

氨吸附式制冷技术研究进展*

曾涛¹, 何兆红^{2†}, 小林敬幸¹, 黄宏宇²

(1. 名古屋大学, 名古屋 464-8601; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要: 氨吸附式制冷系统具有制冷量大、传质快等优点, 是一种优良的吸附式制冷系统。氨吸附式制冷系统可利用船舶余热、太阳能以及工业过程余热等热量提供冷量, 具有节能环保作用。本文从氨吸附式制冷系统吸附工质对、热力循环以及用途等方面开展探讨。

关键词: 吸附式制冷; 氨; 物理吸附; 化学吸附

中图分类号: TK12

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.02.011

Research Progress of Adsorption Refrigeration Using Ammonia as Adsorbate

ZENG Tao¹, HE Zhao-hong², KOBAYASHI Noriyuki¹, HUANG Hong-yu²

(1. Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Ammonia adsorption refrigeration system is an excellent system with advantages of good cooling capacity and high performance of mass transfer. It can generate cooling power by using ship's waste heat, solar energy and industrial process waste heat, and etc, which is environment friendly and energy saving. Adsorption working pair, heat & mass transfer and applications of this system were discussed in this paper.

Key words: adsorption refrigeration; ammonia; physical adsorption; chemical adsorption

0 引言

吸附式制冷技术利用低品位热量提供冷量, 同时采用环保工质对, 具有节能与环保特点, 引起了世界各国科技工作者的关注。制冷剂的性质对制冷机系统的效率, 驱动热源温度, 输出冷量温度以及环境保护等起到重要的影响作用。氨是在传统的吸附式制冷技术中普遍采用的一种制冷剂, 被认为是CFC与HCFCs的替代物。由于氨的沸点较低, 氨吸附制冷系统可以用于制冰, 并且运行压力为正压, 传质速率快, 蒸发潜热较大, 在以热制冷方面具有独特优势。

氨吸附式制冷系统中按吸附原理分为物理吸附剂、化学吸附剂以及复合/混合吸附剂。物理吸附的工质对主要是活性炭-氨, 化学吸附的工质对有金属氯化物/溴化物-氨, 如氯化钙-氨、氯化铯-氨、氯

化镁-氨以及氯化钡-氨等。复合/混合吸附采用化学吸附剂与多孔介质相混合, 当多孔介质对吸附质也有吸附作用时为复合吸附; 当多孔介质对吸附质没有吸附作用时为混合吸附^[1], 复合吸附工质对有石墨/氯化钙-氨, 混合吸附工质对有活性炭/金属氯化物-氨等。

另外, 制冷循环也是影响氨吸附式制冷系统性能的重要参数, 有基本型制冷循环、回热循环、回质驱动的优化循环以及热液循环等。

本文从氨吸附式制冷系统的发展趋势与应用现状出发, 重点介绍了系统中吸附工质对、制冷循环以及氨吸附式制冷系统的应用等方面的研究进展。

1 吸附工质对

吸附工质对是吸附式制冷系统中至关重要的因素, 每一种工质对都有较适合的应用场合。通常根

* 收稿日期: 2016-07-22 修订日期: 2017-03-17

† 通信作者: 何兆红, E-mail: hezh@ms.giec.ac.cn

据热源温度、制冷温度、用途、运行环境等选择合适的工质对。本文介绍了氨吸附的三类工质对,物理吸附工质对、化学吸附工质对以及复合/混合吸附工质对,在制冷系统中的应用。

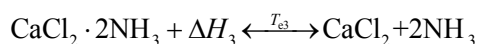
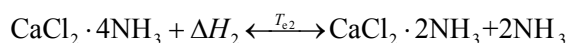
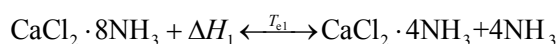
1.1 物理吸附工质对

活性炭对氨气的吸附属于物理吸附,主要依靠活性炭多孔材料吸附。在吸附式制冷方面,活性炭-氨是一种较好的吸附工质对,可适用于较高的热源温度,同时具备吸附量大、吸附速率快、吸附热不太高等优点。然而,活性炭-氨制冷系统也存在一些不足,一方面氨具有刺激性气味,对铜有腐蚀性^[2];另一方面脱附时压力较高,要求系统必须具有一定的承压能力。

王树刚等^[3]以活性炭-氨为吸附工质对开展吸附式制冷数值计算研究,采用高温烟气为驱动热源,建立吸附床数学模型,获得吸附床内部温度和压力的分布情况。王海民^[4]开展以活性炭-氨为吸附工质对的船舶余热驱动吸附式制冷研究,根据吸附工质对的吸附特性、船舶余热特点进行吸附式制冷系统设计。

1.2 化学吸附工质对

化学吸附是靠分子间发生络合、配位、氧化等化学反应而产生的。以氯化钙-氨为例,其反应方程式如下:



式中, ΔH_1 、 ΔH_2 和 ΔH_3 为化学反应焓, T_{e1} 、 T_{e2} 和 T_{e3} 为反应平衡温度。

从上述反应方程式可以看出,进行吸附反应时,1 mol 氯化钙能与 8 mol 的氨发生反应,与物理吸附相比,化学吸附的有效吸附量大得多,因此,采用化学吸附工质对能够降低吸附式制冷设备的体积,有利于设备小型化,但化学吸附剂存在易结块、使用寿命较短等问题。常用的化学工质对有氯化钙-氨、氯化锶-氨、氯化钡-氨以及氯化锰-氨等,其中氯化钙因吸附量大、价格低廉应用最为广泛。

早期国内外研究学者们已开展氨系吸附式制冷机理分析,获得氨系化学吸附工质对传热传质特性。梅宁等^[5]通过建立一维传热传质模型,对氯化钙-氨

为吸附工质对的吸附床开展传热传质研究,结果表明,提高吸附床导热系数和降低接触热阻都有利于制冷量的增加。王丽伟等^[6]对氯化钙-氨吸附机理进行研究,一方面考察吸附剂吸附过程膨胀与结块的影响因素,另一方面探讨了氯化钙吸附过程相对解吸过程存在滞后现象的原因,结果表明,吸附剂膨胀空间与吸附剂所占用体积比是吸附剂结块的重要因素,当比例较大时,吸附剂的厚度较薄,吸附剂没有结块;随着比例降低,吸附剂开始出现结块现象,吸附性能也开始提高,这种现象与化学吸附的 Arrhenius 活化能有关;同时,等压吸附与等压解吸性能相差较大,这与氨合氯化钙的稳定常数与不稳定常数以及反应过程的活化能有关。ZHOU 等^[7]对 $\text{MnCl}_2\text{-NH}_3$ 、 $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ 和 $\text{NH}_4\text{Cl-NH}_3$ 三对工质对进行非平衡吸附过程研究,结果表明工质对的 Clapeyron 曲线是温度与压力双变量曲线而非单变量曲线。

1.3 复合/混合吸附工质对

吸附剂的传热传质特性是影响吸附式制冷系统性能的重要因素。研发复合/混合吸附剂是提高吸附剂的传热传质特性的重要方法。

添加导热性能优异的材料可改善吸附剂传热问题。上海交通大学王如竹团队开展了以膨胀石墨为高导热材料提高吸附剂导热性能的研究^[8-10]。田波^[8]以膨胀石墨为基质分别研究膨胀石墨/活性炭和膨胀石墨/氯化钙混合吸附剂的导热特性与渗透性能,结果显示,添加膨胀石墨能够有效提高吸附剂导热性能。当膨胀石墨含量为 28.6% 时,活性炭/膨胀石墨混合吸附剂的导热系数为 2.08 W/m·K,是纯活性炭吸附剂的 5.8 倍;而膨胀石墨含量为 16.7% 时,氯化钙/膨胀石墨混合吸附剂的导热系数为 1.08 W/m·K,显著高于纯氯化钙吸附剂的导热系数。王如竹团队^[11]还对氯化钡与膨胀石墨进行复合,以期应用于氯化钡-氨太阳能热制冷系统中,在热源温度为 75~90 条件下,该复合吸附剂具有 0.61 kg/kg 的吸附量,当蒸发温度为 0~15、热源温度为 80 时,该制冷系统的制冷性能系数 (coefficient of performance, COP) 达 0.5~0.53,显示出利用太阳能或其他低品位能的潜力。金哲权^[9]用实验和数值模拟的方法研究了活性炭/膨胀石墨和氯化钙/膨胀石墨的传热与传质特性。吴永生等^[12]将导热性能优异的膨胀石墨与颗粒活性炭按照一定比例混合后固

化成型,制得导热性能良好的活性炭/膨胀石墨的混合固化吸附剂,同时还考察了该混合吸附剂的吸附特性。

ZAJACZKOWSKI 等^[13]利用膨胀石墨、碳纤维与氯化钙复合,形成复合吸附剂,其材料的导热系数为 13 ~ 15 W/m·K,显著提高氯化钙吸附剂的导热性能。对该复合吸附剂-氨为工质对的吸附式制冷系统的实验研究结果表明,其系统 COP 为 0.48 ~ 0.96。

另外,由于金属氯化物吸附剂在工作过程中容易发生结块,影响吸附剂传质性能,降低系统性能。添加或生成多孔材料为吸附剂基质,把金属氯化物负载到多孔材料内,利用多孔材料的多孔性,解决金属氯化物吸附剂吸附过程易结块、使用寿命短的问题,从而提高金属氯化物吸附剂的实用性。ZHONG 等^[14-15]以膨胀蛭石为基质负载氯化钡形成复合吸附剂,研究其吸附过程的动态特性,认为吸附床与冷凝器间的压力差是影响复合吸附剂工质对吸附动态特性的重要因素,其最大吸附量为 0.4 kg/kg 吸附剂;将该复合吸附剂应用到吸附式空调系统中,当蒸发温度为 15 °C、冷凝温度为 35 °C 时,系统制冷性能系数最大为 0.6。VESELOVSKAYA 等^[16]用膨胀蛭石负载氯化钡制备了复合吸附剂,以氨气为制冷剂在吸附式制冷机中进行实验,该复合吸附剂在 80 ~ 90 °C 低温热源驱动下能够使制冷机的 COP 达到 0.54,其单位质量吸附剂制冷功率 (specific cooling power, SCP) 达 300 ~ 680 W/kg。GREKOVA 等^[17]搭建了吸附式制冷系统,以 BaCl₂ 和 BaBr₂ 二元卤化盐浸渍蛭石为吸附剂,氨为制冷剂,系统制冷功率最大可达 1.2 kW/kg,制冰量达到 2 kg/h。YAN 等^[18]将 CaCl₂ 负载到多壁碳纳米管上,制备了用于氨吸附式制冷系统的新型复合吸附剂,同时考察复合吸附剂的吸附特性,实验表明,在相同的实验条件下纯多壁碳纳米管和复合吸附剂对氨气的吸附量分别为 90.05 mg/g 和 859.85 mg/g,复合吸附剂的吸附量是纯多壁碳纳米管的 9 倍;另外,多壁碳纳米管能够缓解氯化钙化学吸附时结块和吸附性能衰减现象。

LI 等^[19]将二氯化锰和膨胀石墨在-35 °C 下进行冷冻干燥从而形成复合多孔固化吸附剂,复合吸附剂内部包含大量的多孔道石墨,可有效阻止吸附剂结块和吸附剂吸附性能的衰减。在一定实验条件下,该复合吸附剂的平衡吸附量可达 0.537 kg/kg,单位质量吸附剂制冷功率范围为 200 ~ 700 W/kg,具备较

高的吸附制冷性能;同时文中还分析了复合吸附剂的传热传质特性以及动力学特性等。

段琼^[20]、毛雪峰等^[21]利用浸渍法将氯化钙负载到粗孔硅胶上,通过焙烧法和微波强化法使之分散于硅胶表面,就吸附剂吸附量而言,微波法优于焙烧法,并且通过吸附-脱附循环实验研究表明,所制备的复合吸附剂具有良好的吸附稳定性。

2 热力循环

在氯化钙-氨吸附式制冷系统前期研究过程中,大部分实验装置采用间歇式制冷方式^[22-24]。随着研究的深入和应用的要求,系统连续制冷逐渐成为主要制冷方式。袁晓军等^[25]搭建了一套氯化钙-氨吸附式制冷系统,能够连续提供冷量,实验中利用燃气轮机或吸收式制冷机的排放余热作为驱动热源,系统运行良好。段龙等^[26]建立一套氯化钙-氨两床吸附制冷系统连续制冷,实验考察不同热源温度下,制冷量、制冷系数在一个循环周期内的动态变化,结果表明提高热源温度有利于系统制冷量的增加,但是热源温度 200 °C 下的制冷系数要高于热源温度 400 °C。

在普通连续制冷循环中,吸附床吸附/再生交替过程存在大量的热损,从而影响氨吸附式制冷系统性能。采用先进热力循环是提高氨吸附式制冷系统性能的重要措施。根据回热方式与强化传质方法的不同,可分为回热循环、质驱动优化循环(包括回质循环和多级循环等)以及热波循环等^[1]。为了提高系统的 COP,一般采用回热/回质循环或者热波循环;降低系统驱动热源温度扩大吸附式制冷,可采用二级/多级吸附式制冷循环。

LU 等^[27]建立回热回质循环的氨吸附式制冷系统,以活性炭负载氯化钙为复合吸附剂,氨为制冷剂,开展系统制冷性能研究,结果表明,在再生温度为 126 °C、冷却水温为 22 °C、制冰温度为-7.5 °C、回质循环时间为 40 s 和回热时间为 2 min 条件下系统制冰量、SCP 和 COP 分别为 17.6 kg/h、369.1 W/kg 和 0.2,显著高于相同条件下基本循环氨吸附式制冷系统的性能。

热波循环将吸附床吸附过程释放的热量用于解吸过程吸附床,回收余热,提高系统性能;同时在两个吸附床内形成较大温差,改善吸附床传热特性^[1]。在热波循环基础上,CRITOPH^[28]提出利用气态制冷剂与吸附剂间的强制对流,强化吸附床传热,即为

对流热波循环。以活性炭-氨为工质对的对流热波循环吸附式制冷，在蒸发温度 5 、冷凝温度 40 、再生温度 200 条件下，系统的 COP 可达 0.9，提升效果显著。

王健等^[29]建立氯化钙/氯化钡-氨两级吸附式制冷系统吸附解吸传热传质模型，计算结果表明，两级吸附式制冷系统可以利用 85 的低温热源，当冷凝温度为 30 ，获得的制冷温度为-15 时，制冷量可达到 2.6 kW。罗伟莉等^[30]采用 SrCl₂-NH₄Cl-NH₃ 作为工质对搭建二级吸附式制冷系统开展实验研究，实验结果表明，当热源温度为 70 时，二级吸附式制冷也能够实现-25 以下的冷量输出。热源温度、冷却温度以及蒸发温度分别为 80 、25 和 -25 时，二级吸附式制冷系统的 COP 和 SCP 分别达到了 0.25 和 160 W/kg。这个数值与系统在 85 驱动热源以及同等的冷源与制冷温度条件下的数据相对比，驱动热源需求降低了 5 ，COP 提高了 4%，SCP 提高了 10%以上。METCALF 等^[31]对活性炭-氨的吸附循环进行模拟研究，通过多床循环与热波循环系统的性能对比，发现多床循环的输出功率密度和系统的 COP 较大，并且在热泵状态下，系统 COP 能达到 1.53，有望得到应用。

3 应用

根据氨吸附式制冷技术的优势与特点，主要应用在船舶或余热制冰/制冷、太阳能制冰/制冷以及工业过程余热制冷等。船舶余热制冰/制冷方面，王海民^[4]以 SITCTAISHAN 号散货船的废气锅炉余热为驱动热源，活性炭-氨为吸附工质对，开展船用吸附式制冷的可行性研究；同时，根据活性炭-氨吸附特性以及船舶结构，设计了吸附式制冷系统。彭庆龙^[32]以内燃机尾气作为吸附式制冷的驱动热源，氯化钙-氨为吸附工质对，建立吸附式制冷系统运行的动态数学模型，并考察了系统运行性能。根据仿真结果，系统制冷功率为 9.56 kW，SCP 为 177.67 W/kg。宁尚斌^[33]开展太阳能固体吸附式冰箱研究，采用热管对吸附床加热与冷却，以氯化钙-氨为工质对，探讨了影响系统性能的因素。

另外，氨吸附系统耦合其他技术形成联供系统，可提高能源利用效率。高鹏^[34]建立 ORC 系统与氯化钙/氯化钡-氨二级吸附式制冷耦合的小型冷电联供系统，利用 ORC 系统产生的废热作为吸附式制冷系统驱动热源，在实现冷电联供的同时实现热能的梯

级利用，具有重要的节能作用。ZHU 等^[35]基于 MnCl₂-CaCl₂-NH₃ 二级吸附系统进行冷热电联产研究，该系统储能密度可达 1706 kJ/kg，制冷功率为 1.07 kW。

4 结 论

氨系以热制冷技术能够利用工业余热、太阳能等低品位热能制冷，实现能量的梯级利用，具有重要的节能意义。氨吸附式制冷技术是氨系以热制冷技术中的重要研究内容，因制冷量大、传质好，在以热制冷、低品位能高效利用方面具有独特优势，具有广泛的应用前景。并且与氨吸收式制冷相比，发生器内为固体，适合震动场合，同时也不存在溶液结晶的潜在危险，具备一定的制冷优势。但其系统结构复杂、制冷效率不高以及氨泄漏带来一定危害，阻碍了氨吸附式制冷的发展，目前我国氨吸附式制冷技术还处于研究阶段。研发导热性能好的吸附剂是提高氨吸附式制冷系统性能的重要研究方向。

参考文献：

- [1] 王如竹, 王丽伟, 吴静怡. 吸附式制冷理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 97.
- [2] ASKALANY A A, SALEM M, ISMAEL I M, et al. An overview on adsorption pairs for cooling[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 19: 565-572. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.037.
- [3] 王树刚, 王如竹, 曲天非. 活性炭-氨吸附式制冷循环中吸附床的传热传质性能研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 476-478. DOI: 10.3321/j.issn:0253-231X.2002.04.023.
- [4] 王海民. 船舶余热驱动的活性炭-氨吸附式制冷研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [5] 梅宁, 谢迎春, 徐霞. 吸附式制冷单管吸附床传热传质的数值模拟及分析[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(3): 469-475. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5174.2003.03.018.
- [6] 王丽伟, 王如竹, 吴静怡, 等. 氯化钙-氨的吸附特性研究及在制冷中的应用[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34(3): 268-279. DOI: 10.3321/j.issn:1006-9275.2004.03.004.
- [7] ZHOU Z S, WANG L W, JIANG L, et al. Non-equilibrium sorption performances for composite sorbents of chlorides-ammonia working pairs for refrigeration[J]. International journal of refrigeration, 2016, 65: 60-68. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.11.014.
- [8] 田波. 混合吸附剂的渗透率与导热性能试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [9] 金哲权. 吸附/解吸过程中混合吸附剂传热传质性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [10] WANG K, WU J Y, WANG R Z, et al. Effective thermal

- conductivity of expanded graphite-CaCl₂ composite adsorbent for chemical adsorption chillers[J]. *Energy conversion and management*, 2006, 47(13/14): 1902-1912. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.09.005.
- [11] LI T X, WANG R Z, WANG L W, et al. Study on the heat transfer and sorption characteristics of a consolidated composite sorbent for solar-powered thermochemical cooling systems[J]. *Solar energy*, 2009, 83(9): 1742-1755. DOI: 10.1016/j.solener.2009.06.013.
- [12] 吴永生, 郑青榕. 氨在活性炭-膨胀石墨混合吸附剂上的吸附平衡分析[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2014, 19(1): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7405.2014.01.008.
- [13] ZAJACZKOWSKI B, KRÓLICKI Z, JEŻOWSKI A. New type of sorption composite for chemical heat pump and refrigeration systems[J]. *Applied thermal engineering*, 2010, 30(11/12): 1455-1460. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.03.005.
- [14] ZHONG Y, CRITOPH R E, THORPE R N, et al. Dynamics of BaCl₂-NH₃ adsorption pair[J]. *Applied thermal engineering*, 2009, 29(5/6): 1180-1186. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.015.
- [15] ZHONG Y, CRITOPH R E, THORPE R N, et al. Isothermal sorption characteristics of the BaCl₂-NH₃ pair in a vermiculite host matrix[J]. *Applied thermal engineering*, 2007, 27(14/15): 2455-2462. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.02.011.
- [16] VESELOVSKAYA J V, CRITOPH R E, THORPE R N, et al. Novel ammonia sorbents "porous matrix modified by active salt" for adsorptive heat transformation: 3. Testing of "BaCl₂/vermiculite" composite in a lab-scale adsorption chiller[J]. *Applied thermal engineering*, 2010, 30(10): 1188-1192. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.035.
- [17] GREKOVA A D, VESELOVSKAYA J V, TOKAREV M M, et al. Novel ammonia sorbents "porous matrix modified by active salt" for adsorptive heat transformation: 5. Designing the composite adsorbent for ice makers[J]. *Applied thermal engineering*, 2012, 37: 80-86. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.005.
- [18] YAN T, LI T X, LI H, et al. Experimental study of the ammonia adsorption characteristics on the composite sorbent of CaCl₂ and multi-walled carbon nanotubes[J]. *International journal of refrigeration*, 2014, 46: 165-172. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2014.02.014.
- [19] LI T X, WANG R Z, KIPLAGAT J K, et al. Performance study of a consolidated manganese chloride-expanded graphite compound for sorption deep-freezing processes[J]. *Applied energy*, 2009, 86(7/8): 1201-1209. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.06.004.
- [20] 段琼. 氯化钙在粗孔硅胶上的单层分散及其氨吸附研究[J]. *四川化工*, 2010, 13(2): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4887.2010.02.005.
- [21] 毛雪峰, 张莹, 李丹凤, 等. 氯化钙/大球硅胶复合吸附剂的氨吸附研究[J]. *现代化工*, 2011, 31(5): 56-59.
- [22] 林贵平, 袁修干, 梅志光, 等. 太阳能固体吸收式制冰机[J]. *太阳能学报*, 1993, 14(2): 101-104.
- [23] 余舜辉. 氯化钙-氨水质对吸附制冷性能强化的理论及实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2001.
- [24] WANG L W, WANG R Z, WU J Y, et al. Compound adsorbent for adsorption ice maker on fishing boats[J]. *International journal of refrigeration*, 2004, 27(4): 401-408. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2003.11.010.
- [25] 袁晓军, 欧阳新萍, 刘妮, 等. 氯化钙-氨吸附式制冷的实验研究[J]. *上海理工大学学报*, 2004, 26(5): 409-411, 417. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6735.2004.05.006.
- [26] 段龙, 孙文哲, 韩笑生, 等. 氯化钙-氨吸附式制冷的实验研究[J]. *低温与特气*, 2013, 31(2): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7804.2013.02.003.
- [27] LU Z S, WANG R Z, LI T X, et al. Experimental investigation of a novel multifunction heat pipe solid sorption icemaker for fishing boats using CaCl₂/activated carbon compound-ammonia[J]. *International journal of refrigeration*, 2007, 30(1): 76-85. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2006.07.001.
- [28] CRITOPH R E. Forced convection adsorption cycle with packed bed heat regeneration[J]. *International journal of refrigeration*, 1999, 22(1): 38-46. DOI: 10.1016/S0140-7007(97)00036-4.
- [29] 王健, 胡远扬, 王丽伟, 等. CaCl₂-BaCl₂-NH₃ 二级吸附式制冷系统及其制冷性能与仿真[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(9): 1389-1394.
- [30] 罗伟莉, 王健, 王丽伟, 等. 采用 SrCl₂-NH₄Cl-NH₃ 工质对的二级吸附式冷冻循环性能[J]. *化工学报*, 2012, 63(4): 1004-1010. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.04.002.
- [31] METCALF S J, CRITOPH R E, TAMAINOT-TELTO Z. Optimal cycle selection in carbon-ammonia adsorption cycles[J]. *International journal of refrigeration*, 2012, 35(3): 571-580. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.11.006.
- [32] 彭庆龙. 内燃机尾气驱动的化学吸附式制冷系统仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [33] 宁尚斌. 太阳能固体吸附式光热冰箱系统的理论及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [34] 高鹏. 低品位热能驱动的小型冷电联供系统的性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [35] ZHU F Q, JIANG L, WANG L W, et al. Experimental investigation on a MnCl₂-CaCl₂-NH₃ resorption system for heat and refrigeration cogeneration[J]. *Applied energy*, 2016, 181: 29-37. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.015.

作者简介:

曾涛 (1986-), 男, 博士研究生, 主要从事制冷与能源工程研究。

何兆红 (1983-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事吸附式制冷与传热传质研究。