

零距拉伸技术评价木材管胞纵向抗拉强度*

余 雁¹ 费本华² 张 波²

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

摘 要: 把造纸领域的零距拉伸技术引入木材科学研究领域,用于快速评价人工林杉木管胞纵向抗拉强度。结果表明:零距拉伸试样的最佳厚度是 80 μm ,最适宜的夹持力为 70 psi;杉木管胞的纵向抗拉强度从髓心到树皮呈增大趋势,但在树高方向(1.3~7.3 m)的差异不显著。利用零距拉伸技术具有测量迅速、可操作性强等特点,可以作为快速评价木材纤维纵向力学性能的新方法。

关键词: 零距拉伸;木材管胞;抗拉强度

中图分类号:S781 文献标识码:A 文章编号:1001-7488(2006)07-0083-04

Estimation of Longitudinal Tensile Strength of Tracheids with Zero-Span Tension Technique

Yu Yan¹ Fei Benhua² Zhang Bo²

(1. International Center for Bamboo and Rattan Beijing 100102; 2. Research Institute of Wood Industry, CAF Beijing 100091)

Abstract: The zero-span tension technique, used widely in papermaking industry, was introduced to wood science research in China, and used to estimate rapidly the longitudinal tensile strength of tracheids of Chinese Fir plantation wood. It was found optimum thickness of samples and clamping pressure for zero-span tension was 80 μm and 70 psi respectively. Statistical analyses indicated stable increase of tracheids tensile strength from bark to pith, while no significant variation was observed along tree height from 1.3 m to 7.3 m. Therefore, it was inferred that zero-span tension could be used as a novel and reliable method for assessing the axial tensile strength of softwood tracheids.

Key words: zero-span tensile test; wood tracheid; tensile strength

木材纤维(管胞)是各种木材纤维复合材料的主要构成单元,其力学性能对产品的最终性能起着重要的作用(Cown *et al.*, 1980; Labosky *et al.*, 1981; Pugel *et al.*, 1990)。Groom 等(1999)证明了木材纤维的纵向抗拉强度直接影响着中密度纤维板的力学性能。纸浆纤维与纸制品的力学性能之间存在着密切关系,纤维本身强度对于纸张的抗拉强度具有与纤维间结合强度同等的重要性,这一点已经被许多研究所证实(Clark, 1954; Akker *et al.*, 1958)。Clarke(1995)认为了解木材纤维力学性质在树木中的变异规律对木材纤维/塑料复合材料和制浆造纸领域对木材纤维的选择性利用,改善产品性能具有重要意义。

零距拉伸的思想来源于造纸领域。其原理是:在零距状态拉伸时,纸张的断裂完全是由横跨夹具交界面两端纤维的断裂所致,排除了正常间距拉伸断裂时纤维拔出的影响,从而直接评价纤维的抗拉强度。在制浆造纸领域,通常使用零距抗张强度试验仪对按一定标准制作的手抄片(handsheets)进行零距拉伸测试,从而快速评价纸浆纤维的抗拉强度。自从 20 世纪 70 年代初,Pulmac 公司研制出为制浆造纸业普遍接受零距抗张强度测试仪以来,零距抗张强度逐渐成为评价纸张力学性能的一项重要指标。我国在 1994 年也制定了《纸浆和纸零距抗张强度测定法》的国家推荐标准(GB/T 2678.4-94)。

零距拉伸主要基于 3 个假设:1)零距拉伸状态时,断裂由横跨夹具交界面的纤维断裂所致,排除正常间距拉伸时的纤维断裂;2)忽略纤维间结合力的影响;3)可以确定纤维取向效应的影响。对于第一个假设,拉断试样断口显微观察表明可以保证。对于第二个假设,早期很多研究者认为,纸张纤维处于饱水状态时,纤维之间的结合力可以忽略不计,但近年来随着研究的深入,更多的试验数据和电镜显微图像观察(Gurnagul *et al.*, 1989; Soriano *et al.*, 1996a; 1996b)证实:特定含水率状态的纤维强度值只能是该状态下的测试值,湿拉

收稿日期:2005-11-08。

基金项目:国家自然科学基金项目“针叶材管胞的力学性质及其主要影响因子研究”(30371125);国家重大基础研究发展规划(973)子课题“木材结构及化学组成与其品质特性的分子基础”(G1999016001)。

* 费本华为通讯作者。

伸并不能反映干拉伸状态下的纤维强度值。而第三个假设,对于木材微切片,由于纤维的纵向平行排列,可以与加载力的方向一致,取向系数为1。所以如果能测出试样断口的胞壁物质面积,就可以得到木材管胞的纵向抗拉强度。

本研究借鉴零距拉伸技术评价纸浆纤维强度的思想,从理论上探讨运用零距拉伸技术测量天然态管胞纵向抗拉强度的可行性,通过试验确定了样品的尺寸规格、试验条件和操作程序,并在此基础上研究了人工林杉木(*Cunninghamia lanceolata*)管胞纵向抗拉强度的变异规律。

1 材料与方法

1.1 材料

人工林杉木取自江西大岗山试验林场,树龄36年左右。在采样点内选取4株生长状况良好的树木。在每株树的1.3、3.3、5.5、7.3 m处各取一个50 mm厚的圆盘,沿南北向过髓心锯取宽为15 mm的长条,取北向部分作为试验材料。

1.2 方法

用零距拉伸仪器测出木材微切片的抗张强度,根据试样断口处胞壁物质的面积,即可以得到木材细胞壁的纵向抗拉强度,即管胞的抗拉强度;而试样断口处细胞壁的面积则可以通过胞壁率估算得到(余雁,2003)。理论上计算公式为:

$$S_{\text{cell}} = \frac{\rho_{\text{cell}} \int_0^L s(x) dx}{\rho_{\text{cell}} L} = \frac{m}{\rho_{\text{cell}} L}$$

结合零距拉伸试验仪器所提供的基础公式,得到管胞的纵向抗拉强度计算公式:

$$T_s = \frac{(p - p_0) \rho_{\text{cell}} 3.599}{\rho h w}$$

式中: p 为仪器读数值,psi; p_0 为仪器设定值,根据采用的夹距取1.9 psi; ρ_{cell} :细胞壁密度,取 $1.515 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (成俊卿,1985); ρ 为微切片气干密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; h 为微切片厚度, μm ; w 为微切片宽度,mm; T_s 为管胞纵向抗拉强度,MPa; m 为微切片的质量,g; L 为微切片的长度,mm。

1.3 样品制备与测量

毛坯条锯切刨光后,厚度为30 mm,宽度为7.5 mm,置于蒸馏水中浸泡约3 d,每天换水1次。用滑走式切片机(M2000R, Leica, Germany)在年轮较宽的早材区域切制厚度为80 μm (确定最佳厚度时切取了60、80、100、150、300 μm)的弦切片15~20片(图1),然后夹在载玻片中间气干,取样尽量均匀分布在该年轮的整个早材区域。测试前将样品放在温度20 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度65%的调温调湿箱内平衡24 h,试样最终含水率为12%。测量每个微切片的质量,精确到0.000 1 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(Mitutoyo, Ip65, Japan)测量试样的实际厚度,选择其中厚度差异小于3 μm 的试样备用。

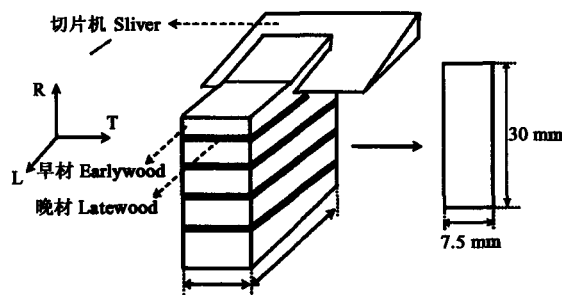


图1 零距拉伸试样的制作示意图

Fig. 1 Schematic representation of sample preparation for zero-span tension

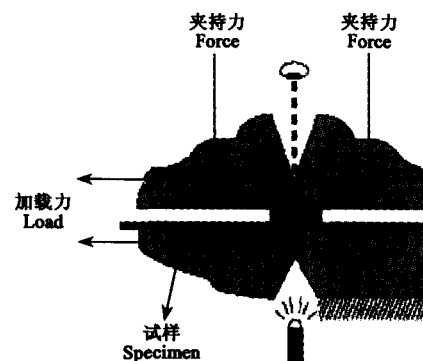


图2 零距抗张强度测试仪及其夹具

Fig. 2 Zero-span tensile strength tester and its grips

由于人工林杉木晚材率较小,一般13.4%~17.2%(鲍甫成等,1998),而且晚材部分较硬,制样时成功率较低,所得样本数较少,因此在分析管胞纵向抗拉强度变异规律时主要取早材部分。

强度测试所用仪器为 Pulmac 公司生产的零距抗张强度测试仪,在其夹具的端部有 2 个凸起,便于夹紧试样。当装上试样以后,夹具端头相互紧密接触,并于底座之间形成一定压力,即夹持力,力大小可调。试验时要求端头的紧密接触,从夹具上部看不到下部光源的光线,这样才能保证所谓的零距拉伸(图 2)。

2 结果与分析

2.1 试样厚度的确定

零距拉伸作为一种管胞抗拉强度的测试方法,试验过程中,要求切片厚度大于 1 个而小于 2 个管胞径向直径,而且试样夹持状况良好。人工林杉木成熟材和幼龄材的早材管胞径向直径 42.40 ~ 45.22 μm (鲍甫成等,1998),所以试样厚度最好介于 50 ~ 100 μm 。图 3 是在夹持力为 90 psi 时 60、80、100、150、300 μm 厚度微切片的管胞纵向抗拉强度值, N 为测试样个数,可见对于杉木试样厚度为 80 μm 时管胞纵向抗拉强度值最大。而且研究过程中还发现,如果厚度太小,夹持力容易压溃夹紧处的细胞壁,会明显降低试样的零距断裂力;如果厚度过大,试样容易在夹具内发生一定的滑移,同时容易产生纤维的不完全断裂,产生纤维的拔出现象(这一点可以在试样断口的电镜观察中得到证实,图 4)。从图 4 中可以明显看出:试样的厚度越大,纤维拔出现象越明显,特别是试样厚度达到 300 μm 时,可以观察到有成簇纤维拔出;而厚度为 150 μm 时,纤维拔出也时有出现,但一般以单根纤维的形式零星分布;当厚度小于 100 μm 以后,纤维拔出现象已不明显。结合切片切片情况(为 20 μm 的整数倍时操作方便)和管胞径向直径最后确定试样的最佳厚度为 80 μm 。

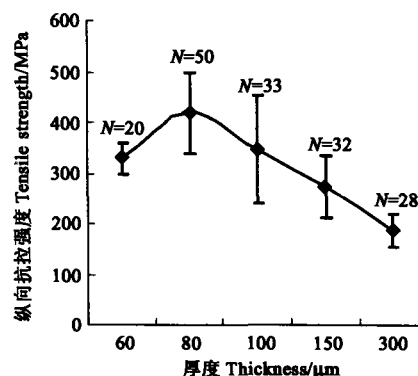


图 3 试样厚度对零距抗拉强度的影响

Fig. 3 The effects of sample thickness on the zero-span tensile strength

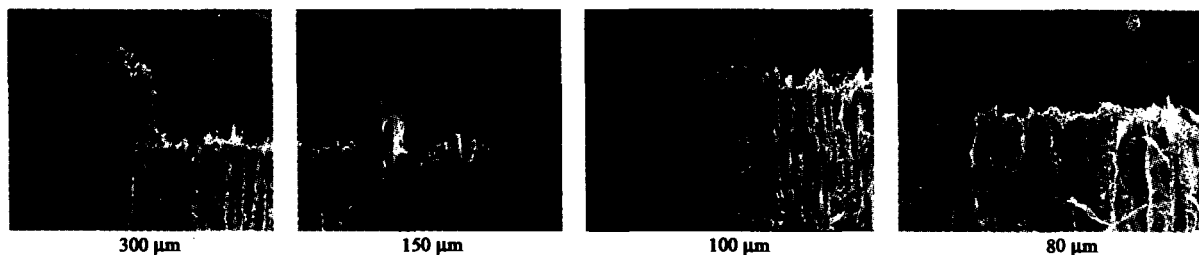


图 4 不同厚度零距断裂试样的电镜照片($\times 150$)

Fig. 4 SEM micrographs of fracture surface of samples with different thickness resulting from zero-span tension

2.2 夹持力的确定

零距拉伸测量管胞的纵向抗拉强度时,适当的夹持力对获得正确的结果极为重要。夹持力太小,木材微切片拉伸时可能在夹具内滑移,例如 20 psi 时微切片会轻易从两夹头间滑脱;如果夹持力太大,过大的应力集中会造成管胞的强度降低。图 5 是夹持力为 60、70、80 和 90 psi 时 80 μm 厚度微切片的纵向抗拉强度值,图中每个点为 15 个测试样的平均值。可见夹持力为 70 psi(483 kPa)时试样的零距抗拉强度值最大。因此选择 70 psi(483 kPa)作为 80 μm 厚木材微切片的最佳夹持力。

2.3 管胞纵向抗拉强度的变异规律

用零距拉伸技术所得杉木早材管胞纵向抗拉强度值介于 300 ~ 600 MPa 之间(图 6),其中管胞纵向抗拉强度的值为 4 株相同高度处的平均值,显著大于木材的宏观试件抗拉强度 70 ~ 80 MPa,与 Mott 等(2002)利用单根纤维拉伸测量美国南方松所得值 604 MPa 相接近。

从图 6 中还可得出,杉木管胞纵向抗拉强度在径向上从心材到边材总体上有增大趋势。一般从髓心向外强度值迅速增加,到第 10 年后基本趋于稳定,反映了树木进入正常生长阶段,内部组织结构趋于稳定,材质趋于优良。这与 Mott 等(2002)对单根纤维微拉伸方法研究火炬松(*Pinus taeda*)管胞纵向模量和强度的单株变异规律结果相一致。在高度方向上从 1.3 m 到 7.3 m 管胞纵向抗拉强度值没有显著的变化,可以看出

在胸高以上位置,同一年轮不同高度管胞的强度值基本趋于稳定。

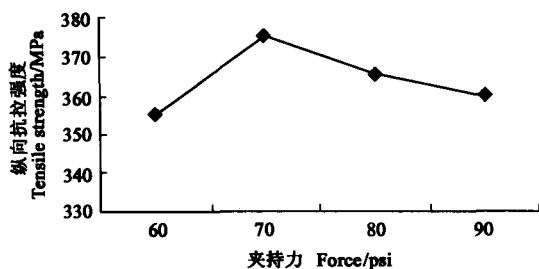


图5 夹持力对零距拉伸强度的影响(厚度:80 μm)

Fig. 5 The effect of force on the zero-span tensile strength (thickness: 80 μm)

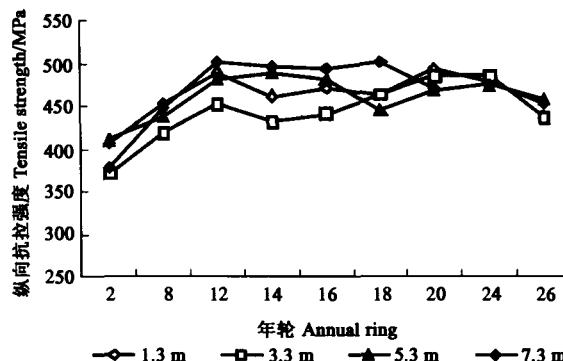


图6 不同高度早材管胞抗拉强度变异

Fig. 6 Radial variation of tensile strength of earlywood tracheids at various tree heights

3 结论

- 1) 零距拉伸技术可以用来研究管胞纵向抗拉强度,作为相比较单纤维拉伸更为迅速、更具可操作性的技术,可能成为一种测量木材微观力学的新方法;
- 2) 对于人工林杉木,管胞纵向抗拉强度介于 300 ~ 600 MPa 之间,平均为 460 MPa,零距拉伸试样的最佳厚度是 80 μm ,最适宜的夹持力为 70 psi;
- 3) 早材管胞纵向抗拉强度从髓心到树皮呈增大的趋势,10 年以后基本稳定;
- 4) 早材管胞纵向抗拉强度在树高方向(1.3 ~ 7.3 m)差异不显著,没有明显的变异规律。

参 考 文 献

- 成俊卿. 1985. 木材学. 北京:中国林业出版社,631
- 鲍甫成, 江泽慧. 1998. 中国主要人工林树种木材性质. 北京:中国林业出版社,5
- 余 雁. 2003. 人工林杉木管胞的纵向力学性质及其主要影响因子研究. 中国林业科学研究院博士学位论文,1-4
- Akker V D, Lathrop J A, Voelker M H, *et al.* 1958. Importance of fiber strength in paper. *Tappi*, 41(8): 416-425
- Clark J D A. 1954. *Cellulose and cellulose derivatives*. Interscience Publishers Inc, New York, 1954
- Clarke C R E. 1995. Variation in growth, wood, pulp and paper properties of nine eucalypt species with commercial potential in South Africa. Ph D thesis University College of North Wales, UK
- Cown D J, Kibblewhite R P. 1980. Effects of wood quality variation in New Zealand radiata pine on kraft paper properties. *NZ J Forest Sci*, 10(3): 521-532
- Groom L H, Mott L, Shaler S M. 1999. Relationship between fiber finish properties and the structural performance of MDF. 33rd Proceedings of particleboard/composite materials symposium. Pullman WA, 89-100
- Gurnagul N, Page D H. 1989. The difference between dry and rewetted zero-span tensile strength of paper. *Tappi J*, 72(12): 164-167
- Laboslky P, Ifju G. 1981. A study of loblolly pine growth increments. Part IV: Papermaking properties. *Wood Fiber and Science*, 13(2): 120-137
- Mott L, Groom L H, Shaler S M. 2002. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part II: Comparison of earlywood and latewood fibers with respect to tree height and juvenility. *Wood Fiber and Science*, 34(2): 221-237
- Pugel A D, Price R G, Hse C Y. 1990. Composites from southern pine juvenile wood. Part I: Panel fabrication and initial properties. *Forest Prod J*, 40(1): 29-33
- Soriano F P, Evance P D. 1996a. A microtensile technique. Part I: Theory and application in thin King William Pine wood strips. *FPRDI*, 55-70
- Soriano F P, Evance P D. 1996b. A microtensile technique. Part II: Fractography of thin King William Pine wood strips. *FPRDI*, 71-83

(责任编辑 石红青)