

余热制冷用氯化钙/硅胶复合吸附剂的制备及性能研究

王令宝,卜宪标,马伟斌,陆振能

(中国科学院广州能源研究所 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室,广东 广州 510640)

摘 要: 为了开发出利用余热进行吸附制冷的高性能吸附剂,采用浸渍法在真空下将氯化钙担载于粗孔硅胶上,制备了硅胶/氯化钙复合吸附剂,测试了复合吸附剂的吸附等温线和吸附速率,测试结果表明:浸渍法得到的复合吸附剂对水具有更大的吸附能力,在 20% 的湿度下,复合吸附剂在 2 h 的吸附量为 15.64 g/100 g 吸附剂,是单一硅胶在相同条件下吸附量的 8.06 倍。用制备的复合吸附剂制作了一台小型吸附制冷机并进行了测试,当热源温度为 90 ℃,冷却水温度为 35 ℃ 时,在整个循环周期内(15 min),制冷功率为 0.705 kW,单位质量吸附剂的制冷功率(SCP)为 70.51 W/kg,COP 为 0.25。

关 键 词: 吸附制冷;复合吸附剂;余热利用;浸渍法
中图分类号:TB64;TK 511. *3 文献标识码:A

引 言

吸附式制冷可以利用可再生能源及低品位热源,使用对环境无公害的制冷剂,又可以回收利用能源,成为近年来各国学者竞相研究的课题^[1-5]。特别是对于汽车和船舶而言,其发动机排出了大量的废热(热水和烟气),而这部分热量不容易利用,如果能用吸附的方式将废热转化为冷量,将具有重要的实用价值^[6-7]。从目前实用化研究成果来看,吸附制冷技术还存在着单位吸附剂的制冷功率低、系统造价高、热利用率低等问题。究其原因是由于吸附制冷工质对的循环吸附量较小、吸附热较大、吸附速率较慢、固体吸附剂导热性能较差以及化学吸附存在膨胀、结块等现象导致的制冷剂气体渗透性能差,吸附制冷循环时间长,系统输出功率较低^[8-10]。

解决这些问题的关键之一是研制出性能优越的吸附工质对。硅胶具有再生温度较低、吸附性能稳定、具有丰富的微孔结构和巨大的比表面积的优点,但是其循环吸附量比较小。氯化钙对水有较强的吸附能力,但是氯化钙在吸附过程中容易出现膨胀、结

块等现象^[11-15]。针对上述问题,可以利用溶液浸渍法把氯化钙嵌入到硅胶的微孔内,这样一方面可以利用氯化钙的吸附能力提高吸附性能;另一方面可以利用硅胶将氯化钙分散开来,解决了氯化钙在吸附过程中产生的膨胀结块问题。为了有效的利用发动机及工厂余热,本研究利用真空浸渍法制备了硅胶/氯化钙复合吸附剂,并对其吸附性能进行了测试与研究。

1 实 验

1.1 原料及仪器

实验所用原料和仪器为:硅胶,球型颗粒,粒径 20~28 目,孔径 4~7 nm,比表面积 450~600 m²/g,孔容 0.50~0.80 ml/g;无水氯化钙,粉末状分析纯;去离子水;真空泵;恒温恒湿箱;精密电子天平;恒温水浴等。详细参数如表 1 所示。

表 1 主要原料及试剂
Tab. 1 Main raw materials and reagents

	规格型号	生产厂
硅胶	球型 20-28 目	青岛美高
无水氯化钙	分析纯	广州化学试剂厂
去离子水		自制
真空泵	旋片式	旋片式
恒温恒湿箱	LY-2150	东莞立一设备
精密电子天平	EJ-200	广州艾安得

1.2 复合吸附剂的制备

- (1) 用去离子水配制一定浓度(例如 50% 质量分数)的氯化钙水溶液;
- (2) 将干燥好的硅胶放在法兰连接的容器中,对容器进行抽真空;

收稿日期:2011-07-25; 修订日期:2012-03-15

基金项目:中科院院长基金资助项目(y007y51001);广东省外专局基金资助项目(y006051001)

作者简介:卜宪标(1979-),男,江苏徐州人,中国科学院广州能源研究所助理研究员,博士。

(3) 把真空容器置于恒温水浴中继续抽真空, 恒温水浴设置温度 90℃;

(4) 把配置好的氯化钙水溶液导入到真空容器中, 使得硅胶完全浸渍到氯化钙溶液中;

(5) 停止对真空容器的加热, 并在常温下让硅胶浸渍在氯化钙水溶液中 24 ~ 36 h;

(6) 去掉法兰, 用筛网过滤出复合吸附剂, 并用去离子水快速水洗, 洗去其表面的氯化钙;

(7) 把过滤出的复合吸附剂放在干燥箱中干燥, 直到其质量不再减少时即为干燥完毕。

利用上述方法分别把硅胶颗粒浸渍在 10%、20%、30%、40%、50% 的氯化钙水溶液中得到 S10、S20、S30、S40、S50 5 种复合吸附剂。由于氯化钙对金属具有一定的腐蚀作用, 所以制备过程中通过快速水洗的方法洗去复合吸附剂表面的氯化钙, 通过反复实验发现快速洗涤一次就能保证复合吸附剂在高湿度环境下不会出现液滴的现象。表 2 列出了配制出的各种复合吸附剂的氯化钙担载量。由表 2 可知, 氯化钙溶液浓度越大, 所制备的复合吸附剂中氯化钙的担载量就越高。

表 2 复合吸附剂的氯化钙担载量 (%)

Tab. 2 CaCl₂ carrying quantity of compound adsorbents

样品名称	浸渍溶液质量浓度	氯化钙担载量
S0	0	0
S10	10	3.61
S20	20	14.09
S30	30	21.6
S40	40	26.74
S50	50	41.3

1.3 吸附性能的测试

复合吸附剂的吸附性能测试(包括吸附量和吸附速率)是在恒温恒湿箱中完成的。对于吸附制冷而言, 吸附过程要比脱附过程慢, 因此研究吸附过程具有更重要的实际意义^[15~16]。恒温恒湿箱的测试环境为: 吸附温度 40℃, 相对湿度 20% ~ 60%。因为余热驱动的吸附制冷冷却水温度一般都在 30℃左右, 考虑到实际操作时冷却水和吸附床以及吸附剂的传热温差, 所以认为 40℃的吸附温度是合适的。复合吸附剂的脱附过程是在干燥箱中完成的, 干燥温度为 90℃。恒温恒湿箱中装有一个电子天平, 用来测试吸附剂的重量变化。电子天平的量程为 120 g, 精度为 0.001 g, 带计算机接口。实验时, 数据采集间隔设为 1 s, 每个样本在每个湿度下的测

试时间为 2 h。

实验步骤:

(1) 将复合吸附剂放在 90℃ 的干燥箱中干燥 2 h;

(2) 将恒温恒湿箱的温度设为 40℃, 相对湿度设为要求值;

(3) 将复合吸附剂从干燥箱中取出放入恒温恒湿箱中的电子天平上, 测试吸附剂的重量随时间的变化, 持续时间为 2 h;

(4) 重复第一步操作;

(5) 改变恒温恒湿箱的相对湿度, 将复合吸附剂再放入恒温恒湿箱中的电子天平上进行测试。如此反复操作。每个样本的测试湿度为 20%、30%、40%、50% 和 60%。

2 结果与分析

2.1 吸附等温线

吸附剂的吸附性能主要包括两个方面: 吸附量和吸附速率。吸附量可以在吸附等温线图中反映出来。图 1 表示的是在吸附温度为 40℃, 吸附时间为 2 h, 6 个样品的吸附等温线。由图 1 可以观察到 3 个现象。

第一个现象是, 各个样本的吸附量都随着相对湿度的增大而增大, 由图中曲线的斜率可以明显观察到复合吸附剂的斜率更大一些。在 20% 的湿度下, 样品 S0 和 S50 的吸附量分别是 1.94 g/100 g 吸附剂和 15.64 g/100 g 吸附剂。在 60% 的湿度下, 样品 S0 和 S50 的吸附量分别是 12.07 g/100 g 吸附剂和 47.33 g/100 g 吸附剂, 与 20% 湿度下的吸附量相比, 分别增加了 10.13 g 和 31.69 g, 样品 S50 的增加量更大。可见, 复合吸附剂具备更强的吸附能力。

第二个现象是, 所有复合吸附剂的吸附量都大于纯硅胶。在 20% 的湿度下, 样品 S0 和 S50 的吸附量分别是 1.94 g/100 g 吸附剂和 15.64 g/100 g 吸附剂, S50 的吸附量是 S0 的 8.06 倍。在 60% 的湿度下, 样品 S0 和 S50 的吸附量分别是 12.07 g/100 g 吸附剂和 47.33 g/100 g 吸附剂, S50 的吸附量是 S0 的 3.92 倍。在同等湿度下, 其它样品的吸附量也都大于 S0。以上分析说明采用浸泡的方法制备硅胶和氯化钙的复合吸附剂能够大幅度的提高吸附量, 吸附量增加的具体原因为: 由于硅胶具有丰富的微孔结构和巨大的比表面积, 通过浸泡的方法,

氯化钙浸入了硅胶的微孔内并且附着在孔壁上。在吸附进行时,水分子先扩散进入硅胶的微孔内,一部分水分子被硅胶本身吸附,另一部分和氯化钙形成水合物。因为氯化钙对水的吸附量远大于硅胶,因此硅胶/氯化钙复合吸附剂对水的吸附量大于硅胶。

第三个现象是,样品的吸附量随浸泡用氯化钙溶液浓度的增加而增加,也就是随着样品中氯化钙承载量的增加而增加,各个样品的详细参数如表 2 所示。在 20% 湿度下,样品 S0、S10、S20、S30、S40 和 S50 的吸附量分别为 1.94、5.14、6.70、9.08、10.47 和 15.64 g/100 g 吸附剂,就吸附量而言 S50 > S40 > S30 > S20 > S10 > S0。其它湿度下也会得到同样的结论。实验中制备复合吸附剂采用的硅胶的孔容为 0.50 - 0.80 mL/g,假如硅胶的微孔中全部填满氯化钙,则硅胶中氯化钙的最大质量含量也就是承载量应在 51.81% 和 63.24% 之间,而本实验所制备的 6 个样品中,最大的氯化钙承载量为 41.3% (样品 S50)。这说明氯化钙没有完全填满硅胶的微孔,水分子可以进入微孔内进行吸附和形成水合物。氯化钙含量越大,在长时间的吸附过程中

对水的吸附量也就越大,这就解释了样品的吸附量随着氯化钙承载量的增加而增加的原因。

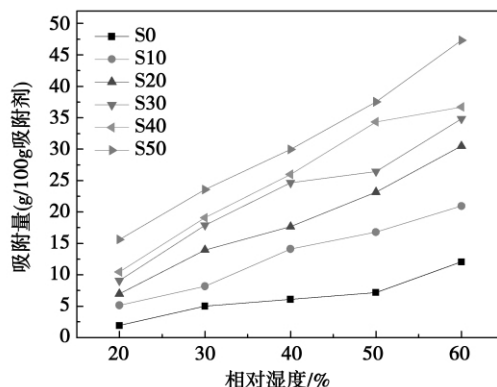


图 1 吸附等温线

Fig. 1 Adsorption isotherms

2.2 吸附速率

要开发高性能的吸附制冷机,不仅要求吸附剂具有较大吸附量,还要求具有较快的吸附速率,以提高制冷功率。从图 2 可知,所有样品的吸附量都随着时间的增加而增加,吸附速率是逐渐变小的。

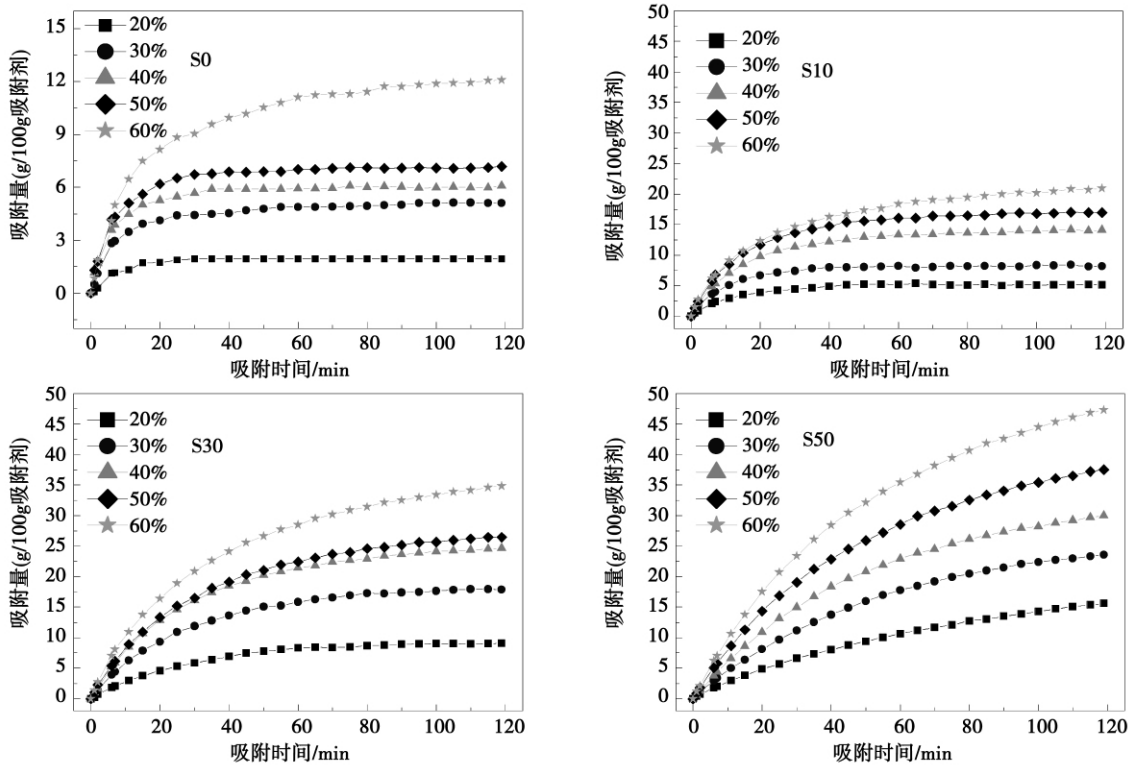


图 2 吸附速率

Fig. 2 Adsorption rate

在 20% 的湿度下, S0、S10、S20、S30、S40 和 S50 6 个样品的吸附量: 5 min 时分别为 1.07、1.80、

1.57、1.50、1.62 和 1.45 g/100 g 吸附剂; 10 min 时分别为 1.31、2.80、2.92、2.73、2.71 和 2.87 g/100 g 吸附剂; 15 min 时分别为 1.71、3.49、3.67、3.74、3.68 和 3.80 g/100 g 吸附剂; 20 min 时分别为 1.74、3.90、4.42、4.62、4.44 和 4.89 g/100 g 吸附剂。通过比较可知, 5 min 时, S10 的吸附量最大, S40 次之, S0 最小; 10 min 时, S20 最大, S50 次之, S0 最小; 15 min 时, S50 最大, S30 次之, S0 最小; 20 min 时, S50 最大, S30 次之, S0 最小。因此可以说, 当吸附时间小于 30 min 时, 复合吸附剂的吸附速率大于纯硅胶, 但是复合吸附剂之间进行比较, 没有哪种样品占有绝对优势。其它湿度下可以得出同样的结论。对短时间吸附性能的分析参考 2.3 节。

当吸附时间大于 30 min 时, 同样在 20% 湿度下, 以 30、40、80 和 120 min 为例: 样品 S0 的吸附量都是 1.94 g/100 g 吸附剂, 这说明 30 min 时样品 S0 已经达到吸附平衡; 样品 S10 的吸附量分别为 4.40、4.87、5.08 和 5.14 g/100 g 吸附剂, 30 和 80 min 的吸附量占 2 h 吸附量的比例分别为 85.60% 和 98.83%; 样品 S30 的吸附量分别为 5.86、6.94、8.65 和 9.08 g/100 g 吸附剂, 30 和 80 min 的吸附量占 2 h 吸附量的比例分别为 64.54% 和 95.26%; 样品 S50 的吸附量分别为 6.64、8.03、12.75 和 15.64 g/100 g 吸附剂, 30 和 80 min 的吸附量占 2 h 吸附量的比例分别为 42.46% 和 81.52%。比较可知, 当吸附时间大于 30 min 时, 吸附速率随样品中氯化钙承载量的增加而增加。通过 30 和 80 min 的吸附量与 2 h 的吸附量进行比较可知, 氯化钙的承载量越大, 其达到吸附平衡所需的时间越长, 也就是说, 氯化钙的存在延长了吸附剂达到吸附平衡的时间。其它湿度下可以得出同样的结论, 这可能是因为: 一是热效应问题, 纯硅胶对水分子的吸附属于物理吸附, 由于吸附量较小, 放热量也较小, 吸附热能够及时的散出, 硅胶微孔内温度变化不大, 因此其吸附平衡时间短; 而对于复合吸附剂, 水分子在硅胶微孔内和氯化钙形成水合物时放出大量的热, 又由于吸附量较大和吸附剂导热系数偏低, 造成热量不能及时的散出, 导致微孔内的温度升高, 温度升高就减慢了水分子和氯化钙形成水合物的速度, 导致吸附平衡时间的延长。另一个是传质通道变窄的原因, 氯化钙的存在导致了硅胶的传质通道变窄, 减慢了水分子进入硅胶微孔内的速度, 降低了硅胶本身的吸附速率以及氯化钙和水分子的结合速率, 进而导致吸附平衡时间的延长。

2.3 复合吸附剂的制冷性能

本研究所开发的复合吸附剂主要是用作余热吸附制冷, 单位质量吸附剂的制冷功率 (SCP) 是衡量吸附系统的一个重要指标。典型的吸附制冷工况的相对湿度为 20%, 每个循环周期的吸附时间一般在 5~20 min 之间。由图 3 可知, 吸附剂的 SCP 在前 3 min 达到最大值, 然后随着时间缓慢减少。但是, 在吸附制冷机实际操作过程中, 一般不会选择吸附时间少于 5 min, 虽然短的吸附时间对应的 SCP 较高, 但是 COP 会很低, 其原因是, 在脱附和吸附切换的过程中, 刚脱附完的吸附床温度很高, 需要用冷却水冷却吸附床才能进行吸附过程, 频繁的转换吸附和脱附操作, 导致吸附床的冷热交替频繁, 热损失太大, 系统的 COP 会很低。

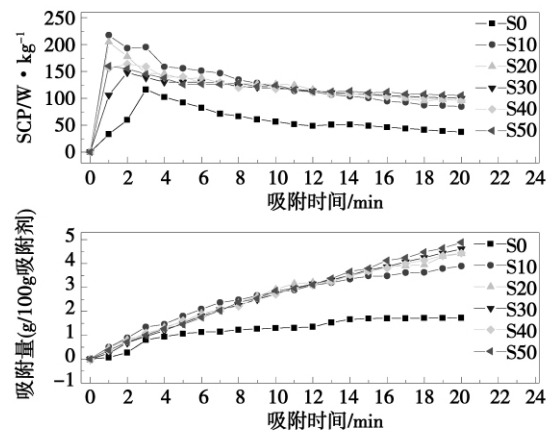


图3 SCP随吸附时间的变化曲线

Fig. 3 Curves showing a change of SCP with time

由图 3 可知, 复合吸附剂样品的 SCP 较纯硅胶高。由 2.2 节对样品吸附速度的比较可知, 在 20% 湿度下, 5 min 时, S10 的吸附量最大, S40 次之, S0 最小; 10 min 时, S20 最大, S50 次之, S0 最小; 15 min 时, S50 最大, S30 次之, S0 最小; 20 min 时, S50 最大, S30 次之, S0 最小。在 5、10 和 15 min, 样本 S50 的 SCP 分别为 125.92、124.43 和 109.88 W/kg; 而纯硅胶的 SCP 分别为 92.67、56.62 和 49.41 W/kg。在 10 min 的吸附时间, S50 的 SCP 是 S0 的 2.2 倍。由 2.1 和 2.2 节的分析结果可知, 对于长时间的吸附, 样品 S50 不论是吸附量还是吸附速率都是最优的; 但是, 对于短时间的吸附, 特别是 10 min 以下的吸附, S50 不是最优的。因此, 在选择复合吸附剂时, 要首先确定余热的情况以及制冷机的循环时间。

以上述分析结果为参考依据,利用复合吸附剂 S50 制作了一台小型化的吸附制冷机,如图 4 所示。制冷机为间歇式制冷,设有一个吸附床,一个冷凝器和一个蒸发器,吸附床采用管翅式换热器,吸附剂填充在翅片间。循环时间为 15 min,其中吸附 10 min,脱附 5 min,设计制冷功率为 0.8 kW,吸附剂装填量为 10 kg。吸附制冷机本体的尺寸为:长 600 mm,宽 500 mm,高 500 mm。热源采用恒温水域模拟,冷却水由恒温水域提供。



图 4 吸附制冷机图片

Fig. 4 Photo of an adsorption refrigeration machine

对吸附制冷机的性能进行了简单的测试。在热源温度为 90 °C,冷却水温度为 35 °C,冷冻水进口 16.5 °C,出口 14.6 °C,吸附 10 min,脱附 5 min 的运行工况下,在整个循环周期内(15 min),制冷功率为 0.705 kW,SCP 为 70.51 W/kg,COP 为 0.25。在吸附周期内(10 min),制冷功率为 1.06 kW,SCP 为 105.77 W/kg。

3 结论

采用浸渍法在真空下将氯化钙负载于硅胶孔内制备了硅胶/氯化钙复合吸附剂,并在恒温恒湿箱中对复合吸附剂的性能进行了测试,利用复合吸附剂制作了一台小型化吸附制冷机并对制冷机的性能进行了简单测试,得到如下结论:

(1) 浸渍法得到的复合吸附剂对水具有更大的吸附能力。在 20% 的湿度下吸附 2 h,复合吸附剂的吸附量是 15.64 g/100 g 吸附剂,而硅胶的吸附量是 1.94 g/100 g 吸附剂。

(2) 复合吸附剂的吸附量随浸泡用氯化钙溶液浓度的增加而增加。在 20% 湿度下吸附 2 h,10%、20% 和 50% 浓度氯化钙溶液浸渍制备的复合吸附剂的吸附量分别为 5.14、9.08 和 15.64 g/100 g 吸附剂。

(3) 当吸附时间大于 30 min 时,吸附速率随样

品中氯化钙负载量的增加而增加。而且氯化钙的负载量越大,其达到吸附平衡所需的时间越长。对于吸附制冷而言,由于吸附时间一般较短,而在较短的吸附时间内,复合吸附剂的吸附速率并不是随氯化钙负载量的增加而增加。因此,在选择制冷用复合吸附剂时,要首先确定余热情况以及制冷机的循环时间。

(4) 对用复合吸附剂制作的小型吸附制冷机进行的测试表明,在热源温度为 90 °C,冷却水温度为 35 °C,冷冻水进口 16.5 °C,出口 14.6 °C,吸附 10 min,脱附 5 min 的运行工况下,在整个循环周期内(15 min),制冷功率为 0.705 kW,SCP 为 70.51 W/kg,COP 为 0.25。说明复合吸附剂用于余热吸附制冷机是可行的。

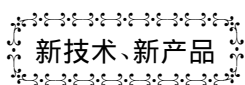
参考文献:

- [1] Yu I Aristov, Restuccia G, Cacciola G, et al. A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(2): 191 - 204.
- [2] Chen Hai-jun, Cui Qun, Tang Ying, et al. Attapulgite based LiCl composite adsorbents for cooling and air conditioning applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17 - 18): 2187 - 2193.
- [3] Wang R Z. Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001, 5(1): 1 - 37.
- [4] Vasiliev L L, Mishkinis D A, Antukh A A. Solar-gas solid sorption refrigerator [J]. Adsorption-Journal of the International Adsorption Society, 2001, 7(2): 149 - 161.
- [5] 卢允庄,王如竹,许煜雄,等.真空集热型太阳能固体吸附式制冷的理论研究[J].太阳能学报,2001,22(4):480 - 485.
LU Yun-zhuang, WANG Ru-zhum, XU Yu-xiong, et al. Theoretical study of vacuum heat-collection solar energy solid adsorption type refrigeration [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 480 - 485.
- [6] 周洪峰,张兴彪,王雪章,等.船舶余热固体吸附式制冷可行性分析和模拟实验系统设计[J].节能技术,2007,25(3):238 - 246.
ZHOU Hong-feng, ZHANG Xing-biao, WANG Xue-zhang, et al. Feasibility analysis of marine waste heat solid adsorption type refrigeration and simulation test system design [J]. Energy-saving Technology, 2007, 25(3): 238 - 246.
- [7] 杨培志.燃料电池汽车余热驱动的吸附式制冷系统结构设计[J].制冷,2007,26(2):1 - 6.
YANG Pei-zhi. Structural design of a fuel cell adsorption type refrigeration system driven by waste heat in vehicles [J]. Refrigeration, 2007, 26(2): 1 - 6.
- [8] 王国庆,林勇,吴锋,等.浸泡法制备吸附制冷用复合吸附剂[J].北京理工大学学报,2005,25(10):919 - 922.
WANG Guo-qing, LIN Yong, WU Feng, et al. Preparation of re-

- frigeration-purpose compound adsorbents by using a soaking method [J]. Journal of Beijing Institute of Technology. 2005 25(10): 919 - 922.
- [9] 崔 群, 陈海军, 朱跃钊 等. 吸附制冷用复合吸附剂的吸附性能[J]. 化工学报, 2005 56(10): 1860 - 1864.
CUI Qun; CHEN Hai-jun; ZHU Yue-zhao ,et al. Adsorption performance of adsorption-refrigeration-purpose compound adsorbents [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering. 2005 ,56 (10): 1860 - 1864.
- [10] 崔 群, 陆海军, 姚虎卿. 太阳能吸附制冷用复合吸附剂制备及其吸附机理探讨[J]. 太阳能学报, 2004 25(2): 182 - 188.
CUI Qun ,CHEN Hai-jun ,YAO Hu-qing. Preparation of solar energy adsorption-refrigeration-purpose adsorbents and exploratory study of their adsorption mechanism [J]. Acta Energiae Solaris Sinica. 2004 25(2): 182 - 188.
- [11] Mikhail Tokarev ,Larissa Gordeeva ,Vyacheslav Romannikov ,et al. New composite sorbent CaCl₂ in mesopores for sorption cooling heating [J]. International Journal of Thermal Sciences , 2002 41(5): 470 - 474.
- [12] Zhu Dongsheng ,Wu Huijun ,Wang Shengwei. Experimental study on composite silica gel supported CaCl₂ sorbent for low grade heat storage [J]. International Journal of Thermal Sciences ,2006 45 (8): 804 - 813.
- [13] Daou K ,Wang R Z ,Xia Z Z. Development of a new synthesized adsorbent for refrigeration and air conditioning applications [J]. Applied Thermal Engineering 2006 26 (1): 56 - 65.
- [14] 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的应用[J]. 中国科学, E 辑 技术科学, 2004 34(3): 268 - 279.
WANG Li-wei ,WANG Ru-zhu ,WU Jing-yi ,et al. Study of the adsorption characteristics of calcium chloride-ammonia and their applications in refrigeration [J]. Chia science. 2004 34(3): 268 - 279.
- [15] Hamamoto Y ,Alam K C A ,Akisawa A ,et al. Performance evaluation of a two-stage adsorption refrigeration cycle with different mass ratio [J]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid 2005. 28(3): 344 - 352.
- [16] Akahira A ,Alam K C A ,Hamamoto Y ,et al. Mass recovery adsorption refrigeration cycle-improving cooling capacity [J]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid , 2004 27(3): 225 - 234.

(辉 编辑)

第一、四作者均为在读中国科学院研究生院的研究生。



GT26 的升级改进及其联合循环装置

据《Gas Turbine World》2011 年 7 ~ 8 月刊报道, Alston 公司已对其 20 世纪 90 年代推出的 GT26 燃气轮机进行了升级改进。

压气机仍为 22 级, 但是新研制的压气机具有更高的质量流量, 微增的压比使燃气轮机的输出功率略增。采用 4 列可变几何导叶, 以便更灵活地控制流量。

GT26 具有顺序布置, 能单独控制的两个燃烧室。在从 100% 减少到低于 40% 负荷输出功率的运行范围内, 新燃烧系统能使 NO_x 排放低于 25 mg/kg。

更高效的空气冷却四级涡轮能以更高的燃烧温度运行。

Alstom 突破性的下一代 KA-26 联合循环装置是围绕升级改进的新 GT26 燃气轮机而设计的, 后者已在与电网连接的 Alstom 电站试验装置上完成了部分负荷和全负荷性能验证试验。

KA-26 联合循环装置的设计性能:

输出功率: 联合循环装置输出功率大于 500 MW, 效率超过 61%。

启动: 在不到 15 min 时间就能达到 350 MW 的输出功率, 并且在不足 30 min 内就能发出全负荷输出功率。

排放: 在从 100% 满负荷输出功率到低于 40% 部分负荷功率运行的燃气轮机运行范围内, DLN(干式低 NO_x) 燃烧系统能保持 NO_x 排放低于 25 mg/kg。

(学牛 摘译)

critical point of the natural coke to be fully gasified. To increase temperature and pressure can effectively promote the gasification and improve the quality of coal gas ,but not the greater the better. In a comprehensive consideration ,the practical operating temperature and pressure should be chosen in a range from 850 to 1000°C and from 0.1 to 6.0 MPa respectively. In different reaction atmospheres ,the reaction characteristics of natural coke vary greatly. However ,in the steam atmosphere ,coal gas quality will be better. **Key words:** natural coke ,gasification ,Aspen Plus ,composition of coal gas ,heating value of coal gas

R134a 在水平内微翅管管内凝结换热的实验研究 = **Experimental Study of the Condensation Heat Exchange of Coolant R134a in a Horizontal Inner-micro-finned Tube** [刊 汉] OUYANG Xin-ping ,CHEN Qi-wei (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 361 ~ 365

Experimentally studied was the condensation heat exchange performance of coolant R134a in a horizontal intensified heat exchange tube. The test tubes were two types of inner-micro-finned tube ,designated as tube A and B respectively. The test pieces adopted a tube-in-tube structure with the glycol water solution passing through the passage between the outer surface of the intensified heat exchange tube and the inner surface of the outer tube (between tubes) . During the test ,the condensation temperature inside the tube was 51 °C and the flow speed of the glycol water solution between tubes was 3.35 m/s. The inlet temperature of the glycol water solution was adjusted according to the mass flow speed of the coolant to ensure a supercooling degree of the coolant at the outlet of the test piece. The test results show that both in-tube condensation heat exchange coefficients of the two types of horizontal intensified heat exchange tube will increase with an increase of the mass flow speed of the coolant. When the mass flow speed of the coolant increases from 300 kg/(m² · s) to 700 kg/(m² · s) ,the in-tube condensation heat exchange efficient of tube A is 1.87% to 6.28% higher than that of tube B while the flow resistance of the coolant in tube B is 9.56% to 11.05% higher than that in tube A. Therefore ,the structure of tube A is superior to that of tube B. **Key words:** engineering thermophysics ,intensified heat exchange ,inner-micro-finned tube ,in-tube condensation heat exchange

余热制冷用氯化钙/硅胶复合吸附剂的制备及性能研究 = **Preparation and Performance Study of Silica Gel/ Calcium Chloride Compound Adsorbent for Use in Refrigeration by Using Waste Heat** [刊 汉] WANG Ling-bao ,BU Xian-biao ,MA Wei-bin ,LU Zhen-neng (Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Renewable Energy Sources and Natural Gas Hydrate ,Guangzhou Energy Source Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 366 ~ 371

To develop a high performance adsorbent for adsorption refrigeration by using waste heat ,the dipping method was used to load calcium chloride onto coarse porous silica gel in vacuum and prepare silica gel/calcium chloride compound adsorbent. In this process ,the adsorption isotherms and speed of the adsorbent were tested. The test results show that the compound adsorbent thus obtained by using the dipping method has a greater adsorption capacity to water. At a relative humidity of 20% ,the adsorption quantity of the adsorbent will be 15.64 g/100g adsorbent in 2 hours being 8.06 times as much as that of a single silica gel under the same conditions. The compound adsorbent was used to make a small-sized adsorption refrigeration machine and a test was conducted. When the temperature of the heat source was 90 °C and the cooling water temperature was 35 °C ,during the whole cycle (15 minutes) ,the refrigeration power was 0.705 kW and the refrigeration power of the specific mass adsorbent was 70.51 W/kg with COP (coefficient of performance) reaching 0.25. **Key words:** adsorption refrigeration ,compound adsorbent ,waste heat utilization ,dipping method

尘源类型对空气滤料动态过滤性能的影响研究 = **Study of the Influence of Types of Dust Sources on the Dynamic Filtration Performance of Air Filtration Materials** [刊 ,汉] WANG Zhi-chao ,WU Zhan-song (Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) ,LI Jian-dong ,XU Zhao-wei (China Architecture Science Research Institute ,Beijing ,China ,Post Code: 100013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 372 ~ 376

With the dust in a power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk being chosen as three types of dust source respectively ,tested were such dynamic dust removal performance indexes as the resistance of the filtration material used in a bag-type precipitator ,average filtration cycle and efficiency etc. The statistics and analysis of a large quantity of the test data show that the types of dust sources have a relatively big influence on the resistance of the air filtration materials. Under the same conditions ,the remaining resistance value of the filtration materials tested and obtained by using French chalk is obviously greater than that obtained by using the dust in a practical thermal power plant and the difference of the dust source also has a comparatively big influence on the average filtration cycle of the air filtration materials. A test was performed by using the dust in a thermal power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk respectively ,the average filtration cycles in the initial stage were 28.2 min ,19.0 min and 14.5 min respectively and those in the final stage were 28.7 min ,8.3 min and 11.3 min respectively. These show that the average filtration cycle obtained by using French chalk in the test is obviously shorter and can reduce greatly the test duration ,however ,not yet objectively reflects the real filtration cycle characteristics of the filtration materials. The difference in the types of dust source has a certain influence on the filtration efficiency of the air filtration materials. The filtration efficiencies of the filtration materials in the initial stage obtained through a test by using the dust in a thermal power plant 500-mesh and 1250-mesh French chalk were 99.203% ,99.642% and 99.870% respectively and those in the final stage were 98.250% ,98.996% and 99.945% respectively. **Key words:** dust source , air filtration materials ,dynamic performance ,filtration cycle ,filtration efficiency