



施印炎, 李成光, 汪小昆, 等. 基于有限单元法的芦蒿茎秆力学特性分析[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 106-111.

基于有限单元法的芦蒿茎秆力学特性分析

施印炎¹, 李成光¹, 汪小昆^{1,2}, 章永年¹, OLUOCH Morice Odhiambo¹

(1 南京农业大学 工学院, 江苏 南京, 210031; 2 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 江苏 南京, 210031)

摘要:【目的】建立芦蒿 *Artemisia selengensis* 茎秆柔性体模型。【方法】根据芦蒿茎秆的物性参数, 通过 ANSYS 有限元分析软件建立茎秆力学模型, 对芦蒿茎秆在不同生长部位的轴向、径向压缩力学特性进行研究, 分析比较模型计算值和试验测试值。【结果】模型计算值和试验测试值最大偏差为 14.46%。芦蒿茎秆具有各向异性特征, 其轴向压缩力学特性远大于径向; 在 3 种不同位置段, 径向压缩时, 茎秆破碎出现在加载面的两端边缘位置, 轴向压缩时, 茎秆破碎出现在加载面, 且应力由接近加载区域向周围逐渐减弱。【结论】可以运用模型仿真分析芦蒿茎秆力学特性, 结果可为减少芦蒿在收获、运输、加工、储藏过程中的机械损伤和芦蒿收获机具的研制提供理论依据和参考。

关键词: 芦蒿茎秆; 有限单元法; 力学特性; 模型

中图分类号: S183, S121, S313

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2017)03-0106-06

Finite element analysis of mechanical properties of *Artemisia selengensis* stalk

SHI Yinyan¹, LI Chengguang¹, WANG Xiaochan^{1,2}, ZHANG Yongnian¹, OLUOCH Morice Odhiambo¹

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2 Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract:【Objective】To establish a stalk flexible model of *Artemisia selengensis*. 【Method】Based on the physical parameters of the stalk of *A. selengensis*, the finite element model of stalk was established by using the ANSYS software. The axial and radial mechanical properties of *A. selengensis* stalk at different growth positions under compression were studied. The model calculation value and experimental value were analyzed and compared. 【Result】The maximum deviation of model calculation value and experimental value was 14.46%. *A. selengensis* stalk had anisotropic characteristics with its axial compression mechanical properties being much better compared to the radial. At three different positions, the stem breakage occurred on the edges of both ends of the loading surface under radial compression, while under axial compression, the stem breakage occurred on the loading surface, and the stress gradually receded from close to the loading area to surroundings. 【Conclusion】The mechanical properties of *A. selengensis* stalk can be analyzed by model simulation, and the results can provide theoretical references for reducing mechanical damage during harvesting, transportation, processing and storage of *A. selengensis* and for designing *A. selengensis* harvest machine.

Key words: *Artemisia selengensis* stalk; finite element method; mechanical property; model

收稿日期: 2016-08-10 优先出版时间: 2017-04-12

优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20170412.1441.026.html>

作者简介: 施印炎 (1990—), 男, 博士研究生, E-mail: 2015212011@njau.edu.cn; 通信作者: 汪小昆 (1968—), 男, 教授, 博士, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (BE2015334); 江苏省农机三新工程 (NJ2014-08); 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (KYLX16_1017)

芦蒿 *Artemisia selengensis* 因富含多种人体所必需的矿物质元素及各种氨基酸,药用价值高而受到人们的喜爱^[1-2]。随着芦蒿产业的快速发展,种植面积日益扩大,对芦蒿生产机械化的要求越来越高^[3-4]。芦蒿茎秆的力学特性是实现芦蒿机械化收获的重要参数,在农作物物料分析和相关作业机具设计中是不可缺少的研究内容^[5-7],国内外学者对不同农作物的力学特性做了大量的研究^[8-10]。近年来,有限单元法在物料力学特性研究领域已越来越广泛^[11-13],但运用试验分析和有限元数值模拟技术相结合的方法对芦蒿茎秆的力学性能研究鲜有报道。为考察受压过程中芦蒿茎秆的微观纤维组织变化及其损伤机理,提供芦蒿收获机具设计时的结构特征参数,参照龙眼^[14]、板栗^[15-16]、玉米^[17-18]和西瓜^[19-20]等其他茎秆作物力学特性的研究方法,选用芦蒿茎秆为试验材料,应用有限元软件 ANSYS 建立准确的力学特性模型,结合静力学试验和有限元模拟仿真方法分析其压缩力学性质,验证有限元分析方法的准确性。

1 材料与方法

1.1 材料

芦蒿茎秆样本于 2015 年 4 月采自江苏省南京市八卦洲芦蒿生产基地,品种为青白芦蒿,随机挑选茎秆直径大致相同、尽可能通直、无病虫害、少分枝的样品,采完样后将茎秆装箱封存。取茎秆直径(以根部为参照) $(8.0 \pm 0.5) \text{ mm}$ 、长 $(10.0 \pm 0.5) \text{ mm}$ 的圆柱体试样,从茎秆齐地部分往上的节间依次定义为根部、中部、顶部,根部在距离齐地割茬 10 ~ 15 mm 取样;中部在位于植株中央偏差 5 mm 处取样;顶部距离中部试样 100 ~ 150 mm 取样。

试验仪器采用美国 Food Technology Corporation 公司的 TMS-PRO 质构仪,对芦蒿茎秆力学性能进行测试。压缩试验装置为底面直径 65 mm、厚 10 mm 的圆柱形平板钢制压缩头,承压面为边长 130 mm 的正方体钢制框架。

1.2 方法

1.2.1 芦蒿茎秆压缩特性试验 压缩试验在 TMS-PRO 质构仪上采用准静态加载方式进行,加载速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,回程速率为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用平板压缩方式,对芦蒿茎秆不同生长部位进行径向、轴向压缩试验,每个试验重复 5 次,压缩载荷、变形量等参数通过质构仪自动采集、记录,每组试验获得的力学特性参数求其平均值,比较分析其力学性

能。采用质构仪穿刺试验和 ASAE(美国农业工程师学会) Standards S352.2 方法^[21]对芦蒿茎秆硬度和含水率进行测定。

1.2.2 芦蒿茎秆有限元模型的建立 有限单元法的实质是把具有无限个自由度的连续体理想化为仅有有限个自由度的集合体,即将一个结构或连续体的求解域离散为若干个子域(单元),通过边界结点提出等效力代替实际作用单元上的外力,建立位移和节点力之间的关系,使问题简化为适合于数值解法的结构型问题。在有限元法中,一般假定多项式为单元的位移模式,推导出单元结点位移列阵表示的单元应力、应变,最后利用弹性体的虚功方程建立单元结点力阵与结点位移列阵之间的关系,即形成单元的刚度方程式:

$$F^e = K^e \delta^e,$$
$$K^e = \iiint_v B^T D B \, dx dy dz,$$

所以有总体坐标系下的刚度矩阵:

$$F = K \delta,$$

式中, K 表示系统结构刚度矩阵; δ 表示系统节点的位移列阵; F 表示总的载荷列阵; B 为几何矩阵,各元素是跟单元性质有关的常量; B^T 为几何的矩阵转置; D 为弹性矩阵。

模型建立的准确性对收获机构的结构优化、运动学和动力学仿真的合理性有很大的影响。通过对青白芦蒿茎秆的生长参数进行测量,按照实际情况将茎秆视为柔性体建模,以测定的植株参数作为参考,保证模型与实体的一致性。将芦蒿茎秆简化为均匀的线弹性材料,其形状简化为圆柱体。

利用有限元软件 ANSYS14.0 对芦蒿茎秆进行压缩力学特性分析,单元类型采用三维 8 节点等参数的 Solid185 单元,具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化等特点,适用于构造三维模型。

1.2.3 芦蒿茎秆不同位置段有限元压缩力学分析 运用有限单元法对 3 种不同生长部位的芦蒿茎秆径向、轴向 2 种压缩受力方式进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 芦蒿茎秆压缩特性试验

对不同生长部位的芦蒿茎秆在不同加载方向(轴向、径向)进行压缩加载试验,根据质构仪记录的力-变形量数值,计算其压缩力学特性参数值,如表 1 所示。试验发现,在相同的加载速率下,沿不同加载方向对芦蒿茎秆施加压缩力,所产生的压缩载荷-变形曲线是不同的。从表 1 可以看出,芦蒿茎

秆在根部、中部、顶部 3 个不同位置段压缩力学特性参数中硬度、变形量、破碎力、抗压强度、弹性模量均逐渐减小,且其抗压缩能力具有各向异性特征,其压缩力学特性参数在不同加载方向下具有差异性,轴向压缩力学特性远大于径向,这是芦蒿茎秆本身材料的结构特点所决定的。

表 1 芦蒿茎秆压缩力学性能参数
Tab. 1 Compression mechanical performance parameters of *Artemisia selengensis* stalk

茎秆位置	加载方向	$w(\text{水})/\%$	硬度/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	破碎力/N	变形量/mm	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
顶部	径向	64.57	18.13	64.18 ± 1.27	3.47 ± 0.26	1.28	3.67
	轴向	64.57	18.13	179.59 ± 10.36	7.58 ± 2.04	3.57	4.71
中部	径向	58.43	26.74	73.42 ± 3.19	2.86 ± 0.22	1.46	5.10
	轴向	58.43	26.74	284.17 ± 12.41	5.32 ± 1.49	5.66	10.64
根部	径向	52.74	29.56	86.31 ± 3.97	1.49 ± 0.14	1.72	11.54
	轴向	52.74	29.56	391.27 ± 14.58	3.75 ± 1.13	7.79	20.77

2.2 芦蒿茎秆有限元模型的建立

选取茎秆长度为 10 mm、直径为 8 mm 的芦蒿样品。为避免径向压缩时接触点的应力集中以及滑动,在圆柱体外侧向里切除 0.15 mm,建立茎秆的几何模型如图 1 所示。在对有限元受力模型进行分析时做如下假设:忽略茎秆皮层的影响;各部分均为各向同性的线弹性体;开始施加荷载时茎秆的应力为 0,其含水率和温度无变化。

材料属性是根据芦蒿茎秆含水率为 58.43% 时试验测得的数据:轴向压缩时的弹性模量为 10.64 MPa,径向压缩时的弹性模量为 5.10 MPa;通常水果和蔬菜的泊松比为 0.20 ~ 0.50,取芦蒿茎秆的泊松比为 0.35;划分网格时,选取网格精度为 2 mm,在有限元模型上直接施加载荷,施加的力由试验得出,由于压缩接触面积较小,可以把茎秆所受力简化成集中力,模型网格划分与加载方式如图 1 所示。

的最大应力为 2.18 MPa,最小应力为 0.60 MPa,最大应变为 0.20 mm,最小应变为 0.05 mm。芦蒿茎秆中部的有限元分析见图 3,茎秆根部的有限元分析见图 4,并对比 3 种位置段芦蒿茎秆压缩破坏时应力与应变的分布状态。从图 2 ~ 图 4 可以看出:芦蒿茎秆径向受载所产生的最大应力及应变均小于轴向受载,这说明芦蒿茎秆轴向所能承受的压力和变形比径向大,即茎秆轴向抗挤压能力大于径向,茎秆抗挤压能力具有各向异性的特征,与试验研究得出的结论相一致。茎秆在载荷加载点的应力最大,接近加载点的区域次之,应力和应变主要出现在 2 个位置:轴向加载时,出现在载荷施加区域,最大应力和应变出现在集中载荷施加的位置,即茎秆最先破裂的位置,应力和应变均沿施加载荷的中心向四周扩展,强度逐渐变小;径向加载时,出现在茎秆顶面边缘的位置,因为茎秆加载面是圆弧面,所受载荷并非集中在一点,因此产生的应力和应变较小,这与试验的结果在加载点处损伤情况相一致。

2.4 试验结果与有限元分析的比较

分别对径向、轴向压缩的芦蒿茎秆进行有限元模拟,获得有限元计算的压缩载荷 - 变形曲线,并将其与压缩试验得到的变形曲线进行比较(图 5),可以看出有限元模拟的芦蒿茎秆压缩力 - 变形量曲线与试验值略有差异,但其相关系数仍可达到 0.99,试验值与模拟值的最大和最小偏差分别为 14.46% 和 5.17%,宏观表明运用有限单元法建立的模型分析研究芦蒿茎秆的压缩力学特性是可行的。图 5 中的模拟曲线与试验曲线之间存在着一定的误差,原因可能是:将模型黏弹性材料简化为各向同性的线弹性材料时,忽略了茎秆皮层的影响,有限元建模加载点与实际加载点的误差、茎秆材料实际属性参数的误差,简化模型的几何形状与茎秆实际形状之间的差别,试验数据的误差等。

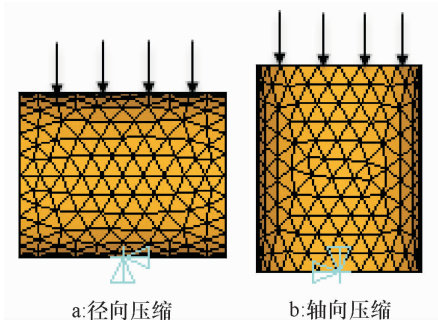


图 1 芦蒿茎秆有限元模型网格划分和加载方式
Fig. 1 Mesh generation and loading mode of the finite element model of *Artemisia selengensis* stalk

2.3 芦蒿茎秆不同位置段有限元压缩力学分析

图 2 为茎秆顶部在径向、轴向受压状态下有限元分析的等效应力、总的等效应变,对比 2 种受压情况下的等效应力图发现:相同压缩条件下轴向受压的最大应力为 7.90 MPa,最小应力为 3.67 MPa,最大应变为 0.38 mm,最小应变为 0.18 mm;径向受压

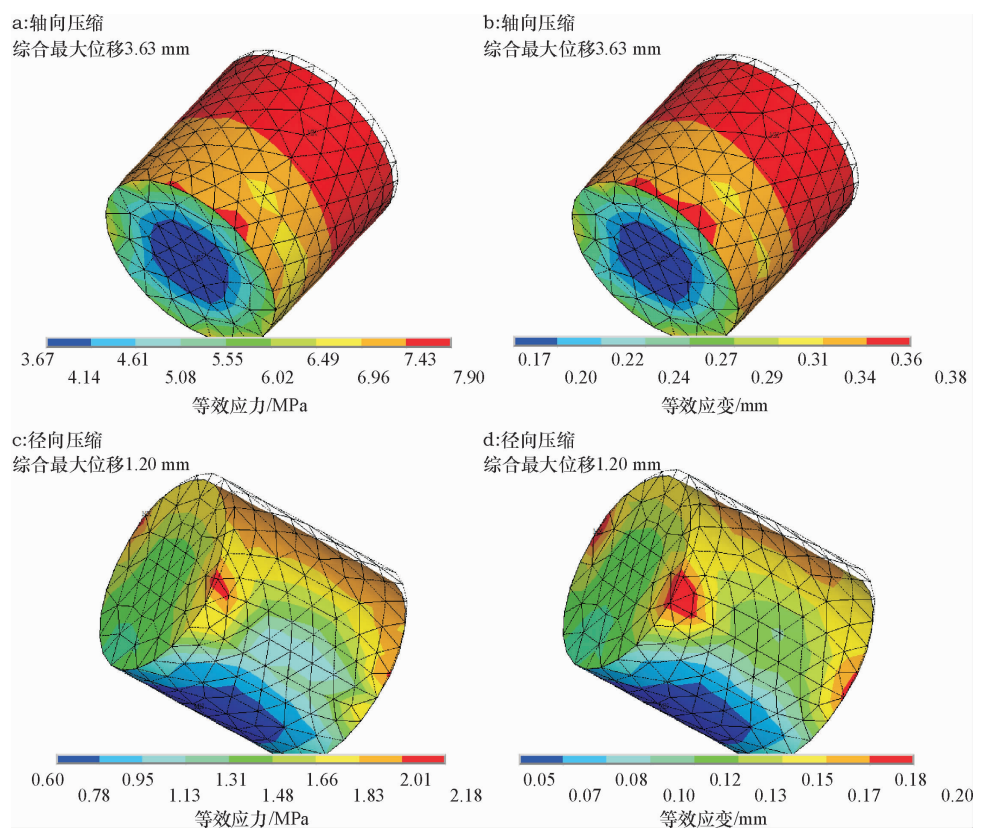


图 2 芦蒿茎秆顶部受压的有限元分析结果

Fig. 2 Finite element analysis of *Artemisia selengensis* top stalk under compression

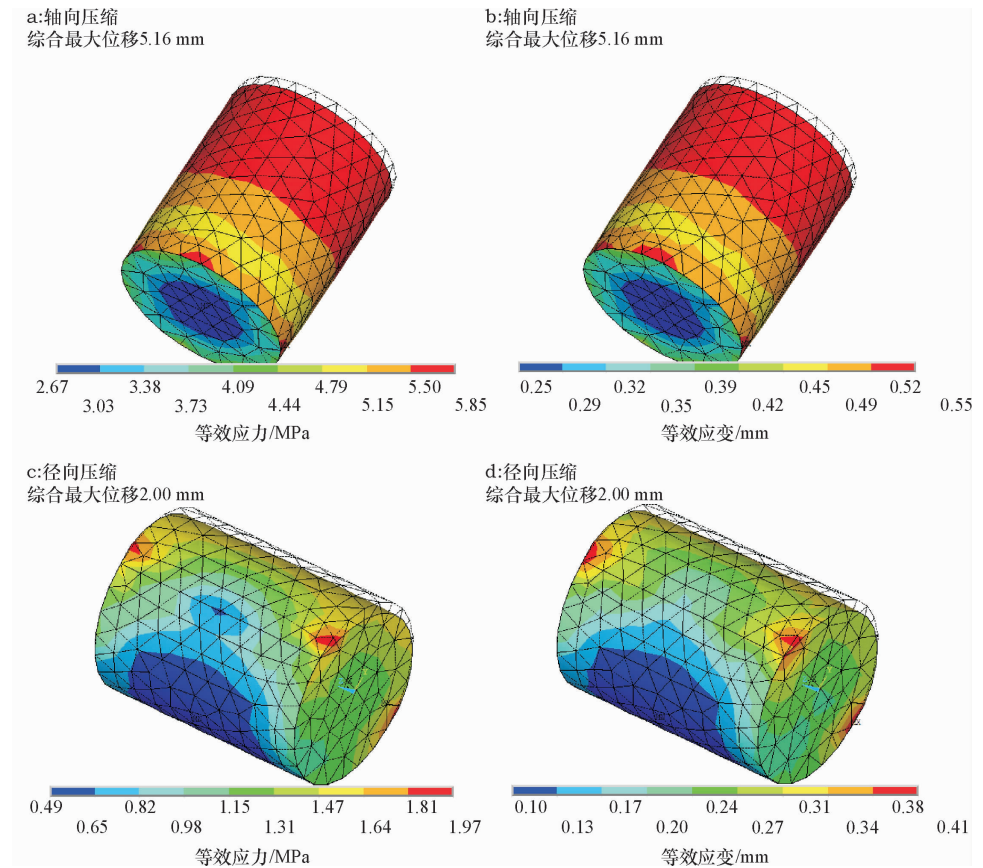


图 3 芦蒿茎秆中部受压的有限元分析结果

Fig. 3 Finite element analysis of *Artemisia selengensis* middle stalk under compression

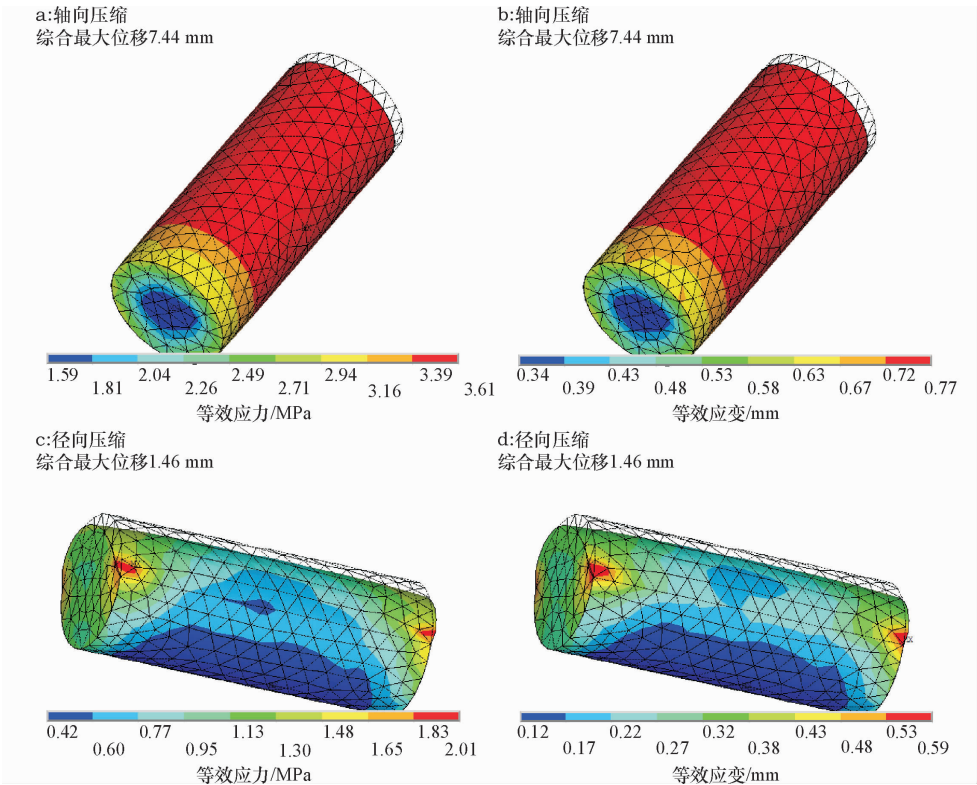


图 4 芦蒿茎秆根部受压的有限元分析结果

Fig. 4 Finite element analysis of *Artemisia selengensis* bottom stalk under compression

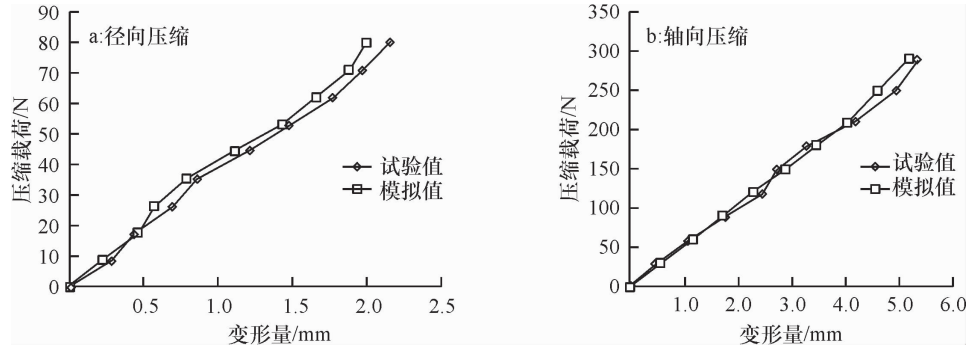


图 5 芦蒿茎秆有限元模拟的压缩载荷 - 变形曲线与试验曲线的比较

Fig. 5 Comparison between compression force-deformation curve of the finite element model and the experimental curve for *Artemisia selengensis* stalk

3 结论

对不同生长部位的芦蒿茎秆在不同加载方向进行压缩试验,茎秆径向破碎力为 64.18 ~ 86.31 N,轴向压缩破碎力为 179.59 ~ 391.27 N;茎秆径向变形量为 1.49 ~ 3.47 mm,轴向压缩变形量为 3.75 ~ 7.58 mm;茎秆径向抗压强度为 1.28 ~ 1.72 MPa,轴向压缩抗压强度 3.57 ~ 7.79 MPa;茎秆径向弹性模量为 3.67 ~ 11.54 MPa,轴向压缩弹性模量为 4.71 ~ 20.77 MPa。

压缩试验和有限元模拟结果都表明,芦蒿茎秆不同加载方向下其压缩力学特性参数具有差异性,轴向压缩力学特性远大于径向,轴向受载所产生的

<http://xuebao.scau.edu.cn>

应力和应变均大于径向受载。

运用所建立的芦蒿茎秆有限元模型模拟茎秆在不同加载方向下压缩力学特性的应力 - 应变曲线,与试验结果进行比较,最大和最小偏差分别为 14.46% 和 5.17%,验证本研究建立的芦蒿茎秆有限元模型有效。

有限元分析结果显示茎秆在载荷加载点的应力最大,接近加载点的周围区域次之,逐渐减弱。应力和应变主要出现在 2 个位置:轴向加载时,出现在施加载荷的区域,即茎秆最先破裂的位置,应力和应变均沿施加载荷的中心向四周逐渐变小;径向加载时,出现在茎秆顶面边缘位置,产生的应力和应变较小,这与试验的结果在加载点处损伤相一致,这说明运

用有限元法进一步分析研究芦蒿茎秆的压缩力学特性是可行的。

研究结果为减少芦蒿在收获、运输、加工、储藏过程中的机械损伤及其收获装备的研制提供一定的理论依据。由于芦蒿茎秆不同位置的材料属性并不完全相同,使得茎秆有限元模型的简化存在一定的不足,有待今后进一步的研究。

参考文献:

[1] 董萌,赵运林,雷存喜,等. 洞庭湖湿地 Cd 富集植物蒹蒿(*Artemisia selengensis*) 的耐性生理机制研究[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(1) : 111-120.

[2] PENG L, JIA X P, WANG Y Z, et al. Ultrasonically assisted extraction of rutin from *Artemisia selengensis* Turcz.: Comparison with conventional extraction techniques [J]. Food Anal Method, 2010, 3(3) : 261-268.

[3] 邓荣华,陆敏,夏秋琴. 芦蒿秸秆黄酮类化合物对晚期蛋白质糖基化终末产物形成的抑制作用[J]. 食品科学, 2014, 35(9) : 123-127.

[4] HUANG B, BAN X Q, HE J S, et al. Hepatoprotective and antioxidant activity of ethanolic extracts of edible lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaves [J]. Food Chem, 2010, 120(3) : 873-878.

[5] 李耀明,秦同娣,陈进,等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1) : 160-164.

[6] 李玉道,杜现军,宋占华,等. 棉花秸秆剪切力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2) : 124-128.

[7] 吴良军,杨洲,洪添胜,等. 荔枝树枝力学特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16) : 68-73.

[8] 陈燕,谈建豪,蒋志林,等. 柑橘机器人夹持损伤有限元预测及试验验证[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5) : 98-102.

[9] 牟英辉,辜松,马稚昱. 瓜类嫁接苗生物力学特性的试验分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4) : 15-20.

[10] 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.

[11] 张克平,黄建龙,杨敏,等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6) : 352-356.

[12] ZHU H X, MELROSE J R. A mechanics model for the compression of plant and vegetative tissues [J]. J Theor Biol, 2003, 221(1) : 89-101.

[13] CARDENAS-WEBER M, STROSHINE R L, HAGHIGHI K, et al. Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping [J]. TASABE, 1991, 34(3) : 920-929.

[14] 卿艳梅,曹玉华,李长友,等. 龙眼鲜果剥壳力学特性 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(5) : 122-126.

[15] 张荣荣,李小昱,王为,等. 基于有限元方法的板栗破壳力学特性分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9) : 84-88.

[16] 袁越锦,袁月定,党新安,等. 板栗真空破壳力学特性有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5) : 136-141.

[17] 李心平,高连兴,马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10) : 64-67.

[18] 崔涛,刘佳,张东兴,等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 玉米茎秆柔性体仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(Z1) : 112-115.

[19] LEE K J, CHOI W Y, KIM G Y, et al. Internal quality estimation of watermelon by multiple acoustic signal sensing [J]. Key Eng Mat, 2006, 321(2) : 1209-1212.

[20] 王芳,王春光,杨晓清. 西瓜的力学特性及其有限元分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11) : 118-121.

[21] American Society of Agricultural and Biological Engineers. Moisture measurement: Unground grain and seeds [S]. Philadelphia: ASAE, 2003.

【责任编辑 霍 欢】