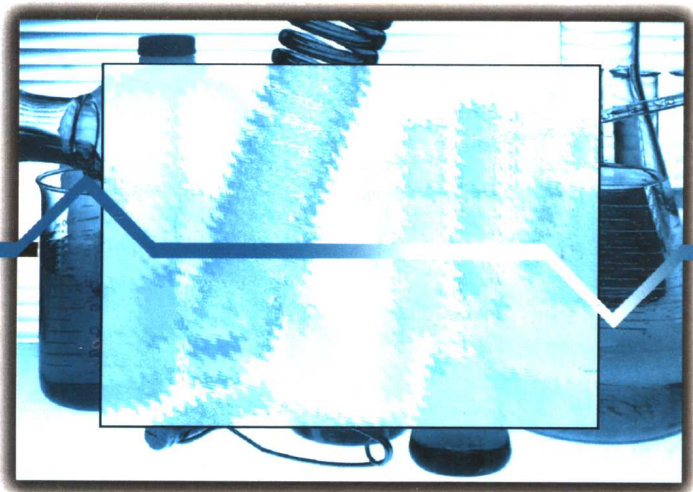


邵明望 张文敏 合著



微波化学与工程

WEIBO HUAXUE YU GONGCHENG

安徽大学出版社

微波化学与工程

邵明望 张文敏 合著

安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微波化学与工程/邵明望. 张文敏合著. - 合肥: 安徽大学出版社, 1999. 6

ISBN 7-81052-201-9

I. 微… II. ①邵… ②张… III. 微波技术-应用-化学工程 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 18632 号

微波化学与工程

邵明望 张文敏 合著

出版发行	安徽大学出版社 (合肥市肥西路3号 邮编 230039)	印刷	中国科学技术大学印刷厂
联系电话	总编室 0551-5107719 发行部 0551-5107784	开本	850×1168 1/32
责任编辑	李虹	印张	5.5
封面设计	孟献辉	字数	133 千
经 销	新华书店	版次	1999 年 11 月第 1 版
		印次	1999 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 7-81052-201-9/O·16 定价 8.50 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

序

值此世纪之交,由安徽师范大学邵明望、张文敏两位老师合著的《微波化学与工程》一书终于问世了。微波技术自本世纪 30 年代随着军事通讯如雷达、导航、遥感等方面的应用而得到了迅速发展。微波技术在工农业生产中主要应用于微波测量、微波加热和干燥等方面。目前微波的应用领域不断扩大,已深入到化学、生物医学等基础学科研究诸方面。

本书作者长期从事微波技术的研究与实践,在微波微乳状液合成均分散纳米粒子曾进行了开创性的研究工作,该法与常法相比具有高效、节能、无环境污染等优点,同样利用微波法合成均分散高分子胶体微粒也是一种行之有效的好方法,既可用于聚合,又可用于共聚,从而制得功能性的高分子微料。采用微波法合成超细粒子必将在材料工业上大展宏图。用微波处理黄铁矿或磁黄铁矿,所得产品用作重金属废水净化剂,其净化效果良好,且易于大量制备。为使微波技术在化学工程上的推广作用,作者进行了微波加热性能、微波加热均匀性、稳定性和化学反应模拟的研究。因此,作者将多年工作中所取得的成果,在短时间内撰写出一本既注重理论,又有实用价值的较为新颖的书,是十分难得的,故乐为序。

合肥工业大学化工学院教授 范文元
一九九九年九月

内容提要

微波技术已应用于化学化工领域。本书从实用出发,介绍了微波源及元件、传输特性、电介质性质、微波在化学上的应用、连续式微波反应器的特点、微波的安全使用等。本文可供化学专业高年级学生、研究生和教师参考。

前 言

微波技术已越来越广泛地在化学研究和化学工业领域得到应用,作为一门近年来得到迅速发展与应用的高新技术,最早是因军事上的需要而产生的,现在已随着科学技术的进步而进入千家万户。

微波技术发展的特点表现在它的应用范围不断扩大,除了许许多多较成熟的应用,微波还用在合成纳米粒子、硅酸盐化合物、金属有机化合物、制取金刚石、环境保护、化学分析、催化剂改性、高分子加工、聚合物改性、加热、传质分离、测量湿度、测量悬浮体浓度、测量厚度、结构完整性检测、称量、遥感、灭菌、灭酶和医学方面。

本文作者几年来在利用微波制备纳米粒子以及微波加热方面作了有益的尝试,得到了一些肯定。我们本着抛砖引玉的宗旨,结合工作经验,纂写此书,希望得到行家的指点。

本书是作者多年来的工作的成果,它不仅注重理论,而且也有实用价值。

作者在微波方面的工作得到了国家自然科学基金(29773001)、安徽省自然科学基金(95-材-13,95-化-02)和安徽省教委科研基金(96JL0040)的资助;本书的出版过程中得到安徽师范大学出版基金的资助,在此表示感谢!

由于作者学识和文字水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

1999年7月3日

目 次

第一章 微波和微波管	(1)
1.1 微波简介	(1)
1.1.1 微波技术的发展	(1)
1.1.2 微波的特点	(3)
1.2 微波管概述	(6)
1.3 连续波磁控管	(7)
1.3.1 磁控管的工作原理	(9)
1.3.2 磁控管的工作特性和负载特性	(11)
1.4 连续波磁控管的电源	(14)
1.5 磁控管的稳定操作	(16)
第二章 微波的传输原理、常用元件及微波材料	(18)
2.1 微波的传输方法	(18)
2.2 微波传输中场的分布和波型特性	(20)
2.2.1 同轴线中的场结构及其波型特性	(20)
2.2.2 矩形波导中的场结构及其波型特性	(20)
2.2.3 圆柱波导中的场结构及其波型特性	(23)
2.3 传输线的截止特性	(24)
2.3.1 截止波导的一些特性	(25)
2.3.2 截止波长	(26)
2.4 传输线的阻抗特性	(29)
2.4.1 什么是驻波	(29)
2.4.2 传输线的输入阻抗	(30)
2.4.3 阻抗匹配	(33)

2.5	传输线的衰减特性·····	(34)
2.6	常用微波元件·····	(36)
2.7	截止波导的材料·····	(42)
2.8	微波透波材料·····	(42)
2.9	微波吸收材料·····	(44)
第三章	微波加热 ·····	(46)
3.1	微波加热基本原理·····	(46)
3.2	微波加热的基本关系式·····	(49)
3.2.1	功率计算·····	(49)
3.2.2	被加热物质在微波场中吸收的功率·····	(50)
3.2.3	微波对加热物质的穿透深度·····	(51)
3.2.4	经验估计·····	(51)
3.3	材料性能对加热的影响·····	(52)
3.4	影响介质特性的典型参数·····	(54)
3.5	微波加热的主要特点·····	(56)
3.6	微波加热的优点·····	(60)
3.7	采用微波加热应当注意的事项·····	(61)
第四章	电介质的概念 ·····	(64)
4.1	电介质的概念·····	(64)
4.1.1	材料的分类·····	(64)
4.1.2	电介质与极化·····	(66)
4.1.3	电介质的介电系数·····	(69)
4.1.4	电介质的介质损耗·····	(71)
4.1.5	介电系数的特点·····	(72)
4.2	介电系数与物态的关系·····	(81)
4.2.1	气体·····	(81)
4.2.2	非极性液体和固体电介质·····	(82)
4.2.3	极性液体电介质·····	(84)

4.2.4	极性固体电介质·····	(85)
4.2.5	低介电系数的离子晶体·····	(87)
4.3	高聚物的介电行为·····	(89)
4.3.1	高聚物的介电系数和介质损耗·····	(89)
4.3.2	高聚物的介电松弛·····	(93)
4.4	复合电介质的介电系数·····	(96)
第五章	水的微波特性 ·····	(97)
5.1	水的微波特性·····	(97)
5.1.1	水分子的结构和键·····	(97)
5.1.2	水分子的导电性能与存在形式·····	(98)
5.1.3	水的介电系数 ·····	(100)
5.1.4	水的介电系数随温度的变化 ·····	(101)
5.2	水的介电系数的计算式 ·····	(104)
第六章	微波的应用 ·····	(107)
6.1	微波在化学反应中的应用 ·····	(107)
6.1.1	微波合成纳米粒子 ·····	(107)
6.1.2	微波在有机化学反应中的作用 ·····	(109)
6.1.3	微波在硅酸盐中的作用 ·····	(112)
6.1.4	微波在金属有机化合物中的应用 ·····	(113)
6.1.5	微波在热分解反应中的应用 ·····	(113)
6.1.6	微波在制取金刚石中的应用 ·····	(114)
6.1.7	微波在环境保护中的应用 ·····	(115)
6.1.8	微波在其它化学反应中的作用 ·····	(115)
6.2	微波在化学分析中的应用 ·····	(116)
6.3	微波辐射在催化剂改性上的应用 ·····	(119)
6.4	微波在高分子加工中的应用 ·····	(119)
6.5	微波在聚合物改性上的应用 ·····	(120)
6.6	微波在加热过程中的应用 ·····	(121)

6.7	微波在测量中的应用	(122)
6.8	微波在农业上的应用	(124)
6.9	微波在医学上的应用	(125)
6.10	微波在无线输电中的应用	(126)
第七章	连续式微波反应器	(127)
7.1	连续式微波反应器的注意事项	(127)
7.2	微波对流动物料的加热规律	(130)
7.2.1	介电系数与温度的关系	(131)
7.2.2	单管反应器	(131)
7.2.3	双管反应器	(133)
7.3	微波加热的热稳定性	(135)
7.4	利用微波加热进行化学反应模拟	(137)
第八章	微波的安全使用	(141)
8.1	微波对人体的影响	(141)
8.1.1	微波的生物学效应	(141)
8.1.2	微波辐射的安全标准	(144)
8.2	微波设备漏能分析	(148)
8.3	微波设备的安全管理	(149)

第一章 微波和微波管

微波和大家都很熟悉的无线电长波、中波及短波一样,是一种电磁波。所谓“微”,是指微小的意思。因此,微波就是指波长很短(也就是频率很高)的电磁波。波长一般从 1m 到 1mm(相当频率从 300MHz~300000MHz)范围内。

1.1 微波简介

1.1.1 微波技术的发展

微波与无线电波、红外线、可见光等同属于电磁波,它们之间的区别在于频率不同。微波通常是指频率在 300MHz~300GHz 之间的电磁波。低于 300MHz 的电磁波就是通常的无线电波,高于 300GHz 的依次分别属于红外线、可见光等等。

电磁波的频率 f 与波长 λ 和光在真空中的速度 C 之间有下列关系:

$$f\lambda = C \approx 300000000\text{m/s}$$

因此,微波的波长范围是从 1m 到 1mm,由于微波的波长与通常无线电波的相比更为微小,故称为“微波”。

微波技术是在第二次世界大战中发展起来的。由于战争的需要,利用微波方向性强的特点测量飞机、战舰的方位,这就是雷达定位技术。到 50 年代,微波技术被广泛用于通信、导航、遥控遥测等领域,同时不断涌现出新的微波元器件。到 60 年代,微波技术一方面向小型化、微波集成电路及毫米波段发展;另一方面,向微

波应用方面发展。微波应用又可分为两大分支,一支是微波能应用技术,主要是大功率的微波源应用于化学反应(合成纳米粒子、加速有机反应、硅酸盐反应、金属有机化合物、热分解反应)、化学分析、催化剂改性、高分子加工和改性、微波加热、微波干燥及医学上的应用(治癌、灭菌);另一支是微波非电量测量,主要是将小功率的微波源应用于微波测湿、测量悬浮体浓度、测厚、测速、测距及测量材料密度和结构完整性的检测等方面。

为了避免微波对雷达、通信、导航等微波设备的工业干扰,同时选定频率也有利于所用装置和器件的配套互换,目前世界上比较多的国家采用了如表 1 所示的所谓工业、科研、医疗(ISM)专用频率,而目前在微波加热干燥方面所采用的主要是其中 915 和 2450 两个频率。

表 1-1 供工业、医学使用的微波加热和干燥的微波波段

波段	频率(MHz)	中心波长(cm)
L	915 ± 25	33.0
S	2450 ± 50	12.2
C	5800 ± 75	5.2
K	22125 ± 125	1.4

微波波段除了 ISM 专用波段外,还有另外几个波段:

波段	频率(MHz)	中心波长(cm)
X	6200~10900	4.84~2.75
Q	36000~46000	0.83~0.65
V	46000~56000	0.65~0.54

微波不仅是一门日新月异的尖端学科,而且应用在不断扩大,同时,它和几乎所有近代尖端技术和学科都发生极其紧密的联系。随着这门学科的飞速发展,微波的一部分内容在和物理学的某些分支相结合的基础上,已经逐渐从原来的微波领域中划分出来,形

成了若干新的科学分支,如微波波谱学、量子电子学、微波半导体电子学等。在近代自然科学中,微波的发展对很多学科都起着重要的影响。

1.1.2 微波的特点

微波既是一个频率很高的波段,同时也是一个频率很宽的波段。它所包括的频带比下面频率较低的所有波段的频带加在一起还要宽约一千倍。为方便起见,通常微波划分为分米波、厘米波和毫米波等几个波段。从 $1\text{m} \sim 0.1\text{m}$ 的波(频率为 $300\text{MHz} \sim 3000\text{MHz}$)叫分米波。从 $10\text{cm} \sim 1\text{cm}$ 的波(频率为 $3000\text{MHz} \sim 30000\text{MHz}$)叫厘米波。从 10mm 到 1mm 的波(频率为 $30\text{GHz} \sim 300\text{GHz}$)叫毫米波。

然而,仅仅用频率或波长范围来说明微波的特点还是不充分的。因为频率范围并不是微波所独有的特点,其他的波段也都有它们自己的频率范围。那么,究竟为什么单单要把微波从电磁波的频谱中划分出来加以研究呢?

1. 微波具有类似光的性质

从电子学的观点来看,说微波的波长很短,不仅是和它以下各个波段相比较而说的,同时还意味着,它的波长和地球上很多物体的尺寸相比要小很多,或者在同一数量级。微波波长比物体尺寸大很多的情况虽然也有,但这种情形是比较少见的。

当波长远小于物体(如飞机、船只、火箭、建筑物等)的尺寸时,微波的特点就和几何光学很接近。利用这个特点,就能在微波波段制成方向性极高的发射和接收系统,如抛物面反射镜。当波长和物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸有相同的数量级时,微波的特点又与声波接近。因而,微波技术中所用的许多元件都可以在声学器件中找到相应的东西。例如,微波所用的波导有如声学中的传声筒,号角天线有如喇叭,各种形式的空腔有如不同的乐

器。

作为微波波长比外界尺寸大很多的例子,可以举出微波越过小物体边缘或通过小孔和缝隙所发生的绕射现象。这和光学中的绕射现象也是相似的。

对于普通无线电波来说,情形就不一样。无线电波的波长比物体尺寸大很多的情形是很常见的,和空间尺寸相近的情形是个别的。至于波长远小于物体尺寸的情形就更少见。

2. 电磁振荡周期短

微波在电子学上的另一个特点是微波的电磁振荡周期($10^{-9} \sim 10^{-12}$ s)很短,已经和电真空器件中电子在电极间飞越所经历的时间(即渡越时间)具有相同的数量级。正是利用这个特性,才研制出一系列的新型微波电子管。

3. 波段很宽

波段是指某一种电磁波的频率范围,也就是从这种电磁波最低的频率到最高的频率之间的范围。波段宽,可利用的频率就多;可以传送的信息就多,正如公路越宽,可以并行通过的车辆越多一样。但是,波段的宽度并不是以尺寸来衡量的,而是以频率来衡量的,所以又叫频带宽度或频宽。我们知道,无线电长波、中波、短波、超短波等,统统加在一起,频宽只有 1GHz。而微波的波段,从 1GHz 开始到 300GHz,其频宽为 299GHz。所以微波的频宽是长波、中波、短波、米波、分米波的波段频宽加在一起的 299 倍。频率从某种意义上来说也是一种资源,所以,微波的波段广阔,资源丰富。

4. 理论与实际联系紧密

微波这门学科具有技术科学的特色,它一方面以理论科学为基础,另一方面又与生产实践有密切联系。微波理论一旦脱离了生产实践,就会失去它的生命力;反之,微波的科学实践如果离开了微波理论的指导,也很难迅速发展。

5. 其他

微波还有一些其他的特点,如分米和厘米波段以及毫米波段的几个特殊波长(8mm,3mm)的电磁波并不被高空大气游离层反射,而可以毫无阻碍地透过这些游离层。因此,对于人类来说,微波波段是电磁波频谱中的一个宇宙“窗口”,它给宇宙通信、导航、定位以及射电天文学的研究指出了广阔的前途。

此外,微波在生物学和医学等方面也有特点。

微波和较长波考虑方法的不同点,主要是电磁场的概念更加重要了。在较长的无线电波段,只是在研究天线的辐射问题时才必须利用场的概念和方法,至于处理其它问题则主要是利用电路的概念和方法。然而,到了微波波段,如果不利用场的概念,那么即使是微波技术中的最基本元件(波导、空腔)也将得不到解释。因为微波问题主要是研究场的问题,所以微波设备的空间结构比较长波段的更为重要。此外,设计微波电子管时,一般总是同时考虑到电子管的外部电路(空腔、波导、输入和输出耦合元件等),不象通常的电子管那样可以单独分开来进行设计。然而,尽管“场”的概念在微波问题中显得突出重要,但这并不意味着“路”的概念就没有用了。事实上,许多微波问题(无论是波导传输,或是微波管),常常是从场的分析开始,然后归结为路或传输线的问题来处理。这样做不仅简化了问题的分析,同时还给理解微波问题的物理意义带来很大方便。

微波信号从微波信号源发射到空间,以与水波相似的波动方式向外传播,它与水波的不同之处在于,它是以交变电场产生交变磁场,由交变磁场再产生交变电场,如此交替转换,愈传愈远,将电磁波的能量传向远方。

奇妙的微波以它的独特的功能开拓了微波应用新技术。那么,微波能是怎样产生的呢?

微波能的产生来自微波源。它是由产生微波能的“心脏”——微

波管和为微波管提供必要工作条件的电源所组成的。

1.2 微波管概述

频率很低(50Hz)的工业用电是利用发电机来产生的,而无线电波则是一直等到电子管发明后才被产生出来。普通电子管的基本工作原理是利用栅极、阴极间的电场变化来控制电子流的密度。这种原理也可以称为“密度调制”。

利用普通的电子管来产生电磁振荡,是否有可能不断地提高振荡频率,一直高到微波波段呢?

电子管振荡器的振荡频率 f 取决于和电极相接的谐振电路(由线圈和电容器组成)的电感 L 和电容 C :

$$f = 1/2\pi \sqrt{LC}$$

为了提高频率,自然应该减小电感和电容,但这是有限制的。因为,即使不再外接线圈和电容器,普通电子管电极引线的电感和电极间的电容也要成为限制频率提高的因素。另一个问题是,当频率提高到微波波段时,由于电磁振荡周期已经短到与电子和电子在电子管电极间的渡越时间有相同的数量级,密度调制的工作方式已经失效了(电子流的密度来不及随着电极间电压的高低而变化)。

人们采取两种截然不同的途径解决这一问题。

一种途径是在原有的基础上来改进电子管的结构。为了避免引线电感和极间电容的影响,人们用空腔谐振器来代替以往由线圈和电容器组成的谐振电路,并且将电极制成圆盘形或圆柱形,以便和空腔谐振器相配合而成为后者的一部分。为了减小渡越时间的影响,可以适当缩短电极间的距离,并在电极上加上可以经受得住的较高的电压。这种类型的微波电子管(如玻璃灯塔管和金属陶瓷管)一般工作在微波范围内波长较长的分米波段。

另一方面,人们又采用一种新的方法。这种方法的基本概念是不去设法减短电子的渡越时间来控制电子的运动速度,从而产生高频率的振荡。这种新的工作原理就称为“速度调制”。利用这种原理,人们制成了一系列的新型微波电子管,包括速调管、磁控管和行波管,它们一直是微波管的主要型式。

随着微波技术的发展,微波管也得到了迅速的发展。微波管器件主要有电真空器件和半导体两大类。

由于半导体器件所获得的微波功率要比电真空器件差3个数量级,除了在微波测量等小功率源方面采用外,用于大功率源时,只能采用电真空器件。

能产生大功率的微波管,有磁控管,多腔速调管,微波三、四极管,正交场器件以及回旋管等许多种。

磁控管是一种微波振荡管,其主要特点是:能给出中等或大功率(几百W到一二十kW,目前商品管最高达30kW),较高的效率(约50%~80%左右),所需电压较低(约几百V到几千V),中等寿命(约几千h),结构简单,体积重量较小,价格较低;多腔速调管是另一种微波功率放大管,故需前级推动。其主要特点是:高功率(从几十千瓦到兆瓦级),中等效率(约40%~60%左右),需高电压(约几十kV到几百kV),长寿命(可达10000h),结构较复杂,体积和重量均大,价格较高。

一般中等功率微波加热装置大量使用的是磁控管,大功率的也可以采用若干磁控管并联运行,在微波加热领域中,国内外普遍采用的是连续波磁控管。故在这一章中主要对磁控管作一介绍。

1.3 连续波磁控管

磁控管是大功率微波管的主要形式之一。它是大多数雷达机中不可缺少的振荡源。在某些微波中继通信的发射机中,也采用