

全国高等林业院校试用教材

木材干燥

南京林产工业学院主编

木材机械加工专业用

中国林业出版社

全国高等林业院校试用教材

木 材 干 燥

南京林产工业学院主编

木材机械加工专业用

中国林业出版社

全国高等林业院校试用教材

木 材 干 燥

南京林产工业学院主编

中国林业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 西安新华印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 428 千字

1981 年 8 月第 1 版 1981 年 8 月西安第 1 次印刷

印数 1—7,200 册

统一书号 15046·1015 定价 1.85 元

前 言

木材干燥是木材机械加工专业的一门专业基础课程，是实践性较强的应用科学学科之一。教材内容着重于阐述各种成材干燥方法的基本原理、设备与工艺，以及干燥设备的设计与计算；同时也介绍了国内外有关木材干燥的现代化成就。

教材的编写以1977年冬在南京会议上确定的木材干燥教学大纲为依据，由南京林产工业学院梁世镇教授主编，各章编写人是：

绪论，第一章，第二章，第三章的第五节与第六节——梁世镇（南京林产工业学院）；

第三章的第一节至第四节，第四章，第五章——朱政贤（东北林学院）；

第六章——熊民棣（东北林学院）；

第七章——孙建国（东北林学院）；

第八章——田赞成（北京林学院）；

第九章——孙令坤（南京林产工业学院）；

第十章——林伟奇（中南林学院）；

第十一章——顾练百（南京林产工业学院）。

编 者

1979年11月

目 录

绪论	(1)
第一章 干燥介质的性质	(2)
第一节 湿空气	(2)
第二节 常压过热蒸汽	(10)
第三节 炉气	(13)
第二章 与干燥工艺有关的木材性质	(15)
第一节 木材中的水分	(16)
第二节 木材的干缩、变形、容积重	(22)
第三节 木材的热学性质与电学性质	(25)
第四节 木材的弹性与塑性	(29)
第三章 木材加热与干燥过程的规律性	(31)
第一节 热转移的基本公式	(31)
第二节 质转移的基本公式	(33)
第三节 木材对流加热与冷却	(38)
第四节 木材非对流加热	(46)
第五节 干燥过程中木材内水分的移动	(50)
第六节 木材在气体介质中的对流干燥过程	(54)
第四章 有关木材干燥技术的空气动力学原理	(67)
第一节 空气动力学在木材干燥技术上的意义	(67)
第二节 用于木材干燥技术的空气动力学基本概念	(68)
第三节 干燥装置内空气的自然流动	(71)
第四节 空气沿着被干木料的强制流动	(75)
第五节 喷气强制循环的应用	(77)
第六节 空气循环对于室干均匀度的影响	(79)
第七节 连续式室干过程中气流与木料的相互作用	(81)
第五章 木材干燥室	(85)
第一节 木材干燥室的分类	(85)
第二节 周期式强制循环干燥室	(86)
第三节 周期式自然循环干燥室	(101)
第四节 连续式强制循环干燥室	(106)
第五节 木材干燥室类型的分析和选用	(107)
第六节 木材干燥室的建筑	(111)
第七节 木材干燥室的防腐蚀	(115)
第六章 干燥室的设备	(118)

第一节	供热设备	(118)
第二节	强制气流循环设备	(130)
第三节	木材运载与装卸设备	(140)
第七章	干燥过程的自动控制及仪表	(151)
第一节	木材干燥生产中应用的仪表	(151)
第二节	木材干燥过程的自动控制	(164)
第八章	木材室干工艺	(169)
第一节	干燥室壳体及设备的检查	(169)
第二节	木料的堆积	(170)
第三节	干燥基准的选用	(173)
第四节	木材含水率及应力的检验方法	(175)
第五节	木材室干工艺	(181)
第六节	木材在常压过热蒸汽中干燥的特点	(188)
第九章	木材干燥室的设计与计算	(191)
第一节	干燥方式与室型的选择, 室数的计算, 干燥车间的规划	(191)
第二节	周期式蒸汽干燥室的热力计算	(195)
第三节	常压过热蒸汽干燥室的计算要点	(203)
第四节	干燥室的气体动力计算	(205)
第五节	进气道和排气道的计算	(210)
第六节	周期式强制循环干燥室计算示例	(211)
第十章	木材大气干燥	(226)
第一节	关于大气干燥的基本概念	(226)
第二节	成材的大气干燥	(228)
第三节	硬阔叶树材气干的特点	(232)
第四节	小材料气干的堆积法	(232)
第五节	强制气干	(233)
第六节	太阳能木材干燥室	(234)
第十一章	木材的特种干燥法	(237)
第一节	木材的微波干燥	(237)
第二节	红外线干燥 (辐射干燥)	(242)
第三节	木材在亲水性液体中的干燥	(247)
第四节	其它特种干燥法	(250)
附录	(252)

绪 论

本课程以成材（板材和方材）的干燥理论、工艺与设备作为教学的主要内容。

板、方材由于厚度较大，其干燥技术较难解决。为了对板、方材进行大批量、高质量和高效率的干燥处理，须从干燥介质（简称介质，下同）、木材性质、干燥工艺、设备性能与室体设计等方面作系统的研究。这样就逐步形成了关于木材干燥的专门学科。

在应用方面，这个学科关系到充分利用森林资源、选择造林树种、综合利用木材和提高木制品质量等问题；在理论方面，它需要从木材学的若干基本概念出发，探讨木材由湿变干的内在规律，以便在保证质量的前提下，运用适当的干燥技术与设备，提高干燥速度。

我国的森林资源较少，但却有许多分布较广的树种，由于木材本身存在一些缺陷而没有被充分利用，如针叶树材的马尾松和阔叶树材的枫香等。

马尾松在南方分布较广，树干粗大，容积重与强度中等，宜作建筑、车辆、包装箱等用材。但马尾松的生材含水率较高，可超过百分之一百；木材易受虫、菌的侵蚀。若不在制材之后立即经过干燥处理，则在贮存与运输过程中，不仅边材迅速变为青蓝色，而且容易遭受虫蛀、腐朽而降等；用湿材制成的物品，往往因严重变形与朽坏而不能使用。

在南方山区，枫香也是一种常见的树种，树干高直，材质细而坚，花纹与色泽俱佳，是制作家具、纺织器材、地板、箱榭、鞋楦等产品的珍贵原料。但枫香木材容易开裂而难干，如不采取妥善的干燥措施，在自然气干过程中，木料本身就会产生许多深长的裂纹。若用湿材制成家具如床板、书桌等，不仅易开裂变形，而且人体长期与其接触，易患风湿病症。因此，必须经过干燥处理。

由此可见，有些树种的木材虽然本身有其缺陷，但是只要经过适当干燥处理，是可以很好利用的。

我国当前以人造板为主的木材综合利用工业的发展是迟缓的，原材料的浪费极为严重。人造板工业进展缓慢的原因很多，其中的一个是向用户直接调拨原木，分散制材，剩余物不能集中，不能充分综合利用。应当在适当的城市集中制材，集中干燥，不对用户调拨原木而调拨干成材。这样做，才能将剩余物尽可能多地集中起来，作为制造纤维板、碎料板（刨花板）和纸浆等产品的原料。

集中制材和集中干燥二者之间关系密切。湿成材不经过干燥处理，在调拨运输途中，不仅会增大运输重量，浪费车辆的吨位，还将因变形、虫蛀、腐朽而降等，造成很大的损失。

今后在逐步实现森林资源的充分利用和制材工业的现代化过程中，将会出现两个趋势。一是以调拨干成材的方式代替调拨原木，为大力发展人造板工业和造纸工业提供原料，为合理利用木材创造条件；二是用快速室干技术代替常规室干技术；用强制循环和太阳能加热的气干技术代替常规自然干燥技术，使大规模的木材干燥作业在保证质量、节省投资、节约能量、降低成本的前提下多快好省地发展起来。

第一章 干燥介质的性质

在干燥室中对成材（各种规格的板材与方材）进行干燥处理，首先需把冷的木材和它所含有的水分加热到一定的程度，这是加热过程，简称预热；还需使已经预热过的水分变为水蒸汽，并脱离木材，这是干燥过程。预热和干燥都要耗费热能。由锅炉通到室内加热器和喷蒸管中的具有较高压力的水蒸汽是供热的载热体。大量的热能不能直接从加热器表面传给木材（少量辐射能除外）。在加热器表面和材堆的每一块木材的表面之间，需有一种气态物质，它在室内不断循环流动，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，并把此水蒸汽带出室外。此类在加热器和木材之间起着传递热能作用，又在木材和室外大气之间起着传递湿气作用的气体，叫做在干燥过程中对流（或环流）；传热传湿的媒介物质，又叫做干燥介质，或简称为介质。

强制循环常规室干法或自然循环常规室干法所采用的干燥介质主要是湿空气；过热蒸汽室干法所采用的干燥介质主要是常压过热蒸汽。

有的工厂以废木料、锯屑、树皮、煤、原油、天然气等为燃料，把燃烧燃料所得的炽热炉气体作为载热体，使炉气体与空气相混合后送入干燥室内作为介质。

木材的大气干燥以太阳能作为热源，以经过太阳照射后流入材堆的热湿空气作为干燥介质。

采用在平钢板之间或嫌水液体中用接触热传导法干燥木材时，热钢板或热嫌水液体是对木材直接传热的载热体。对钢板或嫌水液体供热的热源可以是电能、高温蒸汽、高温液体或炉气体等。

以下着重讨论湿空气和常压过热蒸汽两种干燥介质的性质。

第一节 湿空气

纯净的干空气由75.5%的氮、23.2%的氧和1.3%的氢组成。不纯净的空气内混杂有少量其它气体，如二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫、乙炔、甲烷、乙烯等。

空气中常含有水蒸汽。含水蒸汽的空气叫做湿空气。也就是说，湿空气是以干空气和水蒸汽为主体的混合气体。

一、湿空气的特性

（一）湿空气的状态方程式 根据道尔顿定律，当干空气和水蒸汽在同一容积内混合为湿空气时，每一种气体的存在状态就好象它单独占据着容器的整个容积一样。湿空气的总压力等于干空气的分压力（简称分压，下同）与水蒸汽分压之和。当水蒸汽分压的变动范围不超过一个大气压时，可以认为：

$$P_{\text{大气}} = P_{\text{空}} + P_{\text{汽}} \quad (1-1)$$

式中:

$P_{\text{大气}}$ ——大气压力 (公斤/米²) ;

$P_{\text{空}}$ ——空气分压力 (公斤/米²) ;

$P_{\text{汽}}$ ——水蒸汽分压力 (公斤/米²) 。

湿空气的特性可以按照理想气体方程式 (克莱普朗方程式) 进行推导, 即:

$$PV = GRT, \quad (1-2)$$

式中:

P ——气体压力 (公斤/米²) ;

R ——气体常数;

T ——绝对温度 [°K (绝对温度 = 273.1 + t°C)] ;

G ——气体重量 (公斤) ;

V —— G 公斤气体所占的容积 (米³) 。

气体压力可用以下单位计量:

工程上的气压 1 公斤/厘米² = 10000 公斤/米² = 735.5 毫米汞柱 (0°C 时) = 10000 毫米水柱 (4°C 时) = 7733.9 毫米空气柱 (0°C 及 760 毫米汞柱时) = 0.968 物理上的大气压。

气体在温度为 0°C 和压力为 760 毫米汞柱时的状态是气体的对比状态或气体的标准状态。

一单位容积内的气体的重量叫做该气体的重度, 其符号与单位为 γ 公斤/米³; 一单位重量的气体的体积叫做该气体的比容, 其符号与单位为 v 米³/公斤。由此得出下式,

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{P}{RT}, \quad P = \gamma RT;$$

$$v = \frac{V}{G} = \frac{RT}{P}, \quad Pv = RT;$$

$$\gamma = \frac{1}{v}, \quad v = \frac{1}{\gamma}.$$

根据亚弗加德罗定律, 在相同压力与温度下, 体积相等的任何气体中所含的分子数相同。因之得出下式,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{M_2}{M_1}, \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{M_2}{M_1},$$

或

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 = \text{常数}. \quad (1-3)$$

在等式 (1-3) 中, M 是以公斤表示的气体分子量, 其值等于气体的分子量, 叫做公斤分子或千克分子。

MV 为 1 公斤分子的体积, 对于包括空气和水蒸汽在内的所有遵从理想气体方程式的气体, 在温度为 0°C 及压力为 760 毫米汞柱 (10333 公斤/米²) 的标准状态下, 都等于 22.4 米³。

对于 1 公斤分子来说, 气体状态方程式为,

$$PV = MRT,$$

式中:

M——分子量 (公斤)。

设若: $P = 10333 \text{ 公斤/米}^2$;

$T = 273.1^\circ\text{K}$;

$V = 22.4 \text{ 米}^3/\text{公斤分子}$,

则气体常数值为

$$R = \frac{10333 \times 22.4}{M \times 273.1} = \frac{847.5}{M} \quad (1-4)$$

在温度为 0°C 及压力为 760 毫米汞柱的标准状态下, 气体的重量是

$$\gamma = \frac{M}{22.4} \quad (\text{公斤/米}^3) \quad (1-5)$$

在表 1-1 中列举了空气、水蒸汽、二氧化碳等气体的分子量 M, 并列举了按照公式 (1-4) 与 (1-5) 算出的气体常数 R 及重量 γ 的数值。

表 1-1

气 体	化 学 式	分 子 量 M (公斤)	气 体 常 数 R (公斤·米/公斤·°C)	重 度 (公斤/米 ³)
空气 (纯净的)		28.96	29.27	1.293
水 蒸 汽	H ₂ O	18.02	47.1	0.804
二 氧 化 碳	CO ₂	44	19.27	1.977

以 R 为符号的气体常数表示 1 公斤气体在压力不变的条件下, 当它的温度升高 1°C 时因膨胀而作的功, 以公斤·米/公斤·°C 计。由表 1-1 中的数值可知, 当温度以相同程度上升时, 水蒸汽因膨胀而作的功最大, 其次为空气, 又其次为二氧化碳气; 又可知, 在同样温度与容积的情况下, 水蒸汽最轻, 空气其次, 二氧化碳气最重。

(二) 空气的湿度 空气的湿度有两种概念, 即: 绝对湿度与相对湿度。

1. 绝对湿度 1 立方米湿空气中的水蒸汽的重量, 即包含于空气中的水蒸汽的重量, 叫做空气的绝对湿度, 用 $\gamma_{\text{汽}}$ 表示。在数值上 $\gamma_{\text{汽}}$ 是水蒸汽比容 $v_{\text{汽}}$ 的倒数, 即

$$\gamma_{\text{汽}} = \frac{1}{v_{\text{汽}}} \quad (\text{公斤/米}^3),$$

$$\gamma_{\text{汽}} = \frac{P_{\text{汽}}}{R_{\text{汽}}T} \quad (\text{公斤/米}^3)。$$

2. 湿容量 在一定温度下被水蒸汽所饱和而不能再容纳更多水蒸汽的空气叫做饱和空气。饱和空气的绝对湿度叫做空气的湿容量, 用 $\gamma_{\text{饱}}$ 表示。 $\gamma_{\text{饱}}$ 与此饱和空气内的水蒸汽分压 $P_{\text{饱}}$ 成正比, 即

$$\gamma_{\text{饱}} = \frac{P_{\text{饱}}}{R_{\text{汽}}T} \quad (\text{公斤/米}^3)。$$

3. 相对湿度 (简称湿度) 空气的相对湿度 φ 指空气绝对湿度 $\gamma_{汽}$ 对在同一温度下的空气湿容量 $\gamma_{饱}$ 的比值, 即

$$\varphi = \frac{\gamma_{汽}}{\gamma_{饱}} \quad (1-6)$$

空气的湿度说明在一定温度下空气被水蒸汽所饱和的程度, 常用百分率表示:

$$\varphi = \frac{\gamma_{汽}}{\gamma_{饱}} 100\%$$

在一定的大气压力下, 空气中最多能够含有的水蒸汽的数量 $\gamma_{饱}$ 与温度有关。 $\gamma_{饱}$ 随着温度的升高而增大, 但这只有当温度低于该大气压力下水的沸点时才属正确。 温度等于水的沸点时, 容器内的空间全被水蒸汽占据, 而不再含有空气。 此时的水蒸汽叫做 1 个大气压力下的饱和水蒸汽, 或常压饱和水蒸汽。 此时的容积为 1 立方米的水蒸汽的重量叫做饱和水蒸汽的重度。

表 1-2 中列出了当大气压在广大地区内的平均值为 $P = 745$ 毫米汞柱时在不同温度下的 $\gamma_{饱}$ 的数值。 按照公式 $\gamma_{汽} = \varphi \gamma_{饱}$, 可以算出不同温度与湿度下湿空气内的水蒸汽的重度 $\gamma_{汽}$ 。

表 1-2 饱和空气中的水蒸汽的重度 $\gamma_{饱}$ (克/米³)
($\varphi = 100\%$, $P = 745$ 毫米汞柱, 水的沸点等于 99.4°C)

$t(^{\circ}\text{C})$	$\gamma_{饱}$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\gamma_{饱}$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\gamma_{饱}$
-15	1.39	25	23.03	65	161.05
-10	2.14	30	30.36	70	197.95
-5	3.24	35	39.59	75	241.65
0	4.84	40	51.13	80	292.99
5	6.80	45	65.42	85	353.23
10	9.40	50	82.94	90	423.07
15	12.82	55	104.28	95	504.11
20	17.29	60	130.09	99.4	586.25

空气的湿度还等于空气中水蒸汽分压 $P_{汽}$ 对在同样温度下的饱和空气中水蒸汽分压 $P_{饱}$ 的比值, 即

$$\varphi = \frac{\gamma_{汽}}{\gamma_{饱}} = \frac{P_{汽} \cdot R_{汽} \cdot T}{P_{饱} \cdot R_{汽} \cdot T} = \frac{P_{汽}}{P_{饱}} \quad (1-7)$$

表 1-3 中列出了在不同温度下的饱和空气内水蒸汽分压 $P_{饱}$ 的数值。 大气压力仍取广大地区内的平均值 ($P = 745$ 毫米汞柱或 10128 公斤/米²), 沸点为 99.4°C 。

4. 空气湿度的测定 空气的湿度用湿度计测定。 湿度计可用两支任何种类的但精确度相同的温度计组成。 一支温度计的温包外包裹着洁净的细纱布; 细纱布的下端浸在清水内, 使温包外的纱布保持湿润状态。

温包外包裹着湿纱布的温度计叫做湿球温度计, 用它测得的温度叫做湿球温度 $t_{湿}(^{\circ}\text{C})$;

表1-3 当 $\varphi=100\%$ 时饱和空气中的水蒸汽分压 $P_{\text{饱}}$ (公斤/米²)

$t(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{饱}}$	$t(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{饱}}$	$t(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{饱}}$
-15	16.85	25	322.98	65	2549.80
-10	26.50	30	432.67	70	3177.10
-5	40.91	35	573.40	75	3930.60
0	62.26	40	752.18	80	4828.60
5	88.96	45	977.30	85	5895.00
10	125.20	50	1257.70	90	7148.00
15	173.86	55	1604.80	95	8620.00
20	238.40	60	2030.90	99.4	10128.00

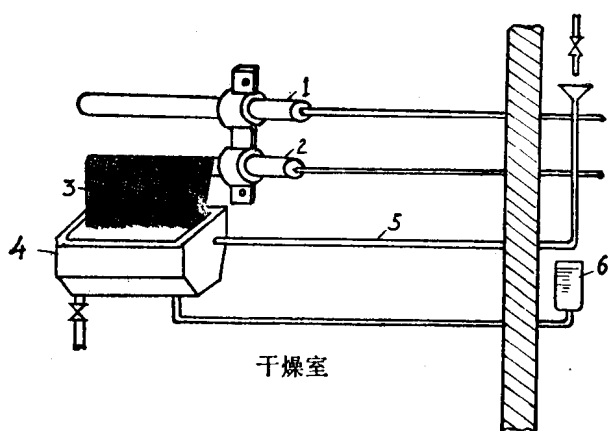


图1-1 湿度计安装图

- 1—湿度计的干球 2—湿度计的湿球 3—细纱布
4—盛水容器 5—输水管 6—连通器

另一支温包裸露在空气中的温度计叫做干球温度计，用它测得的温度叫做干球温度 $t_{\text{干}}(^{\circ}\text{C})$ 。图1-1是安装在木材干燥室内外的湿度计的示意图。

当空气湿度较小时，包裹在湿球外的细纱布所含的水分向空气中蒸发；水分蒸发时从湿球吸取热量，使得湿球温度小于干球温度，也就是小于空气的温度。干球温度和湿球温度之间的差值 ($t_{\text{干}} - t_{\text{湿}}$) 叫做湿度计差，或干、湿球温度差。

空气越干，湿度计差的数值越大，空气容纳水蒸汽的能力越强，

湿物料中的水分的蒸发越快。空气越湿，湿度计差的数值越小，空气容纳水蒸汽的能力越弱，湿物料中的水分的蒸发越慢。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，湿度计差的数值为零，此时湿物料中的水分停止蒸发。

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

(三) 露点 露点指湿空气中水蒸汽的分压 $P_{\text{汽}}$ 与湿空气完全饱和时水蒸汽的分压 $P_{\text{饱}}$ 相等时的温度。这就是湿空气冷却到湿度为百分之一百时的温度。湿空气冷却到露点后，容器壁的表面上将出现露滴。

(四) 湿含量 空气的湿含量指1公斤干空气中所含有的水蒸汽的克数。湿含量用字母 d 表示。

空气的湿含量正比于水蒸汽的重度对干空气重度的比率，即

$$d = \frac{\gamma_{\text{汽}}}{\gamma_{\text{空}}} \cdot 1000 \text{ (克水蒸汽/公斤干空气)}。 \quad (1-8)$$

根据公式 (1-2) 与 (1-8) 加以换算, 得到:

$$\begin{aligned} d &= \frac{\gamma_{\text{汽}}}{\gamma_{\text{空}}} \cdot 1000 = \frac{P_{\text{汽}} \cdot R_{\text{空}} \cdot T}{R_{\text{汽}} \cdot T \cdot P_{\text{空}}} \cdot 1000 = \frac{P_{\text{汽}} \cdot 29.37}{P_{\text{空}} \cdot 47.10} \cdot 1000 \\ &= 622 \frac{P_{\text{汽}}}{P_{\text{空}}} = 622 \frac{P_{\text{汽}}}{P - P_{\text{汽}}} \text{ (克水蒸汽/公斤干空气)}; \end{aligned} \quad (1-9)$$

和

$$P_{\text{汽}} = \frac{d \cdot P}{622 + d} \text{ (公斤/米}^2\text{)}。 \quad (1-10)$$

公式 (1-10) 表明, 在大气压力 P 不变动时, 空气中的水蒸汽分压 $P_{\text{汽}}$ 只随着空气湿含量 d 的增大或减小而变异。

(五) 热含量 (焓) 湿空气的热含量指属于 $(1 + 0.001d)$ 公斤湿空气的热量。 $(1 + 0.001d)$ 公斤湿空气的热含量 I 等于 1 公斤干空气的热含量 $i_{\text{空}}$ 加上 $0.001 \times d$ 公斤水蒸汽的热含量 $i_{\text{汽}}$ 。即

$$I = i_{\text{空}} + 0.001 \times d \times i_{\text{汽}}。 \quad (1-11)$$

1 公斤干空气的热含量 $i_{\text{空}}$ 等于把空气从 0°C 烘热到 $t^\circ\text{C}$ 所需的热量。 1 公斤水蒸汽的热含量 $i_{\text{汽}}$ 等于在 0°C 下蒸发 1 公斤水和把所形成的水蒸汽从 0° 加热到 t° 所需的热量。因此,

$$\begin{aligned} i_{\text{空}} &= C_{\text{空}} \times t, \\ i_{\text{汽}} &= r + C_{\text{汽}} \times t \end{aligned}$$

式中:

$C_{\text{空}}$ ——干空气的热容量, 等于 0.24 千卡/公斤· $^\circ\text{C}$;

$C_{\text{汽}}$ ——水蒸汽的热容量, 等于 0.46 千卡/公斤· $^\circ\text{C}$;

r ——水的汽化热, 约等于 595 千卡/公斤 (在 $t = 0^\circ\text{C}$ 时)。

将以上数值代入公式 (1-11), 得

$$I = 0.24t + 0.001d(595 + 0.46t) \text{ [千卡/(1 + 0.001d) 公斤湿空气]}。 \quad (1-12)$$

二、湿空气的 I - d -图

综合了湿空气的各种参数的 I - d -图, 使技术人员在进行干燥器的设计计算时得到很大的方便。此图以广大地区内大气压的平均值 ($P = 745$ 毫米汞柱 = 10128 公斤/米 2) 为根据, 对于我国的大部分地区也是适用的。

(一) I - d -图上的各组线系 I - d -图上一一般包括七组线系 (附录 3), 即: 热含量等于常数 $I = \text{const}$ 线系, 湿含量等于常数 $d = \text{const}$ 线系, 温度等于常数 $t = \text{const}$ 线系, 湿空气重度等于常数 $\gamma = \text{const}$ 线系, 干空气比容 [或 $(1 + 0.001d)$ 公斤湿空气容积] 等于常数 $V_{\text{c}} = \text{const}$ 线系, 水蒸汽分压等于常数 $P_{\text{汽}} = \text{const}$ 线系与空气湿度等于常数 $\phi = \text{const}$ 线系。为了使图面不致因线系复杂而难于利用, 往往将 $\gamma = \text{const}$ 和 $V_{\text{c}} = \text{const}$ 两种线系从总图分出 (附录 4)。

I - d -图上 $I = \text{const}$ 线是斜的, 刻度标示在直坐标上, $d = \text{const}$ 线是垂直的, 刻度标示在

横坐标上。这两种线之间的交角等于 $90^\circ + L\beta$ (图 1—2), 即横坐标与 $I = \text{const}$ 线之间的

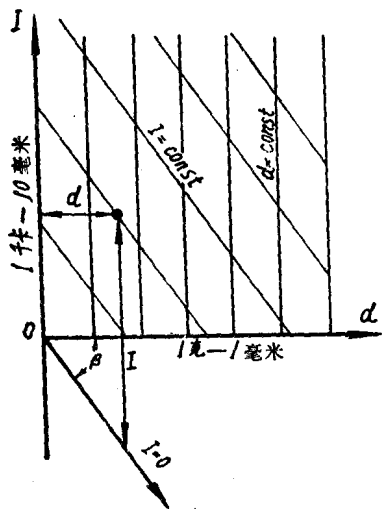


图 1—2 Id-图的编制

交角为 $\angle\beta$ 。热含量 $I = 0.24t + 0.001d (595 + 0.46t)$ 。当 $t = 0^\circ\text{C}$ 时, $I_0 = 0.595d$ 。设热含量的刻度缩尺 M_i 为每 10 毫米 1 千卡; 湿含量的刻度缩尺 M_d 为每毫米 1 克; 则

$$I_0 \frac{M_i}{M_d} = 0.595d \frac{10}{1},$$

$$\text{tg}\beta = 5.95, \quad \angle\beta = 80^\circ 28'.$$

(二) Id -图的应用 在干燥器的设计与计算中 Id -图可应用于下列几个方面: 根据已知的任何两个参数在图上查出湿空气的其它参数; 分析和进行湿空气的加热或冷却的计算; 进行蒸发过程的计算; 确定两种或几种状态的空气混合物的特征。

湿空气的多种参数中最容易测定的两种参数是干球温度 $t_{\text{干}}$ 和湿球温度 $t_{\text{湿}}$ 。测定出 $t_{\text{干}}$ 和 $t_{\text{湿}}$ 的数值后, 就可以在 Id -图上确定其它参数, 并对空气状态的变动进行分析。

设用置放在湿空气中的湿度计测得 $t_{\text{干}} = 72^\circ\text{C}$ 和 $t_{\text{湿}} = 56^\circ\text{C}$, 而须确定此湿空气的其它参数。为此, 需在 Id -图上查出 $t = 56^\circ\text{C}$ 与 $\varphi = 1.0$ 两线的交点, 由此点知此湿空气的热含量为 90 千卡/公斤。 $I = 90$ 千卡/公斤和 $t = 72^\circ\text{C}$ 两线的交点就是所给湿空气的状态点。根据此状态点得知: 空气的湿度 φ 约为 0.44 或 44%; 水蒸汽分压 $P_{\text{汽}}$ 约为 1600 公斤/米²; 湿含量 d 约为 116 克/公斤干空气; 重度 γ 约为 0.945 公斤/米³; 干空气比容 v 约为 1.18 米³/公斤。

(三) 空气的加热、冷却及水分的蒸发

1. 在 Id -图上表示空气的加热或冷却过程 空气的加热, 或空气与冷表面相接触时的冷却, 是在湿含量保持不变的情况下进行的。因此, 在 Id -图上, 表示在加热或冷却前的空气状态的点 a 将沿着垂直线移动 (图 1—3)。

空气加热时, 它的温度和热含量升高, 而它的湿度却减小, 点 a 上升。冷却时点 a 向下移动。空气继续冷却, 它将在湿含量不变的情况下被水分所饱和。点 B 相当于这时的饱和空气的状态。

2. 露点温度 空气冷却到饱和状态时 ($\varphi = 1.0 = 100\%$) 的温度叫做露点温度。前文已经说过, 如果饱和空气继续冷却, 它的湿含量将因一部分水分的排出而减小。排出的水分将以露滴的形状凝聚在冷却表面上。

3. 在 Id -图上表示水分的绝热蒸发过程 蒸发 1 公斤的温度 $t = 0^\circ\text{C}$ 的水, 使其成为水蒸汽, 约需消耗 595 千卡的热量。此热量叫做汽化潜热, 或汽化热。在干燥木材时, 这个热量是由湿空气 (或其它介质) 传

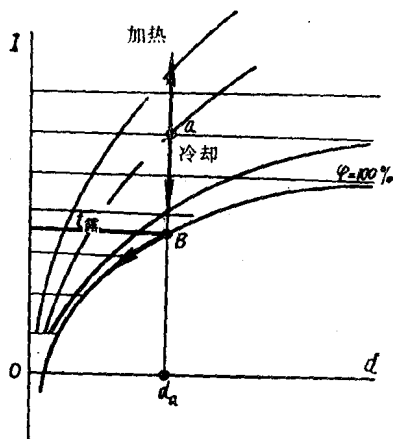


图 1—3 Id -图上空气的加热与冷却

给木材中的水分的。但这个热量以后和被蒸发出来的水分（水蒸汽）又一起回到湿空气之中。在一定条件下，空气的热含量在蒸发过程中不增加也不减少。

在热含量不变的条件下水分蒸发的过程叫做绝热蒸发过程。此过程在 $I-d$ 图上由 a 点沿着热含量等于常数 $I = \text{const}$ 线进行。空气的终点状态决定于此 $I = \text{const}$ 线与湿度等于常数 $\varphi = 100\%$ 线的交点 C (图 1-4)。

在热含量不变的情况下， $\varphi = 100\%$ 时的 C 点的温度叫做蒸发时的冷却极限温度。

如前文所述，干球温度与湿球温度的差值 ($t_{干} - t_{湿}$) 叫做湿度计差或干湿球温度差。此差值的大小可以作为空气汽化液态水分的能力的指标，因之可叫做干燥势。

4. 实际蒸发过程 水分由木材中蒸发时的绝热蒸发过程的真正形式在干燥室内是看不到的。作为干燥介质的湿空气，在吸收从木材中蒸发出来的水蒸汽的同时，其热含量将要增大。在水分蒸发过程中此空气的状态将沿着倾斜角稍小于 $I = \text{const}$ 线而变化。

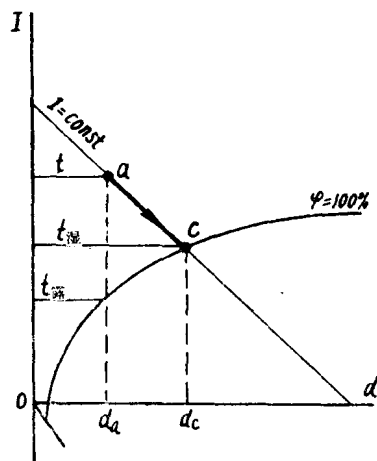


图 1-4 $I-d$ 图上 $I = \text{const}$ 的蒸发过程

在湿含量差 $d_a - d_c$ 的数值很小时，在技术计算中可以认为此情况下的蒸发过程就沿着 $I = \text{const}$ 线进行。

在各种干燥装置内建立有效的蒸发过程时，必须考虑透过装置的壁壳的热损失。此时的蒸发过程将沿着倾斜角比 $I = \text{const}$ 线为大的 $a-d$ 线进行 (图 1-5)。过程终点 (d) 的热含量将比开始时的 (a 点) 小些。减小的值 $\Delta I = Cd$ 。

如果被干材料没有经过预热，那末，在蒸发水分的同时空气中所含的热量还消耗于烘热木材与运载材堆的小车。此时， $I-d$ 图上的蒸发过程将更加急剧地向下倾斜而接近于沿着 $d = \text{const}$ 线进行的冷却过程。

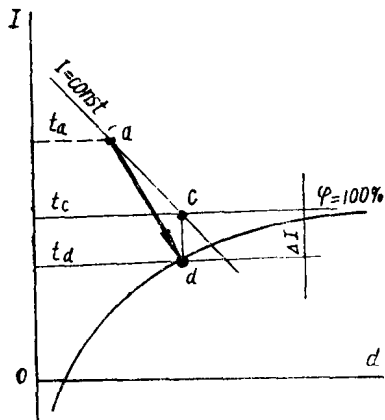


图 1-5 考虑到热损失的蒸发过程

(四) 两种或几种状态的空气相混合的过程 木材的室干过程中，常常须从室外引入新鲜空气与室内循环流动的空气相混合。混合的过程可在 $I-d$ 图上绘出。

1. 干燥室内空气混合的实况 图 1-6 示两种状态的空气在室内相混合的过程。点 0 代表新鲜空气的状态 (I_0, d_0)，点 2 代表室内原有空气的状态 (I_2, d_2)，点 CM 代表混合后的空气的状态 (I_{CM}, d_{CM})。

设状态为 0 的新鲜空气有 g_0 公斤，状态为 2 的原有的循环空气有 $g_{循}$ 公斤，而且 $g_{循}:g_0 = n:1$ 。 n 是循环空气的补充系数，又叫混合比例系数。由此得下列诸式：

$$I_0 + I_2 n = I_{CM}(n + 1), \tag{1-13}$$

$$d_0 + d_2 n = d_{CM}(n + 1), \tag{1-14}$$

$$I_{CM} - I_0 = n(I_2 - I_{CM}), \tag{1-15}$$

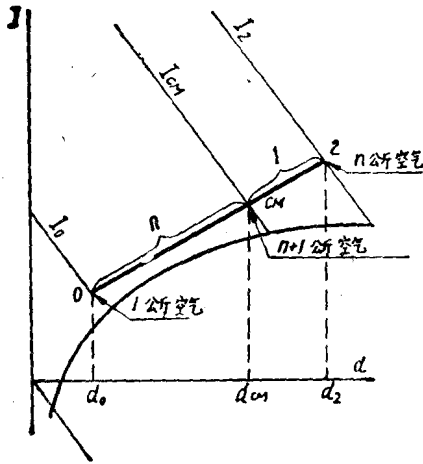


图 1-6 两种状态的空气的混合

首先求混合 1 份 I_1, d_1 状态的空气和 m 份状态为 I_2, d_2 的空气形成的混合物的特征。第一次混合物的分量是 $m + 1$ 份。

其次使 $(m + 1)$ 份状态为 I_{CM}, d_{CM} 的空气与 n 份状态为 I_3, d_3 的空气相混合，所得到的状态为 I_{CM_2}, d_{CM_2} 的第二次混合物的份量是 $(m + 1) + n$ 份。

4. 混合点的虚假状态与真实状态 如果用上述方法求出的混合点 CM' 位于 $\varphi = 100\%$ 线的下方(图 1-7)，那末，这一点就不是真实的，而是虚假的。为了求出混合物的真正状态，必须通过 CM' 点引直线 $I_{CM} = \text{const}$ ，在 $I_{CM} = \text{const}$ 线和 $\varphi = 100\%$ 线相交处找到 CM 点。这一点才是混合后所得湿空气的真实状态。

$$d_{CM} - d_0 = n(d_2 - d_{CM}) \quad (1-16)$$

2. 在 $I-d$ 图上表示混合过程 若在 $I-d$ 图上把表示混合物的组成部分的两点联结成直线，则确定混合物状态的 CM 点必在此直线上(图 1-6)。若已知混合物的湿含量 d_{CM} 或循环空气的补充系数(混合比例系数) n ，即可求出混合线在直线上的位置。技术计算往往需要求出 n 的数值，

$$n = \frac{d_{CM} - d_0}{d_2 - d_{CM}} \quad (1-17)$$

3. 三种及多种状态的混合 在混合几种状态的空气时，最后混合物的特征可用空气混合过程依次图解的方式求出。设需要混合三种状态的空气——状态为 I_1, d_1 的空气 1 份，状态为 I_2, d_2 的空气 m 份，状态为 I_3, d_3 的空气 n 份。

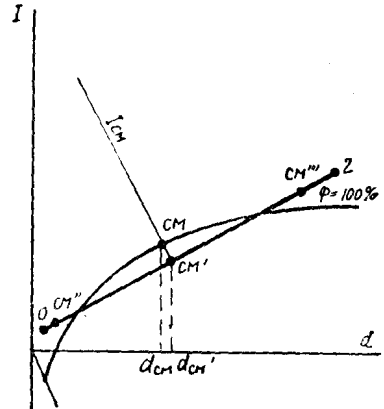


图 1-7 真实混合点的确定

第二节 常压过热蒸汽

新的木材快速干燥技术一般以常压过热蒸汽作为干燥介质。此种作为介质的常压过热蒸汽不同于从锅炉输送到室内加热器中的、作为载热体的干饱和蒸汽或具有一定压力的过热蒸汽。

一、干燥室内的常压过热蒸汽的来源

近几年来，国内已有较多地区的木材加工厂采用常压过热蒸汽作为介质对板、方材进行干燥作业。为了了解此种介质的性质，须先叙述新室干法的要点和常压过热蒸汽的来源。

把材堆推入干燥室；密闭室门；开加热器。同时，把锅炉中的水蒸汽喷射入室，替换室内空气。

室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。此时须开大加热器，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。其热含量更大。新室干法便利用它作为传热传湿的干燥介质。木材在此介质的作用下烘干到一定程度，并经过适当的喷蒸处理与冷却后即可出室。

从木材中蒸发出来的用作介质的水蒸汽虽处于室内，但经过排气孔和室外的大气相通连。它的压力和大气的大致相等，因之它是常压蒸汽。常压饱和蒸汽的温度应是约为 100°C ，而介质在经过加热器时过热后达到的温度却远远高于 100°C 。因之它叫做常压过热蒸汽。这就是新室干法所用介质的来源。

二、干饱和水蒸汽

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），而湿度为百分之一百时，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（1公斤/厘米²），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 （ $^{\circ}\text{C}$ ）、容积重 γ （公斤/米³）、水蒸汽的热含量 $i_{\text{汽}}$ （千卡/公斤）、汽化热（千卡/公斤）以及水的热含量 $i_{\text{水}}$ （千卡/公斤）都随着锅炉中水蒸汽压力 p （公斤/厘米²）的大小而不同。

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

表1-4 干饱和水蒸汽的参数

绝对压力 P (公斤/厘米 ²)	饱和温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	容 积 重 γ (公斤/米 ³)	热 含 量		汽 化 热 (千卡/公斤)
			$i_{\text{水}}$ (千卡/公斤)	$i_{\text{汽}}$ (千卡/公斤)	
1.0	99.1	0.580	99.2	638.8	539.6
1.5	110.8	0.847	111.0	643.1	532.1
2.0	119.6	1.109	119.9	646.3	526.4
3.0	132.9	1.621	133.4	650.7	517.3
4.0	142.9	2.124	143.7	653.9	510.2
5.0	151.1	2.620	152.1	656.3	504.2
6.0	158.1	3.111	159.3	658.3	498.9
7.0	164.2	3.600	165.7	659.9	494.2
8.0	169.6	4.085	171.4	661.2	489.8
9.0	174.5	4.568	176.5	662.3	485.8
10.0	179.0	5.051	181.3	663.3	482.1
11.0	183.2	5.531	185.7	664.1	478.4
12.0	187.1	6.013	189.8	664.9	475.1
13.0	190.7	6.494	193.6	665.6	472.0
14.0	194.1	6.974	197.3	666.2	468.9
15.0	197.4	7.452	200.7	666.7	465.9