

文章编号:0253-4339(2019) 02-0154-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.02.154

太阳能溶液除湿空调系统再生技术的研究进展与能耗分析

周君明¹ 张小松^{1,2} 孙 博¹

(1 东南大学能源与环境学院 南京 210096; 2 东南大学能源热力与控制重点实验室教育部 南京 210096)

摘 要 本文对太阳能溶液除湿空调系统的最新再生技术进行了综述,并对太阳能光热再生、太阳能光伏再生和太阳能光伏/热(PV/T)再生这 3 个再生方法进行了模拟对比。结果表明:在理想状态下,光伏/热电渗析(PV/T-ED)再生比光伏电渗析(PV-ED)再生节能 40.5%,光伏电渗析再生比光热再生节能 51.6%。光伏/热电渗析再生系统在理想工况下运行时,对比 LiCl 溶液、LiBr 溶液、CaCl₂ 溶液再生分析发现 LiBr 溶液的再生进出口浓度差最大,而 LiCl 溶液再生后除湿能力最强。
关键词 太阳能;溶液再生;电渗析;能耗分析
中图分类号:TB61⁺1; TK519; TU834. 9 文献标识码: A

Research Progress on Regenerative Technology and Energy Analysis of Solar Liquid Desiccant Air-conditioning System

Zhou Junming¹ Zhang Xiaosong^{1,2} Sun Bo¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 2. Ministry of Education of Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract Solar liquid desiccant air-conditioning represents a new, environmentally friendly, and energy-saving air-conditioning system. Solar-energy solution regeneration is one of the most important aspects of the system. In this study, a comprehensive review of the latest regeneration technologies for solar liquid desiccant air-conditioning systems is presented. The following three regeneration methods were simulated and compared: photothermal, photovoltaic, and PV/T. The results showed that under ideal conditions, the PV/T-ED regeneration was 40.5% greater than PV-ED regeneration in terms of energy-saving, whereas PV-ED regeneration was 51.6% better than PT regeneration. When the PV/T-ED regeneration was operated for LiCl-H₂O, LiBr-H₂O, and CaCl₂-H₂O under ideal conditions, it was found that the LiBr-H₂O had the largest concentration difference between the inlet and outlet, whereas the LiCl-H₂O had the strongest dehumidification capability after regeneration.
Keywords solar energy; solution regeneration; electrodialysis; energy analysis

溶液除湿技术因其能够高效利用低品位热能和除湿效率较高而备受关注^[1-3]。与常规空调相比,溶液除湿空调具有更好的空气除湿性,能够有效净化空气,对环境无污染,耗电量低^[4-5]。且盐溶液还能实现高密度储能,储存能力高达1 300~1 400 MJ/m³,比传统冰蓄冷高 3~4 倍,无需保温等措施^[6-7]。太阳能作为一种利用自由、环保洁净的可再生能源,与溶液除湿相结合是缓解空调能耗和环境问题的重要解决方案,近年来利用太阳能进行溶液再生已成为研究热点^[8-9]。太阳能溶液除湿空调系统是一种利用低品位能源的空调系统,它利用太阳能热量进行溶液再生,所需的温度范围为 40~80 ℃^[5]。然后将再生后

的浓溶液储存,巨大储能特性可以弥补太阳能能量密度低、间歇性、不稳定等问题。溶液再生过程是太阳能溶液除湿空调系统中最重要的一部分。本文研究的主要目的是介绍太阳能溶液再生技术的发展,寻求提高太阳能溶液再生系统的方法。

1 太阳能溶液再生技术的研究现状

再生器是整个溶液除湿空调系统中最重要传热传质设备之一^[10],合理利用太阳能等低品位能源可以有效减少溶液除湿空调系统的能耗。根据太阳能转换成的能量形式的不同,太阳能溶液再生系统划分为三种:1)光热式(PT)溶液再生,利用集热器将太

基金项目:国家自然科学基金(1520105009)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51520105009).) 收稿日期:2018-04-09;修回日期:2018-06-09

阳能转化成热能,并用所得热能驱动溶液再生;2) 光伏式(PV)溶液再生,利用光伏发电技术将太阳能转换成电能,并以电能的形式驱动的溶液再生;3) 光伏/热式(PV/T)溶液再生,利用太阳能电池和集热器将太阳能分别转化为电能和热能,以驱动复合型溶液再生。

1.1 太阳能光热式(PT)溶液再生的研究现状

太阳能光热式(PT)溶液再生系统一般由太阳能集热器、热再生器、储液罐、泵等组成^[11],如图 1 所示。光热式溶液再生,根据再生方式的不同,可分为空气式和沸腾式。Yin Yonggao 等^[12-13]对填料塔式再生器的溶液除湿蒸发冷却空调系统进行了实验研究,发现再生器热源温度对再生性能有重要影响,并对比了内热型再生器和传统绝热型再生器,结果表明内热型再生器具有较高的再生速率和能源利用效率。空气式再生装置一般利用再生空气和稀溶液接触并将其水分带走,所需热源温度较低,溶液再生浓度和效率较低,且受环境因素影响较大^[14]。除湿溶液的沸腾式再生能够降低空调系统对室外环境的依赖性,沸腾式的再生设备一般是利用稀溶液沸腾将其水分蒸馏出去,沸腾再生方式受环境因素的影响很小,但所需再生温度较高^[15]。李达等^[16]搭建了低压沸腾溶液再生实验平台,并建立数学模型,分析了不同运行工况对溶液再生装置性能的影响规律。徐惠斌等^[17-18]研究了常见盐溶液的沸腾温度和传热系数,研究表明在相对湿度为 40% 的空气状态参数下,LiBr、CaCl₂、LiCl 溶液和空气相平衡时的质量分数分别为 46%、40%、31%,LiBr、CaCl₂、LiCl 溶液的沸腾温度分别为 123、116、121 °C,再生温度较高。H. R. Yon 等^[19]提出一种在真空条件下运行的溶液再生系统,这种新型的吸收性液体除湿再生(ALDR)系统有望取代传统的溶液除湿系统(LDDS)中的常规填料再生器,并建立了实验平台验证其可行性,结果表明:当真空压力为 1~2 kPa, LiBr 为除湿剂时,ALDR 系统的再生温度降至 20~35 °C,该系统的再生温度明显低于其他形式的再生系统。PT 溶液再生,根据溶液的加热过程与浓缩过程是否在同一装置上进行,又分为间接太阳能溶液再生器和直接太阳能溶液再生器。间接太阳能再生设备一般由填料喷淋塔和太阳能平板集热器组成,太阳能平板集热器不考虑再生过程;直接太阳能再生器指集热装置上同时进行溶液的加热过程和浓缩过程,也称为集热/再生器。Peng Donggen 等^[20-22]对一种新型太阳能溶液预处理集热/再生器的再生性能进行了研究,发现新型再生器溶液出口浓度、再生效率、蓄能容量均有较大提高,建立数

学控制方程,并与相关实验结果对比验证模型的正确性,研究表明逆流形式比顺流形式的太阳能集热/再生器性能提高了 10%。

热再生是较为常见的溶液再生方式,但有以下几个缺点:1) 热再生大部分受高温高湿空气的影响,在高温高湿条件下再生效果不佳;2) 热再生必然造成溶液温度的升高,产生对除湿过程不利的热量;3) 热再生存在液滴溅入周围环境并污染周围空气的风险^[23]。

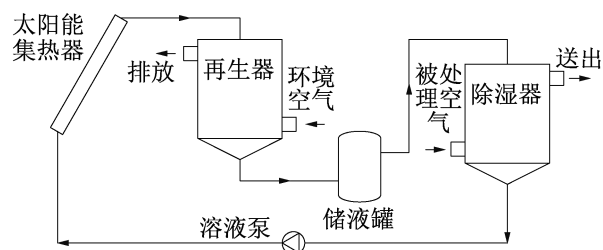


图 1 典型的光热式(PT)溶液再生系统
Fig.1 Typical photothermal (PT) solution regeneration system

1.2 太阳能光伏式(PV)溶液再生的研究现状

图 2 所示为一种典型的太阳能光伏式电渗析(PV-ED)再生系统,采用 PV-ED 再生技术可以很好地解决热再生过程中的问题^[24-25],且太阳能光伏板能够加强屋面的通风换热,在一定程度上减小建筑能耗^[26]。

吴俊伟^[27]建立了计算系统综合效率,利用投资回收期的数学模型,对比了太阳能光伏和光热制冷系统的综合效率,结果表明太阳能光伏制冷系统的综合效率远高于光热制冷系统。Li Xiuwei 等^[28-29]提出了一种基于 PV-ED 再生的溶液除湿空调系统,并对该种再生方式进行了分析,结果表明该种再生方法具有良好的稳定性,性能远高于热再生方式。为进一步探索电渗析再生,Cheng Qing 等^[30-33]将一种新型太阳能溶液耦合再生系统与传统太阳能溶液热再生系统进行了对比研究,结果表明,新型系统比太阳能热再生系统具有更大的节能优势,并建立了电渗析(ED)再生器实验系统,以确定不同浓度的液体干燥剂再生过程中 ED 再生器的稳定性,研究了 ED 再生器在不同浓度下的再生性能。

国外对 PV 溶液再生技术方面的研究也不断增多。Guo Yi 等^[34]以 LiCl 溶液为除湿剂进行了电渗析再生实验,研究分析了溶液流量、电流密度、溶液初始浓度对电渗析的再生能力的影响,实验结果对电渗析再生器的设计有很大帮助。A. Al-Jubainawi 等^[35]探讨了膜电渗析在液体溶液系统中的传质机理和性

能,结果表明为了获得较好的电渗析性能,应该尽量减小再生和淡化溶液之间的浓度差。

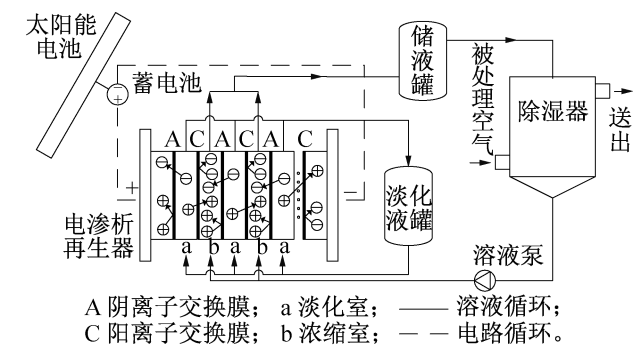


图 2 典型的光伏式电渗析 (PV-ED) 再生系统
Fig.2 Typical photovoltaic electrodialysis (PV-ED) regeneration system

2 太阳能光伏/热式 (PV/T) 再生系统

PV/T 组件由太阳能电池和集热器组成^[37],太阳能电池和集热器分别使用了太阳光谱的不同部分,集热器使用红外波,太阳能电池使用可见光波,因此 PV/T 组件可以更有效地利用整个太阳光谱。且集热器将太阳能电池表面的热量收集带走,降低了太阳能电池表面的温度,提高了太阳能电池的发电效率, PV/T 组件安装所需的总空间小于每个系统单独安装的空间^[38]。储存罐中的浓溶液进入除湿器中对空气进行除湿,除湿后的浓溶液被稀释,由溶液泵送入 PV/T 组件进行加热,温度升高后的稀溶液进入热再生器,在热再生器中温度较高的稀溶液与环境空气直接接触进行热质交换,热再生后的溶液进入电渗析再生器中进一步再生,电渗析再生器的电能由 PV/T 组件提供,电渗析再生后的浓溶液流入储存罐进行储存。图 3 所示为一种典型的太阳能光伏/热式电渗析 (PV/T-ED) 再生系统^[30,36]。

2.1 光热式 (PT) 再生系统能耗模型

在 PT 再生系统溶液再生过程中,再生器消耗的能量主要为用于加热稀溶液的太阳能,溶液泵和风机的能耗较少可忽略。加热后的稀溶液与环境空气直接接触,空气将稀溶液中的水分带走。理想状态下, PT 再生过程再生单位质量浓溶液所消耗的太阳能^[30]:

$$q_{TH} = \frac{Q_{TH}}{m_{TH} - m_w} = \frac{m_w r_0}{\eta_{TH} \eta_{collector} (m_{TH} - m_w)} = \frac{r_0 (C_{out} - C_{in})}{\eta_{TH} \eta_{collector} C_{in}} \quad (1)$$

式中: Q_{TH} 为加热稀溶液的太阳能, kW; m_{TH} 为

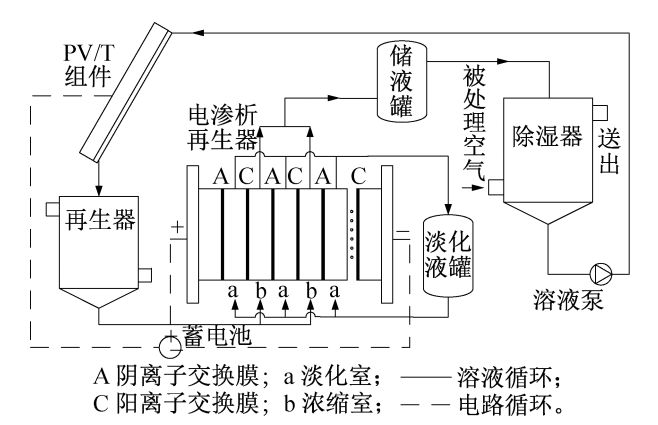


图 3 典型的光伏/热电渗析 (PV/T-ED) 再生系统
Fig.3 Typical photovoltaic/thermoelectric dialysis (PV/T-ED) regeneration system

太阳能集热器中稀溶液的质量流量, kg/s; m_w 为稀溶液中水的蒸发速率, kg/s; r_0 为水的蒸发潜热, kJ/kg; $\eta_{collector}$ 太阳能集热器的集热效率, %; η_{TH} 为热再生效率, %; C_{in} 、 C_{out} 分别为再生系统溶液进、出口的质量浓度, %。

2.2 太阳能光伏式 (PV) 再生系统能耗模型

在 PV 再生系统溶液再生过程中, ED 再生器所耗电能为运行电流与电压的乘积,同样忽略溶液泵的能耗,而再生器运行消耗的电能来源于太阳能电池。因此, PV-ED 再生过程再生单位质量浓溶液所消耗的太阳能^[30]:

$$q_{PV} = \frac{Q_{PV}}{m_{PV}} = \frac{zF(C_{out} - C_{in})}{\beta \zeta NM} U \quad (2)$$

式中: Q_{PV} 为电渗析再生消耗的太阳能, kW; m_{PV} 为稀溶液的质量流量, kg/s; z 为溶液的化学价; F 为法拉第常数; U 为电渗析再生器运行的电压, V; β 为太阳能电池的发电效率; ζ 为电流效率; N 为膜对数; M 为溶液溶质的分子质量, g/mol。

2.3 太阳能光伏/热 (PV/T) 再生系统能耗模型

PV/T-ED 再生系统的 PV/T 组件同时为系统提供电能和热能,以驱动电渗析再生器和热再生器, PV/T-ED 再生系统的能耗主要取决于 PV/T 组件的能耗,系统中溶液泵和风机的能耗较小可忽略。 PV/T-ED 再生系统再生单位质量浓溶液所消耗的太阳能^[39]:

$$q_{PV/T} = \begin{cases} \frac{zF(C_{ED,out} - C_{ED,in})}{\eta_E \zeta NM} U, & C_{ED,in} \leq C'_{ED,in} \\ \frac{r_0(C_{ED,in} - C_{in})}{\eta_{TH} \eta_T C_{in}}, & C_{ED,in} > C'_{ED,in} \end{cases} \quad (3)$$

$$C'_{ED,in} = \frac{\eta_T \eta_{TH} z F U C_{in} C_{out} + C_{in} r_0 \zeta N M \eta_E}{\eta_T \eta_{TH} z F U C_{in} + r_0 \zeta N M \eta_E} \quad (4)$$

式中： $C_{ED,in}$ 、 $C_{ED,out}$ 分别为电渗析再生器的再生室进、出口溶液的质量浓度，%； η_E 为 PV/T 系统的发电效率，%； η_T 为 PV/T 系统的集热效率，%； $C'_{ED,in}$ 为理想运行工况下电渗析再生器的再生室进口溶液的质量浓度，%。

3 能耗对比分析结果

运用以上建立的 3 种太阳能再生系统的能耗模型，分别对其进行能耗模拟。为了更直接地对比不同系统间的能耗，假设系统的除湿溶液均为 LiCl 溶液，相同太阳辐射，相同面积的光热/光伏板。这 3 种太阳能再生系统的能耗模型参数较多，运用 Cheng Qing 等^[39]的计算参数进行模拟计算，模拟过程中的参数设定如表 1 所示。

表 1 模拟计算参数^[39]

Tab.1 Simulation calculation parameters

参数	数值	参数	数值
z	1	$C_{out}/\%$	38
$F/(C/mol)$	96 485.3	$\eta_{collector}/\%$	55
U/V	100	$\eta_{TH}/\%$	50
$\zeta/\%$	80	$\eta_E/\%$	12
N	250	$\eta_T/\%$	45
$M/(g/mol)$	42.5	$\beta/\%$	10
$r_0/(kJ/kg)$	2 257.6	—	—

3 种太阳能再生系统的 $C_{in}=35\%$ 、 $C_{out}=38\%$ ，PT 再生系统和 PV/T-ED 再生系统中 $\eta_{TH}=50\%$ 时，PV/T-ED 再生系统消耗的太阳能 $q_{PV/T}$ 随 PV/T-ED 再生系统 $C_{ED,in}$ 的变化如图 4 所示，PT 再生系统和 PV-ED 再生系统的能耗不受 $C_{ED,in}$ 影响。由图 4 可知，相同条件下，PT 再生系统的太阳能能耗为 703.7 kW/kg，PV-ED 再生系统能耗为 340.5 kW/kg，由此可见 ED 再生比热再生有一定的优势，且 PT 再生系统的太阳能能耗也高于 PV/T-ED 再生系统。当 $C_{ED,in}$ 从 35.5% 增至 37.5% 时，PV/T-ED 再生系统的太阳能能耗随其先减小后增大。当 $C_{ED,in}<35.86\%$ 时，PV/T-ED 再生系统的太阳能能耗随其减小而增大，说明此时 PV/T 组件转换得到的热能没有完全被利用；当 $C_{ED,in}>35.86\%$ 时，PV/T-ED 再生系统的太阳能能耗随其增大而增大，说明此时 PV/T 组件转换得到的电能也没有完全被利用。可见当 $C_{ED,in}=C'_{ED,in}=35$ 。

86% 时，PV/T-ED 再生系统的太阳能能耗最小，为 202.4 kW/kg。此时 PV/T 组件转换得到的热能和电能均被完全利用，处于理想运行工况，PV/T-ED 再生系统比 PV-ED 再生系统节能 40.5%，PV-ED 再生系统比 PT 系统节能 51.6%。当 $C_{ED,in}>C'_{ED,in}$ 时，PV/T 组件转换得到多余的电能，可以储存在蓄电池中，在太阳能不充足的条件下驱动 ED 再生器进行再生。

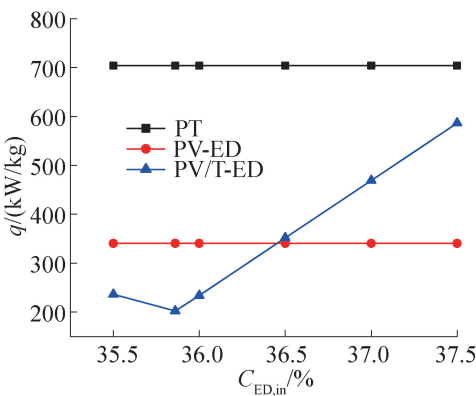


图 4 ED 再生器入口浓度对再生系统能耗的影响
Fig.4 Effect of electro dialysis regenerator inlet concentration on energy consumption of regenerative system

当 PV/T-ED 再生系统处于理想工况下运行，3 种太阳能再生系统的 $C_{in}=35\%$ 、 $C_{out}=38\%$ 时，再生系统消耗的太阳能随 η_{TH} 的变化如图 5 所示。由图 5 可知，在理想工况下 PV/T-ED 再生系统太阳能能耗最低，PV-ED 再生系统次之，PT 再生系统最高，PV/T-ED 再生系统具有较大的节能优势。当 η_{TH} 由 40% 增至 60% 时，PV-ED 再生系统和 PV/T-ED 再生系统太阳能能耗均随之减小，分别减小了 33.2% 和 15.1%，热再生效率对 PT 再生系统影响较大，对 PV/T-ED 再生系统的影响较小。

PV/T-ED 系统仍处于理想工况下运行，3 种太阳

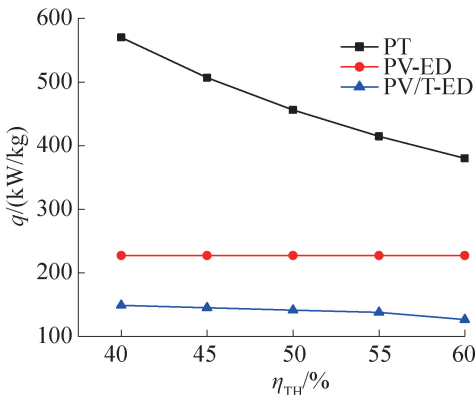


图 5 热再生效率对 3 种再生系统能耗的影响
Fig.5 Effect of thermal regeneration efficiency on energy consumption of three different regeneration systems

能再生系统 $C_{out} = 38\%$, PT 再生系统和 PV/T-ED 再生系统中 $\eta_{TH} = 50\%$ 时, 3 种太阳能再生系统的太阳能能耗随再生系统 C_{in} 的变化如图 6 所示。由图 6 可知, 在相同 C_{in} 时, 同样是 PV/T-ED 再生系统太阳能能耗最低, PV-ED 再生系统次之, PT 再生系统最高。当 C_{in} 从 35% 增至 37.5%, 3 种太阳能再生系统的太阳能能耗均会减少, 这是由于 C_{out} 相同, C_{in} 的减少使再生系统再生的量减少, 再生系统的太阳能能耗也随之减少。当 $C_{in} = 35\%$ 时, PV/T-ED 再生系统太阳能能耗比 PT 再生系统节能 69.6%, PV-ED 再生系统太阳能能耗比 PT 再生系统节能 51.6%; 当 $C_{in} = 37.5\%$ 时, PV/T-ED 再生系统太阳能能耗比 PT 再生系统节能 68%, PV-ED 再生系统太阳能能耗比 PT 再生系统节能 48%, 随着 C_{in} 的增加, PV/T-ED 再生系统、PV-ED 再生系统与 PT 再生系统相比的节能优势也随之减少, 分别降低 1.6% 和 3.6%。再生系统入口溶液浓度在低浓度的情况下, PV/T-ED 再生系统、PV-ED 再生系统的节能效果更明显, 且 PV/T-ED 再生系统受 C_{in} 影响更小。

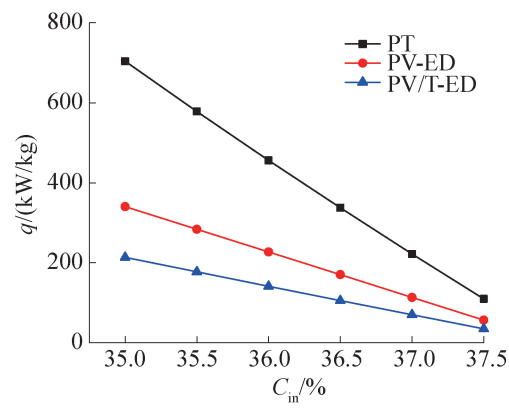


图 6 溶液入口浓度对 3 种再生系统能耗的影响
Fig.6 Effect of solution inlet concentration on energy consumption of three different regeneration systems

通过上述分析可知, 太阳能光热光伏的综合利用有效降低系统太阳能能耗, 是未来太阳能溶液再生技术研究的方向。目前溶液除湿空调系统中使用的除湿溶液最常见的有 LiCl 溶液、LiBr 溶液、CaCl₂ 溶液。为了方便对比 3 种不同除湿溶液在 PV/T-ED 再生系统中的应用效果, 假设 PV/T-ED 再生系统处于理想工况下运行, 3 种不同除湿溶液状态下, 系统太阳能能耗相同, 系统溶液入口参数相同。对于溶液除湿空调系统, 其再生能力可用溶液进出口浓度差 $\Delta C = C_{out} - C_{in}$ 表示。对于不同除湿溶液的除湿能力可通过除湿溶液和空气水蒸气分压力差 $\Delta p = p_a - p_s$ 表示, 其中 p_s 为不同除湿溶液的水蒸气分压力, 可由文献[40

-41] 计算得到, p_a 为空气水蒸气分压力, 以南京市为例, 取 3 368 Pa^[42]。整个再生过程中系统温度变化均较小, 对比时设定除湿溶液的温度为 30 ℃^[42-43]。如图 7 所示为 LiCl 溶液、LiBr 溶液、CaCl₂ 溶液分别在 PV/T-ED 再生系统中进出口浓度变化量 ΔC 和除湿能力 Δp 随 C_{in} 的变化。由图 7 可知, 相同入口浓度时, 出口浓度变化量 ΔC 由小到大分别为 LiCl-H₂O、CaCl₂-H₂O、LiBr-H₂O, 而出口溶液除湿能力由小到大分别为 CaCl₂-H₂O、LiBr-H₂O、LiCl-H₂O。当 C_{in} 从 35% 升至 40% 时, 出口溶液除湿能力也随之增强。因此, LiBr-H₂O 的再生进出口浓度差最大, 而 LiCl-H₂O 再生后除湿能力最强。

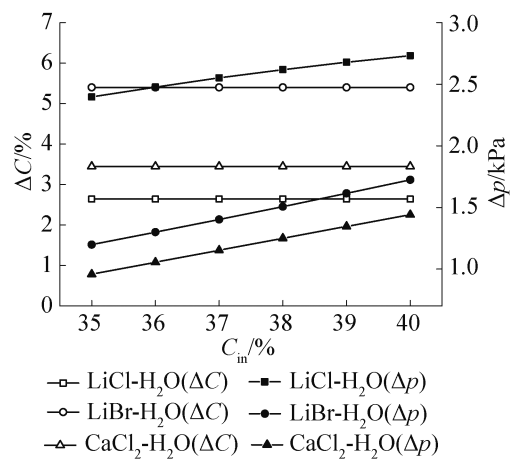


图 7 不同除湿溶液的再生浓度变化量和除湿能力对比
Fig.7 Comparison of the concentration change and dehumidification capacity of different dehumidifying solutions

4 结论

本文对太阳能光热再生方法和太阳能光伏再生方法的最新技术进行了综述, 并对太阳能光热再生方法、太阳能光伏再生方法、太阳能光热/伏再生方法进行了对比, 得出如下结论:

1) 太阳能溶液热再生系统严重依赖于周围环境, 在高温高湿的气候条件下, 太阳能热再生不能满足除湿要求, 且在光热式溶液再生中不可避免的造成了溶液温度的升高, 产生了对除湿过程不利的热量。太阳能光伏电渗析再生系统与热再生相比, 不再受周围气候的影响, 同时也避免了再生溶液的液滴溅入周围环境并污染空气。

2) 太阳能光伏/热再生系统实现了太阳能的综合利用, 通过能耗模拟发现, 在理想状态下, 光伏/热电渗析再生比光伏电渗析再生节能 40.5%, 光伏电渗析再生比光热再生节能 51.6%, 太阳能光热光伏

的综合利用有效降低系统太阳能能耗,是未来太阳能溶液再生技术研究的方向。

3) 在理想工况下,光伏电渗析再生系统和光伏/热电渗析系统太阳能能耗均随热再生效率的增加而减小,分别减小了 33.2% 和 15.1%,热再生效率对光伏热再生系统影响较大,对光伏/热电渗析再生系统的影响较小。

4) 分析溶液入口浓度对 3 种再生系统能耗的影响发现,光伏/热电渗析再生系统、光伏电渗析再生系统与热再生系统相比的节能优势随着溶液入口浓度的增加而减少,分别降低了 1.6% 和 3.6%,光伏/热电渗析再生系统受浓度影响较小。

5) PV/T-ED 再生系统处于理想工况下运行时,对比 LiCl 溶液、LiBr 溶液、CaCl₂ 溶液 3 种溶液再生结果发现,出口浓度变化量 ΔC 由小到大分别为 LiCl-H₂O、CaCl₂-H₂O、LiBr-H₂O,而出口溶液除湿能力由小到大分别为 CaCl₂-H₂O、LiBr-H₂O、LiCl-H₂O。

参考文献

- [1] ZHANG Tao, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Performance investigation and exergy analysis of enthalpy recovery device using liquid desiccant[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106:76-86.
- [2] KABEEL A E, KHALIL A, ELSAYED S S, et al. Dynamic behaviour simulation of a liquid desiccant dehumidification system[J]. Energy, 2018, 144: 456-471.
- [3] DAS R S, JAIN S. Simulation of potential standalone liquid desiccant cooling cycles[J]. Energy, 2015, 81:652-661.
- [4] 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.
- [5] FU Huangxi, LIU Xiaohua. Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality[J]. Building and Environment, 2017, 116: 158-172.
- [6] 刘晓华,李震,张涛. 溶液除湿[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014. (LIU Xiaohua, LI Zhen, ZHANG Tao. Liquid desiccant dehumidification [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [7] SHUKLA D L, MODI K V. A technical review on regeneration of liquid desiccant using solar energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78:517-529.
- [8] ULLAH K R, SAIDUR R, PING H W, et al. A review of solar thermal refrigeration and cooling methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 499-513.
- [9] LI Yutong, LU Lin, YANG Hongxing. Energy and economic performance analysis of an open cycle solar desiccant dehumidification air conditioning system for application in Hong Kong[J]. Solar Energy, 2010, 84(12): 2085-2095.
- [10] PENG Donggen, ZHOU Junming, LUO Danting. Exergy analysis of a liquid desiccant evaporative cooling system[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82:495-508.
- [11] MAHDIYEH D, HAMID M, HAMID-REZA A, et al. Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system[J]. Solar Energy, 2018, 162:364-371.
- [12] YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Comparative study on internally heated and adiabatic regenerators in liquid desiccant air conditioning system[J]. Building and Environment, 2010, 45(8): 1799-1807.
- [13] YIN Yonggao, QIAN Junfei, ZHANG Xiaosong. Recent advancements in liquid desiccant dehumidification technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 31:38-52.
- [14] ZHANG Fan, YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Performance analysis of a novel liquid desiccant evaporative cooling fresh air conditioning system with solution recirculation[J]. Building and Environment, 2017, 117:218-229.
- [15] 徐惠斌,宋新南,葛凤华,等. 常见液体除湿剂池内核态沸腾换热特性[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1211-1216. (XU Huibin, SONG Xinnan, GE Fenghua, et al. Pool nucleate boiling heat transfer of conventional desiccant solutions[J]. CIESC Journal, 2013, 64(4): 1211-1216.)
- [16] 李达,梁彩华,蒋东海,等. 热源塔热泵溶液低压沸腾再生装置性能研究[J]. 制冷技术, 2017, 37(2):25-31. (LI Da, LIANG Caihua, JIANG Donghai, et al. Research on performance of low pressure boiling solution regeneration device of heat-source tower heat pump[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(2):25-31.)
- [17] 徐惠斌,胡自成,宋新南,等. 高浓度氯化锂水溶液沸腾换热特性实验[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 465-468. (XU Huibin, HU Zicheng, SONG Xinnan, et al. Experiment study on the of concentrated boiling heat transfer property aqueous LiCl solution[J]. Journal of Changchun University of Technology(Natural Science Edition), 2012, 33(4): 465-468.)
- [18] 徐惠斌,宋新南,葛凤华,等. 常压下溴化锂水溶液沸腾换热特性实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(3):56-59, 95. (XU Huibin, SONG Xinnan, GE Fenghua, et al. Experiment study of pool nucleate boiling heat transfer of aqueous LiBr solution at normal atmospheric pressure[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 56-59, 95.)
- [19] YON H R, CAI Wenjian, WANG Youyi, et al. Performance investigation on a novel liquid desiccant regeneration system operating in vacuum condition[J]. Applied Energy,

- 2018, 211: 249–258.
- [20] PENG Donggen, LUO Danting. Modeling and parametrical analysis on internally-heated liquid desiccant regenerator in liquid desiccant air conditioning[J]. *Energy*, 2017, 141: 461–471.
- [21] PENG Donggen, ZHANG Xiaosong. Experimental investigation on regeneration performance, heat and mass transfer characteristics in a forced solar collector/regenerator[J]. *Energy*, 2016, 101: 296–308.
- [22] PENG Donggen, LUO Danting, CHENG Xiaosong. Modeling and performance comparisons of the grading and single solar collector/regenerator systems with heat recovery[J]. *Energy*, 2018, 144: 736–749.
- [23] LUO Yimo, SHAO Shuangquan, QIN Fei, et al. Investigation on feasibility of ionic liquids used in solar liquid desiccant air conditioning system[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2718–2724.
- [24] CHENG Qing, ZHANG Xiaosong, LI Xiuwei. Double-stage photovoltaic/thermal ED regeneration for liquid desiccant cooling system[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 51: 64–72.
- [25] 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 Qing, ZHANG Xiaosong. Performance analysis of double stage PV/T electrodialysis regeneration system[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1890–1894.)
- [26] 贾艳刚, 刘帆, 张小松, 等. 光伏板阵列对空气夹层内自然通风影响的数值模拟[J]. *制冷技术*, 2017, 37(3): 18–23. (JIA Yangang, LIU Fan, ZHANG Xiaosong, et al. Numerical simulation on influence of photovoltaic panel array on natural ventilation in air layer[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2017, 37(3): 18–23.)
- [27] 吴俊伟. 太阳能光热与光伏制冷系统对比分析[J]. *制冷技术*, 2016, 36(3): 43–48. (WU Junwei. Comparative analysis of solar photothermal and photovoltaic refrigeration systems[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology* 2016, 36(3): 43–48.)
- [28] LI Xiuwei, ZHANG Xiaosong, QUAN Shuo. Single-stage and double-stage photovoltaic driven regeneration for liquid desiccant cooling system[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4908–4917.
- [29] 李秀伟, 张小松, 程清, 等. 光伏/光热驱动的溶液除湿空调系统性能比较[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2): 295–300. (LI Xiuwei, ZHANG Xiaosong, CHENG Qing, et al. Performance comparison between photovoltaic and solar thermal driven liquid dehumidification air-conditioning system[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2014, 44(2): 295–300.)
- [30] CHENG Qing, ZHANG Xiaosong. A solar desiccant pretreatment electrodialysis regeneration system for liquid desiccant air-conditioning system[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 67(12): 434–444.
- [31] 程清, 张小松. 一种新型光伏光热溶液再生系统性能研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(7): 1616–1621. (CHENG Qing, ZHANG Xiaosong. Performance analysis of a new PV/T desiccant regeneration system[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(7): 1616–1621.)
- [32] CHENG Qing, ZHANG Xiaosong, JIAO Shun. Experimental comparative research on electrodialysis regeneration for liquid desiccant with different concentrations in liquid desiccant air-conditioning system[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 155: 475–483.
- [33] CHENG Qing, ZHANG Xiaosong, JIAO Shun. Influence of concentration difference between dilute cells and regenerate cells on the performance of electrodialysis regenerator[J]. *Energy*, 2017, 140(1): 646–655.
- [34] GUO Yi, MA Zhenjun, AL-JUBAINAWI A, et al. Using electrodialysis for regeneration of aqueous lithium chloride solution in liquid desiccant air conditioning systems[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 116: 285–295.
- [35] AL-JUBAINAWI A, MA Zhenjun, GUO Yi, et al. Factors governing mass transfer during membrane electrodialysis regeneration of LiCl solution for liquid desiccant dehumidification systems[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 30–41.
- [36] CHENG Qing, XU Wenhao. Performance analysis of a novel multi-function liquid desiccant regeneration system for liquid desiccant air-conditioning system[J]. *Energy*, 2017, 140(P1): 240–252.
- [37] AL-WAELI A H A, SOPIAN K, KAZEM H A, et al. Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 109–130.
- [38] YUAN Weiqi, JI Jie, LI Zhaomeng, et al. Comparison study of the performance of two kinds of photovoltaic/thermal (PV/T) systems and a PV module at high ambient temperature[J]. *Energy*, 2018, 148: 1153–1161.
- [39] CHENG Qing, ZHANG Xiaosong. Review of solar regeneration methods for liquid desiccant air-conditioning system[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 67: 426–433.
- [40] 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.
- [41] PATIL K R, TRIPATHI A D, PATHAK G. Thermodynamic properties of aqueous electrolyte solutions/vapor pressure of aqueous solution of LiCl, LiBr, and LiI[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1990, 35(2): 166–168.

(下转第 166 页)

- tion analysis in high heat density space[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2011, 11(1):30–36.)
- [14] 李奇贺, 黄虎, 张忠斌. 热管式机房空调性能试验研究[J]. *暖通空调*, 2010, 40(4):145–148. (LI Qihe, HUANG Hu, ZHANG Zhongbin. Performance experiment of heat pipe type air conditioning units for computer and data processing rooms[J]. *Journal of HV & AC*, 2010, 40(4):145–148.)
- [15] YAN Gang, FENG Yongbin, PENG Leqin. Experimental analysis of a novel cooling system driven by liquid refrigerant pump and vapor compressor[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 49:11–18.
- [16] MA Yuezheng, MA Guoyuan, ZHANG Shuang, et al. Experimental investigation on a novel integrated system of vapor compression and pump-driven two phase loop for energy saving in data centers cooling[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 106:194–200.
- [17] 王铁军, 王蒙, 刘向农, 等. 机房用热管复合型空调机组及其控制方法: CN102538100A [P]. 2012-07-04. (WANG Tiejun, WANG Meng, LIU Xiangnong, et al. The integrated air conditioning unit based on heat pipe and its control method for computer room: CN102538100A [P]. 2012-07-04.)
- [18] 王铁军, 曾晓程, 刘志峰, 等. 一种复合式制冷多联空调系统. CN104251529A [P]. 2014-12-31. (WANG Tiejun, ZENG Xiaocheng, LIU Zhifeng, et al. A integrated refrigeration VRV air conditioning system: CN104251529A [P]. 2014-12-31.)
- [19] 王铁军, 赵绍博, 王俊, 等. 一种复合制冷系统用组合式风冷换热总成: CN104266411A [P]. 2015-01-07. (WANG Tiejun, ZHAO Shaobo, WANG jun, et al. A combined air cooling heat exchange assembly for the integrated refrigeration system: CN104266411A [P]. 2015-01-07.)
- [20] 王铁军, 李宏洋, 吴昊, 等. 一种多功能换热器的设计与试验[J]. *流体机械*, 2014, 42(9):1–4. (WANG Tiejun, LI Hongyang, WU Hao, et al. Design and experiment of a kind of multi-functional heat exchanger[J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(9):1–4.)
- 通信作者简介**
王铁军, 男, 教授, 合肥工业大学制冷与空调技术研究所所长, 13905510159, E-mail: wtj555@sina.com. 研究方向: 制冷空调系统节能与能源综合利用。
- About the corresponding author**
Wang Tiejun, male, professor, the Head of Refrigeration and Air Conditioning Institute, Hefei University of Technology, + 86 13905510159, E-mail: wtj555@sina.com. Research fields: conservation and utilization of energy in refrigeration and air conditioning system.
- (上接第 160 页)
- [42] 程清. 基于电渗析的溶液再生系统性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014. (CHENG Qing. Performance research on liquid destccant regeneration system using electrodialysis [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.)
- [43] 杨青. 基于电极再生溶液吸收剂的空调系统初步研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017. (YANG Qing. Primary research on the air-conditioning system regenerating liquid absorbent with electrodes [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.)
- 通信作者简介**
张小松, 男, 教授, 博士生导师, 东南大学能源与环境学院, 15251890778, E-mail: 230179378@seu.edu.cn. 研究方向: 太阳能溶液除湿/再生。
- About the corresponding author**
Zhang Xiaosong, male, professor, doctoral supervisor, School of Energy and Environment, Southeast University, + 86 15251890778, E-mail: 230179378@seu.edu.cn. Research fields: solar solution dehumidification/regeneration.