

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.023

库尔勒香梨不同膨压水平下的动态粘弹特性*

吴杰^{1,2} 郭康权¹ 顾蓉¹ 张佳¹ 漆楚生¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 石河子大学机械与电气工程学院, 石河子 832003)

【摘要】 对经过不同浓度蔗糖溶液渗透处理后具有高、低和正常3种膨压水平的库尔勒香梨果肉进行振荡剪切试验和蠕变试验,以考察膨压水平对香梨果肉组织粘弹特性的影响。结果表明,不同膨压香梨果肉在各频域内的储能模量(G')均远大于损耗模量(G''),且变化都不受频率影响,但均随膨压提高呈增大趋势。同时,不同膨压香梨果肉的蠕变响应可采用六元件广义 Kelvin-Voigt 模型精确拟合,模型中的瞬时弹性柔量(J_0)、延迟弹性柔量(J_1 和 J_2)和稳态粘性柔量($1/\eta_0$)均随着膨压下降而增大。果肉组织扫描电镜观察表明,各粘弹参数(G'' 、 G' 、 J_0 、 J_1 、 J_2 、 $1/\eta_0$)的显著变化与膨压调控引起的细胞结构和胞间隙变化有直接关系。

关键词: 库尔勒香梨 细胞膨压 动态粘弹特性

中图分类号: S183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0113-05

Turgor Effects on Dynamic Viscoelasticity of Korla Pear Tissue

Wu Jie^{1,2} Guo Kangquan¹ Gu Rong¹ Zhang Jia¹ Qi Chusheng¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract

Viscoelastic properties of Korla pear (*Pyrus bretschneideri rehd*) tissue osmotically treated in iso-, hypo- or hypertonic sucrose solutions were investigated using oscillatory shear and creep-recovery tests. Results indicate that storage moduli (G') is much higher than loss moduli (G'') over the entire frequency range. Both G' and G'' show frequent independent, but increase with the increasing of turgor. In creep testing, the creep compliance responses of low, normal and high turgor tissues were characterized by a generalized Kelvin-Voigt model with six elements. The instantaneous (J_0), retarded compliance (J_1 and J_2) and steady-state fluidity ($1/\eta_0$) increased as turgor was reduced. By scanning electron microscopy (SEM), many rheological parameters (G'' , G' , J_0 , J_1 , J_2 and $1/\eta_0$) show the marked changes among the three turgor levels, which relates with the changes of cells and intercellular spaces due to the turgor manipulation.

Key words Korla pear, Turgor, Dynamic viscoelasticity

引言

库尔勒香梨(*Pyrus bretschneideri rehd*)因其果肉中含有石细胞且含水率很高(84.5%~86%)而极不耐机械损伤^[1]。研究已普遍认识到,果蔬材料受力时所表现出的粘弹特性是有助于发现改善果蔬机

械损伤敏感性的方法^[2-4]。然而,早期研究采用质构仪或万能材料试验机很难获得梨果可靠的粘弹特性数据,原因是梨果的果肉在较长的测试期间易出现大量水分散失和果肉褐变等理化变化,从而直接影响测试精度^[5]。近年来随着测试技术的发展,可对果品在极短时间内施加小于0.1%的应变,保证

收稿日期:2009-12-05 修回日期:2010-02-01

* 石河子大学自然科学与技术创新项目(ZRXX2009YB04)和北京大学对口支援石河子大学专项资金项目

作者简介:吴杰,博士生,石河子大学副教授,主要从事农产品品质检测研究,E-mail:wjshz@126.com

通讯作者:郭康权,教授,博士生导师,主要从事农产品贮藏与加工研究,E-mail:jdgkq@nwsuaf.edu.cn

在线性粘弹范围内精确研究果品的粘弹特性^[6-7]。

库尔勒香梨在贮存期因呼吸和蒸腾作用而出现水分散失,这会引引起果肉组织膨压水平下降。膨压是胞间液体施加的静水压力,使细胞保持一定形状、体积、刚度和弹性^[8]。国外已有文献研究了膨压对果蔬的压缩、剪切、弯曲、穿刺等力学特性的影响^[9-12],但就果蔬的粘弹力学特性而言,目前国内外关于膨压对其影响规律尚缺乏全面了解,因此,本文研究不同膨压水平对梨果粘弹力学特性的影响程度及规律,以期对香梨采摘期的灌溉控制和贮藏期的湿度调控优化提供一定思路。

1 材料与方法

1.1 香梨采样

库尔勒香梨采自新疆库尔勒沙衣东园艺场,选择无畸形、无虫害、无损伤、无粗皮果的果样,以减小各果样的生物变异及其采摘期对果肉组织质地的影响,采后迅速置于 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 $85\%\sim 95\%$ 环境下贮藏以备试验使用^[1]。

1.2 香梨果肉组织膨压调控

香梨果肉组织膨压调控根据 Lin 和 Pitt 提出的方法进行^[9],首先采用小液流法测量香梨果肉组织的等渗点,确定香梨组织在 $(0.9\pm 0.1)\text{ mol/L}$ 浓度的蔗糖溶液中可达到等渗状态。随后,以等渗点对应的蔗糖浓度作为标尺,配置等渗 (0.9 mol/L) 、低渗 (0.4 mol/L) 和高渗 (1.4 mol/L) 3种浓度梯度的蔗糖溶液。用直径 15 mm 的取样器在香梨赤道部取果肉柱样,用平行刀片切去距核部和皮部较近的果肉,留取厚度为 10 mm 。将果肉柱样分别浸泡于3种浓度梯度的蔗糖溶液中,溶液抽真空以提高渗透速度,并采用 $0.02\text{ mol/L K}_2\text{HPO}_4$ 和 $0.02\text{ mol/L KH}_2\text{PO}_4$ 配置的缓冲液(pH值 5.2)进行缓冲。在进行力学测试前,香梨果肉渗透时间为 24 h ,渗透温度保持在 4°C 。

1.3 粘弹力学测试

采用 Q800 动态力学分析仪及配套的 Universal Analysis 2000 软件包(美国 TA 公司)进行粘弹力学测试分析,测试温度保持 20°C 。首先如图 1(图中 G' 表示储能模量, G'' 表示损耗模量)所示,在频率 1 Hz 下对试样进行应力扫描,以确定果肉的线性粘弹区(LVR),获得3种膨压水平香梨果肉的线性粘弹区在 $0.02\%\sim 0.18\%$ 范围,因此取应变率 0.06% 作为各膨压水平下香梨果肉的线性粘弹值。各试样力学测试在密闭腔室内进行,保持近皮部果肉朝上,与夹具非接触部位均匀涂抹硅油以防止褐变和失水,测试温度通过加热炉和相连的氮气制冷罐

(GCA)进行调控,温度平衡时间设定为 20 min 。

1.3.1 振荡剪切测试

试样尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,厚度不超过 10 mm 。采用2个“三明治”剪切夹具进行应力控制模式的正弦波应变测试,在 $0.1\sim 10\text{ Hz}$ 频率范围进行频率扫描,应变幅度为 0.06% ,获得储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和损耗正切 $\tan\delta$ 的动态频谱曲线。

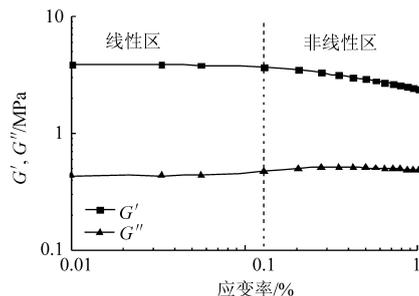


图1 库尔勒香梨果肉在 1 Hz 时的典型应力扫描图

Fig. 1 Typical strain sweep of Korla pear tissue with normal turgor at 1 Hz

1.3.2 蠕变-回复测试

试样直径为 15 mm ,在直径 15 mm 的平行板夹具间进行蠕变测试,应力设定为 0.005 MPa ,以确保香梨果肉变形在弹性极限范围之内。蠕变时间设定为 180 s ,蠕变回复时间设定为 360 s 。

1.4 试验数据分析

蠕变试验数据采用六元件的广义 Kelvin-Voigt 模型进行拟合(见图2),其数学表达式为^[13]

$$J(t, \tau) = J_0 + \sum_{i=1}^2 J_i (1 - e^{-t/\lambda_i}) + t/\eta_0$$

其中

$$J_0 = 1/G_0 \quad J_i = 1/G_i$$

式中

$$J(t, \tau) \text{——蠕变柔量, Pa}^{-1}$$

$$J_0 \text{——瞬时弹性柔量, Pa}^{-1}$$

$$J_i \text{——延迟弹性柔量, Pa}^{-1}$$

η_0 ——与牛顿流体相关的粘性系数,其倒数为稳态流度或稳态粘性柔量, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

λ_i ——延迟时间, s t ——蠕变时间, s

采用 SPSS11.5 软件进行非线性回归分析,用渐进的 95.0% 置信区间拟合,非线性最优化的 LM 法

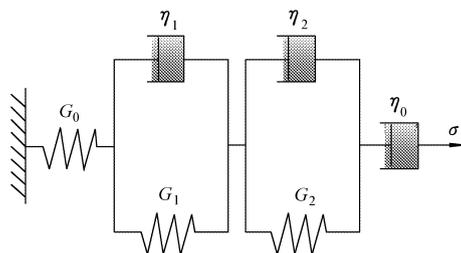


图2 库尔勒香梨果肉蠕变力学模型示意图

Fig. 2 Mechanical model for creep-recovery response of Korla pear tissue

估计各粘弹参数,模型参数采用单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 动态粘弹频谱

储能模量 G' 表征果肉弹性,损耗模量 G'' 表征果肉粘性,两模量可说明果肉冲击变形过程能量的储

存和损耗,直接反映了果肉抗冲击损伤的能力。损耗正切 $\tan\delta$ 则为损耗模量与储能模量的比值,反映了果肉总体的粘弹特性^[5]。图 3 和图 4 表示的是库尔勒香梨果肉 3 种膨压水平下的动态粘弹频谱曲线,储能模量 G' 和损耗正切 $\tan\delta$ 的统计值可见表 1。

表 1 3 种膨压水平的库尔勒香梨果肉的储能模量 G' 和损耗正切 (G''/G') 统计值

Tab. 1 Average storage modulus G' and loss tangent (G''/G') for Korla pear tissue under three turgor levels

膨压水平	储能模量 G' /MPa			损耗正切 $\tan\delta$		
	$f=0.1$ Hz	$f=1$ Hz	$f=10$ Hz	$f=0.1$ Hz	$f=1$ Hz	$f=10$ Hz
低膨压 (0.4 mol/L)	0.014 ± 0.0003^a	0.016 ± 0.001^a	0.018 ± 0.002^a	0.198 ± 0.012^a	0.115 ± 0.004^a	0.113 ± 0.002^a
常膨压 (0.9 mol/L)	0.177 ± 0.024^b	0.105 ± 0.033^b	0.092 ± 0.031^b	0.177 ± 0.024^a	0.096 ± 0.002^b	0.094 ± 0.001^b
高膨压 (1.4 mol/L)	0.372 ± 0.075^c	0.383 ± 0.073^c	0.336 ± 0.068^c	0.103 ± 0.010^b	0.089 ± 0.004^b	0.087 ± 0.009^b

注:平均值和标准差的计算样本数大于等于 10,同列平均值具有相同上标表示无显著差异性 ($p < 0.05$)。

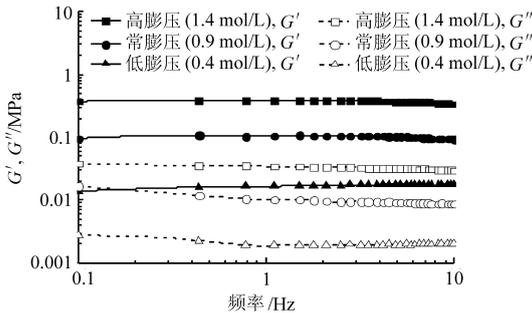


图 3 库尔勒香梨果肉的动态模量频率扫描曲线

Fig. 3 Storage (G') and loss (G'') modulus vs frequency for Korla pear tissue under three turgor levels

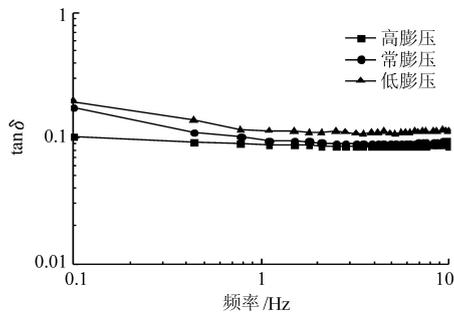


图 4 库尔勒香梨果肉的损耗正切频率扫描曲线

Fig. 4 Loss tangent with frequency for Korla pear tissue under three turgor levels

在振荡剪切应变下,3 种膨压香梨果肉的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的变化受频率影响甚微,这与 Gerschenson 关于猕猴桃果肉的研究结论一致^[14],但与 Varela 关于苹果果肉的研究不同^[15]。损耗正切 $\tan\delta$ 值在低频范围随频率增加略有降低,但在 1~10 Hz 频域则变化很小。此外,在各频率下 3 种膨压水平果肉的 G' 均大于 G'' , $\tan\delta$ 值范围为 0.09~0.20,这说明具有粘弹特性的香梨果肉是以弹性特征为主导。

由图 3 和表 1 可看出,膨压对果肉的动态模量

有显著影响 ($p < 0.05$),随着香梨果肉组织膨压水平提高, G' 和 G'' 都明显降低。高膨压 (1.4 mol/L) 果肉的 G' 值是常膨压 (0.9 mol/L) 果肉的 2~3 倍,而低膨压 (0.4 mol/L) 果肉的 G' 值则是常膨压果肉 G' 值的 1/10,这些明显的差异充分表明香梨果肉在高膨压状态具有较大弹性,而低膨压状态则逐渐失去刚度。另外,从 $\tan\delta$ 值的变化看,提高膨压可使 $\tan\delta$ 值略微降低,但在 1~10 Hz 范围变化甚微,这意味着膨压调控不能改变香梨以弹性主导的粘弹本质特性。

2.2 蠕变-回复响应

图 5 所示为香梨果肉 3 种膨压水平下的蠕变曲线,可看出膨压对蠕变变形有显著影响 ($p < 0.05$)。采用六元件的广义 Kelvin-Voigt 模型建立的本构方程可精确拟合蠕变试验曲线,相关系数大于等于 0.999,所拟合的各粘弹参数见表 2。根据 Martinez 的解释可知^[13], J_0 反映了果肉卸载后的瞬时变形或可恢复变形,与果肉组织中具有弹性的结合单元有关; J_i 反映了果肉延迟弹性回复程度,与果肉中半纤维素和果胶的粘接有关,这些粘接通常具有不同断裂速率; $1/\eta_0$ 反映了果肉不可恢复变形,与果肉中流体或失去结合的单元有关。

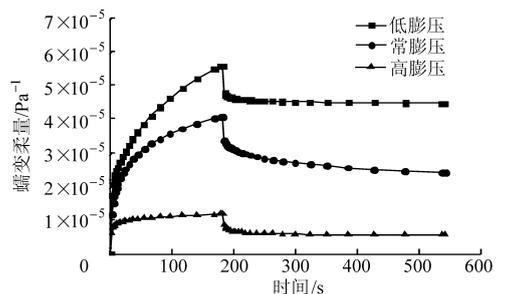


图 5 库尔勒香梨果肉的蠕变-回复曲线

Fig. 5 Creep-recovery curves of Korla pear tissue under three turgor levels

表2 3种膨压水平的库尔勒香梨果肉的蠕变参数统计值

Tab.2 Viscoelastic parameters of each type of compliance for Korla pear tissue under three turgor levels

膨压水平	蠕变参数					
	$J_0/10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$J_1/10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	$J_2/10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$	λ_1/s	λ_2/s	$\eta_0/10^7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
低膨压(0.4 mol/L)	3.20 ± 0.06^a	1.88 ± 0.29^a	5.05 ± 0.08^a	38.89 ± 3.08^a	1.14 ± 0.07^a	0.96 ± 0.10^a
常膨压(0.9 mol/L)	1.47 ± 0.07^b	1.70 ± 0.24^a	2.78 ± 0.05^b	26.23 ± 0.67^b	1.59 ± 0.10^b	1.67 ± 0.02^a
高膨压(1.4 mol/L)	0.89 ± 0.05^c	0.26 ± 0.04^b	1.65 ± 0.01^c	17.63 ± 1.65^c	1.46 ± 0.12^b	11.21 ± 2.98^b

由图5可以看出,膨压对香梨果肉的瞬态粘弹特性有显著影响,并存在大量的塑性(永久)变形;随着膨压降低,蠕变阶段的总柔量明显升高,而瞬时弹性柔量 J_0 和稳态粘性柔量 $1/\eta_0$ 也均随着膨压提高呈逐渐下降趋势,这些变化都与振荡剪切测试中动态模量的变化趋势非常相似,因而可以进一步说明高膨压的香梨果肉趋于更脆,而低膨压的果肉趋于更软。其中具有较高稳态粘性柔量的果肉(低膨压)一旦发生蠕变变形时,伴随着较多的永久变形,意味着果肉有较高的机械损伤敏感性。

从表2可以看出,香梨果肉存在明显的粘弹双重特性,延迟弹性柔量 J_1 和 J_2 均随膨压降低而升高。与Martínez关于苹果果肉蠕变结果相比较^[13],香梨果肉的延迟弹性柔量 J_1 和 J_2 并不相近, J_1 明显

低于 J_2 ,两Kelvin-Voigt单元相应的延迟时间也相差近10倍。这可以解释为,Kelvin-Voigt的两单元可能分别表示纤维素和果胶不同的结合强度,其中延迟时间短的单元具有较快的弹性变形速率。

2.3 微观结构分析(SEM)

图6为3种膨压水平下香梨果肉微观组织扫描电镜图。在常膨压(0.9 mol/L)的香梨果肉中可明显看见细胞间隙和紧凑一致的细胞壁结构,细胞以近似网状规则排列(图6a);低膨压(0.4 mol/L)香梨果肉组织中的细胞出现塌缩和折叠,细胞间隙大量减少,一些区域由于半纤维素和果胶的溶解和解聚作用而出现细胞分离现象(图6b);高膨压(1.4 mol/L)香梨果肉组织细胞开始膨胀张紧,轮廓趋于圆状,细胞质膜紧贴于细胞壁(图6c)。

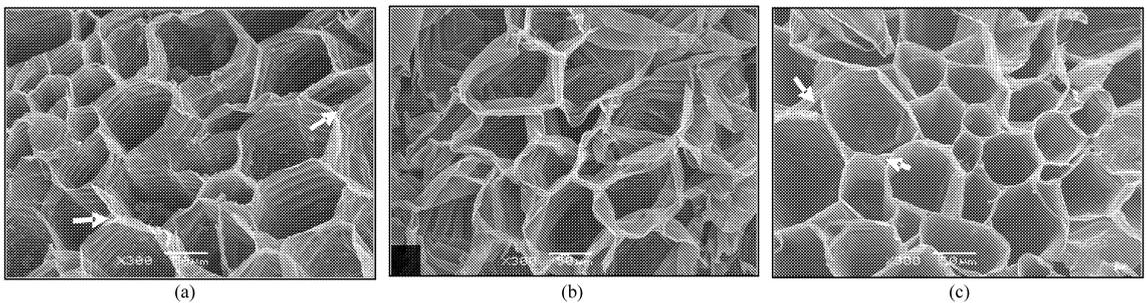


图6 3种膨压水平的库尔勒香梨果肉组织电子扫描电镜图

Fig.6 SEM images of parenchyma tissue of Korla pear with different turgor pressures

(a) 常膨压 (b) 低膨压 (c) 高膨压

当常膨压的香梨果肉组织调控至高膨压或低膨压时,细胞结构的这些显著变化进一步说明了细胞膨压对香梨的动态模量(G' 、 G'')和蠕变柔量(J_0 、 J_1 、 J_2 、 $1/\eta_0$)显著影响的内在机制。由于 G' 和 J_0 与材料的弹性或刚度有关,因此高膨压果肉组织中具有较高的 G' 和 J_0 ,恰好说明细胞膨压具有维持细胞架构、为细胞提供力学支撑和赋予细胞壁足够强度的作用;对低膨压果肉组织 G' 和 J_0 的下降,Martínez认为部分原因可能是因为低渗处理过程气液交换将具有弹性的气体置换为不可压缩的液体^[13]。另外,由于 G'' 和 $1/\eta_0$ 表征了材料的流动性和粘性,因此两参数在低膨压组织较高的主要原因可能与膨压调控过程中果胶和半纤维素的溶解和解聚、水合力降低和外渗等现象有关^[8,13-15]。

3 结论

(1) 香梨果肉的动态粘弹模量(G' 、 G'')随着膨压下降而降低,在0.1~10 Hz的频域中不受频率影响;不同膨压香梨果肉的储能模量 G' 远高于损耗模量 G'' ,表现出弹性主导的粘弹双重特性;损耗正切 $\tan\delta$ 在整个频域中受膨压影响甚微,表明香梨果肉粘弹本质不会发生根本变化。

(2) 不同膨压的香梨果肉蠕变特性均可用六元件的广义Kelvin-Voigt模型精确拟合,其模型所定义的蠕变参数(J_0 、 J_1 、 J_2 、 $1/\eta_0$)受膨压水平显著影响,均随膨压降低而增大;随着膨压水平降低,蠕变阶段的总柔量明显增大,并伴随较高的永久变形。

(3) 具有常膨压、高膨压和低膨压香梨果肉组

织的扫描电镜观察证明膨压对香梨果肉组织的细胞结构和细胞间隙有明显改变,并导致香梨振荡剪切测试和蠕变测试中的各粘弹参数 G' 、 G'' 、 J_0 、 J_1 、 J_2 、

$1/\eta_0$ 都发生显著变化,这也进一步表明合适的膨压调控可以显著改变香梨果肉的质地品质和机械损伤敏感性。

参 考 文 献

- 1 陈国刚,王祯丽,童军茂. 不同贮藏条件对库尔勒香梨果实采后生理及贮藏效果的研究[J]. 食品科技, 2005(7): 83~85.
- 2 Sadato I, Takayuki K. Studies on mechanical properties of agricultural products (part 2) [J]. Journal of JSAM, 1970, 32(1): 59~64.
- 3 De Baerdemaeker J G, Segerlind L J. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh [J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(2): 346~348, 353.
- 4 Pitt R E, Chen H L. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(4): 1 275~1 280.
- 5 周祖镔. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1994.
- 6 Wang J, Lu Q J. The steady-state sinusoidal dynamic behaviour of peach and pear [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 463~469.
- 7 Lakes R S. Viscoelastic measurement techniques [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(4): 797~810.
- 8 Nieto A B, Salvatori D M, Castro M A, et al. Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61: 269~278.
- 9 Lin T T, Pitt R E. Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure [J]. Journal of Texture Studies, 1986, 17(3): 291~313.
- 10 Konstantkiewicz K, Zdunek A. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue [J]. International Agrophysics, 2001, 15: 27~30.
- 11 Jackman R L, Marangoni A G, Stanley D W. The effects of turgor pressure on the puncture and viscoelastic properties on tomato tissue [J]. Journal of Texture Studies, 1992, 23(4): 491~505.
- 12 Alvarez M D, Saunders D E J, Vincent J F V. Fracture properties of stored fresh and osmotically manipulated apple tissue [J]. European Food Research and Technology, 2000, 211: 284~290.
- 13 Martínez V Y, Nieto A B, Castro M A, et al. Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83: 394~403.
- 14 Gerschenson L N, Rojas A M, Marangoni A G. Effects of processing on kiwi fruit dynamic rheological behaviour and tissue structure [J]. Food Research International, 2001, 34: 1~6.
- 15 Varela P, Salvador A, Fiszman S. Changes in apple tissue with storage time: rheological, textural and microstructural analyses [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78: 622~629.

(上接第 69 页)

- 5 张蔚,姚文斌,李文彬. 竹纤维加工技术的研究进展 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 308~311.
Zhang Wei, Yao Wenbin, Li Wenbin. Research and development of technology for processing bamboo fiber [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 308~311. (in Chinese)
- 6 王斌,李恩生,夏龙全. 单纤维平均梳力的研究 [J]. 棉纺织技术, 2005, 33(4): 198~120.
Wang Xian, Li Ensheng, Xia Longquan. Research on average carding force of single fiber [J]. Cotton Textile Technology, 2005, 33(4): 198~120. (in Chinese)
- 7 Ray A K, Mondal S, Das S K, et al. Bamboo—a functionally graded composite—correlation between microstructure and mechanical strength [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(19): 5 249~5 253.
- 8 洗杏娟,洗定国,叶微颖. 竹纤维增强树脂复合材料及其微观形貌 [M]. 北京:科学出版社, 1995: 18~22.
- 9 薛少林. 纺纱学 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2002: 70~73.
- 10 许斌,蒋身学,张齐生. 毛竹生长过程中纤维壁厚的变化 [J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(4): 75~77.
Xu Bin, Jiang Shenxue, Zhang Qisheng. Variation of fibre wall thickness during the moso bamboo's aging [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2003, 27(4): 75~77. (in Chinese)
- 11 詹怀宇. 纤维化学与物理 [M]. 北京:科学出版社, 2005: 13~18.