

热风微波耦合干燥技术和设备的研究进展

崔政伟, 陈丽君, 宋春芳, 金光远

(江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 热风微波耦合干燥(简称耦合干燥)是微波与热风同时作用于干燥物料的新型干燥方法和技术,但微波加热不均匀性是制约其发展的一个主要因素。作者综述了国内外耦合干燥及其实验设备研究现状,分析了其工业化的主要问题,提出了解决微波均匀性的主要技术方案,探索了工业化耦合干燥器的结构。

关键词: 干燥技术;干燥设备;热风微波耦合

中图分类号: TS 203 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2014)11—1121—08

Advances in Coupled Hot-Air and Microwave Drying Technique and Equipment

CUI Zhengwei, CHEN Lijun, SONG Chunfang, JIN Guangyuan

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Coupled Hot-air and Microwave (CHAM) drying is a novel methods and techniques which microwave and hot-air act on drying materials at the same time. The uniformity of microwave heating is the negative phenomenon which restrains its development and application. This paper gives an overview of CHAM drying and dryer and the latest development of laboratory equipment over the world and analyzes the main problems of its industrialization. In addition, the new scheme is proposed in this paper to solve the heating uniformity of microwave and the industrialized coupling structures of the dryer are also proposed.

Keyword: drying technique, drying equipment, coupled hot-air and microwave

微波技术及其能量应用近几十年取得了巨大发展,微波已从军事、通讯应用走进百姓家庭;微波原器件实现批量化生产,价格大幅度降低;磁控管从风冷发展到水冷,长时间连续工作已成为可能,发展微波食品机械的时机已经成熟。作为主要的能

量利用,微波加热或干燥在农产品和食品的加工中得到了较快的发展和应用^[1]。然而微波加热干燥最主要的缺点是耗电量较大,成本较高,处理量又比较小,单纯的微波干燥往往导致过度加热,温度难以控制导致产品劣变。因此,采用热风干燥和微波

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(21206051)。

作者简介: 崔政伟(1963—),男,江苏扬中人,工学博士,教授,硕士研究生导师,主要从事微波食品加工技术与装备方面的研究。

E-mail: cuizhengwei@jiangnan.edu.cn

干燥相结合的方法,可以降低干燥成本,提高生产能力。耦合干燥指在热风干燥的同时辅以微波干燥,两种干燥同时进行,可以使热、质传递方向一致,大大缩短了干燥时间,如果工艺条件选取合适,还可较大程度地提高干燥产品质量,较好地保持物料的色、香、味和外形。

1 耦合干燥的技术原理和特点

微波作为一种能量形式,要转化为热量的形式对样品进行加热,一般须与电介质相互作用,这种转化有多种方式,其中比较肯定的两种是离子传导和偶极子的转动^[2]。微波加热干燥过程中,其传热传质机理与传统干燥有很大区别。

如图 1 所示,在传统的干燥过程中,随着水分在干燥样品表面的蒸发,表面的水分浓度降低,则样品内部的水分逐渐的朝着样品表面进行扩散;而能量的传递方向却与此相反,由样品表面向内部传递。温度梯度是传热的主要推动力,外部温度越高,形成的温度梯度越大;传质的推动力则是样品内外的浓度差,因此传质和传热的方向是相反的。而在介电干燥过程中热量在样品的内部产生,样品内部水分形成大量的水蒸汽,其形成的压力梯度成为传质过程主要的推动力。如果样品的初始含水量很高,则样品内部水蒸汽形成的压力上升速度较快,

液态的水分也可以在压力梯度作用下从样品内部排出来,就像一种“泵”的作用^[3]。在这种“泵”效应下,液态水和气态水同时从样品内部向样品表面扩散,因此干燥速率快。物料内部的热质传递方向与物料大小有关,当物料的尺寸为微波的穿透深度 1~2 倍时,则热量可在内部积累,内部温度高于外部温度,传热传质方向一致,若干燥系统无其它热源,系统内部的空气温度不变,样品表面温度始终低于内部温度。当样品的尺寸相对于穿透深度而言大很多时,样品内部的热传递与传统的干燥情况类似。耦合干燥技术是将热风场和微波场同时作用于干燥物料,热风能有效地排除物料表面的自由水分;微波加热独特的“泵”效应能快速排除内部的自由水分和结合水分,充分发挥各自的工艺优势,其优点主要表现为:

- 1) 实现内外同时加热;
- 2) 环境温度上升加大系统抽湿能力;
- 3) 合理分配两者之间能量比例,可加快干燥速度,提高产品质量,降低干燥成本;
- 4) 充分发挥各自的工艺优势,如热风的处理量大,干燥成本低,微波场中热、质传递快;
- 5) 干燥兼有杀菌、杀虫功效,保证了产品的安全卫生;
- 6) 实时监控,便于实现连续生产及自动化控制。

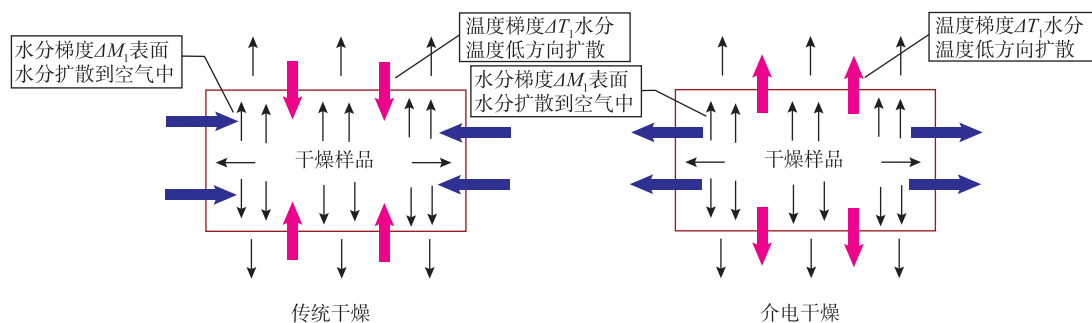


图 1 传统干燥和介电干燥传热传质的区别

Fig. 1 Difference of heat and mass transfer between conventional drying and dielectric drying

2 耦合干燥的研究现状

热风与微波联合干燥(AD+MD)是将热风干燥和微波干燥两种方式有机组合的干燥技术^[4],主要有两种类型:串联干燥和耦合干燥。串联干燥即热风干燥和微波干燥分阶段进行,微波作用于干燥过程的某个阶段,比如先热风后微波干燥;而耦合干燥即热风与微波同时作用于干燥产品和整个干燥

过程。

串联干燥在国内外的研究较多,而耦合干燥在国内外的实验室有较多的研究,但国内研究较少。Schiffmann 等^[5]首次将微波与热风相结合应用微波烤肉炉的设计中,开启了热风微波组合干燥研究。刘青梅等^[6]以浙贝母为原料,研究热风、微波及联合干燥对其品质的影响,探讨热风-微波串联干燥的最佳工艺参数,贝母最优串联干燥工艺试验结果:

前期 80 °C 热风干燥 30 min; 后期微波功率 240 W, 干燥时间 5 min。徐艳阳等^[7]对玉米进行热风与微波串联干燥特性试验研究, 与单独热风干燥相比, 串联干燥的总能耗降低了 50.6%, 并有明显的杀菌效果。Dev 等^[8]研究了豆类串联干燥和传统的热风干燥, 通过气相色谱-质谱法进行分析结果表明, 串联干燥方法显著降低了挥发物物质在干燥过程中的损失。Kumar 等^[9]选取秋葵作为样品, 通过响应面分析对耦合干燥进行优化, 发现微波对流干燥以 1.51 m/s 的风速, 52.09 °C 的空气温度和 2.41 W/g 微波功率密度条件下秋葵的干燥产品质量最佳, 能源消耗最低; Varith 等^[10]对龙眼肉进行耦合干燥, 得出相对于 65 °C 热风干燥减少了 64.3% 的干燥时间和 48.2% 的能耗; Upri 等^[11]用耦合干燥方法对奶酪进行干燥, 得出当热风温度为 53.5 °C, 微波功率为 111.5 W 时, 干燥产品的质量较好。美国金谷通心面公司使用 915 MHz、60 kW 微波通心面干燥设备, 在微波加热干燥的同时辅以温度为 82~93 °C、相对湿度为 15%~20% 的对流热风, 使通心面含水率由 18% 降到 13%~13.5%, 加工时间由原来的 8 h 缩短为 1.5 h, 节能 25%, 细菌含量仅为原加工法的 1/15。Nijhuis 等^[12]运用微波-热空气耦合干燥洋葱、土豆切片等蔬菜, Kisselmina 等^[13]利用热风微波耦合系统, 以番茄为样品, 通过控制过程中不同的微波功率密度得到最佳的产品质量。Botha^[14]等采用耦合干燥并结合渗透脱水(90 min 40 °C 下 55° 糖度溶液浸泡), 对菠萝进行试验, 通过烧焦率、水分含量、可溶性固形物含量、水活度、硬度、颜色这 6 个方面对产品品质进行了评价, 得出微波功率和空气温度是影响脱水菠萝质量的两个最重要的工艺参数。陈桂芬等^[15]通过用响应面分析法对耦合干燥茶油籽工艺进行优化, 得出较佳的干燥工艺: 热风温度为 58.9 °C, 热风速度为 1.262 m/s, 微波功率密度为 1.972 W/g, 干燥时间为 306 min 时, 油脂的过氧化值为 1.047 2 nmol/kg; 陈桂芬等^[16]对剥壳荔枝肉采用热风干燥、耦合干燥、真空微波干燥、真空冻干四种干燥方法, 得出荔枝在耦合干燥条件下的荔枝蛋白质和还原糖含量最高。张琦等^[17]采用波耦合干燥对鲜枣进行了干燥工艺研究, 以微波功率、热风温度、载重为实验因素。实验表明, 耦合干燥各因素对干燥速率及干燥产品质量均有明显影响且耦合干燥相比微波干燥和热风干燥, 可以获得更高干燥速率、VC 含量

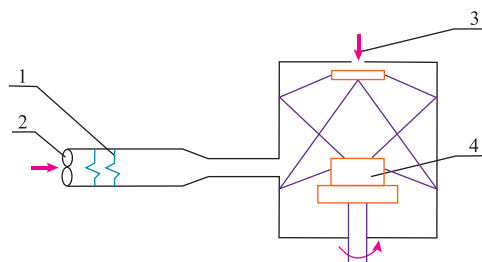
和复水性能良好的优质产品。总之, 目前的国内外研究主要集中在干燥工艺参数研究, 对耦合干燥设备研究的报道很少。

3 耦合干燥设备的主要技术问题及其工业化屏障

耦合干燥的研究目前主要停留在实验研究水平, 所用设备大都由微波炉改造而来, 缺少性能优良的中试和工业化设备是制约该项技术发展和应用的主要障碍^[18]。物料在微波加热过程中, 其内部温度的变化除受微波腔中电磁场分布的影响外, 还与物料本身的形状、位置与介电特性等因素有关。微波是空间分布的电磁场, 电场致热而磁场不致热, 如果物料不动, 电场作用点会导致过热, 如何合理地解决微波的均匀性是本项技术的关键, 目前的主要技术有以下几种。

3.1 物料随转盘运动

物料位置的改变可弱化对电磁场分布的过分依赖, 平移或旋转是改变物料位置的常用方法, 如: 转盘式微波炉、输送带式微波干燥装置等。图 2 为物料随转盘运动^[19], 微波能输入位置固定, 通过旋转台转动, 提高了物料对微波能的吸收均匀性。



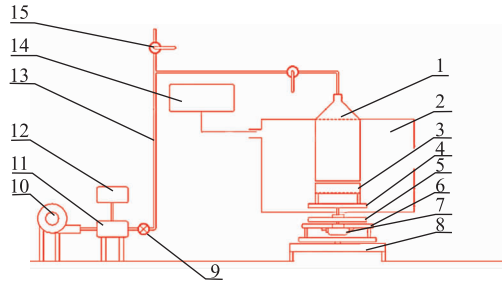
1. 风扇; 2. 电加热器; 3. 微波馈能口; 4. 旋转台

图 2 物料随转盘运动耦合干燥器原理图

Fig. 2 Schematic of dryer with turntable

图 3 是 Upri 等^[12]设计的实验耦合干燥装置, 此装置具有在线检测样品温度及质量变化的功能, 同样也是通过旋转板转动, 带动物料旋转。中国科学院过程工程研究所申请了回转式连续微波干燥装置专利^[20], 干燥室置于微波腔内, 通过旋转盛放物料的干燥室使得物料相互混合作空间运动, 而且随着物料的不断输送, 改变物料在炉腔内的横向位置, 从而改善微波加热的均匀性。Atong^[21]设计的微波连续带式干燥器, 通过输送带改变物料的位置, 又通过增加微波发生器数量、可调节输出功率等来

实现物料干燥的均匀性。



1. 玻璃纤维网;2. 干燥腔;3. 控制面板;4. 样品盒;5. 旋转板;6. 转盘;7. 电机;8. 电子天平;9. 阀门;10. 风机;11. 加热器;12. 调压器;13. 管道;14. 温度湿度监测器;15. 阀门

图3 热风微波干燥设备原理图

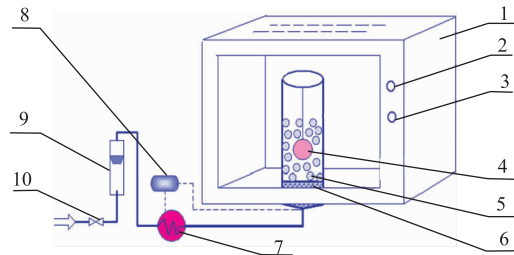
Fig. 3 Schematic of CHAM drying

然而只平移或旋转盛放物料的容器对微波干燥均匀性的改善是有限的,物料的堆积厚度也不能超过微波的穿透厚度。Geedipalli 等^[22]对带有转盘的微波炉中的加热不均匀程度进行了研究,指出转盘的转动在一定程度上可以改变热不均匀性,可以改善物料在同一层的热均匀性,但对于物料的不同层,其热不均匀性仍然很明显。

3.2 物料在谐振腔内喷动

为克服平移或旋转的不同层加热不均匀性,对处理块状或颗粒状的样品,采取喷动方式对其干燥是一种有效的选择。图4是喷动式干燥原理图^[23]。微波与热风喷射的结合,使样品在喷动气流的作用下处于不断运动的状态,加热更加均匀(均匀性提高22%~30%)^[24],通过改变热风的温度、流量、微波辐射量及加热时间,得到较为合理的工艺条件。章虹^[25]、Wang^[26]和范乐明^[27]对微波喷动干燥莴笋和土豆片的产品质量进行研究,得出相对于稳定喷动床模式,在脉冲喷射模式下干燥更均匀,干燥时间更短。图5为Feng 等^[28]设计的一种微波喷动装置,利用微波-热风喷动干燥器对切片苹果进行试验,并对干燥时间、干燥中物料内部温度以及干燥产品的品质进行了测定。其中,干燥时间与物料随转盘运动型式相比降低88%,由于喷动床的气流扰动使得物料有效混合并随机运动,物料内部温度分布均匀,测得干燥初期、中期最大温度偏差为 $\pm 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥末期温度偏差达 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Askari^[29]等对苹果块进行微波辅助流化床干燥试验,通过模型预测水分分布和样品的温度变化,并对中心和表面温度的数据进

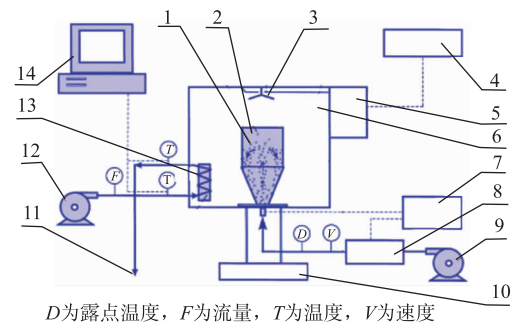
行验证,证明流化床有利于微波能吸收的均匀性。Reyes 等^[30]在微波固定流化床与微波脉动流化床进行了芜菁籽干燥动力学实验。Szabo 等^[31]提出微波辅助热空气振动流化床干燥装置。李占勇等^[30]设计微波热风转鼓干燥器,转鼓为圆锥形并水平转动安装于壳体内,在设置有料斗一端的转鼓内同轴安装有微波源的波导。实验结果显示,这种动态微波干燥效率远远大于静态微波干燥,同时也比物料随转盘运动的微波干燥更加均匀。



1. 微波炉;2. 计时开关;3. 功率开关;4. 干燥样品;5. 惰性因子;6. 喷气口;7. 风机;8. 温度控制器;9. 流速仪;10. 控制阀

图4 喷动式耦合干燥设备原理图

Fig. 4 Schematic of spouted CHAM dryer



1. 样品;2. 喷动床;3. 搅拌器;4. 微波控制器;5. 磁控管;6. 微波炉腔;7. 温度控制器;8. 加热器;9. 风机;10. 电子天平;11. 水槽;12. 水泵;13. 水负载;14. 计算机

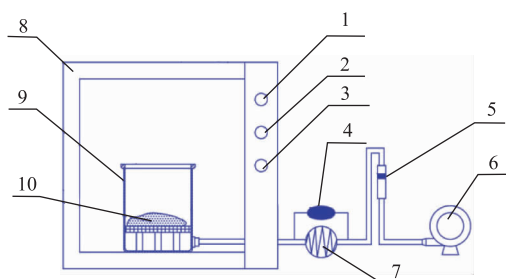
图5 微波喷动床干燥系统原理图

Fig. 5 Schematic of MW and spouted bed drying system

3.3 微波动而物料不动

微波分布固定,物料平移或旋转或喷动在一定程度上改善了物料微波加热的均匀性,但这些方案最大的问题是装置必须增加运动部件,给设备干燥腔的设计和空间的有效利用带来很多不便,大型化更是困难。针对这些弊病,作者^[33]利用无转盘型家用微波炉改造成耦合实验干燥器,见图6。采用无转盘微波分散技术,通过波导出口处的微波模式搅拌器

的扰动,改善微波场的均匀性,以胡萝卜片作为试验材料,得出该实验装置干燥的胡萝卜片的 β -胡萝卜素保留率、复水比、感官品质较传统的热风干燥、微波干燥的胡萝卜片好。Dominguez^[34]和Plazad等^[35-36]通过多微波馈能系统改善电磁场的均匀性,指出馈能口的位置与馈能系统本身决定电磁场的均匀性。模式搅拌结合馈能口位置和数量优化可使微波均匀性极大提高。



1. 时间按钮;2. 功率按钮;3. 开始/取消;4. 温度控制器;5. 风速仪;6. 风机;7. 电加热器;8. 微波炉;9. 玻璃干燥罐;10. 样品

图6 无转盘耦合干燥器

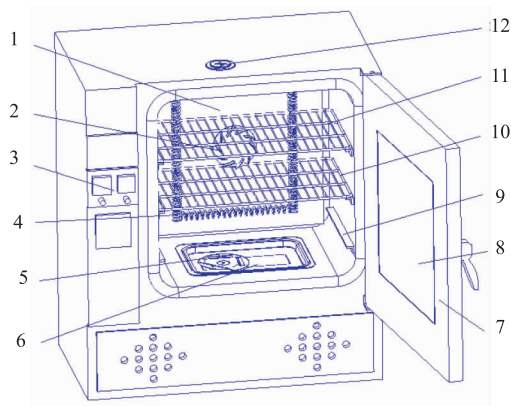
Fig. 6 Structural schematic of CHAM dryer without turntable

4 耦合干燥的设备研制

热风和微波串联干燥是微波和热风两个环节分别进行,从而达到干燥目的的工艺。该种方式虽然可缩短干燥时间,但各自缺点仍然存在。耦合干燥融合了微波和热风干燥的优点,两者互相结合,使食品快速干燥的同时可保证产品质量,但目前该工艺仅实验研究,国内、外无定型工业设备,设备研制上有难点。

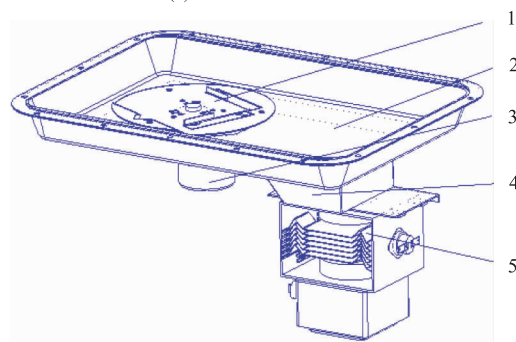
江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开发了3种大小不同的耦合干燥器。图7(a)所示为小型耦合干燥机原理图,主要用于实验规模研究,由微波馈能系统、热风系统和控制系统组成,微波功率为0~1 000 W无级可调。料盘由低介电常数的玻璃纤维网制成(允许微波和水蒸气穿过),底部为微波馈能口。图7(b)由磁控管、波导和模式搅拌器组成,微波经波导传进入干燥腔内,波导出口处可旋转的模式搅拌器,改变微波辐射角度,使微波在谐振腔中进行规律性扰动,从而改变腔体内微波的模式和电磁场分布,使微波的均匀性得到更大提高。干燥时,将物料平铺在料盘的玻璃纤维网上,

开启热风系统和微波系统,热空气在干燥腔内循环,高湿空气由排湿口排出,实现热风和微波同时作用干燥物料。Plaza等^[33-34]也使用模式搅拌器改善微波加热的不均匀性。此装置解决了静止物料微波受微波辐射均匀性问题,同时,干燥器空间大,可放置多层干燥物料。



1. 多模式矩形腔体;2. 风扇;3. 控制面板;4. 加热器;5. 模式搅拌器;6. 微波输入系统;7. 干燥箱门;8. 观察窗;9. 层3;10. 层2;11. 层1;12. 排湿孔

(a) 热风—微波耦合干燥箱



1. 模式搅拌器;2. 金属底盘;3. 搅拌器电机;4. 波导;5. 磁控管

(b) 微波馈能口结构图

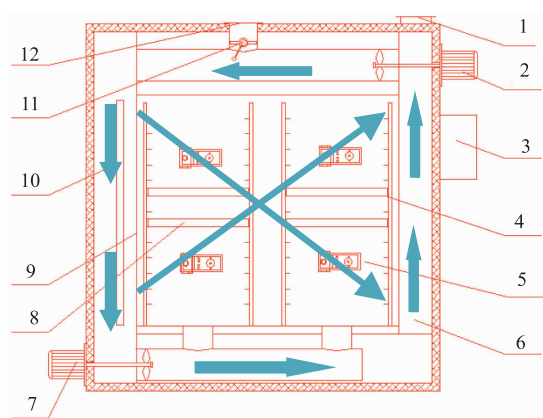
图7 小型热风微波耦合干燥器

Fig. 7 Schematic of the small CHAM dryer

图8为中等规模耦合干燥器^[37],由箱体、热风循环系统和多个微波馈能组件组成。干燥时,在烘盘上放置物料,上轴流风机进风口吸入空气,经腔体的上风道,进入左腔体,经过换热器后,冷风转变为高温热风,其中一部分热风通过位于箱体左侧下方的下轴流风机工作,进入下风道,由于下风道与干燥室相连通,使热风可以在下风道中沿垂直方向进入干燥室,并形成穿流;另一部分热风穿过左面板后进入干燥室,通过左右面板上开孔的设计和布置,使热风的流向通过左面板后转化为如图8中箭头所示的交叉对流,干燥室内形成交叉对流及穿流

热风,与在烘盘上的物料进行充分接触,使传热和传质效果好。

在干燥室内热风循环的同时,微波馈能组件(4个)也开始工作,由磁控管发射出微波进入由波导进入干燥室,波导出口处模式金属搅拌叶片转动,改变干燥室内微波场的分布,从而使位于干燥室内烘盘上的物料受微波均匀辐射,实现热风场和微波场同时共同作用于干燥物料。另外,可根据干燥室的大小设置微波馈能口数量,同时可调节每个微波馈能口输入的微波能大小,从而能够针对不同的干燥产品将热风能量和微波能量比调节到合适的比例。



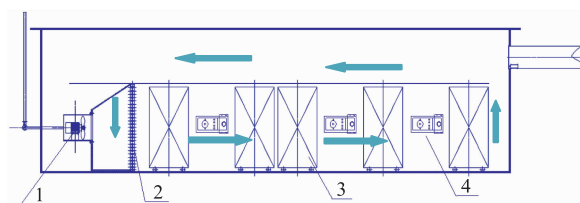
1. 进风口;2. 上轴流风机;3. 控制箱;4. 烘盘架;5. 微波馈能组件;6. 腔室;7. 下轴流风机;8. 烘盘;9. 面板;10. 换热器;11. 排湿阀;12. 出风口

图8 中等规模热风微波耦合干燥器

Fig. 8 Schematic of CHAM dryer in middle scale

图9为大型耦合干燥设备,即隧道式热风干燥耦合设备,由风机,金属料架,热风加热器,微波馈能组件等组成。该设备适用于大规模生产。在物料小车上放入所需干燥的物品后,风机启动,使冷风

经过热风加热器转化为高温热风,与中型耦合设备原理相似,热风在隧道内形成循环流动,见图9中箭头所示。微波馈能组件装于前后两侧面,使整个隧道成为一个微波谐振腔。



1. 风机;2. 热风加热器;3. 物料小车;4. 微波馈能组件

图9 隧道式热风微波耦合干燥器

Fig. 9 Schematic of the tunnel CHAM dryer

5 展望

耦合干燥方式,与传统的干燥方法相比,节约了干燥时间,改善了微波加热的不均匀性,避免产品出现“热点”的同时并可以提高被干燥物的品质。物料随转盘转动、物料喷动、物料不动而微波变动都可以改善微波加热均匀性。微波变动、物料不动的技术方案使干燥器结构简单化,为工业耦合干燥设备的开发奠定了技术基础。

自行设计研制了三种耦合干燥设备,对其结构、功能、用途等进行了简要概述,对耦合干燥设备的工业化研制进行了探索工作。随着技术的发展进步,耦合干燥设备将走向成熟,成为高效节能的干燥新技术。优化干燥装置结构、模块化设计以及微波场中物料温度和湿度的在线检测和微波能大小的控制,建立数学模型模拟耦合干燥场中的传热传质等将是进一步深入研究的课题。热风微波耦合干燥技术及其设备必将在我国农产品加工中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 潘焰琼,卓小芬. 微波干燥在食品工业中的应用及前景[J]. 广东化工,2013,17(40):117-118.
PAN Yangqiong,ZHOU Xiaofen. The application and prospect of microwave drying in food industry [J]. **Guangdong Chemical Industry**, 2013,17(40):117-118.(in Chinese)
- [2] Schubert H,Regier M. 食品微波加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2008.
- [3] 段洁利. 微波干燥食品的现状及其发展前景[J]. 现代农业装备,2006,13(6):36-39.
DUAN Jili. The situation and prospect of microwave drying application in food industry [J]. **Modern Agricultural Equipment**, 2006,13(6):36-39. (in Chinese)
- [4] 关熔,廖兰,曾庆孝,等. 热风微波干燥龙眼肉工艺的优化[J]. 食品与发酵工业,2008,8:86-90.
GUAN Rong,MIAO Lan,ZENG Xiaoqing,et al. Optimization of drying process of longan meat by hot-air and microwave

- technology[J]. **Food and Fermentation Industry**, 2008, 8: 86–90. (in Chinese)
- [5] Schiffmann R F. The application of microwaves to the food industry in the United States[J]. **Microwave Power**, 1973, 8(2): 137–142.
- [6] 刘青梅, 王建中, 梁宇婷, 等. 贝母热风—微波联合干燥技术研究[J]. 中国食品学报, 2013, 6: 141–146.
LIU Qingmei, WANG Jiangzhong, LIANG Yuting, et al. Study on the drying technology of fritillaria by hot air and microwave combination[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2013, 6: 141–146. (in Chinese)
- [7] 徐艳阳, 蔡森森, 吴海成. 玉米热风与微波联合干燥特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 2: 579–584.
XU Yanyang, CAI Sensen, WU Haicheng. Combination of drying characteristics of hot-air and microwave for maize [J]. **Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition**, 2014, 2: 579–584. (in Chinese)
- [8] Dev S R S, Geetha P, Orsat V, et al. Effects of microwave-assisted hot air drying and conventional hot air drying on the drying kinetics, color, rehydration, and volatiles of *Moringa oleifera*[J]. **Drying Technology**, 2011, 29(12): 1452–1458.
- [9] Kumar D, Suresh P, Ganti S M. Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2014, 51(2): 221–232.
- [10] Varith J, Dijkkanarukkul P, Achariyaviriya A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan [J]. **Journal of Food Engineering**, 2007, 81(2): 459–468.
- [11] Uprit S, Mishra H. Microwave convective drying and storage of soy-fortified paneer [J]. **Food and Bioproducts Processing**, 2003, 81(2): 89–96.
- [12] Nijhuis H H, Toringa H M, Muresan S, et al. Approaches to improving the quality of dried fruits and vegetables [J]. **Trends in Food Science and Technology**, 2008, 9: 13–20.
- [13] Kisselmina Y K, Cyril D, Etienne Z, et al. Power density control in microwave assisted air drying to improve quality of food[J]. **Journal of Food Engineering**, 2013, 119(4): 750–757.
- [14] Bothaa G E, Oliveirab J C, Ahrné L. Quality optimization of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission[J]. **Food and Bioproducts Processing**, 2012, 90: 171–179.
- [15] 陈桂芬, 宋春芳, 崔政伟. 响应面分析法优化热风微波耦合干燥油茶籽工艺[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 272–275.
CHEN Guifeng, SONG Yunfang, CUI Zhengwei. Optimizing of coupled hot-air and microwave drying of tea camellia seeds by response surface analysis[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2012, 33(3): 272–275. (in Chinese)
- [16] 陈桂芬, 崔政伟. 几种不同干燥方法对荔枝肉干燥品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(12): 1320–1324.
CHEN Guifeng, CUI Zhengwei. Effects of different drying methods on the drying quality of peeled litchi [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2012, 31(12): 1320–1324. (in Chinese)
- [17] 张琦, 宋春芳, 周韵, 等. 热风微波耦合干燥鲜枣的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 123–126.
ZHANG Qi, SONG Chunfang, ZHOU Yun, et al. Study on coupled hot-air and microwave drying of fresh jujube [J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2012, 33(11): 123–126. (in Chinese)
- [18] 吴贺君. 我国微波技术应用的发展现状及市场前景[J]. 长春师范学院学报, 2012, 31(6): 45–46, 44.
WU Hejun. The situation and market prospects of microwave technology application in China [J]. **Journal of Changchun Normal University**, 2012, 31(6): 45–46, 44. (in Chinese)
- [19] Khraisra M A M, Coopera T J R, Mageea T R A. Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions[J]. **Drying Technology**, 1997, 15(3&4): 1003–1022.
- [20] 中国科学院过程工程研究所. 回转式连续微波干燥装置[P]. 中国专利: 200720096086.8, 2008–03–20.
- [21] Atong D. Drying of a slip casting for tableware product using microwave continuous belt dryer[J]. **Drying Technology**, 2006, 24: 589–594.
- [22] Geedipalli S, Rakesh V, Datta A. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007, 82(3): 359–368.
- [23] Souraki B A, Andres A, Mowla D. Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples[J]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 2009, 48(1): 296–305.
- [24] Geedipalli S, Datta A K, Rakesh V. Heat transfer in a combination microwave-jet impingement oven [J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2005, 38: 549–553.

- [25] 章虹,冯宇飞,张懋,等. 莴苣微波喷动均匀干燥工艺[J]. 食品与生物技术学报,2012,31(4):373-378.
ZHANG Hong,FENG Yufei,ZHANG Min,et al. Study of microwave and spouted bed even drying technology of lettuce[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2012,31(4):373-378.(in Chinese)
- [26] Wang Y C,Zhang M,Mujumdar A S,et al. Microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying of stem lettuce slices—effect on product quality[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2013,6(12):3530-3543.
- [27] 范乐明,张丽萍,张懋,等. 土豆片脉冲喷动微波真空负压干燥特性及品质[J]. 食品与生物技术学报,2013,32(12):1311-1318.
FAN Leming,ZHANG Liping,ZHANG Min,et al. Characteristics and technology of potato slices by pulse-spouted microwave vacuum drying[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2013,32(12):1311-1318.(in Chinese)
- [28] Feng H,Tang J. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed[J]. **Journal of Food Science**,1998,63(4):679-683.
- [29] Askari G R,Emam D Z,Mousavi S M. Heat and mass transfer in apple cubes in a microwave-assisted fluidized bed drier[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2013,91(3):207-215.
- [30] Reyes A,Campos C,Vega R. Drying of turnip seeds with microwaves in fixed and fluidized beds[J]. **Drying Technology**,2006,24(11):1469-1480.
- [31] 李占勇,苏伟光,叶京生,等. 微波热风转鼓干燥器[P]. 中国专利:02104214.4,2002-02-09.
- [32] 周韵,宋春芳,崔政伟. 热风和微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J]. 农业工程学报,2011,27(2):382-386.
ZHOU Yun,SONG Yunfang,CUI Zhengwei. Coupled hot-air and microwave drying technology for carrot slices dehydration[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2011,27(2):382-386.(in Chinese)
- [33] Dominguez T E,Plaza G P,Diaz M A. et al. Optimisation of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms [J]. **International Journal of Materials & Product Technology**,2007,29 (1-4):149-162.
- [34] Plaza G P,Monzo C J,Catala C J M,et al. NEW approach for the prediction of the electric field distribution in multimode microwave-heating application with mode stirrers[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2004,40(3):1672-1678.
- [35] Plaza G P,Monzo C J,Catala C J M,et al. Effect of mode-stirrer configurations on dielectric heating performance in multimode microwave application[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2005,53(5):1699-1706.
- [36] 崔政伟. 一种热风微波耦合装置[P]. 中国专利:CN201210210100.8,2012-10-17.

会 议 信 息

会议名称(中文): 第一届纳米能源与纳米技术国际会议

会议名称(英文): The First International Conference on Nanoenergy and Nanosystems 2014

开始日期: 2014-12-08

结束日期: 2014-12-10

所在城市: 北京市 海淀区

主办单位: 中科院北京纳米能源与系统研究所

会议主席: 王中林

联系人: 于丽娜

联系电话: 01082854869

E-MAIL: nens@binm.cas.cn

通讯地址: 北京市海淀区学院路天工大厦 C 座

邮政编码: 100083

会议网站: <http://www.nens.cn>

会议背景介绍: 近年来,移动电子产品和传感网络的快速发展迫切的需要能源供给,以满足小电子器件独立的,可持续的连续工作。自供电技术的趋势主要是纳米传感器在医学,环境,基础设施监控,防御网络等方面的应用。纳米能源是对纳米材料和纳米技术的重大应用,即从生活环境中收集能量为微纳米系统供电。纳米材料也会对大规模能源有广泛的影响,包括能源收集,能来管理和能量存储。通过集成可移动自供电系统与传感网络,在未来的 10 年一场技术革命将会在世界上迸发。纳米能源与纳米系统第一次国际会议将集中但不局限于以下内容:1:纳米发电机和能量收集技术;2:能量存储和复合电池;3:压电电子学和纳米电子学;4:压电光电子学和纳米光电子学;5:纳米传感器;6:自驱动设备和系统集成。本次会议将提供一个平台,使科学家们可以交流科学信息并建立合作关系。会议将会从 2014 年开始每年举办两次,希望建立纳米能源和纳米系统发展的一个品牌。