

微波应用基本知识

讲义

北京市第一轻工业研究所翻印

1976年3月

前 言

在批林批孔运动的推动下，我国工人阶级在毛主席革命路线指引下，走独立自主，自力更生的道路，使微波技术在工农业生产各个方面得到越来越广的应用。

为了适应广大工农兵在三大革命运动中推广微波技术应用的需要。为了使微波技术在工农业生产中获得更加广泛的应用，我们上海科技交流站试编了这套讲座材料，重点介绍了关于微加热技术的基本原理。

由于我们在微波加热的实践方面经验很少，且由于我们学习不够，水平也很低，加上时间较紧，在编资料中难免有不少错误之处，迫切希望广大工农兵提出宝贵意见！

上海科技交流站电子电器交流队

1975年2月

微波应用基本知识

目 录

第一讲：	国内外微波加热和微波测量应用概况	1
一、	微波测量在工农业生产方面的应用	2
二、	微波加热在工农业生产中的应用	11
三、	目前我国在微波加热和测量的应用方面取得的进展	20
第二讲：	微波加热原理	27
一、	什么是微波？	27
二、	微波加热设备	29
三、	微波加热的原理	35
四、	微波加热功率计算	40
五、	微波加热的经济性以及与其它加热方法的比较	42
第三讲：	微波传输线和元件	49
一、	常用的微波传输线	49
二、	传输线的波型特性	52
三、	传输线的截止特性	60
四、	传输线的阻抗特性	64
五、	传输线的衰减特性	77
六、	传输线尺寸的选择	82
七、	常用元件介绍	85

附录:

一、 国产射频电缆规格	100
二、 我国波导管的标准尺寸	102
三、 我国矩形及扁矩形法兰盘尺寸	105
四、 同轴线特性阻抗表	109
五、 ISM波导常数表	110
六、 驻波比与对应参量	112
七、 分贝与电压、功率关系	113
八、 常用金属电特性	114
九、 某些介质的电特性	115
第四讲: 谐振腔的基本原理及其应用	117
一、 谐振腔的一般概念	117
二、 谐振腔的基本原理	120
三、 谐振腔的性能参数	131
四、 谐振腔的耦合方式	133

微波应用基本知识

~ 1 ~

第一讲 国内外微波加热和微波测量应用概况

微波技术最早开始应用于雷达。雷达是在1939年发明的，到现在已经有三十五年了。从五十年代起，开始用于通信，也就是现在大家所熟知的微波地面中继通信或接力通信。六十年代开始用于卫星通信。现在卫星通信中地面和卫星之间，卫星和地面之间的联系都是使用微波频率。地面向卫星发送用6,000兆赫的频率，卫星向地面发送用4,000兆赫的频率。在国防上，微波技术起着十分重要的作用。

在科学研究方面，产生高能粒子的微波加速器和微波谱仪是研究物质结构的重要工具。

近十多年来，微波技术向着一个新的方向发展，就是越来越多地用于工农业生产了。这是一个十分值得重视的动向。

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”微波技术在工农业生产上的广泛应用，体现了毛主席教导的无比正确。

有人说：“微波技术现在已经饱和了。”“饱和论”是违反毛主席的教导的。它的实质是反对前进和反对变革。事实上，微波技术非但没有饱和，而且正在更广泛地与各门科学技术结合起来，更多地为工业、农业和各门科学技术服务，并且在服务的过程中，要求微波技术本身不断地革新。

微波技术目前在工农业生产中的应用主要在两个方面：微波加热和微波测量。现在用于工农业生产中的加热方法是很多的，有用高频加热的，有用热风加热的，有用红外线加热的，但是这些方法各有其缺点。微波加热的特点是：加热均匀，热能利用率高，产品质量好，加热时间短，产品率高，较易实现

自动控制，以及加热具有自控的性质（也称选择性加热）。微波测量的特点是：迅速而准确，特别适宜于生产线上连续或非接触测量和进行生产的自动控制。

一、微波测量在工农业生产方面的应用：

使用微波技术可以测量各种谷物中的含水量，测量鼓风炉中料面的深度、钢板的厚度和炼钢炉的湿度，测量石油中的水份，测量纸张中的水份，测量木材中的水份，测量烟单中的水份，测量肥皂中的水份，测量型砂中的水份，测量药粉、药片和药材中的水份，测量砖墙和土壤中的水份，测量化学反应中的水份，测量海面的风浪，测量海水的湿度和盐份，测量海洋中的冰层，测绘地形和探测矿藏，以及在许多特定的场合，测量距离、速度和位置。

各种粮食有一安全水份，超过安全水份，需要及时处理，否则会发霉、生虫和变质。表1列出的是上海地区稻谷保管的安全水份。

表1 上海地区稻谷保管安全水份

稻谷湿度	粳 稻 水 份 (%)		秈 稻 水 份 (%)	
	早中粳	晚 粳	早 秈	中、晚秈
30°C 左右	14.0 以下	15 以下	13 以下	13.5 以下
20°C 左右	15 左右	16 左右	14 左右	14.5 左右
10°C 左右	16 左右	17 左右	15 左右	15.5 左右
5°C 左右	17 左右	18 左右	16 以下	16.5 以下

注：本表取自《粮食保管》P. 249

国家收购粮食是根据含有的水份等级收购的。粮食仓库对库存粮食要经常进行湿度检查。

大豆根据它的含水量确定其保存期。色装堆存，水份在16%。

左右的一般可以保管过冬；水份在15%左右的，一般可以保管到第二年5月；水份在14%左右的，一般可以保管到6月；水份在13%左右的，一般可以保管到7月；水份在12%左右的可以过夏。

油菜籽如果湿度过高，发热霉变很快。如果水份在13%以上，仅一夜之间，湿度会突升 10°C 以上，而发生霉变。对于高水份的油菜籽，每天检查应不少于2~3次。

现在有许多方法可以用来测量粮食的湿度，例如电烘箱法、电阻法、电容法和红外测湿法等。电烘箱法是取一定重量的样品放在烘箱里烘，烘干后称它的失重。这种方法的缺点是测量的时间长，把粮食放在华氏 105° 的烘箱内干燥需要烘4个小时。红外测湿，视被测谷物对象，每次测定时间约为10至30分钟。电阻法和电容法都不容易得到很高的精度。

用微波的方法来测量谷物的湿度，能够得到较高的精度，并且可以做成一种棒入式，只要把探头棒入到粮堆中就能立刻测出粮食的湿度。

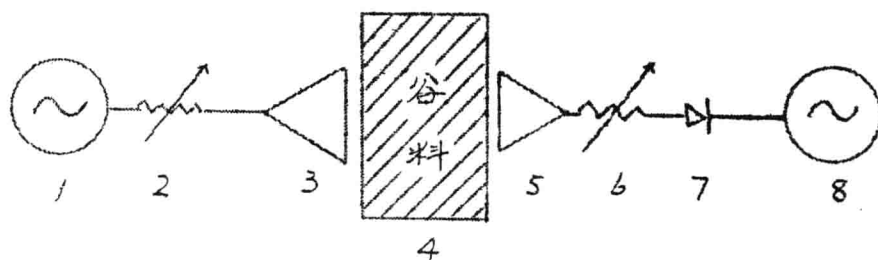


图 1

图1表示出用微波测量谷物水份的测量系统的一种。图1中(1)是微波信号源；(2)是隔离衰减器；(3)和(5)是喇叭；(6)是读数衰减器；(7)是检波器；(8)是指示电表。(4)是

~4~

容器，其中存放被测的谷物。

测量步骤：(1) 在谷物未放入容器前，调整读数衰减器(6)使电表指示某一适当读数。

(2) 把谷物倒入容器，由于微波通过谷物时一部份被吸收，电表示数下降。调整读数衰减器(6)使电表(8)仍旧指示原来的读数。

(3) 由衰减器(6)的二次读数差值得出被测谷物对微波的吸收衰减量(一般以分贝表示)。

(4) 谷物对微波的吸收程度是由其含有的湿度决定的，所以由衰减量的大小也就能知道谷物的湿度。这可以从制备好的衰减、湿度对照曲线上查出。

根据经过物料的波是空间波、波导管中的波还是表面波，微波粮食水份仪分有：(1) 空间波水份仪；(2) 波导型水份仪和(3) 表面波水份仪等不同类型。

用微波水份仪来测量各种粮食中的含有水份，有利于国家对粮食的保管、加工和收购，对于落实和贯彻毛主席关于“广和粮”的指示是具有十分重大的意义的。

鼓风炉中料面的深度通常是用料杆反映出来的，现在有用微波技术来测量的。方法是用简易的调频式雷达，据资料上报有一种工作于10.3千兆赫的微波测试仪能测0—10米范围的深度，具有±7.5厘米的精度。图2是这种测试仪的方块图。微波方法比料杆能更正确地反映料面深度。

在轧钢过程中，要求能在生产流水线上准确地测量钢板的厚度。现在已经制成多种微波钢板测厚仪。有利用波的相位和利用半开放式谐振腔来测量的两种方案。图3是后一方案的示

意图。

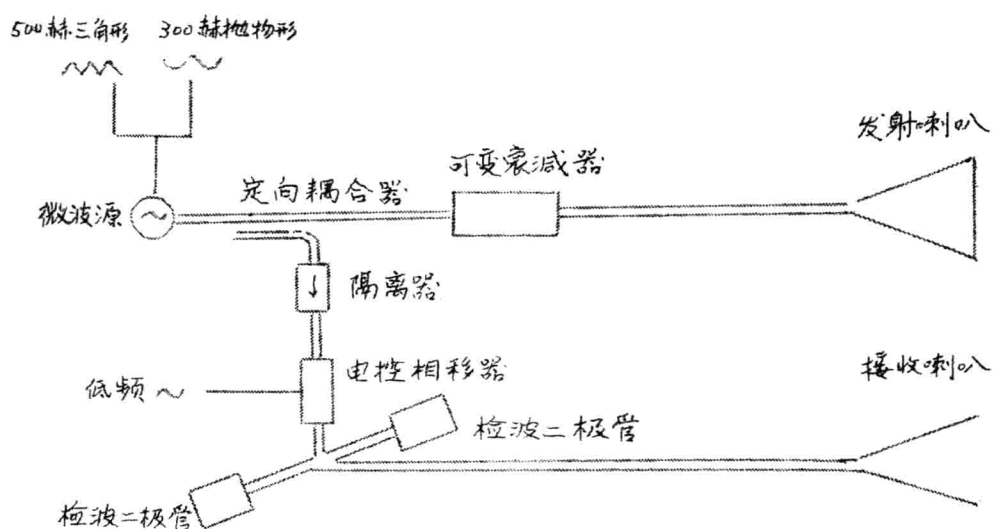


图 2

两个腔相隔距离为 K ，它们谐振频率 f_{01} 和 f_{02} 决定于腔与钢板的距 x_1 和 x_2 根据 f_{01} 和 f_{02} 可知 x_1 和 x_2 从 $d = K - (x_1 + x_2)$ 的关系就能求知钢板的厚度 d 。

资料上报导一个工作于 TE_{013} 模式和 $9.2 \sim 94$ 千兆赫的测厚仪，采用 $D/2L = 0.22$ ， $L = 10$ 厘米，其测试性能是：

测量范围， $1 \sim 10$ 毫米；分辨力， ± 0.01 毫米；精度， ± 0.03 毫米，响应时间， 20 毫秒。 D 和 L 分别是测厚仪所用腔的直径和长度。

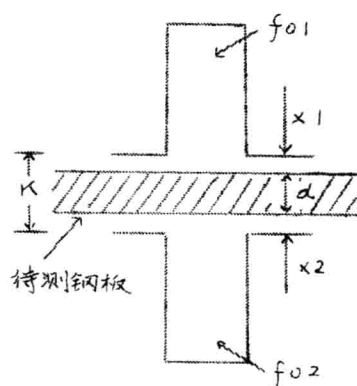


图 3

微波钢板测厚仪与原用的利用 β 、 γ 和 X 射线的测厚仪比较具有：(1) 对工作人员无害；(2) 测量结果和钢板中的化学成分无关；(3) 响应时间短和 (4) 设备成本低的优点。

~ 6 ~

在冶炼的过程中，准确控制温度是十分重要的。现在有把谐振腔放在熔炉里，测量它的谐振频率来测量温度的。谐振腔是封闭的金属盒，它的体积随着温度变化，热胀冷缩，体积大时谐振频率低，体积小则谐振频率高。资料上报导用镍铬钢做成的谐振腔能测到 1000°C ，用铌和1%的锆制成的谐振腔能测到 1500°C 。用微波谐振腔测炉温的优点是能承受温度的往复循环和不受辐射的影响。

农业以粮为纲，工业以钢为纲，把微波技术用在钢铁工业上的意义是十分重大的。

石油中不宜含有水份。含有过多水份会降低它的燃烧价值，并且导致机器损坏，在石油的生产过程中需要测定石油中的含水量。通常炼油厂采用两种方法：一种是化学方法，误差达到 $\pm 10\%$ ，一种是滴定的方法，每次测定所需的时间很长，而且这两种方法都不能用于流水生产线。用微波来测能够得到很高的精度，能测出微小的含水量，并且能够用于流水生产线。

测量方法的一种是让油通过波导管，根据石油对微波的吸收衰减来测，也可以让油经过谐振腔，根据引起的谐振频率的变化来测。

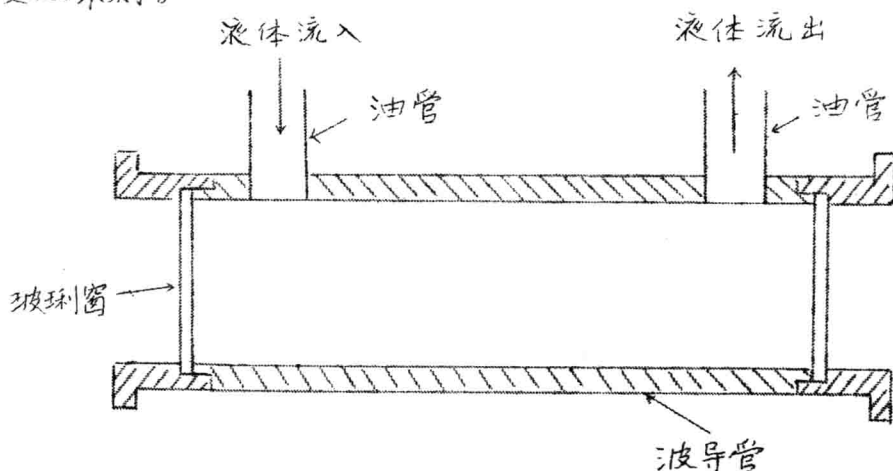


图 4

图4是前一方案。石油从一个油管中流入，经过波导管，从另一油管中流出。玻璃窗对石油起密封的作用，不让石油流出，但是微波却可通过，测出石油对微波的吸收衰减，就能知道石油的含水量。

图5是后一方案的一种，在9.4千兆赫下测试，谐振腔工作于 TE_{013} 模式，油管用硼硅玻璃做成，外直径1.4毫米，内直径1毫米。如果能读出0.1兆赫的频率偏移，采用这种方案可望测出0.05%的含水量。

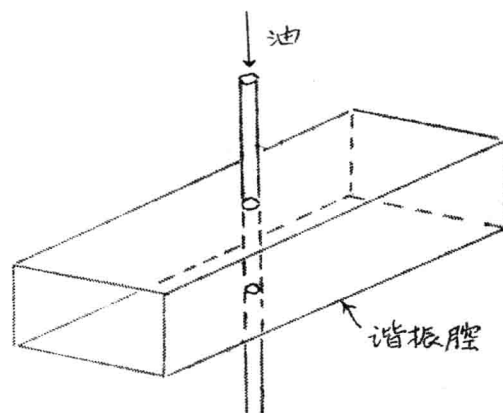
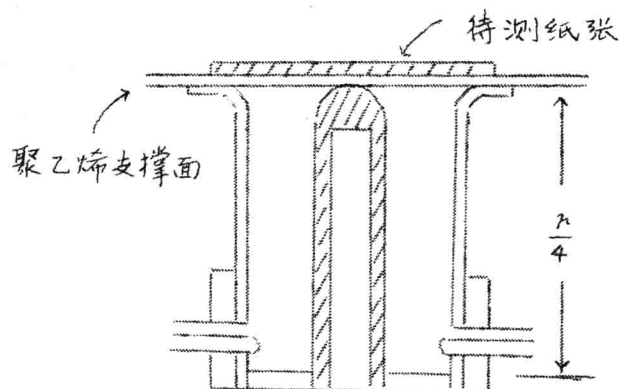


图 5

水对毫米波的吸收远比厘米波大。在3厘米波长(10千兆赫)，水对微波的吸收衰减是每毫米3.15分贝，在毫米波范围，水的吸收衰减提高到每毫米20~45分贝。采用毫米波的测试方案，有可能测定石油中约0.002~0.01%的含水量。

在造纸工业中要求纸张的最后含水量为8%，库存纸张，在印刷前希望保持这个湿度，并且要求均匀分布。在这个湿度下印刷，质量最高，纸张也不容易撕破。可以用微波在造纸厂的流水生产线上测出纸张的含水量并对生产过程进行自动控制。

测量库存纸张，可以用一种插入式的表面波微波水份仪来测。在生产流水线上测纸张的湿度，可以让纸张通过波导管，根据它对微波的吸收衰减来测或者采用如图6所示的探测头来测。这个探头是由一个四分之一波长的同轴谐振腔构成的。纸张的湿度影响腔的谐振频率也影响通过腔的微波信号的相移，一个测量方案是将不通过探测头的信号和经过探测头的信号进



进行对比，用网络分析仪（也称矢量电压表）测量由于纸张含有的湿度所引起的相移，从而测出纸张的湿度。这种方案不需要用鉴频器。一个工作于 7.8 兆赫的这样的测湿仪，在 0-10% 的湿度范围内的测量精度达到 0.3%。

在胶合板的生产过程中，要求板料的湿度控制在 8%~12%，过干或太湿都是不好。如果木料过于干燥，会变得很脆，难于胶合如果太湿，热压时含有的水份会蒸发成为水汽，也不利于胶合。制造滑翔机的木板，湿度要求控制在 12%，因为空气中的水份为 12%，这样就可以使木板中的水份与空气中的水份取得平衡而不致发生变形。装饰板要求水份控制在 6%，高于或低于都不好。

在生产线上测量木板湿度较好的方法是用反射法来测，图 7 示出这种方法的示意图。

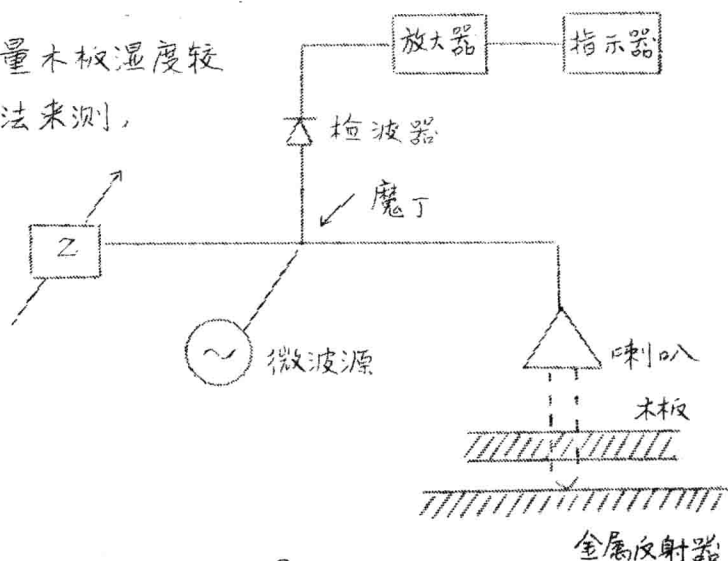


图 7

从喇叭发射出的微波经过木板时一部分为木板所吸收，射至金属板为其反射，再经过木板，又被木板吸收一次，测出回到喇叭的微波的强度，就能知道木板的湿度。这个方案中用了—个称做“魔丁”的重要微波元件，它的作用在于：使从微波源发出的微波不进入检波器，而只有从金属板反射回来的微波才进入检波器而被测量出来。

在测量木板湿度时遇到的困难是木板的吸收衰减与木纹和电场强度矢量之间的角度很有关系，而且一般木板总是高低不平的，板面会有几个毫米的起伏，这些都要引起误差。

在卷烟的生产过程中，烟中的含水量是一个关键因素。它在加工过程中的每一环节具有最理想的数值。拆色时要求烟叶的湿度为18%，抽茎前要求控制在17%至19%，抽好后要求湿度是16%，加料时要求湿度是17-18%，切丝完毕17%，然后烘干到14%，进行卷烟。卷烟完成后要烘干到11.5%±0.5%（黄霉天要求烘干到11%），然后进行包装。水分太高或太低都不太好，水份太高烟单要变色。卷烟时如果不是14%，卷成的香烟会稀密不均。卷卷成的烟支要烘干到11.5%±0.5%，如果没有烘透或者烘得过干都是不好。水份多了会点不着，容易发霉。烘得过干会造成两头漏空。

用3厘米波长的微波水份仪测卷烟的烟丝，可以在8~12%含水量的范围内达到±0.25%的准确度，具有每10℃约0.2%的温度系数。

肥皂粉含有的水份是它的质量指标。含有的结晶水越多越好。结晶水是结合在物质分子中的水，冷到零度时并不结成冰。高质量的肥皂粉含有的结晶水应达到20~40%，结晶水越多，越不容易受潮。可以用微波水份仪来测量肥皂粉的含水量。

铸钢、铸铁需要翻砂造型。砂中水份要适当，太多太少都不

好，太多太少都不利于造型。一般要求水份不超过 5%。可以用微波水份仪来测，微波水份仪的特点是测量迅速。现在有自动化的型砂制备设备，自动测定湿度和水份，用电子计称机控制加入冷却用水量。在这场合采用微波水份仪是很适宜的。

可以用微波来测量土壤和砖墙的湿度。土壤的湿度反映出它的抗压、抗拉等力学强度，在地质勘探中测量土壤湿度是很重要的。根据测出的土壤湿度就能知道在那里建筑房屋或挖洞是否合适。根据砖墙的湿度能够判断房屋的状况和质量。研究和试制微波水份仪在落实毛主席关于“深挖洞”的指示方面的意义也是很大的。地质勘探要求测定的含水量的范围比较大，要求能测到 70~80% 的湿度。

药粉、药片都有规定的标准含水量，水份太多影响它们的保存期。可以用微波的方法来测。

可以用微波的方法测量海面的风浪、海水的湿度、海水的盐份和海洋中的水层。可用辐射计、雷达或散射计在飞机上或卫星上测。海面有风浪时，它辐射的微波和对微波的反射、散射都是和没有风浪时不同的。水的介电常数为 81，冰的介电常数为 3，它们对微波的反射特性大不相同，所以可以用微波方法探测出海面是否已经结成了冰。

把雷达装在人造卫星上可以测绘地形。在卫星上用微波方法探测地面对不同频率微波的吸收情形可以探索地下矿藏。

在需要测速和测距的地方，也可以用微波的方法来测，远距离可用脉冲式雷达来测。在工业生产上，一般要测的是近距离，可用调频式的雷达来测。

微波测量，与其他的测量方法相比较，它的最主要的优点是适宜于生产线上连续测量和进行生产的自动控制。

二、微波加热在工农业生产中的应用：

在微波技术的许多应用中，例如在雷达和通信的应用中，微波是用来传送信号的，不是作为能源来用的，把微波作为能源来用，还是近十五年来事。这在科学技术的发展史上，是一件值得重视的新生事物。

目前，微波加热的主要用途：加热、干燥、医疗和杀菌。这些用途都是利用微波在物质或加工材料中产生的热效应。总的来讲都是加热。在广义的微波加热之下，根据目的的不同，可再把它分为狭义的微波加热、微波干燥、微波医疗和微波杀菌等。狭义的微波加热是指利用微波而产生的热效应达到改变物体的物理状态，促进化学反应等的目的。微波干燥是利用微波的热效应达到去湿的目的。微波医疗是利用微波治疗疾病，微波杀菌（包括杀虫）是利用微波的热效应杀灭细菌和害虫。

下面介绍已经成功的或者在试验中的微波加热的各种可能用途：

（一） 加热

橡胶传热的性能很差。在橡胶工业中，通常是先加热一种气体或流体再将它们和橡胶接触进行加热的。这种加热方式需要的加热时间很长（通常要好几天），并且不容易使温度均匀分布。可以用微波加热。由于在用微波加热时热量是产生于橡胶内部的，不是由外面传入的，加热时间短而且加热均匀。现在已有用于橡胶工业流水线上的微波加热器。

在失腊铸造工艺中，在石腊模芯外喷涂石英砂及氧化铝后要将腊芯融化，再将外壳烤干。由于石腊的导热性差，对复杂形状的模芯要用热水或烘箱加热几十分钟才能除尽石腊。用微波脱腊只需几分钟，用以烘干外壳速度也较快。

可以用微波来烹煮食物，这一方面国外有较多的报导。用

微波烧煮食物，仅需几分钟时间，每次能烧煮几百斤。在烤烘面色以前，先用微波加热，能使生面团很快地发酵。以前是在高湿的发面箱内加热，需要20至40分钟，用微波加热只需4分钟。可以节省劳动力，而且提高产品的质量。

现在国外商业用和家庭用的微波灶的生产量正在逐年增多。

可以用微波来进行解冻，在解冻的过程中遇到的困难是冰和水的物理性质差别很大。例如在某一微波频率，水的介电常数是80，介质损耗为25，而冰的介电常数为3.2，介质损耗为0.001。水很容易吸收微波，而冰却是不怎么吸收微波。在融化冰冻食物的过程中，会发生表面上的食物快将煮熟而里面的食物还是结冻的情况。现在采用的微波解冻是在低温下解冻——即用低功率的微波在低温下进行解冻，这样能使微波穿过表面冰层，加热内部，达到快速融化而又不致造成过热。

资料上看到在外科手术上有用微波解冻冷藏肾的报导。

(二) 干燥——去湿：

可以用微波来干燥粮食、胶片、纸张、皮革、木材、烟草、茶叶、化工试剂、药粉、药片、中草药及成药等。在工农业生产上，用途很多，意义很大。

(1) 干燥粮食：

粮食有一安全湿度，超过安全湿度需要处理，用通常的方法（一般用火烘）会使谷物受到损伤。用微波干燥可以使加热温度降低，存在的问题是成本高。

(2) 干燥胶片：

在胶片厂，最后生产的胶片的湿度要控制在3~5%，太干太湿都不好。太干了容易产生静电，引起曝光；太湿了会使

卷成的胶片粘在一起。两种情况都要造成损失。胶片厂现在常用的干燥方法是用热风在暗室中干燥的，暗室有100米长。

热风干燥是把干燥空气加热到 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，直角、高速地作用于胶片。热风干燥的缺点是：干燥时会使乳胶层表面硬化，干燥速度慢，易落上尘埃或小水点，沾污胶片和形象。微波干燥没有这些缺点。

(3) 干燥烟草 — 焙烟：

卷烟时，烟草的湿度要控制在14%，卷成后要干燥到 $11.5\% \pm 0.5\%$ 。通常是把卷成的烟放在烘房里干燥的，要经过几小时的烘焙，烘房很大、劳动效率很低。现在大的卷烟厂要有很多人捧烟、推烟，把卷成的烟推到烘房里去烘，烘干后又推出来，捧到包装机上去装，车间里要有很多铁架车来来去去。

用微波焙烟，可以实现卷包联合，烘房可以取消，人力可以节省，大大提高劳动生产率。

(4) 干燥茶叶

茶叶是我国的一项重要出口物资。为了提高茶叶的质量，需要用先进的技术来制茶，用理化的方法来检定茶叶的质量。制茶主要是烘。检定是检定其中含有的有益成份和杂质。现在通常用的制茶房法：在茶厂里是热风来烘；小规模生产是放在锅子里炒。

我国目前主要出口的茶叶是绿茶和花茶。花茶的生产过程比较复杂，要经过印花的手续。所谓“印花”是把鲜花放在茶叶上使茶叶吸收花的香味。一般印花不止一道，茶叶印花后，由于湿度上升，要立即烘干，冷却后再进行第二次印花。由于印花、烘干和冷却需要时间，所以茶厂里堆满了茶叶。这种生产