

研究论文

竹材在压缩大变形下的力学行为 I. 应力-应变关系

邵卓平

(安徽农业大学林产工业系, 合肥 230036)

摘要: 以毛竹为对象,研究了竹材在不同温度及约束条件下沿径向、弦向和轴向压缩大变形下的力学行为,建立了描述竹材在压缩大变形下的应力-应变关系。试验表明,竹材在径向施压和弦向施压下具有相同的力学行为,其整个大变形过程可分为三个阶段:线弹性阶段、屈服后弱线性强化阶段和幂强化阶段。

关键词: 毛竹;压缩大变形;应力-应变关系

中图分类号:S795 文献标识码:A 文章编号:1001-8654(2003)02-0012-03

Mechanical Behavior of Bamboo with Large Deformation: I. The Relationship between Stress and Strain

SHAO Zhuo-ping

(Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: This study tested the mechanical behavior of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) under large compression deformation at different temperatures and directions (radial, tangential and longitudinal) with restricting conditions. Based on the experimental data, the relationship between stress and strain was established. The results showed that bamboo revealed the same mechanical properties under compression in both radial and tangential directions. The entire deformation process could be divided into three stages: linear plasticity, feeble linearity strengthening after yielding, and power strengthening.

Key words: Moso Bamboo; Large compressive deformation; Relation between stress and strain

关于木材在压缩大变形下的力学行为已有许多报道^[1,2],其研究结果对开发人造板和成型制品生产新工艺起到了重要贡献。近年来由于木材资源紧缺,“以竹代木”给我国竹材工业带来了发展机遇,已有许多新研发的竹材产品投入市场,所以有必要对竹材的力学性能作进一步的了解。竹材质轻,但却异常坚韧,并具有很高的硬度、弹性和韧性,其顺纹抗拉强度最高可达 280 MPa,几乎是普通碳素钢的一半。Lakkard 和 Patel^[3]的研究报告指出,就杨氏模量而言,竹材明显地优于单向玻璃纤维增强塑料,而竹材的比强度则比低碳钢高 3 倍。人们对竹材的常规力学性质已经有所了解,但有关竹材在大变形下的力学行

为、微观特征尚未见报道。在许多竹制品生产过程中,给竹材或其坯料施加压力的工序都必不可少,如竹胶合板的热压工艺以及竹片展平、辊压工艺等。因此,研究竹材在压缩大变形下的力学行为及其微观特征,将有助于了解加工过程中工艺因素对竹材的物理、力学性质的影响,从而为制定合理的工艺参数提供依据。

1 试材与试验方法

试材 安徽大别山 5~6 年生毛竹 (*Phyllostachys pubescens*),胸径约 12~16 cm,选取胸高处壁厚约 11~13 mm 竹秆,气干后除去竹青、竹黄。

试验方法 竹材静压大变形试验采用三种加载方式:(1)径向压缩;(2)弦向压缩;(3)顺纹压缩。由于

收稿日期:2002-11-14

作者简介:邵卓平(1956—),男,安徽农业大学林产工业系副教授。

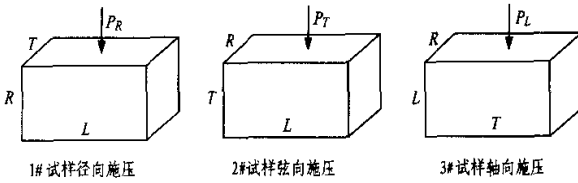


图 1 竹材试样类型与施压方向

Fig. 1 Bamboo sample dimensions and compression direction

竹壁的厚度有限,为使不同施力方向的载荷-变形结果能够相互比较,本试验对象为小尺寸试样(图 1): 1#、2# 试样尺寸为 $L \times T \times R = 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 3# 试样尺寸为 $L \times T \times R = 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。试样含水率均为 12%,在垂直载荷方向分无约束和有约束(钢套)2 种条件,试验温度分室温(约 30 ℃)和 100 ℃两种。因此,每组试样有 3 种试验条件:① 室温、横向无约束;② 室温、横向有约束;③ 高温、横向有约束。

上述试验条件是考虑了竹材的日常使用情形和在压缩加工时的工艺条件而设计的,其中试验条件③是模拟竹地板坯材在热压时的工艺条件(含水率 8% 的竹坯在涂胶热压后的平均含水率为 12%)。

试验设备 WDW-100 微机控制万能材料试验机,试样置于球面滑动支座中心位置,加载速度 3 mm/min,载荷-变形曲线由计算机自动绘出。

2 竹材压缩大变形的宏观行为

2.1 不同约束条件下竹材在横向压缩大变形的力学行为

图 2 中的 RW30、TW30 分别是在 30 ℃ 横向无约束时,沿径向和弦向施压时的载荷-位移曲线, R30、T30 分别是在 30 ℃ 横向有约束时,沿径向和弦向施压时的载荷-位移曲线。从图 2 可见,在受压密实化之前,竹材试样在两种约束条件下沿径向施压或弦向施压具有相同的弹性和屈服行为。从试样受压时的

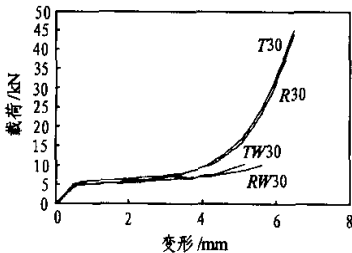


图 2 竹材在 30 ℃ 时的载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of bamboo at 30 ℃

变形过程来看,试样在载荷达到屈服点之后,载荷增加不大,但变形却急剧增加。横向无约束的试样在大变形压缩过程中会产生较大的横向膨胀(应力因此失真过大而只能取其载荷-变形曲线分析),随着载荷的增加,在试样周边将出现与轴向平行、与载荷约成 45° 的裂缝,这是由最大剪应力所致,并因此引起载荷-变形曲线出现向下的波动。横向有约束试样的载荷-变形曲线则始终比较光滑,并逐渐过渡到载荷急剧增长的压密阶段。

本试验对象虽为小试样,但对于大尺寸试样,其边缘少部分材料类似横向无约束受载,而中间大部分材料则属于横向有约束受载情形,其载荷-变形曲线的形状基本同 R30 或 T30。显然,竹材试样无论是径向施压还是弦向施压都表现出相同的力学行为。

2.2 不同温度下竹材横向压缩大变形的力学行为

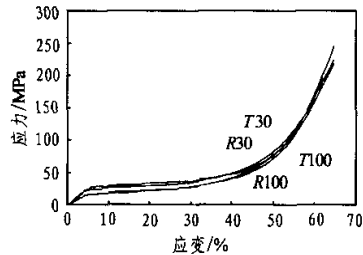


图 3 不同温度下竹材有横向约束时的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of bamboo under transverse restriction

图 3 中的 4 条曲线分别是竹材试样在 30 ℃ 和 100 ℃ 时沿径向和弦向有约束施压时的应力-应变曲线,由图 3 可见,不同温度下的应力-应变曲线高低有别但形状相同。从整个受力过程来看,不同温度下竹材试样的变形均可分为 3 个阶段:Ⅰ. 弹性阶段,是管状细胞发生微小变形、载荷和位移基本上呈正比例关系阶段;Ⅱ. 屈服后弱线性强化阶段,当载荷达到屈服点之后,细胞胞壁开始向腔内塌陷,且因胞壁厚薄及胞径不等而逐渐压溃,出现载荷变化不大,而变形却急剧增大的塑性屈服现象,此阶段的载荷-变形曲线比较平坦,竹材处于弱的线性强化阶段;Ⅲ. 压密强化阶段,随着细胞壁先后相互接触,竹材的细胞腔逐渐被完全填充密实化,材料抗变形能力急剧增大,竹材处于强强化阶段。当竹材完全压密成为实质性物质后,变形已由分子间距变化所致,载荷-位移曲线将再次呈线性趋势。

比较温度对试验曲线的影响,具有 3 个特征:(1)

在不同温度下的弹性模量和屈服极限不等,高温时柔软且易屈服(本例中 100℃ 时弹模和屈服强度分别约为 30℃ 时的 70% 左右);但(2)弹性阶段和屈服阶段的范围似乎受温度的影响不大;(3)在压密化阶段,2 种温度下的曲线基本重叠,说明在本文涉及的温度变化范围内,竹材的横压大变形主要取决于竹材结构腔隙空间的变化。

2.3 竹材横向压缩大变形的应力-应变关系

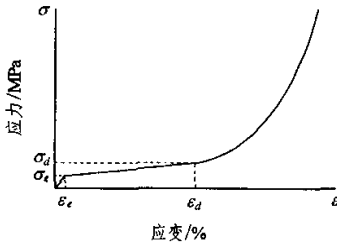


图 4 简化的竹材横向压缩 σ - ϵ 曲线

Fig. 4 An predigest σ - ϵ curve of bamboo under transverse compression

Tabarsa 等^[4]在研究木材在压缩时的应力-应变关系时,将第 I 阶段简化为水平屈服平台,陶俊林等人^[5]则以小斜率的直线描述木材横纹压缩的第 II 阶段。根据本试验竹材的应力-应变曲线,拟采用后者,即将竹材的应力-应变图简化为图 4 所示曲线,其应力-应变关系表述如下:

$$\sigma = E_1 \epsilon, \quad 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_e \quad (1)$$

$$\sigma = E_1 (\epsilon - \epsilon_e) + \sigma_e, \quad \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_d \quad (2)$$

$$\sigma = a\epsilon^3 + b\epsilon^2 + c\epsilon + d, \quad \epsilon > \epsilon_d \quad (3)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为 2 个线性阶段的斜率,其中 E_1 是竹材横向压缩弹性模量; ϵ_e 和 ϵ_d 分别为屈服点和压密点处的应变。根据本试验的竹材横向压缩应力-应变曲线(图 3),分别取 ϵ_e 和 ϵ_d 为 6% 和 30%,应用 Excel 数据分析工具得到的应力-应变回归方程(见表 1)具有大于 0.99 的高相关系数,说明上述给出的本构关系式能够很好地反映竹材受横向载荷时的力学行为。

试验中还注意到,线性强化的第二阶段和幂强化的第三阶段可以用同一个 4 次多项式来描述,即:

$$\sigma = a\epsilon^4 + b\epsilon^3 + c\epsilon^2 + d\epsilon + e, \quad \epsilon > \epsilon_e \quad (4)$$

统计分析表明,取 $\epsilon_e = 6\%$ 得到的 4 次多项式回归方程对整个屈服后强化阶段的应力、应变关系同样也具有大于 0.99 的高相关系数。实际上,由于竹细胞被压溃过程中,部分细胞壁在细胞腔完全消失之前已经相互接触,因而在应力-应变曲线上确定 ϵ_d 相对

应的转折点是难以实现的^[2]。所以,在工艺上如果压缩率在 30% 以上,则以一个线性方程和一个 4 次多项式来描述竹材受横向载荷大变形时的应力-应变关系式可能更方便实用些。

2.4 竹材顺纹压缩大变形的力学行为

图 5 为竹试件沿轴向施压的应力-应变曲线,其中 LW30 为 30℃ 时横向无约束的 σ - ϵ 曲线、L30 和 L100 分别是竹试件在 30℃ 和 100℃ 时横向有约束的 σ - ϵ 曲线。比较 LW30 和 L30 曲线,可见横向有无约束的竹材试件在轴向受压时,具有相同的弹性阶段和屈服极限,所不同的是随着载荷的逐渐增加试件愈压愈扁,横向无约束试件横截面增大(此时应力已不具实际意义),在靠近侧边处会出现顺轴向开裂,并引起载荷-位移曲线向下波动,而横向有约束受压试件则无上述情形,在材料达到屈服极限后不久即进入变形强化阶段,并逐渐过渡到压密阶段。

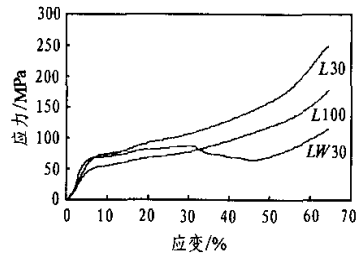


图 5 竹材顺纹压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of bamboo under compression parallel to the grain

比较 L30 和 L100 曲线,可见竹材在不同温度下的轴向压缩 σ - ϵ 曲线形状相似,均可分 2 个阶段: I. 弹性阶段,是管状细胞发生轴向压缩变形及微弯、载荷和位移基本上呈正比例的阶段; II. 屈服后逐渐压溃至压密阶段,当载荷达到屈服点之后,一些管状细胞开始失去直线平衡的能力,且因胞壁厚度及胞径不等,胞壁逐渐皱折或向腔内塌陷,并逐渐压溃至压密化。

根据图 5 给出的竹材顺纹压缩应力-应变曲线,测得屈服点应变约为 $\epsilon_e = 7\%$,回归分析表明,由此分界点所得到的一个线性方程(弹性阶段)和一个 4 次多项式(屈服后强化阶段)对整个压缩大变形曲线均具有很高的拟合度。当然,仍如上所述,如果试件压缩率在 30% 以内,当以式(1)、(2)两个线性方程来描述应力-应变关系较为简便。根据本试验结果,无论是以 2 个线性方程(1)、(2)来拟合 $\epsilon < 30\%$ 的变形曲线,还是用一个线性方程和一个 4 次多项式来拟合整个压

(下转第 32 页)

要开 2 条防变形槽,深 5 mm,宽 3~3.5 mm。

4.2 效益评估

经济效益 充分利用杉木小径材,节约了珍贵树种木材,有效地提高了木材的综合利用率,生产成本大为降低;改性白乳胶价格低、胶接性能好;UV 漆自身的成本低,其不可燃性节省了防爆与单独贮存的费用,此外,UV 漆涂饰表面的敏感性低,因而降低了包装费用^[3];生产流水线自动化程度高,大大优化了生产过程,减少了操作人员、提高了效率。

生态效益 ①面板厚度仅 0.7 mm,节约了大量的珍贵木材;②改性白乳胶不含甲醛,无毒、无臭、无污染;③ UV 漆不含溶剂,施工时无残留物产生。

5 初步结论

本试验开发的 3 层不同树种木材复合地板,由于

采用了耐磨、耐烫的第 2 代 UV 漆,具有:①表面硬度高,耐磨耐烫;②保持天然木材的特性,纹理清晰;③结构和尺寸稳定性好,强度亦高;④具有耐热、耐寒和耐温变性;⑤UV 漆膜外观丰满厚实,保光、保色性和透明度好;⑥铺设装修方便,容易维护,牢固耐用;⑦无甲醛释放;⑧成本低廉。

参考文献:

- [1] 刘鹏,等. 东南亚热带木材[M]. 北京:中国林业出版社,1993, 147-149.
- [2] 李兰亭. 胶粘剂与涂料[M]. 北京:中国林业出版社,1992,87-106.
- [3] Wolfgang klumpp. 木材工业中水基漆的发展趋势[J]. 国际木材加工技术,1999(1): 40-44.
- [4] 吴智耀. 复合地板的生产工艺技术[J]. 林产工业,1997,(24) 4: 41-43.

(上接第 14 页)

表 1 竹材在压缩大变形下的应力-应变回归关系式

Tab. 1 Stress and strain regression of bamboo with large compressive deformation

加载 温度/℃	线性阶段	线性强化阶段	幂强化阶段
横 向	30 $\sigma=4.7189\epsilon$	$\sigma=0.3963\epsilon+24.898$ $\sigma=0.0043\epsilon^3-0.412\epsilon^2+14.187\epsilon-137.18$	
	100 $\sigma=2.873\epsilon$	$\sigma=4\times 10^{-5}\epsilon^4-0.0032\epsilon^3+0.0824\epsilon^2-0.442\epsilon+27.146$ $\sigma=0.4498\epsilon+13.385$ $\sigma=0.008\epsilon^3-0.879\epsilon^2+33.395\epsilon-400.93$	
横 向	30 $\sigma=10.729\epsilon$	$\sigma=8\times 10^{-5}\epsilon^4-0.0075\epsilon^3+0.264\epsilon^2-3.2894\epsilon+29.164$ $\sigma=1.6258\epsilon+58.432$ $\sigma=0.0999\epsilon^2-5.599\epsilon+190.32$	
	100 $\sigma=8.456\epsilon$	$\sigma=3\times 10^{-5}\epsilon^4-0.0028\epsilon^3+0.1063\epsilon^2-0.0566\epsilon+67.21$ $\sigma=1.0843\epsilon+46.658$ $\sigma=0.048\epsilon^2-1.8923\epsilon+93.735$	
		$\sigma=7\times 10^{-5}\epsilon^4-0.0004\epsilon^3+0.018\epsilon^2+0.728\epsilon+47.714$	

注:应力单位:MPa;应变单位:%;相关系数 >0.985
 压缩大变形曲线均具很高拟合度(见表 1)。

需要说明的是,竹材在受压屈服后,由于胞壁厚薄不等,细胞是逐渐压溃向内塌陷、充填至密实,所谓压密化临界点是不易确定的。所以,本文所取的 $\epsilon_d=30\%$,严格地讲,仅指试件在压缩屈服后,加载曲线由线性强化过渡为幂强化的过渡点。通过在显微镜下对小试样的动态观察(详见续文Ⅱ),竹材加载至该过渡点时,明显可见竹材的基本组织和维束管中部的薄壁组织多已破碎填实,仅导管腔被受压弯曲的纤维帽所围尚存少量空隙,继续加载,在迫使维束管的纤维帽压折合拢的同时,周围基本组织已经开始压密。

3 结论

竹材在径向和弦向施压大变形下具有相同的力学行为,其整个大变形过程可分为 3 个阶段:线性弹性阶段、屈服后弱线性强化阶段和幂强化阶段。在本试验条件下,测取屈服应变 $\epsilon_s=6\%$ 、压密点应变 $\epsilon_d=$

30%所得到的相应三个阶段的应力-应变回归方程具有很高的相关性。但由于竹材在横压大变形试验中压密点不易确定,所以在工艺上,如果压缩率在 30%以上,当以一个线性方程描述其弹性阶段、以一个 4 次多项式描述其屈服后的整个压缩大变形下的应力-应变关系为宜。对某一特定环境和工艺条件,

可以很方便地通过一组试验确定该条件下应力-应变关系式中的参数,所得回归方程具有很高的拟合度。

竹材在轴向压缩大变形下的宏观行为与横向压缩时的大体相似,具有相近的屈服应变,但屈服应力是横向的 2~3 倍;无论是两阶段还是三阶段回归方程的组合,也同样适用于描述竹材在轴向压缩下的应力-应变关系。

参考文献:

- [1] 王培元. 木材横纹压缩流变参数的测定[J]. 林业科学, 1985, 21(4):404-413.
- [2] 刘一星. 木材横纹压缩大变形应力-应变关系的定量表征[J]. 林业科学, 1995, 31(5):436-441.
- [3] Lakkard S C, Parel J M. Fiber Sci. Technol., 1981, 14:319.
- [4] Tabarsa T, Chui Y H. Stress-strain Response of Wood under Radial Compression[J]. Wood Fiber Sci., 2000(32):144-152.
- [5] 陶俊林,蒋平,余作生. 木材静压大变形本构关系研究[J]. 力学与实践, 2000, 23(5):25-27.