

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-073-09

低温再生转轮除湿、加湿一体机的设计及实验

刘忠宝¹ 姚舒译¹ 饶 锋² 余志广²

(1. 北京工业大学环境与生命学部 北京 100124;

2. 杭州海奥绿建科技有限公司 杭州 311215)

【摘要】 湿度调节设备在工业生产中有重要的意义。除湿与加湿作为湿度调节的两个方向, 其功能通常分置于两台设备上。在一台设备上将两个功能有机融合在市场上有极大的发展潜力。故在先前的研究基础上, 设计了一种除湿和加湿一体化的、以热回收节能的基于 MOF 材料低温再生转轮的湿度控制一体机。测试设备的除、加湿特性, 结果表明该设计具有有效的除、加湿能力, 夏季能够表现出优于市面一般转轮除湿设备的除湿能力且较为节能, 冬季能表现出一定的加湿能力, 但其冬季能耗经济性方面仍待探究。

【关键词】 转轮除湿; 无水加湿; 低温再生转轮
中图分类号 TB494T/U834.9 文献标识码 A

Design and Experiment of an Integrated Machine for Dehumidification, Humidification with a Low Temperature Regeneration Wheel

Liu Zhongbao¹ Yao Shuyi¹ Rao Feng² Yu Zhiguang²

(1. Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing, 100124;

2. Hangzhou Haiao Green Construction Technology Co., Hangzhou, 311215)

【Abstract】 Humidity conditioning equipment is of great significance in industrial production. Dehumidification and humidification are two aspects of humidity regulation, and their functions are usually placed on two devices. The organic integration of two functions on one device has enormous potential in the market. Therefore, based on previous research, a humidity control integrated machine based on MOF material low-temperature regeneration wheel, which integrates dehumidification and humidification, and uses heat recovery to save energy is designed. The dehumidification and humidification characteristics of the equipment are evaluated. The results show that the design has effective dehumidification and humidification capabilities. In summer, it can show better dehumidification capabilities than general rotary dehumidifiers in the market and is more energy-saving. The economic aspects of energy consumption in winter are still to be explored.

【Keywords】 Rotary dehumidification; Anhydrous humidification; Low temperature regeneration wheel

0 引言

室内环境与工业生产和人们的日常生活息息相关, 空气调节系统作为调节室内环境的主要设备被广泛应用。生产生活环境的适宜与舒适主要体现在环境的空气的温度、湿度、流动速度及清洁度这

四大指标^[1]。空气中的湿成分与我们的生产生活关系极为密切, 从日常生活中的舒适到食品、医药、冶金加工等各行各业都有其各自的要求。适宜的湿度对于确保人体的舒适与健康、室内生活用品的使用寿命、食品药品的储存期限、保证设备的运转

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (3202008); 国家自然科学基金项目 (51776006)

作者 (通讯作者) 简介: 刘忠宝 (1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: liuzhongbao@bjut.edu.cn

收稿日期: 2022-07-05

安全以及保护生态环境的可持续发展都有重要的意义^[2]。特别是在沿海地区各省份，如何保证在高湿度环境下开展有高湿度要求的工业生产一直是一项非常重要的课题。表 1 展示了部分工业与民用建筑对温湿度的要求。

表 1 部分工业与民用建筑对温湿度的要求^[3]

Table 1 Temperature and humidity requirements for some industrial and civil buildings^[3]

| 使用场合 | 标准空气情况 | | |
|------|--------|--------|-------|
| | 温度/°C | 相对湿度/% | |
| 军事类 | 火药调配 | 21 | 40 |
| | 弹药存储 | 2~24 | 10~15 |
| | 负荷追踪弹丸 | 27 | 40 |
| | 粉状保险丝 | 21 | 40 |
| 食品 | 巧克力 | 32 | 13 |
| | 咖啡粉 | 27 | 20 |
| | 果汁粉 | 18~24 | 40~45 |
| | 谷类储存 | 16 | 40 |
| | 口香糖 | 27~30 | 24~30 |
| | 彩色印刷 | 28 | 45 |
| | 安全底片 | 16~27 | 40~50 |
| 轻工类 | 胶合物品 | 27 | 20 |
| | 涂料及喷漆 | 27 | 50 |
| | 聚酯纤维厂 | 20~25 | 35~45 |
| | 底片纸储藏 | 21~24 | 40~50 |
| | 纸仓库 | 15~20 | 40~50 |
| | 电池生产 | 20~25 | 2 |
| | 轮胎线储藏 | 52 | 7 |

我国大部分地区夏季高温、高湿，属于典型的热湿气候；冬春低温干燥，少雨雪。在冬夏两季湿度相差悬殊的背景下，市面空气调节设备普遍仅有除湿功能。市面上常见设备非使用季节占用空间。市场亟需一种以除湿加湿一体化为主要特点的湿度控制设备。

1 湿度调节概述

1.1 除湿方法

市面上常用的除湿设备主要通过冷凝除湿、液体除湿和固体除湿三种方法控制空气湿度。固体除湿通过固态吸附剂吸附被调空气中的水分进行除湿，达到控制空气湿度的目的。其中，转轮除湿能够在不需要切换气流的情况下连续实现在 3/4 转轮

除湿的同时，利用另外 1/4 转轮再生。具有处理风量大、出风含湿量低、空间布局紧凑等特点^[4]，是一种发展前景非常好的除湿方式，亦被认为是未来除湿领域极具竞争力的方式^[5]。但其仍存在再生能耗高的问题。王教领等^[5]从除湿能量循环利用、吸附材料组合和数学模型构建等角度剖析了目前国内转轮除湿干燥设备的研究现状。提出应在研究中着力于解决能耗问题、探索新型再生技术。Tu 等^[6]根据所转轮除湿再生所使用的热源，通过仿真进行优化从而最大限度地提高再生效率。基于标准煤耗对三个系统进行优化比较得出了各自的最优再生面积比和级数要求。袁艳等^[7]提出了对再生排风进行热回收用以加热再生风，减小再生加热能耗。通过实验检测，其设备通过再生排风的循环利用，极有效地降低热回收型转轮除湿系统的功耗，使之较普通型低 6%~20%。O' Connor 等^[8]实验测试了一种新型的转轮除湿设计。整个设备的最大压降测量为 10.31Pa，明显低于当前的除湿系统。再生空气温度设定在 25°C 和 40°C 之间，以 5°C 的增量增加。实验表明，在此范围内，气流的相对湿度可能降低多达 67%，而硅胶继续解吸水分子，即使在低至 25°C 的再生温度下也存在解吸效果。

1.2 加湿方法

传统加湿方法如水加湿法、雾化加湿法均为有水加湿方法，易滋生细菌等微生物或造成其他空气污染^[9]。无水吸附加湿作为一种新型加湿方式，已成为国内外学界研究的重点方向。为了解决上述方法问题而提出的无水吸附加湿是通过吸附除湿的逆向应用，利用吸附材料吸附空气中的水分，经过再生后通过风机送入室内达到加湿的目的^[10]。李荣年等^[11]通过多次实验，形成了一套适合无水加湿转轮端面加工的方法，满足了无水加湿转轮端面密封的要求。最终所得无水加湿转轮在测试中在各方面都体现了良好的性能，每小时加湿量可达 239.4g。袁琪等^[10]通过对无水转轮加湿的原理进行分析，设计了一台快速成型的无水加湿样机并对其与国内外产品进行了多种工况对比实验。经测试认为其所设计加工的无水加湿样机具有较好的加湿效果，其加湿性能优于国内其他产品，在其额定制热条件下，加湿量可达 521g/h。杨国忠等^[12]总结以往无水吸附加湿装置设计中所存在的问题，进行了创新性改进设计。其改进设计的无水加湿装置可以满足面

积为 20m² 的房间的加湿需求。吴宣楠等^[9]构建了无水加湿系统的数学模型, 其实验与理论分析验证表明太阳能或工业废热完全可以作为供能方式驱动其所研究的无水加湿系统。在优选参数条件下, 系统能够完全满足冬季室内环境加湿的需求。

1.3 除湿加湿一体化

调湿设备在工业生产中的应用相当广泛, 但少有设备能将除湿与加湿两个功能融合进一台设备之中。这种情况既造成了用户的先期成本增加, 又使得设备在非使用季节闲置导致老化或损坏。除湿加湿设备一体化则在根本上解决了设备闲置这一问题, 同时减小了用户对湿度控制设备的先期成本。国内外研究中已有将除湿与加湿一体化的先例。何海斌等^[13]提出一种将空气集热器与转轮除湿融合的混合系统并实验分析了其供暖加湿的有效性。实验证明经过其设备处理之后能够基本满足冬季室内湿度适宜。秦峰等^[14]提出将加湿功能融入除湿设备中, 使其能够在除湿的同时加湿并通过实验证明其设备加湿效果较市面常见家用加湿器更节能。范红^[15]在转轮除湿空调中通过利用转轮除湿机再生侧对空气进行加湿。夏季工况经实验, 较一般空调有更高的能效并可从排风中取水。Lim 等^[16]开发了一种供暖季节液体干燥剂系统加湿性能的预测模型。结果验证了在采暖季节使用液体干燥系统的再生部分进行加湿可行。因此, 研究一种除湿加湿一体化的湿度控制设备有重要的现实意义。

2 设备设计

设备主要依靠转轮除湿对夏季炎热潮湿、冬季寒冷干燥地区的工业建筑中的空气进行除、加湿处理。回收夏季室内排出废冷减小空调器新风处理负荷, 实现夏季工况节能。

2.1 吸附剂选择与转轮制备

转轮吸附剂的吸湿能力能够直接影响整个除湿、加湿系统的性能, 因而是设计工作中的重点。一般而言, 选择吸附剂时需要考虑三个关键因素: 水蒸气吸附能力、热稳定及循环稳定性和再生温度^[17]。

设备设计选取实验室自制 MOF 复合除湿转轮, 制备方法如图 1 所示。该转轮采用浸渍-喷淋法制备。在玻璃纤维纸基体上先采用浸渍法负载富马酸铝 (Al-Fum) 后通过喷淋法负载 PVA:LiCl=1:

1.25 的混合吸附剂, 再经干燥、活化和拼接后即获得负载有复合吸附剂的自制 MOF 除湿轮。通过该方法自制的复合吸附材料转轮经 Liu 等^[18,19]的实验验证, 具有比表面积高、热稳定性良好低含湿量工况下平均温升低等特点。并且其在 27℃、RH=80% 时, 吸湿量可达纯 Al-Fum 的 2.5 倍、硅胶的 3.18 倍, 再生温度在 50℃ 时也可以取得较好的再生效果, 此时再生率可达 82%。

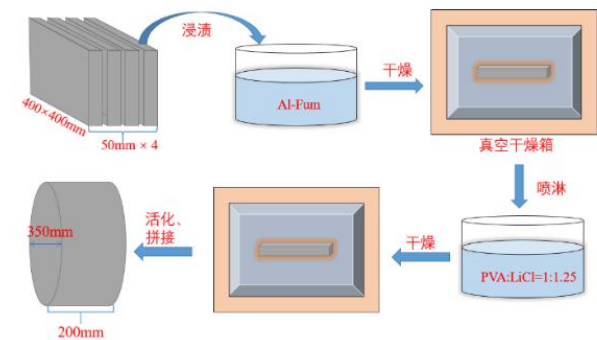


图 1 MOF 复合除湿转轮制备方法^[18]

Fig.1 Preparation method of MOF composite dehumidification wheel^[18]

2.2 设备流程设计

2.2.1 夏季工况流程

设备夏季除湿流程由全热回收器、转轮系统和电加热系统构成。图 2 所示为该设备夏季除湿工况流程。室外新风 W 经全热回收初步降温除湿得到吸附进风 Q, 经由除湿转轮吸附区进一步除湿得到吸附排风 T, 再经过蒸发吸热得到送风点空气 O 送入室内; 室内排风 N 由全热回收后再生加热升温得到再生风 R。之后进入除湿转轮再生区带走额外湿量得到再生排风 P 排出至室外。

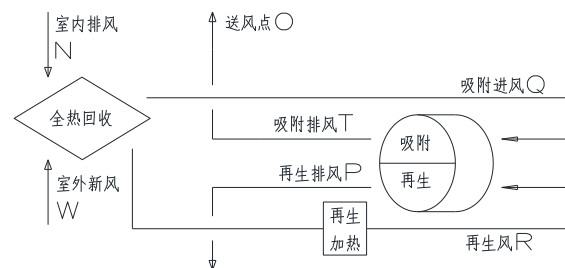


图 2 夏季除湿工况流程

Fig.2 Processes of dehumidification condition in summer

2.2.2 冬季工况流程

设备冬季加湿流程由转轮系统和电加热系统构成。图 3 所示为该设备冬季加湿工况流程。室内

排风 N 经再生加热后得到再生风 R, 之后经过除湿转轮再生区获得额外的湿量后得到再生排风 P, 直接送入室内。

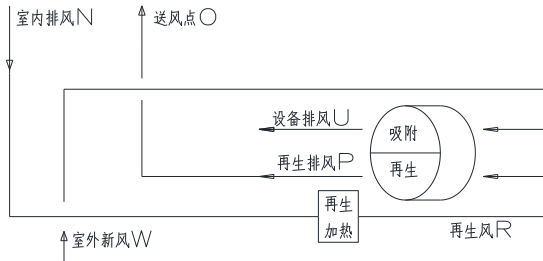


图 3 冬季加湿工况流程

Fig.3 Processes of humidification condition in winter

2.2.3 一体化整合

对设备两季流程进行整合, 得到设备除、加湿一体化设计如图 4 所示。

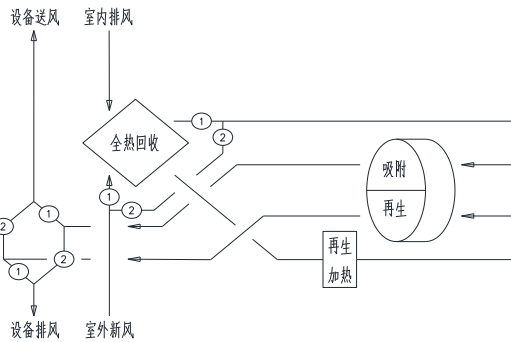


图 4 除、加湿功能一体化流程

Fig.4 Processes of integrated dehumidification and humidification functions

总体依靠风阀改变设备内风的流向从而运行冬夏两季不同运行模式。图 4 中标号 1 处风阀打开、标号 2 处风阀关闭时设备运行夏季除湿工况模式, 室外新风与室内排风先在全热回收器中进行热湿交换后新风进入吸附区除湿准备送入降温室内, 排风通过再生热回收与再生加热升温进入再生区吸湿, 回收其中热量后排至室外; 标号 1 处风阀关闭、标号 2 处风阀打开时设备运行冬季加湿工况模式, 采用室内内循环, 新风直接进入吸附区吸收其中水分后直接排出, 室内排风经加热后进入再生区加湿后回收热量降温送回室内。

2.3 热回收部分设计

热回收部分是设备的主要节能部分。夏季工况中, 由于采用全新风除湿送风设计, 夏季室外温、湿度均大幅度高于所需温、湿度, 对除湿部分吸附

材料除湿负荷较大。故在室外新风入口和室内排风入口后设置一个常用于新风设备的纸芯叉流板翅式全热交换器从而达到初步降低室外新风的温、湿度、初步提高将被加热作为再生风的室内排风的温度从而降低再生能耗的目的。

3 实验系统

为了获得该设备在夏季除湿工况与冬季加湿工况的性能参数, 针对两季工况分别设计了多种工况的实验, 通过多种仪器多个测点获得各工况实验的实时数据并记录。

3.1 实验装置

3.1.1 转轮系统

转轮系统的原理如图 5 所示, 对于处理侧, 过滤后的潮湿空气进入除湿区, 由除湿轮内部的复合吸附剂吸附水分至低湿状态, 然后送入待除湿空间内; 室内风经过预处理后作为再生风送入再生侧, 被电加热器加热至高温低湿的状态后经过除湿轮, 高温的再生风将吸附剂中的水分再生出来, 紧接着排到室外。在转轮系统运行过程中, 处理侧和再生侧的面积比始终保持在 3:1, 期间电机驱动除湿轮不断旋转, 从而实现不间断除湿。

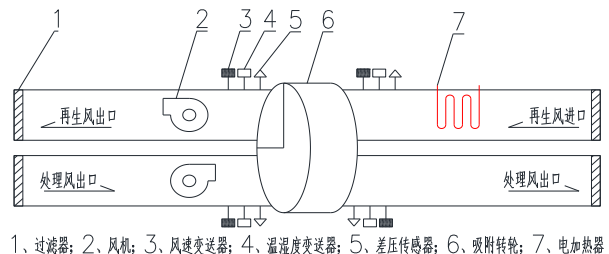


图 5 转轮系统流程

Fig.5 The processes of the wheel system

3.1.2 环境室

环境室位于北京工业大学制冷实验室二层, 由环境室本身和环境室外的控制系统构成。其通过室内的循环风机将室内空气循环至处理区域, 通过电加热、电加湿、制冷系统调节温度和湿度后在循环送回环境室内。电加热和电加湿负责升温与加湿, 制冷系统负责降温除湿。为防止实验需要零下温度时冷冻除湿水箱凝结造成损坏低温下必须打开电加热。环境室外的控制系统通过人工设定温度, 变频控制环境室内各调节设备以保证环境室内空气状态稳定。



图 6 环境室与其控制系统

Fig.6 Environment room and its control system

3.2 实验方案

实验分为夏季工况与影响因素实验、冬季工况与影响因素实验。分别检测冬夏两季设备的稳定工况性能与再生温度等指标对设备性能的影响。实验过程中, 转轮与热回收部分放置在环境室外, 根据不同实验工况调整环境室内部温湿度。为减少漏风对实验产生影响, 除湿侧和再生侧的转轮迎面风速应始终相同。在其他条件相同的情况下, 通过单独改变各工况测试目标参数, 研究设备在不同工况下的性能。

实验开始前对转轮系统和环境室进行调试, 待系统稳定后开始实验。实验步骤如下: 首先打开循环风机、加热器、加湿器、制冷机等, 调节环境室的空气状态, 使环境室稳定到要求的温湿度条件; 随后调试转轮系统, 开启并调节转轮电机、再生风机、处理风机、电加热器等, 运行约 20 分钟后即可达到稳定状态; 为减小实验误差, 每隔 5 分钟记录一次实验数据, 每个工况记录五次并取平均值。

3.2.1 夏季工况选取

实验在标准大气压力条件下进行。在检测设备进风温、湿度对设备性能影响时, 设定转轮转速 8.63r/h; 吸附侧进风风速 3m/s; 再生温度 55℃。并依据相关标准选取工况如表 2 所示。

在检测设备再生温度对设备性能的影响时, 转轮转速 8.63r/h; 吸附侧进风风速 3m/s, 并根据设备设计再生温度为 50℃~90℃, 每 10℃选取一个点, 在如表 2 中 27℃、RH=70%的情况下实验再生温度影响。

表 2 夏季试验工况

Table 2 Experiment conditions in summer settings

| 温度 | 相对湿度 | 含湿量 g/kg _干 |
|-----|------|-----------------------|
| 17℃ | 30% | 3.59 |
| | 50% | 6.01 |
| | 70% | 8.44 |
| | 90% | 10.89 |
| 22℃ | 30% | 4.91 |
| | 50% | 8.22 |
| | 70% | 11.58 |
| 27℃ | 90% | 14.96 |
| | 30% | 6.64 |
| | 50% | 11.14 |
| | 70% | 15.71 |
| | 90% | 20.35 |
| | 32℃ | 30% |
| 50% | | 14.96 |
| 70% | | 21.14 |
| | 90% | 27.45 |

3.2.2 冬季工况选取

实验在标准大气压力条件下进行。在检测设备进风含湿量对设备性能影响时, 设定转轮转速 8.63r/h; 吸附侧进风风速 3m/s; 再生温度 80℃。并依据相关标准选取工况如表 3 所示。

表 3 冬季试验工况

Table 3 Experiment conditions in winter settings

| 温度 | 相对湿度 | 含湿量 (g/kg _干) |
|-----|------|--------------------------|
| -5℃ | 50% | 1.117 |
| | 55% | 1.295 |
| | 60% | 1.413 |
| 0℃ | 45% | 1.696 |
| | 50% | 1.886 |
| | 55% | 2.075 |
| | 60% | 2.264 |
| 5℃ | 45% | 2.425 |
| | 50% | 2.696 |
| | 55% | 2.966 |
| | 60% | 3.237 |

在检测设备再生温度对设备性能的影响时, 转轮转速 8.63r/h; 吸附侧进风风速 3m/s, 根据设备设计选取再生温度为 60℃和 80℃, 在如表 3 中 -5℃、RH=45%~60%的情况下实验再生温度影响。

3.3 评价指标

3.3.1 夏季工况评价指标

夏季工况实验评价指标为除湿量 D_- ，由于加湿情况下，除湿前后温差对空气密度影响不大可忽略，故其公式如下：

$$D_- = d_{in} - d_{out} \quad (1)$$

式(1)中， d_{in} 为吸附进风含湿量， $g/kg_{干}$ ； d_{out} 为吸附排风含湿量， $g/kg_{干}$ 。

同时由于转轮除湿中吸附剂对空气中水分吸附时放热，可导致经过除湿过程后的处理风温度上升。因其最终应排入室内影响室内温湿度，其温度能够明显的影响冷却处理风的能耗。故处理风温升也是一个重要的评价指标。其公式如下：

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} \quad (2)$$

式(2)中， T_{out} 为吸附排风温度， $^{\circ}C$ ； T_{in} 为吸附进风温度， $^{\circ}C$ 。

3.3.2 冬季工况评价指标

冬季工况实验加湿能力评价主要指标为总加湿量 D_+ ，由于除湿情况下设备处理空气温差对空气密度影响较大，故考虑其密度变化后公式如下：

$$D_+ = \frac{\rho_{out} \cdot Q_{V,out}}{d_{out} + 1} \cdot d_{out} - \frac{\rho_{in} \cdot Q_{V,in}}{d_{in} + 1} \cdot d_{in} \quad (3)$$

式(3)中， ρ_{in} 为再生风密度， ρ_{out} 为再生排风密度， kg/m^3 ； $Q_{V,in}$ 为再生风体积流量， $Q_{V,out}$ 为再生排风体积流量， m^3/h ； d_{in} 为再生风含湿量， d_{out} 为再生排风含湿量。

同时为了比较设备在各变量变化时性能影响，也应比较加湿量 d_+ ，其公式如下：

$$d_+ = d_{out} - d_{in} \quad (4)$$

式(4)中， d_{in} 为再生风含湿量， $g/kg_{干}$ ； d_{out} 为再生排风含湿量， $g/kg_{干}$ 。

4 设备性能与影响因素

4.1 夏季工况实验

4.1.1 稳定工况

实验测试了设备在四个进风温度下四个相对湿度点上的稳定工况除湿能力。图7展示了设备在夏季共16个温湿度工况下的除湿能力。可以看出设备在夏季各工况下均有良好的除湿表现，能够在各工况下将室外潮湿空气处理至室内设计温湿度范围送入室内。经计算设备在27 $^{\circ}C$ 、RH=50%时总

除湿量可达486.08g/h，在较低再生温度下达到了市售除湿设备的水平。

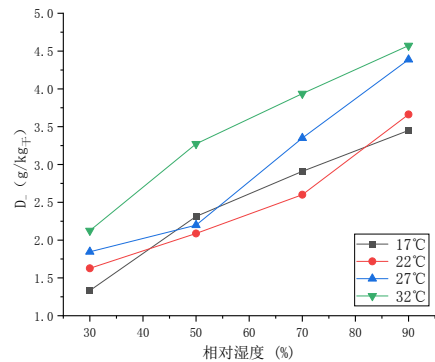


图7 设备稳定工况除湿量

Fig.7 Dehumidification capacity of equipment under stable working conditions

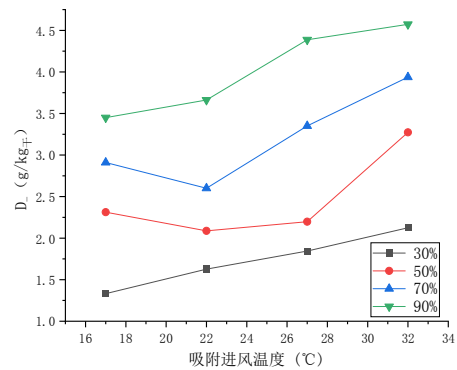


图8 吸附进风温度对设备除湿性能的影响

Fig.8 Influence of adsorption inlet air temperature on dehumidification performance of equipment

4.1.2 吸附进风温度的影响

不同的进风温度对转轮的吸附过程有一定的影响。图8展示了进风温度对设备夏季除湿能力的影响。可看出在相对湿度相同的情况下进风温度也在一定程度上对设备除湿能力有一定的影响。相对湿度相同的情况下，随进风温度上升，设备除湿量总体来说呈上升趋势。在RH=30%的情况下，随着进风温度的上升（17 $^{\circ}C$ ~32 $^{\circ}C$ ）设备除湿量增加了59.47%。但随着相对湿度的增加，温度对设备除湿量的影响逐渐减小，相对湿度在90%时设备除湿量随温度上升仅增加32.54%。在17 $^{\circ}C$ 工况下，随进风含湿量增加203.5%，设备除湿量增加158.9%，但在32 $^{\circ}C$ 工况下随进风含湿量增加208.8%，设备除湿量仅增加115.2%，在含湿量均增加200%的情况下，高进风温度下除湿量增比较

4.1.3 吸附进风含湿量的影响

不同温湿度的室外空气含湿量不同, 会直接影响设备除湿转轮部分的除湿量。图 9 展示了吸附进风含湿量对设备除湿性能的影响。

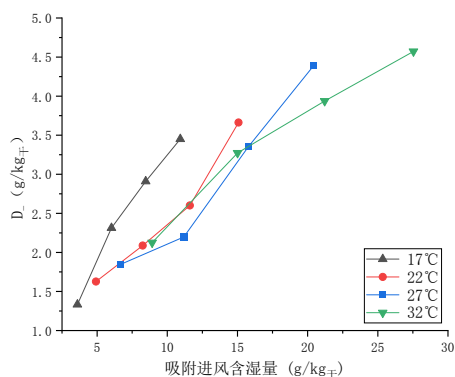


图 9 吸附进风含湿量对设备除湿性能的影响

Fig.9 Influence of adsorption inlet air moisture content on dehumidification performance of equipment

可以发现除湿转轮部分除湿量与吸附进风含湿量有密切联系, 除湿量会随吸附进风含湿量的增加而增加, 总体成正比。设备除湿能力虽受吸附进风含湿量影响但并不影响送风舒适性, 各工况下皆可将空气处理至室内设计温湿度范围送入室内。在 17°C 工况下, 设备除湿量随进风含湿量的上升增加了 158.9%; 在 32°C 工况下, 设备除湿量随进风含湿量的上升增加了 115.2%。可知在较低温度下吸附进风含湿量对设备除湿量的影响明显高于较高温度下的影响, 并分析认为存在一个含湿量分界线, 达到此分界线时有设备的极限除湿量。由于疫情影响, 并未找到实验工况下设备的极限除湿量。

4.1.4 再生温度的影响

再生温度会直接影响再生侧吸附剂的再生效果, 高再生温度使吸附剂中的水分更容易再生, 当转轮转到处理侧时, 其内部吸附剂与处理风之间的压差也会变大, 从而影响吸附剂在处理侧的除湿量。对再生温度要求的高低更多的取决于吸附剂本身的性质。再生温度对恢复吸附剂的除湿性能具有显著影响。图 10 显示了再生温度对设备除湿性能的影响。在实验工况下设备除湿量随再生温度的提高有明显的上升。再生温度从 50°C 增加至 90°C, 设备除湿能力增加 50.24%。可以看出设备再生温度的提高可以有效提高设备的除湿能力。

但同时, 提高再生温度也会使送风温升随之增

加。这会使室内空调能耗增加, 对建筑总体节能性造成较大影响。因此应选取一个适中的再生温度, 此温度应同时照顾到设备再生性能和建筑总体节能。

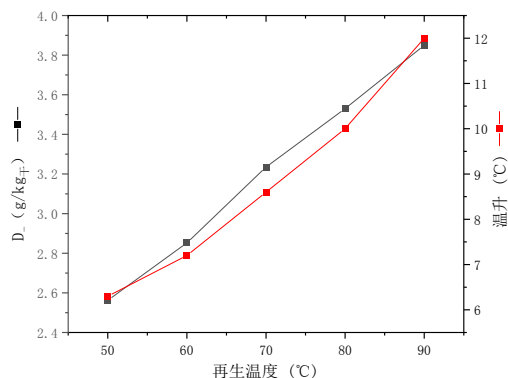


图 10 再生温度对设备除湿性能与送风温升的影响

Fig.10 Influence of regeneration temperature on dehumidification performance and supply air temperature rise of equipment

4.2 冬季工况实验

4.2.1 稳定工况

实验测试了设备在三个进风温度下四个相对湿度点上的稳定工况加湿能力。图 11 展示了设备在冬季共 11 个温湿度工况下的加湿能力。

可以发现, 设备仅在极端气候条件下, 即外界空气含湿量极低 ($<1.2\text{g/kg}_{干}$) 设备加湿效果较差, 在 200g/h 以下。其余工况下均能有较好的加湿效果, 基本在 200~280g/h。虽无一工况加湿量可达 300g/h, 仍与市面有水加湿设备有一定差距, 但实验工况与实际工况有一定差距。实际工况室内空气温湿度会随设备处理上升而实验工况室内空气温湿度不变, 作为劣势工况效果略小于实际工况。

4.2.2 进风温度的影响

不同的进风温度对转轮的吸附过程有一定的影响。图 12 展示了进风温度对设备冬季加湿能力的影响。可以看出, 在相对湿度相同的情况下进风温度也在一定程度上对设备加湿能力有一定的影响。相对湿度相同的情况下, 随进风温度上升, 设备加湿量总体上来说呈上升趋势。在相对湿度为 50% 的情况下, 随着进风温度的上升设备总加湿量增加了 37.15%。但随着相对湿度的增加, 温度对设备加湿能力的影响逐渐减小, 相对湿度在 60% 时设备总加湿量随温度上升仅增加 21.75%。

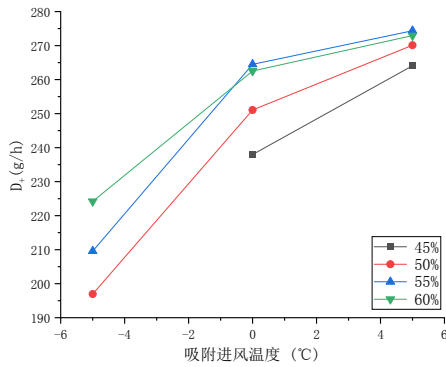


图 12 吸附进风温度对设备加湿性能的影响

Fig.12 Influence of adsorption inlet air temperature on humidification performance of equipment

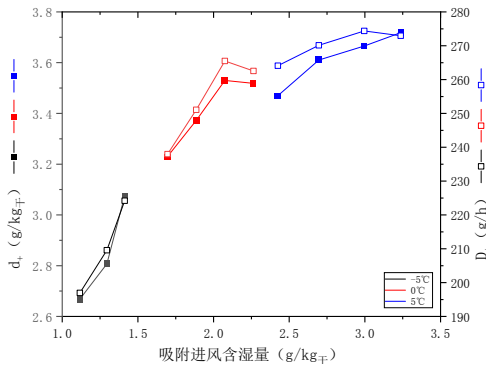


图 13 吸附进风含湿量对设备加湿性能的影响

Fig.13 Influence of adsorption inlet air moisture content on humidification performance of equipment

4.2.3 进风含湿量的影响

不同温湿度的室外空气含湿量不同，会直接影响设备吸附加湿部分的加湿能力。图 13 展示了吸附进风含湿量对设备加湿性能的影响。可以发现总加湿量与吸附进风含湿量有一定的联系，总加湿量会随吸附进风含湿量的增加而增加。在 0℃工况下，随进风含湿量增加 20.04%，设备加湿量增加 4.32%；在 5℃工况下随进风含湿量增加 20.07%，设备除湿量增加 3.00%。发现在进风含湿量小于 2.2g/kgₐ 时影响较大，之后影响逐渐减小。

4.2.4 再生温度的影响

再生温度也对设备性能有一定的影响。图 14 是再生温度对设备加湿性能的影响。可以发现，在 RH=50%、再生温度 60℃时设备由于再生温度不足无法将吸附的水分再生，几乎没有加湿能力。而再生温度提升至 80℃时的总加湿量可以达到 196.95g/h。在其他相对湿度下设备总加湿量也随再生温度的提高有一定的上升。可以看出设备再生温

度的提高可以有效提高设备的加湿能力，相同温度下进风相对湿度越低，再生温度对加湿性能的提升越大。但同时，再生温度的升高也会使再生排风的温度随之升高。由于再生排风直接送入室内，考虑到室内温度可能存在要求，不应将再生温度设定过高。

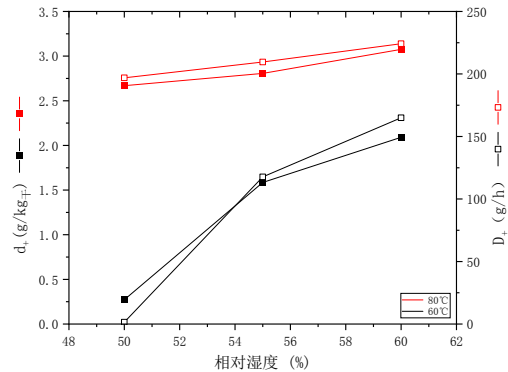


图 14 再生温度对设备加湿性能的影响

Fig.14 Influence of regeneration temperature on humidification performance of equipment

5 结论

设备经测试在潮湿季节可以代替市面上常见工业除湿设备，并以全新风除湿为技术特点，采用新风与室内排风全热回收一次除湿为主要节能方式；干燥季节有一定的加湿能力，以无水加湿为技术特点，采用室内内循环加湿；两个季节两种湿度调节方向相结合。有较好的技术特点与优势，并且有较大的市场潜力。经济性方面设备极大的减少了用户在采购设备、设备使用及维护方面的投资。并且在一定程度上减小了总体能耗。在设备价格与后期费用方面较市面常见设备有较大的优势。

利用转轮系统测试设备各参数对除湿性能的影响，获得结果如下：

(1) 设备表现出了随吸附进风温度上升而增大的除湿能力，随着温度由 17℃ 升至 32℃，设备除湿量平均增加了 42.21%；

(2) 设备表现出了随吸附进风含湿量升高而增大的除湿能力，随着含湿量的上升设备除湿量平均增加了 134.23%，分析认为存在一个含湿量分界线，达到有设备时的极限除湿量；

(3) 设备在再生温度为 50℃ 时表现出了较好的除湿能力，随再生温度由 50℃ 升至 90℃，设备除湿能力增加 50.24%，设备除湿性能上升。但过

高再生温度影响设备总体能耗,此温度应同时照顾到设备再生性能和建筑总体节能性。

利用转轮系统测试设备各参数对加湿性能影响,获得结果如下:

(1) 设备加湿量随吸附进风温度上升总体来说呈上升趋势。随着吸附进风温度由 0℃ 升至 5℃, 设备总加湿量平均增加了 29.45%;

(2) 吸附进风含水量对设备吸附加湿量有一定的有利影响,随吸附进风含水量增加约 20%, 设备加湿量平均增加 3.66%。但在吸附进风含水量小于 2.2g/kg_干时影响较大,之后影响逐渐减小,理论分析后认为影响减小的原因为低温导致 MOF 复合吸附剂难以吸附空气中更多的水分与再生温度不足导致的转轮上吸附的水分再生不完全;

(6) 设备再生温度的提高可以有效提高设备的加湿能力,相同温度下吸附进风相对湿度越低,再生温度对加湿性能的提升越大。但同时,再生温度的升高也会使再生排风的温度随之升高。考虑到室内温度可能存在要求,不应将再生温度设定过高。

在设备实际使用中发现,设备风量的增加对设备除、加湿性能均有影响。分析认为是风量增加导致转轮区域风速上升,吸附侧气体与吸附剂接触时间减少导致吸附效果减弱,从而减弱设备整体性能。这一发现对设备的改进与未来的研究提供了方向。

参考文献:

- [1] 赵荣义.空气调节(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 刘章君.调湿材料室内温湿度调节效果及机制研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [3] 连锦杰.改善空调空气品质与节省能源之蜂巢式陶瓷除湿轮与全热交换空气清净机[J].暖通空调,1994,(2):33-36.
- [4] 裴海涛,陈吉明,陈振华,等.大型连续式跨声速风洞干燥系统参数优化研究[J].实验流体力学,2022,36(1):89-95.
- [5] 王教领,宋卫东,金诚谦,等.转轮除湿干燥技术研究进展[J].中国农机化学报,2021,42(4):110-119.
- [6] TU R, HWANG Y. Efficient configurations for desiccant wheel cooling systems using different heat sources for regeneration[J]. International Journal of Refrigeration, 2018,86:14-27.
- [7] 袁艳,欧阳惕,林创辉,等.热回收型转轮复合型除湿系统的实验研究[J].制冷,2013,32(2):5-9.
- [8] O'CONNOR D, CALAUTIT J K, HUGHES B R. A novel design of a rotary desiccant system for reduced dehumidification regeneration air temperature[J]. Energy Procedia, 2017,142:253-258.
- [9] 吴宣楠,葛天舒.无水加湿系统性能模拟与分析[J].制冷技术,2021,41(4):1-6.
- [10] 袁琪,刘清龙,肖凯,等.无水加湿技术在空调产品中的应用[C].第五届全国制冷空调新技术研讨会论文集,2008:599-603.
- [11] 李荣年,叶晟.舒适性空调用无水加湿转轮开发[J].制冷空调与电力机械,2003(6):46-47,37.
- [12] 杨国忠,徐江康,张惟,等.房间空调器无水加湿装置设计及试验研究[J].制冷与空调,2015,15(4):24-27.
- [13] 何海斌,李勇,代彦军,等.太阳能空气集热及转轮除湿/加湿混合系统冬季供暖分析[J].太阳能学报,2015,36(7):1690-1696.
- [14] 秦峰,喻智锋,杨凯,等.太阳能吸附除湿加湿冷暖多用机[J].中国水运(下半月),2020,20(9):76-78.
- [15] 范红.转轮除湿空调系统再生排风回收及利用研究[D].西安:西安科技大学,2021.
- [16] LIM H, LEE S J, SU Y, et al. Experimental study and prediction model of a liquid desiccant unit for humidification during the heating season[J]. Journal of Building Engineering, 2022,45:103549.
- [17] 宋蕊.冰箱内吸收/吸附除湿技术分析[J].科学创新导报,2019,16:50-52.
- [18] LIU Z, CHENG C, HAN J, et al. Experimental evaluation of the dehumidification performance of a metal organic framework desiccant wheel[J]. International Journal of Refrigeration, 2022,133:157-164.
- [19] LIU Z, CHENG C, HAN J, et al. Dehumidification performance of aluminum fumarate metal organic framework and its composite[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,199:117570.