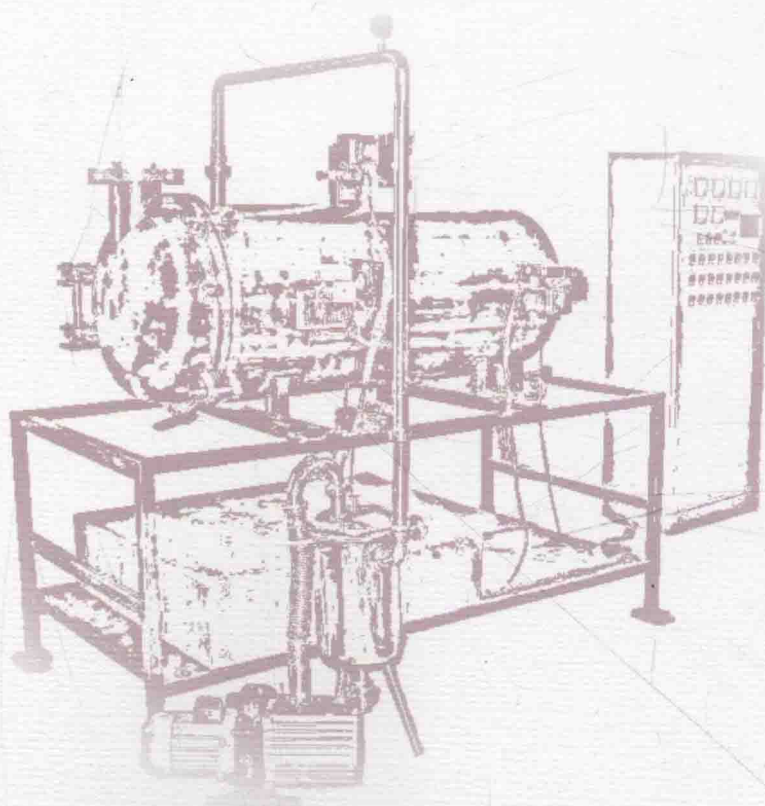


中国科协三峡科技出版资助计划

农产品微波组合 干燥技术

李树君 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

农产品微波组合干燥技术

李树君 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

农产品微波组合干燥技术/李树君著. —北京: 中国科学技术出版社, 2015. 11
(中国科协三峡科技出版资助计划)

ISBN 978-7-5046-7015-1

I. ①农… II. ①李… III. ①微波技术-应用-农产品-干燥-研究 IV. ①S375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 272789 号

总 策 划 沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹

项 目 策 划 杨书宣 赵崇海

编辑组组长 吕建华 赵 晖

责任编辑 史若晗

责任校对 何士如

印刷监制 李春利

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62103130

传 真 010-62103166

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 450 千字

印 张 20.75

版 次 2015 年 11 月第 1 版

印 次 2015 年 11 月第 1 次印刷

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

书 号 978-7-5046-7015-1/S · 590

定 价 110.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

内容简介

微波组合干燥利用微波干燥速度快、效率高、能耗低的技术特点，与其它干燥方式进行优势组合，在农产品加工得到广泛的应用。本书融合了农产品微波干燥技术理论、装备设计、工艺技术与研究实例，系统阐述了多种农产品微波组合干燥技术与装备，介绍了大宗典型物料的工艺技术及其研究实例，分析了农产品微波应用技术的发展趋势。该书面向从事农产品干燥和微波干燥的科研教学和生产制造等的专业人士，以及对新型干燥技术有兴趣的读者。

According to the technical characteristics of high drying speed, high efficiency and low energy consumption, microwave drying was always combined with other drying methods by advantage combination, which was widely used in the field of agricultural products processing. In this book, agricultural products microwave drying theory, equipment design, technology and case study were covered, a variety of agricultural products microwave combined drying technology and equipment were system described, the technology of bulk materials and its typical case studies were introduced, the development trend of microwave drying technology in agricultural products were analyzed. This book was prepared for the professionals who major in research, teaching, producing and manufacturing on agricultural products drying, microwave drying and other related fields, and also fit for the readers who are interested in the new drying technology.

总 序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为19世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。

放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士论文奖获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

前 言

干燥是农产品加工的重要手段，经脱水的农产品具有卫生、方便和有益于健康的特点。微波干燥利用微波辐射能进行物料介质的整体加热，干燥速度快、效率高、能耗低，是一种高效节能、高品质的干燥加工新技术，采用微波干燥与其它干燥方式相结合的组合干燥，按照优势互补的原则，充分发挥各自的技术优势，最大限度地弱化单一干燥方式的技术缺陷，从而缩短干燥时间，提高干燥效率，改善产品质量。近年来，这种组合干燥技术在农产品加工中取得了良好的干燥效果。

本书对农产品微波干燥组合技术进行了全面系统地分析和阐述，介绍了微波基本特性和干燥原理、农产品微波干燥特性、不同干燥方法和干燥条件对干燥过程和品质的影响；阐述了工业化微波干燥设备的设计原则，常压微波干燥设备、微波真空干燥设备和微波真空冷冻干燥设备的组合和关键部件设计；系统分析了多种微波组合干燥的技术特点和产品质量，并介绍了大宗果蔬、名优产品和水产品典型物料的工艺技术及其研究实例等主要内容，希望能对提高我国农产品干燥和微波干燥技术的研究和应用起到一定的促进作用。本书主要内容来自作者及其研究团队十多年来从事微波组合干燥技术研究的科研成果和工作积累，其中不少是第一手研究资料。本书也参考了部分国内外学者在农产品和微波干燥方面的研究成果。

本书在编写过程中，得到了中国农业机械化科学研究院杨炳南研究员、韩清华研究员、曹有福研究员、李仪凡工程师和尹青硕士等的帮助和支持，特此感谢！本书的出版得到了中国科协三峡科技出版资助，谨此表示衷心感谢。同时，感谢中国科学技术出版社提出的宝贵意见和给予的支持鼓励。

由于水平有限，书中难免出现疏漏和不足之处，殷切欢迎广大读者批评指正。

序 言

我国农产品资源丰富，其中 2013 年蔬菜年产量为 7.02 亿吨，水果年产量为 2.4 亿吨，但产后损失率严重，分别达到 20%~25% 和 15%~20%。干燥是农产品贮藏减损、安全保质的关键基础单元和加工的重要环节，也是加工耗能的最大环节。发展绿色干燥技术与装备，提高农产品干燥制品品质，促进节能增效，是农产品干燥行业的迫切需求，对促进我国农产品加工业的健康发展具有重要意义。

微波干燥是一种利用微波辐射能对物料介质进行整体加热的干燥方法，具有干燥速度快、效率高、能耗低等优点，但微波干燥均匀性差，容易过热出现物料边缘或尖角部分焦化，产品表面硬化和内部糊化等现象，导致产品品质裂变加剧、成品率低。微波组合干燥技术是利用微波干燥速度快、效率高、能耗低的技术优势，与真空干燥的低温保质、热风干燥的高水分段低成本、冷冻干燥的高品质特点进行优势组合，具有干燥效率高、能耗低、品质优的特点，可广泛应用于水果、蔬菜、食用菌、特色名优产品、水产品等农产品的干燥加工。中国农业机械化科学研究院李树君研究员带领的团队自“十一五”以来先后承担了国家 863 计划“食品低能耗联合干燥技术与设备”、农业成果转化“热风微波真空组合干燥技术与装备中试”等科研项目任务，取得了多项专利和鉴定成果，培养了近 10 名硕士和博士研究生，在此基础上编写了《农产品微波组合干燥技术》一书。该书融合了农产品微波干燥技术理论、装备设计、工艺技术与研究实例，系统深入

地阐述了农产品微波组合干燥技术与装备。该书是作者多年来从事微波干燥技术研究获得的经验总结，具有很强的理论性、适用性和指导性，为农产品微波组合干燥技术装备的深入研究开发提供了理论依据和技术支持，可作为从事农产品干燥加工和微波干燥技术装备科研和教学活动的高校师生、科技工作者的参考书籍，也可作为农产品生产企业、微波设备制造企业、基层农业技术推广站等单位的参考用书，是一本很好的科学论著。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters.

2015 年 10 月 18 日

目 录

总序

序言

第1章 农产品微波干燥技术概述	1
1.1 微波特性及其主要应用	1
1.1.1 微波概述	1
1.1.2 微波的基本特性	3
1.1.3 微波与材料的相互作用	4
1.2 微波干燥理论概述	6
1.2.1 微波干燥原理	6
1.2.2 物质的介电特性	8
1.2.3 影响介电特性的因素	9
1.2.4 部分常用物料的介电特性	11
1.3 微波技术在农产品加工中的应用	13
1.3.1 微波干燥	14
1.3.2 微波杀菌	15
1.3.3 微波漂烫	16
1.3.4 微波解冻	18
1.3.5 微波焙烤	19
第2章 农产品微波干燥技术原理	21
2.1 农产品的干燥特性	21

2.1.1	农产品的物理特性指标	21
2.1.2	农产品干燥过程的传热传质参数	24
2.1.3	农产品干燥的动力学特性	30
2.1.4	农产品干燥过程的品质变化	32
2.2	农产品的微波干燥特性及其实例	39
2.2.1	苹果片的微波真空干燥膨化过程	39
2.2.2	不同干燥条件的苹果片微波真空干燥特性	44
2.2.3	不同干燥条件的苹果片微波真空膨化特性	55
2.3	不同干燥方法的农产品品质	60
2.3.1	农产品干燥方法	60
2.3.2	不同干燥方法的苹果片产品质量	62
2.3.3	不同干燥方法的人参片产品质量	68
第3章 微波干燥技术系统		71
3.1	微波干燥系统组成	71
3.2	微波电子管	72
3.2.1	微波管及其工作原理	72
3.2.2	速调管	73
3.2.3	磁控管	76
3.2.4	磁控管的特性和使用方法	77
3.3	微波功率源	82
3.3.1	小功率磁控管的微波功率源	82
3.3.2	大功率磁控管的微波功率源	83
3.3.3	高稳定程控微波功率源	84
3.4	微波传输系统	85
3.4.1	微波的传输条件	85
3.4.2	微波传输系统的作用和基本要求	87
3.4.3	微波传输系统的组成	87

3.5 微波加热器	91
3.5.1 微波加热器的类型	91
3.5.2 微波加热器的选择和设计	96
3.6 微波干燥控制系统	98
3.6.1 微波加工主要参数的测量	98
3.6.2 微波加工过程的可视化	100
3.6.3 微波加工过程的安全控制	101

第4章 常用农产品微波干燥技术 102

4.1 常压微波干燥技术	102
4.1.1 常压微波干燥概述	102
4.1.2 常压微波干燥的产品质量	103
4.2 微波真空干燥技术	105
4.2.1 微波真空干燥概述	105
4.2.2 微波真空干燥理论基础	106
4.2.3 微波真空干燥的技术特点	107
4.2.4 微波真空干燥的产品质量	108
4.3 微波真空冷冻干燥技术	109
4.3.1 微波真空冷冻干燥概述	109
4.3.2 微波真空冷冻干燥的机理探讨	110
4.3.3 微波真空冷冻干燥的低压放电分析	113
4.3.4 微波真空冷冻干燥的产品质量	115
4.4 热风微波组合干燥技术	115
4.5 热风微波真空组合干燥技术	116

第5章 典型物料微波干燥工艺技术及其实例 118

5.1 大宗果蔬微波干燥工艺技术	118
5.1.1 苹果微波真空干燥工艺技术	118

5.1.2	胡萝卜微波干燥工艺技术	140
5.1.3	土豆微波干燥工艺技术	145
5.1.4	大蒜微波干燥工艺技术	147
5.1.5	蘑菇微波干燥工艺技术	150
5.2	名优产品微波干燥工艺技术	152
5.2.1	茶叶微波干燥杀青工艺技术	152
5.2.2	香菇微波干燥工艺技术	155
5.2.3	大枣微波干燥工艺技术	158
5.2.4	人参微波干燥工艺技术	179
5.2.5	枸杞微波干燥工艺技术	188
5.3	水产品微波干燥工艺技术	192
5.3.1	扇贝柱微波干燥工艺技术	192
5.3.2	鱼片微波干燥工艺技术	197
第6章	微波干燥设备	202
6.1	工业化微波干燥设备概述	202
6.1.1	工业化微波干燥设备的设计原则	202
6.1.2	微波干燥设备均匀性的改善	204
6.1.3	微波干燥设备的微波密封方法	211
6.2	常压微波干燥设备	215
6.2.1	常压微波干燥设备的类型	215
6.2.2	常压微波干燥设备的系统设计	216
6.2.3	常压微波干燥设备的关键部件	217
6.3	微波真空干燥设备	221
6.3.1	微波真空干燥设备概述	221
6.3.2	微波真空干燥设备的系统设计	222
6.3.3	微波真空干燥设备的关键部件	224
6.4	微波真空冷冻干燥设备	242

6.4.1	微波真空冷冻干燥设备的设计思路	242
6.4.2	微波真空冷冻干燥设备的系统组成	243
6.4.3	微波真空冷冻干燥设备的关键部件	245
第7章 微波的生物效应及其健康防护		262
7.1	微波的生物效应	263
7.1.1	微波生物效应的作用机制	263
7.1.2	微波对人和动物的生物学效应	266
7.1.3	微波对人体的损伤及治疗	267
7.2	微波生物防护允许值标准	268
7.2.1	比吸收率	268
7.2.2	电磁辐射吸收剂量与人体响应	268
7.2.3	各国所制定的标准	269
7.3	工业微波设备的泄漏	276
7.3.1	批量系统	276
7.3.2	连续系统	276
7.4	微波安全防护措施	284
7.4.1	职业辐射防护	284
7.4.2	公众辐射防护	285
第8章 农产品微波应用技术发展趋势		286
8.1	微波喷动床干燥技术	286
8.2	微波灭酶技术	287
8.2.1	微波灭酶的机理	288
8.2.2	微波灭酶的特点	288
8.2.3	国内微波灭酶研究现状	288
8.2.4	国外微波灭酶研究现状	289
8.2.5	发展前景	290

8.3 微波杀青技术	290
8.3.1 微波杀青的原理	290
8.3.2 微波杀青对绿茶品质的影响	291
8.3.3 微波杀青的影响因素	292
8.3.4 展望	293
8.4 微波杀菌技术	293
8.4.1 微波杀菌机理	293
8.4.2 微波杀菌的特点	295
8.4.3 微波杀菌加工方式	296
8.4.4 影响微波杀菌效果的因素	297
8.4.5 微波杀菌在食品工业中的应用	297
8.4.6 微波杀菌的应用前景	298
8.5 微波提取技术	299
8.5.1 微波提取的原理	299
8.5.2 微波提取的特点	300
8.5.3 影响微波提取的主要因素	300
8.5.4 微波提取设备	302
8.5.5 微波提取应用	303
8.5.6 展望	305
参考文献	306
索 引	310

第 1 章 农产品微波干燥技术概述

1.1 微波特性及其主要应用

1.1.1 微波概述

微波是电磁波的一部分，通常是指波长在 1mm 到 1m，频率在 300MHz ~ 300, 000 MHz 的电磁波，它介于低频的无线电波和高频的红外线及可见光之间，因此微波属于非电离辐射，微波在电磁光谱图中的位置如图 1-1 所示^[1,2]。

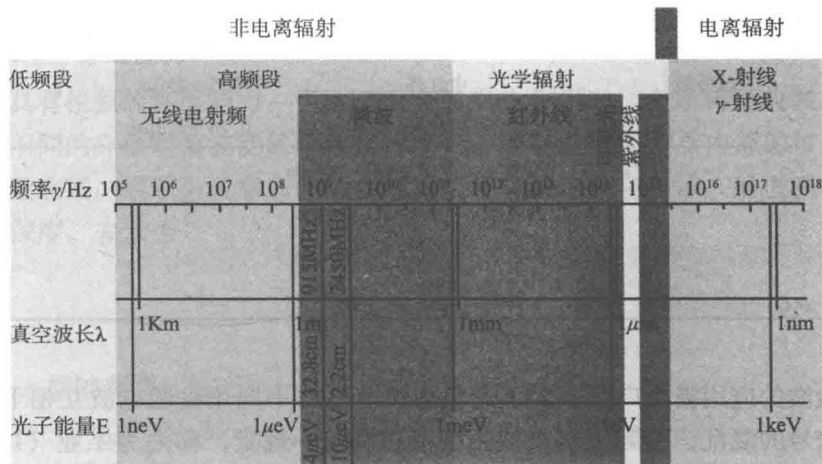


图 1-1 微波在电磁光谱中的位置^[1]

频率与光速和相应的波长有关，可用表达式 1-1 来表述。光的传播速度及光波在

物质中的波长取决于材料。在真空状态下,光速为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 与之相对应的微波波长在 1mm 到 1m 之间。在微波波段中,通常又将其划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波,电磁波频谱和微波波段的划分见表 1-1。

$$c = \lambda \cdot f \quad (1-1)$$

式中 c ——光速, m/s

λ ——波长, m

f ——频率, Hz

表 1-1 电磁波频谱和微波波段的划分^[2]

名 称		波长范围	频率范围	
电磁波	无线电波	超长波	约 10km	约 30kHz
		长 波	1 ~ 10km	30 ~ 300kHz
		中 波	100 ~ 1000m	300 ~ 3000kHz
		短 波	10 ~ 100m	3 ~ 30MHz
		超短波	1 ~ 10m	30 ~ 300MHz
	微波	分米波	1 ~ 10dm	300 ~ 3000MHz
		厘米波	1 ~ 10cm	3 ~ 30GHz
		毫米波	1 ~ 10mm	30 ~ 300GHz
		亚毫米波	0. 1 ~ 1mm	300 ~ 3000GHz
	红外线	远红外	25 ~ 1mm	
中红外		2. 5 ~ 25 μm		
近红外		0. 76 ~ 2. 5 μm		
	可见光	400 ~ 760nm		
	紫外线	3 ~ 400nm		
	X 射线	1 ~ 3000pm		
	γ 射线	1pm		

由于微波的应用极为广泛,为了避免微波范围内不同用途的电波互相干扰,引起通信、电信号的混乱,国际上对微波频率范围有统一规定,称之为工业 (Industrial)、科学 (Scientific) 和医疗 (Medical) 用电波频带,简称 ISM 频带。其中常见的频率有 433MHz、915MHz、2450 MHz 和 5800 MHz 等。目前我国常用的微波频率为 915MHz 和 2450MHz。