

文章编号:0253 – 4339(2015) 02 – 0083 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2015. 02. 083

内热再生式除湿器除湿再生性能研究

吕 宁 张 辉 陈振乾

(东南大学能源与环境学院 南京 210000)

摘 要 提出一种内热再生式固体除湿器,描述了其物理模型和工作中传热传质过程的数学模型,并编写了基于有限差分法的数值求解程序对其控制方程组进行求解。通过搭建实验台进行实验,测得了除湿器在除湿再生过程中的动态特性,并与模拟结果进行了对比分析。模拟和实验结果均表明,除湿器在不采用内冷措施的情况下对夏季室内的高湿气体或微环境内的低湿气体均具有较高的除湿效率,再生时间远小于有效除湿时间,吸附床床体压降小,对室内小型空间的除湿需求具有很好的适用性。

关键词 微环境;固体除湿器;硅胶;数值模拟;性能实验

中图分类号: TB61 + 1; TU834. 9 **文献标识码:** 文 A

Study of Dehumidification-regeneration Performance of an Internally-heating Regenerated Dehumidifier

Lü Ning Zhang Hui Chen Zhenqian

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210000, China)

Abstract An internally-heating regenerated dehumidifier is proposed, its physical model and mathematical model for heat and mass transfer process are described, and a numerical procedure based on finite difference method is developed to solve the governing equations. By conducting experiment researches, the dehumidifier's dynamic behavior is measured, and then compared with simulation data. Result shows that the dehumidifier has a high dehumidification efficiency for both indoor air with high moisture content in summer and relatively dry air in microenvironment without inner-cooling device, the time consumed in regeneration and cooling process is much less than that consumed in dehumidification process, and the pressure drop in fix bed is small, which indicates that the dehumidifier can be widely used in dehumidification for small indoor space.

Keywords microenvironment; solid dehumidifier; silica gel; numerical simulation; performance experiments

与常规大空间内的除湿需求相比,文物柜、航海中精密仪器的存储空间等小型空间内微环境的除湿需求具有其自身的特殊性。主要表现为除湿过程中需保证微环境温湿度的相对稳定,以及对空气品质、噪声等方面的更高要求^[1]。与冷凝除湿或溶液吸附除湿方法相比,固体吸附除湿因其除湿过程易于控制、材料无腐蚀性、运动部件少且可利用低品位能源进行再生等特点^[2],在针对此类微环境的除湿上具有得天独厚的优势。

近年来,国内外很多学者对固体吸附除湿技术做了相关研究,除了已经得到广泛应用的转轮除湿技术,当前的研究内容主要集中在新型再生方式的研发、提高现有固定床的热湿传递效率,以及高效吸附剂材料的研制等方面^[3-5]。国外的 Mina E 等^[6-7]首次提出了除湿剂电渗再生的概念;A Ramzy K 等^[8]研

究了不同吸附剂填充方式对除湿器工作性能的影响。在国内,姚晔等^[9-11]论证了固体除湿剂超声波再生的可行性,并通过实验对超声波再生的效果和能耗做了分析,完善了固体除湿剂超声波再生技术;刘晓茹等^[12]提出了一种内冷却紧凑式叉流除湿器,通过增加次边换热结构控制主边吸附剂的工作温度来提高除湿器的除湿效率,实则是对固定床的结构做了改进;还有一些学者在开发新型改性吸附材料方面做了工作^[13-14],如郭敬花等^[15]对改性硅胶和分子筛混合物的除湿性能做了相关研究。

总体来说,国内外对固体吸附除湿技术的研究已经比较深入,但对固体除湿器具体产品的研究却仍然较少,该文针对微环境的除湿需求特点和缺乏适用除湿器的现状提出了一种内热再生式除湿器,通过模拟和实验对其除湿、再生性能进行了研究。

1 内热再生式除湿器的物理模型

内热再生式除湿器结构如图1所示,采用细孔硅胶作吸附剂,除湿器出入口均设有均流板保证气流均匀,PTC加热器在除湿过程中关闭,进入再生过程后开启,再生气体使用室内环境状态下的空气。

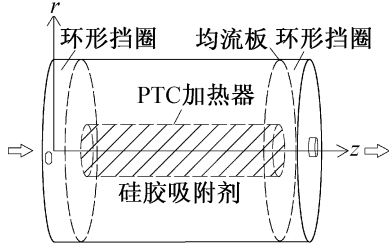


图1 内热再生式除湿器结构简图

Fig. 1 Structure diagram of internally-heating regenerated dehumidifier

2 除湿器内传热传质过程的数学模型

2.1 控制方程组

本文对除湿器工作时内部区域的气固两相微控制体做了能量守恒和质量守恒分析,对气流在吸附剂中的流动过程、气固两相之间的热质交换过程建立了数学模型,其控制方程组如式(1)~式(7)所示。模型中忽略了接触热阻以及物性参数随温度的变化,并做了二维轴对称简化,进行与水蒸气有关的计算时使用理想气体模型。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial\tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u)}{\partial r} + \frac{\partial\rho w}{\partial z} + \rho_s \frac{\partial q_s}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Brinkman-Forcheheimer 方程:

$$\rho[\phi^{-1} \frac{\partial V}{\partial\tau} + \phi^{-1} \nabla \cdot (\frac{V^2}{\phi})] = -\frac{1}{\phi} \nabla \cdot (P\phi) + \quad (2)$$

$$\frac{\mu}{\phi\rho} \nabla^2 V - \frac{\mu}{k} - \frac{1}{\sqrt{k}} C_f |V| V$$

气体能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho_g c_g \phi T_g)}{\partial\tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_g c_g u T_g)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_g c_g w T_g)}{\partial z} =$$

$$\frac{\phi}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r}) + h a_s (T_s - T_g) \quad (3)$$

吸附剂能量守恒方程:

$$\frac{\partial[(1-\phi)\rho_s c_s T_s]}{\partial\tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\lambda_s (1-\phi) \frac{\partial T_s}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_s (1-\phi) \frac{\partial T_s}{\partial z}] - h a_s (T_s - T_g) + H_{ad} \rho_s \frac{\partial q_s}{\partial t} \quad (4)$$

水蒸气质量守恒方程:

$$\frac{\partial\phi c}{\partial\tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u c) + \frac{\partial}{\partial z} (w c) + (1-\phi) \rho_s \frac{\partial q_s}{\partial t} - D\phi(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}) = 0 \quad (5)$$

线性驱动力模型:

$$\frac{\partial q_s}{\partial\tau} = K(q_s^* - q_s) \quad (6)$$

平衡吸附量计算公式:

$$q_s^* = K_0^I \exp[H_{ad}/RT_s] P \quad (7)$$

2.2 初始条件和边界条件

初始条件:

$$u|_{\tau=0} = 0, w|_{\tau=0} = \bar{w}, T_g|_{\tau=0} = T_f,$$

$$T_s|_{\tau=0} = T_f, c|_{\tau=0} = c_0$$

边界条件:

$$u|_{z=0} = 0, w|_{z=0} = \bar{w}, T_g|_{z=0} = T_f,$$

$$T_s|_{z=0} = T_f, c|_{z=0} = c_0 \text{ (除湿器进口处)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=L} = 0, \frac{\partial w}{\partial z}|_{z=L} = 0,$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial z}|_{z=L} = 0, \frac{\partial T_s}{\partial z}|_{z=L} = 0, \frac{\partial c}{\partial z}|_{z=L} = 0$$

(除湿器出口处)

$$u|_{r=r_1} = 0, w|_{r=r_1} = 0, T_g|_{r=r_1} = T_w,$$

$$T_s|_{r=r_1} = T_w, \frac{\partial c}{\partial z}|_{r=r_1} = 0$$

(再生阶段加热器壁面处)

$$u|_{r=r_1} = 0, w|_{r=r_1} = 0, \frac{\partial T_g}{\partial r}|_{r=r_1} = 0,$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r}|_{r=r_1} = 0, \frac{\partial c}{\partial r}|_{r=r_1} = 0$$

(除湿阶段加热器壁面处)

$$u|_{r=r_2} = 0, w|_{r=r_2} = 0, \frac{\partial T_g}{\partial r}|_{r=r_2} = 0, \frac{\partial c}{\partial r}|_{r=r_2} = 0,$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}|_{r=r_2} = h(T_s - T_f) \text{ (除湿器内壁面处)}$$

其中: u 为气体径向速度, m/s; w 为气体轴向速度, m/s; T_g 为气体温度, °C; T_s 为吸附剂温度, °C; c 为水蒸气质量浓度, kg/m³; q^* 为吸附质量百分比; r_1 为加热器半径, m; r_2 为除湿器内径, m。

使用 SIMPLE 算法求解流场,各方程之间彼此耦

合,通过不断迭代进行求解。数学模型的求解结果需做网格独立性检验,进行除湿计算时时间步长取 1 s,再生计算时取 1 min;几何坐标步长 5 mm。经计算,此计算结果与网格数量加密一倍时的计算结果相差小于 1%,因此可基本排除数值解的网格依赖性。

3 实验与数据分析

3.1 实验装置

论文搭建了实验台对除湿器除湿再生过程中的运行数据进行采集,以与模拟结果进行对比分析。实验装置如图 2 所示。使用由 Sensirion 公司生产的 SHT75 系列的温湿度传感器对除湿器出口气流温湿度进行测量,湿度测量范围 0% ~ 100% RH,温度测量范围 - 40 ~ 123.8 ℃。使用上海菱生 CYR-2D 型差压变送器测量除湿器进出口压差,美国双杰 JJ-Y 系列电子天平测量除湿器质量,实验数据均由 CCT-RTD104 模块采集,并与上位机通讯,最后由编写的 Delphi 程序记录。

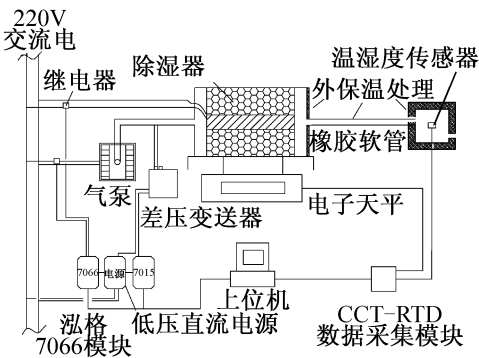


图 2 实验数据采集系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental data acquisition system

由泓格公司生产的 7066 模块和继电器对 PTC 加热器、气泵的起停动作进行控制,从而实现除湿器除湿、再生、冷却过程之间的切换。为了保证所测数据的准确性,温湿度采集空间、除湿器气出口侧面及橡胶软管均做保温处理。

除湿器通过内置 PTC 材料制作的加热器来实现吸附床的再生,其特点是当温度达到设定值时电阻会趋于无穷大,因此可以实现温度的自恒定。对于除湿器来说,再生温度越高,再生的速度就越快,再生效果也会越好,但受到细孔硅胶温度承受能力的限制,实验中 PTC 加热器设定温度不能无限升高。结合所使用硅胶的实际情况,定做加热器的设定温度为 150 ℃。由于加热器自身具有一定热容,通电后需一定时间才能达到设定温度,其温度变化规律经测量后使用

公式进行拟合。
除湿器结构尺寸、各物性参数及加热器温度拟合公式如表 1 所示。

表 1 除湿器尺寸及吸附剂物性参数
Tab. 1 Parameters of dehumidifier and adsorbent

参数	数值
吸附床床体长度/ mm	80
吸附床床体直径/ mm	96
硅胶颗粒直径/ mm	3
PTC 加热器直径/ mm	25
硅胶总质量/ kg	0.608
金属床体质量/ kg	0.713
硅胶导热系数/ (W/(m·K))	0.198
除湿开始时硅胶含水率/%	20
再生开始时硅胶含水率/%	31.9
孔隙率/%	42

加热器温度拟合公式:

$$T = \begin{cases} 21.005 \times \log t - 55.204 (t \leq 16200) \\ 150 (t > 16200) \end{cases}$$

3.2 实验流程

实验条件为南京夏季室内工况,首先进行再生实验,随后将实验后的除湿器冷却至室温并进行除湿实验。再生实验中,再生气体直接取室内空气,不需要单独制备,实验目的主要是为了考察除湿器在给定工况下的再生速度与再生程度。除湿实验分两组,实验 1 的入口气体使用高含湿量的室内空气,以考察除湿器在最不利情况下的除湿性能,而事实上,除湿器在正常情况下的除湿对象往往是微环境内的循环低湿气体,根据国际文物保护机构制定的博物馆标准及我国的博物馆卫生标准,书画、织绣品类文物保存较适宜的温湿度环境为温度 (18 ± 2) ℃,相对湿度 (55 ± 5) %。因此,实验 2 中入口气体改为经过预降温除湿处理的低温低湿空气,对除湿器正常工作条件下的性能进行检测,具体实验参数见表 2。

3.3 实验数据分析

实验数据与数学模型求解结果的对比分析如图 3 ~ 图 8 所示。为了便于分析,定义参数平均吸附质量百分比 $\theta = \frac{\text{吸附床吸附水蒸气的质量}}{\text{吸附床完全再生时的质量}} \times 100\%$ 。

图 3 为实验 1 条件下再生过程中除湿器出口空气含湿量与温度随时间的变化趋势。在图中我们可以看到,进入再生阶段后除湿器出口空气含湿量在短

时间内迅速上升,峰值约为环境空气含湿量的 2 倍,随后较为快速的下降,在约 200 min 后逐渐趋于入口值。这是因为再生过程开始后,PTC 加热器周围吸附剂温度的上升使得再生过程快速进行,除湿器出口空气含湿量也随之显著上升,但随着该过程的持续,加热器附近的吸附剂逐渐趋于再生完全,且吸附剂自身存在热容热阻,远离加热器的吸附剂温度低于靠近加热器吸附剂的温度,再生速度相对较慢,因此整个吸附床的平均再生速度也随之减缓,出口空气含湿量相应下降。400 min 后,其值几乎不再发生变化。

表 2 实验工况参数

Tab. 2 Parameters of experiment condition	
工况	参数值
空气流量/(m ³ /h)	1.5
硅胶初始温度/℃	27
入口空气含湿量/(g/kg) (实验 1)	13.87
入口空气含湿量/(g/kg) (实验 2)	6.2
入口空气含温度/℃ (实验 1)	27
入口空气含温度/℃ (实验 2)	18

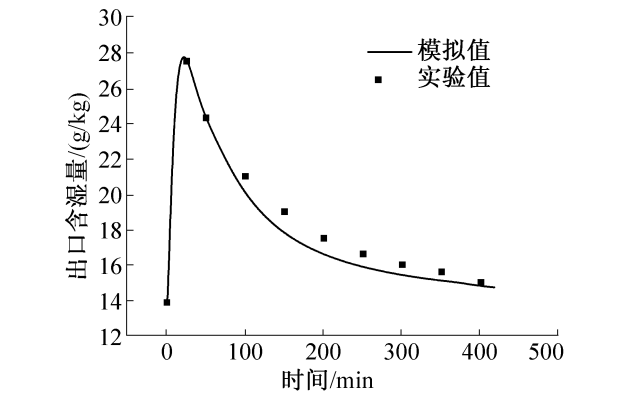


图 3 再生时出口空气的含湿量变化

Fig. 3 Variation of moisture content at outlet in regeneration process

图 4 为再生过程中除湿器整个吸附床平均吸附质量百分比随时间的变化。该参数是评价再生过程进行程度的重要指标。相对应于出口空气含湿量的变化,进入再生过程后吸附剂平均吸附质量百分比的下降速率也呈现逐渐减小的趋势,200 min 内下降约 12%。200 min 以后,吸附百分比的下降趋势有明显的减缓,因此根据其再生特点,除湿器的再生时间可控制在 200 min 以内,以在保证再生效果的前提下减小能耗,在随后对除湿过程的分析中可以看到,此再生时间能够确保除湿器具有良好的除湿效果。事实

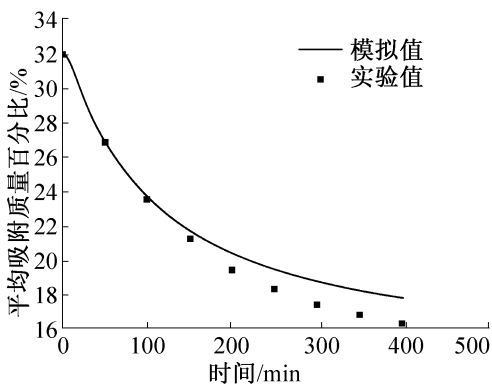


图 4 再生时吸附床平均吸附质量百比的变化
Fig. 4 Variation of q in regeneration process

上,为了使除湿器的性能具有一定余量,再生实验并没有使用除湿过程结束时的吸附床,而是重新装填了在周围环境中吸附饱和了的吸附剂,此吸附剂的平均吸附质量百分比要高于前者,因此实际情况下除湿器的再生速度要更快一些。

图 5 为再生时出口气流温度的变化趋势,它可以很好地反映再生过程中整个吸附床的平均温度变化。由图 5 可知,出口气流温度开始时上升很快,但很快趋于平缓上升。这是因为吸附剂温度上升到一定程度后开始脱附,吸附剂从 PTC 加热器处得到的热量不再用于吸附剂本身温度的上升,转而提供脱附过程所需的热量;随着一些吸附剂完成再生,吸附床平均温度也继续上升,并逐渐与周围环境之间达到动态平衡。对于除湿器本身而言,整个再生过程中吸附床床体的平均温度越高,除湿器的再生速度也就相对越快。因此,除湿器吸附床床体温度进入稳定上升阶段所需的时间在很大程度上反映了除湿器的再生性能。在实验条件下,除湿器出口气流温度进入平缓上升阶段所需时间较长,约为 20 min,这与加热器本身具有

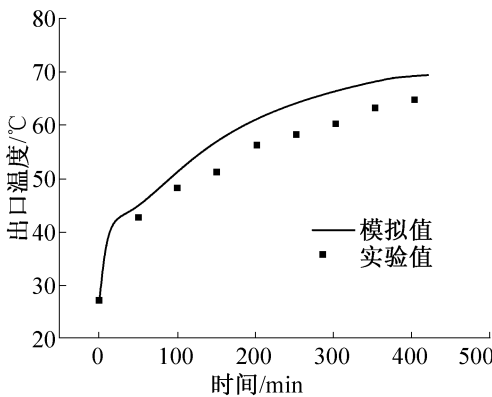


图 5 再生时出口空气的温度变化
Fig. 5 Variation of temperature at outlet in regeneration process

一定热容,且与硅胶颗粒之间存在较大的接触热阻有关。

图 6~图 7 为进入除湿过程后除湿器出口含湿量与温度随时间的变化关系。由图 6 可以看出:出口气流含湿量在进入除湿过程后迅速下降至最低值,随后缓慢上升,新再生过的除湿器在 30 min 内对周围环境条件下的高湿气体具有接近 40% 的平均除湿效率,而累计工作时间达到 4 h 以后,除湿器的除湿效率仍然能维持在 20% 以上,吸附温升引起的除湿效果下降现象并不明显。这主要是由处理气流流量较小导致,而较为和缓的除湿效果对于维持微环境内湿度的相对稳定是十分有利的。多孔介质比表面积大,气固两相之间具有很好的换热效果,吸附过程所放出的热量大多由被处理气流带出,由图 7 可以看出:连续工作时除湿器出口气流温度会有较大幅度升高,为了维持除湿空间内温度的相对稳定,可使用高温冷源对出口气流进行降温处理。由于模型中没有考虑除湿器金属筒体热容,以及保温材料覆盖不严等因素,出口温度实验值略低于计算值。

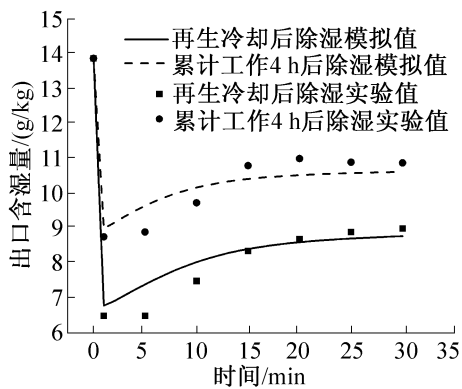


图 6 除湿时出口空气的含湿量变化

Fig. 6 Variation of moisture content at outlet in dehumidification process

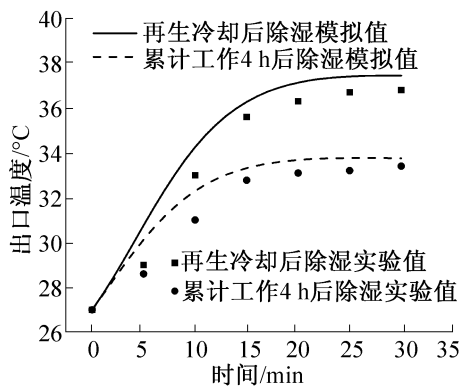


图 7 除湿时出口空气的温度变化

Fig. 7 Variation of temperature at outlet in dehumidification process

该除湿器的除湿对象是小型密闭空间,因此其处理气流往往是在小空间内循环的低湿气体,这就要求除湿器不仅能在高湿环境的极限条件下工作,对微环境内的低湿气体也同样要有良好的除湿效果。为了检测除湿器在低湿环境下的工作性能,实验 2 将入口空气改为含湿量低于 6.5 g/kg 的低湿气体。图 8 为除湿器在实验 2 工况下累计除湿 4 h 后的出口含湿量变化,由图可知,此时除湿器对于低含湿量气体具有超过 25% 的除湿效率。这是因为入口含湿量减小虽然降低了传质驱动力,但吸附量减小后吸附热也相应减少,吸附剂温度的下降又促进了吸附过程的进行,两者作用相互减弱,除湿器总体的吸附能力并没有明显下降。因此,除湿器能够在周围环境湿度发生变化时保持相对稳定的除湿性能。事实上,实验 2 中所使用的入口空气具有很低的露点温度,若使用冷凝除湿法对其进行除湿必然会造成较大的能源浪费,而相比之下,使用该除湿器进行除湿则能在不消耗过多能源的前提下获得较好的除湿效果。

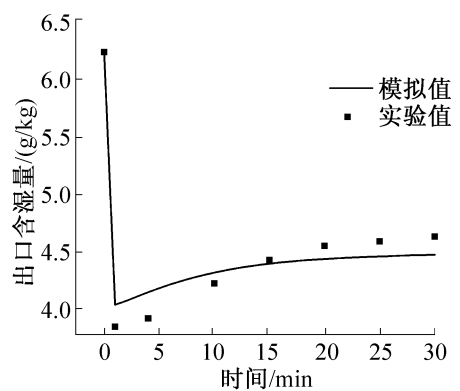


图 8 入口空气为低含湿量空气时出口含湿量的变化

Fig. 8 Variation of moisture content at outlet with low moisture content air income

吸附床工作压降是固定床吸附除湿器进行设计选型等工作时所需的一个重要参数。实验中通过多次改变流量调节阀的开度,测得了除湿器在处理不同气流流量时的压降,并由此计算出吸附床的压降。小雷诺数下,压差与流量之间的关系服从达西定律。从图 9 中可以看出:流量增大时压差呈近似线性升高地趋势,床体在计算流量范围内的压降约为 100~400 Pa,较小的气体阻力不仅减小了泵耗,也有效降低了除湿器工作时所产生的噪声。

4 结论

本文针对内热再生式除湿器工作中传热传质过程所建立的数学模型能够对除湿器的各项运行参数

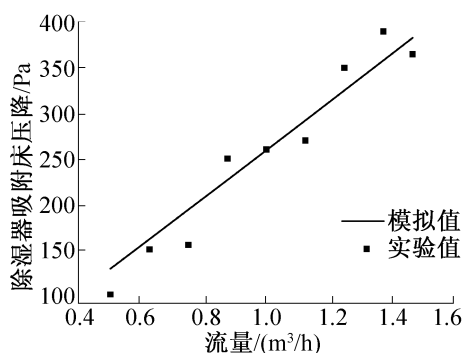


图9 吸附床压降与流量的关系

Fig.9 Relationship between pressure difference on adsorbent bed and flux

进行有效计算,实验数据与计算结果吻合良好。通过分析模拟和实验结果可以发现:除湿器对夏季室内的高湿气体或微环境内的循环低湿气体均具有较好的除湿效果,累计除湿时间达到4 h后,除湿效率仍能保持在20%以上。内置加热器的再生方式使除湿器具有较快的再生速度,两台除湿器交替工作可对微环境进行连续除湿。此外,在设计尺寸与填充方式下,吸附床的压降很小,有效降低了泵耗及除湿器的工作噪声,除湿器能够很好地满足室内小空间微环境小负荷、高湿度控制标准的除湿需求。

参考文献

- [1] 徐方圆,吴来明,解玉林,等. 文物保存环境中温湿度评估方法研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24 (Suppl.1): 6-12. (Xu Fangyuan, Wu Laiming, Xie Yulin, et al. Study on temperature and humidity in the museum environment[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2012, 24 (Suppl.1): 6-12.)
- [2] 陈欢,李维. 固体吸附除湿在集中空调系统中的适用性分析[J]. 暖通空调, 2011, 41(4): 120-122. (Chen Huan, Li Wei. Applicability of solid adsorption desiccant to central air conditioning systems[J]. Journal of HV & AC, 2011, 41(4): 120-122.)
- [3] K Fathalah, S E Aly. Study of a waste heat driven modified packed desiccant bed dehumidifier[J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(4): 457-471.
- [4] Pradeep Bansal, Sanjeev Jain, Choon Moon. Performance comparison of an adiabatic and an internally cooled structured packed-bed dehumidifier[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(1): 14-19.
- [5] Kuei S Chang, Hui C Wang, Tsair W Chung. Effect of regeneration conditions on the adsorption dehumidification process in packed silica gel beds[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5/6): 735-742.
- [6] Mina E, Newell T A. Electroosmosis for dehumidification (Proof of principle study) [C]//Proceedings of the 21st International Congress of Refrigeration, Arlington, Virginia,

a, 2004.

- [7] 蔡戎辉,田长青,邵双全. 固体除湿剂电渗再生[J]. 化工学报, 2010, 61(3): 642-647. (Qi Ronghui, Tian Changqing, Shao Shuangquan. Electro-osmotic regeneration for solid desiccant[J]. CIESC Journal, 2010, 61(3): 642-647.)
- [8] A Ramzy K, Ravikiran Kadoli, T P Ashok Babu. Performance studies on the desiccant packed bed with varying particle size distribution along the bed[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(3): 663-675.
- [9] 姚晔,陆志,连之伟,等. 固体除湿剂超声波再生可行性实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 138-141. (Yao Ye, Lu Zhi, Lian Zhiwei, et al. Experimental study on the feasible application of ultrasonic in regeneration of solid dehumidifier[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(1): 138-141.)
- [10] 姚晔. 超声波技术在空调除湿剂强化再生中的应用研究进展[J]. 制冷学报, 2012, 12(6): 12-18. (Yao Ye. Research progress in the application of ultrasonic technology in the regeneration of desiccants for air-conditioning[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 12(6): 12-18.)
- [11] Ye Yao, Zhang Weijiang, Bei Xinghe. Regeneration of silica gel by power ultrasonic: models investigation[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(10): 3319-3326.
- [12] 刘晓茹,袁卫星,于志强. 内冷却紧凑式叉流式除湿器性能数值模拟与分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 110-115. (Liu Xiaoru, Yuan Weixing, Yu Zhiqiang. Numerical simulation and analysis of performance of an internally cooling compact dehumidifier[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005, 26(1): 110-115.)
- [13] 方玉堂,李大艳,张紫超,等. 金属离子掺杂硅胶吸附剂的性能与结构表征[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(2): 299-309. (Fang Yutang, Li Dayan, Zhang Zichao, et al. Characterization and performance of metallic doped silica gel adsorbent[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(2): 299-309.)
- [14] 方玉堂,易立群,刘艳山. 新型钛掺杂硅胶吸材料的制备及性能[J]. 华南理工大学学报, 2005, 33(10): 9-13. (Fang Yutang, Yi Liqun, Liu Yanshan. Preparation and performance of novel ti-doped silica gel adsorptive materials[J]. Journal of South China University of Technology, 2005, 33(10): 9-13.)
- [15] 郭敬花. 改性硅胶/分子筛复合物除湿性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

作者简介

吕宁,男,在读硕士,东南大学,18795856832, E-mail: 864703585@qq.com. 研究方向:固体吸附除湿。

About the author

Lü Ning, male, master candidate, Southeast University, + 86 18795856832, E-mail: 864703585@qq.com. Research fields: solid adsorption dehumidification.