

用直接 X 射线法测定木材微密度*

刘永辉 戚大海 敬克兴 刘从贵 李 泽

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章以原子物理学中的射线衰减方程为基础, 用直接 X 射线方法, 采用三种不同能量的 X 射线源, 对红松、杨树、桦树、水曲柳、高山栎五种树木样品进行了质量衰减系数和微密度的测定。结果表明: 该方法是可行的, 测定精度也是较高的。

关键词 直接 X 射线法, 木材微密度, 密度变异, 质量衰减系数。

一、引 言

木材密度是衡量木材材质的重要指标之一^[1,2], 也是木材物理学研究的重要课题。随着测量技术的发展, 木材密度的测定已从测定平均密度发展到微密度的测定, 从而了解年轮内和年轮间木材密度的变异。目前, 气候学、树木年轮学、地质学以及树木遗传学把测定早晚材的平均密度、早材最小密度、晚材最大密度、早晚材微密度特征, 作为研究气候变化、生物遗传、环境污染^[3]和树木改良^[4]的重要手段。

六十年代初, Phillips^[5]和 Polge^[6]分别提出应用 β 射线扫描技术和 X 射线照相法测定木材微密度, 之后, Harrise^[7], Parker^[8]和 Woods^[9]先后发表了用以上方法测定的结果。1983年, Cown^[10]报导了用直接 X 射线法测定木材微密度的工作, 此法同称重法, β 射线扫描法相比, 它提高了密度分辨率, 同 X 射线照相法比较, 它操作程序简单, 更重要的是避免了胶片冲洗过程引入的偶然误差。

尽管我国早在五十年代就开始了木材密度的研究, 但采用 X 射线直接测定并系统研究树木样品的微密度特征、质量衰减系数随着不同树种、同树种不同株间、同株内边与心不同部位变化以及密度变异的测定精度, 国内尚未见报导。

二、测 量 原 理

树木生长随外界条件的变化, 其密度也有变化, 如同一年轮内, 早晚材的密度差异就非常大。当用一定能量的 X 射线扫描该木材样品时, X 射线的透射率随样品的密度而变化, 根据原子物理学中的射线衰减方程有:

$$\begin{cases} I(r) = I_0 e^{-\nu \rho(r) t \sec(\theta)} \\ \rho = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \rho(r) \end{cases} \quad (1)$$

* 本工作得到中国原子能科学研究院青年基金资助。

则
$$\rho(r) = \frac{1}{vt \sec(\theta)} \ln \frac{I_0}{I(r)} \quad (2)$$

$$\nu = \frac{1}{n \rho t \sec(\theta)} \sum_{n=1}^n \ln \frac{I_0}{I(r)} \quad (3)$$

式中 $\rho(r)$ 为样品 r 处的微密度, $I_0, I(r)$ 分别为入射和透过木材样品的 X 射线强度, ν 为 X 射线在该样品中的质量衰减系数, t 为样品厚度, ρ 为样品的平均密度, θ 为 X 射线发散角, n 为测量点数。

三、实验测量

1. 测量装置 X 射线透过样品进入探测器, 形成的脉冲信号, 经前置放大、主放大、单道脉冲幅度分析器, 进入自动定标器。样品距源和探测器分别为 2 和 4 cm, 在测 ν 值变化和微密度时, 狭缝宽度分别为 0.4 和 0.25 mm。

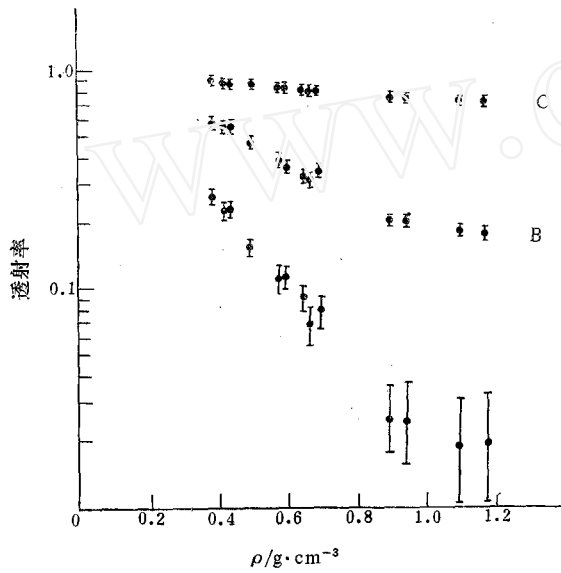


图 1 透射率随木材密度的变化
Fig. 1 Transmission rate of x-rays versus the wood density
A—5.9 keV(最下面); B—8.04 keV; C—16.31keV.

2. X 射线源 选用三种 X 射线源: (1) ^{55}Fe , 单能 $E_x = 5.9 \text{ keV}$, 强度为 10 mci(370 MBq), 源斑为 $\phi 10 \text{ mm}$ 。(2) X 光机, 铜靶, $E_x = 8.04 \text{ keV}$, 强度为 10 mA。(3) ^{238}Pu , 多能, 范围为 13~20keV, $\bar{E}_x = 16.31 \text{ keV}$, 强度为 15mci(555MBq), 源斑为 $\phi 7 \text{ mm}$ 。

3. 样品制备 在测定 ν 值和透射率随密度变化时, 从四个树种八株树木中的边、心不同部位取了 16 块样品, 样品为长方体, 长度方向与木材纹理方向平行, X 射线入射方向与木材纹理方向垂直。测定密度变异时, 选取了三种树木样品, 取向与上述相反。样品参数列于表 1。

4. ν 值和透射率随木材宏观密度变化的测定 用 5.9 keV 的 X 射线测量了质量衰减系数随树木种类、同种异株及同株边与心不同部位的变化, 用 5.9, 8.04 和 16.31 keV 能量的 X 射线分别测量了透射率随密度变化的关系。每块样品以等间距测量 5~10 个点, 由方程(1), (3)得到透射率和 ν 值, 结果分别示于图 1 和表 2。表 2 中, $\bar{\nu}_d$ 为同一树种的算术平均值, $\bar{\nu}_{s,x}$ 为同种异株的结果, ν_s, ν_c 分别为同株内边、心不同部位的结果。

5. 密度变异测定 用 8.04 keV 的 X 射线分别测量了红松、杨树、水曲柳三种树木样品的密度随树木横截面径向变化, 结果示于图 2, 上图为透射率随径向 r 的变化, 下图为微密度随 r 的变化。

表 1 样品参数表
Table 1 The parameters of samples

样品号	树种	株号	部位	厚度/cm	重量/g	密度/g·cm ⁻³
1-1	红松	1	边材	0.212	0.191	0.407
1-2	红松	1	心材	0.206	0.191	0.419
1-3	红松	2	边材	0.203	0.171	0.377
1-4	红松	2	心材	0.197	0.183	0.427
2-1	杨树	1	边材	0.203	0.185	0.412
2-2	杨树	2	心材	0.211	0.195	0.423
2-3	杨树	2	心材	0.209	0.228	0.499
2-4	杨树	2	心材	0.213	0.262	0.570
3-1	桦树	1	边材	0.225	0.325	0.659
3-2	桦树	1	心材	0.205	0.309	0.688
3-3	桦树	2	心材	0.202	0.259	0.589
3-4	桦树	2	心材	0.235	0.285	0.642
4-1	高山栎	1	心材	0.185	0.494	1.199
4-2	高山栎	2	边材	0.224	0.445	0.893
4-3	高山栎	2	边材	0.207	0.433	0.935
4-4	高山栎	1	心材	0.198	0.485	1.098
5-1	*红松			0.230	0.256	0.424
5-2	*杨树			0.198	0.368	0.367
5-3	*水曲柳			0.203	0.256	0.664

* 测定密度变异用的样品。

表 2 质量衰减系数测量结果
Table 2 The measured mass attenuation coefficient

树种	同树种	同树种不同株间			同株树不同部位间			
	$\bar{\nu}_d$	株号	$\bar{\nu}_{ik}$	差别/%	株号	ν_i	ν_c	差别/%
红松	17.28	1	17.18	1.16	1	17.14	17.21	0.4
		2	17.38		2	17.43	17.33	
杨树	18.01	1	17.39	4.7	1	17.39	18.17 18.15 18.32	0.9
		2	18.21		2			
桦树	18.10	1	17.95	1.8	1	17.96	17.93	0.16
		2	18.27		2		18.36 18.17	
高山栎	18.49	1	18.18	5.1	1		18.09 18.27	0.9
		2	19.10		2		19.10	
最大差别/%	7.0			5.1				1.0

表 3 三种X射线能量最佳测量条件

Table 3 The optimal measurement conditions for 5.9, 8.04, 16.31keV

宏观密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	样品厚度 t_1^*/cm	样品厚度 t_2/cm	样品厚度 t_3/cm
0.1	0.55	1.29	7.47
0.2	0.28	0.65	3.74
0.3	0.18	0.43	2.49
0.4	0.14	0.32	1.87
0.5	0.11	0.26	1.49
0.6	0.09	0.22	1.25
0.7	0.08	0.18	1.06
0.8	0.07	0.16	0.93
0.9	0.06	0.14	0.83
1.0	0.06	0.13	0.75
1.1	0.05	0.12	0.68
1.2	0.05	0.11	0.62
1.3	0.04	0.10	0.56
1.4	0.04	0.09	0.53
1.5	0.04	0.09	0.50
1.6	0.035	0.08	0.47
1.7	0.032	0.08	0.44
1.8	0.03	0.07	0.42
1.9	0.029	0.07	0.39
2.0	0.028	0.06	0.37

* t_1 时,5.9keV; t_2 时,8.04keV; t_3 时,16.31keV; $T=I/I_0=0.37$ 。

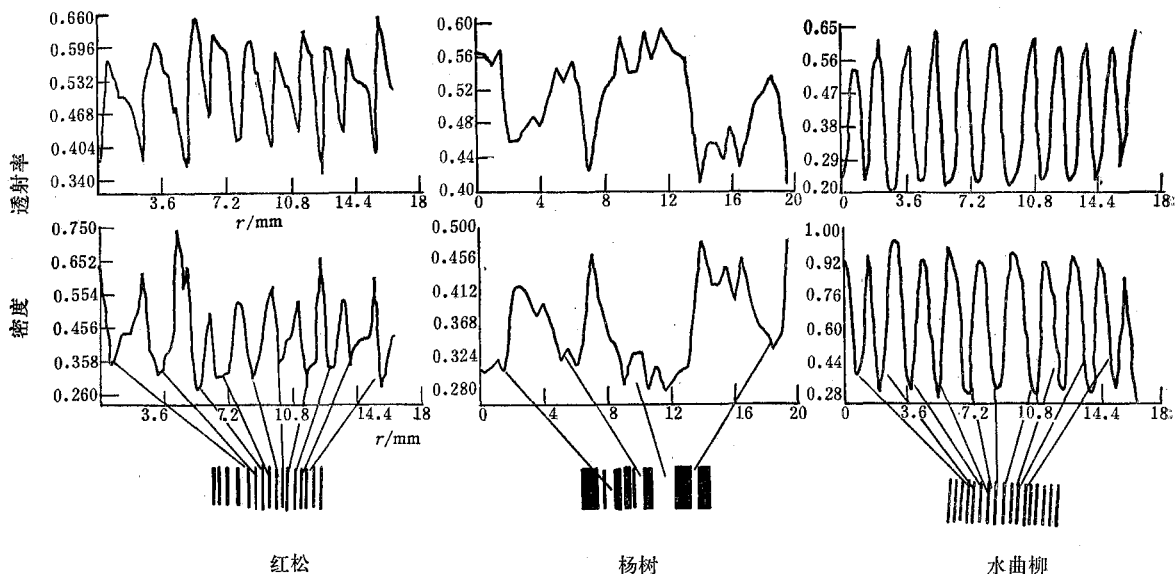


图 2 木材密度变异曲线
Fig. 2 The wood density variation

四、结果与讨论

1. 用直接X射线法能否测定木材密度变异的关键在于X射线在木材样品中的透射率随密度的变化是否灵敏。从图1可见,当样品厚度为2 mm左右时,样品密度 $\leq 0.9 \text{ g/cm}^3$ 范围内,用5.9 keV或8.04 keV的X射线是合适的。而曲线C,由于X射线能量较高,对测定该厚度、密度范围内的样品是不合适的。这表明对于一定能量的X射线,存在一个最佳测量条件的问题即透射率、厚度和密度都处于最佳条件。

图2是木材密度变异曲线,它不仅能反映出树木生长轮内早、晚材之间存在着较大的密度差异,而且也能看出早材或晚材中密度的细微变化,这也进一步说明该方法是可行的。

2. 三种不同能量X射线测得同一样品 ν 值分别是 17.96 ± 0.3 (5.9 keV), 7.77 ± 0.11 (8.04 keV), 1.31 ± 0.05 (16.31 keV)。可见, ν 值随X射线能量变化是非常显著的,这是因为不同能量X射线对木材中的氢、碳、氧、氮四种主要元素及其它灰份元素作用截面存在着较大差异造成的。从表2可知,不同树种 ν 值最大差异为7.0%,同一树种不同株间最大差异为5.1%,但在同一株内边、心不同部位这种差异仅为1.0%,没有明显差别。这表明不同树种、同种异株内元素组份存在一定差异,而同一株内各生长轮间元素组份分布是较均匀的,这为应用直接X射线法测定密度变异提供了重要依据。

用该法测定 ν 值与通过测定木材样品中元素组份 W_i 和微观截面 σ_i 后求得 ν 值方法^[11]相比较,有以下优点:

(1) 测定精度高,因测量样品宏观密度误差远小于 W_i 和 σ_i 的测量误差。(2) 因测定 ν 值和透射率用同一样品,同一测量条件,因此可消除X射线发散角的影响。(3) 可消除分析样品与测定微密度时用的样品条件的差异引入的误差。(4) 该方法简便易行,经济实用。

3. 如何提高测定木材密度变异的精度是值得研究的问题。我们将衰减方程求微分得最佳透射率 $T=1/e$,将该值代回原方程,进而得到不同密度样品在最佳透射率条件下的样品厚度值,列于表3。此表为测定木材微密度选择最佳测量条件提供了方便。

4. 影响微密度测定精度的其它因素:(1) 在测量期间,X射线源强度是否稳定直接影响测定精度。以X光管作为X射线源时,X射线强度随外加电压变化而变化,因此测量时要附加一套监测X射线强度的系统。而同位素X射线源不随外界条件而变化,被认为是较好的X射线源。(2) 样品宏观密度测定误差、计数率统计误差、仪器系统误差等可以通过精心制备样品、选择仪器最佳测量条件使其减小。

目前,我们正在加工、调试一台由计算机控制的木材微密度自动测量装置,狭缝宽度在0.001~1 mm范围可调,样品移动由步进电机实现,可望为我国进一步开展木材密度研究发挥作用。

中国林业科学研究院梁景森、管宁同志参加了部分实验;北京航空学院唐明以及本院的黄清良、张志毅、张景荣等提供了帮助,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 成俊卿, 木材学, 中国林业出版社, 北京, (1986).
- [2] Shaosuong, C. et al., Correlation between mechanical strength of wood and annual ring characteristics in douglas-fir juvenile and nature wood, MS thesis, Oregon State University, (1986).
- [3] Polge, H., *Wood Sci. Technol.*, **12**, 187(1978).
- [4] Echols, R. M., *Wood Sci. Technol.*, **7**, 34(1973).
- [5] Phillips, E. W. J., *J. Wood Sci.*, **5**, 16(1960).
- [6] Polge, H., *Ann. Ec. Natl. Eauz Forest. St. Rech. Exper.*, **20**(4), 530(1963).
- [7] Harris, J. M., *N. Z. J. Sci.*, **12**(2), 395(1969).
- [8] Parker, M. L. et al., Proc. IUFRO. Div 5 Meeting, South Africa., **2**, 882(1973).
- [9] Woods, F. W. et al., *Forest Sci.*, **20**(3), 267(1974).
- [10] Cown, D. J. et al., *Wood Sci. Technol.*, **17**, 91(1983).
- [11] Liu, C. J. et al., *Wood Fiber Sci.*, **20**(1), 22(1987).

(编辑部收到日期: 1990年5月12日)

THE DETERMINATION OF WOOD DENSITY USING DIRECT SCANNING WITH X-RAYS

LIU YONGHUI QI TAHAI JING KEXING
LIU CONGGUI LI ZE

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The variation of the wood density is studied by using the method of direct scanning with X-rays, based on the rays attenuation equation of atomic physics. The mass attenuation coefficient and the density variation are determined for samples of five kinds of tree using X-rays of 5.9, 8.04, and 16.31 keV respectively.

Key words Direct X-ray method, Wood density variation, Wood microdensity, Mass attenuation coefficient.