

# 利用各种排热驱动的新型高效吸附式除湿空调系统

株式会社西部技研开发部 金伟力 岡野浩志

**摘要:** 作为新一代节能环保型空调之一的吸附式除湿空调系统, 具有不使用冷媒及其他有害物质, 不使用压缩机, 利用各种工业废热作为驱动能源、并可与各种燃气轮发电机等构成能量利用率极高的热电联产系统 (Cogeneration System) 等特性, 倍受瞩目。本文分析了现行吸附式除湿空调系统存在的问题, 对开发的新型高效吸附式除湿空调系统的构造、运转原理、性能特性, 实验结果及讨论作了详细阐述。为该新型节能环保型空调的设计与应用提供了重要的基础数据和设计指南。

**关键词:** 吸附式除湿空调系统, 热电联产系统, 蜂窝式吸附除湿转轮, 废热利用, 吸附

## 0. 前言

由于吸附式除湿空调系统可以对空气的温度和湿度分别加以处理, 近年来在许多领域得到了广泛的应用。鉴于上述情况, 我们从数年前开始了对吸附式除湿空调系统性能改进及实用化的开发研究。特别是针对近年来各种分布型热电联产系统不断普及的现状, 开发了一种可以直接利用各种排热的新型高性能吸附式除湿空调机。

## 1. 现行的吸附式除湿空调系统

吸附式除湿空调系统的概念是 1960 年代提出的, 80 年代以后研究人员开始从实验及模拟计算两方面对这一系统进行了大量的研究<sup>[1-9]</sup>。其流程如图 1 所示, 由蜂窝式吸附除湿转轮、显热交换转轮、再生空气加热器、直接蒸发式冷却器、风机等构成。该空调系统运转时空气状态变化过程在空气焓湿图上表示的结果如图 2 所示。新风风机将室外空气 OA 送到吸附除湿转轮的除湿区, 空气中的水分被除湿转轮所吸附, 由于有吸附热发生空气温度会升高 (1→2)。经过显热交换转轮与从空调对象室内的排气 RA 进行热交换, 被冷却到室温状态 (2→3)。然后, 通过直接蒸发式冷却器, 向此干燥空气中喷水, 借助水的蒸发潜热使空气进一步等焓冷却到较低温度 (3→4), 冷风被送到空调对象室内。

另一方面, 从空调对象室内返回的排气 RA 首先经过直接蒸发冷却器, 借助喷雾水的蒸发, 将空气等焓冷却到较低温度 (5→6) 后通过显热交换转轮与除湿后的空气进行热交换, 在冷却干燥空气的同时, 自身被加热 (6→7), 再经过再生空气加热器被加热到再生温度 (7→8) 后送到吸附除湿转轮的再生部, 将除湿转轮吸附的水分脱附, 使除湿转轮得到

再生。再生后的空气 EA 被排放到大气中 (8→9)。

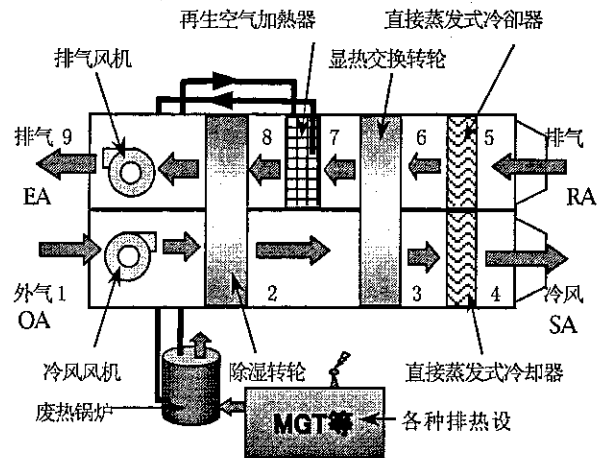


图 1 现行的吸附式除湿空调系统

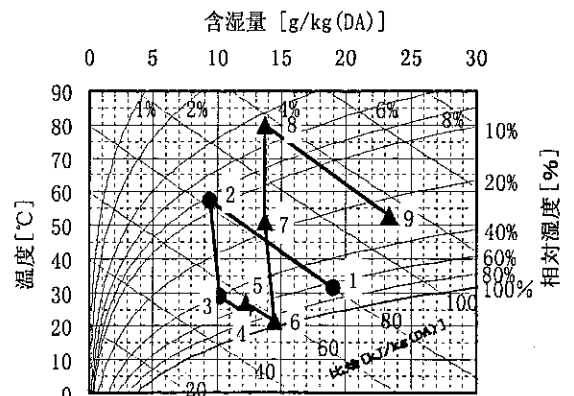


图 2 现行的吸附式除湿空调系统空气状态变化

对其运转过程分析可以看出该吸附式除湿空调系统存在着以下的问题: (1) 随着显热交换转轮的旋转, 会有一部分高湿度的排气 RA 被携带到冷风 SA 侧 (这一现象也被称为内部泄漏); (2) 由于显热交换转轮的内部泄漏, 会将室内被污染的空气带到冷风中, 造成所谓交叉污染; (3) 制造成本高,

为了冷却冷风空气 SA, 需要直接蒸发冷却器和显热交换转轮两台设备; (4) 热交换器效率较低, 直接蒸发冷却器+显热交换转轮的综合热交换效率低于 80%; (5) 该系统是将排热转换成热水后再利用, 通常从废热锅炉仍然要排出 100°C 左右的气体, 加上废热锅炉及热水配管的热损失, 排热回收利用率大大降低; (6) 由于使用热水作为再生空气加热的热源, 再生空气温度仅约 80°C, 其再生效率较低<sup>7)</sup>。

## 2 新型高效吸附式除湿空调系统

### 2.1 吸附式除湿转轮最佳再生方法探讨

在吸附式除湿空调系统中, 虽然除湿过程中空气的焓值没有降低, 但是由于除湿转轮将空气的潜热转换成了显热, 为后续的热交换过程降低空气焓值奠定了基础。因此, 高性能的除湿转轮是实现高性能的吸附式除湿空调系统的先决条件。

在排热温度为 150°C 以上的前提下, 对除湿转轮的最佳再生方式进行了实验研究<sup>7)</sup>。实验方法如下, 选用了直径 300mm, 厚度 200mm 的除湿转轮 SSCR-U, 在其处理风量、及再生空气加热用能量一定的前提下, 改变再生空气的温度, 对除湿转轮的除湿性能进行测试。而且, 为了消除再生空气面风速的影响, 制作了三种不同再生区面积比的除湿转轮实验用风洞, 使再生空气面风速维持在 2m/s。详细的实验条件在表 1 中给出。

实验结果如图 3 所示。当空气湿度低于  $X_{P1}=13\text{g/kg}$  时, 高温再生流程的除湿性能显现出若干优势。但是, 在入口湿度高于  $X_{P1}=13\text{g/kg}$  的条件下, 标准再生流程的除湿性能变得最好。原因是: 再生空气温度越高(相对湿度就越低), 除湿转轮被再生的程度也就越好, 因此在低湿度范围内, 提高再生温度可以得到湿度更低的干燥空气。另一方面, 根据物质衡算、热量衡算关系可知, 再生出口空气含湿量将以再生风量比的倒数的倍率关系随处理空气除湿量的增加而变化, 再生空气温度下降与处理空气温升之比例系数则是再生风量比的倒数。在高湿度范围内, 随着处理空气除湿量的增加, 对于再生空气量较少的高温再生流程而言, 再生区出口空气的湿度变得很高, 其温度却降到较低。致使再生空气在出口附近的相对湿度高于处理空气, 发生再生空气中的水分被除湿转轮所吸附的逆向过程, 其除湿性能必然降低。相对于标准再生流程、高温再生流程而言, 低温再生流程的除湿性能在全湿度范围内均较低。这是由于再生温度越低, 除湿转轮被再生的程度就越差。因此, 当排热热源温度在 150

°C 以上时, 采用标准再生流程, 比采用低温再生型除湿转轮的吸附式除湿空调系统, 无论是在潜热处理能力、还是在能量利用效率(减少有效能损失)方面都会有很大的改善。

表 1 除湿转轮性能实验条件一览表

流程类型	低温再生	标准再生	高温再生
再生区/处理区	1/1	1/3	1/4
再生用能量(kW)	3.64		
再生空气温度(°C)	80	130	155
再生风量 OR(m <sup>3</sup> /h)	224	112	89.6
再生风速 VR(m/s)	2.0	2.0	2.0
处理风量 QP(m <sup>3</sup> /h)	224		
处理风速 VP(m/s)	2	1.33	1.25
风量比 QR/QP	1/1	1/2	1/2.5
处理入口空气温度(°C)	30		
再生空气湿度(g/kg)	与处理空气湿度相同		
转轮转速 N(rph)	14	12	11.5

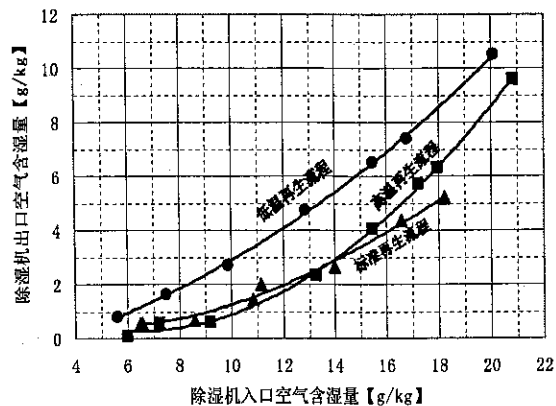


图 3 再生温度及风量对除湿转轮性能的影响

### 2.2 高效率显热除去装置的开发

与除湿转轮一样, 显热处理设备—显热交换器对吸附式除湿空调系统来说也是非常重要的设备。

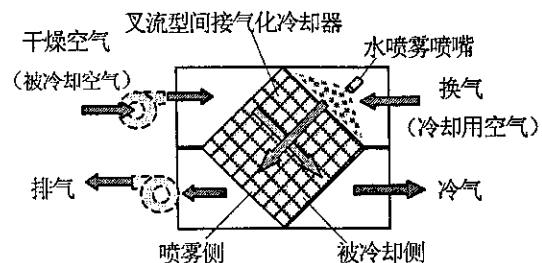


图 4 叉流型间接气雾化冷却器流程概略图

作者研发了一种用于吸附式除湿空调系统的高效率, 无内部泄漏、叉流型间接气雾化冷却器<sup>10)</sup>, 其构造及运转原理如图 4 所示。其性能测试结果在图 5 中给出。为了与其他类型的热交换器性能进行比

较,在图5中同时给出了显热交换转轮、叉流型显热交换器的测定结果。

结果表明:间接气化冷却器比叉流型显热交换器、以及显热交换转轮的热交换效率都好。以风速2m/s的操作条件为例,间接气化冷却器的热交换效率却达到了85%,比显热交换转轮的热交换效率高5%左右。同时,压力损失在三种热交换器中最小。

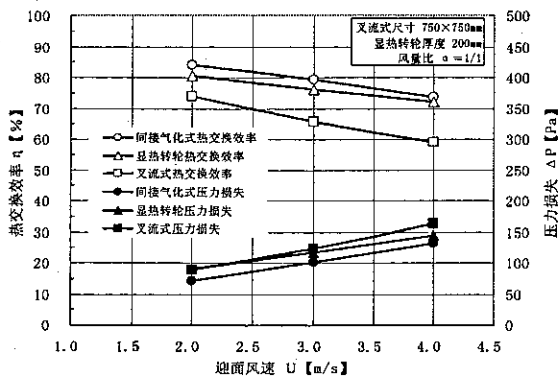


图5 各种热交换器性能比较

综上所述,开发了一种用于与各种分布型发电设备配套的热电联产系统用新型高效吸附式除湿空调系统,如图6所示。该系统有如下的特性:(1)根除了显热交换转轮所存在的由换气侧向冷风侧的水分携带问题及所谓交叉污染的问题;(2)提高了热交换效率,降低了冷风的温度及焓值;(3)由于采用了排热气体直接用于除湿转轮的再生,降低了废热锅炉及热水供水管等过程约30%的热损失;

(4)突破了现行的吸附式除湿空调系统再生温度只能达到80℃的界限。再生效率可提高20~30%;(5)构成设备简单、造价低。

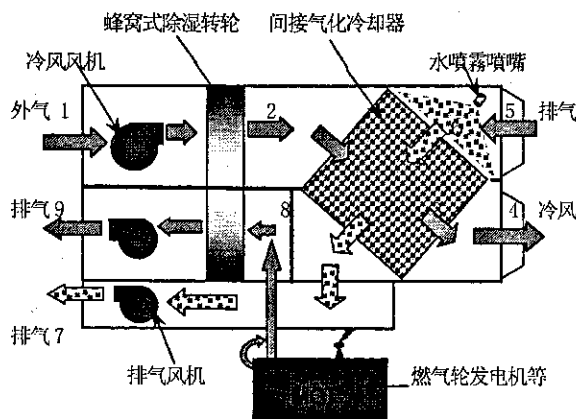


图6 新型高效吸附式除湿空调系统

### 3 实验及其结果讨论

为了对上述空调系统的性能从实验上加以确认,在本公司办公大楼设置了一台冷风量为5500m<sup>3</sup>/h 制冷能力约为53kW的吸附式除湿空调系

统与发电能力为28kW的微型燃气轮发电机所构成的热电联产系统。进行了为期1年的实证实验。

#### 3.1 实验装置系统概要

实验是由吸附式除湿空调系统(概要见表2),和美国Capstone Turbine Corporation公司制造的微型燃气轮发电机(Micro Gas Turbine Generator,概要见表3)所构成。燃气轮机发电机排出的排气温度约为275℃。将这一排气与用来冷却发电机内部构成设备的温度约为65℃的被称为低温排热的空气混合后,直接用作吸附式除湿空调系统的驱动热源—再生除湿转轮。

表2 新型高效吸附式除湿空调系统概要

冷风风量	5, 500m <sup>3</sup> /h	
制冷能力* (夏季)	显热: 9.4kW	合计: 53.4kW
	潜热: 44kW	
加热能力* (冬季)	显热: 46.1kW	合计: 68.1kW
	潜热: 22kW	
外形尺寸	2200(H) × 3380(L) × 1450(W)	
运转方式	制冷、供暖、换气(可切换)	

\*制冷、加热能力计算基准:

外气条件 夏季: 温度32℃, 相对湿度65%

冬季: 温度2℃, 相对湿度57%

室内条件 夏季: 温度27℃, 相对湿度55%

冬季: 温度22℃, 相对湿度50%

表3 微型燃气轮发电机概要

制造厂商	Capstone Turbine Corporation		
发电能力	28kW	燃料消费	112.1kW
	发电效率	26%	最高转速
排气中NO <sub>x</sub>	9ppm(O <sub>2</sub> =15%)		
外形尺寸	2040(H) × 2000(L) × 800(W)		

#### 3.2 系统运转状况及结果讨论

这一吸附式除湿空调系统,不仅可以用于夏季的制冷,而且也可以用于冬季的供暖,及中间期的换气运转。这里,仅对夏季的制冷运转实验结果作详细讨论。由于该空调系统向空调室内供给的空气全部为新鲜的室外空气,因此,其冷却能力CC(kW)可由下面的公式计算:

$$CC = G_{SA} * (I_{OA} - I_{SA})$$

其中G<sub>SA</sub>为冷风量(kg/s), I<sub>OA</sub>与I<sub>SA</sub>分别为室外空气OA和冷风SA的焓值(kJ/kg)。

从实验数据中,选取了晴天(图7)、雨天(图8)两种典型的天气状况下的结果加以说明。在室外空气温度26~33℃,相对湿度55~98%的情况下,不论是晴天、雨天,该空调系统都可以向空调对象

室提供温度为 19~25℃, 相对湿度 40~70%的温、湿度条件比较稳定的冷风。冷风的温度比室外空气温度约低 6~9℃, 绝对湿度也降低到室外空气的一半以下。而且冷风的焓值也只有室外空气的 60%以下, 换算为冷却能力超过了设计值的 53kW 以上。而且在外气温度变化 6℃ (27~33℃) 的情况下, 冷风的温度仅变化 3℃ (22~25℃)。冷风的温度虽然受到外气温度的影响, 但其影响程度却不是很大。

此外, 由图 8 所示结果可见: 即使是相对湿度 >85%RH 的雨天, 该空调系统也可以向室内提供温

度 22~24℃, 相对湿度 45%~60%的冷风。

图 9 是将吸附式除湿空调系统运转时外气、冷风及室内空气的状态在空气焓湿图上描绘的结果。同时, 将压缩制冷式空调机的冷风空气状态也标绘在同一图上。压缩机制冷式空调机为了把空气的湿度降到 12g/kg 以下, 需要将空气冷却到 13~16℃ (相对湿度达 95~100%)。这样的冷风直接吹到人身上会让人感到很冷, 时间长了会使人得空调病。而吸附式除湿空调系统所提供的冷风空气却是体感最舒适的状态。

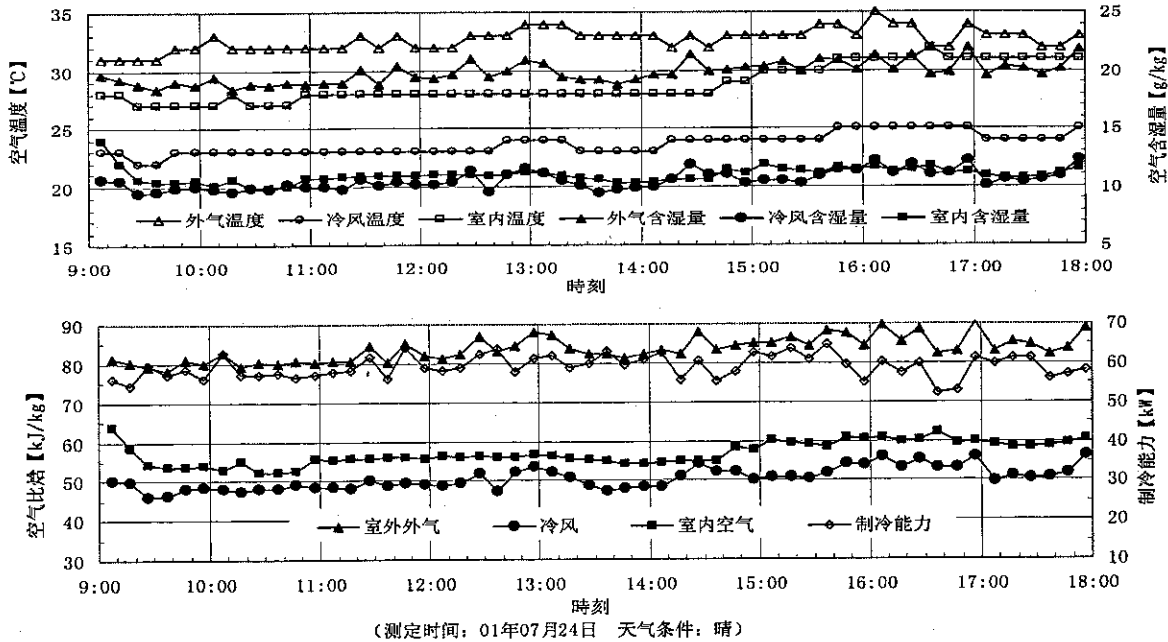


图 7 晴天条件时吸附式除湿空调系统运转结果

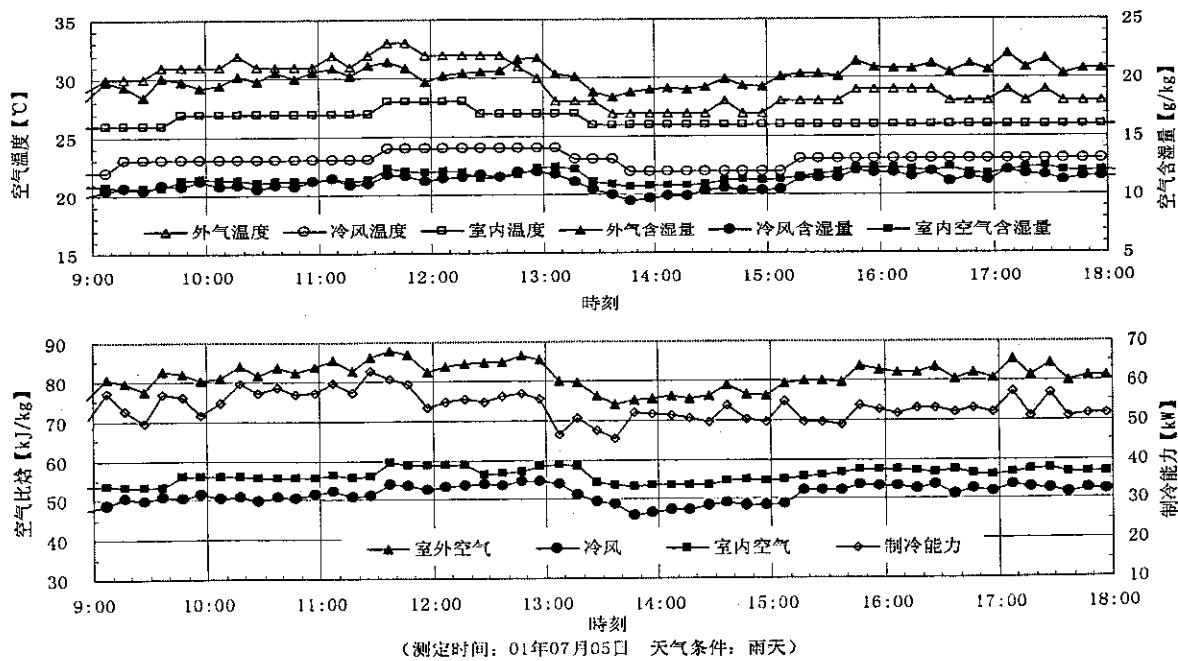


图 8 雨天条件时吸附式除湿空调系统运转结果

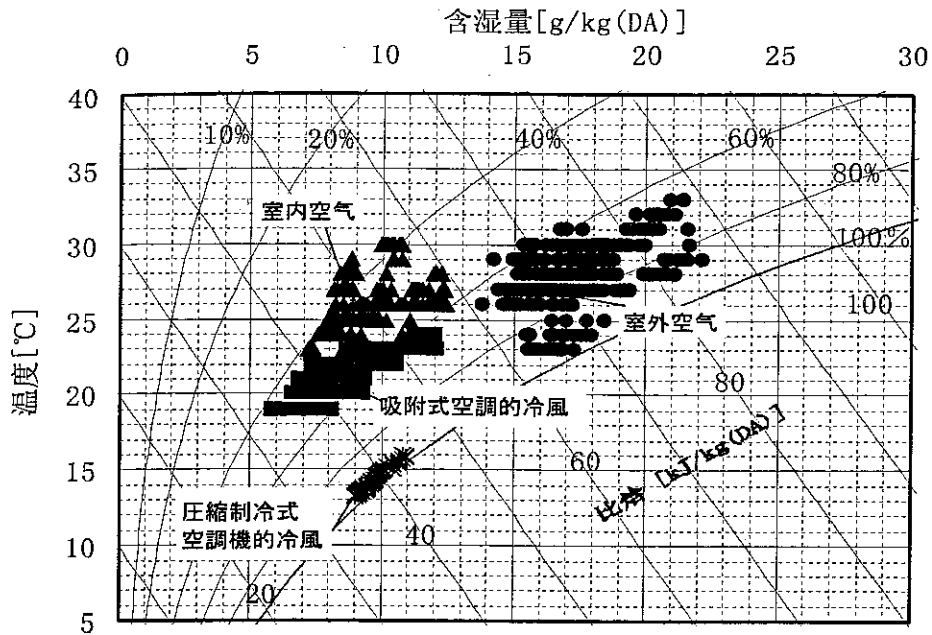


图9 吸附式除湿空调系统运转时外气、冷风及其室内空气的状态

### 3.3 热电联产系统运转结果

表4给出了该系统运转的一个结果。高效吸附式除湿空调系统与微型燃气轮机所构成的新热电联产系统的综合能量利用率达到了90.9%，比现行的热电联产系统提高了15%以上。

表4 热电联产系统运转结果

项目	新热电联产系统		现行热电联产系统	
	(kW)	百分率	(kW)	百分率
投入能量	102.2	100%	112	100%
发电量(1)	22.5	22.0%	28	25%
热回收量(2)	70.4	68.9%	56	50%
热损失量(3)	9.3	9.1%	28	25%
能量利用率(4)=(1)+(2)	90.9% (实测值)		75% (设计最大值)	
吸附式除湿空调系统(实验结果一例)				
	温度	相对湿度	绝对湿度	
室外空气条件	32°C	66.4%	20.02g/kg'	
冷风空气条件	24°C	54.6%	11.07g/kg'	
空调制冷能力CC=59.7kW, 成绩系数COP=0.85				

### 4 结论

(1) 开发的吸附式除湿空调系统与微型燃气轮机所构成的热电联产系统的综合能量利用率达到了90.9%，比现行的热电联产系统提高15%以上。

(2) 在外气温度32°C，相对湿度66.4%的条件下，该吸附式除湿空调系统的冷风温度为24°C，相

对湿度54.6%，外气基准的制冷能力达到59.7kW。

(3) 在外气温度变化6°C的情况下，冷风的温度仅变化3°C。吸附式除湿空调系统的冷风的温度虽然受到外气温度的影响，其影响程度不是很大。

(4) 与采用压缩机制冷式空调机相比，吸附式除湿空调系统所提供的冷风空气温度虽然偏高，但由于其湿度较低，两者的焓值却相差无几。

(5) 该吸附式除湿空调系统从根本上解决了随着显热交换轮旋转而产生的由换气侧向冷风侧的水分携带问题及所谓交叉污染的问题。

(6) 该吸附式除湿空调系统向室内供给的空气全部为新风，可以大大提高IAQ。而且吸附式除湿空调系统所提供的空气处于体感最舒适的状态，自然也就不会有空调病的问题。

### 参考文献

1. Jurinak J J, Mitchell J W, Beckman W A. Open-Cycle Desiccant Air Conditioning as an Alternative to Vapor Compression Cooling in Residential Applications. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1984, 106(8): 252-260
2. Kang T S, Maclaine-cross I L. High Performance, Solid Desiccant, Open Cooling Cycles. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1989, 111(5): 176-183
3. Farooq S, Ruthven D M. Numerical Simulation of a

- Desiccant Bed for Solar Air Conditioning Applications. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1991, 113(5): 80-88
4. Jin W L, Kido C, Kodama A, et al. Experimental Study of Performance of Adsorptive Desiccant Cooling System by Thermally Activated Honeycomb Rotor Dehumidifier. In: Proceedings of the Fourth China-Japan-USA Symposium on Advanced Adsorption Separation Science and Technology, 1997. 220-225.
  5. Jin W L, Kodama A, Goto M, et al. An Adsorptive Desiccant Cooling Using Honeycomb Rotor Dehumidifier. Journal of Chem. Eng. of Japan, 1998, 31(5): 706-713
  6. 金偉力, 児玉昭雄, 後藤元信, 等. 吸着式除湿制冷システムの性能に及ぼす操作条件の影響. 化学工学論文集, 1998, 24(6): 894-900
  7. 岡野浩志, 金偉力, 広瀬 勉. デシカント空調システムへの排熱投入方法と除湿効率の検討. 見: 化学工学会第 67 年会講演要旨. 福岡: 社団法人化学工学会, 2002. 272
  8. 金偉力. 高性能デシカント空調システム実施例. 建築設備と配管工事, 2001, 39 (11): 33-37.
  9. 岡野浩志, 金偉力, 広瀬 勉. マイクロガスタービンの排熱を利用したデシカント空調システムの実証試験. 見: 化学工学会第 34 回秋季大会講演要旨. 札幌市: 社団法人化学工学会, 2001. 961

## A New High Performance Adsorptive Desiccant Air-conditioning System Driven by Various Exhaust Heat

Jin Weili \* Okano Hiroshi

**Abstract:** From the point of view of Energy-saving and environmental protection, there are problems which must be solved in the present vapor compression type air-conditioning system. A new generation energy-saving and environmental protection type air-conditioning system using honeycomb rotor dehumidifier was developed, which has improved efficiency compared with the prior technique and has a simple construction as a desiccant air-conditioning system. At the adsorptive desiccant air-conditioning system, because does not use fluorocarbon and/or substitute fluorocarbon refrigerant, and other harmful substances, do not use the compressor, can utilize various kinds of industrial used heat and/or exhaust heat from various kinds of generating equipments of scattering type form electric heat Cogeneration System of energy with extremely high utilization ratio and give the characteristics etc., Time attracts attention.

In this paper the formidable shortcomings and the issue that current adsorptive desiccant air-conditioning system exist are analyzed, the construction of the developed new desiccant air-conditioning system, an operation principle, and an actual proof examination result are explained in detail. Offer the important basic data and design guide for adsorptive desiccant air-conditioning system application and design.

**Keywords:** Adsorptive Desiccant Air-conditioning System, Honeycomb Rotor Dehumidifier, Electricity and Heat Cogeneration System, Adsorption, Waste Heat Utilization