

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.042

热管—热泵和红外—热泵联合干燥技术在农产品加工中的应用

Application of heat pipe-heat pump and infrared-heat pump in agricultural product processing

李晓燕 强秋秋 樊博玮 付健 赵宜范 张丽红

LI Xiao-yan QIANG Qiu-qiu FAN Bo-wei FU Jian ZHAO Yi-fan ZHANG Li-hong

(哈尔滨商业大学能源与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

(Energy and Architectural Engineering Institute, Harbin University of
Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China)

摘要:综述了具有耗时时间短、品质优良、节约能源等优点的热管—热泵和红外—热泵干燥农产品的研究进展,分析干燥过程中的干燥效率与干燥品质变化,总结热管—热泵干燥技术和红外—热泵干燥技术存在的问题,指出优化干燥农产品新思路。

关键词:热泵干燥;热管;红外

Abstract: This paper reviews the research progress of heat pipe-heat pump and infrared-heat pump dry agricultural products with the advantages of short time, good quality and energy saving. The drying efficiency and drying quality change in the drying process are analyzed. The problems of heat pipe-heat pump drying technology and infrared-heat pump drying technology are summarized, which provides new ideas for optimizing dry agricultural products.

Keywords: heat pump drying; heat pipe; infrared

中国是农业生产大国,但农产品加工业发展水平与国外相比,仍处于较低状态,农产品加工率仅 60%,低于发达国家(80%),加工和农业产值比值为 2.2:1,低于发达国家的 3.4:1^[1]。中国农产品的低加工水平及低附加值已对农业发展造成较大影响^[2]。农产品加工过程中需要对食品进行不同程度的干燥,以便后期运输、贮存和销售^[3-4]。

目前,热泵干燥(heat pump drying, HPD)在农产品

干燥方面有着广泛的应用。热泵采用逆卡诺循环原理,是一种将能量从低温热源转移到高温热源,并使能量品质得到提升的装置。热泵干燥是一种节能干燥技术,在热泵装置的基础上联合冷凝除湿装置,完成对热湿空气(干燥介质)能量回收的过程^[5-6]。与其他干燥方式相比,热泵干燥较温和,能有效控制进入干燥室内空气的温度和湿度,使得干燥样品表面水分的蒸发速度与内部水分向表面迁移速度大致接近,制成品质好、色泽好的干燥产品。同时,热泵干燥系统的能效比在 3.0 左右,能源利用率高。此外,热泵干燥使用范围广、环保无污染^[7-8]。然而在热泵干燥的中后期,干燥物料水分会降低,干燥速率变慢,干燥能耗增加,导致干燥产品发生氧化,内部结构被破坏,干燥产品品质降低^[9-10]。

单一的热泵干燥技术已难以满足干燥行业的需求,将热泵干燥技术与其他干燥技术联合是优化干燥技术的新思路,如太阳能干燥技术、微波干燥技术、热管余热回收技术以及红外干燥技术。其中,太阳能—热泵干燥技术对太阳能依赖性较大,受地域性和天气影响较大,也受不同时刻的太阳能辐射强度影响,制约了太阳能—热泵干燥系统的推广使用^[11]。微波—热泵干燥技术针对微波干燥在温度控制以及干燥物料在吸收微波能的均匀性上仍存在较大问题,需深入研究,且生产成本较高,制约了其发展^[12]。而热管—热泵干燥技术和红外—热泵干燥技术因其干燥品质优良、节能效果明显,受到学者关注。

文章主要综述热管—热泵干燥技术和红外—热泵干燥技术,通过分析两种联合干燥方式的干燥机理、干燥效率和干燥对产品品质的影响,探究热管—热泵干燥和红外—热泵干燥现存的问题,以期优化干燥农产品提供帮助。

基金项目:国家自然科学基金(编号:51476049);哈尔滨商业大学研究生创新科研项目(编号:YJSCX2018-530HSD);哈尔滨商业大学研究生创新科研项目(编号:YJSCX2019-603HSD)

作者简介:李晓燕(1962—),女,哈尔滨商业大学教授,博士。

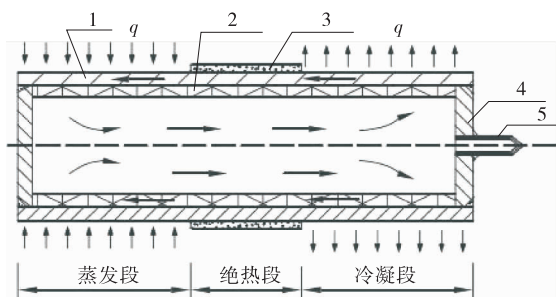
E-mail: mylxy6168@sina.com

收稿日期:2019-05-30

1 热管—热泵干燥技术

1.1 余热回收式热管

热管是目前导热能力最强的金属传热元件之一,主要结构包含蒸发段、绝热段和冷凝段,其优异的导热性能得益于管内工作液体相变快速传热性质。蒸发段吸收外界热量驱动其管芯内的液态工质发生相变,使液态工质相变为气态工质。气态工质在蒸气压的作用下流向低压的冷凝段,到达冷凝段后冷凝释放汽化潜热,并将热量传到管外环境。基于毛细虹吸效应,冷凝的液体回流到蒸发段^[13],如此循环。热管结构如图1所示。



1. 管壳 2. 吸液芯 3. 绝热层 4. 管端板 5. 排气口

图1 热管结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of heat pipe

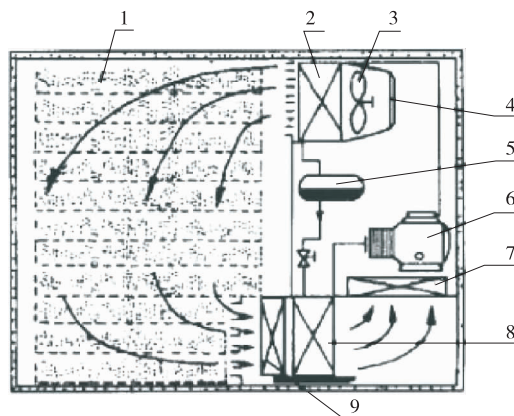
热管技术在回收利用传统余热方面有着非常大的潜力,尤其是应用于农产品干燥过程。由于振荡热管节能率高,运行过程耗能少,系统维护费用低,故张壁光等^[14]提出采用振荡热管换热器来回收木材干燥行业的余热。肖旭霖等^[15]采用热管辅助射流干燥香菇,利用热管回收余热,明显减少了能耗。厉从波等^[16]设计了一种烟草干燥热管换热器,为烟草干燥工艺提供新的设计思路。周宁^[17]将热管技术运用于茶叶的干制,发现热管技术能将传热效率提高40%左右,并且大大改善了干燥品质。周永光^[18]利用热管技术干燥油菜籽,回收利用柴油机排出的废热,减少了能耗。王龙龙等^[19]开展了热管干燥粮食试验,将热管放置在换热器顶部,有助于完成粮食干燥过程中的热量回收。

1.2 热管—热泵干燥机理

热管技术传热性能优异,在热泵干燥中能很好地实现对余热的回收利用。热管—热泵干燥通过热管换热器完成对循环湿空气中干燥介质的预冷和预热过程,当干燥介质通过热管蒸发端时将被预冷至露点温度,冷凝结露排出干燥室,而热管冷凝端释放的热量能够对干燥介质预热,提高进入干燥室内的空气温度,如图2所示。由此可见,热管—热泵干燥系统在提高干燥介质干燥能力、降低干燥能耗方面有着很大的优势。

1.3 热管—热泵干燥性能研究

热管联合热泵技术于20世纪90年代已出现在木材



1. 干燥室 2. 冷凝器 3. 送风机 4. 风机 5. 贮液器 6. 压缩机 7. 热管换热器冷凝段 8. 蒸发器 9. 热管换热器蒸发段

图2 空气回热闭式热泵干燥系统示意图

Figure 2 Diagram of heat pump drying system with air heat recovery

干燥工艺中,中国学者主要研究如何提高干燥设备的除湿能力。金苏敏^[20]采用分离式热管换热器,发现热泵干燥木材的除湿能力得到明显提升,节约用电24%。为了解决常用竖直并联式热管换热器冷凝端与蒸发端存在高度差,会造成风管布置困难、气流阻力大的问题,罗乔军等^[21]提出了一种水平排管式热管换热器,通过对比,发现该热管换热器能有效提高干燥稻谷的干燥速率,可替代原有的竖直并联式热管换热器进行农产品干燥加工。李永田等^[22]对热管和热泵联合技术在谷物干燥领域的应用进行了节能分析,发现热管联合热泵干燥技术相比于自然烘干节约费用84%。

在大型粮食干燥过程中,传统干燥工艺采用燃煤干燥,换热介质热空气仅与物料进行一次换热后直接排放到大气中,浪费能源,同时也对环境造成了一定程度的污染。李伟钊等^[23]设计了热管联合多级串联热泵干燥系统,结果表明,联合热泵系统干燥速率达2 016 kg/h,系统能耗为538 kW·h,除湿能耗比达3.75 kg/(kW·h)。结合目前干燥塔现状,燃煤干燥玉米除湿量为732 kg/h,而联合热泵干燥玉米除湿量为2 016 kg/h,联合热泵干燥大大增强了废热的回收能力,能有效降低系统能耗,且整个闭式干燥系统能隔绝废气直接排放到环境中,从而保护环境。

2 红外—热泵干燥技术

2.1 红外—热泵干燥机理

热泵干燥依靠热风由表及里对农产品进行干燥,但该干燥方式会阻碍干燥的均匀性,且在热泵干燥后期,农产品中水含量降低,物料内部和表面温度梯度增大,干燥速率减小。远红外是指波长在5.6~1 000.0 μm的电磁

波,其在干燥行业有着广泛的应用,如对烟叶、玉米、香蕉等农产品加工^[24-26]。红外干燥主要利用远红外辐射(far-infrared radiation, FIR)的电磁波能量从加热元件快速转移到干燥物料内部 1~3 mm 处^[27],使物料表面水分快速蒸发,在不加热周围空气的情况下使物料受热更快速、更均匀,抑酶、抑菌效果良好,能提供优质的干燥产品^[28-30]。将红外干燥技术与热泵干燥技术联合进行优势互补,不仅能提高干燥速率,还能提升干燥产品质量,优化干燥效果^[31]。红外—热泵干燥前期采取热泵低温除湿干燥,以便更好地保持干燥物料的热敏性活性成分,而在干燥后期采用远红外辐射干燥,有利于提高干燥速率,减少干燥能耗。远红外联合热泵干燥装置原理图见图 3。

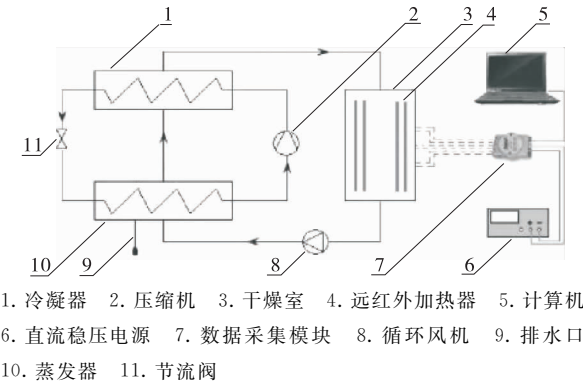


图 3 远红外联合热泵干燥装置原理图
Figure 3 Schematic diagram of far-infrared combined heat pump drying device

2.2 红外—热泵干燥效率

干燥效率是优化干燥工艺的重要参数之一,近年来,国内外学者对干燥过程除湿效率进行了深入研究。宋小勇等^[32]以湿毛巾为研究对象,发现红外联合热泵干燥较单一热泵干燥的除湿能力分别提高 8.1%, 15.7%, 22.2%。宋小勇^[33]又以铁棍山药为研究对象,发现铁棍山药的水分扩散率与红外加热功率的大小呈正相关,加热功率越大,铁棍山药干燥效率越好。Nachaisin 等^[34]研究红外干燥糙米时发现,在红外干燥初期有效水分扩散率随糙米含水率的降低而增加,当糙米含水率接近临界含水量时,有效水分扩散率逐渐下降。Thuwapanichayanan 等^[35]基于随温度 t 变化的有效水分扩散系数 D_{eff} 的 Arrhenius 方程建立了耦合传热传质模型,并指出,当 D_{eff} 为 $0.41 \times 10^{-10} \sim 1.43 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,该模型能够较好地预测蒜末含水量和内部温度的变化规律;在进行红外—热泵干燥蒜末试验时发现,前期热泵干燥阶段对蒜末水分含量的影响无显著性差异,而后期的红外干燥阶段干燥后样品内部温度较高,与热泵干燥相比,其含水率降低更快,干燥效率得到明显提高。

Nathakaranakule 等^[36]对红外—热泵干燥龙眼进行干燥能耗效率分析(表 1),发现 HP55+FIR450 比 HP55 的比能耗更低。

表 1 不同干燥工艺的比能耗[†]
Table 1 Specific energy consumption of different drying processes

干燥方法	干燥时间/h	比能耗/(MJ · kg ⁻¹)
HP 55 °C	15.5	55.98
HP 55 °C + FIR250 W	12.0	40.07
HP 55 °C + FIR350 W	11.0	34.02
HP 55 °C + FIR450 W	9.5	27.86

[†] HP 表示热泵温度;FIR 表示红外功率。

2.3 红外—热泵干燥对农产品品质影响

不同的干燥工艺条件对农产品品质的影响不同,干燥品质越高其产生的经济价值也越大。在鱿鱼干燥过程中,主要营养物质蛋白质是衡量其干燥品质好坏的重要指标,而挥发性盐基总氮(TVB-N)是国内外评价鱼的质量指标。汪岳刚等^[37]对比了热泵干燥和 100,500,800 W 红外热泵干燥 4 种不同的干燥方式对鱿鱼片中蛋白质和挥发性盐基总氮含量的影响,发现红外辐射板温度对鱿鱼片 TVB-N 值无显著差异。Antonio 等^[38]在用热风干燥鱿鱼时,发现 TVB-N 值随空气干燥温度的升高而显著增加。Wang 等^[39]研究发现,干燥后鱿鱼的必需氨基酸和非必需氨基酸含量无明显变化,Deng 等^[40]采用红外—热泵干燥鱿鱼时也得出了类似的观察结果。Wang 等^[39]还发现,100 W 红外—热泵干燥造成的鱿鱼片氨基酸质量损失最小,此条件更适合鱿鱼的干燥。Luo 等^[41]研究表明,与干燥温度 39 °C 的单一热泵干燥相比,红外加热温度 90 °C、热泵加热温度 39 °C、转换含水率 55% 时,红外—热泵干燥中绿原酸、木犀草苷、花色苷含量分别增加了 3.3%, 0.6%, 1.3%, 金银花褐变度降低了 4.1%。

3 存在的问题及展望

(1) 红外—热泵干燥系统中,热泵干燥属于联合干燥的前一阶段,而联合干燥的后一阶段为红外干燥。红外辐射板的温度对干燥产品的水分扩散率、结构以及干燥样品所含的营养物质均会产生影响,而红外辐射板存在较大的热惯性,容易造成超过设定温度范围进而损坏干燥物料,故研究红外加热温度的控制系统对红外—热泵干燥系统的干燥性能优化不可缺少。

(2) 热管—热泵干燥系统中,热管换热器的余热回收能力存在不足,而热管换热器的结构更直接影响了其与热泵干燥系统的耦合干燥性能。热管—热泵干燥系统的发展主要体现在热管换热器的变化。传统的分体式热管换

热器一方面存在携带现象影响传热能力的问题,另一方面安装布置的难度使得系统的能耗增加,而传热性能更优的环路热管也面临着启动问题和不稳定性等问题,故后续研究方向是如何优化热管换热器的结构,提升其余热回收性能,进而增强热管—热泵干燥系统的干燥性能。

(3) 对联合干燥的研究较多停留在工艺层面上,缺乏理论上的深入研究,对物料的干燥工艺参数、联合干燥的先后顺序及干燥转换点的确定都未进行细致深入的研究。后续的研究方向还需在研究工艺的基础上,重点研究干燥理论,深层次分析不同工艺条件的作用机理,深入探究物料的干燥规律。

热管—热泵干燥和红外—热泵干燥具有干燥时间短、干燥品质高、节能环保等优点,在农产品干燥领域有广阔的应用前景。但联合热泵干燥存在着红外辐射板、热管回热器自身性能和结构的缺点,仍需进行深入研究。经设计和技术的不断优化,热管—热泵干燥技术和红外—热泵干燥技术将会有助于缓解能源危机和减少环境污染,为节能环保带来更大效益。

参考文献

- [1] 农业部农产品加工局. 农业部关于印发《农产品加工业“十三五”发展规划》的通知[EB/OL]. (2016-11-30) [2019-08-30]. http://jiuban.moa.gov.cn/sjzz/qiyeju/dongtai/201611/t20161130_5383074.htm.
- [2] 蔡家勇. 我国农业经济发展中存在的问题及对策研究[J]. 中国经贸导刊, 2016(35): 68-70.
- [3] 杨爱金, 刘璇, 毕金峰, 等. 食品干燥过程中水分扩散特性的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 247-250.
- [4] 李文丽. 枸杞脱蜡剂及促干机理研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 2-6.
- [5] ZAFER E, ARIF H. Assessment of cost-sources and improvement potentials of a ground-source heat pump food drying system through advanced exergoeconomic analysis method[J]. Energy, 2017, 127: 502-515.
- [6] 张振涛, 张璧光, 顾炼百, 等. 两级压缩高温热泵木材干燥的研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007(4): 41-45.
- [7] 戚玉欣, 陶志国. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 资源节约与环保, 2016(5): 69.
- [8] 张兴亚, 吴晶晶, 於海明, 等. 热泵干燥机研究现状及展望[J]. 农业工程, 2018, 8(8): 78-82.
- [9] 李晖, 任广跃, 时秋月, 等. 怀山药片热泵—热风联合干燥研究[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 101-105.
- [10] 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.
- [11] 王林军, 李亚宁, 张东, 等. 太阳能热泵联合干燥系统研究现状[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(4): 1-5.
- [12] 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.
- [13] JOUHARA H, CHAUHAN A, NANNOU T, et al. Heat pipe based systems: Advances and applications[J]. Energy, 2017, 128: 729-754.
- [14] 张璧光, 高建民, 伊松林, 等. 我国木材干燥—节能减排技术研究现状[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(3): 38-42.
- [15] 肖旭霖, 袁华聪, 高晓丽, 等. 香菇热管射流干燥动力学研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 114-117, 121.
- [16] 厉从波, 刘超锋, 杨玮, 等. 烟草干燥系统热管换热器的结构确定[J]. 广州化工, 2009, 37(8): 200-201.
- [17] 周宁. 热管技术在采花毛尖加工中的应用研究[J]. 中国茶叶, 2014, 36(2): 19-21.
- [18] 周光永. 基于柴油机余热的油菜籽干燥系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 250-253.
- [19] 王龙龙, 武文斌, 秦强, 等. 热管余热节能回收装置在粮食干燥系统中的应用试验研究[J]. 粮食与饲料工业, 2016, 12(2): 10-13.
- [20] 金苏敏. 热管空气回热器在热泵木材干燥机上的应用[J]. 南京化工大学学报, 1995(S1): 49-52.
- [21] 罗乔军, 张进疆, 吴耀森, 等. 稻谷热管辅助热泵除湿干燥技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 247-251.
- [22] 李永田, 张丽. 热管和热泵联合技术在谷物干燥领域的应用研究[J]. 现代农业科技, 2016(21): 147-148.
- [23] 李伟钊, 盛伟, 张振涛, 等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 278-284.
- [24] 李旭, 陈良元, 韩李峰, 等. 红外一对流滚筒干燥方式下烤烟叶丝质量的变化特征[J]. 南方农业学报, 2017, 48(12): 240-246.
- [25] 魏忠彩, 孙传祝, 苏国梁, 等. 红外玉米穗干燥试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 247-250, 256.
- [26] 黄斌, 麦馨允, 张开平, 等. 香蕉片远红外干燥工艺的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 132-136.
- [27] DING Chao, KHIR R, PAN Zhong-li, et al. Influence of infrared drying on storage characteristics of brown rice[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 149-156.
- [28] SENEVIRATHNE M, KIM S H, KIM Y D, et al. Effect of far-infrared radiation drying of citrus press-cakes on free radical scavenging and antioxidant activities[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 168-176.
- [29] ADAK N, HEYBELI N, ERTEKIN C. Infrared drying of strawberry[J]. Food chemistry, 2017, 219: 109-116.
- [30] KRISHNAMURTHY K, KHURANA H K, SOOJIN J, et al. Infrared heating in food processing: An overview[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 2-13.
- [31] PARK J H, LEE J M, CHO Y J, et al. Effect of far-infrared heater on the physicochemical characteristics of green tea during processing[J]. Journal of Food Biochemistry, 2009, 33(2): 149-162.