

毛竹材玻璃化转变温度的影响因素

黄梦雪¹, 张文标¹, 张晓春¹, 余文军¹, 李文珠¹, 刘贤淼², 戴春平³, 汪孙国⁴

(1. 浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102; 3. 加拿大林产品创新工业研究院, 温哥华 V6T1W5; 4. 加拿大光润生物质材料与生物能源技术公司, 埃德蒙顿 T6R3J6)

摘要: 利用动态机械热分析仪(DMTA)研究毛竹 *Phyllostachys edulis* 材在不同初含水率、径向部位、竹龄和高度等条件下的玻璃化转变温度(T_g)并分析其变化规律, 旨在为竹材的软化和展平提供理论依据。结果表明: ①在温度50.0~250.0 °C范围, 随初含水率增加(0%, 15%, 30%, 60%和饱水), 毛竹材的玻璃化转变温度显著降低, 从绝干材的217.3 °C降低到饱水材的113.0 °C, 毛竹材在较低含水率(<15%)范围内比高含水率(>15%)范围内变化对毛竹材的玻璃化转变温度影响更明显, 表明提高毛竹材初含水率对竹材软化有益。②在相同竹龄、初含水率和高度条件下的毛竹材沿竹壁径向的竹青、竹肉和竹黄的玻璃化转变温度有差别但不显著, 两两之间最大和最小分别相差12.0 °C和0.5 °C。③在相同径向部位和含水率条件下, 不同竹龄和不同高度的毛竹材玻璃化转变温度均无明显差异, 相差在5.0 °C以内。这有助于实际生产中最大化利用原材料。图4表2参22

关键词: 木材科学与技术; 毛竹; 竹材; 动态机械热分析仪; 玻璃化转变温度; 储能模量; 损耗模量

中图分类号: S781.9; TS652 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)06-0897-06

Factors for *Phyllostachys edulis* timber glass transition temperatures

HUANG Mengxue¹, ZHANG Wenbiao¹, ZHANG Xiaochun¹, YU Wenjun¹, LI Wenzhu¹, LIU Xianmiao²,
DAI Chunping³, WANG Sunguo⁴

(1. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 3. FPIInnovations, Vancouver B C V6T1W5, Canada; 4. Sungro Bioresource & Bioenergy Technologies Corp., Edmonton T6R3J6, Canada)

Abstract: To provide a theoretical basis for bamboo softening and flattening, a dynamic mechanical analyzer (DMTA) was used at various initial moisture contents (MC) (0%, 15%, 30%, 60%, and water saturation), radial positions (outer, median, and inner layers), ages (3, 5, and 7 years old), and heights (2.5 m, 4.0 m, 5.5 m) to study the glass transition temperature (T_g) of *Phyllostachys edulis* bamboo. The test were performed between 30.0–260.0 °C with heating rate 5 °C·min⁻¹, and amplitude 5 μm and a frequency of 3 Hz. Results showed: that (1) with an increase of MC at 50.0–250.0 °C, T_g decreased from 217.3 °C to 113.0 °C. Initial MC changes at lower levels (<15% MC) had a greater effect on T_g than moisture content changes >15% MC. (2) The T_g for the outer, median, and inner layers of bamboo along the radial direction showed little differences under the same age, initial MC, and height; maximum difference in T_g was 12.0 °C and minimum was 0.5 °C. (3) With identical radial positions and initial MC, different ages and the heights did not affect bamboo T_g which had differences of less than 5.0 °C. This study showed that an increased initial MC was good for bamboo softening and will, thus, help make full use of materials in the production process. [Ch, 4 fig. 2 tab. 22 ref.]

Key words: wood science and technology; *Phyllostachys edulis*; bamboo timber; dynamic thermal mechanical analysis; glass transition temperature; storage modulus; loss modulus

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-03-24

基金项目: 国际竹藤中心专项资助项目(1632013002); 浙江省重大科技专项资助项目(2014C02018, 2014C02004)

作者简介: 黄梦雪, 从事竹木材加工与利用研究。E-mail: 464685741@qq.com。通信作者: 张文标, 教授, 博士, 从事竹木材加工与利用研究。E-mail: zwb@zafu.edu.cn

毛竹 *Phyllostachys edulis* 是竹类植物中用途最为广泛、经济价值最大的竹种,生长快,产量高,材质好,目前已开发出竹工艺品、竹地板、竹家具、竹炭等许多产品^[1]。毛竹秆直径小,壁薄中空,尖削度大,中间有节,竹青、竹肉和竹黄层的结构不同,这些特点造成毛竹产品加工难以实现连续机械化、自动化,生产效率低,材料有效利用率一般只有 20%~50%,同时产品制作过程中常需使用大量的胶黏剂和化学物质,污染环境,严重制约了竹材加工业的健康快速发展,产业亟须创新和转型升级。原竹展平技术是近来许多专家学者和厂商关注的热点,它的成功开发将为竹材的工业化利用开辟新的途径,可以解决毛竹材本身结构和加工过程中的相应难题,被竹加工行业认为是目前科技含量最高的产品。而原竹展平技术的关键是竹材软化,软化又与竹材的玻璃化转变温度(T_g)直接有关,当温度加热到 T_g 时,材料的形变明显地增加,并在随后的一定温度区间形变相对稳定,此状态即为高弹态,即竹材的非结晶区部分从玻璃态转变到高弹态的过程,此时竹材的性质会发生巨大的改变^[2]。许多专家学者如张齐生^[3]、汪孙国等^[4]、姜海波等^[5]、钱俊等^[6]和程瑞香等^[7]已开展了竹材软化方面的工作,主要采用尿素、碳酸氢钠等弱碱类软化剂,软化温度低于 140.0 °C,时间都在 30 min 以上,软化效果不理想,未达到竹材的 T_g 。李霞镇等^[8]对富阳产含水率 8%的毛竹材竹青和竹黄的 T_g 研究分析表明,4.5 年生毛竹的 T_g 从竹黄到竹青,逐渐增大,在 210.4~222.8 °C 范围内,0.5 年生、2.5 年生和 4.5 年生毛竹材竹肉部分 T_g 无明显差异。江敬艳^[9]用动态机械热分析仪(DMTA)测试仪研究南京林业大学竹类植物园的 7 年生绝干毛竹材竹肉的 T_g 在 18.03~189.0 °C,用 DSC 方法研究的绝干毛竹材竹青 T_g 为 208.3~211.3 °C,竹肉 T_g 为 198.7 °C,竹黄 T_g 为 217.8 °C。MATAN 等^[10]利用 DMTA 测试不同初含水率(0%, 13%, 37%和 60%)3~4 年生的泰国马来甜龙竹 *Dendrocalamus asper* 的 T_g ,绝干时 T_g 最大为(194.0 ± 10.0) °C,含水率 60%时最小是(85.0 ± 10.0) °C。目前,对竹材 T_g 方面的研究报道很少也不全面。因此,本研究用 DMTA 系统研究了毛竹材不同初含水率、竹材部位、竹龄和高度等条件下的 T_g ,分析变化规律,以便为原竹筒软化和展平提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试件制备

毛竹材,由浙江德长竹木有限公司提供。竹龄分别为 3 年生、5 年生和 7 年生,壁厚 8~10 mm,竹筒弯曲度 ≤ 1.5%,无干枯、虫蛀、虫眼、腐朽、干燥裂纹及明显外伤,材质符合 GB/T 2690-1999《毛竹材》标准要求。分别在距毛竹材端头 2.5, 4.0, 5.5 m 处截取长为 60 mm 的竹筒,再将竹筒依次连续截取成竹块:尺寸为 60.0 (L)mm × 9.0 (T)mm × t mm (R),并将每个竹块从弦向劈分成竹青、竹肉、竹黄的竹薄片,并依据测试仪器要求利用 240 号砂纸将试件打磨成尺寸为 60.0 (L)mm × 8.0 (T)mm × 2.0 mm (R)表面平整、厚度均匀的标准试件,以备试验用。

1.2 试件含水率调控

试件含水率调控采用烘干法,即将试件放置水中浸渍至饱和,将饱和试件放入设定温度(103.0 ± 2.0) °C 的恒温干燥箱中干燥,根据目标含水率将试件干燥至相应质量为止,取出密封。目标初含水率分别为绝干, 15%, 30%, 60%, 饱水状态。

1.3 试验方法

实验利用 Q800 型动态机械热分析仪(DMTA)。DMTA 把材料的黏弹性分为 2 个模量:一是储能模量 E' ,即材料在形变过程中由于弹性形变而储存的能量,反映材料黏弹性中的弹性成分,表征材料的刚度;二是损耗模量 E'' ,即材料产生形变时能量散失或转变为热的现象,反映材料黏弹性部分中的黏性成分,表征材料的阻尼特性^[11]。在 DMTA 图谱中 T_g 有 3 种对应温度,第 1 种是 E' 曲线上折点所对应的温度;第 2 种是 E'' 曲线峰点所对应的温度;第 3 种为 $\tan\delta$ 峰所对应的温度^[12]。本研究以 ISO 标准中建议的 E'' 曲线峰点所对应的温度作为 T_g 。

研究采用双悬臂梁弯曲形变模式。测试参数为:温度 30.0~260.0 °C,升温速率 5.0 °C·min⁻¹,测量频率 3.0 Hz,振幅为 15.0 μm。在室温下测量试件的长度、宽度和厚度,并输入仪器中;再将毛竹片放入 DMTA 样品室的夹具中加以固定,然后关闭样品室,开始试验。完成一个试件后,需待样品室的温度降至室温,且保证样品室关闭后稳定温度小于 25.0 °C 才能进行下一个试件的测试。

2 结果与分析

2.1 不同含水率毛竹材的 T_g

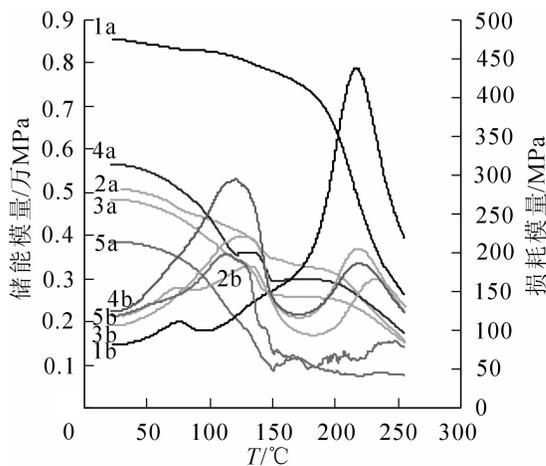
选用距毛竹材端头 5.5 m 处的不同初含水率下的 5 年生毛竹材的竹青、竹肉和竹黄试件，进行 DMTA 的 E' 和 E'' 测试，测试数据图谱(图 1) E'' 曲线峰所对应的温度即为毛竹材的 T_g (表 1)。由表 1 可知：随着初含水率升高，毛竹材竹青、竹肉和竹黄的 T_g 均不同程度降低，将绝干状态与饱水状态的毛竹材的 T_g 进行对比，竹青 T_g 降低了 103.5 °C，竹肉 T_g 降低了 104.3 °C，竹黄 T_g 降低了 116.1 °C。这是由于初含水率的增加，半纤维素降解，水分子容易进入毛竹材纤维的无定形区使纤维润胀，纤维素分子之间的相互移动变得易发生，从而使表征竹材刚度的弹性模量降低，塑性增强，进而使毛竹材 T_g 降低。同时含水率增加也使毛竹材含有的自由水增多，在细胞腔中的少量的自由水形成类似雪的极细冰晶，这种冰晶在低温时使毛竹材在受力作用时需要克服细胞间隙间的摩擦^[13-14]，因此，毛竹材初含水率升高，使反应毛竹材黏性的损害模量值相应增大。从表 1 中还可知：初含水率(MC)比较低的变化(<15%)比初含水率(MC)高(>15%)的变化对毛竹材的 T_g 影响更大，从而说明，毛竹材细胞腔中自由水对毛竹材的 T_g 影响相对较小。从图 1 竹肉的 E' 和 E'' 曲线图谱中还可知：不同初含水率的毛竹材 E' 均随着温度的升高呈现不同程度的下降趋势；在初始温度状态下(取 50.0 °C 进行分析)，初含水率越大， E' 越低，绝干毛竹材 E' 为 8 446.0 MPa，饱水毛竹材 E' 为 3 766.0 MPa，降低了 4 680.0 MPa，表明随着初含水率的升高，毛竹材弹性模量降低和抗弯曲性能降低，达到了竹材半纤维素和木质素的玻璃化转变温度，使竹材容易软化。

表 1 毛竹材不同初含水率不同竹部位的玻璃化转变温度 T_g
Table 1 T_g of bamboo with various initial moisture contents & radial positions

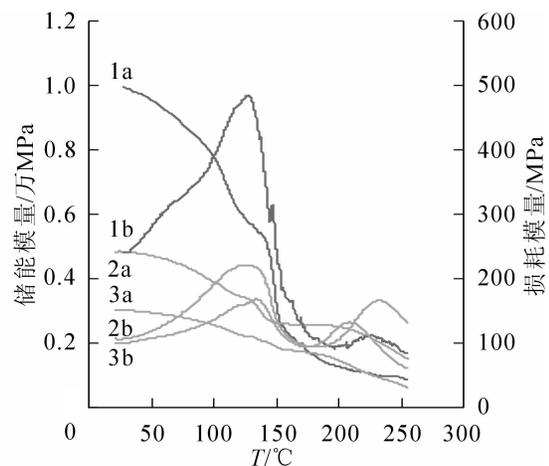
毛竹材含水率/%	$T_g / ^\circ\text{C}$		
	竹青	竹肉	竹黄
0	222.7	217.3	223.2
15	134.7	133.9	135.2
30	127.4	122.9	134.7
60	122.5	121.5	113.2
饱水	119.2	113.0	107.1

2.2 不同部位毛竹材 T_g

从表 1 可知：在毛竹初含水率为 0%，15% 和 30% 时，毛竹材的竹黄 $T_g >$ 竹青 $T_g >$ 竹肉 T_g ，同江敬艳等^[9]研究 7 年生毛竹材绝干含水率时结果相吻合；在初含水率为 60% 和饱水时，毛竹材的竹青 $T_g >$ 竹肉 $T_g >$ 竹黄 T_g ，同李霞镇等^[8]研究 4.5 年生毛竹材的结果相一致。从图 2 中也可看出：毛竹材(30%MC)3 个部位的竹壁径由内而外 E' 和 E'' 依次增大，即靠近竹青部位最大，在 50.0 °C 时分别达到 9 552.0 MPa 和 279.0 MPa，竹肉次之为 4 716.0 MPa 和 118.0 MPa，竹黄最小为 2 946.0 MPa 和 108.0 MPa。主要是



1. 绝干；2. 15%；3. 30%；4. 60%；5. 饱水
a. 储能模量；b. 损耗模量



1 竹青；2 竹肉；3 竹黄
a: 储能模量；b: 损耗模量

图 1 不同初含水率 5 年生毛竹材竹肉的 E' 和 E'' 图
Figure 1 E' and E'' of 5 years old bamboo of median layer with various initial moisture contents

图 2 不同竹部位 5 年生 30% 毛竹材的 E' 和 E'' 图
Figure 2 E' and E'' of 5 years old bamboo in 30% MC with different radial positions

由于毛竹材的有机组成和竹壁部位有关^[10,15],距毛竹材端头 5.5 m 处的竹青部位的木质素和 α -纤维素含量最高,从竹青到竹黄逐渐升高,综纤维素含量基本不变,半纤维素从竹青到竹黄逐渐降低^[16],竹材三大主要有机成分相互交联作用,随着温度升高,毛竹材细胞壁软化,木素降解,纤维素结晶区被破坏。

当毛竹材试件处于纤维饱和点以上时,竹黄 T_g 小于竹肉,竹青 T_g 最大。这是由于在增加试件含水率的过程中,会有抽提物被抽出,毛竹竹青结构致密,含有蜡质和有机硅,竹青部分的冷水、热水抽提物较竹黄低。竹黄中的抽提物降低,其有机成分的交联程度也降低,导致竹黄 T_g 降低程度比竹青和竹肉大。再者,水分的增加使纤维内部结合力降低,半纤维素含有大量氢键吸收水分,易发生降解。同时水分增加可以破坏三大成分之间的连接键,降低其交联程度,从而提高竹材的软化性能。由于水分增加到一定程度后竹青 T_g 大于竹黄 T_g ,这从一定程度上可推断竹青部位有机物的交联程度大于竹肉和竹黄且竹青部位受水分影响较小。

2.3 不同竹龄毛竹材 T_g

选取初含水率为 30% 毛竹不同部位进行不同竹龄毛竹材的 T_g 测试(表 2),并得到竹肉 DMTA 的 E' 和 E'' 测试图谱(图 3)。从表 2 可知:竹龄(3 年生、5 年生和 7 年生)的毛竹材 T_g 竹青为 124.0~128.8 °C,竹肉 120.5~122.9 °C,竹黄 132.3~136.3 °C,不同竹龄同一部位的毛竹材 T_g 基本相近无显著差异,绝干毛竹材 T_g 也是类似的结论,但绝干毛竹材 T_g 数值远比初含水率 30% 的要高。从图 3 可知:当温度从 50.0 °C 升到 250.0 °C 时,3 年生、5 年生和 7 年生 E'' 呈先增大后减小的趋势,毛竹材 E' 均呈下降趋势,3 年生 E' 从 4 671.0 MPa 降到 1 688.0 MPa,5 年生 E' 从 4 716.0 MPa 降到 1 637.0 MPa,7 年生 E' 从 4 139.0 MPa 降到 1 377.0 MPa,7 年生毛竹材的抗弯性能最低。不同竹龄的绝干毛竹材的竹青、竹肉和竹黄的 T_g 也无显著差异,但比 30% 初含水率的毛竹材 T_g 要高,进一步说明,初含水率的大小对毛竹材的 T_g 有较大的影响。

在毛竹材成熟阶段,纤维素的含量随着竹龄的增加而减少,到 II 度毛竹(3~4 年生)纤维素含量趋于稳定,3,5,7 年生竹材木质素、半纤维素和 α -纤维素含量差异较小,综纤维素含量的差异不显著,且随着毛竹成熟度的增加,竹材内的热抽提物、灰分等少量成分逐渐减少^[15-17],故随着竹龄的增加,毛竹材的储存模量和损耗模量会相应的增加。研究表明:木质材料的 T_g 是纤维素、半纤维素和木质素共同作用的结果。在全干状态下纤维素、半纤维素和木质素的 T_g 分别为 231.0~253.0 °C,167.0~217.0 °C 和 134.0~235.0 °C^[18-20],水分增加其对应的软化点温度会相应的降低。在竹材的成熟过程中,木质化与细胞壁增厚同时进行,随着细胞壁连续的增厚,纤维素、半纤维素和木素同时积累,各自增加的质量比例保持不变,即三大组分在成熟竹材中的干质量百分率不随竹龄的变化而变化^[21-22]。因此,在试验选定水平内,竹龄对成熟毛竹材的 T_g 影响不明显。

2.4 不同高度毛竹材 T_g

选取初含水率为 30% 的 5 年生毛竹不同高度的竹肉部位 DMTA 的 E' 和 E'' 测试图谱(图 4)。不同高度的毛竹材 E'' 随着温度的增加呈先增大后减小的趋势,离根部 2.5 m,4.0 m 和 5.5 m 处的毛竹材的 T_g 分别为 125.7,123.9,122.9 °C,表明不同高度同一部位(竹肉)毛竹材 T_g 变化不显著。由图 4 还可知:当温度从 50.0 °C 升到 250.0 °C 时,2.5 m,4.0 m 和 5.5 m 处的毛竹材 E' 均随着温度的增加而降低,2.5 m 的 E' 从 5 732.0 MPa 降到 1 908.0 MPa,4.0 m 的 E' 从 5 051.0 MPa 降到 2 234.0 MPa,5.5 m 的 E' 从 4 716.0 MPa 降到 1 637.0 MPa;在同一温度下,不同高度的竹材的 E' 和 E'' 都具有随着毛竹高度的增加而降低的趋势,在温度开始变化阶段,2.5 m 处的试样 E' 最高,而 5.5 m 处的试样 E' 最低,毛竹材越靠近梢部其抗弯性能越低。这是由于毛竹材的有机组成中木质素、综纤维素随着毛竹高度的增加而逐渐增加,半纤维素从基部到梢部逐渐降低,但 α -纤维素含量没有显著的变化。竹材 T_g 与纤维素、半纤维素和木质素含量及其三者之间的混溶性有关,不同高度毛竹材的有机成分含量不同导致了 T_g 差异,它还与有机成分的交联程度有关,交联程度随着毛竹材高度的增加而降低,可看出基部的毛竹材的 T_g 和损耗模量要略高于梢部处的,所以综合来看,离根部 2.5 m,4.0 m 和 5.5 m 处毛竹材的 T_g 基本相近。

表 2 不同竹龄的 T_g

Table 2 T_g of bamboo with different ages

竹龄	0 含水率 T_g /°C			30% 含水率 T_g /°C		
	竹青	竹肉	竹黄	竹青	竹肉	竹黄
3 年生	220.6	215.9	224.0	124.0	120.5	132.3
5 年生	222.7	217.3	223.2	127.4	122.9	134.7
7 年生	224.8	219.7	227.5	128.8	121.6	136.3

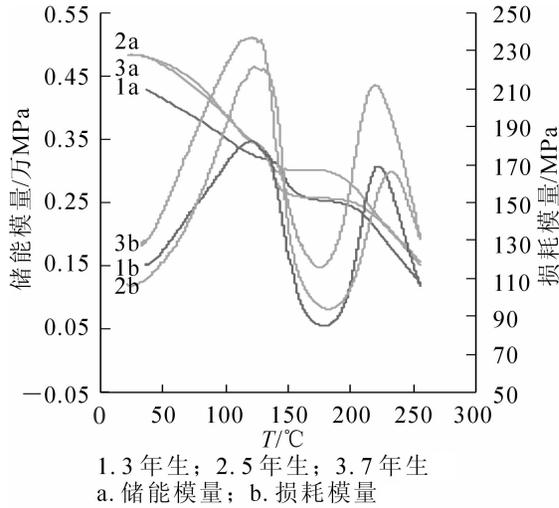


图3 不同竹龄30%毛竹材竹肉的 E' 和 E'' 图
Figure 3 E' and E'' of median layer in 30% MC with different ages

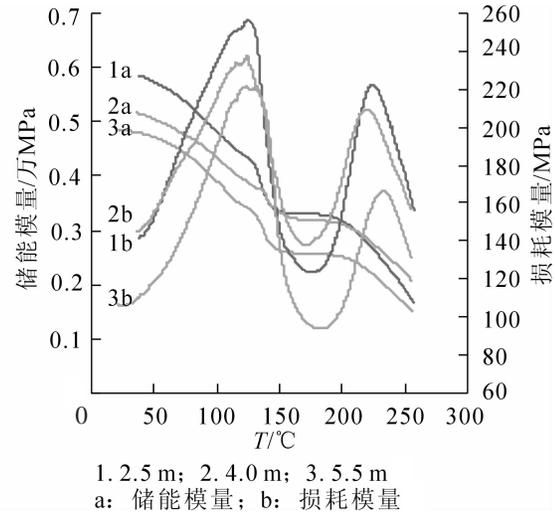


图4 不同高度5年生30%毛竹材竹肉的 E' 和 E'' 图
Figure 4 E' and E'' of 5 years old bamboo of median layer in 30% MC with different heights

3 结论

竹材初含水率对毛竹材的 T_g 影响显著,随着初含水率增加,其 T_g 显著降低;绝干毛竹材的 T_g 最大为217.3℃,饱水状态的毛竹材 T_g 最小为113.0℃。在相同竹龄、初含水率和相同部位的毛竹材沿竹壁径向的 T_g 不同。说明实际生产中可通过控制毛竹材的初含水率来降低 T_g ,从而实现毛竹材充分软化。

在平衡含水率以下(0%, 15%和30%)其竹肉 T_g 最小,其次是竹青和竹黄;在含水率较高(60%和饱水状态)其竹黄 T_g 最小,其次是竹肉和竹青。说明在实际竹材软化过程中可以考虑去除竹青和竹黄,便于降低竹材 T_g ,易于实现软化充分。30%初含水率条件下不同竹龄和高度毛竹材 T_g 并无显著差异。竹龄(3年生、5年生和7年生)的毛竹材 T_g 竹青为124.0~128.8℃,竹肉120.5~122.9℃,竹黄132.3~136.3℃;离根部2.5 m, 4.0 m和5.5 m处的毛竹材竹肉的 T_g 分别为125.7, 123.9, 122.9℃。说明实际生产过程中可以选用竹材的竹龄和高度更加宽泛。

4 参考文献

- [1] 张齐生. 我国竹材加工利用要重视科学和创新[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(1): 1-4.
ZHANG Qisheng. Attaching importance to science and innovation in the processing and utilization of bamboo timber in China [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, 20(1): 1-4.
- [2] 程瑞香. 动态热机械分析在木材加工行业的应用[J]. 木材工业, 2005, 19(4): 28-30.
CHENG Ruixiang. Applications of dynamic mechanical analysis in wood processing industry [J]. *China Wood Ind*, 2005, 19(4): 28-30.
- [3] 张齐生. 竹材胶合板的研究(I)竹材的软化与展平[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1988, 12(4): 13-20.
ZHANG Qisheng. Studies on bamboo plywood (I) the softening and flattening of bamboo [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 1988, 12(4): 13-20.
- [4] 汪孙国, 华毓坤. 软化工艺条件对竹材及其重组材性能的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1994, 18(1): 57-62.
WANG Sunguo, HUA Yukun. Effect of softening process variables on reconsolidated bamboo and bamboo itself properties [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 1994, 18(1): 57-62.
- [5] 姜海波, 彭伊光. 竹材软化工艺及设备[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(4): 53-54.
JIANG Haiibo, PENG Yiguang. Technology and equipment of bamboo softening [J]. *For Mach & Woodwork Equip*, 2007, 35(4): 53-54.

- [6] 钱俊, 叶良明, 李文珠. 毛竹展平的初步研究[J]. 竹子研究汇刊, 1999, **18**(1): 23 – 26.
QIAN Jun, YE Liangming, LI Wenzhu. Preliminary study on bamboo unfolding [J]. *J Bamboo Res*, 1999, **18**(1): 23 – 26.
- [7] 程瑞香, 张齐生. 高温软化处理对竹材性能及旋切单板质量的影响[J]. 林业科学, 2006, **42**(11): 97 – 100.
CHENG Ruixiang, ZHANG Qisheng. Effect of softening treatment at high temperature on property and veneer quality of bamboo [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(11): 97 – 100.
- [8] 李霞镇, 任海青, 王小青. 毛竹材动态热机械特性分析[J]. 西南林业大学学报, 2011, **31**(4): 80 – 84.
LI Xiazhen, REN Haiqing, WANG Xiaoqing. Analysis on dynamic mechanical properties of *Phyllostachys pubescens* material [J]. *J Southwest For Univ*, 2011, **31**(4): 80 – 84.
- [9] 江敬艳. 圆竹家具有研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2001.
JIANG Jingyan. *A Study on Bamboo-culm Furniture* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2001.
- [10] MATAN N, KYOKONG B, PREECHATIWONG W. Softening behavior of black sweet-bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer) at various initial moisture contents [J]. *Wal J Sci Technol (WJST)*, 2011, **4**(2): 225 – 236.
- [11] 邓友娥, 章文贡. 动态机械热分析技术在高聚物性能研究中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2002, **21**(1): 38 – 39.
DENG You'e, ZHANG Wengong. A application of dynamic mechanical thermal analyses technique in polymer research [J]. *Lab Res Explor*, 2002, **21**(1): 38 – 39.
- [12] 过梅丽. 高聚物与复合材料的动力学热分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 32 – 38.
- [13] CHENG Ruixiang, ZHANG Qisheng, SUI Shujuan. Improvement of softening treatment technology of bamboo [J]. *Wood Sci Technol*, 2006, **40**(4): 327 – 335.
- [14] 韩书广, 那斌, 罗婉璐, 等. 不同含水率速生杨木 DMA 图谱分析及应用[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(9): 69 – 70.
HAN Shuguang, NA Bin, LUO Wanjun, *et al.* DMA spectra analysis of fast-growing poplar with different moisture contents [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39**(9): 69 – 70.
- [15] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 235 – 252.
- [16] 江泽慧, 于文吉, 余养伦. 竹材化学成分分析和表面性能表征[J]. 东北林业大学学报, 2006, **34**(4): 1 – 6.
JIANG Zehui, YU Wenji, YU Yanglun. Analysis of chemical components of bamboo wood and characteristic of surface performance [J]. *J Northeast For Univ*, 2006, **34**(4): 1 – 6.
- [17] 马灵飞, 马乃训. 毛竹材材性变异的研究[J]. 林业科学, 1997, **33**(4): 356 – 364.
MA Lingfei, MA Naixun. Study on variation in bamboo wood properties of *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens* [J]. *Sci Silv Sin*, 1997, **33**(4): 356 – 364.
- [18] 孙丰波, 费本华, 江泽慧, 等. γ 射线辐照处理竹材的动态黏弹性与温度变化的关系[J]. 林业科学, 2012, **48**(3): 160 – 163.
SUN Fengbo, FEI Benhua, JIANG Zehui, *et al.* Dynamic viscoelastic properties of γ rays treated bamboo strip in different temperatures [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(3): 160 – 163.
- [19] BACK E L. Glass transitions of wood components: hold implications for molding and pulping processes [J]. *Tappi*, 1982, **65**: 107 – 110.
- [20] LIU Jin, ZHANG Haiyang, CHRUSCIEL L, *et al.* Study on a bamboo stressed flattening process [J]. *Eur J Wood Wood Prod*, 2013, **71**(3): 291 – 296.
- [21] 温太辉, 周文伟. 中国竹类维管束解剖形态的研究初报(之一)[J]. 竹子研究汇刊, 1984, **3**(1): 1 – 21.
WEN Taihui, ZHOU Wenwei. A report on the anatomy of the vascular bundle of bamboos from China (I) [J]. *J Bamboo Res*, 1984, **3**(1): 1 – 21.
- [22] 温太辉, 周文伟. 中国竹类维管束解剖形态的研究初报(之二)[J]. 竹子研究汇刊, 1985, **4**(1): 28 – 43.
WEN Taihui, ZHOU Wenwei. A report on the anatomy of the vascular bundle of bamboos from China (II) [J]. *J Bamboo Res*, 1985, **4**(1): 28 – 43.