

文章编号:1673-2049(2006)01-0085-05

# 太阳能吸附式转轮制冷机研究

郑爱平, 顾娟, 宋慧, 罗璇

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**从实用的角度出发,设计了以活性炭纤维-乙醇为工质对,由太阳能驱动的固体吸附式转轮制冷机试验研究系统,该系统以辐射状排列的活性炭纤维板构成的转轮式吸附器为核心部件,在强化传热的基础上,强化传质设计,应用吸附机理研究成果,改善吸附床内解吸和吸附的传质过程,从而使制冷装置具有结构简单、无噪声、制冷速度快、热力系数比较大、不污染大气环境和对人体无害等优点。通过对系统性能分析,得出了该系统综合利用了高级制冷循环,具有实现连续制冷,改善制冷剂在吸附床中的传热、传质性能,提高吸附、解吸速度,从而进一步提高了循环效率的结论。

**关键词:**太阳能;固体吸附式制冷;辐射状转轮吸附器;制冷系统

中图分类号:TU831.6

文献标志码:A

## Research on Solar Energy Adsorption Rotary Refrigerator

ZHENG Ai-ping, GU Juan, SONG Hui, LUO Xuan

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** On the basis of being utilized practically, adopting activated carbon fibre-ethanol as its working pair, an experimental research system about solar energy rotary solid adsorption refrigerator was designed. Rotary adsorption bed made by the activated carbon fibre board arranged like the radiation form as the key part, on the basis of strengthening the heat transfer, the solid adsorption rotary refrigeration machine could improve the spreading quality of the design. Through using the research results of the adsorbing mechanism, improving the mass transfer course of adsorption and desorption in the adsorbing bed, the refrigeration device has the advantages of simple structure, no noise, fast refrigerating, higher heating power coefficient, no pollution to the atmospheric environment, no harm to human body, etc. Through analyzing the performance of the system, utilizing the advanced refrigeration cycle synthetically, authors draw the conclusion that the system has realized many innovations including the refrigerating continuously, improvement of the quality of the mass and heat transfer of the refrigerant in the adsorbing bed, increasement of the speed of adsorbing and desorbing, and improvement of the circulation efficiency to a further step finally, etc.

**Key words:** solar energy; solid adsorption refrigeration; rotary adsorber with radiation form; refrigeration system

收稿日期:2005-11-06

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2004E210);北京市“供热、供燃气、通风及空调工程”重点实验室项目(KF200306)

作者简介:郑爱平(1948-),女,山西夏县人,教授,E-mail:zhaing@chd.edu.cn。

## 0 引言

利用太阳能、地热能、工业余热、废热等作为补偿,完成热量自低温热源向高温热源的传递过程,是提高能源有效利用程度,开展以节能为中心的技术改造的一项重要途径。

早在 20 世纪 70 年代初期,为了解决能源短缺问题,中国与世界一些其他国家已开展了太阳能驱动的固体吸附式制冷的研究工作,但由于热力系数较小,始终没能使太阳能制冷理论研究的科研成果转化为生产力,从而实现太阳能制冷设备走向市场的理想。随着科学技术的发展,新材料、新工艺、新技术不断涌现,这种无 CFCs 的制冷技术,因其结构简单、制冷速度快、驱动能源品位低、不产生温室效应和臭氧层损耗等特点,所以受到各国专家的广泛关注。

近年来关于太阳能驱动的固体吸附式制冷研究内容可以概括为 3 个方面:

(1) 制冷剂性质、制冷剂-吸附剂工质对与制冷循环性能的研究;

(2) 高效热力循环的研究;

(3) 吸附床结构及传热性能的研究。

吸附床结构及传热性能的研究正是目前研究的热点问题,因为它是提高吸附式制冷效率,使吸附式制冷机械走向市场的关键所在。

通过科技查新,从有关吸附式制冷的研究资料来看,近几年各国关于吸附床结构及传热性能方面的研究成果可以归结为:

(1) 翅片管式吸附床。这种吸附床的优点是结构简单、造价低廉,但传热系数比较低 [ $10 \sim 20 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ],温度分布不均匀,操作亦不方便。

(2) 板式、螺旋板式吸附床。这种吸附床的优点是传热面积大、热损失小、温度分布均匀、传热、传质性能较好,但压降情况尚待研究;其缺点是加工比较复杂,造价比较高。

(3) 连续回热型吸附式制冷。这种系统是针对连续回热型循环设计的,系统包括 2 个以上吸附器、蒸发器、冷凝器与回热装置,其结构非常紧凑,热损失小、热力系数较大、操作比较方便,很适合于宇航事业中应用。因其压力损失大、制冷量控制比较困难,加工工艺十分复杂,在民用制冷方面经济性较差。

在以太阳能为动力,以沸石-水为工质对的制冷循环试验研究中,受转轮式除湿机的启发,变间歇式

制冷为连续制冷过程,可提高制冷效率,从而引起了笔者的极大关注,因此在模拟计算和理论分析的基础上,设计了以活性炭纤维-乙醇为工质对,由太阳能驱动的固体吸附式转轮制冷机试验研究系统,该系统以转轮式活性炭纤维波纹板吸附床作为核心部件,在强化传热的基础上,强化传质设计,应用吸附机理的研究成果,改善吸附床内解吸和吸附的传质过程,从而使制冷装置具有结构简单、无噪声、制冷速度快、热力系数比较大、不污染大气环境和对人体无害等优点。

## 1 制冷系统工作原理及设计

固体吸附式制冷是通过微孔固体吸附剂在较低温度下吸附制冷剂,在较高温度下解吸制冷剂的吸附-解吸循环来实现的。相对于同样利用热能驱动的吸收式制冷而言,在热源温度比较低或冷凝温度比较高的条件下,采用合适的制冷工质对,吸附式制冷具有更高的效率,因此吸附式制冷在低品位热源的利用方面极具优越性。

由于吸附式制冷中吸附器需要反复加热和冷却,导致部分能量以显热的方式损失。若能将冷却阶段释放的热量,回收于加热阶段,无疑会提高系统的能效比。采用转轮式吸附器不但可以回收冷却阶段释放的热量,充分利用吸附器的吸附热,而且可以实现连续制冷过程,降低蒸发器的温度波动,从而进一步提高系统效率。

太阳能驱动的固体吸附式转轮制冷机主要由太阳能加热器、吸附器、冷凝器、膨胀阀、蒸发器以及气体循环泵等辅助设备组成,其工作原理如图 1 所示。

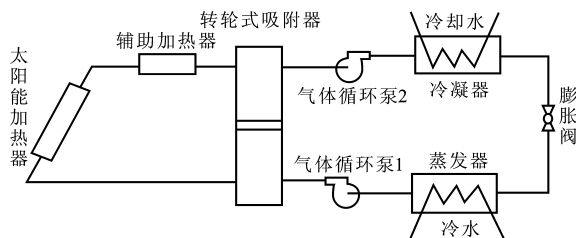


图 1 固体吸附式转轮制冷机工作原理

Fig. 1 Solid Adsorption Rotary Refrigerator Operation Principle

来自蒸发器的低温低压制冷剂蒸气由气体循环泵引入转轮式吸附器下部 3/5 区域,首先使吸附床温度下降,继而被吸附床中的活性炭纤维所吸附,吸附过程中放出的吸附热,被未被吸附的制冷剂蒸气带走,穿过波纹板通道,进入太阳能加热器。太阳能加热器由真空管式集热器及其辅助加热设备等组

成。未被吸附器吸附的制冷剂蒸气,在太阳能加热器中吸热升温,压力提高后进入转轮式吸附器上部 2/5 区域,遇到旋转上来的吸满了制冷剂的吸附床层,由于受到高温制冷剂蒸气加热,被吸附器吸附的那部分制冷剂便从活性炭纤维中解吸出来,进入冷凝器,被冷却水冷却,凝结为液态制冷剂。液态制冷剂经膨胀阀节流降压后,进入蒸发器。在蒸发器内,低压制冷剂液体吸收被冷却介质的热量,在低压下气化为制冷剂蒸气。被冷却介质因失去热量,温度降低产生制冷效应。低温低压制冷剂蒸气再次由气体循环泵导入转轮式吸附器下部 3/5 区域,开始下一轮的吸附—解吸—制冷过程,如此循环,从而达到连续制冷的目的。

由于流经转轮式吸附器上部 2/5 区域的是高温高压制冷剂蒸气,流经下部 3/5 区域的是低温低压制冷剂蒸气,为了避免高压部分制冷剂向低压部分泄漏,应使脱附状态的制冷剂蒸气处于气体循环泵 2 的吸入段,而使吸附状态的制冷剂处于气体循环泵 1 的压出段,如图 1 所示。

转轮式吸附器是太阳能吸附式制冷系统的关键设备,吸附器由活性炭纤维转轮、隔板、外壳、传动机构和自控调速装置等几部分组成,如图 2 所示。活性炭纤维转轮是由 4 mm 厚的活性炭纤维毡制成口袋型,分别套装在转轮中心数个辐射状金属网板上制成的。转轮以缓慢的速度旋转,来自蒸发器的低温低压制冷剂蒸气,通过气体循环泵自转轮右端进入其下部 3/5 区域内各个气流通道,部分制冷剂蒸气被活性炭纤维吸附,未被吸附的制冷剂蒸气则携带着吸附热,从转轮的左端进入太阳能加热器,受热升温后的热气流再由转轮左端进入其上部 2/5 区域内各个气流通道,带走被活性炭纤维吸附了的那部分制冷剂,并排入冷凝器。

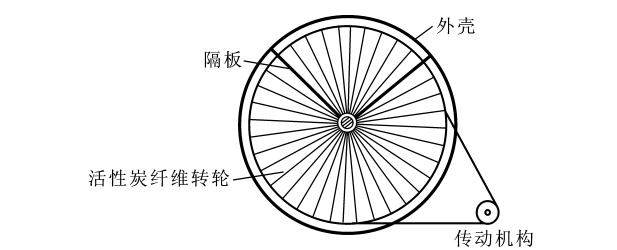


图 2 转轮式活性炭纤维吸附器

Fig. 2 Rotary-Type Activated Carbon Fiber Adsorber

转轮式吸附器外壳由钢板制作,在转轮两端的封头内侧分别焊接着 2 块隔板,以便将低温低压制冷剂蒸气和高温高压制冷剂蒸气分隔开来。两端封头外侧与隔板相对应的上、下区域各设一根管,使其

与相应的蒸气管道相连接。外壳要求严格密封,不允许有气体泄漏。

自动调速装置和传动装置可以自动调节转轮的速度,以得到不同的吸附效率,从而控制加热蒸气量,调节吸附—解吸平衡。

转轮式吸附器在连续制冷循环中,利用每半个循环将要结束时,脱附状态的吸附床处于高温高压状态,吸附状态的吸附床处于低温低压状态,随着吸附器的旋转运动,使脱附状态吸附床脱附的部分制冷剂蒸气迅速扩散到吸附状态吸附床而被吸收,达到脱附状态吸附床部分降温降压而吸附状态吸附床部分升温升压的目的。在这个内部蒸气回收利用过程中,由于两部分吸附床均处于绝热状态,即与外界没有热量交换,只有质量传递,内部蒸气回收利用过程非常迅速,使吸附床的传热、传质性能大大提高。该循环过程在  $p$ - $T$ - $x$  上的表示如图 3 所示<sup>[1]</sup>。

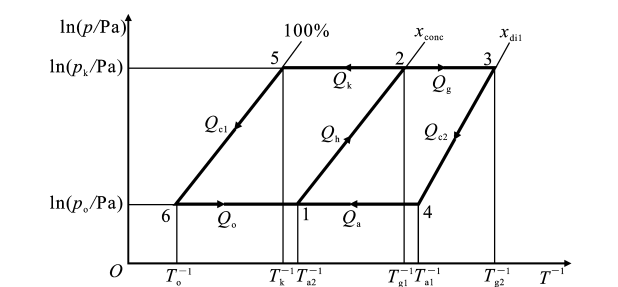


图 3 吸附式制冷基本循环  $p$ - $T$ - $x$

Fig. 3 Adsorption Refrigeration Basic Circulation  $p$ - $T$ - $x$

1—2 过程为吸附床定容加热过程,温度由  $T_{n2}$  升高到  $T_{g1}$ ,吸附床定容加热过程吸收的显热用  $Q_k$  表示。此过程可以认为尚未发生制冷剂解吸,在吸附床的压力达到冷凝器压力  $p_k$  之前,无冷凝发生,因此吸附床在这个过程的吸附量没有变化,这个过程也称为等吸附量过程或等量过程。

2—3 过程为吸附床定压脱附过程,吸附床连续吸收热量,温度由  $T_{g1}$  升高到  $T_{g2}$ ,制冷剂蒸气不断解吸并在冷凝器里被冷凝,点 3 表示脱附終了吸附床的状态,解吸态吸附率用  $x_{dil}$  表示,脱附过程吸收的热量用  $Q_g$  表示。

2—5 过程为自吸附床解吸出来的制冷剂在冷凝器中定压冷凝过程,制冷剂温度由  $T_{g1}$  降低到  $T_k$ ,此过程可以认为与 2—3 过程同时发生,冷凝过程放出的热量用  $Q_k$  表示。

5—6 过程为冷凝液体经膨胀阀降压、降温过程,液态制冷剂从冷凝压力  $p_k$  降低到蒸发压力  $p_o$ ,温度由  $T_k$  降低到  $T_o$ ,释放出的显热用  $Q_{c1}$  表示。

6—1 过程为制冷剂液体在蒸发器中定压蒸发

过程,温度由  $T_0$  升高到  $T_{a2}$ ,蒸发过程吸热量用  $Q_0$  表示。

3—4 过程为吸附床定容冷却过程,温度由  $T_{a2}$  降低到  $T_{a1}$ ,随着温度降低,压力随之由  $p_k$  降低到  $p_0$ ,冷却吸附床带走的热量用  $Q_{c2}$  表示,可以认为此过程尚没有发生制冷剂吸附。

4—1 过程为吸附床定压吸附过程,吸附床不断放热,温度由  $T_{a1}$  降低到  $T_{a2}$ ,制冷剂在蒸发器中蒸发并进入吸附床被吸附剂吸附,吸附过程中带走的热量用  $Q_a$  表示。此过程可以认为与 6—1 过程同时发生。

改进制冷循环是一种非常有潜力的强化吸附床

表 1 制冷工质对的工作特性

Tab. 1 Characteristics of Refrigeration Working Pairs

工质对	$T_0/K$	$T_k/K$	$T_a/K$	$T_j/K$	$x_0/kg$	$R_{COP}$	真空度要求	抗压性要求	有无毒性
硅胶-水	278	308	303	373	0.070	0.87	高	低	无
活性炭-氨气	268	303	303	363	0.150	0.86	高	高	有
活性炭-甲醇	268	303	303	383	0.171	0.84	高	适中	有
活性炭-乙醇	268	303	303	373	0.145	0.85	适中	适中	无

注: $R_{COP}=\lambda/H$ , $\lambda$  为  $T_0$  下的蒸发潜热, $H$  为平均等量吸附热; $x_0$  为每千克工质对所吸附制冷剂质量。

活性炭是一种内部具有许多极细小孔隙的有机物,每升活性炭的质量约为 485 g,1 g(约 2 cm<sup>3</sup>)活性炭的有效接触面积接近 1 000 m<sup>2</sup>,在正常情况下,它所吸附的物质等于它本身质量的 15%~20%,具有很好的吸附性能,能吸附多种制冷剂蒸气,如水、氨、甲醇、乙醇、氟利昂等。活性炭-水是一种很好的制冷工质对,淡水在 0℃ 附近蒸发压力很低,且会结冰,故在 0℃ 以下很难使用。甲醇凝固点较低(−980℃),低温下系统压力较高,再加上分子直径较小,易于吸附,蒸发潜热也比较大,因此人们多注重对活性炭-甲醇工质对的研究,但甲醇有剧毒,可导致失明,最高解吸温度不能超过 150℃,否则活性炭会促进甲醇的分解。乙醇的蒸发潜热比甲醇低,但在活性炭中的最大吸附量以及吸附特性均与甲醇十分接近<sup>[3]</sup>。

活性炭纤维是活性炭经过物化处理之后的一种吸附剂,具有很高的比表面积,一般可达 1 000~3 000 m<sup>2</sup>·g<sup>−1</sup>,并具有丰富的微孔和均匀的孔径,微孔率高达 90% 以上,具有吸附容量大、吸附和解吸速度快等优点。研究结果表明:活性炭纤维与甲醇组成的吸附工质对与活性炭-甲醇工质对比较,可将吸附式制冷系统的  $R_{COP}$  值提高 15% 左右,单位活性炭纤维的制冷量可达活性炭的 2~3 倍,并可使吸附-解吸时间缩短为活性炭系统的 1/10,活性炭纤

的传热、传质性能的方法。转轮式吸附器以制冷剂本身作为加热介质,在吸附床外部利用太阳能加热器加热制冷剂蒸气,然后令其流经吸附床直接加热吸附剂,从而避免了传热损失,提高了吸附床的传热、传质性能。

2 制冷工质对的选择

研究表明:当蒸发温度  $T_0=263\text{ K}\sim273\text{ K}$ ,冷凝温度  $T_k=298\text{ K}\sim313\text{ K}$ ,吸附终止温度  $T_a=298\text{ K}\sim303\text{ K}$ ,脱附终止温度  $T_j=343\text{ K}\sim383\text{ K}$  时,太阳能驱动的固体吸附式制冷工质对的工作特性如表 1 所示<sup>[2]</sup>。

维-甲醇制冷系统的单位质量制冷功率可达活性炭-甲醇制冷系统的 20~30 倍<sup>[4]</sup>。

因此,在低品位热能的应用方面,从系统真空度、抗压要求以及安全和使用角度考虑,认为活性炭纤维-乙醇是比较适宜的制冷工质对。

3 制冷系统可行性分析

假定乙醇的比热容等于相同温度条件下饱和液体的比热容,系统蒸发温度  $t_0$ 、冷凝温度  $t_k$  均为常数,设时刻  $\tau$  吸附器温度为  $t$ ,吸附量为  $x$ , $d\tau$  时间后,温度变化量为  $dt$ ,吸附量变化为  $dx$ ,控制体体积为  $dv$ ,可得到过程能量动态变化关系式。

(1)定压吸附过程

吸附器内压力下降到蒸发压力后,吸附器开始吸附蒸发器中的制冷剂蒸气,若不计流动损失和热量损失,定压吸附过程中,微元控制体内吸收的热量为

$$\delta q_x = \rho(C_1 + xC_2) dt dv + \rho \Delta H dx dv + \rho \int_{t_0}^t C_2(t) dt dx dv$$

(1)

式中:等号右边第一项为由于温度变化导致的显热变化, $\rho$ 、 $C_1$  分别为活性炭纤维的密度和比热容, $C_2$  为乙醇的比热容;第二项为吸附量变化而释放的吸附热, $\Delta H$  为吸附热;第三项为将蒸发温度下的制冷剂蒸气加热到吸附剂温度时的显热变化。

## (2) 定容加热过程

未被吸附器吸附的乙醇蒸气,吸收太阳能加热器能量,温度上升,压力提高,其微元控制体内吸收的热量为

$$\delta q_H = \int_{t_0}^{t_k} (1-x) C_2(t) dt dx dv \quad (2)$$

## (3) 定压脱附过程

吸附器内压力上升到冷凝压力后,从吸附剂上脱附出来的制冷剂蒸气流入冷凝器,并在冷凝器内冷凝,微元控制体内吸收的热量为

$$\delta q_T = \rho(C_1 + xC_2) dt dv + \rho \Delta H dx dv \quad (3)$$

## (4) 冷凝器热负荷

$$\delta q_k = \rho[\lambda(t_k) + \int_t^{t_k} C_2(t) dt] dx dv \quad (4)$$

## (5) 微元控制体制冷量

$$\delta q_0 = \rho[\lambda(t_0) dx dv + \int_{t_0}^t C_2(t) dt] dx dv \quad (5)$$

## (6) 制冷系数

$$R_{COP} = \delta q_0 / \delta q_H \quad (6)$$

因此,建立均匀压力场数学模型便可以计算吸附制冷过程中吸附床的传热、传质动态过程。

## 4 结 语

(1) 实现了连续制冷过程。通常吸附式制冷系统包括2个吸附器,由于吸附器需要反复加热和冷却,不但导致了部分能量以显热的方式损失,而且会因为切换损失产生间歇式制冷过程。采用转轮式吸附床不但可以回收冷却阶段释放的热量,充分利用吸附热,而且可以实现连续制冷过程。

(2) 改善了制冷剂在吸附床中的传热、传质特性,提高了吸附、解吸速度。笔者采用活性炭纤维波纹板这种成型吸附剂技术,不但从根本上解决了颗粒吸附剂接触热阻问题,而且由于辐射状排列的活性炭纤维板,减少了吸附床厚度,增大了吸附床换热面积,同时在结构上留下了利于扩散、渗透和对流等传质作用的气道,从而强化了传热、传质特性,提高了吸附、解吸速度。

(3) 综合利用高级制冷循环,极大地提高了循环效率。这种由辐射状排列的活性炭纤维板构成的转轮式吸附器,可以被看成是由一系列能独立进行热交换的小吸附床所组成的,在转轮缓慢旋转过程中,各个小吸附床沿流体流程存在很大的温度梯度。随着转轮的旋转运动,上、下两部分吸附床反向运行,回热、回质过程迅速地在吸附、脱附的分界线上连续

进行,最大限度地利用了吸附过程放出的热量,实现了吸附终了气体的回质过程。气体循环泵的应用,增加了吸附床的吸附压力,实现了强迫对流过程,改善了吸附床传热、传质性能,所以说由辐射状排列的活性炭纤维板构成的转轮式吸附器,综合利用了连续回热型循环、热波循环、对流热波循环、回质循环等高级制冷循环,极大地提高了循环效率。

(4) 改进了系统循环方式。改进系统循环方式是一种非常有潜力的提高吸附式制冷效率的方法。该系统设计以制冷剂本身作为加热介质,不但避免了传热损失,而且最大限度地回收了吸附热,提高了系统循环效率。

以活性炭纤维-乙醇为工质对,由太阳能驱动的固体吸附式转轮制冷机,以辐射状排列的活性炭纤维板构成的转轮式吸附器为核心部件,在强化传热的基础上,强化传质设计,应用吸附机理的研究成果,改善吸附床内解吸和吸附的传质过程,从而使制冷装置具有结构简单、无噪声、制冷速度快、热力系数比较大、不污染大气环境和对人体无害等优点。在太阳能制冷研究领域,有望填补传热、传质耦合理论研究的某些空白,在强化传质、提高热力系数方面取得了突破性进展。

## 参考文献:

### References:

- [1] 王如竹,丁国良.最新制冷空调技术[M].北京:科学出版社,2002.  
WANG Ru-zhu, DING Guo-liang. Newest Refrigeration Technology[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 张学军,施 峰,曾言行.固体吸附制冷工质对的研究[J].新能源,1998,20(1):27-30.  
ZHANG Xue-jun, SHI Feng, ZENG Yan-xing. Research on Solid Adsorption Refrigeration Working Pairs[J]. New Energy, 1998, 20(1): 27-30.
- [3] 陈江平.活性炭-乙醇吸附式制冷系统的实验研究[J].太阳能学报,1996,17(3):216-219.  
CHEN Jiang-ping. Experiment Research on Active Carbon-Ethanol Adsorption Refrigeration System[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 1996, 17(3): 216-219.
- [4] 王如竹.一种有潜力的吸附式制冷工质对——活性炭纤维-甲醇[J].太阳能学报,1997,18(2):222-227.  
WANG Ru-zhu. A Potential Adsorption Refrigeration Working Pairs: Carbon Fibre-Methanol Activated[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 1997, 18(2): 222-227.