

微波食品工程

(修订版)

王绍林 编著

北京农业工程大学

再版说明

本教材系“微波加热技术”课程教学讲义,着重介绍微波能在食品加工中应用。在多年教学基础上,结合作者科研成果,这次再版时对内容作出较大修改,主要体现在:

1. 突出微波电磁特性和传输特性,以及它与介质的相关性,具体介绍微波加热器及其系统的电气设计理论、方法和实例,使理论与实际相结合,学以致用。

2. 从食品加工工艺和机械装备密切结合观点出发、通过国内外微波能在食品加工中应用实例,使读者了解微波加工工艺和设备与常规的食品加工工艺和设备之间的差别和特点,使读者能熟悉微波能在食品加工中的工艺和装备技术体系。

3. 从国内外微波能在食品加工中应用实例介绍,展望微波能在食品加工中广泛的应用范围及其潜在的应用前景。

本教材教学学时为 60 学时,其主要内容共分为八章。第一章至第三章论述微波电磁场理论,微波元器件的传输特性,以及介质在微波场中的物理特性和影响。第四章以大量篇幅阐述微波加热器及其系统设计的理论依据和方法,实例。第五章至第八章,着重从工艺角度论述食品加工中微波能在预烹调,烘烤,煮白、杀虫、灭霉和钝化酶活力,解冻,杀菌等方面的工艺和有关微波设备使用。

本教材力求概念、原理与实践相结合,阐述突出重点,简明扼要、避免数学公式的繁琐推导过程。对于教材中所使用的公式和结论可参考电磁场和微波技术等有关教材。

微波能在食品加工中应用,是微波能应用领域的一个方面,它涉及电子工程、食品工程和物理学等学科知识,是近年发展起来的上述多学科知识的结晶。本教材适用于电子工程、食品工程系本科生和研究生使用,以及从事食品、电子行业的工程技术人员参考。

本教材讲授和修改曾得到学校基础科学部、食品工程系、电子工程系以及研究生部的领导和同志们的大力支持,并提出宝贵的修改意见,值此再版之际特表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指教。

编者

1993 年 11 月

目 录

第一章 微波及其性质	(1)
第一节 微波基本特性	(1)
一、波动特性	(1)
二、高频特性	(1)
三、热特性	(2)
四、非热特性——生物效应	(3)
第二节 微波传输基本特性	(5)
一、矩形波导中电磁场分布结构	(5)
二、波导管壁电流形式	(8)
三、波导传输的基本参数	(12)
四、圆波导中的波型及其场分量	(14)
第三节 微波器件及其特性	(15)
一、波导器件	(15)
二、波导中能量问题	(17)
三、环行器	(20)
第四节 磁控管	(21)
一、基本结构	(21)
二、工作原理简介	(21)
第二章 微波加热的物理基础	(25)
第一节 介质内部的电磁场及其能量	(25)
一、电磁波能流密度	(25)
二、物料在微波场中吸收的功率	(26)
三、物料内场强的估算	(26)
四、微波透入物料后的衰减状态	(28)
第二节 湿物料的热力学特性	(30)
一、不可逆过程热力学方法	(30)
二、微波干燥机理分析	(31)
三、微波场中热传导和热平衡问题	(34)
四、微波输入功率的估算	(36)
第三章 食品的介电特性	(37)
第一节 介质损耗机理	(37)
一、德拜理论	(37)
二、介质损耗的定量描述	(41)
三、复合介质损耗	(43)

第二节 影响物料介质特性的参数	(44)
一、介电常数 ϵ' 与湿度的关系	(44)
二、介电常数 ϵ'' 与温度的关系	(44)
第四章 微波加热器设计	(48)
第一节 箱型微波加热器	(48)
一、微波谐振腔基本特性参数	(48)
二、箱型谐振腔设计步骤和方法	(52)
三、加热均匀性问题	(59)
四、功率密度的选择	(62)
五、炉门结构设计	(63)
第二节 隧道式箱型微波加热器	(66)
一、基本结构	(67)
二、漏能抑制器	(68)
三、观察窗孔和排湿孔的设计	(74)
四、连续波磁控管电源	(75)
五、大功率微波电源微机控制问题	(78)
六、隧道式箱型微波加热器装置使用效果实例	(81)
第三节 圆柱波导加热器	(82)
一、圆柱波导多模腔	(82)
二、耦合口位置选择	(83)
三、微波真空干燥装置	(83)
第四节 管道式液料微波加热装置	(86)
一、装置结构	(86)
二、工作原理	(88)
第五章 微波加热干燥	(89)
第一节 微波加热干燥	(91)
一、微波干燥应用场合与经济性分析	(91)
二、土豆片的最终干燥	(92)
三、通心面的微波干燥	(93)
第二节 微波烘烤	(95)
一、面包烘烤	(95)
二、面包圈的微波工艺	(96)
三、无壳瓜子焙炒	(96)
第三节 微波膨化	(97)
一、淀粉料膨化干燥制品	(98)
二、蛋白原料膨化干燥制品	(101)

三、苹果片的膨化	(102)
第四节 高含水量物料的干燥	(103)
一、高含水量物料微波干燥特性分析	(103)
二、高含水量物料干燥工艺设计和设备	(104)
第五节 蔬菜水果的微波真空干燥	(105)
一、蔬菜粉制作工艺	(105)
二、蔬菜粉微波真空干燥装置结构	(105)
三、脱水葡萄微波真空干燥工艺	(106)
第六节 微波冷冻干燥前景	(107)
一、微波冷冻干燥原理	(107)
二、微波冷冻干燥前景	(108)
第六章、微波烹调	(109)
第一节 肉和肉制品的微波烹调	(109)
一、咸肉片预烹调工艺和设备	(109)
二、咸肉片预烹调的经济性	(109)
第二节 鸡肉的微波烹调工艺和设备	(110)
一、鸡肉预烹调生产线	(110)
二、鸡肉预烹调工艺	(110)
第三节 肉馅饼的工业化生产	(110)
一、肉馅饼微波烹调	(112)
二、一些具有前景的产品生产工艺介绍	(112)
第四节 微波灭酶	(113)
一、微波煮白	(113)
二、人参灭酶效果	(114)
第五节 白酒的快速醇化	(115)
一、微波催熟白酒醇化机理	(115)
二、微波催熟白酒醇化工艺参数和设备	(115)
第七章 微波解冻	(118)
第一节 物料解冻过程及其存在问题	(118)
一、解冻温度曲线	(118)
二、食品解冻温升的影响	(119)
三、解冻终温的最佳选择	(119)
第二节 微波回温特点和问题	(119)
一、微波回温特点	(119)
二、微波回温供能速率的设计要求	(120)
三、微波回温的技术要求	(121)

第三节 工业微波解冻回温装置.....	(123)
一、国外微波解冻回温装置特点	(123)
二、国内微波解冻回温装置应用情况	(123)
三、微波回温装置的微波泄漏问题	(124)
四、微波回温技术的经济性分析	(125)
五、微波回温装置的应用前景	(126)
第八章 微波灭菌.....	(128)
第一节 微波灭菌机理和方法的研究.....	(128)
一、微波灭菌机理探讨	(128)
二、传统加热灭菌工艺中初温等影响的实质	(132)
三、微波灭菌工艺的研究	(132)
四、能恒温状态测定残菌率的装置	(134)
第二节 工业微波灭菌装置.....	(136)
一、液态物料的工业微波灭菌装置	(137)
二、固态物料工业微波灭菌装置	(139)
第三节、微波灭菌和食品保鲜	(139)
一、酱油微波灭菌效果	(140)
二、微波辐照蛋糕、月饼和切片面包防霉保鲜效果.....	(140)
三、国内食品加工中微波灭菌应用问题综述	(141)
附 录.....	(144)
参考文献.....	(150)

第一章 微波及其性质

第一节 微波基本特性

微波是一种频率由 300M 至 300GHZ 的电磁波,其对应的波长为毫米至分米 ($10^{-3} \sim 10^{-1}$) 的数量级,比光波、红外波波长长,属高频波段的电磁波。它们又可细分为如下波段:

分米波, UHF, 超高频 300~3000MHZ

厘米波, SHF, 特高频 3~30 GHZ

毫米波, EHF, 极高频 30~300 GHZ

以及亚毫米波、超极高频、300~3000GHZ 等。

对工业微波加热设备常用的固定专用频率有二种: 915MHZ 和 2450MHZ。其波段名称和中心频率、波长分别如表 1-1 所示。

表 1-1 工业微波设备规定使用的频率和波长

频率 (MHZ)	波段名称	中心波长 (M)
915±25	L	0.327
2450±50	S	0.122
5800±75	C	0.052
22125±125	K	0.008

一、波动特性

既然微波是电磁波,因此,它将具有电磁波的,诸如反射、透射和干涉、衍射、偏振,以及伴随着电磁波能量传输等波动特性。

具体来说有:

(一) 由于它的频率甚高,因此波动传播时有“似光性”的直线传播,遇到金属表面将发生反射,其反射方向符合光的反射规律。

(二) 当入射波与反射波相遇迭加时能形成波的干涉现象,其中包括驻波现象。这在有限的微波波导或谐振腔中,微波电磁场的驻波分布现象是很常见的。并且常借此多种频率模式的电磁场分布的迭加来改善总电磁场分布的均匀性。

(三) 微波能量的空间分布,也如同一般电磁场能量一样具有空间分布性质。即在微波能量传输方向上空间某点,其电场能量的数值大小与该处空间的电场强度的平方有关。而微波电磁场总能量为该点的电场能量与磁场能量迭加的总和。

$$W_e \propto E^2$$
$$W_m \propto H^2$$
$$W = W_e + W_m$$

二、高频特性

高频特性包括三方面:即趋肤效应、辐射效应和相位滞后。微波由于它的频率比高频

电磁波更高些,因此其辐射效应更为明显。它意味若微波在普通的金属导线上传输时,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。微波的这种辐射效应给微波的传输带来的不同于高频电磁波的传输特点,以及对传输元器件具有特殊要求,形成微波传输理论的独特性。例如:

(一)使用圆形或矩形截面的金属管道传输微波,而不是使用普通的金属导线。如果使用金属导线的话,也需特殊设计成定距双排金属线,或者是同轴屏蔽电缆线。即常见的电视天线信号馈送的扁平馈线和同轴电缆线。

(二)不能用低频时适用的传输特性参数,如电流、电压和电阻等“电路”的概念去讨论微波传输特性。它需用交变电磁场理论“场”的概念。值此状况,上述趋肤效应、辐射效应和相位滞后等高频特性绝不容许随意忽略。其原因是:低频电路的尺寸与低频电磁场的工作波长相比要小得多,可以认为低频电路系统各处稳定状态的电压和电流效应均同时建立,因此,电压和电流在低频电路中有明确的物理意义。但在微波频段电磁波的工作波长与其电路尺寸已可比拟,甚至更小时,电磁波的相位滞后现象已十分明显,不可略去了。因此只能摒弃低频电路所常用的“电路”概念及其传输特性参数。

三、热特性

物料,从其电性质来说称作介质,对电磁波都表现有吸收特性。

介质对微波的吸收特性表现在微波能穿透深入到物料内部,其深入距离与微波波长同数量级,透入物料内部的微波能量被物料吸收转换成热能对物料加热,形成独特的物料受热方式——物料整体被加热。即所谓无温度梯度加热。此时物料的表、里层温度差不多。随着物料表面水分不断蒸发,物料表面层温度将略低于里层温度,形成的温度梯度由内指向外,与加热过程中伴随发生的蒸汽压迁移方向与热量迁移方向均一致。据物料干燥理论,这种加热状态是极有利于物料干燥的。因此,微波加热物料具有加热均匀、热转换效率高、加热时间短的优点。

由微波加热理论与实践均表明,在单位体积物料内消耗的微波功率 P 与该处的电场强度 E 的平方和微波频率及物料介电特性参数成正比,其数学表达式为

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \cdot E^2 \quad (1-1)$$

式中 ϵ'' 称为介质损耗角正切,是表征介质吸收微波能量本领的一个物理量。

各种食品的 ϵ'' 值从 0.001~0.6 不等,它们数值间相差较大。例如生牛排为 0.30,土豆为 0.29,蒸馏水为 0.16,而蒸馏水加 0.5mol 的 NaCl,则为 0.62(详见附录 I)。

ϵ'' 值小的物料,对微波的入射可以说是“透明”的,因为它吸收入射微波能量极少。例如,聚四氟乙烯材料就属此性质。然而一般的物料,诸如食品原料,通常都含有一定量的水分,其 ϵ'' 值约在 0.15~0.20 之间,数值越大,意味着能强烈地吸收微波能。因此,如果整个物料所组成的各部分介电性质不同的话,微波对这种物料就呈现出选择加热特征。例如,食品原料混合结构中存在不同的介质损耗成分时,它们受加热程度将略有不同。

微波选择加热的现象,在物料加热时有利也有弊。

加热程度还受到微波加热器中场强分布状况或者材料成分的影响。例如,加热时食物的边缘(如鸡翅尖),因出现电场强度集中有可能过热烧焦,需要通过工艺措施加以

调整。

又如,微波能量分布在加热器内,由于被加热物料的介质特性与微波加热器箱体的金属特征,它们对微波的吸收呈现极大反差。因此,微波能量绝大部分耗散在被加热物料上,而对加热物料周围的空气,或者加热设备的金属部件耗能极小。因此,微波加热器工作时,其箱体部分不受热,完全不同于远红外或蒸汽加热时,其炉体与被加热物料同时受热状态,车间温度环境恶劣。换言之,微波加热与它们相比是节能的。

节能还反映在上述各方法所需加热的预热时间的不同。微波加热仅需电源的预热时间,在这段时间中进行微波管的灯丝预热,它不需要加热工作的预热时间,输出的能量即刻就被物料吸收而加热。但对于红外加热等方式,它们输出能量同时被物料和冷的炉体吸收,真真要达到能工作状态,将在输出能量的一段时间后才行,这就是我们所说在常规加热时的预热时间。微波能量输出后加热的即时性,以及工作过程中不需要对除物料外的工件部件散热损耗的能量维持,是微波加热时节能的又一重要方面。

必须看到,微波对物料整体加热状态,省却了常规加热的热传导时间,与常规加热方式相比,对物料加热时间在同样的加热效果下要短。加热时间短,显然对节能有利。可以说,评价某加热方式是否节能,不光要看设备所使用的功率大小,更重要的是应从物料受热的热能转换效率,物料受热与设备部件耗能比例,以及加热总时间等方面综合评价而定。对于社会上把微波炉作为耗能大的误解应该由上述事实来彻底否定。

微波加热过程中物料温升依赖于微波输出功率状态。即有微波辐射时物料加热,当停止辐射微波时,物料得不到微波能量,其加热过程即刻停止,显示出微波加热的热惰性小的特点。加热方式的热惰性小,表明随着微波输出功率的调节,物料加热状态(如温升)可以无惰性地随之改变。这种状态是极有利于某些场合的自动控制生产需要的,通过它可以达到控制物料温升速率、终温限定等生产工艺所特定需要,从而保证食品生产工艺条件的一致性。

其它加热方式的热惰性都较大,不利于食品加工中工艺条件的控制。问题还并不就此而止,加热方式的热惰性不同,引起微波工艺过程的独特性,我们切不可再以常规加热工艺的经验去对待微波加热。我们需要创建崭新的微波加热工艺。

由于微波功率输出可调和微波加热的瞬时性,使得物料被加热时其内部蒸汽压力梯度和蒸汽向外层迁移速率也具有可调节性,在适宜条件控制下能使物料达到膨化效果。这就是膨化食品的生产原理。

四、非热特性——生物效应

利用加热杀灭食品中有害微生物和如何杀灭食品所沾污的微生物,延长食品新鲜程度的方法,一直是食品加工研究者努力研究的内容。研究中曾利用过各种可能的物理的或者化学的方法来达到杀菌目的,微波加热灭菌法是其中之一,它与其它方法所不同之处在于:微波电磁场不仅对微生物具有加热的热力作用,如蛋白质受热变性凝固,而且同时还具有非热力的电磁辐射作用。

微波电磁场对微生物的非热力作用后果有多种解释,最常见的解释认为,微生物体内的水分是极性分子,在微波的交变电场作用下引起强烈的极性振荡,导致电容性细胞膜

细胞电击穿破裂,或者细胞分子间氢键松弛等破坏,使得组成生物体(微生物)的最基本单元细胞的生命化学活动过程中所必须具备的物质、能量、信息交换的正常条件和环境遭到严重破坏,以至死亡。当前,细胞赖以生存的,能与外界交换物质的“离子通道”的发现,更加强上述的论证。离子通道在不适合细胞正常活动条件下可以关闭,阻断物质在细胞膜内外的交流。

微波的生物效应是医学、细胞学基础研究工作中的一个重要方面,能为微波理疗或微波手术、微波治癌等方面提供理论依据,此项工作正在逐步深入研究之中。

在食品加工中微波加热杀菌效果不同于常规加热杀菌,基于下面的实验可以说明这个问题。

目前食品杀菌方法最常用的是巴氏杀菌法,即用低于 100°C 温度对食品加热处理,借以杀灭污染食品的致病菌。但这种方法不能杀灭耐热性较强的芽孢杆菌,因此,常用于 pH4.5 以下的酸性食品,如饮料、果汁、果茶、糖水、水果罐头和蔬菜类罐头及软包装食品的杀菌。对于大于 pH4.5 的低酸性食品,为杀灭耐热芽孢杆菌,常用高温高压方法杀菌,其工作温度超过 100°C 以上。无论巴氏杀菌法或是高温高压杀菌法,其细菌均属于热力性质致死。但是当采用微波杀菌时,细菌处于高频电磁场辐射下,它将同时受到热力致死(温度)和电磁力致死(微波生物效应)二个因素共同作用。从残菌致死率来看,微波杀菌与巴氏杀菌情况差别甚大。如图 1-1 所示。该图显示在三种不同的温度下用微波法和巴氏法杀菌得到二组对应的实验结果。以曲线 3 和 3' 对比,它们的温度同为 100°C ,但是前者(曲线 3,微波法)的 D_{100} 值为 0.70,而后者(曲线 3',巴氏法)的 D_{100} 值为 5.56。杀菌实验对象是枯草芽孢杆菌,浓度相同。按食品杀菌理论,腐败菌及其芽孢的耐热性规律以 D 值表征。在相同的菌种、浓度和温度情况下所得 D 值差异,只能从它们分别所受处理的方法的不同来解释。显然,微波法除热力使菌致死原因外,还存在电磁场辐射的因素,强烈地加速菌致死。

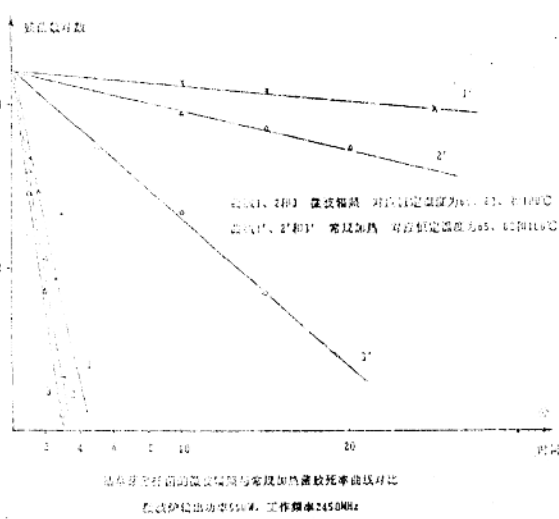


图 1-1 枯草芽孢杆菌的微波辐照与常规加热菌致死率曲线对比

曲线对比

如图 1-1 所示。该图显示在三种不同的温度下用微波法和巴氏法杀菌得到二组对应的实验结果。以曲线 3 和 3' 对比,它们的温度同为 100°C ,但是前者(曲线 3,微波法)的 D_{100} 值为 0.70,而后者(曲线 3',巴氏法)的 D_{100} 值为 5.56。杀菌实验对象是枯草芽孢杆菌,浓度相同。按食品杀菌理论,腐败菌及其芽孢的耐热性规律以 D 值表征。在相同的菌种、浓度和温度情况下所得 D 值差异,只能从它们分别所受处理的方法的不同来解释。显然,微波法除热力使菌致死原因外,还存在电磁场辐射的因素,强烈地加速菌致死。

微波对物料(有生命的,如谷物种子)的生物效应作用后果,与微波辐射剂量(辐射强度)大小有密切关系。当微波辐射剂量高于某阈值(各种物料阈值各有不同),将呈现抑制该物料的细胞生命活动现象,反之,则可能激活细胞的生命活动。于是,前者的处理可用来杀菌、杀虫等,以及钝化酶的活性。而后者又成为育种、改变遗传基因的一种有效手

段,常用来激活作物种子,增加发芽率,强壮发芽势。

第二节 微波传输基本特征

微波的高频特性决定了微波传输的物理过程和所需的传输器件,它与常见的低频电流的传输情况大不相同。

微波传输的物理过程简略地说,应是微波以电磁波的形成在空间传输过程,它服从电磁波波动过程的基本规律。电磁波传播的最简单的形式是平面波。这种电磁波是随时间作正弦变化的电场矢量 E (垂直方向) 及与电场作同位相正弦变化的磁场矢量 H (水平方向) 所组成。 E 和 H 矢量位于同一平面上,据电磁场右手定则指示出,其能流方向垂直于 $E \times H$ 所组成的平面(即 Z 方向)。

由电磁场理论知,电磁波沿 Z 方向的波动方程为:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} &= \epsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} &= \epsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中 ϵ, μ 分别为介质的介电常数和磁导率,对于该波动方程在无限的均匀各向同性介质中传播的平面波,其电场矢量具有下列形式为

$$E = E_0 \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$$

或

$$E = E_0 \cdot \cos(\omega t - \gamma z) \quad (1-3)$$

式中 $\gamma = j\omega \sqrt{\epsilon \mu} = \alpha + j\beta$ 为传播常数。

α, β 分别为衰减常数和相位常数

假如介质不吸收电磁波的能量,则波沿 Z 方向传播时其衰减为零。此时的传播常数为纯虚数,相位常数 β 等于长度为 2π 的线段上波的数目 ($= \frac{2\pi}{\lambda}$)。因此,又可称为波数。可是一般情况下,介质对电磁波都是有吸收损耗的,电磁波有衰减,存在功率耗散。据计算,该功率耗散是电场强度 E 的平方的函数。

一、矩形波导中电磁场分布结构

由于普通的双导线间距离与微波波长的数量级相近,用它来传输微波能量将引起强烈的微波能量辐射损失。为此,微波在短距离传输时采用与外部有隔离的传输线——波导。

波导,一般是指有一定截面形状的空心金属导管。电磁波能量由导管的一端注入,经波导传输到导管的另一端,具有导引电磁波能量传播作用。就此意义上说,它可以分为三种类型:(1)由两个彼此绝缘的圆柱状导体组成的同轴电缆,如图 1-2(a)所示;(2)一定截面形状的空心金属导管,即封闭式波导,如图 1-2(b)所示;(3)传输表面波的介质波导,又称开放式波导,如图 1-2(c)所示。

这里以常用的矩形波导为例,阐述微波在这种波导内传播过程。

对于任意形状截面的金属波导,设想管内充有介电常数为 ϵ ,磁导率为 μ 的无损耗的理想介质,考虑导体表面上的边界条件,即要求在理想导体表面上的电场强度切向分量 E_t

和磁场强度法向分量 H_n 分别等于零, 则可由 Maxwell 方程组求得电磁波动方程解的具体形式。

若是矩形波导, 采用直角坐标系, 如图 1-3 所示。矩形波导中 E 和 H 在 X 、 Y 和 Z 三个方向上的分量为

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{K_c^2} \left(\dot{\gamma} \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \\ E_y &= \frac{1}{K_c^2} \left(-\dot{\gamma} \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ H_x &= \frac{1}{K_c^2} \left(j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial y} - \dot{\gamma} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \\ H_y &= \frac{1}{K_c^2} \left(j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial x} + \dot{\gamma} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (1-4)$$

而 $E_z = E_0 \cos(K_x X + \psi_x) \cos(K_y Y + \psi_y) e^{-\gamma z}$
 $H_z = H_0 \cos(K_x X + \varphi_x) \cos(K_y Y + \varphi_y) e^{-\gamma z}$
 式中 E_0 、 H_0 、 K_x 、 K_y 、 ψ_x 和 ψ_y , 以及 φ_x 和 φ_y 为待定常数。

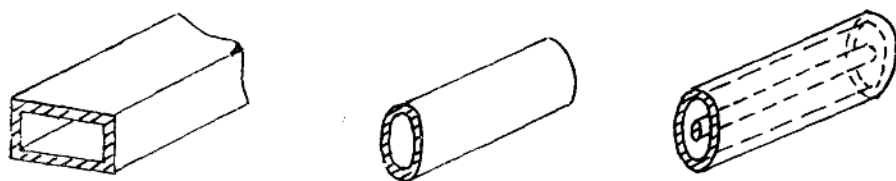


图 1-2 传输线种类

波导中传播电磁波均为一定形式的电磁场结构, 称为波型。波导中波导以有无纵向场分量 (Z 方向) 划分为三种类型:

(1) 若 $E_z = 0$ 和 $H_z = 0$ 的电磁波称为横电磁波, 即 TEM 波。

(2) 若 $E = 0$ 和 $H_z \neq 0$ 的电磁波称为横电波或磁波, 即 TE 或 H 波。

(3) 若 $E_z \neq 0$ 而 $H_z = 0$ 的电磁波称为横磁波或电波, 即 TM 波或 E 波。

据电磁场理论分析, 波导中一般不能传播 TEM 波。因此, 讨论波导中波型只有 TE 波和 TM 波。

于是, 对于 TE 波由于 $E_z = 0$, 则式 (1-4) 简化为:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{j\omega\mu}{K_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ E_y &= -\frac{j\omega\mu}{K_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (1-5)$$

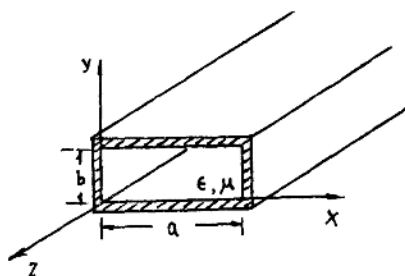


图 1-3 矩形波导及其坐标

$$H_x = -\frac{\dot{Y}}{K_z^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$H_y = -\frac{\dot{Y}}{K_z^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

根据边界条件要求:

$$\text{在 } X=0 \text{ 和 } a \text{ 处, } E_y=0 \text{ 或 } \frac{\partial H_z}{\partial x}=0$$

$$\text{在 } Y=0 \text{ 和 } b \text{ 处, } E_x=0 \text{ 或 } \frac{\partial H_z}{\partial y}=0$$

可以确定如下待定系数:

$$\Phi_x=0 \text{ 和 } K_x=\frac{m\pi}{a} \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

$$\Phi_y=0 \text{ 和 } K_y=\frac{n\pi}{b} \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

然后求得:

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-\gamma z}$$

因此, 对于传输型 TE 波 ($\gamma=j\beta$), 其场分量为

$$E_x = j \frac{\omega\mu}{K_z^2} \cdot \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_y = -j \frac{\omega\mu}{K_z^2} \cdot \frac{n\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_z = 0$$

(1-6)

$$H_x = j \frac{\beta}{K_z^2} \cdot \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y = j \frac{\beta}{K_z^2} \cdot \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$\text{式中 } K_z^2 = K_x^2 + K_y^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

上式表明, 当 m 和 n 取值不同时, 将对应有无穷多个 TE_{mn} 波型。但是其中 m 和 n 不可能同时等于零, 否则全部场分量都将等于零, 这是不合情理的; 如果 m 和 n 中之一为零, 则其场结构是存在的。 TE_{mn} 模中最简单的波型应为 TE_{10} 模。

同样的解法, 可得 $H_z=0, E_z \neq 0$ 的传输型 TE 型波的场分量为:

$$E_x = -j \frac{\beta}{K_z^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_y = j \frac{\beta}{K_z^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

(1-7)

$$H_x = j \frac{\omega\epsilon}{K_z^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y = -j \frac{\omega\epsilon}{K_z^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$\text{式中 } K_z^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \text{ 与 TE 波中相同}$$

由此可见,与 TE_{mn} 波情况一样,取不同的 m 和 n 值,波导中也可有无穷多个 TM_{mn} 波,其最简单的波型为 TM_{11} 波。

为了形象化地表达上述波型的电磁场结构,我们常用电力线和磁力线的疏密程度和形状来描述其分布情况。

例如,矩形波导中最简单的 TE_{10} 波,其场分量式为

$$\begin{aligned} E_y &= -j \frac{\omega \mu_0}{k_z^2} \frac{\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_x &= j \frac{\beta}{k_z^2} \frac{\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_z &= E_y = H_y = 0 \\ H_z &= H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \end{aligned} \quad (1-8)$$

对于电场只剩 E_y 分量,它沿 X 方向呈正弦分布,其最大值在波导中心 $x=a/2$ 处,两侧数值则对称减弱,如图 1-4(a)所示。而沿 Z 方向其瞬时值呈 $\sin(\omega t - \beta z)$ 规律变化,如图 1-4(b)所示。对于 TE 波的磁场分量 H_x 和 H_z ,其中 H_x 沿 X 方向(在宽边)呈正弦分布。当 $x=a/2$ 处为最大,两侧数值对称减弱。而 H_z 沿 X 方向,呈余弦分布,在 $X=0$ 和 a 处最大, $X=a/2$ 处为零,两侧数值增减也呈对称分布,如图 1-4(c)所示。 H_x 、 H_z 在沿 Z 方向上的瞬时值与 E_y 的规律一样,也呈周期性变化,但 H_x 与 H_z 位相差 $\pi/2$,如图 1-4(d)所示。图中 λ_g 为波导中电磁波传播的波长。 H_x 和 H_z 分量在 XZ 平面上合成,以闭合的磁力线(图中虚线)表示,其形状为椭圆形。把 TE_{10} 的电场和磁场场结构合并起来,即构成 TE_{10} 波电磁场完整结构,如图 1-4(e)所示。

由此可见, TE_{mn} 波的模式,由 m 、 n 取值不同而得。对于 TE_{10} 波的下标号 $m=1, n=0$,即在波导宽边 a 上分布有一个“半驻波”,而在波导窄边 b 上,半驻波个数为零。因此, m 、 n 值分别表示沿波导宽边 a 和窄边 b 上所分布的半驻波个数。以此类推,对于 TE_{mn} 模的 TE_{20} 、 TE_{30} ……等模式的场结构,将表示沿 a 边有二个、三个……, m 个半驻波的分布,而沿 b 边则无变化。反之,对于 TE_{01} 、 TE_{02} 、 TE_{03} ……,等模式的场结构,半驻波个数在沿 a 边和 b 边的分布,恰与 TE_{m0} 模结构相反。两者相比,其模式结构的差别只是波的极化面,即电场矢量与波导轴的平面旋转了 $\pi/2$,或者说,是将 TE_{m0} 模的电磁场结构,以波导管轴旋转 $\pi/2$ 而成。

上述分析,对于 TM 波的场结构同样适用。在波导中 TE_{10} 、 TE_{01} 、 TE_{11} 和 TM_{11} 四个模构成矩形波导中场结构的四个基本形式(又称“小巢”)。波导中所有的 TE 和 TM 波的场结构将是它们的适当组合形式。我们如果能熟悉波导中各种模的场结构,以及它们具体分布形式,就能了解微波加热均匀性问题的根由,并且可针对场结构的分布提出改善措施,其中包括波导的激励、耦合,以及减少波导损耗的合理设计,使微波加热均匀性问题从设计一开始就能得到统筹考虑而妥善解决。图 1-5 为矩形波导中 TE 和 TM 模场结构截面图。

二、波导管壁电流形式

波导中传输频率很高的微波,在金属波导管内壁上将产生感应电流,称为管壁电流。

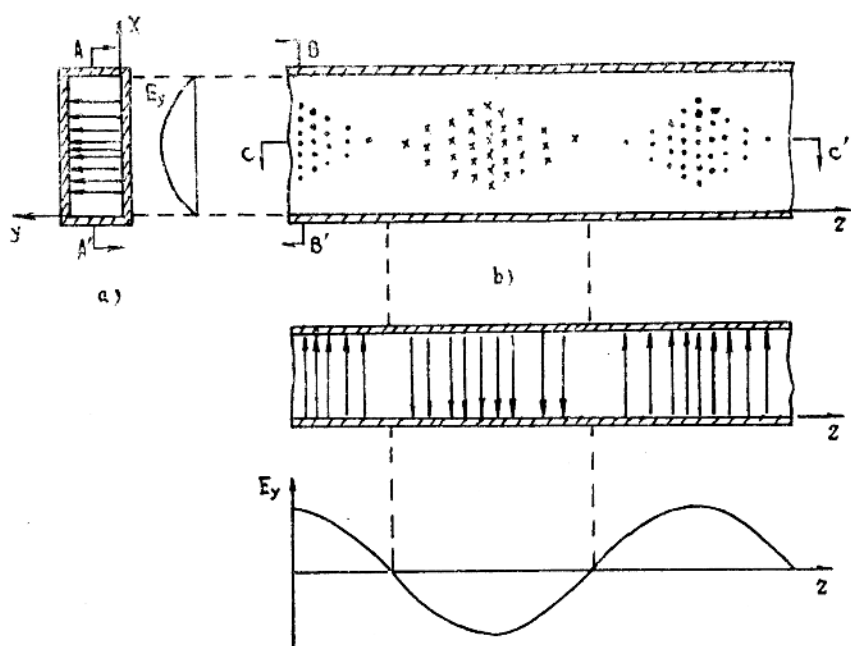
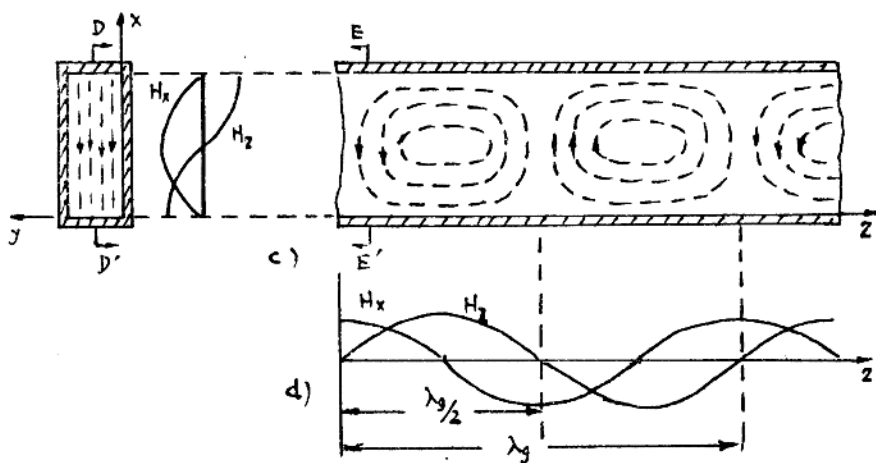


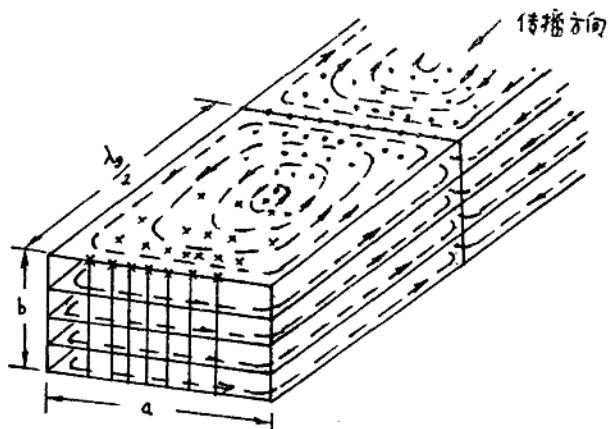
图 1-4 TE_{10} 模电磁场结构图

a)、b) BB' 横剖面, AA' 、 CC' 纵剖面, TE_{10} 模电场结构图



c)、d) EE' 横剖面, DD' 纵剖面, TE_{10} 模磁场结构图

据 Maxwell 提出的全电流概念,对于具有良好导电性能的波导管壁电流属传导电流性质。与此同时,由于微波对良导体的穿透深度的数量级仅几微米左右,因此,可以认为管壁内层的电流为面电流。而在波导中的介质内,则存在有位移电流。



c) TE₁₀模电磁场结构图

对于管壁上传导电流的分布,取决于管壁附近的磁场分布,由下式表示

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_t \quad (1-9)$$

式中 $\mathbf{J}_s$ 为波导内壁的面电流密度矢量

$\mathbf{H}_t$ 为内壁表面附近的磁场切向分量

$\mathbf{n}$ 为波导内壁的法向单位矢量。

由式(1-9)可知, $\mathbf{J}_s$ 的大小等于波导内壁附近的磁场切向分量,其方向由右手螺旋定则确定,如图 1-6(a)所示。

以传输 TE₁₀ 模为例,可得:

在波导上顶面($y=b$)和下底面($y=0$)上的面电流密度为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_s|_{y=0} &= H_x \mathbf{i} - H_z \mathbf{k} \\ \text{和 } \mathbf{J}_s|_{y=b} &= -H_x \mathbf{i} + H_z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-10)$$

在波导左侧壁上($x=a$)和右侧壁上($x=0$)的面电流密度为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_s|_{x=0} &= -H_z \mathbf{j} = -H_{10} e^{j(\omega t - \beta z)} \cdot \mathbf{j} \\ \mathbf{J}_s|_{x=a} &= H_z \mathbf{j} = H_{10} e^{j(\omega t - \beta z)} \cdot \mathbf{j} \end{aligned} \quad (1-11)$$

由式(1-10)和式(1-11)可见,矩形波导传输 TE₁₀ 模时,在波导管壁左、右两侧壁(窄边)内只有 J_y 分量的面电流,且大小相等,方向相同;而在上、下宽边内的面电流将由 J_x 和 J_z 分量合成,并且在同一 x 位置处的上、下宽壁内的面电流大小相等,方向相反,如图 1-6(b)所示。由图可见,在宽壁上传导电流呈会聚或发散的流向,它将与波导内介质中的位移电流流向相衔接,形成全电流。

由电磁场辐射理论知,当切断(诸如,在管壁上开槽或者开孔,又或者是加热器箱体周围的接缝不严密等)管壁面电流的通路,将引起波导内能量向外辐射。利用这个特性,常在波导壁上适当位置开槽或开孔,以达到微波能量激励或耦合功能。上述状况是我们确定波导上在合适位置开槽或开孔的理论依据,另一方面,也提醒我们在设计微波加热箱体,以及一切微波器件相互连接时应注意接缝处的严密性,以提供必要的面电流通路,对

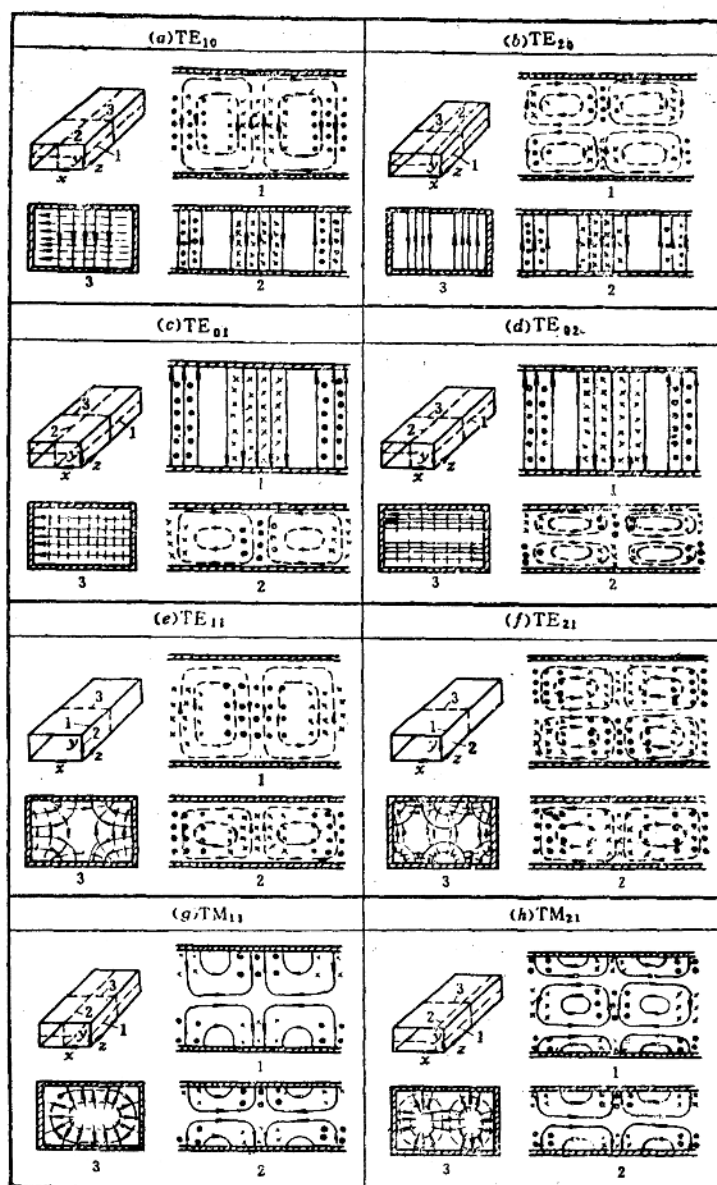


图 1-5 矩形波导中若干 TE 和 TM 模场结构截面图

防止或减少微波泄漏将具有现实的指导意义。