

文章编号: 0253-4339(2010)02-0001-06

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2010.02.001

# 太阳能吸附空调的全性能实验研究及其应用

陆紫生<sup>1</sup> 王如竹<sup>1</sup> 夏再忠<sup>1</sup> 代彦军<sup>2</sup> 鲁秀锐<sup>2</sup> 杨传波<sup>2</sup>

(1 上海交通大学太阳能发电及制冷教育部工程研究中心 上海 200240

2 山东德州皇明太阳能集团有限公司 山东 253000)

**摘要** 研究了不同工作条件对硅胶-水吸附机组性能的影响,例如热水进口温度、冷却水进口温度、热水流量、冷水出口温度等因素对吸附制冷性能的影响。在北纬 $36^{\circ}41'$ 地区进行应用,经过测量计算,在夏日典型晴天条件下,集热器平均效率为0.36,吸附制冷机平均COP(性能系数)为0.44,平均太阳能COP值为0.16。测量结果表明,机组性能受多种工作条件影响。机组制冷性能随着热水进口温度、热水流量、冷水出口温度、太阳辐射强度的增加而增加,而随着冷却水进口温度的上升而降低。当热水进口温度为 $79.0^{\circ}\text{C}$ ,冷却水进口温度为 $25.4^{\circ}\text{C}$ ,冷水出口温度为 $13.7^{\circ}\text{C}$ ,制冷功率为17.9kW, COP可达0.63。当热水流量为2124kg/h(名义热水流量为3400kg/h),热水进口温度为 $79.9^{\circ}\text{C}$ ,冷却水进口温度为 $30.2^{\circ}\text{C}$ ,冷水出口温度为 $15.3^{\circ}\text{C}$ 时,制冷功率12.7kW, COP为0.42。

**关键词** 热工学; 太阳能; 硅胶; 水; 吸附; 空调

**中图分类号**: TK511<sup>+</sup>.2; TB651

**文献标识码**: A

## Experiment on Performance of Solar Adsorption Air Conditioning

Lu Zisheng<sup>1</sup> Wang Ruzhu<sup>1</sup> Xia Zaizhong<sup>1</sup> Dai Yanjun<sup>2</sup> Lu Xiurui<sup>2</sup> Yang Chuanbo<sup>2</sup>

(1 Engineering Research Center Solar Power & Refrigeration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2 Himin Solar Energy Group Co., Ltd., Shandong, 253000, China)

**Abstract** The influence of hot water inlet temperature, cooling water inlet temperature, chilled water outlet temperature, and hot water flow rate on the performance of a silica gel-water solar adsorption unit was experimentally investigated. Moreover, a prototype of the solar adsorption air conditioning was installed and measured in Dezhou city (north latitude of  $36^{\circ}41'$ ) in China. On a typical summer day, the average thermal efficiency of the solar collector, the average COP of the adsorption refrigerator, and the average solar COP of the system are 0.36, 0.44, and 0.16, respectively. The results show that the performance rises with the increase in the hot water inlet temperature, chilled water outlet temperature, hot water flow, and solar radiation intensity, and it declines with the increase in the cooling water inlet temperature. When the hot water inlet temperature, cooling water inlet temperature, and chilled water outlet temperature were  $79.0^{\circ}\text{C}$ ,  $25.4^{\circ}\text{C}$ , and  $13.7^{\circ}\text{C}$ , respectively, the cooling capacity was 17.9kW and the COP was 0.63. The cooling capacity was 12.7kW and the COP was 0.42 when the hot water flow rate, hot water inlet temperature, cooling water inlet temperature, and chilled water outlet temperature were 2124kg/h,  $79.9^{\circ}\text{C}$ ,  $30.2^{\circ}\text{C}$ , and  $15.3^{\circ}\text{C}$ , respectively.

**Keywords** Pyrology; Solar; Silica gel; Water; Adsorption; Air conditioning

随着社会的发展,节能和环保问题越来越受到各国的重视。《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔协定书》明令规定了CFC以及HCFC将最终被臭氧破坏系数ODP和温室效应系数GWP均为零的绿色制冷剂所代替。《京都条约》更是注重了对地球变暖的影响,因此ODP系数为零的HFC类物质将被大幅度地限制使用<sup>[1]</sup>。另外,在能源消耗方面,大约有30%的能源消耗在建筑中。如何减低建筑能耗、

如何取代氟里昂压缩制冷成为研究热点问题。

吸附式制冷可以有效解决上述问题。吸附制冷系统使用水、甲醇等作为制冷剂,可以由 $50\sim 90^{\circ}\text{C}$ 的热水驱动,这些热源在工业中大量存在,也可很容易由太阳能加热得到。已经有大量研究人员对吸附式制冷做了许多有意义的研究。例如Meunier<sup>[2]</sup>、Ismail<sup>[3]</sup>等研究了沸石-水吸附制冷系统; Pons<sup>[4]</sup>研究了活性炭-甲醇吸附制冷系统等。

基金项目: 国家863计划(2006AA05Z413)、国家科技支撑计划(2006BAA04B03)资助项目。(The project was supported by National 863 Program (2006AA05Z413) and National Key Technology R&D Program (2006BAA04B03).)

收稿日期: 2009年11月13日

Nishiyodo Air Conditioning Co., Ltd<sup>[5]</sup>研发了商用硅胶-水冷水机组, 其驱动热水进口温度为85℃、冷却水进口温度31℃、制冷功率为10kW。Saha<sup>[6]</sup>、Boelman<sup>[7]</sup>、Chua<sup>[8]</sup>以及 Alam<sup>[9]</sup>研究了硅胶-水吸附制冷, 驱动热水进口温度为80℃, 冷却水进口温度为30℃。

然而, 传统吸附制冷系统的性能系数COP较低。Shelton<sup>[10]</sup>研究了热波循环, 换热流体从一个正在冷却的床中帶出热量, 去加热另一个床, 这样可以有效地减少额外的加热量。但热波循环对传热性能要求极高, 所以现在只处于理论分析阶段。Douss<sup>[11]</sup>研究了复叠循环, 活性炭-甲醇循环和沸石-水循环复叠在一起。利用沸石-水循环中的吸附热来加热活性炭-甲醇系统。Saha<sup>[12]</sup>通过数据计算, 模拟了三级硅胶-水吸附空调, 当50℃热水驱动时, 冷却水进口温度为20℃~35℃。当40℃热水驱动时, 冷却水进口温度为20℃~28℃。吸附系统的较低的传热传质性能是制约其快速产业化的瓶颈之一。Vichan<sup>[13]</sup>在硅胶中添加活性炭以提高太阳能吸附制冷系统的传热传质性能。上海交通大学的研究人员将热管原理应用在吸附制冷系统中, 可以有效地提高系统的传热性能<sup>[14-15]</sup>。当使用热管式蒸发器时, 吸附系统可以减少真空阀门数<sup>[16-19]</sup>。但系统中采用甲醇作为热管工质, 当甲醇工质渗漏到吸附床中, 将对吸附性能产生严重影响。

在前面研究的基础上, 这里的研究的目的在于:

1) 吸附床采用紫铜管铝翅片式换热器, 铜管和翅片之间通过高压水胀胀紧, 以提高吸附床传热性能; 2) 所有工作介质都采用水, 避免了不同工质之间渗漏的问题; 3) 全面研究各种参数对系统性能的影响, 如热水进口温度、冷却水进口温度、冷水出口温度以及热水流量等; 4) 研究此太阳能驱动的吸附空调系统在实际工程中的应用。

## 1 硅胶-水吸附机组

上海交通大学研制的硅胶-水制冷机, 主要由蒸发器(热管蒸发端)、两个隔离器(热管冷凝端)、两个吸附床、两个冷凝器以及阀门等组成。其工作原理如图1所示, 工作过程主要包括以下三个阶段: 1) 右吸附床加热解吸, 左吸附床冷却吸附过程, 如图1(a)。在此过程中, 热水进入右吸附床解吸出其中的水蒸汽, 水蒸汽在右冷凝器中被冷凝成液体后流到右隔离器水盘中, 以供在下一个循环中被吸附。冷却水进入左吸附床, 左吸附床从左隔离器水盘中吸附水蒸汽。此时, 蒸发器水盘中的水

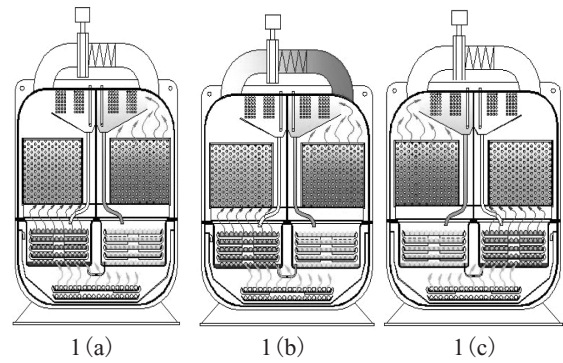


图1(a) 左床冷却, 右床加热

Fig. 1(a) Cooling left bed, heating right bed

图1(b) 回质回热过程

Fig. 1(b) Mass and heat recovery process

图1(c) 右床冷却, 左床加热

Fig. 1(c) Cooling right bed, heating left bed

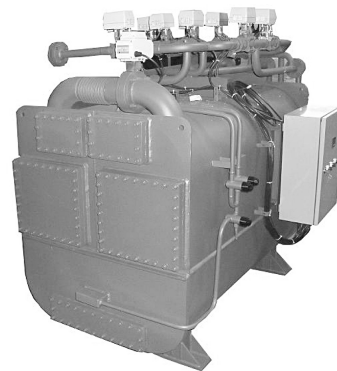


图2 硅胶-水吸附制冷机

Fig.2 Silica gel-water chiller

表1 硅胶-水吸附机组设计参数

Tab.1 Design parameters of silica gel-water chiller

| 名称 | 热水 |    |                   | 冷却水 |    |                   | 冷水 |    |                   |
|----|----|----|-------------------|-----|----|-------------------|----|----|-------------------|
|    | 进口 | 出口 | 流量                | 进口  | 出口 | 流量                | 进口 | 出口 | 流量                |
| 数值 | 80 | 75 | 3.4               | 30  | 35 | 5.5               | 20 | 15 | 1.8               |
| 单位 | ℃  | ℃  | m <sup>3</sup> /h | ℃   | ℃  | m <sup>3</sup> /h | ℃  | ℃  | m <sup>3</sup> /h |

不断蒸发, 水蒸汽进入到左隔离器的换热管内, 被冷凝成液体, 再流回到蒸发器水盘中, 从而形成热管式蒸发器。冷水从蒸发器的换热管中流过并帶出冷量。2) 回质、回热过程, 如图1(b): 在解吸、吸附结束后, 将两吸附床进行连通, 由于两床存在着压力差, 高温床中的水蒸汽得到更充分地解吸, 并流入到低温床。此时, 高温真空腔中的隔离器水盘中的水大量蒸发, 蒸汽进入到低温腔中的隔离器水盘中冷凝成液体, 并释放冷凝热。回质过程之后, 冷却水先经过热床, 再流过冷床, 这样可以

回收热床的热量。3)左吸附床加热解吸,右吸附床冷却吸附过程,如图1(c):此过程如第一步过程类似。此后系统的加热和冷却过程轮流切换,一直循环下去。硅胶-水吸附机组如图2所示,其设计参数如表1所示。

## 2 硅胶-水吸附机组性能测试

首先对吸附机组进行全性能测试,研究不同工作条件对硅胶-水吸附机组性能的影响,例如热水进口温度、冷却水进口温度、热水流量、冷水出口温度等因素对吸附制冷性能的影响。最后将吸附机组实际应用在皇明太阳能集团日月坛大厦的图书馆中。

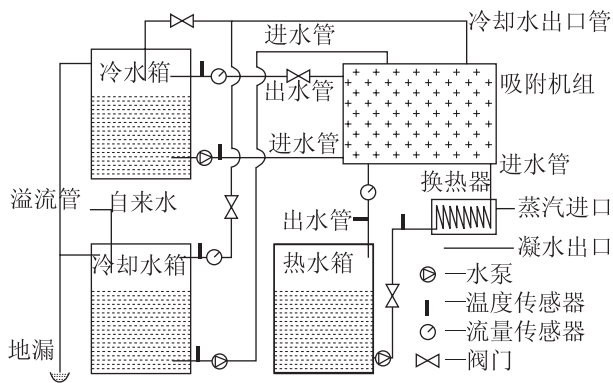


图3 硅胶-水太阳能吸附机全性能测试系统  
Fig.3 Test system of the silica gel-water solar adsorption chiller

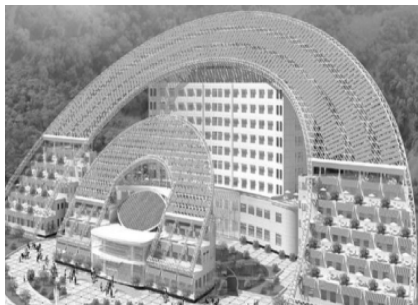
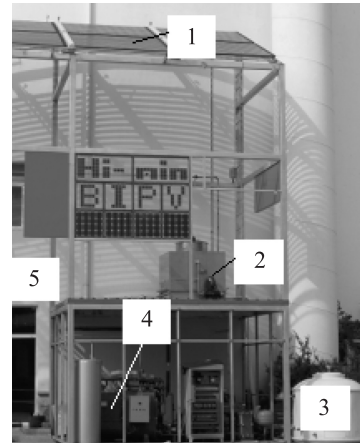


图4 皇明日月坛大厦  
Fig.4 Himin green building

机组性能测试系统如图3所示,其主要包括四个子系统:1)热水系统:热水从热水箱底部流出经热水泵后进入蒸汽换热器,在换热器中被蒸汽加热后进入吸附机组,来加热一个吸附床,最后再返回到热水箱。2)冷却水系统:冷却水从冷却水箱底部流出经冷却水泵后进入吸附机组,来冷却另一个吸附床,最后再返回到冷却水箱。3)冷水系统:冷水从冷水箱底部流出经过冷水泵后进入吸附机组的蒸发器,输出冷量,最后再返回到冷水箱。4)测量系统:四线制Pt100温度传感器(精度A级)、流量

计(精度1%)、数据巡检仪XSLE/A-08S2V0(精度 $\pm 0.05FS$ )和电脑等。吸附机组应用安装在山东皇明太阳集团日月坛大厦图书馆中,如图4和图5。采用U型管式太阳能集热器,集热器面积 $79.7m^2$ ,其安装面与水平面呈 $30^\circ$ 角,图书馆使用面积约 $65m^2$ 。



1 集热器 2 冷却塔 3 热水箱 4 硅胶水吸附制冷机  
5 图书馆入口

图5 制冷系统应用在大厦图书馆  
Fig.5 The adsorption air conditioning system is applied in the library of this green building

系统的制冷功率、性能系数COP等的计算公式如下所示:

$$\eta_{cd} = \frac{Q_u}{A_c J_\tau} \quad (1)$$

其中:  $\eta_{cd}$ -集热器集热效率,  $Q_u$ -太阳辐照能中转化为热能的部分, kJ;  $A_c$ -集热器总集热面积,  $m^2$ ;  $J_\tau$ -太阳月平均日辐照量,  $kJ/m^2$ ;

$$q_e = \dot{m}_{ch} C_w (T_{ch,i} - T_{ch,o}) \quad (2)$$

其中:  $q_e$ -制冷功率, kW;  $\dot{m}_{ch}$ -冷水流量,  $kg \cdot s^{-1}$ ;  $C_w$ -水比热容,  $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $T_{ch,i}$ -冷水进口温度,  $^\circ C$ ;  $T_{ch,o}$ -冷水出口温度,  $^\circ C$ ;

$$q_h = \dot{m}_h C_w (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (3)$$

其中:  $q_h$ -加热功率, kW;  $\dot{m}_h$ -热水流量,  $kg \cdot s^{-1}$ ;  $T_{h,i}$ -热水进口温度,  $^\circ C$ ;  $T_{h,o}$ -热水出口温度,  $^\circ C$ ;

$$COP = \frac{q_e}{q_h} \quad (4)$$

其中, COP-性能系数;  $q_e$ -制冷功率, kW;  $q_h$ -加热功率, kW;

$$COP_s = \frac{q_e}{A_c J_z} \quad (5)$$

其中,  $COP_s$ -太阳能性能系数。



### 3 测试结果与分析

#### 3.1 冷却水进口温度对系统性能的影响

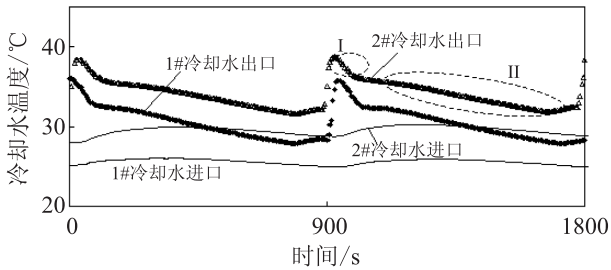


图6 不同冷却水时温度变化图

Fig.6 Temp. variation versus cycle time under different cooling water temp

表2 不同冷却水进口温度下的性能参数

Tab.2 Performance result under different cooling water temp

| 冷却水进口 /°C | 冷却水出口 /°C | 热水进口 /°C | 热水出口 /°C | 冷水出口 /°C | 制冷功率 /kW | COP  |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|------|
| 25.4      | 30.4      | 79.0     | 71.9     | 13.7     | 17.9     | 0.63 |
| 29.5      | 34.2      | 79.2     | 71.4     | 14.9     | 15.3     | 0.50 |
| 25.8      | 28.3      | 55.2     | 50.8     | 15.6     | 5.8      | 0.32 |
| 27.2      | 29.4      | 55.7     | 51.4     | 15.8     | 3.9      | 0.22 |
| 29.1      | 31.3      | 54.5     | 50.6     | 16.4     | 1.3      | 0.08 |

热水进口温度在79℃左右,冷水出口温度在14℃左右,回质时间90s,回热时间30s,冷却水进口温度不同,冷却水进出口温度变化如图6所示。可以看出,当系统刚切换时,由于吸附量较少,冷却水出口温度迅速下降(如图中虚线框I所示),其后由于吸附床释放吸附热,冷却水出口温度缓慢下降(如图中虚线框II所示)。其不同冷却水进口温度下的系统性能如表2所示。从表2中可以看出,机组性能随冷却水进口温度降低而提高。当热水进口温度为79.0℃、冷却水进口温度为25.4℃、冷水出口温度为13.7℃、回质时间90s,回热时间30s时,制冷功率为17.9kW, COP为0.63。当热水进口温度为54.5℃、冷却水进口温度为29.1℃、冷水出口温度为16.4℃、回质时间180s、回热时间30s时,制冷功率为1.3kW, COP可达0.08。热水进口温度较低时,冷却水对吸附性能的影响更为显著。

#### 3.2 冷水出口温度对系统性能的影响

热水进口温度在80℃左右,冷却水进口温度在30℃左右,回质时间90s,回热时间30s,冷水出口温度分别为9.8℃左右、13.2℃左右、14.9℃,制冷功率变化图如图7所示。从图7中可以看出,制

冷功率随着冷水出口温度的上升而上升。不同冷水出口温度下的系统性能如表3所示。从表3中可以看出,当热水进口温度为80.9℃、冷却水进口温度为29.7℃、冷水出口温度为9.8℃时,制冷功率为10.3kW, COP为0.36。

表3 不同冷水出口温度下的性能参数表

Tab.3 Performance result under different chilled water

| 冷水出口 /°C | 热水进口 /°C | 热水出口 /°C | 冷却水进口 /°C | 冷却水出口 /°C | 制冷功率 /kW | COP  |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|------|
| 9.8      | 80.9     | 73.6     | 29.7      | 33.7      | 10.3     | 0.36 |
| 13.2     | 79.4     | 71.9     | 29.9      | 34.3      | 14.0     | 0.46 |
| 14.9     | 79.2     | 71.4     | 29.6      | 34.2      | 15.3     | 0.50 |

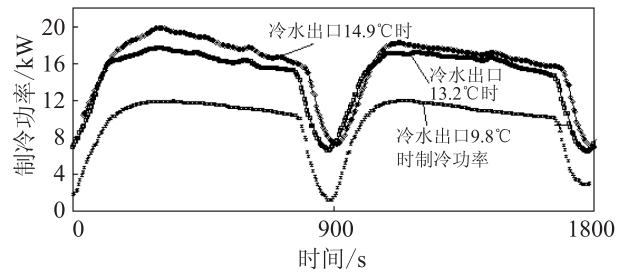


图7 不同冷水出口温度时的制冷功率和COP变化图

Fig.7 Cooling capacity and COP variation versus cycle time under different chilled water temp

#### 3.3 热水流量对系统性能的影响

热水进口温度为80℃左右,冷却水为30℃左右,冷水出口温度为15℃左右,回质时间90s,回热时间30s,热水流量分别为2124kg/h、2573kg/h以及3394kg/h。热水进出口温差变化图如图8所示。

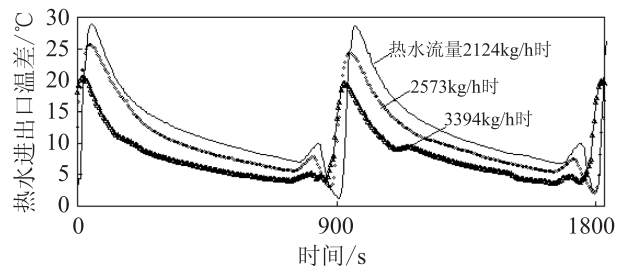


图8 不同热水流量时的热水进出口温度差变化图

Fig.8 Hot water temp. variation versus cycle time under different hot water mass flow

从图8中可以看出,热水流量越小,进出口温差越大。不同热水流量下的性能参数如表4所示,可以看出,当热水流量减少37.4%,制冷功率和COP分别减少17.0%和16%。这是因为,随着热水流量减少,热床的换热温差将会增加,使得解吸床的传热性能有所下降,从而影响其解吸性能,最终

将影响制冷性能。

表4 不同热水流量时的吸附制冷性能参数

Tab.4 Performance result under different hot water mass flow

| 热水流量<br>(kg/h) | 冷水出口<br>/°C | 冷却水进口<br>/°C | 冷却水出口<br>/°C | 热水进口<br>/°C | 热水出口<br>/°C | 制冷功率<br>/kW | COP  |
|----------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 2124           | 15.3        | 30.2         | 35.6         | 79.9        | 67.6        | 12.7        | 0.42 |
| 2573           | 15.8        | 30.2         | 35.9         | 80.1        | 69.6        | 14.5        | 0.46 |
| 3394           | 14.9        | 29.5         | 34.2         | 79.2        | 71.4        | 15.3        | 0.50 |

### 3.4 热水进口温度对系统性能的影响

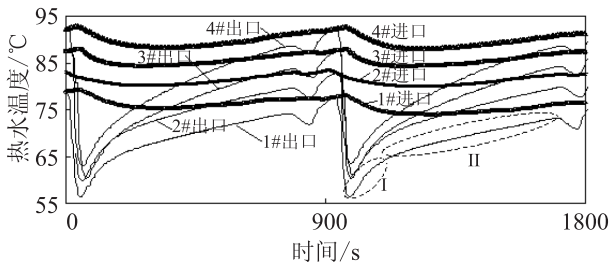


图9 不同热水进口温度时温度变化图

Fig.9 Water temp. variation versus under different hot water inlet temp

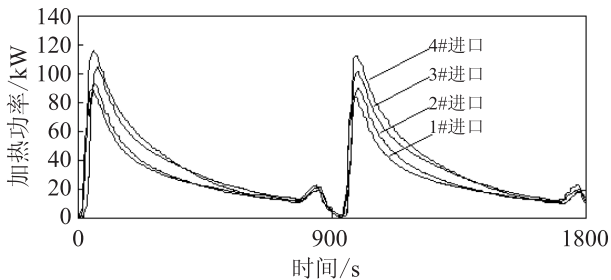


图10 不同热水进口温度时解吸床的加热功率变化图

Fig.10 Heating capacity variation versus cycle time under different hot water inlet temp

冷却水进口温度为30℃左右、冷水出口温度为15℃左右、回质时间为90s、回热时间为30s、不同热水进口温度时，其热水进出口温度变化图如图9所示。可以看出，系统刚切换后，解吸床有少量水被解吸出来，解吸床所需热量也较少，热水出口温度上升速度较快(如图中虚线框I所示)；当有大量水被解吸出来时，解吸床所需热量也较大，所以热水出口温度的上升速度较慢(如虚线框II所示)。不同热水进口温度时的加热功率变化图如图10所示，可以看出，随着热水进口温度的提高，其提供给解吸床的热量也随之增加，即解吸床可以被加热到更高的温度，解吸得更充分，所以吸附制冷机的制冷功率也将增加。不同热水进口温度时的制冷功率如表5所示。可以看出，当热水进口温度为89.9℃，冷却水进口温度为29.7℃，冷水出

口温度为16.4℃，回质90s，回热30s，制冷功率为19.5kW，COP为0.56。

表5 不同热水进口温度下的性能参数表

Tab.5 Performance result under different hot water inlet temp

| 实验编号 | 热水进口<br>/°C | 热水出口<br>/°C | 冷水出口<br>/°C | 冷却水进口<br>/°C | 冷却水出口<br>/°C | 制冷功率<br>/kW | COP  |
|------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|------|
| 1    | 75.8        | 69.2        | 15.3        | 29.4         | 33.5         | 12.0        | 0.45 |
| 2    | 79.2        | 71.4        | 14.9        | 29.5         | 34.2         | 15.3        | 0.50 |
| 3    | 85.2        | 78.1        | 15.1        | 29.3         | 34.7         | 17.3        | 0.53 |
| 4    | 89.9        | 81.0        | 16.4        | 29.4         | 34.8         | 19.5        | 0.56 |

### 3.5 在皇明太阳能集团日月坛大厦工程应用

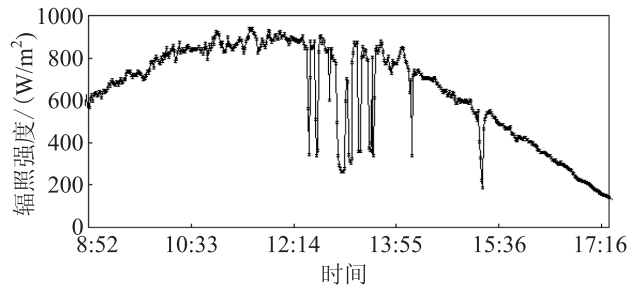


图11 北纬36°41'于2009年8月典型晴天下的太阳辐射强度

Fig.11 Intensity of solar radiation in one typical summer day at north latitude 36°41'

吸附机组安装应用在皇明太阳能集团的日月坛大厦(山东德州市地区，北纬36°41')。研究了夏季8月典型一天中系统运行情况，其太阳辐照情况如图11所示，系统性能曲线如图12所示。从图11中可以看出，经测量一天总辐照量为1274.4MJ左右。从图12中可以看出，随着太阳辐照的减弱，热水进口温度也随之降低，从而吸附制冷功率也降低，最终冷水出口温度将有所升高。

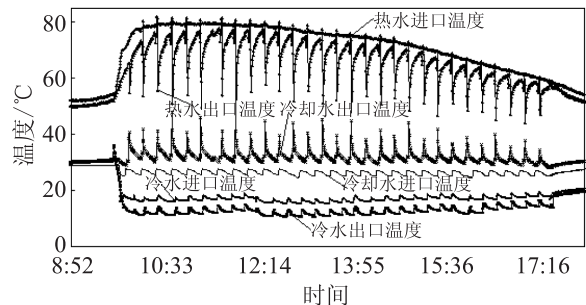


图12 北纬36°41'于2009年8月典型晴天下的系统运行性能曲线

Fig.12 Performance result in August at north latitude 36°41'

经过测量得出，集热器总面积平均辐照强度为59.2kW；热水进口平均温度为72.1℃，热水平均出口温度为66.5℃，热水平均流量为3220kg/h；冷

却水平平均进口温度为26.5℃, 冷却水平均出口温度为32.0℃, 冷却水平均流量为4914kg/h; 冷水平均进口温度为16.9℃, 冷水平均出口温度为12.1℃, 冷水流量为1697kg/h。经计算得出, 集热器效率为0.36, 机组的平均制冷功率为9.5kW, COP为0.44, 太阳能COP为0.16。

## 4 小结

通过以上的理论和实验研究, 可以得出如下的结论:

1) 太阳能吸附空调性能随冷却水进口温度的下降而上升。当热水进口温度为79.0℃、冷却水进口温度为25.4℃、冷水出口温度为13.7℃时, 制冷功率为17.9 kW, COP可达0.63;

2) 太阳能吸附空调性能随冷水出口温度的下降而下降。当热水进口温度为80.9℃、冷却水进口温度为29.7℃、冷水出口温度为9.8℃时, 制冷功率为10.3kW, COP为0.36;

3) 太阳能吸附空调性能随热水流量的下降而下降。当热水进口温度为80℃左右、冷却水为30℃左右、冷水出口温度为15℃左右时, 热水流量减少37.4%, 制冷功率和COP分别减少17.0%和16%;

4) 太阳能吸附空调性能随热水进口温度的上升而上升。当热水进口温度为89.9℃, 冷却水进口温度为29.7℃, 冷水出口温度为16.4℃, 制冷功率为19.5kW, COP为0.56。

## 参考文献

- [1] Yu I Aristov, G Restuccia, G Cacciola, et al. A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22: 191-204.
- [2] M Karagiorgas, F Meunier. Heat Recovery Systems & CHP 7[M]. 1987: 285.
- [3] Ismail, F Meunier, B Brandon, et al. Porc. XVIth Int. Congress on Refrigeration, 1983, 2: 363.
- [4] M Pons, Ph. Grenier. Proc. ISES Conference Intersol 85, Montreal, Pergamon, Oxford, 1985.
- [5] Nishiyodo Air Conditioning Co., Ltd, Kyoto. Energy Conservation[G]. Special Issue, Energy Conservation Award Wining Product, 1987, 39:96.
- [6] B B Saha, E C Boelman, T Kashiwagi. Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle-the influence of operating conditions on cooling output and COP[J]. ASHRAE Transaction: Research, 1995, 101:348-355.
- [7] E C Boelman, B B Saha, T Kashiwagi. Experimental investigation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle-the influence of operating conditions on cooling output and COP[J]. ASHRAE Transaction: Research, 1995, 101:358-366.
- [8] H T Chua, K C Ng, T Kashiwagi, et al. Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers[J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22:94-204.
- [9] K C A Alam. Design aspects of adsorption refrigeration systems[D]. Tokyo: University of Agriculture and Technology, 2001.
- [10] S V Shelton, J W Wepfer, D J Miles. Heat Recovery Systems & CHP 9[M]. 1989: 233.
- [11] N Douss, F Meunier. Chem. Energy Sci., 1989, 44: 225.
- [12] Bidyut B Saha, Elisa C Boelman, Takao Kashiwagi. Computational analysis of an advanced adsorption-refrigeration cycle[J]. Energy, 1995, 20 (10): 983-994.
- [13] Vichan Tangkongsirisin, Atsushi Kanzawa, Takayuki Watanabe. A solar-powered adsorption cooling system using a silica gel-water mixture[J]. Energy, 1998, 23:347-353.
- [14] R Z Wang. Efficient adsorption refrigerators integrated with heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28:317-326.
- [15] Y L Liu, R Z Wang, Z Z Xia. Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28:218-230.
- [16] Wang D C, Xia Z Z, Wu J Y, et al. Study of a novel silica gel water adsorption chiller, Part I: design and performance prediction[J]. Int. J. Refrig., 2005, 28 (7): 1073-83.
- [17] Wang D C, Wu J Y, Xia Z Z, et al. Study of a novel silica gel water adsorption chiller, Part II: Experimental study[J]. Int. J. Refrig., 2005, 28 (7): 1084-91.
- [18] Di J, Wu J Y, Xia Z Z, et al. Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel water chiller under the conditions of variable heat source temperature[J]. Int. J. Refrig., 2007, 30: 515-26.
- [19] Li, J Y Wu. Theoretical research of a silica gel water adsorption chiller in a micro-combined cooling, heating and power (CCHP) system[J]. Applied Energy, 2009, 86: 958-67.

## 作者简介:

陆紫生, 男(1979-), 博士, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海交通大学闵行校区东川路800号, 200240, 021-34206309, luzisheng@sjtu.org。主要研究方向有: 吸附制冷; 空调; 太阳能。

## About the authors:

Lu Zisheng (1979-), male, Ph. D./ Machine Building, 800# Dongchuan Rd., Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai, China, 200240. (021) 34206309, luzisheng@sjtu.org. Research fields: adsorption refrigeration, air-conditioning, solar energy.