

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.039

# 微波处理技术在食品干燥领域中的应用

## Application of microwave treatment technology in the field of food drying

刘盼盼<sup>1</sup> 任广跃<sup>1,2</sup> 段 续<sup>1,2</sup>LIU Pan-pan<sup>1</sup> REN Guang-yue<sup>1,2</sup> DUAN Xu<sup>1,2</sup>靳力为<sup>1</sup> 张迎敏<sup>1</sup> 马丽苹<sup>1</sup>JIN Li-wei<sup>1</sup> ZHANG Ying-min<sup>1</sup> MA Li-ping<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000;

2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Food Storage Security Henan Collaborative Innovation Center, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**摘要:**文章主要分析了微波处理技术的机理和特点,与传统干燥方式相比,微波处理作用下,物料微观结构出现较多的孔隙和较少的坍塌,有利于水分的脱除,增加了对流传质速率,降低了干燥能耗,提高了营养成分的保存率。同时也比较了微波干燥处理、微波在联合干燥和辅助干燥过程中的应用,对比分析了其干燥能耗、干燥时间和物料品质,并展望了微波处理技术在食品干燥领域良好的发展前景。

**关键词:**微波处理;联合干燥;辅助干燥;干燥能耗

**Abstract:** Microwave has extremely strong penetrability and highly selective heating of only polar molecules, and its radiation effect can enhance the heat and mass transfer efficiency of moisture in the drying process. Therefore, microwave treatment technology has been widely used in the field of food drying. The mechanism and characteristics of microwave treatment were discussed in this review. Compared with the traditional drying method, the microstructure of materials under microwave treatment has more pores and less collapse, which is conducive to the removal of water, increases the mass transfer rate, reduces the drying energy consumption and improves the storage rate of nutrients. Meanwhile, the applications of microwave drying, combined drying and assisted drying were compared. The drying

energy consumption, drying time and material quality were also compared, and microwave treatment technology was prospected to have a good prospect in the field of food drying.

**Keywords:** microwave treatment; combined drying; assisted drying; energy consumption of drying

干燥是农产品加工的重要方式,也是食品工业中的操作单元,干燥后的农产品不仅有利于贮藏,降低损失率,增大经济效益,还可以减少运输成本。干燥主要是通过脱水降低食品的水分活性、抑制食品中酶的活性和微生物的生长来延长食品的贮藏时间的目的<sup>[1]</sup>。目前,常用的干燥方式有热风干燥(HD)、热泵干燥(HPD)、真空干燥(VD)和冷冻干燥(FD)等,但各干燥方式均存在不同程度的不足,如干燥时间过长、干燥效率低下、干燥产品质量低劣等。

微波干燥(Microwave-drying, MD)作为一种高效率的干燥方式,近年来被广泛应用于食品干燥过程中,微波可以产生高频电磁场,具有较强的穿透性和只对极性分子加热的高选择性,使其可以穿透物料内部,对整体进行加热,避免了传统干燥方式“内生外焦”现象的发生。微波干燥被认为是一种节能的干燥方法,具有反应灵敏,无污染、无余热、干燥效率高、便于控制的优点,常被用于联合或辅助其他干燥技术<sup>[2-3]</sup>。较传统的干燥方式,微波联合干燥技术能缩短干燥时间、降低干燥能耗、提高干制品质量。文章拟主要介绍微波在食品干燥领域中的应用,从微波干燥、微波联合干燥和微波辅助干燥 3 个方面综述其优越性,并重点介绍微波技术对物料干燥能耗、干燥时间、干燥品质的影响,以期进一步推动微波技术在食品干燥领域的应用,为其工业化发展提供依据。

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:31671907);国家重点研发项目(编号:2017YFD0400901);智汇郑州·1125 聚才计划(编号:郑政[2017]40号);河南省高校重点科研项目(编号:20A550006);河南省科技攻关项目(编号:182102110043)

**作者简介:**刘盼盼,女,河南科技大学在读硕士研究生。

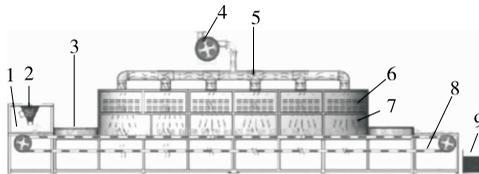
**通信作者:**任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

**收稿日期:**2020-07-21

## 1 微波干燥(MD)技术

MD处理过程中,常用的微波频率为300 MHz~3 000 GHz,微波波长为0.1 mm~1.0 m,其加热原理是介质材料自身损耗电磁场能量而发生的加热。介质材料与微波电磁场相互耦合实现能量转化,其转化方式如离子传导、偶极子转动、界面极化、磁滞、压电现象等,其中偶极子转动是微波加热的主要原理,偶极子受到电磁场力作用,迫使其顺着电场方向整齐排列,引起偶极子转动,致使分子间频繁碰撞而产生大量摩擦热,并以热能的形式在物料内表现出来,使物料在短时间内温度迅速升高。MD的原理是透过物料内部的微波对整体进行加热,物料中的水分介电常数大,吸收微波能转化成热能后优先受热蒸发,蒸发掉物料内部的大部分自由水和弱结合水,从而达到干燥的效果<sup>[4]</sup>。图1是一种常见的微波干燥机的原理图,其中微波系统是整个微波干燥机的核心,是保证干燥顺利进行的重要组成部分。MD干制品在外观形状、微观结构、复水性能和各种营养成分的保持等方面均较其他传统干燥方式有较大的优越性。



1. 进料区 2. 进料斗 3. 微波抑制器 4. 排热系统 5. 排湿系统 6. 微波系统 7. 微波箱体 8. 传输系统 9. 出料区和出料斗

图1 微波干燥机原理图

Figure 1 Schematic diagram of microwave dryer

由于食品物料内部水分的耗散因子较大,吸收大量微波能,使得内部温度迅速升高,导致内外温度梯度和水分梯度较大,促进了内部水分向外扩散快速蒸发,所以MD具有较高的干燥速率。微波能主要用于转化为热能,加热水分,在其他方面的耗散较少,从而可以降低干燥能耗,提高MD的效率<sup>[5]</sup>。

近年来,随着科学技术的进步,食品干燥方法趋于多样化,可选择的干燥方法也日益增多。在保证最终干制品水分含量相同的条件下,不同干燥方式对食品干燥效果(能耗、质量、效率)的对比结果见表1。

由表1可知,与热风、冷冻、真空干燥相比,MD处理具有较高的干燥速率,可以明显地缩短干燥时间,对产品的营养成分保留程度更高,提高了产品品质,微观结构破坏程度低,复水性能较优,感官评价较好。

## 2 微波联合干燥

传统的热风、热泵、冷冻干燥存在干燥时间长、干燥效率低、干燥品质差等缺点,与传统的对流干燥和传导干燥相比,MD具有干燥效率高、能耗低的优点,但MD单独使用,因为微波场强分布不均匀,大小形状不一的干燥物料因受热不均匀会发生碳化,容易使物料局部发生灼烧<sup>[13]</sup>,在不同的区域产生“热点”。Peyre等<sup>[14]</sup>研究表明,微波功率水平、功率循环、物料不同的介电性能以及物料不规则的形状和尺寸都是影响MD干燥不均匀的因素。Wang等<sup>[15]</sup>研究了磁控管布置和功率结合对胡萝卜微波干燥温度场均匀性的影响,发现3个磁控管的温度场均匀度明显高于两个磁控管,说明可以通过改变磁控管的布置来改善微波干燥的均匀性,但这种电磁场模式的改变依赖于微波反馈系统的设计,增加了MD的生产成本,

表1 微波干燥与其他干燥方式对食品干燥效果的比较

Table 1 Comparison of microwave drying with other drying methods in food drying

方法	物料	结果	来源
微波、热风、真空冷冻干燥	睡莲花茶	MD速率明显大于另外两种干燥方法,能较好地保留睡莲花茶中的酚类物质	[6]
热风、微波、热风—微波联合干燥	甘蓝	MD样品的维生素C、游离酚、总酚的保留率分别为67.3%、90.0%、86.6%,抗氧化能力较强	[7]
热风、冷冻、微波干燥	胡萝卜	MD产品的复水性能较优, $\alpha$ -胡萝卜素、维生素C含量较高,感官评价与冷冻干燥样品相近	[8]
真空冷冻、微波、真空冷冻—热风联合、热风—真空冷冻联合	香菇片	MD样品中甲醛含量最低	[9]
阴干、晒干、烘干、真空冷冻、微波干燥	红花	MD后红花羟基、红花黄色素A、山奈素及红花黄色素A含量较高	[10]
微波、冷冻、热风对流、真空干燥	红辣椒粉	微波组干燥时间最短,所得制品色泽亮度好,颗粒密度较高、孔隙率较低,更有利于贮藏	[11]
热风、真空、真空冷冻、微波	朝鲜蓟粉	微波组干燥时间最短、所得制品堆积密度最大、持水性和持油性最好、粗脂肪含量最高	[12]

不利于其工业化发展。因此,实际生产中常将 MD 与 HAD、HPD、FD 和 VD 相结合,既能克服 MD 不均匀的缺点,又能降低能耗,提高效率,保证品质。

### 2.1 微波—热风联合干燥

传统 HAD 操作简单,投资成本低,但会导致热敏性的生物活性成分降解,颜色损失和微观结构转变严重,且所得干制品表面易皱缩、营养成分损失严重。作为一种节能的干燥方法,MD 可以节省干燥时间、加快干燥速率、提高产品质量。近些年常将 MD 与 HAD 联合使用,即微波—热风联合干燥(MD-HAD)。MD-HAD 不仅同时具有 MD 和 HAD 的优点,能够克服营养成分损失严重、干燥不均匀、干燥能耗大的缺点,还能够穿透物料对整体进行加热,缩短了干燥时间、提高了干燥效率,既能达到干燥的目的,保证外观品质和内在品质,又能降低干燥成本,此外还具有杀菌的效果<sup>[16]</sup>,且 MD-HAD 产品质量高于单一的 HAD 产品。

Zehra 等<sup>[17-18]</sup>研究发现,豆角粉干燥过程中,MD-HAD 能耗较单独使用 HAD 能耗降低了 50%;甘蓝干燥过程中采用 MD-HAD 的干燥时间缩短了 57.6%,干燥能耗降低了 12%;MD-HAD 对甘蓝抗坏血酸的保留率比 HAD 的高 13.50%,总多酚、总黄酮降解率比 HAD 的分别低 19.28%,13.87%。这是由于微波辐射具有穿透性使得细胞发生破裂,有利于营养成分的提取,且微波—热风

联合干燥制品的微观结构具有较少的塌陷,表现为均匀的蜂窝状多孔结构,且与联合干燥速率高、干燥时间短有关。刘小丹等<sup>[19]</sup>采用微波+高温热风+低温热风联合干燥红枣,与 HAD 相比,联合干燥速率更高,干燥时间更短(联合干燥时间 22.4 h、热风干燥时间 28 h),能耗低[联合干燥能耗为 26.32 g/(kW·h)、热风干燥能耗为 30.80 g/(kW·h)],且联合干燥过程中抑制了非酶褐变,营养成分损失减少,与 Xu 等<sup>[20]</sup>的研究结果相似。表 2 为 MD-HAD 较传统 HAD 对各物料干燥时间、干燥能耗和品质的影响。

由表 2 可知,较传统的 HAD,MD-HAD 的干燥时间可缩短 40%~75%,干燥能耗可降低 25%~65%,且对一些物料的特殊营养成分的保存率有所提高。有研究<sup>[29]</sup>表明,联合微波干燥对干制品有明显的杀菌作用。刘伟东等<sup>[30]</sup>研究表明,两种干燥方法对枸杞的杀菌作用有明显差异,联合干燥的杀菌率为 91.26%,而传统 HAD 的杀菌率为 82.25%。徐艳阳等<sup>[31]</sup>采用热风温度 60℃、转化点含水率 20%、微波功率 119 W 联合干燥玉米对霉菌有明显抑制作用,且较传统的 HAD 能耗降低了 50.6%。

### 2.2 微波—热泵联合干燥

HPD 因其操作简单、干燥效率高、卫生安全、无污染等优点被广泛应用于食品领域<sup>[32]</sup>。HPD 过程中,物料表面的水分蒸发速度与内部水分向外迁移的速度相近,所

表 2 微波联合对热风干燥的影响

Table 2 Effect of microwave combination on hot air drying

物料	联合方式	时间/能耗	品质	来源
速溶米饭	热风温度 65,80,90,110℃,微波功率 0.588 W/g	干燥时间缩短 60%	总多酚含量和总抗氧化能力较热风干燥显著提高	[21]
花生	高(0.95 W/g)、低(0.48 W/g)微波功率交替耦合热风温度 45℃,风速 0.45 m/s	干燥能耗降低 37.1%	色泽、外形、口味显著提高,花生仁颜色均匀,收缩程度小,且无明显的红衣脱落	[22]
杏鲍菇	热风 50℃,转换点含水率 25%,微波功率 300 W	干燥能耗降低 29.9%	较热风干燥,颜色更亮,复水性能更好,多糖含量更高	[23]
柠檬	热风 50,55,60℃,微波功率 0.97,2.04 W/g	干燥时间缩短 20~30 倍	褐变程度低,复水比显著高于热风干燥	[24]
南瓜	热风 60℃,转换点含水率 50%,微波功率 210 W	干燥时间缩短 45%,干燥能耗降低 48%	类胡萝卜素保留效果优于热风干燥,颜色亮度更高,褐变程度较低	[25]
菊花	微波作用 30,60,90 s,热风 75℃干燥	干燥时间缩短 21.7%~47.8%,干燥能耗降低 29.98%	联合干燥较高地保留了总多酚和总黄酮含量,抗氧化能力提高,收缩率下降	[26]
番薯	热风 60℃,转换点含水率 50%,微波功率 210 W	干燥时间缩短 55%,干燥能耗降低 64%	褐变不严重, $\beta$ -胡萝卜素保留效果较好	[27]
蓝莓	热风 60,90℃,转换点含水率 2 kg H <sub>2</sub> O/kg·DM,微波功率 1.3 W/g	干燥时间缩短 68%~75%	联合干燥显著提高花青素和多酚的保留率(59%~70%),抗氧化能力显著增强	[28]

得制品品质高、色泽好,但在 HPD 中后期,随着干燥物料水分的减少,干燥速率变慢,干燥时间延长,干燥能耗增加,同时使得物料表面发生氧化、内部微观结构被破坏,产品品质降低<sup>[33]</sup>。为了克服 HPD 中后期的缺点,常将 HPD 与 MD 联合使用<sup>[34]</sup>。但不同食品对热泵—微波联合干燥(HPD-MD)参数如热泵温度、微波功率、微波作用时间、转换点含水率的敏感性不同,这些参数会影响干制品的品质如营养成分含量、色泽、复水率、微观结构以及干燥能耗。

由表 3 可知,关志强等<sup>[35]</sup>研究发现,当热泵温度为 35 ℃、转换点含水率为 39%、微波功率为 252 W 时,干燥能耗最低,为 10.55 kW·h,并且与 HPD 的干燥时间(15.0 h)和复水率(39.16%)相比,联合干燥时间(4.9 h)缩短了 66.7%,复水率(57.40%)提高了 46.5%,且干制品品质得到了大大提高。此外,荔枝在热泵温度为 50 ℃、转换点含水率为 100%,微波时间为 2.5 min 下进行干燥,其能耗节约 30%以上,且干燥时间和干燥能耗受转换点含水率的影响,并与其呈反比<sup>[36]</sup>。

Chong 等<sup>[41]</sup>对比分析了苹果块干制品的质地特性、外表颜色、抗氧化活性及总多酚含量,发现 HPD-MD 所得苹果块干制品的抗氧化活性及总多酚含量比单独使用 HPD 的提高了 60%~70%,其色泽、硬度等物理外观均比其他方法干制的好,干燥能耗也大大降低。宋杨等<sup>[42]</sup>研究发现,与单独 HPD 相比,热泵—微波真空联合干燥的干燥时间可缩短 50%以上,产品复水率有较大提高;单独使用 HPD 制得的海参表面深黑,且伴有焦糊、干瘪现象,品质一般,而联合干燥制得的海参表面呈黑色,无焦糊现象,形状保持基本完好、无干瘪,品质良好。说明与微波的联合使用可以提高物料的干燥速度、降低干燥成本,保证产品质量。目前,HPD-MD 在能耗、效率及品质

方面优于传统 HPD。

### 2.3 微波—冷冻联合干燥

FD 是在多种干燥方式中维持食品色泽、结构、营养成分、风味物质最好的一种干燥方式。其基本原理是在真空状态下将提前预冻好的食品进行干燥,物料中的水分从固态升华为汽态,达到脱水干燥的目的<sup>[43]</sup>。FD 可以较好地保存物料原有的微观结构,不会出现大部分坍塌现象,避免了物料体积的大幅度收缩,有利于营养物质和挥发性物质的保留。此外,由于 FD 物料微观结构会出现较多孔隙,所以冷冻干制品具有较好复水性能,且贮藏周期较长。但 FD 能耗大、干燥时间长,成本较高,限制了其在食品领域的应用,也阻碍了 FD 的工业化发展<sup>[44]</sup>。为了缩短生产周期、降低干燥能耗,并保证干制品质量,常将微波真空干燥(MVD)与 FD 结合对物料进行脱水处理。

Pei 等<sup>[45]</sup>将双孢菇冷冻—微波真空联合干燥(FD-MVD)与传统 FD 的动力学和复水性能进行了比较,并对干燥过程中水分的变化和复水过程中水分含量进行了模型拟合。结果表明,在 FD-MVD 过程中的有效水分扩散系数( $2.318 \times 10^{-5} \sim 5.565 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ )为 FD 过程( $1.291 \times 10^{-6} \sim 3.389 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )的 10 倍,说明 FD-MVD 具有更好的传质效率,因为微波可选择性地针对冰晶体加热使得干燥速率大大增加,明显缩短干燥时间;同时,Peleg 模型可以较好地拟合 FD-MVD 和 FD 干制品的复水过程,且复水能力相似。FD-MVD 具有干燥效率高、干燥时间短、干燥能耗低、复水性能与 FD 产品相似等优点,较 FD 更适合于工业化发展。Cui 等<sup>[46]</sup>发现 MVD-FD 样品的胡萝卜素和维生素 C 的保留率与 FD 样品相当,且颜色变化最小,虽然联合干燥样品收缩率大于 FD,但联合干燥样品表面平坦无明显翘曲;且 FD 样品与联合干燥

表 3 食品热泵—微波联合干燥工艺优化

Table 3 Optimization of heat pump microwave combined drying process for food

物料	优化方法	评价指标	最佳干燥工艺	来源
罗非鱼	响应面中心组合设计	干燥能耗、复水率	热泵温度 35 ℃、转换点含水率 39%、微波功率 252 W	[35]
荔枝	正交试验设计	含水率、感官品质	热泵温度 50 ℃、转换点干基含水率 100%、微波时间 2.5 min	[36]
辣椒	单因素试验、响应面优化	辣椒碱、二氢辣椒碱、单位能耗、色差	热泵温度 50.38 ℃、转换点含水率 50.39%、微波功率 286.14 W	[37]
青花椒	响应面优化	色差、干燥能耗、挥发油	热泵温度 59 ℃、转换点含水率 40%、微波功率 340 W	[38]
雪莲果	二次回归正交旋转组合设计	干燥速率、单位能耗、色差、复水比	热泵温度 42.7 ℃、热泵风速 1.69 m/s、转换点含水率 50%、微波功率 2 W/g	[39]
莲藕	单因素试验、正交试验	色差、复水比、硬度、干燥时间	微波功率 5.5 W/g、微波时间 120 s,热泵温度 40 ℃	[40]

样品复水比几乎相同,其微观结构也相似。这是因为 MVD-FD 干燥过程是直接通过升华进行的,使制品具有易于复水的多孔性结构。Li 等<sup>[47]</sup>探究了 FD 和 MVD 联合干燥顺序对胡柚干燥品质的影响,无论 MVD 是先干燥还是后干燥,联合干燥均比 FD 显著缩短了干燥时间,并改善了品质;FD-MVD 对胡柚还原糖和类胡萝卜素的保留率高于 MVD-FD 和 MVD-FD-MVD,且 FD-MVD 样品的总多酚和总黄酮含量显著高于 FD,所以 FD-MVD 具有较强的抗氧化能力;MVD-FD 样品颜色与 FD 样品相当,吸湿性最弱。

由表 4 可知,与 FD 相比,MVD-FD 可以缩短干燥时间 14%~75%,降低干燥能耗 30%~70%,显著提高样品还原糖、总多酚、总黄酮、维生素 C 等营养成分含量,提高样品的复水性能、降低吸湿能力,且保持与 FD 样品相似的微观结构,含有较多孔隙和空洞,有利于提高复水性能。此外,MVD-FD 还具有杀菌功能,能显著降低微生物含量。

### 3 微波辅助干燥

微波辅助干燥是将微波能应用于干燥过程的各个阶段,为干燥物料提供脱水所需的能量。较传统的干燥方法,微波辅助干燥能够阻止干燥过程中热量的散失,保证其充分干燥物料,不仅可以获得较好的产品品质,还可以大大降低干燥能耗和干燥时间。

Wang 等<sup>[54]</sup>研究表明,较传统的 HAD,微波辅助干燥时间缩短了 64.29%,干燥速率是 HAD 的 22~35 倍;微波辅助干燥香菇的多糖含量为新鲜样品的 84.97%,较传统 HAD 具有较高的保留率,且在干燥过程中产生的硝

酸香气种类和数量均显著高于 HAD;但微波辅助干燥在复水性能方面表现出了负面效应,其复水率是 HAD 的 57.23%,可能是微波辅助干燥导致水分的快速蒸发,有助于内部黏度较高的成分渗出,并在物料表面形成了阻碍复水进行的厚层。这与干燥过程中微波功率和热风温度以及干燥物料的性质有关<sup>[55]</sup>。而 Horuz 等<sup>[56]</sup>研究发现,微波辅助干燥的样品其复水性能显著优于传统 HAD,可能是微波造成细胞损伤,增加了细胞内空腔和细胞间隙,使水分得以更好地迁移,增加了复水能力。此外,由于微波的穿透性可以加速物料加热,所以微波辅助干燥技术在提高干燥速率、降低干燥能耗方面有显著性影响。微波辅助干燥酸樱桃时,其干燥时间缩短了 52.0%~66.6%,干燥能耗降低了 55.08%~58.64%,微波功率越大越有利于干燥时间和干燥能耗的降低,且显著提高了对总多酚和维生素 C 的保留率。Abano<sup>[57]</sup>发现微波辅助热风干燥芒果较传统 HAD 时间缩短了 23%,干燥能耗降低了 29.7%,营养成分保留率显著高于传统 HAD。Justyna 等<sup>[58]</sup>发现微波辅助干燥红甜菜根可以使干燥时间缩短 66%,干燥能耗降低 20%,且具有更好的色泽和更高的甜菜碱保留率。Altan<sup>[59]</sup>研究表明,微波辅助热风干燥不仅可以降低通心粉的干燥时间,且对其烹饪特性和质构特性有明显改善作用。此外,对胡萝卜<sup>[60]</sup>、孜然<sup>[61]</sup>、树莓<sup>[62]</sup>、火龙果<sup>[63]</sup>等的研究表明,微波辅助干燥不仅可以明显缩短干燥时间、降低干燥能耗,且对物料营养成分的保留有积极效应。

由表 5 可知,微波辅助干燥对不同干燥方式均有积极作用,所得干制品质量均有所提高。微波具有辐射作

表 4 微波联合对冷冻干燥的影响

Table 4 Effect of microwave combination on freeze drying

物料	联合方式	时间/能耗	品质	来源
鸭蛋清	FD 8 h, 转换点 25%, 微波功率 600 W	干燥时间缩短 29.2%	FD-MVD 制得蛋白粉的起泡能力和乳化性质与 FD 制得蛋白粉相似,且色泽更亮	[48]
双孢菇	FD 至 85%, 38%, 20% 后在微波功率密度 60 W/g、真空度 -90 kPa MVD	干燥时间缩短 35.63%、干燥能耗降低 35.27%	FD-MVD 与 FD 微观结构相似,还原糖、总糖、维生素 C、蛋白质含量稍低于 FD,但差异不显著	[49]
甘蓝酸奶	FD 3, 4, 5 h 后转至微波功率密度 8 W/g、真空度 11 kPa MVD	干燥时间缩短 14.86%~31.08%, 干燥能耗降低 30.56%~46.11%	联合干燥样品营养成分与 FD 样品含量相近,外观形状和感官特性好	[50]
秋葵	FD 10 h 后转至微波功率 1 356 W、真空度 70 kPa MVD	干燥时间缩短 75.36%, 干燥能耗降低 71.92%	FD-MVD 对秋葵营养物质和易挥发性物质的保留率高	[51]
蘑菇	FD 至 15%, 30%, 55% 后转至微波功率 150 W	干燥时间缩短 50%	微生物含量明显减少	[52]
香蕉	冷冻、微波冷冻联合干燥	干燥时间缩短 40%, 干燥能耗降低 33.8%	与 FD 样品相比,复水性能提高,感官评价较好	[53]

表 5 微波辅助对传统干燥方式的影响

Table 5 Effect of microwave assisted drying on traditional drying methods

物料	干燥方式	时间/能耗	品质	来源
大蒜	微波辅助真空干燥	干燥时间约缩短 5 倍,干燥能耗降低 54.42%~86.25%	微波辅助干燥样品色泽更亮,抗氧化能力显著提高	[64]
扁豆	微波辅助红外干燥	微波功率 0.35~0.70 kW 时可显著缩短干燥时间	微波辅助干燥显著降低了扁豆的硬度,缩短了烹饪时间	[65]
青豆	微波辅助热泵流化床干燥	干燥时间约降低 33.3%	微波辅助干燥样品外观平坦、无明显翘曲、形成多孔的内部结构,提高复水性能	[66]
莴苣	微波辅助喷动床冷冻干燥	干燥时间缩短 20%	降低了收缩率、硬度、色差,提高了复水能力,微观结构紧密	[67]
苹果	微波辅助脉冲喷动床真空干燥	干燥时间缩短约 80%	微波辅助显著提高了复水性能,颜色和形状与冻干产品相似,感官评分高于常规真空干燥	[68]
蛹虫草	冷冻、脉冲喷动床微波冷冻干燥	干燥时间缩短 71.88%,干燥总能耗降低 28.40%	与 FD 相比,挥发性化合物含量增加、复水性能和抗氧化活性提高,收缩率降低	[69]

用,可以穿透食品物料内部,对物料整体进行加热使物料内外温度同时升高,产生大量水蒸气,内外产生气压差,使得内部水分快速向外迁移,极大地提高了干燥速率,同时使物料形成了比原始组织结构更大的孔隙,进而提高了干制品的复水性能<sup>[70]</sup>。

由图 2 可知,微波辅助的干制品更具多孔性和蜂窝状网络,而常规真空干燥干制品的微观结构紧密堆积,无可见蜂窝状网络,说明微波辅助有助于样品孔隙和孔洞的产生,更有利于物料的复水<sup>[71]</sup>。

#### 4 结论与展望

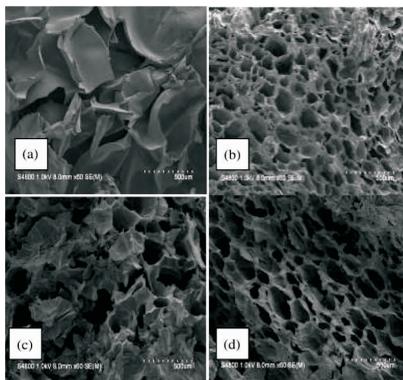
无论是微波干燥处理技术还是微波联合干燥、微波辅助干燥,在食品干燥过程中均表现出显著的强化作用,微波技术的应用可以提高干燥过程中的有效水分扩散系

数,促进传热传质的进行,明显地缩短干燥时间、降低干燥能耗,此外,微波还可以降低干燥产品的营养成分损失,提高产品品质,抑制产品收缩,降低其微观结构的塌陷,增加其孔隙和孔洞,提高其复水性能。微波干燥处理改善了单一干燥方式带来的不足和缺陷,可实现高效率、低能耗、高品质的干燥效果。微波处理在食品干燥领域的研究可从以下方面进行深入:

(1) 食品物料性质的研究和预处理的开发。由于微波的选择性加热,物料吸收微波的能力受物料介电性能的影响,为了避免物料干燥不均匀,在干燥过程中应考虑物料介电性能的改善,尝试干燥前进行预处理,如电离辐射、超声波、远红外辐射等。后续应深入分析联合微波干燥过程中物料某种性质随含水量和温度的变化,以及不同预处理方式对物料介电性能的影响,并探究物料性质、品质的改变机理,以开发最佳的干燥方法保持产品最理想的特性,如高孔隙率,并尽可能抑制不佳的干燥效果,如过度收缩。

(2) 微波与传统干燥方法结合工艺的优化。不同干燥方式的联合、转换点的选择、联合顺序均会影响干燥成本和干燥产品质量,需重点研究微波功率、干燥室压力、微波模式、干燥温度对干燥能耗、干燥效率、干燥产品质量以及水分迁移机理的影响,尤其是微波模式下探究间歇微波处理、连续微波处理、恒温微波处理和变温微波处理对品质的影响,干燥工艺的选择应尽量降低干燥能耗,保持食品外观和营养价值。

(3) 微波辅助干燥设备的开发。微波联合干燥和辅助干燥技术虽然取得了较多研究成果,但仍局限于实验室,并未进行工业化大批量生产,为了推进微波技术在食品干燥领域的应用,需开发方便、节能、高效的微波辅助



a. 真空干燥 b. 微波真空干燥 c. 微波喷动床干燥 d. 微波脉冲喷动真空干燥

图 2 苹果干块的扫描电子<sup>[68]</sup>

Figure 2 Scanning electron micrographs of dried apple cubes

干燥机器,此外,还需结合在线监测水分系统和自动控制系 统,优化干燥设备结构来促进微波技术工业化的发展。

(4)微波加热不均匀性的改善。微波因其具有穿透性,加热过程中会出现局部过热造成加热不均匀的问题。同时提高均匀性和效率是微波技术应用于干燥领域的难点,后续可结合变频技术和选频技术在保证高效率的前提下改变微波加热的频率来提高加热的均匀性,开发双端口或多端口加热方式,建立微波多角度加热温度和时间的模型,预测物料局部温度,进一步提高物料加热的效率和均匀性,使微波处理技术更好地应用于食品干燥领域。

### 参考文献

- [1] VILLACRÉS E, ÁLVAREZ J, ROSELL C, et al. Effects of two debittering processes on the alkaloid content and quality characteristics of lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2 166-2 175.
- [2] 吕豪, 韩清华, 吕为乔, 等. 果蔬微波干燥与低频超声波协同干燥应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 180-185.
- [3] 苏慧, 郑明珠, 蔡丹, 等. 微波辅助技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 171-173.
- [4] LI Zhen-feng, RAGHAVAN G S V, ORSAT V. Optimal power control strategies in microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(3): 263-268.
- [5] 丁泽智, 杨晚生. 微波干燥技术的研究发展现状[J]. 应用能源技术, 2019(4): 44-47.
- [6] 唐毓玮, 龙凌云, 毛立彦, 等. 干燥方式对睡莲花茶多酚及其抗氧化性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 59-65.
- [7] 王红利, 郁志芳. 不同干燥方式对甘蓝理化性质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 40(21): 81-86.
- [8] TEIN M L, DURANCE T D, SCAMAN C H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices[J]. Food Research International, 1998, 31(2): 111-117.
- [9] 高伦江, 曾顺德, 李晶, 等. 热风微波联合干制对香菇品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 80-83.
- [10] 范胜莲, 刘光兴. 不同干燥方法对红花中羟基红花黄色素 A、山奈素及红花黄色素 A 含量的影响[J]. 中国药师, 2020, 23(6): 1 198-1 200.
- [11] GULSAH Ç K. The effect of different drying techniques and microwave finish drying on the powder properties of the red pepper powder (*Capsicum annuum* L.)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(12): 4 576-4 587.
- [12] 王振师, 盛怀宇, 陈善敏, 等. 不同干燥方法对朝鲜蓟多酚、抗氧化性及香气成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 149-156.
- [13] ZHANG Min, TANG Jing, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-relate drying of fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 524-534.
- [14] PEYRE F, DATTA A K, SEYLER C, et al. Influence of the dielectric property on, microwave oven heating patterns: Application to food materials[J]. Journal of Microwave Power, 1997, 32(1): 3-15.
- [15] WANG Shun-min, YANG Run-qiang, HAN Yong-bin, et al. Effects of magnetron arrangement and power combination on temperature field uniformity of microwave drying of carrot [J]. Drying Technology, 2016, 34(8): 912-922.
- [16] CUI Zheng-wei, CHEN Li-jun, SONG Chun-fang, et al. Research progress of hot air microwave coupling drying technology and equipment[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(11): 1 121-1 128.
- [17] ZEHRA G, MEHMET T, HILAL S. Sugar, *d*-pinitol, volatile composition, and antioxidant activity of carob powder roasted by microwave, hot air, and combined microwave/hot air[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, DOI:10.1111/jfpp.14371.
- [18] XU Ya-yuan, XIAO Ya-dong, CAMEL L, et al. A comparative evaluation of nutritional properties, antioxidant capacity and physical characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata* var L.) subjected to different drying methods[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 124935.
- [19] 刘小丹, 张淑娟, 贺虎兰, 等. 红枣微波-热风联合干燥特性及其品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 280-286.
- [20] XU Wan-xiu, CAO Xiao-huang, ZHU Guang-yu, et al. Effect of temperature difference on the aroma and quality of carrots processed through microwave drying combined with hot air drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 120: 58-68.
- [21] ARKOM P, ANGELIQUE M S, SOMCHART S, et al. Study on quality attributes and drying kinetics of instant parboiled rice fortified with turmeric using hot air and microwave-assisted hot air drying [J]. Drying Technology, 2020, 38(4): 420-433.
- [22] 王招招, 路风银, 朱广成, 等. 花生果微波-热风耦合干燥特性及能耗分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 140-146.
- [23] 曹森, 化志秀, 童斌, 等. 不同干燥方法对即食杏鲍菇脆片品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(5): 136-139, 143.
- [24] OMID M K, MORTEZA S, SEYED A M. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices[J]. Engineering in Agriculture, Environment and

- Food, 2016, 9(3): 216-223.
- [25] 王军, 程晶晶, 余垒. 南瓜片热风—微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品工业, 2016, 37(4): 84-88.
- [26] WANG Ying, LI Xia, CHEN Xue-tao, et al. Effects of hot air and microwave-assisted drying on drying kinetics, physicochemical properties, and energy consumption of chrysanthemum[J]. Chemical Engineering and Processing, 2018, 129: 84-94.
- [27] 王军, 程晶晶, 牛亚冰. 番薯片热风与微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 138-142.
- [28] ZIELINSKA M, MARKOWSKI M. The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Food Chemistry, 2016, 196(A1): 1 188-1 196.
- [29] WOJDYLO A, FIGIEL A, OSZMIANSKI J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color and antioxidant activity of strawberry fruits [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 1 337-1 343.
- [30] 刘伟东, 顾欣, 郭君钰, 等. 微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 296-302.
- [31] 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, 44(2): 579-584.
- [32] HII C L, LAW C L, SUZANNAH S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276-282.
- [33] PATEL K K, KAR A. Heat pump assisted drying of agricultural produce: An overview[J]. Journal of Food Science & Technology, 2012, 49(2): 142-160.
- [34] COLAK N, HEPBASLI A. A review of heat-pump drying (HPD) Part 2: Applications and performance assessments[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 2 187-2 199.
- [35] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 热泵—微波联合干燥罗非鱼片工艺研究[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 58-62.
- [36] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 热泵—微波联合干燥整果荔枝工艺研究[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 20-24.
- [37] 池春欢, 汪友友, 陈厚荣. 多指标综合评分法优化辣椒热泵—微波联合干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(6): 172-179.
- [38] 田冰, 王玲, 彭林, 等. 多指标综合评分法优化青花椒热泵—微波联合干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 149-155.
- [39] 郑亚琴. 雪莲果热泵—微波联合干燥工艺研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013: 32-40.
- [40] 李莉峰, 叶春苗, 韩艳秋. 正交试验优化热泵—微波联用制取莲藕干工艺条件[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 82-86.
- [41] CHONG C H, FIGIEL A, LAW C L, et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum microwave, and intermittent techniques[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(4): 975-989.
- [42] 宋杨, 张国琛, 王彩霞, 等. 热泵与微波真空联合干燥海参的初步研究[J]. 渔业现代化, 2009, 36(1): 47-51.
- [43] TAMS A, SIKOLYA L. Effect of drying methods on the quality of the essential oil of spearmint leaves (*Mentha spicata* L.) [J]. Drying Technology, 2011, 29(15): 1 836-1 844.
- [44] JIN Jue, YURKOW E J, ADLER D, et al. Improved freeze drying efficiency by ice nucleation proteins with ice morphology modification [J]. Food Research International, 2018, 106: 90-97.
- [45] PEI Fei, SHI Ying, MARIGA A M, et al. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(6): 1 629-1 639.
- [46] CUI Zheng-wei, LI Chun-yang, SONG Chun-fang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1 517-1 523.
- [47] LI Lin-lin, ZHANG Min, BIMAL C, et al. Effect of combined drying method on phytochemical components, antioxidant capacity and hygroscopicity of Huyou (*Citrus changshanensis*) fruit [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109102.
- [48] ZHOU Bing, ZHANG Min, FANG Zhong-xiang, et al. A combination of freeze drying and microwave vacuum drying of duck egg white protein powders[J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1 840-1 847.
- [49] PEI Fei, YANG Wen-jian, SHI Ying, et al. Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 702-710.
- [50] LAO Yan-yan, ZHANG Min, SAKAMON D, et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. Drying Technology, 2020, 38: 5-6.
- [51] JIANG Ning, ZHANG Zhong-yuan, LI Da-jiang, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 216-226.
- [52] REN Guang-yue, ZENG Fan-lian, DUAN Xu, et al. The effect of glass transition temperature on the procedure of mi-

- crowave-freeze drying of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Drying Technology*, 2015, 33(2): 169-175.
- [53] JIANG Hao, ZHANG Min, ARUN S, et al. Microwave freeze-drying characteristics of banana crisps [J]. *Drying Technology*, 2010, 28(12): 1 377-1 384.
- [54] WANG Qing-fa, LI Song, HAN Xue, et al. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 107: 236-242.
- [55] LECHTAŃSKA J M, SZADZIŃSKA J, KOWALSKI S J. Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations [J]. *Chemical Engineering & Processing (Process Intensification)*, 2015, 98: 155-164.
- [56] HORUZ E, BOZKURT H, KARATAS H, et al. Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries [J]. *Food Chemistry*, 2017, 230(S1): 295-305.
- [57] ABANO E E. Kinetics and quality of microwave-assisted drying of mango (*Mangifera indica*) [J]. *International Journal of Food Science*, 2016, 2 016: 1-10.
- [58] JUSTYNA S, DOMINIK M, ANDRZEJ P, et al. Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot [J]. *Drying Technology*, 2020, 38(1/2): 93-107.
- [59] ALTAN A. Microwave assisted drying of short-cut (Ditalini) macaroni: Cooking process and textural properties [J]. *Food Science and Technology International*, 2004, 10(3): 187-196.
- [60] JOANNA K, SZADZIŃSKA J, MARCIN S, et al. Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots: Process kinetics and product's quality analysis [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 48: 249-258.
- [61] BABAKI A, ASKARI G, EMAM-DJOMEH Z. Drying behavior, diffusion modeling, and energy consumption optimization of *Cuminum cyminum* L. undergoing microwave-assisted fluidized bed drying [J]. *Drying Technology*, 2020, 38(1/2): 224-234.
- [62] OZCELIK M, HEIGL A, KULOZIK U, et al. Effect of hydrocolloid addition and microwave-assisted freeze drying on the characteristics of foamed raspberry puree [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 183-193.
- [63] YI Jian-yong, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 70: 271-279.
- [64] ÁNGEL C, ADAM F, ANETA W, et al. Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: Kinetics, energy consumption, and quality studies [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 398-408.
- [65] HEYDARI M M, KAULDHAR B S, MEDA V. Kinetics of a thin-layer microwave-assisted infrared drying of lentil seeds [J]. *Legume Science*, 2020, DOI: 10.1002/leg3.31.
- [66] ZIELINSKA M, ZAPOTOCZNY P, ALVES-FILHO O, et al. Microwave vacuum-assisted drying of green peas using heat pump and fluidized bed: A comparative study between atmospheric freeze drying and hot air convective drying [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(6): 633-642.
- [67] WANG Yu-chuan, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying of stem lettuce slices-effect on product quality [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(12): 3 530-3 543.
- [68] MOTHIBE K J, WANG Chuan-yu, MUJUMDAR A S, et al. Microwave-assisted pulse-spouted vacuum drying of apple cubes [J]. *Drying Technology*, 2014, 32 (15): 1 762-1 768.
- [69] WANG Yu-chuan, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Study of drying uniformity in pulsed spouted microwave-vacuum drying of stem lettuce slices with regard to product quality [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(1): 91-101.
- [70] JIANG Hao, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Analysis of temperature distribution and sem images of microwave freeze drying banana chips [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(5): 1 144-1 152.
- [71] WU Xiao-fei, ZHANG Min, BHESH R B, et al. Effects of microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying (MPS-FD) on volatile compounds and structural aspects of *Cordyceps militaris* [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(12): 4 634-4 643.