

脱绒包衣棉花种子的力学特性

胡梦杰^{1,2}, 周 勇^{1,2*}, 汤智超^{1,2}, 徐照耀^{1,2}, 王会丽^{1,2}, 王培通^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 优势农作物机械化生产技术与装备湖北省工程实验室, 武汉 430070)

摘 要: 脱绒包衣棉花种子的力学特性是建立种子模型和精量排种器结构与优化的基础。以鄂抗棉 10 号棉种为试验对象, 利用 TMS-PRO 质构仪与单片机测量系统对完整棉种进行挤压试验, 且采用图像处理技术基于最小二乘法边缘轮廓曲线椭圆拟合获取棉种曲率半径, 分析计算出棉种泊松比与弹性模量力学参数, 同时对棉种开展不同方位下的剪切试验。结果表明, 棉种径向受压时, 泊松比为 0.142, 弹性模量为 9.154 MPa, 平均挤压破坏力为 48.510 N; 剪切方位对剪切破坏力和破坏能均无显著性影响, 但对剪切位移有显著性影响, 剪切破坏力为 36.6~37.68 N。

关键词: 脱绒包衣棉种; 泊松比; 弹性模量; 挤压特性; 剪切特性

中图分类号: S562

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)01-0175-06

Mechanical properties of the delinted and coated cottonseed

HU Mengjie^{1,2}, ZHOU Yong^{1,2}, TANG Zhichao^{1,2}, XU Zhaoyao^{1,2}, WANG Huili^{1,2}, WANG Peitong^{1,2}

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

2. Hubei Provincial Engineering Laboratory for Mechanization Technology and Equipment of Main Crop Production, Wuhan 430070)

Abstract: The mechanical properties of the delinted and coated cottonseed are the basis for developing a seed model and designing and optimizing a precision metering device. Using TMS-PRO texture analyzer with a micro-controller measurement system, we carried out an extrusion test on intact cottonseed of E`kangmian-10. Based on least squares boundary curve elliptic fitting, we utilized image processing techniques to determine the curvature radius of cottonseed that was used to calculate the force parameters such as Poisson's ratio and elastic modulus. Meantime, we carried out a shearing test for cottonseed under different directions. The results showed that: the Poisson's ratio was 0.142, the elastic modulus was 9.154 MPa and the average extruding rupture force was 48.510 N under radial compression for cottonseed. The shearing direction had no significant effect on rupture force and crushing energy, but it had a significant effect on shearing displacement, and the shearing rupture force was 36.60-37.68 N.

Key words: delinted and coated cottonseed; Poisson's ratio; extrusion properties; shear properties; elastic modulus

棉花是我国重要的经济作物和纺织工业原料, 在国民经济中占有举足轻重的地位。我国现有棉花种植制度中, 棉花的栽培方式分为直播和育苗移栽两大体系。在 21 世纪初期, 直播棉占全国棉花种植面积的 58%~61%^[1]。排种器性能的好坏是影响棉花机械化直播作业质量的关键因素^[2]。机械式棉花排种器结构简单、成本低, 但在排种过程中, 易造成棉种挤压与剪切损伤, 因此, 为避免棉种损伤, 确保排种器结构与仿真的合理性, 研究棉种的

力学特性具有重要意义。

目前, 国内外学者对荔枝、西瓜、龙眼、红枣、大豆和稻谷等农作物进行了大量的力学研究^[3-11], 但对脱绒包衣棉种力学特性研究还鲜见报道。王吉奎和付威^[12]对脱绒包衣棉种的力学特性只做了初步探索。为获取棉种机械化直播过程中与挤压和剪切相关的力学特性参数及其变化规律, 本试验对棉种开展了不同条件下的挤压与剪切试验。

收稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD08B02)和中央高校基本科研业务费专项(2662015PY070, 2012ZYTS022)共同资助。

作者简介: 胡梦杰, 硕士研究生。E-mail: 953416744@qq.com

* 通信作者: 周 勇, 博士, 副教授。E-mail: zhyong@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选取鄂抗棉 10 号棉种作为测试对象,棉种均经脱绒包衣处理,表面光滑,人工精选后无破损。

1.2 试验装置

试验采用美国 FTC 公司研制的 TMS-PRO 质构仪,精度为±1%,最大检测力为 1 000 N;台州市椒江西域电子公司的直线位移传感器,精度为 0.2%,量程为 0~5 mm,所供电源为直流稳压电源,电压为 5 V; STM32F4 discovery 单片机; SONY UI-6220SE-C-HQ 工业相机,采用 ICX415AQ CCD 传感器,分辨率为 768×576 像素; FOCVIS H0814-3M 型工业镜头,焦距为 8 mm;上海美耐特实业有限公司的数显电子游标卡尺,精度为 0.02 mm,量程为 0~150 mm;南通沪南科学仪器有限公司制造的 HN101-2A 鼓风干燥箱; SHIMADZU AUY 220 电子天平,精度为 0.1 mg。

1.3 棉种三轴尺寸测定

随机选取 50 粒棉种,将其放置于 3 个坐标轴相互垂直的三维坐标系中,定义棉种的长度、宽度和厚度分别为三维坐标的三轴。其中,长度为棉种在平面投影图中的最大尺寸,宽度为垂直于长度方向的最大尺寸,厚度为同时垂直于长度和宽度方向的直线尺寸,使用数显游标卡尺分别对其进行测量。

1.4 棉种含水率测定

棉种含水率测定采用低恒温 103℃、8 h 一次烘干测量法^[13],试验按照《农作物种子检验规程水分测定(GB/T 3543.6-1995)》^[14]方法进行测量。

1.5 棉种挤压力学参数测定

为减小棉种因个体差异较大所引起的随机误差,力学试验中根据需要,人工选取差异较小,长度为 8.40~9.80 mm 的棉种为试验样品。

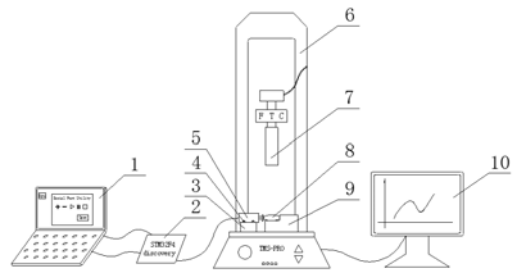
1.5.1 泊松比测定 (1) 试验原理及装置。泊松比是最重要的常规力学特征参数之一,本试验采用定义法测量棉种泊松比,即棉种挤压过程中,在比例极限内由纵向应力所引起的横向应变与相应的纵向应变之比的绝对值,其计算公式为

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right| = \frac{\Delta l / l}{\Delta d / d} \quad (1)$$

式(1)中: μ 为泊松比,无量纲; ε_1 为棉种横向应变,无量纲; ε 为棉种纵向应变,无量纲; Δl 为棉种横向绝对变形量, mm; Δd 为棉种纵向绝对变形量, mm; l 为棉种横向原长, mm; d 为棉种纵

向原长, mm。

试验过程中,纵向数据采集由质构仪与 PC1 自行完成,横向数据采集通过单片机测量系统完成,单片机测量系统由位移传感器、STM32F4 discovery 单片机和 PC2 三部分组成。STM32F4 discovery 单片机为此系统核心组成部分,其主要实现功能为对位移传感器测量所获取的脉冲信号进行采集、存储,经 RS232 串口与 PC2 实现通信,通过 Serial Port Utility 串口调试助手将接收数据显示并保存。STM32F4 discovery 单片机由 PC2 直流供电,其原理如图 1 所示。



1.PC2; 2.单片机; 3.传感器固定架; 4.内六角螺栓; 5.位移传感器; 6.质构仪; 7.加载探头; 8.棉种; 9.承压台; 10.PC1
1.PC2; 2.Micro-controller; 3.Sensor fixed frame; 4.Hexagon socket screw; 5.Displacement sensor; 6.Texture analyzer; 7. Load sensor; 8.Cottonseed; 9.Pressure platform; 10.PC1

图 1 棉种压缩测试装置

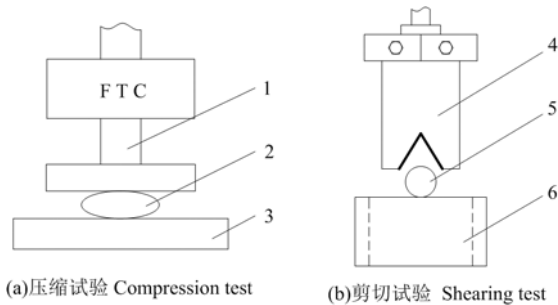
Figure 1 Cottonseed compression test facility

(2) 试验方法。泊松比测定试验采用刚性圆柱压模作为加载装置对完整棉种进行压缩试验,试验前需调整承压台放置位置,确保加载探头与承压台凸台和位移传感器均不发生干涉。圆柱压模直径为 $\Phi 8$,承压台固定不动,圆柱模垂直向下,加载速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,属于准静态范畴。压缩深度约为 1~2 mm 时棉种发生宏观破裂,并伴有咔嚓声,故压缩深度设置为 2.5 mm。将棉种样品水平放置于承压台上,两端分别与位移传感器和承压台凸台紧贴,且长度方向与位移传感器一致,对棉种厚度方向进行挤压试验,试验重复 50 次。

1.5.2 弹性模量测定 (1) 试验原理。棉种为不规则凸状物体,对其进行压缩试验时,内部形成复杂的应力分布,无法按照传统应力与应变关系式表示,本试验将棉种视为各向同性体,根据赫兹接触应力理论,采用刚性平板对棉种加载时,其弹性模量计算公式为^[15-16]

$$E = \frac{0.338K^{1.5}F(1-\mu^2)}{D^{1.5}} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式(2)中: E 为棉种弹性模量, Mpa; D 为接触处棉种的变形, mm; μ 为棉种泊松比, 无量纲; R_1 为棉种接触处的最小曲率半径, mm; R_2 为棉种接触处的最大曲率半径, mm; F 为施加外载荷, N; K 为系数, 无量纲。



1.压缩探头; 2.棉种; 3.承压台; 4.剪切刀具; 5.棉种; 6.底座
1.Compression probe; 2.Cottonseed; 3.Pressure platform; 4.Shearing tool; 5.Cottonseed; 6.Base

图 2 棉种力学特性测试示意图

Figure 2 Schematic diagram of cottonseed mechanical properties test

(2) 曲率半径测定方法。棉种接触处曲率半径采用图像处理法获得。将棉种水平放置于质地紧密的黑色布料上, 增强背景与棉种对比度, 采用 SONY UI-6220SE-C-HQ CCD 工业相机对其进行图像采集, 获取的彩色图像经由灰度化、阈值分割、形态学处理、膨胀与腐蚀和图像边缘检测等一系列预处理提取棉种边缘轮廓。因二维平面坐标系中, 棉种外形轮廓近似于椭圆, 应用椭圆一般式方程基于最小二乘法进行边界曲线拟合, 得到棉种边缘轮廓椭圆拟合曲线。椭圆一般式方程为^[17]。

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (3)$$

因椭圆方程一阶、二阶均可导, 且 $y = f(x)$ 在 $(x, f(x))$ 处曲率半径为

$$R = \frac{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{|y''|} \quad (4)$$

则棉种接触处曲率半径可根据所获得的棉种边缘轮廓曲线椭圆拟合方程由上式借助 Matlab 软件编程辅助计算求出。

(3) 弹性模量试验方法。弹性模量测定试验采

用平顶圆柱压膜作为加载探头对完整棉种进行压缩试验^[15], 其示意图如图 2(a) 所示。将棉种样品平放(长度、宽度平面)于承压台上, 且目测使其置于压缩探头中间部位, 承压台固定不动, 加载探头垂直向下, 进程速率为 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 回程速率为 $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 当以种子为加载对象时, 加载速率一般为 $1.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \pm 50\%$, 试验需重复 20 次以上才能达到有效结果, 故选取加载速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 压缩深度设置为 2.5 mm , 对棉种进行压缩试验测定弹性模量, 试验重复 50 次^[18]。

1.6 棉种剪切力学特性测定方法

剪切试验中, 刀具长度为 70 mm , 宽度为 50 mm , 厚度为 1.2 mm , 试验前需调整底座放置位置, 确保刀具刀口与底座所开凹槽对齐, 剪切示意图如图 2(b) 所示。将棉种样品平放(长度、宽度平面)于底座的凹槽上, 且经目测使得剪切刀具的刀口作用于棉种中间部位, 分别对棉种厚度方向进行沿长度与宽度两个方位的纵向剪切试验, 剪切刀具匀速加载, 加载速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[19], 每组试验重复 10 次。

2 结果与分析

2.1 棉种物理机械特性测定结果

棉种的含水率与三轴尺寸测量数据如表 1 所示。由表 1 可知, 鄂抗棉 10 号含水率为 11.016% (湿基), 满足 GB4407.1-2008^[20]经济作物纤维类种子质量要求。由棉种三轴尺寸数据可看出, 宽度与厚度比较接近, 对排种器进行结构设计与仿真分析时, 可将其视为长椭球体。

2.2 棉种横向位移与时间变化规律

棉种挤压过程中, 横向位移以电压形式经单片机测量系统显示并保存, 其横向位移随时间变化曲线如图 3 所示。由图 3 可看出, 棉种的横向位移随加载探头纵向挤压而增加, 当棉种发生破裂后, 由于棉种种胚因挤压向外膨胀, 横向位移增加量随时间推移而增大。当时间到达 150 s 时, 加载探头停止加载并快速回升, 此时在位移传感器内弹簧力的作用下, 位移传感器探头开始回位, 故横向位移陡降, 最后趋于平衡。

表 1 棉种含水率与三轴尺寸

Table 1 Moisture content and triaxial dimensions of cottonseed

项目 Item	含水率/% Moisture content	长度/mm Length	宽度/mm Width	厚度/mm Thickness
均值 Mean	11.016	9.137	5.277	4.784
标准差 Standard deviation	0.192	0.479	0.301	0.342

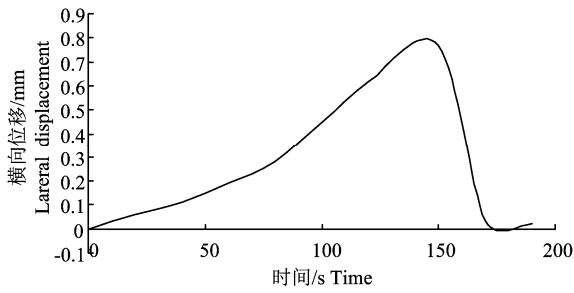


图 3 棉种受压的横向位移-时间曲线

Figure 3 Lateral displacement-time curve of cottonseed compression

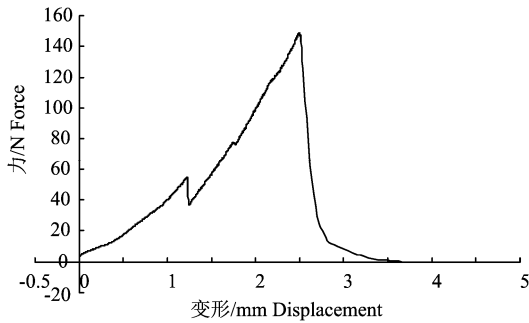


图 4 棉种受压的纵向力-变形曲线

Figure 4 Vertical force-deformation curve of cottonseed compression

2.3 棉种纵向挤压力与位移变化规律

棉种纵向挤压力-位移曲线如图 4 所示。由图 4 可知，棉种压缩过程中无明显的生物屈服点出现。当所加载荷上升达到破裂力时，棉种种皮发生破裂，此时棉种出现宏观裂纹视为受损，且挤压力迅速减小，但随着压缩探头的持续下降，挤压力又随之而

增大，裂纹进一步扩展，种胚因失去种皮保护后所受挤压力增大继续产生形变，在种皮破裂后至纵向挤压力达到最大值之前，种胚因受到挤压导致局部破裂而使得挤压力再次产生突变，即曲线上所出现的第二次锯齿状波动。由于受到棉种间在形态结构上存在的些许差异与压缩深度设置的影响，在种皮破裂后至挤压力达到最大值之前，曲线一般会产生一次锯齿状波动，但也存在有极少数未产生或产生两次锯齿状波动。

2.4 棉种挤压力学特性参数

棉种曲率半径采用图像处理法获得。图像采集所得到的彩色图像为稳定、高精度的提取棉种特征需进行一系列预处理，对提取的棉种边缘轮廓采用最小二乘法椭圆曲线拟合，其主要过程如图 5 所示。经 Matlab 软件辅助计算可得棉种曲率半径。

根据 STM32F4 discovery 单片机采集的横向位移、质构仪采集的纵向位移以及棉种三轴尺寸，由式 (1) 可计算出棉种泊松比。利用上述所获得的曲率半径、泊松比及纵向载荷-变形曲线，由式 (2)、式 (4) 可求出棉种弹性模量，结果如表 2 所示。由表 2 可知，棉种接触处平均最大曲率半径为 6.051 mm，平均最小曲率半径为 2.853 mm，泊松比为 0.142，弹性模量为 9.154 MPa，这些参数为排种器的结构设计与仿真提供了理论依据；棉种平均挤压破坏力为 48.510 N，破裂相对变形为 27.297%，这些参数为排种器仿真后处理分析其结构设计合理性给予了判断基准。

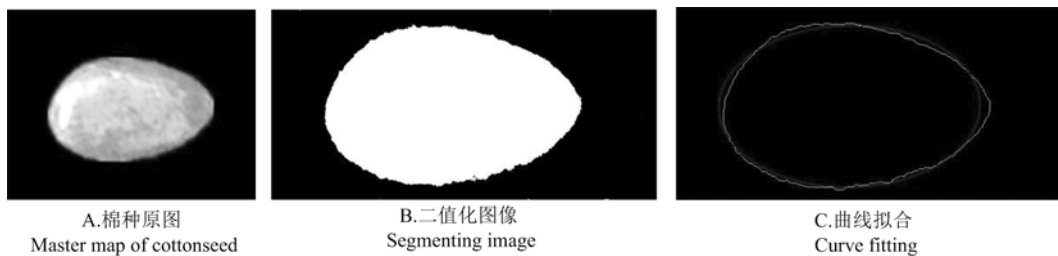


图 5 棉种图像处理示意图

Figure 5 Schematic drawing of cottonseed image processing

表 2 棉种曲率半径与挤压力学参数

Table 2 Curvature radius and squeezing mechanical parameters of cottonseed

项目 Item	最大曲率 半径/mm Maximum radius of curvature	最小曲率 半径/mm Minimum radius of curvature	泊松比 Poisson's ratio	弹性模 量/MPa Elasticity modulus	破坏力/N Rupture force	破裂相对变形/% Relative deformation of rupture
均值 Mean	6.051	2.853	0.142	9.154	48.510	27.297
标准差 Standard deviation	0.514	0.192	0.041	1.136	13.458	0.069

注：加载速率为 1 mm·min⁻¹。Note: Loading rate is 1 mm·min⁻¹.

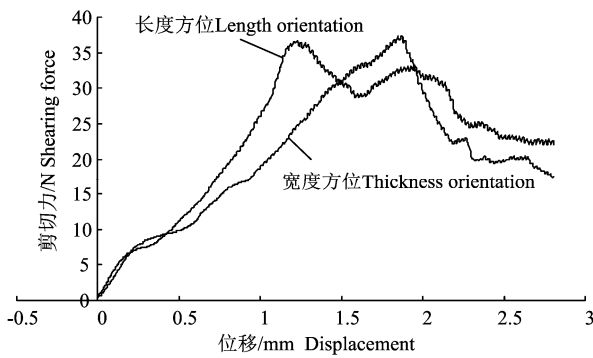


图 6 棉种剪切力-位移曲线

Figure 6 Shearing force-deformation curve of cottonseed

2.5 棉种剪切力学特性分析

对鄂抗棉 10 号棉种厚度方向分别进行沿长度与宽度两个方位的纵向剪切试验, 其剪切力与位移变化曲线(图 6)显示, 棉种剪切过程中, 剪切力先随位移的增加而增大, 呈非线性关系, 且无明显的生物屈服点出现; 曲线出现锯齿状是由于棉种组

织的不均匀性导致内部结构物强度薄弱处出现局部破裂而引起的剪切力微小突变, 但未达到破坏极限^[21]; 随着剪切刀具持续下降, 裂纹应力集中处发生裂纹扩展, 棉种出现宏观裂纹即棉种受损^[22], 此时剪切力开始下降。由于沿长度方位棉种形状不规则与组织不均匀性, 导致剪切刀具两边刃口切破种皮步调不一致, 因此在剪切力达到第一次峰值之后, 仍可能出现剪切力的二次峰值。

棉种在不同剪切方位下的力学特性参数如表 3 所示。由表 3 可知, 宽度方位平均剪切破坏力与破坏能大于长度方位, 这是由于棉种合点端与珠孔周围的种皮结构与其他部位略有不同, 一般不具有排列紧密且高度木质化的栅状细胞层^[23], 故承载能力相对较弱。采用 SPSS 统计分析软件对试验所得数据进行方差分析, 结果(表 4)表明, 剪切方位的不同对剪切破坏力与破坏能均无显著性影响, 但对剪切位移的影响显著。

表 3 棉种剪切力学参数

Table 3 Shearing mechanical parameters of cottonseed

方位 Direction	破坏力/N Rupture force	位移/mm Displacement	破坏能/N·mm Crushing energy
长度 Length	36.6±5.515	1.593±0.214	31.247±7.202
宽度 Width	37.68±10.830	1.913±0.428	39.041±13.799

注: 加载速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Note: Loading rate is $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

表 4 剪切力学参数方差分析

Table 4 Variance analysis for shearing mechanical parameters of cottonseed

差异源 Variance factor	变量 Variable	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P-value	显著性 Significance
方位 Direction	破坏力 Rupture force	5.832	1	5.832	0.079	0.782	
	破坏能 Crushing energy	303.732	1	303.732	2.507	0.131	
	剪切位移 Shearing displacement	0.512	1	0.512	4.470	0.049	*

注: $F_{0.05}(1,18)=4.41$, $F_{0.01}(1,18)=8.29$; “*”表示为 0.05 水平上的显著性差异。

Note: $F_{0.05}(1,18)=4.41$, $F_{0.01}(1,18)=8.29$; “*” refers to the significance at the 0.05 level.

3 结论

试验结果表明, 鄂抗棉 10 号脱绒包衣棉花种子的宽度与厚度差异甚小, 进行排种器关键部件结构设计与种子建模时, 可将其近似为长椭球体。

鄂抗棉 10 号棉种含水率为 11.016% (湿基), 棉种径向受压时, 泊松比为 0.142, 弹性模量为 9.154 MPa, 可为排种器仿真提供数据参考; 平均挤压破坏力为 48.510 N (加载速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 剪切破坏力为 36.6~37.68 N (加载速率为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 可为仿真分析后处理对棉种损伤判断提供试验依据。

棉种剪切力学特性试验表明, 种皮破裂是由于

棉种内部结构物强度薄弱处, 在外力作用下出现局部破裂, 进而裂纹扩展, 最终导致种皮破裂。

剪切方位对棉种剪切破坏力与破坏能无显著性影响, 对剪切位移的影响显著 ($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 张国强, 周勇. 棉麦套作棉花种植机械化现状与思考[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(32): 11597-11598.
- [2] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 56-62.
- [3] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 360-364.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 付威, 何荣, 坎杂, 等. 红枣力学特性的试验研究[J]. 石河子大学学报, 2013, 31(4): 518-522.
- [7] 张洪霞, 马小愚, 雷得天. 大米籽粒压缩特性的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(1): 42-45.
- [8] 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.
- [9] 马小愚, 雷得天, 赵淑红, 等. 东北地区大豆与小麦籽粒的力学-流变学性质研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 70-75.
- [10] 王荣, 焦群英, 魏德强, 等. 葡萄的力学特性及有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 7-10.
- [11] 马晓丽, 陈晓英, 闫语丝, 等. 杨梅果的机械损伤试验和生物力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 282-287.
- [12] 王吉奎, 付威. 脱绒棉种的物料学特性研究[J]. 农机化研究, 2012, 1(1): 169-172.
- [13] 王丽华, 王志伟, 李浩, 等. 棉花商品种子质量检测方法综述[J]. 中国种业, 2012, 8: 6-7.
- [14] 中华人民共和国农业部. 农作物种子检验规程水分测定:GB/T 3543.6-1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [15] 周祖锴. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 40-50.
- [16] MOHSENIN N N. Physical properties of plant and animal materials:Vol. 1 [M]. New York:Gordon and Breach Science Publishers, 1970.
- [17] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295-298.
- [18] ASAE.Compression test of food materials of convex shapes:S368.4 [S]. St Joseph:American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012.
- [19] 王显仁. 水稻谷粒的力学性能及基于能量平衡的脱粒损伤机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [20] 中华人民共和国农业部.经济作物种子 第1部分:纤维类: GB4407.1-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 周显青, 张玉荣, 褚洪强, 等. 糙米机械破碎力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 255-262.
- [22] 周显青, 孙晶, 张玉荣, 等. 糙米力学特性与加工品质的相关性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2015(6): 1-6.
- [23] 董合忠, 李维江, 张晓洁, 等. 棉花种子学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 3-10.