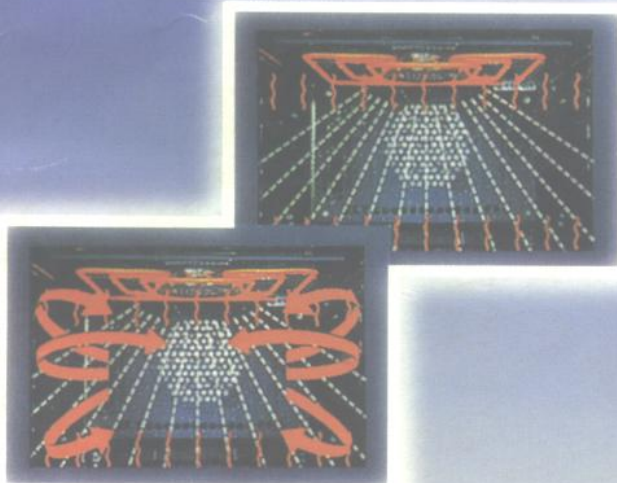


微波技术 在食品工业中的应用

刘钟栋 编著



中国轻工业出版社

微波技术在食品工业中的应用

中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

微波技术在食品工业中的应用/刘钟栋编著.-北京:
中国轻工业出版社,1998.2
ISBN 7-5019-2139-3

I. 微… II. 刘… III. 微波技术-应用-食品工业
IV. TS2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 22547 号

责任编辑:白 洁

*

中国轻工业出版社出版发行

(100740 北京市东长安街 6 号)

北京市卫顺印刷厂印刷 新华书店经销
1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/32 印张:9.625

字数:216 千字 印数:1—2000 册

定价:25.00 元

ISBN 7-5019-2139-3/TS·1345

前 言

本书是在国家自然科学基金项目 (29576263)、内贸部 1995 年度科技攻关项目 (1995 年第 6 号)、河南省 1994~1997 年科技攻关项目的基础上, 结合“微波食品工艺”课程的有关内容编写而成的。

微波技术在 80 年代有较快的发展, 尤其是在食品添加剂、食品分析、食品分离过程、各个食品加工单元操作中, 几乎都不同规模地开展了微波技术应用的探索, 并都取得了一定程度的突破。本书分六章, 分别论述了微波技术的有关基本概念、原理和其在食品工业各部门中应用方面的内容。

因微波食品工程是一个多学科、交叉的综合领域, 为了兼顾各方面读者的需要, 本书尽量避免有关微波、电磁场理论中过多高深、繁琐的公式与数学推算, 也略去了食品、粮食生化及化学、分析科学中十分专业、复杂的理论演绎而直接给出有关的结果, 读者如有这方面的需要, 可参阅有关的理论专著。

本书第一章阐述了微波的特性; 第二章阐述了微波工程设备的结构、设备类型和安全控制、操作; 第三章阐述了微波食品添加剂, 重点是食品添加剂的制备; 第四章阐述了微波食品分析技术, 重点是微波溶样技术与微波水分分析技术; 第五章阐述了微波萃取分离技术; 第六章阐述了微波食品加工技术。

本书稿由成都电子科技大学微波所季天仁教授大力帮助，并提供了有关资料，在此表示感谢。

书中的缺点错误与遗漏之处，希望读者批评指正。

编者

目 录

第一章 微波概论	1
第一节 微波的性质	1
一、什么是微波	1
二、微波的特殊性质	2
三、微波与材料的相互作用	3
第二节 微波的传输、微波设备构件的特性及微波源 工作原理	6
一、微波的传输与其在空间的分布形式	6
二、空腔谐振器	14
三、其他常用微波元件及辅助设施	18
四、微波工作原理	23
第三节 微波的产生	29
一、产生微波能的器件	29
二、连续波磁控管	30
三、速调管简介	34
第二章 微波工程设备的结构、设备选型及过程 控制	37
第一节 常用加热器结构	38
一、驻波场谐振腔加热器（箱式加热器）	38
二、连续式加热器（隧道式箱型加热器）	39
三、波导型微波加热器	40
四、慢波型微波加热器（表面波加热器）	41

五、梯形加热器	41
第二节 设备的选型	42
一、频率的选定	42
二、加热器形式的选定	43
三、微波源的选定	44
四、微波设备的选型	46
第三节 微波设备中主要参数的确定	52
一、驻波测量	53
二、功率的测定	53
三、设备工作参数的选定	55
第四节 微波设备的控制与操作	57
一、负载匹配	58
二、设备在启动过程中的控制	58
三、设备运行中磁控管工作应注意的问题	61
四、冷却控制	63
五、防止泄漏	64
六、磁场的使用注意事项	65
七、设备操作	67
第五节 微波的安全防护	77
一、概述	77
二、微波泄漏的防护	84
第三章 微波食品化工合成技术	89
第一节 概述	89
一、微波化学机理简介	90
二、影响微波反应速率的因素和反应条件的优化	91
第二节 合成容器的选择和反应中参数的测量	97
一、容器的选择	97
二、温度测量	98
三、压力测量	100

四、温度和压力数据的处理	102
五、参数监控在安全方面的应用	103
第三节 微波技术在食品精细化工中的应用	104
一、微波工艺在有机化学中的应用	104
二、食品添加剂的微波合成	107
第四节 微波条件下合成反应作用机制与反应设备 的设计制作	113
一、反应机制	113
二、微波合成设备的设计制作	120
第五节 特例	122
一、干法反应特例：微波条件下干法制备芳香醛与丹 宁衍生物	122
二、液态反应特例：微波条件下单糖与氨基酸的合成 反应	125
第六节 本章小结	127
第四章 微波食品分析技术	128
第一节 微波溶样技术	128
一、概述	128
二、微波溶样的具体操作	136
三、仪器校准和条件预测	139
四、特例：密闭容器中的食品样品微波溶样研究	143
第二节 微波对粮食、化工原料中水分的测定	146
一、微波加热条件下谷物中水分的测定	146
二、微波加热测定硫磺中的水分	149
第五章 微波食品工程分离技术	152
第一节 概述	152
一、微波萃取设备简介	153
二、微波萃取技术的特点和操作方法	153
第二节 微波提取工艺	154

一、微波萃取制备果胶新工艺	154
二、微波条件下萃取制备高粘度壳聚糖	156
三、用微波法提取各种植物中的香精油简介	159
第三节 微波萃取技术	161
一、微波微量萃取技术	161
二、微波浸提法测定果品中的总酸度	165
第六章 微波食品加工技术	169
第一节 概述	169
一、微波食品加工中应掌握的基本知识	174
二、微波在食品加工中对食品各种营养成分的作用	182
三、微波在食品加工中的工艺优化	192
四、微波食品加工小结	196
第二节 食品的微波干燥与膨化	198
一、微波干燥技术在食品加工中的应用	198
二、食品的微波膨化干燥	206
三、微波真空冷冻干燥	207
四、特例	208
第三节 微波灭菌	229
一、微波杀菌机理	230
二、微波对食品灭菌的效果	236
三、特例	237
四、微波对食品包装用纸的消毒效果	244
五、专用微波杀菌设备简介	246
六、小结	249
第四节 微波焙烤	251
一、微波焙烤的特点	251
二、烧炙与油炸	254
三、特例	256
第五节 微波在粮食储藏中的应用	263

一、概述	263
二、特例：微波小麦入库前处理设备简介	265
第六节 微波调温与解冻	271
一、冷冻食品的微波加工	271
二、调温	273
三、解冻	275
第七节 微波白酒醇化	276
一、微波白酒醇化机制	277
二、设备	279
第八节 微波食品加工中的包装材料	281
一、微波食品包装材料的选择	281
二、外包装	283
三、内包装（盘式、盒式容器）	284
参考文献	287

第一章 微波概论

第一节 微波的性质

一、什么是微波

微波是一种电磁波。微波包括的波长范围没有明确的界限，一般是指分米波、厘米波和毫米波三个波段，也就是波长从1mm到1m左右的电磁波。由于微波的频率很高，所以也叫超高频电磁波。

为了进行比较，这里将微波与工业用电和无线电中波广播的频率与波长范围列于表1-1中。

表 1-1 各系统所用频率与波长范围

	频 率	波 长
工业用电	50Hz 或 60Hz	60 000 000m 或 50 000 000m
无线电中波广播	300~3 000kHz	1 000~100m
微波	300~300 000MHz	1~0.001m

因为微波的应用极为广泛，为了避免相互间的干扰，供工业、科学及医学使用的微波频段是不同的，现将其列于表1-2中。

表 1-2 常用的微波频率范围

频率范围/MHz	波段	中心波长/m	常用主频率/MHz	波长/m
890~940	L	0.330	915±25	0.328
2 400~2 500	S	0.122	2 450±50	0.122
5 725~5 875	C	0.052	5 800±75	0.052
22 000~22 250	K	0.014	22 125±125	0.014

目前只有 915MHz 和 2 450MHz 被广泛使用。在较高的两个频率段还没有合适的大功率工业设备。

二、微波的特殊性质

微波是电磁波，它具有电磁波的诸如反射、透射、干涉、衍射、偏振以及伴随着电磁波进行能量传输等波动特性，这就决定了微波的产生、传输、放大、辐射等问题都不同于普通的无线电、交流电。在微波系统中，元件的电性质不能认为是集总的，微波系统没有导线式电路，交、直流电的传输特性参数以及电容和电感等概念亦失去了其确切的意义。在微波领域中，通常应用所谓“场”的概念来分析系统内电磁波的结构，并采用功率、频率、阻抗、驻波等作为微波测量的基本量。

具体来说：

(1) 在研究微波问题时，应使用电磁场的概念，许多高频交变电磁场的效应不能忽略。例如微波的波长和电路的直径尺寸已是同一数量级，位相滞后现象已十分明显，这一点必须加以考虑。

(2) 微波传播时是直线传播，遇到金属表面将发生反射，其反射方向符合光的反射规律。

(3) 微波的频率很高，因此其辐射效应更为明显，它意

味着微波在普通的导线上传输时，伴随着能量不断地向周围空间辐射，波动传输将很快地衰减，所以对传输元器件有特殊要求。

(4) 当入射波与反射波相遇叠加时能形成波的干涉现象，其中包括驻波现象。在微波波导或谐振腔中，微波电磁场的驻波分布现象就很常见。在微波设备中，我们也利用多种模式的电磁场的分布、叠加来改善总电磁场分布的均匀性。

(5) 微波能量的空间分布同一般电磁场能量一样，具有空间分布性质。哪里存在电磁场，哪里就存在能量。例如微波能量传输方向上的空间某点，其电场能量的数值大小与该处空间的电场强度的二次方有关，微波电磁场总能量为空间点的电磁场能量的总和。

三、微波与材料的相互作用

当微波在传输过程中遇到不同材料时，会产生反射、吸收和穿透现象，见图 1-1。这些作用和其程度、效果取决于材料本身的几个主要的固有特性：介电常数(ϵ_r)、介质损耗角正切($\tan\delta$ ，简称介质损耗)、比热、形状、含水量的大小等。

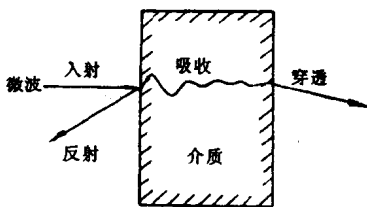


图 1-1 微波在介质中的传播

1. 常用材料

在微波加工系统中，常用的材料有导体、绝缘体、介质、极性和磁性化合物几类。

(1) 导体 一定厚度以上的导体，如铜、银、铝之类的金属，能够反射微波，因此在微波系统中，常利用导体反射

微波的这种特殊的形式来传播微波能量。例如微波装置中常用的波导管，就是矩形或圆形的金属管，通常由铝或黄铜制成。它们像光纤传导光线一样，是微波的通路。

(2) 绝缘体 在微波系统中，绝缘体有其完全不同于普通电路中的地位。绝缘体可透过微波，并且它吸收的微波功率很小。微波和绝缘体相互间的影响，就像光线和玻璃的关系一样，玻璃使光线部分地反射，但大部分则透过，只有很少部分被吸收。在微波系统中，根据不同情况使用着玻璃、陶瓷、聚四氟乙烯、聚丙烯塑料之类的绝缘体，它们常作为反应器的材料。由于这种“透明”特性，在微波工程中也常用绝缘体材料来防止污物进入某些要害部位，这时的绝缘体就成为有效的屏障。

(3) 介质 对微波而言，介质具有吸收、穿透和反射的性能。介质通常就是被加工的物料，它们不同程度地吸收微波的能量，这类物料也称为有耗介质。特别是含水和含脂肪的食品，它们不同程度地吸收微波能量并将其转变为热量。

(4) 极性和磁性化合物 这类材料的一般性能非常像介质材料，也反射、吸收和穿透微波。应当指出，由于微波能量具有能对介质材料和有极性、磁性的材料产生影响的电场和磁场，因此许多极性化合物、磁性材料同介质材料一样，也易于作微波加工材料。

2. 微波对介质的穿透性质

微波进入物料后，物料吸收微波能并将其转变为热能，微波的场强和功率就不断地被衰减，即微波透入物料后将进入衰减状态。不同的物料对微波能的吸收衰减能力是不同的，这随物料的介电特性而定。衰减状态决定着微波对介质的穿透能力。

(1) 渗透深度(穿透深度) 当微波进入物料时, 物料表面的能量密度是最大的, 随着微波向物料内部的渗透, 其能量呈指数衰减, 同时微波的能量释放给了物料。

渗透深度可表示物料对微波能的衰减能力的大小。一般它有两种定义:

①渗透深度为微波功率从物料表面减至表面值的 $1/e$ (36.8%) 时的距离, 用 D_E 表示, e 为自然对数底值。

$$D_E = \lambda_0 / \pi \sqrt{\epsilon_r \tan \delta} \quad (1-1)$$

式中 λ_0 ——自由空间波长;

ϵ_r ——介电常数;

$\tan \delta$ ——介质损耗。

②微波功率从物料表面衰减到表面值的 $1/2$ 时的距离, 即所谓半功率渗透深度 $D_{1/2}$, 其表示式为

$$D_{1/2} = \frac{3\lambda_0}{8.686\pi \sqrt{\epsilon_r \tan \delta}} \quad (1-2)$$

渗透深度随波长的增大而变化, 换言之, 它与频率有关, 频率越高, 波长越短, 其穿透力也越弱。在 2450MHz 时, 微波对水的渗透深度为 2.3cm, 在 915MHz 时增加到 20cm; 2450MHz 时, 微波在空气中的渗透深度为 12.2cm; 915MHz 时为 33.0cm。

由于一般物体的 $\pi \sqrt{\epsilon_r \tan \delta} \approx 1$, 微波渗透深度与所使用的波长是同一数量级的, 这些结论也揭示了一个电磁场穿透能力的物理特性。由此可知, 目前远红外线加热常用的波长仅为十几个纳米, 因此, 与红外、远红外线加热相比, 微波对介质材料的穿透能力要强得多。

穿透能力差的加热方式, 对物料只能进行表层加热, 从

整个物料的加热情况来看,属热传导加热范畴。而微波依靠其穿透能力较强的特点,能深入物料内部加热,使物料表里几乎同时吸热升温形成体热状态加热,其加热方式显然有别于热传导加热,由此,微波加工工艺带来一系列不同的加热效果。

(2) 渗透深度与温度 微波的渗透深度也和物质的温度有关(见表 1-3)。

表 1-3 微波对不同温度物质的渗透深度

物 料	温度/℃	渗透深度/cm	
		915MHz	2 450MHz
冰	-12.0	180	70
水	1.5	4.1	0.6
	5.0	4.8	0.7
	15.0	6.6	0.9
	25.0	9.0	1.3
	35.0	12.0	1.8
	45.0	13.8	2.0
	55.0	16.3	2.3
	65.0	19.0	2.8
	75.0	21.5	3.2
	85.0	25.0	4.0
	95.0	29.5	4.8
瘦肉	5.0	1.8	1.9
	-7.8	9.8	7.5
	-15.0	70.0	48.0

第二节 微波的传输、微波设备构件的特性及微波源工作原理

一、微波的传输与其在空间的分布形式

微波能量的传输,已不能运用普通导线电路的形式与概

念，而要运用超高频中“电磁场”的概念来解释。微波是一种超高频电磁波。电磁波以交变的电场和磁场相互感应的形式传输，也就是伴随着电能和磁能的相互转换而传输。下面详细阐述微波是怎样传输的。

1. 微波的传输

微波能不能像在低频及高频电路中的电磁波那样，按我们指定的路线传输呢？实践证明，是完全可以的。在电磁波传输技术中，对于不同波长的电磁波，应采用不同形式的传输形式。在米波波段，可以用双导线传输能量。当频率提高到分米波波段时，双导线已不再适用，因为电磁场会沿着双导线向空间辐射，造成很大的功率辐射损失。此时，通常采用同轴线（如图 1-2）。这样一来，电磁场就被屏蔽于内外导体之间。当频率继续提高到厘米波段时，沿同轴线内导体表面的电流将产生较大的功率损耗，支撑内导体的介质的热损耗也不容忽视。同时，随着波长的减小，同轴线允许传输的最大功率就要随着波长的缩短而下降。因此，在厘米波段一般不用同轴线传输较大的功率。此时，同轴线被波导（如图 1-3）所代替。波导是圆形或矩形截面的金属管，电磁波在波

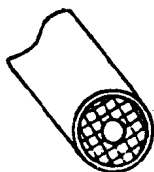


图 1-2 同轴线

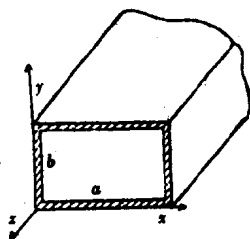


图 1-3 波导

导内传输，若波导尺寸、内表面光洁度符合质量要求，则功