

文章编号:0253-4339(2017)06-0001-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2017.06.001

高效填料型除湿器新传质关联式实验研究

王凌士 肖赋 陆韬

(香港理工大学屋宇设备工程学系 香港 999077)

摘要 填料作为溶液除湿器的重要部件,其传质特性直接关系到整个溶液除湿空调系统性能的好坏。本文搭建了逆流填料型溶液除湿实验台,以LiCl溶液为除湿溶液,对高比表面积波纹纤维规整填料($650\text{ m}^2/\text{m}^3$)进行了除湿实验研究。以气液界面的水蒸气分压差为传质驱动力,获得了新的传质系数实验关联式和除湿效率实验关联式。并对该填料的除湿效果与文献中的不同填料进行对比。结果表明:该填料具有最高的单位体积传质系数,且填料的单位体积传质系数随着填料比表面积的增加而增大。传质系数实验关联式计算值与实验值相对偏差在 $\pm 20\%$ 以内,除湿效率实验关联式计算值与实验值相对偏差在 $\pm 15\%$ 以内。新的传质关联式可以比较精确的计算除湿器的传质性能。

关键词 溶液除湿;传质系数;效率;实验关联式;蒸气压差

中图分类号:TU834.9;TK124

文献标识码:A

New Experimental Correlations for the Mass Transfer of a High-efficiency Packed-type Dehumidifier

Wang Lingshi Xiao Fu Lu Tao

(Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 999077, China)

Abstract The packing is a crucial part of a liquid-desiccant dehumidifier, and its mass-transfer characteristics have a great impact on the overall performance of liquid-desiccant-based air-conditioning systems. An experimental test rig was built to study the performance of a counter-flow packed-type liquid-desiccant dehumidifier that employs cross-corrugated cellulose-structured packing with a high specific surface area ($650\text{ m}^2/\text{m}^3$). A LiCl aqueous solution was used as the desiccant solution. The water-vapor pressure difference between the gas and liquid interface was considered as the mass-transfer-driven force. New experimental correlations for the mass-transfer coefficient and the dehumidification effectiveness were developed. The performance of this type of packing was compared with other types of packing in the literature. The results show that this type of packing has the highest volumetric mass-transfer coefficient. In addition, the volumetric mass-transfer coefficient is found to increase with the specific surface area of the packing. The deviations between the experimental data and the predicted data using the experimental correlation for the mass-transfer coefficient are within $\pm 20\%$, and within $\pm 15\%$ for the dehumidification effectiveness. This indicates that the two new correlations can be used to accurately predict the mass-transfer performance of a dehumidifier.

Keywords liquid desiccant; mass transfer coefficient; effectiveness; experimental correlation; vapor pressure difference

由于传统空调系统在较低温度下需要对空气冷凝除湿,导致空调能耗增加。溶液除湿空调可以在常温下独立去除空气潜热负荷,避免了低温除湿,近年来受到广泛的关注。除湿器作为溶液除湿空调系统的关键设备,其传质特性影响着整个系统的性能。

溶液除湿是利用除湿溶液表面的水蒸气压低于被处理空气的水蒸气分压力,从而产生传质驱动力,将空气中水分吸收到除湿溶液中。除湿器中空气与溶液直接接触,除湿过程是复杂的耦合传热传质过

程。尽管描述此过程的详细数学模型更符合其物理本质,但是解法非常复杂。在基于溶液除湿的空调系统的性能模拟以及优化控制策略中,简化的除湿器模型可以大幅增加运行效率^[1-2],所以受到研究者更多的关注。简化模型中一些关键参数,如传质系数^[3]、除湿效率^[1]等通常通过实验获得其经验关联式。近年来人们对除湿过程中的传质系数和除湿效率实验关联式进行了许多研究。

A. A. Al-Farayedhi 等^[4]研究了一种纱网填料型

基金项目:国家自然科学基金(51306157)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51306157).)

收稿日期:2017年2月15日

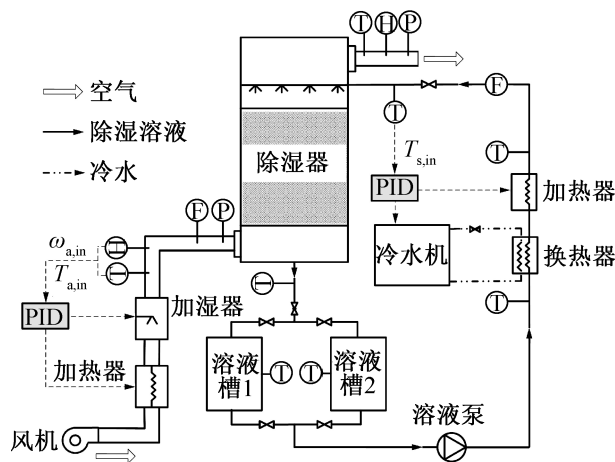
除湿器,分析得到了3种类型除湿溶液的气相和液相传热系数与传质系数关联式,关联式以空气与溶液流速、溶液温度与浓度为变量。Yin Yonggao等^[5]提出一种可以分开计算传热系数与传质系数的新方法,并给出了叉流填料型除湿器的传热系数与传质系数关联式。T. W. Chung等^[6]基于无量纲分析,分别提出了散装填料和规整填料的传质系数与传热系数实验关联式,关联式中变量包括气侧 Re 数、气侧 Sc 数、溶液浓度、液气比。E. Elsarrag等^[7]以CELdek填料为研究对象,以溶液表面水蒸气压为传质驱动力,得到了两种不同溶液流速下的传质系数关联式,并发现当液气比 <2 时,溶液流量对传质系数有显著影响。不同于以前的形式,张润霞等^[8]提出了以蒸气压差为驱动力的传质系数关联式,并将计算值与不同类型填料的实验结果进行了对比,结果表明此关联式具有较高的精确度,但该关联式未考虑溶液流量对传质系数的影响。

除湿效率实验关联式可分为线性回归模型和非线性回归模型^[9]。线性回归模型具有较简单的形式,Liu X. H.等^[10-11]分别采用LiBr溶液和LiCl溶液,提出了CELdek填料型叉流除湿器除湿效率线性回归关联式。T. W. Chung等^[12-13]分别提出了逆流填料型除湿器和叉流填料型除湿器的除湿效率非线性回归关联式,式中以溶液表面水蒸气压为变量。而Liu X. H.等^[14]在其提出的CELdek填料型叉流除湿器除湿效率非线性回归关联式中,则以溶液浓度为变量。S. Jain等^[15]对不同文献中提出的填料型除湿器传质系数关联式和除湿效率关联式进行了总结与分析。

目前除湿器体积普遍偏大,增加了安装难度和成本投入。通过使用紧凑高效型填料,可减少除湿器体积,以满足溶液除湿系统的实际应用需求。紧凑高效型填料通常需要较高比表面积和良好表面润湿性,其中代表填料为CELdek填料。此前研究中其比表面积通常为 $396\text{ m}^2/\text{m}^3$ ^[11]。本文采用了更高比表面积的CELdek填料($650\text{ m}^2/\text{m}^3$),实验研究了该填料的除湿性能。以T. W. Chung等^[6,8]提出的实验关联式为基础,综合考虑传质过程的影响因素,提出了新的传质系数关联式与除湿效率关联式,并将本实验的除湿效果与文献中不同填料的除湿效果进行了对比分析。

1 实验台简介

图1所示为溶液除湿实验装置。实验台由4部分组成:空气系统、溶液系统、除湿器、测量与采集系统。



T 温度计;H 湿度计;F 流量计;P 压力计。

图1 溶液除湿实验装置

Fig. 1 Experimental facility

空气系统用于调节通入除湿器的空气参数。空气系统主要包括风机,空气加热器(4 kW),电热式空气加湿器(10 kg/h),风阀等。加热器和加湿器分别用PID进行精确调节,从而获得需要的空气温湿度。溶液系统用于调节流进除湿器的溶液参数。溶液系统主要包括溶液槽(2个)、氟塑料溶液泵、板式换热器、溶液加热器(4 kW)、冷水机(2.7 kW)、阀门等。本实验采用LiCl溶液作为除湿溶液。溶液从其中一个溶液槽中流出,通过加热器或板式换热器进行加热或冷却,获得需要的温度后进入除湿器。经过除湿器后,被稀释的溶液流入另一个溶液槽。两个溶液槽之间通过若干阀门来切换溶液的流动方向,可以快速进行下一次实验。除湿器采用逆流型结构,空气从底部通入,溶液从顶部通入,通过新设计的布液器可以使填料上方的溶液均匀散布。本实验采用CELdek5090型纤维规整填料,填料比表面积为 $650\text{ m}^2/\text{m}^3$,横截面是 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$,高度为 0.4 m 。除湿器外壳采用8 mm厚有机玻璃进行隔热。

测量与采集系统包括除湿器进出口空气的温度、湿度、进口流量的测量,以及进出口溶液的温度、密度、进口流量的测量。空气温湿度采用高精度温湿度变送器测量(型号:HF535-W,HC2-S3),精度为 $\pm 0.8\%$ RH, $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$,测量范围为 $0\sim 100\%$ RH, $-40\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$;空气流量采用差压风量变送器测量(型号:CP218-BO),精度为 $\pm 2\%$,测量范围为 $0\sim 30\text{ m}^3/\text{s}$;溶液温度采用防腐型PT100铂电阻测量,精度为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$;溶液流量采用电磁流量计测量(型号:LDE-15),精度为 $\pm 0.5\text{ FS}$,测量范围为 $0.06\sim 6.36\text{ m}^3/\text{h}$;采用玻璃液体比重计测量溶液密度,精度为 $\pm 1\text{ kg}/\text{m}^3$,测量范围为 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ kg}/\text{m}^3$,溶液浓度

可通过测得的密度与温度根据 LiCl 溶液物性公式求得,其物性公式见文献[16]。所有测量数据通过数据采集系统(Agilent 34972A)进行实时采集与储存。

2 实验结果与分析

综上所述,表征除湿器除湿性能的参数一般有两

种,一是除湿器的传质系数,二是除湿器的效率。此两种参数常用于除湿器设计和基于溶液除湿的空调系统的计算模拟。本文分别从这两种参数的角度,对此填料型除湿器进行了实验研究,得到实验关联式,并将此填料性能与文献进行了对比,空气和溶液的进口参数范围如表 1 所示。

表 1 实验参数范围

Tab. 1 Ranges of experimental inlet parameters of air and desiccant solution

$m_a / (\text{kg/s})$	$T_{a,\text{in}} / ^\circ\text{C}$	$\omega_{a,\text{in}} / (\text{g/kg})$	$m_s / (\text{kg/s})$	$T_{s,\text{in}} / ^\circ\text{C}$	X_s
0.048 ~ 0.082	25.0 ~ 40.5	11.6 ~ 25.1	0.030 ~ 0.120	16.4 ~ 32.4	0.317 ~ 0.401

2.1 传质系数实验关联式

除湿器单位时间的除湿量 m_{de} 代表除湿器实际除湿能力, m_{de} 可由填料内单个控制体的单位时间的除湿量 $m_{\text{de},z}$ 沿高度方向积分得到,如式(1)表示:

$$m_{\text{de}} = \int_0^H m_{\text{de},z} dz = \int_0^H K_a (\omega_a - \omega_e) \frac{A}{H} dz$$

$$= K_a A \frac{\int_0^H (\omega_a - \omega_e) dz}{H} \quad (1)$$

其中,

$$\Delta\omega = \frac{\int_0^H (\omega_a - \omega_e) dz}{H} \quad (2)$$

故传质系数 K_a 的实验值可由式(3)计算:

$$K_a = \frac{m_{\text{de}}}{A \Delta\omega} \quad (3)$$

其中, m_{de} 的实验值可由式(4)计算得到:

$$m_{\text{de}} = m_a (\omega_{a,\text{in}} - \omega_{a,\text{out}}) \quad (4)$$

根据换热器设计理论^[17], $\Delta\omega$ 等于除湿器两流体进出口对数平均湿度差,见下式:

$$\Delta\omega = \frac{(\omega_{a,\text{in}} - \omega_{e,\text{out}}) - (\omega_{a,\text{out}} - \omega_{e,\text{in}})}{\ln[(\omega_{a,\text{in}} - \omega_{e,\text{out}})/(\omega_{a,\text{out}} - \omega_{e,\text{in}})]} \quad (5)$$

溶液与空气之间的传质系数与气相和液相的各项参数有关。T. W. Chung 等^[6-7] 发现传质系数与气侧 Re 数、气侧 Sc 数、溶液浓度或溶液表面水蒸气压、液气比有关。而张润霞等^[8] 指出传质过程的驱动力不单是溶液表面的水蒸气压,实际上为气液界面的水蒸气分压差,并采用以气液界面的水蒸气分压差为变量,然而并未考虑溶液流量对传质系数的影响。根据 E. Elsarrag 等^[7] 的研究成果,当液气比低于 2 时,溶液流量对传质系数有显著影响。

本文基于前人的研究,综合考虑了气液界面的水蒸气分压差和溶液流量两因素,得到传质系数实验关联式,如式(6)所示。文献[8]中参考点压力 p_0 为当地大气压,由于除湿过程气液界面的水蒸气分压差相对于大气压来讲非常小,二者之比易出现误差,故本文采用 25 °C 饱和空气水蒸气分压力作为 p_0 的值。

$$Sh = 0.034 Re^{0.77} Sc^{0.33} \left(\frac{p_a - p_s}{p_0} \right)^{0.13} \left(\frac{L}{G} \right)^{0.3} \quad (6)$$

其中,

$$Sh = \frac{K_a a d_e^2}{D_a \rho_a} \quad (7)$$

表 2 不同填料的类型与参数

Tab. 2 Specifications of packing used in different dehumidifiers

编号	填料类型	比表面积/(m^2/m^3)	等效直径/ m
No. 1 ^[6]	聚丙烯环散装填料	315	0.015 9
No. 2 ^[6]	波纹纤维规整填料	410	0.007 2
No. 3 ^[4]	纱网规整填料	470	0.007 6
No. 4(本文)	CELdek 5090 型填料	650	0.006 0

将采用式(6)~式(7)计算得到的传质系数与实验值进行对比,如图 2 所示,二者偏差均在 $\pm 20\%$ 以

内,平均偏差为 9.4%。故该关联式可以用于传质系数的计算并对除湿器除湿特性进行预测。

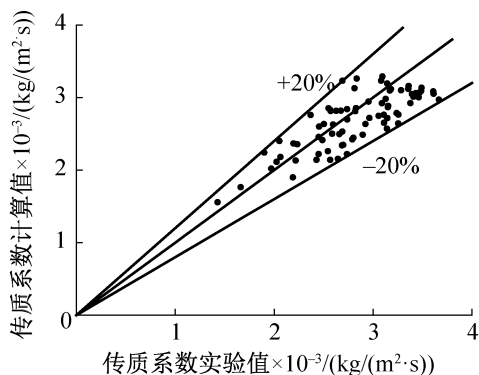


图2 传质系数实验值与计算值比较

Fig. 2 Comparison of predicted results and experiment results for mass transfer coefficient

为了验证本文所用填料的除湿效果,将该填料的单位体积传质系数与文献中其他3种填料进行了对比,不同填料的相关参数见表2。采用文献[6]中相同的实验工况,用各自填料的传质系数关联式计算出传质系数,对比结果见图3,可知本文采用的填料No. 4的单位体积传质系数最大。说明当获得同样的除湿效果时,采用该填料的体积最小,从而可以降低除湿器的尺寸,便于安装与减少投资成本。此外,单位体积传质系数与填料的比表面积成正相关。由于No. 1填料的比表面积最小,使得单位体积传质系数最小,另一个原因可能是塑料表面润湿性比较差。而本文采用的波纹纤维规整填料,可以获得较好的表面润湿性。

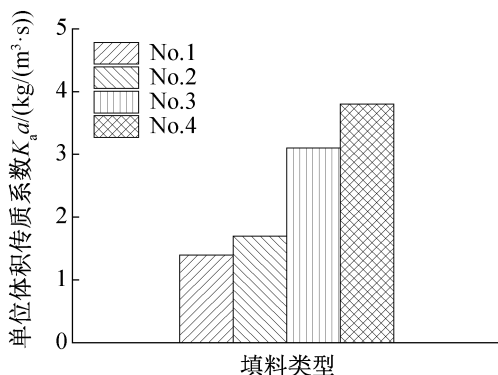


图3 不同填料单位体积传质系数比较

Fig. 3 Volumetric mass transfer coefficients for different packings

2.2 除湿效率实验关联式

除湿器的实验除湿效率可以由式(8)计算:

$$\varepsilon = \frac{\omega_{a,in} - \omega_{a,out}}{\omega_{a,in} - \omega_{e,in}} \quad (8)$$

除湿效率的非线性回归模型由 T. W. Chung^[12] 提出,由于此模型的建立是基于除湿效率定义式,更

能体现传质过程的本质,并考虑到了除湿器的参数,所以得到不断的应用^[13-14]。本文以 T. W. Chung^[12] 的非线性回归模型为基础,通过本文实验数据进行非线性回归分析,得到了新的除湿效率实验关联式,如式(9)所示。与以前关联式不同的是,本关联式以气液界面水蒸气分压差为变量,从而更准确的反应了传质过程的本质。

$$\varepsilon = \frac{1 - \left\{ \frac{1.033 \left(\frac{G}{L} \right)^{0.323} \exp \left(-0.203 \frac{T_a}{T_s} \right)}{(aH)^{0.093} \left[\frac{(p_a - p_s)}{p_0} \right]^{-0.286}} \right\}}{1 - \left\{ \frac{-0.168 \exp \left(-1.557 \frac{T_a}{T_s} \right)}{\left[\frac{(p_a - p_s)}{p_0} \right]^{2.937}} \right\}}$$

(9)

图4对比了采用式(9)得到的除湿效率计算值与采用式(8)得到实验值。可以看出二者偏差在 $\pm 15\%$ 以内,平均偏差为4.9%,计算值与实验值吻合的很好。故该关联式可以用于除湿效率的计算和基于溶液除湿的空调系统的模拟分析。

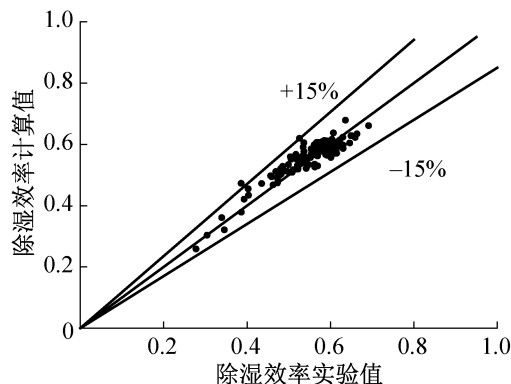


图4 除湿器除湿效率实验值与计算值比较

Fig. 4 Comparison of predicted results and experiment results for dehumidification effectiveness

当除湿效率已知时,可以用式(10)计算得到单位时间除湿量:

$$m_{de} = \varepsilon m_a (\omega_{a,in} - \omega_{e,in}) \quad (10)$$

将单位时间除湿量的计算值与实验值进行对比,如图5所示,可以发现二者较好的一致性,偏差在 $\pm 15\%$ 以内,平均偏差为4.9%。所以该除湿效率实验关联式可以准确预测除湿器的单位时间除湿量。

3 结论

本文搭建了逆流填料型溶液除湿实验台,研究了紧凑型除湿器的除湿性能。除湿器采用高比表面积

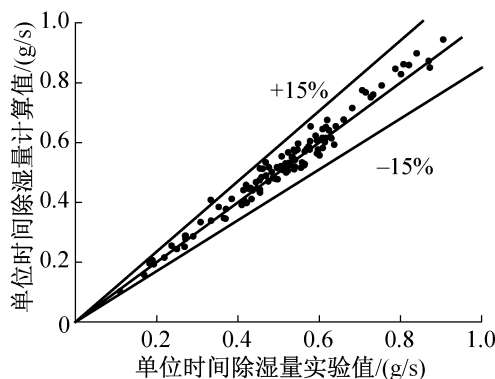


图 5 单位时间除湿量实验值与计算值比较

Fig. 5 Comparison of predicted results and experiment results for moisture removal rate

波纹纤维规整填料($650 \text{ m}^2/\text{m}^3$),以 LiCl 溶液为除湿剂。考虑了气液界面的水蒸气分压差和溶液流量等因素,实验得到了新的传质系数关联式和除湿效率关联式,并将实验结果与文献中不同填料的除湿性能进行了对比,得到了以下结论:

1) 根据新的传质系数实验关联式计算的传质系数与实验值吻合较好,二者偏差均在 $\pm 20\%$ 以内,平均偏差则为 9.4%。

2) 不同填料的除湿效果对比结果表明:本文采用的填料具有最高的单位体积传质系数,采用该填料可以减少除湿器尺寸,降低安装成本;单位体积传质系数随着填料比表面积的增加而增大。

3) 将新的除湿效率实验关联式的计算结果与实验结果进行对比。二者偏差在 $\pm 15\%$ 以内,平均偏差为 4.9%。以该关联式计算得到的单位时间除湿量同样与实验结果吻合的很好。

本文提出的新的传质关联式可以用于除湿器的设计计算,并可用于基于溶液除湿的空调系统的模拟分析。

符号说明

- a ——填料比表面积, m^2/m^3
- A ——填料总表面积, m^2
- d_e ——等效直径, m
- D_a ——空气中水分的扩散系数, m^2/s
- G ——单位填料横截面的空气质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- H ——填料高度, m
- K_a ——传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- L ——单位填料横截面的溶液质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- m ——质量流量, kg/s
- m_{de} ——单位时间除湿量, g/s
- p ——水蒸气分压力, Pa
- p_0 ——25 °C 饱和空气水蒸气分压力, Pa

- Re ——Reynolds 数(ud_e/ν_a)
- Sc ——Schmidt 数(ν_a/D_a)
- T ——温度, °C
- u ——空气流速, m/s
- X ——溶液浓度
- ρ_a ——空气密度, kg/m^3
- ν_a ——空气动力黏度, m^2/s
- ε ——除湿效率
- ω ——含湿量, g/kg
- z ——高度, m

下标

- a——空气
- e——溶液等效状态
- in——进口
- out——出口
- s——溶液

参考文献

- [1] GE Gaoming, XIAO Fu, XU Xinhua. Model-based optimal control of a dedicated outdoor air-chilled ceiling system using liquid desiccant and membrane-based total heat recovery[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4180-4190.
- [2] XIAO Fu, GE Gaoming, NIU Xiaofeng. Control performance of a dedicated outdoor air system adopting liquid desiccant dehumidification[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 143-149.
- [3] CHEN X Y, LI Z, JIANG Y, et al. Analytical solution of adiabatic heat and mass transfer process in packed-type liquid desiccant equipment and its application[J]. Solar Energy, 2006, 80(11): 1509-1516.
- [4] AL-FARAYEDHI A A, GANDHIDASAN P, AL-MUTAIRI M A. Evaluation of heat and mass transfer coefficients in a gauze-type structured packing air dehumidifier operating with liquid desiccant[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(3): 330-339.
- [5] YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. A new method for determining coupled heat and mass transfer coefficients between air and liquid desiccant[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(13/14): 3287-3297.
- [6] CHUNG T W, GHOSH T K, HINES A L. Comparison between random and structured packings for dehumidification of air by lithium chloride solutions in a packed column and their heat and mass transfer correlations[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35(1): 192-198.
- [7] ELSARRAG E, MAGZOU B E E M, JAIN S. Mass-transfer correlations for dehumidification of air by triethylene glycol in a structured packed column[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(23): 7676-7681.

- [8] 张润霞, 王赞社, 孟祥兆, 等. 溶液除湿中基于水蒸汽压差的传质系数[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4774-4779. (ZHANG Runxia, WANG Zanshe, MENG Xiangzhao, et al. Mass transfer coefficient for liquid dehumidification based on vapor pressure difference[J]. CIESC Journal, 2015, 66(12): 4774-4779.)
- [9] 张海江, 柳建华, 张良, 等. 叉流除湿器传质性能实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(6): 21-27. (ZHANG Haijiang, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. Experiment on mass transfer performance of a cross-flow dehumidifier[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(6): 21-27.)
- [10] LIU X H, QU K Y, JIANG Y. Empirical correlations to predict the performance of the dehumidifier using liquid desiccant in heat and mass transfer[J]. Renewable Energy, 2006, 31(10): 1627-1639.
- [11] GAO W Z, LIU J H, CHENG Y P, et al. Experimental investigation on the heat and mass transfer between air and liquid desiccant in a cross-flow dehumidifier[J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 117-123.
- [12] CHUNG T W. Predictions of moisture removal efficiencies for packed-bed dehumidification systems[J]. Gas Separation & Purification, 1994, 8(4): 265-268.
- [13] MOON C G, BANSAL P K, JAIN S. New mass transfer performance data of a cross-flow liquid desiccant dehumidification system[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(3): 524-533.
- [14] LIU X H, ZHANG Y, QU K Y, et al. Experimental study on mass transfer performances of cross flow dehumidifier using liquid desiccant[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(15/16): 2682-2692.
- [15] JAIN S, BANSAL P K. Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(5): 861-872.
- [16] 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.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 474-483. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 474-483.)

通信作者简介

肖赋, 女, 副教授, 香港理工大学屋宇设备工程学系, (852) 27664194, E-mail: linda.xiao@polyu.edu.hk。研究方向: 建筑节能, 楼宇自动化与诊断, 空调系统优化控制, 溶液除湿。

About the corresponding author

Xiao Fu, female, associate professor, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, 852-27664194, E-mail: linda.xiao@polyu.edu.hk. Research fields: building energy efficiency, building automation and diagnostics, optimal control of HVAC systems, liquid desiccant.