

焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 217-225.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.026

莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析

焦俊¹, 张国忠^{1,2}, 杜俊^{1,2}, 刘浩蓬^{1,2}, 查显涛^{1,2}, 邢赫^{1,2}

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 以鄂莲 5 号为试验对象, 采用单轴压缩试验获取其主藕体弹性模量、剪切模量和泊松比等本征参数, 通过摩擦、碰撞试验获取莲藕间及其与钢之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数等接触参数。采用 Geomagic studio 3D 以及 Solidworks 软件对莲藕主藕体进行三维建模; 利用 EDEM 仿真软件中的 Hertz-Mindlin with bonding 模型, 建立莲藕主藕体离散元模型。以莲藕主藕体弯曲破坏结果为对照, 以法向粘结刚度、切向粘结刚度、法向临界应力、切向临界应力为影响因素, 开展主藕体弯曲破坏离散元单因素和二因子模拟试验。试验结果显示, 法向粘结刚度、切向粘结刚度对第一弯曲破坏发生时位移值以及第一峰值影响显著, 法向临界应力、切向临界应力影响不显著; 在法向临界应力为 3.80 MPa、切向临界应力为 3.12 MPa 时, 采用最速下降法分析确定主藕体法向粘结、切向粘结刚度最优解分别为 5.814×10^8 、 3.450×10^8 N/m³, 据此获得主藕体第一弯曲破坏仿真峰值和位移值分别为 269.72 N、7.14 mm, 仿真结果相对实测结果误差分别为 2.56%、2.00%。

关键词 莲藕; 莲藕采收; 弯曲破坏; 离散元; 参数标定; 水生蔬菜

中图分类号 S 222.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0217-09

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn), 简称莲, 别名莲菜、荷藕等, 是一种用途十分广泛的水生经济作物, 也是我国种植面积最大的水生蔬菜^[1]。我国莲藕种植主要分布于湖北、江苏、山东、安徽、福建、湖南、浙江等省。近年来, 我国莲藕种植区域逐步扩大, 种植面积亦呈稳定增长态势。莲藕具有很好的食用和药用价值, 莲藕和莲子可供食用, 花粉、荷叶、莲芯等也都可以作为菜肴、饮料及保健食品。莲藕地下茎为主要食用部位, 其由主藕、支藕组成, 无序生长于水下淤泥中, 斜植交叉, 无规律随机分布。其中, 主藕由 3~7 节膨大节间组成, 总长度可达 1.2~1.4 m, 质量达 3.0~4.0 kg^[2]。为保证成品合格率, 现阶段莲藕采收多用人工挖掘, 先由人工脚踏摸索出藕枝大致位置及生长方向, 再用手持高压水枪沿莲藕外侧环绕切割、粉碎淤泥, 随后人工辅助拔出主体莲藕, 使其与淤泥分离^[3]。受限于莲藕生长无规律及子藕旁支错综复杂等问题, 拔出过程中若部分莲藕枝节仍埋于淤泥中, 易发生弯曲、断裂, 泥水会经断裂处进入内孔, 致使莲藕品质受损。提高效率并减少收获过程对莲藕的损伤与破坏是当前莲藕机

械化采收领域亟待解决的技术难题。

采用三维建模以及数值计算仿真软件对采挖作业进行仿真分析, 是优化改进机械化收获技术与设备的有效途径^[4-6]。莲藕作为一种狭长枝节状的多孔质生物物料, 其力学仿真模型缺乏研究。近年来, 有关农业物料力学特性的研究如肥料、马铃薯^[7]、三七种子等散粒以及茎秆类农业物料的离散元建模和仿真参数标定的报道逐渐增多。于庆旭等^[8]采用逆向工程技术对三七种子进行了三维建模, 通过碰撞试验、斜面试验、圆筒提升堆积试验标定其接触参数, 并开展非规则散粒物料的仿真模拟。马文鹏等^[9]以苜蓿种子休止角与堆积角开展双指标多目标寻优计算得到其离散元接触参数, 并通过槽轮式排种器进行试验验证。张涛等^[10]采用抽板试验测定了玉米秸秆径向堆积角, 以其为目标采用正交试验标定了接触参数。廖宜涛等^[11]以不同直径的饲料油菜薹期收获茎秆为对象, 结合圆筒提升堆积试验以及弯曲破坏仿真试验分别标定其接触参数以及粘结参数, 建立茎秆的离散元力学模型。

本研究以鄂莲 5 号莲藕为对象, 采用物理试验

收稿日期: 2021-06-06

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-24-D-02)

焦俊, E-mail: 269741246@qq.com

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

测定其主藕体本征参数、接触参数以及内孔尺寸,利用三维反求技术获取主藕体轮廓以及放样切割内孔方法完成主藕体三维建模,采用 EDEM 内置的 Hertz-Mindlin with bonding 粘结模型建立主藕体离散元模型,进而开展弯曲破坏规律仿真分析,以期莲藕机械化收获过程仿真研究以及莲藕损伤、破坏途径与因素的分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为湖北省广泛种植的莲藕 (*Nelumbo nucifera* Gaertn) 鄂莲 5 号。选取第二节主藕体为对象进行仿真分析,取样区域与部位如图 1 所示。

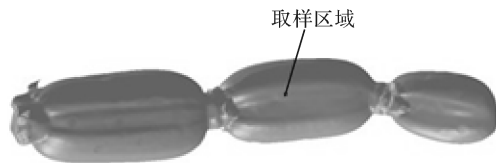


图 1 莲藕取样区域

Fig.1 Sampling diagram of lotus root

1.2 本征参数测量

1) 轴向压缩试验。为测定主藕体弹性模量、剪切模量、泊松比等本征参数,选取莲藕表层和心部等部位制作 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 立方标准试样,在 TMS-Pro 质构仪进行平板轴压缩试验(图 2)。设置压缩速度为 10 mm/min 、加载位移为 4 mm ,重复 10 次,通过测量试样单轴压缩前后高度与直径变化量并参考文献[12]方法计算获得主藕体弹性模量、剪切模量、泊松比等本征参数。

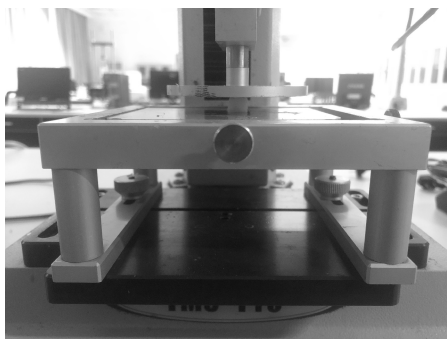
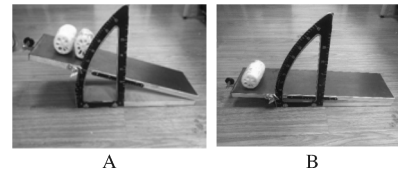


图 2 单轴压缩试验

Fig.2 Uniaxial compression test

2) 主藕体-钢摩擦系数测定^[10]。采用斜面法获取主藕体-钢摩擦系数。试验前根据前期莲藕外形尺寸抽样调查结果,选取横截面长轴为 $(70 \pm 5)\text{ mm}$ 、短轴为 $(60 \pm 5)\text{ mm}$ 的第二节莲藕,去除两端,

选取中间部位制备成长 100 mm 筒状主藕体试样。静摩擦系数测量时,为保证试样在斜面上仅能产生滑动,将 2 节主藕体沿垂直纵轴方向插入直径 5 mm 、长 20 mm 钢条,形成并联结构摆放(图 3A),缓慢推动斜面至其发生滑动,记录该时刻斜面与水平面夹角,重复 20 次取平均值,计算得到主藕体-钢静摩擦系数。测量主藕体-钢滚动摩擦系数时(图 3B),取 1 节试样沿轴向方向放置于斜面上,按照静摩擦试验方法试验,试验同样重复 20 次,最后取平均值计算滚动摩擦系数。



A: 滑动试验 Coefficient of static friction test; B: 滚动试验 Coefficient of rolling friction test.

图 3 主藕体-钢滚动摩擦试验

Fig.3 Main lotus root and steel rolling friction test

3) 主藕体-主藕体摩擦系数测定。目前尚无对主藕体间摩擦系数测量的文献报道。本研究参照 GB/T 10006 — 2021《塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定》标准,采用摩擦系数测试仪进行测量。测量时,沿主藕体周向均匀切取若干个规格为 $8\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 切片,并采用粘结剂将切片内表面均匀依次密布粘在滑块以及试验台上,使其外表面相对所采用粘结剂对主藕体外表面无渗透硬化作用(图 4)。粘贴完毕后,驱动滑块以 100 mm/min 的速度相对试验台直线运动,牵引方向与摩擦方向平行,以模拟主藕体间滑动、滚动等相对运动情形,测量计算主藕体间滚动摩擦、静摩擦系数。试验时控制试验时间,确保试验环境条件恒温恒湿,保持主藕体以及切片水

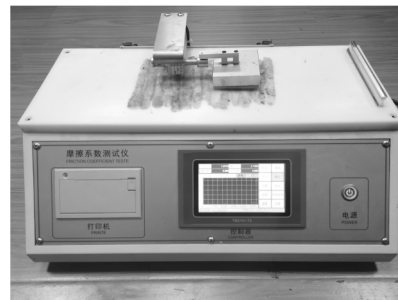


图 4 主藕体-主藕体摩擦系数测定

Fig.4 Measurement of friction coefficient between main lotus root and main lotus root

分恒定,试验前后采集同一部位小块主藕体试样,采用水分测定仪测定其含水率,均稳定保持在 75%±5%。

4)主藕体碰撞系数测定。为测定主藕体-钢碰撞恢复系数,制备与前述摩擦试验规格一致主藕体试样,在其表面涂上粉末以用于标记碰撞点。基于压缩试验结果以及防止试验时损伤主藕体,调整台架高度 H 为 20 cm(图 5)。试验时主藕体莲藕在高度 H 处经限位环投放,自由落体至与碰撞板发生碰撞后做抛物线运动落入沙箱。同一试样多次重复试验后取其集中落点并采集落点距碰撞点水平距离 S_1 ,以及无底座时主藕体落入沙盘的水平距离 S_2 ,按照式(1)计算碰撞后水平、垂直方向分解速度 v_x 、 v_y ,按照式(2)计算主藕体-钢碰撞恢复系数^[13]。

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1 - S_2)}{2(h_1S_2 - h_2S_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2v_x} \end{cases} \quad (1)$$

$$e = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 \cos\left[\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) + \frac{\pi}{4}\right]}}{\sqrt{2gH \sin\frac{\pi}{4}}} \quad (2)$$

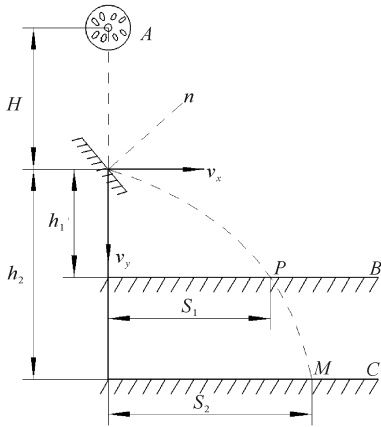


图 5 碰撞模型

Fig.5 Model of collision

为测定主藕体间碰撞恢复系数,开展主藕体间对心碰撞试验。试验时,在纵轴高度 20 cm 处释放主藕体,其与下方固定状态主藕体试样碰撞,以下方主藕体试样上表面轴向切线方向为横轴,垂直方向为纵轴,建立如图 6 所示坐标系,采用高速摄影仪记录上方主藕体碰撞后沿纵向弹跳高度,计算二者比值得到主藕体间碰撞恢复系数^[14]。

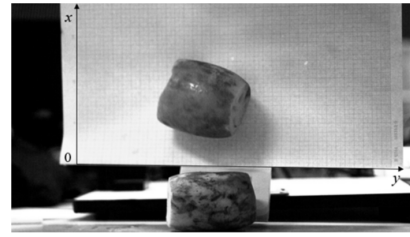


图 6 主藕体对心碰撞试验

Fig.6 Central collision test between main lotus root and other main lotus root

5)主藕体本征与接触参数。经以上试验得到主藕体本征与接触参数,结果如表 1 所示。

表 1 主藕体本征与接触参数

Table 1 Intrinsic and contact parameters of main lotus root

参数 Parameters	数值 Value
泊松比 Poisson's ratio	0.22
弹性模量/MPa Young's modulus	3.02
剪切模量/MPa Shear modulus	1.24
主藕体间碰撞恢复系数 Coefficient of restitution between main lotus root and other main lotus root	0.54
主藕体间静摩擦系数 Coefficient of static friction between main lotus root and other main lotus root	0.58
主藕体间滚动摩擦系数 Main lotus root-main lotus root coefficient of rolling friction	0.19
主藕体-钢碰撞恢复系数 Coefficient of restitution between main lotus root and steel	0.81
主藕体-钢静摩擦系数 Coefficient of static friction between main lotus root and steel	0.51
主藕体-钢滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction between main lotus root and steel	0.16

1.3 主藕体仿真模型建立

1)三维模型获取。主藕体结构不规则,其形状参数直接影响粘结模型中粘结键数量以及粘结结构。为此,采用逆向工程技术,通过 EinScan-pro 手持式 3D 扫描仪对其扫描,封装点云数据,从而得到精确主藕体轮廓模型^[7]。采用 Geomagicstudio 3D 软件,将点云数据转换为多边形,删除尖状物、填充孔,去除多余特征,针对反映主藕形状特征的轮廓锐化处理,生成栅格,拟合曲面得到主藕 NURBS 轮廓曲面模型。由于主藕体内部存在贯通内孔(图 7),其多孔质结构直接影响物料机械强度,故将主藕体内孔依次标号后统计测量分析其形状参数(表 2),导入 Solidworks 三维软件,放样切割得到主藕体三维实体模型。

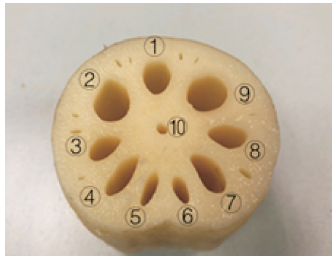


图 7 主藕体截面

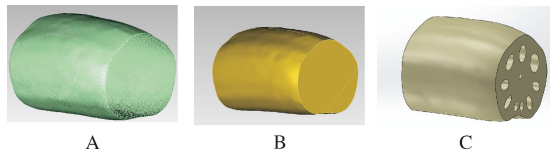
Fig.7 Cross section of main lotus root

表 2 主藕体内孔尺寸

Table 2 Size of inner hole of main lotus root mm

编号 Number	长轴 Long axis	短轴 Minor axis	深度 Depth
1	13	9	7
2	15	12	8
3	11	7	7
4	12	7	6
5	7	5	4
6	7	5	4
7	12	6	6
8	11	8	7
9	14	13	8
10	4	4	30

取颗粒半径 3 mm,以外表面轮廓向内缩放 2 倍颗粒半径距离建立壁面,将主藕体模型分为内外两层,用于后续建立外表皮以及心部的颗粒材料(图 8)。



A: 点云数据 Point cloud data; B: 轮廓曲面模型 Profile surface; C: 实体模型 Solid model.

图 8 主藕体三维模型

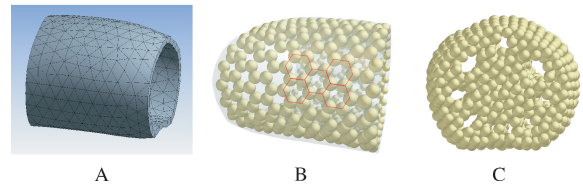
Fig.8 Three-dimensional model of main lotus root

2) 颗粒填充与粘结。将主藕体颗粒模型分为心部与外表皮颗粒模型。如图 9A 所示,外表皮模型利用 Workbench 构建单层 Prism 网格模型后导入 Fluent 中,利用 udf 计算得到空心六边形密排面(图 9B),构建双层 prism 网格模型后分别导出内外表面以及整体节点坐标信息,筛选去除重复坐标信息后得到中层节点信息,将其作为正六边形中心,最终得到完整密布形外表皮颗粒模型,后处理输出外表皮 XML 文件^[15]。

设置壁面模型为 Hertz-Mindlin 无摩擦(no slip)模型,采用落雨法生成心部颗粒,设置 box 为 physical,作为颗粒工厂生成心部颗粒后,利用平板向下压缩,保证颗粒密实堆积,而后主藕体内层几何

模型由初始 Virtual 状态变为 physical 状态,沿壁面外形束缚颗粒。压缩过程中存在部分颗粒进入内孔,设置内孔模型以 100 mm/s 速率沿轴向直线运动,同时设置接触几何与多余颗粒接触,采用 Remove particle API,清理内孔中多余颗粒,后处理输出心部 XML 文件。提取 2 份 XML 文件中心部与外表皮颗粒坐标信息,输入 XML 文件中得到完整填充文件,将完整填充文件输入 EDEM。

若壁面弹性模量过大,会造成颗粒间短时间难以达到平衡状态,而过小也会造成颗粒在加载压实过程中穿透壁面使得颗粒无法贴合非球形壁面。为获取反映莲藕形状特征的精准粘结模型,取壁面弹性模量为颗粒弹性模量的 1/10,在颗粒间无明显重叠下重新排列填充直至达到平衡状态,最终得到主藕体颗粒模型(图 9C)。



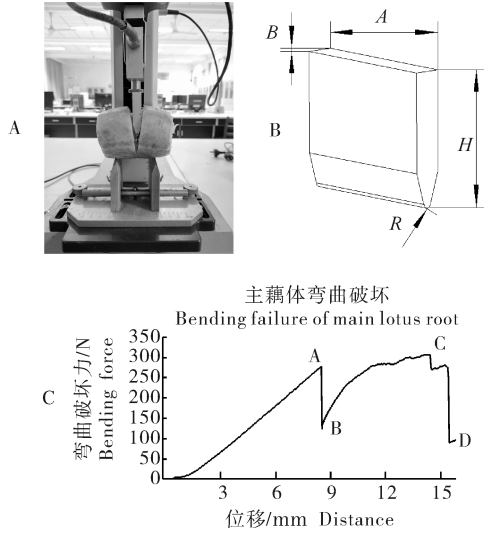
A: 网格模型 Mesh model; B: 六边形基础模型 Hexagon base mode; C: 完整模型 Complete model.

图 9 主藕体颗粒模型

Fig.9 Particle model diagram of main lotus root

1.4 主藕体弯曲破坏离散元仿真

1) 主藕体弯曲破坏试验。如图 10A 所示,采用 TMS-Pro 质构仪(FTC 公司)进行主藕体弯曲破坏试验,选用质构仪自带长(A)×宽(B)×高(H)×厚(R,刃口)为 50 mm×10 mm×60 mm×3 mm 刀头(图 10B),以 10 mm/min 速率对主藕体施加载荷,记录加载过程中随加载位移变化的弯曲破坏力曲线,试验规格与前述摩擦试验一致,固定支撑两点间距为 50 mm,参照文献[11]重复试验 10 次,统计显示最大破坏力平均值为 315 N。由图 10C 可知:(1)起始时,主藕体在加载过程中经过原点到 A 间为塑性形变阶段,此时局部出现由斜裂纹扩展导致的剪切破坏以及轴向拉裂纹扩展而出现的劈裂破坏^[15];(2)随后,在 A-B 阶段出现应力集中现象,裂纹扩展迅速,对外表现为局部脆性断裂;(3)而后,在 B-C 阶段主藕体开始断裂,裂纹扩张至藕心部,应力增加;(4)最后,压头继续加载,藕体迅速断裂,表现为典型楔入断裂。



A: 弯曲破坏试验 Bending failure test; B: 弯曲刀头示意图 Curved tool head; C: 典型主藕体弯曲破坏应力-应变曲线 Typical bending failure curve of main lotus root.

图 10 主藕体弯曲破坏试验

Fig.10 Bending failure test of main lotus root

2) 粘结模型及参数计算。弯曲破坏试验显示主藕体产生劈裂现象, 故视其为脆性材料。由于 Hertz-Mindlin with bonding 模型是 1 个粘结接触模型, 常用于模拟断裂问题, 故用其来模拟主藕体弯曲破坏过程^[17]。Hertz-Mindlin with Bonding 模型中颗粒间力学特性满足梁弹性理论^[18], 如式(3)所示:

$$\begin{cases} F_n = K_n U_n \\ \Delta F_n = -K_s \Delta U_s \end{cases} \quad (3)$$

其中, K_n 、 K_s 分别为法向接触刚度、切向接触刚度, N/m; F_n 为法向应力, 成对颗粒接触后产生切向应力增量 ΔF_s 叠加在切向应力 F_s 上^[19]。颗粒间受力以式(4)随时间步长迭代计算得到^[20]:

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n k_n A \delta_t \\ \delta F_s = -v_s k_s A \delta_t \\ \delta M_n = -\omega_n k_n A \delta_t \\ \delta M_t = -\omega_s k_s A \delta_t \end{cases} \quad (4)$$

其中, k_n 、 k_s 分别为法向粘结刚度、切向粘结刚度, N/m³, $A = \pi R^2$ 、 $I = \frac{1}{4} \pi R^4$ 和 $J = \frac{1}{2} \pi R^4$ 分别是粘结键横截面积、惯性矩和极惯性矩, 其单位分别为 m²、m⁴、m⁴。

离散元模型需要标定的参数: 法向粘结刚度 k_n , N/m³; 切向粘结刚度 k_s , N/m³; 切向临界应力 τ_{max} , MPa; 法向临界应力 σ_{max} , MPa; 粘结半径

R , m。为节约仿真计算时间, 球形颗粒物理半径 r 为 3 mm, 接触半径取 4 mm, 粘结半径一般为接触半径的 1.2~2.0 倍, 粘结半径 R 取 5 mm^[21]。根据梁理论, 计算得到粘结键之间的法向临界应力和切向临界应力:

$$\begin{cases} \sigma_{max} = -\frac{F_n}{A} + \frac{|M_s| R}{I} \\ \tau_{max} = \frac{|F_s|}{A} + \frac{|M_n| R}{J} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, 当拉伸应力、剪切应力超过上述最大值后, 粘结键断裂。

3) 主藕体弯曲破坏离散元仿真单因素试验。按照前述测定的结果, 开展主藕体弯曲破坏仿真试验(图 11)。由于 Hertz-Mindlin with bonding 模型中法向粘结刚度、切向粘结刚度、法向临界应力、切向临界应力的粘结参数均对仿真结果存在影响, 为探索其影响规律, 设置外表皮、心部、外表皮粘结参数一致, 采集初始段曲线, 对法向粘结刚度 x_1 、切向粘结刚度 x_2 、法向临界应力 x_3 、切向临界应力 x_4 , 分别设置 10^6 、 10^7 、 10^8 3 个水平(表 3), 重复 10 次, 开展主藕体弯曲破坏仿真单因素试验^[22]。

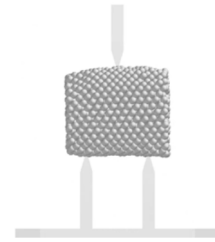


图 11 主藕体弯曲破坏仿真试验

Fig.11 Bending failure simulation of main lotus root

表 3 单因素试验

Table 3 Single factor test

序号 No.	$x_1/(N/m^3)$	$x_2/(N/m^3)$	x_3/Pa	x_4/Pa
1	10^6	10^8	10^6	10^6
2	10^7	10^8	10^6	10^6
3	10^8	10^8	10^6	10^6
4	10^8	10^6	10^6	10^6
5	10^8	10^7	10^6	10^6
6	10^8	10^8	10^6	10^6
7	10^8	10^6	10^6	10^6
8	10^8	10^6	10^7	10^6
9	10^8	10^6	10^8	10^6
10	10^8	10^6	10^6	10^6
11	10^8	10^6	10^6	10^7
12	10^8	10^6	10^6	10^8

试验时, 设置颗粒接触模型为 Hertz-Mindlin with bonding 模型, 在外表皮颗粒、心部颗粒以及外表皮-心部颗粒间分别添加粘结键, 输入粘结参数,

设置几何壁面弹性模量为 7.94×10^{10} MPa, 基于该模型对时间步长敏感, 取低于 10% 时间步长, 取整后为 3×10^{-5} s 进行运算。

由图 12 可知, 法向、切向粘结刚度对曲线位移值以及第一峰值影响显著, 法向临界应力、切向临界应力对曲线峰值以及位移值影响不显著。根据单因素试验获得法向粘结刚度、切向粘结刚度、法向临界应力、切向临界应力参数上下限区间如表 4 所示。

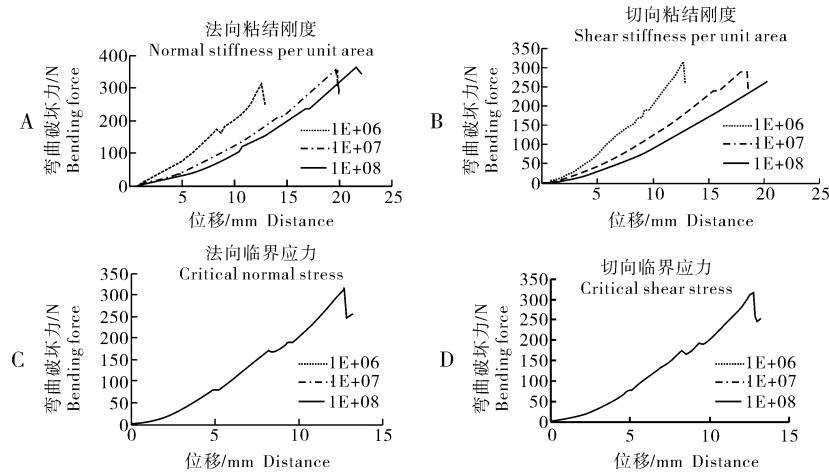


图 12 单因素试验

Fig.12 Single factor test

4) 主藕体弯曲破坏离散元仿真二因子试验。根据单因素试验结果, 为进一步获取上述因素对弯曲破坏曲线的影响规律以及二次效应(弯曲性)是否显著^[23], 开展了 5 个中心点的二水平因子试验。

5) 最速下降法。为快速趋近实际弯曲破坏曲线及关键破坏点, 从二因子试验获取的一阶响应曲面方程中心点出发, 取沿垂直于拟合曲面等高线的直线为最速下降路径, 取步长与回归系数成正比, 按照最速下降法寻找法向粘结刚度、切向粘结刚度、法向临界应力、切向临界应力的最优解。

2 结果与分析

2.1 一阶响应曲面分析

由单因素试验可知, 刚度参数同时对曲线第一峰值以及位移值影响显著, 为精确衡量仿真曲线与实测曲线相似性, 采用式(6)以仿真以及实测曲线中第一峰值与位移点组成的坐标点, 计算坐标间欧拉距离(ED)作为衡量仿真与实测试验相对误差的指标。

$$ED(S_a - S_b) = \sqrt{(F_a - F_b)^2 + (D_a - D_b)^2} \quad (6)$$

式(6)中, S_a 、 S_b 分别为仿真、实测曲线坐标点,

编码值 Code value	粘结参数 Bonding parameters			
	$x_1 /$ ($\times 10^8$ N/m ³)	$x_2 /$ ($\times 10^8$ N/m ³)	$x_3 /$ MPa	$x_4 /$ MPa
-1	1.00	1.00	1.00	1.00
0	1.95	1.35	2.80	3.12
1	2.90	1.70	4.60	5.23

F_a 、 F_b 分别为仿真、实测曲线第一峰值, D_a 、 D_b 分别为仿真、实测曲线位移值。

试验指标包含峰值以及位移点, 两者度量单位不一, 需采用式(7)所示的阈值比较法进行无量纲化处理。

$$\begin{cases} F_0 = \frac{F_a - F_b}{F_b} \\ D_0 = \frac{D_a - D_b}{D_b} \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得无量纲化的欧拉距离 ED_0 。

$$ED_0 = \sqrt{F_0^2 + D_0^2} \quad (8)$$

以表 4 所示参数上下限值设计二水平因子试验(表 5)。由表 6 可知: 主效应 x_1 、 x_2 对 ED_0 参数影响显著($P < 0.01$), 主效应 x_3 、 x_4 、弯曲性(纯二次效应)以及其余交互作用均对 ED_0 参数影响不显著($P > 0.05$), 弯曲性不显著证明一阶响应曲面方程具有适用性。使用最小二乘法, 利用规范变量以一阶模型拟合得到关于 ED_0 参数一阶响应曲面方程:

$$ED_0 = 2.24 - 7.20 \times 10^{-9} x_1 - 1.06 \times 10^{-8} x_2 + 3.75 \times 10^{-17} x_1 x_2 \quad (9)$$

表 5 二水平因子试验

Table 5 Regular two-level factorial design

序号 No.	$x_1/$ ($\times 10^8$ N/m ³)	$x_2/$ ($\times 10^8$ N/m ³)	$x_3/$ MPa	$x_4/$ MPa	ED ₀
1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85
2	2.90	1.00	1.00	1.00	0.19
3	1.00	1.70	1.00	1.00	0.37
4	2.90	1.70	1.00	1.00	0.21
5	1.00	1.00	4.60	1.00	0.85
6	2.90	1.00	4.60	1.00	0.19
7	1.00	1.70	4.60	1.00	0.37
8	2.90	1.70	4.60	1.00	0.21
9	1.00	1.00	1.00	5.23	0.85
10	2.90	1.00	1.00	5.23	0.19
11	1.00	1.70	1.00	5.23	0.37
12	2.90	1.70	1.00	5.23	0.21
13	1.00	1.00	4.60	5.23	0.85
14	2.90	1.00	4.60	5.23	0.19
15	1.00	1.70	4.60	5.23	0.37
16	2.90	1.70	4.60	5.23	0.21
17	1.95	1.35	2.80	3.12	0.34
18	1.95	1.35	2.80	3.12	0.34
19	1.95	1.35	2.80	3.12	0.34
20	1.95	1.35	2.80	3.12	0.34
21	1.95	1.35	2.80	3.12	0.34

表 6 一阶曲面响应模型方差分析

Table 6 Analysis of variance of first order surface response equation

方差来源 Source	自由度 df	均方和 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
模型 Model	10	0.111 9	87.25	<0.000 1
x_1	1	0.656 0	511.760 0	<0.000 1
x_2	1	0.213 4	166.450 0	<0.000 1
x_3	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_4	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_1x_2	1	0.249 1	194.340 0	<0.000 1
x_1x_3	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_1x_4	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_2x_3	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_2x_4	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
x_3x_4	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
纯二次 Curvature	1	0.012 8	0.771 9	0.393 5
残差 Residual	10	0.001 3		
失拟项 Lack of fit	6	0.002 1		
纯误差 Pure error	4	0.000 0		

2.2 最速下降法分析

由一阶响应曲面方程可知, x_1 、 x_2 对 ED₀ 参数为负效应。非显著项 x_3 、 x_4 取中间水平。以一阶响应曲面方程中系数最大的 x_2 作为基准值, 取 0.70 MPa 为基本步长, 由式(10)所示规范向量 x_1 、 x_2 与自然向量 z_1 、 z_2 关系, 设计最速下降试验(表 7)。

$$\begin{cases} x_1 = \frac{z_1 - 1.95 \times 10^8}{9.50 \times 10^7} \\ x_2 = \frac{z_2 - 1.35 \times 10^8}{3.50 \times 10^7} \end{cases} \quad (10)$$

表 7 最速下降试验

Table 7 Steepest ascent

步长 Step	$x_1/$ ($\times 10^8$ N/m ³)	$x_2/$ ($\times 10^8$ N/m ³)	ED ₀
0	1.950	1.350	
Δ	1.288	0.700	
0+ Δ	3.238	2.050	0.21
0+2 Δ	4.526	2.750	0.19
0+3 Δ	5.814	3.450	0.03
0+4 Δ	7.102	4.150	0.13

由表 7 可知, 在步长为原点 +3 Δ 处 ED₀ 参数最低, 该粘结参数下第一弯曲峰值为 269.72 N、位移值为 7.14 mm, 与实测试验数据相对误差分别为 2.56%、2.00%, 总体误差为 2.28%, 可以认为此时法向粘结刚度、切向粘结刚度、法向临界应力、切向临界应力等粘结参数为最优解, 仿真与实测弯曲曲线对比如图 13 所示。

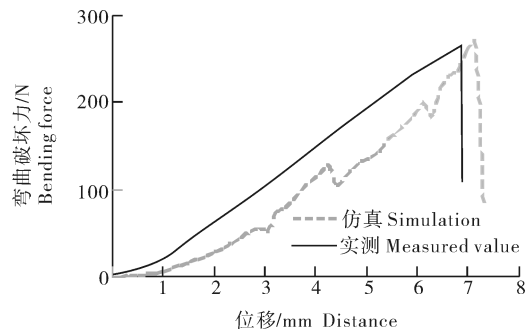


图 13 仿真-实测曲线

Fig.13 Curve of simulation-test

3 讨论

本研究建立了鄂莲 5 号主藕体离散元模型, 使用 Hertz-Mindlin with bonding 模型对其弯曲破坏模型进行了仿真分析, 采用单因素试验、二因子试验、最速下降法得到法向粘结刚度为 5.814×10^8 N/m³、切向粘结刚度为 3.450×10^8 N/m³、法向临界应力为 3.80 MPa、切向临界应力为 3.12 MPa。第一弯曲峰值 269.72 N、位移 7.14 mm, 相较实测曲线相差 2.56%、2.00%。对仿真模型各关键参数分析显示, 法向刚度粘结系数与切向粘结刚度对于第一弯曲力峰值以及峰值位移点影响显著, 而法向临界应力与切向临界应力对第一峰值以及位移点影响不显著, 其中法向刚度大于切向刚度, 第一弯曲力峰

值大于第二弯曲力峰值。

本研究仅对主藕体弯曲破坏塑形变形阶段进行了仿真模拟分析,后期需要进一步对藕节以及主藕、藕节联合体的受力破坏进行研究。此外,本研究未分析截面藕孔分布以及对藕体破坏性能的影响,后续也需进一步开展研究。

参考文献 References

- [1] 郭洋民.水田莲藕采挖机设计与研究[D].武汉:华中农业大学,2015.GUO Y M.The research and design of lotus digging machine for paddy field[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2015(in Chinese with English abstract).
- [2] 谢晋,韩迪,王靖,等.中国莲藕产业发展现状及展望[J].农业展望,2017,13(12):42-45,51.XIE J,HAN D,WANG J,et al.Development status quo and prospect of China's lotus root industry[J].Agricultural outlook,2017,13(12):42-45,51(in Chinese with English abstract).
- [3] 满昌伟.移动式藕荸荠等水生蔬菜栽培技术[M].北京:化学工业出版社,2014.6:39-40.MAN C W.Cultivation technology of aquatic vegetables such as mobile lotus root and water chestnut [M].Beijing:Chemical Industry Press,2014.6:39-40(in Chinese).
- [4] 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 Z W,MA X,CAO X L,et al.Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J].Transactions of the CSAM,2021,52(4):1-20(in Chinese with English abstract).
- [5] 张雯,张衍林,李善军,等.基于虚拟样机运动学仿真的割草机喂草导向装置参数优化[J].华中农业大学学报,2019,38(4):134-142.ZHANG W,ZHANG Y L,LI S J,et al.Parameter optimization of disc lawn mower grass-feeding guide device based on dynamic simulation of virtual prototype[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2019,38(4):134-142(in Chinese with English abstract).
- [6] 李大鹏.气力式藜麦精量排种器离散元分析与性能试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.LI D P.Discrete element analysis and performance test of pneumatic precision metering device for quinoa[D].Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2020(in Chinese with English abstract).
- [7] 余参参,段宏兵,蔡兴奎,等.基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J].华中农业大学学报,2021,40(1):210-217.YU C C,DUAN H B,CAI X K,et al.Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(1):210-217(in Chinese with English abstract).
- [8] 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 Q X,LIU Y,CHEN X B,et al.Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM [J].Transactions of the CSAM,2020,51(2):123-132(in Chinese with English abstract).
- [9] 马文鹏,尤泳,王德成,等.基于RSM和NSGA-II的苜蓿种子离散元模型参数标定[J].农业机械学报,2020,51(8):136-144.MA W P,YOU Y,WANG D C,et al.Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-II [J].Transactions of the CSAM,2020,51(8):136-144(in Chinese with English abstract).
- [10] 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.ZHANG T,LIU F,ZHAO M Q,et al.Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J].Journal of China Agricultural University,2018,23(4):120-127(in Chinese with English abstract).
- [11] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等.饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2020,51(6):73-82.LIAO Y T,LIAO Q X,ZHOU Y,et al.Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J].Transactions of the CSAM,2020,51(6):73-82(in Chinese with English abstract).
- [12] 肖科星,夏俊芳,陈子林,等.莲藕力学特性的试验研究[J].华中农业大学学报,2016,35(5):125-130.XIAO K X,XIA J F,CHEN Z L,et al.Biomechanics of lotus root [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2016,35(5):125-130(in Chinese with English abstract).
- [13] 冯斌,孙伟,石林榕,等.收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J].农业工程学报,2017,33(13):50-57.FENG B,SUN W,SHI L R,et al.Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors [J].Transactions of the CSAE,2017,33(13):50-57(in Chinese with English abstract).
- [14] 王洪飞.大豆育种自动清换种排种系统的设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.WANG H F.Design and experiment of automatic changing seeding system for plot-soybean breeding [D].Harbin:Northeast Agricultural University,2020(in Chinese with English abstract).
- [15] 李金光.基于离散元法的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[D].泰安:山东农业大学,2020.LI J G.Optimization design and test of spinach harvester's root-cutting shovel based on discrete element method [D].Taian:Shandong Agricultural University,2020(in Chinese with English abstract).
- [16] 赵程,刘丰铭,杨磊,等.岩石单裂纹扩展及损伤演化规律的数值模拟研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(5):22-27.ZHAO C,LIU F M,YANG L,et al.Numerical simulation of single crack propagation and damage evolution mechanism of rock specimens [J].Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science edition),2016,35(5):22-27(in Chinese with English abstract).
- [17] JIANG M J,YU H S,HARRIS D.Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses [J].International journal for numerical and analytical methods in geomechanics,2006,30(8):723-761.
- [18] TOKUNAGA H,KAIZU K,IKEDA K,et al.Impact fracture analysis of thermally tempered glass by the extended distinct el-

- ement method[J]. Journal of solid mechanics and materials engineering, 2007, 1(8): 986-997.
- [19] 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.
- [20] 韩丹丹. 内充气吹式玉米精量排种器仿真优化与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. HAN D D. Optimization simulation and experimental research of inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [21] 宋学锋. 基于离散元法的玉米秸秆揉丝机工作过程研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018. SONG X F. Study on the operation process of the corn straw kneading machine based on discrete element method[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘凡一. 清选装置中小麦颗粒和短茎秆离散元建模研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. LIU F Y. Discrete element modeling of the wheat particles and short straw in cleaning devices [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [23] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 236-243. LIAO Y T, WANG Z T, LIAO Q X, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S1): 236-243(in Chinese with English abstract).

Discrete element simulation of bending failure of main lotus root

JIAO Jun¹, ZHANG Guozhong^{1,2}, DU Jun^{1,2}, LIU Haopeng^{1,2}, ZHA Xiantao^{1,2}, XING He^{1,2}

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract The Geomagic studio 3D and SolidWorks software were used to 3D modeling the main lotus root of Elian No.5 with the elastic modulus, shear modulus, Poisson's ratio and other intrinsic parameters obtained by uniaxial compression test and the contact parameters including the collision coefficient of restitution, static friction coefficient and rolling friction coefficient among lotus roots and between lotus roots and steel obtained by friction and collision test. The Hertz Mindlin with bonding model in EDEM simulation software was used to establish the discrete element model of main lotus root. The bending failure test of the main lotus root was conducted on the texture analyzer. Referring to the test results, the single-factor and two-factor discrete element simulation tests of the bending failure of the main lotus root were carried out with normal stiffness per unit area, shear stiffness per unit area, critical normal stress and critical shear stress as the influencing factors. The results showed that the normal stiffness per unit area and the shear stiffness per unit area significantly affected the displacement and the first peak value when the first bending failure occurred, while the critical normal stress and the critical shear stress had no obvious effects on them. When the critical normal stress was 3.80 MPa and the critical shear stress was 3.12 MPa, the optimal solutions of the normal stiffness per unit area and the shear stiffness per unit area were obtained by steepest descent method to be $5.814 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ and $3.450 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, respectively. Based on this, the simulation peak value of the first bending failure of the main lotus root was 269.72 N and the displacement value was 7.14 mm. The relative errors of the simulation results and the measured results were 2.56% and 2.00%, respectively. The discrete element model of lotus root established will provide important reference for simulating the mechanical harvesting process of lotus root and effectively reducing the damage of lotus root.

Keywords lotus root; lotus root harvesting; bending failure; discrete element; parameters calibration; aquatic vegetables