

The Research and Investigation of the Cooling Performance of an Adsorption Cooling System Using Novel Composite Adsorbents

Longqian Zhu¹, Chili Wu^{2*}, Wei He², Senwen Luo², Hanying Hu³

¹Fok Ying Tung Graduate School, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong

²Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

³Guangzhou Wanbao Group Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

Email: *chiliwu@ust.hk, lzhuac@connect.ust.hk

Received: Dec. 22nd, 2018; accepted: Jan. 7th, 2019; published: Jan. 14th, 2019

Abstract

In this study, a double-bed adsorption cooling system using vehicle radiators as an adsorbent bed was built and the system performance was tested and investigated experimentally under various working conditions. The results proved that the operating conditions have a positive effect on the cooling performance of the system. Zeolite 13X/CaCl₂ composite adsorbent-water was used as the adsorbent-adsorbate working pair. The adsorption cooling system contained two adsorbers, an evaporator, a chilled water tank, a condenser, an overall controller, a hot water tank and a water cooling tower. It was equipped with measurement instruments and supplementary system components. Various operating conditions for example, adsorption/desorption phase time, mass recovery time, heat recovery phase time, cooling water inlet temperature, hot water inlet temperature and hot water flow rate, were investigated and optimized. The coefficient of performance (COP) of the system was recorded at about 0.25 while the specific cooling power (SCP) was about 171 W/kg under the operating condition of about 25°C cooling water inlet temperature, 85°C hot water inlet temperature, 16°C chilled water inlet temperature, 600 s of adsorption/desorption phase time, 50 s of heat and mass recovery time, 2.4 kg/min chilled water flow rate, 7.8 kg/min hot water flow rate and 8 kg/min cooling water flow rate.

Keywords

Adsorption Cooling System, Composite Adsorbent, Coefficient of Performance, Specific Cooling Power, Operating Conditions

*通讯作者。

基于新型复合吸附剂的吸附制冷系统的研究和测试

朱龙潜¹, 吴池力^{2*}, 贺伟², 罗森文², 胡韩莹³

¹香港科技大学, 霍英东研究院, 香港

²广州市香港科大霍英东研究院, 建筑物能源研究中心, 广东 广州

³广州市万宝集团有限公司, 广东 广州

Email: chiliwu@ust.hk, lzhuac@connect.ust.hk

收稿日期: 2018年12月22日; 录用日期: 2019年1月7日; 发布日期: 2019年1月14日

摘要

本文研发了一台使用车用换热器作为吸附床的双箱吸附制冷系统, 并在不同的运行参数下对系统性能进行了测试及研究, 证明了运行参数优化对系统性能有着积极的影响。本次研究中使用了分子筛13X/氯化钙复合吸附剂-水作为吸附剂-吸附质工质对。吸附制冷系统由两个吸附器, 一个蒸发器, 一个载冷水箱, 一个冷凝器, 一个控制器, 一个热水箱及一个冷水箱组成。系统还添加了一些数据测量及辅助设备。实验中对多个运行参数, 例如: 吸附/脱附时间, 回质时间, 回热时间, 冷却水进水温度, 热水进水温度, 热水流速等进行了研究及优化。在25℃冷却水进水温度, 85℃热水进水温度, 16℃载冷水进水温度, 600 s吸附/脱附时间, 50 s回质回热时间, 2.4 kg/min载冷水流速, 7.8 kg/min热水流速, 以及8 kg/min冷却水流速的工况下, 系统能效比(COP)为0.25, 单位制冷量(SCP)为171 W/kg。

关键词

吸附制冷系统, 复合吸附剂, 能效比, 单位制冷量, 运行参数

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪言

在过去的几十年中, 全球气候变暖以及能源短缺受到越来越多的关注。与此同时, 人们对电能的需求, 特别是在通风制冷设备上, 却越来越大。由此可见, 若能在空调设备上节约电能, 将能在节能这一目标上做出巨大的贡献。在拥有废热, 太阳能等低品味热源的情况下, 吸附式制冷技术是实现这一目标, 替代压缩式制冷技术, 节省电能的一个可行方案[1]。

吸附剂是吸附制冷系统中的一个核心[2] [3]。Ahmed 等总结了一部分可用的吸附剂, 并分类为了 3 种: 物理吸附剂, 化学吸附剂及复合吸附剂[4]。Solmus 等研发了一台吸附制冷系统并使用了天然沸石作为吸附剂, 系统 COP 为 0.26, SCP 为 7 W/kg [5]。TSO 等研发了一种复合吸附剂, 主要由活性炭, 氯化钙组成。在理想状况下, 其 SCP 为 378 W/kg, COP 为 0.7 [6] [7]。由此可见, 复合吸附剂相对于普通的吸附剂, 更具有优越性, 此次研究将使用自主研发的分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂。

在系统运行过程中，运行参数是影响系统性能的关键因素[8]。Miyazaki 等研发了一台多个吸附器的新型蒸发式吸附制冷系统，并研究了载冷水进水温度及循环时间对系统性能的影响。由实验结果得知，载冷水进水温度越高，系统 SCP 和 COP 越高，与此同时，更长的预热预冷时间，可以减小载冷水出水温度的波动范围[9]。TSO 等通过数值模拟研究了吸附脱附时间，热水进水温度，冷却水进水温度以及载冷水进水温度对系统性能的影响。模拟结果表明吸附脱附时间，热水进水温度，冷却水进水温度对系统 SCP 和 COP 都有较大的影响[10] [11]。

虽然现在已经有很多研究在改进吸附剂，运行参数优化等，但是仍然有更多的工作需要去完成。此次研究主要目的是研发一台使用车用换热器作为吸附床，使用分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂，由低温热源驱动的吸附制冷系统。最后，通过实验将研究不同的运行参数，例如：冷却水进水温度，热水流速，冷却水流速，吸附脱附时间，以及回质回热时间对系统性能的影响。最终，通过系统的性能测试，验证分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂的应用潜力。

2. 吸附制冷系统详解

2.1. 复合吸附剂

吸附剂是吸附制冷系统中最关键的部分之一。分子筛 13X/CaCl₂ 复合剂制备流程如下：

- 1) 在 200℃ 下煅烧分子筛 13X 持续 12 小时；
- 2) 以质量比 1:9 的比例混合分子筛 13X 及浓度为 40% 的 CaCl₂ 溶液，在室温下持续搅拌 24 小时；
- 3) 过滤掉 CaCl₂ 溶液，并用去离子水清洗混合后的以分子筛为主体的吸附剂；
- 4) 在 110℃ 下烘干清洗后的吸附剂 12 小时。烘干后的吸附剂即为分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂。

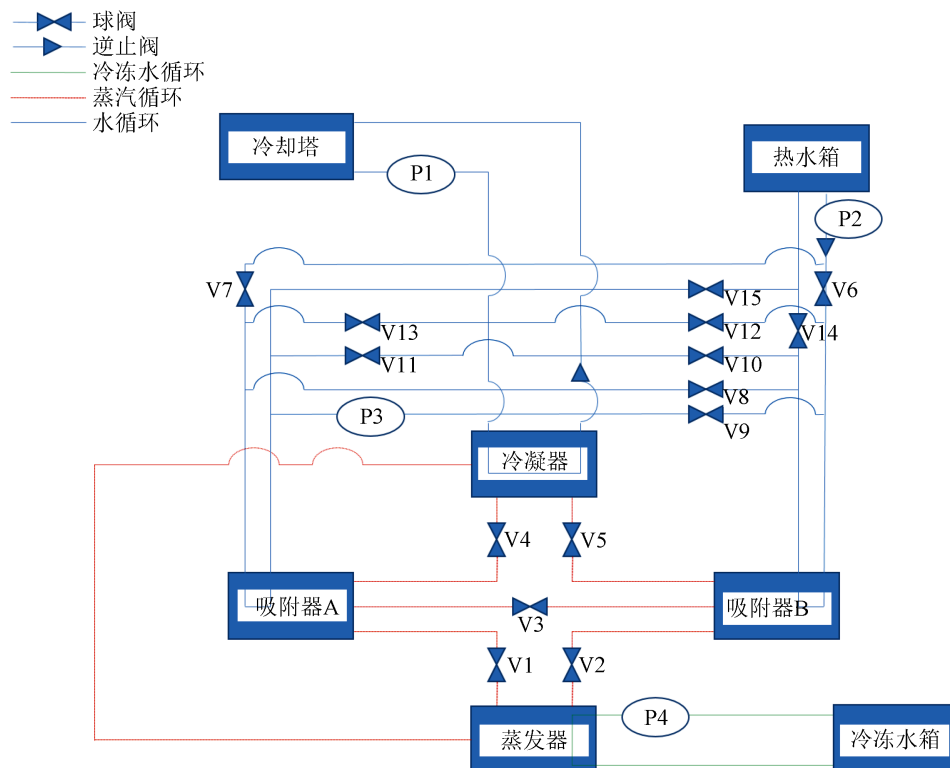


Figure 1. The schematic design of the adsorption cooling system
图 1. 吸附制冷系统原理图

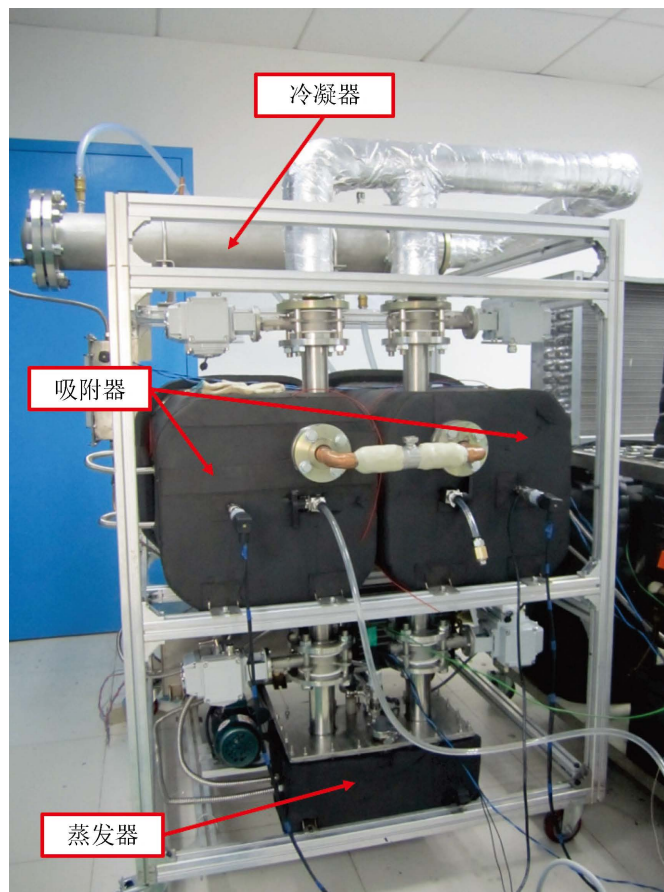


Figure 2. The adsorption cooling system
图 2. 吸附制冷系统

2.2. 吸附制冷系统

图 1 展示了本文中使用的吸附制冷系统的原理图。吸附制冷系统的主要部件有：冷凝器，吸附器，蒸发器，控制器，水泵以及热水箱。吸附制冷系统的工作原理为：大量复合吸附剂填充在 2 个吸附器中的吸附床上。2 个吸附器分别为吸附箱和脱附箱。在吸附阶段，在蒸发器中，有大量制冷剂(水)在低压下低温沸腾吸热制冷，并产生气体气态制冷剂(水汽)；吸附箱中的复合吸附剂吸附从蒸发器中传过来的水汽；冷却水通入吸附箱，通过换热器带走吸附时产生的热量。经过一定时间后，复合吸附剂吸附达到饱和。饱和的复合吸附剂需要被加热再生，此过程为脱附阶段。热水通入脱附箱，通过换热器加热复合吸附剂，而水汽从中脱附而出。当脱附完全后，复合吸附剂完成再生。由于冷凝器中气压比脱附箱气压低，水汽会流入冷凝器并冷凝成水珠。同时冷却水通入冷凝器带走冷凝时产生的热量并保持冷凝器温度比脱附的水汽温度低。水珠则因为重力及压差作用，流回蒸发器。为了保证系统持续制冷，需要 2 个或以上吸附器，一个用于吸附时(吸附箱)，另一个脱附再生(脱附箱)，并交叉循环。

图 2 展示了本文中使用的吸附制冷系统。冷却塔放置于室外并提供冷却水给系统。为了给系统的脱附阶段提供稳定的脱附温度，冷却水温度以及载冷水温度，分别安装了 3 kW 的电加热器到了热水箱中，2 kW 的电加热器到冷水塔中以及使用了 2 kW 的冷水机组。所有电加热器及冷水机组都被集成在总控制器中的 PID 温度控制器中。所有由热电偶以及压力传感器所得到的数据都由数据采集设备所采集并直接导入电脑中。在电脑中的数据采集界面由 NI LabVIEW 构建。数据每 3 秒采集一次并上传到电脑中。

2.3. 计算

系统的 COP 由公式(1)得出。需要注意的是, 算出的 COP 是平均值[12]:

$$\text{COP} = \left(\int_0^{t_{\text{cycle}}} (Q_{\text{chill}} / Q_{\text{des}}) dt \right) / \left(\int_0^{t_{\text{cycle}}} dt \right), \quad (1)$$

式中, Q_{chill} 为制冷量; Q_{des} 为消耗的热能; t_{cycle} 为完成一个完整循环需要的时间。系统的制冷量以及热能消耗则通过公式(2)和公式(3)计算的出[12]:

$$Q_{\text{chill}} = \dot{m}_{\text{chill}} c_{p,\text{water}} (T_{\text{chill},\text{in}} - T_{\text{chill},\text{out}}), \quad (2)$$

$$Q_{\text{des}} = \dot{m}_{\text{hot}} c_{p,\text{water}} (T_{\text{hot},\text{in}} - T_{\text{hot},\text{out}}), \quad (3)$$

式中, \dot{m}_{chill} 和 \dot{m}_{hot} 分别为载冷水流速和热水流速。 $c_{p,\text{water}}$ 为水的比热容。 $T_{\text{chill},\text{in}}$ 和 $T_{\text{chill},\text{out}}$ 分别为载冷水进水温度及出水温度。 $T_{\text{hot},\text{in}}$ 和 $T_{\text{hot},\text{out}}$ 分别为热水进水温度及出水温度。公式(4)则陈述了 t_{cycle} 的计算方法[12]:

$$t_{\text{cycle}} = 2t_{\text{ads,des}} + 2t_{\text{hmr}}, \quad (4)$$

式中, $t_{\text{ads,des}}$ 为吸附/脱附时间; t_{hmr} 为回质回热时间。最后, 公式(5)为 SCP 的计算方式[12]:

$$\text{SCP} = Q_{\text{chill}} / W, \quad (5)$$

式中 W 为单个吸附器中吸附剂的质量。

3. 实验结果及分析

表 1 为吸附制冷系统的标准运行参数。由于热能消耗是由热水箱的进出水温差计算的出, 因此热损失也被计算在内。热损失主要包括从吸附器散失到外界, 从热水箱散失到外界, 从管道散失到外界的能量。表 1 中, $T_{\text{cool,in}}$ 为冷却水进水温度; t_{hmr} 为回质回热时间; \dot{m}_{cool} 为冷却水流速。

Table 1. Standard operating condition of the adsorption cooling system
表 1. 吸附制冷系统的标准运行参数

参数	数值	单位
$T_{\text{hot,in}}$	85	°C
$T_{\text{cool,in}}$	25	°C
$T_{\text{chill,in}}$	16	°C
$t_{\text{ads,des}}$	600	s
t_{hmr}	60	s
\dot{m}_{hot}	8	kg/min
\dot{m}_{cool}	8	kg/min
\dot{m}_{chill}	2.4	kg/min
W	7	kg

通过控制变量法, 逐个测试冷却水温度, 吸附/脱附时间, 回质回热时间, 热水流速及冷却水流速对系统性能的影响。具体测试的参数及范围如表 2 所示。

Table 2. Varied operating conditions of the adsorption cooling system
表 2. 吸附制冷系统多项不同的运行参数

参数	数值	单位
$T_{\text{cool,in}}$	20, 30, 35, 40	°C
$t_{\text{ads,des}}$	480, 540, 660, 720	s
t_{hmr}	40, 50, 70, 80	s
\dot{m}_{hot}	7.6, 7.8, 8.2, 8.4	kg/min
\dot{m}_{cool}	7.6, 7.8, 8.2, 8.4	kg/min

由于吸附制冷系统可以用廉价甚至是免费的低品位热源(例如: 太阳能, 废热等)驱动, 因此 SCP 是描述系统性能的最主要参数, 而 COP 仅作为参考作用。在优化参数的实验中, 最佳参数的判定以 SCP 的高低作为主要依据, 以 COP 的高低为次要依据。在测试过程中, 为减少误差, 每组实验均重复 5 组, 并取平均值作为最终的实验结果。

3.1. 冷却水进水温度对系统性能的影响

在本文中, 对冷却水进水温度对系统性能的影响进行了实验研究, 实验结果如图 3 所示。

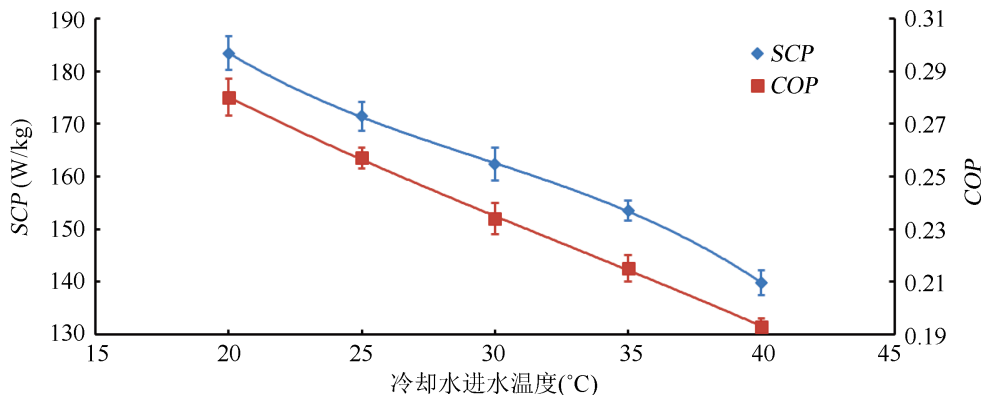


Figure 3. Effect of the cooling water inlet temperature on the cooling performance of the system
图 3. 冷却水进水温度对系统性能的影响

冷却水进水温度初始设定为 25°C, 而后通过冷却塔中的电加热器以及 2 kW 的冷水机组分别调控到 20°C, 30°C, 35°C 和 40°C。由图可见, 当冷却水温度升高时, 系统性能会有所降低。系统在 40°C 冷却水进水温度时的 SCP 和 COP 相较于 20°C 冷却水进水温度时分别降低了 24% 和 31%。当冷却水进水温度更低时, 吸附剂可以在吸附阶段吸附更多的水汽, 从而使 SCP 和 COP 更高。即使冷却水进水温度高达 40°C, 该系统仍然保持着稳定的制冷效果, 证明该系统具有良好的性能。由于在实际应用中, 冷却水温度一般为 25°C 左右, 因此此后的实验中, 冷却水进水温度被设置为 25°C。

3.2. 吸附/脱附时间对系统性能的影响

图 4 所展示的是吸附/脱附时间对系统性能的影响的实验结果。从图 4 中可见, SCP 和 COP 的最大值均出现在吸附/脱附时间为 600 s 的时候。当吸附/脱附时间过短时, 吸附箱中的吸附剂不能完全达到饱和而脱附箱中的吸附剂则不能完全脱附再生, 因此导致了吸附剂利用不完全, 系统性能的降低。当吸附/脱附时间过长时, 吸附剂已达到饱和, 不能吸附更多的水汽, 从而使得气压持续上升, SCP 持续下降。在实际运行过程中, 当吸附/脱附时间过长时, 制冷量持续降低, 然而热损基本维持不变, 因此 COP 会持续降低。在这种情况下, 600 s 为最优吸附/脱附时间。

3.3. 回质回热时间对系统性能的影响

图 5 所展示的是回质回热时间对系统性能的影响的实验结果。SCP 的最大值出现在 50 s, 而 COP 的最大值出现在 70 s。在回质回热阶段中, 2 个吸附器中的吸附床相互连通, 内部的导热流体(水)进行热交换。同时 2 个吸附器箱体之间也相互连通, 因为压差的原因, 水汽从高压的脱附箱流入到低压的吸附箱, 直到 2 个吸附器中的气压平衡为止, 此过程可以使脱附箱里的压力进一步降低, 从而脱附出更多的水汽, 再生得更彻底, 使吸附剂在下一阶段的吸附中能吸附更多的水汽。在回质回热阶段中, 通过热回收, 使

吸附床达到预热的效果，既能回收热量，又能使吸附床在下一阶段更快的达到脱附温度，使系统在下一个循环的实时制冷量更快的达到最高值。然而在回质回热阶段，2个吸附器与蒸发器及冷凝器断开，因此系统此时基本没有制冷量，所以回质回热时间不能过长。然而过短的回质回热时间，会导致回质回热不完全，也不一定能带来更好的制冷效果。综上所述，50 s是系统的最优回质回热时间。

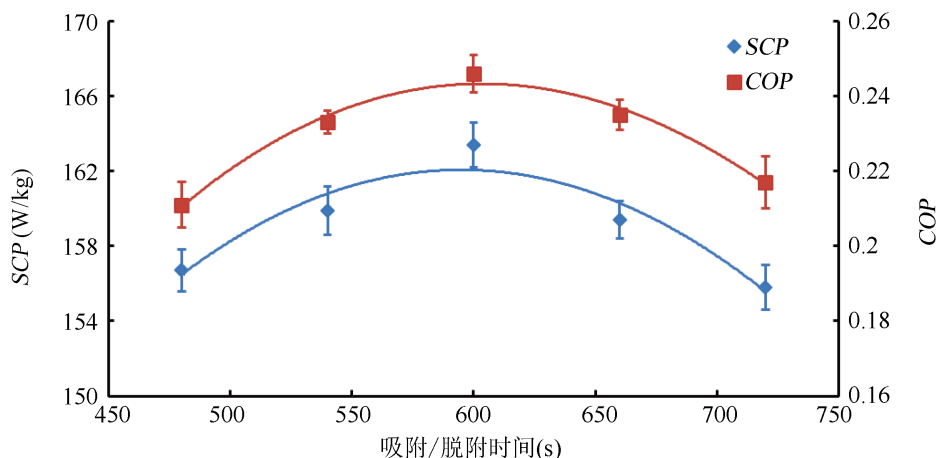


Figure 4. Effect of the adsorption/desorption phase time on the cooling performance of the system
图 4. 吸附/脱附时间对系统性能的影响

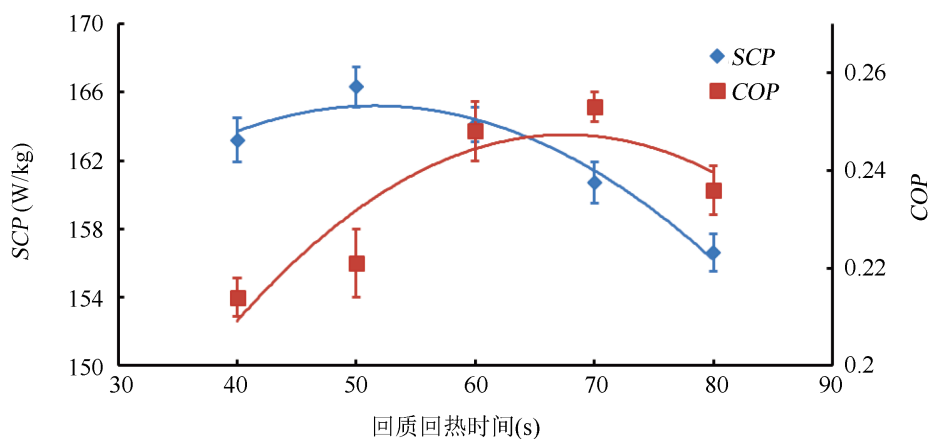


Figure 5. Effect of the heat and mass recovery time on the cooling performance of the system
图 5. 回质回热时间对系统性能的影响

3.4. 热水流速及冷却水流速对系统性能的影响

由图 6 以及图 7 可见，当热水流速为 7.8 kg/min，冷却水流速为 8 kg/min 时，SCP 达到最大值。当流速过低时，会导致热水与脱附箱中吸附床之间，冷却水与吸附箱中吸附床之间温差过小，降低换热效率；当流速过高时，则会导致热水与脱附箱中吸附床之间，冷却水与吸附箱中吸附床之间换热不充分，降低换热效率。与此同时，过高的流速也会导致更高的热损失。因此 7.8 kg/min 为最优热水流速，因此 8 kg/min 为最优冷却水水流速。

本文对吸附制冷系统的多个运行参数的最优值进行了研究，然而最优值具体的数值取决于多个原因，例如：吸附剂总重量，吸附床及吸附器的设计，管道的设计，阀门的大小等等。因此，系统一旦有所改变，最优值也会相应的进行变化。

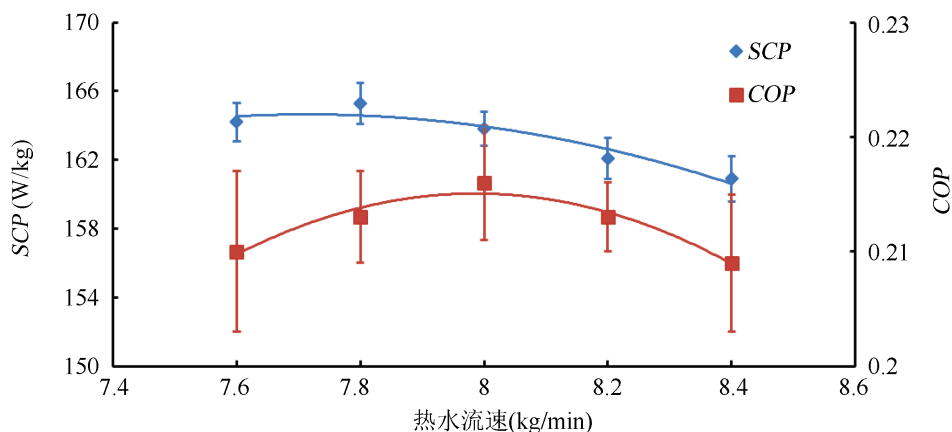


Figure 6. Effect of the hot water flow rate on the cooling performance of the system

图 6. 热水流速对系统性能的影响

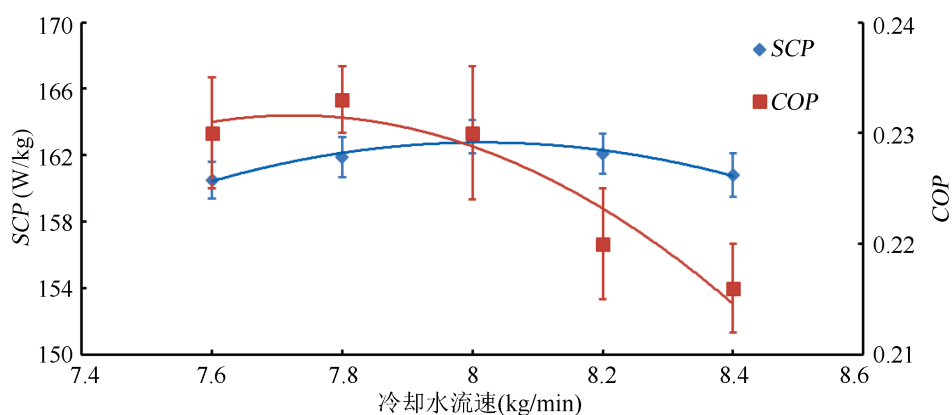


Figure 7. Effect of the cooling water flow rate on the cooling performance of the system

图 7. 冷却水流速对系统性能的影响

3.5. 导热流体在各个位置的温度曲线

图 8 所展示的是导热流体在最优运行参数下在各个位置的温度曲线。系统的运行参数为：85℃热水进水温度，25℃冷却水进水温度，16℃载冷水进水温度，600 s 吸附/脱附时间，50 s 回质回热时间，7.8 kg/min 的热水流速，8 kg/min 的冷却水流速，2.4 kg/min 的载冷水流速。系统在该运行参数下的 SCP 为 171 W/kg，COP 为 0.25。载冷水出水温度在运行过程中一直低于载冷水入水温度，证明了系统有稳定的持续制冷能力，复合吸附剂有稳定的吸附及脱附能力。热水进水温度在完成回热阶段之后有个快速的较大幅度的下降，这表示了有一部分完成了回质回热阶段之后的较低温的水涌入了热水箱并导致了热水温度下降，同时也表明了吸附床及复合吸附剂具有良好的传热能力。热水与冷却水流速相近，然而热水温度在完成回热阶段之后下降幅度大，而冷却水温度下降幅度小，是因为冷却塔容量为 200 L 而热水箱容量仅为 50 L。

4. 结论

在本文中，研发了一台吸附制冷系统。系统中使用了分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂。单个吸附器中的吸附床能填装 7 kg 复合吸附剂。本文主要研究了不同的运行参数对系统性能的影响，分析了其原因，并验证了分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂在吸附制冷系统中的应用潜力。

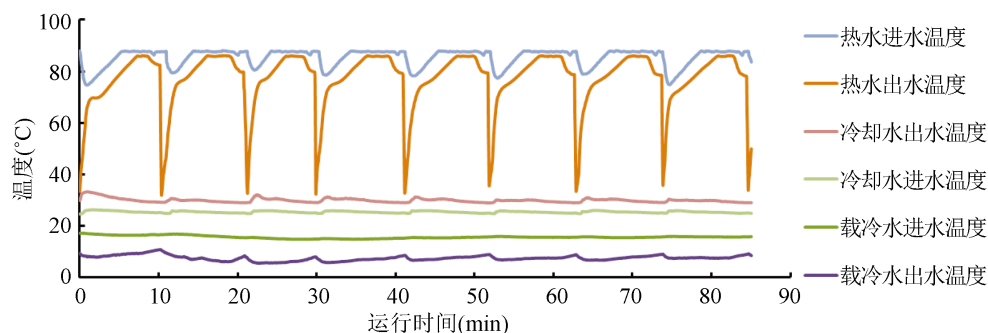


Figure 8. Temperature profiles of the heat transfer fluid at different locations

图 8. 导热流体在各个位置的温度曲线

在优化运行参数后，吸附制冷系统的 SCP 为 171 W/kg，而 COP 为 0.25。由参数优化实验的结果可见：冷却水进水温度越低系统性能越好；最优吸附/脱附时间为 600 s；最优回质回热时间为 50 s；最优热水流速为 7.8 kg/min，最优冷却水流速为 8 kg/min。通过本文的研究发现，运行参数对系统性能有明显的影响；分子筛 13X/CaCl₂ 复合吸附剂在吸附制冷系统的应用上具有一定的潜力。

基金项目

广州市科技项目(No. 201807010097)；广东省博士后项目(No. 219600)；南海科大专项资金(No. FSNH-18FYTRI01)。

参考文献

- [1] Wang, R.Z. and Oliveira, R.G. (2006) Adsorption Refrigeration—An Efficient Way to Make Good Use of Waste Heat and Solar Energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, **32**, 424-458. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.01.002>
- [2] Wang, D.C., Wu, J.Y., Xia, Z.Z., et al. (2005) Study of a Novel Silica Gel-Water Adsorption Chiller, Part II Experimental Study. *International Journal of Refrigeration*, **28**, 1084-1091. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.03.002>
- [3] Liu, Y.L., Wang, R.Z. and Xia, Z.Z. (2005) Experimental Performance of a Silica Gel-Water Adsorption Chiller. *Applied Thermal Engineering*, **25**, 359-375. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.012>
- [4] Ahmed, A., Salem, M., Ismael, I.M., et al. (2012) An Overview on Adsorption Pairs for Cooling. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **19**, 565-572.
- [5] Solmus, I., Kaftanoglu, B., Yamali, C., et al. (2011) Experimental Investigation of a Natural Zeolite-Water Adsorption Cooling Unit. *Applied Energy*, **88**, 4206-4213. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.057>
- [6] Tso, C.Y., Fu, S.C. and Chao, C.Y.H. (2014) Modeling a Solar-Powered Double Bed Novel Composite Adsorbent (Silica Activated Carbon/CaCl₂)-Water Adsorption Chiller. *Building Simulation*, **7**, 185-196. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0129-4>
- [7] Tso, C.Y. and Chao, C.Y.H. (2012) Activated Carbon, Silica-Gel and Calcium Chloride Composite Adsorbents for Energy Efficient Solar Adsorption Cooling and Dehumidification Systems. *International Journal of Refrigeration*, **35**, 1626-1638. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.05.007>
- [8] Sapienza, A., Santamaria, S., Frazzic, A., et al. (2011) Influence of the Management Strategy and Operating Conditions on the Performance of an Adsorption Chiller. *Energy*, **36**, 5532-5538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.020>
- [9] Miyazaki, T., Akisawa, A. and Saha, B.B. (2010) The Performance Analysis of a Novel Dual Evaporator Type Three-Bed Adsorption Chiller. *International Journal of Refrigeration*, **33**, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.10.005>
- [10] Tso, C.Y., Chao, C.Y.H. and Fu, S.C. (2012) Performance Analysis of a Waste Heat Driven Activated Carbon Based Composite Adsorbent-Water Adsorption Chiller Using Simulation Model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 7596-7610. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.064>
- [11] Tso, C.Y., Chan, K.C., Chao, C.Y.H., et al. (2015) Experimental Performance Analysis on an Adsorption Cooling

System Using Zeolite 13X/CaCl₂ Adsorbent with Various Operation Sequences. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **85**, 343-355. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.005>

- [12] Zhu, L.Q., Tso, C.Y., Chan, K.C., *et al.* (2018) Experimental Investigation on Composite Adsorbent-Water Pair for a Solar-Powered Adsorption Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, **131**, 649-659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.053>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org