

新型高效热驱动溶液除湿空调原理及应用

清华大学 谢晓云 江亿 刘拴强 刘晓华 陈晓阳

摘要: 新型高效的热驱动溶液除湿机组^[1]利用低品位的热能驱动空调,可有效缓解能源问题,节省空调耗电。本文总结了应用于不同类型建筑,不同冷热源条件下的多种热驱动溶液新风机组流程,以两个示范工程为例给出机组的实测性能: 实测溶液除湿系统的综合COP为 1.5, 远高于国内外同类产品。最后阐述这种高效溶液空调的推广意义和应用前景。

关键词: 溶液除湿空调 热驱动

0 引言

随着人们对室内环境的舒适、健康要求日益提高,能源问题的日益严重,对空调整能的要求日益迫切,使得传统空调在各方面面临挑战。而基于溶液除湿的温度湿度独立控制空调系统^[1]被认为是一个有效的解决途径。怎样实现高效的溶液除湿方式成为问题的关键。

溶液除湿的空气处理方式在国外早在 30 年代就已出现,70 年代我国也在三线地下建筑工程中大量使用,有效地解决了地下建筑除湿问题^[2]。然而国内外已有系统都存在如下问题: 能源利用率一般在 0.3~0.5, 低于单效吸收机; 系统复杂, 体积大, 占用大量空间; 无法同时解决排风的能量回收问题; 以直接燃烧燃料的方式对稀溶液加热, 实现再生, 而不能用低温(60~90°C)热水驱动。

目前国内的青岛益青药用胶囊有限公司和浙江大之医药胶囊有限公司均将LiCl液体除湿空调系统应用于空气除湿和净化系统中, 采用蒸汽再生, 能源利用效率低于 0.6。美国能源部支持的一家公司 Ail Research^[3]正在研发氯化锂溶液除湿机, 利用 85°C热水作动力, 希望达到的性能为COP=0.6。以色列一家公司目前是世界上唯一一家已有正式溶液除湿产品的公司, 性能指标劣于上述目标。而采用同温度热水驱动的常规单效吸收式制冷机的能源利用效率为 0.6~0.7, 可见前述溶液除湿空调系统能源效率均低于常规的吸收式空调系统, 使其出现后一直未能得到推广应用。

而通过江亿等^[1]自 1998 年开始的溶液除湿方面的研究, 现已成功研制出新型高效的溶液除湿机组, 利用此新型高效的溶液机组, 可以实现夏季对新风降温除湿、冬季对新风加热加湿等各种空气处理过程, 过渡季也可根据室外的状态不同而充分利用新风的能量。此研究成果已在多个实际工程中进行了成功示范^[4-6]。研制成功的溶液除湿机组按驱动源可分为电驱动和热驱动两种方式。对于热驱动的方案, 在北京热力集团完成了世界上第一个温湿度独立控制空调系统的工程实践^[4], 溶液除湿系统利用城市热网热水(70~75°C)驱动, 实测溶液再生器的COP为 0.82, 除湿空调系统总的COP为 1.5。另外在清华大学超低能耗示范建筑实现了世界上第一个能源梯级利用的BCHP系统。利用发电后的烟气、缸套水的废热产生 60~75°C热水驱动溶液除湿系统的再生器, 产生的浓溶液送入溶液新风机组处理出足够干燥的新风送入室内带走湿负荷。在溶液循环系统中设置溶液罐, 通过高效蓄能解决了BCHP系统电、热负荷匹配的问题。实测溶液再生器的COP为 0.81。

本文主要介绍前述新型高效的热驱动溶液除湿机组的多种流程, 以两个示范工程为例介绍机组的实际性能, 最后阐述热驱动溶液除湿机组的应用前景。

1 热驱动溶液除湿机组的流程及其工作原理

1.1 热驱动溶液除湿空调系统

溶液除湿是利用空气和易吸湿的盐溶液接触, 使空气中的水蒸气吸附于盐溶液中而实现的空气除湿过程。溶液对空气除湿后自身会变稀, 需要再生, 根据再生驱动源的不同, 可将溶液除湿系统分为两类: 电驱动方式和热驱动方式。本文主要讨论热驱动方式的系统, 即利用城市热网热水(70~90

℃)、BCHP（建筑热电冷联供）系统废热、太阳能等低品位热能驱动溶液再生的系统。

对于上述三种热源，首先城市热网热水驱动的方案除湿系统，对于热水供应侧，希望有比较稳定的用户需求，而室内负荷却在较大范围内变化，这就使得热源供应与室内负荷变化不匹配。其次以 BCHP 废热为驱动源的系统，由于热、电、冷负荷的变化并不同步，比如电负荷出现高峰的时候并无相应的冷负荷或热负荷，或者电力出现低谷而热负荷或冷负荷出现高峰，均使得热源供热量与溶液除湿的需求不匹配。最后太阳能驱动的方案除湿系统，热水获得的热量随太阳辐射强度而变化，与室内负荷的变化也构成不匹配。利用能量蓄存装置是解决上述热源与用户需求不匹配的有效措施，而利用溶液蓄能也恰为一种高效蓄能方式。所以一般在热驱动溶液除湿系统中分别设置溶液新风机组、溶液再生器和溶液罐，采用溶液统一再生的方式，由一台再生器为多台新风机组提供浓溶液，溶液除湿空调系统原理图（以 BCHP 废热驱动的系统为例）如图 1 所示。首先通过溶液泵将浓溶液罐的溶液输送到新风机组，产生足够干燥的新风，溶液本身变稀后流回稀溶液罐，稀溶液被送入再生器，经废热驱动再生后的溶液流回浓溶液罐，由此完成溶液的循环。再生器和溶液新风机组可以独立运行：当系统中存在多余的热量时，利用再生器制得浓溶液，送入溶液罐储存起来；当系统湿负荷变大，而热源可提供的热量较少时，即可利用蓄存的浓溶液实现除湿过程，从而利用溶液蓄能使热源供应和用户负荷匹配起来。

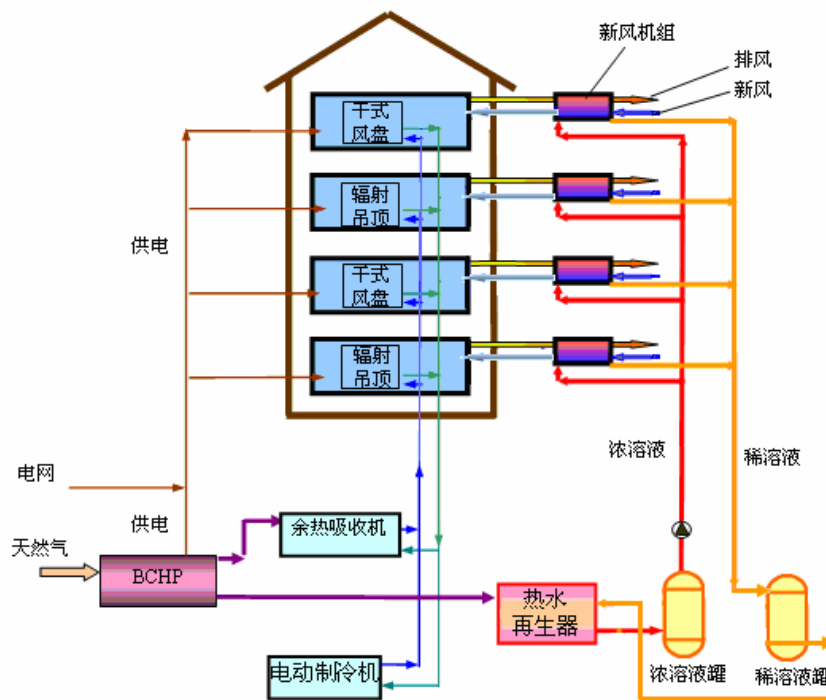


图 1 溶液除湿空调系统原理图（BCHP 废热驱动）

1.2 热驱动溶液除湿新风机组

热驱动溶液除湿新风机组是溶液除湿系统中最核心的部件，已建立起一整套湿空气热力学分析方法^[7]，通过对溶液除湿的空气处理过程中多个热湿交换环节不可逆损失的分析，发明设计出多种新风处理流程。和国内外已有的溶液除湿产品相比，有几个明显提高效率的措施和特征：

1. 通过研发基本的热湿交换单元^[1]，从而改进吸湿方式，变等焓除湿为等温除湿，并可实现空气除湿、加湿、降温、加热等各种空气处理过程；
2. 通过全热回收模块对排风进行高效热回收，多级全热回收的效率可达 60~70%。

3. 通过多级的串联，合理选择级内循环和级间循环的溶液流量，实现了匹配的、接近可逆的空气处理过程。

利用基本的热湿交换单元，可搭建出多种热驱动的新风处理流程。由于除湿过程需要补入冷量来带走传质过程释放的潜热，由此根据除湿过程可用冷源的不同，可将溶液除湿新风机组大致分为以下几类：

(1) 利用冷水作为冷源的流程

图 2 所示为利用冷水和冷却水作为冷源的溶液除湿新风机组的流程图：

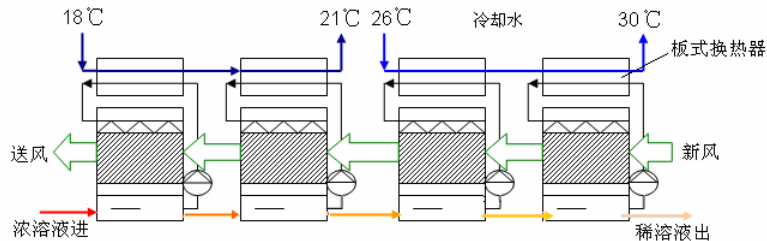


图 2 利用冷水作为冷源的溶液除湿新风机组

图 2 由四个基本热湿交换单元串联而成，新风处理的前两级采用 26~30℃冷却水带走除湿产生的潜热，最后两级用 18~21℃冷水冷却，以获得更好的除湿效果，并实现较低的送风温度。浓溶液从新风处理的最后一级进入，从第一级的除湿模块排出。其中冷却水可以通过冷却塔获得；18~21℃冷水可以通过多种方式获得[8~9]：可以是电动的高温冷水机组；在年平均气温比较低的城市，可利用土壤热泵等方式；在气候比较干燥，但仍需除湿的地区，还可利用间接蒸发冷却的方式。浓溶液进口浓度越高，实现相同的除湿效果所需冷源的品位越低，当再生器热源品位足够高以便再生出足够浓的溶液时，四级除湿过程可全部采用冷却水作为冷源带走传质过程释放的汽化潜热。

这种使用冷水作为冷源的溶液除湿机组，体积小，占用空间小，主要适用于空间较紧张，室内无法设置排风道，也即无法进行排风全热回收的建筑。随着室外气象条件的变化，可以通过调整溶液的浓度和板式换热器的水温来实现不同季节不同工况的连续转换。

(2) 利用排风全热回收型溶液新风机组

由于新风只用来排除室内CO₂和余湿，所需新风量和常规的全空气系统送风量相比大幅度减小，从而减小了送风道尺寸，这样即使需要排风道对排风进行全热回收，也不会占用很多的空间。对于大多数建筑来说，均可设置排风道。由此，设计充分回收排风能量的溶液新风机组。已发明设计出多种全热回收方式^[1]，此处主要介绍两种方式：溶液在上、下模块间直接喷淋全热回收的方式和上部模块喷水、下部喷溶液的全热回收方式。

图 3 所示为采用溶液在上、下模块间直接喷淋进行全热回收的新风机组。

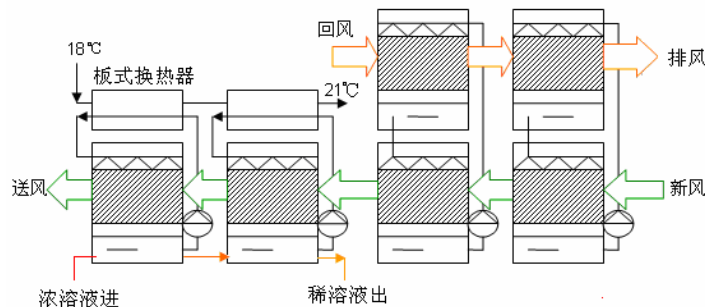


图 3 溶液直接循环实现全热回收的新风机组

图 3 由两级全热回收的模块和两级除湿的模块搭建而成，在全热回收模块中，通过溶液在上、下模块间直接循环喷淋的方式，回收排风的能量。两级除湿模块所用冷源为 18~21℃ 的高温冷水。浓溶液从最后一级除湿模块进入机组，从第一级除湿模块排出。

随着室外气象条件的变化，当室外温度高于要求的送风温度，而湿度低于要求的送风湿度时，可停止排风侧的喷淋，送风侧改为喷水，蒸发冷却降温。冬季运行时，继续开启全热回收模块，但最后两级的除湿模块的板换中通入热水，通过喷稀溶液或喷水的方式实现对房间的加热加湿。

(3) 通过喷水对排风进行全热回收的新风机组

图 3 所示为上部模块喷水，下部模块喷溶液来对排风进行全热回收的新风机组。

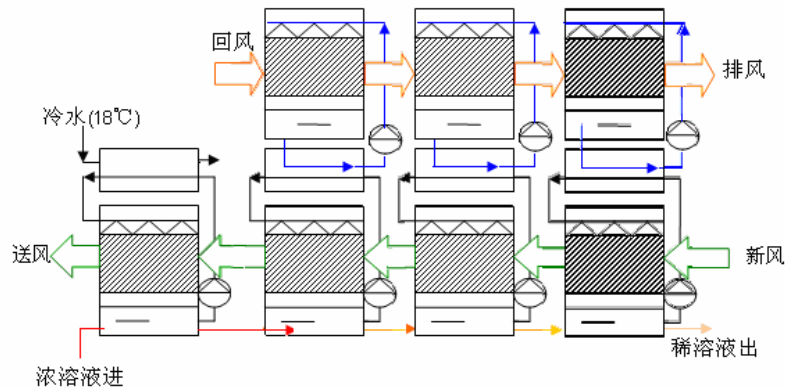


图 4 通过喷水对排风进行全热回收的新风处理机

图 4 由三级全热回收模块加一级除湿模块搭建而成，在三级全热回收上部模块中，通过喷水对回风进行直接蒸发冷却产生冷水做为下部模块除湿过程的冷源。最左侧的除湿模块作为补充模块，通入 18℃ 高温冷水带走除湿的潜热。浓溶液从除湿模块流入，依次经过各级全热回收模块后变为稀溶液流出，之后被送入再生器进行再生。当输入溶液的浓度足够高时，可停止最后一级除湿模块的运行，只依靠三级全热回收模块实现新风的除湿过程。冬季运行时全热回收上部模块改为喷淋溶液的方式对排风进行全热回收，最右侧模块的板换中可通入热水，通过喷稀溶液或喷水的方式对新风进行加热加湿。

除上述三种热驱动机组流程外，还可根据实际的需要设计出多种不同的空气处理流程，应用在基于溶液除湿的温湿度独立控制空调系统中，来满足不同地区、不同类型建筑、不同的热源和冷源条件下，全年工况的新风处理要求。

2 热驱动溶液机组的开发及其在示范工程中的应用

在流程设计的基础上，已研制出多种热驱动全热回收型溶液除湿机组，并已成功应用于多项示范工程，实测 75℃ 热水驱动的溶液除湿系统的 COP 为 1.5，远高于国内外同类产品的研发水平。下面以北京市热力集团和清华大学超低能耗示范建筑为例，介绍开发出的热驱动溶液除湿机组的性能及在实际工程中的应用。

2.1 热驱动溶液除湿机组应用于清华大学超低能耗示范建筑

在清华大学超低能耗示范建筑实现了世界上第一个能源梯级利用的 B CHP 系统：利用发电机发电，利用发电后的烟气、缸套水的废热产生 60~80℃ 热水驱动溶液除湿系统的再生器，产生浓溶液送入溶液全热回收型的新风机组，产生足够干燥的新风送入室内带走湿负荷；同时发电后的烟气废热驱动吸收式热泵产生 18℃ 冷水，送入室内独立的温度控制末端带走室内显热。溶液罐作为溶液循环的环节，通过高效蓄能解决了 B CHP 系统电、热负荷匹配的问题。系统图如图 1 所示。

应用研制出的溶液全热回收型新风机组，如图 5 所示，风量 4000m³/h，风机可变频调节，采用溶液在上、下模块间直接喷淋的全热回收方式。实测新风机组送风在 24~27℃ 之间变化，送风含

湿量在 $7 \sim 10 \text{g/kg}$ 之间变化，满足带走室内湿负荷的要求。

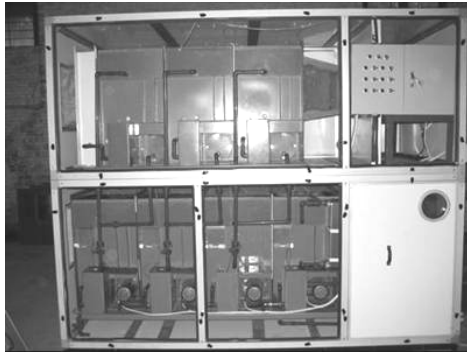


图 5 热驱动溶液除湿新风机组

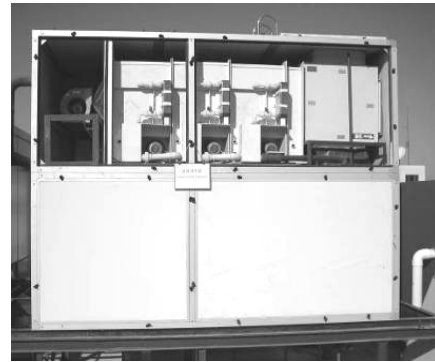


图 6 热水型溶液再生器

图 6 所示为热水型溶液再生器，利用 BCHP 系统发电机发电后产生的缸套水和烟气的废热产生 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 的热水驱动溶液再生。图 7~8 给出再生器的性能实测结果，图 7 为测试工况再生器热水的供、回水温度，图 8 为再生器的 COP（从溶液中排除水量的潜热与消耗的循环水热量之比），平均 COP 为 0.81。单从再生器的性能来看，已高于国内外同类产品的性能（能源利用率 0.6），而新风机组还采用了高效的排风全热回收方式，使整个溶液除湿系统的能源利用率大于 1。

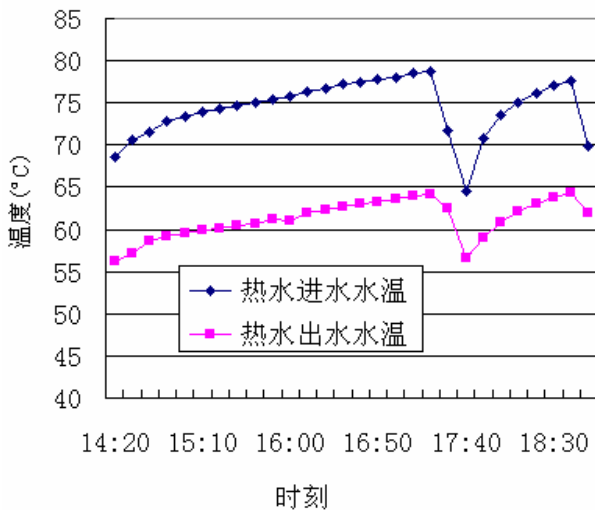


图 7 清华示范楼再生器的热水的供、回水温度

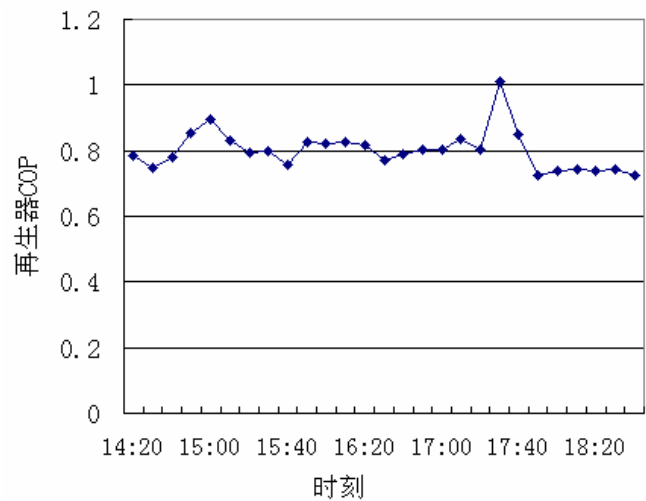


图 8 清华示范楼再生器的性能系数 COP

2.2 热驱动溶液除湿机组应用于北京市热力集团双榆树办公楼

在北京热力集团双榆树供热厂办公楼实现整个建筑的以城市热网热水为主要动力的“温度湿度独立控制”的空调方式，成为世界上第一个温度湿度独立控制系统的工程实践应用。此系统的详细介绍见文献^[4]，在每层楼设新风机组，以集中供应的浓溶液为动力，实现排风的全热回收和新风的除湿降温，由新风承担排除室内余湿、控制室内湿度的任务。采用另外的风冷冷水机组制取 18°C 冷水，通过干式风机盘管吸收室内余热，实现温度控制。溶液再生器以 $70 \sim 75^\circ\text{C}$ 供水， 60°C 回水的循环热水为动力，对溶液再生。



图 9 通过喷水对排风热回收的溶液除湿新风机组



图 10 蓄能溶液罐

实测再生器的 COP 为 0.82，实测新风机平均 COP 在夏季为 1.83，见图 11。综合新风机和再生器，除湿空调系统总的 COP 为 1.5，远高于国内外同类产品的性能（美国 LiCl 溶液除湿机组，期望 COP 为 0.6，以色列的溶液除湿产品，性能低于上述系统）。

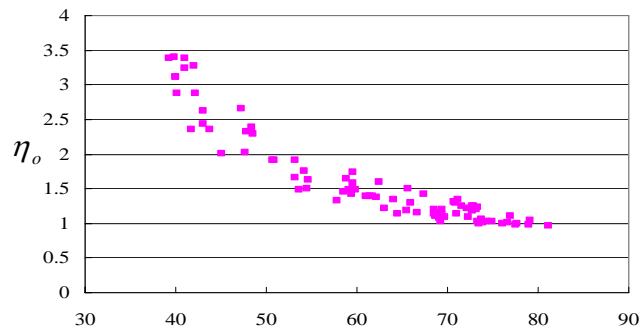


图 11 新风机组的性能系数

3 热驱动溶液机组的推广意义和应用前景

热驱动的溶液除湿机组，实现了以低品位热能为主要动力来驱动空调，这对缓解夏季用电压力，缓解日益严重的能源问题意义重大。目前北方地区大量的热电联产集中供热系统由于夏季无热负荷而无法运行，使得电力负荷出现高峰的夏季热电联产设施反而停机，或按纯发电模式低效运行。而若利用热电联产的热量驱动溶液除湿空调系统，即可省下空调电耗，又能使热电厂夏季运行，增加发电能力，同时提高能源利用率，成为热电联产系统持续发展的关键。

以北京市为例，其集中供热面积约 8000 万 m^2 ，其中至少有 2500 万 m^2 具备安装溶液除湿空调的条件，若均安装溶液除湿的空调，首先节约电耗：由于溶液除湿的系统比常规空调系统节电 30%，常规系统耗电约 50kWh/ m^2 /年，则溶液式系统节电 15kWh/ m^2 /年，应用于 2500 万 m^2 的空调面积，则每年为国家节电 3.75 亿度。按电价 0.8 元/kWh 计算，节约运行费用 3 亿元。其次创造效益：由于热电厂在夏季利用发电后的余热来驱动溶液除湿空调，和纯发电模式相比，可使热电厂多收益 23 元/GJ 余热，创造效益 7500 万元。最后新增产值：以溶液除湿空调的设备费为 80 元/ m^2 计算，若 2500 万 m^2 的空调面积均安装溶液除湿空调的话，将新增产值近 20 亿元。

除此之外，BCHP（楼宇热电冷联供系统）将是今后建筑能源系统的最佳解决方案之一^[1]，利用余热驱动溶液空调可能成为 BCHP 夏季利用废热的最佳方案。同时可以利用溶液蓄能，解决了 BCHP 系统热、电负荷不匹配的矛盾，成为 BCHP 系统真正高效运行的关键。

同时，溶液除湿机组以高效节能的方式解决了温湿度独立控制空调系统产生干燥空气的关键问题，使温湿度独立控制相对于传统空调在健康、舒适、节能等各方面的优势充分发挥出来，推动其走向大规模的推广应用。

由此，已专门开发出模具制作单元除湿/再生模块，开始产品化过程。

4 结论

新型高效的热驱动溶液除湿机组^[1]利用低品位的热能驱动空调,可有效缓解能源问题,节省空调耗电。研制出的热驱动溶液除湿机组已成功用于多项示范工程,通过清华大学超低能耗示范建筑和北京热力集团两项示范工程,给出溶液除湿机组的实测性能:实测溶液除湿系统的综合COP为 1.5,远高于美国、以色列等国内外同类产品的性能。热驱动溶液除湿系统具有重大的推广意义:可使热电厂夏季运行,为其创造效益,成为缓解日益严重的能源问题的重要举措之一,和常规空调系统比,系统节电 30%,仅以北京可用溶液除湿空调的 2500 万m²空调面积为例,每年可为国家节电 3.75 亿度。解决BCHP系统废热利用的关键问题,解决热、电负荷不匹配的矛盾,成为BCHP真正高效运行的关键;使温度湿度独立控制系统在健康、舒适、节能等各方面的优势充分发挥出来。综上,这种新型高效的溶液除湿系统有着非常广阔的应用前景。

5 参考文献

- [1] 江亿, 李震, 陈晓阳, 刘晓华, 溶液式空调及其应用, 暖通空调, 2004, (34) 11, 88-97
- [2] 地下建筑通风空调写作组: 地下建筑通风空调设计手册, 建工出版社, 1982
- [3] Ail Research: Liquid desiccant air processor, Power point presentation, 在中美奥运科技清洁能源联合工作组第三次会议上的报告, 芝加哥, 2004 12
- [4] 陈晓阳, 江亿, 李震, 湿度独立控制空调系统的工程实践, 暖通空调, 2004 (34) 11, 103-109
- [5] 刘晓华, 李震, 江亿, 溶液全热回收装置与热泵系统结合的新风机组, 暖通空调, 2004 (34) 11, 98-102
- [6] 刘拴强, 刘晓华, 江亿, 热泵驱动溶液除湿空调系统模拟方法及应用, 全国暖通空调模拟年会, 2005
- [7] 李震, 江亿, 湿空气处理过程热力学分析方法及其在溶液除湿空调中应用, 清华大学博士论文, 2004
- [8] 刘晓华, 江亿, 温湿度独立控制空调系统, 中国建筑工业出版社, 2006
- [9] 谢晓云, 江亿, 陈晓阳, 等, 利用盐溶液制备冷水的冷水机组, 暖通空调, 2004, 34 (11), 110-113

谢晓云 女 1981年11月 在读博士研究生

北京清华大学建筑技术科学系 100084

电话: 010-62773772 传真: 010-62770544 Email: xy-xie03@mails.tsinghua.edu.cn