

文章编号:0253-4339(2021)02-0053-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.02.053

# 氨蒸气压缩高温热泵系统研究现状

宁静红 刘华阳

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

**摘要** 高温热泵是解决冷热双利用、实现节能减排的重要方法。由于工质使用的限制,自然工质成为研究的重点,氨作为自然工质,具有优良的热力性能。本文通过热力计算对氨和其它常用热泵工质进行了性能对比分析,并对氨蒸气压缩式高温热泵进行了综述,发现氨在 80~95 °C 范围内综合性能最佳,适用于 60~110 °C 高温工况。同时本文基于单级压缩热泵循环提出利用太阳能补偿的氨蒸气压缩高温热泵系统并进行了分析,结合天津地区的辐射日照条件论证了系统的可行性。

**关键词** 高温热泵;氨;余热回收;太阳能辅助

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1;TK519

文献标识码:A

## Research Status of Ammonia Vapor Compression High-temperature Heat Pump System

Ning Jinghong Liu Huayang

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

**Abstract** High-temperature heat pumps are an important means to solve the dual utilization of cold and heat and realize energy saving and emission reduction. Owing to the limitation of refrigerant use, natural working fluid has become the focus of research. As a natural working fluid, ammonia has excellent thermal properties. In this study, the performances of ammonia and other commonly used working fluids for heat pump were compared and analyzed by thermal calculations and the research progress on ammonia vapor compression high-temperature heat pumps were summarized. It is shown that ammonia has the highest overall performance in the range of 80~95 °C and is suitable for high temperatures of 60~110 °C. Based on the single-stage vapor compression cycle, an ammonia high-temperature heat pump system using solar energy compensation is proposed and its feasibility is discussed in combination with the solar radiation conditions in Tianjin.

**Keywords** high-temperature heat pump; ammonia; waste heat recovery; solar-assisted

目前,我国工业约占全国能源消耗总量的 70%,而工业能源利用率低于世界平均水平,加工工业消耗的能源有 50% 以上转变为废气和废水形式的余热<sup>[1]</sup>。据统计,仅有 30% 的废热得到再利用,这是能源利用率低的原因之一<sup>[2]</sup>。工商业领域存在大量用冷同时用热的工艺,制冷系统的冷凝温度通常较低,产生的冷凝热属于低品位热能,很难满足生活供热及热工艺的需求。若直接回收这些低品位能经济性差,故系统一般将高温高压的制冷剂蒸气通过冷凝器或冷却塔把热量排至大气或冷却水中,不仅有热损失还存在热污染。在大型制冷工程中,若将冷凝废热通过高品位能或高温补偿等方法将低品位热能提升为更高水平,并用于生活热水、生产工艺用水、生活供暖等场所,则可以成为解决冷热双利用、实现节能减排的重要方法。热泵技术就是从低温热源获得能量,通过

消耗一定的高品位能为代价补偿提升,将热能由低温热源转移至高温热源的系统<sup>[3]</sup>。随着热泵技术在世界范围内得到广泛认可和使用的增加,高温热泵工质的选用逐渐成为研究的重点。氨作为自然工质具有绿色环保、价格低、单位容积制热量大、使用历史悠久等特点。目前,氨在工业热泵中被广泛使用,对氨高温热泵的研究也越来越多。

本文对常用高温热泵工质的物性进行了对比,并分析了工质之间的制热性能差异,综述了氨蒸气压缩式高温热泵几种常用的基本形式,基于基本形式,提出利用平板太阳能集热器加热压缩机排气,通过提高排气的过热温度,利用蒸气显热制取高温热水的新型太阳能辅助高温热泵系统,结合天津地区的太阳能辐射日照条件,对系统进行了理论热力性能分析,分析了太阳能补偿用于氨高温热泵系统的可行性及系统

优化潜力。

## 1 高温热泵工质对比分析

热泵工质通常受到压缩机技术的限制,在制冷系统中使用的制冷剂大多数不适合高温应用。一些具有适当性质的合成工质又受到基加利修正案的限制,这些合成工质大多存在消耗臭氧潜值(ODP)或全球变暖潜值(GWP)较大,或具有潜在的有毒分解物,对环境存在潜在危害等问题。因此,高温热泵未来的发展将集中在自然工质<sup>[5]</sup>。

### 1.1 常用高温热泵工质

目前,商用高温热泵中常用的工质有 R245fa、R717、R744、R134a 和 R1234ze(E)等<sup>[4]</sup>,碳氢化合

物、二氧化碳、水等自然工质将是高温热泵的研究重点<sup>[6-9]</sup>。O. Bamigbetan 等<sup>[6]</sup>分别对比讨论了热泵工质对压缩机排气温度、压力、尺寸、压比、COP 的影响。R. Bergamini 等<sup>[10]</sup>将单级压缩高温热泵和双级压缩高温热泵与锅炉进行了热性能对比,发现高温热泵在替代锅炉方面具有竞争优势,同时得出氨在较高温度下性能较好。表 1 所示为目前常用的商用高温热泵工质和部分自然工质的主要热物理性质,通过对比物性参数发现,在常用热泵工质中氨和水的 ODP 和 GWP 均为 0,高温工况下氨的压力较高,而工质水对于压力的要求更高,其临界压力约为氨的 2 倍,氨的分子质量小,密度较小,在相同充注量条件下,系统运行功耗少。

表 1 常用高温热泵工质的物性参数

Tab.1 Physical parameters of commonly used high temperature heat pump refrigerants

工质	R245fa	R717	R744	R134a	R1234ze(E)	R718	R290	R600
临界温度/°C	154.00	132.30	31.10	101.06	109.37	373.95	96.74	151.98
临界压力/MPa	3.65	11.33	7.38	4.06	3.64	22.06	4.25	3.79
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP	950	0	1	1300	6	0	3.3	20
安全等级	B1	B2	A1	A1	A1	A1	A3	A3
分子质量	134.05	17.03	44.01	102.03	114.04	18.02	44.09	58.12

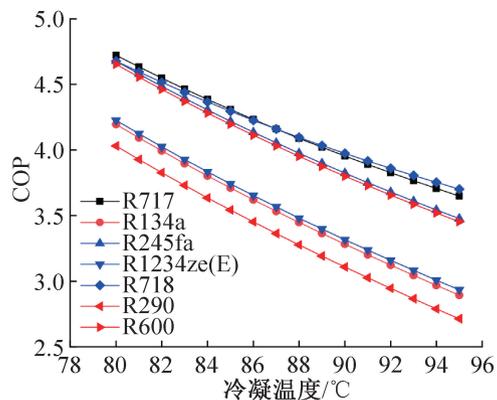
通过物性软件 REFPROP9.0 调取参数,对上述热泵工质进行简单的热力循环性能计算。系统假设为简单的单级压缩热泵循环,压缩和冷凝过程存在一定的过热度 and 过冷度,取 5 °C;压缩机的指示效率为 0.8;节流过程为绝热过程。由于 R744 的临界温度为 31.10 °C,当冷凝温度为 85 °C 时属于跨临界循环,冷凝过程存在温度滑移,不再进行对比分析。不同高温热泵工质在蒸发温度为 25 °C,冷凝温度为 80~95 °C 条件下热泵制热性能系数随冷凝温度的变化如图 1(a) 所示;不同高温热泵工质冷凝温度为 85 °C,蒸发温度为 15~25 °C 条件下热泵制热性能系数随蒸发温度的变化如图 1(b) 所示。由图 1 可知,高温工况下氨和水的热力性质相似,两者的性能系数较大,随着冷凝温度的升高性能系数逐渐降低,温度越高氨系统性能降低的越显著,这是由于氨的绝热指数较大( $k=1.40$ ),在低蒸发温度高冷凝温度时,压缩机压比较大,排气温度较高,功耗增加较大。

采用自然工质制取高温时通常存在压力较高的问题,高温高压状态下存在爆炸的危险,自然工质热泵最高温度通常在 85~95 °C 之间。通过分析发现在

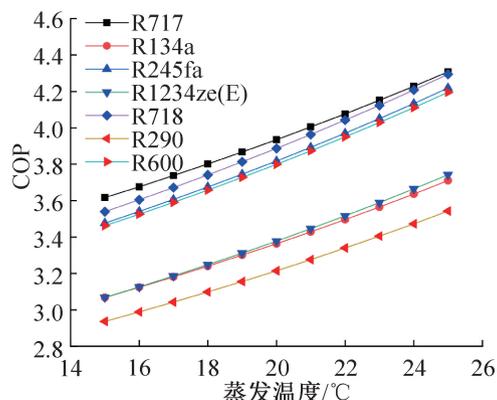
冷凝温度为 80~95 °C 高温热泵工况下氨的综合性能最佳。氨的临界温度较高,可在较高的热源温度和冷源温度下实现亚临界循环,适合作为冷热联供热泵工质,特别适合制取 60~110 °C 的热源温度<sup>[10]</sup>。上述结果与李军等<sup>[11]</sup>通过对比热泵工质在复叠式热泵高温级工况下的性能,得出氨热泵性能系数最大,制热量最多的结论一致;与 S. S. Baakeem<sup>[12]</sup>对多级蒸气压缩制冷系统的性能进行理论、能量和经济分析,使用性能参数和经验模型对 8 种工质进行研究,得出氨为最佳选择的结论相一致。

### 1.2 氨的物性分析

氨作为自然工质,不仅适应政策要求,热力性质也很好,氨的导热系数较大,气化潜热大(-15 °C 时的气化潜热为 R410A 的 5.5 倍),节流损失小,制热系数高,可以减少压缩机换热器尺寸,节省材料<sup>[13]</sup>。氨也存在一定的危险性,当空气中氨的浓度达到 15.7%~27.4% 时,遇到明火会发生爆炸,安全等级为 B2。虽然我国发生过多次氨泄漏事故,但氨泄漏多数是由于人员操作不当、设备老化、常年缺乏检修导致,氨存在明显的刺激气味,且极易溶于水,一旦发生



(a) 冷凝温度对不同工质热泵性能的影响



(b) 蒸发温度对不同工质热泵性能的影响

图 1 热泵工质性能对比

Fig.1 Performance comparison of heat pump refrigerant

泄漏事故极易被发现。同时,氨的分子质量小,密度小于空气,极易上升,当氨发生泄漏事故可通过通风排气及喷淋洒水装置及时除去存在空气中的氨。通过对氨系统进行设计、施工、操作规范,可以保证氨系统的安全性、可靠性<sup>[14-15]</sup>。

氨除了具有一定的危险性外还有其它的问题。氨排气温度较高,容易造成润滑油碳化,必须采取相应的冷凝措施。氨的临界温度(132.30 °C)和临界压力(11.33 MPa)较高,在制取较高温度的热水时冷凝压力较大,对压缩机和系统的承压能力要求较高。除了排气温度和压力的限制外,氨系统在选用材料上也存在挑战,氨与铜在有水的条件下会发生化学反应,这限制了氨热泵材料的选择。目前,氨高温热泵通常有两种形式:氨蒸气压缩式高温热泵;氨-水吸收式高温热泵<sup>[2]</sup>。本文主要对氨蒸气压缩式高温热泵进行讨论。

## 2 氨蒸气压缩式高温热泵

蒸气压缩制冷循环是最常用的制冷方式,若将冷凝温度提高至更高的温度则可同时用于供热。目前,大多通过锅炉或电加热器来满足高温热的需求,锅炉

燃烧化石燃料存在排放温室气体问题,电加热系统则存在用电效率低等问题。据估计,在未来的发展中,高温热泵技术可以提供 150 °C 的热源温度<sup>[6]</sup>。在一定温度区间内,若采用高温热泵则可以代替传统的供热系统。

### 2.1 蒸气压缩热泵系统的分类

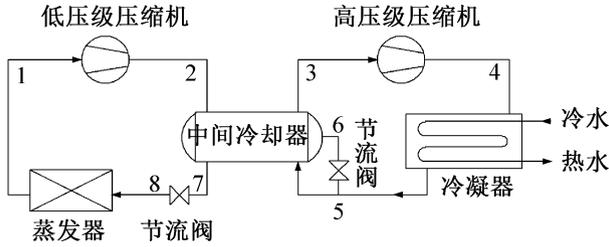
蒸气压缩热泵系统可以简单的分为蒸气压缩式循环、蒸气机械再压缩式循环和热蒸气再压缩式循环 3 种类型<sup>[2]</sup>。蒸气压缩式循环通常由压缩机、冷凝器、节流装置、蒸发器及连接管路组合为一个闭合回路,工质在系统中循环流动,在蒸发器内蒸发制冷,冷凝器内冷凝放热,该系统可以实现冷热联供。蒸气机械再压缩循环则为蒸气送入压缩机内进行压缩升温后,在冷凝器内冷凝放热,与循环工艺(即封闭系统)的压缩热泵相反,其中蒸气来源广泛作为开式系统来工作,常见的为半开式系统。热蒸气再压缩循环则为利用喷射器增压代替压缩机,高温高压的蒸气作为工作流体,经蒸发器吸收低温热源的蒸气作为引射流体,经喷射器混合升温后送至冷凝器内冷凝放热。与前两种机械压缩方式不同,该循环可由热蒸气驱动。本文主要对可以满足冷热双利用,实现冷凝热回收的蒸气压缩式循环热泵进行讨论。

### 2.2 蒸气压缩式循环热泵系统

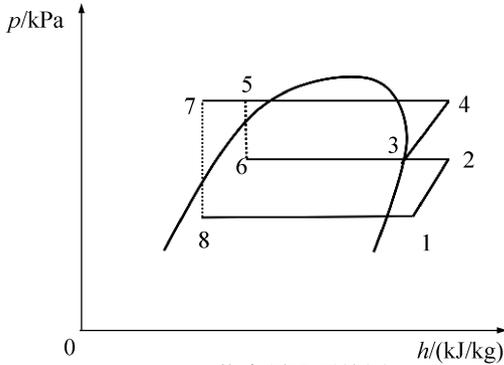
蒸气压缩循环分为 3 类:单级压缩、多级压缩和增添其它辅助设备(如引射器、中间冷却器、内部换热器等)的循环<sup>[2,7-8]</sup>。高温热泵的研究主要是在选择合适的工质和提高热泵制热效率方面。氨作为高温热泵工质具有较高的冷凝压力,使用单级压缩存在压比大、容积效率低、排气温度高等问题。目前技术的限制,压缩端的温度不宜超过 150 °C,过高的排气温度会造成压缩机内部润滑油碳化,对压缩机电机的热管理和材料的选择也带来了挑战<sup>[4]</sup>。故氨蒸气压缩式高温热泵系统一般采用多级压缩逐级升温的方法降低压比,以达到所需的温度。氨高温热泵有双级压缩(多级压缩)冷热水系统、冷凝热全回收系统、复叠式热泵系统等几种常用的基本形式<sup>[16-20]</sup>。

氨双级压缩冷热水系统如图 2(a) 所示。氨双级压缩冷热水系统的高、低压级由中间冷却器连接,高压级、低压级均为氨工质,低压级排气经中间冷却器冷却至中间压力下的饱和状态,进入高压级进一步升温升压,高温高压的蒸气在冷凝器内冷凝与冷却水换热制取热水。冷凝后的饱和液经节流阀节流降压后进入中间冷却器,一部分用于冷却低压级的排气和过冷盘管中的高压氨液,另一部分经蛇形盘管冷却后再送至蒸发器吸热蒸发完成循环。两级压缩热泵系统

可以降低压比,提高系统的制热量<sup>[21]</sup>。



(a) 氨双级压缩冷热水系统原理



(b) 热力循环压焓图

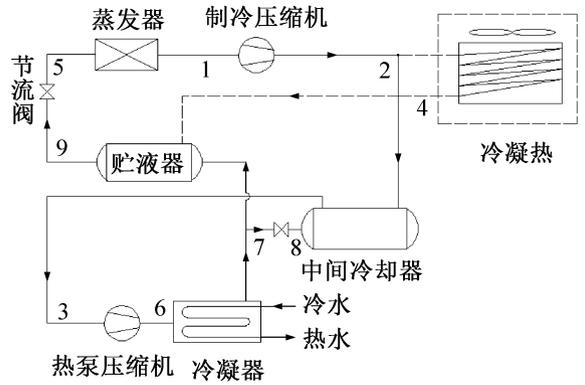
图 2 氨双级压缩冷热水系统原理及压焓图

Fig.2 Principle and  $p-h$  diagram of ammonia two-stage compression hot and cold water system

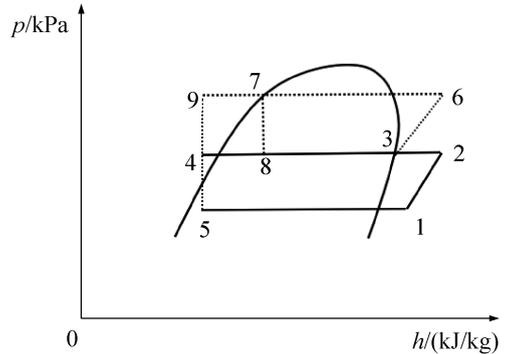
陈孚江等<sup>[22]</sup>分析了低温工况下的运行参数对两级压缩空气源热泵系统性能的影响,得出蒸发温度、冷凝温度是主要影响因素,其中蒸发温度越低对系统的影响越大。刘炳伸等<sup>[23]</sup>将准两级压缩联合过冷器的循环方式引入了热泵系统,结果表明该方式提高了系统性能,降低了排气温度,增加了安全性能。

图 3 所示为氨冷凝热全回收系统原理与压焓图。该系统将制冷压缩机的排气通往中间冷却器进行洗涤,得到中间压力下的饱和氨气,经热泵压缩机变成高温高压的氨气,此时再经冷凝器与循环水进行热交换,冷凝后的制冷剂节流降压一部分送至中间冷却器供洗涤排气,另一部分节流后送至贮液器供系统制冷。该系统可同时设有冷凝器,可以控制通往热泵压缩机蒸气流量,在不使用热泵机组时可以关闭热泵系统,图 3(a)中虚线部分表示热泵系统,实线表示带蒸发冷的制冷系统。该系统与氨双级压缩冷热水系统相比少了一个制冷循环过程,节省了部分制冷设备的初投资,适用范围也更加广泛<sup>[18]</sup>。

图 4 所示为氨复叠式热泵系统原理与压焓图。系统分为高温级和低温级两个独立的系统,自然工质氨通常作为高温级制冷剂,采用二氧化碳作为低温级制冷剂,两个系统通过冷凝蒸发器连接,高温级吸收低温级的冷凝热作为高温热泵的低温热源,低温级蒸发器则用来制取更低的低温环境<sup>[24]</sup>。使用复叠系统



(a) 氨冷凝热全回收系统原理



(b) 热力循环压焓图

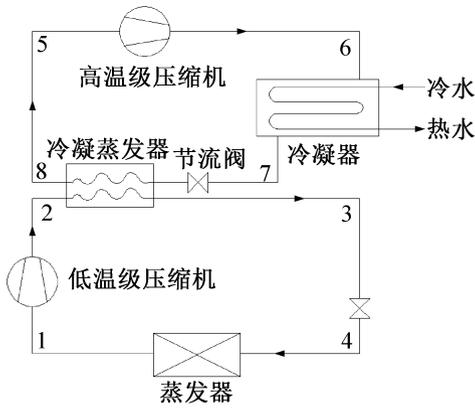
图 3 氨冷凝热全回收系统原理及压焓图

Fig.3 Principle and  $p-h$  diagram of ammonia condensation heat recovery system

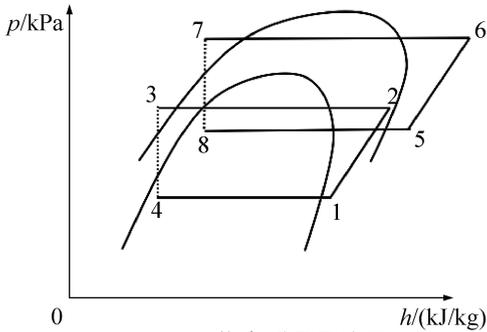
可以降低压缩机压比,在制取高温热源时可同时提供更加低温的冷源,但同时也使系统更加复杂,成本更高。杨永安等<sup>[25]</sup>提出采用单一工质复叠式空气源热泵系统,并进行热力模型建立和实验分析,结果证明该系统可以降低压缩机排气温度,满足低温下的供暖需求,扩大了空气源热泵的应用范围。曲明璐等<sup>[26]</sup>在传统复叠式空气源热泵中增设双螺旋盘管蓄热器,在满足除霜问题的同时优化了系统性能。

### 2.3 蒸气压缩式高温热泵的发展限制

文献中对于高温热泵的温度范围定义各不相同,通常的温度区间为 80~100 °C。一般来说,当温度高于 80 °C 时,在食品、造纸和化学等工业中有很大的应用潜力;当温度高达 100 °C 时,则可用于杀菌消毒、蒸发蒸馏、干燥预热等工艺。所达到的温度越高应用的范围越广,但同时对于技术和系统的效率要求也越来越高<sup>[6]</sup>。可以通过增添辅助设备提高系统的效率, Luo Baojun 等<sup>[8]</sup>研究了采用引射器、内部换热器、耦合循环等方式对系统性能的影响,结果证明几种方式对系统均有不同的积极作用。目前只有 20 种已经上市的型号可以提供 150 °C 的冷凝温度,但全部使用合成工质,高温热泵的主要限制还是工质,在全球变暖



(a) 氨复叠式热泵系统原理



(b) 热力循环压焓图

图 4 氨复叠式热泵系统原理及压焓图

Fig.4 Principle and  $p-h$  diagram of ammonia Cascade heat pump system

形势下,急需在对环境影响较小的范围内寻找可用的制冷剂,在高温高压下运行润滑油的润滑性和油密性会存在丧失现象,同时润滑油与材料的兼容性、压缩机的冷却及耐高温等技术问题也限制高温热泵的发展<sup>[4]</sup>。对于环境而言,自然工质将是高温热泵制冷剂未来发展更有希望的替代物,同时急需突破压缩机在更高温度和压力下运行的技术限制<sup>[5]</sup>。

### 3 采用太阳能补偿的氨高温热泵系统

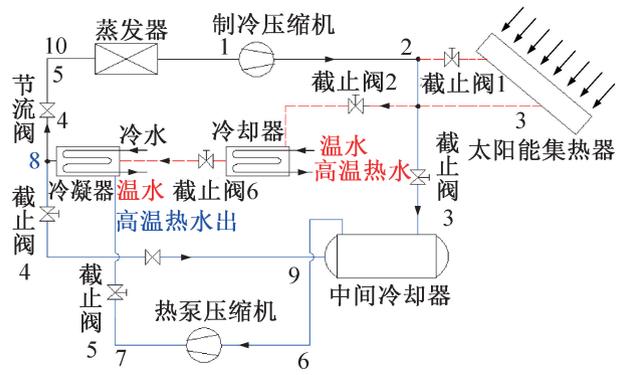
#### 3.1 基本原理

我国大部分地区光照充足,约超过 2/3 的地区辐射总量超过  $5\ 016\ \text{MJ}/\text{m}^2$ <sup>[27]</sup>,太阳能是优秀的天然可再生清洁能源,且太阳能利用技术也越来越成熟,考虑利用太阳能作为高温热泵补偿热源以达到高温的目的。国内外学者对太阳能辅助空气源热泵进行了大量的分析,系统一般可以分为两类:一类为利用太阳能集热器作为蒸发器以提高系统的蒸发温度,工质直膨式循环,为单纯满足供热的热泵系统;另一类为太阳能集热器与空气源热泵共同加热水,太阳能集热器内工质为水、气体或者防冻液,属于非直膨式,该系统可以同时满足制冷和供热<sup>[28-29]</sup>。氨工质常用于大中型制冷系统中,冷凝热充足,考虑由太阳能集热器

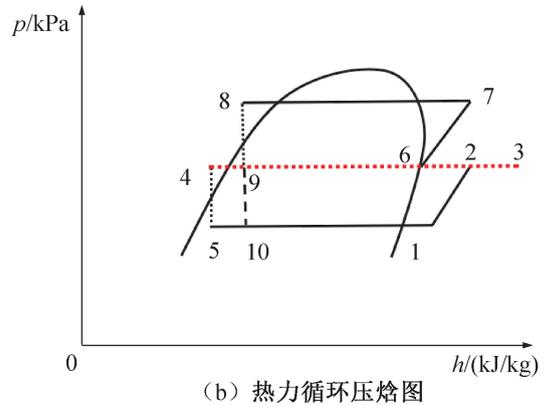
直接加热压缩机的排气,提高氨蒸气的过热度,满足高温供热的需求。由于太阳能集热器热性能受光照条件的影响较大,昼夜存在极大差异,在光照条件不足时,增设一台氨热泵压缩机代替太阳能集热器工作,以满足热泵全天候的工作需求。按此提出利用太阳能集热器补偿和热泵压缩机联合运行的高温热泵系统。

#### 3.2 系统流程

图 5 为采用太阳能加热补偿的氨蒸气压缩高温热泵系统原理及压焓图。该系统可分为太阳能辅助高温热泵和冷凝热全回收高温热泵两部分。



--- 太阳能辅助热泵系统    ——— 冷凝热全回收系统  
(a) 太阳能辅助蒸气压缩高温热泵系统原理



(b) 热力循环压焓图

图 5 太阳能辅助蒸气压缩高温热泵原理及压焓图

Fig.5 Principle and  $p-h$  diagram of solar-assisted vapor compression high temperature heat pump

图 5 中虚线代表太阳能辅助热泵。压缩机排气由太阳能集热器加热提升过热度,基本流程为:吸热蒸发后的饱和氨蒸气经制冷压缩机压缩后达到高温高压状态,后氨蒸气进入平板太阳能集热器,经太阳能集热器升温达到更高温度状态后,高温高压氨蒸气进入冷却器内冷却加热水。冷却降温后的氨蒸气再经冷凝器冷凝,后经节流阀节流降压进入蒸发器内完成循环。其中冷却水先经冷凝器加热升温,升温后的水分为两部分,一部分送至冷却器内冷却过热氨蒸

气成为高温水,另一部分温水则可送至生活区或冷却降温后循环再利用。实线则代表冷凝热全回收热泵,由热泵压缩机补偿提升单级压缩排气的温度,系统基本流程为:吸热蒸发的饱和氨蒸气经制冷压缩机压缩升温升压变为过热蒸气,后通入中间冷却器洗涤冷却至中间温度(点 6)下的饱和蒸气状态,饱和蒸气经热泵压缩机增压为高温高压的过热蒸气,此时经过压缩补偿升温后的蒸气再流入冷凝器内冷凝放热,加热产生高温热水。经冷凝器冷凝后的饱和液分为两路,一部分经节流阀节流降压后送至中间冷却器,用于洗涤冷却制冷压缩机的排气,另一部分节流后送至蒸发器内蒸发制冷完成循环<sup>[30]</sup>。

### 3.3 系统可行性分析

太阳能集热器按结构形式可分为真空管型和平板型;按照温度区间可以分为高温型、中温型和低温型集热器。平板太阳能集热器为低温型太阳能集热器,内部结构如图 6 所示,一般由玻璃盖板、吸热板、保温层、箱体外壳组成,具有耐久性强、质量轻、效率高特点。板内温度一般在 200 °C 以下,在晴朗或少云天气条件下,吸热板可达到 120 °C 以上的高温,并可维持 5~6 h,管内温度最高可达到 160 °C 以上。平板型空气集热器具有采光面积大、结构简单、维护方便、无防冻等优点<sup>[31-32]</sup>。氨单级压缩排气温度不高、压力不大,可以实现对排气加热补偿升温。本系统采用平板太阳能集热器直接对单级压缩制冷循环的压缩机的排气进行加热,经太阳能集热器补偿升温后具有更高过热度,利用过热蒸气冷却过程释放的显热,制取更高温度的热水。

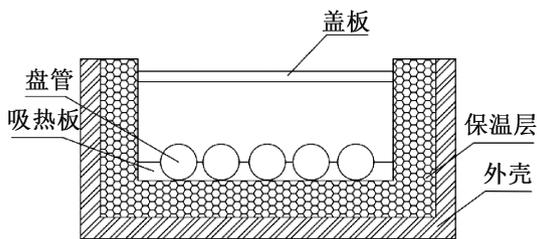


图 6 太阳能集热器局部原理

Fig.6 Partial principle of solar collector

天津市属于太阳能资源较为丰富的二类区域,全年日照辐射时长大于 3 000 h,全年太阳能辐射可利用率在 60% 以上,在冬季晴天室外温度 7 °C 条件下,平板太阳能集热器平均集热效率可维持在 0.51 以上,最高可达约 0.6。一天中日照时长大于 6 h 为可利用太阳能,天津平均各月可利用太阳能日为 22 d。在太阳能可利用日,09:30—16:00 管内温度可维持 120 °C 以上,在此期间管内温度随辐射强度增加逐渐

升高,10:00—15:00 辐射强度较大,管内温度可高达 140 °C 以上。日平均辐射强度约为 400 W/m<sup>2</sup>,一天中满足加热要求的集热时间可达约 5 h,总集热量为 1 020 W/m<sup>2</sup>。根据热负荷大小、建筑可用安装面积、太阳能保证率等因素选取太阳能集热器数量。在热泵模式下,太阳能集热器可以保证提供循环工质的补偿热量,具备作为补偿热源的潜力<sup>[33-37]</sup>。

## 4 结论

本文对比了目前常用的高温热泵工质,对氨蒸气压缩式高温热泵几种常用的系统进行了综述,重点分析了氨作为高温热泵工质的优劣势,归纳了氨蒸气压缩式高温热泵目前发展所面临的问题,最后提出了利用太阳能补偿辅助的高温热泵系统的改进方案,对系统进行了可行性分析,得到如下结论:

1) 氨的热物理性质、环保性、导热系数等方面符合作为高温热泵工质的要求,且在 85~95 °C 温度区间内综合性能最佳,具备作为高温高压热泵工质的良好潜力。

2) 氨高温热泵存在排气温度过高、压力过大等问题,压缩机排气温度、润滑油和材料的兼容性等条件限制了高温热泵发展至更高温度,研发在更高温度和压力下工作的压缩机和寻找研发适当的润滑油是目前发展的主要任务。

3) 氨单级压缩制冷系统中增设太阳能补偿系统,可以提高热泵系统性能,降低供热系统的能耗,同时可实现冷凝废热的回收利用,提高冷热联供系统的整体运行效率,为高温热泵的优化和发展提供了新思路 and 方向。

本文受天津市自然科学基金(18JCYBJC22200)项目资助。(The project was supported by the Tianjin Natural Science Foundation (No. 18JCYBJC22200).)

### 参考文献

[1] LI Xiaoqiong, ZHANG Yufeng, FANG Lei, et al. Energy, exergy, economic, and environmental analysis of an integrated system of high temperature heat pump and gas separation unit[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111911.  
[2] ZHANG Jing, ZHANG Honghu, HE Yaling, et al. A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China[J]. Applied Energy, 2016, 178: 800-825.  
[3] 赵力. 高温热泵在我国的应用及研究进展[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 8-13. (ZHAO Li. Application and re-

- search progress of high temperature heat pumps in my country[J]. *Journal of Refrigeration*, 2005, 26(2): 8-13.)
- [4] ARPAGAUS C, BLESS F, UHLMANN M, et al. High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials[J]. *Energy*, 2018, 152: 985-1010.
- [5] BAMIGBETAN O, EIKEVIK T M, NEKSÅ P, et al. The development of a hydrocarbon high temperature heat pump for waste heat recovery [ J ]. *Energy*, 2019, 173: 1141-1153.
- [6] BAMIGBETAN O, EIKEVIK T M, NEKSÅ P, et al. Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural working fluids [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 80: 197-211.
- [7] MIKIELEWICZ D, WAJS J. Performance of the very high temperature heat pump with low GWP working fluids[J]. *Energy*, 2019, 182: 460-470.
- [8] LUO Baojun, ZOU Peng. Performance analysis of different single stage advanced vapor compression cycles and refrigerants for high temperature heat pumps [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 104: 246-258.
- [9] FUKUDA S, KONDOU C, TAKATA N, et al. Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps [ J ]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40: 161-173.
- [10] BERGAMINI R, JENSEN J K, ELMGAARD B. Thermodynamic competitiveness of high temperature vapor compression heat pumps for boiler substitution [ J ]. *Energy*, 2019, 182: 110-121.
- [11] 李军, 吴一波. 氨螺杆式高温热泵的应用范围分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2017, 17(2): 1-4. (LI Jun, WU Yibo. Analysis of the application range of ammonia screw high temperature heat pump[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2017, 17(2): 1-4.)
- [12] BAAKEEM S S, ORFI J, ALABDULKAREM A. Optimization of a multistage vapor-compression refrigeration system for various refrigerants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 84-96.
- [13] 杨一凡. 氨制冷技术的应用现状及发展趋势[J]. *制冷学报*, 2007, 28(4): 12-19. (YANG Yifan. The application status and development trend of ammonia refrigeration technology[J]. *Journal of Refrigeration*, 2007, 28(4): 12-19.)
- [14] 唐俊杰, 柳琳, 李鹏, 等. 氨制冷剂应用与冷链可持续发展建议[J]. *冷藏技术*, 2019, 42(2): 1-4. (TANG Junjie, LIU Lin, LI Peng, et al. Application of ammonia refrigerant and suggestions for sustainable development of cold-chain[J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2019, 42(2): 1-4.)
- [15] 司春强, 唐俊杰, 马进, 等. 我国氨系统冷库安全现状及发展建议[J]. *制冷技术*, 2014, 34(3): 15-17. (SI Chun qiang, TANG Junjie, MA Jin, et al. Safety status and development suggestions for ammonia system cold storage in my country [ J ]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2014, 34(3): 15-17.)
- [16] NI Long, DONG Jiankai, YAO Yang, et al. A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade [ J ]. *Renewable Energy*, 2015, 84: 30-45.
- [17] 桑宪辉, 徐树伍, 于志强. NH<sub>3</sub> 螺杆式全热回收高温热泵系统研究 [ J ]. *制冷与空调(北京)*, 2016, 16(1): 41-44. (SANG Xianhui, XU Shuwu, YU Zhiqiang. Research on NH<sub>3</sub> screw type full heat recovery high temperature heat pump system [ J ]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2016, 16(1): 41-44.)
- [18] 舒建国, 白单英. 基于冷凝废热回收的氨高温热泵系统性能分析[J]. *制冷技术*, 2018, 38(2): 22-26. (SHU Jianguo, BAI Danying. Performance analysis of ammonia high temperature heat pump system based on condensation waste heat recovery [ J ]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2018, 38(2): 22-26.)
- [19] 胡斌, 王文毅, 王凯, 等. 高温热泵技术在工业制冷领域的应用[J]. *制冷学报*, 2011, 32(5): 1-5. (HU Bin, WANG Wenyi, WANG Kai, et al. Application of high temperature heat pump technology in industrial refrigeration [ J ]. *Journal of Refrigeration*, 2011, 32(5): 1-5.)
- [20] 谭海龙, 王志强, 荆炎荣. 氨在高温热泵机组中的应用 [ J ]. *制冷与空调(北京)*, 2018, 18(9): 32-34, 14. (TAN Hailong, WANG Zhiqiang, JING Yanrong. Application of ammonia in high temperature heat pump unit [ J ]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2018, 18(9): 32-34, 14.)
- [21] JIN Xu, WU Zhe, ZHANG Kuo, et al. Analysis of performance and economical efficiency of two stage compression heat pump system with inter-stage injection in cold regions of northern China [ J ]. *Building Simulation*, 2019, 12(4): 551-562.
- [22] 陈孚江, 张云, 姜钦青, 等. 低温环境下运行参数对两级压缩空气源热泵性能的影响[J]. *流体机械*, 2017, 45(3): 56-60, 74. (CHEN Fujiang, ZHANG Yun, JIANG Qinqing, et al. The influence of operating parameters on the performance of two-stage compressed air source heat pump in low temperature environment [ J ]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(3): 56-60, 74.)
- [23] 刘炳仲, 龚宇烈, 陆振能, 等. 热泵蒸汽系统准两级压缩联合过冷器循环的性能分析及优化 [ J ]. *化工进展*, 2017, 36(7): 2360-2367. (LIU Bingzhong, GONG Yulie, LYU Zheneng, et al. Performance analysis and

- optimization of quasi-two-stage compression combined sub-cooler cycle of heat pump steam system [J]. *Progress in Chemical Industry*, 2017, 36(7): 2360-2367.)
- [24] 吴曦, 徐士鸣, 刘嘉威, 等. 适用于复叠式中高温热泵的混合制冷剂分析 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(5): 53-58. (WU Xi, XU Shiming, LIU Jiawei, et al. Analysis of mixed refrigerant suitable for cascade heat pumps with medium and high temperature [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(5): 53-58.)
- [25] 杨永安, 李瑞申, 李坤, 等. 采用 R410A 单一工质的复叠式空气源热泵 [J]. *化工学报*, 2020, 71(4): 1812-1821. (YANG Yongan, LI Ruishen, LI Kun, et al. Cascade air source heat pump using R410A single working fluid [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(4): 1812-1821.)
- [26] 曲明璐, 樊亚男, 李天瑞, 等. 复叠式空气源热泵双螺旋盘管蓄热器蓄放热特性实验研究 [J]. *制冷学报*, 2017, 38(3): 23-29, 49. (QU Minglu, FAN Yanan, LI Tianrui, et al. Experimental study on heat storage and release characteristics of double spiral coil accumulator of cascade air source heat pump [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(3): 23-29, 49.)
- [27] 王岗, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能-空气复合热源热泵热水系统 [J]. *化工学报*, 2014, 65(3): 1033-1039. (WANG Gang, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Solar-air composite heat source heat pump hot water system [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(3): 1033-1039.)
- [28] KONG X Q, ZHANG D, LI Y, et al. Thermal performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater [J]. *Energy*, 2011, 36(12): 6830-6838.
- [29] 刘宗江, 贾春霞, 李忠, 等. 一种太阳能辅助空气源热泵设备研究 [J]. *建筑节能*, 2018, 46(3): 44-48. (LIU Zongjiang, JIA Chunxia, LI Zhong, et al. Research on a solar-assisted air source heat pump equipment [J]. *Energy Conservation of Buildings*, 2018, 46(3): 44-48.)
- [30] 翟晓婷, 张会明, 崔一丹, 等. 冷热互联系统研究及其能效计算准则讨论 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 128-134. (ZHAI Xiaoting, ZHANG Huiming, CUI Yidan, et al. Research on cold-heat interconnection system and discussion of energy efficiency calculation criteria [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 128-134.)
- [31] 杨鲁伟. 平板太阳能集热器耐久可靠性的实验研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2019. (YANG Luwei. Experimental study on the durability and reliability of flat solar collectors [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019.)
- [32] 孟欣, 冯荣. 基于太阳能补偿的空气源热泵系统性能分析 [J]. *太阳能*, 2020(3): 62-67. (MENG Xin, FENG Rong. Performance analysis of air source heat pump system based on solar compensation [J]. *Solar Energy*, 2020(3): 62-67.)
- [33] 郭军. “中新天津生态城”太阳能资源评估 [J]. *天津科技*, 2009, 36(1): 86-88. (GUO Jun. Assessment of solar energy resources in "Sino Singapore Tianjin Eco-city" [J]. *Tianjin Science and Technology*, 2009, 36(1): 86-88.)
- [34] 任绳风, 吕建, 殷洪亮. 天津市太阳能资源分析及其在供暖上的应用 [J]. *中国建设动态 (阳光能源)*, 2007(2): 34-36. (REN Shengfeng, LYU Jian, YIN Hongliang. Analysis of solar energy resources in Tianjin and its application in heating [J]. *China Construction Trends (Sunshine Energy)*, 2007(2): 34-36.)
- [35] 张建军. 平板型太阳能双效集热器热经济性评价 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019. (ZHANG Jianjun. Thermal economic evaluation of flat-plate solar double-effect collector [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.)
- [36] 徐嘉, 李红旗, 王东越, 等. 太阳能-空气源热泵多能互补系统能效分析 [J]. *制冷与空调 (北京)*, 2018, 18(12): 77-83. (XU Jia, LI Hongqi, WANG Dongyue, et al. Energy efficiency analysis of solar-air source heat pump multi-energy complementary system [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2018, 18(12): 77-83.)
- [37] 陈雁. 太阳能辅助空气源热泵供暖实验和模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006. (CHEN Yan. Experimental and simulation research on solar-assisted air source heat pump heating [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.)

#### 通信作者简介

宁静红, 女, 教授, 天津商业大学, 18602665332, E-mail: ningjinghong@126.com。研究方向: 制冷系统节能与优化。

#### About the corresponding author

Ning Jinghong, female, professor, Tianjin University of Commerce, +86 18602665332, E-mail: ningjinghong@126.com. Research fields: energy saving and optimization of refrigeration system.