



木结构设计理论与实践丛书

DESIGN METHODS AND PROJECTS OF MULTI-STORY
TIMBER AND HYBRID TIMBER STRUCTURES

多层木结构及木混合结构 设计原理与工程案例

何敏娟 倪 春 著

中国建筑工业出版社

非外借

木结构设计理论与实践丛书

多层木结构及木混合结构 设计原理与工程案例

何敏娟 倪 春 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多层木结构及木混合结构设计原理与工程案例/何敏娟, 倪春著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 10

(木结构设计理论与实践丛书)

ISBN 978-7-112-22409-8

I. ①多… II. ①何…②倪… III. ①多层结构-木结构-结构设计-研究②钢结构-木结构-混合-结构设计-研究 IV. ①TU366.2
②TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 145974 号

本书系统介绍了各类多层木结构和木混合结构的体系构成、材料性能、荷载特点、传力路径、结构分析方法、设计特点以及相应的构造要求等。具体结构体系包括: 轻型木结构、胶合木框架结构、正交胶合木 (CLT) 结构、轻型木结构与钢筋混凝土结构的上下混合体系、轻型木结构与钢筋混凝土框架的同层混合体系、轻型木结构与钢框架的同层混合体系等多种结构体系。本书着眼于工程应用, 通过每种结构形式的具体案例分析, 展示了相应结构体系的设计方法。

本书可供从事多高层木结构设计、施工和工程管理等工程技术人员参考, 也可作为高等院校学生的学习参考书。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任校对: 王雪竹

木结构设计理论与实践丛书

多层木结构及木混合结构设计原理与工程案例

何敏娟 倪 春 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{3}{4}$ 字数: 437 千字

2018 年 11 月第一版 2018 年 11 月第一次印刷

定价: 59.00 元

ISBN 978-7-112-22409-8

(32282)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

木结构是中国的一种传统结构形式，具有几千年的历史。一些著名的木结构历史建筑如位于山西的应县木塔，历经近千年风霜，仍屹立于中国大地。近年来，随着我国对建筑业可持续发展、推行绿色施工等问题的重视，木结构因利用可再生木材资源、装配化程度高等特点受到业内的重视。近两年，国务院、住房和城乡建设部及地方政府等连续颁发文件，鼓励有条件情况下应用木结构。

国外对现代木结构材料、结构形式、结构性能等研究深入，木结构建设规模不断向大跨、高层发展，近年建起了不少十层以上的木结构建筑，2016年高达53m的18层木结构在加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）结构封顶，不久24层的木结构有望在维也纳落成。我国人口众多、城市建设用地有限，多高层木结构也是我们期待的一种绿色、装配化建筑形式。虽然中国超高层建筑数量已达全球第一，有着丰富的设计和建造经验，但木结构不同于钢筋混凝土结构和钢结构，无论是结构体系，还是构造方式等都有其特殊性，而目前由于我国木结构设计资料和建筑工程案例缺乏，设计师往往觉得设计时力学模型和相关参数等不易确定、较难马上开展设计工作。基于近年来国内外工程案例分析及木结构和木混合结构方面的研究成果，编写《多层木结构及木混合结构设计原理与工程案例》，以期对投资方进行工程决策、设计师进行工程设计、管理部门进行工程审批，以及相关工程技术人员从事项目建设与管理等都有所帮助。

本书共分七章，内容包括木结构特点与材料性能，多层轻型木结构、多层胶合木框架结构、多层正交层板胶合木结构、多层轻型木结构与混凝土上下混合结构、多层轻木-混凝土框架混合结构和多层轻木-钢框架混合结构等多种结构形式的特点、设计原理、设计方法以及设计案例。本书由同济大学何敏娟教授、加拿大林业创新研究院倪春研究员合作编著，编著过程中得到团队许多同事和研究生们的帮助，很多内容源于团队研究生近年来的研究成果。同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司的孙永良高工、何桂荣工程师参加了本书第二、第三章的编写，同济大学研究生罗晶、韩倩文、王佳瑶、王希珺等分别参加了第四、第五、第六、第七章等内容的整理，苏州昆仑绿建的周金将先生提供了实际工程——御玲珑项目的案例分析，在此一并表示感谢。本书出版得到加拿大木业协会的经费支持，也表示衷心的感谢。限于作者时间和水平有限，书中谬误之处在所难免，敬请读者指正。

目 录

第一章 概述	1
第一节 木结构特点	1
第二节 木结构材料	2
第三节 多层木结构及木混合结构研究进展	17
第四节 多层木结构及木混合结构的结构体系	22
第五节 多层木结构及木混合结构设计的相关问题	27
参考文献	27
第二章 多层轻型木结构设计及案例	31
第一节 结构体系与材料	31
第二节 荷载特点与传力路径	34
第三节 设计方法与要求	35
第四节 构造特点与要求	45
第五节 案例分析——向峨小学宿舍楼	55
附录 轻型木结构的有关要求	76
第三章 多层胶合木框架结构设计及案例	79
第一节 结构体系与材料	79
第二节 荷载特点与传力路径	85
第三节 设计指标与分析方法	85
第四节 构造特点与要求	93
第五节 案例设计——大庆金融产业园木结构	98
参考文献	117
第四章 多层 CLT 结构设计及案例	118
第一节 结构体系与材料	118
第二节 荷载特点与传力路径	126
第三节 设计假定、设计内容与设计方法	129
第四节 节点构造特点与要求	139
第五节 伦敦 Stadthaus 案例介绍	149
参考文献	155
第五章 多层轻型木结构与混凝土上下混合结构的设计及案例	158
第一节 结构体系	158
第二节 结构抗震性能	160
第三节 设计假定与分析方法	167
第四节 构造特点与要求	179

第五节 案例设计——成都青白江小学（部分） 179

参考文献 194

第六章 多层轻木-混凝土框架混合体系的结构设计及案例 196

第一节 结构体系与材料 196

第二节 荷载特点与传力路径 196

第三节 试验与理论研究 197

第四节 设计假定、设计指标与分析方法 221

第五节 构造特点与要求 223

第六节 案例分析——六层轻木-混凝土框架混合结构 224

参考文献 241

第七章 多层轻木-钢框架混合体系的结构设计及案例 242

第一节 结构体系与受力特点 242

第二节 构造特点 245

第三节 设计要求和设计方法 250

第四节 案例设计——实验用四层轻木-钢框架混合结构 256

附录 结构建模方法 269

参考文献 274

第一章 概 述

第一节 木结构特点

木结构是指以木材为主要受力体系的工程结构。木混合结构则指以木材与其他建筑材料共同形成受力体系的结构工程，本书所述木混合结构有别于只将木材作为填充墙体（不起结构作用）、受力体系由其他材料形成的结构。木结构及木混合结构在房屋建筑、桥梁、道路等方面都有应用。在房屋建筑方面，木结构及木混合结构除大量用于住宅、学校和办公楼等中低层建筑之外，也大量存在于大跨度建筑，如体育场、机场、展览馆、图书馆、会议中心、商场和厂房等；本书主要涉及用于住宅、学校、办公楼等多层木及木混合结构的设计原理及工程案例。与其他材料建造的结构相比，木结构具有资源再生、绿色环保、保温隔热、轻质、美观、建造方便、装配化程度高、抗震和耐久等许多优点。

(1) 木材资源最可再生。木材依靠太阳能而周期性地自然生长，只要合理种植、开采，相对于其他建筑材料如砖石、混凝土和钢材等，木材最易再生产，一般周期为 50~100 年；随着林业、木材加工业的发展，很多速生材也可用于建筑结构中，这样大大缩短林业资源的再生产周期。

(2) 木材是一种绿色环保材料。对分别以木材、钢材和混凝土为主要结构材料的面积约 200m² 的一幢住宅建筑进行比较，结果表明：木结构建筑耗能、二氧化碳排放、对空气和水的污染、生态资源耗用都是最低的；木材工业发展虽损失大片林区，但这一影响只是短暂的，树木再植、森林资源的可持续管理将生态资源影响降低到最低程度。因此，综合考虑各种因素，木材最为绿色环保。

(3) 木结构建筑美观。木结构建筑的纹理自然，与人有很强的亲和力。住在木结构的建筑中使人有一种回归自然的感觉。

(4) 木结构可降低软土地区的基础造价。木材密度比传统建筑材料都小。木材的强度与荷载作用方式、荷载与木纹的方向等因素有关，但只要设计合理，木材的顺纹抗压、抗弯强度还是比较高的。因此，木结构建筑总体上自重较轻，可以降低软土地区的基础造价。

(5) 木结构建筑具有较好的抗震性能。结构物上的地震作用与结构质量有关，木结构质量轻，产生的地震作用当然也小；同时，由于木结构质量轻，地震致使房屋倒塌时对人产生的伤害也会小一些。另外，木结构的整体结构体系一般具有较好的塑性、韧性，因此在国内外历次强震中，木结构都表现出较好的抗震性能。

(6) 木结构建筑装配化程度高。木材加工容易，可锯切成各种形状；木构件、木部件可在工厂预制，运到现场组装，使木结构建造作业面多、施工周期短，现场只是通过螺栓等连接件进行组装，湿作业少、施工污染少，装配化程度高，有利于推动绿色施工。对于运输条件好、设计合理的建筑，甚至可分段预制、整幢预制，现场只要节段拼装或整体连于基础，装配化程度非常高。

(7) 木结构具有一定的耐久性。如果木结构设计合理, 具有较好的防潮构造、合理的防火措施, 则也有很好的耐久性。如现存的我国五台山南禅寺大殿和佛光寺大殿都已有 1200 年左右的历史。挪威一座建于 12 世纪的木结构教堂, 由于其出色的设计和精心的保养, 历经 800 年的风雨依然完好如初。无数北美和欧洲的 19 世纪建造的木结构建筑物, 都证明了木结构能够经受得起时间的考验。

但是木结构也有一些缺点, 这些缺点有时会影响木结构的应用, 因此需合理设计, 避免这些缺点对建筑物使用的影响。

(1) 木材各向异性。树木自然生长, 断面上有显示生长周期的年轮; 树木沿纵向随其纤维长度的生长而增高。因此从外观上看, 木材沿纵向、横向完全不同, 而从力学性能上说为各向异性体。木材强度按作用力性质、作用力方向与木纹方向的关系一般可分为: 顺纹抗压、横纹抗压、斜纹抗压、顺纹抗拉、横纹抗拉、抗弯、顺纹抗剪、横纹抗剪、抗扭等, 各种强度差别相当大, 其中顺纹抗压、抗弯的强度较高。因此, 木结构设计最好尽可能使构件承受压力, 避免承受拉力, 尤其要避免横纹受拉。

(2) 木材容易腐蚀。木材腐蚀主要是由附着于木材上的木腐菌的生长和传播引起, 但木腐菌生长需要有一定的温度、湿度条件。木腐菌最适宜的生长温度约为 20°C , 这也是人类生活的舒适温度, 因此控制湿度是阻止木腐菌生长的唯一办法。使用干燥的木材, 做好建筑物的通风、防潮, 都是避免木材腐蚀的有效措施; 当然长期可能受到潮气侵入的地方, 如与基础连接的木构件、直接暴露于风雨中的构件等, 可采用具有天然防腐性的木材或对木材进行防腐蚀处理。

(3) 木材易于受虫害侵蚀。侵害木材的虫类很多, 如白蚁、甲虫等, 品种因地而异。切实做好木材防潮是减少或避免虫害的主要措施; 在房屋建造前, 对建房场地及四周土壤清理树根、腐木, 设置土壤化学屏障等也是预防虫害的一种措施; 木结构一旦遭受虫害, 需及时用药物处理。

(4) 木材易于燃烧。对于房屋的使用者而言, 火灾是随时存在的危险, 但研究和事实表明: 房屋的防火安全性与建筑物使用的结构材料的可燃性之间并无太多关联, 很大程度上取决于使用者对火灾的防范意识、室内装饰材料的可燃性以及防火措施的得当与否。因此, 木结构须按防火规范做好防火设计, 合适的防火间距、安全疏散通道、烟感报警装置的设置等都是防止火灾发生的必要措施。

第二节 木结构材料

一、木材的树种

木材可分为两类: 针叶材和阔叶材。针叶材一般质地较软, 又称为软木; 而阔叶材一般质地较硬, 所以又称硬木, 见图 1-1。结构中的承重构件大多采用针叶材。针叶材一般为四季常青, 而阔叶材秋冬季会落叶。其实, 软木(针叶材)并非强度一定比硬木(阔叶材)低, 有些软木的强度比一些硬木强度还高。但是硬木的木纹不像软木那样平直、有规律, 而木材加工时沿着木纹取材、刨光者较多, 因此硬木加工较困难, 感觉很硬, 而使用时因木纹方向变化较大使得强度离散性很大, 所以硬木用作结构材较少。

截至 2015 年年底，我国森林面积达 2.08 亿公顷，居世界第 5 位，森林覆盖率达 21.66%；我国森林资源呈总量持续增长、质量不断提高、天然林稳步增长、人工林快速发展的特点。但是我国森林覆盖率仍远低于全球 31% 的平均水平，人均森林面积仅为世界人均水平的 1/4；森林总量相对不足、质量不高、分布不均，因此目前还是大量通过进口来满足国内木材需求。

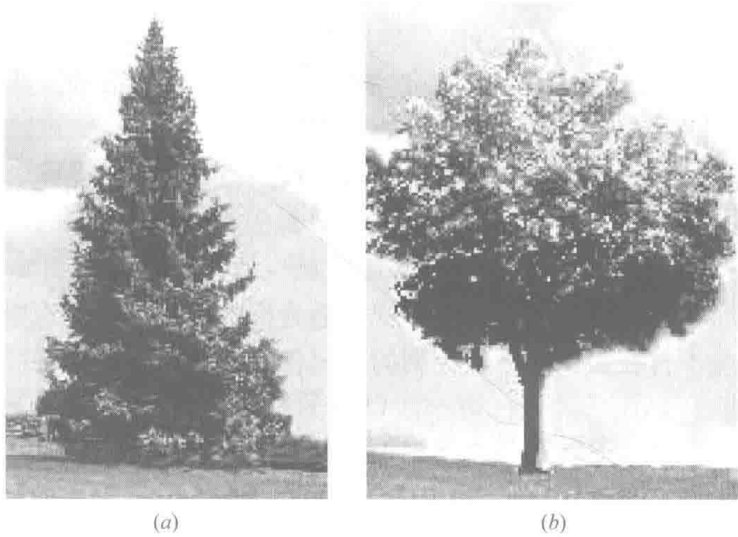


图 1-1 树种
(a) 针叶材；(b) 阔叶材

我国各地区可供选用的常用树种有：

- (1) 黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古：红松、松木、落叶松、杨木、云杉、冷杉、水曲柳、桦木、槲栎、榆木。
- (2) 河北、山东、河南、山西：落叶松、云杉、冷杉、松木、华山松、槐树、刺槐、柳木、杨木、臭椿、桦木、榆木、水曲柳、槲栎。
- (3) 陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆：华山松、松木、落叶松、铁杉、云杉、冷杉、榆木、杨木、桦木、臭椿。
- (4) 广东、广西：杉木、松木、陆均松、鸡毛松、罗汉松、铁杉、白栎、红栎、红锥、黄锥、白锥、檫木、山枣、紫树、红桉、白桉、拟赤杨、木麻黄、乌墨、油楠。
- (5) 湖南、湖北、安徽、江西、福建、江苏、浙江：杉木、松木、油杉、柳杉、红栎、白栎、红锥、白锥、栗木、杨木、檫木、枫香、荷木、拟赤杨。
- (6) 四川、云南、贵州、西藏：杉木、云杉、冷杉、红杉、铁杉、松木、柏木、红锥、黄锥、白锥、红桉、白桉、桉木、木莲、荷木、榆木、檫木、拟赤杨。
- (7) 台湾：杉木、松木、台湾杉、扁柏、铁杉。

此外，各地往往对同一树种有不同的称呼。

目前可供建筑使用的常用进口树种有：

- (1) 北美：花旗松、北美黄杉、粗皮落叶松、加州红冷杉、巨冷杉、大冷杉、太平洋银冷杉、西部铁杉、白冷杉、太平洋冷杉、东部铁杉、火炬松、长叶松、短叶松、湿地松、落基山冷杉、香脂冷杉、黑云杉、北美山地云杉、北美短尾松、扭叶松、红果云杉、

白云杉。

- (2) 欧洲：欧洲赤松、落叶松、欧洲云杉。
 - (3) 新西兰：新西兰辐射松。
 - (4) 俄罗斯：西伯利亚落叶松、兴安落叶松、俄罗斯红松、水曲柳、栎木、大叶槲、小叶槲。
 - (5) 东南亚：门格里斯木、卡普木、沉水稍、克隆木、黄梅兰蒂、梅灌瓦木、深红梅兰蒂、浅红梅兰蒂、白梅兰蒂。
 - (6) 其他国家：辐射松、绿心木、紫心木、李叶豆、塔特布木、达荷玛木、萨佩莱木、苦油树、毛罗藤黄、红劳罗木、巴西红厚壳木。
- 国内在用的进口树种也不仅限于上述，很难一一列举。

二、木材的构造

木材的构造分宏观构造和微观构造。宏观构造为肉眼或放大镜下观察到的木材构造及其特征；微观构造是木材在显微镜下观察到的木材各组成分子的细微特征及其相互联系。

(一) 宏观构造

1. 木材三向特征

木材特征沿三个方向不同，此三向为：纵向（longitudinal，简记为 L），径向（radial，简记为 R）和切向（tangential，简记为 T）。木材在不同方向上的分子特征不同，其物理性质、力学强度也因此不同。木材三个方向见图 1-2。纵向是沿着木纹生长的长度方向；径向和切向均垂直于木纹长度方向，径向为沿着横截面的半径方向，切向为沿着横截面的切线方向。

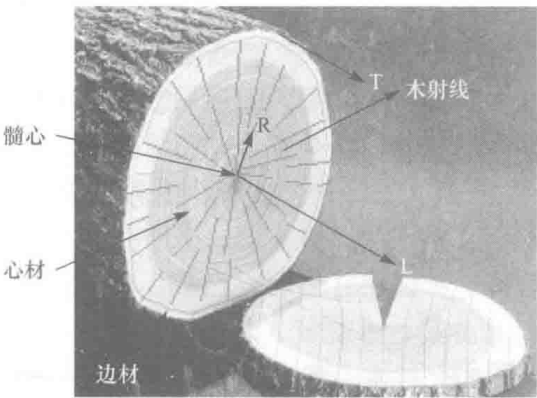


图 1-2 木材宏观构造

2. 边材和心材

边材是指在存活树木中含有活细胞及储存物质的木材部分，位于树皮内侧并靠近树皮处，边材材色一般较浅，含水率一般较大；心材是指在存活树木中不包含活细胞，位于边材里面的木材，一般颜色较深。树横断面中心部位称为髓心，髓心为第一年的初生木质，常为褐色或淡褐色，髓心质地较软、强度低、易开裂，在工程木材加工时，往往去除髓心。心材、边材、髓心的位置也见图 1-2。

有些树种，心材和边材区别显著，如马尾松、云南松、麻栎、刺槐、榆木等，称为心材树种。有的树种，木材外部和内部材色一致，但内部的水分较少，称为熟材树种或隐心材树种，如冷杉、云杉等。有的树种，外部和内部既没有颜色上的差异，也没有含水量的差别，称为边材树种，如桦木、杨树等。

心材是由边材转变而成的。心材密度一般较大，材质较硬，天然耐腐蚀性也较高。

3. 年轮、早材和晚材

年轮：指一年内木材的生长层，在横断面上围绕髓心呈环状。年轮在许多针叶材中明显，见图 1-3。在热带、亚热带，树木的生长期与雨季、旱季的季节相适应，因此一年内

能形成数个年轮；而在温带、寒带，树木的生长期则与一年相符，一年形成一轮，因此通称年轮。

早材：指一个年轮中，靠近髓心部分的木材。在明显的树种中，早材的材色较浅，一般材质较松软、细胞腔较大、细胞壁较薄、密度和强度都较低。

晚材：指一个年轮中，靠近树皮部分的木材。材色较深，一般材质较坚硬、结构较紧密、细胞腔较小、细胞壁较厚、密度和强度都较高。

在年轮明显的树种中，一个年轮内从早材过渡到晚材，有渐变的，也有急变的。渐变者为年轮中早材、晚材界限不明显，从早材到晚材颜色逐渐由浅变深；急变者为年轮中早材、晚材界限明显，从早材到晚材颜色突变。

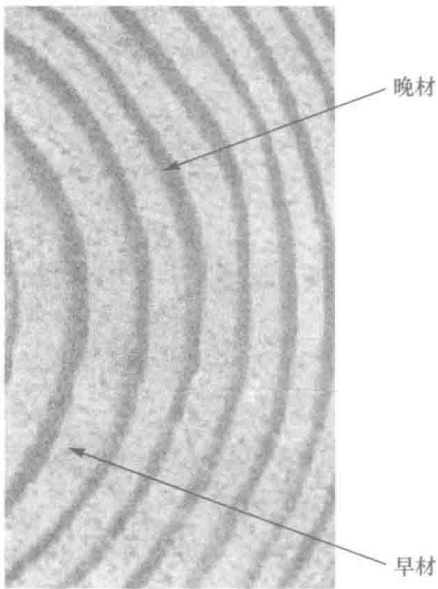


图 1-3 年轮

4. 木射线

木射线为从髓心到树皮连续或断续穿过整个年轮的、呈辐射状的条纹，仍可见图 1-2。木射线在树木生长过程中起横向输送和储藏养分的作用。木材干燥时，常沿木射线开裂。木射线有利于防腐剂的横向渗透。

(二) 微观构造

1. 木材的细胞组成

针叶树材的细胞组成简单、排列规则，因此材质均匀，主要分子组织为轴向管胞、木射线、薄壁组织及树脂道等。轴向管胞占总体积的 90% 以上，是决定针叶树材料物理力学性能的主要因素。木射线约占 7%。管胞的形状细长，两端呈尖削状，平均长度为 3~5mm，其长度为宽度的 75~200 倍。早材管胞细胞壁薄而腔大呈正方形；晚材管胞细胞壁比早材厚约一倍而腔小呈矩形。

阔叶树材的组成分子包括木纤维、导管分子、木射线和轴向薄壁组织细胞等。其中以木纤维为主，占总体积的 50%，是一种厚壁细胞，它是决定阔叶树材物理力学性能的主要因素；导管分子是一串连轴向细胞末端顺纹相连组成的管状组织，约占总体积的 20%，在树木中起输导作用；木射线约占 17%；轴向薄壁组织细胞约占 13%。阔叶树材组成复杂、排列不整齐、木射线全由薄壁细胞组成，轴向薄壁组织发达，材质不均匀。

2. 木材细胞壁的纹孔

木材细胞壁上有不少纹孔。这是轴向细胞之间、轴向细胞与横向木射线细胞之间水分和养分的通道；也是木材干燥、防腐药剂处理及胶合时，水分、药剂及胶料渗透的通道。

3. 木材细胞的成分

木材细胞的主要成分为纤维素、木素和半纤维素。其中以纤维素为主，在针叶树材中约占 53%。纤维素的化学性质很稳定，不溶于水和有机溶剂，弱碱对纤维素几乎不起作用。这就是木材本身化学性质稳定的原因。

针叶树材的木素含量约为 25%，半纤维素含量约为 22%。它们的化学稳定性较低。阔叶树材的纤维素和木素含量较少，而半纤维素较多。

木材细胞基本元素的平均含量几乎与树种无关，其中碳约 49.5%，氢约 6.3%，氧约

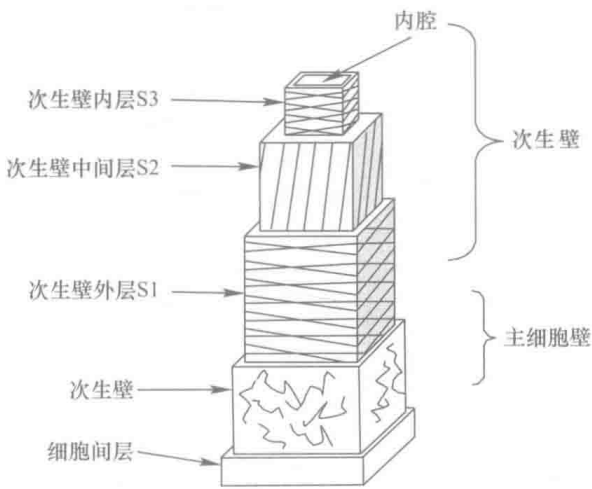


图 1-4 细胞简图

44.1%，氮约 0.1%。

4. 木材细胞壁的构造

纤维素分子能聚集成束，形成细胞壁的骨架，而木素和半纤维素包围在纤维素外边。图 1-4 为一个细胞的简图。细胞壁本身分成主细胞壁和次生壁。次生壁进一步分成三层：S1、S2 和 S3，细胞壁主体为厚度最大的次生壁中层 S2，该层微细纤维紧密靠拢，排列方向与轴线间成 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 角，这就是木材各向异性的根本原因。其他各层尽管与轴向夹角较大，但因厚度较小，对木材强度不起控制作用。

三、木材缺陷

木材主要缺陷有木节、斜纹、髓心、裂缝、变色及腐朽，这些都会降低木材利用价值，影响材料的受力性能。

木节为树干上分枝生长而形成，木节周边会形成涡纹，因此木节与周围纤维的联系较弱。外观尺寸相同的木节随在材料上的位置不同而对材料性能产生不同的影响。

斜纹有天然和人为之分。天然斜纹在木材生长过程中产生，人为斜纹是锯面与木纹方向不平行而引起。木纹较斜、木构件含水率较高时，干燥过程会产生扭翘变形和斜裂纹，从而对构件受力不利。

髓心如前所述，其组织松软、强度低、易开裂，因此对受力要求较高的构件应避免用髓心部位的材料。

裂缝是木材受外力作用，或随温度、湿度变化而产生的木材纤维间的脱离现象，裂缝既影响外观又影响受力性能。

变色是由木材的变色菌侵入木材后引起的，由于菌丝的颜色及所分泌的色素不同，有青变（青皮、蓝变色）及红斑等；如云南松、马尾松很容易引起青变，而杨树、桦木、铁杉则常有红斑。变色菌主要在边材的薄壁细胞中，依靠内含物生活，而不破坏木材的细胞壁，因此被侵染的木材，其物理力学性能几乎没有太大改变。一般除有特殊要求者外，均不对变色加以限制。

木腐菌在木材中由菌丝分泌酵素，破坏细胞壁，引起木材腐朽，使木材材质变得很松软或成粉末，降低木材强度。

四、木材的受力性能

木材是一种自然生长的材料，其受力性能受树木生长速度、生长条件、树种、材料含水率以及缺陷等许多因素的影响。如前所述，树木生长有年轮；木材力学性能沿纵向、横向完全不同，为各向异性体。这些都会影响木材强度。

木材强度按作用力性质以及作用力方向与木纹方向的关系一般可分为：顺纹抗拉、顺纹抗压、抗弯、顺纹抗剪及横纹承压等几类。其他形式受力如横纹抗拉等因强度太低，应

尽可能避免,规范也不给出相应的强度设计值。

1. 顺纹抗拉强度

木材顺纹受拉的应力-应变曲线接近于直线,因此木材受拉破坏前并无明显的塑性变形阶段,表现为脆性破坏。木材顺纹抗拉强度极限较高,但木材横纹抗拉强度很低,一般为顺纹抗拉强度的 $1/40 \sim 1/10$ 。因此,在受力构件中不允许木材横纹受拉。

木材缺陷对顺纹抗拉强度的影响很大。有斜纹时,由于木纹方向与拉力方向不一致,产生横纹方向的分力,而使受拉构件的强度降低,木纹斜率越大,降低也越多。干缩裂缝沿斜率较大的木纹开展时,对受拉构件的危害极大,甚至导致断裂。因此对受拉构件应严格限制木纹的斜率。

木节对受拉构件承载能力的影响也很大。木节与周围木质之间的联系很差,削弱了截面并使截面偏心受力;木节旁存在涡纹,使该处形成斜纹受拉;木节边缘产生局部的应力集中,由于木材受拉工作的脆性特点,这种应力集中一直到破坏得不到缓和。木节对强度的影响不但与木节的尺寸有关,且与木节在构件截面上的位置也有关系。位于边缘部分的木节影响最大,试验表明:当木节的尺寸等于构件宽度的 $1/4$,且位于边缘部分,构件的承载能力只相当于同样尺寸无节试件的 $30\% \sim 40\%$ 。这说明在选择拉杆木材时严格限制木节尺寸的重要性。具有相同净截面面积的情况下,有缺孔等局部削弱的拉杆的承载能力,要比没有削弱时为低;因为削弱后的孔边会出现应力集中现象。

2. 顺纹抗压强度

木材顺纹受压破坏时,纤维失稳而屈曲。木材顺纹受压和受拉相比,受压时木材具有较好的塑性。正由于这种性质,能使局部的应力集中逐渐趋于和缓,所以在受压构件中通常可不考虑应力集中的不利影响。木节的影响也远小于受拉。例如,当木节尺寸为构件宽度的 $1/3$,且位于边缘部分时,构件的承载能力为同样尺寸无节试件的 $60\% \sim 70\%$ 。斜纹的影响也小得多。裂缝在轴心受压时几无影响。因此,木构件的受压工作要比受拉工作可靠得多。

3. 抗弯强度

木材的抗弯强度极限介于抗拉和抗压强度极限之间。由于木材受弯时既有受压区又有受拉区,因此木节和斜纹对强度的影响介于受压和受拉之间。当木节直径之和占宽度的 $1/3$ 时,其强度为无节试件的 $45\% \sim 50\%$ 。木节对原木受弯构件的影响小于锯材,因为锯材边缘的纤维被切断,节旁斜纹在受弯时会劈开,而原木无此等现象。故木节尺寸达到上述程度时,原木的强度能达到无节试件的 $60\% \sim 80\%$ 。

4. 承压强度

连接处常常为木材承压受力。按承压受力方向与木纹所成角度的不同,可分为顺纹、横纹和斜纹三种情况,见图 1-5,顺纹承压强度稍小于顺纹抗压强度,这是因为承压面不可能完全平整所致。但差别很小,故规范中对顺纹抗压强度设计值和顺纹承压强度设计值不作区别。

木材横纹承压在开始时是细胞壁的弹性压缩阶段,当应力超过比例极限以后细胞壁失去稳定,细胞腔被压扁,这时荷载虽然增加很少,但变形却增长很快。最后,当所有的细胞腔压扁以后,其变形逐渐减少,而应力急剧上升,直到无法加压为止。木材横纹承压变形较大,在实际使用中不希望在构件的连接处产生过大的局部变形,因此,一般由比例极限确定木材横纹承压强度。

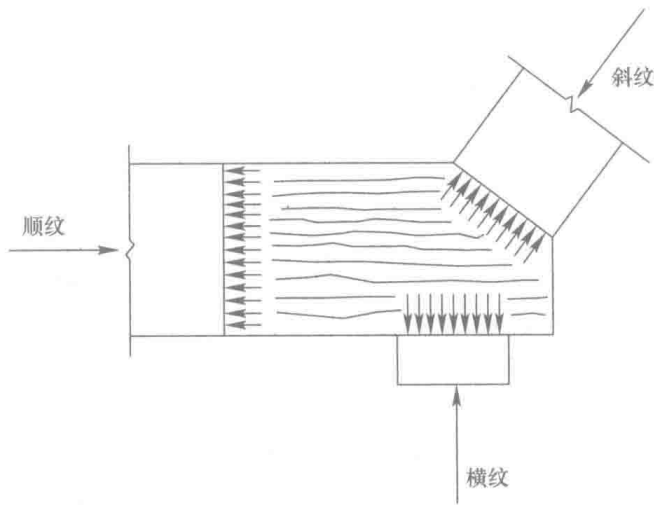


图 1-5 木材承压的三种方向

在横纹承压中，又可分为全表面承压，见图 1-6 (a)，以及局部表面承压，见图 1-6 (b)、(c)。

横纹全表面承压的强度几乎与承压面的尺寸无关。

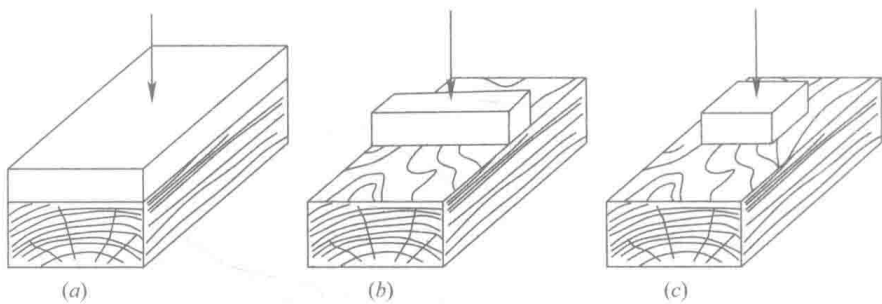


图 1-6 木材横纹承压几种不同情况

(a) 全表面承压；(b) 局部长度承压；(c) 局部长度和宽度承压

局部长度承压时，见图 1-6 (b)，不但压块下面一定深度的木材纤维参加承压工作，在压块两端一定范围内的木材纤维也参加工作，但它们是处于受弯和受拉状态，见图 1-7 (a)。由于压块两端范围内木材纤维的支持，局部长度承压强度高于全表面承压。

横纹承压强度值与承压面长度 l_a 和非承压面自由长度 l_c 的比值有关。当 $\frac{l_c}{l_a}=0$ 时，即为全表面承压，此时强度最低；当 $\frac{l_c}{l_a}$ 很小时，非抵承端部可能出现横纹撕裂现象，如图 1-7 (b)；只有当 $\frac{l_c}{l_a}$ 足够大时，才能考虑横纹承压强度的提高，当 $\frac{l_c}{l_a}=1$ ，且 $l_a \leq h$ 时，局部承压强度几乎达到最大值，以后再增加 $\frac{l_c}{l_a}$ 比值，强度几乎不再提高。

当长度方向和宽度方向都局部承压时，见图 1-6 (c)，由于木材纤维横向的联系很弱，其强度与局部长度承压相差甚微。

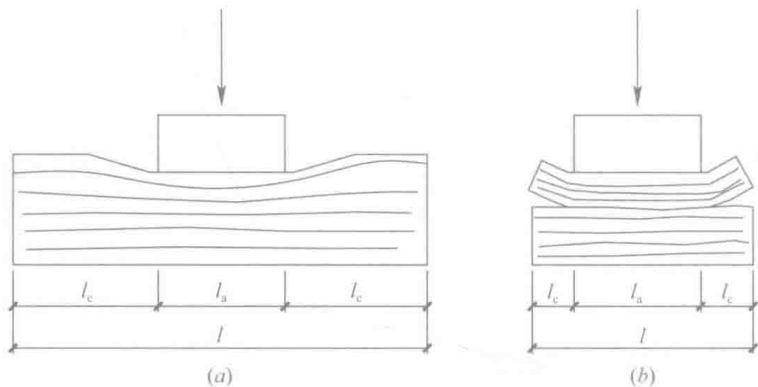


图 1-7 横纹局部长度承压时两端非抵承面木材纤维的工作情况
(a) 非抵承面较长时；(b) 非抵承面很短时

5. 抗剪强度

木材受剪破坏时变形很小，达到强度极限时突然破坏，表现为脆性特点。木材抗剪强度很低，应尽可能避免。

6. 受拉、受压、受剪及弯曲弹性模量

木材顺纹受压和顺纹受拉弹性模量基本相等，记作 E_L 。横纹弹性模量分为径向 E_R 和切向 E_T ，它们与顺纹弹性模量的比值随木材的树种不同而变化，当缺乏试验数据时，可以近似取： $\frac{E_T}{E_L} \approx 0.05$ ， $\frac{E_R}{E_L} \approx 0.1$ 。木材顺纹弹性模量近似地比木材静力弯曲弹性模量提高 10%。

木材受剪弹性模量 G （也称剪变模量），随产生剪切变形的方向而变化。 G_{LT} 表示变形发生在沿木材纵向和横断面切向所组成的平面内的剪变模量； G_{LR} 表示变形发生在沿木材纵向和横断面径向所组成的平面内的剪变模量； G_{RT} 表示变形发生在横断面内的剪变模量。木材剪变模量也随树种、木材密度等因素变化，具有近似关系式： $\frac{G_{LT}}{E_L} \approx 0.06$ ， $\frac{G_{LR}}{E_L} \approx 0.075$ 和 $\frac{G_{RT}}{E_L} \approx 0.018$ 。

五、木结构材料的种类

结构用木材按照其加工方式不同，主要分三大类：原木、锯材和胶合材。

原木为伐倒的树干经打枝和造材加工而成的木段。

锯材为原木经切割加工而成的成品材或半成品材，按其断面尺度不同分为方木、板材和规格材。随着木材加工技术的发展，锯材生产过程的自动化程度不断提高，通过计算机控制，对断面进行最优分割，从而最大程度地利用原材料，生产出各种截面的锯材，提高生产效率和原材料利用率。

胶合木为以木材为原料通过施压胶合，制成的各种矩形截面构件和板材的总称。胶合木由于在加工过程中所用单块原材料较薄或较小，所以容易去除木材本身的缺陷，从而材质较为均匀、强度和可靠度都比同样尺寸的锯材高，同时材料利用率也较高。

木结构中除上述三类结构木材外，还有一些用木材制作而成的工程构件，如轻型木桁

架、“工”字木等。现代木结构中，锯材、胶合木和工程构件应用广泛，下面分类作一详细介绍。

1. 原木

原木为伐倒的树干，经打枝、去皮制作后可直接用作结构的构件。原木用作结构构件时往往要求很高，整根构件长度大、直径变化小、外观好、缺陷少，因此这样的建筑往往造价很高，且不利于充分利用原材料。国内的一些历史建筑很多用原木作结构的柱子，20世纪农村住宅常常以原木作梁，并以梁的直径作为财富的象征；国内外目前仍在建造一些原木建筑，但造价相当昂贵、数量也不多。

2. 锯材 (Sawn Timber)

如上所述，锯材分方木、板材和规格材。

(1) 方木 (Square Timber)

方木指从原木经直角锯切得到的、宽厚比小于3的、截面为矩形或方形的锯材，常用作建筑物的梁和柱。一般方木的最小截面尺寸为 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ ，最大截面尺寸可达到 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 左右。截面尺寸越大，要求原木直径越大，材料越难得到。因此较易得到的方木截面尺寸一般在 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ 以下，长度约9m。对于大尺寸方木并不是所有树种都可得到，因为有些树种的树干直径有限。此外大尺寸方木需提早预订，而且并非所有工厂可供货。

方木常用于干燥方法为放在空气中自然晾干或在干燥棚中烘干。由于方木截面尺寸和构件长度都较大，中心部位水分难以彻底挥发，因此在自然状况下难以彻底干燥；而放进棚中干燥，表面和中心部位水分挥发速度差异很大，容易产生裂缝。所以方木一般在使用过程中容易产生收缩并导致裂缝，但只要裂缝不超过规范规定的范围，不会影响承载能力和正常使用。为避免方木中大裂缝的产生，使用前最好留有足够时间使它在空气中慢慢干燥，使用时避免温度较高、湿度很低的环境。

(2) 板材 (Plank)

板材指从原木直角锯切得到的，宽厚比大于等于3的，截面为矩形的锯材。常用的板材为启口板，常用于“梁柱式木结构”体系中的楼、屋面板。相对于“轻型木结构”，在“梁柱式木结构”体系中，楼、屋面板跨度较大，所以此处所用启口板为单跨或多跨的承重板。在楼屋面结构中，如果启口板质量等级较高，其外观和承载能力都较好，此时它既是承重楼板又是装修面板。启口板常用厚度为40mm、65mm、90mm，在结构中采用何种厚度的板是根据板的跨度和楼屋面荷载确定。板厚度较薄如40mm厚时，板边缘采用单启口，板厚度较厚如65mm、90mm厚时，板边缘采用双启口，相邻板块通过启口镶嵌保证固定；厚度为65mm或90mm的板沿板长度方向每隔一定距离预先钻一小孔，安装时每一小孔用一长钉子连接相邻板块，以此确保板块间固定。启口板与支座的固定方式既有斜钉、又有直钉。启口形式、连接方式示意于图1-8。启口板在使用前均需经过干燥处理，否则安装后板块收缩较大，从而引起启口之间松动、板块之间产生缝隙，这样既影响美观也影响受力。

3. 规格材 (Dimension Lumber)

规格材为木材截面的宽度和高度按规定尺寸加工的规格化木材。规格材的常用厚度为40mm、65mm、90mm，截面高度为40mm、65mm、90mm、140mm、185mm、235mm、

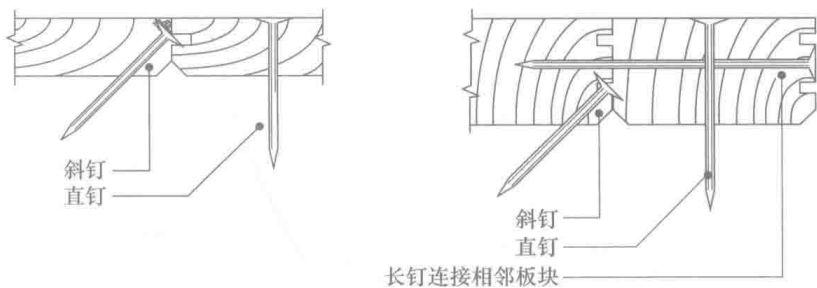


图 1-8 启口板及连接

285mm 等，规格材示意于图 1-9。规格材生产过程为先经去皮，然后锯成一定截面规格、目测分类、干燥、表面磨光、按外观及强度分等级、打包。其中并非所有材料需经干燥处理，根据用户要求及截面规格确定，厚度约为 40mm 的规格材一般经干燥处理，而厚度较大，如 65mm 或 90mm 的规格材一般不经干燥处理，而仅供应“湿材”。规格材主要用于“轻型木结构”建筑的主体结构中，如墙骨柱、楼面搁栅、椽条、檩条以及轻型木屋架的弦杆和腹杆等。

规格材等级与各种缺陷有关，如木节的大小和位置、木纹的方向、缺损的大小、各种裂纹裂缝的位置和长度等。构件越大，出现缺陷的概率越高，强度越低。规格材的强度分等有目测分级和机械分级两种。目测分级为用肉眼观测方式、按标准对木材材质划分等级；机械分级则采用机械应力测定设备对木材进行非破坏性试验，按测定的木材弯曲强度和弹性模量确定木材的材质等级。

对于长度较大的构件，规格材可用“指接”连接。所谓“指接”，就是将相邻规格材端部用特定的机器切成“齿形”，在“齿形”断面上均匀涂抹特定的胶水，然后将两者对接、加压连为一体。“指接”节点见图 1-10。只要工艺质量保证，相同等级的“指接”规格材强度并不低于非“指接”规格材。

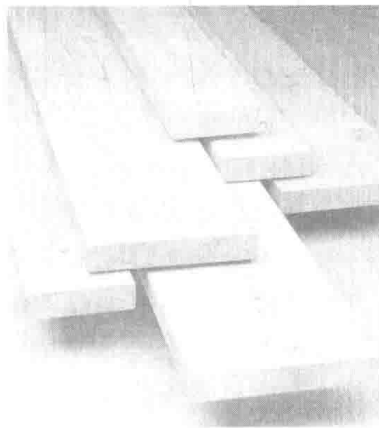


图 1-9 规格材示意

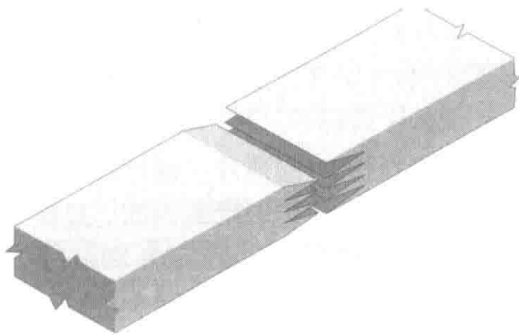


图 1-10 规格材“指接”

4. 胶合材

以木材为原料通过胶合压制而成的产品的总称为胶合材。胶合材类型非常多，木结构中常用的有层板胶合木（Glued laminated timber，简称 Glulam）、正交层板胶合木（Cross laminated timber，简称 CLT）、旋切板胶合木（Laminated veneer lumber，简称