

研究论文

# 间歇热源对吸附式制冷系统 运行特性影响

王德昌 吴静怡 许煜雄

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

**摘 要** 通过实验研究了双床连续吸附式制冷系统在间歇热源驱动下的动态运行性能, 获得了系统各参数在间歇热源驱动下的变化规律. 对有蓄热和无蓄热两种条件下系统在间歇热源驱动下的动态运行性能进行了比较, 分析了热源切断时间长短对系统解吸过程的影响, 并讨论了蓄热在热源切断期间的的作用, 指出添加蓄热设备是减小间歇热源不利影响的有效手段之一.

**关键词** 吸附式制冷系统 间歇热源 蓄热

中图分类号 TK 172

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2004) 05-0711-05

## INFLUENCE OF INTERMITTENT HEAT SOURCE ON OPERATING CHARACTERISTICS OF ADSORPTION REFRIGERATION SYSTEM

WANG Dechang, WU Jingyi and XU Yuxiong

(*Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

**Abstract** In this paper, the dynamic characteristics of a continuous adsorption refrigeration system driven by intermittent heat source are studied by means of experiments. The variation regulations of the operating parameters are obtained. Meanwhile the dynamic characteristics of the system with a heat accumulator are compared with that without a heat accumulator in the working condition with intermittent heat source. The influences of heat source cut-off time are analyzed and the role of heat accumulator during the heat source cut-off is discussed. From the results, a heat accumulator is found to be one of best devices to alleviate the bad influence of intermittent heat source on an adsorption refrigeration system.

**Keywords** adsorption cooling system, intermittent heat source, heat accumulation

### 引 言

吸附式制冷系统因具有无 CFCs 问题、无温室效应问题、结构简单、可以没有运动部件、可利用余热等优点而吸引了中外学者广泛的研究兴趣<sup>[1~6]</sup>. 但是, 长期以来人们把连续吸附式制冷系

统研究的重点放在了连续热源上, 很少考虑间歇热源对系统的动态影响; 而对于吸附式制冷系统实用价值较大的场合, 如机车、渔船、移动冰箱等, 发动机是不断启停或不断在高低负荷间转换的, 因此热源往往是间歇性的, 而热源的间歇对系统的运行特性又产生着重要的影响. 因此, 有必要研究

2003-01-17 收到初稿, 2003-04-11 收到修改稿.

联系人及第一作者: 王德昌, 男, 28 岁, 博士.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (No. 2000026309) 和上海曙光计划 (No. 02SG11) 共同资助.

Received date: 2003-01-17.

Corresponding author: Dr. WANG Dechang. E-mail: wdechang@sjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2000026309).

间歇热源对连续吸附式制冷系统的影响, 摸清系统各参数在间歇热源下的变化规律, 以提供系统优化控制必要的参数依据, 使系统能够高效经济地运行。

文献 [6] 已经对间歇热源驱动的吸附式制冷系统的运行特性进行了数值模拟的研究, 本文则通过样机实验, 研究了双床连续吸附式制冷系统在间歇热源驱动下的动态运行特性, 获得了系统各运行参数在间歇热源驱动下的变化规律, 并分析了热源变化对系统解吸过程的影响, 为吸附式制冷系统的实用化研究提供了参考依据。

### 1 实验系统

本系统为双床连续吸附式制冷系统, 主要由吸附床 1 和吸附床 2、蒸发器、冷凝器、锅炉加热器、中间换热器和连接它们的管道及其附件组成, 如图 1 所示。该系统可以分为 3 个子系统: 由锅炉加热器、油水换热器、油泵 (与锅炉加热器作为一体)、热水泵和膨胀水箱等组成的加热系统, 本系统中锅炉本身具有一定的蓄热作用; 由中间冷却器、冷却水泵、循环水泵等组成的冷却系统; 由 (甲醇/水) 板式换热器、冷媒水泵和平衡水箱等组成的冷媒水系统。其中, 加热系统、冷媒水系统和冷却系统中的吸附床冷却水系统为闭式系统, 而冷却系统中的冷凝器冷却水系统采用开式系统。系统中, 吸附床的加热和冷却部分做成闭式, 可以有效地避免在系统切换时由于“跑水”而造成热量

的损失及系统运行的不稳定, 从而提高了系统运行的可靠性。系统采用的工质对为活性炭/甲醇, 甲醇的充灌总量约为 23 kg, 吸附剂的质量为每床 26 kg。系统产生的冷量由板式换热器输出到平衡水箱中, 因此, 该系统既可以做空调工况实验又能模拟冰箱冷藏工况实验。在系统工作时, 蒸发器中大约存有 10 kg 的甲醇, 因而, 蒸发器具有一定的蓄冷作用。

本文实验中采用的循环周期为文献 [2] 中提供的最佳周期——40 min, 进行了 5 个典型工况的实验: (1) 进行了一个热源不间断的正常工况实验, 获得正常工况下系统的运行特性 (工况 I); (2) 在加热阶段的第 10 min, 停止锅炉加热器和两泵 (加热泵和油泵) 10 min, 获得无蓄热条件下间歇驱动热源对系统运行性能的影响 (工况 II); (3) 在加热阶段的第 10 min, 停止锅炉加热器 10 min, 保持两泵正常运行, 获得有蓄热条件下系统的运行特性 (工况 III); (4) 在锅炉运行的第 10 min, 锅炉加热器停运 5 min, 两泵保持运行 (工况 IV); (5) 在锅炉运行的第 10 min, 停止锅炉加热器和两泵 5 min, 考察在无蓄热条件下较短时间热源间歇对系统影响的变化情况 (工况 V)。各种实验工况均需完成至少 2 个周期的循环, 以剔除前一工况对本实验工况结果的影响。实验中除解吸量是手动记录外, 其余被测量均使用计算机自动采集。实验不采用回热回质。本文实验模拟的是冰箱冷藏工况, 蒸发温度控制在  $-2 \sim -3$  °C。

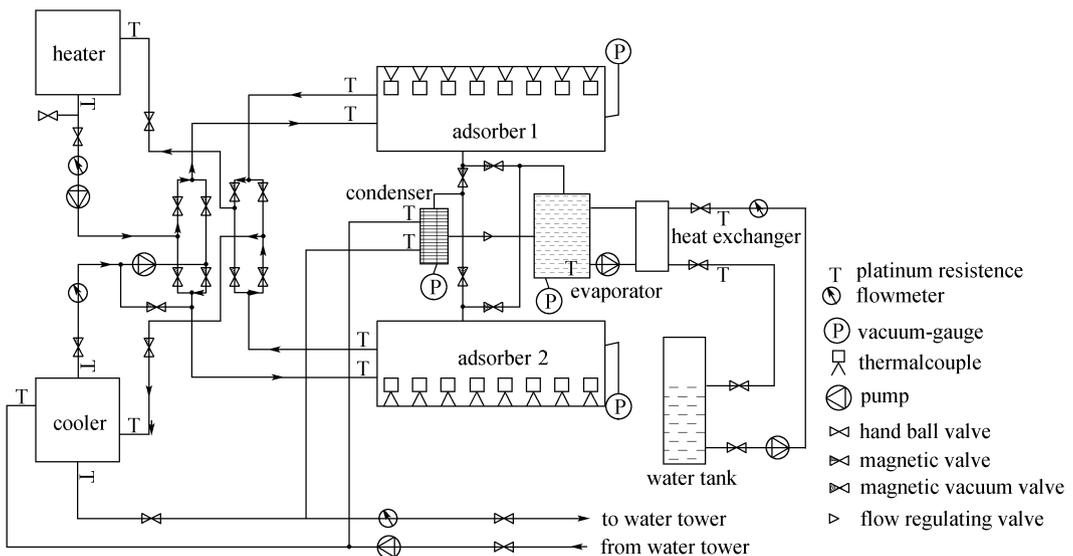


Fig. 1 Diagrammatic sketch of experimental system

Table 1 Some performance coefficients of system at different working modes

Working modes	Refrigerating power/kW	SCP /kW · kg <sup>-1</sup>	COP	Desorption quantity in a semi-cycle/ml
normal(I)	3.813	73.3	0.428	2840
stop 10 min without heat accumulation(II)	3.55	68.3	0.424	2160
stop 10 min with heat accumulation(III)	3.7	71.2	0.391	2620
stop 5 min with heat accumulation(IV)	3.725	71.6	0.377	2740
stop 5 min without heat accumulation(V)	3.575	68.8	0.405	2580

Note: Desorption quantity is that in the former semi-cycle for one bed; Refrigerating power and SCP are those in the latter one for the same bed.

## 2 实验结果及分析

本文实验工作是连续进行的, 部分实验结果示于图 2~图 5 及表 1 中, 其中表 1 示出了各工况下系统的运行参数, 实验数据均取自每一工况的第 2 个循环周期.

### 2.1 间歇热源对解吸过程的影响

各个工况下获得的解吸量随时间的变化关系与文献 [6] 中计算预测的结果基本相符, 如图 2 所示. 正常工况 I 的解吸量最大, 全停 10 min 工况 II 的解吸量最小, 其他工况介于两者之间. 在加热停止期间, 有蓄热比无蓄热解吸量明显要大, 半个循环周期内两者最大可相差 600 ml 以上, 而有蓄热工况 III 和 IV 解吸量最大减少仅为 220 ml, 因此, 有蓄热时热源的间歇对系统运行的不利影响要小得多, 添加蓄热装置是减小吸附式制冷系统中余热间歇不利影响的较为有效的方法.

从表 1 中还可以发现, 在加热的第 10 min 停止加热 5 min 时, 有无蓄热对系统的解吸量影响较小, 与工况 III 差不多, 与此不同若停止加热 10 min 则影响较大, 这主要是因为正常工况下系统的解吸量基本集中在吸附床加热开始的第 15 min 以前, 而热源恢复加热的 5 min 实际上部分弥补了热源间歇的时间, 如图 2.

实际上, 在吸附床加热—热源间歇—恢复加热的过程中, 吸附床是在进行预热—解吸—解吸停止甚至微量吸附—预热—解吸的过程, 也是一个非平衡解吸—平衡解吸—非平衡解吸的过程; 如果解吸开始吸附床的温度较低则在热源恢复时预热时间会较长, 同时, 如果停止解吸的时间较长也会导致预热时间加长, 有效解吸时间减少, 这都是热源间歇造成的不利状况.

解吸过程中, 影响解吸量和解吸速度的主要因素是吸附床的压力和温度. 在吸附床的等容加热开

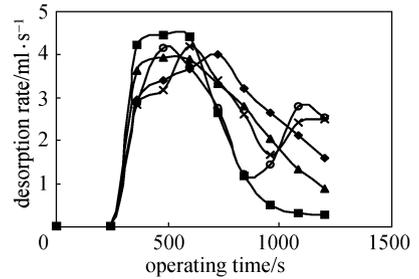


Fig. 2 Desorption quantity in semi-cycle at different modes

◆ mode I; ■ mode II; ▲ mode III;  
× mode IV; ○ mode V

始, 由于吸附床的温度较低而加热功率较大, 此后随着吸附床温度的上升及解吸量的减少加热功率迅速降低; 在加热 4 min 之后吸附床开始解吸, 此时加热量基本稳定, 此后随着解吸量的减小加热量逐渐减小, 如图 2、图 3. 对于热源间歇无蓄热工况, 与正常工况和有蓄热工况不同, 在热源间歇期间, 由于热水的温度比吸附床的温度要高很多 (15 °C 左右) 而使吸附床仍然能吸热解吸, 但由于此时吸附床内的热水不流动, 因此换热效果很差, 吸附床吸热较少, 吸附床的解吸作用逐渐减小, 直至解吸过程完全结束, 该过程中吸附床温度基本不变, 甚至有所下降, 如图 3 所示.

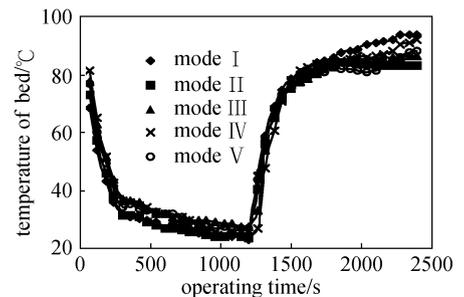


Fig. 3 Temperature of bed at different working modes

对比表 1 和图 3 可以发现, 正常工况下吸附床的平均温度最高, 而无蓄热热源间歇 10 min 的工

况吸附床平均温度最低，其他工况介于两者之间，这与循环的总解吸量相一致。热源间歇时吸附床的温度较低，偏离最佳解吸温度（90 ℃）较多<sup>[2]</sup>，特别是工况 II 时解吸量最少。

吸附床的压力除了与吸附床的温度有关外，还受冷凝压力的影响，而冷凝压力由冷却水的温度和冷凝器冷却功率决定，因此在冷却水温度和冷凝器冷却功率恒定的情况下，解吸量越大对应的解吸压力就越高。虽然开始本文实验前系统先进行正常工况的预处理，但是由于实验使用的冷却水来自于冷却塔循环水，实验中冷却水的温度随着实验的进行不断上升，而正常工况又在正式实验的开始进行，因此冷却水的温度仍然要比以后工况的温度要低，由此吸附床的压力也就只能维持在较低的水平。随后的实验工况，冷却水的温度逐渐趋于稳定，吸附床的解吸压力也就较好地反映了系统解吸量的变化。在同一工况的解吸过程中，解吸量的总体变化趋势是不断减小，因此吸附床的压力也总体呈现下降趋势，如图 4 所示。从图 5 中也可以看出正常工况和有无蓄热工况下的循环过程以及循环中吸附床内压力和温度的变化情况：正常工况  $p-T$  曲线包围的面积最大，吸附床解吸和吸附的过程都较长，解吸阶段吸附床的温度升的最高，系统的做功能力也最大；而间歇热源无蓄热工况  $p-T$  曲线包围的面积最小，解吸阶段吸附床温度最低，其对应的系统做功能力最小；间歇热源有蓄热工况介于两者之间。

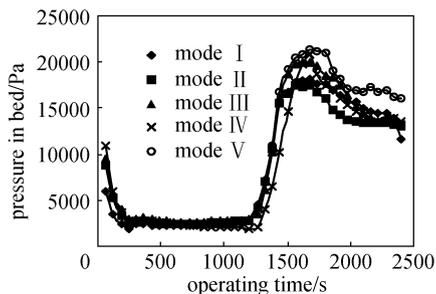


Fig. 4 Pressure in bed at different modes

## 2.2 热源间歇对系统制冷量和 COP 的影响

总体上来说，热源的间歇对系统的解吸和吸附的影响均为不利，但是从表 1 中发现各工况下系统的解吸量变化较大而制冷量却减少不多，仅 0.2 kW 左右，分析认为，其主要原因是间歇热源对解吸的影响是直接的，而对吸附的影响是间接的，在热源间歇期间冷却吸附过程依然进行，同时，实验

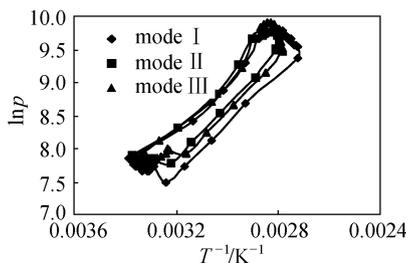


Fig. 5 Comparison of  $p-T$  diagram between different working modes

中各个工况是在不断切换中连续进行的，无法避免各工况之间的互相影响，再加上蒸发器的蓄冷效果的影响致使热源间歇对制冷量影响不会太大，如图 6。同时，间歇热源工况中连续不断的冷却吸附过程对系统的解吸产生了有利的影响，而吸附床解吸温度的降低也使得吸附床起始的吸附温度有所降低，从而使得系统开始时的解吸量有所增大，如图 2 所示。因此，实验中工况 V 因受前面多个热源间歇工况的影响而使其对应的制冷量与不受前面热源间歇工况影响的工况 II 的制冷量相差不多。

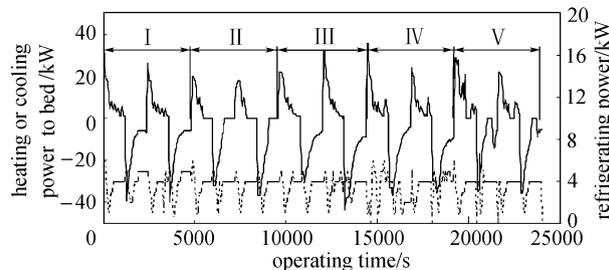


Fig. 6 Heating and refrigerating power in experiments (negative and positive values denote cooling and heating power respectively)  
— heating or cooling power to bed; - - - refrigerating power

系统的 COP 的变化与解吸量的变化有所不同，在热源间歇期间一般解吸量都会减小甚至解吸停止，与此同时加热量也减小，对于无蓄热工况在热源间歇期间的加热量则减小为零，而制冷量仍然不为零，所以系统的 COP 下降不多，特别是工况 II 其 COP 基本不变，如表 1 所示。

## 3 结 论

(1) 热源的间歇对系统长时间经济稳定地运行极为不利，但是添加蓄热装置会有效改善系统的这种运行状况；

(2) 对于 40 min 的循环，解吸过程主要集中

在加热的前 15 min，如果热源间歇过程发生在此前应对有效加热时间予以补偿，发生在此后可以不考虑热源间歇的影响。

## References

- 1 Zhang Lizhi, Wang Ling. Effects of Coupled Heat and Mass Transfers in Adsorbent on the Performance of a Waste Heat Adsorption Cooling Unit. *Applied Thermal Engineering*, 1999, **19** (2): 195—215
- 2 Wu Jingyi (吴静怡), Wang Ruzhu (王如竹), Xu Yuxiong (许煜雄). Cycle Characteristics and Dynamic Performance of Continuous Heat Recovery Adsorption Air-conditioning System/Heat Pump. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (2): 144—155
- 3 Critoph R E. Simulation of a Continuous Multiple-bed Regenerative Adsorption Cycle. *International Journal of Refrigeration*, 2001, **24** (5): 428—437
- 4 Vasiliev L L. Solar Sorption Refrigerators with Dual Sources of Energy. In: Proc. of the Sorption Heat Pump Conf. . Shanghai, China, 2002
- 5 Wang R Z, Xu Y X, Wu J Y, Li M, Shou H B. Research on a Combined Adsorption Heating and Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, 2002, **22** (6): 603—617
- 6 Wu Jingyi (吴静怡), Wang Ruzhu (王如竹). Research on Operation Characteristics of an Adsorption Refrigeration System Driven by Intermittent Heat Source. *Journal of Engineering Thermophysics (China)* (工程热物理学报), 2003, **24** (6): 926—928

## 信息与交流

### 国家最新发布我国农药产品抽样合格率

国家质量监督检验检疫总局最新发布的数据显示，我国农药产品抽样合格率为 86.4%。质检总局近期对农药产品质量进行了国家监督抽查，共抽查了北京、天津、河北、山西、上海、江苏、浙江、安徽、山东、河南、湖北、湖南、广东、四川等 14 个省、直辖市 104 家企业生产及经销的 118 种产品，合格 102 种。

抽查显示，农药产品中的杀菌剂和复配制剂问题较多。杀菌剂和复配制剂不合格产品中主要的不合格项为有效成分含量、乳液稳定性和悬浮率等重要技术性能指标，农民购买使用后，必然会影响农作物病虫害防治，甚至会产生严重药害，对农民增产增收产生不利影响。此外，假冒伪劣、制假售假行为依然存在，部分产品标示混乱。

(摘自“中国化工信息网”)