

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.03.002

空气源热泵干燥技术在粮食干燥中应用与展望

周 迅¹, 鲍官培¹, 余友群¹, 李秀明², 陆必发²

(1.安徽科技学院机械工程学院,安徽 凤阳 233100;2.安徽森米诺智能装备有限公司,安徽 芜湖 241200)

摘要:目前粮食干燥方式受限于环境和人工条件,极大地限制了粮食加工行业的发展,因此,寻求高效的干燥技术与装备成为粮食加工行业发展的重要目标。梳理了国内外空气源热泵干燥技术与装备的研发应用现状,以系统控制和工艺参数为研究对象,研究空气源热泵干燥技术的装备结构与工作原理,分析了干燥装备存在的干燥不均匀、能耗大、效率低等问题产生的原因,并探讨了相应改善方法;针对多重组合干燥技术,分析了微波、太阳能与远红外3类与空气源热泵干燥技术联合方式下的干燥优势,探讨了联合干燥技术相较于单一干燥技术在装备和工艺中存在的优势和不足。结合干燥行业发展问题,从联合干燥技术研究方向、联合干燥工艺改进、干燥信息平台搭建、干燥设备研发升级4个方面对联合干燥在粮食干燥领域进行了展望,以期干燥领域发展和装备创新提供参考。

关键词:空气源热泵;联合干燥;干燥装备;工艺参数

中图分类号:TS210.4;S226.6 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)03-0007-10

Application and Prospect of Air Source Heat Pump Drying Technology in Grain Drying

ZHOU Xun¹, BAO Guanpei¹, YU Youqun¹, LI Xiumin², LU Bifa²

(1.Anhui Science and Technology University Faculty of Mechanical Engineering, Fengyang 233100, Anhui, China;2.Anhui SunMero Intelligent Equipment Co., Ltd., Fanchang, Wuhu 241200, Anhui, China)

Abstract:At present, grain drying methods are limited by environmental and artificial conditions, which greatly restricts the development of the grain processing industry. Therefore, seeking efficient drying technology and equipment has become an important goal for the development of the grain processing industry. This paper summarizes the research and application status of air source heat pump drying technology and equipment at home and abroad. Taking the equipment structure and working principle of air source heat pump drying technology as the research object, it analyzes the reasons for problems such as uneven drying, high energy consumption, and low efficiency in drying equipment and discusses the corresponding improvement methods. It also discusses the advantages and disadvantages of combined drying technology compared to single drying technology in terms of equipment, processes, and other aspects. Based on research directions, improvement of joint drying processes, construction of drying information platforms, and equipment research and development policies, the development of joint drying technologies in the field of grain drying is expected to provide a reference for the development and equipment innovation in the drying field.

Keywords:air source heat pump; combined drying; drying equipment; process parameters

收稿日期:2024-05-14

基金项目:芜湖市科技计划项目(2022ly02)。

作者简介:周迅(1999—),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向:菊花干燥设备设计,e-mail:2794404736@qq.com。

*通信作者:鲍官培(1988—),男,安徽桐城人,副教授,博士,研究方向:智能农机装备设计,e-mail:baogp@ahstu.edu.cn。

0 引言

国家统计局数据显示,2023年我国粮食总产量69 541万 t,比2022年增长1.3%^[1]。从粮食产量来看,国内粮食总产量稳步上升,但2022年人均粮食消费量仅有486 kg。除去国家出口和消费的粮食,粮食损耗率高于世界平均水平。其主要原因之一是刚收获的粮食含水量较高,没有及时进行粮食烘干,其中水分较高的水稻和小麦在堆积高温环境中发芽导致损耗,且刚收获的水稻、小麦的脱壳和后续加工都需要干燥环境和低含水量^[2]。据农业部统计,我国农产品因干燥问题引起的损失高达8%,远高于发达国家在粮食干燥上的4%损耗^[3-4]。每年因干燥问题损失约5 000万 t,因此干燥在粮食加工环节中至关重要。

近年来,空气源热泵在粮食干燥中得到了越来越多的应用。空气源热泵通过置换的方式把粮食中所含的自由水置换出来,完成粮食干燥的目的。空气源热泵干燥具有高效节能、运行费用低、稳定性高、质量好、绿色环保等优点。在其他领域如农

业、食品、医药、化工、环保等行业中,许多应用表明了空气源热泵干燥技术的重要性。因此,本文就近几年开发的多种类型的空气源热泵干燥设备及其联合干燥设备进行分析。介绍不同类型的空气源热泵联合干燥设备的工作原理;分析多种联合干燥技术相对于单一空气源热泵干燥的优势与不足,结合农业机械化发展为粮食干燥技术与装备创新提供参考。

1 空气源热泵干燥设备

1.1 空气源热泵干燥设备的工作原理

空气源热泵是一种能够将低温热能转化为高温热能的设备,利用空气当作干燥介质与物料进行热质交换,带走物料中的自由水实现干燥的目的。空气源热泵吸入周围空气,经过压缩成为高温高压的气体,使气体进入冷凝器^[5],营造烘干室内高温环境,加速物料中水分排出实现干燥效果。空气源热泵的基本结构包括压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器4个部件^[6]。空气源热泵的干燥原理如图1所示。

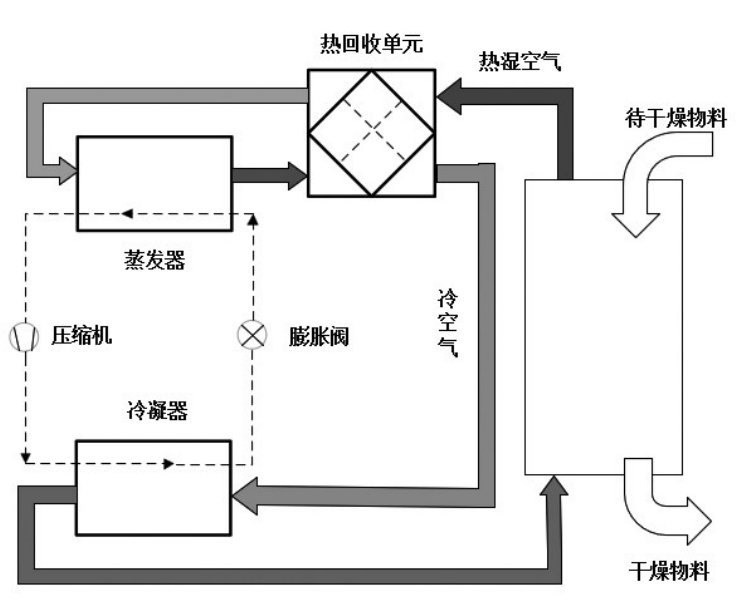


图1 空气源热泵干燥原理图^[7]

1.2 空气源热泵联合设备工作原理

1.2.1 微波联合空气源热泵干燥设备

微波发生器产生 300 MHz-300 GHz 的电磁波,通过波导装置输送到干燥室,形成微波场。物料内部极性分子在间断的微波影响下不断摩擦,从而达

到内部温度上升,物料内部的自由水快速析出,热泵产生的热风带走空气中的高温高湿空气完成物料的烘干^[8-10]。微波联合空气源热泵工作原理如图 2 所示。

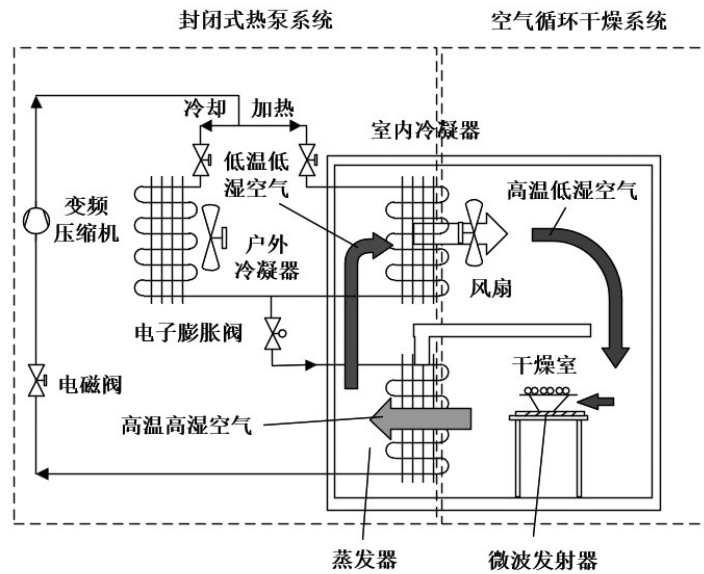


图2 微波联合空气源热泵联合干燥原理图^[11]

1.2.2 太阳能联合空气源热泵干燥设备

太阳能联合空气源热泵干燥设备原理如图 3 所示。太阳能板将收集的电力供给给热泵干燥系统,

用于空气源热泵生产热风,同时将部分余热送入干燥系统中,减轻热泵干燥工作压力。后续工作过程由热泵干燥系统带走水分,完成物料烘干。

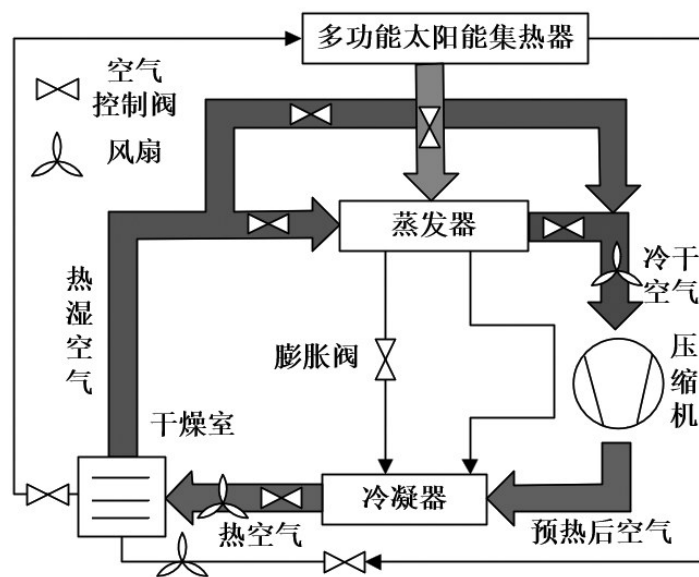


图3 太阳能联合空气源热泵联合干燥原理图^[12]

1.2.3 红外热源联合空气源热泵干燥设备

红外热源联合空气源干燥原理如图 4 所示,采用上下两层红外热源发射器不间断发射红外线进入烘干物料内部,物料吸收红外线,温度快速上升,

内部自由水快速析出至表面^[13]。热泵干燥系统带动烘干室内部空气流通带走物料表面水分,实现物料烘干。

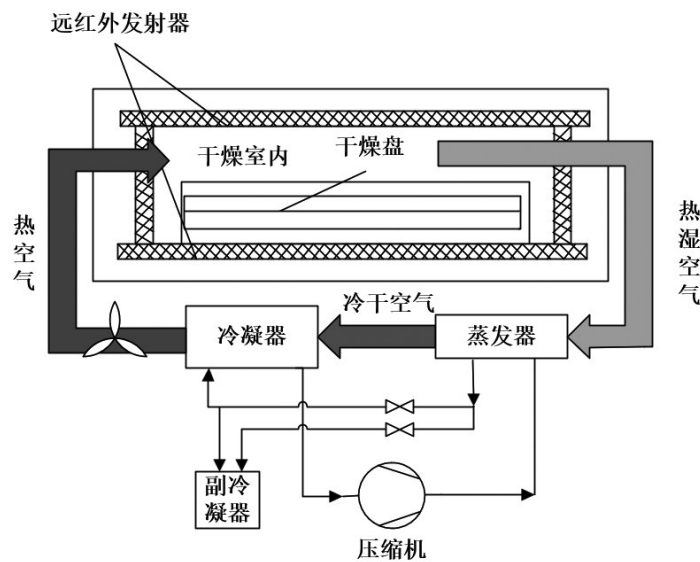


图 4 红外热源联合空气源热泵联合干燥原理图^[14]

2 空气源热泵干燥技术研究

2.1 空气源热泵干燥设备结构优化

空气源热泵干燥技术是解决温室效应最可行的方案之一,也是唯一已知的将环境和废热再循环回热生产的技术^[15]。空气源干燥设备主要由空气源热泵和烘干室组成。热泵的干燥性能与环境温度有关,环境温度降低会导致制冷介质所需压力和温度升高,相比较同体积的制冷介质在寒冷状态下流量减少、冷凝器制热量降低与热效率系数下降。Heo 等^[16]采用新型的蒸汽喷射技术的过冷器 (FTSC)和双膨胀过冷器 (DESC)循环空气源热泵的加热性能对闪蒸罐 (FT)和过冷器 (SC)的循环性能比较,结果表明,与 SC 循环相比,FT、FTSC 和 DESC 循环能力分别平均高出 14.4%、6.0% 和 3.8%,但是各循环选项的性能参数 (COP) 非常相似。Guoyuan 等^[17]研究逆循环除霜时室外温度和相对湿度对空气源热泵性能的影响,结果表明,除霜对热泵性能

的贡献不可忽视,在同等条件下,每个小时的 COP 最多可以减少 20%。Underwood 等^[18]使用参数化建模结合除霜结构进行仿真研究,结果表明,该模型可以推导出关键的热泵性能参数,可以在替换系统之间进行比较。空气源热泵通过对干燥介质的加热除湿与余热回收,减少了能量消耗,且加强了干燥介质的除湿能力,从而避免了极端温度对农产品外观与有效成分的破坏,降低了农产品损耗率。烘干室的内部结构决定了风场的流动状态和温度场的分布状态。烘干室内部空间大,结构复杂,产生烘干室内气流组织不均匀和风速死角区域,且每种物料具有不同的烘干要求,对不同干燥要求的物料采用的烘干室也应有相应的设备结构^[19]。张静峰等^[20]搭建一个实现烘干室内风速反向流动的热泵干燥试验台,来研究烘干室内物料放置厚度、风速、风口的数量等因素对烘干室内的物料的干燥效果的影响,实验得到的内部流场分布规律可为货架摆放方式和烘干室的结构优化提供技术方案和理论

参考。张鹏飞等^[21]利用 FLUENT 仿真软件对多层带式干燥机建模,再通过调整烘干室进风口风速方式对烘干室内的流场进行了模拟研究,得到的数据与实际风速实验的得到数值进行对比,模拟值比实验值大 17%,且风速的差异对实验数据也有一定的影响,数据表明,采用仿真模拟实验得到的数据可以应用到实际烘干室内的流场研究中。烘干室结构的优化解决了物料差异而导致的烘干不充分、效率低、速度慢等部分问题,提高了整体物料烘干后的外观形状。

2.2 空气源热泵干燥控制系统的研究

空气源热泵按照干燥介质循环情况可将热泵干燥系统分为开路式、半开路式与闭路式 3 类,通用的 PID 控制难以提升整体系统能效,且根据干燥要求进行精确建立智能控制系统困难,导致空气源热泵无法系统提升烘干能效比^[22-23]。李阳春等^[24]按照以干燥介质的循环方式对热泵干燥系统进行分类并设计对比试验与分析,结果表明,通过在蒸发器入口位置加装外接换热器能将干燥过后的部分热能重复利用,提高除湿效率。在冷凝器位置增加加装辅助冷却器的热泵干燥系统除湿更快且节约物料干燥时间,降低干燥过程中的能耗。代替辅助冷凝器,减少干燥装备成本。张绪坤等^[25]开发了应用于脱水蔬菜的热风式干燥控制系统,主要应用于蔬菜等绿色产品,且实验结果表明,通过对压缩机和循环风机的载荷置换,使整个干燥过程中输入的能量能随之变化,较好地解决热泵运行工况变差的问题。张华希等^[26]结合稻谷干燥过程设计了一套空气源热泵粮食干燥机的信息采集,根据物料含水量降速研制开发一个程序对干燥机和热泵机组进行单独控制,可以解决热泵粮食干燥机自动进料、循环除湿和间歇干燥等多个工作状态。魏娟等^[27]针对由于环境导致粮食干燥能耗大和空气排放污染的问题,采用闭式多级串联除湿和加热的方法对热泵干燥系统进行理论和试验对比,采用多级串联除

湿和加热干燥系统效率高于传统单次热湿交换,且多级热泵干燥系统能源节省达到 30% 以上。梁晓东等^[28]提出了采用 Climatix 平台搭建的热泵机组与烘干室一体化智能控制系统,主要应用适用热风式干燥装备多种物料干燥方案,并制定了不同参数及控制程序。空气源热泵控制程序的研究与开发极大地提高了物料在烘干过程的机械化,降低烘干过程中不必要的能量消耗,解决了部分由于环境温度导致的烘干问题,同时开发的多级干燥系统有利于应用到非粮食领域的其他热敏物料,极大地提高了空气源热泵干燥的应用范围。

2.3 空气源热泵干燥工艺参数优化

热泵干燥方法干燥物料的过程中,温度、速度、物料层厚度以及烘干室内部相关结构会影响物料干燥的效果,对于不同的物料种类,各个因素对物料干燥效果的影响程度也不相同^[29]。赵永玲等^[30]研究了小麦干燥过程中麦层厚度、风速、穿透风速对干燥工艺的影响,通过设备干燥试验台,得出的麦层阻力与麦层厚度和穿透风速的关系曲线以及不同条件下小麦的干燥特性曲线,试验数据为谷物干燥设备设计提供了理论基础。张鹏霞等^[31]为研究柿饼的干燥工艺,设计了一套自控柿饼干燥房及控制系统,以柿饼的口感和色泽对比传统的自然干燥,分析温度、风速和容量对柿饼的效率及品质的影响,得出了柿饼的最佳干燥工艺参数。冯指名等^[32]以玉米为研究对象,参考不同方式干燥前后玉米的电导率、脂肪酸值、淀粉得率等品质关键指标,研究干燥温度、时间、玉米的初始含水率 3 个因素对玉米品质的影响,得到了适合的干燥工艺参数。王平等^[33]通过西红花提取物建立的指纹图谱进行对比,确定了影响西红花提取物含量的主要干燥因素,得到了西红花最优的干燥参数。Müller 等^[34]采用间歇式热泵干燥方法,对移动的谷物循环多次经过热风区域,在干燥区域进行除湿,通过多次联合加热除湿让水从谷物的中心逐步扩散到外围,降低

由于水分蒸发过快而导致脂质和总 γ -氨基丁酸的损耗。Kelly 等^[35]为了模拟空气源热泵的性能,开发了一个设备模型验证不同温度、流量和热量对性能参数(COP)的影响,结果表明,不同条件对性能参数(COP)是有影响的。热泵干燥技术满足了市场对粮食的品质要求,且干燥过程节能环保,符合当今绿色低碳的发展理念,在产地初级加工中有着良好的应用前景。但目前装备投资及维护成本较高,今后应提高热泵系统性能以适应各种产地加工环境,并进一步降低工作能耗,扩大热泵干燥的优势。

3 联合干燥技术

3.1 微波与空气源热泵联合干燥技术

微波空气源热泵联合干燥方式分为串联和耦合干燥 2 种。串联干燥是通过分阶段对同一物料不同含水率阶段进行干燥;而耦合干燥是对其同时进行干燥,使物料同时受热,加速内部水分挥发^[36]。Sangdao 等^[37]设计了一种微波联合热泵干燥系统,以稻谷为材料进行干燥实验,得出优化后的干燥效率可以提升到 61.5%。Sharma 等^[38]设计了一种微波对流干燥机,以蒜瓣为材料进行干燥实验,结果表明,当微波功率为 40 W,风速为 1.0 m/s 时候蒜瓣干燥后质量好,干燥过程能耗比最低。宋瑞凯^[39]发明了一种微波热风耦合干燥系统装置,采用磁控管相互垂直于干燥区域,经由传动装置将干燥物带动干燥,通过热泵加热过的热风带走干燥区域内的水分,并通过可编程逻辑控制器(programmable logical controller, PLC)对磁控管、热泵、传动装置进行独立控制,对不同粮食的干燥工况进行转换。颜建春等^[40]研制了一种小型的热板-微波联合干燥装置,以茭白为实验材料进行干燥实验,确定茭白在热板-微波联合干燥设备中的最佳作业参数,为制定品质优良、高效节能的茭白干燥工艺提供参考。Rapponi 等^[41]运用计算机视觉这一量化视觉颜色的方法,对烘干过程中类胡萝卜素含量展开检测。检测

结果显示,干燥速率会随着微波功率的增加而相应提高,并且经实践验证,微波-热泵干燥具备更为出色的再水化能力。经微波-热泵干燥后的部分粮食,其品质得以提升,并且与单一的热泵干燥相比,该方法在速度和能量消耗方面更具优势。但该方法存在一些不足,如微波加热效率较低、电磁场分布不均匀等,还常出现干燥物料局部烧焦、炭化的情况。同时,微波和热风在作用于不同含水率区域时,对干燥效果有着不同的影响。因此,为保证物料的干燥品质,有必要制定合格的干燥标准来把控微波干燥过程中的工艺参数。

3.2 太阳能与空气源热泵联合干燥技术

太阳能联合干燥装置类型丰富,其种类主要取决于太阳热能的利用形式,具体可划分为直接式、间接式和混合式 3 类。在太阳能联合干燥过程中,常配备辅助装置,这些辅助装置可利用风能、电能、地热能等能源形式助力干燥,其中热泵就是电能协同干燥的典型代表^[42]。Dai 等^[43]采用南瓜片作为实验材料对比太阳能辅助热泵干燥与单一热泵干燥的差异,实验结果表明,采用太阳能辅助热泵方式干燥过后的南瓜片在外观和结构上更加好。苗庆伟等^[44]对一种冲孔波纹板空气集热器展开了深入研究,依据不同进风口的运行模式构建了相应的数学模型,并通过将试验所得数据与模拟值进行对比分析,对该数学模型的准确性加以验证。此项研究为太阳能空气集热器在设计改进方面提供了一定的理论依据。朱传辉等^[45]设计了一种新型太阳能-热泵联合干燥装置,该装置配备了以双螺旋形状设计的直流真空管。此真空管为空气式太阳能集热器,内部填充有高性能相变蓄热材料。通过开展物料干燥实验,对该装置的性能加以考察,旨在为开发节能环保的新型干燥设备提供思路。Naemsai 等^[46]对太阳能-热泵联合干燥性能开展了实验研究,以辣椒作为干燥物料进行实验,结果显示,配备太阳能联合的干燥方式比单一热泵干燥具备更优

异的干燥性能。张力等^[47]设计了一种太阳能-热泵联合干燥系统,并针对太阳能与双热源热泵联合干燥系统在处理同一物料时的干燥参数、能耗、结构进行对比和性能测试,结果表明,联合干燥方式在能耗方面优于单一的太阳能干燥技术。太阳能-热泵联合干燥装置性能稳定可靠,太阳能利用率高,兼具节能与环保优势。其整体太阳能与热泵提供热源比例约为2:1,性能参数(COP)可达3.5。太阳能干燥装置借助太阳辐射产热实现物料热交换,然而天气变化会直接影响物料干燥时长,并且该装置整体干燥结构较单一热泵干燥装置更为复杂,不过其装备成本投资回收期远低于热泵干燥装置。今后研究应依据不同物料的干燥特性,搭配合适的太阳能干燥技术,在满足要求的前提下尽可能降低成本、提升干燥效果。

3.3 红外热源与空气源热泵联合干燥技术

红外热源频段与微波频段类似,二者皆属于电磁波范畴,且都具有显著的热效应。红外热源可细分为远红外、中红外、近红外3种类型,其中远红外在烘干领域的应用较为广泛^[48]。远红外能够穿透干燥物料,促使物料内部温度升高,进而加速自由水的析出。在此过程中,物料内部水分子扩散方向与热扩散方向保持一致。相较于热泵烘干技术,远红外干燥可使自由水更快析出,物料内外受热均匀,能有效避免因温度差过大而致使物料外观发生显著变化。常见的远红外热源发射装置多采用电加热或燃气加热方式,然而此类方式需将加热温度提升至高达400℃才能发射红外热源射线,这种高温条件在很大程度上会降低干燥效率,对热敏性物料的干燥品质产生不良影响。吴坤霖等^[49]针对红外热源联合空气源热泵干燥规律展开了研究,以茭白作为研究材料,实验结果显示,在60℃和400W红外辅助装置干燥条件下,其干燥效果优于单一热泵,且干燥时长更短。宋小勇^[50]对多种不同功率下红外辅助热泵干燥对山药的影响进行了探究,结果

表明,红外功率越高,山药的水分扩散系数越快。牛婷婷等^[51]对一种褐煤热风-联合干燥方式展开了研究,在试验过程中运用了电热鼓风干燥箱、红外热源灯管、高精度电子天平。试验采用干燥箱与红外热源管串联和并联这2种结构,通过热风、红外热源-热风串联、红外热源-热风3种方式对褐煤干燥过程中的干燥参数进行对比分析,该研究结果能够为热风-红外热源联合干燥工艺设计提供优化依据。麦馨允等^[52]对黄秋葵采用热风 and 远红外热源干燥工艺特性进行了对比研究,试验设备包括食品物性分析仪、电子天平及鼓风干燥箱。试验通过对热风干燥和远红外热源干燥情况下黄秋葵的干燥特性、动力学及干燥品质进行研究,旨在获取黄秋葵的最佳干燥工艺,进而为红外热源-热泵联合干燥技术提供参考。Xu等^[53]研究了热风干燥(HAD)、红外热源热风联合干燥(IR-HAD)以及IR-HAD和HAD顺序(IR-HAD+HAD)对菊花外观、收缩率、香气特征、酚类化合物和微观结构的影响。结果表明,在这3种干燥策略中,IR-HAD在降低能耗、改善收缩率、持水性、水结合力和细胞微观结构方面更具优势,而IR-HAD+HAD在抑制颜色变质方面效果更佳。红外热源-热泵联合干燥能够在热风到达之前,通过使物料组织结构松动来减少水分结合,加速物料水分析出,完成物料干燥的预处理,从而缩短干燥时间,并且部分经远红外热源干燥的物料,其有效成分和抗氧化性均有所提高。红外热源对流辅助干燥相较于超声波干燥预处理更为有效,不过能耗有所增加。红外热源干燥的原理是物料吸收红外能量并将其转化为热能,进而加速水分析出,然而由于红外热源穿透能力较弱,其适用范围受到限制,仅适用于干燥薄层或切片储存的物料。

4 总结与展望

当下,在诸多行业领域里,能源消费与碳排放方面所存在的结构性问题依旧较为突出。就粮食

加工行业而言,热泵干燥技术发挥着重要作用,其不仅能够延长物料的保质期,还可提升物料品质,同时兼具节能环保、减少污染的显著优势。并且,热泵干燥技术在近些年来已经取得了令人瞩目的长足进步,装备集成技术、智能控制、知识产权保护、政策引导以及国家财政支持等诸多因素,均为该技术的发展提供了积极且有力的推动作用。以下将对热泵干燥技术在未来的发展趋势展开探讨。

1)着力搭建契合实际需求的热泵联合干燥数学模型,围绕其数值分析、参数优化等关键方面展开系统且深入的剖析工作。进而将联合干燥技术广泛且灵活地应用于茶叶、果蔬、中药、木材、泥土等多个不同类型的干燥场景之中。凭借空气源热泵与其他干燥方法相互联合所展现出的独特技术优势,深入挖掘并开发出针对不同种类物料的各具特色的联合干燥方式,以此实现对物料干燥过程进行精细化、精准化的管理,全方位满足各类物料在干燥环节的差异化需求。

2)精心设计以热泵作为核心关键的集成式联合干燥技术装备,通过该装备达成在物料干燥过程中,依据不同含水量精准对应相应联合工况的目标。细致设定物料有效成分在各类对应工况下的干燥曲线,审慎选取有效成分含量作为关键比值,以此为依据来制定出契合物料特性的独特联合工艺曲线,力求最大程度地降低珍贵物料在干燥流程中因各种因素所导致的损失比例,切实保障珍贵物

料的干燥质量以及其内在价值不受损。

3)切实且扎实地强化物料干燥信息体系的搭建工作,致力于实现物料干燥科研信息的全面系统建设。全力确保科研成果、生产动态、市场流通以及服务支持等多维度的信息资源能够达成全面共享的良好状态,从而切实保障从科研创新环节起始,贯穿至生产流程,再延伸至市场流通以及终端服务等整个链条能够实现毫无阻碍地无缝对接。积极主动地推动与物料干燥相关的各类企业,在技术理念、科研成果、安全生产标准以及服务流程等多个重要方面展开深度且广泛的交流互动,借由此举促进整个行业在技术层面实现稳步进步,在服务水平方面达成同步提升,全方位增强行业整体的发展活力与竞争力。

4)加快推进新型干燥设备的更新升级步伐,持续完善农业干燥设备技术发展所对应的政策体系架构。进一步加强企业与高校之间紧密且深入的科研联系与合作,将重点聚焦于开发那些适用于多功能作业要求、能够契合不同地区实际使用特点且完全符合绿色低碳环保理念的高质量干燥设备。扎实做好单项技术的集成化整合工作,妥善解决粮食干燥过程中存在的各类配套问题。着力构建起以农民为主体,呈现多元化、多渠道特征的农业机械化发展长期投入机制,为农业干燥领域的可持续、高质量发展筑牢坚实根基。

参考文献:

- [1] 国家统计局.国家统计局关于2023年粮食产量数据的公告[EB/OL].(2023-12-11)[2024-02-04].https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202312/t20231211_1945417.html.
- [2] 王志鹏,余泳昌,李赫.农产品干燥技术的应用和发展[J].农技服务,2014,31(4):184.
- [3] 王延坤,陈鹏泉,朱文学,等.大中型粮食干燥设备研究进展[J].粮油食品科技,2024,32(2):171-177.
- [4] 王乐意,李长河,刘明政,等.中药材干燥技术与装备研究现状[J].农业工程学报,2024,40(2):1-28.
- [5] CHESSER M, LYONS P, O'REILLY P, et al. Air source heat pump in-situ performance[J]. Energy and Buildings, 2021, 251:111-365.
- [6] SONG M, DENG S, DANG C, et al. Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting[J].

- Applied Energy, 2018, 211: 1150–1170.
- [7] 刘紫薇, 贵宗友, 杨浩勇, 等. 粮食干燥机变频式热泵系统的开发及试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(6): 1286–1294.
- [8] TAHERI S, BRODIE G, GUPTA D. Microwave fluidised bed drying of red lentil seeds: drying kinetics and reduction of botrytis grey mold pathogen[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 119: 390–401.
- [9] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing—a review[J]. Food research international, 2013, 52(1): 243–261.
- [10] MANICKAVASAGAN A, JAYAS D S, WHITE N D G. Non-uniformity of surface temperatures of grain after microwave treatment in an industrial microwave dryer[J]. Drying Technology, 2006, 24(12): 1559–1567.
- [11] CHONG C H, FIGIEL A, LAW C L, et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7: 975–989.
- [12] SINGH A, SARKAR J, SAHOO R R. Experimentation on solar-assisted heat pump dryer: thermodynamic, economic and exergoeconomic assessments[J]. Solar Energy, 2020, 208: 150–159.
- [13] 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.
- [14] AKTAŞ M, KHANLARI A, AMINI A, et al. Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 327–338.
- [15] WU Y, WANG W, SUN Y, et al. Development of evaluation indexes for assessing the regional operating performances of air source heat pump (ASHP) units operated in different climate regions based on the equivalent temperature drop method[J]. Energy and Buildings, 2021, 247: 111–111.
- [16] HEO J, JEONG M W, BAEK C, et al. Comparison of the heating performance of air-source heat pumps using various types of refrigerant injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(2): 444–453.
- [17] GUOYUAN M, QINHU C, YI J. Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 12–18.
- [18] UNDERWOOD C P, ROYAPOOR M, STURM B. Parametric modelling of domestic air-source heat pumps[J]. Energy and Buildings, 2017, 139: 578–589.
- [19] 李若兰. 空气能热风式枸杞烘干机流场均匀性模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [20] 张静峰, 赵海波, 乔玲敏, 等. 热泵干燥箱流场空载试验[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2022, 35(4): 453–458+498.
- [21] 张鹏飞, 吴鹏鹏, 张琦, 等. 基于带式干燥机的循环风机频率对料层表面风速场分布的模拟及试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 81–88.
- [22] 孙乐平, 郭小璇, 韩帅, 等. 基于模糊控制的高温热泵果脯干燥系统设计[J]. 节能, 2024, 43(5): 98–102.
- [23] 陈怡吉. 电动汽车热泵系统制热性能与控制策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [24] 李阳春, 王剑锋, 陈光明, 等. 热泵干燥系统几种循环的对比分析与研究[J]. 农业机械学报, 2003(6): 84–86+95.
- [25] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 脱水蔬菜热泵-热风组合干燥试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 226–229.
- [26] 张华希, 闫一哲, 李和清, 等. 空气源热泵粮食干燥机信息采集与自动控制系统的研制[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(1): 205–211.
- [27] 魏娟, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 塔式玉米除湿热泵连续干燥系统的模拟及应用[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4):

114-119.

- [28] 梁晓东,姚俊平.基于 Climatix 平台的空气源热泵干燥机组与烘干室一体化智能控制系统[J].制冷与空调,2020,20(6):15-19+52.
- [29] 牟国良,张学军,朱自成,等.循环式红枣干燥机的研制[J].机械工程与自动化,2014(2):87-88.
- [30] 赵永玲,张仲欣,姬江涛,等.小麦干燥工艺参数的试验分析[J].洛阳工学院学报,2000(4):1-5.
- [31] 张鹏霞,党凯锋,邹超,等.自控热泵柿饼干燥房及快速干制出霜工艺研究[J].包装与食品机械,2019,37(6):51-54.
- [32] 冯指名,王小萌,谢奇珍,等.不同干燥工艺参数对玉米品质的影响[J].中国粮油学报,2021,36(9):36-41.
- [33] 王平,杨君,童应鹏.西红花花瓣不同干燥工艺提取物 HPLC 指纹图谱研究[J].浙江工业大学学报,2018,46(1):106-109.
- [34] MÜLLER A, NUNES M T, MALDANER V, et al. Rice drying, storage and processing: effects of post-harvest operations on grain quality[J]. Rice Science, 2022, 29(1): 16-30.
- [35] KELLY N J, COCKROFT J. Analysis of retrofit air source heat pump performance: results from detailed simulations and comparison to field trial data[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(1): 239-245.
- [36] 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.
- [37] SANGDAO C, SONGSERMPONG S, KRAIRIKSH M. A continuous fluidized bed microwave paddy drying system using applicators with perpendicular slots on a concentric cylindrical cavity[J]. Drying Technology, 2010, 29(1): 35-46.
- [38] SHARMA G P, PRASAD S. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(4): 441-446.
- [39] 宋瑞凯.热风微波耦合干燥系统的优化设计与试验[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [40] 颜建春,胡志超,吴朋来,等.热板-微波联合真空冷冻干燥茭白工艺优化[J].农业工程学报,2017,33(1):262-270.
- [41] RAPONI F, MOSCETTI R, MONARCA D, et al. Monitoring and optimization of the process of drying fruits and vegetables using computer vision: a review[J]. Sustainability, 2017, 9(11): 20-29.
- [42] WANG Y, QUAN Z, ZHAO Y, et al. Performance and optimization of a novel solar-air source heat pump building energy supply system with energy storage[J]. Applied Energy, 2022, 324: 119706.
- [43] DAI Y, DENG K. Modeling and optimization of solar-assisted heat pump drying of pumpkin slice[J]. British Food Journal, 2021, 123(12): 4383-4401.
- [44] MAJID Z A A, OTHMAN M Y, RUSLAN M H, et al. Multifunctional solar thermal collector for heat pump application [C]// World Scientific and Engineering Academy: Proceeding of the 3rd WSEAS international conference on renewable energy sources (RES'09). Athens: WSEAS Press, 2009: 342-346.
- [45] 苗庆伟,由世俊,张欢,等.一种冲孔波纹板渗透型空气集热器性能优化研究[J].太阳能学报,2016,37(10):2554-2561.
- [46] 朱传辉,李保国,杨会芳,等.太阳能-热泵联合装置设计及香菇干燥实验研究[J].太阳能学报,2020,41(11):149-155.
- [47] NAEMSAI T, JAREANJIT J, THONGKAEW K. Experimental investigation of solar-assisted heat pump dryer with heat recovery for the drying of chili peppers[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13193.
- [48] 张力,胡传坤,高建民,等.太阳能与双热源热泵组合干燥落叶松[J].东北林业大学学报,2014,42(12):141-144.
- [49] 王乐然,万霖.远红外干燥技术研究现状[J].现代化农业,2024(5):88-90.