

梳解法制备竹纤维的力学模型*

张蔚¹ 姚文斌¹ 李文彬²

(1. 浙江农林大学工程学院, 临安 311300; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 通过研究梳解法制备竹纤维的原理,提出竹子梳解制纤中平均梳解力的概念;运用动力学方法,建立竹纤维平均梳解力与纤维长度、细度关系的计算模型。对模型进行分析和验证,结果表明:模型表述的平均梳解力、滚筒转速及滚筒梳针参数与竹纤维长度、细度的关系正确;运用模型计算竹纤维长度的结果与实验结果相吻合,此模型可用于梳解法制备竹纤维的长度、细度预测与计算。

关键词: 竹纤维 梳解法 力学模型

中图分类号: TQ351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0066-04

Mechanical Model of Processing Bamboo Fiber with Combing Method

Zhang Wei¹ Yao Wenbin¹ Li Wenbin²

(1. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on mechanism of processing bamboo fiber by combing method, a concept of average combing strength was put forward. Calculation model of relationship between average combing strength of fiber and fiber length and fineness was established with dynamic principle. The model was analyzed and validated, and the results showed that the model of bamboo fiber length and fineness against average combing strength, roller speed and comb-pins parameters was correct. The values calculated for bamboo fiber length by the model agree well with the experimental values. The length and fineness of bamboo fiber can be calculated by the model.

Key words Bamboo fiber, Combing method, Mechanical model

引言

对竹纤维的研究,大多集中于纤维的结构特性、后处理及复合材料开发研究等方面,有关竹子机械开纤的原理、方法及其应用基础研究,未见报道^[1~3]。竹纤维的机械加工技术落后,导致竹纤维至今未进入工业化生产阶段^[4]。

梳解法制备竹纤维(本文简称梳解制纤),是采用机械梳解设备将通常经过软化的竹子梳解成粗竹纤维,再对其进行后处理。此方法工艺过程简单、机械加工效率高,是目前加工竹纤维的主要方法之一^[5]。但目前生产中仅凭感觉和经验通过反复调

整设备参数来加工竹纤维,竹纤维的长度、细度无法得到有效控制,因此如何获得所需竹纤维的长度、细度是目前梳解制纤技术中尚需研究和解决的问题。

在单纤维梳理的理论研究中,王兢于2005年提出锡林单纤维平均梳理力表示纤维在锡林盖板工作区中所承受的梳理作用强弱^[6]。梳解制纤中,竹纤维是束纤维,竹纤维的长度、细度具有一定的统计规律,与竹子的性能及机械参数之间可能存在一定关联性,其中纤维束平均梳解力是一个关键指标,平均梳解力和加工出的纤维的长度和细度密切相关,而这些问题尚未研究。本文从研究纤维平均梳解力入手,建立竹子梳解制纤的力学模型,寻求影响纤维束的

收稿日期: 2010-03-28 修回日期: 2010-04-26

* 浙江省自然科学基金资助项目(Y3090261)和浙江省科技厅重大项目(2007C12066)

作者简介: 张蔚,副教授,博士,主要从事竹材加工与利用及林业机械自动化与智能化研究,E-mail: zhangweix0025@sina.com

长度和细度的主要技术参数,为实现竹纤维可控加工提供依据。

1 纤维束的平均梳解力

从竹子的微观结构来看,竹子是维管束厚壁细胞(纤维)嵌在薄壁细胞内。除纤维束以外,竹子的薄壁细胞等结构可认为是竹子的基体,纤维束沿竹子的轴向排列整齐,且纤维束模量远大于其余部分的模量,起主要承受载荷的作用^[7~8]。

竹子梳解制纤的工作原理与纤维握持开松原理^[9]类似,工作装置主要由高速旋转梳针滚筒和握持机件组成,如图1所示。当竹片由进料辊送入时,高速旋转梳针滚筒的梳针刺入被握持的竹片内,破坏基体组织且梳解纤维束,使竹片内纤维束分离。竹片在握持状态下以慢速喂入机内的同时,受到高速回转的滚筒梳针的作用力 T ,其方向沿着梳针运动轨迹的切向,可分解为 N 与 F , N 沿梳针工作面方向,它使竹片纤维层受到压缩,增加纤维与梳针间的摩擦; F 垂直于 N ,起梳解纤维束的作用。纤维束被梳解还是被拉断取决于梳解力 F 的大小。

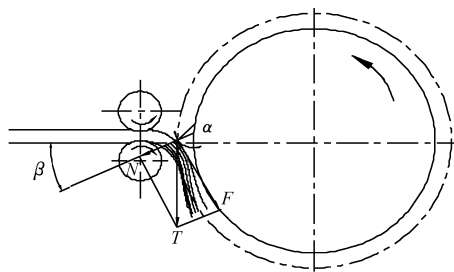


图1 竹纤维梳解原理示意图

Fig.1 Diagram of combing bamboo fiber

竹材中维管束在基本组织中分布密度不同,纤维层中纤维的密度从竹黄至竹青层逐渐增大^[8]。从竹黄至竹青层,纤维束直径由粗变细,每层纤维束直径变异不大,可认为基本相同^[10]。由于竹纤维分布及尺寸的不均匀性,每一时刻作用在竹片上的梳解力是不同的;又由于竹纤维分布及尺寸存在一定的规律性,滚筒每转加工纤维束的长度、细度应满足一定的统计规律,且与纤维所受的梳解力密切相关。

由于纤维梳解加工中,每一时刻作用在竹片上的梳解力不同,而滚筒每转中对竹片的作用可认为是相同的,因此本文定义竹子梳解制纤中,纤维平均梳解力为滚筒每转中作用在竹片上梳解纤维的平均力。

纤维束平均梳解力计算公式为

$$P = \frac{\sum F}{N_f} \quad (1)$$

其中

$$N_f = \frac{10^6 q}{N_i L}$$

式中 $\sum F$ ——滚筒每转作用在竹片的梳解力, N
 N_f ——滚筒每转被梳解纤维的平均数
 q ——滚筒每转输出纤维量,kg
 N_i ——纤维细度,tex
 L ——纤维长度,mm

2 竹子梳解制纤的力学模型

就加工出的纤维而言,长度、细度不但取决于机械设备的主要参数,还与竹子本身的性质和细观结构密切相关。为简化问题,本文未考虑竹子细观结构的影响。

设滚筒共有 m 排梳针,单排梳针转过瞬时,梳解下来的纤维束质量分别为 $q_1, q_2, \dots, q_m$,滚筒转一圈时,梳解下来的纤维束的质量用 q 表示,则 $q = q_1 + q_2 + \dots + q_m$ 。视单根纤维束为质点,单排梳针转过瞬时,梳解下来的纤维束为一个质点系。纤维束由于梳解点和握持点的速度差而断裂,因此纤维束断裂时的速度 v_2 是滚筒的线速度 v_c 沿梳解方向的分速度, $v_2 = v_c \sin \alpha$,握持点速度 v_1 是竹片的进料速度。

每排梳针的梳解力 F_n ,作用时间为 Δt ;滚筒转速用 n_c 表示,则有

$$\Delta t = \frac{60}{mn_c} \quad (2)$$

式中 m ——滚筒梳针排数

由质点系的动量定理,滚筒转一圈时,当 $1 \sim m$ 排梳针转过瞬时,对上述纤维质点系,有

$$\begin{cases} F_1 \Delta t = q_1 (v_2 - v_1) \\ \vdots \\ F_m \Delta t = q_m (v_2 - v_1) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得

$$\sum_{n=1}^m F_n \Delta t = (q_1 + q_2 + \dots + q_m) (v_2 - v_1) \quad (4)$$

与滚筒速度相比,竹片进料速度很小,为简化公式,可忽略不计,将式(2)代入式(4),且 $v_2 = v_c \sin \alpha$ 并结合 q ,有

$$\sum_{n=1}^m F_n \frac{60}{mn_c} = q v_c \sin \alpha = 10^{-6} N_i L N_f v_c \sin \alpha \quad (5)$$

纤维束平均梳解力可表示为

$$P = \frac{\sum F_n}{N_f} = \frac{10^{-6} N_i L v_c n_c m \sin \alpha}{60} = \frac{10^{-6} \pi D n_c^2 N_i L m \sin \alpha}{3\,600} \quad (6)$$

式中 D ——滚筒直径,mm
还可表示为

$$P=\frac{10^{-6}mv_c^2N_tL\sin\alpha}{\pi D}=\frac{10^{-6}v_c^2N_tL\sin\alpha}{l_m}\tag{7}$$

式中 l_m ——滚筒两排梳针之间的隔距,mm
变换式(7),可得纤维长度、细度计算模型为

$$N_tL=\frac{10^6Pl_m}{v_c^2\sin\alpha}\tag{8}$$

P 在数值上为纤维的断裂强力,即 $P=[\sigma_b^f]A$,其中 $[\sigma_b^f]$ 为纤维的抗拉强度, A 为纤维的横截面积。对被梳解的纤维束,当 $P<[\sigma_b^f]A$ 时,梳针梳解纤维束; $P>[\sigma_b^f]A$ 时,纤维断裂。

3 模型的分析与修正

3.1 模型的定性分析

在式(8)中,纤维的长度和细度的乘积与平均梳解力成正比,表达了竹材性质与平均梳解力的关系。即当竹子强度高时,梳解力大,当细度一定时,加工出的纤维长;反之,加工的纤维短。当其他条件不变时,纤维长度和细度与滚筒速度的平方成反比,即滚筒速度对纤维束长度和细度有显著的影响。当提高滚筒速度,纤维束变细、长度减短;反之,降低滚筒速度,纤维束变粗、长度增长。这个结论与实际情况吻合,改变滚筒速度是调整纤维束长度、细度的有效手段。滚筒上梳针的参数应对纤维束长、细度有一定的影响。式(8)表达了梳针排距对梳针工作角的影响,纤维束长、细度与梳针排距成正比,即梳针排距变宽,则竹纤维的长度增加、细度增粗;反之,纤维变短和细。纤维束长度、细度与梳针工作角的正弦成反比,梳针工作角大,滚筒速度在梳解方向的分力大,同样条件下纤维易拉断,对应的结果是纤维长度、细度小,这也与实际情况相符。

3.2 模型的定量考察

以竹纤维梳解机为研究对象,用梳解法加工竹纤维的实际统计数据进一步定量考察计算模型。较纤维细度而言,纤维的长度测量计算方便、直观,以下通过纤维长度的实测值与模型计算值的分析比较,来考察计算模型。

3.2.1 竹纤维梳解实验

- (1) 实验设备及方法
- 实验材料:新鲜一年生慈竹,产地:四川省。
- 设备参数:梳解机滚筒转速 $n_c=600\text{ r/min}$,滚筒直径 $D=500\text{ mm}$,滚筒梳针工作角 $\alpha=60^\circ$,两排梳针间距 $l_m=20\text{ mm}$ 。
- 实验方法:纤维参数有纤维束的断裂强力、纤维长度和细度。从试生产现场取样,取样4组,每组称

出10 g竹纤维。将纤维试样横向铺在绒板上,按一定间隔用镊子抽取单根纤维,共取100根纤维。测量留取的100根纤维长度,将它们以2 cm为组距分成若干小组并进行分组整理。每组100根纤维干燥后,分别用天平称质量,将组距根数及质量列于表1。纤维断裂强力的测量取样后立即进行,测得纤维束的断裂强力为8.8 N。

表1 竹纤维组距根数与质量实验数据

Tab.1 Experiment date of bamboo fiber

组别	纤维长度/mm					质量 G /mg
	≤ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	≥ 80	
1	15	27	30	16	12	86
2	22	23	32	14	9	78
3	16	31	27	11	15	82
4	19	28	25	18	10	81

- (2) 实测参数计算
- 纤维的长度一般用根数长度来表示,纤维根数长度计算公式为^[11]

$$L=\frac{n_1l_1+n_2l_2+\cdots+n_il_i}{n_1+n_2+\cdots+n_i}\tag{9}$$

- 式中 l_i ——第 i 组纤维长度的组中值,mm
 n_i ——第 i 组纤维根数
- 纤维细度计算公式为

$$N_t=\frac{10^4(1+13\%)G}{L}\tag{10}$$

- 竹纤维产业刚起步,还没有确切的公定回潮率。根据竹纤维的微观结构,参照苧麻的公定回潮率12%,暂定竹纤维的公定回潮率为13%。
- 按表1实验数据及式(9)和式(10)分别计算纤维根数长度和细度。纤维根数长度计算时,纤维长度小于等于20 mm,取10 mm;纤维长度大于等于80 mm,取100 mm。计算4组平均值,得纤维根数长度为46 mm,细度为20 tex。
- 3.2.2 按模型计算纤维长度及结果分析
- 按式(8)模型计算纤维长度,代入竹纤维的实测数据:纤维断裂强力8.8 N、细度20 tex,计算得纤维长度为
- $$L=\frac{10^6Pl_m}{N_tv_c^2\sin\alpha}=41.1\text{ mm}$$
- 纤维长度的实验实测值计算结果为46 mm,按模型的计算值为41.1 mm,说明计算模型基本正确,但存在一定误差。竹纤维梳解设备,由于进料速度远小于滚筒转速,因此,在建立力学模型时,为简化计算未考虑进料速度的影响,在纤维实际加工中,进料速度和滚筒速度的不同匹配,对纤维的长度、细度有较大的影响,因此,应考虑进料速度对计算模型进

行修正。

式(12)可写为

3.3 计算模型的修正

通过实验的方法,测试进料速度的影响,确定进料速度的影响系数,对计算模型进行修正。通过纤维根数长度的测量计算,确定修正系数。

设进料速度 v_1 的影响系数为 k ,令

$$k = \frac{L_1}{L}$$
 (11)

式中 L_1 ——实测计算值

则计算模型修正为

$$L = k \frac{10^6 Pl_m}{N_l v_c^2 \sin \alpha}$$
 (12)

在上述参数下,滚筒转速 600 r/min、进料速度分别 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m/s,各加工 2 kg 慈竹纤维。按实验实测结果计算纤维长、细度,通过分析比较,适宜的进料速度在 0.2 ~ 0.3 m/s 之间,相应适宜速比 $v_c/v_1 = 50 \sim 80$; k 值为 1.05 ~ 1.1,则

进料速度慢时, k 取小值,进料速度快时, k 取大值。

3.4 计算模型的实验验证

滚筒转速分别为 450、500、550、600、650、700、750、800 r/min 时按速比 $v_c/v_1 = 50$ 调整进料速度,在不同的工况下,分别加工了 2 kg 竹纤维。按上述方法测试计算纤维参数,按式(13)计算上述不同滚筒转速下纤维束根数长度(k 值取 1),将结果列表 2。表中 R 为竹纤维的断裂强力。

从表 2 可知,纤维根数长度的计算值与实验计算值在不同转速下最大相差不超过 2.6 mm,最大误差不超过 8.4%,平均误差小于 4.4%;说明计算模型能正确反映纤维长度、细度和控制参数之间的关系,能用于纤维长度、细度的预测与计算。

表 2 不同滚筒转速下的竹纤维的根数长度实验数据

Tab.2 Weighted length of bamboo fiber under different roller speeds

$n_c/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	N_l/tex	R/N	L_1/mm	L/mm	$ L - L_1 /\text{mm}$	误差/%
450	11.78	35	10.7	53	54.8	1.8	3.2
500	13.09	30	9.8	50	48.7	1.3	2.7
550	14.40	24	9.2	49	47.1	1.9	4.0
600	15.71	20	8.8	46	45.0	1.0	2.2
650	17.01	18	8.1	42	39.4	2.6	6.6
700	18.33	15	7.0	33	35.2	2.2	6.3
750	19.63	13	6.2	31	31.5	0.5	1.6
800	20.94	11	4.8	23	25.1	2.1	8.4

4 结论

(1) 通过研究竹子梳解制纤的原理,提出了梳解制纤技术中竹纤维长度、细度可控加工的思想,定义了梳解制纤技术中的平均梳解力。

(2) 运用动力学方法,建立了纤维平均梳解力和竹纤维长度、细度关系的计算模型,即

$$L = (1.05 \sim 1.1) \times \frac{10^6 Pl_m}{N_l v_c^2 \sin \alpha}$$

(3) 计算模型表述的参数与纤维长度、细度的关系与实际情况相符,获得了影响竹纤维长度、细度的技术参数;使用模型计算竹纤维长度与实验结果吻合。

参 考 文 献

1 Ryoko T, Duc M V, Kazuya O, et al. How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers[J]. Journal of Materials Science,2008,43(2):775 ~ 787.

2 Deshpande A P, Rao M B, Rao C L. Extraction of bamboo fibers and their use as reinforcement in polymeric composites[J]. Journal of Applied Polymer Science,2000,76(1):83 ~ 92.

3 Yao Wenbin, Zhang Wei. Research on manufacturing technology and application of natural bamboo fibre[C]//The Essays of First International Bamboo Fiber Technology and Application Symposium,1999.

4 张蔚. 竹子机械开纤的理论与实验研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.

Zhang Wei. Theoretical and experimental research of mechanical method for processing bamboo fiber[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2009. (in Chinese)

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 周祖锬. 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 Konstankiewicz 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 冼杏娟,冼定国,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.