

太阳能制冷技术的应用与发展

张朝昌 厉彦忠 陈曦 王强

(西安交通大学制冷与低温研究所)

摘要 太阳能制冷具有环保节能的优点,是当前制冷界的研究热点。本文综合介绍了各种太阳能制冷技术的原理和特点,以及一些当前最新的研究成果,并对太阳能制冷技术的发展和前景作了分析。

关键词 太阳能 吸附制冷 吸收制冷 喷射制冷

APPLICATION AND DEVELOPMENT OF SOLAR REFRIGERATION

Zhang Zhaochang Li Yanzhong Chen Xi Wang Qiang

Xi'an Jiaotong University

ABSTRACT Nowadays, solar refrigerators receive considerable attention as they are energy savers and environmentally benign. The mechanism and characteristics of several types of solar refrigeration systems, as well as their recent research advancements, are introduced in this paper. The promising prospect of the development and application of solar refrigeration technology is also analyzed.

KEY WORDS Solar Absorption refrigeration Adsorption refrigeration Eject refrigeration

1 前言

随着人们节能和环保意识的加深,开发新能源和可再生能源已经成为许多发达国家和发展中国家 21 世纪能源发展战略的基本选择。太阳能就是一种可再生清洁能源,长期以来一直受到科学家的研究和重视。在太阳能的利用中,太阳能制冷空调是一个极具发展前景的领域,也是当前制冷技术研究中的热点。

太阳能制冷具有以下几个优点。首先是节能,据统计,国际上用于民用空调所耗电能耗约占民用总电耗的 50%。而太阳能是取之不尽,用之不竭的。太阳能制冷用于空调,将大大的减少电力消耗,节约能源;其次是环保,根据《蒙特利尔议定书》,目前压缩式制冷机主要使用的 CFC 类工质因为对大气臭氧层有破坏作用应停止使用(美、欧等已停止生产和使用),现在各国都在研究 CFC 类工质的替代物质及替代制冷技术。太阳能制冷一般采用非氟氯烃类物质作为制冷剂,臭氧层破坏系数(ODP)和温室效应系数(GWP)均为零,适合当前环保要求,同时可以减少燃烧化石能源发电带来的环境污染。

太阳能制冷的另外一个优势是热量的供给和冷量的需求在季节和数量上高度匹配。太阳辐射越强、气温越高,冷量需求也越大。太阳能制冷还可以设计成多能源系统,充分利用余热、废气、天然气等其他能源。

2 太阳能制冷技术的原理和特点

太阳能属于低品位、低密度热源,太阳能制冷系统不同于蒸气压缩式制冷系统。目前,关于太阳能制冷系统的研究较多^[1~14],从原理上看主要包括两种,一种是以热能为驱动能源,如吸收式、吸附式、喷射式制冷等;另外一种是以电能为驱动能源,先把太阳能转化成电能,然后再利用电能来制冷,如光电式制冷,热电制冷等。下面主要介绍几种常用的太阳能制冷系统的基本原理和特点。

2.1 吸收式制冷原理和特点

吸收式制冷是利用溶液浓度的变化来获取冷量的装置,即制冷剂在一定压力下蒸发吸热,再利用吸收剂吸收制冷剂蒸汽。系统简图如图 1 所示。自蒸发器出来的低压蒸汽进入吸收器,被吸收剂强烈吸收,吸收过程中放出的热量被冷却水带走,形

成的浓溶液由泵送入发生器中,被热源加热后蒸发,产生高压蒸汽,进入冷凝器冷却,而稀溶液减压回流到吸收器,完成一个循环。它相当于用吸收器和发生器代替压缩机,消耗的是热能。热源可以利用太阳能、低压蒸汽、热水、燃气等多种形式。

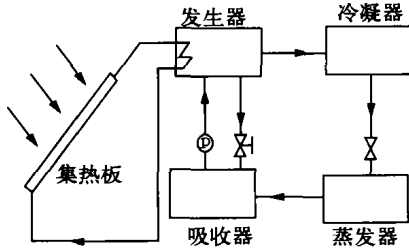


图 1 太阳能吸收制冷系统简图

吸收式制冷系统的特点与所使用的制冷剂有关,常用于吸收式制冷机中的制冷剂大致可分为水系、氨系、乙醇系和氟里昂系四个大类。水系工质对是目前研究最热门的课题之一,对它的研究主要是针对现今大量生产的商用 LiBr 吸收式制冷机依然存在的易结晶、腐蚀性强及蒸发温度只能在零度以上等缺陷。氨系工质对中包括了最为古老的氨水工质对和近期开始受重视的以甲氨为制冷剂的工质对。由于氨水工质对具有互溶极强、液氨蒸发潜热大等优点,它至今仍被广泛用于各类吸收式制冷机。人们对氨水工质对的研究主要是针对它的一些致命的缺陷,如:COP 较溴化锂小;工作压力高,具有一定的危险性;有毒;氨和水之间沸点相差不够大,需要精馏等。吸收式空调采用溴化锂或氨水制冷机方案,虽然技术相对成熟,但系统成本比压缩式高,主要用于大型空调,如中央空调等。

2.2 吸附式制冷原理和特点

根据吸附剂与吸附质之间作用关系不同,吸附可分为物理吸附和化学吸附。物理吸附是依靠吸附剂与吸附质分子之间的弱范德华力来实现吸附过程的。化学吸附是吸附质分子与吸附剂表面原子发生化学反应,生成表面络合物的过程。一个基本的吸附式制冷系统由吸附床(集热器)、冷凝器、蒸发器和阀门等构成,如图 2 所示。工作过程由热解吸和冷却吸附组成。基本循环过程是利用太阳能或者其他热源,使吸附剂和吸附质形成的混合物(或络合物)在吸附器中发生解吸,放出高温高压的制冷剂气体进入冷凝器,冷凝出来的制冷剂液体由节流阀进入蒸发器。制冷剂蒸发时吸收热量,产生制冷效果,蒸发出来的制冷剂气体进入吸附发生

器,被吸附后形成新的混合物(或络合物),从而完成一次吸附制冷循环过程。基本循环是一个间歇式的过程,循环周期长,COP 值低,一般可以用两个吸附床实现交替连续制冷,通过切换两床的工作状态及相应的外部加热冷却状态来实现循环连续工作。常有的吸附对主要有:活性炭—甲醇、沸石—水、硅胶—水、金属氢化物—氢(物理吸附)和氯化钙—氨、氯化锶—氨(化学吸附)等,目前应用较多的是前两者。各工质对的吸附动力学特性是吸附制冷的基础研究内容。

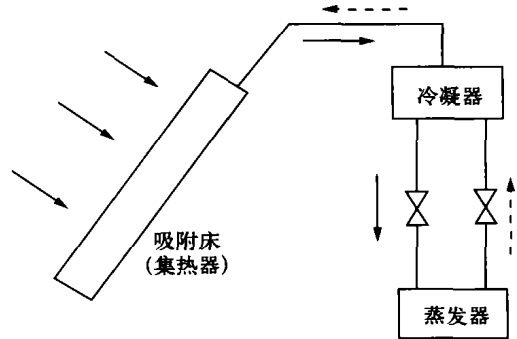


图 2 太阳能吸附式制冷系统简图

吸附式制冷具有结构简单、一次投资少、运行费用低、使用寿命长、无噪音、无环境污染、能有效利用低品位热源等一系列优点。与吸收式制冷系统相比,吸附式制冷不存在结晶问题和分馏问题,且能用于振动、倾颠或旋转的场所。一个设计良好的固体吸附式制机系统,其价格效用比可优于蒸汽压缩式制冷系统。国内外都在开展对固体吸附式制冷和热泵的研究工作。从吸附工质对的性能、吸附床的传热、传质和系统循环及结构等方面推动了吸附制冷的发展。但与压缩式及吸收式制冷相比,吸附式制冷还很不成熟。主要问题在于:固体吸附剂为多微孔介质,比表面大,导热性能很低,因而吸附/解吸所需时间长;单位质量吸附剂的制冷功率较小,使得吸附制冷机尺寸较大;吸附制冷虽然可以采用回热,然而仍有大量的热量损失,使得系统制冷性能系数(COP)值不够高。

2.3 喷射式制冷原理和特点

喷射式制冷系统的原理如图 3 所示。制冷剂在换热器中吸热后汽化、增压,产生饱和蒸汽,蒸汽进入喷射器,经过喷嘴高速喷出膨胀,在喷嘴附近产生真空,将蒸发器中的低压蒸汽吸入喷射器,经

过喷射器出来的混合气体进入冷凝器放热、凝结,然后冷凝液的一部分通过节流阀进入蒸发器吸收热量后汽化,这部分工质完成的循环是制冷循环。另一部分通过循环泵升压后进入换热器,重新吸热汽化,他们所做的循环称为动力循环。

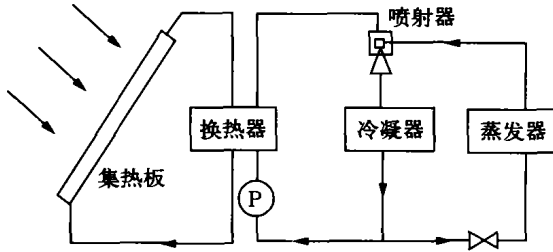


图 3 太阳能喷射式制冷系统简图

喷射式制冷系统中循环泵是唯一的运动部件,系统设置比吸收式制冷系统简单,运行稳定,可靠性较高等优点。缺点是性能系数较低。

2.4 光电式太阳能制冷原理和特点

这种制冷系统实质上是太阳能发电的一种应用。它利用光伏转换装置将太阳能转化成电能,经过逆变(高频或者工频)后驱动一般的压缩式制冷机,实质仍是压缩式制冷。这种系统的关键是光伏转换技术。虽然光电式太阳能制冷系统已经被用于空调和冰箱,但是目前人们对其制冷系统特性的研究不多,一般都直接采用常规的空调或冰箱,压缩机一般都没有考虑光伏系统的特性,因而整个系统的效率尚不能与专用的直流压缩机相比,成本比直接以热能为动力的制冷循环高的多(约 3~4 倍),这是其最大的缺点。值得一提的是太阳能发电不仅可以用于制冷空调,还可以用于其他电器,或者并入电网。随着光伏转换装置效率的提高和成本的降低,加上许多国家政府的大力扶助,太阳能发电得到迅速发展。例如美国采取的一项重要措施是实施“百万太阳能屋顶计划”,提出到 2010 年要在全国的屋顶上安装 101.4 万套太阳能装置,光伏组件累计用量将达到 3025 MW。日本通产省提出的“新能源推广的基本原则”要求到 2010 年安装光伏容量累计达到 5000 MW。我国也已经把太阳能光伏发电作为“十五”重点推广的能源项目之一。随着太阳能发电的发展,光电式太阳能制冷作为光伏技术与制冷技术的集成产品,作为庞大的制冷空调市场和潜力巨大的光伏市场两者的结合点,将有广阔的发展前景。

此外,还有其他一些制冷系统,比如太阳能半

导体空调,它利用的是热电转换原理,但是由于其成本很高,目前只应用在一些有限的领域。

3 太阳能制冷的研究现状与展望

吸收式制冷技术出现的最早,技术相对成熟。目前太阳能溴化锂吸收式制冷机已广泛地应用在大型空调领域。例如我国首座大型太阳能空调系统^[2],制冷能力可达 100 kW,冷媒水温度 6~9℃,热源水温在 60~75℃能很正常地制冷,COP 初步预算大于 0.4,可以满足面积超过 600 平方米的办公和会议室的空调需求。为了使水/溴化锂吸收式制冷系统得到更为广泛的应用,向广阔的家用空调领域发展,必须使系统实现空冷化和小型化。当前对水/溴化锂制冷机组的空冷化研究是其研究的一个重要方向。而对于水/溴化锂吸收制冷工质的性能研究则集中在改进其特性上,主要有如下几个方面:(1) 提高溴化锂的溶解度,在较高浓度、较低温度和较低压力的条件下,避免溴化锂结晶的析出,以便采用风冷;(2) 在提高溴化锂溶解度的同时,进一步提高溴化锂吸收式制冷循环的性能系数;(3) 减轻溴化锂溶液对金属材料的腐蚀作用;(4) 采用辅助制冷剂,进一步提高吸收式制冷循环的性能系数;(5) 采用表面活性剂,减小吸收界面的传质阻力,改善吸收过程,减小吸收面积。此外,正在研究的吸收式制冷系统有无泵溴化锂机、小型氨水制冷及其循环泵,多效吸收制冷等等。还有一种采用开式循环的开式除湿冷却型空调,系统的成本较低,可以较好的控制温度和湿度,也是比较有发展前景的空调系统。

在太阳能吸附式制冷技术方面,从目前的研究来看,进一步发展需要解决的关键问题主要有:吸附床传热传质性能如何进一步强化;吸附床/集热器白天的集热和夜间的散热之间的关系如何有效的解决;对于以甲醇和水等低蒸汽压吸附质作为制冷剂的负压系统,如何长期维持系统的真空度;如何将夜间的制冷量有效地贮存到白天使用等等^[3]。吸附式制冷的循环类型有基本型、连续型、连续回热型、热波型及对流热波型等。前三种目前已经有成功的样机,而后两种的研究目前大多是理论模拟,需要进一步的试验研究。对高级循环系统的研究将有利于提高太阳能吸附制冷的性能系数,降低系统成本。太阳能吸附式制冷技术的一个主要应用是太阳能制冰机。表 1 列出了一些国内外的研究成果。

在喷射式制冷技术方面, Sokolov 针对其 COP 较低的缺点, 设计了增压喷射循环和压缩喷射混合循环两种解决方案^[12], 以消耗少量电能为代价, 换取系统性能系数的大幅提高。Sokolov 的工作促进了太阳能喷射式制冷系统的研究, 将喷射器与其他系统结合使用, 可以有效的改进工艺过程、降低能耗或者在不增加系统复杂性的基础上产生出新的更高效的制冷系统。据此思想, 人们提出了喷射—压缩和喷射—吸收等混合系统。方承超对太阳能热源增强型喷射式制冷系统进行了热力学分析, 初步实验表明系统的 COP 值比传统的纯喷射制冷循环的 COP 值提高 50%^[13]。

太阳能制冷技术中的另一个关键因素是太阳能集热板。目前的太阳能集热板主要有平板式和真空管式, 效率有待提高。在太阳能吸热材料方面的研究, 我国清华大学, 北京太阳能研究所等单位先后研制出一系列优良的选择性涂层材料, 如黑钴

选择性吸收涂层和铝—氮/铝太阳光谱选择性吸收涂层。目前国内外所研制的选择性吸收涂层材料正在向多层化、梯度化方向发展。从已达到的水平来看, 光热转换材料的性能还可进一步提高。如德国一研究所的研究表明, 在平板盖板表面上进行纳米结构处理, 以增加太阳光透射率, 减少太阳能的反射损失, 可以使太阳能的热利用效率得到了进一步提高。除了吸热性能外, 还要求太阳能集热板的使用寿命要长, 生产成本要低等。Grossman 对采用溴化锂—水的太阳能空调系统的研究指出, 吸收式制冷中太阳能集热器的成本约占系统成本的 50% 以上, 集热和储热装置的成本占系统成本的绝大部分, 所以采用双效和单效循环的系统时, 成本相差不大, 但是双效循环的 COP 较高。而采用三效循环, 成本就会增加一倍^[14]。高效太阳能集热材料的研究有利于减少集热面积, 降低系统成本, 促进太阳能制冷的发展和应用。

表 1 太阳能制冷技术的部分研究进展

作者	工质	COP	性能	其他说明
A. Boubakri ^[4]	活性炭-甲醇	0.19	5~15 kg 冰/(m ² ·天)	-
王如竹 ^[5]	活性炭-甲醇	0.064-0.144	5 kg 冰/(m ² ·天)	+ 60 kg 热水
Leite ^[6]	活性炭-甲醇	0.13	7~10 kg 冰/(m ² ·天)	-
L. L. Vasiliev ^[7]	活性炭-氨	0.3	制冷量 250 W/m ² , 蒸发温度 -5 ℃,	电辅助
Huang ^[9]	R141b	0.22	制冷量 150 W/m ² , 蒸发温度 8 ℃,	喷射
B. B. Saha ^[10]	硅胶-水	0.36	-	两级吸附
R. E. Critoph ^[11]	活性炭-氨	0.06~0.07	-	-

虽然与压缩式制冷相比, 太阳能制冷技术目前还不是很成熟, 但是因为其环保节能的特点, 决定了它良好的发展前景。目前, 制约其广泛应用的主要原因是成本较高。太阳能制冷要降低成本, 一方面要大力开发高效太阳能集热板, 提高热力学性能; 另一方面, 走产业化发展的道路。为此, 可以与太阳能热水器的应用相结合(如太阳能冰箱—热水器复合机), 太阳能制冷与太阳能热水器结合, 实行冷热联产。太阳能热水器的热销可以看出太阳能制冷的广阔前景。2000 年我国太阳能热水器的年

产量达到 640 万平方米, 比 1999 年增长率 40%, 太阳能热水器的累计拥有量超过 2600 万平方米, 而户用比例只有 3%, 与日本的 20%, 以色列的 80% 相比, 市场发展潜力巨大^[15]。同时, 家用空调和冰箱的需求也是一个巨大的市场, 美国家庭家用空调的持有量为 40%, 我国还远没有达到, 尤其在中小城镇和农村地区, 太阳能资源丰富, 利用方便, 随着人们生活水平的提高, 对制冷空调的需求越来越多, 太阳能制冷将会大有用武之地, 必定会为广大制冷企业带来无限的商机。

参考文献

- 1 A. O. Dieng, R. Z. Wang, Literature review on solar adsorption technologies for ice - making and air - conditioning purposes and recent developments in solar technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001, 5: 313~342.
- 2 李戩洪, 马伟斌, 江晴. 我国首座大型太阳能空调系统. 制冷学报, 1999, 2.
- 3 卢允庄, 王如竹, 姜周曙. 固体吸附式制冷技术及其研究进展. 能源技术, 2001, 22(3): 91~95.

- 4 A. Boubakri, J. J. Guillemot, F. Meunier, Adsorptive solar powered ice maker: experiments and model. *Solar Energy*, 2000, 69(3): 249~263.
- 5 R. Z. Wang, M. Li, Y. X. Xu and J. Y. WU, An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker, *Solar Energy*, 2000, 68(2): 189~195.
- 6 A. P. F. Leite, M. Daguene, Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration, *Energy Conversion & Management* 2000, 41: 1625~1647.
- 7 L. L. Vasiliev, D. A. Mishkinis, A solar and electrical solid sorption refrigerator, *Int. J. Therm. Sci.* 1998, 38: 220~227.
- 8 B. J. Huang, J. M. CHANG, V. A. PETRENKO et al, A solar ejector cooling system using refrigerant R141b, *Solar Energy*, 1998, 64: 223~226.
- 9 B. B. Saha, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller, the Prototype, *Renewable Energy*, 2001, 23: 93~101.
- 10 R. E. Critoph, Z. Tamainot-telto, Solar sorption refrigerator, *Renewable energy*, 1997, 12(4): 409~417.
- 11 M. SOKOLOV, D. HERSHIGAL, Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low grade heat(part1, 2). *Int. J. Refrig.* 1990, 13(9): 351~363.
- 12 方承超, 赵军等. 太阳能增强型喷射式制冷系统的研究. *太阳能学报*, 1994, 2.
- 13 G. Grossman, Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning, *Solar Energy* 2002, 72(1): 53~62.
- 14 罗振涛. 我国的太阳热水器产业太阳能. 2001, 4: 8~11.

热烈庆祝 中元国际工程设计研究院 成立五十周年
(原机械工业部设计研究院)

中元国际工程设计研究院始建于 1953 年, 是国家甲级工程勘察设计单位。具有机械、建筑、城市规划、医药、船舶、兵器、铁道、市政、商业、智能建筑、环境污染防治等工程设计和工程勘察证书, 并具有工程总承包、建设监理、工程咨询、压力管道、压力容器设计等甲级资格。有独立的进出口经营贸易权、对外经济合作资格证书、进出口企业资格证书、自理报关单位注册登记证书、工程造价咨询单位资质、施工图设计文件审查许可证和质量体系认证证书, 是全国勘察设计综合实力百强单位之一。

该院十分重视技术进步, 近几年自行开发的技术转让项目有 280 多项次, 主编和参编的国家技术规范、技术标准、标准图达 39 项, 部标准规范 6 项。共获国家级和省部级科学技术成果奖 175 项, 专利 16 项。代表项目有: 巴基斯坦重机厂、第一重机厂技术改造、第二重机厂技术改造、徐州工程机械集团公司技术改造、柳州工程机械厂技改工程、厦门

工程机械厂、山东滨州活塞集团、广州重机集团迁建工程、中国国际航空公司、首都国际机场、上海浦东国际机场、深圳、广州白云机场货运站、配餐中心、飞行员训练中心、生产运控中心及行李处理系统、BAC 型工业炉微机控制系统、高能 X 射线电子直线加速器定时显相系统无损检测、北京西罗园集中供热厂、首都机场供热厂、北京亦庄供热中心、北京翠微园小区、北京方庄小区、北京新东安市场、北京万通新世界广场、北京远洋大厦、北京中粮广场、北京财富中心、联想(北京)研发大厦、中关村西区 CEC 大厦、北京航空航天大学体育馆、北京朝阳体育馆、北京石景山体育馆、燕山大学、北京科技大学、北京理工大学、广东佛山医院、金华中医院、北京大学眼科中心、北京安贞医院等工程设计项目和人民大会堂维修改造、中华人民共和国外交部办公大楼建设监理, 以及自行开发的多层与高层建筑结构 CAD 软件, 工业厂房排架计算, 平法软件等, 赢得了良好的声誉。

地 址: 北京市西三环北路 5 号
传 真: (010)68458354

邮 编: 100089
网 址: <http://www.ippr.com.cn>

电 话: (010)68428811
E-mail: office@ippr.com.cn