DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.010

回热式热泵干燥系统温湿度智能调控策略研究

郎少华[1], 冯荣[1, 2*], 曹岗林[1, 2], 刘晔[3], 侯刚[4], 崔红[1, 2]

(1. 陕西理工大学机械工程学院,陕西汉中,723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室,陕西汉中,723001; 3. 西安交通大学能源与动力工程学院,陕西西安,710049; 4. 陕西理工大学电气工程学院,陕西汉中,723001)

摘要:针对传统热泵干燥系统能源利用率低,干燥速率与风量调控比例关系不确定等问题,研究提出带有回热器的智能化热泵干燥系统,由热泵循环子系统和空气循环子系统组成。为提高系统的干燥速率与能源利用率,通过MATLAB/Simulink构建了热泵循环、物料产湿、干燥室空气温湿度、风量比智能调控及空气回热器换热等模型,基于能量守恒,以物料产湿量与排湿量相等作为约束条件,建立空气循环温湿度调节方法,实现回风与新风比的智能化动态调控。并以香菇为干燥对象,研究了温湿度和干燥风速对干燥特性和回风/新风比的影响。结果表明:当环境温度从15 ℃提升至35 ℃时,干燥室入口温度也随之升高,为维持系统最佳干燥效率,回风/新风比从7:3逐渐减小至6:4;环境相对湿度从80%降至40%时,香菇产湿速率逐渐增大,回风量增多,回风/新风比从6:4逐渐增大至7:3;干燥风速从1 m/s提升至3 m/s,对流换热强化,香菇产湿速率加快,最佳回风/新风比从5:5同步增大并趋近7:3。对比结果可知,高温工况下降低回风/新风比;低湿、高风速工况下增大回风/新风比有利于维持风道内高温低湿环境,促进香菇水分蒸发。研究结果可保证热泵干燥系统提升能源利用率的同时维持风道高温低湿以保障最佳干燥速率,为热泵干燥系统智能化提供理论和技术支持。

关键词:热泵干燥;温湿度调节;智能调控;风量比;产湿速率;回热器

中图分类号:S24 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2026)01-0096-09

郎少华, 冯荣, 曹岗林, 刘晔, 侯刚, 崔红. 回热式热泵干燥系统温湿度智能调控策略研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2026, 7(1): 96−104

LANG Shaohua, FENG Rong, CAO Ganglin, LIU Ye, HOU Gang, CUI Hong. Research on air volume ratio control strategy of heat pump drying system with regenerator [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 96−104

0 引言

我国农特产品种类丰富,产量庞大,农特产品种植与深加工无疑是实现乡村产业振兴的重要途径之一[1],干燥环节是大部分干鲜农特产品深加工的重要组成部分。2023年6月,农业农村部联合国家发展和改革委员会、财政部、自然资源和规划局制定关于加快粮食产地烘干能力建设相关政策,明确提出推进烘干设施综合利用,重点建设和提升粮食减损绿色烘干设施。政策倡导推广节能、高效、低碳的烘干设施装备,推动粮食烘干技术向绿色化方向发展[2-4]。空气源热泵干燥技术利用空气中的能量进行干燥,无须额外燃料,避免了废气、废水的产生,契合了环保理念[5-8]。在实际应用中,空气源热泵干燥系统可根据物料特性灵活调节风量流通形式[9-11],以满足不同农特产品的干燥需求。

目前,针对空气源热泵干燥技术的研究已经取得了很多成果并应用。YOUSAF等[12]研究了空气旁通率对于热泵干燥水稻的影响,结果表明当空气旁通率为0.4时,系统*SMER*(比吸湿率)和*MER*(水分迁移速率)取最大值,分别为1.321和0.796。WANG等[13]提出了一种梯级空气除湿热泵干燥系统,研究结果表明,当供风温度为63.1 ℃、相对湿度为20.2%时,平均*COP*为3.58,平均除湿能耗比为2.282 kg/(kW·h)。一些学者针对热泵干燥技术的智能化调控进行了研究。KANG等[14]研发了一种多能干燥装置的控制系

收稿日期:2025-08-21 修回日期:2025-10-30

基金项目:陕西省教育厅产业化培育项目(24JC023);陕西省自然科学基金项目(2025JC-YBQN-575);重庆教委科学技术研究计划项目(KJQN202303805);陕西理工大学研究生创新基金项目(SLGYCX2521)

第一作者:郎少华,男,2000年生,山西晋城人,硕士研究生,研究方向为热泵干燥及装备研发。E-mail:15702665005@163.com

*通信作者:冯荣,男,1987年生,甘肃定西人,博士,副教授;研究方向为分布式能源系统和新型热泵技术。E-mail:18992660048@126.com

统，建立了不同工作模式自动切换策略的模型，结果表明：温度调控量为 2.75%～3.95%，偏差在 1.5 ℃以内，*SMER* 为 2.36～4.27。

综上所述，目前学者在热泵干燥系统及控制策略方面已经取得不少研究成果，同时本研究团队前期开发了手动调节的回热式热泵干燥系统[6]，为系统智能调控发展奠定了基础。然而，在干燥过程中对空气循环的温湿度智能调控研究尚存不足。因此，本研究构建一套智能调控的回热式热泵干燥系统，基于回风/新风实时开度调整的方法，提出干燥空气温湿度回风/新风比调控策略。该策略在提高能源利用率的同时，使干燥过程中风道内保持高温低湿状态以维持最佳干燥速率，从而全面提升系统风量智能调节能力和干燥性能。

1　带有回热器的热泵干燥系统

带有回热器的热泵干燥系统如图 1 所示，该系统主要包括热泵循环子系统与空气循环子系统：热泵循环部分由蒸发器、压缩机、冷凝器、经济器和节流阀构成。

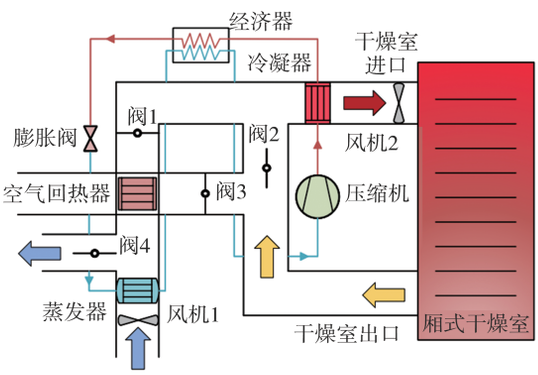


图 1　带有回热器的热泵干燥系统图

Figure 1　Diagram of a heat pump drying system with a regenerator

其中蒸发器用于空气降温除湿，压缩机将低温低压的制冷剂蒸汽压缩为高温高压流体，冷凝器通过释放热量加热空气，经济器回收制冷剂中的热量，节流阀则对制冷剂进行降温减压；空气循环部分主要由风机、阀门、空气回热器、风道和干燥室组成，风机 1 负责吸入空气，风机 2 将空气送入干燥室，阀门 1、2、3 分别控制新风量、回风量和排风量，空气回热器用于回收排风热量并预热新风，干燥室则是物料与空气进行热质交换的场所。系统运行时，外界空气经风机 1 吸入后依次通过蒸发器降温除湿和空气回热器预热，再经阀门 1 调节新风量后进入冷凝器加热，形成高温低湿空气由风机 2 送入干燥室与物料换热并带走水分；干燥室出口形成的高温高湿空气一部分通过阀门 2 控制作为回风，在冷凝器前与新风混合，另一部分通过阀门 3 排出，其热量在空气回热器中被回收用于预热新风，从而实现热量的最大化利用。

2　模型建立

2.1　热泵系统模型的构建

本系统涵盖压缩机、蒸发器、冷凝器、电子膨胀阀等部件，选用 R134a 作为制冷剂。系统数学模型借助 MATLAB 软件编写并计算，理想状态不考虑运行过程中的效率损失。

压缩机压缩过程为可逆绝热过程，由制冷剂流量与进出口比焓之差乘积得出，计算公式如式(1)。

$$W_{com} = m_r \times (h_2 - h_1) \tag{1}$$

式中：m_r——制冷剂流量[15]，kg/s；

h_2——等熵压缩后排气比焓，与冷凝器入口比焓相等，kJ/kg；

h_1——压缩机吸气口比焓，kJ/kg。

冷凝器制热量计算如式(2)。

$$Q_{cond} = m_r \times (h_3 - h_4) \tag{2}$$

式中：h_3——冷凝器入口比焓，与压缩机排气口比焓相等，kJ/kg；

h_4——冷凝器出口比焓，kJ/kg。

冷凝器与蒸发器与空气之间换热遵循式(3)。

$$Q = C_p \times m_a \times (T_{out} - T_{in}) \tag{3}$$

式中：C_p——空气比热容，J/(kg^{-1}·K^{-1})，取值范围 1 000～1 013 J/(kg^{-1}·K^{-1})；

m_a——空气质量流量，kg/s，当风速为 1～3 m/s 时，取 0.206 4～0.619 2 kg/s；

$T_{out} - T_{in}$——冷凝器与蒸发器空气侧进出口温度差。

2.2　物料产湿模型构建

物料产湿速率遵循式(4)计算[16-17]。

$$m = k \times A \times (C_s - C_a) \tag{4}$$

式中：k——质传递系数[18]，温度为 15 ℃～35 ℃时，取值为 0.055 47～0.056 52，风速为 1～3 m/s，取值为 0.032 06～0.062 95；

A——物料表面积，m^2，本模型中为 3 m^2；

C_s——物料表面水分浓度[19-20]，kg/m^3；

C_a——干燥介质中水分浓度[21-23]，kg/m^3。

2.3　干燥室空气温湿度模型构建

干燥室入口焓值约等于干燥室出口焓值 $H_{in} \approx H_{out}$，焓值计算公式遵循式(5)。

$$H_{in} = 1.005 \times T + \omega \times (1.86 \times T + 2\,501) \tag{5}$$

式中：T——对应位置温度，℃；

ω——对应位置绝对湿度，kg/m^3。

干燥室出口空气绝对湿度遵循式(6)。

$$\omega_{out}=\omega_{in}+\frac{m}{V} \tag{6}$$

式中:V——干燥室体积,m^3,本模型中为3 m^3。

干燥室出口空气相对湿度遵循式(7)~式(8)。

$$P_v=\frac{P_{atm}\times\omega_{out}}{0.622+\omega_{out}} \tag{7}$$

$$\varphi=\left[\frac{P_v}{P_{sat}(T)}\right]\times 100\% \tag{8}$$

式中:P_v——水蒸气压力,Pa;

P_{atm}——标准大气压力,Pa,取101 325 Pa;

$P_{sat}(T)$——对应温度下饱和水蒸气压力,Pa;

$P_{sat}(T)$由Antoine方程计算得出[18],与温度有关,遵循式(9)。

$$P_{sat}(T)=610.78\times\left[\frac{17.27\times(T-273.5)}{T-35.85}\right] \tag{9}$$

2.4 风量比调节模型构建

混合风温湿度由新风与回风混合后得到。风量比调节:设定干燥室出口空气绝对湿度均匀分布,通过绝对湿度与空气流量乘积计算出与产湿量之间的关系,并建立二者的等量关系,从而实现对开度的调控。

产湿速率与排湿速率等量关系建立遵循式(10)。

$$m_{out}=m_a\times\omega_{out}\times(1-x)=m \tag{10}$$

式中:ω_{out}——干燥室出口空气绝对湿度;

x——回风比,%;

m——产湿速率,g/s。

产湿量与排湿量建立等量关系过程中设计空气质量流量,不同风速下质量流量不同。

2.5 空气回热器换热模型构建

设定空气回热器热交换时的热交换率φ_e为60%。

$$\varphi_e=\frac{T_{n,out}-T_{n,in}}{T_{o,in}-T_{n,in}} \tag{11}$$

式中:$T_{n,in}$——新风经过回热器入口温度,℃;

$T_{n,out}$——新风经过回热器出口温度,℃;

$T_{o,in}$——排风经过回热器入口温度,℃。

带有回热器的热泵干燥系统模型计算流程图如图2所示。

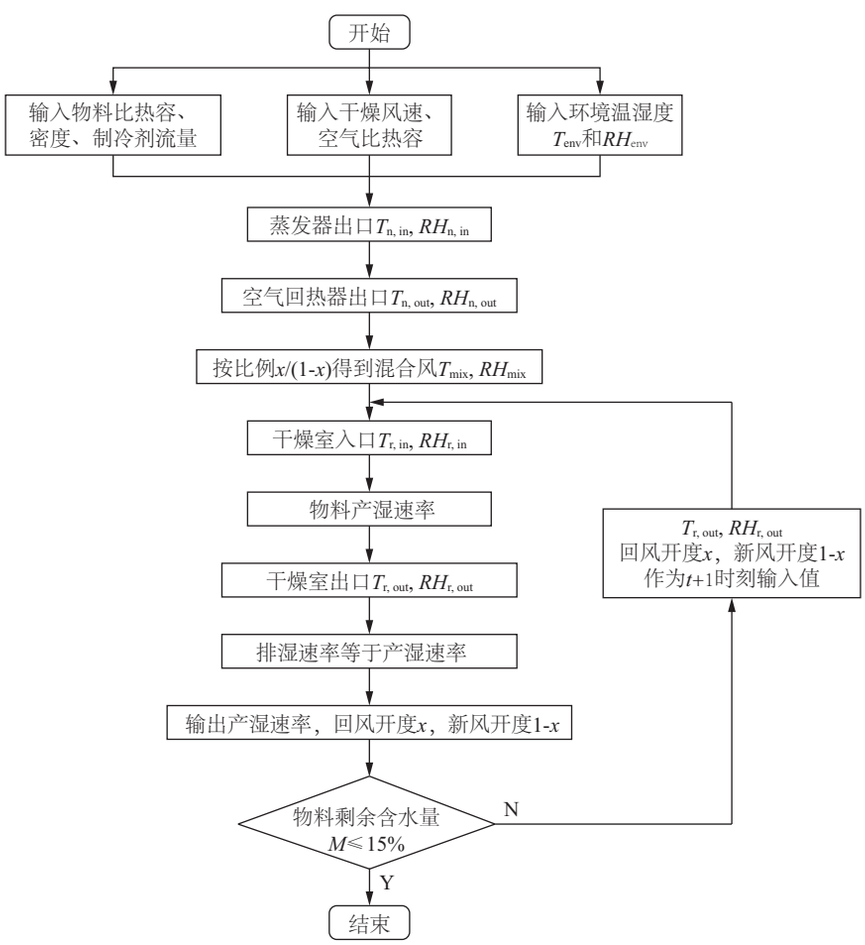


图2 系统计算流程图

Figure 2 System calculation flowchart

本章构建了热泵系统模型,物料产湿模型,干燥室内空气温湿度模型,风量比调节模型与空气回热器模型。热泵系统模型确定了系统的制热量;物料产湿模型研究干燥风与物料之间热交换从而得到物料产湿速

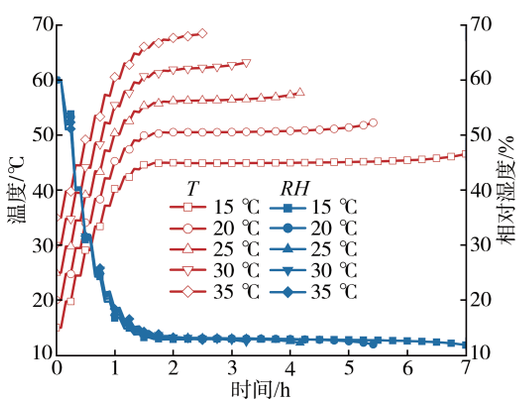
率；风量比调节模型以产湿量与排湿量相等作为条件，探索出回风与新风量的关系；干燥室内空气温湿度模型与空气回热器模型主要为回风与新风温湿度变化情况做好前提准备。

3　仿真与结果分析

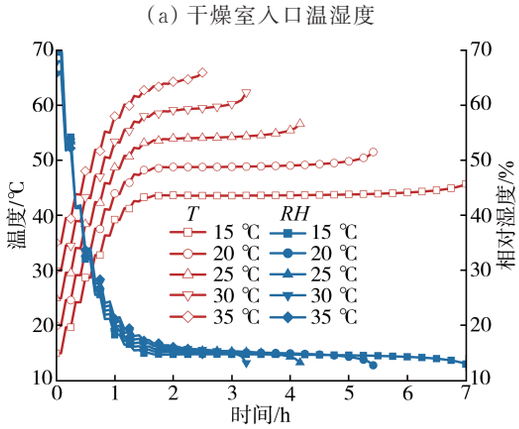
本研究以质量 50 kg，初始含水率 85% 的香菇作为干燥对象，预期干燥效果含水量为 15%。通过改变环境空气温湿度与干燥风速，分析干燥室进出口温湿度，产湿速率及回风与新风比等参数变化规律，探究不同工况下系统达到最佳干燥效率时的风量比调控策略。

3.1　不同环境温度下干燥特性分析

设定环境相对湿度为 60%，干燥风速为 2.5 m/s，环境温度分别为 15 ℃、20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃时对系统干燥特性进行分析。不同环境温度下干燥室入口与出口的温湿度变化情况如图 3 所示，其中图 3(a)、图 3(b)两图分别对应入口与出口的温湿度变化结果。



(a) 干燥室入口温湿度



(b) 干燥室出口温湿度

图 3　干燥室进出口空气温湿度变化情况

Figure 3　Changes in temperature and humidity of air at the entrance and exit of the drying room

系统启动后，干燥室入口温度自环境温度开始逐步上升；随着温度持续升高，香菇内部水分逐渐析出，使空气绝对湿度有所增加。需要说明的是，绝对湿度的上升幅度和速率远低于温口温度可达 67 ℃，出口温度达 64 ℃，此时干燥速率最快，香菇达到目标含水率度升高，因此空气相对湿度整体呈下降趋势。数据显示，在 35 ℃环境温度下，干燥室入所需时间最短；而当环境温度降至 15 ℃时，入口温度仅能升至约 45 ℃，出口温度 43 ℃，干燥耗时显著延长。新风经过空气回热器出口温度变化情况如图 4 所示。

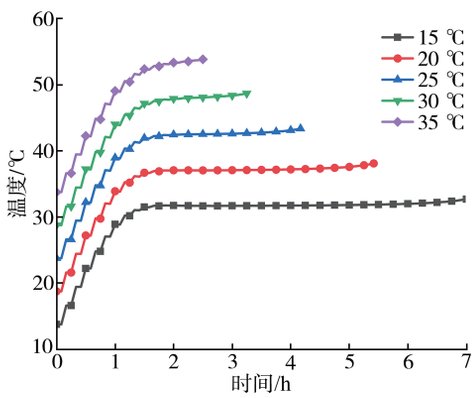


图 4　新风经过空气回热器出口温度变化情况

Figure 4　Temperature variation of fresh air at the outlet of the air recuperator

由于新风会先经过蒸发器除湿降温，故初始温度低于设定的环境温度。系统开始运行后，0～1 h 内温度升高较快，随着产湿速率提升，新风开度与排风开度同步增加，排风与新风在空气回热器进行热交换。从图中可以看出，环境温度分别为 15 ℃、20 ℃、25 ℃、30 ℃、35 ℃时新风经过空气回热器出口温度分别可达 31 ℃、37 ℃、42 ℃、48 ℃和 53 ℃。这是由于系统稳定后，换热量趋于稳定，温度曲线逐渐趋于平稳；干燥后期因产湿速率波动，温度出现微弱起伏。

香菇产湿速率变化情况如图 5 所示。从图中可以看出，0～1 h 内，由于香菇初始含水率高，产湿速率快速攀升，且环境温度越高，曲线上升越陡峭，35 ℃时产湿速率峰值最高，产湿速率最高可达 4.0 g/s，对应干燥结束时间最早。后期随着香菇内部水分减少，迁移速率下降，产湿速率逐步降低至停止运行。

回风与新风阀门开度变化情况如图 6 所示。在零时刻，系统尚未开始运行，处于封闭阶段，回风开度 100%，新风开度为 0。运行开始后，随着干燥风温度的升高，香菇产湿速率增加，回风开度逐渐下降而新风开度同步上升，在最大产湿阶段保持稳定；干燥末期因产湿速率降低，阀门开度再次调整直至干燥结束。环境温度分别为 15 ℃、20 ℃、25 ℃、30 ℃和 35 ℃时，回风与新风开度比分别为 70%∶30%、68%∶32%、65%∶35%、62%∶38% 和 59%∶41%。结果表明，不同温度工况下，随着温度升高，最佳风量比从 7∶3 逐渐趋近于 6∶4。

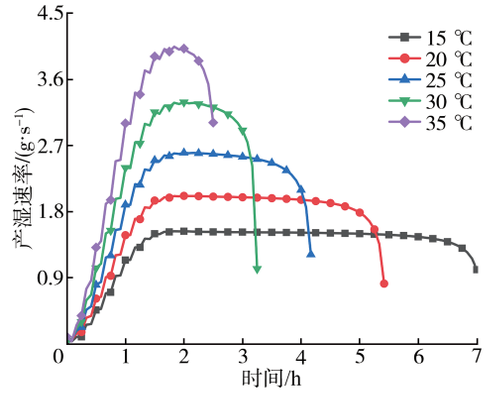


图 5 产湿速率变化情况

Figure 5 Variation of moisture production rate

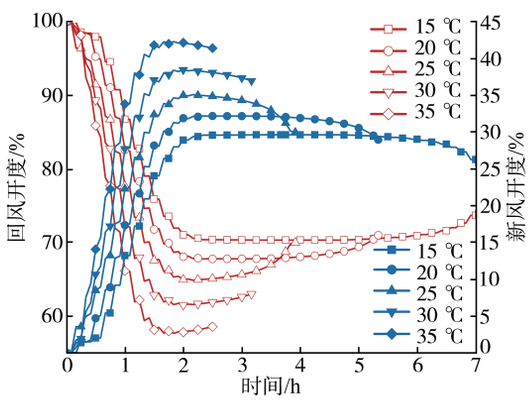


图 6 回风与新风阀门开度变化情况

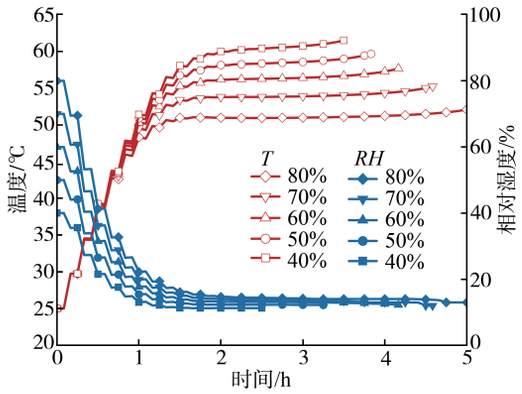
Figure 6 Changes in the opening of return air and fresh air dampers

3.2 不同湿度下干燥特性分析

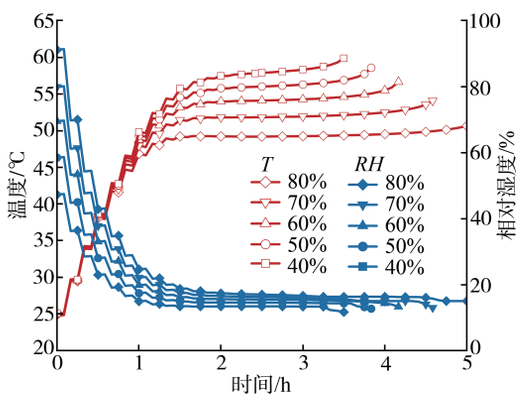
设定环境温度为 25 ℃,干燥风速为 2.5 m/s,环境相对湿度分别为 40%、50%、60%、70%、80% 时对系统干燥特性进行分析。

不同环境相对湿度下干燥室入口与出口空气温湿度变化情况如图 7 所示,图 7(a)、图 7(b)分别为干燥室入口与出口温湿度变化情况。系统启动后,干燥室入口温度从 25 ℃逐步上升。相对湿度从不同的设定值开始持续下降,最终系统内干燥风稳定在 17% 左右,形成利于干燥的高温低湿环境。从图中可以看出,相对湿度为 40 %时,干燥室入口与出口温度分别达到 60 ℃与 58 ℃;相对湿度为 80% 时,干燥室入口与出口温度分别达到 51 ℃与 49 ℃。结果表明:环境相对湿度越低时,香菇与环境空气湿度之间湿度差大,产湿速率较大,达到预期干燥效果时间短。

新风经过空气回热器出口空气温度变化情况如图 8 所示。系统运行后,因设定环境温度恒定,新风初始温度一致;0~1.5 h 处于干燥前期,系统温度快速上升,不同相对湿度下排风与回风开度差异导致换热量不同,使得新风预热后的温度存在显著差异。当相对湿度分别为 80%、70%、60%、50%、40% 时,空气回热器出口温度分别可达 39 ℃、41 ℃、43 ℃、44 ℃和 45 ℃。结果表明:相对湿度越低时,新风经过空气回热器后温度越高。



(a) 干燥室入口温湿度



(b) 干燥室出口温湿度

图 7 干燥室进出口空气温湿度变化情况

Figure 7 Changes in temperature and humidity of air at the entrance and exit of the drying room

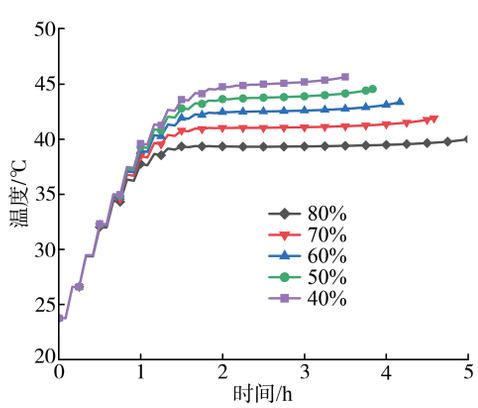


图 8 新风经过空气回热器出口温度变化情况

Figure 8 Temperature variation of fresh air at the outlet of the air recuperator

香菇产湿速率变化情况如图 9 所示。0~1.5 h 内产湿速率迅速增加,由于运行初始阶段,香菇内部水分较多且快速释放,故产湿速率迅速上升。环境相对湿度为 40% 时的曲线上升最为陡峭,产湿速率最高达 3.0 g/s,同时对应的结束时间最早。说明相对湿度越低时,与香菇含水量之间存在水分浓度差越大,越有利

于香菇内部水分析出，产湿速率越大。后期随着香菇含水率降低，产湿速率逐步下降至停止运行。

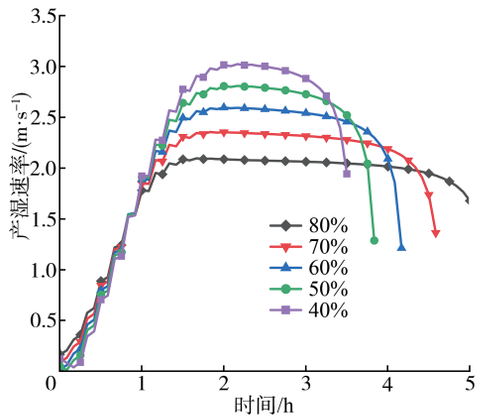


图 9　产湿速率变化情况

Figure 9　Variation of moisture production rate

回风与新风阀门开度变化情况如图 10 所示。系统运行开始后，回风开度随着产湿速率的增加而降低，新风开度相应增加，在最大产湿阶段维持稳定；干燥后期香菇内部水分减少，产湿速率下降，为维持系统最佳干燥效率，回风开度与新风开度对应进行调整，直至香菇达到预期干燥效果结束运行。环境相对湿度分别为 80%、70%、60%、50% 和 40% 时，对应的回风与新风开度比分别为 61%∶39%、64%∶36%、67%∶33%、69%∶31% 和 71%∶29%。结果表明，不同相对湿度工况下，随着相对湿度降低，最佳风量比从 6∶4 逐渐趋近于 7∶3。随着产湿速率增大排风量减少是因为干燥风受到环境相对湿度影响程度大于产湿速率，故环境相对湿度降低时，回风量增多。

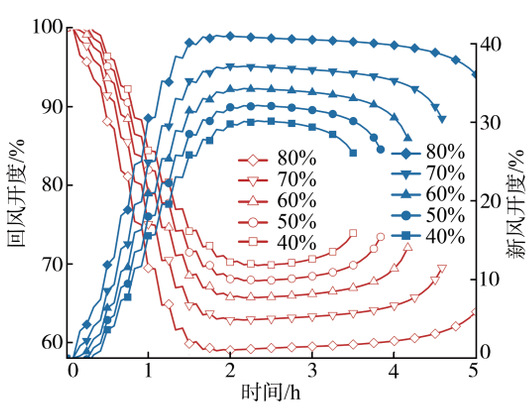


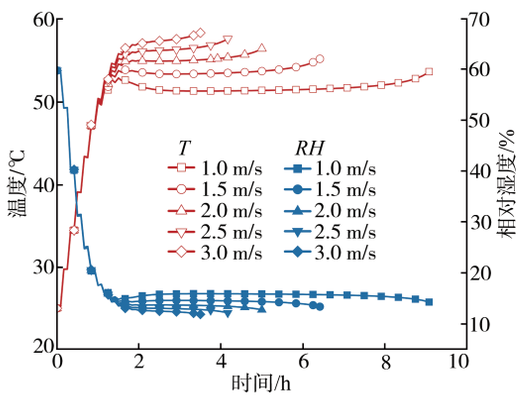
图 10　回风与新风阀门开度变化情况

Figure 10　Changes in the opening of return air and fresh air dampers

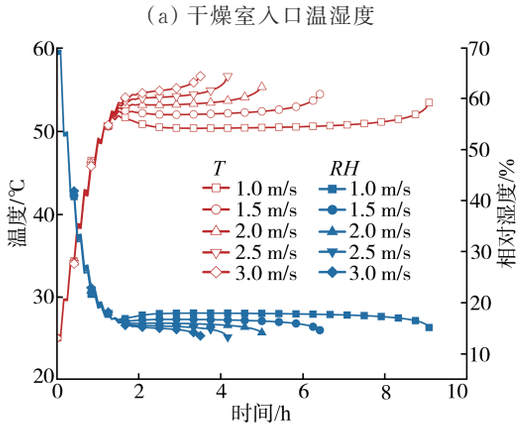
3.3　不同风速下干燥特性分析

设定环境温度为 25 ℃，相对湿度为 60%，干燥风速分别为 1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s、3 m/s 时对系统干燥特性进行分析。

不同干燥风速下干燥室入口与出口空气温湿度变化情况如图 11 所示，图 11(a)、图 11(b)分别为干燥室入口与出口温湿度变化情况。系统开始运行后，干燥室入口温度从 25 ℃逐步上升，相对湿度从 60% 持续下降，且风速越高，干燥室入口与出口温度稳定值越高。这是由于高速气流提升产湿速率，促使排风量增加，新风经回热器回收的热量增多，混合风经冷凝器加热后温度更高。风速为 1 m/s 时，干燥耗时长达 10 h，随着风速提升，干燥时间显著缩短。



(a) 干燥室入口温湿度



(b) 干燥室出口温湿度

图 11　干燥室进出口温湿度变化情况

Figure 11　Changes in temperature and humidity of air at the entrance and exit of the drying room

新风经过空气回热器出口空气温度变化情况如图 12 所示。0～1.5 h 内随系统升温快速上升，风速分别为 1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s、3 m/s 时，新风经过空气回热器出口温度分别可达到 39 ℃、41 ℃、42 ℃、43 ℃和 44 ℃。这是由于风速越大时，产湿速率越大，由于空气流量也比较大，排风开度变化较小，所以排风与新风在空气回热器处换热量变化较小。

香菇产湿速率变化情况如图 13 所示。0～1.5 h 内，香菇内部水分较多，随着气流扰动增强，水分蒸发加速，产湿速率骤升。风速为 3 m/s 产湿速率曲线上升最陡峭，最高达 3 g/s，对应的结束时间最早；风速为 1 m/s 时，产湿速率仅 1.2 g/s，需 9 h 才能达到预期干燥效果，

随着香菇内部水分减少,产湿速率逐步下降至停止。

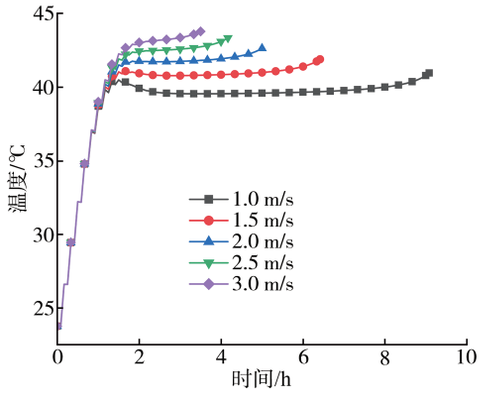


图 12 新风经过空气回热器出口温度变化情况

Figure 12 Temperature variation of fresh air at the outlet of the air recuperator

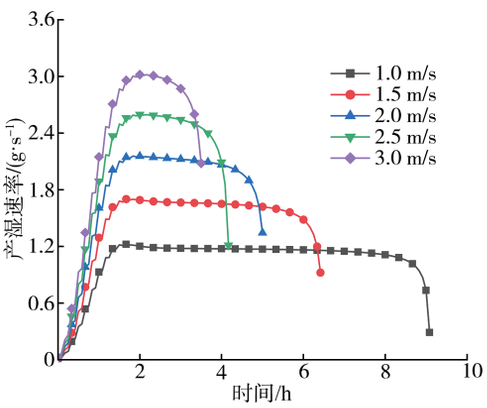


图 13 产湿速率变化情况

Figure 13 Variation of moisture production rate

回风与新风阀门开度变化情况如图 14 所示。系统开始运行后,回风开度随产湿速率增加而降低,新风开度相应增加,在最大产湿阶段保持稳定;干燥后期随产湿速率下降再次调整。

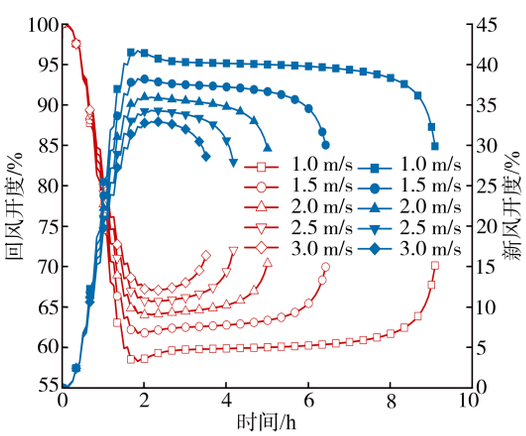


图 14 回风与新风阀门开度变化情况

Figure 14 Changes in the opening of return air and fresh air dampers

可以看出,当风速分别为 1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s、3 m/s 时,对应的回风与新风开度比分别为 60%:40%、64%:36%、66%:34%、67%:33%、68%:32%。结果表明,随着干燥风速的增大,最佳风量比从 6:4 逐渐趋近于 7:3。产湿速率越大时,由于风速较高,单位时间内空气流量大,排风开度很小即可实现排湿效果,故风速越快,回风开度越大。

4 结论

本研究基于 MATLAB/Simulink 构建了热泵干燥系统回风与新风比智能调控模型,以香菇作为干燥对象,研究了不同工况下的干燥特性,主要结论如下:

1)在环境相对湿度 50%、风速 2.5 m/s 的条件下,环境温度与干燥速率呈正相关。温度从 15 ℃升至 35 ℃时,干燥室入口温度随之从约 45 ℃提升至 67 ℃,产湿速率逐步升高,回风/新风比由 7:3 逐渐减少并趋于 6:4。

2)在环境温度 25℃、风速 2.5 m/s 的条件下,环境相对湿度与干燥时间呈正相关。当环境相对湿度从 80% 降至 40% 时,香菇产湿速率加快,干燥风相对湿度最终稳定在 10% 左右的高温低湿状态,随着环境湿度降低,最佳回风/新风比从 6:4 趋近于 7:3。

3)在环境温度 25℃、湿度 50% 的条件下,风速与干燥速率呈正相关。当干燥风速从 1 m/s 提升至 3 m/s 时,气流扰动增强,对流换热效果强化,产湿速率加快,最佳回风/新风比从 6:4 增大并趋近于 7:3,高风速下增加回风比能够减少热量损失,提高系统能源利用率。

4)对比不同工况可知,回风/新风比的动态调整需匹配环境参数:低湿、高风速增大回风占比,高温降低回风占比有利于维持风道内高温低湿环境,促进香菇内部水分蒸发。这一规律为不同农特产品的干燥工艺优化提供了量化调控依据。

参 考 文 献

[1] 于浩. 推动全面推进乡村振兴战略,加强“三农”法治建设——十三届全国人大农业与农村委员会五年工作回眸[J]. 中国人大, 2023(4): 33-35.

[2] 农业农村部, 国家发展改革委, 财政部, 自然资源部. 关于印发《全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)》的通知[EB/OL]. (2023-06-09)[2025-08-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6887551.htm.

[3] 李亮, 周磊, 郝建贺, 等. 党的二十大背景下的农业现代化竞争力研究——以江苏南京为例[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(4): 49-56.
LI Liang, ZHOU Lei, HAO Jianhe, et al. Research on the competitiveness of agricultural modernization under the background of the 20th National Congress of the Communist Party of China: Taking Nanjing, Jiangsu as an example [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4

(4)：49－56.

[4] 张艳来，陈培基，陈驹，等．“双碳”目标下农产品热泵干燥技术应用现状与发展趋势[J]．安徽农业科学，2023，51(23)：12－16，35.
ZHANG Yanlai，CHEN Peiji，CHEN Ju，et al. Application status and development trend of heat pump drying technology for agricultural products under the dual carbon target [J]. Anhui Agricultural Sciences，2023，51(23)：12－16，35.

[5] TUNÇKAL C. Investigation of performance and drying kinetics of the closed，partially open，and open heat pump drying systems [J]. Journal of Food Process Engineering，2020，43(12)：e13566.

[6] XIAO T Y，FENG R，ZHAO X，et al. Heating performance，exergy，and economic analysis of a heat pump drying system with an independent operating ability for drying shiitake mushrooms [J]. Journal of Cleaner Production，2023，426：138982.

[7] YAHYA M，FAHMI H，FUDHOLI A，et al. Performance and economic analyses on solar-assisted heat pump fluidised bed dryer integrated with biomass furnace for rice drying [J]. Solar Energy，2018，174：1058－1067.

[8] 丘文杰，李浩权，刘军，等．稻谷热泵干燥机智能控制系统设计[J]．现代农业装备，2024，45(6)：50－55.
QIU Wenjie，LI Haoquan ，LIU Jun，et al. Design of intelligent control system for rice heat pump drier [J]. Modern Agricultural Equipment，2024，45(6)：50－55.

[9] 赵雅婷，李一寒，高何昊，等．不同干燥方式对香菇干燥特性及品质的影响[J]．农产品加工，2024(20)：26－30.
ZHAO Yating，LI Yihan，GAO Hehao，et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of shiitake mushrooms [J]. Farm Products Processing，2024(20)：26－30.

[10] 赵星辰，冯荣，李旭杰，等．汽油发电机驱动的热泵干燥系统制热性能仿真[J]．中国农机化学报，2022，43(1)：101－108.
ZHAO Xingchen，FENG Rong，LI Xujie，et al. Heating performance simulation of a heat pump drying system driven by a gasoline generator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(1)：101－108

[11] YAN J，HAN W，WEI B，et al. Drying characteristics of white radish slices under heat pump-low-temperature regenerative wheel collaborative drying [J]. Case Studies in Thermal Engineering，2025，69：105950.

[12] YOUSAF K，LIU H L，GAO X，et al. Influence of environmental conditions on drying efficiency and heat pump performance in closed and open loop drying of paddy [J]. Drying Technology，2020，38：2217－2230.

[13] WANG D，CAO X，LI X，et al. Experimental investigation of a part air dehumidification cascade-like heat pump drying system [J]. International Journal of Refrigeration，2021，131：235－243.

[14] KANG C，ZHANG G，MU G，et al. Solar-heat pump combined drying with phase change heat storage：Multi-energy self-adaptive control [J]. Renewable Energy，2024，230：120867.

[15] 李勇，赵雨菲，宋春雨，等．准二级压缩耦合储能装置的空气源热泵性能研究[J]．储能科学与技术，2025，14(5)：1991－1999.
LI Yong，ZHAO Yufei，SONG Chunyu，et al. Research on the performance of air source heat pump with quasi-second-order compression coupled energy storage device [J]. Energy Storage Science and Technology，2025，14(5)：1991－1999.

[16] ONWUDE D I，HASHIM N，ABDAN K，et al. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato [J]. Journal of Food Engineering，2018，228：12－24.

[17] ABEDINI E，HAJEBZADEH H，MIRZAI M A，et al. Modeling transport phenomena in the shrimp drying process [J]. Solar Energy，2022，241：396－403.

[18] 王文媛．粮堆干燥通风过程对流热质传递系数的测定方法与装置[D]．北京：北京邮电大学，2016.
WANG Wenyuan. Method and apparatus for determining convective heat and mass transfer coefficient in the drying and ventilation process of grain piles [D]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications，2016.

[19] YU X L，ZIELINSKA M，JU H Y，et al. Multistage relative humidity control strategy enhances energy and exergy efficiency of convective drying of carrot cubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2020，149：119231.

[20] TZEMPELIKOS D A，MITRAKOS D，VOUROS A P，et al. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices [J]. Journal of Food Engineering，2015，156：10－21.

[21] AVERSA M，CURCIO S，CALABRÒ V，et al. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process [J]. Journal of Food Engineering，2007，78：922－932.

[22] 井世亮，王久元，NUHU Jibril，等．全闭式谷物干燥机热泵系统的优化与研究试验[J/OL]．南京农业大学学报，1－12[2025－07－20].
JING Shiliang，WANG Jiuyuan，NUHU Jibril，et al. Optimization and research on fully closed heat pump system for grain dryer [J]. Journal of Nanjing Agricultural University，1－12[2025－07－20].

[23] 黄建江，郭子洋，李圣陶，等．油茶果热风干燥爆蒲后茶

籽传热传质特性及干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 332－341.
HUANG Jianjiang, GUO Ziyang, LI Shengtao, et al. Heat and mass transfer characteristics and drying process optimization of Camellia oleifera seeds after hot air drying and shelling of the fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(23): 332－341.

Research on air volume ratio control strategy of heat pump drying system with regenerator

LANG Shaohua[1], FENG Rong[1, 2*], CAO Ganglin[1, 2], LIU Ye[3], HOU Gang[4], CUI Hong[1, 2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong* 723001, *China*; 2. *Key Laboratory of Industrial Automation of Shaanxi Province, Hanzhong* 723001, *China*; 3. *School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*; 4. *School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong* 723001, *China*)

Abstract: In response to the problems of low energy utilization efficiency and the uncertain relationship between the drying rate and air volume regulation in traditional heat pump drying systems, this study proposes an intelligent heat pump drying system with a regenerator, which consists of a heat pump cycle subsystem and an air circulation subsystem. To enhance the drying rate and energy utilization efficiency of the system, models for the heat pump cycle, moisture production of materials, air temperature and humidity in the drying chamber, intelligent regulation of air volume ratio, and heat exchange in the air regenerator were constructed using MATLAB/Simulink. Based on the principle of energy conservation and with the constraint that the moisture production of materials is equal to the moisture removal rate, a method for regulating the air circulation temperature and humidity was established to achieve intelligent dynamic regulation of the ratio of return air to fresh air. Taking mushrooms as the drying object, the effects of temperature, humidity, and drying air velocity on drying characteristics and the ratio of return air to fresh air were investigated. The results show that when the ambient temperature increased from 15 ℃ to 35 ℃, the inlet temperature of the drying chamber also rose. To maintain the optimal drying efficiency of the system, the ratio of return air to fresh air gradually decreased from 7∶3 to 6∶4. When the ambient relative humidity decreased from 80% to 40%, the moisture production rate of mushrooms gradually increased, the return air volume increased, and the ratio of return air to fresh air gradually increased from 6∶4 to 7∶3. When the drying air velocity increased from 1 m/s to 3 m/s, the convective heat transfer was enhanced, the moisture production rate of mushrooms accelerated, and the optimal ratio of return air to fresh air increased synchronously from 5∶5 and approaches 7∶3. The comparison results show that reducing the ratio of return air to fresh air under high-temperature conditions and increasing it under low-humidity and high-velocity conditions are beneficial to maintaining a high-temperature and low-humidity environment in the air duct and promoting the evaporation of mushroom moisture. The research results can ensure that the heat pump drying system improves energy utilization efficiency while maintaining a high-temperature and low-humidity environment in the air duct to guarantee the optimal drying rate, providing theoretical and technical support for the intelligence and application of the heat pump drying system.

Keywords: heat pump drying; temperature and humidity regulation; intelligent control; air volume ratio; moisture production rate; regenerator

Foundation items: Scientific Research Program funded by Education Department Shaanxi Provincial Governement (24JC023); Shaanxi Provincial Natural Science Foundatio (2025JC-YBQN-575); Chongqing Education Commission Science and Technology Research Project (KJQN202303805); Shaanxi University of Technology Graduate Innovation Fund Project (SLGYCX2521)

First Author: LANG Shaohua, E-mail: 15702665005@163.com

* **Correspondence Author:** FENG Rong, E-mail: 18992660048@126.com