

文章编号:1674-2869(2018)02-0233-04

小型溶液除湿空调叉流再生器性能的实验研究

纪亚琨,丁国忠*,陈 想,李永珍

华中科技大学能源与动力工程学院,湖北 武汉 430074

摘 要:基于小型溶液除湿空调系统,搭建了叉流再生器性能实验平台,选用 Celdek 规整填料作为热质传递介质, LiCl 溶液作为再生剂,并以再生量作为性能评价指标。实验研究了在小型化条件下溶液流量、溶液入口温度、空气流量、空气入口温度等四个因素对叉流再生器性能的影响。结果表明:在小型化条件下,溶液再生量随溶液流量、溶液入口温度、空气流量的增大而增大,而空气入口温度对溶液再生量影响甚微。同时,还拟合出适用于小型化的传质系数关联式,并利用热湿传递理论模型将实验值与理论计算值进行对比,结果显示误差控制在 $\pm 9\%$ 范围内,精度较高。

关键词:溶液除湿空调;叉流;再生器;传热传质

中图分类号:TB66 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2018.02.022

Experimental Study on Cross-Flow Regeneration Based on Small Liquid Desiccant Air Conditioner

Ji Yakun, DING Guozhong*, CHEN Xiang, LI Yongzhen

School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: The cross-flow regeneration experimental equipment was set up based on the small liquid desiccant air conditioning system. The Celdek structured packing was chosen as the heat and mass transfer medium, LiCl was served as regenerant, and the regenerated capacity was selected as the evaluation criteria for system performance. The effects of liquid desiccant flowrate, liquid desiccant inlet temperature, air flowrate and air inlet temperature on the performance of the regenerator were fully studied. The conclusion was that: under the condition of miniaturization, the regenerated capacity increased with the growth of solution flowrate, liquid desiccant inlet temperature and air flowrate; while air inlet temperature had little effect on the regenerated capacity. Moreover, the correlation formula of mass transfer coefficient about miniaturization system was fitted, and it was adapted to compare the experimental values with calculated values, the results showed that the deviation of each parameter was controlled within the range of 9%, which indicated that the fitted correlation formula had a good performance.

Keywords: liquid desiccant air conditioner; cross-flow; liquid desiccant regeneration; heat and mass transfer

近年来溶液除湿空调系统^[1]受到广泛关注与研究,现已成功应用于大型中央空调系统中^[2-3]。不同于传统空调系统采用冷却除湿的空气处理方式,该系统利用溶液循环调节室内空气含湿量,实

现室内湿负荷与显热负荷解耦^[4]从而提高制冷系统蒸发温度,具有温湿度独立控制,节能环保,净化空气^[5]等诸多优点,但溶液再生一直是阻碍系统小型化应用的关键难题^[6-7]。目前许多研究者针对

收稿日期:2017-11-02

作者简介:纪亚琨,硕士研究生。E-mail: jiyakun@hust.edu.cn

*通讯作者:丁国忠,博士,副教授。E-mail: Ding_guo_zhong@163.com

引文格式:纪亚琨,丁国忠,陈想,等. 小型溶液除湿空调叉流再生器性能的实验研究[J]. 武汉工程大学学报,2018, 40(2):233-236.

溶液除湿空调系统的再生器做了实验研究,如 Bassuoni^[8]以 CaCl_2 作为实验工质,通过多组实验研究了规整填料再生器溶液再生性能的影响因素; Zhang等^[9]结合空调实际运行工况,将风速控制在 $0.5 \text{ m/s} \sim 1.5 \text{ m/s}$ 进行实验,并将实验数据与模型预测值相比较,将误差严控在 20% 的范围内; 刘晓华等^[10]搭建溶液除湿空调系统的叉流热质传递实验台进行实验,并将实验数据代入热湿交换模型验证,拟合出换热单元数与各入口参数的关联式; 张海江等^[11]将氯化锂工质应用于再生实验,并与其他再生剂性能进行了综合对比。但是这些实验基于大型中央空调系统,其具有空间足够大,填料尺寸大,溶液流量大,可安放独立风机的特点,易于根据实际情况灵活布局设备和设计尺寸。而将溶液调湿技术应用于小型分体式空调器尚缺乏相关理论研究和实验数据。本文根据小型家用空调有关参数,针对叉流、低流量、强制对流换热的再生工况进行实验,研究溶液再生的影响因素,为解决溶液空调系统小型化应用中的难题做出尝试。

1 实验装置与理论模型

1.1 实验装置

依据小型家用分体式空调室外机尺寸和小型分体式空调冷凝器及风机有关型号和参数,搭建了如图1所示的实验系统。该系统由溶液子系统、风子系统和热质传递模块三部分组合而成。实验系统的实验工质选用质量浓度 29% 的 LiCl 溶液,填料选用 Celdek 规整填料^[12]。由于小型空调器的可用空间狭小,填料被切割为小而薄的尺寸,其高度、宽度和厚度分别为 350 mm 、 350 mm 和 30 mm 。实验过程中,保温桶内的溶液经过防腐蚀电加热器加热,经由溶液泵至布液器均匀喷洒到填料上边缘,因重力因素自上而下润湿填料,并与水平方向的经过热湿处理的洁净空气进行充分的叉流热质交换,最后流到溶液桶中被回收,风经由轴流式风机排出系统。在实验过程中,溶液流量通过溶液入口端的流量计调节、监测;溶液温度由防腐蚀电加热器所自带的电子温控器控制,实现溶液加热和保温的精确调控。风速由 Testo 405i 热线风速仪监控。溶液入口和出口温度、空气入口干湿球温度、空气出口干湿球温度均由安捷伦温度测试系统配合 Pt100 铂电阻进行实时监测。风速仪和安捷伦温度测试仪器实现了自动化数据采集与保存,数据采集间隔为 1 s ;由流量计所测得的溶液流量人工读取记录,采集间隔 30 s 。

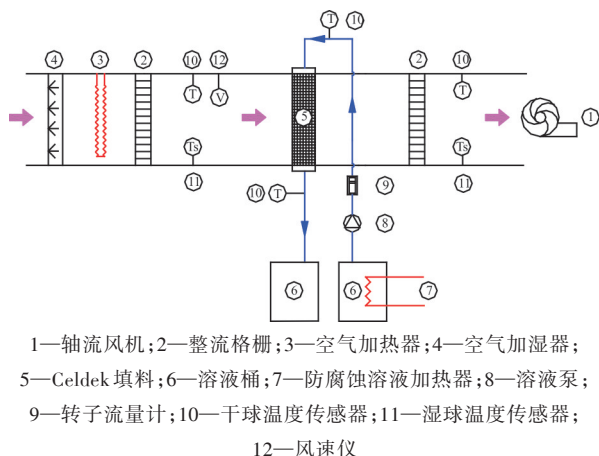


图1 小型溶液除湿空调系统的再生器性能实验台

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.2 热湿传递理论

上述实验系统为基础选取任一叉流热质传递微元作为研究对象^[13-14],定义刘易斯数 L 和换热单元数 N 两个无量纲数为:

$$L = \frac{k_h}{k_m C_{pa}} \quad (1)$$

$$N = \frac{k_m a_w HDW}{m_a} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中的 k_m 为溶液与湿空气之间的传质系数,单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; k_h 为溶液与湿空气之间的传热系数,单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; C_{pa} 为湿空气定压比热容,单位 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 式(2)中: H 、 D 、 W 分别为填料的长度、厚度和宽度,单位 m ; a_w 为填料的比表面积,单位 m^2/m^3 ; m_a 为空气质量流量,单位 kg/s 。

又根据叉流情况下的能量守恒和质量守恒,得到控制方程(3)~(6):

$$\frac{m_a}{H} \cdot \frac{\partial h_a}{\partial z} + \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial (m_s h_s)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{m_a}{H} \cdot \frac{\partial w_a}{\partial z} + \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial (m_s)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial h_a}{\partial z} = \frac{N \cdot L}{D} \cdot [(h_e - h_a) + r \cdot (\frac{1}{L} - 1)(w_e - w_a)] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_a}{\partial z} = \frac{N}{D} \cdot (w_e - w_a) \quad (6)$$

式(3)~(6)中: x 、 z 代表溶液和空气的流动方向; h_a 、 h_s 、 h_e 分别为空气焓值、溶液焓值和与溶液状态相平衡的空气状态的比焓,单位 kJ/kg ; m_s 为溶液质量流量,单位 kg/s ; w_e 为溶液等效含湿量, w_a 为湿空气的含湿量, ε 为溶液的质量浓度。

定义再生量 M 表征经过再生器前后溶液中含水量的变化,并以此作为评价实验结果的指标:

$$M = m_s \cdot (w_{a, \text{in}} - w_{a, \text{out}}) \quad (7)$$

而利用上述理论及控制方程结合适当的传质

单元数关联式可得出再生量的理论模拟值。

2 结果与讨论

2.1 溶液流量对再生量的影响

溶液再生量随溶液流量的具体变化如图2所示。实验中空气流量1 290 kg/h,入口空气温度35℃,含湿量15 g/kg,溶液流量5.9 kg/h~26.4 kg/h,入口溶液温度65℃。从图2中可以看出,随着溶液流量增大,系统的溶液再生量显著增大。这是因为在此小尺寸填料、小溶液流量的系统工况下,随溶液流量的增大,溶液对填料的浸润程度逐渐增大,使系统对填料比表面积利用率大幅度提升,从而提高了传热传质效果和再生性能。

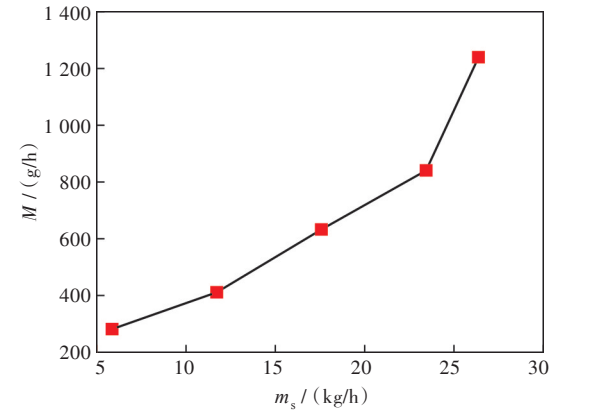


图2 溶液流量对再生量的影响

Fig. 2 Effect of desiccant solution flowrate on regenerated capacity

2.2 溶液入口温度对再生量的影响

图3展示了溶液入口温度对再生效果的影响。实验中空气流量1 290 kg/h,入口空气温度35℃,含湿量15 g/kg,溶液入口温度55℃~80℃。从图3中可以看出,随着溶液入口温度增大,系统的再生量增大。在同一溶液初始浓度下,随溶液入口温度的上升,溶液等效含湿量增大,溶液表面水蒸气分压力增大^[15],利于稀溶液水分被空气携带从而实现溶液再生。

2.3 空气流量对再生量的影响

空气流量也是影响再生装置传热传质性能的重要因素之一。在大型中央空调中,通过在进风风道安放独立风机来自由调节空气流量。由于分体式空调器系统空间有限,本文提出借助空调室外机风扇进行强制对流换热的构想。经过系列测试,常见的小型家用空调室外机风量控制在645 kg/h~1 500 kg/h,因此本文涉及的变空气流量实验,进口空气流量范围选择为580 kg/h~

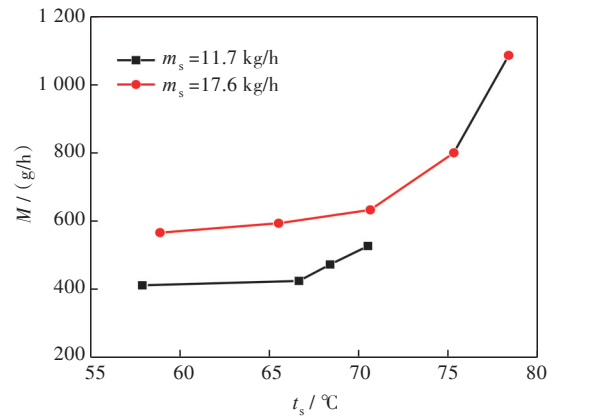


图3 溶液入口温度对再生量的影响

Fig. 3 Effect of desiccant solution inlet temperature on regenerated capacity

1 680 kg/h。其他实验参数为:入口空气温度35℃,溶液流量14 kg/h,含湿量15 g/kg,入口溶液温度65℃。该因素对系统再生量的影响如图4所示。可以观察到,随着空气流量的增大系统溶液再生量呈增大趋势。这是因为随着空气流量增大,空气与溶液在填料内部的接触面积增大,热质交换过程进行得更加充分。且根据实验观测,相同实验条件下,大空气流量利于减小高温溶液在传热传质过程中的温降,这使得溶液的表面蒸气压提高^[15-16],利于溶液再生。

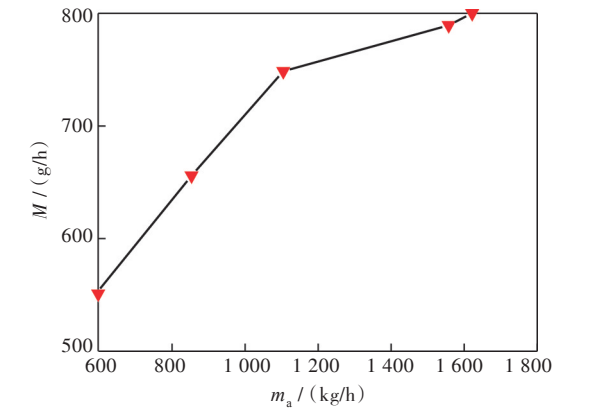


图4 空气流量对再生量的影响

Fig. 4 Effect of air flowrate on regenerated capacity

2.4 空气入口温度对再生量的影响

溶液再生量随空气入口温度的具体变化如图5所示。实验中空气入口风量1 290 kg/h,空气入口温度28℃~40℃,含湿量15 g/kg,溶液流量14 kg/h,溶液入口温度65℃。在此空气入口温度测试工况下,溶液再生量随空气入口温度升高而降低,随空气入口温度上升,空气与溶液的传热温差降低,导致空气和溶液的水蒸汽分压力的压力差减小,从而影响了溶液再生过程的传热传质。

但由于空气流经的填料厚度与中央空调相比大大减薄,影响程度并不明显。

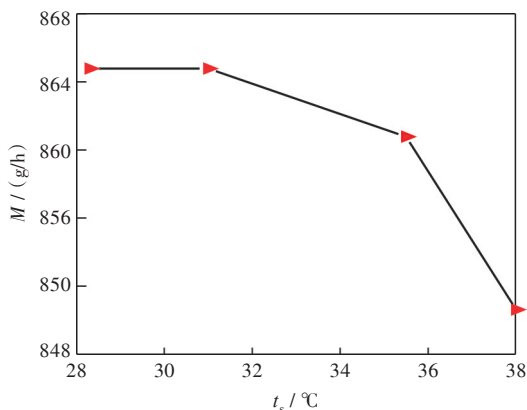


图5 空气入口温度对再生量的影响

Fig. 5 Effect of air inlet temperature on regenerated capacity

2.5 叉流再生的关联式

利用大量现有实验数据建立该实验工况下叉流再生的体积传质系数表达式如下:

$$k_m a_w = 0.00358 t_a^{0.2213} \cdot v_a^{0.254} \cdot \omega_a^{-0.24} \cdot t_s^{1.356} \quad (8)$$

式(8)中 v_a 为空气流速(m/s), ω_a 为湿空气的含湿量, t_a 和 t_s 分别代表空气入口温度与溶液入口温度。

利用上述热湿传递理论的系列控制方程与关联式(8)得到再生量的理论拟合值,并将再生量实验值与拟合值比较,如图6所示。可以看到,再生量实验值与拟合值的误差控制在 $\pm 9\%$ 的范围内。

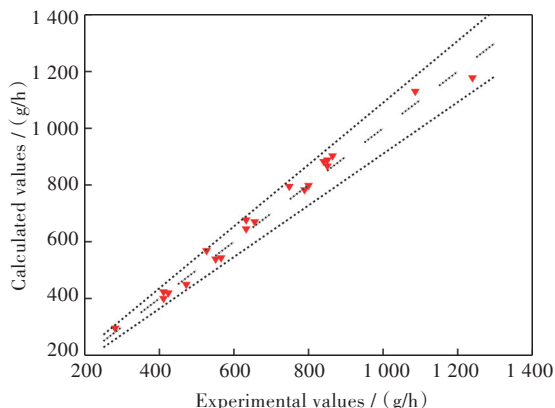


图6 再生量实验值与模拟值比较

Fig. 6 Comparison of predicted and experimental values of regenerated capacity

3 结 语

在参考小型空调系统的运行工况和机器参数的基础上搭建了溶液叉流再生实验台,并进行多组实验,分析了各参数对溶液再生的影响;

1)再生量随溶液流量、溶液入口温度、空气流量的增大而增大,空气入口温度对再生量的影响

并不明显。

2)溶液再生装置在小型家用溶液除湿空调系统的应用将大大提高系统湿负荷处理能力,从而提高制冷量。

3)文中体积传质关联式更加适用于小型化再生工况的需要,使得再生量的实验值与模拟值偏差在 $\pm 9\%$ 范围内,能够较好吻合。

上述实验结果为小型家用溶液除湿空调系统再生器的设计提供了参考和数据支持。

参考文献:

- [1] 刘晓华,李震,张涛.溶液除湿[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 胡建丽.温湿度独立控制技术在世博会瑞典王国馆暖通空调设计中的应用[J].暖通空调,2010,40(8):96-98.
- [3] 周敏.西安咸阳国际机场T3A航站楼温湿度独立控制的应用[J].暖通空调,2011,41(11):27-30.
- [4] 王琴,吴薇,刘松松,等.内热型与绝热型溶液再生器再生过程性能[J].化工学报,2016,67(增刊1):186-194.
- [5] 郑晓红,李可俊,王如竹,等.中央空调复合净化除病毒技术实验研究[J].科学通报,2003,48(24):2510-2514.
- [6] 周朝霞,叶晓江.大空间应用新风换气机加风机盘管的节能分析[J].武汉工程大学学报,2013,35(12):79-82.
- [7] 张甜焱.热湿独立处理空调系统内热源型溶液再生过程研究[D].南京:南京师范大学,2015.
- [8] BASSUONI M M. An experimental study of structured packing dehumidifier/regenerator operating with liquid desiccant[J]. Energy, 2011, 36(5):2628-2638.
- [9] LI Z, HIHARA E, MATSUOKA F, et al. Experimental analysis of mass transfer in adiabatic structured packing dehumidifier/regenerator with liquid desiccant [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, 53(13):2856-2863.
- [10] 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.
- [11] 张海江,柳建华,张良,等.叉流再生器性能试验研究[J].制冷与空调,2011,11(1):51-55.
- [12] 黄志甲,王永泰.不同填料溶液除湿器热质传递过程的数值模拟[J].流体机械,2013(6):54-57.
- [13] 王敏.溶液除湿空调系统再生器性能研究[D].天津:天津商业大学,2014.
- [14] 杨飞.溶液除湿空调系统的应用研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [15] 易晓勤.常用溶液除湿剂的性质研究[D].北京:清华大学,2009.
- [16] 朱正元,姚晔. LiCl-CaCl₂混合溶液表面蒸汽压验证与研究[J].制冷学报,2015,36(6):52-56.

本文编辑:陈小平