

# 微波干燥：机遇和挑战

李占勇, T.Kudra, 王瑞芳

(天津科技大学机械工程学院)

**摘要:** 本文对微波干燥面临的困难与挑战进行综述, 主要包括以下三个方面: (1) 技术问题, 如: 放电、阻抗失配、有限穿透深度、磁控管的寿命短、单一磁控管的低功率及功率分配不均匀等问题; (2) 非技术问题, 如: 热失控、受热温度不同、边角过热及冷冻干燥中融化等问题; (3) 相关研究问题, 如: 入射功率的测量、连续与间歇辐射、微波在组合技术中的应用以及规模化等问题。在指出成功应用微波所存在障碍的同时, 也提出了克服困难、开发新应用领域过程改进机遇。

**关键词:** 化工过程机械; 微波干燥; 加热均匀性; 穿透深度; 间歇辐射

**中图分类号:** TQ 051.5

## MICROWAVE DRYING: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

LI Zhanyong, T.Kudra, WANG Ruifang

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222)

**Abstract:** This paper reviews the major challenges and barriers in microwave drying categorized into: (1) Technical issues such as electric discharge, impedance mismatch, limited penetration depth, short life time of magnetrons, low power from a single magnetron, and non-uniform power distribution, (2) Non-technical issues exemplified by thermal runaway, differential heating, edge and corner overheating, melting in freeze drying, and (3) Research-related issues such as determination of incident power, continuous vs. intermittent irradiation, targeted application of MW in hybrid technologies, and scale-up. Barriers to the successful adoption of microwave processing are pointed out along with opportunities for improved process to overcome the obstacles and open new application areas.

**Key words:** chemical process machinery, microwave drying, heating uniformity, penetration depth, intermittent irradiation

## 0 引言

微波热处理主要包括干燥、脱水、融化、烘烤、巴氏灭菌、焙烧、酶抑制、无菌包装等方面<sup>[1,2]</sup>。目前, 微波在食品工业中的应用主要是在不影响食品安全的前提下尽量延长其保存期。另外, 微波干燥可以减小水的活性和病原体的活性, 在微波热处理过程中可以产生一些理想的变化, 如: 蛋白质凝结, 纤维柔软以及芳香化合物的形成等。这些特点使得微波成功应用于各种食品、水果和蔬菜的干燥<sup>[3]</sup>; 鱼、肉及禽类的解冻<sup>[4]</sup>, 面包、饼干及甜食的烘烤<sup>[5]</sup>, 冷冻产品的融化<sup>[6]</sup>, 水果和蔬菜的漂烫<sup>[7]</sup>、膨化<sup>[8]</sup>、灭菌<sup>[9]</sup>以及无菌包装<sup>[10]</sup>等。微波在食品中的另一个应用为食品配制, 即使用淀粉、纤维素、藻酸盐和油等获得更加均匀的加热, 以及使用褐变和脆化剂克服低表面温度的问题。

由于微波加热是将高频电场能转变为热能, 因此, 微波加热的关键特点是体积加热。当物料尺寸小于穿透深度时, 介电材料的整个体积均被加热。体积加热缩短了因热扩散而导致的热延迟现象, 并具有其独特的特点: (1) 选择性, 即将微波能量供给最易吸收的物料,

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金 (20111208110004); 国家自然科学基金 (21106104)

**作者简介:** 李占勇 (1968-3-8), 男, 教授, 主要研究方向: 干燥技术、流态化工程及废弃物处理. E-mail: zyli@tust.edu.cn

如水和脂肪；（2）快速均匀加热，尤其有利于热导性较差的冷冻食品；（3）加速液体组分的扩散；（4）理想的化学和物理反应，如膨化、融化、收缩、蛋白质变性、淀粉糊化、微生物失活等；（5）可以处理不规则几何形状的物料。另外，低能耗，无预热期及节省空间等特点也是微波加热的优势。微波在组合干燥技术中也得到了广泛的应用，比如：微波-冷冻干燥、微波-真空干燥及微波辅助渗透脱水等<sup>[3,11]</sup>。

虽然微波加热有以上优点，但为了更广泛的工业应用，微波辅助干燥还存在很多问题需要解决<sup>[12]</sup>。例如，微波的有限穿透深度限制了处理物料的尺寸。由于微波腔内电磁场分布的不均匀性导致的微波加热不均匀性，加热不均匀性也与被处理物料的尺寸、类型和特性有关。计算机辅助过程和基于数学模型的微波加热设备设计对克服这些缺点具有很好的帮助作用<sup>[13-16]</sup>。

本文简要综述了微波加热在技术和非技术方面面临的主要挑战。这些内容在技术文献和资料中均可找到<sup>[17]</sup>。许多科学家用家用微波炉进行研究，但家用电器的特性会影响实验结果的准确性。

## 1 技术问题

### 1.1 放电

放电是由于微波腔内较强的电场强度相互叠加而引起短暂存在的局部等离子体。当微波腔内的金属物体靠近时或者灰尘将微波装置的部件分割开时容易发生（比如微波炉中金属垫圈的打火现象）。由于金属表面的电场场强为零，两个平行面间电场最大梯度为 30 kV/cm 时，在微波腔内或处理物料内会发生有害的电弧，同时也损失了能量。当微波腔内存在有尖角的金属时，1 kV/cm 的电场强度就能引起电晕或弧形放电。放电的阈值随着压力的减小而减少，因此微波干燥在真空操作条件下更容易发生击穿现象。例如：微波冷冻干燥在常压下水蒸气的电晕放电发生在电场强度峰值为 400 kV/cm 及以上<sup>[18]</sup>。特制的微波辐射器通过降低真空中微波场的峰值并快速调整微波输入功率到要求负荷可以减小放电的危险。Metaxas 等<sup>[19]</sup>对击穿现象进行了详细的讨论。

### 1.2 阻抗失配

在微波干燥中，由于介电负载的变化，使微波应用器与传输线相互匹配可以充分利用微波能。传输线中的驻波越小，电磁波反射到发生器的程度越小，阻抗匹配越好。传输线中的驻波会导致功率损耗，过多的电磁波反射到磁控管中不仅降低了微波能的利用率，而且在没有三通式分配器（可将微波能通向水载）保护的情况下容易损坏磁控管。通过合理设计微波系统可以解决以上问题。假设该不匹配率小于 2:1，目前制造的 6 和 8 kW 的磁控管在设计上对处理反射电磁波有充分的保证。

### 1.3 磁控管寿命

与一天使用几分钟的家用微波炉相比，工业微波器一天工作 12 到 20 小时。Shiffmann<sup>[17]</sup>指出 2450Hz、2.5kW 的磁控管寿命是 4000 小时，6kW 的磁控管寿命是 6000 小时，粗略估计 6kW 的磁控管比 2.5kW 的要贵 50%，因此，影响磁控管寿命的因素需要认真考虑，如：起动瞬间、功率损失及空载运行损害等。图 1 表示了新旧磁控管在启动时间上的差异，对于旧磁控管，启动具有滞后性。磁控管寿命是一个重要的研究课题，尤其对于间歇干燥。

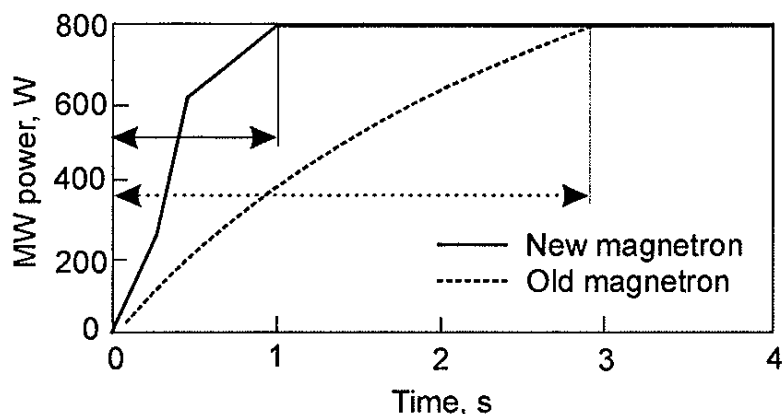


图1 新旧磁控管的启动时间

Fig. 1. Start-up time of new and old magnetrons

#### 1.4 有限穿透深度

微波穿透物料时，其能量不断衰减，穿透深度指微波功率衰减为物料表面功率值的  $1/e$  (36.8%) 时的距离，即在穿透深度内 62.2% 的能量被物料吸收。穿透深度与损耗系数、介电常数和波长（或频率）有关，其关系到处理物料的尺寸，因此是一个重要的参数。当物料尺寸是穿透深度的几倍时，温度梯度将朝向物料的中心，其类似于传统干燥；但当物料尺寸小于穿透深度时，电磁波将在物料的中心集聚，从而导致过热。实际应用中，可以通过以下两种方法解决有限穿透深度的问题。一种是在悬浮状态下干燥颗粒，例如旋转床、流化床、振动床、喷动床以及旋转流；对于木材和陶瓷这样的固体材料，采用 915Hz 的微波可以提供更高的效率和微波能。

#### 1.5 单一磁控管的低功率

相比射频发生器，微波发生器的单一磁控管的功率输出最大只有几千瓦，因此，对于高功率应用器则需要几个磁控管来提供所需功率。尽管这在带式干燥器中不是主要的技术问题，但每个磁控管需要独立电源的要求无疑提高了投资和操作成本。另外，每个微波源都需要单独控制输出功率，并与加工过程中物料变化的特性相匹配。

#### 1.6 不均匀加热

微波加热的不均匀性已经成为追求均匀干燥和均匀温度分布以及避免干燥过程中恶化现象的主要问题。例如，冷冻干燥时不均匀的微波能分布将引起冷冻材料中的电晕放电，由于蒸发代替了升华而导致的局部融化现象以及在高能量区域产生的过热问题。由于微波加热的不均匀性是影响微波应用的一个重要问题，很多研究者都对其展开了研究。作者<sup>[12]</sup>对微波加热的不均匀性进行了简明而广泛的综述。对于非谐振多模微波腔在使用中应尽量减少或克服这一问题。通过调整微波源的频率可以提高非谐振腔的电磁场分布。在 2.45GHz 和 7.6GHz 操作条件下的磁控管扫频模式被认为是提高干燥均匀性的一种技术方法<sup>[20]</sup>。

### 2 非技术问题

#### 2.1 边角过热

在微波加热中，不论处理物料的介电特性和热物理特性如何，加热的不均匀性总是存在的。主要原因是传统传热和微波内部加热的双重影响。最显著的边角效应常发生在有限平板、

矩形或圆柱形物料，因为这些形状的物料可接收来自 2 到 3 个方向的微波能量。类似的现象发生在传统热空气加热中，如加热马铃薯块时，由于边角过热，马铃薯的边角干燥速度快于表面，从而发生边角褐变。在微波干燥中，边角过热现象更加强烈，在边角的微波能吸收量能达到其中心的几倍，如图 2 所示<sup>[21]</sup>。

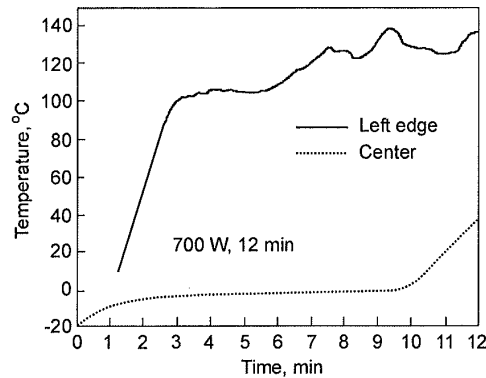


图 2 塑料容器中加热冷冻通心粉和奶酪时的边缘退化

Fig. 2. Edge degradation of frozen macaroni and cheese heated in a plastic container

## 2.2 加热/干燥不均一

即使微波腔中的电磁场分布相对均匀，冷点和热点也会因为物料产生热量的差异而出现。产生热量差异的原因主要有：物料内不均匀的湿含量分布，物料特性的局部差异，几何形状、物料距微波腔壁的距离以及微波腔内物料的位置等。影响物料表面入射能量分布的电磁场模式也可能引起物料表面产生“热点”。在具有多相特性的均质材料中也会发生加热不均一现象<sup>[22]</sup>，另外由瘦肉、脂肪和盐等组成的物料也会引起加热不均一。

## 2.3 热失控和冷冻干燥中的融化

热失控是指由于损耗因子与温度成正比关系而造成的一种戏剧性的无法控制的物料温度不断上升的现象。即：物料吸收微波能后温度升高，而随着温度的升高损耗因子增大，反过来导致温度的继续升高。我们可以采取中断微波能量的输入或从加热区域移走物料等措施避免热失控的危害。由于多模微波应用器中固有的驻波特性，热失控更加敏感。相反，连续干燥器（比如：带式干燥器）因为电场比较容易控制，故热失控现象不易产生。

在干燥应用中，热失控在微波冷冻干燥中更易出现，主要原因是冷冻物料中的液态水更易吸收微波能。因此，在冷冻干燥中物料温度要控制在冰点以下以避免因液态水损耗因子提高引起的热失控问题，这对于各种产品的解冻也同样适用，例如，用微波解冻鱼和肉时会出现热失控，一般通过降低微波功率以保证工作循环的热平衡<sup>[22]</sup>。

## 3 相关研究问题

在微波干燥的研究中，研究者们使用任何可用的微波功率，其中也包括家用微波炉。一般最好的实验系统包括：可控功率的微波发生器、可将未吸收的微波功率转向虚拟负载的环形器以及微波入射功率的调节与测定。

在家用微波炉的使用中，如果缺乏操作方面的知识，对于研究很可能会产生错误的结论。一个常见的误解就是微波炉的设置功率，实际上，功率设置控制应用功率，额定功率 600W 的微波炉设置为 50% 时，其产生的实际功率为 300W。这一结论适合于长时间工作的微波炉，

其不适用于短时间操作。

除非特殊设计，一般微波炉在固定的功率下工作，比如 1000W。而低功率是通过磁控管间歇工作而获得，即：控制面板上 250W 的功率相当于 1000W 的磁控管工作时间为 25%。换句话说，1000W 的磁控管工作 1 分钟，然后停止 3 分钟，用 1/4 的时间提供 250W 的发射功率。当干燥时间设定 40 分钟时，磁控管的开关重复 10 次。磁控管开关的次数可能会变，但是其间歇操作提供功率的原则保持不变（图 3）。显然磁控管间歇操作引起间歇加热/干燥，这将影响水分的传输机理。但是使用家用微波炉的研究者常常忽略该问题。另外，常提及的干燥单位质量物料的微波功率值只是作为研究参考，不能和其他研究者的结果进行比较。

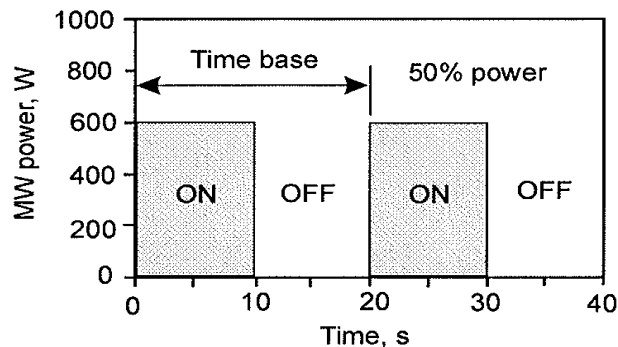


图 3 开/关操作控制微波功率；设定功率 600W 在 20s 的时间内减半

Fig. 3. MW power control by on/off operation; power set at 600 W is reduced by half at a time base of 20 s

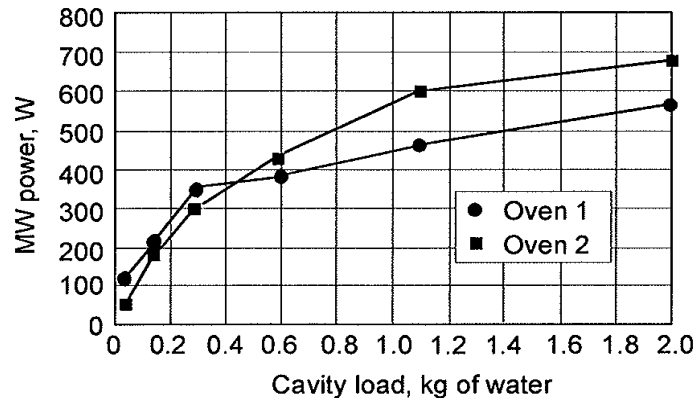
众多实验中，认为控制面板上设置的微波功率就是物料吸收的能量。实际上这是不正确的，未被物料和其他负载吸收的微波能反射回磁控管中，所以被物料吸收的微波能是未知的。单位质量物料的微波能（即：功率密度）是一个有误导性的概念，家用微波炉的功率不仅未知而且可能随着物料的吸收能力发生变化。一般可以用实验装置来控制 and 测量入射功率及空负载中的能量来解决这一问题。

家用微波炉的功率一般通过加热放入烧杯中水的温度进行校核。这个方法虽然简单，但不是很准确，因为吸收微波能的多少取决于微波腔中水的质量和温度，如图 4 示<sup>[23]</sup>。图中可见，由磁控管输出的微波功率随着处理物料的大小而变化（主要是湿含量的不同），因此通过 1kg 的水负载测定的微波功率不一定适合 1kg 的湿物料（含水量为 100g）。

校准微波能的吸收与反射可使用连续流动的水负载，其中吸收的微波能量可以由质量流量和进出口温度决定。这一方法最早由 Kudra<sup>[24]</sup>提出，后来被其他研究者采用<sup>[25]</sup>。

需要指出的是图 4 中不同腔体间微波功率的不一致性。不同厂家或者同一厂家不同型号的微波炉都有不同的功率级别和范围，由开/关操作控制的功率级别可以通过不同的工作循环得到。脉动时间长可达 60s，短则到 1s，微波能量不同的间歇输出将影响干燥机理及干燥指数。





4 微波能和水负载

Fig. 4. MW power vs. water load size

## 4 微波干燥的障碍与挑战

在微波应用中遇到的主要障碍如下：

1.微波处理系统的制造商一般都是小公司或者是大型企业的下属部门，大多数的年销售额只有几百万美元。因此他们不愿意投资发展新的微波处理过程，只是依靠用户来发展更加先进的工艺过程。这就意味着终端用户只能尽自己所能或者依靠相关的大学或研究中心进行研究与开发。

2.从事微波处理研发的公司想保持最大利益而不愿把成果公布于外界或者竞争者。微波设备制造商和用户之间存在着一定的利益冲突，即：制造商希望将一套微波系统卖给不同的客户使用，而研究用户和资助者则想拥有知识产权。只有微波设备制造商和想从微波操作系统中获利的常规设备制造商达成联盟，微波技术才得以发展。

3. 由于用户对微波加热机理理解的欠缺将产生不切实际的期望。这并不是用微波做什么的问题，而是微波处理过程性能和投资回报是否合理。通过对微波过程进行经济分析，结果显示微波过程对于商业并不实际，尤其对于普通商品和在微波过程中无法获得额外价值以及具有低内在经济价值的物品。尽管学术研究表明微波干燥苹果、胡萝卜、土豆、蓝莓等有很大的优势，但是微波技术的使用比现存的干燥方法昂贵的多。然而，微波辅助干燥对于开发高价值和新颖的材料具有良好的应用前景，例如用溶胶-凝胶转化法生产纳米材料、超纯物质等<sup>[26]</sup>。

## [参考文献] (References)

- [1] Schubert H, Regier M. The microwave processing of food[M]. Boca Raton Boston New York Washington, DC, 2005.
- [2] Proctor A. Alternatives to Conventional Food processing[M].Microwave Food Processing(chapter 11), Royal Society of Chemistry, 2011.
- [3] Zhang M, Tang J, Mujumdar A S,Wang S.Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006,17(10):524-534.
- [4] Curet S, Rouaud O, Boillereaux L. Microwave tempering and heating in a single-mode cavity: Numerical and experimental investigations[J].Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(9-10): 1656-1665.
- [5] Sumnu G. A review on microwave baking of foods[J]. International journal of food science & technology, 2001,36(2):117-127.
- [6] Chamchong M, Datta A K. Thawing of foods in a microwave oven: I. Effect of power levels and power cycling[J].Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1999,34(1):9-21.
- [7] Ramesh M N, Wolf W, Tevini D, et al. Microwave Blanching of Vegetables[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(1):390-398.

- 250 [8] Rakesh V, Datta A K. Microwave puffing: Determination of optimal conditions using a coupled multiphase porous media - Large deformation model[J]. Journal of Food Engineering, 2011,107: 152-163.
- [9] Ramaswamy H, Tang J. Microwave and Radio Frequency Heating[J]. Food Science Technology International, 2008,14(5):423-427.
- 255 [10] Steed L E, Truong V D, Simunovic J, et al. Continuous Flow Microwave-Assisted Processing and Aseptic Packaging of Purple-Fleshed Sweet potato Purees[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(9): 455-462.
- [11] Zhang M, Jiang H, Lim R X. Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products - drying kinetics and quality considerations[J]. Drying Technology, 2010, 28(11):1307-1316.
- [12] Li Z Y, Wang R F and Kudra T. Uniformity issue in microwave drying. Drying Technology[J]. 2011, 29(6): 652-660.
- 260 [13] Vadivambal R, Jayas D S. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials-A review[J]. Food Bioprocess Technology, 2010, 3(2): 161-171.
- [14] Campanone L A, Zaritzky N E. Mathematical analysis of microwave heating process[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3): 359-368.
- 265 [15] Geedipalli S S, Rakesh V, Data A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 359-268.
- [16] Kowalski S J, Rybicki A. Qualitative aspects of convective and microwave drying of saturated porous materials[J]. Drying Technology, 2004, 22(5): 1173-1189.
- [17] Shiffmann, R F. Microwave and dielectric drying[M]. Chapter No 12 of Handbook of Industrial Drying/ ed. A.S. Mujumdar/, 3rd edition, CRC Press, Boca Raton, USA, 2007, 285-306.
- 270 [18] Gould J W, Kenyon E M. Gas discharge and electric field strength in microwave freeze-drying[J]. Journal of Microwave Power, 1971, 6(2): 151-168.
- [19] Metaxas A C, Meredith R J. Industrial Microwave Heating[M]. Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1983.
- [20] Espinoza R J, Johnson A C, Thigpen L T, Lewis W A, Everleigh C A, Garard R S. Use of variable frequency microwave power to achieve uniform results throughout large volumes for material processing[C]. Proc. 28th Microwave Symposium: Quality Enhancements Using Microwaves. Montreal, Canada, July 11-14. 1993, 26-31.
- 275 [21] Ball M D, Lorensen C P, Hewitt B C, Lacroix C M, Keefer R M. Characterization of non-uniform heating and its impact on food quality[C]. Proc. 28th Microwave Symposium: Quality Enhancement Using Microwaves. Montreal, Canada, July 11-14, 1993, 246-253.
- [22] Mudgett R E. Microwave properties and heating characteristics of foods[J]. Food Technology, 1986, 40(6):84-93,98.
- 280 [23] Gilbert A M. Understanding microwave oven characterization in relation to product performance[C]. Proc. 28th Microwave Symposium: Quality Enhancement Using Microwaves. Montreal, Canada, July 11-14. 1993, 244-245.
- [24] Kudra T. Dielectric drying of particulate materials in a fluidized state[J]. Drying Technology, 1989, 7(1): 17-34.
- 285 [25] Feng H, Tang J. Microwave finish drying of diced apples in spouted bed[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(4): 679-683.
- [26] Bessarabov A, Shimichev V, Menshutina N. Microwave drying of multicomponent sols[J]. Drying Technology, 1999, 17(3): 379-394.
- 290