

文章编号:1007-6735(2013)04-0382-05

闭式热泵干衣机干衣性能实验研究

张联英¹, 付永霞¹, 张宏飞¹, 王秋旺²

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要: 对闭式热泵干衣机干衣性能进行实验研究,采用热泵系统性能系数 COP 、除湿能耗比 SPC 、单位时间除湿量 MER 、单位能耗除湿量 $SMER$ 等指标考察其性能. 研究表明,热泵系统的 COP 值在低负载时随着衣物含水率的增大而增大,在较高负载时,在含水率为 45% 时达到最大值;热泵干燥系统的 $SMER$ 值在低负载时随着衣物含水率的增大而增大,在较高负载时随着含水率的增大而增大且基本维持在较高的数值;热泵系统和热泵干燥系统相互影响相互制约,热泵系统的 COP 值与热泵干燥系统的 $SMER$ 值不能同时达到最大.

关键词: 闭式热泵干衣机; 含水率; 单位能耗除湿量
中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Experimental Research on Drying-cloth Performance of Closed Heat Pump Dryer

ZHANG Lian-ying¹, FU Yong-xia¹, ZHANG Hong-fei¹, WANG Qiu-wang²

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The performance of closed heat pump dryer was investigated. The indexes of coefficient of performance of heat pump systems COP , specific dehydration power consumption SPC , average specific dehumidification MER , specific dehumidification $SMER$ and so on were used to study its performance. The results indicate that the value of COP increases with the increase of moisture content at the lower load, and it arrives at the highest value when the moisture content is 45% at the higher load. The $SMER$ of heat pump and drying system increases with the increase of moisture content at the lower load, and it basically remains at a high value when the load is higher. Because the heat pump system and drying system restrict and interact with each other, the values of COP and $SMER$ can't reach its highest value simultaneously.

Key words: closed heat pump dryer; moisture content; specific dehumidification

干衣机在发达国家应用比较普遍,日本 70% 以 上的家庭将干衣机和洗衣机配套使用^[1],而我国仅

收稿日期: 2012-05-22
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XJJ2012106); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2012K10-16)
第一作者: 张联英(1968-),女,副教授. 研究方向: 传热传质的强化. E-mail: zhangly@mail.xjtu.edu.cn

在南方潮湿地区有所应用,且应用比例较大的是采用电加热的传统干衣机.传统干衣机将干燥过程中产生的废气直接排放,不仅浪费了热量,而且对环境造成了湿污染.与传统干衣机相比,热泵干衣机具有节能、干燥产品质量高、干燥条件易达到、与环境友好等方面的优势.

许多学者在热泵干衣机节能方面进行了大量的研究工作.Chen 等^[2]在蒸发器前加装了热管,用来吸收湿空气热量,经过蒸发器干燥后再将这部分热量还给干燥系统内的空气,使其升温.Chua 等^[3]对双蒸发器热泵干燥系统进行了研究,指出双蒸发器热泵干燥系统比单蒸发器热泵干燥系统热回收率高 35%,如果在系统前加预冷系统,可使热泵系统性能系数 COP 和单位能耗除湿量 $SMER$ 分别相对提高 12%~20% 和 25%~50%.Baines 等^[4]指出,风机与热交换器的匹配关系对干燥能耗有很大影响,匹配不当会造成能量的严重浪费.Yadav 等^[5]通过研究指出,热泵干燥过程中各个参数及其经济性能受其负载及周围环境的影响.

大多数研究者对热泵干衣机的研究局限于对某个部件的节能上,而不是对整个热泵干燥系统的节能.本文从热泵干衣机系统节能出发,采用热泵系统性能系数 COP 、除湿能耗比 SPC 、单位时间除湿量 MER 、单位能耗除湿量 $SMER$ 等性能指标考察其节能状况,并且对热泵干衣机系统优化给出了相应的建议.

1 热泵干燥的工作原理

热泵干燥装置由热泵系统和干燥系统组成,其工作原理如图 1 所示.热泵系统由压缩机、冷凝器、毛细管及蒸发器等组成;干燥系统由冷凝器、蒸发器、风机和干燥室组成.在热泵系统中,热泵工质经压缩机压缩后变成高温高压气体,进入冷凝器冷凝,向干燥系统中的空气放热,然后经毛细管节流降压后进入蒸发器,从干燥系统中的空气吸热变成低温低压气体,至此完成一个热泵循环;在干燥系统中,由冷凝器出来的高温干燥空气进入干燥室,与湿物料进行热质交换,流出干燥室的温湿空气经蒸发器将部分显热和潜热传给工质,温度降至露点,水分冷凝析出,含湿量很低的低温干燥空气通过冷凝器加热升温变成具有较强吸湿能力的高温干燥空气,在循环风机的作用下再次进入干燥室,至此干燥空气完成一次循环.周而复始,不断将湿物料中的湿分转移.

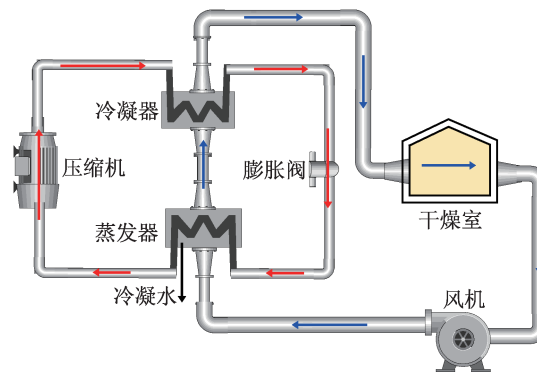


图 1 热泵干燥装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat pump drying equipment

2 性能指标

热泵系统性能系数 COP 指热泵供热量与压缩机耗功之比。 COP 值越大,系统越节能,热泵系统的节能效果越好,其定义式为

$$COP = \frac{Q_c}{W_c}$$

式中, Q_c 为冷凝器释放热, kJ ; W_c 为压缩机耗功, kJ .

除湿能耗比 SPC 指干燥设备每除去 1 kg 水分所消耗的能量^[6],用来评价干燥系统的能耗,其定义式为

$$SPC = \frac{W_h}{m}$$

式中, W_h 为干燥系统的能耗, kJ ; m 为干燥系统除去的水分, kg .

单位时间除湿量 MER 指干燥过程中所除去的湿分与干燥时间的比值^[6],反映了干燥速度的快慢,但没有考虑干燥系统的综合性能,其定义式为

$$MER = \frac{m}{t}$$

式中, t 为干燥时间, h .

单位能耗除湿量 $SMER$ 是指热泵干燥系统每消耗 1 kJ 能量所除去的水分质量^[7],是衡量干燥系统性能的指标,其定义式为

$$SMER = \frac{m}{W}$$

式中, W 为热泵干燥系统消耗的能量, kJ .

3 实验装置与实验步骤

实验采用小天鹅滚筒洗衣机为干燥室,管翅式换热器为蒸发器和冷凝器,毛细管为工质回路的节

流装置,制冷工质为 R134a,压缩机采用空调用涡旋式压缩机,进/回风口采用多个小孔,使干燥介质(空气)在干燥室内均匀分布.本实验采用闭式循环,在干燥过程中采用橡塑保温管材对干燥介质管路进行保温来减少热量损失.实验装置图如图 2 所示,其中 $t_1 - t_5$, $t_6 - t_{10}$ 是均匀地分布在冷凝器外部和蒸发器外部的温度测点,湿度测试点为 h_1, h_2, h_3 . q 为质量流量.

在多种工况下对热泵干衣机进行实际能效对比测试.通过电子秤称重来获得干燥前后物料的质量差(即除湿量),采用型号为 DDSHT-17215 的单相全电子电能表来测量热泵干燥系统的总耗电量.为保证干燥充分且避免耗费更多的能量,衣物在干燥室内的烘干时间定在 3 h,实验步骤如下:

- 称得标准干布条质量 m_1 ,然后浸入自来水桶全部浸透;
- 对布条进行脱水,脱水后质量为 m_2 ,含水率 $w = \frac{m_2 - m_1}{m_2}$;
- 将布条放入干燥室内,设定工作时间 3 h;
- 对仪表进行调零和校正后启动数据采集系统;
- 根据设定时间测试和记录各个测试点相关数据;
- 对干燥后的布条进行称重,质量记为 m_3 ,除湿量即为 m_2 与 m_3 质量之差;
- 重复 a—f 所有步骤,直到所有测试工况完成.

4 实验结果及分析

4.1 除湿量随含水率的变化

如图 3 所示,负载为 1.05 kg 时,除湿量 m 随含水率 w_t 的增大而增大,且基本呈线性关系变化,说明此时干衣机除湿能力有较大富裕,干燥过程中的传热传质效率高,在开始阶段除去的是与衣物以松散方式结合的自由水分,接着再除去的是结合水.负载为 1.50 kg 时,除湿量随含水率的增大而迅速增加,但在含水率 45% 时存在一个峰值,随后呈下降趋势.从整体上来说,此负载下的除湿量较高,在此过程中除去的主要是自由水.负载为 2.25 kg 时,除湿量却小于负载为 1.50 kg 时的除湿量,主要是因为负载较大,衣物在干燥滚筒内与干燥空气接触不充分,对传热及水分的扩散产生了不利影响.同样在含水率 45% 时也存在一个峰值,后呈下降趋势.

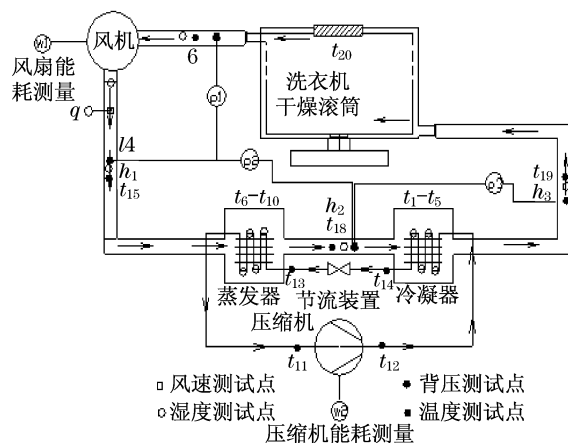


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experiment installing

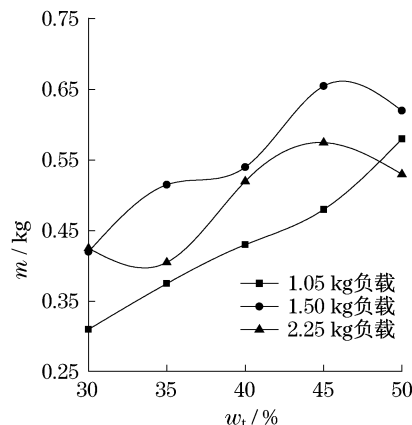


图 3 除湿量随含水率的变化

Fig.3 Change of dehumidification with moisture content

4.2 耗电量随含水率的变化

如图 4 所示,负载为 1.05 kg 时,耗电量 w 先是变化很小,后在含水率 50% 时突然增大;负载为 1.50 kg 与 2.25 kg 时,耗电量分别在 45%, 40% 时存在峰值,然后两者的耗电量呈下降趋势.出现该现象的原因是该系统在设计时,在蒸发器的出口设定了一个温度值,若干燥空气经过蒸发器后的温度高于该温度,将不再对湿物料进行干燥,热泵系统停止运行;反之,则继续运行.在负载较大、含水率较高的情况下,由于潜热的存在,水蒸气放出热量变成水,与没有潜热或潜热较小的情况相比,空气经过蒸发器后的温度变高,热泵系统提前终止运行,但此时的除湿量变小,这可以在图 3 得到验证,且耗电量也变小.所以,负载为 2.25 kg 时的耗电量小于负载为 1.05 kg 时的耗电量.

4.3 COP 随含水率的变化

热泵的 COP 反映了热泵系统的节能水平,其值

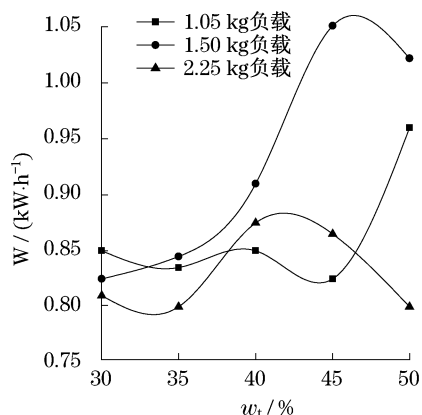
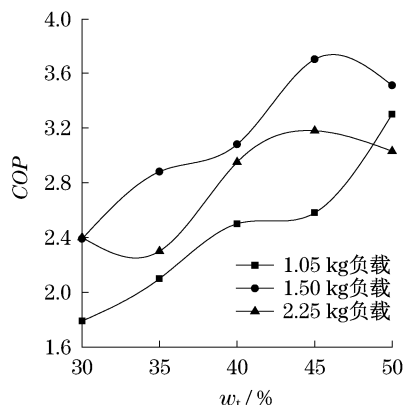


图4 耗电量随含水率的变化

Fig.4 Change of electricity consumption with moisture content

越大,节能效果越好.如图5所示,负载为1.05 kg时, COP 值持续升高,呈线性关系,可见在低负载时干衣机有较大的节能潜力.本次实验 COP 值在负载1.50 kg、含水率45%时达到最大值,高达3.8,在含水率50%时又呈下降趋势.负载为2.25 kg时, COP 在含水率45%时达到最大值.

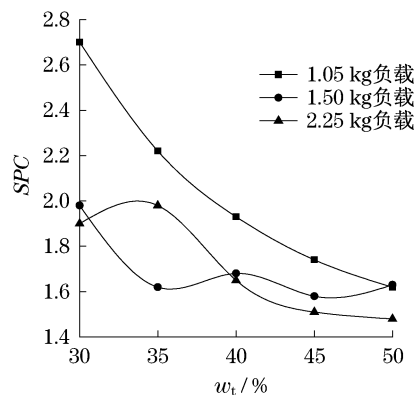
压缩机的功耗是热泵干燥系统的主要功耗,所以,图5与图4的变化趋势相似. COP 值的大小仅仅反映了热泵干衣机的节能效果,而没有考虑干衣机的整体运行情况.对于较为复杂的干衣系统,在考察其节能性时,不能仅以 COP 值作为参考.小型空气源热泵的 COP 值一般介于2.0~3.0之间,而本实验台充分利用了干燥室废气中的大量潜热和显热,可提高热泵系统的 COP 值,即提高热泵系统的能量利用率.

图5 COP 随含水率的变化Fig.5 Change of COP with moisture content

4.4 SPC 随含水率的变化

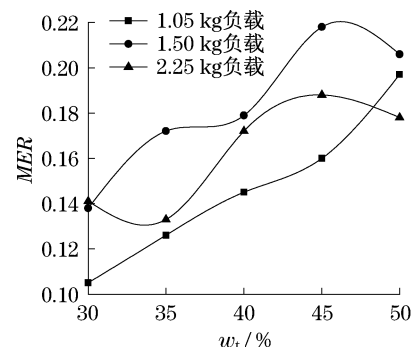
SPC 是反映热泵干燥系统能耗的指标,在不同的负载条件下, SPC 随含水率的增大均呈下降趋势,

如图6所示,在衣物含水率为40%~50%的情况下,负载为2.25 kg时的 SPC 值明显低于负载为1.05 kg和1.50 kg时的 SPC 值.说明在含水率40%~50%的情况下,热泵干燥系统除去1 kg水分所消耗的能量较低,此时水分是以自由水的形式被除去的.

图6 SPC 随含水率的变化Fig.6 Change of SPC with moisture content

4.5 MER 随含水率的变化

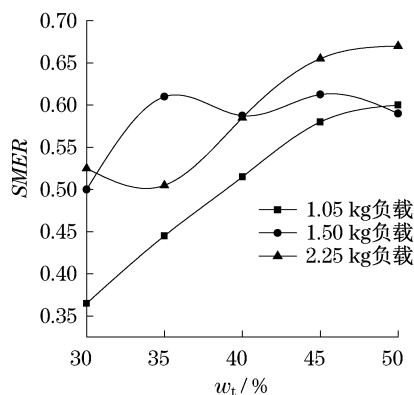
MER 反映系统的除湿速率,与除湿量及 COP 的变化趋势类似. MER 只考虑了干燥产品的输出速率而不考虑系统的整体性能.如图7所示,在负载为1.05 kg时, MER 持续增大;在负载1.50 kg、含水率45%时, MER 达到最大值;负载为2.25 kg时, MER 值也在含水率45%时达到最大值.综上所述,在含水率40%~50%时,系统的除湿速率较快.

图7 MER 随含水率的变化Fig.7 Change of MER with moisture content

4.6 SMER 随含水率的变化

作为热泵干燥系统最重要的性能指标参数 $SMER$ 能充分反映出热泵干衣机系统的能量利用率. $SMER$ 与耗电量成反比,与除湿量成正比.

如图8所示(见下页),负载为1.05 kg时, $SMER$ 随着待干衣物含水率的升高而逐渐增大,基

图8 $SMER$ 随含水率的变化Fig.8 Change of $SMER$ with moisture content

本呈线性增长.可见干衣机在低负载运行时,干衣机的除湿能力远远大于实际所除去的水分,使得设备的有效利用率不高,存在“大马拉小车”的现象,系统的干燥能力有盈余,对能源造成了一定程度的浪费.引起这种现象的原因是干燥介质空气在出干燥室后,经过与待干衣物的热湿交换,从衣物中吸湿放热,所吸收的水分使空气未能达到饱和状态,再经过蒸发器吸热析湿,空气中所含水分全部变为冷凝水析出.随着含水率的增大,干燥介质从干燥室出来后其相对湿度增大,逐渐达到蒸发器除湿上限.

负载为 1.50 kg 时,当含水率由 30% 增大到 35% 时, $SMER$ 有较大幅度增加,之后变化幅度不大.随着含水率的增加, $SMER$ 基本维持在较稳定的数值,在 0.6 kg/(kW·h) 左右浮动,说明此时干衣机在较为理想的状态运行,其能耗、除湿量及系统的整体性能匹配良好.

负载为 2.25 kg 时, $SMER$ 变化幅度较大.尽管其除湿量不是最大的,但其耗电量较小,因而有较高的 $SMER$.随着含水率的升高, $SMER$ 迅速增大,当含水率为 50% 时, $SMER$ 达到 0.68 kg/(kW·h),在此状态下,热泵干衣机的各个部件匹配良好,干燥介质从干燥室吸收的热量在蒸发器中释放,湿分也完全析出,能量利用效率大大提高;同时,这些热量通过冷凝器再次传给干燥介质,使其温度升高,达到良性循环.

从图 8 和图 5 中对比可以看出, $SMER$ 与 COP 不能同时达到最大值,这说明热泵系统与干燥系统

相互影响.综合考虑热泵干衣机的 COP , SPC , MER , $SMER$ 等性能指标,建议在实际运行中使衣物的初始含水率在 40%~50%,接近设计工况下为宜,此时整个热泵干燥系统具有较高的效率.

5 结 论

热泵干衣系统中热泵 COP 在低负载时随着含水率的增大而增大,在较高负载时, COP 在含水率为 45% 时达到最大值; $SMER$ 在低负载时随着含水率的增大而增大,在较高负载时随着含水率的增大而增大,且基本维持在较高的数值; COP 与 $SMER$ 不能同时达到最大,热泵干燥系统中热泵循环和干燥循环相互影响、相互制约.综合考虑热泵干衣机的各个性能指标,建议在实际运行中使衣物的初始含水率在 40%~50% 之间,接近设计工况下为宜,此时整个热泵干燥系统具有较高的效率.

参考文献:

- [1] 锦文.家用干衣机应该有所作为[J].家用电器,2003(11):61-62.
- [2] Chen P Y S, Helmer W A. Design and test of a solar-dehumidifier kiln with storage and heat recovery systems[J]. Forrester Product Journal, 2007, 37(5): 26-35.
- [3] Chua K J, Chou S K. A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(8/9): 1363-1379.
- [4] Baines P G, Carrington C G. Analysis of rankine cycle heat pump driers[J]. International Journal of Energy Research, 1988, 7(12): 495-510.
- [5] Yadav V, Moon C G. Fabric-drying process in domestic dryers[J]. Applied Energy, 2008, 85(2/3): 143-158.
- [6] 文键.二氧化碳热泵干燥系统的研究[D].西安:西安交通大学,2002.
- [7] Oktay Z, Arif H. Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(8): 1193-1207.

(编辑:石 瑛)