

太阳能驱动制冷空调技术

吴 薇¹, 殷勇高², 冒海阳¹, 李晖艳¹, 尹成志¹

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

[摘要] 太阳能驱动制冷空调技术主要分为光热转换、光电转换及光化转换等 3 种方式. 详细阐述了太阳能吸收式制冷、太阳能吸附式制冷、太阳能溶液除湿蒸发制冷及太阳能喷射式制冷等方法的原理、组成特点和研究现状与进展. 简要分析了太阳能光电制冷和太阳能光化制冷的特点及发展趋势, 并对光热转换、光电转换及光化转换等 3 种方式制冷方法的性能进行综合比较, 从系统能耗、系统初投资以及推广应用等角度探讨了太阳能用于制冷空调的前景与技术难题.

[关键词] 太阳能制冷空调, 光热转换, 光电转换, 光化转换

[中图分类号] TU 831.7+4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2007)04-0040-05

Solar Energy-Powered Refrigeration and Air-Conditioning Technologies

Wu Wei¹, Yin Yonggao², Mao Haiyang¹, Li Huiyan¹, Yin Chengzhi¹

(1. School of Power Engineering Nanjing Normal University Nanjing 210042 China

2. School of Energy and Environment Southeast University Nanjing 210096, China)

Abstract Solar energy is an unlimited and renewable source of green energy. Solar energy-powered refrigerating and air-conditioning system mainly includes photothermal conversion, photovoltaic conversion and photochemical conversion. We illustrate in detail the principles, the composite features, and the present research state and evolution of the such methods of solar energy-powered refrigeration and air conditioning technologies as solar energy absorptive refrigeration, solar energy adsorptive refrigeration, solar energy evaporating and dehumidifying refrigeration and solar energy jet refrigeration, and analyze in brief the configurative characteristics, present research state and evolution about photovoltaic refrigeration and photochemical refrigeration of solar energy, and make a comprehensive comparison of the performances of the three refrigeration methods of photothermal conversion, photovoltaic conversion and photochemical conversion, and finally explore the prospect and technology trouble of solar refrigeration from the angles of energy consumption, initial investment and product application.

Key words solar energy-powered refrigerating and air-conditioning, photothermal conversion, photovoltaic conversion, photochemical conversion

0 引言

目前,大部分的制冷空调设备都是以电能驱动的.随着制冷空调技术的快速发展,传统的制冷空调设备消耗大量的电能,同时也带来了制冷工质氟里昂对环境的污染(温室效应和破坏臭氧层),因此制冷空调中的环保和节能问题成为人们关注的焦点.以太阳能作为主要驱动能源、以自然工质作为循环工质的太阳能制冷与空调技术成为当前制冷空调研究领域的热点之一.

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的可再生绿色能源,地球每年接受的太阳能总量为 1×10^{18} kWh.太阳能驱动制冷空调系统具有环保和节能的双重优势.太阳能用于现代制冷空调的方式很多,本文主要探讨太阳能作为主要能源驱动制冷与空调的技术方法,对其种类、组成、性能特点进行综合比较分析.

1 太阳能驱动的制冷空调方法

太阳能的利用途径分为以下 3 种:光热转换、光电转换和光化转换^[1].光热转换是利用各种集热器把

收稿日期: 2007-06-28

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(07KJB480060)资助项目.

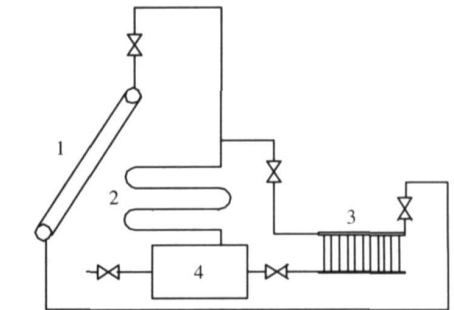
作者简介: 吴薇(1974-),女,讲师,主要从事能源利用与环境保护等方面的教学与研究. E-mail: wuwe@njnu.edu.cn

太阳能收集起来, 然后利用收集到的热能来驱动太阳能制冷空调装置; 光电转换是将太阳能转化为电能来驱动制冷系统; 光化转换是先将太阳能转化为化学能, 然后进行制冷。太阳能制冷空调系统主要由太阳能集热装置、热驱动制冷装置和辅助热源以及相关控制设备组成^[2]。主要的太阳能制冷空调方法有如下几种类型^[3]: 光热转换式主要有吸收式制冷、吸附式制冷、除湿蒸发冷却、喷射式制冷; 光电转化主要有电能驱动传统制冷方式、半导体制冷; 光化转换主要有化学热泵、氢化物制冷。

1.1 光热转换方式太阳能制冷空调

1.1.1 太阳能吸收式制冷

吸收式制冷是利用溶液浓度的变化来获取冷量, 稀溶液吸收来自蒸发器的低压蒸气, 释放出热量由冷却介质带走, 溶液变浓后经溶液泵升压送至发生器, 经过高温热源加热产生高压蒸汽进入冷凝器冷凝, 节流后进入蒸发器蒸发制冷。太阳能吸收式制冷机有如下几种^[4]: 间歇式太阳能吸收式制冷机 (如图 1 所示)、连续式太阳能吸收式制冷机 (分为直接式和间接式) 和无泵吸收式制冷机 (分汽泡泵式和双吸收器式)。间歇式太阳能吸收式制冷机中集热器兼作发生器和吸收器用, 工质为氨水溶液。经有关试验研究, 在太阳能辐射为 700 W/m^2 和发生时间为 5 h 的条件下, 环境温度为 $22\sim 35^\circ\text{C}$, 冷却水温度为 20°C , 冷凝温度为 $21\sim 35^\circ\text{C}$, 发生器内的溶液温度最高达到 $75\sim 83^\circ\text{C}$, 能够产生并冷凝 $3.6\sim 4.2\text{ kg}$ 氨。制冷阶段周围环境温度为 $18\sim 31^\circ\text{C}$, 蒸发温度为 $-17\sim -7^\circ\text{C}$, 结冰量为 $6.8\sim 8.0\text{ kg}$ 每平方米采光面积的结冰量达 $4.5\sim 5.3\text{ kg}$ 间接连续式太阳能吸收式制冷机是通过集热器加工热水, 然后通过热水作为热源媒体加热待发生溶液。日本矢崎 1 号太阳房就是一种间接连续式太阳能驱动溴化锂吸收式制冷机, 试验研究表明, 冷却水温为 29.5°C , 冷冻水温度为 9°C , 发生器入口温度为 85°C , 制冷量为 $25\ 100\text{ kJ/h}$ 工况系数为 0.5 1998 年, 江门 100 kW 太阳能空调系统是我国首座大型实用性的太阳能空调系统^[5], 采用两级溴化锂吸收式制冷机, 标志着我国太阳能热利用技术上上了一个新台阶, 运行数据表明系统性能 COP 在 0.45 左右。多级太阳能吸收式制冷是进一步提高 COP 和减少加热功率的制冷系统, 表 1 给出了多级太阳能溴化锂吸收式制冷系统的比较。



1.集热器/发生器/吸收器;2.冷凝器;3.蒸发器;4.储氨罐

图 1 间歇式太阳能吸收式制冷系统

Fig.1 Intermittive solar-powered absorption refrigeration system

表 1 每 kW 制冷功率下太阳能溴化锂吸收式制冷系统比较

Table 1 Solar-powered LBr/H₂O absorption refrigeration system (per 1 kW cooling capacity)

类型	COP	热源温度 /℃	集热器类型	所需加热功率 /kW	所需集热器面积 /m ²
单级	0.7	85	平板、真空管	1.43	7.48
两级	1.2	130	真空管	0.83	5.07
三级	1.7	220	聚光型	0.59	4.49

溴化锂吸收式制冷机存在易结晶、腐蚀性强、蒸发温度在 0°C 以上的缺点, 但 COP 比氨水吸收式要高。而且氨水吸收式制冷工作压力高, 具有一定的危险性, 且氨有毒, 要防止泄漏到环境大气中, 同时系统还要精馏装置, 但可以得到很低的蒸发温度。总体来说吸收式制冷技术相对比较成熟, 但由于初投资大, 一般应用于大型的中央空调场所。

1.1.2 太阳能吸附式制冷

自 19 世纪中叶 Faraday 提出利用吸附原理进行制冷的构想、20 年代实现吸附制冷的初步应用, 但因为相比于压缩制冷效率低、初投资高而停滞, 一直到 70 年代中期因石油危机导致太阳能应用研究升温, 采用太阳能驱动吸附制冷装置作为利用太阳能的有效方式, 其研究随之展开。上海交通大学在此领域做出了大量深入的研究。其基本原理是以多孔性固体作为吸附剂, 以某种气体作为制冷剂, 形成吸附制冷工质对, 固体吸附剂吸附制冷剂气体, 使得制冷剂液体不断蒸发制冷, 固体吸附剂吸附饱和之后通过太阳能加热解吸。1988 年美国沸石动力公司研制高性能的沸石/水回热吸附制冷装置, 采用两床循环可回收 $70\%\sim 80\%$ 吸附热, COP 达 1.2, COA 达 1.8 以上; 1992 年英国 Critoph^[6] 研制活性炭/氨对流热波吸附制冷机, 理论 COA 达 1.9, 供热量达 $1\sim 3\text{ kW}$; 1993 年法国 Douss 研制沸石/水-活性炭/甲醇复叠吸附制冷机样机试验

结果 COP 为 1.6 COA 为 1.78 回热率达 57%; 1996 年美国 Miles^[7] 研制了天然气直燃活性炭/氨热波型热泵, 季节性能指数 COP 达 0.76 COA 达 1.21; 1998 年上海交通大学开发了两床回热活性炭/甲醇吸附空调, COP 达 0.4 以上, COA 达 1.2 以上。

太阳能吸附式制冷根据制冷系统的运行方式一般可分为连续式制冷系统和间歇式制冷系统。目前吸附式制冷主要集中在吸附-制冷工质对性能、吸附床的传热传质强化、吸附过程机理分析等方面的研究^[8]。吸附制冷工质对主要是: 活性炭-甲醇、分子筛-水、分子筛-氨、硅胶-水、活性炭纤维-甲醇、氯化钙-氨、氯化锶-氨等等。从目前的研究看来, 太阳能固体吸附制冷需要解决的关键性问题有: 吸附剂/集热器白天的高效集热和夜间的有效散热之间的矛盾; 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; 如何将夜间所制的冷量有效地储存到白天使用。

太阳能固体吸附式制冷技术存在导热系数低、传热效果差、解析周期长、单位质量吸附剂制冷功率小、设备庞大、系统热量利用率不高、性能系数低、难以长期保证系统的高真空度等缺点。但固体吸附式制冷有一些自身的优势: 结构简单、无运动部件、无噪音、无污染、运行稳定、不存在结晶问题、可靠性高, 特别是还能适用于一些振动或者旋转场所。

1. 1. 3 太阳能除湿蒸发冷却空调系统

太阳能除湿蒸发冷却制冷方式分为固体除湿蒸发冷却和液体除湿蒸发冷却两种。由于固体除湿存在系统庞大、再生温度高、系统相对比较复杂等缺点, 溶液除湿蒸发冷却制冷越来越受到重视, 得到了广泛的研究, 清华大学、东南大学等高校分别在此领域进行了比较深入的研究。

溶液除湿蒸发冷却空调系统利用溶液除湿剂对湿空气进行除湿干燥, 然后将这部分空气送入直接蒸发冷却器产生冷水或者温度较低的湿空气。一种制取冷冻水的流程如图 2 所示。常用的除湿剂有氯化锂、氯化钙、溴化锂及它们的混合物。溶液再生温度通常在 55~75℃, 能较好地利用太阳能作为系统主要驱动能源, 太阳能驱动的方案除湿蒸发冷却空调系统的热力系数可达到 0.7, 是一种具有节能和环保双重优势的新型制冷空调方法^[9]。溶液除湿蒸发冷却空调系统跟吸收式制冷系统一样, 都是利用溶液浓度的变化来制取冷量, 但相对于吸收式制冷方式, 溶液除湿蒸发冷却系统有着显著的优势: (1) 需要的驱动热源温度低, 一般 55~75℃均能满足系统运行要求, 能有效地利用如太阳能、工业余热、废气余热等低品位热源; (2) 空调系统所有装置设备均在大气压环境下运行, 无真空密封要求; (3) 系统主要部件少, 结构简单; (4) 系统风量大, 温湿度容易控制调节, 新风量大, 空气品质好。

鉴于太阳能具有不连续性的特点, 必须配备一定的辅助热源或者通过蓄能技术来保证系统可靠连续地运行, 而溶液除湿蒸发冷却空调系统能够实现一种溶液除湿潜能蓄能方式, 在一定的情况下, 使得空气的潜热和显热相互转化。此蓄能方式具有蓄能密度大, 蓄能密度高达 3 000 MJ/m³, 蓄能方式简单, 常温保存, 与系统耦合性强等特点。目前主要集中在除湿剂包括混合溶液除湿剂性能、除湿器再生器的设计与传热传质强化、系统结构流程合理设计、溶液独立除湿空调系统等方面的研究, 如何解决除湿剂对设备的腐蚀性和强化传热传质过程使得设备小型化是将溶液除湿蒸发冷却空调推广的关键性技术。

1. 1. 4 太阳能喷射式制冷

太阳能喷射式制冷是利用制冷剂经太阳能集热器产生一定压力的蒸汽, 再通过喷嘴喷射制冷。该系统一般分为两个循环: 动力循环和制冷循环。制冷剂在集热器中汽化、增压, 产生饱和蒸汽, 进入喷射器, 经喷嘴高速喷出并膨胀, 在喷嘴附近产生真空, 将蒸发器中的低压蒸汽吸入喷射器, 经过喷射器的混和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, 完成制冷循环。

喷射式制冷系统和吸收式相比具有结构简单、运行稳定可靠等优点, 但其致命的弱点是性能系数 COP 值太低。例如以氟里昂 R12 为喷射制冷剂, 热源温度为 80℃, 冷凝温度为 40℃, 蒸发温度为 5℃, 喷射系数为 0.2 时, 工况系数 COP 为 0.15 针对这一弱点, 研究者提出了电能辅助和其他制冷方式相结合等方

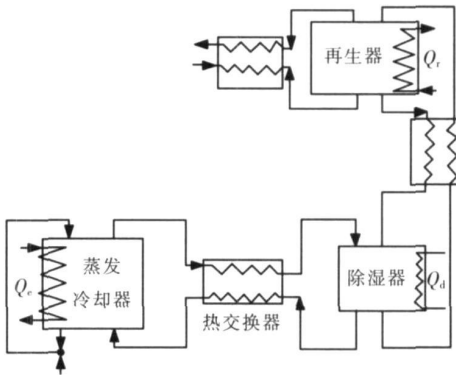


图 2 溶液除湿蒸发冷却系统
Fig.2 Liquid desiccant evaporative cooling system

案来提高系统的 COP 值. 1996 年 Riffat 提出一种热管 - 喷射器复合制冷装置的原理性结构, 由太阳能或者太阳能和燃气联合驱动, 其特征是系统中存在一毛细泵, 该毛细泵用于使得一部分冷凝液进入发生器^[10]. 东南大学^[11]对该系统进行了一定的数值模拟研究, 论证了该系统的可行性. 2004 年, 天津大学^[12]在二元非共沸工质的太阳能喷射式制冷空调系统方面进行了理论和实验研究, 得到了较高的寿命期内性能系数.

针对以上各种太阳能制冷空调技术, 图 3 和图 4 是对其在不同热源温度和冷却温度下的系统性能比较.

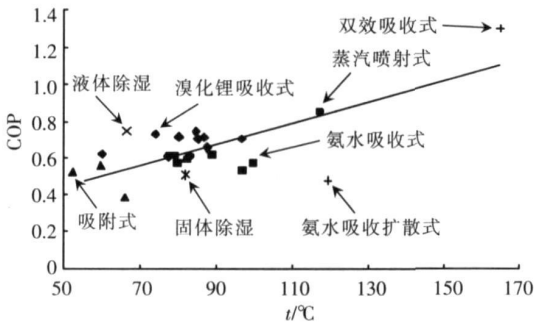


图 3 不同热源温度下系统性能特征

Fig.3 The COP at different heating temperatures

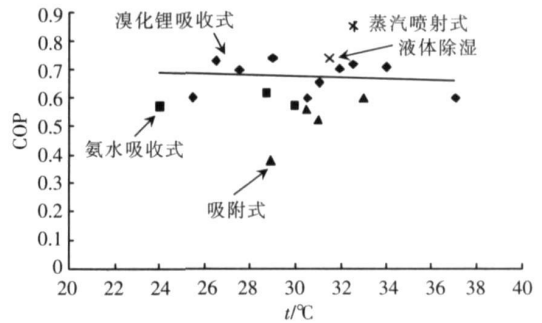


图 4 不同冷却温度下系统性能特征

Fig.4 The COP at different cooling temperatures

1.2 光电转化方式制冷

光电转化方式制冷就是先将太阳能转化为电能, 然后利用电能驱动传统的制冷空调系统完成制冷循环实现制冷. 光伏发电是应用半导体器件将太阳光能转换为电能, 目前发电成本比起煤电和水电要高一些, 但是具有安全可靠、无噪声、无污染、无需燃料、无机械转动部件等优点, 并且不受地域限制, 规模大小很灵活, 与建筑结合方便, 建站周期短, 故障率低, 维护简便. 如今正在使用的光伏发电系统中的大部分设备还处于较为原始的阶段, 较低的制造技术和应用研究水平已成为制约太阳能发电技术应用的瓶颈. 截止到 2002 年年底, 世界太阳能光伏发电系统的总装机容量达到 2 200 MW, 国内外分别有相应的示范性工程. 随着光电转化技术的发展, 光电转化驱动传统制冷空调系统会将来可能会有一定的应用比例. 光电转化半导体制冷由于光伏转化效率和半导体制冷性能系数很低的瓶颈问题, 在此方面的应用短期内不会有很好的改善, 也很少人从事这方面的研究. 2004 年, 叶继涛^[13]等人对太阳能半导体制冷结露法空气取水器进行了一定的理论研究, 适合于沙漠地区中制取淡水, 理论表明具有一定的可行性和应用前景.

1.3 光化转换方式制冷

光化转换是将太阳能转化为化学能, 利用化学反应进行制冷或者供热. 以太阳能等低品位热源驱动的化学热泵系统, 既节能降耗, 又绿色环保, 并且太阳能化学储能密度大, 是一般显热储能的 50 倍, 是潜热储能的 10 倍, 还能常温储存. 太阳能热泵主要有 3 种利用形式: 利用太阳能驱动化学热泵以实现升温、贮能; 利用太阳能和其它废热驱动化学热泵来提高能量品位; 太阳能、化学热泵和其它废热三者整合用以升温、贮能. 化学热泵工质对一般有金属卤化盐和氨、金属氧化物和水、金属氧化物和二氧化碳、金属氢化物和氢、丙酮和氢、环己烷和氢等. 有关研究表明, 系统制冷 COP 在 0.5 左右, 供热 COP 在 1.5~1.6 之间.

2 太阳能制冷空调性能特征及现阶段的局限性

太阳能具有诸多优点的同时也存在自身的局限性, 因而要进一步加强研究开发, 努力在推广应用过程中逐步解决这些问题:

(1) 虽然太阳能制冷空调可以显著减少常规能源的消耗, 大幅度降低运行费用, 但由于现有太阳能集热器的价格较高, 造成太阳能初投资偏高, 应当坚持不懈地降低现有太阳能集热器的成本.

(2) 虽然太阳能制冷空调可以无偿利用太阳能资源, 但由于自然条件下的太阳能辐照密度不高, 使得太阳能集热器采光面积与空调建筑面积配比受到限制, 目前只适用于楼层不多的建筑. 加紧研制可产生水蒸气的中温太阳能集热器, 以便与蒸汽型吸收式制冷机结合, 是解决此矛盾的有效途径.

(3) 虽然太阳能制冷空调开始进入实用化示范阶段, 但都是较大型的吸收式制冷机, 用户不多, 开发各种小型的太阳能制冷空调机, 以便与太阳能集热器配套, 逐步进入千家万户.

3 结论

太阳能制冷空调系统为人类生产、生活提供热量和冷量,是未来制冷空调技术的一个极其重要的发展方向,符合世界当前可持续性发展的战略思想.特别是当前传统的制冷方式带来的能源问题和环境问题,给太阳能空调的发展带来了良好的契机.经过几十年的发展,某些太阳能空调已经迈入实用化阶段,要针对不同的实际条件,大力、因地制宜地发展太阳能空调.相信在政府和社会的大力支持下,太阳能空调技术一定有广阔的发展前景.

[参考文献] (References)

- [1] 李金伟, 秦玉涛, 马利军, 等. 浅析太阳能空调技术的开发与应用 [J]. 中州大学学报, 2003, 20(4): 111-112
LI Jinwei, Qin Yutao, Ma Lijun, et al. An analysis of application and development of solar air-condition [J]. Journal of Zhongzhou University, 2003, 20(4): 111-112 (in Chinese)
- [2] 罗运俊. 太阳能利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 219-220
Luo Yunjun. The Technology of Solar Energy Utilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 219-220 (in Chinese)
- [3] 周建戎, 潘毅群. 太阳能空调系统综述 [J]. 制冷, 2002, 21(4): 60-63
Zhou Jianrong, Pan Yiqun. Summary of solar air conditioning system [J]. Refrigeration, 2002, 21(4): 60-63 (in Chinese)
- [4] 李军, 朱冬生, 赵朝晖. 太阳能吸附式空调的研究与展望 [J]. 流体机械, 2004, 32(7): 61-64
Li Jun, Zhu Dongsheng, Zhao Chaohui. Research and expectation on solar energy adsorption air condition [J]. Fluid Machinery, 2004, 32(7): 61-64 (in Chinese)
- [5] Fbrides, Tassou, Kalogirou, et al. Review of solar and low energy cooling technologies for buildings [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2002(6): 557-572
- [6] Cripps R E. An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling [J]. Renewable Energy, 1994, 5(1/4): 502-508
- [7] Miles D J, Sanborn DM, Nowakowski G A, et al. Gas fired sorption heat pump development [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1993, 13(4): 347-351.
- [8] 周水洪. 太阳能在制冷空调中的应用及关键技术 [J]. 能源研究与利用, 2004(3): 32-34
Zhou Shuihong. The applications and the key technologies of solar energy in refrigeration and air-conditioning [J]. Energy Research and Utilization, 2004(3): 32-34 (in Chinese)
- [9] 殷勇高, 张小松, 李应林, 等. 蓄能型太阳能溶液除湿蒸发冷却空调系统研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 73-76
Yin Yonggao, Zhang Xiaosong, Li Yinglin, et al. Investigation of solar powered liquor desiccant evaporation cooling air conditioning system with energy storage [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(1): 73-76 (in Chinese)
- [10] Riffat S B, Zhao X. A novel hybrid heat-pipe solar collector/CHP system-Part II: theoretical and experimental investigations [J]. Renewable Energy, 2004, 29(12): 1965-1990
- [11] 施明恒, 王兴春, 蔡辉. 太阳能毛细驱动喷射式空调器性能模拟研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 69-72
Shi Mingheng, Wang Xingchun, Cai Hui. Numerical simulation of the performance of a capillary thermal driven ejector refrigerator [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(1): 69-72 (in Chinese)
- [12] 张于峰, 田琦, 赵薇, 等. 二元工质太阳能喷射制冷空调系统集成热器 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(10): 901-905
Zhang Yufeng, Tian Qi, Zhao Wei, et al. Collectors of solar ejector cooling system using non-azeotropic binary mixture refrigerant [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(10): 901-905 (in Chinese)
- [13] 叶继涛, 谢安国, 陈儿同. 太阳能半导体制冷结露法空气取水器的研究 [J]. 鞍山科技大学学报, 2004, 27(4): 282-286
Ye Jitao, Xie Anguo, Chen Ertong. Study on using solar-energy semiconductor refrigeration to dewater from air [J]. Journal of Anshan University of Science and Technology, 2004, 27(4): 282-286 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]