

○ 李贤军 著



MUCAI WEIBO ZHENKONG GANZAO TEXING

木材微波真空干燥特性 及其热质迁移机理

JIQI REZHI QIANYI JILI

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

MUCAI WEIBO ZHENKONG GANZAO TEXING

木材微波真空干燥特性

JIQI REZHI QIANYI JILI

及其热质迁移机理



ISBN 978-7-80209-989-0



9 787802 099890 >

定价：28.00元

北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书

木材微波真空干燥特性及其 热质迁移机理

李贤军 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

木材微波真空干燥特性及其热质迁移机理/李贤军著.
北京:中国环境科学出版社,2009
(北京林业大学优秀博士论文基金资助丛书.第5辑)
ISBN 978-7-80209-989-0

I. 木… II. 李… III. 木材干燥:微波干燥:真空
干燥—研究 IV. S781.71

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第055555号

责任编辑 周 煜
封面设计 龙文视觉

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.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2009年11月第1版
印 次 2009年11月第1次印刷
开 本 850×1168 1/32
印 张 7.75
字 数 200千字
定 价 28.00元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载,侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

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，已被看做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，还以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。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

摘 要

微波真空干燥作为一种快速高效的新型干燥技术,已经逐步在食品加工等行业得到了较为广泛的应用,然而它在木材干燥行业中的工业化应用几乎是空白,也未见文献对木材的微波真空干燥规律及其干燥机理进行系统报道。本文以马尾松试材为研究对象,系统研究了木材微波真空干燥特性,揭示了木材微波真空干燥基本规律,探明了木材内部的热、质迁移机理,建立了相应的数学模型,为木材微波真空干燥的应用提供了科学依据和理论基础。本研究的主要成果和创新点有:

1. 探明了马尾松木材微波真空干燥基本规律。

研究表明:(1)随着微波辐射功率密度、木材初含水率和干燥室真空度的增加,木材平均干燥速率增加。(2)尺寸(厚度和长度)对木材平均干燥速率没有明显规律性影响。(3)木材纹理方向对水分迁移速率有一定的影响,其大小关系为:未封闭试件>纵向>径向>弦向。(4)方差分析显示只有微波辐射功率密度和木材初含水率对平均干燥速率的影响显著,其他因素对平均干燥速率的影响达不到显著性水平。(5)木材的整个微波真空干燥过程可以分为三个阶段:快速升温加速干燥段,恒温恒速干燥段和后期升温减速干燥段。(6)在微波真空干燥过程中,每千瓦的微波能可以排除 0.7~1.2 kg 的水分,且随着初含水率和真空度的增加,微波能的利用效率显著增加。(7)木材微波真空干燥具有很高的干燥速率。工艺试验证明木材的微波真空干燥速率比真空浮压干燥速率大 5 倍以上。

2. 通过试验和理论分析,揭示了微波作用对木材内水分迁

移性能的影响。

研究表明：(1) 微波处理能有效破坏木材纹孔膜结构，提高木材渗透系数，可以加快以渗透方式作为水分迁移机理的干燥方法的干燥速率；(2) 微波处理对马尾松木材扩散系数的提高程度不超过 3%，对常规蒸汽干燥中木材的后续干燥过程无明显促进作用。

3. 揭示了短期非等温条件下，木材内热扩散效应对水分迁移的影响规律。

研究表明：(1) 在短期非等温条件下，木材内的水分将由热端向冷端迁移，建立起与温度梯度相反的含水率梯度场，其比值 (dM/dT) 在 $0.9\%/^{\circ}\text{C}$ 以下；(2) 在外界稳定温度梯度作用下，木材内能在 1~2 小时内建立起相应的稳定温度场，各点温度与距离木材热端的距离具有显著线性关系；随着作用时间的延长，木材内含水率分布曲线由对数形式向指数形式过渡，热扩散效应越显著；(3) 随着木材温度、温度梯度和初含水率的增加，木材中的热扩散效应越明显，其中温度和含水率是影响热扩散效应的主要因素；(4) 微波预处理和取材部位对木材热扩散效应的影响不显著。

4. 系统阐述了微波真空干燥过程中木材内的热、质迁移机理，建立了相应的数学模型对其干燥过程进行数学模拟。

研究表明：(1) 微波真空干燥过程中，木材内部的温度和含水率分布比较均匀，在厚度方向没有明显的整体性温度梯度和含水率梯度。在干燥末期，木材内部的含水率分布更加均匀，但木材内温度分布的局部不均匀性有增加趋势。(2) 当含水率在纤维饱和点 (FSP) 上时，木材中的自由水和水蒸气在压力梯度的作用下以渗透流的形式在木材内部迁移。当含水率在 FSP 以下时，木材中的水分在压力梯度的作用下以水蒸气的形式向木材表面迁移。因热扩散、含水率梯度引起的水分迁移可以忽略不计。(3) 模型能较好地模拟木材微波真空干燥过程中的温

度和含水率变化规律,模拟值与测试值之间相关系数的平方在 0.98 以上,且含水率变化规律的模拟精度高于温度变化规律的模拟精度。

The Characteristics of Wood Microwave Vacuum Drying and Its Mechanism of Heat and Mass Transfer

Li Xianjun (Wood Science and Technology)

Directed by Professor Zhang Biguang

Abstract

Microwave-vacuum (MV) drying is a fast and efficient technology that has been widely used in various industries for drying material, but it is relatively new in wood product industry. The fundamental principle and mechanism of wood drying under microwave-vacuum were limited in the literature. In this thesis, *Masson pine* was selected as experimental material to systematically investigate the drying characteristics under MV. The mechanism of heat and mass transfer in wood during the MV drying process was described and a mathematic model based on the theory of heat and mass transfer was developed. The research will provide a better understanding for the further application of MV drying technology in wood industry. The main conclusions and originality of this study were summarized as the following:

1. Basic characteristics of *Mason pine* wood during microwave-vacuum drying.

The result showed: (1) the average drying rate of Mason wood

increased with the increase of microwave input power, wood initial moisture content, and vacuum level; (2).the effects of thickness and length of wood on the average drying rate was negligible;(3).the rate of moisture transfer varied with the grain direction of wood and could be ranked in the order of: unsealed sample >longitudinal >radial >tangential; (4).the analysis of variance indicated that the other factors except for intensity of microwave power input and initial moisture content of wood didn't significantly affect the average drying rate of wood; (5). The whole process of MV wood drying could be divided into three distinct periods: sharp increase of the temperature and gradual increase of wood drying rate period; stable temperature and drying rate period; and increase of the temperature and decrease in wood drying rate period. (6) To remove 0.7 to 1.2 kilogram moisture from wood consumed about 1 kilowatt microwave energy during MV drying. It was observed that the microwave energy efficiency could be significantly increased with the increase of vacuum level and wood initial moisture content. (7) The result showed that drying rate of MV drying could be 4 times higher than that the one of floating pressure drying.

2. Effect of microwave treatment on moisture movement inside wood.

The results showed that: (1) microwave treatment was an effective way to break the pit membrane structure of wood, which improved the permeability and speeded up the moisture movement inside wood in which moisture permeability can be considered to be predominant mass transfer. (2) the MC treatment didn't show considerable improvement in water diffusion process (only increased the diffusion coefficient by 3%), which was not able to improve significantly the sequence drying process during conventional drying.

3. Effect of thermal diffusion on moisture transfer.

The result showed that: (1) The moisture could flow inside wood from cold surface to warm surface, and the moisture content gradient could be possibly opposite to the temperature gradient if the opposite faces of the wood sample were exposed continuously to different temperature for a short period. The magnitude of thermal diffusion (dM/dT) was below 0.9%; (2) A new constant temperature profile could be reached after the short period of time (between 1 to 2 h) in wood whose two opposite end surfaces were subjected to two different temperatures. As the time increased, the moisture content distribution curve along the thickness direction of wood subjected to non-isothermal condition changed from logarithmically form to exponentially, and the effect of thermal diffusion in wood was more significant; (3) The temperature and initial moisture content in wood were the key factors to determine the thermal diffusion in wood. When they increased, the effect of thermal diffusion would be more significant. (4) The effect of microwave pretreatment and wood specimens from different locations (sapwood or heartwood) on thermal diffusion was not significant.

4. Mechanism of moisture transfer during MV drying process

Based on the mechanism of moisture and heat transfer in wood during microwave-vacuum drying (MVD), a one-dimensional mathematical model to describe the process of wood MVD was established and verified by experiments. The results showed that: (1) During the MV drying, the temperature and moisture distribution in wood was relative uniform compared with conventional drying methods to minimize the drying stresses induced by the moisture difference. By the end of drying, moisture content distribution in wood was even more uniform, however, it was noticed that the inner

temperature difference of wood presented growing trend. (2) Above fiber saturation point (FSP), the movement of moisture inside wood was assumed to be permeable movement of free water and vapor under the action of pressure gradient. Below FSP, moisture moved mainly in vapor form in response to a pressure gradient. The moisture transfer caused by heat diffusion and moisture content gradient could be neglected. (3) The predicted temperature and moisture content in wood matched well with the experimental data. The square of the correlation coefficient between the simulated and measured values was above 0.98. The correlation coefficient to predict the moisture gradient was higher than to the temperature gradient.

目 录

1 绪论	1
1.1 微波与真空	1
1.2 木材微波干燥的优点	3
1.3 木材微波、真空干燥研究概况	5
1.4 木材微波干燥和真空干燥的局限性	17
1.5 选题依据及本研究的目的	18
1.6 本研究的内容	20
2 木材微波真空干燥理论基础	22
2.1 木材微波加热理论基础	22
2.2 穿透深度	30
2.3 木材真空干燥理论基础	33
2.4 木材内部构造及水分	35
2.5 本章小结	36
3 木材微波真空干燥基本规律	38
3.1 引言	38
3.2 试验材料与装置	39
3.3 微波炉输出功率和能量分布测定	42
3.4 微波真空干燥过程中木材含水率变化特性	46

3.5 微波真空干燥过程中木材温变特性	69
3.6 木材微波真空干燥的工艺性试验	78
3.7 本章小结	83
4 微波作用对木材内水分迁移性能的影响	85
4.1 概述	85
4.2 微波作用对木材内部水分扩散性能的影响	87
4.3 微波作用对木材内部水分渗透性能的影响	101
4.4 本章小结	114
5 短期非等温条件下木材中热扩散效应的研究	117
5.1 概述	117
5.2 理论分析	121
5.3 热扩散效应的试验研究	123
5.4 本章小结	138
6 微波真空干燥过程中木材内的热质迁移特性	140
6.1 概述	140
6.2 微波真空干燥过程中木材内的热迁移特性	143
6.3 微波真空干燥过程中木材内部的质迁移特性	158
6.4 微波真空干燥过程中木材内部水分迁移方程	166
6.5 本章小结	178
7 木材微波真空干燥过程的数学模拟	181
7.1 木材内的水分迁移模型	182

7.2 木材内的热量迁移模型	185
7.3 传热、传质方程中相关参数的计算与确定	187
7.4 模型求解与验证	197
7.5 本章小结	208
 8 总结	 211
8.1 主要结论	211
8.2 主要创新点	214
8.3 建议	214
 参考文献	 216
致 谢	226

1 绪论

1.1 微波与真空

1.1.1 微波与微波加热

微波是指波长足够短，以致在发射和接收中能实际应用波导和谐振腔技术的电磁波，包括了从 1 mm 到 1000 mm 的波长范围，对应的频带为 3×10^5 MHz 到 3×10^2 MHz，是一个极为宽广的频率资源。1862 年，著名英国物理学家 Maxwell 提出了位移电流的概念，并提出了“光与电磁现象存在联系”的想法。1888 年赫兹利用振荡器和谐振器在实验中证实了电磁波的存在。1936 年，Southworth 的波导传输试验取得成功。1940 年 7 月，英国伯明翰大学的 Randall 和 Boot 发明了多腔磁控管，从而打开了通往“厘米波，大功率”的道路。在随后的几十年中，微波科学在很多行业表现出了巨大的应用价值。如：雷达的诞生与发展，射电天文学的迅速发展，微波中继通信和卫星通信，广播的建立与普及，微波波谱学与量子电子学的巨大进步，微波能利用及微波医学的发展等。

微波加热，是指介质材料吸收微波能量并将其转化为热能。1945 年美国雷声公司的研究人员发现了微波热效应。同年，美国人 Spencer 申请了微波加热技术的第一个专利。1955 年，美国泰潘公司向市场推出了世界上第一台微波炉（康健，1999）。1965 年，美国 Crydry 公司开发出了大功率磁控管，使得微波加热技