

余热驱动多功能热管型吸附制冰机组的性能*

李廷贤 王如竹 王丽伟 陆紫生

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要: 介绍一种以氯化钙/活性炭复合吸附剂和氨作为吸附工质对的多功能热管型吸附式制冰机组, 该机组利用低品位余热作为驱动热源进行制冰。为了强化机组换热及防止余热腐蚀现象, 采用热管技术完成吸附床的加热解吸、冷却吸附及回热过程, 吸附床加热解吸时, 形成以余热发生装置为热管蒸发段、以吸附床为热管冷凝段的热管型加热回路; 两吸附床间回热时形成以高温解吸床为热管蒸发段、以低温吸附床为热管冷凝段的热管型回热回路; 吸附床冷却吸附时, 形成以吸附床为热管蒸发段、以冷却器为热管冷凝段的热管型冷却回路。在此基础上采用新回质回热循环方式对机组性能进行了研究。试验结果表明: 新回质回热方式与传统回质回热方式相比, 可大幅度增加机组制冷量, 单位质量吸附剂制冷功率, (Specific cooling power, SCP)和性能系数(Coefficient of performance, COP)增大幅度均在 17% 以上; 相对基本循环, 传统回质回热方式可使机组 COP 提高 43.8%, 新回质回热方式可使机组 COP 提高幅度高达 68.7%。可见采用新回质回热方式更有利于提高吸附制冰机组的工作性能。

关键词: 吸附制冷 回质 回热 热管 制冰机

中图分类号: TK172

Performance of a Multifunctional Heat Pipe Type Adsorption Ice Maker Machine Driven by Waste Heat

LI Tingxian WANG Ruzhu WANG Liwei LU Zisheng

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: A multifunctional heat pipe type adsorption ice maker with CaCl_2 /activated carbon as compound adsorbent and ammonia as refrigerant is designed. Low-grade waste heat is utilized as driving heat source in this machine to make ice, and heat pipe technology is employed to enhance heat transfer and prevent the corrosion of adsorbers in the presented system. The heating, cooling and heat recovery processes between two adsorbent beds are performed by multifunctional heat pipes. The waste heat device serves as evaporator and adsorber serves as condenser during desorption process while adsorber works as evaporator and cooler works as condenser in adsorption phase, and high temperature bed serves as evaporator and low temperature bed serves as condenser during heat recovery process. The adsorption performance is investigated by introducing a novel mass and heat recovery strategy. The experimental results show that the novel strategy can obtain a higher adsorption cooling capacity compared with conventional mass and heat recovery, and the former can improve coefficient of performance (COP) and specific cooling power (SCP) by more than 17%. In comparison with basic cycle, the COP improvements of conventional and novel mass and heat recoveries are 43.8% and 68.7%, respectively. The novel strategy is more beneficial to improvement of the system performance.

Key words: Adsorption refrigeration Mass recovery Heat recovery Heat pipe Ice maker

0 前言

吸附式制冷是一种可有效利用低品位热能的环境友好型绿色制冷技术, 其制冷能力与吸附制冷工

质对、吸附床传热传质及系统循环方式等因素紧密相关^[1-2]。最早的吸附式制冷采用单床间歇循环, 制冷过程不连续且效率低, 为此提出了多种高效吸附制冷循环, 典型的有热波循环^[3]、对流热波循环^[4]、回热循环^[5]、回质循环^[6]、回质回热循环^[7]和多级循环^[8]等。近些年来, 吸附制冷技术得到了很好的发展, 但与压缩式和吸收式制冷相比, 吸附制冷还不

* 国家杰出青年科学基金(50225621)和上海市自然科学基金(05ZR14072)资助项目。20070830 收到初稿, 20080425 收到修改稿

够成熟,存在吸附性能不稳定、吸附床传热传质能力差、单位质量吸附剂制冷功率小和吸附过程出现膨胀结块等缺点^[9-10]。

吸附床传热传质特性是影响吸附制冷性能的主要因素之一,也是长期以来吸附式制冷技术的研究焦点,其中采用热管技术强化吸附床传热可有效提高吸附制冷机组的工作性能及单位时间的制冷能力^[11-12]。本文在前人研究的基础上通过优化设计研制了余热驱动的多功能热管型吸附制冰机组,采用氯化钙和活性炭固化处理的复合吸附剂和氨作为吸附工质对。在此基础上,提出了一种新型回质回热循环,并与两床连续基本循环及传统回质回热循环进行了比较,研究了不同回质回热方式对吸附制冰机组性能的影响。

1 多功能热管型吸附制冰机试验系统

余热驱动的多功能热管型吸附制冰机组的工作原理如图 1 所示,试验台主要由两个吸附床、冷却器、冷凝器、储液罐、蒸发器(制冰机)、余热发生装置(电加热锅炉)及多功能热管组成,其中电加热锅炉用来模拟余热发生装置。该机组采用氯化钙/活性炭复合吸附剂以解决化学吸附剂 CaCl_2 的膨胀结块现象,每个吸附床中填装有复合吸附剂 7.4 kg,其中含 5.9 kg CaCl_2 。

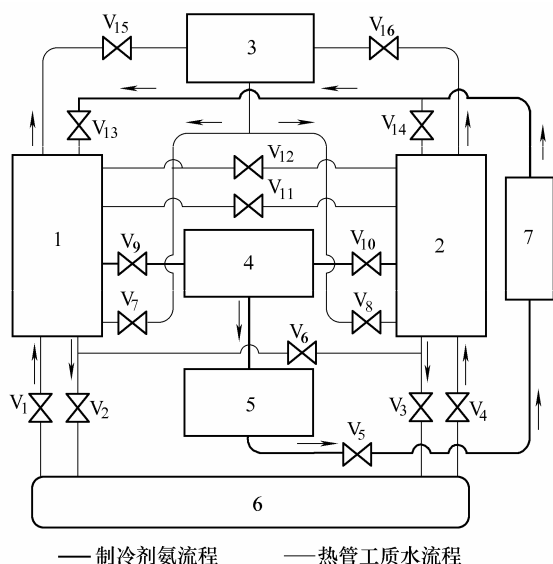


图 1 多功能热管型吸附制冰机工作原理图

1. 吸附床 A 2. 吸附床 B 3. 冷却器
4. 冷凝器 5. 储液器 6. 余热发生装置 7. 蒸发器(制冰机)
 $V_1 \sim V_4$ —加热回路电磁阀 $V_5, V_9, V_{10}, V_{13}, V_{14}$ —制冷剂回路电磁阀
 V_6, V_{11} —回热回路电磁阀 V_7, V_8, V_{15}, V_{16} —冷却回路电磁阀
 V_{12} —制冷剂回质阀

为了强化吸附制冷机组的换热能力及防止余热烟气/工业废热对吸附床的腐蚀现象,采用热管二次

换热技术完成吸附床的加热解吸、冷却吸附及回热过程。吸附床加热解吸时,形成以余热发生装置为热管加热端、以吸附床为热管冷却端的重力热管型加热回路;两吸附床间回热时形成以高温解吸床为热管加热端、以低温吸附床为热管冷却端的热管型回热回路;吸附床冷却吸附时,形成以吸附床为热管加热端、以冷却器为热管冷却端的重力热管型冷却回路。

余热驱动的多功能热管型吸附制冰机组照片如图 2 所示。整个机组采用 PLC 控制箱进行程序控制,可使得制冰机连续运行,由于氨制冷剂在制冰机蒸发转盘中蒸发,而盘片外喷水,因而在盘片外表面冻结形成约 2 mm 厚的片冰,通过盘片的定速旋转,用刮冰刀将冰片刮下,积累的片冰经微型电子称称重即可得到单位时间的制冰量。



图 2 余热驱动的多功能热管型吸附制冰机组

试验过程中,测量的主要参数有:电压、电阻、时间、温度和制冰量。其中:电压采用型号为 TSGC2J 接触调压器来测量,精度为 0.5%;电阻采用万用表来测量,精度为 0.4%;时间采用秒表来测量,精度为 ± 0.1 s;温度采用四线制铂电阻测量,精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$;制冰量采用型号为 ACS-6A 的电子秤测量,精度为 ± 0.2 g。

2 吸附制冷循环分析

化学吸附与物理吸附不同,前者是单变量系统而后者为双变量系统。化学吸附制冷循环如图 3 所示。对于以 $\text{CaCl}_2 - \text{NH}_3$ 为吸附制冷工质对的制冷循环而言,其络合反应方程为

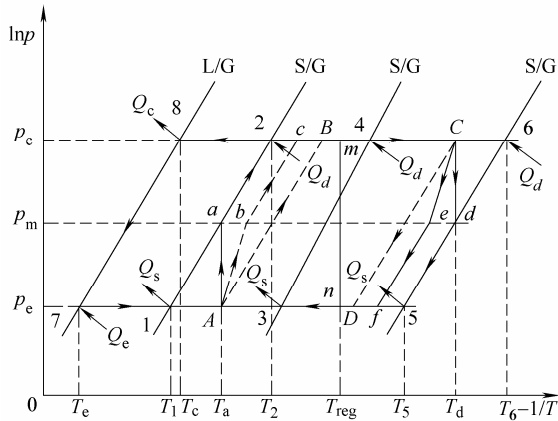
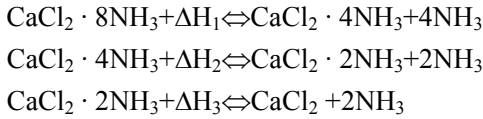


图3 化学吸附制冷循环示意图

L/G——气液反应 S/G——气固反应
 基本循环 A-B-C-D-A
 传统回质回热循环 A-b-c-B-m-C-e-f-D-n-A
 新型回质回热循环 A-a-2-B-m-C-d-5-D-n-A
 1, 2. $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$
 3, 4. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$
 5, 6. $\text{CaCl}_2 \leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$

在传统回质回热循环的基础上，本文采用新型回质回热循环方式来进一步提高吸附制冷机组的工作性能，在该循环回质阶段继续加热解吸床以增大系统制冷剂循环量，回质阶段的额外耗热量采用随后的热管型回热回路进行回收利用。从图3中可以看出，与基本循环 A-B-C-D-A 相比，两种回质回热型吸附制冷循环均具有较好的热动力性能，特别是，新型回质回热循环由于可逆反应 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{CaCl}_2$ 和 $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ 的发生使得 1 mol CaCl_2 的循环吸附量从基本循环的 2 mol 提高到 8 mol，系统制冷剂循环量显著增大。

3 试验结果及讨论

3.1 吸附制冰机组吸附床温度变化

为了提高吸附制冷性能，机组采用基于两床压差及温差的新回质回热型吸附制冷循环方式，其中回质过程利用解吸床和吸附床之间的压差来增大制冷剂循环量，回热过程利用两床在切换过程中的温差来实现热量回收利用。新回质回热循环与基本循环的吸附床温度变化如图4所示。

可以看出，在解吸床和吸附床切换阶段，通过回质回热过程可有效降低切换状态的解吸床(即将变为吸附床)温度和提高吸附床(即将变为解吸床)温度；当吸附完毕时，两种循环方式的吸附床温度都约为 40 °C，为了再生吸附剂，冷床需加热到解吸温

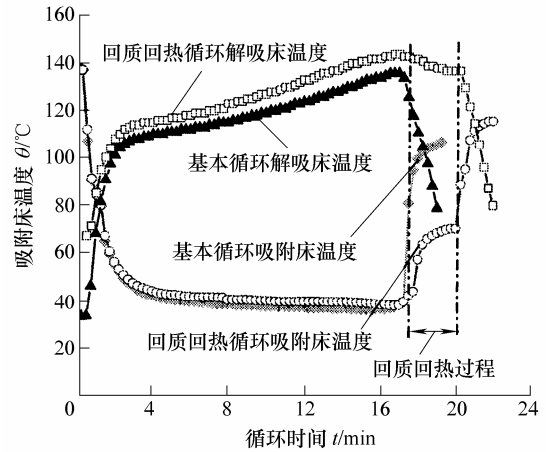
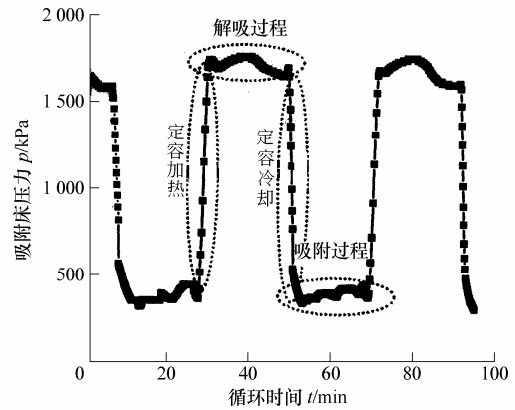


图4 新回质回热循环与基本循环的吸附床温度变化

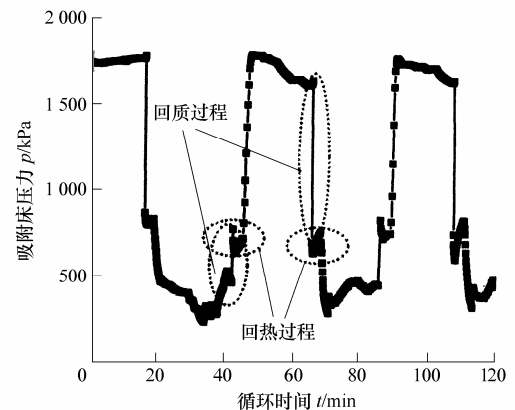
度，对于基本循环，冷床将从 40 °C 加热到解吸温度，但对于新回质回热循环而言，由于通过回质回热过程冷床温度已从 40 °C 升温到约 70 °C，即只需将冷床从 70 °C 加热到解吸温度，从而大大减少了外界热量的消耗。

3.2 吸附制冰机组吸附床压力变化

新回质回热循环与基本循环的吸附床压力变化如图5所示，其中基本型吸附制冷循环的定容加热、解吸过程、定容冷却及吸附过程如图5a所示，新回质回热循环在系统切换阶段的回质过程和回热过程如图5b所示。



(a) 基本循环



(b) 回质回热循环

图5 新回质回热循环与基本循环的吸附床压力变化

在回质过程中,解吸床和吸附床之间的回质阀门打开,此时由于解吸床压力较高,吸附床压力相对较低,在两床压差驱动下制冷剂蒸汽迅速从解吸床流入吸附床,实现两床之间的回质,从而使得解吸床解吸更加完全,吸附床吸附更加饱和,增大了系统制冷剂循环量。

从图 5b 可以看出,在回质过程中高压解吸床压力降低、低压吸附床压力升高;相对而言,回热过程对吸附床压力变化的影响较小。

3.3 吸附制冰机组 Clausius–Clapeyron 循环图

图 6 为新回质回热循环与基本循环的 Clausius–Clapeyron 图,可以看出,实际循环过程与图 3 所示的理想循环有一定的差别,但回质回热过程的效果却是十分显著的。在相同的解吸温度和吸附温度条件下,新回质回热循环相对基本循环具有更好的热动力性能。

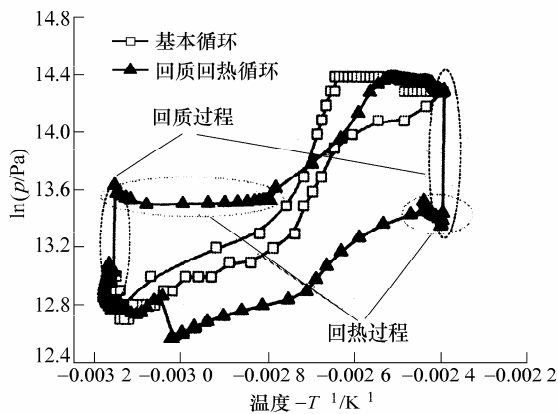


图 6 新回质回热循环与基本循环的 Clausius–Clapeyron 图

由于回质过程的实施,在相同温度的冷却水冷却作用下新回质回热循环中吸附床在定容冷却阶段的冷却速率较大,其吸附压力远低于基本循环的吸附压力,从而更有利于提高机组的制冷性能。在回热过程中,通过热管回路转移热量使得热床温度降低冷床温度升高,一方面降低了热床在随后定容冷却阶段的冷负荷,另一方面减少了冷床在定容加热阶段外界热源提供的热量。

3.4 回质回热方式对吸附制冰机组性能的影响

当解吸温度为 145 °C,冷却水温度为 10 °C,蒸发温度为 -18.9 °C 时,对基本循环、传统回质回热循环、新型回质回热循环进行了比较研究,试验结果如下表所示。

可以看出,相对基本循环,无论采用那种回质回热方式,吸附制冰机组耗热量均减少,制冰量、单位质量吸附剂制冷功率 (Specific cooling power, SCP) 及性能系数 (Coefficient of performance, COP) 都有很大提高,提高幅度均在 11% 以上。特别地,在系统最佳回质时间 40 s 时,传统回质回热方式可使机组 SCP 增加 24.3 %, COP 提高 43.8 %,若采用新回质回热方式,机组 SCP 和 COP 可进一步提高,分别高达为 47.8 % 和 68.7 %。可见采用新回质回热方式更有利于提高吸附制冰机组的工作性能。

相对传统回质回热方式,新型回质回热方式由于在回质过程中继续加热解吸床使系统加热量略有增加,但同时机组制冰量也增加,且制冰量增加幅度高于加热量增加幅度,从而使得新回质回热方式下,制冰机组的 SCP 和 COP 都有较大提高,二者提高幅度均在 17% 以上。

AKAHIRA 等^[13]研究发现相对传统回质方式,回质过程继续加热可有效提高机组制冷量,但性能系数 COP 降低。本文试验结果与文献[13]的研究结果相比有所不同,在文献[13]的回质过程中,由于仅仅采取回质过程而没有采用回热过程使得回质阶段增加的加热量得不到回收利用,尽管制冷量增大,但同时加热量也增大,导致机组制冷量提高但 COP 下降。本文试验中,在回质过程结束后又立即采取了回热过程,由于两个过程时间间隔很小,从而使得回质阶段增加的额外加热量在随后的回热过程中得到很好的回收利用,机组制冰量、SCP 和 COP 均大幅度提高。

表 回质回热方式对吸附制冰机组性能的影响

回质时间 t/s	回质回热方式	制冰量 $Q_c/(kg \cdot h^{-1})$	加热量 Q_h/kW	单位质量吸附剂 制冷功率 $P_{SCP}/(W \cdot kg^{-1})$	提高幅度 $\Delta P_{SCP}/\%$	性能系数 P_{COP}	提高幅度 $\Delta P_{COP}/\%$
0	基本循环	16.58	12.13	329.1	—	0.16	—
20	传统回质回热	18.71	10.55	367.5	11.7	0.21	31.3
	新型回质回热	22.59	10.61	442.8	34.6	0.25	56.3
40	传统回质回热	20.82	10.55	409.1	24.3	0.23	43.8
	新型回质回热	24.81	10.66	486.5	47.8	0.27	68.7

4 结论

(1) 多功能热管型吸附式制冰机组具有较好的传热性能和循环周期短,且能防止余热的腐蚀现象。

(2) 与基本循环相比,回质回热过程可有效降低切换状态的解吸床(即将变为吸附床)温度和提高了吸附床(即将变为解吸床)温度,减小机组耗热量,制冰量、SCP及COP提高幅度均在11%以上;在最佳回质时间40s时,传统回质回热循环和新型回质回热循环可使机组COP提高幅度分别高达43.8%和68.7%。

(3) 相对传统回质回热方式,新型回质回热方式可进一步增加机组制冰量、提高COP和SCP;机组SCP和COP增大幅度均在17%以上,且回质阶段增加的额外加热量在随后的回热过程中得到很好的回收利用。

参考文献

- [1] 王如竹, 吴静怡, 代彦军, 等. 吸附式制冷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
WANG Ruzhu, WU Jingyi, DAI Yanjun, et al. Adsorption refrigeration [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] WANG Ruzhu, OLIVEIRA 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.
- [3] SHELTON S V, WEPFER J W, MILES D J. Ramp wave analysis of the solid/vapor heat pump [J]. ASME J. Energy Resources Technology, 1990, 112: 69-78.
- [4] CRITOPH R E. Performance estimation of convective thermal wave adsorption cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16: 429-437.
- [5] DOUSS N, SUN L M, MEUNIER F. Predictive model and experimental results for a two-adsorber solid adsorption heat pump [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1988, 27: 310-316.
- [6] PONS M, POYELLE F. Adsorptive machines with advantaged cycles for heat pumping or cooling applications [J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22: 27-37.
- [7] WANG Ruzhu. Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 602-611.
- [8] 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.
- [9] 王如竹, 王丽伟. 低品位热能驱动的绿色制冷技术: 吸附式制冷[J]. 科学通报, 2005, 50 (2): 101-111.
WANG Ruzhu, WANG Liwei. Adsorption refrigeration— Green cooling driven by low-grade thermal energy [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (2): 101-111.
- [10] WANG Liwei, WANG Ruzhu, WU Jingyi, et al. Compound adsorbent for adsorption ice maker on fishing boats [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27: 401-408.
- [11] WANG Ruzhu. Efficient adsorption refrigerators integrated with heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 317-326.
- [12] WANG Liwei, WANG Ruzhu, LU Zisheng. Split heat pipe type compound adsorption ice making test unit for fishing boats [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29: 456-468.
- [13] AKAHIRA A, ALAM K C A, HAMAMOTO Y. Mass recovery adsorption refrigeration cycle-improving cooling capacity [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27: 225-234.

作者简介: 李廷贤, 男, 1979年出生, 博士研究生。主要研究方向为吸附式制冷。

E-mail: litx@sjtu.edu.cn