

编者的话

物理学的发展，结合着其他自然科学基础学科的发展，为技术进步不断开辟出新的方向，导致了一系列现代高新技术的诞生。从 20 世纪 40 年代起，工业生产的现代化和科学研究的规模化，使得科学与技术的关系空前增强，形成了科学的技术化和技术的科学化的新局面，从科学发现到技术应用的时间已大大缩短。当前，以物理学理论为基础的各种高新技术，正以不断加快的速度渗透到物质生产、经济管理、商业流通、文化娱乐等各个领域，也渗透到我们的家庭生活领域。现代社会的每个家庭，正在向着家庭自动化的方向迈进。

家庭自动化，主要是指家庭生活服务的自动化和家庭信息服务的自动化。家庭生活服务的自动化，将把人们从繁琐的家务劳动中解放出来，让人们有更多的时间在一个更为舒适的家庭生活环境中得到良好的休息和愉快的享受。家庭信息服务的自动化，将把每个家庭同全世界紧密联系在一起，让人们随时了解信息社会日新月异的发展，以更高的效率创造物质文明和精神文明。

在世界上某些发达国家，家庭自动控制系统、家庭信息系统、家庭安全报警系统、家庭文化娱乐系统、家庭供电节能系统、家庭机器人等高度先进的家庭生活服务设施和家庭信息服务设施，有的已经研制出来，正在研究改进，有的已经批量生产，进入普通家庭。我国还是一个发展中国家，家庭自动化正处于起步阶段，而且各地的发展

也不平衡。家庭自动化在我国主要还是体现在家用电器方面。现代家用电器所涉及的技术，几乎无一不同物理学有着密切的关系。我们广大的物理教师，作为物理学工作者，无疑应当从物理学理论高度对各种现代家用电器有着较深的了解；作为教育工作者，则应当有着不断进行知识更新，丰富课堂教学的自我要求。为此，本书将针对我国现代家庭生活中常用的一些先进家用电器，简要但不失系统性地介绍有关的应用技术及其中的物理学原理。

本书是这样安排的。第一章以家用微波炉为对象，介绍微波加热的物理学原理和特点。微波是一种特定频段的电磁波，它既有电磁波的共性，又有它自己的个性。物理学中的电磁学是微波加热技术的理论基础。第二章介绍家用电冰箱、家用空调器及有关的制冷技术。在这里，物理学中的热力学唱了主角。第三章、第四章围绕现代家庭中常用的音乐影像设备，介绍磁记录技术及有关的数字技术。这里涉及物理学中多个分支，如磁学、电学、光学等。20世纪90年代初期，在自动控制技术领域，模糊控制技术异军突起。采用模糊控制技术的家用电器很快就在市场上出现。因此，本书第五章特别介绍了模糊控制技术和模糊控制家用电器。虽然这里的理论基础主要是模糊数学与模糊控制理论，我们认为还是值得物理教师一学的，不但是因为有关的技术实现要靠以物理学为基础的电子技术，而且是因为——作为物理教师，视野应该更开阔些。

本书第一章、第三章和第五章由张锡年编写，第二章由舒信隆编写，第四章由朱鸿鹄编写。由于时间紧迫，缺乏经验，不足之处希望读者能及时提出改进意见和建议。

张锡年

于华东师范大学

1999年12月

第一章 微波加热技术与微波炉

【摘要】微波炉在许多地方已成为家喻户晓的家用电器。用过家用微波炉的人都会提出这样一个问题：微波炉是怎样对炉中的食品加热的？确实，微波加热方法与传统的加热方法相比有其独特之处。本章从微波加热的物理学原理出发，围绕复介电常量这一在微波加热过程中起主要作用的物理量，讨论微波加热的特性，并介绍家用微波炉的结构、工作原理和使用常识，以及微波热效应的其他一些应用。

§ 1.1 微波的热效应

1. 从微波到微波炉

微波 19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦在分析和总结前人对电磁现象的研究成果的基础上，建立了他的经典电磁理论。根据这一理论，麦克斯韦预言：变化着的电磁场以波的形式向空间传播。也就是说，存在着一种电磁波。1887 年，德国物理学家赫兹用实验方法产生了电磁波，实现了这一预言。从此，人类进入了无线电时代。

根据电磁波的频率，人们把电磁波分为各个频段。处于 300MHz ~ 300GHz 频段（波长相应地在 1m ~ 1mm）的电磁波，一般称为微波。这一频段高于通常的无线电广播频段而低于红外线。事实上，在赫

兹证实电磁波存在的实验以及后来其他科学家的类似验证实验中，电磁波的频率范围已处于微波频段。因此，微波是人类最早接触的电磁波之一。

同人类对电磁波的早期应用一样，微波最初也是用于无线电通信领域。特别是在第二次世界大战期间，英国军方为了对付给英国本土带来严重威胁的纳粹德国飞机，使用了新生的雷达技术。在雷达技术中，为了更精确地测定来犯敌机的数量、航向和距离等信息，采用了处于微波频段的脉冲形式的无线电波。微波通信技术在 20 世纪 40 年代从实验到理论得到了全面的发展。目前，微波已广泛应用于测量、雷达、遥控、电视、射电天文学、微波接力通信、卫星通信、粒子加速器等方面。

微波热效应的发现 产生大功率微波的元件叫做磁控管，这是英国伯明翰大学的两位教授于 1940 年发明的。时值第二次世界大战，为了对付共同的敌人德国法西斯，美国的雷声公司承担了为英国的雷达设施制造磁控管的任务。该公司的一位名叫斯潘塞的工程师对磁控管从生产工艺到结构作了很大的改进，在很短的时间内将磁控管的生产率提高了近 100 倍，有力地支持了盟国的反法西斯战争。后来，正是这位斯潘塞，发现了微波的热效应。

1945 年的某一天，正在工作的斯潘塞发现口袋里的巧克力莫名其妙地被融化了。机会只会赋予有准备的人，这种准备在很多情况下就是创新意识。这一在旁人可能毫不经意的事实被富于创新意识的斯潘塞抓住了，他排除了巧克力是被体温所融化的可能之后，意识到使巧克力融化的能量可能来自磁控管发出的大功率微波，也就是说，微波具有对食品加热的能力。经过反复试验，斯潘塞确信他的发现具有应用开发价值，于是就在当年的 10 月以“处理食品的一种方法”为名申请专利。专利的基本内容是利用微波能对食品进行处理，处理时将食品放在一个封闭的空间内，在足够的时间内对其施加微波能量，这样就可对食品进行烹饪，并达到预定的要求。

微波炉的诞生 采用斯潘塞的这项专利，1947年雷声公司研制成一种供饭店和企业用的落地式商用微波炉，当时叫“雷达炉”。世界上第一种微波炉就此诞生。但这种微波炉体积大，价格贵，第一批约100台，每台售价约2000~4000美元，因此很难大规模推销。在50年代初期，雷声公司微波炉在美国市场上的月销售量仅50~100台。此后，雷声公司采取了种种措施，并向美国以及加拿大、联邦德国、日本的多家公司转让微波炉技术，但微波炉的市场销售仍不见起色。

转机发生在1967年。那年雷声公司收购了阿曼纳制冷公司，阿曼纳公司的创始人福斯特对微波炉很感兴趣，经过认真的试制和广泛的市场调查，于当年在芝加哥举办的新闻发布会上推出了一种最先进的家用微波炉。这种家用微波炉不仅价格低，质量高，而且安全可靠，特别是在炉门上采用了1962年发明的抗流密封技术，有效地防止了微波泄漏，因此受到了极大的欢迎，微波炉终于在美国市场上起飞了。到20世纪90年代，美国的微波炉家庭普及率已达85%。目前，微波炉已成为世界各国现代家庭的必备家用电器之一。

我国自20世纪80年代开始引进家用微波炉，人们对家用微波炉的安全、节能、方便、卫生等优点很快就有了认识，加上市场价格的不断降低，家用微波炉正在我国向千家万户渗透。

2. 微波加热的最基本原理

微波加热的最基本原理 当微波辐射到物体表面上时，将通过三种途径继续传播。一部分微波将从物体的周围“绕”过去，另一部分则从表面上反射回来，还有一部分将穿透到物体内部去。对于不同尺寸、不同材料的物体，这三部分的比例是不相同的。

如果物体的截面尺寸比微波的波长小得多，则很容易发生衍射，相当一部分微波将“绕”过物体，继续向前传播。如果物体截面的尺寸大大超过微波的波长，物体本身又是良导体，则微波将主要被反射

回来。如果是不导电的物体，且截面尺寸大于微波的波长，则微波主要将穿透物体的表面进入内部。正是这种进入物体内部的微波，与组成物质的分子相互作用，使一部分微波能量转换成热能，从而使物体的温度升高。

这就是微波加热的最基本原理。当然，这只是一种较粗略的描述，下一节中将对微波加热的微观机理作较细致的介绍。

从定性上看微波加热的特点 通常的加热过程都是由一个发热体通过热传导、对流、辐射等方式 对物体的表面加热 使热量从物体表面传向物体内部的。这叫表面加热。而微波加热则是在微波穿越物体内部的过程中，把微波的能量逐步转换成热能的。这种加热方式叫做体积加热，它与表面加热有着本质上的不同。从定性的角度看，与表面加热相比，微波加热有以下一些特点。

(1) 微波加热是对物体内部的整体加热。如果被加热物体体积不是很大，可以让微波充分穿透加热，那么加热以后，由于物体表面的热传导和热辐射等因素，被加热物体表面耗散了一些热量，因此，物体内部的温度通常会高于表面。

(2) 微波加热是微波与物体直接作用产生热量，因此加热速度快，效率高，热损失低。例如表面加热中隔在发热体与被加热物体之间的导热容器就可以免去，代之以能让微波穿透但不吸收微波能量的材料所制的容器，这样就避免了使容器升温的热损失。

(3) 由于是微波与物体直接进行能量转换，所以只要调节微波功率，就可以控制升温速度。这一优点在工业自动控制中显得特别重要。

(4) 微波加热所能达到的最高温度，取决于物体的吸收转换效率以及对被加热物体进行隔热保温的程度。从理论上说，只要物体吸收微波而升温的速度大于物体向周围环境散热而降温的速度，物体的温度就保持上升。

微波不仅能对固体加热，而且还能对液体、气体加热，虽然具体

的加热机理不尽相同，但都是按照能量转换和守恒定律从微波能转换成热能的过程。

§ 1.2 物质的介电特性

微波加热是微波与物质相互作用的结果，是电磁波在物质内部将电磁能量转化为分子不规则运动的动能的过程。这个能量转换对于不同的材料是不同的。有的材料微波不能加热；有的材料微波能加热，但加热较慢；有的材料则加热很快。这里的因素取决于材料本身 特别是对于介质材料 一般是指绝缘材料 来说 决定的因素是介质的介电特性。

1. 介质极化和复介电常量

介质极化 通常情况下，被加热的物质是介质材料。介质材料一般可以分为两大类。

一类是非极性电介质。众所周知，物质的分子都是由原子（原子团或离子）所组成的。任何物质分子的电荷的代数和为零。但是不同物质的分子电荷在空间的分布是不同的。如果在没有外电场作用的情况下，分子的正电荷中心与负电荷中心相重合，则这种分子叫做非极性分子。由非极性分子组成的介质就叫做非极性电介质。在外电场的作用下，非极性电介质分子中的电子云会发生相对于分子（或原子骨架）的位移，使正负电荷的中心不再重合，从而形成偶极子，这叫电子极化。分子中的原子或离子，在外电场的作用下也会发生相对于分子骨架的位移，形成偶极子，这叫原子极化。电子极化和原子极化统称位移极化。从施加外电场到位移极化完成的时间和从撤去外电场到位移极化消除恢复原状的时间都极短。电子极化约为 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ s 量级，原子极化为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s 量级。

另一类是极性电介质。极性电介质的分子在没有外电场时，正

负电荷的中心已不重合，具有一定的偶极矩，但由于它们在介质中各个方向上的概率是相等的，所以从宏观来看其偶极矩为零。当有外电场作用时，偶极子在电场力作用下朝着外电场的方向转动，电介质出现宏观偶极矩，这种极化叫转向极化。转向极化无论是建立还是消除都要经过一定的时间（ 10^{-10} s 或更长），所以这种极化又叫惯性极化或松弛极化。

微波对介质材料的加热就是通过介质的极化实现的。而定量地描述介质极化特性的物理量主要是复介电常量。

复介电常量 当电介质处于外电场中时，描述电介质介电性能的宏观参数是介电常量 ϵ 其定义为

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{D}{\epsilon_0 E} \quad (1.1)$$

式中， C 为充满该介质的平板电容器的电容； C_0 为同样尺寸的真空电容器的电容； D 、 E 分别为介质中电感应强度矢量和宏观平均电场强度矢量。显然，在真空情况下， $C = C_0$ ，所以真空的介电常量为 1。而 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ，称为电力单位转换常量。

当介质处于交变电场 $E = E_m e^{j\omega t}$ 的作用之下时，如果介质中只发生位移极化，则 D 和 E 同相位， ϵ 为实数。当介质是极性电介质时，由于这时发生的转向极化具有惯性， D 将滞后于 E 。设其相位差为 δ 即有 $D = D_m e^{j(\omega t - \delta)}$ 则 ϵ 为复数：

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.2)$$

式中， ϵ' 为复介电常量的实部，一般就称为介电常量，它反映了介质传输电场的性能； ϵ'' 为复介电常量的虚部，称为损耗因子，它反映了介质损耗电场能量，并将之转换为热能的性能。 δ 称为介质损耗角，常用的是它的正切：

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.3)$$

2. 损耗机理与微波加热

微波在穿透介质表面深入到介质内部去的过程中不断与介质中的分子发生作用，使微波能量损耗，转换成热能。这种能量的损耗主要是通过极化过程实现的，其中偶极子转向极化引起的损耗可能是所有损耗中最重要的形式。

一般来说，当电磁波作为外加交变场作用于极性电介质时，其中的偶极子将随着交变场的频率而不断发生转向极化。虽然转向极化需要相对较长的时间，但在电磁波频率较低时，偶极子仍有充分时间跟随外加交变场变化，这时电磁波的能量以偶极子不断转向极化的形式储存在介质材料中，能量并没有损耗。当频率提高到微波频段时，外加交变场的变化加快，偶极子的转向极化就跟不上微波场的变化了，这时极化所储存的能量大为减少，分子无规则运动的动能大为增加，即微波的大部分能量以热的形式耗散在介质材料中。

由于在微波炉中加热的食品一般都是介质材料，所以上面仅介绍介质材料在微波场中的加热机理。实际上，能够在微波场中被加热的除了电介质以外，还有其他性质的材料。如半导体材料、铁氧体材料，甚至金属材料，在一定条件下也是能被微波加热的，不过它们与介质材料在加热机理上是不同的。

3 复介电常量与频率、温度、湿度的关系

材料的复介电常量实际上并不是绝对的常数，其实部（介电常量）和虚部（损耗因子）的数值受工作频率、温度、湿度等物理因素的影响。

频率的影响 前面已经提到，介质分子的转向极化是有惯性的，需要一定的时间才能达到稳态。因此当外加交变场的变化速度比分子转向极化的速度更快时，分子转向极化落后于外加场的变化，这时介质的极化减弱。显然，外加场的频率越高，极化就越弱。因此在一定的频率范围内，表征介质传输外加场性能的介电常量 ϵ' 将随着频

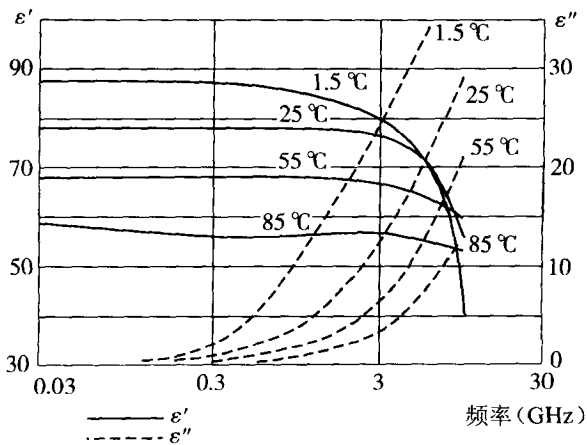


图 1.1 频率对水的复介电常量的影响

率的升高而减小。而随着 ϵ' 的减小，外加场用来使分子转向极化的能量也越来越少，使分子的不规则热运动加剧的能量越来越多。因此表征介质损耗外加场能量，并将之转换为热能的损耗因子 ϵ'' 随着 ϵ' 的减小而增大。这一点可用图 1.1 十分清楚地表现出来。从图 1.1 可以看到，在一定的温度下和一定的频率范围内，随着频率的提高，水的介电常量 ϵ' 逐渐减小，而损耗因子 ϵ'' 却是逐渐增加。

但介质的损耗因子当频率提高到某个值时会达到最大值，这个频率值叫做介质的弛豫频率。在高于弛豫频率的情况下，随着频率的上升，介质的损耗因子反而单调下降。水的弛豫频率约在 20GHz。工业用微波炉的工作频率定在 915MHz，家用微波炉则定在 2450MHz，均低于水的弛豫频率。介质的弛豫频率是随着温度的升高而升高的。

温度的影响 温度和复介电常量之间相互影响，它们的关系实际上是很复杂的。介质材料的损耗因子随着温度的升高可能是增加也可能是减小。

对于水来说，在微波频段，特别是在家用微波炉的工作频率 2450MHz 附近，其介电常量和损耗因子在 0℃ 以下都很小，接近 0℃ 时开始急剧上升，到 40℃ 附近达到最大值， ϵ' 为 82.4， ϵ'' 为 25.2 以后随着温度的升高， ϵ' 和 ϵ'' 反而有所下降，特别在 40 ~ 25℃ 下降得较快，40℃ 以后变化比较平缓。

水的这种特性对含水食品的微波加热来说是非常有益的。在加热时随着温度的升高水的损耗因子 ϵ'' 反而下降，这就使得微波能中转换成热能的比例减小，温度的上升得到一定的控制。这种“自控”的性质可以使被加热的含水食品不至于过热，有助于实现均匀加热。

另一些介质材料，如某些陶瓷和高分子聚合物，它们在微波加热过程中，随着温度的升高，损耗因子也不断增大，结果造成材料中温度越高的部分微波能量损耗越多，升温也就越快。这种正反馈式的恶性循环往往使材料内部局部过热（热击穿）甚至燃烧起来。

湿度的影响 材料中水分的含量（湿度）对材料的介电常量有很大的影响。水的介电常量很高，约在 80，而一般材料的介电常量大大低于此值，通常在 5 左右。材料含了水，介电常量就会提高，而且含水越多，即材料的湿度越高，介电常量就越大，但不会超过纯水的介电常量。

然而含水材料的损耗因子通常却高于水，这是因为材料吸附了水以后发生了一些变化。

材料中吸附的水可以有两种形态。一种存在于材料的毛细管或空隙中，这叫自由水；另一种与材料的分子发生化学结合，这叫束缚水。束缚水受材料分子引力的影响，在有外电场作用时不易发生转向极化，介质损耗高，这就是含水材料的损耗因子比水大的基本原因。一般情况下，损耗因子 ϵ'' 与湿度 M 的关系可见图 1.2。由图可见， ϵ'' 随着 M 的增大而上升，起先较为平缓，但从某个湿度值 M_c 开始上升明显，这个湿度值叫做临界湿度。对于高吸湿材料， M_c 在 10% ~ 40%，对于非吸湿材料 M_c 约为 1%。

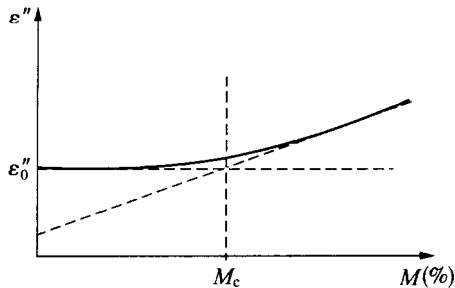


图 1.2 湿度对损耗因子的影响

4. 常用材料的复介电常量

要深入研究和实际应用微波加热技术，必须了解被加热的介质材料的介电常量和损耗因子。国外对许多常用材料的介电常量和损耗因子进行了实验测量，取得了大量实验数据。现将其中的一部分列于表 1.1 供参考。其中穿透深度 D_p 这一概念将在下文介绍。

许多材料的介电常量 ϵ' 在 1 ~ 5，而许多吸收材料的损耗角正切 ($\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$) 在 0.05 ~ 0.3。含水材料的最大损耗角正切大约为 0.3 通常不小于 0.1。液体和陶瓷具有比较高的介电常量，其范围在 2 ~ 2000；其损耗角正切在 0.01 ~ 0.5。

损耗因子 ϵ'' 越大，材料越容易吸收入射微波的能量，将之转换为热能，温度上升也越快。作为一般规律，当损耗因子小于 10^{-2} 时，要使材料有合适的温度上升速率，必须要有很高的电场强度；但当损耗因子大于 5 时，由于材料对微波辐射的吸收太强烈，入射微波的能量在数毫米的浅表内很快被吸收掉，使材料的内部得不到加热，造成不均匀的加热后果。所以通常用于微波加热的材料其损耗因子一般在 $10^{-2} \sim 5$ ，否则必须采取特殊措施。例如，对于损耗因子较低的材料可以加入适量的损耗因子较高的材料，以提高微波加热效果。在工业上用微波加热天然纯橡胶时，就是在其中添加炭黑。

表 1.1 某些材料的介电特性参数和穿透深度

$t = 20 \sim 25^{\circ}\text{C}$ $f = 2450\text{MHz}$			
材料名称	ϵ'	ϵ''	$D_p(\text{cm})$
纯水	76.7	12.0	1.42
冰(-12℃)	3.1	0.002	1144
生牛肉	46.7	14.6	0.91
冻牛肉(-12℃)	4.05	0.30	13.0
食用油	2.6	0.02	157
面包	3.8	2.1	1.8
耐热玻璃	4.0	0.02	195
尼龙	2.4	0.02	151
木材	1.2 ~ 5	0.02 ~ 0.5	
纸	3 ~ 4	0.05 ~ 1	
瓷	5.6	0.018	256
聚四氟乙烯	2.1	0.0003	9420
聚乙烯	2.2	0.0026	570
有机玻璃	2.7	0.016	200
生物组织	肌肉	45 ~ 48	
	皮肤	40 ~ 45	19
	骨骼	4.5	0.84
	脂肪	3.9 ~ 7.2	

要测出各种材料的介电常量和损耗因子，以及对同一材料在不同频率、不同温度、不同湿度时的介电常量和损耗因子进行比较，是一项值得研究的课题。利用家用微波炉和温度计，可以进行必要的定性观察，以比较各种材料对微波能吸收的程度，供实用时参考。

§ 1.3 微波加热的物理学基础

1. 单位体积中的耗散功率

计算微波功率吸收的公式 微波加热是材料吸收微波能并将

之转化为热能的过程。根据电磁场理论，通过一个闭合曲面的功率流可由积分坡印廷矢量计算出来。单位体积的被加热物体从微波场中吸收的微波功率 P_a 可用下式计算：

$$P_a = 55.61fE^2\epsilon'' \times 10^{-14}(\text{W/cm}^3)。 \quad (1.4)$$

式中 f 为频率 单位为 Hz; E 是电场强度的有效值, 单位是 V/cm; ϵ'' 是被加热材料的损耗因子。当材料中还存在因离子碰撞引起的功率吸收时, 上式右边还应加上 σE^2 一项 这里 σ 是材料由于离子碰撞而呈现的电导率, 单位为 $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 。

从定量上看微波加热的特点从 (1.4) 式可以看出微波加热还有以下一些定量上的特点。

(1) 材料吸收的微波功率与微波的频率成正比。同一材料在同样的场强下, 微波的频率越高, 材料吸收的功率也越多。

(2) 同一材料吸收的微波功率与材料放置处的电场强度的平方成正比。场强越高功率吸收越多。因此对于介质损耗比较小的材料可以用提高电场强度的方法来进行微波加热, 但是场强太高也会有击穿、打火的危险。

(3) 损耗因子 ϵ'' 不同的材料, 在同一微波场中, 它们吸收微波功率的程度是不同的, 这种性质叫做选择性加热。这正是有的食品在微波炉中很容易加热而有的食品不容易加热的根本原因。这一特点也可以为我们所利用。例如有些塑料的损耗因子很小, 就可以用来制成盛食品的容器, 放在微波炉中加热时, 容器对微波功率吸收极小, 绝大部分功率为损耗因子较大的食品所吸收, 从而提高了加热效率。

2. 穿透深度和趋肤效应

穿透深度 当微波进入被加热材料内部后, 其能量将被不断吸收并转变为热能, 也就是说, 微波穿过材料表面后随着穿透距离的增长其场强和功率将会衰减。这种衰减是指数式的。当微波在材料内

部某处其场强减弱到材料表面处的 $1/e$ ($e \approx 2.718$ 即自然对数的底) 时, 该处离开表面的距离被定义为穿透深度 D_p 。据 (1.4) 式, 电场强度下降到材料表面处的 $1/e$, 功率则下降到 $(1/e)^2$, 即仅为表面处功率的 13% 左右。下降如此之多, 可见在深于穿透深度的地方, 微波的加热效应已很不明显。穿透深度可用下式计算:

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''} \quad (1.5)$$

式中 λ_0 为微波在真空中的波长。由 (1.5) 式可见 材料的介电常量 ϵ' 越小或损耗因子 ϵ'' 越大, 微波穿透得就越浅。

对于家用微波炉所用的频率为 2450MHz, 即 λ_0 为 12.2cm 的微波, 由 (1.5) 式可得

$$D_p = 1.95 \times \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''} \text{ (cm)} \quad (1.6)$$

利用 (1.6) 式可以算出, 对家用微波炉中 25℃ 的水 ($\epsilon' = 76.7, \epsilon'' = 12$) D_p 约为 1.42cm 对 -12℃ 的冰 ($\epsilon' = 3.1, \epsilon'' = 0.003$), D_p 约为 1144cm。其他材料用家用微波炉加热时的穿透深度可参见表 1.1。

另外还可以看到, 微波的波长 λ_0 越长, 穿透深度越深。所以被加热的材料很厚时, 要得到内外均匀加热, 最好不要采用较高的微波频率。但据 (1.4) 式, 要得到较高的微波吸收功率, 频率越高越好。权衡这两方面因素, 在我国用于微波加热的频率, 规定为 915MHz 和 2450MHz。家用微波炉容积小, 被加热的食品常切成小块, 所以都是采用 2450MHz 的微波。工业上常处理体积较大的材料, 就要采用 915MHz 的微波。

趋肤效应 现在考虑微波对于金属导电体的热效应, 因为微波炉中有一些部件是用金属制成的。当微波从空气中入射到金属表面时, 有一部分会被反射回来形成反射波, 另一部分则进入导体内部以折射波的形式继续传播 (这里假定金属材料的截面尺寸足够大, 所以不考虑衍射)。这部分进入导体内的微波其能量将沿着垂直于表面

的方向按指数衰减。这就是趋肤效应。其原因是导体内的自由电子在微波场的作用下引起了壁电流从而产生了热损耗。与穿透深度的定义类似，当微波在金属内部某处其场强衰减到表面处的 $1/e$ 时，该处距表面的距离叫做趋肤深度。当然，在物理原因上金属材料的趋肤深度有别于介质材料的穿透深度。根据电磁场理论可以算出，金属的趋肤深度

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1.7)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, f 为微波的频率; $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$; σ 为金属材料的电导率。例如紫铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 (\Omega/\text{m})^{-1}$ 则 $d = 0.066/\sqrt{f}$ 。若 $f = 2450\text{MHz}$ 则 $d = 1.33 \times 10^{-6}\text{m}$ 。其他一些金属材料的情况见表 1.2。

表 1.2 几种常用金属材料的电导率和趋肤深度

材料	电导率 $\sigma((\Omega/\text{m})^{-1})$	趋肤深度 $d(\text{m})$
银	6.17×10^7	$0.0642/\sqrt{f}$
紫铜	5.80×10^7	$0.0660/\sqrt{f}$
铝	3.72×10^7	$0.0826/\sqrt{f}$
黄铜	1.57×10^7	$0.127/\sqrt{f}$
不锈钢	0.14×10^7	$0.427/\sqrt{f}$

对于微波在金属波导管中作远距离传输来说，金属的趋肤效应加大了微波能量在传输过程中的热损耗，这是不利的。但是对于家用微波炉来说，可以有意识地利用这一点，采用镀锌铁皮、不锈钢等有热损耗的金属材料做炉腔的腔壁，加大炉腔的壁损耗，以提供足够的“空炉匹配”，防止因在微波炉中忘记放入食品而损坏磁控管。

对于厚度小于某一频率下的趋肤深度的金属膜，微波将会穿透，使整张膜的温度急剧升高。例如将真空喷镀的铝膜塑料纸放在 2450MHz 的家用微波炉中，只要几秒钟就能将这张铝膜烧毁。这一

特性可用来弥补微波炉的体积加热不能烤制外焦内熟食品的缺陷。有的厂商就专门制造一种金属薄膜纸，将它裹在要烤制的食品上，放在微波炉中加热。由于趋肤效应，微波能起先集中在金属薄膜上，很快便把食品的表面烤成微焦状态，这时金属薄膜也被烧毁，于是微波大量进入食品内部，继续加热，最后制成喷香松软的烧烤食品。

3. 关于微波加热的热学计算

温升热与去湿热 在微波炉中加热的材料往往是诸如食品的含水材料，因此被加热材料吸收的热量除包括用于使材料（包括其中的水分）升温的温升热外，还包括使其中水分蒸发的去湿热。设含水材料的质量为 $M(\text{kg})$ ，含水率为 W_1 ，材料本身的比热容为 $c(\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$ 而材料加热后温度的升高为 $\Delta t(^{\circ}\text{C})$ 则用于材料升温的温升热在实用上可用下式计算：

$$Q_{\text{温升}} = (c(M - MW_1) + 4190MW_1)\Delta t(\text{J})。 \quad (1.8)$$

而用于使材料中水分蒸发的去湿热在实用上可用下式计算：

$$Q_{\text{去湿}} = 2256M(W_1 - W_2)(\text{kJ})。 \quad (1.9)$$

式中 W_1 和 W_2 为加热前后材料的含水率。

脱水量的计算 现在我们用 (1.8) 式和 (1.9) 式计算 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的微波能如果被完全吸收可以使多少水由 20°C 加热到 100°C 并全部汽化为水蒸气。

首先， $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的能量等于 $3.6 \times 10^6\text{J}$ 。其次，据 (1.8) 式，要使 $M\text{kg}$ 的水从 20°C 升温至 100°C 所需温升热 $Q_{\text{温升}}$ 为 $4190 \times 80M\text{J}$ 而据 (1.9) 式 $M\text{kg}$ 的水全部汽化所需的热量为 $2256M\text{kJ}$ ，于是有

$$3.6 \times 10^6 = M(4190 \times 80 + 2256000)， \quad (1.10)$$

由此得

$$M \approx 1.4(\text{kg})。 \quad (1.11)$$

实际上在加热过程中微波能总有损失。因此 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 微波能的实际脱水量要小于 1.4kg 。在微波加热干燥工程中一般以 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 微