

发动机余热驱动的固体吸附式 制冷技术应用研究

王学生 王如竹 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: 吸附式制冷既节能又环保。简述了固体吸附式制冷的基本原理及热力循环过程,讨论了适合发动机余热特点的吸附制冷工质对特性,开发了一种氯化钙/活性炭复合吸附剂。介绍了吸附式制冷技术在内燃机车司机室空调、渔船制冰、重载卡车空调等领域的应用情况。指出强化吸附床的传热传质,提高系统运行稳定和可靠性是推动该技术工业化应用的关键。

关键词: 吸附制冷;吸附剂;传热传质;发动机余热

中图分类号:TQ424;TB616

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S1-0207-04

Research on application of engine exhaust-powered solid adsorption refrigerating system

WANG Xue-sheng, WANG Ru-zhu, WU Jing-yi, XU Yu-xiong

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

Abstract: The principle and thermodynamic mechanisms of solid adsorption refrigeration system which is energy-saving and environmental friendly one were analyzed. The performance of several working pairs which are suitable for the solid adsorption refrigeration system driven by the wasted heat of engine were discussed, and a new kind of hybrid adsorbent was developed. The industrial application of engine exhaust-powered adsorption ice maker for fishing boat and adsorption air-conditioners for locomotive and truck driver-cabin were introduced. The applied examples show that the core technologies for enhancing the heat and mass transfer of adsorbent bed and ensuring high system reliability and operational stability are important to realize the industrial application of adsorption refrigeration.

Key words: adsorption refrigeration; adsorbent; heat and mass transfer; wasted heat of engine

吸附式制冷技术利用可再生能源(如太阳能)及低品位余热作为驱动源替代压缩机,使用对环境无公害制冷剂替代传统氟利昂,不对环境造成污染,被认为是 21 世纪替代氟利昂压缩式制冷的一种绿色制冷方式^[1]。目前驱动汽车、火车、船舶等运输工具的制冷设备都需要消耗额外的燃料,而这些运输工具的发动机排气、发动机冷却介质能产生大量余热。吸附制冷系统利用余热驱动,无须额外能源,结构简单,抗震性能好,特别适宜于汽车、火车、船舶等运输工具内的制冷。

近年来,由发动机余热驱动的固体吸附式制冷技术受到了较广泛的研究^[2-3]。但这些研究大都局限在理论分析和实验研究阶段,离实际应用仍有一

段距离。目前上海交通大学在固体吸附制冷关键技术的研究工作中取得了重大进展,先后成功开发了应用于内燃机车司机室空调、渔船制冰、重载卡车空调等余热驱动的吸附式制冷系统。基于此,笔者分析了对固体吸附式制冷的基本原理,介绍了发动机余热驱动的固体吸附式制冷技术应用情况。

1 固体吸附式制冷

1.1 吸附制冷原理

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。固体吸附式制冷系统一般由吸附器、冷凝器、蒸发器三大部件以及节流阀、连

收稿日期:2003-09-27;修回日期:2004-02-18

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G2000026309)

作者简介:王学生(1965-),男,博士,副教授,主要研究方向为过程装备传热强化与节能,021-62932601, wangxs@sjtu.edu.cn。

接管路等一些辅助设备组成,吸附剂和制冷剂一起构成吸附式制冷工质对。其工作原理如图 1 所示。

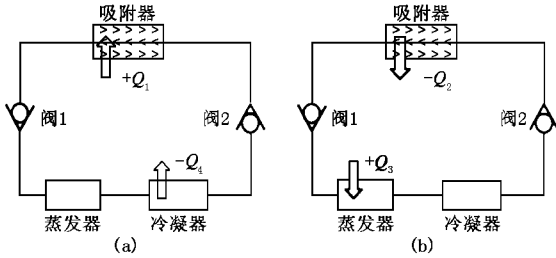


图 1 固体吸附式制冷系统原理图

固体吸附式制冷机的工作过程主要分为以下 2 部分:

(1) 加热解吸过程,如图 1(a)所示。当吸满制冷剂的吸附床被加热时,制冷剂从多孔吸附剂中解吸出来,使系统中的制冷剂蒸气压力升高。达到冷凝压力后,单向阀 1 导通(即解吸),单向阀 2 截止。制冷剂蒸气在冷凝器中冷凝释放热量 Q_4 ,并流到蒸发器中储存起来。蒸发器起储液器的作用。在这个过程中,吸附床获得 Q_1 的热量。

(2) 吸附制冷过程,如图 1(b)所示。制冷剂解吸完后,对吸附床进行冷却。吸附剂由于温度降低而重新吸附制冷剂蒸气,系统中制冷剂蒸气压力降低,单向阀 1 截止,单向阀 2 导通(即吸附)。从而引起储存在蒸发器中的液态制冷剂蒸发制冷,吸收热量 Q_3 (即制冷量)。因在吸附过程中要放出吸附热,所以必须不断地对吸附剂进行冷却,吸附床向外界放出 Q_2 的热量。当吸附制冷过程完毕后,吸附式制冷系统就完成了—次制冷循环,达到制冷的目的。循环中如不考虑能量的损失,则有: $Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4$ 。由此可见,单个吸附器的吸附式制冷是间歇制冷的。若要获得连续的制冷,就必须使用 2 个或 2 个以上的吸附器,以至于总有 1 个吸附器处于吸附制冷过程。

1.2 吸附制冷循环

—个理想的吸附制冷循环过程的温度(T)、压力(p)与吸附量(x)的变化如图 2 所示。过程 A—B—C—D—A 为基本循环中吸附器的基本热力过程,循环包括 4 个热力过程: A—B 为等容(等吸附量)加热; B—C 为等压解吸; C—D 为等容冷却; D—A 为等压吸附。吸附阶段终了时的吸附量 x_a 对应于吸附温度 T_a 和蒸发压力 p_{ev} 下的平衡吸附量;解吸阶段终了时的吸附量 x_b 对应于解吸温度 T_g 和冷凝压力 p_{cond} 下的平衡吸附量。最大吸附量与最小

吸附量之差($\Delta x = x_a - x_b$)即为对应于单位质量吸附剂的制冷剂循环量。由此可根据制冷剂的蒸发潜热确定系统的制冷量。过程 A—B—F—E—A 为制冷剂热力过程, B—F 为制冷剂的冷凝过程, F—E 为制冷剂液体从冷凝器到蒸发器的冷却过程, E—A 为制冷剂蒸发过程,此过程产生冷量。为充分利用能源以提高吸附制冷的效率,可采用双床回热循环或双床回热回质循环^[1]。

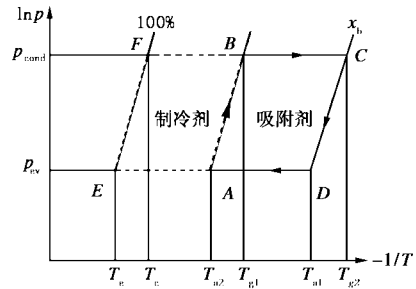


图 2 吸附制冷基本热力循环图

1.3 吸附工质对

吸附制冷的效果取决于吸附工质对的吸附特性。对吸附剂而言,其吸附量对温度变化要敏感,以期在同样的温度范围内得到尽可能大的 Δx (吸附量);在满足较好的吸附性能(传质)下,应具有较好的导热性能。另外,吸附与脱附的可逆性要好。作为吸附工质对的制冷剂应满足如下条件:单位体积蒸发潜热大、良好的热稳定性、合适的冰点、适当的饱和蒸气压、无毒、不燃烧等。目前常用的制冷剂有水、甲醇和氨。针对汽车、火车、船舶等运输工具发动机余热的特点,我们通过实验筛选出如下适合上述环境的吸附制冷共质对:

(1) 沸石(分子筛)-水

沸石是一种含水架状结构硅铝酸矿物,对水的吸附力很强,它的解吸温度较高,可高达 250 ~ 300℃,比较适合于以高温余热回收。沸石-水能在较大温升(吸附温度与蒸发温度之差)情况下使用(70℃以上),可放宽对吸附温度要求,有利于提高吸附温度、缩短循环时间和增加单位吸附剂制冷功率,同时水气化潜热大、价廉、无毒、不燃烧。但水的蒸发压力低,蒸气体积大,只能制取 0℃ 以上的冷水,对制冷系统的真空度要求较高。如果作为空调系统的工质对,沸石分子筛-水是理想的选择。

(2) 活性炭-甲醇

活性炭具有很好的吸附性能,甲醇能在 0℃ 以下蒸发,但因甲醇分子直径小,易于吸附,在活性炭上的吸附容量较大。吸附量对温度变化比较敏感,

解吸温度较低,一般为70~150℃。同时,甲醇的气化潜热较大(1 173 kJ/kg)、冰点低(-93.3℃),不腐蚀设备。因而,活性炭-甲醇被认为是最具实用化的几种工质对之一。活性炭-甲醇的最高解吸温度不能超过120℃,否则活性炭将促进甲醇分解,所以该工质对比较适合于低温余热(发动机缸套水)为动力源的制冷(冰)系统。

(3) 硅胶-水

硅胶是一种具有无定形链状和网状结构的硅聚合物,很易吸附水汽,吸附性能稳定,在室温下可吸附水汽至其干质量的35%左右开始解吸。易于再生,从50℃开始脱水,但再生温度不能超过120℃,否则硅胶将被烧毁。硅胶-水吸附式制冷系统在70℃左右的热源温度下运行,可获得良好的性能参数。所以该工质对比较适合于回收发动机缸套水余热。但在低压下,水在硅胶上的吸附量较小,限制了硅胶-水吸附式制冷的蒸发温度。所以硅胶-水吸附式制冷常用于空调和冷藏系统。

(4) 氯化钙-氨

氯化钙对氨有良好的亲和性,吸附过程属化学吸附。1 mol CaCl_2 可与8 mol NH_3 发生反应生成 $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$, 在不同的温度和压力下,1 mol $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ 能分别脱去4 mol NH_3 、6 mol NH_3 、8 mol NH_3 生成 $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$ 、 CaCl_2 同时放出热量。温度超过105℃便可解吸充分,适合于发动机尾气余热的回收。氨的沸点低(-34℃),所以 CaCl_2 - NH_3 工质对可用于吸附式制冰系统。然而使用氨为制冷剂,系统工作压力较高。

(5) 氯化钙/活性炭-氨

化学吸附过程往往会发生吸附剂膨胀和结块现象,经多次循环使用后其吸附性能有所衰减,而物理吸附时吸附剂性能则比较稳定。通过适当配制,将化学吸附与物理吸附相结合(混合吸附),物理吸附剂给化学吸附剂预留了较大的膨胀空间,化学吸附剂的膨胀则会造成物理吸附剂的无液,使得传热得到强化。我们所研制的氯化钙/活性炭块状复合吸附剂,导热系数由0.09 W/(m·K)提高到0.34 W/(m·K),并积累了不少经验。目前氯化钙/活性炭复合吸附剂已成功地应用发动机尾气驱动的吸附式汽车空调。

以上筛选出的用于汽车、火车、船舶等运输工具发动机余热驱动的吸附制冷工质对,被认为是比较接近实用化的吸附工质对。这些工质对在不同应用条件下,具有不同的特性和优势。其具体情况见

表1。

表1 固体吸附制冷工质对的工作特性

工质对	制冷剂		系统压力	解吸温度/℃	吸附温度/℃
	沸点/℃	潜热/(kJ·kg ⁻¹)			
沸石(分子筛)-水	100	2258	真空	> 150	< 80
活性炭-甲醇	65	1102	真空	110	< 35
硅胶-水	100	2258	真空	< 120	< 30
氯化钙-氨	-34	1368	正压	> 105	< 40
氯化钙/活性炭-氨	-34	1368	正压	> 105	< 40

2 发动机的余热能量分析

作为发动机动力的能量约为燃油燃烧量的30%~42%,而可以利用的废热量为燃烧总量的16%左右^[4]。假设一台汽车发动机的功率为100 kW,如在部分负载60 kW(按60%计)下工作时,如动力的能量利用率按35%计算,则燃烧的总热量约为171.4 kW。经发动机尾气排入大气的热量为42.9~77.1 kW,循环冷却水带走的热量至少为22~56.6 kW。目前吸附式制冷机的性能系数可达0.20~0.3,因此利用尾气和循环冷却水余热驱动的吸附式制冷系统至少可分别获得5.85 kW和4.4 kW的冷量(性能系数按0.20计算)。这种方式的余热回收效果非常可观。火车、渔船的功率更大,回收余热的量就更多。

3 应用实例

3.1 余热驱动的内燃机车司机室吸附式空调

内燃机车由于受机车内热辐射的影响,当室外温度为33℃时,司机室内温度高达45℃以上。全国在役内燃机车中,仅少数司机室加装了空调器,大多仍靠电扇产生的强制对流空气降温。2001年,上海交通大学与上海铁路局某分局合作,完成了内燃机车司机室吸附式空调器的研制开发工作。系统选用分子筛-水作为工质对。加热解吸时,内燃机排气进入吸附器,解吸出的冷剂蒸气进入风冷式冷凝器(室外),凝结成水后进入蒸发器(室内)。冷却吸附时,室外迎面风进入吸附器使其冷却而具备吸附能力,同时蒸发器中的冷剂蒸发制冷。系统中释放的冷凝热和吸附热由机车行驶时产生的迎面风直接排入大气。蒸发器中的冷媒水通过换热器,在水泵驱动下,由风机盘管将冷量送往司机室。系统采用

单床间歇型吸附式制冷循环与水蓄冷装置复合的方式。解析时驾驶室所需的冷量由水蓄冷装置提供,这样可实现系统的连续供冷。系统设计参数指标如表 2 所示。

表 2 机车空调系统设计参数指标

项 目	指标
机车内燃机功率/kW	1000
制冷量/kW	5.0
性能系数	0.23
解吸温度/℃	180 ~ 200
吸附温度/℃	70 ~ 100
吸附/解吸循环周期/min	20 ~ 40
吸附器中的吸附剂填充量/kg	120
冷媒水进口温度/℃	15
冷媒水出口温度/℃	5
冷媒水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.9

2001 年初,样机在某机务段东风 DF4B-2369 号机车上进行了装车,机车运行于杭州—上海、杭州—金华—江山等区段,系统运行开始时为冷却吸附过程,机车内的温度由 33℃ 降低为 25℃,平衡后,风机盘管的出风温度可以达到 18℃。2002 年 9 月已进行了 2 个夏季的运行,运行的性能状况良好,满足机车司机室的空调要求。

3.2 渔船发动机尾气余热驱动的制冰机

在渔轮的运行中,可利用柴油发动机排气余热驱动吸附式制冰机来为鱼类的保鲜提供冷量,既环保又经济。2002 年上海交通大学与湖北某船用辅机厂联合开发了渔船发动机尾气余热驱动的制冰系统,系统选用块状活性炭-甲醇为工质对。由于柴油机的烟气余热温度为 500℃ 左右,甲醇在温度高于 150℃ 时会分解成二甲醚,所以烟气余热经热交换器转换成温度控制在 120℃ 以下的水。系统加热解吸时,采用热水作为热源。冷却吸附时,利用河水(海水)冷却吸附床。由于用河水(海水)对金属有腐蚀作用,吸附床要进行防腐处理。系统采用回热回质双床连续吸附式制冷循环的方式。该设备安装于柴油机为 6160A 型的渔船上,运行 1 年多来,平均日产冰 600 kg,满足渔船鱼类的保鲜与冷藏。系统设计参数指标如表 3 所示。

表 3 渔船制冰系统设计参数指标

项 目	指标
渔船柴油机功率/kW	100
制冷量/kW	3.0
性能系数	0.11
解吸温度/℃	100 ~ 120
吸附温度/℃	30 ~ 35
吸附/解吸循环周期/min	20 ~ 30
吸附器中的吸附剂填充量/kg	60(每床)
蒸发温度/℃	-7
制冰量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	25

3.3 卡车发动机尾气驱动的吸附式空调

目前我国现运行的载重卡车一般都没有配备空调系统,而往往这种车型司机的工作环境比客车和轿车要差得多,更需要空调来改善工作环境。由于空间和价格成本的原因,要安装电压缩式空调器几乎已经不可能。目前第一台 EQ1108-G6-D13 型东风卡车吸附式空调器正在湖北某汽车备件制造厂加工制造,2003 年 5 月装车运行。系统选用氯化钙/活性炭-氨为工质对,系统加热解吸利用发动机尾气,冷却吸附时,利用环境风冷。系统采用双床连续吸附式制冷循环的方式。发动机功率为 110 kW,空调制冷量设计为 3.0 kW。有望取得吸附式制冷技术在汽车应用上的突破。

4 结语

吸附式制冷在节能、环保等方面具有突出的优势,目前已成为国内外制冷界研究的热点。今后主要研究内容包括强化吸附器传热传质,提高系统效率,简化系统结构,提高运行稳定和可靠性,拓宽产品的应用领域。我国余热资源非常丰富,余热回收的潜力很大,大部分低品位的余热资源,如太阳能等可再生能源和余热特别是汽车、火车、船舶的余热都可以用不同的固体吸附式制冷系统进行回收。这些领域既是吸附制冷技术优势之所在,同时又是其社会及经济意义之所在。

参考文献

- [1] 王如竹,吴静怡,代彦军,等.吸附式制冷[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] Suzuki M.[J].Heat Recovery Systems &CHP,1993,13(4):335-340.
- [3] Zhu R Q,Han B Q.[J].International Journal of Refrigeration,1992,15(1):31-34.
- [4] 蒋德明.内燃机原理[M],北京:机械工业出版社,1990. ■