采用复合吸附剂-氨的多功效热管型高效吸附制冷机

陆紫生 王如竹* 王丽伟 陈传涓

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200030. * 联系人, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn)

摘要 采用复合吸附剂-氨工作对设计出多功效热管型高效吸附制冷系统. $CaCl_2$/活性碳的复合吸附剂, 由于活性碳中丰富的微孔结构强化了$CaCl_2$的传质, 提高了系统的吸附性能. 系统在加热吸附床时, 加热锅炉为热管加热端, 吸附床为热管冷却端; 在冷却吸附床时, 吸附床为热管加热端, 冷却器为热管冷却端; 在回热时, 热的吸附床为热管加热端, 冷的吸附床为热管冷却端; 回质时, 将热的吸附床和冷的吸附床的氨管路相连通, 由于热床压力高, 其中的氨将迅速流到冷床中而实现回质. 在渔船柴油机余热加热, 海水冷却的条件下, 系统在–20℃蒸发温度下可以获得单位质量吸附剂的制冷功率, SCP = 770.4 W/kg, COP = 0.39. 在太阳能热水驱动下, 系统在蒸发温度为 5.6℃时可以获得单位质量吸附剂制冷功率, SCP = 524.2 W/kg, COP = 0.27.

关键词 复合吸附剂 热管 吸附制冷 渔船 太阳能

采用天然工质作为制冷剂的吸附式制冷不仅具有ODP和GWP均为 0 的环保优点, 而且具有可以充分利用低温余热、太阳能的优点, 因而受到制冷领域的广泛重视. 此外, 这种系统还具有制造简单、无运动部件、低噪声、低维修费用等工艺优点, 所以吸附制冷被认为是具有广泛的应用前景的制冷技术[1].

上海交通大学于 2004 年成功研制了一种能够利用 65~85℃低温热源的硅胶-水吸附式制冷机, 采用 85℃热水驱动, 其空调冷水机组工况可以获得 10 kW 的制冷功率, COP可达 0.4 以上[2]. 2005 年, 研究人员利用热管理论设计出了高效复合交变热管型吸附制冰机, 在蒸发温度为–15℃时, 平均SCP和COP分别可达 731 W/kg和 0.41[3]. 此外, 还提出了将回质与回热循环相结合, 利用先回质、后回热的方式, 证明了回热和回质对于提高吸附制冷机性能十分有效[4].

本文在以前研究的基础上, 采用复合吸附剂-氨工作对, 设计出多功效热管型高效吸附制冷系统(图 1). 由于化学吸附剂$CaCl_2$工作中发生的膨胀结块等现象会恶化其传质性能, 从而带来化学吸附剂的性能衰减[5,6]. 通过合理工艺, 当$CaCl_2$∶活性碳以 4∶1 (质量比)混合成复合吸附剂后, 可有效改善吸附性能, 可能原因是活性碳中丰富的微孔结构强化了$CaCl_2$的传质. 系统的半循环工作流程为: (ⅰ) 加热及冷却吸附床过程: 在加热吸附床时, 加热锅炉为热管加热端, 吸附床为热管冷却端, 形成热管型加热回路; 在冷却吸附床时, 吸附床为热管加热端, 冷却器为热管冷却端, 形成热管型冷却回路; (ⅱ) 回质过程: 回质时将热的吸附床和和冷的吸附床的氨回路相连通, 由于热床压力高, 其中的氨将迅速流到冷床中而实现回质; (ⅲ) 回热过程: 在回热时热的吸附床作为热管加热端, 冷的吸附床作为热管冷却端, 构成热管型回热回路. 接下来的半循环中, 冷热床交替. 依此类推, 一直循环下去.

与其他系统相比较, 多功效热管型吸附制冷机的创新点表现在以下 3 方面: (ⅰ) 采用了热管型回热, 利用了热管高导热性, 提高了回热效果, 从而提高了制冷效果. 同时, 此回热回路中, 不需要另加回热媒体和回路, 降低了系统复杂性. (ⅱ) 由于采用了多功效热管型系统, 所以其加热、冷却和回热回路有部分重叠. 这样, 既简化了管路又减少了金属热容. (ⅲ) 采用氯化钙/活性炭复合吸附剂, 通过合理工艺, 可以避免$CaCl_2$的膨胀结块, 提高了对氨的吸附性能.

在所建立的实验系统上, 我们进行了两种制冷工况实验: 渔船柴油机排气废热驱动的渔船制冰工况实验和太阳能热驱动的太阳能空调工况实验. 实验中采用电加热来模拟废热加热和太阳能加热, 通过恒温箱控制冷却水温度, 蒸发器中液位高度通过磁制伸缩液位传感器来测量, 其相对测量误差小于 0.05%. 实验中平均 SCP 的计算公式为

$$\text{平均 SCP} = \frac{1000\rho v_l r}{tm}, \qquad (1)$$

其中ρ为吸附时氨液的密度(kg/m^3), v_l为t时间内吸附的氨液容积(m^3), r为蒸发温度下氨的汽化潜热(kJ/kg), t为吸附时间(S), m为单个吸附床中$CaCl_2$的质量(1.88

kg).

$$\mathrm{COP}=\frac{\rho v_l r}{(w_1+w_2)t}, \qquad (2)$$

COP为制冷机性能系数; w_1为加热功率(kW); w_2为泵功(kW).

实验研究了回质回热过程对吸附制冷性能的影响, 采用水为热管工质, 循环时间为 70 min, 蒸发温度为–20℃左右, 冷却水温度为 20℃左右, 回质时间 40 s, 回热时间 2 min. 其制冷效果比较如图 2 所示, 图 2 中纵坐标SCP为单位质量$CaCl_2$吸附剂组分所对应的平均制冷功率. 将有回质回热循环的平均SCP分别和只有回质循环的以及无回质回热循环的相比, 平均要高 28.7%和 99.5%. 可见回质回热有效地提高了吸附制冷性能. 从图 2 中还可以看出, 加热时间为 35 min, 高温解吸后的吸附床, 由于解吸充分, 所以在前 15 min中冷却吸附制冷时, 有回质回热循环的平均SCP都可达到 1000 W/kg, 其值要比现有的报道高很多. 如果解吸充分并且能进一步提高吸附床传热系数, 缩短循环时间, 其平均 SCP 有望进一步提高.

捕渔期海水的温度为 15~30℃. 实验研究了 15℃, 20℃, 25℃和 30℃的冷却水情况下的系统制冷性能. 实验中采用水为热管工质, 40 s 回质, 2 min 回热. 其实验结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 渔船制冰工况下的平均 SCP 为 528.0~865.8 W/kg, 平均 COP 为 0.26~0.43. 其数值随冷却水温度上升而下降.

在太阳能空调实验中(采用 80℃热水做驱动热源), 研究了不同加热功率对系统性能的影响. 由于丙酮的热启动快, 故采用丙酮为热管工质. 回质时间为 40 s, 循环时间为 20 min, 蒸发温度为 0℃左右, 冷却水温度为 30℃左右, 其结果如图 3 所示. 从图 3 中可看出, 加热功率太小和太大都不利于提高 SCP. 这是因为吸附性能不仅与吸附剂解吸状况有关, 也与吸附床被冷却的状况有关. 在加热功率为 3.51 kW 时, 不同蒸发温度下的制冷性能如表 2 所示. 在蒸发温度为 5.6℃时, 其平均 SCP 可达 524.2 W/kg. 如果采用更高太阳能集热温度, 显然可以进一步提高解吸温度, 从而使得太阳能系统制冷性能进一步提高.

本制冷机采用了复合吸附剂, 又采用了多功效热管型复合系统, 将其制冷性能和国内外其他研究成果相比较, 可以看出本系统具有明显的优势(表 3).

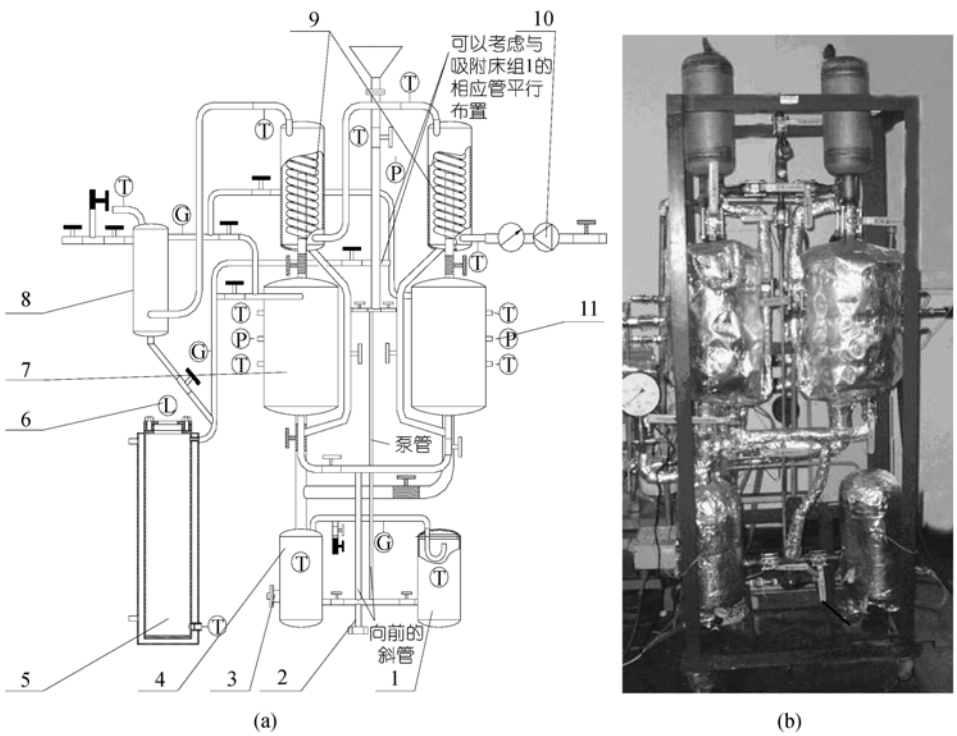

图 1　系统结构图

(a) 原理图; (b) 实物照片. 1, 充液锅炉; 2, 放液阀; 3, 电加热器; 4, 加热锅炉; 5, 蒸发器; 6, 液位传感器; 7, 吸附床 1; 8, 冷凝器; 9, 冷却器; 10, 冷却水泵; 11, 吸附床 2

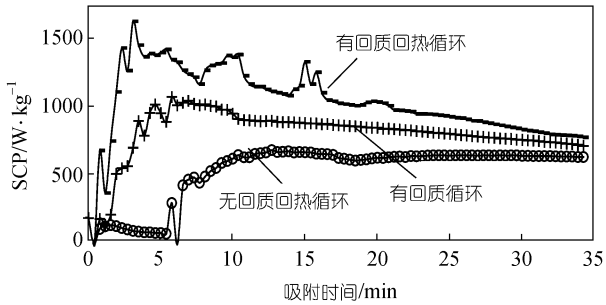

图 2 不同回质回热情况下平均 SCP 随时间的变化曲线

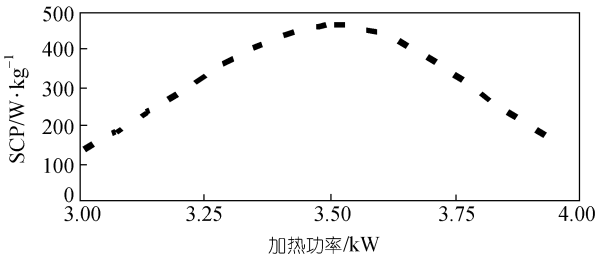

图 3 不同加热功率下平均 SCP

表 1 不同冷却水温度下渔船制冰工况实验结果

冷却水温度/℃	循环时间/min	回热时间/min	蒸发温度/℃	最高解吸温度/℃	加热功率/kW	平均SCP/W·kg^{-1}	平均 COP
15.9	70	2	−19.1	110.1	3.64	865.8	0.43
20.3	70	2	−21.3	114.7	3.64	770.4	0.39
24.8	70	2	−18.1	114.0	3.64	676.8	0.34
29.4	70	2	−19.4	113.7	3.64	528.0	0.26

表 2 不同蒸发温度下太阳能空调工况实验结果

冷却水温度/℃	循环时间/min	蒸发温度/℃	最高解吸温度/℃	加热功率/kW	平均SCP/W·kg^{-1}	平均 COP
28.3	20	−6.3	71.3	3.51	406.2	0.21
29.4	20	0.0	80.6	3.51	472.8	0.24
31.1	20	5.6	81.1	3.51	524.2	0.27

表 3 国内外研究结果对比

工质对	平均 COP	平均SCP/W·kg^{-1}	冷却水温度/℃	解吸温度/℃	蒸发温度/℃	数据来源	参考文献
$MnCl_2/NiCl_2$-NH_3	0.4	140	40	115	−25	模拟	[7]
$SrCl_2$-NH_3	0.32	230	40	290	−10	实验	
金属氢化物-氢	0.4	50	35	215	−10	实验	[8]
沸石分子筛-水	0.9	250	–	160	5	模拟	[9]
$CaCl_2$/活性炭复合吸附剂-氨	0.27	524	30	81.1	5.6	实验	本工作
	0.39	770	20	114.7	−21.3		

致谢 感谢夏再忠老师和许煜雄高工的帮助. 本工作为国家杰出青年科学基金(批准号: 50225621)和上海市教委曙光跟踪计划 (批准号: 02GG03)资助项目.

参 考 文 献

1 王如竹, 吴静怡, 代彦军, 等. 吸附式制冷. 北京: 机械工业出版社, 2002. 9

2 Wang D C, Wu J Y, Wang R Z, et al. Research on a novel adsorption chiller driven by low grade heat source. Denver, International Sorption Heat Pump Conference, 2005. 69~74

3 Wang L W, Wang R Z, Wu J Y, et al. Design of heat pipe type adsorption ice-making for fishing boats. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13(3): 403~410

4 Wang R Z. Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation. International Journal of Refrigeration, 2001, 24: 602~611[DOI]

5 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. 科学通报, 2005, 50(2): 101~111[摘要]

6 王丽伟, 王如竹, 吴静怡, 等. 氯化钙-氨的吸附特性研究及在制冷中应用. 中国科学, E辑, 2004, 34(2): 268~279[摘要]

7 Pons M, Meunier F, Cacciola G, et al. Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling and heat pumping. International Journal of Refrigeration, 1999, 22: 5~17[DOI]

8 Willers E, Groll M. Evaluation of metal hydride machines for heat pumping and cooling applications. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(1): 47~58[DOI]

9 Lai H M. An enhanced adsorption cycle operated by periodic reversal forced convection. Applied Thermal Engineering, 2000, 20: 595~617[DOI]

(2005-05-24 收稿, 2005-09-01 收修改稿)