

文章编号:0253 – 4339(2016) 02 – 0059 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2016. 02. 059

新型双温驱动吸收制冷循环性能

何丽娟¹ 朱超群¹ 杨彬² 王丽芳¹ 张少华² 肖卓楠¹

(1 内蒙古科技大学能源与环境学院 包头 014010;2 内蒙古科技大学包头师范学院 包头 014030)

摘 要 针对跨临界 CO₂ 压缩制冷系统制取冷量以消耗高品位能量为代价的问题,本文依据能量梯级利用原理,提出双温低品位热源驱动的新型 CO₂-[emim][Tf₂N]吸收式制冷循环的新流程,在构建该制冷循环数学模型的基础上,搭建测试双温驱动吸收制冷循环性能的实验装置,利用模拟和实验方法分析了操作参数对系统性能的影响规律。在定流量的条件下,研究驱动热源温度、冷却水入口温度以及载冷剂入口温度等操作参数对新系统性能的影响规律,结果表明双温驱动新型吸收制冷系统不仅可实现高效制冷,而且最低制冷温度可达到 -15.2℃,研究结果为 CO₂-离子液体制冷系统的理论设计计算提供实用的数据基础。
关键词 双温低品位热源;CO₂-[emim][Tf₂N];吸收制冷系统;传热传质;系统性能
中图分类号:TB61+6; TB61+2 **文献标识码**:A

Experimental Study on Performances of a New Absorption Refrigeration System Driven by Double Low-grade Energy

He Lijuan¹ Zhu Chaoqun¹ Yang Bin² Wang Lifang¹ Zhang Shaohua² Xiao Zhuonan¹

(1. Institute of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, 014010, China; 2. Baotou Teachers' College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, 014030, China)

Abstract To solve the problem caused by transcritical CO₂ compression refrigeration system, a new absorption refrigeration system driven by double low-grade energy was presented based on the principle of energy cascade utilization. Based on mathematical model for each component of the system, an experimental equipment driven by the double low-grade energy were developed. The effect of operating parameters, such as hot source temperature, cooling water inlet temperature and cooled medium, on the system performances had been investigated under constant flow rate. The results showed that the new absorption refrigeration system owned a higher COP and the lowest refrigeration temperature -15.2℃ under the same experimental conditions. The study results are helpful to the optimal design.
Keywords double low-grade energy; CO₂-[emim][Tf₂N]; absorption refrigeration system; heat and mass transfer; system performance

吸收制冷系统可被地热和太阳能等低品位能源驱动,有效节省高品位能源,因此成为制冷领域的重要研究方向之一^[1]。制冷工质 CO₂ 是一种对环境友好的自然工质,具有传热损失小、节流损失小、单位容积制冷量大等优点^[2-5],而 CO₂ 大多在压缩制冷机中作为制冷工质,以消耗高品位能量制取冷量。随着对离子液体的深入研究^[6-9],解决了吸收制冷系统中可利用 CO₂ 做制冷工质的问题。
Sen M 等^[10-11]分别采用 CO₂-[bmim]PF₆(1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐)作为吸收式制冷循环的制冷工质对,当制冷温度为 278 K,冷凝温度为 313 K 时系统 COP 是 0.11。罗二仑等^[12-14]采用 CO₂-[bmim]PF₆

作为新型吸收工质对,模拟结果表明该吸收制冷循环的热力性能并不理想,制冷温度为 5℃、COP 仅为 0.49。
针对上述离子液体的溶解度不高的问题, Kim Y S 等^[15]、Schilderman A M 等^[16]、Yokozeki A 等^[17]、Meysam M 等^[18]对离子液体[emim][Tf₂N](1-乙基-3-甲基咪唑双三氟甲基磺酰亚胺)和 CO₂ 的 VLE 数据进行了预测,研究表明[emim][Tf₂N]对 CO₂ 气体具有极好的吸收能力。当 CO₂ 摩尔分数为 12.3% ~ 59.3%、温度为 310 ~ 450 K、压力 ≤15 MPa 的条件下,CO₂ 溶度最高可达到约 60% (摩尔分数),CO₂ 在离子液体[emim][Tf₂N]中的溶度随着压力的增加及

基金项目:国家自然科学基金(51106068 & 51566014)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51106068 & No. 51566014))
收稿日期:2015 年 7 月 8 日

温度的降低而增加,因此,咪唑型离子液体 [emim][Tf₂N] 对 CO₂ 的溶解度较大,在吸收处理 CO₂ 方面具有极好的潜力。故本文选用 CO₂-[emim][Tf₂N] 作为新制冷系统的吸收制冷工质对。

为了降低溶液温度和增强溶液吸收能力,依据能量梯级利用原理,提出一种双温低品位热驱动新型 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收式制冷循环,该系统以低品位热驱动吸收制冷循环制取的低温冷量置换高位冷量,冷量品位实现高效转换,提高吸收制冷系统性能。

1 双温驱动新型 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收制冷循环

图 1 是双温热驱动新型 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收式制冷系统流程原理图。制冷剂富液在发生器 1 中吸收温度在 100 ~ 130 °C 低品位热源的热量汽化为高压过热的制冷剂蒸气,进入气体冷却器被冷却水冷凝成制冷剂液体,制冷剂液体分为两路,一路经节流阀节流降压,低温低压的制冷剂液体进入蒸发器,在此蒸发制冷,制冷剂蒸气被吸收蒸发器的制冷剂贫液吸收,成为低温侧的制冷剂富液,经溶液泵加压后泵入发生器 2,在此被温度在 60 ~ 90 °C 的低品位热源汽化成压力和温度较高的制冷剂蒸气,分两支,当输入发生器 1 的热量不足以维持系统正常运行时,将来自发生器 2 的一支制冷剂蒸气量作为补充气源经阀门 1 引入气体冷却器;另一支与来自吸收蒸发器的制冷剂蒸气汇合后进入吸收器 1,被来自发生器 1 的制冷剂贫液吸收,成为高温侧的制冷剂富液,不仅提高了吸收器的吸收压力和系统中制冷剂质量流量,还降低了循环倍率,提高了系统的 COP。另一路制冷剂液体进入过冷器,换热后成为过冷液体,在吸收蒸发器中蒸发吸热被汽化为低压制冷剂蒸气,与另一支来自发生器 2 的气态制冷剂汇合,在吸收器 1 被来自发生器 1 制冷剂贫液吸收成为制冷剂富液,经溶液泵加压后泵入发生器 1,之后重复上述循环。

吸收-压缩制冷系统还有一些辅助设备、若干测试仪器以及数据采集系统和控制系统等。其中数据采集是利用 Agilent34970A 数据采集/开关单元以及 PC 机实现,采集系统的温度、流量等操作参数。为确保温度测量精度,所有铜-康铜热电偶以及铂电阻均在气液相平衡实验台进行标定,精度为 ± 0.1 °C^[10];采用德鲁克精度为 $\pm 0.04\%$ FS 的压力传感器测量压力;采用美国 EESIFLO 公司生产的 EESIFLO6000 便携式超声波流量计和 AMERSON F025P150C 型质量流量计测量制冷剂质量流量,其中 AMERSON 流

量计测量精度为 0.2 级;EESIFLO6000 流量计测量液体体积流量的最高精度为 0.5 级,最高量程流速为 25 m²/s,最小读数为 0.01 m²/s。

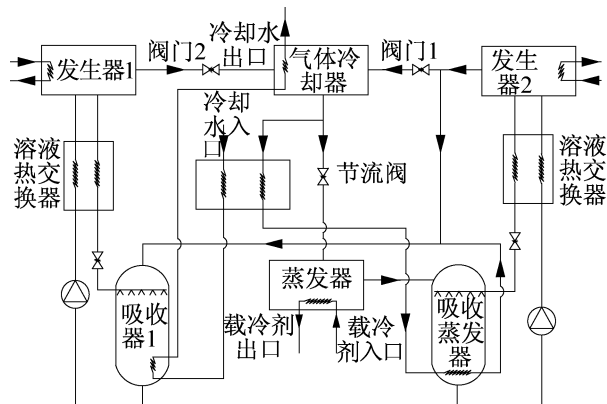


图 1 双温热驱动的新型吸收式制冷循环工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the new absorption refrigeration system driven by double hot source

2 构建新型吸收制冷系统的数学模型

依据能量和质量守恒原理,建立双温 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收制冷循环热力学数学模型,分析操作参数对系统性能的影响,制冷系统各部件的热力学模型表示如下:

$$\sum m_i - \sum m_o = 0 \quad (1)$$

$$\sum m_i x_i - \sum m_o x_o = 0 \quad (2)$$

除溶液泵外,新型吸收制冷循环各部件能量守恒方程可写成下式:

$$Q + \sum m_i h_i - \sum m_o h_o = 0 \quad (3)$$

新型吸收制冷系统的性能系数:

$$\text{COP} = \frac{Q_E}{Q_{G_1} + Q_{G_2}} \quad (4)$$

3 实验内容

基于双温热驱动新型 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收式制冷系统的工作原理和数值模拟,自行搭建测试 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收式制冷系统性能的实验台。设定冷却水流量和载冷剂流量值,在指定范围内调整发生器 1、发生器 2、冷却水水箱和载冷剂水箱的输入功率,用来改变高低温热源温度、冷却水和载冷剂入口温度。测量采集系统实时监控采集所需数据,同时寻找吸收制冷系统最佳溶液循环量。运行 CO₂-[emim][Tf₂N] 吸收式制冷系统的实验内容如下:

1) 给定低温热源温度、冷却水进口温度和载冷剂入口温度,热源温度在 102 ~ 120 °C 范围内变化时,

测定 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收式制冷系统的各设备热负荷等参数随高温热源温度的变化趋势。

2) 给定高温热源温度、冷却水进口温度和载冷剂入口温度,低温温度在 $60\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时,测定 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收式制冷系统的各设备热负荷等参数随低温热源温度的变化趋势。

3) 给定高温热源温度、低温热源温度和载冷剂入口温度,冷却水进口温度在 $19\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时,测定 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收式制冷系统的各设备热负荷等参数随冷却水入口温度的变化趋势。

4) 给定高温热源温度、低温热源温度和冷却水进口温度,载冷剂入口温度在 $-5\sim 11\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时,测定 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收式制冷系统各设备热负荷等参数随载冷剂入口温度的变化趋势。

4 性能分析

在定流量的条件下进行实验研究,当冷却水质量流量为 0.1 kg/s ,载冷剂质量流量为 0.05 kg/s ,循环的溶液循环量为 0.06 kg/s ,高低温发生制冷剂质量流量比为 9.0 时,分析驱动热源温度、冷却水入口温度和蒸发器载冷剂入口温度等操作参数对系统性能的影响规律。

4.1 驱动热源温度变化对新循环性能的影响

当低温热源温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$,冷却水进口温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$,载冷剂入口温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,新型跨临界 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收制冷系统的制冷量和 COP 随高温热源温度变化的曲线如图 2 所示。

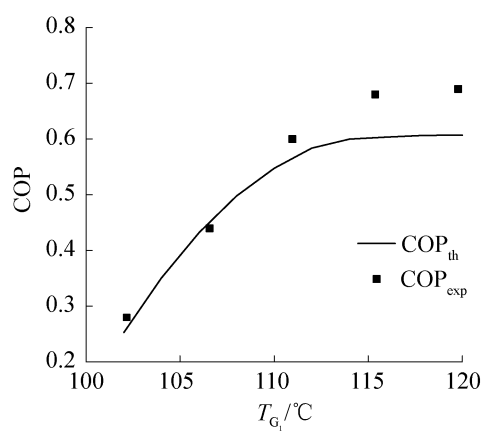


图 2 高温热源温度对 COP 的影响
Fig. 2 Effect of high heat source temperature on COP

由图 2 和图 3 可知,在外界条件相同时,随着高温热源温度的增大,新型跨临界 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收系统的制冷量和 COP 均呈现上升趋势,由于吸收器的溶液浓度不变,系统的放气范围增大,制冷循

环的制冷剂流量增大,因此新系统 COP 增大。

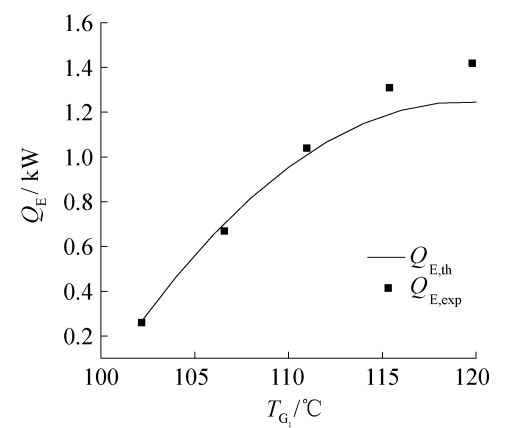


图 3 高温热源温度对制冷量的影响
Fig. 3 Effect of high heat source temperature on Q_E

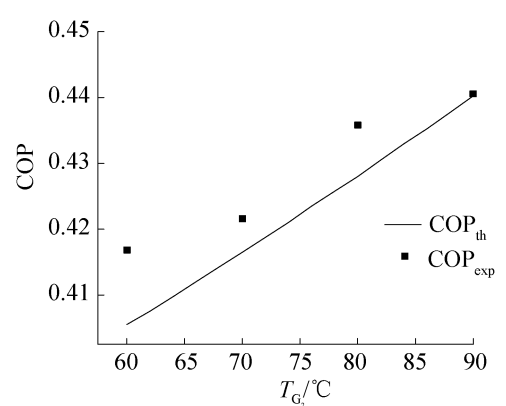


图 4 低温热源温度对 COP 的影响
Fig. 4 Effect of low heat source temperature on COP

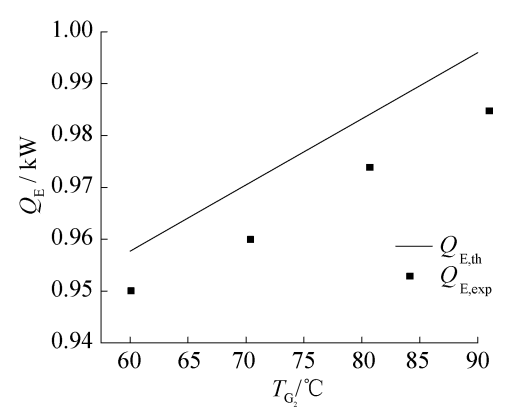


图 5 低温热源温度对制冷量的影响
Fig. 5 Effect of low heat source temperature on Q_E

新型跨临界 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收制冷系统的制冷量和 COP 随低温热源温度变化的曲线如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,在外界条件相同时,新循环 COP 和制冷量均随低温侧热源温度的增加而增加,由于发生温度较低,故 COP 和制冷量的增

加幅度较缓,但可以实现利用低温侧吸收制冷系统产生低品位冷量实现高效制冷目的。

由图 2 ~ 图 5 可以看出,随着高低温热源温度的增加,新系统 COP、制冷量的模拟值和实验结果变化趋势一致。研究结果表明双温驱动新型吸收制冷系统中,利用热转换系统的能量梯级利用原理,以低温低品位热源驱动吸收制冷循环制取的低品位冷量作为补偿,实现了冷量品位间的转换,具有较高的效率。

4.2 冷却水入口温度变化对新循环性能的影响

当高温热源温度为 110 °C,低温热源温度为 80 °C,蒸发器载冷剂入口温度为 5 °C 时,双温驱动新吸收制冷系统的制冷量、COP 和制冷温度随冷却水入口温度变化曲线如图 6 ~ 图 8 所示。

由图 6 和图 7 可知,在外界条件相同时,随冷却水入口温度增加,双温低品位驱动 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收制冷系统制冷量和 COP 随冷却水入口温度升高而降低。由图 8 可知,新系统蒸发温度随冷却水进口温度增加而增加,最低制冷蒸发温度为 -15.2 °C。图 6 ~ 图 8 可以看出,模拟值和实验结果相近,变化趋势一致。

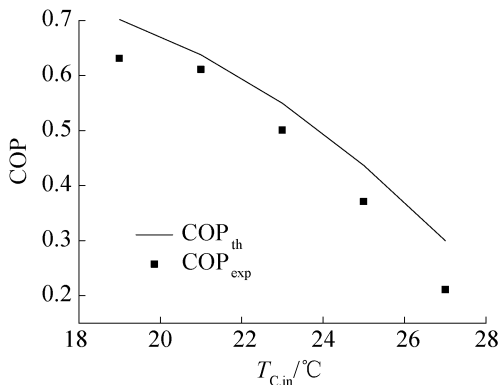


图 6 冷却水入口温度对 COP 的影响

Fig. 6 Effect of cooling water temperature on COP

依据吸收制冷循环原理可知,有效降低溶液温度是提高系统 COP 的有效途径之一,故冷却水入口温度越低,过热器就会获取越高的冷量,更能降低吸收蒸发器的溶液温度,减小循环倍率,制取更多高品位冷量,提高系统性能,反之则不利于系统的高效运行。

4.3 蒸发器载冷剂入口温度变化对新循环性能的影响

当高温热源温度为 110 °C,低温热源温度为 80 °C,冷却水入口温度为 23 °C 时,双温低品位热驱动 $\text{CO}_2\text{-[emim][Tf}_2\text{N]}$ 吸收制冷系统的制冷量和 COP 随载冷剂入口温度变化的曲线如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,在外界条件相同的条件下,

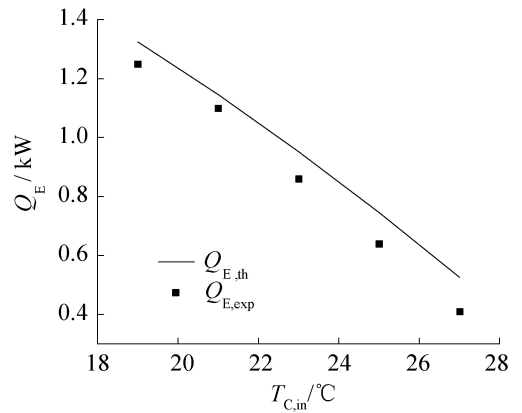


图 7 冷却水入口温度对制冷量的影响

Fig. 7 Effect of cooling water temperature on Q_E

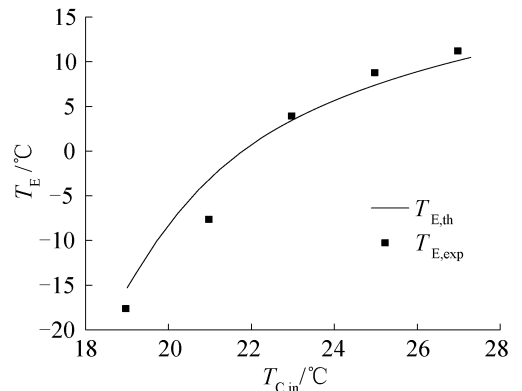


图 8 冷却水入口温度对蒸发温度的影响

Fig. 8 Effect of cooling water temperature on T_E

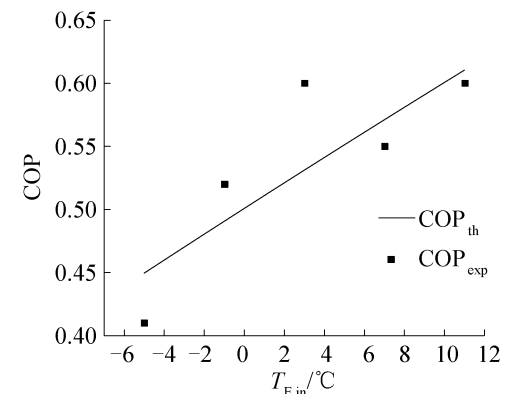


图 9 载冷剂入口温度对 COP 的影响

Fig. 9 Effect of cooled water temperature on COP

随着载冷剂温度的升高,双温驱动新型吸收制冷系统的 COP 和制冷量随着载冷剂入口温度的增加而增加。说明新系统充分利用了能量梯级利用的原理,利用吸收蒸发器进行循环耦合,使冷量品位得到提升,丰富了吸收制冷循环科学理论,也为有效利用低品位的低温热源、节省高品位能源、拓展 CO_2 回收再利用的应用范围提供了新思路。

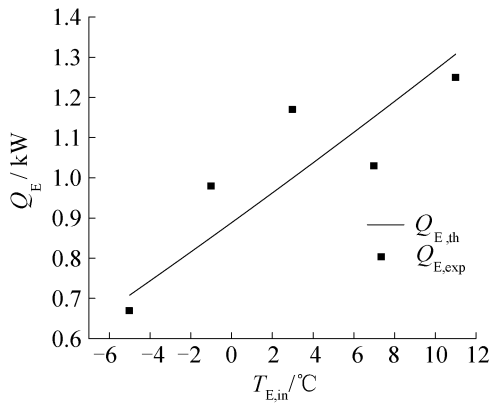


图 10 载冷剂入口温度对制冷量的影响

Fig. 10 Effect of cooled water temperature on Q_E

从以上各图可以看出,模拟值和实验值变化趋势一致。以 COP 精度为例进行分析,COP 的平均相对误差 16.3%,其中 CO_2 -[emim][Tf_2N]溶液比焓计算精度导致的相对误差为 12.1%。分析其原因有:模拟时没有考虑热损失和系统压降带来的误差;实验中的测量误差;计算 CO_2 -[emim][Tf_2N]热力学性质时模型计算精度有待进一步提高。上述原因都会引起模拟值和实验值出现偏差。

5 结论

本文提出一种双温低品位热源驱动的 CO_2 -[emim][Tf_2N]吸收式制冷新流程,阐述了新流程的工作原理,然后建立组成循环各个部件的数学模型,依据数值计算和实验结果分析了双温驱动热源温度、冷却水入口温度以及蒸发器载冷剂入口温度对新循环热力学性能的影响。研究结果表明:

1)利用能量梯级利用原理,将吸收器和蒸发器的能量耦合,减少二者放热和吸热过程中的节流损失,低品位热源可以制取高品位冷量,还具有较高的效率。

2)在本文研究的条件下,新型双热源驱动吸收制冷系统 COP 变化范围为 0.4 ~ 0.97,与文献 [12-14]相比,COP 增幅在 50% 以上。

3)高温低品位能源供应不足时,新循环仍可以正常工作。

符号说明

COP——系统的制冷系数

h ——各状态点的焓值,kJ/kg

m ——各状态点质量流量,kg/s

Q ——各部件负荷,kW

x ——溶液浓度

下标

E——蒸发器

G_1 ——高温发生器

G_2 ——低温发生器

i——进口

o——出口

th——模拟值

exp——实验值

本文受内蒙古自然科学基金(2015MS0547)和产学研基金(PY-2012)项目资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia (No. 2015MS0547) and CEEUSRO (No. PY-2012).)

参考文献

- [1] 王建召,郑丹星. 以 TFE-[BMIm][Br]为工质对的吸收式制冷循环性能分析[J]. 工程热物理论, 2008, 29(11): 1813-1816. (WANG Jianzhao, ZHENG Danxing. Theoretical study on performance of an absorption refrigeration system using TFE-[BMIm][Br] as working pairs[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11): 1813-1816.)
- [2] Wang Ruzhu, Li Yong. Perspectives for natural working fluids in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(4): 568-581.
- [3] 侯晓飞, 诸凯, 付萌, 等. 超临界二氧化碳在套管内换热的实验研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(1): 13-16. (HOU Xiaofei, ZHU Kai, FU Meng, et al. Experimental study on heat transfer of supercritical carbon dioxide in tube[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(1): 13-16.)
- [4] 姜云涛, 马一太, 李敏霞, 等. 二氧化碳跨临界循环系统用新型膨胀机的研发[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 1-4. (JIANG Yuntao, MA Yitai, LI Minxia, et al. Development of newly-designed expander used in CO_2 transcritical system[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5): 1-4.)
- [5] 邓建强, 姜培学, 石润富, 等. 跨临界 CO_2 汽车空调微通道气体冷却器的设计开发[J]. 制冷学报, 2005, 26(4): 51-55. (DENG Jianqiang, JIANG Peixue, SHI Runfu, et al. Development of microchannel gas cooler for transcritical CO_2 automotive air conditioning[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 51-55.)
- [6] 范薇, 孙晓霞, 苏岩. 基于离子液体固定二氧化碳的研究进展[J]. 化学研究, 2009, 20(3): 102-107. (FAN Wei, SUN Xiaoxia, SU Yan. Study progress based on absorption carbon dioxide using ionic liquid[J]. Chemical Research, 2009, 20(3): 102-107.)
- [7] Anthony J L, Maginn E J, Brennecke J F. Solubilities and thermodynamic properties of gases in the ionic liquid 1-n-

- Butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(29): 7315-7320.
- [8] Wei Ren. High-pressure phase equilibria of Ionic liquids and compressed gases for applications in reactions and absorption refrigeration [D]. USA: University of Kansas, 2009.
- [9] Gurkan B E, de la Fuente J C, Mindrup E M, et al. Equimolar CO₂ absorption by anion-functionalized ionic liquids [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(7): 2116-2117.
- [10] Sen M, Paolucci S. The use of ionic liquids in refrigeration [C]// *Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Process Industries Division, USA: Chicago, Illinois, 2006: 131-134.
- [11] Cai W H, Sen M, Paolucci S. Dynamic modeling of an absorption refrigeration system using ionic liquids [C]// *Proceedings of 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Seattle, Washington, USA, 2007.
- [12] 罗二仓, 胡剑英, 戴巍, 等. 一种采用 CO₂ 为制冷剂的吸收式制冷机, CN101718479A [P]. 2010-06-02.
- [13] 黄宇, 杨琴, 罗二仓, 等. 一种二氧化碳-离子液体吸收式制冷系统性能的分析研究 [J]. *低温与超导*, 2009, 37(6): 47-52. (HUANG Yu, YANG Qin, LUO Ercang, et al. Analysis on absorption refrigeration by using ionic liquid and carbon dioxide [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2009, 37(6): 47-52.)
- [14] 杨琴, 黄宇, 罗二仓, 等. 以跨临界 CO₂-离子液体 [bmim]PF₆ 为工质对的吸收式制冷循环性能分析 [J]. *低温工程*, 2009, 169(3): 5-10. (YANG Qin, HUANG Yu, LUO Ercang, et al. Analysis on thermodynamic performance of absorption refrigeration cycle utilizing transcritical CO₂-[bmim]PF₆ as working pairs [J]. *Cryogenic Engineering*, 2009, 169(3): 5-10.)
- [15] Kim Y S, Choi W Y, Jang J H, et al. Solubility measurement and prediction of carbon dioxide in ionic liquids [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2005, 228(3): 439-445.
- [16] Schilderman A M, Raeissi S, Peters C J. Solubility of carbon dioxide in the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2007, 260(1): 19-22.
- [17] Yokozeki A, Shiflett M B. Gas solubilities in ionic liquids using a generic van der Waals equation of state [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2010, 55(2): 846-851.
- [18] Mirarab M, Sharifi M, Ghayyem M A, et al. Prediction of solubility of CO₂ in ethanol-[EMIM][Tf₂N] ionic liquid mixtures using artificial neural networks based on genetic algorithm [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, 371(18): 6-14.

通信作者简介

何丽娟, 女, 教授, 博士, 硕士生导师, 内蒙古科技大学能源与环境学院, (0472)5951569, E-mail: zdlilyhe@163.com。研究方向: 低品位能源热利用, 自然工质替代。

About the corresponding author

He Lijuan, female, professor, Ph. D., master's supervisor, Institute of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, +86 472-5951569, E-mail: zdlilyhe@163.com. Research fields: utilization of low-grade heat source, natural refrigeration substitution.