

真空冷冻联合干燥技术在食品工业中的研究进展

陈瑞瑞, 谢婵媛, 柴 燃, 张紫阳, 田振扬, 常世敏*

(河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056002)

摘要:综述了热风、喷雾、微波、红外等不同干燥技术联合真空冷冻干燥的工艺参数及对产品品质的影响, 阐述了真空冷冻干燥联合其他不同干燥技术的干燥原理与特点, 分析了不同联合干燥技术在缩短干燥时间、节约成本、改善食品品质方面的协同作用, 以期真空冷冻联合干燥技术在食品工业中的研究与应用提供参考。

关键词:真空冷冻干燥; 联合干燥; 喷雾; 微波; 食品工业

Research Progress of Vacuum Freezing Combined Drying Technologies in Food Industry

CHEN Rui-rui, XIE Chan-yuan, CHAI Ran, ZHANG Zi-yang, TIAN Zhen-yang, CHANG Shi-min*
(College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056002, China)

Abstract: In this paper, the effects of process parameters of different drying technologies such as hot air, spray, microwave and infrared combined with vacuum freeze-drying on products qualities were summarized, the drying principles and characteristics of vacuum freeze-drying combined with other drying techniques were elaborated, and the synergistic effects of different combined drying technologies on shortening drying time, saving cost and improving foods qualities were analyzed, in order to provide references for the researches and applications of vacuum freeze-drying combined technologies in food industry.

Key words: vacuum freeze-drying; combined drying; spray; microwave; food industry

中图分类号: TS205.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2023.03.010

干燥是食品加工和储藏的主要技术手段, 目前常用的干燥方法主要有热风干燥、辐射干燥、喷雾干燥、真空干燥等。真空干燥技术又包括真空冷冻干燥、真空微波干燥^[1]、红外真空干燥^[2]和组合干燥等。其中, 真空冷冻干燥生产的产品品质好、复水率高、能更好地保留食物的营养成分和风味^[3], 因而在食品行业中应用较广, 多用于新型食品研发、功能性食品干燥、高

档产品加工。然而单独使用真空冷冻干燥技术存在时间长、能耗高的缺点, 通过真空冷冻干燥联合其他干燥技术能够很好地解决此类问题。真空冷冻联合干燥技术相比于单一真空冷冻干燥, 节约了能耗, 降低了生产成本, 丰富了食品加工应用领域, 并进一步提升了产品品质, 逐渐成为现代食品工业研究的热点。

真空冷冻联合干燥技术主要有喷雾-真空冷冻

基金项目: 河北省重点研发计划项目(18227139D)

作者简介: 陈瑞瑞(1992—), 女, 汉族, 硕士在读, 研究方向: 食品营养品质评价与功效。

*通信作者: 常世敏, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养品质评价与功效。

干燥(Spray-freeze drying, SFD)技术、超声波喷雾-真空冷冻干燥(Ultrasonic spray-freeze drying, USFD)技术、红外-真空冷冻干燥技术、真空冷冻-变温压差膨化联合干燥技术^[4]等。本文阐述了不同真空冷冻联合干燥技术的原理和特性,分析了其对水果、蔬菜、汤料、果粉等原料进行加工时,不同工序和工艺参数对产品品质、节约能耗等方面的影响,以期真空冷冻联合干燥技术在食品工业中的应用提供理论参考。

1 热风-真空冷冻联合干燥技术

1.1 热风干燥原理及特点

热风干燥以热空气为干燥介质与食品进行湿热交换,物料外周的水分通过表面的气膜向气流主体扩散,物料内部和表面之间产生水分梯度差,物料内部的水分因此以气态或液态的形式向表面扩散^[5],故干燥时间较长,复水率较低^[6]。

1.2 真空冷冻干燥原理及特点

真空冷冻干燥(Freeze drying, FD)是将物料置于干燥箱内,使含水物料冷冻成固态,通过减小干燥仓中的压强使物料所含水分沸点降低,由冰晶直接升华成气体,干燥物料^[7]。真空冷冻干燥不能灵活控制物料的温度和水分,需通过热传导的方式由隔热板控制物料温度^[8],升华阶段去除了物料中的大部分自由水,解吸阶段耗时长,但只是去掉了少部分结合水^[9]。

1.3 热风-真空冷冻联合干燥原理及特点

热风干燥需长时间高温运行,在此运行模式下会损失挥发性成分,钝化酶的活性并破坏活性成分。热风-真空冷冻联合干燥(Hot air-vacuum freeze drying,

HA-VFD)结合了热风干燥和真空冷冻干燥两种干燥方式的优点,可显著缩短干燥时间,节约能耗,提高干燥效率和食品品质。热风-真空冷冻联合干燥分为两种形式:一种为先热风干燥,然后进行真空冷冻干燥;另一种为先进行真空冷冻干燥,然后进行热风干燥。

1.4 热风-真空冷冻联合干燥应用研究

热风-真空冷冻联合干燥主要应用于果蔬干燥加工。邓媛元等^[10]分别采用热风干燥、真空冷冻干燥和热风-真空冷冻联合干燥制备龙眼果干,发现热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干复水比、水分活度、皱缩率介于热风干燥、真空冷冻干燥之间,但与真空冷冻干燥相比,热风-真空冷冻联合干燥技术可节约时间 12.16%,减少 25.40%单位能耗。徐英英等^[11]将热风-真空冷冻联合干燥工艺应用于土豆片的脱水加工过程,该方法既克服了热风干燥品质差,冷冻干燥时间长、成本高的缺点,又发挥了热风干燥效率高,真空冷冻干燥品质好的优点,较大地提升了土豆片干燥加工的效率和品质。将热风-真空冷冻联合干燥调换工序流程,先进行真空冷冻干燥,再进行热风干燥可获得色、香、形、味具佳的产品。罗小梅等^[12]采用冷冻真空-热风联合干燥技术处理金花茶花朵,以微波干燥、冷冻真空干燥作为对照,发现冷冻真空-热风联合干燥技术较好地解决了金花茶花朵在微波干燥过程中的外形皱缩、色泽褐变的问题,有效弥补了真空冷冻干燥产品干燥时间长、能耗高、不耐储藏的缺点。应用热风-真空冷冻干燥技术的参数及特点见表 1。

表 1 热风-真空冷冻干燥技术的参数及特点

Table 1 Parameters and characteristics of hot air-vacuum freeze-drying technology

原料	技术参数	特点	参考文献
龙眼果	热风干燥 100 °C, 3 h; 真空冷冻干燥 -20 °C 预冻 12 h; 真空度 3~4 Pa, 低温 -80 °C, 50 h	节约干燥时间 12.16%, 节约单位能耗 25.40%	[10]
土豆片	热风干燥 63 °C, 转换含水率 36%, 真空度 40 Pa, 真空冷冻干燥 12.2 h	提升了土豆片干燥加工的效率和品质, 复水比为 4.7	[11]
金花茶花	-20 °C 预冻结冰, 真空度 0.09~0.095 MPa, 35 °C 烘 2 h, 40 °C 烘 2~3 h, 45 °C 烘 4~5 h, 转换含水率 18%, 热风干燥 90~100 °C, 含水率 7% 结束	产品色泽金黄, 花形完整, 总耗时 21 h, 比单独真空冷冻干燥缩短 5 h	[12]
杏鲍菇	热风干燥 55 °C, 54 min; 真空冷冻干燥 11 h	联合干燥耗能比热风干燥减少 63.3%, 比真空冷冻干燥减少 6.3%	[13]

2 喷雾-真空冷冻联合干燥技术

2.1 喷雾干燥原理及特点

喷雾干燥(Spray drying, SD)是指用雾化器将料液分散成雾状液滴,同时在热风中干燥,最终获得粉

状或颗粒状成品的过程^[14],其主要特点是干燥速度快、产量大、成本低,但存在对活性物质破坏大,容易糊化等缺点,为解决此类问题,可在进行喷雾干燥时对原料进行包埋,或降低料液黏性,从而保留料液中的活性成分^[15]。

2.2 喷雾-真空冷冻干燥原理及特点

喷雾-真空冷冻干燥是一种非常规的冷冻干燥技术,一般包括两步:第一步是将悬浮液雾化、冻结,第二步是真空冷冻干燥^[16]。

SFD 技术可避免单一真空冷冻干燥成粉易结块、需轻微碾压过筛的缺点,可将物料直接干燥成粉状颗粒,比表面积大,结晶度低。微观外貌呈球形,SFD 在常压下可得到粒径 10~30 μm 的颗粒^[17],在室温条件下可将乳液固化并保护芯材不被氧化^[18],同时具有生产过程快、连续^[19]、产量高、成本低的特点。在制备粉末的过程中 SFD 可控制产品规格,如平均粒径、粒度分布、湿含量等,设备操控具有灵活性^[20],制出的粉状颗粒粒径分布均匀,分子结构有序,呈多孔性,溶解度大,可更好地应用于保健食品、特需食品的生产。SFD 还可有效保留生物活性成分,适用于制备温度敏感的速溶性特效药^[21]。

2.3 喷雾-真空冷冻干燥应用研究

喷雾干燥、真空冷冻干燥、喷雾-真空冷冻干燥 3 种干燥工艺制备的粉体颗粒微观形态具有一定的差异,进而影响产品品质。苏小军等^[22]应用喷雾冷冻干燥、真空冷冻干燥、喷雾-真空冷冻干燥 3 种技术处理紫淮山,发现真空冷冻干燥制备的紫淮山颗粒表面有褶皱,微粒间有相互作用;喷雾干燥制备的颗粒大小不一,表面较光滑,溶解性差;喷雾-真空冷冻干燥得到的全粉堆积密度小、蓬松度高、冲调性好。SFD 应用于粉末颗粒制备,所制成的产品具有很好的冲调性,

较好地保护了产品中的活性成分。刘丽莉等^[23]对比了喷雾冷冻干燥蛋清粉与喷雾干燥蛋清粉,结果表明:喷雾冷冻干燥制得的蛋清粉为大孔隙颗粒网络结构,溶解度增大,分子结构有序,蛋白质聚集程度小,更好地保留了蛋白质活性;而喷雾干燥制得的蛋清粉蛋白变性和聚集程度较大,凝胶硬度大,保水性好,二者起泡性无明显差别。Laglar 等^[24]比较了真空冷冻干燥与喷雾干燥两种干燥方式生产的酵母粉,结果表明:喷雾干燥制得的酵母粉微观结构为多面体,边缘呈刺状、弧形、拉长和脊状形状,而真空冷冻干燥酵母粉微观结构更接近球形。喷雾干燥与真空冷冻干燥都可使酵母粉货架期更长。车馨子等^[25]采用喷雾冷冻干燥技术制备鱼油微胶囊,运用加权综合评分法确定喷雾冷冻干燥的最佳工艺参数为:真空压力 35 Pa,冷风风量 5.5 m^3/min ,制得的鱼油微胶囊产品品质最佳,且鱼油包埋前后经喷雾冷冻干燥后脂肪酸成分变化不大,鱼油微胶囊饱和脂肪酸相对含量减少,不饱和脂肪酸相对含量增加。Tanaka 等^[26]利用喷雾-真空冷冻干燥分别制备了茶碱粉末和茶碱-草酸共晶体粉末,发现茶碱-草酸共晶体在 40 $^{\circ}\text{C}$ 室温,96.4% 盐水浸湿 1 500 min 后,高湿度条件下吸湿性减少,微观形态保持完好。SFD 结合共晶工艺生产出的低密度多孔晶体具有较大的比表面积和较低的吸湿性,更加适用于吸入式粉雾剂型的药物制备。综上所述,相比于 FD,SFD 提升了产品品质,制得的产品结构完整,活性成分含量高。喷雾-真空冷冻干燥技术参数及特点如表 2 所示。

表 2 喷雾-真空冷冻干燥技术的参数及特点

Table 2 Parameters and characteristics of spray-vacuum freeze-drying technology

产品	技术参数	特点	参考文献
奶粉	-40 $^{\circ}\text{C}$ 加热到 40 $^{\circ}\text{C}$, 614 min	单一真空冷冻干燥 48 h, 采用喷雾-真空冷冻干燥缩短为 10 h	[19]
紫淮山全粉	进料流量 25 mL/min , 固液比 1:1, 冻结温度 -30 $^{\circ}\text{C}$	紫淮山药全粉品质好, 含水率 3.89%, 溶解度 23.12%, 花色苷含量 13.28 $\text{mg}/100 \text{g}$	[22]
鱼油微胶囊	真空压力 35 Pa, 冷风风量 5.5 m^3/min	鱼油微胶囊产品质量较优, 粒径分布较为集中, 集中分布于 117.13~200.06 μm	[25]

3 超声波喷雾-真空冷冻联合干燥技术

3.1 超声波喷雾技术原理

超声波喷雾技术是利用超声波的振峰将液滴分离并破碎,使液体在气相中形成微细雾滴的过程^[27]。食品加工中常使用 16~100 kHz 的超声波改变食品的物理、化学性质^[28]。超声波喷嘴因使用低频超声波进行雾化,喷雾冲击力很小,可避免物料飞溅及浪费^[29]。

3.2 超声波喷雾-真空冷冻干燥技术原理及特点

超声波喷雾-真空冷冻干燥是喷雾-真空冷冻干燥应用超声波雾化形式的一种技术。在干燥腔低温和真空环境下通过超声波雾化器将液体样品雾化,瞬时冻结^[30]。超声波喷雾-真空冷冻干燥与喷雾干燥相比,减少了干燥过程中热和氧的胁迫作用^[31],同时超声波喷雾技术有利于黏稠物料的干燥^[32]。但因超声波过程产热,热量过多会使冻结物料塌陷,破坏冷冻干燥

过程中物料的内部结构,因而需要严格控制超声作用的时间^[33]。

3.3 超声波喷雾-真空冷冻干燥应用研究

超声波喷雾-真空冷冻干燥一般应用于高黏度、高油脂含量粉体颗粒的制备。表3列举了两种采用超声波喷雾-真空冷冻干燥技术制备高汤粉体的参数。郑旭等^[34]研究发现,超声波喷雾-真空冷冻干燥技术制备高汤微胶囊粉体调味料时,利用超声喷雾可增加物料表面积,缩短生产周期,增加经济效益,制得的高

汤粉体品质高。与真空冷冻干燥相比,超声波喷雾-真空冷冻干燥的可控参数增多,制出的粉体颗粒大小可调,稳定性和溶解性好。刘雨曦等^[35]研究发现,与喷雾干燥、真空冷冻干燥相比,超声波喷雾-真空冷冻干燥技术加工出的佛跳墙汤料粉尺寸可控、粉体均匀、多孔、呈球状,复水时溶解性好,利用超声波喷雾-真空冷冻干燥处理的粉末样品不仅可检测出39种挥发性风味物质,而且能较好地保留汤的原有风味。

表3 超声波喷雾-真空冷冻干燥技术的参数及特点

Table 3 Parameters and characteristics of ultrasonic spray-vacuum freeze-drying technology

产品	技术参数	特点	参考文献
高汤微胶囊粉体	超声波功率3 W,体积流量3 mL/min,物料固形物浓度5%,退火时间5 h,退火温度-40 ℃	相比常规干燥工艺,以低成本、低周期获得了较高品质、复水后风味保留较好的高汤微胶囊粉体	[34]
佛跳墙高汤粉体	超声功率3 W,进料流量3 mL/min,喷雾后,将小液滴转移至-40 ℃的冰箱中,退火5 h。干燥压力1 kPa。升温程序:隔板温度-25 ℃,30 h;-15 ℃,1 h;-5 ℃,1 h;5 ℃,1 h;20 ℃,10 h	检测出39种挥发性风味物质,制成的粉体能更好地保留高汤总体风味	[35]

4 微波-真空冷冻联合干燥技术

4.1 微波干燥原理及特点

微波干燥是利用高频电磁波为加热源,食品通过吸收微波使内部直接升温进行干燥^[36]。微波干燥具有速度快、可随时调节微波功率、热效率高、节约能源的特点^[37],但单独使用微波干燥使物料表面干燥不均匀,产品颜色和形状发生较大变化,水分含量难以控制^[38]。

4.2 微波-真空冷冻干燥原理和特点

微波-真空冷冻干燥(Microwave vacuum freeze-drying, MVFD)是一种低温快速干燥的方法,可使两种干燥方式优势互补。微波-真空冷冻干燥先对原料进行真空冷冻干燥去除大部分水分,形成了半干产品的“骨架”,再采用真空微波方式去除剩余水分,利用微波的穿透性,快速高效地穿透至物料内部^[39],辐射能转化为热能,使物料内、外同时加热^[40],加速水分的扩散和蒸发。微波-真空冷冻干燥使真空微波干燥阶段替代冗长的冻干解吸干燥阶段,从而缩短干燥时间,最大限度地保留食品的原始颜色和营养成分^[41]。

热风-真空冷冻干燥和微波-真空冷冻干燥多用于果干的加工制备,两者的区别在于微波-真空冷冻干燥在干燥的同时可对原料进行物理杀菌、营养损失小,能够较好地保留产品营养和原有色泽。对菌类进行加工时,微波-真空冷冻干燥与热风-真空冷冻干燥总时长相近。

4.3 微波-真空冷冻干燥技术应用研究

微波-真空冷冻干燥技术在对物料进行干燥的同时可物理杀菌,该技术现多用来加工大型子实体真菌、水果、蔬菜等。表4列举了多种原料使用微波-真空冷冻干燥技术的参数及特点。孙静儒^[42]利用微波-真空冷冻干燥联合技术制作芦笋干可降低能耗,脱水时间缩短40%,脱水率可达95.4%,杀菌率可达86.9%。廉苗苗等^[43]发现猕猴桃具有疏松的内部结构和较高的初始含水量,先利用真空冷冻干燥去除自由水,形成“骨架”,再进行真空微波干燥,可在原有空间结构稳定的情况下进行水分迁移,水分被快速汽化,使得新鲜的猕猴桃片快速干燥。朱彩平等^[44]采用微波-真空冷冻干燥技术处理平菇,当微波功率300 W、转换点含水率37%、真空冷冻干燥时间11 h时,得到的平菇制品品质最好,营养价值最高。研究表明,微波-真空冷冻干燥技术不仅可以缩短干燥时间、进行杀菌、提高产品品质,而且还可以较大程度地保留产品的风味物质。韩玮等^[45]对比了真空冷冻干燥和真空冷冻-微波联合干燥的李果干香气成分种类及数量,结果表明,前者处理的李果干鉴定出51种物质,后者制备的李果干香气成分种类总数为52种,说明联合干燥对李果干的风味影响较小。

5 红外-真空冷冻联合干燥技术

5.1 红外干燥原理及特点

红外干燥是辐射能直接将热量传递给被干燥的

表4 微波-真空冷冻干燥技术的参数及特点
Table 4 Parameters and characteristics of microwave-vacuum freeze-drying technology

原料	技术参数	特点	参考文献
平菇	微波功率 280 W, 时间 4 min, 真空冷冻干燥冷阱温度-60 ℃, 真空度 110 Pa, 时间 10 h	硬度适中, 色泽亮丽, 复水性好, 单位能耗较低, 感官评价高	[42]
猕猴桃	真空冷冻干燥加热板 40 ℃, 压强 50 Pa, 冷阱温度-50 ℃, 时间 8 h, 微波真空干燥真空度 3 kPa, 冷阱温度-35 ℃, 微波功率 0.39 W/g, 干燥至含水率为 10%	色差小, 复水好, 孔隙率大	[43]
平菇	微波功率 300 W, 加热 2 min, 间歇 2 min, 转换点含水率 37%, 预冻-20 ℃, 时间 3 h, 真空冷冻干燥-60 ℃, 真空度 8.2 Pa, 干燥 11 h	感官品质好, 色泽良好, 品质极佳, 营养成分保留较高	[44]
李果	功率 800 W, 温度 50 ℃, 干燥时间 2 h	时间短, 能耗低, 果干酸甜可口且较有韧性	[45]
胡萝卜	厚度 7 mm 的胡萝卜片, 在 240 W 微波功率下干燥至含水率 60%, 放入-40 ℃的冰箱中预冻 24 h, 最后冷冻干燥 24 h	冻干后的胡萝卜片与新鲜胡萝卜片颜色差异最小, 保留了产品的天然色素	[46]
芦笋	切 2~3 cm 小段, 微波干燥 2 min, 冷冻干燥 12 h	微波处理后脱水时间缩短 40%, 脱水率可达 95.4%	[47]
青椒	微波功率 381.17 W, 中间转换点含水率 61.81%, 真空冷冻干燥时间 12.04 h	产品组织微观结构破坏最小, 营养成分损失较小	[48]
鸡蛋清蛋白	微波功率 500 W, 进料 15 mL/min, 真空度 140 Pa, 冷阱温度-40 ℃, 加热温度 60 ℃	鸡蛋清蛋白粉分子结构更有序, 蛋白聚集程度小, 从而使其乳化特性得到改善	[49]

物体, 不需要介质^[50]。红外线产生的电磁波以光的速度传给物料, 引起物料中分子强烈振动, 在物料内部发生摩擦产生热而达到干燥的目的。

5.2 红外-真空冷冻干燥原理和特点

红外与真空冷冻结合可改善传热方式, 加速水分升华^[51]。红外-真空冷冻干燥有两种方法: 第 1 种方法是冷冻-红外分段组合干燥(Sequential freeze-infrared drying, FD-IRD), 该法利用真空冷冻干燥去除物料中的大部分自由水, 再由红外干燥去除结合水和剩下的自由水^[52]; 第 2 种方法是红外-真空冷冻(Infrared radiation freeze-drying, IRFD), 是将红外灯安装到冷冻干燥机中, 进行真空冷冻干燥^[53]。与热风-真空冷冻干燥相比, 红外-真空冷冻干燥具有更高的干燥速率,

且随着辐射强度的增加干燥效率显著增加^[54]。由于红外干燥加热温度稳定, 物料受热均匀, 红外-真空冷冻干燥的水果脆片比单一真空冷冻干燥的水果脆片质地更脆, 成为了近几年果蔬加工的热点。

5.3 红外-真空冷冻干燥应用研究

表 5 列举了红外-真空冷冻干燥技术的参数及特点。吴晓菲^[55]研究发现: 将红外灯安装到冷冻干燥机中, 红外辐射对蔬菜的穿透性较弱, 对蔬菜颜色影响较大, 在干燥后期红外灯管具有较强的辐射力, 容易引起上海青叶柄中的叶绿素降解, 使其颜色发黄, 造成色差的明显增加。Khampakool 等^[56]应用 IRFD 技术与 FD 技术制备酥脆香蕉休闲食品, 发现单一使用 FD 干燥时长为 696 min, 使用 IRFD 可缩短 213 min, 节省干燥时间 70%。

表5 红外-真空冷冻干燥技术的参数及特点
Table 5 Parameters and characteristics of infrared radiation-vacuum freeze-drying technology

原料	技术参数	特点	参考文献
青叶柄、菜用红薯、菜用蛹虫草	红外灯管温度 60 ℃, 与物料距离 70 mm, 功率 100~450 W, 真空度 80 Pa, 冷阱温度-40 ℃	节省时间 6%~25%	[55]
香蕉	功率 250 W, 与物料距离 150 mm, 真空度 267 Pa, 冷阱温度-100 ℃	节省时间约 70%	[56]

6 展望

联合干燥相比于单一真空冷冻干燥减少了废料排出和微生物污染, 节约能源, 并以较低成本生产出更高质量的产品, 提高了生产效率, 增加了经济效益,

越来越受到生产商的关注和消费者的青睐。目前工业上主要应用的联合干燥技术有热风-真空冷冻干燥、微波-真空冷冻干燥技术。红外-真空冷冻干燥技术因其生产果蔬脆性高、护色好, 符合人们对天然、健康零食的追求可能成为以后的主导。

未来对真空冷冻联合干燥技术的深入研究可从如下几点着手:第一,持续改进现有真空冷冻联合干燥技术生产工艺或者开发新的联合冷冻干燥技术,满足多样化市场需求,如浓缩-真空冷冻干燥、真空冷冻-变温压差膨化干燥、太阳能-真空冷冻干燥等,运用各种联合干燥技术制备出对消费者更有吸引力和价值的产品。第二,持续深入研究干燥机制,如预冻阶段的冻结温度会影响物料内部小冰晶的形成,对产品内部结构和升华阶段速率都有影响。将预冻阶段由原来的一个温度值划分为多个温度值,在预冻阶段进行温度调控可减少真空冷冻干燥总时长,制作出更优质产品。第三,改进检验技术,找出快速准确检查物料转换点含水率的方法,对两种干燥方式的转换点进行准确把握,减少干燥方式转换过程中物料的变质。第四,针对高糖、高脂、高膳食纤维等不同类型的食品开展系统的联合冷冻干燥技术研究,解决实际生产中的问题。第五,冷冻干燥机研发可分为“走大、做小”两部分,“走大”即实验室和小试阶段往工业化生产演化;“做小”即制造出成本低廉、体积小、节能环保的小型节能家用真空冷冻干燥设备,在家即可对水果蔬菜及时“锁鲜”,随意取用。

参考文献:

- [1] LIU Y, SABADASH S, DUAN Z H. Research of physicochemical properties and antioxidant activity of beetroots as affected by vacuum microwave drying conditions[J]. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, 5(3):40-45. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.243069.
- [2] JIH È NE L, AMIRA T, ZAGROUBA F. Effect of infrared drying on the stability of physicochemical properties, phenolics, flavonoids and on antioxidant activity of *Allium sativum* [J]. *Chemical Science International Journal*, 2016, 10(2):1-12. DOI: 10.9734/ACSJ/2016/19342.
- [3] 马有川,毕金峰,易建勇,等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18):241-250. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.029.
- [4] 杨慧,吴洪斌,贾文婷,等. 基于品质分析的哈密瓜真空冷冻-变温压差膨化联合干燥工艺研究[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(5):56-62. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2022.05.009.
- [5] 唐泽群. 生姜干燥过程对姜辣素含量影响及姜蛋白酶提取工艺研究[D]. 贵州:贵州大学, 2021. DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2021.002332.
- [6] 张莉会,刘杜娟,廖李,等. 真空冷冻-热风联合干燥对草莓品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(4):188-197. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.029.
- [7] ABDALLAH W, KAMAL M R. Influence of process variables on physical characteristics of spray freeze dried cellulose nanocrystals[J]. *Cellulose*, 2018, 25(10): 5711-5730. DOI: 10.1007/s10570-018-1975-0.
- [8] DA SILVA E S, BRAND ã O S C R, DA SILVA A L, et al. Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 246:119-124. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.11.013.
- [9] 孙江丽,李瑞,朱洪梅. 基于低场核磁的紫薯片真空冷冻干燥过程中水分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(7):9-14. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020050207.
- [10] 邓媛元,杨婧,魏振承,等. 热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质及益生活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(10):2078-2090. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.10.014.
- [11] 徐英英,赵哲,袁月定,等. 土豆切片热风冷冻联合干燥工艺研究[J]. *陕西科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(3):132-137, 160. DOI:10.3969/j.issn.1000-5811.2016.03.026.
- [12] 罗小梅,林国轩,覃榆龙,等. 冷冻真空-热风联合干燥技术对金花茶花朵品质的影响[J]. *中国热带农业*, 2021(3):67-72. DOI:10.3969/j.issn.1673-0658.2021.03.014.
- [13] 孙翠,王钰,沈小瑞,等. 鲍香菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. *食品与机械*, 2017, 33(2):189-193. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.02.040.
- [14] 许青莲,王丽,吴林,等. 湿法研磨结合喷雾干燥制备苦荞麸皮超微粉工艺优化[J/OL]. *中国粮油学报*:1-13[2022-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20211228.1137.008.html>.
- [15] DING Z, WANG T T X, PRAKASH S, et al. Influences of different carbohydrates as wall material on powder characteristics, encapsulation efficiency, stability and degradation kinetics of microencapsulated lutein by spray drying [J/OL]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(7)[2022-06-24]. <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ijfs.14544>. DOI: 10.1111/ijfs.14544.
- [16] SCHÖSSLER K, JÄGER H, KNORR D. Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 16:113-120. DOI: 10.1016/j.ifset.2012.05.010.
- [17] LEUENBERGER H. Spray freeze-drying — the process of choice for low water soluble drugs?[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2002, 4(1): 111-119. DOI: 10.1023/A:1020135603052.
- [18] MUTUKURI T T, WILSON N E, TAYLOR L S, et al. Effects of drying method and excipient on the structure and physical stability of protein solids: Freeze drying vs. spray freeze drying[J/OL]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, 594[2022-06-24]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378517320311546?via%3Dihub>. DOI:10.1016/J.IJPHARM.2020.120169.

- [19] 黄立新,周瑞君, MUJUMDAR A S. 奶粉的喷雾冷冻干燥研究[J]. 化工机械,2009,36(3):219-222. DOI:10.3969/j.issn.0254-6094.2009.03.010.
- [20] WANNING S, SÜVERKRÜP R, LAMPRECHT A. Pharmaceutical spray freeze drying[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2015, 488(1-2): 136-153. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2015.04.053.
- [21] EMAMI F, VATANARA A, VAKHSHITEH F, et al. Amino acid-based stable adalimumab formulation in spray freeze-dried microparticles for pulmonary delivery[J/OL]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2019, 54[2022-06-24]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1773224719310081>. DOI: 10.1016/j.jddst.2019.101249
- [22] 苏小军,罗振海,李雁含,等. 紫淮山全粉喷雾冷冻干燥工艺及其特性研究[J]. 激光生物学报,2018,27(4):373-380,372. DOI:10.3969/j.issn.1007-7146.2018.04.014.
- [23] 刘丽莉,代晓凝,杨晓盼,等. 喷雾冷冻干燥对鸡蛋清蛋白结构和特性的影响[J]. 食品与机械,2020,36(1):30-35,41. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.01.004.
- [24] CAGLAR N, ERMIS E, DORAK M Z. Spray-dried and freeze-dried sourdough powders: Properties and evaluation of their use in breadmaking[J/OL]. Journal of Food Engineering,2021, 292[2022-06-24]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877420304416?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110355.
- [25] 车馨子,段续,王月月,等. 喷雾冷冻干燥制备鱼油微胶囊[J]. 食品与机械,2019,35(7):193-198,209. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.07.037.
- [26] TANAKA R, HATTORI Y, OTSUKA M, et al. Application of spray freeze drying to theophylline-oxalic acid cocrystal engineering for inhaled dry powder technology[J]. Drug Development and Industrial Pharmacy, 2020, 46(2):179-187. DOI: 10.1080/03639045.2020.1716367.
- [27] CAGLAR N, ERMIS E, DURAK M Z. Spray-dried and freeze-dried sourdough powders: Properties and evaluation of their use in breadmaking[J/OL]. Journal of Food Engineering, 2021, 292[2022-06-24]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877420304416>. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110355
- [28] CHEMAT F, HUMA Z E, KHAN M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 813-835. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023.
- [29] ZAINOL M K, LEW H W, ZIN Z M, et al. Ramification of gum arabic microencapsulation on the physicochemical and microbiological properties of butterfly pea (*Clitoria ternatea*) flowers using ultrasonic spray dryer[J]. Food Research, 2020, 4(3):764-771. DOI: 10.26656/fr.2017.4(3).369.
- [30] VISHALI D A, MONISHA J, SIVAKAMASUNDARI S K, et al. Spray freeze drying: Emerging applications in drug delivery[J]. Journal of Controlled Release, 2019, 300: 93-101. DOI: 10.1016/j.jconrel.2019.02.044.
- [31] 邹强,张琼,刘海波,等. 基于雾化方式的益生菌包埋研究进展[J]. 食品与发酵科技,2018,54(6):83-86. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2018.06-016.
- [32] 杨菊芳,周正,吴昊,等. 超声波强化真空冷冻干燥酸奶中水分蒸发的研究[J]. 食品科学技术学报,2014,32(1):53-58. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2014.01.010.
- [33] NOWACKA M, WIKTOR A, ANUSZEWSKA A, et al. The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 56: 1-13. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.03.023.
- [34] 郑旭,薛佳,张玉莹,等. 超声喷雾-冷冻干燥制备高汤微胶囊粉体工艺优化[J]. 大连工业大学学报,2020,39(6):406-411. DOI:10.19670/j.cnki.dlgydxxb.2020.0604.
- [35] 刘雨曦,薛佳,傅宝尚,等. 超声波喷雾-冷冻干燥与传统干燥技术制备高汤粉体的比较[J]. 食品科学,2020,41(11):128-134. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190705-070.
- [36] 陈春莲,徐小烽,彭秀分,等. 微波干燥对果蔬制品的影响[J]. 农产品加工,2019(19):34-37,40. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2019.10.009.
- [37] 夏亚男,侯丽娟,齐晓茹,等. 食品干燥技术与设备研究进展[J]. 食品研究与开发,2016,37(4):204-208. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.04.050.
- [38] XU Y Y, LANG X M, XIAO Y D, et al. Study on drying efficiency, uniformity, and physicochemical characteristics of carrot by tunnel microwave drying combined with explosion puffing drying[J]. Drying Technology, 2020, 40(2):1-14. DOI: 10.1080/07373937.2020.1803351.
- [39] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96:612-619. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.06.023.
- [40] LIU C, LIU C H, XUE H K, et al. Effect of microwave energy dissipation on drying process of berry puree under microwave foam drying conditions[J/OL]. Drying Technology, 2017, 35(11)[2022-06-24]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2017.1329741?journalCode=ldrt20>. DOI: 10.1080/07373937.2017.1329741.
- [41] DUAN L L, DUAN X, REN G Y. Evolution of pore structure during microwave freeze-drying of Chinese yam[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6):1388-1397. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181106.4250.
- [42] 孙静儒. 平菇微波-真空冷冻干燥工艺研究及其脆皮的研

- 制[D]. 西安:陕西师范大学,2019.
- [43] 廉苗苗,段续,黄略略,等. 猕猴桃片冻干—真空微波联合干燥过程中品质变化及收缩模型[J]. 食品与机械,2020,36(5):140–145,210. DOI:10.13652/j.issn.1003–5788.2020.05.026.
- [44] 朱彩平,孙静儒,孙红霞,等. 平菇微波—真空冷冻联合干燥工艺优化及其品质分析[J]. 现代食品科技,2019,35(6):129–138. DOI:10.13982/j.mfst.1673–9078.2019.6.017.
- [45] 韩玮,曾里,冉旭. 不同干燥方式青脆李果干芳香成分分析[J]. 食品科技,2020,45(9):67–72. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.09.011.
- [46] 马霞,李路遥,程朝辉,等. 冻干胡萝卜片护色工艺的优化[J]. 食品工业,2017,38(3):9–13.
- [47] 汤梦情,陈宏伟,朱蕴兰,等. 微波真空与真空冷冻组合干燥对芦笋营养与品质的影响[J]. 食品研究与开发,2019,40(5):76–81. DOI:10.3969/j.issn.1005–6521.2019.05.014.
- [48] 肖曼玉,张秀玲,刘明华,等. 响应面法优化青椒微波—真空冷冻联合干燥工艺及品质分析[J]. 现代食品科技,2022,38(4):191–200. DOI:10.13982/j.mfst.1673–9078.2022.4.0513.
- [49] 代晓凝. 微波真空冷冻干燥对鸡蛋清蛋白凝胶特性的影响[D]. 洛阳:河南科技大学,2020. DOI:10.27115/d.cnki.glygc.2020.000151.
- [50] 赵圆圆,易建勇,毕金峰,等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. 食品科学,2019,40(3):101–108. DOI:10.7506/spkx1002–6630–20171108–091.
- [51] WANG H C, ZHANG M, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze–drying and mid–infrared radiation[J]. Food and Bioprocess Processing, 2015, 94: 507–517. DOI: 10.1016/j.fbp.2014.07.008
- [52] 刘德成,郑霞,肖红伟,等. 红枣片冷冻—红外分段组合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报,2021,37(17):293–302. DOI:10.11975/j.issn.1002–6819.2021.17.034.
- [53] 张晓妮. 柠檬片真空远红外干燥工艺研究[D]. 天津:天津科技大学,2015.
- [54] SHIH C, PAN Z, MCHUGH T, et al. Sequential infrared radiation and freeze–drying method for producing crispy strawberries[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(1): 205–216. DOI: 10.13031/2013.24205.
- [55] 吴晓菲. 特色蔬菜的红外冷冻干燥及其减损机理研究[D]. 无锡:江南大学,2019. DOI: 10.27169/d.cnki.gwqgu.2019.000075.
- [56] KHAMPAKOOL A, SOISUNGWAN S, PARK S H. Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture[J]. LWT–Food Science and Technology, 2019, 99: 355–363. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.09.081.

收稿日期:2022–09–19