

高等学校教材

微波能应用

刘岐山 编

电子工业出版社

924.76

内 容 简 介

书中详细地论述了各国及我国微波能的应用概况,着重阐述了微波加热原理和各种微波加热器的理论与设计以及今后的发展。全书共分四章,主要内容有微波能应用史,微波加热原理,微波源及电路,行波加热器,腔式加热器,微波泄漏的防护与安全标准,微波等离子体,微波能的各项应用前景。每章末附有思考题及习题,书末附有参考文献。

本书系高等学校工科电子类统编选修教材,可供微波、天线、电子物理技术或其它相近专业使用,也可供教师、工程技术人员,以及微波炉用户参考。

高等学校教材

微 波 能 应 用

刘岐山 编

责任编辑: 洋 溢

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学院印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 11.625 字数: 305 千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数: 1000 册 定价: 2.50 元

ISBN 7-5053-0864-5/TN·305

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之外,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划,由电磁场与微波技术教材编审委员会微波技术编审小组征稿、审定并推荐出版的,责编委王湖庄。

本教材由电子科技大学刘岐山担任主编,浙江大学王湖庄担任主审。

本课程的参考学时数为34学时,其主要内容为四章,第一章概述微波加热发展史,以及各国微波能应用状况。第二章阐述介质特性及微波加热原理。第三章论述微波源及各种微波加热器的理论与设计。第四章讨论微波等离子体,以及各项微波能应用的发展。本课程的先修课程为电磁场与微波技术,已学过的公式与结论多直接引用,不重复推导。本教材力求概念的完整与连贯。使用本教材时应注意,一些较深入的内容,采用小体字印刷,这些内容可以不讲,而作为进一步研究的参考。本书也尽可能地介绍了当前的一些发展,以利于多方面读者的使用。本书每章末附有习题和思考题,书末附有参考文献。

浙江大学王湖庄副教授详细地审阅文稿,微波技术编审小组的同志们提出了宝贵的修改意见,这里都表示诚挚的感谢。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正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 微波能应用史	2
§ 1.3 微波加热装置	8
§ 1.4 微波加热频段	9
思考题与习题	9
第二章 介质特性与微波加热原理	11
§ 2.1 静电场中的介质极化	11
§ 2.2 交变场中的介质极化	14
§ 2.3 电介质特性	30
§ 2.4 湿度与温度对 ϵ 的影响	39
§ 2.5 体积加热理论	49
§ 2.6 热量与质量传递	57
思考题与习题	63
第三章 微波源与加热器	65
§ 3.1 磁控管及电源	65
§ 3.2 对微波加热器的一般要求	72
§ 3.3 行波式加热器	74
§ 3.4 多模腔式加热器	82
§ 3.5 单模腔加热器	97
§ 3.6 其它微波加热器	117
§ 3.7 防止微波泄漏的标准与安全措施	121
思考题与习题	130
第四章 微波等离子体及微波能应用的前景	131
§ 4.1 等离子体的基本性质	131
§ 4.2 微波气体放电等离子体	140
§ 4.3 微波等离子体的应用	150
§ 4.4 家用微波炉	160
§ 4.5 微波加热	162
§ 4.6 微波干燥	163
§ 4.7 微波灭菌与消毒	170
§ 4.8 微波膨化	172
§ 4.9 微波漂白与熟酒	174
§ 4.10 微波加热应用的经济性	174
思考题与习题	177

附录	178
I 水在饱和下的特性	178
II 常用波导	178
III 国产加热磁控管	179
主要参考文献	180

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

微波的发展与应用,是从产生微波振荡与放大的器件出现开始的。1921年与1939年分别制出了磁控管与速调管,它们不但能产生或放大微波信号,而且它们是两种微波功率源,它们的出现为微波加热应用打下了基础。60年代出现的回旋管更把微波推向了毫米波大功率领域,为微波加热应用展示了更广阔的前景。微波自出现以来,主要的应用方面是雷达、导航、电视等通讯领域,它们在二次大战中,以及战后有了飞速的发展。微波全息、微波遥感在经济领域有了多方面的应用。当前,微波固体器件正冲击着常规低功率微波电子管,卫星通讯、光纤通讯正冲击着常规通讯,而且它们二者也相互竞争,微波功率方面迅速进入了微波加热应用,家用微波炉已走入了人们的家庭。

自60年代,尤其是70年代以来,家用微波炉以人们未料及的态势,飞速地发展了起来。首先在美国和日本,微波炉进入了人们的家庭,成为烹调的得力工具。70年代中期以后,这两个国家的家用微波炉产量都在几百万台水平上,产值几亿美元,于是微波能应用工业以一种产业的形式崛起了。与此同时,人们正从理论上计划着充分利用太阳能,通过微波把未来空间站或月球上的太阳能电站的强大电力传送至地球。人们也正从理论上和实验上用高功率微波加热等离子体,以产生受控核聚变。这些微波能应用的研究课题,把微波能应用提高到了家庭生活必需品,科学与未来的广度和高度。1984年IEEE创刊百周年的纪念文章中,把微波生物效应及医学应用,微波加热,未来太阳能电站电力的高功率传输,都分别作为一个题目,写出历史与发展的总结性文章,这些文章与有关雷达,通讯,以及光纤的文章完全是并列的。

微波对物质(微波中称为介质)要产生物理、化学及生物的效应,微波能透过地球大气层中的等离子体放电层进入宇宙,利用这些性质所进行的传送能量,加热物质,合成材料,乃至医疗服务都属于微波能应用的范畴。一般来说,又可把这种应用分为高功率及低功率两个方面。高功率应用包括加热、干燥、消毒、微波医疗、微波生物学、微波等离子体及高功率传输等。产品有家用微波炉,医用微波装置,工业微波装置等。低功率应用包括利用微波技术、计算机、传感器等现代技术实现测电介质、测湿、测厚、测长、测温与工业控制,又把它称为微波非电量的测量,这方面基本不属于本课程研究的范围。

微波能应用从科学意义上讲,也可看成是一种属于横向发展的,带有综合诸多学科,如物理、化学、电工、机械、加工工程、热动力学、材料科学、医学、等离子体、微波技术及电子学的一个学科,这构成了它的复杂性,也显示了它的趣味性。但本课程仍主要限制在加热原理及加热器的基本分析方面,适当包括微波激发的等离子体。

§ 1.2 微波能应用史^[8]

1. 微波加热的早期历史

1937年德国人卡勒在他们的火花隙微波发生器专利中提出,“在几分之一毫米至2米的波长范围,产生的加热不仅是一种温升,而是偶极子物质内部能量含义的变化,因此有一个化学状态的变化”。他实际上提出了透热疗法中产生的微波非热效应,此观点为当时的德国医生们所接受,另一些高频生物效应由测试高频电子管的工人所报告,在10~150MHz, 5~15kW的频率与功率电平上,测试工人发生了头痛及其它一些感觉,而在比同时在医院里设立了高频透热疗法,治疗风湿、软组织损伤。

1940年一部影片“Richmond Ua”摄制了一组镜头,使胶合板在高频加热下迅速实现胶合剂硬化的技术。

二次大战中,射频加热的工程设计已完满地建立起来,已认识到振荡管与负载的耦合是完好工作的最主要的问题,并认为应小心地控制功率源的频率与噪声,防止对通讯的干扰与破坏。1945年,美国联邦电信委员会(FCC)分配了三个频率,13.66、27.32、40.98MHz为自由辐射频率,1947年又规定,在1000英尺*高空的辐射应小于 $25\mu\text{V}/\text{m}$,带宽为5MHz。这些规定一直沿用至今。二次大战中,汪·赫伯领导的MIT辐射实验室进行了多种材料介电特性的测量,这项工作是一种带基础性的工作,不仅对射频加热器而且对当时的电话、通讯、雷达的发展都是重要的,其结果于1954年公布。

二次大战结束,微波电子管市场衰落到了低点,微波加热是主要寻求的出路。从当时申请的专利可以看出,美国一些公司的兴趣在工业微波加热与透热疗法上。如1950年的几个专利是关于如何加热一个轮胎,传送带食品烹调系统和多个磁控管平行向波导系统馈能等。开始了研究对橡胶、纺织品、木材、塑料进行微波加工的可能性。虽然如此,微波加热的工业应用进展仍比较缓慢。

美国的另一些公司把兴趣转向了微波炉。1949年Spence提出了“烹调腔”这个名词,并称加热装置为“微波炉”,他用此微波炉作快速加热来爆玉米花,观看鸡蛋爆炸,甚至在实验中还发现了自己口袋中的冰糖棒融化了。他后来成了雷声公司(Raytheon)的技术负责人。1947年通用电气公司(GE)报导了另一种原型炉。随着微波加热应用的发展,以上两个公司都提出了微波炉使用频率的申请,雷声公司提出2450MHz,其优点是可容许轻的负载及较好的耦合,尺寸小,而可用多模腔改善加热均匀性。通用电器公司则提出了915MHz,其优点是穿透深度大,解冻中热失控小。1947年FCC批准了这两个频率,分配给微波加热使用,并一直沿用至今天。

2. 微波加热在美国

60年代雷声公司支配着美国的微波加热市场,它大力推进微波炉进入餐馆,并成为

* 1英尺=25.4cm——下同。

炉用磁控管的主要生产厂家。这十年里,微波能的 120 个专利中,雷声公司拥有一半以上。它生产了 600W 及 1.6kW 的微波炉,还进行了大量研究工作,如土壤消毒,蘑菇漂白,冰冻马血浆升温,橡胶成形,塑料制造,铸芯制陶,食品加工等。同时出现了许多竞争对手,最突出的是 Tappan 公司,它大力发展了雷声公司忽视了的家用微波炉,并占据了美国家用炉的市场,这个时期每台微波炉的售价都超过了 1000 美元。

微波能的发展与微波电子管的发展紧密相关,1949 年美国微波管的年销售值降至 1 千万美元,后来由于朝鲜战争,越南战争,1962 年又升至 1.6 亿美元,以后又有下跌,各个公司于是都努力去寻找非军事市场。这个时期前微波管的主要市场是雷达、电子干扰(ECM)、通讯等,以军事需求为主。空间系统的市场当时正在开始,用量很小。1964 年研制了一个 915MHz、20~30kW 磁控管,具有 80~90% 的效率,这个产品奠定了磁控管作为微波功率源的主要地位。激烈的竞争还是主要在家用微波炉用磁控管上,不久 Litton 公司推出了新型加热管,取代了 Tappan 家用炉中使用的雷声制的磁控管,同时,新日本无线电公司又发展了一种 2450MHz、700W、钽钨阴极、同轴输出、空气冷却的新管种,雷声公司又把这种日本管子改进成一种新型号 QKH1381,被广泛用于微波炉。同期 GE 公司推出了 915MHz、700W 的家用微波炉,荷兰的 Philips 公司也设计了 2~5kW 磁控管,一时间微波加热市场在美国、日本、欧洲热起来了。1963 年还召开了第一次微波功率会议。

美国的微波加热兴起于西海岸,搞了许多探索,如尼龙丝烘干、软糖烘干、纸干燥、公路颜料干燥、橡胶成形、装订、肉升温、乙醇脱水、人造橡胶加热、砂芯硬化、鸡烹调、干燥磁带、土豆片干燥等,最大的单机功率达到 80kW(土豆片干燥),并企图用这个机器改装成金矿石粉碎机,或建筑物粉碎机。但是主要由于可靠性、经济性和与消费者间关系等原因,西海岸的微波加热冒险失败了,就技术原因而言,还有神秘的波导和加热器中的打火问题等,据认为这是由于高功率微波与工业环境的灰尘是不相容的。

西海岸的诸多公司中,只有 Microdry 留下来了,Litton 公司停止了工业加热分部,集中于餐馆用微波炉的研制与生产,并一直在 1970 年前控制着美国的市场,后来它又把这种 Mode 500 型微波炉用到了飞机上。

1966 年,仅有 1 万个微波炉在美国家庭中使用,普及率低的原因主要在于它的价格,以及人们的认识与了解需要一个过程。1967 年雷声改进日本的磁控管后,使价格大幅度下跌,每台炉子降至 495 美元。70 年代的家用户主要生产者是 Litton 公司,它们主要是 2450MHz 型,改进了密封门,天线搅拌器或转盘,有的装上了微电脑。以后日本的微波炉大量拥进美国市场,加剧了竞争,促使了简易炉价格进一步下跌,80 年代中期美国把二条微波炉生产线转让给了南朝鲜,以寻求更便宜的劳动力市场,自己不再生产微波炉,只生产某些重要部件。当前微波炉的最低价格已跌至 69 美元,一个炉用 600W, 2450MHz 的磁控管仅 8~10 美元,目前美国的家庭拥有率已超过 70%。炉子价格的下跌主要归功于磁控管价格的下降,见图 1.1,炉子价格的下跌就加快了向家庭的普及。目前美国市场的炉子,多都是带有电炉丝的自清洁式,内炉表面的污垢,可用电炉丝加热至 500℃ 烧去,体积 1.6~2 呎³。家庭中普遍使用它作为快速加热器,主要用于加热预烹调食品,如塑包食品、早点、牛奶等,也用于解冻、消毒、温饭、饮料加温等。图 1.2 给出了按年度的家用微波炉销售量。

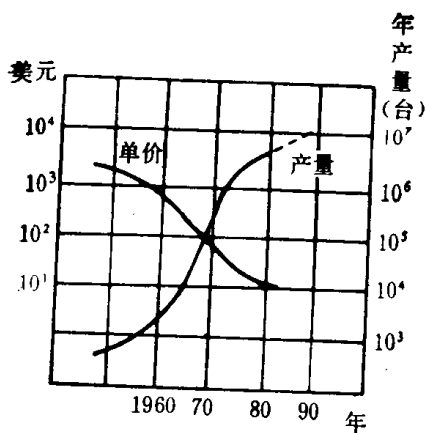


图 1.1 烹调磁控管单价、产量预测

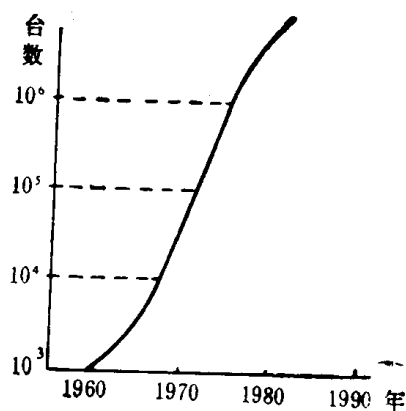


图 1.2 美国按年度销售的家用电微波炉

可是工业微波加热的市场一直只是缓慢增长着,有时是波动的。这是由于技术上的不成熟、对微波的恐惧心理,电价格的上涨和与消费者关系等因素,1984年仅达到1000万美元。

3. 微波加热在日本^[10]

日本的微波能工业是从家用微波炉发展起来的。70年6月30日,日本政府公布了微波泄漏应低于 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 的标准,这个值低于当时美国标准 $10\text{mW}/\text{cm}^2$,日本人认为低于美国标准就是安全的,71年以后,微波炉的售量就开始大幅度上升,见图1.3。在74年石油危机后又有所下降,在此时期制造商们又以更加多样的品种,及高的质量来增加微波炉的销量,如使用了水平风冷型高效磁控管,以铁氧体代替磁钢而大大降低管子价格,从而促成了微波炉向美国市场的打入。微波炉品种甚多,主要有两类,一类是高档炉,它具有尽可能多的功能,如带电脑控制,带测温和发褐元件,可调功率,煤气-微波复合炉等。另一类是低档炉,它的特点是适用条件下尽可能低的价格。主要的微波炉厂商是夏普(Sharp)、东芝(Toshiba)和日立(Hitachi),夏普是美国市场的主要竞争者,它的炉子代表了70年代的水平。目前已出现了固态微波源的炉子,在功率、价格二方面看来,它的普及

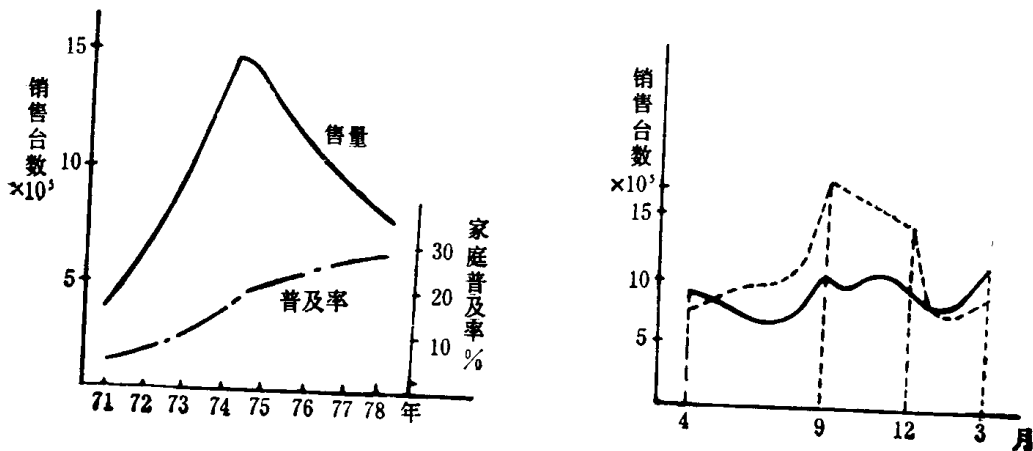


图 1.3 日本微波炉的年售量与月售量

可能比较遥远。日本人把微波炉的优点归结为三点：方便、快速、节能。这里要提到的是与此同时，70年代苏联已有了自己的600W,220V微波炉供应市场，中国的微波炉组装件则是84年引入的，并小量投入市场。

在工业利用方面，由于有了美国西海岸失败的教训，日本微波工业加热的发展，是注重效益，稳步发展的。从稻草席灭虫开始，1971年就安装了34台，550kW。由于注重效益与实用截止到78年底总的安装容量已达4MW，见图1.4，每年增加容量见图1.5。日本工业微波加热发展的原因可归结为三点，一是家用微波炉普及解除了人们的心理恐惧，二是注重实用、效益、稳步发展，三是提供了优良质量的磁控管。日本的磁控管用于工业加热在频率2450MHz是1.4kW,5kW两种，915MHz为30kW一种，它们的寿命在2000小时以上，有的超过5000小时。由于速调管控制复杂，价格昂贵，目前微波源主要还是使用磁控管。大功率加热系统需要多只磁控管馈能。

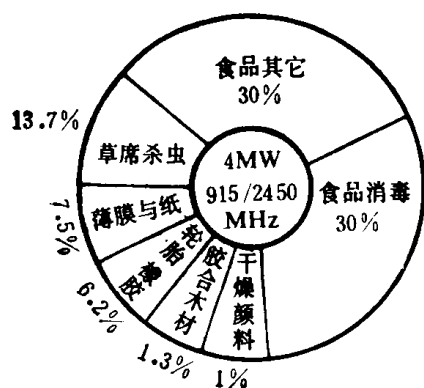


图 1.4 日本的工业微波应用

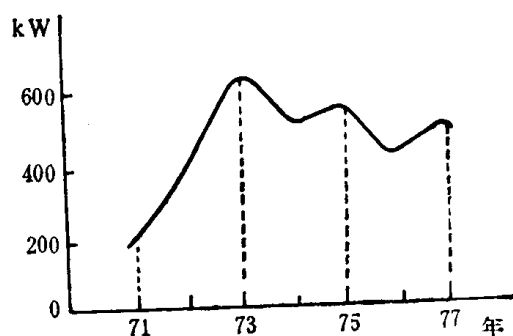


图 1.5 日本每年增长的微波加热功率

日本工业加热的主要应用是：

1) 杀菌

日本气候潮湿，发霉是食品的一大问题，海绵蛋糕用5~10kW微波辐照2分钟，温升至70℃，15天不发霉，不处理的5天内发霉。

2) 膨化与干燥

膨化后的食品，味香而脆，这种加工的容量为1MW，包括爆米花，海味，快餐面、散子、烤酥等加工品。

3) 解冻

它不造成常规法产生的流汁损失，更易保鲜，营养，节省时间。一般从-20℃升温至-2℃，一台915MHz,25kW的设备每小时可解冻800kg。

4) 杀虫

免除了农药灭虫对人体的危害，微波辐照草席升温至60℃或稍高，虫与卵都可杀死，为了推销，他们当场表演杀虫效应。

5) 橡胶加热

一般用于硫化前预热,挤压出的制品由微波加热至 100°C ,再由热空气加热至 $160^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 硫化,微波加热提高了对不导热橡胶的加热效率,大大缩短了加热时间。

其它的项目有烘漆,它用微波与远红外复合干燥,前者功率 5kW ,后者为 39kW ,每小时可烘干 2500 件。还有铅笔干燥、安瓿针剂消毒、烘烟、干燥胶片、铸芯等。另外,也发展了等离子体蚀刻半导体表面技术。低功率应用有温度计、入侵警报器、自动门传感器、车防撞装置等。在医学上有与 X 线联合治癌、杀生器等,总功率为 50kW 。

4. 微波加热在英国^[11]

英国 40 年代就已引入射频加热,至今射频加热仍占整个高频加热的 90%,微波加热只是少量的。已成熟的射频加热项目是木材胶合,从最早的老式蚊式轰炸机的机架到一般木器,都广为使用。在英国射频加热如木工用圆盘锯一样普通,一般有胶合线加热、通过式和杂散场三种加热方式,应用频率为 13.56MHz ,更高频率易引起打火。加热时都要同时加压,胶合剂为间苯二酚、三聚氰胺、尿素和聚醋酸乙烯酯,接合时间为 $5 \sim 10$ 秒,大件可到 40 秒。其它的射频加热项目有鱼块解冻、烘烤饼干、液化蜂蜜、干燥木材、纺织品真空射频干燥、纸湿成形等。微波加热主要限于轮胎预热、硫化前预热、肉解冻等。英国人认为射频加热是可靠的。采用射频还是微波取决于使用者和具体情况。

5. 我国的微波能应用^[16]

我国的磁控管生产开始于 50 年代后期,速调管(多腔)稍晚,而微波加热的探索则开始于 70 年,主要由电子部的几个微波管的生产厂如南京电子管厂、贵州宇光电子管厂、成都国光电子管厂、甘肃虹光电子管厂、江西景光电子管厂以及上海灯泡厂进行研制与生产微波加热管和加热设备,截止到 1983 年底,已能生产出 2450MHz , 0.2 、 1.5 、 5 、 10kW ; 915MHz , 0.7 、 5 、 10 、 20 、 30kW 的磁控管,并销售出 3195 只,217 万元。生产出包括热疗机、烟叶复烤机、鹿茸干燥机等 20 个品种的产品,销售出 619 台,约 576 万元,总工作容量约有 1.8MW 。最成功的项目是木材烘干,有 680kW ,烟叶干燥,有 580kW ,这两项占售出功率值的 $2/3$ 。售出热疗机约 83 台, 40kW 。

我国的微波炉生产正在酝酿中,上灯、国光等厂已试制出家用微波炉用加热管。目前,正在向提高质量、降低价格方面努力,看来要想进入国际市场还需在基本元器件上下一番功夫。我国的工业微波应用已有了好的开端,但是仍遇到别国同样的问题,稳定性、可靠性、经济效益、与消费者关系、还有我们国家的电力不足等,都需要认真去解决。

6. 新的微波加热应用

在微波炉方面,对进一步减小重量与售价的大趋势,固体源的采用肯定会是一个方向,但现有炉子还会改进与完善,可是价格不会有大的突破。销量在不同的地区会有所不

同,美国、日本已趋饱和,西欧、加拿大、澳大利亚、东欧、苏联还会有较大市场,第三世界国家的销量也会增加。

在工业利用方面,除了行之有效的加热、烹调、解冻、漂白、熟化酒、干燥、膨化、消毒等效能会平稳发展外,目前微波等离子体在美国有较大发展。这种等离子体的效率比直流及高频等离子体的效率要高 10 倍,由于电子温度比在等离子体中的离子温度高得多,而处理环境温度主要决定于离子温度,因而可有低的等离子体加工温度,对半导体基本上可在常温下沉积,而一般电阻式或电子束加工的加热温度要 900°C 以上,致使设备大而昂贵。微波激发等离子体可在宽的压力范围下进行,如从 $1\sim 10^{-5}\text{Pa}$,而在 $10^3\sim 10^4\text{Pa}$ 下最易激发。目前的应用主要是沉积金刚石膜、太阳能膜、超导膜和光纤等。在极高功率上,微波激发的等离子体,可对等离子体加热,控制等离子体的温度,进而达到控制核聚变的目的。

在高功率传输上,所谓利用太阳能发电的宇宙空间站计划,已经在理论上进行了研究,从 1978 年开始召开了多次国际会议,并建立了专门的刊物“Space Solar Power Review”,美国宇航局 NASA 提出了 500 万瓩的试验电站方案,按此方案,空间天线阵直径 1km,空间天线由 7000 个小天线点阵构成,每个点阵 100m^2 , (相当于半径 $r = 5.6\text{m}$ 的圆),使用 2450MHz , 10 万只速调管,每只管子功率 70kW ,效率 80%,加速电压 40kV ,而地面天线阵直径则为 10km ,空间与地面天线间的转换效率为 70%,地面上每个微波管的效率应为 90%。这个方案的可行性取决于:

(1) 选择最佳的微波管。高效率、耐高温、高输出功率、高的功率质量比、低的本征噪声电平和长的寿命。

(2) 宇宙天线应有最佳方向图。

研究认为这种宇宙电力系统中用的微波管只能是速调管、磁控管或泊管,以磁控管最好,它有高效率(已达到 85%)高的 P/m 比(已达 2.5kW/kg)。美国国会已决定对此计划进行资助,87 年加拿大还进行了微波能供动力的无人飞机试验,并在电视上播放。机名锋利 5 号,升空 80 米,4 分钟,机翼宽 3.5 米,下一个目标准备用它取代通讯卫星。目前该方案的拥护者们认为,第一个宇宙电站可望于 2000 年投入使用,电的价格相当于煤的发电价格,当收回成本后,电价可降低一半。而反对者们认为电站的造价超出了美国的经济能力。1980 年确定的预算为 13000 亿美元,现已压低了 60%,实际的投资可能是 1 万美元/瓩。这项计划的最近发展是提出了利用此项技术,把一个电动的使用离子推进引擎的飞船从低地点轨道送向地球同步轨道,甚至供给低地点上飞船或卫星的动力,这就必须首先在空间产生强大的电力,可以使用太阳光电池阵或核电,再则要把几百瓩或几兆瓦的微波功率在空间集中起来。

7. 国际微波能协会

在微波能应用迅速发展的形势下,1966 年,在 IEEE 范围里,一个新的组织——国际微波能协会成立了,建立于加拿大,现迁往美国。国际微波能协会 (IMPI) 出版有会刊“Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy”,一年四期,每年有 40 篇文章发表,包括在工业、生物学,医学和食品等方面的应用文章。1979 年它又分成二个部

分,第一部分取名为烹调应用部 CAS,第二部分称为工业、科学、医学和测试设备部 ISMI,并在出版季刊微波功率杂志的同时,还出版新闻刊物“Microwave world”,适用于家庭与烹调爱好者。IMPI 是一个国际学术性组织,在 70 年代有会员几百人,目前会员已大量增加,他们的分布是 50% 在美国,20% 在加拿大,30% 在日本,东欧、苏联少于 3%,我国也有少量会员,并于 1981 年开始派代表参加每年一次的学术年会。

最后,引用 IEEE 协会的理事 (Fellow) John·M·Osepchun 的一段话,“微波炉作为一种重要电器在美国与日本家庭存在之后,微波加热领域已变得非常稳固,世界性的扩展至其它国家只是时间问题。工业市场是落后的,由于技术上的原因,它肯定会进入自己的发展期。在不太远的将来,多数无线电通讯、电视服务将会为电缆、光纤网络所代替,也就是为非辐射工具所代替的同时,微波加热应用会在电磁技术里处于一种主要的统治地位,而与光纤平行发展(非发射模式)。”

§ 1.3 微波加热装置

一个微波加热装置应包括以下三个主要部分,微波功率源,加热器和控制器。参见图 1.6。

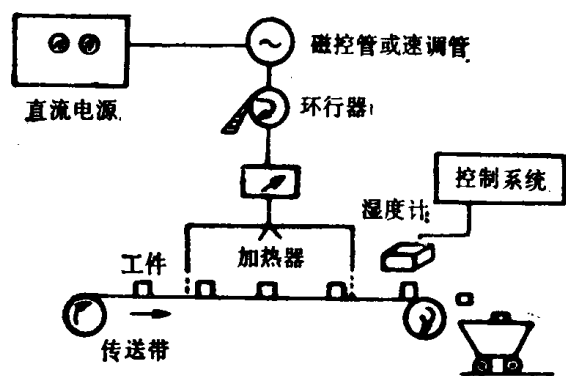


图 1.6 微波加热装置示意图

微波功率源

它是提供微波功率的装置,包括微波电子管,如磁控管或速调管,以及为它提供直流能量的直流电源和传送微波功率到加热器的传输波导系统,一般在磁控管后面接有大功率环行器,它具有防止在加热器失配或大驻波状态下吸收反射回微波管功率的能力,因而保护磁控管正常工作,不致发生管内打火而造成

损坏。传输线上的功率监视器可以指示线上功率的大小,以及线上的驻波值。

加热器

它是微波功率对材料或工件进行加热的装置,又称辐照装置或利用器。这种加热器一般分为传输式和谐振式(腔式)二种,材料在此区域里产生换能,即转换微波能为对材料的加热和温升,它是一个微波加热装置最为重要的部分,决定着加热的效率、经济效益与安全。加热器有时带有传送带系统、通风系统、热风系统、或真空系统。

控制器

它是成品的质量检测与反馈控制系统。可配置微波或其它的测湿、测温、测厚装置,通过计算机控制反馈信号来改变传送带电机的转速,或者改变热风的流速及流量,或者调制微波源的功率以达到控制产品质量的目的。

§ 1.4 微波加热频段

从电磁兼容方面考虑,在世界范围里,为了防止加热应用频率对通讯、电视的干扰,共同制定了一些公认的频率为微波加热所专用,对非专用的频率则不能任意使用作加热频率。1979年世界行政无线电会议 WARC 经过协商,公布并校正了原有的工业、科学、医学用的频率,这些规定为各国所遵守,列表于下:

表 1.1 WARC 颁布的工业、科学、医学使用频率表—1979

频率 MHz	区 域	条 件
6.765~6.795	全 球	国际通讯联盟 ITU 属无线电协商委员会 CCIR 特别授权限制频段内,频段外的功率密度
13.553~13.567 26.975~27.283 40.66~40.70	全 球	自由辐射频率
433.05~434.79	在欧洲、部分亚洲国家、西德、澳大利亚、列士敦、葡萄牙、南斯拉夫等限定的国家内	自由辐射频率
433.05~434.79	上述其余国家地区	由 CCIR 特别限定功率密度
902~928	西 半 球	自由辐射频率
$2.4 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^3$	全 球	自由辐射频率
$5.725 \times 10^3 \sim 5.875 \times 10^3$	全 球	自由辐射频率
$24.0 \times 10^3 \sim 24.25 \times 10^3$	全 球	自由辐射频率
61~61.5 $122 \sim 123 \times 10^3$ 244~246	全 球	CCIR 在频段内、外特别限定功率密度

目前主要应用的加热频段,对射频而言有使用更高频率的趋势,以减少打火,提高加工速度。一般大件多用 13MHz,小件用 40MHz。434MHz 主要为医用,它比 915MHz 有更大的穿透深度。915MHz、2450MHz 则是主要微波加热使用的频率,这两个频率的选择取决于加工材料与其尺寸大小,类似于射频,对大件,要求穿透深的应选 915MHz,对小件,以及家用微波炉都用 2450MHz。显然还有广阔的频段没有充分利用,尤其是毫米波段上,这有赖于更便宜、更可靠的大功率微波管的问世。

思考题与习题

1. 微波能应用的范畴是什么?
2. 早期美国微波加热失败的原因何在?
3. 微波炉的价格不断降低在它的发展中是否起了关键的作用。
4. 为什么说微波炉的生产与普及使微波能工业形成了一种产业?

5. 应该怎样认识微波能的工业方面的应用及其前景?
6. 美国、日本、英国的微波加热工业各有什么特点可为我国借鉴?
7. 国际微波能协会 IMPI 是个什么样的组织,有什么出版物?
8. 新的微波能应用主要可能向哪些方向上发展?
9. 一个完整的微波加热器应包括哪几个主要部分?
10. 微波加热的主要应用频段是哪二个? 为什么原因?

第二章 介质特性与微波加热原理

§ 2.1 静电场中的介质极化

1. 极化

在静电场中,若在平板电容器中放入介质,介质分子中的正负电荷会产生微观尺度上的相对位移,由于分子的束缚,这种位移电荷并不能形成电流,只是在电介质内形成偶极矩,偶极矩方向是从 $-q$ 指向 $+q$,顺电场方向排列。于是在垂直于外电场的介质表面上出现了与极板电荷反号的极化电荷,或称束缚电荷,这种介质内部产生沿电场方向感生偶极矩的现象称为极化,或电介质的电极化。顺电场方向有序排列的极化电荷属于束缚电荷,不能流动,伴随外电场而产生,又随外电场而消失,当外电场消失时,束缚电荷的有序排列在宏观上就消失了,介质表面上的极化电荷也消失了,原强迫定向的束缚电荷又处于杂乱的热运动中。极化时,实际上只有部分电力线终止于表面极化电荷上,另一部分穿入介质内部,这部分未为表面极化电荷屏蔽而穿入介质的力线,使介质内部电场不为零。若介质是真空时,内电场最大,若介质换为金属时,内电场为零。

现研究一个外加直流电压的固定电容器,真空填充时,极板上的电荷面密度为 σ_0 ,若填入介质后,部分力线终止于极化电荷上,为使极间电场 $E = U/d$ 不变,必须补充到极板上额外的电荷 Q' ,或额外电荷面密度 $\sigma' = Q'/A$, A 为极板面积。此时总电荷面密度

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma' \quad (2.1)$$

由于 σ 增大,电容填充介质后使电容量增大

$$C = \frac{\sigma A}{U} = C_0 + \frac{\sigma' A}{U} \quad (2.2)$$

C_0 为真空填充时的电容量,定义介质与真空填充下电容量之比

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \frac{\sigma'}{\sigma_0} \quad (2.3)$$

ϵ_r 称为相对介电系数,值大于 1,表征直流场下介质产生极化电荷能力的强弱, ϵ_r 大的介质极化能力强, ϵ_r 小的介质极化能力弱。介质的极化显然可用产生束缚电荷面密度值来衡量

$$\sigma' = (\epsilon_r - 1)\sigma_0 = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E = (\epsilon - \epsilon_0)E \quad (2.4)$$

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 为介质的介电系数。

极化就是介质中产生了感应偶极矩,因此可用单位体积内感应偶极矩的矢量和来定义极化强度,用它表征极化的大小。