

# 南美白对虾虾肉流变学模型的建立

李立杰, 柴春祥\*, 鲁晓翔

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134)

**摘 要:** 为了研究在真空微冻状态下南美白对虾虾肉流变学特性的变化, 以南美白对虾虾肉为原料进行应力松弛实验, 基于虾肉应力实验曲线特征提出了Burgers模型表征其黏弹性的流变模型, 获得其黏弹塑性模型参数, 并研究其变化趋势。结果表明: Burgers模型对实验曲线拟合的决定系数达到0.99以上, 能够较准确地表示南美白对虾虾肉的应力松弛现象。在贮藏后期, 虾肉的黏性和弹性模量有了明显下降, 且松弛时间( $\tau$ )具有规律性变化, 反映出虾肉随贮藏时间改变其肌肉组织状态及品质发生变化, 能够为其快速检测提供一种方法。

**关键词:** 南美白对虾; 流变; 应力松弛; Burgers 模型; 黏弹性

## Rheological Modeling of *Penaeus vannamei* Meat

LI Li-jie, CHAI Chun-xiang\*, LU Xiao-xiang

(Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**Abstract:** This study was conducted to examine the rheological changes of white shrimp (*Penaeus vannamei*) meat under vacuum partial freezing conditions using stress relaxation test. Based on the stress curve characteristics, Burgers rheological model was proposed to characterize the viscoelastic properties of shrimp meat. In addition, viscoelastic parameters were obtained from the model and changing trends were analyzed. The results showed that the rheological model, having a determination coefficient above 0.99, was able to accurately describe the stress relaxation characteristics of shrimp meat. The viscosity and elastic modulus were decreased obviously during the late storage stage, and regular changes in relaxation time ( $\tau$ ) were observed. Therefore, changes in shrimp muscle tissue and quality with storage time may provide experimental data for developing a rapid method to detect shrimp meat.

**Key words:** *Penaeus vannamei*; rheology; stress relaxation; Burgers model; viscoelastic modulus

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 11-0062-04

doi:10.7506/spkx1002-6630-201411013

水产品作为常见的食品原料, 其品质评定一直受到人们重视。目前, 感官评价结果主观性强, 可重复性差; 化学分析步骤繁琐, 并且属于破坏性检测<sup>[1]</sup>, 而利用检测对象的力学、光学、电磁学等物理性质, 在无需破坏样品的情况下对其品质进行快速、客观、准确的检测逐渐受到人们重视<sup>[2-7]</sup>。

食品的流变特性是其重要的物理特性之一, 在预测食品品质构特性和口感品质方面起到非常重要的作用<sup>[8]</sup>。国内外学者陆续进行了食品流变学性质的研究。高昕等<sup>[9]</sup>对鲍鱼在加工贮藏过程中的流变特性进行了研究, 发现鲍鱼的流变学参数能够反映内部成分、组织构造的变化等。马龙等<sup>[10]</sup>对酱牛肉进行应力松弛实验, 建立了流变模型, 获得应力、应变与时间的变化规律。Campus等<sup>[11]</sup>对高压

处理的海鲤肌肉进行流变特性测试, 发现流变参数随处理方式和贮藏时间的变化而发生改变。Herrero等<sup>[12]</sup>对冷冻贮藏的鳕鱼进行应力松弛实验, 用模型来拟合实验曲线, 得到松弛参数与感官指标具有高度的相关性, 表明这些松弛参数可以对冷冻鳕鱼质量进行评估。然而, 虾作为欢迎程度较广的食品之一, 人们对其黏弹塑性特征的研究却非常缺乏, 有必要进行深入探讨。本实验以鲜活南美白对虾为原料, 进行应力松弛实验, 提出了表征其非线性黏弹性的流变模型, 对虾肉流变学特性参数的变化进行研究探讨, 为虾品质快速检测提供客观依据。

虾肉水分含量较高, 同时含有大量的蛋白质, 肌肉组织较松软, 主要由肌原纤维蛋白组成<sup>[13]</sup>, 这就决定了虾肉既有黏性, 也有弹性。虾肉的黏弹性则可以用能够

收稿日期: 2013-07-20

基金项目: 天津市自然科学基金项目(11JCZDJC17800); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD38B01)

作者简介: 李立杰(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与贮藏。E-mail: jackieleellj@163.com

\*通信作者: 柴春祥(1971—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品品质的无损检测。E-mail: ccxiang@tjcu.edu.cn

同时反映黏性和弹性的模型来表示, 其中麦克斯韦模型 (Maxwell model) 和开尔芬模型 (Kelvin model) 是两种基本的黏弹性模型。

麦克斯韦模型由弹性 ( $E$ ) 元件和黏性 ( $\eta$ ) 元件串联而成 (图1), 此时模型的总应变为两元件的应变  $\varepsilon$  之和; 开尔芬模型是由弹性 ( $E$ ) 元件和黏性 ( $\eta$ ) 元件并联而成 (图2), 两元件的总应变都等于模型的总应变, 而模型的总应力为两元件的应力 ( $\sigma$ ) 之和, 这两个模型常被用来反映黏弹性物质的流变特性。

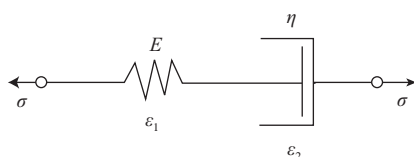


图1 Maxwell模型

Fig.1 Maxwell model

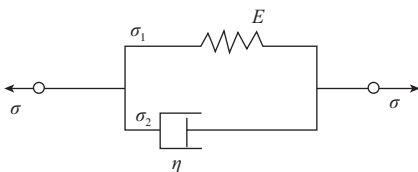


图2 Kelvin模型

Fig.2 Kelvin model

但是, 食品由脂肪、蛋白质、碳水化合物等物质组成, 属于复杂的黏弹性物质, 单独的Maxwell模型和Kelvin模型反映的流变过程函数比较简单, 不足以描述实际黏弹性物质的复杂流变性质<sup>[14-16]</sup>。所以, 对特殊的黏弹性材料, 常将多个基本元件组合成特定的模型。Burgers模型则是由Maxwell单元和Kelvin单元串联在一起, 组成的一种四元件的模型 (图3)。这一特殊组合使得其具有Maxwell和Kelvin模型的流变特性<sup>[17]</sup>。

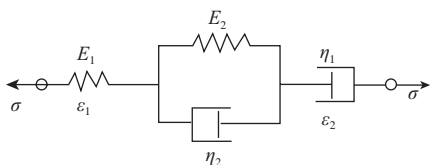


图3 Burgers模型

Fig.3 Burgers model

Burgers模型的本构方程为:

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_1 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon}$$

其中,

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t}, \quad \ddot{\sigma} = \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2}, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad \ddot{\varepsilon} = \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2}$$

$$p_1 = \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2}, \quad p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}, \quad q_1 = \eta_1, \quad q_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2}$$

Burgers模型应力松弛公式如下:

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{p_1^2 - 4p_2}} \left[ (q_1 - \alpha q_2) e^{-\alpha t} + (\beta q_2 - q_1) e^{-\beta t} \right] \quad (1)$$

其中,

$$\alpha = \frac{1}{2p_2} (p_1 - \sqrt{p_1^2 - 4p_2}), \quad \beta = \frac{1}{2p_2} (p_1 + \sqrt{p_1^2 - 4p_2})$$

式(1)中:  $\sigma(t)$  为物料承受的瞬时应力/Pa;  $\varepsilon_0$  为形变量/%。

通过公式计算可求出胡克体弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$  (N/mm<sup>2</sup>), 阻尼体的黏度模量  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  (N·s/mm<sup>2</sup>); 应力松弛时间  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ /s。其中,  $\tau = \eta/E$ <sup>[18]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

鲜活南美白对虾购于天津市北辰区水产市场, 每只体质量约为15 g。虾运至实验室, 先用碎冰块致死, 抽真空, 在-3℃条件下贮藏32 d并对其进行流变性质进行测定, 前8 d每隔2 d测定一次; 8~20 d每隔4 d测定一次; 后期每隔6 d测定一次。

### 1.2 仪器与设备

TA-XT2i型质构分析仪 英国Stable Micro Systems公司; BCD-268WBCS变温冰箱 青岛海尔公司; FA1104电子分析天平 上海精密科学仪器有限公司; DZQ550L真空充气包装机 杭州佑天元包装机械制造有限公司。

### 1.3 样品处理及探头选择

选取体长 (13±1) cm、质量 (15±1) g 的样品, 去头去皮, 采用TA-XT2i型质构分析仪进行应力松弛实验, 应力松弛压缩形变为30%。测试探头选用直径50 mm的P50平底柱形探头; 探头下降、测试和返回速率均为1 mm/s; 实验测试时间保持45 s; 数据采集速率: 500 Hz。

### 1.4 数据处理

应力松弛的实验数据用公式(1)拟合, 用Matlab软件来计算处理<sup>[19]</sup>, 从而得到有用的黏弹性参数, 来比较虾肉内部结构系统产生的变化, 为虾肉的贮藏品质评价提供依据。

## 2 结果与分析

### 2.1 虾肉的应力松弛实验

应力松弛是样品在恒定应变下, 应力随作用时间而减小的现象。虾肉的应力松弛实验曲线以贮藏2 d时的样品为例, 见图4。样品在30%压缩形变量下, 样品的应力不断发生变化, 开始变化速率很快, 之后逐渐变缓, 表明虾肉具有应力松弛现象。

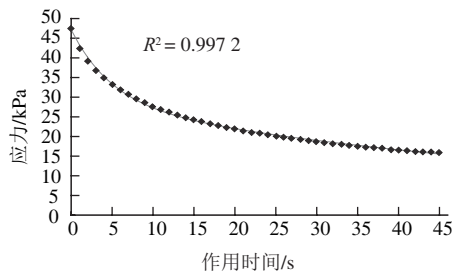


图4 南美白对虾贮藏2 d时的松弛实验曲线

Fig.4 Stress-relaxation curve of *Penaeus vannamei* on the second day of storage

在整个贮藏过程中虾肉样品的应力松弛实验曲线与图4类似,用Burgers模型的应力松弛方程进行拟合,曲线拟合度均达到0.99以上,说明此模型的应力松弛方程可以较好地描述虾肉的应力松弛现象。

## 2.2 应力松弛实验结果分析

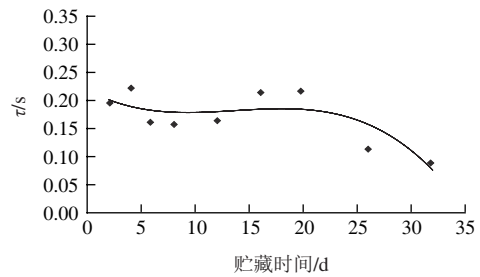
表1 南美白对虾在贮藏期间应力松弛参数的变化

Table 1 Stress-relaxation parameters of *Penaeus vannamei* during the storage period

贮藏时间/d	$E_1$ /kPa	$\eta_1$ /(kPa·s)	$\tau_1$ /s	$E_2$ /kPa	$\eta_2$ /(kPa·s)	$\tau_2$ /s
2	157.17±1.91 <sup>a</sup>	6 305.69±67.34 <sup>a</sup>	40.12±0.15 <sup>d</sup>	294.02±1.53 <sup>a</sup>	2 348.06±9.18 <sup>a</sup>	7.99±0.02 <sup>b</sup>
4	85.13±1.71 <sup>c</sup>	3 807.91±63.94 <sup>d</sup>	44.73±0.15 <sup>e</sup>	123.70±1.15 <sup>f</sup>	1 225.58±26.58 <sup>c</sup>	9.91±0.12 <sup>a</sup>
6	115.13±2.09 <sup>b</sup>	5 376.15±94.06 <sup>b</sup>	46.69±0.13 <sup>e</sup>	248.49±7.57 <sup>b</sup>	1 861.17±55.28 <sup>b</sup>	7.49±0.05 <sup>c</sup>
8	88.13±1.95 <sup>c</sup>	3 756.79±85.00 <sup>d</sup>	42.63±0.27 <sup>d</sup>	153.75±3.00 <sup>f</sup>	1 036.81±49.53 <sup>d</sup>	6.74±0.23 <sup>d</sup>
12	120.50±1.55 <sup>b</sup>	5 112.74±63.29 <sup>c</sup>	42.43±0.06 <sup>d</sup>	260.50±2.89 <sup>b</sup>	1 805.75±49.66 <sup>b</sup>	6.93±0.19 <sup>d</sup>
16	94.03±2.39 <sup>d</sup>	3 431.65±81.91 <sup>e</sup>	36.49±0.23 <sup>e</sup>	130.44±5.29 <sup>f</sup>	1 018.67±100.92 <sup>d</sup>	7.81±0.49 <sup>c</sup>
20	104.03±1.47 <sup>c</sup>	3 805.91±55.51 <sup>d</sup>	36.58±0.12 <sup>e</sup>	144.14±0.58 <sup>f</sup>	1 136.56±59.91 <sup>c</sup>	7.89±0.40 <sup>c</sup>
26	107.23±0.70 <sup>c</sup>	5 675.32±36.19 <sup>a</sup>	52.93±0.06 <sup>d</sup>	272.82±2.65 <sup>b</sup>	1 615.87±31.48 <sup>c</sup>	5.92±0.15 <sup>e</sup>
32	92.08±0.74 <sup>d</sup>	5 592.70±37.80 <sup>a</sup>	60.74±0.08 <sup>d</sup>	247.90±4.36 <sup>b</sup>	1 360.02±67.72 <sup>d</sup>	5.49±0.19 <sup>e</sup>

注: 同列小写字母不同,表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

由公式(1)拟合得出虾肉在贮藏过程中应力松弛的参数变化,见表1。随着贮藏时间的延长,应力松弛Burgers四元件模型中的弹性模量 $E_1$ 、 $E_2$ 和黏性模量 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 明显小于贮藏初期(第2天)样品且变化显著( $P < 0.05$ );松弛时间 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 的变化波动较大且均与贮藏初期相比均有显著性变化( $P < 0.05$ )。而松弛时间是应力松弛特性中重要的参数,表示应力松弛到起始应力 $\sigma_0$ 的1/e倍时所需要的时间,是黏性和弹性行为共同作用的结果。应力松弛时间和肌原纤维蛋白分子间的黏结力密切相关,松弛时间越长时,肌原纤维蛋白分子间黏结力越大,互相滑动所需的时间越长。松弛时间较短时,则黏结力变小,此时黏性形变也较明显<sup>[20]</sup>。但Burgers模型中有两个松弛时间,共同反映松弛特性的变化: $\tau_1$ 呈现先下降后上升的变化,而 $\tau_2$ 有缓慢下降趋势。为了清晰的反映虾肉在贮藏期间黏弹性的变化,对获得的应力松弛参数反复比较分析, $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 的比值( $\tau = \tau_2/\tau_1$ )可较好的表示虾鲜度的变化规律(图5)。虾肉在贮藏前期 $\tau$ 下降比较平缓,贮藏20 d后, $\tau$ 显著下降,这说明 $\tau$ 随贮藏时间的延长,有一定的规律性变化。

图5  $\tau$ 随贮藏时间延长的变化趋势Fig.5 Change in  $\tau$  during the storage period

## 2.3 模型的验证

通过应力松弛实验得到Burgers本构模型参数 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 和决定系数 $R^2$ ,结果如表2所示。所选Burgers模型的本构方程与实验测试结果之间具有较高的决定系数( $R^2 > 0.99$ ),即所选模型具有较高的合理性与可靠性,可以表示虾肉的黏弹性变化。

表2 南美白对虾贮藏期间的Burgers本构模型参数及拟合方程的决定系数

Table 2 Constitutive parameters of the Burgers model and coefficient of determination of the fitted equation for *Penaeus vannamei* at different storage periods

贮藏时间/d	$p_1$	$p_2$	$q_1$	$q_2$	$R^2$
2	80.24±0.31 <sup>f</sup>	376.03±2.82 <sup>e</sup>	7 400.37±47.58 <sup>b</sup>	59 100.12±361.14 <sup>d</sup>	0.997 2
4	89.46±0.30 <sup>d</sup>	466.85±11.88 <sup>d</sup>	4 011.56±19.99 <sup>f</sup>	39 744.34±320.84 <sup>e</sup>	0.997 8
6	93.39±0.26 <sup>c</sup>	439.67±7.32 <sup>b</sup>	6 758.55±27.99 <sup>e</sup>	50 620.50±555.02 <sup>b</sup>	0.997 7
8	85.25±0.53 <sup>e</sup>	336.53±15.39 <sup>d</sup>	4 398.07±34.01 <sup>e</sup>	29 659.24±1 066.43 <sup>g</sup>	0.996 4
12	84.86±0.13 <sup>e</sup>	369.34±7.53 <sup>c</sup>	6 420.31±25.16 <sup>d</sup>	44 505.05±1 319.04 <sup>d</sup>	0.996 6
16	72.99±0.45 <sup>f</sup>	295.79±24.18 <sup>e</sup>	3 561.47±30.93 <sup>f</sup>	27 813.67±1 976.94 <sup>f</sup>	0.997 8
20	73.17±0.25 <sup>e</sup>	298.97±13.49 <sup>f</sup>	3 944.54±26.31 <sup>f</sup>	31 102.95±1 667.49 <sup>f</sup>	0.997 8
26	105.86±0.12 <sup>b</sup>	424.90±9.46 <sup>b</sup>	7 692.25±13.20 <sup>a</sup>	45 560.21±1 095.81 <sup>e</sup>	0.996 4
32	121.47±0.16 <sup>a</sup>	463.97±17.55 <sup>a</sup>	7 787.54±12.02 <sup>a</sup>	42 723.55±1 528.40 <sup>f</sup>	0.996 5

## 3 结论

本实验基于南美白对虾准静态压缩变形特征,提出了Burgers流变模型对其非线性黏弹性进行表征,获得了其非线性黏弹塑性模型参数。结果表明:四元件Burgers模型与实验结果拟合程度较高,决定系数大于0.99,能够表征南美白对虾虾肉的应力松弛现象。并且,应力松弛能够较客观地描述南美白对虾虾肉的黏弹性变化。从流变学各特征参数的变化来看,随着贮藏时间的延长虾肉在应力松弛过程中的弹性、黏性有逐渐变小的趋势,并且贮藏时间变化对应力松弛时间 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 有明显影响。流变参数间接地表明了虾肉组织结构与品质的变化,可以为虾肉快速无损检测的研究提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] 马荣朝, 秦文, 吴维维, 等. 食品电物性在无损检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 278-283.

- [2] 何春雷, 秦文, 王政. 基于介电特性的花生油加热及贮存过程中品质快速检测技术[J]. 食品科学, 2009, 30(24): 389-392.
- [3] ARGYRI A A, PANAGOU E Z, TARANTILIS P A, et al. Rapid qualitative and quantitative detection of beef fillets spoilage based on fourier transform infrared spectroscopy data and artificial neural networks[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 145(1): 146-154.
- [4] 李立杰, 柴春祥, 鲁晓翔, 等. 微冻对南美白对虾质构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(3): 73-76.
- [5] KIMIYA T, SIVERTSEN A H, HEIA K. VIS/NIR spectroscopy for non-destructive freshness assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 758-764.
- [6] TOHI S, HAGURA Y, SUZUKI K. Measurement of change in moisture content during drying process using the dielectric property of foods[J]. Food Science and Technology Research, 2002, 8(3): 257-260.
- [7] MATEO A, SOTO F, VILLAREJO J A. Quality analysis of tuna meat using an automated color inspection system[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1): 1-13.
- [8] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 36-57.
- [9] 高昕, 张亚琦, 许家超, 等. 不同干燥条件对鲍鱼组织构造及流变特性的影响[J]. 中国食品学报, 2008, 8(3): 108-115.
- [10] 马龙, 武杰, 赵大庆, 等. 酱牛肉应力松弛特性实验[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(1): 221-224.
- [11] CAMPUS M, ADDIS M F, CAPPUCCINELLI R, et al. Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L.) following high pressure treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 192-198.
- [12] HERRERO A M, CARECHE M. Stress-relaxation test to evaluate textural quality of frozen stored Cape hake (*M. capensis* and *M. paradoxus*)[J]. Food Research International, 2005, 38(1): 69-76.
- [13] 李姣, 李学鹏, 励建荣, 等. 冷藏条件下中国对虾肌肉蛋白质的生化特性[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 16-21.
- [14] 孟庆君. 菊芋及其腌渍品的流变特性和质地评价研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [15] 刘鑫. 褐藻胶-鱼肉蛋白质复合凝胶体系流变特性及水分状态的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [16] 王琦, 李海涛, 刁宪军. 食品的力学参数及影响因素研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2004, 20(1): 98-102.
- [17] MYHAN R, BIAŁOBRZEWSKI I, MARKOWSKI M. An approach to modeling the rheological properties of food materials[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 351-359.
- [18] 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 13-37.
- [19] 周萌. 鲫鱼的形态、肌电、材料本构实验研究与“数字鱼”数据库初探[D]. 合肥: 中国科技大学, 2010.
- [20] 孟岳成, 刘鑫, 陈杰. 原料组分及应力松弛与方便米线品质的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 375-382.