

国外微波干燥技术进展

上海科学技术情报研究所

毛主席语录

抓革命促生产，促工作，促战备，把各方面的工作做得更好。

坚持政治挂帅，加强党的领导，大搞群众运动，实行两参一改三结合，大搞技术革新和技术革命。

洋为中用。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

前 言

在党的十届二中全会和四届人大精神鼓舞下，在无产阶级专政理论学习运动推动下，全国各条战线都出现了抓革命促生产的兴旺景象，显示了更加安定团结的政治局面。全国人民决心在伟大领袖毛主席和中国共产党的领导下，坚持政治挂帅，努力增加生产，尽量采用先进技术，大搞技术革新，加快社会主义建设的步伐，使我国社会主义制度的物质基础更加巩固，为争取在本世纪末，全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化，把我国建设成为社会主义的现代化强国而奋斗。

微波加热干燥，是在微波理论和技术以及微波电子管成就的基础上发展起来的一门新技术。它起始于四十年代后期，但只是到六十年代，由于微波管性能提高、大量生产及成本降低，才得到了迅速发展。和其他加热干燥方法相比，微波加热干燥具有一系列优点，如加热均匀，加热迅速，而且可选择性加热，以及易于实现自动化控制和连续生产，因此越来越引起人们的注意，应用的领域也越来越广。可以认为，微波干燥有着宽广的发展前途。当然，这项新技术也存在着一一些缺点，例如成本还比较高，强微波长期辐射对人体，特别是对眼睛有一定影响，但只要采取有效措施，这些缺点是不难克服的。

为了配合这项新技术的推广，我们会同浙江大学、浙江医科大学、复旦大学、上海科技大学、上海市轻工业研究所、上海市造纸研究所、上海市橡胶制品研究所、上海市粮食科学研究所、上海市印刷技术研究所、上海市染料涂料研究所、上海市轻工业设计院、上海市纺织工业设计院、上海市食品工业公司、上海卷烟厂等单位，根据国外有关资料，编译了这本《国外微波干燥技术进展》，供有关行业的工人、干部、技术人员及有关院系的师生参考。

因时间仓促，所搜资料不全，业务水平也有限，谬误之处，希批评指正。

上海科学技术情报研究所

一九七五年六月

目 录

前言

第一章 概述	(1)
一、微波原理	(1)
二、微波加热干燥原理	(3)
三、微波加热干燥的优点	(8)
四、微波加热干燥的注意事项	(9)

参考文献

第二章 微波加热器	(14)
一、概况	(14)
二、行波型加热器	(15)
三、驻波型谐振腔加热器	(18)
四、辐射型加热器	(22)
五、各种加热器性能比较及发展方向	(23)
六、几个关键问题	(25)

参考文献

第三章 应用领域实例	(31)
一、谷物干燥	(31)
二、食品干燥	(32)
三、木材干燥	(33)
四、纸张干燥	(34)
五、树脂浸渍纸干燥	(35)
六、涂层干燥	(38)
七、塑料干燥和加热	(40)
八、橡胶加热	(40)
九、印件干燥	(43)
十、胶片干燥	(43)
十一、皮革干燥	(45)
十二、织物干燥	(46)

参考文献

第四章 辐射及其防护	(49)
一、微波的生物学效应	(49)
二、微波辐射的安全标准	(51)
三、微波辐射的防护	(52)

参考文献

第一章 概 述

微波加热干燥起源于四十年代,到六十年代国外才大量应用。由于微波加热干燥具有加热时间极短,温度均匀,产品率高,质量好,热能利用率高,以及具有某些有利的选择加热作用和易于实现自动控制等一系列优点,所以发展很快,已在工业特别是轻工业、食品工业、化学工业、农业和农产品加工以及医疗、科学研究、甚至家庭烹调等方面广泛应用。由于微波对水(及某些有机溶剂)有选择加热作用,故利用微波加热进行干燥特别适宜,例如粮食、油料作物、茶叶、蚕茧、木材、纸张、纤维、烟草、皮革、药品、化工产品、胶片、塑料、油漆、油墨,凡含水物质或含有某些有机溶剂的物质,均可用微波进行干燥。利用微波干燥,不仅效率特高,所需时间极短,而且产品质量好。七十年代以来,国外微波加热干燥的应用还在继续扩大,是一项有发展前途的新技术。

一、微波原理

微波与无线电波、红外线、可见光等同属于电磁波,它们之间的区别在于频率不同。微波通常是指频率在 300 兆赫到 300 千兆赫之间的电磁波。低于 300 兆赫的电磁波就是通常的无线电波,高于 300 千兆赫的依次分别属于红外线、可见光等等。

电磁波的频率 f 与波长 λ 和光在真空中的速度 C 之间有下列关系:

$$f \cdot \lambda = C \approx 300,000,000 \text{ 米/秒。} \quad (1)$$

因此,微波的波长范围是从 1 米到 1 毫米,由于微波的波长与通常无线电波的相比更为微小,故称为“微波”。

对微波加热干燥规定了若干专用频率,这主要是为了避免对雷达、通信、导航等微波设备的工业干扰,同时选定频率也有利于所用装置和器件的配套互换。目前世界上比较多的国家采用了如表 1 所示的所谓工业、科研、医疗(ISM)专用频率*,而目前在微波加热干燥方面所采用的主要是其中 915 和 2450 两个频率。

表 1

波 段	频 率 (兆 赫)	中 心 波 长(厘 米)
L	915±25	33.0
S	2450±50	12.2
C	5800±75	5.2
K	22125±125	1.4

典型的微波工业加热干燥装置,其中整流电源主要是提供微波管所需要的高压直流功率,加在微波管上产生微波功率,然后通过波导输送到微波加热器中,在这里微波与产品相互作用

*此外有少数国家还使用: 433.92±0.8678 兆赫, 896±10 兆赫,以及 2375±50 兆赫等频率。

被吸收而产生热。因为水能强烈地吸收微波，故微波加热器常用来干燥各种产品。在自动化连续生产线上，产品经过传送带源源不断地通过加热器，而附加的传感器和控制器，则根据产品的情况自动控制输入到加热器中的微波功率，以达到调节加热温度，保证产品质量的目的。

微波管是产生微波的电子管，微波加热干燥用的主要有两种：一种是磁控管，它是一种微波振荡管，其主要特点是：能给出中等或大功率（几百瓦到一、二十千瓦，目前商品管最高达 30 千瓦），较高的效率（约 50% 到 80% 左右），所需电压较低（约几百到几千伏），中等寿命（约几千小时），结构简单，体积重量较小，价格较低。另一种是多腔速调管，它是一种微波功率放大管，故需前级推动。其主要特点是：高功率（从几十千瓦到兆瓦级），中等效率（约 40% 到 60% 左右），需高电压（约几十到几百千伏），长寿命（可达一万小时），结构较复杂，体积和重量均大，价格较高。此外还有正交场放大管等。一般中等功率微波加热装置大量使用的是磁控管，大功率的也可以采用若干磁控管并联运行，故目前磁控管用得最多。

磁控管实际上是一个二极管，阳极与阴极同心而阴极居中。阴极一般是圆柱形的，内有加热灯丝（也有直接将螺旋形的灯丝作阴极的，所谓“直热式”）。阳极是中空的铜块，内圆周上对称分布着若干空腔，称为谐振腔。阳极与阴极之间的环形区域是电子与电磁场相互作用的“作用区”。当在极间加上直流高压时，就在作用区中建立起径向的静电场，同时装在管壳外的磁铁在作用区产生轴向的静磁场，两者互相垂直形成所谓“正交场”。灯丝预热以后，阴极发射出电子到作用区，径向电场力使电子加速向阳极运动，但由于存在轴向磁场，电子还受到一个与其运动方向和磁场方向都垂直的力的作用，这使电子改变方向而趋向于“转圈子”，实际上电子的运动是上述两种运动的合成，即“转着圈子慢慢向阳极移动”，电子运动的能量当然是由电源所提供的直流电能转化来的。这种在正交场作用下作回旋运动的一些电子会逐渐失去部分能量而转换为微波能量，这就在作用区建立起初始的旋转微波场。因此实际上是，在正交场与旋转微波场的共同作用下，电子在移向阳极的过程中，不断地转圈子，同时不断地吸收直流电能而转化为微波能量，这样经过若干圈以后，最后打到阳极块上，完成了它的使命。这类能辐射微波的电子称为“有利电子”。有利电子之所以能产生微波，是因为它不断地受到微波场的减速作用，速度减慢，部分动能转化为微波能量。此外还有一种“不利电子”，它与有利电子的区别，在于它是在“不利的时刻”从阴极出来的，这种电子被微波场所加速，故它不但不会产生反而要吸收微波能量。但不利电子转了半圈就打到阴极上，离开了作用区，所以它是“短命”的。由于不利电子是短命的，而有利电子是长命的，所以作用区中最后剩下的绝大部分是有利电子。在正交场与旋转微波场的作用下，它们聚集成为“轮辐”状电子云，随着旋转的微波场一起同步地旋转，不断地将直流电场转化为微波能量，其作用有点类似于发电机中的“转子”，不同的是这里的“电子转子”的转速高达每秒几亿次。

阳极块上的谐振腔有两个作用：一是“储能”，即将产生出来的微波能暂时储存在腔体内，以便输出使用，在这个意义上它好象发动机中的飞轮。二是“定频”，即管子所产生的微波频率基本上由谐振腔的几何形状和尺寸所决定，这与钢琴发出的声音的频率由钢丝琴弦的长度决定类似。可以证明，谐振腔的尺寸与波长成正比，故波长越长，腔体越大，相应地管子也越大。大管子的散热能力强，功率容量大，所以长波段的管子比较容易做到大的输出功率。在干燥含水量很多的产品（如潮湿的粮食等）需要大功率时（往往需要几十甚至上百千瓦微波功率），选用 915 兆赫比 2450 兆赫较为有利。

前面说的不利电子打回阴极(这称为“回轰”)会产生两个作用:一是使阴极发热,二是会打出“二次电子”来。一般磁控管在启动以后,因电子回轰,阴极会过热,所以往往要求能自动降低灯丝电压,以防止因过热而损坏管子,有时甚至可以切断灯丝电源,只靠回轰就能维持阴极的正常发射。这在设计磁控管电源和运行中应加以注意^[1]。

波导是用来传输微波的。在直流与低频(例如 50 周工频)下,只要用两根导线就可以把电能传输到很远的地方。这种方法完全不适用于微波,这是因为微波的频率很高,用双根线那样的敞开方式传输,会有很多的能量辐射出去而损耗掉,传输效率极低。为了防止微波在传输过程中的辐射损耗,可以采用微波无法穿透的良导体将传输线封闭起来,即让微波在金属做的空心管子内部传输,这就是波导。常用波导的截面形状是矩形、圆形或同轴式的,波导的壁由铜、黄铜或铝做成,微波在其内部空间传播,不会有能量漏出,损耗很小,传输效率很高。

在微波加热装置中,波导不仅用来将微波管产生的微波功率输送到加热器,而且有不少加热器本身就是由一段波导做成,因而为了正确设计和使用微波加热装置,有必要了解波导中电磁场的分布。

试以矩形波导中所谓“ H_{10} 波”(这也是最常用到的)的电磁场分布,以及波导内壁表面的电流分布作为例子。电力线表示电场分布,由箭头指出的电力线方向就是电场的方向,电力线的密度表示电场的强度,电力线最密的地方电场最强。矩形波导中 H_{10} 波的电场垂直于宽壁,沿宽壁的分布是中间最强,越到两边越弱,靠近窄壁处电场为零。在加热器中被加热的产品应放在电场较强处,故了解波导中的电场分布对于设计和使用某些波导型加热器是必要的。磁力线同磁场之间的对应关系与电力线同电场的一样。微波场还在波导内壁表面感应出电流,其大小正比于表面的磁场强度,而其方向则与磁场相垂直。以电流线的形式表示出壁上电流的分布时,电流线的方向就是电流流通的方向。有时要在波导壁上开槽,如果槽缝切断了壁上电流的通路,微波就会从槽缝中辐射出来。如果平行于电流线开槽从而不切断电流的通路,就基本上没有辐射,这称为“无辐射缝”。例如在矩形波导做成的加热器中,为了引入传送带,常在宽壁中线处开狭而长的无辐射缝。

实际上,波导中的电磁场和电流都是在迅速变化的。在波导中电磁波向一个方向传播而无反射时,这种单一方向传播的波称为行波。行波场的变化规律是:保持电磁场的结构不变,整体地向前迅速地移动。因此如果在波导中的一个固定截面上观察时,就将“看到”其中的电磁场,随时间作迅速的周期变化,变化的频率就是微波场的频率,下面将会看到,就是这种迅速交变的微波电场与某些物质相互作用而产生热。

为了有效地传输微波能量,波导的截面尺寸应大致与波长有相同的数量级,因此一定尺寸的波导只能用于一定的波段,不同的波段则应采用不同尺寸的波导。实用的波导的尺寸已经规格化,有标准产品可供选用。但如有特殊要求则应根据需要自行设计。

除了微波管与传输线以外,在微波加热装置中还要用到其他一些微波元件,如谐振腔、定向耦合器、匹配器、分功率器、环行器与隔离器、匹配负载等。为了进行测量,还要用到一些微波测量仪器如功率计、波长计、测量线、反射计、场强计等。

二、微波加热干燥原理^[2]

所谓“微波干燥”实际上就是利用微波加热促使水分(或其他液体)蒸发,使产品干燥。因

此明确了微波加热的基本原理,也就不难弄懂微波干燥的原理。

微波加热的原理基于微波与物质相互作用被吸收而产生的热效应。一般物质按其电性质大致可以分为两类:第一类是可以导电的导体,如银、铜、铝等金属,属良导体。微波在良导体的表面产生全反射而极少被吸收(这与镜面反射光类似),所以良导体一般不能用微波直接加热。第二类是不导电的介质,如玻璃、陶瓷、石英、云母以及某些塑料等,微波在其表面发生部分反射,其余部分透入介质内部继续传播(这与光透过玻璃类似)。如果是良介质,则微波在其中传播很少被吸收,热效应极微,故良介质也不适宜用微波直接加热。但有另一些所谓吸收性介质,微波在其中传播时会显著地被吸收而产生热,即具有明显的热效应,这类吸收性介质最宜于用微波加热。各种介质对微波的吸收各有不同,水能强烈的吸收微波,所以含水物质一般都是吸收性介质,都可以用微波来加热,用微波进行干燥也是根据这个道理。

在介质中微波能怎样转化为热能,换句话说热效应的机理究竟如何,下面作一通俗的解释。如电池通过一个换向开关与电容器的极板连接,极板之间放一杯水。水分子(H_2O)由两个氢原子(H)和一个氧原子(O)组成。氢原子有一个电子,氧原子有八个电子(两个在内层,六个在外层)。在组成水分子时,外层电子重新分布的结果,使得水分子的电荷分布不对称,所以水分子虽然在整体上是电中性的(因为原子核的正电荷为电子的负电荷所抵消),但由于电荷分布不对称而呈现局部的电性,两个氢原子的那一端带正电,而氧原子的那一端带负电,这种两端带等量异号电荷的分子称为“极性分子”。水分子是极性分子,但水通常却不呈现宏观的极性。这是因为分子的杂乱热运动,使得分子的排列不是整齐有序而是杂乱的,各种方向都有,而且在迅速变化,分子的极性互相抵消,因此水在宏观上就平均而言并不出现极性。为了说明热效应的机理,可作一理想实验。如把开关合向左,电池就向电容器充电,在其上、下极板上分别充以正、负电荷,而在极板间建立起相应的电场。在这个外电场的作用下,由于异性电荷互相吸引,杯中水的极性分子就有沿着外电场方向取向的趋势,即带正电荷的氢端倾向于下面的负极板,而带负电荷的氧端倾向于上面的正极板,从而使水分子在杂乱的热运动中,多少形成某种程度的整齐的有序排列,于是杯中水在外电场作用下产生了宏观的极化。这种整齐排列的极性分子,包含着额外的能量——位能,这就是由电源供给能量的外电场做功转化而来的介质“极化能”。如果这时再把开关合向右,电池的极性反了,原来充电的电容器先是通过电池放电,而后就反向充电,直到在极板间建立起与以前同样强度而方向相反的电场为止。在这个过程中,杯中水的极性分子就转过来在相反的方向上形成某种程度的整齐的排列,使水产生相反的极化。如果象这样迅速地来回扳动开关,杯中的水分子就不断的改变方向而迅速地摆动,但是由于分子的热运动和相邻分子间的相互作用,上述分子随外电场变化而摆动的规则运动受到干扰和阻碍,产生了类似于摩擦的效应,结果是有一部分能量转化为分子的杂乱热运动的能量,使分子运动加剧,水的温度就升高了。这就是介质在交变电场作用下热效应机理的一个大致的概貌。

这样解释热效应虽然很通俗,但失之过简。实际上热效应所产生的热不仅表现为分子运动的形式,还表现为辐射热形式,这个过程与分子内部运动状态的变化密切相关。此外,除了上述极性分子摆动所引起的热效应外,还有由于介质中的自由电子或离子在外电场力作用下运动所形成的传导电流产生的热效应,例如在上述杯中的水里放一些食盐($NaCl$),盐溶于水产生正、负离子 Na^+ 、 Cl^- ,这些带电粒子在外电场作用下受力而运动,形成所谓“传导电流”,这种传导电流也产生热效应。严格地说,介质的热效应包括上述极性分子热效应与离子导电热

效应两种。但是在微波频率下,除非有大量的离子,否则介质的热效应主要是由前述极性分子所产生的。

实际的加热装置当然不是这样的,具体的形式视所用的频率不同而异。通常把频率为几兆赫到几十兆赫的称高频介质加热,能源是用普通三极管做成的高频功率振荡器(俗称“高频炉”),加热器最简单的就可以采用电容器的两块极板,被加热的介质置于极板之间。如果频率提高到微波范围,那就是微波加热装置(即“微波炉”),能源就是前述的微波管,被加热的介质放在加热器中微波电场很强的地方,例如在矩形波导做成的加热器中,就应放在位于两个窄壁之间的宽壁中线附近的强电场区。微波场以每秒几亿次的高速周期地改变外加电场的方向,使介质的极性分子迅速摆动,而产生显著的热效应。

从上述极性分子摆动的模型,不难定性地理解,如果极板间的外电场越强,分子摆动的振幅就越大,介质的极化能就越多,即外电场做功就越多,相应地其中转化为热能的那一部分也就越多。如果开关换向的速度越快,极性分子的摆动就越频繁,因此单位时间内由于摩擦而损耗的能量也就越多。这就是说,高频电场越强,频率越高,介质吸收的微波功率就越多。此外,如果杯中盛的不是水,而是别的东西,则同样条件下吸收的微波功率当然也不一样,即吸收的微波功率还与介质的种类与电性质有关。可以证明,在单位体积内介质吸收的微波功率 P_a 与该处的电场强度 E 和频率 f 之间有下列关系:

$$P_a = 2\pi\epsilon_0\epsilon'\text{tg}\delta E^2 f, \quad (2)$$

其中常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 安·秒/伏·米, ϵ' 称为介质的“介电系数”,它是表征介质极化程度的参量, $\text{tg}\delta$ 称为介质的“损耗正切”,它是表征介质损耗的参量。根据能量守恒与转化定律,被介质吸收的微波能量当然全部转化为热能,因此只要将(2)式的 P_a 除以“热功当量”就可以理解为单位时间内在单位体积的介质中产生的热量。(2)式与前面得到的定性解释是符合的。

综上所述,可将微波加热干燥的主要特点大致归纳如下。

1. 就地发热,里外一起热,加热速度非常快。

微波加热的最大特点为,热是在被加热物体内部就地产生的,而不是象常规加热那样从外部输入的。微波加热的热源分布在物体之内,这样里外一起热,不仅温度很均匀,不会造成“外焦里不熟”的夹生现象,有利于提高产品质量;特别重要的是大大缩短了加热所需的时间。这是因为用常规方法加热,热源在外部,物体内部温度的升高是“由表及里”,即在其表面热了以后,主要依靠热传导再传热到内部的,由于介质都不是热的良导体,故传热很慢,加热所需时间自然很长。而微波加热的热源在内部,表里一起热,不靠热传导,所以加热所需的时间非常短。

常规加热时,温度是表面高、内部低。这种“外高内低”的温度分布,不利于内部的水分迅速蒸发,故利用常规加热干燥产品往往需时很久,才能使其内部烘干。微波加热则不然,由于里外一起热,而且因为外部较易散热,故往往是内部的温度反而比外部高,这种“内高外低”的温度分布可以促使物体内部的水分迅速蒸发,并很快扩散到表面挥发掉,这就使干燥时间大为缩短。实践证明,改用微波干燥以后,干燥时间可以缩短到只有原来用常规加热时的十分之一、几十分之一、甚至几百分之一是常见的事。微波加热干燥的速度这样快,将为生产带来一系列的好处。

2. 场强和频率对加热的影响。

(2) 式指出 P_a 正比于电场强度的平方,因此微波电场越强,在一定体积的介质中吸收的微波功率和单位时间内产生的热量就越多,因而在热容量与散热情况相同条件下的介质之温

升也就越大。这表明为了有效地加热产品,应将产品放在加热器中微波电场较强的地方;而为了提高温度,就应该设法提高作用区的场强。这些在设计和使用微波加热器时都是必须注意的。

(2) 式还指出, P_a 随频率 f 提高而提高*, 因此提高频率也可以达到与增加场强类似的效果。这就说明了为什么微波加热比普通高频介质加热优越, 因为对于一定的产品, 其参量 ϵ' 和 $\text{tg}\delta$ 的数值基本上是固定的, 要提高单位体积内的吸收功率, 从而增加热量与温升, 有两个办法, 一是增大场强, 二是提高频率。但增大场强受到高频击穿的限制, 特别是在某些干燥过程中, 产品处于低气压和含有水蒸汽的气氛中, 就更容易产生高频击穿, 这就限制了高频加热所能输入的最大功率密度。因此在一定的击穿场强限制下, 要提高功率, 采用更高的频率较为有利。以高频介质加热的常用频率 40.68 兆赫与常用的微波加热频率 915 兆赫相比, 在同样的场强下, 单位体积内吸收的微波功率要比高频功率提高二十倍以上。这就是采用微波加热比高频加热较为有利的重要原因之一。

3. 穿透能力与加热均匀性。

红外线比微波的频率高得多, 照这样说采用红外线加热不是更有利吗? 是的, 在一定场强下从单位体积介质中获得高功率吸收这一点看, 红外线似乎比微波有利。但从对物体的穿透能力以达到表里一致、均匀加热这一点看, 红外线就远不如微波。所谓穿透能力就是电磁波穿透到物体内部的本领, 电磁波透入介质表面并在其内部传播时, 由于能量不断被吸收而转化为热能, 波所携带的能量就随着深入介质内从表面算起的距离以指数形式衰减, 电磁波的能量衰减到只有表面处的 $1/e^2 \approx 1/2.72^2 \approx 13.5\%$ 时所能透入介质的深度 D , 称为“穿透深度”, 就是说大约有 86.5% 的电磁波的能量在介质表面深度为 D 的一层内损耗掉, 也就是说热量主要在在这一层内产生。可以证明近似地有:

$$D = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon' \text{tg} \delta}} \quad (3)$$

(3) 式表明, 一般吸收性介质的穿透深度大致与波长同一数量级。以 915 兆赫 ($\lambda = 33$ 厘米) 和 2450 兆赫 ($\lambda = 12.2$ 厘米) 的常用的微波加热频率而言, 通常吸收性介质的 D 值大致约为几十厘米到几厘米的范围, 故除特大物体外, 一般可以大致做到表里一致均匀加热。而红外线的 D 值一般小于 0.1 毫米, 故其穿透能力很差。在红外线照射下的物体, 只有表面一薄层发热, 热量透入内部主要靠热传导, 这实际上就是常规加热的情形, 不仅加热时间很长, 而且很容易造成外焦里不熟, 从而影响产品质量。

4. 介质电性质与选择加热效应

前面说过, 微波加热的效果与被加热物质的电性质有密切关系。这一点反映在 (2) 式中就是 P_a 与介质的介电系数 ϵ' 与损耗正切 $\text{tg}\delta$ 之积成正比。各种物质的介电系数 ϵ' 的值各不相同, 但除含水物质和某些“铁电”(如钛酸钡之类) 物质以外, 一般介质的 ϵ' 在 1 到 10 之间, 水的 ϵ' 特别大, 约为 80 左右。各种介质的损耗正切 $\text{tg}\delta$ 则相差更大, 优良介质(如石英、聚四氟乙烯等)的 $\text{tg}\delta$ 小于千分之一, 而吸收性介质的 $\text{tg}\delta$ 最大可达十分之几。水的 $\text{tg}\delta$ 很大, 约为 0.3, 故水能强烈地吸收微波。而一般含水量在百分之几到百分之几十的各种含水物质的 ϵ' 和 $\text{tg}\delta$ 都相当大, 都能有效地吸收微波, 从而都适合于用微波加热。这就是为什么微波加热特别适用于含水较多的农林产品、食品、轻工业产品和某些化工产品的道理, 这也就是为什么微波加热特别

* P_a 与频率 f 并不是正比关系, 这是因为 ϵ' 和 $\text{tg}\delta$ 都随频率而变。

适用于烘干水分的道理。而由金属或优良介质做成的产品,则不适宜用微波直接加热。总之,不同的物质,微波加热的效果完全不同,这就是微波加热的选择性。这种选择性使得一些产品不能用微波加热,这是坏事,但坏事在一定的条件下可以引出好的结果来。在某些微波加热过程中,选择性加热反而是一个十分有利的因素,特别是在利用微波加热干燥产品时,由于产品中的水分比其中的干物质对于微波的吸收大得多,温度也就高得多,这种在产品内部的对水的选择加热的结果,使得水分很快蒸发而产品不致过热,这对于缩短干燥时间和提高产品质量均有好处。特别是在干燥某些不耐高温的产品时,选择加热的优越性更为明显。例如国外在某种特种纸的干燥试验中发现^[2],原来用红外线烘干,最后含水量只能降至2%,而纸的纤维温度却高达200°C,纸的质量明显降低;改用微波干燥以后,由于选择加热,水比纤维素先热,所以能在较低的温度下干燥而不损伤纸的纤维素。试验的结果是纤维素最高不超过125°C,而含水量可均匀降低到0.5%,提高了纸的质量。在干燥某些不耐高温的产品如合成纤维、药品以及化工产品时,微波对水的选择加热对于提高产品质量很有用处。

5. 弛豫频率与温度效应^[3, 4]

介质的电参量 ϵ' 和 $\operatorname{tg} \delta$ 都不是常数,随频率和温度而变,这一点对于微波加热干燥有重要影响,应加以注意。

为了下面讨论方便起见,将(2)式改写为如下形式:

$$W_a = P_a T = P_a \frac{1}{f} = 2\pi \epsilon_0 \epsilon'' E^2, \quad (4)$$

其中

$$T = \frac{1}{f} \quad (5)$$

是电磁波的振荡周期,而

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (6)$$

称为介质的“损耗因子”。 $W_a = P_a T$ 是一个周期内单位体积介质所吸收的微波能量,与 ϵ'' 成正比。试验表明,当温度 t 一定时,在 $f < f_r$ 范围内, ϵ'' 随频率上升而上升,在 $f = f_r$ 时 ϵ'' 达到峰值,而在 $f > f_r$ 以后,频率再提高, ϵ'' 反而下降。 f_r 称为介质的弛豫频率,一般吸收性介质在微波频段内有一个(或几个)吸收峰。

ϵ'' 的这种随频率变化的趋势,也可以用上述极性分子摆动模型加以定性的解释。前面说过,介质的极性分子在外电场(即微波电场)的作用下摆动,一个周期 T 内改变方向两次,介质吸收微波能转化为热能,主要是在摆动过程中相邻分子之间的“摩擦力”的作用。频率越高,分子摆动越快,“摩擦力”就越大,一个周期内损耗的能量也就越多,故 ϵ'' 随 f 上升而增大,这就是 $f < f_r$ 的情形。但为什么 $f > f_r$ 以后 ϵ'' 反而下降呢?原来分子的极化能转化为热能,不是瞬时发生的,而是有一个过程称为“弛豫过程”,需要滞后一段时间 τ ,称为“弛豫时间”,可以认为在 τ 这段时间内,介质的极化能转化为热能的过程基本上完成。可以证明

$$f_r \sim \frac{1}{\tau} \quad (7)$$

因此在

$$f \ll f_r, \text{ 即 } T \gg \tau \quad (8)$$

条件下,分子的摆动不太快,因而在摆动一次所需的 $\frac{T}{2}$ 时间内,分子的极化能“来得及”转化为热能,所以低频时弛豫过程的时间滞后对于介质损耗没有多大影响。当在

$$f \gg f_r, \text{ 即 } T \ll \tau \quad (9)$$

条件下, 情形就不同了, 这时由于分子摆动得太快了, 因而在一次摆动的 $\frac{T}{2}$ 时间内, 极化能还“来不及”转化为热能, 外电场就又反向了, 所以这时极性分子虽然摆动得很迅速, 但是由于滞豫过程的时间滞后效应, 使得分子的极化能“来不及”转化为热能, 故一个周期内的损耗反而下降。这就是为什么 ϵ'' 在 $f > f_r$ 以后反而下降的一个简单的定性解释。

当温度 t 上升时, f_r 也随之增加, 这是因为滞豫时间 τ 与温度有关, 温度越高, 分子的杂乱运动越剧烈, 分子间的相互作用也就越频繁, “摩擦力”就越大, 极化能就能够更快地转化为热能, 也就是说 τ 越小, 根据(7)式 f_r 就增大。

从上述分析中可以得出一个重要的结论: 如果工作频率 $f_1 < f_r$, 则当温度 t 上升时 ϵ'' 下降, 因此 $d\epsilon''/dt < 0$, 称为“负温度系数”。反之, 如果工作频率 $f_2 > f_r$, 则温度 t 上升时 ϵ'' 随之增加, 这时 $d\epsilon''/dt > 0$, 称为“正温度系数”。 ϵ'' 的温度影响对于微波加热相当重要, 尤其是在利用微波加热对含水物质进行干燥时, 必须了解水的电性质及其温度影响。为此, 必须区别水分子的两种状态: 一种称为“自由水分子”, 即通常处于液态或汽态的水分子*, 自由水分子的 $f_r \approx 20$ 千兆赫, 因此微波加热常用频率915兆赫和2450兆赫均低于自由水分子的弛豫频率。另一种称为“结合水分子”, 即与干物质的分子紧密相连被束缚而不能自由运动的水分子, 如某些晶体中的结晶水, 以及生物机体中为某些有机分子所结合的水分子均为结合水分子。结合水分子的弛豫频率, 因各种不同情况而异, 一般大约在几百兆赫的范围内, 低于915兆赫和2450兆赫。因此对于自由水分子而言, 微波加热的频率 $f < f_r$, 故 ϵ'' 随温度提高而下降, 是负温度系数; 而对于结合水分子而言, 微波加热频率 $f > f_0$, 故 ϵ'' 随温度提高而上升, 是正温度系数。国外通过试验给出了一种木材的 ϵ'' 随含水量与温度变化的曲线^[2]。发现当含水量大于20%以上时, ϵ'' 是负温度系数, 说明在高含水量时主要是自由水分子在起作用。而当含水量小于8%以下时, ϵ'' 变为正温度系数, 这说明在低含水量时, 剩下的大部分是结合水分子了。而在含水量在8%到20%这一范围内, 由于两种水分子均有作用, 故 ϵ'' 的温度变化呈现复杂的形式。

上述温度效应在微波干燥过程中应加以特别注意, 加热过程刚开始产品内的含水量高时, 自由水分子占多数, ϵ'' 是负温度系数, 故温度低的地方 ϵ'' 大, 吸收功率多, 温度高的地方 ϵ'' 小, 吸收功率少, 这有利于均匀加热。而且随着温度的升高, ϵ'' 下降, 使吸收的微波功率自动减少, 这种自动调节作用是有利的。但产品快烘干时, 自由水分子已大部分蒸发了, 剩下的主要是结合水分子了, 因而 ϵ'' 变为正温度系数, 故越是温度高的地方, ϵ'' 越大, 吸收越多, 而且随着温度的上升, ϵ'' 不断增大, 吸收功率也随之增多, 温升更大, 这样造成“雪崩”式的恶性循环, 使温度剧烈上升, 结果造成过热, 使产品烧焦, 严重时甚至会着火燃烧。这种过热现象必须设法加以防止, 以保证产品质量, 例如可在产品快烘干时, 应相应降低输入的微波功率。

三、微波加热干燥的优点

实践证明, 利用微波对某些产品进行加热干燥, 具有一系列独特的优点, 主要有以下几方面。

1. 加热时间非常短, 产品率很高

* 水的固态——冰中的水分子是结合的, 故冰的 ϵ' 和 ϵ'' 均远比水的小, 而且具有低得多的弛豫频率, 这使得对冰冻物体的微波加热变得很困难。

这是微波加热最突出的优点。有人给出了用微波加热与用常规加热干燥产品所需时间的对比^[1~2]。发现将产品的含水量从80%烘干到5%，用常规方法需900分钟以上；而用微波加热只需40分钟就行了。两者相差达20倍以上。国外某些工厂的经验证明，微波加热用于干燥木材，效果甚为显著，用常规方法需几个月甚至一年以上才能干燥的硬木，改用微波加热与常规加热结合的方法，只要五、六天就可以干燥，而且质量很好^[2, 5]。

由于加热时间显著缩短，使产品率成倍提高。例如国外曾在纺织厂进行过试验^[2]，原来用红外线配合热空气加热，对浆过的纱进行干燥，需经反复三次处理，车速为350呎/分，产品率为400磅/小时；改为微波加热配合热空气进行干燥，车速增加到1200呎/分，产品率提高为1300磅/小时。

2. 热能利用率高，节省能源

微波加热所需时间短，加热过程中的热损耗就大为减少；同时，由于热源在产品内部，避免了热量的长途传输，减少了传输中的热损耗。故微波加热的热能利用率很高。根据国外报导，利用微波加热进行干燥的热能利用率，一般比用常规加热的要高出几十倍，可以接近理论效率。国外曾有人专门做过对比试验^[6]，即将16克马铃薯粉加热干燥，从23%的含水量烘干到3%，单纯用热空气烘干需电能238瓦小时，而单纯用微波烘干只需电能7.07瓦小时，两者相差达三十倍以上。由此可见，采用微波加热干燥，对于节约电力，减少煤耗具有重大意义。

3. 产品质量提高

微波加热温度均匀，表里一致，故用于干燥产品时，可以做到湿度分布均匀；且由于对水有选择加热效应，可以在较低的温度下进行快速干燥，不致使产品中的干物质过热而损坏；对于某些加热过程，微波还可以产生一些有利的物理或化学作用。这些均有利于提高产品质量。例如利用微波干燥电影胶片，就可以做到表里一致快速干燥，表面不会起皱，保证了质量。又如利用微波烘干彩印的图片，可以使彩色鲜艳，提高印刷质量。

4. 便于连续生产和生产自动化，有利于提高劳动生产率

采用常规加热方法，在生产线上加热，特别是干燥，往往是费时最多的薄弱环节。例如在卷烟工厂中，就是因为烘烟所需时间太长，使得卷烟与包装两条流水线无法连接起来。如改用微波烘烟，就有可能实现从卷烟到包装的全程流水线，可以提高劳动生产率。

此外，常规加热由于存在费时较多的输热和传热过程，所以热惯性很大；而微波加热由于是就地生热，无需传热过程，所以热惯性极小，要开就开，要停就停。这便于实现快速自动控制，有利于生产过程的自动化，可以进一步提高劳动生产率。

5. 没有公害，有利于改善劳动条件

微波加热设备体积小，可以节省厂房面积。微波加热没有外部高温热源和高温输热管道，车间温度不致过高，可以改善工人劳动条件。微波加热不排出烟尘等有害物质，没有公害。至于微波功率的漏出问题，只要正确设计和使用加热装置，加强防护，是可以做到对操作人员无害的。

四、微波加热干燥的注意事项

根据国外报导，微波加热确有不少突出的优点，应该大力推广。但事物都是一分为二的，微波加热也是如此，目前这项新技术还存在一些问题。对于这些问题如不事先充分估计，认真

对待,加以克服,将会影响到这一新技术的推广应用。国外在六十年代后期,兴起了微波加热干燥的一股“热潮”,很多行业纷纷上马,改用微波加热干燥。其中不少项目确实收到效果,得到巩固和发展。但也有一些项目,由于事先估计不足,遇到问题无法解决,以致后来被迫下马^[7,8]。当然,其中有些是因为资本主义所固有的生产盲目性,以及竞争、兼并所造成的。但也有些是因为技术原因或技术经济上的原因所致。

现将几个主要问题分述如下。

1. 产品的性质

产品的性质是否适合于微波加热,这是必须首先加以考虑的问题。前面说过,有些产品不宜于用热波加热,就不能勉强采用,否则就可能遭到失败。到底哪些产品适合于用微波加热?笼统地说,凡含有一定水分的农付产品和某些轻工业和化工产品,以及其他一些吸收性介质做成的产品,一般都能采用微波加热干燥。但这还不够,还必须对具体的产品进行具体的分析研究。是否适合用微波加热,主要决定于其微波电性质,即其 ϵ' 特别是 $\text{tg}\delta$ 的数值, $\text{tg}\delta$ 太低的就不宜用微波直接加热。关于一般物质的 ϵ' 和 $\text{tg}\delta$ (或 ϵ'')的数据已积累了一些资料^[3,9],但是由于产品种类繁多,规格品种不一,加以 ϵ' 和 $\text{tg}\delta$ 的数值与物质的化学成分、物理状态、温度、湿度以及频率等一系列因素有关,因此最好事先对产品进行测量,以便取得可靠的数据。这样,不仅可以据此判断是否适合于用微波加热,而且这些数据对于正确设计和使用加热器也是必要的。建立适当的测量基地,有计划地对于各种物质的微波电参数进行全面的测量,是一项应该引起重视的有意义的工作^[10,11,12]。

2. 与其他加热干燥方式进行全面的比较

微波加热干燥能否取代其他常规方式,关键在于它是否比其他方式优越。在决定采用何种加热干燥方式以前,应对各种方式进行全面的比较。表2中给出了各种加热方式的大致对比,供选择时参考。但是由于各种产品的情况不同,加热干燥的具体要求不一,情况很复杂,不是单凭一张表就可以判断的,还必须对具体情况进行具体分析,最好是先进行一些小模规的中间试验。

表 2

项 目 名 称	微波加热干燥	红外线加热干燥	高频加热干燥	电炉加热干燥	热空气或蒸汽加热干燥
电-热转换效率	中 等	较 高	中 等	高	
热能利用率	很 高	较 低	较 高	低	低
加热区域及均匀性	内部,均匀	表层,不均匀	内部,均匀	表层,不均匀	表层,不均匀
加热时间	极 短	中 等	较 短	较 长	较 长
控制性能	好	中 等	好	较 差	差
选择性加热	有	无	有	无	无
产品质量问题	需防止过热	表面易焦	需防止击穿	易 焦	易 焦
产品率	很 高	中 等	较 高	较 低	较 低
固定投资	高	中 等	高	低	中 等
生产费用	高	较 高	高	中 等	低
公害	微量辐射	环境高温	高频强场	环境高温	高温、烟、尘

3. 经济核算

目前微波加热的主要缺点是成本高, 因此有必要进行经济核算。但是微波加热的经济核算问题很复杂, 各种不同产品, 各种不同的要求, 情况不一, 事先彻底的核算较困难。下面仅就有关技术经济的几个主要问题, 提供一些资料供参考。

1) 所需微波功率的计算方法: 设计或选用微波加热装置, 选用微波管, 估计所需电功率, 都必须知道加热干燥所需要的微波功率。下面介绍一种简单的计算方法:

根据热功当量:

$$1 \text{ 千卡/秒} = 4.18 \text{ 千焦耳/秒} = 4.18 \text{ 瓩}, \quad (10)$$

单位时间内产生的热量 Q 与所需加热功率 P 之间有简单关系:

$$P \text{ (瓩)} = 4.18Q \text{ (千卡/秒)} = 0.07 \text{ (千卡/分)}. \quad (11)$$

在单位时间内加热产品所需热量 Q , 则可按通常计算热量的方法算出。对于不含水物质:

$$Q \text{ (千卡/分)} = MC\Delta t, \quad (12)$$

其中: Δt ——产品的温升,

C ——产品的热容量(千卡/°C·公斤),

M ——每分钟处理的产品重量(公斤/分)。

对于含水物质的干燥, 还要计及水分蒸发所需热量。水的热容量是 1 千卡/°C·公斤, 常压下水在 100°C 时沸腾而大量蒸发, 蒸发热为 539 千卡/公斤。考虑到选择加热效应*, 则对于含水产品的干燥应有:

$$Q \text{ (千卡/分)} = M[W_1(100-t_1) + C(1-W_1)(t_2-t_1) + 539(W_1-W_2)], \quad (13)$$

其中: t_1 ——加热前产品温度(°C), t_2 ——加热后干物质的温度,

C ——产品不含水时干物质的热容量(千卡/°C·公斤),

M ——每分钟处理的产品重量(公斤/分), 包括水分在内,

W_1 和 W_2 ——分别为处理前与处理后的含水率(%)。

将(12)或(13)式代入(11)式, 就可以算出所需的加热功率 P , 但上述计算中没有考虑到效率, 由于存在热损耗与微波损耗, 故实际所需微波功率比 P 要大一些, 至于损耗多少, 所需微波功率比 P 大多少, 则要根据具体情况才能作出估计。

2) 损耗和效率: 据称, 从市电的进线功率至输送到产品中的有用微波功率, 即总的电-热转换效率大约为一半左右(45%), 这是比较低的^[2]。其中主要损耗是因为微波管效率不高所引起的管的热损耗。在理论上, 某些类型微波管的效率可达 90% 以上^[13], 因此继续努力提高微波管的效率, 对于提高电-热转换效率, 降低成本具有重要意义。

3) 热能利用率: 前面说过, 微波加热的热能利用率非常高, 这就在一定程度上补偿了上述电-热转换率低的缺点。有不少实例证明, 改用微波加热以后, 耗电量反而比常规加热的降低。

4) 固定投资、生产费用与成本: 微波加热的固定设备, 包括整流电源、微波管与加热器以及传送带、控制器等附属设备。由于微波管价格高, 并需要电源设备, 所以固定投资较大。以产生每瓩微波功率计所需价格, 国外 70 年水平是^[2]: 单纯微波管约 100 美元/瓩, 最低为 70 美元/瓩, 预计几年以后对于兆瓦级的大管子可以降低到约 35 美元/瓩。整个微波加热设备, 大约

* 由于选择加热效应, 产品中水分的温升远比干物质的高, 故在微波加热过程中, 干物质加热后的温度 t_2 不一定到达 100°C, 而水分就大量蒸发了。

为 1500 美元/瓩, 最低为 700 美元/瓩, 对于 1 瓩的小型简单设备估计还可以降低到约 350 美元/瓩。微波加热的生产费用主要是设备折旧(包括更换管子在内)和电费, 国外 70 年的水平是包括全部折旧费和电费等等在内, 每瓩小时微波能量的价格(4 美分)比市电 1 度的价格(1 美分)高出三倍。这应该说是比较高的, 但产品实际吸收的有用热量以千卡计的价格就不一定高, 这是因为微波加热的热能利用率很高。至于成本的问题就更复杂, 因为这不仅要计及投资与生产费用, 而且还要考虑由于产品率提高, 劳动生产率提高, 以及质量改善等对降低成本的影响。国外有些工厂改用微波加热以后, 成本降低, 在短期内就可以收回投资的实例说明, 采用微波加热是有可能降低成本的^[2]。

5) 降低成本的途径: 微波加热的成本较高, 必须在降低成本上下功夫, 才能做到多快好省, 才能普及推广。降低成本的途径很多, 下面只介绍几个主要的途径:

① 与常规加热结合与利用余热: 用热空气烘干费用少, 但时间长; 而用微波加热干燥, 则费用大而时间短。如果两者结合, 先用热空气把水分烘干到一定含水量, 再用微波补充加热烘干, 就可以做到既缩短时间(比单纯用热空气缩短一半以上), 又降低费用(所需微波功率不到原来的四分之一)。此外, 微波加热与热空气或红外线同时使用, 也是一种常用的结合方式, 对于各种不同的产品, 存在一种最佳的结合方式, 可以通过实验确定之^[6]。总之, 根据实际情况和要求, 把微波加热与其他方法结合起来, 充分发挥各自的特长, 互相取长补短, 就可做到多快好省。表 3 列出了联合干燥的试验结果^[4]。

表 3 联合干燥试验结果

物 料	沙	马 铃 薯 粉	硅 胶
样品重量, 克	50	16	30
含水量, %			
初始	14	23	23
最终	3	3	3
干燥至含 3% 所需的能量, 度电	3.56	2.13	3.97
联合干燥方法			
微波能部分, 度电	5.6	4.0	11.28
空气能量部分, 度电	31.4	36.8	63.7
单一能源			
热空气能, 度电	99.4	238	272
微波能, 度电	8.85	7.07	16.43
干燥时间			
单一热空气时, 分钟	35	84	96
单一微波时, 分钟	20	23.5	25.5
联合时, 分钟	11.5	13	18

前面曾说过, 由于微波管的效率不高, 管子的热损耗功率相当可观, 采用适当的通风、冷却方式, 利用这部分“余热”作为常规热输送到加热器中, 对于提高总效率、降低成本是很有意义的。

② 提高微波管的性能, 简化电源设备: 对加热用微波管的基本要求是高效率、长寿命、低价格。此外, 微波管的电源设备占了固定投资的相当大部分。为了降低成本, 希望简化电源。例如采用“倍压整流”电路, 以便省去变压器, 但这要求磁控管降低阳极电压。又如磁控管本身是一个二极管, 可以采用“自整流”电路, 从而省去整流管, 但这要求磁控管能在交流电压下正

常运行。此外, 监控等附属设备也应力求简单、可靠、低廉, 以降低成本。总之, 只要从各方面努力, 是可以做到使微波加热干燥的成本逐步降低的。

参 考 文 献

- [1] Microwave Power Engng, Academic Press, 1968, New York and London.
- [2] Proceedings of IMPI Short Course for Users of Microwave Power, 1970 年
- [3] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 23 页
- [4] Theory and Application of Microwave Power in Industry: A Short Course, Proceeding of 1971 IMPI, 1971 年
- [5] Varian Associates Magazine, 1969 年 4 月
- [6] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 245 页
- [7] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 167 页
- [8] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 173 页
- [9] "Tables of Dielectric Materials", Dielectric Materials and Applications, MIT Technology press, 1954 页
- [10] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 3 页
- [11] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 13 页
- [12] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 69 页
- [13] Proceedings of the IEEE 1974 年 62 卷 11 页
- [14] J. of Microwave Power 1973 年 8 卷 246~252 页