

# 太阳能吸收式和吸附式制冷系统的研究

杨小聪<sup>1</sup>, 张秀霞<sup>1,2</sup>, 樊 荣<sup>1,2</sup>, 温俊霞<sup>1</sup>

(1. 北方民族大学 电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 近年来由于人们对能源需求量增大导致矿物能源供应紧张, 同时给环境带来污染, 使得开发利用新能源成为研究重点。对太阳能的开发力度也不断加大, 不仅利用太阳能发电, 而且制冷。主要是对目前比较成熟的太阳能吸收式和吸附式制冷技术的原理以及研究情况进行了介绍, 对其应用与优缺点进行了总结, 提出了一些建议, 并展望了太阳能制冷在未来空调领域重要的推广利用价值。太阳能制冷系统的成本降低, 性能的不断改进, 为太阳能制冷的推广应用奠定了基础。因此太阳能制冷逐渐走向小型化, 促进普及推广与商品化将是未来的发展趋势。

**关键词:** 关键词: 太阳能; 吸收式; 吸附式; 制冷技术

**中图分类号:** TK51<sup>+.3</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7086(2013)03-0130-05

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-7086.2013.03.002

## RESEARCH STATUS OF SOLAR ENERGY IN ABSORPTION AND ADSORPTION REFRIGERATION SYSTEMS

YANG Xiao-cong<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-xia<sup>1,2</sup>, FAN Rong<sup>1</sup>, WEN Jun-xia<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China;

2. College of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Recent years, because of people's demand of fossil energy increased and the pollution of environment, which made the development and utilization of new energy resources become a research focus. The development of solar energy is also increasing, not only the use of solar power, but also the refrigeration. The article described several mature solar refrigeration technology, which were solar absorption and adsorption refrigeration technologies works and research. Their research progress and application were summarized. And some suggestions were posed, the important promotional value of solar refrigeration in air conditioning were prospected. The reduction of cost and improvement of performance established the basis for promotion and application of solar refrigeration. Finally, we can get that solar refrigeration would become smaller and the popularization and commercialization would be the future development trend.

**Key words:** solar energy; absorption; adsorption; refrigeration technology

### 1 引言

随着化石能源危机以及带来的污染, 对风能、水能、潮汐能等的开发与研究力度不断增加。而所有这些清洁能源的利用与发展从根本上来说都是离不开太阳的。太阳每秒能够释放出  $391 \times 10^{21}$  kW 的能量, 而辐射到地球表面的能量虽然只有它的二十二亿分之一, 但也相当于全世界目前发电总量的 8 万倍<sup>[1]</sup>。低碳已经成为世界的主流, 尤其是在建筑上, 我国建筑耗能占社会总耗能的 30% 左右, 空调、采暖、热水等耗能占建筑耗能的 50% 以上<sup>[2,3]</sup>。因此研究人员关注并研究如何利用太阳能。尤其是制冷空调领域, 太阳能制冷不仅可以减少电力消耗, 同时由于没有采用氟氯烃类物质, 不会对大气臭氧层产生破坏, 属于清洁能源, 符合环保要求。另外, 采用太阳能制冷其热量的供给和冷量的需求在季节和数量上高度匹配, 在夏季太阳辐射

收稿日期: 2013-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金(51365001), 国家民委项目(2012BFZ004), 北方民族大学校重点项目(2013XZZ01)

作者简介: 杨小聪(1985-), 女, 山东威海人, 研究生, 主要从事电路与系统专业。

强、气温高,制冷量就越大。因此,利用太阳能制冷技术对节约常规能源,保护自然环境都具有十分重要的意义。

近年来,人们研究开发的太阳能制冷方式主要有以下几种: 太阳能吸收式制冷、太阳能吸附式制冷、太阳能除湿式制冷、太阳能蒸汽喷射式制冷。这四种方法实质上都是太阳能系统替代常规能源给常规制冷循环供给热媒水。关键技术不在太阳能,而在制冷系统本身<sup>[4-6]</sup>。吸收式和吸附式制冷在各国已经有不少示范应用。本文对已有实际应用的太阳能吸收式制冷和太阳能吸附式制冷进行对比介绍。

## 2 太阳能吸收式制冷系统研究

太阳能吸收式制冷技术起源于 20 世纪,但是由于成本高、效率低等问题限制了它的发展。随着科技的进步和发展,尤其是受能源危机的影响,使得吸收式制冷受到发达国家的重视,太阳能科技不断发展,研究领域也不断扩大。大部分的太阳能吸收式制冷系统都是采用的溴化锂吸收式制冷方式<sup>[7]</sup>。

吸收式制冷是根据吸收剂强烈吸收制冷剂的特性,利用热能驱动溶液进行制冷。常用的一种是氨吸收式制冷机,它的制冷温度在  $1 \sim -45\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,用作工艺生产过程的冷源; 另一种是溴化锂吸收式制冷机,其制冷温度只能在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,可用于制取空气调节用冷水或工艺用冷却水。吸收式制冷机主要由四个热交换设备组成,即发生器、冷凝器、蒸发器和吸收器。简单吸收式制冷系统循环框图如图 1 所示:

太阳能吸收式制冷的循环方式都是采用单效方式,还可以具体分为单效单级和单效双级。现在绝大部分都是溴化锂( $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$ ) 吸收式制冷机。

我国太阳能制冷和空调的研究大约开始于 20 世纪 70 年代,当时有很多高等院校、科研机构和企业都投入大量人力和

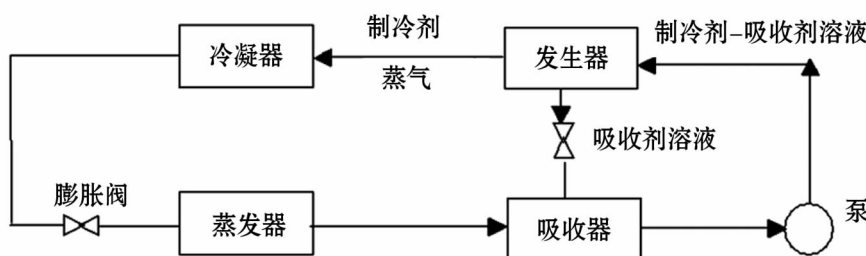


图 1 简单吸收式制冷系统循环框图

物力研制太阳能制冷空调,大部分是小型氨—水吸收式制冷实验样机。1999 年香港大学的李中付等在总结了前人研究的基础上,提出了一种采用分层蓄热水箱的太阳能驱动式空调系统<sup>[8-10]</sup>。陈滢等<sup>[11]</sup>提出了一种新型的单效双级吸收式制冷循环,采用增大热源温差的思路,增加了一个发生器和一个换热器。最后经过模拟计算,得出热源出口温度可以降到  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,COP 值提高。但是由于该系统比较复杂,而且投资成本较高。所以陈光明等<sup>[12]</sup>又提出了一种单效单级循环,主要是根据热变器原理,在传统循环基础上增加了一个压缩机,使得从发生器出来的制冷剂蒸汽分为两路,一路是直接将制冷剂蒸汽送入冷凝器,一路是经过压缩机压缩后,回到发生器换热,最后制冷剂蒸汽进入冷凝器。使得进入冷凝器和发生器的热负荷得到降低,提高系统的 COP 值,但是由于压缩机的正常运行难以保证,所以没有应用于实际。大连理工大学的徐士鸣<sup>[13]</sup>用热空气代替传统闭式循环中的加热蒸汽或热水,研究以空气为携热介质的太阳能吸收式制冷系统。上海交通大学的王如竹等提出一种通过太阳能燃气联合驱动的太阳能吸收式空调,采用溴化锂作为制冷剂,把燃气直燃型双效溴化锂机组与热管式真空管集热器结合在一起,并且在普通双效循环的基础上又加入了太阳能热水作为低压发生器的辅助驱动能源,从而可以做到夏季制冷、冬季供暖以及全年都可以提供生活热水的功能,非常适宜家用<sup>[14,15]</sup>。2006 年长沙远大公司研制出一种采用槽式太阳能集热器驱动的双效吸收式空调,与常规燃气结合,提高了制冷效率,在国内一些单位也进行应用。王晓东<sup>[16]</sup>将太阳能和生物质能结合利用到制冷系统中,设计了一台小型氨水吸收扩散式冰箱,用氨水作为制冷工质对,氢气作为辅助气体;通过实验测得其最大制冷系数 COP 可达 0.39。2009 年王艳<sup>[17]</sup>通过利用溴化锂溶液的特性,降低其在吸收式制冷系统发生器内的蒸发压力,从而降低了溶液蒸发时的温度,增加了制冷循环时冷凝的蒸气量,达到提高制冷效率的目的。这是一种新型高效制冷的方法,也是我国首次提出利用流体的旋转运动。Ventis 等<sup>[18]</sup>研究以  $\text{NH}_3\text{--LiNO}_3$  为工质的吸收压缩制冷系统,该工质具有良好的热力学性能,大大降低了系统驱动温度,提高了制冷量。刘辉等<sup>[19]</sup>提出了一种以  $\text{NH}_3\text{--LiNO}_3$  为工质对。采用数值计算的方法对吸收—压缩太阳能制冷循

环的性能参数、冷却水量和电热比进行了研究。得出补偿相当于一定量太阳能的电能耗可大大降低热源温度,提高循环性能参数,降低冷却水量。

太阳能吸收式制冷系统能够在商业化中应用的较多,主要是因为它不仅能够很好的与季节性相匹配、无污染等,而且还可以与大型溴化锂吸收式制冷机组相配套,大幅降低投资运行费用并且运行安全可靠。因此太阳能吸收式制冷系统比较适合应用于办公楼、宾馆等公共建筑中<sup>[24]</sup>。目前已经有这样的吸收式空调系统兼具供暖、制冷、热水功能。该系统主要由高效太阳能集热器、制冷机组、辅助加热装置、智能控制器等组成。不仅可以全天提供热水,而且可以在夏季通过热水驱动吸收式制冷产生冷量,在冬季用集热器系统中的热水又可以供应暖气,可以为  $600 \text{ m}^2$  的办公面积制冷或供暖。这也将成为以后的发展趋势。

### 3 太阳能吸附式制冷系统研究

太阳能吸附式制冷系统是利用吸附床中的固体吸附剂对制冷剂周期性的吸附、解吸附过程实现制冷循环。该系统主要是由吸附床、冷凝器、蒸发器和节流阀等组成。主要是利用太阳能或其他热源,使吸附剂和吸附质形成的混合物(或络合物)在吸附床中发生解吸,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而完成一次吸附制冷循环过程。目前常用的工质对主要有活性炭—甲醇、活性炭—氨等,活性炭—甲醇适用于太阳能制冷工况,而活性炭—氨等常用于正压条件下的制冰系统<sup>[21,22]</sup>。制冷系统简图如图 2 所示:

为了提高吸附式制冷系统的性能,提升其 COP 值,国内外学者做了很多研究<sup>[22-28]</sup>:

(1) 通过合理选择工质对来提高制冷效率,从而达到节省成本,增强可靠性。(2) 对吸附式制冷循环方式的研究。(3) 通过改善吸附床传热传质性能的研究。孙志坚等对以硅胶—水作为工质对的可行性进行了研究。

Anyanwu E. E 等对几种工质对性能进行了研究,如:活性炭—氨、沸石—水及活性炭—甲醇,研究得出,沸石—水是用于太阳能吸附式空调系统的最佳工质。还有研究人员

将几种吸附剂混合在一起从而有效地提高了吸附剂的吸附能力。helton 提出将吸附床设计成存在一定温度梯度的形式,相当于一些能够进行独立热交换的小吸附床,两个吸附床反向进行,每个吸附床只有一小部分进行热交换,另一部分则保持温度,从而能够使吸附放出的热量最大化地利用<sup>[29,30]</sup>。Sward Brian K.等<sup>[31]</sup>对以水—NaX 子筛为工质对的热波循环研究后认为在热源温度  $393 \text{ K}$ 、冷凝器温度  $303 \text{ K}$ 、蒸发温度  $278 \text{ K}$  的条件下,循环 COP 可超过 1.2。

我国在太阳能吸附式制冷方面独具特色,主要是对吸附床传热传质进行的研究。常用的强化吸附床导热的方法有两种:在吸附床中加入金属片和在吸附剂中加金属颗粒,李春华分析了不同强化传热后得出,在吸附床中嵌入合适的金属片或提高吸附剂的导热系数均可大大减小窗内的温度梯度,并且方法简单有效,但是由于金属片的热容对吸附床的温升有很大的负面影响,所以要选取热容比较小的金属,而且间距也要恰当<sup>[32-34]</sup>。李东明等<sup>[35,36]</sup>对吸附床内的动态特性做了一些分析研究,主要是对窗内温度、压力、质量之间的相互作用建立模型研究。朱冬升等<sup>[37]</sup>对如何减少热阻做了进一步研究,实验表明,在接触面上涂导热胶和加压可以减少热阻,而且对吸附剂的传质过程没有影响。王如竹等研制的小型硅胶—水吸附式空调机组有效地提高了系统的传热传质性能以及整体 COP 值,并且在上海和山东的一些工程中得到了实际应用<sup>[38]</sup>。

太阳能吸附式空调的最大缺陷就是系统的 COP 值偏低,不仅低于传统压缩式空调,而且远低于太阳能吸收式空调,这使得吸附式制冷的竞争力降低。但是太阳能吸附式制冷所需热源温度较低,并且太阳能集热部分一般都采用平板式集热器,大大降低了使用成本,同时由于系统的制冷功率比较小,并且其工作特性导

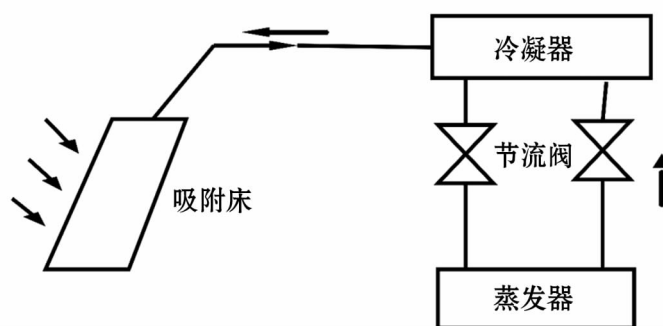


图 2 吸附式制冷系统简图

致成本和系统重量的增加,因此吸附式比较适合普通住宅的小型空调系统,与传统空调相比具有较大的市场发展潜力<sup>[24]</sup>。

#### 4 总结与展望

吸收式制冷和吸附式制冷各有优缺点,吸收式制冷供热温度较低,但是 COP 值也较低并且系统比较复杂。吸附式制冷热利用性能系数较高,但是系统过于笨重,吸附剂的热导率太低,并且系统运行不稳定<sup>[24]</sup>。从吸收式和吸附式的各种研究实验可以得出,吸收式比较适合发展大型商业化的制冷系统,而吸附式适合小型家用制冷系统。太阳能空调技术以其独特的优势已展现出巨大的应用前景。但太阳能制冷的空调系统的技术、产品还处于研制、试验、示范阶段,远未达到人们所期望的推广应用的程度,其重要原因仍然在于利用效率不高,经济成本较高等。然而零输入和污染零排放的巨大优势,使我们努力建立一种环保实用、高效、低成本、多功能的太阳能空调系统,使之能够得到广泛应用。太阳能制冷系统的成本降低以及性能的不断改进,为太阳能制冷的推广应用奠定了基础。因此太阳能制冷的逐渐普及推广与商品化将是未来的发展趋势。展望未来,清洁、无噪音的太阳能制冷系统必将走进千家万户。

#### 参考文献:

- [1] 王如竹,代彦军. 太阳能制冷 [M]. 北京: 化学工业出版社,2006.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能 2011 年度发展研究报告 [R]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 住房和城乡建设部. 建筑业“十二五”发展规划 [M]. 北京: 住房和城乡建设部,2011.
- [4] 刘鉴民,太阳能利用: 原理·技术·工程 [M]. 北京: 电子工业出版社,2010.
- [5] 方承超,赵军,赵律,等. 太阳能增强型喷射式制冷系统的研究 [J]. 太阳能学报,1994,15(2): 178-182.
- [6] 冯毅,谭盈科,李宗楠. 太阳能驱动的吸附除湿空调系统的研究 [J]. 太阳能学报,2000,21(3): 265-268.
- [7] FAN Y, LUO L, SOUYRI B. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1758-1775.
- [8] Li Z F, Sumathy K. Simulation of a solar absorption air conditioning system [J]. Energy Conversion & Management, 2001, 42(3): 213-327.
- [9] Li Z F, Sumathy K. Experimental studies on a solar powered air conditioning System with partitioned hot water storage tank [J]. Solar Energy, 2001, 71(5): 285-297.
- [10] Li Z F, Sumathy K. Technology development in the solar absorption air-conditioning systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2000, 4(3): 267-293.
- [11] 陈滢,朱玉群. 低温热源驱动的单效/双级 (SE/DL) 吸收式制冷循环 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 101-107.
- [12] 陈光明,冯仰浦,王剑峰,等. 一个用太阳能驱动的新型吸收制冷循环 [J]. 低温工程, 1999, 20(1): 50-55.
- [13] 徐士鸣,刘渝宏. 以空气为携热介质的开式太阳能吸收式制冷循环研究与分析 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 204-210.
- [14] 刘艳玲,王如竹,代彦军. 太阳能双效溴化锂吸收式制冷系统的模拟和经济性分析 [C]. 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集, 2002: 347-351.
- [15] Liu Y L, Wang R Z. Performance prediction of a solar gas driving double LiBr-H<sub>2</sub>O absorption system [J]. Renewable Energy, 2004, 29(10): 1677-1695.
- [16] 王晓东. 太阳能生物质能联合吸收式制冷系统研究 [D]. 河南: 河南农业大学, 2009.
- [17] 王艳. 小型高效太阳能吸收式制冷系统涡旋发生器特性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [18] Ventas R, Lecuoua A, Zacarias A, et al. Ammonia-lithium nitrate absorption chiller with an integrated low-pressure compression booster cycle for low driving temperatures [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 1351-1359.
- [19] 刘辉,李长胜. 新型太阳能增压吸收式制冷循环 [J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 38-47.
- [20] 金叶佳,尹芳芳,李开创,等. 常见太阳能空调制冷技术的现状及比较 [J]. 太阳能, 2011, (9): 32-35.
- [21] 王默晗,姚易先,郝红宇,等. 浅谈太阳能制冷技术的发展及应用 [J]. 制冷与空调(四川), 2007, 21(1): 100-103.
- [22] 何梓年. 太阳能热利用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [23] 李明,孙长江,王如竹,等. 改进型太阳能固体吸附式制冰机的研制 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1671-1674.
- [24] 李军,朱冬生,张立志,等. 固体吸附式制冷在太阳能利用中的研究与进展 [J]. 制冷与空调, 2004, 4(3): 5-8.

- [25] 周远, 王如竹. 制冷与低温工程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [26] 李传统. 新能源与可再生能源技术 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [27] 王林. 小型吸收式制冷机原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [28] 陈恒, 吴静怡, 李廷贤, 等. 氯化钙膨胀石墨吸附制冰系统固化复合吸附剂的性能 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(4): 561–564.
- [29] 蔡辉, 施明恒. 太阳能制冷技术的发展概况 [J]. 科技与经济, 2003, 16(2): 58–60.
- [30] 赵加佩, 陈宁, 冻小飞. 太阳能吸附式制冷技术进展综述 [J]. 能源研究与信息, 2007, 23(1): 23–29.
- [31] LI M, HUANG H B, WANG R Z. Experimental study on adsorbent of activated carbon with refrigerant of methanol and ethanol for solar ice maker [J]. Renewable Energy, 2004, 29(15): 2235–2244.
- [32] CHEN Cuiqun, YAO Haijun, HU Qing. Preparation and adsorption mechanism of composite adsorbents on solar powered adsorption refrigeration [J]. Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(2): 182–188.
- [33] SWARD Brian K, Douglas LeVan M, FRANCIS Meunier. Adsorption heat pump modeling: The thermal wave process with local equilibrium [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(8): 759–780.
- [34] 李春华, 代彦军, 王如竹. 太阳能平板吸附床强化传热的分析 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 24–26.
- [35] LI M, WANG R Z. Heat and mass transfer in a flat plate solar solid adsorption refrigeration ice maker [J]. Renewable Energy, 2003, 28(4): 613–622.
- [36] LI Dongming, JIANG Yaojian, WANG Zhiguo. Thermodynamic calculating method of adsorption bed in solar adsorption refrigeration system [J]. Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(4): 483–487.
- [37] ZHU Dongsheng, WANG Shengwei. Experimental investigation of contact in solar adsorption refrigeration systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(4): 301–327.
- [38] 陆紫生, 翟晓强, 王如竹, 等. “可再生能源与建筑集成技术研究与示范”项目课题二/子课题: 小型硅胶—水吸附太阳能空调研制及应用 [J]. 建设科技, 2009, 7(24): 37–39.
- [39] FAN Y, LUO L, SOUYRI B. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1758–1775.

欢

迎

投

稿

欢

迎

订

阅