

北京林业大学
研究生教学用书
建设基金资助

SUPPORTED BY GRADUATE
TEXTBOOK FUND OF BJFU

木材科学 与技术 研究进展



ADVANCE IN WOOD SCIENCE
AND TECHNOLOGY

(北京林业大学研究生院组织编写)

主编 张璧光
副主编 于志明
赵广杰
常建民

中国环境科学出版社

S781

B450

木材科学 与技术 研究进展

(北京林业大学研究生院组织编写)

主编 张璧光
副主编 于志明
赵广杰
常建民

中国环境科学出版社
北京

720031

图书在版编目 (CIP) 数据

木材科学与技术研究进展/张璧光主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2003.9

北京林业大学研究生教学用书建设基金资助

ISBN 7-80163-556-6

I. 木… II. 张… III. 木材学-研究 IV. S781

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 074929 号

木材科学与技术研究进展

出 版	中国环境科学出版社
社 址	北京崇文区广渠门内大街 16 号 (100062)
网 址	http://www.cesp.cn
电子信箱	cesp@95777.com
印 刷	北京市联华印刷厂
经 销	各地新华书店经销
版 次	2004 年 1 月第一版 2004 年 1 月第一次印刷
印 数	1—3000
开 本	787×1092 1/16
印 张	17.75
字 数	388 千字
定 价	20.00 元

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社发行部更换

前 言

木材作为一种可再生资源材料，在国民经济建设和人民生活中将发挥越来越大的作用。研究木质及其复合材料的基本性质、基础理论、加工工艺及其应用具有重要意义。

本书作为木材科学与技术学科研究生的教学用书，也可作为林业工程一级学科内其它二级学科研究生的参考书、同时亦可供相关的科研与工程技术人员参考。内容包括木材科学、木材改性、木材干燥和检测、人造板等方面的新近研究成果和发展趋势，反应了学科前沿的研究动态。

具体编写分工如下：第一章，赵广杰；第二章，王洁璞；第三章，曹金珍；第四章，罗文圣；第五章，鹿振友、王丽宇、司慧；第六章，张璧光；第七章，常建民；第八章，伊松林；第九章，张璧光、王丽宇（第四节）；第十章，高建民；第十一章，撒潮；第十二、十三、十四章，于志明；第十五章，李建章、周文瑞。全书由张璧光和于志明统稿。宁炜同志为全书排版做了大量的工作；余雁、李宁参加了第五章的编写工作，此书在出版工作中也得到其他一些同志的帮助，同时本教材得到北京林业大学研究生教学用书建设基金资助，在此一并表示感谢。

书中引用了大量的国内外研究成果和最新资料，在此向作者表示衷心感谢。书中的内容和观点难免有不妥之处，欢迎提出批评指正。

《木材科学与技术研究进展》编写组
2003年9月

序 言

木材科学与技术是一门包括了木材学、木材干燥、人造板与木材胶粘剂等内容的综合性学科。“木材科学与技术研究进展”一书作为该学科的研究生教学用书，它分别介绍了木材学、木材干燥、木质与非木质人造板及胶粘剂等几个领域的国内外最新研究成果和发展趋势，反映了学科前沿的研究动态。本书的多数内容反映了本书作者近年来的研究成果，它包涵了曾被 SCI、EI、CAB 等检索收录的多篇论文的基本内容，如木材变色的产生、回复及永久固定；木材的机械吸湿蠕变；木材的断裂力学理论；真空-过热蒸汽干燥理论；太阳能干燥技术；除湿干燥理论分析及木材变色与诱发变色等内容。其余内容则介绍该学科领域的国内外研究成果，如干燥理论的研究动态与数学模型、非木质人造板加工技术及胶粘剂理论与技术等内容。

该教材的特点是内容较全面，理论深度较高，反映和跟踪了本学科前沿的研究动态。全书理论严谨、文字流畅、深入浅出，参考文献丰富，不仅是一本实用价值较高的研究生用书，而且可供相关工程技术人员参考。

据本人了解，目前国内外尚无与本书内容相同的教材，且木材科学与技术学科内正式出版的可供研究生参考的教材极少，多数研究生课程是自编讲义或根本无教材，严重地影响了研究生的教学质量。因此，本书的正式出版发行，对提高本学科研究生的教学质量，开阔研究生的眼界和科研思路，增进国内外学术交流都十分有利。

本人热切期望本书的出版有助于推动木材科学与技术学科的发展。

中国工程院院士 張齐生

2002 年 12 月 12 日

目 录

第一篇 木材科学研究进展

第一章 木材细胞壁的构造及其主成分的堆积过程	2
第一节 纤维素微纤丝形态学及其内部构造	2
第二节 木材细胞壁的壁层构造	3
第三节 微纤丝的生成及排列取向	5
第四节 木质部细胞的多糖物质和木素的堆积	6
第二章 木材变定的产生、回复及其永久固定	12
第一节 木材变定的概念及特征	12
第二节 木材变定的产生和回复	13
第三节 木材变定的永久固定	17
第三章 木材的机械吸湿蠕变	26
第一节 木材的机械吸湿蠕变现象的特征和几种代表观点	26
第二节 机械吸湿蠕变数学模型	29
第三节 解释木材的机械吸湿蠕变现象的构想	33
第四章 木材细胞壁的空隙构造及物质的输运过程	37
第一节 木材细胞壁的空隙构造及物质的输运通路	37
第二节 木材细胞壁中物质的输运过程及平衡态分布	39
第五章 木材力学研究进展	45
第一节 木材力学性质研究	46
第二节 木质复合材料力学与家具力学性能研究	50
第三节 木材纤维力学研究	53
第四节 木材断裂力学研究	56

第五节 木材的无损检测技术研究	64
-----------------------	----

第二篇 木材干燥理论与技术研究进展

第六章 我国木材干燥技术的现状与国内外发展趋势	77
第一节 我国木材干燥技术的研究现状	77
第二节 木材干燥技术的发展趋势	81
第七章 木材干燥理论研究动态与数学模型	86
第一节 概述	86
第二节 木材干燥的数学模型	87
第三节 木材干燥应力的研究动态	96
第八章 真空过热蒸汽干燥理论研究进展	102
第一节 真空状态下过热蒸汽干燥介质的热力学特性	103
第二节 木材真空过热蒸汽干燥的基本规律	108
第三节 真空过热蒸汽干燥中木材的湿迁移特性	110
第九章 木材干燥的新技术	121
第一节 太阳能干燥技术与设计基础	121
第二节 热泵除湿干燥技术与节能分析	126
第三节 冷冻干燥	135
第四节 速生材、小径材干燥技术	140
第十章 木材变色与诱发变色	149
第一节 木材的颜色	149
第二节 木材的变色与防治	153
第三节 木材的诱发变色	167
第十一章 木材干燥的检测技术	176
第一节 概述	176
第二节 木材含水率的检测	179
第三节 空气的湿度和平衡含水率的测量	187
第四节 木材干燥应力的检测	190
第五节 木材干燥过程的控制	193

第三篇 人造板理论与加工技术研究进展

第十二章 人造板加工技术面临的形式与发展趋势·····	202
第一节 新世纪我国林产工业面临的机遇与挑战·····	202
第二节 林产工业未来应坚持走可持续发展道路·····	207
第三节 人造板与木材综合利用·····	208
第十三章 非木材人造板加工技术·····	212
第一节 非木材植物原料综合利用·····	212
第二节 农作物秸秆人造板·····	216
第十四章 阻燃人造板的理论与加工技术·····	226
第一节 概述·····	226
第二节 木材阻燃机理·····	229
第三节 木质材料阻燃处理的方法与阻燃剂的特点、分类·····	231
第四节 木质材料阻燃的关键·····	234
第十五章 木材胶粘剂理论与应用技术新进展·····	237
第一节 绪论·····	237
第二节 脲醛树脂胶粘剂理论与应用进展·····	242
第三节 木材工业用酚醛树脂胶粘剂的快速固化研究与应用现状·····	250
第四节 聚醋酸乙烯酯乳液胶粘剂的耐水性及其他改性研究进展·····	253
第五节 其他木材加工用胶粘剂的发展概况·····	257
第六节 现代仪器分析技术在木材胶粘剂方面的应用·····	259
第七节 胶接理论和技术研究新方法·····	264
第八节 无损检测在胶粘剂和胶接技术方面的应用·····	267

第一篇 木材科学研究进展

第一章 木材细胞壁的构造及其主成分的堆积过程

20世纪70年代,日本木材解剖学家原田浩教授^[1]提出:有必要研究木材细胞壁主成分的形成过程,要打破当时对纤维素微纤丝(cellulose microfibril)形态学及其形成和取向排列过程研究的停滞局面。随着扫描电子显微镜(SEM)、分析电子显微镜及高分解能电子显微镜对纤维素微纤丝构造和对木材细胞壁构造以及细胞壁形成过程相关连的木材生物化学的研究,尤其是近年来,木材分子生物学所取得的研究成果,极大地深化了人们对木材细胞壁层的微细构造及其形成过程。

本章就有关木材细胞壁的壁层构造、木材细胞壁的堆积过程,以及其中有关木质部分子生物学方面的最新研究成果梗概地做一些回顾,旨在使我们对这个领域的研究有一个比较全面的了解,以便在思考21世纪中国的木材解剖学研究方向,尤其是对确定符合中国国情的木材解剖学近期或远期的研究目标时有所参考和帮助。

第一节 纤维素微纤丝形态学及其内部构造

1.1.1 微纤丝的横断面形状

纤维素被称为木材细胞壁的骨骼(framework constituent)^[2]。纤维素分子集合成长度不定的细长丝状构造物,被称为纤维素微纤丝或简称微纤丝。微纤丝的大小及其断面形状始终是木材解剖学领域的研究焦点,一般采用模型材料法囊藻(Valonia)来研究微纤丝横断面形状。因为法囊藻的细胞壁是未木质化的,这样可以通过较轻度的处理,把微纤丝从细胞壁中提取出来。另一方面,法囊藻纤维素的结晶度较高,其微纤丝的宽度约为20nm左右,是木材的5倍^[3]。因此把法囊藻细胞壁纤维素微纤丝研究的信息,作为研究木材细胞壁纤维素微纤丝的线索。Preston^[4]最初得到了法囊藻微纤丝的电子显微镜照片。Goto^[5,6]采用正交层状排列且微纤丝宽度较大的大囊藻(Valonia microphysa)及木材细胞壁未木质化且微纤丝几乎和细胞轴平行的杨树应拉木为研究材料,得到了微纤丝横断面的电子显微镜照片。法囊藻微纤丝横断面呈长方形,长边15~20nm,短边7~10 nm,杨树应拉木木纤维的细胞壁胶质层微纤丝

横断面接近正方形，其边长约 4nm。Revol^[7]使用明视野衍射反差法测定了偏肿法囊藻 (*Valonia ventricosa*) 的微纤丝横断面的形状呈准正方形，其边长为 18nm。杉山^[8]也用同样的方法观测到了大囊法囊藻细胞壁微纤丝的横断面形状为正方形。

1.1.2 纤丝的内部构造

在电子显微镜下，利用负染色法和金属摄影法 (shadowing) 都没能观察到纤维素微纤丝的内部构造^[7,8]，这是因为在电子显微镜下直接观测大囊法囊藻纤维素微纤丝的内部构造，需要高分辨率的电子显微镜。例如要得到微纤丝结晶为 0.54nm (Meyer-Misch 模型的 101 面隔) 的晶胞像，必须高度扩大倍数后才能观测到，这样就需要大量的电子线照射到试料上，结果会使材料的结晶构造崩毁。因此，人们试图用低温处理^[9]、加速电压以及试料的液态氮极低温冷却^[11]等手段来实现观测微纤丝内部构造晶格像的目的，但终究没有得到晶胞的电子显微镜像。杉木探讨了大囊法囊藻的微纤丝，以及赤松管胞细胞壁的次生壁中层 S₂ 及杨树应拉木的木纤维较质层的超薄切片，在电子线照射下各种试料纤维素结晶构造崩坏的条件。结果，得到了法囊藻微纤丝的晶胞像，但没有获得木材纤维素微纤丝的晶格像，其原因是木材纤维素微纤丝的大小为法囊藻的 1/5 左右，而且木材纤维素微纤丝的结晶度也比法囊藻差。

第二节 木材细胞壁的壁层构造

1.2.1 多层交叉构造及有序微纤丝说

所谓多层交叉构造是由 Chafe 和 Chauret^[10]在研究阔叶树材轴向薄壁细胞的初生壁构造中提出的，Roland^[11]用多层生长说不能解释交叉多层构造的形成机理，于是提出了所谓有序微纤丝说。多层生长说认为：最初形成的微纤丝的取向将伴随着细胞的伸长生长而再取向。与此相对，有序微纤丝说则认为：微纤丝所具有的交叉状态是在最初堆积而成的，微纤丝伴随着细胞的伸长生长而不再进行取向。但是，初生壁中微纤丝再度进行取向的实验事实，在针叶树材的木纤维、导管及薄壁细胞的初生壁中被观察到^[5,12,13]。藤井^[14]通过对阔叶树材薄壁细胞的研究，提出了一个能够说明多层交叉构造的有序微纤丝修正说。按照他的观点，微纤丝首先相对细胞轴成 45° 或比 45° 更大的角度堆积成最初的一层，其下一层微纤丝的方向和上一层的方向交叉，这样一层一层地堆积下去。最后随着细胞的扩大，微纤丝层将变薄，从而引起微纤丝的再度取向。但是，微纤丝的再度取向行为是以层为单位进行的。

1.2.2 次生壁的过渡层及微纤丝的回转构造

木材细胞壁的标准构造之一是针叶树材管胞构造模型。在这个模型中,存在着如 Wardrop^[17]提出的 S_1 层的交叉构造及原田^[3]提出的次生壁各层间的过渡层 S_{12} , S_{13} 。一度曾有人提出在成熟细胞壁中,这种过渡层只是偶然出现的,认为是一种变异构造。后来,原田等人利用复型法及扫描电子显微镜对分化过程中细胞壁内表面做了观察,结果在针叶树早材管胞细胞壁中观察到了 S_1 交叉层及 S_{12} , S_{23} 过渡层的存在^[16,17],并且今村等观察到从 S_1 到 S_2 的过渡方式:与 S_2 到 S_3 相比,微纤丝倾角的变化缓慢渐进^[18]。

另一方面,山中使用锰酸钾-倾斜超薄切片法,观察了次生壁中微纤丝倾角的变化^[19]。芦田^[20]和岸^[22]对导管细胞壁次生壁从 S_1 到 S_3 的微纤丝倾角及螺旋变化形式进行了观察。Harada 等人将这种方法应用到赤松早材管胞次生壁微纤丝倾角的观察研究上。岸^[21]还用前述的倾斜超薄切片方法、立体观察法、复型法等方法进行了多方面的研究。Roland 和 Mosiniak^[23]还提出了一个关于细胞壁次生壁微纤丝排列是呈回转变化的。例如,导管细胞壁的次生壁的微纤丝的排列变化是连续的,而管胞和木纤维的次生壁是由内中外 3 层构成的,微纤丝的排列呈规则回转、缓慢回转、停滞回转 3 种状态。

1.2.3 导管、薄壁细胞的壁构造

1.2.3.1 导管的壁构造 岸^[21]详细地研究了阔叶树材导管细胞壁的构造,提出了导管壁的标准构造模型^[12,24,22,21],根据这些研究结果,导管细胞壁的初生壁构造按照微纤丝的排列特征可以分成外中内 3 部分。在初生壁外侧微纤丝与细胞轴的倾角几乎呈直角,在中层呈无序状态,在内侧则呈直角、倾斜、平行 3 方向排列状态。次生壁的构成因树种不同可分成 3 层、1 层、多层 3 种构造类型。3 层者和管胞及木纤维次生壁的构造相同,1 层构造其微纤丝的倾角变化非常小,多层构造微纤丝的倾角变化非常显著,能分成 4 个以上不同的层次。

1.2.3.2 薄壁细胞的壁构造 与管胞、木纤维的细胞壁构造相比,木质部薄壁细胞壁的构造变化非常大,且薄壁细胞初生壁存在着多层交叉构造^[10]。Fujikawa 和 Ishida^[25]、Harada^[26]研究了针叶树材射线薄壁细胞的壁层构造。其细胞壁构成可分为两种类型,一种类型是由初生壁和保护层(protective)构成,另一种类型是由初生壁和保护层再加上次生壁构成。初生壁是由微纤丝和细胞轴几乎呈平行排列的 P_1 层、网状排列的 P_2 层及交叉多层构造的 P_3 层构成。次生壁与管胞和木纤维的次生壁相当,按照微纤丝的排列不同可分成 2 层。两种类型构造的细胞壁最内层都是保护层,这层微纤丝排列特点是呈网状。轴向薄壁细胞除了 P_1 之外,其细胞壁构造和射线薄壁细胞相同^[26]。

藤井详细地研究了阔叶树材射线薄壁细胞和轴向薄壁细胞的构造^[13,14,17,28~30]。首先这两种薄壁细胞壁的初生壁都呈交叉多层构造,次生壁构造特征是存在着无定形层(amorphous layer)。通过对连续超薄切片的脱木素、脱半木素、脱果胶、脱多糖的操作处理,进行的单独或组合分析的结果,这个无定形层中半纤维含量丰富,含有少量果胶和纤维素,且木质化程度很高。据此,原田认为,有人提出的所谓阔叶树材薄壁细胞的细胞壁次生壁中存在的保护层^[30]和同性层(isotropic layer)^[31],从形成过程来看,其化学组成及微纤丝排列形式诸点同无定形层一样。阔叶树材薄壁细胞的细胞壁次生壁构造,由和管胞、木纤维相同的纤维素、半纤维素、木素构成的层(CL)和无定形层(AL)的组合,可分为3CL, 3CL + AL, 3CL + AL + ICL这3种类型。这里ICL是位于AL内侧的CL层。3CL是标准构造,3CL + AL是位于导管之间具有纹孔对的薄壁细胞的标准改造。

第三节 微纤丝的生成及排列取向

1.3.1 微管说

Ledbetter 和 Poter^[32]将分化的细胞用戊醛(glutaric aldehyde)固定后的电子显微镜下观察,发现在接近原生质膜附近的原生质中存在着一层厚度约7nm致密的壁,其中含有直径在23~27nm之间,长短不一的细管状器官,这些细管的大多数经常和细胞壁微纤丝的方向保持平行排列,把这些小器官叫作微管(microtubule),并推定这些微管决定着细胞微纤丝的取向排列。其后,许多研究者在各种各样的植物细胞中发现了微管的存在。尤其是 Ronshow^[33]详细研究了燕麦木质部细胞和美国槭树细胞壁形成过程和微管之间的关系。通过木质部细胞分化全过程的观察研究,发现多数微管经常集聚在最新形成的细胞壁微纤丝的细胞质周边并和纤维素方向平行排列。只有初生壁构成的细胞微纤丝和微管的方向一致,且与细胞轴呈直角排列。美国槭树木纤维细胞壁中次生壁的S₂层形成时,在其周边细胞质中的微管也同原生质膜结合在一起。因此推定细胞壁的构成物质通过微管进行移动、蓄积,形成与微纤丝,或者微管与原生质的运动相关,间接地控制微纤丝的取向排列。事实上,如果将细胞壁形成中的植物组织用秋水仙碱处理后,则微管的形成受到阻碍,结果纤维微纤丝的取向也出现了紊乱^[34]。

1.3.2 原生质膜颗粒说

原生质膜颗粒说最初是由 Preston 提出的^[35]。Preston 用复型法分离海藻细胞中的原生质,在电子显微镜下观察,发现在细胞壁内表面有许多直径50 nm左右的颗

粒。这些颗粒一端和已形成的微纤丝相接。各颗粒含有 1, 4- β - 甙键结合的合成酶, 紧密地堆积成立方体。因此推定微纤丝在这些颗粒之间形成。Frey-wyssling 和 Muhlethaler^[36]等人研究发现母菌和洋葱原生质膜表面上散布许多 15nm 大小的颗粒。在某些部位上这些颗粒 20~50 个集聚一起呈六角形整齐排列, 并通过微纤丝和细胞壁结合在一起。微纤丝的直径 50 nm 左右, 和构成母菌细胞壁微纤丝的大小几乎一致。因此推定这些颗粒具有合成葡萄糖微纤丝能力的器官。进而他们又在其他生物的原生质膜上发现了同样的颗粒。从而推定初生壁微纤丝是由分散排列的颗粒, 次生壁是由紧密排列的颗粒群生成的。最近, Brown^[37]等人将绿藻和母细胞冻结, 在电子显微镜下观察细胞壁的断面, 发现原生质膜上的颗粒集成蔷薇状 (rosette), 微纤丝从这些蔷薇状颗粒集合体中伸出。认为这些颗粒群是纤维素合成酶的复合体, 由纤维素合成酶复合体形成的纤维素分子和邻近的分子之间形成氢键结合, 结晶后形成微纤丝的成长, 蔷薇状颗粒集合体可以在原生质膜上移动, 移动方向由微管来决定, 微管如同列车的轨道一样, 蔷薇状颗粒集合体在两根微管之间一边移动一边形成微纤丝, 就这样决定了微纤丝的取向。

第四节 木质部细胞的多糖物质和木素的堆积

形成层进行核分裂后在两个核之间形成细胞板 (cell plate), 细胞来源于高尔基体和小胞体, 研究表明, 细胞板中含有 β -1, 3- 葡聚糖和复葡聚糖成分。前者在原生质膜上合成, 后者由高尔基体合成。细胞分裂结束木质部细胞要扩大生长, 此时形成的初生细胞壁含有丰富的木聚糖、复葡聚糖半纤维素和果胶质, 与次生壁相比纤维素的含量较低。纤维素是由于原行质膜的呈六角形排列的蔷薇状颗粒集成 (TC) 合成的, 然后伸出细胞壁内表面。而半纤维、果胶质则是在高尔基体内合成, 通过高尔基小胞和原生质膜的融合运输到细胞壁。研究还表明, 这些基质多糖是在高尔基装置不同部位上合成运输到细胞壁上的^[38]。

针叶树材细胞壁的次生壁主要由纤维素, 半乳葡甘露聚糖 (galactoglucoanna) 阿拉伯糖-4-O-甲基-葡萄糖醛基木聚糖 (arabino-4-O-methyl-glucronic-xylan) 组成, 阔叶树材细胞次生壁主要由纤维素, 4-O-甲基-葡萄糖基木聚糖 (4-O-methyl-glucronic-xylan), 葡萄糖基甘露聚糖 (gluco-mannan) 组成, 在针叶树材细胞壁的次生壁中外层 S_1 、内层 S_3 的形成期时, 是半纤维素堆积的最活跃阶段, 次生壁中层 S_2 形成期, 是纤维堆积的最活跃阶段^[39]。这样, 形成了针叶树材细胞壁的次生壁 S_1 , S_3 中半纤维的含量丰富^[40]。

根据电子显微镜射线自显影术 (autoradiography) 的研究, 纤维素要进行所谓叠式附加堆积 (appositional deposition), 半纤维素则要在堆积成网状的纤维素间进行所谓插入堆积 (insertion) ^[41], 近期研究表明, 由高尔基体运输来的半纤维素, 在细胞外吸收水分溶胶化后, 薄薄地覆盖在细胞壁的内表面^[42], 纤维素则在由

颗粒集合构成的蔷薇状纤维素酶复合体中合成,在半纤维溶胶中移动进行堆积,这样堆积的数根纤维素微纤丝集成一起形成带状层,堆积一层排列角度为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 左右。微纤维不断地改变着排列角度进行堆积,增加细胞壁的厚度。堆积而成的纤维素、半纤维素含有大量水分,其后由于木素物质的沉积、进行脱氢聚合排除水分,形成疏水性细胞壁。

1.4.1 木质部细胞壁的木素堆积

由于木素是二次代谢产物,所以细胞分化到某一个定阶段之前,是不会产生木素堆积现象的,木素前驱物质的合成和这些物质向细胞壁的输送过程与高尔基有关^[43,44]。供给细胞壁中的木素前驱物质在埋填于纤维素微纤丝(CWF)溶胶中以扩散形式移动。通过投氧化物酶和过氧化氢双氧水的脱氢聚合高分子化,在这个过程中和半纤维素形成化学结合,沉积在细胞壁中。针叶树材次生木质部中木素的含量约 $25\%\sim 35\%$,阔叶树材含量约 $20\%\sim 25\%$,细胞壁部位不同,木素的浓度也不同,细胞间层和初生壁的含量最高,但占细胞壁整体的比例最低。

有人指出,由初生组织分化的初生木质部的由形成层分化的次生木质部的木素堆积过程的构造不同^[45],但初生木质部在木本植物中所占的比例十分小,通常把次生木质部当作木质部。因此这里主要讨论树木次生木质部中木素的堆积过程的构造。

1.4.2 针叶树木质部细胞壁木素的形成及其构造

通过紫外线(UV)显微镜和放射性同位素(^{14}C , ^3H)的标记示踪法和微观自动射线显影术等技法的组合使用,可以观测到木素的堆积过程。针叶树管胞木素的堆积过程大致可以分为3个阶段。最初和次生壁外层 S_1 开始形成的同时,在细胞角隅、胞间层木素开始了比较活跃地沉积;稍后,初生壁中也开始了沉积。接着要和次生壁中层 S_2 和内层 S_3 形成时,在初生壁和次生壁的 S_1 层经缓慢的速度进行少量的沉积。 S_3 层形成后,次生壁全体开始了最活跃的堆积过程^[43,46~49],用干涉显微镜研究得到了同样的结果^[50],这样,在细胞角隅和复合胞层,次生壁中木素的堆积时期存在着差别,胞间层中木素构造单位间的结合形成时与次生壁相比聚合型构造丰富^[48,49]。另外,在复全胞间木质化的形成层附近分化中的木质部或者利用比重分离的复合胞间层的化学分析结果可知,复合胞间层中存在着H型木素^[51~53],应压木(compression wood)管胞的木素的堆积过程和正常材不同。木素的浓度在次生壁 S_2 的外侧非常高。应力木管胞的次生壁呈螺旋状扭曲,没有 S_3 层,越往 S_2 层内侧木素的浓度越低^[54,55]。另外,应力木木素的浓度比正常材含量高。其构造由G单元构造和H单元构造组成,聚合型构造丰富^[56]。

1.4.3 阔叶树木质部细胞壁木素的形成及构造

阔叶树次生木质形成分裂、分化成具有各种功能的导管、真正木纤维、射线薄壁细胞等构成。因此,为了得到细胞水平有关木素的形成及构造的信息,必须采取特殊的方法进行解析。具代表性的方法有:UV 显微分光法^[56~59]、毛勒氏反应^[59,60]、溴化或水银化木质部试料通过扫描或透射电子显微镜能量分散 X 射线解析法^[61,62]、利用放射性同位素对木素的 S、G 单元进行选择标记、微观自动显影术可视化方法^[63,64]、利用比重差或振动分离得到胞间层、次生壁分析方法^[65~68]或者对胞间层木质化的分化中木质部的分析^[69~71]。综合这些研究成果,阔叶树在初期木质分形成的木素中 G 单元丰富,聚合型构造多,后期堆积的木素 S 单元丰富。导管先开始木质化,木纤维稍迟些。导管和木纤维都是按照细胞角隅、细胞间层、初生壁、次生壁的顺序进行木质化。其结果,导管和胞间中 G 单元木素、真正木纤维次生壁 S 单元木素丰富。这些不均一木质的现象,通过杨树形成层附近新生木质部和新生韧皮部组织木素合成相关的研究得到证实^[72,73]。

1.4.4 木素在分子水平上堆积

木素和埋填于纤维微纤丝间的半纤维素结合形成无定形区域。如果按照 Goring 等人提出的所谓断续层构造模型,其间隔约 7 nm (云杉, S2 层)^[74],这样,推定木素可能进行堆积的空间即无定形部分为 3.5nm^[75]。另外,根据拉曼光谱分析,云杉次生壁中木素的芳香与细胞壁面平行取向^[76],提出了木素一半充填在纤维素微纤丝间的分子构造模型。

参考文献

- 1 原田浩. 木材细胞膜 ミクロファイブリンと膜層構成. 木材学会誌, 1970, 16: 357~363
- 2 Wardrop AB, Formation of Wood in Forest Trees. Academic Press, 1964. 87~134
- 3 Harada H Goto T. Cellulose and Other Natural Polymer Systems. Plenum Press, 1982. 383~401.
- 4 Preston R D The Physical Biology of Plant Cell Walls. Chapman and Hall, 1974, 163~172
- 5 Goto G, Harada H, Saiki H. Cross - Sectional View of Microfibrils in Valonia, Mokuzai Gakkashi, 1973, 19: 463~468
- 6 Goto T, Harada H, Saiki H. Cross - Sectional View of Microfibrils in Gelatinous Layer Tension Wood (Populus eurauricana). Mokuzai Gakkashi, 1975, 21: 537~521
- 7 Revol J, On the Cross Sectional Shape of Crystallites in Valonia Ventricosa. Carbohydropolym, 1982, 2: 123~134
- 8 原田浩. 木材の细胞壁の构造. 木材学会誌, 1984, 30: 513~521
- 9 坂田茂雄. 電子顕微鏡技術. 日本朝倉書店, 1982, 3
- 10 Chafe SC, Chauret G. cell wall structure in the xylem paren protoplasm. 1974, 18: 129~147
- 11 Roland J C, Vain B, Reis D. Observations With Cytochemistry and Ultracytometry on the Fine Structure

- ture of the Expanding Walls in Actively Elongating Plant Cells. *Jcell Sci*, 1975, 19: 23~259
- 12 岸恭二, 原田浩, 佐伯浩. 广叶树材道管一次壁の構造. *材料*. 1981, 30: 673~678
 - 13 藤井智之, 原田浩, 佐伯浩. メソドロの放射柔細胞一次壁の構造. *京大演報*. 1977, 49: 127~131
 - 14 藤井智日之. 广叶树の木部柔細胞一次壁の構造: [学位论文]. 京都: 京都大学, 1981, 12~13
 - 15 Wardop AB, The Organization and Properties of the Outer Layer of Secondary Wall in Conifer Tracheids. *Holzforshong*, 1957, 11: 102~110
 - 16 今村佑嗣, 原田浩, 佐伯浩. 分化中木部細胞膜内表面の電子顯微鏡觀察法. *京大農演報*, 1972, 43: 303~308
 - 17 Hirakawa Y, Ishida S. A SEM Study on the Layer Structure of Secondary Wall of Differentiating Tracheids in Conifer. *Res Bull Coll Wxp For Hokkaido Univ*, 1981, 38: 55~71
 - 18 今村佑嗣, 原田浩, 佐伯浩. 針叶树假道管の形成と構造. *京大農演報*, 1972, 44: 183~193
 - 19 山中胜次. 数種の南洋材道管膜の構造. [学位论文]. 京都: 京都大学, 1969, 31~46
 - 20 芦田让二, 原田浩, 佐伯浩. 第25回日本木材学: [学位论文]. 京都: 京都大学, 1984. 研究发表要旨集, 1975.43
 - 21 岸恭二, 原田浩, 佐伯浩. 偏光顯微鏡法による广叶树材道管二次壁の层構成. *京大農演報*, 1977, 49: 122~126
 - 22 岸恭二, 广叶树の構造: [学位论文]. 京都大学, 1984
 - 23 Roland J C, Mosiniak M. On The Twisting Pattern, Texture and Layering of the Secondary Cell Walls of Lime Wood. Proposal of an Unifying Model. *IAWA Bull*, 1983, 4 (1): 15~26
 - 24 Kishi K, Harada H, Saiki H. An Electron Microscopic Study of the Layered Structure of the Secondary Wall in Vessels. *Mokuzai Gakkaishi*, 1979, 25: 521~527
 - 25 Fijikawa S, Ishida S. Ultrastructure of Ray Parenchyma Cell Wall of Softwood. *Mokuzai Gakkaishi*, 1975, 21: 445~456
 - 26 Harada H, Imamura Y, Saiki H. The Development and Ultrastructure of Pits of Parenchyma Cells in Softwood. *App Poly Sym*, 1976, 28: 1239~1251
 - 27 Fujii T, Harada H, Saiki H. The Layered Structure of Parenchyma Secondary Wall in the Wood of 49 Japanese Angiosperm Species. *Mokuzai Gakkaishi*, 1979, 25: 251~257
 - 28 Fujii T, Harada H, Saiki H. The Layered Structure of Secondary Walls in Axial Parenchyma of the Wood of 51 Japanese Angiosperm Species. *Mokuzai Gakkaishi*, 1980, 26 (6): 373~380
 - 29 Fujii T, Harada H, Saiki H. Ultrastructure of "Amorphous Layer" in Xylem Parenchyma Cell Wall of Angiosperm Species. *ibid*, 1981, 27: 149~156
 - 30 Schmid R. Cellular Ultrastructure of Woody Plant. *Syracuse Univ Press*, 1965. 291~320
 - 31 Chafe S C, Chauret G. Cell Wall Structure in the Xylem Parenchyma of Trembling Aspen. *Protoplasma*, 1974, 80: 129~147
 - 32 Ledbetter M C, Porter K R. A "Microtubule" in Plant Cell Fine Structure. *J Cell Biol*, 1963, 19: 239~250
 - 33 Ronshow J. Cellular Ultrastructure of Woody Plant. *Syracuse Univ Press*, 1965, 61
 - 34 Itoh T. Fine Structure of the Membranes and Organelles in Parenchyma Cells of Poplar Shoot Observed by Freeze Etching Technique. *Wood Res*, 1974, 57: 31~47
 - 35 Preston R D. The Formation of Wood in Forest Trees. *Academic Press*, 1964. 169