

文章编号:0253-4339(2013) 05-0047-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.05.047

## 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望

王洋浩<sup>1</sup> 王志华<sup>2</sup> 郑煜鑫<sup>2</sup> 郝吉波<sup>1</sup>

(1 西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049; 2 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

**摘要** 空气源热泵作为一种高效、节能环保装置,具有广泛的应用前景和市场价值。但其在低温环境下性能不稳定,制热效率过低,抑制了空气源热泵产品的推广和应用。通过总结国内外学者对改善系统在低温环境下适应性所做的研究,分析了空气源热泵在低温环境下存在的弊端,并根据最新研究进展,分别从新型工质替代问题,相变材料与空气源热泵的结合,新型热泵循环系统的开发方面对今后的研究方向作出展望。

**关键词** 空气源热泵; 热水器; 低温适应性

**中图分类号**:TQ051.5; TK114; TB69

**文献标识码**:A

## Research Progress and Prospect of Air Source Heat Pump in Low Temperature Environment

Wang Fenghao<sup>1</sup> Wang Zhihua<sup>2</sup> Zheng Yuxin<sup>2</sup> Hao Jibo<sup>1</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China)

**Abstract** Air source heat pump, a high efficiency, energy conservation and environmental protection device, is in prospect of wide application and market value. But the unstable performance and lower coefficient of performance (COP) in low ambient temperature restrain the promotion and application of air source heat pump products. This paper analyzed the disadvantages of air source heat pump in low temperature environment through the review of both domestic and international investigations on system improvement in low temperature environment. Besides, the development and trend of air source heat pump is also proposed based on the latest research progresses in the aspects of new alternative refrigerant, the combined air source heat pump with phase change materials as well as the development of new heat pump system, respectively.

**Keywords** air source heat pump; water heater; cold adaptation

空气源热泵作为一种以空气为低温热源,通过少量高位电能驱动,将空气中的低位热能提升成高位热能加以利用的装置。具有高效节能,环保无污染等特点。此外,空气源热泵热水器作为空气源热泵的一种新兴产品,被认为是减少 CO<sub>2</sub> 排放和降低对化石燃料依赖程度最具有发展潜力的环保产品。

空气源热泵在环境温度相对较高时,运行性能好,但是在室外环境较低情况下,热泵系统并不能高效、可靠、稳定的运行。这一直制约着空气源热泵的发展和推广应用。究其原因主要有:

1) 当室外环境温度较低时,系统的蒸发温度降低,冷凝温度不变的情况下,压缩比增大,超出普通单级压缩系统正常运行的临界值,且压缩比的增大引起排气温度过高,超过压缩机正常的工作范围,致使压

缩机频繁启停,系统无法正常工作,严重时可导致压缩机烧毁。

2) 低温环境下,压缩机吸气比体积增大,输气系数减小,此外,蒸发器表面容易结霜,换热器传热效果恶化,且增加了空气流动阻力,使得机组制热量减少,性能下降。

3) 低温工况下,大量的润滑油积存在气液分离器内而造成压缩机的缺油,同时由于粘度增加,引起启动失油,降低润滑效果。

### 1 国内外学者研究现状

针对空气源热泵在低温环境出现的弊端,众多学者对其进行了大量的研究,使得机组的稳定性、制热性能和 COP 等都有了很大的提高。主要包括以下几个方面:

### 1.1 补气增焓热泵系统

补气增焓技术(原理如图1)能够较好地改善低温环境下压缩制冷循环的效率,降低压缩机排气温度,提高制冷设备的效率以达到节省能源的目的<sup>[1]</sup>。申江等<sup>[2]</sup>通过实验在 $-10^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 的低温环境中发现,该系统仍然具有较高的制热能力和供暖温度,能够满足寒冷地区冬季的采暖要求,但随着环境温度的升高,补气改善性能系数的效果变差。Ma等<sup>[3]</sup>研究发现,带闪发器的热泵系统能够满足寒冷地区恶劣气候的供热要求。与带过冷器的系统相比,在低温环境下,带闪发器的系统供热效率更高。但是,该系统较适合于小型空气源热泵系统。杨丽<sup>[4]</sup>从压缩机补气口位置、经济器传热温差、冷凝器出口过冷度和工质类型对机组性能的影响。但所研究的喷液及补气影响多集中于压缩机本身,而且所研究的喷液基本是在吸气结束后直接喷入压缩腔。这样,就需要采用有补气孔口的专用压缩机,提高系统的成本。费继友<sup>[5]</sup>认为,在低环境温度下,吸气喷液可更有效地降低压缩机的排气温度,但喷液对低环境温度下的压缩机高压比恶劣运行工况没有改善。同时吸气喷液降低了系统的制热量和能效比,造成热泵机组功耗上升,随着环境温度的提高,吸气喷液对制冷量、功耗及能效比的影响增大。

综上所述,采用喷液冷却的压缩机、引入辅助换热器和性能优良混合工质对单级压缩空气源热泵系统的低温适应性有了一定的提高,但仍然无法从根本上解决压缩比大和排气温度高的问题,系统的可靠性也没有得到本质提高,对于补气增焓技术有待于进一步的研究。

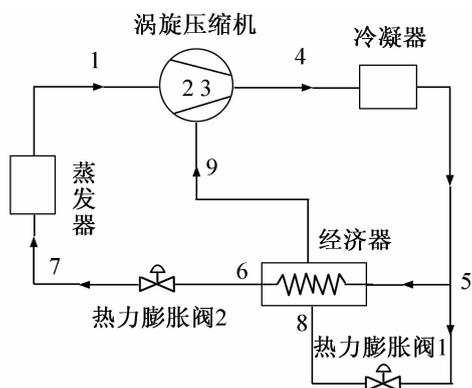


图1 带经济器的补气增焓热泵原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat pump system with economizer of increasing enthalpy by supplying gas

### 1.2 双级压缩热泵循环系统

双级压缩式热泵循环系统通过中间压力补气方

式来提高系统低温下的性能,同时可以有效的降低排气温度过高,压比过大等带来的一系列可靠性问题。

王伟<sup>[6]</sup>以R134a为工质,在蒸发温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ ,冷凝温度为 $60^{\circ}\text{C}$ 下,通过计算得出:两级节流中间不完全冷却双级压缩循环系统的排气温度及压缩比均优于普通单级热泵循环系统,且性能系数较高,但是,作者只是从理论角度进行分析,并未进行实验验证。谢英等<sup>[7]</sup>对双级压缩、利用喷射器代替节流阀的 $\text{CO}_2$ 跨临界双级压缩和喷射制冷循环深入分析后,得出在给定条件下双级压缩/喷射循环的性能系数具有明显优势。但是没有考虑压缩机绝热效率对其系统的影响。田长青等<sup>[8]</sup>把变频技术和双级压缩技术有效结合,提出了双级压缩变频空气源热泵系统。但是缺少对于低高压级压缩机合理的输气量之比,中压力对系统动态性能影响。对此,金旭<sup>[9]</sup>基于质量与能量守恒方程,以转子压缩机几何模型为基础,建立反映中间压力形成过程的变容量双级压缩系统压缩机动态耦合模型,分析了中间压力随时间的变化及其变工况特性。盛健<sup>[10]</sup>从供暖角度出发,以理论和实验相结合,分析中间压力和高低压级质量流量比与COP的关系。但是该实验依靠手动调节热力膨胀阀来调节中间压力,难以精确调节到其理论设定的中间压力值。此外,对热泵热水器而言,其研究也有一定的局限性,因为热泵热水器冷凝侧所处的是一个动态环境,其蒸发压力、冷凝压力和加热功率随着热水温度的升高而升高,箱内热水温度分布对空气源热泵热水器的制热系数有很大影响。马最良等<sup>[11]</sup>利用中间水环路将两套单级热泵系统进行耦合来提高空气源热泵的低温适应性,提出单、双级耦合热泵系统(如图2)。通过低温空气/水热泵从大气中吸取热量,提供 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 的低温热水并作为高温级水源热泵的低位热源制备高温热水向建筑物供暖的,但中间水环路增加了系统的传热温差,且系统结构复杂,不适合用作小型装置。此外,兰江华<sup>[12]</sup>发现双级压缩空气源热泵热水器存在启动异常故障现象,主要原因由工作环境和注油量造成,但是作者只对该现象进行分析描述,并未给出解决方案。Zehnder<sup>[13]</sup>对双级压缩系统油平衡、油迁移及其油分布规律进行了研究,指出系统连续制热 $1 \sim 2\text{h}$ ,高压机油位低于正常油位底线,运行工况恶化。该作者提出一种回油方案,但此方案过于复杂,需要在压缩机回油口设置电磁阀和油位传感器以及在系统低压侧增加油泵。

对于双级压缩而言,仍存在许多急需解决的问题:如注油量,油平衡及油迁移,系统的控制策略,变频压缩低高压级的合理的输气量比,最佳中间压力的

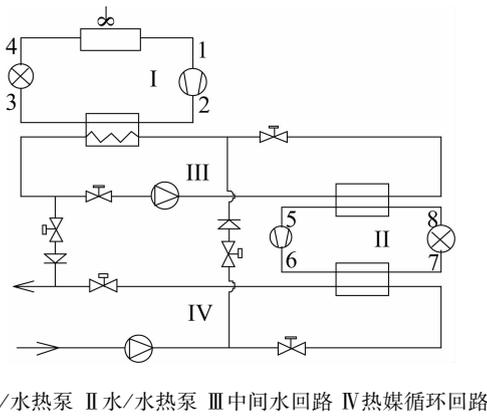


图 2 单、双级耦合热泵系统图

Fig. 2 Schematic diagram of single double-stage coupling heat pump system

变化等问题。

### 1.3 复叠式空气源热泵系统

复叠式循环是将一种中、高温制冷剂与一种低温制冷剂相结合,以满足系统在温跨较大时,能效比低、单台压缩机的压缩比大等要求,其最大的优点是两种工质均在最佳的温度范围内工作。

目前,对于复叠式循环的研究,主要停留在利用热力学理论循环方法,以制冷效率为目标,选取最佳中间冷凝温度和其他相关设计参数<sup>[14-16]</sup>,对于制热方面的研究仍处于实验阶段,尚缺乏基础理论性以及指导方向性的研究。而复叠式制冷与复叠式热泵相比,两者差别较大。如工质方面,低温工质已经相当成熟普遍,而高温工质的研究还处于较初级的阶段,这是制约复叠式高温热泵发展的一个瓶颈;针对这一缺陷,H. M. Getu 等<sup>[17]</sup>以 R744 为低温级制冷剂,R717、R1270 和 R404A 分别为高温级制冷剂复叠式系统做了研究,同时,利用多元线性回归方式得出 COP 与蒸发温度,过冷过热度等之间的数学表达式,以及在最佳蒸发温度下,R717 与 R744 的最佳质量流量比。A. Kilicarslan 等<sup>[18]</sup>利用热力学第一,第二定律,分析了不同工质耦合下系统 COP 和不可逆性随蒸发温度,冷凝温度,复叠温差和压缩机多变效率的变化规律。但是,该学者只是从热力学理论循环出发,定性分析了对系统的性能影响,并未从实验角度进行验证。Bertsch<sup>[19]</sup>对带中间冷却器的两级压缩、带经济器的两级压缩和复叠式热泵研究表明,0℃ 为三种系统性能的分界点,在 0℃ 以下,带中间冷却器的两级压缩循环 COP 最低,复叠式循环略优于带经济器的两级压缩循环。而在 0℃ 以上,两种两级压缩循环效率基本相同,COP 均高于复叠式循环。但是,该学者是以 R410A 为工质,对于单级,复叠式系统的温度切换点具有一定的局限性,同时在优化控制方面

也并未进行实验研究。再如润滑油问题,除了考虑润滑油与工质的相容性之外,复叠式制冷更多考虑的是润滑油低温凝固的问题,而复叠式热泵更多需要考虑的是润滑油的高温分解问题<sup>[20]</sup>。

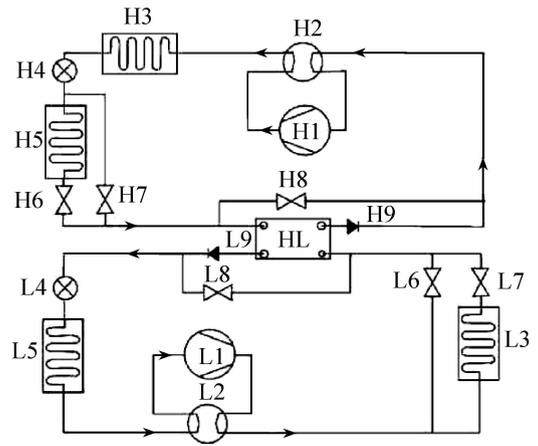


图 3 新型空气源热泵循环流程原理图

Fig. 3 Schematic diagram of new air source heat pump system

在热泵方面,陈光明等<sup>[21]</sup>提出一种新型空气源热泵装置(如图 3),该装置既可按传统单级空气源热泵方式运行,又可按复叠循环方式运行。但该学者只是提出优化方案措施,并没有对其产生的效果进行实验验证。对热泵热水器而言,由于水箱里的水存在较明显的分层现象,导致冷凝换热欠佳。为解决此问题,Wu, J. 等<sup>[22]</sup>在复叠式热泵热水器系统中加入相变材料,以热力学理论为基础,通过理论与实验相结合,对系统有无相变材料两种情况下的动态性能进行了研究,并给出不同蒸发温度下复叠式系统与单级系统的切换条件。此外,随着蒸发温度的降低,高温部分和低温部分压缩机耗功之间的比值不断提高,而非定值。对于传统复叠循环系统而言,一般以低温级达到最低温度来匹配两台压缩机。这样,当低温蒸发温度高于设计最低温度运行时,低温级压缩机功率相对偏小,高温级压缩机功率偏大,中间温度会发生偏移,中间温度的偏移会导致低温级达不到该蒸发温度的最佳性能系数<sup>[20]</sup>。变容量压缩机有助于低高压级匹配,使中间温度在变工况下始终处于最佳值,此方面已成功运用于单双级压缩系统,但对具有变容量特性的复叠式系统及高低压压缩机动态耦合过程优化鲜有报道。

### 1.4 空气源热泵的除霜技术

空气源热泵系统在低温工况下运行时,蒸发器表面霜的形成导致换热器传热效果恶化,且增加了空气流动阻力,使得机组制热能力下降,严重时机组会停

止运行,因此,提高蒸发侧的除霜和延缓结霜技术是提高空气源热泵在低温环境下制热性能和系统稳定性的有效途径之一。

目前常用的除霜方式主要有电热除霜,逆循环除霜,热气旁通和蓄热除霜几种方式。电加热除霜是用电加热提供化霜热,具有系统简单、除霜完全、实现控制简单的优点,在小型装置上广泛采用,但缺点是耗电多,不宜在大型装置上采用<sup>[23]</sup>。逆循环除霜通过四通换向阀使制冷剂沿环路反向流动,将热泵从制热工况转换成制冷工况,热泵从室内吸热排到室外换热器以融化其表面结霜。研究表明,逆循环除霜简单易行,除霜效果良好<sup>[24]</sup>。然而,在除霜时高低压对接过程会对系统各部件产生比较严重的冲击,系统可靠性受到影响,除霜控制系统不完善,甚至造成误除霜<sup>[25]</sup>。此外,逆循环除霜时为了避免向室内吹冷风而必须关闭室内机所导致的除霜缺少低位热源的本质问题仍没有得到解决。

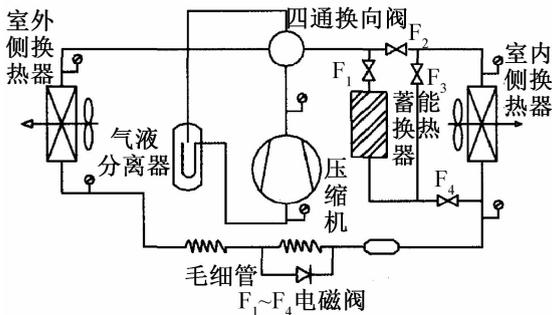


图4 空气源热泵蓄能热气除霜系统

Fig. 4 Schematic of PCM based thermal energy storage and defrosting for air source heat pump

热气旁通法是在压缩机出口与蒸发器入口之间设置一根旁通管,通过增加旁通管内的热气(制冷剂)来抑制蒸发器表面结霜<sup>[26-27]</sup>。Byun, J.等<sup>[28]</sup>研究表明:旁通管的流量占总流量的20%时系统的性能最好,与一般系统相比,热气旁通方式是系统的平均COP和制热量分别增加8.5%和5.7%,但是由于蒸发器入口温度的提高,导致了系统制热量的下降。热气旁通除霜的能量主要来自压缩机的输入功,而且制冷剂流过分液器和分液毛细管的能量损失较大,除霜时间比逆循环除霜长;同时,除霜时,导致蒸发压力变低,吸气比容变大,系统中制冷剂循环质量流量随之变小,供给除霜用的热量变少。基于此缺点,胡文举等<sup>[29-30]</sup>将相变蓄能装置引入到热泵系统中,提出空气源热泵蓄能热气除霜新系统(见图4),该系统把热泵平时高效运行时的余热转存到蓄热器内,使之作为热泵除霜工况下的低位热源,有效的解决了热气除霜时能量来源不足的问题。基于除霜时间、除霜时压

缩机排气压力、室内温度波动等特性,张杰等<sup>[31]</sup>分别对逆循环除霜系统、热气旁通除霜系统和相变蓄能除霜系统进行对比分析,实验表明,相变蓄能系统除霜有利于缩短除霜时间,且室内温度相对稳定,能耗较少,但是,该系统的压缩机排气温度比另外两种系统高,对压缩机的安全性提出更好的要求。

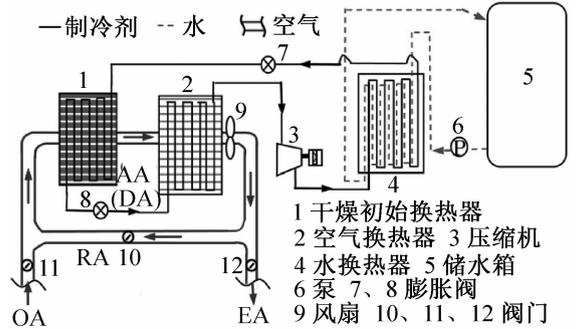


图5 无霜空气源热泵热水器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the frost-free air source heat pump system

JIA等<sup>[32-33]</sup>利用室外换热器的除湿剂首先对被处理的空气进行干燥去湿,从而抑制或延缓结霜,然而随着除湿剂吸收水蒸汽能力的减弱,抑制结霜的作用也逐渐失效。为解决此问题,Zhang等<sup>[34]</sup>提出一种新型干燥除湿无霜空气源热泵(如图5),该系统利用冷凝后的余热加热空气来对固体吸湿剂进行解析。但是,在解吸模式下,当蒸发温度低于0℃时,该系统依然存在结霜的问题。同时,该学者并未对新型系统进行实验验证以及固体吸湿剂的材料和用量进行分析,对该模型和系统有待进一步的实验研究。

纵观国内外研究现状,人们对空气源热泵的除霜有了很大的改进,但是在实际运行中常规除霜性能仍难以令人满意,除霜过程的稳定性与可靠性也远没有解决。究其原因,所做研究在特定实验条件下,其应用是否具有广泛性还需要进一步研究。此外,融霜机理十分复杂,从传热传质的机理上揭示蒸发器的除霜过程有待于进一步的深化和完善。因此,如何从根本上解决除霜问题,成为今后研究的重点方向。

### 1.5 新型工质的替代

由于R22具有对臭氧层的破坏作用及温室效应,使全世界空调和热泵行业面临严峻的考验,研究开发、寻找新型环保制冷剂替代传统的高ODP、高GWP值的制冷剂是一项急需研究的课题。目前对空气源热泵研究的新型制冷工质主要有CO<sub>2</sub>, R32, R407C和R410A, R290等。

绿色环保天然工质二氧化碳以其优良的热物性成为热泵系统中合成工质最有潜力的替代物之一,在

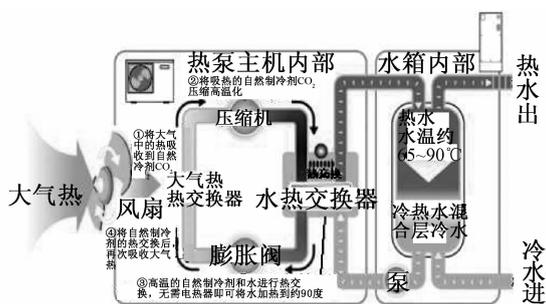


图 6 二氧化碳热泵热水器原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the carbon dioxide heat pump water heater

热水器应用方面尤为突出。其吸热过程(蒸发、压缩)在亚临界条件下进行,换热主要依靠潜热来完成;而冷凝过程则是在接近或超过临界点的区域内进行,放热依靠显热来完成,是一个伴随有较大温度滑移的变温过程(如图 6)。这正好可与水加热时的温升相匹配,自然可减少高压侧不可逆传热引起的能量损失<sup>[35]</sup>。因此,这种特殊的劳伦兹循环,特别适合于家用热水的加热,由于其高容积制冷量,优良的传热性能和节能性能,CO<sub>2</sub> 热泵热水器在日本赢得“ECO CUTE”(生态精灵)的称号。

由于 CO<sub>2</sub> 热泵制热循环的工作压力比氟利昂热泵循环高 5~7 倍,李涛等<sup>[36]</sup>利用喷射器提高跨临界二氧化碳系统的性能。但是,随着蒸发温度的提高,对系统的性能提高有限。Goodman 等<sup>[37-38]</sup>通过内部换热器来提高在低温环境下 CO<sub>2</sub> 热泵热水器性能,此外,由于 CO<sub>2</sub> 节流损失及放热滑移温度相对较大,增加气冷器水流量可有效提高系统的制热系数<sup>[39]</sup>。程林<sup>[40]</sup>等通过使用 Simulink 建立 PID 控制和模糊控制的模型并进行对比分析,得出使用模糊控制方法时蒸发器的过热度响应时间更快,且过热度在控制过程中变化更为平稳,适用于跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵这种具有强烈非线性特性的系统。但是其仿真结果未经实验验证,该模型尚有待进一步完善。

作为 R410A 一个组成部分的 R32,具有较好的传热性能、较高的能效和良好的应用前景。黄玉优等<sup>[41]</sup>通过对 R32 替代 R410A 空气源热泵热水器研究后,得出在 3°C 低温环境下, R32 样机的性能系数提高 31.1%,但排气温度达到 101.9°C,不利于 R32 制冷剂在低温条件下的应用。史琳等<sup>[42]</sup>对家用/商用空调中 R32 替代 R22 的可行性进行分析,同样发现 R32 存在排气温度高的问题。为解决此问题,矢岛龙三郎等<sup>[43]</sup>利用膨胀阀控制压缩机吸气干度,同时使用 R32 专用的润滑油来降低排气温度,但是此

方法对压缩机的安全性存在一定安全隐患。秦妍等<sup>[44]</sup>以理论和实验相结合,分析了 R32 替代 R410A 后,提出采用补气方法,能够有效降低排气温度,同时一定程度上增加换热量及 COP。但是最佳补气量与环境的变化关系未进行分析,有待进一步的研究。

吴华根等<sup>[45]</sup>认为,与使用 R22 相比,使用 R134a 会导致样机制热量、COP 和功耗降低。且 R134a 属于中压制冷剂,R404 在膨胀过程中要损失更多的蒸发比焓以冷却通过膨胀阀的液体,使制热量受到更大的影响,两者均非 R22 的理想替代工质。而 R407C 与 R22 的工作范围和制热量基本相当,是 R22 比较理想的替代工质。但是,作为非共沸制冷剂,R407C 在传热表面上的传质阻力会增加,从而可能造成蒸发、冷凝过程的换热效率降低。

以上研究推动了空气源热泵系统在寒冷地区的应用,纵观国内外学者的研究,采用补气增焓技术、双级压缩系统或复叠式制冷系统是解决空气源热泵低温适应性的有效途径,不过尚处于理论和实验研究阶段。同时由于系统过于复杂及成本因素,目前尚未有真正意义上的补气增焓热泵、双级压缩式或复叠式泵产品。因此,如何进一步提高空气源热泵的低温适应性,利于产品的推广应用是亟待解决问题。

## 2 展望

空气源热泵作为一种高效、节能、环保的装置,具有广泛的市场应用价值,热泵热水器的出现,更使空气源热泵有着巨大的市场潜力。此外,随着技术进步日新月异,空气源热泵的产品和功能也将趋向多样化,对产品的可靠性也会提出更高要求。因此,提高空气源热泵低温环境下的制热能力和运行可靠性,已成为近年来国内外研究人员非常重视的研究课题,作者对空气源热泵未来的发展做出一些展望。

### 2.1 新工质替代问题

作为过度替代的制冷剂 R22 会引起温室效应和破坏臭氧层,因此,寻找一种能够替代 R22,并且具有更高能效、更加环保,适应于低温环境的制冷剂显得尤为迫切。另外,HCFCs 替代技术涉及到的相关标准的制订是行业发展的基础,应该受到特别关注。我国与美国、欧洲等相关组织正在共同制订 CO<sub>2</sub> 制冷压缩机性能测试方法等标准,将推动我国 CO<sub>2</sub> 制冷技术的发展<sup>[46]</sup>。目前,清华大学、浙江大学、合肥通用机械研究院等进行新型制冷工质及其系统的理论与实验研究。西安交通大学,上海交通大学,天津大学, North Dakota State University, United Technologies Research Center (USA) 等对 CO<sub>2</sub> 热泵系统进行相关

的研究工作。

## 2.2 相变材料与热泵技术的结合

蓄热技术是提高能源利用效率和保护环境的重要技术,可用于解决热能供给与需求失配的矛盾。华南理工大学、哈尔滨工业大学, University of Ulster (UK)等在蓄热型热泵做了大量的研究工作,蓄热型热泵经常处于满负荷运行,有利于系统高效能运行,因此,将相变储能技术与热泵技术相结合,充分发挥各自的优势,可以有效地提高设备在低温环境下的性能系数。

## 2.3 空气源热泵系统新型系统的开发

开发适合于低温环境的热泵循环系统,同时完善系统的仿真模型,利用计算机仿真技术,对空气源热泵机组在低温环境下的工作状态进行动态模拟分析,并与实验相结合,对系统进行改进优化,使系统制热效率和稳定性达到最佳状态。上海交通大学,西安交通大学,北京工业大学, University of Vigo 等一直从事相关的研究工作。

## 3 结论

空气源热泵作为一种高效节能、绿色环保装置,受到越来越多的关注,但在实际推广使用的过程中,低温环境下影响了系统可靠性和制热性能,制约了空气源热泵的推广应用。通过从补气增焓技术、双级压缩系统、复叠式热泵系统、空气源热泵除霜技术、新型工质替代方面对国内外学的研究进行了总结,分析了低温环境下系统所存在的弊端,并对其系统的优缺点做了简要剖析。指出上述系统对空气源热泵系统的低温适应性有一定的改善,但也存在一些不足之处。补气增焓技术存在压缩比较大和排气温度过高的问题。注油量、油平衡及油迁移、系统的控制策略、变频压缩低高压级的合理输气量比、最佳中间压力的变化等问题也存在于双级压缩系统中。对复叠式系统而言,分析了复叠式制冷与复叠式热泵存在的区别,对复叠式热泵的应用有待于进一步深入研究。在延缓结霜和除霜方面,对新型除霜技术,即热气旁通除霜,蓄热除霜,干燥除湿系统进行了较为详细的总结。同时,对新型环保工质如:CO<sub>2</sub>, R32, R410a 等的应用进行了对比分析。

此外,通过从新型工质替代问题,相变材料与热泵系统的结合,新型热泵系统的开发对今后的发展提出来展望。指出寻找高效、环保低温制冷剂尤为迫切,相变材料与热泵系统的结合有助于解决热能供给与需求失配的矛盾,提高空气源热泵的低温适应性。开发适合低温的热泵循环系统,完善系统的仿真模

型,能够提高系统制热效率和稳定性。相信随着对系统可靠性的深入研究,必将提高其运行性能,减轻城市环境污染,为创造性地实现我国“节能减排”目标,以及建设科研创新型国家探索道路。

### 参考文献

- [1] 李玉春,蔡志鸿,何永锋. 带经济器的热泵性能特征研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(6):40-43. (Li Yuchun, Cai Zhihong, He Yongfeng. Study on Performance Characteristic of Heat Pump with Economizer[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6):40-43.)
- [2] 张华俊,王震,陈小康,等. 空气源热泵热水器应用于低温环境的研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2009, 30(4): 1-5. (Zhang Huajun, Wang Zhen, Chen Xiaokang, et al. A Experimental Study on Air-source Heat Pump Water Heater Application in Low Temperature Environment[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2009, 30(4): 1-5.)
- [3] Ma G, H Zhao. Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 697-701.
- [4] 杨丽,王文,白云飞,等. 经济器对压缩制冷循环影响分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(4):35-38. (Yang Li, Wang Wen, Bai Yunfei. Influence of Economizer on Compression Refrigeration Cycle[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4):35-38.)
- [5] 费继友,曹锋,邢子文,等. 吸气喷液对空气源热泵热水器性能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 818-822. (Fei Jiyou, Cao Feng, Xing Ziwen, et al. Influence of Suction Stream Liquid Refrigeration Injection on the Performance of an Air-Source Heat Pump Water Heater[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 818-822.)
- [6] 王伟,金苏敏,陈建中,等. 空气源热泵热水器双级压缩循环研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(9):58-61. (Wang Wei, Jin Sumin, Chen Jianzhong, et al. Two-stage compression cycle for water heaters in air source heat pumps[J]. HV&AC, 2006, 36(9):58-61.)
- [7] 谢英柏,刘迎福,汤建成,等. CO<sub>2</sub> 跨临界双级压缩/喷射制冷循环热力学分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 645-649. (Xie Yingbai, Liu Yingfu, Tang Jiancheng, et al. Thermodynamic Analysis On CO<sub>2</sub> Transcritical Two-Stage Compression/Ejection On Cycle[J]. Acta Energetica Sinica, 2011, 32(5):645-649.)
- [8] 田长青,石文星,王森,等. 用于寒冷地区双级压缩变频空气源热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 388-393. (Tian Changqing, Shi Wenxing, Wang Sen, et al. Research On Two-Stage Compression Variable frequency Air Source Heat Pump in Cold Regions [J]. Acta Energetica So-

- laris Sinica, 2004, 25 (3): 388-393. )
- [9] 金旭, 王树刚, 张腾飞, 等. 变工况双级压缩中间压力及其对系统性能的影响[J]. 化工学报, 2012, 63 (1): 96-102. (Jin Xu, Wang Shugang, Zhang Tengfei, et al. Intermediate pressure and its effect on performance of two-stage compression system with variable operating mode [J]. CIESC Journal, 2012, 63 (1): 96-102. )
- [10] 盛健, 吴兆林, 周志钢, 等. 高低压级流量比对双级压缩热泵影响[J]. 低温与超导, 2011, 39(4): 35-39. (Sheng Jian, Wu Zhaolin, Zhou Zhigang, et al. Research on the effect of refrigeration quality flow rate of the high and low pressure system Oil the performance of two-stage compressor air-source heat pump [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2011, 39(4): 35-39. )
- [11] 马最良, 姚杨, 姜益强. 双级耦合热泵供暖的理论与实践[J]. 流体机械, 2005, 33 (9): 30-34. (Ma Zuiliang, Yao Yang, Jiang Yiqiang. Theory and Practice of Double Stage Coupling Heat Pump [J]. Fluid Machinery, 2005, 33 (9): 30-34. )
- [12] 兰江华. 双级压缩空调热泵热水器启动异常故障研究[J]. 家电科技, 2011 (11): 66-67. (Lan Jianghua. Research on the Two-stage Air-source Heat pump Water Heater Failing to Start [J]. Household Appliance Technology, 2011(11): 66-67. )
- [13] Zehnder M. Efficient air-water heat pumps for high temperature lift residential heating including oil migration aspects [D]. 2004.
- [14] Wang Bingming. Experimental investigation on the performance of NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> cascade refrigeration system with twin-screw compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(7): 1358-1365.
- [15] Bhattacharyya S, Garaia A, Sarkar J. Thermodynamic analysis and optimization of a novel N<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> cascade system for refrigeration and heating [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 1077-1084.
- [16] Yari M, S M S Mahmoudi. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO<sub>2</sub>) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO<sub>2</sub> cycle) [J]. Energy, 2011, 36(12): 6839-6850.
- [17] Getu H M, P K Bansal. Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(1): 45-54.
- [18] Kilicarslan A, M Hosoz. Energy and irreversibility analysis of a cascade refrigeration system for various refrigerant couples [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51 (12): 2947-2954.
- [19] Bertsch S S, E A Groll. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U. S. climates [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(7): 1282-1292.
- [20] 王忠良, 杜垵. R23/R134a 自然复叠循环和经典复叠循环的分析比较[J]. 流体机械, 2005, 33(增刊): 364-367. (Wang Zhongliang, Du Kai. Analyze and Comparison of R23/R134a Auto-cascade and Classical Cascade Refrigeration Cycle [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(suppl.): 364-367. )
- [21] 王林, 陈光明, 陈斌, 等. 一种用于低温环境下新型空气源热泵循环研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 34-38. (Wang Lin, Chen Guangming, Chen Bin, et al. Cycle Analysis of Heating and Refrigeration in New Air-source Heat Pump [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(2): 34-38. )
- [22] Wu J, Yanga Z, Wub Q, et al. Transient behavior and dynamic performance of cascade heat pump water heater with thermal storage system [J]. Applied Energy, 2012, 91 (1): 187-196.
- [23] 李阳. 空气源热泵热水器除霜技术现状分析[J]. 民营科技, 2011(1): 18. (Li Yang. Analyze of Air Source Heat Pump Water Heater for defrosting technology present situation [J]. Non-state Running Science & Technology Enterprises, 2011(1): 18. )
- [24] Donga J K, Denga S M, Jiang Y Q, et al. An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37: 380-387.
- [25] 韩志涛, 姚杨, 马最良. 空气源热泵除霜特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 15-19. (Han Zhitao, Yao Yang, Ma Zuiliang. Experiment on characteristics of an air source heat pump in false defrosting [J]. HV&AC, 2006, 36(2): 15-19. )
- [26] Hoffenbecker N, Klein S A, Reindl D T. Hot gas defrost mode development and validation [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28 (4): 605-615.
- [27] 付文成, 郭宪民, 陶祥成. 一种新型空气源热泵除霜方式的实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30 (3): 16-20. (Fu Wencheng, Guo Xianmin, Tao Xiangcheng. Experiment A Novel Defrost Cycle for Air Source Heat Pumps [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30 (3): 6-20. )
- [28] Byun J S, Lee J, Jeon C D. Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 328-334.
- [29] 胡文举, 姜益强, 姚杨, 等. 温湿度对空气源热泵相变蓄能除霜系统特性影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 65-69. (Hu Wenju, Jiang Yiqiang, Yao Yang, et al. Effect of air temperature and humidity on system defrosting characteristics of a PCM based air source heat pump [J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 2012, 44

- (6): 65-69.)
- [30] 董建锴,姜益强,姚杨,等. 空气源热泵相变蓄能除霜特性实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2011,38(1):18-22. (Dong Jiankai, Jiang Yiqiang, Yao Yang, et al. Experimental Study of the Characteristic of Defrosting for Air Source Heat Pump with Phase Change Energy Storage[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011,38(1): 18-22.)
- [31] 张杰,兰菁,杜瑞环,等. 几种空气源热泵除霜方式的性能比较[J]. 制冷学报,2012,33(2):47-49. (Zhang Jie, Lan Jing, Du Ruihuan. The Performance Comparison of Several Defrosting Modes for Air-source Heat Pump[J]. Journal of Refrigeration, 2012,33(2):47-49.)
- [32] Jia C X, Dai Y J, Wu J Y, et al. Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system [J]. Int. J. Refrigeration, 2007,30(2):345-353.
- [33] Zhang L, Hiharab E, Saikawaa M. Combination of air-source heat pumps with liquid desiccant dehumidification of air [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 57: 107-116.
- [34] Zhang L, T Fujinawa, M Saikawa. A new method for preventing air-source heat pump water heaters from frosting [J]. International Journal of Refrigeration, 2012,35(5): 1327-1334.
- [35] 周子成. 二氧化碳热泵热水器近期的发展[J]. 制冷, 2009,28(9):33-39. (Zhou Zicheng. The Development of Carbon Dioxide Heat Pump Water Heater in Recent Years [J]. Refrigeration, 2009,28(9): 33-39.)
- [36] 李涛,孙民,李强,等. 利用喷射提高跨临界二氧化碳系统的性能[J]. 西安交通大学学报,2006,40(5):553-557. (Li Tao, Sun Min, Li Qiang, et al. Performance of Transcritical Carbon Dioxide System with Ejector[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006,40(5):553-557.)
- [37] Goodman C, B M Fronk, S Garimella. Transcritical carbon dioxide microchannel heat pump water heaters; Part II - System simulation and optimization[J]. International Journal of Refrigeration, 2011,34(4): 870-880.
- [38] Fernandez N, Y Hwang, R Radermacher. Comparison of CO<sub>2</sub> heat pump water heater performance with baseline cycle and two high COP cycles[J]. International Journal of Refrigeration, 2010,33(3): 635-644.
- [39] 蔡操平,刘业凤,苏强. 跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵热水器系统的试验研究[J]. 制冷与空调, 2011,11(1):66-70. (Cai Caoping, Liu Yefeng, Su Qiang. Experimental study on heat pump water heater with transcritical CO<sub>2</sub> cycle [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011,11(1):66-70.)
- [40] 程林,胡益雄,廖佳仪. 跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵系统电子膨胀阀控制方法研究[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(6): 21-23. (Cheng Lin, Hu Yixiong, Liao Jiayi. Compared of Two Control Methods of Electronic Expansion Valve of Transcritical CO<sub>2</sub> Heat Pump[J]. Building Energy & Environment, 2011, 30(6):21-23.)
- [41] 黄玉优,王俊,尹茜,等. R32 空气源热泵热水器的实验研究[J]. 制冷与空调,2011, 11(4):69-72. (Huang Yuyou, Wang Jun, Yin Qian, et al. Experimental study of R32 air source heat pump water heater [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 11(4):69-72.)
- [42] 史琳,朱明善. 家用/商用空调 R32 替代 R22 的再分析 [J]. 制冷学报,2010, 1(1):1-5. (Shi Lin, Zhu Mingshan. Reanalysis on Using R32 to Substitute for R22 in Household/commercial Air-conditioning [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 1(1):1-5.)
- [43] 矢岛龙三郎,吉见敦史,朴春成. 降低 R32 压缩机排气温度的方法 [J]. 制冷与空调, 2011,2(11):60-64. (Ruzaburo Yajima, Atsushi Yoshimi, Chun-cheng Piao. Measures to reduce the discharge temperature of R32 compressor [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2011, 2(11): 60-64.)
- [44] 秦妍,张剑飞. R32 制冷系统降低排气温度的方法研究 [J]. 制冷学报,2012,33(1):14-17. (Qin Yan, Zhang Jianfei. Study on the Method of Reducing Discharge Temperature of Refrigerant System with R32 [J]. Journal of Refrigeration, 2012,33(1):14-17.)
- [45] 吴华根,束鹏程,邢子文. 采用替代工质的空气源热泵性能试验研究[J]. 暖通空调, 2006,36(1): 61-62. (Wu Huagen, Shu Pengcheng, Xing Ziwen. Experimental study on performance of air source heat pumps with alternative refrigerants [J]. HV&AC, 2006, 36(1):61-62.)
- [46] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势 [J]. 制冷学报,2011,32(6):53-57. (Li Liansheng. Research Progress on Alternative Refrigerants and Their Development Trend [J]. Journal of Refrigeration, 2011,32(6):53-57.)

#### 通信作者简介

王洋浩,男(1972 - ),博士生导师,教授,西安交通大学建筑节能研究中心主任,13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. 研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

#### About the corresponding author

Wang Fenghao (1972 - ), male, Ph. D./Professor, Head of Building Energy Research Center, Xi'an Jiaotong University, 13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: Building energy efficiency and renewable energy Technology.