

## 转轮除湿系统优化技术研究进展\*

陈捷超<sup>1,2</sup>, 黄宏宇<sup>1,2†</sup>, 何兆红<sup>1,2</sup>, 邓立生<sup>1,2</sup>, 刘林<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 新型高效除湿技术可满足家居环境舒适性需求和相关工业行业除湿标准, 符合节能环保政策要求。目前转轮除湿机技术已较成熟, 具有系统设备简单、除湿费用低和绿色环保等优点, 但仍然存在可改善的技术方向, 比如提高除湿剂吸附能力、除湿装置内部传热传质性能、低品位能源利用效率等。本文针对转轮除湿系统的优化技术进行了讨论和总结, 分别从新型复合除湿剂、除湿床结构、循环系统、低品位能源高效利用以及运行环境等五个优化方面进行阐述, 为转轮除湿系统的实际应用提供参考。

**关键词:** 除湿; 固体吸附; 除湿转轮; 优化

中图分类号: TK173 文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.06.007

## Research Progress of Optimizations for Rotary Desiccant Wheel

CHEN Jie-chao<sup>1,2</sup>, HUANG Hong-yu<sup>1,2</sup>, HE Zhao-hong<sup>1,2</sup>, DENG Li-sheng<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The new efficiency dehumidification technology can meet the comfort requirements in the household environment and the relevant industrial dehumidification standards, which is in line with the energy conservation and environmental protection policy. The rotary desiccant wheel is of relatively mature technology, which has advantages of simple equipment, less consumption and environment-friendly. However, there are still several aspects to improve the technology, for example, the improvement in adsorption ability of desiccants, heat and mass transfer performance of the internal dehumidifying device, utilization efficiency of the low-grade energy sources, and so on. In this paper, the recent optimization techniques for rotary desiccant wheel systems are summarized. Five aspects of optimization such as development of new composite desiccant, invention of structure of desiccant bed, novel design of circulation system, enhancement of the utilization efficient of low-grade source energy and operation optimum with ambient air condition, are described. This review may provide some reference for the actual application of rotary wheel dehumidification system.

**Key words:** dehumidification; solid adsorption; rotary desiccant wheel; optimization

## 0 引言

随着人们对居住环境舒适性的重视以及工业生产中除湿标准的提高, 新型高效的除湿技术引起了广泛关注。常用的空气除湿方法有液体吸收剂除湿、转轮法除湿、蒸汽压缩除湿、冷却法除湿、膜法除湿、热泵除湿、热电冷凝除湿以及电化学除湿等。与传统蒸汽压缩除湿法相比, 液体吸收式除湿法节

能效率可达 40%, 并可充分利用低品位热源, 目前已被商业化广泛推广<sup>[1]</sup>。转轮除湿法具有与液体吸收式除湿法相同量级的效率值, 并且还可满足小型化、防振动、设备简化等应用要求。

转轮除湿空调系统属于空调领域的一个重要分支, 在各种行业得到广泛应用, 包括制药、食品加工、医疗产品、自动化仪表、废水处理设施、电子、国防应用等行业。全球范围内转轮除湿机的主要产

\* 收稿日期: 2017-09-07 修订日期: 2017-10-25

基金项目: 广东省科技计划项目 (2016A050502040); 广东省自然科学基金项目 (2017A030310185)

† 通信作者: 黄宏宇, E-mail: haughny@ms.giec.ac.cn

地集中在日本、美国、瑞典和中国等地。虽然国产的除湿机已发展了 20 多年,但先进技术仍被美国、日本、瑞典等国的企业所掌握,因而中国产品在国内外、外市场中的地位并不显著。

尽管对转轮除湿技术的研究已有很多,但仍然存在一些不足之处,比如除湿床吸附量低、热量和组分传递系数小、循环再生周期长等。为了进一步提高系统除湿效率,国内外学者开展了大量关于新型复合除湿剂的研究,开发出更效率的除湿床结构,以及对宏观的循环系统进行了优化。本文就目前转轮除湿系统各类优化方向的主要研究进展进行概括和描述,予读者以借鉴和分析。

## 1 转轮除湿机原理及技术特点

转轮除湿技术最早由美国的 BRYANT 在 1950 年发明,但随着技术的发展,日本和瑞典在转轮制造技术上逐步领先,而国内技术落后于世界前沿较多。除湿转轮大多采用蜂窝式结构,划分为吸湿区(或称为处理区)和再生区;两个区域分别通入流动方向相反的待处理空气和再生空气,如图 1 所示。随着驱动装置带动转轮缓慢转动,吸湿区内吸附湿空气中水分达到饱和状态后的通道逐渐进入再生区,由高温空气进行脱附再生,此过程周而复始,从而稳定持续获得干燥空气。干燥空气经温度调节后送入指定空调房间,实现高精度的潜热和显热分步控制。

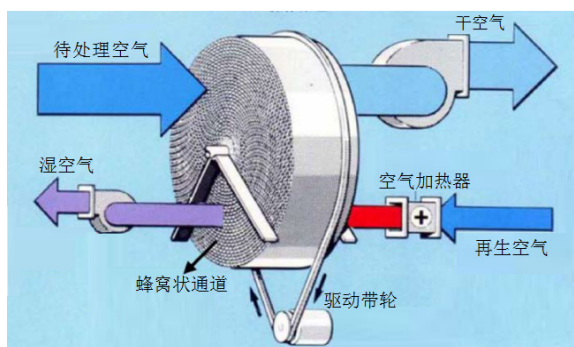


图 1 转轮除湿机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the desiccant wheel

目前转轮除湿机技术较成熟,与传统的蒸汽压缩冷凝除湿相比,具有以下几点显著优势<sup>[2]</sup>:(1)采用固体吸附除湿节省总电力消耗 25%以上,实现省电节能目标;(2)低能消耗,热源温度要求低(80℃以下),可充分利用低品位的再生热源;(3)尽管周

围环境空气条件在较大的范围内变化,它都可控制相对湿度低达±1%,并且可提供 80 ~ 42 500 m<sup>3</sup>/h 标准容量的干燥空气;(4)系统设备简单、除湿费用低、操作容易;(5)除湿所需吸附剂绿色环保无污染。

## 2 转轮除湿的主要优化方向

目前转轮除湿技术仍然存在不少不足之处,比如除湿剂吸附能力差、除湿装置传热传质阻力系数大、能源利用效率低等。为了进一步提高转轮除湿系统性能,国内外学者们从新型复合除湿剂、除湿床结构、循环系统、低品位能源高效利用以及运行环境等方面进行分析及优化。

### 2.1 新型复合除湿剂

转轮除湿剂的开发在 2008 年已发展到第四代,目前出现了分子筛、硅胶、卤素盐、活性炭、金属有机框架等除湿材料<sup>[2]</sup>。硅胶因具有价格低廉、运行稳定性好、使用相对湿度范围广、几乎无滞后现象等优点而被广泛接受。

单一除湿剂受自身孔参数的限制,只能在特定空气条件下发挥最大除湿能力,比如硅胶对低湿度空气除湿的能力较差,因而,现在出现了各类复合除湿剂,其中常见的复合除湿剂有“分子筛-硅胶”、“硅胶-氯化锂”、“硅胶-高分子材料”等。除湿剂大多用于涂覆式蜂窝转轮,从而能通过介质流体的换热减弱吸附热的影响。AL-ALILI 等<sup>[3]</sup>开发了一种功能沸石吸附材料 FAM-Z01,结果表明,在给定条件下转轮除湿能力可达  $1.96 \pm 0.12$  kg/h,并且控制湿度波动范围在 5%以内。贾春霞等<sup>[4]</sup>开发了硅胶与氯化锂复合而成的除湿剂,研究结果表明当两者比例合适时,硅胶的除湿能力显著增强、且再生温度降低,而氯化锂结晶溶解失效的问题也得到解决。HU 等<sup>[5]</sup>还发现,采用硅胶-氯化锂复合除湿剂的除湿系统能准确地对湿度进行控制。符合图 2 中 Langmuir 型除湿等温线的高分子除湿剂,在相对湿度大及再生温度低的环境中,其吸附量和吸附速率都优于硅胶,还可高效回收利用低品位能,因此,近年来关于高分子除湿剂的研究较多<sup>[6]</sup>。

表 1 中总结了近年来具有代表性的新型高分子聚合物除湿材料的除湿性能,显然,复合材料比纯硅胶具有更大的除湿性能值(DCOP)和除湿量。新型复合除湿剂还可应用于填充式除湿转轮。表 1 中

可看出, 硅胶与聚丙烯酸钠盐复合而成的除湿剂具有非常强的除湿能力, 给定湿空气条件下除湿量达  $7.0 \text{ g/kg}$ , 且其平均吸附率达  $5.8 \text{ g/min}^{[7]}$ 。其中, CHUA<sup>[8]</sup>开发了硅胶-氯化钙、硅胶-氯化锂、硅胶-聚乙烯醇等三种以硅胶为基体的复合材料, 与商用纯硅胶相比, 除湿量至少增加 55%, 综合除湿性能系数至少增加 11%。CHEN 等<sup>[9]</sup>通过实验分析了除湿剂分别为硅胶、聚丙烯酸、活性矾土、分子筛及硅藻泥等五种材料的填充式除湿转轮, 结果表明, 分子筛由于温度过低无法再生脱附; 聚丙烯酸具有大的吸附能力, 但吸附周期较长; 当聚丙烯酸钠与矾土合成新型复合材料后, 空气进出口压力降减少了 33%, 是一种理想的新型除湿剂。因此, 高分子

复合除湿剂的再生温度较低, 今后的研发方向主要在于进一步增加除湿量及缩短除湿周期。

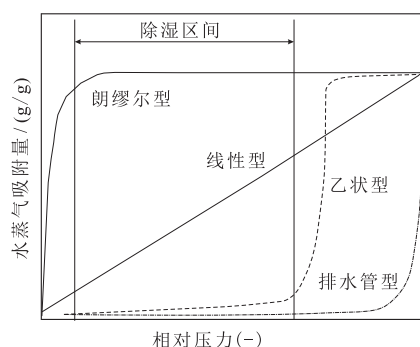


图2 水蒸气吸附等温线<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Water vapour adsorption isotherms<sup>[2]</sup>

表1 不同除湿剂除湿性能对比

Table 1 Performance comparison of different kinds of desiccant

除湿剂	吸附床类型	进口温度/°C	进口相对湿度/%	再生温度/°C	DCOP	除湿量/(g/kg)	文献
硅胶	蜂窝状转轮	28	40	100	1.8	4.0	[4]
硅胶+氯化锂	蜂窝状转轮	28	40	100	3.3	6.1	[4]
硅胶+氯化锂	蜂窝状转轮	28	72	100	1.7	3.2	[8]
硅胶+聚乙烯醇	蜂窝状转轮	28	72	100	2.1	1.9	[8]
活性铝	填充式	30	70	25	1.1	1.7	[9]
				40	0.9	2.1	[9]
聚丙烯酸+活性铝	填充式	16~33	65~78	25~40	3.21	-	[9]
聚丙烯酸钠盐	填充式	30	70	50	-	1.31	[10]
	涂抹式	25~30	75	60	0.45~0.5	1.2	[11]
硅胶+聚丙烯酸钠	填充式	16	45	40~50	-	7.0	[7]
硅胶+聚丙烯酸钠	填充式	30	70	50	-	2.2	[12]

## 2.2 除湿床结构优化

除湿转轮由支撑载体、金属气流通道、吸湿介质以及驱动转置组成。转轮内部支撑载体的材料通常为玻璃纤维和陶瓷, 转轮内部结构可制作成正弦、三角形、以及蜂窝状等结构, 增加除湿剂与空气的接触面积; 为了减轻转轮重量和降低成本, CHUNG 等<sup>[13]</sup>开发了一种可增强转轮气密性的塑料再生器。

转轮内部固体除湿剂与空气之间存在较大的对流传热热阻和导热热阻, 并且水蒸气凝结过程中产生大量吸附热, 因而转轮内部温度逐渐升高, 除湿效率降低。GOLDSWORTHY 等<sup>[14]</sup>开发出一种内部水冷的除湿转轮, 主要特点为基于管壳式换热器在气流通道一侧涂抹除湿剂层。实验和数值模拟结果表明, 此技术的除湿效率明显高于传统除湿转轮, 且再生温度可低至  $50^\circ\text{C}$ , 选择适当的干燥剂(硅胶)

和优化设计除湿转轮, 还可进一步提高除湿能力。类似以高效换热器技术为基础的恒温除湿床的研究还有上海交大王如竹团队对内部水冷翅片管式除湿床的研发<sup>[15-17]</sup>, 以及名古屋大学窪田光弘团队对内部风冷叉流式恒温除湿床的研发<sup>[18]</sup>, 但此类除湿系统的金属材料比重较高, 设备体积大。

YADAV 等<sup>[19-20]</sup>提出了一种有效提高除湿性能的转轮模型, 即除湿转轮增加吹扫净化区域, 如图3所示, 室外空气经过此转轮区域进入室内后, 加热至再生温度后通入转轮再生区域, 并称模型为有效再生模型。他们建立了完整的数学模型进行数值计算, 结果表明, 进口速度范围为  $1\sim 4 \text{ m/s}$  时转轮除湿的效率较高, 并且当改变再生温度、外部空气湿度等控制参数时, 有效再生模型相对于常规再生模型具有更佳的除湿效果。此外, YADAV 等还对净



化区域扇形角进行优化<sup>[21]</sup>, 指出转轮沿逆时针方向旋转时除湿性能更佳, 净化区域扇形角为 5°时除湿效率最高。MANDEGARI 等<sup>[22]</sup>通过采用数值模拟的方法分析了湿空气各种物理参数与吹扫角度匹配时的 DCOP 值, 数值结果表明, 吹扫角度与出口空气湿度成函数关系, 而作为运行参数的处理空气流速和作为设计参数的流道长度, 是影响 DCOP 值的两个次要因素, 而为除湿转轮配置一个最优角度的吹扫区域, 可显著提高 DCOP 值。

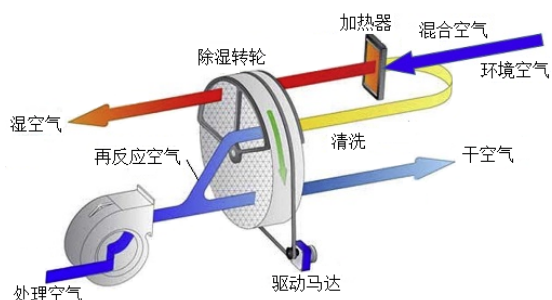


图 3 配置吹扫区域除湿转轮的气流示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Schematic air flows of DW with purge angle<sup>[20]</sup>

为了降低转轮再生时由于电加热产生的能量损失, 姚晔等<sup>[23-25]</sup>提出除湿剂再生脱附时采用超声波技术。超声波是一种高频弹性波, 利用其特有的高频机械振动效应将除湿剂表面的液体水膜撕裂为微米级的小颗粒水珠, 继而从除湿剂表面脱离, 这样将大大降低再生能耗。超声振动使介质产生强烈的高频振荡, 介质之间互相摩擦而发热, 与传统热传导的加热方式不同, 超声波的热作用一开始便深入固体除湿剂的内部, 使整个固体除湿剂的温度得到增加, 因此将更有助于加快水分子从除湿剂中的脱离速度。此外, KUBOTA 等<sup>[26]</sup>提出联合热空气和微波加热的方式对转轮进行再生, 实验结果表明除湿转轮的再生率与微波功率成正比, 且热空气和微波加热联合的再生的方式可有效降低除湿循环周期短的系统的能耗。超声波或微波再生技术是高效节能的新型再生方法, 但此技术依然存在不足之处, 如超声波转置相对较复杂, 将使除湿转轮加工成本升高, 同时存在超声波泄漏的问题。

循环流化床除湿系统是一种传热传质效率非常高的系统。与填充床相比, 循环流化床具有压降小、除湿剂物性均匀、无驱动装置等特点<sup>[27]</sup>。由图 4a 和图 4b 可知, 系统包含两个充满除湿剂颗粒的流化床转置, 设定风速为 4~6 m/s 使颗粒流化。床体内部

设有两个烟囱状通道, 分别用于收集沉降颗粒及两流化床之间颗粒传输。CHIANG 等<sup>[27]</sup>采用实验方法分析了流化床除湿空调系统的吸附和脱附循环特性, 实现系统在无外部能量施加时可连续高效运行, 结果表明, 系统的除湿性能随气流速度与再生温度而增加, 同时指出聚合物除湿剂的使用可有效解决 CHEN 等<sup>[28]</sup>发现的硅胶除湿颗粒之间碰撞产生粉尘污染的问题。HAMED 等<sup>[29]</sup>和 CHEN 等<sup>[30]</sup>采用实验的方法分析了流化床吸附系统内的传热传质效率, 发现流化床出口的空气湿度比填充除湿床的低 20%, 且吸附和脱附的效率与风速成正比。

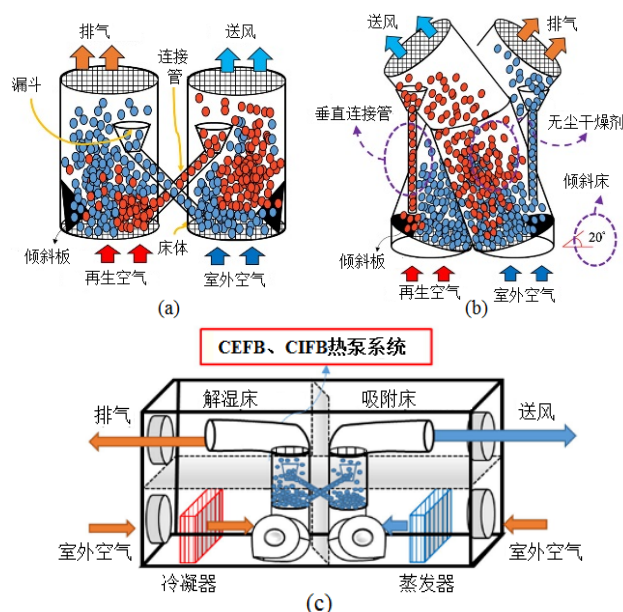


图 4 循环流化床除湿系统<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Circulating fluidized bed dehumidification system: (a) erect fluidized beds, (b) inclined fluidized beds and (c) desiccant wheel combined with a heat-pump system<sup>[27]</sup>

除了开发出上述新型除湿床结构外, 学者们还深入探讨了除湿转轮的再生区域扇形角<sup>[31]</sup>、转轮再生转速<sup>[32]</sup>、转轮的密封性<sup>[13]</sup>、非平衡空气进出口气流参数<sup>[33]</sup>以及热质传递效率<sup>[34]</sup>等因素对除湿效率的影响, 为除湿转轮结构的改进与优化方向提供了坚实丰富的理论指导。

### 2.3 循环除湿系统优化

通过转轮除湿机辅助暖通空调 (DHVAC) 系统对新风温度和湿度进行独立控制的应用, 已经得到了全面商业化推广<sup>[35]</sup>。目前应用广泛系统有五种类型, 分别为 Pennington 循环、Recirculation 循环、Dunkle 循环、SENS 循环以及 DINC 循环, 其中,

串联配置的 SEN 循环, 其热效率最高<sup>[36]</sup>。盛颖等<sup>[37]</sup>根据多元线性回归理论建立了评价除湿性能的回归模型, 发现转轮再生温度和室外空气相对湿度对除湿性能影响较大。LEE 等<sup>[38]</sup>把转轮除湿辅助暖通系统应用至汽车上, 并且设计了五套应用方案, 总功耗最大可减少 8%。

双级或多级转轮系统可降低转轮的再生温度, 显著提高了除湿效率, 增加低品位能的利用途径<sup>[39]</sup>。不同热源时的双级除湿转轮的除湿能力如表 2 所示, 显然, 太阳能系统的除湿能力与热水系统及电加热系统相当<sup>[40]</sup>。刘晓华等<sup>[40]</sup>分别对单级和双级转轮除湿空调系统进行了焓分析, 其中双级系统中处理空气通过第一级转轮后, 经冷却盘管降温后再次进入第二级转轮; 研究表明, 当除湿量相同时, 双级系统所需的热源温度比单级的低, 更能利用再生能源或低品位能源进行除湿再生; 当热水流量较低时, 双级系统具有更高的焓效率。GADALLA 等<sup>[41]</sup>把目前备受关注的 Maisotsenko 制冷机与多级转轮除湿机进行匹配, 并对此系统进行了实时性能分析, 结果表明, 在 6 月至 10 月期间每天用电高峰时段系统的平均 COP 值约为 1.77。

JEONG 等<sup>[42-43]</sup>设计出在单个转轮中实现二级除湿的方法, 即把常规转轮分成面积相同的四部分

气流区域, 如图 5 所示, 其中过程①→②→③→⑤为除湿过程, ⑧→⑨→⑩→⑪为再生过程。研究结果证实四分除湿转轮最低可利用 33℃ 的低温热源, 并通过对复合除湿空调系统中转轮转速和除湿性能的优化发现, 该系统比蒸气压缩除湿空调系统的 COP 值提高近 94%。然而, 四分除湿转轮中的压降比常规转轮的高, 将在一定程度上削弱其效率。在保证低再生温度的条件下, 采用新型复合除湿剂的多级系统可进一步提高除湿性能。

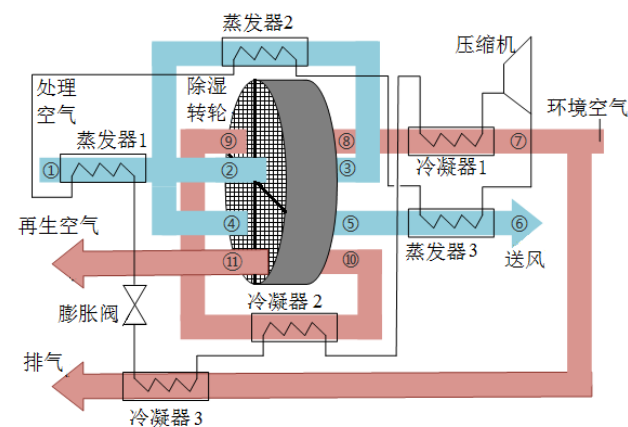


图 5 四分除湿转轮复合空调系统<sup>[42-43]</sup>

Fig. 5 Hybrid air-conditioning system with four-partition desiccant wheel<sup>[42-43]</sup>

表 2 双级转轮除湿空调系统研究的文献对比<sup>[40]</sup>

Table 2 Analysis of two-stage desiccant wheel systems from the literature<sup>[40]</sup>

热源	$A_p/A_r$	$m_r/m_a$	$m_w/m_a$	除湿能力/(g/kg)	再生温度/℃	处理空气进口	再生空气进口
热泵	1	1.0	-	8.5	44.0	33.0℃, 19.0 g/kg	12.0 g/kg
热水	1	1.0	-	4.0	43.2	28.0℃, 11.9 g/kg	19.5 g/kg
热水	3	2.6	0.4 ~ 1.7	6.0 ~ 9.0	50.0 ~ 90.0	35.0℃, 14.1 g/kg	14.1 g/kg
太阳能	3	2.5	-	9.0 ~ 12.0	60.0 ~ 80.0	26.0℃, 16.0 g/kg	18.0 g/kg
电能	3	2.4	-	3.0 ~ 15.0	60.0 ~ 90.0	24.8 ~ 37.1℃, 10.0 ~ 30.3 g/kg	3.6 ~ 16.3 g/kg

注:  $A_p/A_r$ , 转轮处理与再生区域面积比;  $m_r/m_a$ , 再生与处理空气流量比;  $m_w/m_a$ , 水流量与再生空气流量比。

## 2.4 太阳能等低品位能源应用的开发

人们对室内环境舒适性的要求越来越高, 因而空调能耗成为了建筑行业最大能耗之一, 大量电力需求给电网施加了巨大供电压力。为缓解能源压力, 开发和利用太阳能、生物质能等低品位能源的研究逐渐受到重视。

太阳能利用技术至今已发展到第三代, 即低温热回收转化为冷量和电能的技术, 其中包括翅片管

涂抹式除湿<sup>[15-16]</sup>和多级除湿<sup>[40]</sup>等技术。GUO 等<sup>[44]</sup>通过理论计算及文献整理对太阳能 PV/T 集热吸附转轮除湿进行分析, 结果发现, 通过保持单位集热板面积低流量、采用瓷釉涂层处理以及优化管道水力半径等方法, 能高效利用集热板上 50 ~ 60℃ 的低温热源。ASSADI 等<sup>[45]</sup>采用 TRNSYS 软件对太阳能转轮除湿暖通系统进行了一系列数值模拟, 对循环系统中各部件进行了性能分析, 结果表明, 对于面

积为 115 m<sup>2</sup> 的办公楼, 太阳能系统相对于机械压缩制冷系统减少约 40% 能耗, 并且在白天时节能效果更明显。此外, 太阳能吸附除湿系统应用的经济性分析结果表明, 尽管前期的投资和维护成本较高, 但生命周期成本会更低<sup>[46]</sup>。

KOGA 等<sup>[47]</sup>在菲律宾政府节能住宅建设项目的支持下, 设计了一套太阳能、生物质能、地热能等可再生能源综合高效利用的节能建筑, 转轮除湿系统和地面蒸发冷却系统相结合, 保证室内温度低于 27℃, 全年平均空气湿度值小于 11 g/kg。JEONG 等<sup>[42-43]</sup>开发出的四分除湿转轮, 最低可利用 33℃ 的低温热源, 更是极大地拓宽了低品位热源的利用来源。

## 2.5 根据运行环境优化

除湿空调系统是对室外湿空气进行处理, 因而系统的运行性能与环境条件有关。PANARAS 等<sup>[48]</sup>针对实际运行环境中水蒸气含量变化范围广的问题, 综合考虑转轮除湿空调系统的送风温度、再生温度以及系统组件的效率等因素进行粗略计算, 建议高温空气环境采用 Pennington 循环 (Ventilation 循环), 而高湿度空气环境采用 Recirculation 循环。SPHAIER 等<sup>[49]</sup>采用数值模拟对变化的环境条件下吸附除湿暖通系统的运行过程进行了分析, 结果表

明, 空气流速和再生温度等参数对室内热舒适温湿度区间的调节至关重要, 蒸发冷却器和加热再生器的效率是维持空调房间内热舒适条件的主要因素。FATOUH 等<sup>[50]</sup>采用复合除湿空调实验, 证实了高温 (28 ~ 36℃)、高湿度 (40% ~ 100% RH) 的气候条件下空调系统可连续运行, 结果表明, 当除湿床内除湿层为多层活性氧化铝涂层时, 复合除湿系统的 COP 值比常规压缩式空调系统提高 12.4%。ENTERIA 等<sup>[51]</sup>对亚洲东部地区温带、亚热带和热带气候三种气候条件下太阳能吸附除湿空调系统的运行性能进行数值模拟研究, 结果表明, 太阳能除湿系统的规格随气候带的变化而变化, 由表 3 可知, 温带地区 (北京和东京) 所需集热平板的面积比热带地区 (马尼拉和新加坡) 的大, 而热带地区所需蓄热水箱的体积最大。此外, 学者们还针对性地分析了全球各地区不同气候条件下吸附除湿系统的运行特性, 如太平洋亚洲地区<sup>[52]</sup>、欧洲地中海地区<sup>[53]</sup>、拉丁美洲及赤道附近热带城市<sup>[54]</sup>、澳大利亚的不同城市<sup>[55]</sup>等, 调研结果发现, 在全球各地区不同气候类型的温、湿度条件下, 除湿系统的选型需要重新设计。完善的时间和空间空气参数信息库及有效的数据模型, 可智能化地为设计人员提供最优配置的除湿参数。

表 3 亚洲东部不同气候类型下太阳能吸附除湿空调系统的规格

Table 3 Specifications of the solar desiccant cooling system under investigation when applied under different climatic conditions in East Asian countries

城市	平板集热器		蓄热水池		空气流量	
	倾斜角 / °	表面积 / m <sup>2</sup>	体积 / m <sup>3</sup>	高度 / m	室外空气 / (m <sup>3</sup> /h)	送风 / (m <sup>3</sup> /h)
北京	39	12	0.644	1.7	700	350
东京	35	10	0.644	1.7	800	400
台北	25	14	0.966	1.7	1 200	600
香港	22	12	0.966	1.7	1 200	600
马尼拉	14	14	1.288	1.7	1 000	500
新加坡	1	14	1.288	1.7	1 500	750

## 3 结 论

本文对转轮除湿系统现有主要优化方向进行了综述, 优化方向包括新型复合除湿剂、除湿床结构、循环系统、低品位能源高效利用以及运行环境等, 为除湿转轮系统的优化设计提供参考。结果表明,

除湿剂影响转轮除湿性能的重要因素, 其中, 硅胶与高分子聚合物复合而成的新型复合除湿剂的除湿性能优异、再生温度低, 成为了目前许多研发人员努力的方向。对系统而言, 内部水冷的管壳式除湿转轮可降低吸附热的影响, 可实现恒温除湿过程; 而设置吹扫净化区域后的转轮和采用微波或超声波

再生技术后的装置, 则可降低再生温度, 提高 DCOP 值。降低再生温度、提高低品位能利用效率的除湿方法还可采用双级(或多级)转轮除湿机系统, 在一定条件下具有更高的焓效率, 其中四分转轮最低可利用 33℃ 的低温热源。

### 参考文献:

- [1] KOZUBAL E, HERRMANN L, DERU M, et al. Low-flow liquid desiccant air conditioning: General guidance and site considerations[R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2014. DOI: 10.2172/1159352.
- [2] WANG W L, WU L M, LI Z, et al. An overview of adsorbents in the rotary desiccant dehumidifier for air dehumidification[J]. Drying technology, 2013, 31(12): 1334-1345. DOI: 10.1080/07373937.2013.792094.
- [3] AL-ALILI A, HWANG Y, RADERMACHER R. Performance of a desiccant wheel cycle utilizing new zeolite material: Experimental investigation[J]. Energy, 2015, 81: 137-145. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.084.
- [4] JIA C X, DAI Y J, WU J Y, et al. Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system[J]. International journal of refrigeration, 2007, 30(2): 345-353. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2006.04.001.
- [5] HU L M, GE T S, JIANG Y, et al. Performance study on composite desiccant material coated fin-tube heat exchangers[J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 90: 109-120. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.033.
- [6] KANG H, LEE D Y. Experimental investigation and introduction of a similarity parameter for characterizing the heat and mass transfer in polymer desiccant wheels[J]. Energy, 2017, 120: 705-717. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.122.
- [7] CHEN C H, HSU C Y, CHEN C C, et al. Silica gel/polymer composite desiccant wheel combined with heat pump for air-conditioning systems[J]. Energy, 2016, 94: 87-99. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.139.
- [8] CHUA K J. Heat and mass transfer of composite desiccants for energy efficient air dehumidification: Modelling and experiment[J]. Applied thermal engineering, 2015, 89: 703-716. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.061.
- [9] CHEN C H, HUANG P C, YANG T H, et al. Polymer/alumina composite desiccant combined with periodic total heat exchangers for air-conditioning systems[J]. International journal of refrigeration, 2016, 67: 10-21. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.01.003.
- [10] LEE J, LEE D Y. Sorption characteristics of a novel polymeric desiccant[J]. International journal of refrigeration, 2012, 35(7): 1940-1949. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.07.009.
- [11] CAO T, LEE H, HWANG Y, et al. Experimental investigations on thin polymer desiccant wheel performance[J]. International journal of refrigeration, 2014, 44: 1-11. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2014.05.004.
- [12] CHEN C H, HSU C Y, CHEN C C, et al. Silica gel polymer composite desiccants for air conditioning systems[J]. Energy and buildings, 2015, 101: 122-132. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.05.009.
- [13] CHUNG H J, LEE J S, BAEK C, et al. Numerical analysis of the performance characteristics and optimal design of a plastic rotary regenerator considering leakage and adsorption[J]. Applied thermal engineering, 2016, 109: 227-237. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.074.
- [14] GOLDSWORTHY M J, WHITE S. Design and performance of an internal heat exchange desiccant wheel[J]. International journal of refrigeration, 2014, 39: 152-159. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.10.009.
- [15] ZHENG X, WANG R Z, GE T S. Experimental study and performance predication of carbon based composite desiccants for desiccant coated heat exchangers[J]. International journal of refrigeration, 2016, 72: 124-131. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.03.013.
- [16] ZHENG X, WANG R Z, GE T S, et al. Performance study of SAPO-34 and FAPO-34 desiccants for desiccant coated heat exchanger systems[J]. Energy, 2015, 93: 88-94. DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.024.
- [17] GE T S, CAO W, PAN X, et al. Experimental investigation on performance of desiccant coated heat exchanger and sensible heat exchanger operating in series[J]. International journal of refrigeration, 2017, 83: 88-98. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.07.005.
- [18] KUBOTA M, HANAOKA N, MATSUDA H, et al. Dehumidification behavior of cross-flow heat exchanger type Adsorber coated with Aluminophosphate zeolite for desiccant humidity control system[J]. Applied thermal engineering, 2017, 122: 618-625. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.047.
- [19] YADAV L, YADAV A. Effect of different arrangements of sector on the performance of desiccant wheel[J]. Heat and mass transfer, 2017: 1-17. DOI: 10.1007/s00231-017-2092-6.
- [20] YADAV L, YADAV A. Effect of desiccant isotherm on the performance of a desiccant wheel at different operating conditions[J]. Heat transfer—Asian research, 2017, 46(6): 623-646. DOI: 10.1002/htj.21234.
- [21] YADAV L, YADAV A. Mathematical investigation of purge sector angle for clockwise and anticlockwise rotation of desiccant wheel[J]. Applied thermal engineering, 2016, 93: 839-848. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.062.
- [22] MANDEGARI M A, FARZAD S, ANGRISANI G, et al. Study of purge angle effects on the desiccant wheel performance[J]. Energy conversion and management, 2017, 137: 12-20. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.01.042.
- [23] YAO Y. Using power ultrasound for the regeneration of dehumidizers in desiccant air-conditioning systems: A review of prospective studies and unexplored issues[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(7): 1860-1873. DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.042.
- [24] YAO Y, LIU S Q. Desiccant system with ultrasonic-assisted regeneration[M]//YAO Y, LIU S Q. Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014: 283-292. DOI: 10.1002/9781118921616.ch6.
- [25] YAO Y. Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2016, 31: 512-531. DOI: 10.1016/j.ultrsonch.2016.01.039.
- [26] KUBOTA M, HANADA T, YABE S, et al. Regeneration characteristics of desiccant rotor with microwave and hot-air heating[J]. Applied thermal engineering, 2013,

- 50(2): 1576-1581. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.044.
- [27] CHIANG Y C, CHEN C H, CHIANG Y C, et al. Circulating inclined fluidized beds with application for desiccant dehumidification systems[J]. *Applied energy*, 2016, 175: 199-211. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.009.
- [28] CHEN C H, Schmid G, Chan C T, et al. Application of silica gel fluidised bed for air-conditioning systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 229-238. DOI: org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.058.
- [29] HAMED A M, EL RAHMAN W R A, EL-EMAM S H. Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed[J]. *Energy*, 2010, 35(6): 2468-2483. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.042.
- [30] CHEN C H, MA S S, WU P H, et al. Adsorption and desorption of silica gel circulating fluidized beds for air conditioning systems[J]. *Applied energy*, 2015, 155: 708-718. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.06.041.
- [31] MUTHU S, TALUKDAR P, JAIN S. Effect of regeneration section angle on the performance of a rotary desiccant wheel[J]. *Journal of thermal science and engineering applications*, 2016, 8(1): 011013. DOI: 10.1115/1.4030966.
- [32] ANGRISANI G, ROSELLI C, SASSO M. Effect of rotational speed on the performances of a desiccant wheel[J]. *Applied energy*, 2013, 104: 268-275. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.051.
- [33] SUN J, BESANT R W. Heat and mass transfer during silica gel-moisture interactions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(23): 4953-4962. DOI: org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.043.
- [34] KANG H, LEE G, LEE D Y. Explicit analytic solution for heat and mass transfer in a desiccant wheel using a simplified model[J]. *Energy*, 2015, 93: 2559-2567. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.091.
- [35] ENTERIA N, YOSHINO H, TAKAKI R, et al. Exergetic performance of the desiccant heating, ventilating, and air-conditioning (DHVAC) system[M]//ENTERIA N, AWBI H, YOSHINO H. *Desiccant Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems*. Singapore: Springer, 2017: 109-131. DOI: 10.1007/978-981-10-3047-5\_5.
- [36] JANI D B, MISHRA M, SAHOO P K. Solid desiccant air conditioning—a state of the art review[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 60: 1451-1469. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.031.
- [37] SHENG Y, ZHANG Y F, SUN Y X, et al. Experimental analysis and regression prediction of desiccant wheel behavior in high temperature heat pump and desiccant wheel air-conditioning system[J]. *Energy and buildings*, 2014, 80: 358-365. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.05.040.
- [38] LEE H, LIN X J, HWANG Y, et al. Performance investigation on solid desiccant assisted mobile air conditioning system[J]. *Applied thermal engineering*, 2016, 103: 1370-1380. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.053.
- [39] HUANG C K. Adsorption cooling with multi-stage desiccant processes[C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. San Diego, California, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2013: V06BT07A034. DOI: 10.1115/IMECE2013-64480.
- [40] LIU X H, ZHANG T, ZHENG Y W, et al. Performance investigation and exergy analysis of two-stage desiccant wheel systems[J]. *Renewable energy*, 2016, 86: 877-888. DOI: 10.1016/j.renene.2015.09.025.
- [41] GADALLA M, SAGHAFIFAR M. Performance assessment and transient optimization of air precooling in multi-stage solid desiccant air conditioning systems[J]. *Energy conversion and management*, 2016, 119: 187-202. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.018.
- [42] JEONG J, YAMAGUCHI S, SAITO K, et al. Performance analysis of desiccant dehumidification systems driven by low-grade heat source[J]. *International journal of refrigeration*, 2011, 34(4): 928-945. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.10.001.
- [43] JEONG J, YAMAGUCHI S, SAITO K, et al. Performance analysis of four-partition desiccant wheel and hybrid dehumidification air-conditioning system[J]. *International journal of refrigeration*, 2010, 33(3): 496-509. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.12.001.
- [44] GUO J Y, LIN S M, BILBAO J I, et al. A review of photovoltaic thermal (PV/T) heat utilisation with low temperature desiccant cooling and dehumidification[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 67: 1-14. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.056.
- [45] ASSADI M K, MOHAMMADI A. Simulation of dynamical performance of solar desiccant cooling cycle[J]. *Applied mechanics and materials*, 2016, 819: 160-170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.819.160.
- [46] EICKER U, SCHNEIDER D, SCHUMACHER J, et al. Operational experiences with solar air collector driven desiccant cooling systems[J]. *Applied energy*, 2010, 87(12): 3735-3747. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.022.
- [47] YUKI K, JIN S, YOSHIHITO K, et al. Basic research for desiccant-based cooling system in consideration of effective utilization of low-temperature heat source[J]. *Memoirs of the faculty of engineering Miyazaki university*, 2013, 42: 59-64.
- [48] PANARAS G, MATHIOULAKIS E, BELESSIOTIS V. Investigation of the effect of ambient conditions on the performance of solid desiccant cooling cycles[J]. *International journal of sustainable energy*, 2018, 37(1): 67-80. DOI: 10.1080/14786451.2016.1177051.
- [49] SPHAIER L A, NÓBREGA C E L. Desiccant cooling cycle tuning for variable environmental conditions[J]. *Heat transfer engineering*, 2014, 35(11/12): 1035-1042. DOI: 10.1080/01457632.2013.863071.
- [50] FATOUH M, ABOU-ZIYAN H, MAHMOUD O, et al. Experimental analysis of hybrid and conventional air conditioning systems working in hot-humid climate[J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 118: 570-584. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.019.
- [51] ENTERIA N, YOSHINO H, MOCHIDA A, et al. Performance of solar-desiccant cooling system with silica-gel (SiO<sub>2</sub>) and titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) desiccant wheel applied in East Asian climates[J]. *Solar energy*, 2012, 86(5): 1261-1279. DOI: 10.1016/j.solener.2012.01.018.
- [52] ENTERIA N, MIZUTANI K, MONMA Y, et al. Experimental evaluation of the new solid desiccant heat pump system in Asia-Pacific climatic conditions[J]. *Applied thermal engineering*, 2011, 31(2/3): 243-257. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.09.004.
- [53] ZOUAOUI A, ZILI-GHEDIRA L, NASRALLAH S B. Solid desiccant solar air conditioning unit in Tunisia: Numerical study[J]. *International journal of refrigeration*, 2017, 74: 662-681. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.11.013.



- [54] CAMARGO J R, GODOY JR E, EBINUMA C D. An evaporative and desiccant cooling system for air conditioning in humid climates[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2005, 27(3): 243-247. DOI: 10.1590/S1678-58782005000300005.
- [55] WHITE S D, KOHLENBACH P, BONGS C. Indoor temperature variations resulting from solar desiccant cooling in a building without thermal backup[J]. International journal of refrigeration, 2009, 32(4): 695-704. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.01.019.

#### 作者简介:

陈捷超(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事低品位能源高效利用、吸附式除湿技术的研究。

黄宏宇(1978-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”项目引进人才, 主要从事低品位能提质及高效利用技术的研究。