

# 葵花籽仁力学特性的有限元分析

## Finite element analysis on mechanical properties of sunflower seed

张新 王博 张黎骅

ZHANG Xin WANG Bo ZHANG Li-hua

(四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**摘要:**为减少葵花籽仁在收获、储运过程中的机械损伤,并为相关机械的设计提供理论依据,根据测量得到的几何尺寸与试验得到的力学参数,建立了葵花籽仁的物理模型及有限元计算模型。通过有限元分析的方法,分析了葵花籽仁在不同载荷和作用方式下的破坏形式以及变形与应力的分布规律,并将有限元仿真结果与试验结果进行对比,验证了模型的可行性。结果表明:葵花籽仁的抗挤压能力具有各向异性,其沿 X、Y、Z 3 个方向的弹性模量分别为  $E_X = 64.01$  MPa,  $E_Y = 23.63$  MPa,  $E_Z = 101.8$  MPa。相同压力下,葵花籽仁受到水平方向挤压时破碎的可能性最大,而竖直方向破碎的可能性最小;加载方向的不同使得籽粒的破坏形式不同,竖直方向加载时易产生局部裂纹破裂,而水平和垂直两向加载时籽粒会沿子叶夹缝开裂,其中垂直向加载时有失稳的可能。

**关键词:**力学特性;葵花籽仁;有限元分析;弹性模量

**Abstract:** In order to reduce the mechanical damage of sunflower seed during its harvest and storage, and provide the theoretical foundation for the design of related mechanical devices, was studied the mechanical properties of sunflower seed. According to the geometrical dimensions and the mechanical parameters, which obtained from the experiment, we established the physical model and the finite element calculation model of sunflower seed. By the method of finite element analysis, not only analyzed the failure modes of sunflower seed under different compression loads and compress methods, but also the regularity of distribution of its stress and strain. By comparing the results of experiment and finite element simulation, we confirmed the feasibility of the model. The results showed that the anti-extrusion capacity of sunflower seed is anisotropic, along the directions of X, Y and Z, its elastic modulus are  $E_X = 64.01$  MPa,  $E_Y = 23.63$  MPa,  $E_Z = 101.8$  MPa, respectively. Under the same pressure, sunflower seed is most likely to rupture in horizontal direc-

tion and least likely to rupture in the perpendicular direction. Different loading directions lead to different failure modes, the perpendicular loading tends to cause local cracks and rupture, while the horizontal and transversal loading lead to the seed cracks along the crevice of the cotyledons. Besides, instability failure might happen under the transversal loading.

**Keywords:** mechanical properties; sunflower seed; finite element analysis; elasticity modulus

葵花籽仁在收获、储藏、运输的过程中易产生机械损伤,从而加速其氧化和变质,极大地影响食用和出油的质量。近年来,已有学者对葵花籽仁的力学特性进行了初步的研究,张亚新等<sup>[1]</sup>通过葵花籽仁的侧限压榨试验建立了葵花籽仁压榨过程中基于增量理论的塑性模型;R. Khodabakhshian 等<sup>[2]</sup>研究了水分含量、形状以及加载方向对于 Azargol 品种葵花籽和葵花籽仁力学特性的影响;L.F. Hernández 等<sup>[3]</sup>则通过理论计算和试验数据的比较进行有限元模型的验证,研究了葵花籽整果在不同条件下的破壳特性。为减少葵花籽仁的机械损伤,还需要进一步对葵花籽仁的力学特性进行研究。由于仅仅通过试验很难精确地获得果蔬受载作用下的应力与变形规律<sup>[4]</sup>,对于果蔬力学特性的研究,国内外的许多学者采用了有限元分析的方法。例如,李心平等<sup>[5]</sup>通过有限元分析法获得了玉米种子在不同施力部位压载作用下的微观力学性质;王荣等<sup>[6]</sup>通过有限元分析法得出了压载作用下葡萄内部的应力分布规律;郑甲红等<sup>[7]</sup>则利用有限元分析云图得出加载方向并不是青核桃去皮的决定性因素;Cardenas-Weber M 等<sup>[8]</sup>通过力学试验与有限元分析相结合的方法研究了网纹瓜的内部应力规律。

因此,为了确定在外加载荷的作用下,葵花籽仁产生机械损伤与破坏的原因,本试验主要用有限元分析的方法,通过与试验结果的对比,对葵花籽仁在不同外加载荷作用下的应力分布和破坏形式进行研究,为改进葵花籽的脱粒、榨油等工艺以及减少葵花籽仁的机械损伤提供理论依据。

**作者简介:**张新,男,四川农业大学在读本科生。

**通信作者:**张黎骅(1969—),男,四川农业大学教授,博士。

E-mail: zhanglihua69@126.com

**收稿日期:**2016-12-17

# 1 葵花籽仁力学参数的试验测定

## 1.1 材料与设备

试验材料为四川省雅安市采购的新鲜三道眉葵花籽,葵花籽仁饱满、无损伤、无虫害。随机取 100 粒,测得葵花籽仁长、宽、厚的平均值分别为 9.92, 5.20, 2.40 mm。试验用济南方辰仪器设备有限公司生产的 WD-W 型精密微控电子万能试验机,可在试验过程中实时地记录力和位移的变化,并可调节加载速度,最大试验力为 500 N,分辨率为 0.01。

## 1.2 葵花籽仁弹性模量的测定

采用刚性平板的压缩方式,加载速度为 1 mm/min。由于葵花籽仁的形状不规则,压缩试验采用横放(加载方向平行于厚度方向,即 X 方向)、侧放(加载方向平行于宽度方向, Y 方向)、立放(加载方向平行于长度方向, Z 方向) 3 种不同的加载方式。参照同类型试验的处理方式<sup>[9]</sup>,试验前用锉刀磨去葵花籽仁的尖端,为了保证试验机所施加的载荷与葵花籽仁同轴,且产生尽量小的弯曲应力<sup>[10]42</sup>,试验前在保持葵花籽仁与压盘垂直的同时,用少量 AB 胶进行固定<sup>[11]</sup>。

用钢板加载时,根据赫兹接触应力理论<sup>[10]47</sup>,可由式(1)求得葵花籽仁在 X、Y、Z 3 个方向的弹性模量。

$$E = \frac{0.338K^{\frac{3}{2}}F(1-\mu^2)}{D^{\frac{3}{2}}} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中:

- E —— 葵花籽仁的弹性模量, MPa;
- F —— 施加的外载荷, N;
- D —— 接触点处物料的变形, mm;
- $\mu$  —— 物料的泊松比;
- R —— 物料在接触点处的最小曲率半径, mm;
- $R_1$  —— 物料在接触点处的最大曲率半径, mm;
- K —— 系数,它的数值取决于物料在接触点处的主曲率

$$\begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_p & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_p & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_p \end{bmatrix} \delta^e. \quad (2)$$

即  $f^e = \mathbf{N}\delta^e$ , (3)

式中:

- $N_i$  —— 单元形函数;
- $\mathbf{N}$  —— 形函数矩阵。

(3) 单元节点的应变与应力:由空间问题的几何方程可知



图 1 葵花籽仁的几何模型

Figure 1 The geometry model of sunflower seed

半径以及主曲率的法向平面之间的夹角,查表<sup>[10]48</sup>求得  $K_X = 1.24$ ,  $K_Y = 0.94$ ,  $K_Z = 1.19$ 。

查阅相关资料<sup>[10]49[12]</sup>可知,一般农业物料的泊松比都在 0.2~0.5 之间,可取葵花籽仁在 X、Y、Z 3 个方向的泊松比  $\mu_X = \mu_Y = \mu_Z = 0.25$ ,由式(1)可以得出葵花籽仁在不同方向上的弹性模量:  $E_X = 64.01$  MPa,  $E_Y = 23.63$  MPa,  $E_Z = 101.8$  MPa。

# 2 葵花籽仁的有限元力学模型

## 2.1 物理模型的建立

在建立葵花籽仁的力学模型时,可将葵花籽仁看作均一稳定的线弹性材料,形状近似长椭球体,其粒长、粒宽、粒厚分别为 9.92, 5.20, 2.40 mm。

在根据葵花籽仁几何尺寸进行三维建模时,为避免应力集中,参照实际情况和同类型试验的处理方式<sup>[6]</sup>,将籽粒模型向内切除 0.2 mm 形成受载平面,葵花籽仁的三维模型见图 1。

## 2.2 有限元计算模型的建立

2.2.1 结构离散化处理 将葵花籽仁的几何模型划分成有限个单元与节点,相邻的单元在节点处连接,单元间的力可以通过节点传递。本试验将葵花籽仁看作均质的三维实体,并将其划分为有限个四面体单元。

### 2.2.2 单元的特性分析

(1) 节点位移与节点力:建立三维直角坐标系,将节点编号为  $i, j, m, p$ , 节点沿 x 轴、y 轴、z 轴的线位移分别为  $u, v, w$ 。每个节点的位移分量可表示为  $\delta_{i < j, m, p >} = [u_{i < j, m, p >} \quad v_{i < j, m, p >} \quad w_{i < j, m, p >}]^T$ , 单元节点位移则可以用矩阵表示为  $\delta^e = [\delta_i, \delta_j, \delta_m, \delta_p]^T$ 。

(2) 位移函数:单元内任一点的位移可以用矩阵形式表示为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

整理得

$$\epsilon = \partial f = \partial \mathbf{N}\delta^e = \mathbf{B}\delta^e, \quad (5)$$

式中:

$\mathbf{B}$  —— 几何矩阵;

$\partial$  —— 空间问题微分算子<sup>[13]55-56</sup>, 且

$$\partial = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}。$$

由空间问题的物理方程可知

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]^T, \quad (6)$$

则在线弹性范围内,

$$\sigma = \mathbf{D}\varepsilon = \mathbf{S}\delta^e, \quad (7)$$

式中:

$\mathbf{D}$ ——弹性矩阵;

$\mathbf{S}$ ——应力矩阵,且  $\mathbf{S} = \mathbf{D}\mathbf{B}$ 。

(4) 单元刚度矩阵:由虚功原理可得单元  $e$  的节点力列阵为

$$\mathbf{F}^e = \left( \iiint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx dy dz \right) \delta^e = \mathbf{K}^e \delta^e, \quad (8)$$

式中:

$\delta^e$ ——单元节点的位移列阵;

$\mathbf{K}^e$ ——单元刚度列阵,  $\mathbf{K}^e = \iiint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx dy dz$ 。

2.2.3 整体分析 由节点处的变形协调条件、静力平衡条件整理可得

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\delta, \quad (9)$$

式中:

$\mathbf{F}$ ——结点载荷列阵;

$\mathbf{K}$ ——整体刚度矩阵;

$\delta$ ——节点位移列阵。

整体刚度矩阵可以按以下原则<sup>[13]57</sup>进行构造:

$$K_{ij} = \sum K_{ij}^{e_{ij}} \quad (\text{节点 } i, j \text{ 相关, 即共同组成单元}), \quad (10)$$

$$K_{ij} = 0 \quad (\text{节点 } i, j \text{ 不相关}), \quad (11)$$

式中:

$K_{ij}^{e_{ij}}$ ——节点  $i, j$  共同组成的单元  $e_{ij}$  的对应子块。

2.2.4 载荷处理与约束处理 当载荷作用在非节点上时,需要用虚功等效原则将载荷移置到节点上;通过引入边界条件对整体刚度矩阵进行修正,使其成为非奇异矩阵,并具有唯一解。

### 3 有限元分析

将葵花籽仁的三维模型导入 UG NX 8.0 的高级仿真模块并新建 FINITE ELEMENT MODLE 和仿真,选择求解器 NX NASTRAN 并进行平板压缩的仿真试验。

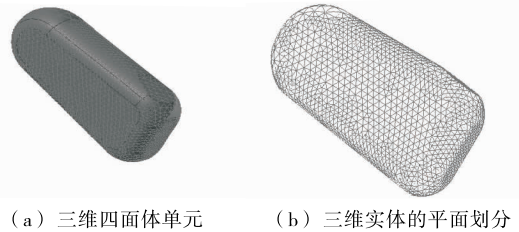
#### 3.1 仿真材料的选取

根据上文结果设置葵花籽仁在  $X, Y, Z$  3 个方向上的弹性模量和泊松比,并设置葵花籽仁的密度  $\rho = 1.4 \text{ g/cm}^3$ <sup>[14]</sup>。

压板材料选择 UG 库材料中的 STEEL,其密度为  $\rho = 7.829 \text{ g/mm}^3$ ,弹性模量  $E = 206.94 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.288$ 。在实际加载过程中,籽粒的切平面与压板平面相接触,源区域为籽粒受压面,目标区域为压板平面<sup>[15]</sup>,设置籽粒与压板间静摩擦系数  $\mu = 0.404$ <sup>[10]103</sup>。

#### 3.2 网格划分及加载

在本试验中葵花籽仁的三维模型被划分成三维四面体网格,单元大小为  $0.3 \text{ mm}$ ,在平面上被划分成三角形的面网格,见图 2。



(a) 三维四面体单元 (b) 三维实体的平面划分

图 2 划分网格后的的葵花籽仁模型

Figure 2 Meshed sunflower seed model

根据实际加载情况,葵花籽仁被沿不同方向放置在两压板之间,其中与载物台接触一端为固定约束,与压盘接触一端为接触受载面。故将籽粒底面设置为固定约束,将接触源区域设置为受载面,将压板除施力方向外均设置为固定,载物台的 6 个自由度全部设置为固定。添加约束和载荷并隐藏载物台的葵花籽仁模型见图 3。



(a) 沿X方向加载 (b) 沿Y方向加载 (c) 沿Z方向加载

图 3 划分网格后的葵花籽仁模型加载方式

Figure 3 The loading methods of meshed sunflower seed model

#### 3.3 不同方向加载时的有限元分析

对 3 种加载方式下的葵花籽仁依次施加  $5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ N}$  的载荷,其中,载荷为  $45 \text{ N}$  时的有限元分析结果见图 4~6。分析可知,受不同方向压缩载荷作用下的葵花籽仁,不同区域的变形和所受应力都有较大的差别,变化趋势随籽粒外形和载荷的变化而明显不同。然而,当载荷相同时,最大位移和最大应力均发生在籽粒与压盘的接触面区域。当载荷为  $5 \text{ N}$ 、沿  $X, Y, Z$  方向加载时,最大位移分别为  $0.123, 0.055, 0.070 \text{ mm}$ ,最大应力分别为  $2.214, 2.214, 1.801 \text{ MPa}$ 。随着载荷逐渐增大,籽粒的最大位移和应力分别增大,伴随着单元间的相对滑动,压盘与籽粒间的接触面积也逐渐增大,当载荷为  $45 \text{ N}$ 、沿  $X, Y, Z$  方向加载时,最大位移分别为  $0.695, 0.613, 0.616 \text{ mm}$ ,最大应力分别为  $12.54, 8.16, 7.74 \text{ MPa}$ 。

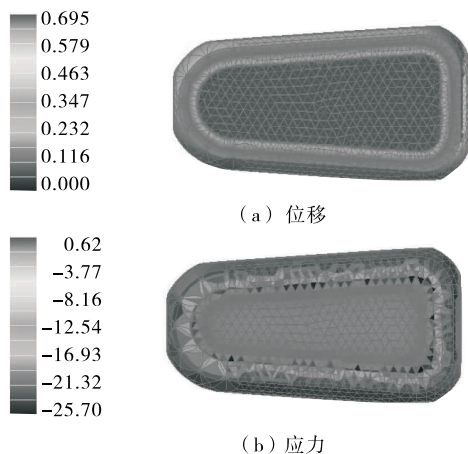


图4 X向加载时的位移和应力云图

Figure 4 Deformation and stress nephogram when loading in direction X

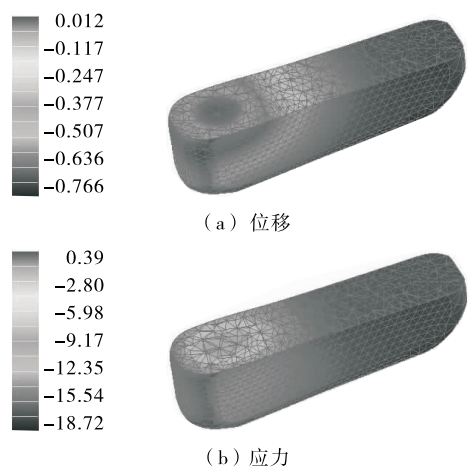


图5 Y向加载时的位移和应力云图

Figure 5 Deformation and stress nephogram when loading in direction Y

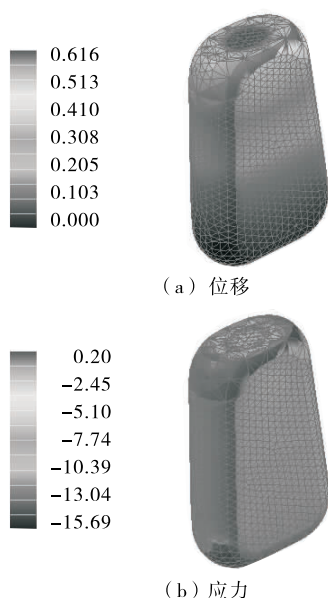


图6 Z向加载时的位移和应力云图

Figure 6 Deformation and stress nephogram when loading in direction Z

由图4可知,沿X方向加载时,随着载荷的增加,位移和应力由接触面向子叶夹缝的两侧区域逐渐减小。这是因为由接触区域至子叶夹缝,X方向受载平面的面积沿受载方向是逐渐增加的。由上可见,在X方向受载时,接触区域内的应力峰值超过籽粒材料的压缩强度极限使得外皮破裂产生裂纹后,裂纹向周围的延伸最终导致了葵花籽仁的断裂;沿Y方向加载时,由图5可知,籽粒与压盘的接触面比X方向受载时更小。在受载方向上,与接触面距离较小时,应力与变形的峰值相差较大,而在距接触区域较远处的横截面上的应力分布是近似均匀的。这是因为在Y方向受载时,不同横截面的受载面积差异较大,由圣维南原理可知,在载荷的作用下,仅接触面区域局部范围内的应力分布明显不均匀,且这种现象发生在籽粒的Z方向和Y方向较之X方向更明显。此外,由于沿Y方向加载时载荷方向平行于子叶夹缝的方向,籽粒沿Y方向受载时较其他方向更容易破裂;沿Z方向加载时的有限元分析结果见图6,在Z方向下对葵花籽仁加载时,由图6可以看出,籽粒与压盘的接触面积大于Y向而小于X向。由于籽粒在Z向加载时为一端固定一端加载的形式,且其长度为X向的4.1倍,在加载时易出现失稳的情况,所以Z向加载破坏形式可能为夹缝破裂或者失稳后继续加载而产生破裂。

由上可知,沿不同方向加载,相同载荷下,籽粒的变形和应力的分布形式相似;不同载荷下,籽粒的变形和应力的变化规律相似。葵花籽仁受到沿Y向挤压时破碎的可能性最大而沿X向破碎的可能性最小。加载方向的不同使得籽粒的破坏形式不同,X向加载时产生局部裂纹破裂,而Y、Z两向加载时籽粒会沿子叶夹缝开裂,其中Z向加载时有失稳的可能。

### 3.4 力—位移结果对比

将X、Y、Z 3个方向下理论计算、有限元计算与试验测量得到的葵花籽仁力—位移曲线进行比较,其结果见图7~9和表1。

图7~9和表1的结果显示,理论计算、有限元分析和试验结果所得的力—变形曲线的变化规律相同,总体均为斜率逐渐减小的响应曲线。对比结果可知,理论计算的最大平均误差为18.8%,有限元计算的最大平均误差为19.7%;由此可见,结合赫兹接触理论与有限元方法研究葵花籽仁的力学特性是可行的。

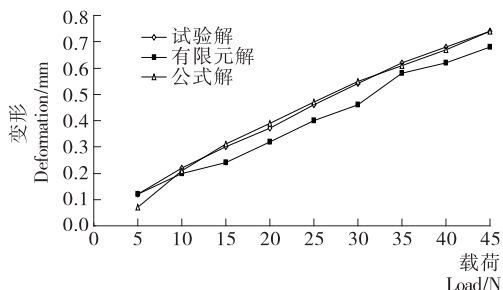


图7 X向力—位移对比图

Figure 7 Force-deformation curve of three solutions along the direction of X

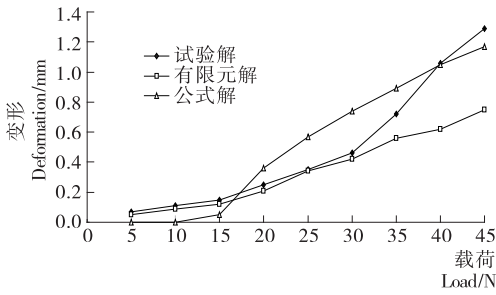


图 8 Y 向力—位移对比图

Figure 8 Force-deformation curve of three solutions along the direction of Y

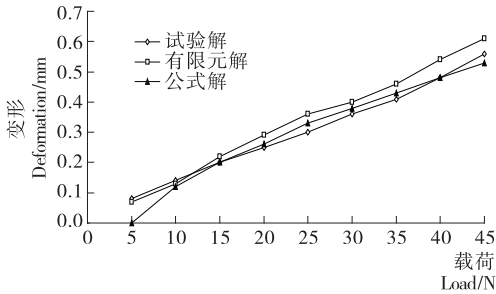


图 9 Z 向力—位移对比图

Figure 9 Force-deformation curve of three solutions along the direction of Z

表 1 3 个方向下理论计算、有限元计算与试验结果的误差对比

Table 1 Comparison between the results of FEM theory and theoretical calculations %

| 载荷/N | X    |      | Y    |      | Z    |      |
|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 理论   | 有限元  | 理论   | 有限元  | 理论   | 有限元  |
| 5    | 44.8 | 2.5  | 42.6 | 14.8 | 15.2 | 11.7 |
| 10   | 5.2  | 7.2  | 53.2 | 18.1 | 16.7 | 6.4  |
| 15   | 3.5  | 21.6 | 68.8 | 18.0 | 0.4  | 11.0 |
| 20   | 7.6  | 14.3 | 59.2 | 11.3 | 6.8  | 16.8 |
| 25   | 3.7  | 11.0 | 63.6 | 0.3  | 9.0  | 21.0 |
| 30   | 1.8  | 14.8 | 62.2 | 0.6  | 6.1  | 12.2 |
| 35   | 0.3  | 5.9  | 25.2 | 21.0 | 5.7  | 13.1 |
| 40   | 1.0  | 9.7  | 1.4  | 42.0 | 0.3  | 13.5 |
| 45   | 0.7  | 7.3  | 8.6  | 40.0 | 5.7  | 10.0 |
| 最大值  | 44.8 | 21.6 | 68.8 | 42.1 | 16.7 | 21.0 |
| 最小值  | 0.3  | 2.5  | 1.4  | 0.3  | 0.3  | 6.4  |
| 平均值  | 4.0  | 9.9  | 18.8 | 19.7 | 0.7  | 8.8  |

然而,在 Y 向受载时,理论解及有限元解的总体误差都比较大,出现误差的可能原因是:

(1) 简化后的几何模型与葵花籽仁真实形状有差别。

(2) 将具有黏弹性的葵花籽仁简化为各向同性的线弹性材料而产生的误差。

(3) 试验中存在的系统误差和随机误差,以及在重复试验时不同样本之间具有差异性。

## 4 结论

(1) 通过三道眉葵花籽仁的压缩试验,得到了其竖直、水平及垂直方向上的弹性模量分别为  $E_x = 64.01 \text{ MPa}$ ,  $E_y = 23.63 \text{ MPa}$ ,  $E_z = 101.8 \text{ MPa}$ 。

(2) 通过试验及有限元分析结果可知,葵花籽仁的抗压能力具有各向异性,竖直方向的受载能力最强,水平方向的受载能力最弱。

(3) 通过有限元分析法得到了载荷大小和方向变化时,三道眉葵花籽仁的变形和应力的分布形式及变化规律:应力和位移在葵花籽仁和压盘的接触面处有最大值,且沿受力方向逐渐减小;竖直方向受载时,葵花籽仁在应力峰值超过压缩强度极限处开裂,裂纹沿外力方向延伸;水平和垂直受载时,葵花籽仁沿子叶夹缝处开裂,且垂直受载时葵花籽仁可能发生失稳。

## 参考文献

- [1] 张亚新, 郑晓, 林国祥. 葵花籽压榨过程中的塑性模型[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 138-142.
- [2] KHODABAKHSHIAN R, EMADI B, ABBASPOUR FARD M H, et al. Mechanical Properties of Sunflower Seed and Its Kernel, Azargol Varietas a Case Study, under Compressive Loading[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2010, 4(2): 34-40.
- [3] HERNÁNDEZ L F, BELLÉS P M. A3-D finite element analysis of the sunflower (*Helianthus annuus* L.) fruit. Biomechanical approach for the improvement of its hullability[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 861-869.
- [4] 卿艳梅, 李常友, 黄江东, 等. 龙眼力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 143-147.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 郑阳红, 吴东泽, 梁金生, 等. 基于 Workbench 的青核桃力学特性分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 86-131.
- [8] CARDENAS-WEBER M, STROSHINE RL, HAGHIGHI K, et al. Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(3): 920-929.
- [9] 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.
- [10] 周祖谔. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- [11] 代治国. 豌豆籽粒的力学性能试验分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013: 7-40.
- [12] 丁林峰, 李耀明, 徐立章. 稻谷压缩试验的接触力学分析[J]. 农机化研究, 2007(12): 112-115.
- [13] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 唐玄之, 吴涌涛. 自制种子密度计的试验及应用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 1995(4): 431-432.
- [15] 高耀东, 刘学杰. ANSYS 机械工程应用精华 50 例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 8-33.