

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250916001

新型低温热能驱动的 R32/DMF 紧凑型吸收式制冷系统

朱海平¹ 高鹏¹ 王启栋¹ 索振宇¹ 武卫东¹ 王丽伟²

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 吸收式制冷被认为是数据中心余热回收最具前景的技术之一。然而现有吸收式制冷系统面临驱动温度高(>85 °C)以及系统体积大等问题,与数据中心余热温度低(<70 °C)和高密度空间部署需求不匹配。为此,本文提出一种针对数据中心余热回收的低温热能驱动的紧凑型吸收式制冷系统,并首次搭建了实验样机,采用适配于低温热能的有机工质对 R32/DMF 降低驱动温度,同时使用紧凑化板式换热器作为吸收器、发生器和溶液热交换器,强化传热和缩小系统体积。实验表明,在驱动热源温度为 50~70 °C、吸收器冷却水进口温度为 25 °C 时,系统蒸发温度约为 13.1 °C,此时 COP 最高可达 0.57。通过调制冷剂的侧膨胀阀开度,蒸发温度可降至 10.4 °C, COP 最高可达 0.69,逐渐减小稀溶液侧膨胀阀开度, COP 会小幅上升,此外 COP 随蒸发器进风温度的降低而降低。本文设计的低温热能驱动的紧凑型 R32/DMF 吸收式制冷样机,为数据中心绿色低碳转型提供新的技术思路。

关键词 吸收式制冷;余热回收;数据中心冷却;有机工质对;紧凑化设计

中图分类号:

文献标识码:

A Novel Compact R32/DMF Absorption Refrigeration System Driven by Low-Temperature Heat Source

Zhu Haiping¹ Gao Peng¹ Wang Qidong¹ Suo Zhenyu¹ Wu Weidong¹ Wang Liwei²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Absorption refrigeration is one of the most promising methods for recovering waste heat in data centers. However, the conventional method demands high driving temperatures (>85 °C) and occupies substantial space, rendering it incompatible with the waste heat (<70 °C) and high-density deployment requirements of data centers. To address these problems, for the first time, to the best of our knowledge, a novel compact absorption refrigeration experimental prototype was developed based on the working pair R32/DMF, which was selected for its suitability as a low-temperature driving heat source. Furthermore, compact plate heat exchangers were employed for the absorber, generator, and solution heat exchangers to minimize the overall system footprint. Experimental results indicated that under a driving heat source temperature range of 50–70 °C and an absorber cooling water inlet temperature of 25 °C, the novel system achieved an evaporating temperature of approximately 13.1 °C and a coefficient of performance (COP) of up to 0.57. By adjusting the expansion valve opening on the refrigerant side, the evaporating temperature was reduced to 10.4 °C, with a corresponding increase in COP to 0.69. Meanwhile, gradually reducing the expansion valve opening on the weak solution side caused the COP to increase slightly. Moreover, a reduction in the evaporator inlet air temperature led to a corresponding decrease in the system COP. The proposed compact, low-temperature, waste-heat-driven R32/DMF absorption refrigeration prototype presents a novel technical solution for the decarbonization of data centers.

Keywords absorption refrigeration; waste heat recovery; data center cooling; organic working pair; compact design

近年来,随着人工智能、云计算、大数据、5G 等信息技术的快速发展,数据中心的规模不断扩大,导致其电耗显著增加。在过去 5 年里中国数据中心机架规模年均增速超过 30%^[1]。2021 年中国数据中心用电量达 2 166 亿 kW·h,碳排放量达 1.35 亿 t,约占全

国碳排放量的 1.14%;预计到 2030 年用电量将超过 3 800 亿 kW·h,碳排放将超过 2 亿 t^[2]。传统数据中心的能耗结构中,IT 设备耗电约占 45%,冷却系统耗电约占 38%^[3]。IT 设备消耗的能源大部分转化为废热,导致大量能源浪费。在“双碳”目标驱动下,保证

基金项目:国家自然科学基金(52236004,52206017)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52236004 & No. 52206017).)

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX

数据中心制冷效果的前提下降低系统能耗并实现余热回收,已成为行业发展的必然趋势。

液冷技术相比于传统风冷在更低的能耗下具有更高的散热效率,逐渐成为高热流数据中心的主流冷却方式^[4]。该技术利用高比热容液体与主要发热源直接接触,在器件近端捕获热流,显著提升了余热品位^[5-6],增大了数据中心余热回收可能性。在现有的数据中心余热回收方法中,吸收式制冷技术以低功耗及可由低温废热直接驱动等优势^[7],为回收数据中心废热提供了一条有效途径。

尽管一些研究已经有效证明使用吸收式制冷机组进行数据中心余热回收的可行性和意义^[8-9],但仍需克服一些挑战。其一,数据中心余热制冷是一个低驱动热源温度而高蒸发温度的应用需求^[10-11];其二,传统溴化锂/水吸收式制冷受限于驱动热源温度与冷却条件,工质易结晶、设备庞大,难以满足该场景。

为此,研究者探索有机工质对替代方案。R32/DMF(二甲基甲酰胺)工质对在蒸发温度约15℃、发生温度低于70℃的工况下系统COP(性能系数,coefficient of performance)达0.70~0.85,显著优于R22/DMF与R134a/DMF^[12],可有效适配数据中心的低驱动热源温度而高蒸发温度需求。另外,当前吸收式制冷机组体积庞大,难以适配空间受限的数据中心部署环境,以板式换热器作为主要部件可显著缩减设备体积并提升传热效率^[13-14]。吸收器与发生器采用板式换热器可同步实现设备体积缩减及强化吸收/发生过程^[15-17],为紧凑高效吸收式冷机在数据中心余热回收系统中的应用提供了技术支撑。

鉴于紧凑型吸收式制冷系统当前主要应用在工业废热回收领域^[18],而在数据中心低品位余热制冷场景的研究较少。因此,本文首次提出搭建了基于板式换热器的紧凑型R32/DMF吸收式制冷机,以板式换热器作为制冷机组的主要部件,采用有机工质对R32/DMF降低驱动热源温度以适配数据中心低品位废热,并开展实验研究,测定系统运行参数和结果,探究影响系统稳定运行的因素。

1 新型低温热能驱动的紧凑型吸收式制冷系统

1.1 有机工质对选择

面向数据中心的新型低温热能驱动的紧凑型吸收式制冷系统原理如图1所示,本系统采用R32作为制冷剂,DMF作为吸收剂。R32制冷剂在热力学性能以及能源效率上表现优良^[19],其ODP(臭氧损耗潜

值,ozone depletion potential)为零且GWP(全球变暖潜值,Global Warming Potential)较低。同时液冷数据中心的余热回收热温度通常在50~70℃^[20],基于此驱动热源温度区间,R32与DMF的相容性良好且效率最高^[12],能够有效满足液冷数据中心余热制冷在低驱动热源温度和高蒸发温度应用场合的需求。

1.2 实验样机

本文首次搭建了一套基于有机工质对R32/DMF的紧凑型板式换热器吸收式制冷系统,并展开了实验研究。设计的实验样机如图2所示,实验样机由浓溶液、稀溶液以及制冷剂3条支路构成,并配备加热发生器内浓溶液的高温恒温槽,冷却吸收器内溶液的低温恒温槽,其中高温恒温槽用于模拟液冷数据中心产生的50~70℃低温余热。

在系统设计中,发生器、吸收器、溶液热交换器均选用高效紧凑的板式换热器;冷凝器选用微通道换热器,蒸发器选用翅片管式换热器。

吸收器采用板式换热器相较于降膜式、鼓泡式吸收器有更紧凑的结构,但来自蒸发器的R32制冷剂蒸气和来自溶液热交换器出口的稀溶液若直接通过三通进入板式吸收器,溶液中会存在较大的R32制冷剂气泡,导致其接触面积变小,从而影响传热和传质效率,严重限制吸收式制冷系统的整体性能。为此,本实验样机在稀溶液和R32制冷剂进入板式吸收器之前,设置混合器,以确保气液混合更加稳定和均匀,提高吸收效果。

气液分离器主要起到将R32蒸气和饱和稀溶液分离开的作用,同时浓溶液经过板式发生器被加热至设计发生温度后,受限于板式换热器内狭窄的通道,R32制冷剂在板式换热器内无法有效气化,因此气液分离器在该小型吸收式制冷系统中提供闪蒸空间让R32从浓溶液中蒸发出来。

吸收式制冷系统在稀溶液回路和制冷剂回路上分别设置了1个电子膨胀阀,系统内高低压的调节需要其进行精细配合。

为了监测实验过程中的数据,在该实验样机中布置了16个温度传感器、9个压力传感器、2个齿轮流量计、2个温湿度传感器、1个风速仪以及安捷伦数采仪。

2 实验结果

2.1 变驱动热源温度对系统性能影响

图3所示为在吸收器冷却水进口温度为25℃,阀门开度全开时,驱动热源温度变化对系统制冷量

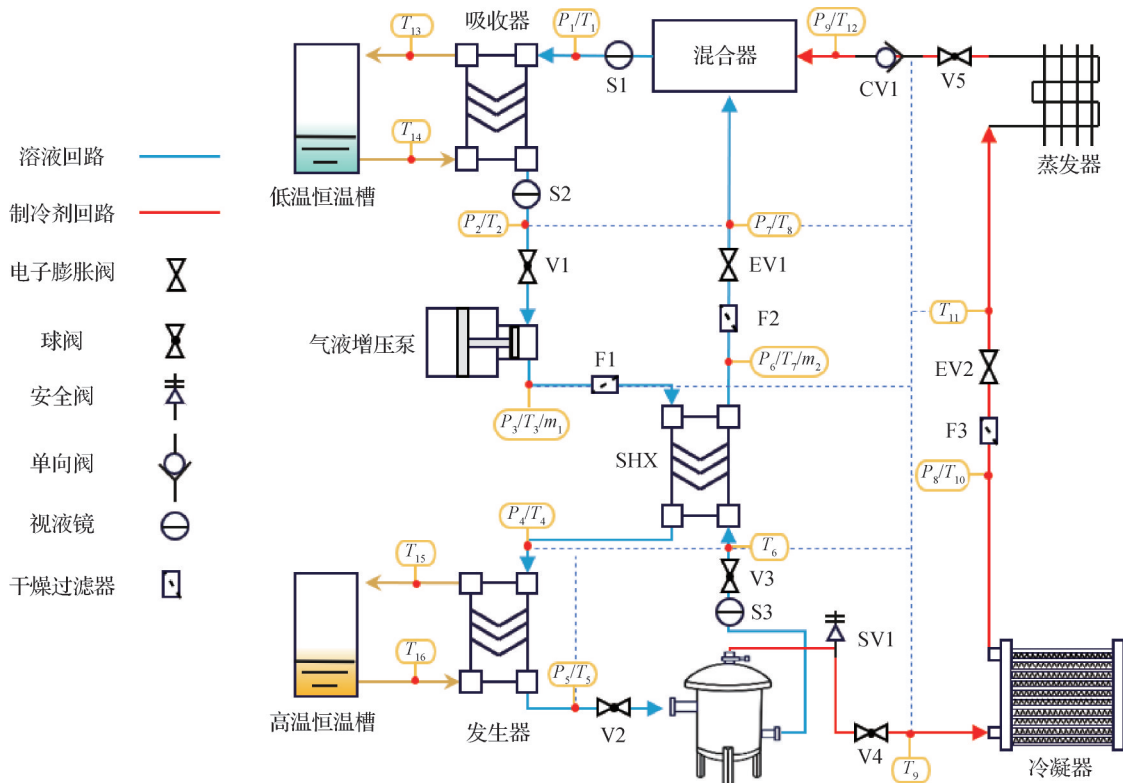


图1 新型低温热能驱动的紧凑型吸收式制冷系统原理

Fig.1 Principle of a compact absorption refrigeration system driven by low-temperature heat sources

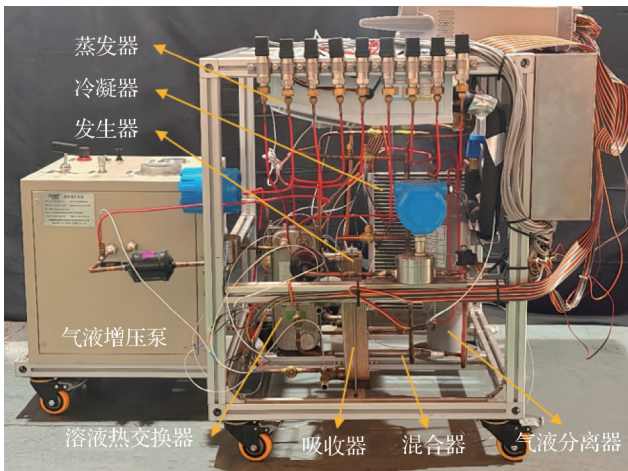


图2 R32/DMF吸收式制冷实验样机

Fig.2 R32/DMF absorption refrigeration experimental prototype

与COP的影响。随着驱动热源温度从50℃逐渐升至70℃,系统制冷量也由0.29kW逐渐增至0.68kW。主要原因在于,随着驱动热源温度的升高,发生器出口干度增大,制冷剂流量随之增加,制冷量呈上升趋势。但是由于冷凝器冷凝能力不足,冷凝压力上升,由1.65MPa升至2.10MPa,发生压力也随之上升,导致发生过程变得困难,发生过程进出口焓差增大,由34kJ/kg增至71kJ/kg,此时系统COP从0.57逐渐降至0.36。

2.2 制冷剂膨胀阀开度对系统性能影响

2.2.1 蒸发器高进风温度下系统性能

图4所示为在驱动热源温度为70℃、蒸发器进风温度为23.5℃时,制冷剂侧电子膨胀阀EV2的开度变化对系统蒸发温度、制冷量以及COP的影响。电子膨胀阀EV2以10%的开度递减,由100%全开逐渐调节至60%时,蒸发温度由13.1℃逐渐降至10.4℃,制冷量由0.65kW增至0.77kW,此时系统COP由0.46升至0.69。

电子膨胀阀EV2在吸收式制冷系统中用于精确控制制冷剂的流量,阀门开度调整直接影响制冷剂进入蒸发器的制冷剂质量。随着电子膨胀阀EV2开度的减小,制冷剂侧节流效果增强,导致蒸发压力下降剧烈,蒸发温度也随之下降,增大传热温差,单位质量R32吸收的热量增加,使得制冷量呈上升趋势。随着制冷剂电子膨胀阀开度的减小,吸收器出口浓溶液浓度降低,使得循环中浓溶液在发生器中需发生出来的R32总量减少,此时驱动热源温度保持不变,发生器换热量由1.42kW降至1.10kW,使得系统COP随制冷剂侧膨胀阀门开度的减小而逐渐上升。

2.2.2 蒸发器低进风温度下系统性能

图5所示为驱动热源温度保持70℃,蒸发器进风温度由23.5℃降至16.0℃时,制冷剂侧电子膨胀阀EV2的阀门开度对系统蒸发温度、制冷量以及COP

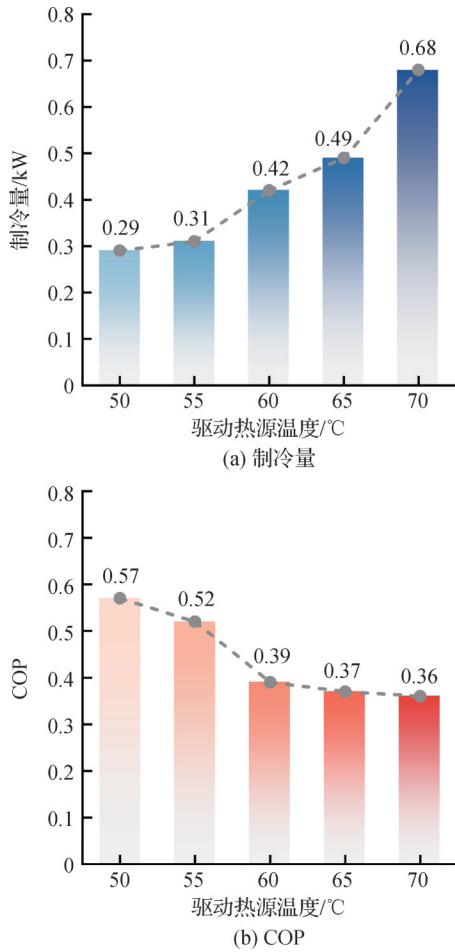


图3 变驱动热源温度下系统性能

Fig.3 System performance under varying driving heat source temperatures

的影响。

将电子膨胀阀EV2以10%的开度递减,阀门开度由100%全开逐渐减少至60%,此时蒸发温度由7.4℃降至5.3℃,制冷量由0.58kW增至0.73kW,系统COP由0.31增至0.58。

在图5(b)中,通过对比蒸发器进风温度变化对COP的影响可知:随着蒸发器进风温度由23.5℃降至16.0℃时,在相同阀门开度下,低进风温度下的制冷量以及COP相对于高进风温度整体略低,幅度分别在3%~13%和17%~35%。这是因为随着蒸发器进风温度的降低,蒸发温度以及蒸发压力下降,此时系统在相同冷却温度下吸收过程变得困难,吸收量减少,使得蒸发器单位制冷量更低,系统COP也更低。

2.2.3 不同充注量下系统性能

图6所示为在驱动热源温度为70℃,蒸发器进风温度为16.0℃下,继续向系统内充入100g制冷剂R32时,制冷剂侧电子膨胀阀EV2的阀门开度对系统制冷量以及COP的影响。此时制冷量由0.49kW增至0.70kW,COP由0.27增至0.49,相较于未充入,

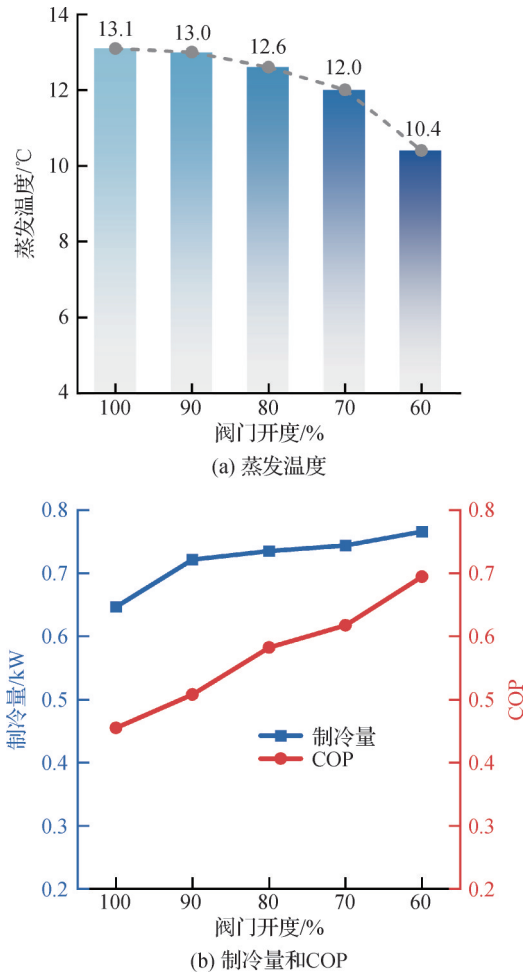


图4 变制冷剂侧膨胀阀开度下($T_{air,in}=23.5℃$)系统性能

Fig.4 System performance under varying refrigerant expansion valve opening ($T_{air,in}=23.5℃$)

降幅分别为4%~14%和7%~15%。主要原因在于向系统继续充入R32后,冷凝压力上升,幅度在0.02~0.1MPa,吸收压力上升幅度在0.01~0.03MPa,蒸发压力也随之略微上升,由于蒸发器进风温度保持不变,蒸发温度上升0.5~1.3℃,使系统在相同阀门开度下,制冷量下降,COP也下降。

2.3 稀溶液侧膨胀阀开度对系统性能影响

图7所示为在驱动热源温度为70℃,蒸发器进风温度为16℃时,稀溶液侧电子膨胀阀EV1的阀门开度对系统蒸发温度、制冷量以及COP的影响。电子膨胀阀EV1同样以10%的开度递减,由100%全开逐渐调节至60%时,蒸发温度由6.5℃逐渐升至6.9℃,制冷量由0.65kW降至0.59kW,此时系统COP由0.33升至0.39。这是因为随着稀溶液侧电子膨胀阀EV1开度的下降,稀溶液流量减少,对吸收器内R32制冷剂蒸气的吸收速率下降,使得吸收压力略有上升,蒸发压力也随之略微上升,导致蒸发温度上升幅度较小。而随着蒸发压力上升,吸收器出口浓

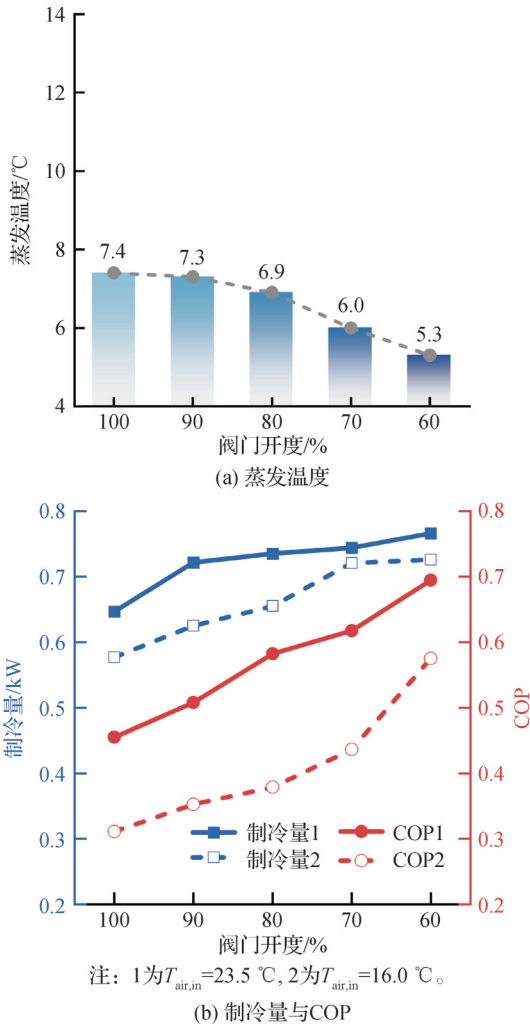
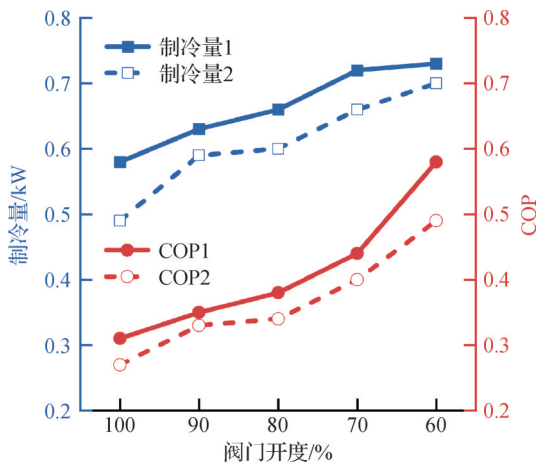


图5 变制冷剂侧膨胀阀开度下系统性能

Fig.5 System performance under varying refrigerant expansion valve opening



注: 1为未充入100 g制冷剂, 2为充入100 g制冷剂。

图6 不同充注量时变制冷剂侧膨胀阀开度下系统性能

Fig.6 System performance under varying refrigerant expansion valve opening at different charging rates

溶液浓度更高,发生变得相对容易,发生器进出口焓差变小,最终使系统COP略微上升。

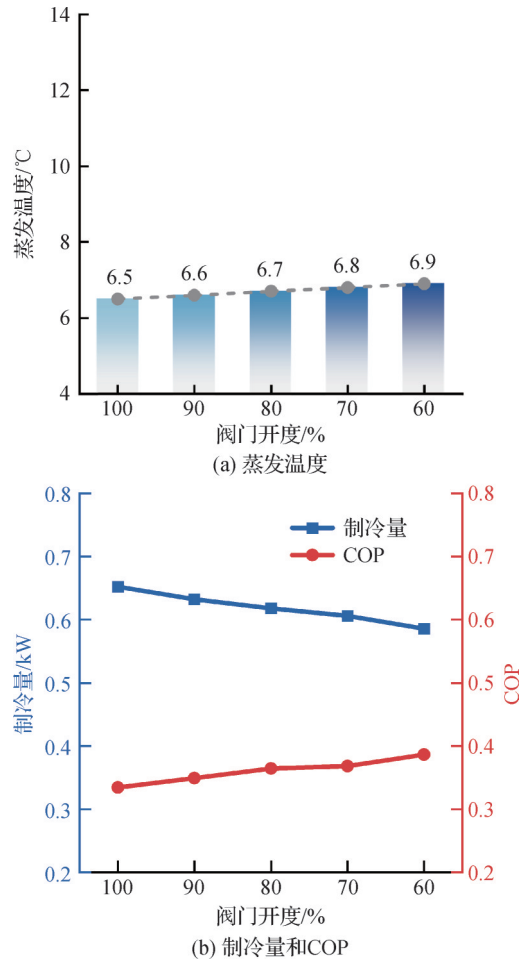


图7 变稀溶液侧膨胀阀开度下($T_{air,in}=16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)系统性能

Fig.7 System performance under varying weak solution expansion valve opening ($T_{air,in}=16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3 结论

本文针对液冷数据中心余热制冷时低驱动热源温度而高蒸发温度的应用场合,提出了一种低温热能驱动的紧凑型吸收式制冷系统。通过选择在50~70 °C温区效率较高的有机工质对R32/DMF有效降低了驱动热源温度。并针对传统吸收式制冷系统体积大等问题,采用板式换热器作为吸收器、发生器和溶液热交换器进行紧凑化设计的同时强化传热过程。基于上述设计,首次搭建了基于有机工质对R32/DMF的紧凑化吸收式制冷样机,得到结论如下:

1)吸收式制冷样机在吸收器冷却水进口温度为25 °C时,随着驱动热源温度从50 °C增至70 °C,样机制冷量在0.29~0.68 kW,COP在0.36~0.57。

2)在驱动热源温度为70 °C,蒸发器进风温度为23.5 °C时,调控制冷剂侧电子膨胀阀开度,蒸发温度由13.1 °C降至10.4 °C,制冷量由0.65 kW增至0.77 kW,系统COP也由0.46升至0.69。

3)将蒸发器进风温度降至16.0℃时,制冷剂侧电子膨胀阀在相同开度下,蒸发温度由7.4℃降低至5.3℃,制冷量和COP整体下降,降幅分别在3%~13%和17%~35%之间。继续向系统内充入R32,制冷量与COP降幅分别在4%~14%和7%~15%。

4)在驱动热源温度为70℃,蒸发器进风温度为16.0℃时,调节稀溶液侧电子膨胀阀开度,随着阀门开度的递减,制冷量随之下降,蒸发温度及系统COP呈现轻微上升趋势。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 中国绿色算力发展研究报告(2024) [R]. 2024. (CAICT. Research report on the development of green computing power in China (2024) [R]. 2024.)
- [2] 国家互联网数据中心产业技术创新战略联盟. 绿色节能液冷数据中心白皮书[R].2023. (NIISA. Management white paper of energy-saving liquid data center[R]. 2023.)
- [3] Ahmed K M U, Alvarez M, Bollen M H J. Reliability analysis of internal power supply architecture of data centers in terms of power losses [J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 193: 107025.
- [4] 周峰, 王芮敏, 马国远, 等. 高热流液冷服务器相变工质的研究及应用进展[J]. *制冷学报*, 2024, 45(6): 23-32. (Zhou Feng, Wang Ruimin, Ma Guoyuan, et al. Research and application progress of phase-change working fluid for high-heat-flux liquid cooling servers [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(6): 23-32.)
- [5] 谢文韬, 余承学, 谢昕言, 等. 数据中心冷却节能技术及余热回收技术研究进展[J]. *暖通空调*, 2025, 55(2): 1-9, 25. (Xie Wentao, Yu Chengxue, Xie Xinyan, et al. Research progress of cooling energy-saving technology and waste heat recovery technology of data centers [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2025, 55(2): 1-9, 25.)
- [6] 包云皓, 陈建业, 邵双全. 数据中心高效液冷技术研究现状[J]. *制冷与空调(北京)*, 2023, 23(10): 58-69. (Bao Yunhao, Chen Jianye, Shao Shuangquan. Research status of high-efficient liquid cooling technology in data center [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2023, 23(10): 58-69.)
- [7] 陈光明, 石玉琦. 吸收式制冷(热泵)循环流程研究进展[J]. *制冷学报*, 2017, 38(4): 1-22. (Chen Guangming, Shi Yuqi. State-of-the-art absorption refrigeration and heat pump cycles [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 1-22.)
- [8] Haywood A, Sherbeck J, Phelan P, et al. Thermodynamic feasibility of harvesting data center waste heat to drive an absorption chiller [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 58: 26-34.
- [9] Huang Congqi, Shao Shuangquan, Wang Ningbo, et al. Performance analysis of compression-assisted absorption refrigeration-heating system for waste heat recovery of liquid-cooling data center [J]. *Energy*, 2024, 305: 132325.
- [10] 李帮俊, 王晨曦, 仵斯, 等. 电子器件动态热管理软件实施方法[J]. *中国科学(技术科学)*, 2020, 50(10): 1298-1315. (Li Bangjun, Wang Chenxi, Wu Si, et al. The implementation of software and hardware for dynamic thermal management of electronic devices [J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2020, 50(10): 1298-1315.)
- [11] 徐震原, 王如竹, 夏再忠. 一种根据热源温度品位自动调节效能的溴化锂吸收式制冷循环[J]. *制冷学报*, 2014, 35(1): 1-7. (Xu Zhenyuan, Wang Ruzhu, Xia Zaizhong. Analysis of a 0. n-effect LiBr/water absorption refrigeration cycle [J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(1): 1-7.)
- [12] He L J, Tang L M, Chen G M. Performance prediction of refrigerant-DMF solutions in a single-stage solar-powered absorption refrigeration system at low generating temperatures [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(11): 2029-2038.
- [13] Song J Y, Park J H, Kang Y T. Heat transfer and frictional pressure drop characteristics of H₂O/LiBr solution in plate heat exchangers for triple-effect absorption application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: 116730.
- [14] Jiménez-García J C, Rivera W. Parametric analysis on the experimental performance of an ammonia/water absorption cooling system built with plate heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 87-95.
- [15] Cerezo J, Bourouis M, Vallès M, et al. Experimental study of an ammonia-water bubble absorber using a plate heat exchanger for absorption refrigeration machines [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5/6): 1005-1011.
- [16] Zhai Chong, Wu Wei. Experimental study on heat/mass transfer and pressure drop of plate heat exchanger desorber for compact and efficient absorption cooling [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 145: 243-255.
- [17] Balamurugan P, Mani A. Heat and mass transfer studies on compact generator of R134a/DMF vapour absorption refrigeration system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(3): 506-517.
- [18] Zhai Chong, Wu Wei. Experimental evaluation on heat/mass transfer and pressure drop of a microchannel membrane-based desorber for compact and efficient H₂O/LiBr absorption refrigeration [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 195: 123198.
- [19] Xu Xing, Hwang Y, Radermacher R. Performance

comparison of R410A and R32 in vapor injection cycles [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 892-903.

- [20] Wahlroos M, Pärssinen M, Manner J, et al. Utilizing data center waste heat in district heating-Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks[J]. Energy, 2017, 140: 1228-1238.

通信作者简介

高鹏,男,副教授,上海理工大学能源与动力工程学院,

13761241490,E-mail:p.gao@usst.edu.cn。研究方向:热化学储能、余热制冷。

About the corresponding author

Gao Peng, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13761241490, E-mail: p. gao@usst. edu. cn. Research fields: thermochemical energy storage, waste heat refrigeration.

(责任编辑:王亚薇)