



自然对流下垂直帘式中空纤维膜 组件的除湿供冷特性

李锦航, 张子含, 刘江峰, 张光玉

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为探讨竖直壁面在较高冷源温度下同时进行供冷除湿的可行性, 开展了自然对流条件下基于中空纤维膜的竖直壁面供冷除湿特性的实验研究。利用中空纤维膜接触器技术制作了能够同时除湿供冷的组件, 搭建了供冷除湿性能测试实验台, 以氯化钙溶液为除湿溶液, 采用正交试验方法, 研究了自然对流下溶液进口质量浓度、温度、流速等参数对中空纤维膜组件除湿量、显热供冷量以及除湿效率的影响。结果表明: 溶液进口质量浓度和温度对除湿量、除湿效率有重要影响, 进口温度和流速对显热供冷量影响较显著。在试验因素水平取值范围内, 组件单位膜面积除湿量达 5~14 g/h, 显热供冷量为 4~24 W, 除湿效率为 28%~65%, 表明该组件具有一定的工程应用前景。

关键词: 中空纤维膜; 溶液除湿; 供冷; 自然对流; 辐射供冷

中图分类号: TU831.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)01-0124-07

引文格式: 李锦航, 张子含, 刘江峰, 等. 自然对流下垂直帘式中空纤维膜组件的除湿供冷特性[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2023, 49(1): 124-130.

Reference Format: LI Jinhang, ZHANG Zihan, LIU Jiangfeng, et al. Dehumidification and cooling properties of a vertical curtain type hollow fiber membrane module under natural convection[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(1): 124-130.

Dehumidification and cooling properties of a vertical curtain type hollow fiber membrane module under natural convection

LI Jinhang, ZHANG Zihan, LIU Jiangfeng, ZHANG Guangyu

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to find the feasibility of simultaneous cooling and dehumidification by vertical wall at a high cooling medium temperature, an experimental study on cooling and dehumidification properties of vertical wall based on hollow fiber membrane under natural convection was conducted. A non-direct contact non-liquid dehumidification and cooling module employing hollow fiber membrane contactor technology was designed and fabricated. A test bench for cooling and dehumidification properties was built. With CaCl_2 solution as the dehumidification desiccant, the effects of inlet solution parameters, such as concentration, temperature and flow rate, on the dehumidification capacity, sensible heat cooling capacity and dehumidification efficiency of hollow fiber membrane module were studied. The results showed that the inlet concentration and temperature were major parameters that influenced the dehumidification property. Inlet temperature and flow rate were major parameters that influenced the sensible heat cooling property. Within the value range of test factor level, the dehumidification capacity per unit membrane area of the module was 5~14 g/h, the sensible heat cooling capacity was 4~24 W and the dehumidification efficiency was 28%~65%, indicating that this module was promising for engineering purpose.

Key words: hollow fiber membrane; solution dehumidification; cooling; natural convection; radiant cooling

收稿日期: 2022-02-25 网络出版日期: 2022-06-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY22E060004)

作者简介: 李锦航(1997-), 男, 浙江台州人, 硕士研究生, 主要从事暖通空调新技术方面的研究。

通信作者: 张光玉, E-mail: guangyuzhang@zstu.edu.cn

0 引言

除湿是空气调节的重要功能之一。传统空调系统通过冷却空气到露点温度以下进行除湿,存在能效低、凝结水影响室内空气品质等缺点^[1-3]。采用溶液除湿技术,不仅可实现等温除湿,能效较高,还可蓄冷,且蓄冷密度较高^[4-5]。然而,常规的溶液除湿技术采用空气与溶液直接接触的方式,溶液液滴很容易随空气进入室内,造成气液夹带问题,影响人体健康和室内设备。解决气液夹带问题的主要方法是采用防水透气膜^[6-7]隔离溶液与空气,或采用中空纤维膜溶液除湿技术^[8-11]。其中,中空纤维膜是一种中空的纤维管状防水透气膜,膜管壁上有大量微孔,空气中的水蒸气可以通过膜孔道被膜内溶液吸收,而溶液由于膜的疏水性不能透过膜孔,这种特性非常适用于溶液除湿。

目前关于中空纤维膜溶液除湿技术的研究,主要集中在膜材料选择、组件装填方式、流体流动方式等对膜组件除湿性能的影响方面。Huang 等^[8]采用一种椭圆形的中空纤维膜管用于除湿,发现椭圆形管传热传质强度较圆管有所加强;张宁等^[9]发现,中空纤维膜管三角形排列较四边形排列有更好的除湿效果;梅宁等^[10]采用顺流中空纤维膜组件进行了除湿过程的数值研究,发现提高溶液进口质量分数对提高吸湿性能最为有效;殷少有等^[11]采用叉流中空纤维膜组件进行了除湿过程传热传质特性研究,结果发现组件除湿效率为 20%~60%,且与工况有关。在上述研究中,空气均以强制对流方式掠过膜管,膜组件为常规的强制对流传热传质设备。将中空纤维膜组件作为室内壁面、在自然对流工况下吸收室内空气中水蒸气的同时,以辐射、对流的方式为室内供冷是一种新的技术思路,有望进一步降低动力消耗和噪声,并提高舒适性^[12],但相关报道目前较少。本文设计制作了竖直安装的帘式中空纤维膜组件,采用氯化钙(CaCl_2)溶液作为除湿剂,通过实验研究探明自然对流工况下不同溶液进口质量浓度、温度、流速对组件除湿量与供冷量的影响和作用规律,为新型高效空调供冷技术的研究开发提供基础。

1 实验方案

1.1 实验材料与仪器

实验所用中空纤维膜组件如图 1 所示,中空纤维膜管竖直密布排列,膜管连接在供液集管与回液集管之间,形成帘式结构。中空纤维膜材质为聚丙

烯,组件的具体参数见表 1。实验采用氯化钙(CaCl_2)溶液作为除湿剂^[13]。实验主要仪器及其参数见表 2。



图 1 中空纤维膜除湿组件实物照片

表 1 中空纤维膜组件参数

参数	数值
膜丝有效长度/mm	720.00
膜丝内径/mm	0.37
膜丝外径/mm	0.45
膜丝根数/根	2800.00
膜平均孔径/ μm	0.15
孔隙率/%	50.00

表 2 实验主要仪器及其参数

仪器名称	量程	精度
磁力泵	-46 kPa	—
电子秤	0~30 kg	1.0 g
温度计	0~50 $^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
湿度传感器	相对湿度 20%~95%	2%
除湿机	相对湿度 20%~100%	—

1.2 实验系统与流程

实验系统如图 2 所示,由进液桶、磁力泵、膜组件和出液桶及电子秤构成,其中进液桶储存除湿浓溶液,出液桶储存流出膜组件的稀溶液。溶液流量通过两部电子秤称重测量。实验过程中, CaCl_2 溶液先降温至设定温度,由微型电动磁力泵输送至膜组件,温度较低的除湿溶液通过膜管向室内供冷的同时,吸收膜外侧室内空气中的水蒸气,然后流入出液桶。

1.3 实验方法

为快速探究各参数对组件供冷、除湿性能的影响,采用正交试验方法,选取溶液进口温度、进口质量浓度、进口流速 3 个参数为考察因素,考虑到除湿需要的最低质量浓度和受限于室温下溶解度的最大质量浓度,其中每个因素皆选择 3 个水平数进行实

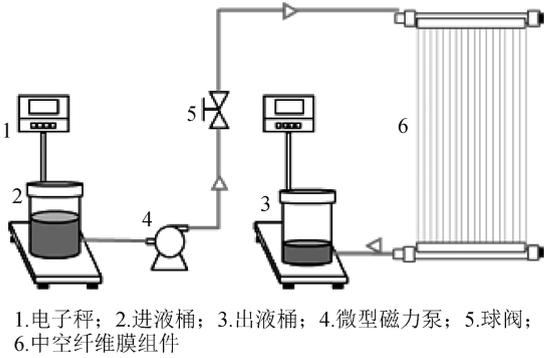


图2 实验系统示意图

验,以控制实验次数。本文采用 $L_9(3^3)$ 正交表^[14],共9组实验。各因素水平划分见表3。

表3 各因素水平划分

水平数	溶液进口流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	溶液进口质量 浓度/%	溶液进口 温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.8	34.0	18.0
2	1.0	37.0	20.0
3	1.2	40.0	22.0

表4 各组实验方案结果

实验号	溶液进口流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	溶液进口 质量浓度/%	溶液进口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	溶液出口 温度/ $^{\circ}\text{C}$	单位膜面积 除湿量/ ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	单位膜面积 显热供冷量/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	单位膜面积 全热供冷量/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	除湿 效率/%
1	0.8	34.0	18.0	25.0	5	21	24	65
2	1.0	34.0	20.0	24.8	6	17	21	56
3	1.2	34.0	22.0	24.9	5	12	15	45
4	1.0	37.0	18.0	24.7	10	22	28	47
5	1.2	37.0	20.0	24.8	9	19	24	40
6	0.8	37.0	22.0	25.7	8	4	9	40
7	1.2	40.0	18.0	24.4	14	24	32	33
8	0.8	40.0	20.0	25.5	11	11	18	35
9	1.0	40.0	22.0	25.7	9	9	15	28

实验过程中间接测量参数的相对误差可根据式(1)计算^[15]:

$$\left| \frac{\delta_y}{y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \delta_{x_i} \right)^2}}{y} \times 100\% \right| \quad (1)$$

其中: y 为与自变量 x_i 相关的因变量; δ_x 为自变量的误差; δ_y 为因变量的误差。将仪器精度等参数代入式(1),计算得出除湿量和显热供冷量的相对误差分别小于11%和8%,说明所得除湿量、显热供冷量等性能数据较准确,可靠性较高。

2.2 组件性能评价

利用膜组件在自然对流条件下进行除湿供冷是一项新型空调技术,其除湿供冷性能是考察其工程应用潜力的最重要参数,而除湿效率则反映其传质

实验开始前,将进液桶与出液桶分置于电子秤上,调节进液桶中溶液质量浓度与温度至设定数值,调节磁力泵流量至流速对应值。实验开始后,系统先运行10 min,以保证溶液完全充满管路。系统参数稳定后开始每隔5 min记录流量数据以及空气温湿度的变化,实验总时长为30 min,取多次测量的平均值为最终结果。

2 实验结果及组件性能评价

2.1 实验结果

各组实验所得结果如表4所示。测试的中空纤维膜组件除湿量在5~14 $\text{g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$,显热供冷量在4~24 W/m^2 ,全热供冷量在9~28 W/m^2 ,除湿效率在28%~65%。第7组表现出最优的性能,即在试验因素水平范围内,当溶液进口质量浓度为40.0%、温度为18.0 $^{\circ}\text{C}$ 、流速为1.2 cm/s 时,组件除湿量与显热供冷量取得最大值,单位膜面积除湿量与供冷量分别为14 g/h 和24 W 。

性能。因此,重点考察除湿量 ω 、显热供冷量 Q_s 、除湿效率 η 三个参数,以评价膜组件性能。

2.2.1 除湿量

根据质量守恒定律,实验组件的除湿量为每小时进液桶溶液增加的质量与出液桶溶液减少的质量差,计算公式可用式(2)表示:

$$\omega = 2[(m_{o2} - m_{o1}) - (m_{i1} - m_{i2})] \quad (2)$$

其中: ω 为除湿量, g/h ; m_{o2} 为实验结束时刻出液桶溶液质量, g ; m_{o1} 为实验开始时刻出液桶溶液质量, g ; m_{i1} 为实验开始时刻进液桶溶液质量, g ; m_{i2} 为实验结束时刻进液桶溶液质量, g 。由于每次实验时长为30 min,因此每小时除湿量为组件30 min除湿量的2倍。

根据表4,在所有实验中,实验1、2、3溶液进口

质量浓度最低,总体上除湿量也最低;实验 4、5、6 溶液进口质量浓度高于实验 1、2、3,除湿量也高于实验 1、2、3;而实验 7、8、9 溶液进口质量浓度最高,相比前 6 组实验,总体上除湿量也更高,其中实验 7 溶液进口质量浓度、速度为最高值而温度为最低值,除湿量为最大,而实验 9 虽然溶液进口质量浓度最高,但进口温度也较高,与溶液进口质量浓度较低、但进口温度更低的实验 5 相比,除湿量相同,且低于溶液进口质量浓度较低、但进口温度为最低值的实验 4。此外,由表 4 还可知,溶液进口质量浓度较高但速度较低低的实验 8、6,除湿量均高于进口速度较高但质量浓度较低低的实验 2、3。上述结果说明:溶液进口质量浓度和温度对除湿量有重要影响,速度的影响则稍弱。

2.2.2 显热供冷量

供冷量包括显热供冷量和潜热供冷量,二者之和为全热供冷量。其中潜热供冷量 Q_L 为溶液吸收的水蒸气量所对应的潜热量,计算公式可用式(3)表示:

$$Q_L = wr/3600 \quad (3)$$

显热供冷量 Q_s 为溶液进出口焓差与潜热供冷量之差,计算公式可用式(4)表示:

$$Q_s = Mc_p(t_o - t_i) - wr/3600 \quad (4)$$

$$Q = Mc_p(t_o - t_i) \quad (5)$$

其中: M 为除湿溶液质量流量 g/s ; c_p 为比热容, $J/(g \cdot K)$; t_o 为溶液出口温度, $^{\circ}C$; t_i 为溶液进口温度, $^{\circ}C$; r 为水蒸气汽化潜热,取 $2440 J/g$ 。由实验可知,溶液在吸湿过程中吸收水蒸气的量相对较小,溶液质量浓度变化不到 0.5% ,因此溶液质量流量与比热容可认为不变,取为溶液进口质量流量与比热容。

比较表 4 中不同进口温度下的显热供冷量,可以发现:进口温度为最低值的实验 1、4、7,显热供冷量也为最大,而进口温度最高的实验 3、6、9,显热供冷量最小;进口温度介于中间实验 2、5、8 则其显热供冷量也介于中间,且各组中进口速度较高的相应的显热供冷量也较大。说明除湿量不太大的情况下,组件的显热供冷量主要取决于溶液进口温度和速度。这是因为溶液温度低,则辐射及自然对流传热温差较大,而溶液流速高,则膜管内传热系数较高,因而低温、高速下传热能力也较大,从而显热供冷量较大。

2.2.3 除湿效率

在溶液吸收除湿过程中,室内空气的水蒸气分压力与溶液蒸汽压之间的压差是驱动吸收的推动

力,理论上最大驱动力为溶液进口质量浓度对应的蒸汽压与室内空气的水蒸气分压力之差。随着溶液流动和吸收过程的进行,溶液质量浓度不断降低,其对应的蒸汽压不断提高,与室内空气中水蒸气的分压力之差逐渐减小。在极限情况下,出口溶液质量浓度蒸汽压与室内空气的水蒸气分压平衡。故溶液进出口质量浓度差对应的蒸汽压差可近似反映溶液对水蒸气的吸收程度。因此,本文定义溶液进出口质量浓度对应的蒸汽压差与室内空气的水蒸气分压与进口溶液蒸汽压差之比为除湿效率,以反映组件的吸收效率:

$$\eta = \frac{P_{so} - P_{si}}{P_v - P_{si}} \quad (6)$$

其中: η 为除湿效率,%; P_{so} 、 P_{si} 分别为出口溶液与进口溶液水蒸气分压力, Pa; P_v 为空气中水蒸气分压力, Pa。

除湿效率反映组件的实际除湿量与其潜在的理论除湿量的接近程度。由表 4 可知,除湿量较小的实验 1、2、3,其除湿效率反而较高,而除湿量最大的实验 7、8、9,其除湿效率反而较小,除湿量介于中间实验 4、5、6,除湿效率也介于中间。除湿量、除湿效率间的上述差异表明,组件结构、膜材料参数、溶液参数需要优化组合,在最优匹配时,才能获得最好的综合性能,实际机理则需进一步分析。

3 影响因素分析

3.1 极差分析

采用极差分析法对实验结果进行分析,可定量判断各因素对性能指标的影响和作用规律,进一步检验前文的分析和说明,为后续的研究和开发指明方向。图 3 是不同温度、质量浓度和流速等参数所对应的除湿量、供冷量和除湿效率的极差图。

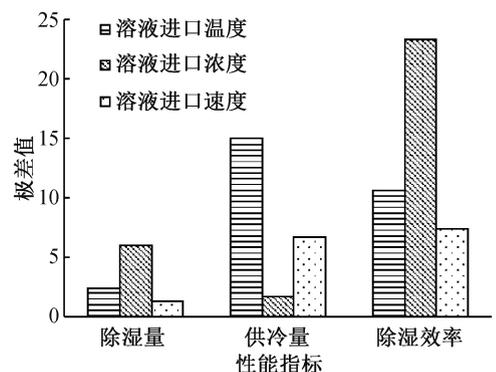


图 3 组件除湿供冷性能的极差图

由图3可见:对于除湿量,三个极差中质量浓度对应的极差值最大,温度对应的极差值次之,流速对应的极差值最小,说明质量浓度对除湿量的影响最显著,其次是温度,流速的影响最小,与前述分析一致。对于供冷量,三个极差中温度对应的极差值最大,其次是流速对应的极差值,质量浓度对应的极差值最小,说明进口温度对显热供冷量的影响最显著,其次是流速,质量浓度的影响最小,与前述分析也一致。而对于除湿效率,三个极差中质量浓度对应的极差最大,其次是温度应对的极差值,流速对应的极差值最小,说明质量浓度对除湿效率影响最大,其次温度,流速的影响最小,与前述分析也基本一致。

图4—图6为除湿量、供冷量随质量浓度、温度、速度三个因素的变化趋势图,其中横坐标为某因素的水平值,纵坐标为该因素在某水平下的性能指标和的平均值 k_i , k_i 越大,说明在相同因素时,该水平下的性能指标越高^[15]。由图可见,组件除湿量和供冷量的 k_i 值变化与前述分析一致,说明提高质量浓度和速度、降低温度有利于提高除湿量,而要提高供冷量,则应降低温度和质量浓度、提高流速。

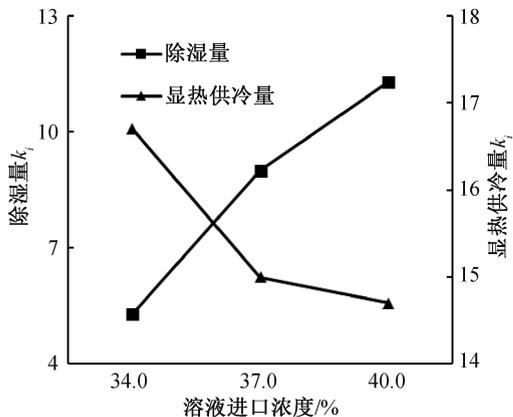


图4 不同溶液进口质量浓度下的除湿量与显热供冷量

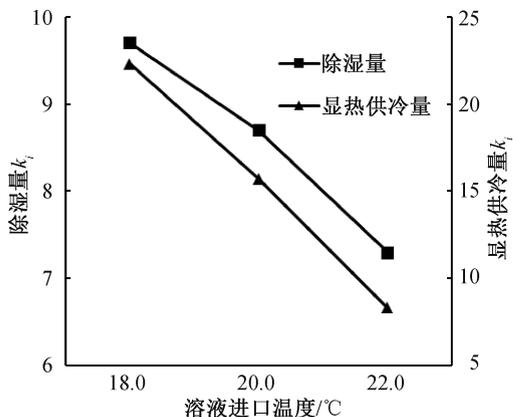


图5 不同溶液进口温度下的除湿量与显热供冷量

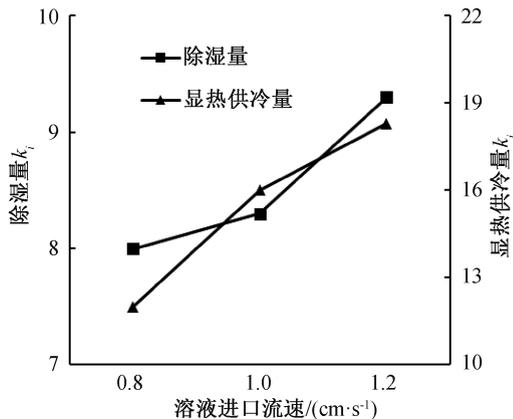


图6 不同溶液进口流速下的除湿量与显热供冷量

图7—图9给出了除湿效率的 k_i 值随质量浓度、温度、速度三个因素变化的趋势图。由图7—图9可见,除湿效率的 k_i 值随溶液进口温度升高而降低,与前述除湿量变化趋势一致,说明采用较低的进口温度可获得较高的除湿量和除湿效率,除湿性能较好;但除湿效率的 k_i 值随溶液进口质量浓度、速度则呈下降趋势,与前述除湿量的变化趋势相反,值得进一步分析。

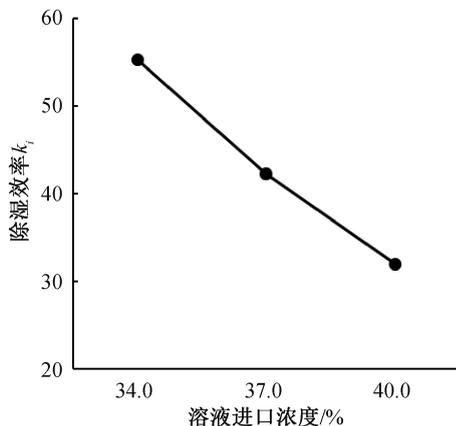


图7 不同溶液进口质量浓度下的除湿效率

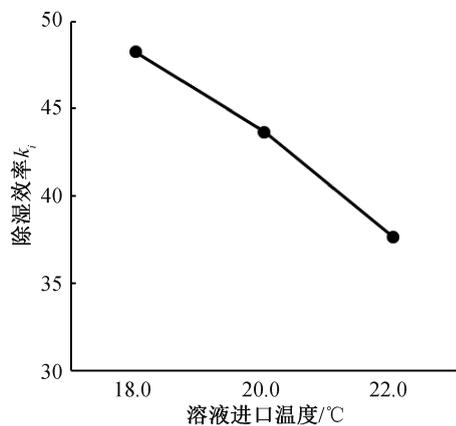


图8 不同溶液进口温度下的除湿效率

3.2 提高除湿性能的方法

实验数据和极差分析均表明,膜组件除湿量、除

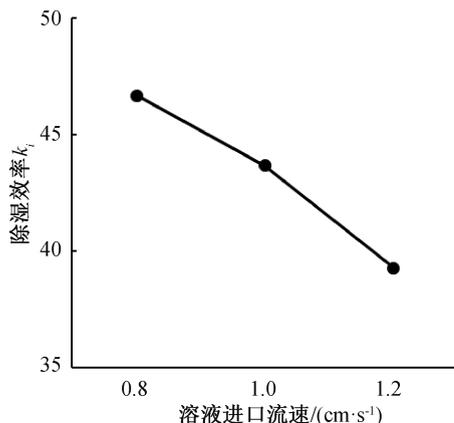


图 9 不同溶液进口流速下的除湿效率

除湿效率随溶液进口温度的降低而提高,但除湿量和除湿效率随溶液进口质量浓度的变化呈现相反的变化趋势,即:提高溶液进口质量浓度,组件除湿量增加,而除湿效率却降低;此外,提高溶液进口流速,组件除湿量增加,但除湿效率也降低。

这种现象可以根据传热传质理论进行机理分析。在吸收过程中,组件除湿量由传质系数和空气与溶液之间的水蒸气分压差决定。提高空气中水蒸气分压与溶液蒸气压之间的压差可增大吸收的传质驱动力,从而提高组件除湿量。当进口质量浓度较高而进口温度较低时,溶液的蒸气压降低,与空气中的水蒸气间分压差增大,从而提高了吸收驱动力;而提高溶液进口流速,强化了膜管内的扩散,提高了传质系数,最终获得较高的除湿量。实验结果与上述分析一致。同时,提高溶液进口质量浓度和流速,组件除湿效率却下降,说明高质量浓度溶液的潜在除湿能力未能充分发挥,实际除湿量远未达到溶液的理论除湿量,因而除湿效率较低。综合质量浓度、温度、速度对除湿量、除湿效率的影响,本文认为存在阻碍溶液实现理论除湿能力的因素。根据室内空气中水蒸气到膜管内溶液的扩散传递路径可以判断,阻力主要在于膜管壁本身及膜管外的扩散传递过程中。正是因为通过膜管壁本身和膜管外的传质阻力较大,影响了水蒸气的扩散和吸收,使组件的实际除湿量远未达到溶液的理论除湿量,因而质量浓度提高时总除湿量提高了,但除湿效率反而降低。

上述分析表明,要提高膜组件供冷除湿性能,选择合适的溶液进口质量浓度、温度等操作参数外,一方面应改进膜本身的性能,如降低膜厚度、提高孔隙率等,以减少水蒸气扩散路径长度,降低膜管自身的传质阻力;另一方面,还应强化膜管内外的传递过程,合理采用膜管内流速,采取适当措施提高膜管外

空气流速,使其处于受迫流动和自然对流的混合流状态,即强化吸收传质,提高供冷除湿性能,又不过分增加动力消耗。此外,改进组件的结构设计,也是值得考虑的方向。

4 结 论

本文制作了疏水性中空纤维膜供冷除湿组件,搭建了性能测试实验台,在室内温度(26.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度(60 ± 5)%条件下,以 CaCl_2 溶液为除湿溶液,采用正交方法实验,研究了自然对流工况下不同参数对膜组件除湿、供冷性能的影响,探明了各运行参数对中空纤维膜组件性能的影响规律,在试验因素水平范围内获得了组件单位膜面积除湿量 $5 \sim 14$ g/h,显热供冷量 $4 \sim 24$ W,除湿效率 $28\% \sim 65\%$ 的结果,证明了基于中空纤维膜的溶液除湿、同时供冷的技术思路的可行性,主要结论如下:

a) 各因素对中空纤维膜组件除湿量影响由大到小排序为:溶液进口质量浓度,溶液进口温度,进口流速。对显热供冷量影响由大到小排序为:溶液进口温度,溶液进口流速,溶液进口质量浓度。

b) 溶液进口质量浓度和温度是影响除湿性能的主要参数。提高溶液进口质量浓度,降低溶液进口温度有利于提高除湿性能。

c) 膜管壁及膜管外存在较大传质阻力,使组件的实际除湿量远未达到理论除湿量,除湿效率较低。因此研究改进膜性能、强化膜外传质,是提高除湿效率的重要途径。

本文进行的自然对流条件下基于中空纤维膜的溶液除湿供冷实验研究,是探索和发展新型空调除湿技术的新尝试,取得了有意义的实验结果,为可能的新型、高效空调除湿技术的研究开发提供了良好的基础。

参考文献:

- [1] Fang S, Zhi X Q, Cheng X W, et al. Numerical study on the moisture transfer characteristics of membrane-based liquid desiccant dehumidifiers: resistance distribution and concentration polarization [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 155: 119877.
- [2] Zhang L Z, Huang S M, Pei L X. Conjugate heat and mass transfer in a cross-flow hollow fiber membrane contactor for liquid desiccant air dehumidification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012,

55(25/26): 8061-8072.

- [3] Li G P, Zhang L Z. Investigation of a solar energy driven and hollow fiber membrane-based humidification-dehumidification desalination system [J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 393-408.
- [4] 曾瑞璇, 颜承初, 李梅. 除湿等级划分及深度除湿技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2020, 41(6):12-21.
- [5] Zhang N, Yin S Y, Yang H H. Transient performance of coupled heat and mass transfer in cross-flow hollow fiber membrane module for air dehumidification [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 108: 190-199.
- [6] 张光玉. 一种空间热湿环境控制装置: CN107166568A [P]. 2018-02-23.
- [7] 姚颖, 张光玉. 基于 TRIZ 的辐射供冷表面凝露防控技术研究[J]. *制冷与空调*, 2018, 18(11): 19-22.
- [8] Huang S M, Yang M L. Heat and mass transfer enhancement in a cross-flow elliptical hollow fiber membrane contactor used for liquid desiccant air dehumidification [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 449:184-192.
- [9] 张宁, 张立志. 基于质量积耗散的膜法除湿组件结构设计[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(10): 2023-2026.
- [10] 梅宁, 何思远, 赵健, 等. 中空纤维膜管内 LiBr 溶液除湿过程的数值研究[J]. *热科学与技术*, 2015, 14(5): 362-369.
- [11] 殷少有, 张宁. 中空纤维膜液体除湿过程中热质传递特性的实验研究[J]. *制冷学报*, 2017, 38(3): 96-100.
- [12] Hout M, Ghaddar N, Ghali K, et al. Displacement ventilation with cooled liquid desiccant dehumidification membrane at ceiling; modeling and design charts[J]. *Energy*, 2017, 139:1003-1015.
- [13] Arjunan T V, Seenivasan D, Selladurai V. Experimental studies on the performance of dehumidifier using calcium chloride as a liquid desiccant [J]. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2018, 14(1): 49-63.
- [14] 潘黎, 赵德印, 徐强. 上海超低能耗办公建筑围护结构技术研究与实践[J]. *暖通空调*, 2020, 50(7): 91-96.
- [15] 王建伟, 张小松, 孙博, 等. 基于真空膜蒸馏的空调除湿溶液再生实验研究[J]. *制冷学报*, 2021, 42(4): 91-100.

(责任编辑:康 锋)