

冬季工况下溶液再生器性能的实验研究

李永存, 陈光明, 张绍志, 曹晶晶

(浙江大学制冷及低温研究所, 310027, 杭州)

摘要: 针对溶液再生器冬季工况下的性能数据缺少问题, 搭建了冬季工况下再生器性能实验台, 实验研究了再生溶液为 LiCl 溶液时空气入口温度、空气入口含湿量、空气流量以及溶液入口温度、溶液入口浓度、溶液流量对再生器性能的影响, 采用再生量和再生效率为评价再生器性能的指标. 结果表明: 在本实验的工况范围内, 增大溶液流量, 能够提高再生量和再生效率; 空气入口含湿量变化对再生量和再生效率影响不大; 提高空气入口温度会使再生量和再生效率略有增加; 增大空气流量会使蒸发量和再生效率降低; 提高溶液入口温度会使再生量增加而再生效率降低; 提高入口溶液浓度能够提高再生效率而再生量减小.

关键词: 再生器; 冬季工况; 再生量; 再生效率

中图分类号: TK511 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0074-05

Experimental Study on Performance of Regenerator with Liquid Desiccant under Winter Conditions

LI Yongcun, CHEN Guangming, ZHANG Shaozhi, CAO Jingjing

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: An experimental system was established to test the performance of a regenerator under winter conditions, and the experiment was conducted to investigate the effects of the inlet parameters of the air and the LiCl aqueous solution on the performance of the regenerator. The results show that both the evaporation rate and the humidity effectiveness increased with the increase in the desiccant flow rate. The increase in the inlet air humidity ratio almost had no influence on the evaporation rate and the humidity effectiveness. The evaporation rate and the humidity effectiveness increased slightly with the increase in the inlet air temperature and decreased with the increase in the air flow rate. The evaporation rate increased and the humidity effectiveness decreased with the increase in the inlet desiccant temperature. In addition, the evaporation rate decreased and the humidity effectiveness increased with the increase in the inlet desiccant concentration.

Keywords: regenerator; winter condition; evaporation rate; humidity effectiveness

溶液再生器被广泛应用于化工过程、空调、热回收等领域^[1-3], 对其性能的研究已引起国内外诸多学者的关注. Fumo 等^[4]通过理论和实验研究了采用 LiCl 溶液为再生溶液的再生器性能, 其空气入口温度为 30~40 °C. Yin 等^[5]研究了空气入口温度为 21

~30 °C 时内热型再生器的性能. Li 等^[6]研究了绝热型溶液再生器的性能, 其夏季、冬季工况下空气入口温度分别为 44.14~46.72 °C 和 4.42~9.98 °C. Sultan 等^[7]研究了以 CaCl₂ 溶液为工作流体, 空气入口温度为 63~113 °C 时再生器的性能. Liu 等^[8]

收稿日期: 2011-01-20. 作者简介: 李永存(1976—), 男, 讲师, 博士生; 陈光明(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976097).

网络出版时间: 2011-06-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110621.1704.006.html>

研究了叉流再生器溶液与空气间的热质传递特性,其空气入口温度为 29~36 ℃. Martin 等^[9]研究了以 TEG 为再生溶液的再生器热质传递性能,其空气入口温度为 30~50 ℃. Longo 等^[10]研究了再生溶液为 LiCl 溶液,空气入口温度为 48.2~50.1 ℃ 时的再生器热质传递性能.

通过文献调研可知,关于溶液再生器在冬季工况下空气入口温度低于 0 ℃ 时的性能研究还未见文献报道,而再生器的性能除与其结构有关外,还与进入再生器的空气与溶液入口参数有关,因而研究冬季工况下空气入口温度低于 0 ℃ 时再生器的性能很有必要. 由于在冬季工况下空气入口温度较低,所以采用较低的再生温度也可以获得所需的再生温差,从而达到溶液再生的目的^[11]. 对于较低的溶液再生温度,可以采用太阳能、冷凝热、余热等低品位热源作为再生热源^[12-13]. 本文搭建的冬季工况下溶液再生器性能实验台,利用电加热来模拟太阳能等低品位热源,实验研究了冬季工况下溶液及空气入口参数对再生器性能的影响.

1 实 验

1.1 实验系统

冬季工况下溶液再生器性能实验系统如图 1 所示. 该系统由 3 部分组成:溶液系统,人工气候室,溶液、空气参数测量及采集系统.

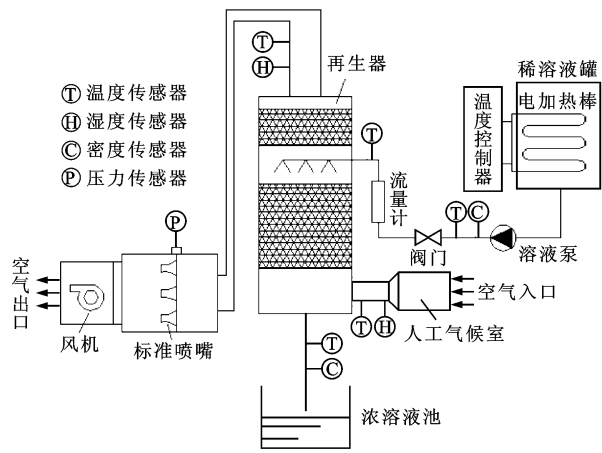


图 1 实验系统示意图

溶液系统包括稀溶液罐、浓溶液池、阀门、溶液泵,稀溶液罐内装有电加热器并通过 PID 温度控制系统来实现溶液温度达到稳定的设定值. 人工气候室包括蒸发器(带制冷机组)、加热器、加湿器、风机,气候室内的温度和湿度通过控制系统调节,即通过

控制蒸发温度、加热量、加湿量来达到所需的设定值,如图 2 所示. 溶液及空气参数测量系统包括溶液流量、密度、入口温度、出口温度的测量,以及空气流量、入口温度、入口湿度、出口温度、出口湿度的测量. 利用标准喷嘴加高精度压差传感器来测量系统的空气流量,测量范围为 0~2 000 m³/h,精度为读数的±1%;空气温、湿度采用温、湿度变送器(型号: PCMini52)测量,温度测量范围为-20~80 ℃,精度为±0.2 ℃,湿度测量范围为 0~100%,精度为 2%;溶液流量采用防腐型电磁流量计(型号: HH-LDE)测量,测量范围为 0~2 kL/h,精度为读数的±0.5%;溶液温度采用防腐型 PT100 铂电阻测量,精度为 0.2 ℃;溶液密度采用智能型密度传感器(WS3051-MD07L)测量,测量范围为 500~1 800 kg/m³,精度为±0.1 kg/m³. 溶液浓度由测得的温度和密度根据其物性关系获得^[14]. 为了保证仪器的精度,尤其是对于参数测量难度较大的湿度传感器和密度传感器等,需严格按照相关安装、使用要求及注意事项来进行. 湿度传感器及数据线等配件都是英国 MICHELL 仪表的原装进口产品,安装时固定点所配的法兰必须与仪表所带法兰规格一致,保证固定可靠,探杆方向与空气来流方向保持垂直,多向探头无堵塞;密度传感器在安装时必须保证垂直安装,固定好后要进行校验,保证垂直度小于 5°,密度计在使用时必须确保附近无变频器或者大功率电机使用,电源线以及数据线采用屏蔽线.

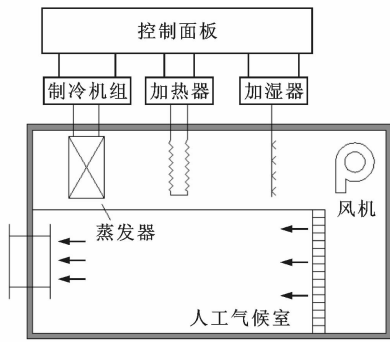


图 2 人工气候室示意图

溶液再生器是本实验系统中最核心的部件,本次实验中再生器采用逆流式再生器,填料尺寸为 400 mm×300 mm×500 mm,填料由一种新型表面带亲水材料的波纹板制成,其比表面积为 500 m²/m³. LiCl 水溶液为本次实验的再生溶液.

实验过程中的所有测点数据都通过数据采集系统(Agilent 34970A)实时采集并存储.

1.2 性能评价指标

通常采用再生量和再生效率作为评价溶液再生器性能的指标^[15-16],再生量可通过下式计算

$$m_e = m_a(h_{a,o} - h_{a,in}) \tag{1}$$

式中: m_a 为空气流量; $h_{a,o}$ 为空气出口含湿量; $h_{a,in}$ 为空气入口含湿量.

再生效率用下式来计算

$$\varepsilon = \frac{h_{a,o} - h_{a,in}}{h_{a,eq} - h_{a,in}} \tag{2}$$

式中: $h_{a,eq}$ 为与再生器入口溶液状态相平衡时的空气含湿量.

1.3 实验工况

实验过程中空气及溶液的变化范围如下:空气入口温度 $t_{a,in}$ 为 $-12\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$;再生器内单位面积的空气流量为 $2.14\sim2.41\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;空气入口含湿量为 $1.43\sim1.751\text{ g}/\text{kg}$;溶液入口温度 $t_{s,in}$ 为 $33\sim41\text{ }^{\circ}\text{C}$;再生器内单位面积的溶液流量 m_s 为 $1.77\sim2.43\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;溶液入口质量分数 $\xi_{s,in}$ 为 $32.8\%\sim38\%$. 当以上参数中的任何一个发生变化时,其余参数保持以下设定值:空气入口温度为 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$;单位面积的空气流量为 $2.22\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;空气入口含湿量为 $1.751\text{ g}/\text{kg}$;溶液入口温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$;单位面积的溶液流量为 $2.11\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;溶液入口质量分数为 33.5% . 也就是说,当在实验过程中改变其中某一参数时,其他参数维持不变,以研究该参数对再生器性能的影响.

2 实验结果及分析

图 3 给出了溶液入口温度变化对再生器性能的影响,可以看出,再生量随着溶液入口温度的升高而增加. 这是因为溶液入口温度的升高使得溶液表面的水蒸气分压增大,从而增加了质传递的驱动力. 相反,再生效率随着入口溶液温度的升高而降低. 因为溶液入口温度的增加使 $h_{a,eq}$ 和再生器出口空气含湿量均增加,而 $h_{a,eq}$ 的增加幅度大于再生器出口空气含湿量的增加量,从而使再生效率降低.

空气流量对再生器性能的影响如图 4 所示. 空气流量增加时,空气流经再生器的流速增大,单位质量的空气在再生器中与溶液进行热质交换的时间缩短,传热与传质过程进行的不充分,因此再生器出口空气的含湿量降低. 当再生器入口空气含湿量保持恒定时,虽然空气流量有所增加,但在本次实验过程中其增加幅度小于出、进口空气含湿量差的减小幅度,所以再生量和再生效率均有所减小.

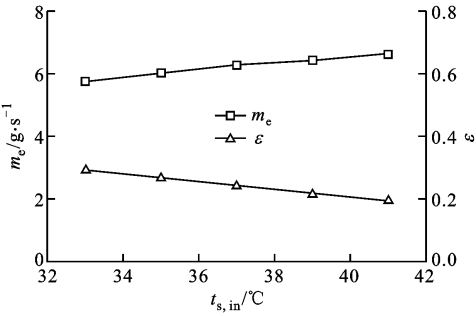


图 3 溶液入口温度对再生量和再生效率的影响

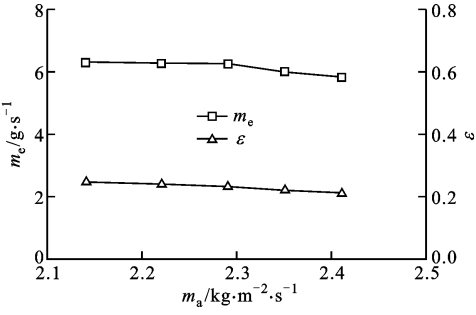


图 4 空气流量对再生量和再生效率的影响

由图 5 可知,再生量和再生效率均随再生溶液流量的增加而增大. 溶液流量的增加提高了再生器内溶液的平均温度,在溶液浓度一定时,溶液温度越高,其表面水蒸气分压越大,因而质传递的驱动力增大,再生器出口空气含湿量增大,所以再生量和再生效率增大.

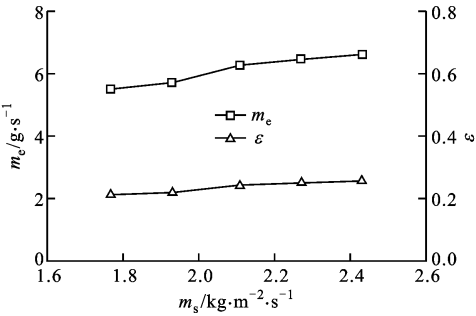


图 5 溶液流量对再生量和再生效率的影响

图 6 给出了空气入口温度对再生器性能的影响. 随着空气入口温度的升高,再生器内溶液的平均温度升高,这样溶液表面水蒸气分压就会增大,溶液与空气间质传递驱动力增加,空气出口含湿量增加;同时,空气温度升高使得再生器内空气和溶液的换热温差减小,这就使得溶液平均温升幅度减小,即再生器内溶液与空气间质传递驱动力增幅较小,因此

再生量和再生效率随着空气入口温度的升高有所增大,但增加幅度不大。

空气入口含湿量对再生器性能的影响如图 7 所示,可以看出,在本实验参数范围内,空气入口含湿量的增加对再生量和再生效率的影响都很小,空气入口含湿量的增加能增大入口空气中的水蒸气分压,因此溶液和空气间的传质驱动力减小。但是,由于在冬季工况下,尤其是温度低于 0℃ 时,由空气的物性特点可知,在低温工况下空气的含湿量小,因此在实验中空气入口含湿量的增加量小,使得入口空气中水蒸气分压增加量小,即溶液和空气间的传质驱动力变化很小,所以在本实验参数范围内,再生量和再生效率几乎保持不变。

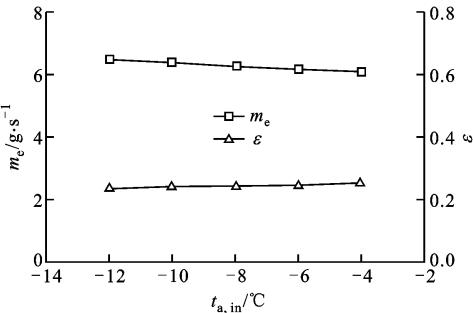


图 6 空气入口温度对再生量和再生效率的影响

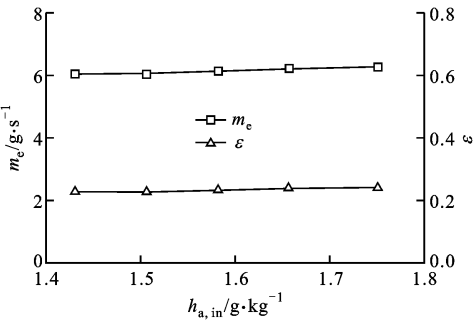


图 7 空气入口含湿量对再生量和再生效率的影响

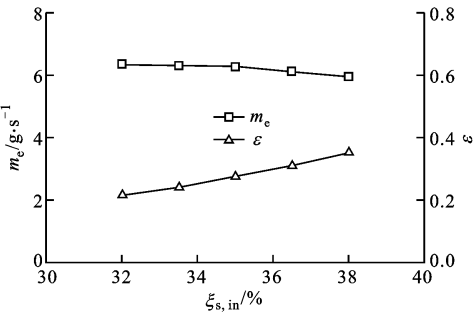


图 8 溶液入口质量分数对再生量和再生效率的影响

图 8 表明,在本实验参数范围内随着溶液入口质量分数的增加,再生量减小而再生效率增大。在一定温度下,溶液浓度越高,溶液表面水蒸气分压越低,因此再生器内质传递的驱动力随着溶液浓度的增加而降低,空气出口含湿量减小,再生量减小。随着入口浓度的增加, $h_{a,eq}$ 减小,且 $h_{a,eq}$ 的减小幅度较出、入口空气含湿量差的减小幅度大,所以在本实验参数范围内再生效率增大。

3 结 论

搭建了冬季工况下溶液再生器性能实验台,实验研究了入口空气和入口溶液参数对再生器性能的影响。根据实验结果,分析了各参数对再生量和再生效率的影响。

(1)再生量随溶液入口温度和溶液流量的增加而增大,随空气入口温度的升高有小幅增加,随空气入口含湿量的增加无明显变化,随空气流量和入口溶液浓度的增加而减小。

(2)再生效率随溶液入口浓度和溶液流量的增加而增大,随空气入口温度的升高有小幅增加,随空气入口含湿量的增加无明显变化,随空气流量和溶液入口温度的增加而减小。

(3)在冬季工况下,用较低的再生温度也可以达到比较理想的再生量和再生效率。

本文实验结果可为冬季工况下再生器的设计、性能研究、优化等提供基础数据。

参考文献:

[1] MURALIKRISHNA S. Study of heat transfer process in a regenerator [J]. Chemical Engineering Research, 1999, 77(2): 131-137.

[2] LIU X H, JIANG Y, YI X Q. Effect of regeneration mode on the performance of liquid desiccant packed bed regenerator [J]. Renewable Energy, 2009, 34(1): 209-216.

[3] 彭冬根,张小松,殷勇高. 一种新型溶液再生装置理论性能研究 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(9): 1078-1085.

PENG Donggen, ZHANG Xiaosong, YIN Yonggao. The study on theoretical performance of a sort of new type liquid regeneration equipment [J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2008, 29(9): 1078-1085.

[4] 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.
- [5] YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong, PENG Donggen, et al. Model validation and case study on internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant systems[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(8): 1664-1671.
- [6] LI Zhang, HIHARA E, MATAUOKA F, et al. Experimental analysis of mass transfer in adiabatic structured packing dehumidifier/regenerator with liquid desiccant [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13): 2856-2863.
- [7] SULTAN G I, HAMED A M, SULTAN A A. The effect of inlet parameters on the performance of packed tower-regenerator [J]. Renewable Energy, 2002, 26(2): 271-283.
- [8] LIU X H, JIANG Y, CHANG X H, et al. Experimental investigation of the heat and mass transfer between air and liquid desiccant in a cross-flow regenerator [J]. Renewable Energy, 2007, 32(10): 1623-1636.
- [9] MARTIN V, GOSWAMI D Y. Heat and mass transfer in packed bed liquid desiccant regenerators; an experimental investigation [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1999, 121(3): 162-170.
- [10] LONGO G A, GASPARELLA A. Experimental and theoretical analysis of heat and mass transfer in a packed column dehumidifier/regenerator with liquid desiccant [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25): 5240-5254.
- [11] 牛润萍. 冷凝热再生式溶液除湿空调系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [12] 裴清清, 韩俊召. 太阳能集热型溶液再生器性能实验研究 [J]. 广州大学学报, 2007, 6(6): 79-82.
- PEI Qingqing, HAN Junzhao. Experimental research on heat and mass transfer for solar energy regenerator [J]. Journal of Guangzhou University, 2007, 6(6): 79-82.
- [13] YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong, CHEN Zhenqian. Experimental study on dehumidifier and regenerator of liquid desiccant cooling air conditioning system [J]. Building and Environment, 2007, 42(7): 2505-2511.
- [14] CONDE M R. Properties of aqueous of lithium and calcium chlorides; formulations for use in air conditioning equipment design [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(4): 367-382.
- [15] ELSARRAG E. Performance study on a structured packed liquid desiccant regenerator [J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1624-1631.
- [16] LIU Xiaohua, JIANG Yi, XIA Jianjun, et al. Analytical solutions of coupled heat and mass transfer processes in liquid desiccant air dehumidifier/regenerator [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2221-2232.

[本刊相关文献链接]

- NH₃-H₂O-LiBr 吸收式制冷机吸收和蒸发性能的实验研究. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 40-43.
- 回热型氨-水-溴化锂吸收式制冷机的实验研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 38-41.
- 室外换热器流路布置对热泵空调器的性能影响分析. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 33-37.
- 不可逆回热式磁 Brayton 循环制冷性能的理论及数值研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 56-60.
- N₂O 跨临界喷射/压缩制冷循环的理论研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 66-70.
- 混合工质成分对自复叠冷冻干燥装置降温速率的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 37-42.
- 脉管制冷机的整机数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 1-9.
- 室温磁制冷活性蓄冷器多孔介质模型及其数值模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 31-35.
- 氨-水和氨-水-溴化锂在吸收式制冷机中的对比实验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 46-49.
- 一种新的喷射器模型及其实验验证. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1096-1101.
- 流路布置对热泵空调中冷凝和蒸发两用换热器性能的影响. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1107-1111.
- 丝网回热器中换热性能的优化. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1070-1074.
- 溴化锂对 NH₃-H₂O-LiBr 三元溶液特性作用机理的初步研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 848-851.
- 整体式斯特林制冷机用于家用冰箱的性能研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 811-814.

(编辑 荆树蓉)