

采用环保制冷剂的三种增压辅助喷射制冷循环性能对比

邹霖庚¹ 刘嘉瑞^{1,2} 刘晔^{1,3,4} 鱼剑琳^{1,3}

(1 西安交通大学 制冷与低温工程系 西安 710049; 2 浙大宁波理工学院 能源与环境工程研究所 宁波 315100;

3 西安交通大学 深低温技术与装备教育部重点实验室 西安 710049; 4 陕西赛默新能科技有限公司 西安 710049)

摘要 本文针对喷射制冷循环(ERC)能效低、高温工况性能衰减显著的问题,提出一种新的带有气液分离器的增压辅助喷射制冷循环,该循环蒸发器的单位制冷量大,所需的发生器供热量小。基于热力学方法将该循环与已有的2种增压辅助喷射制冷循环进行了对比分析,并系统评估了4种环保制冷剂的适用性。研究表明:改进循环通过气液分离降低蒸发器入口干度,在典型工况(发生温度为80℃、冷凝温度为35℃、蒸发温度为0℃)下COP达1.198,较传统循环性能具有显著提升。R1234ze(Z)因兼具低GWP与最优热力性能,成为最适配制冷剂。参数敏感性分析表明:改进循环的COP随冷凝温度的升高而上升(冷凝温度从30℃升至40℃时COP从1.168增至1.232),而传统循环则呈现下降趋势;当发生温度从70℃升至90℃时,改进循环的COP下降28.6%,但其制冷量仍保持高于传统循环。研究结果为低品位热驱动制冷技术的能效提升与环保制冷剂应用提供了理论依据。

关键词 喷射制冷;增压器;环保制冷剂;性能对比

中图分类号:TB61*2;TB61*7

文献标识码:A

Performance Comparison of Three Booster-Assisted Ejector Refrigeration Cycles with Environmentally Friendly Refrigerants

Zou Lingeng¹ Liu Jiarui^{1,2} Liu Ye^{1,3,4} Yu Jianlin^{1,3}

(1. Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Institute of Energy and Environmental Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo, 315100, China; 3. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 4. Shaanxi Saimo Energy Technology Co. Ltd., Xi'an, 710049, China)

Abstract To address the low energy efficiency and significant performance reduction under high-temperature conditions of ejector refrigeration cycles (ERCs), this study proposed a novel booster-assisted ejector refrigeration cycle integrated with a vapor-liquid separator that exhibited a higher unit refrigeration capacity and lower generator heat input. A thermodynamic analysis was conducted to compare the proposed cycle with two existing booster-assisted ejector refrigeration cycles, and the applicability of four environmentally friendly refrigerants was systematically evaluated. The results demonstrated that the improved cycle enhanced the performance by reducing the evaporator inlet vapor quality through vapor-liquid separation. Under typical operating conditions (generation temperature: 80 °C, condensation temperature: 35 °C, and evaporation temperature: 0 °C), the proposed cycle achieved a coefficient of performance (COP) of 1.198, showing significant improvement over conventional cycles. R1234ze (Z) was identified as the optimal refrigerant because of its low Global Warming Potential (GWP) value and superior thermodynamic properties. A parameter sensitivity analysis revealed that the COP of the improved cycle increased with rising condensation temperature (from 1.168 at 30 °C to 1.232 at 40 °C), whereas conventional cycles exhibited an opposite trend. When the generation temperature increased from 70 °C to 90 °C, the COP of the improved cycle decreased by 28.6%; however, its refrigeration capacity remained higher than that of conventional cycles. This study provided a theoretical foundation for enhancing the energy efficiency of low-grade heat-driven refrigeration technologies and promoting the application of eco-friendly refrigerants.

Keywords ejector refrigeration; booster; environmentally friendly refrigerants; performance comparison

在全球气候变化与能源结构转型的双重压力下,建筑领域的低碳化进程已成为国际社会的核心

基金项目:国家自然科学基金(52176019)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176019).)

收稿日期:2025-05-09;修回日期:2025-06-04;录用日期:2025-07-10

议题。国际能源署数据显示,2023年全球建筑空调系统能耗占终端能源消费总量的15%^[1],在热带及亚热带地区该比例高达40%~50%,且年均增长率维持在4.2%^[2]。传统蒸气压缩式制冷循环凭借成熟的技术体系和高性能系数(COP>3.0)占据市场主导地位,但其完全依赖高品位电能驱动的特性导致2大矛盾:全球电力生产仍以化石能源为主(2023年占比约63%),间接推高空调系统的碳足迹^[3];发展中国家空调负荷高峰与电网供电能力的矛盾日益尖锐^[4],部分城市夏季空调负荷占峰值电力需求的70%以上。在该背景下,基于低品位热源驱动的喷射制冷技术(ejector refrigeration cycle, ERC)因其能源适配性广、碳排放低的特点^[5-6],成为破解建筑制冷高能耗难题的关键技术路径。ERC系统可通过回收工业余热(80~150 °C)、太阳能或地热能等可再生能源驱动制冷循环,其初投资成本较传统蒸气压缩系统降低约30%,运行维护费用减少40%^[7-8]。然而,随着《蒙特利尔议定书》和《基加利修正案》的通过^[9-10],零ODP(臭氧消耗潜值, ozone depletion potential)和低GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)制冷剂或天然制冷剂已成为全球制冷/热泵行业制冷剂替代品的主要发展趋势^[11]。因此,适配的环保工质如R245fa(GWP=1 030)或HFOs类制冷剂如R1234ze、R1234yf(GWP<1)显著优于传统氟利昂类制冷剂(如R410A(GWP=2 100), R134a(GWP=1 530)),进一步提升了其环境友好性^[12]。然而,ERC技术的推广长期受限于引射效率低与工况适应性差两大瓶颈,其平均COP普遍处于0.2~0.5区间,仅为蒸气压缩系统的1/6~1/3,且在高温高湿环境下(冷凝温度>40 °C)系统的性能衰减显著,严重制约了其实际应用^[13]。

为突破ERC性能瓶颈,学者们从喷射器结构优化、循环构型改进及工质适配3方面展开研究。早期研究聚焦于喷射器内部流动特性的优化,例如通过可调喉部设计或多喷嘴阵列提升引射效率。Zhou Mengliu等^[14]针对双蒸发器家用冰箱,提出了一种新型的双喷嘴喷射器增强型制冷循环。所提出的循环匹配2个喷嘴的喷射器能够有效地从循环节流过程回收膨胀功并提高循环性能。研究表明改进循环的COP比基本循环提高了22.9%~50.8%。近年来,循环结构创新成为研究热点,Zhu Lin等^[15]提出一种太阳能辅助空气源热泵系统的新型双喷嘴喷射器增强蒸气压缩循环。研究表明,新循环的COP和单位容积制热能力分别比传统循环提高了4.6%~34.0%和7.8%~51.9%。同时,工质选择对系统性能的影响逐渐被重视,Chen Guangming等^[8]通过对比R245fa、

R1233zd(E)和R1336mzz(Z)的热物性参数,发现R1233zd(E)在高冷凝温度下的稳定性更优,但其与润滑油的兼容性问题尚未完全解决。尽管上述研究取得一定进展,ERC技术在实际应用中的能效与稳定性仍无法满足市场需求,尤其是高温环境下冷凝温度超过40 °C时COP的指数级衰减问题仍未得到有效解决。

在此背景下,增压辅助喷射制冷循环(booster ejector refrigeration cycle, BERC)的提出为技术突破提供了新思路。该技术通过引入机械增压装置改善喷射器工作条件,其演进路径可分为2类:一是由M. Sokolov等^[16]于1990年提出的二次流增压技术,通过在蒸发器与喷射器二次流入口间增设压缩机提升引射压力。实验表明,当二次流压力从0.3 MPa升至0.6 MPa时,引射比可提高58%,但发生器热负荷同步增加27%,导致系统能效比的净增益受限。Zhao Hongxia等^[17]针对传统ERS性能不足的问题,提出了一种增压器辅助喷射制冷系统。该研究通过一维模型分析了增压器对二次流压力的提升效应,并与ERS及压缩机制冷系统(compressor-based refrigeration system, CRS)进行热力学和焓损对比。结果表明:增压器出口压力对基于热输入的COP_h和基于功的COP_w具有显著影响,最佳增压压力下COP_w较CRS提升约15%;系统焓损主要集中于喷射器(44.6%)、冷凝器(20.8%)和蒸发器(19.5%),揭示了关键部件的优化方向。Yan Gang等^[18]则聚焦于低温环境下热泵性能提升,提出了一种太阳能驱动的喷射-压缩复合热泵系统。该系统结合太阳能集热器与喷射器,利用太阳能驱动喷射器提升压缩机吸气压力,从而降低压缩比并增强制热能力。通过对比传统压缩热泵,研究发现:改进循环的COP和制热能力分别提高15.3%和38.1%,且使用环保工质R1234yf时性能接近传统工质R134a;焓分析表明,喷射器(25.7%)、冷凝器(20.8%)和蒸发器(19.5%)为焓损主要来源,太阳能辐射强度对系统焓效率影响显著。尽管BERC技术展现出潜力,其规模化应用仍面临三大瓶颈:首先,增压器布局对系统性能的影响机制尚未明晰,缺乏多构型对比分析框架;其次,第4代环保制冷剂(如R1234yf、R1234ze)在增压环境下的相变调控规律研究不足;最后,现有BERC系统在高温工况(冷凝温度>45 °C)下的COP衰减率仍高达40%~60%,宽工况适应性亟待提升^[19]。

针对上述问题,本文提出一种集成气液分离器的新型增压辅助喷射制冷循环。该循环通过气液分离装置降低蒸发器入口制冷剂干度,匹配增压器则

提高了喷射器的二次流压力,提高引射系数,显著提升了系统能效与稳定性。研究采用热力学建模与实验验证相结合的方法,系统对比了增压器位于二次流入口和增压器位于喷射器出口的循环性能差异,并研究了 R1234yf、R236fa、R245fa 和 R1234ze(Z) 这 4 种第 4 代环保工质对循环性能的影响。本研究的创新在于揭示了气液分离与单相增压的协同增效机制,为低品位热驱动制冷技术的工程化应用提供了理论支撑。

1 循环描述

图 1 所示为增压器位于蒸发器和喷射器二次流入口之间的喷射制冷循环(BERC1);图 2 所示为增压器位于喷射器出口的喷射制冷循环(BERC2)。在 BERC1 中,增压器的引入提高了喷射器二次流压力,从而降低了喷射器升压比,提高了其引射系数,因此制冷量和性能系数会提高。在 BERC2 中,在冷凝压力固定的情况下,增压器的引入降低了喷射器出口压力,同样会导致喷射器升压比降低,引射系数提高,制冷量和性能系数得到提高。相比于 BERC1 和 BERC2,BERC3 配置中的气液分离器使得蒸发器入口干度大幅减小,从而增大了蒸发器的单位制冷量。此外,BERC1 和 BERC2 的发生器出口制冷剂为饱和和气态,BERC3 的发生器出口制冷剂为饱和液态,可以减小发生器的供热量。因此,BERC3 的性能相比于 BERC1 和 BERC2 得到改善。

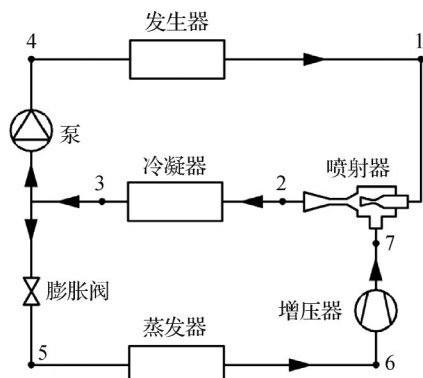


图 1 BERC1 系统
Fig.1 The BERC1 system

基于可持续发展的环境观,制冷空调行业要求制冷剂的 ODP 尽可能为零,GWP 尽可能小。表 1 所示为 R1234yf、R236fa、R245fa 和 R1234ze(Z) 这 4 种制冷剂的 ODP、GWP 和安全分类。本文对采用这 4 种制冷剂的循环的性能进行了对比。

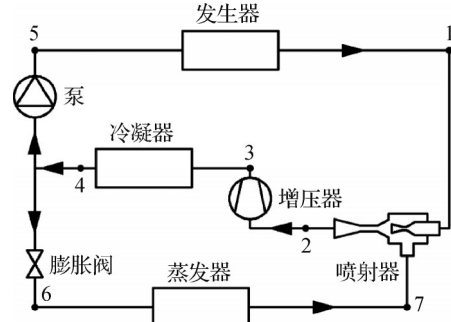


图 2 BERC2 系统
Fig.2 The BERC2 system

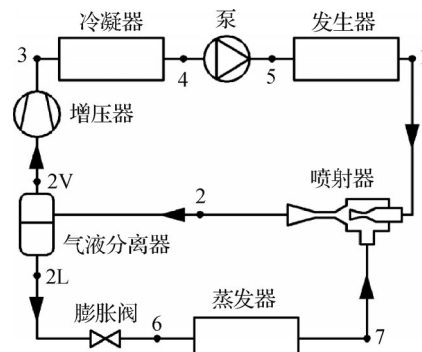


图 3 BERC3 系统
Fig.3 The BERC3 system

表 1 制冷剂的 ODP、GWP 和安全分类^[20-22]

Tab.1 ODP, GWP and safety classification of refrigerants^[20-22]

制冷剂	GWP ₁₀₀	ODP	安全分类
R1234yf	4	0	A2L
R236fa	9 820	0	A1
R245fa	1 050	0	B1
R1234ze(Z)	<10	0	A2L

2 循环模型

为了对比上述 3 个循环在各种工况下以及采用不同工作流体时的性能,基于热力学第一定律建立热力学模型。为简化理论模型,进行以下假设:1)假定系统各个组件均处于稳态过程;2)增压器及泵的等熵效率取恒定值;3)膨胀阀中等焓节流;4)忽略循环中的制冷剂压降和热泄漏。

喷射器是喷射制冷系统最重要的组件,通过一维恒压混合方法对其进行建模^[23]。为简化计算,进行如下假设:1)喷射器中流体流动是一维稳态且绝热的;2)喷射器入口和出口速度忽略不计;3)喷射器内部流动损失通过喷嘴,混合段和扩压管的效率衡量,且这些效率被假设为定值。

引射系数(μ)和升压比(r_{pj})是喷射器的 2 个主要

性能参数,定义为:

$$\mu = \dot{m}_s / \dot{m}_p \quad (1)$$

$$r_{pj} = p_{d, out} / p_s \quad (2)$$

式中: μ 为引射系数; r_{pj} 为升压比; \dot{m}_p 和 \dot{m}_s 分别为喷射器主流和二次流的质量流量,kg/s; $p_{d, out}$ 为扩压管出口压力,kPa; p_s 为二次流压力,kPa。

蒸发器的制冷量为:

$$Q_e = \dot{m}_e (h_{out} - h_{in}) \quad (3)$$

式中: Q_e 为蒸发器的制冷量,kW; \dot{m}_e 为制冷剂流经蒸发器的质量流量,kg/s; h_{out} 为部件出口的比焓,kJ/kg; h_{in} 为部件出口的比焓,kJ/kg。

泵的输入功计算如下:

$$W_{pu} = \dot{m}_{pu} (h_{out} - h_{in}) = \dot{m}_{pu} (h_{out, is} - h_{in}) / \eta_{pu} \quad (4)$$

式中: W_{pu} 为泵的输入功,kW; $h_{out, is}$ 为等熵过程泵出口的理想比焓,kJ/kg; η_{pu} 为泵的等熵效率。

增压器的输入功计算如下:

$$W_b = \dot{m}_b (h_{out} - h_{in}) = \dot{m}_b (h_{out, is} - h_{in}) / \eta_b \quad (5)$$

式中: W_b 为增压器的输入功,kW; \dot{m}_b 为制冷剂流经增压器的质量流量,kg/s; η_b 为增压器的等熵效率。

发生器的供热量计算如下:

$$Q_g = \dot{m}_g (h_{out} - h_{in}) \quad (6)$$

式中: Q_g 为发生器的供热量,kW; \dot{m}_g 为制冷剂流经发生器的质量流量,kg/s。

循环的性能系数(COP)为:

$$COP = Q_e / (Q_g + W_{pu} + W_b) \quad (7)$$

基于上述模型,用Fortran语言编写了循环的计算程序,基于给定的运行工况,计算出各状态点的热力学参数,从而得到3个系统的性能参数。此外,在计算过程中,各个制冷剂的热力学性质是通过调用REFPROP子程序得到的^[24]。

3 模拟结果与讨论

在模拟中,分别选择R1234yf、R236fa、R245fa和R1234ze(Z)作为工作流体,运行工况如下:发生温度(发生器出口温度) t_g 为70~90℃,冷凝温度(冷凝器出口温度) t_c 为30~40℃,蒸发温度(蒸发器出口温度) t_e 为-10~10℃。假设发生器、冷凝器、蒸发器出口的制冷剂均为饱和态,BERC1和BERC2的发生器出口制冷剂为饱和气态,BERC3的发生器出口制冷剂为饱和液态。假设喷射器的效率为:喷嘴效率 $\eta_n = 0.85$,混合段效率 $\eta_m = 0.90$ 和扩压段效率 $\eta_d = 0.85$;泵的等熵效率为: $\eta_{pu} = 0.85$;增压器的等熵效率为: $\eta_b = 0.85$ ^[25]。假设喷射器入口的制冷剂质量流量为

0.1 kg/s。

表2所示为3个循环在典型运行工况下的性能结果($t_g=80$ ℃, $t_c=35$ ℃, $t_e=0$ ℃)。由表2可知,对3个循环而言,在同样的运行工况下,采用R1234ze(Z)时的循环COP最高,接下来依次为R245fa、R236fa、R1234yf。此外,由表1可知,4种制冷剂的ODP均为0;R1234yf和R1234ze(Z)的GWP均<10,它们的安全分类为A2L,表明其毒性为低慢性毒性,可燃性为若可燃;R236fa的安全性最高,但是其GWP很高;R245fa的毒性为高慢性毒性,同时GWP略高。因此,综合考虑制冷剂的安全性、环保性以及循环性能,R1234ze(Z)为最合适的制冷剂。此外,由表2还可知,在该典型工况下,BERC2的COP比BERC1的COP平均高50%,BERC3的COP远高于BERC1和BERC2。

表2 采用不同制冷剂的循环COP

Tab.2 Circulating COP using different refrigerants

制冷剂	COP		
	BERC1	BERC2	BERC3
R1234yf	0.235	0.353	0.561
R236fa	0.236	0.354	0.769
R245fa	0.253	0.379	1.058
R1234ze(Z)	0.263	0.392	1.198

注:运行工况: $t_g=80$ ℃, $t_c=35$ ℃, $t_e=0$ ℃

图4所示为当采用R1234ze(Z)做制冷剂时3个循环的制冷量 Q_e 和COP随 t_g 的变化趋势。随着 t_g 的升高,2个基本循环的制冷量和COP均呈上升趋势,然而BERC3的制冷量和COP呈现下降趋势。对于BERC1和BERC2而言,喷射器的二次流压力和出口压力不随发生温度变化,即升压比不变,因此发生温度的升高导致喷射器主流压力升高,从而导致BERC1和BERC2的引射系数随发生温度的升高而升高,如图5所示,流经蒸发器的制冷剂增多,因此BERC1和BERC2的制冷量和COP均呈上升趋势。但对于BERC3而言,随着发生温度的升高,喷射器的引射系数下降,流经蒸发器的制冷量流量下降,因此BERC3的COP和制冷量呈下降趋势。此外,由图4还可知,在给定的 t_g 变化范围内,BERC3的COP优于BERC2,BERC2的COP优于BERC1,尤其是在较低的发生温度下。BERC2和BERC3的制冷量均高于BERC1,这是因为BERC2和BERC3的引射系数高于BERC1。随着 t_g 从70℃升至80℃,BERC3的制冷量高于BERC2,这是因为:一方面,BERC3的单位制冷量大于BERC2;另一方面,BERC3的引射系数大于

BERC2,即BERC3蒸发器的制冷剂流量高于BERC2。随着 t_g 从80℃升至87.5℃,BERC3的制冷量仍高于BERC2,但在该范围内BERC3蒸发器的制冷剂流量低于BERC2。随着 t_g 从87.5℃升至90℃,BERC3的制冷量低于BERC2。

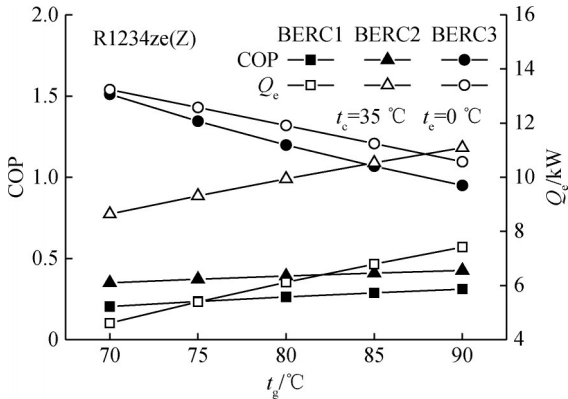


图4 COP和 Q_c 随 t_g 的变化趋势
Fig.4 Variation trends of COP and Q_c with t_g

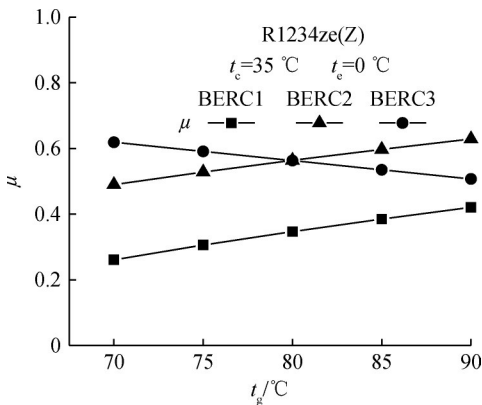


图5 μ 随 t_g 的变化趋势
Fig.5 Variation trend of μ with t_g

图6所示为3个循环的增压器功耗 W_b 和发生器的供热量 Q_g 随发生温度 t_g 的变化趋势。由图6可知,随着发生温度的升高,3个循环的 Q_g 均增大。在给定的 t_g 变化范围内,BERC1和BERC2的 Q_g 为22.134~23.183 kW,然而BERC3的 Q_g 仅为4.739~7.652 kW。此外,由图6还可知,随着发生温度的升高,BERC1和BERC2的增压器功耗增大,而BERC3的增压器功耗减小。BERC1和BERC2增压器功耗增大是因为经过增压器的制冷剂流量增大,而BERC3的增压器功耗减小是因为喷射器升压比增大导致增压器压比减小。此外,在给定的 t_g 变化范围内,BERC3的 W_b 高于BERC2的,BERC2的 W_b 高于BERC1的。

图7所示为当采用R1234ze(Z)做制冷剂时3个循环的制冷性能随冷凝温度 t_c 的变化趋势。随着冷凝温度的升高,BERC1和BERC2的制冷量呈下降趋

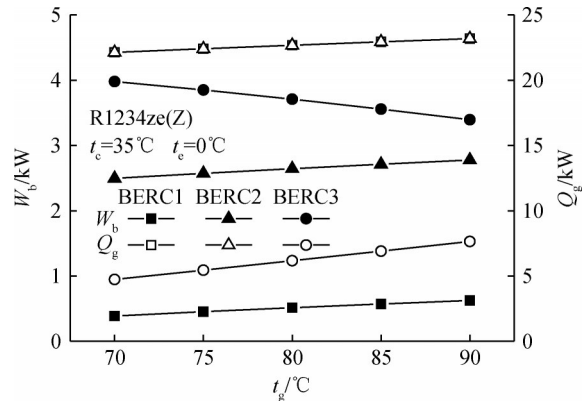


图6 W_b 和 Q_g 随 t_g 的变化趋势
Fig.6 Variation trends of W_b and Q_g with t_g

势,这是因为:一方面,冷凝温度的升高导致喷射器升压比增大,引射系数减小,因此经过蒸发器的制冷剂流量减小;另一方面,冷凝压力的升高导致蒸发器的单位制冷量减小。而随着冷凝温度的变化,BERC3的蒸发器的单位制冷量和喷射器的引射比均不变,因此其制冷量不随冷凝温度的变化而变化。此外,由图7还可知,随着 t_c 从30℃升至40℃,BERC1的COP从0.360降至0.185,BERC2的COP从0.478降至0.323,而BERC3的COP从1.168升至1.232。在给定的冷凝温度范围内,BERC3的COP高于BERC2,BERC2的COP高于BERC1,BERC2和BERC3的制冷量均高于BERC1。当冷凝温度低于31℃时,BERC2的制冷量高于BERC3,当冷凝温度高于31℃时,BERC3的制冷量高于BERC2。

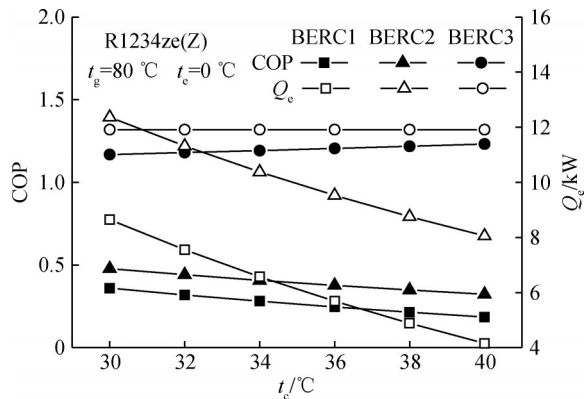


图7 COP和 Q_c 随 t_c 的变化趋势
Fig.7 Variation trends of COP and Q_c with t_c

图8所示为当采用R1234ze(Z)做制冷剂时3个循环的COP和制冷量 Q_e 随蒸发温度 t_e 的变化趋势。如图8所示,随着蒸发温度的升高,3个循环的制冷量和COP均呈现上升趋势。随着 t_e 从-10℃升至10℃,BERC1的COP从0.165升至0.425,BERC2的COP从0.298升至0.545,BERC3的COP从1.059升至

1.357。在给定的蒸发温度范围内,BERC2和BERC3的制冷量均高于BERC1。当蒸发温度低于7℃时,BERC3的制冷量高于BERC2;当蒸发温度高于7℃时,BERC2的制冷量高于BERC3。

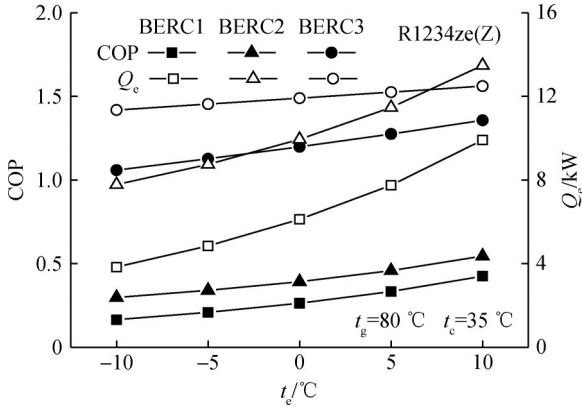


图8 COP和 Q_c 随 t_e 的变化趋势
Fig.8 Variation trends of COP and Q_c with t_e

4 结论

本研究通过热力学分析,对比了3种增压辅助喷射制冷循环(BERC1、BERC2、BERC3)在环保制冷剂下的性能,得到结论如下:

1)创新循环构型(BERC3)性能突破。提出集成气液分离器的新型BERC3循环,通过降低蒸发器入口干度(实现近饱和液态供液)和优化发生器出口状态(饱和液态输出),显著提升能效。在典型工况(发生温度为80℃、冷凝温度为35℃、蒸发温度为0℃)下:COP达1.198(采用R1234ze(Z)),较传统BERC1(COP=0.263)和BERC2(COP=0.392)具有显著提升;蒸发器入口干度显著降低,单位制冷量提升40%以上。

2)环保制冷剂适配性。对比了4种制冷剂,R1234ze(Z)综合性能最优:COP最高,在BERC3中达1.198(典型工况),较R245fa(COP=1.058)、R236fa(COP=0.769)、R1234yf(COP=0.561)分别高13.2%、55.8%、113.5%。

3)宽工况适应性提升。高发生温度下制冷量优势保持:当 t_g 从70℃升至90℃时,COP下降28.6%,但制冷量仍高于BERC2(87.5℃以下)及BERC1(全区间);蒸发温适应性广:当 t_e 从-10℃升至10℃时,COP从1.059升至1.357(增幅28.1%),制冷量增长35%。

本文受西安市科技计划项目(24NYGG0041,24XTHG0014)资助。(The project was supported by the Science and

Technology Planning Project of Xi'an (No. 24NYGG0041 & No. 24XTHG0014).)

参考文献

- [1] IEA. World Energy Outlook 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [2] Che W W, Tso C Y, Sun L, et al. Energy consumption, indoor thermal comfort and air quality in a commercial office with retrofitted heat, ventilation and air conditioning (HVAC) system [J]. Energy and Buildings, 2019, 201: 202-215.
- [3] 胡开永, 常昊天, 路坤仑, 等. 基于全生命周期的间接制冷系统碳排放案例分析[J]. 冷藏技术, 2025, 48(1): 14-19. (Hu Kaiyong, Chang Haotian, Lu Kunlun, et al. Case study on carbon emissions of indirect refrigeration systems based on the entire lifecycle [J]. Journal of Refrigeration Technology, 2025, 48(1): 14-19.)
- [4] 王鸿军. 基于需求响应的公共楼宇空调负荷管理策略[J]. 能源与节能, 2024(10): 49-51. (Wang Hongjun. Demand response based air conditioning load management strategies for public buildings [J]. Energy and Energy Conservation, 2024(10): 49-51.)
- [5] 晁亮亮, 刘青荣, 阮应君, 等. 喷射式制冷利用技术研究综述[J]. 节能, 2016, 35(5): 11-15. (Chao Liangliang, Liu Qingrong, Ruan Yingjun, et al. Review of the use of jet refrigeration technology [J]. Energy Conservation, 2016, 35(5): 11-15.)
- [6] Abdulateef J M, Sopian K, Alghoul M A, et al. Review on solar-driven ejector refrigeration technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7): 1338-1349.
- [7] Akbari H, Sorin M. Optimal component-scale design of ejector refrigeration systems based on equivalent temperature [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 209: 112627.
- [8] Chen Guangming, Zhelezny V, Khliyeva O, et al. Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioners [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74: 129-137.
- [9] Abas N, Kalair A R, Khan N, et al. Natural and synthetic refrigerants, global warming: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 557-569.
- [10] BIRMPILI T. Montreal Protocol at 30: The governance structure, the evolution, and the Kigali Amendment [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2018, 350(7): 425-431.
- [11] 卢天宇, 马国远, 李想, 等. 履约基加利修正案的家用空调制冷剂替代方案解析[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 14-20. (Lu Tianyu, Ma Guoyuan, Li Xiang, et al. Analysis of refrigerant substitution scheme for household

- air conditioning under Kigali amendment [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(4): 14–20.)
- [12] Calm J M. The next generation of refrigerants-Historical review, considerations, and outlook [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(7): 1123–1133.
- [13] Chen Zhuang, Zhao Hongxia, Kong Fanchen, et al. Synergistic effect of adjustable ejector structure and operating parameters in solar-driven ejector refrigeration system[J]. *Solar Energy*, 2023, 250: 295–311.
- [14] Zhou Mengliu, Wang Xiao, Yu Jianlin. Theoretical study on a novel dual-nozzle ejector enhanced refrigeration cycle for household refrigerator-freezers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 73: 278–284.
- [15] Zhu Lin, Yu Jianlin, Zhou Mengliu, et al. Performance analysis of a novel dual-nozzle ejector enhanced cycle for solar assisted air-source heat pump systems [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 735–740.
- [16] Sokolov M, Hershgal D. Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low grade heat. Part 1. Systems characterization[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1990, 13(6): 351–356.
- [17] Zhao Hongxia, Zhang Ke, Wang Lei, et al. Thermodynamic investigation of a booster-assisted ejector refrigeration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104: 274–281.
- [18] YAN Gang, BAI Tao, YU Jianlin. Energy and exergy efficiency analysis of solar driven ejector-compressor heat pump cycle[J]. *Solar Energy*, 2016, 125: 243–255.
- [19] Elbel S, Lawrence N. Review of recent developments in advanced ejector technology [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 62: 1–18.
- [20] 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.
- [21] Kajurek J, Rusowicz A, Grzebielec A, et al. Selection of refrigerants for a modified organic Rankine cycle [J]. *Energy*, 2019, 168: 1–8.
- [22] 张迪, 郭智恺, 于万金, 等. 新型低GWP制冷剂在-100~200℃的应用研究进展[J]. *制冷学报*, 2024, 45(3): 23–37. (Zhang Di, Guo Zhikai, Yu Wanjin, et al. Research progress on the application of novel low GWP refrigerants in the temperature range from-100 °C to 200 °C [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(3): 23–37.)
- [23] He S, Li Y, Wang R Z. Progress of mathematical modeling on ejectors [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 1760–1780.
- [24] Lemmon E, Bell I, Huber M. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0[DB/OL]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. Standard Reference Data Program, 2018, <https://doi.org/10.18434/T4/1502528>.
- [25] Wang Yazhi, Chen Tian, Liang Yingbo, et al. [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112321.

通信作者简介

刘晔,男,博士,副研究员,西安交通大学能源与动力工程学院,制冷与低温工程系,15091678656, E-mail: liuye52t@xjtu.edu.cn。研究方向:半导体制冷技术,制冷与空调系统节能新技术。

About the corresponding author

Liu Ye, male, associate research fellow, School of Energy and Power Engineering, Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, 86-15091678656, E-mail: liuye52t@xjtu.edu.cn. Research fields: semiconductor cooling, new energy-saving technology for refrigeration and air conditioning system.