

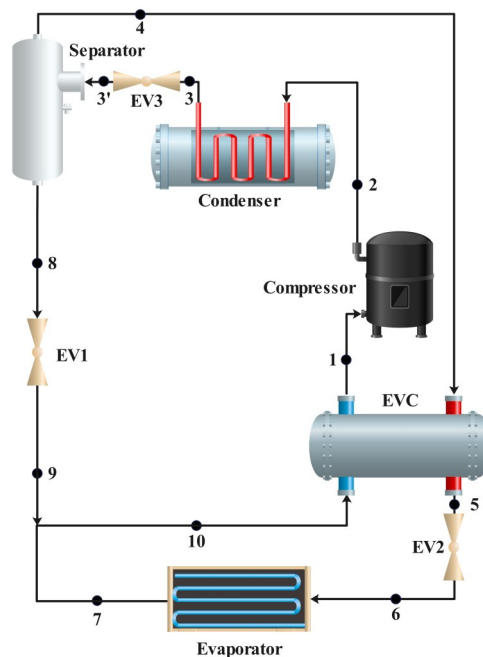
Characteristics analysis of throttling-enhanced auto-cascade refrigeration cycle

Sen CHEN, Ziyun SONG, Yingying TAN, Zhanwei WANG, Lin WANG, Xiuzhen LI*

Institute of Building Energy and Thermal Science, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China

Abstract: The auto-cascade refrigeration cycle is characterized by its simple design, stable operational characteristics, broad cooling temperature range, and promising applications, making it a focal point in the field of low-temperature research. However, the traditional auto-cascade refrigeration cycle (BACR) is limited by refrigerant flow rate within the evaporator, typically addressed by reducing evaporation pressure to enhance cooling capacity. This approach leads to the issues such as high compressor power consumption, high exhaust temperature and low refrigeration efficiency. Researchers have extensively explored refrigerant component ratio optimization and system process improvements to address these issues. However, previous cycles are relatively complex, posing challenges to stable operation for the systems. Thus, a simple and effective cycle improvement scheme is necessary for practical applications. This work proposes a novel throttling-enhanced auto-cascade refrigeration cycle (VACR). This configuration reduces the pressure of the two-phase refrigerant mixture at the condenser outlet through a throttling process, promoting partial evaporation of the liquid phase and increasing the refrigerant flow rate into the evaporator. Using R1150/R600a as the refrigeration, a thermodynamic model of the cycle is established, and the effects of key parameters such as component ratio, condenser outlet vapor quality, condensation temperature, and evaporation temperature on thermodynamic performance are analyzed. The results show that when the R1150 component ratio ranges from 0.45 to 0.60, the VACR increases the refrigerant flow rate within the evaporator by 15.1% to 17.0% compared to the BACR. The highest coefficient of performance (COP) of the VACR is 0.743, representing a 14.54% improvement over the BACR. When the condensation temperature ranges from 30°C to 40°C, the COP of the VACR increases by 13.82% to 31.19% compared to the BACR. When the evaporation temperature ranges from -60°C to -70°C, the cooling capacity of the VACR increases by 19.43% to 56.11% compared to the BACR. Overall, the comparative analysis highlights the thermodynamic performance improvement potential in the proposed VACR.

Keywords: zeotropic mixture; auto-cascade refrigeration cycle; coefficient of performance; thermodynamic analysis



收稿: 2024-11-26, 修回: 2025-02-24, 网络发表: 2025-05-08; Received: 2024-11-26, Revised: 2025-02-24, Published online: 2025-05-08

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(编号: 2024M760802); 河南省科技研发计划联合基金(编号: 242103810075); 河南省高校科技创新团队项目(编号: 22IRTSTHN006); 河南省高校科技创新人才项目(编号: 22HASTIT025)

作者简介: 陈森, 硕士研究生, 从事自复叠制冷循环理论及实验研究, E-mail: senchen1215@163.com; 通讯联系人, 李修真, 副教授, 动力工程及工程热物理专业, E-mail: lixiuzhen90@126.com

引用格式: 陈森, 宋紫云, 谈莹莹, 等. 节流增效自复叠制冷循环特性分析. 过程工程学报, 2025, 25(8): 845-852.

Chen S, Song Z Y, Tan Y Y, et al. Characteristics analysis of throttling-enhanced auto-cascade refrigeration cycle (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2025, 25(8): 845-852, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.224371.

节流增效自复叠制冷循环特性分析

陈 森, 宋紫云, 谈莹莹, 王占伟, 王 林, 李修真*

河南科技大学建筑能源与热科学技术研究所, 河南 洛阳 471023

摘 要: 自复叠制冷循环凭借结构设计简单、运行特性稳定、制冷温区宽以及广阔的应用前景, 已成为目前低温领域的研究热点。传统自复叠制冷(BACR)循环由于进入蒸发器的制冷剂工质流量较小, 通常采用降低蒸发压力的方式来提高制冷量, 这会引起压缩机耗功高、排气温度高及制冷效率低等问题。为此, 研究者们从工质组分优化、系统流程改进等方面开展了广泛的研究, 但以往提出的循环结构较为复杂, 给系统稳定运行带来挑战。因此, 一种简单有效的循环改进方案更具实际应用价值。本工作创新性地提出节流增效自复叠制冷(VACR)循环, 通过节流过程降低冷凝器出口气液两相混合工质的压力, 促使部分液相工质蒸发, 从而增加蒸发器进口工质流量。本工作以R1150/R600a为工质, 建立循环热力学数学模型, 对比分析了组分配比、冷凝器出口干度、冷凝温度和蒸发温度等关键参数对循环性能的影响。结果表明, 当R1150的组分配比为0.45~0.60时, VACR循环通过节流效应, 使进入蒸发器的制冷剂流量较BACR循环增加15.1%~17.0%; VACR循环COP最高达0.743, 相比于BACR循环提升14.54%; 在冷凝温度为30~40℃时, VACR循环的COP相比于BACR循环提升13.82%~31.19%; 当蒸发温度为-60~-70℃时, VACR循环的制冷量较BACR循环提升19.43%~56.11%。综上, 对比分析突出了VACR循环在热力学性能方面的改进潜力。

关键词: 非共沸混合工质; 自复叠制冷循环; 性能系数; 热力学分析

中图分类号: TB611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2025)08-0845-08

1 前言

随着全球气候变暖问题加剧、居民生活质量提升以及冷冻医疗等前沿科技的快速发展, 低温制冷产品的需求愈加旺盛^[1]。目前, 获取-60℃以下低温的制冷方式主要包括复叠式制冷、林德-汉普森制冷和自复叠制冷。其中, 自复叠制冷相较于复叠式制冷, 仅需单台压缩机即可获得-60℃甚至更低的制冷温度, 与林德-汉普森制冷相比, 其在润滑油分离和系统运行可靠性方面更具优势。自复叠制冷循环具有结构简单、运行可靠、工作温区宽、灵活性高、低温端无运动部件以及无润滑油凝固堵塞等特点, 在低温制冷领域具有独特的应用优势^[2]。

传统自复叠制冷循环为了获得更高的制冷量, 往往以牺牲蒸发压力为代价, 这不可避免地引起压缩机压缩比增大, 还会引起富含高沸点组分支路节流损失增加以及压缩机排气温度过高的问题, 最终造成制冷效率明显降低。为此, 国内外学者开展了广泛研究, 致力于优化循环性能。随着《含氟气体法规》(F-Gas Regulation)对高全球变暖潜力(GWP)制冷剂的限制, 研究者们开始探讨环保工质在自复叠制冷领域的替代方案^[3,4]。Rodríguez-Jara 等^[5]、Liu 等^[6]、Li 等^[7]和 He 等^[8]探讨了R1150和R600a在自复叠制冷循环中的应用潜力, 研究结果表明, 该混合工质具有良好的热力学性能。在优化

循环结构方面, Wang 等^[9]利用精馏塔提纯富含低沸点组分工质, 提高了制冷效率。Qin 等^[4]通过两级分离提高了气液分离器的分离效率。Tan 等^[10]利用喷射器回收膨胀功得以提升循环的性能系数(COP)。Hao 等^[11]将热驱动喷射制冷循环与自复叠制冷循环耦合, 以降低压缩机能耗。Cheng 等^[12]则构建了由两台压缩机串联的自复叠制冷循环。Zhang 等^[13]通过分凝分离器提高了富含低沸点组分工质的纯度, 使蒸发温度降低9.1~20.3℃。Liu 等^[14]增加了辅助气液分离器, 通过收集液相组分中含有的低沸点组分, 从而提高组分分离效率。

以往研究表明, 通过优选混合工质、设置多级分离器(例如分凝器或精馏器)以及优化循环流程均可改善传统自复叠制冷循环的性能。然而, 这些改进措施往往会增加系统的复杂性。鉴于此, 在以往研究^[10,11,15,16]基础上, 本工作选用碳氢化合物R600a和R1150作为制冷剂, 创新性地构建了一种兼具简洁性与高效性的节流增效自复叠制冷(VACR)循环。该循环利用节流过程降低了冷凝器出口工质的压力, 促使部分液相工质蒸发, 进而获得富含高纯度低沸点组分的气相工质, 显著提高了蒸发器进口工质流量, 从而在较高性能系数下实现低温制冷。为了深入探究VACR循环热力学性能, 建立了循环热力学模型, 重点分析了关键运行参数对循环性能的影响, 为进一步优化自复叠制冷循环并提升其能效提供理

论基础。

2 循环原理

图1为传统自复叠制冷(BACR)循环和VACR循环的原理图以及相应的压焓(p - h)图。BACR循环运行原

理如图1(a)所示,压缩机排出的高温高压制冷剂蒸汽(点2),首先经过冷凝器(Condenser)冷凝为气液两相的混合制冷剂(点3),然后在气液分离器(Separator)中,混合工质被分离为富含低沸点组分的饱和气相工质(点4)和富含高沸点组分的饱和液相工质(点8)。其中,气相工质进入蒸发冷凝器(EVC)的冷凝侧,并在冷凝过程中转化

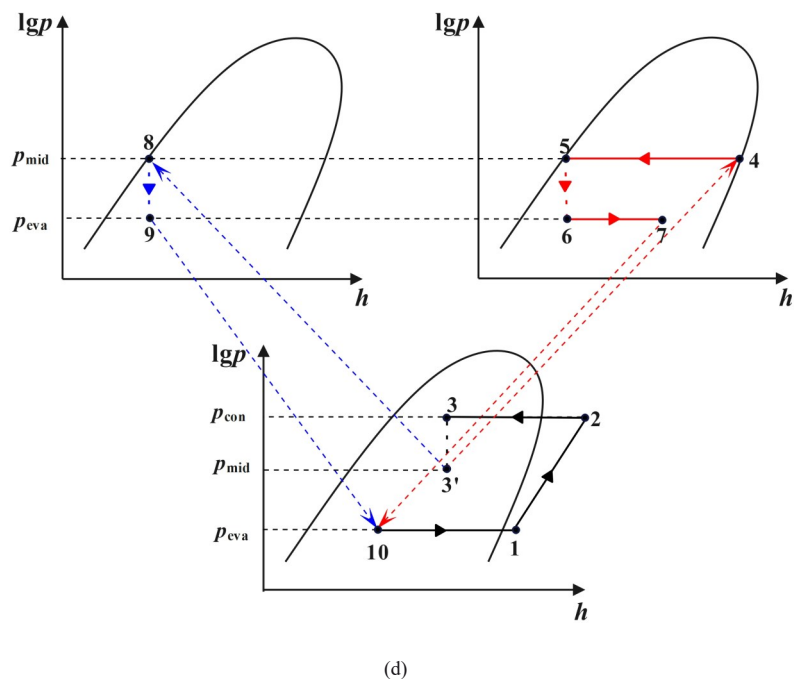
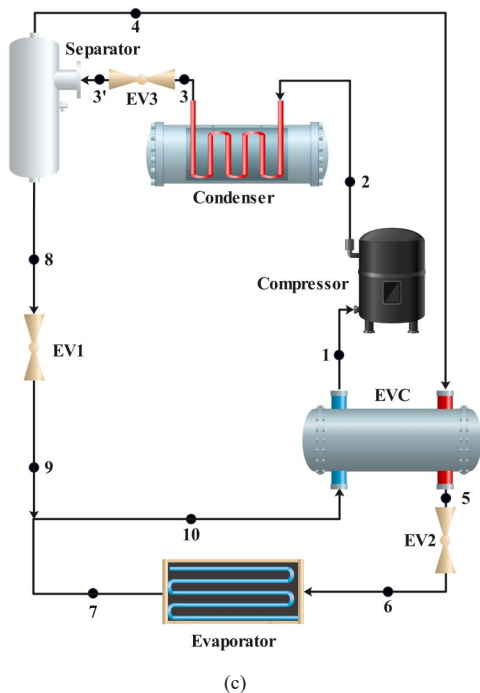
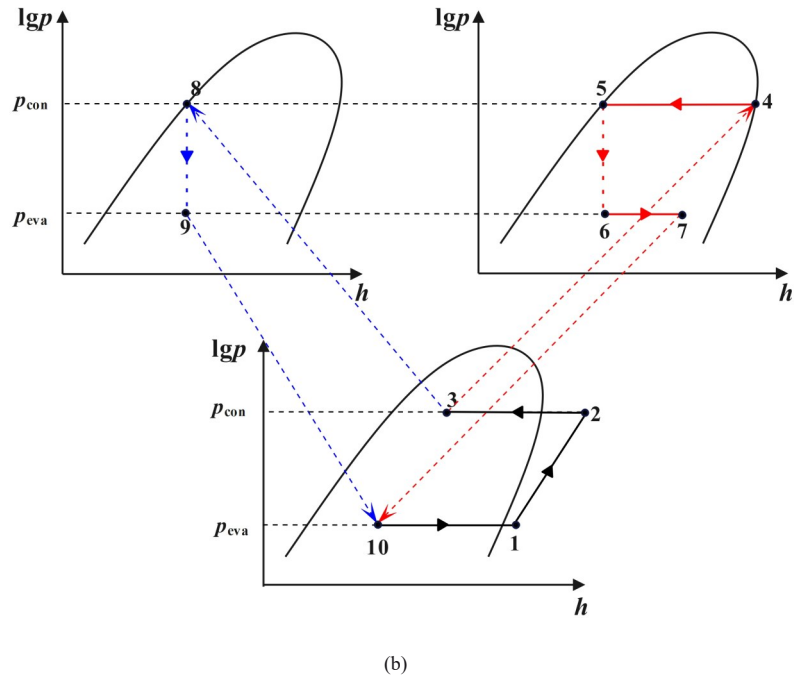
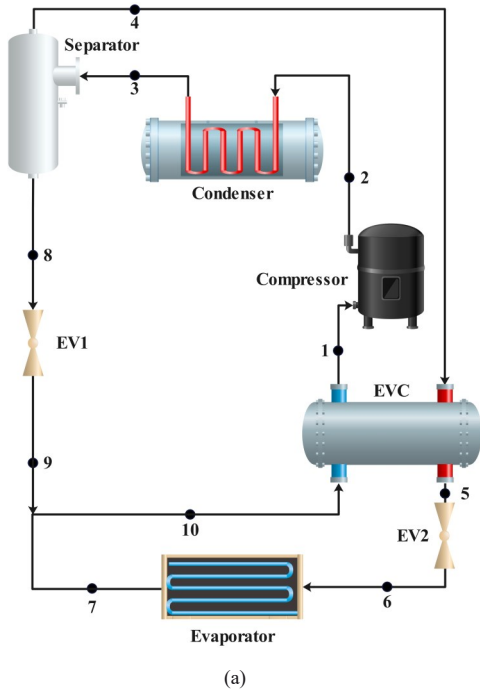


图1 (a) BACR循环运行示意图; (b) BACR循环的 p - h 图; (c) VACR循环运行示意图; (d) VACR循环的 p - h 图;
Fig.1 (a) Schematic diagram of the BACR cycle; (b) the p - h diagram of the BACR cycle; (c) schematic diagram of the VACR cycle; (d) the p - h diagram of the VACR cycle

为液相工质(点5)。随后,该股液相工质流经节流阀2(EV2),经历节流降压过程,转变为气液两相共存的状态(点6),再进入蒸发器(Evaporator)蒸发吸热(点7)而实现低温制冷。与此同时,来自气液分离器底部的饱和液相工质(点8),则通过节流阀1(EV1)节流降压至蒸发压力,形成气液两相工质(点9)。此后,该股气液两相工质(点9)与蒸发器流出的气液两相工质(点7)进行混合,共同进入蒸发冷凝器的蒸发侧(点10),为冷凝侧的流体提供冷量,进而形成饱和气相工质(点1)。最终,该气相工质(点1)被压缩机(Compressor)的吸气口吸入,完成压缩过程,至此完成一个循环过程。

相较于BACR循环,VACR循环[图1(c)]在冷凝器和气液分离器之间增设了节流阀(EV3),定义EV3节流至中间压力与冷凝压力的比值为节流比(R)。当混合工质流经EV3时,压力显著降低,促使部分液相工质蒸发,形成气相工质。同时,由于部分液相工质蒸发过程吸热,使得流过EV3的混合工质温度下降,形成点3'。可见,通过增设EV3,进入气液分离器的混合工质温度不仅得到降低,混合工质的气液质量比也得到提高,从而使得进入蒸发器的工质流量增大,有利于提升循环制冷量。但该改进伴随着不同于BACR循环的热力学约束:EV3的节流作用通过提升气相工质流量,间接导致气液分离器液相中R600a纯度上升但质量流量降低。该变化使节流至蒸发压力时,气液两相工质(点9)温度同比升高,进而引发混合工质(点10)温度上升,过度降压可能导致气液分离器内液相占比显著降低,造成蒸发冷凝器中气相工质冷凝效果降低,影响循环的制冷量。基于上述机理,本研究建立VACR热力学模型,重点探究组分配比、冷凝器出口干度和节流比等参数的影响,旨在优化新循环的运行,以提高循环效率。

3 数学模型

3.1 能量分析

本工作基于质量守恒和能量守恒原理构建循环热力学数学模型,为简化循环热力学计算过程,作出如下假设^[14]:(1)循环运行稳定工况;(2)压缩机进行绝热非等熵压缩过程;(3)气液分离器出口工质均为饱和状态;(4)节流前后工质的焓值不变;(5)制冷剂的混合视为等压混合过程;(6)忽略循环运行中的热量损失和压力损失。循环各部件的控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\sum m_i Z_i - \sum m_o Z_o = 0 \tag{1}$$

式中, m 为工质质量流量(kg/s), Z 为工质质量分数(%),下标*i*和*o*分别代表各部件的入口和出口。

能量守恒方程:

$$\sum Q + \sum W + \sum m_i h_i - \sum m_o h_o = 0 \tag{2}$$

式中, Q 为部件吸收或释放热量(kW), W 为部件功耗(kW), h 为工质焓值(kJ/kg)。

在压缩机的非等熵压缩过程中,依据等熵压缩效率进行修正。具体地,等熵效率的计算公式^[17]为:

$$\eta_{\text{com}} = 0.874 - 0.0135 p_2 / p_1 \tag{3}$$

根据该效率,非等熵压缩过程的耗功为:

$$W_{\text{com}} = m_1 (h_{2s} - h_1) / \eta_{\text{com}} \tag{4}$$

式中, p_1 和 p_2 分别为点1和2的压力(kPa), η_{com} 为压缩机压缩过程的等熵效率, W_{com} 为非等熵压缩过程的耗功量(kW), m_1 为点1的工质质量流量(kg/s), h_{2s} 为状态点2在理想工况下进行等熵压缩的焓值(kJ/kg)。

循环性能系数:

$$\text{COP} = Q_{\text{eva}} / W_{\text{com}} \tag{5}$$

式中,COP为性能系数, Q_{eva} 为蒸发器制冷量(kW)。

基于循环流程,根据式(1)~(4)构建各部件热力学模型,如表1所示。

表1 各部件的质量和能量守恒方程
Table1 The mass and energy conservation equations for each component

Component	Mass conservation equation	Energy conservation equation
Compressor	$m_1 = m_2$	$W_{\text{com}} = m_1 (h_{2s} - h_1) / \eta_{\text{com}}$
Condenser	$m_2 = m_3$	$Q_{\text{con}} = m_2 (h_2 - h_3)$
Separator	$m_3 = m_4 + m_8$	$m_3 h_3 = m_4 h_4 + m_8 h_8$
EVC	$m_4 = m_5, m_{10} = m_1$	$m_4 (h_4 - h_5) = m_{10} (h_1 - h_{10})$
Evaporator	$m_6 = m_7$	$Q_{\text{eva}} = m_6 (h_7 - h_6)$
EV1	$m_8 = m_9$	$h_8 = h_9$
EV2	$m_5 = m_6$	$h_5 = h_6$
EV3	$m_3 = m_{3'}$	$h_3 = h_{3'}$

构建VACR和BACR循环的热力学仿真程序,采用REFPROP 10.0物性数据库获取R1150/R600a非共沸混合工质的热力学参数。仿真输入参数设置如下:总工质质量流量(m_3)为10 g/s,压缩机压比(PR)为8^[7,18],冷凝器出口干度(q_3)为0.5^[7,19],以及压缩机中R1150的质量分数($Z_{\text{R1150,com}}$)、冷凝温度(t_c)、蒸发温度(t_e)和节流比(R),针对非共沸混合工质相变过程呈现显著的非线性温变特性,通过迭代计算获取蒸发冷凝器冷凝端温度,确保蒸发冷凝器冷端最小传热温差始终不低于5℃^[20]。图2为VACR循环热力学性能仿真算法流程。

3.2 模型验证

为验证本工作建立的热力学模型的可靠性,在组分配比R170/R290为0.5/0.5,总质量流量为0.001 kg/s,冷凝温度为30℃且出口干度为0.5,蒸发温度为-55℃且出

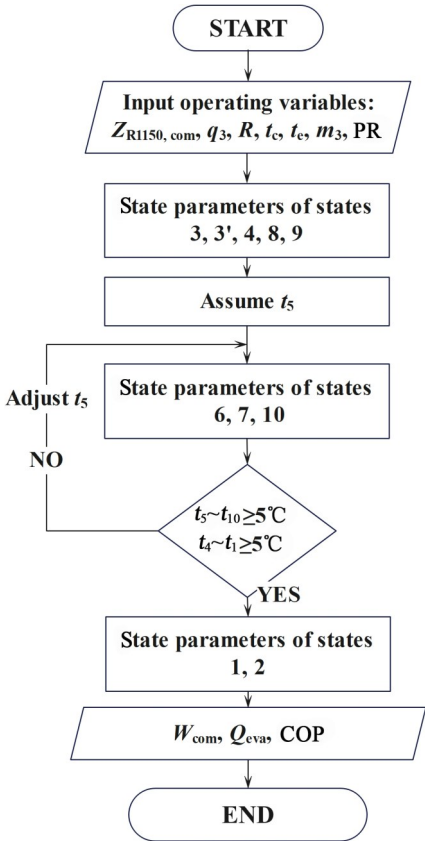


图2 VACR循环的热力学性能仿真算法
Fig.2 The algorithm of thermodynamic performance simulation for the VACR cycle

表2 BACR循环结果与Liu等^[14]的结果对比
Table 2 Comparisons of present BACR cycle results with the results of Liu et al^[14]

Parameter	Present BACR results	The results of Liu et al ^[14]	Relative error
Q_{eva}/W	109.9	110.0	0.09%
Q_{con}/W	314.8	315.0	0.06%
COP	0.536	0.537	0.19%

口干度为0.55,蒸发冷凝器冷端传热温差为5℃的工况下,对BACR循环的模拟结果与Liu等^[14]的模拟结果进行对比。表2数据显示,关键参数的相对误差最大值仅为0.19%,有效验证了本工作数学模型的精确性。

为进一步评估仿真程序的适用性,依据Bai等^[21]BACR循环的实验设计工况,构建了相应的热力学模型进行对比验证(表3)。实验基准参数包括:R23/R134a的组分配比(质量比)为0.3/0.7,总质量流量为7.837 kg/h,冷凝器出口温度和压力分别为18℃和1.09 MPa,蒸发器制冷量为100 W且压力为0.224 MPa。结果表明,循环COP相对偏差为3.5%,蒸发器进口温度误差为4.5℃,虽然存在一定偏差,但均满足热力学仿真误差阈值。通过理论验证与实验验证,本研究的仿真程序

在数学模型的准确性和可靠性方面均得到充分验证。

表3 BACR循环结果与Bai等^[21]的实验数据对比
Table 3 Comparison of the simulation results of BACR cycle with the experimental data of Bai et al^[21]

Parameter	Present BACR result	Experimental result	Relative error
$t_e/^\circ\text{C}$	-48.70	-44.20	10.2%
COP	0.146	0.141	3.5%

4 结果与讨论

4.1 组分配比对循环性能的影响

图3展示了在设定工况(冷凝温度 t_c 为35℃,蒸发温度 t_e 为-60℃,冷凝器出口干度 q_3 为0.5,压缩机压比PR为8,节流比R为0.6时)下,压缩机中R1150的质量分数($Z_{R1150,com}$)对蒸发器进口工质中R1150质量分数($Z_{R1150,eva}$)及蒸发器进口工质流量($m_{eva,inlet}$)的影响。尽管 $Z_{R1150,com}$ 的增大可提升混合工质的相平衡压力,使蒸发压力升高,但会导致VACR和BACR循环的蒸发器进口温度分别上升6.89和7.42℃,对循环制冷量产生不利影响。此外随着 $Z_{R1150,com}$ 增加,冷凝器中气相和液相工质中的R1150质量分数均得到增加,使VACR循环和BACR循环的 $Z_{R1150,eva}$ 分别提升21.34%和16.85%,促使蒸发器内部温度滑移程度更为平稳,对制冷量产生有利影响。研究发现,在节流压力下,低沸点组分的R1150更易蒸发为气相,而高沸点组分的R600a主要保持液相状态,形成了纯度较高的R1150气相工质。随着 $Z_{R1150,com}$ 进一步增加,冷凝形成的液相工质中R1150的质量分数也随之提高,实现EV3产生的气相工质纯度高于冷凝产生的气相工质,促使VACR循环 $Z_{R1150,eva}$ 的增长速率明显大于BACR循环。同时,EV3的节流作用使得VACR循环的 $m_{eva,inlet}$ 相较于BACR循环增加15.1%~17.0%。如图4所示,与BACR循环相比,VACR循环的制冷量(Q_{eva})提升了17.8%~29.4%。

然而,随着 $Z_{R1150,com}$ 增加,VACR和BACR循环的耗功分别提高了14.68%和10.25%。原因是尽管两个循环的压比均不变,但冷凝压力与蒸发压力均升高,致使压缩过程克服的压力差增加了58.14%;且随着压缩过程的进行,能量损失更为突出,压缩过程曲线在压焓图上的斜率逐渐减小,导致压缩机的出口焓值显著增大。因此,两个循环的COP均表现为先增加后降低的趋势,但与BACR循环相比,VACR循环的平均COP提高了15.3%。在对VACR循环进行组分配比优化重构后,最优 $Z_{R1150,com}$ 应调整至0.57,从而使VACR循环的最高COP达到0.706,明显高于BACR的0.610。

4.2 冷凝器出口干度对循环性能的影响

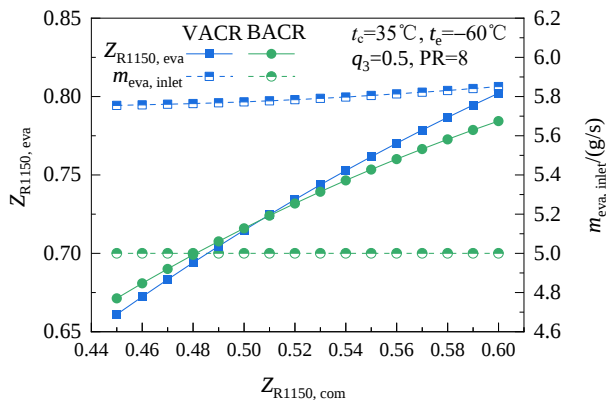


图3 $Z_{R1150,com}$ 对 $Z_{R1150,eva}$ 和 $m_{eva,inlet}$ 的影响
Fig.3 Impact of $Z_{R1150,com}$ on $Z_{R1150,eva}$ and $m_{eva,inlet}$

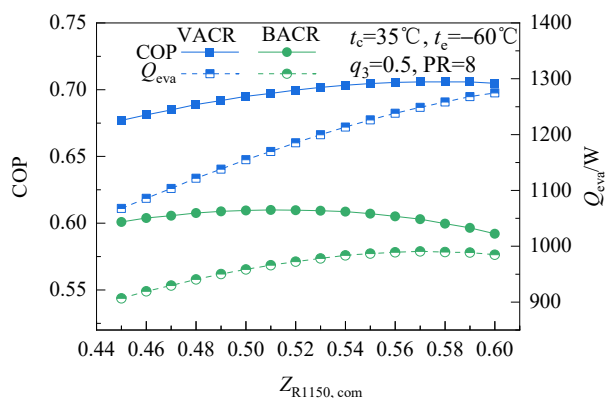


图4 $Z_{R1150,com}$ 对 COP 和 Q_{eva} 的影响
Fig.4 Impact of $Z_{R1150,com}$ on COP and Q_{eva}

图5展示了冷凝器出口干度(q_3)对蒸发器进口工质中 R1150 质量分数($Z_{R1150,eva}$)、蒸发器进口工质流量($m_{eva,inlet}$)和 COP 的影响。在压缩机中 R1150 的质量分数($Z_{R1150,com}$)为 0.51 的条件下,采用控制变量法分析 q_3 对循环性能的影响。此外,针对 VACR 循环,还探讨了 $Z_{R1150,com}$ 提升至 0.57 时的最优性能条件。为了确保蒸发冷凝器的蒸发侧效能和换热温差,VACR 和 BACR 循环的冷凝器出口干度均存在最大限值,由于节流效应促使液相工质蒸发,进而增加冷凝侧流量、减少蒸发侧流量,因此 VACR 循环的冷凝器出口干度受到更强的约束,VACR 和 BACR 循环的 q_3 最高值分别为 0.56 和 0.64。当 VACR 循环的 $Z_{R1150,com}$ 为 0.57 且 q_3 为 0.56 时,COP 达到最高值 0.707,较 BACR 循环提升了 8.94%。

当循环 $Z_{R1150,com}$ 为 0.51 时,随着冷凝器出口干度增大,冷凝器的冷凝效果减弱,导致蒸发器进口工质中 R1150 的质量分数下降(不利于制冷量提升),但蒸发器进口工质流量上升(有利于制冷量提升)。最终,BACR 循环的 COP 显著提升了 19.08%,达到最高值 0.649;而 VACR 循环的 COP 则随冷凝器出口干度增加呈现先增

加后减小的趋势。对 BACR 循环而言,流量增加对制冷量的促进作用强于低沸点组分 R1150 纯度降低的负面影响;而对 VACR 循环而言,节流效应虽提高了蒸发器进口工质流量,缓解了工质流量对制冷量的制约,但气液分离器内冷凝形成的液相工质流量减少,导致闪蒸出的气相工质中 R1150 纯度明显降低,VACR 循环蒸发器进口工质的 R1150 质量分数降低 8.58%,而 BACR 循环则降低 6.84%。因此,当冷凝器出口干度为 0.40~0.56 时,VACR 循环相较于 BACR 循环的性能优势从 26.61% 降至 10.60%,这表明 BACR 循环的性能主要受蒸发器进口工质流量的限制。

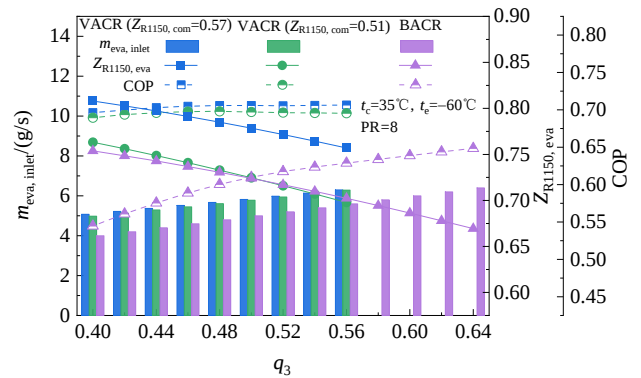


图5 q_3 对 $m_{eva,inlet}$, $Z_{R1150,eva}$ 和 COP 的影响
Fig.5 Impact of q_3 on $m_{eva,inlet}$, $Z_{R1150,eva}$ and COP

4.3 节流比对循环性能的影响

图6展示了在设定工况(冷凝温度 t_c 为 35°C,蒸发温度 t_e 为 -60°C,冷凝器出口干度 q_3 为 0.5,压缩机压比 PR 为 8,压缩机中 R1150 的质量分数 $Z_{R1150,com}$ 为 0.57)下,节流比(R)对 VACR 循环的性能系数(COP)、蒸发器进口工质 R1150 质量分数($Z_{R1150,eva}$)和蒸发器进口工质流量($m_{eva,inlet}$)的影响。由图可知,随着 R 增大,节流程度减弱,中间压力升高,导致节流过程产生的气相工质流量减少,进而使 VACR 循环中蒸发器进口工质流量减少了 5.06%,这对循环的制冷量产生不利影响。但与此同时,节流形成的气相工质中 R1150 质量分数相应提高,使 $Z_{R1150,eva}$ 从 77.48% 提升至 77.84%,不仅促进蒸发器进口温度降低了 0.31°C,还有助于混合工质在蒸发器内部温度滑移的平稳化。因此,VACR 循环的 COP 随着 R 的增大而表现出先增加后降低的趋势。当节流比为 0.42 时,VACR 循环的 COP 达到最高值 0.743,故判定 0.42 为该工况下的最优节流比。对于蒸发温度为 -60°C、冷凝温度为 35°C 时,采用 0.42 的节流比可以实现 VACR 循环的 COP 相较于 BACR 循环(0.649)提高 14.54%。

4.4 冷凝温度对循环性能的影响

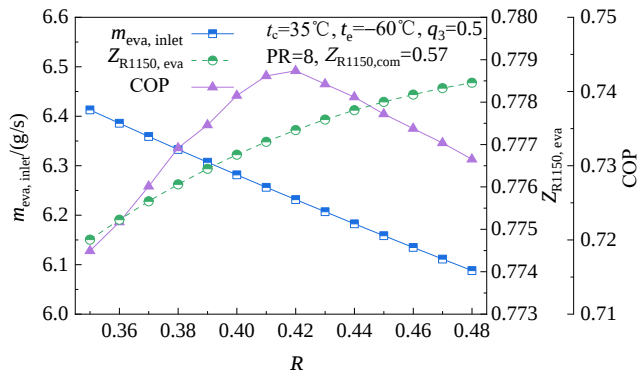


图6 VACR循环中 R 对COP, $Z_{R1150,eva}$ 和 $m_{eva,inlet}$ 的影响
Fig.6 Impact of R on COP, $Z_{R1150,eva}$ and $m_{eva,inlet}$ for VACR cycle

图7为冷凝温度(t_c)对循环的制冷量(Q_{eva})、蒸发器进口工质中R1150质量分数($Z_{R1150,eva}$)和蒸发器进口工质流量($m_{eva,inlet}$)的影响。由图可知,随着冷凝温度的升高,VACR和BACR循环的制冷量分别降低了15.60%和29.11%。一方面,冷凝压力随冷凝温度升高而增加,在保证压比不变时必然引起蒸发压力上升,导致VACR和BACR循环的蒸发器进口温度分别上升了5.25和5.79°C(循环程序中获得);另一方面,冷凝温度的升高还会导致冷凝器出口混合工质组分的分离效率下降,形成的气相工质中R1150的质量分数降低,从而使得VACR和BACR循环蒸发器中R1150质量分数分别下降2.35%和3.45%。值得注意的是,冷凝温度变化对VACR和BACR循环的影响存在差异。在VACR循环中,不仅蒸发器进口温度提高幅度较小, $Z_{R1150,eva}$ 的下降幅度相对平缓,这确保了蒸发过程中温度滑移的稳定。相比之下,冷凝温度升高对BACR循环的影响则更加显著,导致其制冷量出现更为剧烈的降低。两个循环在 $Z_{R1150,eva}$ 上的差异源于:冷凝温度升高使得冷凝器出口液相工质中R1150的质量分数增加。在VACR循环中,节流后形成的气相工质中R1150的质量分数相应提升,从而部分抵消了冷凝温度升高对制冷量的不利影响。因此,在冷凝温度范围为30~40°C时,VACR循环的制冷量较BACR循环提高了22.42%~45.74%,通过计算其COP相应提高了13.82%~31.19%,VACR循环的性能优势较为明显。

4.5 蒸发温度对循环性能的影响

图8展示了蒸发温度(t_e)对循环COP和制冷量(Q_{eva})的影响。随着蒸发温度降低,蒸发器进出口焓差值减小,导致VACR和BACR的制冷量分别降低了54.11%和69.91%。同时,两循环的COP也分别降低了43.57%和56.83%。然而,相较于BACR循环,VACR循环在制冷量和COP方面的降幅更小,表现出更高的稳定性与适应性。这是因为与BACR循环相比,VACR循环不仅能够

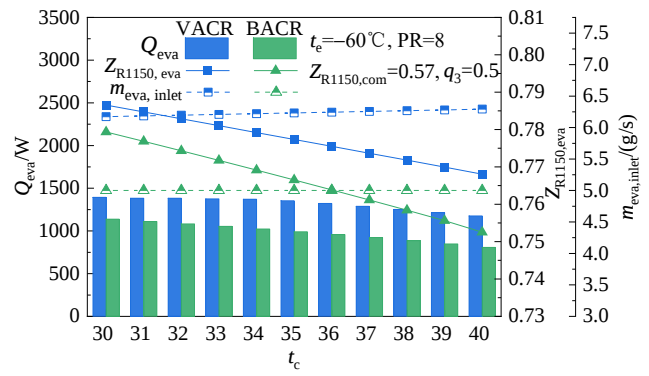


图7 t_c 对 Q_{eva} , $Z_{R1150,eva}$ 和 $m_{eva,inlet}$ 的影响
Fig.7 Impact of t_c on Q_{eva} , $Z_{R1150,eva}$ and $m_{eva,inlet}$

增加蒸发器进口工质中质量流量,还能够提高工质的纯度。在更低蒸发温度的工况下,工质纯度(富含低沸点组分)对制冷量的影响更为关键,VACR循环展现出更为优越的制冷性能。当蒸发温度为-60~-70°C时,VACR循环的制冷量相较于BACR循环实现了31.02%~66.62%的提升,同时其COP值也取得了19.43%~56.11%的增长。

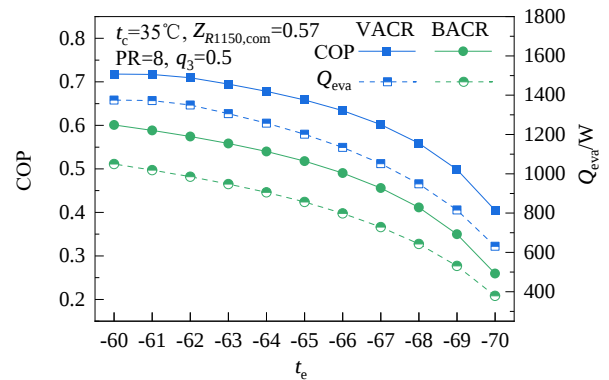


图8 t_e 对COP和 Q_{eva} 的影响
Fig.8 Impact of t_e on COP and Q_{eva}

5 结论

本研究提出节流增效自复叠制冷(VACR)循环通过节流效应降低冷凝器出口混合工质压力,促使部分液相工质蒸发,显著增加进入蒸发器的工质流量,进而提高循环性能,得到以下结论:

(1) 随着压缩机内R1150质量分数的增加,VACR循环促使蒸发器进口的工质流量相较于BACR循环提升15.1%~17.0%,在提升制冷量方面展现出显著优势。

(2) 当节流比为0.35~0.48时,VACR循环蒸发器进口的工质流量下降5.06%,但蒸发器进口工质中R1150的质量分数从77.48%提升至77.84%。受此影响,VACR

循环的COP呈现先增加后减小的趋势,并在节流比为0.42时达到最大值0.743,相比BACR循环提高14.54%。

(3) 冷凝温度的升高会提高VACR循环节流形成的气相工质中R1150的质量分数,当冷凝温度为30~40℃时,VACR循环的COP相较于BACR循环提高13.82%~31.19%。

(4) 蒸发温度的降低时,蒸发器进口工质纯度成为影响制冷量的主要因素。当蒸发温度为-60~-70℃时,VACR循环的制冷量相较于BACR循环提高19.43%~56.11%。

参考文献

- [1] Mclinden M O, Seaton C J, Pearson A. New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration [J]. *Science*, 2020, 370(6518): 791-796.
- [2] Li Y L, Liu G Q, Chen Q, et al. Progress of auto-cascade refrigeration systems performance improvement: composition separation, shift and regulation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 187: 113664.
- [3] Fatouh M, Abou-Ziyan H. Energy and exergy analysis of a household refrigerator using a ternary hydrocarbon mixture in tropical environment-effects of refrigerant charge and capillary length [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 145: 14-26.
- [4] Qin Y B, Li N X, Zhang H, et al. Energy and exergy performance evaluation of a three-stage auto-cascade refrigeration system using low-GWP alternative refrigerants [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 126: 66-75.
- [5] Rodríguez-Jara E Á, Sánchez-De-La-Flor F J, Expósito-Carrillo J A, et al. Thermodynamic analysis of auto-cascade refrigeration cycles, with and without ejector, for ultra low temperature freezing using a mixture of refrigerants R600a and R1150 [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 200: 117598.
- [6] Liu J R, Liu Y, Yan G, et al. Thermodynamic analysis on a modified auto-cascade refrigeration cycle with a self-recuperator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 137: 117-28.
- [7] Li D W, Bai T, Yu J L. Thermodynamic performance optimization and analysis of an auto-cascade refrigeration cycle with vapor injection for ultra-low temperature freezer [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 145: 425-435.
- [8] He Y N, Wu H H, Liu Y Y, et al. Theoretical performance comparison for two-stage auto-cascade refrigeration system using hydrocarbon refrigerants [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 142: 27-36.
- [9] Wang Q, Cui K, Sun T F, et al. Performance of a single-stage auto-cascade refrigerator operating with a rectifying column at the temperature level of -60℃ [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2011, 12(2): 139-145.
- [10] Tan Y Y, Li X Z, Wang L, et al. Thermodynamic performance of the fractionated auto-cascade refrigeration cycle coupled with two-phase ejector using R1150/R600a at -80℃ temperature level [J]. *Energy*, 2023, 281: 128328.
- [11] Hao X Y, Wang L, Wang Z W, et al. Hybrid auto-cascade refrigeration system coupled with a heat-driven ejector cooling cycle [J]. *Energy*, 2018, 161: 988-998.
- [12] Cheng Z, Wang B L, Shi W X, et al. Performance evaluation of novel double internal auto-cascade two-stage compression system using refrigerant mixtures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168: 114898.
- [13] Zhang L, Xu S M, Du P, et al. Experimental and theoretical investigation on the performance of CO₂/propane auto-cascade refrigerator with a fractionation heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 669-677.
- [14] Liu J R, Liu Y, Yan G, et al. Theoretical study on a modified single-stage autocascade refrigeration cycle with auxiliary phase separator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 122: 181-191.
- [15] Tan Y Y, Yuan J J, Wang L, et al. Proposal and performance study on a component-based double-stage compression auto-cascade refrigeration cycle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 276: 116566.
- [16] 谈莹莹, 刘晓庆, 王林, 等. R1150/R600a自复叠制冷循环开机动态特性实验研究 [J]. *化工学报*, 2023, 74(z1): 213-222.
- [16] Tan Y Y, Liu X Q, Wang L, et al. Experimental study on startup dynamic characteristics of R1150/R600a auto-cascade refrigeration cycle [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(z1): 213-222.
- [17] Bai T, Yan G, Yu J L. Influence of internal heat exchanger position on the performance of ejector-enhanced auto-cascade refrigeration cycle for the low-temperature freezer [J]. *Energy*, 2022, 238: 121803.
- [18] Wang Q, Cui K, Sun T F, et al. Performance of a single-stage Linde-Hampson refrigerator operating with binary refrigerants at the temperature level of -60℃ [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2010, 11(2): 115-127.
- [19] Li Y L, Dong P W, Liu G Q, et al. Thermodynamic performance analysis of the fractionation and flash separation auto-cascade refrigeration cycle using low GWP refrigerant [J]. *Energy*, 2024, 308: 132715.
- [20] Sobieraj M, Rosiński M. High phase-separation efficiency auto-cascade system working with a blend of carbon dioxide for low-temperature isothermal refrigeration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114149.
- [21] Bai T, Yan G, Yu J L. Experimental investigation of an ejector-enhanced auto-cascade refrigeration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 792-801.