

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251217001

空气源热泵技术在农产品干燥中的研究进展

张慧 王誉霖 刘帅领

(天津市制冷技术重点实验室 天津商业大学 天津 300134)

摘要 农产品干燥是农业产后加工的核心环节,传统干燥技术存在效率低、能耗高和品质差等痛点,难以适配农业绿色发展与“双碳”目标需求。空气源热泵干燥技术通过逆卡诺循环回收余热,具备能源利用率高、控温控湿精准、产品品质优等优势,是传统干燥方式的理想替代方案。本文阐述了空气源热泵在农产品干燥领域的最新研究进展,重点分析了热泵干燥系统的工作原理、系统结构优化、多技术联合干燥、低GWP制冷剂替代及智能运行控制策略等方向的研究成果,旨在为该技术的规模化推广和研究应用提供参考。

关键词 空气源热泵;干燥;多技术联合;农产品

中图分类号: TK173;TQ051.5

文献标识码: A

Research Progress of Air-Source Heat Pump Technology in Agricultural Product Drying

Zhang Hui Wang Yulin Liu Shuailing

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract The drying of agricultural products is a core aspect of post-harvest agricultural processing. Traditional drying techniques suffer from certain limitations, such as a low efficiency, high energy consumption, and poor quality, which make them difficult to adapt to the needs of green agricultural development and the "dual carbon" goals. Air-source heat pump drying technology, which recovers waste heat through the reverse Carnot cycle, offers advantages such as a high energy utilization efficiency, precise control over temperature and humidity, and superior product quality, which render it an ideal alternative to traditional drying methods. This article outlines the latest research progress of air-source heat pumps in the field of agricultural product drying, focusing on analyzing research outcomes in terms of the operating principles of the heat pump drying system, system structure optimization, integrated multi-technology drying, low-GWP(Global Warming Potential) refrigerant substitution, and intelligent operational control strategies. The aim is to provide a reference for the large-scale promotion and application of this technology.

Keywords air-source heat pump; drying; multi-technology integration; agricultural products

农产品干燥是农业产后加工的核心环节,不仅能降低农产品含水率、抑制微生物滋生,还能降低产后损耗、延长储存周期,对保障国家粮食安全具有不可替代的作用。目前,干燥技术已应用于果蔬、谷物、中药材等各类农产品加工领域,但干燥过程本身是一项能量消耗巨大的传热传质过程,据统计,在许多发达国家,干燥过程消耗了全国总能耗的7%~15%,约占整个产品能耗的30%~70%^[1]。我国作为农业大国,农产品产量大、干燥需求分散,传统干燥方式的高能耗和低效率问题更为突出,已成为制约农业绿色发展的关键瓶颈。因此,研发和推广高效低耗的农产品干燥技术具有重要的现实意义和战略价值。

现阶段,传统农产品干燥技术以热风干燥、微波干燥和真空冷冻干燥为主;热风干燥因设备简单、成本低廉而应用广泛,但存在能量利用低、产品品质差等问题;微波干燥虽升温速率快,但易产生局部过热导致农产品焦糊,且能耗较高;真空冷冻干燥能最大程度保留产品品质,但设备投资与运行费用昂贵,难以规模化应用^[2]。与传统技术相比,空气源热泵干燥技术作为热泵干燥的主流形式,以空气为干燥介质,通过逆卡诺循环回收干燥室排气中的显热和潜热,能源利用率显著提高,且具有控温控湿精度高、产品品质优和环境友好等优势,已成为解决传统农产品干燥痛点的理想技术路径^[3]。

近年来,随着“双碳”目标的推进与农业绿色转

型的深入,农产品干燥的节能降碳需求日益迫切。2025年3月,国家发布《推动热泵行业高质量发展行动方案》,明确提出要积极推进热泵技术在农业领域的规模化应用,为空气源热泵干燥技术的创新升级提供了政策导向^[4]。在此契机下,空气源热泵干燥系统的优化与创新成为研究热点。本文围绕空气源热泵在农产品干燥中的最新研究进展展开综述,重点探讨其在系统结构优化、制冷剂替代、多技术联合干燥、智能运行控制策略等方面的研究现状与发展趋势,以期为该技术在农产品干燥领域的规模化推广、精准化应用及后续创新研发提供参考。

1 热泵干燥系统工作原理

根据干燥介质-空气是否循环,热泵干燥系统可分为开式、闭式以及半开式^[5]。开式系统是干燥介质与外界环境完全连通,无内部循环;半开式系统是部分干燥介质内部循环,部分与外界环境连通;闭式系统是干燥介质完全在系统内部闭环循环,不与外界环境进行质量交换,通过蒸发器回收干燥室排气中的显热和潜热,节能效果显著,如图1所示。鉴于闭式热泵干燥系统在能效提升、温湿度精准控制及农产品干燥品质稳定性方面具有更为突出的综合优势,本文后续研究与分析将重点围绕闭式热泵干燥系统展开。

热泵干燥系统的性能通常由COP(性能系数, coefficient of performance)、SMER(单位能耗除湿率, specific moisture extraction rate)和MER(单位时间除湿量, moisture extraction rate)等指标进行评价^[5]。

COP是热泵的制热系数,其表达式如下:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W} \quad (1)$$

式中: Q_H 为热泵提供的制热量,kW; W 为泵的功率消耗,kW。

R_{SME} 定义为干燥过程中的除湿量(m_{water})与总能耗(E)的比值:

$$R_{\text{SME}} = \frac{m_{\text{water}}}{E} \quad (2)$$

式中: m_{water} 为干燥过程中的除湿量,kg; E 为干燥过程中的总能耗,kW·h。

R_{ME} 定义为干燥过程中的除湿量与干燥时间(t)的比值:

$$R_{\text{ME}} = \frac{m_{\text{water}}}{t} \quad (3)$$

式中: t 为干燥时间,h。

S. Prasertsan等^[6]实验研究了热泵系统对香蕉进行干燥,结果显示,在干燥负荷最高时,香蕉干燥的

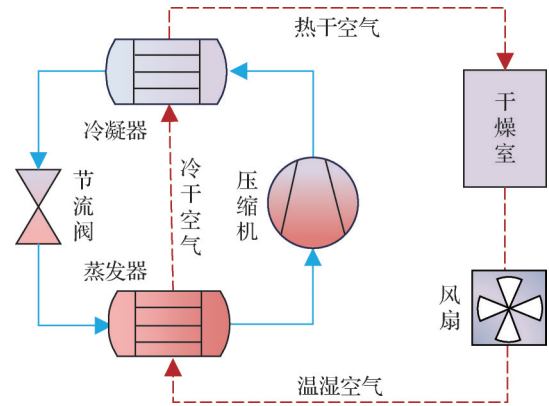


图1 闭式热泵干燥系统

Fig.1 Closed-loop Heat Pump Drying System

平均MER最大,为2.710 kg/h,对应的SMER为0.540 kg/(kW·h),与电加热热风干燥机和直燃干燥机相比,热泵系统的运行成本最低。J. Sarkar等^[7]搭建了CO₂热泵干燥系统仿真模型,分析发现,与旁通空气比和环境湿度相比,干燥器效率、再循环空气比、环境温度和空气质量流量对系统性能的影响非常显著。M. Ashok Kumar等^[8]研究了风速对闭式热泵干燥系统水分移除速率的影响,结果表明,压力在80 kPa时,风速从1.1 m/s提高至1.4 m/s时,水分移除速率提高了25.47%。

2 热泵系统结构优化

热泵干燥技术虽然具有能效高、干燥质量高和环保的优点,但传统单级压缩热泵循环的制热能力和COP在低蒸发温度和高加热温度下会迅速下降,此外,在干燥阶段后期也存在一些问题,如除湿效率低、干燥时间长、能量消耗显著增加等问题^[9]。为解决传统热泵干燥系统存在的问题,研究学者在优化热泵系统结构方面开展了大量工作。

2.1 热泵耦合回热器系统

回热器作为提升热泵干燥系统能源利用率的关键部件,通过回收排风中的余热预热进风或制冷剂,实现系统能耗有效降低,如图2所示。

梁坤峰等^[10]研究了旁通比、干燥室温度和循环风速对带回热器的闭式热泵干燥系统性能的影响,分析指出,3种影响因素使回热系统的SMER提升5.57%~37.4%,与无回热系统相比,回热系统在优化后的SMER提升7.71%~22.78%。张茜颖等^[11]针对闭式热泵干燥系统提出2类回热优化方案:方案一为回热器预冷干燥室出口湿空气,方案二为预冷辅助冷凝器出口制冷剂。分析表明,2种方案可分别使系统SMER提升0.38、0.46 kg/(kW·h),耦合后平均

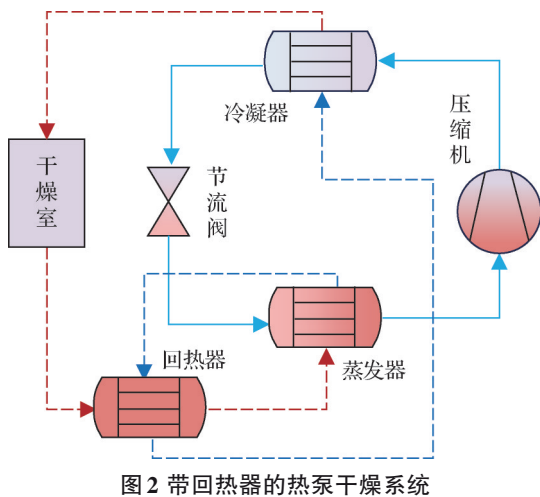


Fig.2 Heat pump drying system with heat recovery

提升 $0.85 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 显著优化了水稻烘干的能效。Fu Hailun 等^[12]根据回热器布置位置的不同提出了3种热回收方案,具体包括:方案一为利用干燥室出口湿空气加热蒸发器出口湿空气,方案二为利用冷凝器出口制冷剂加热蒸发器出口制冷剂,方案三为利用冷凝器出口制冷剂加热蒸发器出口湿空气。分析表明,方案一和方案三可有效提升系统 SMER,分别提升 0.46 、 $0.50 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,两者相结合后,系统的 SMER 提高了 35.59% 。

2.2 多级/多回路热泵系统

多级/多回路热泵系统通过分级压缩、梯级加热等方式实现能量的梯级高效利用,进而提升系统整体性能,如图3所示。Cheng Jiahao 等^[13]提出一种带增强蒸汽喷射压缩机的准二级热泵干燥系统,并将该系统与传统热泵系统和带独立热管的热泵系统进行了热力学性能和经济性对比。设计工况下(温度为 45°C ,相对湿度为 40%),新型系统的 SMER 为 $3.07 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,MER 为 $43.8 \text{ kg}/\text{h}$,与传统热泵系统相比分别提高了 16.7% 和 12.9% ,与带独立热管的热泵系统相比分别提高了 8.9% 和 4.5% 。王天皓等^[14]提出了一种多级热泵串联干燥系统,计算结果表明,多级热泵串联干燥系统比单级热泵干燥系统具有更高效能。Liu Shuailing 等^[15]提出了单吸双排梯级热泵干燥系统,与单级热泵系统相比,该梯级系统的耗电量和 SMER 分别为 1.63 、 $3.08 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,比单级热泵系统耗电量减少 20.3% ,SMER 提升 22.2% 。Dong Xiaofei 等^[16]提出了一种用于玉米干燥的四级闭式串联热泵干燥系统,该系统中设置辅助蒸发器和过冷器优化能量利用。仿真结果表明,系统在夏、冬季的 COP 最高分别可达 5.5 和 4.5 ,增大辅助蒸发器冷却温差可提升多数系统布局的 COP 约

10% ;提高回风温度将导致 COP 下降约 15% 并引起压缩机功率显著变化。此外,与燃煤系统相比,该系统投资回收期约为 1.22 年。

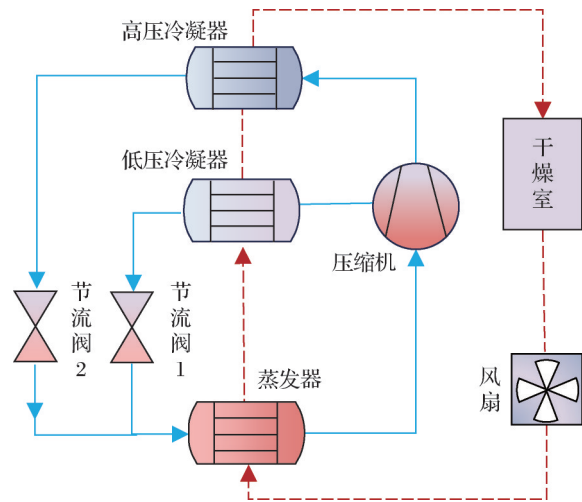


图3 单吸双排梯级热泵干燥系统^[15]

Fig.3 Single-suction double-row cascade heat pump drying system^[15]

2.3 带喷射器技术

喷射器可回收膨胀过程中的部分功,提升系统性能且不增加额外能耗,在热泵干燥系统中使用喷射器已成为提高系统性能的一种合适的方法^[17],如图4所示。Yu Mengqi 等^[18]采用动态网格数值模拟方法,研究了混合室喉部与喷嘴喉部的面积比对喷射器性能的影响。研究表明,存在最佳面积比范围 ($2.65 \sim 4.87$)使卷吸比最大化,喷嘴出口位置为 5 mm 时性能最优,研究结果为可调式喷射器结构优化提供了依据。Yu Mengqi 等^[19-20]设计了一款采用 R134a 制冷剂的太阳能辅助喷射器增强型热泵干燥器系统,实验得出该系统的焓效率和 MER 始终优于传统热泵干燥系统。在相同工况下,该系统的焓效率和 MER 比传统热泵干燥系统分别提高了 28.7% 和 54.3% 。

2.4 热泵耦合热管系统

热管技术通过高效的热传导和热回收,显著提高了热泵干燥系统的性能,如图5所示。C. Tunçkal 等^[21]对带马蹄形热管热回收的闭式热泵干燥系统进行了9种不同葡萄品种的干燥过程的焓分析,在 45°C 和 3 m/s 风速下进行实验测试,发现外部冷凝器开启时蒸发器效率更高,系统总 COP 达 3.035 。

罗乔军等^[22]设计了一套分离式热管换热器并将其用于热泵蒸发器两侧,该系统在不增加能耗的前提下,提高了热泵除湿系统的除湿能力。实验研究表明,环境温度为 26.2°C ,相对湿度为 80.2% 时,热

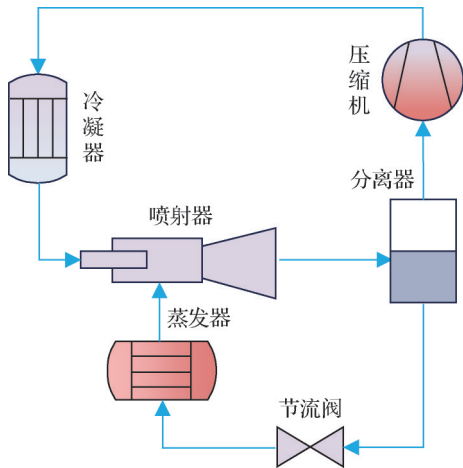


图4 带喷射器的热泵系统^[20]

Fig.4 Heat pump system with injector^[20]

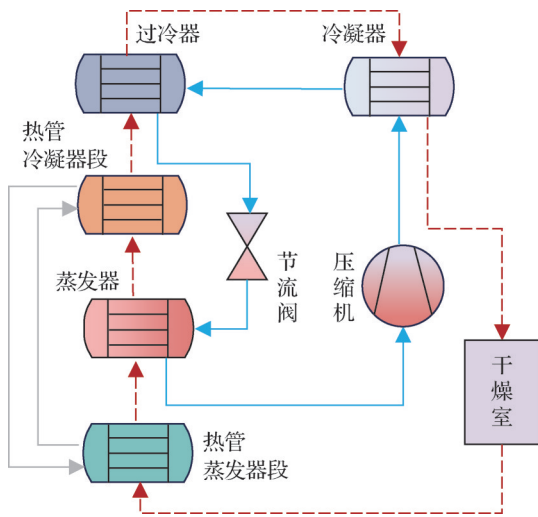


图5 带热管的热泵干燥系统^[13]

Fig.5 Heat pump drying system with heat pipes

泵耦合热管系统除湿能耗为 1 560 kJ/kg,比单独使用热泵技术节能 18.2%。

2.5 热泵耦合转轮系统

转轮除湿技术利用转轮的吸附性能,通过吸附和再生2个过程实现空气的除湿,如图6所示。Chen Qun等^[23]将干燥轮与高温热泵集成,并对转轮除湿性能进行模拟,结果表明,转轮辅助热泵系统的蒸发器尺寸比普通的热泵系统的蒸发器尺寸小50%~60%,随着空气湿度的增加,热泵耦合干燥轮所带来的性能提升更明显。K. N. Çerçi等^[24]设计了一种热泵与转轮干燥器协同除湿的干燥系统,并将该系统与其它结构的干燥系统进行对比,结果发现,所提出的系统的COP最高,能耗最低。王教领等^[25]将热泵系统与除湿干燥转轮相结合用于解决热泵干燥系统深度除湿能力有限的问题,研究发现该系统可实现深度除湿,同时降低了系统能耗,为干燥工艺的优化提供

了一个可行方案。Sun Zhili等^[26]对带有转轮除湿的闭式CO₂热泵干燥系统进行实验研究。整个干燥过程分为升温模式、干燥模式及控温模式,实验研究表明,与传统CO₂闭式热泵干燥系统相比,该系统的SMER提高了26%,干燥速度提升了41%,同时保留了香蕉片更多的色泽和维生素C含量。

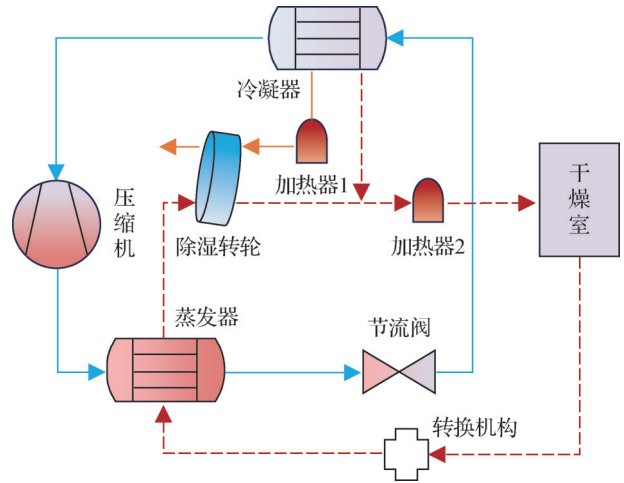


图6 带干燥轮的热泵干燥系统^[25]

Fig.6 Heat pump drying system with a drying wheel^[25]

3 联合其他干燥技术

单独使用热泵干燥技术在实际应用中常面临干燥效率偏低、物料干燥后品质劣变、系统能耗居高不下等技术瓶颈,难以同时兼顾生产效率、产品品质与节能降耗等多元需求。将热泵技术与其他干燥技术进行耦合集成,可实现不同干燥技术优势的互补与协同,从而在保障干燥效率的同时,兼顾物料干燥品质与系统的低能耗运行。

3.1 联合太阳能干燥技术

太阳能干燥技术作为新能源利用的一种形式,具有节能、清洁的特点,但其具有能量密度低、间歇性、受天气和地理位置影响大等问题^[27]。热泵干燥技术与太阳能干燥技术相结合可形成互补,热泵干燥技术可解决太阳能干燥技术的间歇性和不稳定性,太阳能干燥技术可减少热泵系统的能耗,两者相辅相成,如图7所示。明廷玉等^[28]提出了一种相变蓄热太阳能与空气源热泵联合干燥系统,该系统可分别运行太阳能干燥模式、热泵干燥模式及太阳能与热泵联合干燥模式,与传统燃煤烘箱干燥相比,该联合干燥系统可节能36.7%~41.1%,节能效果显著。何伟等^[29]设计了一种太阳能-空气源热泵联合干燥系统,该系统可分别进行太阳集热器单独运行、空气源热泵单独运行、集热器与热泵联合运行3种模式。

实验研究发现,热泵单独运行模式和联合干燥模式的平均制热 COP 分别为 3.47 和 4.72,采用二次回热技术可进一步提高联合系统的 SMER,达 2.91 kg/(kW·h)。B. Aktekel 等^[30]设计了一种基于双流体(空气和制冷剂)的光伏光热辅助热泵干燥装置,该装置将废铝材料安装在光伏板后的蒸发器管路之间起到强化传热作用。研究表明,独立光伏和光伏-光热的电效率分别为 15.97% 和 18.21%,系统的 COP 达 3.15。Xu Bo 等^[31]提出了一种太阳能辅助热泵干燥系统,该系统可运行 5 种模式:太阳能干燥模式,闭式热泵干燥模式以及闭式、开式和半开式的太阳能辅助热泵干燥模式。实验表明,太阳能干燥模式适合阳光强烈的晴天,闭式热泵干燥模式适合阴雨天或无太阳辐射的夜晚,太阳能辅助热泵干燥模式适合太阳辐射强度较弱的情况。在光伏板的即热效率分别为 0.526、0.223 和 0.434,太阳能辅助热泵干燥系统的平均 COP 分别为 3.08、2.68 和 3.20,远优于闭式热泵干燥模式。

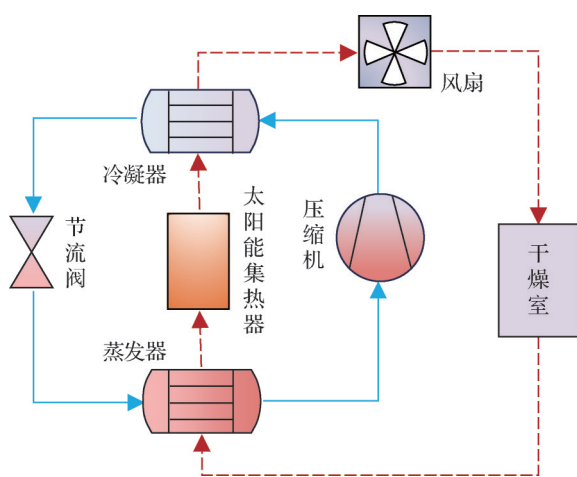


图7 热泵联合太阳能干燥系统

Fig.7 Heat pump combined with solar drying system

3.2 联合超声波干燥技术

超声波干燥技术主要是基于机械海绵效应和空化作用,对物料表面施加超声波可使得物料组织快速收缩和膨胀,形成微小通道使水分更容易去除,在加快物料干燥的同时不会引起温度的升高,联合超声波技术可进一步提高热泵干燥效率^[32]。目前,超声波技术主要用于热泵干燥前的预处理。Li Min 等^[33]将超声波与热泵干燥技术相结合,证实了超声波预处理可提高产品品质,同时可缩短干燥时间。余飞等^[34]探究了干燥温度及超声波功率对种子干燥动力学特性及发芽特性的影响。提高干燥温度和增大超声波功率均可加快种子干燥速率,而过高的温

度和超声波功率会降低种子的生命活力,较优发芽特性对应的干燥温度范围为 28~36℃,超声波功率区间为 100~150 W。值得注意的是,高功率的超声波会对物料内部结构产生永久性破坏^[35],间歇干燥工艺可改善这一问题。杨宗豫^[36]研究了温度,超声波功率和间歇比对红小豆种子干燥特性的影响,研究结果得出温度 37.10℃、超声波功率 102.80 W 和间歇比 0.59 为最佳干燥参数。

3.3 联合微波干燥技术

微波干燥是通过电磁波使物料内部的极性分子发生极化,分子间摩擦增大,物料被加热,这种特别的热效应使微波干燥的效率较高^[37]。微波干燥技术主要采用电能,跟热泵技术相比,能源消耗较大,两者联合使用可形成各自优势,达到最佳效果。宋杨等^[38]研究发现,与热泵干燥相比,热泵-微波真空联合干燥的效率更高,产品质量更好。C. H. Chong 等^[39]将热泵干燥与热泵-微波真空联合干燥技术分别用于制备苹果块干制品,发现热泵-微波联合干燥后的苹果块干制品的抗氧化活性及多酚含量比单独使用热泵干燥技术提高 60%~70%,色泽、硬度等物理外观更佳,能耗更低。

3.4 联合真空冷冻干燥技术

真空冷冻干燥技术对食品的色、香、味等保留度较好,被认为是最好的干燥技术之一,但存在干燥效率低、时间长和能耗高等问题。热泵与真空冷冻干燥结合可在保持产品品质较优的基础上,减少干燥时间和能耗^[40]。目前,在热泵-真空冷冻联合干燥技术方面的研究较少,马有川等^[41]研究了热泵、红外、真空微波和热风等不同干燥方式联合真空冷冻干燥对苹果片感官品质和营养成分的影响,结果表明,与真空冷冻干燥相比,热泵联合真空冷冻干燥的有效干燥时间缩短 22.7%,干燥能耗降低 18.3%,苹果片的硬度和脆度分别提高了 35% 和 94%,香气更接近新鲜苹果。程慧等^[42]将热泵联合真空冷冻技术用于干燥香菇,发现该联合技术的单位能耗比真空干燥降低 37.69%,但高于热泵干燥,其感官评价和复水比接近真空干燥,高于热泵干燥,解决了热泵干燥品质不佳的问题。

4 制冷剂替代研究

随着《蒙特利尔议定书基加利修正案》和《欧盟 F-Gas 法规》的实施,传统高 GWP 制冷剂(如 R134a、R22)逐步被淘汰,开发低 GWP、高能效的新型制冷剂成为研究热点。P. Gataric 等^[43]发现 R450A 是热泵干

干燥系统中R134a的合适替代品,使用R450A的热泵干燥系统总能耗降低了3.7%,CO₂排量降低50%以上。A. Singh等^[44]对间歇式开式热泵干燥系统进行了模拟实验。结果表明,采用R152a制冷剂时,干燥效率最高可达29.74%且焓破坏最小,从性能、环境和安全性来看,R152a是热泵干燥系统工质的选择之一。M. Deymi-Dashtebayaz等^[45]采用R134a、R1234yf、R1234ze、R717以及R152a这5种制冷剂作为热泵工质,分析其对系统的COP、焓效率、干燥时间以及干燥产品的单位质量成本的影响。结果表明,使用R717工质的系统COP最大,为3.9。但使用R1234yf工质可以获得最短的干燥时间以及干燥成本。Ni Hui等^[46]在传统闭式热泵干燥系统上增添了一个回热器,并对其工质进行分析,结果表明CO₂/R290(20/80)混合工质为最佳工质,与R134a相比,其COP、SMER、体积热容和压比均得到显著提高,最大性能提高分别为33.66%、41.50%、181.44%和46.55%。与纯R290相比,CO₂还减少了焓损失,降低了工作流体的可燃易爆性。M. Cop等^[47]在热泵干燥机中对其制冷剂进行研究,发现使用R290/RE170(质量分数30%/70%)这种非共沸混合工质比R134a的充注量减少了40%,同时干燥时间也得到缩短。

5 运行策略

在热泵干燥系统中,合理的运行策略可进一步提升系统能效和干燥品质。Hu Zicheng等^[48]设计了一套双蒸发器的闭式热泵干燥系统,在初始阶段,第2个蒸发器从环境中吸收热量,加快物料温度的快速提升,在稳定阶段,第2个蒸发器作为辅助冷凝器,用于维持系统能量平衡,该新型系统比传统热泵系统启动时间缩短20.8%,初投资降低6.5%。雷欣雨等^[49]研究了旁通排气对热泵干燥系统性能的影响,实验表明,实施旁通策略后系统COP提高了8.5%,SMER提高了24.5%。J. Y. Choi等^[50]采用有限体积法搭建了热泵干燥系统的瞬态仿真模型,分析了改变运行模型和换热管长度对系统性能的影响。研究得出,压缩机高频运行时,干燥时间缩短,MER提高了16.5%,换热器长度从80%增至120%,MER增加了10%,SMER增加了14%,随着压缩机频率的升高,最大性能所需要的换热器长度也需相应增加。M. Deymi-Dashtebayaz等^[45]对热泵干燥系统进行参数分析与多目标优化,以系统COP、焓效率、干燥时间和成本为目标函数建立了基于TOPSIS的多目标优化模型,得出冷凝器温度为69.68℃,蒸发器温度为10.32℃时为系统最优点。Hou Yaxiang等^[51]在新型

三元制冷剂热泵干燥系统中对玉米粒进行了间歇式干燥,研究了间歇率对系统性能以及玉米粒干燥特性的影响,结果表明,在间歇率为2/6时,系统性能有所升高,总干燥时间缩短,玉米粒的复水率提高了6.78%,裂纹率下降了13.04%。Yu Mengqi等^[52]研究了变频压缩机在太阳能辅助喷射式热泵干燥系统中的应用,发现通过调节压缩机转速可以控制干燥温度,在相同干燥温度下新型系统能耗更低,与基本系统相比,新型系统的MER、SMER和COP分别最高提升6.8%~22.4%、23.7%~31.4%和26.5%~42.3%,展现了该新型系统的节能优势。

6 不同优化技术性能对比分析

现有文献综述表明,不同优化技术对农产品干燥品质及热泵系统性能的影响存在显著差异,相关性对比详见表1。其中,结构优化技术是提升热泵系统能效的核心路径,可推动COP、SMER及焓效率等关键指标大幅跃升;联合干燥技术能精准匹配高附加值农产品的干燥需求,在兼顾干燥效率与产品品质的同时,存在系统结构复杂、初始投资较高的特点;采用低GWP制冷剂可在小幅提升系统性能的基础上降低碳排放,精准契合绿色农业发展导向;间歇调控、旁通策略等技术适配性较强,无需对原有系统进行大幅改动,是存量系统节能改造的优选方案。综上所述,农业干燥领域热泵系统优化需以“场景适配+效益平衡”为核心,实际应用中需结合物料特性、生产规模及成本预算,科学选取适配的优化技术或组合方案,最大化提升干燥综合效益。

7 未来发展方向探讨

在农产品干燥领域,使用不同设计的热泵技术可以显著减少农产品的收后损失。本文总体介绍了空气源热泵干燥技术在系统结构优化、多技术联合、制冷剂替代及运行策略优化等方面取得的最新研究成果。现有研究表明,不同技术路径在系统能效提升、干燥强化及产品品质改善方面各具优势,但总体仍处于从单一优化向多因素协同优化过渡的阶段。因此,未来研究方向应在总结现有进展的基础上,围绕不同研究方向的深化、融合与工程化应用展开。

1) 系统结构优化方面:系统结构优化研究应从单一结构改进转向多结构耦合与整体系统协同优化,重点关注结构复杂度、系统可靠性与工程可实施性之间的平衡,以推动高效结构型热泵干燥系统的工程化应用。

2) 与其它技术的耦合方面:未来研究可进一步

表1 不同优化技术对空气源热泵干燥系统性能的影响对比

Tab.1 Comparison of the effects of different optimization technologies on the performance of air-source heat pump drying systems

文献	干燥方式	物料种类	运行工况	物料品质	能源消耗	应用场景
[10]	耦合回热器	萝卜	干燥温度 50 °C, 循环风速 1.5 m/s, 旁通比 0.6	—	SMER 提升 7.71% ~ 22.78%	
[13]	多级串联	海藻	干燥室出口干球温度 45 °C, 相对湿度 40%	—	SMER 提升 16.7%, MER 提升 12.9%	
[19]	添加喷射器	海绵	干燥温度 25 °C	—	烟效率提升 28.7%, MER 提升 54.3%, SMER 降低 7.7%	较适用于高湿、高含水率物料干燥工况
[22]	应用热管技术	稻谷	环境温度 26.2 °C, 相对湿度 80.2%	—	节能 18.2%	
[26]	应用转轮技术	香蕉	干燥温度 43 °C	V _c 含量提升 12%, 色差降低 16%	SMER 提升 26%, 干燥速率提升 41%	
[29]	联合太阳能技术	枸杞	变温干燥 45 °C(6 h)、50 °C(6 h)、55 °C(3 h)、60 °C(4 h), 集热器效率 50.02%	—	SMER 提升 36%。	
[34]	联合超声波技术	黄豆	干燥温度 28 °C, 超声波功率 50 W	过氧化物酶活性提高 74.3%	干燥时间缩短 48.81%	系统结构复杂、初投资较高, 适合高附加值农产品加工
[38]	联合微波技术	海参	热泵干燥至 60% 含水率+微波干燥(功率 230 W, 真空度 0.06 MPa)至 13% 含水率	复水率提升 50%, 收缩率减少 32.2%	干燥时间缩短 50%	
[42]	联合真空冷冻技术	香菇	干燥温度 49 °C, 真空度 110 Pa	复水比提高 87.6%, 硬度降低 19.8%, 感官评分更高	干燥能耗提高 19.4%	
[45]	使用低 GWP 制冷剂	动物饲料	采用 R1234yf, R1234ze, R717, R152a, 蒸发温度 10.32 °C, 冷凝温度 69.68 °C	—	R717 具有最高的 COP 值, 为 3.9, R1234yf 具有最短的干燥时间和产品成本	小幅提升干燥性能, 但其能降低碳排放
[46]	使用混合制冷剂	—	CO ₂ /R290(20/80)	—	COP 提升 33.66%, SMER 提升 41.5%	
[13]	采用旁通策略	海藻	干球温度 35 °C, 相对湿度 55%	—	MER 提升 51.2%, SMER 提升 66.7%	
[51]	采用间歇干燥方法	玉米	间歇比 2/6	产品复水率提高了 6.78%, 裂纹率下降了 13.04%	干燥速率提升 16.41%, SMER 提升 42.98%	适合现有干燥系统的节能改造
[52]	采用变频压缩机	—	转速由 3 000 r/min 提升到 3 600 r/min	—	MER 提升 31.8% ~ 58.4%, SMER 降低 7.9% ~ 9.3%, COP 提升 3.4% ~ 5.7%	

围绕耦合方式的合理匹配机制展开,明确不同干燥技术在热泵干燥过程中所起的主导作用与协同边界,避免系统复杂度过度提升。同时,应加强对联合干燥系统能效、品质及经济性的综合评价,为其在高附加值农产品领域的推广应用提供理论依据。

3) 制冷剂替代方面:制冷剂替代的未来研究应在已有性能分析基础上,进一步关注安全性、长期运行稳定性及系统匹配性问题,并结合系统结构与运行策略开展协同优化研究,以推动环保制冷剂在农业热泵干燥设备中的规模化应用。

4) 运行策略调整方面:进一步结合物料干燥特性和系统动态响应特征,发展面向干燥全过程的动态优化运行策略,并引入智能控制方法,实现系统运行参数与干燥需求的实时匹配,从而进一步提升系统综合性能。

总体而言,农业热泵干燥技术未来的发展方向并非完全独立的新路径,而是建立在现有研究基础上的深化与融合。系统结构优化、多技术耦合、制冷剂替代与运行策略优化之间的协同作用将成为未来研究的重要方向。通过构建多因素耦合优化框架,

实现能效、干燥效率与产品品质的综合提升,将是推动热泵干燥技术在农业领域规模化应用的关键。

本文受天津市杰出青年科学基金(23JCJQJC00290)和京津冀基础研究(24JCZXJC00280)项目资助。(The project was supported by Tianjin Outstanding Young Scientist Fund (No. 23JCJQJC00290) and Beijing-Tianjin-Hebei Basic Research Project(No. 24JCZXJC00280).)

参考文献

- [1] 张艳来,尹凯丹,龙成树,等.热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J].农机化研究,2014,36(5):1-7. (Zhang Yanlai, Yin Kaidan, Long Chengshu, et al. Application and prospects of the agricultural product drying using the heat pump in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36 (5) : 1-7.)
- [2] 杨鲁伟,魏娟,陈嘉祥.热泵干燥技术研究进展[J].制冷技术,2020,40(4):2-8. (Yang Luwei, Wei Juan, Chen Jiayang. Research progress of heat pump drying technology [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4): 2-8.)
- [3] 黄佳兵.闭式热泵干燥系统除湿性能与调控技术研究[D].广州:广州大学,2018. (Huang Jiabing. Study on dehumidification performance and control technology of closed heat pump drying system [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.)
- [4] 国家发展改革委,工业和信息化部,生态环境部,等.国家发展改革委等部门关于印发《推动热泵行业高质量发展行动方案》的通知[A/OL].(2025-03-17)[2025-12-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7016926.htm. (National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Ecology and Environment, et al. Notice of the National Development and Reform Commission and other departments on issuing the action plan for promoting high-quality development of the heat pump industry [A/OL]. (2025-03-17) [2025-12-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7016926.htm)
- [5] Gao Lei, Fix A, Seabourne T, et al. A comprehensive review of heat pump wood drying technologies[J]. Energy, 2024, 311: 133241.
- [6] Prasertsan S, Saen-saby P. Heat pump drying of agricultural materials[J]. Drying Technology, 1998, 16(1/2): 235-250.
- [7] Sarkar J, Bhattacharyya S, Gopal M R. Transcritical CO₂ heat pump dryer: part 2. validation and simulation results [J]. Drying Technology, 2006, 24(12): 1593-1600.
- [8] Ashok Kumar M, Kumaresan G, Rajakarunakaran S. Experimental study of moisture removal rate in Moringa leaves under vacuum pressure in closed-loop heat pump dryer [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 1205-1210.
- [9] Zhao Haibo, Wu Kun. Annual performance analysis of heat pump drying system with waste heat recovery [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102625.
- [10] 梁坤峰,赵一宸,陈浩远,等.基于空气回热的闭式热泵干燥系统性能研究[J].河南科技大学学报(自然科学版),2025,46(4):17-23. (Liang Kunfeng, Zhao Yichen, Chen Haoyuan, et al. Performance study of closed-loop heat pump drying system based on air heat recuperation [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 46 (4) : 17-23.)
- [11] 张茜颖,王迪,袁俊球,等.闭式热泵干燥系统回热方式设计及热力学分析[J].中国农机化学报,2024,45(12):216-223. (Zhang Xiying, Wang Di, Yuan Junqiu, et al. Design and thermodynamic analysis of heat recovery method for closed-cycle heat pump drying system [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45 (12): 216-223.)
- [12] Fu Hailun, Shi Juan, Yuan Junqiu, et al. Heat recovery scheme design and thermodynamic analysis of closed-cycle heat pump drying system[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286: 117034.
- [13] Cheng Jiahao, Cao Xiang, Shao Liangliang, et al. Performance evaluation of a novel heat pump system for drying with EVI-compressor driven precooling and reheating[J]. Energy, 2023, 278: 127989.
- [14] 王天皓,张振涛,杨俊玲,等.多级热泵串联干燥系统性能模拟[J].制冷技术,2020,40(4):15-21,39. (Wang Tianhao, Zhang Zhentao, Yang Junling, et al. Performance simulation on multi-stage series heat pump drying system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(4): 15-21, 39.)
- [15] Liu Shuailing, Ma Guoyuan, Jiang Yuepeng, et al. Performance evaluation and optimization of a novel heat pump clothes dryer with ESD-compressor[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107798.
- [16] Dong Xiaofei, Zhao Hongxia, Kong Fanchen, et al. Parameter optimization of multistage closed series heat pump drying system [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119124.
- [17] Zhang Zhenying, Feng Xu, Tian Dingzhu, et al. Progress in ejector-expansion vapor compression refrigeration and

- heat pump systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207: 112529.
- [18] Yu Mengqi, Zou Lingeng, Yu Jianlin. Numerical investigation on the effect of area ratio on an adjustable ejector for heat pump dryer based on dynamic mesh [J]. *Energy*, 2024, 308: 132876.
- [19] Yu Mengqi, Zou Lingeng, Yu Jianlin. Experimental investigation on the drying characteristics in a solar assisted ejector enhanced heat pump dryer system [J]. *Solar Energy*, 2024, 267: 112265.
- [20] Zou Lingeng, Liu Ye, Yu Jianlin. Energy, exergy and economic evaluation of a solar enhanced ejector expansion heat pump cycle [J]. *Renewable Energy*, 2023, 217: 119119.
- [21] Tunçkal C, Direk M, Doymaz İ, et al. Drying kinetics and energy-exergy analysis of an experimental heat pump dryer utilized horseshoe heat recovery heat pipes for drying different grapes [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 36: 101487.
- [22] 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. (Luo Qiaojun, Zhang Jinjiang, Wu Yaosen, et al. Rice drying using heat pump dehumidifying system with heat pipe [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(S1): 247-251.)
- [23] Chen Qun, Cleland D J, Carson J K, et al. Integration of desiccant wheels and high-temperature heat pumps with milk spray dryers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119083.
- [24] Çerçi K N, Hürdoğan E. Performance assessment of a heat pump assisted rotary desiccant dryer for low temperature peanut drying [J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 223: 1-17.
- [25] 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. (Wang Jiaoling, Song Weidong, Jin Chengqian, et al. Structural design and process parameter optimization of heat pump drying system of wheel dehumidification for *Pleurotus eryngii* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(4): 273-280.)
- [26] Sun Zhili, Wang Qianqian, Yuan Yingying, et al. Experimental analysis of a CO₂ closed heat pump drying system combined with rotary dehumidification for drying banana slices drying [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 160: 76-87.
- [27] Singh A, Sarkar J, Sahoo R R. Experimental energy, exergy, economic and exergoeconomic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer [J]. *Renewable Energy*, 2020, 156: 1107-1116.
- [28] 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. (Ming Tingyu, Li Baoguo. Application research of combined drying tea with solar energy and heat pump system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(10): 2730-2736.)
- [29] 何伟, 储文峰, 胡中停, 等. 新型太阳能-空气源热泵联合干燥系统设计及枸杞干燥实验研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 59-63. (He Wei, Chu Wenfeng, Hu Zhongting, et al. Design of new solar energy and air source heat pump combined drying system and experimental study on Chinese wolfberry drying [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 59-63.)
- [30] Aktekel B, Aktaş M, Koşan M, et al. Experimental study of a novel design bi-fluid based photovoltaic thermal (PVT)-assisted heat pump dryer [J]. *Renewable Energy*, 2025, 238: 121971.
- [31] Xu Bo, Wang Dengyun, Li Zhaohai, et al. Drying and dynamic performance of well-adapted solar assisted heat pump drying system [J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 1290-1305.
- [32] 陶志超. 绿豆种子的超声波-热泵联合连续及间歇干燥特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (Tao Zhichao. Study on the drying characteristics of continuous and intermittent ultrasonic combined heat pump drying of mung bean seeds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [33] Li Min, Ye Biao, Guan Zhiqiang, et al. Impact of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pre-treatment on the quality of heat pump dried tilapia fillets [J]. *Energy Procedia*, 2017, 123: 243-255.
- [34] 余飞, 杨昭, 杨宗豫. 超声波-热泵联合干燥黄豆种子特性分析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(8): 144-153. (Yu Fei, Yang Zhao, Yang Zongyu. Characteristics of heat pump combined with ultrasound for drying soybean seed [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 144-153.)
- [35] Kowalski S J, Mierzwa D, Stasiak M. Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions [J]. *Drying Technology*, 2017, 35(8): 939-947.
- [36] 杨宗豫. 超声波-热泵联合间歇干燥红小豆种子干燥工艺的研究[D]. 天津: 天津大学, 2020. (Yang Zongyu. Study on the drying process of ultrasound-heat pump combined intermittent drying of adzuki bean seeds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.)
- [37] 刘盼盼, 任广跃, 段续, 等. 微波处理技术在食品干燥领域中的应用[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 194-202. (Liu Panpan, Ren Guangyue, Duan Xu, et al. Application of microwave treatment technology in the field

- of food drying [J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 194–202.)
- [38] 宋杨, 张国琛, 王彩霞, 等. 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(1): 47–51. (Song Yang, Zhang Guochen, Wang Caixia, et al. Combined heat pump and microwave-vacuum drying of sea cucumber [J]. *Fishery Modernization*, 2009, 36(1): 47–51.)
- [39] 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(4): 975–989.
- [40] 谢欢, 刘晓艳, 杨淑纯, 等. 热泵联合干燥技术在果蔬干燥工艺中的应用进展[J]. *农产品加工*, 2022(16): 75–78. (Xie Huan, Liu Xiaoyan, Yang Shuchun, et al. Application progress of heat pump combined drying technology in fruit and vegetable drying process [J]. *Farm Products Processing*, 2022(16): 75–78.)
- [41] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转换点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 110–120. (Ma Youchuan, Bi Jinfeng, Yi Jianyong, et al. Effects of pre-drying methods and moisture conversion point on the quality of freeze dried apple chips [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 110–120.)
- [42] 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. (Cheng Hui, Ji Changying, Zhang Bo, et al. Optimization of drying process for *Lentinus edodes* by combing heat pump with vacuum [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(1): 125–132.)
- [43] Gatarić P, Lorbek L. Evaluating R450A as a drop-in replacement for R134a in household heat pump tumble dryers [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 128: 22–33.
- [44] Singh A, Sarkar J, Sahoo R R. Comparative analyses on a batch-type heat pump dryer using low GWP refrigerants [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 117: 1–13.
- [45] Deymi-Dashtebayaz M, Davoodi V, Khutoraya J, et al. Parametric analysis and multi-objective optimization of a heat pump dryer based on working conditions and using different refrigerants [J]. *Energy*, 2023, 284: 129231.
- [46] Ni Hui, Hu Peng, Li Yuchen. Analysis and optimization of the performance of closed heat pump dryer based on zeotropic mixtures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 260: 124916.
- [47] Cop M, Nosbers R, Thomas C, et al. Experimental investigation of a heat pump tumble dryer with a zeotropic refrigerant blend [C]//18th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. West Lafayette: Purdue University, 2021.
- [48] Hu Zicheng, Li Yang, El-Mesery H S, et al. Design of new heat pump dryer system: a case study in drying characteristics of kelp knots [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 32: 101912.
- [49] 雷欣雨, 刘龙, 时豪, 等. 旁通排气对热泵干燥系统性能的影响研究[J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(11): 1565–1570. (Lei Xinyu, Liu Long, Shi Hao, et al. Study on the influence of bypass exhaust on the performance of heat pump drying system [J]. *Fire Science and Technology*, 2024, 43(11): 1565–1570.)
- [50] Choi J Y, Lee D C, Park M H, et al. Effects of compressor frequency and heat exchanger geometry on dynamic performance characteristics of heat pump dryers [J]. *Energy*, 2021, 235: 121391.
- [51] Hou Yaxiang, Wu Weidong, Wang Huaichen, et al. Effect of intermittent ratio on the performance of a closed-loop heat pump drying system with a novel ternary refrigerant and on the drying characteristics of corn kernels [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 161: 108541.
- [52] Yu Mengqi, Zou Lingeng, Yu Jianlin. Experimental study on effects of compressor speed on a heat pump dryer system with auxiliary solar source [J]. *Renewable Energy*, 2024, 228: 120636.

通信作者简介

刘帅领,男,讲师,天津商业大学机械工程学院,13363014855, E-mail: liusl@tjcu.edu.cn。研究方向:建筑排风余热回收,热泵干燥,数据中心冷却。

About the corresponding author

Liu Shuailing, male, lecturer, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, 86–13363014855, E-mail: liusl@tjcu.edu.cn. Research fields: Waste heat recovery from building exhaust air, heat pump drying, data center cooling.

(责任编辑:王亚薇)