

环绕式回路热管除湿系统性能实验研究

曹广懿德, 陈 帅, 胡 超

上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘 要:目的 针对传统冷凝除湿系统能耗较大的问题, 提出使用环绕式回路热管除湿系统提高除湿能效的方法, 并探究进口空气状态参数对该除湿系统的性能影响。方法 首先, 在恒温恒湿实验室中, 搭建环绕式回路热管除湿系统实验测试台架; 其次, 通过环绕式回路热管除湿系统的预冷实验, 分析其在除湿过程中的节能作用; 最后, 分析进口空气风速、干球温度和相对湿度等状态参数对环绕式回路热管除湿系统除湿性能的影响。结果 实验结果表明: 环绕式回路热管除湿系统可以对进口空气起到预冷作用, 随着进口空气温度的增加, 预冷温度与节能量逐渐增大, 表明预冷作用降低了除湿过程中的系统总能耗; 另外, 该系统的单位输入功率除湿量随着进口空气风速的增加呈现先增加后减少的趋势, 随着进口空气干球温度和相对湿度的增加而增加。结论 环绕式回路热管除湿系统可以在除湿过程中通过预冷作用起到良好的节能效果; 在其他参数不变的条件下, 进口空气干球温度或相对湿度的增加都会提升除湿系统的除湿能效; 同时, 为保证除湿系统具有较高的除湿能效, 需要控制进口空气风速在 1.5 ~ 2.0 m/s 区间内。

关键词:环绕式回路热管; 进口空气状态参数; 除湿

中图分类号:TU83 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.016

Experimental Study on the Performance of a Wraparound Loop Heat Pipe Dehumidification System

CAO Guangyide, CHEN Shuai, HU Chao

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Objective Aiming at the large energy consumption of traditional condensing dehumidification systems, this study proposed a method to improve the dehumidification efficiency using a wraparound loop heat pipe dehumidification system and investigated the influence of inlet air state parameters on the performance of this dehumidification system. **Methods** Firstly, the experimental test bench of the wraparound loop heat pipe dehumidification system was constructed in a constant temperature and humidity laboratory. Secondly, through the pre-cooling experiment of the wraparound loop heat pipe dehumidification system, the energy-saving effect during the dehumidification process was analyzed. Finally, the influence of state parameters such as inlet air velocity, dry bulb temperature, and relative humidity on the dehumidification performance of the wraparound loop heat pipe dehumidification system was analyzed. **Results** The experimental results showed that the wraparound loop heat pipe dehumidification system can pre-cool the inlet air, and with the increase of inlet air temperature, the pre-cooling temperature and energy-saving amount gradually increase, indicating that the pre-cooling effect reduces the total energy consumption of the system during the dehumidification process. Additionally, the dehumidification capacity per unit input power of the system showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of inlet air velocity, while it increases with the increase of inlet air dry bulb temperature and relative humidity. **Conclusion** The wraparound loop heat pipe dehumidification system can achieve good

收稿日期:2023-05-25 **修回日期:**2023-08-18 **文章编号:**1672-058X(2025)05-0124-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51736007)。

作者简介:曹广懿德(1996—), 男, 安徽明光人, 硕士, 从事建筑能源应用技术研究。

通信作者:陈帅(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事建筑能源应用技术研究。Email:shrechen@126.com。

引用格式:曹广懿德, 陈帅, 胡超. 环绕式回路热管除湿系统性能实验研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5): 124-130.

CAO Guangyide, CHEN Shuai, HU Chao. Experimental study on the performance of a wraparound loop heat pipe dehumidification system[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 124-130.

energy-saving effects through pre-cooling during the dehumidification process. Under the condition of unchanged other parameters, the increase of inlet air dry bulb temperature or relative humidity will enhance the dehumidification efficiency of the system. Meanwhile, to ensure a higher dehumidification efficiency of the dehumidification system, it is necessary to control the inlet air velocity within the range of 1.5 m/s ~ 2.0 m/s.

Keywords: wraparound loop heat pipe; inlet air state parameters; dehumidification

1 引言

当前我国建筑运行的总能耗约占全国能源消费总量的21%^[1]。暖通空调在公共建筑中的能耗占比超过50%,降低空调系统运行能耗是暖通空调领域实现碳达峰、碳中和目标的重要途径。为确保顺利实现双碳目标,应加大绿色低碳技术的研发与推广^[2]。空气湿度处理是暖通空调系统中重要的一环,提高其能效比有利于暖通空调系统的节能运行^[3]。

传统暖通空调系统采用冷凝除湿的方法,先把空气冷却到露点温度,析出空气中的水分,再对其再热降低相对湿度,以达到所需的温、湿度。但这种除湿方式存在冷热抵消的问题^[4]。热管除湿系统能够有效解决这个问题,因此近年来热管除湿系统受到越来越多的研究和关注。例如,Ong^[5]分析了各种空调系统在冷却和除湿方面的研究进展,发现热管换热器可有效增强除湿和降低空调运行成本,尤其是在炎热潮湿的热带国家;Yau^[6]通过实验研究了用于热带建筑暖通空调系统的热管湿热比,发现其受到进口空气状态的3个关键参数影响,即干球温度、相对湿度和空气速度。研究表明热带暖通空调系统安装热管换热器可以显著加强除湿效果;Jouhara等^[7]研究了空气处理装置中热管的效率与气流速度之间的关系,效率被定义为热管传递热量与最大理论传热量的比率,研究结果表明:在1.65~2.5 m/s的风速范围内,效率随着风速的增高而降低;李新梅等^[8]探究了U型重力热管换热器的工作特性,对迎风速度和回风温度进行了调整,通过测量U型热管换热器前后的各项参数,并据此计算换热温差与换热效率;姜忠磊等^[9]进行了泵驱动热管除湿系统的除湿性能实验研究,控制进口空气状态和热管充液率进行除湿量测试,得到了热管除湿机的除湿性能变化规律。

以上研究表明:在暖通空调系统中采用环绕式热管装置可以显著提高空调系统的除湿性能并降低能耗,尤其是在炎热潮湿的环境中。进口空气的干球温度、相对湿度和空气速度都是影响环绕式热管系统性能的关键参数,可以通过调整这些参数来改变热管的换热效率和除湿性能。总之,现有研究结果为热管在

空调系统中的应用提供了重要的理论和实验基础,揭示了热管在除湿方面的性能变化规律。但目前很多研究都是针对单管结构的热管进行的,回路结构的热管相关研究不足。回路结构的热管由于其内部工质流动速度明显高于单管结构热管,因此其传热效率明显高于单管结构的热管^[10]。基于此,本文对回路结构的环绕式热管除湿系统展开研究。

将围绕进口空气状态对环绕式回路热管除湿系统增强除湿性能的影响开展研究。从提升暖通空调系统除湿效果的任务出发,在恒温恒湿实验室中针对环绕式回路热管除湿系统进行了实验,对不同进口空气风速、进口空气温度和进口空气相对湿度进行实验测试;分析不同运行工况下环绕式热管换热器的性能特性;通过实验研究更加清晰地认识热管除湿系统处理空气湿度的规律,为暖通空调系统中利用热管装置对空气湿度处理研究提供指引。

2 环绕式回路热管除湿系统介绍

传统的暖通空调除湿系统包括一个表冷器和一个再热器,分别用于冷却空气和再热过冷空气,以除去空气中多余的水蒸气,使空气达到所需的温度和湿度。加装环绕式回路热管装置后,热管装置对空气进行无能耗的预冷和再热,增强系统的除湿能力并减少能耗。环绕式回路热管是一种回路闭合环形热管,热量通过热管内部工质的相变从蒸发段传递到绝热段再到冷凝段。在实验测试管道中,蒸发段布置在表冷器之前,热管除湿系统的冷凝段布置在表冷器之后,热管的绝热段连接蒸发段和冷凝段,绝热段布置在表冷器的侧面。原理如图1所示。

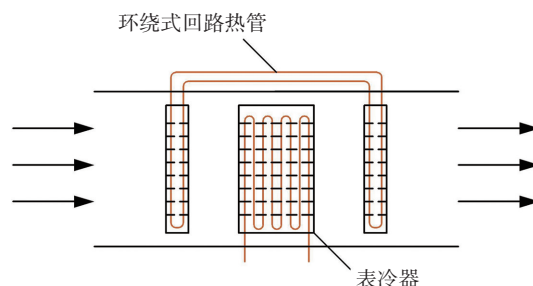
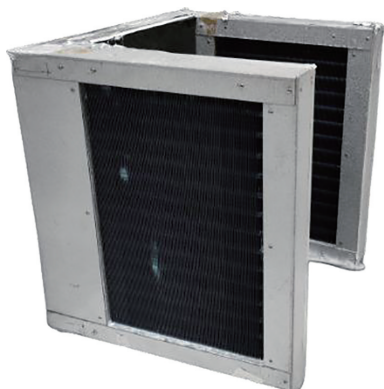


图1 环绕式回路热管除湿系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of wraparound loop heat pipe dehumidification system

首先,较高温度的进口空气流经环绕式回路热管的蒸发段一侧,导致热量被吸收,管内的流体变成蒸汽并移动到绝热段,然后到冷凝段,这一过程导致通过环绕式回路热管蒸发段的空气温度降低,减少了冷却耗能;然后,来自表冷器的冷空气流经环绕式回路热管冷凝段,导致管内的气态工质冷凝并释放热量,这个过程中气态工质变回液态并流向环绕式回路热管蒸发段一侧。由于除湿过程中热管蒸发段和冷凝段之间存在温差,工质的相变过程会不断重复。环绕式回路热管不仅可以通过吸收表冷器处理后空气中的冷量来进行预冷,而且可以回收进口空气的热量进行再热。预冷过程减少了表冷器的能量消耗,再热过程降低了出口处过高的相对湿度,提升了暖通空调系统的除湿性能。

在本研究中,为研究环绕式回路热管除湿系统的性能,设计了环绕式回路热管除湿系统。环绕式回路热管除湿系统是在表冷器基础上加装了环绕式回路热管后形成的一体式装置。实验用到的环绕式回路热管及表冷器的实物图如图 2 所示。实验中使用的环绕式回路热管是热虹吸管,热虹吸管又称重力热管,依靠重力驱动管内工质的回流,与普通热管不同在于内部没有吸液芯,不依靠毛细力驱动工质回流。实验中使用的环绕式回路热管由铜管制成,采用双排结构,排列方式为叉排,内部工质为 R410A。其外壳基于表冷器的尺寸制作,蒸发段和冷凝段长度为 350 mm,绝热段长度为 390 mm。热管管外径为 12.7 mm,管间距为 31.75 mm。热管每排有 14 根热管,每侧总根数为 28 根。蒸发段和冷凝段两侧的铜管与固定孔距的铝制波纹翅片组成翅片管形式,翅片增大了铜管与空气的接触面积,翅片厚度为 0.16 mm,翅片间距为 2.16 mm。本次实验针对此结构的环绕式回路热管除湿系统,分析其在除湿过程中的节能作用,并探究进口空气状态参数对其除湿性能的影响。



(a) 除湿热管系统的热管部分



(b) 除湿热管系统的表冷器部分

图 2 环绕式回路热管除湿系统组成图

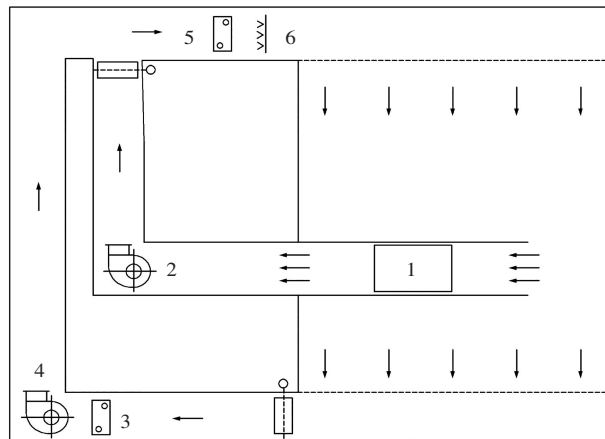
Fig. 2 Composition of wraparound loop heat pipe dehumidification system

3 实验系统设计与评价指标分析

3.1 实验系统设计

本次环绕式回路热管除湿系统的性能测试实验是在恒温恒湿实验室中进行的。恒温恒湿实验室是用于测试装置在一定温度和湿度条件下性能的实验室,包括水循环系统、空气循环系统、自控系统和环境室。本次实验使用的恒温恒湿实验室测试精度较高,相对湿度精度为 $\pm 0.5\%$,温度精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。恒温恒湿实验室可以精确地模拟本次除湿性能实验所需要的进口空气状态。进口空气状态是通过 PID 原理控制空气处理系统中热湿处理设备来实现的,即利用空气处理系统中冷、热水盘管、电加湿器协调控制来完成^[11]。

为保证进气空气状态稳定,环境室送风方式采用上送下回风的孔板送风方式。空气经过处理后通过恒温恒湿环境室上方的孔板均匀送至测试间内,从而保证房间气流的均匀性,即保证了进气空气状态的稳定^[12]。环绕式除湿热管除湿系统的实验系统原理图如图 3 所示。



1. 环绕式回路热管除湿系统; 2. 回风风机; 3. 冷水盘管; 4. 送风风机; 5. 热水盘管; 6. 蒸汽加湿。

图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

系统布置在恒温恒湿室的实验台架上,测试系统通过铝箔岩棉保温管道与实验室风量测量段相连,岩棉材料具有良好的保温隔热性能^[13]。实验需要测量流经测试系统空气的流量,测试装置进、出口位置的干球温度和湿球温度,表冷器进口位置的干球温度等。除湿系统进、出口处的干球温度和湿球温度通过采样装置采样,采样装置可以采样测点区域内足够多的点,保证采样的准确性。进口空气的采样装置布置在恒温恒湿室内实验装置进气位置,出口空气的采样装置布置在管道内实验装置出口位置。采样后的空气使用 K 型热电偶干湿球温度计测量干球温度和湿球温度。表冷器进口空气温度使用热电偶温度计测量。空气流量由喷嘴流量计测得,根据空气流量计算得到管道内的空气流速。除湿量根据除湿系统前后空气含湿量计算得到。各测点的温度及空气流量均通过数据采集仪进行采集和记录。测试仪器及精度如表 1 所示。

表 1 测试仪器及精度		
Table 1 Test instruments and accuracies		
测量参数	测量仪器仪表	精 度
温度	K 型热电偶温度计	±0.1 ℃
风量	喷嘴流量计	0.5 级
压力降	电子压差计	±0.05 hPa
大气压力	水银气压表	±0.3 hPa

3.2 评价指标分析

除湿系统的评价指标包括名义除湿量与单位功率除湿量。名义除湿量即在名义工况下,除湿系统运行 1 h 凝结水量的名义值,反映了除湿系统的除湿能力,单位为 kg/h。

名义除湿量以单位时间内制冷除湿系统的冷凝水量表示。名义除湿量测定可以通过冷凝水称重计量和空气状态变化计算两种方式得到。空气状态变化计算除湿量先根据试验测得的空气干球温度和湿球温度确定空气的相对湿度。

根据湿空气的物理性质,湿空气中所含水蒸气质量与干空气质量之比,称为湿空气的含湿量,通过式 (1) 计算出空气的含湿量:

$$d=622\frac{\varphi P_q}{B-\varphi P_q}$$
 (1)

式 (1) 中, d 为含湿量,单位为 g/kg; B 为大气压力,单位为 pa; P_q 为水蒸气分压力,单位为 pa; φ 为相对湿度,单位为 %RH。

根据 GB/T 40397-2021,户式新风除湿机中的除湿量计算式^[14],可通过式 (2) 计算得到热管除湿系统的名义除湿量:

$$M=\frac{3\ 600L\rho(d_1-d_2)}{1\ 000}$$
 (2)

式 (2) 中, M 为名义除湿量,单位为 kg/h; d_1 为环绕式回路热管系统进口空气含湿量,单位为 g/kg; d_2 为环绕式回路热管系统出口空气含湿量,单位为 g/kg; L 为空气流量,单位为 m³/s; ρ 为空气密度,单位为 kg/m³。

根据 GB/T 19411-2003,除湿机对单位输入功率除湿量的定义,在名义工况下,除湿量与输入总功率之比,反映了除湿系统的能量利用效率情况^[15]。

通过式 (3) 计算得到热管除湿系统的单位输入功率除湿量 M' :

$$M'=\frac{M}{P}$$
 (3)

式 (3) 中, M 为名义除湿量,单位为 kg/h; M' 为单位输入功率除湿量,单位为 kg·(h·kW)⁻¹; P 为环绕式回路热管除湿系统输入总功率,单位为 kW。

4 结果分析与讨论

4.1 节能分析

在进口空气风速为 1.5 m/s、相对湿度为 60% 工况下,改变进口干球温度,对环绕式回路热管除湿系统进行实验测试。记录进口空气经热管除湿系统热管蒸发段预冷作用后的温度变化,如图 4 所示。

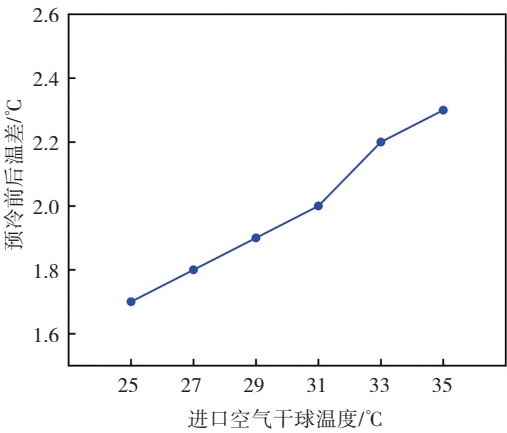


图 4 除湿系统对空气的预冷作用

Fig. 4 Pre-cooling effect of dehumidification system on air

由图 4 可知:空气经过热管除湿系统的热管蒸发段,温度均有不同程度的下降,可见热管除湿系统对空气起到预冷作用,且进口空气温度越高,预冷效果越强。随着进口温度的上升,热管除湿系统蒸发端和冷凝端的温差逐渐增大,换热效果随之增大。

由于预冷和再热之间必须存在能量平衡,因此焓的变化值将始终相等。在预冷过程没有冷凝的情况下,预冷与再热的温差值也相同。根据 GB/T 40397-2021,户式新风除湿机中的换热量计算式^[14],可通过式 (4) 计算得到预冷过程中每小时的换热量,即预冷过程的节能量:

$$E=L\rho\Delta ht$$
 (4)

式(4)中, E 为节能量,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; t 为运行时间,单位为 h ; L 为空气流量,单位为 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; ρ 为空气密度,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Δh 为空气焓值变化量,单位为 $\text{kJ}\cdot(\text{kg})^{-1}$ 。

由表2得出:随着进口空气温度的增加,预冷温差逐渐增加,节能量逐渐增加。除湿系统预冷减少了表冷器的负荷,同时,再热减少了再热设备的负荷。因此除湿过程的总能耗和峰值需求均降低,环绕式回路热管除湿系统起到了节能效果。因此进口空气温度越高,进口空气与除湿系统预冷段的翅片管之间的温差也就越大,除湿系统对空气的预冷效果越好,节能效果也随之递增。

表 2 预冷过程的节能量

Table 2 Energy savings in the pre-cooling process

进口空气干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	预冷温差/ $^{\circ}\text{C}$	节能量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$
25	1.7	0.407
27	1.8	0.462
29	1.9	0.525
31	2.0	0.593
33	2.2	0.703
35	2.3	0.793

4.2 除湿性能实验结果分析

4.2.1 进口空气风速对除湿性能的影响

在相同的进口空气干球温度和相对湿度条件下,改变进口空气风速,对环绕式回路热管除湿系统进行实验测试。控制进口空气干球温度为 29°C 、相对湿度为60%,改变进口空气风速为 $0.5\sim 3\text{ m/s}$ 。风速实验测试得到的除湿结果如表3所示。

表 3 风速实验测试结果

Table 3 Test results of air velocity experiment

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	除湿量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	输入功率/ kW	单位输入功率除湿量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\cdot\text{kW})^{-1}$
0.5	1.461	1.256	1.164
1	2.180	1.751	1.245
1.5	2.220	2.068	1.074
2	2.378	2.401	0.990
2.5	2.353	2.562	0.919
3	2.181	2.668	0.817

为进一步探究进口空气风速对系统的除湿性能影响,在不同的相对湿度工况下,进行除湿性能实验。实验得到的热管除湿系统单位输入功率除湿量随进口空气风速的变化如图5所示。

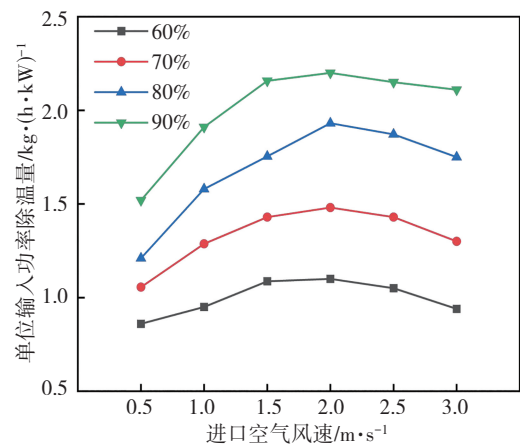


图 5 进口空气风速对系统除湿量的影响

Fig. 5 Influence of inlet air velocity on system dehumidification

进口空气风速较小时,空气与环绕式回路热管除湿系统的翅片铜管接触的空气量较少,且与翅片铜管间的对流换热系数较小,除湿系统未能有效同空气换热,导致除湿量较小。

随着风速的逐渐增加,与环绕式回路热管除湿系统铜管接触的空气量和对流换热系数增加,除湿量也随之增加。但当风速继续增加,流速较高的空气未能与翅片铜管充分换热就流出除湿系统,导致单位输入功率除湿量开始下降。

由图5可知:环绕式回路热管除湿系统单位输入功率除湿量随着进口空气风速的增加呈现先增加后减少的现象,且进口空气风速为 $1.5\sim 2.0\text{ m/s}$ 区间时,本热管除湿系统获得最大的单位输入功率除湿量。

4.2.2 进口空气干球温度对系统除湿性能的影响

在相同的进口空气风速和相对湿度条件下,改变进口空气干球温度,对环绕式回路热管除湿系统进行实验测试。

控制进口空气风速为 1.5 m/s 、相对湿度为60%,改变进口空气干球温度为 $25^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。温度实验测试得到的除湿结果如表4所示。

表 4 温度实验测试结果

Table 4 Test results of temperature experiment

温度/ $^{\circ}\text{C}$	除湿量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	输入功率/ kW	单位输入功率除湿量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\cdot\text{kW})^{-1}$
25	1.347	1.729	0.779
27	1.784	1.800	0.991
29	2.220	2.043	1.087
31	3.892	2.949	1.320
33	4.319	3.080	1.402
35	5.443	3.468	1.569

在不同的相对湿度工况下,进行进口空气风速对环绕式除湿热管除湿系统的除湿性能实验。实验得到的热管除湿系统单位输入功率除湿量随进口空气干球温度的变化如图 6 所示。

由图 6 可知:热管除湿系统单位输入功率除湿量随着进口空气干球温度的增加而增加。在进口空气相对湿度相同时,空气的干球温度越高,空气的含湿量越大,热管除湿系统的单位输入功率除湿量也越大,除湿效率越高。

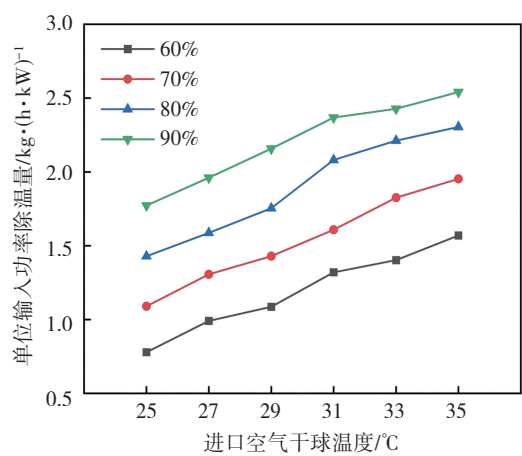


图 6 进口空气干球温度对系统除湿量的影响

Fig. 6 Influence of inlet air dry bulb temperature on system dehumidification

4.2.3 进口空气相对湿度对系统除湿性能的影响

在相同的进口空气风速和干球温度条件下,改变进口空气的相对湿度,对环绕式回路热管除湿系统进行实验测试。控制进口空气风速为 1.5 m/s、干球温度为 29 ℃,改变进口空气相对湿度为 60%~90%。实验测试得到的除湿结果如表 5 所示。

表 5 湿度实验测试结果

Table 5 Test results of humidity experiment

相对湿度/ %RH	除湿量/ kg·h ⁻¹	输入功率/ kW	单位输入功率除湿量/ kg·(h·kW) ⁻¹
60	2.220	2.043	1.087
70	3.783	2.615	1.430
80	4.925	2.808	1.754
90	6.595	3.056	2.157

在不同的干球温度工况下,进行进口空气风速对环绕式除湿热管除湿系统的除湿性能实验。实验得到

的热管除湿系统单位输入功率除湿量随进口空气相对湿度的变化如图 7 所示。

由图 7 可知:热管除湿系统单位输入功率除湿量随着进口相对湿度的增加而增加。在进口空气干球温度和进口空气风速相同时,空气相对湿度越高,空气含湿量越大,热管除湿系统的单位输入功率除湿量也越大,除湿效率越高。

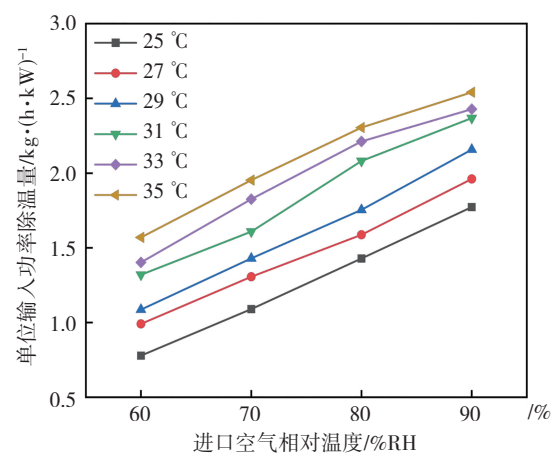


图 7 进口空气相对湿度对系统除湿量的影响

Fig. 7 Influence of inlet air relative humidity on system dehumidification

5 结 论

环绕式回路热管除湿系统可以通过预冷作用减少表冷器的负荷,相比传统冷凝除湿方式降低了除湿过程的能耗,具有良好的节能效果。在相同进口空气干球温度和相对湿度条件下,环绕式回路热管除湿系统的单位输入功率除湿量随着进口风速的增大先增大后减少,且进口空气风速为 1.5~2.0 m/s 区间时,本热管除湿系统获得最大的单位输入功率除湿量。在相同进口风速和进口空气相对湿度下,进口空气干球温度越高,环绕式回路热管除湿系统的单位输入功率除湿量越大,热管除湿能效越好。

参考文献(References):

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2023[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
Building Energy Research Center of Tsinghua University. Annualreport on China building energy efficiency 2023[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023.

[2] 陈欢, 牟琰. “双碳”目标下重庆市碳排放影响因素及其预

- 测研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 7-14.
- CHEN Huan, MU Ying. Research on the influencing factors and forecasting of carbon emissions in Chongqing under the “double carbon” target[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 7-14.
- [3] 刘晓华, 张涛, 江亿. 空气除湿处理过程性能改善分析: 从理想到实际流程[J]. 科学通报, 2015, 60(27): 2631-2639.
- LIU Xiao-hua, ZHANG Tao, JIANG Yi. Performance improvement in air dehumidifiers: From ideal to actual[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(27): 2631-2639.
- [4] 高俊峰. 舒适性空调系统不同除湿方式的经济性分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(15): 157-158.
- GAO Jun-feng. Economic analysis on different dehumidification methods of comfort-oriented air-conditioning system[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(15): 157-158.
- [5] ONG K S. Review of heat pipe heat exchangers for enhanced dehumidification and cooling in air conditioning systems[J]. Low-Carbon Technologies, 2016, 11(3): 416-423.
- [6] 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]. Thermal Sciences, 2007, 46(2): 164-171.
- [7] JOUHARA H, MESKIMMON R. Experimental investigation of wraparound loop heat pipe heat exchanger used in energy efficient air handling units[J]. Energy, 2010, 35(12): 4592-4599.
- [8] 李新梅, 王克勇. U 形热管换热器对空调箱机组除湿性能影响的试验研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(5): 59-61, 13.
- LI Xin-mei, WANG Ke-yong. Experimental study on the influence of U-type heat pipe exchanger on the dehumidification performance of air-conditioning unit[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2011, 11(5): 59-61, 13.
- [9] 姜忠磊, 赵孝保, 王若琳, 等. 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[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2014, 14(2): 34-38.
- JIANG Zhong-lei, ZHAO Xiao-bao, WANG Ruo-lin, et al. Effects of inlet air state parameters on performance of cooling dehumidification system with heat tube air regenerator[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2014, 14(2): 34-38.
- [10] 段炼, 徐永田, 韩吉田, 等. 两相闭式热虹吸管内不同表面蒸发器的沸腾换热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(5): 1032-1038.
- DUAN Lian, XU Yong-tian, HAN Ji-tian, et al. Experimental study on boiling heat transfer of different surface evaporators in two-phase-closed thermosyphon[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(5): 1032-1038.
- [11] 张涛, 刘晓华, 张海强, 等. 温湿度独立控制空调系统设计方法[J]. 暖通空调, 2011, 41(1): 1-8.
- ZHANG Tao, LIU Xiao-hua, ZHANG Hai-qiang. Design method of temperature and humidity independent control air conditioning system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011, 41(1): 1-8.
- [12] 齐昊, 李瑛, 吴一鸣, 等. 局部孔板送风人工环境的气流组织数值模拟与试验研究[J]. 流体机械, 2021, 49(9): 83-89.
- QI Hao, LI Ying, WU Yi-ming, et al. Numerical simulation and experimental study on air distribution with local perforated ceiling air supply in artificial environment room[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(9): 83-89.
- [13] 甘靓月. 恒温恒湿实验室墙体保温施工技术要点[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(12): 67-69.
- GAN Liang-yue. Key points of thermal insulation construction technology in wall of constant temperature and humidity laboratory[J]. Building Technology Development, 2022, 49(12): 67-69.
- [14] GB/T 40397-2021, 户式新风除湿机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- GB/T 40397-2021, Household outdoor air dehumidifier[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [15] GB/T 19411-2003, 除湿机[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- GB/T 19411-2003, Dehumidifiers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.

责任编辑: 李翠薇