

## 棉籽和蓖麻籽的冷榨试验与数值模拟

郑 晓, 林国祥, 游 燕, 王经州  
(武汉工业学院机械工程系, 武汉 430023)

**摘 要:** 探讨棉籽和蓖麻籽植物油料的冷榨应力-应变关系、应力-压缩比关系以及加载速率对应力-应变关系和应力-压缩比关系的影响, 探讨临界压榨压力选取问题。进行了棉籽和蓖麻籽冷榨试验, 采用川北方程建立双曲线型应力-应变模型和压缩比的理论计算模型。研究表明, 加载速率对油料破碎应力、应变以及应力-应变关系有影响, 速率越大, 破碎应力和应变越大; 棉籽和蓖麻籽的模拟结果与实测值比较吻合。根据压缩比变化率及其斜率曲线近似确定出棉籽和蓖麻籽工程临界压榨压力分别为 70 MPa 和 100 MPa。

**关键词:** 棉籽; 蓖麻籽; 数值模拟; 应力-应变; 压缩比; 临界压榨压力

**中图分类号:** TS224.3

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-6819(2007)9-0260-05

郑 晓, 林国祥, 游 燕, 等. 棉籽和蓖麻籽的冷榨试验与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 260-264.

Zheng Xiao, Lin Guoxiang, You Yan, et al. Cold pressing experiment and numerical simulation of cottonseed and castor bean[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 260-264. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

植物油料冷态压榨具有诸多优点, 近年来广受人们的重视<sup>[1-3]</sup>。植物油料在冷榨过程中的应力-应变关系、应力-压缩比关系是植物油料冷榨试验与理论研究的重要内容, 两种关系模型的建立为渗透率、孔隙度和压榨微分方程等众多压榨理论研究课题提供了基础, 同时也为工程实际中榨油机榨腔结构设计以及参数选取提供可靠依据。采用一般的弹塑性理论难以建立符合实际的植物油料应力-应变关系模型, 或者建立的数学模型过于复杂, 不便实际工程应用<sup>[2-5]</sup>。对于旨在准确模拟实际压榨过程的压缩比的理论计算模型, 现有研究结果或是存在模型过于复杂、计算不便的问题, 或是模型与实际相差太大、计算精度不高<sup>[6,7]</sup>。文献[2-4]研究了菜籽和菜籽仁冷榨应力-应变关系、应力-压缩比关系以及加载速率对应力-应变关系和应力-压缩比关系的影响; 研究了花生、亚麻籽和芝麻压缩比理论计算模型。关于其他植物油料的冷榨应力-应变关系、应力-压缩比关系以及加载速率对应力-应变关系和应力-压缩比关系的影响研究目前尚未见文献报道。

本文研究的目的是通过侧限排油压榨试验, 探讨棉籽和蓖麻籽植物油料的冷榨应力-应变关系、应力-压缩比关系以及加载速率对应力-应变关系和应力-压缩比关系的影响, 探讨临界压榨压力选取问题。采用川北方程建立双曲线型应力-应变模型, 运用应力-应变关系模型建立压缩比的理论计算模型, 通过压缩比变化率及其斜率与压榨应力的关系曲线确定植物油料临界压榨压力值。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

试验用蓖麻籽产地湖北, 棉籽为国棉 284(大龄系), 产地山东, 棉籽和蓖麻籽分别经过 8 目和 4 目网筛筛分处理, 使其颗粒具有一定的均匀性。

#### 1.2 试验方法

运用自制的侧限排油一维压渗可视化试验装置<sup>[1-3]</sup>, 采用双面渗流压榨方式。采用等应力加载方式, 为了探讨加载速率对应力-应变关系的影响, 试验选择了 0.2、0.1、0.067 及 0.05 MPa/s 4 种不同的加载速率, 室温下进行压榨试验。每种油料共进行 4 次试验, 每次试验称取物料 30 g, 分别装入压榨室, 将试验装置置于材料试验机上, 利用材料试验机上的加载装置对试验装置上的活塞直接加载。材料试验机采用济南试验机厂生产的 WDW-300D 微机控制电子万能试验机。

定义压榨应力  $P$ 、轴向应变  $\epsilon$  和压缩比  $\epsilon_n$  分别为<sup>[2-4]</sup>

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

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

$$\epsilon_n = \frac{V_0}{V} = \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (3)$$

式中  $P$ ——压榨应力, MPa;  $\epsilon$ ——轴向应变;  $\epsilon_n$ ——油料压缩比;  $F$ ——作用在油料表面上的压力, N;  $A$ ——油料表面面积, mm<sup>2</sup>;  $H_0$ ——压榨起始时油料高度, mm;  $H$ ——对应  $P$  压榨应力下的油料高度, mm;  $V_0$ ——压榨前油料体积, mm<sup>3</sup>;  $V$ ——压榨后油料体积, mm<sup>3</sup>。

#### 1.3 模型描述

当忽略应力-应变突变, 可采用川北公夫的压力-体积应变双曲线型应力-应变关系模型建立植物油料的应力-应变关系模型<sup>[2-4,8-14]</sup>

$$\epsilon = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{abP}{1 + bP} \quad (4)$$

收稿日期: 2006-09-25 修订日期: 2007-09-07

基金项目: 湖北省教育厅重点科研计划项目(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, 主要研究方向为农产品加工设备设计理论与方法。武汉 武汉工业学院机械工程系, 430023。Email: zhengxiao580405@163.com

式中  $a, b$ —— 待定模型参数, 由压榨试验确定。

根据应力-应变关系模型以及压缩比的定义式可得植物油料应力-压缩比关系计算模型<sup>[4]</sup>

$$\epsilon_v = \frac{1 + bP}{1 + (1 - a)bP} \tag{5}$$
$$\frac{d^2\epsilon_v}{dP^2} = \frac{2ab^2(1 - a)}{[1 + (1 - a)bP]^3} \tag{7}$$

对式(5) 进行一次和二次微分可分别得到压缩比变化率和变化率斜率计算模型<sup>[4]</sup>

$$\frac{d\epsilon_v}{dP} = \frac{ab}{[1 + (1 - a)bP]^2} \tag{6}$$

2 结果与分析

2.1 应力-应变结果与分析

应力-应变试验结果见图 1、表 1。

棉籽和蓖麻籽应力-应变试验表明, 油料的应力-应变均存在突变的一段曲线, 应力-应变突变表现为油料颗粒的屈服与破碎, 其中蓖麻籽的应力-应变突变现象比棉籽明显。应力-

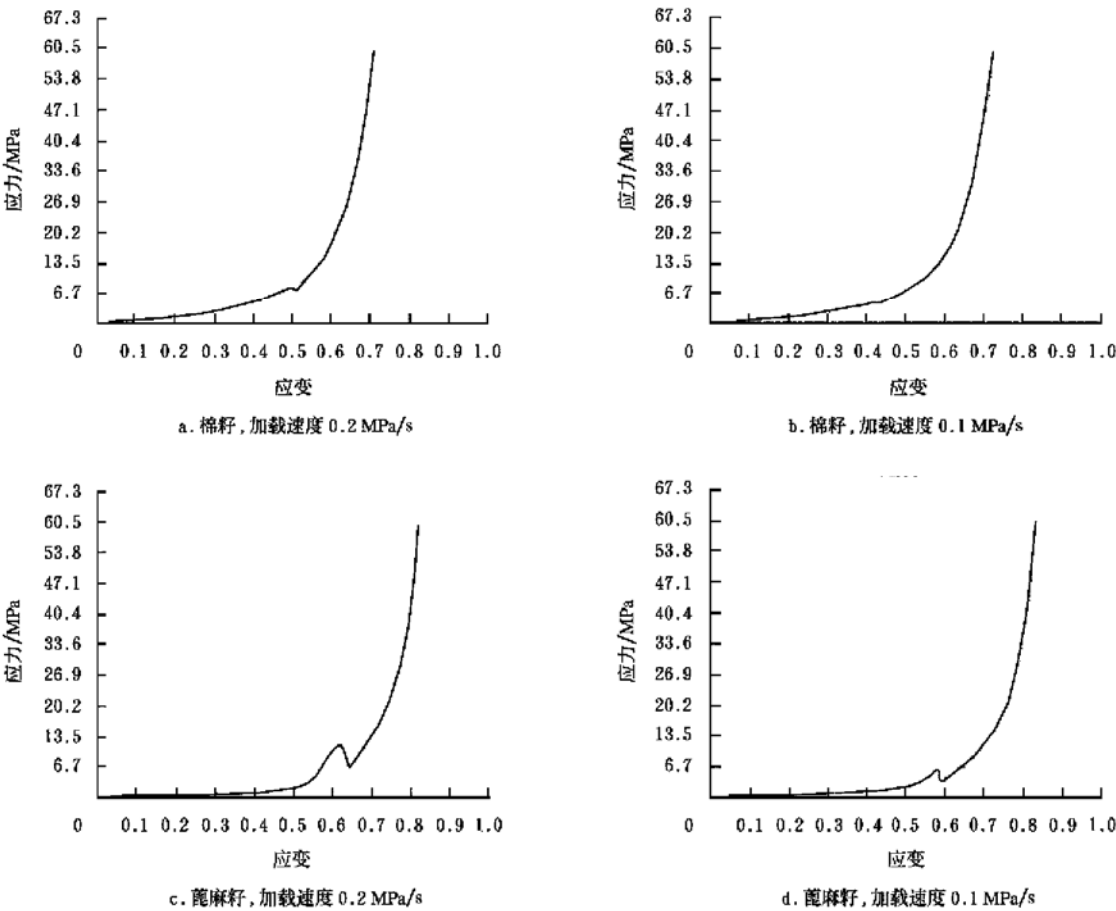


图 1 棉籽和蓖麻籽应力-应变曲线

Fig. 1 Results of stress-strain experiment of cottonseed and castor bean

表 1 应变试验结果

Table 1 Experimental results of strain

油料	加载速率 /MPa·s <sup>-1</sup>	压力 P/MPa						
		5	10	20	30	40	50	60
棉籽	0.2	0.4091	0.5367	0.6151	0.6534	0.6769	0.6941	0.7091
	0.1	0.4249	0.5483	0.6311	0.6695	0.6847	0.6995	0.7169
	0.067	0.4342	0.5515	0.6338	0.6704	0.6925	0.7086	0.7214
	0.05	0.4373	0.5523	0.6349	0.6712	0.6938	0.7099	0.7225
蓖麻籽	0.2	0.5605	0.6726	0.7387	0.7749	0.7965	0.8105	0.8214
	0.1	0.5848	0.6792	0.7453	0.7812	0.8031	0.8175	0.8280
	0.067	0.6068	0.6857	0.7573	0.7899	0.8086	0.8220	0.8312
	0.05	0.6152	0.6936	0.7646	0.7951	0.8122	0.8245	0.8335

应变突变的原因主要是棉籽和蓖麻籽等植物油料均由外皮壳和内仁核构成,一般外皮壳较坚硬,内仁核较软,表现出外硬内软。油料散体层中存在大量孔隙,壳仁间也存在空隙。当油料外皮壳破碎后,颗粒强度减小,散体层孔隙和壳仁间空隙迅速消失,散体层体积迅速减小,产生应力-应变突变。油料散体层孔隙和壳仁间空隙越大,壳仁强度差异越大,应力-应变突变也越大。蓖麻籽的皮壳较厚、较坚硬,颗粒尺寸较大、形状近似球状,散体层孔隙和壳仁间空隙均较大,因此蓖麻籽的应力-应变突变比棉籽应力-应变突变大,现象明显。加载速率对油料的破碎应力、应变以及压榨全过程应力-应变关系有影响,同种油料在不同的加载速率下的破碎应力和应变是不同的,速率越大,破碎应力和应变越大,而压榨全过程的应变则随加载速率的增加而减小。产生这种现象原因主要是当压力达到一定值时,往往是油料颗粒皮壳尚未破裂,油脂便从皮壳微孔渗出,流向散体层孔隙,油料散体层变成油液半饱和或饱和多孔介质,此后的变形主要受油液的渗流影响,根据渗流理论,液体在多孔介质中的渗流具有明显的时间效应,液体渗流量与渗流时间成正比,加载速率越大,渗流时间越短,液体渗流量越少,变形也越小,表现出来的位移变化量也越小,应变也越小。又由 Terzaghi 有效应力原理,作用在半饱和或饱和多孔介质上的应力等于作用在固相上的有效应力与孔隙流体压力之和。孔隙液体存量越多,孔压越大,有效应力则越小。决定颗粒皮壳破裂的压力是有效应力,因此,当颗粒的有效应力大于等于皮壳强度时,皮壳便破裂。由于加载速率越大,液体渗流量越少,孔隙流体存量越多,有效应力越小,要使皮壳破裂,必须施加更大的压榨应力,以使有效应力增加到大于等于皮壳强度,这就产生了加载速率越大,破碎所需压榨应力和应变越大现象。当压榨应力超过一定值时,应力-应变曲线变得陡峭,这表明此时油料散体层孔隙液体存量极少,油料结构变得

致密,进入了应变硬化阶段。这揭示出压榨时,油料出油主要集中在压榨的中段,后段出油较少。两种油料的压榨破碎应力和应变大小依次为蓖麻籽和棉籽,这与前面的分析一致。加载速率在 0.2~0.05 MPa/s 之间,棉籽和蓖麻籽的破碎应力和应变见表 2。

表 2 破碎应力和应变

Table 2 Broken stress and strain

加载速率 /MPa·s <sup>-1</sup>	棉 籽		蓖麻籽	
	破碎应力 /MPa	破碎应变	破碎应力 /MPa	破碎应变
0.2	8.06	0.500	11.80	0.625
0.1	4.50	0.425	8.10	0.615
0.067	3.35	0.355	6.60	0.575
0.05	3.15	0.325	4.47	0.567

根据棉籽和蓖麻籽应力-应变试验数据结果,采用最小二乘法可求得模型参数  $a$ 、 $b$ <sup>[15]</sup>,见表 3。

表 3 应力-应变参数

Table 3 Stress-strain parameters

加载速率 /MPa·s <sup>-1</sup>	参数 $a$		参数 $b$	
	棉 籽	蓖麻籽	棉 籽	蓖麻籽
0.2	0.7505	0.8641	0.2495	0.2988
0.1	0.7568	0.8695	0.2525	0.3175
0.067	0.7636	0.8728	0.2547	0.3319
0.05	0.7658	0.8745	0.2575	0.3459

当忽略应力-应变突变,运用双曲线型应力-应变模型(4)模拟棉籽和蓖麻籽冷榨应力-应变关系,结果见图 2。

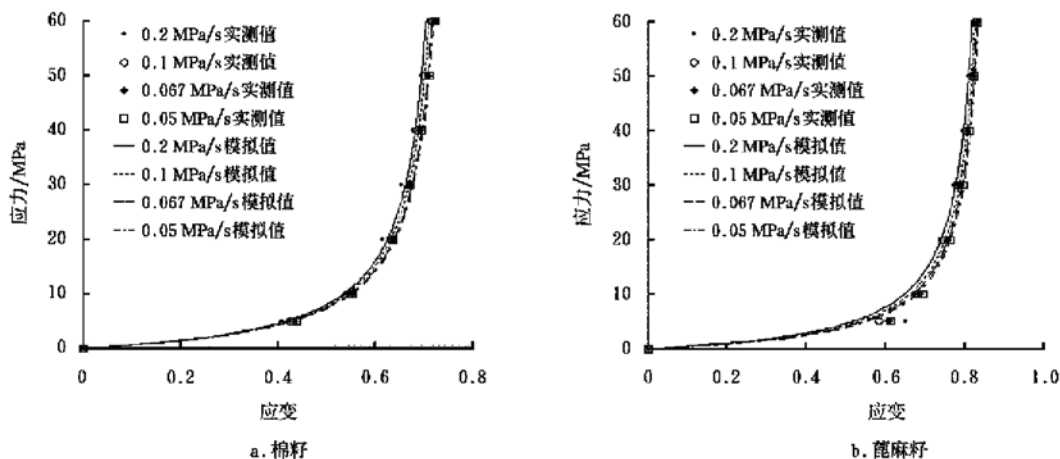


图 2 应力-应变模拟

Fig. 2 Stress-strain simulation

## 2.2 压缩比结果与分析

由式(3)计算得到棉籽和蓖麻籽的压缩比实测值见表 4。

运用式(5)计算出棉籽和蓖麻籽的压缩比理论值,并与实测值进行比较,结果见图 3。

图 3 表明,运用双曲线型应力-应变模型建立的植物油料压缩比理论计算模型能较好描述棉籽和蓖麻籽的压缩比。加载速率对油料压缩比有影响,同种油料,加载速率越大,压缩比越小。蓖麻籽的压缩比比棉籽大。

表4 压缩比实测值

Table 4 Experimental results of compression ratio

油料	加载速率 /MPa·s <sup>-1</sup>	压力 P/MPa						
		5	10	20	30	40	50	60
棉籽	0.2	1.69	2.16	2.60	2.89	3.10	3.27	3.44
	0.1	1.74	2.21	2.71	3.03	3.17	3.33	3.53
	0.067	1.77	2.23	2.73	3.03	3.25	3.43	3.59
	0.05	1.78	2.23	2.74	3.04	3.27	3.45	3.60
蓖麻籽	0.2	2.28	3.05	3.83	4.42	4.91	5.28	5.59
	0.1	2.41	3.12	3.93	4.57	5.08	5.48	5.81
	0.067	2.54	3.18	4.12	4.76	5.23	5.62	5.92
	0.05	2.60	3.26	4.25	4.88	5.32	5.70	6.01

运用式(6)、(7)分别模拟棉籽和蓖麻籽压缩比变化率及其斜率,结果见图4、5。

### 2.3 工程临界压榨压力选取

在一定条件下,植物油料压榨存在一极限,压榨最后,油料进入不可压缩阶段。不可压缩阶段起始点的压力称为临界压榨压力,理论上不可压缩阶段意味油料已是致密的连续介质,此时

的压缩比变化率曲线趋于水平,压缩比变化率斜率值趋于零。理论上当压榨压力趋无穷大时,压缩比变化率及其斜率趋于无穷小,由此得出,理论临界压榨压力应为无穷大。然而实际压榨压力是非常有限的,实际压榨中油料饼或多或少存在一定残油量和孔隙。目前还没有一个油料压榨临界压榨压力的取值标准及方法,作者提出采用实际压缩比变化率及其斜率选取工程实际临界压榨压力的两种方法<sup>[4]</sup>。本文根据压缩比变化率斜率计算式和曲线,统一选取一极小的压缩比变化率斜率值 $2 \times 10^{-4}$ 作为油料临界压榨压力的取值标准,按公式(7)计算,压榨压力为70 MPa时,棉籽的压缩比变化率斜率值为 $1.516 \times 10^{-4} \sim 1.671 \times 10^{-4}$ ;压榨压力为100 MPa时,蓖麻籽的压缩比变化率斜率值为 $1.618 \times 10^{-4} \sim 1.724 \times 10^{-4}$ 。对于棉籽和蓖麻籽,当压榨压力分别大于70和100 MPa时,压榨压力对压缩比的影响已可忽略不计,可认为油料已进入不可压缩阶段。这从图5可直观看出,压榨压力分别大于70、100 MPa时,棉籽和蓖麻籽的压缩比变化率斜率曲线趋于水平,表明压榨进入该阶段后,油料进一步压缩将非常有限,因此,可以认为一般条件下,棉籽和蓖麻籽的工程临界压榨压力可分别近似取为70和100 MPa。

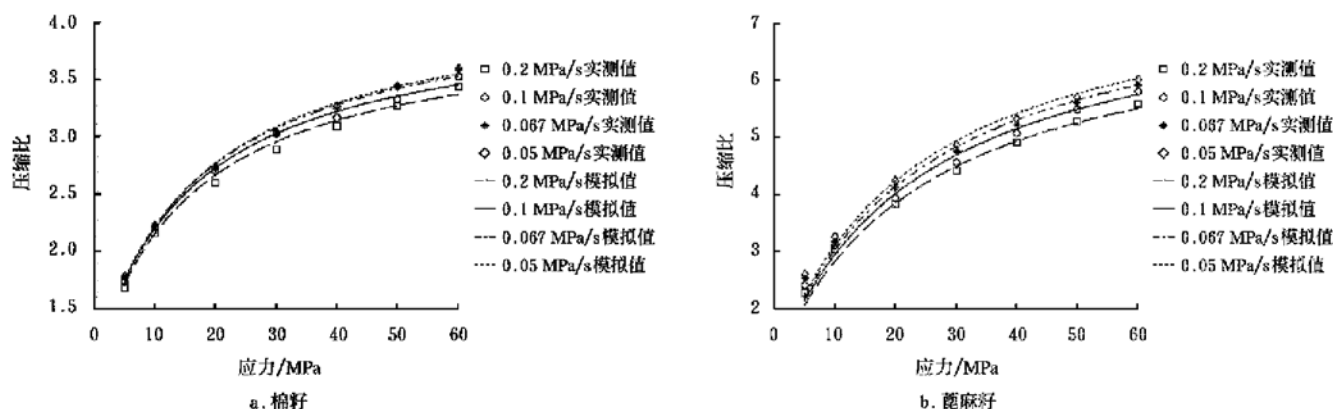


图3 压缩比模拟值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between simulated and measured value compression ratio

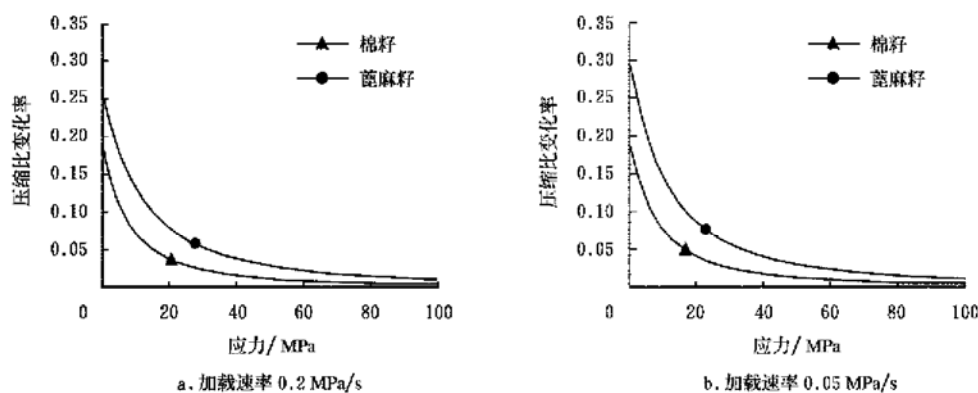


图4 压缩比变化率曲线

Fig. 4 Variation rate curves of compression ratio

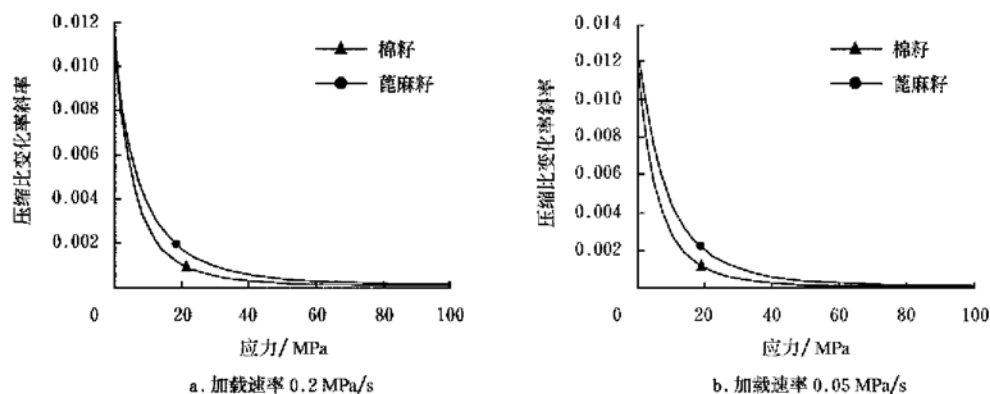


图5 压缩比变化率斜率曲线

Fig. 5 Slope curves of variation rate of compression ratio

### 3 结论

加载速率对油料破碎应力、破碎应变、应力-应变关系以及应力-压缩比关系均有影响,在相同压榨应力下,速度越大,破碎应力和应变越大,应变和压缩比随加载速率的减小而增加。采用川北方程建立的双曲线型应力-应变关系模型以及压缩比理论计算模型能较好描述棉籽和蓖麻籽冷榨应力-应变关系和应力-压缩比关系,根据压缩比变化率及其斜率曲线可近似确定棉籽和蓖麻籽植物油料冷榨的工程临界压榨压力分别为 70 和 100 MPa。油料破碎应力、破碎应变、应力-应变关系和应力-压缩比的试验与数值模拟研究为榨油机设计提供依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 郑 晓,李 智,林国祥,王少梅.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.
- [2] 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.
- [3] 郑 晓,李 智,林国祥,等.侧限单面渗流冷榨下的菜籽应力应变关系反演[J].粮油加工与食品机械,2004,(9):44-47.
- [4] 郑 晓,林国祥,尹 芳,等.植物油料实际压榨比计算模型与数值

模拟[J].农业机械学报,2006,37(8):11-15.

- [5] 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.
- [6] 雕鸿荪.油料预处理及压榨工艺学[M].南昌:江西科学技术出版社,1985.
- [7] 倪培德.压榨法取油及有关理论问题[J].油脂科技,1982,(5):27-42.
- [8] 魏汝龙.土的强度和变形[M].北京:人民交通出版社,1987.
- [9] 魏汝龙.从实测沉降过程推测固结系数[J].岩土工程学报,1993,15(2):12-19.
- [10] 徐少曼.饱和粘土地基沉降量计算的规一化曲线法[J].岩土工程学报,1987,9(4):70-77.
- [11] 黄培云,金展鹏,陈振华.粉末冶金基础理论与新技术[M].长沙:中南大学出版社,1995.
- [12] 吴成义,张丽英.粉体成形力学原理[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [13] 葛荣德.川北公夫粉末压制方程应用中的几个问题及方程的修正[J].粉末冶金技术,1993,11(2):90-94.
- [14] 郭康权,佐竹隆显,吉崎繁.农林废弃物粉碎后的压缩特性[J].农业工程学报,1994,11(增刊):140-145.
- [15] 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.

## Cold pressing experiment and numerical simulation of cottonseed and castor bean

Zhena Xiao, Lin Guoxian, You Yan, Wana Jinazhou

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

**Abstract:** The experiments of cold pressing of cottonseed and castor bean were carried out to study the stress-strain relationship and the stress-compression ratio relationship. The effects of rate of applied pressure on the stress-strain relationship and the stress-compression ratio relationship were investigated. The methods of identification of critical pressing pressure were proposed. Hyperbolic stress-strain model and calculative model of compression ratio of oil plant were developed on the basis of the Kawakita's Equation. The results of the experiments indicate that effects of rate of applied pressure on the broken stress and strain and stress-strain relationship are obvious, the broken stress and strain increase with increasing rate of applied pressure. The simulated results of cottonseed and castor bean coincide with those from experiments. By using of variation rate and slope curves of realistic compression ratio, 70 MPa and 100 MPa are defined as the critical pressing pressure of cottonseed and castor bean respectively.

**Key words:** cottonseed; castor bean; numerical simulation; stress-strain; compression ratio; critical pressing pressure