

高频介质加热技术

陈新谋 刘悟日 编著

科学出版社

内 容 简 介

高频介质加热技术是近三十年发展起来的一门新技术，其应用领域正在不断扩大。

本书系统地介绍了高频介质加热技术的原理和应用。内容包括：高频介质加热的原理、特点和应用范围，介质的高频物理特性，高频设备中的工作电容器、大功率电子管，功率振荡器等主要装置和电路元件的原理与计算，高频设备的附属电路，高频设备的安装、调试和使用维护以及几种典型的高频设备。

本书叙述力求通俗易懂，深入浅出，着重物理概念，而没有繁杂的数学推导。可供从事高频系统设计、生产和使用的工人、技术人员阅读，也可供工农业加热领域中从事技术革新的人员参考。

高频介质加热技术

陈新谋 刘悟日 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

湖南省新华印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年8月第一版 开本：787×1092 1/32
1979年8月第一次印刷 印张：9 3/4 插页：1
印数：0001—17,800 字数：223,000

统一书号：15031·218

本社书号：1339·15—7

定 价：0.80 元

前 言

高频介质加热是近三十年发展起来的一门新技术，它的应用领域正在不断扩大。近年来，这门技术在我国得到了迅速发展，应用在塑料热合、木制品加工、农副产品加热和烘干、杀虫灭菌等方面都取得了可喜的成果。由于高频介质加热具有加热速度快、加热均匀、有选择性、产品质量好、易于实现生产自动化等一系列优点，所以目前在工业、农业和科学研究等方面的应用越来越广泛。可以预料，高频介质加热技术的应用范围随着高频设备的不断改进还将逐步扩大。

高频介质加热技术和其它电子技术一样，它的有效应用有赖于各有关方面的协同努力。就拿高频介质加热设备的研制来说，虽然这主要是电子工业部门的任务，但也需要机械加工部门及各个应用部门的紧密配合。而整个高频介质加热的工艺设计和自动化，更要求与相应的工艺技术和自动化技术结合起来。因此，高频介质加热技术的发展就不只是从事高频技术工作的人的事，也需要其他有关部门特别是应用部门的人的共同关心和努力。我们编写本书的目的，就是试图比较通俗地系统介绍高频介质加热技术，供从事高频介质加热系统设计和使用的人员参考。

本书编写过程中，曾得到许多同志的热情帮助和支持。铁岭电子设备厂吴士毅技师、钟瑞璋工程师曾审阅过部分草稿，鞍山钢铁学院李培廉教授、北京市木材厂刘建民工程师曾仔细校阅过全部初稿。借本书出版的机会谨向这些同志表示深切的谢意。

由于我们专业知识和实践经验都不足，书中错误和不妥之处一定不少，欢迎读者批评指正。

编著者

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 高频介质加热的原理、特点及应用范围	8
第三节 高频介质加热系统技术指标的确定	17
第二章 介质的高频物理特性	30
第一节 介电常数 ϵ 和损耗角正切 $\tan \delta$ 的物理意义	30
第二节 介电常数 ϵ 和损耗角正切 $\tan \delta$ 的测量方法和仪器	38
第三节 介质的临界击穿场强	48
第三章 工作电容器	50
第一节 工作电容器的计算方法	50
第二节 工作电容器的配置	55
第三节 工作电容器的制作	63
第四节 典型工艺装置介绍	65
第四章 大功率电子管工作状态的计算	96
第一节 大功率电子管的特点及参数	96
第二节 等流曲线工作状态计算法	101
第三节 如何提高电子管的阳极效率	115
第五章 功率振荡器原理及计算方法	121
第一节 功率振荡器原理	121
第二节 振荡电路的构成及计算方法	130
第三节 超高频自激振荡器	133
第四节 匹配电路的计算	150
第五节 自激振荡器的相角补偿	166

第六节 多负载情况下的功率分配	169
第六章 电路主要元件的选择和结构的计算	177
第一节 电感线圈	177
第二节 电容器	184
第三节 分布参数系统	191
第四节 绝缘材料与绝缘子	202
第七章 高频设备的附属电路	207
第一节 高压整流器	207
第二节 电子管灯丝供电电路	223
第三节 控制电路	228
第八章 高频设备的安装、调试和维护	234
第一节 高频设备的冷却装置	234
第二节 设备的接地	244
第三节 设备的屏蔽	246
第四节 高频设备的调试	248
第五节 寄生振荡及其防止方法	270
第六节 指标的测定	275
第七节 高频设备的维护	278
第九章 典型设备介绍	290
第一节 GP 06-J7 型高频设备	290
第二节 J-107 型高频设备	294
第三节 GP-3.5C 型高频设备	297
第四节 GP8-J5 型高频设备	300
第五节 GP20-J9 型高频设备	303

第一章 绪 论

第一节 概 述

一提起工业加热，人们自然就想起了以阳光、煤炭、石油和工频（50 赫兹）电力作能源的热风机、烘房、烘箱和电炉等。但是，除此以外，近三十多年来又兴起了一门新的加热技术——高频加热。高频加热也是工业加热的一个方面。它的热量主要是依靠每秒钟变化几万次、几百万次，甚至几亿次的电磁场对物体进行作用来产生的。由于电磁场变化很快，所以叫作高频电磁场¹⁾。高频加热又可根据不同的特点分为高频感应加热、高频介质加热、高频等离子加热和微波加热等。其具体分类及它们所对应的频谱关系如表 1-1 所列。

从表中可见，高频感应加热所使用的频率通常在 100 千赫至 1 兆赫之间。高频介质加热及高频等离子加热通常在 1 兆赫至 100 兆赫之间。微波加热则在 300 兆赫以上。

高频感应加热的对象主要是铁磁性金属材料或者通过石墨坩锅加热各种金属，合金及半导体材料。其工作原理大致可用图 1-1 来说明。被加热的铁磁性材料制成的工件放在通有高频电流的感应圈之中，高频电流在感应圈的轴向上感应出高频磁场，高频磁场在金属工件中产生涡流损耗而使工件发热来实现加热工件的目的。感应加热主要用于焊接、金属熔炼、金属热处理（淬火、回火）以及半导体提纯等方面。

1) “高频”这一名词在现代无线电频谱上定义不是很严格的，这是历史上沿用下来的名词，实际上包括了长、中、短、超短波的笼统称呼。

表 1-1 高频加热的种类及其对应的频谱

频谱	100千赫	1兆赫	10兆赫	100兆赫	1千兆赫	10千兆赫
分类	中频加热		高频感应加热		微波加热 (同高频介质加热)	远红外加热
细目			高频等离子加热	高频介质加热		
应用举例			磁场等离子	热反应		
			电场等离子	烘干		
			热核反应	化学反		
			光谱分析	反应		
			化学反应	生物学作用		
			熔炼	电疗		
			半导体提纯	玻璃钢固化成型		
			金属熔炼	胶合		
			金属热处理	粮食、皮革、丝绸、木材烘干		
			焊接	失蜡脱模		
				塑料热合		
				电木粉加热		
				硅片光刻去胶		
				机场驱鸟		
				种子处理		

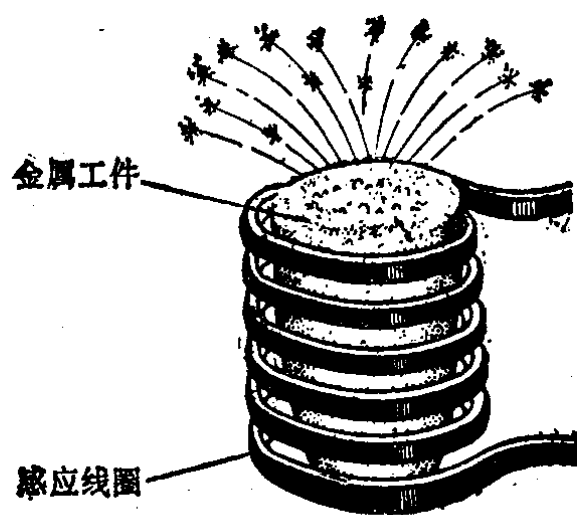


图 1-1 高频感应加热示意图

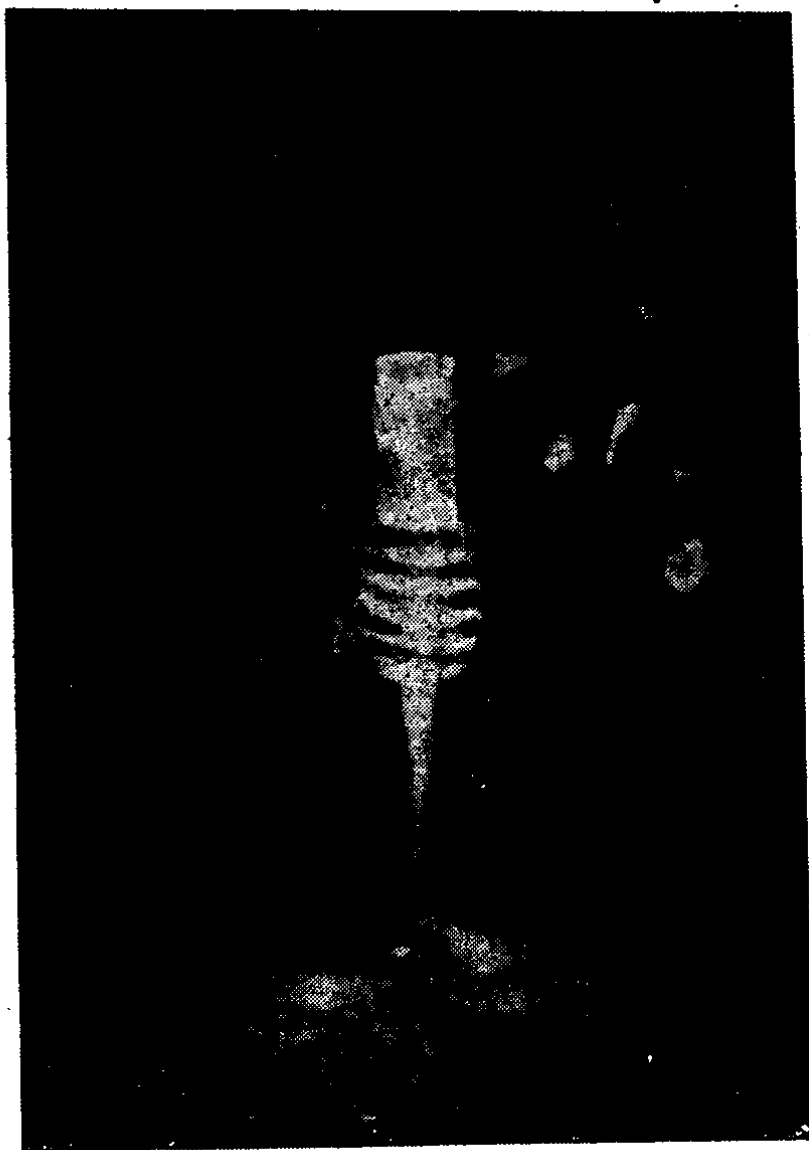


图 1-2 高频感应等离子体熔制石英

高频等离子加热还可细分为高频电场等离子和**高频磁场等离子**。高频磁场等离子加热的输出方式与感应加热有某些相似之处。例如，它们都通过感应圈输出。如图 1-2 所示。所不同的是，它的加热方式不是靠高频涡流损耗，而是靠高频等离子体；在感应圈中放置的不是金属工件，而是石英管。管内通以 Ar, O₂ 或 H₂ 等气体，或者直接用空气气流，通过高频磁场使气体电离形成能量巨大、温度极高的等离子弧。这种等离子弧的温度可达 1 万度到 3 万度以上。利用等离子弧可以熔炼各种高熔点材料，促进其化学反应。例如利用等离子弧熔制具有高纯度的光学石英玻璃，可以制取二氧化钛和二氧化钇等。近年来，高频等离子弧又被用于光谱分析。由于高频磁场等离子弧具有温度高、火焰稳定、而且火焰具有“中空”形状，所以高频等离子光谱分析与目前采用的各种光谱分析方法相比较，具有十分明显的优点，如灵敏度高，准确性、稳定性好，组分影响小和背景清洁等。图 1-3 是高频等离子光谱分析系统的灯具示意图。

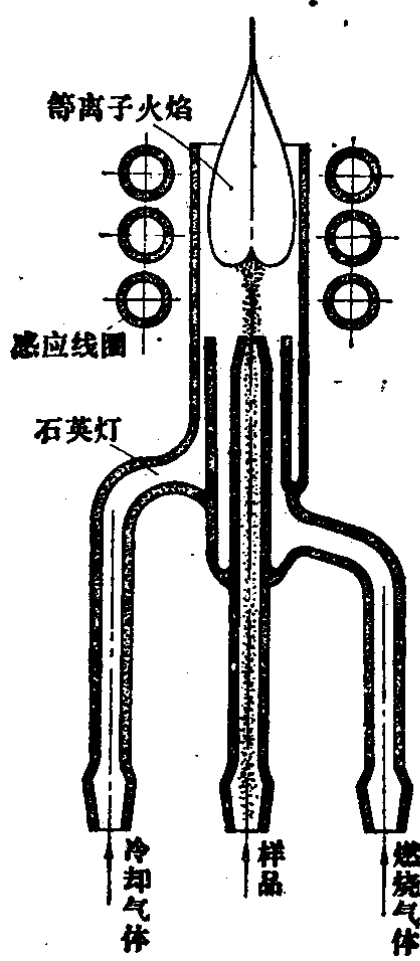


图 1-3 高频等离子光谱分析灯剖面

而高频电场等离子一般是在低压密闭的容器里通过高频电场的作用使气体分子放电离解成正负电荷相等的等离子形成的。通常又叫做低温等离子。图 1-4 是产生电场等离子体装置的示意图。其典型用途可举硅片去胶为例说明。

集成电路在制片过程中需要除掉光刻胶。光刻胶是一种

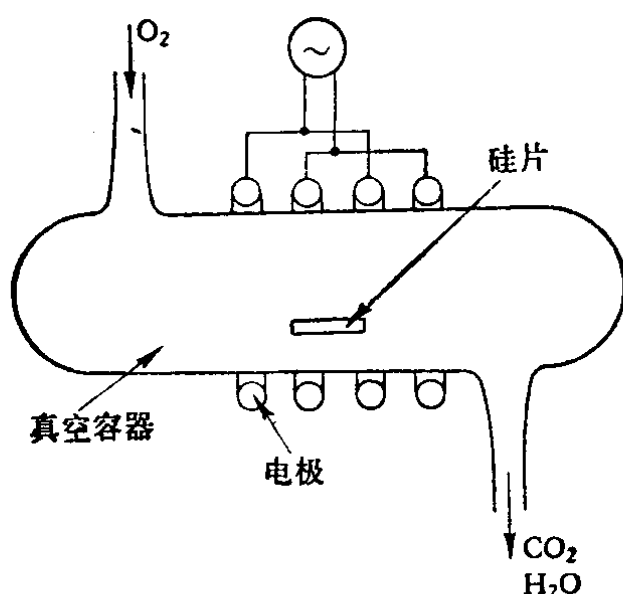


图 1-4 用于硅片去胶的电场等离子装置示意图

碳氢化合物——聚己烯醇肉桂酸酯。把带有光刻胶的集成电路硅片放在石英管内，由机械泵抽真空后输入一定量的氧气，氧气在高频电场的作用下产生电离，形成由氧离子、电子、氧原子和氧分子构成的混合物。混合物中有 10—20% 的原子态氧、它的性能十分活泼，氧化能力极强，能立即使光刻胶氧化，形成 CO 、 CO_2 、 H_2O 和其它挥发性气体，从而达到去胶的目的。与化学溶剂清洗法去胶相比，高频等离子去胶优点很多，如无毒，质量高，清洁，无划痕，效率高，成本低，易于控制等。近来，利用氧等离子体的强氧化作用、氢等离子体的强还原作用用于化学反应工艺之中，成为一门新兴的分支学科——高频等离子化工。

本书重点介绍的是高频介质加热。顾名思义，介质加热的主要对象是电介质，即绝缘体。介质在高频电场中被反复极化，分子运动的能量增加，相互“摩擦”而产生热量，从而达到被加热的目的。由于介质加热比通常的传导、对流加热具有速度快、加热均匀及热效率高等优点，所以，使它在国民经济中占有一定的地位。

譬如，目前在木材加工生产中，无论是木材干燥，还是木制品胶合，加工方式一般都采用老办法，即自然干燥，蒸汽烘干等。这些方法的缺点是加热的时间特别长。有些木材干燥需要持续两、三个月的时间，甚至更长。但是，采用高频加热的方法则可以大大缩短这一过程，仅需一昼夜或几昼夜就行了。而在胶合过程中，这一优点就更明显了：高频加热能把自然固化需几十小时，蒸汽固化需几十分钟的过程缩短到几十秒钟，甚至几秒钟。这一新技术在我国木器工业加工方面正在迅速推广，并已在木材拼接、衣箱、衣柜及胶合板制品流水线生产上取得了显著的成效。

又如电容器纸的烘干。大家知道，电容器纸密度大，纸张薄，所要求的抗电强度高，介质损耗小。如果纸中含有水，则后两项指标就会大大降低。在生产过程中，将电容器纸卷成圆盘形，然后干燥脱水。由于电容器纸的导热性很差，纸盘又绕得很密实，所以用传导法加热是很难进行烘干的。例如，外径为 300 毫米，高度为 80 毫米的纸盘，要从 5% 的含水率降到 1% 以下，用 2 千瓦电热烘箱加热至少持续 80 小时，而采用 6 千瓦、70 兆赫高频设备进行烘干仅需要 20—30 分钟。显然，用工频电炉作为热源的烘箱所消耗的电能无论如何也不如高频设备经济。

以上这样的例子是很多的。采用新技术之后的效果是非常明显的。它使生产效率大大提高，使产品质量显著上升，使作业环境得到改善，而且给生产自动化创造了条件。

高频介质加热技术早在四十年代就已开始进行研究并用于生产实际了。随着电子技术的发展，新器件的出现，大工业生产自动化的需要，高频加热技术也有了长足进步。正如伟大导师恩格斯早就指出的：“社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”到了六十年代

初期,木材干燥、木制品胶合、橡胶硫化、塑料薄膜热合及电木粉加热等技术就已经日趋成熟。以这些用途为主要对象的高频设备开始大量涌现。随着微波技术的发展,连续波磁控管的出现,又开拓了微波介质加热领域,出现了微波炉,微波电子灶等。高频介质加热和微波介质加热作为电磁场介质加热的两支新军,平行前进,互相补充,从而把介质加热技术又推到了一个新的水平。

我国早在五十年代就开始了这些方面的研究工作。六十年代初,已经批量生产了高频热合机,并在印刷行业的包、烫、切自动线中成功地采用了高频烫背机。同时在木材、橡胶、茶叶和烟草等生产中广泛地进行了试验。

七十年代以来,生产单位与科研单位、使用单位相结合,坚持实践第一的观点,边研究、边实验、边推广,使高频技术开始在木材、橡胶、纺织、印染、烟草、铸型、玻璃钢制品及医药卫生等行业中得到了广泛的应用,为赶超世界先进水平作出了可喜的成绩。

在农业方面,高频及微波种籽处理的科研活动纷纷开展,粮食烘干大规模的工艺性试验扎扎实实地进行,高频加热在为农业服务的广阔天地里大显身手,群众性科研活动也空前高涨,从而为高频介质加热技术在农业上的发展铺平了道路。

由此可见,高频介质加热技术在工业加热领域中大有用武之地。它为工业加热领域实现自动化生产提供了可能性和现实性。可以预料,在加速实现四个现代化的伟大号召下,深入研究、大力普及和全面推广电子技术的群众性技术革命和技术革新活动一定会把高频加热技术广泛地用于生产实践,并推向一个崭新的阶段。

第二节 高频介质加热的原理、特点及应用范围

一、高频介质加热原理

所谓介质就是通常所说的绝缘物质。绝缘物质中没有自由电荷,所以不能传导电流。从物质本身的电结构来看,电介质可分为两类:在一类电介质中,分子呈电中性,分子内部正负电荷中心是重合的,叫做无极分子电介质;在另一类电介质中,即使没有外加电场,分子的正负电荷中心也不重合,叫做有极分子电介质。

无极分子在外电场的作用下,分子的正负电荷中心将发生相对位移,形成电偶极子。所形成的电偶极子的方向都沿着外电场的作用方向取向,如图 1-5 所示,因此,在电介质的表面上将感应出极性相反的电荷,这种电荷不同于自由电子,

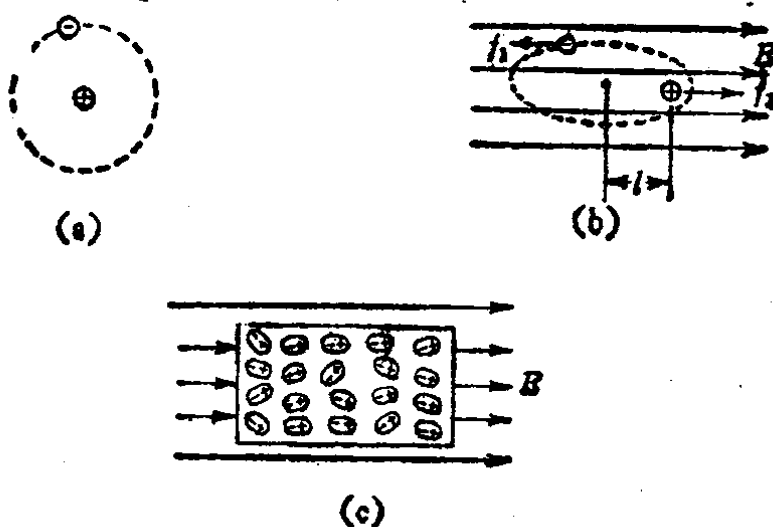


图 1-5 无极性分子极化示意图

- (a) 没有电场时,无极分子呈电中性;
- (b) 有外电场时,分子极化形成偶极子;
- (c) 有外电场时,物质宏观上感应出束缚电荷

所以叫做束缚电荷。在宏观上，把电介质出现束缚电荷的现象叫做电介质的极化。无极分子的极化是使正负电荷中心的距离发生变化，所以叫做位移极化。外电场越强，每个分子的正负电荷中心的距离也越大，极化的程度也就越高。

对于有极分子来说，当没有外加电场时，每个分子正负电荷的中心并不重合，但是，由于热运动使这些偶极子的排列十分紊乱，整个电介质呈电中性，对外不显电性。如果把这种电介质放在外电场的作用之下，那么每个分子的正负电荷都要受到电场力的作用使电偶极子转动并趋向于外电场的作用方向，如图 1-6 所示。但是，在外电场较弱的情况下，电场的作用并不能完全克服分子的热运动而使所有的分子全都整齐地排列起来。外电场越强，偶极子排列得越整齐，在宏观上电介质表面出现的束缚电荷越多，因而电极化的程度也越高。

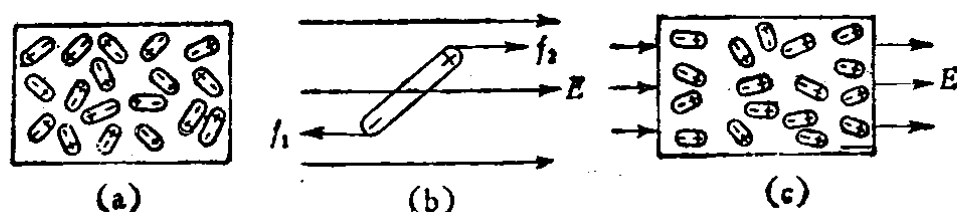


图 1-6 有极分子极化示意图

- (a) 没有外电场时，分子热运动使其排列杂乱无章；
- (b) 有外电场时，偶极子受到电场作用力 $f_1 = -f_2$ 的作用取向；
- (c) 有外电场时，物质宏观上感应出束缚电荷

如果把电介质放在交变电场中，则电介质在交变电场的作用下被反复极化。外电场的变化越快（亦即频率越高），偶极子反复极化的运动也越剧烈。反复极化越剧烈从电磁场所得到的能量也越多。同时，偶极子在反复极化的剧烈运动中又在相互作用，从而使分子间的摩擦也变得越剧烈了。这样就把它从电磁场所吸收的能量变成了热能，从而达到使电介质升温的目的。实用上所使用的电场频率是很高的。如果频率在中、短、超短波波段内（从几百千赫到 300 兆赫），则叫

做高频介质加热; 如果高于 300 兆赫, 到了微波波段, 则叫做微波介质加热。所不同的是, 高频介质加热是在电容器电场中进行的; 而微波介质加热则是在波导、谐振腔或者微波天线的辐射场照射下进行的。下面将从分析盛有被加热介质的电容器入手, 导出介质加热的基本关系。

设有一个如图 1-7(a) 所示的盛有被加热介质的工作电

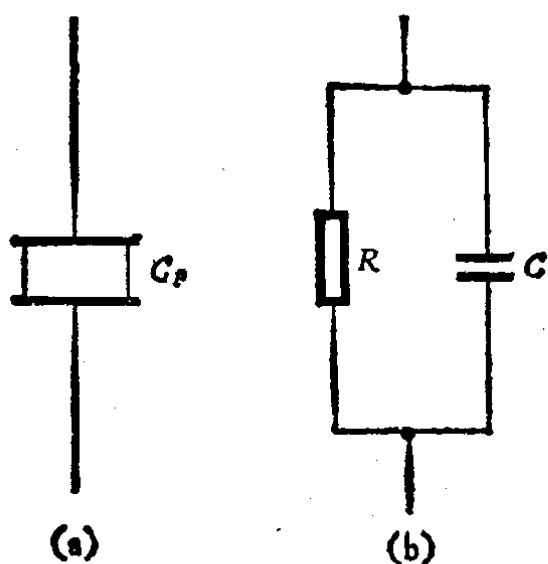


图 1-7 工作电容器及其等效电路

(a) 工作电容器;

(b) 工作电容器的等效电路

容器。在电路理论中, 介质损耗与一个有功电阻等效, 因此, 我们可以采用等效电路来进行分析。图 1-7(b) 所示就是它的并联等效电路。

如果电容器两端所加的高频电压为 $\dot{U}$, 则电路中就要流过一定的电流。设总电流为 $\dot{I}_0$, 纯电容支路中流过的位移电流为 $\dot{I}_C$, 电阻支路中流过的电流为 $\dot{I}_R$ 。我们

知道, $\dot{I}_0$ 等于 $\dot{I}_C$ 和 $\dot{I}_R$ 的矢量和。用 C 表示盛放介质后工作电容器的电容量, R 表示并联等效电阻, $\omega = 2\pi f$ 表示外电场的角频率, 则两个支路的电流分别为:

$$\dot{I}_C = j\omega C \dot{U}; \quad (1-1)$$

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{U}}{R}, \quad (1-2)$$

总电流为:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_C + \dot{I}_R = \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) \dot{U}. \quad (1-3)$$

上面的关系可以画成如图 1-8 所示的矢量形式。 $\dot{I}_0$ 便

是 $\dot{I}_R$ 和 $\dot{I}_C$ 为边长构成的平行四边形的对角线。

如果在电容器中没有盛放被加热的介质，而是真空(或充填空气)，那么，电容器的电容量也不等于 C 了，而是等于 C_0 。它们之间有下列关系：

$$C = \varepsilon C_0, \quad (1-4)$$

式中 ε ——所盛放的那种介质的介电常数。

把上式代到(1-3)式中，得到

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \left(\frac{1}{R} + j\omega\varepsilon C_0 \right) \dot{U} \\ &= j\omega C_0 \left(\varepsilon - j \frac{1}{\omega C_0 R} \right) \dot{U}. \end{aligned} \quad (1-5)$$

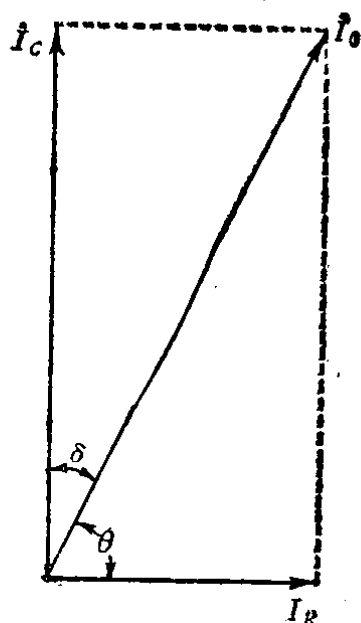


图 1-8 工作电容器并联等效电路电流矢量图

令 $\varepsilon' = \varepsilon$, $\varepsilon'' = 1/(\omega C_0 R)$ ，则可引进复数介电常数：

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''. \quad (1-6)$$

$\dot{\varepsilon}$ 又称复数电容率。

因此，总电流又可以写成

$$\dot{I}_0 = j\omega C_0 \dot{\varepsilon} \dot{U} = j\omega C_0 \dot{U} (\varepsilon' - j\varepsilon''). \quad (1-7)$$

由此可见，复数介电常数是由两部分构成的。实部 ε' 叫作介电常数。以后为方便起见，把上面的一撇省掉，直接写成 ε 。虚部 ε'' 代表损耗，叫做损耗因数。

从等效电路可以得出，单位时间内介质所吸收的电能，亦即介质所吸收的电功率为：

$$P = UI_0 \cos \theta = UI_R \quad (\text{瓦}). \quad (1-8)$$

位移电流 $\dot{I}_C$ 与总电流 $\dot{I}_0$ 之间的相位差用 δ 表示，则有

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \delta, \quad (1-9)$$

式中 δ 叫做损耗角。一般来说，介质的损耗角都较小。根据