

热虹吸管换热器应用于除湿系统的节能性分析

王佳敏¹, 夏学鹰¹, 李 栋¹, 赵孝保¹, 苏晓翔²

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

(2. 联发智能科技股份有限公司, 福建 厦门 361000)

[摘要] 对加装热虹吸管换热器的除湿机与普通除湿机的性能进行了对比试验研究,并以环境温度 27 ℃,空气相对湿度 60%工况为例,对比分析了系统除湿性能及节能性。实验结果表明,不同雷诺数条件下,与普通除湿机相比,加装热虹吸管换热器的除湿机除湿量可提高至少 24%,除湿能耗比降低至少 20%,析湿系数提高 30%以上,能量利用率提高至少 4.3 倍。结果表明,加装热虹吸管换热器的除湿机具有更高的除湿性能且节能效果显著。然后,进一步分析了加装热虹吸管换热器的除湿系统除湿量、雷诺数与能量利用率之间的关系。最后,拟合得到了三者的试验关联式。

[关键词] 热虹吸管换热器,除湿量,除湿能耗比,析湿系数,能量利用率

[中图分类号] TU834.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)04-0001-07

Energy-saving Analysis of Thermosiphon Heat Exchanger Used in Dehumidification System

Wang Jiamin¹, Xia Xueying¹, Li Dong¹, Zhao Xiaobao¹, Su Xiaoxiang²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Lianfa Intelligent Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: A comparative experimental study on the performance of dehumidifier equipped with thermosiphon heat exchanger and regular dehumidifier is conducted and a comparative analysis is carried out concerning the dehumidifying performance and energy saving property under the operating condition in which the ambient temperature equals to 27 ℃ and the air relative humidity is 60%. The experimental results indicate that under different Reynolds number conditions, the dehumidification amount of dehumidifier equipped with thermosiphon heat exchanger increases at least 24% and the specific power consumption decreases at least 20% compared with the regular dehumidifier. Besides, the moisture separation coefficient increases by more than 30% and the energy utilization is enhanced by at least 4.3 times. The result show that the dehumidifier equipped with thermosiphon heat exchanger has higher dehumidification performance and remarkable energy-saving effect. In addition, the relation among the dehumidification amount, Reynolds number and energy utilization is further analyzed and the correlation of the three factors is obtained.

Key words: thermosiphon heat exchanger, dehumidification amount, specific power consumption, moisture separation coefficient, energy utilization

空气湿度是衡量人体热舒适性的重要指标,针对湿负荷较大的场所,通常采用的除湿方式有冷却除湿、溶液除湿等。冷却除湿是先进行降温除湿^[1],然后进行再热处理,所使用的再热设备大多为电加热器^[2]。该除湿方式降温、再热过程均需消耗能量,且相互抵消,浪费能量。溶液除湿过程是基于除湿溶液与空气中水蒸气分压力之差,推动水蒸气在气相与液相间的迁移,进而达到除湿效果^[3]。但需要通过加热再生才能实现溶液的循环利用,且其设备复杂,体积庞大,设备内部溶液会腐蚀金属^[4]。因此研究节能型的除湿技术具有重要的科学意义和工程应用价值。

近年来,热虹吸管以其良好的均温性和高效的传热性能,已逐渐应用于除湿领域。Hill 等^[5]研究了热

管热交换器应用于空调系统中的除湿特性,指出热管可使系统的除湿能力提高 25%~55%. Yau 等^[6-8]对热带湿气候地区热管热交换器应用于除湿系统的可行性进行了研究. 实验结果表明,加装热管换热器后,空调能耗可显著降低. Jouhara 等^[9]和朱培根等^[10]研究了热管换热器在空气处理机组上的应用. 实验表明,热管调温除湿机单位电能除湿量比普通除湿机提高 47%,能源消耗明显下降.

本文设计制造了热虹吸管换热器,将其应用于普通冷冻除湿机中,构造了热虹吸管除湿机,并对热虹吸管除湿机的除湿过程进行了对比研究,分析了加装热虹吸管换热器对其系统除湿量的影响,分别从除湿能耗比、析湿系数及能量利用率等方面对其节能性进行了分析,为热虹吸管除湿机的进一步应用提供数据支撑.

1 实验装置及实验方法

1.1 热虹吸管换热器

为了构建热虹吸管除湿系统,首先设计并制造了热虹吸管换热器,各结构参数如表 1 所示. 其中热虹吸管材质采用紫铜管,工质为水,充液率 15%.

表 1 热虹吸管换热器结构参数
Table 1 The structure parameter of thermosiphon heat exchanger

结构	参数值	结构	参数值	结构	参数值
管长/m	0.80	翅片厚度/mm	0.13	换热器宽度/m	0.55
管子外径/mm	9.50	横向管排数	20	管子排列方式	叉排
壁厚/mm	0.35	纵向管排数	3	翅片型式	开窗直翅片
翅片间距/mm	4.00	迎风面上管中心距/mm	25.00		

1.2 热虹吸管除湿机性能测试方案

为了分析热虹吸管除湿机的除湿性能,构建了热虹吸管除湿机性能测试平台. 整个系统由制冷系统、风系统、热虹吸管换热器系统组成,热虹吸管换热器置于制冷系统蒸发器与冷凝器之间,实现湿空气的预冷与再热.

如图 1(a)所示,经焓差实验室处理的湿空气首先经热虹吸管蒸发段预冷降温,降温后的湿空气进入制冷系统蒸发器降温除湿,除湿后的空气再经热虹吸管冷凝段,实现空气再热,最终经制冷系统冷凝器加热成适宜温度的低湿空气,完成湿空气的整个除湿升温过程.

为了对加装上述热虹吸管换热器的除湿机的除湿性能及其节能性进行量化分析,系统共布置 5 个测点测量空气参数,测点位置如图 1(a)所示,对进口空气、热虹吸管蒸发段出口空气、制冷系统蒸发器出口空气、热虹吸管冷凝段出口空气及制冷系统冷凝器出口空气进行测量. 为了对比分析,在未装热虹吸管换热器的普通除湿机系统上布置了 3 个测点,测点位置如图 1(b)所示. 为了保证实验的准确性,两组实验 a、c、e 测点位置一致. 热虹吸管除湿机测试系统现场实物图如图 2 所示. 试验测试具体空气参数如表 2 所示.

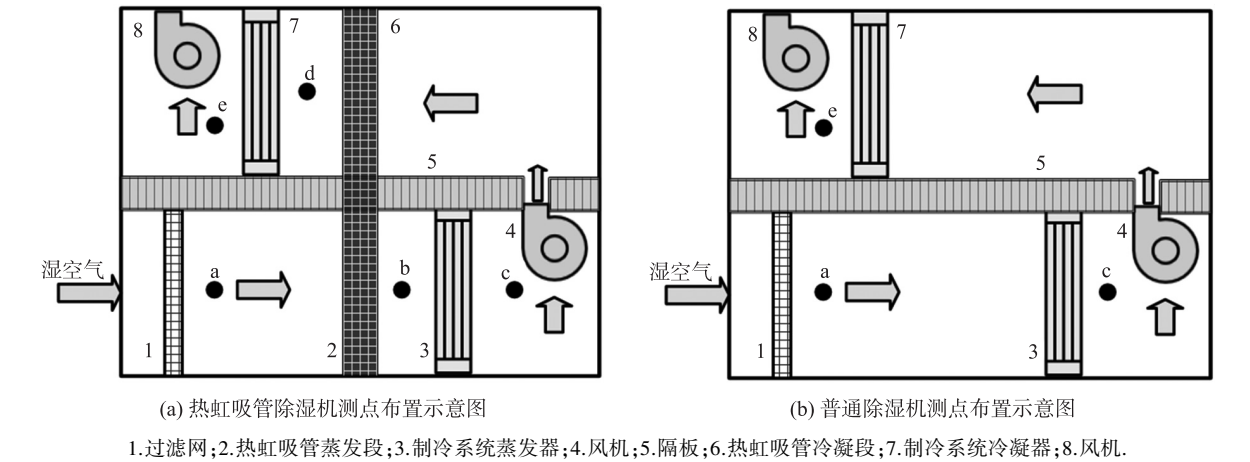


图 1 除湿机系统测点布置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of measuring point arrangement for dehumidifier system

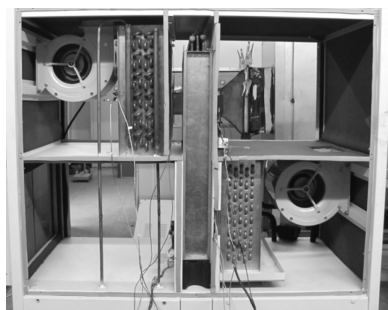


图 2 热虹吸管除湿机测试系统实物图
Fig. 2 Physical diagram of thermosiphon dehumidifier test system

1.3 热虹吸管应用于除湿系统的节能潜力

为了分析热虹吸管应用于除湿系统的节能潜力,给出了热虹吸管除湿机的除湿过程焓湿图,如图 3 所示. 从图中可以看出,加装热虹吸管换热器以后,利用热虹吸管的蒸发段可首先对进入制冷系统蒸发器的湿空气进行预冷,从而减少蒸发表冷器的冷负荷,增加单位功率除湿量,同时可利用热虹吸管预冷吸收的热量对进入制冷系统冷凝器的空气进行再热,提高空气温度,从而实现能量的有效利用.

2 实验结果与讨论

2.1 普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿过程比较

以环境温度 27 ℃,空气相对湿度 60%,雷诺数 1 042.5 (以测点 a 处空气流速为基准,以热虹吸管外径为定型尺寸)的湿空气测试工况为例,对普通除湿机与加装上述热虹吸管换热器的除湿机就除湿过程进行对比分析. 图 4(a)和图 4(b)分别给出了普通冷冻除湿过程及加装热虹吸管换热器后除湿过程的空气状态焓湿图.

如图 4(a)所示,普通冷冻除湿过程中湿空气状态变化过程为点 1-3-5. 从图中可以看出,湿空气在制冷系统蒸发器点 1 处由 27 ℃经冷却-冷凝除湿至点 3 处(17.1 ℃),此过程中蒸发器承担全部显热负荷和潜热负荷,随后湿空气由冷凝器再热至点 5 处(40.95 ℃).

加装热虹吸管换热器后,湿空气状态变化过程变为点 1-2-3-4-5,如图 4(b)所示. 由图可知,进口湿空气首先经热虹吸管蒸发段点 1 处由 27 ℃冷却降温至点 2 处(20.95 ℃),此过程热虹吸管承担部分显热负荷,使得进入制冷系统蒸发器的湿空气温度降低,蒸发器承担的显热负荷减少,冷量主要用于冷凝除湿,除湿量增加,冷凝除湿后,空气状态到达点 3 处(15.1 ℃),随后湿空气再次流经热虹吸管冷凝段,利用吸

表 2 热虹吸管除湿性能试验测试参数
Table 2 Test parameters for dehumidification performance of thermosiphon

测点	测点位置	测试参数(温度、湿度、流速)
a	空气进口	空气干球温度 T_1 、空气相对湿度 φ_1 、空气流速 v
b	热虹吸管蒸发段出口	空气干球温度 T_2
c	蒸发器出口	空气干球温度 T_3 、空气相对湿度 φ_3
d	热虹吸管冷凝段出口	空气干球温度 T_4
e	冷凝器出口	空气干球温度 T_5

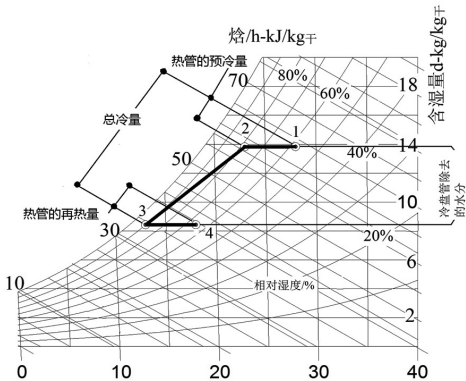


图 3 热虹吸管除湿过程焓湿图
Fig. 3 Enthalpy-Humidity diagram of thermosiphon in dehumidification process

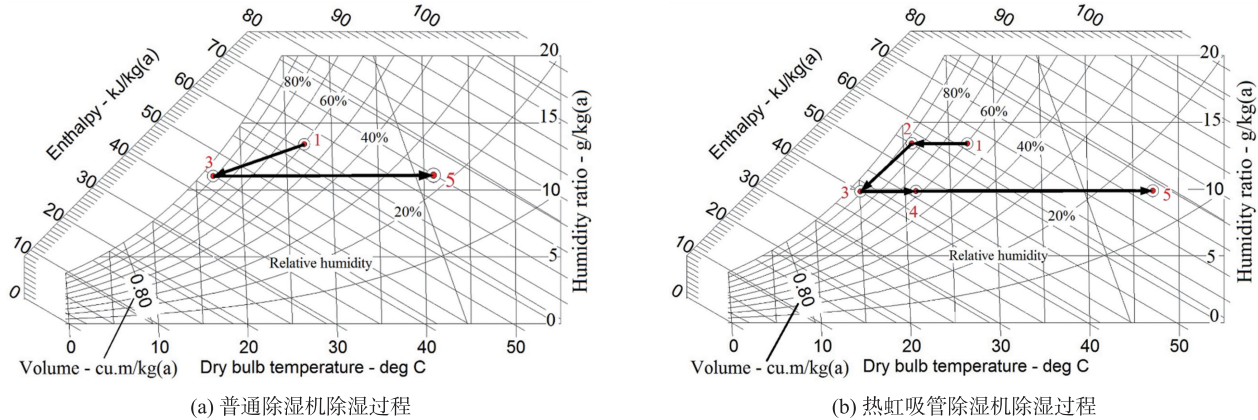


图 4 普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿过程对比
Fig. 4 Comparison of dehumidification process between ordinary dehumidifier and thermosiphon dehumidifier

收的蒸发器前湿空气的热量,使得湿空气上升至 21.6 ℃(点 4 处),最后由制冷系统冷凝器再热至 46.7 ℃(点 5 处).

对比分析可知,加装热虹吸管换热器后,进入蒸发器的湿空气温度由 27 ℃降至 20.95 ℃,同时由于热虹吸管冷凝段对空气进行再热,出冷凝器的空气温度由 40.95 ℃提高到 46.7 ℃. 整个过程,普通除湿机的除湿能耗比为 0.91 kW·h/kg,而热虹吸管除湿机除湿能耗比为 0.67 kW·h/kg,能耗比降低了 26.4%. 由此可见,加装热虹吸管换热器可显著降低系统除湿能耗比,相同功耗条件下,除湿效果显著提升.

2.2 除湿量对比分析

为了进一步量化分析加装热虹吸管换热器后除湿机除湿性能,对普通除湿机与热虹吸管除湿机的除湿量进行了对比分析.

图 5 给出了普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿量对比图,从图中可以看出,不同雷诺数条件下,加装热虹吸管换热器后,除湿系统的除湿量均高于普通除湿机的除湿量. 与普通除湿机相比,雷诺数分别为 836.22、1 042.05、1 222.6、1 434.43、1 578.64 时,除湿量各增加了 1.73 kg/h、1.3 kg/h、1.32 kg/h、1.31 kg/h、1.39 kg/h,除湿量增加的百分比分别为 39.2%、28.1%、25.9%、24.1%、24.3%. 可见,加装热虹吸管换热器后,除湿机的除湿能力显著提高. 这是因为湿空气流经热虹吸管换热器后,其承担了湿空气的部分显热负荷,使得进入蒸发表冷器的湿空气温度降低,蒸发器承担的显热负荷量减少,冷量主要用于湿空气的冷凝除湿,从而使得除湿量显著增加. 由图可知,加装热虹吸管换热器后,不同工况下,其除湿量至少增加 24%.

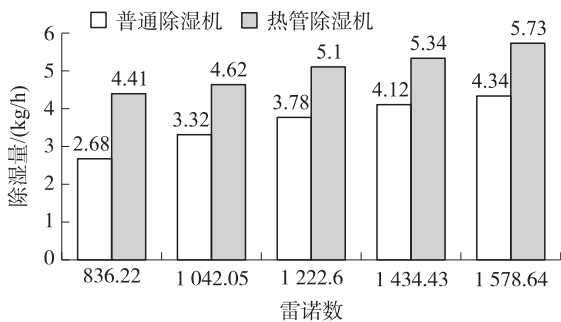


图 5 普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿量比较
Fig. 5 Comparison of dehumidification process between ordinary dehumidifier and thermosiphon dehumidifier

2.3 除湿能耗比对比分析

除了除湿量,除湿能耗比(specific power consumption, SPC)也是衡量除湿系统性能的重要指标. 以产生 1 kg 凝结水的压缩机功率消耗表示^[11].

$$SPC = \frac{W}{M}$$

(1)

式中,SPC 为除湿能耗比,kW·h/kg;W 为压缩机功率,kW;M 为除湿量,kg/h.

表 3 给出了进口湿空气参数为 $t_g = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi = 60\%$ 的条件下,不同雷诺数的普通除湿机与热虹吸管除湿机的除湿量、除湿功耗值,从而由公式(1)可求得 SPC.

表 3 除湿能耗比对比
Table 3 Comparison of dehumidification energy consumption ratio

雷诺数 <i>Re</i>	进风干球温度/℃	普通除湿量/(kg/h)	热虹吸管除湿量/(kg/h)	普通除湿功耗/kW	热虹吸管除湿功耗/kW	普通除湿能耗比/(kW·h/kg)	热虹吸管除湿能耗比/(kW·h/kg)
836.22	27.6	2.68	4.41	3.11	3.21	1.16	0.73
1 042.05	27.4	3.32	4.62	3.00	3.11	0.91	0.67
1 222.60	27.6	3.78	5.10	2.97	3.08	0.79	0.61
1 434.43	27.6	4.12	5.43	3.00	3.14	0.73	0.58
1 578.64	27.4	4.34	5.73	3.18	3.17	0.73	0.55

注:工况: $t_g = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 60\%$.

图 6 给出了不同雷诺数时,普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿能耗比对比. 从图中可以看出,加装热虹吸管换热器后,除湿机的除湿能耗比显著降低. 这是因为与普通除湿系统相比,热虹吸管除湿机除湿量增加,而功耗基本相同,除湿能耗比必然降低. 从图中可以看出,随着雷诺数的增加,除湿能耗比逐渐降低. 雷诺数分别为 836.22、1 042.05、1 222.6、1 434.43、1 578.64 时,热虹吸管除湿机的除湿能耗比分别降低 37.1%、26.4%、22.8%、20.6%、24.7%,除湿能耗比的下降率均在 20%以上. 由此可知,加装热虹吸管换热器后,除湿机除去相同质量的水分,耗功降低. 可见,热虹吸管除湿机具有显著的节能性.

2.4 析湿系数对比分析

热湿交换中全热量与显热量的比值称为析湿系数(ξ)^[12],析湿系数越大,意味着潜热交换量越大,凝结水析出能力越强.为了从热量交换的角度分析除湿系统的除湿能力,对普通除湿机以及热虹吸管除湿机的析湿系数进行了对比.

普通除湿机的析湿系数 ξ_1 可用表冷器前后湿空气参数表示:

$$\xi_1 = \frac{h_1 - h_3}{c_p(t_1 - t_3)}. \quad (2)$$

加装热虹吸管换热器后的系统析湿系数 ξ_2 可表示为:

$$\xi_2 = \frac{h_2 - h_3}{c_p(t_2 - t_3)}. \quad (3)$$

式中, h_1 为系统入口测点处的空气焓值,kJ/kg; h_2 为热虹吸管蒸发段之后蒸发器之前测点处的空气焓值,kJ/kg; h_3 为蒸发器之后热虹吸管冷凝段前测点处的空气焓值,kJ/kg.

表4给出了进口湿空气参数为 $t_g = 27^\circ\text{C}$ 、 $\varphi = 60\%$ 的条件下,不同雷诺数工况下的普通除湿机与热虹吸管除湿机各状态点参数,由此可得两种除湿机的析湿系数.

表4 析湿系数对比

Table 4 Comparison of wet precipitation coefficient

雷诺数		836.22	1 042.05	1 222.16	1 434.43	1 578.64
普通除湿机	t_1	27.60	27.40	27.60	27.60	27.40
	t_3	16.50	16.85	17.00	17.40	17.10
	h_1	60.30	60.60	60.40	60.30	60.30
	h_3	43.70	44.90	45.20	46.20	45.30
	ξ_1	1.48	1.47	1.42	1.37	1.43
热虹吸管除湿机	t_2	20.70	20.95	21.75	22.00	22.55
	t_3	14.70	15.10	15.20	15.55	16.10
	h_2	52.80	55.10	54.10	54.60	55.40
	h_3	38.60	40.00	40.10	41.30	42.90
	ξ_2	2.34	2.35	2.11	2.01	2.07

注:工况: $t_g = 27^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$.

图7给出了普通除湿机与热虹吸管除湿机析湿系数之间的对比.从图中可以看出,热虹吸管除湿机的析湿系数 ξ_2 明显高于普通除湿机的析湿系数 ξ_1 ,说明加装热虹吸管换热器后,蒸发器除湿过程中,显热量占比减少,蒸发器的冷量主要用于冷凝除湿,潜热交换占比增加,除湿量增大.由图7可知,不同雷诺数下,与普通除湿机相比,热虹吸管除湿机的析湿系数各增加36.8%、37.4%、32.7%、31.8%、30.9%.因此,从析湿系数分析可知,热虹吸管除湿机除湿能力显著提升.

2.5 能量利用率比较分析

为了比较加装热虹吸管换热器前后,除湿系统的能量利用状况,引入能量利用率 ζ 来分析比较两者的能量利用能力.

能量利用率定义为冷凝器再热量及热虹吸管换热器有效利用热量之和与蒸发器除湿过程能量变化之比.

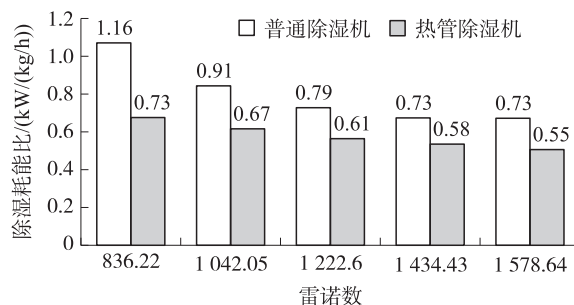


图6 普通除湿机与热虹吸管除湿机除湿能耗比比较

Fig. 6 Comparison of dehumidification energy consumption ratio between ordinary dehumidifier and thermosyphon dehumidifier

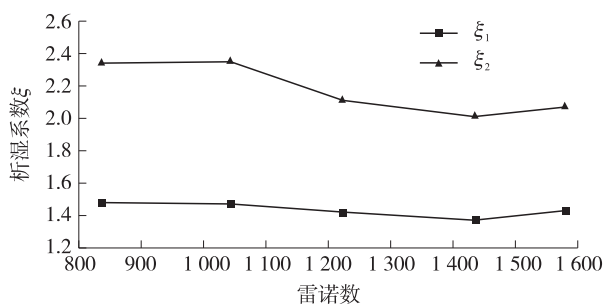


图7 普通除湿机与热虹吸管除湿机析湿系数的比较

Fig. 7 Comparison of moisture removal coefficients between ordinary dehumidifiers and thermosyphon dehumidifiers

普通除湿机能量利用率 ζ_1 可表示为:

$$\zeta_1 = \frac{h_5 - h_3}{h_1 - h_3}. \quad (4)$$

热虹吸管除湿机能量利用率 ζ_2 表示为:

$$\zeta_2 = \frac{(h_1 - h_2) + (h_4 - h_3) + (h_5 - h_4)}{h_2 - h_3}. \quad (5)$$

上述各式中, h_1, h_2, h_3 同上; h_4 为冷凝器之前热管冷凝段之后测点处的空气焓值, kJ/kg; h_5 为系统冷凝器之后测点处的空气焓值, kJ/kg.

图 8 给出了加装热虹吸管换热器前后除湿机能量利用率变化曲线. 从图中可以看出, 加装热虹吸管换热器后, 由于热虹吸管换热器的预冷和再热效应, 使得能量得到充分有效利用, 能量利用率显著提高, 结果表明, 较普通除湿机的能量利用率至少可提高 4.3 倍. 从能量有效利用的角度分析, 进一步体现了热虹吸管除湿机的节能性.

2.6 除湿量与能量利用率试验关联式

为了研究热虹吸管除湿机的除湿量与雷诺数及空气状态间的关系, 以无量纲参数进行试验数据拟合, 拟合得到了除湿量、流动雷诺数及能量利用率间的计算关联式.

选取参数 $m(h_2 - h_3)$ 、 Re 、 ζ_2 进行关联分析, 得到拟合关联式如下:

$$\frac{m(h_2 - h_3)}{3600} = a Re^b \zeta_2^c. \quad (6)$$

$$m = \frac{M}{P}. \quad (7)$$

式中, m 为单位功率除湿量, kg/(h·kW).

用 MATLAB 拟合得到: $a=0.452, b=-0.443, c=1.047$. 拟合关联式为:

$$\frac{m(h_2 - h_3)}{3600} = 0.452 Re^{-0.443} \zeta_2^{1.047}. \quad (8)$$

式中, 雷诺数与能量利用率适用范围分别为: $600 < Re < 1600, 2.1 < \zeta_2 < 3.2$.

2.7 误差分析

本实验主要的测试参数包括除湿机内各测点处的空气温度、相对湿度及空气进口处的空气流速. 分析误差存在的原因主要有两点, 一是实验时工况环境的改变, 由于实验是在焓差实验室进行的, 实验室空间较大, 无法准确调节至设定工况. 二是试验过程中测试仪器精度影响产生的误差, 包括测量温度时使用的 K 型热电偶的精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 测量空气流速使用的叶轮风速仪精度为 $\pm 0.2 \text{ m/s}$; 且测量时由于测点位置受限, 也会有误差的产生.

3 结论

设计并制造了热虹吸管换热器, 以 $t_g = 27^\circ\text{C}, \varphi = 60\%$ 的工况为例, 对不同雷诺数条件下, 热虹吸管除湿机和普通除湿机的除湿性能进行了对比实验, 并对除湿量、除湿能耗比、析湿系数以及能量利用率进行了对比分析, 实验结果发现:

(1) 与普通除湿机相比, 加装热虹吸管换热器后, 不同雷诺数条件下, 除湿机的除湿量增加 24% 以上, 除湿量显著提高.

(2) 与普通除湿机相比, 加装热虹吸管换热器后, 除湿系统除湿能耗比降低至少 20%, 热虹吸管除湿机的能耗比显著降低.

(3) 与普通除湿机相比, 加装热虹吸管换热器后, 除湿机的析湿系数提高 30% 以上, 热虹吸管除湿机

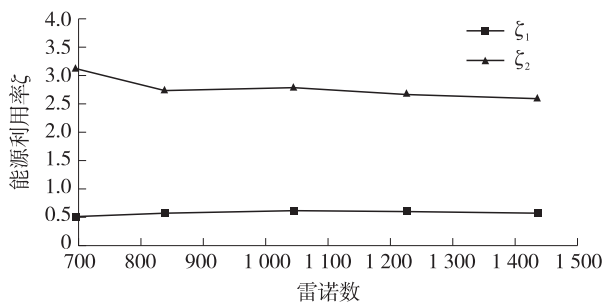


图 8 普通除湿机与热虹吸管除湿机能量利用率对比

Fig. 8 Comparison of energy utilization ratio between ordinary dehumidifier and thermosiphon dehumidifier

性能提高,除湿能力显著提升.

(4)与普通除湿机相比,热虹吸管除湿机能量利用率提高 4.3 倍以上,系统节能效果显著.

(5)拟合得到了热虹吸管除湿机除湿量、流动雷诺数以及能量利用率之间的计算关联式,为进一步拓展试验结果提供了参考.

$$\frac{m(h_2-h_3)}{3600}=0.452Re^{-0.443}\zeta_2^{1.047}.$$

研究表明,除湿系统加装热虹吸管换热器后,除湿量显著提高且节能性显著,结果为热虹吸管应用于除湿系统提供了理论基础和数据支撑.

[参考文献] (References)

- [1] 田向宁,杨毅,丁德,等. 空气冷却除湿过程的理论研究[J]. 暖通空调,2014(1):121-124.
- [2] 陈晓阳,江亿,李震,等. 湿度独立控制空调系统的工程实践[J]. 暖通空调,2004,34(11):103-109.
- [3] 解鸣,茆春俊,吕雯,等. 基于热管传热的除湿溶液真空再生过程实验研究[J]. 制冷学报,2019,40(6):103-110.
- [4] 陈剑波,李美玲,韩星,等. 辐射空调用节能新风控温除湿机除湿性能实验研究[J]. 制冷学报,2015,36(3):79-91.
- [5] HILL J M, JETER S M. Use of heat pipe heat exchangers for enhanced dehumidification[J]. Ashrae Transactions, 1994, 100(1):91-102.
- [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]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(2):164-171.
- [7] 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):1143-1152.
- [8] YAU Y H, AHMADZADEHTALATAPEH 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨光. 整体式热管的设计开发与全热回收器的实验研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- [12] 赵荣义. 空气调节[M]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[责任编辑:陈 庆]