

微波加热技术的应用

——干燥和杀菌

王绍林 编著



机械工业出版社



a)



b)



c)



d)

图 3-17 荔枝经微波保鲜处理后，存放不同时间的色泽和霉变对比情况

a) 32°C 以下存放 8 天

b) 32°C 以下存放 23 天

c) 冷藏存放 23 天

d) 在 c) 情况后，又在常温下存放 3 天，打开密封包后的荔枝情况

前 言

微波加热干燥和杀菌是利用微波加热特点对物料干燥脱水和杀菌，与常规加热干燥和杀菌相比，具有干燥效率高、节能和杀菌温度较低、杀菌时间短等优点，成为干燥和杀菌领域中的一项新方法、新技术。书中列举众多实例阐述微波加热干燥和杀菌设备的设计依据和方法，每个实例都从一个侧面指出解决实际问题的途径。所列的实例经过精选有极强的针对性，但并不是说，实例中所列的设计方法或思路都是惟一的。仅仅是通过实例中的解决方法作一示范而已。为此，本书采用“点评”的方式，指出实例中所存在的优、缺点，目的在于使读者了解如何使自己的设计更完善；发扬原设备设计的优点，避免缺点。当然“点评”中的建议也不是最完善的，仅仅是提出看法，以期引起读者注意。如果大家都能看到这一点，那么对原设计者来说可以精益求精，而对读者来说，今后实践中可以警惕，不致于照抄照搬，重蹈覆辙。另外，如果读者通过这些实例了解微波设备设计方法的多样性，成为设计入门的一种启示，这将使作者感到十分欣慰。

本书主要介绍微波加热技术应用，故对微波加热技术原理和特点，以及微波设备设计知识的阐述尽量简明扼要，摒弃了冗长的数字公式和推导。如果读者对某些结论性的物理知识和定律需作深入掌握的话，可参阅有关书籍（见书后的参考文献）。

本书引用资料除署名的外，均采用微波学术会议有关论文，在此仅向论文作者表示衷心感谢，全书由北京山久科贸公司鼎力协助打印成稿，特在此一并感谢，并致以崇高敬礼。书中有些实例及分析，也是作者多年科研成果和经验总结，首次披露于此。

本书内容共分两大部分，即微波加热干燥脱水和微波杀菌消毒。由于本书撰写于2003年春季全国非典时期，在此期间，人们对消毒杀

IV

菌产生强烈要求，并且采取众多消毒方法和杀菌剂，期望自己能处于一个较安全的环境中。值此背景，书中微波杀菌技术章节中增加微波对医用物品和污水杀菌消毒的实例研究资料，向读者介绍一种不同于化学消毒剂，更为环保的杀菌消毒方法。由于篇幅所限，有关微波加热技术在化学催化反应，萃取等方面的应用内容不再编入，将另辟专著论述。

由于编写时间紧迫和作者能力所限，书中不妥之处在所难免，敬请读者提出并斧正。

作者

2003 年 6 月于中国农业大学

目 录

前言

第一章 微波加热物理特性和微波加热设备设计入门 1

第一节 微波对物质的相互作用 1

一、物质对微波的吸收和反射 1

二、微波对物料的非热效应 3

三、微波对化学过程的激励效应 3

四、物料吸收微波能转换成热量的瞬时性 4

第二节 微波器件及其特性 5

一、波导器件 5

二、磁控管 8

第三节 箱型微波加热器设计 9

一、箱型微波加热器工作特性以及与物料间匹配问题 9

二、箱型谐振腔设计入门 13

三、炉门结构设计 20

四、连续波磁控管电源工作原理和微机控制问题 23

第四节 微波加热设备总体设计的若干问题 30

一、建立微波传热学概念的必要性 31

二、微波加热设备智能化问题 33

第五节 抑制微波泄漏的技术措施 35

一、抑制微波泄漏的重要性 35

二、抑制微波泄漏的基本原理和方式 37

三、抑制微波泄漏的几种机械结构及其电原理 39

第二章 微波干燥脱水技术 41

第一节 微波干燥特点和经济性 41

一、微波干燥特点和机理分析 41

二、微波加热法的经济分析 44

第二节 高含水量物料的微波干燥	46
一、高含水量物料的微波干燥	47
二、高含水量物料微波干燥特性分析	47
三、“缓苏”与微波加热	49
四、点评	50
第三节 微波真空干燥和微波冷冻干燥	51
一、微波真空干燥技术	51
二、微波冷冻干燥技术	57
第四节 低含水率物料微波干燥	60
一、玻璃纤维干燥要求	61
二、设备结构及其设计要点	61
第五节 陶瓷的微波干燥	65
一、陶瓷管坯体微波干燥定形设备	66
二、陶瓷坯体微波干燥脱模技术	67
第六节 化工产品的微波干燥	68
一、“品紫”的微波干燥	69
二、氯化钾和硫酸铜等化工产品的干燥	71
第七节 橡胶微波硫化及再生橡胶微波脱硫	73
一、橡胶微波硫化	73
二、再生橡胶微波脱硫	75
三、橡胶微波硫化生产线实例介绍	76
第八节 竹、木、农副产品和中药材等制品微波干燥	77
一、竹筷的微波干燥和杀虫设备设计	77
二、木材微波干燥	78
三、微波复烤烟叶技术	79
四、花生仁微波加热脱皮工艺	80
五、中药材及其制品的微波干燥	81
六、杭白菊微波—热风组合干燥	84
七、微波解冻回温技术	85
 第三章 微波杀菌技术	 90
第一节 微波杀菌机理及设备设计	90
一、微波杀菌机理分析	90
二、工业微波杀菌设备设计	96
第二节 米、面制品微波杀菌保鲜	99
一、乳儿糕微波烘烤和杀菌	100

二、带馅面条微波杀菌保鲜	102
三、铜锣烧、月饼微波杀菌保鲜	105
第三节 海蜇、低盐榨菜和禽肉等方便食品微波杀菌	106
一、即食海蜇微波杀菌	107
二、低盐榨菜微波杀菌保鲜	108
三、方便面汤料粉和火锅调料微波杀菌保鲜	110
四、禽肉制品微波杀菌保鲜	111
第四节 豆制品和豆奶、牛奶微波杀菌保鲜	114
一、一种能在常温下保鲜 15 天以上的内酯豆腐微波保鲜专利技术	114
二、豆制品微波杀菌保鲜问题	116
三、豆奶、牛奶微波杀菌保鲜	118
四、点评	120
第五节 荔枝微波杀菌保鲜技术	121
一、荔枝微波保鲜机理	121
二、荔枝微波保鲜实验效果	122
三、荔枝微波保鲜技术核心及其优点	123
第六节 医用衣物、被褥和医疗手术器械的微波杀菌	123
一、微波对医院用衣物、被褥灭菌效果	124
二、设计专用医用微波杀菌设备	125
三、微波杀菌增效问题的研究	127
参考文献	128

第一章 微波加热物理特性和微波加热设备设计入门

能量可以储存在物质中，在条件合适时，会向外释放其所储存的能量，如煤的燃烧，核的裂变或聚变等。至于能量的传递也有多种形式，其中之一为依赖波的波动。所谓波，可以是声波（包括次声波等极低频率的波）、无线电波、甚至频率更高的电磁波，例如，微波、红外波、可见光波、紫外光波和 X 射线等。

能量是怎样依赖于波的波动进行传递的；波动时又遵守怎么样的物理规律，可参阅物理学有关内容，这里不再赘述。本书作为微波加热应用技术的主题，将针对“微波”——一种频率范围在 300MHz 至 300GHz 的电磁波的特性作详细阐述，从而了解和掌握其物理特性，并加以利用之。

第一节 微波对物质的相互作用

一、物质对微波的吸收和反射

（一）体热源概念

物质对电磁波有反射和吸收现象，这是自然界中的基本规律。微波作为电磁波，它受物质的反射和吸收也不例外，但是，物质反射和吸收微波的情况与对其他电磁波有差别：以红外线与微波二种电磁波相比，前者的波长短，为微米（ μm ）数量级，而后者的波长可达米（m）的数量级。两者被物质的吸收深度是不同的。按物理学规律指出，红外线被物质吸收，其深入的深度仅局限于物体表面层，而微波被物质吸收的深度将深得多，可达到几厘米左右。

从加热的角度来说，当物质吸收微波意味着微波能量传递给物质并转变为热能。因此，能深入物体的深度多少，就表示物体被加热的范围所在。所以，红外线加热与微波加热的范围是大不相同的，两者在加热方式有着本质的差别，微波加热表现为物体深层范围的加热，物体出现体热源（范围）状况，而红外加热仅是对物体表层加热，若欲使物体整体加热，则必须通过积累在物体表面的热量，依靠热传导方式逐次地向物体内层传递，最终才加热整个物体。这种依靠物体表面热传导加热方式，称为常规加热方式，而微波加热，它不依靠表面热传导方式，开创了一种新的加热方式，就可以避免常规加热方式存在的一些问题，诸如需要预热、加热时间长和加热干燥速率慢等弊病。

（二）不同物质吸收微波有差异

不同的物质对微波的吸收是不同的。金属不吸收微波，严格的说，微波遇到金属只能作浅表层的透射，大部分微波将反射回去，表现为反射微波，其反射规律如同光波在镜面上得到反射一样。介质（即俗称非金属的普通物质）对微波能部分或完全吸收。例如：聚四氟乙烯、普通的聚乙烯塑料、玻璃或陶瓷等物质少量吸收微波；食品原料及含水物料，或者水，则较强烈的吸收微波。物料的介电特性（指介电常数等）决定了它们对微波吸收强弱的程度。

必须指出，纵然是少量吸收微波的物料，在微波加热时也会表现出快速升温结果。因为这里所说的“少量吸收微波”是指“每一次”微波作用于物体的结果。实际上，物料处在微波加热作用区域内，（该区域受微波加热箱体所框定），在微波加热过程中并不是仅受到微波的一次作用，而是连续不断地受到微波的多次作用，其中包括透射物料后未被物料（指较薄的物料，或吸收量少的物料）全部吸收的微波，经箱体金属壁反射后又途径物料的部分。因此，可以说物料是多次吸收或者说是**在一段时间内（加热时间内）累积吸收，最终将物料剧烈加热的。

由此可见，上述所谓物料吸收微波多少的差别，是指同一时间内物料之间吸收量的差异，并不代表总加热量的差别，或者说，由于微波传递速度是如此之快（与光速相等）以致只要不同物料之间吸收能力差别不是极悬殊的话，达到总加热效果的所需加热时间差别可以略去不计，而且总加热时间与常规加热方式相比要短得多。

如上所述，不同的物料虽然相互之间有吸收微波性能上的差别，但它们在微波加热时的加热效果，其中包括物料温升速度、加热力度和总加热时间长短都与常规的热传导加热方法有极大不同，于是需要抛弃常规加热工艺，制定与微波加热特点相适应的微波加热工艺。为改变人们长期习惯于常规加热概念，避免常规加热模式对微波加热概念的干扰，特列表 1-1，以简明形式归纳制定微波加热工艺的一些原则。

表 1-1 红外线与微波加热效果及微波加热工艺制订原则

物 料 状 况	红 外 加 热	微 波 加 热	微波加热工艺原则
焦糊开始位置	表层	里层	不能从物料表面观察火候
预热时间长短	较长 (min)	短 (s)	几乎不需要预热时间
加热惯性状态	有	无	加热瞬时
温升状态	表层升温在先	里层升温高	表层不易结硬壳
温度梯度与方向	大，其方向由物料里层指向表层	较小，其方向由物料表层指向里层	均温时间短
干燥层扩展方向	由表及里	里层向表层	对低含水率物料干燥效率高
热量传递方式	表面热传导	透射物料中转换	整体加热
热量吸收与介质特性关系	有关	密切相关	因物而异
加热干燥与杀菌工序	分开	合一	省去杀菌工序
杀菌力度	热力杀菌	热力与非热力杀菌综合	杀菌力度大

表 1-2 空气-物料界面微波透射比值与频率关系

频率/MHz	透 射 比 值	备 注
100	0.224	
300	0.319	
750	0.393	
915	0.404	工业微波加热频段
2 450	0.431	
5 000	0.439	
10 000	0.448	

二、微波对物料的非热效应

微波对物料加热时，将同时出现热效应和非热效应（或称生物效应）。微波加热的热效应，指物料吸收微波能量转换成热量后，物料升温、物料内含的水分蒸发、干燥和脱水；若适当控制脱水速率还可造成物料的膨化，使其结构疏松。研究发现，微波加热物料时，对于生物体还存在有非热效应现象。它能使处在微波电磁场环境中的生物体出现所谓应答性反应。即以最小的微波量造成生物体生存环境条件以及自身生理活动的改变。例如，破坏生物体细胞膜内外的电位平衡，阻断细胞膜与外界交换物质的离子通道的通畅性等。这些改变对生物体作用是致命的，它能在极短时间内让生物体（例如细菌）死亡。其致死成因为微波电磁场的热力与电磁力的共同作用结果，其中以电磁力作用为主。（详细阐述参阅微波杀菌部分章节）

由于电磁力作用的存在，以及它对生物体的强烈影响，这是常规加热环境下所没有的因素，再加上微波加热存在体热源状态，不需要预热，又能在短时间内使物料整体升温等因素，致使微波杀菌与常规加热的其他杀菌法相比，微波杀菌效果极为显著。对于食品杀菌来说，能在较低的杀菌温度下，短时间内杀灭玷污在食品上的细菌，例如，大肠杆菌杀灭时间约 30 s（理论值）。

杀菌温度低、杀菌时间短，就能最大限度保持食品的口感、风味和营养成分。其次，微波杀菌属物理性质的杀菌，对食品本身不存在放射性物质的残留和污染，也没有化学防腐剂成分，不必考虑食品因添加化学防腐剂，在食用后积累而对人体的潜在危害。

三、微波对化学过程的激励效应

近期研究表明，微波电磁场可以直接作用于化学体系，从而催化加速或改变各类化学反应过程。例如，在微波电磁场环境下，通过微波功率的诱导，使气体转变为等离子体（作为光源）去检测某些常规方法难以测定的非金属元素。或者，用来在一些基本材料上增强化学相沉积。其中最成功的例子是以 CH_4 和 H_2 为原料气，在钼和硅基片上沉积出厚度为 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的金刚石膜（1981 年）。又例如，用微波辐射 4-氰基苯氧离子与氰苯的 SN_2 亲核取代反应，使其反应速率提高 1 240 倍，并且产率也有不同程度的提高（1986 年）。

微波对化学反应的催化,使一些在通常条件下不易进行的反应迅速得到完成的事例受到了学者的高度重视。人们不仅做出更多的应用,也在研究它的作用机理。发现微波对化学反应的影响,除了对反应物加热的热效应外,还存在着微波电磁场对参与反应分子间行为的非热效应的直接作用。可以认为是微波电磁场对物质的又一方面的直接作用,即微波电磁场可以对生物体,也可以对组成物质的分子结构产生组合的影响。国外,有在橄榄油制备肥皂过程中应用微波方法加速酯的皂化,取得明显效果的实例。同样,笔者多次实验结果表明,用微波方法辐照新鲜的人参和西洋参,分析样品中皂甙含量(包括总皂甙和各种分皂甙成分含量)均有10%~20%左右的提高(1993年)。同样的方法运用于葛根内提取药效成分——异黄酮的处理中,也发现异黄酮产率的提高。有用药效成分产率的提高,意味着工业生产中可节省药原料,提高原料利用率,这对当前药源材料日益枯竭状况改善有一定辅助作用,对于企业来说,付出同样的原料成本,却可获取更多的利润。

四、物料吸收微波能转换成热量的瞬时性

按微波能量在物料内转换为热能(热量)的机理,基于组成物料的极性分子随微波电磁场交变的方向变更而交变(来回振动)转向,众多极性分子相互间摩擦转成热能(即将微波能量转为热能形式)加热了物料。由于微波电磁场方向变化的次数就是微波频率。国家准许使用的工业微波频率为915MHz和2450MHz,其频率相当高,微波能量转换热能可以说是瞬间的。并且如前述的那样,微波透入物料内转换,其分布性是形成对物料整体瞬时加热的特征。这是其一。

其二,磁控管是产生微波的重要部件。它工作时源源不断地输向微波加热工作区域(该区域由金属腔体(箱体)限制着的),通过物料吸收转化为热能,使物料升温。如前述,微波能量几乎全部由物料所吸收,而金属箱体仅起到反射微波的作用,不吸收微波的。实践中可见,金属箱体仅有微热,其原因有二:

(1) 随加热过程的进行,被加热物料包括蒸发水分在箱壁上凝聚向其周围环境的散热。

(2) 为建立持续工作的微波电磁场所必须的、在金属箱上流动的面电流(一种高频电流)所产生的微量热量。它们所消耗的能量,与物料吸收热量相比,极其微量,甚至可以不计。

综合上述分析可知,微波加热具有节能特点,是其他常规加热方式所无法比拟的:

(1) 物料吸收微波能量的转换率高,达95%以上。一般而言,热能转换利用率;蒸汽加热为15%以上,红外加热为50%。

(2) 金属与介质(物料)对微波吸收特性的悬殊差别。

从磁控管工作过程中我们还能看到微波加热的操作具有易控特点。

磁控管及其系统，在通电后能连续不断的产生微波，对于微波输出功率小于 1kW 的磁控管，当接通电路约 2s 后即可达到正常工作状态，即产生微波。当断开电路后，将即刻停止微波产生。微波的产生与否，就在电路通断瞬间。同理，对于微波输出功率大于 1kW 的磁控管，虽然接通电源后必须进行一系列点燃加热灯丝如建立和调整磁场电流等能使磁控管达到正常工作状态的操作，（这些操作可视为使磁控管正常工作的预备操作），此时，当加上工作电压后也是瞬间就产生微波。因此由磁控管工作过程来看，无论哪种输出功率的磁控管产生微波均是受控于电路的接通与否，并且都瞬间完成的。这种事先不需要预加热，仅由操纵微波产生的瞬时操作，特别适合于自动控制操作需求。再加上物料吸收微波能量即刻转换为热量，当不需要加热物料时，可立即断开电路停止微波的产生，即切断消除加热源头，使物料得不到热源热量的补给，物料就会停止继续升温，这种现象，专业术语称作无“热惯性”。产生微波的瞬时性和无热惯性，构成自动控制要求必备要素的前提，使得微波加热方法及微波加热设备能很快地融入工业生产流水线应用之中。

第二节 微波器件及其特性

微波的产生、传输需要专用的微波元器件，了解它们的结构和工作原理，将会有助于我们正确的选用。

一、波导器件

波导是微波频段传输电磁波能量的主要元器件。依靠各种截面形状的波导，可完成微波传送，相互连接耦合，以及改变传送方向等传输任务。从能量损耗角度来说，电磁场被限制在波导的空间内，因此，波导传输微波能量就不存在辐射损耗，仅在波导壁上会有面电流的少量热损耗。电磁波有各种频率的模式，称为横电磁波（TEM 波）以及横电波（TE 波）和横磁波（TM 波）。一般波导中不能传播 TEM 波。从传输电磁波模式来说，波导尺寸确定后只有频率高于最低截止频率的模式才能得到传输通过。一般情况，给定的波导中，有可能存在不同频率的几种模式的传播，但实际上是这些高次模式将很快的被衰减，只剩下主模在传输，因此，特别需要选择合适的波导尺寸。

波导为金属材质制成的各种截面的（矩形、圆形）空心金属管件。以矩形波导为例，从其形状和功能上区分，可有：

（一）矩形直波导

矩形直波导是指矩形截面的长直空心金属管。输入的微波以一定的人射角 θ 入射，在波导壁面上反射，以合成波形式沿波导轴向（ z 方向）行进。如图 1-1 所示。由电磁波传输特性知，该波导中的合成波具有 TE 型和 TM 型波性质，

其模式为 TE_{mn} 和 TM_{mn} 型。其中下标 m 、 n ，表示在 x 和 y 方向上出现半波的个数。

(二) 矩形曲波导、弯波导和扭波导

如果欲改变波导中电磁波传播方向，则需要依靠波导的弯曲或扭转。由电磁波传输特性知，当波导弯曲或扭转时，因电传输阻抗的不连续性将引起电磁波的反射，即所谓波导系统的失配。

为尽量减少波导系统的失配程度将对波导设计提出如下要求：

1. 曲波导

曲波导有单角连接折转和双角连接折转两种结构，可作波导的电场方向和磁场方向的折转。作电场 E 面折转和磁场 H 面折转的区别，仅仅反映在波导边宽度的不同，如图 1-2a, b 所示。

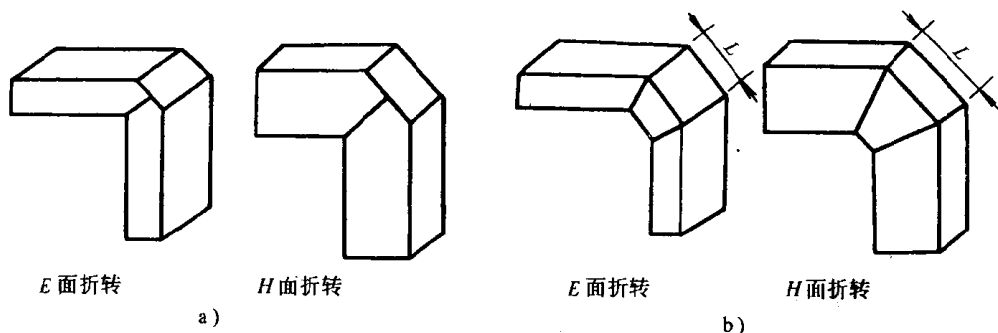


图 1-2 曲波导

a) E 面和 H 面的单角折转 b) E 面和 H 面的双角折转

双角折转波导在两个方向波导端面之间需有一中间长度为 L 的波导过渡。如图 1-2b 所示。而且 L 应等于 $\frac{1}{4}$ 波导波长的奇数倍，其作用是使两波导连接端口的反射波完全抵消。即

$$L = (2n + 1) \lambda_g / 4 \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (1-1)$$

式中 λ_g 为波导波长

2. 弯波导

弯波导是由波导连续弯曲而得，它能连续改变波在波导中传播方向，其弯曲的方向决定于波导两端的端面之间的夹角 θ 。如果 $\theta = \pi/2$ ，则表示该波导出入口的微波传输方向已转过 $\pi/2$ 。如图 1-3 所示，弯波导也有 E 面弯曲和 H 面弯曲两种。有学者认为，波导的 E 面弯曲取 $R = 1.5b$ ， H 面弯曲取 $R = 1.5a$ ，这里的 a 和 b 分别为弯波导的宽边和窄边的边长， R 为弯曲半径。

3. 扭波导

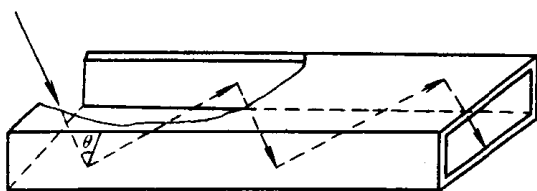


图 1-1 波导中 z 方向传播电磁波情况示意图

如果将波导端面以其中轴线 (z 方向) 扭转, 则构成扭波导。扭转结果使波导出入口端面的宽边和窄边位置绕中轴线转过 θ 角。其作用是使原本在波导入口端面的电磁场方向 (E 或 H) 在波导出口端面转过 θ 角。

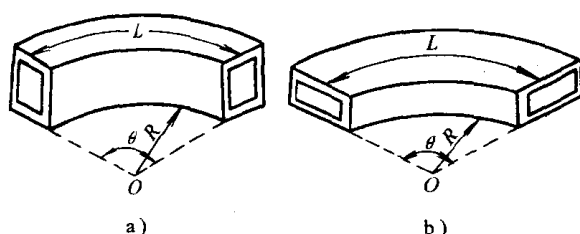


图 1-3 弯波导

a) E 面弯曲 b) H 面弯曲

从波导扭转的机械结构来分, 有波导均匀连续扭转和波导阶梯式扭转两种。若从单位扭转角的长度来说, 以阶梯式波导的为小。阶梯扭转波导每节的长度均应取四分之一波导波长, 每节扭转 θ 角, 总扭转角的大小由多节扭转角叠加而得。如图 1-4 所示, 其为取得 90° 的扭转角, 共有三节波导阶梯连接构成。

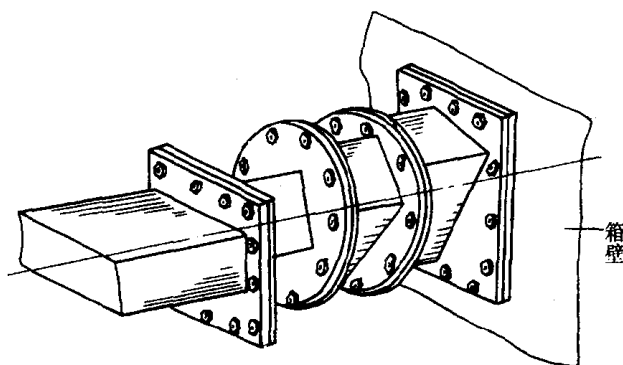


图 1-4 阶梯波导连接示意图

(三) 环行器

环行器是一种非可逆的微波传输器件。它由多个臂 (每臂相当于一个微波支路) 所组成。图 1-5 所示为三臂微波环行器。其功能为由①臂输入微波能量, 则在②臂有微波能量输出。理想的情况下③臂应没有微波输出。如果②臂作微波能量输入端, 则③臂有微波能量输出, 而①臂无输出。依此循环置换。图中箭头指示微波环行方向。该环行方向可以是逆时针方向环行, 也可以顺时针方向环行, 视环行器中恒定磁场 H_0 大小而定, 或者说是由环行器中铁氧体的固有谐振频率 ω_0 。与工作频率 ω 比值大小而定。即 $\omega_0/\omega < 1$ 为逆时针方向环行。若 $\omega_0/\omega > 1$ 则作顺时针方向环行。

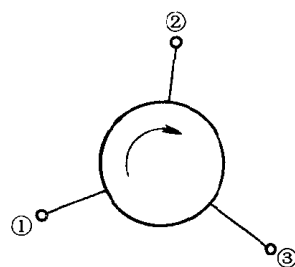


图 1-5 环行器工作原理

环行器的单向通行特性依赖于环行器中铁氧材料的法拉第旋转效应。铁氧体是一种灰褐式的介质磁性材料, 脆而坚硬, 有二价金属代替二价铁的粉末烧结而成。分子式为 MOFe_2O_3 , 分子式中符号 M 代表金属, 微波频段中常用锰镁。铁

氧体材料有这样特性：当有外加直流磁场 H_0 时，它变得各向异性，并能引起电磁场传播中磁场极化（面）方向，以波传播方向为轴不断的旋转现象，即所谓法拉第旋转效应。其旋转角 θ 称为法拉第旋转角，旋转角大小与波导尺寸、铁氧体半径、微波频率和极化强度有关。环行器在工业微波设备中常用来连接微波源和谐振腔（腔体内为微波加热工作区域）。当谐振腔内因被加热物料不能全部吸收所输入的微波能量时，该部分多余能量将通过环行器进入终端负载。对照图 1-5 所示，即进入③臂支路，从而避免多余的微波能量直接返回（进入①臂支路）微波源而损坏磁控管。

二、磁控管

磁控管是完成电能转换为微波能作输出微波的器件。工作在微波频率的磁控管有线性束管（O 形管，源于 Original 词）和交叉场型管（M 形管）等多种。交叉场是指直流电场与直流磁场彼此处于垂直状态。在这种交叉电场和磁场作用下，磁控管阴极发射的电子受电场加速而速度增高，并受正交磁场的洛仑磁力作用，结果其运动路径弯曲。同时在阳极交变电压作用下获得足够能量（速度）最终到达阳极。此过程中电子将所获得的能量全部给于并建立高频振荡。如果该过程能够持续不断地重复进行下去，则该高频场的振荡得以维持，并能持续不断地向外发射微波。

这种磁控管称为连续波磁控管，因其所处工作状态而得名，属于 M 形管的一种。从电原理上来说，它是一个特殊的两极管，其基本结构如图 1-6 所示。它有一个圆筒形能提供发射电子的阴极，环绕阴极的是一个由多个谐振腔（通常为偶数个）所组成的阳极块，它们共同组成谐振系统。

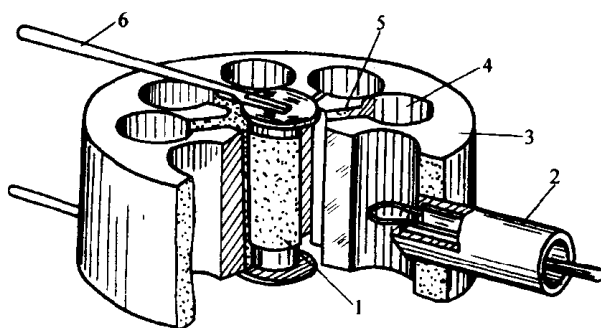


图 1-6 连续波磁控管内部结构剖析

1—阴极 2—能量输出器 3—阳极块
4—谐振腔孔 5—谐振腔隙 6—引线

这些谐振腔起着高频回路的作用，因此决定了磁控管的振荡工作频率，同时它也作为收集已交出运动动能的电子的电极，故该谐振电极系统统称为阳极。该谐振电极中多个谐振腔体间互相紧靠。阴极与谐振阳极系统之间有缝隙，并加有

直流电压，因此，缝隙间的电场强度 E 的方向是径向的。在管轴方向上加有垂直于 E 方向的直流稳恒磁场 B 。

这种多谐振腔磁控管的特点是输出微波功率大。电能转换为微波能的转换效率高。常用于雷达发射机或微波加热应用领域中作为微波源的主要部件。就目前技术水平能制造的连续波磁控管，其输出功率最高可达 $100 \sim 300\text{kW}$ 。一般为 $20 \sim 25\text{kW}$ （标称），转换效率约为 0.7 。由此可见，磁控管中电子所转换传递的能量，大部分作为微波能向外输出，另一小部分成为磁控管本身的热损耗。为此，大功率磁控管需用冷却水作管内循环来解决自身的散热问题。

第三节 箱型微波加热器设计

微波加热器仅是指微波电磁场与被加热物料（介质）相互作用空间的装置，也即前述的物料吸收微波转为热能而得到加热的微波加热工作区域。它并不包括微波功率源、功率馈送和控制等部分。微波加热器从适用加工物料对象形状和要求，大致可分为箱型、平板波导型、辐射型和表面波导型等，选用时由被加热物料的形状尺寸、介质损耗、物料受热限度以及加工量大小等因素而定。

家庭烹调用的微波加热器为批量式箱型的，其微波输出功率一般小于 1kW 左右，俗称家用微波炉。连续输送式箱型微波加热器适用于工业流水生产线生产用，输出功率较大，达几十千瓦、上百千瓦之多。目前，一般民用的单个磁控管输出功率为 $5 \sim 30\text{kW}$ ，因此，如设备需要较大的输出功率，则常用多个磁控管组合在单个箱体上，再将多个箱体串接起来成为大输出功率隧道式（多个）箱型微波加热器，设备总长达几米或几十米以上。

由电磁场理论知，在腔体内的微波能量分布是按电磁场型分布的，因此其功率密度在上述腔体“空间”的分布是不均匀的。作为微波加热器设计者，就需要熟悉和掌握微波电磁场理论知识，物料介质性质和加热的要求，完善设计思想和技术措施达到应用微波加热器时加热更均匀，操作更简便、安全，加工物品质量更高的要求。本节将以多模箱型微波加热器等实例，阐述它们的基本结构、设计要求及其工作特性。

一、箱型微波加热器工作特性以及与物料间匹配问题

箱型微波加热器，从电磁场性质来看，实际上是一个两端短路的矩形波导所组成的谐振腔（俗称箱体）。它具有分布参数的 LC 回路电特性，对于一个箱型形状的空腔的谐振腔，可以用电磁场方程和它的边界条件求解得知：①腔体内存在无限多不同振荡模式的自由振荡。不同的振荡模式对应不同的谐振频率。这表明空腔谐振腔内电磁场存在多谐性。说通俗一点，即空腔谐振腔内有多种频率所对应的电磁场形式的分布。这种谐振腔又称多谐腔。②谐振腔的单模电场和磁场都是周

期性函数分布, 两者的相位差 $\pi/2$ 。即电场最大时, 磁场为零; 磁场最大时, 电场为零, 两者的最大储能相等。③当腔内有介质损耗 (包括腔体壁导体损耗和被加热物料的介质损耗), 即耗能吸热时, 腔内谐振频率密度比空载 (腔内无被加热物料) 时增加, 谐振频谱线展宽, 损耗越大, 谐振频谱范围越宽。出现所谓负载效应的现象。

1. 谐振腔工作特性的参数

谐振腔工作特性可由三个基本参数: 谐振波长 λ_0 (或谐振频率 f_0)、品质因素 Q_0 和等效电导 G_0 等表示。

(1) 谐振波长 λ_0 谐振波长能说明微波谐振腔内波的振荡规律, 它的数值可以定量地表示微波谐振腔内振荡存在的条件。由波导中电磁波传输理论指出, 由于波导沿 z 方向, 即其长度方向无边界限制, 则电磁波沿 z 轴方向传输时, 其相位因数 β 的值是连续的。它表明电磁波沿 z 方向不具有谐振性。现在为箱型谐振腔情况——沿 z 方向有边界限制, 因此, 波沿 z 方向呈驻波分布。波导中波长 λ_g 与谐振腔 z 方向长度 l 有如下函数关系:

$$l = p\lambda_g/2 \quad (p=1, 2, 3\cdots) \quad (1-2)$$

$$\beta = p\pi/l \quad (1-3)$$

经计算知, 波导式谐振腔谐振波长 λ_0 表示式为

$$\lambda_0 = 1/\sqrt{(1/\lambda_c)^2 + (1/\lambda_g)^2} = 1/\sqrt{(1/\lambda_c)^2 + (p/2l)^2} \quad (1-4)$$

式中 λ_c ——截止波长。它表示在波导中凡是小于波导截止波长的波, 不能在波导中传输。以频率来说, 则是大于截止频率 f_c 的波, 不能在波导中传输。截止波长计算式表示为

$$\lambda_c = 2/\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2} \quad (1-5)$$

式中 a, b ——波导宽边和窄边的边长;

m, n ——波导内半驻波在宽边和窄边上的个数。

例如, 波导中对应的频率最低的场型 TE_{10} 模, (其中 $m=1, n=0$) 也称为主模或基模, 它的截止波长最长, 为 $2a$ 。主模的频率最低, 因为波导中传输的电磁波, 只有频率大于 f_c 的波才能传播, 故波导具有“高通滤波器”的性质。

由式 (1-4) 可见, 波导空谐振腔的谐振波长 λ_0 是一个与谐振腔体的几何尺寸和工作模式之间具有决定性影响的物理参数。

(2) 品质因数 Q_0 品质因数 Q_0 是表明腔体回路中的损耗及其储能之间性能优劣的一个物理量, 假设谐振腔体内不存在辐射损耗, 而介质又是无耗的情况下, 可定义为

$$Q_0 = 2\pi W/W_T \quad \text{或} \quad Q_0 = \omega_0 W/P_L \quad (1-6)$$

式中 W ——谐振腔总储能 (电能或磁能);