

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170033

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

彭冬根, 罗丹婷, 程小松

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 为了在极端气候条件下提高高浓度溶液的集热再生效率, 提出一种带同级热回收和级间热回收的太阳能分级溶液集热再生方法。基于填料储液槽的热质平衡, 建立预除湿溶液参数可动态调整的太阳能分级集热再生系统数学模型。数值模拟发现在不同室外环境条件下分级再生和单级再生效率对比存在临界点, 室外环境温度和相对湿度高于临界点, 太阳辐射强度低于临界点, 分级再生优于单级再生。文章最后综合给出分级集热再生的环境和溶液浓度适用范围, 发现在低太阳辐射、高温高湿的气候环境下, 其对高浓度溶液再生越有利。

关键词: 分级; 再生; 临界点; 模拟; 效率

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 08—3242—08

Modeling and environmental applicability of solar solution grading collector/regenerator system with heat recovery

PENG Donggen, LUO Danting, CHENG Xiaosong

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract: To improve the collection and regeneration efficiency of strong solution under extreme conditions, this paper reveals a solar grading collector/regenerator method with inter-grade and same-grade heat exchangers. Based on heat and mass balance in the packed reservoir, a model of solar grading collector/regenerator system in which pre-dehumidification solution parameters could be adjusted is established. Numerical simulation shows that there are critical points in regeneration efficiency of grading regeneration under variety of outdoor situations compared with single-stage regeneration. Grading regeneration is preferable to single-stage regeneration while outdoor environmental temperature and relative humidity are above the critical points as well as sun radiation intensity is lower than the critical point. Finally, the applying ranges of grading collector/regenerator system on environmental parameters and solution concentration are comprehensively provided in this paper and it is found that the situations of lower radiation from sun and higher temperature and relatively humidity are beneficial to regenerate solution of high concentration by grading collector/regenerator system.

Keywords: grading; regeneration; critical point; simulation; efficiency

引言

太阳能溶液再生装置^[1-2]是太阳能溶液除湿蒸发冷却空调系统中最重要部件, 它在本质上也是一

种内热型的溶液再生器^[3-5], 但是可利用太阳能等可再生能源。国内外学者将太阳能集热和溶液再生相结合构建太阳能溶液集热/再生装置^[6]。其中利用室外空气进行太阳能集热/再生的装置分为自然和强

2017-01-09 收到初稿, 2017-05-05 收到修改稿。

联系人及第一作者: 彭冬根 (1975—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51266010); 江西省科技支撑计划项目 (20123BBG70195)。

Received date: 2017-01-09.

Corresponding author: PENG Donggen, ncu_hvac2013@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51266010).

迫对流两种, 最早是采用自然对流方式对溶液进行集热/再生, 并且是直接利用斜屋顶对溶液进行集热/再生^[7]。自然对流太阳能溶液集热/再生装置依据其与室外环境的接触程度分为敞开式^[8]、部分敞开式^[9-11]及带玻璃盖板封闭式^[12-13]3种。由于自然对流太阳能集热再生器再生效率较低, 因此国内外学者纷纷构建强迫对流太阳能溶液集热/再生器, Yang等^[14-18]在20世纪90年代至21世纪初对强迫对流太阳能溶液集热/再生装置进行大量理论和实验研究。Alizadeh等^[19-20]对顺流太阳能溶液集热再生过程进行理论和实验研究, 得到溶液再生效率最大可达0.8~0.9左右。Kabeel^[21]实验对比了自然和强迫对流集热再生的性能。Gandhidasan^[22-23]就构建强迫对流集热/再生数学模型, 在假设溶液温度、浓度及水蒸气压力为进出口算术平均值时推导出一种求解溶液再生过程水分蒸发率的简单方法。文献[24]从理论上推导出强迫对流溶液集热/再生的水蒸发率沿集热板长度方向的控制方程, 但是他们在进行理论建模时忽略玻璃盖板对太阳光的部分吸收作用。Li等^[25]在对太阳能溶液集热/再生过程进行理论建模时考虑了溶液对玻璃盖板辐射换热影响。Peng等^[26-27]构建了一种(单级)空气预处理太阳能集热再生装置, 并进行相关理论研究, 但是该装置采用和再生溶液等浓度的溶液对再生用空气进行预除湿, 不利于系统性能改善, Peng后来在文献[28]中提出一种以蒸发率

品质系数为模型基础的分级集热再生模型, 该模型采用固定一级集热/再生溶液浓度方法进行系统性能分析, 并不完全符合实际再生过程。因此, 本研究基于填料槽溶液质量和能量守恒, 提出一种除湿溶液参数可动态调整的太阳能分级集热再生系统数学模型, 并对系统的气候适用性进行分析。

1 热回收型太阳能分级溶液集热再生原理

热回收型太阳能分级溶液集热再生系统(图1), 它可实现5种再生模式(A模式: 不带热回收的单级集热再生; B模式: 不带热回收的分级再生; C模式: 带热回收的单级再生; D模式: 带同级热回收的分级再生; E模式: 带同级+级间热回收的分级再生)。每种模式包括空气循环回路与溶液循环回路。

A模式中, 一级和二级集热/再生器处于并联运行。再生用空气直接采用室外空气, 再生溶液不经热回收器预热直接进入一级和二级集热/再生器。

B模式中, 一级集热/再生是为二级集热/再生服务, 提供干燥空气。二级集热/再生用空气来自空气预处理器, 一级集热/再生用空气来自室外; 二级再生溶液是目的溶液不经热回收预热进入二级集热/再生器, 一级再生溶液属于装置内循环溶液, 它相对于二级再生溶液(目的溶液)是一种低浓度溶液, 它在一级集热/再生器和填料除湿器之间流动, 一级

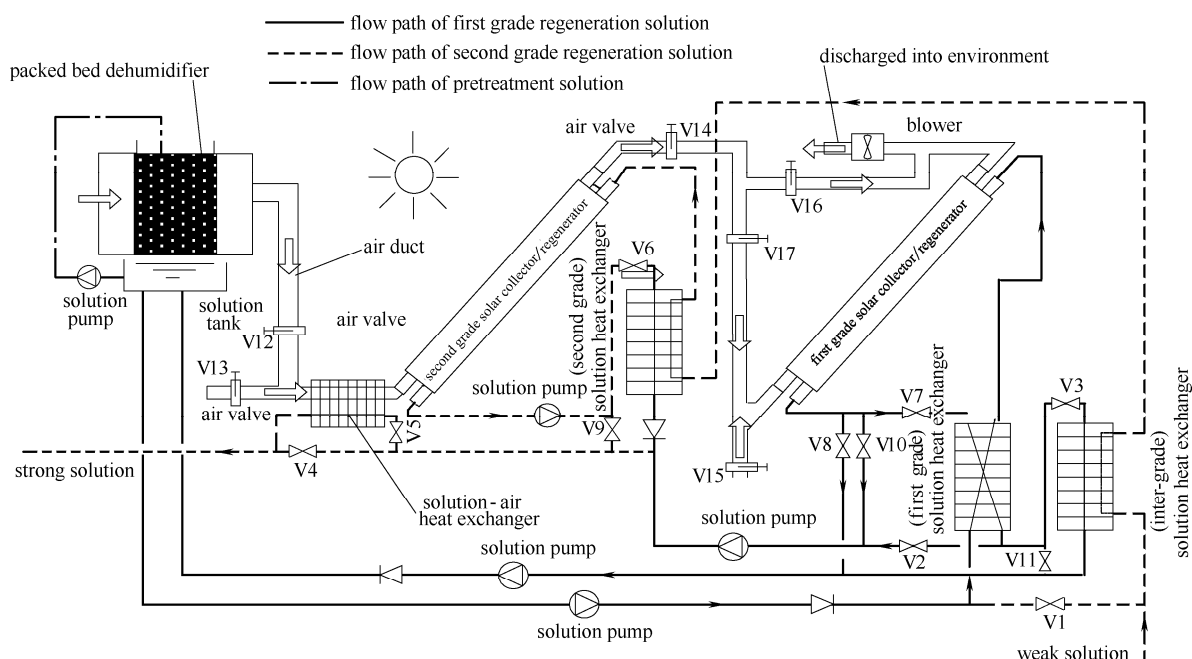


图1 5种太阳能集热再生系统流程

Fig.1 Schematic diagram of five solar solution collector/regenerator systems

和二级再生溶液都不经热回收器预热。

C 模式中,一级和二级集热/再生器处于并联运行。它在 A 模式基础上增设(一级)溶液热交换器和(二级)溶液热交换器分别预热一级和二级集热/再生器入口溶液。

D 模式中,一级集热/再生是为二级集热/再生服务,提供干燥空气。它在 B 模式基础上,增设(一级)溶液热交换器和(二级)溶液热交换器分别预热一级和二级集热/再生器入口溶液。

E 模式中,一级集热/再生是为二级集热/再生服务,提供干燥空气。它在 D 模式基础上,增设(级间)溶液热交换器预热二级再生溶液,增设溶液-空气热交换器预热二级再生用空气。

E 模式的热回收体现在:利用(一级)溶液热交换器和(二级)溶液热交换器分别提高一级和二级集热/再生器入口溶液温度;采用(级间)溶液热交换器回收一级集热/再生器出口溶液的显热,既能提高二级集热/再生器溶液入口温度,又可降低进入预处理器填料槽中溶液温度;采用溶液-空气热交换器既提高二级集热/再生器空气入口温度,又可降低再生后的高浓度溶液流出系统的温度,有利于后续的除湿循环。

B、D、E 模式中的预除湿溶液回路是一种在空气预处理器的内部循环,从空气预处理器的下部储液槽中出来的预除湿溶液经过防腐溶液泵加压进入预处理器上部布液槽中,布液槽中溶液靠自身重力下行流动与其中预除湿空气进行接触,吸收预除湿空气中水分。

热回收型太阳能分级溶液集热/再生系统采用较稀溶液对室外空气进行预除湿以达到对更高浓度溶液进行更有效再生的目的,同时进行同级及级间(溶液和空气)的热回收,实现了不同浓度溶液分级再生和能源分级梯度利用,有效提高太阳能对高浓度除湿溶液的再生效率,从而达到节能目的。表

1 中列出 5 种再生模式溶液和空气阀的开关方式。

2 太阳能空气预处理分级溶液再生模型

2.1 太阳能集热再生模型

作者早前提出一种考虑玻璃盖板温度影响的太阳能集热/再生数学模型^[29],文中一、二级太阳能集热/再生器采用该模型。

2.2 预除湿模型

图 1 中作为预处理器的填料除湿器采用叉流填料除湿模型^[30]。假设填料除湿装置高度为 H , 长度为 Z , 宽度为 W 。 x 轴与溶液喷淋方向一致, z 轴与空气流动方向一致。叉流除湿工况下装置的能量和质量守恒方程分别为

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

$$\frac{m_a}{H} \frac{\partial Y_a}{\partial z} + \frac{1}{Z} \frac{\partial m_s}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

溶液中盐分质量守恒方程为

$$d(m_s \xi) = 0 \quad (3)$$

空气侧能量和质量传递方程为

$$\frac{\partial h_a}{\partial z} = \frac{NTU_m \times Le}{Z} \left[(h_{cl} - h_a) + h_{ig} \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) (Y_{cl} - Y_a) \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial Y_a}{\partial z} = \frac{NTU_m}{Z} (Y_{cl} - Y_a) \quad (5)$$

Lewis 数 Le 和传质单元数 NTU_m 定义为

$$Le = \frac{k}{k_m c_{pa}} \quad (6)$$

$$NTU_m = \frac{k_m A_p}{m_a} \quad (7)$$

2.3 填料储液槽热质平衡模型

一级再生溶液回路的溶液在一级集热/再生器和填料除湿器之间循环,其浓度和温度受室外环境、溶液流量及一级集热/再生器和填料除湿器的结构参数影响。从一级集热再生器和填料除湿器来及去

表 1 5 种太阳能集热/再生模式

Table 1 Five modes of solar collector/regenerator

Mode	Name	On	Off
A	single solar collector/regenerator without heat recovery	V1, V4, V9, V10, V13, V14, V15, V16	V2, V3, V5, V6, V7, V8, V11, V12, V17
B	grading solar collector/regenerator without heat recovery	V4, V8, V9, V12, V14, V15	V1, V2, V3, V5, V6, V7, V10, V11, V13, V17, V16
C	single solar collector/regenerator with heat recovery	V1, V2, V4, V6, V7, V13, V14, V15, V16	V3, V5, V8, V9, V10, V11, V12, V12, V17
D	grading solar collector/regenerator with their own heat recovery	V4, V6, V7, V11, V12, V14, V15	V1, V2, V3, V5, V8, V9, V10, V13, V16, V17
E	grading solar collector/regenerator with all heat recovery	V3, V5, V6, V7, V12, V14, V17	V1, V2, V4, V8, V9, V10, V11, V13, V15, V16

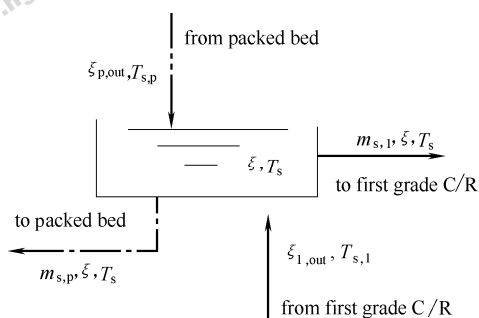


图2 储液槽中能量和质量守恒示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat and mass balance in solution tank

的溶液都在填料除湿器下部的溶液储液槽中混合,如图2所示。预除湿溶液和一级再生溶液在储液槽中满足能量和质量守恒。

能量守恒方程

$$m_{s,p}c_{ps}(T_s - T_{s,p}) = m_{s,1}c_{ps}(T_{s,1} - T_s) \quad (8)$$

水分质量守恒

$$m_{s,p}\xi \left(\frac{1-\xi_{p,out}}{\xi_{p,out}} - \frac{1-\xi}{\xi} \right) = m_{s,1}\xi \left(\frac{1-\xi}{\xi} - \frac{1-\xi_{1,out}}{\xi_{1,out}} \right) \quad (9)$$

2.4 再生效率和综合再生效率模型

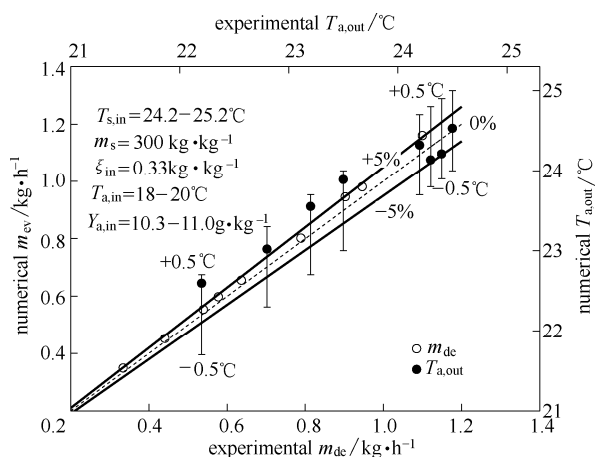
在太阳能分级集热再生系统中,由于一级集热/再生面积是为二级集热/再生提供有利条件:一是为二级集热/再生提供较为干热的再生用空气;二是预热二级集热/再生溶液。它本身并没有产出可作为溶液除湿系统的目的溶液。因此在定义该系统的再生效率时应考虑该部分的面积损失,定义综合再生效率为二级集热/再生水分蒸发所需吸收潜热与投入到两级集热再生面板上的太阳能辐射能之比,见式(10)。式(11)为单级集热再生效率定义式。

$$\eta_z = \frac{m_{ev,2}h_{fg}}{I_c(A_1 + A_2)} \quad (10)$$

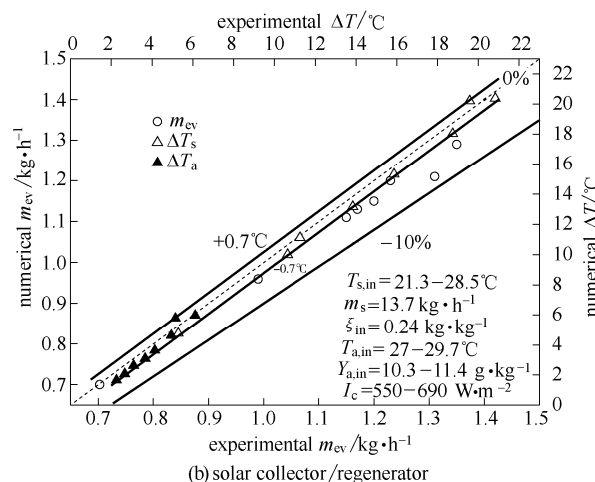
$$\eta = \frac{m_{ev}h_{fg}}{I_c A_2} \quad (11)$$

2.5 模型验证

主要利用的数值模型为太阳能集热再生模型和溶液预除湿模型,为验证模型正确性,分别建立一台2.0 m(长)×1.0 m(宽)×0.035 m(高)逆流太阳能集热再生器和一台0.5 m(宽)×0.5 m(高)×0.3 m(长)比表面积为368 m²·m⁻³的规则填料除湿器,实验中空气流量测量误差为±3.9%,空气相对湿度测量误差为±2%,太阳辐射强度测试精度小于2%,温度传感器测量误差±0.2℃,经系统误差分析蒸发率(除湿率)误差为10.3%。将实验结果和理论数值模拟结果进行对比,如图3所示。图3(a)



(a) packed tower



(b) solar collector/regenerator

图3 数值模拟解和实验结果对比

Fig.3 Comparison of numerical solution and experimental data

为填料除湿器的实验验证,显示在除湿率比较上,两者相差在±5%内,空气出口温度相差在±0.5℃内。图3(b)为太阳能集热再生器的数值解和实验结果对比,显示再生蒸发率的数值结果比实验值最大低10%,绝大部分相差在-5%以内。图3(b)还对比了溶液和空气进出口温升的数值解和实验结果,显示两者相差在0.7℃内。上述对比结果说明数值模拟结果和实验数据能较好吻合,验证了理论模型的正确性。

3 系统气候适用性分析

理论模拟的一级和二级集热再/生装置及填料预除湿器的结构参数同2.5节,两种集热/再生器都为逆流,系统中溶液采用氯化锂水溶液^[31]。一级集热/再生溶液温度和浓度在系统模拟中是根据填料储液槽内溶液热质平衡模型进行变动的;其他模拟初始参数见表2。以下将针对溶液热回收、环境参数变化对系统再生效率影响规律进行研究,给出系统的气候适用范围。

表 2 数值模拟初始参数

Table 2 Initial parameters of numerical simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
$m_a/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	240	$m_{s,p}/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	150
$T_{a,in}/^\circ\text{C}$	31	$T_{s,2,in}/^\circ\text{C}$	32
$\varphi_{a,in}/\%$	80	$\zeta_{2,in}/\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.4
$I_c/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	800	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	0.6
$m_{s,1}/m_{s,2}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	15		

3.1 热回收对系统性能的影响

对比 5 种集热再生模式分析热回收对系统再生性能影响, 其中太阳辐射强度分别为 600 、 $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 其他参数见表 2。两种太阳辐射强度下 5 种再生模式的对比结果见图 4。图中显示不带热回收的再生模式不管是单级集热再生 (A 模式) 还是分级集热再生 (B 模式), 再生效率都非常低甚至为负值, 此时表明不但没发生溶液浓缩再生, 相反发生溶液稀释现象 (称为逆再生)。C、D、E 3 种模式再生效率为正值, 并且在 $I_c = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 D 模式下综合再生效率低于 C 模式, 说明只靠同级热回收考虑到一级集热再生所付出代价并不能提高系统整体性能; 但当同时考虑级间热回收时的 E 再生模式高于 D 模式。在 $I_c = 600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, E 模式的综合再生效率比 C 模式再生效率相对提高 75.1%。在 $I_c = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, E 模式的综合再生效率仅高于 C 模式 1.65%。这些说明热回收型太阳能分级集热再生在较低太阳辐射条件下才能体现出优势。这是由于较低太阳辐射强度下, 单级太阳能集热再生溶液温度相对较低, 需要对再生用空气进行预处理才能实现较好再生。另外, 带热回收型的集热/再生模式溶液入口温度要高于不带热回收型的, 造成溶液

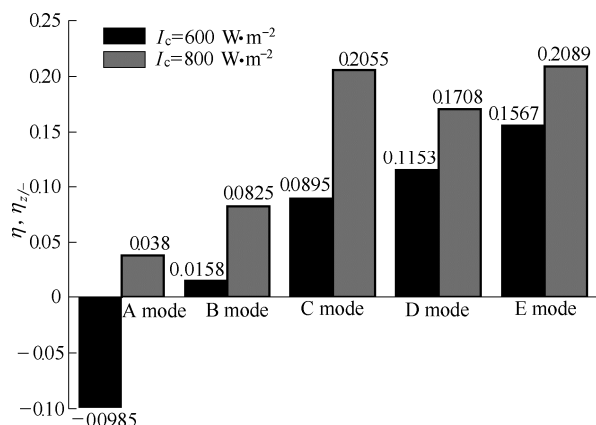


图 4 5 种再生模式再生效率比较

Fig.4 Comparison of regeneration efficiency under five kinds of different regeneration modes

和空气间的传质驱动力越大, 因此其再生效率要高。以下将重点针对 E、C 两种再生模式效率进行比较以分析热回收型分级集热再生的气候适用范围。

3.2 室外环境参数对系统性能影响

图 5(a)为在太阳辐射强度 I_c 为 $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 环境相对湿度 80% 下, 环境温度 T_0 从 10°C 升到 40°C , E、C 两种模式再生效率及预除湿溶液槽中温度和浓度随环境温升变化。图中显示随环境温度上升, 带热回收器的单级集热再生器再生 (C 模式) 效率在 $T_0 = 19^\circ\text{C}$ 时达最大值 0.218, 之后快速下降到 0.179 左右。相反, 带同级+级间热回收的分级再生 (E 模式) 效率从 0.191 升到 0.209 ($T_0 = 28^\circ\text{C}$) 之后缓慢降到 0.2, 并且当环境温度 $T_0 > 31^\circ\text{C}$ 时, E 模式再生效率高于 C 模式, 最大可提高 12.2%。说明高温高湿气候条件下, 分级集热再生性能相对传统单级集热再生性能有明显提高。这是由于在相同相对湿度条件下, 环境温度越高, 其含湿量也越高, 传统集热再生器 (C 模式) 在高含湿量条件下对高浓度溶液再生效率很低。另外, 图中还显示随环境干球温度升高, 预除湿溶液槽中溶液浓度从 $0.416 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.341 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 温度从 24.5°C 升到 51.3°C , 说明随环境空气温度升高, 其含湿量越高, 在一级集热再生器及预除湿器之间流动的溶液浓度会随之降低, 即高含湿量环境只要较低浓度溶液进行预处理即可。

图 5(b)为环境相对湿度变化对系统再生性能影响, 图中显示随环境湿度增加, E 和 C 模式的再生效率都呈线性递减, 并且 C 模式再生效率递减更快, 相对湿度等于 78% 为两种再生模式性能优劣的临界点, 低于 78% 单级带热回收的 C 模式优于分级带热回收的 E 模式, 当室外相对湿度高于 78% 时才能体现分级再生的优势。图中还显示预除湿溶液槽中溶液浓度从 $0.39 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.34 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 温度从 42.6°C 升到 44°C , 同样说明湿度增加, 预除湿溶液浓度要求降低。

图 5(c)为太阳辐射强度变化对系统再生性能影响。图中显示随太阳辐射强度升高, E 和 C 模式的再生效率都呈增加趋势。C 模式的再生效率在 $I_c < 500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时为负值, 说明在较低太阳辐射条件下, 即使带热回收器单级集热再生器在对高浓度溶液进行再生依然处于失效 (逆再生) 状态。比较两种再生模式发现当 $I_c \leq 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, E 模式综合再生效率 η_z 高于 C 模式再生效率, 说明在中低太阳辐射条件下, 分级集热再生才能更好地体现其性能优势。另

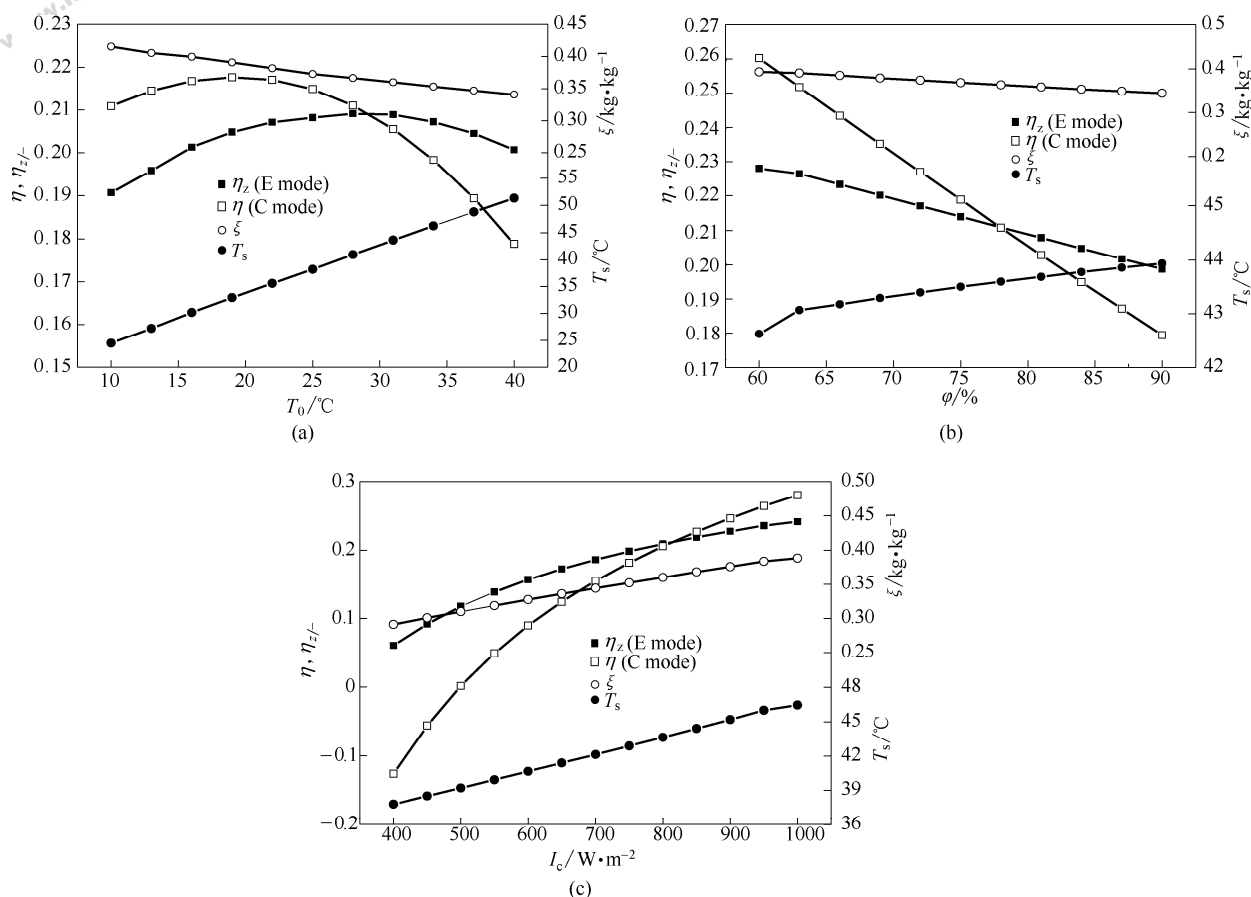


图 5 室外环境参数对系统性能的影响

Fig.5 Effect of ambient parameters on regeneration performance (E and C modes)

外,预除湿溶液槽中溶液浓度从 $0.29 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高到 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,温度从 37.8°C 升到 46.5°C ,说明随太阳辐射强度增高,一级集热再生溶液浓度及温度升高。

3.3 分级集热再生对环境 and 溶液参数的适用范围

图 5 显示 E、C 两种再生模式性能比较存在一个转折点,也即在某一气候范围内才能体现多级集热再生的优势。图 6 为浓度为 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 再生溶液

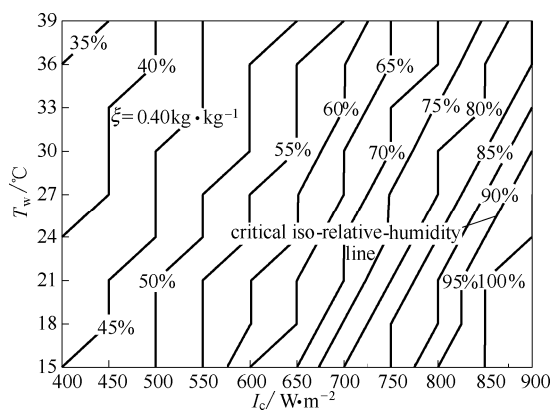


图 6 E 模式再生室外环境适用范围

Fig.6 Application scope of outdoor environment of E mode regeneration

的气候适用范围,图中斜折线为环境空气临界等相对湿度线。由太阳辐射强度 I_c 和室外环境温度 T_0 查出所对应临界相对湿度 ϕ_0^0 ,当环境相对湿度大于该临界相对湿度时 E 模式再生性能优于 C 模式。图中显示随太阳辐射强度增加及室外环境温度降低,临界等相对湿度变大,说明此时 E 模式再生的适应范围变窄,也即太阳辐射强度增加(或室外环境温度降低)到一定程度,不需要进行分级集热再生,只需要带热回收的单级集热再生即可。另外,从图中可看出临界等相对湿度线近似和纵坐标平行,说明太阳辐射强度对临界相对湿度起的作用要远大于室外温度。

图 6 只显示 $0.40 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度的溶液 E 模式再生的气候适用范围,针对溶液浓度的适用范围见图 7。图中采用室外含湿量代替室外干球温度和相对湿度对再生的综合影响,斜折线为临界等浓度线。由室外含湿量和太阳辐射强度查出临界浓度值,当再生溶液浓度大于该临界浓度值时, E 模式再生性能优于 C 模式。图中显示随太阳辐射强度增加及环境空气含湿量降低,临界浓度变大,说明在这些工况下溶液浓度适用范围变窄。也即在高湿度、低

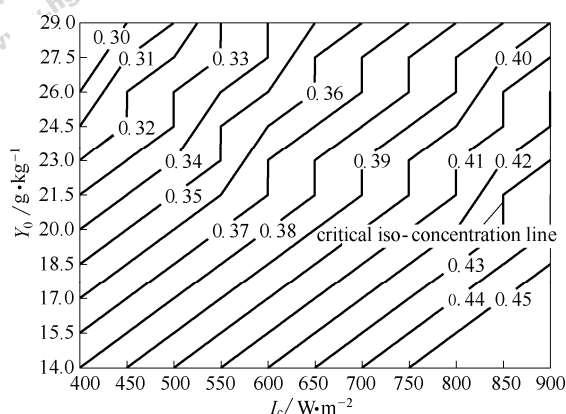


图 7 E 模式再生溶液浓度适用范围

Fig.7 Application scope of solution concentration of E mode regeneration

辐射的恶劣气候条件下, 分级集热再生可对更低浓度的溶液进行相对较好再生。

4 结 论

(1) 提出一种新型 带热回收的太阳能空气预处理溶液分级集热再生原理, 并基于预除湿的填料储液槽能量和质量平衡, 建立预除湿溶液参数动态调整的太阳能分级集热再生系统数学模型, 通过实验验证系统中主要部件的理论模型正确性。

(2) 文章分析热回收对再生性能影响, 发现在再生相同再生条件下, 不带热回收的再生效率很低甚至再生失效(再生效率为负), 而带热回收的模式最高效率仍可达 0.2 左右。

(3) 文章系统分析和对比了带热回收分级集热再生(E 模式)和带热回收单级集热再生(C 模式)性能, 发现在不同室外环境条件下两种再生模式存在临界点, 室外环境温度和相对湿度高于临界点, 太阳辐射强度低于临界点, E 模式再生优于 C 模式再生。

(4) 最后给出分级集热再生的环境和溶液浓度适用范围, 发现在低太阳辐射、高温高湿的极端环境下, E 模式对高浓度溶液再生越有利。

符 号 说 明

A ——面积, m^2
 c_p ——比热容, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 H ——填料高度, m
 h ——比焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
 h_{ig} ——水蒸气的蒸发潜热, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
 k ——传热系数, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

k_m ——传质系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
 I_c ——太阳辐射强度, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$
 Le ——Lewis 数
 m ——质量流率, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
 m_{ev} ——蒸汽蒸发率, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
 NTU_m ——传质单元数
 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_s ——储液槽中溶液温度, $^{\circ}\text{C}$
 W ——填料宽度, m
 Y ——湿空气含湿量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
 Z ——填料长度, m
 ζ ——溶液浓度, $\text{kg 盐分}\cdot(\text{kg 溶液})^{-1}$
 ξ ——溶液槽内浓度, $\text{kg 盐分}\cdot(\text{kg 溶液})^{-1}$
 η ——单级再生效率,
 η_z ——分级综合再生效率

下角标

a ——空气
 eL ——平衡状态
 in ——进口
 out ——出口
 p ——填料
 s ——溶液
 1 ——一级集热再生器
 2 ——二级集热再生器

References

- [1] CHENG Q, ZHANG X S. Review of solar regeneration methods for liquid desiccant air-conditioning system [J]. Energy and Buildings, 2013, **67**: 426-433.
- [2] MEHTA J R, RANE M V. Liquid desiccant based solar air conditioning system with novel evacuated tube collector as regenerator [J]. Procedia Engineering, 2013, **51**: 688-693.
- [3] MUN J H, JEON D S, KIM Y L, *et al.* A study on the regeneration performance characteristics of an internally heated regenerator in a liquid desiccant system [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, **30** (3): 1343-1349.
- [4] YIN Y G, ZHANG X S, WANG G, *et al.* Experimental study on a new internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, **31** (5): 857-866.
- [5] 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** (8): 1664-1671.
- [6] ELSARRAG E. Evaporation rate of a novel tilted solar liquid desiccant regeneration system [J]. Solar Energy, 2008, **82** (7): 663-668.
- [7] KAKABAEV A, KHANDURDYEV A, KLYSHCHAEVA O, *et al.* A large scale solar air conditioning pilot plant and its test results [J].

- International Chemical Engineering, 1976, **16** (1): 60-64.
- [8] COLLIER R K. The analysis and simulation of an open cycle absorption refrigeration system [J]. Solar Energy, 1979, **23**: 357-366.
- [9] GANDHIDASAN P, AL-FARAYEDHI A A. Solar regeneration of liquid desiccants suitable for humid climates [J]. Energy, 1994, **19** (8): 831-836.
- [10] GANDHIDASAN P, AL-FARAYEDHI A A. Thermal performance analysis of a partly closed-open solar regenerator [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1995, **117** (2): 151-153.
- [11] KHALID C S, GANDHIDASAN P, ZUBAIR S M. Exergy analysis of a liquid-desiccant-based, hybrid air-conditioning system [J]. Energy, 1998, **23** (1): 51-59.
- [12] NELSON D J, WOOD B D. Evaporation rate model for a natural convection glazed collector/regenerator [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1990, **112** (1): 51-57.
- [13] NELSON D J, WOOD B D. Two-dimensional, analysis and performance of a natural convection glazed collector/regenerator [J]. Solar Engineering, 1987, **2**: 933-940.
- [14] YANG R, WANG P L. Experimental study for a double-glazed forced-flow solar regenerator [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1998, **120** (4): 253-259.
- [15] YANG R, WANG P L. A simulation study of performance evaluation of single-glazed and double-glazed collectors/regenerators for an open-cycle absorption solar cooling system [J]. Solar Energy, 2001, **71** (4): 263-268.
- [16] YANG R, WANG P L. Experimental study of a forced convection solar collector/regenerator for open-cycle absorption cooling [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1994, **116** (4): 194-199.
- [17] YANG R, WANG P L. The optimum glazing height of a glazed solar collector/regenerator for open-cycle absorption cooling [J]. Energy, 1994, **19** (9): 925-931.
- [18] YANG R, WANG P L. The effect of heat recovery on the performance of a glazed solar collector/ regenerator [J]. Solar Energy, 1995, **54** (1): 19-24.
- [19] ALIZADEH S, SAMAN W Y. An experimental study of a forced flow solar collector/regenerator using liquid desiccant [J]. Solar Energy, 2002, **73** (5): 345-362.
- [20] ALIZADEH S, SAMAN W Y. Modeling and performance of a forced flow solar collector/regenerator using liquid desiccant [J]. Solar Energy, 2002, **72** (2): 143-154.
- [21] KABEEL A E. Augmentation of the performance of solar regenerator of open absorption cooling system [J]. Renewable Energy, 2005, **30** (3): 327-338.
- [22] GANDHIDASAN P. Simple analysis of a forced flow solar regeneration system [J]. Journal of Energy, 1982, **6** (6): 436-437.
- [23] GANDHIDASAN P. Thermal performance predictions and sensitivity analysis for a parallel flow solar regenerator [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1983, **105** (2): 224-229.
- [24] ZEIDAN E B, ALY A A, HAMED A M. Modeling and simulation of solar-powered liquid desiccant regenerator for open absorption cooling cycle [J]. Solar Energy, 2011, **85** (11): 2977- 2986.
- [25] LI Y T, YANG H X. Investigation on solar desiccant dehumidification process for energy conservation of central air-conditioning systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, **28** (10): 1118-1126.
- [26] PENG D G, ZHANG X S. Modeling and performance analysis of solar air pretreatment collector/regenerator using liquid desiccant [J]. Renewable Energy, 2009, **34** (3): 699-705.
- [27] PENG D G, ZHANG X S, YIN Y G. Theoretical storage capacity for solar air pretreatment liquid collector/regenerator [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, **28** (11/12): 1259-1266.
- [28] 彭冬根, 张小松. 太阳能空气预处理分级溶液集热再生系统特性 [J]. 农业工程学报, 2016, **32** (6): 242-247.
- PENG D G, ZHANG X S. Characteristics of solar air-pretreatment solution grading thermal regeneration system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32** (6): 242-247.
- [29] PENG D G, ZHANG X S. A modified model of solar collector/regenerator considering effect of the glazing temperature [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, **49**: 151-159.
- [30] LIU X H, JIANG Y, XIA J J, *et al.* Analytical solutions of coupled heat and mass transfer processes in liquid desiccant air dehumidifier/regenerator [J]. Energy Conversion and Management, 2007, **48** (7): 2221-2232.
- [31] 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.