

## 长白落叶松木材单根管胞力学性能分析

邢新婷<sup>1</sup>, 邵亚丽<sup>1,2</sup>, 安 珍<sup>2</sup>, 赵荣军<sup>1</sup>, 任海青<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 内蒙古农业大学木材科学和艺术设计学院, 呼和浩特 010010)

**摘 要:** 为了评价长白落叶松木材作为纸浆材的管胞力学强度, 采用单纤维拉伸技术开展了长白落叶松早晚材单根管胞拉伸力学性能研究。结果表明, 长白落叶松早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率的均值分别为 9.64 GPa、714.05 MPa 及 6.01%, 晚材的均值分别为 12.74 GPa、963.85 MPa、和 8.60%。方差分析表明长白落叶松早晚材间单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率存在极显著差异 (0.01 水平), 晚材单根管胞力学性能显著高于早材; 单根管胞弹性模量和拉伸强度在径向年轮间的变异极显著 (0.01 水平), 断裂伸长率在年轮间的差异性不显著。在株内径向上, 长白落叶松单根管胞力学性质均随着年轮的增加而增加; 在株内纵向上, 单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度变异性极显著 (0.01 水平), 而断裂伸长率在纵向上的变异性不显著。该结论为长白落叶松木材的适材适用和定向培育提供了理论依据。

**关键词:** 长白落叶松; 早材; 晚材; 单根管胞力学

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2013)04-0597-06

### Mechanical properties of single tracheids of *Larix olgensis* wood

XING Xin-ting<sup>1</sup>, SHAO Ya-li<sup>1,2</sup>, AN Zhen<sup>2</sup>, ZHAO Rong-jun<sup>1</sup>, REN Hai-qing<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Wood Industry, CAF, Beijing 100091;

2. College of Material Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010)

**Abstract:** In order to evaluate the mechanical properties of single tracheids sampled from mature wood of *Larix olgensis* Henry, tensile testing method was involved. The results show that the mechanical properties of the single tracheids of early-wood tracheids, including the modulus of elasticity, tensile strength and breaking elongation, were 9.64 GPa, 714.05 MPa and 6.01%, respectively; and 12.74 GPa, 963.85 MPa, and 8.60% of the late-wood tracheids. According to analyzing the data by anova analysis method, there was significant difference ( $P < 0.01$ ) between early and late wood tracheids in properties of mechanics, and latewood tracheids owned higher qualities of mechanics. It was clear that the modulus of elasticity and tension strength were significantly different ( $P < 0.01$ ) among rings of wood tracheids, whereas the breaking elongation of single tracheids showed no significant difference. In radial direction, the mechanical properties of single tracheids were increased with the ring grading. The modulus of elasticity and tension strength of single tracheids were significantly different ( $P < 0.01$ ) in longitudinal, whereas there was no significant difference of single tracheids in the breaking elongation. The conclusion would provide a theoretical basis for *Larix olgensis* in selecting and cultivating.

**Key words:** *larix olgensis*; earlywood; latewood; mechanical property of single tracheids

木材纤维是纤维板和纸张的重要组成, 木材纤维的拉伸力学性能可以有效评价纤维板和纸张的强度。对于单根纤维力学的研究始于 20 世纪 20 年代, 一段时间以来研究主要集中于测试方法的改进和探

索<sup>[1-3]</sup>。随后, 不同学者将相对成熟的测试技术应用不同树种单根纤维力学性质株内变异的研究。Groom 等<sup>[4]</sup>测得化学离析的火炬松纤维弹性模量和最大抗拉强度的均值, 分别是 19.7 GPa 和 1 040

收稿日期: 2012-12-17

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金(CAFINT2009C07)和国家自然科学基金重点项目(30730076)共同资助。

作者简介: 邢新婷, 女, 博士, 副研究员。E-mail: xingxinting@caf.ac.cn

\* 通信作者: 任海青, 女, 研究员, 博士生导师。E-mail: ren hq@caf.ac.cn

MPa, 并对成熟材和幼龄材纤维强度做出评价。Page 等<sup>[5]</sup>最早在《Nature》发表了针叶材单根管胞力学特性及其测定方法, 引起了制浆造纸行业对于单根纤维拉伸技术的兴趣。Nasko 等<sup>[6]</sup>研究了挪威云杉纤维交错对纸张力学强度的影响, 研究表明无交错纤维纸张的撕裂度高于普通纸张。随着人们对于工业用纤维的大量需求, 快速获得较高强度工业纤维成为学者和企业面临的重要课题。长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)是我国重要的结构材和纸浆材用材树种, 前人已经对长白落叶松纸浆材木材性质特别是管胞形态和纸浆特性方面开展了较多研究<sup>[7-9]</sup>, 但是直接影响纸张强度的管胞微力学性能鲜有报道。鉴于此, 为了评价长白落叶松作为纸浆材的管胞力学强度, 本研究以长白落叶松人工林木材管胞作为研究对象, 利用单根纤维拉伸技术测试了长白落叶松木材管胞力学性质在径向和纵向的变异, 为长白落叶松纸浆材性能评价、适材适用和定向培育提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

选取人工林长白落叶松木材为实验材料, 在样木的 1.3 m、6.3 m 及 11.3 m 处各截取 50 mm 厚的圆盘, 沿南北向过髓心锯取宽为 20 mm 的中心条, 将毛坯中心条锯切刨光成宽度为 7.5 mm, 高度为 45 mm 的中心条, 选取北向为研究对象。将北向中心条的 5、10、20 年轮的样品劈成火柴棍大小备用。

### 1.2 方法

**1.2.1 管胞离析** 将试样装入试管, 倒入提前配制好的离析液(氧化氢与冰醋酸 1:1), 在 60℃烘箱中放置 18~20 h, 待样品发白后将样品取出洗净置于载玻片上气干 24 h。

**1.2.2 单根管胞固定** 在实体显微镜下用超精细镊子挑取管胞横放在开有宽度为 2 mm 狭缝的有机玻璃板上, 在管胞两端滴冷固化胶放置 12 h。每个年轮测定单根管胞 25 根。

**1.2.3 单根管胞拉伸** 实验拉伸仪器为 Instron5848 微型力学试验机, 试验机配备量程为 5 N 的传感器, 可以对 1.5 mm 以上各种植物纤维的纵向力学性能进行测量, 拉伸载荷精度为 0.01 μN, 拉伸速率为 0.048 mm·min<sup>-1</sup>。

**1.2.4 单根管胞横截面面积测量** 将拉断管胞置于吖啶橙(Acridine Orange)溶液中染色。染色后管胞采用 ZEISS 公司生产的 LSM510META 激光共聚焦显微镜进行管胞横截面面积的测量, 实验采用的激光光源为 488 nm 激光光谱<sup>[10-11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 长白落叶松单根管胞的长度、面积

单根管胞的长度和管胞的横截面面积是获得单根管胞应力应变曲线的必要参数。管胞有效拉伸长度是指两个胶滴之间的长度, 是单根管胞拉伸过程中的有效长度(图 1)。管胞在拉伸测试过程中破坏形式分为 2 种, 分别是在管胞中间和管胞端头(图 2)。表 1 和表 2 是长白落叶松早、晚材单根管胞横截面面积在同一高度不同年轮间和不同高度同一年轮处的统计值, 从表中可以看出长白落叶松早材和晚材单根管胞横截面面积随着年轮的增加而增加, 晚材单根管胞横截面面积随着树木高度的增加而减少。早材和晚材单根管胞横截面面积的均值分别为 358.39 μm<sup>2</sup>, 和 364.50 μm<sup>2</sup>。表 3 和表 4 是长白落叶松单根管胞有效拉伸长度的统计值, 从表中可以看出本实验中长白落叶松单根管胞有效拉伸长度(2 个胶滴之间的距离)值介于 0.53~0.66 mm 之间。

表 1 长白落叶松 1.3 m 处木材单根管胞横截面面积均值  
Table 1 Average cross-sectional area of *L. olgensis* tracheids at 1.3 m height

项目 Item	单根管胞横截面面积/μm <sup>2</sup> Cross-sectional area			变异系数 Coefficient of variation V/%		
	5a	10a	20a	5a	10a	20a
早材 Earlywood	259.82	362.68	452.67	22.77	24.86	28.59
晚材 Latewood	241.39	394.77	457.35	38.56	18.99	22.98
平均值 Average	250.60	378.70	455.00	30.70	21.90	25.80

### 2.2 长白落叶松单根管胞力学性能株内变异

**2.2.1 径向年轮间变异** 图 3 是长白落叶松早晚材不同年轮管胞拉伸的载荷-位移曲线。载荷-位移曲线中出现明显滑移的直线产生的数据视为无效数据在分析中剔除。载荷-位移曲线出现的滑移现象很早

就有学者进行了解释, Kersavage<sup>[3]</sup>认为滑移现象的出现源于夹具对纤维的夹持。从图中可以看出, 载荷-位移曲线在年轮间均存在不同程度的差异。晚材载荷-位移曲线的斜率较早材有明显的增大, 其中以 10 年最为显著, 曲线伸长长度也随着年龄的增大而

增加。

单根管胞拉伸的载荷-位移曲线直接影响管胞拉伸的力学性能,管胞拉伸的力学性能也是在载荷-位移曲线中算得。长白落叶松木材不同年轮间的单根管胞弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率的均值见表 5。从表 5 中可以得出长白落叶松木材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率的均值分别为 11.19 GPa、838.95 MPa 和 7.31%,且单根管胞力学性质均随着年轮的增加而增加,均表现为 20 年

>10 年>5 年。长白落叶松早材的管胞拉伸力学性能小于火炬松<sup>[12]</sup>。弹性模量在 5 年、10 年、20 年的均值分别为 8.28 GPa、10.58 GPa、14.72 GPa; 拉伸强度在 5 年、10 年、20 年的均值分别为 515.10 MPa、898.00 MPa 和 1 103.75 MPa; 断裂伸长率在 5 年、10 年、20 年的均值分别为 7.21%、7.28%和 7.43%。表 6 的方差分析表明,长白落叶松单根管胞弹性模量和拉伸强度在年轮间的变异极显著(0.01 水平),断裂伸长率在年轮间的差异性不显著。

表 2 长白落叶松不同树高同一年轮晚材单根管胞面积均值

Table 2 Average cross-sectional area of *L. olgensis* latewood tracheids at different heights

项目 Item	单根管胞横截面面积/ $\mu\text{m}^2$ Cross-sectional area			变异系数/% Coefficient of variation		
	1.3 m	6.3 m	11.3 m	1.3 m	6.3 m	11.3 m
晚材 Latewood	457.35	457.70	422.73	22.98	24.15	27.38

表 3 长白落叶松 1.3 m 处单根管胞拉伸有效长度均值

Table 3 Average tensile span of *L. olgensis* tracheids at 1.3 m height

项目 Item	有效拉伸长度/ $\mu\text{m}$ Tensile span			变异系数/% Coefficient of variation		
	5a	10a	20a	5a	10a	20a
早材 Earlywood	0.53	0.62	0.66	17.82	19.07	19.48
晚材 Latewood	0.54	0.55	0.58	10.21	12.43	12.76
平均值 Average	0.53	0.58	0.62	14.01	15.75	16.12

表 4 长白落叶松不同树高同一年轮晚材单根管胞拉伸有效长度均值

Table 4 Average tensile span of *L. olgensis* latewood tracheids at different heights

项目 Item	拉伸长度/ $\mu\text{m}$ Tensile span			变异系数/% Coefficient of variation V		
	1.3 m	6.3 m	11.3 m	1.3 m	6.3 m	11.3 m
晚材 Latewood	0.58	0.62	0.64	10.21	12.43	12.76

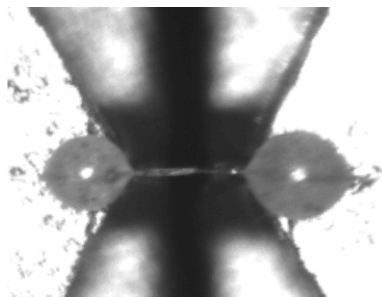


图 1 管胞长度测量

Figure 1 The measurement of tensile span

**2.2.2 径向年轮内早晚材间变异** 表 5 是单根管胞拉伸力学性能在年轮内早晚材间的变异。从表 5 中得出,长白落叶松早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率的均值分别为 9.64 GPa、714.05 MPa 和 6.01%,相应的变异系数分别为 24.09%、27.37%和 24.09%;长白落叶松晚材单根管胞拉伸弹

性模量、拉伸强度、断裂伸长率的均值分别为 12.74 GPa、963.85 MPa 和 8.60%,相应的变异系数分别为 24.73%、22.45%及 16.82%,晚材单根管胞力学性能明显要高于早材。对其变异程度进一步进行方差分析(表 6),结果表明,单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率在早晚材间差异极显著(0.01 水平),晚材单根管胞力学性能显著大于早材。

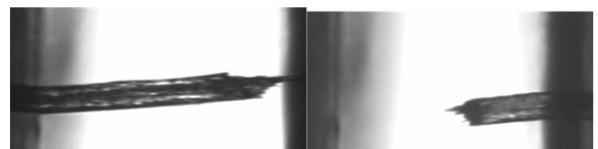


图 2 单根管胞断裂

Figure 2 Fracture of individual tracheids

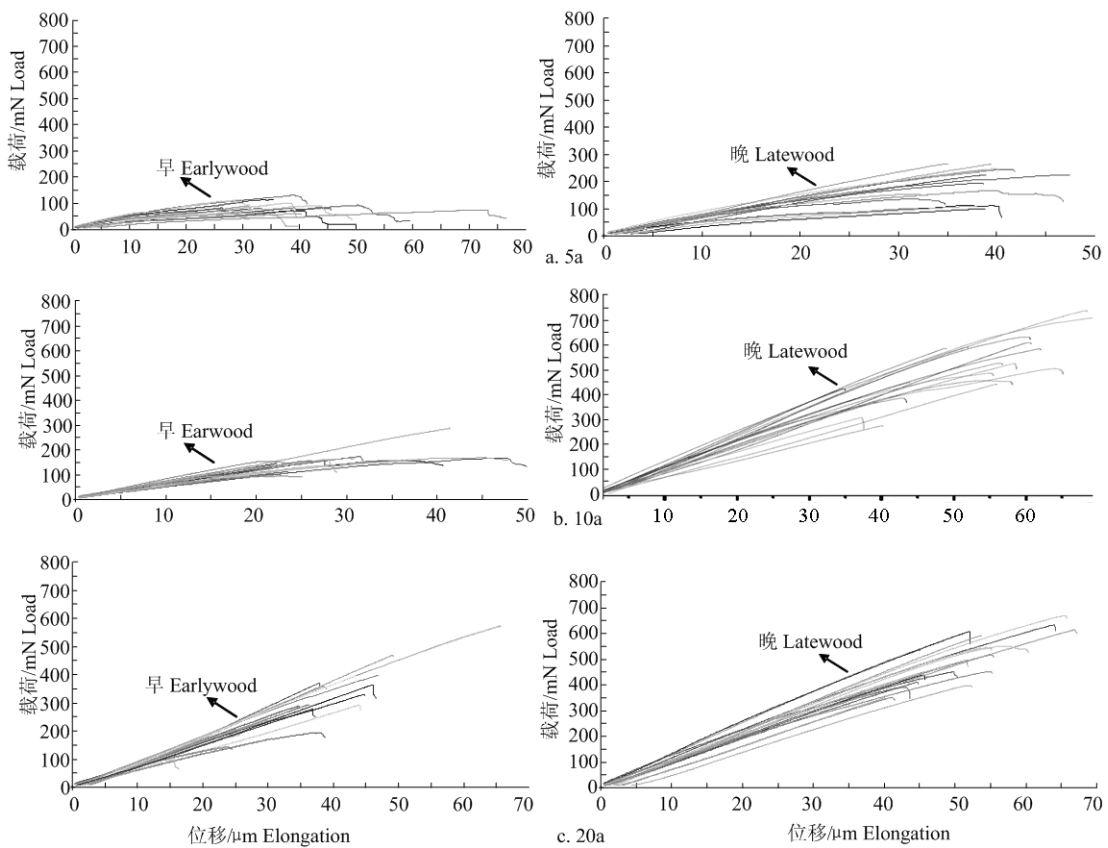


图 3 长白落叶松木材管胞早晚材的载荷-位移曲线

Figure 3 Individual load-elongation curves for *L. olgensis* tracheids in earlywood and latewood

表 5 长白落叶松 1.3 m 处单根管胞拉伸力学性质统计

Table 5 Average mechanical properties of *L. olgensis* individual tracheids

项目 Item	弹性模量/GPa Modulus of elasticity			变异系数/% Coefficient of variation		
	5a	10a	20a	5a	10a	20a
早材 Earlywood	5.88	6.67	16.38	27.87	15.02	29.39
晚材 Latewood	10.68	14.50	13.05	29.19	27.15	17.84
平均值 Average	8.28	10.58	14.72	28.53	21.09	23.61

项目 Item	拉伸强度/GPa Tension strength			变异系数/% Coefficient of variation		
	5a	10a	20a	5a	10a	20a
早材 Earlywood	363.53	661.11	1 117.50	26.99	28.42	26.69
晚材 Latewood	666.67	1 134.89	1 090.00	25.01	23.20	19.13
平均值 Average	515.10	898.00	1 103.75	26.00	25.81	22.91

项目 Item	断裂伸长率/% Elongation at break			变异系数/% Coefficient of variation		
	5a	10a	20a	5a	10a	20a
早材 Earlywood	7.21	4.95	5.86	15.26	28.43	28.58
晚材 Latewood	7.21	9.60	9.00	14.30	19.30	16.86
平均值 Average	7.21	7.28	7.43	14.78	23.86	22.72

2.2.3 纵向变异 图 4 为长白落叶松同一年轮晚材单根管胞在纵向的载荷-位移曲线, 通过该载荷-位移曲线计算获得管胞拉伸力学性质 (表 7), 长白落叶松晚材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂

伸长率在树木高度方向的均值分别为 15.07 GPa、1 278.89 MPa 和 9.54%, 6.3 m 的单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度大于 11.3 m 且显著大于 1.3 m 的管胞力学强度, 说明在树高 6.3 m 处的木材强度较

高。表 8 的方差分析表明, 单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度在树木高度上的变异性极显著 (0.01 水平), 而断裂伸长率在树木高度上的变异性不显著。EL-Hosseiny<sup>[13]</sup>证明细胞壁 S<sub>2</sub> 层的微纤丝角度

对于单根管胞力学性质有显著影响, 因此本研究需要进一步测定其微纤丝角度以分析其纵向上差异大的原因。

表 6 长白落叶松单根管胞径向力学性能方差分析  
Table 6 Analysis of mechanical property of *L. olgensis* tracheids

来源 Source	自由度 DF	平方和 SS	均方和 MS	F value	P value Pr>F
弹性模量 Modulus of elasticity	2	258.76	134.38	22.69**	<0.000 1
年轮 Ring	1	57.15	57.15	9.65**	0.004 0
早晚材 Early-late wood	1	57.15	57.15	9.65**	0.004 0
拉伸强度 Tension strength	2	2 350 210.89	1 175 105.45	44.87**	<0.000 1
年轮 Ring	1	738 453.78	738 453.78	28.20**	<0.000 1
早晚材 Early-late wood	1	738 453.78	738 453.78	28.20**	<0.000 1
断裂伸长率 Elongation at break	2	5.37	2.68	1.99	0.153 0
年轮 Ring	1	5.37	5.37	1.99	0.153 0
早晚材 Early-late wood	1	5.37	5.37	1.99	0.153 0

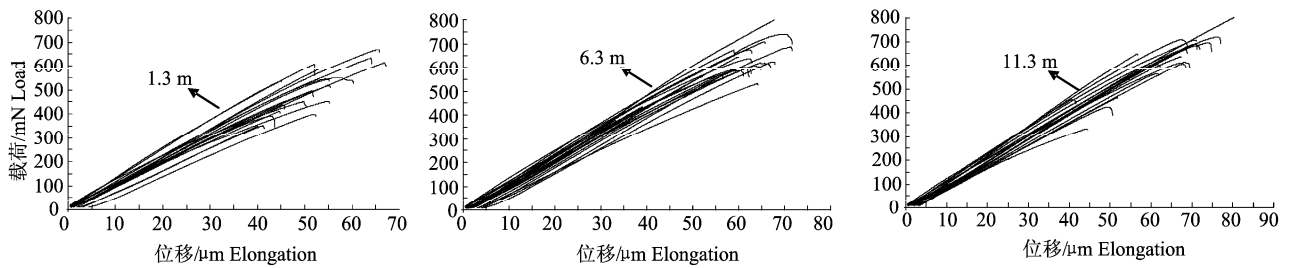


图 4 长白落叶松同一年轮木材管胞在树高方向的载荷-位移曲线

Figure 4 Individual load-elongation curves for *Larix olgensis* tracheids at different heights in 20 ring

表 7 长白落叶松同一年轮晚材管胞在树高方向的力学性质  
Table 7 Average mechanical properties of *L. olgensis* individual tracheid at different heights

项目 Item	单根管胞力学性能 Mechanical property of individual tracheid			变异系数/% Coefficient of variation		
	1.3 m	6.3 m	11.3 m	1.3 m	6.3 m	11.3 m
弹性模量/GPa Modulus of elasticity	13.44	16.32	15.45	17.84	26.88	28.27
拉伸强度/MPa Tension strength	1 121.67	1 400.00	1 315.00	19.13	28.64	28.29
断裂伸长率/% Elongation at break	9.47	9.43	9.72	16.86	25.85	25.06

表 8 长白落叶松同一年轮晚材管胞纵向力学性能方差分析  
Table 8 Analysis of mechanical property of *L. olgensis* tracheids at different heights

来源 Source	自由度 DF	平方和 SS	均方和 MS	F value	P value Pr>F
弹性模量 Tension strength	2	33.46	16.73	11.61**	0.000 9
高度 Height	1	33.46	33.46	11.61**	0.000 9
拉伸强度 Tension strength	2	261 448.44	130 724.22	11.50**	0.000 9
高度 Height	1	261 448.44	261 448.44	11.50**	0.000 9
断裂伸长率 Elongation at break	2	1.16	0.58	0.99	0.395 1
高度 Height	1	1.16	1.16	0.99	0.395 1

### 3 结论

长白落叶松木材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率的均值分别为 11.19 GPa、838.95

MPa 和 7.31%, 且单根管胞力学性质均随着年轮的增加而增加, 均表现为 20 年>10 年>5 年。方差分析表明长白落叶松单根管胞弹性模量和拉伸强度在年轮间的变异性极显著 (0.01 水平), 断裂伸长率在年

轮间的差异性不显著。

长白落叶松早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率的均值分别为 9.64 GPa、714.05 MPa 及 6.01%，晚材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率的均值分别为 12.74 GPa、963.85 MPa 及 8.60%。方差分析表明长白落叶松单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率在早晚材间差异极显著 (0.01 水平)，晚材单根管胞力学性能显著大于早材。

长白落叶松同一年轮晚材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率在纵向的均值分别为 15.07 GPa、1 278.89 MPa 和 9.54%。方差分析表明，单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度在纵向上的变异性极显著 (0.01 水平)，6.3 m 的单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度大于 11.3 m 显著大于 1.3 m 的管胞力学强度，而断裂伸长率在纵向上的变异性不显著。

#### 参考文献:

- [1] Klauditz W, Marschall A, Ginzl W. Technology verholzter pflanzlicher Zellwände[J]. *Holzforschung*, 1947, 1(4): 98-103.
- [2] McIntosh D C, Unrig L O. Effect of refining on load elongation characteristics of *Loblolly pine* holocellulose and unbleached kraft fibers[J]. *Tappi*, 1968, 51(6): 265-273.
- [3] Kersavage P C. A system for automatically recording the load elongation characteristics of single wood fibers under controlled relative humidity conditions[M]. USDA U.S. Government Printing Office, 1973: 1-46.
- [4] Groom L H, Mott L, Shaler S M. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I: Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility[J]. *Wood and Fiber Science*, 2002, 34(1): 14-27.
- [5] Page D H, El-Hosseiny F, Winkler K. Behavior of single wood fibers under axial tensile strain[J]. *Nature*, 1971, 229(5282): 252-253.
- [6] Terziev N, Daniel G, Marklund A. Effect of dislocations in Norway spruce fibers on the mechanical properties of paper[M]. ESWN-Stockholm, 2003.
- [7] 王树力, 吴济生, 仲崇淇. 长白落叶松纸浆林木材材性和纸浆特性的研究[J]. *林业科学*, 1997, 33(3): 283-287.
- [8] 段喜华, 张含国, 潘本立, 等. 长白落叶松木材材性株内变异[J]. *东北林业大学学报*, 1997, 25(2): 33-36.
- [9] 郭明辉, 陈广胜, 王金满. 初植密度对落叶松人工林纸浆材材质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2003, 31(4): 18-19.
- [10] Yan Y, Jiang Z H, Fei B H. An improved microtensile technique for mechanical characterization of short plant fibers: a case study on bamboo fibers[J]. *Journal of Material Science*, 2011, 46(3): 739-746
- [11] Jang H F, Robertson A G, and Seth R S. Optical sectioning of pulo fibers with confocal scanning laser microscopy[C]// *International Paper Physics Conference*. 1991: 277-280.
- [12] Mott L, Groom L H, Shaler S M. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part II: Comparison of earlywood and latewood fibers tree respect to tree height and juvenility[J]. *Wood and Fiber Science*, 2002, 34(1): 221-227.
- [13] EL-Hosseiny F E, and Page D H. The mechanical properties of single wood pulp fibers: Theories of strength[J]. *Fiber Science and Technology*, 1975, 8(1): 21.