

# 木材蠕变特性常数化研究方法探讨\*

## Discussion on the Determination of Constants for Creeping Properties of Wood

刁海林 梁炳钊 徐峰 兰才武 苏初旺 梁宏温 牟继平

Diao Hailin Liang Bingzhao Xu Feng Lan Caiwu Su Chuwang Liang Hongwen Mu Jiping

(广西大学林学院 南宁市邕武路16号 530001)

(Forestry College, Guangxi Univ., 16 Yongwulu, Nanning, Guangxi, 530001, China)

**摘要** 为了探讨确定木材蠕变特性的常数的方法,用应变测试方法代替相关文献的挠度测试方法对试件进行试验.结果获得木材稳定蠕变阶段内的木材蠕变曲线,测取3个常数:  $J_0, Z_0, \sum J_i$  即足以说明材料的蠕变特性.简化了实验,使木材蠕变特性的工程评价变得十分便捷.

**关键词** 木材 蠕变特性 常数化

中图法分类号 S781.23; S792.11

**Abstract** To probe into a method for determining the constants of creeping properties of wood, the strain gauging method is employed in the test of test-pieces instead of the flexibility method in the relevant references. The creeping curve is obtained in the stage of stable creeping of wood. Three constants,  $J_0, Z_0, \sum J_i$ , are measured to explain the creeping properties of the test-pieces. The determination is simplified and is helpful to the evaluation of creeping properties of wood in engineering.

**Key words** wood, creeping property, constant

木材的蠕变与时间有关,而且是非线性的,使得木材蠕变特性研究非常困难,以至于至今未能象其它物理力学性质,如弹性模量、硬度、强度等那样,可以用一个不变的常数来衡量它的蠕变特性.木材蠕变特性只能在极有限的范围内采用图表或回归式表示<sup>[1]</sup>.表示的方法不一致,而且是非常数表示法,导致树种间木材蠕变特性的比较非常困难.

工程实际中迫切要求木材蠕变特性指标表示常数化.一旦实现木材蠕变特性常数化,不仅便于工程中对各种木材进行蠕变性能比较,指导合理选材、用材,而且将为结构材料耐久性研究、木材粘弹性理论研究以及工程应用等方面的研究提供极大的方便,于理论于实际均有重要意义.

用常数来表示木材蠕变特性的研究,近年来国内外均有尝试,最早的是日本椋代等人<sup>[2]</sup>在1980年提出根据蠕变及蠕变恢复的实测结果确定模型元件数和元件常数的思想和方法.1982年,日本蒲上等人<sup>[3]</sup>又提出,可根据短时间内测得的蠕变曲线来确定蠕变常

数,从而缩短了测试时间.1989年以来,我国一些林业院校也相继开展此方面的研究<sup>[4-6]</sup>,如东北林业大学材力教研室借鉴日本学者的主要思想,根据国内实际情况率先对木材蠕变特性常数化研究进行了颇有建树的探讨,提出在对木材试件进行短期(420 min)弯曲挠度测试的基础上,利用流变学中“梁之对应原理”将挠度值换算为蠕变柔量以获得木材的蠕变特性曲线,最后通过解开尔芬锁来确定木材的蠕变特性常数的研究方法.这在我国目前算得上一个比较有代表性的研究方法,极有可借鉴之处,但毕竟仍处于探索阶段,在一些具体问题上,如在实验方法上以及最终对蠕变特性常数的确定及评价方法上,均存在值得商榷之处.因此,本文对这两个方面提出自己的观点和见解,供同行参考.

### 1 蠕变特性常数化研究的方法

#### 1.1 木材蠕变特性曲线的测绘

根据流变学理论,材料的蠕变用蠕变柔量  $J(t)$  来度量.以时间  $t$  为横坐标,蠕变柔量  $J(t)$  为纵坐标,对试件进行(420 min)实验测试,测试方法采用新提出的应变测试法.该方法不对试件进行挠度测量而是

将试件采用4点加载弯曲,在纯弯曲区段用应变计直接测取弯曲应变,然后由流变学中关于蠕变柔量的定义确定材料的蠕变柔量.流变学中关于蠕变柔量的定义为<sup>[7]</sup>

$$J(t) = \frac{\bar{X}(t)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_0$  为恒定的单向应力,  $\bar{X}(t)$  则为沿  $\epsilon_0$  方向与某瞬时  $t$  相应的线应变.

然后经数据转换,即可绘制出图1所示的蠕变特性曲线.

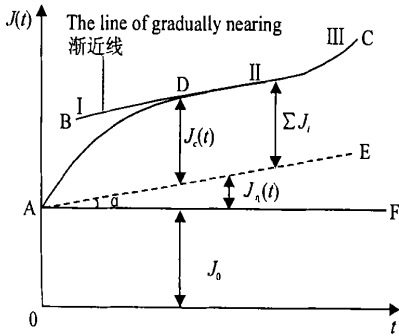


图1 木材蠕变特性曲线

Fig. 1 Creeping curve of wood

## 1.2 木材蠕变特性曲线的力学模拟和数学模拟

木材蠕变特性曲线(图1)是一粘弹性曲线.根据流变学理论,该曲线特性可用图2所示粘弹性力学模型模拟.该模型又称广义伏格特模型,它由一个麦克斯韦体和  $n$  个开尔芬体串联而成.麦克斯韦体和开尔芬体的恒应力时间—应变关系分别如图3图4所示.可见将它们串联叠加起来模拟图1所示蠕变特性曲线是相当理想的.

根据流变学理论,图2所示广义伏格特模型又可由式(2)所示数学模型模拟<sup>[7,8]</sup>,即

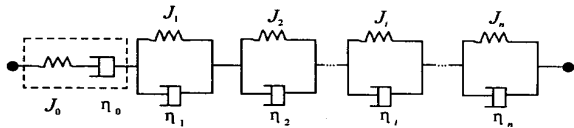


图2 广义伏格特模型

Fig. 2 Broad sense Voigt-W. model

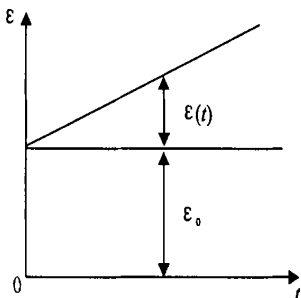


图3 麦克斯韦体的  $t-X$  曲线

Fig. 3 Maxwell J.  $t-X$  curve

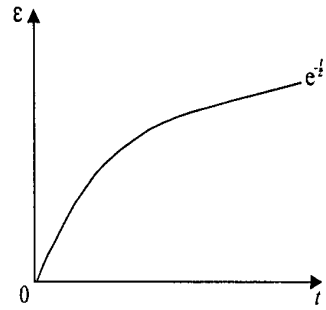


图4 开尔芬体的  $t-X$  曲线

Fig. 4 Kelvin  $t-X$  curve

$$J(t) = J_0 + \frac{t}{Z_0} + \sum_{i=1}^n J_i (1 - e^{-t/Z_i}) \quad (2)$$

式中  $J(t)$  表示伏格特模型在恒载下任一瞬时的蠕变柔量,第1项代表伏格特模型中麦克斯韦体的蠕变柔量,  $J_0$ 、 $Z_0$  分别是其元件的弹性柔量和粘性系数;第3项则代表模型中  $n$  个开尔芬体的蠕变柔量之和,  $J_i$  为第  $i$  号开尔芬体中弹性元件的平衡柔量,  $Z_i = J_i Z_0$  为第  $i$  号开尔芬体的延迟时间,即第  $i$  号开尔芬体达到平衡时所需的时间,  $Z_0$  为第  $i$  号开尔芬体中粘性元件的粘性系数.

令  $J_z(t) = \frac{t}{Z_0}$ , 称为粘性柔量.

令  $J_c(t) = \sum_{i=1}^n J_i (1 - e^{-t/Z_i})$ , 称为延迟弹性柔量.

于是(2)式又可写为

$$J(t) = J_0 + J_z(t) + J_c(t) \quad (3)$$

式中  $J_0$  为瞬间弹性柔量,  $J_z(t)$  为粘性柔量,  $J_c(t)$  为延迟弹性柔度.

## 1.3 木材蠕变特性常数的确定

至此我们已经知道,任一树种的木材蠕变特性均可用图2所示广义伏格特模型来模拟,任一瞬时的蠕变柔量由(2)式来确定.只是不同树种应具有不同的伏格特元件常数  $J_0, J_1, J_2, \dots, J_i, \dots, J_n; Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_n$  及  $Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_n$ . 我们就是根据各自不同的常数来区别不同树种木材的蠕变特性的.那么,对一具体树种,需要用几个常数来表示它的蠕变特性,主要取决于它的伏格特模型中元件的个数.  $n$  个元件对应于  $n$  个元件常数.

首先,伏格特模型中,麦克斯韦体是必需的.它的2个元件常数  $J_0, Z_0$  均可由蠕变特性曲线确定.  $J_0$  可直接量取,  $Z_0$  则由粘性蠕变直线 AE 的斜率确定.

其次,伏格特模型中开尔芬体的个数及其元件常数可按以下方法确定.

由(3)式知

$$J_c(t) = J(t) - \left( J_0 + \frac{t}{Z_0} \right) = \sum_{i=1}^n J_i (1 - e^{-t/Z_i})$$

(4)

式(4)不能直接求出  $J_k Z_k$  及  $Z_k$ . 所以设此时的延迟时间为  $Z_1$ , 且  $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$ ; 如果此时的测试时间  $Z_2 < t < Z_1$ , 使  $\geq 2$  的开尔芬元件柔量达到平衡柔量, 即  $\geq 2$  的  $J_i$  为定值. 于是(4)式变为

$$J_c(t) = J_1 \left( 1 - e^{-t/Z_1} \right) + J_2 + \dots + J_i + \dots + J_n = \sum_{i=1}^n J_i - J_1 e^{-t/Z_1}. \quad (5)$$

将上式改写为

$$\Delta J_c(t) = \sum_{i=1}^n J_i - J_c(t) = J_1 e^{-t/Z_1}, \quad (6)$$

两边取对数得

$$\ln \Delta J_c(t) = \ln J_1 - \frac{t}{Z_1}. \quad (7)$$

式(7)为一线性方程, 故可由它的斜率和截距求得  $J_k Z_k$  及  $Z_k = Z_1 / J_1$ . 因此, 可得 1号开尔芬体的蠕变柔量:

$$J_{c1}(t) = J_1 \left( 1 - e^{-t/Z_1} \right). \quad (8)$$

从  $J_c(t)$  中减去  $J_{c1}(t)$  后再重复上述算法, 可求得  $J_k Z_k$ ; 当  $J_c(t) - \sum_{i=1}^n J_{ci}(t) \approx 0$  时计算结束.

经实际计算知, 以上计算过程收敛极快, 当  $i = 2$  时即可达到足够的模拟精度. 所以, 当用伏格特模型模拟木材的蠕变时, 只须将 1个麦克斯韦体和 2个开尔芬体串联即可. 因此, 可用 6个蠕变常数  $J_0, J_1, J_2, Z_0, Z_1, Z_2$  来确定木材的柔变特性.

## 2 讨论

至今为止的所有关于木材蠕变特性研究, 虽然都以流变学理论为基本依据, 但在实验方法及在获取最终常数和评价方法上均因实验条件及对力学模型中开尔芬锁等的认识不同而存在差异. 本文在实验方法上, 经研究论证, 提出新的测试方法——应变测试法. 该实验方法直接从定义入手, 概念清晰, 避免了复杂的数据转换, 易于操作, 可充分发挥应变仪可以同时多点测量的特点, 在一个时间单元内可对试件进行批量测试, 提高实验效率. 如果采用智能应变仪, 则可与计算机联接, 自动进行数据记录、数据处理并作图. 这些都是“挠度测试法”所不能实现的. 经本课题的实际应用, 获得了与标准曲线吻合得相当好的蠕变曲线, 充分显示出它的独特优势. 但是哪一种实验方法最可靠、最实用, 还有待于进一步探讨和比较.

前面介绍了通过解开尔芬锁, 最终采用 6个广义伏格特模型元件常数来表示木材蠕变特性的方法<sup>[1]</sup>. 从其解开尔芬锁的过程可见, 在反复计算过程中, 每开一级锁均需重新描绘与之相应的蠕变曲线, 操作上

十分复杂, 而且太多的辅助图形, 难以保证精度. 此外, 在最终所得的 6个常数中,  $J_0, J_1, Z_0, Z_1, Z_2$  作为单个常数均无独立解释蠕变特性的作用. 我们认为无须克意求取, 太多的常数将只会给树种间木材蠕变特性的比较带来累赘.

根据木材的一般蠕变规律知, 木材蠕变过程分为初期蠕变阶段、稳定蠕变阶段及最后蠕变断裂阶段<sup>[6,9]</sup>. 由于目前我们所借鉴的是利用短时间 (420 min) 内弯曲蠕变实验来确定木材蠕变特性的理论, 所获得的是第二阶段即稳定蠕变阶段以内的木材蠕变曲线. 在木材整个蠕变过程中, 该阶段所持续时间最长, 为主要蠕变阶段, 最能说明木材的蠕变特性. 从木材的蠕变及蠕变恢复曲线可见, 该阶段呈一倾斜的直线, 它与表示木材粘性蠕变特性的 AE 直线几近平行. 因此, 我们认为可以通过作稳定蠕变阶段的平行线获得 AE 线, 而无需通过卸载测取蠕变恢复曲线来获取 AE 线, 使实验得以简化. 在此理论上, 即可以用第二蠕变阶段的有关特性来说明木材的主要蠕变特性. 此阶段的蠕变柔量可表示为

$$J(t) = J_0 + J_Z(t) + \sum J_i.$$

式中  $\sum J_i$  为一常数 (因为全部开尔芬体均达到了平衡) 它代表所有开尔芬体蠕变柔量的总和, 无须考虑其中使用了多少个开尔芬元件. 其值可由实验曲线上直接量取. 因此, 实际上我们只须测取常数  $J_0, Z_0, \sum J_i$  即足以说明材料的蠕变特性了. 其中,  $J_0$  说明材料抵抗瞬间弹性变形的能力,  $J_0$  愈小则材料抵抗瞬间弹性变形能力愈强;  $Z_0$  说明材料抵抗长期粘性蠕变的能力,  $Z_0$  愈大则抗长期粘性蠕变能力愈强;  $\sum J_i$  则是一种继  $J_0$  之后的延迟弹性柔量,  $\sum J_i$  愈小则材料抗蠕变能力愈强. 显然, 经过上述简化后, 使木材蠕变特性的工程评价变得十分便捷.

## 参考文献

- 1 卢宝贤等. 粘弹性模型在木材蠕变中的应用. 力学与实践, 1989, 11(2): 41-44.
- 2 棕代纯辅, 田口雅之. 木材学会志, 1980, 26.
- 3 浦上弘幸, 福山万治郎. 木材学会志, 1982, 28.
- 4 史贵荣. 木材的粘弹性及其蠕变模型. 北京林业大学学报, 1988, 10(2): 88-94.
- 5 张斌等. 小兴安岭几个主要树种的蠕变特性. 东北林业大学学报, 1988, 16(5): 71-78.
- 6 李大纲. 意杨木材弯曲蠕变特性的初步研究. 四川农业大学学报, 1998, 16(1): 99-101.
- 7 M 雷讷著. 理论流变学讲义. 北京: 科学出版社, 1965. 2.
- 8 冈小天著. 生物流变学. 北京: 科学出版社, 1980. 11.
- 9 尹思慈主编. 木材学. 北京: 中国林业出版社, 1996. 10.

(责任编辑: 邓大玉)