

太阳能-溴化锂溶液除湿-再生系统的实验研究

王海峰，张守兵，董闪闪，原惠惠，李玉夺

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 建立一种新型的太阳能-溴化锂溶液除湿-再生试验系统,并用正交试验法对影响除湿效果的入口溶液质量分数、入口溶液温度、入口液气比、入口空气相对湿度、入口空气温度、溶液再生温度等诸多因素进行了实验分析.结果表明:对单位除湿量的影响程度由大到小排序为:入口空气相对湿度、入口液气比、入口溶液温度、入口溶液质量分数、入口空气温度.当系统入口液气比为 3.5 时,系统的除湿效果较好.同时,利用闪蒸原理使系统溶液的再生温度控制在 60~70℃ 之间,为太阳能-溴化锂溶液除湿器的设计、使用提供了依据.

关键词: 太阳能;溶液除湿;溴化锂;正交试验法

中图分类号: TU831.7

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.011

0 引言

除湿是生产和生活中经常遇到的问题^[1]. 溶液除湿方法是采用吸湿性强的盐溶液作为除湿剂,如溴化锂溶液、氯化锂溶液、氯化钙溶液等,盐溶液与被处理空气直接接触,由于盐溶液表面的水蒸气分压力与被处理空气的水蒸气分压力间存在压差,驱动水分在空气和吸湿溶液间传递,从而实现空气湿度的改变^[2-3].

国内外众多学者对溶液除湿系统进行了研究. Florida Solar Energy Center 的 Swami^[4] 在 1998 年提出利用屋顶作为太阳能吸收表面对溶液进行再生的系统. Nelson 等^[5] 实验研究了 LiCl 溶液为除湿剂的除湿性能. Kabeel^[6] 搭建了一套由太阳能驱动的溶液除湿蒸发冷却机组, 并进行了实验分析. 张小松等^[7] 建立了蓄能型液体除湿蒸发冷却系统, 并对除湿与再生性能进行了实验分析. 沈钰龙^[8] 实验测试了液体除湿空调中 LiCl 溶液为除湿剂的除湿与再生性能. 邹同华等^[9] 实验分析了 LiCl 溶液除湿系统的除湿性能, 但并没有研究溶液的再生温度. 杨金伟等^[10] 专门对 LiBr 的再生性能进行了研究. 国内外学者对 LiBr 的除湿性能研究较少, 由于在 PH 相同和浓度等效相等的情况下, 溴化锂的表面蒸气压、比热容、腐蚀性等理化性质优于氯化锂、氯化钙等除湿剂^[11], 鉴于

此,笔者实验研究了以太阳能-溴化锂溶液为基础的除湿-再生系统及其影响除湿效果的因素,并对溴化锂溶液的再生温度进行了分析,为工程设计与应用奠定了基础。

1 溶液除湿-再生系统的建立

太阳能-溶液除湿-再生系统的原理如图1所示(图中箭头表示溶液流向). 主要由六部分组成: 1. 除湿器; 2. 太阳能加热器; 3. 溶液再生器; 4. 回热器; 5. 风冷器; 6. 溶液泵. 还有风机、喷头、填料、流量计、调压器等辅助设备. 其中除湿溶液为溴化锂溶液. T 为温度测点, Q 为流量测点, RH 为相对湿度测点.

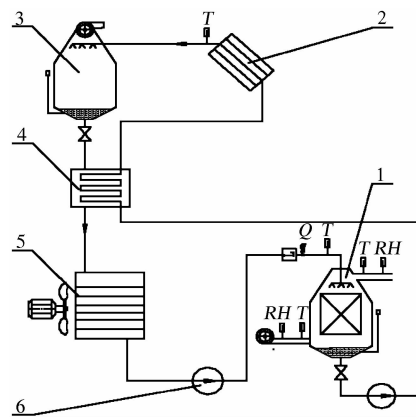


图 1 系统原理图

Fig. 1 The principle diagram of the system

收稿日期:2015-03-17;修订日期:2015-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176174);郑州大学大学生创新创业训练计划项目(1210459076)

作者简介:王海峰(1957—),男,河南西华人,郑州大学高级工程师,硕士,主要从事制冷、热泵、节能技术的研究。

E-mail: wanghaifeng@zzu.edu.cn.

2 正交试验方案的建立

本实验用正交试验方法来完成实验方案的设计,并找到影响除湿性能的主要因素.影响太阳能-溶液除湿系统性能的因素有进入除湿器的空气流量、入口空气温度、入口空气相对湿度、入口溶液质量分数、入口溶液温度、溶液流量、溶液再生温度等.

由于空气流量和溶液流量相互影响,本实验稳定溶液流量,通过调节入口空气流量,测得空气和溶液的相关参数,最终以液气比作为一个入口影响

因素.液气比定义为除湿器入口溶液与气体的质量流量之比.取入口液气比(A)、入口溶液质量分数(B)、入口溶液温度(C)、入口空气相对湿度(D)、入口空气温度(E)等 5 个因素,根据正交试验表选取 $L18(3^7)$ 正交表^[12],正交设计见表 1.最后研究了不同工况下溶液再生温度的变化情况.

3 实验结果与分析

实验中,当系统运行相对稳定时,开始记录数据,每组实验记录 10 组数据,每 3 min 记录一组数据,查询湿空气焓湿图并整理得表 1.

表 1 正交试验设计表及结果分析
Tab.1 Orthogonal experiment design and results analysis

实验	因素					出口空气含湿量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)干空气	出口空气 温度/ $^{\circ}\text{C}$	除湿量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)干空气	溶液再生 温度/ $^{\circ}\text{C}$
	A	B	C	D	E				
1	1.5	36%	27	65%	23	10.19	24	1.23	63
2	1.5	39%	30	72%	26	13.70	27	1.53	66
3	1.5	42%	33	80%	29	18.35	30	1.97	69
4	2.5	36%	27	72%	26	13.66	27	1.57	63
5	2.5	39%	30	80%	29	18.43	29	1.89	66
6	2.5	42%	33	65%	23	10.00	24	1.42	69
7	3.5	36%	30	65%	29	14.82	29	1.59	65
8	3.5	39%	33	72%	23	10.80	24	1.87	68
9	3.5	42%	27	80%	26	14.26	26	2.70	70
10	1.5	36%	33	80%	26	15.48	28	1.48	60
11	1.5	39%	27	65%	29	15.07	29	1.34	62
12	1.5	42%	30	72%	23	11.21	25	1.46	65
13	2.5	36%	27	80%	23	11.31	23	2.80	66
14	2.5	39%	33	65%	26	12.19	28	1.52	69
15	2.5	42%	30	72%	29	16.19	29	2.04	70
16	3.5	36%	33	72%	29	16.59	29	1.64	60
17	3.5	39%	27	80%	23	11.80	25	2.31	62
18	3.5	42%	30	65%	26	11.70	27	2.01	65
K_1	9.01	10.31	11.95	9.11	11.09				
K_2	11.24	10.46	10.52	10.11	10.81				
K_3	12.12	11.6	9.90	13.15	10.47				
\bar{K}_1	1.50	1.72	1.99	1.52	1.85				
\bar{K}_2	1.87	1.74	1.75	1.69	1.81				
\bar{K}_3	2.02	1.93	1.65	2.19	1.75				
R	0.52	0.21	0.34	0.67	0.10				

3.1 极差法分析

把每个因素的各个水平分组相加,则相当于把每个因素的实验结果分成了 3 组,分别用 K_1, K_2, K_3 表示,并求各自的算术平均值,最后计算各因素的极差.通过比较各因素极差的大小,可得影响因素的主次顺序为 $D > A > C > B > E$.造成这种顺序的原因与溶液、湿空气自身的物性、溶液与湿

空气的传热传质以及外界环境有关.入口空气相对湿度和入口液气比是影响除湿量的主要因素.因为入口空气相对湿度以及液气比直接影响气液两相的传质和传热过程,实际运行过程中,入口空气相对湿度由外界环境决定的,无法控制,而液气比是可以调节的,设计除湿系统时应重点考虑;其次是入口溶液温度和入口溶液质量分数,因为溶

液温度对表面水蒸气分压力的作用大于溶液质量分数的作用,故对除湿效果的影响更大;由于入口空气温度和出口空气温度的温差变化并不是很大,因而对除湿剂溶液除湿效果的影响也较小. 由表 1 实验结果可知,最优组合^[12]为 A3, B3, C1, D3, E1, 即:液气比 3.5, 入口溶液质量分数 42%, 入口溶液温度 27 ℃, 入口空气相对湿度为 80%, 入口空气温度 23 ℃.

3.2 分析结果

各个因素对除湿效果的影响如图 2 所示. 由图 2(a)可知,随着液气比的增加,除湿量也逐渐增加,但当液气比为 3.5 时,除湿量增加幅度明显放缓,且在实验中发现,液气比增加到一定程度,除湿量基本不发生变化. 因为液气比很小时,待除湿空气是过量的,湿空气与溶液接触时间短,除湿量较小;随着液气比的增加,溶液与空气接触时间增加,除湿量有所增加;但液气比太大时,由空气带入的水蒸气量减少,除湿量增加缓慢. 故在除湿过程中可以通过调节入口空气流量与溶液流量来改变系统除湿量,而且要想系统达到最佳除湿效果,必须要选择合适的液气比.

由图 2(b)可知,随着入口溶液温度增加,除湿量减小. 由于溶液温升,溶液表面蒸气分压力升高,导致湿空气与溶液的水蒸气分压力差减少,除湿量减少,溶液温度过高时,除湿量会减少到零甚至为负值. 故在系统中增加了回热器和风冷器,一方面可回收利用能量,另一方面对溶液充分冷却却使溶液达到较低温度.

由图 2(c)可知,随着入口溶液质量分数增加,除湿量增加. 因为溶液质量分数增加时,浓度增加,溶液表面的水蒸气分压力减少,与空气中水蒸气分压力的压差增大,除湿量的增长越快. 但溶液质量分数不能太大,否则溴化锂就会结晶析出,影响整个系统正常运行^[13].

由图 2(d)可知,随着入口空气相对湿度增加,除湿量逐渐增加,几乎成正比关系. 入口空气相对湿度大时,其水蒸气分压力大,湿空气与溶液表面的水蒸气分压力差增加,除湿量增加,故对空气含湿量大的地方除湿效果较好.

由图 2(e)可知,入口空气温度变化(最大为 6 ℃)时,除湿量变化较小(最大为 0.1 g/kg 干空气),说明入口空气温度对除湿效果影响较小. 但出口空气温度会受入口空气温度以及入口溶液温度的影响,出口空气温度太高,说明除湿系统的整体性能不理想,会加重室内空调负荷.

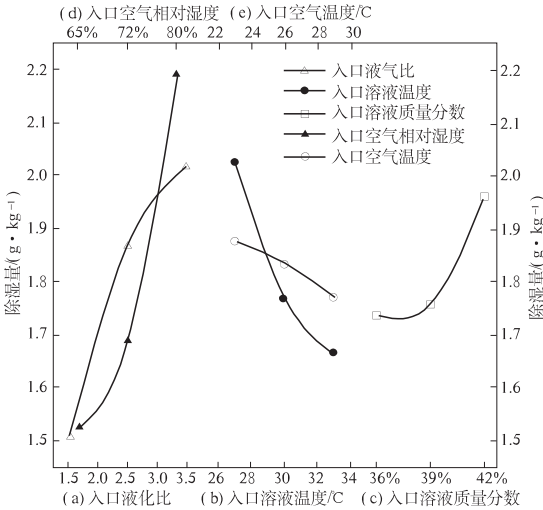


图 2 除湿量随各个因素的变化
Fig.2 Dehumidification capacity varies with each factor

3.3 溶液再生温度的分析

根据文献[14]可知,闪蒸初始压力不同时,即使相同溶液在闪蒸的除湿阶段,压力较低溶液的蒸发速度明显快于压力较高者. 因此蒸发压力是决定蒸发速度的核心因素,压力越低蒸发速度越快,但压力也不能过低以防溶液结晶使得闪蒸过程终止. 此外为了保证闪蒸过程能够持续不间断进行,必须将闪蒸过程中产生的水蒸气及时除去,从而在再生器中维持一个较低的水蒸气分压力.

实验过程中溶液的再生采用太阳能加热器,把溶液加热到适当温度后进入再生器,并通过离心风机的抽吸作用,使再生器内的压力较低,让溶液中的水蒸气发生闪蒸,在较低温度下就能获得较高的再生效率,这样可以减轻风冷器的负荷.

由表 1 可知,不同入口溶液质量分数所需要的再生温度不同,且溶液质量分数较大时所需的再生温度较高. 故提高再生温度有利于溶液的再生. 表中显示再生温度在 60 ~ 70 ℃,实验过程中定时测量溶液的浓度,每个再生温度下都能保持稳定,说明此除湿系统能够在较低温度下实现溶液的再生.

4 结论

- (1)建立了太阳能-溴化锂溶液除湿-再生试验系统,通过实验得到了各入口参数对单位除湿量的影响程度,由大到小为:入口空气相对湿度 > 入口液气比 > 入口溶液温度 > 入口溶液质量分数 > 入口空气温度.
- (2)系统运行过程中,通过调整入口空气流量与溶液流量可改变系统的除湿量,当入口液气

比为 3.5 时,系统的除湿效果较好.

(3)利用闪蒸原理,降低再生器的内部压力,再生温度为 60 ~ 70 ℃可以满足系统运行需求.

参考文献:

- [1] 张立志. 除湿技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:20-22.
- [2] 薛殿华. 空气调节[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:101-105.
- [3] 刘晓华,江亿. 建筑节能技术与实践丛书-温湿度独立控制空调系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006:42-46.
- [4] SWAMI Z. Theoretical and computational investigation of algorithms for simulataneous heat and moisture transport in buildings;task 2 final report[J]. Solar Energy, 1998, 89(B):12-13.
- [5] NELSO F, GOSWAMI D Y. Study of an aqueous lithiumchloride desiccant system; air dehumidification and desiccant regeneration [J]. Solar Energy, 2002, 72(4):351-361.
- [6] KABEEL A E. Augmentation of the perfor-mance of solar regenerator of open absorption cooling system [J]. Renewable Energy, 2005, 30(3):327-338.
- [7] 张小松,殷勇高,曹毅然. 蓄能型液体除湿蒸发冷却系统中除湿性能的实验研究[J]. 热科学与技术, 2004, 3(1):60-64.
- [8] 沈钰龙,柳建华. 液体除湿空调再生性能分析[J]. 制冷, 2008, 27(1):1-5.
- [9] 邹同华,张涛,马淑媛,等. 溶液除湿系统除湿性能实验研究[J]. 暖通空调, 2013, 43(1):76-79.
- [10] 杨金伟,裴刚,林媛,等. 溴化锂溶液除湿系统再生性能的研究[J]. 热科学与技术, 2011, 10(4):345-350.
- [11] 易晓勤. 常用溶液除湿剂的性质研究[D]. 北京:清华大学建筑学院, 2009:57-73.
- [12] 夏伯忠. 正交实验法[M]. 吉林:吉林人民出版社, 1985:1-22.
- [13] PATEK J, KLOMFAR J. Solid-liquid phase equilibrium in the systems of LiBr-H₂O and LiCl-H₂O[J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 250(1):138-149.
- [14] 高文忠,时亚茹. 混合除湿盐溶液液滴闪蒸机理[J]. 化工学报, 2012, 63(11):3453-3459.

Investigation on Solar Energy-Lithium Bromide Solution Desiccant-Regeneration System

WANG Hai-feng, ZHANG Shou-bing, DONG Shan-shan, YUAN Hui-hui, LI Yu-duo

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the solar energy-lithium bromide solution desiccant-regeneration test system, the influence of a range of factors at an inlet, such as solution mass fraction, solution temperature, liquid-gas ratio, relative humidity ratio of air and temperature, on export air moisture content were analyzed with the orthogonal experiment method in the experiment. The results show that the influence degree of them on the capacity of dehumidification from large to small is: relative moisture content air, liquid-gas ratio, liquid solution temperature, solution mass fraction, and the inlet air temperature. When liquid-gas ratio of the inlet was 3.5, the system had a better dehumidification effect. Meanwhile, based on the flash principle, the regeneration temperature of the solution system could be controlled within the range of 60 ℃ and 70 ℃. The results provide the basis for the engineering design and application of the solar energy-lithium bromide solution dehumidifier.

Key words: solar energy; liquid dehumidification; lithium bromide; orthogonal experiment method