

微波技术

在工业生产和医疗中的应用

冯垛生 张亚婉 宋金莲 冯玉昆 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



微波技术

在工业生产和医疗中的应用

冯垛生 张亚婉 宋金莲 冯玉昆 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要说明了现代微波技术的基本概念,微波加热技术的原理,重点介绍了常用微波元器件及微波加热在工业生产和医疗上的应用。在编写时作者注意深入浅出,少用高深的数学推导分析,尽量用物理概念和试验数据(曲线)来说明问题。由于微波加热技术在我国方兴未艾,希望本书能起到抛砖引玉的作用,为我国发展环境亲和型和节能型企业,提供一条新的思路。

本书可供电气(电力)、电子、信息等专业学生作为参考教材,也可为企业和医院在改造现有设备、工艺和医疗仪器临床治疗等方面起一定参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术在工业生产和医疗中的应用/冯焱生等编著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8754-3

I. 微… II. 冯… III. ①微波技术-应用-工业生产②微波技术-应用-医学 IV. F4 R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 061402 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 217 千字

印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

众所周知,微波技术在20世纪40年代首先应用于雷达技术和通信上,亦即优先在信息载体上应用。而微波能的应用则晚了一步,但经过半个多世纪的努力,微波加热技术已在食品、材料、塑料、陶瓷、医疗等领域得到广泛普及和应用。特别是微波加热用于物体内部加热亦即在电磁场作用下使物体自身发热,能量的损耗小,因此节能效果特别好。从节能的角度看,工业微波加热技术也是十分有前途值得推广的朝阳项目。在国外,从20世纪40年代中期就推广了高频或微波加热,美国和日本等先进国家以实用为目的进行了多方面研究和开发。例如,日本现有大型微波加热设备(不含家用微波炉)数万台。我国仅是家用微波炉和医用微波仪较为普及。其他领域使用的进口设备较多,而已进入自主研究实用阶段的批量产品还较少。本书在叙述了微波加热理论的基础上介绍了微波加热技术的应用。希望引起国内同行的注意,在消化国外技术的基础上进行创新,把微波加热技术推广到工业生产的各个方面,为国家的节能和环保作出贡献。

由于工业技术门类繁多,本书不可能面面俱到。本书重点介绍食品和木材加工(据了解20世纪90年代,我国已生产木材加热微波设备),其余,如茶叶、橡胶和陶瓷只作一般介绍。特别对宇宙太阳能发电站微波输配电知识只作了科普性介绍。医疗方面也仅限于介绍医用微波仪和临床治疗的少数病例。

全书共分11章,主要内容包括:绪论,微波特性和应用需注意事项,微波功率发生器及主要部件,微波技术在食品工业上的应用,微波技术在橡胶工业上的应用,微波技术在木材加工业中的应用,微波加热在茶叶加工中的应用,微波加热在陶瓷工业中的应用,微波加热技术在公路养护中的应用,微波技术在临床医疗上的应用,用微波传输太空超级太阳能发电站的电功率。编写分工如下:全书由冯堃生教授主编并统稿,负责编写第1~3章,微波理论的编写是在云南大学原物理系微波专家冯竞教授的指导和关心下完成的;第4~6章由张亚婉老师编写;第7~9章和第11章由王赞老师和宋金莲编写;第10章由昆明医科大学附属一院冯玉昆主任医师编写。宋金莲硕士为本书校对文字录入和绘图做了大量工作,在此向她表示衷心感谢。

本书编写过程中借鉴了国内外较新文献内容，仅将主要文献列于书后，并向原作者（单位）致以深深的谢意。

由于作者水平有限，书中错漏难免，敬请读者批评指正。

编 者

前言

第1章 绪论	1
1.1 电磁波发热及微波应用发展史	1
1.2 微波加热法和感应加热法的比较	2
1.3 微波加热理论概述	3
1.4 介电体损耗系数 (ε 和 $\tan \delta$) 的测量方法	4
1.4.1 概述	5
1.4.2 测量方法	5
1.5 微波加热的物理量计算	7
1.5.1 基本公式	7
1.5.2 加热的计算	8
1.5.3 烘干的计算	9
第2章 微波特性和应用需注意事项	11
2.1 微波特性及应用	11
2.1.1 微波概述	11
2.1.2 微波的特性	13
2.1.3 微波在工业上的应用特点和需注意的几个原则	18
2.1.4 微波的杀菌作用	20
2.2 微波加热在应用时的注意事项	21
2.2.1 负荷特性和状态	21
2.2.2 符合无线电频率管理的规定	24
2.2.3 对人体健康的影响	24
2.3 微波特性小结	25
2.3.1 微波的优点	25
2.3.2 微波的缺点	27
第3章 微波功率发生器及主要部件	28
3.1 微波电子管	28

3.1.1 微波管及其工作原理	28
3.1.2 速调管	29
3.1.3 磁控管	29
3.1.4 磁控管的特性和使用方法	31
3.2 微波用电源	33
3.3 回路的主要部件	34
3.3.1 传输线路	34
3.3.2 微波加热器	38
3.3.3 防止泄漏装置	40
3.3.4 回路的其他部件	41
第4章 微波技术在食品工业上的应用	45
4.1 概述	45
4.2 食品烹调	49
4.3 用微波进行食品原料的处理	51
4.4 干燥	51
4.4.1 微波干燥的均匀化作用	52
4.4.2 利用微波加热进行材料干燥的三种形式	53
4.4.3 常压干燥	54
4.4.4 真空(减压)干燥	54
4.4.5 真空冻结干燥	55
4.4.6 食品干燥实例	56
4.5 利用微波杀菌和防霉	60
4.5.1 微波灭菌机理	61
4.5.2 夹心面包等食品灭菌举例	64
4.5.3 脉冲式功率进行灭菌	68
4.6 解冻	69
4.6.1 解冻和半解冻	69
4.6.2 微波解冻实例(美国)	72
4.7 食品的再加热	74
4.8 微波烧烤	75
4.8.1 微波焙烤的特点	75
4.8.2 烧炙与油炸	77

第5章 微波技术在橡胶工业上的应用	79
5.1 橡胶加硫	79
5.1.1 加硫的目的和方式	79
5.1.2 应用微波加热的特点	80
5.1.3 橡胶材质和配方的改变	81
5.2 连续加硫装置	83
5.3 橡胶加硫预热机	85
第6章 微波技术在木材加工业中的应用	89
6.1 概述	89
6.1.1 木制品胶合	89
6.1.2 木材干燥	89
6.1.3 可塑化加工	90
6.1.4 木材热处理	91
6.2 木材的介电特性和微波加热的关系	91
6.3 木材的干燥	92
6.3.1 微波干燥特点	92
6.3.2 微波干燥与热风干燥并用的效果	93
6.3.3 木材干燥曲线	93
6.3.4 木材或木制品微波干燥举例	95
6.3.5 含水率的均衡化	97
6.3.6 微波减压干燥	99
6.4 木材的黏合加工	99
6.4.1 适合微波加热用的黏合剂	100
6.4.2 黏合方法	100
6.4.3 高频加热黏合和微波加热比较	101
6.4.4 微波加热黏合机简介	103
6.5 木材的弯曲加工	105
6.5.1 木材弯曲特性	105
6.5.2 水分和温度的影响	106
6.5.3 木材弯曲变形的机理	107
6.5.4 微波弯曲加工的特殊炉具	108

6.5.5	利用微波进行木材弯曲举例	109
6.5.6	含水率高低对弯曲性能的影响	111
第7章	微波技术在茶叶加工中的应用	113
7.1	微波技术应用的历史和现状	113
7.2	茶叶的类别和加工的工艺流程	115
7.2.1	茶叶的类别	115
7.2.2	制茶工艺流程	115
7.2.3	微波加热的优点	115
7.3	微波技术在茶叶加工领域的应用	116
7.3.1	微波在茶叶杀青中的应用	116
7.3.2	微波在茶叶干燥中的应用	117
7.3.3	微波在茶饮料灭菌中的应用	117
7.3.4	微波用于茶叶水分的测定	118
7.3.5	微波在茶叶储藏中的应用	118
7.4	微波技术用于茶叶杀青和干燥的机理	118
7.4.1	微波杀青、干燥的可行性	118
7.4.2	微波杀青、干燥的影响因素	120
7.5	微波茶叶加工设备的特点	121
7.5.1	茶叶原料和加工工艺流程	121
7.5.2	微波茶叶加工设备	122
7.5.3	微波加热用于绿茶杀青	122
7.5.4	微波干燥	123
7.5.5	微波加工设备的效率	124
7.5.6	应用微波后的加工工艺改变	124
7.5.7	常用微波茶叶干燥机的技术性能和效果	125
7.6	日本 NJE 公司微波茶叶干燥机简介	130
7.6.1	组成	130
7.6.2	技术规格和指标	130
第8章	微波技术在陶瓷工业中的应用	132
8.1	陶瓷坯料的干燥	132
8.2	瓷片干燥不同方式的比较	133
8.3	粉末状的陶瓷原料的微波干燥技术	134

8.3.1	介电特性和加热方法	134
8.3.2	加热器的构造	135
8.3.3	加热特性	135
8.3.4	粉末状陶瓷材料微波干燥机举例	135
8.4	微波加热进行高温烧结	138
8.4.1	陶瓷微波烧结技术的进展	138
8.4.2	微波烧结技术的特点	139
8.4.3	微波烧结的工艺特点	140
8.5	微波烧结的设备	141
第9章	微波技术在公路养护中的应用	143
9.1	应用微波技术清除公路积冰	143
9.1.1	微波溶冰概述	143
9.1.2	微波除冰机理	144
9.1.3	微波溶冰实验的结果	145
9.2	微波除冰车的设计	147
9.2.1	整体布局设计	147
9.2.2	微波加热器的选择及固定	148
9.3	微波技术在公路沥青路面养护中的应用	149
9.3.1	概述	149
9.3.2	微波加热养护与常规热补养护的比较	150
9.3.3	中小型批量生产的微波路面养护车简介	152
9.4	微波技术用于沥青路面养护(热再生)技术的应用前景	154
第10章	微波技术在临床医疗上的应用	157
10.1	用微波在患者病灶部位加热	157
10.2	微波治疗仪原理	158
10.2.1	概述	158
10.2.2	微波治疗仪的结构设计	159
10.3	微波治疗仪的温度测量方法	163
10.4	国内应用简介	166
10.4.1	概述	166
10.4.2	国产微波治疗仪系统结构	167
10.4.3	国产微波仪简介	168

10.4.4 应用微波治疗仪临床疗效分析 (供参考)	173
10.5 微波治疗仪的检测与限制微波辐射的国家标准	179
10.5.1 概述	179
10.5.2 主要技术指标的检测	180
10.5.3 结论	181
第11章 用微波传输太空超级太阳能发电站的电功率	182
11.1 微波输电计划	182
11.2 SSPS 计划概要	183
11.3 送电(发射)系统概述	185
11.4 传输损耗	187
11.5 接收系统	187
11.6 结论	190
参考文献	192

第 1 章

绪 论

Chapter 1

1.1 电磁波发热及微波应用发展史

微波又称为厘米波，即其波长的单位为厘米，我们把这一类的电磁波称为微波。通常应用较广泛的厘米波其频率范围约为千兆赫兹（波长为 30cm）至 3 万 MHz（波长为 1cm）之间。

在高速交变的电场作用下，介电体（绝缘物）将会被加热。一般在两个电极上加上数兆赫兹或数十兆赫兹的高频电场，其间放置木材或橡胶这类介电物，就会迅速被加热，我们称其为感应加热。利用此原理人们制成了感应加热炉，早已进入市场并家喻户晓。

下面简单介绍一下，微波的发展史。微波技术的应用比起其他电力领域是一个很年轻的行业。它的历史不过才几十年，而且最早是大量用于军事（雷达），以后才转为民用。追溯起来，在 20 世纪 40 年代由于空军的需要发展了一种称为“雷达”的检测跟踪军事目标仪，在第二次世界大战期间取得重要的成果，在海、空军方面取得决定性的优势地位。研究方面英国皇家雷达学院处于领先地位。战后（40 年代中），军用雷达的需求锐减，才将此项技术转入民用。其中，美国的雷神公司（Raytheon）首次将微波在雷达上的应用转为微波在物体加热上的应用，该公司的斯宝沙博士，设想在波导管的出口处置一个容器，内置非金属物体观察加热状况。之后，又将一枚鸡蛋置入进行加热测试，结果闹了一场笑话，由于鲜鸡蛋温度上升过快而爆裂，溅出高温的液体使观察者受到伤害。这一创意试验对未来的开发提出了几点宝贵的建议：① 容器必须密封；② 微波不可能在一开放的空间传播，必须充分考虑到微波的导入路径，以保证运行安全并提高加热效率。不久，就诞生了第一台家用微波炉，并设计出工业用的隧道型微波加热装置，在橡胶加硫、食品干燥、解冻方面得到广泛的应用。



微波技术的发展与微波器件的发展和应用密不可分,其发展过程大致可分为以下四个阶段:

(1) 1940 年以前为第一阶段。此阶段为实验室阶段,主要研究微波产生的方法。

(2) 1940 ~ 1945 年为第二阶段。这个阶段是微波技术迅速发展并应用于实际的阶段。该阶段正处于第二次世界大战期间,由于军事应用的迫切需要,微波技术得到了巨大的发展,产生了很多微波器件。但是由于各国都忙于实际应用,对理论的研究注意较少,使得理论落后于实际应用。

(3) 1945 ~ 1965 年为第三阶段。这一阶段不仅开辟了新波段,而且扩展了应用范围,并逐步形成了一系列新的科学领域,如微波波谱学、射电天文学、射电气象学等。同时在前一阶段的基础上,比较完整和系统地建立了一整套微波电子学,为微波技术的进一步发展打下了理论基础。

(4) 1965 年以后为第四阶段。随着微波固体器件和微波集成电路的发展与应用,为微波技术的发展,也为微波设备的定型化与小型化开辟了一个新时代。

2 目前,微波设备正向着更高频段、宽频带、高功率、数字化、高可靠性、小型化等方面发展。微波技术正向毫米波和亚毫米波波段迅速发展,并且已经获得了广泛的实际应用。



1.2 微波加热法和感应加热法的比较

目前在家用电器上,高频电磁炉与微波炉是最重要的两类烹饪器具,但两者在使物体加热的原理上却有着根本的区别。电磁炉是利用高频磁场使铁锅加热,煮熟锅内的食品,而微波炉则利用了高频电场(微波)对食物直接加热。两者相比(就加热食品说),微波加热有如下优点:

(1) 发热效率极高,效率与微波频率成正比。

(2) 设计不同的箱状容器,可对任意形状的介电体进行加热。如细长的圆木、木板,甚至人体的某个部位。

(3) 由于微波通道的合理设计,使电波谐振与箱体形状无关,故微波极为稳定,且负荷的改变不会影响电源的稳定。

(4) 防止微波泄漏容易,使用安全性好。

(5) 由于微波是在一个密闭空间(容器)进行加热,故容器周围的物理环境,不会影响微波加热。例如,环境温度变化,甚至真空减压,可注入保护性气体等。



但微波加热亦有其不足之处（在以后章节中会加以说明），即电磁场的频率与浸透介电体的深度成反比。若微波频率恒定，则对大而厚的物体造成内部（中心部）加热程度不够。这时，往往要调低微波频率，使物体加热均匀。



1.3 微波加热理论概述

众所周知，微波是一类电磁波，简单地说它是以一种电场和磁场直交的方式，交变地向周围传播。这种电磁场状态可用麦克斯韦（Maxwell）方程式来描述，用 MKS（米·千克·秒）制量纲表示的一组用矢量表示的方程组

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中： $\mathbf{D}$ 为电磁场密度（电位变化）； $\mathbf{B}$ 为磁通密度； ρ 为电荷电量； $\mathbf{J}$ 为电流； $\mathbf{H}$ 为磁场强度； $\mathbf{E}$ 为电场强度； div 和 rot 是用矢量表示的微分。此外被加热物体的物理特性，亦可表示为：

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_s$$

式中： ε 为介电常数； μ 为磁导率； σ 为电导率； $\mathbf{J}_s$ 为初始电流。

须注意到在真空状态下 $\varepsilon = \varepsilon_0$ ， $\mu = \mu_0$ 。 ε_0 和 μ_0 在高斯量纲系中其值为 1，但在 MKS（米·千克·秒）量纲系中， $\varepsilon_0 = 10^7/4\pi c^2$ ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

对于一般的电介质可用式 $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ 来表示， ε_r 称为相对介电常数，本书为简化起见一般就用 ε 代替 ε_r 。

当在介电体上加微波电场后产生

$$\mathbf{E} = E_0 e^{j\omega t} = E_0 (\cos \omega t + j \sin \omega t)$$

此时，电位变化 $\mathbf{D}$ 与静电场 $\mathbf{E}$ 成正比，微波频率增高， $\mathbf{D}$ 相对于 $\mathbf{E}$ 产生滞后相位角 δ ，即

$$\mathbf{D} = D_0 e^{j(\omega t - \delta)} \quad (1-2)$$

如果只看其实数部分，对于 $E = E_0 \cos \omega t$ ，产生



$$D = D_0 \cos(\omega t - \delta) = D_0 \cos \delta \cos \omega t + D_0 \sin \delta \sin \omega t \quad (1-3)$$

如果用 Maxwell 方程式中 $\text{rot}H$ 的公式来解释, 则式 (1-3) 第一项可视为传导电流, 而第二项则表示由于电磁场密度变化而产生的电位变化电流。如果是纯电介质亦即绝缘体则 $\sigma = 0$, 式 (1-3) 的第一项传导电流不存在, 这时, 只有第二项电流成分起作用, 它将生成微波损耗并产生热量。

微波损耗公式可表示为

$$\frac{dD}{dt} = -D_0 \omega \cos \delta \sin \omega t + D_0 \omega \sin \delta \cos \omega t \quad (1-4)$$

用 E 与其同相位电流成分相乘即为功率 L (W), 可表示为

$$L = D_0 \omega E_0 \sin \delta = 2\pi f E_0^2 \frac{D_0}{E_0} \sin \delta \quad (1-5)$$

再从 E 和 D 之比加以考虑, 亦即, 求出介电系数 ε 和相位差的关系式

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{D_0 e^{j(\omega t - \delta)}}{E_0 e^{j\omega t}} = \frac{D_0}{E_0} e^{-j\delta} \\ &= \frac{D_0}{E_0} (\cos \delta - j \sin \delta) \end{aligned} \quad (1-6)$$

介电常数是一个复数, 现将其分解为实数和虚数

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1-7)$$

$$\varepsilon' = \frac{D_0}{E_0} \cos \delta, \quad \varepsilon'' = \frac{D_0}{E_0} \sin \delta \quad (1-8)$$

这样, 微波产生的电耗 L 即可写为

$$L = 2\pi f \varepsilon'' E^2 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 说明损耗 (产生热量) 只与介电系数的虚数部分 ε'' 有关, 但两者的关系为

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$$

一般把相对介电系数的实数常记为物体的介电系数, δ 称为介电损耗角 (或 $\tan \delta$), $\varepsilon \tan \delta$ 则称为损耗系数。以上系数均为研究微波加热时的重要参数和设计标准。



1.4 介电体损耗系数 (ε 和 $\tan \delta$) 的测量方法

设计微波加热方案时, 首要考虑的是被加热物体的微波加热特性, 亦即该物体损耗系数测量。只有这样才能确定设计方案合适与否。工艺是否能实现,



从而设计出一台高效的微波加热装置。

1.4.1 概述

介电材料的电气特性可用 ε 和 $\tan\delta$ 表征, 这两项指标的测量一般可用如下四种方法进行, 本书仅作一般原理性的介绍。

(1) 渗透法。该法特别适用于波长极短的微波带, 试件可以置于自由空间, 或插入波导管等传导线路内部。当微波射入试件后求出微波的相位、振幅值, 再由相关公式求出 ε 和 $\tan\delta$ 。一般的固体材料可随意置于自由空间内, 对 ε 和 $\tan\delta$ 小的固体、液体、气体则应置于波导管及附加线路内测试。

(2) 反射波法。该法与上述 (1) 相同, 也可分为两种情况: ① 将试件置于大气中; ② 插入波导管传送线路内。主要是测出试件和大气的界面或试件和传导线路的界面的反射系数, 再根据有关公式求出 ε 和 $\tan\delta$ 。特别是后者用于 ε 和 $\tan\delta$ 较大的固体、液体、气体更为准确。

(3) 谐振法。把试件插入谐振腔内, 通过插入和取出两种情况下谐振频率或热量的变化值间接求出 ε 和 $\tan\delta$, 该法一般用于 ε 和 $\tan\delta$ 的值较低的试件。所用的谐振腔体有同轴、半同轴、圆筒腔等多种型式。

(4) 摄动法。一般用于容器特别小的试件。把试件插入谐振腔内, 谐振状态的变化很小, 算出 ε 和 $\tan\delta$ 。与前三方法相比, 算法简单但精度差, 由于试件尺寸小, 也可辅助测量磁导率 μ 以作参考。

考虑试件发热 (亦即产生功耗) 最受影响的是试件介电系数这个参数, 如上所述, 它是一个复数, 即

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\varepsilon' - j\varepsilon''), \quad \tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1-10)$$

式中: ε_0 为真空状态下介电系数, 该值若用 MKS 量纲, 应为

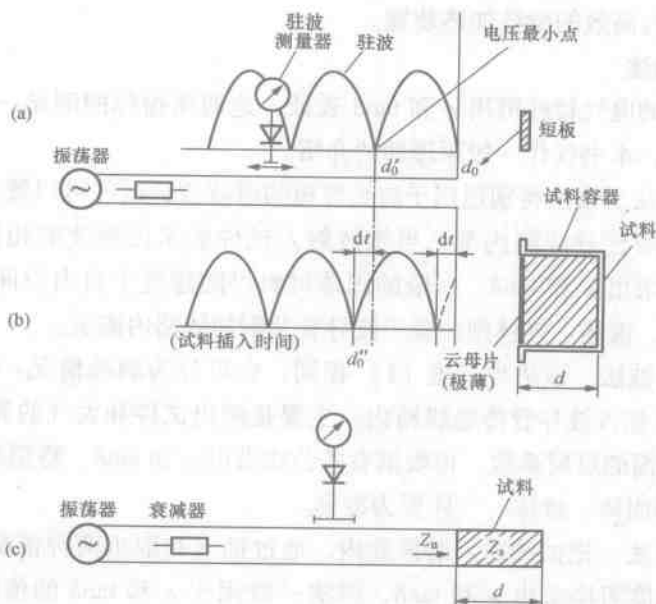
$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \approx \left(\frac{1}{36\pi} \right) \times 10^{-9} \quad (1-11)$$

1.4.2 测量方法

(1) 用波导管的反射法。如图 1-1 所示在波导管的右端垂直地插入试件, 求出插入前端到插入部分的特征阻抗 Z_s , 设试件长度为 d , 管内空气部分的波长为 λ_{g0} 。

求出试件的传递系数 γ_s , 再由有关公式求出 ε' 和 $\tan\delta$ 。

若选用在波导管中以 TE_{10} 模式进行微波传递 (后章详述), 则 TE_{10} 模式的阻抗为 Z_{g0} , 真空时的传递系数 γ_0 是已知的, 则通过以下公式可求出试件阻抗 Z_s , 即

图 1-1 用波导管反射法测量 ϵ 和 $\tan\delta$

(a) 测试初始点电压最小值; (b) 试件插入时进行测试; (c) 测量系统示意图

$$Z_{g0} = j \frac{\omega\mu}{\gamma} \quad (1-12)$$

$$\gamma_0 = (2\pi/\lambda) \sqrt{(\lambda/\lambda_c)^2 - 1} = j\beta_0 \quad (1-13)$$

$$\gamma_s = (2\pi/\lambda) \sqrt{(\lambda/\lambda_c)^2 - (\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (1-14)$$

$$Z_n = \frac{\gamma_0}{\gamma_s} = \sqrt{\frac{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}{(\epsilon' - \epsilon'') - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (1-15)$$

式中: μ 为磁导率; β_0 为波导管的相位常数; λ_c 为波导管的阻断波长; γ_0 为微波在空气中的传输常数。设波导管的模轴长度为 a , 则求出

$$\lambda_c = 2a \quad (1-16)$$

在图 1-1 试件前面 (左侧) 的波导管输入阻抗为 Z_n (波导管的额定特性阻抗 Z_{g0} 已知), 则

$$Z_n = Z_{g0} \tanh \gamma_s d \quad (1-17)$$

经整理可得

$$\frac{Z_n}{j\beta_0 d} = \frac{\tanh \gamma_s d}{\gamma_s d} \quad (1-18)$$