

板栗真空破壳力学特性有限元分析*

袁越锦¹ 袁月定² 党新安¹ 徐英英¹ 董继先¹ 徐君臣¹

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 宜春学院数学与计算机科学学院, 宜春 336000)

【摘要】以半球形板栗为研究对象,运用有限元方法和传递过程原理建立了板栗真空破壳的有限元模型,并采用间接顺序耦合法对模型进行了求解。模拟与试验结果表明:运用该模型模拟分析板栗真空破壳力学特性可行;真空破壳过程中应力和应变主要沿栗壳边缘分别向弧顶和壳底中心递减分布;湿应力是真空破壳的主导因素;绝对压力对破壳的影响很大,绝对压力的降低不仅使压差应力增大,同时也使湿应力增大。

关键词: 板栗 真空破壳 力学特性 热质传递 有限元

中图分类号: TS255.36 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0136-06

Finite Element Method on Mechanical Properties of Vacuum Shelling Chestnut

Yuan Yuejin¹ Yuan Yueding² Dang Xin'an¹ Xu Yingying¹ Dong Jixian¹ Xu Junchen¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China

2. College of Mathematics and Computer Science, Yichun University, Yichun 336000, China)

Abstract

Taking the hemispherical chestnut as the study object, a finite element model for the mechanical properties of vacuum shelling chestnut was established by applying the finite element method and transport-process theory. The simulation and experimental results indicated that the finite element model could explain the mechanical properties of vacuum shelling chestnut well. The moisture distribution of chestnut shell was higher in the bottom center area and lower in the shell edge. The value of stress and strain was decreasing from the shell edge to the bottom center and arc peak. The wet stress played an important role in the vacuum shelling process, and was about five times larger than the pressure difference stresses in the initial and middle stage, but the wet stress decreased gradually at the end of the shelling process. The vacuum degree had a great effect on the vacuum shelling process, and the increasing vacuum degree did not only increase the pressure difference stresses but also the wet stresses.

Key words Chestnut, Vacuum shelling, Mechanical properties, Heat and mass transfer, Finite element

引言

板栗脱壳是板栗深加工的头道工序,其难点主要是板栗外壳韧硬坚实且没有结合缝。目前,板栗脱壳的方法主要有:手工法、火烧法、化学法、机械法、气体射流冲击法、能量法、真空法、微波法等^[1~7]。其中,真空法因环保卫生、省时省力、栗仁

不易熟化、整仁率和破壳率高等优点而日益受到重视,应用前景广阔^[5,7]。

近年来,有限元分析法在坚果力学特性研究领域中的应用已十分广泛^[8~13]。但目前对坚果破壳力学特性的有限元模拟分析大部分是基于机械法进行的,而基于真空法的板栗破壳力学特性有限元模拟研究尚未见报道。获得板栗温度、水分和应力分布

收稿日期: 2010-08-16 修回日期: 2010-11-08
* 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(2010JK455)、浙江省科技厅面上农业资助项目(2009C32102)和陕西科技大学科研创新团队基金资助项目(SKTD10-02)
作者简介: 袁越锦,副教授,博士,主要从事干燥技术与设备研究,E-mail: yuanyj@sust.edu.cn

等情况是进行板栗真空破壳力学特性分析的前提,这方面仅依靠试验研究往往存在较大的困难。因此,本文运用有限元方法和传递过程原理等知识建立板栗真空破壳过程的有限元模型,模拟其温度、水分和应力应变分布等情况,获得板栗真空破壳的一般力学特性规律,以期板栗加工过程和相关设备设计提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

一般来说,板栗的几何形状主要有球形、半球形和扁平形 3 种。其中半球形较为常见,所占比例达 80% 以上^[13]。试验样品选自浙江省云和县的半球形板栗,其外形如图 1 所示。通过取样(100 颗板栗)测量获得其平均几何尺寸为:长 28.31 mm,宽 29.23 mm,高 18.42 mm,干基含水率为 46%。板栗外壳完整没有结合缝,其厚度平均值为 0.62 mm。新鲜板栗的外壳、红衣和栗仁往往紧密结合在一起,但经过一定时间的储藏或干燥,果壳和果仁之间会出现一定的间隙(约 0.41 mm)。

将准备好的半球形板栗试样均匀平整地置于自制真空试验装置(图 2)的丝网料板上破壳 40 min,设置绝对压力为 20 kPa,加热温度为 75℃;板栗初始温度为 30℃。自制真空试验装置主要由真空箱、加热系统和抽真空系统等组成。为强化传热,试验中开启扰流风扇。为获得板栗在破壳过程中的收缩变形量,在真空箱的玻璃观察窗前近距离固定一高性能数码相机,每隔一段时间对板栗拍照,经图像处理^[14]即可得获得板栗在不同时刻的收缩变形量。

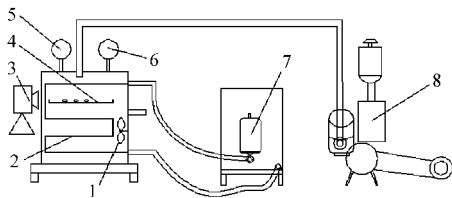


图 2 板栗真空破壳试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of chestnut vacuum shelling test equipment

1. 扰流风扇 2. 蛇形加热盘管 3. 数码相机 4. 丝网料板
5. 真空表 6. 温度表 7. 蒸汽发生器 8. 抽真空系统

2 板栗真空破壳有限元模型

板栗真空破壳的动力原理在于热量导入板栗

后,栗壳水分不断被干燥蒸发,温、湿度梯度的出现使栗壳承受着一定的热、湿应力作用。同时,栗仁内部的水分也不断向外扩散;栗仁因失水而收缩,与栗壳自行分离,壳、仁之间出现一定的间隙;由于栗壳致密,栗仁水分扩散到壳仁间隙气化后无法及时逸出,真空作用又使壳外压力降低,致使栗壳还承受着一定的压差力作用。由此可见,板栗真空破壳过程中栗壳主要受以下 3 方面的载荷作用:因加热温度梯度引起的热应力;因水分扩散湿分梯度引起的湿应力;壳内水蒸气与壳外真空引起的压差作用力。为获得热、湿应力,需先求解得到板栗的温、湿度场。

2.1 热质传递模型

为便于处理,认为所研究的板栗为规则的半球形,采用 ANSYS 软件建立的板栗模型如图 3 所示。模型包括栗壳和栗仁两部分,其球半径 16.34 mm,栗壳厚 0.62 mm。为简化模型,本文在推导板栗真空破壳热质传递数学方程时作如下基本假设:板栗为各向同性的常物性均匀连续体;忽略板栗的收缩与变形,栗壳与栗仁紧密接触;初始时板栗中的温度和含水率分布均匀,不存在温、湿度梯度。

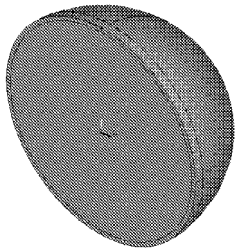


图 3 半球形板栗物理模型

Fig. 3 Physical model of chestnut

基于上述假设,应用傅里叶定律可得板栗的传热方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \tag{1}$$

式中 a ——板栗的热扩散系数, m^2/s
 t ——时间, s

T ——板栗内某处的温度, K

同理,应用费克定律可得其传质方程为

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

式中 D_m ——板栗的水分扩散系数, m^2/s

M ——板栗内某处的干基含水率

基于上述假设,以上板栗热质传递方程的初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad M|_{t=0} = M_0 \tag{3}$$

式中 T_0 ——板栗的初始温度, K

M_0 ——板栗的初始干基含水率

考虑到板栗与真空箱内丝网料板为线接触,热传导作用微弱;而在真空条件下箱内仍存在着一定的空气与板栗进行对流换热,同时板栗与箱内环境的辐射换热不可忽略,且栗壳表面存在着水分的气

化,于是板栗热质传递方程的边界条件为

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_f) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_f^4) + \\ \rho [\eta_{fg} + c_v(T - T_f)] \frac{V}{A} \frac{\partial M}{\partial t} \\ -D_m \frac{\partial M}{\partial n} = h_m(M - M_e) \end{cases} \quad (4)$$

式中

λ ——板栗的导热系数, W/(m·K)
 h ——对流换热系数, W/(m²·K)
 T_f ——箱内温度, K ε ——板栗表面黑度
 ρ ——板栗密度, kg/m³
 σ ——Stefan - Boltzmann 常数, 其值为 5.67 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)
 η_{fg} ——气化潜热系数, J/kg
 c_v ——水蒸气比热容, J/(kg·K)
 V ——板栗体积, m³
 A ——板栗表面积, m²
 h_m ——对流传质系数, m/s
 M_e ——板栗平衡干基含水率

2.2 应力应变模型

与上述热质传递模型基本假设不同的是,建立有限元应力应变模型时不再忽略板栗的收缩与变形,真空破壳一段时间后壳仁间会出现一定的间隙,从而使板栗真空破壳与机械破壳不同的是栗仁与栗壳之间没有接触力作用。故本文仅针对板栗外壳建立其有限元应力应变模型。采用 ANSYS 软件 8 节点壳单元经网格划分后建立的栗壳有限元几何模型如图 4 所示。在真空破壳过程中果壳表现为脆性材料,其破坏方式主要为脆性破坏,因此破坏准则采用脆性断裂破坏强度准则;经试验测定其弹性模量为 102 MPa,泊松比为 0.30。

求解上述热质传递模型可得栗壳温度、含水率分布,而热、湿应变计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_T = \alpha \Delta T \\ \varepsilon_M = \beta \Delta M \end{cases} \quad (5)$$

式中

ε_T ——热应变 ε_M ——湿应变
 α ——温度线膨胀系数
 β ——湿度线膨胀系数

根据弹性力学理论^[15],栗壳受力的平衡微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——栗壳微元体的正应力, Pa
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ——栗壳微元体的剪应力, Pa
 X, Y, Z ——栗壳微元体所受的体积力分量, N/m³

根据栗壳微元体变形情况,可以列出其几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \partial u / \partial x \\ \varepsilon_y = \partial v / \partial y \\ \varepsilon_z = \partial w / \partial z \\ \gamma_{xy} = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y \\ \gamma_{yz} = \partial w / \partial y + \partial v / \partial z \\ \gamma_{zx} = \partial u / \partial z + \partial w / \partial x \end{cases} \quad (7)$$

式中

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ——栗壳微元体的正应变
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ——栗壳微元体的剪应变
 u, v, w ——栗壳微元体的弹性位移分量

由虎克定律可得到栗壳受力的物理方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \varepsilon_T + \varepsilon_M \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] + \varepsilon_T + \varepsilon_M \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \varepsilon_T + \varepsilon_M \\ \gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \\ \gamma_{yz} = \tau_{yz} / G \\ \gamma_{zx} = \tau_{zx} / G \end{cases} \quad (8)$$

式中

E ——材料的弹性模量, Pa
 μ ——泊松比 G ——剪切模量, Pa

在板栗真空破壳过程中,栗仁水分扩散到壳仁间隙气化后无法及时逸出,此时该狭小间隙内的水蒸气可认为近似处于饱和状态,其压力可由对应的饱和温度求得。于是,施加在栗壳上的压差载荷计算公式为

$$q = P_{sa} - P_{va} \quad (9)$$

式中

P_{sa} ——水蒸气压力, Pa
 P_{va} ——绝对压力, Pa

3 模型求解

本文采用 ANSYS11.0 软件求解上述有限元模型。方程组采用间接顺序耦合法求解,即先进行热质传递模型的求解,然后将求解得到的栗壳单元节

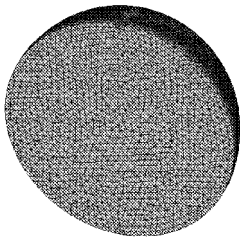


图4 栗壳有限元几何模型

Fig.4 Finite element geometry model of chestnut shell

点温湿度值作为体载荷施加于应力应变模型,并考虑施加在栗壳边界上的压差载荷,则可求解上述应力应变模型,最终得到栗壳的应力应变分布。需要指出的是,虽然 ANSYS 软件中没有专门的湿分析模块,但从上述热质传递方程可以看出,热、湿应力问题具有相似性,即在湿应力分析中,只要将湿度变化量 ΔM 与温度变化量 ΔT 对应,湿度线膨胀系数 β 与温度线膨胀系数 α 对应等,则完全也可用 ANSYS 软件中的热分析模块求得湿应力^[16]。

模拟过程中采用的工况参数与试验相同;对流换热系数 h 满足^[17]

$$\frac{hd}{\lambda}=0.664\left(\frac{\nu}{a}\right)^{1/3}\left(\frac{vd}{\nu}\right)^{1/2}\tag{10}$$

式中 d ——板栗球半径, m

ν ——空气运动粘度, m^2/s

v ——风速, m/s

对流传质系数 h_m 满足弗罗斯林经验公式^[17],即

$$\frac{h_md}{D_m}=2.0+0.552\left(\frac{\nu}{D_m}\right)^{0.33}\left(\frac{vd}{\nu}\right)^{0.5}\tag{11}$$

壳仁间隙内的饱和水蒸气压力由对应的温度求得,该温度值由栗壳内表面温度场决定。而水蒸气饱和压力与对应饱和温度间的拟合关系曲线为

$$P_{sa}=\exp(23.209-3\,816.44/(T-46.44))\tag{12}$$

其他参数主要通过试验测量或查阅相关资料^[17]类比获得。栗壳绝干密度 $820\text{ kg}/\text{m}^3$,温度线膨胀系数 2.5×10^{-4} ,湿度线膨胀系数 15.2,热扩散系数 $1.9\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$,水分扩散系数 $4.2\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

4 结果分析与讨论

4.1 收缩变形量模拟与试验结果的比较

图 5 为栗壳高度方向收缩变形量模拟与试验结果的比较。从图中可以看出,在破壳开始阶段栗壳收缩较快,16 min 后收缩放慢,曲线趋于平缓。栗壳高度方向收缩变形量模拟与试验变化曲线基本一致,吻合较好,其最大相对误差约为 13.6%。这从宏观上表明,本文建立的模型有效可行。

4.2 温度分布和含水率分布

图 6 为真空破壳 10 min 时栗壳的温度分布和含水率分布模拟结果。从图中可以看出,栗壳温度已近似等于真空破壳加热温度 75°C ,且各点温度相差很小,温度分布整体上沿栗壳边缘分别向弧顶和壳底中心递减分布;而含水率分布正好相反,沿栗壳边缘分别向弧顶和壳底中心递增分布。这主要是因为板栗内水分扩散与热量传递的方向正好相反,水分由内向外扩散,而热量由外向内导入。

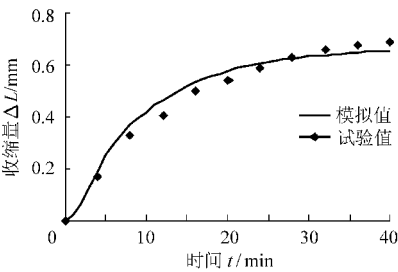


图 5 收缩变形量模拟与试验结果的比较
Fig. 5 Shrinkage curves comparison of simulation and experiment

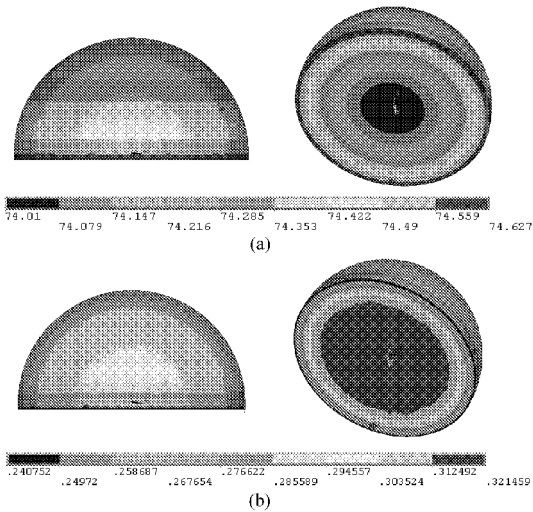


图 6 温度和含水率分布模拟结果
Fig. 6 Temperature and moisture distributions of the simulation for chestnut vacuum shelling
(a) 温度 (b) 含水率

4.3 等效应力和应变云图

图 7 为模拟得到的真空破壳 10 min 时栗壳等效应力和应变云图。从图中可以看出,应力和应变主要沿栗壳边缘分别向弧顶和壳底中心递减分布;较大的应力和应变值均主要出现在栗壳边缘处,图中所示点的最大应力值达 53.4 MPa。这表明半球形板栗真空破壳时最先破裂位置在栗壳边缘,这一点与试验观察到的结果一致。

4.4 应力变化曲线

由上文所述知,真空破壳过程中栗壳上任意一点应力由热、湿应力和压差应力 3 部分组成。为探究该 3 种应力主次关系,选取图 7 中所示最大应力点为代表,模拟追踪该点 3 种应力随时间变化的规律如图 8 所示。从图 8a 可以看出,热应力主要发生在破壳开始阶段,约 3 min 达最大值 0.079 MPa;然后迅速下降,10 min 后热应力已非常小,可忽略不计。这主要是因为热量传递相对较快,栗壳升温迅速,当接近于真空破壳加热温度(图 6a)时,传热趋近于稳定,温度变化近似为零。其次,从图 8b 可以看出,压差应力在破壳开始的 5 min 内增加较快,至

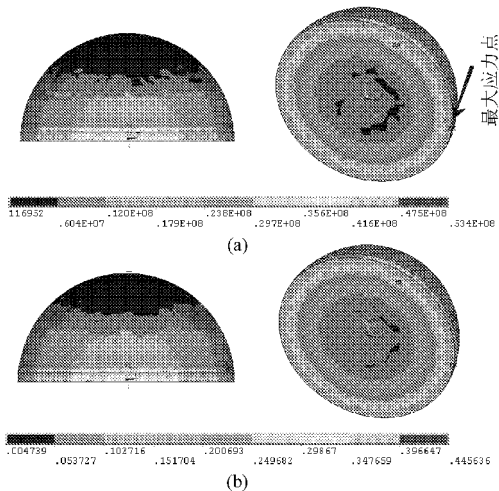


图7 等效应力和应变云图

Fig.7 Nephogram of Von Mises stress and strain
(a) 等效应力 (b) 等效应变

10 min 后,曲线趋于平稳,其值稳定在 9 MPa 左右;而湿应力在开始阶段增加更快,至 14 min 时达到最大值 46.1 MPa,然后缓慢减小,到破壳终了时,湿应力仍维持在 17 MPa 左右。

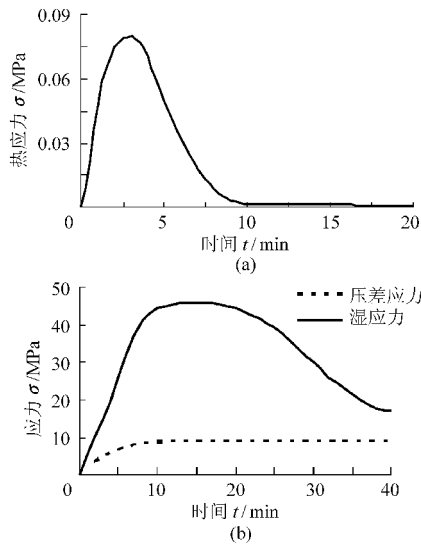


图8 应力变化曲线

Fig.8 Stress curves of thermal and wet and pressure differences
(a) 热应力 (b) 湿应力和压差应力

总的来看,真空破壳过程中湿应力和压差应力远大于热应力,热应力对破壳的影响可忽略不计;湿

应力是真空破壳的主导因素,特别是在破壳开始和中间阶段,湿应力约 5 倍于压差应力,优势明显;到破壳后期,由于湿应力减小,压差应力作用开始显现,但仍小于湿应力。

4.5 绝对压力对破壳的影响

为考查绝对压力对破壳的影响,仍选取图 7 中所示最大应力点为代表,模拟追踪在不同绝对压力(10、20、30 kPa)下压差应力和湿应力随时间变化的规律如图 9 所示。从图中可以看出,绝对压力对破壳的影响很大,绝对压力降低不仅使压差应力增大,同时也使湿应力增大;对于后者,主要是因为绝对压力的降低加快了板栗内水分的干燥速率,从而间接增大了湿应力。

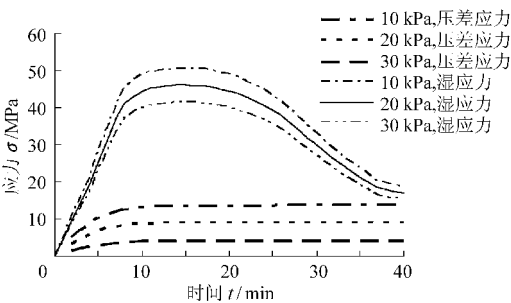


图9 不同绝对压力下压差和湿应力变化曲线

Fig.9 Stress curves of the simulation for different vacuum degrees

5 结束语

建立了板栗真空破壳过程的有限元模型。模拟得到的收缩变形量曲线与试验结果基本一致,运用该模型模拟分析板栗真空破壳力学特性可行;真空破壳过程中栗壳含水率分布呈壳底中心大,弧顶次之,栗壳边缘小的趋势;应力和应变主要沿栗壳边缘分别向弧顶和壳底中心递减分布,较大的应力和应变值均出现在栗壳边缘处;湿应力和压差应力远大于热应力,湿应力是真空破壳的主导因素,特别是在破壳开始和中间阶段,湿应力约 5 倍于压差应力,优势明显;到破壳后期,由于湿应力减小,压差应力作用开始显现,但仍小于湿应力;绝对压力对破壳的影响很大,绝对压力的降低不仅使压差应力增大,同时也使湿应力增大。

参 考 文 献

1 Kim J H, Park J B, Choi C H. Development of chestnut peeling machine[J]. Korean Soc. Agric. Machinery, 1997, 22(3): 289~294.
2 Hwang J Y, Hwang I K, Park J B. Analysis of physicochemical factors related to the automatic pellicle removal in Korean chestnut (*Castanea crenata*)[J]. J. Agric. Food Chem., 2001, 49(12): 6 045~6 049.
3 Moreira R, Chenlo F, Chaguri L, et al. Mathematical modeling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea sativa mill.*): influence of the natural shells [J]. Food and Bioproducts Processing, 2005, 83(4): 306~314.

- 4 Gao Zhenjiang, Lin Hai, Xiao Hongwei. Air-impingement de-shelling of chestnuts (*C. mollissima*): process parameter optimization [J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(2): 15 ~ 16.
- 5 党新安,张昌松,葛正浩. 板栗真空爆壳技术与设备的研究[J]. 轻工机械, 2001(2): 19 ~ 21.
Dang Xin'an, Zhang Changsong, Ge Zhenghao. Study of technology and equipment on the vacuum burst opening of the Chinese chestnut shell[J]. Light Industry Machinery, 2001(2): 19 ~ 21. (in Chinese)
- 6 王武,张莉,方红美,等. 预设应力对板栗微波爆壳的影响研究[J]. 食品科学, 2005, 26(9): 333 ~ 336.
Wang Wu, Zhang Li, Fang Hongmei, et al. Study on technology of microwave shelling of cut Chinese chestnut [J]. Food Science, 2005, 26(9): 333 ~ 336. (in Chinese)
- 7 袁越锦,徐英英,党新安,等. 板栗脱壳技术与破壳机理研究现状及发展趋势[J]. 食品工业科技, 2008, 29(10): 301 ~ 305.
Yuan Yuejin, Xu Yingying, Dang Xin'an, et al. Current situation and development trend of chestnut shelled technology and cracked mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(10): 301 ~ 305. (in Chinese)
- 8 王灵军,全燕鸣,邓文君. 银杏脱壳的有限元受力分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 59 ~ 61.
Wang Lingjun, Quan Yanming, Deng Wenjun. Analysis of finite element method for threshing ginkgo fruit shell [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 59 ~ 61. (in Chinese)
- 9 史建新,赵海军,辛动军. 基于有限元分析的核桃脱壳技术研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 185 ~ 188.
Shi Jianxing, Zhao Haijun, Xin Dongjun. Technology for breaking walnut shell based on finite element analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 185 ~ 188. (in Chinese)
- 10 谢丽娟,宗力. 莲子受力有限元分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 94 ~ 97.
Xie Lijuan, Zong Li. Analysis of finite element method for loaded lotus seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 94 ~ 97. (in Chinese)
- 11 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, 72.
Li Xinping, Gao Lianxing, Ma Fuli. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 64 ~ 67, 72. (in Chinese)
- 12 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.
Zhang Keping, Huang Jianlong, Yang Min, et al. Finite element analysis and experimental verification of wheat grain under compression loads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 352 ~ 356. (in Chinese)
- 13 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.
Zhang Rongrong, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Analysis of mechanical properties of Chinese chestnut cracking based on the FEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 84 ~ 88. (in Chinese)
- 14 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- 15 徐秉业,王建学. 弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- 16 卢爱红,茅献彪. 湿度应力场的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊2): 2 470 ~ 2 473.
Lu Aihong, Mao Xianbiao. Numerical simulation on theory of humidity stress field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp. 2): 2 470 ~ 2 473. (in Chinese)
- 17 曹崇文,朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

(上接第 182 页)

- 8 宋开山,张柏,王宗明,等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 21(8): 16 ~ 21.
Song Kaishan, Zhang Bai, Wang Zongming, et al. Inverse model for estimating soybean chlorophyll concentration using in-situ collected canopy hyperspectral data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 21(8): 16 ~ 21. (in Chinese)
- 9 Joan Ferr, Nicolaas Klaas M Faber. Net analyte signal calculation for multivariate calibration [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2003, 69(1 ~ 2): 123 ~ 136.
- 10 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Liu Muhua, et al. Determination of total polyphenols content in green tea using FT-NIR spectroscopy and different PLS algorithms [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2008, 46(3): 568 ~ 573.
- 11 Wu Di, He Yong, Nie Pengcheng, et al. Hybrid variable selection in visible and near-infrared spectral analysis for non-invasive quality determination of grape juice [J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 659(1 ~ 2): 229 ~ 237.
- 12 Avraham Lorber, Klaas Faber, Bruce R Kowalski. Net analyte signal calculation in multivariate calibration [J]. Analytical Chemistry, 1997, 69(8): 1 620 ~ 1 626.