

基于松弛试验的光皮树果实冷态压榨流变模型

刘汝宽^{1,2}, 肖志红¹, 张爱华¹, 李培旺^{1,3}, 张良波¹, 李辉¹, 李昌珠^{1,3*}

(1. 湖南省林业科学院生物能源研究所, 长沙 410004; 2. 中南大学化学化工学院, 长沙 410083;
3. 湖南省生物柴油工程技术研究中心, 长沙 410004)

摘要: 该文以研究光皮树果实冷榨制油过程中的流变特性为目标, 利用自制直筒式压榨试验装置进行不同压榨应变水平的应力松弛试验, 基于岩石流变基本模型分段模拟应力应变关系, 建立其流变模型并进行验证。结果表明: 光皮树果实加载过程中应力应变关系呈现线性和非线性两部分, 屈服应变为 0.4, 应力松弛量随着压榨应变的增大而增大。采用分段模拟建模分析, 并确定相应的模型参数。首先利用弹性元件和阻尼器组合而成的广义 Maxwell 模型模拟线性段松弛过程, 再利用线性与川北公夫模型叠加共同模拟非线性段松弛过程, 构建了直筒式冷态压榨的流变模型, 并进行了参数求解。误差分析表明: 应变为 0.5 时, 相对误差较大; 而实际压榨过程中光皮树果实压榨应变均大于 0.55, 在此段应变范围内的模型平均相对误差均在 7%之内, 因此该模型为研究光皮树果实直筒式冷态压榨设备时应力应变参数的选取提供基础数据。

关键词: 油脂; 应力松弛; 模型; 光皮树果实; 冷态压榨

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.037

中图分类号: TQ641

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0278-06

刘汝宽, 肖志红, 张爱华, 李培旺, 张良波, 李辉, 李昌珠. 基于松弛试验的光皮树果实冷态压榨流变模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 278—283. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.037 http://www.tcsae.org
Liu Rukuan, Xiao Zhihong, Zhang Aihua, Li Peiwan, Zhang Liangbo, Li Hui, Li Changzhu. Rheological model for swida wilsoniana fruits in process of cold pressing based on stress-relaxation tests[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 278—283. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.037 http://www.tcsae.org

0 引言

光皮树 (*Swida wisoniana* (Wanger.) Sojak) 别名光皮栳木、斑皮抽水树, 是一种优良的木本油料树种, 根据地域的不同其果实含油率约为 30%~36%^[1], 在湖南、江西和贵州等地的资源量约为 160 万 t, 是国家重点支持发展的木本油料之一 (国办发[2014]68 号)。光皮树果实油具有较大的食用价值^[2-3], 同时亦可以作为生物柴油的生产原料^[4]。光皮树果实全果含油, 可采用压榨或者浸提的方式制油^[5-6], 限于目前光皮树种植面积及果实采收资源量, 采用机械压榨法制油, 既经济又方便。

机械压榨法中, 直筒式压榨则是机械压榨的基础^[7]。目前, 国内外相关学者在油料力学特性方面取得了一些研究成果, P.C. Bargale 等^[8]研究了大豆等出油率和压榨时间的关系, 给出保压过程中孔隙流体压力模型, 但未给出其流变模型; 郑晓等^[7,9-10]基于蠕变试验建立了菜籽、

花生和芝麻的非线性黏弹塑性模型, 但该模型并不适用于松弛试验中光皮树果实油料的流变特性; 同时由于植物油料在压榨过程变形速度较大, 保压过程中压力波动较大, 大部分万能试验机很难进行精确的保压。而在流变试验中应力松弛试验和蠕变试验是等价的^[11], 且恒定应变较好控制。

针对光皮树果实冷态压榨过程, 将油料散体视为多孔介质, 其受压过程中重新排列以及多孔介质孔隙结构的变化将导致光皮树果实油料散体非线性变形, 而这种非线性变形与压榨应力和压榨时间相关^[7]。因此, 光皮树果实油料散体可视为非线性流变体。本文根据光皮树果实应力松弛试验结果, 利用半理论半经验法^[12-13]建立光皮树果实直筒式压榨非线性流变模型, 以为光皮树果实制油技术的开发提供基础数据支撑。同时, 研究光皮树果实机械压榨制油过程中果实压榨流变特性, 对认识机械压榨过程、开发专用压榨装备具有指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验设备与材料

光皮树果实 (自然干燥, 含油率 30.15%、含水率 8.96%、蛋白质质量分数为 5.38%、淀粉质量分数为 12.22%、纤维素质量分数为 14.18%, 除含水率指标外均为干基含量): 湖南省林业科技示范园。

双视窗单轴压榨试验装置 (图 1), 自制, 内径为 40 mm; 液压自动加载保压试验机 (WEW-600b): 上海

收稿日期: 2015-03-17 修订日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31470594); 国家林业行业公益性行业专项 (201304608)。

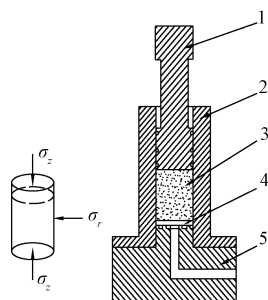
作者简介: 刘汝宽, 男, 山东省滕州市人, 助理研究员, 博士, 2014 年赴意大利费德里克二世国王大学进修, 主要从事工业油料资源能源化利用技术研究。长沙, 湖南省林业科学院生物能源研究所, 410004。

Email: liurukuan@gmail.com

*通信作者: 李昌珠, 男, 湖南省道县人, 研究员, 博士, 主要从事生物质能技术研究。长沙, 湖南省林业科学院, 410004。

Email: lichangzhu2013@aliyun.com

和晟仪器科技有限公司，用于对试验装置加载，上位工控机用于读取实时压力值和活塞杆位移。



注：\$\sigma_z\$ 为轴向应力；\$\sigma_r\$ 为径向应力。
Note: \$\sigma_z\$ is axial stress; \$\sigma_r\$ is radial stress.

1. 柱塞；2. 榨筒；3. 油料；4. 透水石；5. 底座
1. Piston; 2. Barrel; 3. Oil seeds; 4. Permeable stone; 5. Base

图 1 单轴压榨试验装置

Fig.1 Experimental device for pressing

1.2 试验方法

1.2.1 力学特性试验

取一定量的光皮树果实，装入压榨试验装置内，装填高度^[12]为 115 mm。利用电子万能试验机对直筒式压榨试验装置进行加载，加载速度 18 mm/min，设置上位机采样频率为 10 Hz，利用上位机读取万能试验机的压力值和柱塞的位移值。

1.2.2 应力松弛试验

取一定量的光皮树果实，装入压榨试验装置内，装填高度为 115 mm。将试验装置放入电子万能试验机上，在上位机上设置万能试验机为位移控制，根据力学特性试验结果选定 0.3 为初始应变水平，加载位移为：\$0.3 \times 115 = 34.5\$ mm，应变保持时间 15 min。然后开始加载，在进入保持应变水平后，每间隔 30 s 读一次压力值。同理，再取 4 组光皮树果实进行压榨试验，使每组试验分别达到 0.4、0.5、0.55、0.6 的应变水平，同样并保持各应变水平 15 min，每间隔 30 s 读取电子万能试验机的压力值，即可得到不同压榨应变下光皮树果实松弛过程中的应力变化。

1.3 试验结果分析处理

根据轴向应力 \$\sigma\$ (MPa) 与轴向应变 \$\varepsilon\$ 的定义，有：

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

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

式中：\$F\$ 为电子万能试验机所施加的压力值，kN；\$D\$ 为柱塞直径，40 mm；\$H_0\$ 为压榨前光皮树果实的原始高度，115 mm；\$\Delta H\$ 为直筒式压榨试验装置柱塞位移，mm。

2 结果与分析

2.1 加载过程应力应变关系与松弛分析

2.1.1 加载过程中的应力应变关系

将加载过程中柱塞位移和压力值及松弛过程中的压力值变化代入式 (1) 和 (2)，得到加载过程中应力应

变关系曲线，图 2 为加载过程中应力应变关系。

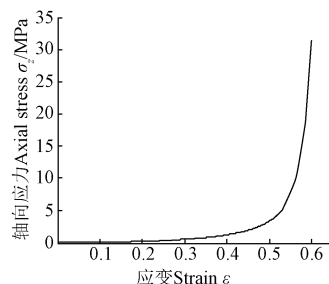


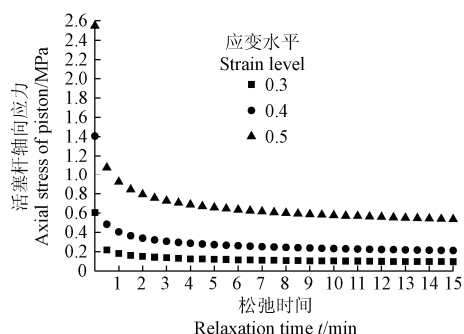
图 2 光皮树果实加载过程中应力应变关系

Fig.2 Relationship between stress and strain of loading process for *Swida wilsoniana* fruits

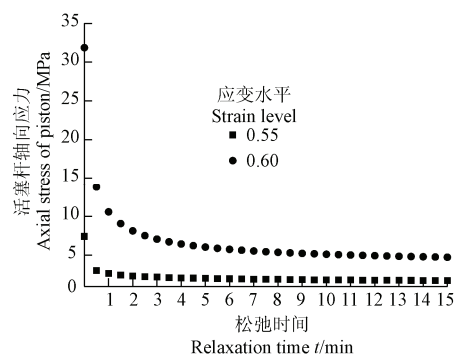
由图 2 可看出，压榨过程中光皮树果实在应变小于 0.4 时，应力与应变基本是线性关系；应变大于 0.4 时，呈现出非线性。这是由于应变在 0.4~0.6 之间，果实开始破裂并发生塑性变形，由于油脂不能及时从榨筒中流出而加快了应力的增加速度，因此轴向应力与应变呈现近似的幂次增长关系；根据此现象及其屈服过程^[12]，可选取光皮树果实直筒压榨的屈服应变 \$\varepsilon_s\$ 为 0.4。

2.1.2 加载过程中的应力松弛曲线

同理，将加载过程中柱塞位移和压力值及松弛过程中的压力值变化代入式 (1) 和 (2)，得到加载过程中光皮树果实压榨过程应力松弛变化趋势，如图 3。



a. 应变水平为 0.3、0.4、0.5
a. Levels of strain were 0.3, 0.4 and 0.5



b. 应变水平为 0.55、0.60
b. levels of strain were 0.55 and 0.60

图 3 光皮树果实加载过程中的应力松弛试验结果

Fig.3 Results of strain-stressing relaxation of *swida wilsoniana* fruits in loading process

由图 3 可看出，应力松弛量（保压阶段始末活塞杆

轴向应力变化差值)随着压榨应变的增大而增大,尤其在应变大于 0.5 以后,这是由于应变大于 0.5 以后,光皮树果实已经破裂出油,且压榨应变越大,出油量越大,因此松弛量也越大。

2.2 压榨过程中的流变模型及参数求解

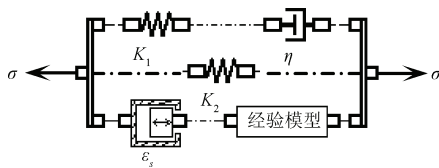
2.2.1 流变模型的建立

由图 2 和图 3 可知,加载过程中应力应变呈现线性和非线性两部分,应对其进行分段模拟,对于线性部分,根据胡克定律,在线性部分利用弹性体进行模拟;而对于非线性部分,可近似看作线性与纯非线性的叠加,参照粉体压榨过程^[12-14],可利用川北公夫双曲线模型^[15-16]进行模拟其纯非线性。据此可得到加载过程中应力应变模型为:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} K\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ K\varepsilon + \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{a - b(\varepsilon - \varepsilon_s)} & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 为线性阶段光皮树果实弹性模量, MPa; a 、 b 为川北公夫模型参数; ε 为轴向应变; ε_s 为屈服应变。

结合应力松弛试验及岩土流变模型的研究方法,广义 Maxwell 模型能较好模拟木材等固体材料的松弛过程^[17-19],在此利用弹性元件和阻尼器模组合而成的广义 Maxwell 模型模拟线性段松弛过程,利用线性与川北公夫模型叠加共同模拟非线性段松弛过程,构建得到以下松弛模型:



注: K_i 为弹性模量; η 为黏性系数, MPa·min; ε_s 为屈服应变; σ 为轴向应力, MPa。

Note: K_i for modulus of elasticity; η for viscosity coefficient, MPa·min; ε_s for critical yield strain; σ for axial stress.

图 4 光皮树果实应力松弛试验的流变模型

Fig.4 Rheological model of strain-stressing relaxation of swida wilsoniana fruits

图 4 中 ε_s 为理想滑块模型的屈服应变,当应变值小于 ε_s 时,经验模型未承受外力,该支路未起作用,此时图 4 所示模型为广义 Maxwell 模型;当应变值大于 ε_s 时,经验模型起作用,与线性模型叠加共同模拟。设图 4 中 K_1 对应的支路应力为 σ_1 , K_2 对应的支路应力为 σ_2 , 该两线性支路并联得到的广义 Maxwell 模型同样为线性;设经验模型对应的非线性支路应力为 σ_{JM} , 由并联应力叠加原理^[20]可得图 4 所示系统总应力:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{JM} \quad (4)$$

式中: σ_1 为 K_1 对应的支路应力, MPa; σ_2 为 K_2 对应的支路应力, MPa; σ_{JM} 为非线性对应的支路应力, MPa。

2.2.2 模型参数求解

由式 (3) 和图 4 可知,模型在应变小于屈服应变时,模型只由广义 Maxwell 模型构成,可利用线性段试验数据反求参数;当应变大于屈服应变时,经验模型与广义

Maxwell 模型共同作用,可利用并联应力叠加原理求得经验模型应力值,从而反求出模型参数值。

1) 线性支路参数的求解

由图 4 知,广义 Maxwell 模型由 Maxwell 模型和弹性体并联而成,据其各自本构方程^[20-21]得到:

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sigma_1 + \sigma_2 = K_1 \varepsilon e^{-\frac{K_1 t}{\eta}} + K_2 \varepsilon = K(t) \varepsilon \quad (5)$$

式中: $K(t)$ 为 t 时刻的松弛模量, MPa; t 为时间, min; η 为黏性系数, MPa·min; ε 为轴向应变; K_1 、 K_2 为对应支路的松弛模量, MPa。

可见线性支路应力应变关系由松弛模量决定,而松弛模量 $K(t)$ 即为线性部分(应变小于 0.4 段)不同时刻应力应变关系对应的斜率。根据实际压榨过程,当应力为 0 时应变也为 0, 据此对不同时刻线性部分数据进行拟合,得到如表 1 所示的不同时刻的线性斜率。

表 1 不同时刻线性段拟合斜率
Table 1 Linear fitting slope at different time

时间 Time/min	拟合斜率 Fitting slope	相关系数 Correlation coefficient	时间 Time/min	拟合斜率 Fitting slope	相关系数 Correlation coefficient
0.5	1.0360	0.9430	8.0	0.5206	0.9400
1.0	0.8665	0.9434	8.5	0.5140	0.9411
1.5	0.7785	0.9411	9.0	0.5072	0.9403
2.0	0.7241	0.9400	9.5	0.5015	0.9415
2.5	0.6867	0.9406	10.0	0.4977	0.9437
3.0	0.6566	0.9414	10.5	0.4916	0.9426
3.5	0.6318	0.9403	11.0	0.4876	0.9440
4.0	0.6105	0.9385	11.5	0.4817	0.9443
4.5	0.5950	0.9400	12.0	0.4761	0.9422
5.0	0.5807	0.9405	12.5	0.4715	0.9424
5.5	0.5688	0.9429	13.0	0.4673	0.9428
6.0	0.5552	0.9391	13.5	0.4643	0.9438
6.5	0.5456	0.9395	14.0	0.4605	0.9429
7.0	0.5346	0.9380	14.5	0.4576	0.9443
7.5	0.5286	0.9404	15.0	0.4545	0.9444

由上表可看出,相关系数均在 0.9 以上,可见拟合满足线性要求。且根据式 (6) 可知:

$$K(t) = K_1 e^{-\frac{K_1 t}{\eta}} + K_2 \quad (6)$$

将表 1 中拟合斜率值代入上式,进行非线性回归,可得到线性支路参数值:

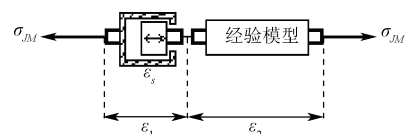
$$K_1 = 2.4149 \text{ MPa}$$

$$K_2 = 0.5434 \text{ MPa}$$

$$\eta = 0.8993 \text{ MPa} \cdot \text{min}$$

2) 非线性阶段经验模型

将图 4 中经验模型支路分离出来,如图 5 所示。



注: ε_1 为线性段应变; ε_2 为非线性段应变; ε_s 为屈服应变; σ_{JM} 为非线性对应的支路应力, MPa。

Note: ε_1 for linear strain; ε_2 for nonlinear strain; ε_s for critical yield strain; σ_{JM} for branch stress in nonlinear process, MPa.

图 5 经验模型支路

Fig.5 Branch of empirical model

由图 5 可知，当达到屈服后有：

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_s \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： ε_1 为线性段应变； ε_2 为非线性段应变； ε_s 为屈服应变。

由表 1 中流变试验结果可知，松弛过程中某一时刻的应力值等于 0 时刻应力值与该时刻应力松弛量之差，即可设：

$$\sigma_{JM}(\varepsilon, t) = \sigma_{JM0}(\varepsilon) - \sigma_{JMt}(\varepsilon, t) \quad (8)$$

式中： σ_{JM0} 为 $t=0$ 瞬时应力值， σ_{JMt} 为 t 时刻对应的应力松弛值，MPa。

根据式 (3)，可知 σ_{JM0} 即为保持应变过程中不同应变下对应的初始值，因此有：

$$\sigma_{JM0}(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_2}{a - b\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{a - b(\varepsilon - \varepsilon_s)} \quad (9)$$

同时，由松弛试验及图 2 知，应力松弛量与时间呈现出幂函数关系，故可设 t 时刻应力松弛量为：

$$\sigma_{JMt}(\varepsilon, t) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{c - d(\varepsilon - \varepsilon_s)} t^n \quad (10)$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 为经验模型参数。

联立式 (4)、(5) 并代入表 1 中试验数据可得经验模型应力 $\sigma_{JM}(\varepsilon, t)$ 值，见表 2。

表 2 经验模型应力值

Table 2 Stress value of empirical model

时间 Time/ min	应力 Stress /MPa			时间 Time/ min	应力 Stress /MPa		
	应变为 0.5	应变为 0.55	应变为 0.6		应变为 0.5	应变为 0.55	应变为 0.6
0	1.0693	5.7800	30.0950	8.0	0.3289	1.5995	5.0468
0.5	0.4934	2.3851	13.0676	8.5	0.3221	1.5836	4.9757
1.0	0.5687	2.2579	10.1412	9.0	0.3156	1.5682	4.9089
1.5	0.5501	2.1403	8.7053	9.5	0.3102	1.5549	4.8504
2.0	0.5146	2.0370	7.7851	10.0	0.3047	1.5420	4.7963
2.5	0.4826	1.9610	7.1807	10.5	0.2999	1.5304	4.7453
3.0	0.4552	1.8954	6.7320	11.0	0.2967	1.5193	4.6976
3.5	0.4340	1.8427	6.3855	11.5	0.2903	1.5083	4.6550
4.0	0.4150	1.7991	6.1160	12.0	0.2863	1.4984	4.6140
4.5	0.3990	1.7628	5.8972	12.5	0.2826	1.4890	4.5761
5.0	0.3856	1.7295	5.7136	13.0	0.2783	1.4800	4.5390
5.5	0.3733	1.7018	5.5601	13.5	0.2742	1.4713	4.5042
6.0	0.3623	1.6766	5.4284	14.0	0.2704	1.4624	4.4723
6.5	0.3527	1.6552	5.3153	14.5	0.2666	1.4547	4.4436
7.0	0.3444	1.6353	5.2155	15.0	0.2635	1.4470	4.4129
7.5	0.3356	1.6150	5.1267				

由式 (8)、(10) 可知 $\sigma_{JM}(\varepsilon, t)|_{t=0} = \sigma_{JM0}(\varepsilon)$ ，即是表 2 中 $t=0$ 时刻数据，利用麦夸特算法非线性回归反求参数^[22-23]，可得到 a 、 b 的值： $a=0.0918$ 、 $b=0.4259$ 。

由式 (8) 可知，应力松弛量 σ_{JMt} 等于表 2 中 $t=0$ 时刻的瞬时应力值与其他非 0 时刻 t 应力值之差，由式 (10)

可知 σ_{JMt} 具有两自变量 t 、 ε ，为多元非线性函数，利用 1stOpt 软件多元非线性回归^[23-24]，可求解得 t 时刻应力松弛量方程参数值： $c=0.1577$ 、 $d=0.7399$ 、 $n=0.0911$ 。

综上所述，由式 (4) 可得光皮树果实压榨过程中的流变模型为：

$$\sigma(\varepsilon, t) = 2.4149\varepsilon e^{-\frac{2.4149}{0.8993}(\varepsilon - 0.4)} + 0.5434\varepsilon + \frac{\varepsilon - 0.4}{0.0918 - 0.4259(\varepsilon - 0.4)} - \frac{\varepsilon - 0.4}{0.1577 - 0.7399(\varepsilon - 0.4)} t^{0.0911} \quad (11)$$

2.3 模型验证

2.3.1 模型误差计算

同理，利用式 (11) 对各应变水平进行模拟，并将其与试验值对比，其相对误差见表 3。

表 3 模拟值与试验值误差对比

Table 3 Comparison of errors between simulation and experiment

应变水平 Strain level	最大相对误差 Maximum relative error/%	平均相对误差 Average relative error/%
0.50	44.84	40.67
0.55	10.48	5.86
0.60	15.78	6.85

由表 3 可知，应变为 0.5 时，相对误差较大，这是由于在该段光皮树果实发生破裂，刚压榨出油脂，应力发生突变，导致误差较大；而实际压榨过程中光皮树果实压榨应变均大于 0.55，在此段应变范围内的模型平均相对误差均在 7% 之内，因此该模型为研究光皮树果实直筒式冷态压榨设备时应力应变参数的选取提供基础数据。

2.3.2 模型验证

选取应变水平为 0.58，进行松弛试验；利用式 (11) 进行曲线拟合，并将其与试验值对比，如图 6 所示。

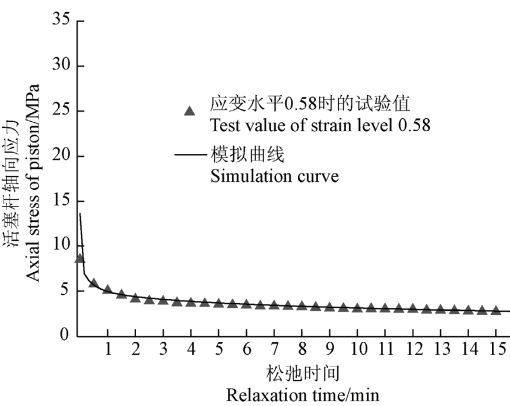


图 6 松弛试验与模型模拟值对比

Fig.6 Comparison of values between simulation and experiment

由图 6 知，应变水平为 0.58 时进行的松弛试验值与模型拟合曲线吻合较好，其平均相对误差为 6.24%，验证了模型的可靠性。

3 结 论

1) 光皮树果实加载过程中应力应变关系呈现线性和

非线性两部分,当应变小于 0.4 时,应力与应变基本是线性关系;而当应变大于 0.4 时,呈现出非线性关系。应力松弛量随着压榨应变的增大而增大。

2) 采用分段模拟建模分析,并确定相应的模型参数。首先利用弹性元件和阻尼器模组合而成的广义 Maxwell 模型模拟线性段松弛过程,再利用线性与川北公夫模型叠加共同模拟非线性段松弛过程,构建了直筒式冷态压榨的流变模型,并进行了参数求解。误差分析表明:应变为 0.5 时,相对误差较大;而实际压榨过程中光皮树果实压榨应变均大于 0.55,在此段应变范围内的模型平均相对误差均在 7%之内。

压榨压力仅仅是影响光皮树果实压榨制油效果的一个因素,其他因素有油料形态、内含物组成、压榨速度、温度等;同时,应变仅从形态变化的角度来反映光皮树果实压榨过程的表现形态变化,有一定的局限性,制油效果的主要考核指标是出油率或饼残油率,考察应力、应变与残油指标的关系是开展研究的重要方向。因此,需要综合多种因素的影响分析来建立适当的制油操作条件,最终实现冷态高效制油。

参 考 文 献

- [1] 刘汝宽,肖志红,姜莎,等. 近红外光谱法无损测定光皮树果实内含物含量[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 120—123.
Liu Rukuan, Xiao Zhihong, Jiang Sha, et al. Near-infrared spectroscopy destructive determination of *Swida wilsoniana* fruit Inclusion content[J]. Chinese Cereals and Oils Association 2014, 29(9): 120—123. (in Chinese with English abstract)
- [2] Liu Rukuan, Li Peiwan, Xiao Zhihong, et al. Research on parameters in cold pressing process of *swida wilsoniana* fruits and analysis of its oil[C]. International Conference on Energy and Manufacturing Technology. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [3] 肖志红,刘汝宽,李昌珠,等. 光皮树果实高效制油的低温压榨与正丁醇研磨浸提技术[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 54—59.
Xiao Zhihong, Liu Rukuan, Li Changzhu, et al. Combination technology of low temperature press and n-butanol grinding extraction for *swida wilsoniana* fruits oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association. 2014, 29(12): 54—59. (in Chinese with English abstract)
- [4] Zhang Liangbo, Xiao Zhihong, Li Peiwan, et al. Research on *Swida wilsoniana* for Biodiesel Production[J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy. 2015, 9: 78—81.
- [5] 李昌珠,肖志红,刘汝宽. 光皮树果实专用型螺旋冷榨机的压榨性能研究[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(2): 6—8.
Li Changzhu, Xiao Zhihong, Liu Rukuan. The pressing performance of spiral cold pressing machine for fruits from *Swida wilsoniana*[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2013, 40(2): 6—8. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李诗龙,刘协舫,张永林,等. 双螺杆冷榨茶籽油的中试生产[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 30—38.
Li Shilong, Liu Xiefang, Zhang Yonglin, et al. Pilot-plant-scale test of cold-pressed oil extraction with twin-screw pressing for *camellia* seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2014, 30(19): 30—38. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑晓. 油料压榨理论与试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Zheng Xiao. Research on Pressing Theory and Experiment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [8] Bargale P C. Mechanical Oil Expression from Selected Oilseeds Under Uniaxial Compression[D]. Canada: Department of Agricultural & Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, 1997.
- [9] 刘汝宽,施亮林,肖志红,等. 压榨时间和压力对蓖麻籽压榨性能的影响及其数学拟合研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 51—55.
Liu Rukuan, Shi Lianglin, Xiao Zhihong, et al. Effect of press time and press performance of castor seeds and its mathematical fitting[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association. 2014, 29(10): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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): 87—91.
Zheng Xiao, Lin Guoxiang, Li Zhi, et al. Nonlinear viscous-elastic-plasticity constitutive model of rapeseed and rapeseed kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 87—91. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [12] 黄志辉,杨星星,曹玉,等. 基于松弛试验的蓖麻籽压榨非线性流变模型[J]. 华南农业大学学报, 2015(2): 106—111
Huang Zhihui, Yang Xingxing, Cao Yu, et al. A nonlinear rheological model of castor pressing based on stress-relaxation tests[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015(2): 106—111. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄志辉,白鹏展,刘汝宽,等. 基于蠕变试验的蓖麻籽压榨非线性流变模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2015(1): 68—72.
Huang Zhihui, Bai Pengzhan, Liu Rukuan, et al. Nonlinear rheological model of castor pressing based on creep tests[J]. Journal of Shenyang Agricultural University. 2015, (1): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [14] 汪训流,陆新征,叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76—81.
Wang Xunliu, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of recolumns under cyclic loads[J]. Engineering Mechanics. 2007, 24 (12): 76—81. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
Ge Rongde. Several problems on application of Kawakita's powder compaction equation and its modification[J]. Powder Metallurgy Technology. 1993, 11(2): 90—94. (in Chinese with English abstract)
- [16] Rong-de G. A new powder compaction equation[J]. International journal of powder metallurgy. 1991, 27(3): 211—216.
- [17] 张贵科,徐卫亚. 适用于节理岩体的新型黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2894—2897.
Zhang Guike, Xu Weiya. Analysis of a new visco-elasto-plastic model for jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, 25(Supp.1): 2894—2897. (in Chinese with English abstract)

- [18] 冯上环, 赵有科. 木材应力松弛特性及其影响因素概述[J]. 木材加工机械, 2010(3): 37—40.
Feng Shanghuan, Zhao Youke. Summary of wood stress relaxation and its influencing factors[J]. Wood Processing Machinery, 2010(3): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈炳瑞, 冯夏庭. 黏弹塑性普适组合模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1028—1035.
Chen Bingrui, Xia Fengting. Universal viscoelastoplastic combination model and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1028—1035. (in Chinese with English abstract)
- [20] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] 王芝银, 云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [22] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]. Berlin Heidelberg: Springer. Numerical analysis, Lecture Notes in Mathematics. 1978: 105—116.
- [23] 李树平, 刘遂庆. 用麦夸尔特法推求暴雨强度公式参数[J]. 给水排水, 1999, 25(2): 26—29.
Li Shuping, Liu Suiqing. Application of the levenberg-marquardt method to determine the rainfall parameters[J]. Water & Waste after Engineering. 1999, 25(2): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王磊, 董国梁. 利用 1stOpt 软件优化设计重力式挡土墙断面[J]. 岩土工程技术, 2009(2): 72—74.
Wang Lei, Dong Guoliang. Optimum Design for cross-section of gravity retaining wall based on 1stOpt software[J]. Geotechnical Engineering and Technique, 2009(2): 72—74. (in Chinese with English abstract)

Rheological model for *swida wilsoniana* fruits in process of cold pressing based on stress-relaxation tests

Liu Rukuan^{1,2}, Xiao Zhihong¹, Zhang Aihua¹, Li Peiwan^{1,3}, Zhang Liangbo¹, Li Hui¹, Li Changzhu^{1,3*}

(1. Institute of Bioenergy, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China; 2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Hunan Engineering Research Centre for Biodiesel, Changsha 410004, China)

Abstract: *Swida wilsoniana* is one of the important woody oil plants supported by the State Council, mainly distributed in Hunan, Guizhou and Jiangxi Province, of which the whole fruits contain about 30% oils with high nutritional value. Mechanical pressing and solvent extraction are 2 major ways for fruit oil, and the lack of equipment for *Swida wilsoniana* fruits with the characteristics of hard core make it imperative to carry out this work. In order to study the rheological property of *Swida wilsoniana* fruits in cold pressing process, the stress relaxation tests under different loading strain levels were carried out by using the self-made straight cylinder pressing device. Based on the basic model of rock rheology, the relationship between the stress and strain was simulated, and its rheological model was established. The results showed that the relationship of stress and strain in the loading process of *Swida wilsoniana* fruits was divided into 2 parts which were defined as linear period and nonlinear period, and the critical yield strain was 0.4, meaning that the relationship between stress and strain was linear when the strain level was lower than 0.4 and was nonlinear as strain level was higher than 0.4. The amount of stress relaxation rose with the increase of pressing strain level, especially as the strain level was higher than 0.5, due to the oil bursting out of oilseeds, and the higher strain levels, the greater amount of oil, and the greater amount of stress relaxation. Segmented simulation was used to analyze and determine the parameters of the model. Firstly, the Maxwell model generalized by elastic element and damper mode was used to simulate the linear relaxation process. Then linear mode and the Kawakita's superposition model jointly simulated the process of nonlinear relaxation. Finally the rheological model was established and the parameters were obtained. Error analysis showed the application range and simulation effect. The relative error was large when the strain was 0.5 due to the rupture occurring in the period of loading, and the average relative errors were less than 7% when the strains were larger than 0.55, which could provide basic data of stress and strain parameters for squeezing process and special equipment. However, pressing pressure was only one of the pressing factors which would affect the pressing effect for *Swida wilsoniana* fruits. Other factors such as form of oilseeds, composition of main contents, pressing speed and temperature were also important factors influencing squeezing effect. Morphological change of *Swida wilsoniana* fruits was just a reflection for pressing, which had some limitations. The main evaluation index for pressing effect was the oil yield rate or residual oil of cake. So establishing the relationship between stress, strain and residual oil was an important direction of research. Therefore, a comprehensive analysis of the impact of various factors should be considered to establish an appropriate system for oilseed processing conditions, and to realize a cold and effective pressing technique for oil *Swida wilsoniana* fruits.

Key words: oil and fats ; stress relaxation; models; *Swida wilsoniana* fruits; cold pressing