

DOI: 10.7652/xjtuxb201905002

采用 R1234ze(E)/离子液体工质对的 吸收式制冷循环性能分析

张 焱, 朱山杉, 王晓坡, 孙艳军
(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统吸收式制冷工质对 $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ 和 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 等存在的问题,且含离子液体的工质对是一类有潜力的新型吸收式制冷工质对,选取烯烃类制冷剂 R1234ze(E)与 3 种离子液体 $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 和 $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 组成的工质对在单效吸收式制冷循环中的性能展开了研究。首先,运用 NRTL 活度系数模型关联了 3 种工质对的相平衡数据,建立了相关的热力学模型;其次,通过建立的热力学模型分析了不同发生温度、蒸发温度和冷凝温度时工质对的循环倍率、稀溶液与浓溶液的浓度差、系统性能系数以及炯效率等的变化规律;最后,通过与文献中的 R1234ze(E)以及其他离子液体(包括 $[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 、 $[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{BF}_4]$ 和 $[\text{Emim}][\text{BF}_4]$ 等)组成的工质对在吸收式制冷循环中的性能进行了对比。研究结果表明:在冷凝温度为 30°C 时,3 种工质对的性能在发生温度 70°C 时达到最大值,循环的炯效率在 65°C 时达到最大,且工质对 R1234ze(E)/ $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 的性能系数最大,可达到 0.21,其炯效率为 0.089;R1234ze(E)/ $[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 系统性能最优,R1234ze(E)/ $[\text{Emim}][\text{BF}_4]$ 的性能最低。研究结果可为后续新型制冷工质对在吸收制冷循环中的实际应用提供一定的参考。

关键词: 吸收式制冷;R1234ze(E);离子液体;性能分析

中图分类号: TB651 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0009-07

Performance Analysis on the Absorption Refrigeration Cycle Using R1234ze(E)/Ionic Liquids as Working Pairs

ZHANG Yao, ZHU Shanshan, WANG Xiaopo, SUN Yanjun
(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Traditional refrigerant-absorbent pairs, such as $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ or $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ used in the absorption refrigeration system, have some drawbacks, and some of the mixtures including ionic liquids are considered as promising alternative working pairs. The performance of the single-effect absorption refrigeration system using R1234ze(E)/ $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]$, R1234ze(E)/ $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$, or R1234ze(E)/ $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ as the working pair was investigated in the present work. Firstly, the NRTL activity coefficient model was used to correlate the experimental vapor-liquid equilibrium data, and the thermodynamic models of the absorption cycles were also established. In addition, the circulation ratio, mass concentration difference between strong and weak solutions, coefficient of performance and exergy coefficient of the cycle were analyzed at different

generation temperatures, evaporation temperatures and condensation temperatures. At last, the performances of the refrigeration system based on R1234ze(E) with other ionic liquids (including [Hmim][Tf₂N], [Omim][BF₄], [Hmim][BF₄] and [Emim][BF₄]) reported in the literatures are compared with the results of this work. The results show that when the condensation temperature is 30 °C, the maximum coefficient of performance and the maximum exergy coefficient of the cycle can be attained at the generation temperatures of 70 °C and 65 °C, respectively. And at this condition, the R1234ze(E)/[Omim][PF₆] pair has the highest coefficient of performance of 0.21, and the exergy coefficient is 0.089. The R1234ze(E)/[Hmim][Tf₂N] pair has the highest performance, but that for R1234ze(E)/[Emim][BF₄] is the lowest. This study may provide useful information for the application of new working pairs to the absorption refrigeration systems.

Keywords: absorption refrigeration system; R1234ze(E); ionic liquids; performance analysis

吸收式制冷循环可以利用余热、废热以及太阳能等低品位热源,一直是国内外学者关注的热点^[1-3]。然而,传统的吸收式制冷工质对 H₂O/LiBr 和 NH₃/H₂O 有一定的缺陷,LiBr 水溶液有一定的腐蚀性,且系统的蒸发温度需保持在 0 °C 以上,NH₃ 具有毒性,并且在制冷循环中需要安装精馏装置,增大了结构的复杂性^[4-5]。离子液体具有饱和蒸气压几乎为零、高的热稳定性等优良特性,所以其与制冷剂组成的工质对被认为是一类有潜力的新型吸收式制冷工质对。

近年来,国内外学者对 HFCs 类制冷剂与离子液体组成的工质对在制冷循环中的性能进行了大量的分析和研究^[6-10],但是关于烯烃类 HFO 制冷剂的研究却很少。HFO 制冷剂相对比 HFCs 类制冷剂具有更低的 GWP 和 ODP 值,对环境更加友好。Wu 等分析了烯烃类制冷剂 R1234ze(E) 与 3 种离子液体 [Emim][BF₄], [Hmim][BF₄], [Omim][BF₄] 组成的 3 种工质对在单效吸收式制冷系统以及压缩-吸收联合制冷系统的性能,对比了不同发生温度、蒸发温度和冷凝温度时系统的性能系数和效率变化情况^[11]。Wu 等分别对比分析了烯烃类制冷剂 R1234ze(E) 和 R1234yf 与离子液体 [Hmim][Tf₂N] 组成的工质对在吸收式制冷循环中的性能,并和 R152a/[Hmim][Tf₂N]、R32/[Hmim][Tf₂N]、R125/[Hmim][Tf₂N] 工质对以及 H₂O/LiBr 和 NH₃/H₂O 等进行了对比分析^[12-13]。为了进一步研究烯烃类制冷剂与离子液体组成的工质对在吸收式制冷循环中的表现,本文对 R1234ze(E) 与 3 种不同离子液体 [Bmim][PF₆], [Hmim][PF₆] 和 [Omim][PF₆] 组成的工质对进行研究,并与其他工质对进行对比分析。

1 R1234ze(E)/离子液体物性模型

对循环进行研究时,需要用到工质对的相平衡数据,本文用 NRTL 模型^[14]对文献测得的 R1234ze(E)/[Bmim][PF₆], R1234ze(E)/[Hmim][PF₆] 和 R1234ze(E)/[Omim][PF₆] 的相平衡实验数据^[15]进行关联。对每一组分,NRTL 活度系数模型可表示为

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left\{ \tau_{21} \left[\frac{\exp(-\alpha \tau_{21})}{x_1 + x_2 \exp(-\alpha \tau_{21})} \right]^2 + \frac{\tau_{12} \exp(-\alpha \tau_{12})}{[x_2 + x_1 \exp(-\alpha \tau_{12})]^2} \right\} \quad (1)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2 \left\{ \tau_{12} \left[\frac{\exp(-\alpha \tau_{12})}{x_2 + x_1 \exp(-\alpha \tau_{12})} \right]^2 + \frac{\tau_{21} \exp(-\alpha \tau_{21})}{[x_1 + x_2 \exp(-\alpha \tau_{21})]^2} \right\} \quad (2)$$

$$\tau_{12} = \tau_{12}^0 + \frac{\tau_{12}^1}{T} \quad (3)$$

$$\tau_{21} = \tau_{21}^0 + \frac{\tau_{21}^1}{T} \quad (4)$$

式中: τ_{12} 、 τ_{21} 为二元交互参数; T 为温度; τ_{12}^0 、 τ_{12}^1 、 τ_{21}^0 、 τ_{21}^1 为 3 种工质对相平衡实验数据拟合得到的参数; γ 为活度系数。对于二元相平衡可表示为

$$y_i p \varphi_i = x_i \gamma_i p_i^s, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$$\Phi_i = \exp \left[\frac{(B_i - V_i)(p - P_i^s)}{RT} \right] \quad (6)$$

式中: x_i 为液相摩尔分数; y_i 为气相摩尔分数; p 为平衡压力; p_i^s 为饱和蒸气压; φ_i 为逸度系数; B_i 为第二维里系数; V_i 为饱和液相摩尔体积。 B_i 、 V_i 和 p_i^s 的数据可通过 Refprop 9.1 得到,离子液体的饱和蒸气压可忽略不计,故其气相摩尔分数取为 1。回归得到制冷剂 R1234ze(E)/离子液体工质对二元

交互参数如表 1 所示。

表 1 工质对二元交互参数

工质对	τ_{12}^0	τ_{12}^1	τ_{21}^0	τ_{21}^1
R1234ze(E)/ [Bmim][PF ₆]	3.126 2	-466.027 2	0.963 8	-156.108 1
R1234ze(E)/ [Hmim][PF ₆]	1.855 0	-186.653 8	1.064 9	-218.006 7
R1234ze(E)/ [Omim][PF ₆]	1.657 3	-176.745 9	0.821 5	-186.573 4

为了验证模型参数的准确性,图 1 给出了 3 种工质对 NRTL 模型计算值与实验值的偏差分布,可知计算值和实验值的最大偏差在 5.5% 以内,模型具有较高的计算精度,可用于下一步循环计算,偏差 $\delta_{ARD}=100(x_{exp}-x_{cal})x_{exp}^{-1}$ 。

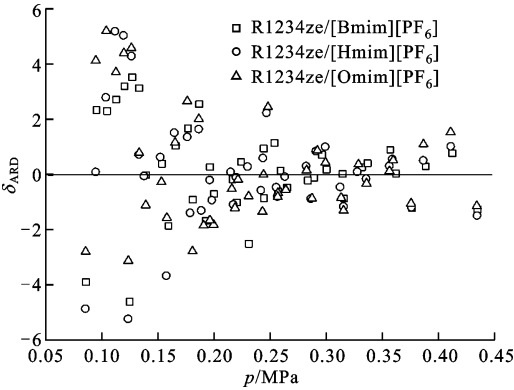


图 1 工质对相平衡实验值与 NRTL 模型计算值偏差分布

进行制冷循环分析时,需要用到制冷剂与离子液体混合物的焓值,即^[16-17]

$$H = x_1 H_1 + x_2 H_2 + H^E \tag{7}$$

$$H_2 = \int_{T_0}^T c_{p,IL} dT + \int_{p_0}^p v_{IL} dp + H_0 \tag{8}$$

$$H^E = -RT^2 \sum_{i=1}^2 x \left(\frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial T} \right)_{p,x} \tag{9}$$

式中: H_1 、 H_2 分别为制冷剂、离子液体的焓; H^E 为混合物的过量焓; $c_{p,IL}$ 为离子液体的定压摩尔比热容; v_{IL} 为离子液体的摩尔体积。根据国际制冷学会参考标准, $T_0=273.15\text{ K}$ 时, $H_0=200\text{ kJ/kg}$ 。离子液体的定压摩尔比热容 $c_{p,IL}$ 和摩尔体积 v_{IL} 计算公式为^[18-19]

$$c_{p,IL} = R \left(A + B \frac{T}{100} + D \frac{T^2}{100^2} \right) \tag{10}$$

$$v_{IL} = \sum_{i=0}^2 (D_i (T - 298.15)^i) + n \sum_{i=0}^2 (E_i (T - 298.15)^i) + \sum_{i=0}^2 (F_i (T - 298.15)^i) \tag{11}$$

式中 R 为通用气体常数。

2 吸收式制冷循环模型及验证

整个吸收式制冷循环中,来自蒸发器的过热制冷剂蒸汽在吸收器中被浓溶液吸收,成为稀溶液并经过溶液泵加压,随后经溶液换热器输送到发生器,溶液换热器起到预热作用。通过吸收外界高温热源的热量,稀溶液在发生器解析出制冷剂随后溶液成为浓溶液,同时释放出高温、高压的制冷剂蒸汽,随后浓溶液依次经过溶液换热器放热、膨胀阀减压后回到吸收器。高温、高压的过热蒸汽则进入冷凝器,被冷却后经过节流阀进入蒸发器进行制冷,最后制冷剂蒸汽重新进入吸收器被浓溶液吸收,完成吸收式制冷的整个循环过程。吸收制冷循环的基本原理如图 2 所示,图中数字 1~10 表示循环节点。

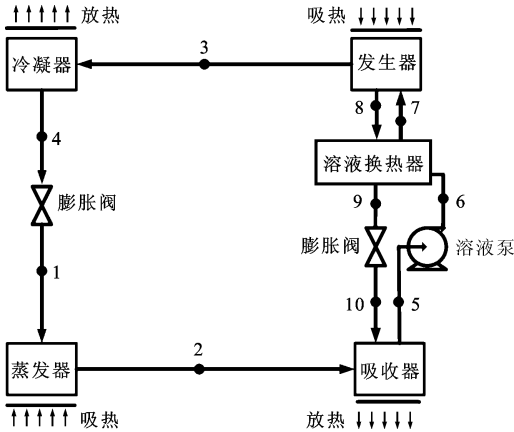


图 2 单效式吸收制冷循环结构图

在进行循环性能分析时,假定整个循环处于稳态,制冷剂离开蒸发器和冷凝器时为饱和状态,制冷剂与离子液体在发生器、吸收器出口处于相平衡状态,流动阻力、压力损失、热损失忽略不计。在吸收式制冷循环中,尽管溶液泵是一个非常重要的组成部分,但相比其他各部分吸、放热量的量级而言,溶液泵耗功可忽略不计^[20],因此本文在循环计算时未考虑泵功。

基于质量和能量守恒,建立制冷循环中各部件的质能方程。对发生器而言,热平衡关系为

$$Q_g + m_r h_7 = m_r h_3 + (m_w - m_r) h_8 \tag{12}$$

式中: Q_g 为发生器热负荷; h_i 为各状态节点的焓值; m_w 为稀溶液的质量流量; m_r 为制冷剂蒸汽的质量流量。

对于吸收器

$$Q_a + m_w h_5 = m_r h_2 + (m_w - m_r) h_{10} \tag{13}$$

对于冷凝器

$$Q_c + m_r h_4 = m_r h_3 \quad (14)$$

对于蒸发器

$$Q_c + m_r h_1 = m_r h_2 \quad (15)$$

对于溶液换热器

$$Q_x = (m_w - m_r)(h_8 - h_9) \quad (16)$$

式中: Q_a 、 Q_c 、 Q_e 、 Q_x 分别为吸收器、冷凝器、蒸发器和溶液换热器的热交换量。本文设定换热器效率 80%。循环倍率定义为^[21-22]

$$f = \frac{m_s}{m_r} = \frac{1 - x_w}{x_s - x_w} \quad (17)$$

式中: m_s 为浓溶液的质量流量; x_w 为稀溶液的质量分数; x_s 为浓溶液的质量分数。单效式吸收式制冷系统的性能系数为

$$C_{\text{cop}} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (18)$$

系统的焓效率为

$$\eta_{\text{Ex}} = \frac{E_{Q_e}}{E_{Q_g}} = C_{\text{cop}} \frac{|1 - T_{\text{ref}}/T_e|}{(1 - T_{\text{ref}}/T_g)} \quad (19)$$

式中: E_{Q_e} 、 E_{Q_g} 分别为收益焓、代价焓; T_e 、 T_g 分别为蒸发温度、发生温度; $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$ ^[17,23]。

为了验证循环模型计算的准确性,本文计算了 R1234ze(E)/[Hmim][Tf₂N]工质对在单效吸收制冷循环的性能,并与文献[11]的计算结果进行了比较。图 3 给出了在相同计算工况条件下(吸收器温度和冷凝温度 T_c 均为 35 °C,蒸发器温度为 5 °C),发生器出口温度变化时系统性能的变化,可知本文计算结果与文献结果吻合较好,二者细微的差别可能是由离子液体的比热容计算方法不同造成的。

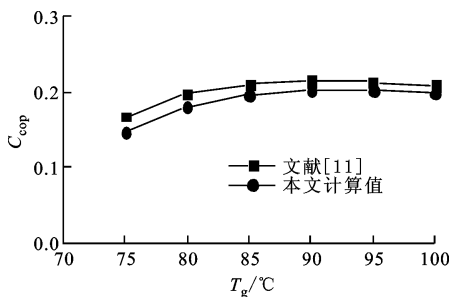


图3 R1234ze(E)/[Hmim][Tf₂N]工质对系统的性能系数计算值与文献[11]对比

3 结果分析

本文研究了 R1234ze(E)与 3 种不同离子液体组成的工质对在单效式吸收式制冷循环中的应用,并分析了不同工况下变化对系统性能的影响。

3.1 发生温度和蒸发温度对系统性能的影响

分析发生温度对系统循环倍率的影响可直观反映出工质对在制冷系统中的表现,因此本文首先分析了不同蒸发温度时发生器出口温度对循环倍率的影响,结果如图 4、5 所示。设定的吸收器温度为 35 °C,冷凝温度分别为 30 °C、35 °C。

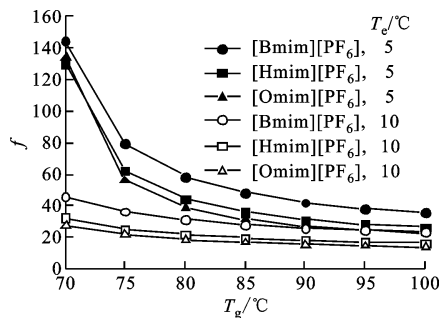


图4 $T_c = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时发生器出口温度对循环倍率的影响

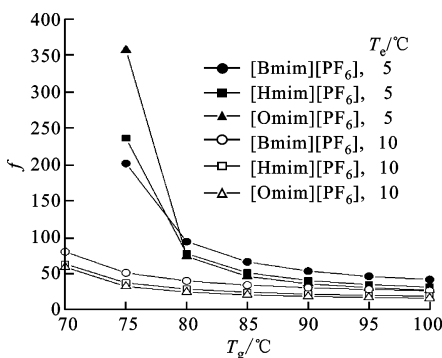


图5 $T_c = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时发生器出口温度对循环倍率的影响

由图 4 可知,在相同的蒸发温度和冷凝温度下,所研究的 3 种工质对的循环倍率变化由小到大依次为 [Omim][PF₆]、[Hmim][PF₆]、[Bmim][PF₆]。由图 5 可知,蒸发温度从 5 °C 变化到 10 °C 时,循环倍率明显减小,有利于制冷循环的进行。冷凝温度变化对循环倍率也有一定的影响,提高冷凝温度会造成冷凝器内制冷剂压力的升高,从而影响发生器中制冷剂的释放,造成循环倍率降低。[Bmim][PF₆] 相对于其他两种离子液体拥有更高的循环倍率,表明产生相同质量的制冷剂蒸气需要更大的稀溶液质量流量。随着发生温度的升高,循环倍率逐渐下降,产生单位质量的制冷剂需要稀溶液质量流量逐渐减小,最终平稳,发生温度越高,浓溶液与稀溶液的浓度差越大,循环倍率越低。

溶液浓度表示制冷循环中溶液在进入发生器前后的制冷剂在离子液体中的质量分数,稀溶液和浓溶液的浓度差 $\Delta x = x_s - x_w$ 直接取决于制冷剂在离子液体的溶解度和压力的变化。图 6 给出了冷凝温

度和吸收温度一定时,不同蒸发温度下溶液浓度差随发生器温度的变化趋势。由图 6 可知,当蒸发温度从 10℃升高到 20℃时,浓度差变大,导致稀溶液质量流率减小,制冷系统制冷量增大,系统性能上升。图 7 给出了冷凝温度变化时,溶液浓度差随发生器温度的变化,可知冷凝温度 35℃时,[Omim][PF₆]的浓度差变化最明显,改变冷凝温度可提升循环性能。

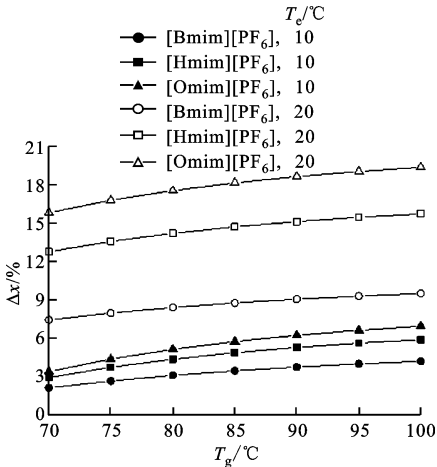


图 6 $T_c=30\text{℃}$ 、 $T_a=35\text{℃}$ 时不同温度下浓度差随温度的变化

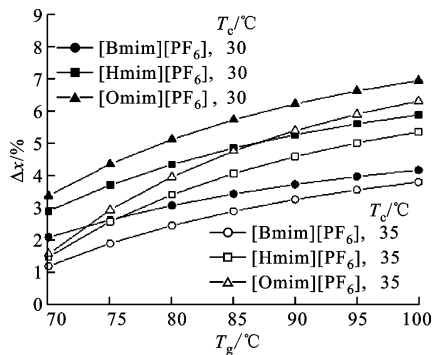


图 7 $T_c=10\text{℃}$ 、 $T_a=35\text{℃}$ 时不同温度下浓度差随温度的变化

图 8 给出了蒸发温度和吸收温度一定,冷凝温度分别为 30℃、35℃时,系统性能系数随发生温度的变化情况。由图 8 可知:冷凝温度为 30℃时,[Omim][PF₆]与[Hmim][PF₆]的性能变化相近,并在发生温度 70℃时性能系数达到最大值,随后逐渐下降;冷凝温度为 35℃时,工质对在 85℃时性能系数达到最大值。两种工况下[Bmim][PF₆]的性能系数值最小,[Omim][PF₆]相对于其他两种离子液体,性能系数值最大,可达到 0.21。

3.2 吸收温度对系统性能的影响

结合工业中的实际需要,本文将吸收温度设定

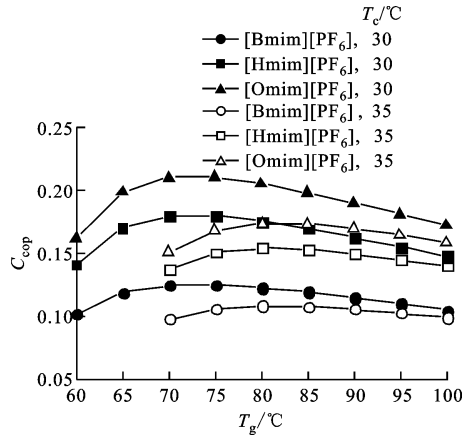


图 8 $T_c=10\text{℃}$ 、 $T_a=30\text{℃}$ 时 3 种工质对在不同发生器出口温度时的系统性能变化

为环境冷却水的温度,温度为 30~50℃。图 9 给出了 3 种工质对在不同吸收器出口温度的系统性能,可知在发生温度为 100℃、冷凝温度为 30℃、蒸发温度为 10℃时,随着吸收温度的逐渐升高,性能系数逐渐降低,呈现单调减小的趋势,其中[Omim][PF₆]的降低幅度最大,这是由于 R1234ze(E)在[Omim][PF₆]的溶解度随温度的变化幅度大于其他 2 种离子液体,降低吸收温度可明显提升系统的性能。

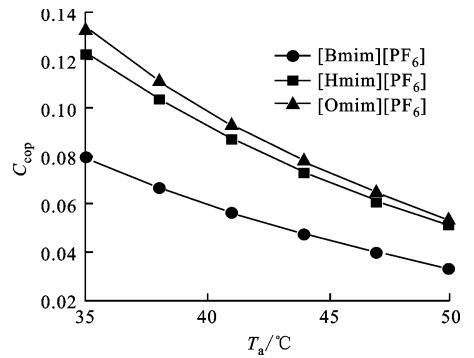


图 9 3 种工质对在不同吸收器出口温度时的系统性能变化

3.3 系统的焓分析

为了对循环有进一步的认识,本文计算了 3 种工质对应用于吸收式制冷循环时的焓效率,分析了焓效率随发生温度的变化情况,如图 10 所示。在冷凝温度 30℃时,对 3 种工质对而言,循环的焓效率值在 65℃时均达到最大,分别为 0.089、0.072 和 0.054,其中[Omim][PF₆]最大,[Bmim][PF₆]最小;在冷凝温度为 35℃时,循环的焓效率较低。

3.4 与其他工质对对比分析

为了进一步考察分析本文研究的 3 种工质对与文献中 R1234ze(E)与其他离子液体组成的工质对

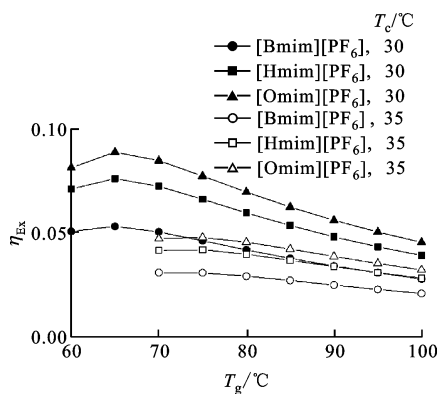


图10 循环焓效率随发生器出口温度的变化
($T_c = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_a = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

的性能,图11、12分别给出了蒸发温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、吸收温度和冷凝温度均为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件时,不同发生温度对系统循环倍率和系统性能的影响。由图11可知,当发生温度在 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同工质对循环倍率由小至大依次为 $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{Emim}][\text{BF}_4]$,而当发生温度高于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{BF}_4]$ 和 $[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 的循环倍率基本趋于一致,其中 $[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 随发生温度的变化下降最为明显。

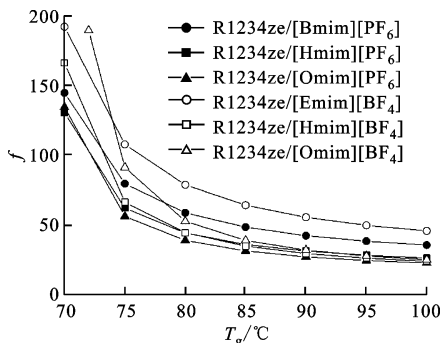


图11 不同工质对发生器出口温度随循环倍率的影响

图12中 $\text{R1234ze(E)}/[\text{Emim}][\text{BF}_4]$ 、 $\text{R1234ze(E)}/[\text{Hmim}][\text{BF}_4]$ 、 $\text{R1234ze(E)}/[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 的结果取自文献[9], $\text{R1234ze(E)}/[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 的结果取自文献[10]。按系统性能由大至小依次为 $[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 、 $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Emim}][\text{BF}_4]$ 。工质对 $\text{R1234ze(E)}/[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 在发生温度为 $70\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时性能系数上升明显,在 $95\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时性能系数与 $\text{R1234ze(E)}/[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 基本接近。同样,在发生温度较高时, $\text{R1234ze(E)}/[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 和 $\text{R1234ze(E)}/$

$[\text{Omim}][\text{BF}_4]$ 具有相近的性能系数。

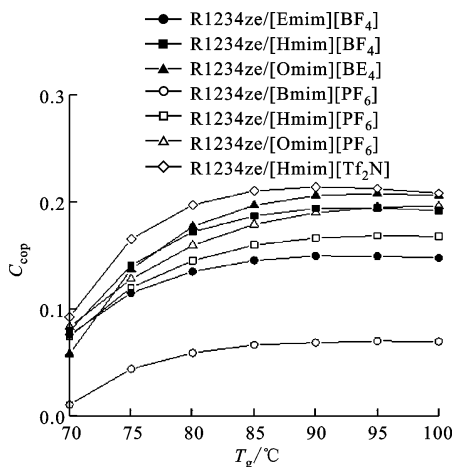


图12 不同工质对系统性能随发生器出口温度的变化

4 结 论

本文研究了 R1234ze(E) 与3种离子液体 $[\text{Omim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Hmim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]$ 组成的新型工质对在吸收式制冷循环中的热力学性能,分析了不同发生温度、蒸发温度以及冷凝温度下的循环倍率、稀溶液的质量流量浓度差以及系统性能系数和焓效率变化情况。提高系统蒸发温度,可以降低系统的循环倍率,溶液浓度差变大,提高系统性能;提高冷凝温度,系统性能则会下降;随着温度的变化,3种工质对呈现先增大后缓慢减小的趋势;提高吸收温度,系统性能单调递减。此外,与多种 R1234ze(E) +离子液体进行了对比,结果表明, $\text{R1234ze(E)}/[\text{Hmim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 系统性能最优, $\text{R1234ze(E)}/[\text{Emim}][\text{BF}_4]$ 性能最低。

参考文献:

- [1] SRIKHIRIN P, APHORNRATANA S. A review of absorption of technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2001, 5(4): 343-372.
- [2] WU W, WANG B, SHI W, et al. Absorption heating technologies: a review and perspective [J]. Applied Energy, 2014, 130(5): 51-71.
- [3] SUN J, FU L, ZHANG S. A review of working fluids of absorption cycles [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2012, 16(4): 1899-1906.
- [4] WU W, WANG B, SHI W, et al. An overview of ammonia-based absorption chiller and heat pumps [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2014, 31(3): 681-707.
- [5] 禹志强, 吴铁晖, 吴裕远, 等. 氨-水和氨-水-溴化锂

- 在吸收式制冷机的对比实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 46-49.
- YU Zhiqiang, WU Tiejui, WU Yuyuan, et al. Experimental comparison between ammonia-water and ammonia-water-lithium bromide in absorption chiller [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(3): 46-49.
- [6] KIM Y J, KIM S, JOSHI Y K. Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system with ionic liquid/refrigerant mixture as a working fluid [J]. Energy, 2012, 44(1): 1005-1016.
- [7] KIM S, KOHL P A. Theoretical and experimental investigation of an absorption refrigeration system using R134/[bmim][PF₆] working fluid [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52: 13459-13465.
- [8] KIM S, KOHL P A. Analysis of [hmim][PF₆] and [hmim][Tf₂N] ionic liquid as a absorbent for an absorption refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 48: 105-113.
- [9] 李星, 徐士鸣, 李建波. 基于 R124-DMAC 为工质对的余热吸收式制冷 [J]. 化工学报, 2015, 66(5): 1883-1890.
- LI Xing, XU Shiming, LI Jianbo. Absorption refrigeration cycle driven by waste heat using R124-DMAC as working fluids [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(5): 1883-1890.
- [10] 梁世强, 赵杰, 王立, 等. 离子液体型新工质对吸收式制冷循环 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1626-1630.
- LIANG Shiqiang, ZHAO Jie, WANG Li, et al. Absorption refrigeration cycle utilizing a new working pair of ionic liquid type [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1626-1630.
- [11] WU W, YOU T, ZHANG H Y, et al. Comparisons of different ionic liquids combined with trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene(R1234ze(E)) as absorption working fluids [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88(4): 45-47.
- [12] WU W, ZHANG H Y, TIAN Y, et al. Thermodynamic investigation and comparison of absorption cycles using hydrofluoroolefins and ionic liquid [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56: 9906-9916.
- [13] SUJATHA I, VENKATARATHNAM G. Comparisons of performance of a vapor absorption refrigeration system operating with some hydrofluorocarbons and hydrofluoroolefins as refrigerants along with ionic liquid [hmim][Tf₂N] as the absorbent [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88(3): 370-382.
- [14] RENON H, PRAUSNITZ J M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures [J]. AIChE Journal, 1968, 14(1): 135-144.
- [15] SUN Y J, ZHANG Y, DI G L, et al. Vapor-liquid equilibria for R1234ze(E) and three imidazolium-based ionic liquids as working pairs in absorption-refrigeration cycle [J]. Journal of Chemical Engineering and Data, 2018, 63(8): 3053-3060.
- [16] SHIFLETT M B, YOKOZEKI A. Solubility and diffusivity of hydrofluorocarbons in room-temperature ionic liquids [J]. AIChE Journal, 2006, 52(3): 1205-1219.
- [17] KIM Y J, GONZALEZ M. Exergy analysis of an ionic-liquid absorption refrigeration system utilizing waste-heat from datacenters [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 48: 26-37.
- [18] GARDAS R L. A group contribution method for heat capacity estimation of ionic liquids [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2008, 47(15): 5751-5757.
- [19] JACQUEMIN J, HUSSON P, MAYER V, et al. High-pressure volumetric properties of imidazolium-based ionic liquids: effect of the anion [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2007, 52(6): 2204-2211.
- [20] HEROLD K E, RADERMACHER R, KLEIN S A. Absorption chillers and heat pumps [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC press, 2016: 128-129.
- [21] MORENO D, FERRO V R, RIVA J D, et al. Absorption refrigeration cycles based on ionic liquids: Refrigerant/absorbent selection by thermodynamic and process analysis [J]. Applied Energy, 2018, 213: 179-194.
- [22] WANG M, BECKER T M. Assessment of vapor-liquid equilibrium models for ionic liquid based working pairs in absorption cycles [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 87(3): 10-25.
- [23] AYOU D S, CURRAS M R. Performance analysis of absorption heat transformer cycles using ionic liquids based on imidazolium cation as absorbents with 2,2,2-trifluoroethanol as refrigerant [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84: 512-523.

(编辑 赵炜)