

研究与开发

# 有限元法在木材热处理中的应用

冯武<sup>1</sup>, 王恒武<sup>1</sup>, 周晓扬<sup>2</sup>, 罗婷<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学理学院, 武汉 430070; 2. 江岸车辆厂测试中心, 武汉 430012)

**摘要:** 采用有限元法对木材升温杀虫过程中木材的热响应进行了数值模拟, 结果与实测值吻合。在此基础上, 分析了木材截面形状、环境升温速度和保温值对木材热响应的影响, 描述了这种方法的优点及应用的可行性, 为监测系统和升温杀虫工艺的制定提供了理论依据。

**关键词:** 有限元; 数值模拟; 温度; 木材; 热处理

中图分类号: TS653 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2003)06-0013-03

## The Application of Finite Element Analysis in Wood Heat Treatment

FENG Wu<sup>1</sup>, WANG Heng-wu<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-yang<sup>2</sup>, LUO Ting<sup>2</sup>

(1. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Jiang'an Rolling Stock Works, Wuhan 430012, China)

**Abstract:** A numerical simulation model based on finite element analysis was established in this article to determine the temperature distribution in wood during an insecticidal heating treatment. The calculated temperature was compared with that measured from a typical operation and shows the feasibility of applying finite element analysis to predict the thermal response of wood. On the basis of the results, further experiments were conducted to analyze the effects on the shape of wood sections, the temperature elevation rate and heat preservation value as a result of the thermal response of wood. The calculated results provide a theoretical reference for designing a monitoring system and operating process for insecticidal treatment of wood.

**Key words:** Finite element method; Numerical simulation; Temperature; Wood; Heat treatment

我国加入 WTO 之后, 西方发达国家对我国出口产品的限制已由过去的贸易配额限制变成以技术限制为主, 即通过高要求的技术标准阻止我国产品进入。例如, 我国近来出口到欧盟国家的货物中, 因包装材料中有害虫虫卵, 没有达到欧盟的高温杀虫要求而被扣押或退回的事件已发生多次, 这一现象已经引起我国政府和企业界的高度重视, 相关企业也加强了对木材干燥及杀虫工艺的监控。而针对不同标准, 要达到高温杀虫的目的, 过去以低温(45~50℃)除湿为主的木材干燥设施如何控制升温过程和加温保温时间将是一个重要的工艺问题。本文以达到杀虫目的所必

需的木材中心温度和保温时间作为制定方案的依据, 以北美乔松(*Pinus strobus*)木材在环境温度线性变化的工况中作为分析实例, 采用有限单元法建立木材的有限元模型, 分析木材的截面形状、环境升温速度、保温温度与保温时间对木材热响应的影响, 为监测系统和制定升温杀虫工艺提供参考。

### 1 木材温度场模拟和计算

#### 1.1 基本原理

木材的干燥及升温杀虫过程是将木板放置在干燥设施中, 当设施内介质温度随时间推移而升高时, 木材内部温度也随之发生变化。因此, 应用瞬态传热原理来分析木材内部温度场的变化规律。

收稿日期: 2003-03-04

作者简介: 冯武(1978-), 男, 武汉理工大学理学院硕士研究生。

瞬态传热过程是指一个系统的加热和冷却过程。根据能量守恒原理,瞬态热平衡可以表示为:

$$[C]\{T'\} + [K]\{T\} = \{Q\},$$

式中:[K]—传导矩阵:[C]—比热容矩阵:[T]—节点温度向量:[T']—温度对时间的导数,[Q]—节点热流率向量,包含热生成。

1.2 模型的建立

通常被干燥木材为长条形板,可以认为木材沿长度方向每个断面温度场的变化相同,因此,可近似为二维温度场处理。干燥设施中一般有风扇、除湿系统等辅助介质流动装置,使介质流动均匀,因而木材表面的温度变化可以等同于环境温度变化。同时在升温杀虫过程之前,木材满足含水率不大于12%,即假定木材干燥过程已完结。

考虑多数情况下木材厚度不超过60 mm,以截面为60 mm×60 mm、长度为1.2 m的北美乔松木材为试材。环境温升状态为:初始温度48℃,温升速度6℃/h,上升到60℃后保温1 h。采用有限元法建立数值分析模型。

1.3 试验与数值模拟结果

计算每一时刻试件截面中心的温度及变化积律。图1所示为截面中心温度随环境温度变化的规律,计算结果与实测值基本吻合。木材中心温度是通过埋入温度传感器结合自主开发的干燥窑温控与数据采集系统获得,采用4个试件,其中2个在试件60 cm处截面中心埋置,2个在40 cm和80 cm处截面中心同时埋置,取3次试验的平均值。

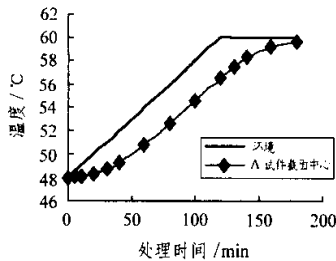


图1 环境和试材截面中心温度-时间曲线  
Fig. 1 Air temperature versus specimen core temperature with respect to time

2 截面形状对温度场分布的影响分析

截面形状直接影响木材内部的温度场分布。为考察木材截面形状的影响,取三种截面形状的四组试件:A正方形(60 mm×60 mm)、B圆形(与试件A截

面面积相等)、C不等边矩形(40 mm×90 mm)和D小正方形(40 mm×40 mm),对其在同一温升条件下的热响应进行比较分析。选择的温升条件为:初始温度48℃,温升速度6℃/h,上升到60℃后保温1 h。

计算所得的环境温度和试件A、B、C、D的截面中心温度随时间的变化曲线见图2,可以看出:在相同温升条件下,不同截面木材的中心温升曲线很相似;在开始一段时间内变化较小,曲线平滑,原因是开始阶段木材和环境温差小,木材获得的热量主要被木材外层所吸收。随着截面中心的温度与环境温度差值变大,到达一定值时,截面中心与环境温度同步升高,在一段时间内可近似地认为是直线变化,两者温差几乎维持不变。当环境温度到达60℃后保持不变,截面中心的温度在此之后渐渐逼近环境温度,直至相等。

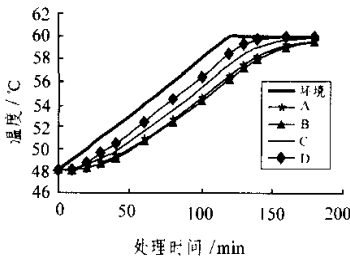


图2 环境与不同截面试材中心温度-时间曲线  
Fig. 2 Comparison of air temperature and core temperature in shaped wood pieces with respect to time

表1 不同截面形状试样的中心温度  
Tab. 1 Core temperature of shaped wood pieces

| 时间<br>/min | 环境温<br>度/℃ | 试件截面中心温度/℃ |       |       |       |
|------------|------------|------------|-------|-------|-------|
|            |            | A          | B     | C     | D     |
| 0          | 48         | 48.00      | 48.00 | 48.00 | 48.00 |
| 10         | 49         | 48.03      | 48.02 | 48.10 | 48.17 |
| 20         | 50         | 48.23      | 48.20 | 48.48 | 48.74 |
| 30         | 51         | 48.66      | 48.59 | 49.09 | 49.55 |
| 40         | 52         | 49.26      | 49.15 | 49.83 | 50.47 |
| 60         | 54         | 50.80      | 50.63 | 51.59 | 52.42 |
| 80         | 56         | 52.59      | 52.37 | 53.51 | 54.41 |
| 100        | 58         | 54.50      | 54.25 | 55.48 | 56.41 |
| 120        | 60         | 56.46      | 56.19 | 57.47 | 58.41 |
| 130        | 60         | 57.41      | 57.15 | 58.37 | 59.24 |
| 140        | 60         | 58.20      | 57.96 | 59.00 | 59.67 |
| 160        | 60         | 59.17      | 59.00 | 59.63 | 59.94 |
| 180        | 60         | 59.62      | 59.51 | 59.87 | 59.99 |

表1列出了环境和4种试件截面中心温度在特定时间点的计算结果,可以看出:在同一种温升条件下,截面面积相等的A、B、C三种试件中,圆形截面木材的热响应最为缓慢,矩形截面木材的热响应较快,正方形截面的热响应位于二者之间。而对于截面同样

正方形的试件 A 和 D,很明显边长较大的热响应慢。由分析结果说明,在生产时,锯材宜多采用小截面结构,若需采用较大截面时,在不影响使用功能的前提下,尽量选择不等边矩形,以达到较好的热响应效果。

3 升温速度对温度场分布的影响分析

环境温度升高的速度不仅影响木材的热响应,同时决定着能否既满足木材杀虫要求,又能缩短杀虫时间,实现节约能源、减少消耗的目的。采用截面为 60 mm×60 mm 的正方形木材,将其放置在初始温度为 48℃,但升温速度分别控制在 6℃/h 和 3℃/h 的环境中,待温度上升到 60℃后保温 1 h,测定试件的热响应情况。

以环境温度值为参考标准,表 2 列出了在升温速度分别为 6℃/h 和 3℃/h 的条件下,试件截面中心温度的计算结果。从中可以看出:当环境温度到达某一数值时,在 3℃/h 的升温速度条件下,试件截面中心的温度比在升温速度为 6℃/h 的要高,说明当环境温度升较慢时,木材内部温度对环境温度的追随性较好,即热响应效果好,但所需时间较长;而环境升温较快,所需时间缩短,但木材热响应效果较差,同时使木材内外产生较大温差,有可能导致开裂现象出现。

表 2 在两种升温速度下截面中心的温度的变化

Tab. 2 Core temperature of the samples at two temperature elevation rates

| 环境温度<br>/℃ | 试件截面中心温度/℃ |           |
|------------|------------|-----------|
|            | 升温速度 6℃/h  | 升温速度 3℃/h |
| 48         | 48.00      | 48.00     |
| 49         | 48.03      | 48.14     |
| 50         | 48.23      | 48.65     |
| 51         | 48.66      | 49.42     |
| 52         | 49.26      | 50.31     |
| 54         | 50.80      | 52.23     |
| 56         | 52.59      | 54.26     |
| 57         | 53.54      | 55.20     |
| 58         | 54.50      | 56.22     |
| 59         | 55.47      | 57.19     |
| 60         | 56.46      | 58.22     |

4 保温温度值的选择对温度场分布的影响

为分析不同保温温度对木材升温杀虫所需时间的影响,取截面面积为 60 mm×60 mm 的试材,在初始温度均为 48℃,升温速度为 6℃/h 的条件下,选取不同的保温条件:(1)温度升到 60℃后保温 1 h;(2)温度升到 63℃后保温 30 min,分别测定其截面中心温度的变化。试验结果见图 3。

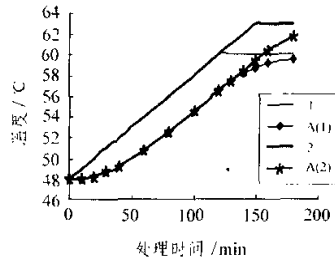


图 3 不同保温条件下截面中心温度-时间对比曲线

Fig. 3 Core temperature of various samples with respect to time in different heat preservation processes

从图 3 可以看出,在保温条件(2)下,当环境温度达到 60℃后继续升高,木材中心温度曲线追随延长,温差与条件(1)的相同。同时与试件在条件(1)下的计算结果相比较,对同一杀虫要求,条件(1)下所需的保温时间比条件(2)下的要长。例如:某客户的要求为木材的中心温度达到 58℃,持续时间不小于 30 min。从分析结果可以得到,在条件(1)下,环境温度达到 60℃时,木材中心温度为 56.45℃,未达到 58℃,对应保温时间需要延长;在条件(2)下,当环境温度达到 63℃时,木材中心温度已经超过 58℃,对应保温时间可以缩短。当主要考虑时间因素的前提下,显然选择条件(2),即较高的保温温度效果更好。

5 结论

目前,木材干燥和升温杀虫的处理过程多采用计算机结合传感器进行监控。但在实际生产过程中,对不同种类木材的内部特别是中心温度采用传感器进行实时检测是相当复杂的,并且费用较高。利用有限元法实现了对此问题的计算机模拟,通过定性和定量分析,可以获得木材中心在不同时刻的温度分布。与其他试验方法相比,它不受试验条件限制,同时可沿时间推进求解,为最终的监测系统和升温杀虫工艺的制定提供理论依据。

参考文献:

[1] 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.  
[2] 李延军,高建民. 常见木材干燥方法和设备的应用[J]. 木材工业,2002,16(4):23-28.  
[3] 周永东,关永福,雷得定,等. 小型木材除湿干燥设备的合理配置及应用[J]. 木材工业,2001,15(5):29-30.  
[4] 李明海,任建勋,罗群生,等. 钢-木组合结构在火灾中的热响应数值模拟[J]. 北京:清华大学学报(自然科学版),2001,41(2):68-71.