

针叶材管胞纵向零距抗张强度的影响因素研究

余雁¹ 江泽慧¹ 任海青² 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, 北京, 100091)

摘要: 对厚度为80 μm的人工林杉木弦切片进行纵向零距抗张强度测试, 以此快速评价管胞的抗张强度, 重点探讨了管胞纵向抗张强度的一些重要影响因素。研究表明, S₂层微纤丝角对管胞的抗张强度有着显著影响, 微纤丝角越小, 管胞的抗张强度越大; 含水率对管胞的抗张强度影响不显著; 纤维素的聚合度小于757时与管胞的抗张强度存在正相关关系, 但当聚合度大于757后对管胞的抗张强度没有显著影响; 过度脱木素会削弱细胞壁内基质对微纤丝的应力传递作用, 限制纤维素承载潜力的发挥, 从而显著降低管胞的纵向抗张强度。

关键词: 零距抗张强度; 管胞; 影响因素

中图分类号: TS721^{+.1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6842(2007)03-0072-05

在制浆造纸领域, 木材纤维的纵向抗张强度是一个重要指标。当纸张拉伸断裂时, 有相当大比例的纤维被拉断, 说明纤维本身强度对于纸张的抗张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^[1]。近10年来以木材纤维为主要增强相的可降解生物高分子复合材料的兴起, 引起了人们对木材纤维力学性能及其测试技术的极大兴趣。目前, 木材纤维力学强度的评价方法主要有两种, 一是直接对单根木材纤维进行微拉伸, 测定其纵向抗张强度。尽管随着测试技术的进步, 这种方法的测量速度和精度比以前有了很大提高^[2-5], 但实施起来仍然具有较大的难度, 而且不适合长度较短的纤维。二是使用专门的零距抗张强度试验仪测定按一定标准制作的手抄片零距抗张强度, 从而快速评价纸浆纤维的抗张强度。零距抗张强度测试是在零距状态拉伸时, 纸张的断裂完全由横跨夹具交界面两端纤维断裂所致, 排除了抗张强度测试过程中拉伸断裂时纤维拔出的影响, 从而达到直接评价纸浆纤维本身强度的目的。自20世纪70年代初Pulmac公司研制出了为制浆造纸业普遍接受的零距抗张强度测试仪以来, 零距抗张强度已经成为评价纸张力学性能的一项重要指标。

虽然零距抗张强度的测试对象通常是标准制作的具有特定厚度和紧度的纸浆手抄片, 但早在1960年, Stone等就尝试了对木材微切片进行零距抗张强度的测试, 并模拟制浆过程对木材微切片进行处理, 由此研究制浆工艺对木材纤维强度的影响^[6]。Soriano

在对木材微切片的零距和短距抗张强度测试进行了比较研究后也认为, 可以使用零距抗张强度测试方法快速评价天然态木材纤维的纵向抗张强度^[7]。在先前进行的研究中, 详细研究了木材微切片厚度、夹持力对其零距抗张强度的影响, 并由此研究了人工林杉木管胞纵向抗张强度的株内变异规律^[8]。本次研究是上述研究的继续, 目的是利用零距抗张强度测试方法研究微纤丝角、含水率、纤维素聚合度、木素含量对管胞纵向抗张强度的影响, 以期为人工林木材材性改良提供合理的目标和数据, 并加深在细胞水平对木材宏观力学特性的理解。

1 实验

1.1 样品制备

实验材料为人工林杉木, 样品来源参见文献[9]。在造纸行业, 零距抗张强度的测试样品是根据标准制作的具有特定厚度和紧度的手抄片, 因此为了使用零距抗张强度实验仪, 必须制作与纸张相似, 具有一定厚度的木材微切片, 其最佳厚度应该通过实验确定。对于人工林杉木, 在先前的研究中得出微切片的最佳厚度为80 μm^[9]。为了保证微切片厚度在长度方向的均匀性, 使用了型号较新的滑走切片机(M2000R, Leica, Germany)。木条经过充分软化后, 选择年轮较宽的早材区域连续切制厚度为80 μm的弦切片。然后把接近饱水状态的微切片夹在载玻片中间压紧, 放在大气条件下干燥7天, 使微切片平

收稿日期: 2007-01-12(修改稿)

本项目为国家自然科学基金项目(30371125, 30400337)。

作者简介: 余雁, 男, 博士, 助理研究员; 主要研究方向为木材基础性质。

*E-mail: yuyan@icbr.ac.cn

直。接着用锋利的刀片把微切片切制成宽为 7.5mm 的试样。在测试前, 试样还需在大气条件下放置 1~2 周, 使其达到与周围大气相平衡的含水率 (8%~9%)。同时需要测量每个微切片的绝干质量, 精确到 0.0001 g。使用分辨率为 1 μm 数显螺旋测微器测量试样的实际厚度, 只有在长度方向厚度差异小于 3 μm 的试样才被认为有效。

为了直接建立起管胞抗张强度与 S₂ 层微纤丝角之间的关系, 需要在测得管胞的抗张强度后, 直接测量所对应的断裂试样的微纤丝角。由于试样的厚度只有 80 μm 左右, 离析后大约有 25% 的纤维具有单层壁, 因此使用偏光法测量纤丝角。每个样品测量 30 个数据。

在研究纤维素聚合度、含水率、木素含量对管胞抗张强度的影响时, 需要在较宽年轮的早材区域连续切制尽可能多的试样, 并且为了减小样品本身差异的影响, 根据需要采用交叉原则分组。

为了得到不同聚合度的样品, 使用不同剂量的 γ 辐射随机切断纤维素分子链, 辐射剂量为 0 (对照组)、1.0、10、50 Mrad (兆拉德), 辐射剂量的增加速率为 276.6 GY (戈瑞) /min。

在研究含水率对管胞抗张强度的影响时, 只比较气干和饱水 2 种条件下的差异。

研究木素含量这个影响因子时, 一组未脱木素的试样作为对照组, 另一组则用过氧化氢和冰醋酸的混合液在 55 ℃ 的条件下处理 72 h, 并测量其质量损失率。

1.2 测试

实验所用的仪器为 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。在未夹紧时, 上下夹具之间留有一定空隙。当装上试样以后, 夹具端头相互紧密接触, 并与底座之间形成一定压力, 压力大小可调。在防止试样滑移的前提下应尽量选用较小的压力, 以减少夹紧处应力集中造成的强度降低。根据以前的研究结果, 最佳的夹持力为 483kPa^[9]。

用零距抗张强度测试仪测出木材微切片的零距断裂载荷后, 除以试样断口处胞壁物质的面积, 即可得到木材细胞壁的纵向抗张强度, 即管胞的抗张强度。尽管沿微切片的长度方向, 细胞壁面积不是一个常数, 但从数学上讲, 可以找到一个平均面积用以表示其长度方向面积的平均值, 该值可通过测量试样绝干质量, 由式 (1) 计算得到。

$$S_{\text{cell}} = \frac{\rho_{\text{cell}} \int_0^L S(x) dx}{\rho_{\text{cell}} L} = \frac{m}{\rho_{\text{cell}} L} \quad (1)$$

由此, 管胞的纵向抗拉强度为:

$$T_s = \frac{N}{S_{\text{cell}}} = \frac{N}{\frac{m}{\rho_{\text{cell}} L}} \quad (2)$$

式中: S 为细胞壁面积, m²; m 为木材微切片的绝干质量, g; L 为微切片的长度, 为 30 mm; ρ_{cell} 为细胞壁密度, 对于杉木, 取 1.515 g/cm³^[10]; T_s 为管胞的纵向抗张强度, MPa; N 为零距断裂载荷, N。

2 结果与讨论

2.1 S₂ 层微纤丝角的影响

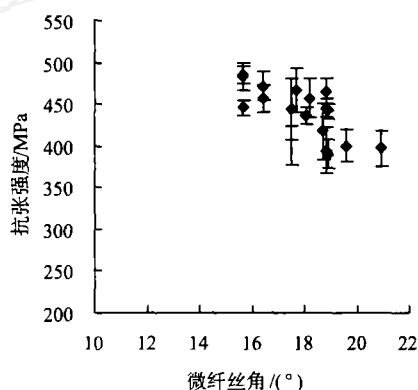


图1 S₂层微纤丝角对早材管胞纵向抗张强度的影响

图 1 表明, 管胞的抗张强度和 S₂ 层微纤丝角之间存在显著的负相关关系, 即随着微纤丝角的增大, 管胞的抗张强度显著减小。这个结论与 Page^[11] 使用单根纤维微拉伸方法得到的结论一致。其实, 如果把管胞细胞壁看成是纤维素微纤丝为增强体、木素半纤维素为基质的纤维增强复合材料, 微纤丝角则是材料偏轴拉伸方向与材料主轴之间的夹角。夹角越大, 复合材料的抗张强度越低, 复合材料力学早已从实验和理论上证明了这一点^[12]。

2.2 含水率的影响

木材力学强度在纤维饱和点以下随含水率的减小而增大, 在纤维饱和点以上则大致保持恒定值。然而不同强度指标对含水率变化的敏感程度不尽相同, 其中顺纹抗张强度对含水率的变化最不敏感^[10]。当含水率增减 1% 时, 顺纹抗张强度增减 1%, 横纹抗张强度增减 1.5%, 而顺纹抗压强度增减可达 6%^[13]。由此可推出, 针叶材在饱水态 (含水率 30% 左右) 时的顺纹抗张强度大约比气干态 (含水率 8%~9%) 时低 20% 左右。然而, 图 2 表明, 管胞抗张强度在饱水态

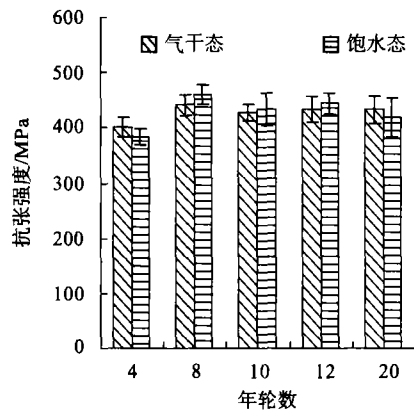


图2 含水率对早材管胞抗张强度的影响

表1 气干态和饱水态下管胞抗张强度的方差分析

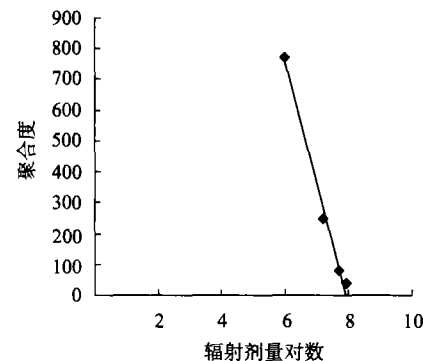
差异源	平方和	自由度	均方	F值	Fcrit	显著性
组间	2172.0	1	2172.0	0.5333	3.933	不显著
组内	419476	103	4072.6			
总计	421648	104				

和气干态下的差异很小。有的年轮是前者略微大于后者，有的则相反，这可能与木材固有的天然变异性有关。本实验进一步把上述数据分为气干态和湿态两组进行方差分析(见表1)。表1表明，组间平均离差平方和与组内平均离差平方和的比值F为0.5333，小于F分布的临界值(Fcrit)3.933，说明两者之间的差异不显著。方差分析进一步表明，管胞在气干态和饱水态下的抗张强度之间的差异不显著(见表1)。这是因为，管胞纵向受拉时，细胞壁S₂层的纤维素微纤丝作为增强物质承担了绝大部分载荷，这一点已经通过拉曼激光光谱得到了证明^[14]，而纤维素的纵向力学性能对水分不敏感^[15-17]，因此含水率的变化不会对管胞的抗张强度造成显著影响。理论计算表明，含水率对细胞壁纵向弹性模量的影响不显著，这也间接支持了上述结论^[9]。而在宏观水平上，针叶材的顺纹抗张强度不仅与管胞本身的抗张强度有关，还与其拉伸断裂模式密切相关。Côté等认为，木材纵向拉伸有3种可能的断裂模式^[18]：①横壁断裂，裂纹垂直细胞长轴方向扩展；②细胞间破坏，裂纹沿胞间层扩展；③细胞壁内破坏，指的是壁层之间，特别是S₁和S₂层之间的分层。第1种断裂模式表示细胞壁的承载潜力得到了充分利用。在气干状态下，木材纵向拉伸断裂时一般以横壁断裂为主，但随着含水率的增大，发生后两者断裂模式的概率增大。这是因为含水率的增大虽然对管胞本身的纵向抗张强度影响不大，但会显著降低细胞之间、壁层之间(特别是S₁和S₂层之间)的结合强度，从而增加了纵向拉伸时发生细胞间和细胞壁内破

坏的可能性，造成顺纹抗张强度的显著降低^[19]。由此可见，木材强度应由细胞和胞间层本身的强度以及两者之间的界面结合强度决定。在通常情况下，木材纤维之间的结合强度足以保证纵向拉伸断裂不会起始于胞间层，但如果外界因素降低了纤维之间的界面结合强度(例如含水率增大)，就会造成木材整体力学性能的显著降低。

2.3 纤维素聚合度的影响

γ射线处理木材可以造成纤维素分子链在结晶区或无定形区的随机切断，而木素由于具有苯环结构而非常稳定，几乎不受辐射的影响。因此通过γ射线辐射只会造成木材内纤维素或部分半纤维素聚合度的降低。Saernan等的研究认为，当辐射剂量小于1.0 Mrad时，γ射线辐射对纤维素聚合度几乎没有影响，而辐射剂量大于1.0 Mrad后，纤维素聚合度随剂量的增大迅速降低^[20]。

图3 辐射剂量对纤维素聚合度的影响
(数据来自文献21)

Tsutomu^[21]对9篇不同研究报道的测试数据进行综合分析后发现，γ射线剂量在1~100 Mrad的范围内，木材纤维素聚合度与辐射剂量的对数之间存在良好的线性关系(图3)^[21]。图3给出了纤维素聚合度和γ射线辐射剂量对数之间的数学关系：

$$y = -394.7x + 3124.8 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9936$$

式(3)中：y为聚合度，x为辐射剂量对数，R为相关系数。根据式(3)，计算得到了纤维素聚合度。纤维素聚合度与杉木管胞抗张强度之间的关系曲线如图4。从图4可知，当辐射剂量小于1.0 Mrad，即纤维素聚合度大于757时，管胞的抗张强度没有显著变化。由于木材纤维素的聚合度一般在8000~10000之间^[22]，因此不同树种纤维素聚合度之间的差异对管胞的抗张强度没有影响。

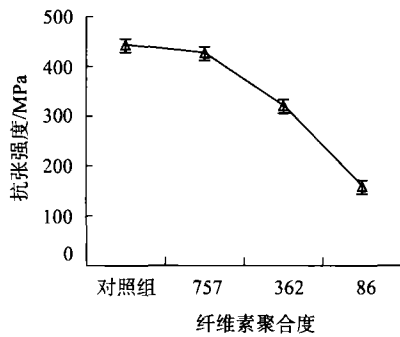
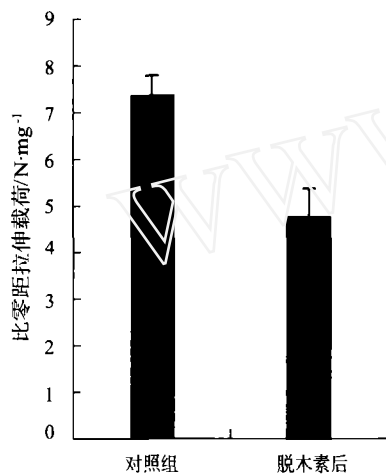


图4 纤维素聚合度对管胞抗张强度的影响



注 脱木素后质量损失率为25.2%

图5 木素含量对比零距拉伸载荷的影响

2.4 木素的影响

由于木素的脱除改变了细胞壁的密度,因此采用每单位质量的零距断裂载荷,即比零距拉伸载荷(N/mg)来表征管胞的强度。

$$p = \frac{N}{m} \quad (4)$$

式(4)中: N 为脱木素或未脱木素试样的零距断裂载荷, N ; m 为未脱木素试样的绝干质量,mg。

木素起到类似加强剂的作用,赋予木材一定的刚性和强度。一般认为,脱木素会显著降低木材的湿强度。Klaudits^[23-24]比较研究了脱木素对木材试样和单根管胞湿态抗张强度的影响,发现小试样强度的降幅高达4/5,而单根管胞的降幅只有1/3,这说明了胞间层木素含量对于木材强度的重要性。图5表明,木素含量对管胞的纵向抗张强度有很大影响,在质量损失率为25.2%的条件下,降幅竟高达35%。这说明过度脱木素将会削弱细胞壁内基质对微纤丝的应力传递作用,从而限制了纤维素承载潜力的发挥。笔者推测,此时管胞细胞壁内的微纤丝之间在承受拉伸载荷时易

于发生一定程度的滑移。需要指出的是,这个结论是针对人为脱木素而言,并不适合天然态管胞。推测天然态管胞的纵向抗张强度可能只与微纤丝角和纤维素含量之间存在较强的相关关系,木素含量的差异在树木生理所允许的范围内对管胞的纵向抗张强度影响很小。目前要证实这一点在实验上还有一定困难,主要是难以取到与微纤丝角近似或相同而同时木素含量又存在较大差异的对照样品。

3 结论

3.1 S_2 层微纤丝角对管胞的抗张强度有着显著影响,微纤丝角越小,管胞的抗张强度越大。

3.2 含水率对管胞的抗张强度影响不显著。

3.3 纤维素的聚合度小于757时,与管胞的抗张强度存在正相关关系,聚合度越大,管胞的抗张强度越大。但当聚合度大于757后对管胞的抗张强度影响很小,因此不同树种间纤维素聚合度的差异对管胞的抗张强度没有显著影响。

3.4 过度脱木素会削弱细胞壁内基质对微纤丝的应力传递作用,限制纤维素承载潜力的发挥,从而显著降低管胞的纵向抗张强度。

参考文献

- [1] Ott E, Spurlin H M. Cellulose and Cellulose Derivatives [M]. New York: Interscience Publishers Inc, 1954
- [2] Groom L H, Shaler S M, Mott L. The mechanical properties of individual lignocellulosic fibers [C]. Proceedings of Woodfiber-Plastic Composite, Madison: Forest Product Society, 1995
- [3] 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
- [4] Burgert I, Keckes J, Frühmann K, et al. A comparison of two techniques for wood fiber isolation-Evaluation by tensile tests on single fibers with different microfibril angle [J]. Plant Biology, 2002, 4: 9.
- [5] Burgert I, Frühmann K, Keckes J, et al. Microtensile testing of wood fibers combined with video extensometry for efficient Strain detection [J]. Holzforschung, 2003, 57: 661
- [6] Stone J E, Clayton D W. The use of microtome sections for measuring the change in strength of sprucewood fibers due to pulping [J]. Pulp and Paper Magazine of Canada, 1960, 60: T457
- [7] Soriano F P, Evans P D. A microtensile testing technique. Part II: Fractography of thin King William Pine wood strips [J]. FPRDI Journal, 1996, 22 (2): 71
- [8] 余雁, 费本华, 张波. 零距拉伸技术快速评价针叶材管胞的纵向

- 抗张强度[J]. 林业科学, 2006,42(7): 83
- [9] 余 雁. 人工杉木管胞的纵向力学性质及其主要影响因子研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2003
- [10] 成俊卿. 木材学[M].北京: 中国林业出版社, 1985
- [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] 王兴业,等. 复合材料力学分析与设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999
- [13] 渡边治人. 木材运用基础[M]. 张勤丽,等译.上海: 上海科学技术出版社, 1986
- [14] Eichhorn S J, Sirichaisit J, Young R J. Deformation mechanisms in cellulose fiber, paper and wood [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 3129
- [15] Cave I D. Wood substance as a water reactive fiber reinforced composite [J]. Journal of Microscopy, 1975, 14: 47
- [16] Cave I D. Modelling moisture-related mechanical properties of wood. Part I: Properties of the constituents [J]. Wood Science and Technology, 1978, 12: 75
- [17] Koponen S, Toratti T, Kanerva P, et al. Modelling longitudinal elasticity and shrinkage properties of wood [J]. Wood Science and Technology, 1989, 23 (1): 55
- [18] Côté W A, Hanna R B. Ultrastructural characteristics of wood fracture surfaces [J]. Wood and Fiber Science, 1983, 15(2): 135
- [19] 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
- [20] Saeman J F, Millett M A, Lawton E J. Effect of high energy cathode rays on cellulose [J]. Ind Eng Chem, 1952, 44: 28
- [21] Tsutomu A, Norimoto Misato, Yamada T. Some physical properties of wood and cellulose irradiated with Gamma rays [J]. Wood research, 1977, 62: 19
- [22] 杨淑慧. 植物纤维化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001
- [23] Klaudiv W. Zur biologisch-mechanischen Wirkung des lignins im Stammholz der Nadel-und Laubholzer [J]. Holzforchung, 1952, 6(3): 70
- [24] Klaudiv W. Zur biologisch-mechanischen Wirkung der cellulose und hemicellulose im Festigungsgewebe der Laubholzer [J]. Holzforchung, 1957, 11(4): 110

Factors affecting Longitudinal Tensile Strength of Softwood Tracheids Investigated with Zero-span Tension

YU Yan^{1,*} JIANG Ze-hui¹ REN Hai-qing² FEI Ben-hua² ZHANG Bo²

(1. *International Center for Bamboo and Rattan, Beijing, 100102*; 2. *The Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091*)

(*E-mail:yuyan@icbr.ac.cn)

Abstract: Zero-span tension of wood microtome sections with 80 μ m in thickness was conducted to investigate the factors affecting longitudinal tensile strength of tracheids of Chinese Fir plantation wood. It was found that there exists a significant negative correlation between microfibril angle (MFA) of S₂ layer and tensile strength of tracheids, the moisture content has insignificant effect on the tensile strength of tracheids with a little decrease of 1.5%~10% when moisture content increases from 8%~9%e to water saturation. There exists positive correlation between degree of polymerization (DP) of cellulose and tensile strength of tracheids when DP is less than 757, but above which DP has little impact on the tensile strength of tracheids. Serious delignification will weaken the stress transfer between lignin-hemicellulose matrix and cellulose microfibrils, and results in significant reduction of loading capacity of tracheids.

Key words: zero-span tension; tracheids; tensile strength

(责任编辑: 梁 川)