

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.11.005

太阳能空调与热泵技术进展及应用

Progresses and applications of solar air conditioning and heat pump technologies

陈尔健, 贾腾, 姚剑, 代彦军*

CHEN Erjian, JIA Teng, YAO Jian, DAI Yanjun*

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

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

摘要:当前日益增长的建筑能耗需求与“双碳”目标背道而驰,通过新型节能技术降低建筑能耗势在必行。太阳能空调与热泵技术,可细分为光热与光伏驱动的供热制冷技术,是将太阳能与建筑供能相结合,实现太阳能规模化应用的潜在发展途径。对目前太阳能供热制冷主要技术路线进行总结,主要有热驱动的吸收式制冷/热泵循环、吸附式制冷、除湿空调,电驱动的光伏空调、直膨式热泵、光伏/光热一体化(PVT)热泵等,并对相关技术的研究进展做简要介绍。太阳能空调与热泵技术近年来在能效提升、驱动温区扩展与环境适应性增强等方面取得进展,未来可进一步结合建筑用能需求提高系统供能多样性,利用太阳能推动建筑用能的绿色化转型。

关键词:“双碳”目标;太阳能空调;太阳能热泵;吸收式循环;除湿空调;PVT 热泵

中图分类号:TK 519

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)11-0040-09

Abstract:The increasing energy consumption by buildings runs counter to the goal of carbon neutrality and carbon peaking. Consequently, it is imperative to reduce building energy consumption through new energy-saving technologies. Solar air conditioning and heat pump technologies integrating solar power and energy supply for buildings provide a potential development path to large-scale application of solar energy. They can be subdivided into heating and cooling technologies driven by solar energy or photovoltaic power. The main technical routs of solar air conditioning and heat pump technologies are enumerated, including thermally driven absorption cooling/heating pumps, adsorption cooling, desiccant air conditioning, air conditioners driven by electricity and PV power, direct expansion heat pumps and photovoltaic/thermal (PVT) heat pumps. The progresses of the related technologies are also briefly introduced. The solar air conditioning and heat pump technologies have made progress in improving energy efficiency, broadening the driven temperature range and enhancing environmental adaptability. Considering the energy demand of buildings, the technologies can advance the energy supply diversity and promote the green transformation of building energy.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality; solar air conditioning; solar heat pump; absorption cycle; desiccant air conditioning; PVT heat pump

0 引言

太阳能分布广泛,是对应用选址要求较低的一种可再生能源,将其与建筑用能需求相结合,既符合目前建筑节能的发展趋势,也是太阳能规模化利用的有效途径。在碳达峰、碳中和背景下,太阳能与建筑节能相结合符合当前低碳发展的战略。然而,由于太阳能的间歇性与季节性,与建筑稳定的用能需求存在矛盾,如何解决太阳能供热制冷稳定、高效的难题,是提高太阳能在建筑能源体系中

贡献率的关键所在^[1-2]。

太阳能集热是影响太阳能空调与热泵技术的重要环节,集热温度和环境温度的温差是集热效率的主要影响因素,对于中高温热源驱动的太阳能空调与热泵技术,太阳能转化的制冷供热效率受限于集热效率^[3]。

对于太阳能制冷,夏季太阳辐照强度高,因此集热温度与集热效率较高,而冬季太阳辐照强度低,其集热温度与集热效率受到限制,进而影响太阳能供热制冷的转化效率与稳定。发展太阳能空调与热泵技术,提高太阳能集热全年运行效率,提升太阳能在建筑能源体系中的贡献率,是目前国内外学者正在探索研究的方向。

收稿日期:2021-08-25;修回日期:2021-09-03

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目
(51961165110)

1 太阳能空调与热泵主要技术途径

太阳能应用于建筑供热制冷有 2 种利用方式,光热与热驱动空调(热泵)相结合或光伏发电与蒸汽压缩式空调(热泵)相结合,目前太阳能热驱动和电驱动空调与热泵主要技术途径分别如图 1、图 2 所示。

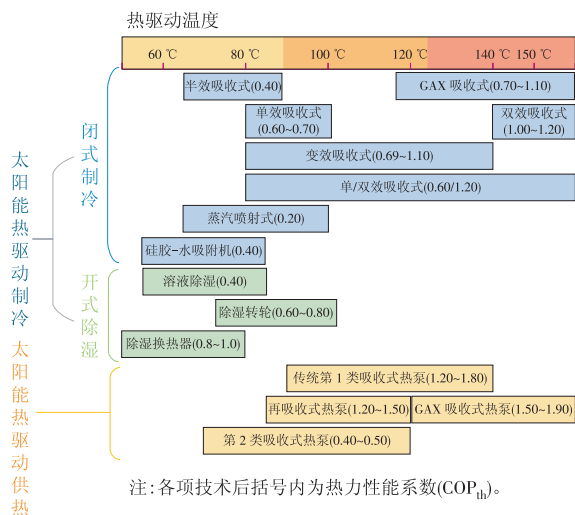


图 1 太阳能热驱动供热制冷主要技术途径

Fig. 1 Technical routes for cooling and heating technology driven by solar thermal power

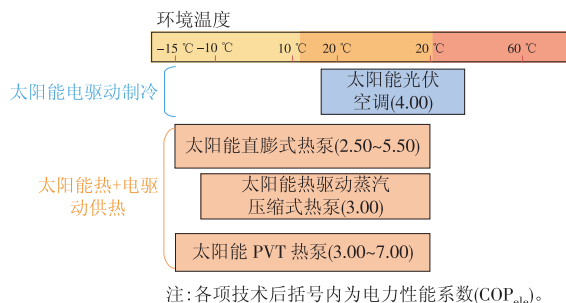


图 2 太阳能电驱动供热制冷主要技术途径

Fig. 2 Technical routes for cooling and heating technology driven by PV power

在太阳能热驱动制冷技术方面,可根据制冷循环与冷却环境是否存在质量交换分为闭式制冷循环或开式除湿循环。

1.1 太阳能热驱动供热制冷技术

吸收式制冷是目前最为成熟且应用最多的热驱动制冷技术。根据《蒙特利尔议定书》的基加利修正案,当前需减少高全球变暖潜能值(GWP)制冷剂的使用来降低温室气体排放,吸收式制冷系统通常使用 H₂O 和 NH₃ 等天然制冷剂,是符合当前发展需要的一个重要优势,科学界和商业界都在大力开发太阳能吸收式制冷系统。与其他太阳能制冷技术相比,吸收式制冷机热力性能系数(COP_{th})更

高,其单效循环驱动温度为 80~100℃,对应的 COP_{th} 为 0.6~0.8,双效循环利用高压发生器发生蒸汽的冷凝热量为低压发生器提供发生热量,可使 COP_{th} 达到 0.9~1.3(热源温度 140~160℃),虽然在三效循环的 COP_{th} 可提升至 1.7(热源温度 180~220℃),但由于驱动热源温度需达到 180℃ 以上,实际运用中 LiBr-H₂O 工质对在高温工况下的结晶风险极大,且对铜管的腐蚀性增强,因此目前三效循环几乎没有商业应用^[4],虽然半效循环驱动热源温度最低,但 COP_{th} 也仅有单效循环的一半,因而对发生热量的消耗量较高^[5],近年又有学者提出变效吸收(1. N 效)循环,其驱动热源温度介于单效与双效之间, COP 则随驱动温度升高连续提升,解决了单效循环热源温度提升性能无法持续增大,使焓损失较大的缺陷^[6]。

“发生器-吸收器热交换”循环(Generator Absorber Heat Exchange, GAX)采用循环内部回热,对外部输入热源总量要求不高,但其驱动温度需达到接近双效循环同等的温度水平,且由于其高低压侧溶液浓度差范围极大,因而不适用于使用 LiBr-H₂O 工质对(易结晶),而使用 NH₃-H₂O 工质对则需增设精馏器,导致制冷性能不及 LiBr-H₂O 工质对,因而 GAX 循环目前尚无在制冷循环上使用,均利用其吸收器中较大的相变温度滑移特性用于制热循环内部回热以提高制热性能^[7]。

由于蒸汽喷射式能效较低,且喷射器运行范围受限设计工况,存在较少应用案例。硅胶-水吸附机驱动温度相比吸收式更低,在低品位热源高效利用上存在优势, COP_{th} 也相对较低,目前已有小批量生产。硅胶-水吸附机在建筑太阳能空调、太阳能低温储粮系统获得应用^[8]。

开式除湿循环,主要有溶液除湿、除湿转轮和除湿换热器技术,这几种技术通过吸湿材料(盐溶液或干燥剂)界面处与处理空气之间的水蒸气分压力差从空气中吸附水蒸气实现无水除湿,通常与常规压缩式空调结合,分别处理热湿负荷,通过热湿解耦处理提高压缩式空调蒸发温度,达到能效提升的目的。

1.2 太阳能电驱动供热制冷技术

太阳能热驱动供热技术围绕第一类吸收式热泵及其循环的各种变式,包括再吸收式热泵和 GAX 吸收式热泵等,在热驱动温度和能效水平上略有差异,该类型循环通过输入高温热源与低温热源获得大量的中温热量;第二类吸收式热泵则通过使用大量的中温热量获得更高品位的热量输出,亦称为升

温型热泵。

太阳能电驱动制冷技术,通过光伏组件发电,用于驱动压缩式制冷机,为了保证稳定供冷与提高运行经济性,通常与蓄冰或蓄电装置结合。太阳能热+电驱动供热技术,通过热电耦合供热,主要有太阳能热驱动蒸汽压缩式热泵,太阳能直膨式热泵,以及太阳能光伏/光热一体化(PVT)热泵。太阳能PVT热泵通过热泵系统为PV板降温提高发电效率,同时提高热泵供热能效,实现高效的热电联产,是目前国内外研究太阳能利用技术学者重点聚焦的技术。

从太阳能向供热制冷能量转换效率角度对比太阳能热驱动与电驱动的供热制冷技术,需从太阳能的发电/集热转化效率出发,结合电驱动或热驱动供能设备的电力/热力效率,获得用于评价太阳能转换效率的统一评价指标(SCOP)。现有太阳能供热技术的 SCOP 如图 3 所示,当前光伏发电效率为 0.15,光热集热效率为 0.50,可见由于光热高效转化使得太阳能热驱动吸收式热泵供热技术 SCOP 达到 0.80,即单位太阳辐射能量输入 Q 可以产出 $0.80Q$ 的供热量,是所有供热技术中的最高值。

对于当前应用较多的太阳能空调技术而言,热驱动吸收式制冷由于吸收式制冷循环的效率较低,其 SCOP 低于结合蒸汽压缩制冷的太阳能光伏空调。

2 太阳能空调与热泵技术进展

近年来,太阳能空调与热泵技术在能效提升、驱动温区与环境适应性扩展等技术要点上有了进一步突破,相关总结与对比见表 1。

表 1 太阳能供热制冷技术进展总结与对比

Tab. 1 Summary and comparison of progresses on solar heating and cooling technologies

太阳能供热制冷技术进展	适用场景	优点	COP_{th}	COP_{ele}
变效(1.N 效)溴化锂吸收式制冷机组	商用	无极变效、单双效之间 COP 连续提升	0.69~1.10	—
单效风冷绝热吸收闪蒸制冷机组	家庭户用	体积小、风冷一体结构	0.64~0.76	—
采用除湿换热器的连续型除湿空调系统	商用	高效除湿,可实现热湿独立控制	0.34	—
热泵/太阳能驱动浓度差蓄冷/制冷循环	商用	可结合峰谷电价提高经济性	—	—
直膨式太阳能热泵	商用/家庭户用	高效稳定供热,受辐照强度影响较小	—	4.47
低温型直膨式太阳能热泵	商用/家庭户用	适应北方低温环境工况	—	2.51
直膨式太阳能辅助 PVT 热泵	商用/家庭户用	实现太阳能热电联产	—	8.00
太阳能辅助单级氨水平衡式再吸收热泵	商用	驱动温度低至 85 ℃	1.55	—
基于 GAX 的两级平衡多重回热式再吸收热泵	商用	驱动温度低至 73 ℃,低温适应性强	1.45	—
再吸收与蒸汽压缩耦合热泵	商用	稳定性好,低温适应性强	—	2.38
双热源驱动的 GAX 氨水吸收式热泵	商用	内部回热,热力性能好	1.80	—

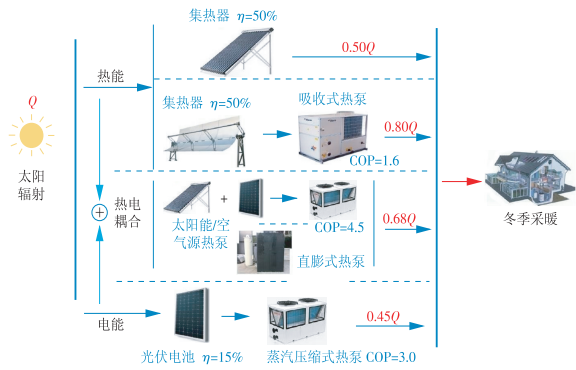


图 3 太阳能供热技术 SCOP

Fig. 3 SCOP of the solar heating technology

2.1 变效（1.N 效）溴化锂吸收式制冷机组

上海交通大学提出一种 1.N 效吸收式循环,如图 4 所示。该循环采用吸收-发生热耦合方式,其中低压吸收器出口溶液分流后,分别进入高压吸收器和高压发生器。利用高压吸收器的吸收热,对第二低压发生器进行加热,该循环根据高压发生器的发生温度变化调节分流溶液的质量比:当高压发生器温度足够高时,溶液更多流入高压发生器,系统逐渐进化为双效循环;当热源温度足够低时,退化为单效循环,实现变效的目的^[6]。

基于中温线性菲涅尔集热器的太阳能利用系统建于广东电网有限责任公司电力科学研究院,能够实现制冷、发电、储热、制取生活热水等多项功能,集合了 1.N 效吸收式制冷技术、有机朗肯循环(ORC)发电技术、熔盐相变蓄热技术与板式换热技术等,其工作原理如图 5 所示。

2.2 单效风冷绝热吸收闪蒸制冷机组

上海交通大学与山东禄禧新能源科技有限公司合作研发出一种单效风冷绝热吸收闪蒸制冷机组,如图 6 所示,实现了吸收式制冷机组的小型化和

风冷结构设计,并解决了风冷散热的高结晶风险问题。考虑到直膨式蒸发器不适合用于以水作为制冷剂的吸收式机组,为解决二次换热损失引入绝热闪蒸流程以提高蒸发温度,从而提高风冷溴化锂吸收式循环制冷 COP_{th} ,且节约了降膜蒸发器和制冷剂水循环泵的设置而降低系统成本。系统在环境空气温度为 29~35 °C 时可正常工作, COP_{th} 为 0.64~0.76,可提供 4.6~5.3 kW 的制冷量^[9]。

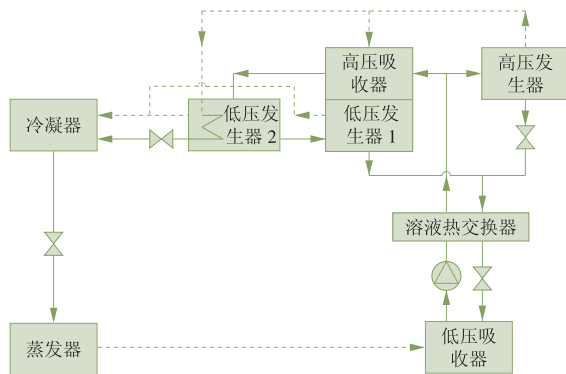


图4 新型变效(1. N效)吸收式循环原理

Fig. 4 Working principle of the novel variable effect (1. N-effect) absorption cycle

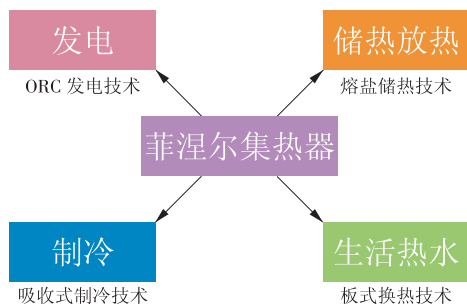


图5 太阳能跟踪聚焦光热系统

Fig. 5 Solar thermal power tracking and concentrating system

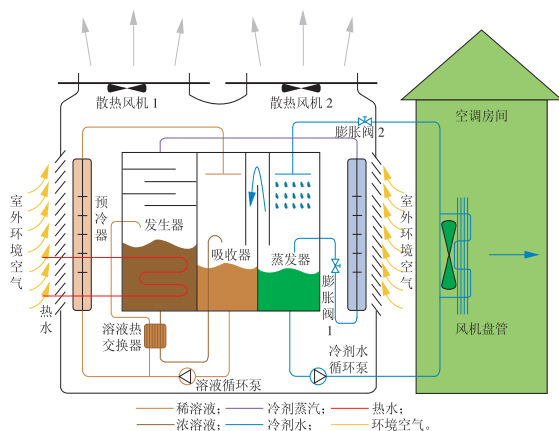


图6 单效风冷绝热吸收闪蒸制冷循环原理

Fig. 6 Schematic of the air-cooled single effect absorption chiller with flash evaporator

2.3 采用除湿换热器的连续型除湿空调系统

除湿换热器是一种内冷式除湿技术,通过在换

热器表面涂敷固体干燥剂的方式实现近似等温除湿过程,克服除湿过程吸附热效应,降低再生热量品位要求。Zhao等^[10]提出2个除湿换热器之间冷/热水的自动切换实现系统的连续除湿/再生运行,验证除湿换热器技术的系统化和实用化设计,使用冷却塔和太阳能集热器分别提供除湿/再生过程的冷/热水需求,通过风道和水路切换实现除湿/再生模式的互相切换,系统原理如图7所示。系统平均除湿量和 COP_{th} 分别可达到 5.08 g/kg DA (g 水/kg 干空气) 和 0.34 左右,该系统对热水的温度需求低至 50 °C 左右,降低除湿空调系统的驱动热源温度。

2.4 热泵/太阳能驱动溴化锂浓度差蓄冷/制冷循环

为提高吸收制冷系统对太阳能利用的灵活性与电能利用的经济性,学者提出一种由热泵和太阳能共同驱动的溴化锂浓度差蓄冷/制冷循环,循环原理如图8所示,通过溴化锂溶液的浓度差储能方式规避常规显热蓄能的热损效应。在太阳能条件良好时,多余的太阳能热能以浓溶液与制冷剂水的形式储存,需释冷时再通过制冷剂水蒸发被浓溶液吸收;太阳能条件不佳时,由热泵满足吸收循环的发生热量与冷凝排热以进行制冷或蓄冷,尤其对于夜间低谷电价时段,热泵驱动具有更好的经济性。这种浓度差蓄能方式蓄能密度约为水蓄冷方式的 13.4 倍,即使考虑系统容积其蓄能密度也高于冰蓄冷系统^[11]。

2.5 直膨式太阳能热泵

直膨式太阳能热泵主要由集热/蒸发器、压缩机、冷凝器与膨胀阀组成,将太阳能集热器与热泵蒸发器直接耦合,工质通过在集热/蒸发器中吸收太阳能和空气能以提高蒸发温度,可在太阳辐照下获得比空气源热泵更好的供热性能,直膨式太阳能热泵原理如图9所示。现有的直膨式太阳能热泵使用常规集热/蒸发器表面温度分布不均匀,过热区域大,平均板温与蒸发温度的差值很大,冷媒在集热/蒸发器中未能充分利用整板吸收的太阳能,陈道川^[12]通过整板结构及六边形流道单元优化提高均温性并减小流道压损,经试验验证整板传热效果显著提高,平均温度略低于环境温度,上海冬季白天良好工况下平均辐照度为 732 W/m²、平均环境温度为 14 °C 时 COP_{ele} 为 4.47。经结构优化的集热/蒸发器已应用于上海华漕养老院大型直膨式太阳能热泵工程中,该工程设计制热功率 110 kW,为养老院提供全年生活热水。相比常规太阳能集热器阵列的集热系统,直膨式太阳能热泵可同时使用环境空气热量、太阳能热量与电能3种能源驱动,在满足相同生活热水热量需求时可使用更少的太阳能集热

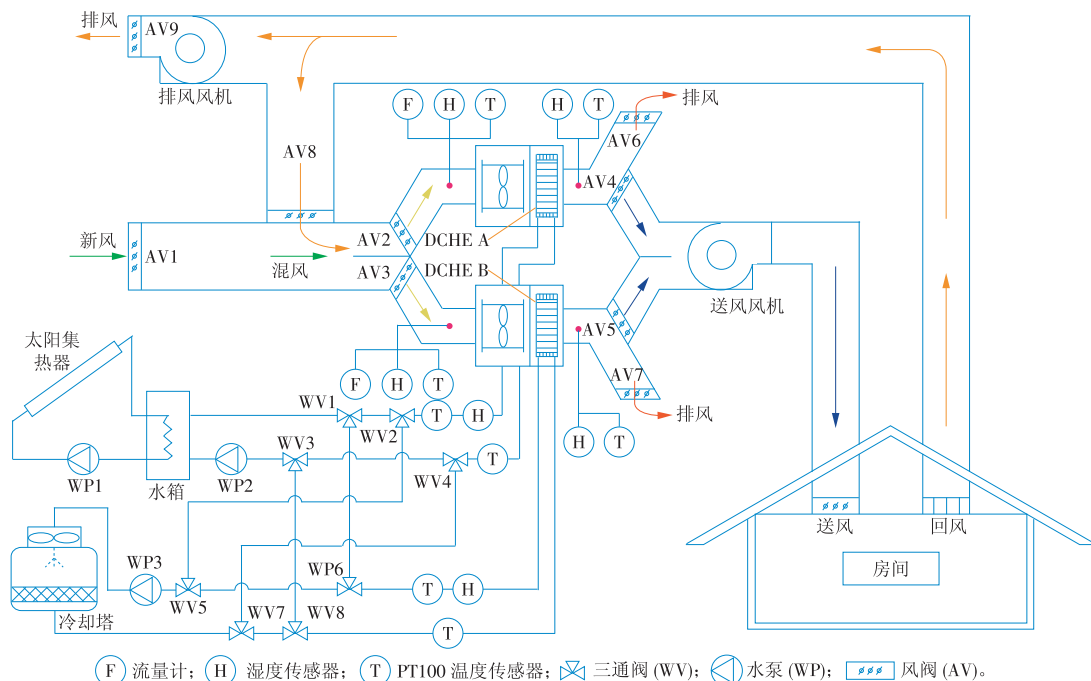


图 7 采用除湿换热器的连续型除湿系统原理

Fig. 7 Continuous dehumidification unit based on desiccant-coated heat exchanger

面积,且供能稳定性更优。

2.6 低温型直膨式太阳能热泵

常规直膨式太阳能热泵在低温工况下难以运

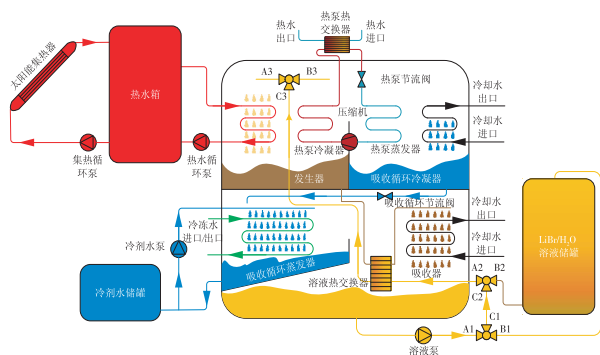


图 8 热泵/太阳能驱动溴化锂浓度差蓄冷/制冷循环

Fig. 8 LiBr-H₂O concentration difference cold storage/cooling system driven by heat pump/solar energy

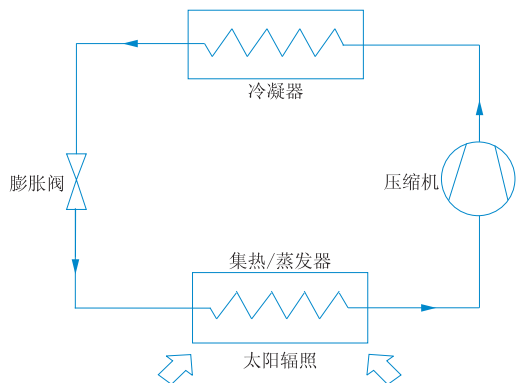


图 9 直膨式太阳能热泵原理

Fig. 9 Schematic of a DX-SAHP (direct expansion solar-assisted heat pump)

行,而低温型直膨式太阳能热泵通过将喷气增焓循环与常规直膨式太阳能热泵耦合,达到提升其低温环境适应性的作用,低温型直膨式太阳能热泵原理如图 10 所示。环境温度较高时,低温型直膨式太阳能热泵相比常规直膨式太阳能热泵略有性能提升作用,但随环境温度下降性能提升比例逐渐增大,环境温度降至-20℃时,低温型直膨式太阳能热泵 COP_{ele} 为 2.51,常规直膨式太阳能热泵 COP_{ele} 为 1.35,该温度下常规直膨式太阳能热泵系统效率极低,甚至无法正常运行。此外,低温型直膨式太阳能热泵系统在超低温的夜晚工况下(环境温度极低、无太阳辐照度),仍保证了较大的制热能力且 COP_{ele}>1.80,系统可保持稳定运行状态^[12]。

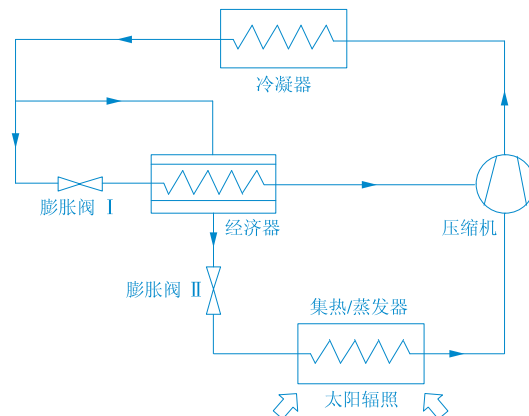


图 10 低温型直膨式太阳能热泵原理

Fig. 10 Schematic of a low-temperature DX-SAHP

2.7 直膨式太阳能辅助 PVT 热泵

PVT 技术是一种利用集热介质冷却光伏组件温度从而提高光伏发电效率、同时回收废热用于满足生活热水或冬季供热需求的太阳能综合利用技术。区别于以水作为集热介质的 PVT 技术,直膨式太阳能辅助 PVT 热泵使用制冷剂作为 PVT 模块的冷却介质,其蒸发过程对模块散热效果更优。使用吹胀式冷板作为 PVT 组件的冷却板,由于增大了冷却板与 PV 板之间的换热面积,其冷却效果相比管板焊接式冷板更好,使得模块热效率和电效率得以提升。Yao 等^[13]人对吹胀式冷板流道结构单元进行设计优化,使用计算流体动力学(CFD)方法研究流道内两相流动特性,提出降低压损提高均温性的优化结构,并对新设计所得吹胀板结构进行试验验证,将该板型应用于直膨式太阳能辅助 PVT 热泵,如图 11 所示。直膨式太阳能辅助 PVT 热泵可将光伏组件的工作温度降低 47.3 ℃,在上海夏季典型工况下可使光伏发电效率提升 46.5%,平均发电效率和热效率分别为 16.7% 和 47.6%,可见其在太阳能高效利用、热电联产、建筑节能等方面具有极大的应用潜力。

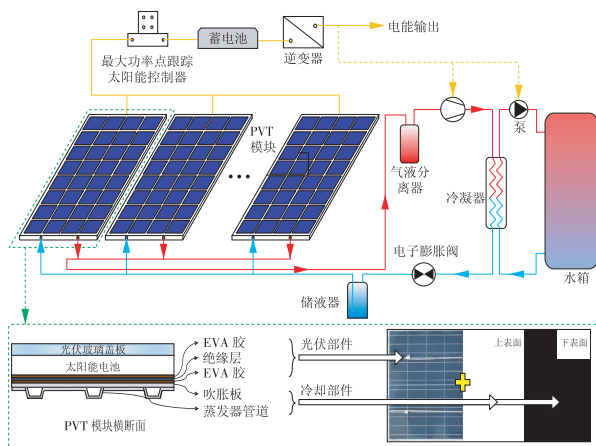


图 11 直膨式太阳能辅助 PVT 热泵原理^[13]

Fig. 11 Schematic of a direct-expansion solar-assisted PVT heat pump^[13]

2.8 太阳能辅助单级氨水平衡式再吸收热泵

传统吸收式热泵由溶液侧半循环(发生器、吸收器)与冷剂侧半循环(冷凝器、蒸发器)构成完整热泵循环,而再吸收热泵与传统吸收式热泵差别在于其使用另一个溶液半循环(高压吸收器、低压发生器)替代传统吸收式热泵中的冷剂侧半循环(冷凝器、蒸发器),由 2 个溶液半循环构成吸收-再吸收热泵循环,从而在同一供热温度下发生温度相比传统吸收式热泵更低,相应地其低温环境适应性也有所弱化。以往的非平衡式氨水再吸收循环中,为保

持左右侧半循环仅有氨蒸气的质量传递,必需在高压发生器出口增设精馏器以分离氨蒸气和水,而 Jia 等^[14]人所构建的平衡式再吸收热泵循环,左右半循环之间同时存在氨蒸气和氨水溶液的交换,因而节约了一个溶液循环泵与精馏器的设置,泵功减少且循环结构也得以简化,循环原理如图 12 所示,图中 Q_{hpa} 为高压吸收器放热量。平衡式再吸收热泵循环的热源温度达到 85 ℃即可正常运行,与非平衡式再吸收热泵循环相当,显著低于常规吸收式热泵的驱动温度(100 ℃),在同等环境温度和供热温度条件下,非平衡式再吸收的 COP_{th} (1.357)低于平衡式再吸收热泵循环 COP_{th} (1.442)。

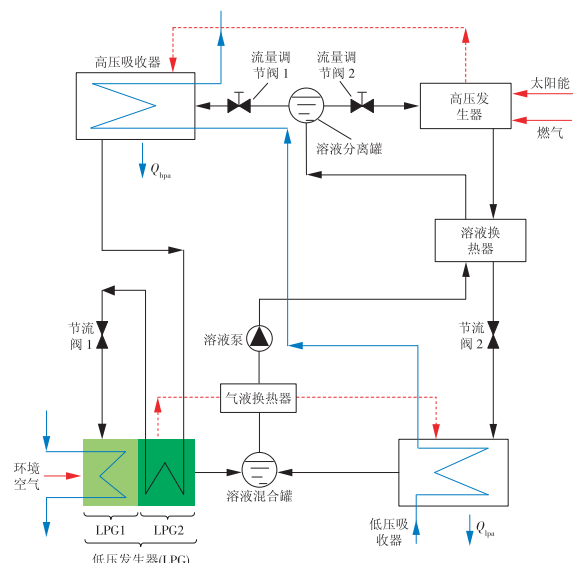


图 12 单级氨水平衡式再吸收热泵循环原理

Fig. 12 Cycle of a single-stage balanced ammonia-water absorption-resorption heat pump (ARHP)

2.9 基于 GAX 的两级平衡多重回热式再吸收热泵

在单级平衡式再吸收热泵循环的基础上,增大压差,引入由中压发生器和中压吸收器组成的中压环节,可以构建两级再吸收热泵循环,并通过结合 GAX 内部回热结构进一步提高两级循环 COP_{th} ,其原理如图 13 所示,图中 Q_{mpg} 为中压发生器吸热量。不同于单级循环,两级循环由于中间压力级的存在,输入驱动热源同时为高压发生器和中压发生器提供驱动力产生氨蒸气,低压发生器则通过吸收周围环境热量完成发生过程,两级循环供热量由低压吸收器、中压吸收器和高压吸收器 3 部分吸收热量组成。为通过循环内部回热使低压发生过程尽可能充分,低压发生器被划分为吸收环境空气热量的前段(低压发生器 1)和回收热溶液显热的后段(低压发生器 2)。循环中 GAX 内部回热环节体现在中压发生器按驱动热源来源划分为低温段与高温段,高温段使用外部输入热源,低温段回收与低压吸收

器温度重叠区段的出口溶液显热;同理,低压吸收器低温段作为对外供热区段,高温段则为GAX环节的吸收器部分。两级循环再吸收热泵在驱动热源温度方面相比传统再吸收循环(103℃)和单级循环(87℃)具有明显优势,仅要求热源温度大于73℃,最大COP_{th}可达1.45,且低温环境适应性(最低运行环境温度为-15.6℃)也优于单级循环(最低运行环境温度为-5.8℃)^[15]。

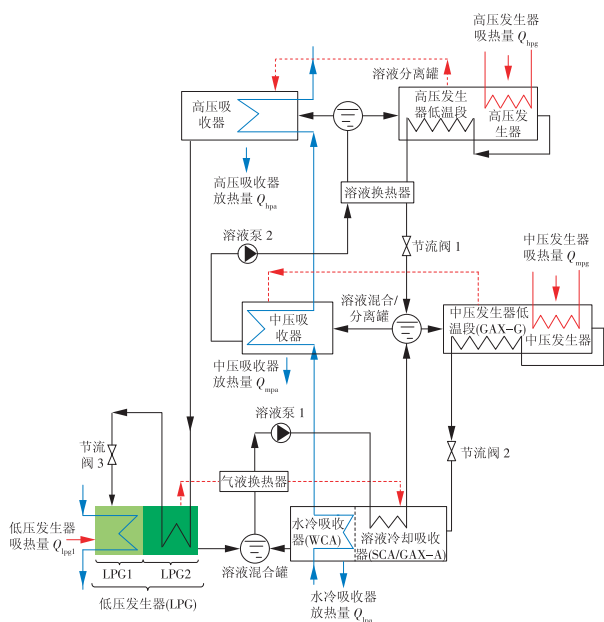


图13 基于GAX的两级平衡多重回热式再吸收热泵循环原理

Fig. 13 GAX-based two-stage balanced ARHP cycle with multiple heat recovery loops

2.10 再吸收与蒸汽压缩耦合热泵

尽管再吸收热泵可在寒冷环境运行,但要维持高效供暖需大幅提高驱动热源温度,传统蒸汽压缩热泵的供暖稳定性和低温适应性更优,但需消耗大量电能。可通过结合再吸收热泵循环与蒸汽压缩热泵循环两者的优势,构建可利用低品位太阳能热驱动的再吸收与蒸汽压缩耦合热泵。

再吸收式与蒸汽压缩式过冷却耦合热泵循环原理如图14所示,过冷却耦合热泵包含2个子循环,即单级平衡式再吸收热泵子循环与蒸汽压缩式热泵子循环。再吸收热泵子循环的低压发生器低温段与蒸汽压缩热泵子循环的过冷器耦合,蒸汽压缩热泵子循环冷媒经压缩机增压升温,后在冷凝器中释放高温潜热后进入过冷器释放高温显热,为再吸收热泵子循环提高低压发生温度,随后进入蒸发器中从环境空气吸收热量完成蒸汽压缩热泵子循环。循环供热量由3部分组成:再吸收子循环的低压吸收器、高压吸收器和蒸汽压缩子循环的冷凝器。通过过冷却耦合增加压缩热泵子循环的过冷

度,可一定程度增强压缩机循环低温环境适应性,再吸收子循环由于低压发生温度被提高至环境温度以上,制热性能和供热量可分别提升5.7%和49.3%,且将热驱动温度降低至71.0℃。过冷却循环相比常规空气源热泵的一次能源率利用率略有提升,设计工况下一次能源节约率达14.6%^[16]。

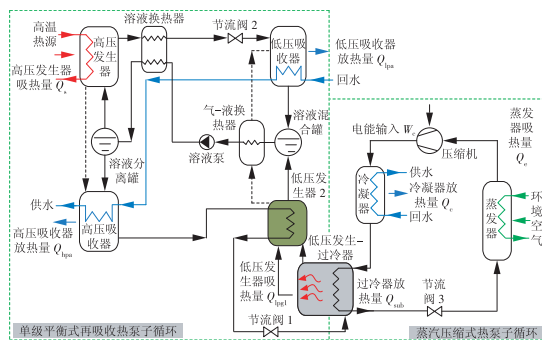


图14 单级平衡式再吸收与蒸汽压缩式过冷却耦合热泵循环原理

Fig. 14 Cycle of a single-stage balanced resorption-sub-cooled compression hybrid heat pump

图15所示为单级平衡式再吸收与蒸汽压缩式复叠耦合热泵循环原理,与过冷却耦合热泵相同,循环中包含一个再吸收子循环和一个蒸汽压缩式子循环。不同的是,复叠耦合热泵中的压缩机冷凝器的高温潜热不直接作为供热量输出,而是作为再吸收子循环的低压发生所需热量。因此,复叠耦合循环中再吸收子循环的低压发生温度运行温区相比过冷却耦合循环更宽,通过降低压缩机循环中压缩机的压比与功耗进而提升供热性能系数效果更为显著;同时,再吸收子循环低压发生温度的提升使得其驱动热源温度的需求降低,循环供热性能系数也得以提高。

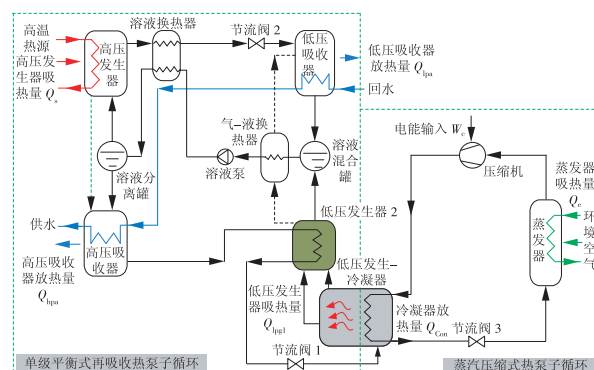


图15 单级平衡式再吸收与蒸汽压缩式复叠耦合热泵循环原理

Fig. 15 Cycle of a single-stage balanced resorption-steam compression cascade coupling heat pump

受压缩机压比实际运行范围限制,复叠耦合循环可将运行蒸发温度降至-35℃,驱动热源温度可

降至 66℃ 左右,这对于使用太阳能提供驱动热源大有裨益,可解决冬季太阳能中温集热效率低下导致热泵供热性能与稳定性较差的问题。复叠耦合循环的一次能源利用率在较高环境温度下相比常规空气源热泵并不具备优势,随环境温度降低,常规空气源热泵由于压比增大 COP_h 急剧下降,复叠耦合循环的一次能源节约率才逐渐由负值提升为正值^[17]。

2.11 双热源驱动的 GAX 氨水吸收式热泵

双热源驱动的 GAX 氨水吸收式热泵试验系统如图 16 所示。氨水溶液在发生器内由外部热源和内部回热两部分加热,外部热源由天然气和太阳能提供,内部回热由发生器部分区段作为溶液显热回收区段实现。

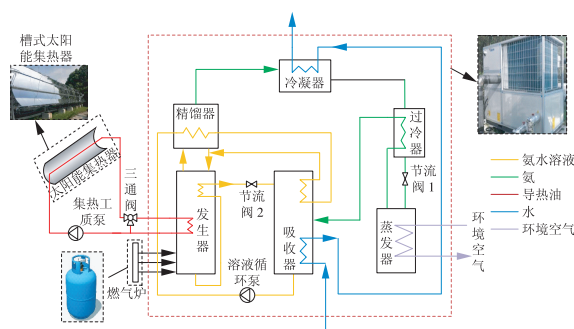


图 16 双热源驱动的 GAX 氨水吸收式热泵试验系统

Fig. 16 Test system of the GAX ARHP driven by dual thermal sources

一方面,稀溶液离开发生器,并经过一个节流阀成为低压液体进入吸收器。另一方面,解吸的蒸汽经过精馏塔提纯得到氨蒸气,被冷凝下来的水回流到发生器。氨蒸气离开精馏塔之后进入冷凝器将热量释放到热水循环并转化为液氨。液氨在溶液热交换器中与来自蒸发器的低温低压氨蒸气换热形成过冷液氨。在通过节流阀之后进入蒸发器吸收空气中的热能形成低温低压的氨蒸气。经过回热的低压过热氨蒸气进入吸收器与来自发生器的稀溶液相遇形成浓溶液,并且放出吸收热。浓溶液经过水冷吸收器释放热量给热水循环,成为饱和液体,而后由溶液泵带至精馏塔,吸收精馏塔的热量之后经过溶液冷却吸收器得到进一步的回热,最终回到精馏塔。系统的能量由水冷吸收器和冷凝器 2 部分提供。对该系统进行 3 种不同运行模式的全天试验,即:双能源驱动模式、太阳能驱动模式和液化石油气驱动模式。平均环境温度分别为 17.52℃, 20.00℃, 8.77℃, 3 种模式的平均一次能源利用率分别为 1.54, 1.63, 1.32。在双能源驱动模式下,太阳能保证率达到 40.20%。在太阳能驱动模

式下,制热量达到额定制热量(即太阳能保证率)的 55.10%。系统的一次能源利用率(PEE)较低是由于液化石油气燃烧产生的烟气直接排放到环境中,其烟气的损失达到 19.25%~23.53%。而系统的制热能效比 COP 在特定工况下能够达到 1.8 以上^[18]。

3 结束语

太阳能空调与热泵技术是可再生能源与建筑用能需求紧密结合的综合技术,在碳中和背景下具有极大的建筑用能减排潜力。

近年来,太阳能空调与热泵技术主要聚焦于系统单一供能(供热或制冷)上的能效提升与太阳能转化效率,而忽视了建筑用能多样性对系统供能的要求。未来的发展方向之一是太阳能空调与热泵的供能多样性及气候适应性上的推进,利用太阳能满足建筑夏季制冷、冬季供热及全年生活热水的用能需求,实现系统全年利用太阳能高效供能,并进一步缩小系统尺寸,降低初投资,通过模块化设计使系统与建筑一体化相匹配,提高系统规模化应用的可行性。

参考文献:

- [1]左春帅,樊海鹰,王恩宇.太阳能跨季节储热供热系统性能研究[J].华电技术,2020,42(11):44-50.
ZUO Chunshuai, FAN Haiying, WANG Enyu. Study on the performance of a solar seasonal heat-storage and heating system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 44-50.
- [2]王长君,刘硕,丁薛峰.相变储能技术在清洁供暖中的应用研究[J].华电技术,2020,42(11):91-96.
WANG Changjun, LIU Shuo, DING Xuefeng. The study on application of phase change energy storage technology in clean heating [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 91-96.
- [3]赵斌,卢大为,刘维安,等.高寒高海拔地区太阳能集中供暖技术及其应用[J].华电技术,2020,42(11):51-55.
ZHAO Bin, LU Dawei, LIU Weian, et al. Technology and application of solar central heating in extremely cold and high-altitude areas[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 51-55.
- [4]ALAHMER A, AJIB S. Solar cooling technologies: State of art and perspectives [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112896.
- [5]SHE X, YIN Y, XU M, et al. A novel low-grade heat-driven absorption refrigeration system with LiCl - H₂O and LiBr - H₂O working pairs[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 58: 219-234.
- [6]徐震原.基于太阳能利用的溴化锂——水变效吸收式制

- 冷的循环与系统研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [7]HEROLD K, RADERMACHER R, KLEIN S. Absorption chillers and heat pumps[M].U.S:CRC Press, 1996.
- [8]代彦军,王如竹.太阳能制冷讲座(1):太阳能空调制冷技术[J].太阳能,2010(5):46-52.
- [9]CHEN J, DAI Y, WANG H, et al.Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application[J].Solar Energy, 2018, 159:579-587.
- [10]ZHAO Y, GE T, DAI Y, et al.Experimental investigation on a desiccant dehumidification unit using fintube heat exchanger with silica gel coating [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(1):52-58.
- [11]CHU P, WANG H, CHEN J, et al.Experiment investigation on a LiBr-H₂O concentration difference cold storage system driven by vapor compression heat pump [J]. Solar Energy, 2021, 214:294-309.
- [12]陈道川.低温型直膨式太阳能热泵实验与性能优化[D].上海:上海交通大学,2020.
- [13]YAO J, LIU W, ZHAO Y, et al. Two-phase flow investigation in channel design of the roll-bond cooling component for solar assisted PVT heat pump application [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113988.
- [14]JIA T, DAI E, DAI Y. Thermodynamic analysis and optimization of a balanced-type single-stage NH₃-H₂O absorption-resorption heat pump cycle for residential heating application[J].Energy, 2019, 171: 120-134.
- [15]JIA T, CHU P, DOU P, et al.Working domains of a novel solar-assisted GAX based two-stage absorption resorption heat pump with multiple internal heat recovery for space heating [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220:113060.
- [16]JIA T, DOU P, CHU P, et al.Proposal and performance analysis of a novel solar-assisted resorption subcooled compression hybrid heat pump system for space heating in cold climate condition [J].Renewable Energy, 2020, 150: 1136-1150.
- [17]贾腾.太阳能氨水再吸收多重回热式热泵循环机理与实验研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [18]DAI E, LIN M, XIA J, et al.Experimental investigation on a GAX based absorption heat pump driven by hybrid liquefied petroleum gas and solar energy [J].Solar Energy, 2018, 169:167-178.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

陈尔健(1994—),男,广东汕头人,在读博士研究生,从事太阳能供热制冷系统方面的研究(E-mail:ejchen@sjtu.edu.cn)。

代彦军*(1971—),男,河北邯郸人,教授,博士生导师,博士,从事太阳能利用与建筑节能、可持续建筑能源、可再生能源区域综合利用及规划方面的教学和研究工作(E-mail:yjdai@sjtu.edu.cn)。