

天然长竹纤维的分离机理及其制备方法初探

张 蔚^{1,2} 李文彬¹ 姚文斌²

(1 北京林业大学工学院 2 浙江林学院工程学院)

摘要:该文阐述了目前天然长竹纤维的制备方法及存在的问题,介绍了作者提出的热-机械耦合开纤方法。该方法基于断裂力学理论,使竹材在热-机械载荷协同作用下,利用竹子纤维和基体之间裂纹的扩展实现竹子纤维的分离。本文着重从宏观力学的角度分析了竹子开纤过程中,初始裂纹的生成及其扩展的行为以及相应的载荷条件,提出了用该方法实现竹子纤维分离的条件和主要影响参数。

关键词:天然竹纤维,分离,热-机械耦合

中图分类号:S785 **文献标识码:**S785 **文章编号:**1000-1522(2007)04-0063-04

ZHANG Wei^{1,2}; LI Wen-bin¹; YAO Wen-bin². **Separating mechanism and preparation method of the longer natural bamboo fiber.** *Journal of Beijing Forestry University* (2007) 29(4) 63-66 [Ch, 10 ref.]

¹ School of Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

² College of Engineering, Zhejiang Forestry University, Lin'an City, 311300, P. R. China.

This paper expounds the present methods of making long natural bamboo fiber and their problems, puts forward a new method to unfasten bamboo fiber, *ie* hot-machine coupling method invented by the authors. The method is based on the fracture mechanics theory, under the combined force of heat and machine load on bamboo plate, realizes the separation of bamboo fibers by the propagating crack between bamboo fiber and matrix. The research mainly analyzed the behavior of making original crack in bamboo and propagating crack as well as their load conditions by macromechanics. Finally, the conditions and main factors to unfasten bamboo fiber by this method was put forward.

Key words natural bamboo fiber, separation, hot-machine coupling

竹纤维可分为天然竹纤维和再生竹纤维两种。再生竹纤维又称为粘胶竹纤维或竹浆纤维,它以竹浆为原料经加入化学填料喷丝成为可纺的纤维,现已应用于纺织领域。天然竹纤维又称为原生竹纤维,它是用机械、物理等方法将竹子直接加工制成的纤维,由于天然竹纤维可降解,竹纤维现已开始用于建筑建材、汽车制造、污水处理、生活制品等行业^[1-2]。天然竹纤维横截面布满了大大小小的空隙,可以在瞬间吸收并蒸发水分。由于天然竹纤维的特殊结构,其横截面的高度“中空”,业内专家称天然竹纤维为“会呼吸”的纤维。天然竹纤维光泽亮丽,具有独特的抗菌防臭性能及优良的着色性、反弹性、悬

垂性、耐磨性、抗菌性。因此,在纺织领域具有极其重要的应用前景^[3]。

竹纤维形态接近纺织用麻纤维,具备纺织用纤维的潜质,但竹纤维其单纤维长度较短,只有 2 mm 左右,因此必须采用工艺纤维(束纤维或长纤维)才能使其成为纺织用纤维。目前人们所制取的竹纤维束太粗、较硬、且均匀度差,木质素残余较多,这与纺织用纤维所必须具有的一定细度、柔软性及强力还有一定差距^[4]。本文总结并分析了目前国内外竹子长纤维的加工方法及存在的问题,提出了通过热-机械耦合开纤法制备长竹纤维的方法,并探讨了其纤维分离的机理。

收稿日期:2007-01-18

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Y305328)。

第一作者:张蔚,博士生,副教授。主要研究方向:竹材加工及利用、林业机械自动化与智能化。Email: zhangweix0025@sina.com 地址: 311300 浙江临安浙江林学院工程学院。

责任作者:李文彬,教授,博士生导师。主要研究方向:林业机构自动化与智能化、人类工效学。电话: 010-62338139 Email: leewb@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京林业大学工学院。

1 竹纤维的生产方法及现状

为满足长纤维生产的需要,日本 1994 年由 ASK 株式会社、三信整热工业株式会社(日本神奈川县)提出了竹材长纤维的生产方法,这些方法包括利用压辊或碾压机直接将竹材压开制取竹纤维,或用闪爆法及炸药爆炸来提取竹纤维.

近年来,我国制作竹材长纤维有以下几种方法.

1)蒸煮锤击或碾压开纤法. 该方法一般将竹材分片,然后蒸煮软化,使纤维牢固结合一体的木素胞间层部分分离,通过锤击或碾压来削弱纤维之间的结合强度. 竹片在受到机械冲击摩擦的外力作用下,最终导致纤维分解. 此方法对纤维的强力损伤大,纤维的细度及均匀度难以保证.

2)机械梳解制纤法. 该方法采用高速旋转的钉辊或针板将经过碾压的扁竹材直接梳解制成纤维束形态. 这一方法工艺过程简单,加工效率较高. 但由于生产过程中纤维被压碎或压断,或采用强力的机械作用破坏了纤维的强力,使所获得的竹纤维粗、短、脆,柔韧性差,一般只能用于生产竹纤维板等低附加值产品.

3)化学机械法. 该方法基本采用造纸制浆工艺原理,首先用化学药品对竹材进行预处理,使竹材中的胶质、木质素、半纤维素等受到破坏而溶解,从而削弱与纤维之间的结合力,再经机械外力作用而形成纤维. 此法纤维得率低,耗费化学品,制得的纤维还有一定酸性,纤维处理工艺复杂,成本高.

从以上方法的分析可以看出,目前国内外长纤维的生产方法各具特点,但均难以满足生产高质量长纤维的要求. 因此,笔者通过对竹材特性及纤维分离方法的研究提出了热-机械耦合开纤的方法,并探讨了其理论依据.

2 热-机械耦合开纤法

2.1 热-机械耦合开纤加工方法

该方法首先将竹材分片成形,然后放在特制的高压蒸煮容器内蒸煮软化,再采用机械外载将竹片夹裂松解产生微裂纹并使这些裂纹沿平行于纤维方向扩展以引发竹材开纤,然后在另一外载荷的协同作用下,促使竹材宏观裂纹不断扩展,实现其界面脱粘分层,从而获得竹子粗纤维.

2.2 应用及特点

竹子粗纤维,再经过后续的软化、梳理等一系列工序,可获得细纤维. 利用该方法生产的竹纤维形态均匀,纤维柔软,细度接近麻纤维,并能够实现规模化生产要求. 该项技术与当前正在采用的技术相

比,有以下特点和优势:第一,实现了制备原理上的突破;第二,不受竹种、竹龄、竹节、竹径限制;第三,具有工艺流程顺畅、简化,操作规程容易掌握,处理成本费用低廉,劳动安全性能良好,环境污染小,产品质量和价格竞争力强等优点;第四,资源利用率高.

3 热-机械耦合开纤机理

竹材本质上属于一种天然非均匀纤维增强复合材料^[5]. 从材质看,它的主体由纵向贯通型长纤维组成,这些长纤维处于基质之中. 长纤维之间的结合力很小,与禾本科(Gramineae)其他植物相类似,所不同的是竹子的纤维分外致密、坚韧,纵向抗拉、抗压强度大^[6]. 本文根据竹子的解剖结构将竹材视为由竹纤维和基体组成的复合材料,提出在热-机械耦合外载作用下,首先利用热载使竹材软化,再在竹子的端部加载,使基体开裂并沿轴向形成大量张开型裂纹,在外界条件诱导下激化竹材裂纹不断扩展,加速其界面分层,直接分离并提取粗竹纤维.

3.1 热载对竹纤维分离的作用

竹材主要的化学成分是纤维素、半纤维素、木质素、果胶、蛋白质等,另外还有灰分等少量物质^[7]. 在常温条件下,木素与纤维素、半纤维素之间通过复杂的作用力相互牢牢地结合在一起. 木质素在 77~128℃开始软化,在 140~150℃开始熔化,最高熔化温度在 170~180℃;而纤维素、半纤维素在 240℃以下时,不但不熔化,而且其抗拉强度也无明显降低^[8]. 因此,加载前对竹材蒸煮软化,可部分溶解木素以及糖分和果胶、蛋白质,同时大大降低作为竹材基体的强度,为机械分离竹纤维准备了条件. 此外,作为竹材中的纤维和基体,其热性能相差较大,因此,热应力的作用对纤维分离极为有效.

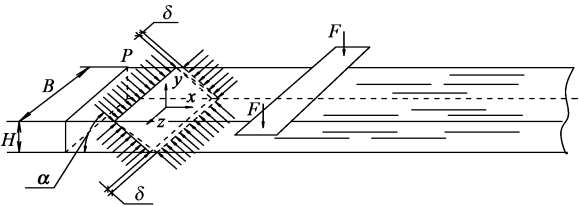
3.2 竹材端部纤维的分离

为了实现竹纤维从竹材中分离,利用外载条件使经过加热后的竹材基体破坏而竹纤维完好无损是热-机械耦合分离的关键. 为此,笔者尝试在竹材端部上下面采用剪切力夹持加载,取得了十分满意的效果.

该方法首先在竹材端部沿与轴向成一定角度 α 的斜截面加载,如图 1 所示. 竹材在外载作用下,产生了剪切和挤压变形. 根据竹材特性,挤压应力难以破坏竹材组织,为方便分析,这里只考虑剪切变形所产生的应力. 先分析竹材的受力情况,根据材料力学可知,竹材受剪面(斜截面)的剪切应力为:

$$\tau_{\alpha} = \frac{P \sin \alpha}{BH} \quad (1)$$

下面结合应力状态来分析开纤原理. 在加载区



B 、 H 分别为竹片的宽度和厚度; P ·加在竹片端部载荷; α ·载荷 P 与 x 轴的夹角; δ ·上下面(左右面)载荷 P 之间距离; F ·对竹片的压紧力

图 1 竹材端部加载示意图

FIGURE 1 Sketch of loading on bamboo ends

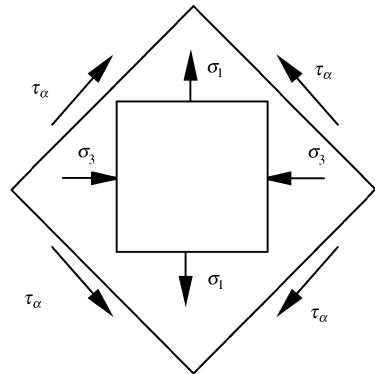


图 2 单元体应力状态

FIGURE 2 Stress state of a bamboo cell

取单元体,如图 2 所示. 由单元体的应力状态可知,当载荷沿 α 为 45° 方向作用时,竹材沿 x 向受到最大压应力 σ_3 ,而在 y 向受到最大拉应力 σ_1 . 当外载产生的剪切力较大时,基体在 y 向拉应力 σ_1 作用下,产生张开型裂纹或 I 型裂纹. 在裂纹的尖端附近形成了一个强应力场,应力在此处高度集中,因而此类裂纹的破坏性最大. 开裂处不但迅即破坏,而且随着外力的不断切入,强应力场随之向前扩展,由此在加载区附近形成竹材多层开裂解纤. 与此同时,因为竹纤维自身的强度大大高于基体强度,而加载区附近的应力场还不能使竹纤维破坏,从而实现竹纤维在竹材端部外载作用区域与基体分离.

由于基体与竹子纤维结合形成的竹材在热载作用下,基体与竹子纤维之间的耦合作用受到严重破坏. 为方便,本文未考虑耦合作用带来的能量损耗及对应力产生的影响.

根据复合材料力学理论及式(1),得出:

$$\tau_m = \frac{G_m}{G} \tau_\alpha = \frac{G_m}{G} \frac{P \sin \alpha}{BH} \tag{2}$$

$$\tau_f = \frac{G_f}{G} \tau_\alpha = \frac{G_f}{G} \frac{P \sin \alpha}{BH} \tag{3}$$

式(2)、(3)中, $G = G_m V_m + G_f V_f$; τ_m 、 τ_f 分别为竹材基体和竹子纤维在 α 斜截面受到的剪切应力; G 、 G_m 、 G_f 分别为竹材、竹材基体和竹子纤维的剪切模量; V_m 、 V_f 分别为竹材基体和竹子纤维在竹材中的

体积比率.

由图 2 单元体分析有:

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_\alpha \tag{4}$$

对竹材基体(视为脆性材料),基体组织开裂破坏的强度条件为: $\sigma_1 \geq \sigma_b^m$, σ_b^m 为竹材基体抗拉强度.

结合式(4),得:

$$\tau_m \geq \sigma_b^m \tag{5}$$

将式(2)带入式(5)得:

$$P \geq \frac{G \sigma_b^m}{G_m \sin \alpha} BH$$

对竹子纤维(视为塑性材料),纤维不断裂的强度条件为:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_s^f$$

式中, $\sigma_2 = 0$, σ_s^f 表示竹子纤维的屈服强度.

结合式(4),得:

$$\tau_f \leq \frac{\sigma_s^f}{\sqrt{3}} \tag{6}$$

将式(3)带入式(6)得:

$$P \leq \frac{\sqrt{3} G \sigma_s^f}{3 G_f \sin \alpha} BH$$

综上,所加载荷只要满足如下条件:

$$\frac{G \sigma_b^m}{G_m \sin \alpha} BH \leq P \leq \frac{\sqrt{3} G \sigma_s^f}{3 G_f \sin \alpha} BH$$

就能使竹材只开裂分纤而不致使纤维断裂破坏.

显然,竹材在适当的外载荷作用下,在 y 向受到最大拉应力使其基体产生大量微裂纹. 裂纹沿轴向扩展的长度由所加载荷决定.

同理,如图 1 所示,在竹材前后面加载,在 z 向(横向)应受到最大拉应力,分析同上. 从理论分析角度,在竹材端部对上下面及前后面同时加载,产生裂纹的效果更佳,同时加载的可行性有待于进一步的实验研究.

3.3 竹材整体开纤

如图 3 所示,在竹材端部裂纹引发下,要实现竹

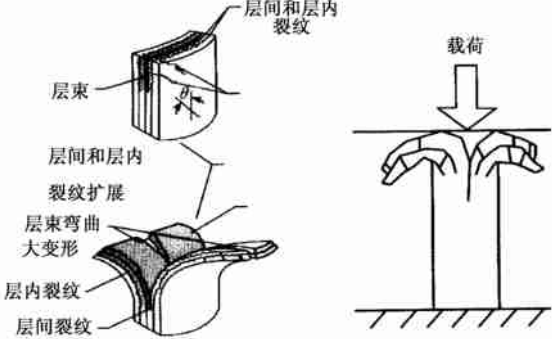


图 3 竹材剥层及裂纹扩展示意图

FIGURE 3 Sketch of cracks extending in bamboo

材整体开纤,还需要使竹材宏观裂纹沿平行于纤维轴向不断扩展,加速其界面脱粘分层^[9-10]. 竹子在加热后,在其端部竹黄下沿 z 向(横向)锯出一条缝,也就是加工出一条裂纹来. 外力使竹子端部与主体产生大弯曲变形,且在力的作用下沿竹子轴向产生相对运动. 那么,在弯曲应力作用下,在锯缝周围又将形成强应力场,竹黄层首先从主体剥离,加之原有裂纹区形成的强应力场,端部裂纹随着相对运动在弯曲应力作用下不断向前扩展,竹子纤维之间较弱的结合力难以抵御迅速前移高度集中了的强应力,于是,实现竹纤维的分离. 若加热温度及加载速度控制合理,竹子还会形成层间相对滑动并脱粘分层,将进一步提高纤维分离的效果.

4 结论与讨论

本文提出的热-机械耦合制备竹子长纤维方法改变了传统长纤维加工原理和加工技术,采用该方法生产的纤维具有天然、绿色和环保等优点,开创了竹材制备长纤维的新领域. 从热-机械耦合分离机理的研究及实验,可得出以下结论:

- 1)热-机械耦合开纤法分离竹子长纤维的关键是解决竹材端部裂纹引发的方式及条件,并在裂纹区形成强应力场.
- 2)竹纤维的细度、长度及其柔韧性等指标取决于竹材的品种、竹龄及热-机械耦合加工过程中的外载条件等.
- 3)竹材能否开纤,开纤程度如何等取决于温度、边界约束、加载条件等因素. 竹材解纤时需要寻求最佳温度、机械作用方式、作用时间、加载速率及引发方式等条件. 这些工作正在研究中.

该技术的继续深入研究和探索将进一步揭示出竹子长纤维分离的机理,完善竹子纤维分离的理论,探索出最佳的制备工艺,为天然长竹纤维的产业化生产奠定基础.

参 考 文 献

[1] 邪声远,刘政,周湘祁. 竹原纤维的性能及其产品开发[J]. 纺织

导报,2004(4):43-48.
XIE S Y, LIU Z, ZHOU X Q. The property of bamboo nature fiber and product exploiture[J]. *China Textile Leader*, 2004 (4):43-48.
[2] 周蘅书,钟文燕. 竹纤维的开发与应用[J]. 纺织科学研究,2003 (4):30-36.
ZHOU H S, ZHONG W Y. Exploiture and application of bamboo fiber [J]. *Textile Science and Research*, 2003 (4):30-36.
[3] 巩继贤,李辉芹. 竹纤维——一种纺织新材料[J]. 纺织导报,2003(3):59-62.
GONG J X, LI H Q. Boobom fiber—a new material used textile [J]. *China Textile Leader*, 2003 (3):59-62.
[4] 程隆棣,徐小丽,劳继红. 竹纤维的结构形态及性能分析[J]. 纺织导报,2003 (5):101-103.
CHENG L L, XU X L, LAO J H. Structure form and property analysis of bamboo fiber[J]. *China Textile Leader*, 2003 (5):101-103.
[5] 鲁博,张林文,曾竟成,等. 天然纤维复合材料[M]. 北京:化学工业出版社,2005:299-302.
LU B, ZHANG L W, ZENG J C, et al. *Natural fiber reinforced plastics*[M]. Beijing :Chemical Industry Press, 2005:299-302.
[6] LI S H, ZENG Q Y, XIAO Y L, et al. Biomimicry of bamboo bast fiber with engineering composite materials[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 1995, 3(2): 125-130.
[7] 张齐生. 中国竹材工业化利用[M]. 北京:中国林业出版社,1995:39-41.
ZHANG Q S. *Industrialization utilization of bamboo wood in China* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995: 19-21.
[8] 高洪亮. 浅谈植物纤维分离技术与设备[J]. 人造板通讯,2003 (6):7-9.
GAO H L. Elementary introduction for technology and machine of sapareting plant fiber[J]. *China Wood-Based Panels*, 2003 (6):7-9.
[9] 徐曼琼,姚学锋,王戈,等. 竹材层合板弯曲破坏机理的实验研究[J]. 实验力学,2004(9): 347-353.
XU M Q, YAO X F, WANG G, et al. Experimental studies on bending failure mechanic of bamboo laminate [J]. *Journal of Experimente Mechanics*, 2004(9):347-353.
[10] TOMMY Y L, CUI H Z, LEUNG H C. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo[J]. *Materials Letters*, 2004, 58: 2 595-2 598.

(责任编辑 赵 勃)