

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80253

果蔬微波干燥品质—效率协同优化技术应用进展

普子麟¹ 李孟卿¹ 张学滔¹ 李梦瑶¹ 杨旭海^{1,2} 张 茜^{1,3}(1. 石河子大学, 新疆 石河子 832003; 2. 现代农业机械兵团重点试验室, 新疆 石河子 832003;
3. 农业农村部西北农业装备重点试验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 果蔬干燥是食品加工领域的重要环节, 其工艺优化需兼顾品质保障与效率提升的双重目标。微波干燥技术因具有高效、节能等特点而备受关注。以微波干燥为研究对象, 阐述了各种微波干燥技术的原理和特点, 指出其在应用上要达到品质—效率协同优化的难点, 综述了各种干燥设备的应用与趋势, 揭示了现有技术在“品质—效率”协同优化中面临的关键瓶颈, 并对微波辅助技术在果蔬干燥领域的发展方向进行了展望。

关键词: 微波干燥; 果蔬干燥; 干燥设备; 干燥品质; 效率

Advances in microwave drying for fruits and vegetables based on quality-efficiency synergistic optimization

PU Zilin¹ LI Mengqing¹ ZHANG Xuetao¹ LI Mengyao¹ YANG Xuhai^{1,2} ZHANG Qian^{1,3}

(1. Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 3. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Fruit and vegetable drying constitutes a critical step in food processing, where process optimization should focus on both quality preservation and efficiency enhancement. Among different drying technologies, microwave drying has garnered significant attention due to its characteristics of high efficiency and energy conservation. Therefore, taking microwave drying as the research subject, this study elaborates on the principles and characteristics of various microwave drying techniques, highlighting the challenges for quality-efficiency synergistic optimization in practical applications. Subsequently, by reviewing the applications and development trends of different drying equipment, the study reveals critical bottlenecks faced by existing technologies for this optimization, prospecting the future directions of microwave-assisted technology in the fruit and vegetable drying.

Keywords: microwave drying; fruit and vegetable drying; drying equipment; drying quality; efficiency

果蔬是人类膳食结构中的重要组成部分, 有着高含水率(普遍维持在 75%~95%), 因此此类生鲜农产品在采收后易发生腐烂变质现象。干燥能够降低果蔬的水分含量, 从而延长保质期并实现全年供应^[1]。然而, 传统干燥方法存在效率低、易污染^[2]等局限性, 这些局限性还促使科研与工业领域积极探索新型干燥技术。微波干燥已成

为一种有前途的干燥方案, 它不仅能够大幅缩短干燥所需的时间, 还可以切实保障干燥质量^[3]。但在品质—效率协同优化条件下, 关于果蔬微波干燥技术的应用进展的文献仍然缺乏。文章旨在讨论微波干燥的基本原理、微波相关的干燥设备, 通过研究微波技术在果蔬干燥中的应用, 综合分析在品质—效率协同优化条件下, 微波技术

基金项目: 兵团项目(编号: CZ00272401); 国家自然科学基金(编号: 32360605)

通信作者: 张茜(1980—), 女, 石河子大学教授, 博士。E-mail: 1554608278@qq.com

收稿日期: 2025-03-20 改回日期: 2025-12-29

引用格式: 普子麟, 李孟卿, 张学滔, 等. 果蔬微波干燥品质—效率协同优化技术应用进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 222-229.

Citation: PU Zilin, LI Mengqing, ZHANG Xuetao, et al. Advances in microwave drying for fruits and vegetables based on quality-efficiency synergistic optimization[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 222-229.

在果蔬干燥领域的研究进展及其所面临的挑战,并对未来的发展方向进行思考和展望,以期对果蔬高效低损干燥提供理论支撑与创新路径。

1 不同的微波干燥方法的效率与品质

1.1 单一微波干燥

单一微波干燥技术是一种仅利用微波电磁波能量,对物料进行非接触式加热与干燥的工艺。其核心在于通过微波与物料中的极性分子(尤其是水分子)相互作用,将电磁能直接转化为热能,实现形状规整果蔬的快速干燥^[4-5]。微波干燥能较好地保持被干燥果蔬原有的色泽、生物活性、营养成分等^[6]。基于干燥速度快的突出优势,该技术在果蔬干燥领域得以广泛应用^[7]。

不过,在采用单一连续微波干燥方式时,虽然干燥效率高,但存在物料内部或表面因微波能量吸收不均而形成的局部高温区域,特别是在干燥流程的最后阶段,这种现象更常见^[8]。而采用间歇微波干燥技术,可以有效缓解加热不均匀问题。这是因为微波的间歇性作用,可以使物料在非工作阶段有充足时间进行内部水分的扩散与平衡,从而促进水分分布均匀化,减少物料表面硬化、开裂等现象^[8],进而提升干燥品质。Raj等^[9]对火龙果的干燥研究证实,相比热风干燥,间歇微波干燥制品的总酚含量和干燥效率更高,但他们并未研究这种方式的干燥均匀性及褐变。郑先哲等^[10]研究表明,连续式微波干燥得到的树莓感官品质较差,产生了表面焦糊,而脉冲式微波干燥得到的品质最好。

对于热敏性高、易氧化的果蔬,单一微波干燥会导致其维生素C、花青素等热敏营养成分大量损失,而且易发生酶促褐变或氧化变色;对于低热敏性果蔬,则需通过间歇微波^[9]或传感器优化^[11]补偿单一微波干燥不均匀的缺陷,所以单一微波干燥尚未达到品质-效率协同优化。为了进一步解决这个问题,研究人员探索了将微波干燥与其他方法(如真空干燥或冷冻干燥)相结合的联合干燥技术。这些联合干燥技术把单一效率驱动转向品质-效率协同优化,通过减轻微波干燥的缺点,进一步提高了产品的质量^[12]。

1.2 微波热风干燥

微波热风干燥,通过微波内部加热和热风外部对流相互配合,能够极大地缩短干燥所需要的时间。在干燥效率方面,与热风干燥相比,微波热风干燥可以有效地将干燥时间缩短34.2%~87.0%^[13]。传统热风干燥容易在物料表面产生“硬化壳”,阻碍内部水分迁移,最终导致干燥不均匀且周期长,而微波的介电加热特性,可以穿透物料内部,使水分子高频振动产热,促使内部水分快速向表面迁移,与热风的外部传质形成互补,减少了传统热风干燥易出现的“外壳硬化”问题^[14],使干燥更均匀。在干燥品质方面,微波热风干燥有着独特优势:一方面,在干

燥过程中,果蔬会形成多孔状微观结构^[15],这种结构增强了产品的复水性和口感。另一方面,微波的体积加热效应减少了高温对物料的热损伤,尤其在合理控制微波功率(200~600 W)和热风温度(50~80 °C)^[16-17]时,微波热风干燥表现出更强的抗氧化活性和活性物质保留能力。例如以微波热风工艺干燥桑葚时,其糠醛含量显著升高,且该工艺对糠醛成分的保留效果优于冷冻干燥^[16]。

微波热风干燥是当前主流的干燥技术之一,其参数控制的难点在于:过高的微波功率可能导致局部过热,引起美拉德反应过度或营养破坏^[18];过低的热风温度则会影响表面水分蒸发速率,所以微波热风干燥智能化水平还不足,需结合物料特性,通过响应面法等手段优化工艺参数,以平衡干燥效率与品质指标。这种技术适用于干燥对热敏性要求不高,果肉较厚的水果,如杏、桃、香蕉等;或者耐高温、水分含量适中的蔬菜,如土豆、胡萝卜、南瓜等^[13, 19]。

1.3 微波真空干燥

微波真空干燥,结合了微波加热与真空环境,利用微波的穿透性,使果蔬内部水分子快速振动、摩擦生热,与此同时,在真空环境中,水分沸点得以降低,进而使水在低温状态下快速蒸发,这种加热方式有效避免了高温对热敏性成分的破坏,减少氧化和微生物污染风险,可极大地保留果蔬的色泽、风味,保障大部分营养成分及生物活性物质不被破坏^[20-21],比如在草莓干燥中,微波真空干燥减少了颜色损失^[22]。另有研究^[23]表明,苹果的颜色变化受微波功率和加热时间的影响,所以优化微波功率和加热时间两个工艺参数,能减少干燥后果蔬的颜色变化。相较于传统热风干燥,微波真空干燥工艺显著提升了香菇的感官品质,也使得橙片与蔓越莓的活性成分保留率得到提升^[24-28]。而且微波真空有较高的干燥效率,比如番茄采用微波真空干燥可比热泵干燥缩短82%的干燥时间^[29]。

因此,适当的微波功率和真空度,在保留较高含量的营养成分的同时,有利于显著缩短干燥时间。其保留营养成分的优势主要体现在:①真空环境降低水的沸点,避免高温破坏花青素等色素与维生素C等热敏性营养素;②真空条件可抑制酶促褐变与氧化反应,留存果蔬天然色泽与风味;③微波真空干燥能规避高温造成的物料塌缩或硬化,适配质地柔软、易变形的果蔬品类。因此,该技术适用于热敏性果蔬的干燥,例如富含维生素C的草莓、蓝莓、菠菜、香菜等。

1.4 微波冷冻干燥

微波冷冻干燥,结合了微波与冷冻干燥,其核心原理是:先将物料低温冻结使水分固化成冰,再利用微波辐射能量加速冰晶的升华过程。从干燥效率和能耗角度,微波能的引入,可使干燥周期比传统冷冻干燥缩短30%~50%,能耗显著降低,而且微波冷冻干燥消耗的电量,仅为真空冷冻干燥的12.63%^[30]。这一技术优势源于微波的体积加热特性:微波可穿透物料内部,使冰晶在电磁场中吸

收能量直接升华,避免了传统冷冻干燥的低效。从品质保留角度,微波冷冻干燥具有多重优势:① 冷冻状态下的冰晶升华过程,最大程度保留果蔬的蜂窝状结构,复水后形态与口感更接近新鲜果蔬,能够维持原有的风味^[31]。例如 Pinar 等^[32]和于萍等^[33]的研究均表明,微波冷冻干燥可以较好地保留物料的活性物质。② 低温环境与真空条件协同,抑制了酶促反应、氧化降解及微生物污染,有效保留热敏性成分。

这种技术适用于高附加值生鲜产品的干燥,如松茸、牛肝菌等珍稀食用菌,或者需保持形态,干燥后品质要求高的水果,比如整颗的蓝莓、树莓等浆果。此外,对于富含益生菌的发酵食品(如发酵大白菜),微波冷冻干燥在缩短干燥时间的同时,也能保留大部分乳酸菌活细胞、生物活性成分和泡菜的抗氧化能力^[30],为功能性食品的开发提供了技术支撑。

1.5 其他微波联合干燥

近年来,微波联合干燥技术种类不断增多,为不同果蔬的定制化干燥工艺设计提供了更高的灵活性与适应性。微波水扩散和重力干燥是一种结合微波加热与重力排水的高效干燥技术。用这种方法处理苹果渣,相比热风干燥效率提高 4 倍以上^[34]。将微波和红外结合,也可以提高干燥效率,而且保持了必需的营养成分、颜色、质地和风味^[35]。结合超声波预处理或转盘微波技术可缩短干燥时间、降低收缩率,并改善外观^[36]。相对于单一微波干燥而言,微波真空+热风干燥技术在甘蓝中表现出更高的营养保留率和抗氧化活性^[37],真空+微波+冷冻联合干燥技术在苹果块干燥中表现出更高的多酚保留率和外观品质^[38-39]。

综上所述,不同微波干燥工艺表现出的效率和品质均不相同。如图 1 所示,单一微波干燥效率高但易导致加热不均和营养流失,可通过间歇微波或联合干燥予以改善;微波真空干燥的真空环境,有利于水分蒸发,能有效保留热敏性果蔬的色泽与活性成分;微波冷冻干燥通过冰晶升华维持多孔结构,适合维持高附加值果蔬的形态与营养成分保留;微波热风干燥融合微波与对流加热,能减少外壳硬化,适用于厚果肉果蔬的快速干燥。在同种果蔬的干燥研究中,不同干燥方法的效率与品质表现存在显著差异。就干燥效率而言,其排序通常为:微波热风干燥>微波真空干燥>单一微波干燥>微波冷冻干燥;从干燥品质来看,综合评分则呈现微波冷冻干燥>微波真空干燥>微波热风干燥>间歇微波干燥>连续微波干燥的梯度特征。然而,实际应用中需兼顾品质与效率的协同优化,不宜片面追求单一指标的极端化,而应在两者间寻求科学平衡以实现工艺优化。

1.6 品质-效率协同优化的实现路径与评价体系

为了实现品质与效率的协同优化,需要建立相应的评价体系以量化两者之间的协同效果,流程如图 2 所示。其中品质-效率协同优化的实现包括 3 个方面。① 工艺

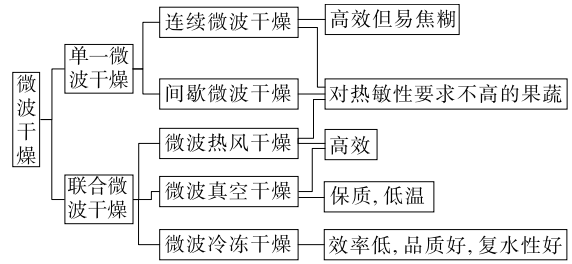


图 1 微波干燥工艺

Figure 1 Microwave drying process

优化方法:一种方法是通过微波工艺耦合预处理工艺达到品质-效率协同优化,如通过超声波预处理,再对苹果干燥,显著缩短了干燥时间,提高了苹果干的品质^[36]。另一种方法是微波工艺耦合其他干燥工艺,相较于单一微波干燥,耦合的干燥工艺(微波热风干燥、微波真空干燥等)具有显著协同效应。② 干燥过程动态控制策略:张志勇等^[40]将香菇微波干燥分为 3 个阶段,基于干燥中果蔬的介电特性动态变化实施分段改变微波功率控制,实现了香菇的品质-效率协同优化。③ 模型驱动优化方法:通过响应面法可以系统匹配与优化微波参数。例如,张沛琳等^[41]对大米干燥的优化结果表明,Box-Behnken 响应面法可有效平衡效率(干燥速率)与品质(硬度、弹性、色泽),为果蔬微波干燥参数匹配提供了参考。此外,将干燥模型与计算流体力学相结合,有助于深入理解干燥过程,从而提高干燥均匀性和干燥速率^[42]。建立基于数学模型的目标优化框架,也是实现效率与品质的协同优化的有效路径^[43]。例如,Jo 等^[44]对比了恒定速率(CR)模型与 Lewis 模型在传送带式干燥系统中的适用性,结果表明,通过干燥模型优化既能避免过度干燥造成的能源浪费(实现效率优化),又能确保产品水分含量精准控制(实现品质优化),从而实现两者的协同提升。

2 微波干燥设备的应用与趋势

2.1 单一微波干燥设备

单一微波干燥设备借助微波的热效应进行干燥,相对联合干燥而言,设备简单,成本低,操作流程简便,微波功率与干燥时间调控起来也较为容易,而且干燥速度快,可迅速促使果蔬升温,进而实现快速干燥。不过,该设备也存在一些弊端,干燥均匀程度欠佳,果蔬干燥过程中易发生局部过热现象,且外形不规则的果蔬更难实现理想干燥效果。但是集成了其他技术,可以增加智能化程度,减少劳动强度。如图 3 所示的微波干燥试验设备,附加了数据采集系统实现实时监测功能,实现了实时观察记录数据,便于分析当前干燥情况,及时调整参数。可预测的是,未来将会有更多的传感器和控制模块加入到微波干燥设备中^[11,46]。首先,在传感技术层面,除现有的温度和质量监测外,新型多光谱传感器、红外热成像传感器以及

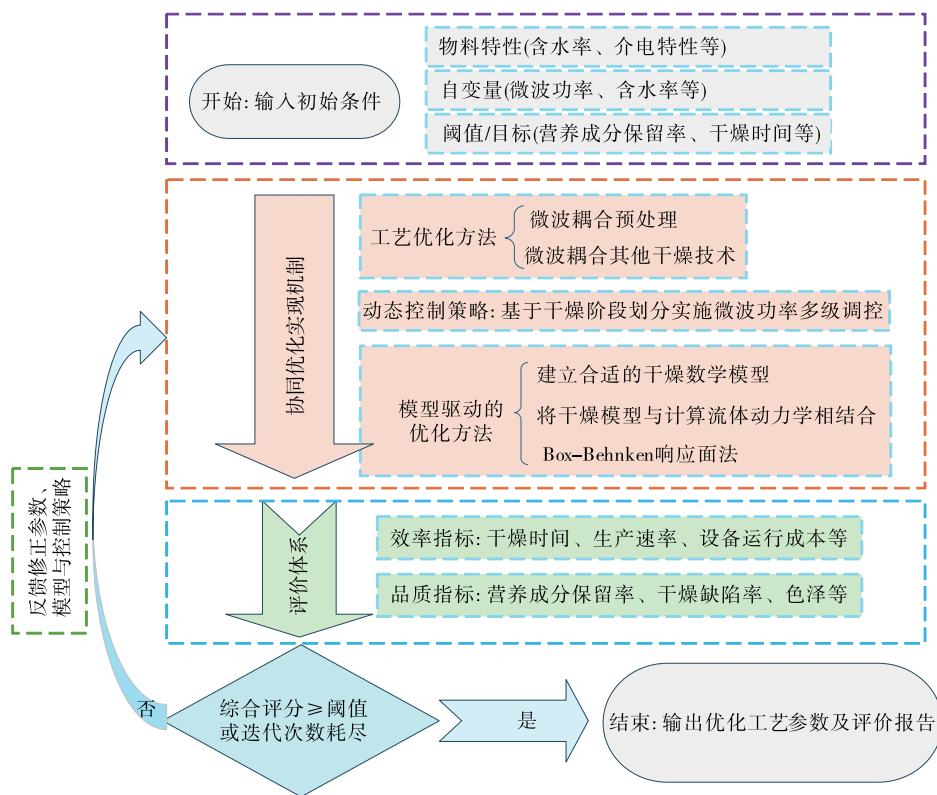


图2 效率—品质协同优化流程

Figure 2 Efficiency-quality synergistic optimization procedure

高精度水分活度传感器的引入,可实时获取果蔬内部水分分布、温度梯度及干燥动力学参数。其次,在控制模块方面,自适应模糊逻辑控制与深度学习算法的融合,将成为干燥系统的控制核心。

2.2 微波真空干燥设备

微波真空干燥设备,能够让微波与真空一起对果蔬施加作用。微波真空干燥设备主要由微波发生器、真空干燥腔、真空系统、果蔬架与控制系统等部分构成。微波发生器负责输出微波能量,果蔬中的水分吸收这些微波能,继而转化为热能,推动水分蒸发。真空系统的作用在于降低干燥腔内的气压,让水的沸点随之降低,如此一来,便能

在较低温度环境下实现果蔬的快速干燥。图4的设备运用真空与微波协同加速干燥,通过旋转托盘设计,使物料依次经过顶部微波源,实现“短期间歇式微波作用”,改善传统微波干燥的加热不均匀问题,提升干燥均匀性。缺点需要配备真空系统,提高了设备制造成本和维护成本。

微波真空干燥设备是高效处理热敏性果蔬的关键技术,可预测其未来发展将围绕智能化、高效化、绿色化及多领域应用等方向展开突破。一方面,深入研究微波功

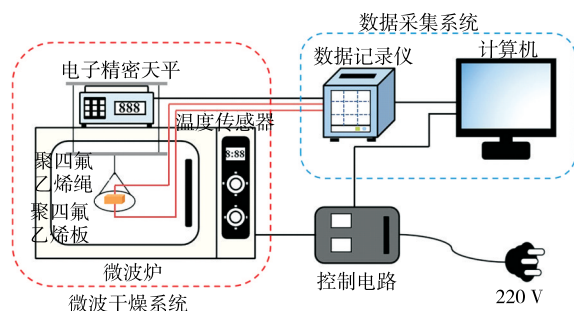


图3 微波干燥试验设备示意图^[45]

Figure 3 Experimental equipment for microwave drying

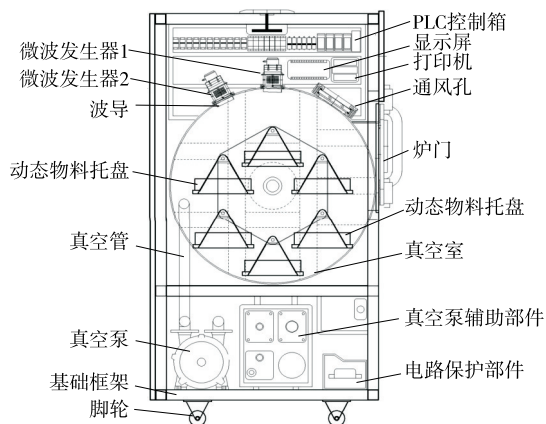


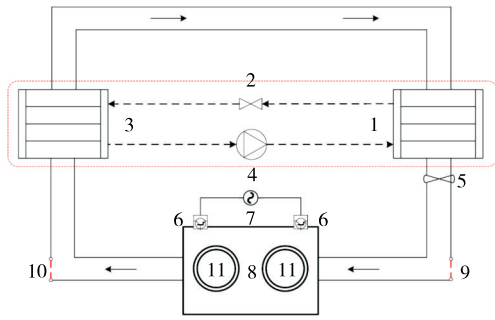
图4 槽式旋转微波真空干燥示意图^[20]

Figure 4 Tray rotation microwave vacuum dryer

率、真空度、物料厚度等参数的交互作用,加深对干燥过程的理解,进而研究出更通用的干燥动力学模型,为智能控制打下基础。另一方面,通过智能化与数字化,设备将深度集成物联网与人工智能技术,构建实时监测与自适应控制系统。

2.3 微波热泵干燥设备

微波热泵干燥设备,融合了热泵干燥和微波干燥的原理,如图 5 所示,干燥过程中,空气首先在热泵系统的蒸发器中冷却除湿,随后流经冷凝器,加热为高温干燥空气,再被送入干燥腔室与消防水带进行热湿交换。热泵回收并利用系统余热,实现高效节能。干燥后期,微波介入可通过内部加热加速水分去除,从而提升整体干燥速率。在干燥质量保障方面,前期热泵干燥过程较为温和,后期微波介入加速干燥进程。但其缺点也不容忽视,设备构造繁杂,导致投资成本高昂;系统控制难度较大,需要精准把控热泵与微波的工作时段。可预测其未来发展将更加注重热泵与微波系统的深度协同。通过改进热泵循环结构和微波场均匀性设计,可进一步提升能效比和干燥均匀性。而且,随着物联网和人工智能技术的渗透,设备的智能化水平也将显著提升。



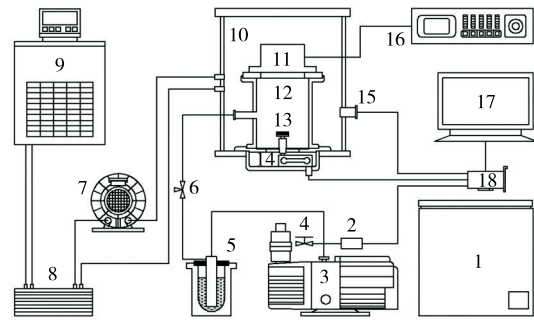
1. 冷凝器 2. 节流阀 3. 蒸发器 4. 压缩机 5. 风机 6. 微波发生器 7. 微波电源 8. 干燥室 9. 风阀 10. 风阀 11. 水带安装位置

图 5 微波热泵联合干燥原理图^[47]

Figure 5 Mechanism of microwave-heat pump combined drying

2.4 微波冷冻干燥设备

微波冷冻干燥设备(图 6),其核心是升华干燥,优点是果蔬的营养成分、色泽、风味和形态几乎不受影响,能最大程度保留果蔬的品质,而且干燥后的果蔬制品复水性好,这种干燥工艺适用于品质要求极高的果蔬。缺点是设备成本高,需要配备深冷冰柜(深冷冰柜如图 6 的 1 所示)、真空泵等设备,提高了设备制造成本和设备能耗,致使干燥产品的生产成本高;而且干燥耗时久(相对于其他微波干燥方法而言),这些缺点严重制约了其在工业化领域的推广应用。未来,随着固态微波源技术的进步,新型高效能、低能耗的微波发生器有望大幅缩短干燥周期^[49];



1. 深冷冰柜 2. 压力传感器 3. 真空泵 4. 调节阀 5. 冷凝器 6. 三通阀 7. 环形风机 8. 换热器 9. 循环水浴 10. 热风循环室 11. 同轴波导转换器 12. 微波干燥室 13. 样品 14. 质量传感器 15. 红外温度传感器 16. 固态微波源 17. 计算机 18. 数据采集卡

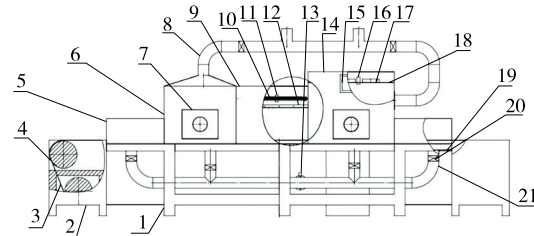
图 6 微波冷冻干燥试验装置流程图^[48]

Figure 6 Experimental process flow of microwave freeze drying equipment

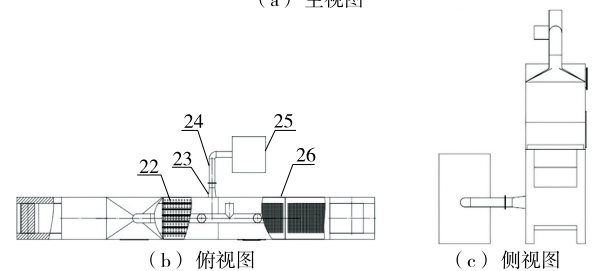
而材料科学的迭代升级与规模化生产模式的推广应用,将进一步有效降低设备的综合成本。

2.5 隧道式微波干燥设备

隧道式微波干燥设备是果蔬连续化干燥作业常见设备之一。如图 7 所示,其组成一般涵盖微波发生器、波导装置、干燥隧道、果蔬输送系统、排湿系统以及控制系统



(a) 主视图



(b) 俯视图

(c) 侧视图

1. 机架 2. 传动带箱 3. 传动带 4. 传动带轮 5. 热风—蒸汽分仓 II 6. 热风—蒸汽分仓 7. 料门 8. 除湿装置 9. 红外加热仓 10. 红外加热保温装置 11. 温度传感器 12. 微波干燥仓 13. 排风装置 14. 传感器 15. 防护屏 16. 温度传感器 17. 微波源 18. 微波源安装装置 19. 保温装置 20. 截止阀 21. 热风输送装置 22. 红外加热管 23. 热风输入装置 24. 热风分流通路 25. 热风发生器 26. 空气分配板

图 7 隧道多物理场协同微波干燥设备结构立体图^[50]

Figure 7 3D structural diagram of the tunnel multiphysics microwave-assisted drying equipment

等部分。隧道式微波干燥设备的优点是实现了连续化生产,适合企业大规模流水线作业,多种干燥方式协同,生产效率高。缺点是设备占地面积大;多种技术集成,设备调试和维护难度较大;投资成本较高;并且由于干燥过程中果蔬摆放位置难以保持一致,导致干燥均匀性较差、成品品质有限,因此通常仅适用于对干燥品质要求不高的果蔬进行大批量预脱水处理,如豌豆的预脱水,预处理后还需要用其他设备进行最终干燥。

未来,隧道式连续多物理场干燥设备的发展,一方面取决于单一技术,如微波、热风、红外等技术的突破;另一方

面,通过优化微波、热风、红外等物理场的耦合方式,或者设备参数的优化,最终追寻全局最优的效果,有望继续提升果蔬的干燥均匀性,使果蔬干燥品质更优。此外,与超声波清洗、紫外线杀菌设备联机集成,可以提高企业生产效率。

综上所述,各种微波相关的干燥设备越来越丰富多样,表1总结了各种微波干燥设备的特点,在实际应用中,应当根据果蔬的特性(如热敏性、含水量、形状等)、企业生产规模和成本预算等因素,综合选择合适的微波干燥设备,以实现果蔬干燥的效率—品质协同优化。

表1 不同微波干燥设备的比较

Table 1 Comparison of different microwave drying equipment

设备名称	工作原理/技术	优点	缺点	适用场景	参考文献
单一微波干燥设备	微波热效应直接加热	设备简单、成本低,操作简便,干燥速度快	干燥均匀性差,易局部过热,对不规则果蔬干燥效果不佳	对均匀性要求不高的快速干燥	[45]
微波真空干燥设备	微波+真空协同作用	低温快速干燥,旋转托盘设计可以提高干燥均匀性	设备成本高,维护复杂(需真空系统)	热敏性果蔬	[20]
微波热泵干燥设备	热泵回收热量+微波加速干燥	节能;前期温和升温,后期微波强化	结构复杂,控制难度大,投资成本高	高效节能需求的生产环境	[51]
微波冷冻干燥设备	微波辅助升华干燥	保留果蔬品质(营养、色泽、复水性好)	设备成本高、能耗大,干燥周期长(相对其他微波干燥方法而言)	高品质要求果蔬	[49]
隧道式微波干燥设备	连续式传送带输送物料,通过隧道内微波与多物理场协同干燥	适合大规模生产,效率高,可与其他技术协同	占地面积大,调试维护难,干燥品质一般	标准化预处理生产线	[50]

3 总结与展望

微波干燥通过与其他技术联合,在果蔬加工领域展现出广阔的应用前景,而且在干燥设备方面,形成了多元化的设备体系,满足了不同果蔬品种在干燥效率、品质保留及成本控制上的差异化需求。但是在“品质—效率”协同优化中仍面临一些瓶颈,需要深入研究。

可预测的未来研究热点有:①深入研究果蔬特性与微波干燥的适配性,优化干燥参数;②进一步研究微波协同的多物理场干燥的效应,兼顾干燥速度与产品质量;③在微波干燥设备的优化升级方面,需致力于降低成本,提高微波的产生效率和能量利用率,降低设备能耗;④结合CFD模拟与机器学习,建立干燥参数—品质预测模型,减少试验依赖^[52]。

参考文献

[1] AN N N, SUN W H, LI B Z, et al. Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131412.
 [2] BASSEY E J, CHENG J H, SUN D W. Thermoultrasound and microwave-assisted freeze-thaw pretreatments for improving infrared drying and quality characteristics of red dragon fruit

slices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 91: 106225.
 [3] 杨震. 稻谷微波干燥热质传递规律及装置控制方法优化研究[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2023: 34.
 YANG Z. Study on heat and mass transfer law of microwave drying of rice and optimization of control method of the device [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023: 34.
 [4] 杨湘良, 尹航, 宁文章, 等. 干制米粉干燥工艺的研究进展[J]. 农业研究与应用, 2023, 36(1): 16-20.
 YANG X L, YIN H, NING W Z, et al. Research progress on drying technology of dried rice noodles[J]. Journal of Agricultural Research and Application, 2023, 36(1): 16-20.
 [5] ANDO Y, NEI D. Comparison of potato void structures dried by air-drying, freeze-drying, and microwave-vacuum-drying, and the physical properties of powders after grinding[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16: 447-458.
 [6] 庞凌云, 詹丽娟, 李家寅, 等. 干燥方式对铁棍山药片挥发性风味成分的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 301-314.
 PANG L Y, ZHAN L J, LI J Y, et al. Effects of drying methods on the volatile components of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. tiegun slices[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 301-314.
 [7] 吴浩. 地源热泵应用于干燥的适用性探究[D]. 天津:天津商业大学, 2021: 3.
 WU H. Applicability of ground source heat pump in drying[D].

- Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021: 3.
- [8] 孙辉, 张渤, 周江鸿, 等. 佛手叶粉微波干燥动力学模型的建立及品质特性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 278-287.
SUN H, ZHANG B, ZHOU J H, et al. Establishment of microwave drying dynamic model for foshou leaves powder and analysis of quality characteristics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 278-287.
- [9] RAJ G B, DASH K K. Effect of intermittent microwave convective drying on physicochemical properties of dragon fruit [J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(5): 549-560.
- [10] 郑先哲, 付科森, 张雨涵, 等. 脉冲式连续微波干燥树莓果浆的控制系统和品质优化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 259-271.
ZHENG X Z, FU K S, ZHANG Y H, et al. Control system and quality optimization of pulsed continuous microwave drying of raspberry pulp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 259-271.
- [11] HE C H, ZHONG G X, WU H, et al. A smart reheating and defrosting microwave oven based on infrared temperature sensor and humidity sensor[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102976.
- [12] VIJI P, RAO B M, DEBBARMA J, et al. Research developments in the applications of microwave energy in fish processing: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 222-232.
- [13] ZHANG Q S, WANG B, ZHANG H, et al. Effects of microwave-hot air combined drying on the moisture content, physical properties, flavor, and volatile components of prunes [J]. Drying Technology, 2025, 43(6): 993-1 005.
- [14] 刘贵阁, 钟耀广, 乔勇进, 等. 干燥方式对黄桃果脯品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 165-170.
LIU G G, ZHONG Y G, QIAN Y J, et al. Effects of drying methods on the quality of preserved yellow peach[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 165-170.
- [15] ZHAO S Y, AN N N, ZHANG K Y, et al. Evaluation of drying kinetics, physical properties, bioactive compounds, antioxidant activity and microstructure of *Acanthopanax sessiliflorus* fruits dried by microwave-assisted hot air drying method[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 357: 111642.
- [16] 郭朔, 李玥, 隋茜茜, 等. 桑葚热风-微波联合干燥动力学模型建立及风味分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 38-48.
GUO S, LI Y, SUI Q Q, et al. Establishment of kinetic mathematical model and flavor analysis of mulberry by hot air-microwave puffing drying[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 38-48.
- [17] 钟杨, 张歌兴, 张方芹, 等. 热风及微波组合热风干燥对小麦胚芽品质的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(1): 21-27.
ZHONG Y, ZHANG G X, ZHANG F Q, et al. Effect of combination of hot air drying and microwave drying on quality of wheat germ[J]. China Condiment, 2025, 50(1): 21-27.
- [18] 凌铮铮, 任广跃, 段续, 等. 间歇微波-热风耦合干燥花生工艺优化及品质研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 183-189, 227.
LING Z Z, REN G Y, DUAN X, et al. Research on process optimization and quality of intermittent microwave-hot air coupling drying peanut[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 183-189, 227.
- [19] DE SOUZA A U, GOMES CORREA J L, TANIKAWA D H, et al. Hybrid microwave-hot air drying of the osmotically treated carrots[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113046.
- [20] ZANG Z P, HUANG X P, HE C C, et al. Improving drying characteristics and physicochemical quality of angelica sinensis by novel tray rotation microwave vacuum drying[J]. Foods, 2023, 12(6): 1 202.
- [21] BHAT I M, WANI S M, MIR S A, et al. Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2023, 5(1): 26.
- [22] BORQUEZ R, MELO D, SAAVEDRA C. Microwave-vacuum drying of strawberries with automatic temperature control[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 266-276.
- [23] RASOOLI SHARABIANI V, KAVEH M, ABDI R, et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 9 155.
- [24] BOZKIR H. Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(10): 13485.
- [25] ZHOU Y H, STANISZEWSKA I, LIU Z L, et al. Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111464.
- [26] LIU Z L, STANISZEWSKA I, ZIELINSKA D, et al. Combined hot air and microwave-vacuum drying of cranberries: effects of pretreatments and pulsed vacuum osmotic dehydration on drying kinetics and physicochemical properties[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(10): 1 848-1 856.
- [27] STANISZEWSKA I, LIU Z L, ZHOU Y H, et al. Microwave-assisted hot air convective drying of whole cranberries subjected to various initial treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 109906.
- [28] KURATA D, ORIKASA T, KOMURO M, et al. Quality evaluation of shiitake mushrooms dried by vacuum microwave treatment[J]. Food Science and Technology Research, 2020, 26 (3): 339-350.
- [29] KUMAR S, JADHAV S V, THORAT B N. Life cycle assessment of tomato drying in heat pump and microwave vacuum dryers[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 57: 1 700-1 705.
- [30] LI X, YI J P, HE J, et al. Comparative evaluation of quality

- characteristics of fermented napa cabbage subjected to hot air drying, vacuum freeze drying, and microwave freeze drying [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 192: 115740.
- [31] DURAK Z, PALAZOĞLU T K, MIRAN W, et al. Effect of microwave freeze-drying at different heating rates on the quality and nutrient content of strawberries[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024, 17(8): 2 393-2 406.
- [32] PINAR H, ÇETIN N, CIFTCI B, et al. Biochemical composition, drying kinetics and chromatic parameters of red pepper as affected by cultivars and drying methods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 102: 103976.
- [33] 于萍, 谭云飞, 贺强, 等. 不同工艺和鲜花产地桂花纯露香气成分比较 [J]. *现代食品科技*, 2025, 41(7): 309-324.
YU P, TAN Y F, HE Q, et al. Comparison of aroma components in *Osmanthus fragrans* hydrosol from different processes and flower origins[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, 41(7): 309-324.
- [34] FERNANDES P A R, BASTOS R, CALVÃO J, et al. Microwave hydrodiffusion and gravity as a sustainable alternative approach for an efficient apple pomace drying[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 333: 125207.
- [35] KGONOTHI D, MEHLOMAKULU N N, EMMAMBUX M N. Effects of combining microwave with infrared energy on the drying kinetics and technofunctional properties of orange-fleshed sweet potato[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024, 2 024: 6336446.
- [36] DEGHANNYA J, AGHAZADE-KHOIE E, KHAKBAZ HESHMATI M, et al. Influence of ultrasound intensification on the continuous and pulsed microwave during convective drying of apple[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2020, 20(Suppl 3): S1 751-S1 764.
- [37] XU Y Y, XIAO Y D, LAGNIKA C, 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.
- [38] FIGIEL A, MICHALSKA A. Overall quality of fruits and vegetables products affected by the drying processes with the assistance of vacuum-microwaves[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(1): 71.
- [39] MA Y H, TIAN X J, WANG Y Q, et al. Comparative study on drying characteristics and quality of apple cubes dried in two different microwave dryers[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2023, 73(4): 367-374.
- [40] 张志勇, 李元强, 刘成海, 等. 基于“热失控”规律的香菇微波干燥工艺优化[J]. *食品科学*, 2020, 41(10): 230-237.
ZHANG Z Y, LI Y Q, LIU C H, et al. Optimization of microwave drying of shiitake mushrooms considering thermal runaway[J]. *Food Science*, 2020, 41(10): 230-237.
- [41] 张沛琳, 李彬, 胡志刚, 等. 微波联合超声干燥对大米干燥品质影响研究[J]. *中国农机化学报*, 2025, 46(3): 146-152.
ZHANG P L, LI B, HU Z G, et al. Study on the effects of microwave combined ultrasonic drying on rice drying quality [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2025, 46 (3): 146-152.
- [42] HASSAN A, JOARDDER M U H, KARIM A. A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry Scale dryers[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 61: 103533.
- [43] WANG H, FANG B, CHEN Y, et al. Numerical simulation and optimization of microwave drying process of wheat bran[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2025, 151: 84-102.
- [44] JOO Y, CHANG S, KIM S I, et al. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems[J]. *Energy*, 2024, 291: 130390.
- [45] BI L S, LIU B, YANG Z D, et al. Analysis of heat and moisture transfer in the microwave drying of potatoes[J]. *Drying Technology*, 2023, 41(9): 1 397-1 410.
- [46] BIAN J P, KANG M L, XI Y, et al. A review of the measurement and control technologies for the critical parameters of microwave drying processes: temperature and humidity[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, 18: 3 124-3 147.
- [47] 胡张鹏. 基于空气源热泵微波联合干燥的消防水带干燥装置性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024: 22.
HU Z P. Research on performance of fire hose drying device based on air source heat pump microwave combined drying [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024: 22.
- [48] WANG W, LIN R Z, ZHANG S, et al. Effects of foaming treatment and wave-absorbing material-assisted microwave heating on freeze-drying of blueberry puree[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(3): 652-666.
- [49] YANG R, CHEN J J. Heating performance of dual-source microwave heating using different frequency shifting strategies in a solid-state system[J]. *Food Research International*, 2024, 175: 113781.
- [50] ZENG S Y, ZHOU C S, WANG B, et al. Tunnel-type continuous multi-physical field drying equipment: design, numerical simulation and application[J]. *Drying Technology*, 2024, 42(10): 1 606-1 622.
- [51] 朱文学, 赵雅婷, 吴建章, 等. 根茎类中药材干燥技术与装备研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(1): 153-171.
ZHU W X, ZHAO Y T, WU J Z, et al. Research progress on drying technology and equipment of rhizome traditional Chinese medicines[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(1): 153-171.
- [52] 李孟卿, 耿智化, 朱丽春, 等. 计算流体力学在果蔬干燥领域的研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(6): 294-305.
LI M P, GENG Z H, ZHU L C, et al. Research progress in computational fluid dynamics in fruit and vegetable drying[J]. *Food Science*, 2024, 45(6): 294-305.