

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251030005

高温自复叠热泵系统研究进展

曹嘉旭 芮胜军 冯廷康 周璐瑶 贺滔

(河南科技大学车辆与交通工程学院 洛阳 471003)

摘要 高温自复叠热泵具有结构简单紧凑,运行性能可靠,可实现较高温制热等优点。目前,高温自复叠热泵的研究与应用还相对不成熟,大多停留在理论阶段,制热量与COP也相对较低,但在高温供热领域仍具有很大的发展前景。本文首先介绍了自复叠技术在制冷和制热领域的研究状况,然后从制冷工质研究进展与系统流程优化2个方面对自复叠热泵的研究现状进行了综述。分析表明:低GWP制冷工质替代是当前研究热点,高临界温度制冷工质如R1233zd(E)、R1224yd(Z)等能使自复叠热泵向更高温供热发展,R290、R1234yf更适用于低环境温度地区供热,R1234ze(Z)、R1234ze(E)具有优异的热力学性能;混合工质配比对自复叠热泵系统性能产生较大影响,循环浓度在线测量方法与混合工质主动调控策略能使系统始终处在最佳配比;在热泵系统流程优化方面,补气增焓技术的应用最为成熟与广泛,多级蒸发、喷射技术等具有发展潜力,多系统耦合有利于提升系统性能,但会影响系统运行的稳定性。

关键词 高温自复叠热泵;非共沸混合工质;流程优化;研究进展

中图分类号: TB61*2;TB657.5

文献标识码: A

Research Progress on High-Temperature Auto-Cascade Heat Pumps

Cao Jiayu Rui Shengjun Feng Tingkang Zhou Luyao He Tao

(College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003, China)

Abstract High-temperature auto-cascade heat pumps exhibit a simple and compact structure and reliable operating performance and can achieve heating at relatively high temperatures. Currently, the research and application of high-temperature auto-cascade heat pumps remain relatively immature, and most studies are still in the theoretical stage. Although their heating capacity and coefficient of performance (COP) are relatively low, they still hold significant promise for development in the field of high-temperature heating. This paper first introduces the research status of auto-cascade technology in the fields of refrigeration and heating and then reviews the research progress of auto-cascade heat pumps from two aspects: research advances in refrigerants and the optimization of system processes. The analysis showed that the replacement of refrigerants with a low global warming potential (GWP) is the current research focus. Refrigerants with high critical temperatures, such as R1233zd(E) and R1224yd(Z), enable auto-cascade heat pumps to achieve high-temperature heating. R290 and R1234yf are more suitable for heating in areas with low ambient temperatures, whereas R1234ze(Z) and R1234ze(E) exhibit excellent thermodynamic performance. The proportion of mixed refrigerants has a significant impact on the performance of auto-cascade heat-pump systems. Online cycle concentration measurement methods and active control strategies for mixed refrigerants can maintain the system at an optimal proportion at all times. In terms of the optimization of heat-pump system processes, the application of vapor injection technology for increasing enthalpy is the most mature and widespread. Technologies such as multistage evaporation and ejection show potential for development. Multi-system coupling is conducive to improving system performance but may affect the stability of system operation.

Keywords high-temperature auto-cascade heat pump; zeotropic mixed working fluid; process optimization; research progress

自20世纪末以来,中国工业化进程逐渐加快,能源消费量不断增长。2024年中国能源消费总量达到59.6亿t标准煤,碳排放量占世界总碳排放量的31.5%,其中,工业能源消费总量占总消费量的60%以上^[1-2]。中国在“双碳”的大背景下,正处于能源低

碳转型关键时期,工业低碳化发展面临巨大挑战。工业生产过程中会产生大量余热,将其回收利用是提高能源效率的有效方法。热泵技术能够将环境中的热量及工业中产生的废热等低品位能量提升至高品位对外进行输出,输出的热能可用于供暖、干燥、

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

海水淡化等多个方面,节能技术潜力巨大^[3]。

蒸气压缩式空气源热泵系统因其结构简单,成本低而得到广泛应用^[4]。采用单一工质的单级蒸气压缩式热泵系统的工作温差一般为40~50℃,由于压缩机压比的限制只能提供55℃以下的水,无法满足寒冷地区的供热要求^[5]。两级压缩热泵以及复叠式热泵能够完成这种大温差循环,但采用多台压缩机使系统的结构变得更加复杂,同时设计制造和生产维护的成本也相应增加^[6]。

自复叠系统采用单台压缩机,利用非共沸混合工质的自然分离实现多级复叠,具有结构简单、工作稳定可靠、成本低廉等特点,因此得到了研究人员的广泛关注^[7]。罗二仓等^[8]提出了一种利用自复叠节流制冷循环获得30~60 K温度的新方案,并通过实验获得了51 K的低温。刘建丽等^[9-10]提出了分凝分离式自复叠制冷循环,应用于乙烯工业中的分凝分离方式代替传统的气液平衡闪蒸,通过实验制取了135 K的低温并获得了74 W的制冷量。Shi Rongxuan等^[11]提出了一种双喷射增效两级自复叠制冷循环,并采用粒子群优化算法对系统进行优化,显著提高了自复叠循环的性能。Qin Yanbin等^[12-13]将Linde-Hampson系统与三级自复叠系统进行耦合,建立了理论模型并对其进行了能量与焓分析验证其制取-150℃低温的可行性,最后搭建了实验系统成功获得了-146.97℃的温度。Li Yinlong等^[14]提出了一种强化分离的自复叠制冷循环,通过在传统的自复叠系统中增加1个额外的冷凝蒸发器和辅助相分离器,显著提高了循环的COP(性能系数, coefficient of performance)及焓效率。Tan Yingying等^[15]采用分馏换热器对相分离器顶部的低沸点组分进行提纯,不仅提高了系统的COP,获得了较低的制冷温度,还降低了系统的焓损失。

自复叠技术已广泛应用于普冷与低温领域,在自复叠热泵方面也已取得了一定进展。目前,自复叠热泵还存在COP与制热量较低的问题。因此,许多研究人员对其进行了研究,以求提高自复叠热泵的性能。然而,还未有研究报道归纳提升自复叠热泵系统性能的方法。本文从制冷工质研究、系统流程优化2个方面探讨了自复叠热泵系统性能优化的手段,为后续学者提供参考。

1 自复叠热泵循环原理

两级自复叠热泵循环的工作原理如图1所示,压焓图如图2所示,非共沸混合工质经过压缩机压缩为高温高压的气体(1→2)后进入冷凝器,在冷凝器中

冷凝放出热量进行制热(2→3),其中大部分高沸点工质被冷凝为液体,低沸点工质仍为气体;冷凝器出来的气液混合物在气液分离器中实现自动分离,其中富含低沸点组分的气相工质(点6)从气液分离器气相出口流入冷凝蒸发器热端进一步冷凝为过冷液体(6→7),经节流阀节流为两相状态(7→8),后进入蒸发器吸收低温热源热量(8→9);富含高沸点组分的液相工质(点4)从气液分离器的液相出口流出,经节流阀节流(4→5)后与蒸发器出口的富含低沸点组分工质混合,混合后的工质(点10)流入冷凝蒸发器冷端进行蒸发(10→1),为低沸点工质冷凝提供冷量,再流入压缩机进行压缩,完成整个循环。

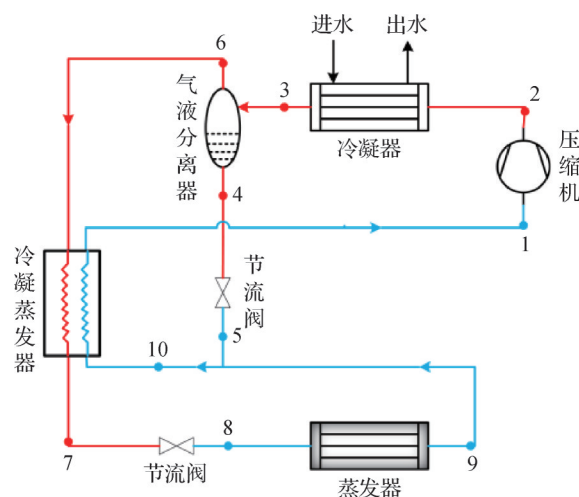


图1 两级自复叠热泵循环原理

Fig.1 Principle of two-stage auto-cascade heat pump cycle

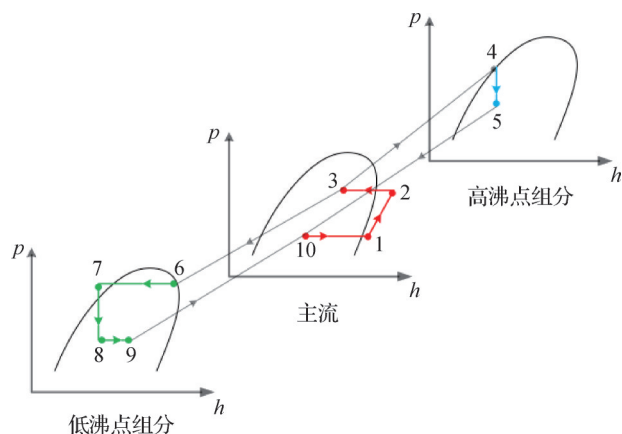


图2 两级自复叠热泵循环压焓图

Fig.2 Pressure-enthalpy diagram of two-stage auto-cascade heat pump cycle

2 制冷工质研究进展

制冷工质是决定自复叠热泵性能的关键因素,其选择和配比均会对自复叠系统的性能产生重大影

响。HFC(氢氟烃)工质因其优异的热力学性质而被广泛使用,其ODP(臭氧损耗潜值, ozone depletion potential)为0,但GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)普遍较高,随着《蒙特利尔议定书》及其修正案的签订,对臭氧有破坏作用及明显温室效应的制冷工质受到严格限制,并将被逐步淘汰,因此,低GWP环保工质对高GWP工质的替代成为当前研究的热点。

2.1 制冷工质的选择

自复叠热泵系统通过非共沸混合工质的自然分离实现多级复叠,与采用纯工质的热泵系统相比,非共沸混合工质在相变过程中存在温度滑移,冷凝器与蒸发器中的制冷工质能够更好匹配换热流体的温度变化,减少系统的不可逆损失,从而提高焓效率^[16]。此外,混合工质具有纯工质相似的性质,可以实现与纯工质的优势互补,得到性能优良的混合制

冷工质^[17]。适用于自复叠热泵系统的非共沸混合工质遵循以下原则:

1)满足制冷剂的通用要求。热力学性质方面,要求工质在工作温度范围内有合适的压力和压比,冷凝潜热大,压缩功小,临界值合适。迁移性质方面,工质的黏度、密度尽可能小,热导率大。工质的化学稳定性与热稳定性好,使用安全。

2)高低沸点组分应互溶且不发生化学反应,标准沸点差在40~80℃之间,便于混合工质的分离。

3)对大气环境无破坏作用。优先使用零ODP,低GWP的环保制冷工质。

4)安全性好。家用或商用场景中优先使用安全等级A1/A2L类工质,工业中应用可放宽至A3,但要限制充注量,并对系统进行防爆设计。

目前,应用于自复叠热泵的常见制冷工质的物性参数如表1所示。

表1 常见制冷工质的物性参数

Tab.1 Physical properties of commonly used working fluids in auto-cascade heat pump systems

制冷工质类型	制冷工质	标准沸点/℃	临界温度/℃	临界压力/MPa	ODP	GWP	安全等级
自然工质	R744	-78.46	30.10	7.38	0	1	A1(不可燃)
	R32	-51.65	78.11	5.78	0	670	A2L(弱可燃)
HFC	R245fa	15.05	153.86	3.65	0	1 030	B1(高毒性)
	R1224yd(Z)	14.62	155.54	3.34	0.000 12	<1	A1
HCFO	R1233zd(E)	18.26	166.45	3.62	0.000 34	1	A1
	R290	-42.11	96.74	4.25	0	3	A3(可燃易爆)
HC	R600a	-11.75	134.66	3.63	0	3	A3
	R600	-0.50	151.97	3.80	0	20	A3
	R1234yf	-29.49	94.7	3.38	0	4	A2L
HFO	R1234ze(E)	-18.97	109.36	3.63	0	6	A2L
	R1234ze(Z)	9.73	150.12	3.53	0	6	A2L
	R1336mzz(Z)	33.45	171.35	2.90	0	2	A1

2.1.1 自然工质

目前,适用于自复叠热泵的自然工质仅有R744。R744具有良好的安全性与化学稳定性,临界温度为30.1℃,因此,作为热泵工质常用于跨临界循环,在超临界状态下具有优异的流动传热性能。S. Dubey等^[18]对比了采用不同低GWP工质的热泵系统性能,发现R744更适用于大温升循环,在30℃的进水温度与75℃的出水温度下,年运行成本比采用R134a的热泵系统低34.24%。P. Ganesan等^[19]研究了以R744/R601为高温级工质,R744/R600为低温级工质的复叠式热泵性能,该系统能在115℃的供热温度下提供205 kW的制热量。运行压力较高是限制工质

R744发展的主要原因之一,需要对各部件及管道进行特殊设计,热泵系统的成本也相应增加。

2.1.2 HCFOs

HCFOs(氢氯氟烯烃)族制冷工质是最新的合成制冷工质,其极低的GWP是目前制冷工质替代的重要方案。

R1233zd(E)、R1224yd(Z)的临界温度分别为166.45℃和155.54℃,在高温工况下表现出优异的性能,是替代R245fa的潜在工质。由于含有氯,它们的ODP分别为0.000 34与0.000 12,但在大气中的停留时间很短,对环境的影响可以忽略不计^[20]。吴迪等^[21]采用双系统并联的循环形式搭建了一台

R1233zd(E)高温热泵样机,在40~65℃的蒸发温度下,能够稳定实现120~145℃的超高温供热。C. Mateu-Royo等^[22]分析了采用R1224yd(Z)的回热式单级热泵性能,在140℃的供热温度下,COP较R245fa热泵系统提高4.5%。R1233zd(E)与R1224yd(Z)问世时间不长,研究者对其研究仍侧重于理论方面,对于其在自复叠热泵系统中的运用还缺乏实践经验。

2.1.3 HCs

HCs(碳氢化合物)因其良好的环保性能而受到广泛研究,是目前制冷工质替代的主要方向之一。

R290虽受限于临界温度较低,无法满足高温化的需求,但其在低温工况下表现出了优异的性能,使其成为在寒冷气候下应用的最佳选择^[23]。随碳原子数量的增加,其临界温度也相应增加,使得R600、R600a、R601、R601a等工质更适合高温热泵^[24]。何永宁等^[25]基于最小过热度理论,对比了采用不同低GWP工质的单级回热高温热泵系统的性能,其中,R601与R601a表现出优异的性能,是替代R245fa的首选。O. Bamigbetan等^[26]通过模拟发现R600与R600a是高温热泵向125℃供热发展的潜在制冷工质。目前,易燃性是限制HCs工质发展的主要原因,在一般场合下使用会有充注量限制,但在安全防护措施完善的场合可以使用,因此,HCs在未来应用于自复叠热泵系统具有一定前景。

2.1.4 HFOs

HFOs(氢氟烯烃)是近年来研究较多的一类制冷工质,具有良好的热力学性能与环保属性,被认为是最具潜力的低GWP替代工质^[27]。

R1234ze(Z)与R1234ze(E)的GWP很低,无毒且不易燃,具有较好的热力学性能。Zhang Xuedong等^[28]对采用6种不同制冷工质的热泵系统性能进行分析,其中采用R1234ze(Z)的热泵系统在85℃的冷凝温度下,COP达3.35,适合中高温热泵应用;F. Molés等^[29]对比了采用R1234ze(E)的不同优化配置的热泵系统,发现喷射器能够大幅提高系统性能。R1336mzz(Z)制冷工质可提供171.35℃的高临界温度,同时在高温条件下化学性质稳定,具有不易燃的性质,在取代高温工况制冷工质R245fa实验中表现优异^[30],可以作为自复叠热泵中的高沸点工质。R1234yf的GWP很低,且在低温环境下具有较好的制热能力,被认为是最适合替代R134a的制冷工质之一。A. Yıldız等^[31]在热泵系统R1234yf替代R134a实验中发现蒸发温度为-5℃时,采用R1234yf的热泵系统有更高的焓效率,且在低蒸发温度下优势更为明显。

2.2 混合工质的组合与配比

混合工质的组合与配比是决定自复叠热泵系统性能的关键因素,对于不同工况,均存在最佳的工质配比,使系统达到最佳性能^[32]。

Feng Chunyu等^[33]基于扰动链统计缔合流体理论状态方程对R134a/R245fa、R1234yf/R1234ze(Z)、R1234ze(E)/R1224yd(Z)、R1234ze(E)/R1233zd(E)这4组非共沸混合工质进行研究。结果显示,在50、60、70℃的热源温度下,R1234ze(E)/R1233zd(E)均表现出最高的COP与热力学完善度。与基准工质R134a/R245fa相比,COP提高了4.4%~4.9%,热力学完善度达0.85%~1.86%,是替代R134a/R245fa的最佳选择。Zhao Li等^[34]对应用于自复叠热泵的制冷工质进行了选择,验证其在寒冷地区应用的可能性。通过对系统COP的分析,得到了15种二元混合工质。其中,混合工质R143/R600在质量分数为0.8:0.2的配比,环境温度为-10℃,加热温度为50℃时,系统COP最大为2.15,与使用R407C作为制冷工质的单级热泵相当。Chen Jiaheng等^[35]分析了高沸点组分分别为R245fa、R1366mzz(Z)、R1233zd(E),低沸点组分分别为R134a、R290、R1234yf组成的9种不同非共沸混合工质的自复叠热泵性能,发现在给定的工况下,R134a/R1233zd(E)系统COP最大,R290/R245fa的制热量最大,R290/R1233zd(E)的压缩比最小,且COP和制热量只比最大值低4.2%和3.5%,综合性能最好。Ma Xudong等^[36]采用高级焓分析方法对不同混合工质在自复叠热泵中的性能进行对比,发现混合工质R245fa/R1234yf在0.6/0.4的配比下具有更显著的供热能力和输出温度。O. A. Zuev等^[37]模拟了采用混合工质R32/R134a/R365mfc的自复叠热泵性能,发现在环境温度较低时,自复叠热泵COP比复叠式热泵高7%以上。

上述研究中的最佳配比大多通过模拟方法得出,但在自复叠系统实际运行过程中,会由于系统配置、制冷工质相积存等原因使混合工质浓度偏离最佳配比,从而影响系统的性能^[38]。

刘金平等^[39]通过实验发现自复叠热泵系统中存在明显的相积存现象,最高可达充注量的50%以上,且出水温度对相积存的影响显著,出水温度每升高10℃,积存量减少10%~21%。司成功等^[40]通过实验研究了以R32/R134a为混合工质的自复叠热泵系统性能的影响因素,发现出水温度、节流阀开度及制冷工质的充注量均会对系统内的循环浓度变化产生影响。因此,对自复叠热泵系统内混合工质浓度进行实时测量,通过对组分的主动调控,使循环浓度始终

处于最优值,也是提升系统性能的有效途径^[41]。目前,在线测量方法在自复叠制冷系统中已取得初步进展,这些方法也同样适用于自复叠热泵系统。R. Liopis等^[42]通过对相分离器液相出口密度的测量,利用系统各部件的质量与能量平衡设计了计算程序,能够准确预测系统内的循环浓度。Li Yinlong等^[43-44]在此基础上进一步提出双质量流量计测量方法与单质量流量计测量方法,循环浓度的测量结果与气相色谱采样偏差在5%之内。

3 自复叠热泵流程优化

传统自复叠热泵系统的制热量与COP均较低,极大地限制了自复叠热泵的发展与应用,对自复叠热泵系统的循环流程进行合理地优化,能够有效提高自复叠热泵的性能。

3.1 补气增焓式自复叠热泵系统

当环境温度较低时,空气源热泵存在因压缩机压比过高使输送的制冷工质流量降低,导致供热不足的问题^[45]。补气增焓循环也被称为准二级压缩循环,通过向带有喷射口的压缩机喷入制冷工质来降低压缩机的压缩比,同时增加了冷凝器的制冷工质流量,使压缩机的性能与制热量均得到提高^[46]。

Chen Jiaheng等^[35]将补气增焓技术应用到自复叠热泵系统中,提出了一种补气增焓式自复叠热泵系统,并对其进行了能量、焓、经济、环境分析。补气增焓式自复叠热泵循环如图3所示,气液分离器中的高压液体流经节流阀1膨胀为中压两相流体,在冷凝蒸发器1中蒸发为饱和或过热蒸气进入压缩机喷射口。在0~20℃的蒸发温度区间内,补气增焓式自复叠热泵的COP及供热量较传统的自复叠热泵分别提高了51.8%和104.3%,同时拥有较好的焓性能。Cui Mengdi等^[47]提出了一种新型的补气增焓式自复叠热泵系统,系统原理如图4所示,闪蒸箱内的液态高沸点组分一部分经节流后进入冷凝蒸发器蒸发,作为喷射蒸气返回压缩机。另一部分与气态低沸点组分混合进入冷凝蒸发器冷凝,经节流后进入蒸发器。由于混合后的制冷工质包含了一定量的高沸点组分,使蒸发压力提高,降低了压缩机的升压比,提高了压缩机的性能。在相同的制热量下,与带闪蒸罐的补气增焓系统相比,COP提高了6.2%~9.0%;与带回热器的补气增焓系统相比,COP提高了1.8%~3.5%。Ma Xudong等^[48-49]采用高级焓分析方法对采用补气增焓的自复叠地源热泵性能进行了综合评价,通过优化策略从10~20℃的低温热源中制取蒸气,实现大温升的同时显著降低了压缩机排气温度。

之后采用两相制冷工质分离优化策略,在余热温度为30℃时,改进后的系统COP平均提高20.36%,运行经济效益也有较大幅度的提高。

补气增焓技术在自复叠热泵系统中的应用广泛,该技术是当前自复叠热泵系统最为合适的优化方案之一,为自复叠热泵系统排气温度高、性能系数低等问题提供良好解决方案。

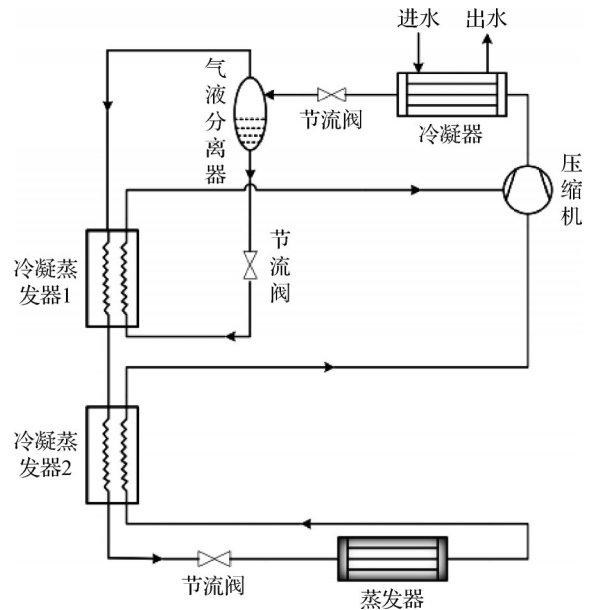


图3 补气增焓式自复叠热泵系统^[35]

Fig.3 Vapor injection auto-cascade heat pump system^[35]

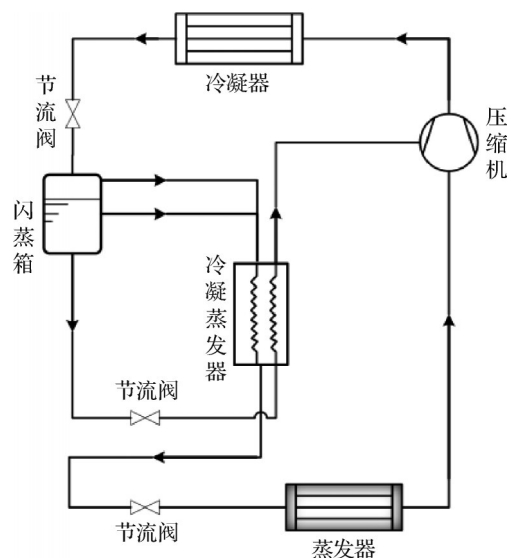


图4 Cui Mengdi等提出的补气增焓式自复叠热泵系统^[47]

Fig.4 Vapor injection auto-cascade heat pump system by Cui Mengdi et al^[47]

3.2 多系统耦合自复叠热泵系统

单独的空气源热泵系统会由于自身的局限性使系统的性能提升有限,与其他系统耦合可以有效提

高热泵系统的热力性能,实现能源的梯级利用^[50]。

贾雪迎等^[51]提出将闭式能源塔热泵技术与自复叠技术相结合,能够在低环境温度下,稳定提供 55 °C 的热水。两系统的耦合不仅提升了能源塔热泵在低温工况的稳定性,同时还解决了传统空气源热泵的结霜问题。Lü Xiaolong 等^[52]提出了一种新型太阳能辅助自复叠热泵系统,如图 5 所示。太阳能集热回路通过闪蒸箱与热泵回路耦合,浸没在闪蒸箱中的盘管式换热器将太阳能集热回路中循环水的热量通过制冷工质传至热泵回路。当低沸点组分 R32 的质量分数在 0.1~0.3 时,与常规的空气源热泵相比,太阳能辅助自复叠热泵系统的 COP 提高了 4.23%~9.85%。Chen Jiaheng 等^[53]提出了一种太阳能辅助补气增焓式自复叠热泵系统,如图 6 所示,根据太阳辐射强度进行工作模式的切换:当太阳辐射强度较低时,截止阀 1 关闭,截止阀 2 开启,为补气增焓模式。当太阳辐射强度足够高时,截止阀 1 开启,截止阀 2 关闭,为太阳能辅助补气增焓模式。建立数学模型后采用遗传算法对系统进行了优化,得到了最佳 COP 的运行参数。在蒸发温度为 0~25 °C 时,太阳能辅助补气增焓自复叠系统的最大 COP 较常规的补气增焓式自复叠系统提高了 17.4%~15.1%,较常规的自复叠热泵提高了 63.8%~61.9%。

多系统耦合能够显著提高自复叠热泵的制热量

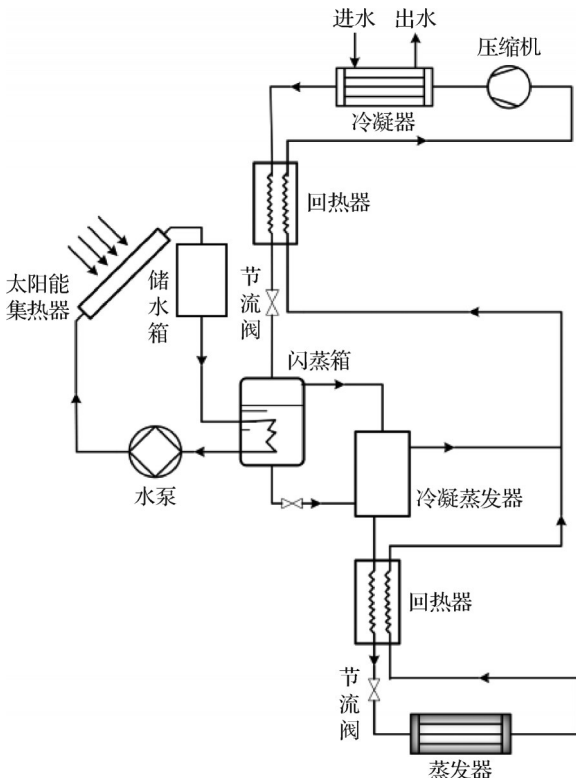


图 5 太阳能辅助自复叠热泵系统^[52]

Fig.5 Solar-assisted auto-cascade heat pump system^[52]

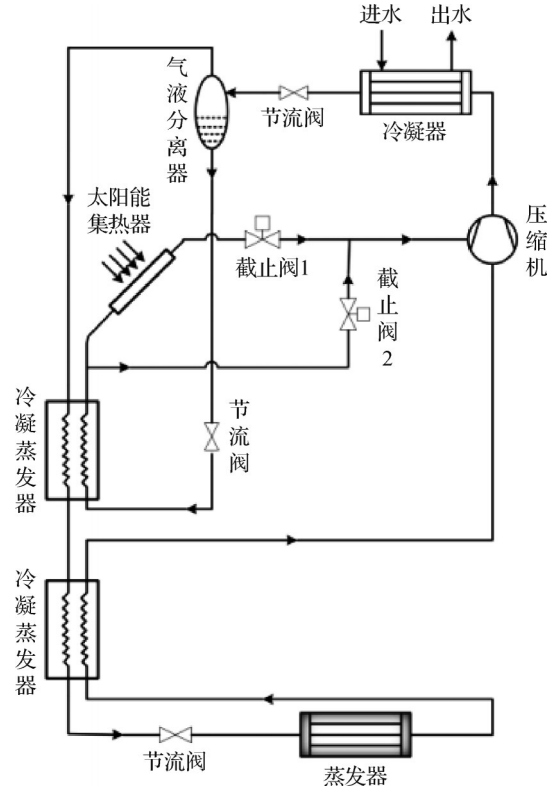


图 6 太阳能辅助补气增焓自复叠热泵系统^[53]

Fig.6 Solar-assisted vapor injection auto-cascade heat pump system^[53]

和 COP,但同时系统的初始投资也相应增加,同时,系统中可能会存在不可逆损失较大的元件如太阳能集热器等,导致系统的焓效率下降。因此,还需要对热泵系统中的关键部件进行进一步研究,从而提高系统的性能。

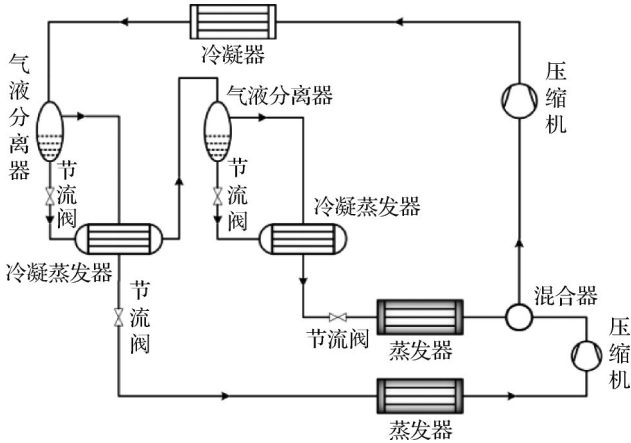
3.3 双压蒸发自复叠热泵系统

多级蒸发技术能将单级蒸发过程转变为以压力为梯度的多级蒸发过程,能有效解决系统在运行过程中压缩机压差过大,热源与制冷工质温度难以匹配的问题。

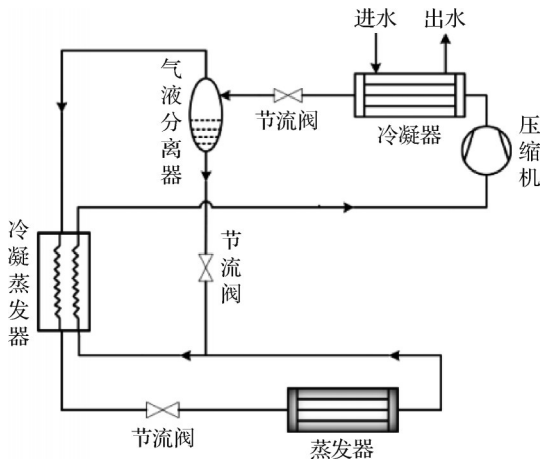
Feng Chunyu 等^[33]提出采用两级分离、双压蒸发技术改善用于生产蒸气的自复叠热泵循环的性能,如图 7 所示,2 个气液分离器将富含低沸点组分的制冷工质引入蒸发器,蒸发压力升高,减少压缩机的功耗。此外,与传统自复叠热泵相比,具有更低的冷凝器出口干度,表明热回收能力更强。经过模拟分析,采用混合工质 R1234ze(E)/R1233zd(E) 的新型自复叠热泵系统较常规的自复叠热泵系统 COP 提高了 24.48%,热力学效率提高了 32.63%。

3.4 增加或改进系统部件

针对传统的自复叠系统冷凝器换热不充分,冷凝器出口制冷工质状态不稳定的问题,陶锴等^[54]提

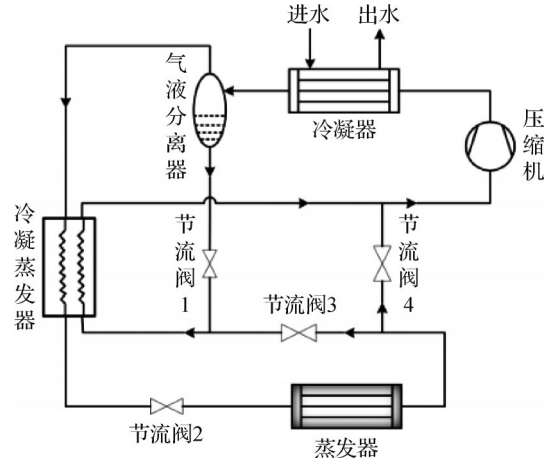
图7 双压蒸发自复叠热泵系统^[33]Fig.7 Dual-pressure evaporation auto-cascade heat pump system^[33]

出了一种带中间节流的自复叠热泵系统,如图8所示。通过在冷凝器与气液分离器之间增加节流元件调节中间压力,实现冷凝器出口制冷工质状态与气液分离器进口制冷工质状态的相对独立,使压缩机在吸气不带液的前提下充分利用冷凝热量,大幅提升系统性能。分析结果显示,带中间节流的自复叠热泵系统的最大COP较传统自复叠热泵提高了19.1%,最大制热量提高了28.9%。

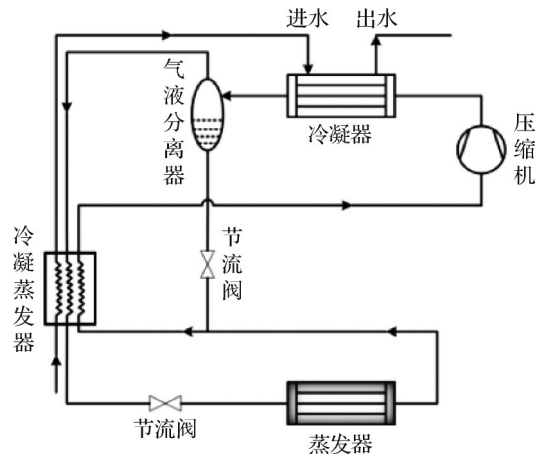
图8 带中间节流的自复叠热泵系统^[51]Fig.8 Auto-cascade heat pump system with intermediate throttling^[51]

赖芬等^[55]提出了一种新型部分自复叠热泵,如图9所示,在蒸发器出口增加2个起分流作用的调节阀,蒸发器出来的冷量一部分进入压缩机降低压缩机排气温度,一部分进入冷凝蒸发器为低沸点组分的冷凝提供冷量。将出蒸发器后分流进入冷凝蒸发器的制冷工质质量分数定义为复叠率,通过控制节流阀3与节流阀4的开度可以改变复叠率,从而调控压缩机排气温度,使压缩机在安全温度下运行。调

节复叠率可使压缩机排气温度降低30℃以上。

图9 新型部分自复叠热泵系统^[52]Fig.9 New partial auto-cascade heat pump system^[52]

杨语晴等^[56]提出了一种级联加热自复叠热泵系统,如图10所示,将冷水先送入复叠换热器被加热至中间温度,再送入冷凝器中二次加热。新循环有助于减少制冷工质和水之间换热时的能量损失和焓损失,提高系统性能。

图10 级联加热自复叠热泵^[53]Fig.10 Modified auto-cascade heat pump system^[53]

3.5 喷射增效自复叠热泵

喷射器具有结构简单,无运动部件的特点,能够回收膨胀功,采用喷射器代替节流阀是减少系统的不可逆损失、提高热泵系统性能的有效途径之一^[57-58]。

Fan Chaochao等^[59-60]研究了混合工质为R32/R290的喷射增效自复叠热泵的性能,系统结构如图11所示。结果显示,喷射增效自复叠热泵在低温环境及高温供热条件下表现出较好的性能。在之后的研究中,将工质改为了R290/R600a。在冷凝温度为100℃,蒸发温度为-10~25℃时,喷射增效自复叠热

泵较传统单级热泵的COP提高了15%~27%，压缩比降低了20%~46%，容积制热量提高了22%~51%。且随着冷凝温度的提高，喷射增效自复叠热泵的优势更加明显。喷射技术在自复叠热泵中的研究还较少，多数都停留在理论层面，还缺乏实验验证。

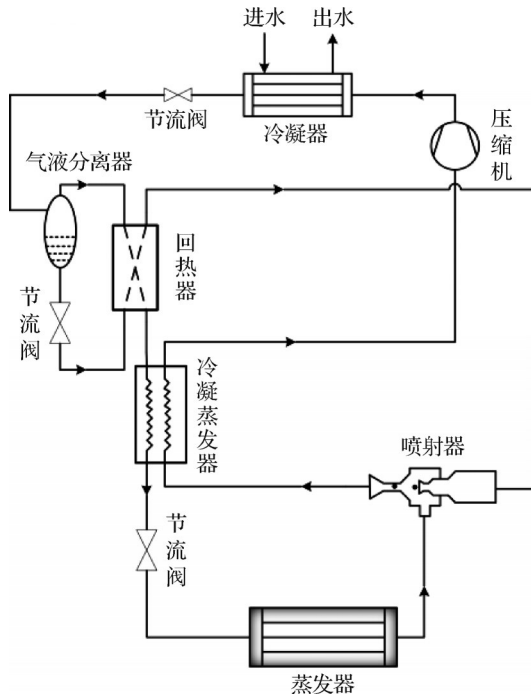


图11 喷射增效自复叠热泵系统^[59-60]

Fig.11 Vapor ejection auto-cascade heat pump system^[59-60]

4 结论与展望

4.1 结论

本文对高温自复叠热泵系统的研究现状进行了综述,从制冷工质优化与自复叠热泵系统流程优化2个方面进行阐述,得到如下结论:

1)低GWP制冷工质替代是当前的研究热点。R1233zd(E)、R1224yd(Z)、R1336mzz(Z)具有较高临界温度,能使自复叠热泵系统向更高温供热方向发展;R290、R1234yf在低温工况下表现优异,适用于低环境温度地区的供热;HC类制冷工质在化工等安全措施完善的场合中具有良好的应用前景。

2)混合工质配比是影响自复叠热泵系统性能的重要因素。实验过程中由于混合工质的组分偏移造成循环浓度与充注浓度存在差异,循环浓度的在线测量与主动调控策略能够使系统始终处在最佳配比。

3)流程优化是提高自复叠热泵系统性能的有效途径。补气增焓技术是目前自复叠热泵系统应用最广泛的技术之一;多级蒸发、喷射技术具有发展潜

力,但多数研究还停留在理论阶段,缺乏实验验证。多系统耦合有利于提高系统性能,实现能源梯级利用,同时会增加系统的成本与复杂度,影响系统的可靠性。

4.2 展望

1)目前,用于自复叠热泵系统的非共沸混合工质,高沸点组分制冷剂主要为R134a、R1234ze(E)、R1233zd(E);低沸点组分制冷剂主要为R32、R290。所选择的非共沸混合工质还较为单一,还有更多的制冷剂组合值得探索,如R1234yf、R600、R744等性能优良的潜力工质。

2)完善组分调控机制,结合先进算法,根据工况变化如热源温度、热负荷等,自动调节系统内混合工质组分配比,以满足工业生产过程中复杂多变的需求。

参考文献

- [1] National Bureau of Statistics of China. National data [EB/OL]. [2025-11-22]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>.
- [2] Energy Institute. Statistical review of world energy [EB/OL]. [2025-11-22]. <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- [3] Chua K J, Chou S K, Yang W M. Advances in heat pump systems: a review [J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3611-3624.
- [4] Zhang Long, Jiang Yiqiang, Dong Jiankai, et al. Advances in vapor compression air source heat pump system in cold regions: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 353-365.
- [5] 芮胜军, 卢向华, 梁坤峰, 等. 自复叠热泵冷凝器设计 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 30-33, 4. (Rui Shengjun, Lu Xianghua, Liang Kunfeng, et al. Condenser design of auto-cascade heat pump [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2013, 34(2): 30-33, 4.)
- [6] 刘鹏鹏, 盛伟, 焦中彦, 等. 自复叠制冷技术发展现状 [J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 45-51. (Liu Pengpeng, Sheng Wei, Jiao Zhongyan, et al. Development status of auto-cascade refrigeration technology [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4): 45-51.)
- [7] 芮胜军, 张华, 张庆钢, 等. 两级分凝自复叠制冷系统特性 [J]. 化工学报, 2013, 64(6): 2029-2035. (Rui Shengjun, Zhang Hua, Zhang Qinggang, et al. Characteristics of two-stage segregation auto-cascade refrigeration system [J]. CIESC Journal, 2013, 64(6): 2029-2035.)
- [8] 罗二仓, 公茂琼, 周远. 30 K ~ 60 K 温区混合工质内复

- 叠节流制冷循环及其实验验证[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(2): 142-146. (Luo Ercang, Gong Maoqiong, Zhou Yuan. A new auto-cascade throttle refrigeration cycle with special cryogenic mixture for achieving the temperature range around 30 K-60 K [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(2): 142-146.)
- [9] 刘建丽, 公茂琼, 吴剑峰, 等. 一种新型分凝分离式混合工质内复叠节流制冷机的实验研究[J]. 低温与超导, 2001, 29(2): 6-11. (Liu Jianli, Gong Maoqiong, Wu Jianfeng, et al. Experimental research on a new type of mixed-refrigerant fractionation refrigeration cycle [J]. Cryogenics and Super Conductivity, 2001, 29(2): 6-11.)
- [10] 刘建丽, 公茂琼, 吴剑峰, 等. 120 K ~ 150 K 温区混合工质内复叠节流制冷机的实验研究[J]. 低温工程, 2001(2): 39-42. (Liu Jianli, Gong Maoqiong, Wu Jianfeng, et al. Experimental research on the mixed-refrigerant auto-cascade cryocooler operating in 120 K-150 K temperature range [J]. Cryogenics, 2001(2): 39-42.)
- [11] Shi Rongxuan, Bai Tao, Wan Jiahao. Performance analysis of a dual-ejector enhanced two-stage auto-cascade refrigeration cycle for ultra-low temperature refrigeration [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 240: 122152.
- [12] Qin Yanbin, Li Nanxi, Zhang Hua, et al. Experimental characterization of an innovative refrigeration system coupled with Linde-Hampson cycle and auto-cascade cycle for multi-stage refrigeration temperature applications [J]. Energy, 2022, 240: 122498.
- [13] Qin Yanbin, Li Nanxi, Zhang Hua, et al. Thermodynamic performance of a modified -150 °C refrigeration system coupled with Linde-Hampson and three-stage auto-cascade using low-GWP refrigerants [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114093.
- [14] Li Yinlong, Chen Qi, Liu Guoqiang, et al. Energy, modified exergy, exergo-economic and exergo-environmental analyses of a separation-enhanced auto-cascade refrigeration cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117801.
- [15] Tan Yingying, Li Xiuzhen, Wang Lin, et al. Thermodynamic performance of the fractionated auto-cascade refrigeration cycle coupled with two-phase ejector using R1150/R600a at -80 °C temperature level [J]. Energy, 2023, 281: 128328.
- [16] Bai Mengjie, Zhao Li, Zhao Ruikai. Review on applications of zeotropic mixtures [J]. Journal of Thermal Science, 2022, 31(2): 285-307.
- [17] Hua Jialiang, He Guogeng, Zhang Zhihao, et al. Study on the hydrocarbon mixtures in high-temperature heat pump systems for industrial waste heat recovery [J]. Energy, 2025, 334: 137886.
- [18] Dubey S, Guruchethan A M, Siva Kumar Reddy Y, et al. Energy, environmental and economic analysis of low GWP refrigerant heat pumps for simultaneous heating and cooling applications [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 51: 102605.
- [19] Ganesan P, Eikevik T M, Hamid K, et al. Thermodynamic analysis of cascade high-temperature heat pump using new natural zeotropic refrigerant mixtures: R744/R600 and R744/R601 [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 215-230.
- [20] Patten K O, Wuebbles D J. Atmospheric lifetimes and Ozone Depletion Potentials of trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoropropylene and trans-1, 2-dichloroethylene in a three-dimensional model [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(22): 10867-10874.
- [21] 吴迪, 胡斌, 姜佳彤. R1233zd(E) 高温热泵实验研究与应用分析 [J]. 化工学报, 2025, 76(S1): 377-383. (Wu Di, Hu Bin, Jiang Jiatong. Experimental study and application analysis of R1233zd(E) high temperature heat pump [J]. CIESC Journal, 2025, 76(S1): 377-383.)
- [22] Mateu-Royo C, Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J. Semi-empirical and environmental assessment of the low GWP refrigerant HCFO-1224yd (Z) to replace HFC-245fa in high temperature heat pumps [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 127: 120-127.
- [23] Bani Issa A A, Liang Changkuan, Groll E A, et al. Residential heat pump and air conditioning systems with propane (R290) refrigerant: Technology review and future perspectives [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 266: 125560.
- [24] Zini A, Soggi L, Vaccaro G, et al. Working fluid selection for high-temperature heat pumps: a comprehensive evaluation [J]. Energies, 2024, 17(7): 1556.
- [25] 何永宁, 曹文良, 王苏澳, 等. 低 GWP 工质高温热泵系统应用研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(6): 3009-3017. (He Yongning, Cao Wenliang, Wang Suao, et al. Application research of high-temperature heat pump system with low GWP refrigerants [J]. CIESC Journal, 2025, 76(6): 3009-3017.)
- [26] Bamigbetan O, Eikevik T M, Neksa P, et al. Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 92: 185-195.
- [27] 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.
- [28] Zhang Xuedong, Xu Huimin. Experimental performance of moderately high temperature heat pump with working fluid

- R1234ze (Z) [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 144(4): 1535–1545.
- [29] Molés F, Navarro-Esbrí J, Peris B, et al. Theoretical energy performance evaluation of different single stage vapour compression refrigeration configurations using R1234yf and R1234ze (E) as working fluids [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 44: 141–150.
- [30] Sulaiman A Y, Cotter D F, Le K X, et al. Thermodynamic analysis of subcritical High-Temperature heat pump using low GWP Refrigerants: a theoretical evaluation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 268: 116034.
- [31] Yıldız A, Yıldırım R. Experimental investigation of exergy, exergoenvironmental and exergoenvironmental analysis of the heat pump system [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19 (11): 10737–10746.
- [32] 李光斌, 王传华, 廖永章, 等. 基于减小中间换热器焓损的自复叠热泵系统最佳工质循环配比分析及实验研究 [J]. *暖通空调*, 2025, 55(2): 94–101. (Li Guangbin, Wang Chuanhua, Liao Yongzhang, et al. Analysis and experimental study on optimal working fluid mixture ratio of auto-cascade heat pump systems based on reducing intermediate heat exchanger exergy loss [J]. *Journal of HV&AC*, 2025, 55(2): 94–101.)
- [33] Feng Chunyu, Guo Cong, Chen Junbin, et al. Thermodynamic analysis of a dual-pressure evaporation high-temperature heat pump with low GWP zeotropic mixtures for steam generation [J]. *Energy*, 2024, 294: 130964.
- [34] Zhao Li, Zheng Nan, Deng Shuai. A thermodynamic analysis of an auto-cascade heat pump cycle for heating application in cold regions [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 621–631.
- [35] Chen Jiaheng, Chen Qi, Qin Xiang, et al. Energy, exergy, economic and environmental analyses and optimization of a novel vapor injection autocascade heat pump for high-temperature water heating [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 267: 115909.
- [36] Ma Xudong, Du Yanjun, Wu Yuting, et al. Performance improvement of air-source autocascade high-temperature heat pumps using advanced exergy analysis [J]. *Energy*, 2024, 307: 132673.
- [37] Zuev O A, Garanov S A, Ivanova E V, et al. Investigation of the efficiency of autocascade and cascade heat pumps in cold climate [J]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, 56(5): 448–455.
- [38] 芮胜军, 张华, 陈曦, 等. 自复叠制冷系统工质成分分析 [J]. *低温与超导*, 2013, 41(3): 74–77. (Rui Shengjun, Zhang Hua, Chen Xi, et al. Composition analysis of auto-cascade refrigeration system [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2013, 41(3): 74–77.)
- [39] 刘金平, 朱宇龙. 非共沸混合工质自复叠热泵相积存实验研究 [J]. *制冷学报*, 2009, 30(6): 5–10. (Liu Jinping, Zhu Yulong. Experimental study on phase holdup in auto-cascade heat pump with zeotropic mixture [J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(6): 5–10.)
- [40] 司成功, 郭健翔, 孙晋飞, 等. R32/R134a 自复叠热泵变组分浓度实验分析 [J]. *高校化学工程学报*, 2024, 38(4): 538–547. (Si Chengong, Guo Jianxiang, Sun Jinfei, et al. Experimental study on concentration control of variable components in auto-cascade heat pumps using R32/R134a [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2024, 38(4): 538–547.)
- [41] 李银龙, 刘国强, 刘嘉瑞, 等. 自复叠制冷系统及其组分分离、迁移与调控研究进展 [J]. *制冷学报*, 2024, 45(1): 1–17. (Li Yinlong, Liu Guoqiang, Liu Jiarui, et al. Review of research progress on auto-cascade refrigeration systems and component separation, migration, and regulation [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(1): 1–17.)
- [42] Llopis R, Martínez-Ángeles M, García-Valero M. A novel method to measure the energy efficiency and performance of an auto-cascade refrigeration cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121146.
- [43] Li Yinlong, Yan Gang, Jing Dongliang, et al. A novel online measurement method for compositions and energy performance of an auto-cascade refrigeration system [J]. *Energy*, 2025, 318: 134780.
- [44] 李银龙, 景栋梁, 刘国强, 等. 自复叠制冷系统的组分在线测量方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(4): 139–147. (Li Yinlong, Jing Dongliang, Liu Guoqiang, et al. Online measurement method for components of auto-cascade refrigeration system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(4): 139–147.)
- [45] Bertsch S S, Groll E A. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U. S. climates [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(7): 1282–1292.
- [46] Xu Xing, Hwang Y, Radermacher R. Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: Literature review and challenges discussions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(2): 402–415.
- [47] Cui Mengdi, Cheng Zuo, Wang Baolong, et al. Experimental investigation on an auto-cascade quasi two-stage compression heat pump system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119498.
- [48] Ma Xudong, Du Yanjun, Wu Yuting, et al. Performance

- evaluation and optimization guidance for steam generating heat pumps with significant temperature lift [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105351.
- [49] Ma Xudong, Du Yanjun, Li Bingqi, et al. Enhancing the performance of autocascade steam generating heat pumps through advanced exergy methods [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 332: 119705.
- [50] 张振亚, 曹浩宁, 金听祥, 等. 补气增焓热泵技术的研究现状及展望[J]. *制冷学报*, 2024, 45(2): 12-21. (Zhang Zhenya, Cao Haoning, Jin Tingxiang, et al. Research status and prospect of vapor injection heat pump technology [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(2): 12-21.)
- [51] 贾雪迎, 梁坤峰, 王林, 等. 带有能源塔的自复叠热泵系统及其热力分析[J]. *低温与超导*, 2015, 43(8): 77-82. (Jia Xueying, Liang Kunfeng, Wang Lin, et al. Thermodynamic analysis of heat pump system with energy tower based on auto cascade refrigeration circle [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2015, 43(8): 77-82.)
- [52] Lü Xiaolong, Yan Gang, Yu Jianlin. Solar-assisted auto-cascade heat pump cycle with zeotropic mixture R32/R290 for small water heaters[J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 167-172.
- [53] Chen Jiaheng, Wang Dingbiao, Zhang Guojie, et al. 4E analyses of a novel solar-assisted vapor injection autocascade high-temperature heat pump based on genetic algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 299: 117863.
- [54] 陶镔, 晏刚, 张敏, 等. 具有中间压力调节功能的新型自复叠热泵[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 43-47. (Tao Kai, Yan Gang, Zhang Min, et al. A novel auto-cascade heat pump with intermediate pressure adjustment [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 43-47.)
- [55] 赖芬, 吴裕远, 欧阳前武, 等. 新型部分自复叠热泵的理论研究[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(3): 15-20. (Lai Fen, Wu Yuyuan, Ouyang Qianwu, et al. Theoretical research on a new partial auto-cascade heat pump [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(3): 15-20.)
- [56] 杨语晴, 李银龙, 晏刚. 采用低GWP制冷剂的级联加热自复叠高温热泵循环热力学分析[J]. *化工学报*, 2025, 76(S1): 43-53. (Yang Yuqing, Li Yinlong, Yan Gang. Thermodynamic analysis of auto-cascade high-temperature heat pump cycle using low GWP refrigerant [J]. *CIESC Journal*, 2025, 76(S1): 43-53.)
- [57] Bai Tao, Yan Gang, Yu Jianlin. Experimental investigation on the dynamic malfunction behavior of the two-phase ejector in a modified auto-cascade freezer refrigeration system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 382-390.
- [58] Liu Shuilong, Bai Tao, Wei Yuan, et al. Performance analysis of a modified ejector-enhanced auto-cascade refrigeration cycle[J]. *Energy*, 2023, 265: 126334.
- [59] Fan Chaochao, Yan Gang, Yu Jianlin. Theoretical study on a modified heat pump cycle with zeotropic mixture R32/R290 for district heating in cold region [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 702-707.
- [60] 樊超超, 晏刚, 鱼剑琳. 一种新型空气源高温热泵的热力学分析[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(1): 83-88. (Fan Chaochao, Yan Gang, Yu Jianlin. Thermodynamic analysis of a modified air source high temperature heat pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(1): 83-88.)

通信作者简介

芮胜军, 男, 副教授, 河南科技大学车辆与交通工程学院, 0379-64231480, E-mail: sjrui@163.com。研究方向: 制冷装置性能优化及节能, 环保混合制冷剂热物理性能研究。

About the corresponding author

Rui Shengjun, male, associate professor, Vehicle and Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, 86-379-64231480, E-mail: sjrui@163.com. Research fields: novel refrigeration cycle system, thermophysical properties of environmentally friendly refrigerants.

(责任编辑:王亚薇)