

# 小型液体除湿空调系统实验研究

卢 军<sup>1</sup>, 卢敬彦<sup>1,2</sup>, 隆亚东<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 深圳奥意建筑工程设计有限公司, 广东 深圳 518031;  
3. 四川长虹置业有限公司, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:**对小型液体除湿空调系统,从居住建筑除湿负荷及经济性角度出发,采用CaCl<sub>2</sub>溶液进行液体除湿实验,研究CaCl<sub>2</sub>除湿和再生的动态特性。研究发现除湿与再生的3个重要因素为溶液温度、溶液浓度和空气进口含湿量。在实验工况下,CaCl<sub>2</sub>溶液的除湿量为3.32 g/kg,再生性能优于除湿性能,约为除湿的1.3~2.9倍。对实验进行总结后,认为CaCl<sub>2</sub>作为除湿剂进行液体除湿还有很大改进空间和推广潜力。

**关键词:**液体除湿;除湿;CaCl<sub>2</sub>溶液;温湿度独立控制

**中图分类号:**TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0099-04

## A Small-Scaled Liquid Dehumidification Air Conditioning System

LU Jun<sup>1</sup>, LU Jing-yan<sup>1,2</sup>, LONG Ya-dong<sup>3</sup>

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Shenzhen A + E Design Co., Ltd, Shenzhen Guangdong 518031, P. R. China; 3. Changhong Real Estate Co., Ltd., Mianyang, Sichuan 621000, P. R. China)

**Abstract:** We studied the dynamic characteristics of dehumidification and regeneration of CaCl<sub>2</sub> solution, based on building dehumidification load and economical operation and conducting an experiment on a small-scaled liquid dehumidification air conditioning system. Experimental results show that three main factors affect the performance of CaCl<sub>2</sub> solution: solution temperature, solution concentration, and inlet air humidity. The dehumidification capacity of the CaCl<sub>2</sub> solution is 3.32 g/kg in experimental conditions. Its regenerating performance is approximately 1.3~2.9 times than that of dehumidifying. After summarizing, we consider the liquid desiccant dehumidification with CaCl<sub>2</sub> solution has substantial potential to be improved and generalized.

**Key words:** liquid desiccant dehumidification; dehumidification; CaCl<sub>2</sub> solution; humidity independent control

由于溶液除湿系统在去除潜热负荷上具有优越性,近年来得到了较快的发展<sup>[1-6]</sup>。除湿器和再生器是溶液系统的主要部件,其传热传质效果直接影响整个溶液除湿系统的性能。由于影响热质交换效果的因素较多,如是否与外界有能量交换、空气与溶液的接触形式、填料的形状和种类、空气与溶液的进口

参数等等,难以通过理论分析和数值模拟方法,给出具体形式除湿器(或再生器)的性能。很多学者进行相关的实验研究工作,并在实验经验和数据上建立模型进行数值模拟分析<sup>[7-10]</sup>。

文中主要以实验的方法对小型液体除湿空调系统实验台的性能进行研究,期望得出适合长江流域

收稿日期:2008-09-20

基金项目:国家支撑计划课题资助(2006BAJ02A02-05,2006BAJ01A05-06-04)

作者简介:卢军(1966-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事建筑节能通风空调方面研究,(E-mail)lujun66@vip.sina.com。

地区住宅建筑的除湿系统,以提供更舒适的室内环境,提高设备效率,实现节能目标。

## 1 小型液体除湿空调系统实验台的设计

### 1.1 实验台的布置及实验设备

实验房间为砖混结构,长、宽、高分别为6.75 m×7.5 m×3 m,一面外墙(朝向为东南向),三面内墙,外墙上有一扇3 m×2.5 m的双层玻璃外窗,挂有浅色内遮阳,室内自然通风情况良好,房间装有地板辐射空调系统,室内温度可通过埋管控制。

实验中,将房间分隔成实验室和机房两个房间。由于实验房间中的地板辐射盘管完全满足室内显热负荷要求,因此,只需开启室内辐射地板空调系统控制室内温度即可,室内的湿度由小型液体除湿实验系统来控制,实现温湿度独立控制。

小型液体除湿装置实验台的原理图如图1所示。图1中,系统分为三个部分,即冷热源部分,除湿循环与再生循环部分,空气处理装置部分。其中,冷热源采用普通家用空调中的风冷热泵机,利用其制冷循环为溶液加热/降温。冷凝器侧为保证热泵机的充分冷凝过程,保留其原有的风冷凝器,并串联一个换热段于再生塔中;为保证热泵机的充分蒸发过程,保留原蒸发器,并串联一个换热段于除湿塔中。除湿塔与再生塔的结构基本一致,在塔的中部装有填料,以保证溶液与空气的充分热质交换。主要实验设备见表1。

表1 实验设备表

设备名称	规格参数	数量
轴流风机	1 000 m <sup>3</sup> /h, 54 Pa	2 台
耐腐蚀泵	3.6 m <sup>3</sup> /h, 4mH <sub>2</sub> O	2 台
风冷热泵空调机	Q <sub>冷</sub> =3.75 kW Q <sub>热</sub> =4.5 kW	1 台
热质交换模块	0.4 m长×0.35 m宽×1 m高	2 台

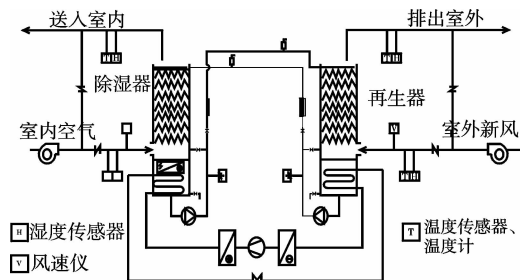


图1 小型液体除湿空调系统原理图

### 1.2 实验台的工作原理

小型液体除湿空调系统实验台的工作原理如图

1所示。空气处理装置包括风机及管道部分,用于提供空气循环动力并控制进入热质交换的空气流量。溶液除湿—再生环路包括热质交换模块、溶液泵及各类管道阀件。冷热源部分为热泵空调机引出的换热管,以及辅助电加热装置。溶液系统分为两个环路:除湿环路和再生环路。

本实验装置提出了溶液—湿空气接触的除湿/再生单元模块,模块中有级间流动的溶液、级内循环喷淋的溶液、外部冷热源。循环喷淋的溶液在进入热质交换填料前,首先在前一级的贮液池中换热,以加强其除湿(再生)能力,循环喷淋的溶液流量可通过阀门调节以满足不同实验工况下的传热传质流量要求。溶液在单元模块中共经历了三个过程,一是级间流入溶液与贮液池内溶液的混合过程,二是溶液在贮液池中与换热器进行换热过程,三是换热后的溶液在溶液泵的驱动下经过布液装置喷淋而下,润湿填料,并与流过的空气进行热量和质量的交换过程。这三个过程,第一个为溶液的混合过程,第二个为溶液与外界显热换热过程,第三个为溶液与湿空气的联合热质交换过程。前两个过程的研究较多,且显热换热过程已有成熟的计算方法。对于第三个过程,国内外已经有许多学者进行了数值与实验的研究<sup>[11-14]</sup>,因此,实验将研究重点放在了CaCl<sub>2</sub>溶液除湿可行性研究、溶液除湿与再生的总体性能以及介质的参数变化研究。

实验中,利用风管上的阀门调节空气流量,通过对实验房间进行温度控制以及送入新风或人工加湿方式调节进入热质交换模块的空气温湿度;通过溶液环路上的旁通阀门改变溶液的流量;利用热泵机提供冷热源对溶液加热/降温,并在除湿器贮液池中增设辅助电加热器,除湿器与再生器同时开启,通过管路上布置的测点详细测试其工作性能和介质参数。

### 1.3 溶液除湿原理及除湿剂和填料的选择

除湿溶液除湿性能的好坏用其表面蒸汽压力的大小来衡量,由于被处理空气的水蒸气分压力与除湿溶液的表面蒸汽压力之间的压差是水分由空气向除湿溶液传递的驱动力,因而除湿溶液表面蒸汽压越低,在相同的处理条件下,溶液的除湿能力越强,与所接触的湿空气达到平衡时,湿空气具有更低的相对湿度。即:进入除湿器的被处理空气的水蒸气压力 $P_v$ 大于除湿溶液表面的蒸汽压力 $P_s$ ,压差 $(P_v - P_s)$ 就是水分由空气向除湿溶液传递的传递势。随着传质过程的进行,被处理空气的湿度下降, $P_v$ 降低,而除湿溶液被稀释,其水蒸气压 $P_s$ 增加;假设接触时间足够长,水分的传递过程将达到平衡,

此时  $P_v = P_s = P_e$  (平衡时两相界面的蒸汽压), 这是实际除湿器中所经历的过程。

由于湿空气的除湿过程是依赖于除湿溶液较低的表面蒸汽压来进行的, 可以说对溶液除湿空调系统的研究最早是从除湿溶液的物性研究开始的。在空气调节工程中, 常用的溶液除湿剂有 LiBr 溶液、LiCl 溶液、CaCl<sub>2</sub> 溶液、乙二醇、三甘醇等。在相同的温度和浓度下, LiCl 溶液的表面蒸汽压力最低, 而 CaCl<sub>2</sub> 是最廉价、最常见的除湿剂。

经过市场询价, 无水 LiCl 平均市值为 60~80 元/kg, 而无水 CaCl<sub>2</sub> 为 6~10 元/kg。从技术经济综合比较, 此次实验台选用 CaCl<sub>2</sub> 溶液作为除湿剂, 对其特定工况下的除湿再生性能进行测试。

绝热型的除湿/再生器中, 大多采用填料形式, 以增加溶液与空气的有效接触面积, 从而增强其热质交换的效果。规整填料相对于散装填料而言, 以其特定的规则几何形状, 规定了气液流道, 在提供较大气液接触面积的同时有效地降低了流体阻力。有不少研究者侧重规整填料的性能分析, 如不锈钢波纹孔板、Celdek 规整填料等。不同性能的填料, 其润湿的难易程度不同, 所能提供的气液有效接触面积不同, 是影响溶液与湿空气热质交换效果的重要因素之一。

本次换热器中的气液热质交换过程类似于冷却塔中的交换过程, 因此实验台所采用的填料, 采用的是冷却塔上所使用过的聚氯乙烯波纹散装填料。

## 2 实验工况及结果

### 1) 空气流量的计算

实验台以 100~150 m<sup>2</sup> 居住建筑温湿度独立控制系统为对象, 进行实验设计。其中, 显热部分由已经调试安装完成的地板辐射盘管承担, 可使房间温度维持在设定温度。潜热部分的负荷在夏季除湿量为 2.6~4.5 kg/h, 且全部由液体除湿装置承担湿负荷, 可处理的新风量为 300~500 m<sup>3</sup>/h, 按此计算, 则空气质量流量为 0.09~0.15 kg/s。

### 2) 溶液流量的计算

取气液流量比(G/L)0.15~1.6, 考虑一定的余量系数和安全系数, 则需溶液质量流量(Ls)为 0.6~1.2 kg/s。

本次实验考虑 6 个因素, 分别是 A(进口干球温度 °C)、B(进口含湿量 g/kg)、C(空气流量 m<sup>3</sup>/h)、D(溶液温度 °C)、E(溶液流量 L/h)、F(溶液浓度 %), 每个因素 2 个水平, 由于实验工况较多, 利用规格化的正交表 L8(2<sup>7</sup>) 来设计实验方案, 共安排 8 种工况。除湿实验工况见表 2。

表 2 除湿实验工况

实验号	A	B	C	D	E	F
1	24.9	14.20	300	24	2 800	50
2	24.9	14.20	300	36	1 800	40
3	24.9	13.16	500	24	2 800	40
4	24.9	13.16	500	36	1 800	50
5	26.4	14.20	500	24	1 800	50
6	26.4	14.20	500	36	2 800	40
7	26.4	13.16	300	24	1 800	40
8	26.4	13.16	300	36	2 800	50

研究在不同工况下溶液除湿再生的效率及模块性能, 以风管进出口空气的含湿量差值作为评价指标, 正值表示除湿, 负值表示加湿。在除湿循环中, 正值越大, 表示除湿量越大, 除湿性能越好; 在再生循环中, 负值越小, 表示再生量越大, 再生性能越好。实验结果曲线如图 2。

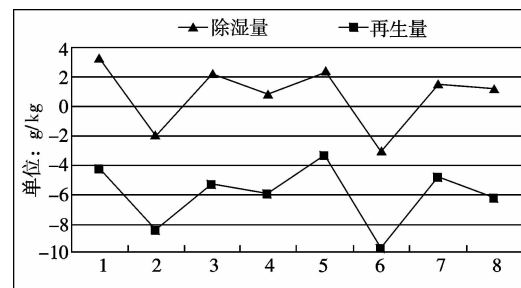


图 2 溶液除湿系统的除湿量和再生量

## 3 实验结果分析

为了确定诸因素对结果影响的主次顺序和各因素的可能最优水平, 从而可以设计出可能更优的试验方案, 对试验结果进行数据处理分析。本文将采用数理统计学中的极差法和方差分析法进行数据分析。

极差是指一组数据中最大值和最小值之差。某一因素的极差越大, 说明该因素的水平改变所引起试验结果的变化越大, 故是关键因素。方差分析是将因素水平变化对结果数据的影响和误差对结果数据的影响做比较, 判断因素水平变化对结果数据的影响是否显著, 是反映观测数据波动的一个测度<sup>[15]</sup>。

### 3.1 小型液体除湿系统除湿实验结果分析

1) 根据极差的比较, 顺次排出因素的主次顺序为: 溶液温度 > 进口含湿量 > 溶液浓度 > 进口干球温度 > 空气流量 > 溶液流量。

确定最优方案为: 溶液温度 24 °C、空气进口含湿量 14.20 g/kg、溶液浓度 50%、进口干球温度 24.9 °C、进口空气流量 300 m<sup>3</sup>/h、溶液流量 2 800 L/h。

2)由方差分析得出,影响除湿性的因素按照显著性排列为:溶液温度>空气进口含湿量>溶液浓度。而进口空气流量、溶液流量在本实验中对结果的影响小,不构成显著性因素。

3)第2和第6工况表现为加湿情况,说明溶液在低浓度和高温度状况下,不但不能除湿,反而会对空气进行加湿;在第4和第8工况下,虽然表现为除湿,但除湿量仅为0.8 g/kg和1.2 g/kg,说明溶液温度对除湿影响很重要。因此,在除湿前对溶液进行预冷可有效提高溶液除湿效率。

### 3.2 小型液体除湿系统再生实验结果分析

1)根据极差的比较,顺次排出因素的主次顺序为:溶液温度>溶液浓度>空气进口含湿量>溶液流量>进口空气流量>空气进口干球温度。

确定最优方案为:溶液温度70℃、溶液浓度40%、空气进口含湿量14.12 g/kg、溶液流量1800 L/h、进口空气流量500 m<sup>3</sup>/h、空气进口干球温度33.0℃。

2)由方差分析得出,影响再生性的因素按照显著性排列为:溶液温度>溶液浓度>空气进口含湿量。而空气进口干球温度、进口空气流量、溶液流量在本实验中对结果的影响小,不构成显著性因素。

### 3.3 综合分析

1)该实验所采用的空气流量 $G$ 为0.09~0.15 kg/s,溶液流量 $L$ 为0.76~1.18 kg/s,气液流量比( $G/L$ )为0.07~0.18,装置的除湿量为1.3~1.8 kg/h。在室内空气流量不变时,还可增大溶液流量以提高装置吸湿性能。

2)用CaCl<sub>2</sub>溶液作为除湿剂用于小型液体除湿,其除湿效果较好,除湿量最高可达3.32 g/kg,而且经过改进后,还有较高的除湿潜力,空气温升在0.6~0.8℃。另外,发现当除湿与再生系统其他条件一致时,再生性能总是大于除湿性能,约为1.3~2.9倍,最大再生量为9.65 g/kg。

3)由实验结果图中看出,除湿曲线和再生曲线很相似,溶液除湿性能好,则再生性能低;除湿性能低,则再生性能好。

## 4 结论

1)除湿与再生的三个重要因素为溶解温度、溶液浓度和空气进口含湿量。表现为溶液温度越低,出口含湿量越低;空气入口含湿量越大,出口含湿量越高;溶液浓度越高,除湿量越高。

2)从溶液除湿与再生的正交实验可知,40%的溶液浓度太低,不利于除湿的控制。同时对于再生

溶液浓度,可以适当降低。两者综合后,认为45%为溶液最佳浓度。

3)以重庆为例,100~150 m<sup>2</sup>居住建筑的湿负荷平均为3.2~4.5 kg/h,设计工况下,进出口含湿量分别为19.72 g/kg和11.28 g/kg,差值为8.44 g/kg,而该装置在实验条件下,进出口含湿量差为3.32 g/kg,仅占到理论除湿量的40%。以此计算,当除湿风量在300~500 m<sup>3</sup>/h时,该装置的除湿量为1.3~1.8 kg/h。因此本小型液体除湿系统应用于居住建筑还需改进。

4)本实验对热泵冷凝热回收进行了一次尝试,实验条件下,热泵所能提供的冷热量不足以满足溶液除湿/再生所需冷热量。因此,应加大换热强度,如设置板式换热器和回热器。

### 参考文献:

- [1] KHAN A Y. Parametric analysis of heat and mass transfer performance of a packed-type liquid desiccant absorber at part-load operation conditions [J]. ASHRAE Transactions, 1996, 102(1):349-357.
- [2] GOMMED K, GROSSMAN G. A liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2004, 126:879-885.
- [3] 杨英, 李心刚, 李惟毅, 等. 液体除湿特性的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2000, 21(2): 155-159.  
YANG YING, LI XIN-GANG, LI WEI-YI, et al. Experimental study on the characteristics of solar powered liquid dehumidification system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2000, 21(2): 155-159.
- [4] CONDE M R. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides; formulations for use in air conditioning equipment design [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(4): 367-382.
- [5] 卢军, 陈启高. 含盐多孔材料湿交换率的确定 [J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(3): 46-48.  
LU JUN, CHEN QI-GAO. Determination of moisture rate of porous saline materials [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(3): 46-48.
- [6] 隆亚东. 长江流域地区小型除湿系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [7] WIMAY J M, BERNTSSON T S. Viscosity and density of aqueous solutions of LiBr, LiCl, ZnBr<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, and LiNO<sub>3</sub>. single salt solutions [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1994, 39(1): 68-72.

(下转第109页)

- 2003,53(3):121-125.
- [8] 祝国强. 方差分析的简易算法[J]. 数理医药学杂志, 2007,20(3):296-297.
- ZHU GUO-QIANG. The simple arithmetic of variance analysis[J]. Journal Of Mathematical Medicine, 2007, 20 (3):296-297.
- [9] MAMAT N J Z, DANIEL J K. Statistical analyses on time complexity and rank consistency between singular value decomposition and the duality approach in AHP: a case study of faculty member selection [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2007,46 (7-8): 1099-1106.
- [10] CLARIDGE D E, TURNER W D, LIU M. Choosing the right parameter for single-duct constant air volume system supply air temperature reset [J]. Journal of Architectural Engineering, 2005, 11(3):76-80.
- [11] 彦启森. 空气调节用制冷技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [12] 田国庆. 离心式冷水机组选型分析[J]. 暖通空调, 2003, 33(3):75-77.
- TIAN GUO-QING. Selection of centrifugal refrigerating machines[J]. HV&AC, 2003, 33(3):75-77.
- [13] MAO S R, CHEN J M, WEI Z P, et al. Intranasal administration of melatonin starch microspheres [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2004, 272 (1): 37-43.
- [14] 辛益军. 方差分析与实验设计[M]. 北京:中国财政经济出版社,2001:49-65.
- [15] 刘晓莉. 试验设计中多元回归分析方法的研究[J]. 数理统计与管理, 2001,20(4):14-16.
- LIU XIAO-LI. The research for method of regression analysis on experiment design [J]. Application of Statistics and Management, 2001,20(4):14-16.
- [16] 刘莹,郑贤德,许新明. 冷水机组部分负荷性能分析[J]. 制冷, 2000,19(4):63-67.
- LIU YING, ZHENG XIAN-DE, XU XIN-MING. Performance analysis of partial load of water chilling unit[J]. Refrigeration, 2000,19(4):63-67.

(编辑 陈蓉)

(上接第 102 页)

- [8] CHUNG T W, WU H. Mass transfer correlation for dehumidification of air in a packed absorber with an inverse U-shaped tunnel [J]. Separation Science and Technology, 2000,35(10): 1502-1514.
- [9] FUMO N, GOSWAMI D Y. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration[J]. Solar Energy, 2002, 72 (4): 351-361.
- [10] 杨英. 液体除湿性的实验研究[D]. 天津:天津大学, 1999.
- [11] 秦朝葵,徐吉浣. 氯化锂除湿转轮传热传质模型[J]. 暖通空调, 2004, 34(11):135-138.
- QIN CHAO-KUI, XU JI-HUAN. Heat and mass transfer model for LiCl rotary dehumidifiers [J]. HV&AC, 2004, 34(11): 135-138.
- [12] 刘晓华,江亿,曲凯阳,等. 叉流除湿器中溶液与空气热质交换模型[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 115-119.
- LIU XIAO-HUA, JIANG YI, QU KAI-YANG, et al. Heat and mass transfer model between air and liquid desiccant in cross-flow dehumidifiers [J]. HV&AC, 2005,35(1):115-119.
- [13] PATNAIK S, LENZ T G, LOF G O G. Performance studies for an experimental solar open-cycle liquid desiccant air dehumidification system[J]. Solar Energy, 1990, 44(3): 123-135.
- [14] ZURIGAT Y H, ABU-ARABI M K, ABDUL-WAHAB S A. Air dehumidification by triethylene glycol desiccant in a packed column [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(1): 141-155.
- [15] 刘振学,黄仁和,田爱民. 实验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

(编辑 陈蓉)