

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-112-07

离子液体用于吸收式制冷系统的筛选

郭紫君¹ 孙 晗¹ 党超宾² 马国远¹

- (1. 北京工业大学环境与能源工程学院制冷与低温工程系 北京 100124;
2. 东京大学新领域创成科学研究科人间环境专攻 日本千叶 2778563)

【摘要】 在传统的吸收式制冷系统中,最常用的工质对是 LiBr/H₂O 和 NH₃/H₂O。然而, LiBr/H₂O 工质对具有腐蚀和结晶的问题, NH₃/H₂O 工质对则面临着 NH₃ 本身有毒和需设置精馏装置等问题。离子液体作为一种新型的吸收剂可以有效地避免采用上述工质对所带来的弊端。研究和开发适合的离子液体/制冷剂工质对是吸收式制冷发展的一个重要方面。针对用于吸收式制冷系统的离子液体,从物性到循环特性的国内外研究进展进行了综述,并从应用于吸收式制冷系统的角度给出筛选工质对的建议。

【关键词】 离子液体; 吸收式制冷; 工质对; 基础物性; 筛选
中图分类号 TB616 文献标识码 A

Ionic Liquid Screening for Absorption Refrigeration Systems

Guo Zijun¹ Sun Han¹ Dang Chaobin² Ma Guoyuan¹

- (1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124;
2. Department of Human and Engineered Environmental Studies, the University of Tokyo, Chiba, 2778563)

【Abstract】 In traditional absorption refrigeration systems, most commonly used working fluid pairs are LiBr/H₂O and NH₃/H₂O. However, LiBr/H₂O working fluid has problems of corrosion and crystallization, and NH₃/H₂O working fluid pair faces problem that NH₃ is toxic and a rectification apparatus must be installed. As a new type of absorbent, ionic liquids can effectively avoid disadvantages of above-mentioned working fluids. Research and development of suitable ionic liquid/refrigerant working fluid pairs for real application is an important aspect of development of absorption refrigeration. This paper summarized research progress of ionic liquid-type working fluid pairs in domestic and overseas from basic physical properties to cycle performance, and gave suggestions for selection of working fluid pairs from point of application of ionic liquid in absorption refrigeration systems.

【Keywords】 ionic liquid; absorption refrigeration; working fluid pairs; basic physical properties; screening

0 引言

随着经济的飞速发展,人类所面临的能源与环境问题日益突出。吸收式制冷机和热泵由于可用工业废热、余热及可再生能源驱动,又可采用天然工质为制冷剂,不破坏臭氧层,不产生温室效应,越

来越受到人们的重视。

吸收式制冷系统的工质对由吸收剂和制冷剂组成,适用于吸收式制冷系统的工质对需要具有以下特性:工质对溶液平衡蒸气压低,吸收剂吸收制冷剂的能力强,工质对组成的溶液具有较大的导热

作者简介:郭紫君(1993.5-),女,在读硕士研究生, E-mail: guozijun0527@sina.com

通讯作者:孙 晗(1969.11-),女,工学博士,讲师, E-mail: han.sun@bjut.edu.cn

收稿日期:2018-05-03

系数、较低的比热容, 较小的粘度, 溶液具有化学稳定性, 无毒性, 安全。

离子液体与制冷剂组成的工质对一般具有平衡蒸气压低, 良好的导热性, 热稳定性, 离子液体不挥发等特点^[1]。这些特点, 使得离子液体可以用于吸收式制冷系统, 但离子液体又往往有比热容大, 粘度大的特点, 这些方面是不利于吸收式系统运行的。本研究在简述离子液体的种类、命名和特性的基础上, 从蒸气压, 扩散系数, 比热容, 粘度及系统性能等方面给出了可用于吸收式制冷系统的几种离子液体, 以供深入研究离子液体用于吸收式系统时选用。

1 离子液体简介

离子液体也称室温离子液体或室温熔融盐, 是由特定的有机阳离子和无机阴离子构成的在室温或近室温下呈液态的熔盐体系。按照有机阳离子母体的不同, 主要可以分为四类: 咪唑盐类、吡啶盐类、季铵盐类和季磷盐类^[2]。

各种离子液体的英文全称较长, 比较难以记忆, 以咪唑离子液体为例, 咪唑离子液体通常使用两个取代烷基的第一个字母的大写(或小写)缩写后边跟“IM”或“im”。如丙基的英文为“propyl”, 甲基的英文为“methyl”, 则丙基甲基咪唑的命名就为“[PMIM]”或“[pmim]”。在有三个取代烷基的情况下, 除非特殊的情况, 三个烷基都是以第一个字母的缩写形式出现, 其他离子液体的命名基本相似, 现有文献中大小写通用^[3]。阴离子的命名更为简单, 可直接用其化学式表示, 如磷酸二乙酯盐可直接写作 $[(EtO)_2PO_2]$, 或者也可像阳离子一样, 取其英文的第一个字母的大写(或小写), 同样如磷酸二乙酯盐的英文为“diethylphosphate”, 而这个词也是根据其组成而写成的, 可根据结构分成“di-ethyl-phosphate”, 分别取第一个字母的大写, 可写作[DEP]。如 1-乙基-3-甲基咪唑磷酸二乙酯, 对应的英文名字为 1-Ethyl-3-methylimidazolium diethyl phosphate, 按上述命名规则其中阳离子 1-Ethyl-3-methylimidazolium 可写做[EMIM], 阴离子 diethyl phosphate 可写作 [DEP] 或直接用化学式 $[(EtO)_2PO_2]$ 表示, 那么该离子液体可写成[EMIM][DEP]或[EMIM][$(EtO)_2PO_2$]。

2 离子液体型工质对的物性研究

由于离子液体与制冷剂种类繁多, 两者组合产

生的工质对数量庞大, 国内外学者从不同的角度对不同的离子液体型工质对进行了大量的研究。

2.1 离子液体型工质对平衡蒸气压研究进展

选取吸收温度为 40°C , 将国内外学者对离子液体型工质对的平衡蒸气压的研究数据汇总, 见图 1。考虑到吸收式制冷系统中所用的工质对, 吸收器中吸收率越大, 系统的 COP 越高。在蒸发压力不变的情况下, 希望工质对溶液的平衡蒸气压越低越好, 以便增大吸收驱动力。从图 1 可以看出以水为制冷剂的离子液体型溶液平衡蒸气压最低的是 $[E_3MPy][OMs]+H_2O$ (离子液体摩尔分数 0.7605), 其次是 $[EMIM]Ac+H_2O$ (离子液体摩尔质量分数是 0.8) 和 $[HMIM]Cl+H_2O$ (离子液体摩尔分数 0.8), 比较适合用于吸收式制冷系统。

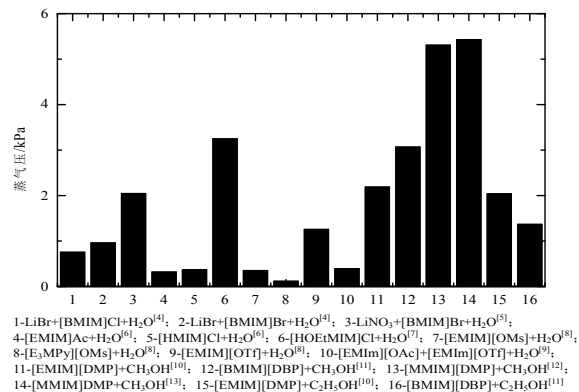


图 1 $t_a=40^\circ\text{C}$ 时, 不同离子液体型工质对对蒸气压数据

Fig.1 Vapor pressure data of different ionic liquid working pairs at $t_a=40^\circ\text{C}$

离子液体的亲水性受阳离子和阴离子类型的影响。在咪唑鎓基离子液体和水相互溶解的情况下, 阴离子的性质在很大程度上决定了这些混合物的宏观行为^[14]。具有较小亲水阴离子的离子液体如氯(Cl), 溴(Br)和乙酸盐(Ac)可以与水互溶并且具有强吸湿性。皇甫立霞的课题组^[15-18]发现两种亲水离子液体[Emim]Ac和[Hmim]Cl可显著降低二元体系的蒸气压。Merkel^[8]等人还发现亲水性按以下阴离子的顺序降低: $[OAc]>[OMs]>[OTf]$, 亲水性直接与蒸气压的降低有关, 因此也与吸收循环的性能有关。

2.2 离子液体型工质对扩散系数研究进展

考虑吸收式系统的循环倍率定义为送往发生器的稀溶液流量除以制冷剂蒸气流量。在制冷量一定的条件下, 制冷剂蒸气流量就确定了, 吸收器内吸收率越高, 说明吸收所需的浓溶液的流量就越

少,对应的吸收后产生的稀溶液流量就越小,循环倍率就越小。而发生器的热负荷与循环倍率成正比。所以在制冷量一定时要提高系统 COP,需要减小发生器的热负荷。而通过增强吸收器的吸收率,减小循环倍率可减小发生器的热负荷。而在吸收器内溶液吸收制冷剂蒸气的过程是扩散过程,要增强吸收,就希望扩散系数越大越好^[19]。

根据斐克定律,扩散系数是沿扩散方向,在单位时间每单位浓度降的条件下,垂直通过单位面积扩散某物质的质量或摩尔数,一种物质的扩散系数表示它的扩散能力,是重要的物理参数之一^[20]。

关于气液扩散系数,早期研究的比较多的是 Shiflett 等人^[21-23]。近年来,何茂刚和刘向阳等人^[24-28]得到了不同氢氟烃在不同离子液体中的扩散系数,结果表明氢氟烃在离子液体中的扩散系数随温度的升高而增大,通过比较 R32、R161、R1234yf、R125、R143a、R152a 与离子液体 [HMIM][PF₆] 的组合,发现 R32 与离子液体 [HMIM][PF₆] 的组合扩散系数最大,因此比较适合作为吸收式制冷循环的工质对。

Chen 等人^[29]将经典的 Mach-Zehnder 干涉光路应用于测量离子液体吸收式制冷工质对的互扩散系数的测量。他们测量了 [MMIM][DMP]+H₂O 和 [MMIM][DMP]+CH₃OH 的扩散系数,发现扩散系数随温度的升高而增大,随着离子液体的质量分数的增加而减小。并得出互扩散系数 [MMIM][DMP]+CH₃OH>[MMIM][DMP]+H₂O>LiBr+H₂O 的关系。

除了对扩散系数的实验研究,也有学者尝试通过模拟的方法得到扩散系数数据。辛绪亮等人^[30]采用 DL_POLY 软件和分子动力学模拟的方法对 [BMIM][Br] 水溶液的扩散系数进行了计算。在 379.4K 下,[BMIM][Br] 阴阳离子的扩散系数的数量级为 10⁹m²·s⁻¹,与 Soriano^[31] 等人测量的实验值数量级一致。也可以看出随着溶液中水含量的增多,扩散系数得到了明显的提高。

2.3 离子液体型工质对比热容研究进展

比热容是重要的物性参数。吸收式制冷的工质对溶液的比热容越小越好,因为比热容越小,发生器中加热溶液到沸腾所需要的热量就越少,同时在吸收器中冷却水带走同样多的热量稀溶液温度下降得越多,越利于吸收。

从目前公开发表的文献中可以看到,尽管纯离子液体的比热容有的比水的比热容大,有的比水

小,但是绝大部分的离子液体型工质对的比热容均呈现以下规律:在温度一定的情况下,比热容随离子液体的浓度增加而减小,在相同浓度下,比热容随温度的升高而升高。如孙立等人^[32],Zheng 的课题组^[7,33],赵宗昌课题组^[11,34-39]对不同的离子液体型工质对的比热容进行了测量,均符合上述变化规律。

然而,也有学者得到了相反的结论。Królikowska^[40]发现纯 [HiQuin][SCN] 的比热容远比水的比热容大,且在同温度下随水含量的增加而降低,在相同的离子浓度下,热容量随着温度的升高而略有下降。Lin 等人^[41]测量了 [EMIM][EtSO₄] 和 [EMIM][CF₃SO₃] 与 H₂O 组成的工质对的热容,发现比热容值随着温度和离子液体浓度的增加而增加,纯 [Emim][EtSO₄] 和 [Emim][CF₃SO₃] 的比热容值远远大于水的比热容值,比热容值与温度呈线性关系。

选取发生温度为 80℃,将各学者研究的离子液体型工质对的比热容数据进行比较,如图 2 所示,仅从比热容角度考虑,可以看出 [HMIM]Cl+H₂O 和 [EMIM]Ac+H₂O 的比热容较小。

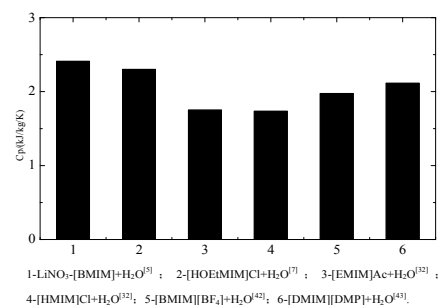


图 2 t_g=80℃ 时不同离子液体型工质对比热容数据

Fig.2 Specific heat capacity data of different ionic liquid working pairs at t_g=80℃

2.4 离子液体型工质对粘度研究进展

粘度是液体的一个很重要的传输性质,在进行离子液体应用于吸收式制冷系统的研究时,不可忽略粘度的影响。由于离子液体中阴阳离子存在很强的氢键,使得其具有较高的粘度,较大的流动阻力,这对吸收系统的运行是不利的,在吸收式制冷系统中,高粘度意味着需要更大的泵功率,更大的管路和系统体积^[44,45]。

目前,关于离子液体型工质对粘度性质的研究比较少。在同样的温度条件下,粘度随着离子液体摩尔浓度的增加而增加,在同样的离子浓度条件下,粘度随温度的增加而减小。在常温条件下,纯离子液体的粘度通常大于水的粘度,当水的含量增加时,粘度下降。

如何减小粘度成为了越来越多学者所关心的问题。有学者发现在离子液体中加入水或醇类物质时, 粘度会下降。He 等人^[46]对几种离子液体的粘度进行实验, 发现粘度的变化符合一般的粘度规律, 并且当 [MMIM][DMP] 被加热或是与水/乙醇/甲醇配对时, 粘度会下降, 这对吸收式热泵在高温下运行提供了帮助。

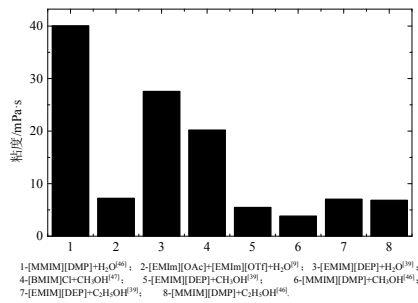


图 3 $t=20^{\circ}\text{C}$ 时不同离子液体型工质对粘度数据

Fig.3 Viscosity data of different ionic liquid working pairs at $t=20^{\circ}\text{C}$

Kim 等人^[44]发现, 粘度随着阳离子质量增加而增加: $\text{emim}^+ < \text{bmim}^+ < \text{hmim}^+$ 。粘度更依赖于阴离子, 顺序如下: $\text{Tf}_2\text{N}^- < \text{BF}_4^- < \text{PF}_6^-$, 离子液体的较高粘度对压降和泵功率的影响通过稍微增加微流体通道横截面积而得到缓解。

选取 20°C 时的离子液体型工质对粘度, 将各学者的离子液体型工质对的粘度数据进行汇总, 如图 3 所示, 可以看出在同样的离子液体和甲醇或乙醇组成工质对的情况下, 粘度明显下降, 且与甲醇组成工质对粘度最低。[MMIM][DMP]+CH₃OH (离子液体摩尔分数 0.202) 和 [EMIM][DEP]+CH₃OH (离子液体摩尔分数 0.202) 具有较低的粘度。

2.5 离子液体型工质对制冷循环性能研究进展

研究离子液体是否适用于吸收式制冷系统, 还需要对离子液体型工质对应用于吸收式制冷系统的 COP 进行研究。

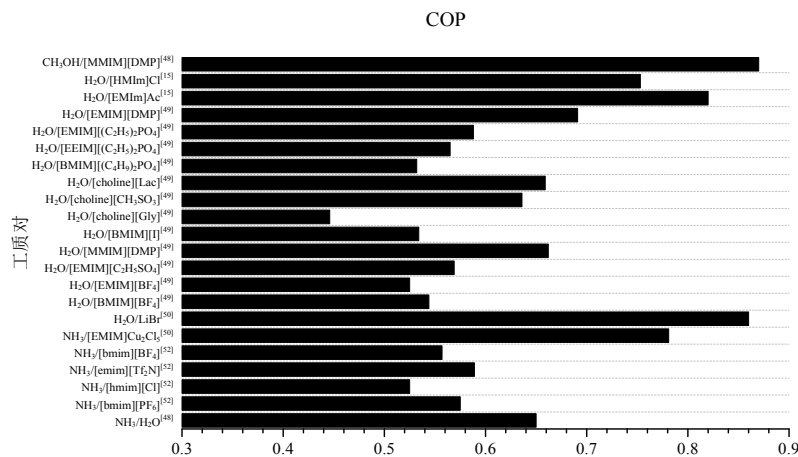


图 4 不同离子液体型工质对在 $t_e=10^{\circ}\text{C}$, $t_a=30^{\circ}\text{C}$, $t_c=40^{\circ}\text{C}$, $t_g=100^{\circ}\text{C}$ 情况下, 单效吸收式制冷系统 COP 对比

Fig.4 COP comparison of single-effect absorption refrigeration systems with different ionic liquid working pairs at $t_e=10^{\circ}\text{C}$, $t_a=30^{\circ}\text{C}$, $t_c=40^{\circ}\text{C}$, $t_g=100^{\circ}\text{C}$

选取离子液体用于单效吸收式制冷系统的研究数据, 比较不同离子液体型工质对在蒸发温度 10°C , 吸收温度 30°C , 冷凝温度 40°C , 发生温度 100°C 实验条件下的 COP, 如图 4 所示。可以看出现有研究的离子液体型工质对的 COP 很少有能超过传统的 LiBr/H₂O 工质对的系统 COP 的, 只是在梁世强^[48]等人的研究中, CH₃OH/[MMIM][DMP] 工质对的 COP 高达 0.87, 比 LiBr/H₂O 系统略高一些。此外栗航^[15]等人的研究中 H₂O/[EMIM]Ac 和 H₂O/[HMIM]Cl 系统也可接近 LiBr/H₂O 系统的 COP, A Yokozeki^[49]等人研

究的 H₂O/[EMIM][DMP] 虽低于 LiBr/H₂O, 但是仍然高于 NH₃/H₂O, 因此以上所述的工质对均具有应用的价值。以 NH₃ 为制冷剂的吸收式系统 COP 普遍较低, 但是 Chen^[50]等人的研究中 [EMIM]Cu₂Cl₅/NH₃ 系统 COP 可达 0.781, 虽低于同工况下 LiBr/H₂O 系统的 COP, 但是高于 NH₃/H₂O 系统, 也具有一定的应用价值。

Thomas Meyer^[51]等人在模拟的基础上对应用 C₂H₅OH/[EMIM][DEP] 工质对的单级吸收式制冷机进行了实验, 在模拟中最大的 COP 可接近 0.76, 然而实验中 COP 范围在 0.42~0.62 之间, 考虑可

能是由于实际实验中存在的热损失, 导致实验中 COP 的下降。

2.6 离子液体型工质对的初步筛选

根据以上各项研究数据对比, 综合分析认为 [EMIM]Ac+H₂O 和 [HMIM]Cl+H₂O 工质对具有相对较低的蒸气压和比热容, [MMIM][DMP]+CH₃OH 具有相对较大的扩散系数和较小的粘度。从基础物性的角度来讲, 这三种工质对具有相对较大的应用潜力; 而从吸收制冷循环性能的角度来讲, CH₃OH/[MMIM][DMP]、H₂O/[EMIM]Ac、H₂O/[HMIM]Cl、H₂O/[EMIM][DMP]和 C₂H₅OH/[EMIM][DEP]具有相对较高的 COP 值。

3 结论

(1) 离子液体与制冷剂组成的工质对数量庞大, 将合适的离子液体用于吸收式制冷系统中需要进行筛选。

(2) 针对提高吸收式系统的 COP, 要求吸收器内吸收率大, 系统循环倍率小。而吸收率与离子液体工质对溶液的平衡蒸气压和扩散系数有密切关系。在蒸发压力一定时, 溶液平衡蒸气压越小, 吸收驱动力越大, 越利于吸收。而制冷剂在离子液体溶液内扩散系数越大, 越利于吸收。

(3) 在制冷量一定时, 工质对溶液的比热容越小, 发生器所需供热量越少, 吸收器需要排出的热量越少, 系统 COP 越高。

(4) 离子液体粘度大, 系统管内流动阻力较大, 需要耗费更大的泵功, 可通过增大系统管路的截面积或通过在离子液体中加入醇类降低粘度。

(5) 经物性数据比较和分析认为 H₂O/[EMIM]Ac、H₂O/[HMIM]Cl 和 CH₃OH/[MMIM][DMP]具备应用于吸收式制冷系统的潜力, 应深入研究其应用于吸收式制冷循环的循环性能; 从已有吸收循环性能实验的研究上看 CH₃OH/[MMIM][DMP]、H₂O/[EMIM]Ac、H₂O/[HMIM]Cl、H₂O/[EMIM][DMP]和 C₂H₅OH/[EMIM][DEP]具有深入研究实用循环的价值。

参考文献:

[1] 邓友全. 离子液体-性质、制备与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006: 48.
[2] Lange N A, Dean J A. Lange's Handbook of

chemistry[M]. McGraw-Hill, 1999.

- [3] 张锁江. 离子液体: 从基础研究到工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 63.
[4] 罗春欢, 张渊, 苏庆泉. LiBr-[BMIM]Cl/H₂O 工质对的饱和蒸气压、结晶温度和腐蚀性[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1110-1116.
[5] Luo C, Li Y, Chen K, et al. Thermodynamic properties and corrosivity of a new absorption heat pump working pair: Lithium nitrate + 1-butyl-3-methylimidazolium bromide + water[J]. Fluid Phase Equilibria, 2017: 451.
[6] Guo K, Bi Y, Sun L, et al. Experiment and Correlation of Vapor-Liquid Equilibrium of Aqueous Solutions of Hydrophilic Ionic Liquids: 1-Ethyl-3-methylimidazolium Acetate and 1-Hexyl-3-methylimidazolium Chloride[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(8): 2243-2251.
[7] Nie N, Zheng D, Dong L, et al. Thermodynamic Properties of the Water+1-(2-Hydroxyethyl)-3-methylimidazolium Chloride System[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(12): 3598-3603.
[8] Merkel N, Weber C, Faust M, et al. Influence of anion and cation on the vapor pressure of binary mixtures of water+ionic liquid and on the thermal stability of the ionic liquid[J]. Fluid Phase Equilibria, 2015, 394: 29-37.
[9] Markus B, Fabian H, Elisa K, et al. Density, Viscosity, and Vapor-Liquid Equilibrium of the Ternary System Water-1-Ethyl-3-methylimidazolium Acetate-1-Ethyl-3-Methylimidazolium Trifluoro-methanesulfonate[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2017, 62(2): 720-728.
[10] 于静. 含乙基甲基咪唑磷酸二甲酯的三元新工质研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
[11] 常仁杰. 离子液体[BMIM][DBP]+水+醇三元工质热力学性质研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
[12] 赵杰, 梁世强, 陈坚, 等. 离子液体 1,3-二甲咪唑磷酸二甲酯盐-甲醇浓溶液气液平衡[J]. 化学工程, 2010, 38(3): 52-56.
[13] 陈伟. 离子液体吸收式制冷工质对基础物性与循环特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.
[14] Freire M G, Santos L M N B F, Fernandes A M, et al. An overview of the mutual solubilities of water-

- imidazolium-based ionic liquids systems[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2007,261(1):449-454.
- [15] 栗航,郭开华,皇甫立霞,等.强吸水性离子液体-水工质对吸收式制冷循环性能分析[J].*制冷学报*,2013,34(3):24-30.
- [16] Guo K, Bi Y, Sun L, et al. Experiment and Correlation of Vapor-Liquid Equilibrium of Aqueous Solutions of Hydrophilic Ionic Liquids: 1-Ethyl-3-methylimidazolium Acetate and 1-Hexyl -3-methylimidazolium Chloride[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012,57(8):2243-2251.
- [17] 皇甫立霞,吴晓虹,郭开华,等.一种水溶性离子液体作为吸收工质的热工特性研究[J].*中山大学学报(自然科学版)*,2011,50(6):39-42.
- [18] 关婷婷,孙立,皇甫立霞,等.离子液体[BMIM]BF₄+H₂O汽液相平衡实验研究[J].*低温物理学报*,2011(3):194-198.
- [19] 吴业正.制冷原理及设备[M].西安:西安交通大学出版社,2015:147.
- [20] 连之伟.热质交换原理与设备(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2011:13-15.
- [21] 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.
- [22] Shiflett M B, Harmer M A, Junk C P, et al. Solubility and Diffusivity of Difluoromethane in Room-Temperature Ionic Liquids[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2006,51(2):483-495.
- [23] Shiflett M B, Yokozeki A. Solubility and diffusivity of hydrofluorocarbons in room - temperature ionic liquids[J]. *Aiche Journal*, 2010,52(3):1205-1219.
- [24] 刘向阳,潘培,彭三国,等.氢氟烃在离子液体[HMIM][PF₆]₂中的扩散系数和亨利常数[J].*化工学报*, 2017,68(12):4486-4493.
- [25] He M, Peng S, Liu X, et al. Diffusion Coefficients and Henry's Constants of Hydrofluorocarbons in [HMIM][TfN], [HMIM][TfO], and [HMIM][BF₄][J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2017,112:43-51.
- [26] He M, Peng S, Zhang Y, et al. Mutual Diffusion Coefficients of Isopropanol + n-Heptane and Isobutanol + n-Heptane[J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2016,96:127-133.
- [27] Ying G, He M, Qiu Z, et al. Mass Diffusion Coefficients of Dimethyl Carbonate in Heptane and in Air at T = (278.15 to 338.15) K[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2008,53(12):2861-2864.
- [28] Guo Y, He M, Zhong Q, et al. Mass diffusion coefficients of oxygenated fuel additives in air[J]. *Energy*, 2009,34(10):1560-1564.
- [29] Chen W, Zhang B, Liu Z, et al. Investigation of the mutual diffusion coefficients of [mmim]DMP/H₂O and [mmim]DMP/CH₃ OH at atmospheric pressure[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017,111:559-569.
- [30] 辛绪亮,张晓冬,赵宗昌,等.离子液体[BMIM]Br的水溶液VLE与扩散系数的分子模拟[J].*化工学报*,2011, 62(s2):16-20.
- [31] Soriano A N, Agapito A M, Lagumbay L J L I, et al. Diffusion coefficients of aqueous ionic liquid solutions at infinite dilution determined from electrolytic conductivity measurements[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011,42(2):258-264.
- [32] 孙立,郭开华,皇甫立霞.EMIMAC和HMIMCl及其水溶液热力学特性实验研究[J].*低温物理学报*,2011(6):467-473.
- [33] Wang J, Zheng D, Fan L, et al. Vapor Pressure Measurement for the Water + 1,3-Dimethylimidazolium Chloride System and 2,2,2-Trifluoroethanol + 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate System[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2010,55(6):2128-2132.
- [34] Jing R, Zhao Z, Zhang X. Vapor pressures, excess enthalpies, and specific heat capacities of the binary working pairs containing the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium dimethylphosphate[J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2011,43(4):576-583.
- [35] Zhang X, Hu D. 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.
- [36] 冯青天.1-丁基-3-甲基咪唑磷酸二丁酯+水/醇新工质研究[D].大连:大连理工大学,2011.

- [37] 吕文斌. 离子液体型新工质“BMIM”“Lac”+水/醇的性质研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [38] 纪雯施. 含[EMIM][DEP]三元体系热力学性质的测定[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [39] 赵健华, 晏双华, 赵宗昌. 乙基甲基咪唑磷酸二乙酯+水/乙醇/甲醇二元溶液混合热及比热容的测量与关联[J]. 计算机与应用化学, 2011, 28(9): 1167-1170.
- [40] Królikowska M, Padaszyński K, Hofman T, et al. Heat capacities and excess enthalpies of the (N-hexylisoquinolinium thiocyanate ionic liquid+water) binary systems[J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2012, 55: 144-150.
- [41] Lin P Y, Soriano A N, Leron R B, et al. Measurements and correlations of electrolytic conductivity and molar heat capacity for the aqueous ionic liquid systems containing [Emim][EtSO₄] or [Emim][CF₃SO₃][J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2011, 35(6): 1107-1112.
- [42] 孙立, 郭开华, 皇甫立霞. 离子液体[BMIM][BF₄]水溶液比热容及热工特性分析[J]. 低温物理学报, 2011, 33(5): 381-385.
- [43] Dong L, Zheng D, Nie N, 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(1): 326-332.
- [44] Kim Y J, Kim S, Joshi Y K, et al. Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration system with ionic-liquid/refrigerant mixture as a working fluid[J]. Energy, 2012, 44(1): 1005-1016.
- [45] Luo C, Chen K, Li Y, et al. Crystallization Temperature, Vapor Pressure, Density, Viscosity, and Specific Heat Capacity of the LiNO₃/[BMIM]Cl/H₂O Ternary System[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2017, 62(10): 3043-3052.
- [46] He Z, Zhao Z, Zhang X, et al. Thermodynamic properties of new heat pump working pairs: 1,3-Dimethylimidazolium dimethylphosphate and water, ethanol and methanol[J]. Fluid Phase Equilibria, 2010, 298(1): 83-91.
- [47] 赵杰, 梁世强, 王立, 等. [bmim]Cl-CH₃OH 作为吸收式制冷工质对的潜能分析[J]. 化工学报, 2009, 60(12): 2957-2962.
- [48] 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): 1627-1630.
- [49] 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.
- [50] Wei C, Yang B. Thermal performance of an absorption-refrigeration system with [emim]Cu₂Cl₅/NH₃, as working fluid[J]. Energy, 2016, 112: 332-341.
- [51] Meyer T, Winker M, Bergemann S, et al. Experimental investigation of an absorption refrigerator working with ionic liquid and ethanol[C]. TPTPR2017, Seoul, 2017.
- [52] Yokozeki A, Shiflett M B. Ammonia Solubilities in Room-Temperature Ionic Liquids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(5): 1605-1610.

(上接第 111 页)

- [5] Jin S, Jin J, Gong Y. Natural ventilation of urban shallowly-buried road tunnels with roof openings[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2017, 63: 217-227.
- [6] 胡春艳. 市政公路隧道顶部开孔自然通风研究[J]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [7] 郭清超, 闫治国, 朱合华. 城市隧道顶部开口型自然通风研究现状综述[C]. 运营安全与节能环保的隧道及地下空间暨交通基础设施建设学术研讨会, 2013.
- [8] JTJ 026.1—1999, 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [9] 金学易, 陈文英. 隧道通风及隧道空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.