

超声处理对果蔬干燥速率及品质的影响

任广跃^{1,2}, 靳力为^{1,2}, 段 续^{1,2}, 张乐道^{1,2}

(1. 河南科技大学 食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023)

摘要: 主要阐述了超声波处理在食品干燥过程中的应用及使用效果,并与单一干燥方法进行比较,分析超声波在食品干燥过程中的应用优势,发现在超声波的作用下,有利于物料内部空化气泡的形成,加速去除物料内部与物料紧密结合的水分;超声波还可促进物料内部形成细微孔道,进而减小传热表面的厚度,增加对流传质速度,使得干燥速率得以加快,且物料中的营养成分也更好的被保留。单一频率超声的辅助作用目前研究较多,多频超声强化果蔬干燥的研究将成为超声波强化果蔬干燥研究中的更重要的一部分。

关键词: 超声波;辅助强化;果蔬干燥

中图分类号:TS 205.1 文章编号:1673-1689(2020)04-0009-09 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.04.002

Effect of Ultrasonic Treatment on Drying Rate and Quality of Fruits and Vegetables

REN Guangyue^{1,2}, JIN Liwei^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, ZHANG Ledao^{1,2}

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Luoyang 471023, China)

Abstract: Consumers' demand and quality requirements for dehydrated foods are gradually increasing, and the market of high-end dehydrated foods is expanding day by day. High-quality and efficient drying technology is an effective means to solve the technical bottleneck of high-end dehydrated foods. This article expounded the application of the ultrasonic treatment in food drying process, compared it with single drying methods, and analyzed the advantages of ultrasonic application in food drying process. Ultrasonic treatment could help the formation of cavitation bubbles and accelerate the removal of water closely integrated with the material. It could also promote the formation of micro-pores in the material, thereby reducing the thickness of the heat transfer surface and increasing the speed of mass transfer. Therefore, with the ultrasonic technology, the drying rate could be increased and nutrients could be better retained. There are currently many researches on the auxiliary effect of single frequency ultrasound, and the study of multi-frequency

收稿日期: 2018-10-30

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0400901);国家自然科学基金面上项目(31671907);河南省高校科技创新团队支持计划项目(16IRTSTHN009);国家重点研发项目(2017YFD0400901);“智汇郑州·1125 聚才计划”(郑政[2017]40号)。

作者简介: 任广跃(1971—),男,博士,教授,主要从事农产品加工及贮藏研究。E-mail: guangyueyao@163.com

ultrasound will become a more important part in the study of ultrasound enhanced fruit and vegetable drying.

Keywords: ultrasonic, auxiliary reinforcement, fruit and vegetable drying

超声波为频率高于 20 kHz 的声波,具有良好的方向性,在水中传播距离远,穿透能力较强等特点。在医学、军事、工业和农业都有很多应用。超声波在食品工业中的超声灭菌、干燥、过滤、清洗等方面应用十分广泛,超声波技术在微生物代谢、酒类发酵、食品检测等方面也取得最新的应用^[1]。

干燥是食品重要的保藏方法之一,通过干燥可以延长食品的货架期,降低食品的各项成本。随着消费者生活水平的日益提高,对干燥食品的需求和质量要求也逐渐增高,传统的热风干燥虽普遍使用,但已经很难满足当前市场对干燥食品的需求,目前真空冷冻干燥、红外干燥、热风干燥、热泵干燥等都是应用较为广泛的食品干燥技术,这些技术虽然都各有优点,但是部分单一的干燥方法存在干燥时间长,能耗较高,造成较高的环境污染;另外,有些干燥方法对设备要求较高,干燥品质一般等,导致干燥食品成本增加而质量并未得到很大提高^[2]。

超声波既可以作为单一干燥方式对食品进行加工,其特点是无需升温就可将水分从固体中去除,也可作为预处理应用于其他干燥方法之前,还可以与其他干燥方法协同作用,加快水分脱除的速度以及降低固体中残留水分含量,进而可提高干燥效率,降低能源消耗以达到降低干燥成本的目的。

现今,研究者对超声波前处理如何提高食品干燥效率的作用机理可归纳为以下几点:当物料经过超声波处理后,由于受到反复的拉伸和压缩作用,物料不断收缩和膨胀,从而形成海绵状结构,当该结构效应所产生的力大于物料内部的微细管内水分表面附着力时,水分就更易从微小管道中迁移出来;在超声波的空化作用下,空化气泡的形成、增长和剧烈破裂以及由此所引发的一系列理化作用,有助于脱去物料内部与之结合紧密的水分;超声波的作用加速物料内部形成细微孔道,降低传热表面层厚度,提高对流传质速率^[3-4];超声波的应用可以在干燥过程中减少外部传质阻力,甚至比增加的空气流速还要大,并且在影响内阻的同时,避免了表面

硬化的不良影响^[5]。

1 超声处理对高品质物料脱水的影响

1.1 超声处理对真空冷冻干燥的影响

真空冷冻干燥(Vacuum Freeze-Drying),是指先将物料冻结到共晶点温度以下,在低压状态下,通过冰的升华作用去除物料中水分的干燥方法,属于物理脱水。一般的干燥方法是将物料内部的水由液态转变为气态,而真空冷冻干燥是将物料内部的水分先由液态变为固态再由固态直接升华为气态^[6]。

真空冷冻干燥需在高真空条件下加热使冰晶升华,由于没有对流,传热效率很低,处理高含水量果蔬物料通常需要 30 h 以上的时间。此外,干燥过程中的加热系统、真空系统、大功率制冷系统的长时间运转使得冻干运行成本十分高昂。超声协同处理可以不同程度地提高 FD 的脱水效率,表 1 列出了超声预处理对 FD 的不同影响。

Ozuna, César 等^[7]通过研究超声波在盐渍鳕鱼低温对流干燥中对产品颜色的影响,发现超声波促进了鳕鱼透明度和黄度的增加,超声波对低温对流干燥的增强可以构成冷冻干燥的可负担的替代方案,但其仅限于高质量食品。

分析表 1 可知,超声处理可明显提高干燥速率,优化干制品品质。除此之外,刘宝华等^[14]经过试验发现,豆腐经 300 W 超声处理 10 min 后,随着超声功率的提高,豆腐的平均粒径和豆腐的析水率逐渐降低,豆腐的硬度、弹性、粘聚性和咀嚼性以及冷冻干燥豆腐复水率逐渐增高。金玮玲等^[15]将香菇切片后在漂烫液中漂烫护色 2~3 min,或直接放入蒸笼中熏蒸 6 min,快速冷却后放入浸渍液中超声处理 20 min,经过对比试验发现漂烫超声浸渍处理的香菇脆片较其他预处理方式白度最白,偏红偏黄趋势最小。周兵等^[16]将脱盐鸭蛋清经超声波预处理后进行干燥制粉,结果发现超声波预处理能有效改善蛋清蛋白质的功能特性,使得与未经超声波预处理

表 1 超声波预处理对真空冷冻干燥的影响

Table 1 Effect of ultrasonic pretreatment on vacuum freeze-drying

物料种类	处理方式	结果影响	
		时间	品质 (颜色、塌陷等)
胡萝卜 ^[8]	超声波处理时间 30 min、超声波频率 40 kHz、超声波功率 250 W	干燥时间缩短约 3 h	复水比均在 5.1 以上,复水性较好,感官性状也较好
香菇 ^[9]	超声波功率 300 W,处理时间 10 min,脉冲 5 s:3 s	干燥时间缩短 29.4%	冻干产品的复水能力提高约 30 %
酸奶 ^[10]	超声波功率 55%(总功率为 900 W)、超声脉冲 5:3、超声波作用时间 1.5 h	干燥时间缩短了 15.75 h 减少 49.2%)	
苹果 ^[11]	超声波功率 200 W,超声温度 35 ℃,超声时间 10 min	真空冷冻干燥总时间缩短了 22%	干制品 VC 保留量更高、颜色更加洁白、硬度变小更加疏松
双孢菇 ^[12]	在 30 ℃、质量分数 50% 蔗糖溶液中进行超声渗透 45 min	时间缩短 28.62%	可滴定酸、总蛋白质及多酚等营养物质的保留率、复水比、硬度均较高
大麦草 ^[13]	不同功率级别(10、30、45、60 W/L)超声处理 10 min	45W/L 超声处理干燥时间减少 14%	总微生物菌落减少了 33%;降低水的活性,减少干燥产品的酸味和苦味

的蛋清粉的凝胶性能、乳化性以及乳化稳定性、起泡性及起泡稳定性等特性有明显差异。

由于单一真空冷冻干燥要求条件较高,干燥时间较长,干燥后物料品质较为一般,引入超声波前处理后大大缩短了干燥时间,提升了干燥效率,降低能耗,从而节约了干燥成本;干燥过后物料的复水率也有较好的提高,总体干燥品质较单一真空冷冻干燥也有所提高。Katharina Schössler 等^[17]通过研究用于蔬菜冷冻干燥过程中的接触式超声系统,以红甜椒块作为研究对象,发现达到最终水分含量所需干燥时间比未加入超声波处理的减少了 11.5%,且超声处理对产品体积密度、抗坏血酸含量,颜色和复水率等方面均为产生负面影响。

超声波可以对结晶作用起到辅助作用,超声波可补充和强化形成临近径河的波动能而加速结晶过程,超声波还可控制结晶生长的速度,使晶体细小而均匀,在真空冷冻干燥中由于超声波作用而形成的细小冰晶可降低干燥过程中对物料的损害^[18-20],因此可生产出高品质的产品。超声增强冷冻的过程是一个较为复杂的过程,Saclier M 等^[21]对超声增强冷冻的过程进行了研究,建立了超声诱导冰晶一次成核的理论模型,该模型建立在汽蚀气泡坍塌过程中形成的高压增加了水的平衡冻结温度,进而提高过冷水平,促进冰成核的理论基础上,建立了超声振幅、过冷度等工作参数与核数的关系。

真空冷冻干燥过程实际是物料中的冰在一定温度下升华,由于超声波的作用给水分子升华提供

了更多能量,并且超声波对物料产生的空化效应或者组织破碎从而形成更多微孔道,加速水分的逸出,但如果功率过大,可能会导致物料组织内部破坏剧烈,物料发生解冻和塌陷,反而不利于水分的逸出,导致冻干时间增加,复水率降低^[22]。

1.2 超声处理对常压冷冻干燥的影响

当含湿物料冻结后,如果在常压条件下使其周围的水蒸气分压低于生化界面上的饱和蒸汽分压,则冷冻物料的水分即可得以升华,也就是说 FD 处理就可以在常压状态下进行,即常压冷冻干燥(Atmospheric Freeze Drying, AFD)。与 FD 相比,AFD 不设置真空系统,理论上可以节省约 1/3 的能耗。但目前 AFD 技术最突出的问题是干燥时间太长,通常是真空冷冻干燥的 3~4 倍,过长的干燥时间也增加了其他系统的能耗,故节能效果并不明显,这也同样制约了 AFD 的实际应用。

Santacatalina J V 等^[23]运用超声波在胡萝卜 AFD 中,试验发现干燥速率有效提高,且 AFD 有效水分扩散率提高 73%。另一方面使用超声波强化的 AFD 样品复水能力较未经过超声处理的样品高,干燥样品硬度差异不显著($p < 0.05$)。Moreno C 等^[24]通过研究如超声波的应用对苹果 AFD 干燥过程以及样品质量和抗氧化能力的影响发现超声处理进一步降低了 TPC、AA 和 AC 的含量,可能是由于超声波产生的能量是细胞损伤和氧转移的改善,最终导致抗氧化能力轻微降低。Bantle 等^[25]研究发现在空气场超声波存在下采用流化床进行常压冷冻干燥,有效

扩散系数可提高达 14.8%，认为在超声波存在的情况下，固气界面传质速率越高，湍流界面越高，边界层越小，进而干燥速率越快。

多频超声波可提高脱水速率，但强化 AFD 行为及机理尚不明确，目前仅有 Colucci 等^[26]将超声波用于茄子的 AFD 处理，证实了超声波处理可显著提高 AFD 干燥速率，但对其干燥过程强化机理未进行深入研究。

探索超声波在常压冷冻干燥过程中对产品品质的影响机制，进而揭示超声波协同常压冷冻干燥作用条件下果蔬物料中水分升华机理与微孔道形成机制，特别是阐明超声波对常压冷冻干燥过程中升华-冷凝-重结晶的抑制机制，以期更好的推动低能耗、高效率的常压冷冻干燥技术在高端冻干食品领域的应用。

2 超声处理对单一常规干燥的影响

2.1 超声处理对热风干燥的影响

热风干燥是一种较为传统的干燥方法，被广泛应用于各种物料的干燥。热风干燥具有便于管理、成本低等优点，是目前干制品行业的一种重要干燥方式。但热风干燥对物料进行的是表面加热，能量由外向内传递，水分子由内向外扩散导致热风干燥存在干燥时间长、传热传质效率低、产品品质较差等缺点^[27]，如何选择有效措施来提高干燥速率，减少其干燥时间，是解决热风干燥的关键性问题。超声协同处理可以不同程度地提高热风干燥效率，表 2 列出了超声波预处理对热风干燥的不同影响。

由表 2 可见，超声处理不仅可以缩短热风干燥时间，提高干制品品质，还可降低热风干燥至同等

表 2 超声波预处理对热风干燥的影响

Table 2 Effect of ultrasonic pretreatment on hot air drying

物料种类	处理方式	结果影响	
		时间	品质 (颜色, 塌陷等)
半干型荔枝干 ^[28]	超声频率 40 kHz, 时间 32.6 min, 功率 354 W	干燥时间减少约 11 h	荔枝外果皮细胞结构发生变化, 产生纤维通道
砀山梨 ^[29]	超声频率 22 kHz, 渗透脱水温度为 40 °C, 不同渗透时间及功率	超声渗透脱水预处理可缩短热风干燥时间 40~120 min	
草莓 ^[30]	0,30,60 W 不同超声功率	干燥时间缩短 13%~44%	
紫薯 ^[31]	0,30,60 W 不同超声功率	干燥时间随超声波功率及干燥温度的提高而降低	提高总酚和总黄酮含量, 但不利于成分的保持

含水量下的能耗。张锁龙等^[32]使用 200 W 的超声波处理稻谷 3 min 后，稻谷干燥时间最快可缩短 25 min，能耗降低 18.25%；罗登林等^[33]在香菇热风干燥中附加频率为 20 kHz，功率为 150 W，辐照圆盘直径为 21 cm 的超声波，干燥时间缩短至单一热风干燥的 50%，蒸发每千克水所需能耗减少约 22%。此外，Garcia-Perez 等^[34]在 30~70 °C 范围内利用超声波对胡萝卜块进行了干燥试验，发现低温下超声波对热风干燥强化效果较好，高温下超声波对热风干燥的强化效果较弱。

通过以上比较可知，经超声处理后的物料内部结构发生变化，是内部微孔道扩散得以强化，将超声波技术联合辅助热风干燥后，相比单一热风干燥不仅提高了干燥速率、降低干燥能耗，而且对于提

升干制品品质也有一定的强化作用。

适当短时间的超声处理所产生的空化效应可强化水分向外部扩散的过程，进而加快物料的干燥速度，超声波功率的大小可影响物料内部结构和性状的机械作用的强度，同时超声波会使物料内部产生微细管并可增加毛细孔隙的尺寸，同样可利于物料内部水分的扩散^[34]。但过长的超声时间会导致物料组织结构的明显破坏^[35]，因此导致干燥过程中物料内部水分挥发不均匀，降低物料的复水率。

2.2 超声处理对热泵干燥的影响

热泵干燥是一种较为现代化的干燥技术，具有操作简便、环境污染小、能耗相对较低等优点，但热泵干燥的设备投资较大，干燥时间长，使得热泵技术一直在干燥产业中受到限制。如果在热泵干燥前

或干燥过程中加以超声波处理辅助,降低物料内部水分迁移阻力,强化内部水分的迁徙能力,则有助于从根本上提高热泵干燥的干燥速率,进而降低干燥时间和干燥成本^[36]。

表3列出了一系列超声波对热泵干燥的影响,超声波前处理对热泵的干燥速率有显著的提高作用,并且对干制品的品质也有更好的保护作用。

超声波的高频振动可将能量直接传入物料内

表3 超声波预处理对热泵干燥的影响

Table 3 Effect of ultrasonic pretreatment on heat pump drying

物料种类	处理方式	结果影响	
		时间	品质 (颜色,塌陷等)
苹果 ^[37]	温度为30、50、70℃时,附加90W的超声波	干燥时间分别减少53.8%、46.1%、17.4%	
苹果 ^[38]	超声频率为28kHz,风速为0.5、1.5、2.5m/s,超声功率为0、30、60W,温度为40、50、60℃	缩短干燥时间与提高干燥速率的比率明显增加,而超声功率越大,对干燥速率的强化效果越明显	
马铃薯 ^[39]	风速为3m/s、介质相对湿度为25%,温度为10、20、30℃,超声功率为0、24、48W	相同温度下,当附加超声功率为24W与48W时,干燥时间分别减少15.69%和35.29%;干燥速率分别提高29.73%和59.64%;在低温条件下,超声对干燥时间的影响更为显著。	缩短VC的降解反应时间,从而有利于VC的保护

部,物料内部组织结构受到了强烈、反复的超声波作用产生了海绵效应^[40],由于其产生的海绵效应所产生的力大于物料内部细微管内水分的表面附着力,则水分更容易从内部迁移出来^[41],进而加快干燥速率。

在超声波的作用下,强烈的空化效应还形成了较多微细孔道,有利于物料内部水分迁移与挥发,较单一热泵干燥降低了其传质阻力,进而缩短干燥时间,提高干燥速率^[36],随着超声功率的增加,超声所产生的机械效应和空化效应均有所增强,导致物料内部的水分湍动更为强烈,使物料内部水分有效弥补了热泵干燥的不足之处。超声预处理对热泵干燥干制品的品质也有一定程度的优化效果。

2.3 超声处理对真空干燥的影响

真空干燥是传统干燥技术之一,目前应用相对比较广泛,有很多优点,如在真空条件下,水的沸点较低,可以实现低温干燥;在缺氧状态下,可抑制部分细菌的生长繁殖;真空干燥过程中还可回收一些有毒有害气体,可被称之为“绿色环保型”干燥方式^[42]。但真空干燥存在干燥时间长,传热速度慢,对于物料营养成分的保留程度依然有限^[43],故可采用其他方式辅助优化干燥过程。

马怡童等^[44]对全蛋液加以50℃的干燥温度,2.0W/g的超声声能密度持续作用2.5h,通过试验发现加入超声作用且声能密度分别为0.4、0.8、1.2、

1.6、2.0W/g时,干燥时间分别缩短了30%、40%、45%、50%、55%,平均干燥速率分别提高了40.4%、62.6%、76.0%、90.6%、110.0%,且干燥产品质地疏松,易于与容器分离,利于粉碎及后期加工。巩鹏飞^[45]通过试验发现超声辅助真空干燥可提高胡萝卜片有效扩散系数,且干制品颜色鲜亮,形变较小;内部形成的微小孔道较为均匀,复水比较高。

在加入超声波之后,超声波所产生的机械效应可产生剪切力,而空化效应对物料内部产生较大的破化作用,这两种效应相结合可对物料内部产生强大的破坏力,增大物料内部的孔隙率,降低水分的扩散阻力,进而干燥速率得到提高,真空干燥的干燥时间可随着超声波功率的增加而降低,干制品的品质也有所提高,超声波的加入弥补了真空干燥的部分缺点,使得整体干燥过程更加优化。

但目前对于超声真空干燥过程中水分迁移规律及机理的研究还比较少,需建立广泛适用的超声真空干燥模型,为超声真空干燥的应用提供理论基础,并且可针对不同的物料类型,进一步研究超声功率、真空度等条件对干燥过程的影响,进而对干燥工艺进行优化^[45]。

2.4 超声处理对红外干燥的影响

红外线为波长是0.75~1000μm的电磁波,也称之为热辐射,分为近红外(0.75~1.5μm)、中红外(1.5~5.6μm)、远红外(5.6~1000μm)^[46]。红外线穿

透物体的深度约等于波长,因此远红外比近红外效果好。红外线干燥具有热辐射效率高、热损失较小且易于控制、传热效率高、热吸收效率高以及对物料造成的损失较小等特点^[47]。但发现红外干燥在对较厚的物料时干燥效率很低,为了解决这一问题,可合理的选择将红外干燥技术与别的干燥技术相结合,以便达到高效、低耗、优质的干燥效果。

表4列出了超声波处理对红外干燥的影响,通过表格可知,超声波的作用可明显降低干燥时间,提高干燥效率,优化干制品的品质。

此外,有人使用超声波频率(0,20,50 kHz)与红外功率(0,757.50,1515 W/m²)研究发现:随着超声频率和红外功率的增大,有效扩散系数增大,活化能降低,但阿伦尼乌斯常数增加。

表4 超声波预处理对红外干燥的影响

Table 4 Effect of ultrasonic pretreatment on infrared drying

物料种类	干燥方法	结果影响		
		时间	能耗	品质(颜色,塌陷等)
红枣 ^[48]	超声频率为40 kHz,功率350 W预处理40 min后进行中短波红外干燥	经超声前处理将红枣干燥至干基含水率约为40%需要9.5 h;未经超声前处理则需要13.3 h	未超声处理中短波红外干燥至相同条件需13.3 h,能量消耗为14.96 kW·h,单位能耗除湿量为10.83 g/(kW·h)	超声处理后中短波红外干燥的红枣果实收缩较小,颜色鲜艳。
久保桃 ^[49]	超声及超声渗透30、60 min预处理后,进行红外辐射80℃干燥处理	超声预处理明显提高干燥速率,减少干燥时间;超声渗透预处理降低干燥速率		桃片TSS含量降低,超声渗透预处理后,桃片TSS含量升高
南瓜 ^[50]	超声功率在30~60 W强化,远红外辐射温度在200~240℃干燥	辐射板温度为200℃时,超声功率为30、60 W时的干燥时间分别缩短了13.3%、26.7%,平均干燥速率分别提高了15.2%、36.1%	用直触式超声技术强化,可降低干燥能耗6.67%~20.21%	
久保桃 ^[51]	超声渗透30 min或60 min后分别经60、70、80℃红外干燥处理	干燥速率随着渗透时间增加而降低,随着干燥温度升高而提高。	随着温度的升高,桃片红外辐射干燥所需能耗降低;桃片经超声渗透脱水后,红外辐射干燥所需能耗增加。	
双孢菇 ^[52]	超声漂烫、常温超声3 min、常温超声10 min	与空白对照组相比,均可缩短干燥时间,		干制品硬度值和收缩率降低,脆度和复水比升高,色泽保持良好,VC含量较高。

红外干燥加入超声波辅助后,由于经超声处理在物料内部产生的机械振动是内部结构松弛,水分扩散通道增加,其转移阻力减小,从而加快干燥速率,缩短干燥时间^[28,53]。通过比较发现,无论是远红外干燥还是中短波红外干燥,其干燥速率均有不同程度的提升,且能耗也有所降低,且单一远红外干燥技术就较传统干燥和热风干燥相比更加节约能源,效果更加显著^[47],在加入超声波强化后,红外干燥的优势也更加突出。加入超声波的前处理后,干制品品质也有不同幅度的提升。所以超声波可整体优化强化红外干燥。

3 结 语

超声波辅助干燥作为一个较为方便易行的辅

助干燥技术,在食品干燥技术中的应用不断增加。由于超声显著的传质强化效果和对物料的各种强化作用,使得在与其他干燥方式相结合不仅可以提高其干燥速率,降低整体能耗,而且对于干制品的品质也有不同程度的提升,弥补单一干燥方式的不足,进而达到高效、低能耗、高品质的干燥效果。

超声波预处理之后,物料由于受到超声波的拉伸和反复压缩作用之后,物料不停收缩和膨胀,内部形成多孔的海绵状结构,当物料内部微细管内的水分表面附着力小于海绵结构所产生的力时,水分更易从组织内部转移出来;在超声波的作用下,物料内部空化气泡的形成与增生以及由于气泡剧烈破裂产生的一系列理化效应,加速去除物料内部与物料紧密结合的水分;超声波还可促进物料内部形

成细微孔道,进而减小传热表面的厚度,增加对流传质速度。在超声波的这些综合作用下,物料的干燥速度得以加快。

目前对超声辅助干燥的研究大多是将超声与其他干燥方式结合起来探讨其中干燥工艺参数的影响,而对超声辅助干燥与物料特性等因素间的关联研究鲜有报道,即如何更科学的将超声与其他干燥过程相结合,实现超声强化作用的更大化,将是

高端食品脱水处理的新方向。未来的研究势必进一步深入研究超声波的应用如何影响产品质量,虽然少数的初步研究表明,在干燥过程中应用超声波有节约能耗的效果,但是又不能确定该过程的能源效率,这不仅包括每个产品的最佳工艺组合,还包括开发更有效的系统,使其能够受益于所产生的总声能,从而提高干燥速度。

参考文献:

- [1] JU Yun, TANG Chunhong, ZHAO Nan, et al. Application of ultrasound in food processing in the future [J]. **Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)**, 2015, 32(12): 71-75. (in Chinese)
- [2] GONG Pengfei, ZHAO Qingsheng, ZHAO Bing. Research progress of ultrasound in foodstuff drying [J]. **Food Research and Development**, 2017, 38(7): 196-199. (in Chinese)
- [3] CÁRCEL J A, BON J, SANJUÁN N, et al. New food drying technologies; Use of ultrasound [J]. **Food Science & Technology International**, 2003, 9(3): 215-221.
- [4] JAMBRAK A R, MASON T J, PANIWNKY L, et al. Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007, 81(1): 88-97.
- [5] CÁRCEL J A, GARCÍA-PÉREZ J V, RIERA E, et al. Ultrasonically assisted drying [C]// *Ultrasound in Food Processing: Recent Advances*.
- [6] QIAO Xiaoling, YAN Zuwei, ZHANG Yuanfei, et al. Research progress of vacuum freeze-drying technology for food [J]. **Food Science**, 2007, 81(1): 88-97. (in Chinese)
- [7] OZUNA, CÉSAR, CÁRCEL, JUAN A, et al. Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 2014, 23: 146-155.
- [8] LIN Ping, ZHU Haixiang, LI Yuanzhi, et al. Study of the influence of ultrasonic pre-processing on vacuum freeze-dried carrot[J]. **Food Science and Technology**, 2010(7): 116-119. (in Chinese)
- [9] DUAN Xu, REN Guangyue, ZHU Wenxue, et al. Effect of ultrasound treatment on freeze drying process of mushroom [J]. **Food & Machinery**, 2012, 28(1): 41-43. (in Chinese)
- [10] YANG Jufang, ZHOU Zheng, WU Hao, et al. Study on water evaporation of ultrasonic vacuum freeze drying yogurt [J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2014, 32(1): 53-58. (in Chinese)
- [11] ZHOU Di, SUN Yanhui, CAI Huazhen, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on vacuum freeze drying process of apple slices[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2015, 36(22): 282-286. (in Chinese)
- [12] CHEN Lifu, PEI Fei, ZHANG Liming, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic pretreatment on freeze-drying efficiency and quality of *agaricus bisporus*[J]. **Food Science**, 2017, 38(23): 8-13. (in Chinese)
- [13] CAO X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2018, 40(Pt A): 333-340.
- [14] 刘宝华, 佟晓红, 吴长玲, 等. 超声制浆工艺对冷冻干燥豆腐制备及品质的影响[J/OL]. *食品科学*: 1-9[2018-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20180228.0959.080.html>.
- [15] JIN Weiling, GAO Hong, FAN Xiuzhi, et al. Effect of different pretreatment methods on the sensory quality of lentinus edodes chips Produced by vacuum freeze-drying[J]. **Food Science**, 2017, 38(13): 108-112. (in Chinese)
- [16] ZHOU Bing, ZHANG Min, WANG Yuchuan, et al. Two kinds of different drying methods affect on different desalination pretreatment duck egg quality[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2013, 32(12). (in Chinese)
- [17] SCHÖSSLER K, JÄGER H, KNORR D. Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables [J].

- Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 2012, 16: 113-120.
- [18] 霍尼. 制糖工艺学原理[M]. 北京: 轻工业出版社, 1960.
- [19] LUQUE M D, PRIEGO-CAPOTE F. Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization)[J]. **Ultrasonics – Sonochemistry**, 2007, 14(6): 717-724.
- [20] ZHENG L, SUN D W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2006, 17(1): 16-23.
- [21] SACLIER M, PECZALSKI R, ANDRIEU J. A theoretical model for ice primary nucleation induced by acoustic cavitation[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2010, 17(1): 98-105.
- [22] TANAKA S, MIYAZAKI T, UEMURA Y, et al. Design of a randomized clinical trial of concurrent treatment with vitamin K2 and risedronate compared to risedronate alone in osteoporotic patients; Japanese osteoporosis intervention trial-03 (JOINT-03). [J]. **Journal of Bone & Mineral Metabolism**, 2014, 32(3): 298-304.
- [23] SANTACATALINA J V, CÁRCEL J A, SIMAL S, et al. Atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound [C]// Iop Conference Series: Materials Science & Engineering. 2012.
- [24] MORENO C, BRINES C, MULET A, et al. Antioxidant potential of atmospheric freeze-dried apples as affected by ultrasound application and sample surface[J]. **Drying Technology**, 2016: 07373937.2016.1256890.
- [25] BANTLE M, EIKEVIK T M. Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas [J]. **Drying Technology**, 2011, 29(10): 1230-1239.
- [26] COLUCCI D, FISSORE D, ROSSELLO Carmen, et al. On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant[J]. **Food Research International**, 2018, 106: 580-588.
- [27] LI Wensheng, ZHU Qingqing, SUN Jincai, et al. Effect of different drying methods on the quality of white shrimps[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2016, 35(5). (in Chinese)
- [28] YAN Xiaohui, YU Xiaolin, HU Zhuoyan, et al. Effects of ultrasound pretreatment on drying time for intermediate-dried litchi[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2011, 27(3): 351-356 (in Chinese)
- [29] LIU Yunhong, WU Jianye, LIU Jianxue, et al. Ultrasonic-assisted osmotic dehydration and subsequent hot-air drying of pear slices[J]. **Food Science**, 2014, 35(3): 23-28. (in Chinese)
- [30] GAMBOA-SANTOS J, MONTILLA A, CÁRCEL J A, et al. Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry[J]. **Journal of Food Engineering**, 2014, 128(128): 132-139.
- [31] SUN Yue, LIU Yunhong, YU Huichun, et al. Drying characteristics and process simulation of ultrasound-assisted hot air drying of purple-fleshed sweet potato based on Weibull distribution model[J]. **Food Science**, 2017, 38(7): 129-135. (in Chinese)
- [32] ZHANG Suolong, GAO Tao, ZHAO Yujie, et al. Grain drying characteristics under the ultrasonic coupling with hot-air [J]. **Food Science and Technology**, 2016(5): 158-162. (in Chinese)
- [33] LUO Denglin, XU Baocheng, LIU Jianxue. Mushroom slices drying using hot-air drying coupled with power ultrasound [J]. **Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery**, 2013, 44(11): 185-189. (in Chinese)
- [34] GARCÍA-PÉREZ J V, ROSSELLÓ C, CÁRCEL J A, et al. Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound[J]. **Defect & Diffusion Forum**, 2006, 258: 563-574.
- [35] FERNANDES F A N, RODRIGUES S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits [J]. **Drying Technology**, 2008, 26: 1509-1516.
- [36] MULET A, CÁRCEL J A, SANJUAN N, et al. New food drying technologies—use of ultrasound [J]. **Food Science Technology International**, 2003, 9: 215-221.
- [37] ÓSCAR R, SANTACATALINA J V, SIMAL S, et al. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties[J]. **Journal of Food Engineering**, 2014, 129(1): 21-29.
- [38] LIU Yunhong, MIAO Shuai, SUN Yue, et al. Drying characteristics of apple slices during contact ultrasound reinforced heat Pump drying[J]. **Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery**, 2016, 47(2): 228-236. (in Chinese)
- [39] 田伏锦, 刘云宏, 黄隽妍, 等. 马铃薯超声强化冷风干燥及品质特性[J/OL]. 食品科学: 1-15 [2018-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20180209.1043.108.html>.
- [40] NOWACKA M, WIKTOR A, SLEDZ M, et al. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties [J].

- Journal of Food Engineering**, 2012, 113(3):427-433.
- [41] ZHAO Fang, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer process in ultrasonic pre-dehydration of carrot [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2010, 26 (11):349-354. (in Chinese)
- [42] ZHANG Zhijun, ZHANG Shiwei, XU Chenghai. Difficulties of grain vacuum drying technology[J]. **Vacuum**, 2018(2):20-23. (in Chinese)
- [43] 王福娟. 胡萝卜真空干燥工艺参数的试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2005.
- [44] MA Yitong, ZHU Wenxue, BAI Xiting, et al. Drying characteristics and kinetic model of liquid whole egg during ultrasound-reinforced vacuum drying[J]. **Food Science**, 2018, 39(3):142-149. (in Chinese)
- [45] 巩鹏飞. 超声真空干燥及应用研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [46] 孙静. 制革生产技术问答[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2009.
- [47] LI Jianjun. Study on far-infrared drying technology and its application prospect [J]. **Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)**, 2013(6):58-59. (in Chinese)
- [48] CHEN Wenmin, PENG Xingxing, MA Ting, et al. Impact of ultrasonic treatment on drying time and quality of red jujubes dried by medium- and short-wavelength infrared radiation[J]. **Food Science**, 2015, 36(8):74-80. (in Chinese)
- [49] ZHANG Pengfei, LV Jian, BI Jinfeng, et al. Effect of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration on infrared radiation drying characteristics of peach slices[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2016(11):197-202. (in Chinese)
- [50] LIU Yunhong, LI Xiaofang, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2016, 32(10):277-286. (in Chinese)
- [51] ZHANG Pengfei, LV Jian, ZHOU Linyan, et al. Drying characteristics and energy consumption of peach slices during ultrasound-assisted osmotic dehydration in combination with infrared radiation [J]. **Modern Food Science and Technology**, 2015(11):78-81. (in Chinese)
- [52] 刘宗博. 双孢菇远红外干燥特性及品质的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2016.
- [53] OZUNA C, GÓMEZ T Á, RIERA E, et al. Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying [J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2014, 21(3):1235-1243.

会 议 消 息

会议名称:中国化学会第15届全国流变学学术会议

会议时间:2020年10月17-20日

会议地点:重庆市

主 办 方:中国化学会流变学专业委员会

共同主办:重庆大学

承 办 方:重庆大学光电工程学院、重庆科技学院建筑工程学院

会议主题:流变本构理论与模型、流变学测试技术、岩土与地质流变学、工业流变学、聚合物及其加工流变学、电-磁-光流变学、多相多组分体系流变学、食品、医药与生物流变学、石油流变学、流变学教育与普及

大会主席:郑强

预计规模:250人

联 系 人:余淼

电子邮箱:yumiao@cqu.edu.cn

电 话:13908371615

会议内容:流变本构理论与模型、流变学测试技术、岩土与地质流变学、工业流变学、聚合物及其加工流变学、电-磁-光流变学、多相多组分体系流变学、食品、医药与生物流变学、石油流变学、流变学教育与普及