

# 超声波应用于食品干燥的研究进展

巩鹏飞<sup>1,2</sup>,赵庆生<sup>1,\*</sup>,赵兵<sup>1,\*</sup>

(1.中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室,北京100190;

2.中国科学院大学,北京100049)

**摘要:** 超声波干燥具有降低干燥温度,缩短干燥总时间,减少干制品质量损失的优点,可与其他干燥方式耦合,用于不同种类食品的干燥。就超声波干燥与其他干燥技术结合应用于食品工业做一综述,探究超声波对食品干燥时间及干燥品质的影响。

**关键词:** 超声波;食品干燥;干燥时间;干燥品质

## Research Progress of Ultrasound in Foodstuff Drying

GONG Peng-fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Qing-sheng<sup>1,\*</sup>, ZHAO Bing<sup>1,\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As an emergent technology, ultrasonic drying has the advantage of drying rapidly at low temperature without affecting the quality of the product. So it is becoming widely used in drying different kinds of food. This paper mainly reviewed the development of ultrasonic drying in combination with different drying techniques in food industry. Then it provided a discussion of the influence of ultrasound on drying time and drying quality.

**Key words:** ultrasound; food drying; drying time; drying quality

干燥是食品工业生产中重要的操作单元,常用的干燥方法有热风干燥、冷冻干燥、渗透干燥等。在工业生产中,食品干燥应最大程度保留食品的营养成分和活性成分,保持良好的口感和色泽,且干燥成本不宜过高,而现有干燥方法均不同程度地存在传质传热效率低,干燥时间长,干燥过程能耗偏高,干燥后产品质量低等问题。因此,需要开发新的干燥技术以满足节能高效并获得高质量产品的绿色化生产需求。

在食品工业中,超声波被用于超声提取、超声灭菌等领域。由于超声波强化传质传热效果明显,近年来,其在食品干燥领域的应用也日渐广泛。本文对超声波耦合热风干燥、冷冻干燥、渗透干燥、真空干燥、红外干燥、热泵干燥在食品干燥中的应用进行了综述,并对超声波干燥的前景进行了展望。

基金项目:国家自然科学基金青年基金(21506220)

作者简介:巩鹏飞(1991—),女(汉),硕士研究生,研究方向:植物细胞工程及天然产物生物炼制。

\*通信作者:赵庆生,副研究员;赵兵,研究员,博士生导师。

## 1 超声波在食品干燥中应用的机理

超声波是频率大于20 kHz的声波,是在介质中传播的有弹性的机械震荡。超声波与介质相互作用产生的热效应、机械效应和空化效应会强化物料的干燥过程。(1)热效应:超声波在物料中传播产生的振动能量不断被物料吸收,从而使被干燥物料温度升高,干燥过程加快;(2)机械效应:超声波的辐射压强和强声压强会作用于物料,对物料反复压缩和拉伸,使物料不断收缩和膨胀,当这种结构效应产生的作用力大于水分表面附着力时会促进物料的水分脱除。同时,超声波在固-液界面和气-固界面产生的剧烈扰动有利于形成微小管道,降低边界层的扩散,促进水分的迁移<sup>[1]</sup>;(3)空化效应:超声波在液体中传播时,形成的空化泡在超声波作用下不断生长,最终崩裂并在局部微小区域产生瞬时高温高压,瞬时温度可达5 200 K,瞬间压强可达 $5.05 \times 10^7$  Pa,并伴有强烈的冲击波和时速高达400 km/h的微射流<sup>[2]</sup>,这种现象被称作空化效应。空化效应产生的冲击波会引起水分子湍流扩散,靠近固体

表面产生的微射流会造成水分子与固体表面分子间结合键的断裂,有利于除去与物料紧密结合的水分,因此空化效应是超声波干燥的主要效应。

## 2 超声波在食品干燥中的应用

### 2.1 超声波-热风干燥

热风干燥所需设备简单,干燥过程易控制,生产成本较低,90%以上的脱水食品的生产采用热风干燥<sup>[9]</sup>。为了提高干燥效率,热风干燥通常在较高温度下进行,这就增加了干燥过程中的能耗,同时高温不利于食品中热敏性成分和某些活性成分的保存<sup>[4]</sup>。将超声波用于热风干燥可降低热风干燥温度,减少耗能,提高热风干燥效率。Bantle M<sup>[7]</sup>利用超声波-热风干燥鳕鱼,当超声强度为25 W/kg,干燥温度为43℃时,超声波可使热风干燥时间缩短43%。

将超声波应用于热风干燥还有利于营养成分的保留。Rodríguez Ó等<sup>[8]</sup>在30、50、70℃条件下,分别用热风干燥和超声波-热风干燥处理苹果,当干燥温度为30℃时,超声波-热风干燥得到的苹果总酚含量和类黄酮含量最高。这是由于超声波可降低苹果的外部传质阻力,同时表面水分蒸发速率提高,干燥时间缩短,因此营养成分受热破坏较小,保留量较高。

在超声波-热风干燥过程中,干燥时间不仅受温度、风速的影响,超声波功率同样会对干燥过程产生影响。研究表明,在一定范围内,超声波功率越大,热风干燥时间越短。Gamboa-Santos J和Kadam S U分别对草莓<sup>[5]</sup>和褐藻<sup>[6]</sup>进行超声波预处理,超声波功率越大,热风干燥时间越短,草莓和褐藻的干燥时间最多可缩短13%~44%和12.62%。

### 2.2 超声波-冷冻干燥

冷冻干燥适用于热敏性或易发生氧化的食品,采用冷冻干燥可较好的维持食品原有的营养成分含量、色泽和气味<sup>[11-12]</sup>。由于冷冻干燥耗能高、生产周期长、产品成本高,冷冻干燥的应用范围和应用规模受到了限制<sup>[4]</sup>。将超声波用于冷冻干燥可一定程度上实现干燥速率、产品品质和生产耗能三者间的平衡,满足消费市场对联干食品的需求。

由于超声波有助于除去物料中的结合水,因此将超声波用于冷冻干燥可显著提高物料在低温下的水分扩散,从而促进冷冻干燥过程。杨菊芳等<sup>[19]</sup>发现,在最合适的超声条件下,酸奶的干燥时间可缩短64.7%。同样,利用超声波-冷冻干燥鳕鱼,鳕鱼的传质能力提高,干燥时间缩短<sup>[20]</sup>,干制品的复水率提高<sup>[21]</sup>。

超声波与冷冻干燥耦合可提高干制品品质。San-

tacatalina J V等<sup>[17]</sup>发现,超声波预处理使苹果在干燥过程中水分有效扩散系数和传质系数分别提高至冷冻干燥的501%和148%,同时苹果的总酚含量、类黄酮含量等营养成分得到了较好的保留,抗氧化能力未受到显著影响。此外,有同样研究表明超声波-冷冻干燥后的苹果片颜色更加洁白,维生素C保留量更高<sup>[18]</sup>。因此,超声波-冷冻干燥有利于得到品质更高的干制品。

### 2.3 超声波-渗透脱水

渗透脱水技术一般用于果蔬干燥前处理、果脯和浓缩果汁的加工等,可抑制农产品发生褐变,有助于维持产品品质<sup>[22]</sup>,但单纯的采用该技术干燥农产品所需干燥时间较长,因此可将超声波用于果蔬的渗透脱水,以提高脱水速率,并使营养成分得到较好的保留<sup>[23]</sup>。

Nowacka M等<sup>[25]</sup>用35 kHz的超声波分别处理猕猴桃片10、20、30 min,然后将猕猴桃片浸没于温度25℃、浓度61.5%(w/w)蔗糖溶液中0、10、20、30、60、120 min。利用扫描电镜对处理后的猕猴桃片检测,结果表明超声处理10 min后会使猕猴桃细胞膜间形成微通道,提高了猕猴桃的传质速率。不仅超声波作用时间会对渗透脱水过程产生影响,超声波功率大小也会对渗透脱水过程产生影响。在超声波强化白萝卜的渗透脱水过程中,在一定范围内,超声波功率越大,处理时间越长,白萝卜脱水速率越快<sup>[24]</sup>。

需要指出的是,超声波渗透脱水得到的产品仍具有一定的含水率,难以实现长期保藏,还需采取热风干燥或冷冻干燥等方法进一步除去物料中的水分<sup>[28-29]</sup>。

### 2.4 超声波-真空干燥

真空干燥是在一定真空度下除去物料中水分的干燥技术。真空干燥可以提高物料干燥过程中水分扩散速率及传质传热速率,Başlar M等<sup>[31]</sup>利用超声真空干燥、真空干燥以及烘干处理鱼片的研究表明,超声波可进一步提高鱼片在干燥过程中的传质传热速率,缩短干燥时间。虽然超声真空干燥耗能高于真空干燥,但超声真空干燥所需干燥温度低,干燥时间短,因此与烘干相比更加经济节约,在食品干燥工业中有巨大的应用潜力。Chen等<sup>[32]</sup>采用同样的方法比较胡萝卜片的干燥,结果显示超声波使胡萝卜片真空干燥时间缩短了41%~53%,超声真空干燥胡萝卜片的复水能力、β-胡萝卜素含量以及维生素C含量均高于真空干燥和烘干胡萝卜片。与Başlar M研究结果不同的是,胡萝卜超声真空干燥能耗最低。这可能与被测样品种类及实验仪器不同有关。

### 2.5 超声波-红外干燥

红外干燥基于水分吸收红外辐射的特性,可使物

料快速干燥,具有热效率高,产品品质好的特点<sup>[33]</sup>。陈文敏<sup>[34]</sup>等发现,超声波预处理会改变红枣表皮细胞结构,促进红枣的红外干燥过程。在适宜超声条件下,超声预处理得到的干制红枣颜色更加新鲜,维生素C含量、总酚含量和总黄酮含量均高于未超声预处理的干燥红枣。同时,经超声预处理的干制红枣酸含量低于未超声预处理的红枣。因此,超声波-红外干燥红枣可有效缩短干燥时间,并得到口感好,营养成分含量高的干制品。Dujmić F 等<sup>[35]</sup>在梨片的超声波-红外干燥中也发现超声波预处理可改变梨片的组织结构,使得干制品的硬度和韧性降低,干燥总时间显著缩短。

## 2.6 超声波-热泵干燥

热泵干燥是一种高效节能、环境友好型的干燥技术<sup>[36-37]</sup>。但在热泵干燥后期,会出现干燥速率降低、能耗比增加等问题。研究发现,将超声波技术应用于热泵干燥可有效提高后期干燥速率,并降低干燥反应所需能耗。魏彦君<sup>[39]</sup>对南美白对虾进行超声波辅助热泵干燥,发现超声波预处理可提高热泵干燥过程中南美白对虾的水分扩散系数,干燥时间缩短,干燥能耗减少。同时,超声波功率、频率和处理时间不会对虾肉的韧性、色泽、虾青素含量等品质造成影响。

## 3 展望

目前,超声波在食品干燥中的应用还存在一定的不足。首先,超声波促进物料干燥的效果受干燥过程中如风速、物料形状、物料坚硬程度<sup>[40]</sup>等条件的影响。García-Perez J V 等<sup>[41]</sup>在研究超声波-流化床干燥胡萝卜时发现,风速过高会破坏超声场,降低超声强度,减弱超声波促进胡萝卜干燥的效果。另有研究发现由于葡萄籽较为坚硬,超声波在促进葡萄籽干燥方面效果并不显著<sup>[42-43]</sup>,因此当超声波产生的机械压力小于物料内部传质阻力时,超声波不会促进物料的干燥过程。其次,由于空化效应在超声波强化干燥过程中占主导作用,随着空化泡的减少,在干燥后期,空化效应不再显著<sup>[44-45]</sup>,超声波促进干燥的效果也相应降低。空化效应的强弱与超声波功率大小、作用时间长短的关系尚不明确,也制约了超声波在食品干燥领域的推广利用。

食品工业新产品的开发必然会对现有干燥技术提出新的要求,超声波可通过改变物料微观结构,促进干燥过程的水分迁移,加快干燥速率,降低干燥温度,缩短干燥时间,在食品工业中有巨大的应用潜力和广阔的发展空间。我们相信,通过对干燥工艺的进一步探索和改进,我们可以克服超声波应用于食品干

燥所存在的问题,开发出更加节能高效的干燥技术,满足实际生产中不断产生的新需求。

## 参考文献:

- [1] S de la Fuente-Blanco, E Riera-Franco de Sarabia, V M Acosta-Aparicio, et al. Food drying process by power ultrasound[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(S1): e523-e527
- [2] 张婵,郑爽英. 超声空化效应及其应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(1): 136-138
- [3] 罗登林,徐宝成,朱文学,等. 功率超声在热风干燥领域中的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(3): 123-128
- [4] Sagar V R, Suresh K P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47(1): 15-26
- [5] Gamboa-Santos J, Montilla A, Cúrcel J A, et al. Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 128: 132-139
- [6] Kadam S U, Tiwari B K, O'Donnell C P. Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 23: 302-307
- [7] Bantle M, Eikevik T M. A study of the energy efficiency of convective drying systems assisted by ultrasound in the production of clip-fish[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 217-223
- [8] Rodríguez Ó, 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: 21-29
- [9] 刘军,张世伟. 鹿茸的冻干新工艺及性质[J]. *真空科学与技术学报*, 2011, 31(2): 229-232
- [10] 赵文亚,张慙. 不同干燥方式对杏鲍菇品质的影响[J]. *北方园艺*, 2015(23): 134-137
- [11] 吴阳阳,李敏,关志强,等. 预处理方法在食品冷冻干燥中的应用分析[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(9): 135-140
- [12] Santacatalina J V, Rodríguez O, Simal S, et al. Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: Influence on drying kinetics and antioxidant potential[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 138: 35-44
- [13] 周岷,孙艳辉,蔡华珍,等. 超声波预处理对苹果片真空冷冻干燥过程的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(22): 282-286
- [14] 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
- [15] César O, Per M W, Enrique R, et al. Influence of high power ultrasound application on drying kinetics of salted cod(*Gadus Morhua*) at low temperature[R]. *European Drying Conference*, 2013
- [16] César O, Per M W, Carmen R, et al. Influence of high power ultrasound application on drying of salted cod (*Gadus Morhua*). Effects on rehydration capacity and structure of dried samples[R]. *European Drying Conference*, 2013
- [17] 张晓敏,兰彦平,周连第,等. 果蔬渗透脱水技术研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(9): 204-207

- [23] 兰冬梅,许平,林晓岚,等. 超声波辅助渗透脱水预处理的农产品干制研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2015, 11(5): 133-138
- [24] 吴晓霞,张华余,张卫红,等. 超声场强化白萝卜渗透脱水研究[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 112-116
- [25] Nowacka M, Tylewicz U, Laghi L, et al. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration[J]. Food Chemistry, 2014, 144: 18-25
- [28] Liu Y, Wu J, Chong C, et al. Ultrasound assisted osmotic dehydration as pretreatment for hot-air drying of carrot[J]. Food Science and Technology Research, 2014, 20(1): 31-41
- [29] 刘云宏,吴建业,刘建学,等. 超声渗透脱水-热风干燥梨的研究[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 23-28
- [31] Başlar M, Kılıçlı M, Yalınkılıç B. Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 26: 182-190
- [32] Chen Z G, Guo X Y, Wu T. A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 30: 28-34
- [33] 王洪彩,张慙,王兆进. 香菇中短波红外干燥的试验[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(7): 698-705
- [34] 陈文敏,彭星星,马婷,等. 超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 74-80
- [35] Dujmić F, Brnčić M, Karlović S, et al. Ultrasound-assisted infrared drying of pear slices: textural issues[J]. Journal of Food Process Engineering, 2013, 36(3): 397-406
- [36] 宋小勇,钟宇,邓云. 热泵干燥技术的研究现状与发展趋势[J]. 上海交通大学学报, 2014, 32(4): 60-70
- [37] 王安建,高帅平,田广瑞,等. 花生热泵干燥特性及动力学模型[J]. 农产品加工, 2015(5): 57-60
- [39] 魏彦君. 南美白对虾超声波辅助热泵干燥动力学及品质特性研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2014
- [40] Ozuna C, Cárcel J A, Santacatalina J V, et al. Textural properties of vegetables: a key parameter on ultrasonic assisted convective drying [C]. Processings of 11th International Congress on Engineering and Food, 2011
- [41] Garcia-Perez J V, Carcel J A, Fuente-Blanco S, et al. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study[J]. Ultrasonics, 2006, 44(S1): e539-543
- [42] Milani J M. Moisture dependent physical properties of black grape seed [J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6: 1-15
- [43] Clemente G, Sanjuán N, Cárcel J A, et al. Influence of temperature, air velocity, and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds[J]. Drying Technology, 2013, 32(1): 68-76
- [44] Rooze J, Rebrov E V, Schouten J C, et al. Dissolved gas and ultrasonic cavitation—a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 1-11
- [45] Liu L, Yang Y, Liu P, et al. The influence of air content in water on ultrasonic cavitation field[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(2): 566-571

收稿日期:2016-05-19

## 四个意识

政治意识 大局意识  
核心意识 看齐意识