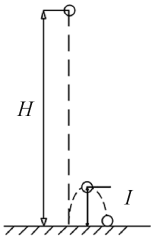
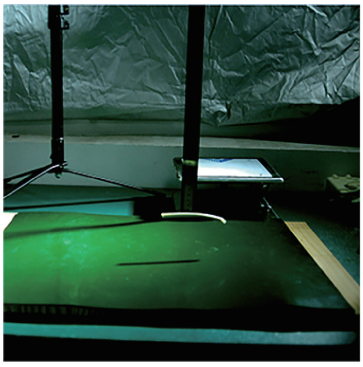


图 3 碰撞恢复系数测定原理图

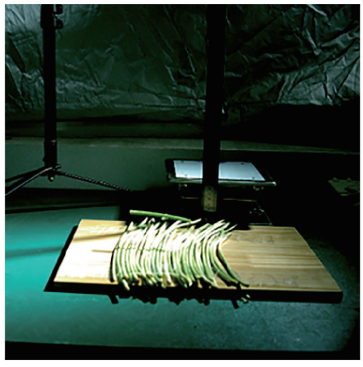
多组试验完成后将视频导入 Tracker 软件中,选取最接近垂直方向上的轨迹进行分析,从而获得完整的碰撞位移曲线,其中弹起的最大高度记为 I。在高速相机下,蒜薹弹起达到最大高度 I_1 的时刻如图 4(a)所示。样品段与 PVC 传送带接触碰撞开始到产生最大压缩时刻的冲量为 l_1,此刻待测样品段的速度为 v_1;从最大压缩到脱离 PVC 传送带表面时刻的冲量为 l_2,此刻待测样品段的速度为 v_2。由于碰撞前后时刻 PVC 传送带的均静止,速度为 0,因此由动量守恒定理,蒜薹与 PVC 传送带之间的碰撞恢复系数 e_1 可以用式(4)计算:

$$e_1=\frac{l_2}{l_1}=\frac{v_2}{v_1}=\frac{\sqrt{2gI}}{\sqrt{2gH}}=\sqrt{\frac{I}{H}} \tag{4}$$

在测定蒜薹-蒜薹碰撞恢复系数时,选择 30 株长势相同、直径相近的蒜薹,紧密贴合后固定在水平放置的木板上,采用同样的方法进行重复试验。在高速相机下,蒜薹弹起达到最大高度 I_2 的时刻如图 4(b)所示。分析碰撞轨迹后由式(4)计算出蒜薹-蒜薹的碰撞恢复系数。



(a) 蒜薹-PVC传送带碰撞恢复系数测定的高速影像



(b) 蒜薹-蒜薹碰撞恢复系数测定的高速影像

图 4 碰撞恢复系数试验的高速影像

2.2 蒜薹-蒜薹和蒜薹-PVC 静摩擦因数测定

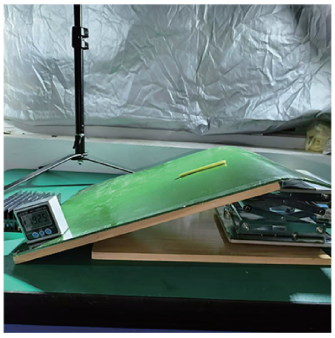
静摩擦因数可定义为物体在静止状态下所受到的摩擦力与接触面压力的比值,与接触物体的材料和表面状况有关。本文中静摩擦因数的测定包括蒜薹-PVC 传送带静摩擦因数的测定和蒜薹-蒜薹静摩擦因数的测定,均采用自制静摩擦因数测定装置进行测定。

蒜薹-PVC 静摩擦因数测定照片如图 5(a)所示,测定蒜薹-PVC 传送带静摩擦因数时,将 3 mm×400 mm×500 mm 的 PVC 传送带固定在倾斜木板上,数显角度仪(温州韦度电子有限公司,量程:4×90°,精度 0.05°,误差±0.2°)固定在倾斜的 PVC 传送带上,倾斜木板下放置一个可以自由调节高度的手摇式升降台。布置完成后将待测样品段平稳的纵向放置在 PVC 传送带上,然后缓慢旋转旋钮来抬升倾斜 PVC 传送带的角度,样品段出现微小滑动时立刻停止旋钮并逐帧检查高速相机拍下的视频,记录下蒜薹样品段出现滑动图像时角度仪上的角度 α。考虑到蒜薹不同段之间和蒜薹不同个体之间的差异,随机选取了 10 株蒜薹,每株蒜薹均匀截为 3 段,共计 30 段,每次放置在 PVC 传送带上的位置尽量各不相同,则蒜薹-PVC 传送带静摩擦因数 μ_1 可以用式(5)计算:

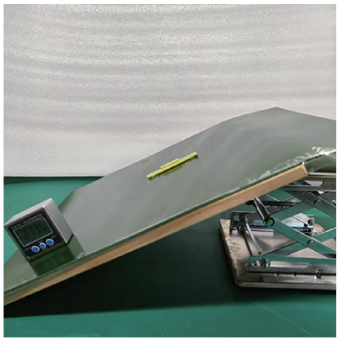
$$\mu_1=\tan\alpha \tag{5}$$

同理,通过斜面法也可以测得蒜薹-蒜薹的静摩擦因数,测定照片如图 5(b)所示。将 2 株直径、长势相同的蒜薹紧密贴合后纵向平行固定在倾斜 PVC 传送带上,将待测蒜薹样品段平稳放置在两株蒜薹的中间,同时旋转升降旋钮来提升升降台,重复试验 30 次,记录下样品段出现滑动时的角度 β。蒜薹-蒜薹静摩擦因数 μ_2 可以用式(6)计算:

$$\mu_2=\tan\beta \tag{6}$$



(a) 蒜薹-PVC静摩擦因数的测定照片



(b) 蒜薹-蒜薹静摩擦因数的测定照片

图 5　静摩擦因数的测定照片

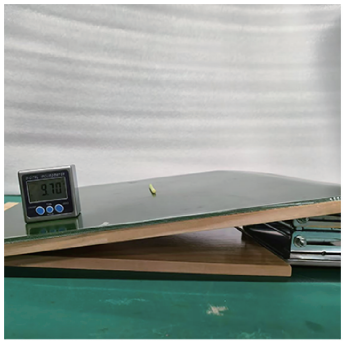
2.3　蒜薹-蒜薹和蒜薹-PVC 滚动摩擦因数

蒜薹-PVC 滚动摩擦因数的测定方法与静摩擦测定方法相同,测定时的照片如图 6(a)所示。滚动摩擦因数测定受力分析示意图如图 7 所示,当倾斜角增大到某个角度时,蒜薹发生滚动,此时滚动摩擦力偶矩 M 与支撑力 F_n 成正比例关系,并满足以下条件:

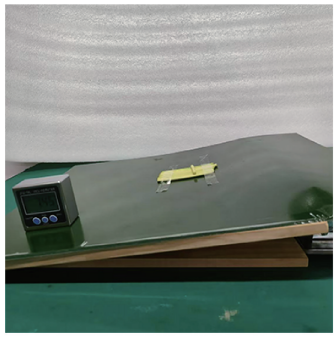
$$\begin{cases} M = f_f \cdot F_n \\ M = Gr\sin\delta \\ f_f = \dfrac{M}{F_n} = r\tan\delta \end{cases} \tag{7}$$

其中:M 为滚动摩擦力偶矩 N·m;f_f 为滚动摩擦因数;F_n 为斜面对蒜薹样品段支撑力,N;G 为蒜薹段自身重力,N;δ 为蒜薹段发生滚动时的倾斜角,(°);r 为蒜薹样品段的半径,mm。

蒜薹-蒜薹的滚动摩擦因数的测定照片如图 6(b)所示。先选择 10 株长势直挺、直径相同的蒜薹,取中间同一位置段直径相同处 50.00 mm 长的蒜薹段,因为蒜薹段较短,直径变化极小,可认为直径近似相同。将 10 小段蒜薹纵向紧密贴合后固定在 PVC 传送带上,PVC 传送带固定在倾斜木板上,同时将数显角度仪固定在倾斜 PVC 传送带上,待测定的蒜薹样品段(10 株共 30 段)以静止状态平稳横向放置在平铺的蒜薹段上,通过升降旋钮缓慢增大角度直至蒜薹样品段发生滚动,记录下此时倾斜角,重复试验 30 次。通过式(7)计算得到蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数。



(a) 蒜薹-PVC滚动摩擦因数的测定照片



(b) 蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数的测定照片

图 6　滚动摩擦因数的测定照片

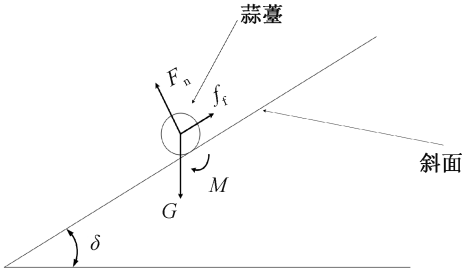


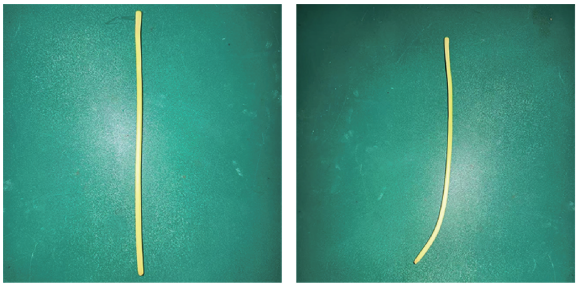
图 7　滚动摩擦因数测定受力分析示意图

3　蒜薹离散元柔性模型的建立

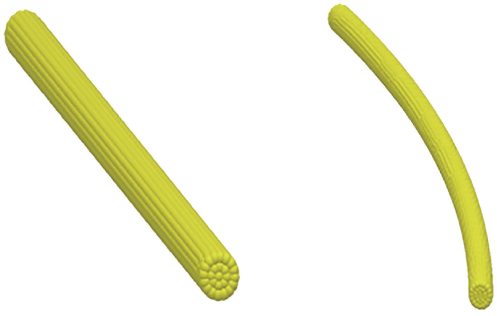
3.1　蒜薹堆积仿真模型

蒜薹的外形尺寸不统一,不同株个体之间存在差异。在田间采摘的同一批蒜薹中随机选取 100 株蒜薹进行外形的统计,发现大多数蒜薹均存在略微弯曲的情况。因此,根据测得的蒜薹不同外形比例,将蒜薹分为两种情形,分别为直立型和弯曲型,并依

据统计获得的比例将两种蒜薹外形的数量关系设定为 3∶7。利用 SOLIDWORKS 软件分别建立蒜薹的模型,对模型进行了网格的划分,保存为. stl 文件后将文件导入 EDEM 软件中。然后用球体自动填充建模的方式对蒜薹的模型进行快速填充,再对间隙较大处手动调整,2 种蒜薹植株的照片和离散元模型如图 8 所示。



(a) 蒜薹照片



(b) 离散元模型

图 8 蒜薹照片与离散元模型

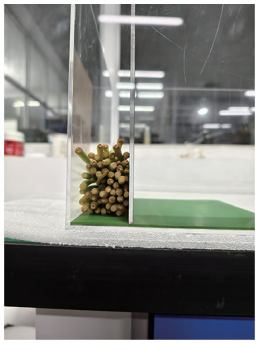
蒜薹堆积角反映了蒜薹植株整体之间以及蒜薹植株与试验材料之间的接触关系,不需要考虑同一株蒜薹离散元模型内部颗粒间的粘结力关系。因此,本文中接触模型选用 EDEM 中 Hertz-Mindlin (no slip)模型,与蒜薹接触的试验材料选用 PVC 材质,其中蒜薹的本征参数已由前文试验测得,PVC 材质的参数可由文献[23]和厂家的技术说明书获取。蒜薹和 PVC 本征参数如表 1 所示。

表 1 蒜薹和 PVC 本征参数

本征参数	蒜薹	PVC
密度/(kg·m^{-3})	955	1350
泊松比	0.44	0.35
剪切模量/MPa	5.58	1.14×10^{3}

3.2 蒜薹物理堆积角测定试验

物理堆积角是反映表征颗粒物料流动摩擦等特性的宏观参数[24-25],本文通过提升隔板法的方式对蒜薹的物理堆积角进行测定。堆积前蒜薹照片如图 9(a)所示,将 60 株长度为 320 mm 的蒜薹按照 30%直立型、70%弯曲型的比例放置于刚性箱体中,距离箱体一边 50 mm 处垂直放置一个可上下活动的挡板。待蒜薹完全静止后,迅速向上抽离可活动挡板,蒜薹整体向另一侧活动,形成物理堆积角,堆积后蒜薹照片如图 9(b)所示。利用 MATLAB 软件对堆积后蒜薹照片进行灰度化以及二值化处理,灰度化图像和二值化图像分别如图 9(c)和图 9(d)所示。



(a) 堆积前蒜薹照片

(b) 堆积后蒜薹照片

(c) 堆积后蒜薹灰度化图像

(d) 堆积后蒜薹二值化图像

图 9 蒜薹物理堆积角测定的图像

对堆积后蒜薹的轮廓线进行拟合,此时拟合线的斜率所对应的就是蒜薹物理堆积角的大小,重复5次试验,5次试验的物理堆积角平均值为36.35°,拟合线如图10所示。

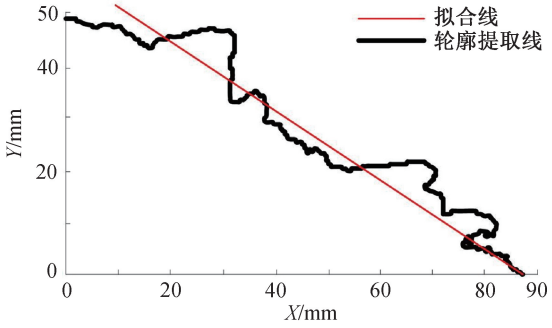


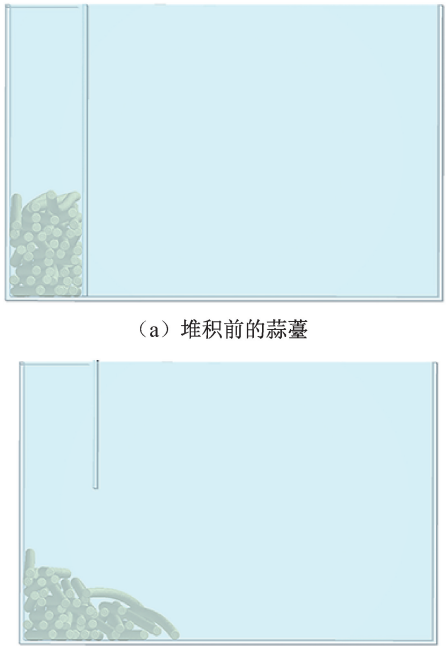
图10　物理堆积角轮廓斜率拟合线

3.3　蒜薹仿真堆积角测定试验

将上文所得到的泊松比、剪切模量、碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等重要参数输入EDEM软件中,进行堆积角试验的仿真设计。蒜薹仿真堆积角测定示意图如图11所示。首先,在SOLIDWORKS中完成试验所需箱体的建模,保存为.stl文件,然后导入EDEM软件。然后,在400 mm×50 mm×200 mm的箱体底面区域正上方添加颗粒工厂,按照3:7的比例生成直立型、弯曲型2种外形尺寸蒜薹并对蒜薹颗粒生成的方向和速度进行设置,从而保证蒜薹能完成平稳堆积。堆积期间共生成60株蒜薹,仿真时间4 s。最后,待蒜薹全部堆积完成后,对隔板的运动进行设置,速度设置为200 mm/s,运动时间设置为1 s,待蒜薹滚动完全静止后,通过EDEM自带的量角工具测定蒜薹的堆积角。重复试验5次,取其平均值,得到蒜薹最终的仿真堆积角。

3.4　Plackett-Burman试验设计

影响蒜薹仿真堆积角的试验因素众多,需要先筛选出对仿真堆积角有极显著性影响的重要参数,再对这些重要参数作进一步分析。Plackett-Burman试验可以通过比较预设的2组试验参数在高低水平下对试验整体的差异性影响,筛选出各个试验因素,从而评价这些因素对试验结果是否有极显著性影响。本文以蒜薹仿真堆积角θ为响应值,选择蒜薹-蒜薹静摩擦因数、蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数、蒜薹-蒜薹碰撞恢复系数、蒜薹-PVC静摩擦因数、蒜薹-PVC滚动摩擦因数、蒜薹-PVC碰撞恢复系数共计6个参数设计Plackett-Burman试验。结合本文第二章中接触物理参数测定所获得的各项参数的取值范围,6个参数各取一组高水平值和低水平值,其中高水平值用编号+1表示,低水平值用编号−1表示,各项参数选择如表2所示。



(a) 堆积前的蒜薹

(b) 完成堆积后的蒜薹

图11　蒜薹仿真堆积角测定示意图

表2　Plackett-Burman试验参数

试验参数	低水平(−1)	高水平(+1)
蒜薹-蒜薹静摩擦因数(A)	0.80	0.95
蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数(B)	0.015	0.025
蒜薹-蒜薹碰撞恢复系数(C)	0.45	0.57
蒜薹-PVC静摩擦因数(D)	0.57	0.68
蒜薹-PVC滚动摩擦因数(E)	0.20	0.32
蒜薹-PVC碰撞恢复系数(F)	0.40	0.50

Plackett-Burman试验的方案设计与结果如表3所示,共计进行了12组试验,获得了不同试验参数设置下的仿真堆积角。

通过Design-Expert软件对结果进行显著性分析,可以得到如图12所示Plackett-Burman试验的帕累托图,图中横坐标按照各试验参数对仿真堆积角影响的显著性由大到小排列表示,并通过颜色区分各参数的正负效应。从图12可以看出:影响最为显著的是A因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数,其次是B因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数,且都与仿真堆积角的大小成正相关。

各因素详细的显著性分析如表4所示,$P<0.01$时视为极显著性参数。从表4可以看出,A因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数和B因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数均为极显著性参数。

表 3 Plackett-Burman 试验设计方案及结果

序号	试验参数						仿真堆积角/(°)
	A	B	C	D	E	F	
1	−1	−1	−1	1	−1	1	28.41
2	1	−1	1	1	−1	1	35.45
3	−1	1	1	−1	1	1	31.14
4	1	1	−1	1	1	1	41.38
5	1	−1	−1	−1	1	−1	38.60
6	1	1	1	−1	−1	−1	36.03
7	1	1	−1	−1	−1	1	41.56
8	1	1	−1	1	1	−1	35.05
9	−1	−1	−1	−1	−1	−1	28.70
10	−1	1	1	−1	−1	−1	31.68
11	−1	−1	1	−1	1	1	25.59
12	−1	1	−1	1	1	−1	36.16

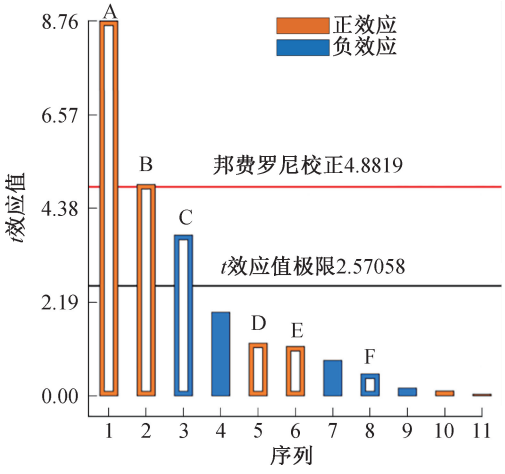


图 12 Plackett-Burman 试验的帕累托图

对表 4 的试验结果进行可靠性分析,结果如表 5 所示。由表 5 可知:模型的 P 值为 0.0025 < 0.01,表明 Plackett-Burman 试验结果极显著,该模型可行性良好,即该模型能在被研究的回归区域能够被很好地拟合;复数关系 R=0.9594,说明相关性良好;校正决定系数 U=0.9107,表明 91.07%的试验数据的变异特性可适用于该回归模型;在通常情形下变异系数 C 值越低,则试验具有更高的可信度和精度,本模型中 C = 4.48,说明了 Plackett-Burman 试验具有较高的可信度与精确性;精密度 J 是有效信号与噪声的比值,Plackett-Burman 实验精密度为 14.1146,数值大于 4.0,可视为 Plackett-Burman 试验参数选择合理。

表 4 Plackett-Burman 试验因素、水平及显著性分析结果

指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	是否显著
整体	276.45	6	46.07	19.70	0.0025	极显著
A	179.34	1	179.34	76.68	0.0003	极显著
B	56.99	1	56.99	24.36	0.0043	极显著
C	32.90	1	32.90	14.07	0.0133	
D	3.53	1	3.53	1.51	0.2738	
E	3.09	1	3.09	1.32	0.3023	
F	0.6030	1	0.6030	0.2578	0.6332	
残差	11.69	5	2.34			
总和	288.14	11				

表 5 Plackett-Burman 试验可行性分析结果

参数	参数值
R	0.9594
U	0.9107
C	4.48
J	14.1146

3.5 最陡爬坡试验设计

为进一步确定极显著性参数相对于最终试验指标的最优参数组合,以 A 因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数、B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数为影响因素,以物理堆积角与仿真堆积角的误差为试验指标进行爬坡试验。试验因素编码如表 6 所示,试验的 A 因素

蒜薹-蒜薹静摩擦因数取值为 0.83～0.93;B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数的取值为 0.015～0.025。

表 6　试验因素水平表

水平	蒜薹-蒜薹静摩擦因数(A)	蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数(B)
1.414	0.950	0.0250
1	0.928	0.0235
0	0.880	0.0200
−1	0.822	0.0165
−1.414	0.800	0.0150

3.6　中心组合设计(CCD)试验分析

利用 Design Expert 软件和 EDEM 仿真试验进行中心组合设计试验,蒜薹仿真试验的方案设计以及 EDEM 仿真试验的结果见表 7。

表 7　中心组合设计试验方案与结果

序号	试验参数		仿真堆积角/(°)
	A	B	
1	1	−1	35.91
2	0	1.414	35.83
3	−1	1	35.39
4	0	0	35.05
5	0	0	35.12
6	−1.414	0	35.08
7	0	0	35.11
8	1	1	36.82
9	1.414	0	37.10
10	−1	−1	34.87
11	0	0	35.14
12	0	0	35.20
13	0	−1.414	34.86

设 A 因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数的数值为 x_1,B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩薹静摩擦因数的数值为 x_2,则 x_1、x_2 与最终仿真堆积角 θ 的二次回归方程满足式(8):

$$\theta = 35.12 + 0.6658x_1 + 0.3502x_2 + 0.0975x_1x_2 + 0.4905{x_1}^2 + 0.1180{x_2}^2 \quad (8)$$

中心组合设计试验响应面图如图 13 所示。

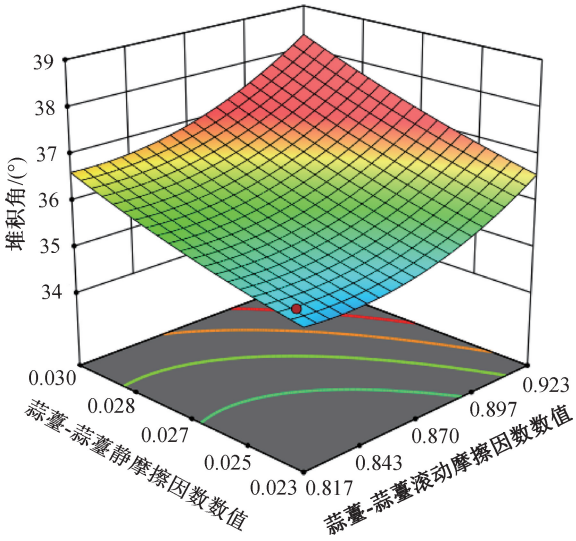


图 13　中心组合设计试验响应面图

对二次回归方程模型进行分析,分析各个因素对试验指标产生的规律,方差分析结果如表 8 所示。由表 8 可知:中心组合设计试验的整体 $P<0.01$,可见 CCD 试验整体极显著,而失拟差不显著,表明分析结果合理有效;A 因素、B 因素以及 A、B 因素的平方 P 值均小于 0.01,表明 A、B 因素与 CCD 试验结果具有强相关性,是影响仿真堆积角的极显著参数。

表 8　CCD 试验因素、水平及显著性分析结果

指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	是否显著
整体	6.26	5	1.25	268.55	<0.0001	极显著
A	3.55	1	3.55	760.71	<0.0001	极显著
B	0.9813	1	0.9813	210.46	<0.0001	极显著
AB	0.0380	1	0.0380	8.16	0.0245	
A^2	1.67	1	1.67	358.97	<0.0001	极显著
B^2	0.0969	1	0.0969	20.78	0.0026	极显著
残差	0.0326	7	0.0047			
失拟差	0.0209	3	0.0070	2.38	0.2106	不显著
误差	0.0117	4	0.0029			
总和	6.29	12				

3.7　堆积角参数的优化

为了使仿真堆积角更贴合实际测得的物理堆积角(36.35°),本文运用 Design Expert 软件对 A 因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数、B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数的数值进行优化求解,设 A 因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数的数值为 x_1,B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩薹静摩擦因数的数值为 x_2,其中相关的约束条件设置为:

$$\begin{cases}\theta = 35.12 + 0.6658x_1 + 0.3502x_2 + \\ \quad 0.0975x_1x_2 + 0.4905{x_1}^2 + 0.1180{x_2}^2; \\ \text{s.t. } \theta = 36.35°, \\ \quad 0.80 \leqslant x_1 \leqslant 0.95, \\ \quad 0.015 \leqslant x_2 \leqslant 0.025 \end{cases} \tag{9}$$

通过式(9)的计算,可以得到蒜薹仿真堆积试验的最佳参数组合,其中 A 因素蒜薹-蒜薹静摩擦因数为 0.914,B 因素蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数为 0.018,其他接触物理参数对蒜薹仿真堆积角的影响作用较小,统一取各取值范围内的中间值作为最终结果,即:蒜薹-蒜薹碰撞恢复系数为 0.51;蒜薹-PVC 静摩擦因数为 0.625;蒜薹-PVC 滚动摩擦因数为 0.26;蒜薹-PVC 碰撞恢复系数为 0.45。

4 结 论

为获取准确可靠的蒜薹离散元仿真参数,本文以红帽蒜薹为研究对象,完成了对蒜薹本征参数的测定和接触物理参数的测定;并通过 EDEM 软件建立了蒜薹的离散元仿真模型,以蒜薹仿真堆积角为响应目标,设计 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验和中心组合设计试验对仿真参数进行寻优求解,得到的主要结论如下:

a)蒜薹的密度为 955 kg/m^3,平均泊松比为 0.44,获得物理堆积角为 36.35°。

b)蒜薹-蒜薹静摩擦因数、蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数对仿真堆积角有极显著影响。通过试验获得了极显著性参数与仿真堆积角之间的二阶回归方程,优化后的蒜薹-蒜薹静摩擦因数为 0.914,蒜薹-蒜薹滚动摩擦因数为 0.018。

c)参数优化后的蒜薹仿真堆积角为 35.12°,与物理堆积角(36.35°)的误差为 3.3%,表明仿真参数具有一定的可靠性和准确性。

参考文献:

[1] 周晓琳,牟文良,王庆国. 3 种植物提取液对蒜薹货架期品质的影响[J]. 农学学报,2012,2(1):48-52.

[2] 胡云峰,杜威,魏增宇. 温度波动对蒜薹贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发,2018,39(16):185-189.

[3] 李娜,张仰猛,周进,等. 蒜薹采收方式及植株叶片损伤程度对鳞茎均重的影响[J]. 中国农机化学报,2021,42(10):7-14.

[4] 冯芮,李超,徐洪岑,等. 蒜薹机械化收获技术现状分析[J]. 中国农机化学报,2021,42(2):37-44.

[5] 朱新华,赵洲,郭文川. 面向采摘机械手的蒜薹力学特性试验研究[J]. 中国农业大学学报,2016,21(7):98-104.

[6] 崔志超,刘先才,陈永生,等. 我国大蒜全程机械化生产现状、问题与对策[J]. 中国农机化学报,2023,44(6):239-243.

[7] 屈哲,刘龙,孙雅欣,等. 电驱式蒜薹收获机控制系统的设计与仿真[J]. 农机化研究,2021,43(12):78-84.

[8] 耿令新,李洋,张利娟,等. 低损采摘蒜薹的微幅振动特性试验研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2023,44(4):30-40.

[9] 耿令新,卢富运,张利娟,等. 基于人工抽薹原理的蒜薹采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):115-124.

[10] 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.

[11] 马彦华,宋春东,宣传忠,等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(11):22-30.

[12] 张喜瑞,胡旭航,刘俊孝,等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):121-130.

[13] 周俊,孙文涛,梁子安. 收获期菊芋根-块茎离散元柔性模型研究[J]. 农业机械学报,2023,54(10):124-132.

[14] 王知多,王松松,朱佩彦,等. 基于离散元法的生姜根茎挖掘铲关键参数研究[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版): 1-13 (2025-01-13)[2025-01-21]. https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.03.012.

[15] 刘珂,魏伟锋,朱纪跃,等. 田间机收元胡离散元模型参数标定与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(4):32-38.

[16] 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.

[17] 王小勇,余志,张德,等. 炒青绿茶离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(8):418-427.

[18] 谢伟,欧阳琛,蒋蘋,等. 面向夹持采收的油菜薹夹段茎秆离散元参数标定与优化[J]. 农业工程学报,2024,40(7):104-116.

[19] 谢伟,彭磊,蒋蘋,等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报,2023, 54(5):112-120.

[20] Zhang Z G, Zeng C, Xing Z Y, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of safflower biomechanical properties[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(2): 37-46.

[21] Liu F Y, Zhang J, Chen J. Modeling of flexible wheat straw by discrete element method and its parameters calibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 42-46.

[22] 顿国强,王雷,纪欣鑫,等. 莱菔子离散元仿真模型参数标定与试验验证[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 127-133.

[23] 彭道军,徐树全,焦亚东,等. PVC 材料基本力学性能和结构应用现状[J]. 建材世界,2022,43(6):1-5.

[24] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120-127.

[25] 崔涛,刘佳,杨丽,等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报,2013, 29(15):34-41.

团队介绍

赵雄教授团队专注于农业机械设计与机构学方面的研究,致力于解决农业种植、收获设备研发制造中的关键问题。团队承担了国家自然科学基金项目 3 项、国家“十四五”重点研发计划项目子课题 1 项、浙江省“尖兵”研发攻关项目 1 项;以核心成员身份参与“十三五”重点研发计划项目课题 2 项、工信部和农业部攻关项目 2 项;获浙江省科学技术一等奖和浙江省农业科学技术三等奖。在机构学和农业工程领域,已在国内外知名期刊发表研究论文 20 余篇。团队提出了多种移栽机构非圆齿轮的设计方案和整机模型,设计制造了包括西蓝花采收机械、蒜薹收获机械在内的多种田间收获样机,推动了农业种植机械化和农业收获机械化的发展。

(责任编辑:康　锋)