

文章编号:0253-4339(2019)04-0052-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.052

采用离子液体-水工质对的 GAX 吸收式制冷循环性能研究

赵心蕊 徐震原 王如竹

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 热驱动的吸收式制冷技术是太阳能利用和工业余热回收的重要途径,其中 GAX(吸收发生换热)吸收式循环具有高效、效率可随热源温度变化的特点。本文提出采用无结晶风险的离子液体工质对,并使用 NRTL 模型对离子液体工质对性质进行计算,并对 GAX 吸收式制冷循环进行性能计算。结果表明:采用 1,3-二甲基咪唑磷酸二甲酯盐([DMIM][DMP])/水工质对可以使用 GAX 吸收式循环,且在发生温度较高的情况下 COP 能够达到约 1.02,比相同特定工况下的单效循环 COP 提升 27.5%,比采用溴化锂/水工质对的吸收式循环具有更加优异的性能。

关键词 制冷;GAX 吸收式循环;NRTL 模型;离子液体

中图分类号:TB61⁺6;TB64 **文献标识码**:A

Performance Analysis of a GAX Absorption Cycle with Ionic Liquid-water Working Pairs

Zhao Xinrui Xu Zhenyuan Wang Ruzhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Heat-driven absorption refrigeration technology is an important approach for solar-energy utilization and industrial-waste heat recovery. Among them, the generation and absorption heat exchange (GAX) absorption cycle exhibits a high efficiency whose coefficient of performance (COP) can vary with the heat-source temperature. This paper proposes the use of an ionic liquid-water working pair without crystallization risk for the GAX absorption cycle. The NRTL (non-random two liquid) model is utilized to calculate the thermal physical properties of the ionic liquid-water working pair, and the performance of the GAX absorption refrigeration cycle is calculated based on the working-pair properties. The results showed that the [DMIM][DMP]/water solution can be used in the GAX absorption cycle and achieves a COP of 1.02, which is 27.5% higher than that in a single-effect cycle. In addition, the results show that the ionic liquid-water absorption cycle achieves better performance than the LiBr-water absorption cycle.

Keywords refrigeration; GAX absorption cycle; NRTL model; ionic liquid

在不同的能源消耗类别中,制冷所占比例很大,目前广泛使用的压缩式制冷需要消耗高品位电能,采用的制冷剂可能具有破坏臭氧层和产生温室效应的缺陷^[1]。吸收式制冷具有可直接利用低品位热能,采用环保制冷剂和无噪音等优点。为提高能源利用率,提出工业余热应用到双效溴化锂吸收式制冷技术,节能效果较好^[2]。但溴化锂-水工质对存在易结晶的问题,限制了其使用范围,同时增加了系统的设计难度。氨水溶液具有腐蚀性、毒性及高温下的不稳定性,存在需要精馏和工作压力高等缺点。为解决以上工质对的弊端,近年很多研究者关注不易挥发、无腐蚀性且没有结晶问题的离子液体作为吸收剂。目

前离子液体吸收气体的研究多集中于 CO₂ 捕捉^[3],但如果将 CO₂-离子液体的工质对用于吸收式制冷循环,只能得到约 0.2 的低 COP,所以吸收式制冷很少采用 CO₂ 作为制冷剂^[4]。虽然多数采用离子液体工质对的吸收式循环不能达到采用溴化锂水溶液工质对的吸收式循环的效率,但在运行中仍存在离子液体所特有的运行优势,如无需考虑结晶与毒性问题。以水系工质对的单效制冷循环为例,循环在发生温度为 100 ℃、蒸发温度为 10 ℃、冷凝温度为 30 ℃、吸收温度为 40 ℃的情况下,最高 COP 可达 0.829^[5]。效率次之的组合为三氟乙醇作为制冷剂,以[BMIM][Br]作为吸收剂,在上述工况下单效循环 COP 可达

基金项目:国家自然科学基金(51606124)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51606124).)

收稿日期:2018-06-02;修回日期:2018-09-14

0.807^[6]。但目前离子液体比溴化锂与氨的价格高,若采用离子液体作为吸收剂仅能达到与溴化锂水溶液或氨水溶液接近的吸收式制冷 COP,离子液体工质对的实用价值远低于溴化锂水溶液和氨水溶液工质对。

吸收式制冷的另一大决定性因素是吸收式循环。在众多吸收式循环中,GAX(吸收发生换热)吸收式循环是一种高效的内部回热式循环,通过将部分吸收热用于驱动发生器,有效提升了系统的热效率和循环性能^[7]。目前氨水工质对常用于 GAX 吸收式循环中,但其存在需要精馏、工作压力高、有毒性等问题,且氨的相变潜热和传质性能比水差;同时水为制冷剂的溴化锂-水工质对存在结晶的风险,无法应用于 GAX 吸收式循环;离子液体则不存在以上工质对存在的问题。为了充分发挥离子液体的运行优势,即高温状态下的稳定性与难结晶性,以及 GAX 吸收式循环的高效优势,本文提出将离子液体工质对应用于 GAX 吸收式循环,同时兼顾高系统效率和运行稳定性。

本文将根据已发表文献筛选出具有高系统效率潜力的离子液体溶液作为工质对,并将其应用于 GAX 吸收式循环中进行效率计算,根据离子液体溶液的相平衡数据和实验拟合出的模型参数,使用 NRTL(non-random two liquid)模型建立离子液体溶液工质对的热物性函数,然后根据工质对热物性进行 GAX 吸收式循环的性能计算并讨论结果,最后与采用该工质对和溴化锂水溶液工质对的单效制冷循环进行对比分析。

1 工质对的选取

1.1 水系工质对

常用制冷剂中,水是环保无污染且成本较低的制冷剂,目前吸收式制冷中也常采用溴化锂水溶液作为工质对,具有较高的效率,其中水为制冷剂,溴化锂水溶液为吸收剂。在搭配合适的离子液体吸收剂时,采用水为制冷剂的单效吸收式制冷循环 COP 如表 1 所示^[4,8],在发生温度为 100 ℃,蒸发温度为 10 ℃,冷凝温度为 30 ℃,吸收温度为 40 ℃的情况下,水和大多数离子液体的组合进行的单效吸收式制冷循环 COP 可达约 0.5~0.6。采用[DMIM][DMP]作为吸收剂时,COP 最高达到 0.829。

1.2 氨系工质对

在吸收式制冷剂工质对中,常用的氨系工质对为氨水溶液,其中氨为制冷剂,水为吸收剂。由于氨的蒸发温度低,可以制得 0 ℃以下的冷量,具有显著的

运行区间优势。很多学者研究了氨与离子液体的组合,E. Ruiz 等^[9]将氨与[Choline][NTf2]、[EMIM][Ac]、[EMIM][EtSO₄]等离子液体吸收剂进行组合,在发生温度为 100 ℃、蒸发温度为 10 ℃、冷凝温度为 30 ℃、吸收温度为 40 ℃的情况下得到的最高 COP 为 0.668。由于氨本身的潜热和传热传质性能弱于水,在氨与离子液体组合中,目前未发现 COP 大于[DMIM][DMP]水溶液的组合。

表 1 采用离子液体水的单效吸收式制冷循环 COP^[4,8]

Tab.1 COP of the single stage absorption refrigeration cycle with different water-ionic liquids

制冷剂/吸收剂	COP
H ₂ O/[BMIM][BF ₄]	0.544
H ₂ O/[EMIM][BF ₄]	0.525
H ₂ O/[EMIM][EtSO ₄]	0.569
H ₂ O/[DMIM][DMP]	0.662
H ₂ O/[BMIM][I]	0.534
H ₂ O/[BMIM][DBP]	0.532
H ₂ O/[EEIM][DEP]	0.565
H ₂ O/[EMIM][DEP]	0.588
H ₂ O/[EMIM][DMP]	0.691
H ₂ O/[DMIM][DMP]	0.829
H ₂ O/[DMIM][Cl]	0.827

注:发生温度为 100 ℃,蒸发温度为 10 ℃,冷凝温度为 30 ℃,吸收温度为 40 ℃。

1.3 其他工质对

对以有机工质(如 HFC)作为制冷剂,有机离子液体作为吸收剂的组合早有研究,具有能够达到较低制冷温度、易提纯等优点,但仍存在破坏臭氧层和温室效应的缺点。此外,采用 HFC-离子液体工质对的吸收式制冷循环的 COP 较低^[10],与采用水-离子液体工质对的吸收式制冷循环的 COP 有较大差距。

醇类制冷剂主要包括甲醇与三氟乙醇,其中甲醇与[MMIM][DMP]组合的 COP 较高但仍低于溴化锂,且甲醇具有一定毒性。三氟乙醇可以达到较高的 COP,但传热性能较差,无法设备小型化,且汽化潜热较小,增加了设备的容积^[11]。

通过以上工质对的调研和筛选发现,HFC 类制冷剂与离子液体结合 COP 通常较低;醇类制冷剂与离子液体组合的吸收式制冷机无法设备小型化,氨类制冷剂与离子液体组合的 COP 低于水类制冷剂,所

以本文最终选择水为制冷剂。根据表 1 中的数据,选择 [DMIM][DMP] 为吸收剂,以求在其单效 COP 较高的基础上通过 GAX 吸收式循环扩大优势,更好的提升系统性能。

2 GAX 吸收式循环

图 1 所示为 GAX 吸收式循环的 p - T - x 图。其工作过程为:

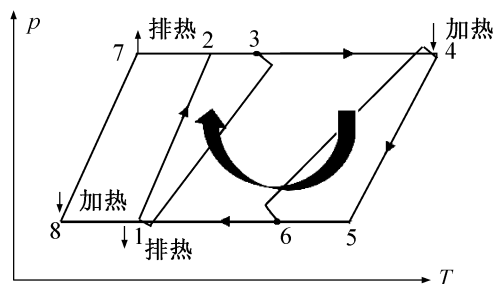


图 1 GAX 吸收式循环的 p - T - x 图

Fig.1 p - T - x diagram of the GAX absorption refrigeration cycle

1) 1-2: 此过程为稀溶液(本文中浓度指离子液体的浓度)的预热过程,该过程由 4-5 过程的浓溶液显热和 5-6 过程的吸收热进行加热,当溶液达到状态 2 时饱和,开始发生。

2) 2-4: 此过程为溶液的发生过程,可被分为 2-3 即 GAX 发生过程和 3-4 即外热源加热发生过程,其中 2-3 的热量来自于 5-6 的吸收热,3-4 过程利用外部提供的高温热量继续发生。

3) 4-5: 此过程为发生结束后到开始吸收前的浓溶液冷却过程,放出的热量用于过程 1-3。

4) 5-1: 此过程为吸收过程,可被分为 5-6 即 GAX 吸收过程和 6-1 即由环境冷却的吸收过程,其中 6-5 过程释放的热量被用于发生过程 1-3,而 6-1 过程则向外部冷却水放热继续进行吸收。

5) 2-7 为冷凝过程,8-1 为蒸发过程。

在 GAX 吸收式循环中,溶液开始吸收(状态 5)的温度高于溶液开始发生(状态 2)的温度,所以可采用吸收热对发生过程进行加热,从而减少对外部热源的需求,提升整个循环的 COP。此外,5-1 过程和 2-4 过程之间的温度重叠范围越宽,吸收热回收越多, COP 越高。

3 数学模型

为进一步研究工质对 H_2O /[DMIM][DMP] 应用于 GAX 吸收式制冷循环的工作性能和效率,本文通过建立数学模型进行分析。数学模型建立可分为两

部分,首先建立工质对的物性关系模型,其次建立 GAX 吸收式循环的模型,将循环工作过程进行建模仿真计算。

3.1 工质对热力学性质模型

工质对热力学性质的模型建立包括两部分,首先通过 NRTL 模型确定压强、温度和质量分数或摩尔分数之间的关系,然后在此基础上建立焓值模型进行热量变化计算,为后续的循环性能计算做准备。

NRTL 模型可求解活性系数 γ ,是目前所有求解活性系数模型中最常用的一种,而 γ 是 VLE 气液平衡方程的必要参数^[12]。对于工质对 H_2O /[DMIM][DMP],本文采用上述 VLE 气液平衡方程建立 p - T - x 的关系模型。对于有 n 种组成成分的液体,其 VLE 方程^[13]为:

$$y_i \varphi_i p = x_i \gamma_i p_i^s \quad (1)$$

式中: y_i 为第 i 种工质的气态摩尔分数; φ_i 为第 i 种工质的校正系数; p 为气体压强, MPa; x_i 为第 i 种工质的液体摩尔分数; p_i^s 为第 i 种工质的饱和压强, MPa。

本文采用的工质对只有 H_2O 和 [DMIM][DMP], 由于离子液体的不易挥发性, [DMIM][DMP] 的气相质量分数可以忽略不计,故式(1)可简化为:

$$\gamma_1 = p / (x_1 p_1^s) \quad (2)$$

其中 p_1^s 可通过 Refprop 软件提供的数据拟合得到,拟合结果如下^[13]:

$$p_1^s = 22.064 \exp(647.096 (\sum a_i (1 - T/T_c)^{b_i}) / T) \quad (3)$$

式中: T 为所选用温度, K; T_c 为拟合出的常数; a_i 和 b_i 如表 2 所示。

对于两相系统,根据 NRTL 模型可以得到 γ_1 、 γ_2 , 公式如下^[14]:

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left[\tau_{21} \left(\frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{12}} \right)^2 + \frac{G_{12} \tau_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})^2} \right] \quad (4)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2 \left[\tau_{12} \left(\frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right)^2 + \frac{G_{12} \tau_{21}}{(x_1 + x_2 G_{12})^2} \right] \quad (5)$$

其中:

$$G_{12} = \exp(-\alpha \tau_{12}); G_{21} = \exp(-\alpha \tau_{21}) \quad (6)$$

$$\tau_{12} = \tau_{12}^{(0)} + \tau_{12}^{(1)} / T; \tau_{21} = \tau_{21}^{(0)} + \tau_{21}^{(1)} / T \quad (7)$$

式中: $\tau_{12}^{(0)}$ 、 $\tau_{12}^{(1)}$ 、 $\tau_{21}^{(0)}$ 、 $\tau_{21}^{(1)}$ 、 α 由实验数据拟合得到,如表 3 所示,其中此工质对的校正系数 $\alpha = 0.279$ 。

表 2 饱和和压强拟合关系式的参数
Tab.2 Parameters of the fitting equation of
saturation pressure

<i>i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	-7.85	1.0
2	1.84	1.5
3	-11.79	3.0
4	22.68	3.5
5	-15.96	4.0
6	1.80	7.5

表 3 H₂O/[DMIM][DMP] 的 NRTL 模型的参数
Tab.3 Parameters of model with H₂O/[DMIM][DMP]
as working pairs

上标	0	1
τ_{12}	1.73	177.6
τ_{21}	-2.907	-484.6

由此 NRTL 模型计算所得的 p - T - x 图与文献中实验数据^[15]的对比如图 2 所示,经分析可得实验与此模型的平均误差为 1.44%。

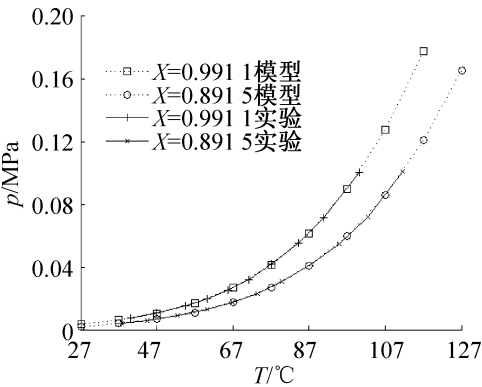


图 2 模型与实验数据对比
Fig.2 Comparison between the simulation results
and experiment results

离子液体的总焓值包括水的焓值、离子焓值和二者的混合焓值:

$$h = x_1h_1 + x_2h_2 + \Delta h_{\text{mix}} \tag{8}$$

式中: x_1 为离子液体中水的摩尔分数; x_2 为离子液体中[DMIM][DMP]的摩尔分数; h_1 为水的焓值, kJ/K; h_2 为离子的焓值, kJ/K; Δh_{mix} 为离液体的混合焓, kJ/K。

h_1 知其比热容与温差,通过积分可直接获得。离子的焓值可通过对比热容积分获得。

[DMIM][DMP] 的比热容可由式(9)求得^[14]:

$$c_p = \sum_{j=0}^2 A_j w_i + T \sum_{j=0}^2 B_j w_i + T^2 \sum_{j=0}^2 C_j w_i \tag{9}$$

式中: A_j, B_j 和 C_j 分别为各项系数,其值如表 4 所示; w_i 为液体质量分数($i=0,1,2$),其中 w_0 为液体总质量分数, w_1 为水的质量分数, w_2 为 [DMIM][DMP] 的质量分数。

表 4 [DMIM][DMP] 的比热容
Tab.4 Heat capacity parameters of [DMIM][DMP]

<i>j</i>	<i>A_j</i>	<i>B_j</i>	<i>C_j</i>
0	5.523	-0.008 33	1.276×10^{-5}
1	-16.595	0.079 08	-1.052×10^{-4}
2	14.284	-0.081 34	1.114×10^{-4}

故离子部分的焓值为:

$$h_2 = \int_{273.15}^T c_p dT \tag{10}$$

由于液体混合过程是非理想情况,会产生混合焓 Δh_{mix} , 计算方式可由吉布斯自由能得到:

$$\Delta g_{\text{excess}} = RT(x_1 \ln \gamma_1 + x_2 \ln \gamma_2) \tag{11}$$

$$\Delta h_{\text{mix}} = \Delta h_{\text{ideal}} + \Delta h_{\text{excess}} \tag{12}$$

其中理想部分 $\Delta h_{\text{ideal}} = 0$, 而非理想部分产生的焓值 Δh_{excess} 为:

$$\Delta h_{\text{excess}} = -T^2 \left[\frac{\partial (\Delta g_{\text{excess}} / T)}{\partial T} \right] \tag{13}$$

3.2 吸收式制冷循环计算模型

GAX 吸收式制冷循环与普通单效循环的区别在于普通的溶液热交换器只能通过交换内部显热^[16]来节约能量,而 GAX 吸收式循环不仅可以交换显热,还可以交换部分潜热来节约能量从而提升循环效率,循环效率可在更大范围内随发生温度的升高而升高。

为对 GAX 吸收式循环进行建模,需进行如下假设:1)GAX 传热为逆流传热,传热最小温差 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$;2)系统处于稳定运行状态;3)泵功耗忽略不计且节流过程为等焓;4)蒸发器与吸收器的压力相同,发生器与冷凝器的工作压力相同。

GAX 吸收式制冷循环的性能计算过程如下:

1)冷凝过程:由设定的冷凝温度得到冷凝与发生压力,从而得到发生结束后的蒸气焓值,冷凝温度下水的焓值与上述蒸气的焓值差即为冷凝热:

$$Q_{\text{condensation}} = m_{\text{steam}} (h'_4 - h_7) \tag{14}$$

2)发生过程(热源驱动部分):指从开始吸收外部热量开始的发生部分,即 GAX 吸收式循环的发生

过程结束后的部分。根据最小传热温差可知:

$$T_6 = \Delta T + T_2 \quad (15)$$

根据 GAX 吸收部分的放热等于其发生部分吸收热量,可得 T_3 。3-4 的发生过程所吸收的热量即为发生热:

$$Q_{\text{generation}} = m_{\text{weak}} h_4 + m'_{\text{steam}} h'_4 - m_{\text{gaxgeneration}} h_3 \quad (16)$$

式中: m_{weak} 为稀溶液。

3) 蒸发过程: 由设定的蒸发温度与冷凝温度即可计算, 蒸发温度下的气态焓值与冷凝温度下的液态焓值差值即为蒸发热:

$$Q_{\text{evaporation}} = m_{\text{steam}} (h'_8 - h_7) \quad (17)$$

4) 吸收过程: 指从开始对外部进行放热的吸收部分, 即 GAX 吸收式循环的吸收过程结束后的部分。6-7 部分所放出的热量即为吸收热:

$$Q_{\text{absorption}} = m_{\text{gaxabsorb}} h_6 + m''_{\text{steam}} h'_8 - m_{\text{strong}} h_1 \quad (18)$$

式中: m_{strong} 为浓溶液。

5) GAX 传热过程: 将吸收过程放出的部分热量转移给发生器用于发生过程, 即 4-6 部分所放出的热量为 GAX 传热量:

$$Q_{\text{gax}} = m''_{\text{steam}} h'_8 - m_{\text{gaxabsorb}} h_6 + m_{\text{weak}} h_5 + m_{\text{weak}} (h_4 - h_5) \quad (19)$$

所以, 此 GAX 制冷循环的效率 COP 为:

$$\text{COP} = Q_{\text{evaporation}} / Q_{\text{generation}} \quad (20)$$

当计算单效吸收式制冷循环的效率时, 无溶液热交换器的循环过程为 8-7-4-5, 所用公式为式 (1) ~ 式 (18) 和式 (20), 如考虑溶液热交换器的传热过程, 溶液热交换器将发生过程结束后的溶液热量传递给吸收过程结束后的溶液用于预热, 根据溶液热交换器有效度 e 计算传热后发生端溶液出口温度:

$$T_{\text{genshxout}} = T_4 - e(T_4 - T_8) \quad (21)$$

溶液热回收器的传热量为:

$$Q_{\text{shx}} = m_{\text{weak}} (h_4 - h_{\text{genshxout}}) \quad (22)$$

当有效度 $e = 0.75$ 时, 在发生温度为 100°C 、蒸发温度为 10°C 、冷凝温度为 30°C 、吸收温度为 40°C 的情况下, 通过在 Matlab 中建模可得单效吸收式循环的 $\text{COP} = 0.822$, 而如表 1 所示同样工况下文献中的 $\text{COP} = 0.829$, 证明本文模型的有效性。

根据式 (1) ~ 式 (20), 通过在 Matlab 中建模计算可得在以上工况下 GAX 吸收式循环的 $\text{COP} = 0.784$ 。其效率低于单效吸收式循环的原因是 GAX 吸收式循环在发生温度和吸收温度相差较小时不具备更大的优势, 吸收潜热回收的能力无法完全发挥, 但在高驱动温度工况下其 COP 相比单效吸收式循环具有较大优势。

4 计算结果与讨论

4.1 发生温度对 COP 的影响

在冷凝温度为 30°C 、蒸发温度为 10°C 、吸收温度为 30°C 时的 GAX 吸收式制冷循环的 COP 变化如图 3 所示。

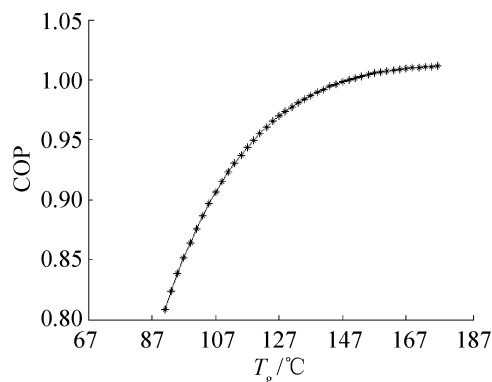


图 3 GAX 吸收式制冷循环 COP 随发生温度的变化
Fig.3 COP of the GAX absorption refrigeration cycle under different generation temperatures

由图 3 可知, 发生温度为 87°C 以后, COP 随发生温度的升高而升高。在温度较低时, GAX 吸收式制冷循环由于发生温度过低, 系统无法达到能量平衡状态, 所以发生温度的起始值较高, 为 91°C 。在此工况下, GAX 吸收式制冷循环的 COP 可在 167°C 发生温度下达到约 1.02。

4.2 蒸发温度对 COP 的影响

当发生温度为 150°C 、冷凝温度为 30°C 、吸收温度为 30°C 时, COP 随蒸发温度的变化如图 4 所示。

由图 4 可知, 循环 COP 随蒸发温度的升高而逐渐增大, 当蒸发温度从 0°C 升至 20°C 时, 系统 COP 从 0.75 升至 1.25, 蒸发温度升高时, GAX 回热温度范围增加, 故 GAX 循环 COP 上升。

4.3 冷凝温度对 COP 的影响

蒸发温度为 10°C 、吸收温度为 30°C 、发生温度为 150°C 时, COP 随冷凝温度的变化如图 5 所示。

由图 5 可知, COP 随冷凝温度逐渐升高而逐渐降低, 且下降趋势变缓, 可见冷凝温度越高, 对 COP 的影响越小。当冷凝温度升高时, GAX 回热的温度范围缩小, 故 GAX 吸收式制冷循环效率下降。

4.4 与溴化锂/水吸收式循环的对比

冷凝温度为 30°C 、蒸发温度为 10°C 、吸收温度为 30°C 的工况下, 将溴化锂和水的单效吸收式制冷循环 COP 与 $\text{H}_2\text{O}/[\text{DMIM}][\text{DMP}]$ 的单效吸收式制冷循环与 GAX 循环 COP 随发生温度变化后的情况

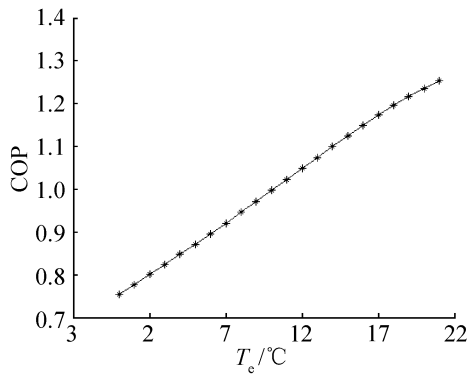


图 4 GAX 吸收式制冷循环 COP 随蒸发温度的变化
Fig.4 COP of the GAX absorption refrigeration cycle under different evaporation temperatures

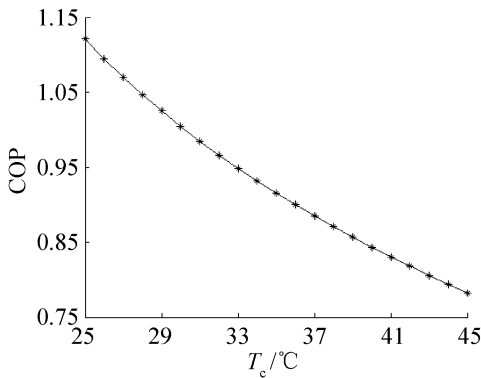


图 5 GAX 吸收式制冷循环 COP 随冷凝温度的变化
Fig.5 COP of the GAX absorption refrigeration cycle under different condensation temperatures

进行对比,如图 6 所示。

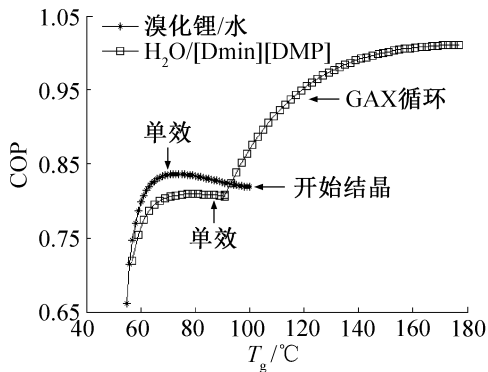


图 6 与溴化锂/水单效吸收式制冷循环的 COP 对比
Fig.6 COP comparison with the single effect H₂O/LiBr absorption refrigeration cycle

由图 6 可知,发生温度为 50~100 ℃ 时,溴化锂和水工质对更具优势,但当发生温度>100 ℃ 时,采用溴化锂水溶液的单效循环开始结晶,而采用离子液体水溶液的循环可以开始采用 GAX 吸收式制冷循环达

到更高的效率。在发生温度为 170 ℃ 时,采用离子液体水溶液的 GAX 吸收式制冷循环 COP 可达 1.02,较相同工况下采用离子液体水溶液的单效循环最高 COP 高 27.5%,较采用溴化锂水溶液的单效循环 COP 高 20%。

5 结论

本文提出采用离子液体与水工质对在发生温度较高的情况下结合 GAX 吸收式循环以得到更高的 COP。通过采用 NRTL 模型对 H₂O/[DMIM][DMP] 进行热力学物性建模,再建立 GAX 吸收式制冷循环的数学模型,计算得到该系统在不同工况下的 COP。结果表明,当发生温度较高时,在冷凝温度为 30 ℃、蒸发温度为 10 ℃、吸收温度为 30 ℃ 的工况下,采用 H₂O/[DMIM][DMP] 的 GAX 吸收式制冷循环的 COP 比其单效吸收式制冷循环高 27.5% 以上,比采用溴化锂水溶液的单效吸收式制冷循环高 20% 以上。

当热源温度较高时,采用离子液体水溶液的 GAX 吸收式制冷循环不仅避免了结晶、毒性和精馏等问题,还可以达到更高系统效率,值得进一步研究。

参考文献

- [1] XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development [J].Frontiers in Energy,2017,11(4):414-436.
- [2] JIN Sumin, CHEN Liyun, ZHU Yongchang. Analysis of energy utilizing efficiency in a two-stage LiBr-H₂O absorption refrigerator driven by waste heat of flue gas[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(1):19-23.
- [3] YUAN Shengjuan, CHEN Yifeng, JI Xiaoyan, et al. Experimental study of CO₂, absorption in aqueous cholinium-based ionic liquids[J]. Fluid Phase Equilibria, 2017,445:14-24.
- [4] MARTÍN Á, BERMEJO M D. Thermodynamic analysis of absorption refrigeration cycles using ionic liquid + supercritical CO₂ pairs [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2010, 55(2):852-859.
- [5] ZHENG Danxing, DONG Li, HUANG Weijia, et al. A review of imidazolium ionic liquids research and development towards working pair of absorption cycle [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 37:47-68.
- [6] WANG Jianzhao, ZHENG Danxing. Performance analysis of absorption cooling cycle utilizing TFE-[BMIm][Br] as working fluid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11):1813-1816.
- [7] 缪宝龙,孙文哲,韩笑生,等. 基于 GAX 循环的喷射-吸

- 收式氨水制冷循环研究[J]. 制冷, 2012, 31(4): 1-5. (MIAO Baolong, SUN Wenzhe, HAN Xiaosheng, et al. Research on the injection-absorption ammonia refrigeration cycle based on the GAX cycle[J]. Refrigeration, 2012, 31(4): 1-5.)
- [8] YOKOZEKI A, SHIFLETT M B. Water solubility in ionic liquids and application to absorption cycles[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(19): 9496-9503.
- [9] RUIZ E, FERRO V R, DE RIVA J, et al. Evaluation of ionic liquids as absorbents for ammonia absorption refrigeration cycles using COSMO-based process simulations[J]. Applied Energy, 2014, 123: 281-291.
- [10] KIM S, KIM Y J, JOSHI Y K, et al. Absorption heat pump/refrigeration system utilizing ionic liquid and hydrofluorocarbon refrigerants[J]. Journal of Electronic Packaging, 2012, 134(3): 031009.
- [11] 卞宜峰, 何国庚, 蔡德华, 等. 吸收式制冷工质对的研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(6): 17-26. (BIAN Yifeng, HE Guogeng, CAI Dehua, et al. Research progress of absorption refrigeration working pairs[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(6): 17-26.)
- [12] SHIFLETT M B, HARMER M A, JUNK C P, et al. Solubility and diffusivity of 1,1,1,2-tetrafluoroethane in room-temperature ionic liquids[J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 242(2): 220-232.
- [13] 史奇冰, 郑逢春, 李春喜, 等. 用 NRTL 方程计算含离子液体体系的汽液平衡[J]. 化工学报, 2005, 56(5): 751-756. (SHI Qibing, ZHENG Fengchun, LI Chunxi, et al. Calculation of vapor-liquid equilibrium for ionic liquid-containing systems with NRTL equation[J]. Journal of Chemical Industry, 2005, 56(5): 751-756.)
- [14] PÁTEK J, KLOMFAR J. A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr-H₂O solutions from 273 to 500 K over full composition range[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(4): 566-578.
- [15] DONG Li, ZHENG Danxing, NIE Nan, et al. Performance prediction of absorption refrigeration cycle based on the measurements of vapor pressure and heat capacity of H₂O+[DMIM] DMP system[J]. Applied Energy, 2012, 98: 326-332.
- [16] ZHANG Xiaodong, HU Dapeng. Performance simulation of the absorption chiller using water and ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium dimethylphosphate as the working pair[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3316-3321.

通信作者简介

徐震原, 男, 博士, 助理教授, 上海交通大学机械与动力工程学院, 18801906602, E-mail: xuzhy@sjtu.edu.cn。研究方向: 吸收式制冷与热泵技术。

About the corresponding author

Xu Zhenyuan, male, Ph. D., assistant professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, + 86 18801906602, E-mail: xuzhy@sjtu.edu.cn. Research fields: absorption refrigeration and heat pump.