

不同成熟度荷叶力学特性试验研究

王洋^{1,2}, 张国忠^{1,2*}, 涂鸣^{1,2}, 侯群喜^{1,2}, 董昭^{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:为减少撒肥机藕田作业时肥料颗粒在被高速抛出以及下落过程中对荷叶造成的冲击损伤, 对不同成熟度荷叶的力学特性进行了研究。以“鄂莲一号”荷叶为对象, 利用质构仪以成熟度、部位和方向为因素进行了拉伸、穿刺全因素试验, 利用 ANSYS 软件对荷叶拉伸与肥料冲击过程进行了仿真。结果表明: 荷叶弹性模量为 2.53~7.45 MPa, 最大拉力为 2.65~5.02 N, 取样部位对弹性模量影响极显著, 成熟度对弹性模量影响显著, 拉伸方向对弹性模量影响不显著; 荷叶表面能够承受的最大穿刺力为 0.86~1.3 N, 取样部位对抵抗穿刺能力影响显著, 成熟度对抵抗穿刺能力影响不显著; 拉伸仿真试验中荷叶断裂前的拉伸曲线与实际拉伸曲线最大、最小误差为 14% 和 3%, 根据冲击仿真试验结果推测的荷叶破坏形式与实际撒肥试验中荷叶破损情况较一致。研究结果可为荷叶加工利用以及藕田撒肥机的设计提供参考。

关键词: 荷叶成熟度; 拉伸; 穿刺; 拉伸仿真; 冲击仿真

中图分类号: S224.21; S645.106.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0694-07

Experimental study on mechanical properties of lotus leaves with different maturity

WANG Yang^{1,2}, ZHANG Guozhong^{1,2}, TU Ming^{1,2}, HOU Qunxi^{1,2}, DONG Zhao^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Wuhan 430070)

Abstract: In order to reduce the impact damage to lotus leaves caused by fertilizer particles thrown out at high speed and falling during lotus field operation by fertilizer spreader, the mechanical properties of lotus leaves with different maturity were studied in this paper. Taking the lotus leaf of "Erlian No.1" as the object, the tensile test and puncture full factor test were carried out by using texture analyzer with maturity, position and direction as factors, and the process of lotus leaf tensile and fertilizer impact was simulated by using ANSYS software. The results showed that the elastic modulus of lotus leaf was 2.53 MPa—7.45 MPa, the maximum tensile force was 2.65 N ~ 5.02 N, the sampling position had an extremely significant effect on the elastic modulus, the maturity had a significant effect on the elastic modulus, and the tensile direction had no significant effect on the elastic modulus; the maximum puncture force on the lotus leaf surface was 0.86 N—1.3 N. The sampling position of lotus leaf had significant effect on puncture resistance, but the maturity had no significant effect on puncture resistance. The maximum and minimum errors between the tensile curve before lotus leaf fracture in ANSYS tensile simulation test and the actual tensile curve are 14% and 3%. In the impact simulation test, the damage form of lotus leaf inferred from the simulation results is consistent with that in the actual fertilizer spreading test. The research results can provide reference for lotus leaf processing and lotus field fertilizer spreader design.

Key words: lotus leaf maturity; stretching; puncture; stretch simulation; impact simulation

莲藕是一种喜肥耐肥的水生蔬菜, 生长期间需要 2~3 次追肥, 由于莲藕生长在积水较深的洼地, 底部被淤泥覆盖, 且后期由于荷叶特殊的生长状态

造成田间封行, 机具无法下田作业, 目前追肥形式主要为人工撒施^[1-3], 效率低、肥料分布的均匀度差^[4-6]; 传统撒肥机具有较大作业幅宽和良好撒肥均

收稿日期: 2020-09-30

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项 (CARS-24-D-02) 资助。

作者简介: 王洋, 硕士研究生。E-mail: 1228302973@qq.com

* 通信作者: 张国忠, 教授, 博士生导师。E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

匀性^[7-11], 但由于存在肥料颗粒被抛送速度过大从而导致荷叶损伤和对莲藕后期生长造成影响的问题, 限制了其在藕田施肥作业中的应用。此外, 荷叶可被生产成荷叶茶或作为环保包装材料, 具有较高商业价值, 一旦损伤其经济价值急剧下降。为此, 探究荷叶的力学特性及其抵抗外部冲击损伤能力的研究具有重要实际应用价值, 但迄今为止对此方面的研究较少。查阅文献显示, 国内外学者围绕减少农产品损伤开展了一些研究。如林燕萍等^[12]、张妍等^[13]和潘周光^[14]对茶叶等叶状物料开展了拉伸与剪切等力学特性研究。针对块状农业物料, 卢立新等^[15]介绍了果品挤压和碰撞过程中的损伤机理, 陈海涛等^[16]和赵荣军等^[17]分别以萝卜与杉木为对象进行了拉伸试验, 孙偲等^[18]、陈燕等^[19]、陈子林等^[20]和胡梦杰等^[21]对分别以山核桃、荔枝、荸荠及棉花种子为研究对象开展了压缩试验以测试物料在不同试验条件下的抗压能力, 张涛^[22]探究了谷物颗粒抵抗针尖穿刺破坏、剪切破坏的能力, 桑永英等^[23]和李晓军等^[24]分别开展了马铃薯的碰撞强度试验及其茎秆的切割强度试验。现有文献虽然关于农产品力学特性的研究较多, 但对与荷叶相关的物料特性方面的研究极少。本研究在参考已有对橘皮等物料特性研究的文献基础上^[25-26], 对荷叶进行了力学特性试验, 以探究不同成熟度的荷叶抵抗拉伸和穿刺损伤的能力, 并根据拉伸曲线计算得到不同部位和成熟度荷叶的弹性模量; 利用 ANSYS 仿真软件对荷叶进行拉伸与冲击仿真, 对比仿真与试验的拉伸曲线误差, 分析荷叶在受到不同速度和不同部位的肥料冲击时冲击力的变化情况以及荷叶表面的应力分布特征。

1 材料与试验方法

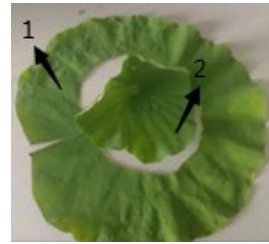
1.1 试验材料

选用表面无损伤无病害的“鄂莲一号”荷叶, 采自湖北省武汉市洪山区, 采摘时间为 2020 年 7 月底。由于荷叶水分易挥发, 故仅使用当天采摘的鲜荷叶作为试验材料, 并在密封状态下保存。采摘期为藕田终止叶出现。对荷塘中不同成熟度的荷叶分别采样, 将其按成熟度分类, 分别为嫩叶(直径 30~40 mm, 色黄绿, 质嫩)、近熟叶(直径稍小于熟叶, 色黄绿, 质稍嫩)和熟叶(直径不再增加, 色绿)。将用于试验的不同成熟度荷叶沿径向等分为内外侧两部分, 如图 1 所示。

1.2 试验仪器

拉伸、穿刺试验在美国 TFC 公司研制的

TMS-PRO 质构仪上进行, 其量程为 0~1 000 N, 精度为±1%; 水分测定采用浙江赛德仪器设备有限公司生产的 SDH-1202 快速卤素水分测定仪。叶片厚度测量采用美耐特公司 MNT 游标卡尺。



1. 荷叶外侧部位; 2. 荷叶内侧部位。

图 1 荷叶的径向分割

Figure 1 Divided Lotus leaf along radial direction

1.3 试验方法

1.3.1 拉伸试验 查阅相关参考文献^[27-28]可知, 物料的弹性模量会影响冲击过程中冲击力的大小, 进而影响物料受损状况, 故利用拉伸试验对荷叶弹性模量值进行测量。试验采用 TMS-PRO 型质构仪, 使用试验仪器自带钢制夹具。为防止荷叶物料在夹具边沿断裂, 在夹具内部粘贴少量泡沫胶带。

荷叶叶片主要由表皮、掌状网型叶脉与叶肉组成, 由前期预试验结果得知, 叶面强度小于叶面与叶脉连接处的强度, 当肥料颗粒碰撞荷叶时, 叶面最先破坏。故在进行拉伸试验时应使上下夹具之间的样本部分不包含叶脉。

以成熟度(嫩叶、近熟叶和熟叶)、部位(叶面内侧和叶面外侧)和拉伸方向(沿叶脉方向和垂直叶脉方向)为因素开展拉伸试验。样本为长×宽 50 mm×15 mm 的矩形叶片, 首先使用游标卡尺测量并记录叶片厚度以计算其截面积 A 的值, 后将样本两端分别固定在质构仪特定夹具上, 如图 2 所示, 调整夹具相对位置使样本处于伸直状态, 测量中间部位长度 L 并记录, 设定加载速度 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 加载位移 10 mm, 样品在夹具中间位置断裂为有效, 在其根部断裂无效。将试验数据保存用以后续处理。每组试验重复 5 次, 求平均值。弹性模量计算公式为:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{F \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (1)$$

式中, E 代表弹性模量; σ 为拉伸样本产生的应力, MPa; ε 为沿拉伸方向的变形率; F 为拉伸产生的应力, N; A 为样本横截面积, mm^2 ; L 为夹具间样本长度, mm; ΔL 为样本伸长量, mm。

1.3.2 荷叶穿刺试验 实际撒肥试验中发现, 肥料颗粒高速冲击下荷叶破损处的形状与穿刺造成的损

伤形状相似，故进行穿刺试验测量不同成熟度和部位荷叶物料的穿刺破裂力，以此反映荷叶叶面的强度，每组试验重复 5 次。参考大颗粒尿素的颗粒直径和形状，采用 3D 打印机将穿刺刀具的头部设计为直径 3 mm 的球形头。以成熟度和部位为试验因素，试验样本仍为长×宽为 50 mm×15 mm 的矩形叶片，将其放置于特制夹具平台上，平台中心开有圆孔以便穿刺刀具通过，拧紧紧固螺栓将物料两端夹紧，设置穿刺刀具下降速度为 20 mm·min⁻¹，下降距离 10 mm，刀具在刺穿荷叶的过程中受到的最大阻力即为破裂力（图 3）。

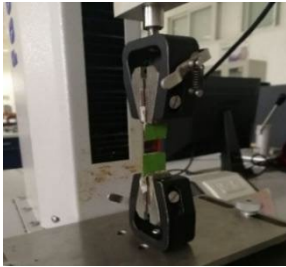


图 2 拉伸试验
Figure 2 Tensile test

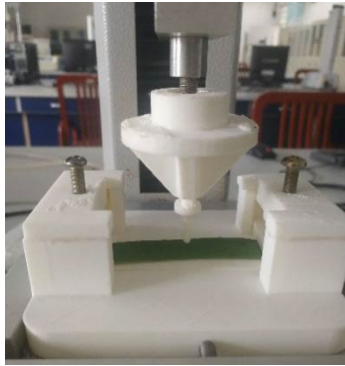
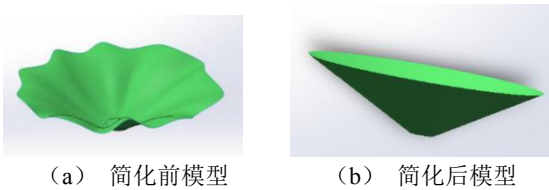


图 3 穿刺试验
Figure 3 Puncture test



(a) 简化前模型 (b) 简化后模型
图 4 荷叶三维模型
Figure 4 Three dimensional model of lotus leaf

1.3.3 肥料冲击荷叶有限元仿真 为进一步研究荷叶在肥料撞击下的损伤特点，使用 ANSYS-LSDYNA 软件模拟冲击过程。首先采用 ANSYS 软件仿真荷叶物料拉伸试验并与实际试验曲线进行比较，以确保材料设置的准确性，使用该材料构建荷叶模型对碰撞过程进行模拟，分析荷叶表面的应力分布情况。选取表面无明显病虫害的近熟叶为仿真对象，测量其直径、高度和锥面角等尺寸，利用

SolidWorks 软件绘制三维模型并将其简化为贴合外叶面的锥形，以防止荷叶表面褶皱对冲击的方向产生影响（图 4）。

运用 ANSYS Workbench-LSDYNA，对肥料冲击荷叶进行模拟，泊松比取 0.4^[29]，弹性模量、厚度与密度分别取近熟叶内外侧试验测得的结果。选取尿素颗粒肥料，弹性模量、密度和泊松比分别为 28 MPa、1 335 kg·m⁻³ 和 0.4^[7]。由于速度一定时冲击力的大小由作用时间决定，作用时间与模型固定方式直接相关，故模型仿照实际荷叶状态，在叶面与茎秆连接处进行固定约束。

2 结果与分析

2.1 荷叶拉伸力学特性

表 1 为不同成熟度、部位、拉伸方向下弹性模量 E 和最大拉力 F 的平均值，利用 SPSS 软件对试验数据进行分析，结果如表 2 所示；可知成熟度对弹性模量的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)，部位对弹性模量的影响极显著 ($P < 0.01$)，这是由于农业物料弹性模量、硬度与其含水率有密切联系。经测量，嫩叶、近熟叶和熟叶的外侧部分平均含水率分别为 70.1%、73.4% 和 59.8%，内侧部分平均含水率分别为 76.0%、73.5% 和 72.4%，熟叶外侧的含水率相对较低，其硬度和弹性模量较高，与玉米等农产品的力学参数与含水率的关系相似^[30]，荷叶的弹性模量增加，相同冲击速度下更易受到较大的冲击力。同时由表 2 可以看出各试验因素对荷叶能够承受拉伸的能力影响均不显著。

图 5 为荷叶拉伸力与变形特性曲线。比较图 5 (a) 和图 5 (b) 可看出，相同拉伸方向下不同成熟度的荷叶内侧拉伸曲线较为相似，说明荷叶在生长期间内侧物料特性变化不大；比较图 5 (c) 和图 5 (d) 显示嫩叶与近熟叶的外侧拉伸曲线较为相似，与熟叶拉伸曲线差别较大，这是由于荷叶生长后期外侧叶面的含水率明显降低导致。综合比较图 5 可以发现，荷叶在拉伸断裂之前物料变形量与拉力之间近似呈线性关系，发生弹性变形，当变形量达到一定值时出现断裂，没有明显的塑性变形阶段。

2.2 荷叶穿刺力学特性分析

表 3 为不同成熟度和部位的荷叶受到穿刺破坏时的平均最大穿刺力。

由表 4 可知，部位对荷叶抵抗穿刺破坏的能力影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)，成熟度对荷叶抵抗穿透能力影响不显著 ($P > 0.05$)；内侧物料抵抗穿刺破坏的能力较强，且弹性模量较外侧小。

表 1 荷叶拉伸试验结果

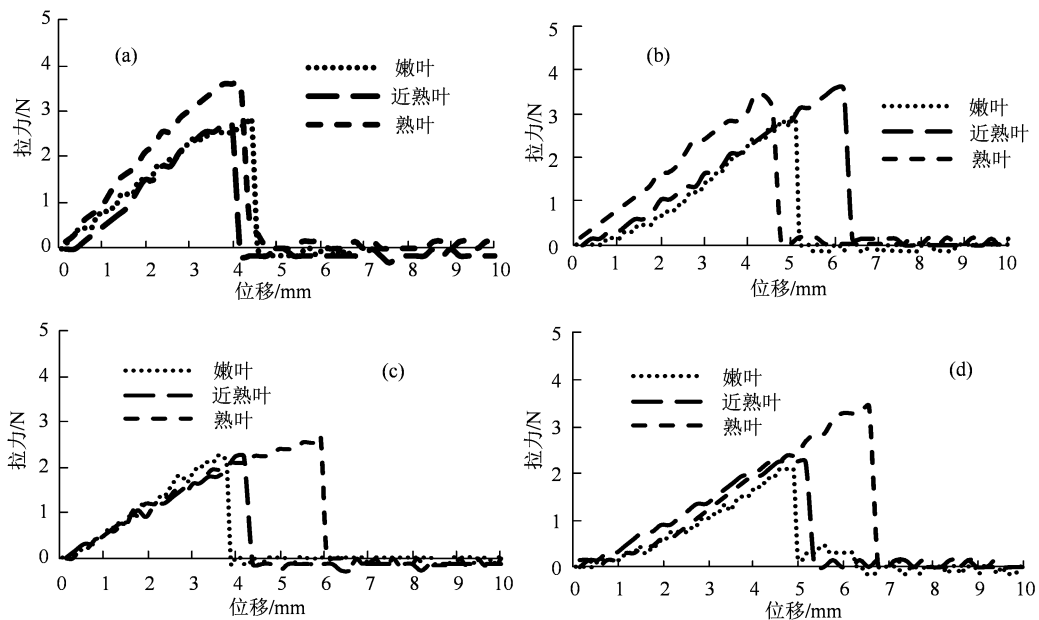
Table 1 Results of lotus leaf tensile test

类别	试验组别	荷叶外侧部位		荷叶内侧部位	
		叶脉方向	垂直叶脉方向	叶脉方向	垂直叶脉方向
弹性模量/MPa	嫩叶	6.35	5.46	3.16	2.53
	近熟叶	6.56	6.45	3.34	4.93
	熟叶	7.45	6.47	6.70	4.78
最大拉力/N	嫩叶	2.85	3.06	2.65	2.84
	近熟叶	3.47	3.20	2.94	3.82
	熟叶	3.53	3.20	5.02	3.72

表 2 方差分析

Table 2 Analysis of variance

类别	因素	自由度	均方值	F 值	显著性 P
弹性模量	成熟度	2	4.095	5.580	0.036
	部位	1	15.278	20.819	0.003
	拉伸方向	1	0.791	1.077	0.334
	随机误差	7	0.734		
最大拉力	成熟度	2	0.578	3.294	0.098
	部位	1	1.020	0.787	0.404
	拉伸方向	1	0.244	0.094	0.763
	随机误差	7	0.029		



(a) 内侧叶脉方向拉伸曲线; (b) 内侧垂直方向拉伸曲线; (c) 外侧叶脉方向拉伸曲线; (d) 外侧垂直方向拉伸曲线。

图 5 拉伸曲线

Figure 5 Tensile curve

表 3 荷叶物料穿刺试验

Table 3 Puncture test of lotus leaf materials N

试验组别	荷叶外侧部位	荷叶内侧部位
嫩叶	0.86	1.22
近熟叶	0.94	1.10
熟叶	1.00	1.30

2.3 肥料冲击荷叶仿真分析

首先使用 Ansys-Workbench 的 Static Structural 模块进行荷叶物料的静力学拉伸试验, 在材料库

Engineering Data 中添加荷叶材料, 根据实际拉伸特性曲线设置材料类型为 Linear Elastic 下的 Isotropic elasticity, 根据近熟叶内外侧部位的实际测量结果设置密度和弹性模量等相关参数, 泊松比参考相关文献取 0.4^[30]。

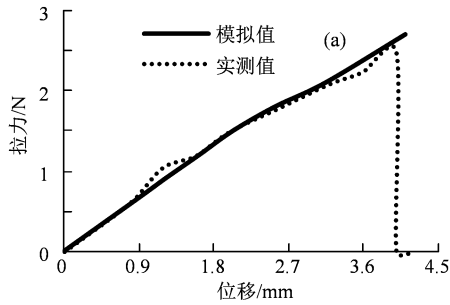
在 Workbench DM 中将物料三维模型划分网格后一端固定, 另一端施加拉力, 设置 10 个时间子步, 总时长 3 s, 添加等效应力应变后求解。

表 4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

因素	自由度	均方值	F 值	显著性 P
成熟度	2	0.010	5.580	0.350
部位	1	0.112	20.819	0.044
随机误差	2	0.005		

根据仿真结果利用 Excel 软件绘制拉力-位移曲线，并与实际拉伸曲线相比较，结果如图 7 所示，可以看出在荷叶出现断裂之前拉伸曲线基本一致，试验值与仿真值之间的最大和最小误差分别为 14% 和 3%，说明在断裂之前的变形阶段模型参数与实际



际物料参数相符合，使用实际测量得到的物料特性参数建模可以反映出荷叶物料的力学特征。

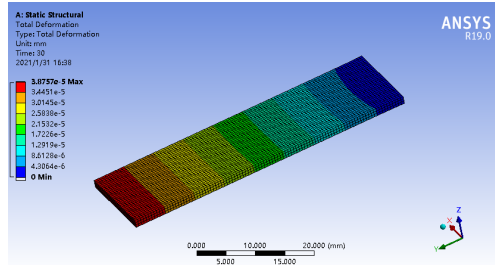
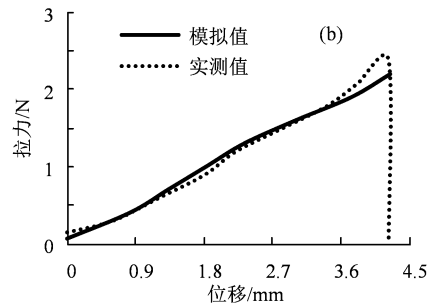


图 6 Ansys 静力学仿真

Figure 6 ANSYS static simulation



(a) 内侧部位拉伸曲线; (b) 外侧部位拉伸曲线。

图 7 仿真与实测拉伸曲线对比

Figure 7 Comparison of simulated and measured tensile curves

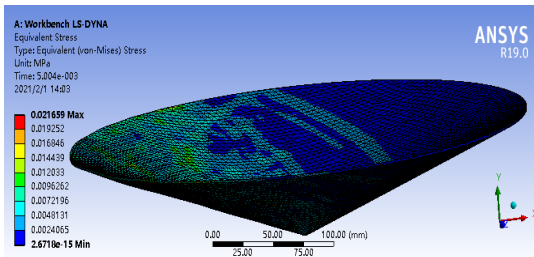


图 8 Ansys LSDYNA 冲击仿真图

Figure 8 Ansys LSDYNA impact simulation diagram

应用 ANSYS-LSDYNA 软件对冲击过程进行仿真，将荷叶物料分为内外侧，其弹性模量和密度根据前期实际测量分别设置为 6.5 MPa、1 025 kg·m⁻³ 和 4.5 MPa、1 356 kg·m⁻³，在荷叶中心添加固定约束，内外侧部分以 bonded 形式连接，使肥料颗粒以 13 m·s⁻¹ 的速度垂直冲击荷叶表面，划分网格后求解。

将结果导入后处理软件 LS-PrePost 分析荷叶受到肥料撞击时表面应力分布特点，如图 9 (a) 所示，以肥料撞击点为中心，共取 5 个点观察其应力大小及变化情况。由图 9 (c) 可看出，撞击点 A 处的等效应力最大，绕 A 点沿径向分布的点 B 和点 C 所受等效应力值大于垂直于径向的点 D 与点 E 的值，且点 B 的值大于点 C，即以撞击点为中心，应力主要沿径向分布且外侧受力较内侧大。由拉伸试验可知荷叶表面承受最大拉力的值与方向无关，故可推测当碰撞使荷叶表面发生破裂时，裂纹较易向受较大应力的径向外侧部位扩展，图 9 (b) 为实际撒肥测试中荷叶表面受损情况，图中共 3 处破损点，其中 1 和 2 处均为穿透破坏，且裂纹方向均沿径向扩展，与推测一致，故该仿真的应力分布与实际相符。

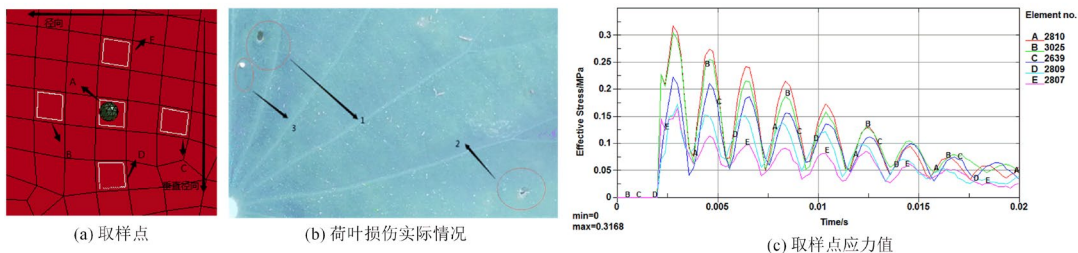


图 9 单一部位冲击仿真分析

Figure 9 Single part impact simulation analysis

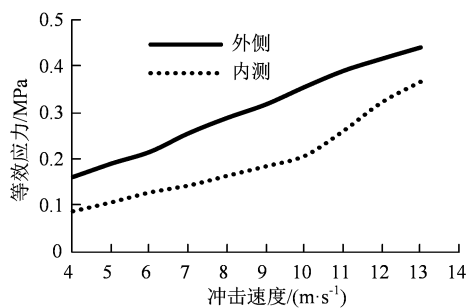


图 10 不同速度最大应力变化仿真

Figure 10 Simulation of maximum stress change at different speeds

对近熟叶内外侧部位进行不同速度的冲击仿真,并统计冲击点应力变化情况如图 10 所示,在 4~13 m·s⁻¹ 的速度范围内,外侧冲击点的最大等效应力基本呈线性变化,内侧冲击点的应力在 4~10 m·s⁻¹ 的速度范围内增加较慢,10~14 m·s⁻¹ 的速度范围内最大应力值增加较快,这是由于内侧距离固定点(茎秆)的距离较近,当速度增大时碰撞的作用时间变化更大。综合比较内外侧冲击曲线,在 4~13 m·s⁻¹ 的范围内,相同速度下外侧冲击点所受应力大于内侧冲击点所受应力,这是由于荷叶外侧弹性模量较内侧大,在肥料颗粒速度较低,荷叶变形不明显,弹性模量越小其碰撞的作用时间越短,但当速度超过一定值时,撞击造成的荷叶表面晃动减小了外侧部位的冲击,但对内侧部位作用不明显,导致内侧所受冲击力明显增加。

3 讨论与结论

荷叶物料特性研究目前缺乏研究,可供参考的文献研究极少,因此,在查阅文献、参考其他物料特性试验研究的基础上对不同成熟度荷叶力学特性试验研究。通过对不同成熟度的荷叶物料进行拉伸试验,测得了 3 种成熟度的荷叶内外侧部位弹性模量为 2.53~7.45 MPa,最大拉力为 2.65~5.02 N,试验结果表明试验部位对荷叶弹性模量的影响极显著 ($0.01 < P < 0.05$),对荷叶抵抗穿刺破坏的能力影响显著 ($0.05 < P < 0.1$);成熟度对荷叶弹性模量的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$),对其抵抗穿刺的能力影响不显著 ($P > 0.05$)。拉伸方向对荷叶弹性模量影响不显著 ($P > 0.05$)。荷叶物料拉伸曲线显示其断裂前做线弹性变形,说明荷叶是一种弹性较强的物料。

由于不同成熟度的荷叶其内侧部位的弹性模量较外侧部位小,故碰撞作用时间长,且内侧物料具有较强的抵抗穿刺的能力,故相同速度的肥料颗粒撞击且荷叶无明显晃动时,外侧首先出现损伤;但

是当肥料颗粒速度较大使荷叶明显晃动时,由于荷叶内侧的缓冲能力小于外侧,损伤逐渐向内侧发展。

利用 ANSYS 有限元软件模拟荷叶物料拉伸试验,实际值与模拟值的最大和最小误差分别为 14% 和 3%,表明根据实际试验测得的物料参数构建的模型较为准确,使用 ANSYS-LSDYNA 模块对荷叶表面进行冲击仿真,根据其表面应力分布情况推测当肥料颗粒撞击荷叶表面引起损伤时,裂纹方向主要以撞击点为中心,沿径向向外侧扩展,与实际撒肥试验中荷叶表面损伤情况较为一致。根据对荷叶不同部位的冲击仿真试验曲线结合物料试验数据可知:在冲击速度较低时,损坏首先出现在荷叶外侧,随着冲击速度的升高,破损向内侧发展。上述研究结果可为荷叶加工利用以及藕田撒肥机设计和作业参数选择提供理论参考。

参考文献:

- [1] 郭红霞. 莲藕高产高效种植关键技术[J]. 河南农业, 2017(2): 13.
- [2] 李瑞安. 莲藕栽后的管理技术[J]. 北京农业, 2013(15): 39.
- [3] 李志华. 藕田施肥有讲究[N]. 河北科技报, 2018-05-19(6).
- [4] 胡海建, 张国斌, 程芳, 等. 莲藕测土配方施肥田间试验[J]. 长江蔬菜, 2019(24): 65-66.
- [5] 郭凤领, 吴金平, 周洁, 等. 湖北省水生蔬菜产业调研报告及对策建议[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(8): 80-84.
- [6] 廖剑, 王锐, 李旭, 等. 莲藕机械化施肥技术研究现状与展望[J]. 湖北农机化, 2019(23): 181-184.
- [7] 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32-39.
- [8] 王飞. 国外撒肥机发展概况[J]. 农业工程, 2016, 6(2): 31-34.
- [9] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosyst Eng, 2011, 109(4): 308-325.
- [10] VILLETTE S, COINTAULT F, PIRON E, et al. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc[J]. Biosyst Eng, 2005, 92(2): 157-164.
- [11] 董向前, 宋建农, 张军奎, 等. 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 33-40.
- [12] 林燕萍, 金心怡, 郝志龙, 等. 茶树嫩梢力学特性与粗纤维试验[J]. 茶叶科学, 2013, 33(4): 364-369.
- [13] 张妍, 周泳锋, 林宏政, 等. 基于农业物料力学特性的乌龙茶造型技术研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(2): 138-143.
- [14] 潘周光. 茶叶梗茎剪切特性与嫩度关系的试验研究[J]. 茶叶科学, 2008, 28(6): 425-428.

- [15] 卢立新, 王志伟. 果品运输中的机械损伤机理及减损包装研究进展[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 131-134.
- [16] 陈海涛, 任珂珂, 余嘉. 北方莖作萝卜物理力学特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 163-169.
- [17] 赵荣军, 程献宝, 孙娟, 等. 针叶材管胞纵向抗拉强度研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(4): 491-495.
- [18] 孙偲, 曹成茂, 娄帅帅, 等. 山核桃破壳力学性能试验[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2): 331-336.
- [19] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝的力学特性测试及其有限元分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 358-363.
- [20] 陈子林, 夏俊芳, 展鹏程. 荸荠压缩特性试验研究[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(1): 171-176.
- [21] 胡梦杰, 周勇, 汤智超, 等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 175-180.
- [22] 张涛. 谷物力学特性与理化指标及其关联性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [23] 桑永英, 张东兴, 张梅梅. 马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(1): 81-84.
- [24] 李晓军, 孙伟, 张涛, 等. 收获期马铃薯茎秆切割强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 172-179.
- [25] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 25-31.
- [26] 孟凡光. 桑叶物料特性及其切碎技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [27] 王育桥. 缓冲材料弹性模量对鸡蛋冲击特性的影响研究[J]. 现代农业装备, 2014(3): 26-29.
- [28] 易伟, 余斌, 刘秧, 等. 滚石冲击力计算方法研究[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 310-316.
- [29] 刘旺玉, 刘希凤. 植物叶片粗枝网络结构多工况模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(23): 6965-6970.
- [30] 姜春雨, 李银昌, 杨锦忠, 等. 玉米脱粒破碎率关键影响因子及其最优预测模型研究[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 142-147.

安徽农业大学生命科学学院计山明教授在蛋白聚集调控衰老和寿命领域研究取得新进展

安徽农业大学生命科学学院计山明教授及其合作者围绕衰老和寿命如何调控这一人们十分关注的问题, 以果蝇为模型, 揭示了蛋白聚集调控衰老与长寿新机制。该研究发现 RNA 结合蛋白 Otu 在生理和体外状态下能发生聚集和液-液相变过程, 且其 LC (Low complexity) 结构域在蛋白聚集和液-液相变过程中发挥着不可或缺的作用; LC 结构域的存在促进了 Otu 蛋白的去泛素酶的活性, 进而调控肠道的免疫活性; 机制研究表明, Otu/Bam/dTraf6 三者肠道细胞中能形成“负反馈调节轴”, 动态调控肠道 IMD 免疫信号, 从而维持肠道屏障及其稳态, 最终调控个体的寿命。蛋白在细胞中的状态直接影响细胞的命运决定及疾病的发生。已有研究表明, 蛋白的异常聚集是阿尔茨海默症、亨廷顿舞蹈症、肌萎缩侧索硬化症等许多神经退行性疾病的主要病因。研究成果从另一个层面揭示蛋白聚集/相变的正向生物学功能, 对人们更好地理解蛋白聚集如何调节其自身酶活及个体生理过程有重要意义。研究论文“LC Domain-Mediated Coalescence Is Essential for Otu Enzymatic Activity to Extend Drosophila Lifespan”在国际著名学术期刊 *Molecular Cell* (IF=17.97) 发表。