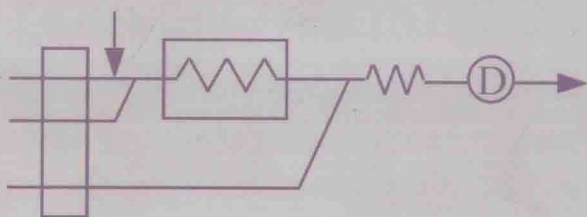




华夏英才基金学术文库

陈兴国 编著
王克太

微波流动注射分析



化学工业出版社

化学与应用化学出版中心



华夏英才基金学术文库

微波流动注射分析

陈兴国 王克勤 编著



化学工业出版社

化学与应用化学出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

微波流动注射分析/陈兴国, 王克太编著. —北京:
化学工业出版社, 2003. 12
ISBN 7-5025-5065-8

I. 微… II. ①陈…②王… III. 微波技术-应用-流
动注射分析 IV. 0661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 115049 号

微波流动注射分析

陈兴国 王克太 编著

责任编辑: 杜进祥

文字编辑: 刘志茹

责任校对: 吴桂萍

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
化学与应用化学出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 215 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5065-8/O · 38

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

1974 年丹麦学者 Ruzicka 和 Hansen 提出了一种新的湿法分析技术——流动注射分析 (flow injection analysis, FIA), 这一新技术的出现使传统的溶液分析技术得到了根本性的改变。在分析化学工作者的努力下, 该技术在化学、生物、临床、冶金等领域得到了迅速的发展和广泛的应用。

随着 FIA 技术的不断发展和完善, 制约该技术更加广泛应用的主要问题逐渐暴露出来, 即有些在通常条件下或用常规加热方式不能发生, 或反应速率极慢的但却具有较重要应用价值的反应, 无法在该技术中加以应用。要解决这一问题, 就必须寻找加速化学反应速率的新途径。

随着微波技术在化学、生物等领域的应用研究不断深入, 人们发现微波对某些化学反应的速率具有极为显著的影响。在微波场作用下, 不但一些在通常条件下或用常规加热方式不能发生或速率极慢的反应其速率显著增加, 而且某些反应的选择性大大提高。显然, 若能将微波技术与流动注射技术有机结合, 实现在线加速反应速率, 就有可能使上述反应用于流动注射分析。基于这一考虑, 笔者所在实验室从仪器的研制、新体系的建立及应用等方面进行了较系统的研究并提出了微波流动注射分析的概念。研究结果证明微波技术确实能使那些在通常条件下难于发生或反应速率极慢的反应很好地用于流动注射分析。这不仅使流动注射分析技术的应用更加广泛, 而且拓宽了微波技术的应用范围。

建立新的微波流动注射分析方法时, 为了获得高的灵敏度、好的选择性和尽可能快的分析速度, 就必须对各种仪器参数和化学因素进行优化。由于这些参数或因素之间通常存在着一定的交互影响作用, 传统的单因素轮换法常常难以奏效。因此, 我们致力于用现

代信息处理技术如人工神经网络解决这一问题的研究，并取得了创新性的成果。

本书结合笔者所在实验室有关微波流动注射分析的研究，介绍了分析化学工作者在这一领域的研究成果，希望能对提高我国自动分析技术的理论和应用研究水平起到一定的促进作用。

本书第1、4、5章由陈兴国撰写，第2、3章由王克太撰写。胡之德教授对本书的出版给予了热情关注。本书在编写过程中，得到陈晓峰、陈宏丽、崔书亚和贾润萍等博士的帮助和支持，在此，作者一并表示衷心感谢。

本书的出版得到华夏英才基金资助，书中涉及的许多研究成果曾得到国家自然科学基金委员会的资助，谨此表示衷心感谢。感谢化学工业出版社提出宝贵意见，并且给予支持和鼓励。

限于笔者水平，本书难免存在缺点和错误，请广大读者批评指正。

编者

2003年10月

于兰州大学

目 录

1 微波场作用下的化学反应	1
1.1 微波及其主要应用	1
1.1.1 微波的频率和波长范围	1
1.1.2 微波的特点	2
1.1.3 微波的主要应用	3
1.2 微波场作用下化学反应场内温度分布及其吸收微波功率的计算 ..	10
1.2.1 复介电常数与温度之间的关系	11
1.2.2 反应物中的微波耗散功率	12
1.2.3 热传导方程	13
1.2.4 微波炉腔内反应物吸收的表观微波功率的简便计算方法	13
1.3 微波与化学物质的相互作用	14
1.3.1 微波介电加热	14
1.3.2 微波介电加热的两种效应	16
1.3.2.1 热效应	16
1.3.2.2 非热效应	17
1.3.3 液体在微波场中的行为	18
1.3.4 水的微波特性	22
1.3.4.1 水分子的结构和键	22
1.3.4.2 水分子的导电性能与存在形式	24
1.3.4.3 水分子的微波特性	25
1.3.5 有机溶剂和二元体系溶液在 9590 MHz 微波源中的微波 吸收及应用	27
1.3.5.1 理论	27
1.3.5.2 实验部分	27
1.3.5.3 结果与讨论	27
1.3.5.4 应用	29
1.3.6 微波吸收法计算弛豫过程的热力学参数	30

1.3.6.1	理论	31
1.3.6.2	计算方法	32
1.3.6.3	结果与讨论	32
1.3.7	微波吸收(衰减)法测定某些物质的分子半径	35
1.3.7.1	理论	35
1.3.7.2	实验部分	38
1.3.7.3	结果与讨论	38
1.3.8	矿物在微波场中的行为	41
1.3.8.1	电导对升温速率的影响	47
1.3.8.2	组成及结构的影响	48
1.4	化学实验用微波装置	50
1.4.1	凝聚态化学反应器简介	50
1.4.1.1	微波化学反应腔类型、选择和设计考虑	51
1.4.1.2	多模箱式微波化学反应器	52
1.4.2	微波化学常用反应装置	57
1.4.2.1	分析化学中常用的微波装置	58
1.4.2.2	微波有机合成反应装置	77
1.4.2.3	材料和环境研究中常用的微波装置	87
1.5	使用微波装置进行化学研究应注意的问题	96
1.5.1	微波辐射的防护	96
1.5.2	使用民用微波炉进行化学研究时应注意的事项	97
	参考文献	98
2	流动注射分析简介	101
2.1	流动注射分析基本原理	103
2.1.1	FIA 输出与峰参数	104
2.1.2	分散系数	104
2.1.3	分散系数值范围的划分	105
2.1.4	分散系数的测定	105
2.1.5	进样体积(S_V)对流动注射分析灵敏度的影响	106
2.1.5.1	流动注射分析体系中的停留时间分布密度函数 $E(t)$	106
2.1.5.2	流动注射分析反应器停留时间分布函数	112
2.1.5.3	流动注射反应管道中产物的停留时间分布密度函数	120
2.1.5.4	进样体积对流动注射分析响应曲线的影响	120

2.2 流动注射常用流路及分析仪的基本组成	123
2.2.1 流动注射常用流路	123
2.2.2 流动注射分析仪的基本组成	125
2.3 流动注射分析理论研究	125
2.4 流动注射分析的应用研究	126
2.4.1 钼的流动注射分析方法	127
2.4.2 钨、铈、钕和铈的流动注射分析方法	128
2.4.3 铂的流动注射分析方法	130
2.5 流动注射 (FI) 与毛细管电泳 (CE) 联用技术简介	130
2.5.1 基本的 CE-FI 分流界面	131
2.5.2 CE-FI 联用装置	132
2.5.3 CE-FI 体系的优越性	134
2.5.4 在线转化和测定青蒿素的 CE-FI 联用技术研究	134
2.5.5 在线反应活化能的测定	138
参考文献	139
3 微波流动注射原理	142
3.1 微波流动注射的基本原理	144
3.1.1 微波流动注射分析的特点	144
3.1.2 微波流动注射分析的常用流路	145
3.1.3 微波流动注射分析的仪器装置	146
3.1.3.1 微波装置	146
3.1.3.2 流动管道	147
3.1.3.3 检测器	147
3.1.3.4 泵	147
3.2 建立微波流动注射方法的基本步骤	149
3.3 微波流动注射分析的理论研究	151
3.3.1 微波场作用下显色剂在流动体系中分散行为研究	151
3.3.2 微波流动注射体系中溶剂物理化学性质与其分散系数的关系	155
3.3.3 微波流动注射分析与普通流动注射分析灵敏度的比较	158
参考文献	159
4 试验设计及条件优化	160
4.1 试验的因素、水平及试验设计	160

4.1.1	因素和水平	160
4.1.2	因素的交互作用	160
4.1.3	全面试验和单因素轮换试验法	162
4.1.3.1	全面试验	163
4.1.3.2	单因素轮换试验法	163
4.2	正交试验设计	165
4.2.1	正交试验法及其特点	165
4.2.2	正交表	167
4.2.2.1	正交表的特性	167
4.2.2.2	交互作用表	168
4.2.2.3	混杂现象混杂技巧	170
4.2.2.4	用正交表安排试验的步骤及正交表的选择原则	172
4.2.3	正交试验结果分析	177
4.3	均匀设计	180
4.3.1	均匀设计的基本原理	180
4.3.1.1	均匀设计表	180
4.3.1.2	试验结果分析	181
4.3.1.3	应用实例	184
4.3.2	均匀设计和正交设计的比较	185
4.4	单纯形优化法	186
4.4.1	单纯形法的原理	187
4.4.1.1	双因素单纯形法	187
4.4.1.2	多因素单纯形法	188
4.4.1.3	双水平单纯形法	189
4.4.2	改进单纯形法	191
4.4.3	单纯形优化的参数选择	193
4.4.3.1	因素和步长	193
4.4.3.2	试验指标	193
4.4.3.3	初始单纯形的构成	194
4.4.3.4	单纯形的收敛	195
4.4.4	单纯形法在微波流动注射分析中的应用实例	195
4.5	人工神经网络在试验设计及条件优化中的应用	196
4.5.1	人工神经网络简介	196

4.5.2	人工神经网络结构及主要模型简介	198
4.5.2.1	BP 神经网络模型	199
4.5.2.2	径向基函数神经网络	201
4.5.3	人工神经网络在微波流动注射分析中的应用实例	204
	参考文献	212
5	微波流动注射分析的应用	213
5.1	微波流动注射分析在药物和环境分析中的应用	214
5.1.1	药物中维生素 C 的快速测定	214
5.1.2	微波流动注射分析在测定微量铬 (VI) 中的应用	216
5.1.2.1	以二溴羧基偶氮胂和二溴邻羧基偶氮氯膦作显色 剂测定铬	216
5.1.2.2	以双安替比林-4- <i>N,N</i> -二甲氨基苯基甲烷为显色剂 在线测定铬 (VI)	218
5.2	微波流动注射分析在铂族元素测定中的应用	221
5.2.1	微波流动注射分光光度法测定钯	221
5.2.1.1	以偶氮氯膦-mN 作显色剂测定钯	221
5.2.1.2	以偶氮氯膦-pC 作显色剂测定钯	224
5.2.2	微波场对贵金属离子与 5-Cl-PADAB 配位反应的作用及 连续测定钯和铑的研究	226
5.2.3	在线微波流动注射分析技术及其在测定铑和连续测定钯和 铑中的应用	230
5.2.4	以偶氮氯膦-mA 作试剂催化动力学测定钌 (III)	234
5.2.5	以二溴羧基偶氮胂 (DBM-AsA) 作试剂催化动力 学测定微量钌	237
5.2.6	以 5-(5-Br-2-吡啶偶氮)-2,4-二氨基甲苯作显色剂测定钌	241
5.3	原子吸收法测定全血样品中铜、锌和铁	243
	参考文献	245

1 微波场作用下的化学反应

1.1 微波及其主要应用^[1]

1.1.1 微波的频率和波长范围

微波是电磁波频谱中无线电波的一个重要分支,通常是指频率范围在 300 MHz~3000 GHz 之间或波长范围在 1 m~0.1 mm 之间的无线电波。在微波波段中,通常又将其再划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波,其中厘米波发展最成熟和应用最广。电磁波频谱和微波波段的划分见表 1-1。此外,在微波和雷达工程中,还常采用不同的字母来表示微波中的不同分波段,见表 1-2。

表 1-1 电磁波频谱和微波波段的划分

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	2.5~25μm	
		近红外	0.76~2.5μm	
		可见光	400~760nm	
		紫外线	3~400nm	
		X 射线	1~3000pm	
		γ 射线	1pm	

表 1-2 微波常用波段代号

波段代号	标称波长/cm	波长范围/cm	频率范围/GHz
L	22	15~30	1.0~2.0
S	10	7.5~15	2.0~4.0
C	5	3.75~7.5	4.0~8.0
X	3	2.4~3.75	8.0~12.5
Ku	2	1.67~2.4	12.5~18.0
K	1.25	1.1~1.67	18.0~27.0
Ka	0.8	0.75~1.1	27.0~40.0

在微波波段，由于它们的频率极高，为了方便通常采用比低频时常用的 Hz（赫兹）和 kHz（千赫）更大的频率单位，它们分别是 MHz（兆赫）、GHz（吉赫或千兆赫）和 THz（太赫），它们与赫兹的关系为

$$1\text{MHz}=10^6\text{Hz}$$

$$1\text{GHz}=10^9\text{Hz}$$

$$1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$$

1.1.2 微波的特点

微波技术为什么愈来愈被人们重视并已发展成为一门相对独立的科学技术呢？这是因为微波除了具有一般无线电波的共性外，还具有许多与低频无线电波所不同的特性。下面仅对微波的一些主要特点加以简介。

① 微波的频带很宽。微波的频带比所有低频无线电波频带的总和还要宽 1000 倍，这么宽的频谱空间的开发及合理利用将对克服频谱空间拥挤的困难具有十分重要的作用。

② 微波的波长很短。由于微波的波长比一般物体的尺寸更小或者几乎无法与之相比，这使得其具有类似于光的特性，即它是直线传播的，因此，它特别适合于无线电定位即雷达技术的需要。事实上，微波技术的迅速发展与第二次世界大战中雷达的发展紧密联系在一起。

③ 微波的频率很高。这一特点使其在应用上能适合于宽频带技术的需要，因为无线电设备的相对带宽 $\Delta f/f_0$ 的增大受到技术

的限制,而载波频率 f_0 的提高就可使设备的绝对频宽 Δf 增加,从而在微波设备上就可容易地实现宽带信号(如很多路的电话和电视节目)的传送和辐射。

④ 微波的振荡周期很短。由于微波的振荡周期 ($10^{-13} \sim 10^{-9} \text{ s}$) 已可以与电子器件中电子的渡越时间 (10^{-11} s) 相比拟,这将导致低频电子器件无法正常工作。因此,产生微波振荡与放大的电子器件必须采用与低频电子器件完全不同的原理工作,速调管、磁控管与行波管等微波电子管就是利用电子渡越时间效应而工作的。

⑤ 微波能够穿透电离层传播,它是地球的电磁频谱宇宙窗口,这就是卫星通信、宇宙通信和射电天文都必须采用微波的原因所在。

⑥ 微波的量子能量 ($10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ eV}$) 与某些物质能级间的能量差相当。基于这一特性,可以利用物质对微波量子的共振吸收或在能级跃迁时所放出的微波量子,研究物质的能谱结构以及微波激射器和原子钟等。

⑦ 微波能够深入物质内部与物质产生相互作用,水和含水物质或溶液对微波具有吸收作用。基于这一特性,可以利用微波治疗和诊断人体的某些疾病,对含水物质或溶液进行选择性地加热,提高化学反应的速度,改善化学反应的选择性。本书将就微波这一特性对化学反应的作用进行详尽的介绍。

除此之外,微波还有另外一些特性。这些特性与本书的目的关系不是十分密切,故在此不予介绍,有兴趣的读者可以参阅其他专著。

综上所述,正是由于微波具有许多独特的性能,才为它的迅速发展和广阔应用提供了强大的动力和开辟了美好的前景。

1.1.3 微波的主要应用

微波理论和技术的发展与它的实际应用密切相关,目前它的应用已经几乎遍及尖端科技、军事国防、工农业生产、科学研究、医疗卫生和人们的日常生活等领域,而且,新的应用领域还在不断地扩大。下面将微波的一些主要应用加以介绍。

(1) 雷达与导航 雷达是微波技术发展的策源地，它利用天线发送一个无线电窄波束，然后通过测定目标的反射回波来确定目标的位置。它根据发射脉冲与接收到的回波脉冲之间的时间间隔 Δt 来确定目标的距离。

$$s = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1-1)$$

式中， c 为光速，并根据接收到回波时雷达天线波束所指向的方位来确定目标的方位角和仰角位置。

如果要测定目标的速度 v ，则可根据所接收到的回波的多普勒频移 f_D 来确定。

$$v = \frac{\lambda}{2\cos\gamma} f_D \quad (1-2)$$

式中， γ 为 v 与波束中心线的夹角。

雷达大多数都工作在微波波段，这是因为目标的尺寸与波长之比越大，反射回波就越强，探测距离就越远；雷达天线口径与波长之比越大，发射波束就越细，测位精度就越高；而且为了能探测外层空间的目标（如导弹、卫星、宇宙飞船等）就必须利用微波能够穿透电离层的特性。

近代雷达技术正向着远距离、高精度、高分辨率、多功能、小型化和开拓新的波段等方向发展。为了扩大探测距离，一方面需要提高微波管的发射功率和天线的增益；另一方面更经济的方法是提高接收机的灵敏度，采用低噪声接收技术和新的接收方法。目前雷达的作用距离已达几千千米以上，甚至在射电天文采用大功率发射机、大口径天线、低噪声器件和信号累集技术等，已从水星、火星和太阳上收到了雷达回波。为了提高测角精度，主要应提高天线增益，目前测角精度已高达千分之几度。现代雷达要求不仅能发现和测定目标位置，而且还要能跟踪目标（如炮瞄雷达）、获得目标更多的信息（如目标的速度、加速度、大小、形状、类型和真假，导弹的弹道和弹着点等）以及能进行信息处理并作出相应的应对措施（如指挥炮火或导弹迎击）等。而且还要求能对规定区域同时进

行多目标的探测和跟踪，为此，研究了各种新技术的雷达，如单脉冲雷达、合成孔径雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、扫频雷达和相控阵雷达等。为了实现雷达的小型化主要应采用微波集成电路技术和固体微波技术，小型化雷达不仅是机载和星载雷达的需要，而且也为雷达的新应用开辟了前景，如汽车防撞雷达、家庭防盗雷达和盲人防撞雷达等。随着毫米波和亚毫米波发射源研制的进展，毫米波、亚毫米波雷达的研制也已受到人们的重视。

另外，为了避免目标被敌方的雷达发现，还开展了反雷达技术的研究。在电子技术方面，主要的方法是施放干扰和目标隐身技术，前者是通过发射干扰电波（积极干扰）或施放假目标（消极干扰）来实现的，后者是通过设计合适的目标形状和在目标表面涂以微波吸收材料以减小目标的反射回波来实现的。

导航就是正确地引导目标（飞机或舰船等）安全航行，利用导航设备可确定目标的位置和其他运动参数（如航向、航速等），可显示目标周围的情况，可指挥目标安全航行。例如，机场的空中交通管制雷达，可显示附近空域中的飞行情况、地面跑道上的车辆、行人等情况，从而可在任何恶劣气候条件下全天候指挥飞机安全起飞和着陆；舰船上的导航雷达可显示周围海域的情况，可使领航员即使在雾天或夜间也能引导舰船航行或入港，并能在舰船与礁石或其他船只过分靠近时进行自动报警。

(2) 通信 由于微波具有极高的频率和极宽的频带，它特别适合于作大容量通信的载波，它可以传输几千路电话和几十路电视。微波通信的主要方式有微波中继通信、卫星通信和波导通信。

微波中继通信是一种比较成熟的通信方式，它是在远距离的两地之间每隔一定距离设置一系列的中继站，每个中继站都定向接收上一站发来的微波信号，并对它进行放大、变频后继续定向向下一站发送，一站一站的接力直至传到终点。采用中继站的原因是为了克服由于地球曲率所造成的对微波直线传播的阻挡以及微波在传播过程中的衰减，两站之间的距离约 50 km 左右，每个中继站收发的微波信号之所以要采用不同的微波频率是为了克服收发之间的耦

合干扰。现在中继通信一般采用厘米波。

卫星通信是由地面站和通信卫星所组成的，它是利用人造同步卫星作为中继站来实现地面上两站之间的通信的。由于微波能够穿透电离层，故卫星通信必须采用微波。目前主要使用 10GHz 以下的频率。为了保证卫星对地面相对静止，通信卫星必须采用其运转速度与地球自转速度相同的同步卫星，其轨道在地球赤道上空约 35800 km 处。如果卫星上天线的波束宽度达 $17^{\circ}\sim 18^{\circ}$ ，它就可覆盖约 $1/3$ 地面。因此，三颗这样的同步卫星就可实现全球范围的通信。目前，国际商用通信卫星正用于世界各国间的通信联系。我国于 1984 年 4 月成功地发射了第一颗试验通信卫星，它可覆盖我国全部领土及周围的一些国家和地区，我国也已成功地制成了卫星通信地面站。

波导通信通常是指圆波导 TE_{01} 波毫米波通信，因为这种波形的传输损耗极低，且频率越高，损耗越小，所以可利用封闭的圆波导连接起来构成通信线路，并在每隔 20~40 km 设置一个增幅机，以克服线路损耗，不过目前毫米波波导通信受到了光导纤维通信的挑战。

(3) 广播电视 微波在广播电视中的应用，一方面可利用微波中继或卫星通信进行两地之间电视或广播信号的传送，如从直播现场向发射台传送；另一方面，正在研究和实验利用卫星进行电视的直播，这需要解决高功率的发射和家用电视机的直接接收问题。

(4) 微波遥感和微波全息照相 因为各种物质都会不同程度地辐射微波，因此，在人造卫星上利用微波遥感技术通过接收和处理目标的微波辐射信号可确定目标的特性，如可测定大气、海洋、土壤的成分和温度的分布等。由于微波的传播不受黑夜和天气的限制，故它优于红外和可见光遥感。

微波全息照相是利用微波能够穿透不透光的非金属介质的特性对物体进行照相的技术，保安人员利用微波全息照相可发现隐藏的手枪，利用从卫星上对地球作全天候微波全息照相可及时掌握火山及冰川的活动情况、农作物的生成和病虫害情况。美国阿波罗宇宙

飞船还拍摄了月球表面浮土下的地层情况，金星探测器拍摄了由不透光大气包围着的金星表面的照片。

(5) 微波非电量测量 利用微波可以对湿度、温度、厚度、距离、速度以及物质的材料参数（如介电常数 ϵ 和导磁系数 μ ）等非电参量进行测量。这种测量的基本原理是利用微波传输中的衰减、反射、相移或谐振腔的谐振频率和品质因数等与这些参数有关的特性，通过测量某个微波参数，从而换算出有关的非电参量，微波参数和非电参量间的对应关系由预先制作好的校正曲线或有关的理论公式描述。利用微波方法测量非电参量具有快速、自动、准确、连续、非接触和非破坏性等优点，且在生产过程中易于实现自动控制。目前它已用于测量粮食、木材、纸张、石油和烟草等的含水率，测量钢板的厚度、高炉料面的高度和某些悬浮液体（如炼乳、水泥黏结剂）的浓度等。

(6) 微波加热 利用含水介质在微波场中由于高频极化产生介质热损耗而使介质加热。由于微波能够透入介质内部且含水量越大处其损耗越大，所以微波加热具有速度快、加热均匀和具有选择性加热等优点，且也容易实现自动控制。

为了防止对雷达和通信等产生干扰，微波加热应使用规定的频段，我国和世界大多数国家规定的工业、科学与医学专用频率为： $(915 \pm 25)\text{MHz}$ 、 $(2450 \pm 50)\text{MHz}$ 、 $(5800 \pm 75)\text{MHz}$ 和 $(22125 \pm 125)\text{MHz}$ 。目前我国主要应用 915MHz 和 2450MHz 。

微波加热设备主要由微波功率源和加热器两大部分组成。微波功率源通常采用连续波磁控管，在很大功率时（几十千瓦以上）也有采用多腔速调管或交叉场放大管的。加热器的主要型式有箱型加热器、行波场波导加热器、慢波型加热器和辐射型加热器等。

微波加热已用于纸张、木材、皮革、粮食、食品和茶叶等的加热干燥，矿石的破碎，沥青的溶化，食品、血浆和冷藏器官的解冻以及在家庭中利用微波炉来烹煮食物。

(7) 微波医疗和诊断 用微波照射人体可透入人体内部产生热效应和其他非热生物效应，从而可以治疗某些疾病，如关节炎、神