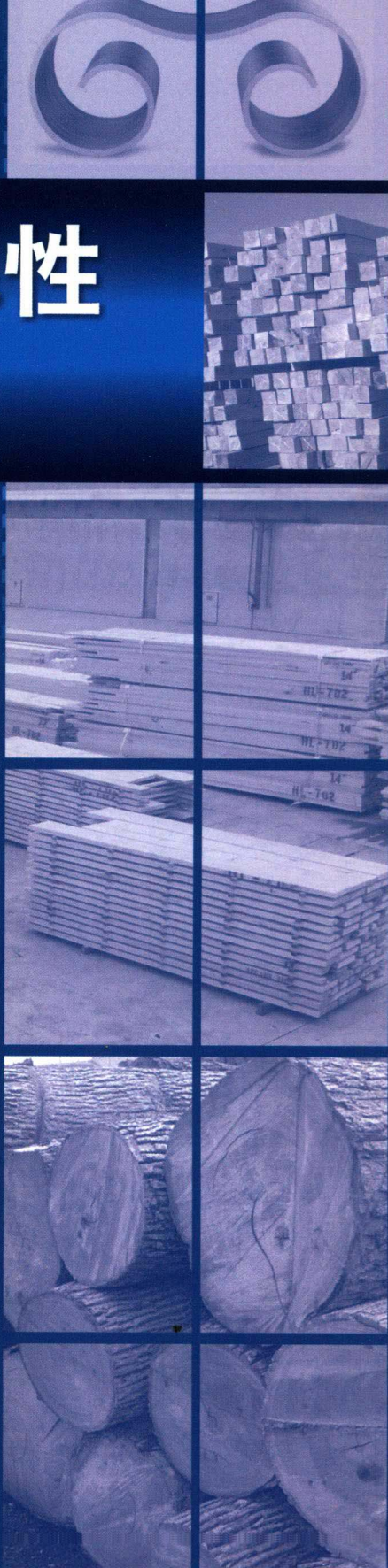


木材动态黏弹性 基础研究

吕建雄 蒋佳荔 著



科学出版社



木材动态黏弹性基础研究

吕建雄 蒋佳荔 著

国家自然科学基金项目（项目编号：30825034，31000266）资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了木材黏弹性的基本原理、动态黏弹性的测试方法及其应用的研究成果。全书共分 10 章。详细阐述了木材黏弹性的概念和木材动态黏弹性的基础理论及其测试与分析方法;归纳了影响木材动态黏弹性的主要因素;在系统开展科学实验研究的基础上,列出了木材动态黏弹性对含水率、温度、时间和载荷频率等因素的响应机制研究实例。

本书可供高等院校和科研单位从事木材科学与加工技术的科技工作者、教师及研究生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

木材动态黏弹性基础研究/吕建雄,蒋佳荔著. —北京:科学出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-03-043130-1

I. ①木… II. ①吕… ②蒋… III. ①木材-弹性-研究
IV. ①S781.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第017759号

责任编辑:张会格 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年2月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年2月第一次印刷 印张:11

字数:209000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

木质材料流变学是以研究木材的黏弹性为主要内容，而动态力学分析（dynamic mechanical analysis, DMA）技术是研究材料黏弹性的重要手段。在高聚物与复合材料领域，动态力学分析技术的应用已较为系统与完善。但是，在木质材料领域，木材黏弹性的基础理论与测试技术亟待发展和完善。鉴于此，作者在吸收与借鉴高分子材料的黏弹性理论与动态力学分析方法的基础上，将近年来围绕木材动态黏弹性所开展的学习与取得的研究成果进行归纳整理并付梓出版，希望能够起到抛砖引玉的作用，为将来更好地应用动态力学分析技术来研究木质材料的流变学性质提供基础，以期在学术思想上丰富木材-流体关系学、木材物理学和木材流变学的内涵，为人工林木材在高性能、高附加值材料中的应用提供理论依据和科学指导。

本书的主要成果是作者在主持国家自然科学基金杰出青年科学基金项目“木材流体与干燥基础科学”（30825034）和“木材动态黏弹特性的湿热效应机制研究”（31000266）期间完成的。本书详细阐述了木材黏弹性的概念和动态黏弹性的基础理论；介绍了采用动态力学分析技术进行木材动态黏弹性测试的实验原理与方法；归纳了影响木材动态黏弹性的主要因素；探讨了木材的线性黏弹区域，考察了木材动态黏弹性的各向异性行为，系统研究并分析了木材的动态黏弹性能温度谱、时间谱和频率谱，并针对木材动态黏弹性的时（间）温（度）等效原理的适用性进行了验证与分析。

本书的主要研究工作是在国家林业局木材科学与技术重点实验室完成的。鲍甫成研究员、姜笑梅研究员、秦特夫研究员、赵广杰教授、鹿振友教授、蔡力平研究员、俞昌铭教授对研究方案提出了宝贵意见，黄荣凤、赵有科、高瑞清、周永东、李晓玲、江京辉、徐金梅、周玉成、殷亚方、吴玉章、阎昊鹏参加了部分实验工作，在本书的编写过程中还得到郝晓峰、余乐、徐康、詹天翼、韩晨静、

赵丽媛同志的帮助，在此表示谢忱！本书参考引用了国内外有关的文献资料，在此谨向相关作者表示衷心感谢！

鉴于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

吕建雄

2014年8月于北京

目 录

前言	
第 1 章 木材黏弹性的概念	1
1.1 引言	1
1.2 木材力学性能的特点	2
1.3 弹性材料的模量、柔量和泊松比	3
1.4 黏性流体的黏度	8
1.5 黏弹性材料的力学行为	10
1.6 木材的黏弹性	12
1.6.1 木材黏弹性的分类	12
1.6.2 高聚物的力学状态和热转变	13
1.6.3 木材的松弛转变	15
第 2 章 木材动态黏弹性基础理论	16
2.1 引言	16
2.2 黏弹性材料的动态力学性能基本参数	16
2.3 黏弹性材料的动态力学性能温度谱	19
2.3.1 微观分子运动与宏观性质的关系简述	19
2.3.2 动态力学性能温度谱	22
2.4 黏弹性材料的动态力学性能频率谱	29
2.4.1 分子运动活化能	30
2.4.2 减震阻尼	31
2.5 黏弹性材料的动态力学性能时间谱	34
2.6 黏弹性与时间、温度的关系——时温等效原理	35
第 3 章 木材动态黏弹性的实验原理与方法	39
3.1 引言	39
3.2 动态力学分析仪的基本结构与性能	40
3.3 形变模式的理论计算	43
3.3.1 拉伸模式	43
3.3.2 压缩模式	45
3.3.3 弯曲模式	46

3.3.4	剪切三明治模式	48
3.4	基本实验模式与选择	50
3.4.1	单点测定	50
3.4.2	应变扫描	50
3.4.3	温度扫描	50
3.4.4	频率扫描	51
3.4.5	频率-温度扫描	52
3.4.6	多频温度扫描	52
3.4.7	时间扫描	52
3.5	影响动态力学分析实验结果的因素	53
3.5.1	动态黏弹性能测试值的相对性	53
3.5.2	影响贮存模量测试值的因素	53
3.5.3	影响力学松弛转变温度测试值的因素	54
3.5.4	关于动态力学分析实验中的误差	54
第4章	木材动态黏弹性的主要影响因子解析	56
4.1	引言	56
4.2	组织构造	56
4.2.1	树种、应力木与正常材	56
4.2.2	心材与边材、幼龄材与成熟材	57
4.2.3	纹理方向	57
4.2.4	早材与晚材	58
4.2.5	微纤丝角	58
4.3	化学成分	58
4.3.1	弹性纤维	59
4.3.2	黏弹性基体	59
4.3.3	抽提物	60
4.4	水分	60
4.5	温度	61
第5章	木材线性黏弹区域的温度与含水率依存性	62
5.1	引言	62
5.2	材料与方法	63
5.2.1	试样制备	63
5.2.2	试样含水率调整	63
5.2.3	动态应变扫描实验	63

5.2.4 线性黏弹区域的确定	66
5.3 全干材的线性黏弹区域	66
5.3.1 线性黏弹区域的温度依存性	66
5.3.2 临界应变值对测量频率的响应	70
5.3.3 弹性势能与屈服应力的计算	71
5.4 湿材的线性黏弹区域	72
5.4.1 不同含水率木材线性黏弹区域的温度依存性	72
5.4.2 不同含水率木材的弹性势能与屈服应力	78
5.5 本章小结	79
第 6 章 木材动态黏弹性的各向异性	81
6.1 引言	81
6.2 材料与方法	81
6.2.1 试样制备	81
6.2.2 试样含水率的调整	82
6.2.3 动态黏弹性能温度谱测定	82
6.3 木材贮存模量的各向异性	83
6.4 木材损耗模量与损耗因子的各向异性	86
6.5 本章小结	88
第 7 章 木材动态黏弹性能温度谱	90
7.1 引言	90
7.2 材料与方法	90
7.2.1 试样制备	90
7.2.2 全干材的制备	90
7.2.3 试样含水率的调整	90
7.2.4 动态黏弹性能温度谱测定	91
7.3 全干材的动态黏弹性能温度谱	91
7.3.1 贮存模量温度谱	91
7.3.2 损耗模量温度谱	93
7.3.3 力学损耗峰温度	94
7.4 木材动态黏弹性的含水率依存性	95
7.4.1 单频测定条件下木材的动态黏弹性	95
7.4.2 复频测定条件下木材的动态黏弹性	97
7.4.3 木材力学松弛过程的表现活化能	99
7.5 湿热环境中木材动态黏弹性能温度谱	101

7.5.1	单频测定条件下的温度谱	101
7.5.2	复频测定条件下的温度谱	103
7.6	本章小结	107
第 8 章	木材动态黏弹性能时间谱	109
8.1	引言	109
8.2	材料与方法	110
8.2.1	试样制备	110
8.2.2	全干材的制备	110
8.2.3	试样含水率的调整	110
8.2.4	动态黏弹性能时间谱测定	110
8.3	热作用温度和时间对全干材动态黏弹性的影响	111
8.3.1	试样质量变化	111
8.3.2	恒温过程的贮存模量时间谱	112
8.3.3	恒温过程的损耗模量和损耗因子时间谱	114
8.4	温湿度场中不同含水率木材的动态黏弹性能时间谱	117
8.4.1	试样含水率的变化	117
8.4.2	湿热耦合作用过程的贮存模量时间谱	118
8.4.3	湿热耦合作用过程的损耗因子时间谱	124
8.5	本章小结	128
第 9 章	木材动态黏弹性能频率谱	130
9.1	引言	130
9.2	材料与方法	130
9.2.1	试样制备	130
9.2.2	动态黏弹性能频率谱测定	131
9.3	稳态试样的动态黏弹性	131
9.4	稳态试样与非稳态试样的动态黏弹性比较	134
9.5	本章小结	140
第 10 章	木材动态黏弹性的时温等效原理适用性分析	141
10.1	引言	141
10.2	材料与方法	142
10.2.1	试样制备	142
10.2.2	全干材的制备	142
10.2.3	试样含水率调整	142
10.2.4	实验仪器	142

10.2.5 基础数据测定	143
10.2.6 数据分析	143
10.3 主曲线的合成	145
10.4 移动因子与温度关系曲线的模型拟合	153
10.5 木材时温等效原理适用性评价	156
10.6 本章小结	156
参考文献	157

第1章 木材黏弹性的概念

1.1 引言

对于弹性固体，当应力在弹性极限以下时，一旦除去应力，固体的应变就完全消失。这种应力解除后立即产生应变完全回复的性质称作弹性。与弹性固体相对，还有一类黏性流体。黏性流体没有确定的形状，在应力作用下，产生的应变随时间的增加而连续增大，除去应力后应变不可回复，黏性流体所表现出的这个性质称为黏性。

木材作为一种生物高分子聚合物材料，同时具有弹性和黏性两种不同机制的变形。木材在长期载荷作用下的变形将逐渐增加，若载荷很小，经过一段时间后，变形将不再增加；当载荷超过某极限值时，变形随时间而增加，直至使木材破坏，木材的这种变形如同流体的性质，在运动时受黏性和时间的影响。所以，在讨论木材的变形时，需要同时考虑木材的弹性和黏性，将木材这种同时体现弹性固体和黏性流体的综合特性称作黏弹性。

目前，将讨论材料在外力作用下产生的变形和流动，即研究材料受载荷后的弹性和黏性的科学称为流变学（Rheology）。流变学是跨越“聚合物科学”、“材料科学”和“应用力学”的交叉学科（Tanner, 2009），主要研究材料在应力/应变、温度、湿度、辐射等条件下与时间因素有关的变形和流动的规律。木质材料流变学主要涉及实体木材与木质复合材料流变行为的特性和机制，是认识木质材料的自然属性，从而对其进行有效利用的科学（王逢瑚, 2005）。流变学研究的主要内容包括材料的蠕变、应力松弛现象（也称为静态黏弹性）及在周期性交变应力/应变作用下的滞后现象和力学损耗（也称为动态黏弹性）。

木材是一种黏弹性材料，但其常规机械力学性能，一般是基于弹性力学范畴，即在研究其性能时，首先假设木材是弹性体，当应力作用在木材上时，其应变在任何作用时间内均是恒定的。但实际情况并非如此，木材受到应力作用时，其应变是随时间变化的，一般情况下，应变随时间推移逐渐增加。这部分与时间相关的应变增量受木材自身的基本特性、载荷类型、载荷频率及外部环境温湿度等因素的影响。对于在振动条件下使用的木质材料或木制品来说，与静态力学性能相比，它们的动态力学性能更能客观地反映出实际使用条件下的情况。从实用的观点出发，木材在实际应用中常常受到动态交变载荷的作用，如木材用于铁轨的枕

木、桥梁的结构件、乐器的面板、减震阻尼材料等。当木材作为刚性结构材料使用时，人们往往希望其具有足够的弹性刚度，以保持其形状的稳定性的，同时，又希望材料具有一定的黏性，以避免脆性破坏；当木材用作减震或隔声等阻尼材料时，除了希望其具有足够的黏性外，减震效果也与弹性成分有关。在木材干燥、木材热处理、木材的可塑化处理、木材的大变形加工、压缩木制造、人造板热压及制浆造纸等工艺过程中，木材的黏弹性起着积极的作用。可见，表征木材的黏弹性具有重要的实践意义。此外，研究木材的黏弹性随温度、含水率、时间、载荷频率、升温速率、应力/应变水平等的变化，可以揭示许多关于木材的结构和分子运动的信息，对深入了解木材性质、合理并高效利用木材具有重要的理论价值和现实意义。

1.2 木材力学性能的特点

木材作为一种生物高分子的聚合物材料，与固体材料如金属、陶瓷等，在力学性能上都有一个共性，那就是具有弹性。在外力作用下立即发生形变，外力除去后，形变立即回复，形变对外力的响应是瞬间的，如图 1-1 所示。但这种弹性形变很小。当形变较大时，木材可能发生不可回复的塑性变形，甚至是脆性断裂。这种普遍存在的弹性称为普弹性，主要是应力引起原子或离子间键长、键角的变化所致。

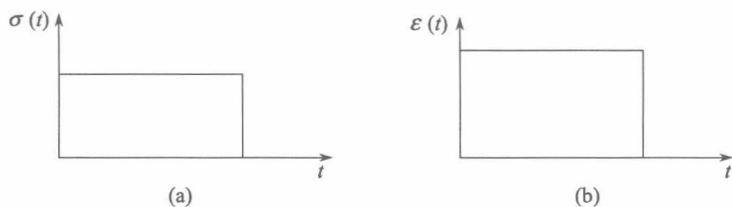


图 1-1 理想弹性体的应变 (ϵ) 对应力 (σ) 的响应

(a) 应力史; (b) 应变史

此外，进一步研究木材的力学性能，发现它们的性能还常常与时间有关。所谓与时间有关，是指同一种木材的力学性能，如刚度、强度、韧性、阻尼等，都会随载荷频率、升温速率、观察时间等时间因素的改变而发生明显的变化。例如，工程木结构梁或其他木制构件在长期载荷作用下发生严重变形，一些构件甚至在远小于极限载荷下遭到破坏，造成重大损失。这种弹性性能随时间因素的变化称为木材的弹性中带有一定的黏性。

木材在一定的外力、含水率和温度条件下会发生塑性变形，但木材的所谓“塑

性”有别于其他塑性材料。通常的塑性材料，在外力去除后，形状并不随外力的去除而发生改变，而残留了变形，且这个变形一般不随温度、湿度等外部条件的变化而改变，所以称为永久变形。木材的“塑性”则表现为在外力去除后的一段时间内形状或变形不发生改变，外力施加的能量被木材的结合机构（在外力施加时所形成的一些氢键结合）所束缚，即木材细胞壁中的纤维素因被迫变形所积蓄的弹性能量无法释放，其变形被暂时固定，这时木材处于一种稳态，于是被认为是具有了一个塑性变形，但实际上这种稳态需要一个“外界条件也不发生变化”的前提才能够维持下去。一旦外界条件发生了变化，如温度升高、含水率增大时，木材内部活性化学基团的活动程度和连接方式将发生改变，一些氢键结合被打开，导致木材结构改变，这时原先被固定住的能量随结构的松动而被释放，木材细胞壁纤维素分子链的弹性恢复，在木材内部产生恢复其原有形状的力的作用，宏观表现为木材的变形逐渐回复、消失（刘一星等，2012）。这种现象称为木材的黏性中带有弹性。

无数事实表明，木材在力学性能上具有弹性和黏性的双重特点，即黏弹性。材料的弹性、黏性和黏弹性均需要一系列参数去表征。

1.3 弹性材料的模量、柔量和泊松比

众所周知，理想弹性体的应力-应变关系服从虎克定律，即应力与应变成正比，比例系数为弹性模量，

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式中， σ 为应力（Pa）； ε 为应变； E 为弹性模量（Pa）。这种应力-应变关系可以用图 1-2 中的直线表示。直线的斜率就是弹性模量。它表征材料的刚度，即材料抵抗形变的能力。材料的弹性模量越高，表示它抵抗形变的能力越强。弹性模量有拉伸模量、压缩模量、弯曲模量、剪切模量和体积模量之分，取决于材料的形变模式。材料形变的基本模式有如图 1-3 所示的 4 类。其中图 1-3（a）表示杆受单向拉伸的情况。设杆的起始长度为 l_0 ，截面积为 A_0 。当它受到一个垂直于截面的外力 F 作用时，伸长至 l 。如果伸长量较小，则杆的拉伸应变 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

拉伸应力 σ 定义为

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1-3)$$

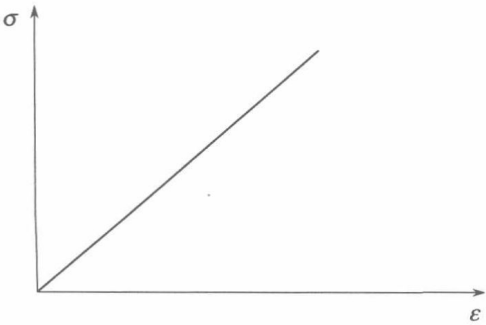


图 1-2 理想弹性体的应力-应变关系

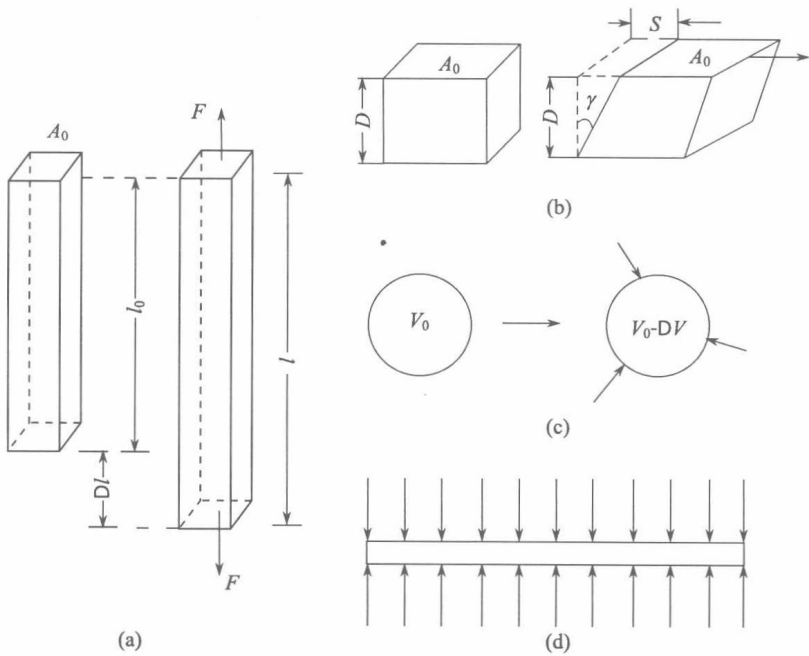


图 1-3 材料变形的基本模式 (过梅丽, 2002)

(a) 单向拉伸; (b) (剪)切变形; (c) 均匀压缩; (d) 薄板压缩

图 1-3 (b) 表示矩形截面试件发生简单 (剪) 切形变的情况。厚度为 D 的试件因剪切力 F 的作用而偏斜一个角度 γ , 偏移的截面距离为 S 。(剪) 切应变定义为 $\tan \gamma$,

$$\tan \gamma = \frac{S}{D} \tag{1-4}$$

当 γ 很小时, 有

$$\gamma \approx \tan \gamma \tag{1-5}$$

(剪)切应力(τ):

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (1-6)$$

在简单(剪)切形变中,材料只发生形变而不发生体积的变化。

(剪)切应变也可以通过杆的扭转来产生,见图1-4。设在长度为 l 、半径为 r 的杆上施加一个力矩 T ,使杆表面扭转一个角度 θ ,则杆表面的(剪)切应变定义为

$$\gamma = \frac{r\theta}{l} \quad (1-7)$$

(剪)切应力为

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (1-8)$$

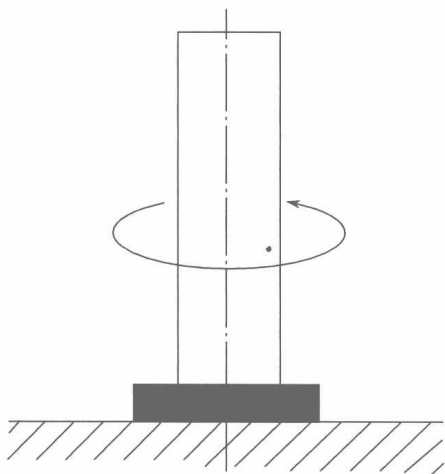


图1-4 杆的扭转(过梅丽, 2002)

图1-3(c)表示起始体积为 V_0 的物体在流体静压力 P 的均匀压缩下,体积缩小 ΔV 。在这种形变方式中,体积应变 Δ 定义为

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-9)$$

在上述3类不同的形变模式中,材料的弹性模量分别称为杨氏模量、剪切模量和体积模量,分别用 E 、 G 和 K 表示,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-10)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1-11)$$

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (1-12)$$

材料受单向压缩时，与单向拉伸唯一的差别是应力为负值。在理想条件下，材料的压缩杨氏模量等于其拉伸杨氏模量。但实际上，二者之间会有一定的区别。

材料的弯曲变形有多种方式，最常见的是三点弯曲和悬臂梁弯曲，如图 1-5 所示。其中 δ 称为挠度。弯曲变形中，试样中性面一侧受拉伸，另一侧受压缩。所以在材料弯曲中测定的也是杨氏模量。模量按式 (1-13) ~ 式 (1-16) 计算。

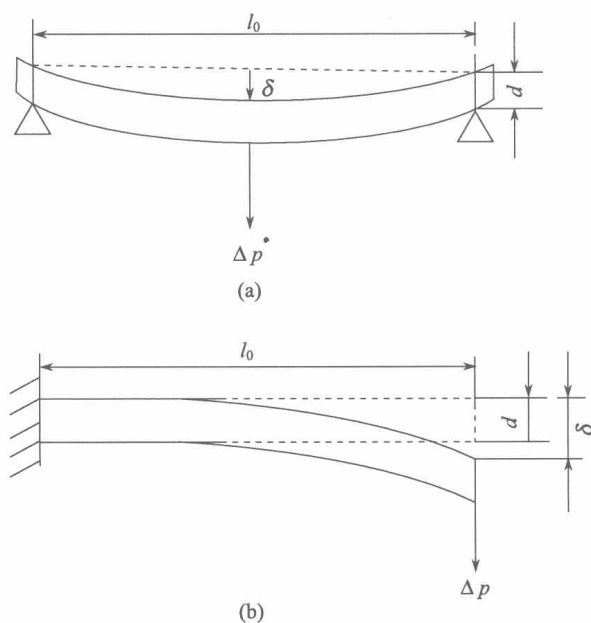


图 1-5 杆、棒的弯曲变形（过梅丽，2002）

(a) 三点弯曲；(b) 单悬臂梁弯曲

对跨距（三点弯曲中）或长度、宽度、厚度分别为 l_0 、 b 、 d 的矩形截面杆，有

$$E = \frac{\Delta P l_0^3}{4 b d^3 \delta} \quad (\text{三点弯曲}) \quad (1-13)$$

$$E = \frac{4 \Delta P l_0^3}{b d^3 \delta} \quad (\text{单悬臂梁弯曲}) \quad (1-14)$$

对跨距（三点弯曲中）或长度和截面半径分别为 l_0 和 r 的圆截面杆，有

$$E=\frac{\Delta Pl_0^3}{12\pi r^4\delta}$$

(三点弯曲)

(1-15)

$$E=\frac{4\Delta Pl_0^3}{3\pi r^4\delta}$$

(单悬臂梁弯曲)

(1-16)

当试样在纵向受到拉伸或压缩时，除纵向长度发生变化外，横向尺寸也要变化。横向应变与纵向应变之比称为泊松比，通常用 ν 表示：

$$\nu=\frac{\varepsilon_{横}}{\varepsilon_{纵}}$$

(1-17)

可以证明，如果材料在形变时体积不变，则泊松比为 0.5。大多数材料在形变时有体积变化（膨胀），泊松比为 0.2~0.5。

木材的组织构造因素决定了其具有各向异性特点，木材的绝大多数细胞和组织平行于树干沿轴向排列，而且树木形成层的分生方式决定了同一生长周期内主要细胞（轴向管胞或木纤维）的集合体在垂直于树干的横切面上来看，是呈同心圆排列的，这样就赋予了木材的圆柱对称性，使它成为近似呈柱面对称的正交对称性物体。因此可认为木材的弹性模量和泊松比具有正交异向的特点。表 1-1 列出了 7 种木材的弹性模量和泊松比（刘一星等，2012）。

表 1-1 7 种木材的弹性模量和泊松比

材料	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	E_L /MPa	E_R /MPa	E_T /MPa	G_{LT} /MPa	G_{LR} /MPa	G_{RT} /MPa	ν_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}
云杉	0.39	12	11583	896	496	690	758	39	0.43	0.37	0.47
松木	0.55	10	16272	1103	573	676	1172	66	0.68	0.42	0.51
花旗松	0.59	9	16400	1300	900	910	1180	79	0.63	0.43	0.37
轻木	0.20	9	6274	296	103	200	310	33	0.66	0.23	0.49
核桃木	0.59	11	11239	1172	621	690	896	228	0.72	0.49	0.63
白蜡木	0.67	9	15790	1516	827	896	1310	269	0.71	0.46	0.51
山毛榉	0.75	11	13700	2240	1140	1060	1610	460	0.75	0.45	0.51

注： E 代表杨氏模量； G 代表剪切模量； ν 代表泊松比； E_L 为顺纹（L）杨氏模量； E_R 为水平径向（R）杨氏模量； E_T 为水平弦向（T）杨氏模量； G_{LT} 为顺纹-弦面剪切模量； G_{LR} 为顺纹-径面剪切模量； G_{RT} 为水平面剪切模量； ν_{RT} 为 T 向压力应变/R 向延展应变； ν_{LR} 为 R 向压力应变/L 向延展应变； ν_{LT} 为 T 向压力应变/L 向延展应变

从表 1-1 中数据可以看出，木材是高度各向异性材料，纵、横向的差异程度可能是所有建筑材料中最高的。木材 3 个主方向的弹性模量一般表现为顺纹杨氏模量（ E_L ）比横纹杨氏模量（ E_R 、 E_T ）大得多，横纹杨氏模量中一般为径向大于弦向，即 $E_L \gg E_R > E_T$ 。木材剪切模量的规律通常为 $G_{LR} > G_{LT} > G_{RT}$ ，横切面上值