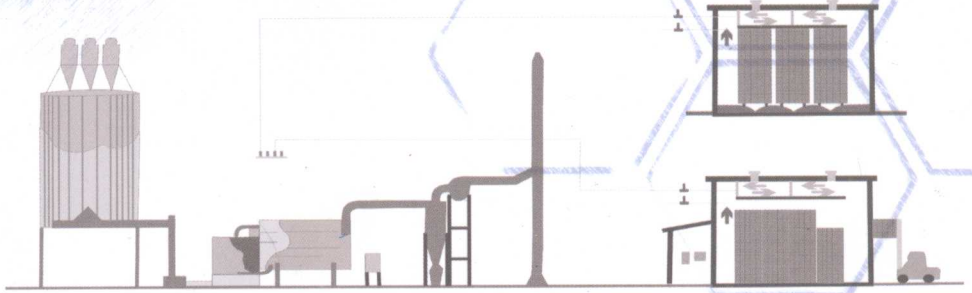




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 木材干燥学

高建民 主编



 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

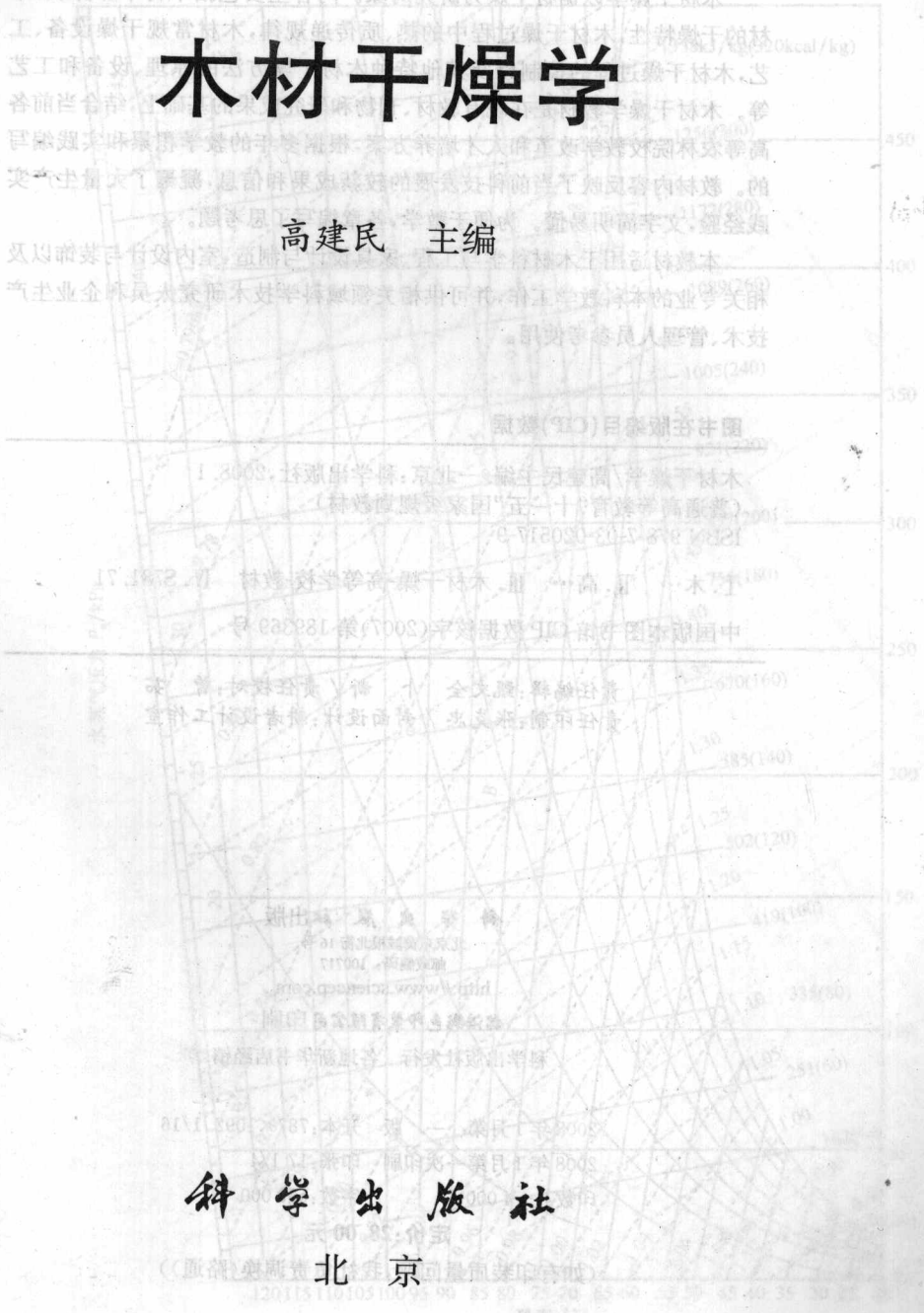
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 木材干燥学

高建民 主编

科学出版社

北京



## 内 容 简 介

木材干燥学以锯材干燥为研究对象。内容主要包括木材干燥介质,木材的干燥特性,木材干燥过程中的热、质传递规律,木材常规干燥设备、工艺,木材干燥过程的控制以及其他特种木材干燥方法的原理、设备和工艺等。木材干燥学教材是在现有教材、刊物和研究成果的基础上,结合当前各高等农林院校教学改革和人才培养方案,根据多年的教学积累和实践编写的。教材内容反映了当前科技发展的较新成果和信息,凝聚了大量生产实践经验,文字简明易懂。为便于教学,各章编写了思考题。

本教材适用于木材科学与工程、家具设计与制造、室内设计与装饰以及相关专业的本科教学工作,并可供相关领域科学技术研究人员和企业生产技术、管理人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

木材干燥学/高建民主编. —北京:科学出版社,2008.1  
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)  
ISBN 978-7-03-020517-9

I. 木… II. 高… III. 木材干燥-高等学校-教材 IV. S781.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 189369 号

---

责任编辑:甄文全 卜 新 / 责任校对:曾 茹  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 1 月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—4 000 字数:550 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

## 编委会名单

主 编：高建民(北京林业大学)

副主编：陈广元(东北林业大学)

蔡英春(东北林业大学)

伊松林(北京林业大学)

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)：

程万里(东北林业大学)

李贤军(中南林业科技大学)

李延军(浙江林学院)

刘志军(河北农业大学)

邱增处(西北农林科技大学)

汪佑宏(安徽农业大学)

王传贵(安徽农业大学)

谢拥群(福建农林大学)

张士成(北华大学)

庄寿增(南京林业大学)

## 前 言

木材干燥学是木材科学与工程、家具设计与制造、室内设计与装饰以及相关专业的必修专业课程,是一门基础理论与实践应用并重的科学。本书比较系统地阐述了木材干燥基础理论、常规干燥设备、常规干燥工艺以及干燥过程的控制,并对常见的几种特种干燥方法的原理、设备和工艺进行了较为系统的介绍。

本书是在现有国内有关木材干燥教材和研究成果的基础上,结合当前各高等农林院校进行的教学改革和人才培养计划调整方案,根据多年的教学积累和实践进行编写的。教材内容反映了当前科技发展的较新成果和信息,凝聚了大量生产实践经验,文字简明易懂,为便于教学,各章编写了思考题。本书适用于木材科学与工程、家具设计与制造、室内设计与装饰以及相关专业的本科教学,并可供相关领域科学技术研究人员和企业生产技术、管理人员参考使用。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由北京林业大学、东北林业大学和南京林业大学等 10 所高等农林院校联合编写。教材共 8 章,编写分工如下。

高建民(北京林业大学):第 1、4 章,6.2、6.5 节。陈广元(东北林业大学):2.2、7.1、7.2 节。蔡英春(东北林业大学):2.3、5.1、5.2、5.4 节。伊松林(北京林业大学):第 3、8 章。程万里(东北林业大学):2.1、5.3、6.6 节。庄寿增(南京林业大学):6.5 节。刘志军(河北农业大学):6.3 节。李延军(浙江林学院):6.1 节。李贤军(中南林业科技大学):6.4 节。谢拥群(福建农林大学):6.2 节。张士成(北华大学):7.3、7.4 节。王传贵(安徽农业大学):2.1、5.4 节。汪佑宏(安徽农业大学):第 8 章。邱增处(西北农林科技大学):2.1 节。

本书参考引用了国内外有关的图书资料以及国家标准、行业标准,在此谨向相关作者表示衷心感谢!本书在编写过程中得到了北京林业大学张璧光教授的大力支持。在统稿和编排过程中,北京林业大学研究生胡传坤做了大量的工作。在此表示衷心感谢!

欢迎读者对书中的错误或不妥之处进行批评指正。

编 者

2007 年 9 月

# 目 录

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 木材干燥学概述 .....	1
1.1.1 木材干燥学研究对象和内容 .....	1
1.1.2 木材干燥的基本原理 .....	1
1.1.3 木材干燥的意义 .....	2
1.2 木材的干燥方法 .....	2
1.2.1 大气干燥 .....	2
1.2.2 人工干燥 .....	3
1.3 木材干燥技术的发展趋势 .....	5
思考题 .....	6
<b>第 2 章 木材干燥基础</b> .....	7
2.1 与干燥相关的木材性质 .....	7
2.1.1 木材构造特征 .....	7
2.1.2 木材与水分 .....	7
2.1.3 木材的密度及其测定 .....	15
2.1.4 木材的干缩与湿胀 .....	18
2.1.5 木材的黏弹性 .....	20
2.1.6 木材的热学性质 .....	22
2.1.7 木材的电学性质 .....	25
2.2 干燥介质 .....	26
2.2.1 过热蒸汽 .....	26
2.2.2 湿空气 .....	29
2.2.3 炉气 .....	40
2.3 木材干燥过程热质传递及作用 .....	43
2.3.1 热传递方式 .....	43
2.3.2 干燥室壳体的热损失 .....	46
2.3.3 木材干燥对流换热过程与基本规律 .....	48
2.3.4 干燥过程中木材水分移动与蒸发 .....	53
2.3.5 木材的常规干燥过程 .....	66
2.3.6 木材干燥过程中的应力与变形 .....	68
思考题 .....	72
<b>第 3 章 木材常规干燥设备</b> .....	73
3.1 常规干燥设备的分类及介绍 .....	73
3.1.1 常规干燥设备的分类 .....	73
3.1.2 常规干燥设备的型号命名 .....	75
3.2 典型常规干燥室的结构 .....	78
3.2.1 顶风机型干燥室 .....	79
3.2.2 侧风机型干燥室 .....	80

3.2.3	端风机型干燥室	81
3.2.4	干燥室空气流动循环的类型与分析	81
3.3	干燥室设备	83
3.3.1	干燥室壳体结构与建筑	83
3.3.2	干燥室通风设备	86
3.3.3	干燥室供热设备	88
3.3.4	干燥室调湿设备	91
3.3.5	木材干燥的运载设备	92
3.4	干燥设备的维护与保养	93
3.4.1	干燥设备的正确使用和保养	93
3.4.2	干燥室壳体的防开裂措施	94
3.4.3	壳体防腐蚀措施	94
3.4.4	室内设备的防腐蚀措施	95
3.5	炉气间接加热常规干燥室设备简介	96
思考题		99
<b>第4章</b>	<b>木材常规干燥工艺</b>	100
4.1	干燥前的准备	100
4.1.1	干燥室壳体和设备的检查	100
4.1.2	木材的堆积	100
4.1.3	干燥前的预处理	102
4.1.4	检验板的使用	105
4.2	干燥基准	111
4.2.1	干燥基准简介	111
4.2.2	干燥基准的编制方法	115
4.2.3	干燥基准的选用	121
4.3	干燥过程的实施	122
4.3.1	预热阶段	122
4.3.2	干燥阶段	123
4.3.3	终了阶段	124
4.3.4	木材干燥操作过程及注意事项	125
4.3.5	木材干燥工艺举例	126
4.4	木材干燥质量的检验	128
4.4.1	干燥木材的干燥质量指标	128
4.4.2	干燥木材含水率	129
4.4.3	干燥木材可见干燥缺陷的检测	132
4.4.4	干燥木材的验收	133
4.5	干燥后木材的保管	134
4.5.1	户外储存	134
4.5.2	暂时或短暂保护	134
4.5.3	敞棚	134
4.5.4	常温密闭仓库	135
4.5.5	加温密闭仓库	135
4.6	木材干燥的缺陷及预防	135
4.6.1	干燥缺陷的类型	135
4.6.2	干燥缺陷产生的原因及其预防	138

思考题	139
<b>第5章 木材干燥过程的控制</b>	140
5.1 概述	140
5.1.1 干燥过程中监控参数及主要影响因素	140
5.1.2 木材干燥监测与控制系统的要求	141
5.2 木材干燥过程监控参数测量	142
5.2.1 温度测量	142
5.2.2 湿度测量	142
5.2.3 木材含水率的测量	144
5.2.4 木材应力的测量	145
5.3 木材干燥控制系统	146
5.3.1 手动控制	146
5.3.2 半自动控制	148
5.3.3 全自动控制	150
5.3.4 木材干燥远程控制技术	154
5.4 现代控制技术简介	155
5.4.1 模糊逻辑控制	155
5.4.2 专家系统	156
5.4.3 神经网络控制系统	156
思考题	156
<b>第6章 其他木材干燥方法</b>	157
6.1 大气干燥	157
6.1.1 木材大气干燥的原理和特点	157
6.1.2 大气干燥时木材的堆积	158
6.1.3 干燥周期	161
6.1.4 强制气干	162
6.1.5 影响大气干燥的因素	162
6.2 除湿干燥	164
6.2.1 除湿干燥的原理与分类	164
6.2.2 除湿干燥设备	168
6.2.3 除湿干燥工艺	172
6.2.4 影响除湿干燥能耗的因素	177
6.2.5 除湿机的维护	178
6.3 真空干燥	180
6.3.1 真空干燥的原理与分类	180
6.3.2 真空干燥设备组成	181
6.3.3 真空干燥工艺	185
6.3.4 真空干燥举例——真空过热蒸汽干燥	187
6.4 高频与微波干燥	190
6.4.1 木材高频与微波干燥的原理及特点	190
6.4.2 高频干燥设备与工艺	192
6.4.3 微波干燥设备与工艺	194
6.4.4 微波与高频干燥实例	197
6.5 太阳能干燥	198
6.5.1 概述	198



6.5.2	太阳能木材干燥室的类型	200
6.5.3	太阳能空气集热器	201
6.5.4	简易太阳能木材干燥室	205
6.6	木材高温干燥方法及工艺举例	208
6.6.1	湿空气高温干燥	208
6.6.2	过热蒸汽干燥	209
6.6.3	高温干燥对设备性能的要求	213
6.6.4	高温干燥对木材性质的影响	214
6.6.5	高温干燥的特点及其适用范围	215
	思考题	216
<b>第7章</b>	<b>木材联合干燥技术</b>	217
7.1	气干-常规联合干燥	217
7.2	常规-除湿联合干燥	217
7.2.1	除湿与常规干燥的优点与局限性	217
7.2.2	常规-除湿联合干燥	218
7.2.3	常规-除湿联合干燥木材的能耗分析	218
7.3	真空-微波(高频)联合干燥	218
7.3.1	真空-微波(高频)联合干燥概述	218
7.3.2	真空-微波(高频)联合干燥装置	219
7.3.3	真空-微波(高频)联合干燥基准	219
7.4	太阳能-热泵联合干燥	221
7.4.1	太阳能-热泵除湿机联合干燥的工作原理	221
7.4.2	太阳能供热系统的性能	222
7.4.3	太阳能-热泵除湿联合干燥示例	222
7.4.4	联合干燥的经济分析	224
	思考题	225
<b>第8章</b>	<b>木材干燥设备的选用与评价</b>	226
8.1	干燥设备的分析选用	226
8.1.1	干燥方法的比较	226
8.1.2	干燥设备的选用	227
8.2	技术经济指标和成本核算	229
8.2.1	木材干燥设备的评价指标	229
8.2.2	成本核算	230
	思考题	232
	主要参考文献	233
附录1	我国55个主要城市木材平衡含水率估计值	235
附录2	中国主要木材树种的木材密度与干缩系数	237
附录3	湿空气相对湿度表	243
附录4	湿空气热力学性质表	246
附录5	针叶树锯材室干基准表	259
附录6	阔叶树锯材室干基准表	260
附录7	湿空气的焓-湿图	264
附录8	补充有密度和比容线的焓-湿图	265
附录9	常压状态(0.1013MPa)湿空气参数图	266

## 第1章 绪 论

### 1.1 木材干燥学概述

随着社会经济的发展和人民生活水平的不断提高,人们对家具和室内装饰的需求量日益增加。目前家具的材料虽然种类繁多,如实木、人造板、金属、塑料、竹藤等,但由于木材具有美丽的天然纹理和色彩,具有吸音、隔热、室内温度与湿度调节等多种优点,同时又是当今世界四大原材料(钢材、水泥、木材、塑料)中唯一可以再生和循环利用的绿色材料,因此人们日益偏爱木质家具,特别是实木家具。这就导致木材的需求量日益增多,每年大约以1000万 $\text{m}^3$ 的速度增加。提高木材利用率和减少木材损失已成为解决木材供需矛盾的主要途径之一。木材干燥(wood drying)是保障和改善木材品质,减少木材损失、提高木材利用率的重要环节。目前我国尚有相当多的木材由于未经干燥处理或干燥设备落后以及干燥工艺不当等,引起木材产生开裂(check)、变形(distortion)、腐朽(decay)、虫蛀(damaged by vermin)以及变色(discoloration)等缺陷,造成木材资源的浪费现象十分严重。这正是我国木材干燥领域从业人员与科研工作者所面临的严峻形势。

#### 1.1.1 木材干燥学研究的对象和内容

新采伐的木材中含有大量的水分,在木材被加工利用之前,需采取适当的措施,使木材的含水率降低到一定程度,以保证木制品的质量与使用寿命。那么,如何来降低木材的含水率呢?通常的做法就是对木材进行干燥处理。木材干燥一般的步骤是:首先提高木材的温度,使木材中水分气化,以水和水蒸气的形式向木材表面移动;然后在循环介质的作用下,使木材表层的水分以水蒸气的形式离开木材表面,这个过程就叫木材干燥。

木材干燥方法(drying method)大体可分为机械干燥(mechanical drying)、化学干燥(chemical drying)、热力干燥(thermal drying)三类。通常所说的木材干燥是指在热力作用下以蒸发或沸腾的汽化方式排出水分的处理过程。

木材干燥学研究的对象为锯材干燥(lumber drying)。研究内容主要包括木材干燥介质,木材的干燥特性及干燥过程中的热、质传递规律,木材干燥设备、工艺及干燥室的设计。因此,木材干燥学是一门综合木材学、热工、机械、建筑、控制等多科性的应用科学,是木材科学与技术领域的一个重要分支。

木材干燥的基本原则是在确保干燥质量、节能、环保以及低成本的前提下尽可能提高木材的干燥速度(drying rate)。

#### 1.1.2 木材干燥的基本原理

木材干燥的任务就是排除木材中多余的水分,以适应不同的用途和质量要求。木材干燥的基本原理就是利用木材含水率梯度(moisture content gradient of wood)、温度梯度和水蒸气压力梯度,促使水分以液态和气态两种形式连续地由木材内部向表面移动,并通过木材表面向干燥介质(drying medium)蒸发;内部的水分移动速度与表面的水分蒸发强度协调一致,使木材由表及里均衡地变干。

以木材常规干燥过程为例:首先采用高温( $100^{\circ}\text{C}$ 以上)和高湿(饱和或接近饱和)的循环空气对木材进行预热处理,当木材内部被加热到规定的温度后,按干燥基准第一阶段的参数

降低介质的温度和相对湿度,使木材厚度方向上形成内高外低的含水率梯度、温度梯度和水蒸气压力梯度的驱动力,迫使木材中的水分由内向外移动,木材表面水分蒸发,这时干燥过程即可开始。然后按照干燥基准逐步提高介质的温度和降低相对湿度,使木材中水分由表及里均衡排除,直到干燥结束。在干燥过程中,应尽可能消除或减轻内应力、开裂和变形,在不降低木材物理力学性质的前提下,确保干燥质量。

### 1.1.3 木材干燥的意义

木材具有质量轻,机械强度高(品质系数高),耐酸、碱腐蚀,热绝缘性与电绝缘性好,易于切削,纹理、色泽美丽等优良特性,但这些优良特性只属于干燥后的木材。由于湿材的含水率较高、密度大、机械强度低、物理和力学性能较差、易腐朽等,不宜作为民用和工业用材,所以一般民用和工业用材必须经过干燥处理。

木材干燥可以从很多方面提高木材的使用性能,主要表现如下:

(1) 可以提高木材和木制品的力学强度、胶结强度以及表面装饰质量,改善木材的加工性能。当木材含水率低于纤维饱和点时,木材的力学强度将随着含水率的降低而提高;干木材的切削阻力小于湿材;湿材对胶黏剂与涂料有稀释作用,降低了木材的胶结强度与表面装饰效果。例如,当松木含水率由30%降低到18%时,其静曲强度将从50MPa增至110MPa。

(2) 可以提高木材和木制品的形状与尺寸稳定性,防止木材开裂。当木材含水率在纤维饱和点以下时,木材在空气中随空气湿度的变化会发生湿胀与干缩现象;当木材干缩时木质门、窗有缝隙,接榫松脱,若干缩不均匀还会引起开裂、变形;当木材发生湿胀时,可能发生木地板翘起和门窗关不上等现象。

(3) 可以预防木材的变质与腐朽,延长木制品的使用寿命。湿木材长期置于大气中,往往会发生腐朽或遭受虫害等。木材的腐朽是由于木腐菌造成的,多数木腐菌在木材含水率高于20%时方能繁殖;含水率在纤维饱和点(30%)以上时,木腐菌会严重地危害木材;含水率在20%以下或达到饱和状态时,木腐菌的生长会受到限制。因此,对木材进行干燥处理是防止木材腐朽的有效措施之一。另外,木腐菌最适宜的温度为24~32℃,在12℃以下、46℃以上,木腐菌几乎完全中止生长。木材经过干燥或采用蒸汽处理,可杀死木腐菌。高温高湿比单纯高温的杀伤力更强。因此,将木材的含水率降至8%~12%时,不仅可以保证木材固有的性质和强度;而且可以提高木材的抗腐蚀能力。

(4) 减轻了木材的质量,有利于提高车辆的运载能力。我国每年有大量的木材要从林区外运,湿材在运输过程中不但易受虫害,发生腐朽,而且由于木材中含有大量的水分,运输很不经济。如果事先对木材进行适当的干燥处理,使木材的含水率降低到20%以下,则可节约大量的运输力。

(5) 可提高木材的热绝缘性与电绝缘性。当木材低于纤维饱和点时,含水率越低,导热性与导电性越小。

## 1.2 木材的干燥方法

木材的干燥方法可分为大气干燥与人工干燥两大类。

### 1.2.1 大气干燥

大气干燥(air drying)简称为气干,是自然干燥的主要形式,分为自然气干和强制气干两种。

自然大气干燥是一种古老而又简单的干燥方式。它是把木材按照一定的方式堆放在空旷的场院(又称板院)或棚舍内,由自然空气流过材堆(stack),使木材内水分逐步排出,以达到干燥的目的。它的特点是简单,不需要太多的干燥设备,节约能源;但这种方法占地

面积大,干燥时间长,干燥过程不能人为控制,受地区、季节、气候等条件的影响;终含水率(10%~20%)较高,在干燥期间易产生虫蛀、腐朽、变色、开裂等缺陷。所以,单纯的气干在实际生产中比较少见。

强制大气干燥(forced air drying)是自然大气干燥的发展,它是指在板院或者棚舍内用通风机提供 1m/s 左右的风速来缩短干燥时间的方法。强制气干的干燥质量较好,木材不致霉烂变色,可以减少端裂(end check),干燥时间较普通气干可缩短 1/2~2/3,但干燥成本约增加 1/3。

## 1.2.2 人工干燥

人工干燥(artificial drying)方法种类很多,其特点是采用适当的干燥设备,干燥过程可人为控制,干燥周期比大气干燥短,干燥过程不受地区、季节与气候的影响,干燥的最终含水率可根据实际需要人为控制,可保证木材的干燥质量。

### 1.2.2.1 常规与高温干燥

常规干燥(usual drying)是指以湿空气(moist air)作干燥介质,以蒸汽(vapor)、热水(hot water)、炉气(furnace gas)或热油(hot oil)为热媒,间接加热湿空气,湿空气以对流换热方式为主加热木材,干燥介质温度在 100℃ 以下的干燥方法。常规干燥中又以蒸汽为热媒的干燥室居多,一般简称蒸汽干燥。以炉气为热媒的常规干燥,在我国南方非采暖地区的中小型木材厂中占有相当的比例,由于它能处理厂内的木废料,又能降低干燥成本,故受到一些干燥量不太大的工厂的欢迎。土法建造的简易干燥室,在我国及一些不发达国家中对环境要求不高的地区仍较盛行。以热水为热媒的常规干燥,由于热水锅炉的价格比蒸汽锅炉低得多,故在一些不需要高温干燥,且干燥量不大的工厂有上升的趋势。以热油为热媒的常规干燥,目前在国内外的应用相对较少。

高温干燥(high temperature drying)与常规干燥的区别是干燥介质温度在 100℃ 以上,一般在 120~140℃。其干燥介质可以是湿空气,也可以是常压、高压过热蒸汽。高温干燥的优点是干燥速度快、尺寸稳定性好、干燥周期短,但高温干燥易产生干燥缺陷(drying defect),材色变深,表面硬化(case hardening),不易加工。高温干燥一般用于干燥针叶材,目前在新西兰、加拿大、澳大利亚、美国、日本等国较盛行,如用于干燥辐射松、柳杉等建筑用材。

常压过热蒸汽干燥(superheated steam drying)方法在我国兴起于 20 世纪 70 年代,其特点是传热系数大、热效率高、节能效果显著、无爆炸和失火危险。这种方法对于薄而且易干的木材具有良好的干燥效果,但干燥室的气密性和防腐蚀性等技术问题还有待进一步研究解决。所以,这种干燥方法至今并没有得到广泛的使用。

### 1.2.2.2 除湿干燥

除湿干燥(dehumidification drying)和常规干燥的原理基本相同,也是以湿空气作干燥介质,湿空气以对流换热为主的方式加热木材。常规干燥是以换气的方式降低干燥介质湿度,热损失较大;除湿干燥是湿空气在除湿机与干燥室间进行闭式循环。它依靠空调制冷和供热的原理,使空气冷凝脱水后被加热为热空气,再送回干燥室继续干燥木材。湿空气脱湿时放出的热量依靠制冷工质回收,又用于加热脱湿后的空气。

除湿干燥虽然具有节能、干燥质量好、不污染环境等优点,但通常温度低、干燥周期长,依靠电加热,电耗高,因而影响了它的推广应用。在日本、加拿大等国家,一般用除湿干燥作为预干(predrying)。

### 1.2.2.3 太阳能干燥

太阳能干燥(solar drying)是利用太阳辐射的热能加热空气,利用热空气在集热器与材堆间循环来干燥木材。太阳能虽然是清洁的廉价能源,但它是受气候影响大的间歇能源,干燥周期长,单位材积的投资较大,故太阳能的推广受限。为缩短干燥周期,太阳能干燥通常与其他能源如蒸汽、炉气及热泵等联合干燥。

### 1.2.2.4 高频干燥与微波干燥

高频干燥(high frequency drying)和微波干燥(microwave drying)都是以湿木材作为电介质,在交变电磁场的作用下使木材中的极性分子做极性取向运动,分子之间产生碰撞或摩擦而生热,使木材从内到外同时加热干燥。高频与微波干燥的区别是前者的频率低、波长较长,对木材的穿透深度较深,适于干燥大断面的木材。微波干燥的频率比高频更高(又称超高频),但波长较短,其干燥效率比高频高,但对木材的穿透深度不及高频干燥。这两种干燥方法的优点是干燥速度快,木材内温度场比较均匀,残余应力(residual stress)小,干燥质量较好;缺点是投资大、电耗高,同时若功率选择不同,功率过大或干燥工艺控制不当,易产生内裂(internal check)和炭化(char)。

### 1.2.2.5 真空干燥

真空干燥(vacuum drying)是木材在低于大气压的条件下实施干燥,其干燥介质可以是湿空气或过热蒸汽(superheated steam),但多数是过热蒸汽。真空干燥时,木材内外的水蒸气压差增大,加快了木材内水分迁移速度;同时由于真空状态下水的沸点低,可在较低的温度下达到较高的干燥速率,干燥质量好,特别适用于透气性好或易皱缩(collapse)以及厚度较大的硬阔叶材。

近十几年来真空过热蒸汽干燥在丹麦、德国、法国、加拿大、日本等国家已有工业应用,效果良好。但真空干燥设备投资大、电耗高,同时真空干燥容量一般比较小。目前我国真空干燥的应用较少。

### 1.2.2.6 远红外干燥

远红外干燥(far-infra-red drying)是指木材在远红外线的照射下,木材中的水分子吸收了远红外线的辐射能,使水分子产生共振,从而将电磁能转化为热能来加热木材,以达到干燥木材的目的。红外线是一种电磁波,波长范围为近红外线 $0.72\sim 2.5\mu\text{m}$ ,远红外线 $2.5\sim 1000\mu\text{m}$ ;木材干燥中使用的远红外线波长范围为 $5.6\sim 25\mu\text{m}$ 。远红外线木材干燥的优点是设备简单,干燥基准易于调节;缺点是电能消耗较大,干燥成本较高,红外线穿透木材的深度有限,干燥不均匀,易产生干燥缺陷,还易引起火灾等,目前极少应用。

### 1.2.2.7 压力干燥

压力干燥(press drying)是20世纪80年代出现的一种木材干燥方法,它是将木材置于密闭的干燥容器内,一方面提高木材的温度,另一方面提高容器内的压力,使木材中的水分在较高温度条件下开始汽化与蒸发,从而达到干燥木材的目的。这种干燥方法的特点是:干燥质量非常好,干燥周期较短;但能耗较大,容器的容积较小,生产量不大;另外成材加压干燥后颜色变暗,在节子周围会出现较大裂纹。此种干燥方法的设备腐蚀问题,干燥工艺、干燥基准,有待进一步研究。

### 1.2.2.8 溶剂干燥

溶剂干燥(solvent drying)是一种很少见的木材干燥方法。它是把湿木材放在嫌水性溶剂中,提高溶剂的温度,加热木材,使木材中的水分汽化和蒸发。这种溶剂的特点是不吸收木材中的水分,也不增加木材的湿度,干燥速度较快,设备简单、易于建造、工艺操作方便,但木材经过干燥后力学强度有所降低,不利于胶合和涂饰。常用的嫌水性溶剂有石蜡油、硫磺等。

## 1.3 木材干燥技术的发展趋势

近20年来,我国木材干燥在基础理论、工艺技术的研究与新技术、新方法的应用等方面有了较大的发展。木材干燥基础理论的研究逐渐向更深、更广的层次拓展;木材常规干燥工艺技术日趋完善与成熟;除湿、真空、微波及高频等干燥技术的应用有了较大的发展;木材干燥生产的范围与规模迅速扩大,木材干燥设备制造企业逐渐增多,干燥设备性能渐趋完善;近年来还出现了一些专业化的大、中型木材干燥企业;特别是我国的常规干燥和除湿干燥设备的设计水平和技术性能方面已接近国际先进水平;常规炉气干燥设备独具特色,可利用木废料作燃料,更适合我国国情。

但我国木材干燥行业在技术规范、设备质量、配套元器件及基础研究等方面还需要进一步改进与提高;木材干燥方法还应以常规干燥为主,也要发展短周期、低能耗、低成本、高质量的干燥方法;木材干燥过程的检测与控制技术有待于提高;干燥过程的节能、环保以及联合干燥技术是木材干燥技术的发展方向。

(1) 木材干燥基础理论的研究侧重点 ①木材干燥过程中的数学模拟——建立数学模型;②木材干燥过程的传热传质;③木材干燥过程中的应力与应变;④高精度的木材含水率和干燥质量的无损检测方法;⑤木材干燥过程的节能与环保等。

(2) 常规干燥仍占主导地位 常规干燥由于具有技术成熟、适应性强等诸多优点,预计在今后相当长一段时间仍将占主导地位。常规干燥的发展目标是高效、优质、低能耗、低成本,也就是在时间、质量、费用三者之间寻求平衡点或者说最优组合方案。要实现上述目标,常规干燥必须在干燥室设计、干燥工艺和监测控制与管理等几方面向精确性与高科技方向发展。

(3) 木材干燥过程的检测、控制与管理 木材干燥过程的检测与控制发达国家大多实现了半自动控制 and 全自动控制;而我国大多数木材干燥仍依靠操作人员凭经验控制干燥过程,从而导致干燥质量不易保证,干燥能耗偏高。今后的发展趋势是逐渐由手工操作转向半自动、全自动控制。干燥过程全自动控制的关键及难点在于干燥应力和含水率梯度的在线检测,目前已有的检测方法都存在一定的缺陷,今后干燥过程控制的重点在于解决控制参数在线测试精度这一难题。同时,现代化管理技术,如专家诊断系统和多媒体管理系统的技术将逐渐在木材干燥行业实施。

(4) 除湿、真空、微波及高频干燥将呈增长趋势 除湿、真空、微波及高频干燥都以清洁的电能作能源,又有各自的特点,已经呈现了增长趋势。太阳能干燥虽然是可再生的清洁能源,但由于间歇性供热等弱点,估计在短期内也不会有明显的增长;除湿干燥的增长比较明显,但除湿干燥温度低,一般用作预干的较多;真空过热蒸汽干燥是一种创新技术,具有潜在的高效率,预计这种干燥技术今后在干燥厚的硬阔叶材方面有较好的发展应用前景;高频和微波干燥加热较均匀、温度梯度较小,应力和变形小,干燥大断面的木材更有优越性,故也有一定的发展前景。

(5) 联合干燥技术是今后发展的重点 联合干燥符合国际干燥技术的创新发展趋势。因为每一种干燥方法都有各自的优点和适用范围,联合干燥正是取其优点而避其缺点。以

除湿干燥与常规蒸汽联合干燥为例,首先用蒸汽热能对木材预热,避免了采用除湿干燥时用电加热预热而带来的升温慢,电耗高的缺点。进入干燥初期至中期阶段,干燥室的排湿量大,此期间采用除湿干燥回收干燥室排气的余热,可以明显地降低干燥的能耗。在干燥后期,当干燥室排湿量很小时,则用蒸汽干燥,可提高干燥室温度,加快干燥速度,缩短干燥周期。此外,还有高频-蒸汽、真空-微波、微波-对流、真空-除湿、太阳能-蒸汽、太阳能-热泵除湿等各种联合干燥。但必须指出,联合干燥并非两种干燥方法的简单组合,而是针对不同干燥对象的优化组合。

(6) 木材干燥生产的规模化和专业化 木材干燥生产只有达到一定的经营规模后才更有利于采用高新技术和现代化管理系统,有利于保障木材干燥质量,有利于节能和环保,有利于降低干燥成本。一些发达国家如美国、加拿大等都有专营木材干燥的公司,根据用户订货要求干燥不同规格的板材或方材。而各种小型木材加工企业不必自备木材干燥设备,既降低成本又保证质量。

### 思考题

1. 木材干燥学研究的对象和主要内容是什么?
2. 木材干燥及其原理?
3. 木材干燥的目的和意义有哪些?
4. 大气干燥和人工干燥的方法主要有哪一些?

## 第2章 木材干燥基础

### 2.1 与干燥相关的木材性质

木材随着树种的不同,在构造上千变万化,而构造上的变异引起其性质上的差异。与干燥有关的木材性质主要包括木材的组织结构、木材中的水分、木材的收缩以及干燥过程中的蠕变、热传导、电学特性等。本节在木材学的基础上,对与干燥密切相关的木材性质进行必要的阐述。

#### 2.1.1 木材构造特征

树木是一种天然生长的生物体,其组成的最小生物单位是细胞,各种细胞的形态和特征不同,而且排列状态也不同。大多数细胞呈纵向排列,少数细胞呈径向排列。另外,木材细胞的细胞壁由薄的初生壁和厚的次生壁组成。其中,次生壁的 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ 层的微纤丝排列方向不同,是引起木材各向异性的一个重要原因,从而导致木材在干燥过程中发生不均匀的收缩,产生较大的收缩应力,引起诸如开裂、皱缩、翘曲(warp)等变形以及内部残留应力的产生。因此,木材的解剖学特性与木材的干燥有着密切的关系。

木材在进行干燥时,水分若要顺利地向外移动,木材内部就必须有水分移动的通道,即细胞腔、纹孔、细胞间隙及细胞壁内的微毛细管等。这些通道若呈开放状态,则木材容易干燥;反之,木材难干。所以说,木材解剖分子的状态及特征对干燥时间长短和干燥工艺制定起着决定性的作用,而且不同树种的木材,其干燥所需的时间和所要求的工艺条件不同。

木材的某些构造特征,往往会使木材在干燥过程中容易产生一些缺陷。如早材与晚材变化为急变的木材,在干燥过程中,在早材与晚材的交界处易产生环裂;在木射线含量多的树种中,特别是具有宽木射线的木材,干燥时易产生径裂。心、边材的干燥性能也有明显的区别。通常情况下,对于阔叶树材,由于边材中含有侵填体的导管较少,多数导管呈开放状态,所以边材的导水性较好;而心材中多数导管内含有侵填体,使导管腔部分或全部被堵塞,心材的导水性较差。因此,在干燥过程中心材和边材产生不均匀的收缩应力,使木材在心材和边材的交界处发生皱缩,特别是小径木木材干燥时,易产生皱缩缺陷。但对于针叶树材,生材在制材后,边材的含水率 $\leq 100\%$ ,干燥的初期阶段所需时间较长,但由于管胞的具缘纹孔处于开启状态,水分容易移动,干燥速度相对较快。然而由于管胞的纹孔在干燥过程中其纹孔膜上的纹孔塞往往偏向一边,从而将纹孔口堵住,形成纹孔闭塞状态,妨碍水分的移动,干燥速度缓慢。

此外,需要强调的是,在木材加工中通常所说的径切板和弦切板,与木材学中所述的径切面和弦切面是有区别的。在木材生产和流通中,借助横切面,将板宽面与生长轮之间的夹角在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 的板材称为弦切板;将板宽面与生长轮之间的夹角在 $45^\circ\sim 90^\circ$ 的板材称为径切板。

#### 2.1.2 木材与水分

##### 2.1.2.1 木材中水分的由来

树木生长时,根部的生活细胞不间断地从土壤中吸取水分,经过侧根送到主根,由主根到树干,经过木质部的管胞(针叶材)或导管(阔叶材)输送到树枝和树叶,树叶内的水分一部分向大气中蒸发,一部分在叶绿素中参与光合作用。树木中的水分既是树木生长所必不可



少的物质,又是树木输送各种营养物质的载体。根部不间断地把土壤中的水分输送到树叶,所以树干中含有大量水分。树木被伐倒锯制成各种规格的锯材后,水分的一部分或大部分仍然保留在木材内部,这就是木材中的水分。

木材中的水分含量因树种而异。同一株树木在不同生长季节,其木质部的含水量不同,同时木质部的各个部位,如心材、边材,根部、树干与树梢等部的含水量也不同,所以说木材的含水量分布很不均匀。当木材周围的大气条件发生变化,其含水量也会随之发生变化。木材中水分含量的多少在一定范围内影响木材的物理力学性质以及机械加工性能。

2.1.2.2 木材含水率及其测定

1. 木材含水率

木材中水分含量的多少通常用含水率或含水量(moisture content, MC)来表示,即用木材中水分的质量与木材质量之比的百分数的方式表示。根据计算基准的不同分为绝对含水率(absolute moisture content)和相对含水率(relative moisture content)两种。木材干燥生产中一般采用绝对含水率(MC),即木材中水分的质量占木材绝干质量的百分率。其计算公式如下:

$$MC = \frac{G_{湿} - G_{干}}{G_{干}} \times 100\% \tag{2-1}$$

式中:G<sub>湿</sub> 为湿木材的质量(g);G<sub>干</sub> 为绝干木材的质量(g)。

在某些情况下,木材的含水率也用相对含水率(MC<sub>0</sub>)来表示,即木材中水分的质量占湿木材质量的百分率。

$$MC_0 = \frac{G_{湿} - G_{干}}{G_{湿}} \times 100\% \tag{2-2}$$

前面已经提到,木材中的水分含量因树种而异,同一株树木各部位的水分含量也不同。一般针叶树种生材的边材含水率大于心材,阔叶树种生材的心材含水率大于边材。几种常见针叶树和阔叶树的心材及边材生材含水率如表 2-1 所示。

表 2-1 几种树种的生材含水率

	树种	含水率/%	
		心材	边材
阔叶树	白桉(white ash)	46	44
	白杨(aspen)	95	113
	黄桦(yellow birch)	74	72
	美洲榆(American elm)	95	92
	糖槭(sugar maple)	65	72
	北方红栎(northern red oak)	80	69
	白橡木(white oak)	64	78
	枫香(sweet gum)	79	137
	黑胡桃木(black walnut)	90	73
针叶树	美国侧柏(western red cedar)	58	249
	花旗松(douglas-fir)	37	115
	白杉(white fir)	98	160
	杰克松(Ponderosa pine)	40	148
	拉布拉利松(Loblolly pine)	33	110
	红杉(redwood)	86	210
	东岸云杉(eastern spruce)	34	128
	西岸云杉(Sitka spruce)	41	142