

○ 伊松林
张璧光
常建民
著



MUCAI FUYA GANZAO DE

木材浮压干燥的 基本特性

JIBEN TEXING



北京林业大学优秀博士
论文基金资助丛书

中国环境科学出版社

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

木材浮压干燥的基本特性

伊松林 张璧光 常建民 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

木材浮压干燥的基本特性/伊松林, 张璧光, 常建民著.
—北京: 中国环境科学出版社, 2005. 10
(北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书. 第3辑)
ISBN 7-80209-129-2

I. 木… II. ①伊… ②张… ③常… III. 木材干燥
IV. S781

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116844 号

出版发行	中国环境科学出版社 (100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号) 网 址: http://www.cesp.cn 电子信箱: bjzhouyu@126.com 电话 (传真): 010—67112738
印 刷	北京中科印刷有限公司
经 销	各地新华书店
版 次	2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月第一次印刷
印 数	1—3000
开 本	850×1168 1/32
印 张	5.125
字 数	135 千字
定 价	20.00 元

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

作者简介



伊松林，男，1970年生，河北涿州人。2002年于北京林业大学获工学博士学位。2004年入南京林业大学博士后流动站，师从张齐生院士。现任北京林业大学材料科学与技术学院副教授。自工作以来，一直从事木材干燥技术及相关基础理论的科研、教学和技术推广工作，获各

级奖励多项。迄今，已主持和参加各级科研课题28项，发表论文35篇，其中以第一作者被EI收录4篇，参编论著4部，获国家专利3项。2000年主持设计了目前国内规模最大、自动化程度最高的专业化木材干燥生产基地——东莞恒生木业干燥中心，目前，该中心已成为北京林业大学研究生科学研究基地。

导师简介



张璧光，女，1938年生，四川人。1960年毕业于重庆大学热力学工程系。现任北京林业大学教授，博士生导师，中国能源研究会热力学与工程应用专业委员会委员，中国林学会木材工业分会木材干燥研究会委员，享受政府特殊津贴。曾获得多项国家级和省部级科技进步奖，已

发表论文130余篇，主编教材和专著5部，获国家专利2项。先后指导硕士、博士共19人。



常建民，男，1956年生，黑龙江人。北京林业大学教授，博士生导师，主要从事木材科学与工程、热能工程方面的研究开发工作，多次主持和参加国家和省部级科研项目，在木材加工热能利用技术、木材干燥、人造板加工技术等领域取得了

多项研究成果，已发表论文60余篇。先后指导硕士、博士共24人。

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

编辑委员会

主 任 朱金兆

副主任 尹伟伦 马履一

委 员 (按姓氏笔画)

王礼先 王向荣 任恒祺 张启翔 李凤兰 孟宪宇

罗菊春 赵广杰 顾正平 续九如 翟明普 贾黎明

秘 书 何艺玲

序 言

科学技术水平是知识经济时代评价一个国家国力的重要标准。科技水平高则国力强盛，无论在政治、经济、文化、信息、军事诸方面均会占据优势；而科技水平低则国力弱，就赶不上时代的步伐，就会在竞争日趋激烈的国际大舞台上处于劣势。江泽民同志在庆祝北大建校 100 周年大会上也强调指出：“当今世界，科学技术突飞猛进，知识经济已见端倪，国力竞争日益激烈。”因此，提高科学技术水平，提高科技创新能力已为世界各国寻求高速发展时所共识。我国将“科教兴国”作为国策也表明了政府对提高科技水平的决心。博士研究生朝气蓬勃，正处于创新思维能力最为活跃的黄金年龄，同时也是我国许多重要科研项目中的中坚力量，他们科研成果水平的高低在一定程度上影响着—所高校、一个科研院所乃至我国科研的整体水平。国务院学位委员会每年一度的“全国百篇优秀博士论文”评选工作是对我国博士研究生科研水平的集体检阅，已被看作是博士研究生的最高荣誉，对激励博士勇攀科技高峰起到了重要的促进作用。北京林业大学不仅积极参加“全国百篇优秀博士论文”的推荐工作，还依此为契机每年评选出三篇校级优秀博士论文并设立专项基金全额资助论文以丛书形式出版，这是一项非常有意义的工作，对推动学校科研水平的提高将发挥重要作用。

从人才培养的角度来看，如何提高博士研究生的创新思维能力和综合素质，高质量地向社会输送人才备受世人关注。提高培养质量的措施很多，但在培养中引入激励机制，评选优秀博士论文并资助出版，不失为一种好方法。博士生和导师可据此证明自

己的学术能力，确立自己的学术地位；也可激励新入学的研究生尽早树立目标，从而在培养的全过程严格要求自己，提高自身的素质。

因学科的特殊性，要想出色完成林业大学的博士论文有许多其他学科所不会遇到的困难，如研究周期长，野外条件难于严格控制，工作条件艰苦等等。非常欣慰的是北京林业大学的博士生们不仅克服困难完成了学业，而且已经有人中选“全国百篇优秀博士论文”。而该丛书资助出版的“校级优秀博士论文”所涉及的研究领域、研究成果的水平也属博士论文中的佼佼者，令我欣喜。对这些博士生所取得的成果我表示祝贺，同时也希望他们以及今后的同学们再接再厉，取得更好的成绩报效祖国。

中国工程院副院长、院士

沈国舫

2002年8月10日

前 言

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，又是木材合理利用和节约木材的重要手段，其重要性和经济效果也越来越被人们所认识、所实践。传统的干燥方法通常是以湿空气作为干燥介质，将空气温度、相对湿度和气流速率作为控制木材干燥过程的“三要素”。然而，在影响木材内部水分移动和表面蒸发强度的外部因素中，周围空气的压力也同样是一个决定性的因素。木材的浮压干燥就是在充分考虑了外界压力影响的基础之上，出现的一种新型的干燥技术（肖亦华，1985）。它与传统的常规蒸汽干燥以及通常意义上的真空干燥相比，最主要的区别在于是以过热蒸汽作为干燥介质，且将压力因素从基本保持压力不变扩展到改变压力并使其浮动。这种环境压力的波动可大大加快木材内部水分的移动速率，而且在整个浮压干燥过程中，木材表面始终处于湿润状态，从而可以有效地防止因表面水分蒸发过程快而导致木材干燥应力的增加，进而防止开裂和变形的产生。木材的浮压干燥以其干燥速率快、质量好等一系列突出的优点，日益受到木材干燥界的广泛重视，被国际上认为是最具发展前景的木材干燥新工艺之一。在目前我国木材供需矛盾日益突出的今天，研究开发这种干燥工艺和技术，对提高干燥质量和干燥效率，节约木材具有重要意义。

本书来源于国家自然科学基金课题（59876005），其研究内容与实际生产需要密切相关，着眼于当前急需解决的进口硬阔叶材等

难干材以及速生材和幼龄材的干燥问题。本书以木材的浮压干燥为背景,以马尾松为试材,在其实用价值最大的压力区段即负压区段进行试验研究。书中首先从浮压干燥的干燥介质特性入手,通过对木材浮压干燥的基本规律以及干燥过程中木材内部热质传递规律等方面的研究,建立了木材浮压干燥热质传递的数学模型,进而为浮压干燥工艺的优化设计和过程控制提供理论依据。

本研究主要成果与创新点如下:

1. 从干燥介质的热力学特性出发,求解了真空状态下过热蒸汽干燥“逆转温度”的理论模型,并首次通过真空状态下空气与过热蒸汽干燥的对比试验证明了真空状态下过热蒸汽干燥“逆转温度”的存在。在仅考虑对流换热的条件下,当环境绝对压力为 0.02MPa 时,“逆转温度”的理论值为 90°C 左右,试验值在 $80\sim 85^{\circ}\text{C}$ 之间。

2. 首次通过大量的试验和理论分析较为系统深入地研究了木材浮压干燥的基本规律。

① 通过对浮压和常规干燥过程中预热阶段的对比试验研究表明:木材浮压干燥预热阶段进行的非常迅速。在绝对压力为 0.02MPa ,介质温度分别为 60°C 、 80°C 时,以蒸汽为干燥介质时的平均升温速率分别是以空气为干燥介质时的 1.55、1.64 倍。同时试验中还发现以蒸汽为干燥介质时,在预热阶段结束后的木材的含水率比预热之前的初含水率要大。这主要是因水分凝结所致,由于凝结的水分仅附着于木材表面且预热时间很短,因此对整个干燥过程影响很小。

② 通过试验及理论分析,探讨了试件尺寸(厚度和长度)对浮压干燥速率的影响规律。试验表明,在一定尺寸范围内,浮压干燥的干燥速率不受试件厚度的影响,但受试件长度的影响。然而,有一点应当特别关注,即纵向水分移动的速率随试件长度的增加衰减迅速,随着试件长度的增加木材内水分从侧面的移动对干燥速率的贡献率将逐渐占据主导地位。因此,在浮压干燥过

程中, 预见有一个“临界尺寸”的存在。

③ 通过浮压干燥介质条件对水分移动速率的影响规律的研究表明, 木材的浮压干燥速率随着干燥介质温度的增加、绝对压力的减小和浮动频率的加大而增加。但在上述三因素中对干燥速率的影响程度各不相同, 从大到小的排列顺序为: 介质温度 (T) >> 压力浮动频率 (v) > 绝对压力 (P)。

3. 首次对浮压干燥过程中木材的湿迁移特性进行了较深入地研究, 揭示了浮压下自由水和吸着水迁移的驱动力及其迁移特性, 并推导出计算方程。

① 通过对浮压干燥的干燥速率和干燥过程中木材内部温、湿度场变化的研究表明, 在温度为 80°C 、压力浮动范围为 $0.02 \sim 0.1\text{MPa}$ 的条件下, 当浮动频率分别取 0.75 次/h 和 0.375 次/h 时, 马尾松试材的浮压干燥速率分别为常压下相同干燥温度时的 3.24 倍和 2.69 倍, 这足见压力浮动幅度和频率对干燥速率的巨大影响。而且在同一温度水平, 压力浮动幅度越大和浮动频率越快, 则木材内的温、湿度场的变化越快, 它表明木材内水分迁移和蒸发速率加快。从湿度场的变化可见, 木材内部各层的含水率变化幅度大致相当, 表、心层含水率差值不大, 这说明含水率梯度不是浮压干燥过程中水分移动的主要驱动力。

② 在浮压干燥过程中自由水的移动由两部分组成, 其一是在毛细管压力下液体的团块迁移; 其二是在压力梯度下, 由于压力波动而引起自由水的蒸发或沸腾后所产生的水蒸气的迁移, 且后者在自由水的迁移过程中占主导地位。

自由水在毛细管中的蒸发或沸腾实质上是复杂的微尺度传热传质过程。由于尺度的微小化, 使管道中流动和换热受管道尺寸、形状、表面结构等因素的影响很大。在木材温度为 80°C , 环境绝对压力为 0.02MPa 的条件下, 理论计算表明此时的汽泡平衡态半径为 $4.68\mu\text{m}$, 而针叶树材管胞的内径为 $20 \sim 30\mu\text{m}$ 。由此可见, 此状态下管胞内腔有足够的空间用于液体内部汽泡的生

成。因此，当木材中大毛细管水达到沸点以后，在细胞腔中液体内部的强烈汽化是可能发生的。在微尺度传热传质中的“汽化空间”与“拟沸腾”的概念同样适用于木材，可以设想当液态水处于纹孔口处时，可能就会出现“拟沸腾”状态。

③ 在浮压干燥过程中，水蒸气压力梯度和压力的浮动是吸着水移动的主要驱动力。纤维饱和点（FSP）以下时水分的扩散移动分成两个部分。其一是在水蒸气压力梯度下的扩散迁移；其二是由于干燥介质压力的波动而引起的浮动压力下的迁移。

④ 采用扩散杯法对水分扩散系数和浮压系数进行了测定。确定出不同压力下与常压（0.1MPa）下水分扩散系数的数学表达式，以及不同压力变化速率下与压力固定不变时浮压系数的数学表达式。运用上述方程，再对常压下水分率和温度与水分扩散系数之间的关系式进行修正后，即可确定出浮压干燥过程中吸着水迁移量的计算方程。对试验数据回归分析表明：木材水分扩散系数随绝对压力的增加呈线性减小；随压力变化速率的增加呈对数曲线增大。

4. 在借鉴常压下锯材干燥数学模型的基础之上，以水蒸气压力梯度为水分移动的主要驱动力，首次建立了木材浮压干燥中热质传递的数学模型。

通过对理论模拟与试验结果比较分析可知：计算机模拟的曲线和试验曲线除在高含水率区域有一定偏差外（含水率最大偏差值为 8.12%），其余区域均可很好地吻合。特别是从初含水率 90%到终含水率 12%的平均干燥速率来看，计算机模拟值为 2.95%/h，试验值为 3.04%/h，两者的误差不超过 5%。数学模型组成了一个木材干燥的动态机制，通过实验证明，模型在较宽的条件范围内能较为准确预测浮压干燥下马尾松的平均含水率。

本书是在作者博士论文的基础上编著而成，在本书即将出

版之际，衷心感谢我的导师北京林业大学张壁光教授和常建民教授，感谢中国科学院工程热物理所刘登瀛教授的热情指导和帮助，感谢北京林业大学研究生院对本书正式出版的资助。由于时间仓促，水平有限，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

伊松林

2005 年 6 月于北京

目 录

1 引言	1
1.1 木材干燥技术的现状及发展趋势	1
1.1.1 木材在国民经济中的地位	1
1.1.2 木材干燥技术的国内外现状	2
1.1.3 木材干燥技术的发展趋势	6
1.2 木材的多孔结构	8
1.3 木材干燥理论研究现状	12
1.3.1 概述	12
1.3.2 木材干燥的理论模型	13
1.4 木材浮压干燥的研究现状	19
1.4.1 木材浮压干燥的含义与特点	20
1.4.2 木材浮压干燥的基础研究	21
1.5 本研究的目的是和意义	23
1.6 本书的主要研究内容	24
2 真空状态下过热蒸汽干燥介质的热力学特性	25
2.1 概述	25
2.1.1 过热蒸汽的形成	25
2.1.2 过热蒸汽干燥的特点	27
2.1.3 过热蒸汽干燥的逆转温度问题	28
2.2 真空状态下过热蒸汽的基本热力学特性分析	29

2.2.1 真空状态下过热蒸汽与空气热力学特性 参数计算方程	32
2.2.2 真空状态下过热蒸汽与空气基本热力学 性质比较	34
2.2.3 真空状态下过热蒸汽与空气 α 值对比分析	36
2.3 真空状态下过热蒸汽干燥逆转温度的理论模型及求解	39
2.3.1 真空状态下过热蒸汽干燥逆转温度理论 模型的建立	39
2.3.2 真空状态下过热蒸汽干燥逆转温度理论 模型的求解	43
2.4 逆转温度的试验验证与分析	46
2.4.1 试验材料及方法	46
2.4.2 试验结果与分析	47
本章小结	51
3 木材浮压干燥的基本规律	53
3.1 概述	53
3.2 试验装置及测试仪表	54
3.3 浮压干燥基本规律的试验研究	56
3.3.1 试验材料	56
3.3.2 浮压干燥预热阶段的特点	57
3.3.3 试件尺寸对浮压干燥速度的影响	61
3.3.4 浮压干燥介质条件对干燥速度的影响	67
本章小结	76
4 浮压干燥过程中木材的湿迁移特性	79
4.1 概述	79
4.2 浮压干燥过程中自由水移动过程的分析	83
4.2.1 试验内容和方法	83

4.2.2 试验结果与分析	84
4.2.3 浮压干燥过程中自由水移动过程的分析	87
4.3 浮压干燥过程中吸着水移动过程的分析	95
4.3.1 试验内容和方法	96
4.3.2 试验结果与分析	102
4.4 木材浮压干燥的驱动力分析	109
本章小结	110
5 木材浮压干燥热质传递数学模型的建立及求解	113
5.1 概述	113
5.2 模型的建立	115
5.2.1 热量和水分通过边界层的传递	115
5.2.2 木材中的热传导	116
5.2.3 浮压下压力梯度及波动引起吸着水的扩散迁移	116
5.2.4 浮压下毛细管力和压力波动引起自由水的 质量流动	120
5.2.5 热量随着扩散水分子与蒸发水分子的传递	122
5.3 模型的求解	123
5.4 木材浮压干燥过程的数值模拟及应用展望	128
5.4.1 数值模拟及讨论	128
5.4.2 数学模型应用展望	131
本章小结	133
6 总结	135
6.1 主要结论	135
6.2 建议	138
参考文献	139

1 引言

1.1 木材干燥技术的现状及发展趋势

木材的干燥是木制品生产过程中最为重要的工艺环节，其能耗约占木制品生产总能耗的 40%~70%（朱政贤，1992）。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，又是木材合理利用和节约木材的重要手段。从 19 世纪 20 年代开始直到 21 世纪的今天，人们对木材干燥进行了大量的卓有成效的研究和探索，使木材干燥从原始的凭感觉操作发展到现在的全自动控制，从完全凭经验操作发展到现在的利用科学的方法来指导操作，取得了巨大的进步和发展。

1.1.1 木材在国民经济中的地位

当今世界正面临着森林资源日益减少所带来的环保和生态问题，为保护人类共同生存的地球，世界大多数国家对森林资源（特别是天然林）都采取了限伐政策，包括中国在内的一些缺材国家，依赖进口材以弥补自身木材资源不足的情况将日益受到制约（朱光前，2000）。与此同时，随着我国经济的快速发展以及人民生活水平和居住条件的改善，人们对木质家具、装饰材料等木制品乃至木建筑的需求量逐年增加。同时随着社会的进步，人们崇尚自然、回归大自然的心情日益迫切，使木质家具、木质建筑备受宠爱。因此，如何有效地利用有限的木材资源显得日益重要。

木材干燥是改善木材物理力学性能，减少木材降等损失，提

高木材利用率,保障木制品质量的重要环节,其重要性和经济效益也越来越被人们所认识、所实践。改进木材干燥技术提高木材干燥的质量,不仅能带来良好的经济效益,而且有明显的环境效益,因为减少降等损失就意味着可少伐树木,因而是对环保的贡献。根据美国有关统计资料,采用常规蒸汽干燥的平均降等损失为 20% (烟气干燥等的降等损失则更大),如果改进干燥技术使降等损失减少一半以上,则每干燥 $10\,000\text{m}^3$ 木材,大约相当于少砍伐 $1\,000\text{m}^3$ 的树木 (张璧光, 1991)。

目前我国的木材干燥技术与国际水平相比在技术规范、设备质量、配套元器件及基础研究等多方面,还有一定差距。而且我国人工干燥设备的干燥能力与需求量相比严重不足,据统计,2000 年我国锯材干燥的需求量为 $2\,400\text{万 m}^3$,而我国人工干燥设备的总干燥能力约占需求量的 25% 左右,美国干燥设备能力可达 60%; 中等发达国家达 30% 左右 (朱政贤, 2000),由此说明我国木材干燥行业蕴藏着巨大的发展潜力。

1.1.2 木材干燥技术的国内外现状

从人们利用空气对流的方法干燥木材开始,几十年来随着科学技术的进步各种新的干燥方法 (如真空干燥、微波干燥、除湿干燥和太阳能干燥等等) 不断问世,并在工业上逐步得到应用。

1.1.2.1 常规干燥应用现状

在现有的各类木材干燥方法中,常规蒸汽干燥以其性能稳定、工艺成熟、干燥容量大、干燥质量较好,易操作等优点目前在世界各国的木材干燥设备中仍占据主导地位。其中,在我国占 80% 以上。以炉气为能源的常规干燥,在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大的工厂的欢迎 (顾炼百, 1996)。土法建造的烟气干燥室,在我国及一些不发达国家中,