

基于沸石和活性炭的二级吸附式制冷循环系统

何兆红^{1,2} 黄宏宇^{1,2} 邓立生^{1,2} 王南南^{1,2} 呼和涛力^{1,2} 李军³
小林敬幸³ 窪田光宏³ 陈勇^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;
2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 日本名古屋大学, 名古屋 464-8603, 日本)

摘要 二级吸附式制冷循环是降低吸附式制冷机驱动热源温度的有效措施,但是存在传质性能下降的问题。通过一级、二级循环吸附剂循环吸附量分析发现,不同循环采用不同吸附剂,可充分挖掘不同吸附剂吸附性能潜力,能够解决二级吸附式制冷循环系统采用单一吸附剂造成传质恶化的局面。本文选择沸石 FAM-Z01、活性炭分别为一级、二级循环对应的吸附剂,建立不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统,并开展系统性能研究。

关键词 二级吸附式制冷; 传质; 吸附量; 制冷性能系数

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)05-1089-04

Two-Stage Adsorption Refrigeration System Based on Zeolite and Activated Carbon as Adsorbents

HE Zhao-Hong^{1,2} HUANG Hong-Yu^{1,2} DENG Li-Sheng^{1,2} WANG Nan-Nan^{1,2} HUHETAOLI^{1,2}
LI Jun³ KOBAYASHI Noriyuki³ KUBOTA Mitsuhiro³ CHEN Yong^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan)

Abstract The two-stage adsorption refrigeration system can lower the heat source temperature of the adsorption chiller obviously. But the mass transfer performance of two-stage adsorption refrigeration system with single adsorbent may degrade compared to the common adsorption refrigeration. It was that applying different adsorbent to the two-stage adsorption cycle improves the adsorption capacity of the different adsorbent through the adsorption capacity analysis of the first and the second cycles. The mass transfer performance was enhanced by with different adsorbent remarkably. The two-stage adsorption refrigeration system with zeolite (FAM-Z01) and activated carbon for the first and second stage cycle adsorbent respectively was proposed, and the system performances were evaluated experimentally.

Key words two-stage adsorption refrigeration; mass transfer; adsorption capacity; coefficient of performance

0 引 言

吸附式制冷机是一种利用热能驱动制冷机,由于能够利用低品位热源,具有结构简单、无运动部件、使用环保工质等优点^[1],应用前景广阔。近几十年来,因能源、环境问题的困扰,推动了吸附式制冷技术进一步的发展。目前日本、德国公司生产硅胶-水吸附式制冷机组^[2-3];国内吸附式制冷机也有了突破,以上海交通大学的研究成果为代表,驱动

热源温度为 55~95℃,该制冷机冷水机组制冷量 6~10 kW^[4-6]。

吸附式制冷机的驱动热源低,是传统压缩式制冷、吸收式制冷所不具备的,但是还有大量的低于 60℃ 热源不能得到有效利用,降低吸附式制冷机的驱动热源温度是其发展的重要方向之一。B. B. Saha 等人^[7-8]对硅胶-水二级吸附式制冷系统进行了

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-04-19

基金项目: 广东省自然科学基金 (No.S2013010014709); 中国科学院“国际访问学者”(No.2015VTC002); 中国科学院可再生能源重点实验室基金 (No.y407j41001)

作者简介: 何兆红 (1983-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事吸附式制冷方面的研究。 通信作者: 黄宏宇, 研究员, Email: huanghy@ms.giec.ac.cn

研究, 驱动热源温度 55°C 时, 二级吸附式制冷系统的 COP 达到 0.36, 同时又研究了硅胶 - 水三级吸附式制冷循环系统, 结果发现三级吸附式制冷循环系统能够利用 40~95°C 的低品位热能, 与一级吸附式制冷循环系统相比, 驱动热源有了显著的降低。所以, 二级/多级吸附式制冷循环是降低吸附式制冷机驱动热源的有效措施。但是, 单一吸附剂的二级吸附式制冷循环系统在降低驱动热源温度同时, 存在其循环吸附量小于单级吸附式制冷系统的循环吸附量的问题, 传质效果受到了恶化。

本文从机理方面分析二级吸附式制冷循环降低驱动热源温度的原因, 获得选择二级吸附式制冷循环系统吸附剂方法, 并针对单一吸附剂二级吸附式制冷循环传质问题提出耦合不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统新方法, 并对新型制冷循环系统进行了研究。

1 二级吸附式制冷循环系统

1.1 原理分析

连续制冷的二级吸附式制冷循环系统包括四个吸附床、一个蒸发器和一个冷凝器以及阀门等, 示意图如图 1 所示。根据图 1 可知, 二级吸附式制冷循环系统工作过程包含两次吸附/脱附过程。图 2 为单级、二级吸附式制冷循环系统的 $P-T$ 图, 循环 a-b-c-d-a 为床 A $P-T$ 图, 循环 A-B-C-D-A 为床 B $P-T$ 图, 循环 e-f-c-d-e 为单级吸附式制冷循环的 $P-T$ 图。

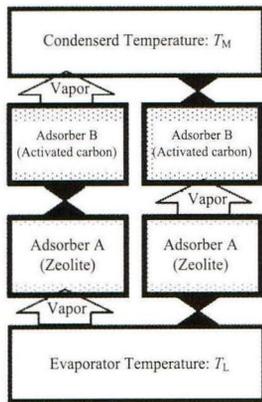


图 1 二级吸附式制冷系统图

Fig. 1 The two-stage adsorption refrigeration system

根据二级吸附式制冷循环工作过程可知, 在单级吸附式制冷循环相同条件下, 二级吸附式循环中吸附床 A 脱附与吸附床 B 吸附的压力差 $P_{TH}(x_2 - x_1) - P_{TM}x_3$, 要远大于吸附床与冷凝器间的压力差 $P_{TH}(x_2 - x_1) - P_{TM}$, 其中 P_{TH} 、 P_{TM} 分别为热源温

度、冷凝/冷却温度下制冷剂饱和蒸汽压, x_1 、 x_2 、 x_3 分别为一级吸附/脱附过程吸附剂等容降温降压吸附率、等容升温升压吸附率、二级吸附过程吸附剂等容降温降压吸附率, 且 $x_1 < 1$ 、 $x_2 < 1$ 、 $x_3 < 1$ 。因此, 二级吸附式制冷循环系统中 A 吸附床脱附温度要低于单级吸附式制冷循环系统, 从而降低了吸附床 A 的热源温度; 同时, 从二级吸附式制冷循环系统 $P-T$ 图得到, 吸附床 B 的吸附温度要高于单级吸附式制冷循环系统的, 对应的 B 吸附床完成吸附过程后吸附率要大于单级吸附式制冷循环的, 即 $x_4 > x_2$, x_4 为二级脱附过程吸附剂等容升温升压吸附率, 所以吸附床 B 吸附质更容易脱附出来, 其热源温度也要低于单级吸附式制冷循环系统。综合二级吸附式制冷循环系统吸附床 A、B 吸附/脱附过程分析, 二级吸附式制冷循环系统的驱动热源温度要低于单级吸附式制冷循环系统的。

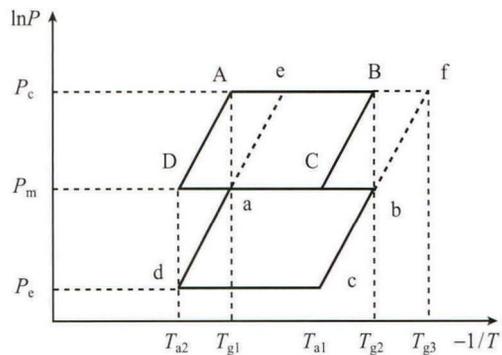


图 2 单级和二级吸附式制冷系统 $P-T$ 图

Fig. 2 $P-T$ diagrams of the single stage and two-stage adsorption refrigeration systems

1.2 二级吸附式制冷循环系统吸附剂选择

在相同的实验条件下, 不同吸附剂一般具有不同的循环吸附量, 据此确定出合适的吸附剂组, 循环吸附量则通过在一定的相对分压范围内一级、二级循环吸附剂吸附量差值计算而得出。实验选取热源温度为 55°C、冷却水温度为 30°C、冷冻水温度为 15°C 的条件, 并选取 4 种吸附剂材料进行研究, 包括硅胶、活性炭、三菱树脂公司开发的沸石 FAM-Z01 和 FAM-Z05。图 3 为 4 种吸附剂的吸附等温线。

根据实验条件下饱和蒸汽温度对应的饱和蒸汽压力, 可获得一级、二级循环运行范围的相对分压值。

一级吸附床对应的相对分压范围为 $\phi_1 - \phi_2$

$$\phi_1 = \frac{P_{T1}}{P_{TH}} \tag{1}$$

$$\phi_2 = \frac{P_{TL}}{P_{TM}} \tag{2}$$

二级吸附床对应的相对分压范围为 $\phi_3 - \phi_4$

$$\phi_3 = \frac{p_{TM}}{p_{TH}} \quad (3)$$

$$\phi_4 = \frac{p_{T1}}{p_{TM}} \quad (4)$$

以上述实验条件为基础, 一级、二级循环对应的相对分压范围分别为 0.17~0.40, 0.27~0.65, 根据图 3 计算出二级吸附式制冷循环采用单一吸附剂时一级循环、二级循环的循环吸附量, 具体的数值见表 1。

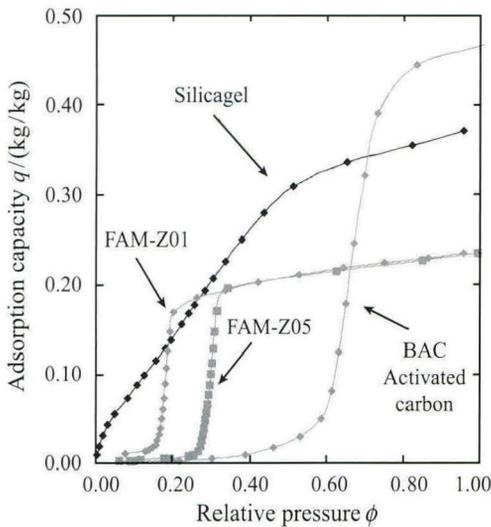


图 3 吸附剂吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isotherms of different adsorbents

表 1 不同吸附剂在一级、二级循环中的循环吸附量

Table 1 The effective adsorption capacities of the first and second cycle with different adsorbents

吸附剂	一级循环的循环吸附量/(kg/kg)	二级循环的循环吸附量/(kg/kg)
硅胶	0.13	0.12
FAM-Z01	0.19	0.04
FAM-Z05	0.19	0.16
活性炭	0.03	0.24

从表 1 中可以看出, 不同吸附剂一级和二级循环的循环吸附量是不一致的, 其中硅胶和 FAM-Z05 对应的一级和二级的循环吸附量基本相同, 但是 FAM-Z01 和活性炭对应的一级和二级的差别很大, 这就表明对于二级吸附式制冷循环系统而言, 选择合适的吸附剂是非常重要的。

另外, 即使根据上述计算确定出单一吸附剂的二级吸附式制冷循环系统的吸附剂, 也还存在该系统的总循环吸附量要小于单级吸附式制冷循环系统的问题, 这是由于在二级吸附式制冷循环系统中二级吸附床脱附结束后存在一定的吸附率, 不能完全把从一级吸附床中脱附出的气态制冷剂运输到冷凝器进行冷凝, 导致整个二级吸附式制冷系统的循环吸附量小于单级吸附式制冷系统的循环吸附量, 从而恶化了吸附式制冷系统的传质性能。

广州能源研究所黄宏宇博士提出了耦合不同吸附剂二级吸附式制冷循环新思路, 不同等级循环采用不同吸附剂, 挖掘不同吸附剂吸附性能潜力, 实现扬长避短, 用以提高二级吸附式制冷循环的循环吸附量, 弥补了采用单一吸附剂恶化系统传质性能的弊端。根据表 1, 在一级循环中, FAM-Z01 和 FAM-Z05 的循环吸附量最大, 活性炭的循环吸附量在二级循环中最好, 因此本文选择 FAM-Z01- 活性炭为吸附剂组, 开展不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统的性能研究。

2 不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统研究

耦合不同吸附剂的二级吸附式制冷循环系统与采用单一吸附剂的二级吸附式制冷循环系统结构基本一致, 不同在于本系统中一级吸附床 A 与二级吸附床 B 采用不同的吸附剂。本文吸附床 A 采用 FAM-Z01, 吸附床 B 采用活性炭, 工作过程图如图 1 所示。图 4 为耦合不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统示意图, 图中①为吸附床 A 和 B, 之间通过阀门连接, 恒温水箱提供热源、冷却水, 热源温度分别选择 50°C、55°C, 冷却水温为 30°C, 提供的冷冻水温度为 15°C。通过以上实验条件测试, 获得该系统的运行性能, 重点考察该系统的输出制冷量、系统制冷性能系数 (COP)。

$$W_{\text{cold}} = C_p \cdot \rho \cdot F \cdot \Delta T / t \quad (5)$$

$$W_{\text{input}} = C_{h,p} \cdot \rho_h \cdot F_h \cdot (T_{\text{inlet}} - T_{\text{outlet}}) / t \quad (6)$$

$$\text{VCP} = C_p \cdot \rho \cdot F \cdot \Delta T / (V \cdot t) \quad (7)$$

$$\text{COP} = \frac{W_{\text{cold}}}{W_{\text{input}}} \quad (8)$$

图 5 是吸附床单位体积输出制冷功率 VCP 在不同实验条件下的变化规律, 图 6 是不同实验条件下系统 COP 的变化规律, 从图 5、6 可以看出, 采用不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统在实验条件范围内运行良好, 可靠。图 5 中表明 VCP 随系统循环时间的增加先增大而后降低, 并在循环时间 90~120 s 时达到最大值, 并且在相同的循环时间下热源温度 55°C 对应的 VCP 要大于热源温度 50°C 的。此外, 热源温度 55°C, 循环时间 120 s 时, VCP 取得最大值, 为 0.3 kW/L。由图 6 可知, 随着系统循环时间的增加, 不同热源温度下的 COP 都是随之增大, 并趋于平衡; 循环时间小于 200 s 时, 热源温度 50°C 的系统 COP 要略高于热源温度 55°C 时, 这可能是由系统的显热损失造成的。另外, 从图 6 还可以看

出,在实验条件范围内,系统的 COP 都小于 0.3,而单级吸附式制冷循环系统的 COP 一般为 0.4 左右,这就意味着与单级吸附式制冷循环系统相比,二级吸附式制冷循环能够降低驱动热源温度,但是热源能量利用率有所下降,如何提高系统的 COP 是二级吸附式制冷循环系统研究的重要内容。

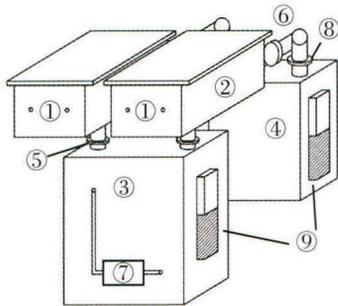


图 4 系统示意图

Fig. 4 The system setup

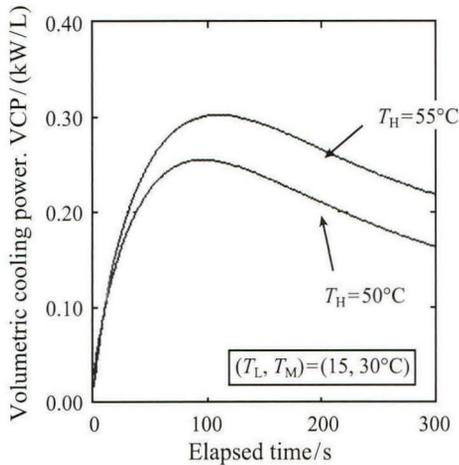


图 5 吸附床单位体积输出制冷功率变化曲线

Fig. 5 The figures of volumetric cooling power for adsorbent

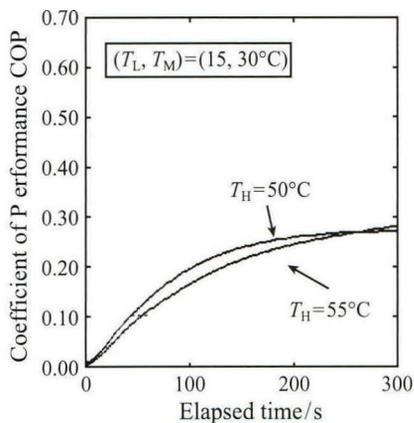


图 6 系统制冷性能系数变化曲线

Fig. 6 The figures of coefficient of performance of system

4 结 论

1) 通过对单级、二级吸附式制冷循环的机理分

析,得出二级吸附式制冷循环具有降低热源温度的效果,但同时也存在传质下降的问题;利用吸附剂循环吸附量计算方法,获得二级吸附式制冷循环系统采用不同吸附剂是解决单一吸附剂传质性能下降的有效手段,同时确定出一级、二级循环吸附剂分别为沸石 FAM-Z01、活性炭,对应的循环吸附量为 0.19 kg/kg、0.24 kg/kg。

2) 通过对不同吸附剂二级吸附式制冷循环系统性能研究,表明了该系统在实验条件范围内运行良好, VCP 最大值为 0.3 kW/L。在实验条件范围内,系统的 COP 都小于 0.3,与单级吸附式制冷循环系统相比,二级吸附式制冷循环能够降低驱动热源温度,但是热源能量利用率有所下降。

参 考 文 献

- [1] WANG Ruzhu, Oliveria R G. Adsorption Refrigeration—An Efficient Way to Make Good Use of Waste Heat and Solar Energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32: 424–458
- [2] 日本前川制作所. 吸着冷冻机 [EB/OL]. [2015-09-19]. http://www.mayekawa.co.jp/ja/products/cooling_freezing_sys/03.
- [3] Japan Maekawa Seisakusho. Adsorption refrigerator [EB/OL]. [2015-09-19]. http://www.mayekawa.co.jp/ja/products/cooling_freezing_sys/03
- [4] 德国 SorTech 公司. eCoo 2.0—Efficient Cooling [EB/OL]. [2015-09-22]. <http://www.sortech.de/de/produkte/adsorptionskaelteaggregate/ecoo-20/>
- [5] Germany SorTech. eCoo 2.0—Efficient Cooling. [EB/OL]. [2015-09-22]. <http://www.sortech.de/de/produkte/adsorptionskaelteaggregate/ecoo-20/>
- [6] Li Y W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Experimental Performance Analysis on a Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump Water Heater [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 2858–2868
- [7] Li Y W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Experimental Performance Analysis and Optimization of a Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump Water Heater [J]. Energy, 2007, 32: 1361–1374
- [8] 王德昌, 吴静怡, 王如竹, 等. 新型硅胶—水吸附式冷水机组动态运行特性 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 306–310
- [9] Wang Dechang, Wu Jingyi, Wang Ruzhu, et al. The Dynamic Operating Characteristics of a Novel Silica Gel Water Adsorption Chiller [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(2): 306–310
- [10] Saha B B, Akisawa A, Kashiwagi T. Solar/Waste Heat Driven Two-Stage Adsorption Chiller: the Prototype [J]. Renewable Energy, 2001, 23: 93–101
- [11] Saha B B, Koyama S, Kashiwagi T, et al. Waste Heat Driven Dual-Mode, Multi-Stage, Multi-Bed Regenerative Adsorption System [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26: 749–757