

# 基于太阳能余热利用下的吸收式制冷系统的 可行性研究

朱益秀, 夏 焱, 戴春祥

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 对南京某商用建筑真空热管太阳能热水系统进行相关参数测试, 在平均辐照强度约为  $614.2 \text{ W/m}^2$  的照射条件下, 集热器平均集热效率可达 45%,  $8 \text{ m}^3$  蓄热水箱经过 4 h 的加热后, 共吸收 653 MJ 的热量, 水箱温度从  $63.8 \text{ }^\circ\text{C}$  升高至  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  以上, 达到了单效溴化锂吸收式制冷机组的驱动热源温度. 实验表明, 该系统采用吸收式制冷来利用太阳能余热的技术方案具有可行性. 在此基础上, 利用 TRNSYS 软件搭建溴化锂吸收式制冷系统模型, 预测分析了吸收式制冷系统在实验当日辐照条件下的运行性能, 结果表明该吸收式制冷系统在无辅助热源条件下, 可稳定运行 5 h, 系统性能系数 COP 的平均值为 0.66, 平均制冷量为  $9.41 \text{ kW}$ , 对其他地区将太阳能余热用于吸收式制冷的可行性研究具有一定的参考价值.

**[关键词]** 太阳能热水系统, 水箱温度, TRNSYS, 吸收式制冷系统, 性能指标

**[中图分类号]** TU822 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2022)03-0009-06

## Feasibility Study of Absorption Refrigeration System Based on Solar Energy Waste Heat Utilization

Zhu Yixiu, Xia Yi, Dai Chunxiang

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The relevant parameters of a vacuum heat pipe solar water heating system in a commercial building in Nanjing are tested. Under the average irradiation intensity of  $614.2 \text{ W/m}^2$ , the average heat collection efficiency of the collector can reach 45%. The  $8 \text{ m}^3$  hot water storage tank absorbs a total of 653 MJ Heat, after being heated for 4 hours, the temperature of the water tank increases from  $63.8 \text{ }^\circ\text{C}$  to over  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , reaching the driving heat source temperature of a single-effect lithium bromide absorption refrigeration unit, which proves the feasibility of the system using absorption refrigeration to utilize solar waste heat. On this basis, the TRNSYS software is used to build a simulation model of the lithium bromide absorption refrigeration system, and predict and analyze the operation performance of the absorption refrigeration system under the irradiation conditions on the day of the experiment. The results show that the absorption refrigeration system can run stably for 5 hours without an auxiliary heat source, that the average value of the system performance coefficient COP is 0.66, and that the average cooling capacity is  $9.41 \text{ kW}$ . It has certain reference value for the feasibility study of solar energy waste heat used in absorption refrigeration in other regions.

**Key words:** solar water heating system, water tank temperature, TRNSYS, absorption refrigeration system, performance index

太阳能热水系统在夏季运行时, 由于基础水温较高, 且辐照强度较大, 系统容易处于过热状态而加速设备老化, 所以应采取一定技术手段来充分利用太阳能集热系统多余的热量<sup>[1]</sup>. 吸收式制冷是由热能驱动, 所以被认为是利用太阳能热能来实现制冷的最佳选择<sup>[2-3]</sup>. 太阳能吸收式制冷技术以太阳能为驱动热源, 不仅对降低建筑能耗、减少环境污染具有重大意义<sup>[4-7]</sup>, 而且在有制冷需求的夏季, 太阳能辐照越强、天气越炎热, 虽然建筑空调负荷在变大, 但太阳能吸收式制冷的制冷能力也在增加, 两者变化具有良好的匹配性, 可缓解空调用电高峰期, 因此有巨大的市场应用前景<sup>[8-9]</sup>.

收稿日期: 2022-03-05.

通讯作者: 夏焱, 博士, 副教授, 研究方向: 太阳能管热应用及吸收式制冷技术. E-mail: njnuxiayi@163.com

国内外学者对太阳能热利用下的吸收式制冷系统进行了大量的应用研究. 如 Greco 等<sup>[10]</sup>对坐落在意大利那不勒斯城市的一栋面积约为 2 500 m<sup>2</sup> 的办公建筑利用 TRNSYS 建立基于真空热管式集热器的太阳能吸收式制冷系统模型并进行动态研究,结果表明该制冷系统的正常运行能够满足此办公建筑的制冷需求. Rosiek 等<sup>[11]</sup>在西班牙的某大楼中设计了一套以太阳能作为辅助热源的吸收式空调系统,对其长期运行进行分析研究,结果表明,夏季各个月份系统性能系数 COP 的平均值为 0.6,系统平均制冷量为 40 kW. 王建辉等<sup>[12]</sup>对一户农村新民居建筑的小型太阳能溴化锂吸收式制冷系统进行试验研究,实验结果表明,该小型太阳能溴化锂吸收式制冷系统具有良好的使用性能,节能效果十分显著. 李悦等<sup>[13]</sup>对基于辐射供冷的太阳能吸收式制冷系统进行了试验,其可以连续稳定运行 8 h,并可以满足热舒适要求.

综上所述,太阳能吸收式制冷系统运行可靠且制冷性能良好,具有极大的推广应用价值. 现研究的太阳能吸收式制冷系统大多采用太阳能全热作为驱动热源,而对于太阳能余热利用下的吸收式制冷系统的应用研究仍相对较少. 针对南京某商用建筑真空热管太阳能热水系统夏季运行时会产生过剩热量的问题,设计增加一套利用太阳能余热驱动的单效溴化锂吸收式制冷系统,并取消原热水系统中利用散热风机进行过剩热量散失的环路. 单效溴化锂吸收式制冷机组的驱动热源温度一般为 80~99 ℃<sup>[14]</sup>,为证明该系统将太阳能余热应用于吸收式制冷的可行性,本文于夏季对该太阳能热水系统进行集热器出回水温度、水箱温度以及太阳能辐照强度等参数测试,并进行相关数据分析. 在此基础上,利用 TRNSYS 搭建拟设计增加的溴化锂吸收式制冷系统仿真模型,模拟分析了在实验当日辐照条件下的吸收式制冷系统的相关运行状态参数.

1 实验系统描述

图 1 为太阳能热水系统流程图. 该项目位于南京某商用建筑内,采用了集中直接加热、封闭承压式的太阳能热水系统. 实验主要设备如图 2 所示,太阳能集热系统采用 36 组真空热管型集热器组合而成,总面积约为 124 m<sup>2</sup>,集热器安装倾角为 45°,蓄热水箱体积为 8 m<sup>3</sup>,半容积式换热水箱体积为 2 m<sup>3</sup>,辅助加热设备为燃气锅炉,实验时其处于不工作状态.

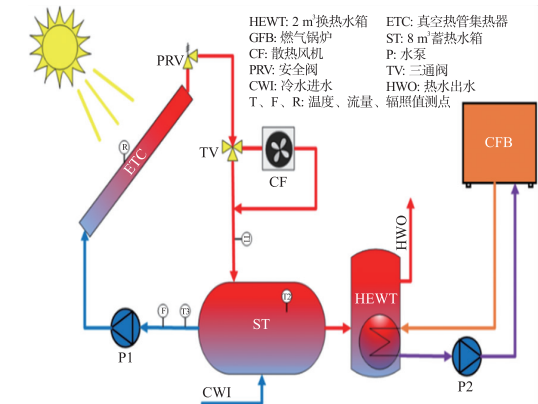


图 1 太阳能热水系统流程图

Fig. 1 Flow chart of solar water heating system



图 2 实验主要设备图

Fig. 2 The main equipment diagram of the experiment

主要测试项目和实验仪器见表 1. 选取夏季 8 月 24 日对集热器出回水温度、水箱温度、集热面板温度以及集热器的时刻辐照值等数据进行实时监测记录,太阳能热水系统集热运行监测时间为 10:00—16:30.

表 1 测试项目和实验仪器

Table 1 Test items and experimental equipment

| 测试项目    | 测量位置 | 仪器                  | 精度                      |
|---------|------|---------------------|-------------------------|
| 集热器出水温度 | T1   | 34970A 数据采集仪 T 型热电偶 | ±1 ℃                    |
| 水箱温度    | T2   | 34970A 数据采集仪 T 型热电偶 | ±1 ℃                    |
| 集热器回水温度 | T3   | 34970A 数据采集仪 T 型热电偶 | ±1 ℃                    |
| 辐照强度    | R    | TES-1333R(记录型)      | ±10 W/m <sup>2</sup>    |
| 集热循环流量  | F    | 手持式超声波流量计           | ±0.01 m <sup>3</sup> /h |

2 实验结果分析

由图 3 可知,8 月 24 日测试时间段内,太阳能辐照强度值随时间呈先上升后下降趋势,无较大波动,

太阳能辐照强度最大值为  $945.4\text{ W/m}^2$ ,最小值为  $105.8\text{ W/m}^2$ ,当天平均辐照强度值约为  $614.2\text{ W/m}^2$ ,集热器瞬时效率在 12:40 左右达到最大值为 67%,当天平均集热效率约为 45%. 由图 4 可知,集热器出回水温差高可达  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,蓄热水箱初始温度为  $63.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,经过 4 h 的加热后,水箱温度升高至  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上. 由分析可知,真空热管集热器太阳能热水系统在高温区域也有较高的集热效率,且水箱输出温度能够达到单效溴化锂吸收式制冷机组的热源驱动温度,可证明在原热水系统已满足生活热水需求温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的基础上,可以增设一套采用太阳能余热作为驱动热源的溴化锂吸收式制冷系统.

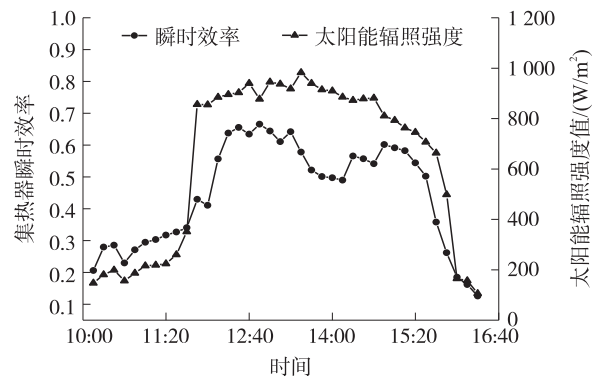


图 3 集热器瞬时效率和太阳能辐照强度  
随时间变化曲线  
Fig. 3 The curve of instantaneous efficiency of  
collector and solar radiation intensity with time

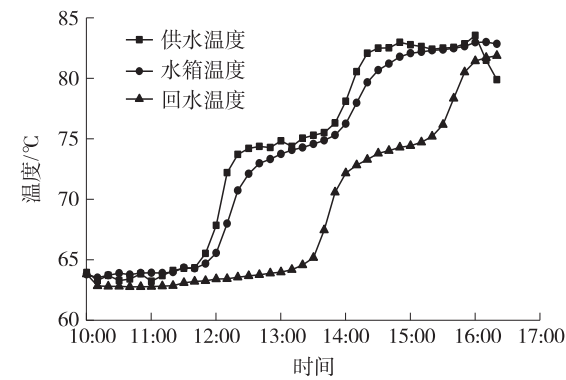


图 4 集热器出水温度、回水温度和水箱温度随时间变化曲线图  
Fig. 4 The temperature of the outlet and return water of  
the collector and the temperature of  
the tank change with time

### 3 搭建太阳能吸收式制冷系统仿真模型

瞬时系统模拟程序 Transient System Simulation Program 适用于建筑能耗、太阳能等一些能源系统进行动态模拟分析. 为分析在原太阳能热水系统基础上拟设计增加的溴化锂吸收式制冷系统的运行性能,本文以南京地区的气象数据作为天气模拟条件,选取利用 TRNSYS 软件中的真空热管集热器、分层蓄热水箱和自带外部文件的吸收式制冷机作为主要部件建立太阳能吸收式制冷系统,此系统模型主要由四个部分组成,包括太阳能集热循环系统、吸收式制冷系统、自动控制系统、在线输出系统,如图 5 所示.

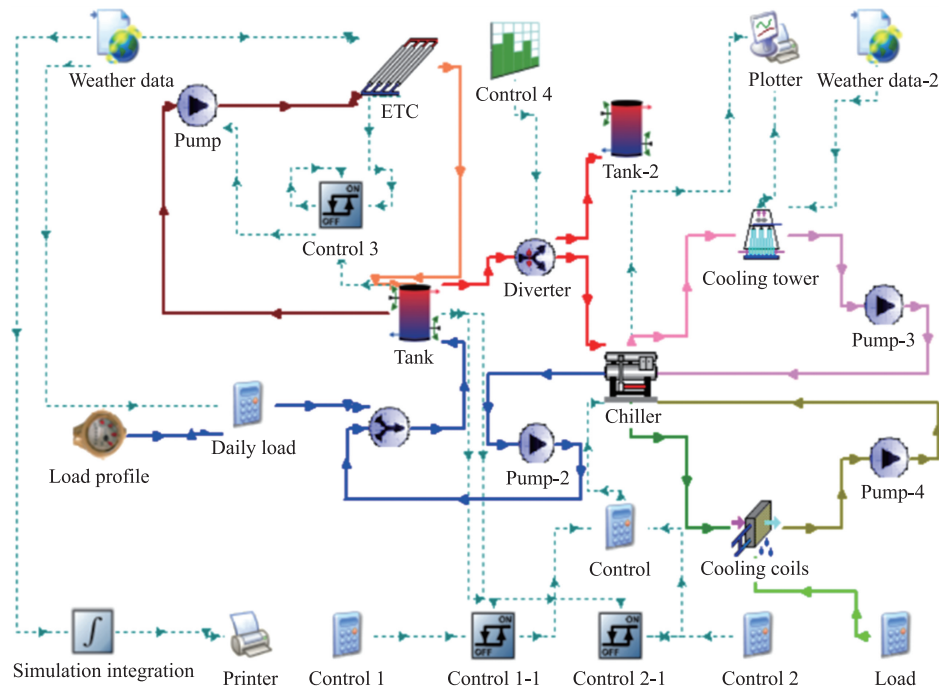


图 5 太阳能吸收式制冷系统 TRNSYS 模型图  
Fig. 5 TRNSYS model diagram of solar absorption refrigeration system

当蓄热水箱的出水温度达到 80 ℃ 时,启动吸收式制冷机. 模型中水箱的初始温度、集热循环泵流量的设置与实验测试初始值保持一致,设置仿真步长为 0.5 h,且各部件之间正确连接后,进行太阳能溴化锂吸收式制冷系统模拟仿真.

4 仿真结果分析

太阳能溴化锂吸收式制冷系统仿真模型是在整个夏季运行的,特别是在典型气象年的 6 月 1 日至 9 月 30 日,将从 Meteonorm 气象软件下载的南京典型气象年文件导入模型中的天气读取模块中,其包括全年辐照值、环境温度、自来水温度等参数,仿真得到 6 月至 9 月室外环境温度以及太阳能辐照强度变化图,如图 6 所示.

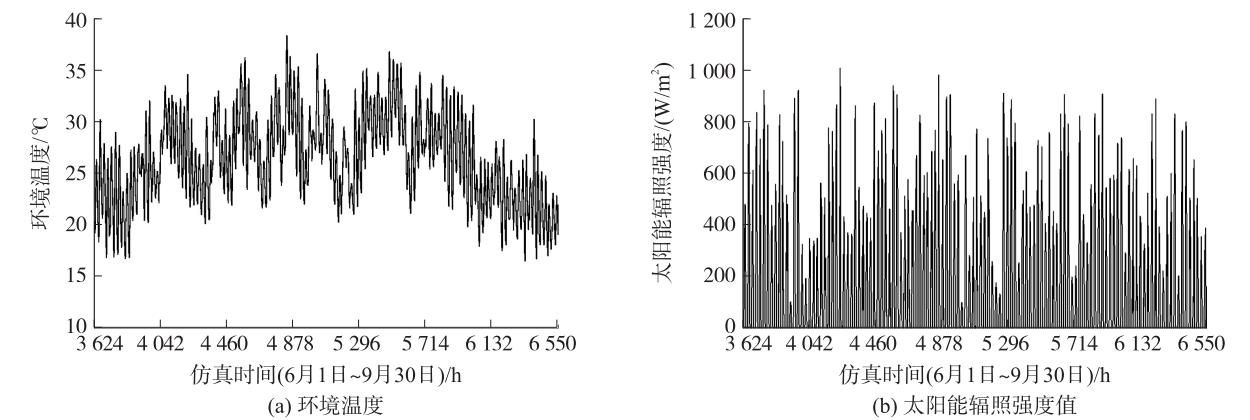


图 6 6—9 月环境温度及太阳能辐照强度值随时间变化曲线图  
Fig. 6 Curves of environmental temperature and solar radiation intensity from June to September

对仿真输出数据计算日平均太阳能辐照强度值,发现系统模型在仿真时间为 8 月 28 日(5 736~5 760 h)的平均太阳能辐照强度约为 605 W/m<sup>2</sup>,与实验值之间的误差仅有 1.5%,故将仿真时间设置为 5 736~5 760 h,模拟输出蓄热水箱出水温度、水箱得热量等参数值,并与实验测量相关数据进行对比分析. 由表 2 可知,实验当天太阳能总辐照量为 1 743 MJ 略大于模拟值的 1 718 MJ,但由于模拟时太阳能热水系统运行是理想状态,忽略了水箱、管路等热损失,使得模拟时的水箱得热量略大于实验值,不过两者误差均控制在 2% 以内. 由图 7 可知,随着太阳能辐照强度的不断增大,使得蓄热水箱平均出水温度最大值均升至 83 ℃ 左右,且两者曲线吻合良好. 由此可见,预测分析吸收式制冷系统在实验当日辐照条件下的运行性能,可直接模拟分析与测试当天辐照值非常接近的 8 月 28 日的运行参数.

表 2 实验与模拟参数对比

| Table 2 Comparison of experimental and simulation parameters |       |       | MJ |
|--|-------|-------|----|
| 总量   | 实验值   | 模拟值   |    |
| 太阳总辐照量   | 1 743 | 1 718 |    |
| 水箱得热量  | 653   | 667   |    |

将仿真时间设置为 8 月 28 日(5 736~5 760 h),模拟输出太阳能吸收式制冷系统各项参数随时间的变化情况,如图 8 所示.

由图 8(a)可知,一天中由于太阳能辐射强度逐渐增强,使得蓄热水箱温度在稳步上升,14:00 左右蓄热水箱出水温度(发生器进口温度)达到 80 ℃,吸收式制冷机组启动运行. 下午太阳能辐射强度较高,加之蓄热水箱具有良好的储能作用,使得制冷机持续运行 5 h,直至 19:00 蓄热水箱出水温度才降至 80 ℃ 以下,达到了吸收式制冷机组的最低运行温度,该机组停止运行. 机组运行期间,性能系数 COP 曲线呈下降趋势,COP 值从 0.68 降至 0.64,这是由于发生器进口温度在逐渐下降,进出口温度差从 4.58 ℃ 升至 4.69 ℃,制取相同的冷

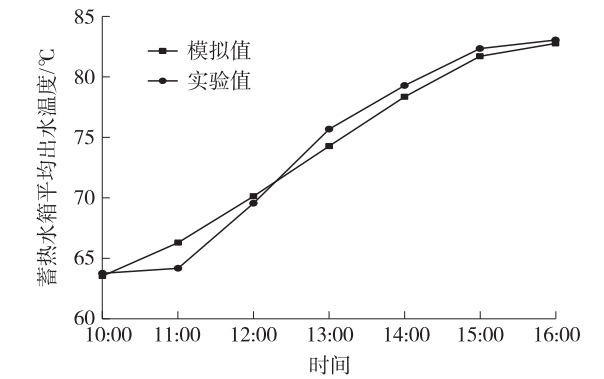


图 7 蓄热水箱平均出水温度  
Fig. 7 Average outlet temperature of hot water storage tank



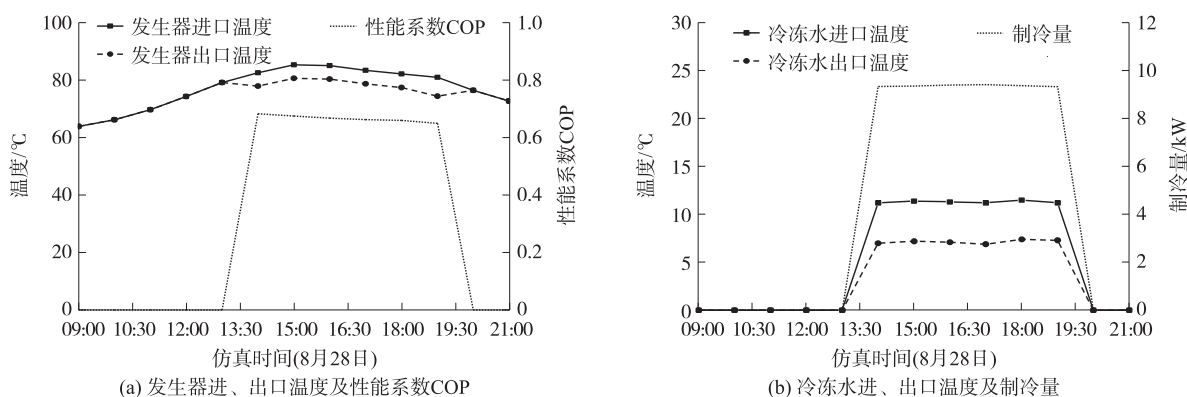


图8 太阳能吸收式制冷系统各项参数随时间的变化情况

Fig. 8 Changes of various parameters of the solar absorption refrigeration system with time

量耗费了更多的热源热量. 由图 8(b)可知,机组平均制冷量可达 9.41 kW,冷冻水进口温度约为 11.2 °C,出口温度约为 7 °C,进出口温差保持在 4.2 °C 左右,具有良好的制冷效果,冷量可储存在蓄冷水箱中,在空调需求高峰期使用,缓解电力紧张问题. 由图 9 可知,吸收式制冷机运行期间,太阳能辐照强度值在逐渐减小,使得真空热管集热器的有效得热量也在不断减小,导致 8 m<sup>3</sup> 水箱瞬时集热功率在逐渐下降,一开始水箱集热功率远大于制冷机的热水消耗功率,直至 18:00 之后,太阳能辐照强度值很小,此时水箱集热功率小于热水消耗功率,最后降为 0.

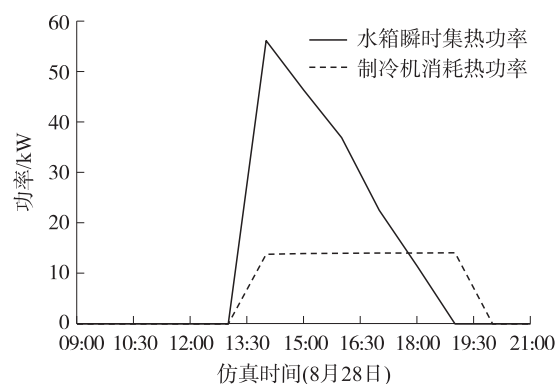


图9 水箱集热功率及制冷机消耗功率随时间变化情况

Fig. 9 Changes of the heat collecting power of the water tank and the power consumption of the refrigerator with time

## 5 结论

本文对南京某商用建筑真空热管太阳能热水系统进行相关参数测试,并对吸收式制冷系统进行了动态模拟分析,主要结论如下:

(1) 在平均辐照强度约为 614.2 W/m<sup>2</sup> 的照射条件下,8 m<sup>3</sup> 蓄热水箱经过 4 h 的加热后,水箱水温升高至 80 °C 以上,集热器平均集热效率可达 45%. 由此可见,该热水系统在高温区域也有较高的集热效率,且水箱输出温度能够达到单效溴化锂吸收式制冷机组的热源驱动温度.

(2) 在原热水系统上拟设计增加的溴化锂吸收式制冷系统具有良好的制冷性能. 其正常运行期间,性能系数 COP 平均值约为 0.66,冷冻水进出口温差保持在 4.2 °C 左右,平均制冷量可达 9.41 kW.

(3) 为保障吸收式制冷系统的连续稳定运行及提高制冷机效率,可在蓄热水箱出口与发生器进口之间加入辅助加热设备,并对该系统的集热循环泵流量、蓄热水箱体积等参数进行优化模拟研究.

(4) 该系统采用吸收式制冷来利用太阳能余热的技术方案具有可行性,有效提高了太阳能系统的综合利用率,符合国家节能减排要求,具有广阔的应用前景.

## [参考文献] (References)

- [1] 胡志鹏,刘华凯,郝占栋. 一种太阳能热辅助溴化锂吸收式制冷机组空调系统的应用研究[J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(4): 477-480.
- [2] BELLOS E, TZIVANIDIS C. Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 809-821.
- [3] SHIRAZI A, TAYLOR R A, WHITE S D, et al. A systematic parametric study and feasibility assessment of solar-assisted single-effect, double-effect, and triple-effect absorption chillers for heating and cooling applications[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 114: 258-277.

- [4] CASCALES J, GARCÍA F, IZQUIERDO J, et al. Modelling an absorption system assisted by solar energy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(1): 112–118.
- [5] 李靖, 朱川生, 李华山, 等. 采用不同集热器的太阳能吸收式制冷系统经济性分析[J]. *新能源进展*, 2018, 6(5): 379–386.
- [6] CHEN J F, DAI Y J, WANG R Z. Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings[J]. *Solar Energy*, 2017, 151: 110–118.
- [7] FRANCIS A, IAN K, MICHAEL R. Design and experimental testing of the performance of an outdoor LiBr/H<sub>2</sub>O solar thermal absorption cooling system with a cold store[J]. *Solar Energy*, 2010, 11(9): 735–744.
- [8] 马瑞, 谢应明, 庄雅琪. 小型太阳能吸收式空调系统的仿真研究[J]. *热能动力工程*, 2019, 34(2): 132–136, 156.
- [9] ANDREA B, FRANCIS A. Modeling and simulation of a small-scale solar-powered absorption cooling system in three cities with a tropical climate[J]. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 2020, 15(1): 1–16.
- [10] GRECO A, MASSELLI C. Dynamic investigation of a solar absorption cooling system in naples[J]. *Tecnica Italiana—Italian Journal of Engineering Science*, 2020, 64(2): 277–283.
- [11] ROSIEK S, BATLLES F J. Integration of the solar thermal energy in the construction: Analysis of the solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(6): 1423–1431.
- [12] 王建辉, 刘自强, 周泉, 等. 小型太阳能溴化锂吸收式制冷系统实验研究[J]. *中国高新技术企业*, 2016, (3): 13–14.
- [13] 李悦, 翟晓强, 尹亚领, 等. 基于辐射供冷的太阳能吸收式空调试验研究[J]. *可再生能源*, 2012, 30(6): 5–8.
- [14] 赵明海, 洪仁龙, 陶海臣, 等. 溴化锂吸收式制冷机在太阳能领域的应用与前景[J]. *流体机械*, 2014, 42(6): 84–86.

[责任编辑: 陈 庆]