



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

木材干燥技术

(木材加工专业)

主编 郝华涛



高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

木材干燥技术

(木材加工专业)

主 编 郝华涛
责任主审 王逢瑚
审 稿 刘一星 艾 军



高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育国家规划教材,是根据教育部 2001 年颁布的中等职业学校木材干燥技术教学基本要求编写的,并参照了有关行业的职业技能鉴定规范,以及中级技术工人等级考核标准。

本书主要内容为介质干燥的性质、与干燥有关的木材性质、木材加热与干燥的物理基础、木材干燥室、木材干燥设备、木材室干燥技术、木材大气干燥、木材特种干燥技术、木材干燥室的设计。本书以木材干燥工艺和干燥操作为主线,不拘泥于原有学科的系统性和完整性,涵盖了本课程教学基本要求确定的相关知识点和技能点,以与课程相关的职业岗位能力需要作为教学内容取舍的依据,加大了实践教学内容的比例,既介绍了木材的常规干燥等目前正在使用的成熟技术,也介绍了除湿干燥等新技术、新工艺和新设备,同时介绍了木材干燥技术的发展趋势。书中还适当增加了图表比例,使教学内容更直观、形象、生动。

本书是中等职业学校木材加工类专业(三、四年制)及其专门化教材,也可作为木材加工企业的职业培训教材和企业职工的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

木材干燥技术/郝华涛主编. —北京:高等教育出版社,2002.6

ISBN 7-04-010394-X

I. 木... II. 郝... III. 木材干燥-专业学校-教材 IV. S781.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 030941 号

木材干燥技术
郝华涛 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014042

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 12.5
字 数 300 000

版 次 2002 年 6 月第 1 版
印 次 2002 年 6 月第 1 次印刷
定 价 15.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

木材干燥技术是木材加工专业的一门专业课，具有很强的实践性。但是多年来，我国中等职业学校木材加工专业一直没有合适的教材，只能参考高校教材进行教学。

进入21世纪，随着中等职业教育培养目标的转变，教学内容、方法等也应有所调整。为此，2000年教育部组织制定了《中等职业学校木材加工专业整体教学改革方案》，2001年又颁布了木材干燥技术教学基本要求，本书是依照本课程教学基本要求编写的。

本书由黑龙江林业职业技术学院郝华涛主编并统稿。参加编写的人员及分工是：郝华涛（黑龙江林业职业技术学院）编写了第1章、第2章、第4章、第6章；郑万友（黑龙江林业职业技术学院）编写了第3章、第5章、第7章、第8章第一节；雷发斌（南昌林业学校）编写了第8章第二节至第五节及技能实训。

本书在送交教育部全国中等职业教育教材审定委员会审定之前，特邀请了东北林业大学王逢瑚教授审阅。在教材编写过程中，王逢瑚教授还提出了许多很好的意见和建议，在此表示衷心的感谢！

本书在编写过程中，始终得到了国家林业局人事教育司、国家林业局职业教育研究中心、林业职业教育教学指导委员会、黑龙江林业职业技术学院、南昌林业学校的关心和指导，特别是黄桂荣和苏惠民两位同志，从本专业各主干课程教材编写思路的拟定，到本课程教材编写提纲的落实，都给予了具体的指导，在此表示深深的谢意！

本书已通过教育部全国职业教育教材审定委员会的审定，责任主审为王逢瑚，审稿人为刘一星、艾军。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中难免有不当之处，敬请读者指正。

编 者

2001年6月

目 录

绪 论	1
第 1 章 干燥介质的性质	4
第一节 水蒸气的性质	4
第二节 湿空气的性质	7
第三节 炉气的性质	16
复习思考题	18
第 2 章 有关干燥的木材性质	19
第一节 木材的含水率	19
第二节 木材的干缩与变形	21
第三节 木材的热学性质和电学性质	27
第四节 木材的弹性与塑性	29
复习思考题	29
第 3 章 木材加热与干燥的物理基础	30
第一节 木材的加热	30
第二节 干燥过程中木材水分的蒸发与移动	34
第三节 木材在气体介质中的对流干燥机理	35
第四节 木材干燥过程中的应力与变形	37
复习思考题	40
第 4 章 木材干燥室	41
第一节 干燥室的分类	41
第二节 连续式干燥室	42
第三节 周期式强制循环干燥室	43
第四节 周期式自然循环干燥室	55
第五节 木材干燥室的壳体结构及建筑	56
第六节 木材干燥室的技术经济分析与选用	62
复习思考题	65
第 5 章 木材干燥设备	67
第一节 供热与调湿设备	67
第二节 通风设备	79
第三节 木材运载与装卸设备	88
第四节 检测仪表与设备	93

复习思考题	103
第 6 章 木材室干工艺	104
第一节 干燥室壳体及设备的检查	104
第二节 装堆	104
第三节 干燥基准	107
第四节 木材室干过程与干燥曲线	124
第五节 木材室干工艺的制定与实施	125
第六节 木材室干过程测试与干燥质量检验	132
第七节 木材的高温室干	140
复习思考题	142
第 7 章 木材大气干燥	143
第一节 木材大气干燥的特点	143
第二节 木材大气干燥的方法	144
第三节 强制气干	150
第四节 联合干燥	152
复习思考题	153
第 8 章 木材特种干燥	154
第一节 木材除湿干燥	154
第二节 木材真空干燥	159
第三节 木材太阳能干燥	163
第四节 木材微波干燥和高频干燥	170
第五节 其他特种干燥法	175
复习思考题	180
技能实训	181
一、干燥室类型及整体结构	181
二、木材干燥室部分主要设备性能	181
三、干燥室介质循环速度和温度分布的测试	182
四、干燥过程与干燥质量检测	185
五、木材微波干燥	188
六、干燥操作实训	190
参考文献	191

绪 论

一、木材干燥的研究对象

木材干燥是指通过蒸发、沸腾或传导的方式排除木材中水分子的处理过程。当湿木材周围空气中的水蒸气分压低于该温度下的饱和蒸汽压时，木材中的水分就会蒸发。蒸发在任何温度下均可发生。当木材在常压下加热到100 °C时，所含水分还会发生沸腾现象。有组织的木材干燥主要采取蒸发或沸腾方式。传导发生在湿木材与吸湿性较强的材料接触的情况下。

木材干燥技术指实施和控制干燥过程的具体方法和手段。

木材干燥的研究对象为实体木材 (solid wood)，主要指锯材 (成材)，也包括地板块、梭坯毛料、鞋植毛料等其他小木料或半成品。至于胶合板、刨花板、纤维板生产中的单板、碎料、木片以及木纤维等木质材料的干燥则划到其他有关学科方向，不包括在本学科范围之内。

二、木材干燥的目的及意义

木材干燥的目的，概括起来主要有以下四个方面：

(一) 防止木材变形和开裂，保证产品的加工质量

木材含水率在纤维饱和点以下范围内变化时，木材就会发生干缩或湿胀。由于这种干缩或湿胀的不均匀性，必然会引起木材变形或开裂。如将木材干燥到其含水率与使用环境相适应的程度，就能保持木材形状和尺寸的稳定性。因此，适当干燥木材是生产高质量产品的重要前提。例如按东北地区采暖条件要求干燥的水曲柳镶拼地板 (含水率6%~8%)，运销到港澳铺装使用 (最高平衡含水率约为17%)，就会因吸湿膨胀而变形凸起；而按上海使用条件 (平均平衡含水率约为15.6%) 干燥的水曲柳镶拼地板用于包头 (平均平衡含水率约为10.7%)，又会因失水干缩而产生缝隙；二者均不符合使用要求。

(二) 提高木材的力学强度，改善木材的物理性能

含水率低于纤维饱和点时，木材的力学强度随着含水率的降低而增高；反之，强度降低。例如松木由含水率30%降到18%，静曲强度从50 MPa增至110 MPa。另外含水率适度降低，可以改善木材的某些工艺性能，提高胶合和装饰质量，降低木材的导电性和导热性。

(三) 预防木材腐朽变质，延长木材的使用寿命

木腐菌和昆虫的寄生都需要适宜的温度、湿度、空气和养料，四个条件缺一不可。当木材含水率低于20%或高于100%时，木腐菌和昆虫难以生存。因此，只要把木材干燥到含水率低于20%，就可以增加木材的抗腐蚀性能，确保木材的固有特性，延长使用寿命。

(四) 减轻木材重量，降低运输费用

经过干燥的木材，重量一般可减轻30%~40%。如在林区将原木就近制材，并将锯材干

燥到含水率低于 20% 外运, 将会节约大量运力, 降低费用, 保证质量。

综上所述, 木材干燥是合理利用木材、节约木材的重要技术措施, 是木材加工生产中一道不可缺少的重要工序。木材干燥涉及行业很多, 包括家具、建筑、造车、造船、纺织、乐器、军工、机械制造、仪器制造、邮电器材、体育用品、文具玩具等。几乎所有使用木材的部门都要进行木材干燥。因此, 木材干燥对社会的进步和经济的繁荣都具有重要意义。

三、木材干燥技术的基本内容

木材干燥技术包括以下内容:

(一) 木材干燥的基本理论

木材干燥的基本理论包括木材干燥介质, 有关干燥的木材性质, 木材加热和水分传导的基本规律, 木材干燥内应力与木材变形等。

(二) 木材干燥的基本方法

木材干燥的基本方法包括目前能在生产实践中广泛应用的干燥方法和成熟技术。如, 常规室干、大气干燥及近几年发展的真空干燥、除湿干燥、太阳能干燥、微波干燥、高频干燥等, 通过分析这些方法的特点, 说明其适用性。

(三) 干燥设备

木材干燥设备包括各种常规室干设备和特种干燥设备的结构、性能、使用与维护方法。

(四) 木材干燥工艺及操作

重点介绍干燥曲线、干燥基准、控制操作。

(五) 干燥质量检验及经济核算

包括锯材干燥质量检验指标与检验方法、锯材干燥质量分级标准、干燥成本的核算。

四、木材干燥技术的发展概况

近年来, 随着国内外木材加工工业化程度的不断提高和电子技术、节能技术、材料技术的快速发展, 木材干燥技术也有了很大的发展。除湿干燥、太阳能干燥等新技术得到了广泛的应用, 常规干燥设备的工艺性更加合理, 保温性、密封性、防腐性进一步增强, 干燥成本大幅度降低, 干燥质量和经济效益大为提高, 为木材工业产品质量水平的提高奠定了基础。

目前, 国内外木材干燥仍以气干和常规室干为主, 占干燥量的 80% ~ 90%。其中气干简单易行, 经济实用, 但由于存在种种弊端, 如干燥速度慢、周转时间长、占地面积大、含水率高等, 难以收到常规室干的效果。因此, 常规室干仍应是发展的主要趋势。在干燥工艺上, 由于木材材种和质量要求的不同, 高温、常温和低温干燥都将得到发展。其中低温干燥以其适合硬阔叶材的干燥、干燥质量稳定等特点近年来备受重视, 根据欧美在发展低温预干方面的成功经验, 未来低温预干在我国将会广泛采用。

特种干燥目前就干燥量而言所占比例并不大, 但这些方法各有特点, 在某些方面的优越性是常规干燥所不及的, 因此, 在一些行业或地区有其独特的适用性。

未来木材干燥的发展集中体现在以下几方面:

1. 节能降耗 木材干燥的能源消耗占制品生产能耗的 40% ~ 70%。因此, 降低木材干燥的能源消耗, 对节约能源、降低成本具有重要意义。节能途径有: ①发展太阳能干燥、除湿干

燥等节能干燥方法；②改进常规干燥室的性能，如提高干燥室壳体的保温和密封性，回收废气热量；③适当采用木材废料作燃料。

2. 发展联合干燥 联合干燥可综合不同干燥方法的优点，取长补短，是木材干燥技术发展的重要方向。根据德国资料介绍，大容量直接室干比气干后室干每立方米投资费用高 8%，干燥成本高 6%。由此可见气干—室干联合干燥的优越性。同样微波—真空联合干燥、除湿—太阳能联合干燥等都具有良好的节能效果。

3. 完善干燥工艺 木材干燥工艺要根据木材树种、用途及所用干燥方法确定。目前生产中的部分木材干燥工艺还不尽合理，有待改进和完善。

据有关资料统计，目前国外干燥材占木材 30% 以上，美国西部达 60%，而我国还不到 15%，以至木材在贮运和加工利用中开裂、变形、腐朽等损失甚大。对此，一方面要积极倡导从政策上建立锯材干燥的强制性规定，另一方面要迅速提高木材干燥技术水平和能力，大力培养木材干燥专业人才，实现锯材干燥优质低耗。后者正是我国木材干燥事业面临的艰巨任务。

第1章 干燥介质的性质

所谓干燥介质，是指在干燥过程中将热量传给木材，同时将木材排出的水蒸气带走的媒介物质。

干燥介质可为气体，亦可为液体。在常规室干中，干燥介质为湿空气；在过热蒸汽干燥中，干燥介质为过热蒸汽；在炉气干燥中，干燥介质为炉气；在嫌水性液体干燥中，干燥介质为嫌水性液体。目前，木材干燥技术中最常用的干燥介质有三种，即水蒸气、湿空气和炉气。

第一节 水蒸气的性质

水蒸气按其存在状态可分为湿饱和蒸汽、干饱和蒸汽和过热蒸汽。下面我们通过一个实验说明这三种水蒸气的存在状态。

设有 1 kg 未饱和水（即温度未达到沸点的水）装在一个带有活塞的气缸内，活塞上压一重块，这样，气缸中的水就处于一定的压力下，当水被加热时，水（或水蒸气）的状态将不断变化，但其压力恒定不变。

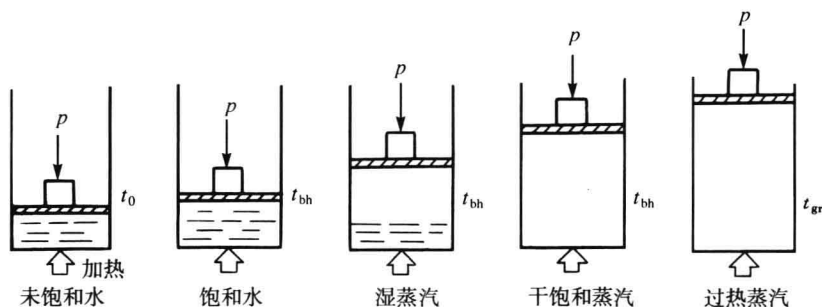


图 1-1 水蒸气定压状态变化示意图

如图 1-1 所示，对容器中 1 kg 温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 p 的水加热，水温不断上升，比容也稍有增加，但因水的膨胀性很小，比容增加极微。此时水几乎不蒸发，这种水称不饱和水。如继续对容器中的水加热，当达到某一温度时，水就开始沸腾，这时的水为饱和水，此时的温度为饱和温度，用符号 t_{bh} 表示。对饱和水继续加热，则水不断汽化，但容器中的饱和水和水蒸气温度并不升高，始终保持开始沸腾的温度 t_{bh} ，只是气缸中的水量逐渐减少，蒸汽逐渐增多，体积明显增大，这种在汽化过程中形成的水、气两相混合物称为湿饱和蒸汽。继续对湿饱和蒸汽加热，最后水全部变成了蒸汽，这时的蒸汽称为干饱和蒸汽。对干饱和蒸汽再继续加热，不仅比容增大，温度也升高，由饱和温度 t_{bh} 上升为 t_{gr} ，这种状态的蒸汽叫过热蒸汽。

从上述水蒸气的定压状态变化过程可以看出：湿饱和蒸汽和干饱和蒸汽都是饱和状态水蒸气，无蒸发水分的能力，也不能吸收水蒸气，因此不可能作为干燥介质，只有过热蒸汽是未饱和蒸汽，在其空间还可以容纳更多的蒸汽分子而不致引起凝结。因此，水蒸气中能作为干燥介质的只是过热蒸汽。

过热蒸汽的状态与湿饱和蒸汽和干饱和蒸汽密切相关，因此下面将三者的性质和参数逐一介绍。

一、湿饱和蒸汽

湿饱和蒸汽简称湿蒸汽，是在汽化过程中形成的水气两相混合物，亦即含有悬浮沸腾水滴的蒸汽，呈白色、雾状。湿蒸汽状态的确定，需知道其中水、气的成分比例，通常用干度表示。干度是指 1 kg 湿蒸汽中干蒸汽的相对重量，用符号 x 表示，即：

$$x = \frac{\text{干饱和蒸汽质量}}{\text{饱和水质量} + \text{干饱和蒸汽质量}}$$

显然，饱和水的干度 $x=0$ ，干饱和蒸汽的干度 $x=1$ ，而湿饱和蒸汽的干度介于 0 和 1 之间。

二、干饱和蒸汽

干饱和蒸汽简称干蒸汽，是与沸腾水处于相平衡蒸汽，无色、透明。干饱和蒸汽的压力叫饱和压力 p_{bh} ，相应的温度叫做饱和温度 t_{bh} ，两者的对应关系见表 1-1。由表可以看出，当温度不高时，饱和压力很小，随着温度的升高，饱和压力明显迅速增加。在 90 ~ 250 °C 范围内，还可近似地用下列经验公式表示，即：

$$p_{bh} = 10 \left(\frac{t}{10} \right)^4$$

式中 p_{bh} 的单位为 Pa。

应该指出，蒸汽的饱和温度等于在该压力下水的沸点温度。

三、过热蒸汽

过热蒸汽是指温度高于相同压力下饱和蒸汽的蒸汽，无色、透明。

过热蒸汽的物理性质近似理想气体，其状态参数之间的关系可用理想气体状态方程式来表

表 1-1 干饱和蒸汽参数表

压力 P/MPa	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比容 $v/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	汽化潜热 $\lambda/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	焓 $I/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
0.001	6.9	0.007 7	129.3	2 484	2 514
0.002	17.5	0.014 9	66.97	2 460	2 533
0.005	32.9	0.035 5	28.19	2 423	2 561
0.01	45.8	0.068 1	14.68	2 393	2 584
0.02	60.1	0.131	7.65	2 358	2 609
0.05	81.3	0.309	3.242	2 305	2 646
0.10	99.6	0.590	1.694	2 258	2 675
0.12	104.8	0.700	1.429	2 244	2 684
0.14	109.3	0.809	1.236	2 232	2 691

续表

压力 P/MPa	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比容 $v/\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	汽化潜热 $\lambda/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	焓 $I/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
0.16	113.3	0.916	1.091	2 221	2 697
0.18	116.9	1.023	0.977	2 211	2 702
0.20	120.2	1.129	0.885	2 202	2 707
0.25	127.4	1.392	0.718	2 182	2 717
0.30	133.5	1.651	0.606	2 164	2 725
0.35	138.9	1.908	0.524	2 148	2 732
0.4	143.6	2.163	0.462	2 134	2 738
0.45	147.9	2.416	0.414	2 121	2 744
0.5	151.8	2.669	0.375	2 108	2 749
0.6	158.8	3.169	0.316	2 086	2 756
0.7	165.0	3.666	0.273	2 066	2 763
0.8	170.4	4.161	0.240	2 047	2 768
0.9	175.3	4.654	0.215	2 030	2 773
1.0	179.9	5.139	0.194 6	2 014	2 777
1.2	188.0	6.124	0.163 3	1 985	2 783
1.5	198.3	7.593	0.131 7	1 946	2 790
2.0	212.4	10.04	0.099 6	1 889	2 797
2.5	223.9	12.50	0.079 9	1 839	2 801

述。对于 1 kg 蒸汽来说，可以写出：

$$p_{\text{gr}} v_{\text{gr}} = RT$$

式中 p_{gr} ——过热蒸汽的压力，Pa；

v_{gr} ——过热蒸汽的比容， m^3/kg ；

T ——绝对温度（ $273 + t$ ），K；

t ——摄氏温度， $^\circ\text{C}$ ；

R ——蒸汽的气体常量，等于 $461 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

由于过热蒸汽的密度 ρ_{gr} 是比容 v_{gr} 的倒数，即： $\rho_{\text{gr}} = 1/v_{\text{gr}}$ ，因此得出：

$$\rho_{\text{gr}} = \frac{p_{\text{gr}}}{RT} = \frac{p_{\text{gr}}}{R(273 + t)}$$

过热蒸汽的温度与同压力下饱和蒸汽温度的差值 $\Delta t = t_{\text{gr}} - t_{\text{bh}}$ 称为过热度，它的大小说明蒸汽过热的程度。

过热蒸汽是未饱和蒸汽，其饱和度可以表示为：

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{gr}}}{\rho_{\text{bh}}} = \frac{p_{\text{gr}}}{p_{\text{bh}}}$$

式中 ρ_{gr} 和 ρ_{bh} ——分别为同一温度下过热蒸汽和饱和蒸汽的密度， kg/m^3 ；

p_{gr} 和 p_{bh} ——分别为同一温度下过热蒸汽和饱和蒸汽的压力，Pa。

压力为一个大气压的过热蒸汽称常压过热蒸汽。用作干燥介质的过热蒸汽一般为常压过热蒸汽。常压过热蒸汽的参数见表 1-2。

木材干燥室内的过热蒸汽在开始时的极短时间内来自锅炉供给的蒸汽，以后则由被干木材中的水分经汽化、加热而成。干燥室内的过热蒸汽因经过排气道和室外大气相通，其压力和大

气压力基本相等，故为常压过热蒸汽。常压饱和蒸汽的温度约为 100 °C，因此常压过热蒸汽的温度都在 100 °C 以上。

表 1-2 常压过热蒸汽参数表

$p_{gr} = 0.1 \text{ MPa}$

蒸汽温度 $t/^\circ\text{C}$	过热温度 $\Delta t/^\circ\text{C}$	饱和度 φ	密度 ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比容 V / $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	蒸汽焓 I / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	过热蒸汽焓 I_0 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
99.6	0	0.000	0.590	1.695	2 675	0.0
100	0.4	0.992	0.589	1.697	2 676	0.8
102	2.4	0.916	0.586	1.709	2 679	5.0
105	5.4	0.814	0.581	1.722	2 683	11.3
110	10.4	0.677	0.573	1.746	2 691	21.8
115	15.4	0.566	0.565	1.770	2 698	31.8
120	20.4	0.477	0.557	1.794	2 706	41.9
125	25.4	0.405	0.550	1.818	2 713	51.9
130	30.4	0.346	0.543	1.842	2 721	62.0
135	35.4	0.298	0.536	1.866	2 727	72.0
140	40.4	0.258	0.529	1.890	2 734	81.7
145	45.4	0.224	0.522	1.914	2 740	91.4
150	50.4	0.196	0.515	1.938	2 746	101.0

第二节 湿空气的性质

完全不含水蒸气的空气称为干空气，含有水蒸气的空气叫湿空气。也就是说，湿空气是干空气和水蒸气的混合物。自然界中的大气、木材干燥室内的空气等都是湿空气。

纯净的干空气主要由 N_2 (76.8%) 和 O_2 (23.2%) 组成，可以视为理想气体。存在于湿空气中的水蒸气，由于其分压很小，比容很大，也可以视为理想气体。所以，由干空气和水蒸气组成的湿空气可认为同样遵循理想气体的规律，其状态参数之间的关系，可用理想气体的状态方程来描述。即：

$$pv = RT$$

式中 p ——气体的压力，Pa；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

T ——绝对温度 ($273 + t$)，K；

t ——摄氏温度， $^\circ\text{C}$ ；

R ——气体常量，其大小与气体的性质有关，对于干空气， $R_{gk} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；对于水蒸气 $R_{sz} = 461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由于 $\rho = 1/v$ ，干空气的密度 ρ_{gk} 为：

$$\rho_{gk} = \frac{p_{gk}}{R_{gk} T} = \frac{p_{gk}}{287(273 + t)}$$

式中 p_{gk} ——干空气分压，Pa。

在木材常规干燥中，用作干燥介质的湿空气虽然温度和湿度与大气不同，但其压力与大气

是相同的。因此，以后所研究的湿空气均指常压湿空气。

当大气压力为 0.1 MPa，温度为 20 °C 时，干空气的密度 $\rho_{gk} = 1.19 \text{ kg/m}^3$ 。

根据道尔顿定律，大气的总压力 p 等于干空气分压力 p_{gk} 与水蒸气分压力 p_{sz} 之和。即：

$$p = p_{gk} + p_{sz}$$

在一定的温度条件下，湿空气中水蒸气的含量越多，空气就越潮湿，水蒸气的分压也越大。如果湿空气中水蒸气的含量超过某一限度，在湿空气中就有水珠析出。这说明，在一定温度条件下，湿空气中容纳水蒸气的量是有一定限度的，也就是说，湿空气中水蒸气的分压力有一个极限值。达此极限值时，水蒸气处于饱和状态，称这种由于空气和饱和水蒸气混合成的湿空气为饱和空气，相应的水蒸气的分压力称为该温度时的饱和分压力 p_{bh} 。一般湿空气中的水蒸气分压力 p_{sz} 都低于相同温度下的饱和分压力 p_{bh} ，即湿空气仍具有一定吸收水蒸气的能力，称这种湿空气为未饱和空气。

由以上分析可以看出，在一定温度条件下，湿空气中水蒸气分压力的大小，是衡量水蒸气含量，即湿空气干燥与潮湿的基本指标。

一、湿空气的主要参数

湿空气的性质不仅与其组分有关，还取决于它所处的状态。描述湿空气的状态，除 p 、 v 、 t 等参数外，还需要有表示湿空气独有特性的状态参数，如绝对湿度、相对湿度、湿含量等。

(一) 湿度

1. 绝对湿度 每 1 m^3 湿空气中所含水蒸气的质量的克数，称为湿空气的绝对湿度。其大小等于水蒸气在相同分压力和相同温度下的密度 $\rho_{sz} \times 1000$ 。在一定温度下，每 1 m^3 湿空气最大限度含有干饱和蒸汽量的克数，或者说饱和空气的绝对湿度叫湿容量。湿容量表示湿空气吸收水蒸气的能力，其大小与温度密切相关。温度升高，湿容量明显增大；反之，迅速降低。处于高温下的未饱和空气经冷却，就会析出凝结水珠，除湿干燥正是利用这一原理来使湿空气变干的。绝对湿度只能说明湿空气中实际所含水蒸气的多少，而不能用它直接说明干湿程度。因此，还必须引入相对湿度的概念。

2. 相对湿度 湿空气中实际水蒸气的含量与同温度下可能含有的最大水蒸气含量之比，亦即，未饱和空气的绝对湿度 ρ_{sz} 与同温度下饱和湿空气的绝对湿度 ρ_{bh} 之比，用符号 φ 表示：

$$\varphi = \frac{\rho_{sz}}{\rho_{bh}} \times 100 = \frac{p_{sz}}{p_{bh}} \times 100 (\%)$$

显然，相对湿度反映了湿空气中所含水蒸气量接近饱和的程度，故也称为饱和度。 φ 值小，表示湿空气干燥，吸收水分的能力强； φ 值大，表示湿空气潮湿，吸收水分的能力弱。当 φ 为 0 时，则为干空气； φ 为 100% 时，则为饱和空气。所以不论空气的湿度如何，由 φ 值的大小，就可直接看出它的干湿程度。

相对湿度的测定一般使用干湿球温度计，它由两支温度计组成。其中一支温度计的温包外面包裹着纱布，纱布下端浸入水中，使温包外面的纱布保持湿润状态，这支温度计叫湿球温度计，用它测得的温度叫做湿球温度 (t_m)；另一支温包不包纱布的温度计叫干球温度计，测得的温度叫干球温度 (t)，见图 1-2。在不饱和空气中，湿球温度总是低于干球温度，这是由于温度计湿球温包上的水分蒸发散失热量的结果，这种差值叫做干湿球温度差 (Δt)。空气越

干,水分蒸发越快,散失热量越多, Δt 越大;反之,空气越湿,则 Δt 越小。当空气被水蒸气所饱和时, Δt 为 0,水分停止蒸发。

根据干球温度和干湿球温度差查表 1-3,可以求得相对湿度的数值。

(二) 湿含量

在含有 1 kg 干空气的湿空气中,所含水蒸气的质量 (g),称为湿含量,用符号 d 表示。设有 G_{sz} kg 水蒸气和 G_{gk} kg 干空气,则:

$$d = 1000 \frac{G_{sz}}{G_{gk}} = 1000 \frac{p_{sz}}{p_{gk}} \quad (\text{g/kg 干空气})$$

从上式可看出,当大气压力 p 为一定值时,空气中水蒸气的含量 d ,只取决于空气中水蒸气分压力 p_{sz} 的大小,即 $d = f(p_{sz})$,湿含量随水蒸气分压力的升降而增减。因此, d 与 p_{sz} 本质上是同一参数。

(三) 焓

指含有 1 kg 干空气的湿空气的热含量,符号为 I ,单位是 kJ/kg (干空气)。它是 1 kg 干空气的焓 i_{gk} 和 d g 水蒸气的焓 i_{sz} 的总和,即:

$$I = i_{gk} + 0.001 d i_{sz}$$

若规定 0 °C 干空气的焓为 0,则:

$$i_{gk} = C_{gk} t = 1.0 t$$

$$i_{sz} = r + C_{sz} t = 2500 + 1.9 t$$

因此, $I = 1.0 t + 2.5 d + 0.0019 d t$

式中 C_{gk} —— 干空气的定压质量比热,等于 1 kJ/(kg · K);

C_{sz} —— 水蒸气的定压质量比热,等于 1.9 kJ/(kg · K);

R —— 0 °C 时水的汽化潜热,等于 2500 kJ/(kg · K)。

(四) 密度

湿空气的密度用 1 m³ 湿空气中含干空气的质量和 水蒸气的质量的总和来表示。即:

$$\rho = \rho_{gk} + \rho_{sz}$$

式中 ρ —— 湿空气的密度, kg/m³;

ρ_{gk} —— 干空气的密度, kg/m³;

ρ_{sz} —— 水蒸气的密度, kg/m³。

湿空气的密度又可以写成:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{p}{287T} - \left(\frac{1}{287} - \frac{1}{461} \right) \frac{\varphi p_{bh}}{T} \\ &= \frac{p}{287T} - 0.001315 \frac{\varphi p_{bh}}{T} \end{aligned}$$

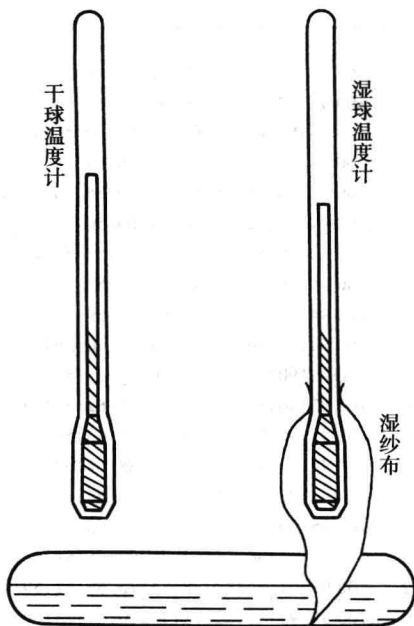


图 1-2 干湿球温度计结构示意图

表 1-3 空气湿度表 $\varphi/\%$ 气流速度为 1.5 ~ 2.5 m/s

空气温度 $t/^\circ\text{C}$	干湿球温度差 $\Delta t/^\circ\text{C}$																																				空气温度 $t/^\circ\text{C}$
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38							
30	100	93	87	79	73	66	66	55	50	44	39	34	30	25	20	16																			30		
32	100	93	87	80	73	67	62	57	52	46	41	36	32	28	23	19	16																		32		
34	100	94	87	81	74	68	63	58	54	48	43	38	34	30	26	22	19	15																	34		
36	100	94	88	81	75	69	64	59	55	50	45	40	36	32	28	25	21	18	14																36		
38	100	94	88	82	76	70	65	60	56	51	46	42	38	34	30	27	24	20	17	14															38		
40	100	94	88	82	76	71	66	61	57	53	48	44	40	36	32	29	26	23	20	16															40		
42	100	94	89	83	77	72	67	62	58	54	49	46	42	38	34	31	28	25	22	19	16														42		
44	100	94	89	83	78	73	68	63	59	55	50	47	43	40	36	33	30	27	24	21	18														44		
46	100	94	89	84	79	74	69	64	60	56	51	48	44	41	38	34	31	28	25	22	20	16													46		
48	100	95	90	84	79	75	70	66	62	58	54	50	47	44	41	37	34	31	29	26	24	19	14												48		
50	100	95	90	84	79	75	70	66	62	58	54	50	47	44	41	37	34	31	29	26	24	19	14												50		
52	100	95	90	84	80	75	71	67	63	59	55	51	48	45	42	38	36	33	30	27	25	20	16												52		
54	100	95	90	84	80	76	72	68	64	60	56	52	49	46	43	39	37	34	32	29	27	22	18	14											54		
56	100	95	90	85	81	76	72	68	64	60	57	53	50	47	44	41	38	35	33	30	28	23	19	15											56		
58	100	95	90	85	81	77	73	69	65	61	58	54	51	48	45	42	39	36	34	31	29	25	20	17											58		
60	100	95	90	86	81	77	73	69	65	61	58	55	52	49	46	43	40	37	35	32	30	26	22	18	14										60		
62	100	95	91	86	82	78	74	70	66	62	59	56	53	50	47	44	41	38	36	33	31	27	23	19	16										62		
64	100	95	91	86	82	78	74	70	67	63	60	57	54	51	48	45	42	39	37	34	32	28	24	20	17										64		
66	100	95	91	86	82	78	75	71	67	63	60	57	54	51	49	46	43	40	38	35	33	29	25	22	18	15									66		
68	100	95	91	87	82	78	75	71	68	64	61	58	55	52	49	46	44	41	39	36	34	30	26	23	19	16									68		
70	100	96	91	87	83	79	76	72	68	64	61	58	55	52	50	47	44	41	39	37	35	31	27	24	20	17									70		
72	100	96	91	87	83	79	76	72	69	65	62	59	56	53	50	47	45	42	40	38	36	32	28	25	21	18									72		
74	100	96	92	87	84	80	76	72	69	65	63	60	56	53	51	48	46	43	41	39	37	33	29	26	22	19	14								74		
76	100	96	92	87	84	80	77	73	70	66	64	61	57	54	52	49	47	44	42	40	38	34	30	27	23	20	15								76		
78	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	42	40	38	34	31	27	24	21	16								78		
80	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	43	41	39	35	31	28	25	22	17								80		
82	100	96	92	88	84	80	77	74	71	67	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40	36	32	29	26	23	18								82		
84	100	96	92	88	84	80	77	74	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40	36	32	29	26	23	19	14							84		
86	100	96	92	88	84	80	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	47	45	43	41	37	33	30	27	24	20	15							86		
88	100	96	92	89	85	81	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	48	46	44	42	38	34	31	28	25	21	16							88		
90	100	97	93	89	85	81	79	75	72	69	66	63	61	58	56	53	51	49	47	45	43	39	35	32	29	26	22	18							90		
92	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	64	62	59	57	54	52	50	47	45	43	39	36	33	30	26	22	19	16						92		
94	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	65	62	60	57	54	52	50	48	46	44	40	37	33	30	27	23	20	17						94		
96	100	97	93	90	87	83	80	76	73	70	68	65	62	60	58	55	53	51	48	46	44	41	37	34	31	28	24	21	18						96		
98	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	65	63	60	58	55	53	51	49	47	45	41	38	34	31	28	25	22	19	16					98		
100	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	66	63	61	59	56	54	52	49	47	45	42	38	35	32	29	26	23	20	17					100		
102			94	91	88	84	81	78	75	72	69	67	64	62	59	56	54	52	50	48	46	42	38	35	32	29	26	23	21	18					102		
104					88	84	81	78	75	72	69	67	64	62	60	57	55	53	50	48	46	42	39	35	32	30	27	24	22	19					104		
106							81	78	75	72	69	67	64	62	60	57	55	53	50	48	46	43	39	36	33	30	27	24	22	20					106		
108								75	72	69	67	64	62	60	57	55	54	51	49	46	43	40	36	33	31	28	25	23	21						108		
110									69	67	65	63	61	58	56	54	51	49	46	43	41	37	34	31	29	26	24	21							110		
112										65	63	61	58	56	54	52	50	47	44	42	38	35	33	30	27	24	22								112		
114											61	58	56	54	52	50	48	45	42	38	35	33	30	27	25	22									114		
116												57	55	53	51	49	46	43	39	36	34	31	28	25	23										116		
118													53	51	50	46	43	40	37	34	32	29	26	23											118		
120														50	47	44	41	38	35	32	29	26	24												120		
125																																					125
130																																					130