

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.04.018

# 多功能热泵干燥装置恒温干燥模式性能研究

Study on the performance of constant temperature drying mode of multifunctional heat pump drying device

穆欢 唐兰 孙艳红

MU Huan TANG Lan SUN Yan-hong

(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

(College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**摘要:**为了推广应用热泵干燥技术,设计了一种多功能热泵干燥装置,并搭建了相应的实验台对其恒温干燥模式进行了性能测试。以湿棉布为研究对象,通过控制系统对热泵干燥装置的送风温度和干燥介质旁通率进行调节,在不同运行条件下进行干燥试验。结果表明,热泵干燥系统的单位能耗除湿量(SMER)随干燥温度升高而减小,随旁通率的增大而增大,最大值为 $2.47 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,而性能系数(COP)呈现相反的规律,最大值为4.24,且不同状态的干燥介质存在不同的最佳旁通率。

**关键词:**热泵干燥;单位能耗除湿量;性能系数;最佳旁通率

**Abstract:** In order to promote the application of heat pump drying technology, a multifunctional heat pump drying device with heating was designed. The conventional drying, constant temperature drying, and various operating modes were refrigerated, and the corresponding experimental bench was set up to test the performance of the constant temperature drying mode. The air supply temperature of the heat pump drying device and the bypass rate of the drying medium were adjusted by the control system, and the drying experiment was carried out under different operating conditions to test the effects on the wet cotton cloth. The results showed that the specific moisture extraction rate (SMER) of the heat pump drying system decreased with the increase of the drying temperature, and increased with the increase of the bypass rate. The maximum value was  $2.47 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ . The coefficient of performance (COP) exhibited a rule opposite to that of SMER, with the maximum value of 4.24, and the different drying media had different optimal bypass rates.

**Keywords:** heat pump drying; specific moisture extraction rate;

coefficient of performance; optimal bypass rates

干燥技术的应用涉及很多领域,如食品加工、药物及生物制品的灭菌与干燥等。中国干燥能耗占工业总能耗的12%<sup>[1]</sup>,发达国家干燥能耗占工业总能耗的7%~15%<sup>[2]</sup>。传统干燥技术如常压热风干燥、微波干燥等具有能耗高、干燥速度慢、运行费用高等缺点。因此开发低能耗、环境友好、保证产品质量的干燥新技术、新产品和新过程,对能源匮乏的今天意义重大。

热泵干燥技术是20世纪40年代初发展起来的一项新技术,在果蔬干燥方面相对于其他干燥技术有更好的节能效果和产品综合品质<sup>[3-5]</sup>。研究者对不同的热泵干燥系统进行了研究,Fatouh等<sup>[6]</sup>采用开式热泵干燥机组干燥草本植物,将高温高湿的废气直接排放到室外,余热没有回收利用;而Hawladar等<sup>[7]</sup>则采用封闭式干燥循环回收了余热,提高了系统的能效;Xanthopoulos等<sup>[8]</sup>将部分干燥废气排出并补入新风,提高了系统的干燥性能;Shi等<sup>[9]</sup>采用旁通法只让一部分空气经过蒸发器,进一步地提高了系统的干燥性能。目前常采用的封闭式热泵干燥系统虽然改善了开式与半开式热泵干燥系统在低温环境下性能较差的缺点,但其存在热湿不平衡及功能单一等问题<sup>[10-12]</sup>,有学者<sup>[13-14]</sup>对干燥介质旁通率对热泵干燥系统性能的影响进行了理论分析,但在热泵干燥系统实现热湿平衡的条件下,还没有相关的试验研究。

本试验设计了一种多功能热泵干燥装置,具有加热模式、常规干燥模式、恒温干燥模式、冷藏模式,可满足不同情况下的需求,扩大了设备的应用范围。对于干燥领域而言,恒温干燥模式是最主要的运行模式,对整个干燥过程的能耗、干燥时间等影响较大,本试验拟以湿棉布为干燥物料,研究不同送风温度与不同旁通率对恒温干燥模式性能的影响,旨在为热泵干燥装置在实际应用中选择最佳的运行工况提供理论参考。

作者简介:穆欢,男,广州大学在读硕士研究生。

通信作者:唐兰(1977—),女,广州大学副教授,博士。

E-mail: tanglan@gzhu.edu.cn

收稿日期:2018-11-06

# 1 热泵干燥系统与性能评价指标介绍

## 1.1 多功能热泵干燥系统各模式的介绍

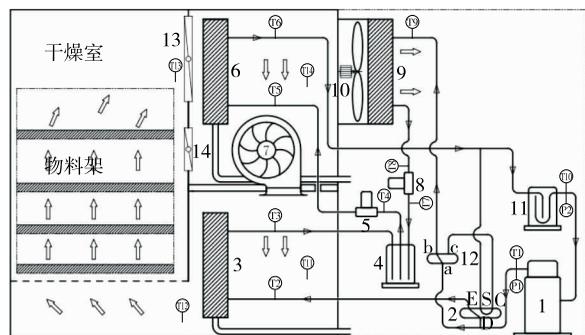
热泵干燥装置由热泵系统和干燥介质循环系统组成。热泵系统主要由压缩机、冷凝器、蒸发器以及膨胀阀等组成,干燥介质通过冷凝器吸收制冷剂的冷凝热升温后被循环风机送入干燥室内吸收物料的水分,然后通过蒸发器冷却除湿,提高了吸湿能力的干燥介质再通过冷凝器升温,如此形成干燥介质循环而达到干燥的目的<sup>[15]</sup>。图 1 为本试验所研究的多功能热泵干燥系统的原理图,其特点在于设置了 3 个换热器,2 个室内换热器与 1 个室外换热器,可通过控制制冷剂及不同的换热器组合而实现不同的运行模式,各模式的工作原理如下。

(1) 加热模式:四通阀 2 处于默认状态(D、E 通,S、C 通),三通阀 12 处于默认状态(b、c 通),膨胀阀 5 关闭,膨胀阀 8 打开,制冷剂先进入室外换热器 9 中蒸发吸收室外环境的热量,后经压缩机 1 压缩后经过室内换热器 3 与室内干燥介质进行换热,从而达到加热的目的。

(2) 常规干燥模式:该模式与加热模式的区别在于膨胀阀 5 打开,膨胀阀 8 关闭,压缩机排出的高温制冷剂先进入室内换热器 3 中与干燥介质换热,后进入室内换热器 6 中对干燥介质进行降温除湿处理而达到干燥的目的。

(3) 恒温干燥模式:四通阀 2 处于默认状态(D、E 通,S、C 通),三通阀 12 处于通电状态(a、b 通),膨胀阀 5 和 8 都打开,压缩机排出的高温的制冷剂并联通过室内换热器 3 和室外换热器 9 分别于干燥介质与室外环境进行换热,再进入室内换热器 6 对干燥介质进行降温除湿处理。在该模式下,一部分冷凝热因排至室外而使室内两个换热器释放的热量和冷量一致,从而达到恒定干燥温度的目的。

(4) 冷藏模式:四通阀 2 处于通电状态(D、C 通,S、E



1. 压缩机 2. 四通阀 3. 换热器 A 4. 储液器 5. 电子膨胀阀 A  
6. 换热器 B 7. 循环风机 8. 电子膨胀阀 B 9. 换热器 C  
10. 室外风机 11. 气液分离器 12. 三通阀 13. 回风电动风阀  
14. 旁通电动风阀

图 1 多功能热泵干燥系统流程图

Figure 1 Multi-function heat pump drying system flow chart

通),三通阀 12 处于默认状态(b、c 通),膨胀阀 5 和 8 都打开,压缩机排出的高温制冷剂先经过室外换热器 9 将热量释放到室外环境中,再进入室内换热器 3 和 6 中蒸发吸收室内干燥介质的热量而达到冷藏的目的。

## 1.2 热泵干燥系统性能评价指标

热泵干燥系统性能的评价指标主要有单位时间除湿量(MER)、单位能耗除湿量(SMER)以及热泵系统性能系数(COP)<sup>[16-17]</sup>。

本试验采用瞬时 COP 反映制冷剂侧性能,干燥介质处理过程焓湿图如图 2 所示,则性能系数 COP 可由式(1)确定。

$$COP = \frac{M_a(h_2 - h_5)}{\sqrt{3}UI\cos\varphi} \quad (1)$$

式中:

- COP——热泵系统性能系数,W/W;
- $M_a$ ——循环空气质量流量,kg/s;
- $h_2$ ——蒸发器前空气比焓值,kJ/kg;
- $h_5$ ——冷凝器器前空气比焓值,kJ/kg;
- $C_p$ ——空气定压比热,取 1.01 kJ/(kg·°C);
- $U$ ——压缩机瞬时电压,V;
- $I$ ——压缩机瞬时电流,A;
- $\cos\varphi$ ——功率因素,取 0.8。

机组的 SMER 可由式(2)确定,其中 SMER 为计算值, $m_w$ 和  $W$  为实测值,因 SMER 中涉及了 MER,则本试验不再重复讨论。

$$SMER = \frac{m_w}{W} \quad (2)$$

式中:

- SMER——单位能耗除湿量,kg/(kW·h);
- $m_w$ ——单位时间除湿量,kg;
- $W$ ——单位时间压缩机消耗电能,kW·h。

# 2 试验材料与方法

## 2.1 试验材料

本试验材料采用碎棉布,总干重为 36 kg。首先用水

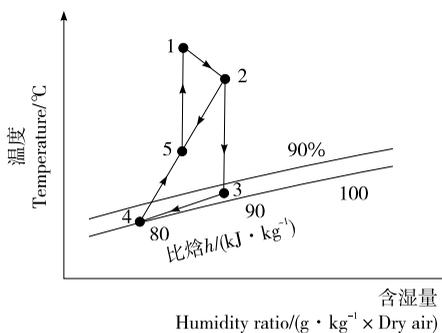


图 2 干燥介质处理过程焓湿图

Figure 2 Drying medium treatment process wetting diagram

将碎棉布完全浸湿,然后用脱水机脱水至不滴水,再称一次湿重,每组试验重复上述过程,使每组试验物料的湿重保持一致。本试验的干燥介质为空气。

### 2.2 测试方法

试验各测点位置如图 1 所示。将物料均匀放置在物料架上,先运行加热模式,当干燥室入口送风温度(干燥温度)达到试验的要求时切换至恒温干燥模式,待恒温干燥模式运行稳定后开始记录各测点数据,温度传感器采用 T 型热电偶,并采用 34972A 型安捷伦每 10 s 自动采集一次数据;湿度、风速、电压、电流每隔 10 min 记录 1 次,每隔 30 min 记录 1 次重量以计算除湿量;采用型号为 DT862-4 三相四线电度表测量压缩机的耗电量,每隔 30 min 记录 1 次读数。不同干燥温度(40,45,50 °C)对应不同空气旁通率(20%,40%,60%,80%)总共做 12 组试验。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 恒温干燥模式不同运行条件的 SMER

当干燥温度为 50 °C,循环空气旁通率分别为 20%和 40%时热泵系统会出现排气温度过高(>110 °C)的情况,原因在于在制冷剂流量一定的条件下,经过蒸发器的风量较大,空气温度较高导致制冷剂蒸发温度高,蒸发效果好,过热度较大使压缩机回气温度高,最终导致压缩机排气温度高。因试验机组的控制系統设置了高温等保护,当机组运行参数超出设置的安全范围时,机组将自动停止运行。因此本试验对于干燥温度为 50 °C、旁通率分别为 20%和 40%这 2 种运行条件不做讨论。

图 3 为不同干燥温度下试验装置 SMER 随运行时间的变化规律,可以看出在所有运行条件下,SMER 都随运行时间逐渐减小,原因在于随干燥过程进行,物料中的水分逐渐变少,水分蒸发需要的热量减小,在送风温度不变的情况下,回风温度随之增加,且相对湿度在逐渐减小,则将回风处理到露点温度所需的冷量增加,在制冷量保持不变的条件下,用于除湿的冷量减少,除湿量也随之减少。在温度为 40 °C 时,旁通率为 80%的折线与旁通率为 60%和 40%的折线有交点,且在交点之前旁通为 80%时的 SMER 小于旁通率为 60%和 40%的,交点之后结果相反,这是因为在干燥的初期,物料中的水分较多,蒸发量较大,干燥介质的相对湿度较大,将回风处理到露点温度所需的冷量较小,在旁通率为 40%,60%,80%时,蒸发器处理的空气终状态点基本一致,即单位质量空气除湿量相差不大,当旁通率较大(80%)时,经过蒸发器的干燥介质流量较小,处理的空气量较小,除湿量较小,而在旁通率较小(40%,60%)时,处理的空气量增加,除湿量也随之增加,随着干燥过程的进行,物料的水分减少,回风温度增加,相对湿度减小,回风处理到露点温度所需的冷量增加,在制冷量不变的条件下,不同的旁通率下空气处理

终状态点差异变大,即单位质量空气的除湿量变化较大,这时在旁通率较小的情况下,因处理的空气量较大,大量冷量被用于降温,只有少量的冷量用于除湿,除湿量降低,反之旁通率较大时除湿量较大。此外,在其他温度条件下,SMER 随旁通率增加而增大也是这个原因。

在旁通率相同的条件下,SMER 随送风温度增加而减小,原因在于送风温度增加,回风温度也随之增加,回风相对湿度减小,将回风处理到露点温度所需的冷量也会增加,在制冷量保持不变的条件下,用于除湿的冷量减少,除湿量也随之减少。

### 3.2 恒温干燥模式不同运行条件的 COP

图 4 为不同干燥温度下试验装置 COP 随运行时间的变化规律,可以看出在所有运行条件下性能系数 COP 都随运行时间有降低的趋势,其中在相同温度条件下,COP 随旁通率的增加而减小,原因在于旁通率增加,经过蒸发器的空气量减小,制冷剂的蒸发效果变差,甚至不能完全蒸发,导致系统制冷量降低,在压缩机的功率变化较

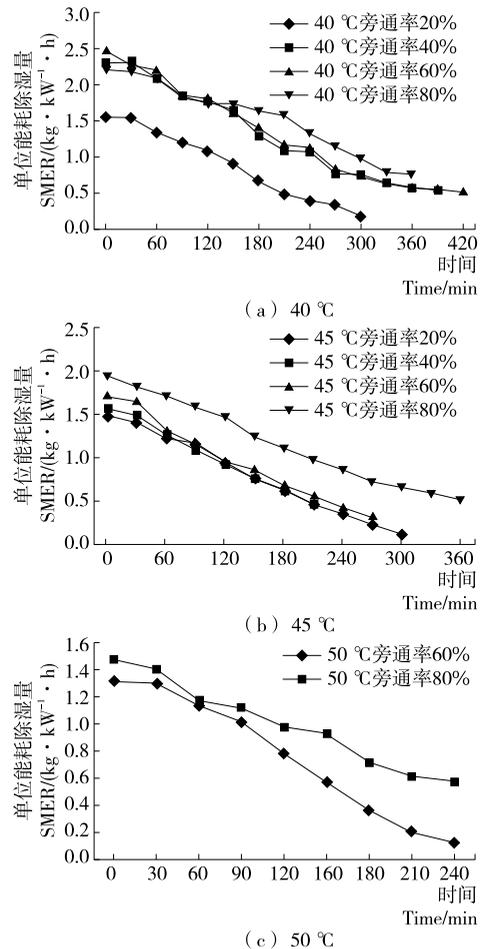


图 3 不同干燥温度下单位能耗除湿量随时间的变化  
Figure 3 Variation of the specific moisture extraction rate with time at different drying temperatures

小的情况下,性能系数随之减小。在旁通率为 20% 和 60% 的情况下,系统性能系数 COP 随干燥温度的增加而增加,这是因为在风量、制冷剂流量一定的情况下,温度越高,制冷剂的蒸发效果越好,过热度越大,制冷量也就越大,性能系数随之增大。

图 4(a)、(b) 比较发现,在旁通率为 40% 时,在前 60 min 内,温度为 40、45 °C 的 COP 相差不大,之后温度为 40 °C 条件下的 COP 大于温度为 45 °C 时的,原因在于温度为 40 °C 时蒸发器前后空气的含湿量差值大于 45 °C 时的,且在前 60 min 内 2 种情况下蒸发器前后空气的含湿量的差值逐渐增大,之后趋于恒定,如图 3(a)、(b) 所示,由式(1)可知,  $h_2 - h_5 = 1.01\Delta t + 2500\Delta d + 1.84(t_2 d_2 - t_5 d_5)$  中 2500 远大于 1.01 和 1.84,即在 60 min 后含湿量变化对 COP 的影响超过了温度变化所引起的。在旁通率为 80% 时,由于温度差异导致的影响与含湿量差值的影响相差无几,温度为 45、50 °C 时的 COP 相差不大,而 40 °C 时的 COP 在 210 min 前小于 45、50 °C 的,在之后出现了相反的结果,即含湿量差值导致的影响在 210 min 后

超过了温度差异引起的。

## 4 结论

(1) 热泵干燥装置的 SMER 随温度的升高而下降,随旁通率的增大而增加,原因在于系统的制冷量分别用于空气的降温 and 除湿,温度越高,用于降温的冷量大,用于除湿的冷量少,SMER 随之降低;旁通率增加,经过蒸发器的空气量减小,制冷量的分配随之偏于除湿,SMER 随之增加。

(2) 干燥温度为 40 °C 时,旁通率为 80% 的 SMER 曲线与旁通率为 40%、60% 时的曲线有交点,即不同的空气状态对应着不同的最佳旁通率。因此在实际干燥过程中应选择合理的干燥温度,且应根据不同的干燥介质的状态调节旁通率的大小以保证最佳的 SMER。

(3) 热泵干燥系统的 COP 随旁通率的增大而减小,随温度的升高的增大,且试验结果表明性能系数 COP 与 SMER 不能同时达到最大值,因此应该综合考虑各个性能系数选择合理的运行工况,以达到最佳的干燥效率和节能效果。

(4) 需进一步改良试验样机热泵子系统结构不合理的地方以提高制冷循环性能,以及对干燥室结构进行优化以改善干燥介质的气流组织,提高干燥介质与物料之间的热湿交换效率。

(5) 应针对该热泵干燥系统开发专门的自动控制系统,根据机组运行参数实时调节干燥介质旁通率、膨胀阀开度等参数,进一步提高系统的性能。

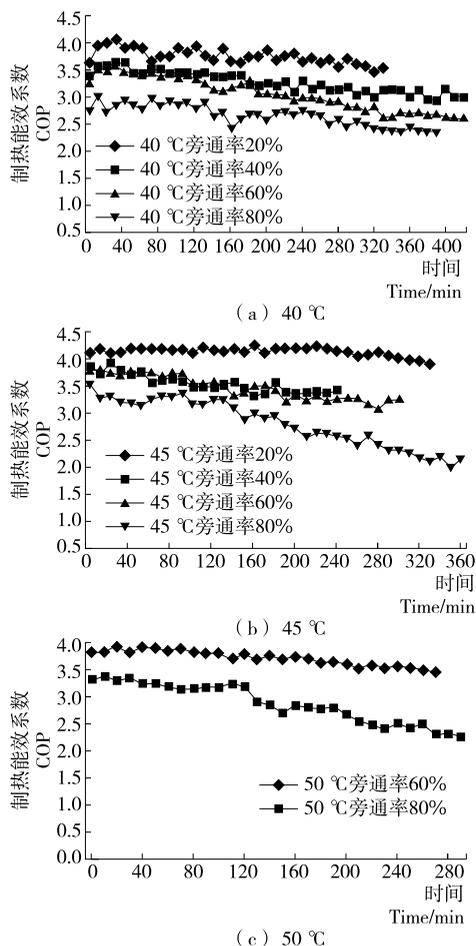


图 4 不同干燥温度下性能系数随时间的变化

Figure 4 Variation of the coefficient of performance with time at different drying temperatures

## 参考文献

- [1] 易中懿. 中国农业机械化年鉴: 2009[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010: 3-6.
- [2] OKTAY Z, HEPBASLI A. Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer [J]. Energy Conversion & Management, 2003, 44(8): 1193-1207.
- [3] 盛金凤, 李丽, 李昌宝, 等. 不同干燥方式对火龙果花品质特性的影响[J]. 食品科技, 2016(2): 98-103.
- [4] 邓媛元, 汤琴, 张瑞芬, 等. 不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 362-71.
- [5] 秦学磊, 张国治, 聂波, 等. 不同干燥工艺对胡萝卜品质影响的研究[J]. 粮食加工, 2017(6): 49-55.
- [6] FATOUH M. Herbs drying using a heat pump dryer[J]. Energy Conversion & Management, 2006, 47(15): 2629-2643.
- [7] HAWLADER Mna. Properties of modified atmosphere heat pump dried foods[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(3): 392-401.
- [8] XANTHOPOULOS G, OIKONOMOU N, LAMBRINOS G. Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 81(4): 553-559.

(下转第 107 页)

表 3 2 种刀具质量磨损量分析

Table 3 Analysis of wear amount of two kinds of tools

g		
刀号	圆形切刀	直刃平刀
1	0.72	0.10
2	0.72	0.07
3	1.02	0.08
4	1.54	0.04
5	0.78	0.06
6	0.99	0.07
7	1.71	0.04
8	0.72	0.02
9	0.45	0.07
10	0.61	0.06
平均值	0.93	0.06

表 4 2 种刀具体积磨损量分析

Table 4 Analysis of volume wear amount of two kinds of tools

刀点	圆形切刀		直刃平刀	
	长度	厚度	长度	厚度
1	0.040	0.150	0.000	0.010
2	0.030	0.150	0.000	0.010
3	0.030	0.170	0.000	0.020
4	0.040	0.110	0.000	0.010
5	0.050	0.170	0.000	0.010
6	0.060	0.210	0.000	0.000
7	0.040	0.170	0.000	0.010
8	0.040	0.100	0.000	0.000
9	0.060	0.260	0.000	0.000
10	0.040	0.230	0.000	0.020
11	0.040	0.240	0.000	0.010
平均值	0.040	0.180	0.000	0.010

### 3 结论

通过对腐竹切割作业中的直刃平刀与圆形切刀进行

静力学分析,得到腐竹切割作业中的应力、应变、位移量等数据;通过磨损质量和体积动态数据的分析,发现圆形切刀切刃上长度与厚度上的磨损量都大于直刃平刀,圆形切刀在作业过程中,刃口处磨损严重,相应会增加生产成本。通过综合分析,选择直刃平刀。在磨损量上的数据均优于圆形刀片,且直刃平刀更适合连续机械化切割,对提高腐竹生产有着重要的研究意义,同时,在食品加工及其他用途刀具的优化设计和选用方面,同样有着重要的参考价值。本研究仅仅选了 2 种形状的刀具进行优化分析,具有一定的局限性,后续可选用多种形状刀具进行优化分析。

### 参考文献

[1] 袁夫彩, 孙海亮. 一种新型腐竹生产设备的研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 119-121, 144.

[2] 秦燕, 黄琼涛, 张荣强, 等. 基于 SolidWorks 零件曲线参数化设计系统的研究[J]. 机械设计, 2015, 12(1): 114-118.

[3] 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS 7.0 的结构分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 46-49.

[4] 袁志林, 高翠芝, 江海蛟, 等. 基于 ABAQUS 的 PET 切片包装机钢结构有限元分析[J]. 包装与食品机械, 2018, 5(6): 45-49.

[5] 安红印. 两轴速率转台 U 型架结构设计及有限元分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53(6): 66-69.

[6] 杨广泽, 李振亮. 概率筛筛箱有限元分析[J]. 煤矿机械, 2016, 26(1): 112-114.

[7] 徐颀, 蔡春源. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 9, 33-37.

[8] 田家林, 袁长福. 输气管道气固耦合振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(7): 1 028-1 034.

[9] 曹雷. 羽毛球训练机结构设计及研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018: 52-53.

[10] 王洪发. 金属耐磨材料的现状与展望[J]. 铸造, 2000, 49(增刊): 577-581.

[11] 王洪琪, 蔡金君. 卧螺机模态分析及结构优化[J]. 过滤与分离, 2012, 22(2): 15-17.

(上接第 96 页)

[9] SHI Qi-long, XUE Chong-hu, ZHAO Ya, et al. Drying characteristics of horse mackerel (Trachurus japonicus) dried in a heat pump dehumidifier[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 12-20.

[10] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 热泵干燥系统性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 94-98.

[11] 张联英, 付永霞, 张宏飞, 等. 闭式热泵干衣机干衣性能实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 382-386.

[12] 刘林, 王强. 热式热泵干燥装置的设计分析[J]. 制冷与空调: 四川, 2018, 32(5): 520-523.

[13] 胡传坤, 高建民, 张璧光. 木材除湿干燥过程中循环风旁通率调控理论分析[J]. 干燥技术与设备, 2011(5): 239-245.

[14] 刘圣春, 李雪强, 邹文思. 带辅助冷凝器的封闭式热泵干燥系统理论分析[J]. 制冷与空调, 2014, 14(12): 59-62.

[15] 陈东, 谢继红. 热泵干燥装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 3-4.

[16] MINEA V. Drying heat pumps-Part II: Agro-food, biological and wood products[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 659-673.

[17] SEYFI Şevik. Mushroom drying with solar assisted heat pump system [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 72(72): 171-178.