

高 等 院 校 研 究 生 教 材

木材物理学

阮锡根 余观夏 编著



中国林业出版社

31.3
00



中国林业出版社教材建设与出版管理中心

责任编辑 / 杜娟

封面设计 / 合之易

ISBN 7-5038-3990-2



9 787503 839900 >

定价：24.00 元

S781.3
R890

高等院校研究生教材

木材物理学

阮锡根 余观夏 编著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

木材物理学/阮锡根, 余观夏编著. —北京: 中国林业出版社, 2005. 8
高等院校研究生教材
ISBN 7-5038-3990-2

I. 木… II. ①阮… ②余… III. 木材学: 物理学—研究生—教材 IV. S781. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 055431 号

中国林业出版社·教材建设与出版管理中心
电话: 66170109 66181489 传真: 66170109

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)
E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话: 66184477
发行 新华书店北京发行所
印刷 三河市富华印刷包装有限公司
版次 2005 年 8 月第 1 版
印次 2005 年 8 月第 1 次
开本 850mm × 1168mm 1/16
印张 11.75
字数 284 千字
定价 24.00 元

凡本书出现缺页、倒页、脱页等质量问题, 请向出版社图书营销中心调换。

版权所有 侵权必究

前言

多年教授木材物理学，偶有一得，很想与别人共享，纵观国内现况，尚未有这方面的专著，因而有动笔的欲望，然而成书之后，却有众多不满意之处。常听一些导演说：电影是门遗憾的艺术，其实许多行当皆如此，十全十美是不可能的，希望在后入，更好的还在后头。

木材是天然高分子材料，木材物理学的研究方法，许多方面都与高分子物理学相同，但是后者的对象是人造高聚物，木材结构复杂，各向异性，不均匀，不同树种，材料迥异，即使是同一树种，生长环境不同，材性亦有差异。这些均为木材物理学的研究带来困难，与高分子物理学相比，木材物理学对实践的指导意义要逊色不少。但笔者坚信，万丈高楼始于基石，随着时间的推移，木材物理学对木材加工业的作用，将日益明显。

本书可以作博士生、硕士生木材物理学课程的教学参考书。在讲授时，对博士生强调最新国内外相关资料的阅读，以及与实际问题的联系，而对硕士生则更强调基础。当然亦可供有兴趣的木材加工业、林产化学等专业高年级本科生，以及相关工程技术人员阅读。

此书出版，得到周定国教授的大力支持，特此致谢。此外，还想借此机会，向江泽慧教授表示感谢，参加她主持的科研项目，使我受益匪浅，还要感谢我多年的合作伙伴黄敏仁教授、尹思慈教授、孙成志研究员，同时感谢史伯章教授对我的帮助。

阮锡根

2005年6月10日

目 录

前 言

第1章 木材的密度分布	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 X射线木材密度计	(2)
1.3 几何学方法求得年轮内密度分布	(6)
1.4 其他测量木材密度分布的方法	(7)
1.5 木材密度分布测量的应用	(10)
参考文献	(12)
第2章 木材中纤维素分子的聚集态结构	(13)
2.1 高分子的结构	(13)
2.2 晶体的基本知识	(14)
2.3 X射线衍射技术	(17)
2.4 木材细胞壁纤维素相对结晶度的研究	(19)
2.5 纤丝角	(22)
2.6 晶面走向问题和晶区大小问题	(29)
参考文献	(30)
第3章 木材弹性力学	(32)
3.1 张 量	(32)
3.2 应 力	(33)
3.3 应 变	(35)
3.4 广义虎克定律	(36)
3.5 木材弹性系数的测量	(38)
参考文献	(42)
第4章 木材动弹模量	(43)
4.1 木材动弹理论	(43)
4.2 影响木材动弹因素	(44)
4.3 木材动弹模量的测量	(46)
参考文献	(49)

第5章 木材的黏弹性	(51)
5.1 黏弹理论	(51)
5.2 木材黏弹的特点	(72)
5.3 影响木材黏弹因素	(75)
参考文献	(76)
第6章 木质材料断裂力学	(78)
6.1 引 言	(78)
6.2 断裂韧度 G_c	(80)
6.3 断裂韧度 K_{Ic}	(82)
6.4 木材的断裂韧度	(84)
参考文献	(87)
第7章 木材及其制品中的残余应力	(88)
7.1 残余应力	(88)
7.2 生长应力及其起源	(89)
7.3 生长应力的测量方法	(93)
7.4 纤维板残余应力研究	(99)
参考文献	(102)
第8章 木材中的吸着现象	(103)
8.1 平衡含水率	(103)
8.2 气液相变	(105)
8.3 Dent 吸着理论	(107)
8.4 微分吸着热与积分吸着热	(109)
8.5 用等温吸湿曲线研究木材空隙结构的分形维数	(112)
参考文献	(115)
第9章 木材的热传导	(116)
9.1 热传导	(116)
9.2 热传导方程	(117)
9.3 材料热传导系数的测量	(119)
9.4 木材的热传导性能	(124)
参考文献	(127)
第10章 木材中水分传递现象	(128)
10.1 概 述	(128)
10.2 柏努利方程和泊谟叶定律	(131)
10.3 木材中渗流现象	(134)
10.4 木材气体渗透流阻网络理论简介	(136)

参考文献	(137)
第11章 木材声学	(139)
11.1 声学基本知识	(139)
11.2 室内声学	(142)
11.3 吸收系数和隔声量的测量	(144)
11.4 声发射(AE)及其在木材工业中的应用	(146)
11.5 声—超声技术	(153)
参考文献	(156)
第12章 木材的电学特性	(157)
12.1 木材电阻	(157)
12.2 导电的机理	(162)
12.3 介电性质	(165)
12.4 介电松弛理论	(170)
参考文献	(178)

第 1 章

木材的密度分布

1.1 引言

可以毫不夸张地说,木材的一切物理性质都和密度有关,因此密度在木材研究中占有重要地位。通常我们用称重法测量密度,这样求得的密度是被测样品密度的平均值。时至今日,木材密度的分布,特别是径向分布,越来越引起研究者的重视。其原因有三:

(1) 木材的物理性质和木材的密度分布相关,两块样品同样的平均密度,密度分布不一样,其物理性质是不相同的,相同平均密度的两块纤维板,一块密度均匀,一块表面密度大、中间密度小,显然其力学性能后者优于前者。

(2) 木材密度的径向分布与营林、立地条件相关,径向密度分布的研究是考察树木生长情况的重要方法。

(3) 年轮研究是研究古代气象和天文的辅助手段^[1]。

要研究密度分布就必须有一个好的测试仪器或方法。从古至今,其测试方法可以分成两大类:直接法和间接法。所谓直接法,就是沿径向连续制作许多小的薄片,然后称重和测量体积,每片的质量除以每片的体积得到每片的密度,从而求得密度的分布,这种方法是显而易见的繁琐,且每片体积不可能很小。但它是一个基本方法,一切新的测试方法是否准确必须经过它来验证。间接法有很多种,大致可分为四类:

(1) 力学方法。这一类方法利用的原理是:材料的硬度、阻力等力学性能和密度紧密相关。例如 Lauer - sandblasting 法^[2],就是利用硬度和密度的关系。在本章的 §4 还将介绍一种应用阻力和密度关系的密度计。

(2) 化学方法。这种方法是利用酸腐蚀。密度大难腐蚀;密度小易腐蚀,从而求得密度的分布。

(3) 光学方法。这种方法是目前比较行之有效的方法,其原理是光波的反射系数或透射系数与密度相关。这里的所谓光波包括微波^[3]、远红外、可见光、X 射线、γ 射线等。

(4) 几何学方法。由木材细胞的尺寸、胞壁比推断木材的密度分布。

由于测试方法众多,不打算逐一讨论,在本章将重点介绍几种较实用的方法,并讨论其应用。

1.2 X射线木材密度计^[4~6]

1.2.1 原理

如图 1-1 强度为 I_0 的 X 射线穿过某一物质时, 其能量部分被吸收, 如果在物质中取一厚度为 dx 的薄层, 若入射至此薄层的 X 射线强度为 I , 透射强度为 $I + dI$, 通过 dx 薄层后, 强度的变化值 dI 应与该薄层厚度 dx 以及入射强度 I 成正比, 即

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dx$$

将上式沿厚度 t 积分, 则有

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^t -\mu \cdot dx$$

积分后得

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1.1)$$

式中: μ 为线吸收系数, 是一与 X 射线波长、吸收物质的种类及其密度有关的量。为了消除吸收系数对密度的依赖性, 改用质量吸收系数 $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ 来代替 μ , ρ 为密度, 此时式 (1.1) 变为

$$I = I_0 \exp(-\mu_m t \rho) \quad \text{或} \quad \rho = \frac{1}{\mu_m t} \ln \frac{I_0}{I} \quad (1.2)$$

式中: μ_m 为质量吸收系数, 是与 X 射线波长以及物质种类有关的常数。由式 (1.2) 可知, 如果欲求未知样品的 ρ , 首先必须知道木材的吸收系数 μ_m , μ_m 理论上可由物质的分子式计算求得, 由于木材分子结构较复杂, 一般由标准样品实验求得。

已知 μ_m 、 t 、 I_0 , 因此, 利用式 (1.2), 实验求得 I 的径向分布, 即可求出木材密度沿径向的变化。

上述公式对其他射线, 如 γ 射线等同样适用。射线波长越短射线的穿透能力越强, 因此 γ 射线常用于厚度较大的样品。

1.2.2 射线源

X 射线源有两种: 一种是 ^{55}Fe 同位素辐射源; 另一种是 X 光管。前者由于 ^{55}Fe 衰变时发出的 γ 射线与在外层电子上相碰撞, 使外层电子激发, 回到基态时发出的 X 射线, 波长为 $1.937 \times 10^{-10} \text{m}$ 。X 光管的原理图如图 1-2 所示, 热电子从灯丝发出, 经高压电场加速, 以极高的速度碰撞阳极 (靶), 从而产生 X 射线。常用 X 射线的靶有 Cr, Fe, Co, Cu, Mo 等。

X 射线管产生的 X 射线如图 1-3 所示。该图为 Mo 靶 X 射线管在 35 kV 时发出的 X 射线谱, 由图可知, 发出的 X 射线可分为两部分: 一部分为特征线, 如图中的 K_α 、 K_β , 其波长与靶采用哪一种金属有关, 例如 Fe 靶的 K_α 线, 其波长为 $1.937 \times 10^{-10} \text{m}$, K_β 线为 $1.757 \times 10^{-10} \text{m}$, Cu 靶的 K_α 线, 其波长为 $1.543 \times 10^{-10} \text{m}$, K_β 线为 $1.392 \times$

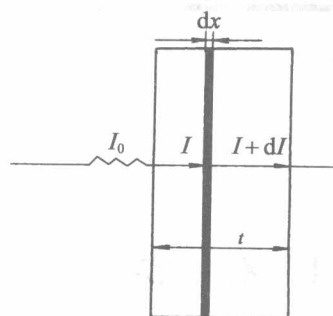


图 1-1 射线垂直通过物质时强度的变化

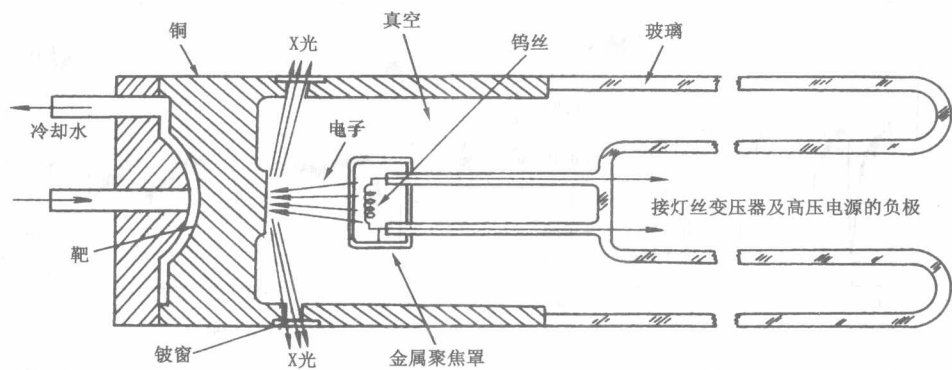


图 1-2 X 光管结构示意图

10^{-10}m ，必须注意的是特征线只有在管压大于 20 kV 时才出现。另一部分连续谱，或称为白色 X 射线，其强度随波长连续变化。用其作为 X 射线密度计时希望用特征谱，因此在使用时必须用单色器去除不需要的辐射。

目前国内外现有的 X 射线木材密度计有两种：一种射线源用放射性同位素 ^{55}Fe ；一种射线源用 X 射线管，这两种密度计各有优缺点，前者价格较低，但因为辐射是向空间各方向发散的，从一孔中出来强度较低，后者相反。

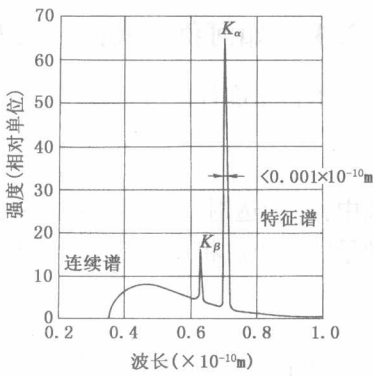


图 1-3 Mo 靶 X 射线管在 35 kV 时发出的 X 射线谱

1.2.3 测试系统

用 X 射线木材密度计进行测量有下述四部分工作：样品制备、定标、测量以及数据分析。如图 1-4 所示为单色软 X 射线木材密度计原理图。X 射线管发出的 X 光经准直狭缝后成为一线状光束（或点状光束），该光束包含多种波长，经单色器单色，例如 Fe 靶 X 光管发出的 X 光，经单色器后，光束波长约为 $1.937 \times 10^{-10}\text{m}$ 。计算机控制平动机构使样品沿垂直光束方向平动，也可以看作光束沿样品长度方向扫描。光束透过样品后，再次单色，经接收狭缝，射入接收传感器，接收传感器采用闪烁计数器，经放大后输入至计算机，得到如图 1-5、图 1-6 所示的图谱，图中计数率小的部分对应晚材，而计数率大的部分对应早材。由此图谱经过数据处理，得到木材密度的径向分布。如图 1-5、图 1-6 右纵轴所示。

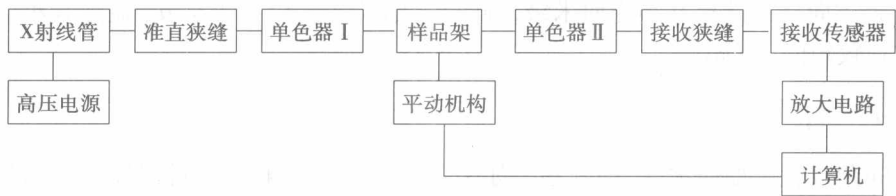


图 1-4 单色软 X 射线木材密度计原理图

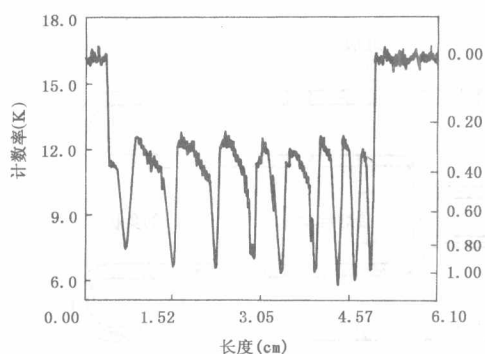


图 1-5 马尾松 11~17 年密度图谱

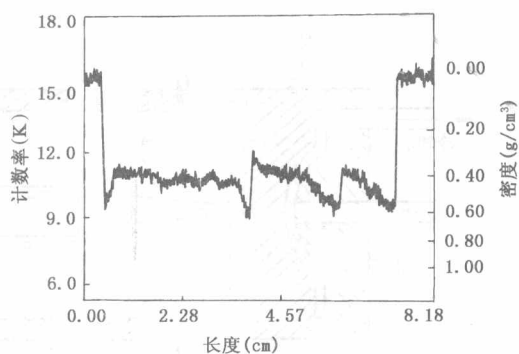


图 1-6 4~5 年生美洲黑杨树密度图谱

1.2.4 如何获得最佳灵敏度

木材密度计的灵敏度 C , 可定义如下

$$C = \frac{dI}{d\rho} \quad (1.3)$$

式中: I 为透射 X 射线的强度; ρ 为密度。因此灵敏度可以理解为单位密度变化时强度增量的大小。将式 (1.2) 代入, 则

$$C = \frac{d[I_0 \exp(-\mu_m t \rho)]}{d\rho} = -\mu_m t I$$

对于一定厚度的木材样品, 取什么样的 X 射线可以得到最大灵敏度呢? X 射线的波长不同, 质量吸收系数不一样, 因而灵敏度不一样, 因此最大灵敏度的条件应为

$$\frac{dC}{d\mu_m} = 0$$

由此可得最大灵敏度, 则下式即可成立。

$$t = \frac{1}{\mu_m \rho} \quad (1.4)$$

对于杨树, 平均气干密度 ρ 约 0.42 g/cm^3 , 而质量吸收系数 μ_m 约为 $15.7451 \text{ cm}^2/\text{g}$ 代入上式, 得 $t = 0.15 \text{ cm}$ 。可见如果样品厚度采用 $1 \sim 2 \text{ mm}$, 灵敏度可以是很高的。在研究中如分析 $0.8 \sim 1 \text{ cm}$ 的样品, 此时只需调换另一种靶的 X 射线管, 用 Mo 靶 K_α 射线, 它的波长比 Fe 靶 K_α 射线短, μ_m 值小, 代入式 (1.4), 得到较大的 t 值, 同样可以得到很高的灵敏度。研究的树木其密度沿径向年轮分布时, 由于样品厚度 (切向) 若较大, 则很可能一束 X 光穿过样品经过不同年轮, 或早晚材。因此样品一般选在 1 mm 左右, 此时采用 Fe 靶可获得较好的灵敏度, 而研究纤维板沿厚度方向密度分布时, 则沿 X 射线束方向样品的尺寸须为厘米级, 此时应用式 (1.4), 求得 μ_m 显然较小, 则必须采用波长较短的 Mo 靶。

1.2.5 定 标

定标问题也就是如何求 μ_m 的问题, 如图 1-5 所示是 X 射线木材密度计径向扫描马尾松木材透射强度图谱, 左右两边近似直线部分实际上是样品未阻挡 X 射线束时的 I_0 值, 根据透射强度图谱的每一点 I 值, 代入式 (1.2) 即可得木材沿径向的密度分布,

在此基础上可以求出一组与年轮密度分布有关的物理量,例如年轮宽度、早材宽度、晚材宽度、晚材率、年轮平均密度、早材密度、晚材密度,年轮内最大密度与最小密度,年轮内木材密度幅度及木材密度梯度。完成上述计算,必须已知样品的厚度和 μ_m 值,厚度可由螺旋测微计求得,如果样品厚度不一致,还可以由实测若干点厚度,求得厚度沿径向变化的回归方程得,从而知道每一点的厚度。现在的问题是如何求 μ_m 。

在大多数文献中, μ_m 值的求法有二。

(1) 是由标准样品求得,已知标准样品厂的密度,实验求得 I_0 和 I ,代入式(1.2)求得 μ_m 。由于木材的复杂性和变异性,标准样品很难取得,此法应用有一定困难。

(2) 利用样品的化学组成求 μ_m 。一般的X射线衍射书中都附有质量吸收系数 μ_m 表^[7],从此表中可以查得所用X射线波长下各元素的质量吸收系数 μ_m ,如果已知样品为分子式 $A_L B_M C_N$ 的化合物,若元素A、B、C的质量吸收系数分别为 $(\mu_m)_A$ 、 $(\mu_m)_B$ 、 $(\mu_m)_C$,则该化合物的质量吸收系数 $(\mu_m)_\Sigma$ 为

$$(\mu_m)_\Sigma = \frac{La(\mu_m)_A + Mb(\mu_m)_B + Nc(\mu_m)_C}{La + Mb + Nc}$$

式中: a 、 b 、 c 分别为元素A、B、C的相对原子质量。例如 Al_2O_3 ,查表得 $(\mu_m)_{Al} = 48.6$, $(\mu_m)_O = 11.5$, $\alpha(Al) = 26.98$, $b(O) = 16.0$,因此 Al_2O_3 的质量吸收系数 $(\mu_m)_\Sigma$ 为

$$(\mu_m)_\Sigma = \frac{2 \times 26.98 \times 48.6 + 3 \times 16.0 \times 11.5}{2 \times 26.98 + 3 \times 16.0} = 31.13 \text{ (cm}^2/\text{g)}$$

如果是混合物,则其质量吸收系数 μ_m 为

$$\mu_m = \sum_{i=1}^k (\mu_m)_i (\omega)_i$$

式中: $(\mu_m)_i$ 是 i 种化合物的质量吸收系数; $(\omega)_i$ 是 i 种化合物的质量分数。但是此法对木材也不适用,因为木材的化学组成过于复杂。

笔者的意见还是利用测试样品本身来求 μ_m 值,称重法求得该样品的平均密度记为 $\bar{\rho}$,根据式(1.2)任一取样点 i 的密度值 ρ_i 为

$$\rho_i = \frac{1}{\mu_m t} \ln \frac{I_0}{I_i} \quad (1.5)$$

若样品总共有 N 个取样点,则此块样品的平均密度值应为

$$\bar{\rho} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\mu_m t} \ln \frac{I_0}{I_i} = \frac{1}{N \mu_m t} \ln \frac{I_0^N}{I_1 \cdot I_2 \cdot \dots \cdot I_N}$$

称重法求得 $\bar{\rho}$,用平均厚度与 $\bar{\rho}$ 代入上式,根据样品的透射强度图谱即可求得 μ_m 值。将求得的 μ_m 值代入式(1.5),从而求出每一取样点的密度,得到样点的密度分布。

1.2.6 小 结

迄今为止,我国已经研制出两种类型X射线密度计:一种为中国林业科学研究院制造(X射线木材微密度测定仪),射线源是 ^{55}Fe 同位素源;另一种是南京林业大学研制,射线源是X光管。前者的最大优点是价格较低,但经狭缝截取后,从狭缝射出的射线强度较低(与X射线管比较)且波长固定,不能根据样品厚度的变化选取不同波

长的射线。后者与之相反,更换不同靶的X光管,可以选取X射线的波长。

运用X射线密度计测量和进行数据处理时必须注意下述几点:

(1) 实验得到木材径向密度分布可以用径切面样品,也可以用横截面样品,如果光源用线光源,样品用径切面样品为好,原因仍然是希望每次取样,光束不要既通过早材又通过晚材。

(2) 求得木材径向密度分布后,可以进一步分析该样品的一组与年轮密度分布有关的物理量,例如年轮宽度、早材宽度、晚材宽度、晚材率、年轮平均密度、早材密度、晚材密度,年轮内最大密度与最小密度,年轮内木材密度幅度及木材密度梯度。但首先必须在密度分布图中找到早、晚材的分界点,文献^[4]给出判断早、晚材分界点的规则是否合理,尚需进一步讨论。

(3) 测得的密度分布与X光束的线度(线光束的宽度或点光束的大小)有关,成反比。显然光束的线度越小,年轮内最大密度越大;最小密度越小,木材密度梯度越小。

(4) 不同树种 μ_m 值不一样;心材与边材,由于化学组成差异, μ_m 值也不一样。

1.3 几何学方法求得年轮内密度分布^[8]

几何法的理论基础是木材组织的显微模型,例如针叶材主要由轴向排列的管胞构成(90%~95%),此外有少量的薄壁射线组织和树脂道,假设轴向管胞的横截面形状为长方形,并考虑在其尾端有分隔壁,早晚材有显著差异,如图1-7所示,这个模型对早、晚材有变化的松木是适合的。

木材的密度 ρ 是各种组织的总值量的单位体积的平均值,可以用式(1.6)表达。

$$\rho = C_1 V_T + C_2 V_R + C_3 V_C \quad (1.6)$$

式中: ρ 为木材密度; V_T 、 V_R 、 V_C 分别是管胞、射线组织和树脂道的比例系数; C_1 、 C_2 、 C_3 是每种组织的密度,规定一组反映细胞特性的尺寸,早材轴向管胞的切向和径向长度分别为 T_e 和 R_e ,平均壁厚为 D ,忽略了径向和切向壁厚的微小差别。晚材管胞的切向和径向尺寸分别为 T_L 和 R_L ,其壁厚相应地为 D_L 和 D_r ,早、晚材管胞的形状因子分别定义为

$$Y_L = \frac{T_L}{R_L} \quad (1.7)$$

早材管胞的胞壁比

$$C_e = \frac{T_e R_e - (T_e - 2D)(R_e - 2D)}{T_e R_e}$$

将 Y_e 代入,则有

$$C_e = \frac{2D(R_e + Y_e R_e - 2D)}{Y_e R_e^2} \quad (1.8)$$

用同样方法可以获得晚材的胞壁比 C_L

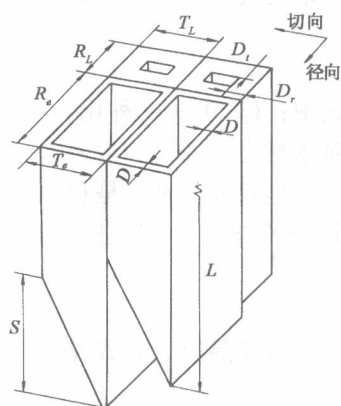


图1-7 针叶材轴向管胞模型

$$C_L = \frac{2(R_L D_r + Y_L R_L D_t - 2D_t D_r)}{Y_L R_L^2} \quad (1.9)$$

尚未考虑管胞长度，轴向管胞可以看作带有指针形尾端的长度很长的矩形柱体，其管胞长度为 L 和尾部长度为 S ，其图形为图 1-7，尾部截面形状为图 1-8。

管胞纵向部分和分割壁假设有同样厚度，晚材管胞分割壁的胞壁比为

$$\frac{(R_L - 2D_t)2D_r B}{Y_L R_L^2 (L - S)}$$

式中： $B = S' - 2X$ ， X 由下式计算

$$\frac{X}{D_r} = \frac{S'}{T} \rightarrow X = \frac{D_r S'}{T}$$

式中： $S' = \sqrt{S^2 + T^2}$ ，因为 $S' \geq T$ ，故有 $S' \approx S$ ，因此 B 能够表示为

$$B = S - \frac{2D_r S}{T} = \frac{S(T - 2D_r)}{T}$$

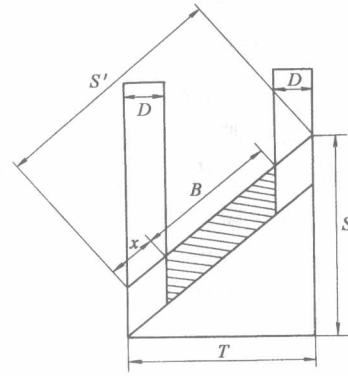


图 1-8 管胞尾部的几何尺寸示意图

利用上式，并考虑到式 (1.8)、(1.9)，早材和晚材整个管胞的胞壁比应为

$$C_e = \frac{2D(R_e + Y_e R_e - 2D)}{Y_e R_e^2} + \frac{2DS(R_e - 2D)(T_e - 2D)}{Y_e R_e^2 T_e (L - S)}$$

$$C_L = \frac{2(R_L D_r + Y_L R_L D_t - 2D_t D_r)}{Y_L R_L^2} + \frac{2D_r S(R_L - D_t)(T_L - 2D_r)}{Y_L R_L^2 (L - S)}$$

若晚材的比率为 P ，则有

$$C = (1 - P)C_e + PC_L \quad (1.10)$$

下面考虑木射线和树脂道的影响，假使具有密度 C_2 的单列木射线与纺锤状木射线的比率为 R_t 和 R_u ，而树脂道的体积比为 A_r ，因为围绕纵向树脂道表皮细胞壁很薄，因此树脂道可以看作是内空的。整个木射线的面积必须测量，而因子 P 被用来计算木射线在细胞壁中的实际面积， P 值对单列射线和纺锤状射线均取为 0.65，因此有

$$\rho = C_1 [C - (R_u + R_t)] + C_2 P (R_u - R_t) - A_r C_1$$

假设 C_2 和 C_1 差别不大，而胞壁密度取为 1.52 g/cm^3 ，最后考虑测量是在充分润胀的薄切片下进行的，密度比利用纤维饱和点 ($m = 0.28$)，体积润胀系数为 α_v ，对于松树 α_v 近似为 0.13。

$$\rho = \frac{1520 [C - 0.35(R_u + R_t) - A_r] (1 + \alpha_v)}{1 + m} \quad (\text{kg/m}^3)$$

利用纵向和横向切片的显微影像，经数字化处理后，测量上述公式中所需的解剖学参数，例如管胞长度、晚材比， R_u ， R_t ， A_r ，将其代入公式算出密度值即为所求。

1.4 其他测量木材密度分布的方法

射线法虽然实用，但射线源对人体有害且不适于现场，特别是对生长的立木进行实

地考察。几何学方法应用更有局限,非但不可能现场测试,限于显微观察、样品大小限制,连续观察许多年轮的密度数值,亦有不少困难,人们不断追求新型的更有特色的木材密度计,这一节介绍几种方法,当然每一种方法都不能尽善尽美。

1.4.1 阻力式木材密度计

阻力式木材密度计装置如图 1-9 所示。一根很长(50 cm 左右)的细针(其直径 2~3 mm),在电动机的驱动下,以恒定速率在木材中钻孔,如驱动电动机的电压恒定,则其电流反映阻力大小,电流是阻力的函数,阻力又与密度相关。因此电流大小反映密度值的大小,将其数值随钻孔深度的变化,经数据采集卡收集至计数机。如图 1-10 所示就是实际得到阻力随深度变化的曲线。经过相应的软件处理,可以得到所需密度的资料,这种装置可以说是准无损的。应用现场测试树木生长情况和古代建筑中木结构腐朽情况,颇有方便之处,当然严格定标亦非易事。

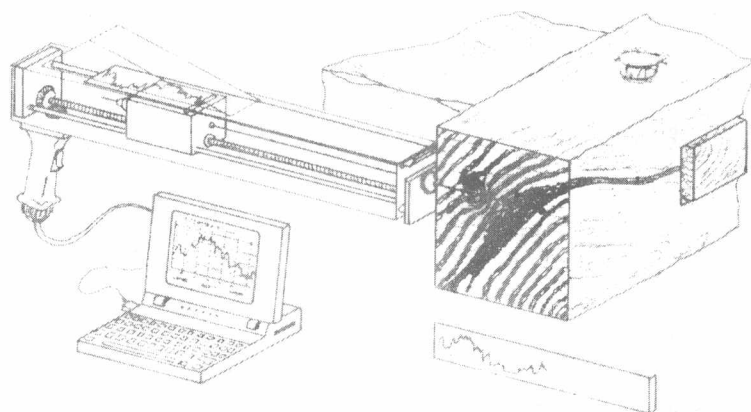


图 1-9 阻力式木材密度计装置图

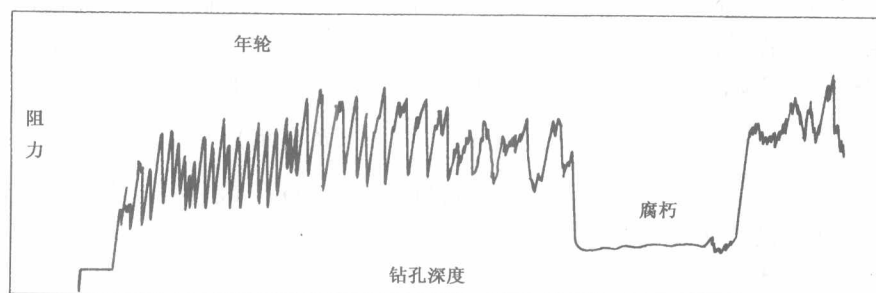


图 1-10 阻力密度计获得的阻力图谱

1.4.2 THz 木材密度计^[9]

X 射线、 γ 射线对人体有害,考虑其他电磁辐射尽在情理之中,对于可见光和近红光,木材是非透明体,可以考虑用反射光谱研究之,对于 X 射线、 γ 射线等是穿透能力较强的辐射,研究透射光与密度的关系更加合理。一般地说,电磁辐射的波长越短,穿

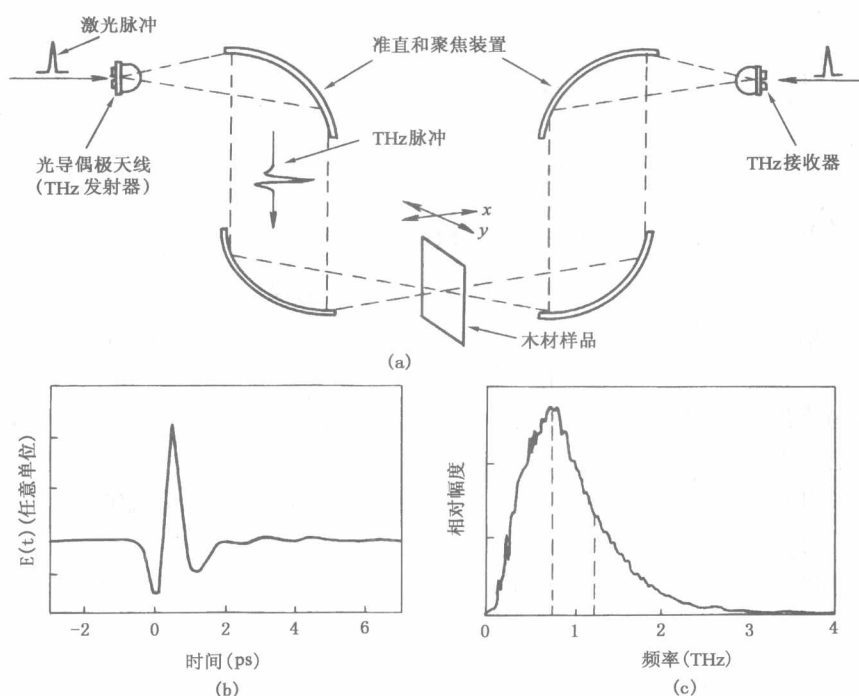


图 1-11 THz 密度计

透能力越强。根据 Abbe's 定律, 空间分辨率与波长有关, 用 GHz (10^9 Hz) 波长的电磁辐射分析木材年轮内密度变化不能达到要求, 波长过短的 X 射线于人体有害, 因此使用 THz (10^{12} Hz) 频率的远红外研究木材密度是一有益的尝试。

THz 木材密度计的实验装置图见图 1-11 (a) 近红外激光短脉冲照射在 THz 发生器上, 使之发生时域波形为图 1-11 (b) 的波形, 经 Fourier 分析后, 得到如图 1-11 (c) 所示的频域波谱图, 其频率范围在 0.1 ~ 3 THz, 该近红外激光短脉冲经抛物面聚集照射在木材样品上, 每个样品点上透射光经接收抛物面聚集后, 由 THz 接收器检测发射强度和透射强度均在给定波谱窗口 (0.75 ~ 1.2 THz 范围内) 积分, 移动样品可以得该样品的空间透射光强度分布图谱, 从而求得密度分布概况。

1.4.3 用图像处理方法测定木材年轮内密度变化^[10]

相关木材的试材经甘油、水混合液体煮沸软化, 用微切片机制成厚度为 20 mm 的横截面样品, 用盐基桃红染色, 并用 50%、70%、90%、99.5%、100% 的酒精依次脱水, 用加拿大树脂胶封存制成永久试样, 用光学显微镜拍摄获得黑白照片, 经扫描仪 A/D 转换, 将其数字图像读入计算机中, 径向为 x 轴方向, 软件进行分析。进行二值化处理, 二值化处理的方法有多种, 其值与其有关, 密度值用下式计算

$$\rho_g = \frac{\lambda B_{ave}(1 + \alpha_v)}{B_m(1 + m)} \rho_a$$

式中: ρ_g 是绝干材密度 (g/cm^3); ρ_a 为细胞壁的密度; B_{ave} 是切线方向 (y 轴方向) 图线平均灰度值; B_m 为细胞壁的灰度值 (255); α_v 是木材体积收缩率; m 为纤维饱和点