

木制品结构强度

主 编：柳万千

副主编：张建华

徐发国

主 审：赵 岩

东北林业大学出版社

木制品结构强度

主 编 柳 万 千

副 主 编 张 建 华

徐 发 国

主 审 赵 岩

东北林业大学出版社

1994.1.28

(黑) 新登字第 10 号

木制品结构强度

主 编 柳万千

副主编 张建华

徐发国

主 审 赵 岩

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

东北林业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 14.75 字数 324 千字

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81008-466-6/TB·39

定价: 7.10 元

木 制 品 结 构 强 度

主 编 柳万千

副 主 编 张建华

徐发国

主 审 赵 岩

编写人员 张建华 徐发国

柳晓絮 贾孝金

柳万千

前 言

我国木制品生产历史悠久,技艺精湛,驰名中外,为人类留下许多精美制品。但是,木制品工业发展缓慢,长期习惯于凭经验估计零部件和结点结构强度;在木制品设计中还缺少精确分析和计算的概念,忽略了木制品在使用过程中的安全性和最大限度地节省原材料,造成用料多,制品粗大笨重,制品强度和刚度达不到要求,导致变形甚至破坏。

随着社会发展和科学技术进步,国际市场竞争的加剧,人们生活水平不断提高,对高质量产品的强烈要求,结构强度和刚度设计日益受到生产和研究部门的重视。到目前为止,世界上一些工业发达国家,都已制定木制品力学性能标准,相应建起一整套本国的测试规范,在国际标准化组织的推动下,统一标准的工作已取得了明显进展。同时,计算机辅助设计在木制品生产中得到广泛应用,使得错综复杂的结构力学问题迎刃而解。科研工作又为木制品结构强度设计建立新的理论和积累大量数据,木制品结构强度设计才有可能进行。

本书是在广泛地收集国内外有关文献资料的基础上,根据作者几年来科研和教学实践经验,编写而成,力求把结构强度原理应用到木制品结构设计中,为木制品设计人员提供系统的理论依据。本书内容包括:木制品构件设计、结点设计、木制品整体受力分析和计算机辅助设计。可作为木材加工和家具等专业的本科生、研究生的教材,亦可供科研人员、木制品设计和工程技术人员参考。

全书共分四章。由黑龙江省苇河林业局人造板厂赵岩担任主审。第一章由东北林业大学张建华、黑龙江省东方红林业局第一木材厂贾孝金和东北林业大学柳万千编写;第二章由黑龙江省家具行业协会徐发国、黑龙江省交通专科学校柳晓絮和东北林业大学张建华编写;第三章由贾孝金、柳万千和徐发国编写;第四章由柳晓絮、徐发国和张建华编写。全书由柳万千整理完成。

东北林业大学刘宝林高级工程师对本书的出版给予了大力支持,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

编者

1994. 1. 28

目 录

第一章 木制品构件设计	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 粘弹性	(2)
一、木材的粘弹性	(2)
二、人造板的粘弹性	(11)
第三节 轴向拉伸和压缩	(16)
一、木材抗拉强度	(16)
二、木材抗压强度	(17)
三、胶合板抗拉和抗压性能	(24)
四、刨花板抗拉和抗压强度	(25)
五、纤维板的抗拉和抗压强度	(28)
第四节 剪切	(31)
一、木材顺纹剪切	(31)
二、刨花板抗剪强度	(33)
三、纤维板抗剪强度	(34)
四、胶合板抗剪强度	(34)
第五节 扭转	(35)
一、圆轴横截面上的应力	(35)
二、矩形截面杆的扭转应力和变形	(38)
第六节 弯曲	(41)
一、实木构件弯曲	(41)
二、人造板弯曲	(60)
第七节 空芯板力学性能	(65)
一、空芯板刚度	(65)
二、表板和芯层应力	(66)
三、平板受力	(67)
四、栅状空芯结构	(70)
第八节 应力选择	(71)
一、影响木材强度的主要因素	(71)
二、木材的容许应力	(75)
第二章 木制品结点设计	(78)
第一节 实木构件圆榫接合抗拔力计算	(78)
一、实木构件侧边圆榫抗拔力	(78)

二、实木构件端部圆榫抗拔力	(80)
三、两个实木构件端部与边部圆榫接合强度计算	(80)
第二节 刨花板部件圆榫接合抗拔力计算	(81)
第三节 双圆榫接合抗扭强度	(84)
第四节 双圆榫接合抗弯强度	(85)
(1) 一、沿板面方向弯曲	(86)
(1) 二、垂直于板面方向弯曲	(87)
(8) 第五节 直角榫接合抗弯强度	(91)
(8) 第六节 圆榫和直角榫接合性能比较	(98)
(11) 第七节 指榫接合	(101)
(81) 一、指榫接合抗弯强度	(101)
(81) 二、角部指榫接合	(104)
(11) 第八节 五金连接件接合	(108)
(18) 一、螺钉接合	(108)
(28) 二、五金连接件接合	(115)
(83) 三、金属齿板连接件	(121)
第三章 木制品整体受力分析	(130)
(18) 第一节 柜类制品受力分析	(130)
(88) 一、柜体变形分析	(130)
(18) 二、角部接合形式对柜体刚度的影响	(132)
(18) 三、前面框架对柜体刚度的影响	(136)
(28) 四、顶板和底板结构形式对柜体刚度的影响	(142)
(88) 五、背板对柜体刚度的影响	(144)
(88) 六、搁板和横撑变形计算	(146)
(11) 第二节 排架结构受力分析	(152)
(11) 第三节 椅子结构受力分析	(157)
(08) 第四节 有限元法结构分析	(162)
第四章 计算机辅助设计	(173)
(28) 第一节 框架结构分析程序	(173)
(88) 一、数据输入卡	(174)
(87) 二、分析例题	(175)
(07) 三、输出解释	(176)
(11) 第二节 计算机辅助设计家具程序	(178)
(17) 一、输入数据	(179)
(87) 二、输出程序	(184)
(87) 三、椅子边框分析	(185)
(87) 四、桌子结构分析	(188)
(87) 第三节 计算机程序补充说明	(196)

一、垂直构件转角	(196)
二、圆形构件(非管状断面)	(197)
三、圆管和不规则截面构件	(197)
四、均布载荷、轴向载荷和扭转载荷	(198)
五、变截面杆和弯曲杆件	(198)
六、半刚性结点	(201)
七、局部坐标系的取向	(205)
八、结构图	(207)
九、大结点	(209)
附录 计算机辅助设计程序	(216)
参考文献	(225)

木制品设计可分为三个方面:造型设计、结构设计和强度设计。造型设计很重要,木制品结构形态的艺术渲染,对消费者将产生很大的吸引力,一件造型美观的木制品,将起到丰富人的文化生活的作用。结构设计是根据人体功效学的原理,来确定木制品的结构和各部尺寸,以满足人们特定的需要。由于空间和材料变得越来越缺乏,结构设计已经引起人们应有的重视。长期以来,人们忽视了对木制品结构强度理论的研究,木制品强度设计还没有采用系统的计算方法,大都按照生产者的经验去制作,但是消费者要求有足够强度的产品,以保证制品在使用中有一定的安全性,同时,又要节省材料,这使木制品结构强度设计显得更加重要。

木制品结构设计设计应由以下几个步骤组成。首先是确定木制品在使用过程中的承载结构。其次是根据承载要求,初步确定零部件尺寸,并绘制木制品样品图。第三步是根据外部载荷,求出木制品样品产生的内力大小和分布情况。第四步是重新修改这个样品结构,直到所有零部件均不起负荷。第五步是结点设计,以便它能安全地承受内力、确定外载荷的方法,就是事先规定木制品设计载荷。木制品的种类不同,使用场所不同,要求承受的外载荷也不同。如设计家庭用木制品所采用的载荷,应比公共场所木制品的载荷小些。可用图1-1-1的方法,对木制品进行分载。规定木制品承载能力。此外,设计者对所设计制品的用途环境,必须有全面的了解,如:一张床只有能承受睡在床上的人的体重不行,小孩在床上蹦跳,会对床有强大的冲击载荷;人们坐在椅子上,座椅扶手后部承受上部载荷,若是再向侧边倾斜,椅子只靠两腿腿或是一系腿支撑人靠靠靠,书架上书的重量是多少等等。因此,在设计一件木制品时,这些在使用过程可能发生的荷载,必须予以考虑。

其次是设计一个假想的样品,并确定样品中各零部件的规格尺寸,假想样品要地承受预定的外载荷。这就必须了解材料具有的屈服应力,变形的强度和韧性。还要考虑到构件在载荷作用下产生的畸变,也必须估计到,采用这些材料是否确实具有足够强度的储备。

构件尺寸确定后,在外载荷作用下构件内产生的内力值和分布情况,可用数学分析方法来确定。对于框架中零部件通常是一般的,横断面不变,结点一般是半刚性结点,在外载荷作用下,结点产生变形并非呈直线关系。这使结点荷载点对应由分析前

第一章 木制品构件设计

第一节 概 述

木制品设计可分为三个方面：造型设计、结构设计和强度设计。造型设计很重要，木制品结构形态的艺术渲染，对消费者将产生很大的吸引力，一件造型美观的木制品，将起到丰富人们文化生活的作用。结构设计是根据人体功效学的原理，来确定木制品的结构和各部尺寸，以满足人们特定的需要。由于空间和材料变得越来越缺乏，结构设计已经引起人们应有的重视。长期以来，人们忽视了对木制品结构强度理论的研究，木制品强度设计还没有采用系统的计算方法，大都按照生产者的经验去制做。但是消费者要求有足够强度的产品，以保证制品在使用中有一定的安全性，同时，又要节省材料，这就使得木制品结构强度设计显得更加重要。

木制品结构强度设计应由以下几个步骤组成。首先是确定木制品在使用过程中所承受的载荷。其次是根据承载要求，初步确定零部件尺寸，并绘制木制品样品图。第三步是根据外部载荷，求出木制品样品产生的内力大小和分布情况。第四步是重新修改这个样品结构，直到所有零部件均不超负荷。第五步是结点设计，以便它能安全地承受内力。

确定外载荷的方法，就是事先规定木制品设计载荷。木制品的种类不同，使用场所不同，要求承受的外载荷也不同。如设计家庭用木制品所采用的载荷，应比公共场所木制品的载荷小些。可利用分类的方法，对木制品进行分级，规定木制品承载能力。另外，设计者对所设计制品的使用环境，必须有全面的了解。如：一张床只有能承受睡在床上的人的体重不行，小孩在床上蹦跳，会对床有很大的冲击载荷；人们坐在椅子上向后靠，椅子后腿承受全部载荷，若是再向侧边倾斜，椅子只有两条腿或是一条腿支撑人体重量；书架上书的重量是多少等等。因此，当设计一件木制品时，这些在使用过程中应该考虑的问题，必须予以考虑。

其次是设计一个假想的样品，并确定样品中各零部件的规格尺寸，使它能安全地承受预先确定的载荷。这就必须了解构件材料的极限应力、疲劳强度和冲击强度，还要考虑到构件在载荷作用下产生的蠕变，也必须估计到，采用这些材料是否能构成具有足够强度的结点。

构件尺寸选定后，在外载荷作用下构件内产生的内力值和分布情况，可用数学分析方法来确定。由于框架中零部件通常是弯曲的，横断面也不一致，结点大都是半刚性结点，在外载荷作用下，结点产生变形并非呈直线关系。结点尺寸和结点对应力分析的影响

响不容忽视。木制品受力问题相当复杂，木制品整体结构通常是三维空间结构，一个复杂的框架应力分析，需要 200 个或更多个未知数。这种工作用笔算是是不可能的，也是不经济的，利用电子计算机辅助设计，才使木制品结构强度设计成为可能，一旦编好一个相应程序，一台现代高速电子计算机，在几分钟内就可把全部结构分析计算出来。

初次结构应力分析完后，需检查样品中各零部件设计的是否合理，是否能承受外载荷的作用，防止零部件尺寸过大和过小现象，修改后的样品再作结构应力分析，反复几次修正，便可得到正确的零部件尺寸。

最后是结点设计。零部件尺寸已确定，精确的结构应力分析已完成，作用在每个结点上的力也就确定。结点总是木制品中最薄弱的环节，大多数木制品的破坏，都是由于结点强度不够而引起的。虽然人们在木制品结点设计领域里已作了大量研究，积累一些常用的结点设计资料，但还需进行更深入的研究。

第二节 粘 弹 性

一、木材的粘弹性

1. 木材粘弹性特点

木材受到外力或内力作用时，结晶区具有可用弹簧模型来模拟的弹性表现，而无定型区具有可用阻尼器来模拟的粘弹性表现。因此，必须假设木材是一种具有各种弹性模量的许多弹簧和具有各种粘性系数的许多阻尼器，一部分串联、一部分并联，相互间密切关连的结构。在实际的木材中，具有各种弹性模量和粘性系数的两种力学模型多种多样地分布着，使木材具有极为复杂的粘弹性的表现。

(1) 弹性滞后

粘弹性体具有弹性滞后现象。这是一种应力-应变图的加载和卸载的过程具有不同经历的现象，是由两个过程中所消耗的能量之差引起的。象木材这样的粘弹性材料产生如图 1-1 所示的应力-应变循环。开始的加载曲线为 OA' ，卸载曲线为 $A'B'$ ，产生了永久应变 OB' 。为了消除永久应变，回复开始时的形状，必须加上反方向的应力 OC' ，以便得到曲线 $B'C'$ 。再把反方向的应力加大到相当于最大值 $A'P'$ 的大小，就可得到曲线 $C'D'$ 。因此卸载得到曲线 $D'E'$ ，留下负的永久应变 $E'O$ 。然后再加上反方向的应力 OF' ，即可回复开始时的形状。如果应力再继续加大，就可以得曲线 $F'A'$ ，应力-应变图描出了封闭的曲线。在热力学上封闭曲线 $C'D'F'A'$ 的面积表示在整个循环中失去的能量。

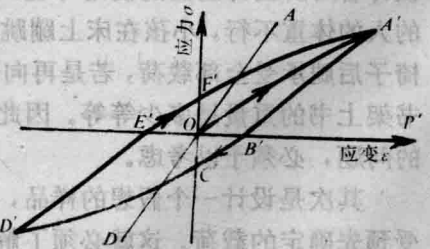


图 1-1 木材及其他粘弹性材料的应力-应变曲线
AD. 理想弹性体

应力常常仅在某一定的方向上作用时，重复地加载、卸载，一般可产生如图 1-2 和图 1-3 所示的两种情况。前者在重复加载和卸载时能量消耗增大，弹性逐渐减小，塑性逐渐增加。而

后者能量的消耗减少，塑性逐渐减小而弹性逐渐增加。在某种条件下，有时木材有前者的表现，如图 1-2 所示。但在另外的条件下往往具有后者的表现，如图 1-3 所示，在这后一种情况下重复加载时，一般会产生弹性滞后的减小和弹性模量的增大，使木材强化和

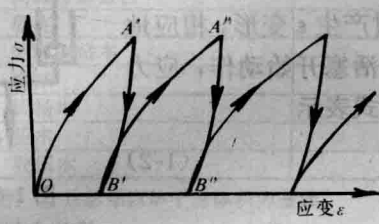


图 1-2 反复加载与卸载增加了塑性的应力-应变曲线

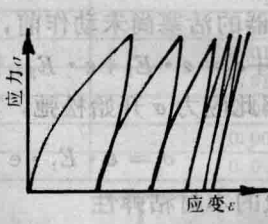


图 1-3 反复加载与卸载的应力-应变循环，接近于理想的弹性

硬化，不管是生材还是干燥材，当受到相当高的重复应力时，其弹性应变都增大。开始产生永久应变的应力大小随树种而不同。

(2) 蠕变和应力松弛

将杨氏模量为 E_1 的弹簧 I 作为弹性元素，与粘性系数为 η_1 的粘性元素阻尼器 III 串联形成麦克斯韦元素。再将杨氏模量为 E_2 的弹簧 II 与粘性系数为 η_2 的阻尼器 IV 并联形成沃伊特元素。将这二元素串联形成一个系统。如图 1-4 所示。

将应力加于该系统，产生应变，此应变可用时间函数来表示

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_n + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}) + \frac{\sigma}{E_1} \cdot \frac{t}{\lambda_1} \quad (1-1)$$

式中： $\lambda_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$;

$\lambda_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$;

- ϵ_e ——弹性应变（瞬时弹性应变）；
- ϵ_n ——弹性后效应应变（延迟弹性应变）；
- ϵ_p ——粘性应变（永久应变）。

木材受到应力时，瞬时产生与所加应力相应的服从虎克定律的弹性应变 OA ，如图 1-5 所示，接着在一定应力下产生蠕变 AB 。至时间 t_1 除去应力，产生瞬时弹性回复 BC_1 ($=\overline{OA}$)，接着从 C_1 到 D 经历时间 t_2 ，产生延迟弹性回复（蠕变回复）。从时间 t_2 以后的回复极小，可忽略不计。 DE 表示经加载~卸载一个循环后残留下来的永久应变。具有这种性能的材料为粘弹性体，木材等很多高分子固体是属于粘弹性体。木材的蠕变和蠕变回复曲线，因各种木材

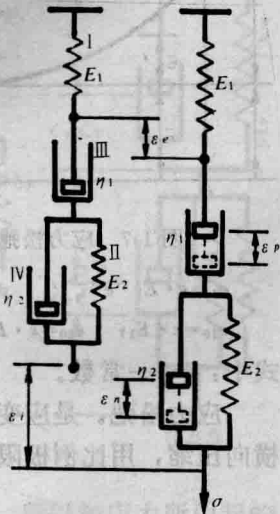


图 1-4 模拟木材蠕变的模式图

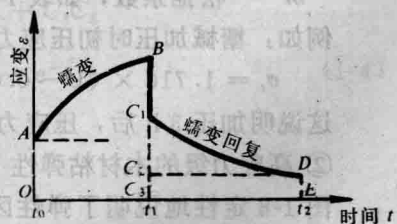


图 1-5 粘弹性体的变形-时间曲线 $t_0 \sim t_1$ ，加载时间； $t_1 \sim t_2$ ，卸载时间

不同的构造而有显著的差异, 所以其表现的形式也很不相同。一般, 蠕变 AB 由在蠕变回复中能区分的两个成分组成, 能回复的延迟弹性成分 C_1C_2 , 称为一次蠕变, 和不能回复的成分 $C_2C_3 (=DE)$, 称为二次蠕变。

图 1-6 表示应力松弛模型, 图 1-7 表示应力松弛曲线。瞬时地产生应变 ϵ 时, 在阻尼器的活塞尚未动作前, 两个弹簧同时产生 ϵ 变形, 相应地产生应力 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \epsilon \cdot E_1 + \epsilon \cdot E_2$ 。随后阻尼器的活塞开始动作, 应力 σ_1 开始减小, 因此应力 σ 开始松弛, 其过程可用下式表示

$$\sigma = \epsilon \cdot E_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \epsilon \cdot E_2 \quad (1-2)$$

①低应力级的木材粘弹性

蠕变。木材加载后经过时间 t 的应变 ϵ , 当应力很小时, 其永久变形可忽略不计, 这时公式 (1-1) 可写成如下形式

$$\epsilon = \epsilon_e + \{1 + \varphi(t)\}$$

对于弯曲蠕变, 具有幂函数关系

$$\epsilon = \epsilon_e + a \cdot t^n$$

式中: t ——经过的时间;

a 、 n ——常数。

此式也适于用来表示横向拉伸和横向压缩的蠕变。

对于短时间的拉伸蠕变, 可用对数函数来表示

$$\epsilon = \epsilon_e + b \cdot \log(t + 1)$$

式中: b ——常数。

应力松弛。是应变不变的条件下, 应力随时间而变化。关于木材的横向压缩, 用比例极限 50% 以下的压缩应力进行试验得到下式

$$\sigma_t = \sigma_1(1 - m \cdot \log t) \quad (1-3)$$

式中: σ_t —— t 时的应力;

σ_1 ——1 min 时的应力;

m ——松弛系数, 如表 1-1 所示。

例如: 糖槭加压时初压应力为 1.716 MPa, 加压 3 h 压应力是

$$\sigma_t = 1.716 \times (1 - 0.0105 \times \log 180) \approx 0.675 \text{ MPa}$$

这说明加压 3 h 后, 压应力损失将近 2.4%。

②高应力级的木材粘弹性

图 1-8 定性地说明了弹性区域内的蠕变粘性系数 η_2 的活塞位置虽有变化, 但活塞不管是从筒底部开始出发, 还是从中途开始出发, 活塞的性质在本质上没有变化。在塑性区域内, 除去初应力后再加应力时, 出发时的状态就与以前不同了。如图 1-9 所示, 使粘性系数为 η_3 的阻尼器与弹性模量为 E_3 的弹簧并联, 在它们之间设置防滑装置。由初应力引起的弹簧 E_3 的应变, 虽是在阻尼器 η_3 的流

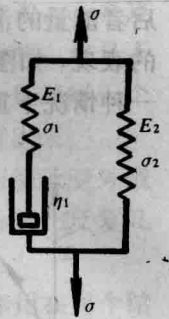


图 1-6

模拟木材应力松弛的模式图

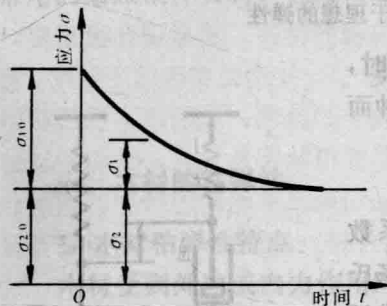


图 1-7 应力松弛曲线

$$\sigma_1 = \epsilon \cdot E_1 \cdot e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}; \quad \sigma_2 = \epsilon \cdot E_2;$$

$$\sigma_{10} = \epsilon \cdot E_1; \quad \sigma_{20} = \epsilon \cdot E_2$$

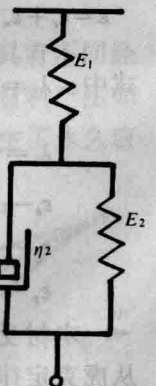


图 1-8

弹性范围内的蠕变模型

表 1-1

干材垂直纹理加压时的松弛系数 m

木材的树种	平均比重 ^①	平均 m 值
铅笔柏	0.38	0.012 1
阿拉斯加柏木	0.48	0.017 8
杨木	0.48	0.012 9
美国西加云杉	0.50	0.018 1
皂荚	0.55	0.010 3
美国白蜡木	0.67	0.010 0
糖槭	0.67	0.010 5
黄杨木	0.69	0.007 0
坚木	1.12	0.006 9
胶压木	1.36	0.007 0

注：① 比重系以炉干材体积为基础。

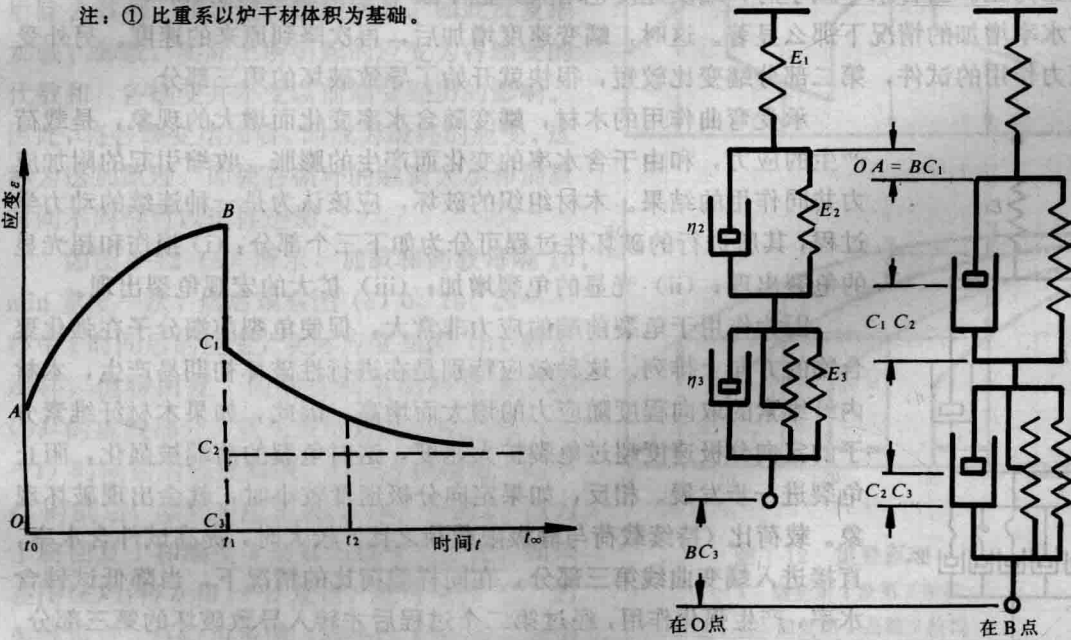


图 1-9 塑性范围内的蠕变模型与时间-应变曲线

动被抑制的状态下产生的，但应力除去时，因有防滑装置的存在，所以初应力所引起的应变能保持原状停止下来。当再加上应力时， E_3 就以应变的中途状态加到全应变上去。因此，塑性区域的应变 ϵ 为

$$\begin{aligned}\epsilon &= \epsilon_e + \epsilon_{n1} + \epsilon_{n2} = BC_1 + C_1C_2 + C_2C_3 \\ &= \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2}(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_2}}) + \frac{\sigma}{E_3}(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_3}})\end{aligned}\quad (1-4)$$

式中： $\lambda_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$ ；
 $\lambda_3 = \frac{\eta_3}{E_3}$ 。

③ 持续载荷和破坏机理的关系

蠕变是粘弹性体受到恒定的、长时间持续作用的载荷而产生的缓慢的变形。图 1-10 表示变形和时间关系的蠕变曲线，可划分成三个部分。第一部分是在载荷除去后，大部分可以逐渐消失的初期可逆蠕变过程。第二部分是稳定的速度进行蠕变的过程。第三

部分,蠕变速度逐渐增大,直至破坏为止。木材的含水率、外界温度和物理化学条件,对受载木材的变形过程有明显影响。持续加载时间越短,含水率、温度对变形的影响就越不明显。

取一松木试件(10 mm×10 mm×300 mm)进行弯曲蠕变试验,如果在蠕变过程的某时刻提高含水率,则此时变形会突然增大。这种蠕变速度增加之后,接着蠕变速度又降低,直至最后稳定在含水率增加前的速度水准上为止。当含水率减小时,蠕变速度也增大,但不象含水率增加的情况下那么显著。这时,蠕变速度增加后,再次降到原来的速度。另外受应力作用的试件,第二部分蠕变比较短,很快就开始了导致破坏的第三部分。

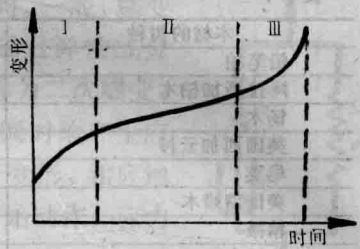


图 1-10 变形-时间关系
蠕变曲线

承受弯曲作用的木材,蠕变随含水率变化而增大的现象,是载荷产生的应力,和由于含水率的变化而产生的膨胀、收缩引起的附加应力共同作用的结果。木材组织的破坏,应该认为是一种连续的动力学过程,其所进行的破坏性过程可分为如下三个部分:(i) 损伤和超光显的龟裂出现;(ii) 光显的龟裂增加;(iii) 扩大的宏观龟裂出现。

因为作用于龟裂前端的应力非常大,促使龟裂前端分子在强化聚合物的方向上排列。这种效应特别是在进行性破坏初期易产生,木材内纤维素的取向程度随应力的增大而增高。因此,如果木材纤维素分子的定向分极速度超过龟裂扩大速度,这时龟裂的前端被强化,阻止龟裂进一步发展。相反,如果定向分极速度较小时,就会出现破坏现象。载荷比(持续载荷与静极限载荷之比)较大时,提高试件含水率,直接进入蠕变曲线第三部分,在同样载荷比的情况下,当降低试件含水率,产生强化作用,经过第二个过程后才转入导致破坏的第三部分。载荷比越小,蠕变曲线第二部分持续时间越长。但是,即使载荷比为 0.3 或 0.4,比疲劳破坏载荷还低的载荷作用下,也有可能因含水率变动,引起构件破坏。疲劳破坏载荷的载荷比,在弯曲的情况下大约为 0.6。

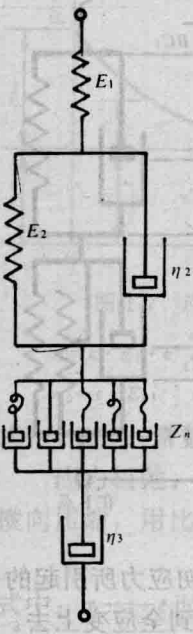


图 1-11

Burgers Regel 模型
 E_1 . 瞬时弹性;
 E_2, η_2 . 延迟弹性;
 η_3 . 粘性流动;
 Z . 破坏和强化

具有粘弹性的木材加载时间与变形的关系,一般可用麦克斯韦元素和沃伊特元素串联的 Burgers 流变模型进行说明。但这种模型作为木材的流变模型还不是十分合适的,没有考虑破坏过程对长期受持续载荷的木材变形影响。为此,在 Burgers 流变模型中导入 Regel 元素。Regel 元素是在二个平行板中间只能起制动器作用,而不能作弹性延

伸的很多绳索组成。见图 1-11。

列出这个模型的流变式是困难的,但是此模型不仅能模拟木材蠕变的粘塑性流动过程,还能很好地定性模拟木材组织破坏所产生的影响。此模型除出现破坏过程以外,温度的影响,加载速度变大时的脆弱性增大,强化过程等都能定性模拟。Regel 元素的所有绳索都处于松弛状态时,不能模拟破坏过程。当一根以下的绳索处于应力状态时,只要

受到应力的绳索不断,变形就不可能继续增大。当这根绳索断裂时,其他绳索就进入了应力状态,与其连接的阻尼器也进入了整个系统。并且根据蠕变的条件,系统被强化或绳索继续发生断裂。当所有绳索都断裂时,整个系统就被破坏了。

(3) 迭加原理

在木制构件持续加载,使其产生蠕变,然后除去载荷,使之进行蠕变回复。如此反复地加载、卸载,实际上所引起的应变为各蠕变的代数,各蠕变并不受以前蠕变经历的影响。因此,将各蠕变迭加后,即成为最终的应变。这称为迭加原理。即使各循环的载荷大小和加载时间不同也可以这样迭加。

如图 1-12 (a) 所示,加载和卸载每隔 10 min 重复一次,然后观察图 (c) 0、10、20……秒中 t 时间后的应变,实际应变如图 (b) 所示那样,但将回复 I 的蠕变回复曲线重迭于图 (b) 的虚线部分,就可得到蠕变 I 在持续 (10 + t) 时间后的蠕变曲线。然后考虑持续 (20 + t) 时间后,实际的应变是图 (b) 中的 c ,但为了将回复 I 和蠕变 II 迭加到蠕变 I 上去,如果在图 (c) 上将 b 和 $c - a$ 重迭,就可与图 (b) 的虚线重合。然后再考虑 (30 + t) 时间后,如果在图 (c) 上将 b 和 $c - a$ 、 $d - b$ 重迭,就可与图 (b) 的虚线重合。

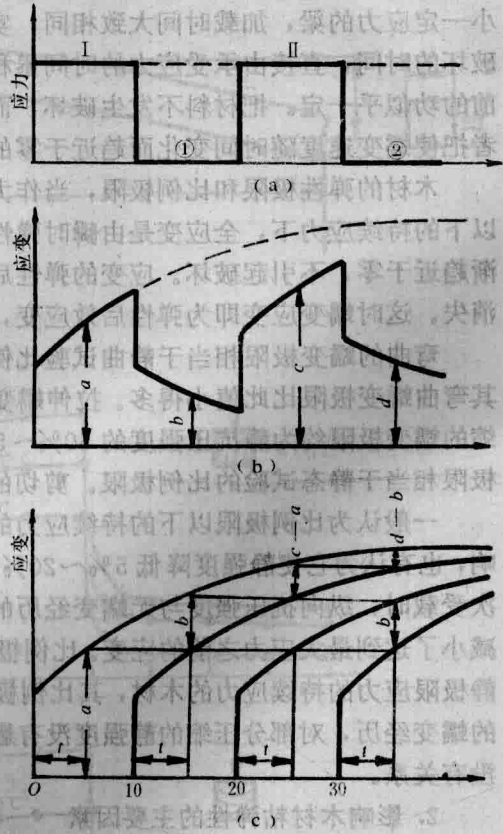


图 1-12 重叠原理

1、1. 蠕变第 1 及第 2 阶段;
①、②. 回复第 1 及第 2 阶段

(4) 蠕变极限

一般在材料上加上超过弹性极限的应力时,即使应力保持一定,应变亦随时间而增大,发生蠕变。木材在弯曲、拉伸、压缩和剪切等应力下都会发生蠕变,但拉伸蠕变应变比其它应力状态下发生的蠕变小。木材弯曲蠕变应变,主要受压缩侧的压缩蠕变控制,而拉伸侧的拉伸蠕变影响可以忽略不计。木材受到持续应力作用时,应变随即急剧增大,当持续应力水准较低时,蠕变速度随时间逐渐减小,经很长时间后逐渐趋于零。随着持续应力水准提高,达到破坏状态所需要的时间缩短,在发生蠕变前,蠕变曲线出现拐点(图 1-13)。

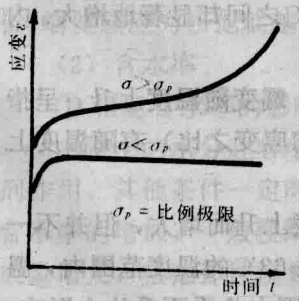


图 1-13 蠕变曲线

如果进行精确测定,木材即使在弹性极限以内的应力下也产生蠕变。在断续应力作用下进行弯曲试验(加载和卸载各为 24 h),结果表明,连结蠕变应变峰值的曲线,与保持一定应力情况下的蠕变曲线相类似。

周期地、断续地受到一定应力的木材梁，破坏前的加载时间，与持续地受到同样大小一定应力的梁，加载时间大致相同，实质上都依存于实际的加载时间。所以发生蠕变破坏的时间，直接由承受应力的时间累积效应决定。在蠕变破坏的情况下，发生破坏以前的功似乎一定。把材料不发生破坏，而能承受的持续应力的最大值称为蠕变极限，或者把使蠕变速度随时间变化而趋近于零的持续应力的最大值称为蠕变极限。

木材的弹性极限和比例极限，当作大致相等的条件下进行试验，结果表明，在蠕变以下的持续应力下，全应变是由瞬时弹性成分和弹性后效成分组成。后者的蠕变速度逐渐趋近于零，不引起破坏。应变的弹性后效成分在持续应力除去后，随时间减小，逐渐消失。这时蠕变应变即为弹性后效应变，蠕变极限大体上相应于弹性后效极限。

弯曲的蠕变极限相当于静曲试验比例极限的 $2/3$ 。对于含水率高、横截面大的构件，其弯曲蠕变极限比此值小得多。拉伸蠕变极限估计是静抗拉强度的 $55\% \sim 60\%$ 。纵向压缩的蠕变极限约为静抗压强度的 $50\% \sim 55\%$ ，明显地比压缩比例极限低。部分压缩蠕变极限相当于静态试验的比例极限。剪切的蠕变极限约为静抗剪强度的 50% 或略小。

一般认为比例极限以下的持续应力的蠕变经历，对该木材再次受载时的静强度无影响，也有认为它使静强度降低 $5\% \sim 20\%$ 。受到蠕变极限以下的持续应力作用的木材，再次受载时，纵向抗压强度与无蠕变经历的木材几乎相等，蠕变经历增大了比例极限，而减小了达到最大应力之前的应变。比例极限增大的比率与持续应力水准成正比。承受 $1/3$ 静极限应力的持续应力的木材，其比例极限约比未受应力的木材大 25% 。蠕变极限以下的蠕变经历，对部分压缩的静强度没有影响，但使比例极限增大。这种倾向与应力种类没有关系。

2. 影响木材粘弹性的主要因素

(1) 温度

① 平衡状态

若是其他条件保持不变，承受载荷木材的温度越高，蠕变速度和整个蠕变的量就越大。根据生材弯曲蠕变试验结果，对给定的时间与应力，在 $5 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内，挠度随温度上升，按指数曲线增大。另外，在 $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内进行木材弯曲蠕变试验结果，温度从 20°C 上升到 50°C 时，蠕变速度只略有增加，但在 50°C 和 60°C 之间却显著地增大。内部摩擦在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内也显著增大。

在 $100 \sim 180^\circ\text{C}$ 范围内，对绝干日本扁柏进行压缩蠕变试验，蠕变随温度上升，呈指数曲线关系。木材纵横拉伸和压缩时，相对蠕变（蠕变应变对初应变之比）有随温度上升而增加的趋势。

根据日本扁柏材的扭转蠕变试验结果，一般蠕变柔量随温度上升而增大，但并不一定都有这种倾向。一般木材温度越高，应力松弛就越大。在 $15 \sim 63^\circ\text{C}$ 的温度范围内，温度越高，木材弯曲松弛弹性模量就越小，但松弛速度在此温度范围内几乎不受什么影响。在较大初应变的横向压缩试验中， 50°C 时应力松弛速度，较 25°C 时的大，但 50°C 时和 70°C 、 95°C 时的松弛速度几乎没有差别。

② 温度变化的影响

弯曲蠕变试验，在 $20 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内，温度上升蠕变反应比温度保持在 50°C 时大，温

度下降使蠕变显著地减小。承受一定载荷的松木梁，在温度周期地变动的弯曲试验中，最初加热期产生显著的蠕变变形，而之后的冷却期及加热期，蠕变缓慢地增加。卸载时，在最初的加热期产生最大的蠕变回复，而之后的冷却期及加热期回复很小。加热温度越高，残留的不可逆永久变形越大。见图 1-14。

弦切面加载弯曲时，在第二个加热期的开始阶段，短时间地产生负的蠕变，而后立即消失，蠕变再次增加。天然干燥木材比高温干燥变形减小显著，这是由于细胞壁结晶区发生不可逆变化的缘故，具有低聚合度的纤维素射线组织，与具有聚合度的纤维素管胞行动不一致。通过热处理，解除载荷之后，不可逆蠕变能回复。

木材预热处理温度（干燥温度）越高，处理时间越长，蠕变或应力松弛就越大。

(2) 含水率

① 恒定含水率的影响

木材中的水分起着增塑剂作用，其他条件一定时，含水率的增加，一般使蠕变柔量增大，松弛弹性模量降低。

木材的弯曲、拉伸、压缩和剪切试验，蠕变速度和全蠕变量，受含水率的影响很大。弯曲时含水率增加，蠕

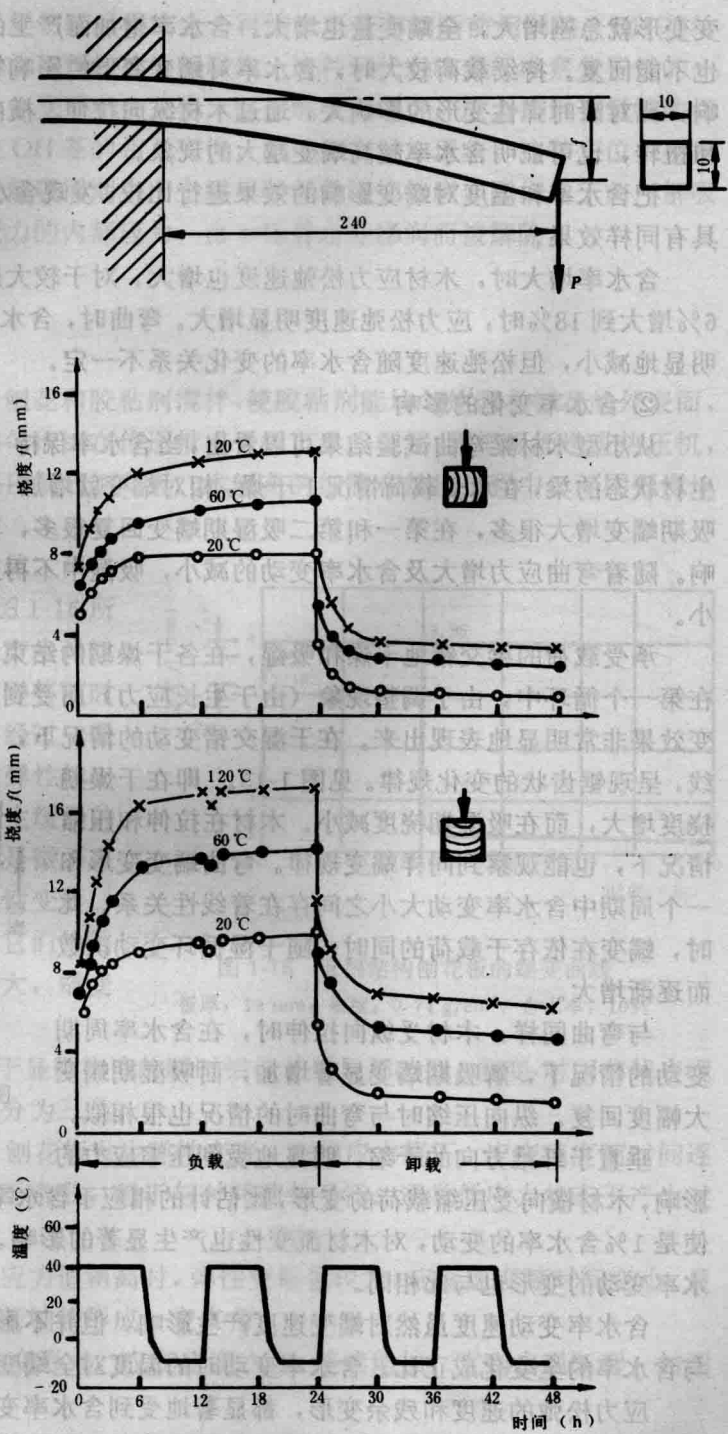


图 1-14 温度周期变化的变形-时间曲线
(载荷为 9.8 N 时的弯曲变形)