

高等院校木材科学与技术专业中英双语教材▶▶

木材腐朽与维护

Wood Deterioration and Preservation

【美】郭梦麟

蓝浩繁 编著

邱 坚



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

高等院校木材科学与技术专业中英双语教材

木材腐朽与维护

Wood Deterioration and Preservation

【美】郭梦麟

蓝浩繁 编著

邱 坚



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

木材腐朽与维护/郭梦麟, 蓝浩繁, 邱坚编著. —北京: 中国计量出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-5026-3282-3

I. ①木… II. ①郭… ②蓝… ③邱… III. ①木材防腐 IV. ①S782.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 078529 号

内 容 提 要

本书为高等院校木材科学与技术专业中英文双语教材, 主要讲述木材和木制品生物分解、风化、化学品腐蚀等腐朽的机制, 以及如何维护使用中的木制物件而减轻或避免其腐朽。在介绍了木材形成及木材化学性质的基础上, 分别讲述了木材的化学分解及其化学色变、风化和热分解。同时, 本书讲述了木材阻燃机制及阻燃处理和由真菌生长引起的色变、真菌及细菌腐朽等, 最后介绍了木材虫害、预防及防腐剂处理前的相关措施及防腐处理等知识。

本书适于普通高等院校木材科学与技术专业本科生双语教学使用, 同时也可供木材行业及相关专业人员用作参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 18 字数 405 千字

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1—1 500 定价: 38.00 元

前言

Preface

木质材料在大自然中可在地面上被火焚毁，在地下受高温变化成油和气，也可被虫菌等生物分解、被气候风化和被化学品腐蚀；这些腐蚀因素都是地球生态平衡不可或缺的条件。本书仅讨论使用中的木材和木制品被这些因素腐朽的机制和如何维护使用中的木质对象而减轻或避免腐朽。第1章和第2章为引介，分别介绍木材的形成及木材的化学性质。第1章本应介绍木材构造，因已有多本书做了详细讨论，本书为避免重复，而以包括微纤丝走向控制及早晚材、心材、应力木及幼龄木的形成等内容替代。第3、4章分别讨论化学分解及木材的化学色变。因真菌生长引起的色变则在第8章讨论。第5章为木材的风化及其防护。第6章先描述木材热解的机理及相关论题，顺便也讨论了木材及其他植物材料的热能利用。第7章则接着讨论木材阻燃机制及阻燃处理。第9、10章分别讨论真菌及细菌腐朽。木材细菌腐朽的数据不多，所幸最近我们取得一些云南出土的千年古木而把研究成果编入书内。第11章介绍木材虫害，为害木材的各种昆虫依其为害程度逐次讨论。第12章讲述木材生物降解的预防及防腐剂处理前的措施；第13章则先比较各种现用防腐剂的性质，再讨论防腐处理。最后以第14章的非传统木材处理结束。

本书特点：(1) 深入浅出，先述经典知识，进而讨论欠缺及科研方向；(2) 收录上百张图片，其中大部分为原创；(3) 中英文对照；(4) 编列检索，便于查找。

本书的题目《木材腐朽与维护》来自 Wood Deterioration and Preservation，“木材腐朽”沿用已久应可广为接受，但“维护”两字则与传统的“保护”和“保存”不同。Preservation 可译成“保护”、“维护”及“保存”。其中“保存”有“存而不用”的含意因而不用，“保护”一词有被动的感觉，“维护”则带有主动和积极的意思。本书内所用的木材专业名词在两岸各自的译法略有不同。例如，wood ray 内地直译为“木射线”，而台湾则用“木质线”；tracheid 内地译为“管胞”，而台湾则为“假导管”；epithelial cell 台湾直译为“上皮细胞”，而内地则取其功能称之为“泌脂细胞”。两岸一些名词翻译不同是因为台湾至今仍然沿用上代学者学长在抗战前的说法，而内地在战后已有修改。

编者特别感谢国家自然科学基金项目(30630052)、西南林业大学木材科学与技术省级重点项目(XKZ200903)及教育部重点实验室项目(西南山地森林保育与利用)给予本书出版的资助。

编者

2009 年秋

目 录

Contents

第1章 木材的形成

1.1 木质部细胞种类及形态概述	(1)
1.2 木质部的生长	(2)
1.2.1 形成层	(2)
1.2.2 子细胞直径增长	(2)
1.2.3 子细胞伸长	(3)
1.2.4 细胞壁增厚	(3)
1.2.5 微纤丝走向	(4)
1.2.6 细胞壁木质化	(5)
1.3 早材与晚材	(5)
1.4 心材	(7)
1.5 应力木	(9)
1.5.1 形成	(9)
1.5.2 应压木的特性	(12)
1.5.3 应张木的特性	(12)
1.6 幼龄木	(13)
1.6.1 幼龄木的特性	(13)
1.6.2 幼龄木的形成	(14)
1.6.3 幼龄木在木材利用上的影响	(15)

Chapter 1 Wood Formation

1.1 Xylem Cell Types and General Morphological Characteristics	(16)
1.2 Xylem Growth	(17)
1.2.1 Cambium	(17)
1.2.2 Cell Diameter Growth	(18)
1.2.3 Cell Elongation	(18)
1.2.4 Cell Wall Thickening	(18)
1.2.5 Microfibrillar Orientation	(19)
1.2.6 Lignification	(21)
1.3 Earlywood and Latewood	(21)
1.4 Heartwood	(23)
1.5 Reaction Wood	(26)

1.5.1	Formation	(26)
1.5.2	Characteristics of Compression Wood	(29)
1.5.3	Characteristics of Tension Wood	(29)
1.6	Juvenile Wood	(30)
1.6.1	Juvenile wood Characteristics	(30)
1.6.2	Juvenile Wood Formation	(32)
1.6.3	Effects on Wood Properties	(32)
参考文献 References		(33)

第2章 木材的化学性质

2.1	木材的主要成分	(37)
2.2	木材成分的变异性	(37)
2.3	纤维素	(37)
2.4	半纤维素	(38)
2.4.1	针叶树材的半纤维素	(39)
2.4.2	阔叶树材的半纤维素	(40)
2.5	木质素	(41)
2.5.1	木质素单元	(41)
2.5.2	木质素单元链接键	(41)
2.5.3	木质素的官能基	(42)
2.6	抽出物	(43)
2.6.1	二羟基甲基戊酸系列 (mevalonogenins) 抽出物	(43)
2.6.2	乙酰系列 (Acetogenins) 抽出物	(44)
2.6.3	糖系列 (Saccharogenins) 抽出物	(45)
2.6.4	芪类 (Stilbenes) 及黄酮类 (flavonoids)	(46)
2.6.5	单宁及高分子量酚类抽出物	(46)
2.7	木材成分在细胞壁里的分布	(46)
2.7.1	纤维素及半纤维素分布	(46)
2.7.2	木质素分布	(48)
2.7.3	抽出物分布	(49)

Chapter 2 Chemical Properties of Wood

2.1	Major Wood Components	(52)
2.2	Variation of Chemical Composition	(52)
2.3	Cellulose	(52)
2.4	Hemicelluloses	(54)
2.4.1	Softwood Hemicelluloses	(54)
2.4.2	Hardwood Hemicelluloses	(56)
2.5	Lignin	(57)
2.5.1	Lignin Monomers	(57)
2.5.2	Linkages	(57)
2.5.3	Functional Groups of Lignin	(58)

2.6	Extractives	(59)
2.6.1	Mevalonogenins	(59)
2.6.2	Acetogenins	(60)
2.6.3	Sacchariogenins	(61)
2.6.4	Stilbenes and Flavonoids	(62)
2.6.5	Tannins and Polymeric Phenolic Extractives	(63)
2.7	Cellular Distribution of Wood Components	(63)
2.7.1	Distribution of Cellulose and Hemicelluloses	(63)
2.7.2	Distribution of Lignin	(64)
2.7.3	Distribution of Extractives	(66)
	参考文献 References	(68)

第3章 木材的化学分解

3.1	木材成分特性	(70)
3.2	水解作用	(71)
3.3	氧化作用	(72)
3.4	弱酸和弱碱对木材的影响	(73)
3.5	与盐类的作用	(74)
3.6	与金属的作用	(74)
3.7	增强木材抗化学分解的方法	(75)

Chapter 3 Chemical Degradation of Wood

3.1	Characteristics of Wood Components	(77)
3.2	Hydrolysis	(78)
3.3	Oxidation	(79)
3.4	Effects of Dilute Acids and Alkalis	(80)
3.5	Interactions with Salts	(81)
3.6	Interactions with Metals	(82)
3.7	Methods Imparting Chemical Degradation	(83)
	参考文献 References	(84)

第4章 木材的色变

4.1	酵素氧化色变	(85)
4.2	干燥氧化色变	(86)
4.3	化学色变	(87)

Chapter 4 Stains

4.1	Enzymatic Oxidation	(88)
4.2	Drying Oxidation	(89)
4.3	Chemical Stains	(90)
	参考文献 References	(91)

第5章 木材的风化

5.1	风化因素	(92)
-----	------------	--------

5.1.1	光能	(92)
5.1.2	水分	(92)
5.1.3	其他因素	(92)
5.2	风化时木材质量的变化	(93)
5.2.1	化学变化	(93)
5.2.2	物理变化	(94)
5.2.3	显微结构变化	(96)
5.3	风化的防护	(99)
5.3.1	成膜涂料	(99)
5.3.2	渗透涂料	(99)
5.3.3	木材表面处理	(100)
5.4	复合材料的风化与保护	(100)
Chapter 5 Weathering		
5.1	Factors in Weathering	(102)
5.1.1	Light	(102)
5.1.2	Moisture	(102)
5.1.3	Other Factors	(102)
5.2	Effects of Weathering	(103)
5.2.1	Chemical Changes	(103)
5.2.2	Physical Changes	(104)
5.2.3	Microscopic Changes	(106)
5.3	Protection from Weathering	(109)
5.3.1	Film-forming Finishes	(110)
5.3.2	Penetrating Finishes	(111)
5.3.3	Surface Treatments	(111)
5.4	Protection of Composite Products against Weathering	(111)
参考文献 References		(113)
第 6 章 木材热解		
6.1	低温热解	(115)
6.2	高温热解	(116)
6.2.1	无氧热解	(116)
6.2.2	燃烧	(118)
6.2.3	炽烧	(118)
6.2.4	冒烟	(119)
6.3	木材在失火时的表现	(119)
6.4	燃烧测试	(120)
6.4.1	烧穿率	(120)
6.4.2	火焰蔓延率	(121)
6.4.3	浓烟测定	(121)

6.5 木材燃烧热能	(121)
6.6 生物质无氧热解油的利用	(122)
Chapter 6 Thermal Degradation of Wood	
6.1 Thermal Degradation below 200 °C	(125)
6.2 Thermal Degradation at High Temperatures	(126)
6.2.1 Pyrolysis	(126)
6.2.2 Combustion	(128)
6.2.3 Glowing	(129)
6.2.4 Smoking	(129)
6.3 Performance of Wood in a Fire	(129)
6.4 Fire Tests	(131)
6.4.1 Fire Penetration	(131)
6.4.2 Flame Spread	(131)
6.4.3 Smoke Determination	(132)
6.5 Energy from wood	(132)
6.6 Potential Uses of Biomass Pyrolysis Oils	(133)
参考文献 References	(135)
第7章 阻燃处理	
7.1 木材阻燃剂	(137)
7.1.1 无机阻燃剂	(137)
7.1.2 有机阻燃剂	(137)
7.2 阻燃剂的倍增效应	(138)
7.3 阻燃机制	(138)
7.3.1 低温区 (低于 200 °C)	(138)
7.3.2 阻燃作用	(138)
7.3.3 阻炽烧作用	(140)
7.3.4 阻烟作用	(140)
7.4 有效阻燃剂的条件	(141)
7.5 木材阻燃处理	(141)
7.5.1 表面涂布	(141)
7.5.2 加压注入	(141)
7.5.3 复合材料的阻燃处理	(142)
7.6 阻燃处理对木材性质的影响	(142)
Chapter 7 Fire Retardant Treatment	
7.1 Fire Retardants	(144)
7.1.1 Inorganic Fire Retardants	(144)
7.1.2 Organic Fire Retardants	(144)
7.2 Synergism	(145)
7.3 Mechanisms of Fire Retardation	(145)

7.3.1	Low Temperature Range	(145)
7.3.2	Pyrolysis and Combustion	(146)
7.3.3	Glowing Retardation	(148)
7.3.4	Smoke Retardation	(148)
7.4	Requirement of Effective Fire Retardants	(148)
7.5	Fire Retardant Treatments	(148)
7.5.1	Surface Coating	(149)
7.5.2	Pressure Treating	(149)
7.5.3	Treating Composite Products	(149)
7.6	Effects of Fire Retardant Treatments	(150)
参考文献 References		(151)

第8章 霉菌与真菌色变

8.1	霉菌	(153)
8.1.1	木材霉菌	(153)
8.1.2	霉菌与居住环境卫生	(153)
8.1.3	霉菌的防患	(154)
8.2	染色真菌	(154)
8.2.1	蓝变木材显微观察	(155)
8.2.2	对木材性质的影响	(155)
8.2.3	真菌色变的防患	(155)
8.3	花斑纹	(156)

Chapter 8 Molds and Fungal Stains

8.1	Mold	(157)
8.1.1	Mold Growth on Wood	(157)
8.1.2	Molds and Sanitation in Living Environments	(157)
8.1.3	Mold Prevention	(158)
8.2	Stain Fungi	(158)
8.2.1	Microscopy of Blue Stained Wood	(159)
8.2.2	Effect on Wood Properties	(159)
8.2.3	Managing Fungal Stains	(159)
8.3	Spalted Grain	(160)
参考文献 References		(160)

第9章 真菌腐朽

9.1	腐朽真菌的生长条件	(161)
9.2	软腐	(162)
9.3	白腐	(163)
9.4	褐腐	(164)
9.5	真菌腐朽材的化学变化	(167)

9.6 木材强度的变化	(168)
Chapter 9 Decay	
9.1 Growth Requirements	(169)
9.2 Soft Rot	(170)
9.3 White Rot	(171)
9.4 Brown Rot	(173)
9.5 Chemical Changes Associated with Decay	(175)
9.6 Effect of Decay on Strength	(177)
参考文献 References	(178)
第10章 细菌腐朽	
10.1 腐朽木材的细菌	(180)
10.2 高湿木	(180)
10.3 细菌腐朽	(180)
10.4 淹埋古木	(181)
10.5 细菌腐朽对木材性质的影响	(183)
Chapter 10 Bacterial Degradation of Wood	
10.1 Bacteria Capable of Degrading Wood	(184)
10.2 Wetwood	(184)
10.3 Bacteria Degradation	(184)
10.4 Waterlogged Archaeological Wood	(185)
10.5 Effect on Wood Properties	(188)
参考文献 References	(189)
第11章 木材虫害	
11.1 为害木材的昆虫	(190)
11.2 等翅目白蚁	(190)
11.2.1 土白蚁	(191)
11.2.2 湿木白蚁	(192)
11.2.3 干木白蚁	(192)
11.3 鞘翅目	(193)
11.3.1 木粉蠹虫	(193)
11.3.2 天牛	(194)
11.3.3 吉丁虫	(195)
11.3.4 神食蠹虫	(195)
11.3.5 树皮蠹虫	(196)
11.4 膜翅目	(196)
11.5 鳞翅目	(197)
11.6 真菌与昆虫互相间的关系	(197)
11.7 海虫	(197)

Chapter 11 Insects

11.1 Wood – damaging Insects	(199)
11.2 Termites (Isoptera)	(199)
11.2.1 Subterranean Termites	(199)
11.2.2 Dampwood Termites	(201)
11.2.3 Drywood Termites	(201)
11.3 Coleoptera	(202)
11.3.1 Powderpost Beetles	(203)
11.3.2 Longhorn Beetles	(204)
11.3.3 Flat-headed Borers	(205)
11.3.4 Ambrosia Beetle	(205)
11.3.5 Bark Beetles	(206)
11.4 Hymenoptera	(206)
11.5 Lepidoptera	(207)
11.6 Interactions between Fungi and Insects	(208)
11.7 Marine Borers	(208)
参考文献 References	(209)

第12章 预防与预处理

12.1 材料选择和预防措施	(210)
12.1.1 木材的自然耐腐能力	(210)
12.1.2 木材虫菌害的预防措施	(211)
12.2 木材处理难易度	(211)
12.3 增进渗透度及处理度	(212)
12.4 预处理	(214)
12.4.1 制材及表面切割	(214)
12.4.2 干燥	(214)

Chapter 12 Prevention and Pre – treatments

12.1 Material Selection and Preventive Measures	(216)
12.1.1 Natural Durability	(216)
12.1.2 Preventive Measures	(217)
12.2 Treatability	(217)
12.3 Improving Permeability and Treatability	(219)
12.4 Pretreatments	(221)
12.4.1 Machining and incision	(221)
12.4.2 Drying	(221)
参考文献 Reference	(222)

第13章 木材防腐剂与防腐处理

13.1 防腐剂	(224)
----------------	-------

13.1.1 防腐油	(224)
13.1.2 油溶性防腐剂	(224)
13.1.3 水溶性防腐剂	(226)
13.2 防腐剂固着	(229)
13.3 新型防腐剂的评估	(230)
13.4 防腐处理	(230)
13.4.1 最低有效处理量	(230)
13.4.2 常压处理	(231)
13.4.3 加压注入	(231)
13.4.4 扩散法	(232)
13.4.5 复合材料防腐处理	(233)
13.5 防腐处理对木材性质的影响	(234)
13.6 研究与发展	(235)
13.6.1 处理方法	(235)
13.6.2 防腐剂	(235)
Chapter 13 Wood Preservatives and Treatments	
13.1 Wood Preservatives	(236)
13.1.1 Preservative Oils	(236)
13.1.2 Oil - borne Preservatives	(236)
13.1.3 Water - borne Preservatives	(239)
13.2 Fixation of Preservatives	(242)
13.3 Performance of Newer Preservative Formulations	(243)
13.4 Preservative Treatments	(244)
13.4.1 Threshold Retention	(244)
13.4.2 Non-pressurized Treatments	(244)
13.4.3 Pressurized Treating	(245)
13.4.4 Diffusion Treating	(246)
13.4.5 Preservative Treatments for Composite Panels	(247)
13.5 Effect of Treating on Wood Properties	(248)
13.6 Research and Development	(249)
13.6.1 Treating Methods	(249)
13.6.2 Preservatives	(249)
参考文献 References	(250)
第 14 章 非传统处理	
14.1 物理改性	(253)
14.2 化学处理	(254)
14.3 树脂处理	(256)
14.4 生物防治	(257)

Chapter 14 Non-conventional Treatments

14.1 Modification by Physical Methods	(258)
14.2 Chemical Modification	(259)
14.3 Resin Impregnation	(261)
14.4 Biological Controls	(262)
参考文献 References	(263)
索引 Index	(265)
著者简介	(273)

第 1 章

木材的形成

1.1 木质部细胞种类及形态概述

木质部里有多种不同形态和功能的细胞。阔叶树木质部里的细胞种类及其排列，比针叶树的复杂（见表 1—1），这些细胞在各树种木质部里的存缺及其排列都有一定的规律，某些规律可以用来鉴别树种。针叶材的管胞（tracheid）约占 95%，剩下的是薄壁细胞组织，包括木射线（rays）、纵向薄壁细胞及树脂道（resin canal）。阔叶材的薄壁细胞组织所占的体积可高达 30% 以上，例如栎木（*Quercus*）具有相当宽的木射线组织，泡桐材（*Paulownia*）则含有大量的纵向薄壁细胞。

表 1—1 针、阔叶树木质部细胞类别及其主要功能与形态

材种	方向	类别名称	功 能	主 要 形 态
针叶树	纵向	管胞（假导管） 薄壁细胞 上皮细胞	输送水分；机械支持 贮藏养分；造抽出物 分泌树脂	长（1.5~5.0） μm ；具有次生壁及重纹孔 上下串连；见于杉、柏科树种 形成纵向树脂沟；见于松科树种
	横向	髓线管胞 髓线薄壁细胞 上皮细胞	输送水分 贮藏养分；造抽出物 分泌树脂	具有次生壁及重纹孔 具有单纹孔；在某些树种具有次生壁 形成横向树脂道
阔叶树	纵向	导管管胞 导管状管胞 环管状管胞 纤维管胞 韧皮型纤维 薄壁细胞 上皮（泌脂）细胞	输送水分；机械支持 输送水分；机械支持 输送水分；机械支持 输送水分；机械支持 输送水分；机械支持 贮藏养分；造抽出物 分泌树脂	长（0.2~0.5） μm ；具有次生壁及重纹孔 短；形状规则；具有次生壁及重纹孔 短；形状不规则；具有次生壁及重纹孔 长（0.5~2.0） μm ；具有次生壁及重纹孔 长（0.5~2.0） μm ；具有次生壁及单纹孔 分为串连形及纺锤形两种 形成纵向树脂沟
	横向	木射线薄壁细胞 油细胞 上皮细胞	贮藏养分；造抽出物 分泌油脂 分泌树脂	分为横卧及直立两型；可具有次生壁 附于髓线组织，仅见于少数树种 形成纵向树脂沟

输导组织的细胞，包括针叶材的管胞和木射线管胞及阔叶材的导管管胞和各种纤维，都具有次生细胞壁（secondary wall）。有些树种的木射线细胞壁具有次生壁，但所有树材的纵向薄壁细胞及上皮细胞（又称泌脂细胞）仅有初生细胞壁（primary wall）。栎木的木射线细胞具有次生壁，虽含大量的木射线组织但并不影响木材的密度；泡桐材因含大量仅具初生壁的轴向薄壁细胞，所以木材密度很低。无论何种细胞，只要是活着，在该处受到机械损伤时，会反分化而产生愈伤组织（traumatic tissue）。油细胞是长在某些阔叶林木射线组织上下

两端的特殊薄壁细胞，它的功能是分泌对虫菌具有毒性的抽出物（extractives）。檫木（*Sassafras*）、桢楠（*Phoebe*）及柚木（*Tectona*）等都具有油细胞，因此这些材种都异常耐腐。有些阔叶树，如白栎木等的木射线细胞在其临死前，能够穿过纹孔长进邻近的导管，形成填充体（tyloses）。

细胞之间有纹孔相通，输导组织细胞壁除了阔叶材的韧皮型纤维之外都具有缘纹孔（bordered pit），薄壁细胞壁上的纹孔都是单纹孔（simple pit）。具有次生壁的细胞互相以重缘纹孔相通，输导组织细胞与薄壁细胞之间则以半缘纹孔（half-bordered pit）互相沟通。纹孔大都长在径向细胞壁上面，仅有极少数纹孔长在晚材的弦向细胞壁上。从径切面显微观察，针叶材的假导管与木射线细胞之间交会区（cross-field）的半缘纹孔的形态依材种而异，因此交会区纹孔的形态是鉴别针叶材种的重要依据。

1.2 木质部的生长

1.2.1 形成层（cambium）

针叶树与阔叶树树干的伸长是由尖端原生组织（apical meristem）负责，树干的直径增大则是由环绕整个树干的次生原生组织形成层执行。形成层里有两种原生细胞，纺锤原生细胞（fusiform initials）向内弦向分裂，形成各种木质部纵向细胞如导管、假导管及纵向薄壁细胞等，木射线原生细胞（ray initials）向内分裂形成木射线组织。形成层原生细胞向外分裂形成韧皮部及树皮；纺锤原生细胞向内弦向分裂之后，子细胞（daughter cells）又再分裂两次，产生四个子细胞。这些子细胞随即增长和分化，形成各种纵向细胞。纺锤原生细胞的向内弦向分裂使木质部不断地径向增厚，纺锤和木射线原生细胞也不时配合进行径向分裂，使树干或树枝的圆周也不断增大，造成树干直径的增大。

无论是在休眠或活动状态，针叶树的形成层都具有4~8层细胞^{1,2,3}。阔叶树活动期的形成层细胞的层数，比休眠期形成层细胞的层数多很多。例如，美国椴木（*Tilia americana*）的休眠期形成层，只有2~3层细胞，而活动期的形成层，却多达8~10层⁴。一般认为形成层原生细胞应该只有单层^{5,6}，可是原生细胞与子细胞不易以其细胞质内的有机体（organelles）的形态予以分辨，但原生细胞与子细胞可以根据径向细胞壁的厚度加以区别。子细胞的径向细胞壁，比弦向细胞壁厚一些，因为子细胞的径向细胞壁，含有多层初生细胞壁（primary wall）⁷。这种差别的原因是径向细胞壁原已有一层初生细胞壁，每次子细胞弦向分裂之后，在弦向的细胞板（cell plate）两面各添一层初生细胞壁，形成新的弦向细胞壁，但在原有的径向细胞壁上又加一层初生细胞壁。细胞经过多次分裂之后，径向细胞壁就有多层的初生细胞壁，而弦向细胞壁只含一层初生细胞壁。因此，原生细胞可以用只含单层径向初生细胞壁的特征予以分别^{2,6}。

1.2.2 子细胞直径增长

子细胞直径的增长，最先的变化是形成一或两个几乎充满整个细胞的大液泡（vacuole），把所有的细胞质挤得贴近细胞壁，造成由内向外的充胀压。增长区的细胞，因为内有充胀压，外有木质部和树皮的阻挡，承受相当大的压力，这个压力却是子细胞增长及分化的必要条件。分离出来的子细胞在培养基里，不但停止分化，反而进行反分化，长成一团愈合组织（callus）⁸。这种必要的压力条件，使细胞壁分化的活体外试验非常难做。大多数针叶树的假导管子细胞，起始的径向直径约为6 μm，扩张之后可达30 μm⁹，其弦向直径则不增长，因此针叶树木质部细胞的径向排列相当整齐。阔叶树分化成为纤维的子细胞，径向扩张到其直径约与弦向直径相同之后就停止扩张。分化成为导管的细胞则同时径向与弦向扩张，

弦向的扩张造成其邻近细胞的变形和不整齐的径向排列¹⁰。

1.2.3 子细胞伸长

针叶树假导管和阔叶树纤维的伸长由其两端以窜生生长 (intrusive growth) 方式进行¹¹。针叶树假导管的长度约可增加 5%~15%，阔叶树纤维的长度却可增加数倍，但导管的长度却不增加。图 1—1 是鱼鳞云杉 (*Picea Jezoensis*) 的径切片，显示其假导管仅在极终端窜生伸长，伸长的部分可由细胞壁开始逐渐变成斜尖之处到顶端来估计。图 1—2 是一个解离的核桃楸 (*Juglans mandshurica*) 纤维，由图可见该纤维在原来的终端开始变成斜尖，然后向两端又各增长了约 25% 的长度。由于细胞紧密的排列，针叶树的假导管仅能有限的窜生伸长，大约只伸长 5%~15%。阔叶树材纤维管胞的窜生伸长比例那么高，是因为导管直径的极度加大挤乱了细胞排列，制造出空间来让纤维管胞进行较大幅度的窜生伸长。

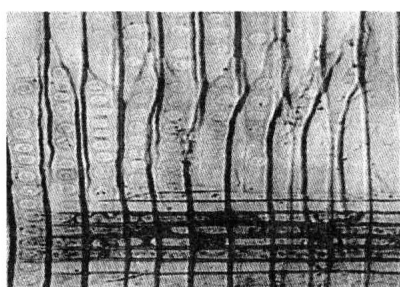


图 1—1 鱼鳞云杉假导管尾尖窜生伸长后的形状，伸长的部分仅为全长的小部分，对细胞在径向和弦向的整齐排列影响小

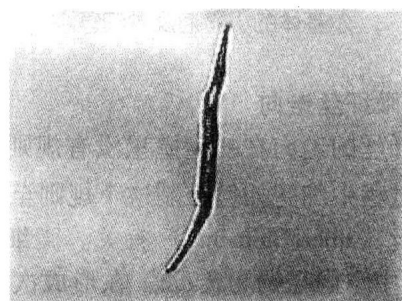


图 1—2 核桃楸纤维窜生伸长；两端开始变形处即以窜伸方式形成，约为原来长度 1 倍以上，造成阔叶树材细胞在径向及弦向的排列不整齐

1.2.4 细胞壁增厚

细胞壁增厚在子细胞最后一次分裂并完成初生细胞壁的形成后就开始添加次生细胞壁。细胞壁增厚的方式是在初生细胞壁上面逐层添加微纤丝 (microfibrils) 和半纤维素，其程序是从中段部分逐渐向两头进行，先一层微纤丝和半纤维素还没有到达尖端，新的一层又从中间部分开始进行¹²。下列诸项证据显示，细胞壁的增厚是在细胞壁与细胞膜 (plasma membrane 或 plasmalemma) 的接口进行。

(1) 在细胞质里从未发现有高分子的葡萄糖聚合体，而仅有核酸葡萄糖 (UDP-Glucose)。

(2) 休眠中的细胞的细胞膜表面平滑而且不经常紧贴细胞壁，而分化中细胞的细胞膜紧贴细胞壁并有无数的褶皱 (如图 1—3)。

(3) 源自内网状体 (endoplasmic reticulum) 和高尔基体的小囊泡不断融入细胞膜。

(4) 与细胞壁紧贴的细胞膜表面上有无数有组织的及零散的粒状体，而且有新形成的微纤丝直接连在有组织的粒状体上面 (如图 1—4)¹³。

根据 Muhlethaler¹³ 的说法，细胞膜里有组织的粒状体负责组编微纤丝，零散的粒状体则负责半纤维素的制造。微纤丝的结晶区 (crystalline region) 里纤维素排列紧密，半纤维素只能分布在非结晶区 (amorphous region) 里面及附着在微纤丝的表面，半纤维素还会扩散到已形成的次生壁的空隙里面¹⁴。