

# 芝麻、花生在压榨过程中非线性粘弹塑性模型与蠕变模拟

郑 晓, 林国祥, 尹 芳, 游 燕

(武汉工业学院机械工程系, 武汉 430023)

**摘 要:** 在芝麻、花生流变试验的基础上, 采用模型理论与经验模型相结合的方法建立芝麻、花生非线性粘弹塑性模型, 并运用改进模拟退火计算方法对模型参数反演。数值模拟芝麻、花生、碎花生的蠕变, 数值模拟的最大相对误差分别为 5.7%、1.5%、4.3%, 结果表明, 非线性粘弹塑性模型能较好描述芝麻、花生流变特性。运用蠕变速率曲线确定了芝麻、花生、碎花生的平衡压榨时间。

**关键词:** 非线性; 粘弹塑; 流变特性; 芝麻; 花生

**中图分类号:** TS201.7; TS221

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)09-0029-05

郑 晓, 林国祥, 尹 芳, 等. 芝麻、花生在压榨过程中非线性粘弹塑性模型与蠕变模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 29-33.

Zheng Xiao, Lin Guoxiang, Yin Fang, et al. Nonlinear viscous-elastic-plastic model and creep simulation of sesame and peanut[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 29-33. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

压榨过程中, 植物油料在压力作用下, 首先消除了油料颗粒间存在的大量孔隙, 并产生弹塑性变形。油料中的气体被部分排出, 变为密实的散体。随压力逐渐增大, 相继产生油料细胞壁破裂, 颗粒破碎, 油液渗出, 油料中的液体被部分排出, 气体基本上被排出掉, 形成液固耦合体(或半固态饱和介质)。随液体不断排出, 最终破碎的油料颗粒互相粘结形成饼。固体颗粒在油料中的重新排列以及油料孔隙的变化贯穿整个压榨过程, 发生在油料中的这些复杂变化将导致油料的非线性变形。又由于液体与颗粒间存在的摩擦阻力以及结合液膜的粘滞性, 油料将产生迟滞变形。因此, 油料属粘弹塑性体, 产生的变形为非线性粘弹塑性变形。其变形不但与压榨应力有关, 还与压榨时间有关。油料的这种非线性流变特性已被试验所证实<sup>[1,2]</sup>。油料的非线性流变特性是其复杂变化的宏观综合表现, 它刻画了油料在压榨过程中所表现出的散体状、半固态饱和状和滤饼状 3 种物理模型的宏观力学特性。压榨理论研究中诸多问题, 如渗透率、孔隙度、压榨微分方程的建立及求解等均应考虑油料的非线性流变特性。粘弹塑性模型的建立为运用有限元方法求解油料实际压榨中的流固耦合问题奠定了基础, 使数值模拟液压榨油机的压榨过程成为可能。

目前非线性流变研究方法主要根据材料的流变试验结果, 获得材料的流变特征, 建立流变模型。建模方法主要有模型理论方法、试验数据直接拟合的经验关系方法以及模型理论与经验模型相结合的半经验半理论模

型方法 3 种<sup>[3-5]</sup>。文献[2]尝试了运用半经验理论模型方法建立菜籽和菜籽仁非线性粘弹塑性模型, 模型分别模拟了菜籽在 6 MPa、20 MPa、50 MPa 3 种压榨应力水平下的应变随时间的变化, 菜籽模拟的最大相对误差为 8.8%, 菜籽仁模拟的最大相对误差为 6.2%, 结果表明, 非线性粘弹塑性模型能较好地模拟菜籽与菜籽仁的实际蠕变。本文在芝麻和花生的流变试验基础上, 采用文献[2]的模型理论与经验模型相结合的方法建立芝麻和花生非线性粘弹塑性模型, 进行蠕变的数值模拟, 探讨运用蠕变速率曲线确定芝麻和花生的平衡压榨时间。

## 1 流变试验

流变试验分蠕变试验和应力松弛试验, 在岩土的流变研究中采用较多的是三轴压缩蠕变试验<sup>[3-5]</sup>, 油料压榨无论是采用螺旋榨油机或液压榨油机, 实际压榨均是在侧限条件下进行的。为了与实际压榨相符, 本文采用侧限压缩蠕变试验。侧限压缩蠕变试验和三轴压缩蠕变试验都是在三维应力状态下进行的, 所不同的是侧限压缩中物料的径向应力与轴向应力相关联, 而三轴压缩中物料的径向应力与轴向应力不相关联。为了进行油料的蠕变试验, 作者研制了一种侧限压缩试验装置<sup>[1,6]</sup>。

### 1.1 试验材料

试验用的芝麻、花生产于湖北省, 经过筛分处理, 使其颗粒具有一定的均匀性。测得芝麻含水率 8%, 含油率 51%; 花生含水率 10%, 含油率 45%。其中花生分为未破碎的整粒花生和将整粒花生破碎成 1/8 的碎花生。

### 1.2 试验方法

本文采用了分别加载的流变试验方法, 即对每组试样分别加载到设定的压榨应力水平后, 保持该压榨应力恒定, 测试并记录试样在各个时段的位移值, 总压榨测试时间取 30 min, 每个时段取 3 min, 压榨应力水平分别取 10、20、30、40、50、60 MPa, 一种应力水平对应一个试样, 芝麻、花生和碎花生各取 6 组试样, 各组试样的物

收稿日期: 2005-08-22 修订日期: 2005-11-07

基金项目: 湖北省教育厅重点科研项目(2002A01008); 武汉工业学院重点科研项目(2002A012)

作者简介: 郑 晓(1958-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事农产品加工设备现代设计理论与方法的研究。武汉 武汉工业学院机械工程系, 430023。Email: zhengxiao580405@163.com

料质量均取 30 g。试样装入压榨室后,将试验装置置于材料压缩试验机上,利用材料压缩试验机上的加载装置对试验装置上的活塞直接加载。完成一组试样的试验后,按相同方法与步骤进行另一组试样的试验,各组试验均在室温下进行。

### 1.3 试验结果与分析

定义压榨应力  $\sigma$  和轴向应变  $\epsilon$  为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2)$$

式中  $F$ ——作用在物料表面上的压力, N;  $A$ ——物料截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $H_0$ ——压榨启始时物料高度, mm;  $\Delta H$ ——物料的压缩量, mm。

同一压榨应力水平下,芝麻、花生的应变  $\epsilon$  随压榨时间  $t$  变化的蠕变曲线见图 1,同一时刻下,应变  $\epsilon$  随压榨应力变化的等时曲线见图 2。

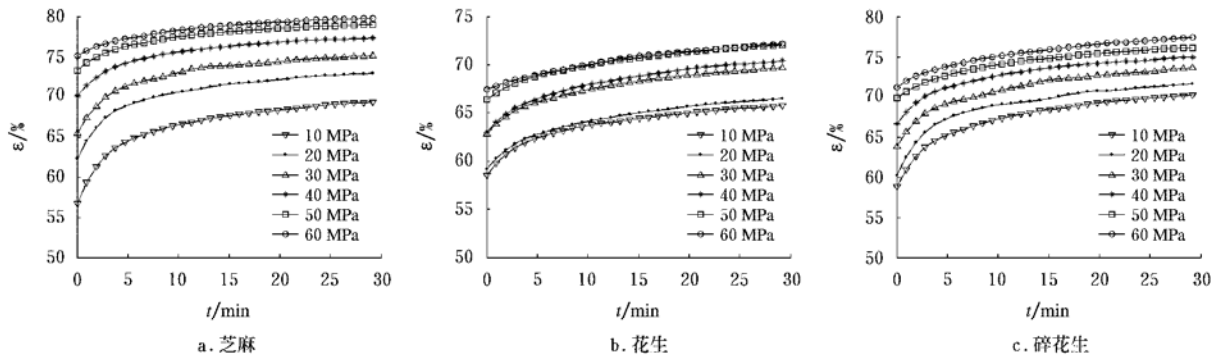


图 1 芝麻、花生和碎花生蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves of sesame, peanut and broken peanut

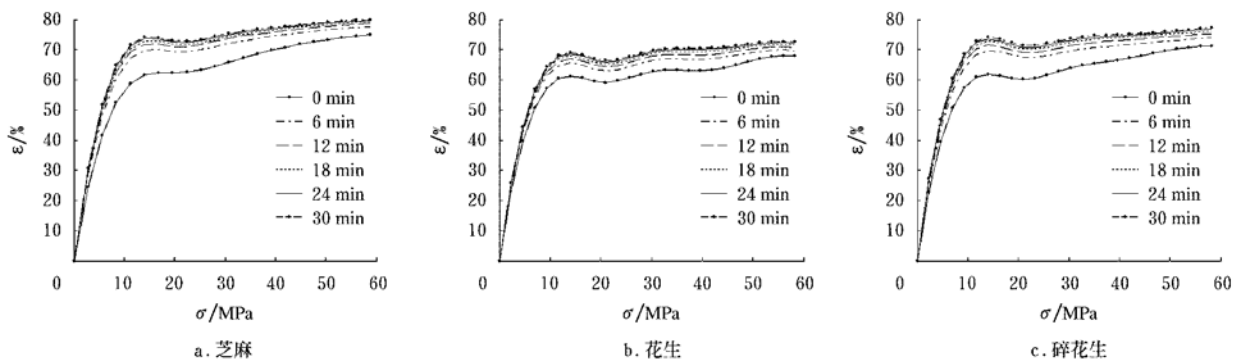


图 4 芝麻、花生和碎花生应力—应变等时曲线

Fig. 4 Stress-strain equivalent time curves of sesame, peanut and broken peanut

蠕变试验结果表明,芝麻和花生应力—应变关系随时间变化,应变是应力和时间的函数;应力—应变关系是非线性的。侧限压榨下的芝麻和花生蠕变曲线基本由一段曲线和一段直线构成,曲线和直线分别对应衰减蠕变和等速蠕变。进入等速蠕变阶段后,不同应力水平下的蠕变曲线近似平行的直线,并且直线斜率很小。

## 2 模型建立

半经验理论模型是将介质的非线性粘弹塑性变形分离成线性和偏离线性的非线性粘弹塑性变形两部分,采用模型理论方法建立线性粘弹塑性问题模型,采用经验公式建立非线性粘弹塑性问题的模型,两者迭加构成整个非线性粘弹塑性模型。该法克服了单独采用模型理论方法描述非线性流变的困难,同时也弥补了单独采用经验模型方法描述流变问题缺乏物理意义和通用性的

缺陷。模型理论即是借助“弹簧”、“粘壶”以及“滑块”三个基本物理元件可分别模拟介质的弹性、粘滞性及塑性的功能,将其串并联组成能充分表征介质的物理质构特征的物理力学模型,以达到能准确模拟介质的力学响应的目的。由于模型理论方法概念直观清晰、物理意义十分明确,便于深入分析介质流变现象。因此,在构建模型时优先采用模型理论方法<sup>[3-5]</sup>。

### 2.1 线性粘弹性模型

将直线关系的应力—应变视为线性粘弹性变形。采用五元件 Kelvin 模型的蠕变方程建立线性粘弹性模型<sup>[2]</sup>

$$\epsilon_k(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_{K1}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t \right] \right] + \frac{\sigma}{E_{K2}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K2}}{\eta_{K2}} t \right] \right] = J_K(t) \sigma \quad (3)$$

$$J_K(t) = \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_{K1}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t \right] \right] + \frac{1}{E_{K2}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K2}}{\eta_{K2}} t \right] \right] \quad (4)$$

式中  $\epsilon_K(\sigma, t)$  —— 线性粘弹性应变, %;  $E_H, E_{K1}, E_{K2}$  —— 弹性元件的弹性模量, MPa;  $\eta_{K1}, \eta_{K2}$  —— 粘性元件的粘滞系数, MPa · min;  $t$  —— 压榨时间, min;  $J_K(t)$  —— 线性粘弹性蠕变柔量, MPa<sup>-1</sup>。

### 2.2 非线性粘塑性模型

将非线性的应力—应变视为非线性粘塑性变形。非线性粘塑性变形可分离成线性粘塑性应变和非线性粘塑性应变。线性粘塑性模型的建立仍然采用模型理论方法, 而非线性粘塑性模型的建立采用经验方法。采用 Maxwell 模型的蠕变方程建立线性粘塑性模型<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_{M1}(\sigma, t) &= \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} \right] (\sigma - \sigma_s) \\ &= J_{M1}(t) (\sigma - \sigma_s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$J_{M1}(t) = \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} \quad (6)$$

式中  $\epsilon_{M1}(\sigma, t)$  —— 线性粘塑性应变, %;  $E_M$  —— 弹性元件的弹性模量, MPa;  $\eta_M$  —— 粘性元件的粘滞系数, MPa · min;  $\sigma_s$  —— 屈服极限, MPa;  $J_{M1}(t)$  —— 线性粘塑性蠕变柔量, MPa<sup>-1</sup>。

采用双曲线函数建立非线性粘塑性应力—应变关系<sup>[2]</sup>。

$$\epsilon_{M2}(\sigma, t) = \frac{A_1 A_2 (\sigma - \sigma_s)}{1 - A_2 (\sigma - \sigma_s)} t^{A_3} \quad (7)$$

式中  $A_1, A_2, A_3$  —— 常数。

### 2.3 非线性粘弹塑性模型

按图 7 应变关系进行线性迭加, 可得图 8 所示的介质非线性粘弹塑性物理模型<sup>[2]</sup>, 数学模型为

$$\begin{aligned} \epsilon(\sigma, t) &= \epsilon_K(\sigma, t) + \epsilon_M = \epsilon_K(\sigma, t) + \epsilon_{M1}(\sigma, t) - \\ \epsilon_{M2}(\sigma, t) &= \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_{K1}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K1}}{\eta_{K1}} t \right] \right] + \\ &\frac{\sigma}{E_{K2}} \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{E_{K2}}{\eta_{K2}} t \right] \right] + \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} \right] (\sigma - \sigma_s) \\ &- \frac{A_1 A_2 (\sigma - \sigma_s)}{1 - A_2 (\sigma - \sigma_s)} t^{A_3} \end{aligned} \quad (8)$$

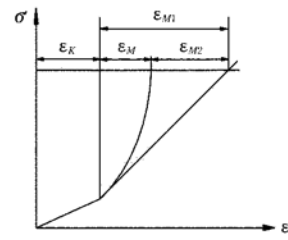


图 7 应变示意图

Fig. 7 Strain diagram

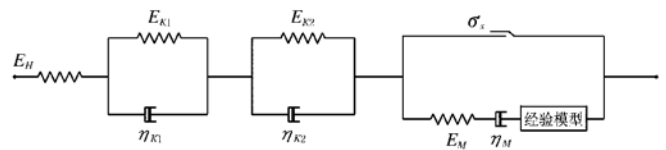


图 8 介质的非线性粘弹塑性模型

Fig. 8 Nonlinear viscous-elastic-plastic model

## 3 模型参数反求

油料的非线性粘弹塑性模型中共有 10 个待定的参数, 根据油料的流变试验结果反求确定 10 个参数。以上各模型是基于单轴压缩蠕变, 在一维应力状态下建立的。根据粘弹性理论的相似原理, 对于侧限压缩三维应力问题, 可用  $\sigma = \sigma(1 - 2\mu\zeta)$  代替模型(8)中的  $\sigma$ <sup>[7]</sup>。式中右边  $\sigma$  为压榨应力, 见公式(1);  $\mu$  为泊松比;  $\zeta$  为侧压系数。对于散体物料, 其泊松比是相对密度或孔隙度的函数<sup>[8,9]</sup>。根据实验室研究结果, 当压榨应力低于 10 MPa 时, 油料的泊松比  $\mu$  和侧压系数  $\zeta$  均很小。于是, 为简化分析, 上面三维应力计算式  $\sigma$  中的第二项可忽略。因此, 侧限压缩三维应力问题可以近似用单轴压缩一维应力问题描述, 在确定模型(8)的参数时, 可直接采用侧限压缩蠕变的试验结果数据。根据蠕变柔量与弹性模量互为倒数关系, 可得到线性粘弹性阶段、线性粘塑性阶段中不同时间段的蠕变柔量, 由蠕变柔量的理论计算模型, 按最小二乘法构造目标函数, 采用改进的模拟退火优化算法对线性粘弹性蠕变柔量模型参数、线性粘塑性蠕变柔量模型参数、非线性粘塑性经验模型参数反演求解<sup>[2]</sup>, 参数求解结果见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	$E_H$ /MPa	$E_{K1}$ /MPa	$E_{K2}$ /MPa	$\eta_{K1}$ /MPa · min <sup>-1</sup>	$\eta_{K2}$ /MPa · min <sup>-1</sup>	$E_M$ /MPa	$\eta_M$ /MPa · min <sup>-1</sup>	$A_1$	$A_2$	$A_3$
芝麻	17.28	258.96	128.30	250.21	1222.1	250.68	168550.67	0.4098	0.0028	0.0587
花生	17.23	328.95	182.31	397.22	2612.0	298.88	148411.47	0.4350	0.0034	0.0617
碎花生	17.01	267.89	132.29	327.41	1652.6	318.82	132415.7	0.4400	0.0025	0.0626

## 4 数值模拟

为了验证本文建立的非线性粘弹塑性模型的适宜性, 应用模型(8)分别计算了芝麻、花生和碎花生在 10、20、30、40、50、60 MPa 6 种压榨应力水平下的应变随时

间的变化, 并与试验结果进行比较, 结果见图 5。芝麻的理论计算值与试验实测值的最大相对误差为 5.7%, 花生的最大相对误差为 1.5%, 碎花生的最大相对误差为 4.3%, 可知非线性粘弹塑性模型能较好地模拟芝麻、花生和碎花生的实际蠕变。

模型(8)对时间  $t$  微分可得到恒定压榨应力下油料蠕变速率

$$\frac{d\epsilon(\sigma, t)}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_{k1}} \exp\left[-\frac{E_{k1}}{\eta_{k1}}t\right] + \frac{\sigma}{\eta_{k2}} \exp\left[-\frac{E_{k2}}{\eta_{k2}}t\right] +$$

$$\frac{\sigma - \sigma_M}{\eta_M} - \frac{A_1 A_2 (\sigma - \sigma_s)}{1 - A_2 (\sigma - \sigma_s)} t^{A_3 - 1} \quad (9)$$

运用模型(9)模拟芝麻、花生和碎花生在各级压榨应力水平下,压榨 80 min 时油料蠕变速率曲线见图 6。

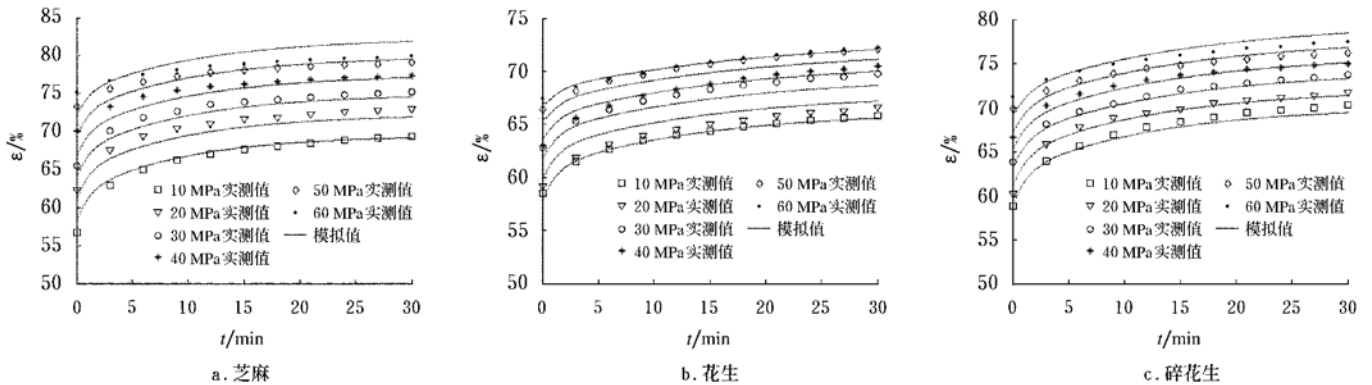


图 5 芝麻、花生、碎花生蠕变试验曲线与理论模型曲线比较

Fig. 5 Comparison of creep curves of test and theoretical model of sesame, peanut and broken peanut

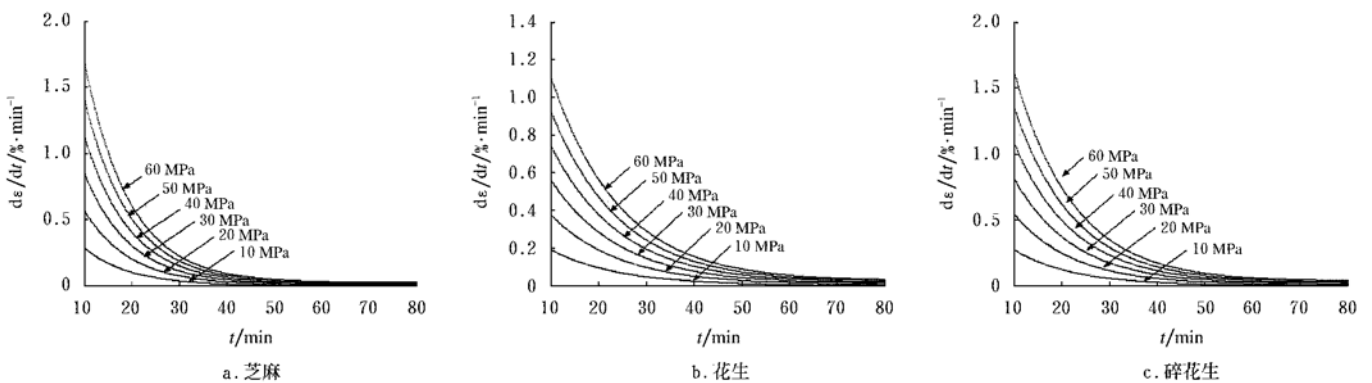


图 6 芝麻、花生、碎花生的压榨模拟(80 min)

Fig. 6 Press simulation of sesame, peanut and broken peanut(80 min)

在侧限压榨条件下,油料的蠕变表示了恒定压榨应力下,油料体积随时间的变化,体积变化主要是由于油料中油液的不不断排出而产生的。蠕变速率为零,表明该时刻蠕变曲线水平,油料体积趋于稳定,油液排出趋于零,油料压榨达到平衡状态。因此,蠕变速率曲线用来确定各级压榨应力下,油料压榨达到平衡状态所需的压榨时间(平衡压榨时间)。理论上当压榨时间  $t$  趋无穷大时,油料蠕变速率趋于无穷小,故理论上油料压榨达到平衡状态所需的压榨时间为无穷大。然而实际压榨时间是非常有限的,不可能取无穷大。式(9)和图 6 表明随压榨时间增大,蠕变速率迅速减小,达到一定值后,蠕变速率曲线趋于水平。实际工程中,压榨时间可依据油料蠕变速率曲线选取一合适值,根据图 6,压榨时间大于某一值后,蠕变速率的进一步减小微乎其微,故可以认为压榨已达到平衡状态。芝麻、花生和碎花生平衡压榨时间见表 2。

表 2 平衡压榨时间

Table 2 Balance press time		/min				
压榨压力 $\sigma$ /MPa	10	20	30	40	50	60
芝麻	45	50	55	60	65	70
花生	55	60	65	70	75	80
碎花生	50	55	60	65	70	75

### 5 结论

芝麻、花生油料在压榨过程中表现出明显的非线性流变特性,模型的理论计算结果与蠕变试验结果吻合较好。采用模型理论与经验模型相结合的方法建立的非线性粘弹塑性模型,能较好的表征芝麻、花生的物理质构特征,并能较好描述芝麻、花生流变特性。文献[2]和本文研究结果表明,非线性粘弹塑性模型用于模拟油料的蠕变与液压榨油机压榨过程,有较好的普适性。油料蠕变速率曲线可方便确定各级压榨应力下,油料压榨达到平衡状态所需的压榨时间,为液压榨油机设计和实际压

榨操作提供依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 郑晓, 李智, 林国祥, 等. 菜籽与脱皮菜籽冷榨的应力应变关系研究[J]. 农机化研究, 2004, 6: 187-189.
- [2] 郑晓, 林国祥, 李智, 等. 菜籽与菜籽仁的非线性粘弹塑性本构模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 88-91.
- [3] 谢宁. 土流变试验设计及有关问题研究[J]. 云南工学院学报, 1994, 10(4): 76-82.
- [4] 郑榕明, 陆浩亮, 孙钧. 软土工程中的非线性流变分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 1-13.
- [5] 詹美礼, 钱家欢, 陈绪禄. 软土流变特性试验及流变模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 54-62.
- [6] 冯紫良, 范厚彬. 软土流变试验的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2003, 31(4): 379-382.
- [7] 张玉生. 流变模型有限元粘塑性参数的推定与应用[J]. 结构工程师, 2002, 1: 31-35.
- [8] 郑晓, 李智, 林国祥, 等. 基于Hopfield神经网络的油菜籽脱皮冷榨压榨系数识别[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 125-129.
- [9] 肖任贤, 许志华, 陈涛. 陶瓷粉料恒压型理论的流变学探讨[J]. 中国陶瓷工业, 2001, 8(3): 1-5.
- [10] 许宏发, 钱七虎, 吴华杰, 等. 确定软土流变模型参数的回归反演法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 265-267.
- [11] 任学平, 王尔德, 霍文灿. 粉末体的屈服准则[J]. 粉末冶金技术, 1992, 10(1): 8-12.
- [12] 任学平, 王尔德, 霍文灿, 等. 粉末体屈服准则的实验验证[J]. 锻压技术, 1991, 16(2): 13-16.
- [13] 郑晓, 林国祥, 王少梅. 菜籽与菜籽仁散粒体的压榨塑性模型[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(6): 802-806.
- [14] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [15] 李智. 改进的模拟退火算法在原料矿混匀优化中的运用[J]. 矿业研究与开发, 2003, 5: 40-42.
- [16] 许宏发, 钱七虎, 吴华杰, 等. 确定软土流变模型参数的回归反演法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 365-367.

## Nonlinear viscous-elastic-plastic model and creep simulation of sesame and peanut

Zheng Xiao, Lin Guoxiang, Yin Fang, You Yan

(Department of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** By combined use of theoretical model with empirical model, the nonlinear viscous-elastic-plastic model of sesame and peanut was developed on the basis of the rheological test. The parameter inversion of constitutive model, using improved simulated annealing, was carried out. Numerical simulation of creep of sesame and peanut was carried out. Greatest relative deviation below 5.7% between the experimental and predicted values of the strain indicates that the nonlinear viscous-elastic-plastic constitutive model can simulate rheological behaviors of sesame and peanut well. The press time for balance of sesame and peanut was selected by using curves of creep rate.

**Key words:** nonlinearity; viscous-elastic-plasticity; rheological property; sesame; peanut