

木材导温系数模型的研究^①

钟云志, 钟义山

(西北农林科技大学 图书馆, 陕西 杨陵 712100)

摘要 研究了一定条件下木材导温系数与温度、含水率、密度及声速的相关关系, 分别导出了弦向和径向导温系数的经验回归方程式。所得理论值和实际值平均相对误差不超过 0.3%, 相对误差绝对值平均不超过 4.8%。

关键词 木材; 导温系数; 模型; 回归方程

中图分类号 S781.37 文献标识码 A 文章编号: 1001-7461(2003)02-0084-03

The Model Research of Wood Thermal Diffusivity

ZHONG Yun-zhi, ZHONG Yi-shan

(Library, NW Sci-Tech Univ. of Agr. and For., Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract The relationship between thermal diffusivity and temperature, moisture content, density and velocity of sound is studied. The experiment regression equations on the thermal diffusivity in the choral and radial direction were deduced. By comparing with the practical value, the average relative error of the theoretical values less than 0.3%, and average absolute value of relative error is less than 4.8%.

Key words wood, thermal diffusivity; model; regression equation

木材导温系数是木材热学性质的主要指标之一。它是在非稳定传热过程中决定热交换强度的主要指标。木材的加热和冷却多属于非稳定传热过程, 研究木材的湿热处理问题时导温系数是一个主要参数。国内外许多学者对此进行了广泛研究, 并从实验数据出发提出各种经验方程式^[1~3]。由于木材由天然高分子有机体组成, 其化学成分及结构极其复杂, 给木材热学性质理论研究带来了困难, 在推导导温系数时不得不进行必要的假设和简化, 因而使其经验表达式精度受到影响。本文以文献[1]中常见木材实验数据为依据, 把木材视为由木材物质、水分和空气组成的三相系统的总体, 从统计学的理论推导木材导温系数。

1 材料与方法

1.1 资料来源

文献[1]列出了中国科学院木材研究所测得的国产木材在室温(13.9~26.0℃)和气干状态下(含水率10%~16%)的导温系数原始数据, 以及

常见的22种木材的弦向导温系数和18种木材径向导温系数原始数据。本文在此原始数据基础上进行研究与统计分析。

1.2 研究方法

根据实验数据分别对弦向和径向导温系数和各因子进行相关分析^[4]。考虑到各因子之间的相互作用和影响^[5], 对导温系数及各因子进行偏相关分析。分别对弦向和径向导温系数对各因子进行多元回归分析。剔除次要因子, 建立导温系数和重要因子的回归方程, 以此作为导温系数的理论表达式。

2 结果与分析

2.1 弦向导温系数对各因素的偏相关分析

根据文献[1]中弦向导温系数原始数据, 计算导温系数与其他变量的相关矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & r_{03} & r_{04} \\ & r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ & & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ & & & r_{33} & r_{34} \\ & & & & r_{44} \end{bmatrix} =$$

① 收稿日期 2002-07-29

作者简介: 钟云志(1971-), 男, 河北卢龙人, 馆员, 在读硕士研究生, 西北农林科技大学图书馆工作。

$$\begin{bmatrix}
 \text{导温系数} & \text{密度} & \text{声速} & \text{含水率} & \text{温度} \\
 1 & -0.699 & -0.612 & -0.200 & -0.040 \\
 & 1 & 0.001 & 0.187 & 0.237 \\
 & & 1 & 0.258 & -0.186 \\
 & \text{对称} & & 1 & 0.223 \\
 & & & & 1
 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,矩阵 R 中的元素为两两变量的相关系数,根据(2)式计算导温系数对各变量的偏相关系数。

$$r_{(oj)} = -\frac{R_{oj}}{\sqrt{R_{oo}R_{jj}}} = -\frac{r^{oj}}{\sqrt{r^{oo}r^{jj}}} \quad (2)$$

式中: r_{0j} 表示导温系数对第 j 变量的偏相关系数, R_{0j} 、 R_{oo} 、 R_{jj} 为相关矩阵 R 阵对应 r_{0j} 、 r_{oo} 、 r_{jj} 代数余子式,而 r^{0j} 、 r^{oo} 、 r^{jj} 为 R 逆阵的相应元素。检验偏相关系数显著性利用 T 检验。

$$T = \frac{r_{(oj)}}{\sqrt{\frac{1-r_{(oj)}^2}{n-p-1}}} \sim T(n-p-1) \quad (3)$$

其中, n 为样本容量, p 为影响导温系数的自变量个数。

应用 SPSS 软件计算导温系数对各变量的偏相关系数、检验 T 值及检验概率(表 1)。

表 1 弦向导温系数的偏相关系数及检验

Table 1 The partial correlation test of the thermal diffusivity in the choral direction

变量	控制变量	偏相关系数	检验 T 值	检验概率 p 值
密度	声速、含水率、温度	-0.887 7	-7.949 4	<0.000 1
声速	含水率、温度、密度	-0.859 4	-6.930 1	<0.000 1
温度	含水率、密度、声速	-0.037 4	-0.154 3	0.879 0
含水率	密度、声速、温度	0.272 9	1.169 6	0.258 0

从表 1 可以看出,温度和含水率对于导温系数没有显著影响,而密度和声速对导温系数均有极显著的影响。

2.2 径向导温系数对各因子的偏相关分析

根据文献[1]中径向导温系数原始数据,计算导温系数与其他变量的相关矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix}
 r_{00} & r_{01} & r_{02} & r_{03} & r_{04} \\
 & r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\
 & & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\
 & & & r_{33} & r_{34} \\
 & \text{对称} & & & r_{44}
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 \text{导温系数} & \text{含水率} & \text{密度} & \text{声速} & \text{温度} \\
 1 & -0.229 & -0.573 & -0.740 & -0.050 \\
 & 1 & 0.234 & 0.262 & 0.371 \\
 & & 1 & 0.317 & 0.371 \\
 & \text{对称} & & 1 & -0.407 \\
 & & & & 1
 \end{bmatrix} \quad (4)$$

同时,计算径向导温系数对各变量的偏相关系

数、检验 T 值及检验概率(表 2)。

表 2 径向导温系数的偏相关系数及检验

Table 2 The partial correlation test of the thermal diffusivity in the radial direction

变量	控制变量	偏相关系数	检验 T 值	检验概率 p 值
含水率	密度、声速、温度	0.141 3	0.514 6	0.615
温度	含水率、密度、声速、	-0.191 9	-0.705 0	0.493
密度	声速、含水率、温度	-0.370 9	-1.440 1	0.174
声速	含水率、温度、密度	-0.656 8	-3.140 5	0.008

从表 2 可以看出,径向导温系数对含水率、温度的偏相关不显著,即含水率和温度对导温系数影响不大。导温系数和密度的偏相关系数在 $\alpha = 0.20$ 水平上是显著的,而导温系数和声速的偏相关在 $\alpha = 0.01$ 水平上是显著的,即声速对导温系数有极显著的影响。

2.3 导温系数对各因子的回归分析及最佳经验方程的确定

根据弦向和径向导温系数原始数据,分别利用最小二乘法建立导温系数对其他 4 个因子的经验回归方程,得到:

$$a_{\text{弦}} = 0.335 52 - 0.000 060 557\rho - 0.000 036 882u + 0.001 071w - 0.000 061 137t \quad (5)$$

$$a_{\text{径}} = 0.389 28 - 0.000 031 955\rho - 0.000 044 603u + 0.001 096 0w - 0.000 787 798t \quad (6)$$

其中, a 、 ρ 、 u 、 w 和 t 分别为导温系数($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、声速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、含水率(%)和温度($^{\circ}\text{C}$)。

根据弦向与径向导温系数和其他相关因素的偏相关关系,可见含水率和温度对导温系数影响不显著,可以从经验方程中逐一剔除,声速和密度都对弦向导温系数有极显著影响,声速对径向导温系数有极显著影响,而密度对径向导温系数亦有一定影响,逐一剔除影响不显著的因素(含水率和温度)。分析表明,它们的不显著与室温、气干状态下有关。分别建立重要因素和弦向及径向导温系数的经验回归方程,建立最佳经验表达式。经计算得到:

$$a_{\text{弦}} = 0.339 22 - 0.000 059 010 9\rho - 0.000 035 090 6u \quad (7)$$

$$a_{\text{径}} = 0.355 57 - 0.000 040 715 3\rho - 0.000 037 193 0u \quad (8)$$

对于弦向和径向导温系数回归方程的回归显著

性检验值分别为 $F = 59.457$ 和 $F = 15.576$ 。而显著性检验概率值均远小于 0.001,即 2 个经验回归方程均有极显著的回归关系。

2.4 导温系数经验回归方程理论值效果

导温系数最佳经验回归方程非常简明且所得理论值和实际值均有极理想的吻合程度,平均相对误差不超过 0.3%,相对误差绝对值平均不超过 4.8%。这里的最佳表达式所得的理论值,分别和文献[1]中弦向和径向导温系数经验公式相比较,极大地提高了理论值的精度,使理论值与实际值的误差普遍大为缩小。根据弦向和径向导温系数原始实验数据,由文献[1]和本文模型 2 种不同方法推得理论值和实际值误差情况(表 3)。文献[1]所得模

表 3 2 种模型误差比较

Table 3 The comparison of error of two models

误差	弦向导温系数		径向导温系数	
	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2
平均误差 $md/10^{-6}m^2 \cdot s^{-1}$	0.000 88	0.000 00	0.006 98	0.000 00
均方误差 $mse/10^{-6}m^2 \cdot s^{-1}$	0.010 59	0.004 76	0.010 66	0.007 79
平均相对误差 $mpd/\%$	0.606 14	0.158 25	4.694 31	0.284 32
相对误差平均 绝对值 $mapd/\%$	7.408 04	3.302 01	6.705 56	4.751 12

$$\text{注: } md = \frac{1}{n} \sum_i (a_i - \hat{a}_i); mse = \frac{1}{n} \sum_i (a_i - \hat{a}_i)^2;$$

$$mpd = \frac{1}{n} \sum_i \left(\frac{a_i - \hat{a}_i}{a_i} \right); mapd = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{a_i - \hat{a}_i}{a_i} \right|。$$

其中 a_i 为导温系数实际值, \hat{a}_i 为导温系数理论值, n 为实验数据个数。

型分别令为模型 1(弦)和模型 1(径),本文所得模型分别令为模型 2(弦)和模型 2(径)。从表中可见,不论采取哪种误差指标,本文模型均远优于文献[1]所

推出的模型。还要指出,文献[1]提供模型得到的弦向和径向导温系数理论值和实际值相对误差达 10%以上者,分别占实验数据总体的 36.4%和 16.7%。而本文提供模型的弦向和径向相对误差均不超过 10%。由此可见,本文所得模型精度较高。

3 结论与讨论

导温系数是木材热学的一个重要参数。本文导出的导温系数的理论值表达式,取得了理论值和实际值理想吻合的效果。在室温和气干条件下,导出的模型可用来预测导温系数。文中从统计学得出导温系数与温度、含水率关系不密切的结论,可能与供统计分析的实验数据本身就是在温度变化不大的情况下和气干条件下有关。当温度、含水率大幅度变化时,导温系数的规律尚待进一步研究。而本文得出的在常见条件下导温系数的理论表达式较前人提出的相同条件下相应公式,不仅较大的提高了精度,而且使模型大为简化。

参考文献:

- [1] 杨庆贤. 木材导温系数的理论表达式[J]. 福建林学院学报, 2001, 2(2):109-112.
- [2] 成俊卿主编. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1985. 501-508.
- [3] 高瑞堂. 木材热学性质与温度关系的研究[J]. 东北林业大学学报, 1985, 13(4):22-27.
- [4] 陈希孺,王松桂. 近代回归分析——原理、方法及应用[M]. 合肥:安徽教育出版社,1987. 212-216.
- [5] Kollmann F P. Principles of wood science and technology [M]. Vol. 1. Soild Berlin: Berlin Springer Verlary, 1968. 200-210.