

# 闭式热泵干燥系统的除湿特性试验

## Experimental investigation of dehumidification characteristics of closed drying system with heat pump

曾文良 陈柏霖 陈 萱 揭雪飞

ZENG Wen-liang CHEN Bo-ling CHEN Xuan JIE Xue-fei

(广东轻工职业技术学院, 广东 广州 510300)

(Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510300, China)

**摘要:**研究了空气流量、相对湿度及有无热管条件下, 闭式热泵干燥系统的单位能耗除湿量(specific moisture extraction rate, SMER)的变化趋势。结果表明: 热管对 SMER 的影响极为显著, 试验条件下, 热管的应用使得系统 SMER 增加 20%~200%; 保持温度和相对湿度不变, 空气流量在 0.2~0.4 kg/s, 系统的 SMER 具有最大值; 保持空气流量和温度不变, 相对湿度的变化对 SMER 影响最为显著, 相对湿度从 25% 增加至 75%, 有热管系统的 SMER 从 1.4~1.6 增加至 4.1~4.3, 而无热管系统 SMER 从 1.1 增加至 3.0~3.1。

**关键词:** 热泵; 热管; 单位能耗除湿量; 闭式干燥系统

**Abstract:** It was studied the performance characteristics such as specific moisture extraction rate (SMER) of closed heat pump drying system with the condition of different air mass-flow-rate, relative humidity and with or without heat pipe. The results showed that the effects of heat pipe on SMER of closed heat pump drying system were very significant, and the application of heat pipe could enhance the system SMER by 20%~200% under test conditions. Under the condition of the constant temperature and constant relative humidity, the SMER of the system had a maximum value while the air mass-flow-rate was between 0.2~0.4 kg/s. With constant air mass-flow-rate and constant air temperature, the change of relative humidity had the most significant effect on SMER. While relative humidity increased from 25% to 75%, the SMER of closed system with heat pipe enhanced from 1.4~1.6 to 4.1~4.3, but the SMER without heat pipe from 1.1 to 3.0~3.1.

**Keywords:** heat pump; heat pipe; SMER; closed drying system

干燥普遍存在于工农业生产和日常生活之中, 是一

项较高能耗的单元操作过程, 在工业过程中约占过程能耗的 4%~35% (化学工业约 4%, 造纸工业约 35%)<sup>[1-2]</sup>, 在西方发达国家中占全社会总能耗的 9%~25%<sup>[2-3]</sup>, 因此对干燥系统及其节能的研究具有十分重要的社会和经济价值。

早在 20 世纪 40 年代, 德国工程师就提出热泵干燥技术并获得相应专利, 但真正应用始于 20 世纪的第二次石油危机之后。相比于传统的热风干燥, 热泵干燥具有节能、绿色环保和干燥温度低等特点, 促使其应用范围广泛且形式多样。近些年随着节能与环保要求的提高, 开式和半开半闭热泵干燥循环系统将逐步退出应用, 而闭式热泵干燥系统即将成为主流, 特别是在农林产品、食品加工、环境保护和生物制药等领域表现尤为突出。

热泵干燥系统的研究主要在两个方面, 一是应用基础理论研究, 主要通过热力学分析<sup>[4-5]</sup>和数值模拟<sup>[6-7]</sup>的方法, 探索热泵干燥中的参数优化等<sup>[8-9]</sup>, 为热泵应用设计提供适当的理论依据; 二是具体的应用研究, 主要通过试验, 探索适用不同干燥物料的工艺参数<sup>[10-12]</sup>、操作条件<sup>[13-14]</sup>、优化控制与设计方案<sup>[15-16]</sup>等。前期研究尽管有大量有益的研究成果, 为热泵干燥技术应用提供众多有益的参考。但由于闭式热泵系统中物料在干燥过程中的状态参数(温度、湿度、含湿量)变化较大, 对于如何优化闭式干燥系统的整体参数, 最大限度同时满足干燥工艺条件和干燥系统的单位能耗除湿量(SMER), 迫切需要寻找热泵干燥系统在不同的工作参数条件下的 SMER 的变化规律, 从而实现闭式热泵干燥系统的优化设计及系统控制。研究拟通过试验方法来探索闭式热泵干燥过程中空气流量、相对湿度、热管回热器等对系统 SMER 的变化规律, 以期达到对闭式热泵干燥性能优化设计、控制和应用提供有力的支撑。

## 1 试验装置与试验方法

### 1.1 试验装置

试验装置与流程如图 1 所示, 设计了一个 4 000 mm×

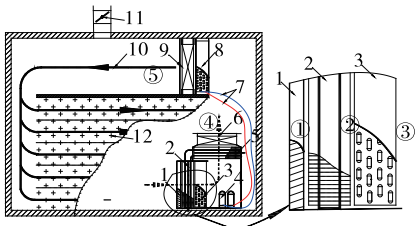
基金项目: 广东省自然科学基金(编号: 2015A030313747)

作者简介: 曾文良(1969—), 男, 广东轻工职业技术学院副教授, 博士。E-mail: 563274029@qq.com

收稿日期: 2020-05-17

2 500 mm×2 700 mm(长×宽×高)的干燥室,干燥室设置有独立的内置循环风道和相应的循环风机,系统设计参照曾文良等<sup>[17]</sup>的方法,试验过程中将热泵冷凝器作为分机单独安装在循环风道内,冷媒通过连管直接连通主机,并由循环风机供风,风机的主要参数见表 1。

热泵主机(带独立控制的风机)设置在干燥区域的回风区域,采用谷轮热泵专用压缩机,其型号为 ZR61KC-PFJ,排气量为 14.37 m<sup>3</sup>/h,ARI 工况下的制冷量和输入功率分别为 14.60,4.43 kW;系统采用热力膨胀阀为主,并辅以手动截止阀进行蒸发温度的调节;热管为重力自返回热管,传热介质为 R22,在热管中间设置独立的手动截止阀,以便控制热管使用,进行试验对比。



1. 回风口 2. 热管沸腾段(高温) 3. 蒸发器 4. 压缩机系统  
5. 热管冷凝段(低温) 6. 主机风机 7. 主机分机连管 8. 冷凝器(分机) 9. 循环风机 10. 循环风道 11. 排热排湿风门 12. 干燥物料及支架 ①~⑤. 温湿度测量位置与编号

图 1 试验流程示意图

Figure 1 The experimental flow diagram

表 1 风机的主要参数

Table 1 The main parameters of fan

| 序号 | 名称 | 型号   | 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 全压/Pa | 功率/kW | 直径/mm | 数量 |
|----|----|------|---------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|----|
| 1  | 冷凝 | JL-4 | 1 450                     | 4 500                                 | 120   | 0.55  | 460   | 2  |
| 2  | 蒸发 | JL-3 | 2 900                     | 2 400                                 | 194   | 0.37  | 360   | 1  |

1.2 试验方法

1.2.1 测量控制方法

(1) 温湿度的测量:干燥介质温度和湿度采用 TH10R-EX 温湿度测试仪在线测量,分别在主机回风口、热管沸腾段与蒸发器之间、蒸发器之后、热管冷凝段之后、冷凝器(分机)之后 5 个位置检测空气的温湿度,具体位置见图 1 中的①~⑤。

(2) 空气流量的测定与控制:① 主机流量。系统正常,不同风机电机频率下,在回风口均匀布置了 6 个测量位置,用热线风速仪测量其风速并取平均值,处理转化为频率—流量曲线,试验中通过控制风机的频率来控制空气的流量。② 冷凝器流量。冷凝器的流量测试方法与主机流量一致,试验中冷凝器空气质量流量(干基)维持在 2.0~2.2 kg/s。

(3) 电功率的测量:直接用功率表测量读数而得,该数据不包含循环风扇的电机功率。

(4) 湿度的控制:在物料区域设置由废旧纸板代替湿物料,通过加饱和水蒸气来控制湿度的湿源。蒸汽来自于电热锅炉,压力控制在 0.01 MPa(表)。

(5) 温度的控制:通过控制排热排湿风门的开度实施,在干燥室的两侧设置有多个均匀的小孔,以便外界空气进入系统,干燥箱内维持其压强控制在 5~5 Pa(表)。

(6) 蒸发温度的控制:手动截止阀调节蒸发温度和过热度。

1.2.2 数据处理方法 试验中空气的压力维持在 101.3 kPa 不变,故空气的湿度和焓可以分别计算为:

$$h_i = \frac{0.622 \times P_i^s \times \varphi_i}{101.3 - P_i^s \times \varphi_i}, \quad (1)$$

$$H_i = (1.01 + 1.88h_i) \times t_i + 2\,500 \times h_i, \quad (2)$$

式中:

$h_i$ ——该状态下空气的绝对湿度,kg/kg 干空气;

$H_i$ ——该状态下空气的焓,kJ/kg 干空气;

$P_i^s$ ——温度  $t_i$  下水的饱和蒸气压,kPa;

$\varphi_i$ ——空气的相对湿度,%;

$t_i$ ——空气的温度,℃。

空气的质量流量(干基),SMER 的计算:

$$q_m = \frac{q_v \times \rho_h}{1 + h_1}, \quad (3)$$

$$SMER = [3\,600 \times (h_1 - h_3) \times q_m] / P, \quad (4)$$

式中:

$q_m$ ——该状态下空气的质量流量,kg/s;

$q_v$ ——该状态下空气的体积流量,m<sup>3</sup>/s;

SMER——单位能耗除湿量,kg/(kW·h);

$\rho_h$ ——湿空气的密度,kg/m<sup>3</sup>;

$P$ ——主机功率(不含循环风扇),kW。

2 结果与讨论

2.1 空气流量的影响

恒定空气温度为 50 ℃,且分别保持相对湿度为 30%,50%,70%的条件下,改变不同的空气流量,热泵干燥系统有无热管和有热管条件下的 SMER 的变化关系曲线分别见图 2、3。从图 2 可以看出,在没有热管回热作用的情况下,系统的 SMER 随流量的增加而减小,当  $\varphi = 70\%$ ,流量为 0.15 kg/s 时,系统的 SMER 最高约为 3.3,而当流量升高至 0.8 kg/s 时,SMER 降低至 2.5, $\varphi = 50\%$  和  $\varphi = 30\%$  的 SMER 变化趋势与上述基本一致;至于进一步降低空气流量,系统的 SMER 值是否会出现最大值,由于当空气流量降低至 0.15 kg/s 以下时,对应换热器的

迎面风速将降至 0.3 m/s 以下, 此时传热效果将急剧恶化, 因此试验未进一步探索更低流量下的 SMER 性能参数变化; 比较图 2 中 3 条曲线, 可以发现  $\varphi$  越小, SMER 的变化曲线的斜率越大, 也就是 SMER 减小的幅度越大; 在  $\varphi=30\%$  且流量接近 0.70 kg/s 时, 系统的 SMER 值接近于 0, 说明如果继续加大空气流量, 将无法除湿。

理论上, 空气进入热泵系统, 首先是温度降低, 其放出的是显热, 只有当温度降低至空气露点温度以下时, 才开始有液态水析出, 总体上说热泵的制冷量是一定的, 如果空气显热过多, 其潜热就不足, 除湿量自然减小, 因此采用除湿效率<sup>[8]</sup>能够更好解释上述试验结果。除湿效率 ( $\epsilon$ ) 的定义为:  $\epsilon = \text{除湿潜热量} / \text{总制冷量}$ , 通过简化可表达为:

$$\epsilon \approx \frac{0.622(\varphi_1 \times p_1^s - p_2^s) \times \Delta H_{\text{vap}}}{101.3 \times 1.01 \times (t_1 - t_2) + 0.622(\varphi_1 \times p_1^s - p_2^s) \times \Delta H_{\text{vap}}} \quad (5)$$

通过式(5)可以看出, 当恒定入口温度  $t_1$  和相对湿度

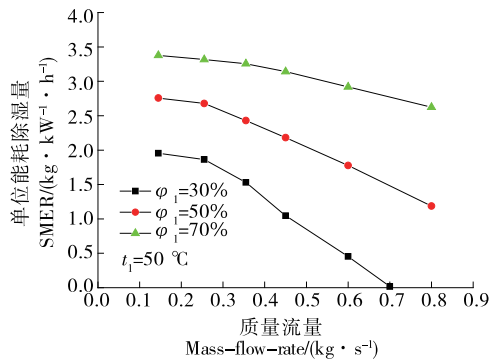


图2 干空气流量对无热管热泵干燥系统单位能耗除湿量的影响

Figure 2 The effect of dry air mass flow-rate on specific moisture extraction rate of heat pump drying system without heat pump

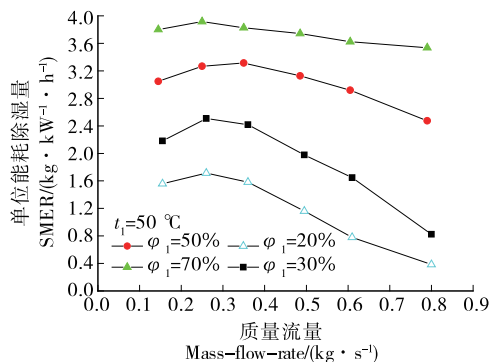


图3 干空气流量对有热管热泵干燥系统单位能耗除湿量的影响

Figure 3 The effect of dry air mass flow-rate on specific moisture extraction rate of heat pump drying system with heat pump

$\varphi_1$  时, 保持制冷量不变前提下, 减小空气流量, 将势必使得  $t_2$  下降,  $t_2$  下降将必然导致  $p_2^s$  的下降, 从而将使得  $(\varphi_1 \times p_1^s - p_2^s)$  增加, 进而使得  $\epsilon$  和 SMER 的升高, 图 2 中所表现出的现象与理论分析是一致的。袁丽等<sup>[8]</sup>通过数值模拟分析风量、相对湿度对除湿机 SMER 的影响规律, 其模拟结果在  $t = 18 \sim 38\text{ }^\circ\text{C}$  及  $\varphi < 60\%$  的条件下, SMER 随风量的变化曲线与试验结果基本一致, 但是当  $\varphi > 60\%$  时, SMER 有一个最大值, 与试验结果不一致, 可能是由数值模拟的初始条件和边界条件与试验不一致而造成的。

由图 3 可以看出, 在具有热管回收余冷的前提下, 随着空气流量的增大, 系统的 SMER 先增大, 达到最大值以后将逐渐减小, 因此其具有一个最佳的空气流量值, 从而使得系统的 SMER 达到最大, 而且  $\varphi$  越低, SMER 的最大趋势越明显; 随着流量的增大, SMER 值经历了最大之后是一直下降的, 且下降的趋势与无热管情况下基本一致, 当  $\varphi = 70\%$  时, 流量对 SMER 的影响较小, 流量为 0.15 kg/s 和 0.80 kg/s, SMER 分别为 3.90 和 3.55, 仅仅下降 8.9%, 而在  $\varphi = 30\%$  时, 对应的 SMER 分别为 2.50 和 0.82, SMER 下降达 79.2%, 说明若要提高闭式热泵干燥系统的除湿效率, 干燥操作时的相对湿度不能过低。

比较图 3 与图 2 可以看出, 在相同的工况下, 热管的应用将使得 SMER 大幅提高, 在  $\varphi = 70\%$ , 流量为 0.15 kg/s, SMER 比无热管提高了 18.8%, 而在  $\varphi = 30\%$ , 流量为 0.6 kg/s, SMER 提高了约 2 倍以上, 随着流量的增大, 提高更加明显, 说明采用热管回收系统余冷, 对节能价值非常明显, 特别是在较低的相对湿度条件下, 这种节能效果更加突出。综合来说, 采用热管换热器的前提下, 维持热泵的空气流量在 0.2~0.4 kg/s 比较合适, 但是应该综合考虑温度和湿度的共同影响, 尤其是湿度的影响。

## 2.2 相对湿度的影响

根据前述的研究结果, 恒定空气流量为 0.35 kg/s, 且分别恒定  $t = 45\text{ }^\circ\text{C}$  和  $t = 55\text{ }^\circ\text{C}$  条件下, 闭式热泵干燥系统在有、无热管的条件下,  $\varphi$  的变化对 SMER 的影响曲线分别见图 4、5。比较图 4 和图 5 看出, 无论是有、无热管情况下, 系统的 SMER 是随着相对湿度升高而增大的, 且基本是呈线性上升; 比较不同温度下  $\varphi$  对 SMER 的影响, 无热管时,  $\varphi$  从 25% 升高至 75%,  $t = 45\text{ }^\circ\text{C}$  和  $t = 55\text{ }^\circ\text{C}$ , SMER 升高幅度基本一致且维持在 260%~270%, 而有热管时, SMER 大约提高了 220%~240%, 说明  $\varphi$  的变化对无热管系统更加敏感。

结合前述式(5), 当恒定  $t_1$  和  $q_m$  时, 减小空气  $\varphi_1$ ,  $\varphi_1 \times p_1^s$  将下降较大, 同时也会使得空气的露点温度  $t_d$  下降, 从而使得  $t_2$  小幅下降,  $t_2$  下降将导致  $p_2^s$  的小幅下降, 最终将使得  $(\varphi_1 \times p_1^s - p_2^s)$  下降较大, 进而使得  $\epsilon$  和 SMER 的下降, 因此图 4 和图 5 表现的结果与理论定性分析是一致的。

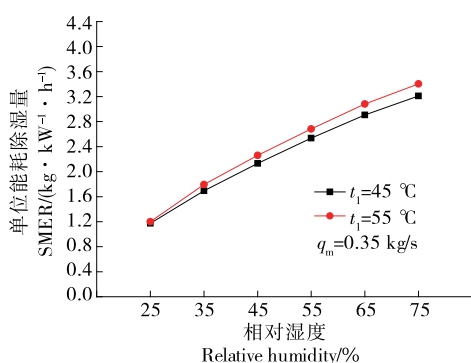


图 4 空气相对湿度对无热管热泵干燥系统单位能耗除湿量的影响

Figure 4 The effect of relative humidity of air on specific moisture extraction rate of heat pump drying system without heat pump

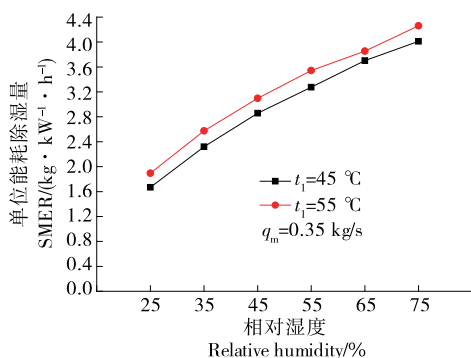


图 5 空气相对湿度对有热管热泵干燥系统单位能耗除湿量的影响

Figure 5 The effect of relative humidity of air on specific moisture extraction rate of heat pump drying system with heat pump

### 3 结论

(1) 文章系统地对空气流量、相对湿度及有无热管对封闭式热泵干燥系统的单位能耗除湿量的影响进行了试验,结果亦与部分文献数值模拟结果相吻合,并揭示出在恒定温度和相对湿度且有热管条件下,系统的单位能耗除湿量将随着流量变化有一个最大值,最佳空气流量大约在 0.2~0.4 kg/s。

(2) 相同的工况下,热管的应用使系统单位能耗除湿量大幅提高,提高幅度在 20%~200%,流量越大,单位能耗除湿量的提高幅度越大,相对湿度越小,单位能耗除湿量的提高幅度越大,温度对单位能耗除湿量的提高幅度相对较小。

(3) 恒定空气流量(干基)为 0.35 kg/s,系统的单位能耗除湿量随着相对湿度的升高而增大,在试验范围内,单位能耗除湿量的提高幅度在 220%~280%。尽管相对湿度的变化对系统单位能耗除湿量的影响大,但在实际干燥过程中,如何选择合适的相对湿度应根据物料脱湿

的内在物理机制而定,如何使得干燥速度和系统能效达到最佳匹配将对封闭式热泵干燥系统具体应用起到重要的作用,有待在后续论文中进一步分析。

### 参考文献

- [1] SAMV S, PETER J C. Analysis of nozzle condensation drying cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19: 832-845.
- [2] HII C L, LAW C L, SUZANNAH S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276-282.
- [3] 宋小勇, 钟宇, 邓云. 热泵干燥技术的研究现状与发展趋势[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(4): 60-66.
- [4] 王芳. 封闭式热泵干燥系统运行过程热力学分析计算[J]. 制冷与空调, 2018, 32(1): 86-90.
- [5] ERBAY Z, HEPBASLI A. Advanced exergy analysis of a heat pump drying system used in food drying[J]. Drying Technology, 2013, 31(7): 802-810.
- [6] SHEN Jiu-bing, GUO Ting, TIAN Ya-fen, et al. Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 59(1): 280-289.
- [7] 樊佳琪, 陈东, 谢继红, 等. 一种低能耗热敏物料干燥装置及其特性模拟[J]. 化学工程, 2019, 47(10): 1-5.
- [8] 袁丽, 范良凯, 耿世彬, 等. 风量影响除湿机 SMER 的原理分析与模拟[J]. 制冷与空调, 2010, 24(5): 38-42.
- [9] OKTAY Z, HEPBASLI A. Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(8): 1 193-1 207.
- [10] MUSTAFA A, LEVENT T, SEYFI S, et al. Heat pump drying of grape pomace: Performance and product quality analysis[J]. Drying Technology, 2019, 37: 1 766-1 779.
- [11] YANG Zhao, LI Xiang, TAO Zhi-chao, et al. Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed[J]. Drying Technology, 2018, 36(5): 1-12.
- [12] SUN Da-wei, CAO Chen, LI Bo, et al. Study on combined heat pump drying with freeze-drying of Antarctic krill and its effects on the lipids[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(6): e12577.1-e12577.1.
- [13] 罗静, 李敏, 关志强. 预处理及级联干燥在热泵干燥食品中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 177-181.
- [14] 穆欢, 唐兰, 孙艳红. 多功能热泵干燥装置恒温干燥模式性能研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 92-96.
- [15] 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.
- [16] 李伟钊, 盛伟, 张振涛, 等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 33(4): 278-284.
- [17] 曾文良, 陈柏霖, 邱嘉豪, 等. 一种重力热管、热管除湿热泵及干燥系统: 202020861155.5[P]. 2020-05-02.