

# 微波加热技术的应用与研究进展\*

牟群英<sup>1 †</sup> 李贤军<sup>2</sup>

(1 中南林学院理学院 株洲 412006)

(2 北京林业大学材料科学与技术学院 北京 100083)

**摘要** 文章简述了微波加热的发展概况,阐述了微波加热的介电损耗机理和微波加热的特性.从微波加热与解冻、微波干燥、微波改性、微波烧结、微波杀菌等方面,介绍了微波加热技术在国内的研究与应用情况,指出微波加热技术具有广阔的发展前景,今后应重点加强微波与物料间相互作用理论、微波场中物料的传热和传质机制、微波加热工艺与设备、微波加热技术和其他技术的有机结合等方面的研究.

**关键词** 微波加热 机理 应用 进展

## Applications of microwave heating technology

MOU Qun-Ying<sup>1 †</sup> LI Xian-Jun<sup>2</sup>

(1 Science School of Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, China)

(2 Material Science and Technology School of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** The development and current applications of microwave heating are reviewed, and the dielectric losses and characteristics of microwave heating analyzed. Microwave heating, defrosting drying, modification, sintering, sterilization and so forth are discussed. Microwave heating technology has wide application prospects, and future research should focus on the interaction mechanism between microwave and materials, heat and mass transfer in the microwave field, heating technology and equipment, and the combination of microwave heating with other technologic.

**Key words** microwave heating, mechanism, application, development

微波是指波长足够短,能在发射和接收过程中实际应用波导和谐振腔技术的电磁波,其波长范围在1—1000mm之间,对应的频率范围为 $3 \times 10^5$  MHz—300 MHz. 1936年,波导传输试验在美国取得成功.随后,微波技术在通信、广播、电视领域中得到了广泛的应用.在使用微波的过程中,人们发现微波会引起热效应,于是在全世界范围内开始了对微波加热技术的应用研究.1945年,美国人Spencer P L申请了微波加热技术的第一个专利.1955年,美国泰潘公司向市场推出了世界上第一台微波炉<sup>[1]</sup>.20世纪70年代初期,我国开始研究和利用微波加热技术,首先是在连续微波磁控管的研制方面取得重大进展,特别是大功率磁控管的研制成功,为微波加热技术的应用提供了先决条件.20世纪80年代,我国开始生产微波炉,到目前为止,已经发展有家用

微波炉、工业微波炉等系列产品,产品质量接近或达到世界先进水平.

## 1 微波加热原理及特性

### 1.1 微波加热的基本原理

按加热方式的不同,我们可以把固体物料的加热分为两类:一类是常规加热,该方法是首先通过传导、对流、辐射的传热方式加热固体周围的环境或固体表面,使固体的表面得到热量,然后再通过热传导的方式将热量传到固体内部,其加热介质可以是热空气、炉气、过热蒸汽,也可以是远红外线辐射等.这

\* 2003-07-07收到初稿,2003-09-11修回

† 通讯联系人, E-mail lxjmu@sohu.com

种加热方式效率低,加热时间长.另一类干燥方法是介质微波加热,这是一种全新的加热方法.其加热原理是:当有极分子电介质和无极分子电介质置于微波电磁场中时,介质材料中会形成偶极子或已有的偶极子重新排列,并随着高频交变电磁场以每秒高达数亿次的速度摆动,分子要随着不断变化的高频电场的方向重新排列,就必须克服分子原有的热运动和分子相互间作用的干扰和阻碍,产生类似于摩擦的作用,实现分子水平的“搅拌”,从而产生大量的热.可见常规加热与微波加热是两种迥然不同的加热方法.微波加热是一种“冷热源”,它在产生和接触到物体时,不是一股热气,而是电磁能.它具有一系列传统加热所不具备的独特优点.

## 1.2 微波加热的特性

### 1.2.1 微波加热的即时性

用微波加热介质物料时,加热非常迅速.只要有微波辐射,物料即刻得到加热.反之,物料就得不到微波能量而立即停止加热,它能使物料在瞬间得到或失去热量来源,表现出对物料加热的无情性.根据德拜理论<sup>[2]</sup>,极性分子在极化弛豫过程中的弛豫时间 $\tau$ 与外加交变电磁场极性改变的角频率 $\omega$ 有关,在微波段时有 $\omega\tau = 1$ 的结果.我国工业微波炉加热设备常用的微波工作频率为915MHz和2450MHz,根据计算,其 $\tau$ 约为 $10^{-11}$ — $10^{-10}$ s数量级.因此,微波能在物料内转化为热能的过程具有即时特征.

### 1.2.2 微波加热的整体性

微波是一种穿透力强的电磁波,如频率为915MHz的电磁波,其波长为32cm,它能穿透物体的内部,向被加热材料内部辐射微波电磁场,推动其极化水分子的剧烈运动,使分子相互碰撞、摩擦而生热.因此其加热过程在整个物体内同时进行,升温迅速,温度均匀,温度梯度小,是一种“体热源”,大大缩短了常规加热中热传导的时间.除了特别大的物体外,一般可以做到表里一起均匀加热.这符合工业连续化生产和自动化控制的要求.

### 1.2.3 微波加热的选择性

并非所有材料都能用微波加热,不同材料由于其自身的介电特性不同,其对微波的反应也不相同,根据材料对微波的不同反应,我们可将材料分为:微波反射型、微波透明型、微波吸收型和部分微波吸收型.因此,我们可以利用微波加热的选择性对混合物料中的各组分或零件的不同部位进行选择性的加热.如利用微波加热对物料进行胶合加工时,其发热和升温集中在胶层,避免了胶缝周围物料因高温而造成

的热损坏.

### 1.2.4 微波加热能量利用的高效性

在常规加热中,设备预热、辐射热损失和高温介质热损失在总的能耗中占据较大的比例,而微波进行加热时,介质材料能吸收微波,并转化为热能,而设备壳体金属材料是微波反射型材料,它只能反射而不能吸收微波(或极少吸收微波).所以,组成微波加热设备的热损失仅占总能耗的极少部分.再加上微波加热是内部“体热源”,它并不需要高温介质来传热,因此绝大部分微波能量被介质物料吸收并转化为升温所需要的热量,形成了微波能量利用高效率的特性.与常规电加热方式相比,它一般可以节电30%—50%<sup>[3]</sup>.

### 1.2.5 微波加热安全、卫生、无污染,具有很强的杀菌能力

常规加热一般采用矿物燃料作为能源,其燃烧产生的二氧化碳被称为产生“温室效应”的主要成分.而微波加热所用能源为电能,对环境没有污染.用微波辐射生物体时,除了产生微波热效应外,微波还能使生物体的生物活性得到抑制或激励,即微波的非热效应或生物效应.在相同温度条件下,微波对细菌的致死率远高于常规加热<sup>[4]</sup>.

除此之外,微波加热还具有加热质量高、营养破坏少、加热设备紧凑、节省空间等优点.

## 2 微波加热的应用与研究

由于微波加热技术具有许多常规加热技术所不具备的优点,国外从20世纪60年代起就将微波加热技术应用于许多行业.我国从20世纪70年代开始研究并应用微波加热技术,目前它已被广泛应用于纺织与印染、造纸与印刷、烟草、药物和药材、木材、皮革、陶瓷、煤炭、橡胶、化纤、化工产品、医疗等行业.其应用主要反映在微波加热与解冻,微波改性,微波干燥,微波灭菌与杀虫等方面.

### 2.1 微波加热与解冻

由于微波加热具有即时性的特点,我们可以使用微波在很短的时间内将物料加热到所要求的温度.目前微波纯加热技术已被广泛应用于工业生产、家庭民用中.据估计,全世界有超过8000万台家用微波炉在使用着<sup>[5]</sup>,它为人们的生活提供了巨大的方便.

微波加热技术可以应用于冻结物料的解冻处理,与传统的解冻方法相比,微波解冻具有解冻时间

短,冻品滴水少,无污水排放、工作环境整洁等一系列优点.据报道,仅需几分钟,原木表面的1—1.5cm深处温度能由-20℃上升到0℃,而且此时树皮附着力也随之下降,与蒸汽/热水解冻相比,每生产1吨纸浆可节省能耗100—300MJ<sup>[2]</sup>.

## 2.2 微波干燥

微波干燥是把固体湿物料作为一种电介质,置于微波交变电磁场中,在频繁交变电磁场的作用下,物料中的极化水分子迅速旋转,相互摩擦,产生热量,从而加热和干燥物料.用微波对物料进行干燥时,一般物料表面温度低于芯层温度,形成“负温度场”(一般加热方式为正温度场),且物料内产生较高的蒸汽压力,与环境形成较大的静压力差,使物料中的自由水和水蒸气形成渗透流.负温度场和物料内外静压力梯度的存在,使微波干燥完全不同于传统的物料干燥方法,形成了微波干燥的独特机理.它具有干燥速度快、质量好的优点.

于秀荣<sup>[6]</sup>等曾用微波对玉米进行干燥,并研究了不同加热功率和加热时间对玉米发芽率、暴腰率、过氧化氢酶活性的影响.其研究表明,选择合适的加热功率和时间,在保持玉米良好品质和低暴腰率的前提下,可以实现对玉米的快速干燥.王俊<sup>[7]</sup>等曾研究了稻谷的微波干燥特性及品质,其结果表明,当干燥功率不超过0.2W/g时,稻谷的发芽率高,暴腰率低,总的干燥时间可缩短到热风干燥的1/3以内.

叶宇煌、程文正<sup>[8]</sup>曾设计了一条竹料的微波干燥线.该生产线由谐振腔、进出口抑制器、波导功率分配系统、物料传送系统、抽风排湿系统和总控制台组成.由3台2450MHz、5kW的微波源提供微波功率,实行流水作业,每小时能将115kg、含水率为20%的竹篾干燥至10%.该生产线具有干燥时间短,杀虫、防霉效果好的特点.国际无线电科学联盟主席Jull E V教授来华考察了该生产线后,也表示极为赞赏,并建议推广使用.王丽宇<sup>[9]</sup>曾用谐振腔型木材微波干燥机(工作频率为915MHz)对刺槐小径木园、斜截片进行干燥.其初步实验表明,采用微波技术干燥刺槐小径木园、斜截片是可行的,但输入的微波功率不宜过大(不宜超过5—6kW),每次辐射时间不宜过长(不宜超过5min).

王俊、王剑平等<sup>[10]</sup>在Fick扩散模型和传导模型基础上考虑热湿扩散、水分直接蒸发及内热源的影响,获得了微波干燥黄桃时内部质热传递模型,并采用显式有限差分法对模型进行求解,其计算值与实测值基本吻合.

范红途<sup>[11]</sup>等曾对以蔬菜为代表的胶体类多孔介质物料的微波干燥特性进行了研究,研究结果表明,除了物料本身的特性对微波干燥的影响外,空气温度、带走水分的空气速度、物料形状大小、料层的厚度、微波功率等因素都对微波干燥速度有影响.但各因素的作用各不相同,影响作用大小依次为:温度>形状因子>微波时间>物料重量>风速.

## 2.3 微波改性

杨进<sup>[12]</sup>等用微波加热技术对米糠进行处理,分析了微波处理时间、料层厚度、米糠原始水分、贮藏时间对米糠稳定性的影响.工艺试验表明,当含水率为15.8%—21%,料层厚度为30—70mm,微波处理时间为150—200s时,可产生较好的稳定效果.实验结果表明,微波处理可以明显地提高米糠的稳定性,且微波加热处理时间是对稳定化效果影响最大的工艺参数.

赵冬艳<sup>[13]</sup>等曾用微波处理谷朊粉,发现微波加热处理能显著提高谷朊粉的乳化性,其最佳作用条件是:pH值为10.0,谷朊粉浓度为9.0%,加热时间为100s,微波能量为560W.在最佳条件下,谷朊粉的乳化活性及乳稳定性均为100%,且经过改性后,溶解度由7.67%提高到37.62%,从而拓宽了谷朊粉的应用范围.

用微波对木材进行加热,可以从内部改变木材的构造和性质,极大地提高木材的渗透性,增加木材防腐药剂的渗透量,从而提高木材的防腐处理效果.例如,对斜叶桉进行微波处理后,可使木材防腐药剂吸入量由18L/m<sup>3</sup>增加至192—255L/m<sup>3</sup>;微波处理能使木材的体积膨胀,密度下降,导热性下降,胀缩性减小,隔音性提高,微波加热处理还能使树木的生长应力和干燥应力得到释放,提高干燥质量<sup>[14]</sup>.

## 2.4 微波烧结

微波烧结技术是一门新的烧结工艺.相对于传统的烧结方法,微波烧结具有突出的优势:材料内部结晶结构更加均匀,致密度更高,改善了材料的性能,实现选择性烧结,产生具有新的微观结构和优良性能的材料.作为前沿跟踪技术,我国也于1988年将微波烧结技术列入国家高技术研究发展计划(“863”计划),取得了可喜的成绩.不仅烧结出了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>瓷舟,而且还成功地烧结出不开裂、组织均匀的发动机增压器涡轮转子.其坯体直径为96mm,最终致密度为理论致密度的97%<sup>[15]</sup>.

曲世明<sup>[16]</sup>针对室温下介电损耗很小的材料采用微波混合加热技术,成功地烧制成ZrO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>O<sub>4</sub>和

$\text{Si}_3\text{N}_4$  的样品,并得出结论:微波混合加热技术具有大幅度缩短烧结时间和节约电能的优点,其推广和应用必将带来重大的经济效益;为了发展微波加热技术,应该配合开展材料介电性能的基础研究,特别是要研究介电损耗随温度而改变的情况。

冯士明<sup>[17,18]</sup>等曾报道微波加热对陶瓷材料的烧结具有明显的促进作用:用 28GHz 微波烧结  $\text{Al}_2\text{O}_3$  烧结陶瓷,可以使其烧结温度降低 400℃;很多种陶瓷在微波下烧结,使烧结扩散系数明显增大,烧结活化能降低,整个烧结时间缩短,烧结温度的降低都出现在绝缘体或离子型电导材料的烧结上,而对于电子型电导材料则没有观察到,其中在高频下烧结温度和活化能的降低程度要比低频时大。

### 2.5 微波杀虫、灭菌

很多研究表明:当物料作用于微波场中时,能引起物料的温升,即产生“温度场”,同时,还能造就“电磁场”,对生物体产生比温度场更大的效能,即微波的生物效应,从而达到杀虫、灭菌的目的。但有些学者认为,微波的量子能量只有  $1.62 \times 10^{-5} \text{eV}$ ,而 H—OH 这样的弱化学结合能也有 3—6eV,用微波的非热效应达到杀虫、灭菌的目的是不可能的,其影响生物体的只能是微波的热效应。

王绍林<sup>[21]</sup>曾对微波非热效应进行了研究,并专门设计了一种能分离微波热效应,即在恒温状态下测定细菌致死率的装置。实验结果表明,在相同温度下,微波加热法的细菌致死率高于巴氏加热法,其杀菌效果得益于另一个与温度场同时存在的物理环境——微波电磁场的作用,即微波的非热效应作用;以微波杀菌的物理环境中存在的温度场与电磁波场相比较,后者处于使细菌致死的主导地位,特别是在低温时。他认为微波杀菌是一种新的、能在较低温度下杀菌的技术手段,开创了既能杀菌又能保持食品风味和品质的有效途径。

杨晓苹<sup>[19]</sup>等曾用微波加热技术对茶叶进行处理,试验结果表明,微波加热可以在很短的时间内,在较低的温度下对茶叶的内部进行杀菌,不仅灭菌效果好,而且能在外包装呈密封状态下进行杀菌,可有效地避免二次污染。

袁泉<sup>[20]</sup>等曾报道用微波直接辐射到土壤里,可以杀灭影响农作物生长的杂草、土壤中的害虫和真菌等微生物。国外试验表明,微波直接辐射土壤可使甜瓜增产 60%,洋葱增产 35%,且不会造成环境污染。我国学者针对一种常见的苹果树腐烂病,利用微波进行类似的处理,也得到了良好的效果。

由于微波灭菌的效果十分显著,目前微波灭菌技术已经被广泛应用于牛奶、酱油、肉制品、饲料的消毒灭菌处理。用微波对食品进行消毒、灭菌处理后,可以不用在食品中添加防腐、防腐剂等对身体有害的物质,确保了消费者身体健康。

微波加热技术除了上述应用外,它还可应用于物料含水率的测定,化学反应中的有机和无机物质的合成,天然气转化,物料定型处理,食品膨化处理,医疗等方面。

## 3 微波加热技术的应用前景

加热过程几乎涉及到国民经济的各个部门,广泛应用于国民生产和人民的日常生活中。微波加热作为是一项新技术,它具有众多其他加热方法无法比拟的优点,无疑将会在各门得到大力推广和应用。但我们也应认识到微波加热一项新技术、新方法,我们对它的研究还很不深入,它在应用的过程中也表现出了一些缺点和不足。如以微波干燥为例,其所用能源为高价位的电能,与传统能源相比,有时其干燥成本仍然较高;单独用微波干燥物料,若控制不当,容易使物料内产生过快的温升和很高的温度,从而导致物料内部产生“炸裂”,甚至出现烧焦现象。在进入 20 世纪 90 年代以后,由于电子技术的飞速发展,微波加热技术也日趋成熟,微波加热设备日渐精良,电力供应得到了很大程度的改善,微波设备电子器件价格的下跌及能源比价的调整,使得微波加热设备及微波加热的直接成本有了大幅度的下降;全球环境的不断恶化,使人们逐步认识到传统的加热方式不再是一种环保良好的作业。这些都为微波加热的应用和发展提供了良好的契机和广阔的前景。我们可以预见,微波加热技术将以其独特的优势在未来的生产和生活中发挥非常重要的作用。

## 4 结束语

微波加热是一种新的加热方法,它具有加热的即时性、整体性、选择性、高效性和安全性的特点,但与其他加热方法相比,我们对物料微波加热的研究还不够深入。要充分发挥微波加热的优越性,我们必须对其作更加广泛和深入的研究:

(1)进一步完善微波与物料间相互作用的理论,摸清物料各特性对微波加热的影响,并实现量化研究。

(2)加强各种物料微波加热工艺以及微波加热设备的综合研究与开发,实现微波加热的在线检测

与控制。

(3)从宏观和微观的不同角度,通过理论分析、实验研究和数字模拟,深入研究微波场中物料传热、传质机制,建立热、质迁移模型,实现对物料干燥过程较精确的数学模拟。

(4)发展、建立微波场中物料热、质迁移性质的测试原理和测试方法,以确保过程再现的标准。

(5)研究微波加热与其他现有技术的有机结合,如微波加热与真空干燥的联合,微波加热与冷冻干燥的联合,微波加热与洗衣机组的微波烘干、洗衣机等,充分发挥各种技术方法的优势,实现微波加热过程的最优化。

致谢 感谢张璧光教授对作者写作的指导。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 康健. 西北农业学报, 1999, 8(4) :110 [ Kang J. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 1999, 8(4) :110( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 王绍林. 物理, 1996, 26(4) :232 [ Wang S L. Wuli( Physics ), 1996, 26(4) :232( in Chinese ) ]
- [ 3 ] 扬洲, 段吉利. 粮油加工与食品机械, 2000, 267(3) :5 [ Yang Z, Duan J L. Grain and Oil Processing and Food Machinery, 2000, 267(3) :5( in Chinese ) ]
- [ 4 ] 王绍林. 食品科学, 2000, 21(2) :6 [ Wang S L. Science of Food, 2000, 21(2) :6( in Chinese ) ]
- [ 5 ] 冯士明, 钱茹. 热固性树脂, 1999(4) :118 [ Feng S M, Qian R. Heat Convertible Resin, 1999(4) :118( in Chinese ) ]
- [ 6 ] 于秀荣, 赵思孟等. 郑州粮食学院学报, 1998(2) :55 [ Yu X R, Zhao S M et al. Journal of Zhenzhou Grain College, 1998(2) :55( in Chinese ) ]

- [ 7 ] 王俊, 金天明. 中国粮油学报, 1998, 13(5) :7 [ Wang J, Jin T M. Journal of Grain and Oil, 1998, 13(5) :7( in Chinese ) ]
- [ 8 ] 叶宇煌, 程文正. 福州大学学报, 1994, 22(5) :124 [ Ye Y H, Chen W Z. Journal of Fuzhou University, 1994, 22(5) :124( in Chinese ) ]
- [ 9 ] 王丽宇. 北京林业大学学报, 1998, 20(5) :103 [ Wang L Y. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(5) :103( in Chinese ) ]
- [ 10 ] 王俊, 王剑平等. 农业工程学报, 1997(6) :235 [ Wang J, Wang J P et al. Transaction of the CSAE, 1997(6) :235( in Chinese ) ]
- [ 11 ] 范红途, 刘雅琴. 能源研究与利用, 1994(2) :24 [ Fan H T, Liu Y Q. Research and Utilization of Energy Sources, 1994(2) :24( in Chinese ) ]
- [ 12 ] 杨进, 顾华孝等. 食品科学, 2003, 24(5) :37 [ Yang J, Gu H X et al. Science of Food, 2003, 24(5) :37( in Chinese ) ]
- [ 13 ] 赵冬艳, 王金水等. 食品科学, 2003, 24(5) :25 [ Zhao D Y, Wang J S et al. Science of Food, 2003, 24(5) :25( in Chinese ) ]
- [ 14 ] 木材工业编辑部. 木材工业, 2001, 15(5) :35 [ Newsroom of Wood Industry. Wood Industry, 2001, 15(5) :35( in Chinese ) ]
- [ 15 ] 王峰, 王安英等. 佛山陶瓷, 1998(1) :33 [ Wang F, Wang A Y et al. Foshan Ceramics, 1998(1) :33( in Chinese ) ]
- [ 16 ] 曲世鸣, 张明. 物理, 1999, 28(2) :117 [ Qu S M, Zhang M. Wuli( Physics ), 1999, 28(2) :117( in Chinese ) ]
- [ 17 ] 冯士明. 陶瓷研究, 1995(2) :80 [ Feng S M. Ceramics Research, 1995(2) :80( in Chinese ) ]
- [ 18 ] Hass P A. J. Am. Ceram Soc., 1979, 58(9) :873
- [ 19 ] 杨晓萍, 郭大勇等. 茶叶机械杂志, 2002, 3 [ Yang X P, Guo D Y et al. Journal of Tea Machinery, 2002(3) :3( in Chinese ) ]
- [ 20 ] 袁泉, 李增方. 农机化研究, 1997, 1 :58 [ Yuan Q, Li Z F. Rural Mechanization Research, 1997, 1 :58( in Chinese ) ]

· 物理新闻和动态 ·

## 行星内部的秘密

地球物理学家可能已经揭开了太阳系中最大的秘密之一——为什么天王星和海王星的磁场与其他的行星不同? 哈佛大学的 Sabine Stanley 和 Jeremy Bloxham 通过计算机模拟指出这两颗行星具有液体的核心和较薄的外层。地球和其他行星,如木星和土星内部是固体核心,而外部是由一层厚的导电流体的壳包围着的。这一结果意味着有可能使用磁场来更多地了解行星的内部结构和成分。

地球、木星和土星的磁场好像是由位于行星的中心并大致与其自转轴平行的一根大的磁棒所产生的。然而在天王星和海王星上的磁极却偏离其自转轴而向赤道倾斜,天王星的主磁场轴偏离其自转轴  $59^\circ$ , 而海王星偏离约  $47^\circ$  度。此外,这些行星的磁场像是由两根磁棒(两个北极和两个南极)所产生的。地球的磁场是由熔融的铁组成的厚的电离对流壳所产生的,这个壳包围着一个小的导电的铁核。类似地,木星与土星的磁场是由包围着小的固体核心的一层厚的导电的金属氢(在很高的压力下,氢原子的质子与电子分离而可以自由运动,所以称为金属氢)所产生的。

Stanley 和 Bloxham 对于天王星和海王星建立了一种不同的模型。他们提出,在这两颗行星中,对流是由一层薄的电离对流壳产生的,这层外壳可能是由含有水、甲烷、氨和硫化氢的“冰”组成的,而其内部是非对流的层流液体。他们模拟计算出的磁场与 20 世纪 80 年代 Voyager 2 太空船对这两颗行星的观测相似。

( 树华 编译自 Physics web News, 11 March 2004 及 Nature 2004, 428 :151 )