

文章编号:0253-4339(2016)01-0065-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.01.065

低温驱动沸石-水吸附式制冷机的性能研究

王南南^{1,2} 刘再冲^{1,3} 邓立生¹ 何兆红¹ 窪田光宏⁴ 大坂侑吾⁵ 黄宏宇¹ 陈颖³

(1 中国科学院广州能源研究所 广州 510640;2 中国科学院大学 北京 100049;

3 广东工业大学材料与能源学院 广州 510006;4 日本名古屋大学 名古屋 4648603;5 日本金泽大学 金泽 9201192)

摘要 本文研究的合成沸石-水吸附式制冷机采用 FAMZ01 沸石作为吸附剂,吸附床选择翅片涂抹式吸附床,通过实验研究该制冷机的制冷功率、制冷性能系数(COP)随热源温度、冷冻水进口温度的变化规律。结果表明,该吸附式制冷机在 55 °C 的热源下就可以稳定输出制冷量,并在驱动热源为 65 °C 左右展现其较佳的性能。

关键词 吸附式制冷机;涂抹式吸附床;COP;热源温度

中图分类号:TB651;TB61+1

文献标识码:A

Experimental Investigation on a Zeolite-water Adsorption Chiller Driven by Low Heat Source

Wang Nannan^{1,2} Liu Zaichong^{1,3} Deng Lisheng¹ He Zhaohong¹ KUBOTA Mitsuhiro⁴
OSAKA Yugo⁵ Huang Hongyu¹ Chen Ying³

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou, 510640, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China; 4. Nagoya University, Nagoya, 4648603, Japan; 5. Kanazawa University, Kanazawa, 9201192, Japan)

Abstract A novel type of adsorption chiller with synthetic zeolite-water was proposed, in which the zeolite FAMZ01 was chosen as the adsorbent and coated adsorber with fin as adsorber. The effects of heat source temperature and chilled water inlet temperature on cooling power and coefficient of performance (COP) were obtained experimentally. The results showed that the adsorption chiller can supply the chilled water steadily at driven heat source temperature of 55 °C, and is with better performance at the driving heat source temperature about 65 °C.

Keywords adsorption chiller; coated adsorber; coefficient of performance; heat source temperature

随着能源的紧缺,低温余热、废热的开发利用成为绿色能源发展的趋势。吸附式制冷利用低品位热能作为驱动热源,采用自然环保工质作为制冷剂,因具有无 CFCs,ODP 和 GWP 为零、抗震性能好等优点而备受关注^[1-4]。当再生温度低于 100 °C 时,硅胶-水被认为是较为理想的吸附工质对^[5]。Saha B B 等^[6-7]对多级硅胶-水吸附式制冷机进行研究,实验结果表明二级系统能在热源为 55 °C,冷却水为 30 °C 下稳定运行,COP 为 0.36。Alam K C A 等^[8]对四床硅胶-水吸附式制冷机进行模拟,结果显示在热源低于 70 °C 时,系统 COP 高于两床的吸附制冷机,当热源大于 60 °C 时,系统 COP 优于二级的吸附制冷机。国内的王如竹团队^[9-12]对硅胶-水吸附制冷机进行深入研究,研发了多代硅胶-水吸附制冷样机,其中研发

的双床回热回质硅胶-水吸附式制冷机在工况热源、冷却水、冷冻水入口温度分别为 85 °C、30.8 °C、14 °C 时,制冷功率为 6.6 kW,COP 为 3.71,SCP 为 63.4 W/kg;研发的无真空阀门的硅胶-水吸附制冷机在热源、冷却水、冷冻水入口温度分别为 82.0 °C、31.6 °C、12.3 °C 时,制冷能力和 COP 分别为 9.6 kW 和 0.49。硅胶-水吸附制冷机对于 100 °C 以下的热源有着巨大优势,但硅胶-水吸附工质对的循环有效吸附量较小,系统循环周期较长,造成系统的 SCP 过低,系统体积庞大,影响了制冷机的推广应用。

为此,本文通过一套采用高效吸附剂合成沸石-水吸附式制冷机,实验研究该制冷机在驱动热源为 55~80 °C 下的制冷特性。

1 制冷机系统

1.1 高效合成沸石吸附剂

高效合成沸石吸附剂 FAM Z01 是日本研发的低温高效吸附剂,对于再生温度 50 ~ 80 °C 下循环的有效吸附量很大,并且在 20 万次反复吸附、脱附后性能基本不发生变化^[13]。该材料的水蒸气吸附等温线如图 1^[14]所示,与其他吸附剂相比,其水蒸气吸附等温线呈 S 型,能产生较大的循环有效吸附量。Kim Y D 等^[15]研究了合成沸石 FAM Z01 在 70 °C 下脱附、30 °C 下吸附过程的水蒸气循环有效吸附量,并与三种商用硅胶进行对比,发现在吸附式制冷机实际运行工况的相对压力下(吸附过程为 0.29,脱附过程为 0.2),循环有效吸附量为 0.167 g/g(吸附剂),分别为 A5BW 硅胶的 5 倍、A 型硅胶的 3 倍、RD 硅胶的 2 倍,充分展现其在吸附式制冷机小型化方面的潜力。吸附剂颗粒在扫描电镜下的形状如图 2 所示,颗粒为条状六棱柱。

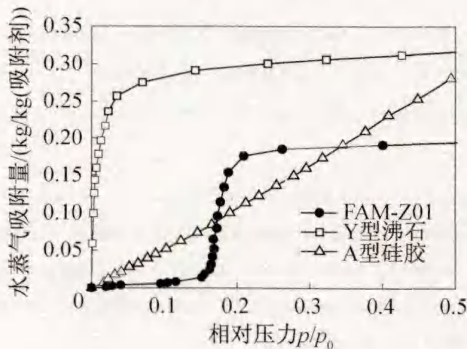


图 1 25 °C 下多种材料水蒸气吸附等温线^[14]

Fig.1 Water vapor adsorption isotherms of adsorption materials at 25 °C

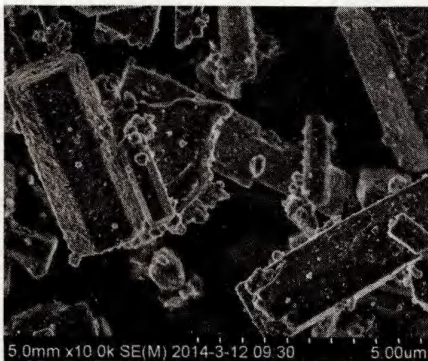


图 2 FAM Z01 沸石的扫描电镜图

Fig.2 The SEM picture of FAM Z01 zeolite

1.2 涂抹式吸附床结构

涂抹式吸附床采用翅片换热器结构。与填充式

吸附床相比,涂抹式吸附床减小吸附剂与吸附床、吸附剂间的接触热阻和,增强吸附床的传热效果^[16-18],从而缩短系统的循环时间。

图 3 为涂抹式吸附床的吸附单元实物图,主要结构参数见表 1。实验样机采用双床结构,每个吸附床都配备 6 个这样的吸附单元,整个吸附制冷机涂抹吸附剂的质量为 26.4 kg。

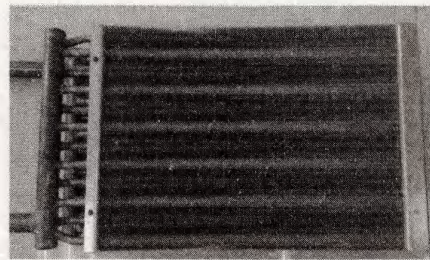


图 3 涂抹式吸附单元实物图

Fig.3 The picture of coated adsorbent bed unit

表 1 吸附单元结构主要参数

Tab.1 Structure parameters of coated adsorbent bed unit

类型	数量
整体尺寸/mm	670 × 264 × 116
铜管分布	错排,12 根 × 4 层
翅片数量/片	209
翅片间距/mm	1.8
吸附剂质量/kg	2.2

1.3 实验样机的结构与工作原理

吸附式制冷机的结构示意图如图 4 所示,实物图如图 5 所示,结构尺寸为长 1.4 m、宽 1.1 m、高 2.1 m。上部为管壳式冷凝器,中间为两个涂抹式吸附床,下部为喷淋式蒸发器。

工作原理:制冷机采用两个涂抹式吸附床交替吸附、脱附,连续输出冷量,两个状态如下:

1) 吸附床 1 通入热源进行脱附时,与冷凝器相连的真空阀门 V3 打开,进行脱附再生;吸附床 2 与蒸发器的真空阀门 V2 打开进行吸附制冷,冷却水先进入吸附床 2 带走吸附热后再进入冷凝器带走冷凝热。

2) 当吸附床 1 脱附完成后,热源与冷却水流路的四通换向阀 1、2 进行切换,同时与冷凝器、吸附床、蒸发器相连的真空阀门也进行切换。状态变为吸附床 1 与蒸发器相连的真空阀门 V1 打开,进行吸附制冷,冷却水进入吸附床 1 带走吸附热后进入冷凝器管路;吸附床 2 与冷凝器相连真空阀 V4 打开,热源进

入吸附床 2 进行脱附再生。如此切换循环,连续输出冷量。

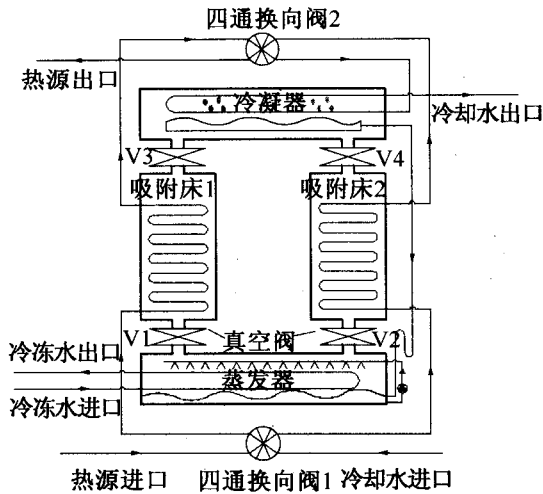
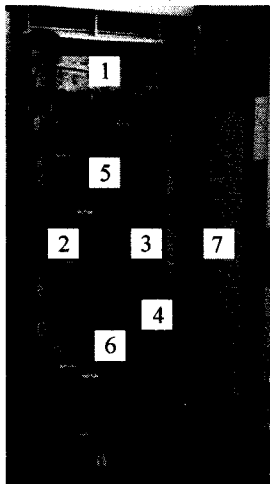


图 4 吸附式制冷机结构示意图

Fig. 4 The schematic diagram of adsorption chiller



1 冷凝器 2 吸附床 1 3 吸附床 2 4 蒸发器
5 四通换向阀 2 6 四通换向阀 1 7 控制箱

图 5 吸附式制冷机实物图

Fig. 5 The picture of the adsorption chiller

2 实验

2.1 测试系统的搭建

为测试该制冷机在不同驱动热源下的性能,本研究搭建测试实验台。热源采用 0.4 m³ 的恒温水箱,内置 12 组 3 kW 的电热丝,智能控制水温(精度为 ±0.5 °C);冷冻水的供给采用 0.2 m³ 恒温水箱,内置 4 组 3 kW 电热丝,智能控制水温(精度为 ±0.5 °C);另外配备一个冷却塔,向环境排放冷却水的热量。在该制冷机的驱动热源,冷冻水及冷却水的进出口布置

热电阻温度传感器 PT100(精度等级 A 级),采用智能涡轮流量计(精度 1% F S)来测量流路的流量,具体位置如测试系统图 6 所示,采用巡检仪及电脑软件来采集实验数据,数据采集间隔时间为 10 s。

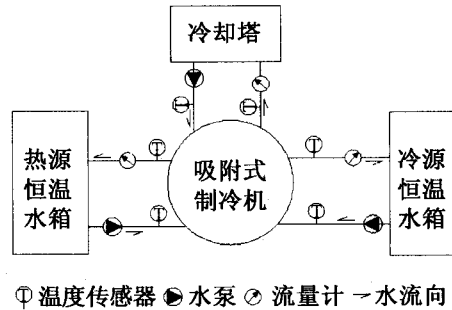


图 6 实验测试系统简图

Fig. 6 Schematic diagram of the testing system

2.2 实验数据分析

该系统的平均制冷功率是根据制冷机稳定运行后,取 5 个周期的制冷功率的平均值。其计算公式如下:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n c_p m_{\text{chilled}} (T_{i,\text{chilled in}} - T_{i,\text{chilled out}})}{t} \quad (1)$$

式中: c_p 为水的定压比热容, J/(kg·K); m_{chilled} 为冷冻水质量流量, kg/s; t 为运行的时间, s; n 为采集数据的组数。

COP 是系统的制冷性能系数,同样采用稳定运行后取 5 个周期进行计算,公式如下:

$$\text{COP} = \frac{\sum_{i=1}^n c_p m_{\text{chilled}} (T_{i,\text{chilled in}} - T_{i,\text{chilled out}})}{\sum_{i=1}^n c_p m_{\text{hot}} (T_{i,\text{hot in}} - T_{i,\text{hot out}})} \quad (2)$$

式中: m_{hot} 为驱动热源水的质量流量, kg/min; SCP 为单位质量吸附剂的制冷功率,衡量吸附系统的重要指标, W/kg, 计算公式如下:

$$\text{SCP} = \frac{P}{m_{\text{ad}}} \quad (3)$$

式中: m_{ad} 为吸附床吸附剂总质量, kg。

吸附式制冷机正常运行一段时间后,调节冷冻水进口温度为 16 ± 0.5 °C, 流量为 22.7 L/min; 热源进口温度为 65 ± 0.5 °C 时, 流量为 58.5 L/min; 冷却水进口平均温度为 24.5 °C, 流量为 100 L/min; 设置的切换周期为 240 s。观察制冷机的瞬时制冷功率变化如图 7 所示。

从图 7 发现该制冷机的瞬时制冷功率变化幅度为 5.8 ~ 9.8 kW。计算其平均制冷功率为 8.2 kW,

系统的 COP 为 0.43, 制冷机的重复性好, 能稳定运行, 循环周期短。

该制冷机运行过程中, 通过冷却塔向环境排放冷却水的热量。在探讨变热源温度下, 冷却水的进口温度会发生变化, 但由于冷却水的流量大, 所配置的冷却塔的功率比较大, 环境温度变化较小, 实验过程中发现冷却水的进口温度变化的幅度较小, 在 24 ~ 25.5 °C 范围内变化。因此在研究吸附式制冷机的制冷性能随热源温度变化时, 认为冷却水的温度变化影响很小。通过改变工况, 测试稳定后该吸附式制冷机的性能, 取热源变化间隔为 5 °C, 冷冻水变化间隔为 2 °C。每个工况都在稳定后选取 5 个循环周期计算, 对系统在变工况下的性能进行分析。本实验的测试工况如表 2 所示。

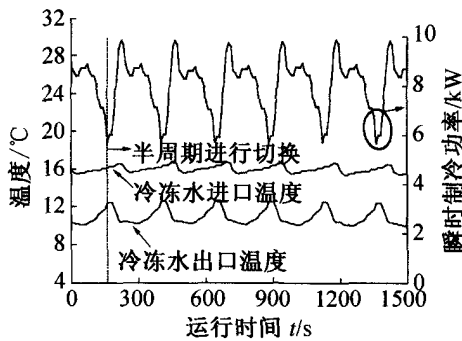


图 7 瞬时制冷功率变化图
Fig. 7 Instant cooling power changes

表 2 实验工况

Tab. 2 Experimental conditions

参数	数值
切换周期/ s	240
热源进口温度/ °C	55 ~ 80
冷却水进口温度/ °C	24 ~ 25.5
冷冻水进口温度/ °C	12 ~ 16
热源流量/ (L/min)	58.5
冷却水流量/ (L/min)	100
冷冻水流量/ (L/min)	22.7

由图 8 可知, 该吸附式制冷机的平均制冷功率随着热源温度的升高而增大, 在 55 ~ 65 °C 的热源温度下, 制冷功率的增幅较大, 65 ~ 80 °C 之间制冷功率的增幅较小, 趋于平缓。原因可能为: 该吸附剂的吸附等温线呈 S 型, 当热源温度上升时, 相对压力范围扩大, 但是循环吸附量的增幅很小, 导致吸附过程制冷功率增幅不大。提高冷冻水进口温度有助于增加系统的制冷功率, 当热源温度为 80 °C, 冷冻水进口温度为 12 °C、14 °C、16 °C, 对应的平均制冷功率分别为

6.1 kW、7.9 kW、9.0 kW, 增幅分别为 30%、48%。因此在满足实际制冷温度情况下, 可以适当提高冷冻水的进口温度来增大制冷功率。

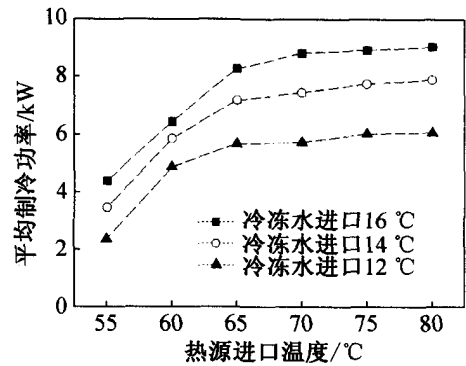


图 8 平均制冷功率随热源温度的变化
Fig. 8 The effect of heat source temperature on the cooling capacity

由图 9 可知, 系统的 COP 值随热源温度的增加出现先增大后减小的趋势, 并在热源温度为 65 °C 时 COP 出现较大值, 而后降低。出现这种趋势的原因: 随着热源温度的增加, 平均制冷功率逐渐增大, 当热源温度高于 65 °C 时趋于平缓 (图 8), 但脱附过程中吸附床内的金属显热和吸附剂显热是逐渐增大的, 导致脱附过程中的所需要的再生热量也随之增大, 在两者的相互作用下, 出现 COP 先增大, 后减小的趋势。因此该吸附式制冷机的较佳运行热源温度为 65 °C 左右。

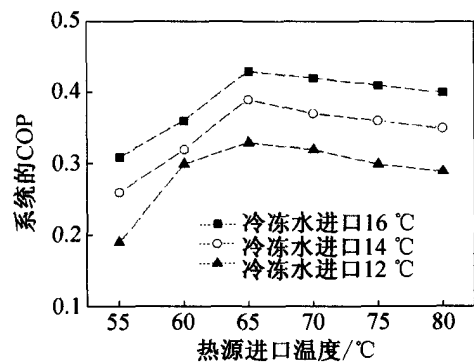


图 9 系统 COP 随热源温度的变化
Fig. 9 The effect of heat source temperature on the coefficient of performance

计算该制冷机在较佳热源温度 65 °C, 冷冻水为 14 °C 时, 系统吸附剂的单位制冷功率 SCP 为 272.5 W/kg, 是文献 [6] 填充式硅胶吸附剂 SCP 的 4 倍。该吸附式制冷机在较低热源温度下就具有高 SCP, 这主要是因为合成沸石 FAMZ01 的循环有效吸附量较大, 且涂抹吸附床的传热传质效果好, 系统循环周期

短,导致系统单位吸附剂制冷功率提高。

3 结论

1) 本文提出的 FAMZ01-水吸附式制冷机在热源温度 55 ℃, 冷冻水进口温度 12 ~ 16 ℃ 时能稳定运行; 随着热源温度的升高, 制冷机的制冷功率逐渐增大, 当热源温度高于 65 ℃ 时, 增幅趋于平缓; COP 随热源温度的升高先增大而后降低, 在热源温度 65 ℃ 时获得最大值, 这是因为热源温度越高, 制冷机显热损失越大, 导致 COP 降低, 因此较佳驱动热源温度为 65 ℃ 左右。

2) 随着冷冻水温度的增加, 制冷机的制冷功率和 COP 都有较大的增幅, 因此在满足实际需求的情况下, 可提高冷冻水的入口温度来提高系统性能。

3) 制冷机采用 FAMZ01 吸附剂, 涂抹式吸附床结构, 具有循环周期短, 吸附剂单位质量制冷功率 SCP 值大的特点。

本文受广东省自然科学基金(S2013010014709)和广东省重大科技专项资金(2013A011402006)项目资助。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of Guangdong (No. S2013010014709) and Major Science and Technology Foundation of Guangdong (No. 2013A011402006).)

参考文献

[1] 陈少杰, 陈光明. 渔船动力余热制冷技术[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 28-34. (CHEN Shaojie, CHEN Guangming. Refrigeration technology utilizing engine waste heat in fishing vessels[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 28-34.)

[2] 万意, 李全国, 芮正球, 等. 凹凸-氯化钙复合吸附剂的制冷性能[J]. 制冷学报, 2012, 33(3): 30-34. (WAN Yi, LI Quanguo, RUI Zhengqiu, et al. Adsorption refrigeration characteristic of attapulgite based calcium chloride composite adsorbents[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(3): 30-34.)

[3] Fernandes M S, Brites G J V N, Costa J J, et al. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 102-123.

[4] Wang D C, Li Y H, Li D, et al. A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 344-353.

[5] Wang D C, Zhang J P, Tian X L, et al. Progress in silica gel-water adsorption refrigeration technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 85-104.

[6] Saha B B, Akisawa A, Kashiwagi T. Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype[J]. Renewable Energy, 2001, 23(1): 93-101.

[7] Saha B B, Kashiwagi T. Experimental investigation of an advanced adsorption refrigeration cycle[J]. Ashrae Transactions, 1997, 133: 50-57.

[8] Alam K C A, Akahira A, Hamamoto Y, et al. A four-bed mass recovery adsorption refrigeration cycle driven by low temperature waste/renewable heat source[J]. Renewable Energy, 2004, 29(9): 1461-1475.

[9] Wang D C, Wu J Y, Xia Z Z, et al. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part II. Experimental study [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(7): 1084-1091.

[10] Chen C J, Wang R Z, Xia Z Z, et al. Study on a compact silica gel-water adsorption chiller without vacuum valves: design and experimental study[J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2673-2681.

[11] Lu Z S, Wang R Z, Xia Z Z. Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel-water[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 1015-1020.

[12] Liu Y, Yu K, Wang R, et al. Design and performance test of the silica-gel and water adsorption system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(6): 968-974.

[13] Kakiuchi H, Shimooka S, Iwade M, et al. Novel water vapor adsorbent FAM-Z01 and its applicability to an adsorption heat pump[J]. Kagaku Kogaku Ronbun, 2005, 31(5): 361-364.

[14] Shimooka S, Oshima K, Hidaka H, et al. The evaluation of direct cooling and heating desiccant device[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2007, 40: 1330-1334.

[15] Kim Y D, Thu K, Ng K C. Adsorption characteristics of water vapor on ferroaluminophosphate for desalination cycle [J]. Desalination, 2014, 344: 350-356.

[16] Schnabel L, Tatlier M, Schmidt F, et al. Adsorption kinetics of zeolite coatings directly crystallized on metal supports for heat pump applications (adsorption kinetics of zeolite coatings) [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(11/12): 1409-1416.

[17] Atakan A, Fuedner G, Munz G, et al. Adsorption kinetics and isotherms of zeolite coatings directly crystallized on fibrous plates for heat pump applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 273-280.

[18] Tatlier M, Munz G, Fuedner G, et al. Effect of zeolite a coating thickness on adsorption kinetics for heat pump applications [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2014, 193: 115-121.

通信作者简介

何兆红, 女, 副研究员, 中国科学院广州能源研究所, (020) 37210762, E-mail: hezh@ms.giec.ac.cn. 研究方向: 吸附式制冷技术。

About the corresponding author

He Zhaohong, female, associate research fellow, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, +86 20-37210762, E-mail: hezh@ms.giec.ac.cn. Research fields: adsorption refrigeration technology.