

文章编号:0253-4339(2025)01-0094-07

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.094

# 装填密度对准双级闭式热泵香菇干燥系统性能影响实验研究

曾涛<sup>1</sup> 武卫东<sup>1</sup> 李敏<sup>2</sup> 汪静<sup>1</sup> 侯亚祥<sup>1</sup>

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海海关机电产品检测技术中心 上海 200135)

**摘要** 香菇干燥是防止香菇出现腐烂、褐变等问题的一种有效方法,而在干燥过程中,装填密度对系统性能及干燥品质均具有重要影响。基于新设计的准双级补气增焓热泵闭式干燥系统,实验研究了不同香菇装填密度对水分比、干燥速率、系统能效比( $COP_{sys}$ )、单位能耗除湿量(SMER)、单位能耗干燥量及复水比的影响规律。结果表明:在干燥室送风温度为55℃和循环风量为580 m<sup>3</sup>/h的条件下,随着装填密度从1.5 kg/m<sup>2</sup>增至3.0 kg/m<sup>2</sup>,香菇干燥速率逐渐下降,平均 $COP_{sys}$ 、平均SMER、单位能耗干燥量及复水比均先增大后减小;当装填密度为2.4 kg/m<sup>2</sup>时,平均SMER、单位能耗干燥量和复水比均取得最大值,分别为0.320 kg/(kW·h)、0.391 kg/(kW·h)和3.6;当装填密度为2.7 kg/m<sup>2</sup>时,平均 $COP_{sys}$ 取得最大值4.22。

**关键词** 热泵;干燥;香菇;装填密度;性能

中图分类号:S226.6;TK173

文献标识码:A

## Experimental Study on the Effect of Loading Density on the Performance of a Closed Drying System Using Quasi-Two-Stage Heat Pump for *Lentinus edodes*

Zeng Tao<sup>1</sup> Wu Weidong<sup>1</sup> Li Min<sup>2</sup> Wang Jing<sup>1</sup> Hou Yaxiang<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Shanghai Customs Electromechanical Products Testing Technology Center, Shanghai, 200135, China)

**Abstract** Drying of *Lentinus edodes* is an effective method to prevent problems such as rotting and browning. During the drying process, the loading density has a significant impact on system performance and drying quality. Based on a newly designed quasi-two-stage enhanced vapor injection heat pump closed drying system, the effects of different loading densities of *Lentinus edodes* on moisture ratio, drying rate, coefficient of performance of the system ( $COP_{sys}$ ), specific moisture extraction rate (SMER), drying capacity per unit energy consumption, and rehydration ratio were experimentally investigated. The results showed that when the drying air supply temperature was 55℃ and the circulating air volume was 580 m<sup>3</sup>/h, the drying rate of *Lentinus edodes* decreased gradually with the loading density in the drying chamber, from 1.5 kg/m<sup>2</sup> to 3.0 kg/m<sup>2</sup>. Meanwhile, the average  $COP_{sys}$ , average SMER, drying capacity per unit energy consumption, and rehydration ratio increased first and then decreased. When the loading density was 2.4 kg/m<sup>2</sup>, the average SMER, drying capacity per unit energy consumption, and rehydration ratio reached the maximum values of 0.320 kg/(kW·h), 0.391 kg/(kW·h), and 3.6, respectively. When the loading density was 2.7 kg/m<sup>2</sup>, the average  $COP_{sys}$  reached its maximum of 4.22.

**Keywords** heat pump; drying; *Lentinus edodes*; loading density; performance

香菇(*Lentinus edodes*)是全球第二大栽培食用菌,占全球蘑菇产量的25%,中国香菇的总产量和种植面积居世界第一<sup>[1]</sup>。香菇以其鲜美的口感和宜人的香气而闻名,并且富含丰富的营养物质,具备独特的保健功能,为人体提供多种营养元素和生物活性物质<sup>[2]</sup>。然而,新鲜香菇的水分含量很高,湿基含水率为87%~95%<sup>[3]</sup>,其新陈代谢活跃,易腐烂,在储藏、运输和销售过程中面临困难,容易失去营养价值和商业价值<sup>[4]</sup>。因此,为了防止香菇出现腐烂、褐变等问

题,有必要采取措施降低香菇含水量,延长其储藏时间。

干燥是降低香菇含水量的有效方法,干燥过程可以减少水分含量,改变微生物生长环境,降低酶的活性,从而保持香菇的质量和新鲜度<sup>[5]</sup>。香菇干燥的方法多种多样,包括自然晾晒、热风干燥、真空冷冻干燥、真空微波干燥、太阳能干燥和热泵干燥等<sup>[6]</sup>。自然干燥虽然成本较低,但由于卫生条件差且受天气限制,其应用受到较大的局限性<sup>[7]</sup>。热风干燥通常采

基金项目:国家自然科学基金(52176016)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176016).)

收稿日期:2023-07-30;修回日期:2023-09-18;录用日期:2023-11-02

用电加热,设备结构相对简单且温度控制较为精准,但能耗较高,能源利用率低,且湿度控制差,排湿困难,导致干燥产品容易出现皱缩、褐变和营养成分严重流失等问题<sup>[8]</sup>。真空干燥在某些方面存在一些缺陷,例如设备投资较高、运行能耗较高以及生产效率较低等问题。太阳能干燥受天气影响大,运行不稳定。热泵干燥具有绿色环保、能源利用率高、温度可调范围广、可控性强和干燥品质较好等优点。在以食用菌为研究对象的实验中,李云林等<sup>[9]</sup>对比了热风干燥和闭式热泵干燥两种干燥方法。研究结果显示,与热风干燥相比,闭式热泵干燥在外观色泽、营养物质保留率、复水性和能耗成本等方面均比热风干燥优良。将热泵干燥技术应用于香菇干燥产业可以实现干制品的高品质、良好的干燥效果和高生产效率,是较为理想的香菇干燥方式,同时,热泵干燥技术还能有效解决我国香菇干燥过程中存在的干燥速率低、能源利用率低、干燥品质不稳定以及环境污染等问题<sup>[10]</sup>。

近年来,许多研究表明,在热泵干燥中,物料装填密度对系统性能及干燥品质均具有重要影响。聂林林<sup>[11]</sup>以香菇为干燥对象,研究了装填密度对香菇干燥品质和干燥速度的影响,结果表明装填密度越小,香菇干燥品质越好,且干燥速度越快。杨玲等<sup>[12]</sup>研究了装填密度对野蘑菇干燥工艺的影响,结果表明装填密度对色泽的影响极为显著( $P < 0.01$ )。李招海<sup>[13]</sup>提出并搭建了一种小型太阳能辅助热泵系统,以香菇为实验对象,利用控制变量法研究了装填密度对系统性能的影响,结果表明随着装填密度的减小,香菇干燥速率略有上升,系统平均 COP 略有增加,但缺少对香菇干燥品质的研究。高婵<sup>[14]</sup>以香菇为原料,采用热泵干燥技术,研究了不同装填密度对香菇干燥特性、色泽和复水比的影响。结果显示,随着干燥过程的进行,不同装填密度下香菇的干基含水率均呈下降趋势,此外,随着装填密度的降低,干基含水率的下降速率加快,色差值呈先下降后上升的趋势,复水比呈先增大后减小的趋势。Hu Zicheng 等<sup>[15]</sup>探索性地提出并搭建了一套新型双蒸发器闭式热泵干燥系统,以海带结为对象,研究结果表明干燥时间随装填密度的降低而减少,但未研究装填密度对热泵系统及干燥品质的影响。综上所述,虽然热泵干燥技术近年来受到广泛关注,但大多数文献仅有限地研究了装填密度对单级热泵系统性能和干燥品质的影响,涉及关键性能评价指标较为单一,尤其缺乏装填密度对准双级闭式热泵干燥系统性能和香菇干燥品质的研究。鉴于此,本文针对香菇干燥,基于新设计的准双级喷气增焓热泵闭式干燥系统,实验研究了不同装填密度对

水分比、干燥速率、系统能效比 (coefficient of performance of the system,  $COP_{sys}$ )、单位能耗除湿量 (specific moisture extraction rate, SMER)、单位能耗干燥量及复水比的影响,通过对这些参数的全面研究,可以全方位地了解不同装填密度条件下准双级热泵干燥系统的运行特性以及干燥品质,研究结果可对香菇热泵干燥系统优化及干燥工艺提供指导与参考。

## 1 系统组成及原理

设计的补气增焓闭式热泵烘干系统如图 1 所示,该系统主要由压缩机、冷凝器、辅助冷凝器、蒸发器、节流装置、干燥箱体、循环风机和水泵等组成。选用海立公司 WHP 系列的补气增焓压缩机,转速为  $900 \sim 7\ 200\ \text{r/min}$ ,采用 R134a 作为制冷剂。补气增焓 (enhanced vapor injection, EVI) 技术可通过增加制冷剂质量流量和过冷度来提高系统换热量<sup>[16]</sup>。相比于单级压缩系统, EVI 系统采用两级压缩中间补气技术,可显著降低压缩机出口温度,但又区别于双级压缩式系统,故又称为准双级压缩系统,该系统结构更简单。为了使系统更为紧凑,采用微通道式换热器作为主冷凝器,钎焊板式换热器作为辅助冷凝器,翅片式换热器作为蒸发器。为了最大化提高能源利用率,系统采用闭式干燥介质循环,充分利用冷凝器放热和蒸发器吸热,可有效避免环境中气体携带的杂质对干燥品质的影响。为了维持系统的热量平衡,在冷凝器

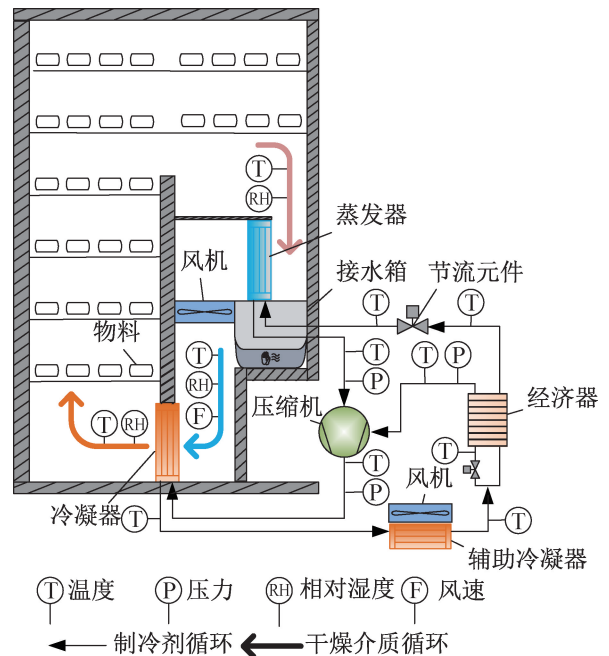


图 1 闭式热泵干燥系统实验原理及测点布置

Fig.1 Experimental principle and measurement point layout of the closed heat pump drying system

后串联安装了水冷辅助冷凝器,带走系统多余的热量。

该热泵烘干系统分为热泵单元和烘干单元两部分。在热泵单元中,制冷剂经过压缩机的压缩,进入冷凝器后流经辅助冷凝器,辅助冷凝器中的部分制冷剂经过辅助节流装置的节流,在经济器处吸热后进入压缩机的补气口;另一部分制冷剂则直接在经济器处释放热量,再经过主节流装置节流后与蒸发器中的干燥介质空气进行换热,随后进入压缩机的吸气口进行压缩,完成制冷剂的循环。对于烘干单元,干燥介质空气在封闭的风道内循环流动。在经过冷凝器吸收热量后,空气转变为高温低湿的气体,并进入干燥室与待干燥物料进行热湿交换,带走物料中的水分,随后空气流经蒸发器进行降温除湿,并析出水分。最后空气再次进入冷凝器被加热,形成干燥介质空气的循环<sup>[17]</sup>。

## 2 实验方法及数据处理

### 2.1 系统测点布置及参数测量方法

实验台测量参数主要包括温度、相对湿度、风速、压力、功率、质量等,测点布置如图1所示。所需仪器主要为温湿度传感器、风速仪、压力传感器、综合电量监测仪、精密电子天平等,相关参数如表1所示。

表1 测量仪器的详细参数

Tab.1 Details of the measurement devices

测量仪器	量程	精度	生产厂家
T型热电偶	40~80 ℃	±0.5 ℃	Omega
温湿度传感器	40~80 ℃	±0.15 ℃	Vaisal
	0~100%	±1.5%	
风速仪	0~15 m/s	±0.1 m/s	SIEMENS
压力传感器	0~6 MPa	±0.02 MPa	DRUCK
精密电子天平	0~4 000 g	±0.2 g	纪铭
综合电量监测仪	0~5 000 W	±0.2%	青智

实验台采集的数据可分为制冷剂侧和空气侧。制冷剂侧主要采集的数据包括:蒸发器、冷凝器、辅助冷凝器、经济器进出口温度,压缩机吸、排气口温度及压力,压缩机中间补气压力,压缩机功耗等。空气侧采集的数据包括:循环风速、风机功耗,蒸发器和主冷凝器进、出口空气的温度和相对湿度等。数据采集及控制系统主要由 PLC、HMI、24V 电源、继电器、压缩机变频器、各传感器及测量设备组成,实现干燥过程数据的实时记录及装置的可靠控制。

### 2.2 主要评价指标

系统性能评价指标主要包括水分比、干燥速率、系统能效比  $COP_{sys}$ 、单位能耗除湿量  $SMER$ 、单位能耗干燥量及复水比。

1)水分比 (moisture ratio, MR) 表征物料的干燥程度,计算式如下:

$$X_{MR} = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

式中:  $X_e$  为物料达到干燥平衡状态时干基含水率, g/g;  $X_t$  为物料  $t$  时刻干基含水率, g/g, 计算如式(2)所示;  $X_0$  为物料初始状态干基含水率, g/g。而  $X_e$  远小于  $X_0$  和  $X_t$ , 故式(1)可简化为式(3):

$$X_t = (m_t - m_d) / m_d \quad (2)$$

$$X_{MR} = X_t / X_0 \quad (3)$$

式中:  $m_t$  为干燥至  $t$  时刻物料的质量, g;  $m_d$  为物料绝干时质量, g。

2)干燥速率 (drying rate, DR) 表征干燥过程的快慢程度, 定义为单位时间内干基含水率的变化,  $g/(g \cdot h)$ , 表达式如下:

$$U_{DR} = (X_t - X_{t+\Delta t}) / \Delta t \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为干燥时间间隔, h;  $X_{t+\Delta t}$  为物料在  $t+\Delta t$  时刻干基含水率, g/g。

3)系统能效比 ( $COP_{sys}$ ) 是指收益能数值与补偿能数值之比<sup>[18]</sup>, 对于该热泵干燥系统而言, 收益能主要包括冷凝器向循环空气释放的热量(制热量)和蒸发器向循环空气吸收的热量(制冷量), 补偿能为压缩机、循环风机和辅助冷凝器风机三者的功耗之和。制热量和制冷量可通过经过换热器前后湿空气焓值的变化进行计算, 计算式如下:

$$COP_{sys} = \frac{Q_k + Q_0}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (5)$$

式中:  $Q_k$  为冷凝器制热量, kW;  $Q_0$  为蒸发器制冷量, kW;  $W_1$  为压缩机功耗, kW;  $W_2$  循环风机功耗, kW;  $W_3$  为辅助冷凝器风机功耗, kW。

4)单位能耗除湿量 ( $SMER$ ) 是衡量热泵干燥系统除湿性能的另一重要指标, 定义为热泵系统每消耗单位能量所能除去物料中水分的质量,  $kg/(kW \cdot h)$ , 计算式如下:

$$W_{SMER} = m_{moist} / E \quad (6)$$

式中:  $m_{moist}$  为待干燥物料除去的水分质量, kg;  $E$  为干燥过程消耗的电能,  $kW \cdot h$ 。

5)单位能耗干燥量 ( $\Omega$ ) 指待干燥物料的总质量  $m_{总}$  与干燥过程所需总能耗  $E$  的比值,  $kg/(kW \cdot h)$ , 计算式如下:

$$\Omega = m_{总} / E \quad (7)$$

6) 复水比( $R_f$ )是衡量物料干燥后品质情况的重要指标,用来表征物料经干燥处理后,复水恢复成初始状态的程度,计算式如下:

$$R_f = m_1/m_2 \quad (8)$$

式中: $m_1$  为干制品复水后质量,kg; $m_2$  为干制品复水前质量,kg。

### 2.3 不确定度分析

系统中测量参数的准确性直接影响系统性能评价指标的准确性,因此需要对实验测量仪器进行不确定度分析。本实验台直接测量参数有温度、相对湿度、风速、压力、功率和重量,其标准不确定度根据式(9)直接计算得到<sup>[19]</sup>,计算结果分别为 $\pm 0.29\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.87\%$ 、 $\pm 0.06\text{ m/s}$ 、 $\pm 1.73\text{ kPa}$ 、 $\pm 5.77\text{ W}$ 和 $\pm 0.29\text{ g}$ 。间接测量参数的不确定度需根据式(10)和式(11)计算得到。式(10)为间接被测参数 $R$ 与各直接被测参数的函数表达式, $X_i$ 表示第 $i$ 个直接被测参数。式(11)中, $\delta R/R$ 表示间接被测参数 $R$ 的相对不确定度,其中 $a, b, \dots, m$ 为式(10)中各直接被测参数的对应指数。水分比、干燥速率、 $\text{COP}_{\text{sys}}$ 、 $\text{SMER}$ 、单位能耗干燥量和复水比的相对不确定度计算结果分别为3.00%、0.38%、0.21%、0.34%、0.29%和0.29%。

$$u = a/\sqrt{3} \quad (9)$$

$$R = X_1^a X_2^b X_3^c \cdots X_m^m \quad (10)$$

$$\frac{\delta R}{R} = \left\{ \left( a \frac{\delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left( b \frac{\delta X_2}{X_2} \right)^2 + \cdots + \left( m \frac{\delta X_m}{X_m} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

### 2.4 实验方法

实验材料选择:选取新鲜香菇——花菇,菇体个头均匀,成熟度一致,菇体直径范围为6.5~8.5 cm,如图2所示。为了解新鲜香菇的初始含水情况,根据GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》<sup>[20]</sup>中的直接干燥法,把新鲜香菇放入恒温干燥箱,并设定105 °C的温度进行干燥,每隔0.5 h称重一次,直至前后两次称重的质量差值小于香菇初始质量的1/1 000,即可视为香菇干物质的质量。测得新鲜香菇的初始干基含水率为5.33 g/g,初始含水率(湿基含水率)为84.19%。

实验方案:在保持环境温度为25 °C,干燥室送风温度为55 °C,循环风量为580 m<sup>3</sup>/h的工况条件下,分别准确称取3 000 g(装填密度为1.5 kg/m<sup>2</sup>)、3 600 g(装填密度为1.8 kg/m<sup>2</sup>)、4 200 g(装填密度为2.1 kg/m<sup>2</sup>)、4 800 g(装填密度为2.4 kg/m<sup>2</sup>)、5 400 g(装填密度为2.7 kg/m<sup>2</sup>)和6 000 g(装填密度为3.0 kg/m<sup>2</sup>)新鲜香菇均匀单层铺放于网状托盘上



图2 新鲜香菇实物

Fig.2 Photograph of fresh *Lentinus edodes*

进行干燥,实验中每隔1 h测量样品质量,直至香菇干燥至安全贮藏水分要求,观察实验现象并记录实验数据,根据 $\text{COP}_{\text{sys}}$ 、 $\text{SMER}$ 、干基含水率、干燥速率、水分比、复水比进行综合评价,以研究装填密度对系统性能和干燥品质的影响。

### 3 结果与讨论

图3所示为不同装填密度下香菇水分比随时间的变化。由图3可知,随着干燥过程的进行,香菇的水分比逐渐减小,水分比降幅也越来越小,且装填密度越小,下降程度越明显。水分比降幅越来越小是因为香菇所含水分随着干燥过程的进行逐渐减小,干燥速率随之降低。同时,不同装填密度条件下,香菇干燥至安全贮藏含水率的时间也不同。在1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 kg/m<sup>2</sup>的装填密度下,干燥完成所用时间分别为10、11、11.5、12、13、14 h,这是因为随着装填密度的增加,需要去除的水分增多,而干燥室送风温度和循环风量是恒定不变的,所以装填密度越大,所需的干燥时间越长。

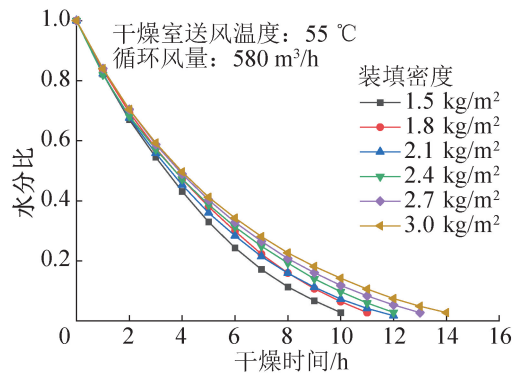


图3 不同装填密度下香菇水分比随时间的变化

Fig.3 Variation of *Lentinus edodes* moisture ratio with time under different loading densities

图4所示为不同装填密度条件下香菇的干燥速率曲线。由图4可知,香菇的干燥过程可分为加速干

燥和降速干燥两个阶段,其中加速干燥持续时间较短,香菇干燥过程无明显的恒速干燥阶段。这是因为香菇表面的水分以蒸汽形式从表面扩散至周围介质中,干燥初期,表面水分蒸发速率呈上升趋势,表现为加速干燥。由于表面水分蒸发,导致香菇内部和表面形成湿度梯度,从而使香菇内部水分沿着毛细管迁移至表面,随着干燥过程的进行,香菇内部水分含量逐渐降低,湿度梯度逐渐减小,内部水分迁移至表面的阻力增大,表面水分蒸发和内部水分迁移速率均下降,干燥速率不断降低,表现为降速干燥。由图4还可知,平均干燥速率随着装填密度的增大逐渐减小。这是因为装填密度增大,挤压程度增加,导致香菇有效蒸发比表面积减小,而且会限制气体在香菇表面的流动,降低了对流传热系数,香菇单位时间吸热量减少,从而香菇水分蒸发速率减小,干燥速率减小。同时,较大的装填密度导致水分蒸发需要的热量增大,而干燥室送风温度和循环风量是恒定不变的,干燥介质空气携带的热量有限,进一步降低了干燥速率。在1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 kg/m<sup>2</sup>的装填密度条件下,平均干燥速率分别为0.52、0.47、0.45、0.43、0.40、0.37 g/(g·h)。平均干燥速率随着装填密度的增大逐渐减小,对干燥速率而言,装填密度为1.5 kg/m<sup>2</sup>最优。

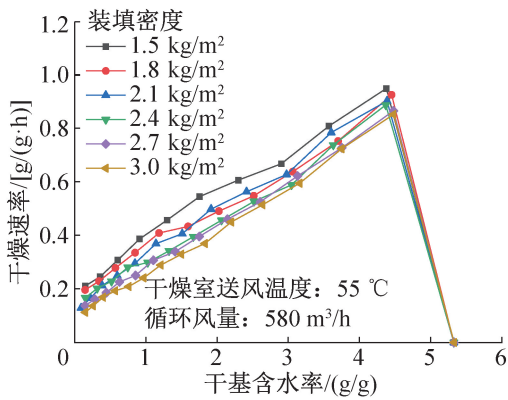


图4 不同装填密度下香菇干燥速率的变化

Fig.4 Variation of lentinus edodes drying rate under different loading densities

图5所示为不同装填密度下系统能效比COP<sub>sys</sub>随时间的变化。由图5可知,随着干燥过程的进行,COP<sub>sys</sub>总体上逐渐减小,而且存在波动现象;尤其装填密度为3.0 kg/m<sup>2</sup>(本文中最大情况)时,COP<sub>sys</sub>下降趋势显著,最小值为3.75。COP<sub>sys</sub>是系统收益与系统功耗的比值,总体上前者的降幅大于后者的降幅,故COP<sub>sys</sub>随时间的增长而逐渐减小;同时干燥室送风温度波动范围设定为±1 °C,干燥过程中当干燥

室实际送风温度低于或高出温度区间,压缩机会进行升速或降速来维持干燥室送风温度的稳定,导致COP<sub>sys</sub>出现波动现象。装填密度较小时,干燥香菇所需的热负荷也较小,干燥室送风温度一定的情况下,干燥室出风温度升高,由上述分析可知,为了维持干燥室送风温度恒定,压缩机会逐渐降低转速,干燥介质在冷凝器处获得的能量和在蒸发器释放的能量均减小,即系统收益随之减小,COP<sub>sys</sub>变小;装填密度较大时,干燥香菇所需的热负荷也较大,干燥室送风温度一定的情况下,干燥室出风温度降低,蒸发器出风温度也随之降低,为了维持干燥室送风温度恒定,压缩机转速逐渐升高,压缩机功耗增大,导致COP<sub>sys</sub>变小。当装填密度为2.7 kg/m<sup>2</sup>时,整个干燥过程COP<sub>sys</sub>较优。在1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 kg/m<sup>2</sup>的装填密度条件下,整个干燥过程中COP<sub>sys</sub>的平均值分别为4.09、4.14、4.17、4.17、4.22、4.05。

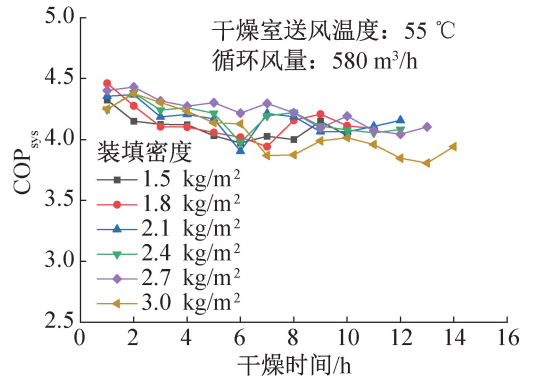


图5 不同装填密度下COP<sub>sys</sub>随时间的变化

Fig.5 Variation of COP<sub>sys</sub> with time under different loading densities

图6所示为不同装填密度下单位能耗除湿量SMER随时间的变化。由图6可知,随着干燥过程的进行,SMER逐渐降低,这是由于香菇的干燥速率(即除水量)逐渐减小引起的。SMER最大值出现在装填密度为2.4 kg/m<sup>2</sup>的第1个小时内,为0.580 kg/(kW·h),最小值出现在装填密度为2.1 kg/m<sup>2</sup>的第12个小时内,为0.086 kg/(kW·h)。

由上述分析可知,装填密度较小时,为了维持干燥室送风温度恒定,压缩机会逐渐降低转速,干燥介质获得的热量较小,蒸发除去的水分较少,导致SMER变小;装填密度较大时,为了维持干燥室送风温度恒定,压缩机转速逐渐升高,压缩机功耗增大,导致SMER变小。当装填密度为2.4 kg/m<sup>2</sup>时,整个干燥过程SMER较优。在1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 kg/m<sup>2</sup>的装填密度条件下,整个干燥过程中SMER平均值分别为0.251、0.256、0.277、0.320、0.300、0.298

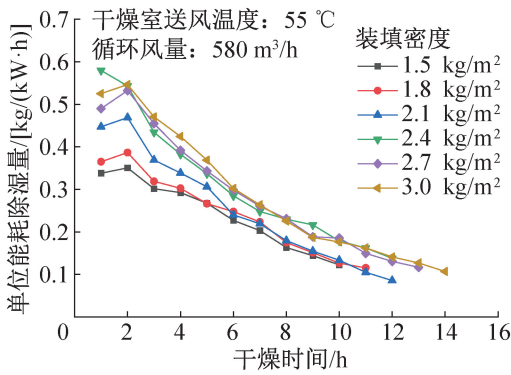


图 6 不同装填密度下单位能耗除湿量随时间的变化  
Fig.6 Variation of SMER with time under different loading densities

kg/(kW·h)。

图 7 所示为不同装填密度下单位能耗干燥量  $\Omega$  及复水比的变化。由图 7 可知,随着装填密度的上升, $\Omega$  先增大后减小,当装填密度为 2.4 kg/m<sup>2</sup> 时, $\Omega$  达最大值 0.391 kg/(kW·h)。这是因为装填密度较小时,压缩机转速较低,压缩机运行工况较为恶劣,所以  $\Omega$  较小;随着装填密度增大,压缩机运行工况逐渐变优, $\Omega$  也逐渐提高,但随着装填密度进一步增大,压缩机转速变大,压缩机的功耗也随之增大,导致  $\Omega$  变小。

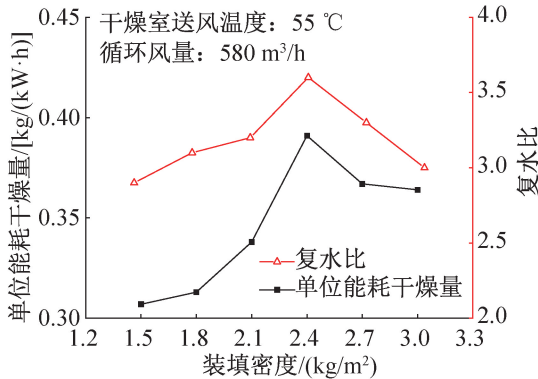


图 7 不同装填密度下单位能耗干燥量及复水比的变化  
Fig.7 Variation of drying amount per unit energy consumption and rehydration ratio under different loading densities

随着装填密度的增大,复水比先增后减,装填密度为 2.4 kg/m<sup>2</sup> 时达最大值 3.6,装填密度为 1.5 kg/m<sup>2</sup> 时有最小值 2.9。装填密度较小时,干燥速率较快,香菇表面因失水过快而易发生硬化现象,使其复水性变差;装填密度较大时,干燥时间变长,会加深对细胞和结构的破坏,复水性能变差;装填密度从 1.5 kg/m<sup>2</sup> 升至 2.4 kg/m<sup>2</sup> 时,表面失水速率较快导致的硬化现象为复水效果的主导性影响因素;装填密度从 2.4 kg/m<sup>2</sup> 升至 3.0 kg/m<sup>2</sup> 时干燥时间较长,干燥时间为

复水效果的主导性影响因素,导致出现复水比先增后减的现象。

综上所述,对干燥时长而言,应选择 1.5 kg/m<sup>2</sup> 的装填密度;对 COP<sub>sys</sub> 而言,应选择 2.7 kg/m<sup>2</sup> 的装填密度;对 SMER、 $\Omega$  及复水比而言,应选择 2.4 kg/m<sup>2</sup> 的装填密度。因此,在实际干燥过程中,应根据具体需求适当平衡干燥时长与各性能参数之间的关系。

## 4 结论

本文基于新设计的准双级补气增焓热泵闭式干燥系统,研究了装填密度对香菇水分比、干燥速率、系统能效比 COP<sub>sys</sub>、单位能耗除湿量 SMER、单位能耗干燥量和复水比的影响,得到如下结论:

1) 随着装填密度从 1.5 kg/m<sup>2</sup> 增至 3.0 kg/m<sup>2</sup> (步长为 0.3 kg/m<sup>2</sup>),香菇干燥时间逐渐增长,平均 COP<sub>sys</sub>、平均 SMER 和复水比均先增大后减小;装填密度为 2.7 kg/m<sup>2</sup> 时,平均 COP<sub>sys</sub> 最大,为 4.22;装填密度为 2.4 kg/m<sup>2</sup> 时,平均 SMER、单位能耗干燥量和复水比均取得最大值,分别为 0.320 kg/(kW·h)、0.391 kg/(kW·h) 和 3.6。

2) 随着干燥过程的进行,COP<sub>sys</sub> 逐渐减小;香菇干燥速率和 SMER 先在加速干燥阶段迅速达到最大,然后在降速干燥阶段随着干基含水率的下降而逐渐下降;香菇的水分比逐渐减小且降幅也越来越小,装填密度越小,水分比降幅越显著。

3) 装填密度较小时,传热传质更为充分,干燥速率较快,但香菇表面因失水过快而易发生硬化现象;装填密度较大时,传热传质速率降低,干燥时间变长。综合各性能指标,装填密度可在 2.4~2.7 kg/m<sup>2</sup> 之间合理选择。

## 参考文献

[1] ZHANG L Z, JIANG L, XU Z C, et al. Optimization of a variable-temperature heat pump drying process of shiitake mushrooms using response surface methodology [J]. Renewable Energy, 2022, 198: 1267-1278.

[2] TUREO J, GUTKOWSKA B, HEROLD F, et al. Optimizing vitamin B<sub>12</sub> biosynthesis by mycelial cultures of *Lentinula edodes* (berk.) Pegl[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2008, 43(4/5): 369-374.

[3] ARUMUGANATHAN T, MANIKANTAN M, RAI R, et al. Mathematical modeling of drying kinetics of milky mushroom in a fluidized bed dryer [J]. International Agrophysics, 2009, 23(1): 1-7.

[4] SHISHIR M R I, KARIM N, BAO Tao, et al. Cold plasma pretreatment—a novel approach to improve the hot

- air drying characteristics, kinetic parameters, and nutritional attributes of shiitake mushroom [J]. *Drying Technology*, 2020, 38(16): 2134-2150.
- [5] 白旭升, 李保国. 香菇热泵干燥特性及数学模型研究[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 42-48. (BAI Xusheng, LI Baoguo. Study on drying characteristics and mathematical model for heat pump drying of mushroom[J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 42-48.)
- [6] ABDELSHAIFY A, LUO Z, BELWAL T, et al. A comprehensive review on preservation of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): techniques, research advances and influence on quality traits[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(5): 2742-2775.
- [7] 乔佳璐. 热泵干燥技术在果蔬脱水上的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014. (QIAO Jialu. Study on the application of heat pump drying technology in fruit and vegetable dehydration [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.)
- [8] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劼, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 331-338. (CHEN Junchen, YANG Yilong, WENG Minjie, et al. Optimization of combined hot-air and vacuum drying technology for instant *Pleurotus eryngii*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 331-338.)
- [9] 李云林, 肖正昆, 邬建明, 等. 热泵干燥在食用菌加工中的应用[J]. *中国食用菌*, 1999, 18(3): 38-40. (LI Yunlin, XIAO Zhengkun, WU Jianming, et al. Application of heat pump drying in edible fungi processing[J]. *Edible Fungi of China*, 1999, 18(3): 38-40.)
- [10] 张国治, 聂林林, 王安建, 等. 香菇干燥中热泵法优势研究[J]. *粮食加工*, 2017, 42(3): 42-45. (ZHANG Guozhi, NIE Linlin, WANG Anjian, et al. Advantage research about heat pump method of *Lentinula edodes* drying[J]. *Grain Processing*, 2017, 42(3): 42-45.)
- [11] 聂林林. 香菇热泵除湿干燥技术的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015. (NIE Linlin. Study on heat pump dehumidification and drying technology of *Lentinus edodes* [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.)
- [12] 杨玲, 王小龙. 天祝野蘑菇热泵干燥工艺研究[J]. *中国食品工业*, 2021(20): 98-106. (YANG Ling, WANG Xiaolong. Study on heat pump drying technology of Tianzhu wild mushroom[J]. *China Food Industry*, 2021(20): 98-106.)
- [13] 李招海. 太阳能辅助热泵干燥系统的热力性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. (LI Zhaohai. Study on thermal performance of solar assisted heat pump drying system[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.)
- [14] 高婵. 香菇热泵干燥加工工艺及品质控制技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. (GAO Chan. Study on heat pump drying technology and quality control technology of *Lentinus edodes* [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.)
- [15] 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.
- [16] 张新玉. R32中间补气压压缩空气源热泵性能研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015. (ZHANG Xinyu. Study on performance of R32 intermediate air supplementation compressed air source heat pump [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015.)
- [17] 汪静, 武卫东, 王浩, 等. 辅助冷凝器冷却水量对闭式热泵干燥系统性能的影响[J]. *化工进展*, 2021, 40(3): 1307-1314. (WANG Jing, WU Weidong, WANG Hao, et al. Effects of cooling water flow rate of auxiliary condenser on performance of closed heat pump drying system[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(3): 1307-1314.)
- [18] AGYENIM F. The use of enhanced heat transfer phase change materials (PCM) to improve the coefficient of performance (COP) of solar powered LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling systems[J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 229-239.
- [19] RAJASEENIVASAN T, SHANMUGAM R K, HAREESH V M, et al. Combined probation of bubble column humidification dehumidification desalination system using solar collectors[J]. *Energy*, 2016, 116: 459-469.
- [20] 食品安全国家标准-食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (National standard for food safety-determination of moisture content in foods: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.)

#### 通信作者简介

武卫东,男,教授,上海理工大学能源与动力工程学院,021-55271875, E-mail: usstwwd@163.com。研究方向: 制冷及低温工程。

#### About the corresponding author

Wu Weidong, male, professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-21-55271875, E-mail: usstwwd@163.com. Research fields: refrigeration and cryogenic engineering.