

预处理及级联干燥在热泵干燥食品中的应用

罗静¹,李敏^{2,*},关志强²

(1. 广东海洋大学 食品科技学院,广东 湛江 524088;2. 广东海洋大学 机械与动力工程学院,广东 湛江 524088)

摘要:热泵干燥技术作为一种热回收节能型干燥技术,广泛用于农产品加工。近年来更趋向于利用预处理技术结合基础热泵干燥或者热泵干燥与其它干燥技术联合的工艺更新研究。该文综述重点预处理结合热泵干燥技术及热泵干燥与其它干燥技术联合干燥的工艺研究进展,为热泵干燥技术匹配不同干燥物料的工艺更新提供参考。

关键词:热泵干燥;预处理;联合干燥;干燥品质;干燥能耗;食品

Application of Pretreatment and Cascade Drying in Heat Pump Drying Food

LUO Jing¹, LI Min^{2,*}, GUAN Zhi-qiang²

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; 2. College of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract: Heat pump drying technology is a drying technology of heat recovering and energy saving, it is widely used in processing of agricultural products. In recent years, it is more inclined to use pretreatment technology combined with basic heat pump drying or heat pump drying combined with other drying techniques to update the process. The research progress of pretreatment combined with heat pump drying technology and combined drying of heat pump drying and other drying technologies was reviewed. And the application status of different pretreatment methods combined with heat pump drying was summarized. It was intended to provide reference for the process update of heat pump drying technology matching different drying materials.

Key words: heat pump drying; pretreatment; combined drying; drying quality; drying energy consumption; food

引文格式:

罗静,李敏,关志强. 预处理及级联干燥在热泵干燥食品中的应用[J].食品研究与开发,2020,41(9):177-181

LUO Jing, LI Min, GUAN Zhiqiang. Application of Pretreatment and Cascade Drying in Heat Pump Drying Food[J]. Food Research and Development, 2020, 41(9): 177-181

干燥在改善食品的风味和口感上具有重要作用^[1],同时,采用干燥方法可除去食品中的大部分水分,防止食品腐败变质,延长食品的贮藏期,且食品经过干燥后,体积减小,运输方便。传统的干燥方法主要有自然干燥、热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和热泵干

燥等^[2]。其中,热泵干燥技术是一种常压节能型干燥技术,且能实现低温干燥,改善产品的品质^[3],结合其他预处理方式还可以缩短干燥时间^[4],干燥环境容易控制^[5]。特别适应于水产品等热敏性食物的干燥加工^[6]。但热泵干燥过程中会出现干燥前期速度快,后期干燥速度慢的现象,且低温下干燥时间长会由于微生物的作用引起品质的异变。为了有效地利用热泵干燥的优势,而又避免这些不利现象的发生,借助于相关技术的发展,业内专家做了大量改善性热泵干燥工艺的研

作者简介:罗静(1995—),女(汉),硕士生,从事水产品冷冻冷藏和干燥贮藏加工方面的研究。

* 通信作者:李敏(1967—),女,教授,硕士,从事制冷热泵及其在水产品加工及贮藏工艺方面的研究。

究工作^[7-11]。积极开发有效利用热泵干燥结合预处理技术或与其他级间联合干燥方式的新工艺,以满足不同干燥材料的工艺需求。因此,本文将通过综述近年来热泵干燥技术的应用,以及预处理结合热泵干燥、热泵-热风联合、热泵-微波联合、热泵-红外联合和热泵-真空冻干联合技术在食品干燥中的应用现状,为热泵干燥技术的开发应用和新型热泵工艺的推广提供参考。

1 热泵干燥技术在干制食品中的应用

热泵干燥技术自被开发以来一直广泛应用于农产品干燥加工中。不同的热泵干燥工艺参数条件直接影响着干燥物料的品质和性能。干燥温度、风速、湿度以及干燥过程等工艺参数的调节及与不同干燥物料的匹配一直受到研究者和使用者的广泛关注。比如在干燥鲑鱼过程中,研究表明分段式升温热泵干燥与恒温干燥相比,不但可以缩短干燥时间,还可以提高产品品质^[12]。在绿豆干燥过程中也得到类似结果^[13-14]。此外,干燥温度和风速也是影响干燥品质的主要原因之一。在干燥腌干鱼制品过程中采用 30℃、1.5 m/s 条件进行干燥,相较于其他的温度和风速条件得到的产品品质更好^[15]。在 45℃、3.5 m/s 条件下干燥菠萝蜜,干制品品质最佳^[16],同时说明了不同的干燥物料匹配不同的干燥工艺条件。水产品是一类易腐食品,且营养丰富口感好,干燥是原味保存和改善风味的常用加工方式。但水产品主要成分是水 and 蛋白质,在干燥过程中,品质容易下降。特别在 25℃ 条件下干燥时间过长容易发生腐败变质导致品质下降,而高温下干燥又会因为其所含肌球蛋白和肌动蛋白的热敏性容易发生变性,同样导致品质下降。所以干燥过程的工艺调节和匹配显得尤为重要。研究发现当加热温度 45℃ 时,鱼肉蛋白质未出现变性,当加热温度在 55℃~65℃ 时,肌球蛋白发生变性,继续加热到 70℃ 时,鱼肉的蛋白质发生完全变性^[17]。而热泵干燥装置可以通过调节干燥过程温度来适应干燥物料的品质要求,干燥水产品通过热泵干燥技术进行干燥,可得到品质较好的产品^[18]。在对小黄鱼干燥时发现,采用 55℃ 热泵干燥,产品品质最佳^[19]。此外,热泵干燥过程进行湿度控制,可强化传质,缩短干燥时间、降低成本。如苹果片干燥过程中,热泵干燥时间比热风干燥时间缩短 30%^[20]。在双华李干燥过程中,热泵干燥时间比自然干燥时间缩短 66.67%;与传统土炉干燥相比,成本降低 50%^[21]。其它,如佛手凉果^[22]、槟榔^[23]等干燥中,采用热泵干燥,均降低了成本。由此可见,热泵干燥相较于传统热风干燥和自然风干在干燥时间和干燥品质上的优势明显。

2 预处理在热泵干燥食品中的应用

热泵干燥前进行适当的预处理,可在有效缩短干燥时间的同时,获得更好的干制品品质。常见干燥预处理包括渗透预处理,超声波预处理,微波预处理,冻融预处理,真空预处理或几种预处理方式的联合等。

渗透是指在一定温度条件下,将生物组织浸入高浓度溶液中,利用细胞膜的半透性进行脱水的一种方法^[24]。Karim OR 等^[25]将蔗糖渗透预处理后的菠萝进行热风干燥的研究表明,经过渗透压脱水可以减少整体干燥时间,且干制品品质变好。Vega-Gálvez 等^[26]研究发现在辣椒干燥前加入 NaCl、CaCl₂ 可以提高干品品质。预先采用油酸乙酯加碳酸钾溶液浸泡黑葡萄,然后进行热风干燥,可以获得最短干燥时间^[27]。西班牙学者 Contreras 等^[28]发现渗透前处理会影响草莓热风干燥的结构特征。吴阳阳等^[29]研究发现不同渗透剂处理后的热泵干燥罗非鱼片其干燥时间均能大大减少,最大减幅达到 31%,且渗透预处理后的干制品其复水性、质构、色泽和蛋白质的变性程度都得到很好的改善,所以合适的渗透预处理可以提高罗非鱼片热泵干燥的综合性能。

超声波预处理时,物料因反复受到压缩和拉伸作用而不断收缩和膨胀,形成海绵效应。有利于除去与物料结合紧密的水分^[30]。功率超声波使物料产生微观孔道,提高水分有效扩散系数,对后续干燥产生有利影响。苹果经超声波预处理后,可缩短干燥时间 31%,提高孔隙率 9%~14%,同时复水率发生改变^[31]。研究表明,超声波联合热风干燥有效提高干燥过程中水分传热传质效率^[32]。超声波也经常结合渗透使用,M. Nowacka 等^[33]发现,超声波有利于渗透时传质作用,形成微观通道,细胞内部水分重新分配。可见,超声波的空穴作用等改善物料中水汽逸出的微观通道,提高传热传质效率。通过超声波的促渗透作用使得渗透液能够较充分地渗入物料组织结构中,从而最大可能的保护物料品质。在猪背最长肌渗透试验中发现,采用超声波辅助渗透有利于 NaCl 渗入^[34]。此外,有研究发现经过超声波渗透处理后,样品达到较高的玻璃态转变温度所需时间比常规渗透样品所需时间短^[35]。对鳕鱼片采用超声波处理,其干制品复水率增加,硬度减小,白度值增加(相比于低温干燥)^[36]。另有研究指出超声波处理辅助腌制牛肉可以加快腌制液的渗透速度,缩短腌制时间。超声破壁处理后竹材纹孔通道的变大变深更加易于液体的流通^[37]。超声波辅助渗透预处理能提高分子热运动加快化学反应速率等,能达到促进水分逸出和溶质渗入的双重效果。

冻融是指将食品先冻结后解冻的过程,经冻融后的食品组织结构容易脱水。干燥前适当的冻融预处理能缩短干燥时间,提高产品品质。经冻融预处理后的甘薯粉,可以提高干制品品质,另外研究发现经过适当次数冻融的甘薯粉品质比经一次冻融后的干制品品质更好^[38]。热泵干燥罗非鱼片经合适的冻融预处理后,热泵干燥的罗非鱼片其产品品质更佳^[3]。此外,添加剂预处理后罗非鱼片进行冻融-热泵干燥,可以缩短干燥时间且得到的干制品品质更佳。冻融处理能打开分子内或分子间氢键,增大原料的孔隙度,冻融还能疏松胶体结构,并促进分子链有序排列^[39]。

此外,有研究表明,物理和化学预处理方法的组合使用,对产品品质的改善效果优于单一处理方法。罗非鱼首先采用海藻糖溶液渗透、不同功率的超声波辅助和冻融循环等预处理,可以大大提高产品品质^[40]。此外,李敏等^[39]也发现罗非鱼片经过适宜浓度的添加剂渗透后,再结合冻融-热泵进行干燥,产品品质接近真空冷冻干燥的干品,但成本却大大降低。利用脉冲真空结合渗透预处理后热泵干燥的罗非鱼片干品,与常压渗透对照组相比,其白度指标提升了17.9%,复水率提升了80%,Ca²⁺-ATPase活性提升了93.6%。脉冲真空条件下的浸渍预处理大幅度提升热泵干燥罗非片的综合品质^[41]。同样,采用糖煮、糖浸和冻融三者组合对甘薯进行预处理,结果发现干燥后的产品品质比单一或者糖煮、糖浸组合处理的品质好^[42]。

3 热泵干燥与其它干燥技术联合在干燥食品中的应用

3.1 热泵-太阳能联合技术

太阳能是一种可再生资源,我国太阳能资源丰富,其中常年被太阳照射超过2 200 h的地区约占2/3,年照射总量大约有5 000 MJ/m²^[43]。由于太阳能受天气影响大,因此当采用太阳能干燥时,其干燥过程不是连续的,从而导致产品品质下降。将太阳能与热泵联合使用,可完整发挥各自的优势^[44],因此,太阳能热泵干燥装置的运行模式开发及其工艺的研究一直备受研究者关注^[45-46]。热泵-太阳能干燥模型的能量损耗研究中发现,热泵-太阳能联合系统在干燥过程中能耗的损失减少了40.53%^[47]。采用热泵-太阳能联合技术干燥罗非鱼片,不仅可以节约能耗,还可以提高干制品的复水率和贮藏稳定性^[48]。采用热泵-太阳能联合技术干制新鲜的香菇时,能耗和品质均达得了预想的效果^[49]。此外,采用太阳能-空气源热泵联合技术干燥枸杞,不仅可提高枸杞品质,而且比单一热泵干燥节约29.5%电能^[50]。

3.2 热泵-热风联合技术

热泵干燥的低温优势特别适用于热敏性物料的干燥。但是,干燥温度低会使得物料持续处于传热控制阶段,干燥速率下降,干燥时间长,导致产品色泽和品质下降^[51]。将热泵-热风联合使用,既可缩短干燥时间,又可提高产品品质^[52]。采用热泵-热风组合干燥南方波纹米粉丝,干燥能耗降低且干燥时间比单一热泵干燥时间、热风干燥时间分别缩短15.63%和25.00%^[53]。此外,徐建国等^[54]研究表明,采用热泵-热风组合技术也可以提高胡萝卜干制品品质。同样,对小黄鱼的干燥实验中发现,热泵-热风组合干燥过程的耗能降低了34.6%^[55]。

3.3 热泵-微波联合技术

微波是一种快速脱水的新型干燥技术,干燥食品厚度只要在微波穿透范围内,在干燥过程中是内外同时开始加热。但微波干燥存在干燥不均,终点不易控制,产品边缘或者尖角容易出现焦化等缺点。而热泵干燥技术在后期干燥过程中水分难以去除,导致干燥速率降低、耗能大,随着干燥时间的延长蛋白质容易发生变性。两者技术联合使用可以实现优势互补^[56]。荔枝采用热泵微波联合干燥工艺进行干燥,较好地解决了表面塌陷,色泽不好的问题,干燥速率也大大提高^[57]。罗非鱼片利用热泵-微波联合技术干燥,干制品的蛋白质变性程度与两者单一干燥相比大大减少、且口感和色泽度大幅度提高^[58]。刺参采用微波热泵联合干燥技术进行干燥明显地提高了其复水率和减小干燥的收缩变形,且不同的转换点参数会影响其综合品质^[9]。采用热泵-微波联合技术干燥豌豆,发现干燥后的豌豆抗氧化酶和发芽性都比单一干燥优势明显^[59]。研究者还发现,采用热泵-微波联合技术能促进部分果蔬香气物质的增加和转化^[60]。

3.4 热泵-真空冻干联合在食品干燥加工中的应用

真空冷冻干燥技术是目前公认的最好的干燥技术,能很好的保持干燥食品的色、香、味和形,但干燥时间长,成本高^[61],很难在常规食品干燥中推广应用。采用热泵-真空冷冻干燥联合技术干燥食品,实现分阶段干燥工艺链接,可以获得接近真空冻干品质的产品,还可大大缩短干燥时间,降低干燥成本。香菇采用热泵-真空冻干联合技术进行干燥其耗能比单一真空冷冻干燥的能耗降低37.69%,且综合品质比热泵干燥大有提高^[62]。南极磷虾采用热泵-真空冻干联合技术进行干燥,磷虾干制品品质与真空冷冻干燥品质接近,且干燥时间比单一的热泵干燥和真空冷冻干燥时间缩短一半^[63]。同样,青豆采用多级热泵-微波真空冻干组合技术进行干燥,产品品质接近真空冷冻干燥产

品的品质^[64]。

3.5 热泵-红外联合技术

红外干燥技术是指食品中的水分吸收红外辐射能量产生热量,水分由内往外扩散从而达到干燥效果。但对食品进行红外干燥时,容易产生受热不均现象,且后期干燥速度慢,终点温度不易确定等缺点^[65]。采用热泵远红外联合技术干燥金银花其干燥时间比单一热泵干燥时间缩短 52.1%,且提高干制品的综合品质^[66]。同样,在胡萝卜上,采用热泵远红外联合技术进行干燥也得到类似的效果^[67]。

4 结论

热泵干燥技术是一种节能干燥技术,可实现常温低湿度干燥,有着不可替代的技术优势,其与普通的热风干燥相比具有品质高能耗低的特点。但随着热泵技术在不同类型食品干燥中的推广应用,其低温干燥导致的后期干燥速率变小,干燥时间延长,产品的色泽和品质下降的缺点开始引起人们关注。目前人们对常规热泵干燥技术的研究已经很成熟了,现有的研究都是在常规热泵干燥技术的基础上进行工艺上改善,或者干燥物料匹配的工艺参数的研究。在充分利用热泵干燥优势的前提下,利用其它技术措施弥补其不足。特别是对含热敏性物质的物料的工艺研究,各种预处理方式及其结合,联合干燥方式的出现都从不同角度对纯热泵干燥技术进行很好的改善。诸如热泵-太阳能联合干燥工艺、热泵-热风组合干燥工艺、热泵-微波联合干燥工艺、热泵-红外联合干燥工艺和热泵-真空冻干组合干燥工艺等能弥补单一热泵干燥技术的不足,达成优势互补。合适的组合和干燥转换点的匹配能缩短干燥时间和提高产品品质。其中热泵-真空冷冻联合干燥制得的产品品质能接近真空冷冻干燥制品的品质且大大减少耗能,是替代真空冻干技术研究的重要方向之一,但目前国内很少采用热泵-真空冷冻干燥联合方法干燥食品,因此热泵-真空冷冻干燥联合方法具有较大的开发和研发应用前景。

参考文献:

- [1] 方嘉沁,韩舜羽,王凤娇,等.莲子的营养成分及其在食品工业中的加工研究进展[J].农产品加工,2019(6): 72-75
- [2] 龚丽,刘清化,刘军,等.柠檬热泵干燥工艺参数优化[J].食品研究与开发,2017,38(7): 79-83
- [3] 吴宝川,李敏,关志强,等.冻融预处理对罗非鱼片热泵干燥特性的影响及响应面法优化[J].渔业现代化,2014,41(1): 53-60,66
- [4] 王教领,宋卫东,金诚谦,等.杏鲍菇转轮除湿热泵干燥系统结构设计及工艺参数优化[J].农业工程学报,2019,35(4): 273-280
- [5] 刘兰,关志强,李敏.罗非鱼片热泵干燥时间及品质影响因素的初

- 步研究[J].食品科学,2008(9): 307-310
- [6] 吴宝川.冻融处理对热泵干燥加工罗非鱼品质影响的研究[D].湛江:广东海洋大学,2014
- [7] 黄皓,胡珊,罗华建,等.黑皮冬瓜空气能热泵干燥工艺参数优化[J].食品研究与开发,2019,40(4): 104-108
- [8] 程慧,姬长英,张波,等.香菇热泵-真空联合干燥工艺优化[J].华南农业大学学报,2019,40(1): 125-132
- [9] 赵海波,戴家傲,乔玲敏,等.热泵微波联合干燥对刺参干燥特性和品质特性的影响[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2018,31(4): 329-335
- [10] 张乐道,樊丹丹,任广跃,等.热泵干燥和远红外干燥干制怀山药溶出性研究[J].食品科技,2018,43(8): 81-84
- [11] 金雪冻,付婷婷,王辉,等.不同预处理方法对马铃薯片热泵干燥速率及其干片品质的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业:1-9.[2019-04-26].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019263>
- [12] 吴佰林,薛勇,李兆杰,等.温度模式对鲑鱼热泵干燥品质及动力学特性的影响[J].食品工业科技,2019(4): 86-92,99
- [13] Zhao H, Yang Z, Tao Z. Drying Kinetics of Continuous and Intermittent Heat Pump Drying of Green Soybean Seeds[J/OL]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13 (11). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0182>
- [14] Zhu Z, Yang Z, Wang F. Experimental research on intermittent heat pump drying with constant and time-variant intermittency ratio[J]. Drying Technology, 2016, 34 (13): 1630-1640
- [15] 任中阳,吴燕燕,李来好,等.腌干鱼制品热泵干燥工艺参数优化[J].南方水产科学,2015,11(1): 81-88
- [16] 石维善,李保国.菠萝蜜热泵干燥机理及工艺研究[J].食品研究与开发,2015,36(22): 102-105
- [17] 孙京新,刘功明,徐幸莲,等.差示扫描量热法测定鸡肉、鱼肉食品加热终点温度[J].食品科技,2015,40(1): 154-158
- [18] 石启龙,薛长湖,赵亚,等.热泵变温干燥对竹荚鱼干燥特性及色泽的影响[J].农业机械学报,2008(4): 83-86
- [19] 吴耀森,刘军,李浩权,等.小黄鱼热泵干燥工艺及设备选型分析[J].现代农业装备,2015(2): 37-42
- [20] 段全成,张绍红,李学瑞,等.苹果片热泵干燥的实验研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2018,33(1): 80-86
- [21] 王爽,周爱梅,杨小斌,等.双华李凉果热泵干燥工艺技术研究[J].食品工业科技,2017,38(12): 227-232
- [22] 周爱梅,王爽,刘欣,等.热泵干燥工艺对佛手凉果色泽及质构的影响[J].食品与机械,2017,33(10): 135-139
- [23] 张容鹄,高元能,冯建成,等.热泵干燥槟榔中试工艺参数优化[J].农业工程学报,2016,32(9): 241-247
- [24] 李为强,宋亚.渗透脱水传质过程的国内外研究进展[J].辽宁化工,2016(4): 507-511
- [25] Karim O. Effects of sulphiting and osmotic pre-treatments on the effective moisture diffusion coefficients DEFF of air drying of pineapple slices[J]. African Journal of Food Agriculture Nutrition & Development, 2010, 10(10): 4168-4184
- [26] A Vega-Gálvez, Lemus-Mondaca R, C Bilbao-Sáinz, et al. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo)[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 42-50

- [27] İbrahim Doymaz. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 212-217
- [28] Contreras C, M E Martín-Esparza, N Martínez-Navarrete, et al. Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes[J]. European Food Research and Technology, 2007, 224(4): 499-504
- [29] 吴阳阳,李敏,关志强,等.不同添加剂渗透预处理对热泵干燥罗非鱼片品质的影响[J].食品与发酵工业, 2015, 41(9): 113-119
- [30] Awad T S, Moharram H A, Shaltout O E, et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: a review[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 410-427
- [31] Nowacka M, Wiktor A, Śledź M, et al. Drying of ultrasound pre-treated apple and its selected physical properties[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 427-433
- [32] 罗登林,徐宝成,刘建学.联合热风干燥香菇片试验研究[J].农业机械学报,2013,44(11): 185-189,179
- [33] 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
- [34] Ozuna César, Puig A, García-Pérez, et al. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(1): 84-93
- [35] Xin Y, Zhang M, Adhikari B. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.)[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 640-647
- [36] Ozuna César, Cárcel Juan A, Walde P M, 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
- [37] 雍宸,常馨曼,关明杰.超声破壁效应对竹材横向渗透性能的影响[J].竹子研究汇刊,2013,32(4): 33-36,41
- [38] 郭婷,何新益,邓放明,等.冻融处理对变温压差膨化干燥甘薯粉特性的影响[J].中国粮油学报,2017,32(12): 12-18
- [39] 李敏,吴宝川,关志强,等.适宜添加剂预处理提高罗非鱼片冻融-热泵干燥品质[J].农业工程学报,2014,30(17): 295-304
- [40] Li M, Wu Y Y, Guan Z Q. Effect of Physical Osmosis Methods on Quality of *Tilapia* Fillets Processed by Heat Pump Drying[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2017, 67(2): 145-150
- [41] 李敏,关志强,吴阳阳,等.脉冲真空渗透预处理改善热泵干燥罗非鱼片品质[J].农业工程学报,2017,33(23): 306-314
- [42] 余彬.组合预处理对甘薯变温压差膨化干燥品质的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2015
- [43] 郝文刚,陆一锋,赖艳华,等.直接式太阳能干燥系统的热性能分析及应用[J].农业工程学报,2018,34(10): 187-193
- [44] 李亚伦,李保国,朱传辉.太阳能热泵干燥技术研究进展[J].包装与食品机械,2018,36(6): 53-58
- [45] 王林军,梁志国,张东.太阳能热泵联合干燥技术的运用分析[J].机械设计与制造工程,2019,48(2): 82-86
- [46] 白旭升,李保国,朱传辉,等.太阳能热泵联合干燥技术在农副产品中应用与展望[J].包装与食品机械,2017,35(3): 57-61,69
- [47] Qiu Y, Li M, Hassanien R H E, et al. Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system[J]. Solar Energy, 2016, 137: 225-235
- [48] 郭胜兰.太阳能-热泵联合干燥装置研制及罗非鱼干燥实验研究[D].湛江:广东海洋大学,2010
- [49] 孙相印.太阳能辅助热泵干燥系统中工艺参数对物料干燥品质的影响研究[D].郑州:郑州轻工业学院,2018
- [50] 胡灯运,何伟,张世超,等.太阳能-空气源热泵联合干燥系统设计及干燥枸杞的实验研究[J].新能源进展,2018,6(2): 83-89
- [51] 邓媛元,张雁,汤琴,等.干燥方式对苦瓜茶感官品质及挥发性物质的影响[J].中国食品学报,2019,19(2): 173-184
- [52] Chua K J, Chou S K, Ho J C, et al. Heat Pump Drying: Recent Developments And Future Trends[J]. Drying Technology, 2002, 20(8): 1579-1610
- [53] 李健雄,杨艾迪,唐小俊,等.南方波纹米粉的热泵-热风组合干燥工艺研究[J].食品科学技术学报,2018,36(2): 69-77
- [54] 徐建国,徐刚,张森旺,等.热泵-热风分段式联合干燥胡萝卜片研究[J].食品工业科技,2014,35(12): 230-235
- [55] 孙媛,谢超,何韩炼.响应面法优化热泵-热风联合干燥小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)的节能参数[J].海洋与湖沼,2013,44(5): 1257-1262
- [56] 杨祝安,吴肖望,钱创,等.热泵微波联合干燥技术研究进展[J].食品科技,2018,43(4): 43-47
- [57] 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
- [58] 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
- [59] Yang Z, Li X, Tao Z, et al. Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed[J]. Drying Technology, 2018, 36(5): 1-12
- [60] 张莉会,廖李,安可婧,等.干燥方式对果蔬风味物质影响研究进展[J].食品工业科技,2018,39(18): 315-319
- [61] 罗洁莹,汤梅,柳建良,等.蓝莓真空冷冻干燥工艺优化[J].食品研究与开发,2018,39(3): 91-95
- [62] 程慧,姬长英,张波,等.香菇热泵-真空联合干燥工艺优化[J].华南农业大学学报, 2019, 40(1): 125-132
- [63] Sun D, Cao C, Li B, et al. Study on combined heat pump drying with freeze-drying of Antarctic krill and its effects on the lipids[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(6): e12577
- [64] Zielinska M, Zapotoczny P, Alves-Filho O, et al. A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas[J]. Journal of Food Engineering,2013,115(3): 347-356
- [65] 刘斌,吴本刚,陈盼,等.红外技术在果蔬干燥中的应用及研究进展[J].包装与食品机械,2015,33(3): 50-53
- [66] 罗磊,康新艳,朱文学,等.热泵远红外联合干燥金银花的工艺优化及品质控制[J].食品科学,2016,37(18): 6-12
- [67] 顾震,徐刚,徐建国,等.胡萝卜热泵与远红外辐射加热联合干燥工艺研究[J].食品科技,2009,34(4): 75-78,84