

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.20190697

内热型超声雾化溶液再生系统最优内热量的研究

倪辉, 杨自力, 钟珂, 陶睿杨, 谷雨倩

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 基于质量守恒、能量守恒定律, 建立了内热型超声雾化溶液再生系统 (IH-UARS) 的再生性能预测模型并进行了充分的实验验证, 通过研究不同内热量下 IH-UARS 的再生性能及其变化规律, 寻求系统所需的最佳内热量并明确其可能的影响因素。结果表明: IH-UARS 系统存在最优的内热量范围, 使其再生系统性能最佳; 所需最优内热量随着再生溶液流量增大呈显著的对数增长, 但受空气流量的影响较弱; 在该研究中的标准工况下, IH-UARS 所需最优内热量约为 275~350 W。此外研究发现: 内热量的增长有益于促进初始浓度较高的溶液进一步浓缩再生, 如当 IH-UARS 中内热量增至 800 W 时, 其初始浓度为 36% 的溶液比 24% 的溶液浓度增量指标改善幅度高 37%。研究所得结果可对提高溶液再生性能及经济性提供积极参考。

关键词: 超声雾化; 溶液; 再生; 内热量; 最优; 建筑节能

中图分类号: TU 834.9

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2020) 03-1035-10

Study on optimal heating power for internally-heated ultrasonic atomization liquid desiccant regeneration system

NI Hui, YANG Zili, ZHONG Ke, TAO Ruiyang, GU Yuqian

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Based on the laws of mass conservation and energy conservation, the regeneration performance prediction model of IH-UARS is established and verified by experiments. Besides, experimental runs were conducted to verify the feasibility of the developed model. The results show that there exists an optimal range of internal heating, which makes the regeneration system present the most energy-efficient regeneration. The optimal heating power was found increasing logarithmically with the growth of the flow rate of the desiccant solution but is weakly affected by the flow rate of the scavenging airflow. Under the standard operating conditions of the present study, the optimal heat power for IH-UARS was around 275 to 350 W. Furthermore, it was also found that the internal heating seems to be more beneficial for regenerating the dilute desiccant solution with a higher initial mass fraction. For instance, by increasing the internal heating power to 800 W, the $DMFI_{c_i}$ of the desiccant solution, with inlet concentration of 36% was better than the desiccant solution with inlet concentration of 24%, with the improvement of $DMFI_{c_i}$ amplitude reached 37%. The study may help realize the optimal running of the internally-heated desiccant

收稿日期: 2019-06-20 修回日期: 2019-10-21

通信作者: 杨自力 (1989—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, ziliy@dhu.edu.cn

第一作者: 倪辉 (1995—), 男, 硕士研究生, 916775781@qq.com

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划 (19YF1401800); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2232018D3-36); 中国博士后基金项目 (2018M630385)

引用本文: 倪辉, 杨自力, 钟珂, 陶睿杨, 谷雨倩. 内热型超声雾化溶液再生系统最优内热量的研究[J]. 化工学报, 2020, 71(3): 1035–1044

Citation: NI Hui, YANG Zili, ZHONG Ke, TAO Ruiyang, GU Yuqian. Study on optimal heating power for internally-heated ultrasonic atomization liquid desiccant regeneration system[J]. CIESC Journal, 2020, 71(3): 1035–1044

regeneration system.

Key words: ultrasonic atomization; solution; regeneration; internally-heating power; optimal; building energy efficiency

引 言

溶液除湿系统由于其显著的建筑节能潜力已在暖通空调行业引起了广泛关注^[1-8]。在除湿系统中,吸湿后的溶液,浓度降低、水蒸气分压力大幅升高,导致其除湿能力被显著弱化。特别地,被稀释的除湿溶液可以利用太阳能、工业废热等进行有效再生^[9-13],以恢复溶液的除湿能力并实现循环使用。因此,如何在再生器中实现稀溶液的高效再生,对整个系统的性能都起到至关重要的作用。

鉴于此,研究者们提出并对各类再生器的再生性能展开了深入探索。如Liu等^[14-15]测试了Celdek型规整填料塔式再生器的再生性能,得到了该类型系统再生过程中热、质传递耦合关系。殷勇高等^[16-17]通过讨论分析填料材料、结构以及比表面积等因素,提出了一种新的Z型填料,为填料塔再生器性能的进一步优化提供借鉴。此外,钱俊飞等^[18]对比分析了平板降膜式溶液再生系统与填料式再生器,结果发现:再生器的再生性能与溶液的比表面积直接相关。鉴于再生过程中气、液接触面积对再生效率影响较大,连之伟等^[19-22]提出将超声雾化技术应用到溶液再生系统中,通过超声波的空化作用,可将溶液有效雾化为粒径约50 μm 的微小液滴,从而极大地提高稀溶液与空气间的接触面积。其研究表明:与填料式系统相比,超声雾化系统中的气液比增大了30~300倍^[23],系统再生效率得到显著提高。Yang等^[24]通过实验证实了应用超声雾化技术可将再生系统性能提高约23.4%,同时还可大幅降低再生温度,实现低品位能源的有效利用。

然而,在绝热再生过程中溶液温度迅速降低,严重地限制了系统的再生性能。一种可能的有效办法是在再生器内增设内热源,以抑制溶液或空气的迅速温降。Yin等^[25-29]通过实验对比分析了内热型与绝热型两种填料再生器的再生性能,并指出:通过再生器内部加热不仅显著提高系统的再生性能,还可有效提高热利用效率。尽管目前已有研究对内热型再生系统的性能进行了讨论,然而,现有研究大多致力于讨论不同运行参数(如空气、溶液的进口状态)对系统再生性能的影响规律。而内热

量的增加,虽可提高再生性能,但同时也消耗了热能。对于内热型再生器的再生过程中,究竟需要多少内热量以及是否存在最佳内热量范围等重要问题,目前仍不明确。

为此,本文以内热型超声雾化溶液再生系统(IH-UARS)为例,在质量守恒、能量守恒的基础上建立了其性能预测数学模型,并借助实验对所建模型进行验证;通过研究不同内热量下IH-UARS的再生性能及其变化规律,在考虑再生性能与经济性相平衡的基础上,寻求IH-UARS所需的最佳内热量。研究所得结果可为提高溶液再生性能及系统经济性提供积极参考。

1 IH-UARS再生器内热质传递过程与模型建立

1.1 再生器内热质传递过程

图1给出了IH-UARS再生器的结构示意及其内部的热、质传递过程。待再生的稀溶液被加热至设定温度(见表1)并存储在进口溶液罐中,当开始再生时,温热的稀溶液经溶液泵送至超声换能器,在超声空化作用^[19-22]下可被有效雾化为粒径约50 μm 的微小液滴,并由顶部喷入再生器内。由于雾化后的液滴较小、具有较好的跟随性,加之再生器内气流速度较大,故雾化液滴与再生气流实际为顺流。

在再生器中,经预先加热的稀溶液液滴具有较高的水蒸气分压力,当其与在再生气流(常温状态)接触时,在水蒸气分压差的作用下将发生较强的

表1 IH-UARS验证实验运行工况

Table 1 Operation conditions for experimental verification study of IH-UARS

参数	额定工况	变化范围
进口溶液流量 $G_{i,s}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	45	13.5~69.5
进口溶液温度 $t_{i,s}/^{\circ}\text{C}$	60	35~65
进口溶液浓度 $n_i/\%$	26	24~32
进口空气流量 $G_{a,i}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	92.5	68~115.5
进口空气温度 $t_{a,i}/^{\circ}\text{C}$	32	26~36
进口空气含湿量 $d_i/(\text{g} \cdot (\text{kg} \text{ 干空气})^{-1})$	18	10~22
液气比 $G_{i,s}/G_{a,i}$	0.49	0.15~0.75

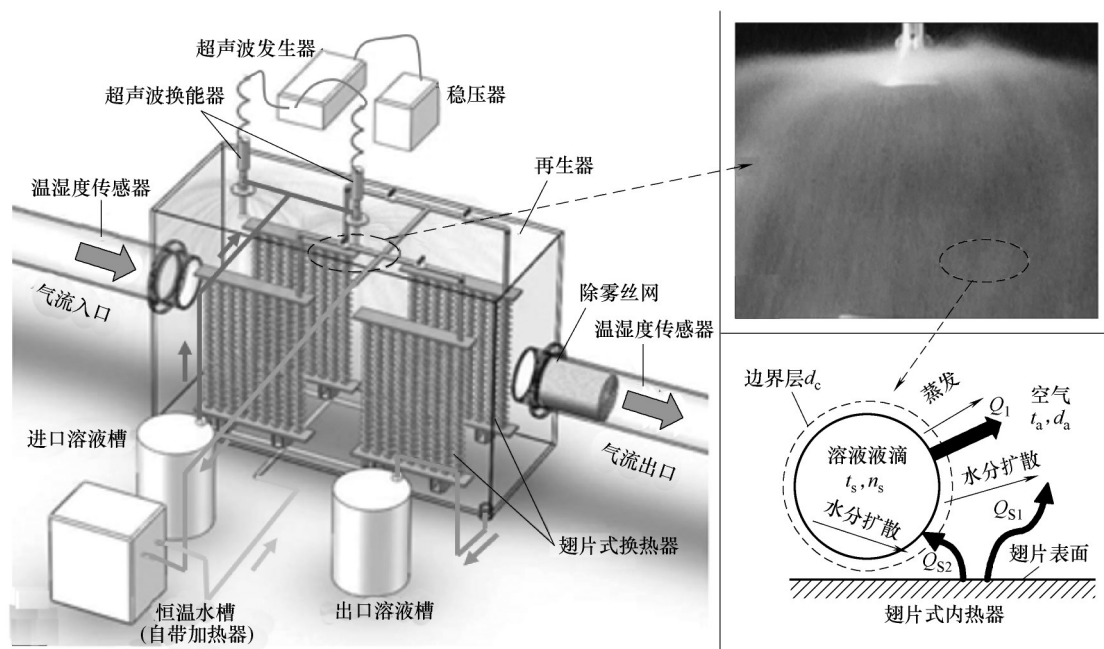


图1 内热式超声雾化再生器结构示意图及内部热质传递过程

Fig.1 Schematic of IH-UARS regenerator and regeneration principle

热、质传递过程,水分由稀溶液传递至再生空气中,从而实现溶液再生;同时,由于气流温度相对较低,与再生热溶液、内热器等均有较大温差,因此,亦会产生由溶液向空气的显热传递 Q_1 ,以及内热器向再生气流的显热传递 Q_{S1} 。此外,在水分汽化吸收的相变潜热以及溶液空气之间的显热交换作用下,再生过程中溶液温度迅速降低,当其温度低于再生器内热器表面温度时,内热器将通过翅片向落在其上的溶液液滴传递热量 Q_{S2} ,从而有效抑制液滴降温,使溶液维持较高的温度及表面水蒸气分压力。

1.2 模型建立

为更加简便地描述上述过程,本文在模型建立时采用如下假设:

(1) 因再生器外部覆有 10 mm 厚的隔热棉,保温性能良好,故忽略再生器与外界的热交换;

(2) 溶液雾化充分,所形成的微小液滴在再生器内部分布均匀;

(3) 由于液滴的跟随性很好,故可认为在再生器出口附近相同位置处,溶液和空气的温度与表面水蒸气分压力相平衡,即 $t_{a,0} = t_{s,0}$ 。

基于上述假设,IH-UARS 再生过程时的质量与能量平衡方程可分别表达为

$$G_a d\omega_a + dG_s = 0 \quad (1)$$

$$G_a dh_a + d(G_s h_s) = Q_s \quad (2)$$

温热溶液经雾化落入再生器后,由于与常温空

气存在温差而产生从溶液至空气的显热交换;而当液滴随气流被捕获或落至内热器上时,换热器翅片则向空气及液滴产生热量传递,从而有效抑制再生器内液滴再生过程中的降温。考虑到再生器具有良好的保温性能,与外界绝热,因此再生器内的显热传递方程可表达为

$$C_{p,s} d(G_s t_s) + C_{p,a} G_a dt_a - Q_s = 0 \quad (3)$$

由于雾化液滴非常微小,气液间比表面积很大,再生过程中热质传递过程较充分,同一位置处溶液表面和空气中水蒸气分压力达到平衡(见前文假设条件(3)),可表示为

$$P_1(n_1, t_1) = P_a = \frac{M_a \omega_a P_{AT}}{M_a \omega_a + M_{a,q}} \quad (4)$$

空气和溶液的焓值(h_a, h_l)可分别用式(5)、式(6)表示

$$h_a = 1.01t_a + \omega_a(2501 + 1.85t_a) \quad (5)$$

$$h_s = f(t_s, n_s) \quad (6)$$

式(6)中溶液焓值的详细计算方法详见文献[30]。

联立上述控制方程以及相应的辅助方程,即可在已知溶液和空气入口参数时,通过改变能量平衡及热平衡方程中的显热量 Q_s 大小来调节内热量,相应地求出 IH-UARS 系统的出口参数及再生性能。

1.3 性能评价指标

为了评价系统的再生性能,本文采用了再生速

率(regeneration rate, RR)、溶液浓度增量(desiccant mass fraction increase, $DMFI_{G_i}$)和单位内热量下再生速率(specific regeneration rate, SRR)等三个指标,具体如下。

1.3.1 再生速率 为了评估空气流量单位时间内从溶液中除去多少水分,本文中使用了再生速率(RR)作为评价指标^[31]。其定义式为

$$RR = G_a (\omega_{a,o} - \omega_{a,i}) \quad (7)$$

可见,若RR值增大,则代表单位时间内溶液的水分去除量增大,溶液的再生效率提高。

1.3.2 溶液浓度增量 再生过程的目的是将除湿过后稀释的溶液浓缩,再次用于除湿系统。因此,待再生的稀溶液量(G_i , kg)在单位时间内(s^{-1})经过再生浓缩后,其浓度增量($DMFI_{G_i}$)也是本文中的重要性能指标之一。其定义为

$$DMFI_{G_i} = n_o - n_i \quad (8)$$

$DMFI_{G_i}$ 值越大,单位时间内再生溶液 G_i 的提升越明显,系统再生性能越好。

1.3.3 单位内热量下再生速率 在内热型溶液再生系统中,尽管内热量越大,系统再生性能越好,但持续增大内热量,虽可进一步提高再生性能,亦会引起为提供内热而产生的热能过度消耗。因此,考虑到系统再生性能的提高与所消耗热能之间的平衡,本文提出单位内热量下再生速率(SRR)作为评价内热型系统运行过程内热能耗所产生的成本效益(cost-efficiency)的指标。其定义为

$$SRR = \frac{RR}{Q_s} \quad (9)$$

2 模型的实验验证

为验证所构建模型的可靠性,本文随后搭建了IH-UARS实验台并展开了实验,以对模型进行验证。所构建的IH-UARS实验系统可介绍如下。

2.1 实验方法

图2为IH-UARS系统的实验示意图,系统主要由5部分组成:空气预处理系统、溶液系统、超声雾化系统、内热系统以及再生器。空气预处理系统包含风机段、冷却段、加热段和加湿段,通过一系列热湿处理过程,将空气处理到实验工况所需的温度、湿度状态后送入再生器;溶液系统配置有额定流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的蠕动泵,同时搭配加热器以将配制好的稀溶液处理至设定温度,通过蠕动泵将温热溶液泵至超声雾化系统,经超声雾化器将溶液雾化为粒径约 $50 \mu\text{m}$ 的小液滴后,由顶部落入再生器中并与空气产生热湿交换;再生器尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,以防腐性良好的亚克力(PMMA)为材质,其外部覆有 10 mm 厚的保温棉,可有效阻止与外界环境的热交换;再生器内平均分布有4组翅片管式换热器(长 $\times$ 高 $\times$ 宽: $650 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$;翅片高度 10 mm),换热器内通有由外置恒温水槽提供的预设温度的热水作为内热源,通过换热器与溶液、空气间的显热交换方式向再生器提供内热。

系统安装有以下测量仪器对运行参数进行实

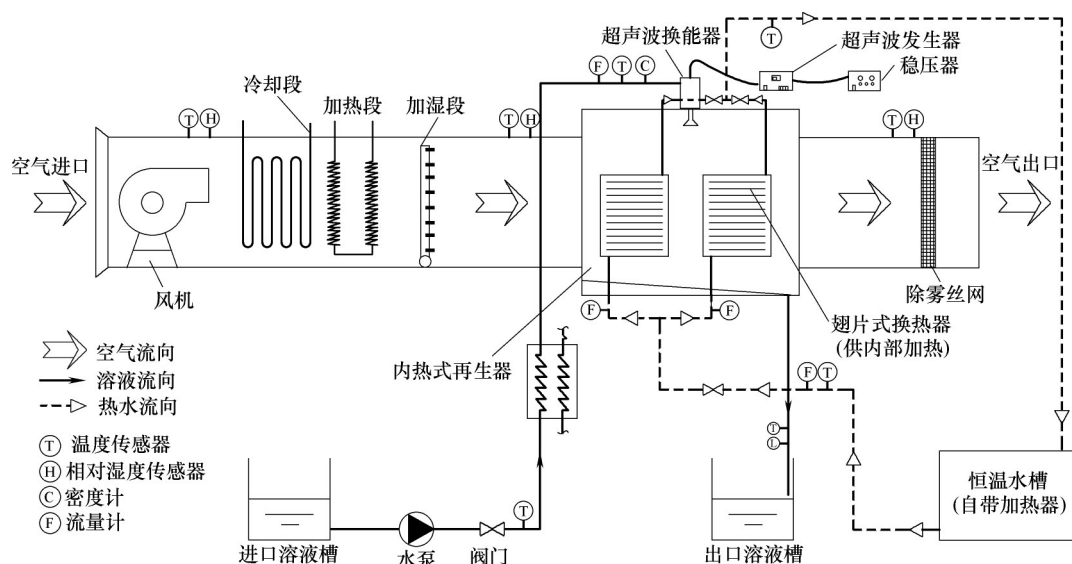


图2 内热式超声雾化溶液再生系统示意图

Fig.2 Schematic of IH-UARS

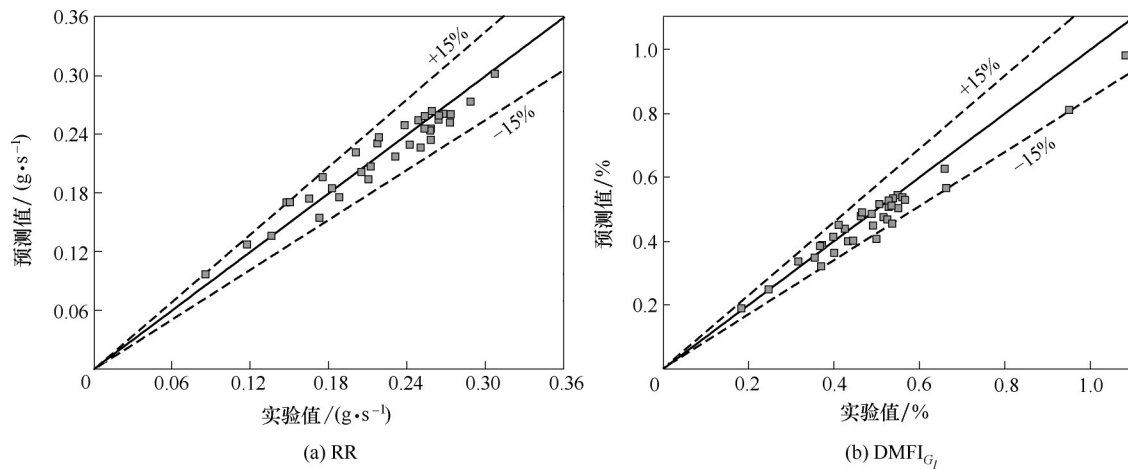


图3 预测模型的实验验证结果

Fig.3 Experimental validation of prediction model

时监测:空气温湿度采用ROTRONIC HC2A-S温湿度传感器测量(测量精度:含湿量误差 $\pm 0.8\%$;温度误差 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,采样频率5秒/次),溶液温度以及内热水温采用PT 100(RTD)温度传感器测量(精度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$),加热热水流量采用高精度电子流量计测量(测量精度: $0.1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$),溶液流量及空气流量通过调节蠕动泵的电压和管道风机的风阀开度实现。所需的其他测量设备还包括电子天平(测量精度: 0.001 g)、体积量筒(测量精度: 0.1 ml)和溶液比重计(测量精度: $0.001\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)等。

2.2 模型验证结果

验证实验采用LiCl为工质,在表1所示的各系统工况下,得到IH-UARS的实验再生性能,并与模型的预测结果进行对比,对比结果如图3所示。

由图3可见:RR和 DMFI_{G_i} 的模型预测结果和实验结果的平均偏差小于3.9%,最大偏差在15%以内,考虑到模型中采用的再生器外部保温绝热等假设因素与实际系统略有区别,可认为本文预测结果与实验结果的偏差是可接受的,所得结果吻合度较高。这表明,通过本文所构建的模型预测IH-UARS系统的再生性能具有较高的准确度和可靠性。

3 不同条件下内热量对IH-UARS系统再生性能的影响

内热是再生系统中溶液维持合理再生温度的关键,但过多的热量输入难免引起能耗的不必要增加,因此内热量的多少直接影响再生器的综合性能及运行经济性。本文通过所构建的IH-UARS数学模型,分析内热量与系统再生性能之间的关系,可

得到研究结果的连续变化规律,寻求系统所需最优内热量。

3.1 不同空气流量下内热量对系统再生性能的影响

内部加热通过影响再生器内部溶液温度,进而影响溶液表面水蒸气分压力,从而对溶液的再生效果产生重要影响。本文将通过所构建的IH-UARS模型,明确不同内热量对IH-UARS再生性能的影响关系,分析中系统的运行工况如表2所示,在额定工况下系统的再生功率(再生前后空气焓差)约为800 W。

表2 IH-UARS模型运行工况

Table 2 Operation conditions for simulation of IH-UARS

参数	额定工况	变化范围
进口溶液温度 $t_{i,s}/^\circ\text{C}$	60	35~65
进口溶液浓度 $\omega/\%$	26	22~36
进口空气流量 $G_{a,i}/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	90	11.25~180
进口空气温度 $t_{a,i}/^\circ\text{C}$	32	22~40
进口空气含湿量 $d_i/(\text{g}\cdot(\text{kg}\text{干空气})^{-1})$	18	10~28
液气比 $G_{i,s}/G_{a,i}$	0.5	0.25~4

图4显示了在不同的空气流量下,内热量对再生性能RR和 DMFI_{G_i} 的影响。由图4可知,溶液的RR和 DMFI_{G_i} 随着内热量的增大而显著提升。在本文额定工况下,当内热量从50 W增加到1000 W时,系统的RR平均从 $0.136\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至约 $0.556\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, DMFI_{G_i} 平均从0.286%提高至1.21%,再生效果提升了约4倍。这是由于大量内热量的输入,使系统内溶液温度显著升高,液滴表面水蒸气分压力增大,溶液再生过程中传质动力提升,从而使得系统再生

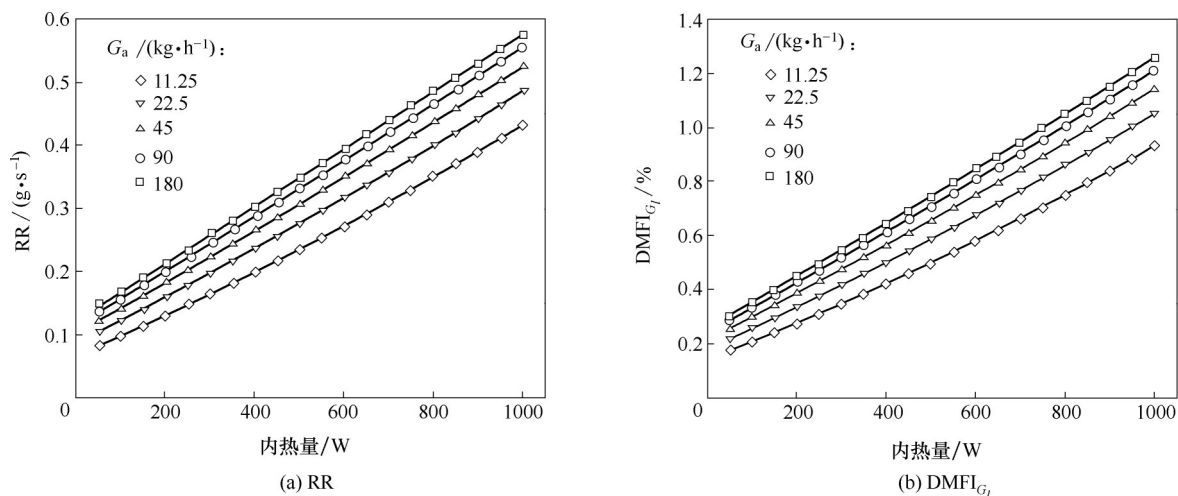


图4 不同空气流量下内热量与再生性能的关系

Fig.4 Effects of internal-heating power on regeneration performance at different air flow rates

性能提升。

然而,尽管RR值越高,系统再生性能越好,但考虑到热源的有效利用率,过多的热量加入,会造成过大的能量消耗。因此本文通过对比分析单位内热量下再生速率(SRR),以综合评价再生器的内热量的使用效率与经济性。

SRR随 Q_s 的变化规律如图5所示。由图5(a)及式(9)可知:SRR将随着内热量 Q_s 的增加逐渐减小并趋于稳定,即单位内热量下系统的再生性能增幅将减缓并保持稳定,其原因是由于SRR中综合考量了系统的整体再生性能(绝热时的再生量和内热后系统所增加的再生量)。综合图4(a)和图5(a),内热型再生系统中RR随着内热量的增加显著提升,单位内热量下的RR随之减小,故存在一个最佳的内热量,使再生系统的再生性能与内热消耗相平衡,从

而实现最经济有效的内热式系统再生性能。通过分析内热量和SRR之间的关系,随着内热量的增加,在SRR与内热量之间的变化率为-1之后,SRR的变化趋势渐趋平缓,故可认为在该点处内热量的综合利用率最高。图5(b)显示了不同空气质量流量时,SRR变化率与内热量的关系。由图可见,在本文所设工况中,最优内热量范围稳定在275~350 W之间,并且空气侧入口条件的变化对系统所需的最优内热量的范围影响较为有限。此时系统的再生性能(RR)为 $0.266 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,比未加入内热的再生系统提高了近95%。

3.2 不同溶液流量下内热量对再生性能的影响

溶液再生的目的是将稀溶液浓缩,在除湿系统循环,当系统溶液流量变化时,系统对应的再生负荷也随之变化。为此,本文研究了不同溶液流量

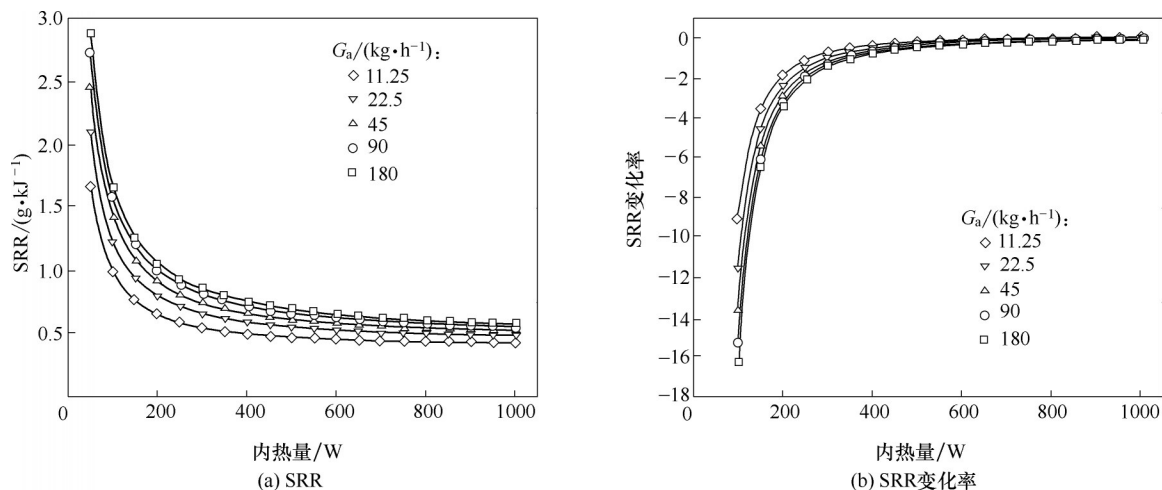


图5 不同空气流量下SRR及其变化率与内热量的关系

Fig.5 Relationships between SRR and slope of SRR and internal heat at different air flow rates

(即再生负荷)下,内热量对再生性能的影响,如图6所示。由图可见,随着内热量的增加,IH-UARS系统的RR显著提高,但是 $DMFI_{G_i}$ 增幅却明显不同。当再生较大流量的稀溶液时,如 $180 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,增大内热量对 $DMFI_{G_i}$ 的提升幅度很有限,在本文中当内热量从 50 W 增大至 1000 W 时,系统的 $DMFI_{G_i}$ 仅增加了 0.18% 。而当对流量较小时,如 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,同样的内热量下(50 W 增加到 1000 W),系统的 $DMFI_{G_i}$ 增加了 2.02% 。

这是由于较大的溶液流量可以有效地缓解再生过程中溶液温度迅速降低,从而保证溶液维持较高的表面蒸气分压力,因此在相同的内热量下,RR随着溶液流量的增加而增大,如图6(a)所示。然而由于溶液流量增加,虽然空气从溶液中带走了更多的水分,但单位质量溶液所失去的水分却有所减

少,因此溶液 $DMFI_{G_i}$ 提升幅度较有限。

图7展示了再生不同流量的溶液时,内热量与SRR之间的关系。由图7可见,随着内热量的增大,单位内热量下系统再生性能(SRR)迅速下降,当内热量约为 $200 \sim 400 \text{ W}$ 时,SRR变化趋于稳定。然而,在不同溶液流量下由于再生器整体再生负荷变化,所需最优内热量范围变化较大。为精确描述不同系统再生负荷(流量)下所需最优内热量,如前所述,本文以SRR变化率等于 -1 作为内热量对再生性能促进效率的判据,得到系统最优内热量及其对应RR如图8所示。由图8可见,随着入口溶液流量增大,系统所需最优内热量也相应持续增加。在本文中,当再生溶液流量从 $20 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $300 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,所对应的最优内热量由 235 W 增加至 700 W ,但增幅逐渐减缓。

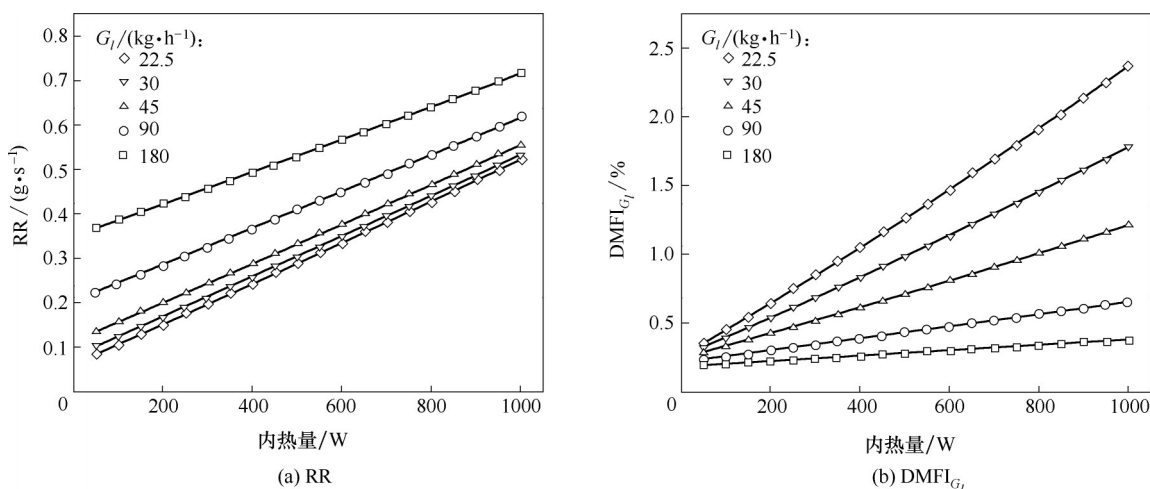


图6 不同溶液流量下内热量与再生性能的关系

Fig.6 Effects of internal-heating power on regeneration performance at different desiccant flow rates

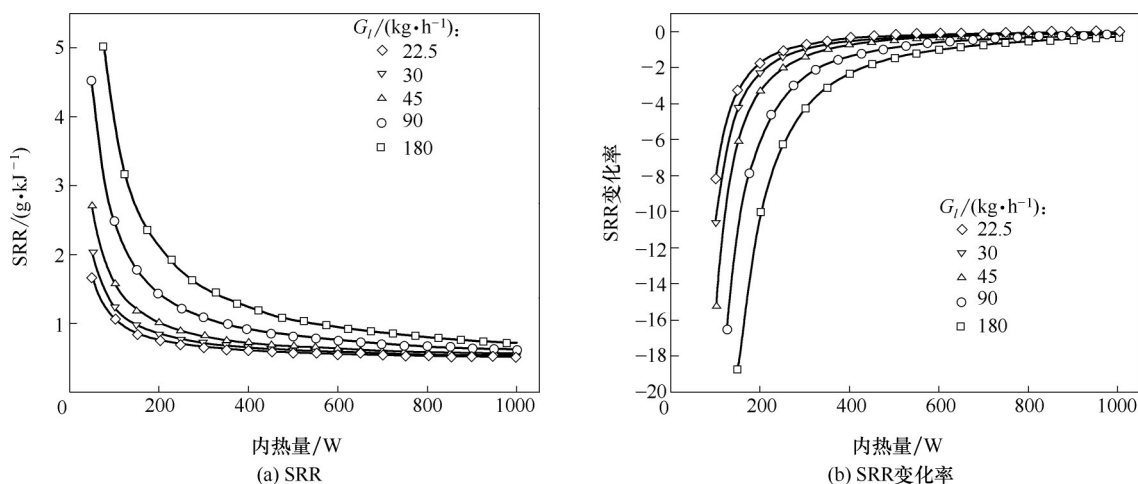


图7 不同溶液流量下内热量与SRR及其变化率的关系

Fig.7 Relationships between SRR and slope of SRR and internal heat at different desiccant flow rates

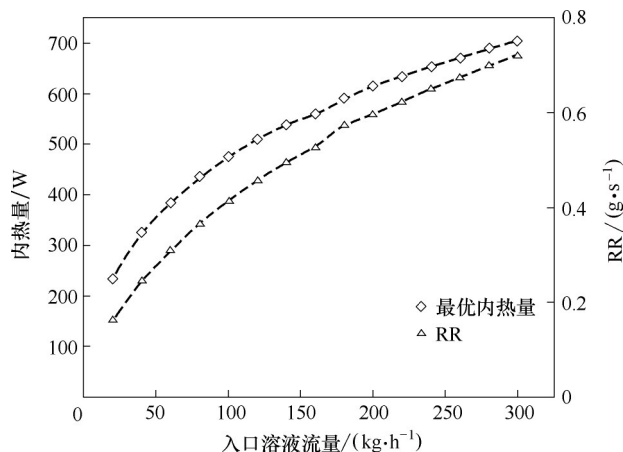


图8 不同溶液流量下IH-UARS的最优内热量及其再生性能RR

Fig.8 Potential optimal heating power of IH-UARS and its corresponding RR at different desiccant flow rates

3.3 不同初始浓度下内热量对再生性能的影响

在溶液再生系统中,再生的驱动力是溶液表面与空气的水蒸气分压力差,溶液的初始浓度关系到溶液表面的水蒸气分压力,直接影响再生热质交换过程。图9为不同溶液初始浓度下内热量对系统再生性能的影响。由图9可见,随着内热量增大,系统的再生性能显著增加,然而在相同的内热量下,浓度越高的溶液,再生效果越不显著。这是由于溶液浓度增大时,其表面水蒸气分压力越小,此时传质动力逐渐减小。

同时,由图9可知,内热量对不同浓度的RR作用效果大致相同,但是对 $DMFI_{G_i}$ 的影响趋势略有变化,具体表现为:增大内热量对初始浓度较高的再生溶液 $DMFI_{G_i}$ 的提升作用似乎更显著。例如,在本

文条件下,当内热量由100 W增加至800 W时,对于初始浓度为36%的稀溶液,其 $DMFI_{G_i}$ 由0.314%提升至1.178%,而初始浓度为24%的溶液其 $DMFI_{G_i}$ 仅由0.313%提升至0.944%,前者 $DMFI_{G_i}$ 提升幅度比后者增大近37%。这可能是由于在相同的工况条件下,等额的内热量增加,对不同溶液中水分去除的量基本相同,但是由于高浓度的溶液中,溶质的质量分数较大,在相同的再生速率时,其质量分数增加量更大。因此,增大内热量对于进口浓度高的溶液再生效果提升更加显著。

为进一步解释该现象,本文对相关过程进行了数学推导求证如下。结合式(7)、式(8),可得 $DMFI_{G_i}$ 与 n_i 之间的关系

$$DMFI_{G_i} = n_o - n_i = \frac{1000n_i G_l}{1000G_l - 3600RR} - n_i \quad (10)$$

而同时,在不同加热量下,RR随着进口溶液浓度的升高呈近似线性减小,如图10所示。

以内热量为350 W为例,其RR和入口溶液浓度间的关系可拟合如式(11)所示

$$RR = -0.0052n_i + 0.4011 \quad (R^2 = 0.9732) \quad (11)$$

此时, $G_l = 45 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,将式(11)代入式(10)中可得

$$DMFI_{G_i} = \frac{-18.72n_i^2 + 1444n_i}{1000G_l + 18.72n_i - 1444} = \frac{-18.72n_i^2 + 1444n_i}{18.72n_i + 4.4 \times 10^4} \quad (12)$$

对式(12)求 n_i 的导数可得

$$\frac{dDMFI_{G_i}}{dn_i} = \frac{-350.4n_i^2 - 1.6 \times 10^6 n_i + 6.3 \times 10^7}{(18.72n_i + 4.4 \times 10^4)^2} \quad (13)$$

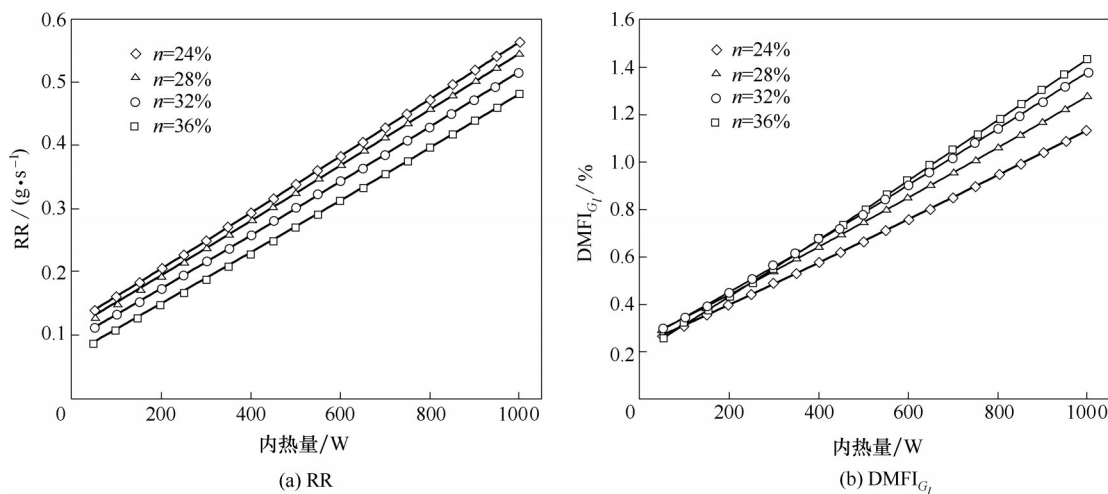


图9 不同溶液浓度下再生性能与内热量的关系

Fig.9 Effects of internal-heating power on regeneration performance at different desiccant inlet mass fractions

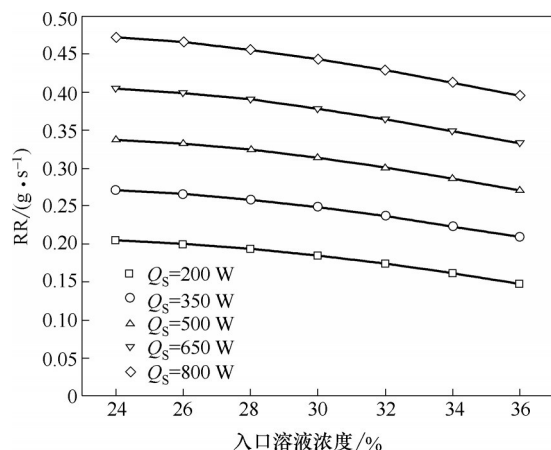


图10 不同加热量下RR与入口溶液浓度之间的关系

Fig.10 Relationships between RR and desiccant inlet mass fractions at different internal-heating powers

由式(13)可知,在本文工况范围内,DMFI_{ci}随 n_i 的增加而逐渐增大,即增大内热量对初始浓度较高的再生溶液DMFI_{ci}的提升作用更加显著。

4 结 论

本文基于质量守恒、能量守恒定律,建立了内热型超声雾化溶液再生系统(IH-UARS)的再生性能预测模型,首先通过实验对该模型的可靠性进行了验证,随后基于该预测模型,探讨了不同系统条件下再生性能与内热量之间的变化关系,研究所得结论可总结如下。

(1)虽然IH-UARS系统中溶液再生性能随着系统的内热量增加而提高,但单位内热量下的再生速率随之减小,存在一个最佳内热量范围,使再生系统具有最经济有效的性能提升。

(2)在进口溶液性质一定的条件下,空气质量流量对溶液再生系统所需最优内热量范围的影响有限。

(3)内热型溶液再生系统所需的最优内热量随再生溶液流量的增大而显著增加,但增幅逐渐减缓。

(4)内热型溶液再生系统中,增加内热量对初始浓度较高的溶液DMFI_{ci}的提升作用比对初始浓度较低的溶液更为显著。

符 号 说 明

c_p —— 比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

G —— 质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

h —— 焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

M —— 摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

n —— 溶液浓度, %

P_{AT} —— 大气压力, Pa

Q_s —— IH-UARS的内热量, W

t —— 温度, $^\circ\text{C}$

ω —— 含湿量, $\text{kg} \cdot (\text{kg 干空气})^{-1}$

下角标

a —— 空气

i —— 进口

o —— 出口

s —— 溶液

参考文献

- [1] 刘晓华, 张涛, 江亿. 采用吸湿剂处理湿空气的流程优化分析[J]. 暖通空调, 2011, 41(3): 77-87.
Liu X H, Zhang T, Jiang Y. Optimization of heat and mass transfer processes between desiccant and moist air[J]. Journal of HV&AC, 2011, 41(3): 77-87.
- [2] Ahmed H A, Ge G M, Carey J S. Performance analysis of a membrane liquid desiccant air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2013, 62: 559-569.
- [3] 刘晓华, 李震, 张涛. 溶液除湿[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 23-89.
Liu X H, Li Z, Zhang T. Liquid Desiccant Dehumidification[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 23-89.
- [4] 殷勇高, 潘雄伟, 陈瑶, 等. 顺流型溶液与空气热质交换性能[J]. 化工学报, 2012, 63: 26-31.
Yin Y G, Pan X W, Chen Y, et al. Heat and mass transfer performance between liquid desiccant and air with parallel flow[J]. CIESC Journal, 2012, 63: 26-31.
- [5] 彭冬根, 程小松, 李霜玲, 等. 一种新型溶液除湿装置数学模型及性能分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 474-479.
Peng D G, Cheng X S, Li S L, et al. Mathematical model and performance analysis of a new liquid desiccant dehumidifier[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 474-479.
- [6] Zhang T, Liu X H, Jiang J J, et al. Experimental analysis of an internally-cooled liquid desiccant dehumidifier[J]. Building and Environment, 2013, 63: 1-10.
- [7] Lun W, Li K N, Liu B, et al. Experimental analysis of a novel internally-cooled dehumidifier with self-cooled liquid desiccant[J]. Building and Environment, 2018, 141: 117-126.
- [8] 常晓敏, 刘晓华, 江亿. 内冷型溶液除湿器的热质交换分析及流型比较研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 170-176.
Chang X M, Liu X H, Jiang Y. Research on the heat and mass transfer performance and flow-pattern comparison of the internally-cooled liquid desiccant dehumidifiers[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(2): 170-176.
- [9] 张凡, 殷勇高. 一种低位热驱动除湿冷却空调系统的热性能分析[J]. 化工学报, 2016, 67: 275-283.
Zhang F, Yin Y G. Thermal performance analysis of liquid desiccant evaporative cooling air-conditioning system driven by low-grade heat[J]. CIESC Journal, 2016, 67: 275-283.
- [10] 高文忠, 柳建华, 章学来. 太阳能叉流溶液除湿空调除湿性能

- 实验分析[J]. 太阳能学报, 2012, **33**(9): 1547-1552.
- Gao W Z, Liu J H, Zhang X L. Experimental analysis of dehumidifier in the solar-driven cross-flow liquid desiccant air conditioning[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, **33**(9): 1547-1552.
- [11] 彭冬根, 罗丹婷, 程小松. 热回收型太阳能分级溶液集热/再生系统模型及环境适用性分析[J]. 化工学报, 2017, **68**(8): 3242-3249.
- Peng D G, Luo D T, Cheng X S. Modeling and environmental applicability of solar solution grading collector/regenerator system with heat recovery[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(8): 3242-3249.
- [12] 程清, 张小松. 一种双级光电光热电渗析再生系统性能研究[J]. 太阳能学报, 2015, **36**(8): 1890-1894.
- Cheng Q, Zhang X S. Performance analysis of double stage PV/T electro-dialysis regeneration system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, **36**(8): 1890-1894.
- [13] 殷勇高, 潘雄伟, 陈瑶, 等. 热空气用于溶液再生实验研究与能效分析[J]. 工程热物理学报, 2013, **34**(4): 596-600.
- Yin Y G, Pan X W, Chen Y, et al. Experimental study and energy efficiency analysis of liquid desiccant regeneration using hot air[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, **34**(4): 596-600.
- [14] Liu X H, Jiang Y, Chang X M, 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.
- [15] 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.
- [16] 戴智超. 不同填料溶液除湿/再生器及热质传递性能研究比较[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- Dai Z C. Study on different type of fillers liquid dehumidifier/regenerator and their comparison about heat and mass transfer performance[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [17] 殷勇高, 郑宝军, 高龙飞, 等. 一种新的Z型填料及其溶液再生性能[J]. 化工学报, 2014, **65**: 280-285.
- Yin Y G, Zheng B J, Gao L F, et al. A novel Z-type packing used for desiccant regenerator[J]. CIESC Journal, 2014, **65**: 280-285.
- [18] 钱俊飞, 殷勇高, 潘雄伟, 等. 平板降膜溶液除湿再生过程实验研究及模型验证[J]. 化工学报, 2014, **65**(6): 2070-2077.
- Qian J F, Yin Y G, Pan X W, et al. Experimental investigation and model validation for liquid desiccant dehumidification and regeneration in falling-film plate[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(6): 2070-2077.
- [19] 姚晔, 连之伟, 刘世清. 超声波强化再生除湿的除湿空调装置: 200510110441.8[P]. 2005-11-17.
- Yao Y, Lian Z W, Liu S Q. Ultrasound-atomizing regeneration/dehumidification for liquid desiccant air conditioning system: 200510110441.8[P]. 2005-11-17.
- [20] Wang L, Lian Z W. Improvement of conventional liquid desiccant dehumidification technology[J]. Journal of Southeast University, 2010, **26**(2): 212-216.
- [21] Yao Y, Zhang W J, He B X. Investigation on the kinetic models for the regeneration of silica gel by hot air combined with power ultrasonic[J]. Energy Conversion and Management, 2011, **52**(11): 3319-3326.
- [22] Yao Y. Research and application of ultrasound in HVAC field: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **58**: 52-68.
- [23] 王俐, 连之伟, 刘蔚巍. 结合超声雾化技术的液体除湿系统分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(1): 240-246.
- Wang L, Lian Z W, Liu W W. Analysis of liquid-desiccant dehumidifying system combined with ultrasound atomization technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(1): 240-246.
- [24] Yang Z L, Zhang K S, Hwang Y, et al. Performance investigation on the ultrasonic atomization liquid desiccant regeneration system[J]. Applied Energy, 2016, **171**: 12-25.
- [25] 殷勇高, 李士强, 张小松. 绝热型和内热型再生过程热性能对比[J]. 化工学报, 2010, **61**: 157-163.
- Yin Y G, Li S Q, Zhang X S. Comparative study on dynamic performance of internally heated and adiabatic regenerators [J]. CIESC Journal, 2010, **61**: 157-163.
- [26] Yin Y G, Zhang X S. Comparative study on internally heated and adiabatic regenerators in liquid desiccant air conditioning system[J]. Building and Environment, 2010, **45**(8): 1799-1807.
- [27] Yin Y G, Zhang X S, Peng D G, 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**: 1664-1671.
- [28] Liu J, Zhang T, Liu X H, et al. Experimental analysis of an internally-cooled/heated liquid desiccant dehumidifier/regenerator made of thermally conductive plastic[J]. Energy and Buildings, 2015, **99**: 75-86.
- [29] 王琴, 吴薇, 刘松松. 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**: 186-194.
- Wang Q, Wu W, Liu S S. Performance of regeneration processes of internally heated and adiabatic regenerators[J]. CIESC Journal, 2016, **67**: 186-194.
- [30] 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.
- [31] Wen T, Lu L, Yang H, et al. Investigation on the regeneration and corrosion characteristics of an anodized aluminum plate regenerator[J]. Energies, 2018, **11**(5): 1209-1215.