

高温条件下木材升温时间的理论计算和实测

刘新有, 张璧光, 伊松林

(北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 提出了木材热处理过程中高温干燥阶段升温时间的理论计算公式,并以 20、40、60 mm 厚的杨木为试材,进行了验证试验。试验设置 100、130、180 °C 三个升温阶段,测定了试材表面和芯层达到温度平衡的时间。结果表明,理论计算时间与试验实测时间能较好地吻合,应用理论计算公式,可为合理制定木材高温热处理工艺参数提供依据。

关键词: 高温热处理; 杨木; 热量传递时间; 理论计算; 试验验证

中图分类号: S782.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654(2009)02-0016-03

Theoretical Prediction of Heat Transfer in Wood and Experimental Verification

LIU Xin-you, ZHANG Bi-guang, YI Song-lin

(College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Theoretical prediction usually provides basic understanding and guidance to establish reasonable technology in the production process. A partial differential equation was used in this study to predict heat transfer time between the surface and core layer of wood during heat treatment. The prediction was compared with the result of an experiment that was performed on Chinese poplar lumber with various thicknesses of 20 mm, 40 mm and 60 mm. The times for the core temperature to reach to 100 °C, 130 °C, and 180 °C were recorded and compared with the predicted values. The comparison of the results showed that the theoretical predicted times matched the experimental values very well.

Key words: heat treatment; poplar; heat transfer time; theoretical prediction; experimental verification

高温热处理木材(又称炭化木)自问世以来,以其良好的生物耐久性、耐候性、尺寸稳定性,及安全、环保等性能,正日益广泛地应用于室外装饰、木扶梯、园林景观以及蒸汽浴室内部设施等诸多领域^[1-2]。

高温热处理木材的生产工序主要包括高温干燥、热处理炭化以及冷却与含水率调节 3 个阶段。在高温干燥阶段,木材表层和内部同步加热,是决定高温

热处理木材质量的重要因素。尤其对厚板而言,如果内外热处理程度不同,产品容易产生缺陷。同时,高温加热时间是处理木材的重要环节,对保证木材炭化程度、缩短炭化时间都至关重要。如果加热时间过短,木材内部热处理程度低,影响产品的质量;若加热时间过长,又会造成能源的巨大浪费^[3]。

至今,鲜有木材高温加热时间方面的研究报道。因此,根据木材热量传递的特点,笔者从理论上推算了木材热处理过程中,其表面和芯层温度达到平衡的升温时间,并辅以试验验证,旨在为木材(特别是人工林木材)制定合理的高温热处理工艺提供依据。

收稿日期: 2008-06-28; 修改日期: 2009-01-18

基金项目: 北京林业大学科研训练计划(200705008);北京市教育委员会共建项目建设计划。

作者简介: 刘新有(1982—),男,北京林业大学学生。

通讯作者: 伊松林,男,北京林业大学材料学院副教授。

1 木材升温时间的理论计算

在木材热处理过程中,既存在木材表面与传热介质之间的对流换热,又存在木材内部热传递。从木材开始加热,到冷却、结束高温热处理的过程中,自始至终存在着不稳定的热交换。因此,掌握高温热处理过程中,木材内部尤其是厚度方向上温度场的分布及变化规律,对于提高木材高温热处理质量,减小能耗具有重要意义。

在不稳定热交换中,木材中任意一点的温度变化可用傅立叶偏微分方程(导热微分方程)来确定^[4]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (1)$$

式中: t —木材中任一点(坐标 x, y, z)在时间 τ 时的温度,℃;

τ —时间, h;

λ —导热系数, W/(m·℃);

c —木材比热, kJ/(kg·℃);

ρ —木材密度, kg/m³;

q_v —单位时间、单位体积木材的生成热量(本文中 $q_v=0$), 称为发热率;

$\lambda/c\rho$ —木材的导温系数或热扩散率, 常用 a 表示, 即 $a=\lambda/c\rho, \text{m}^2/\text{h}$ 。

因木材的长度远大于其厚度和宽度, 试验中将试材封端处理, 所以, 可以忽略长度方向的温度变化, 仅考虑厚度和宽度方向传热(即 2 维传热)^[5], 故无内热源的木材中, 任一点在时间 τ 时的温度为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (2)$$

已知初始加热条件: $\tau=0, t=t_0$, 假设加热前木材各点温度相同; 边界条件加热时, 木材表面的温度等于 t_1 , 近似于介质温度; b, h 分别为木材宽度和厚度; t 为木材指定点温度, τ 为加热时间。将上述条件代入式(2)可解得:

$$t = t_1 + (t_0 - t_1) \frac{16}{\pi^2} \left[e^{-\pi^2 \cdot \tau \left(\frac{a_x}{b^2} + \frac{a_y}{h^2} \right)} \sin \frac{\pi x}{b} \cdot \sin \frac{\pi y}{h} \right] + \dots \quad (3)$$

式(3)是傅立叶级数的展开式, a_r 和 a_t 分别为弦向和径向导温系数。此式是快速收敛的, 大多数情况下根据前两项, 即能求出足够精确的解。因 a_r 和 a_t 相差不大, 所以取 $a_t = a_r = a$, 其值因木材的密度及含水率而异^[6-7]。

由此可知, 利用公式既可由时间求温度, 亦可用温度求时间。

2 木材升温时间的验证试验

2.1 材料

毛白杨(*Populus tomentosa*), 产于北京郊区, 气干材。按实际生产常规用材的要求, 要求试材无变色、节子、虫眼、裂纹等明显缺陷, 试材的含水率、尺寸等其他条件见表 1。

表 1 试材规格

Tab. 1 The dimensions of specimens used in this study

种类	初含水率 / %	尺寸 / mm×mm×mm(长×宽×厚)	块数
1	8.6	150×75×20	20
2	9.3	150×75×40	20
3	10.4	150×75×60	20

2.2 设备

自制木材炭化箱, 可调温度 25~500℃; 多点温度检测系统, 能够实时显示试材内部温度情况。

2.3 方法

1) 试材处理: 包括封端、钻孔、埋热电偶 3 个处理过程。

用环氧树脂和铝箔封闭试材的端面; 之后在试材侧面长度方向的中心线上, 用 $\phi 1 \text{ mm}$ 的钻头钻 3 个孔, 孔的中心分别位于距离表面 1 mm、1/4 试材厚度、试材中心处, 孔深为试材宽度的一半; 钻孔完毕称量试材质量, 然后将热电偶埋入试材中。

2) 验证试验: 将不同厚度的试材分批放入温度和湿度已经升至设定值的炭化箱中, 记录达到设定温度(100、130、180℃)时的时间; 当试材温度达到高温热处理的终了温度(180℃)时, 试验结束, 并记录总升温时间。

3) 数据分析: 将升温时间的理论计算值与试验实测值进行比较, 以验证理论计算公式的可靠性, 同时与经验值进行比较。

毛白杨的导温系数为 $0.00041 \text{ m}^2/\text{h}$ ^[7], 将其代入式(3), 可进一步简化升温时间的理论计算公式。

$$\tau = \frac{\ln(t_1 - t) + 2\ln\pi - \ln 16 - \ln(t_1 - t_0) - \ln \sin \frac{\pi x}{b} - \ln \sin \frac{\pi y}{h}}{-\pi^2 a \left(\frac{1}{b^2} + \frac{1}{h^2} \right)} \quad (4)$$

干燥阶段的经验预热时间依据参考文献^[8]计算, 其值取决于木材的厚度。

$$\tau(\text{经验}) = 1.5 d$$

式中: $\tau(\text{经验})$ —整个干燥过程用时, h;

d —木材厚度, cm。

2.4 结果

表 2 列出 3 种厚度的杨木试材,在热处理的高温干燥阶段,不同层面的温度达到设定温度时的时间。图 1 显示各种厚度试材中心面的升温过程,以及升温时间理论计算值与试验实测值的差异。

表 2 3 种厚度杨木的升温过程

Tab. 2 Times to reach the targeted temperatures for the poplar specimens with different thicknesses

试件 厚度/ mm	时间/ min	100 ℃		130 ℃		180 ℃	
		1/4 厚度	中心	1/4 厚度	中心	1/4 厚度	中心
		平面	面	平面	面	平面	面
20	理论值	16.3	18.3	45.5	47.5	80.6	82.6
	试验值	21.7	23.5	55.5	60.0	99.9	104.3
40	理论值	54.5	60.9	151.9	158.4	269.0	275.5
	试验值	58.3	70.4	158.6	165.8	296.1	301.6
60	理论值	95.9	107.3	233.3	279.0	393.8	485.2
	试验值	108.3	115.4	247.1	288.5	421.1	520.9

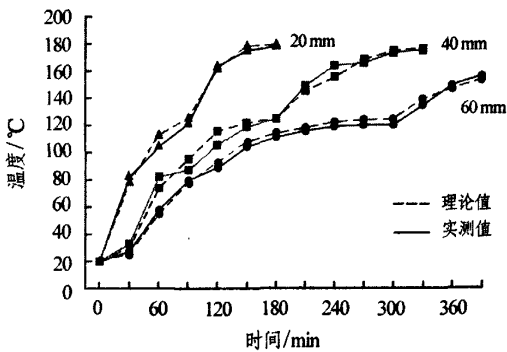


图 1 试材中心面理论计算和试验实测升温时间的比较
Fig. 1 Predicted and experimental heat transferring processes

从表 2 及图 1 可以看出,木材内部达到各设定温度时,其升温时间的理论计算值与试验实测值非常接近。通过计算,得出 20、40、60 mm 厚度的试材,其理论计算时间和试验实测时间的相关系数分别为:0.95、0.99、0.98,说明通过公式从理论上计算木材的升温时间是可行的。

现有的木材干燥经验预热公式,只能估计整个干燥过程所用时间,不能反映温度随时间的变化情况。试验结果表明,3 种厚度试材的经验预热时间均比理论计算值和试验实测值偏长。若以经验预热时间为

依据设置高温热处理工艺,将造成能源浪费。
试验中还发现,在初始加热阶段,试材的实际升温速度比理论值稍快,之后由于传热温差减少,升温速度趋缓,越接近介质温度时,升温越困难;并且,20、40 和 60 mm 厚的试材,到达同样温度所需的时间之比约为 1 : 3 : 6。这是因为在其他条件相同的情况下,木材越厚,其热传导的路径越长,热阻越大,热量传递的速度越慢,故所需时间越长。

3 结论

1) 木材升温时间的理论计算值与试验实测值接近,相关系数 ≥ 0.95 ,说明以理论公式计算木材升温时间的方法是可行的。

将理论公式应用于实践,既可以预计加热时间,在保证热处理木材质量的前提下,尽量缩短加热时间,节约能源;又可以由加热时间反推木材内部某点的温度,控制内层和表层温差在 10 ℃ 以内,提高处理木材的质量。

2) 经验预热公式是针对木材常规干燥而言的,所得时间比理论计算值和试验实测值均偏长。若以此为依据制定高温热处理工艺,必将造成能源浪费。

3) 本研究只对杨木气干材进行了试验,理论公式对其他不同含水率、不同树种木材的适用性,还需进一步研究验证。

参考文献:

[1] 顾炼百,涂登云,于学科. 炭化木的特点及应用[J]. 中国人造板,2007(5):30-32.
[2] 王舒,伊松林,张璧光,等. 高温热处理条件对杨木试材颜色变化的影响[C]// 第十一次全国木材干燥学术研讨会论文集,福州,2007.
[3] 李贤军,张璧光,杨涛,等. 木材干燥预热时间初探[J]. 北京林业大学学报,2004,26(2):90-93.
[4] 杨世铭. 传热学[M]. 北京:人民教育出版社,1987.
[5] 高建民. 木材干燥学[M]. 北京:科学出版社,2008.
[6] 尹思慈. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1996:133-134.
[7] (美)肖(John F Siau). 木材传热传质过程[M]. (肖亦华,滕通廉,郭焰明,译). 北京:中国林业出版社,1989:168-169.
[8] LY/T 1068-2002,锯材窑干工艺规程[S].

(责任编辑 向 琴)

欢迎订阅2009年<木材工业>, 每期10元, 全年60元, 邮发代号2-311
请查阅: WWW.cwjournal.com