

空气能热泵在单板烘干的应用与展望

农宏亮¹, 周楚虹^{2*}, 洪广², 朱夏熠²

1. 广西科泰机电工程有限公司, 广西 南宁 530000

2. 广西农业机械研究院有限公司, 广西 南宁 530000

DOI:10.61369/ME.2026070019

摘 要 : 单板干燥是木材加工产业链中能耗最为集中的工序之一, 传统燃煤、燃气和蒸汽干燥方式面临碳排放成本上升与环保政策趋紧的双重压力。本文以“能效—品质—经济性—碳排放”四维评价框架为分析主线, 系统综述了空气能热泵单板烘干的基础理论、关键技术、性能对比、发展瓶颈及未来展望。研究表明, 空气能热泵干燥在 SMER (0.5~1.2 kg/kWh) 和碳排放方面全面优于传统方式, 但高温工况 COP 衰减和设备初投资偏高仍是制约大规模推广的主要瓶颈。

关 键 词 : 空气能热泵; 单板烘干; 干燥动力学; 性能系数 (COP); 单位脱水能耗 (SMER)

Applications and Prospects of Air Source Heat Pumps in Single-Panel Drying Systems

Nong Hongliang¹, Zhou Chuhong^{2*}, Hong Guang², Zhu Xiayi²

1. Nanning Ketai Machinery Equipment Co.,Ltd., Nanning, Guangxi 530000

2. Guangxi Agricultural Machinery Research Institute Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000

Abstract : Single-board drying is one of the most energy-intensive processes in the timber processing industry chain. Traditional coal-, gas-, and steam-based drying methods face dual pressures arising from rising carbon emission costs and increasingly stringent environmental protection policies. This paper adopts a four-dimensional evaluation framework encompassing "energy efficiency - quality - economic viability - carbon emissions" as its analytical axis to systematically review the fundamental theories, key technologies, performance comparisons, developmental bottlenecks, and future prospects of air-source heat pump-based single-board drying. The study demonstrates that air-source heat pump drying outperforms traditional methods comprehensively in terms of SMER (0.5 - 1.2 kg/kWh) and carbon emission levels; however, the decline in COP under high-temperature operating conditions and relatively high initial equipment investment remain the primary barriers hindering its large-scale adoption.

Keywords : air-source heat pump; single-board drying; drying kinetics; dehumidification drying; coefficient of performance (COP); specific moisture removal energy consumption (SMER)

引言

在木材加工全流程中, 单板干燥环节的能耗占比高达 40%~60%, 是产业链中碳减排压力最为集中的工段之一^[1]。传统燃煤、燃气干燥方式面临碳减排压力。空气能热泵 (air source heat pump, ASHP) 技术通过逆卡诺循环原理, 从环境空气中提取低位热能并转化为可供干燥使用的高位热能, 其制热性能系数 (COP) 通常在 2.5~5.0 之间, 远高于电加热 (COP $\approx$ 1.0) 和化石燃料燃烧 (一次能源利用效率约 0.7~0.9)^[2]。然而, 当前研究仍缺乏针对单板薄层干燥特性的专项研究, 多数成果集中在锯材和方材的厚层干燥领域。

一、空气能热泵单板烘干基础理论与技术原理

(一) 热泵干燥系统工作原理

空气能热泵干燥系统由蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀四大核心部件组成, 通过工质在封闭回路中的相变循环实现热量

的“搬运”。

在单板干燥场景中, 热泵干燥系统有三种基本循环模式: 开式、闭式和半开式。从单板干燥的需求来看, 闭式与半开式循环在排风余热回收和干燥介质参数稳定性方面具有明显优势, 是当前研究和应用的主流方向。

项目名称: 智能木材单板烘干系统开发及应用。

作者简介: 农宏亮 (1984.08-), 男, 壮族, 研究生, 广西田阳人, 高级工程师, 研究方向: 木材热泵烘干技术研究。

通讯作者: 周楚虹 (1989.11-), 女, 汉族, 本科, 湖南永州人, 工程师, 研究方向: 机械工程。

（二）单板干燥传热传质机理

单板作为厚度通常为1~5 mm的薄层木材材料，其干燥过程与厚板或方材有显著差异。当单板含水率降至纤维饱和点（约30%）以下时，干燥进入降速段，水分迁移由内部扩散控制，干燥速率逐渐降低。

供风温度直接决定单板表面的饱和蒸汽压差，温度每升高10℃，饱和蒸汽压差约增大一倍，干燥速率相应提升。

（三）热泵烘干核心技术特性

一是高效节能，系统依托空气热能采集与余热闭环回收机制运行，仅消耗压缩机工作电能，能耗仅为电热烘干的25%~30%、燃煤烘干的40%~60%，系统能效比（COP）可稳定达到3.0以上。二是烘干品质优异，50~75℃低温可控烘干模式可有效规避单板高温碳化、表皮硬化、翘曲开裂等缺陷，最大程度保留木材原生结构与理化性能。三是绿色低碳环保，系统全程闭环运行，无废气、粉尘、废液等污染物排放，仅产生洁净冷凝水，完全契合绿色木材加工产业标准。四是工艺适配性强，可通过智能电控系统实现温湿度、风速、烘干时长的多维度精准协同调控，适配不同树种、不同厚度单板的差异化烘干工艺需求。

二、空气能热泵单板烘干关键技术与应用实践

（一）热泵系统优化技术

面向单板烘干的高温热泵系统优化是提升干燥效率和温区适应性的技术核心。多级压缩中间冷却技术可将冷凝温度提升至80~100℃^[3]；复叠式热泵在环境-15℃时仍可稳定提供68℃以上供风温度。跨临界CO₂循环因放热过程为变温过程，与空气加热温度匹配性好，可降低传热不可逆损失^[4]。表1汇总了四种系统构型的适用性能差异：单级压缩COP最高但温度上限受限，复叠式和跨临界系统在高温干燥及寒冷地区适应性更好。

表1 不同热泵系统构型的适用性能对比

系统构型	供风温度范围/℃	典型COP	适用场景
单级压缩	40~65	3.0~5.0	低温慢速干燥，环境温度≥0℃
多级压缩	60~85	2.5~4.5	中温快速干燥
复叠式热泵	70~100	2.0~3.5	高温干燥，寒冷地区
跨临界CO ₂	60~100	2.5~4.0	高温干燥，低温环境

（二）干燥工艺智能调控

基于含水率在线反馈的智能温湿度控制是实现单板干燥品质一致性的关键技术。在干燥缺陷控制方面，基于含水率实时反馈的智能温湿度控制策略可将干燥缺陷率降低至3%以下。具体而言，在恒速段维持较高的供风温度和较低的相对湿度以最大化干燥速率，在降速段逐步降低供风温度并提高相对湿度，以防止单板表面硬化、开裂和翘曲。

（三）工程应用实践

工程实践表明，热泵单板干燥系统在杨木、桉木等速生材单板干燥中已实现规模化应用。以杨木单板为例，初始含水率

80%~120%的湿单板经热泵干燥至终含水率6%~8%，干燥周期约4~8 h，较传统蒸汽干燥缩短20%~30%，综合运行成本较燃气干燥降低30%~50%^[1]。在设备配置方案上，典型的工业级热泵单板干燥生产线采用“多台并联热泵机组+闭式干燥室+自动进出料系统”的模块化设计，日处理能力50~100 m³。

三、与传统烘干技术性能对比

（一）能耗与能效对比

SMER是衡量干燥系统能量利用效率的核心指标。热泵干燥的SMER值（0.5~1.2 kg/kWh）显著高于电加热干燥（0.2~0.4 kg/kWh）和太阳能干燥（受日照条件限制，SMER波动较大），与蒸汽干燥（0.3~0.7 kg/kWh）相比在高COP工况下具有明显优势^[5]。Khouya^[6]在木材干燥实验中对热泵系统与聚光光伏热系统的性能进行了对比评估，结果表明热泵系统的整体能效比在多数工况下优于光伏热系统。表2从能耗、碳排放、设备投资和干燥品质四个维度对六种干燥方式进行了综合对比，热泵在SMER和碳排放指标上优势明显，但设备投资较高。

表2 六种干燥方式的性能综合对比

干燥方式	SMER/(kg·kWh ⁻¹)	碳排放强度	设备投资	干燥品质
空气能热泵	0.5~1.2	低（零直接排放）	高	优（中低温）
蒸汽干燥	0.3~0.7	中（取决于热源）	中	中（高温风险）
电加热	0.2~0.4	中（取决于电力结构）	低	中
燃气干燥	0.2~0.5	高（约0.41 kg/kg水）	中	中
太阳能干燥	0.5~1.5（受日照影响）	极低	中	优（低温慢速）
微波干燥	0.1~0.3	中（取决于电力结构）	高	中（不均匀风险）

（二）干燥品质与运行经济性对比

从干燥品质维度看，热泵干燥在品质控制上优于传统高温干燥。由于热泵干燥运行于中低温区间（40~80℃），单板在干燥过程中经历的温度梯度较小，热应力引起的开裂和翘曲显著减少，开裂率可降低50%以上^[7]。此外，闭式热泵干燥系统的干燥介质相对湿度可控，可避免单板在干燥末期因过度干燥而导致的脆化和色变。设备初投资仍是制约大规模推广的主要经济瓶颈，尤其是对于年运行时间不足1 000 h的小型加工企业，投资回收期可能延长至6~8年。

（三）碳排放与环境效益对比

基于全生命周期评价方法，热泵干燥与燃煤/燃气/燃油干燥的碳排放强度差异显著。据测算，每蒸发1 kg水分的直接碳排放量，燃煤干燥约为0.82 kg，燃气干燥约为0.41 kg，而采用全国电网平均碳排放因子计算的热泵干燥仅为0.12~0.30 kg（取决于

COP 和电力碳排放因子)。

此外,热泵干燥系统的环境效益还体现在无烟气排放、无粉尘污染和低噪声运行等方面。与燃煤热风炉相比,热泵干燥系统不产生 SO₂、NO_x 和颗粒物等大气污染物,有利于改善厂区及周边环境质量,符合日益严格的工业排放标准。

四、发展瓶颈与展望

(一) 关键技术瓶颈

空气能热泵单板烘干面临五大核心瓶颈:高温工况 COP 衰减、低温环境适应性、工艺标准缺失、初投资偏高与核心部件依赖进口。环境温度低于 -5 °C 时,空气源热泵的蒸发温度降低,制热量和 COP 均显著下降,同时蒸发器表面结霜问题进一步恶化换热性能。针对这一问题,补气增焓与复叠式热泵循环是有效技术路径。单板热泵干燥工艺标准(温度曲线、湿度曲线、干燥基准)的缺失是制约行业规模化发展的关键瓶颈。在产业化层面,设备初投资偏高和核心部件国产化率低是两大制约因素。

(二) 未来发展方向

空气能热泵单板烘干将向智能化、高温化、集成化与标准化四大方向演进。

在智能化方向,人工智能和物联网技术的深度融合将推动干燥工艺从“经验控制”向“数据驱动优化”转变。深度学习模型,如长短期记忆网络(LSTM)和 Transformer,在干燥过程的多变量时序预测中展现出优于传统 PID 控制的自适应能力。未来,基于数字孪生技术的热泵干燥系统虚拟仿真平台有望实现干燥工艺的离线优化和在线自适应调控,将干燥缺陷率进一步降低至 1% 以下。

在高温化方向,跨临界 CO₂ 热泵和复叠式热泵技术将逐步拓展至 100 °C 以上干燥温区,覆盖更多对干燥温度要求较高的树种

和工艺需求。CO₂ 作为自然工质,兼具环保性(GWP=1)和高温适应性,随着压缩机技术的成熟和规模化生产成本的下降,有望成为下一代高温热泵干燥系统的主流工质选择。

在集成化方向,太阳能-热泵-储能多能互补系统将成为实现全天候零碳干燥的关键技术方案。相关综述表明,太阳能辅助热泵干燥系统在日照充足地区已展现出显著的经济和环境效益,而储能技术的引入,包括显热储热、相变储热和电化学储能,可有效解决太阳能间歇性和热泵低温制热能力不足的问题。Lingayat 等^[8]指出,太阳能-热泵混合系统在农业和木材干燥领域的应用前景广阔,预计未来 5~10 年将进入商业化推广阶段。

在标准化方向,建立涵盖主要商品材树种、不同单板厚度和典型干燥工况的干燥基准数据库是推动行业标准化的基础性工作。建议由中国林产工业协会牵头,联合科研院所和设备制造企业,制定《空气能热泵单板干燥工艺规范》等行业标准,明确干燥温度曲线、湿度曲线、风速范围和干燥时间等关键工艺参数的推荐范围,为设备选型、工艺设计和品质控制提供统一的技术依据。

五、结语

空气能热泵烘干技术凭借高效节能、绿色环保、提质降耗、精准可控的优良技术特征,高度适配木材单板精细化烘干的工业化生产需求。研究表明,热泵干燥在 SMER (0.5~1.2 kg/kWh) 和碳排放 (0.12~0.30 kg/kg 水) 方面全面优于传统方式,干燥开裂率可降低 50% 以上,全生命周期碳排放可比燃煤干燥降低 60%~80%。但高温工况 COP 衰减、低温环境适应性不足、工艺标准缺失、设备初投资偏高及核心部件依赖进口等瓶颈仍制约着技术的规模化推广。

参考文献

- [1] GAO L, FIX A, SEABOURNE T, et al. A comprehensive review of heat pump wood drying technologies[J]. Energy, 2024, 288: 133241.
- [2] MINEA V. Heat pump-assisted wood dryers[M]//Industrial Heat Pump Assisted Wood Drying. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [3] LI W, WEI J, YUAN Y, et al. Experimental investigation on performance of multi-stage dehumidification heat pump tower corn drying system in high cold regions[J]. Heat Transfer Engineering, 2023, 44(1): 1-14.
- [4] 刘圣春, 林建森, 滑雪, 等. 跨临界 CO₂ 热泵干燥系统研究现状与进展 [J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 1-12.
- [5] SINGH S P, NAGORI A. Refrigeration waste heat utilization for drying applications: a review[J]. International Journal of Green Energy, 2020, 17(15): 1-12.
- [6] KHOUYA A. Performance assessment of a heat pump and a concentrated photovoltaic thermal system during the wood drying process[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115923.
- [7] ACAR C, DINCER I, MUJUMDAR A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future[J]. Drying Technology, 2022, 40(7): 1329-1351.
- [8] LINGAYAT A, ZACHARIAH R, MODI A. Current status and prospect of integrating solar air heating systems for drying in various sectors and industries[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102274.