



国家林业局研究生教育“十三五”规划教材

WOOD DRYING THEORY

木材干燥理论

何正斌 伊松林◎编著

第1版

中国林业出版社

国家林业局研究生教育“十三五”规划教材

木材干燥理论

何正斌 伊松林 编著

中国林业出版社

内容提要

本书较全面、系统地介绍了与木材干燥有关的理论及数值计算方法。全书共分4章,包括木材干燥理论基础、木材干燥过程中的边界层理论、木材干燥过程中的热量传递及质量传递等内容。本书的特点是理论叙述全面,推导过程详细且实例充分,因而参考价值大、可读性强,不仅可作为从事木材干燥理论的科研工作者的常备资料,也可供相关大专院校师生和木材干燥技术人员作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

木材干燥理论/何正斌,伊松林编著. —北京:中国林业出版社,2016.12

国家林业局研究生教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5038-8898-4

I. ①木… II. ①何…②伊… III. ①木材干燥—研究生—教材 IV. ①S782.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第323576号

国家林业局生态文明教材及林业高校教材建设项目

中国林业出版社·教育出版分社

责任编辑:杜娟

电话:(010)83143553

传真:(010)83143516

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail: jiaocai@public.163.com 电话:(010)83143500

http://lycb.forestry.gov.cn

经 销 新华书店

印 刷 北京市昌平百善印刷厂

版 次 2016年12月第1版

印 次 2016年12月第1次印刷

开 本 850mm×1168mm 1/16

印 张 11

字 数 268千字

定 价 38.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

木材干燥是木材加工与利用的基础环节,其能耗约占木制品生产总能耗的40%~70%。对木材进行正确合理的干燥处理,既是保证木制品质量的关键,又是节约能源、降低成本的重要手段。

目前,我国每年锯材用量约7000万 m^3 ,而实际人工干燥量仅占锯材用量的23%左右,即约有4/5的木材未经干燥处理即进入市场,造成的木材降等损失相当严重。因此,尽快提高我国木材干燥的技术水平,对于合理利用和节约有限的木材资源具有重大的现实意义和经济价值。

近年来,人们在对木材干燥特性进行研究时,往往过分注重实用性,没有系统开展具有普遍意义的木材干燥理论模拟及有关系数的深入研究。国内有关木材干燥热质传递基础理论方面的专著还比较缺乏,供研究生学习和参考的书籍更少,在一定程度上限制了其学术论文的质量,不能从理论上大幅度创新。本书编写的目的即是促进木材干燥的基础理论研究,推动木材干燥技术的进步,为广大研究生提供一本由浅入深的干燥理论书籍,希望对未来的研究有所启示。

本书较全面、系统地介绍了与木材干燥有关的理论基础、木材干燥过程中的边界层理论、木材干燥的热质传递理论及其数值计算方法,理论叙述全面、推导过程详细,实例充分,参考价值大,可读性强。

本书参照北京林业大学木材科学与技术学科“木材干燥理论”的教学大纲编写,具体分工如下:第1章及第4章由何正斌、伊松林编写,第2章及第3章由何正斌编写;全书由伊松林统稿校订。感谢张宇、赵紫剑、马青、黄文娟、武亚峰、王振宇、孔露露、张佳利和曲丽洁在全书图片编辑中的辛勤工作。

本研究受“北京林业大学2015年研究生课程建设项目(JCCB 15068)”、国家自然科学基金项目“超声波促进木材干燥过程中边界层内部热质传递机制(31600457)”和2014年北京高等学校教育教学改革立项项目“工程技术型人才培养模式的探索(2014-MS050)”资助。书中引用了国内外传热学、木材学、木材干燥及工程热力学等方面的文献资料,在此向相关作者表示感谢。书中不妥之处,欢迎提出批评指正。

编者

2016年10月

前 言

第 1 章 木材干燥理论基础	1
1.1 木材干燥介质特性	1
1.1.1 湿空气的状态参数	1
1.1.2 相对湿度的测定原理	3
1.1.3 焓湿图	5
1.1.4 焓湿图在木材干燥过程中的应用	8
1.2 木材的平衡含水率及测量	13
1.2.1 木材的吸湿性	14
1.2.2 平衡含水率的定义及影响因素	14
1.2.3 平衡含水率的测定方法及应用	16
1.2.4 平衡含水率的计算方程	18
1.3 木材水分吸附理论	19
1.3.1 Dent 吸附理论	20
1.3.2 BET 水分吸附理论	24
1.3.3 Hailwood-Horrobin 吸着理论	25
第 2 章 木材干燥过程中的边界层理论	30
2.1 边界层的定义及性质	30
2.2 边界层微分方程	32
2.2.1 质量守恒方程	32
2.2.2 能量守恒方程	33
2.2.3 动量守恒方程	35
2.3 层流边界层的相似解	37
2.4 边界层的测定方法	43
2.4.1 实验装置	43
2.4.2 实验过程	45
2.4.3 实验数据记录和处理	45
2.4.4 结果与分析	47
2.5 强化边界层传热的方法	48

第3章 木材干燥过程中的热量传递	52
3.1 木材热学性质	52
3.1.1 木材的比热容和热容量	52
3.1.2 木材的导热系数	53
3.1.3 木材的导温系数	57
3.2 木材的导热	58
3.2.1 温度场	59
3.2.2 导热基本定律	59
3.2.3 导热微分方程	60
3.3 稳态导热	63
3.3.1 一维稳态导热	63
3.3.2 二维稳态导热	65
3.4 非稳态导热	68
3.4.1 一维非稳态导热	70
3.4.2 非稳态导热问题的数值解法	77
3.4.3 ANSYS 在求解干燥过程中热量传递规律上的应用	83
3.5 木材对流换热	92
第4章 木材干燥过程中的质量传递	98
4.1 内部水分的传递	98
4.1.1 木材的干燥曲线	98
4.1.2 木材内部水分的移动过程	100
4.1.3 木材内部水分的迁移方式	100
4.1.4 各种渗透模型在木材中的应用	103
4.1.5 现有木材内部水分移动模型的介绍	107
4.1.6 毛细作用与水分势能	108
4.1.7 水分势能与水分迁移的关系	117
4.1.8 木材内部水分扩散	120
4.1.9 水分扩散系数	141
4.2 木材干燥过程中表面水分蒸发	148
4.2.1 对流传质	148
4.2.2 干燥过程中木材表面水分的蒸发	152
附 录	159

第 1 章

木材干燥理论基础

木材干燥理论基础涵盖的内容很多，其中有关于木材的微观构造、木材的流体渗透性、木材与水分、木材的干缩湿胀及干燥应力等内容已在本科阶段有所涉及，因此本章重点对木材干燥介质特性、木材的平衡含水率及测量、木材水分吸附理论等方面进行介绍和深化。

1.1 木材干燥介质特性

干燥介质在木材干燥过程中起到非常重要的作用，其不仅将热量传递给木材，同时带走木材干燥出来的水分，因而干燥介质的特性直接影响到木材干燥质量和干燥效率。通常来讲，木材干燥介质均以湿空气为主，湿空气是指含有水蒸气的空气，即干空气和水蒸气的混合物。干空气的成分比较稳定，而湿空气中水蒸气的含量会随着环境的变化而发生改变。一般来说，湿空气中水蒸气的分压力通常都很低，因此可按理想气体进行计算。根据道尔顿定律，湿空气压力 p_b 等于干空气分压与水蒸气分压之和，即

$$p_b = p_a + p_v \quad (1-1)$$

式中： p_v ——水蒸气分压；

p_a ——干空气分压。

通常情况下，如果没有特意进行压缩或抽真空，那么湿空气的压力一般就是当时当地的大气压力。

湿空气中的水蒸气通常处于过热状态，即水蒸气的分压力低于当时温度所对应的饱和压力。这种湿空气称为不饱和空气，不饱和空气具有吸湿能力，即它能容纳更多的水蒸气。如果水蒸气的分压力达到了当时温度所对应的饱和压力，那么这时的湿空气便称为饱和空气，饱和空气不再具有吸湿能力，如再加入水蒸气，就会凝结出水珠来，所以，在木材干燥过程中，为了带走木材中干燥出来的水蒸气，必须保证干燥介质处于不饱和状态。

1.1.1 湿空气的状态参数

湿度、湿容量、含湿量、露点温度以及湿空气的焓，是表征干燥介质(湿空气)的重要参数。

1.1.1.1 湿空气的湿度

湿度是一个非常重要的参数,主要用来表示湿空气中水蒸气的含量。

(1) 绝对湿度

绝对湿度是指 1m^3 湿空气中所含水蒸气的质量,所以,绝对湿度也就是湿空气中水蒸气的密度,即

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{1}{v_v} \quad (1-2)$$

绝对湿度并不能完全说明湿空气的潮湿程度(或干燥程度)和吸湿能力。木材干燥过程中,在同样的绝对湿度下,如果温度较高,则该温度所对应的饱和压力及饱和水蒸气的密度都较高,湿空气中的水蒸气还没有达到饱和压力和饱和密度,因而这时的空气还是比较干燥的,还具有吸湿能力;如果温度较低,则该温度所对应的饱和压力和饱和水蒸气的密度都较低,这时吸湿能力较弱,如果温度再降低,就会有水珠凝结出来。因此,绝对湿度的大小并不能完全说明空气的干燥程度和吸湿能力,还需引入相对湿度的概念。

(2) 相对湿度

相对湿度是指 1m^3 湿空气中所含水蒸气的质量与同温同压下可能含有的最大水蒸气的质量之比,即绝对湿度和相同温度下的饱和空气的绝对湿度的比值:

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{v\max}} = \frac{p_v}{p_s} \quad (1-3)$$

式中: φ ——相对湿度;

ρ_v ——湿空气中水蒸气的实际含量;

$\rho_{v\max}$ ——同温下水蒸气的最大可能含量;

p_v ——水蒸气分压;

p_s ——相同温度下的饱和蒸汽压(数值见附录1)。

相对湿度表示湿空气离开饱和空气的远近程度,所以又称饱和度,即代表湿空气的吸湿能力。 φ 值越小,表明湿空气继续容纳水分的能力越强,当 $\varphi = 0$ 时,就变成了干空气;相反, φ 值越大,表明它吸收水分的能力越弱,当 $\varphi = 100\%$ 时,就变成饱和湿空气,丧失了吸收水分的能力。

1.1.1.2 湿空气的湿容量

在一定温度下每 1m^3 湿空气中含有干饱和蒸汽的克数,即饱和湿空气的绝对湿度,又称湿容量。湿容量表示湿空气吸收水蒸气的能力,它随温度的升高而明显增加。

1.1.1.3 含湿量

含有 1kg 干空气的湿空气中所含的水蒸气质量,称为含湿量,简称湿量,用 d 表示,其单位常用克/千克干空气(g/kgDA)。设湿空气中的干空气质量为 $m_a(\text{kg})$,水蒸气质量为 $m_v(\text{kg})$,则可得

$$d = 1000 \times \frac{m_v}{m_a} = 1000 \times \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (\text{g/kgDA}) \quad (1-4)$$

由于 $m_v = \frac{p_v V}{R_v T}$, $m_a = \frac{p_a V}{R_a T}$, 而 $R_v = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $R_a = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 将以上关系及式(1-1)代入式(1-4)可得

$$d = \frac{1000 \times p_v R_a}{(p_b - p_v) R_v} = 622 \frac{p_v}{p_b - p_v} \quad (\text{g/kgDA}) \quad (1-5)$$

根据式(1-3), 又可得

$$d = 622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s} \quad (\text{g/kgDA}) \quad (1-6)$$

在木材干燥过程中, 湿空气的体积和质量都有可能随湿空气的状态而发生变化, 而其中干空气量却始终保持不变, 因此为方便起见, 以后有关湿空气的分析、计算, 均以 1 kg 干空气作为计算单位。

由式(1-5)可以看出, 当大气压力 p_b 一定时, 湿空气的含湿量 d 只取决于水蒸气的分压 p_v , 并随 p_v 的增加而增大。也就是说, d 与 p_v 是两个相互依存而不是各自独立的参数。因此要确定湿空气的状态, 除已知 p_v (或 d) 外, 还需要加上任意一个别的参数。在木材干燥工艺中, 一般都选用焓作为确定湿空气状态的另一状态参数。

1.1.1.4 露点温度

如果使未饱和湿空气的水蒸气含量不变, 即 p_v 不变, 而将它逐渐冷却至 p_v 所对应的饱和温度, 它就变成了饱和湿空气。这时若继续冷却, 将有部分水蒸气凝结为水而从空气中析出, 在容器壁上将出现露珠, 这种现象称为结露。通常把水蒸气分压 p_v 所对应的饱和温度 t_s 称为湿空气的露点温度, 用符号 t_d 表示。

1.1.1.5 湿空气的焓

湿空气的焓等于干空气的焓与水蒸气的焓之和。因为焓仍以每 1 kg 干空气为计算单位, 故实际上是计算 $(1 + 0.001d) \text{ kg}$ 湿空气的焓值 H , 它应等于 1 kg 干空气的焓与 $0.001d$ 水蒸气的焓之和, 即

$$H = h_a + 0.001dh_v \quad (1-7)$$

式中: h_a ——干空气的比焓, $h_a = 1.002t + 0.00005t^2$ (kJ/kg), 其中 t 为干球温度(见下文);

h_v ——水蒸气的比焓, $h_v = 2501 + 1.850t + 0.00021t^2$ (kJ/kg)。

所以, 综合可得

$$H = 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.850t + 0.00021t^2) \quad (\text{kJ/kgDA}) \quad (1-8)$$

1.1.2 相对湿度的测定原理

相对湿度是表示湿空气成分的重要参数, 是衡量干燥介质吸收水分的重要参数, 准确测量湿空气的相对湿度, 对干燥过程的精确控制有着十分重要的作用。相对湿度的测定方法有多种, 常规干燥过程中多采用干-湿球式湿度计来测量, 如图 1-1 所示。该装置由两支相同的温度计组成, 其中一支是干球温度计, 用来测定湿空气的温度, 称为干球温度, 用 t 表示; 另一支是包有湿纱布(其纱布尾部浸入水中)的湿球温度计,

它所显示的是湿纱布的温度，称为湿球温度，用 t_w 表示。将干-湿球式湿度计置于被测空间，如果它周围的空气是未饱和的(即 $\varphi < 1$)，那么纱布表面的水分就会从本身吸热而不断蒸发，因而使温度下降，于是空气与湿纱布间有了温差，这一温差促使周围空气向湿纱布传热；当水温下降到一定的程度，使水蒸发所消耗的热量正好等于周围空气所传给的热量时，湿球水温将不再下降而维持某一稳定的数值，此时湿球温度计的度数即为湿球温度 t_w 。通常湿球温度总是低于干球温度，而且空气的相对湿度 φ 值越小，水分蒸发越快，湿球温度就比干球温度低得越多；反之空气的 φ 值越大，干、湿球的温差就越小，当 $\varphi = 100\%$ 时，干、湿球的温度相等，二者的温差为零。由此看出，干、湿球的温差可以表征空气的相对湿度，它们之间的关系可以写成如下一般的函数关系：

$$\varphi = f(t, t_w)$$

但这个函数关系没有简单的数学表达式，通常由实验测得大量的数据后，经过整理制成图表，如图 1-2 所示。根据测定的干球温度和湿球温度，可以从附录 2 中查出湿空气的相对湿度 φ 值。

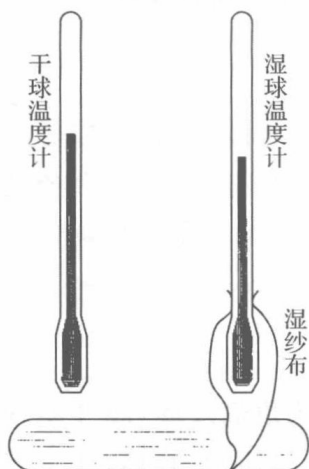


图 1-1 干-湿球式湿度计

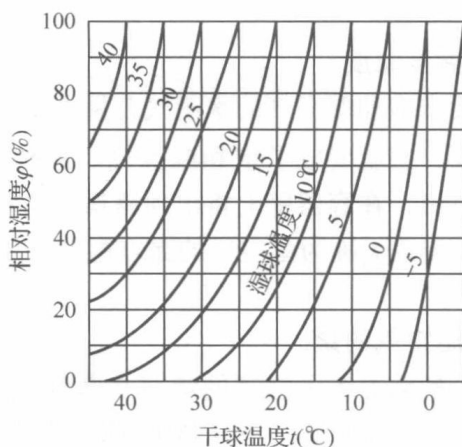


图 1-2 干-湿球温度与相对湿度的关系

从湿球温度的形成过程可以看出，由于湿球纱布上的水不断蒸发，紧靠湿球表面将形成很薄的饱和湿空气层 ($\varphi = 100\%$)，这层饱和湿空气的温度非常接近水温，即近似等于湿球温度 t_w 。这一饱和湿空气层的形成过程，可以近似认为是等焓过程，这是因为湿球处吸热的焓增正好等于饱和湿空气层附近空气的放热焓降，二者互相抵消，其总的效果是湿球附近周围空气的焓 H_2 等于初态(即被测湿空气)的焓 H_1 ，即

$$H_2 = H_1 \quad (1-9)$$

从湿球温度的形成过程还可看出，湿球周围饱和湿空气层的蒸汽分压大于被测湿空气的蒸汽分压，故通常情况下 ($\varphi < 100\%$) 湿球温度高于露点温度，而低于干球温度。

必须指出，湿球温度计的读数和掠过温度计的风速有关，在空气湿度不变的情况下，当风速增加时，湿球温度计的读数将有所下降。

例 1-1 利用干-湿球式湿度计测得常规干燥过程中，干燥密内的干球温度 $t = 80^\circ\text{C}$ 、湿球温度 $t_w = 70^\circ\text{C}$ ，试求干燥密内空气的相对湿度 φ 、水蒸气分压 p_v 、露点 t_d 、含湿量 d 及焓 H (以每 1kg 干空气计)。

解：①求相对湿度 φ 。已知干球温度 $t = 80^{\circ}\text{C}$ ，湿球温度 $t_w = 70^{\circ}\text{C}$ ，由附录 2 查得 $\varphi = 64\%$ ，故湿空气处于未饱和状态。

②求蒸汽分压 p_v 。由附录 1 查得， 80°C 时对应的饱和蒸汽压力为 $p_s = 0.4737 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，根据式 (1-3) 可得

$$p_v = \varphi p_s = 0.64 \times 47370 = 30316.8 \text{ (Pa)}$$

③求露点 t_d 。根据露点的定义可知，它是水蒸气分压所对应的饱和温度。由附录 1 查得露点温度为 69.7°C 。

④求湿空气的含湿量 d 。根据式 (1-5) 得

$$d = 622 \frac{P_v}{p_b - P_v} = 622 \frac{0.303168}{1 - 0.303168} = 270.6 \text{ (g/kgDA)}$$

⑤求湿空气的焓 H 。根据式 (1-5) 得

$$\begin{aligned} H &= 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.850t + 0.00021t^2) \\ &= 1.002 \times 80 + 0.00005 \times 80 \times 80 + 0.001 \times 270.6 \times \\ &\quad (2501 + 1.850 \times 80 + 0.00021 \times 80 \times 80) \\ &= 797.66 \text{ (kJ/kgDA)} \end{aligned}$$

1.1.3 焓湿图

1.1.3.1 普通条件下的焓湿图

为简化计算，便于确定湿空气的状态参数及分析研究湿空气所经历的状态变化过程，常采用湿空气的焓-湿图，即 $H-d$ 图，它在木材干燥工艺中是十分重要的计算工具之一。

湿空气的 $H-d$ 图是在一定的大气压力 p_b 下绘制的，是以含 1kg 干空气的湿空气作为计算基准，以焓 H 为纵坐标，以含湿量 d 为横坐标。为了使图中线条清晰，常采用斜角坐标（一般取 135° ）。但在实用上， d 的数值仍标在直角坐标的水平位置上（见附录 3）。 $H-d$ 图中绘有焓 (H)、含湿量 (d)、温度 (t) 及相对湿度 (φ) 等各组等值线簇。在指定的压力下，只要给出湿空气的两个参量，即可在该图中查到相应的其他参数。

例 1-2 常压下，已知湿空气的温度为 30°C ，相对湿度 $\varphi = 80\%$ ，试从 $H-d$ 图中查出湿空气的其他性质。

解：如图 1-3 所示，从图中可以直接查得，当湿空气的温度为 30°C 、相对湿度 $\varphi = 80\%$ 时， $d = 22 \text{ g/kg(DA)}$ ， $H = 86 \text{ kJ/kg(DA)}$ 。由于定湿球温度线基本上和定焓线平行，因此湿球温度可以这样来确定：由该状态 a 沿定焓线往右下方与饱和空气线 ($\varphi = 100\%$) 相交于 b 点， b 点的温度 27.1°C 即为湿

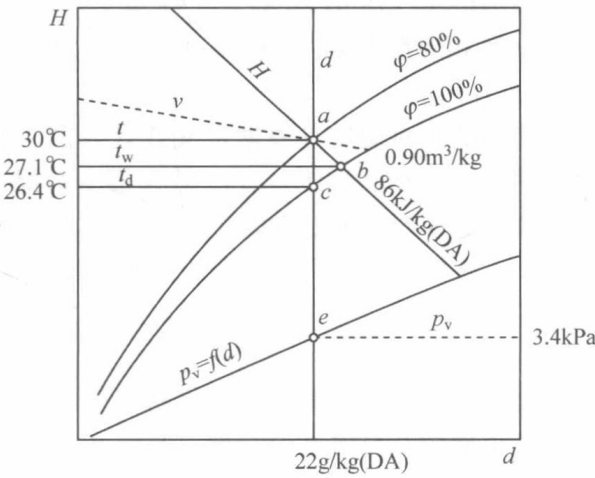


图 1-3 $H-d$ 图实例

球温度。露点温度 t_d 和水蒸气的分压力 p_v 可由 a 点沿定含湿量线垂直往下, 分别与饱和空气线和 $p_v = f(d)$ 线相交于 c 点和 e 点。 c 点的温度 26.4°C 即为露点温度; e 点的压力 3.4kPa 即为水蒸气的分压力。

1.1.3.2 通用焓湿图

在真空或加压条件下, 湿空气的相对湿度不能采用普通焓湿图进行求解, 这方面, 国内学者严加谔(严加谔, 1993)作了大量工作, 并编制了通用焓湿图。湿空气可作理想气体处理, 根据焓的概念可以看出, 只要湿空气的温度、含湿量相同, 它们的焓和饱和蒸汽压也都是相同的。这时, 相对湿度仅仅取决于水蒸气的分压力, 而这一分压力在含湿量(即水蒸气和干空气的相对含量)不变的情况下与湿空气的总压力成正比。所以, 如果用相对湿度与湿空气总压力的比值代替通常的相对湿度, 就可以绘制出适用于不同压力的湿空气的通用焓湿图。将相对湿度与湿空气总压力的比值称为比相对湿度, 也就是单位压力(指湿空气总压力)下的相对湿度, 用 ψ 可表示为

$$\psi = \frac{\varphi}{P} \quad (1-10)$$

具体计算公式如下:

$$\psi = \frac{\varphi}{P} = \frac{A_w - D}{Ap - (A - A_w + D)p_{sv(t)}} (0.1\text{MPa})^{-1} \quad (1-11)$$

式中各量计算公式为

$$\begin{aligned} A &= (1555.6 + 1.151t + 0.00013t^2 - 2.604t_w) \frac{P_{sv(t)}}{p - p_{sv(t)}} \\ A_w &= (1555.6 - 1.453t_w + 0.00013t_w^2) \frac{P_{sv(t_w)}}{p - p_{sv(t_w)}} \\ D &= 1.002(t - t_w) + 0.00005(t^2 - t_w^2) \\ p_{sv(t)} &= 22.064 \exp \left\{ \left[7.2148 + 3.9564 \left(0.745 - \frac{t + 273.15}{647.14} \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. 1.3487 \left(0.745 - \frac{t + 273.15}{647.14} \right)^{3.1778} \right] \left(1 - \frac{647.14}{t + 273.15} \right) \right\} \text{MPa} \end{aligned}$$

给出湿空气压 p (MPa)、干球温度 t 和湿球温度 t_w , 即可根据式(1-11)计算出相对湿度 φ 和比相对湿度 ψ , 然后根据式(1-6)和式(1-8)计算出含湿量 d [g/kg(DA)] 和焓 H [kJ/kg(DA)]。

式中的相对湿度是根据定义式计算的, 其中的最大水蒸气分压 $p_{v\max}$ 取的是干球温度所对应的饱和蒸汽压 $p_{sv(t)}$ 。但在很多情况下, 当干球温度所对应的饱和蒸汽压超过湿空气的总压时, $p_{v\max}$ 应取湿空气的总压, 此时需要将得到的相对湿度值计 $\varphi_{\text{计}}$ 乘以 $p_{sv(t)}/p$, 这样就可以得到正确的相对湿度值, 即

$$\varphi = \frac{p_v}{p} = \frac{p_v}{p_{sv(t)}} \frac{p_{sv(t)}}{p} = \varphi_{\text{计}} \frac{p_{sv(t)}}{p} \quad (1-12)$$

对通用焓湿图中查出的比相对湿度值 ψ 图, 在遇到上述情况时, 只需乘以 $p_{sv(t)}$ 即可得到正确的相对湿度值, 即

$$\varphi = \frac{p_v}{p} = \frac{p_v}{p_{sv(t)}} \frac{p_{sv(t)}}{p} = \frac{\varphi_{\text{图}}}{p} p_{sv(t)} = \psi_{\text{图}} p_{sv(t)} \quad (1-13)$$

通用焓湿图的用法和一般焓湿图基本相同,对任意指定的湿空气压力 p ,只要将通用焓湿图中各个比相对湿度值,按 $\varphi = p\psi$ 的简单关系换算成各个相对湿度值后,它就成了该指定压力下的一般焓湿图了。

例 1-3 计算湿空气的相对湿度、含湿量和焓。已知:①木材常规干燥过程中,干球温度 $t=80^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=75^{\circ}\text{C}$,湿空气压力 $p=0.1\text{MPa}$;②木材高温热处理过程中,干球温度 $t=140^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=85^{\circ}\text{C}$,湿空气压力 $p=0.1\text{MPa}$;③真空干燥过程中,干球温度 $t=50^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=30^{\circ}\text{C}$,湿空气压力 $p=0.08\text{MPa}$;④木材加压干燥过程中,干球温度 $t=200^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $t_w=120^{\circ}\text{C}$,湿空气压力 $p=0.2\text{MPa}$ 。

解: 根据水蒸气的饱和蒸汽压表可查得

$$p_{sv(80)} = 0.04737\text{MPa}; p_{sv(75)} = 0.03856\text{MPa};$$

$$p_{sv(85)} = 0.05782\text{MPa}; p_{sv(140)} = 0.3612\text{MPa};$$

$$p_{sv(50)} = 0.01234\text{MPa}; p_{sv(30)} = 0.004246\text{MPa};$$

$$p_{sv(120)} = 0.1985\text{MPa}; p_{sv(200)} = 1.554\text{MPa}。$$

①在木材常规干燥过程中 $t=80^{\circ}\text{C}$, $t_w=75^{\circ}\text{C}$,由公式计算得

$$A = (1555.6 + 1.151t + 0.00013t^2 - 2.604t_w) \frac{p_{sv(t)}}{p - p_{sv(t)}} = 1370.97$$

$$A_w = (1555.6 - 1.453t_w + 0.00013t_w^2) \frac{p_{sv(t_w)}}{p - p_{sv(t_w)}} = 908.37$$

$$D = 1.002(t - t_w) + 0.00005(t^2 - t_w^2) = 5.05$$

$$\varphi = \frac{A_w - D}{Ap - (A - A_w + D)p_{sv(t)}} p = 0.809$$

$$d = 621.99 \frac{\varphi \cdot p_{sv(t)}}{p - \varphi \cdot p_{sv(t)}} = 386.63 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.85t + 0.00021t^2) = 1105.18\text{kJ/kg}$$

②在木材高温热处理过程中 $t=140^{\circ}\text{C}$, $t_w=85^{\circ}\text{C}$,由公式计算得

$$A = (1555.6 + 1.151t + 0.00013t^2 - 2.604t_w) \frac{p_{sv(t)}}{p - p_{sv(t)}} = -2071.43$$

$$A_w = (1555.6 - 1.453t_w + 0.00013t_w^2) \frac{p_{sv(t_w)}}{p - p_{sv(t_w)}} = 1964.39$$

$$D = 1.002(t - t_w) + 0.00005(t^2 - t_w^2) = 55.73$$

$$\varphi_{\text{计}} = \frac{A_w - D}{Ap - (A - A_w + D)p_{sv(t)}} p = 0.1551$$

由于 $p_{sv(140)} = 0.3612\text{MPa} > 0.1\text{MPa}$,所以可得

$$\varphi = \varphi_{\text{计}} \frac{p_{sv(t)}}{p} = 0.5603$$

$$d = 621.99 \frac{\varphi_{\text{计}} \cdot p_{sv(t)}}{p - \varphi_{\text{计}} \cdot p_{sv(t)}} = 792.53 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.85t + 0.00021t^2) = 2331.91 \text{ kJ/kg}$$

③在真空干燥过程中 $t=50^{\circ}\text{C}$, $t_w=30^{\circ}\text{C}$,由公式计算得

$$A = (1555.6 + 1.151t + 0.00013t^2 - 2.604t_w) \frac{p_{sv(t)}}{p - p_{sv(t)}} = 280.2$$

$$A_w = (1555.6 - 1.453t_w + 0.00013t_w^2) \frac{P_{sv(t_w)}}{p - P_{sv(t_w)}} = 84.75$$

$$D = 1.002(t - t_w) + 0.00005(t^2 - t_w^2) = 20.12$$

$$\varphi = \frac{A_w - D}{Ap - (A - A_w + D)p_{sv(t)}} p = 0.2619$$

$$d = 621.99 \frac{\varphi \cdot P_{sv(t)}}{p - \varphi \cdot P_{sv(t)}} = 26.184 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.85t + 0.00021t^2) = 118.15 \text{ kJ/kg}$$

④在木材加压干燥过程中 $t = 200^\circ\text{C}$, $t_w = 120^\circ\text{C}$, 由公式计算得

$$A = (1555.6 + 1.151t + 0.00013t^2 - 2.604t_w) \frac{P_{sv(t)}}{p - P_{sv(t)}} = -1696.91$$

$$A_w = (1555.6 - 1.453t_w + 0.00013t_w^2) \frac{P_{sv(t_w)}}{p - P_{sv(t_w)}} = 183031$$

$$D = 1.002(t - t_w) + 0.00005(t^2 - t_w^2) = 81.44$$

$$\varphi_{\text{计}} = \frac{A_w - D}{Ap - (A - A_w + D)p_{sv(t)}} p = 0.1277$$

由于 $p_{sv(200)} = 1.554\text{MPa} > 0.2\text{MPa}$

所以可得

$$\varphi = \varphi_{\text{计}} \cdot \frac{P_{sv(t_w)}}{p} = 0.992$$

$$d = 621.99 \frac{\varphi_{\text{计}} \cdot P_{sv(t)}}{p - \varphi_{\text{计}} \cdot P_{sv(t)}} = 76964.33 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 1.002t + 0.00005t^2 + 0.001d(2501 + 1.85t + 0.00021t^2) = 221813\text{kJ/kg}$$

例 1-4 为了比较相同干湿球温度条件下, 不同方式干燥木材过程中介质的热力学性能, 现假设干球温度为 50°C , 湿球温度为 30°C , 求压力分别为 0.2MPa 、 0.1MPa 和 0.08MPa 条件下, 干燥介质的状态参数。

解: 根据水蒸气的饱和蒸汽压表可查得

$$p_{sv(50)} = 0.01234\text{MPa}; p_{sv(30)} = 0.004246\text{MPa}$$

所以, 根据公式可求得

$$\varphi_{(0.2\text{MPa})} = 0.1327; \varphi_{(0.1\text{MPa})} = 0.2404; \varphi_{(0.08\text{MPa})} = 0.2619$$

$$d_{(0.2\text{MPa})} = 5.13 \text{ g/kg(DA)}; d_{(0.1\text{MPa})} = 19.01 \text{ g/kg(DA)};$$

$$d_{(0.08\text{MPa})} = 26.18 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H_{(0.2\text{MPa})} = 63.55 \text{ kJ/kg(DA)}; H_{(0.1\text{MPa})} = 99.54 \text{ kJ/kg(DA)}$$

$$H_{(0.08\text{MPa})} = 118.15 \text{ kJ/kg(DA)}$$

可见在相同干湿球温度差条件下干燥木材, 压力越高, 环境相对湿度和含湿量越高。在木材实际干燥过程中, 我们可以根据干湿球温度, 求得介质的相对湿度和空气的含湿量, 进而实现对干燥过程的控制处理。

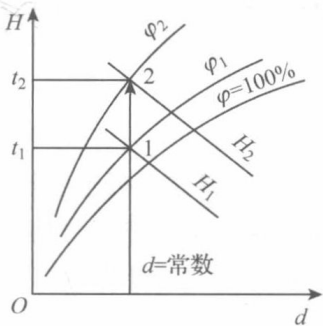
1.1.4 焓湿图在木材干燥过程中的应用

木材干燥过程中通过干燥介质将热量传递给木材, 并将木材内部干燥出来的水分

带走，为了得到较好的干燥控制工艺，应了解木材干燥过程中干燥介质的变化规律。

1.1.4.1 湿空气加热冷却过程

木材干燥过程中，当干燥介质温度没有达到干燥工艺中规定的温度时，必须对湿空气进行加热，干燥介质流经加热器前后，由于没有水蒸气的增加，所以干燥介质的含湿量保持不变，在图 1-4 所示的 $H-d$ 图上相应过程沿等 d 线方向移动，即



$$d = \text{常数} \quad \Delta d = d_2 - d_1 = 0 \quad (1-14)$$

在干燥介质加热过程中，干燥介质的温度升高、焓增加、相对湿度减小，为图中的 1→2，即

$$\begin{cases} \Delta t = t_2 - t_1 > 0 \\ \Delta H = H_2 - H_1 > 0 \\ \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 < 0 \end{cases} \quad (1-15)$$

图 1-4 干燥介质加热和冷却过程

加热过程中吸收的热量(单位 kJ/kg)等于焓的增量，即

$$Q = \Delta H = H_2 - H_1 \quad (1-16)$$

有时候，干燥室的保温没达到要求，当高温高湿的干燥介质流过干燥室内部墙体时会出现冷却过程，这个过程中没有水蒸气的引入，相应过程与加热过程恰好相反，在图 1-4 所示的 $H-d$ 图上表示为从 2→1 的过程。

类似地，当介质的相对湿度小于 100% 时，有

$$d = \text{常数} \quad \Delta d = d_2 - d_1 = 0 \quad (1-17)$$

在干燥介质冷却过程中，干燥介质的温度降低、焓减少、相对湿度增加，则有

$$\begin{cases} \Delta t = t_2 - t_1 < 0 \\ \Delta H = H_2 - H_1 < 0 \\ \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 > 0 \end{cases} \quad (1-18)$$

冷却过程中放出的热量等于焓的减少量，即

$$Q = \Delta H = H_2 - H_1 \quad (1-19)$$

随着冷却过程，当干燥介质的相对湿度达到 100% 时继续冷却，干燥介质中的水分就会析出，即介质等 d 线与 $\varphi = 100\%$ 的相交点所对应的温度即为露点温度。

1.1.4.2 湿空气加湿过程(绝热蒸发过程)

木材干燥过程中，为了防止木材表面水分蒸发过快而引起木材开裂，必须保持干燥介质有一定的湿度，对此通常采用喷蒸的方式进行调节。下面主要探讨干燥室内喷水的过程。干燥介质将热量传给水，使水蒸发变为水蒸气，水蒸气又加入到干燥介质中，而这个过程进行时与外界又没有热量交换，因此干燥介质的焓不变，干燥介质的性质沿着图 1-5 中的等焓线(2→3)变化。

在相应过程中有

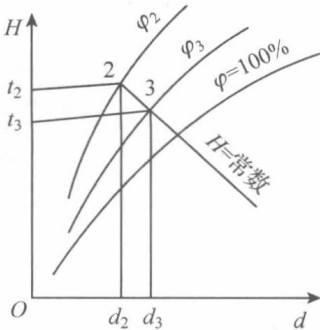


图 1-5 湿空气加湿过程

$$H = \text{常数} \quad \Delta H = H_3 - H_2 = 0$$

在干燥介质加湿过程中,干燥介质的温度降低、相对湿度增加,因而有

$$\begin{cases} \Delta t = t_3 - t_2 < 0 \\ \Delta d = d_3 - d_2 > 0 \\ \Delta \varphi = \varphi_3 - \varphi_2 > 0 \end{cases} \quad (1-20)$$

从图中可以看出,这个过程中干燥介质的湿度会越来越高,理论上最后可能达到100%,从而失去继续吸湿的能力。

1.1.4.3 两种状态空气的混合

木材干燥过程中,当高温低湿的干燥介质流过木材材堆后会逐渐变为低温高湿的介质,这时干燥介质容纳水蒸气的能力减弱,使得干燥能力下降。为了降低其湿度,通常打开排气口进行换气,将一部分低温高湿的空气用室外的低湿空气进行替换。

如图1-6所示,假设从排气口进入干燥窑内的状态0的新鲜空气量为 G_0 (kg),参数为 I_0 , d_0 ;干燥窑内状态2的干燥介质质量为 G_2 (kg),参数为 I_2 , d_2 。二者混合,令

$$G_2/G_0 = n \quad (1-21)$$

即 n 为混合气体的比例参数,表示1kg新鲜空气与 n kg循环空气相混合;设混合气体的参数为 I_c , d_c ,则可得

$$I_0 + nI_2 = (1+n)I_c \quad (1-22)$$

$$d_0 + nd_2 = (1+n)d_c \quad (1-23)$$

$$I_c - I_0 = n(I_2 - I_c) \quad (1-24)$$

$$d_c - d_0 = n(d_2 - d_c) \quad (1-25)$$

综合可得

$$\frac{I_c - I_0}{d_c - d_0} = \frac{I_2 - I_c}{d_2 - d_c} \quad (1-26)$$

上式是以点 I_0 , d_0 及 I_2 , d_2 为坐标的直线方程式,因此混合空气状态点在该直线上。如果已知 n ,即可求出:

$$I_c = \frac{I_0 + nI_2}{1+n} \quad (1-27)$$

$$d_c = \frac{d_0 + nd_2}{1+n} \quad (1-28)$$

如果已知 d_c ,则可反过来求出:

$$n = \frac{d_c - d_0}{d_2 - d_c} \quad (1-29)$$

可见点 c 把直线0—2分成两段,两段的比值等于混合气体的比例系数 n ,点 c 靠近其中分量较大的状态点。

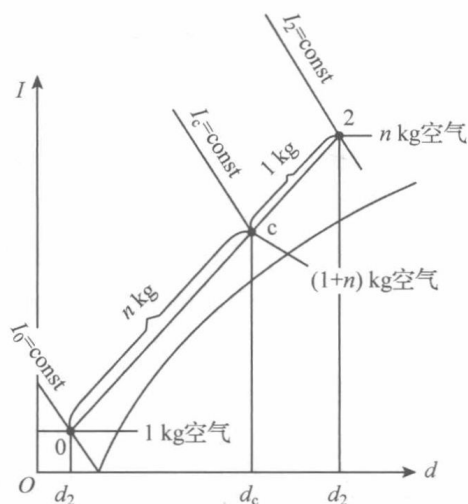


图 1-6 两种状态空气的混合图

1.1.4.4 绝热节流过程

在一些特种干燥过程如真空干燥过程中,在抽真空时,真空干燥箱内的水分状态发生变化,将直接影响木材干燥速率和干燥质量。

此种抽真空过程相当于绝热节流过程(严家騄,1993),抽真空后,干燥箱内部的干燥介质压力降低、比体积增大、焓不变、熵增加;由于可将湿空气看作理想气体,绝热节流后既然焓不变,因此温度也不变;另外,由于节流过程中湿空气的含湿量不变,可知水蒸气的比分压力也不变。介质抽真空前后的比相对湿度,可根据如下方程得到:

$$\psi = \frac{p'_v}{p_{sv(t)}} \quad (1-30)$$

其中 $p_{sv(t)}$ 与干燥介质温度有关,由于绝热节流后湿空气的温度和水蒸气的比分压都不变,所以比相对湿度也不变。由于

$$\varphi = \psi p \quad (1-31)$$

$$p_v = p'_v p \quad (1-32)$$

所以抽真空后,湿空气的压力降低,使湿空气的相对湿度和水蒸气分压力均减小了,同时湿球温度也降低了。

由于绝热节流后湿空气的焓、含湿量和比相对湿度都没有变,所以绝热节流过程在通用焓湿图中表示为同一状态点,但是该点对不同压力代表着不同的相对湿度、不同的水蒸气分压力和不同的湿球温度。

例 1-5 设湿空气的压力为 0.2 MPa、温度为 30℃、相对湿度为 0.6(状态 1),绝热节流后压力分别下降为 0.1MPa(状态 2)和 0.05MPa(状态 3)。求这三个状态下的温度、焓、含湿量、比相对湿度、相对湿度、水蒸气的比分压力和分压力、湿球温度。

解: 湿空气在状态 1 时的温度和比相对湿度为

$$t_1 = 30^\circ\text{C}$$

$$\psi_1 = \frac{\varphi_1}{p_1} = \frac{0.6}{2} = 0.3 \text{ (0.1MPa)}^{-1}$$

根据湿空气绝热节流过程的分析可知:

$$t_3 = t_2 = t_1$$

$$\psi_3 = \psi_2 = \psi_1 = 0.3 \text{ (0.1MPa)}^{-1}$$

状态 1、2 和 3 在通用焓湿图上表示为同一状态点 A,如图 1-7 所示,从图中可以看出:

$$H_3 = H_2 = H_1 = 50.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

$$d_3 = d_2 = d_1 = 8.0 \text{ g/kg(DA)}$$

$$p'_{v3} = p'_{v2} = p'_{v1} = p'_{vA} = 12.7 \text{ kPa/MPa}$$

由于状态 1、2、3 的压力不同, A 点所代表的这三个状态的相对湿度、水蒸气分压力和湿球温度也不同,计算可得

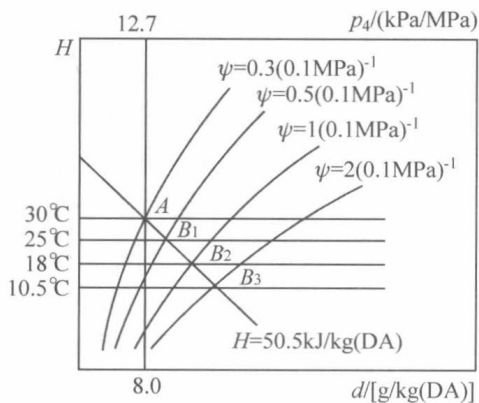


图 1-7 某通用焓湿图