

森林工业技术知识丛书

木材干燥

(二次修订本)

中国林学会 主编

梁世镇 编著

中国林业出版社

目 录

开头语

一、干燥介质	(3)
湿空气	(3)
常压过热蒸汽	(7)
二、木材性质	(10)
木材的构造	(10)
木材细胞壁的构造	(14)
木材与水分	(17)
木材平衡含水率	(20)
木材中水分的移动	(24)
干缩、湿胀和变形	(26)
木材的密度	(28)
木材的弹性和塑性	(29)
三、木材干燥的规律	(32)
干燥时木材内水分的移动	(32)
木材干燥曲线和快速干燥的原则	(35)
木材含水率梯度与干燥梯度	(40)
木材在干燥过程中的应力和变形	(42)
干燥缺陷	(46)
干燥基准	(49)

四、木材大气干燥	(52)
利用自然条件干燥木材	(52)
成材的大气干燥	(55)
硬阔叶树材和小材料的气干	(58)
强制气干	(60)
五、木材在窑内干燥的设备与工艺	(62)
木材干燥窑和设备	(62)
以湿空气为介质的木材窑干工艺	(77)
以常压过热蒸汽为介质的木材窑干工艺的特点	(93)
熏烟干燥法	(97)
六、木材太阳能干燥	(100)
太阳能辐射	(100)
温室型太阳能木材干燥窑	(103)
配有集能器的太阳能木材干燥窑	(109)
七、木材除湿干燥	(113)
热泵	(113)
成材的低温除湿干燥	(115)
成材的高温除湿干燥	(117)
八、木材真空干燥	(119)
九、木材在嫌水液体中干燥	(124)
十、木材溶剂干燥与化学药品干燥	(127)
木材溶剂干燥	(127)
木材化学药品干燥	(128)
十一、木材的高频干燥和微波干燥	(130)
木材高频干燥	(130)
木材微波干燥	(131)

十二、木材红外线辐射干燥	(137)
红外线性质概述	(137)
木材红外辐射干燥	(139)
木材远红外辐射干燥	(141)
十三、各种木材干燥法的比较	(145)
附录 1 湿度表 (气流速度等于和小于 0.5 米/秒) ..	(148)
附录 2 湿度表 (气流速度等于和大于 2 米/秒) ..	(150)
附录 3 干饱和水蒸汽的参数	(152)
附录 4 常压过热蒸汽特性	(152)
附录 5 我国五十三个城市木材平衡含水率估计值 ..	(153)
附录 6 与干燥有关的木材性质	(156)
附录 7 普通干燥基准 (按时间系数)	(159)
附录 8 普通干燥基准 (按含水率阶段)	(161)
附录 9 半波动式干燥基准	(165)

开 头 语

木材是社会主义建设中一项重要物资，用途极为广泛。在建筑、机械、造船、农具、家具以及其他许多工矿和交通运输部门都需要使用大量的木材。

为了保证产品的质量，或者由于工艺上的需要，要求木材经久耐用，能保持形体，能在较小的重量上具有较大的强度；并便于作刨削、胶合、装饰等加工处理。有些产品还要求木材具有某些特种性能，如制造乐器，要求木材具有良好的共振性；航空工业用材，要求轻而且强度高；制造高级家具，要求木材有优美的纹理和色泽。这些性质虽是木材所固有的，但只有在经过合理干燥处理之后，它们才能充分显露出来。

大家知道，用湿木料制造的各种产品，刚制成时好象还合格，可是经过一个时期，随着木材的干缩就会出现开裂、变形，甚至腐朽或者招致虫蛀。在气候比较潮湿的地区制造木器的木材，就当地来说，即使干燥程度是足够的，但是，当把制成的产品运到气候比较干燥的地区或者室内有取暖设备的地方以后，也会出现开裂、变形现象。

可见，用经过适当干燥处理的木料制造产品，可以保证质量、延长使用年限，从而也节约木材、人力和其它物资。木材干燥后，还有改善木材的运输和贮存条件的作用。

所谓木材干燥，就是在控制介质温度和相对湿度的条件下，对木材加热，使木材内部水分向表层移动的速率和表层水分向外界蒸发的速率相适应，逐步从木材中排除水分的过程。它所遵守的一条原则就是在保证干燥质量的前提下提高干燥速度。干燥质量是指：必须使已干材的终含水率及干燥均匀度能满足加工工艺的要求；还须保持木材的完整性，不发生为工艺规范所不容许的缺陷，不削弱木制品所应具有的性质。干燥速度是指：在单位时间内木材含水率降低的程度。

木材干燥方法，就其在工业上应用的情况而论，可分为四类：一是比较成熟，应用较广的，如大气干燥、常规窑干、高温窑干等；二是或尚处于试验阶段，或已初步被采用，而可能有发展前途的，如真空干燥、太阳能干燥、除湿干燥、红外线干燥等；三是在技术上或经济上受到一定限制、适用范围较窄的，如嫌水性液体干燥、高频干燥、微波干燥、溶剂干燥、共沸干燥等；四是使用不便、难于推广的，如离心力干燥等。总的说来，工业上用来干燥大批量成材的主要是气干法与窑干法。

本书初版于1974年，1980年第1次修订。这次进行了第2次修订，除保持原来的目的和内容外，还论述了木材干燥的原理、原则及各种方法的特点以及每一种方法的科学性和可行性。同时，增加了木材太阳能干燥、木材除湿干燥、木材真空干燥、木材溶剂干燥与化学药品干燥、木材远红外线干燥以及各种木材干燥法的比较等部分。

本书可供木材干燥工人学习阅读，同时也是木材加工企业的技术人员和管理干部的一本很好的参考书。

一、干燥介质

在干燥窑中对木材进行干燥处理，首先把冷的木材和它所含有的水分加热到一定的程度，这是预热过程；还要使已经预热过的水分变成水蒸汽，并脱离木材，这是干燥过程。预热和干燥都需要热量。由锅炉通到窑内加热器中的蒸汽是热能的来源，也可以用电作为能源。大量的热能不能直接从加热器表面直接传给木材（少量的辐射能除外）。在加热器表面和材堆内每一块木材的表面之间要有一种气态物质，它在窑内不断循环，在经过加热器表面时吸收热能；在经过木材表面时把热能传给木材，同时吸入从木材表面蒸发出来的水蒸汽，并把水蒸汽带出窑外。这样的在加热器和木材之间起着传递热能作用，又在木材和窑外大气之间起着传递湿气作用的气体，叫做在干燥过程中传热、传湿的媒介物质，简称干燥介质。

常规窑干法采用的干燥介质主要是湿空气。过热蒸汽窑干法采用的干燥介质主要是常压过热蒸汽。

湿 空 气

空气的主要成分是氧、氮、氢和少量其它气体。含有水蒸汽的空气叫做湿空气。湿空气为什么能作为木材干燥介

质，这是因为湿空气有传热和传湿的作用。

空气的压力 空气有一定的重量，在单位面积上它有一定的压力。在标准状态下，就是在海平面上当空气的温度为 0°C 时， 1米^2 面积上的空气压力是 101.325 千帕，这叫做物理上的大气压。

大气压的数值随着海拔高度而不同，就全国范围来说，平均值可采取为：

$$1\text{个大气压} = 99.315\text{千帕}$$

湿空气的压力是空气的压力和水蒸汽压力的总和，其中属于空气的压力叫做空气分压，属于水蒸汽的压力叫做水蒸汽分压，即：

$$\text{湿空气总压力} = \text{空气分压力} + \text{水蒸汽分压力}，$$

用符号表示：

$$P = P_{\text{空}} + P_{\text{汽}}\text{千帕}$$

除了物理上的大气压以外，还规定了一个衡量一切气体的压力的标准，即工程上的气压，或简单地叫做气压。

$$1\text{个气压} = 98.07\text{千帕}$$

锅炉和其它密闭容器内气体的压力以气压为计量单位，用压力表测定。由于密闭容器的壳体的外表面普遍承受着大气压，所以用压力表测出的压力的数值是容器中气体的压力和大气压力之间的差额，也就是说：

$$\text{表压力} + 1 = \text{绝对压力}$$

湿空气的密度 1米^3 容积内的气体以公斤计的 重量，叫做此气体的密度，又叫重度或比重，以 ρ 为符号。

在标准状态下，空间完全被空气占据时，其密度是每

米³1.293公斤/米³；空间完全被水蒸汽占据时，其密度是0.804公斤。由此得知，水蒸汽轻于空气，较湿的空气轻于较干的空气。

湿空气的密度是1米³容积内，以公斤计的空气的重量加水蒸汽重量之和的数值。

空气的密度和水蒸汽的密度都随着温度的高低而变化，湿空气的密度也随着温度的高低而变化。

空气的湿度 1米³湿空气中，实际含有的水蒸汽的重量和在相同条件下最多能容纳的水蒸汽重量之比的比值，叫做空气相对湿度，简称湿度。空气的湿度用百分率表示：

$$\text{空气湿度} = \frac{1 \text{米}^3 \text{空气中实际含有的水蒸汽重量 (克)}}{1 \text{米}^3 \text{空气中最多能容纳的水蒸汽重量 (克)}} 100\%$$

用符号表示，上列公式可写作：

$$\varphi = \frac{Y_{\text{实}}}{Y_{\text{饱}}} 100\%$$

例如，当温度为70℃时，1米³空气中最多能容纳的水蒸汽约为198克，设若实际含有的水蒸汽只有99克，则此时的空气湿度为：

$$\varphi = \frac{99}{198} = 50\%$$

湿度为100%的空气叫做饱和空气。

空气的温度与湿度的测定 在木材干燥过程中，空气的温度与湿度对于干燥速度和干燥质量都有很大影响，应该随时测定温、湿度的变化，并加以控制和调整。

测定空气的温度高低用温度计。在木材干燥中常用的温度计是用玻璃管做的，下有小球，球内灌有水银。

温度计上刻有按一定标准划分的度数。我国通常采用摄氏标准（ $^{\circ}\text{C}$ ），此标准以水的冰点作为 0°C ，沸点作为 100°C 。

检查空气湿度的仪器叫做湿度计。湿度计通常用两支水银球温度计组成，一支用来测定空气的温度，叫做干球温度计；另一支温度计的水银球的外面裹着棉纱或纱布，棉纱的下端浸泡在清水内，叫做湿球温度计（图 1）。当空气湿度较小时，棉纱内的水分就向空气中蒸发；水分蒸发时向水银球吸取热量，就会使水银球的温度降低。这样一来，湿球温度计的水银柱所指的温度就比干球温度计的温度低。干球温度（ t 或 $t_{\text{干}}$ ）和湿球温度（ $t_{\text{湿}}$ ）之间的差数（ $t_{\text{干}} - t_{\text{湿}}$ ）叫做湿度计差，或叫干、湿球温度差。

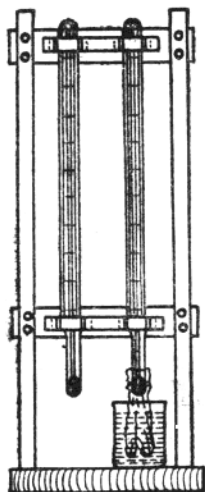


图 1 湿度计

空气越干，湿度计差的数值越大，空气容纳水分的能力越强，水分的蒸发越快。空气越湿，湿度计差的数值越小，空气容纳水分的能力越弱，水分的蒸发越慢。当空气完全被水蒸汽所饱和，湿度为 100% 时，湿球温度和干球温度相等，湿度计差的数值为 0 ，此时水分停止蒸发。

根据干球温度和湿度计差两个数值，可在附录 1 和附录 2 的湿度表中查出空气湿度的数值。

例如，在强制循环干燥窑内，干球温度为 88°C ，湿球温度为 80°C 。此时，根据干球温度为 88 与湿度计差为 8 两个数值，在附录2中查出数字为 72 ，即窑内的空气湿度为 72% 。

湿空气的其它性质 除上述的压力、密度和温、湿度等以外，湿空气的其它重要性质还有湿含量、容积、焓等。

1公斤干空气中含有的水蒸汽的重量（以克计）叫做空气的湿含量（ d ），其单位为克水分/公斤干空气。

$(1 + 0.001d)$ 公斤湿空气所占有体积，叫做湿空气的容积（ v ），其单位为 $\text{米}^3 / (1 + 0.001d)$ 公斤。

1公斤湿空气所含有热量叫做湿空气的焓（ i ），其单位为千焦耳/公斤（ kJ/kg ）。

常压过热蒸汽

近几年来，不少木材加工厂采用常压过热蒸汽作为干燥介质。要了解这种介质的性质，首先要知道新窑干法和以湿空气为介质的常规窑干法相区别的要点和常压过热蒸汽的来源。

把材堆推入干燥窑，密闭窑门，开加热器；同时，把锅炉中的水蒸汽喷射入窑，替换窑内空气。窑内空间逐步被从锅炉输送来的水蒸汽所充斥，此时仍继续喷射蒸汽，目的在于把木材蒸热。

对于已经热透的木材，可以开始它的干燥过程。此时，适当开大加热器，充分对木材供应热量。从木材中蒸发出来的水蒸汽，其温度本来已经超过 100°C ，在被风机驱动而强

制地通过加热器时，温度提升得更高，热含量更大。新窑干法便利用它作为传热、传湿的干燥介质。木材在这种介质的作用下烘干到一定程度，并经过适当的喷蒸处理，待冷却以后即可出窑。

从木材中蒸发出来的用作介质的水蒸汽虽处于窑内，但经过排气孔和窑外的大气相通连。它的压力和大气的大致相等，所以是常压蒸气。常压饱和蒸汽的温度约为 100°C 。当介质经过加热器过热以后达到的温度却高于 100°C ，所以叫做常压过热蒸汽，这就是新窑干法所用介质的来源。

当容器（如锅炉）内的气体的温度为 100°C （随着海拔高度的加高温度相应地减低），湿度为 100% 时，容器内的空气全部排出，而被水蒸汽所代替。此时的水蒸汽叫做饱和水蒸汽；此时容器内的压力是1个绝对压力（ 98.07 千帕），压力表的读数是零。

不含水滴的饱和水蒸汽叫做干饱和水蒸汽。

锅炉中干饱和水蒸汽的温度（ t ）（ $^{\circ}\text{C}$ ）、密度（ ρ ）（公斤/米³）、水蒸汽的热含量（ $i_{汽}$ ）（千焦耳/公斤）、汽化热（千焦耳/公斤），以及水的热含量（ $i_{水}$ ）（千焦耳/公斤）都随着锅炉中水蒸汽绝对压力（ P ）（千帕）的大小而不同。

水蒸汽的汽化热是水蒸汽的热含量（ $i_{汽}$ ）减掉水的热含量（ $i_{水}$ ）的差值。

汽化热容纳在水蒸汽里，又叫做汽化潜热，简称潜热。

干饱和水蒸汽的参数见附录3。

在木材干燥中，在预热、中间处理和终了处理等阶段内，把具有一定压力的饱和水蒸汽由锅炉经过管道喷入干燥

窑，直接对木材加热和对介质调湿；在干燥阶段及上述其它阶段内把具有一定压力的水蒸汽通入窑内的加热器，作为对介质加热的热源。

锅炉内如果安装有过热器，则锅炉内的水蒸汽也可以是过热的。但这种过热蒸汽一般具有一定的压力，和前面介绍的干燥窑内的常压过热蒸汽有所不同。

1个绝对气压下的饱和水蒸汽的温度约为 100°C 。如在压力不变的情况下，强迫饱和水蒸汽通过加热器，使其温度升高到 100°C 以上（例如 120°C ），此种水蒸汽就是常压过热蒸汽。

在海平面上及其附近，常压过热蒸汽的湿球温度为 100°C ；随着海拔高度的增高，湿球温度将逐步降低。

常压过热蒸汽的压力（1个绝对压力）和在其现有温度下饱和水蒸汽所应有的压力之比的比值，叫做过热蒸汽的相对压力。为了方便起见，也可以把相对压力叫做相对湿度，并简称湿度。常压过热蒸汽的湿度（ φ ）以%表示。

例如，当干燥窑内的水蒸汽通过加热器后，其温度上升为 120°C ，其压力应当是2个绝对压力（附录3）。但是，由于窑内水蒸汽经过排气管和窑外大气相通连，窑内水蒸汽的压力约略和大气压力相等，窑内过热蒸汽的实际压力为其应有压力的 $1/2$ ，即，

$$\text{湿度}\varphi = 50\%$$

常压过热蒸汽的温度（ t ）（ $^{\circ}\text{C}$ ）、比容（ v ）（ $\text{米}^3/\text{公斤}$ ）、焓（ i ）（ $\text{千焦耳}/\text{公斤}$ ）和密度（ ρ ）（ $\text{公斤}/\text{米}^3$ ）等参数的关系见附录4。

二、木材性质

使用干燥到符合于预定工艺要求的木料制造各种木制品，才不会走形变样。要懂得木材怎样由湿变干，首先需要了解木材的构造和性质。木材含有大量水分，这些水分是从哪里来的？一块木料在由湿变干的过程中，为什么往往会开裂变形？所以了解木材的构造和有关性质，对更好地熟悉木材干燥技术很有帮助。

木材的构造

木材的种类很多。这些木材在基本构造上有共同的特征，又各有不同的特点。构造上的不同引起性质上的差别，在加工处理时就要区别对待。我们不能把性质上差别较大的几种木材放在一起，用同样工艺进行干燥处理，因为有的木材容易干燥，有的木材难于干燥，放在一起处理，难于取得应有的效果。

各种木材，按树木类别的不同，有针叶树材和阔叶树材两大类。

松、云杉、落叶松、杉、柏、水杉、冷杉等树种的树叶形状象针，一般把它们的木材叫做针叶树材；又由于这一类木材中没有导管，在木材的横切面上看不见导管的管孔，又

叫做无孔材；还由于这些木材中的多数比较软，又叫做软材。针叶树材的共同特点是主干不分叉，通直而且圆，重量比较轻，是建筑房屋的栋梁之材。

榆、杨、桦等树种的树叶扁平宽阔，一般把这些树的木材叫做阔叶树材；它们的木材中具有细胞腔较大的导管，在横切面上看得见导管的管孔，这样又叫做有孔材；并且按管孔在年轮中排列的方式，把早材管孔大、作环形排列的木材叫做环孔材；把早、晚材管孔大小相差不多、管孔在年轮内均匀分布的木材叫做散孔材；把管孔由早材到晚材、由大逐渐变小、由多逐渐减少的木材叫做半散孔材。阔叶树材还可按硬、软程度分类。栎、桦、水青冈、水曲柳、黄檀、丝栗、榆、槐等树种的木材又硬又重，叫做硬阔叶树材，它们宜于制造船舶、车辆、机器构件、家具、农具、运动器材、铁路枕木等。杨、椴、泡桐等树种的木材较轻较软，叫做软阔叶树材，它们各有其特殊用途。例如，杨木适合制造火柴杆、火柴盒；椴木适合制造胶合板、铅笔杆和家具；泡桐适合制造航空模型、轻型家具等。

针叶树材和阔叶树材中的每一种木材在构造上各有特征，这些特征可以在木材的横切面、弦切面和径切面三个切面上观察。沿着和树干相垂直的方向切开的平面是横切面；沿着树干的直径方向，并且通过木材的中心切开的平面是径切面；沿着和年轮相切的方向切开的平面是弦切面。

图2是硬阔叶树材中的核桃木的三个切面。树皮分为外树皮和内树皮。在木材的横切面上可以看到十二个年轮，年轮中的小点就是管孔的形状。核桃木管孔分布的形式是半散

孔材的代表。横切面上的结构在径切面和弦切面上都可以看到，但形象不同。例如，导管在横切面上看是管孔，形状好像一个个小点；在径切面和弦切面上看是长管，成线条形状。三个切面上都没有画出沿树干半径方向延伸的木射线，因为核桃木的木射线很细，一般用肉眼看不清楚。

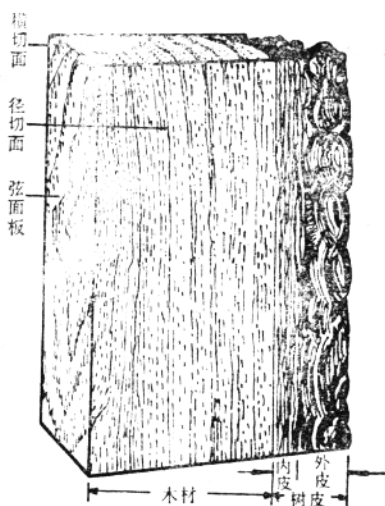


图2 硬阔叶树材的三切面

木材是由许多单个细胞组成的。

图3是松木中的主要纵行组成分子管胞，其它针叶树材的管胞和松木的基本上相似，管胞大约长1—4毫米。沿径切面方向和管胞垂直相交的是木射线的一部分。图4示阔叶树材的纵向组成分子。

图3是松木中的主要纵行组成分子管胞，其它针叶树材的管胞和松木的基本上相似，管胞大约长1—4毫米。沿径切面方向和管胞垂直相交的是木射线的一部分。图4示阔叶树材的纵向组成分子。

在多种木材中，位于内部的较老木材层和位于外部的较新木材层相比，其颜色较深，其中含水率较小。内部的叫心材，外部的叫边材。心材的形成是一极为复杂的过程：心材中原来的生活细胞已经死去；在细胞死亡时，内部物质与酶反应而转变成褐色；此深色物质又侵入细胞壁，使它能抵抗真菌的侵蚀。松木的心材比边材更富于树脂；栎木与栗木更富于单宁。许多落叶阔叶树在心材形成的过程中，导管周围

在多种木材中，位于内部的较老木材层和位于外部的较新木材层相比，其颜色较深，其中含水率较小。内部的叫心材，外部的叫边材。心材的形成是一极为复杂的过程：心材中原来的生活细胞已经死去；在细胞死亡时，内部物质与酶反应而转变成褐色；此深色物质又侵入细胞壁，使它能抵抗真菌的侵蚀。松木的心材比边材更富于树脂；栎木与栗木更富于单宁。许多落叶阔叶树在心材形成的过程中，导管周围

的薄壁细胞钻入导管，并使之堵塞，叫做侵填体。导管被侵填体堵塞后极不易被水和空气所透过，致使这类木材的干燥极为缓慢。

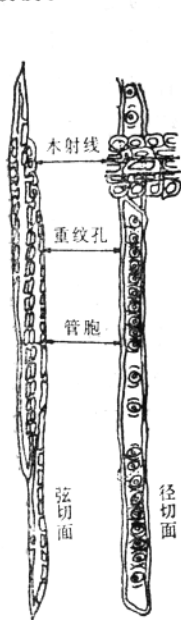


图3 松木的管胞

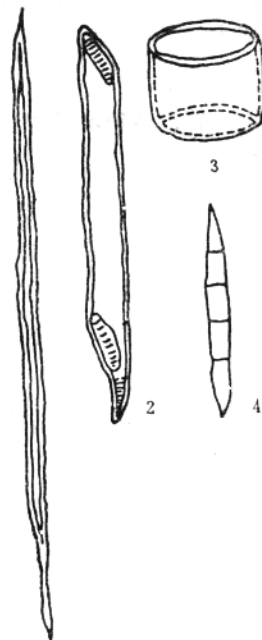


图4 阔叶树材的组成分子

- 1.木纤维 2.枫香的导管段
3.椴木的导管截 4.纵行薄壁细胞

在其它种木材中，心材除颜色比边材的较深之外，含水率也较低，而且还不含淀粉。心材形成的程度、边材的宽度、含水率的高低等，在不同树种之间，甚至在同一树种之内，变异颇大，并随树龄、立地的位置与条件等而不同。