

进口空气状态参数对带热管回热制冷 除湿系统性能的影响

姜忠磊, 赵孝保, 王若琳, 张 敏, 王丽丽

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 本文进行了热管除湿系统的除湿性能实验研究, 控制入口空气状态即空气干球温度、相对湿度和空气流量3个关键因素下进行除湿量测试, 得到了热管除湿机单位功率除湿量随进口空气干球温度、相对湿度增加而增加, 随着空气流量的增加, 单位功率除湿量有最大值的试验结果. 实验研究了热管充液率为0%、15%和30%工况下的热管除湿性能, 发现热管充液率为0%、15%时的除湿量比充液率为30%时高36%~42%.

[关键词] 热管, 除湿, 充液率

[中图分类号] TK172.4 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)02-0034-05

Effects of Inlet Air State Parameters on Performance of Cooling Dehumidification System with Heat Tube Air Regenerator

Jiang Zhonglei, Zhao Xiaobao, Wang Ruolin, Zhang Min, Wang Lili

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: In this paper, the dehumidification performance of heat pipe exchanger is studied experimentally. Three key parameters of the inlet air state, namely, dry-bulb temperature, relative humidity and air flow rate are controlled in the experiment, respectively. The result shows that dehumidification capacity for Heat Tube Air Regenerator increases with the increased inlet dry-bulb temperature and relative humidity. The dehumidification capacity has a maximum value with the increase of air flow rate. The dehumidification performances of heat pipe with filling factor of 15% and 30% are analyzed in the experiment. The dehumidification capacity of heat pipe with filling factor of 15% is 36%~42% higher than that with filling factor of 30%.

Key words: heat pipe, dehumidification, filling rate

空气调节, 自其问世以来, 一开始主要是着重对温度进行控制和调节, 而对湿度的控制则相对较少, 因此除湿能耗也比较少. 然而在科学技术迅猛发展的今天, 除湿能耗已经占到空气调节总能耗的20%^[1]. 空气调节中除湿在某些特定场合, 如档案库房、生产车间、人防工程和国防工程等有严格的要求^[2], 制冷除湿能耗占比更高. 冷冻除湿机目前广泛应用于各种除湿场合, 但是空气经过蒸发器后, 温度降低, 而这部分冷空气的冷量却没有得到充分利用, 造成了能源浪费, 如果能将这部分冷量用来预冷进入蒸发器之前的空气, 那么就能大大增加除湿机的除湿量, 节约能源. Hill 和 Jeter^[3]在空调系统中应用热管热交换器, 建立了热管空调系统性能曲线模型, 计算得出热管可以使系统的除湿能力提高25%~55%. Yat H Yau^[4-6]将热管热交换器应用在热带湿热气候地区建筑暖通空调中, 进行了实验研究, 实验表明空调能耗显著降低. Jouhara H 和 Merchant H^[7]实验研究了热管换热器在空气处理机组上的应用, 实验表明能源消耗明显降低. 本文在制冷除湿系统中增加了热管换热器(HPHX), 构造了热管除湿机, 并在多种不同空气状态下进行热管除湿机实验研究, 分别分析进口空气干球温度、进口空气湿球温度以及空气流量对热管除湿机除湿性能的影响, 其理论和实验研究可以为热管除湿机的进一步发展和推广提供一定的科学依据, 促进了热管

收稿日期: 2014-05-06.

基金项目: 江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室开放课题.

通讯联系人: 赵孝保, 博士, 教授, 研究方向: 多孔介质内汽液两相流动、传热与传质以及热管技术应用. E-mail: zhao@njnu.edu.cn

节能技术的发展.

1 热管除湿系统

热管除湿系统是将制冷除湿和热管技术有机结合的一种新型除湿系统. 本文设计了热管除湿系统, 如图 1 所示. 湿空气通过滤网后, 经过热管换热器的蒸发段, 热管内的传热工质吸收气体的一部分热量, 对湿空气进行预降温, 热管内传热工质吸收热量后蒸发, 进入热管冷凝段. 预降温后的湿空气再经过制冷系统的蒸发器, 使湿空气内水分达到饱和状态并凝结, 凝结的水分通过滴水盘经管道排出. 除湿后的气体流经热管冷凝段, 热管内工质加热除湿后的空气, 释放热量后冷凝, 再回流到热管蒸发段, 实现热管内工质的循环. 除湿后的空气再流经制冷系统的冷凝器再次被加热后成为高温干燥空气, 完成除湿过程.

图 2 是传统除湿系统和加装热管的除湿系统的焓湿图. 图中加装热管之后除湿系统有一个预冷段和再热段, 制冷系统中的单位功率除湿量显著增加.

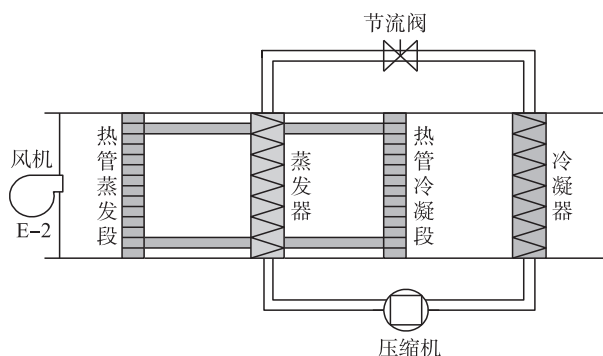


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram for the test rig

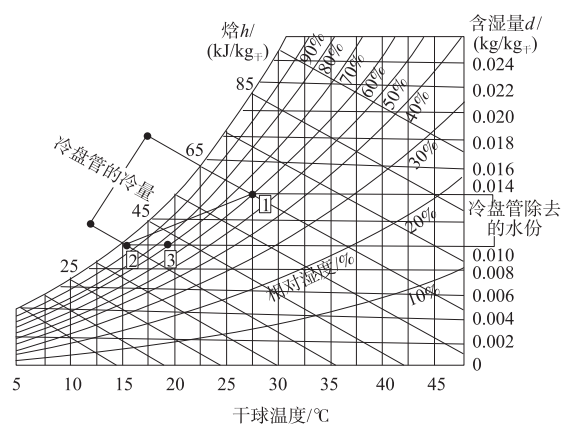


图 2(a) 传统空调系统焓湿图

Fig. 2(a) Conventional psychrometric chart

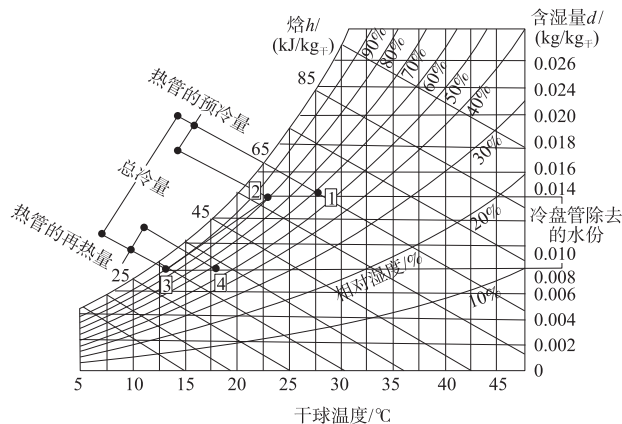


图 2(b) 加装热管空调系统焓湿图

Fig. 2(b) Add HPHX psychrometric chart

2 测试系统及评价指标

2.1 测试系统

本次热管除湿机的性能测试实验是在国家压缩机制冷协会认证的制冷空调性能测试实验室中进行的. 实验所使用到的实验系统有人工环境模拟系统、数据采集系统等, 测试精度较高, 可以较精确地模拟出实验所需要的环境状态. 人工环境模拟系统为本次实验提供了所需要的各种恒温恒湿的室内环境工况, 各种工况的实现通过空气处理系统即加湿器、除湿器等来完成. 测试间采用上送风、下回风的气流组织方式, 空气经过空气处理系统处理后通过测试间上方的穿孔板均匀送至测试间内, 从而保证气流的均匀性.

热管除湿系统除湿量测试流程图如图 3, 热管换热器放置在制冷系统蒸发器与冷凝器之间. 系统中布置 5 个测点, 分别测试空气流量、干球温度和相对湿度. 测点布置与测试参数如表 1, 测试仪表及精度如表 2. 温度及湿度测点均通过数据采集仪进行数据采集和记录. 空气流量由叶轮

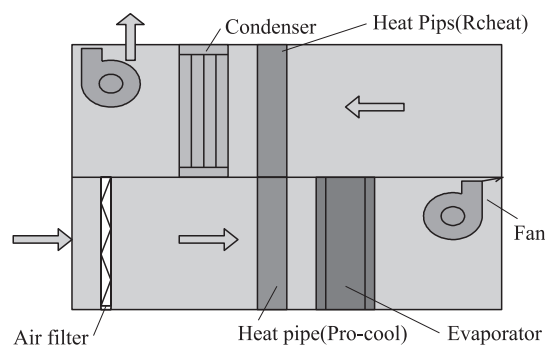


图 3 热管除湿系统测试流程图

Fig. 3 The flow chart of the system test

风速仪测得进口断面处多点流速后计算得到,凝结水量(除湿量)由滴水盘处集水器采用称重法得到. 制冷压缩机功率和风机功率由除湿系统配置的显示仪表记录得到.

表 1 测点布置及测试参数

Table 1 Measuring points and test parameters		
测点编号	测点位置	测试参数(温度、湿度、流量)
1	进口空气	空气干球温度、空气相对湿度、空气流量
2	热管蒸发段出口	空气干球温度
3	蒸发器出口	空气干球温度、空气相对湿度
4	热管冷凝段进口	空气干球温度
5	冷凝器出口	空气干球温度

表 2 测试仪表及精度

Table 2 Instruments and precision				
仪器名称	厂家	规格	精度	备注
数据采集仪	Agilent	34970A	—	
叶轮风速仪	—	testo416	$\pm(0.2\text{ m/s}+1.5\%)$	$+0.6\sim+40\text{ m/s}$
功率仪	YOKOGAWA	WT230	$\pm 0.5\%$	
干球温度计	YOKOGAWA	Pt100	$\pm(0.5+0.2\%)$	
湿球温度传感器	VAISALA	HMT100	$\pm 1\%$	

2.2 评价指标

除湿量是制冷除湿系统的凝结水量 $M/(\text{kg/h})$, 在除湿机稳定运行后采用称重法得到实验除湿量. 实验测得的干球温度与湿球温度, 确定空气的相对湿度, 通过式(1) 计算得到表冷器前后空气含湿量,

$$d=0.622\frac{\varphi P_{q,b}}{B-\varphi p_{q,b}}, \tag{1}$$

式中: B 为大气压力/Pa; $P_{q,b}$ 为饱和水蒸气压力/Pa; φ 为相对湿度/%.

由式(2) 计算得到除湿系统的计算除湿量为:

$$M=\rho_{\text{空气}}\times Q\times\Delta d, \tag{2}$$

式中: Q 为空气流量/ (m^3/h) ; $\Delta d=d_1-d_3$, d_1 是进口空气的干球温度和相对湿度确定的空气含湿量, d_3 是蒸发器后的空气干球温度和相对湿度确定的空气含湿量.

单位输入功率除湿量是评价除湿机性能指标之一, 单位输入功率除湿量越大, 说明除湿机除湿性能越好. 单位输入功率除湿量 $m/(\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{kW}))$ 为除湿量 M 与输入总功率 $P_{\text{总}}$ 之比, 输入总功率由压缩机功率和风机功率之和表示. 单位输入功率除湿量为

$$m=\frac{M}{P_{\text{总}}}=\frac{M}{P_{\text{压缩机}}+P_{\text{风机}}}. \tag{3}$$

3 试验结果及分析

3.1 进口空气相对湿度对除湿系统的影响分析

试验在不同的进口空气流量 Q 、干球温度 t_g 和湿球温度 t_s 下进行, 进口空气相对湿度 RH 由干球温度 t_g 和湿球温度 t_s 查表得到. 热管除湿系统的单位输入功率除湿量 m 的计算值和实验测试值具有很好的一致性. 试验及计算表明, 在进口空气干球温度 t_g 和空气流量 Q 一定的情况下, 热管除湿机的单位输入功率除湿量 m 随着进口空气相对湿度 RH 的增加而增加(图 4~图 6). 即, 当进口空气的其他参数相同时, 如果进口空气的相对湿度越大, 则热管除湿机的单位输入功率除湿量也越大, 除湿效果也越好. 因此, 在高含湿量的空气除湿情况下, 热管除湿机具有更好的除湿性能.

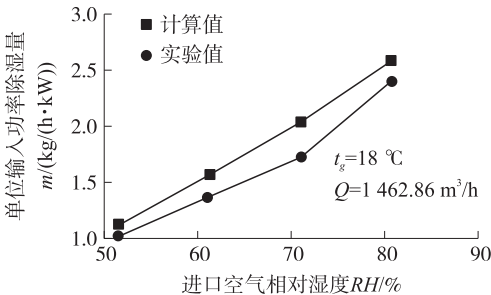


图 4 空气相对湿度对单位功率除湿量的影响
Fig.4 The influence of relative humidity for unit power dehumidification

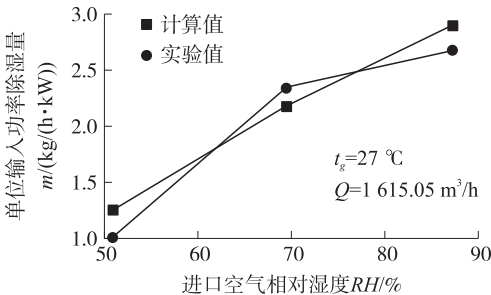


图 5 空气相对湿度对单位功率除湿量的影响
Fig.5 The influence of relative humidity for unit power dehumidification

3.2 进口空气干球温度对除湿系统的影响分析

图7表明在相同进口空气相对湿度 RH 和空气流量 Q 下,空气干球温度 t_g 对热管除湿机单位输入功率除湿量 m 的影响.图中3条曲线对应3个不同的相对湿度,热管除湿机的单位输入功率除湿量 m 随着进口空气干球温度 t_g 的增大而增大,当热管除湿机进口空气的其他参数不变时,进口空气干球温度越大,除湿机的单位输入功率除湿量也越大,除湿效果也就越理想.

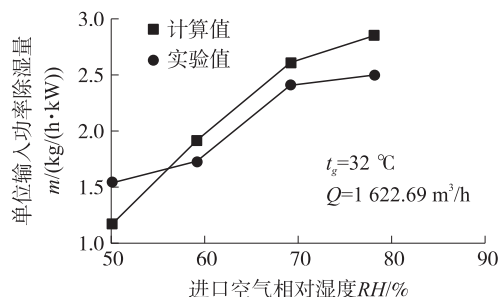


图6 空气相对湿度对单位功率除湿量的影响

Fig.6 The influence of relative humidity for unit power dehumidification

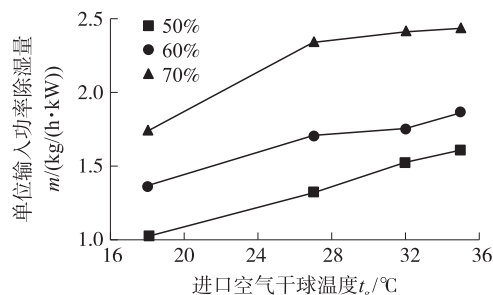


图7 空气干球温度对单位功率除湿量的影响

Fig.7 The influence of dry-bulb temperature for unit power dehumidification

3.3 进口空气流量对除湿系统的影响分析

图8表明空气流量对单位功率除湿量的影响.在相同进口空气干球温度 t_g 和相对湿度 RH 下,热管除湿系统的单位输入功率除湿量 m 随空气流量 Q 的增大而增大,但在空气流量超过一定值后,单位输入功率除湿量 m 随空气流量 Q 的增大而减小,存在一个最佳空气流量值 $Q_{最佳}$.当 $Q < Q_{最佳}$ 时,空气流量越大,意味着单位时间内从湿空气中去除的水分越多,单位输入功率除湿量越大;当 $Q > Q_{最佳}$ 时,流过热管除湿机的空气在流出换热器时未能充分换热和除湿,导致单位输入功率除湿量减小.

3.4 热管换热器的充液率对除湿性能的影响

热管换热器内合适的充液率可以保证蒸发段的液池和管壁液膜内的液体工质不断润湿壁面,改善壁温的均匀性,提高换热系数,从而使得热管换热器的换热性能得到充分的发挥.实验研究了热管充液率为0%、15%和30%情况下的热管除湿机特性.图9是干球温度为27 °C、空气流量1 400 m³/h下3种热管充液率下单位输入功率除湿量随进口空气相对湿度的变化,热管换热器的充液率为15%时的单位输入功率除湿量比充液率30%时要高36%~42%.充液率过高时,会出现管壁液膜过厚的现象,回流液体和蒸汽相互接触,随气液间相对速度提高,气液界面上的剪切力会阻碍回流液体的流动,高速蒸汽流会携带回流液返回到热管的冷凝段,进而削弱热管换热的能力.

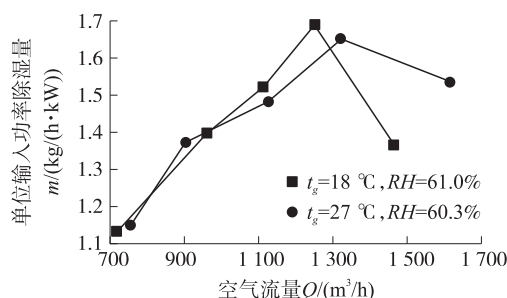


图8 空气流量对单位功率除湿量的影响

Fig.8 The influence of air flow for unit power dehumidification

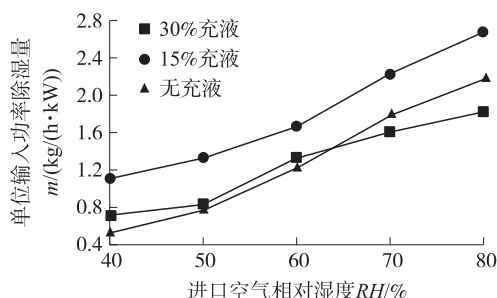


图9 3种充液率时热管除湿机的性能对比

Fig.9 The influence of filling rate for unit power dehumidification

4 结论

- (1) 在普通除湿系统中设置热管换热器可以显著提升制冷除湿性能,降低压缩机功率消耗.
- (2) 进口空气相对湿度越高,干球温度越高,热管除湿机的单位输入功率除湿量越大,热管除湿效果越好.

(3)单位输入功率除湿量随着空气流量的增加达到一个最大值,之后随着空气量的增加,单位输入功率除湿量会下降。

(4)热管充液量过大时,热管除湿机的除湿性能下降,因此热管除湿系统在保证热管换热器正常工作的情况下,充液率应取小值。

[参考文献](References)

- [1] 朱培根,王建勋,朱志平,等. 热管在调温除湿机中的应用研究[J]. 暖通空调,2006,36(2):56-59.
Zhu Peigen, Wang Jianxun, Zhu Zhiping, et al. Application of heat pipe technology to temperature adjustment dehumidifiers [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2006, 36(2): 56-59. (in Chinese)
- [2] 朱志平,刘宇峰. 一种新型除湿机的运用[J]. 流体机械,2002(20):251-254.
Zhu Zhiping, Liu Yufeng. The use of a new type of dehumidifier[J]. Fluid Machinery, 2002(20): 251-254. (in Chinese)
- [3] Hill J M, Jeter S M. The use of heat pipe heat exchangers for enhanced dehumidification [C]//Proceedings of the ASHRAE Winter Meeting. New Orleans: ASHRAE Transactions, 1994, 100(1): 91-102.
- [4] Yau Y H. Application of a heat pipe heat exchanger to dehumidification enhancement in a HVAC system for tropical climates—a baseline performance characteristics study[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(2): 164-171.
- [5] Yau Y H. Experimental thermal performance study of an inclined heat pipe heat exchanger operating in high humid tropical HVAC systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 143-152.
- [6] Yau Y H, Ahmadzadehtalatpeh M. A review on the application of horizontal heat pipe heat exchangers in air conditioning systems in the tropics[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(2): 77-84.
- [7] Jouhara H, Merchant H. Experimental investigation of a thermosyphon based heat exchanger used in energy efficient air handling units[J]. Energy, 2012, 39(1): 82-89.

[责任编辑:丁 蓉]