

# 热泵技术在农产品干燥中的应用

山东建筑大学热能工程学院 马翠亚 杨开敏 王远成

**【摘要】**农产品干燥加工是个高能耗的过程,直接或间接地对环境产生了污染。因此,农产品加工行业迫切需要节能高效的干燥技术及设备。目前农产品干燥方式有热泵干燥、太阳能干燥、微波干燥、冷冻干燥和联合干燥技术等,其中热泵干燥技术具有节能、对环境友好的优点。本文介绍了热泵在农产品干燥工艺中的具体应用,讨论和分析了热泵技术在农产品干燥中展现出的优势和特点,以及与其他节能技术的联合互补等,同时指出了热泵干燥存在的不足及应对措施,并对热泵干燥的发展进行了展望。

**【关键词】**热泵 农产品干燥 环保 节能

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0400104)、(2016YFD0401002),山东省自然科学基金(ZR2016EEB15)

DOI 编码:10.16641/j.cnki.cn 11-3241/tk.2019.04.003

## Application of agricultural product heat pump drying technology

Department of thermal engineering, Shandong Jianzhu University

Ma Cuiya, Yang Kaimin, Wang Yuancheng

**Abstract:** Dry processing of agricultural products is a process of high energy consumption, which directly or indirectly pollutes the environment. Therefore, the agricultural product processing industry urgently needs energy-saving and efficient drying technology and equipments. At present, the drying methods of agricultural products include heat pump drying, solar drying, microwave drying, freeze drying and combined drying system, among which heat pump drying technology has the advantages of saving energy and being friendly to the environment. This paper introduces the specific application of heat pump in the drying process of agricultural products, discusses and analyzes the advantages and characteristics of heat pump technology in the drying of agricultural products and the joint complementarity with other energy-saving technologies, and points out the shortcomings of heat pump drying and countermeasures, and illustrates the future development prospects of heat pump drying.

**Keywords:** Heat pump; agricultural products drying; Environmental protection; Energy saving

## 0 引言

农产品是人类生存的 necessary 物质基础之一，也是维持社会发展和国家经济发展的重要保障。农产品在收获后常常需要再加工，而干燥就是一个比较关键的加工工艺过程。晒干、烘干、烤干等方法是传统的农产品干燥方式，但是太阳日晒方法易受天气的影响，效率不高，而且干燥后难以得到较高质量的产品。传统的燃煤蒸汽烘干或者热风干燥法相比于晒干方式虽然效率有所提高，但却污染环境，能源消耗量大。在节能、环保问题所受的关注度越来越高的情况下，原来的燃煤、燃油干燥方式势必会被逐渐淘汰。所以人们就开始寻找更加节能、环保、安全、高效的新型干燥方法与设备，随之就产生了热泵干燥、太阳能干燥、冷冻干燥、微波干燥及联合干燥技术等。这些方式相比与传统的晾晒工艺来说干燥速率大大加快，能源消耗量也很大程度地降低。但是在实际的生产及推广应用中也存在一些缺陷及不足，需要对其加以完善和优化，使农产品干燥更加高效、节能，并满足环保的要求。

热泵发展起于二十世纪七十年代末八十年代初，在当时被认为是一种新技术，因此发展比较快速。热泵可用于农产品的干燥。其干燥特点是：热效率高、除湿快，所得到的干燥制品品质高而且又节约能源。因此受到了越来越多的重视。当今，世界能源短缺，热泵技术在农业和工业生产中的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。

## 1 热泵技术的发展过程

作为一种可持续发展技术，热泵技术被广泛地应用到空调、工农业等行业，既节约能源又能保护环境。热泵干燥技术较传统的热风干燥方法可节能约 30% 或更多，可以降低能耗，干燥成本可降低约 10%~30%<sup>[2]</sup>。

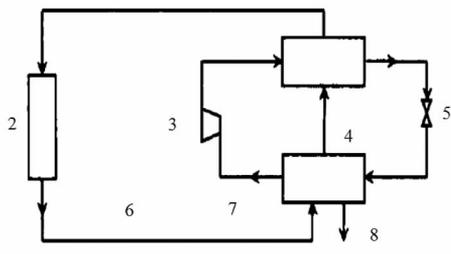
20 世纪初，“热泵”由欧洲人提出。20—30 年代是热泵技术快速发展的阶段。50 年代，国内开始了对热泵的研究工作，当时开始研究

热泵的单位只有天津大学。60 年代，是日本研究热泵技术的起始阶段，如今，日本的谷物机械化和干燥水平几乎是世界上最高的，其干燥机械化率已达 92%<sup>[3]</sup>。80 年代，我国对热泵技术的研究仍然不够深入，还处于研究的起始阶段，并且该技术也没有被广泛地应用到各个行业，仅是用于干燥木材。随着科学技术的进步，国内外对热泵技术的研究更加深入，热泵装置也得到了优化。北京林业大学张璧光等研发了 RCG 系列双热源除湿干燥机<sup>[4]</sup>产品。该产品与北京冷冻机厂联合研制，在实际应用中显示出了低干燥能耗、干燥效果好的优点，我国十几个省市均已引入使用，并且已在海外销售。杨先亮等从热力学定律方面出发分析了带有辅助冷凝器的热泵干燥装置，在对婆枣进行的干燥试验中显示系统的 COP 为 3.82，热效率可达 0.85<sup>[5]</sup>。

## 2 热泵干燥农产品的优点

### 2.1 热泵干燥工作原理

开路式、半开路式和封闭式系统是常见的三种热泵干燥系统，它们之间的差别在于干燥介质的循环不同。其中封闭式系统又称为闭路式系统。目前，应用较多的是封闭式热泵系统。封闭式热泵干燥系统是热泵干燥系统中常用的一种结构形式。这种系统的特点是干燥完物料后的干燥介质没有被直接排入环境，而是重新对其进行除湿升温处理后再次进入干燥循环中。图 1 是一种常见的闭式热泵干燥系统原理图。



1—冷凝器；2—干燥室；3—压缩机；4—蒸发器；5—膨胀阀；6—空气；7—热泵循环工质；8—冷凝水

图 1 热泵干燥原理图

总的来说,空气源热泵系统主要依据逆卡诺循环的原理工作,制冷剂工质在系统中的蒸发器、冷凝器等部件中发生气液两相的热力循环过程,工作中的驱动力是电能,它能实现环境中的热能由低品位向高品位转换,并对高品位的能量加以利用。在干燥室内,干燥介质对物料进行加热,物料温度升高,其内部水分因吸收热量发生蒸发现象,以此实现连续干燥过程。

## 2.2 热泵干燥可行性分析

### 2.2.1 成本低

随着热泵技术和科学研究水平的提高,热泵的性价比也变得越来越好,运行费用越来越低。李伟钊等对玉米热泵干燥和燃煤干燥的经济性分析进行了试验比较,玉米初含水率为 34%,终含水率为 14%,结果发现采用热泵干燥时每千克干玉米的烘干成本为 0.038 元,而采用燃煤干燥时这一数值是 0.049 元,每得到 1 干玉米,热泵干燥比燃煤干燥可节省成本 0.011 元<sup>[6]</sup>。邵红进行了热泵循环干燥器的经济性分析,结果表明热泵干燥器的可行性更高,分析结果显示采用热泵每年的运行费用可减少约一万四千元,虽然增加了二万元的投资费用,但是投资回收期仅为一年半<sup>[7]</sup>。因此还是比较划算的一种投资方法。从上述分析可以看出,热泵干燥确实可以实现省钱的目的。

### 2.2.2 节能环保

对于闭路式热泵干燥系统,通过蒸发器吸收来自干燥室的温湿空气中所含有的显热和潜热,干燥介质在冷凝器内被加热,而给热泵系统输入的能量只有热泵压缩机的耗电<sup>[8]</sup>。热泵机组 COP 较高,因此有显著的节能效果。同时,干燥会产生大量的粉尘,由于空气是闭路循环,可以防止干燥产生的有毒气体及粉尘随废气排入大气,对环境非常友好。

### 2.2.3 干燥温度低、效果好

对于很多农副产品,其热敏性较高,较高温度的干燥工艺会影响其外观品质,使其内

部的营养成分散失。若使用非常低的干燥温度进行干燥,又常常使得干燥速率下降,干燥时间大大增加,物料最终含水率不达标。而热泵干燥可以提供一个很低的温度(大概在 40℃~60℃),可以满足稻谷干燥的温度需求。较低的干燥温度同时又兼有除湿功能,可以使干燥物料的最终含水率保持在标准水平,这就使得热泵干燥在农产品干燥加工中持有优势。

## 2.3 热泵干燥农产品的应用分析

### 2.3.1 干燥谷物

热泵干燥粮食,能够保持粮食的色、香、味与营养成分,种子的发芽率也能得到保障。有研究证明,稻谷热泵干燥机的干燥效率是普通燃油干燥机的 1.1 倍,但能耗费用却能降低 60%。在当下的燃油单价在不断上升的情形下,低耗能的稻谷热泵干燥机更具成本优势。

20 世纪 40 年代国外谷物机械干燥开始起步,到 70、80 年代,已经逐渐向高效率、低耗能、自动化、新动能和新技术的方向发展。如今在发达国家,谷物干燥加工的生产实践中热泵干燥技术已经得到了非常广泛的应用,并且节能效果非常好,国内对于热泵干燥技术的应用也越来越多。在日本,有人对谷物进行了热泵干燥实验,结果发现每从谷物中移除一千克的水所消耗的热量值约为 2000<sup>[9]</sup>。这一数据比传统的气流干燥的平均能耗值还要低。Gioco M 对连续三年的生产试验进行了研究,结果发现热泵干燥较传统的气流干燥法最多可节约一半的能源消耗量<sup>[10]</sup>。吴耀森等从技术和成本方面分析得出热泵稻谷干燥技术的能耗低、成本低,热泵干燥的成本和能耗分别是 10.16 元/(100 稻谷)和 1248.1(水),而某型号的燃油干燥机的这两个数据分别是 16.86 元/(100 稻谷)和 3292(水),燃油干燥机的成本是热泵干燥机的 1.66 倍,能耗是热泵干燥机的 2.64 倍<sup>[11]</sup>。王双凤等利用数值模拟的方法,运用 CFD 软件模

拟了太阳能辅助热泵干燥粮食系统内温湿度的分布规律,结果证明了该系统用于粮食干燥的可行性<sup>[12]</sup>。

### 2.3.2 干燥茶叶

茶产品的品质很大程度上取决于茶产品的生产加工过程,而干燥过程是茶叶加工中的一个重要环节,干燥过程是否得当直接决定了茶产品的营养成分、外观等品质能否达到标准<sup>[13]</sup>。常规的茶叶干燥方式有:晒干、炒干和烘干,但是这些方式都存在着一定的缺陷,比如晒干易受天气状况的影响,电加热炒干的能耗较高,燃煤炒干污染环境等。热泵干燥作为解决传统茶叶干燥方式高能耗、干燥效果低的方法之一,具有良好的干燥效果,而且成本费用低、绿色无污染。国内赵升云等研发了一种热泵-电辅助一体化茶叶烘干机,在对武夷茶进行的干燥试验中表明采用热泵干燥茶叶能够有效节约能源,茶产品的品质得以提升<sup>[14]</sup>。有研究显示,将太阳能-空气源热泵联合干燥技术应用于茶叶干燥中,有显著的节能效果。明廷玉等对太阳能与空气源热泵联合干燥茶叶工艺进行了研究,发现该系统可以有效地解决干燥系统能量供应的稳定性问题,并且在 50℃~60℃之间均可以在 8 小时内使茶叶达到所要求的含水率<sup>[15]</sup>。罗会龙等设计并构建了一种空气源热泵辅助供热的太阳能干燥系统,测试、分析了系统的干燥能效比以及热力性能,分析结果发现空气源热泵辅助供热的太阳能干燥系统有更大的节能潜力<sup>[16]</sup>。

### 2.3.3 干燥果蔬

脱水蔬菜是通过烘干等加工过程,将蔬菜内的大部分水分脱去,脱水后的蔬菜重量约减轻了五分之一,当在遇水条件下可恢复食用,因便于携带及储存,受到大多数人的喜爱,脱水蔬菜的需求量也越来越多。国外在 1990 年后才逐步在食品干燥行业中使用热泵干燥技术。Prasertanetal(1997,1998a)进行了热泵干燥香蕉的研究,结果发现使用热泵干

燥香蕉的干燥效果好、运行费用低<sup>[17]</sup>。西班牙的 Vazquez 在对葡萄进行的热泵干燥试验中发现干燥时间明显缩短,干燥品质显著提高<sup>[18]</sup>。在澳大利亚、新西兰以及挪威等国家,热泵除湿干燥技术在水果、坚果及蔬菜的干燥中已得到了越来越广泛的应用<sup>[19]</sup>。近几年来,国外热泵干燥的重点已经从改善干燥产品本身的工艺优化转移到对设备设计方面的研究,取长补短,充分展现热泵干燥的优势。我国对于热泵在蔬菜干燥领域的研究仍处于试验阶段,还无法达到规模化的生产要求。针对热泵在干燥中后期出现的一些缺陷,比如干燥速率变低、能耗比上升的情况,有学者对热泵系统进行了改进,使得热泵在干燥果蔬过程中出现的这些缺陷得到了改善。张绪坤等进行了热泵干燥胡萝卜的试验,干燥形式为热泵流化组合方式,试验结果表明该干燥方法较箱式热泵干燥的干燥时间更少<sup>[20]</sup>,当用于干燥含水率较高的物料时,可以考虑这种方法。季阿敏等对大红皮萝卜进行了干燥实验,试验方法采用热泵热风联合干燥的形式,该研究得出了热泵热风联合干燥情况下最优的组合方式,该组合方式较传统的干燥方式干燥速率更快、能耗更低,经济效果好<sup>[21]</sup>。

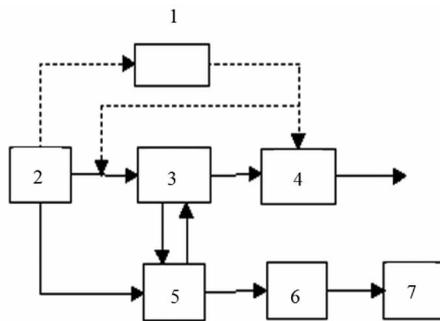
除上述应用之外,使用热泵进行干燥的农产品还有鱼干、香蕉片、药材、核桃、胡萝卜、洋葱、马铃薯薄片等<sup>[22-23]</sup>。

## 3 热泵干燥过程中其他节能技术的应用

### 3.1 热泵与其他热源联合干燥技术

#### 3.1.1 太阳能-热泵联合干燥技术

图 2 是一种常见的太阳能-热泵联合干燥装置系统原理图。太阳能-热泵联合系统由太阳能系统和空气源热泵系统结合组成,是一种新型的干燥系统。太阳能热源在有强烈日照辐射的情况下作为主要供热源,而在夜晚或阴雨天气时采用空气源热泵单独供热。日本研制了一种太阳能-除湿干燥窖,顾名思



1—空气集热器;2—空气;3—热泵干燥系统;4—干燥风机系统;5—热泵换热装置;6—热泵风机;7—排出空气

图2 太阳能-热泵联合干燥系统原理图

义,它的工作系统包括太阳能系统及热泵干燥系统,工作过程中可以实现这两种方式联合,研究表明:这种联合干燥窖的干燥能耗较传统干燥窖可节省能耗约50%~66.6%<sup>[24]</sup>。我国从1980年开始了对太阳能-热泵联合干燥系统的研究。近年来,太阳能-热泵干燥技术在木材干燥行业已经得到了广泛的应用,同时在蔬菜、粮食等领域的使用也越来越多。邵维进等对太阳能热泵联合干燥肉制品系统进行了研究,结果表明,联合干燥系统与燃料锅炉相比可节能约80%以上,比热管供热系统可节能约75%<sup>[25]</sup>。此外,当干燥具有热敏性的物料(如药材)时,可以在保证降低干燥时间及能耗的前提下又能保证干燥物料的品质,从而产生最大的经济效益。

### 3.1.2 热泵-热风联合干燥技术

热泵-热风联合干燥兼具了单独的热泵干燥及热风干燥的优点,比如干燥出的产品品质好,干燥过程中速率快。同时又克服了单独干燥时存在的缺陷,比如能够弥补热泵干燥在中后期存在的一些问题:干燥速率变低、时间变长、耗能增加等,在农产品干燥工艺中是一种值得推荐的干燥方法。李远志等进行了热泵-热风联合干燥胡萝卜和金针菇的试验研究,提出了干燥过程中最佳干燥工艺参数<sup>[26]</sup>。李华栋等利用热泵-热风联合干燥装置进行了胡萝卜片干燥试验,结果发现该方法可以减少在单独的热风干燥下出现物料内成

分受到损坏的情况的发生,同时又能缩短干燥时间,产品品质也能得到保证<sup>[27]</sup>。徐建国等分别采用了热风干燥、热泵干燥以及热泵热风联合干燥三种方式对绿茶进行了干燥试验,结果发现传统的热风干燥工艺无论是从汤色、外形、色泽都跟热泵热风联合干燥出的绿茶有很大差距,而且单一热泵干燥的味道与香气也差之甚远<sup>[28]</sup>。

### 3.1.3 热泵-微波联合干燥技术

将热泵与微波干燥方式联合起来,将干燥过程分为几个干燥段,可以优势互补,并能选择性加热,反应比较灵敏,并获得更高品质的产品。关志强等对整果荔枝进行了热泵-微波联合干燥工艺的研究,得出了系统最优工艺参数组合<sup>[29]</sup>。赵海波等对热泵-微波联合干燥刺参过程中刺参的干燥特性和品质特性进行了研究<sup>[30]</sup>。宋杨等对海参采用微波真空与热泵联合的方式进行干燥试验,结果发现该干燥方式较单纯的热泵干燥时间可缩短约50%以上,产品复水率得到了较大的提高<sup>[31]</sup>。郑亚琴通过热泵微波联合干燥方法对雪莲果进行了干燥实验研究,试验结论是:当热泵风速为1.69、热泵干燥温度为42.7℃、转换点含水率为50%、微波功率为2时,干燥效果最好<sup>[32]</sup>。

### 3.2 变频技术的应用

在生活中的农产品干燥系统设计中,都是考虑了复杂的生产、环境等条件的影响,运行时风机的风速达到了最大值,使得供需失衡,供远远大于求,大量的能量被浪费掉;而风机型号的选择是按照最大产量时的用风量、按最恶劣的条件选用的,这就使得能耗进一步增加<sup>[33]</sup>。由异步电动机的转速公式可知,通过改变频率的大小可以实现控制风速的目的,进一步使能耗得到控制。因此,在干燥系统中引入变频技术可以使干燥过程实现节能目的。因此,为了更好的适应不同的干燥作业要求,推荐将变频器安装在新建或现有的农产品干燥系统的风机上,以使干燥系统

的效率及品质得以提高,降低能源消耗。

### 3.3 回热技术的应用

采用回热技术的系统内循环为:在热泵系统的冷凝器中干燥介质变为高温气体,从风道进入干燥室内干燥物料,最后变成湿热空气,但是温度有所降低,经除湿后在回热器中吸收热量温度上升,最后经冷凝器再次被送入干燥室内。在这个循环中,来自回热器的由干燥物料蒸发的水蒸气汽化热被蒸发器吸收,避免了传统干燥方式将干燥后带有大量热量的湿空气排入环境的现象,使能源的利用率得到提高,达到了节能的目的。张进疆等研究了回热型空气源热泵在农产品干燥加工中的应用,结果发现在空气源热泵系统中加入回热系统后,可以使干燥器进风的相对湿度减小,将该系统应用于稻谷、水产品等的干燥中时发现可比传统干燥系统节能约 3/10<sup>[34]</sup>。杜垲等对分别有热管回热器和无热管回热器的热泵干燥系统进行了实验对比,结果发现与无热管回热器的热泵干燥系统相比采用分离式热管回热器的热泵系统的回热效果较好,增加了系统的干燥能力,减少了干燥能耗<sup>[35]</sup>。

### 3.4 相变材料的应用

相变材料可以用来储存热量,当需要的时候再将热量释放出来。在干燥室内放置相变材料可以使干燥温度保持在预设值允许的范围内。作为常见的相变蓄热材料之一,石蜡的特点是安全可靠、无腐蚀性及价格低廉,当温度低于 500℃时有很稳定的化学性质,并且相变时的体积变化及所需压力都很小,因其良好的特性常被作为热泵蓄冷及蓄热用材料<sup>[36]</sup>,并得到了越来越多的应用。但是纯石蜡的导热系数很低,为了增强传热性能,可在石蜡中加入导热率高、易相容的物质,比如碳纤维、石墨、纳米粒子和金属粉末等,组合成的复合相变材料的热导率明显增大,并且不会影响到石蜡的融化潜热。王剑锋等研究了相变材料在热泵干燥中的应用,结果发现加入

相变材料的热泵系统有更加明显的节能效果,当物料的平均质量百分比为 35.5%,干燥温度为 50℃时<sup>[37]</sup>,使用相变材料的热泵系统较传统的热风干燥系统可节能约 36.5%。史嘉乐等研究了太阳能干燥系统中相变蓄热材料的热能调配作用的影响,结果表明加入相变材料后的干燥系统的集热器和干燥箱的温度变化范围都很小,相变蓄热材料的热能调配作用比较好<sup>[38]</sup>。

## 4 热泵干燥存在的问题

热泵干燥农产品技术虽然已经趋于成熟和完善,但是仍存在如下一些问题:

(1)干燥室内的温度及湿度多是人工控制,无法达到大规模、自动化控制。虽然空气源热泵干燥有很高的稳定性,但是干燥过程既复杂又多变,需要随时监控物料的温湿度值,确保干燥物料的品质,热泵系统还不能对干燥介质的温度、湿度、流量等参数进行精确的控制。

(2)对压缩机性能提出特殊要求。比如,当压缩机处于高压比条件下能效比也要维持在较高的水平;在大负荷、高冷凝温度及高压差的情况下要求压缩机有足够大的机械强度来保证工作的可靠性、平稳性;要求压缩机有较强的抗液击能力和防过热能力。

(3)干燥系统产品序列不够完善,干燥设备类型杂、部分干燥设备质量差。箱式结构的干燥装置居多,干燥室内有着干燥不均匀、传热效率差的缺陷,长时间的干燥降低了干燥物料的品质<sup>[39]</sup>。目前已生产出的干燥设备数量少,规模小,自主开发产品少,干燥设备型号多、部分型号的干燥装置质量得不到保障。很多小型制造厂没有技术和设备条件就模仿制造干燥设备,使得干燥制品品质低,设备寿命短。

(4)热泵工质的影响。蒸发器性能会受热泵工质充入量的影响<sup>[40]</sup>,在某室温下以 CO<sub>2</sub> 热泵为例,充入量越少,蒸发器对干燥室内的热空气进行冷却除湿的能力越好;当充入量

过多时,将影响蒸发器的吸热性能。所以对不同型号的热泵干燥装置应合理选用热泵工质充入量,这对热泵干燥装置性能的发挥有重要意义。

### 5 未来的发展方向

(1)开发高温热泵工质。将高温工质或混合工质加入到热泵干燥系统中,可使冷凝温度增加,并能满足较高的干燥温度要求。目前,已有部分研究人员展开了相关研究,日本神户制钢所开发了一种热泵工质,其名称是R22/R142b,将其应用到热泵系统中可使供水温度达 $85^{\circ}\text{C}$ <sup>[41]</sup>。史琳等通过对制冷工质特性的研究,开发了高温的热泵工质并研制了相应的热泵装置,在实际的水源热泵应用中发现生产出的热水要高于 $70^{\circ}\text{C}$ ,并能稳定运行<sup>[42]</sup>。

(2)在热泵干燥系统中使用自动控制技术,在物料中均匀布置温湿度传感器,运用传感器对物料的温度和相对湿度进行检测,实现对风道及物料温度的全面监控,通过编程创建智能自动控制系统,能显著降低生产成本、提高生产效率。

(3)开发使用新能源。目前我国农产品干燥多以燃煤为热源,但随着近几年燃煤价格上涨,干燥成本也随之增加。可对采用空气能、风能、地热能等新能源的热泵干燥系统进行研究分析,寻找更加节能、高效的热泵干燥方式。

### 6 小结

农产品传统干燥方式缺点明显,效率低,干燥时间长,消耗的能量高,同时也不能保证卫生条件以及干燥制品的品质。与传统热源形式的干燥方法相比,热泵干燥方式能源利用率高、环保无污染、经济效益明显。在对具体的农产品干燥试验中显示,热泵干燥技术能在较低的温度下进行农产品脱水,使干燥过程中出现氧化、变质等现象大大减少,从而提高脱水产品的质量。虽然热泵干燥技术在农产品的干燥中表现出明显的优势,

但是仍存在一些缺陷及不足。比如热泵干燥后期干燥速率下降、时间增长,导致干燥制品色泽度下降,营养成分不同程度地流失,产品品质得不到保障;对于干燥装置的精确控制、干燥室的传热传质模拟研究还比较少,这些在今后的热泵干燥研究领域,都应该作为重点研究内容。

### 参考文献

- [1]石启龙,赵亚,魏彦君.热泵干燥南美白对虾品质特性与玻璃化转变关系研究[J].农业机械学报,2017,48(01):297-302.
- [2]张璧光,李延军.热泵干燥木材的技术现状与发展趋势[J].干燥技术与设备,2003,(001):6-8.
- [3]春芳,童忠良.干燥新技术及应用[M].第一版,北京:化学工业出版社,2009.
- [4]张璧光,赵忠信,高建民等.木材干燥的节能研究——除湿干燥与太阳能干燥[J].南京林业大学学报(自然科学版),1997,1.
- [5]杨先亮,宋蕾娜,靳光亚.热泵干燥系统的热力学分析[J].农机化研究,2009,31(04):200-203.
- [6]陈嘉澍,吕金虎,张平湖,李金成,沈向阳.热泵干燥装置型式分析与新型装置探讨[J].现代农业装备,2017,(02):58-64.
- [7]邵红.箱式热泵循环干燥及其经济性分析[J].化工装备技术,2004,(04):1-4.
- [8]谢继红,陈东,朱恩龙,等.热泵干燥装置的技术经济及环境分析[J].节能,2006,(1):31-34.
- [9]陈明,龚丽,赵锡和,刘清化.热泵干燥机干燥稻谷的试验研究[J].现代农业装备,2004,(04):62-64.
- [10]Gicio M,Finassi A,Gasparetto E. Use of a heat pump in paddy drying. Pretoria,South Africa: International Symposium on Agricultural Engineering,1986,(2):153-161.
- [11]吴耀森.热泵稻谷干燥技术的经济性分析[A].中国农业机械学会.走中国特色农业机械化道路——中国农业机械学会,2008.年学术年会论文集(下册)[C].中国农业机械学会:中国农业机械学会,2008:3.
- [12]王双凤,尹明山,郭振宇,白忠权.太阳能辅助热泵干燥粮食的数值模拟研究[J].节能,2012,31

- (01):32-36.
- [13]杨菊.茶叶干燥方法的研究进展[A].中国农业机械学会.2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集[C].中国农业机械学会,2012:4.
- [14]赵升云,张见明,黄毅彪,翁睿,杨君,杨江帆.武夷岩茶热泵干燥工艺的试验研究[J].海峡科学,2018,(05):40-43.
- [15]明廷玉,李保国.太阳能与热泵联合干燥茶叶的应用研究 [J]. 太阳能学报,2017,38 (10):2730-2736.
- [16]罗会龙,彭金辉,张利波,郭胜惠.空气源热泵辅助供热太阳能干燥系统性能研究 [J]. 太阳能学报,2012,33(06):963-967.
- [17]成刚.蔬菜热泵型联合干燥研究[D].江南大学,2008.
- [18]VAZQUEZ G,CHENLO F,MOREIRA R,et al. Grape drying in a pilot plant with a heat pump[J]. Drying Technology,1997,15:899-920.
- [19]刘锦.热泵干燥机在澳大利亚食品工业中的开发及应用[J].四川食品工业科技,1996,(03):9-11.
- [20]张绪坤,毛志怀,李华栋等.热泵流化床组合干燥胡萝卜丁的试验[J].农业机械学报,2006,37(3):68-71.
- [21]季阿敏,孙明明,何丽,张庆刚,钱剑峰,戴伟楠,王天骧.热泵热风联合干燥的实验研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2011,27(05):736-740.
- [22]盛金凤,李丽,孙健,李昌宝,何雪梅,郑凤锦,廖芬,卫萍,李杰民,刘国明,零东宁.香蕉片热泵干燥特性及数学模型研究 [J]. 食品研究与开发,2016,37(20):89-94.
- [23]张绪坤,毛志怀,李华栋,徐刚,熊康明,顾震.热泵流化床组合干燥胡萝卜丁的试验[J].农业机械学报,2006,(03):68-71.
- [24]梁溥森.太阳能干燥知识讲座[J].太阳能,1986,4:26-29.
- [25]邵维进,陈慧娟.太阳能和热泵联合供热在肉制品干燥中的应用[J].太阳能,2008,(04):32-33.
- [26]李远志,胡晓静,张文明.胡萝卜薄片热风与热泵结合干燥工艺及特性研究 [J]. 食品与发酵工业.1999,26(1):3-6.
- [27]徐建国,李华栋,徐刚,顾震.胡萝卜片热泵-热风联合干燥特征与模型化研究[J].食品工业科技,2008,(11):145-148.
- [28]徐建国,徐刚,顾震,张森旺.不同干燥方法对绿茶品质的影响[J].生物化工,2016,2(04):4-7.
- [29]关志强,郑立静,李敏,郭胜兰.热泵-微波联合干燥整果荔枝工艺研究[J].食品科学,2011,32(06):20-24.
- [30]赵海波,戴家傲,乔玲敏,张玲玲,吴坤.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(04):329-335.
- [31]宋杨,张国琛,王彩霞,王念,王俊东,王麓璐.热泵与微波真空联合干燥海参的初步研究[J].渔业现代化,2009,36(01):47-51.
- [32]郑亚琴.雪莲果热泵—微波联合干燥工艺研究[D].山东理工大学,2013.
- [33]陈盈希,兰青,季旭,彭福明,夏朝凤,李绚阳.热泵干燥核桃的试验研究 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版),2014,34(04):30-34.
- [34]张进疆.回热型空气源热泵在农产品干燥加工中的应用[A].中国农业工程学会(CSAE).中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集[C].中国农业工程学会(CSAE),2011:4.
- [35]杜垲,张建成.分离式热管回热器用于热泵干燥系统传热分析[J].中国电机工程学报,2001,(12):51-54.
- [36]王小鹏,张毅,李东旭.石蜡在相变储能中的研究与应用进展[J].材料导报,2010,24(S2):307-312.
- [37]王剑锋,欧阳应秀,朱永雷,刘建强.相变材料应用于热泵干燥的实验研究[J].太阳能学报,2002,(01):22-26.
- [38]史嘉乐,杨悦,陈静,蒋顺飞,罗建文,郑茂盛.相变蓄热材料对太阳能干燥系统热能的调配作用[J].应用能源技术,2018,(02):45-49.
- [39]张绪坤,毛志怀,李华栋,徐刚,熊康明,顾震.热泵流化床组合干燥胡萝卜丁的试验[J].农业机械学报,2006,(03):68-71.
- [40]杨道龙.小型 CO<sub>2</sub> 热泵干燥装置的性能研究与实验分析[D].南京农业大学,2016.
- [41]张亚立,张吉礼,孙德兴.三种高温工质热力性质分析[J].暖通空调,2005,35(5):123-125.
- [42]刘南希,史琳,韩礼钟,等.高温工质 HTR01 水源热泵机组的研究[J].暖通空调,2004,34(8):48-52.