

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250703002

## 多联机系统低 GWP 制冷剂替代及润滑油技术发展

贺红霞 杨昭 张淑萍

(天津大学机械工程学院 天津 300072)

**摘要** 在全球应对气候变化和加速制冷剂低碳转型的背景下,多联机系统低 GWP 制冷剂替代技术研究已成为制冷空调领域的重要课题。本文系统综述了多联机系统低 GWP 制冷剂替代技术的研究进展。通过构建“政策-性能-技术”三维分析框架,深入分析了全球主要经济体法规政策对技术路线的影响,评估了 R32、R454B 等替代制冷剂的热物性特征。研究表明,R32 在能效方面较 R410A 提升 2.1%~10.2%,但需加强 A2L 可燃性管控;R454C 等低 GWP 制冷剂虽满足环保要求,却存在 5.9%~7.6% 的能效损失。研究重点评述了压缩机优化、润滑油控制、长距离输配等关键技术突破,特别探讨了基于深度学习的智能充注量诊断技术和二次回路系统在降低可燃制冷剂充注量方面的安全解决方案。针对材料可靠性、系统匹配性等挑战,提出了分阶段实施的技术路线。本综述不仅为多联机行业低碳转型提供了系统的理论支撑,同时也为相关政策制定和技术研发方向提供了重要参考。

**关键词** 多联机系统;制冷剂替代;安全应用;系统优化

中图分类号:TB61\*2;TU831.3

文献标识码:A

## Advancements in Low-GWP Refrigerant Substitution and Lubricant Technologies for Variable Refrigerant Flow Systems

He Hongxia Yang Zhao Zhang Shuping

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract** Against the backdrop of global climate change mitigation and the accelerating transition toward low-GWP refrigerants, research on alternative refrigerants for variable refrigerant flow (VRF) systems has emerged as a critical focus in refrigeration and air conditioning. This paper presents a comprehensive review of recent advances in low-GWP refrigerant replacement technologies for VRF systems. A three-dimensional analytical framework encompassing "policy-performance-technology" was developed to systematically evaluate the influence of regulatory policies in major global economies on technological pathways and to assess the thermophysical properties of alternative refrigerants such as R32 and R454B. The findings indicated that R32 offered a 2.1%–10.2% improvement in energy efficiency compared with R410A although stricter control measures were required because of its A2L flammability classification. In contrast, low-GWP refrigerants, such as R454C, met environmental requirements but resulted in a 5.9%–7.6% decline in energy efficiency. Key technological breakthroughs were reviewed, including compressor optimization, lubricant management, and long-distance refrigerant distribution. Special emphasis was placed on safety-enhancing solutions such as intelligent refrigerant charge diagnostics based on deep learning and the application of secondary loop systems to reduce the charge of flammable refrigerants. To address the challenges related to material compatibility and system integration, a phased implementation roadmap was proposed. This review provided a systematic theoretical foundation for the low-carbon transition of the VRF industry and offered valuable insights for future policymaking and technology development.

**Keywords** variable refrigerant flow system; refrigerant substitution; safe application; system optimization

近年来,全球气候变化治理进程加速推进,制冷空调行业面临着前所未有的低碳转型压力。作为建筑能源系统的关键组成部分,多联式空调(热泵)机组<sup>[1]</sup>(简称:多联机)因其出色的节能特性、分布式制冷剂调控能力以及多末端独立温控优势,在中国中

央空调市场占据着举足轻重的地位。

中国多联机系统制冷剂的演进历程折射出全球环保政策与本土技术创新的深度融合。从早期普遍采用的 R22,到后来占据主导地位的 R410A,再到当前备受关注的 R32 和 R454B 等,每一次制冷剂更迭均

基金项目:国家自然科学基金(52476015)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52476015).)

收稿日期:2025-07-03;修回日期:2025-08-15;录用日期:2025-08-19

伴随着能效提升和环保性能改善。

中国2021年9月正式接受《基加利修正案》，2024年1月正式实施HFCs配额管理制度。2025年4月生态环境部联合国家发展改革委、工业和信息化部、商务部、海关总署正式发布《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案(2025—2030年)》<sup>[2]</sup>(简称:国家方案),进一步凸显了制冷剂替代研究的紧迫性和现实意义。

多联机系统因其独特的分布式结构(单/多外机连接多内机、长配管设计)和复杂的变工况运行要求(宽温域、多联供模式),使得制冷剂选择必须兼顾系统能效与安全性平衡。当前,中国多联机系统制冷剂替代面临多重挑战。一方面,现有主流制冷剂R410A的GWP(全球变暖潜值,Global Warming Potential)高达2 088,明显不符合未来环保要求;另一方面,潜在替代品如R32和R454B等在安全性、系统兼容性等方面存在诸多技术瓶颈。

本文基于多联机行业的技术发展动态与全球政策演进趋势,从区域法规差异、替代制冷剂热力学特性及关键技术突破等维度,系统性地对多联机系统制冷剂替代路径开展深入分析。通过构建多维度评价体系,为行业遴选最优替代方案提供理论支撑与工程指导,同时助力我国在国际标准制定中掌握技术话语权。

## 1 多联机制冷剂区域法规分析

相较于房间空调器的小充注量和冷水机组的高充注量,多联机的中等充注量特性使其既面临严格的易燃制冷剂安全标准要求,又需保持优异的变负荷性能。在《基加利修正案》的全球履约背景下,各缔约方的制冷空调行业正通过构建多维政策体系,加速推进该行业制冷剂替代进程。

### 1.1 中国

中国工商制冷空调行业通过第一阶段(2011—2015)HCFCs的淘汰工作,已顺利实现了多联机领域HCFCs的淘汰和HFCs替代工作,目前多联机行业已实现R22向R410A的成功转换。经过十余年发展,R410A多联机技术已处于全球行业领先水平。2020年12月,中国工商制冷空调行业制冷剂替代的第二阶段(2021—2026)HCFCs淘汰管理计划与2023年3月生态环境部对外合作与交流中心启动《中国工商制冷空调行业多联式空调(热泵)机组子行业禁止使用HCFCs作为制冷剂的可行性研究及政策影响评估》项目,将进一步实现R22多联机的淘汰。

中国多联机行业制冷剂替代方向尚不明确。生

态环境部发布的《中国含氢氯氟烃替代品推荐名录》征求意见稿中,曾建议多联机行业采用R32替代R22。综合考虑中国当前R32多联机的技术可行性与成熟度,在该推荐名录正式发布时并未包含多联机制冷剂替代建议。

2025年4月正式发布的国家方案明确指出将逐步削减HCFCs和HFCs受控用途的生产和使用。参考房间空调器制冷剂替代进程,多联机行业冷媒替代工作仍迫在眉睫。

### 1.2 日本

2023年3月,日本经济产业省通过《氟碳化合物的合理使用和适当管理法》修正条例<sup>[3]</sup>,提出日本将于2025年起禁止在单冷型多联机新产品中使用GWP>750的制冷剂、自2027年起禁止在热泵型与寒冷地区应用的多联机新产品中使用GWP>750的制冷剂。

日本冷冻空调工业会于2025年4月1日发布了JRAGL-16:2025商用空调A2L类制冷剂安全使用修订指南<sup>[4]</sup>,要求在商用空调(以多联机为主)中使用R32时必须配备安全截断阀与警报装置,必要时需增加机械通风装置,以防易燃制冷剂泄漏发生安全事故。

### 1.3 欧盟

欧盟于2024年3月生效的《含氟温室气体法规》(F-gas, 2024/573)<sup>[5]</sup>对空调/热泵产品提出了分阶段管控要求,如表1所示。

最新修订的欧盟F-Gas法规虽然并未针对多联机设备设定具体的制冷剂GWP限值要求,由于多联机系统本身所具有的大容量、高充注量等特征,使得向欧洲市场出口多联机产品的制造企业仍然面临着来自该法规的实际约束和影响。这种影响主要体现在制冷剂选择、产品设计以及市场准入等多个方面。

全氟和多氟化合物(per and polyfluoroalkyl substances, PFAS),是含有至少1个完全氟化碳原子的全氟烷基和多氟烷基物质。已有的毒理研究表明PFAS会对实验动物造成肝脏毒性、发育与生殖毒性、遗传和免疫毒性以及致癌性。2023年欧盟出台的PFAS限制法案<sup>[6]</sup>提出了包含对HFCs、HFOs等制冷剂的限制内容,制冷空调行业主要制冷剂与PFAS法案关系如表2所示。

当前,欧盟PFAS限制法案正处于立法评估的关键阶段,相关技术委员会陆续召开了专项会议,就法案的具体实施细则、过渡期安排以及最终生效时间等核心议题进行深入讨论。虽然该法案目前尚处于提案评估期,但其潜在的监管影响已经对制冷空调与热泵行业的制冷剂替代路线产生了实质性冲击,

表 1 欧盟 F-gas 2024/573 修订案针对分体式空调与热泵产品的规定

Tab.1 Provisions of EU F-gas Regulation 2024/573 for split-type air conditioners and heat pumps

产品名称	制冷剂及GWP限制	实施日期
制冷剂充注量<3 kg	含氟制冷剂 GWP<750	2025-01-01
额定容量≤12 kW 的水冷系统	含氟制冷剂 GWP<150*	2027-01-01
额定容量≤12 kW 的风冷系统	含氟制冷剂 GWP<150*	2029-01-01
分体式空调/热泵	额定容量≤12 kW	禁止使用含氟制冷剂*
	额定容量>12 kW	含氟制冷剂 GWP<750*
		含氟制冷剂 GWP<150*

注:\*表示安装现场有特殊安全要求的场景除外。

表 2 相关制冷剂的 PFAS 属性

Tab.2 PFAS properties of relevant refrigerants

制冷剂	是否为 PFAS 法案限制物质
R410A	是
R32	否,豁免
R1234yf	是
R1234ze(E)	是
R452B	是
R454B	是
R454C	是
R290	否

特别是在低 GWP 替代工质的选择方面带来了额外的技术挑战。值得注意的是,R32 作为当前主流替代制冷剂获得了临时豁免资格,从法案完成评估到最终实施之间的政策缓冲期,为多联机行业推进制冷剂替代工作提供了宝贵的时间窗口。这一过渡期对于多联机企业完成技术储备、产线改造以及市场布局具有重要意义。

### 1.4 美国

美国制冷剂管控政策体系正在经历重要调整。2020 年 12 月美国国会通过 American Innovation and Manufacturing Act 法案<sup>[7]</sup>(简称:AIM 法案)。要求在新的制冷、空调和热泵设备中逐步减少高 GWP 制冷剂的使用,加速 HFCs 淘汰进程。2023 年 12 月修订案进一步明确,自 2026 年 1 月起,多联机产品(包括水冷系统与额定容量 15 kW 以上的风冷系统)将禁止使用 GWP>700 的制冷剂。值得注意的是,随着美国政策环境的变化,美国环境保护署于 2025 年 3 月宣布将重新评估 AIM 法案实施细则<sup>[8]</sup>,这一调整可能导致原定技术要求和时间期限发生一定变更,给制冷和空调行业的发展带来不确定性。

此外,加利福尼亚州具有更超前的立法动向,

2025 年 2 月提出的 SB 682 法案<sup>[9]</sup>拟定从 2040 年起,除特殊情况与联邦法律规定外,将全面禁止含 PFAS 产品的销售,其适用范围明确包含制冷剂等化学品。该法案目前正处于立法审议阶段,其最终通过与否将对全美制冷剂管理政策产生示范效应。

目前,全球主要经济体均已颁布了淘汰 HFCs 的相关法规,如图 1 所示。

从政策层面来看,全球多联机制冷剂替代工作正处于关键转型期,各国基于《基加利修正案》框架制定了差异化的实施路径。中国已完成 R22 淘汰并确立 R410A 主导地位,但新一代替代路线尚未明确;日本通过《氟碳化合物管理法》明确设定了 GWP<750、GWP<150 的阶段性目标;欧盟 F-gas 法规采取分阶段、分产品类型的渐进式管控策略,同时 PFAS 限制提案为替代工作带来新的变数;美国通过 AIM 法案构建全国管控体系,而加州 SB 682 法案的 PFAS 禁令可能引领全美政策走向。这些政策差异不仅直接影响制冷剂选择,也对技术研发方向提出了不同要求。

## 2 替代制冷剂

### 2.1 潜在替代制冷剂筛选

中国多联机行业已顺利完成由 R22 向 R410A 的技术转型,目前正处于向低 GWP 制冷剂过渡的关键时期。基于当前技术发展现状,多联机系统适用的替代制冷剂可系统性地分为 2 大类:单质制冷剂和混合制冷剂,具体技术参数对比如表 3 所示。

在单质制冷剂领域,R32 因其适中的 GWP、优良的热力性能以及在房间空调器中相对成熟的应用经验,已成为现阶段最具潜力的替代选择;而在混合制冷剂方面,行业重点关注 R452B、R454B、R454C 和 R466A 等新型工质。值得注意的是,这些混合制冷剂由于组分差异呈现出显著不同的温度滑移特性:R454B 和 R452B 的温度滑移相对较小(分别为 0.9 °C



图1 全球主要经济体多联机相关环保法规概览

Fig.1 Overview of environmental regulations for VRF systems in major global economies

和 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),可以避免因制冷剂泄漏导致制冷剂组分的改变,进而影响整机运行性能;而R454C则表现出较大的温度滑移(约 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),这种特性虽然可能提升传热效率,但也带来了换热器设计优化和膨胀阀控制策略调整的新要求。这些混合制冷剂通过精确的组分调配,在安全性、环保性和系统兼容性等方面展现出差异化优势<sup>[10]</sup>。其中,R466A因含有特殊组分三氟碘甲烷(CF<sub>3</sub>I)而需要特别关注:一方面,其碘元素含量较高,要求系统采用无锌零部件以避免腐蚀;另一方面,还需配套开发专用润滑油体系。这些技术细节,特别是温度滑移带来的传热特性和系统控制变化,对系统设计和维护提出了新的挑战,需要在替代方案选择时予以充分考虑。

## 2.2 热力学与系统性能影响

根据多联机的应用特点,以GB/T 18429—2018标准,空调(热泵)机组在制冷工况为参考,利用NIST分别计算各替代制冷剂的理论循环性能,结果如表3所示。R32在热力学性能方面表现突出,其蒸发压力和冷凝压力与R410A基准值最为接近,理论COP(性能系数,coefficient of performance)较R410A略有提升。R32具有较高的单位质量制冷量,使得系统充注量可相应减少。同时,R32具有较高的单位容积制冷量,使其在系统紧凑性方面具有明显优势。然而,R32排气温度相较于R410A系统提升了约20%,这对压缩机材料选择和冷却提出了更高要求。R452B和R454B表现出良好的性能平衡性。二者工作压力略低于R410A,单位容积制冷量略低于R410A,单位质量制冷量较R410A略有提升,理论COP与R410A相

接近。相比之下,R454C具有较低的蒸发压力,但其单位质量制冷量与容积制冷量较低,在系统中需要较大的充注量。R466A的压力参数、相对容积制冷量与R410A几乎一致,单位质量制冷量略有降低,其充注量相较R410A可能略有上升。

在流动换热研究方面,N. Tran等<sup>[13]</sup>通过实验研究了POE32和POE68润滑油对R410A、R32和R454B的流动换热性能的影响。研究表明,R454B的传热系数比R32和R410A高约4%~5%。润滑油的加入显著降低了传热系数,并增加了压降,且该影响随着含油量的增加而加剧。对于R32,当含油量为3%时,POE68对传热系数的影响显著大于POE32。C. Y. Hsu等<sup>[14]</sup>对比测试了R32、R1234yf、R410A和R452B在光管与翅片管中的换热性能。结果表明,R32的传热系数最高,其次是R410A,而R452B和R454B的传热系数较低且相差较小。特别地,R452B在翅片管中的传热系数约为光管的2.84~3.87倍。相比池沸腾,R452B和R454B的降膜蒸发传热系数分别下降了18.2%和14.5%。李庆普等<sup>[15]</sup>通过热阻分离法分析了R32在不同孔径水平管内的蒸发传热能力。结果表明,随着R32质量流量的增加,管内传热系数和压降均显著提高,且管径对传热系数的影响较大。刘相增等<sup>[16]</sup>通过冷凝实验发现,R32在人字纹管、涟漪纹管和光滑管中的传热系数存在显著差异,其中人字纹管的传热系数最高,换热性能最为优异;涟漪纹管的摩擦压降最高。通过优化管型选择,可以显著提升R32在多联机系统中的换热性能。

根据AHRI 210/240与GB/T18837—2015测试工

表3 替代制冷剂的热物性参数<sup>[10-12]</sup>  
 Tab.3 Thermophysical properties of alternative refrigerants<sup>[10-12]</sup>

参数	R410A	R32	R452B	R454B	R454C	R466A
安全等级	A1	A2L	A2L	A2L	A2L	A1
GWP <sub>100</sub>	2 088 <sup>a</sup>	675 <sup>a</sup>	698 <sup>a</sup>	466 <sup>a</sup>	148 <sup>a</sup>	733 <sup>a</sup>
组分	R32/R125	—	R32/R125/R1234yf	R32/R1234yf	R32/R1234yf	R32/R125/R131I
临界温度/°C	71.34	78.11	77.10	78.10	85.67	73.13
泡点/露点温度 <sup>b</sup> /°C	-51.6/-51.5	—	-51.0/-50.3	-50.9/-50.0	-46.0/-37.8	-51.7/-51.0
温度滑移/°C	0.1	—	0.7	0.9	8.2	0.7
临界压力/MPa	4.90	5.78	5.22	5.27	4.32	5.28
燃烧速度/(cm/s)	—	6.7	4.2 <sup>c</sup>	<4.0 <sup>c</sup>	<4.0 <sup>c</sup>	—
LFL/(kg/m <sup>3</sup> )	—	0.307	0.309	0.307	0.286	—
UFL/(kg/m <sup>3</sup> )	—	0.669	0.672	0.687	0.632	—
最小点火能量/mJ	—	29	—	—	—	—
自燃温度/°C	—	648	—	—	444	—
压比 <sup>d</sup>	3.42	3.44	3.42	3.42	3.66	3.32
排气温度 <sup>e</sup> /°C	92.4	112.0	97.5	98.0	78.6	99.3
单位质量制冷量 <sup>f</sup> /(kJ/kg)	159.5	243.1	187.6	191.0	130.4	141.8
单位容积制冷量 <sup>g</sup> /(kJ/m <sup>3</sup> )	5 618	6 200	5 515	5 462	3 245	5 746

注:a表示AR4;b表示0.101 3 MPa;c表示ISO 817-2024工况;d表示蒸发温度7 °C/吸气温度18.5 °C/冷凝温度54.5 °C/过冷度8.5 °C/压缩机效率0.8;LFL表示可燃下限;UFL表示可燃上限。

况与中国典型地区气候条件,以某多联机企业风冷式样机参数为基础,对制冷季节能效比(cooling seasonal performance factor, CSPF)、制热季节能效比(heating seasonal performance factor, HSPF)、机组全年能源消耗效率(annual performance factor, APF)展开计算分析。

基于4个典型气候区城市的多联机系统性能数据(以R410A为基准工况),不同替代制冷剂展现出显著的性能差异。如图2所示,R32在CSPF、HSPF和APF这三项关键能效指标上均优于R410A及其他候选制冷剂,其性能提升幅度分别为2.1%~10.2%。具体而言,R466A的能效表现虽不及R32,但更接近R410A基准值。在其余替代制冷剂中,R454C的3项能效指标较R410A略有降低,但仍优于R452B。值得注意的是,R454B的性能降幅最为显著,其CSPF、HSPF和APF分别较R410A下降5.9%、7.6%和5.9%。上述性能排序在4个典型气候区城市中均保持一致。

### 3 替代关键技术

#### 3.1 压缩机性能优化技术

多联机系统的室外机通常采用变频双转子压缩

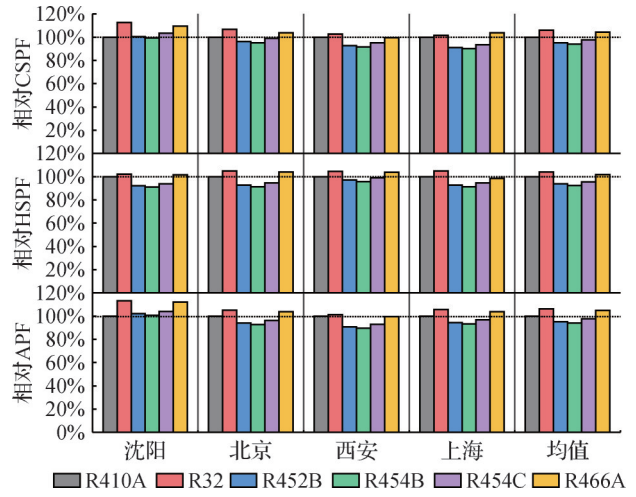


图2 不同替代制冷剂在多联机系统中的性能表现  
 Fig.2 Performance characteristics of alternative refrigerants in VRF systems

机、变频涡旋压缩机或其组合配置,以满足不同环境温度与负荷条件下的动态响应需求。作为系统的核心部件,压缩机性能直接决定了运行效率与安全性。针对低GWP替代制冷剂的特性,目前已发展出多种压缩机优化技术,旨在提升性能或改善排气条件。

D. Kim等<sup>[17]</sup>通过热泵实验验证,发现采用两相制冷剂喷射技术的涡旋压缩机系统相较于传统R32系统,制热能力与COP分别提升6.2%和2%,显著降

低了排气温度,使其在极端工况下仍能维持高频运行。Yang Minghong等<sup>[18]</sup>对比研究了两相吸气、液相喷射及两相喷射技术对R32涡旋压缩机排气温度的影响,结果表明两相喷射技术的制冷量与COP分别较其他方式提升11.8%和4.8%。杨絮霏等<sup>[19]</sup>进一步提出多级制冷剂喷射技术,可实现近等温压缩,大幅提升压缩机效率。D. Kang等<sup>[20]</sup>的实验显示(图

3),在-20℃工况下,双气相喷射系统的制热能力较单气相喷射提升22.1%,且制冷/制热性能均更优。Yang Minghong等<sup>[21]</sup>开发的中间旁通排气涡旋压缩机,通过减少压缩过程能量损失,使多联机系统中在低压比条件下依然能够保持较高的等熵效率,性能提升了23.9%。B. Min等<sup>[22]</sup>的研究表明,多流路旁通与喷射循环可使系统制冷能力提升3.22%~13.43%。

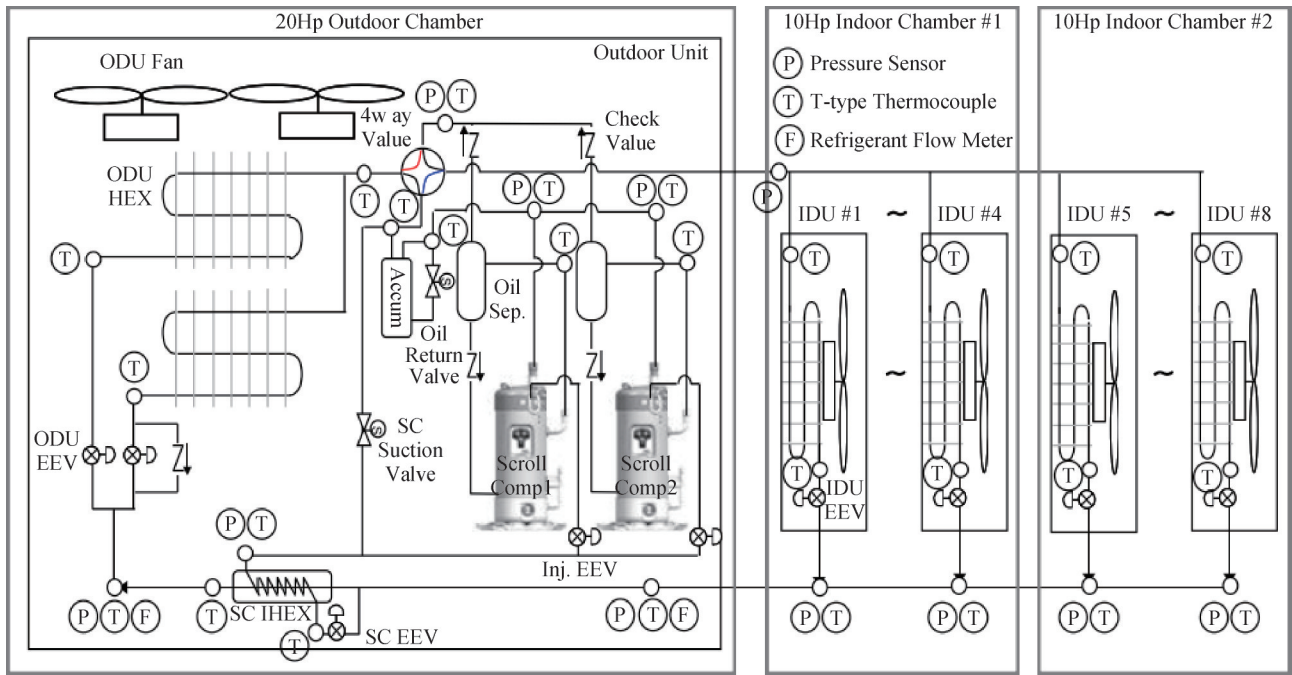


图3 双气相制冷剂喷射多联机系统循环<sup>[20]</sup>

Fig.3 Cycle of dual-gas-phase refrigerant injection VRF system<sup>[20]</sup>

压缩机作为多联机系统的核心部件,其性能优化对提升系统能效和可靠性至关重要。当前研究通过两相喷射、多级压缩、旁通排气等创新技术,有效解决了低GWP制冷剂应用中排气温度过高、压比过大等关键问题,为新型环保制冷剂的推广应用提供了重要技术支撑。未来需进一步探索变工况下的压缩机适应性优化,以满足多联机系统宽范围运行的特性需求。

### 3.2 润滑油循环优化技术

由于制冷剂与润滑油的互溶性,压缩机内润滑油易被制冷剂气流携带至管路系统。多联机系统的长距离、高落差管路特性导致润滑油滞留量显著高于分体式空调,可能引发压缩机缺油、换热器油膜增厚等问题,进而影响系统可靠性与传热效率。因此,回油技术是系统设计与制冷剂替代的关键。

Yan Ziteng等<sup>[23]</sup>建立了多联机管路滞油量模型,实验验证其可准确预测油滞留分布,结果显示管路滞油量占比达20%~80%,提高蒸发温度或混合物流

量可有效减少滞油量。杜文超等<sup>[24]</sup>提出“四通阀持电状态不换向+压缩机按回油频率运行”的不停机回油方案,实验证实其可靠性。王善云等<sup>[25]</sup>通过优化油分离器安装位置显著改善回油效果,并指出降低压缩机启动时升频速率与增大油分容积是改善多联机系统空油现象的关键措施。

润滑油循环优化是多联机系统可靠运行的关键技术挑战。通过建立滞油量预测模型、优化油分离器布置、改进回油控制策略等措施,可显著提升系统稳定性。未来需进一步开发新型润滑油和智能监测系统,以适应低GWP制冷剂的特殊需求。

### 3.3 长距离高落差制冷剂输配技术

多联机系统在高层建筑应用中面临长管路、大落差导致的压降与分流不均问题,可能引起能力衰减及可靠性风险。Li Ziai等<sup>[26]</sup>研究表明,主管路从10 m增至190 m时,多联机系统的制冷量下降约14%;主管路较长时,吸气管道沿程压降受管道内制冷剂制冷流量的影响较大。当长主管道系统中应用

过冷器并控制其最佳旁通流量,可以提高系统的制冷能力,而在短主管路系统中该效益并不明显。燕子腾等<sup>[27]</sup>的系统仿真显示,室内外机落差每增加 20 m,能力衰减 2.7%~11.9%。当室内机落差过高时,多联机系统管路内压降过大将导致系统无法稳定运行。系统内每增加 1 个分歧管,室内机的能力衰减 0.4%~9.7%,通过调节上游流量可部分缓解该问题。

目前,较为先进的多联机系统中通常采用制冷剂分配装置<sup>[28]</sup>实现按需流量分配,如图 4 所示。J. Ko 等<sup>[29]</sup>研究发现,当分配装置主入口位于下侧时,液相制冷剂分布更均匀,而低流速会加剧分配不均。

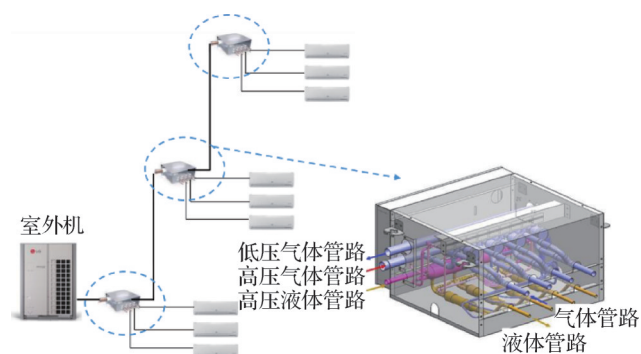


图 4 多联机系统与制冷剂分配装置原理<sup>[28]</sup>

Fig.4 Principle of VRF system with refrigerant distribution unit<sup>[28]</sup>

多联机系统在高层建筑应用中的制冷剂输配技术面临严峻挑战,主要表现为长管路压降损失和高落差导致的制冷剂分配不均问题。针对这些技术难题,目前主要采取以下解决方案:优化过冷器旁通流量控制策略以补偿长管路压降损失;基于 BIM (建筑信息模型, building information modeling) 技术开发智能管路布局算法实现系统最优化设计;采用先进的制冷剂分配装置改善多支路工况下的流量分配均匀性。未来研究应重点关注:1) 极端工况下的动态流量调节技术;2) 新型分配装置的结构优化;3) 智能化自适应控制策略的开发,以全面提升多联机系统在复杂建筑环境中的适应能力。

### 3.4 制冷剂充注量控制与故障诊断技术

多联机系统因其变负荷运行特性,通常需要比传统分体式空调更大的制冷剂充注量。值得注意的是,当前主流替代制冷剂如 R32、R452B、R454B 及 R454C 均属于 ASHRAE 34 标准定义的 A2L 类可燃制冷剂,其泄漏可能引发严重安全隐患。且多联机系统特有的长管路布局和多末端结构,使得制冷剂充注量的精确控制与泄漏检测面临巨大挑战。系统运行中,制冷剂充注量异常可能引发 2 类典型故障:过

量充注会导致压缩机回液和带液压缩,而充注不足则会引起回油不良和性能衰减。

针对这一技术难题,近年来智能诊断技术取得显著进展。学者们基于多联机系统特性,开发了多种先进的故障诊断方法。其中,虚拟制冷剂充注量传感器技术<sup>[30]</sup>通过机器学习算法实现了充注量的实时监测;混合深度森林模型<sup>[31]</sup>有效解决了因周期性除霜导致的制冷剂异常值遮蔽问题,显著提升了系统内制冷剂充注量诊断的准确性;而 Kolmogorov-Arnold 网络及其卷积变体<sup>[32]</sup>在制冷剂充注故障诊断中展现出卓越性能,准确率超过 99%,且具有更快的收敛速度。

为应对 A2L 类可燃制冷剂的安全风险,当前降低系统内制冷剂充注量的研究主要集中在系统结构和关键部件方向。在系统层面,二次回路技术展现出显著优势。Zha Fuhai 等<sup>[33]</sup>开发的“多联机-水循环”复合系统创新性地采用水作为二次传热介质,既实现了环境温度调节和热水供应双重功能,又将室内制冷剂控制在安全范围内。三菱重工<sup>[34]</sup>提出的 R32 混合支路控制系统(图 5),通过精确控制二次水回路的热量传递效率,使系统在保持高性能的同时,将可燃制冷剂泄漏风险降至最低。该技术路线具有普适性,可扩展应用于其他低 GWP 可燃制冷剂系统。

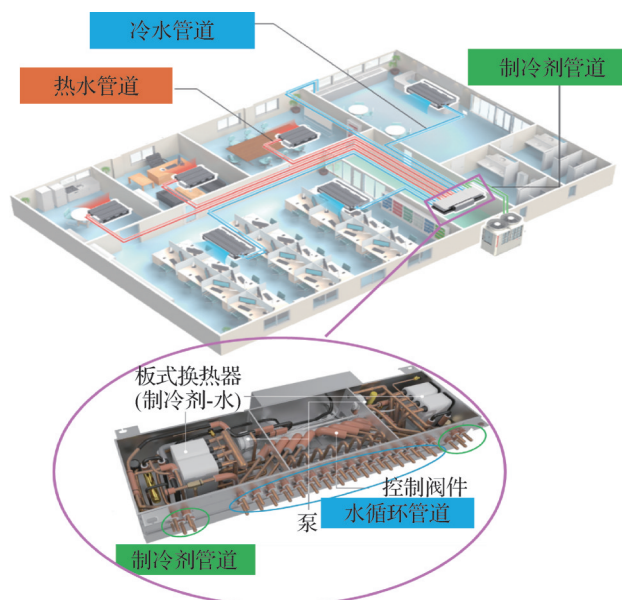


图 5 R32 多联机系统二次回路(水循环)原理<sup>[34]</sup>

Fig.5 Secondary circuit (water loop) schematic of R32 VRF system<sup>[34]</sup>

在部件优化方面,换热器技术创新取得突破性进展。研究证实,利用 R32 更高单位容积制冷量的特性,采用小管径微通道换热器设计可显著减少制

剂充注量(降幅达26.67%~46.67%)<sup>[35]</sup>。全铝微通道换热器(图6)不仅可以解决长管路闪蒸问题,还兼具成本优势。特别值得注意的是,在钎焊板式换热器中,R32在V形结构中的传热性能较R410A提升

30%,明显优于W形<sup>[36]</sup>。该发现为R32系统换热器选型提供了重要依据,V形板式换热器(图7)因优异的综合性能成为理想选择。

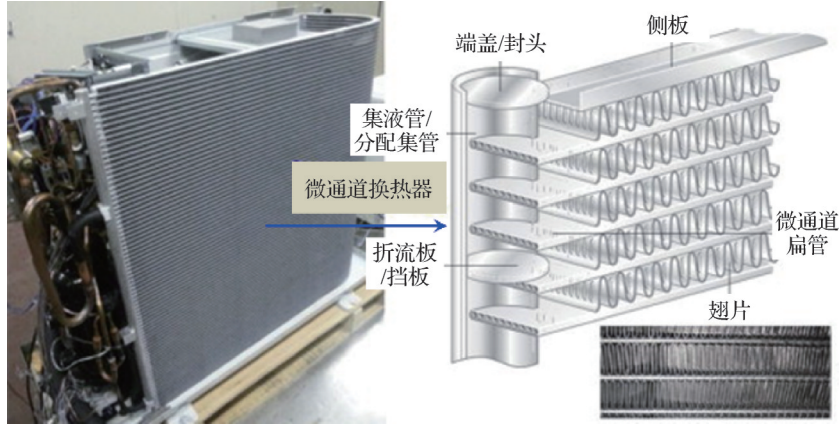


图6 全铝微通道换热器<sup>[35]</sup>

Fig.6 All-aluminum microchannel heat exchanger<sup>[35]</sup>

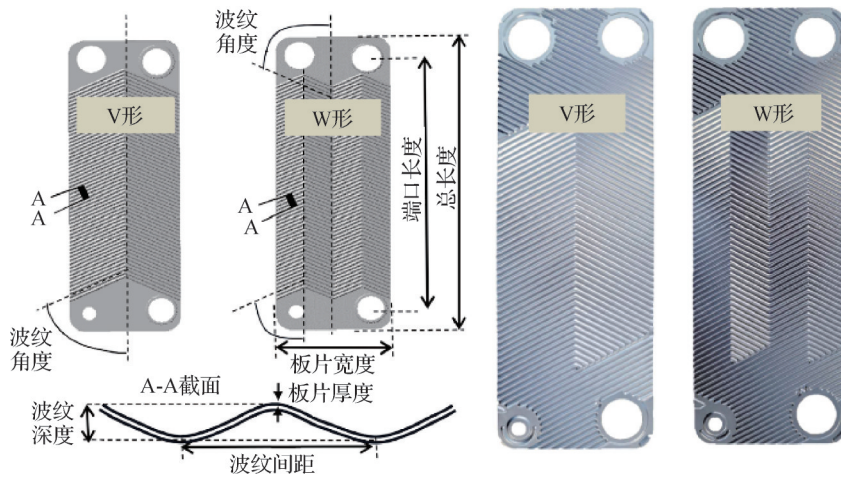


图7 V形、W形钎焊板式换热器<sup>[36]</sup>

Fig.7 V-type and W-type brazed plate heat exchangers<sup>[36]</sup>

当前多联机系统制冷剂充注量控制技术面临精确计量与泄漏预警两大挑战。针对多联机系统复杂工况,基于深度学习的智能诊断方法展现出显著优势。在安全优化方面,通过二次回路系统设计和换热器结构创新,有效降低了可燃制冷剂的潜在风险。未来研究应着重开发自适应充注量调控算法与智能预警系统;同时探索新型材料与微型换热器,以进一步降低可燃制冷剂充注量并提升系统能效,为下一代环保制冷剂的应用奠定技术基础。

### 3.5 替代制冷剂-润滑油相容性研究

在低GWP制冷剂替代过程中,制冷剂与润滑油的相容性问题已成为制约系统性能提升的关键瓶颈。研究表明,二者的互溶特性会显著改变混合体系的黏度特性,直接影响压缩机运动部件的润滑状

态和密封效果。更为重要的是,这种相溶关系还会通过改变油膜特性和传热效率,对整个系统的回油性能、换热效果及运行能效产生级联影响。

当前广泛应用于R410A多联机系统的POE68润滑油在与潜在替代制冷剂的适配性方面存在明显差异。参照NB/SH/T 0699—2023《冷冻机油与制冷剂相容性试验法》标准,分别测试了R410A、R32、R452B、R454B与POE68、PVE68润滑油的下临界互溶温度。结果表明,R32与POE68润滑油的互溶性较差,其最大下临界互溶温度约为11℃,高于多联机系统的极限运行温度范围,存在润滑失效风险。尽管采用PVE68润滑油可在一定程度上改善其相容性,但仍难以满足低温工况下的稳定运行需求。R454B与POE68润滑油的下临界互溶温度始终低于-12℃,优

于R410A;R454B与PVE68的最大下临界互溶温度约为-8℃。从系统适配性与运行可靠性角度出发,建议R454B优先选用POE68润滑油。R452B与润滑油的互溶特性与含油率有关:在含油率大于35%时,其下临界互溶温度较R410A低2~3℃;而当含油率低于30%时,该温度较R410A高4~5℃。R452B与POE68润滑油的最大下临界互溶温度约为-3.5℃,可满足多联机常规运行工况。

未来应重点推进3个方向的工作:首先需要开发面向特定制冷剂的专用润滑油配方,特别是针对R32等主流替代工质;其次要深入探究润滑油物性参数与系统性能的关联机制,建立更精确的预测模型;最后需构建标准化的适配性评价体系,为行业提供润滑油选型依据。这些研究将有效解决当前制冷剂替代过程中的润滑难题,推动多联机系统向更高效、更可靠的方向发展。

#### 4 替代制冷剂展望

本研究通过构建“政策-性能-技术”三维分析框架,系统揭示了多联机系统制冷剂替代面临的关键问题与发展机遇。在全球政策层面,主要经济体已形成差异化管控体系,欧盟F-gas法规、日本《氟碳化合物管理法》等政策对GWP的阶段性限制为技术研发设定了明确目标。性能评估结果表明,R32在能效方面优势显著(较R410A提升2.1%~10.2%),但其A2L可燃性特征需要严格的安全管控;而R454C虽满足GWP<150的长期环保要求,却存在5.9%~7.6%的能效损失。

当前技术发展面临三重核心挑战:首先,材料与制造工艺方面,高温高压工况下的部件可靠性问题突出,特别是换热器焊接工艺、管路抗疲劳设计和关键阀件的密封性能亟待提升;其次,系统匹配性问题显著,新型制冷剂的温度滑移特性导致能效优化困难,且润滑油适配性研究尚不充分;最后,安全验证体系存在短板,复杂建筑环境下的泄漏检测技术需要更多实证支撑。这些挑战本质上是技术参数、安全标准与政策要求三者协同优化的系统工程问题。

基于研究结果,本文提出分阶段实施的技术路线图:1)近期重点攻关A2L制冷剂安全技术,开发集成物联网的智能监测系统,推广二次回路等新型系统循环形式;2)中期建立完善的混合工质数据库,完成专用润滑油匹配研究,形成标准化评价体系;3)长期布局新型制冷技术研发,推动标准体系国际化,实现多学科技术融合创新。

未来研究方向应重点关注:微通道换热器优化

设计、自适应充注量控制算法、数字孪生故障预测系统等前沿领域。通过政产学研协同创新,推动制冷空调行业向低碳化、智能化方向发展,最终实现环境保护与能源效率的双重目标。

#### 参考文献

- [1] GB/T 18837—2015 多联式空调(热泵)机组[S].(GB/T 18837—2015 Multi-connected air-condition (heat pump) unit[S].)
- [2] 生态环境部,国家发展和改革委员会,工业和信息化部,等.关于印发《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案(2025—2030年)》的通知[EB/OL].(2025-04-09)[2025-07-01].[https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content\\_7021651.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7021651.htm).(Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Notice on issuing the National Implementation Plan for China's Compliance with the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (2025—2030)[EB/OL].(2025-04-09)[2025-07-01].[https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content\\_7021651.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7021651.htm).)
- [3] Amend the regulations in accordance with the "Act on Rational Use and Appropriate Management of Fluorocarbons"[EB/OL].[2025-07-01].[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo\\_sangyo/kagaku\\_busshitsu/flon\\_taisaku/018.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/flon_taisaku/018.html).
- [4] JRAIA.Guideline of design construction for ensuring safety against refrigerant leakage from commercial air conditioners using lower flammability (A2L) refrigerants [EB/OL].(2025-04)[2025-07-01].<https://www.jraia.or.jp/jra/>.
- [5] Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance) [EB/OL].[2025-07-01].<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R0573>.
- [6] ECHA publishes PFAS restriction proposal [EB/OL]. [2025-07-01].<https://echa.europa.eu/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal>.
- [7] Enforcement of the American Innovation and Manufacturing Act of 2020 [EB/OL]. [2025-07-01].<https://www.epa.gov/enforcement/enforcement-american-innovation-and-manufacturing-act-2020>.
- [8] EPA Launches Biggest Deregulatory Action in U.S. History [EB/OL]. (2025-03-12) [2025-07-01].<https://www.epa.gov/newsreleases/epa-launches-biggest-deregulatory-action-us-history>.
- [9] SB-682 Environmental health: product safety: perfluoroalkyl

- and polyfluoroalkyl substances [EB/OL]. [2025-07-01]. [https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill\\_id=202520260SB682](https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=202520260SB682).
- [10] Panato V H, Marcucci Pico D F, Bandarra Filho E P. Experimental evaluation of R32, R452B and R454B as alternative refrigerants for R410A in a refrigeration system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 135: 221-230.
- [11] ISO 817: 2024 Refrigerants-designation and safety classification[S].
- [12] GB/T 7778—2017 制冷剂编号方法和安全性分类[S]. (GB/T 7778—2017 Refrigeration air conditioning equipment, number designation and safety classification of refrigerants[S].)
- [13] Tran N, Kasireddy R V, Wang C C. An experimental investigation on convective boiling heat transfer of R-454B with lubricant oil of POE-32 or POE-68 mixture in a horizontal smooth tube [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 181: 121990.
- [14] Hsu C Y, Chien L H, Chang J C. Experimental study of falling film evaporation of refrigerants, R32, R1234yf, R410A, R452B and R454B on horizontal tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 205: 123914.
- [15] 李庆普, 陶乐仁, 王通, 等. R32水平单管内的蒸发换热特性[J]. *制冷学报*, 2017, 38(3): 36-42. (Li Qingpu, Tao Leren, Wang Tong, et al. Evaporation heat transfer of R32 inside horizontal tubes [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(3): 36-42.)
- [16] 刘相增, 冯威, 张敢敢, 等. 管内微尺度强化表面R32流动冷凝传热实验研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(4): 51-59. (Liu Xiangzeng, Feng Wei, Zhang Gangan, et al. Experimental study on R32 flow and condensation heat transfer in tubes with enhanced surface [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(4): 51-59.)
- [17] Kim D, Lee D, Lee M, et al. Energy performance evaluation of two-phase injection heat pump employing low-GWP refrigerant R32 under various outdoor conditions [J]. *Energy*, 2021, 214: 119098.
- [18] Yang Minghong, Wang Baolong, Li Xianting, et al. Evaluation of two-phase suction, liquid injection and two-phase injection for decreasing the discharge temperature of the R32 scroll compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 59: 269-280.
- [19] 杨絮霏, 王宝龙, 程作, 等. 使用多次制冷剂喷射实现(近)等温压缩[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(12): 2705-2711. (Yang Xufei, Wang Baolong, Cheng Zuo, et al. Using multiple refrigerant injection to achieve near-isothermal compression [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(12): 2705-2711.)
- [20] Kang D, Jeong J H, Ryu B. Heating performance of a VRF heat pump system incorporating double vapor injection in scroll compressor[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 96: 50-62.
- [21] Yang Minghong, Shao Shuangquan. Numerical investigation on scroll compressor with intermediate discharge valve for VRF annual performance promotion [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 168: 758-767.
- [22] Min B, Jang S, Lee T, et al. Performance comparison between bypass cycle and injection cycle for sub-cooling methods in multi-split variable refrigerant flow (VRF) system in hot seasons [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 107: 202-213.
- [23] Yan Ziteng, Zhan Feilong, Ding Guoliang, et al. Modeling and experimental investigation of oil retention in pipelines of multi-split air conditioning system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 161: 242-262.
- [24] 杜文超, 秦宪, 童卫城, 等. 家用轻型多联式空调器回油控制改善分析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2022, 22(11): 44-46. (Du Wenchao, Qin Xian, Tong Weicheng, et al. Analysis on the improvement of oil return control of a household light multi-unit air conditioner[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2022, 22(11): 44-46.)
- [25] 王善云, 辛电波, 陈林, 等. 多联式空调(热泵)机组压缩机回油问题研究[J]. *制冷与空调(北京)*, 2021, 21(8): 82-86. (Wang Shanyun, Xin Dianbo, Chen Lin, et al. Research on oil return problem of compressor of multi-connected air-conditioning (heat pump) unit [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2021, 21(8): 82-86.)
- [26] Li Ziai, Wang Baolong, Li Xianting, et al. Simulation on effects of subcooler on cooling performance of multi-split variable refrigerant flow systems with different lengths of refrigerant pipeline [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 126: 301-309.
- [27] 燕子腾, 曹昊敏, 庄大伟, 等. 高落差多分支管路结构对多联式空调系统能力影响的快速仿真[J]. *制冷学报*, 2023, 44(1): 59-70. (Yan Ziteng, Cao Haomin, Zhuang Dawei, et al. Fast simulation of influence of significant height difference and multiple branch pipeline structure on indoor unit performance in VRF system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(1): 59-70.)
- [28] Ham S, Choi S, Jeong J H. Two-phase flow distribution in a refrigerant distributor having four indoor-unit connections of a variable refrigerant flow system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 126: 246-258.
- [29] Ko J, Choi S, Hwan Jeong J. Investigation of two-phase flow distribution in the vertical annular distribution header of a variable refrigerant flow heat pump system [J].

- Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124248.
- [30] Hu Yifeng, Zhang Yun, Liu Xiaoyu, et al. Development and demonstration of a method to detect refrigerant charge level for variable refrigerant volume systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121354.
- [31] Zeng Yuke, Chen Huanxin, Xu Chengliang, et al. A hybrid deep forest approach for outlier detection and fault diagnosis of variable refrigerant flow system [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 120: 104–118.
- [32] Zhang Xue, Cheng Yunxi, Chen Huanxin, et al. Refrigerant charge fault diagnosis in VRF systems using Kolmogorov-Arnold networks and their convolutional variants: a comparative analysis with traditional models [J]. Energy and Buildings, 2025, 336: 115608.
- [33] Zha Fuhai, Wang Yuan, Liang Chenjiyu, et al. Utilizing multi-connected three-fluid heat exchangers in indoor units to improve the low load-ratio performance of variable refrigerant flow systems [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 103: 112150.
- [34] City Multi Hybrid Branch Controllers[EB/OL].[2025-07-01]. <https://les.mitsubishielectric.co.uk/products/air-conditioning/city-multi-hvrf/bc-controller-hvrf>.
- [35] Meng Jianjun, Liu Min, Zhang Wenqiang, et al. Experimental investigation on cooling performance of multi-split variable refrigerant flow system with microchannel condenser under part load conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81: 232–241.
- [36] Wei Wenjian, Lin Kaibing, Du Yubin, et al. Thermal-hydraulic characteristics of R32 and R410A flow boiling in plate heat exchangers with 1 mm chevron depth [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 168: 190–207.

#### 通信作者简介

杨昭,女,教授,博士生导师,天津大学机械工程学院,022-87894028,E-mail:zhaoyang@tju.edu.cn。研究方向:新型工质热物性,制冷剂阻燃技术。

#### About the corresponding author

Yang Zhao, female, professor, Ph. D., supervisor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 86-22-87894028, E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn. Research fields: the thermophysical properties of new refrigerant and flame retardant technology of refrigerant.