

## 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度的研究

邵亚丽<sup>1,3</sup>, 邢新婷<sup>1\*</sup>, 余雁<sup>2</sup>, 赵荣军<sup>1</sup>, 安珍<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102;

3. 内蒙古农业大学材艺院, 呼和浩特 010010)

**摘要:** 采用零距拉伸方法, 研究了4株长白落叶松早材管胞的纵向拉伸强度株内变异性及主要影响因素。结果表明, 长白落叶松早材管胞纵向拉伸强度均值为373.69 MPa, 早材管胞纵向拉伸强度年轮内和株内纵向的变异差异不显著, 径向的变异在0.01水平上显著。通过对水分、微纤丝角和密度等因素的研究表明, 早材管胞的纵向抗拉强度随着微纤丝角的增大而减小, 气干态和饱水态的管胞纵向抗拉强度在0.05水平差异显著, 早材管胞纵向抗拉强度与气干密度在0.01水平具有显著的相关性, 相关系数为0.861。

**关键词:** 长白落叶松; 零距拉伸; 早材; 管胞抗拉强度

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2012)01-0067-05

### Research on longitudinal tensile strength of *Larix olgensis* earlywood tracheids

SHAO Ya-li<sup>1,3</sup>, XING Xin-ting<sup>1</sup>, YU Yan<sup>2</sup>, ZHAO Rong-jun<sup>1</sup>, AN Zhen<sup>3</sup>

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

2. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102;

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

**Abstract:** In this paper, the zero-span tension technique was used to rapidly estimate the longitudinal tensile strengths' variability and main impact factors of tracheids of *Larix olgensis* plantation wood. It was found that the longitudinal tensile strength of earlywood tracheids has significant variation in radial at 0.01, and has no significant variation in longitudinal and in a ring. The tensile strength of earlywood tracheids of *Larix olgensis* decreased as MFA increased. The effect of moisture content on the tensile strength of tracheids has significant variation at 0.05 level, and the strength at air dry state is higher than that under water saturation state, and wood air-dry density has positive relationship with tension strength at 0.01 level with correlation coefficient of 0.861.

**Key words:** *Larix olgensis*; zero-span tension; earlywood; tensile strength of tracheids

管胞是针叶材最重要构成单元, 占针叶材体积的90%以上。管胞的力学性能与细胞壁的结构和组成密切相关, 也是决定木材宏观力学性能的重要因子之一。纸浆纤维的力学强度是影响纸张拉伸强度的主要因子, 因此如何准确、快速评价纸浆纤维的力学强度一直是制浆造纸领域的重要研究方向之一。1925年, Hoffman-Jacobsen<sup>[1]</sup>首次提出在两端夹具紧密接触条件下对纸片进行零间距拉伸测试, 认为该技术排除了纤维之间“拔出”的影响, 可以直接用来快速评价纸张纤维的抗拉强度。1958年,

Akker等<sup>[2]</sup>研究了零距拉伸测试的主要影响参数, 提出了相关数学表达式, 赋予该技术更为严谨的理论基础。2003年, 国内余雁<sup>[3]</sup>首次把零距拉伸技术引入到木材科学领域, 用来快速评价人工林杉木管胞的抗拉强度, 随后其他学者还利用该技术对马尾松管胞、热处理改性杉木管胞的抗拉强度进行了快速评价<sup>[4-5]</sup>。

落叶松(*Larix*)是寒温带及温带树种, 我国具有丰富的落叶松资源, 落叶松已成为我国短周期造纸材的重要栽培树种。我国对于管胞零距拉伸强度

收稿日期: 2011-08-12

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), 国家自然科学基金重点项目(3073006)和中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金(CAFYBB2008008)。

作者简介: 邵亚丽, 女, 硕士研究生。E-mail:shaoyali1117@yahoo.cn

\* 通讯作者: 邢新婷, 女, 博士, 副研究员。E-mail:xingxinting@caf.ac.cn

的研究主要集中在马尾松和杉木,而对于落叶松树种则未见报道。为此,作者采用零距拉伸技术快速评价管胞纵向拉伸强度的方法,系统研究了长白落叶松 (*L. olgensis* Henry) 早材管胞纵向抗拉强度株内纵向、径向、年轮内的变异规律,分析了水分、微纤丝角和气干密度等因素对落叶松早材管胞纵向抗拉强度的影响,从而为落叶松管胞纤维的选择性利用、指导优化落叶松制浆工艺提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的制备与测量

试验材料为采自黑龙江省佳木斯市孟家岗林场的4株生长状况良好的长白落叶松,在样木的1.3、3.8、6.3和11.3 m处各截取50 mm厚的圆盘,沿着南北向过髓心锯取宽为20 mm的通心条,选取北

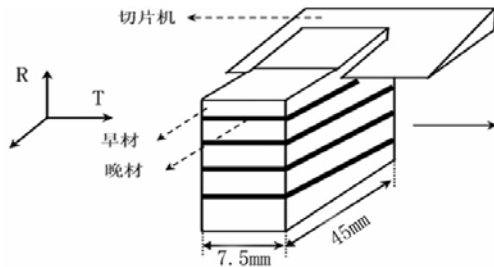


图1 零距拉伸试样的制作示意图

Figure 1 Schematic representation of sample preparation for zero-span tension

向为研究材料。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(刨切过程中尽量保持弦切面上的纹理与水平垂直)。将刨切后的中心条置于蒸馏水中软化一周,软化好的中心条用滑走式切片机(M200OR, Leica, Germany)在5、10、15、20、25和30年轮处连续切取80 μm厚的弦切片,图1所示。测量每个样品的气干质量和绝干质量,精确到0.0001 g,在每个微切片上沿长度方向均匀取4点用分辨率为1 μm的数显螺旋测微器测量试

样的实际厚度,选择其中厚度差异小于5 μm的试样备用。测试前将样品置于恒温恒湿箱中,含水率调整为12%。

### 1.2 测试方法

实验仪器采用Pulmac公司生产的零距抗拉强度测试仪(Z-Span2400),测试木材微切片的纵向抗拉强度,夹持压力为70 psi。微纤丝角的测定仪器为美国Panalytical公司X'Pert Pro粉末x射线衍射仪。管胞纵向拉伸强度为木材微切片的断裂载荷与试样断口处细胞壁物质面积的比值<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度株内变异

**2.1.1 径向年轮间变异** 长白落叶松的晚材率较大介于27.56%到33.99%之间<sup>[6]</sup>,早晚材急变,晚材坚硬,制样时成功率较低,所以本文主要分析落叶松的早材管胞纵向抗拉强度。如表1所示,长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度值介于250.54 MPa到595.86 MPa之间,均值为373.69 MPa,显著大于宏观长白落叶松木材纵向抗拉强度。表1中给出了长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度在径向的变异,从表1中得出,第5年到30年长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度呈波浪状起伏变化趋势,这可能与在早材中取材的位置有关。表2的方差分析结果表明,长白落叶松早材纵向抗拉强度在径向的变异性在0.01水平显著。

**2.1.2 径向年轮内变异** 在较宽年轮处从整个早材区域连续切取零距抗拉所需试样,落叶松晚材制样较难不作为研究的重点。如图2所示,5个有代表性的年轮整个早材的不同位置管胞纵向抗拉强度变化浮动不大,表2的方差分析表明早材管胞的纵向抗拉强度在年轮内早材的变化不显著。根据这个结论我们可以在年轮内的不同样品上开展改性处理对落叶松力学强度影响的研究,这样可以减少其他因素的影响。

表1 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度径向变异

Table 1 Radial variation of tensile strength of *Larix olgensis* earlywood tracheids

年轮 Ring	样本量 Number	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	最大值 Maxium	最小值 Minium
5	54	343.27	40.57	11.82	440.06	250.54
10	42	379.29	54.04	14.25	481.76	257.04
15	31	382.06	76.26	19.96	551.99	277.33
20	31	355.46	47.27	13.3	457.87	275.16
25	20	430.89	80.95	18.79	595.86	337.45
30	20	351.16	52.91	15.07	446.79	270.48

表 2 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度径向变异方差分析

Table 2 ANOVA of *Larix olgensis* earlywood tracheids tensile strength in radial

来源		自由度	平方和	均方和	F 值	P 值	
Source		DF	SS	MS	F value	P value	
年轮间	Inter-growth ring	组间 Inter-group	5	11 063.57	2 212.71	5.73**	< 0.001
		组内 Intra-group	18	6 950.59	386.14		
年轮内	Intra-group	组间 Inter-group	9	2 685.87	298.43	0.22	0.99
		组内 Intra-group	50	1 366.99			

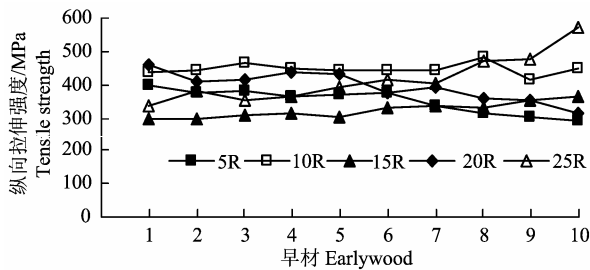


图 2 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度年轮内变异  
Figure 2 Variation of tensile strength of *Larix olgensis* earlywood tracheids in an annual ring

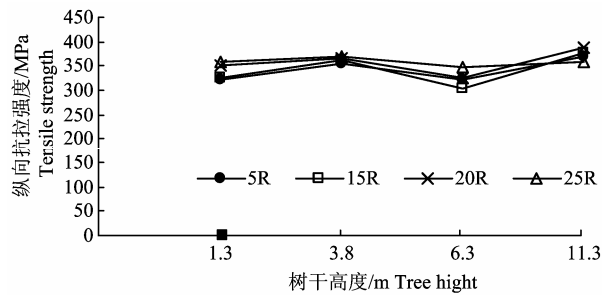


图 3 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度轴向变异  
Figure 3 The longitudinal variation of tensile strength of *Larix olgensis* earlywood tracheids

2.1.3 纵向变异 图 3 是长白落叶松的 4 个年轮在树木纵向的早材管胞纵向抗拉强度的变异曲线。从图中可知,长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度从 1.3 m 到 11.3 m 变化不大,不同年轮早材管胞纵向抗拉强度值在纵向变化趋势基本一致。表 3 方差分析表

明长白落叶松不同年轮的早材管胞纵向抗拉强度在树木纵向上的差异性不显著(0.05 水平)。这一结论与余雁、孙娟等对于杉木和马尾松早材管胞纵向抗拉强度的研究相一致<sup>[7-8]</sup>。

表 3 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度径向变异方差分析

Table 3 ANOVA of *Larix olgensis* earlywood tracheids tensile strength in different annual rings

来源		自由度	平方和	均方和	F 值	P 值	
Source		df	SS	MS	F value	P value	
高度	Height	组间 Inter-group	3	1 965.36	655.12	0.75	0.55
		组内 Intra-group	12	8 118.07	676.51		

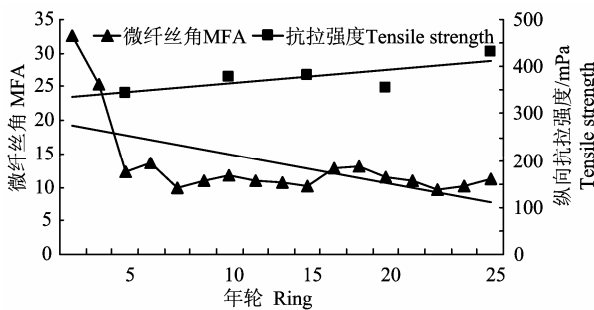


图 4 长白落叶松早材管胞微纤丝角、抗拉强度径向变异  
Figure 4 Radial variation of MFA and tensile strength of *Larix olgensis* earlywood tracheids

2.2 早材管胞纵向抗拉强度影响因素的研究

力学性能的影响因素大多包括微纤丝角、水分含量、密度、自身结构和化学成分等诸多因素,其

中水分、微纤丝角和密度影响较大<sup>[9]</sup>,因此本文重点分析三者对长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度的影响。

2.2.1 微纤丝角的影响 微纤丝角是细胞壁 S<sub>2</sub> 层微纤丝与管胞主轴方向的夹角,微纤丝角越大则力学性能越小。从图 4 中可以看出,长白落叶松微纤丝角 5 年以前呈现急剧下降趋势,从 5 年到 25 年微纤丝角呈现微小的波动趋势,随着微纤丝角度的减小管胞纵向抗拉强度增大。图 5 为长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度与微纤丝角的关系图,从图中可以得出,管胞的纵向抗拉强度随着角度的增大而减小。在 0~15° 范围内纵向抗拉强度变化不大,而在 15~19° 出现急剧下降趋势。此结论与其它学者的研究相一致<sup>[10-11]</sup>。

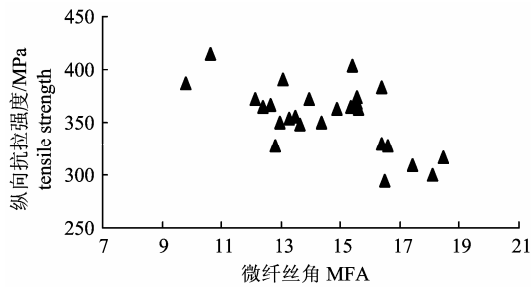


图 5 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度与微纤丝角的相互关系

Figure 5 Relationship between tensile strength and microfibril angle of *Larix olgensis* earlywood tracheids

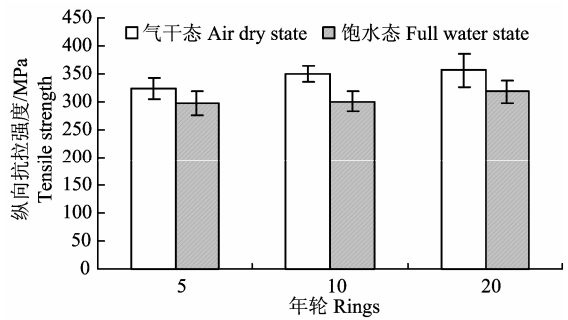


图 6 长白落叶松早材管胞气干态与饱水态纵向抗拉强度  
Figure 6 Tensile strength between air-dried and full water of *Larix olgensis* earlywood tracheids

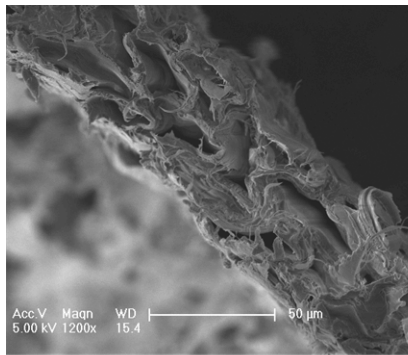
**2.2.2 含水率的影响** 图 6 是对同一个试样分别在气干态和饱水态进行 2 次测量得到的结果。长白落叶松早材管胞试样气干态的平均含水率为 10% 左右, 饱水态为大于 30%。从图中可知, 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度值气干态大于饱水态, 气干态的早材管胞纵向抗拉强度平均值为 343.61 MPa, 饱水态的早材管胞纵向抗拉强度平均值为 305.42 MPa, 气干态比饱水态大 11% 左右。表 4 方差分析

表明在同一年轮内气干态纵向抗拉强度大于饱水态并在 0.05 水平下显著。这是因为湿态拉伸时水分弱化了胞间层间的结合力, 显著降低细胞之间、壁层之间(特别是 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 层之间)的结合强度, 降低了纤维素分子链间的结合力, 从而使胞间层和管胞压溃降低了纵向拉伸强度<sup>[12]</sup>。图 7 是气干态和饱水态落叶松拉断断口的电镜图, 可见饱水态断口处受夹持胞腔几乎消失。

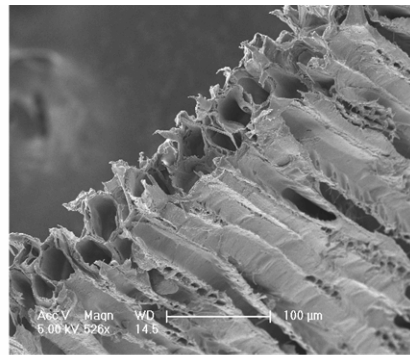
表 4 长白落叶松早材管胞气干态与饱水态纵向抗拉强度的方差分析

Table 4 ANOVA of tensile strength between air-dried and absorbed water conditions of *Larix olgensis* earlywood tracheids

来源		自由度	平方和	均方和	F 值	P 值
Source		df	SS	MS	F value	P value
含水率 Water content	组间 Inter-group	1	2 243.59	2 243.59	29.76*	0.032
	组内 Intra-group	2	150.77	75.38		



饱水态 Full water state



气干态 Air-dried state

图 7 长白落叶松早材管胞气干态与饱水态拉伸样断口电镜图

Figure 7 SEM images of tensile samples between air-dried and full water of *Larix olgensis* earlywood tracheids

**2.2.3 气干密度的影响** 木材气干密度是影响木材物理力学性质的重要因素。本文对于长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度与气干密度的相关性进行了研究, 结果如图 8 所示。落叶松早材管胞纵向抗拉强度与密度在 0.01 水平具有显著的相关性, 其相关系

数达到了 0.861。落叶松早材管胞纵向抗拉强度与气干密度之间呈线性相关, 线性回归方程为  $y=32\ 171x+248.16$ , 决定系数为 0.741。这可能是试样密度越大, 壁腔比越大, 夹持处应力集中对试样的影响越小, 此结果与张波对于马尾松管胞的研究

结论相吻合<sup>[13]</sup>。

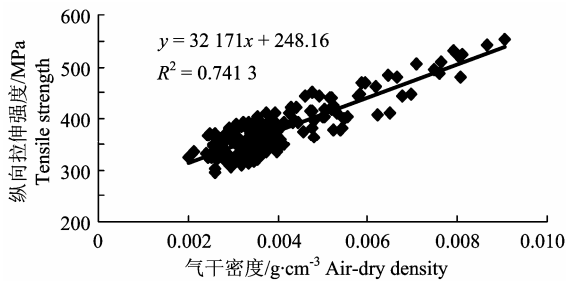


图 8 长白落叶松早材管胞纵向抗拉强度与气干密度的关系

Figure 8 Relationship between tensile strength and air-density of *Larix olgensis* earlywood tracheids

### 3 结论

长白落叶松早材管胞纵向拉伸强度值介于 250.54 MPa 到 595.86 MPa 之间, 平均值为 373.69 MPa。方差分析表明, 随着年轮的增加早材管胞纵向拉伸强度在 0.01 水平呈现显著的差异性, 在株内纵向(树高 1.3~11.3 m)和年轮内的变异均不显著。随着年轮的增加早材管胞纵向拉伸强度呈波浪状起伏变化趋势, 这与取样为早材有关, 而晚材更具有代表性, 所以建议通过单根纤维离析的方法得到晚材管胞的纵向抗拉强度做进一步研究。

水分、微纤丝角和气干密度等因素对长白落叶松早材管胞纵向拉伸强度的影响研究表明, 管胞的纵向抗拉强度随着角度的增大而减小, 在 0~15° 范围内纵向抗拉强度变化不大, 而在 15~19° 出现急剧下降趋势; 管胞纵向抗拉强度值气干态大于饱水态, 气干态的早材管胞纵向抗拉强度平均值为 343.61 MPa, 饱水态的早材管胞纵向抗拉强度平均值为 305.42 MPa, 气干态比饱水态大 11% 左右, 方差分析表明气干态和饱水态的管胞纵向抗拉强度在

0.05 水平差异显著; 落叶松早材管胞纵向抗拉强度与气干密度在 0.01 水平具有显著的相关性, 其相关系数达到了 0.861。

致谢: 在试验过程中得到国际竹藤网络中心程海涛、田根林等老师的帮助和指导, 特此感谢。

### 参考文献:

- [1] Hoffman-Jacobsen P M. A new method of determining of the strength of chemical pulp[J]. Paper Trade Journal, 1925, 53: 216-217.
- [2] Akker V D, Lathrop A L. Importance of fiber strength in paper [J]. Tappi, 1958, 41(8): 416-425.
- [3] 余雁. 人工林杉木管胞的纵向力学性质及其主要影响因素的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003: 123.
- [4] 赵荣军, 程献宝, 孙娟, 等. 针叶材管胞纵向抗拉强度研究[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(4): 491-495.
- [5] 孙娟. 杉木、马尾松细观力学性能及热处理材性能研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [6] 鲍甫成, 江泽慧. 中国主要人工林树种木材力学性质 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [7] 余雁, 费本华, 张波, 等. 零距离抗拉技术评价木材管胞纵向抗拉强度[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 83-86.
- [8] 孙娟, 费本华, 王喜明, 等. 针叶材管胞纵向零距离抗拉强度的研究[J]. 木材加工机械, 2009, 3: 9-12.
- [9] Mark R E. Cell Wall Mechanics of Tracheids[M]. New Haven, Yale University Press, 1967.
- [10] 余雁, 江泽慧, 任海青, 等. 针叶材管胞纵向零距离抗拉强度的影响因子研究[J]. 中国造纸学报, 2007, 22(3): 72-76.
- [11] Page D H, Hosseiny F E L, Winkler K, et al. The mechanical properties of single wood pulp fibers. Part I: A new approach [J]. Pulp Paper Mag Canada, 1972, 73(8): 72.
- [12] Kifetew G, Thuvander F, Berglund L, et al. The effect of drying on wood fracture surfaces from specimens loaded in wet condition[J]. Wood Science and Technology, 1998, 32(2): 83.
- [13] 张波. 马尾松木材管胞形态及微力学性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007: 50.