



CRN

CHINESE REFRIGERATION NEWSLETTER

中国制冷简报

2024年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展专刊



中国制冷学会 主办



《中国制冷简报》着重介绍中国制冷、空调、供暖、通风及相关领域的各类信息，旨在推动科技创新，推广应用技术，报道行业动态，促进业内交流，为我国制冷事业的发展服务，为学术及技术交流服务，为培养专业人才服务。

主办单位：中国制冷学会

主 编：张 华

编 委：陈焕新、杜志敏、冯佳雨、黄 龙、
剧成成、李 传、李晓琼、李振兴、
刘金平、刘亚坤、刘业凤、罗二仓、
马国远、钱苏昕、钱小石、邵双全、
沈 俊、石文星、宋孟杰、孙志利、
田 镇、王 闯、王志学、温程宇、
吴玉庭、肖 鑫、邢子文、徐荣吉、
徐震原、杨 睿、杨 焘、杨西茹、
杨 昭、杨子旭、张 龙、张淑萍、
张天娇、赵东亮、赵松松、甄泽康、
周宇珏（按姓氏拼音排序）

执行主编：范 薇

校 对：王亚薇、田 甜、邵月月

封面设计：王 昊

排 版：田 旭

编辑部联系方式

地址：北京市海淀区阜成路67号银都大厦10层

邮编：100142

电话：010-68463224

传真：010-68434679

邮箱：wfan@car.org.cn

广告索引

封底 丹佛斯（中国）投资有限公司

版权声明

凡本刊发表的文章、图片，未经本刊允许不得转载。经本刊同意授权刊登，应注明出处，向本刊编辑部及作者邮寄样刊，并向作者寄发稿酬。

序 言

自2021年起，中国制冷学会在《中国制冷简报》连续出版了三期“双碳”专刊，对中国制冷行业发展现状、低碳转型路线、技术应用等进行分析总结，为推进“双碳”技术进步和行业健康发展发挥了重要作用，产生了很好的社会影响。随着行业向绿色高效、节能环保、智能化的深入层次和高质量发展，特别是人工智能赋能制冷空调行业新趋势，我们再次编辑出版《中国制冷简报》2024年“双碳”专刊。

本期《中国制冷简报》专刊共分4章，约20万字，包括“双碳”政策及标准、制冷产业总体发展情况、未来发展趋势、系统设备及关键零部件的新技术新产品、重点细分领域的应用进展等。内容主要侧重于2024年出现的新政策、新技术、新产品，并在各章节尽量汇集一些典型案例，增添AI+大数据、AI赋能行业发展技术和案例，为读者提供可借鉴、可复制的技术。

本期专刊由中国制冷学会邀请专家学者和企业技术专家撰写，企业技术专家还根据最新研发的新产品提供了案例素材。上海理工大学张华教授、刘业凤教授对稿件进行了汇编、审校和总结，中国制冷学会秘书处常琳、范薇为专刊的出版做了大量组织、协调和编辑工作。特此向各位编者和材料提供者表示衷心感谢！限于编写水平和时间原因，错漏之处恳请读者批评指正。

张 华

2025年3月27日

C 目录 CONTENTS

第一章 总 论

- 1.1 “双碳”政策及标准 (1)
- 1.2 制冷产业总体情况 (4)
- 1.3 制冷产业技术研究及应用进展 (4)
- 1.4 AI+制冷空调的新技术和案例 (10)

第二章 系统、设备及关键零部件

- 2.1 环保制冷剂的发展 (12)
- 2.2 常规形式制冷热泵整机设备 (20)
- 2.3 关键零部件及保温材料 (31)
- 2.4 融合其他领域技术的制冷产品 (47)
- 2.5 新型制冷技术的整机设备 (33)

第三章 重点细分领域应用进展

- 3.1 家用及商用制冷及供热 (77)
- 3.2 工业余热应用 (88)
- 3.3 食品、药品冷链与干燥技术 (92)
- 3.4 数据中心及算力中心冷却 (99)
- 3.5 储热（冷）技术研究及应用进展 (103)
- 3.6 电化学储能电池的热管理 (120)
- 3.7 制冰造雪技术 (130)
- 3.8 AI+大数据 (142)

第四章 2024年国家、省部、行业科技奖励部分行业获奖项目介绍 (153)

第一章

总 论

刘业凤 张华

(上海理工大学)

1.1 “双碳” 政策及标准

“双碳”目标是中国应对气候变化、推动绿色发展的核心战略目标，具有深远意义和重要地位。

“双碳”目标倒逼制冷空调行业结构转型，推动行业与能源、产业、交通等领域融合，助力绿色低碳高质量发展，使我国农业、工业等领域减少对化石能源的依赖，发展可再生能源，提升能源自主供给能力，保障能源安全。

在国家战略规划层面，2024年国务院先后发布了《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》（双新方案）、《2024—2025年节能降碳行动方案》等通知。《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》通过建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制，加快构建碳排放总量和强度双控制度体系，积极稳妥推进碳达峰碳中和、加快发展方式绿色转型。到2025年，碳排放统计核算体系进一步完善，一批行业企业碳排放核算相关标准和产品碳足迹标准出台实施，国家温室气体排放因子数据库基本建成；

“十五五”时期，实施以强度控制为主、总量控制为辅的碳排放双控制度，建立碳达峰碳中和综合评价考核制度；在碳达峰后，实施以总量控制为主、强度控制为辅的碳排放双控制度，推动碳排放总量稳中有降，旨在推动经济社会发展全面绿色转型。到2030年，实现减污降碳协同能力显著增强；到2035年，实现碳排放达峰后稳中有降；并且建立碳达峰、碳中和标准体系，制定实施碳达峰碳中和综合评价考核制度。把低碳发展作为改善生态环境的根本之策，推动形成有利于资源节约和环境保护的空间布局、产业结构、生产方式和生活方式，以高水平保护促进绿色低碳高质量发展。《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》旨在发展绿色金融，支持绿色项目融资，并制定能源、工业等重点领域的减排目标，推广低碳技术，推进循环经济，促进资源循环利用。到2030年，重点领域绿色转型取得积极进展，绿色生产方式和生活方式基本形成，减污降碳协同能力显著增强，主要资源利用效率进一步提升，支持绿色发展的政策和标准体系更加完善，经济社会发展全面绿色转型取得显著成

效。到2035年，绿色低碳循环发展经济体系基本建立，绿色生产方式和生活方式广泛形成，减污降碳协同增效取得显著进展，主要资源利用效率达到国际先进水平，经济社会发展全面进入绿色低碳轨道，美丽中国目标基本实现。《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》旨在加快推广能效更高的设备，到2027年，重点行业主要用能设备能效基本达到节能水平，环保绩效达到A级水平的产能比例大幅提升，推动节能降碳，助力实现“双碳”目标，促进社会绿色低碳发展。《2024—2025年节能降碳行动方案》推进重点领域节能降碳。到2025年底，交通运输领域二氧化碳排放强度较2020年降低5%，铁路和水路货运量分别较2020年增长10%、12%，钢铁行业能效标杆水平以上产能占比达到30%。推动重点行业节能降碳，助力“碳达峰”目标优化能源结构，提升能源利用效率。

在国家标准建设方面，发改委发布《关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025年）》通知，通过完善“双碳”标准计量体系，为碳排放双控制度和碳定价政策提供技术基础和科学依据并且加快碳排放核算、碳足迹、碳减排等标准的制修订，补齐基础短板，提升碳计量能力，推动经济社会全面绿色转型。另外，指导企业节能降碳，为企业提供更明确的碳排放核算和管理标准，指导企业开展节能降碳升级改造，提升产业竞争力。工信部发布《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》，提出加快推进工业领域碳达峰、碳中和标准体系建设，为工业领域低碳转型提供技术支撑和规范引领，其中涉及氢氯氟烃（HCFCs）、氢氟烃（HFCs）类制冷剂替代与管理。到2025年，初步建立工业领域碳达峰碳中和标准体系，制定200项以上急需标准，重点涵盖基础通用、温室气体核算、低碳技术与装备等领域，为工业领域碳评估和碳减排提供技术支撑。到2030年，形成较为完善的工业领域碳达峰碳中和标准体系，加快制定协同降碳、碳排放管理、低碳评价类标准，实现重点行业和领域标准全覆盖，支撑工业领域碳排放全面达峰，标准化工作逐步向碳中和目标转变。该文件为工业领域碳达峰碳中和工作提供明确的技术规范和标准支撑，推动了工业领域低碳技

术创新和管理创新，促进低碳技术的推广应用。

其他相关政策，包括《关于加强绿色电力证书与节能降碳政策衔接大力促进非化石能源消费的通知》《农业农村部关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》《碳排放权交易管理暂行条例》《全国碳排放权交易市场覆盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案（征求意见稿）》等。其中，《关于加强绿色电力证书与节能降碳政策衔接大力促进非化石能源消费的通知》旨在完善能源消耗总量和强度调控，推动非化石能源消费，促进经济社会绿色低碳转型。完善能耗双控机制，将非化石能源从能源消耗总量和强度调控中剔除，重点控制化石能源消费；推动绿证交易电量纳入节能评价考核，将绿证交易电量纳入“十四五”省级人民政府节能目标责任评价考核指标核算；拓展绿证应用场景，推动绿证在绿色电力消费认证、节能降碳管理、碳核算、碳市场、产品碳足迹管理等方面的应用。加强绿色电力证书（绿证）与节能降碳政策的衔接，大力促进非化石能源消费。

中国生态环境部在2024年印发《2024年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案》，对我国HFCs生产和使用进行配额管理，确定2024年我国HFCs生产配额总量为18.53亿吨二氧化碳当量（tCO₂），内用生产配额总量为8.95亿tCO₂、进口配额总量为0.1亿tCO₂。通过合理设定和分配配额，在确保完成履约目标的同时，支撑、服务、保障好经济平稳运行和持续向好。保持配额管理政策的连续性和稳定性，有利于稳定市场预期，引导相关行业高质量发展，也为相关企业申请2024年度HFCs配额以及开展配额审查、核发工作提供依据，充分保障相关行业发展需求。

我国的“双碳”政策体系已经从顶层设计逐步延伸至基层实践，实现了从宏观规划到具体实施的全面覆盖。目前，政策框架已基本完善，从国家层面到地方、从政府部门到各行业、从产业园区到企业主体，各方正紧密协作、共同努力，将“双碳”目标转化为实际行动。

梳理2024年国内、国际“双碳”政策和规范，主要如下：

中国政策《中国逐步降低氢氟碳化物（HFCs）管控方案》，根据《基加利修正案》履约要求，2024年起中国开始实施HFCs生产和使用配额管理，制冷空调行业需逐步削减高GWP制冷剂（如R410A、R404A），推动R290（丙烷）、R32（GWP较低）等环保工质的应用。

《绿色高效制冷行动方案（2023—2025年）》明确2024年能效标准升级目标，要求商用空调能效提升20%，推广CO₂（R744）等自然工质在冷链领域的应用。《碳排放权交易管理暂行条例》（2024年实施）将制冷设备制造纳入重点行业碳排放核查范围，鼓励企业通过低碳技术（如热泵、余热回收）获得碳配额。

地方政策（如广东、上海）多地出台财政补贴政策，支持制冷设备“以旧换新”和低GWP工质替代，例如对R290空调生产线给予税收优惠。

国际政策与法规中欧盟《氟化气体法规（F-Gas）修订案》，2024年起进一步收紧HFCs市场配额（较2021年减少40%），禁止部分高GWP制冷剂在新设备中使用（如GWP>150的商用制冷剂）。

美国《削减通胀法案》（IRA）中对采用低GWP制冷剂的HVAC设备提供税收抵免（如30%抵免额），推动天然工质（氨、CO₂）在工业制冷中的应用。日本《碳中和技术路线图》将热泵和天然制冷技术列为重点，目标2030年空调设备全面无氟化（GWP<100）。

梳理2024年国内、国际“双碳”标准进展，主要如下如下：

ISO/ASHRAE标准更新，ISO 5149（制冷与热泵系统安全与环境标准）：2024年发布新版，进一步明确A2L类低可燃性制冷剂的使用规范，强化泄漏检测和系统安全设计。2024版新增A3类可燃工质（如R290）的应用规范，推动安全技术标准化。ASHRAE Standard 34（制冷剂分类与标识）：新增部分低GWP制冷剂（如R454B、R32）的安全等级分类。

IEC能效与测试标准IEC 60335-2-40（热泵/空调电气安全）：修订版加强对易燃制冷剂设备的安全

要求，影响欧洲及北美市场准入。

欧盟生态设计指令（ErP）更新空调和热泵的能效限值（Lot 11/21），要求2024年起新设备需符合更高季节能效比（SEER）和环保制冷剂（GWP < 750）。

ISO 14067（产品碳足迹）标准2024年细化制冷设备全生命周期碳排放核算方法，推动行业低碳转型。

中国标准进展中环保工质替代，GB/T 7725—2024（房间空气调节器能效标准）：提高能效门槛，鼓励采用R290（丙烷）等环保制冷剂。GB 21455—2024（多联机空调能效新规）：首次将低GWP制冷剂（如R32）纳入评定体系。

《制冷系统碳排放评价指南》（2024年发布）：明确设备制造、运行到报废阶段的碳计算规则。住建部《绿色建筑评价标准》：要求新建建筑优先选用低GWP制冷剂的空调系统。

针对可燃性制冷剂（如R290），GB 4706.32—2024更新了安装、维护和泄漏应急处理规范。

美国EPA SNAP Program：新增数种低GWP制冷剂（如R454C）为合规替代品，推动淘汰高GWP物质。DOE能效法规：2024年收紧商用制冷设备的能效要求。

日本JIS B 8620（热泵能效标准）：修订后对标国际，强制标注制冷剂的GWP值。

因此，企业加速研发CO₂跨临界循环、太阳能制冷、工业热泵等碳中和技术，格力、大金等厂商推出R290家用空调产品线。欧盟碳边境调节机制（CBAM）可能对高GWP制冷剂出口企业增加成本压力。全球热泵市场预计年增长15%（IEA数据），中国、欧洲为主要推动力。天然工质（CO₂、氨、碳氢类）应用标准逐步完善，A2L类制冷剂市场占比提升。企业需同步满足能效、安全与碳足迹的多维标准，如欧盟CBAM机制下出口产品的碳成本核算。中国标准与国际接轨加速（如等效采用ISO），助力全球供应链协同减碳。

1.2 制冷产业总体情况

目前关于2024年制冷产业的产量和销售额还没有权威的统计数据，本刊根据奥维云网、产业在线、海关总署等网站搜索到的数据，并结合行业报告，从家用空调、工商业制冷两个主要领域估算一下2024年中国制冷产业的总体情况。在家用空调领域，总产量达19508万台，同比增长19.5%。总销量18977万台，同比增长20.9%。内销量首次突破1亿套（约10200万台），同比增长5.86%，创历史新高。出口量约9600万台，同比增长约40.5%，成为全球空调出口的里程碑。内销额约2715亿元人民币，同比增长1.31%，主要受益于以旧换新政策。出口金额206亿美元，同比增长约27.16%，首次突破200亿美元大关。家用空调的总产值在4054亿元左右，内销均价2710元/台，同比下降2.52%。出口均价215美元/台，同比下降9.28%，反映海外市场竞争加剧及中小企业低价策略的影响。在工商制冷领域，总产值约1500亿元，以冷链物流、医药存储、数据中心及酒店扩展显著拉动需求。

2024年全球家用空调行业迎来了新一轮的海外产能扩张浪潮，我国美的、格力、海尔等企业加速海外制造基地布局，提升自主品牌占比，以应对地

缘风险并拓展市场。在东南亚、非洲以及拉美等新兴市场持续发力，产量和销量均达到历史新高。尽管国内市场面临房地产低迷、销售需求保守等挑战，但出口市场的强劲表现推动了行业整体规模的提升，技术创新和政策支持为未来发展提供了新机遇。新兴市场拓展成为重要的增长引擎：拉丁美洲因天气和经济发展等原因引发空调销量大涨，需求量超过北美成为除亚洲外需求最旺的地区；中东地区增长势头强劲，变频机型加速普及；欧洲地区高温推动需求回升，高性价比产品更受欢迎；非洲地区，整体销量明显回升，石油经济推动北非增长超预期。北美洲需求下滑，美国需求占比不足9成。大洋洲移民带来新的需求，空调销量重回增长区间。在冷柜方面，家用冷柜出口量同比增长26.9%，内销有所下滑。

制冷设备在新兴市场和发展中国家的普及率还有很大的提升空间，市场需求将持续增长，特别是商业制冷和工业制冷领域的需求也将保持稳步增长，这将带动制冷行业的产业扩张，促使企业加大生产规模、拓展市场渠道，以满足不断增长的市场需求。

1.3 制冷产业技术研究及应用进展

面对日益严峻的环境形势和政策法规的限制，2024年制冷产业继续朝着低碳化、高效化、智能化的方向转型。主要体现在以下4个方面：

- 1) 继续对现有低GWP制冷剂从热力学参数、燃爆风险及使用安全性等方面进行研究，开发的系统、设备及关键零部件取得新突破；
- 2) 制冷零部件及不同细分领域产品不断向高效、智能化方向发展；
- 3) 制冷行业与新材料、新工艺、新能源结合催生出许多新技术、新产品；
- 4) AI与大数据的深度融合为制冷行业发展提供

了新思路、新方向。

下面分别加以概述和总结，并以代表性案例进行说明。

1.3.1 替代制冷剂的深入研究促进制冷系统、设备及关键零部件取得新突破

在全球范围内尚没有找到一种零ODP值、低GWP值、安全、高性能的“完全理想”的制冷剂，国内外研究机构对现有低GWP制冷剂从热力学参数、燃爆风险及使用安全性等方面进行了研究。现有的低GWP制冷剂，包括CO₂、水、氨等自然工质，R290、R1270、R600a等HCs制冷剂和以

R1234yf、R1234ze(E)为代表的HFOs展示出了广阔的发展前景，但是HFOs目前面临着欧盟 PFAS 限制提案等挑战，天然制冷剂将继续在制冷领域占据重要份额。R717与HCs制冷剂存在安全隐患，需要采用阻燃手段并加强安全监管。物联网、大数据、人工智能等技术的发展，也将会实现制冷系统的智能化监控与管理。

低GWP制冷剂的加速普及。HFOs（如R1234yf、R1234ze）因其全球变暖潜能值（GWP）极低（接近1）且不可燃性好，将成为替代传统氢氟烃（HFCs）的主力，尤其在汽车空调（欧盟、美国已强制应用）和商用制冷领域。氨（R717）、二氧化碳（R744）、碳氢化合物（R290、R600a）等天然工质因零ODP（臭氧消耗潜能）和低GWP，在工业制冷（氨）、热泵（CO₂）和家用冰箱（R290）中占比持续提升。欧洲和中国政策尤其支持其应用。

基加利修正案实施，发达国家需在2024年完成HFCs削减40%的目标（基线2011—2013年），推动制冷剂迭代。中国作为全球最大HFCs生产国，将通过配额制加速替代。

欧盟F-Gas法规修订，2024年新规收紧HFCs配额，并可能扩大禁用范围，刺激HFOs和天然制冷剂市场。美国SNAP环保署可能更新认可制冷剂名单，推动低GWP方案在冷链和建筑空调中的应用。

可燃性碳氢类（如R290）和部分HFOs（如R1234yf）的易燃性需通过系统设计（减少充注量、泄漏检测）和标准更新（如IEC 60335-2-40修订）解决。高温气候适应性问题上CO₂跨临界系统在高温地区能效不足的问题，将通过优化压缩技术和热回收改进。混合制冷剂开发是平衡GWP、能效与安全性（如HFO/HFC共混物），但需解决专利壁垒和高成本问题。

电动汽车空调HFO-1234yf因与现有系统兼容性强，仍是主流选择，但部分车企探索CO₂系统（如大众、奔驰）。数据中心冷却液冷技术兴起推动低GWP制冷剂（如R513A）应用，兼顾散热与环保。

欧洲能源危机加速热泵安装，CO₂热泵（适用于高温出水）和R32（过渡方案）需求增长。

固态磁制冷、电卡效应等无制冷剂技术处于实验室阶段，2024年或在小规模应用（如医疗冷藏）中试点。制冷剂回收和循环经济中各国强化废弃制冷剂管理（如中国《碳排放权交易管理暂行条例》），回收再利用市场规模扩大。发展中国家东南亚、非洲等地区仍依赖高GWP制冷剂，但通过多边基金（如蒙特利尔议定书）支持逐步转型。

针对用作替代方案的制冷剂开发的压缩机及其制冷机组在应用范围拓展、容量等方面取得新突破。例如：比泽尔采用CO₂作制冷剂，开发出排气量达199.5m³/h的CO₂亚临界高承压活塞式压缩机，待机压力可达80bar，用于-18℃低温库时，单台可为约8000~10000吨货物提供冷量。博客压缩机开发了一款丹佛斯BOCK®新型大6缸系列1GX56 CO₂ T-CO₂跨临界压缩机，实现了更宽的应用范围。福建雪人研发的SPT61系列半封闭CO₂活塞压缩机，通过优化壳体设计、低余隙活塞结构设计、采用高效阀板结构等技术，提高产品的可靠性与安装及运行效率。冰轮采用H₂O作制冷剂，发布了105K+超大温升的水蒸汽热泵离心压缩机，并利用此离心压缩机构成的大温升热泵机组可提供1.0~3.6barA的蒸汽或者90~140℃的热水，蒸发器侧最低可回收利用20℃工业废水、江河湖海等自然水源中的余热资源，拓宽了离心热泵的应用范围，可以有效解决中低温余热高效回收利用的难题。康普莱斯压缩技术研发的单螺杆水蒸汽压缩机能够产出195℃饱和蒸汽，基本上适合于大部分工业行业。中石油吉林石化将1套以R1270为制冷剂的ges开启螺杆式压缩冷凝机组用于沥青造气装置及合成氨装置，单套机组一年可处理不同压力的丙烯气体21.4万吨。江森自控提出了针对R1234ze(E)制冷剂的York YK-CP离心式冷水机组，相比其他使用低压制冷剂的冷水机占地面积小22%且性能更高，能在低至7.2℃的环境中运行。

2024年环保制冷剂行业将呈现“政策倒逼+技术多元化”的特点，HFOs和天然工质是短期主流，但需突破成本、安全和能效瓶颈。长期来看，零GWP技术和系统级创新（如低充注量设计）将成为竞争焦点。企业需密切关注区域性法规差异，布局差异化产品线。

1.3.2 制冷零部件及不同细分领域产品不断向高效、智能化方向发展

在压缩机领域，除上述在替代制冷剂应用发展之外，在能效水平提升、容量和工况调节范围扩大、高速轻量化设计等方面也取得突破性进展。江森自控日立万宝研发一款R32制冷剂大容量变频涡旋压缩机，开创全新的190直径筒体平台，采用了涡旋中心偏置、涡旋始末端修正等关键技术，可广泛应用于模块机/热泵热水器/热泵采暖等多种应用场合。丹佛斯（天津）研发一款VZN系列 R290新型变频热泵涡旋压缩机，在油泵外侧增加全包围结构的保护罩，在平衡块增加导油槽并增设静涡旋阻挡结构，提高了压缩机的可靠性和安全性。上海海立研发的高效变频压缩机实现业内首创的气缸空腔隔热结构，引导行业1.5匹空调进入小型化时代，实现产品的性能全面领先。黄石东贝研发的VFLN系列超高效变频压缩机使用MOSFET替代IGBT，提升变频器能效。上海汉钟精机研发的RC3-IVA全配置高速变频机，采用专用变频控制器并搭配云端功能，实现机器的智能运行监测，且性能得到大幅提升。思科普研发的SCE 23/25大排量产品系列升温快，适用于较高的环境温度，能满足各种制冷场景，从结构设计上解决热气除霜过程中液体回流问题。美芝研发的车载微型直流变频压缩机通过表贴式结构与稀土磁瓦的应用等技术，实现电机小型化。长虹华意研发的一款NUD125FSC 智能超高效轻商变频压缩机，实现1800~4500 r/min宽转速范围。冰山松洋研发出一款超低环温空气源热泵，蒸发温度可低至-42℃的高能效涡旋压缩机，通过采用内部低压结构设计、非对称涡旋线和特殊排气通道，提升可靠性。上海汉钟、安徽大学、合肥通用共同研发的冷冻冷藏用宽温区单机双级螺杆压缩机，突破压比自适应级间补气、吸气喷液量调节、排气过热度稳定控制等关键技术，使其能应用于冷冻冷藏库用宽温区。青岛海信日立研发的海信正压液浮无油变频离心机，采用航空航天领域陶瓷球滚动轴、刚度阻尼独立式专用金属橡胶阻尼器、多物理场耦合设计技术和轴向载荷动态平衡控制策略等技术，大幅提升轴承使用寿命和机组可靠性。

在其它关键零部件及保温材料方面也取得显著

进展。近年对于换热器的研究主要聚焦于如何提升换热器的性能、降低能耗、减少环境负面影响。换热器朝着轻量化、小型化和紧凑化的方向发展，在内螺纹管细径化、微通道换热器研制、翅片式换热器优化等方面有了显著成果；水泵研究主要集中在提高效率、降低能耗、智能化控制、材料创新以及多功能化等方向；空调风机技术的研究进展主要集中在提升能效、降低噪音、优化气流分布和智能控制系统的集成等方面；电子膨胀阀在噪声控制、控制策略优化方面的研究取得了显著成就；空调保温材料在保温隔热性、耐火性和环保性等方面取得显著进展，气凝胶材料成为研究热点，而开发无毒、可回收的保温材料也成为趋势。

在家用空调领域，主要发展方向集中在提高低环温制热性能、改进两器换热性能和环保制冷剂的替代与创新、智能化和健康功能应用等方面，并从健康功能向健康解决方案转型，甚至向健康家居融合。美的KFR-35GW/N8MXC1D型机焓分体空调器采用宽频滚动转子式压缩机，实现压缩机6~160Hz范围内的安全、可靠、高效运行，并对霜层厚度进行预测，综合APF最大提升24.4%，节能效果显著。TCL小蓝翼P7新风空调集成高效低噪新风多维空气品质调控关键技术、室温曲线动态追踪控制技术、室内换热器紧凑集成和免扩穿墙孔下大新风量增氧与降噪技术、风负荷自适应节能算法等，降噪和节能效果显著，并提升用户舒适性。长虹KFR-72LW/ZDEVW1+RS大3P巨能省分体空调器实现了电子膨胀阀开度自适应调节，提高了系统的能效比和制热能力。小米米家新风空调采用提效降阻、降噪、自寻优新风控制等创新技术，在不扩墙孔及新风管径条件下，实现扩墙孔及大管径的超大新风量，并保证室内舒适性和整机可靠节能运行。凌达定频高效铝线空调压缩机采用全新缸径比高容积效率泵体和高效大功率密度DS1铝线电机结构，在排量减小的情况下，使能效提升2%以上，噪声减少1~2分贝，振动下降2个加速度单位左右。海信集团和清华大学合作研发空调器舒适自然气流营造技术，四川长虹开展制冷剂流量控制的关键技术研究，海信研发高效低噪空调室外机，格力耀系列产品、冷静风系列产品应用了薄霜速融高效除霜控制技术，海信

日立首创双重热回收变温除湿技术，这些都优化空调器实际运行性能。另外，空调实际使用工况的测试、评价、控制和性能改善方法越来越受到关注，美的与清华大学合作改造的空调器动态性能测量实验室，是面向真实工况机组性能测量的成功案例。该实验室利用现有焓差室进行改造，通过模拟房间对空调器调控的响应，来投入对应负荷。对空调器进行动态测试，发现该方法更反映其实际运行性能。

在工商业用中央空调冷（热）水机组领域，发展呈现以下几个显著特点：（1）磁悬浮技术逐步成熟，并进一步向大冷量、宽负载率和高能效方向发展；（2）静压气悬浮技术实现“先浮后转”的突破，进一步提升机组的运行效率和可靠性；（3）高温热泵和低温热泵机组成为技术热点；（4）新型环保冷媒逐渐成为工商业冷（热）水机组的主流选择；（5）通过5G和物联网技术实现远程数据监控、故障诊断和智能控制。海尔采用静压悬浮技术实现了“先浮后转”，单压缩机制冷量可达350RT，COP达6.80，消除了压缩机启停过程中的摩擦问题，提高了部件的使用寿命，保障了系统的稳定运行。上海交通大学王如竹教授的团队研发的空气源热泵多品位热能高效供应关键技术，使空气源热泵的性能系数达到4.73，将机组的可靠运行环温从-25℃拓宽至-35℃。顿汉布什研发的高效废热梯级循环利用装备，最高可制取120℃的高温热水或蒸汽，替代了传统的高能耗、高污染锅炉，为工业节能提供创新方案。格力首次将双级压缩机技术应用于水冷螺杆式冷水机组中，并发明弱气脉动同齿异构、多叶大扭角螺杆转子型线，低阻流动布局结构和变工况下双级压比的多参数联动调节耦合控制方法，提升系统能效和压缩机等熵效率，从根源上避免传统型线因排气不同步导致的强气流脉动湍流耗散等问题，使其在宽范围内能够高效运行。重庆美的研发的一种机电控一体化磁悬浮变频离心机组，解决了传统PID控制在特定频段幅度和相位调整困难的问题，通过多模态自寻优和变速状态信号追踪等技术确保压缩机的稳定、安全运行。江森自控日立万宝提出全新开发SQ系列离心式高温水源热泵机组的计划，采用自主研发的日立高温热泵离心压缩机，制造成本更

低，可靠性更高。同时，该机组可提供更大压比，拥有更高的制冷循环效率，拓展了压缩机适用工况范围。广东美的设计研发的N系列空气源三联供热泵机组采用R290冷媒，首次将复合阻尼隔音材料应用于热泵行业，使整机噪音达到行业领先水平。诺通科技对浙江某集团进行厂区改造，采用高温热泵热水机替代原有的室内空调给车间降温，对水箱加热方式、出风系统结构等也进行改装并采用智能化全自动运行，实现一机两用，运行至今系统能效为2.3，节能降费率达40%左右。

在空气处理机组领域，研究聚焦于能效提升、环境保护和舒适性控制。通过采用热回收系统、智能算法、优化热交换、提高空气处理机组的风机效率、使用变频技术、优化温控设计等方式提高设备的整体能效，紧凑机组结构，提升室内空气品质和环境舒适度。维克公司提出的全直流变频冷凝热回收恒温恒湿产品通过集成控制技术、云平台技术、全变频技术和冷凝热回收无级调节技术，实现高效恒温、恒湿控制，降低能耗。北京环都拓普空调公司提出变频冷凝排风热回收新风机组，采用3D逆流高效热交换器和变频热泵热回收双重热回收技术，热交换效率和机组综合能效提高。环能建科防结霜热回收新风机组，采用热泵驱动转轮对回风进行深度除湿，在严寒天气下能够实现不结霜稳定运行。

在食品、药品冷链领域，预冷装备、快速冻结装备及新型复合能源冷库（含蓄冷材料）三个方面取得一定进展。预冷装备的新技术进展主要围绕节能低碳技术、智能控制技术和融合改进三个方面开展；食品冻结技术领域涌现出了高压冻结技术、超声波辅助冻结技术、电磁辅助冻结技术、射频/微波辅助冻结技术和脱水辅助冻结技术等新型加速食品冻结过程的辅助技术；新兴的非热物理加工技术在抑制微生物增殖、提高抗氧化酶活性等层面表现出较好效果；对单管多翅片排管蒸发器的几何参数进行研究、改进翅片结构、优化排管蒸发器的几何结构并在排管上增加蓄冷结构，优化排管蒸发器的运行模式等措施提高排管蒸发器性能；为解决食品冻干品质调控工艺不清晰、冻干设备运行效率低和冻干设备智能化程度及工艺匹配度不高等问题，需要根据不同的物质特性，选择合适的冻结方式和参

数，以及与之相配套的制冷系统和智能化工艺匹配技术，以实现最佳的冷冻干燥效果。

在数据中心冷却领域，绿色低碳转型问题变得越来越迫切。2024年国内外在人工智能和大模型方面取得快速发展，对算力需求持续增长，数据中心特别是算力中心高能耗、高碳排放、高功率密度的“三高”问题日益凸显。工信部发布的相关文件推荐间接蒸发冷却制取冷水技术、智能微模块技术、基于间接蒸发冷水机组的综合冷源技术等技术用于推广应用先进适用节能降碳技术装备；同时，2024年4月中国制冷展召开“数据中心冷却低碳技术”专题研讨会，包括数据中心冷却系统的各要点问题，全景展示了数据中心冷却系统各个环节的最新低碳节能技术与产品；2024年10月，《数据中心和通信机房用空气调节机组》（GB/T 19413—2024）发布，为相关空调产品的性能提升提供指导和具体要求。

在储热储冷技术领域，持续取得重要进展，涵盖材料制备及性能调控、装置设计与优化、系统集成及工程应用等多个方面。热能储存的研究重点仍然围绕熔盐储热、相变储热和热化学储热技术展开，并在材料稳定性、热循环寿命及大规模应用方面取得新突破。冷能储存方面，冰/冰浆蓄冷与相变储冷技术的研究进一步深化，聚焦于储冷材料的导热性能优化、高效换热结构设计、系统能效提升及低碳应用拓展等关键问题。在电化学储能电池的热管理领域，随着储能电站向大容量、高密度、长循环、超安全方向发展，如何实现高效热管理、精准控温、快速响应散热以及和储能系统的集成，成为当前及未来储能热管理的核心课题。在空气冷却、液体冷却、相变材料冷却、热管冷却等不同冷却方式上皆取得一定进展。海尔智慧楼宇发布由风冷和液冷两大系列产品组成的储能温控解决方案，能够满足发电侧、电网侧、用户侧的个性化客户需求，覆盖工商业储和集装箱大储等不同应用场景，具备稳定安全、高效节能、节省空间、智慧控制等优势。以全直流变频物联多联机、楼宇能源智控平台为核心，融合光驱储能等新型能源技术，实现多能互补和综合能源利用，满足用户热水及冷暖需求，助力建筑降本提效。蜂巢能源发布储能专用短刀电芯、家庭储能、工商业储能、电力储能等全

系列储能产品解决方案，针对储能场景正向开发350Ah和730Ah大容量储能短刀电芯，以及全球首款6.9MWh-20尺短刀液冷储能系统，实现高效温控策略。美的楼宇科技的“光储热柔”系统整合光伏发电、储能设备以及热泵空调，形成高效能源生产与管理体系，系统能够实现动态调优、实时监测和调整能源的生产与分配。通过热管理算法的优化，进一步提升电池寿命与安全性。这些技术创新不仅提升储能设备性能，还为储能技术的广泛应用奠定了基础。

在造雪技术方面，造雪技术和造雪质量取得明显进步。2024年开始投入使用的上海耀雪冰雪世界位于临港新城，拥有全球最大的室内真雪滑雪场，滑雪场总面积超过9万平方米，垂直落差接近60米，全年维持在-3℃至-5℃的恒温环境。采用的天冰S6型号造雪机和森林雪XFY-06造雪机等无须额外的制冷系统即可正常造雪，配备的智能控制系统使操作员能够远程调节雪质、自动控制造雪过程，可保障雪场365天连续运营，且具有很高的节能效果，属于国际一流造雪装备。第九届亚洲冬季运动会的雪上赛事举办地亚布力滑雪场采用诺泰克（N-07S）造雪机，造雪性能稳定、雪质细腻均匀、对环境适应性强，能够在相对较高的气温条件下稳定运行，从而实现高温造雪需求。

1.3.3 制冷行业与新材料、新工艺、新能源的结合催生出了许多新技术、新产品

高效热交换材料、柔性智能材料、环保制冷剂的利用改善了制冷产品设备的性能、效率、可靠性和环保性能；3D打印与快速成型技术、全能制冷系统集成则为零部件的制造和能源管理提供便利；电卡、压卡和磁卡效应制冷技术减少了制冷产品的碳排放，优化系统效率；新能源发电驱动制冷、太阳能制冷技术、地源热泵制冷、多能互补制冷系统等则推动产业向绿色、高效和智能方向迈进。海尔“零碳光驱储能方案”、格力“光伏直驱”变频空调机组和美的户用光储冷热系统能源高效利用技术是光储直柔系统的智能化应用的代表，

热声制冷和热泵具有潜在高效性、高可靠性和环保等优势，尽管在技术上已取得一定进步，但

一些关键技术仍需进一步突破，才能达到规模化应用需求；磁制冷作为一种可覆盖室温、低温与极低温的典型制冷技术，近年来为了提升整机系统性能和扩展其应用范围，室温与低温磁制冷、极低温磁制冷分别围绕着高性能工质和成型工艺、关键部件优化等开展研究；弹热制冷具有高导热率、高制冷能量密度、高效率等突出优势，取得多相变温度的高性能弹热回热器、动能回收的弹热制冷系统、极低温弹热制冷材料、用于弹热制冷的高效率驱动系统、基于扭转驱动的弹热制冷系统等多项进展；电卡制冷技术可以提供较高的理论循环效率和较低的碳排放量，目前研究主要聚焦在材料改进、器件论证、设计与制造等方面，电卡制冷技术围绕材料和器件发展取得了一定进展，但仍有发展空间；在空气制冷领域，众多学者对开式布雷顿循环、透平膨胀机-压缩机设计、等温压缩等进行研究；辐射制冷方面，相关研究已就提高辐射制冷材料的耐候性、自清洁性及环保性展开深入探索，推动辐射制冷技术在不同领域中的规模化应用。

1.3.4 AI+大数据的深度融合为制冷行业发展提供了新思路、新方向

制冷行业紧随人工智能技术的快速发展，呈现出新的发展思路 and 方向。随着大数据技术的飞速发展，制冷领域正经历一场前所未有的智能化变革。在这一过程中，AI与大数据的深度融合为制冷系统的优化、节能、故障诊断与预测带来全新机遇。通过实时收集运行数据和环境参数，结合大数据分析 with AI算法，不仅可以实现对制冷空调系统的精准控制与管理，还能在能耗优化、故障预防、系统可靠性提升等方面发挥重要作用。

冰轮环境借助边缘侧运行控制平台和云端大数据平台，打造出“双核引擎”协同工作的智能互联系统，为客户提供涵盖能源管理、节能控制、故

障诊断的一站式解决方案，可实时监测能耗和碳排放，将粗放式能源管理转化为精细化管理，显著减少人工运维需求。同时，采用“边缘计算+云端平台”架构，实现制冷系统运行的自适应最优化节能控制，平均节能率超25%，负荷峰值降低20%以上。自研复合模型故障诊断技术则实现精准故障预测与诊断，保障系统高可靠连续运行。目前，该系统已成功推广应用于伊利集团等十几家单位，助力制冷行业向数字化、智能化转型迈进。

海信、美的、格力、海尔等多家空调企业都在极力建立楼宇空调数据云平台，打造一个服务于空调及暖通系统、智能楼宇系统的综合性楼宇自动化管理平台。

小米空调基于物联网（IoT）技术，提出家用空调节能与健康管理新方案，通过物联网（IoT）技术实现高效节能与空气质量的协同优化。系统调控方案实现节能、杀菌、远程控制等功能，为家居智能控制的发展提供新方向。

格力变频空调低碳动态运行关键技术则聚焦于AI控制在空调系统中的应用，其核心创新包括AI动态能效优化控制和房间负荷自学习自适应调节。通过人工智能算法，对各部件进行实时分析并进行动态调整，使系统动态能效保持最优。基于大数据云平台的房间负荷自学习自适应调节方法，能够精准匹配实际使用负荷，减少温度波动和能耗。该技术还开发了行业首款AI芯片，突破传统DSP或MCU控制芯片的计算能力限制，实现更精确的动态节能优化，具有高算力和低功耗的特点，使空调器能效提升。美的厨卫提出的电热混动热泵系统A++超高能效关键技术在控制策略上实现多项突破，通过SMART逻辑控制系统和CFD多物理场仿真优化平台结合等技术，提升系统能效、缩短产品研发周期。

1.4 AI+制冷空调的新技术和案例

围绕着“双碳”政策，制冷产业会继续朝着低碳、高效、智能化等方向持续发展。大数据、AI技术的飞速发展让制冷行业迎来了一场前所未有的智能化变革，为制冷系统的控制策略优化和故障预测与诊断提供新的发展机遇。制冷行业势必将迎来大规模的低碳化、智能化转型。中国制冷空调行业正在积极拥抱人工智能（AI）技术，通过“AI+”实现能效提升、智能化控制和产业升级。

智能节能优化主要是动态负荷预测、系统能效诊断。动态负荷预测AI算法（如LSTM神经网络）分析历史数据、天气、人流量等，预测冷量需求，动态调整压缩机运行频率，降低能耗（部分案例显示节能15%~30%）。

系统能效诊断利用机器学习识别制冷系统中的低效环节（如冷凝器污垢、冷媒不足），提供维护建议。

故障预测与运维（PHM）主要是通过传感器实时监测振动、温度、电流等参数，AI模型（如随机森林、ANNs）提前预警故障（如压缩机磨损、制冷剂泄漏），减少停机时间。海尔、格力等企业已推出“AI云管家”服务，实现远程运维。

个性化舒适控制主要是结合IoT传感器和计算机视觉，AI识别用户位置、活动量，调节送风方向和温度（如大金的“人员感知技术”）。商业楼宇中，AI可动态分配不同区域的制冷量，平衡舒适度与能耗。

制造环节智能化主要是缺陷检测、供应链优化。缺陷检测：机器视觉（如YOLO算法）自动检测蒸发器/冷凝器的焊接缺陷。供应链优化：AI预测原材料价格波动，辅助采购决策。

数据瓶颈主要是高质量数据获取难，制冷系统运行数据分散且标准不统一，影响模型训练效果。解决方法主要是建立行业数据共享平台。

技术与成本平衡主要是中小厂商缺乏AI研发能力，依赖第三方解决方案（如华为云、阿里云提供

的预训练模型等）。边缘计算设备的成本较高，影响普及速度。

安全与伦理问题主要是智能设备可能面临网络攻击（如恶意篡改温控参数），需加强安全防护。

用户隐私保护（如通过摄像头识别人数时需匿名化处理）。

数字孪生构建虚拟制冷系统仿真模型，实时优化控制策略。强化学习（RL）让空调系统自主探索最优运行策略（如谷歌DeepMind在数据中心冷却的案例）。

跨界生态合作主要是空调厂商与云计算公司（如腾讯、百度等）、高校（如清华大学建筑节能研究中心等）联合研发。智慧楼宇场景中，空调系统与光伏、储能设备的AI协同调度。

制冷空调企业布局AI案例。格力电器等推出“G-AIoT”系统，AI算法实现多联机群的负载均衡。美的集团与NVIDIA等企业合作开发制冷设备边缘AI控制器。海尔等构建“E+云服务平台”，实现全球设备的智能诊断。

智能仿真与数字孪生：通过AI加速制冷系统仿真（如换热器流场分析），传统需数天的计算可缩短至小时级（例如格力等使用ANSYS AI工具优化风道设计）。数字孪生技术实时映射物理设备状态，预测不同工况下的性能衰减（如开利等开发了冷水机组数字孪生平台）。

新材料与新结构探索：AI生成设计（Generative Design）自动提出高效换热器结构（如美的等与高校合作生成拓扑优化翅片设计）。

智能制造中智能质检是机器视觉检测蒸发器/冷凝器焊接缺陷（大金等企业采用康耐视系统，漏检率<0.1%）。声纹AI诊断压缩机异响（海尔等企业通过麦克风阵列+深度学习实现99.2%准确率）。

柔性生产中采用AI动态调整生产线节拍（如格力等企业利用预测模型应对空调旺季订单波动）。

产品智能化中大金家用空调“Persona Sense”等企业通过红外传感器识别人体位置/活动量，自动调节送风（节能约12%）。美的“无风感AI”利用CNN算法预测人体体温变化。

麦克维尔商用空调磁悬浮机组采用强化学习动态调整压缩机转速，COP提升8%。

多模态交互中语音控制案例是海尔“小优”音箱支持方言指令，视觉识别是奥克斯空调通过摄像头判断老人/儿童模式。

在运维与服务升级中，预测性维护是特灵商用VRF系统通过分析电流谐波预测电机故障（准确率92%）

日立空调云平台实现全国5000+设备的剩余寿命预测（减少非计划停机30%）。

能源管理中是江森自控Metasys系统AI优化商场冷站群控，上海某综合体年省电费超80万元。

新兴技术融合是海信开发嵌入式AI芯片（制冷专用NPU），实现本地化实时控制（时延<50ms）。

采用强化学习优化R32等低GWP制冷剂的充注量（实验显示可减少冷媒泄漏风险40%）。

美的等企业建立跨地域制冷大模型（训练数据覆盖-30~50℃环境），海尔等企业推出“AI节能可视化管理屏”，直观显示节能效果。空调系统将成为能够自我进化“生命体”（如松下等企业空调通过长期学习用户习惯自动生成最优控制策略）。AI协调空调、光伏、储能的实时调度（远大科技已在长沙某园区实现碳减排15%）。

国内厂商（格力/美的/海尔等）在AI应用层面已与国际品牌（大金/开利）并跑，尤其在场景落地速度上占优。垂直场景专用模型（区别于通用AI，制冷专用模型需理解焓湿图、制冷循环等专业知识）。

AI技术正从单点应用向全链路渗透，推动制冷空调行业从“传统制造”向“服务+数据”转型。未来竞争的关键在于数据积累、算法迭代与跨场景落地能力。企业需尽快制定AI战略，避免在智能化浪潮中掉队。

第二章

系统、设备及关键零部件

2.1 环保制冷剂的发展

杨昭 张淑萍
(天津大学)

环境问题，尤其是近年来日益严峻的全球变暖问题，已成为当今世界面临的重大挑战。因设备充注、维修、事故损坏等情况，制冷剂大量排放到大气环境中，致使温室效应加剧，环境遭到破坏，这一现象成为人们关注的焦点。为应对全球变暖，2015年12月在《联合国气候变化框架公约》下召开的巴黎气候变化大会上，近200个缔约方一致通过了新的《巴黎协定》，旨在将全球平均气温升高水平控制在工业化前的2℃以内。该协议已于2016年11月正式生效，为2020年后全球合作应对气候变化指明了方向。然而，根据世界气象组织的报告，2024年的全球平均气温首次超过工业化前水平1.5℃，联合国秘书长古特雷斯呼吁各国政府采取果断行动应对日益加剧的气候危机。尽管个别年份突破1.5℃的限制并不意味着长期目标的失败，但是这意味着国际社会必须加倍努力，确保达到《巴黎协定》的目标。

作为氯氟烃（CFCs）和氢氯氟烃（HCFCs）的替代物，氢氟烃（HFCs）具有较高的全球变暖潜能

值（GWP），是CO₂的数百至数千倍，有的甚至高于CFCs和HCFCs。这些强温室气体在国际公约的强制性政策下逐步淘汰。2016年10月，197个缔约方签署了具有里程碑意义的协议《蒙特利尔议定书-基加利修正案》，其中18种HFCs工质被列入受控名单，该协议已于2019年1月正式生效。同时，各国也纷纷颁布法规限制高GWP工质的使用，如欧盟含氟气体法案（F-gas法案）、美国SNAP政策、日本《含氟化合物排放抑制法》等，并不断收紧政策。欧盟自2015年实施F-Gas法案，采取配额管理系统削减市场的HFCs消费量，规定了含氟气体的储藏、回收、作业人员培训及认证、报备、禁用等内容，并针对制冷剂泄漏制定了严格的防范和检测规定。2024年3月11日，欧盟F-Gas新法规（EU/2024/573）正式实施，新法规修订案规定，HFCs削减的基线值为2015年的1.8亿吨CO₂当量，到2025年削减75.7%，2027年削减87.7%，2030年削减94.8%，2045年削减97.3%，2050年削减100%。美国环保署于2024年7月25日签署SNAP第26项规则，列出10种可用于空调和冷藏

冷冻用途的新型制冷剂替代产品及使用条件，修改R290在两种终端用途情况中的使用条件，并对R290应用于冷藏冷冻食品加工和运输终端时需遵守《清洁空气法》第608条“通风禁令”进行豁免。此外，美国还发布《可变制冷剂流量空调行业氢氟碳化物的使用限制法规》，规定从2027年1月1日起，只有那些在2026年前制造或进口到美国的特定部件才能用于新型可变制冷剂流量空调系统中，若建筑许可证是在2023年10月5日前签发，并且明确允许使用含氢氟碳化物材料，则该类设备安装期限可延长至2028年初，前提是该系统使用的部件是在2026年1月1日之前在美国制造或进口到美国的。

面对严峻的环境形势，作为负责任的大国，中国已于2020年9月宣布：中国将力争二氧化碳排放量于2030年前达到峰值，争取在2060年前实现碳中和。这在国际社会上掀起了以“碳中和、碳达峰”为目标的温室气体淘汰浪潮。2023年6月生态环境部印发《中国消耗臭氧层物质替代品推荐名录》的通知，推荐了23个消耗臭氧层物质（ODS）HCFCs的替代品，涉及房间空调器和家用热泵热水器、工商制冷、泡沫、清洗等行业，其中制冷剂替代品7个。2023年12月18日，国务院常务会议审议通过《国务院关于修改〈消耗臭氧层物质管理条例〉的决定（草案）》。这是《条例》自2010年公布以来的首次修改。自2024年3月1日起，修订后的《消耗臭氧层物质管理条例》正式施行，在全国适用。目前，我国正开展最后一类ODS—HCFCs的淘汰和替代工作，正向2025年削减67.5%的目标加速迈进。此外，按照基加利修正案履约要求，中国应在2024年冻结削减氢氟碳化物的消费和生产，中国正式进入削减周期。我国对HCFCs和HFCs受控用途生产单位实施配额许可管理，根据履约目标，制定年度配额核发方案，向相关生产单位核发年度生产配额和内用生产配额，通过逐年削减配额，实现年度淘汰目标。

低GWP的HFCs与氢氟烯烃（HFOs）制冷剂成为低碳环保制冷剂替代路线中潜力十足的选择。然而，2023年1月13日，丹麦、德国、荷兰、挪威和瑞典五国向欧洲化学品管理局（ECHA）提交了PFAS限制提案。2月7日，ECHA公布该提案，该提案的公布，对制冷剂的替代提出了更加严格的要求。该

提案认为，HFCs与HFOs制冷剂在大气中被氧化后降解成 CF_3CHO 、 CF_3COF 、 CF_3OH 等中间产物，而这些中间产物可不同程度转化成三氟乙酸（TFA）^[1]，这些中间产物形成TFA后，最终会随着雨雪冲刷或沉积而离开大气，聚集在海洋、湖泊等地。TFA在环境中的积累可能会对生态系统产生影响。高浓度的TFA会影响实验动物的肝脏、肾脏，还会对后代造成体重减轻、畸形等不良影响。并且由于其溶解性好，在水体环境中会改变水体的化学性质，对水生生物的生存环境产生潜在威胁。随着大气中HFCs、HFOs制冷剂的降解，TFA的产量可能会增加，其污染范围也可能不断扩大。鉴于此，提案呼吁对PFAS制冷剂实施严格限制，以最大程度降低其环境与健康风险。由于HFCs与HFOs制冷剂大多因属于全氟烷基酸（PFAA）前体而被列入了PFAS限制提案中，若该限制提案生效，必将对既定的制冷剂替代路线带来冲击，可选择的制冷剂范围可能会大幅减少。

面对日益严峻的环境形势和政策法规的限制，对环境存在危害的工质正在逐步削减甚至淘汰，寻找不同应用场景和设备工况中合适的制冷剂替代方案迫在眉睫，促使全球加快了新型低GWP制冷剂的开发与应用研究。当前，在全球范围内尚没有找到一种零ODP值、低GWP值、安全、高性能的“完全理想”的制冷剂。未来的替代技术选择和行业履约工作还将面临着巨大的压力和挑战，制冷剂替代仍然是制冷行业的研究热点。

2.1.1 低GWP制冷剂的研究现状

随着全球对气候变化和环境保护意识的增强，低GWP制冷剂的研究与应用逐渐成为制冷技术领域的热点。然而，低GWP制冷剂在热力学性能、安全性及循环性能等方面的表现直接影响其实际应用效果。因此，系统研究低GWP制冷剂的各项特性，对推动其广泛应用具有重要意义。本节将从热力学参数、燃爆风险及使用安全性三个方面，系统梳理和分析当前低GWP制冷剂的研究现状。

1) 热力学性质

制冷剂作为蒸发循环系统中能量传输的媒介，其性质极大影响了循环性能。在进行环保制冷剂替

代时，只有充分掌握工质的热力学性质，并开发出准确的状态方程，才能评估新型工质在制冷、热泵和有机朗肯循环等领域的应用潜力。因此国内外许多学者对新工质热物性进行研究，研究内容主要包括：临界参数、PVT特性、黏度、比热容及其声速等。在研究方法上，一方面，研究人员借助高精度仪器，在不同的工况条件下进行精细测定，为制冷系统设计提供支撑。进一步，通过状态方程、人工神经网络等方法对热力学参数进行预测，以便在更少的实验成本下获得更多的热力学参数，并在制冷循环实验台上，对制冷剂实际循环性能进行全方位评估。另一方面，计算机模拟技术的快速发展，对热力学性质的研究更加全面。借助强大的计算流体软件，研究人员可以探究并分析制冷剂在不同工况下的流动与传热过程，借助分子动力学软件，可以从微观领域探究制冷剂分子结构样式、反应路径等，从分子热振动引发的能量传递微观路径，到热量在宏观流体介质中的扩散速率动态变化，均实现全方位可视化呈现。

制冷剂在系统中循环时，裹挟着润滑油，润滑油与制冷剂的物性影响制冷设备的制冷性能。对润滑油的研究主要集中在润滑油与制冷剂的油溶性、润滑油与制冷剂在制冷循环中的黏度。国内外研究机构在制冷剂与润滑油互溶性研究方面，主要集中在互溶性的实验和理论研究，寻找制冷剂与润滑油的互溶性规律，采用热力学规律和数学方法并结合实验数据，模拟制冷剂和润滑油的溶解关系。黏度属于流体的迁移性质，是计算混合制冷剂换热系数所需的基础数据，在制冷系统优化，尤其是换热器设计等方面起着关键的作用。然而，关于此方面的研究依然较少，研究主要集中在多种混合工质的黏度测量，测试方法包括毛细管黏度计法^[2]、表面光散射法^[3]和落球法^[4]等。

2) 燃爆风险

目前对新一代制冷剂的环保特性要求非常严格，而已有的或潜在的环保替代制冷剂大部分具有可燃性，因此在重视环保性的同时安全性亦成为本行业关注的重点。

制冷系统包括多个活动部件、管路、连接处

等，在使用过程中容易发生泄漏。此外，在制冷设备维修、移动中，也会由于操作而发生制冷剂的泄漏。制冷系统的泄漏可分为两类，即微泄漏与灾难性泄漏^[5]。对于制冷剂微泄漏而言，研究多集中在制冷剂发生泄漏后制冷系统的运行特性。制冷剂发生灾难性泄漏时，制冷剂快速泄漏至外部环境，并在外部环境快速到达高浓度，引起燃爆风险，因此，对制冷剂安全性的研究多集中在灾难性泄漏情况。为了评估可燃制冷剂泄漏至外部环境后的燃爆风险与燃爆特性，众多学者对在燃烧极限、燃烧速度（或火焰传播速度）、最小点火能、燃爆压力等进行了研究。其中，燃烧极限可分为可燃下限LFL和可燃上限UFL。可燃气体的浓度接近燃烧下限LFL或燃烧上限UFL时，受限于可燃气体或氧气浓度，体系燃烧的剧烈程度会降低；浓度低于LFL或高于UFL时，则体系无法被点燃；在LFL与UFL之间存在一个燃爆反应的极大值点，当可燃气体浓度接近化学计量浓度，反应近于理论上的完全燃烧，实际燃爆反应多为空气过剩。因此，研究可燃气体在可燃下限的燃烧特征尤为重要。火焰传播速度指火焰前锋（或前沿）的移动速度，最小点火能是衡量可燃工质燃爆危险程度的重要参数之一，是指的工质燃烧反应所需的最小点火能，燃爆压力则是评估发生燃爆反应后对器壁和空间产生的破坏力的强弱，此指标通常也是防爆设备安全设计的重要依据。可燃制冷剂的燃爆特性并不是一成不变的，在不同的环境条件下会呈现出不同的规律，因此，研究人员探究了不同测试条件与环境参数下燃爆特性，包括环境温度、环境湿度、压力、气流扰动等^[6-9]。在实际使用时，不同的制冷设备具有不同的使用场景，为准确评估制冷系统中发生制冷剂泄漏后的危险性，需要对实际工程使用过程中制冷剂发生泄漏后的燃爆风险性进行评估。一种研究方法是实验的方法，测试发生泄漏后的制冷剂分布与燃爆特性，然而，实验是具有破坏性与危险性，制冷剂浓度分布测量的测点是有限的，因此，更多的研究集中在计算机仿真研究，针对不同制冷设备建立不同使用场景模型，并使用计算流体软件模拟制冷剂发生泄漏后的扩散分布，以评估判定可燃性风险^[10-12]。由于新一代的制冷剂多具有可燃、可爆性，在推广时必须要对

制冷系统的泄漏燃爆危险进行风险评估和辨识，以便建立预警防护机制并采取针对性措施。

3) 安全性

为了降低制冷剂泄漏到外部环境中的危险性，研究人员从工质阻燃、监测预警两个角度开展研究，在对可燃工质的阻燃方面，通常是将具有阻燃特性的气体与可燃工质适配，谋求配比而成的混合工质在可燃性、环保特性和系统性能方面折中。尤其是近年来，随着制冷行业的迅速发展，制冷系统的管路与部件的密封工艺日益成熟，可燃工质安装与维护标准的不断完善，其使用范围也在逐渐放宽，可燃工质也慢慢为人们所接受。因此，在低碳工质的开发过程中，不再一味追求可燃工质可燃性的完全抑制，而转变为弱化其可燃性，降低其安全等级，以寻求工质在热力学性质、安全性和环保特性的平衡。目前常用的阻燃剂主要包括天然阻燃剂 CO_2 和 N_2 ，不可燃卤素化合物（如HFCs：R134a、R125、R227ea、R245fa等）、HFOs（如R1336mzz(Z)、R1216等）和HCFOs（如R1233zd(E)等）^[13]。制冷剂发生泄漏后，不仅会影响设备的稳定运行，可燃制冷剂还会造成安全性风险。因此，及时检测制冷剂泄漏故障并做出预警十分重要，对于制冷剂泄漏检测的研究可分为两类^[5]，一类为利用物理规律，对制冷系统中的每一个部件建模，从而获得整个制冷循环系统的计算模型。物理模型基于物理规律，通过系统中关键节点的工况参数，计算出制冷剂在不同部件内的温度和压力，从而得到制冷剂的密度，再结合部件的结构参数，通过传热传质过程获得制冷剂在各部件内的分布，即可得到制冷剂的质量分布。将不同制冷部件的制冷剂量累加与总充注量进行比较，进而判断是否发生制冷剂泄漏故障。另一种为利用数据挖掘的方式，通过制冷系统长期历史运行中获得的运行数据与故障数据进行数据分析，建立制冷剂泄漏故障检测模型，目前常用的算法包括支持向量机、决策树、神经网络、随机森林等一系列算法^[12, 14, 15]，一旦发生制冷剂泄漏故障，模型能够迅速做出判断并发出预警，有效保障制冷系统的稳定运行。

2.1.2 技术应用

在新一代环保制冷剂的选择中，理想的制冷剂应满足：零ODP，极低的GWP，安全无毒，优异的热力学性质和较低的价格。但是完美制冷剂在现阶段并不存在，环保的压力逐年提高，新一代制冷剂的选择通常在各方面权衡和折中。从环境的长期安全考虑，应尽量避免使用最终会排放到大气非自然类工质，所以自然类工质 CO_2 、 NH_3 、水、HCs等则显示出独特的优势。近年来，随着新一代制冷剂的替代进程的深入，依据制冷剂的不同特性，也涌现出一系列新技术、新应用及新产品

1) R744

R744 (CO_2) 作为一种天然制冷剂，因其卓越的环保性能和优异的热力学特性，在全球范围内得到了广泛的关注和应用。 CO_2 作为制冷剂的使用最早可追溯到1850年，由Alexander Twining^[16]首次运用于蒸汽压缩系统中。随后，Carl von Linde^[17]为F.Krupp公司设计开发的制冷剂获得专利并引领 CO_2 作制冷剂的快速发展。1919年前后， CO_2 压缩制冷剂开始被广泛运用于各类舒适性空调系统中，包括百货商店、办公室、剧院等。然而，由于 CO_2 的临界温度较低（ 31.1°C ）和临界压力较高（ 7.37MPa ）^[18]，在高温环境下制冷效率显著降低，加之当时技术条件限制导致的制冷剂泄漏问题， CO_2 逐渐被氟利昂类制冷剂取代，最终在20世纪50年代左右退出市场。随着环保需求的提升，再次引起对 CO_2 作为低GWP自然工质的重视。现代 CO_2 制冷剂已应用于汽车空调、人工冰场、热泵系统和商业制冷领域中。欧盟认为 CO_2 将是R134a的主要替代品。然而，二氧化碳临界温度低这一特性，依然给它的应用带来诸多挑战。当运行环境接近或超过临界温度时，如何保障系统高效运行且维持较低能耗，成为现阶段研究的关键与难点。从设备层面来看，R744需要高压系统设计，其高压操作特性无疑增加了设备设计的复杂程度与成本投入。一方面，二氧化碳的排气压力高、节流损失较大^[19]，这就使得研究二氧化碳与润滑油的相互作用显得尤为关键；另一方面，压缩机材料的密封性也亟待提升，这些都是未来研究的热点方向。为了攻克这些难题，制冷行业积极行动，持续大力推进高压制冷设备的研发与标准化工作，力求提升整

个制冷系统的设计效率与可靠性。图1所示为国家速滑馆“冰丝带”^[20]，采用二氧化碳跨临界直冷制冰系统，1.2万平方米的冰面采用分区制冷方式单独控温，实现同时运行、不同使用。相较于传统制冷方式，效能可提升 20% 以上，制冷更加均匀，且制冰过程中产生的废热可用于除湿、冰面维护、加热场馆生活用水等，全冰面运行的情况下，“冰丝带”仅在制冷环节每年就能节电200多万度，相当于北京6000余个家庭一个月的用电量。



图2.1-1 国家速滑馆“冰丝带”^[21]

2) R718

R718，即水（ H_2O ），是一种天然制冷剂，也是自然界中常见的物质，具有化学稳定性好、安全、制冷系数高的特点。随着全球对环境保护关注度不断提高，R718成为传统制冷剂的有力替代品之一，受到国内外学者的广泛关注。在大型商业建筑和工业厂房的中央空调系统中，R718作为制冷剂的冷水机组逐渐受到关注。采用吸收式制冷技术，以水为制冷剂、溴化锂或其他盐类溶液为吸收剂，组成二元溶液工质对。在食品冷冻冷藏行业，R718制冷技术可应用于速冻装置、冷藏库等。与传统制冷剂相比，R718不会在食品表面残留有害物质，符合食品安全的要求。在化工合成反应中，通过R718制冷循环为反应釜提供稳定的低温冷却条件，确保反应在适宜的温度范围内进行，提高反应的转化率和产品质量。在钢铁、有色冶金、玻璃制造等工业领域，生产过程中会产生大量的中高温余热（如烟气温余热、工艺流体余热等）。R718吸收式制冷技术可以有效地回收这些余热，并将其转化为冷量，实现余热的回收利用。然而，R718的应用也面临一些挑

战。其冷凝和蒸发压力小、容积制冷量低，需要开发真空下专用的大压比压缩机，且蒸汽过热问题会影响系统经济性，这在一定程度上限制了其在蒸汽压缩制冷系统中的广泛应用。冰轮对此进行了研究与开发，发布了105K+超大温升蒸汽热泵离心压缩机，并利用此离心压缩机构成大温升热泵机组，如图2所示^[22]，冷凝器侧可提供1.0~3.6barA的蒸汽或者90~140℃的热水产出，蒸发器侧最低可20℃工业废水、江河湖海等自然水源中的余热资源。该离心压缩机拓宽了离心热泵的应用范围，可以有效解决中低温余热高效回收利用的难题。



图2.1-2 105K+超大温升蒸汽热泵离心压缩机热泵机组

3) R717

R717，即氨（ NH_3 ），作为一种天然制冷剂，具有优良的热力学性质，在相同工作温度和制冷量的条件下，与其他制冷系统相比，氨制冷系统的压缩机和换热器的尺寸可以更小，可节省材料和能源，提高能源利用效率。在双碳背景下，氨制冷系统愈发受到关注。氨系统主要用于蒸发温度在-65℃以上的大、中型单级和双级制冷机中。氨的临界温度高达132.4℃，也可作为高温热泵的制冷剂使用，用于非密集型区域的集中供暖。但是随温度的升高，氨的压力较高，虽低于 CO_2 系统，也需对压缩机进行重新设计，而针对氨系统也已开发出专用的电子膨胀阀、板式换热器，微通道换热器和高压螺杆压缩机等。氨是一种优良的制冷剂，然而，氨具有一定的毒性、可燃性，并且氨是易燃的，在空气中的浓度达到一定浓度时会存在爆炸危险，这对氨制冷系统的安装、运行和维护提出了严格的安全

要求，限制了其在一些对安全性要求极高的场所的应用。未来需要研发更加安全可靠的氨制冷系统，通过改进设备的密封性、加强安全监测和防护装置的应用，降低氨泄漏和爆炸的风险。同时借助智能化控制手段，实现对系统的远程监控、故障诊断、自动调节等功能，提高系统的运行管理效率和可靠性，降低人工成本和运行风险。氨属于第一代制冷剂，经过了历史的验证与使用，技术也已经较为成熟。图3为北京冬奥会国家雪车雪橇中心，采用了氨制冷系统^[23]。这套氨制冷系统拥有 80t 全球最大储量，通过巧妙设计的内置制冷管道，能够在 40℃ 的复杂环境温度下，精准维持 50mm 厚冰面的高质量状态。



图2.1-3 国家雪车雪橇中心全景^[24]

4) HCs

HCs制冷剂即碳氢类制冷剂，该类制冷剂成本低廉且易于获取，同时在环保性能与热力学性能方面表现卓越，受到了极力推崇，是目前最具希望的制冷剂之一。其中丙烷（R290）、丙烯（R1270）以及异丁烷（R600a）为该制冷剂的典型代表。其中，R290的饱和蒸气压、汽化潜热、黏度系数、饱和液态与气态导热系数等均优于R22，充注量仅为R22的30%~40%，排气温度和排气压力较低，有利于高温制冷^[25]。在实际技术应用中，R290已应用于一些小型制冷设备，在家用空调领域，美的R290分体式空调已进入欧洲、印度和中国市场，格力的R290冷媒分体式空调通过了TÜV南德集团的认证，在汽车空调领域，南京的奥特佳量产全球首款R290冷媒的汽车空调系统。此外，R290逐步应用于除湿机、

热泵热水器、商用及家用冷柜领域，展现出其应用潜力。R1270的临界温度、临界压力和标准沸点均与R290相当，汽化潜热略高于R290，在系统性能方面更具优势。在工业制冷领域，R1270展现出了独特的应用价值。例如，在化工生产中的低温冷却环节，它能够精准地控制温度范围，确保化学反应在适宜的低温环境下稳定进行。中石油吉林石化的沥青造气装置及合成氨装置采用1套ges开启螺杆式压缩冷凝机组，如图2.1-4所示，以R1270为制冷剂，设计蒸发温度为-40℃，机组提供液态丙烯至甲醇洗装置进行蒸发，单套机组可处理一级进气和二级补气不同压力的丙烯气体，年处理总量可达21.4万吨^[26]。R600a等熵指数小，排气温度较低，单位容积制冷量仅为R12的50%左右，具有较高的导热系数和较小的压比。在冰箱制冷系统中，R600a得到了广泛应用。它的低排气温度特性，使得冰箱压缩机的工作环境更为稳定，减少了压缩机因过热而损坏的风险，延长了冰箱的使用寿命。不过，HCs制冷剂虽然优势明显，但因其具有可燃性，在应用过程中对安全标准要求极高。相关企业和技术人员在使用这些制冷剂时，必须严格遵循诸如气体泄漏检测、防爆电气设备配置等一系列安全规范，确保制冷系统在安全的前提下高效运行。



图2.1-4 沥青造气装置及合成氨装置

5) HFOs

以R1234yf和R1234ze(E)为代表的饱和烯烃HFOs制冷剂在近年来饱受关注，该制冷剂是在2007年由DuPont与Honeywell公司联合开发，属于丙烯衍生物，由于分子内双键的存在使得碳原子对氢原子的束缚力较弱，容易发生断裂，因此大气寿命较

短。HFO1234yf被认为是R134a在汽车空调中的替代品，并不需要过多的系统改造，因此在欧洲的汽车空调行业得到了迅速的发展，在欧盟新设计的车型中大部分采用HFO1234yf，这也得到了美国通用公司的积极响应。现如今，许多研究人员正在考虑将R1234yf的技术扩展到其他领域，如家用冰箱，热泵，小型制冷系统和冷水机组等。R1234ze(E)价格较R1234yf便宜，可用于贩卖机和干衣机等小型机组。此外，R1234ze(E)在冷水机组中和亚临界中高温热泵及热水器中使用时，系统性能较R134a更为优异^[27]。江森自控提出了针对R1234ze(E)制冷剂的York YK-CP离心式冷水机组^[28]，有2,000至3,000TR两种规格，与其他使用低压制冷剂的冷水机相比，占地面积小22%，性能高，可配备可选的变速驱动装置，能够在低至7.2°C的环境下运行。然而，2023年2月欧盟出台的PFAS限制提案，将HFOs制冷剂列入了限制范围中，因为HFOs属于PFAA前体。这使得制冷空调行业在选用HFOs制冷剂时面临限制，如果该提案最终生效，既定的制冷剂替代路线将受到严重冲击，寻找既符合环保要求又能替代HFOs的制冷剂，或者对现有的HFOs制冷剂进行改进，以期满足法案要求。



图2.1-5 York YK-CP 离心式冷水机组

2.1.3 结论

在现阶段面对环保的压力和制冷剂淘汰政策的推进，国际社会对下一代制冷剂的选择并没有定论。受国际协定以及各国环保法规的强力驱动，制冷行业必须加快淘汰高GWP值制冷剂，全力开发更加环保、高效的新型制冷剂，以满足日益严格的碳排放和臭氧层保护要求。

对于现有低GWP制冷剂，如HFOs，面临欧盟PFAS限制提案等挑战，可深入研究如何降低其潜在环境风险，例如优化分子结构以减少降解产物对生态的影响，或者通过与其他低GWP物质科学配伍，阻断反应路径，在维持或提升制冷性能的同时，符合法规要求。

天然制冷剂因其天然、零ODP、低GWP的特性，具有广阔的发展前景，R717与HCs制冷剂虽存在安全隐患，但是其具有卓越的热力学性能和成熟的技术体系，采用阻燃等技术手段降低可燃性，同时需加强安全管控措施以系统使用安全性，天然制冷剂将继续在制冷领域占据重要份额。

随着物联网、大数据、人工智能等技术的飞速发展，未来制冷系统将实现智能化监控与管理。通过传感器实时监测制冷剂的状态、泄漏情况、制冷系统的运行参数等信息，利用大数据分析和人工智能算法进行故障预测、性能优化，能够为制冷系统的高效安全运行，制冷剂的精准选择、充注量优化提供依据。

参考文献

- [1] 安青松, 侯佳鑫, 史琳, 等. 欧盟PFAS限制提案解读及其对制冷空调行业影响与应对[J]. 制冷学报, 2024, 45(2):22-29.
- [2] COUSINS D S, LAESECKE A. Sealed gravitational capillary viscometry of dimethyl ether and two next-generation alternative refrigerants[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2012, 117: 231-256.
- [3] BI Shengshan, CUI Junwei, ZHAO Guanjia, et al. Surface tension and liquid viscosity measurement for binary mixtures of R134a with R1234yf and R1234ze(E)[J]. Fluid Phase Equilibria, 2016, 414: 60-64.
- [4] DANG Yagu, KAMIKA T, DANG Chaobin, et al. Liquid viscosity of low-GWP refrigerant mixtures (R32+R1234yf) and (R125+R1234yf)[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2015, 89: 183-188.
- [5] 方家浩. 可燃性制冷剂泄漏对制冷系统运行性能影响的理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [6] ZHAI Rui, YANG Zhao, FENG Biao, et al. Effect of environmental condition on the flammability limits of two isomers of tetrafluoropropene[J]. Combustion and Flame, 2019, 207: 295-301.

- [7] ZHAI Rui, YANG Zhao, ZHANG Yong, et al. Effect of temperature and humidity on the flammability limits of hydrocarbons[J]. Fuel, 2020, 270: 117442.
- [8] 冯彪, 杨昭, 翟瑞. 实验研究气流扰动对R161燃爆特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(8): 1661-1664.
- [9] FENG Biao, YANG Zhao, LV Zijian, et al. Effect of gas disturbance on combustion characteristics of flammable refrigerants near LFLs[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 368: 21-32.
- [10] 汪琳琳, 杨昭, 王丹. R1234yf整车汽车空调泄漏扩散研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(1): 59-67.
- [11] 候召宁, 杨昭, 赵延峰, 等. 冷冻箱内工质泄漏及燃爆风险[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(5): 1284-1289.
- [12] HE Hongxia, YANG Zhao, ZHANG Yong, et al. Comprehensive risk assessment of flammable refrigerants in HVAC systems based on Bayesian networks and consequence modeling[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108579.
- [13] 翟瑞, 黎芷均, 杨昭, 等. 可燃低碳制冷剂匹配阻燃剂的研究及应用现状[J/OL]. 制冷学报, 1-9[2025-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20241219.1440.002.html>.
- [14] ZHAO Y, YANG Z, ZHU J, et al. Research on the dynamic characterization and detection of refrigerant leakage in multi-connected air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 309(2024): 114076.
- [15] WANG Z C, WANG S C, LI D, et al. An intelligent fault detection and diagnosis model for refrigeration systems with a comprehensive feature selection method[J]. International Journal of Refrigeration, 160(2024): 28-39.
- [16] BODINUS W S. The rise and fall of carbon dioxide system[J]. Ashrae Journal, 1999, 41(1999):37-42.
- [17] Besonderheiten und Einsatzchancen als Kaltermittel. Stuttgart: DKV, 1998.
- [18] 张永明. 跨临界二氧化碳热泵热水机组的性能模拟与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [19] 轩福臣, 谢晶. 跨临界CO₂制冷循环系统与应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 226-231.
- [20] 王雪莹. 二氧化碳直冷制冰:打造不一样的“冰丝带”[N]. 北京科技报, 2022-01-17(16).
- [21] “从‘最快的冰’到‘大众的冰’——回访国家速滑馆‘冰丝带’.” 2023年1月31日. https://k.sina.com.cn/article_1699432410_654b47da020012f1.html.
- [22] “金奖产品 | 105K + 超大温升蒸汽热泵离心压缩机.” 中国制冷展, 9 Oct. 2024, https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5OTM2ODU2MA==&mid=2649610559&idx=1&sn=da1453175289bcbe5463ff02d7560c0a&chksm=be31260241122f1eb1a6339fe44dd1e2dedd2a01c78987c5b569e5a495e0b45b14aead90ad12&scene=27
- [23] 马一太, 王派. 2022年北京冬奥会国家速滑馆CO₂制冷系统和国家雪车雪橇中心氨制冷系统的简介[J]. 制冷技术, 2020, 40(2): 2-7.
- [24] 李宇, 冯涛, 宋茂祥, 等. 异型双曲面非线性雪车雪橇赛道氨制冷管道系统建造关键技术[J]. 安装, 2022(S1): 31-33.
- [25] PARK K J, SEO T, JUNG D. Performance of alternative refrigerants for residential air-conditioning applications[J]. Applied Energy, 2007, 84(10): 985-991.
- [26] “麦克维尔 | 工业冷冻将助力中石油吉林石化多个重点项目落地.” 2024年10月16日. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/7235451845/1af443bc500101iloi>.
- [27] MOTA-BABILONI A, NAVARRO-ESBRÍ J, MOLÉS F, et al. A review of refrigerant R1234ze(E) recent investigations[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 211-222.
- [28] “江森自控推出大容量离心式冷水机组.” 2024年12月6日. https://m.sohu.com/a/833910677_121123713/.

2.2 常规形式制冷热泵整机设备

刘金平¹ 张天娇²

(1. 华南理工大学; 2. 上海理工大学)

2.2.1 家用空调

家用空调技术的研究进展主要集中在提高低环温制热性能、改进两器换热性能、环保制冷剂的替代与创新、智能化和健康功能应用等方面。

1) 研究进展

随着空调使用要求的不断升级,家用空调制热相关方面功能也越来越受到用户的关注。分析数据表明:制热节能以及除霜控制仍是技术研究的主要方向,暖足功能符合人体理想的采暖方式,未来必将成为产品的一大卖点;加湿技术能够解决空调采暖干燥的痛点,亦会获得用户的认可^[1]。

低温制热量是APF测试的关键项目,也是影响用户体验的重要指标。试验研究结果表明:转子压缩机回油孔高度降低有利于减小吸气过热度,缓解热量衰减,从而提升低温制热量;泵体的缸高与缸径比越小,压缩机容积效率越高,低温制热量就越多,缸高与缸径比每减少3.3%,制热量提高1%^[2]。

随着房间空调器的快速普及和国际铜价的持续升高,未来制冷空调行业采用的翅片管式换热器将向着紧凑、高效和低成本发展。因此开发降本增效的小管径翅片管式换热器具有重要意义。以一款冷暖型房间空调器翅片管式室外换热器为研究对象,将其换热管外径由7 mm减小至5 mm,开发适用于5 mm小管径换热器的高效翅片,在此基础上设计平衡换热能力与制冷剂侧压降的高效制冷剂流路。实验结果表明5 mm小管径换热器在多种工况下性能均超出初始样机水平,同时有效降低换热器的成本^[3]。

以中小型空调设备中的替代制冷剂为例,在行业中提出的方案是推广应用R32, R32具有单位容积制冷量大、单位制冷量制冷剂充注量小、良好的传热性能、理论效率高等优点,是一种成熟稳定的制冷剂,国内有大量生产,价格便宜,可获得性好。而R32被诟病的唯一缺点,无外乎是其GWP值为675,

相较于HCs或HFOs更高。但众所周知,以目前全球均认可的全生命周期气候性能(LCCP)的角度来衡量,R32由于其相较于传统制冷剂有出色的单位容积制冷效率,应用于产品中时本身的材料消耗会大幅降低,使制造成本下降;R32只具有微可燃性,应用于产品中附加的安全成本(相较于传统制冷剂)增加很少;而较高的能效水平使得其寿命期的运行能耗降低,带来大量的温室气体减排成效。因而与其他可能的替代品相比,R32的全生命周期气候性能表现出色。有关统计数据显示,R32制冷剂在全球市场中已经获得广泛应用,目前R32在中国家用空调市场中的占有率已超过80%^[4]。

对基加利修正案具体条款进行解析,按照基加利修正案GWP限值,以R410A制冷剂的GWP作为基线选取中国地区基线年R410A和R32占比分别为26%和74%,并随着时间推移,计算出R410A占比在2035年降至4%,基本退出市场,同年R32占比为96%^[5]。

当前家用空调健康技术的智能化发展主要表现在显性化、自动化、定制化、物联化和场景化5个方面,说明家用空调行业已从健康功能向健康解决方案转型,甚至向健康家电家居融合。与此同时,需要关注识别准确度、隐私性与合规性、安全性和跨品牌互联互通等问题点^[6]。

家用空调作为室内空气调节的电器已经广泛走进了消费者家庭。存量市场和增量市场并存的时代,消费者对空调的消费需求包含城镇的替换需求和农村的新增需求,这两种需求的共同点是消费者对空调功能、品质的不断提升。高效快速地调整室内温度已经成为消费者对空调产品最基本的功能需求,室内空气质量、送风角度、空调使用中的舒适体验是消费者对空调产品提出的新需求。部分品牌开始改进空调送风方式,提升消费者的舒适体验,从原来追求简单的送风距离远,逐渐在送风距离、送风方向、送风力度的多角度综合考量^[7]。

2) 优秀产品

(1) 美的KFR-35GW/N8MXC1D型机焓分体空调器

该家用分体空调器的关键技术包括：研制了宽频滚动转子式压缩机：改进了型线曲轴、双排气阀组结构，研发了全域高效电机，提高了油膜承载力，开发压缩机转子位置估计技术和压缩机交轴电压反馈弱磁控制技术，实现压缩机低频区域准确转子位置估计以及压缩机重载低速运行，提升了低频效率，解决了高频效率衰减和振动噪音恶化问题，实现了压缩机6~160Hz范围内的安全、可靠、高效运行；通过霜层厚度分级感知预测模型，采取多模式交叉耦合进行除霜，显著改善制热舒适性，适应复杂多变的天气环境。整机低频能效提升6%，高频能效提升4%，综合APF最大提升24.4%，满足国家一级能效标准，节能效果显著。



图2.2-1 美的KFR-35GW/N8MXC1D型机焓分体空调器

(2) TCL小蓝翼P7新风空调

TCL小蓝翼P7新风空调聚焦于提升室内空气质量与节能降噪，通过将新风系统与室内换热器紧密集成，实现了新风与室温的动态平衡，避免了传统新风空调因冷热风直吹导致的不适感，并结合智能负荷辨识算法，在确保舒适性的同时实现了节能优化。其控制策略基于外部环境温度、室内空气质量及用户使用习惯的多维度数据，动态调整空调运行模式，显著提升了节能效率（节能率 $\geq 18\%$ ）和用户体验。此外，双层微孔降噪技术和扇形导流结构优化进一步降低了气流噪声（减少1.3dB），同时提升了新风量（增加12%），实现了低噪高效运行。在节能控制方面，超省电AI大数据模型算法通过环境参数实时调整功耗，使挂机和柜机的省电比例分别达

到40.5%和53.3%。TCL小蓝翼P7的控制方法不仅优化了空气品质和节能性能，还为新风空调的智能化发展提供了新的技术路径。

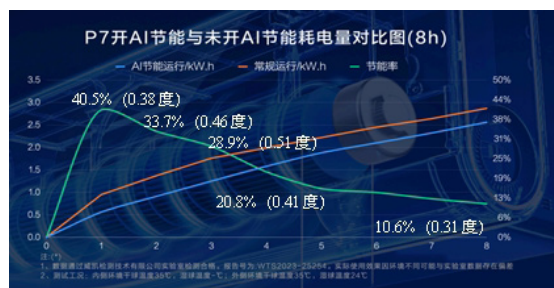


图2.2-2 TCL小蓝翼P7新风空调

(3) 长虹KFR-72LW/ZDEVW1+RS大3P巨能省分体空调器

该家用分体空调器的关键技术包括：通过试验平台和相关试验软件来研究电子膨胀阀的开度、内外风机转速以及压缩机频率等对系统性能的影响，找到合适的开度使换热器与压缩机等设备达到最优匹配，以此来提高系统的能效和制热能力。在最优电子膨胀阀开度值参数运行下，获得使空调能效比最大的最优风机转速值，在最优电子膨胀阀开度值与最优风机转速值参数运行下，调整制冷剂的充注量，通过自适应调节，使得空调能效比最大。



图2.2-3 长虹KFR-72LW/ZDEVW1+RS大3P巨能省分体空调器

(4) 小米米家新风空调

该家用分体空调器的关键技术包括“大新风量风机流道一体化提效降阻技术”“新风动力系统的蜗壳及电机降噪优化技术”和“按需通风及双温差自寻优新风控制技术”三大子创新技术。通过“大新风量风机流道一体化提效降阻技术”提高了动力系统的做功能力，“新风动力系统的蜗壳及电机降噪优化技术”权衡了风量和噪音的设计，“按需通风及双温差自寻优新风控制技术”使得新风运行更加的节能可靠。通过三项技术改进，不扩墙孔小新风管管径方案可实现 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的超大新风换气量，达到扩大墙孔大新风管管径方案的新风量水平，且在高新风换气量下，充分保证了室内舒适性和整机可靠节能运行，对新风空调低噪与可靠节能技术的快速发展具有显著的促进作用。



图2.2-4 米家新风空调

(5) 凌达定频高效铝线空调压缩机

凌达定频高效空调压缩机基于结构动力学和流体热力学进行的高效泵体结构设计，从泵体结构优化设计和从力矩等方面提高电机与泵体匹配度，采用全新缸径比（44/20）高容积效率泵体，高效大功率密度DS1铝线电机结构，对油膜厚度和扰度优化，使膜厚比稳定在5以上，采用电机理论设计软件Ansoft和Jmag，针对空调系统的运行环境、工况，对电机进行优化，提高了电机的能效和可靠性。在排量减小的情况下，压缩机能效提升2%以上，噪声减少1~2分贝，振动（壳上）下降2个加速度单位左右。



图2.2-5 凌达定频高效空调压缩机

2.2.2 商用制冷空调及热泵机组

工商业用中央空调冷（热）水机组的未来发展呈现以下几个显著特点：（1）磁悬浮技术作为工商业冷（热）水机组企业技术实力的重要标志，已经逐步成熟，未来将进一步向大冷量、宽负载率和高能效方向发展；（2）静压气悬浮技术实现了“先浮后转”的突破，消除了机组启停过程中的摩擦问题，进一步提升了机组的运行效率和可靠性，将在小冷量机组中占据重要地位，并逐步扩大应用范围；（3）为满足北方清洁供暖和工业生产需求，高温热泵和低温热泵机组成为技术热点；（4）随着全球对环保和低碳的重视，新型环保冷媒（如R1233zd(E)、R1234ze、 CO_2 等）逐渐成为工商业冷（热）水机组的主流选择；（5）通过5G和物联网技术，工商业冷（热）水机组实现了远程数据监控、故障诊断和智能控制。企业通过云平台提供实时运行报告和维护方案，提升了设备的运行效率和用户体验。

1) 研究进展

随着中国能源结构的转型，工业节能和低碳化已成为亟待解决的关键问题。在当前能源结构仍以煤炭为主的背景下，非化石能源的发展面临诸多制约，且普遍存在高耗能、高排放、低能效的问题，亟需加强绿色低碳技术的研发与应用。工业过程供热占据了能源消耗的50%，因此，实现工业过程供热的低碳化是实现碳中和的重要步骤。为了满足工业过程所需的高温和大规模热能需求，商用制冷空调及热泵机组的研究在近年来取得了显著进展^[8-9]。

在压缩机技术方面，磁悬浮离心机由于具有无

油、能效高等特点，得到了迅速推广应用。研究发现，磁悬浮离心式冷水机组在部分负荷工况下的能效比传统机组高出30%，同时无油设计显著减少了维护成本。近年来，越来越多的厂家加入到离心机生产阵营，包括麦克维尔、约克、格力、海尔、捷丰、克莱门特、SMART、三菱重工等企业，数量达到近20家^[10]。气悬浮技术也是重要的无油轴承技术之一，与磁悬浮轴承相比，气悬浮技术不需要复杂的传感器及控制系统，结构紧凑，更适合离心机向高速小型化发展^[11]。从技术原理上看，行业目前采用的是动压悬浮技术“先转后浮”，海尔采用静压悬浮技术实现了“先浮后转”，其单压缩机制冷量可达350RT，COP达6.80，消除了压缩机启停过程中的摩擦问题，提高了部件的使用寿命，保障了系统的稳定运行^[12]。

在高温热泵领域，研究主要集中在制热效率提升和工质的选择两个方面。上海交通大学王如竹教授^[13, 14]在高温热泵的应用上做出了突出贡献，其领衔团队研发的空气源热泵多品位热能高效供应关键技术，使空气源热泵的性能系数达到4.73的国际最高水平，并成功将机组的可靠运行环温从-25℃拓宽至-35℃，突破了我国全气候区的适应性限制，具有重要的技术意义。同时，顿汉布什（中国）工业有限公司自主研发的高效废热梯级循环利用装备，通过回收再利用可再生或可循环余热资源，实现了最高可制取120℃的高温热水或蒸汽，替代了传统的高能耗、高污染锅炉，为工业节能提供了创新方案。在环保冷媒应用方面，人工合成工质氢氟烯烃（HFOs）、氢氯氟烯烃（HCFOs）和自然工质碳氢化合物（HCs）属于0 ODP、低GWP的环保工质，是未来热泵工质重点发展的方向^[15-17]。在可供选择的低GWP制冷剂中，R1336mzz(Z)由于临界温度达到164.1℃，不易燃且无毒，将高温热泵的供热温度推向155℃。当高温热泵供热温度的目标值为175℃或更高时，采用水作为循环工质是目前的最佳选择，因此，要求开发高温蒸汽压缩机来适应该要求。

综上，工商用制冷空调及热泵机组在能效提升、环保冷媒、压缩机技术以及智能控制等方面取得了显著进展。这些技术进步不仅提升了设备的能源利用效率，降低了碳排放，还为工业节能和低碳

化提供了重要支撑。随着相关技术的不断发展和应用，未来的工商用制冷空调及热泵机组将在推动绿色低碳产业转型中发挥更加关键的作用。

2) 优秀产品

(1) 空气源热泵多品位热能高效供应关键技术与应用

上海交通大学王如竹教授领衔团队研发形成了热能品位广、供热效率高、应用范围宽的空气源热泵多品位高效供热系列关键技术，该技术具有以下特点：①针对空气源热泵季节适应性差的问题，提出了空气源热泵季节适应性变流量控制方法，率先研发高效空气源热泵制取生活热水的新技术，使空气源热泵热水器的性能系数达到4.73的国际最高水平，推动了空气源热泵热水器产业的形成与发展；②项目针对低温环境下难运行的问题，发明了超低环温空气源热泵的气液混合喷射压缩和小温差换热末端技术，将机组可靠运行环温从-25℃拓宽至-35℃，实现了我国全气候区覆盖；③针对输出温度低的问题，首创了空气源热泵闭式预热耦合开式闪蒸压缩及压缩-吸收耦合变温提质大温升热泵循环，首次将空气源热泵供热温度从90℃提升至150℃，将单位蒸汽电耗降至电锅炉的一半，为工业蒸汽的高效低碳供应开创了变革性路径。

此项技术获2023年度国家科技进步奖二等奖，相关产品已成功应用在冬奥会开闭幕式场馆等重大工程以及广大的民生供热，经济效益与社会效益显著，有力推动了电气化低碳供热转型，为国家“双碳”目标提供了重要支撑。

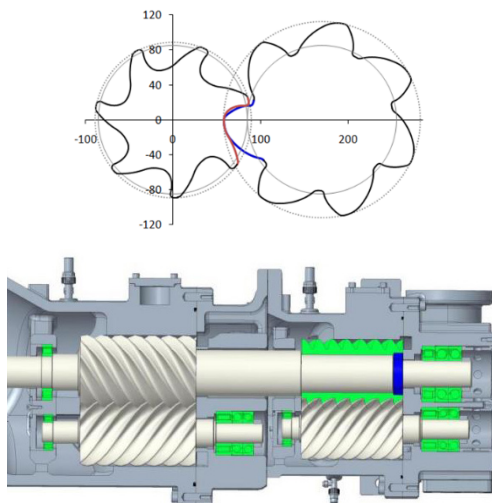


图2.2-6 美的烈焰系列采暖（热水）机组

(2) COP7.0+双级永磁变频螺杆式冷水机组

珠海格力电器股份有限公司首次提出将双级螺杆压缩机技术应用于水冷冷水机组，针对双级压缩后带来的小压比效率衰减问题，从小压比高效转子型线、双级螺杆压缩机的机械损失降低、双级压比的精准调控三个方面开展理论及实验研究，形成如下技术创新：①首次将双级压缩机技术应用于水冷螺杆式冷水机组中，构建双级压缩、中间补气制冷循环，提升系统能效；②发明了适应小压比的弱气脉动同齿异构、多叶大扭角螺杆转子型线，从根源上避免传统型线因排气不同步导致的强气流脉动湍流耗散；③发明了精准适配低声速流体在齿间容积内压力分布非均匀特征的低阻流动布局结构，实现排气流量与排气孔口面积变化的精准适配，降低排气过程转子齿间容积内的压力脉动幅度，提升压缩机等熵效率；④发明了变工况下双级压比的多参数联动调节耦合控制方法，实现无位置精准适配压比调节，消除宏观意义上的过压缩、欠压缩，在宽范围内能够高效运行。

基于上述技术创新，180RT双级永磁变频螺杆式冷水机组依据国家标准GB/T18430进行实验测试，机组COP达7.22，IPLV（GB）达10.1，IPLV（ARI）达12.01，相较国家标准GB 19577规定的一级能效限定值COP超出20.3%，IPLV超出34.7%，与行业同等冷量段（100-300RT）其他技术特征的高水平冷水机组相比整体能效高出9.7%-14.5%，有效推动了中小冷量冷水机组的能效水平提升。



(a) 直列式阳转子共轴直驱双级螺杆布局结构



(b) 产品外观

图2.2-7 180RT双级永磁变频螺杆式冷水机组

(3) 高效高可靠机电控一体化磁悬浮变频离心机

国家政策推动工业与环保节能装备的绿色发展，空调领域节能降耗技术亟待提升。磁悬浮离心机在提高能效方面面临重要挑战，尤其在酒店、医院、数据中心和轨道交通等领域，需求持续增长。针对这些领域对可靠性要求更高的特殊场景，提升磁悬浮离心机组的运行可靠性至关重要。

重庆美的通用制冷设备有限公司设计研发了一种机电控一体化磁悬浮变频离心机组，该机组能够在全转速范围内稳定运行，解决了IP67防护等级和高热流密度环境下的热失控风险，显著提高了机组的适用性和稳定性，并减少了低负荷下的频繁启停现象。该产品具备如下技术特点：①基于高阶非线性矩阵逆向求解，解决了传统PID控制在特定频段幅度和相位调整困难的问题。通过多模态自寻优和变速状态信号追踪技术，抑制转子模态差异引起的控制不稳定，快速生成前馈补偿，确保磁悬浮压缩机系统在全转速范围内稳定运行。②开发负荷虚拟测量及水系统容量辨识技术，提出基于工况的自适应控制参数技术，结合串级控制架构实现多控制器协同，大幅提升机组在全工况下的控制稳定性，显著减少低负荷下的频繁启停现象。③开发3D相变双循环热管理核心部件，确保高热流密度元器件温升全覆盖，并优化器件均温性能，彻底解决了离心机在IP67防护等级和高热流密度环境下的热失控风险。

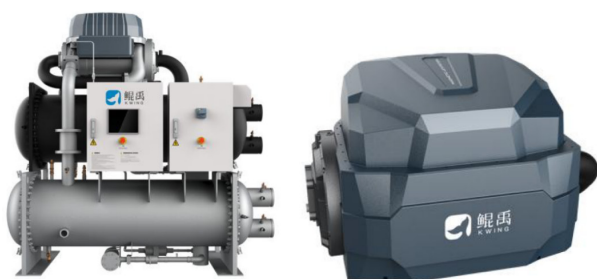


图2.2-8 高效高可靠机电控一体化磁悬浮变频离心机组

(4) 海尔1000RT气悬浮离心式冷水机组

近些年来，以磁悬浮压缩机为代表的无油压缩机已经得到批量产业化的应用，在节能上得到了市场的普遍认可。作为无油压缩机新一代技术静压气悬浮压缩机相对于磁悬浮压缩机能效更高、结构更简单，采购维护成本更低。静压气悬浮压缩机通过外部稳定的气源，利用气体压力产生浮力实现转子悬浮及自调节，不存在低速干摩擦，更可靠高效。

青岛海尔智慧楼宇科技有限公司发明的静压气悬浮一体式供气稳压系统，采用加热冷媒结合稳压耦合控制方案，解决了静压气悬浮压缩机无法稳定供气的问题，保障了系统的稳定运行，其单压缩机制冷量可达350RT，COP高达6.80，比竞品高5.8%以上。同时，海尔研发了领先的前馈控制和母线电压补偿控制技术，攻克了冷水机组因为电压不稳造成的故障停机难题，机组运行电压范围可在额定电压的18%~35%范围内运行。

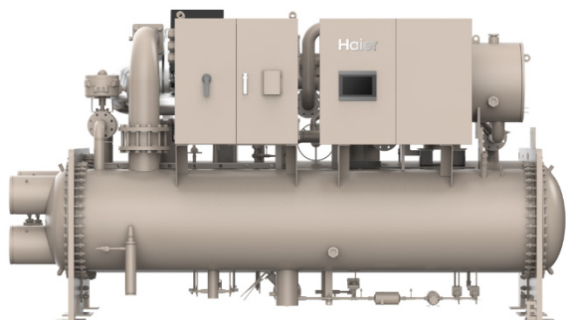


图2.2-9 海尔气悬浮离心式冷水机组

(5) 江森自控SQ系列离心式高温水源热泵机组

离心式高温水源热泵机组已成为中央空调市场的一个亮点和趋势，为了响应市场上热水出口温度60℃的需求，增加日立离心式高温水源热泵机组的

竞争力，江森自控日立万宝空调(广州)有限公司提出了全新开发SQ系列离心式高温水源热泵机组的计划，采用R134a冷媒，热水出口温度最高60℃，最大压缩温差55℃，制热量范围对应4.5~6.5MW。形成主要技术特点如下：①该热泵机组采用自主研发的日立高温热泵离心压缩机，其机构为专利设计的容量调节装置和离心式压缩机流体结构，制造成本更低，可靠性更高；同时，该机组采用二级压缩冷冻循环，为高温热泵工况定制的叶轮流体，可提供更大压比，获得更高的制冷循环效率，二级压缩要比单级压缩效率高7%~8%；同时拓展了压缩机适用工况范围，减少压缩机低负荷下的喘振风险，使机组减载低负荷仍可安全稳定运行。②该机组采用了专利设计的强制过冷冷凝器和离心式气液分离的经济器，实现过冷度以及气液分离性能的提高，从而整体上提升了制冷量和换热效率。

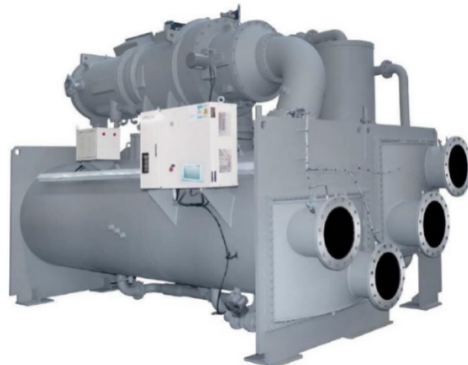


图2.2-10 SQ系列离心式高温水源热泵机组

(6) 广东美的N系列空气源三联供热泵机组

广东美的暖通设备有限公司设计研发了N系列空气源三联供热泵机组，本产品主要应用于户式制冷、采暖和热水场景，可匹配生活热水水箱、风盘、地暖、暖气片多种末端，可基于水温、室温进行控制；基于暖气片与地暖需求水温不同，可进行双区域的分区水温控制。

该产品采用更环保的R290作为冷媒，并首次将复合阻尼隔音材料应用于热泵行业，通过设计高效降噪隔音罩降低压缩机运行噪音，整机运行噪音峰值降低7~10dB(A)，整机噪音达到行业领先水平；在产品可靠性保证的前提下，通过对压缩机、风机等冷媒系统部件的智能算法控制系统冷媒循环状态及环量精准控制，实现低温下系统运行的自适应调节，

减缓结霜及减少除霜时间，取得低温下性能提升，能够在 -7°C 保证制热能力不衰减， -15°C 制热量 $\geq 80\%$ ，并全面提高出水温度，解决了传统锅炉、燃气炉高出水温度无法使用热泵替代的问题。

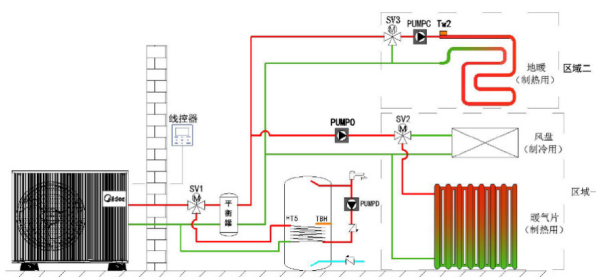


图2.2-11 N系列空气源三联供热泵机组

（7）顿汉布什离心式多工况梯级增热型高温热泵机组系统

顿汉布什（中国）工业有限公司自主研发设计的高效废热梯级循环利用装备，是基于可再生或可循环余热资源（含城市污水、工业余热、废水、废气等）回收再利用的环保装备。该高温热水（蒸汽）热泵已经在多个工业场景成功应用并建立样板示范工程，市场前景广阔。

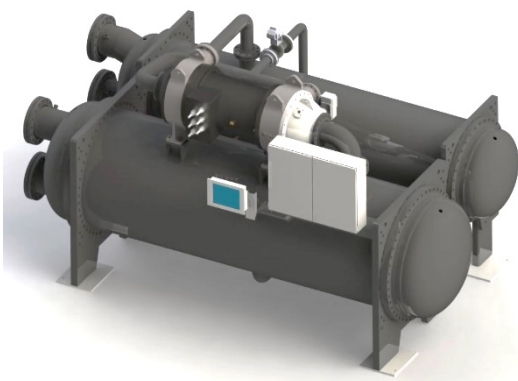


图2.2-12 离心式多工况梯级增热型高温热泵机组系统

高温热水（蒸汽）热泵是将工业工艺循环过程排放的中低品位的废水废气中的废热进行回收利用，机组最高可制取 120°C 的高温热水或高温蒸汽，实现 70°C 的温升，可替代燃煤、燃气锅炉和纯电锅炉等传统高能耗、高污染的传统锅炉，广泛应用于集中供暖、烟草烘干、污泥烘干、原油冶炼和药液提纯等领域，具有高效节能、清洁环保、智能控制、维护简便等特点，处于行业领先水平。该热

泵机组可实现每蒸发1吨水仅消耗55度电，无须专用蒸汽管道，实现无人值守。该装备超前实现了对R1234ze、R515B和R1233zd等低GWP制冷剂的适用性应用开发，进一步助力各行各业以及国家层面实现“双碳”战略目标。

2.2.3 空气处理机组

随着建筑节能标准的提升和对室内空气质量要求的加强，空气处理机组的研究聚焦于能效提升、环境保护和舒适性控制。为响应国家“双碳”政策，空气处理机组在节能增效方面进行了技术升级，采用热回收系统和智能算法等先进技术，推动了产品性能的持续优化，不仅降低了能源消耗，还使得机组结构更加紧凑，同时提升了室内空气品质和环境舒适度。

1) 研究进展

随着节能环保理念的推广，空气处理机组的高效能和节能设计成为研究的热点。研究者们通过优化热交换、提高空气处理机组的风机效率、使用变频技术、优化温控设计等方式提高整体能效。唐洁等^[18]结合洁净手术部负荷组成及特点提出了一种全直流变频冷凝热回收恒温恒湿系统，通过集成控制技术和云平台，解决了冷热量相互抵消的问题，实现高效恒温恒湿控制，显著降低能耗。该系统利用变频压缩机与冷凝再热精准调节，减少电加热投入，使系统的COP能够提高20%，具有显著的节能效果。采用3D逆流高效热交换器和变频热泵双重热回收技术，使用改性复合型导热塑料，使热交换效率高达95%。相比传统新风机组，能效提升至4.5，显著提高了综合能效，符合国家节能减排目标。

传统的空气处理机组多依赖手动控制，然而现代智能控制系统和物联网技术的发展，为空气处理机组提供了自动化和智能化的解决方案。在智能控制方面，空气处理机组的研究引入了自适应控制算法^[19]，能够根据外部环境和室内负荷变化自动优化运行状态。实验结果表明，智能调节系统能够在多变的环境条件下，维持机组的最佳运行模式，从而提升年能效比（COP）超过20%。尤其在天气变化剧烈和负荷波动大的情况下，能效提升更加明显。该智能系统不仅提升了运行效率，还能通过远程监

控、故障诊断和预警功能，减少了设备的维护需求和停机时间，从而提高了机组的可靠性和使用寿命。针对空气处理机组温湿度控制中的不确定性，尚芳等^[20]提出一种带有多参数的反步控制器，可以实现温度和湿度的跟踪控制，且通过仿真实验验证了其有效性，结果显示该控制器的跟踪效果优于传统控制方案，进一步提升了机组的精度和稳定性。

2) 优秀产品

(1) 全直流变频直膨组合式空气处理机组--冷凝热回收系列

洁净手术室、净化实验室等场所通常面临先制冷除湿后再加热调湿的能耗问题，导致冷热相互抵消，增加能耗。维克（天津）有限公司提出的全直流变频冷凝热回收恒温恒湿产品通过集成控制技术、云平台技术、全变频技术和冷凝热回收无级调节技术，解决了这一问题，避免冷热量相互抵消，实现高效恒温恒湿控制，显著降低能耗。该产品通过压缩机变频+冷凝再热的精准调节，保证送风温湿度的同时，尽最大可能节约电再热的投入，节能高效云平台云端智能技术，可以实现远程运维、故障预警、远程诊断以及远程维护等功能，保障客户运维无忧集成式控制技术，采用一体式单片机控制柜+触摸屏人机界面，使用操作简单便捷。

变频冷凝热回收系统可利用系统冷凝热完全取消电加热，同时冷凝热回收器的投入间接加大了制冷系统冷凝器的换热面积，冷凝温度从50℃降低至45℃，压缩机COP提升了20%，机组输入总功率降低70%。



图2.2-13 全直流变频直膨组合式空气处理机组--冷凝热回收系列

(2) 室内微气候环境智能高效调控的多联机和新风系统

本产品围绕室内微气候调控问题，创新性地将多联机与新风调湿机结合，采用集中式管理和分布式控制架构，突破了多个技术难题，主要创新成果如下：①精准分类与需求预测技术：针对传统空调难以精准控制的问题，首创了基于地理位置和环境状态的用户需求预测技术，并通过分析用户历史数据，准确预测下一次使用场景，预测准确率超过90%，控制误差小于15分钟。②双重热回收变温调湿技术：为解决新风引入导致的湿度调控问题，发明了双重热回收变温除湿技术，提升除湿量150%。同时，提出喷淋/储水虹吸复合加湿技术，提升加湿量30%，湿度控制精度为±5%。③跨模块热湿耦合控制技术：通过负荷和能力预测，突破了多联机与新风机组之间的热湿耦合控制技术，系统能耗降低19.8%，实现了高效节能与舒适运行的自动切换。

该系统能智能调控室内温湿度、空气品质等参数，为用户提供健康、舒适的室内环境，并实现低碳节能运行。项目已获得45项发明专利，并被专家鉴定为国际领先水平。



图2.2-14 全室内微气候环境智能高效调控的多联机和新风系统

(3) 北京环都拓普变频冷凝排风热回收新风机组

北京环都拓普空调有限公司提出了变频冷凝排风热回收新风机组采用3D逆流高效热交换器和变频热泵热回收双重热回收技术，其3D逆流高效热交换器采用改性复合型导热塑料，具有热性能高、气密

性好、抗撕裂、抗氧化和防霉变等特点，热交换效率高达95%。直流变频制冷系统能更好地适应新风负荷的变化，并提高机组的综合能效系数。相较于传统新风机组能效约2.6，变频冷凝排风热回收新风机组的能效高达4.5，是国家节能减排的最佳利器。



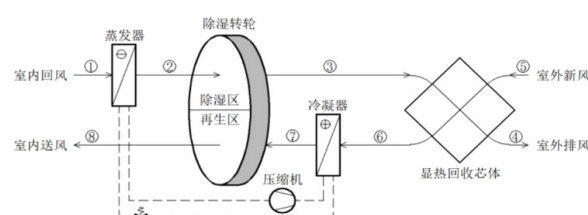
图2.2-15 北京环都拓普变频冷凝排风热回收新风机组

(4) 环能建科防结霜热回收新风机组

本产品主要针对寒区建筑的新风处理，尤其适用于湿度较高的游泳馆、洗浴中心等场所。传统的防结霜方法通过预热室外新风，但会浪费能量并降低热回收效率。为解决这一问题，本产品突破传统热回收采用新风预热的防结霜方式，从回风除湿的角度来实现热回收防结霜，采用热泵驱动转轮对回风进行深度除湿，使其含湿量低至无法在热回收排风出口侧形成霜层。产品在严寒天气下能够实现不结霜稳定运行，排出室内污浊空气的同时为室内送入温暖的新鲜空气，且具备很高的新风制热能效。在室外新风温度 -30°C 、室内回风温度 20°C 、室内回风相对湿度50%的条件下，可实现送风温度达到 17°C 以上、新风显热制热能效达到6.5以上、新风全热制热能效达到8.0以上。



(a) 产品外观



(b) 产品系统原理及空气处理流程焓湿图表达

图2.2-16 环能建科防结霜热回收新风机组

(5) 松下纳诺怡X空气洁净技术

松下电气设备有限公司设计研发了纳诺怡X空气洁净技术，该技术利用珀耳帖元件冷却雾化电极，空气中的水分在冷却后的雾化电极上遇冷结露。通常情况下，凝结的水分受表面张力影响，保持球状。此时对凝结的水滴施加电压，使水带电并产生静电。由于维持水滴球状的表面张力弱于分散水滴的静电力，水成为微粒子被释放到空气中，纳诺怡由此生成。OH离子与有害物质接触后，夺取有害物质中的氢元素(H)，从而使有害物质变性失活。夺取氢离子之后，OH离子还原为水(H_2O)。纳诺怡X用水包裹住OH离子，受到水的保护，不易与空气中的氧(O)、氮(N)反应结合，因此寿命较长。

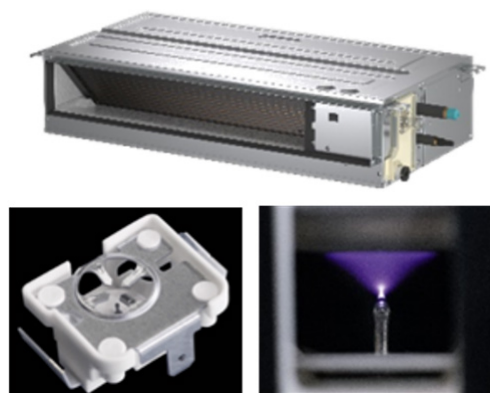


图2.2-17 纳诺怡X空气洁净技术

(6) 山东雅士变频单元式空气调节的控制技术

变频单元式空气调节的控制技术主要由变频压缩机、EC冷凝风机、冷凝器、电子膨胀阀、蒸发器，以及控制器等组成。它们之间用管道依次连接，形成一个密闭的系统，制冷剂在系统中不断地循环流动，发生状态变化，与外界进行热量交换。运行逻辑主要根据自身的运行模式和室外环境温度调取对应的电子膨胀阀初始开度和室外风机初始转速，控制电子膨胀阀和室外风机转速；然后判断运行模式，若为制冷模式，启动压缩机；若为制热模式，控制四通阀换向，至少10秒后启动压缩机；最后运行过程中变频控制室外风机和压缩机，并根据吸气过热度调节电子膨胀阀开度。通过对压缩机与室外风机变频控制，及电子膨胀阀开度的控制，使运行时压缩机以较高的频率运行，更快地达到制冷、制热效果，适应更宽泛运行范围，系统的综合能效能够提高20%，根据《GB 19576—2019 单元式空气调节机能效限定值及能效等级》，该机组可达到国家节能标准。



图2.2-18 山东雅士变频单元式空气调节的控制技术

(7) 全热新风净化机

在住宅追求舒适家居环境下，健康呼吸是不容忽视的一个重要环节，通风换气是健康住宅的重要指标，同时也要考虑建筑环境的节能，需求一种既能通风换气又可节能的换气设备，因此，全热新风净化机应运而生。江苏霍德森环境科技有限公司设计研发的全热新风净化机，具有新风马达和排风马达，开启情况下，室外新风不断送入住宅内，补充

房间内含氧量，同时污浊空气通过排风马达排到室外；全热新风净化机内部设置热回收芯体装置，在室内外新排风有温差条件下进行能量回收，能够有效降低空调制冷或者制热的能量损耗，制冷焓效率55%，制热焓效率65%，实现节能的目的。



图2.2-19 全热新风净化机

参考文献

- [1] 姬安生, 周宏亮, 赵紫生, 等. 家用空调制热技术发展趋势分析[J]. 家电科技, 2023(6):64-68.
- [2] 赵旭敏, 贺申淦, 田永嘉, 等. 转子压缩机结构对空调制热性能的影响研究[J]. 压缩机技术, 2024(6):34-37.
- [3] 陈旗, 马迪, 谭裕锋, 等. 房间空调器5mm小管径室外换热器开发研究: 2024年中国家用电器技术大会[C]//合肥, 2024.
- [4] 张朝晖, 王若楠, 高钰, 等. 由制冷剂替代历程探究产业新时期发展之路[J]. 制冷与空调, 2023, 23(1):1-10.
- [5] 卢天宇, 马国远, 李想, 等. 履约基加利修正案的家用的空调制冷剂替代方案解析[J]. 制冷学报, 2024, 45(4):14-20.
- [6] 刘颖, 高旭, 熊军. 家用空调健康技术的智能化发展研究: 2023年中国家用电器技术大会[C]//宁波, 2023.
- [7] 家用空调舒适送风技术发展白皮书(2023)[J]. 家用电器, 2023(4):24-35.
- [8] JIANG Jiatong, HU Bin, WANG R Z, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112106.
- [9] 赵力. 高温热泵在我国的应用及研究进展[J]. 制冷学报, 2005(2):8-13.
- [10] 刘华, 张治平, 王升, 等. 我国离心式制冷机组发展现状及趋势[J]. 暖通空调, 2022, 52(12):41-47.
- [11] LIU Wanhui, BÄTTIG P, WAGNER P H, et al. Nonlinear study on a rigid rotor supported by herringbone grooved gas bearings: Theory and validation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 106983.

- [12] 王天娜, 矫佳伟, 丁奕涵, 等. 气悬浮制冷压缩机的研究进展[J]. 制冷, 2024, 43(2):90-94.
- [13] 董益秀, 王如竹. 高温热泵的循环、工质研究及应用展望[J]. 化工学报, 2023, 74(1):133-144.
- [14] 胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望[J]. 制冷学报, 2023, 44(6):1-12.
- [15] MCLINDEN M O, KAZAKOV A F, STEVEN BROWN J, et al. A thermodynamic analysis of refrigerants: possibilities and tradeoffs for low-GWP refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 38: 80-92.
- [16] 吴迪, 胡斌, 王如竹, 等. 水蒸气准饱和压缩高温热泵循环性能分析[J]. 化工学报, 2023, 74(增刊1):45-52.
- [17] 陈恒, 张世程, 孙鹏, 等. 中高温热泵技术在工业余热回收中的应用[J]. 中外能源, 2013, 18(11):94-97.
- [18] 唐杰, 魏嘉. 冷凝热回收直膨式空调机组在洁净手术室的节能应用分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(增刊1): 354-357.
- [19] SHANG Fang, JI Yongshuai, PENG Wei. Adaptive backstepping controller design for the air handling units of the HVAC system[J]. Numerical Heat Transfer Part A - Applications, 2023, 83(10): 1095-1110.
- [20] 尚芳, 彭伟, 汲永帅, 等. 基于反步法的空气处理机组温湿度跟踪控制[J]. 山东建筑大学学报, 2024, 39(5): 86-92.

2.3 关键零部件及保温材料

王闯¹ 邢子文¹ 刘金平² 张天娇³

(1. 西安交通大学; 2. 华南理工大学; 3. 上海理工大学)

2.3.1 压缩机

制冷与空调行业的主流系统为蒸气压缩式系统, 此系统的关键高能耗部件为压缩机^[1]。近年来, 随着我国制冷与空调行业的需求不断增加, 压缩机的规模和性能也得到了巨大发展^[2]。然而, 国家对环境保护和能源消耗日渐重视, 对压缩机技术也提出了更高的要求^[3]。因此, 在“双碳”政策背景下, 压缩机成为本行业的首要研究重点, 相关研究人员在2024年多角度优化压缩机, 显著提高了压缩机及制冷空调行业的效能^[4]。

1) 关键研究及技术进展

截至2024年, 在制冷空调行业全体研究人员的共同努力下, 压缩机技术在天然制冷剂应用、压缩机能效水平提升、容量和工况调节范围扩大、高速轻量化设计四大发展趋势内取得了突破性研究进展, 为国家节能减排做出巨大贡献。

(1) 天然制冷剂应用

制冷剂是蒸气压缩式制冷系统内必不可少的一部分, 据统计全球制冷剂市场规模在2024年达到120.89亿美元^[5]。此外, 制冷剂物理特性对环境影响巨大, 因此在全球节能减排的大背景下, 中国的主流制冷剂会从严重破坏臭氧层的氯氟烃类(CFCs)第一代制冷剂转变到对臭氧破坏较小但具备高全球变暖潜值(GWP)的氢氯氟烃(HCFCs)第二代制冷剂, 近年来又转变为对臭氧无破坏但高GWP的氢氟烃(HFCs)第三代制冷剂^[6]。然而, 根据基加利修正案的要求, 此类制冷剂也需要逐步减少应用, 转变为更绿色环保的R32、R290、R600a、CO₂、水等天然制冷剂^[7]。

然而, R32、R290等部分天然制冷剂易燃易爆, 因此在保证安全性及可靠性的前提下, 扩大其应用范围成为业内研究重点之一^[8]。江森自控日立万宝压缩机(广州)有限公司研发了一款R32制冷剂大容量变频涡旋压缩机, 开创了全新的190直径筒体平

合, 并结合涡旋中心偏置、涡旋始尾端修正等关键技术, 成功开发排量达到150 cm³/r的压缩机, 是中190筒体范围排量最大的变频涡旋压缩机。此外, 此压缩机采用立体动态的供油方式、创新采用全新涡旋型线修正技术, 成功攻克高转速、高压比、高负载工况下的压缩机可靠性难题, 可以在600~7 800r/min 转速范围内平稳运行, 同时满足最大压比达到18.9的超低温制热和-40℃低蒸发温度的使用要求, 可广泛应用于模块机/热泵热水器/热泵采暖等多种应用场合。丹佛斯(天津)有限公司研发了一款VZN系列R290新型变频热泵涡旋压缩机, 在油泵外侧增加了全包围结构的保护罩, 可以避免压缩机油池的扰动影响, 保证压缩机可以在转速范围内(30~140 r/s)稳定运转。此外, 本产品上平衡块增加导油槽后, 甩油效果会明显提高, 可以快速及高效地达到润滑效果, 提高压缩机的可靠性。本产品静涡旋阻挡结构的创新设计, 避免密封条因意外脱落后造成刺穿中壳导致制冷剂泄漏的安全风险。

CO₂天然制冷剂具备良好的环保指标, 因此应用并提高CO₂天然制冷剂能效水平成为研究及应用重点^[9]。博客压缩机(苏州)有限公司开发了一款丹佛斯BOCK®新型大6缸系列1GX56 CO₂ T-CO₂跨临界压缩机, 相较于原版CO₂跨临界压缩机的排量扩大了最多96%, 将最大运行压力从120 bar扩大到130 bar, 实现了更宽的应用范围。福建雪人股份有限公司研发的SPT61系列半封闭CO₂活塞压缩机, 壳体结构经优化设计并选用高强度材料, 使压缩机能够承受二氧化碳制冷剂带来的高压。设计低余隙活塞结构, 提高压缩效率, 增大制冷量。此产品采用新型电机定子紧固装置, 简化了半封闭压缩机定子的安装固定工艺, 降低了操作成本。此外, 本产品采用高效阀板结构, 提高了运行效率。

水制冷剂具有绿色环保、原料易得、安全性好、汽化潜热大等诸多优势, 但也具有压比高、体积流量大、单位容积制冷量小、排气温度高等缺点

点，因此提高水蒸汽压缩机性能成为研究重点^[10]。康普莱斯压缩技术（苏州）有限公司研发的康普莱斯单螺杆水蒸汽压缩机，通过高温热泵将项目现场的冷凝水进一步提温至约120℃。此外，康普莱斯超高温蒸汽压缩机已经能够产出195℃饱和蒸汽。该温度应该是目前螺杆压缩机产品化的最高温度之一。195℃饱和蒸汽，在工业应用领域内，基本上适合于大部分工业行业。

（2）压缩机能效水平提升

压缩机的能效水平直接影响其碳排放量，因此国家出台了許多政策来刺激压缩机能效水平的提升^[11]。截至2024年，行业研究人员从结构、零部件、智能控制等多方面进行优化，大幅提高了压缩机能效水平，实现制冷与空调行业绿色节能发展。

制冷压缩机结构直接影响其运行性能，目前业内人员多方位优化各类压缩机结构，大幅提高了制冷压缩机能效水平^[12]。上海海立有限公司研发了高效变转速压缩机的精益设计及精密加工技术，实现了业内首创气缸空腔隔热结构，减少压缩腔内热传导，提高吸气密度，显著提升空调能力，同时改善整体效率，引导行业1.5HP空调进入小型化时代，实现产品的性能全面领先。

电机效率的提高意味着压缩机电效率和总体效率的提高，有利于实现制冷压缩机高效水平。2024年，多家公司深耕电机效率研究，突破诸多关键性技术难题。珠海凌达压缩机有限公司实现了内销超高效双缸多极电机压缩机技术，采用小轴泵体结构、新槽型多极对数电机设计，高摆频焊接方式、新型双层消音器设计，柔性法兰约束，创新油路设计，使新产品在能效、成本、噪声、可靠性、适配性方面均有显著提升。黄石东贝压缩机有限公司研发的VFLN系列超高效变频压缩机，针对变频器的动态功耗，通过辅助电源结构改进、电源滤波电路改进，使用MOSFET替代IGBT，研发了低功耗电路的高效变频器，提升了变频器能效，变频板效率提升了2%。

制冷压缩机实际运行过程中，常见的供需不平衡现象会导致设备能耗过大或供冷能力不足，因此对设备进行数智化控制至关重要^[13]。上海汉钟精机

股份有限公司研发的RC3-IVA全配置高速变频器，采用专用变频控制器自主控制变频器从而驱动压缩机，搭配云端功能，实现机器的智能运行且可被监测，压缩机性能得到了大幅提升。

（3）容量和工况调节范围扩大

容量和工况调节范围扩大，不仅有利于制冷装置制冷量与外界热负荷平衡，提高制冷压缩机运行经济性，还有利于适应不同工况运行要求，减小蒸发温度及被冷却物温度波动或提高产品热舒适性，减少压缩机启停次数从而延长压缩机使用寿命^[14]。此外，选用单台大容量压缩机替代多台小容量压缩机并联可实现更高的能效，简化系统，缩小尺寸，降低成本，为用户带来更轻便、更经济节能、更舒适的体验。因此，容量和工况调节范围扩大成为行业内研究重点。

2024年，许多公司及科研机构研发出多款新型压缩机，突破容量限制，助力绿色低碳。思科普压缩机（天津）有限公司研发的SCE 23/25大排量产品系列，具有高启动能力，高带载能力，同时适用于较高的环境温度，能满足各种制冷场景，实现快速拉温，且保持温度恒定。此产品系列，研发目的不仅在排量上大幅提升，而且做到进一步提高能效，降低噪音，从结构设计上解决了热气除霜过程中液体回流。苏州英华特涡旋技术股份有限公司研发的高能效双向柔性涡旋压缩机具备喷气增焓功能，大幅拓展了我们产品的运行范围，产品可以在-40℃工况运行，制热能力提升约10%~15%，高于日系厂商水平。

（4）高速轻量化设计

小型轻量化、超高转速可实现压缩机材料使用的减少，可显著降低压缩机制造过程中的碳排放^[15]。因此，高速轻量化设计成为业内另一研究重点，并于2024年取得诸多关键性技术突破。

2024年，多家公司创新性研发出多种先进技术，实现制冷压缩机高速轻量化。安徽美芝制冷设备有限公司研发的车载微型直流变频压缩机打破了车载冰箱前装用压缩机仍然被国外品牌如SECOPI和LG垄断的格局。此产品通过表贴式结构与稀土磁

瓦的应用，减小转子外径尺寸，从而实现电机小型化。此外，此产品接线端子设置在壳体短轴方向，优化泵体布局，可有效降低长轴方向尺寸，从而实现整机小型化。长虹华意压缩机股份有限公司研发了一款NUD125FSC 智能超高效轻商变频压缩机，该产品实现1 800~4 500r/min 宽转速范围，可适用于不同容积的冷柜，实现了小体积小排量压缩机替代传统大体积大排量压缩机的功能。

2) 优秀产品介绍

截至2024年，各类型号的压缩机均取得了关键进展，多家公司研发出许多优秀压缩机产品。因此，本节将介绍活塞压缩机、转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机、离心压缩机5种主流类型压缩机的优秀产品各一例。

(1) 亚临界二氧化碳活塞压缩机

随着二氧化碳制冷应用技术的逐渐成熟，在大型制冷系统中二氧化碳制冷剂的应用也越来越广泛。市场对于大型、高效、可靠的二氧化碳压缩机的需求日渐高涨。为了满足市场需求，比泽尔（中国）^[16]研发了一款200立方排量的活塞式亚临界二氧化碳压缩机，效率相较于之前的产品进一步提升3%~5%。此外，该款压缩机配备智能模块，全面优化压缩机能调控制，提升了运行安全，采用高承压机体，待机压力达到80 bar。

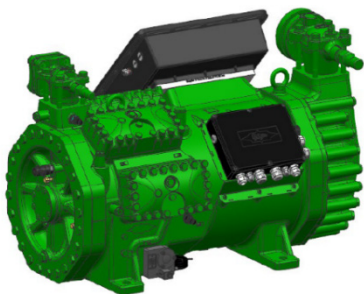


图2.3-1 比泽尔制冷技术（中国）有限公司亚临界二氧化碳活塞压缩机

(2) 小型高速高功率商用变频转子压缩机

上海海立电器有限公司自主研发的小型高速高功率商用变频转子式压缩机，采用八极十二槽电机技术，实现小型化电机的大功率输出，并采用压缩机模态错频技术和气流脉动抑制技术，保证压缩机

在全频段范围内低噪稳定运行，采用重载油膜压力均衡技术和快速自回油润滑技术，保证压缩机全转速内可靠性稳定运行。基于以上关键技术，建立了小型高速大能力变频压缩机产品平台，并实现4~6 HP能力小壳径高速高功率商用变频压缩机批量应用。



图2.3-2 上海海立电器有限公司小型高速高功率商用变频转子式压缩机

(3) 超低环温空气源热泵用蒸发温度-42℃高能效涡旋压缩机

冰山松洋压缩机（大连）有限公司^[17]研发出一款超低环温空气源热泵用蒸发温度-42℃高能效涡旋压缩机，此产品采用内部低压结构设计，通过隔板隔离高低压腔，减小涡旋变形，提升泵体可靠性。此外，采用非对称涡旋线和特殊排气通道，提升排气效率的同时解决低温制热大压缩比工况能效大幅度衰减的难题。在冷凝温度为60℃，蒸发温度为-30℃工况下，压缩机低温制热工况能力提升13%，能效提升18%。



图2.3-3 冰山松洋压缩机（大连）有限公司超低环温空气源热泵用蒸发温度-42℃高能效涡旋压缩机

(4) 冷冻冷藏用宽温区单机双级螺杆压缩机

上海汉钟精机股份有限公司、安徽大学、合肥通用环境控制技术有限公司^[18]共同研发的冷冻冷藏用宽温区单机双级螺杆压缩机，突破压比自适应级间补气、吸气喷液量调节、排气过热度稳定控制等关键技术；提出压缩机电机冷却流道优化、温度可视化及高可靠逆向设计方案，保障变工况运行安全；研发集自卸载机构、中压止回阀、关断阀及经济器过滤器等配件一体化双级螺杆式压缩机产品，实现蒸发温度-10℃满载运行，中低温运行能效较单级螺杆压缩机提高20%以上，填补覆盖冷冻冷藏库用宽温区单机双级螺杆压缩机装备产业化空白。



图2.3-4 上海汉钟精机股份有限公司冷冻冷藏用宽温区单机双级螺杆压缩机

(5) 海信正压液浮无油变频离心机

青岛海信日立空调系统有限公司^[19]研发的海信正压液浮无油变频离心机，使用航空航天领域陶瓷球滚动轴承代替磁悬浮轴承、气悬浮轴承为离心压缩机中转子提供支承，并通过所开发的刚度阻尼独立式专用金属橡胶阻尼器保证了更加稳定可靠的转子工作状态；创新性地将双级压缩切向进气技术、



图2.3-5 青岛海信日立空调系统有限公司正压液浮无油变频离心机

最小气封环间隙优化目标、多工况气动深化综合设计方法相结合，通过多物理场耦合设计技术进一步提升了压缩机的气动效率；在正压液浮无油变频离心机组控制模式中，基于PLC资源的高精度轴向载荷算法以及“先行&反馈”相结合的轴向载荷动态平衡控制策略优化了陶瓷球滚动轴承的工作载荷环境，大幅提升了轴承使用寿命和机组可靠性。

参考文献

- [1] 邢子文, 屈胜利, 王闯. 制冷压缩机技术研究及应用进展[C]//2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛会议论文集. 北京: 中国制冷学会, 2023:3.
- [2] 刘明昆, 李彦澎, 王闯等. “双碳”目标下螺杆制冷压缩机的技术发展趋势[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 55-62.
- [3] 冯艺伟, 王闯, 李彦澎, 等. 基于LSTM模型的螺杆制冷机COP实时及时序预测[J/OL]. 制冷与空调, 1-7 [2025-04-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4519.TB.20241115.0913.002.html>.
- [4] 任大伟, 李彦澎, 王闯, 等. 机理与数据融合驱动的制冷系统节能方案[J]. 冷藏技术, 2024, 47(3):1-5.
- [5] 雪球. 一文看懂中国制冷剂行业：从空调冰箱里的“冷媒”说起[EB/OL]. (2025-01-17) [2025-01-17]. <https://xueqiu.com/6060686560/320869195>.
- [6] 张朝晖, 王若楠, 高钰, 等. 由制冷剂替代历程探究产业新时期发展之路[J]. 制冷与空调, 2023, 23(1):1-10.
- [7] 彭杰, 孙志利, 师雅博, 等. 轻型商用制冷行业制冷剂替代进展[J]. 冷藏技术, 2021, 44(3):1-8.
- [8] 邓雅静. 德国补贴政策支持使用天然制冷剂产品，R290热泵发展潜力巨大[J]. 电器, 2023, (2):33.
- [9] 申江, 魏国东, 赵瑞杰, 等. 不同中温制冷剂的CO₂复叠制冷系统性能研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(12):85-90.
- [10] 吴迪, 胡斌, 王如竹, 等. 水制冷剂及水蒸汽压缩机研究现状和展望[J]. 化工学报, 2017, 68(8):2959-2968.
- [11] 王炳棋, 武晓昆, 王闯, 等. 永磁变频自适应变压比螺杆式水(地)源热泵机组运行特性研究[J/OL]. 制冷与空调, 1-7 [2025-04-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4519.TB.20240726.1256.004.html>.
- [12] 刘明昆, 李丹童, 邢子文. 双螺杆真空泵内压缩转子结构研究现状[J]. 真空, 2022, 59(4):28-32.
- [13] 王闯, 任大伟, 李彦澎, 等. 基于数字孪生的冷冻冷藏装备智能调控系统开发[J]. 制冷与空调, 2023, 23(12): 85-90.
- [14] 马凯, 陈文卿, 李丹童, 等. 中大容量工业余热高温热泵的压缩机技术现状[J]. 制冷学报, 2025, 46(1):1-15.

- [15] 方许丹, 贺小林, 杨湘木. 高速压缩机在变频空调器中的应用研究[J]. 制冷与空调, 2021, 21(12):95-99.
- [16] 比泽尔中国BITZER. 荣誉加冕, 比泽尔8缸高承压CO₂亚临界活塞压缩机荣获2024中国制冷展金奖[EB/OL]. (2024-04-11) [2024-04-11]. <https://www.hvacrhome.com/news/show.php?itemid=73620>.
- [17] 冰山松洋压缩机. 松洋压缩机亮相2024中国热泵行业年会 斩获“热泵行业优秀零部件品牌”大奖[EB/OL]. (2024-08-09) [2024-08-09]. https://bao.hvacr.cn/202408_2109370.html.
- [18] 汉钟精机.LT系列半封闭双级变频螺杆式冷冻压缩机[EB/OL]. (2024-07-11) [2024-07-11]. <https://www.hangyan.co/charts/3409529969775215930>.
- [19] 海信中央空调. 科技驱动, 实力引领! 海信正压液浮无油变频离心式冷水机组发布会暨工装经销商答谢会圆满举办[EB/OL]. (2023-11-24) [2023-11-24]. <http://www.hvrac.cn/xingyezixun/qiyedongtai/2023112420832.html>.

2.3.2 换热器

工业制冷空调系统中的换热器作为关键部件, 其性能和可靠性对系统的运行效率和使用寿命起着至关重要的作用。近年来, 随着技术的不断进步, 尤其在制冷剂替代与能效提升等方面的推动下, 制冷空调用换热器得到了迅速发展, 且其种类与型号日益多样化。然而, 伴随环保意识的不断增强和能源消耗问题的日益严峻, 换热器技术面临着更高的要求。如何提升换热器的性能、降低能耗、减少环境负面影响, 已成为当前及未来研究的核心课题。

1) 研究进展

随着制冷技术的不断进步, 换热器朝着轻量化、小型化和紧凑化的方向发展。现阶段, 制冷空调行业应用最为广泛的传热管为圆形无缝内螺纹铜管。内螺纹铜管的管径、齿形几何参数等对换热器的传热效率有着显著影响, 因此其优化设计是提高换热效率的重要途径。尤其内螺纹管细径化, 已成为其发展的重要方向之一。王皓宇等^[1]研究了小管径冷凝器在冷藏陈列柜上应用的可行性, 当小管径铜管替代原有铜管, 结构参数优化设计的情况下, 换热量相对提升了16%~47%, 优化制冷流程分路, 压降降低了34%~38%, 验证了管径缩减与结构参数协同优化对换热性能提升的可行性。

与此同时, 微通道换热器在工商用制冷设备中的应用研究也取得了显著进展。盛伟等^[2]实验研究了微通道冷凝器在展示柜上的应用效果, 结果表明采用微通道冷凝器的展示柜解决了高温工况下制冷效率下降和压缩机不停机等问题。在环境温度分别为16、25、32℃工况下, 与采用丝管冷凝器相比, 微通道冷凝器换效率分别提升1.67%、24.85%、45.64%。目前该领域研究主要聚焦于翅片和扁管开展研究^[3-4], 对翅片换热性能产生影响的主要因素有翅片的材料、间距、厚度等; 对扁管换热性能的产生影响的主要因素包括扁管的间距、材料、形状等。排水能力是微通道换热器结构设计中面临的重要问题, 排水不畅将促进翅片霜层的形成^[5]。结霜问题是影响微通道换热器推广使用过程中遇到的主要障碍之一。目前解决微通道换热器结霜问题主要通过换热器结构设计来实现, 研究发现垂直翅片微通道换热器具有高效的热工水力性能和良好的排水性能, 可广泛应用于空气源热泵中。

翅片式换热器也是常见的高效换热器之一, 翅片结构包括波纹翅片、开窗翅片、裂口翅片、百叶窗翅片、涡发生器片及桥型翅片等。复杂的翅片结构有利于提高换热面积, 增强换热器的热传性能。但伴随而来的是更高的压力损失。很多学者致力于不同结构翅片管换热器参数优化的研究, 旨在使一定运行工况条件下翅片管换热器性能达到最佳, 实现节能目的。赵日晶等^[6]对复合材料翅片波纹与百叶窗的排列顺序和连接方式进行了对比, 并研究了翅片间距、翅片长度、管间距和翅片厚度等因素对复合材料翅片性能的影响。结果表明, 在相同的风机功率下, 前百叶窗后波纹反向连接的翅片强化传热效果最好, 管间距和翅片长度是影响换热器换热性能的主要因, 为工程优化提供了量化依据。

目前, 我国工商制冷空调用换热器在强化换热技术、加工工艺等方面取得了进步, 但随着应用市场的需求多样化, 对换热器提出了更高的技术要求, 今后换热器研发应从节材、新型制冷剂研发、加工制造智能化等方面着手, 以提高换热器传热效率并节约材料成本, 适应制冷剂替代的行业发展趋势。

2) 优秀产品

(1) 微通道换热器

微通道的通道水力直径在1~100 μm 之间，与传统的翅片管换热器相比，微通道换热器（MCHE）具有优异的热性能、紧凑性和更轻的重量，因此备受关注。它们的潜力已经在不同的行业和专业领域进行了研究和开发，如汽车、发电、余热回收、制冷和空调和电子。目前各厂商所展示的微通道换热器结构（图2.3-6）主要由微通道扁管、翅片以及集流管组成。

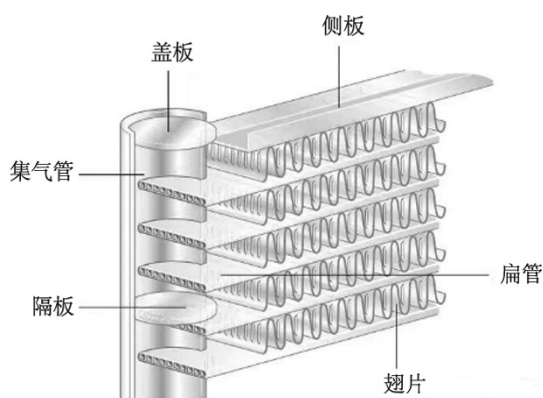


图2.3-6 微通道换热器结构

全铝微通道换热器是空调铝材应用研究的重要推进方向。与传统的铜管换热器相比，铝制微通道换热器具有换热效率高、体积小、降低制冷剂充注量等优势。但在实际应用中，采用微通道扁管技术的换热器腐蚀失效问题严重，包括多孔挤压扁管上的点蚀穿孔失效和翅片脱落换热效率降低等。

聊城万合商贸有限公司展出的铝扁管重量轻，导热性能高，有良好的耐腐蚀性和良好的弯曲加工性能。微通道内可以加工不同尺寸与形状的内肋以增强液体侧流体的扰动，有效地提高传热系数。

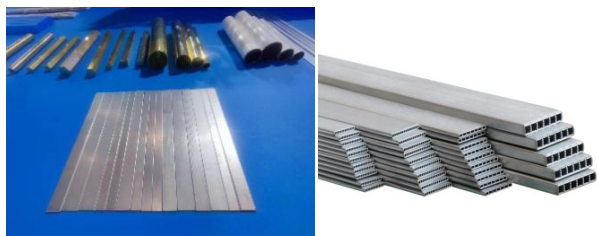
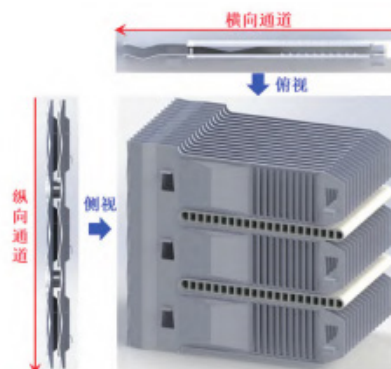


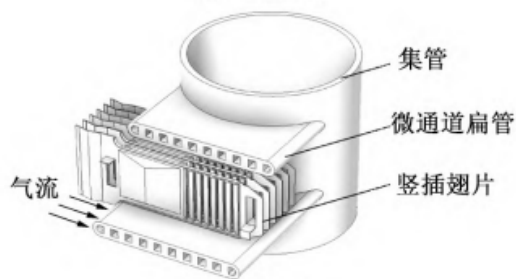
图2.3-7 万合平行流铝扁管结构

对于传统的微通道换热器，其翅片折叠成波浪

形，通过钎焊焊接在平行扁管之间。这种结构使得翅片存在很多夹角，在湿工况下析出的水分会滞留在翅片夹角处难以顺利排出。江苏科菱库精工公司推出了一种竖插翅片式的微通道换热器，翅片竖直布置，扁管通过开槽结构水平插在翅片的凹槽中。目前，竖插翅片微通道换热器技术在中国尚处于初步商业应用阶段，技术开发、制造工艺、耐腐蚀、铝基材配件、扁管/翅片/集管等各环节需要继续进行研究优化。



(a) 竖插翅片结构



(b) 竖插翅片式与扁管连接结构

图2.3-8 科菱库竖插翅片式微通道换热器结构

杭州三花微通道换热器有限公司展示了采用不同抗腐蚀涂层的微通道换热器（图2.3-9），涂层处理也是影响微通道使用效果的关键，不同的涂层用来应对不同的处理需求。三价铬钝化涂层（自钝化膜），提供防腐蚀保护能力，电泳涂层则可以实现极强的腐蚀环境保护，长期保护芯体。三花研发一系列的微通道换热器，与原翅片管换热器相比，该设备可显著降低制冷剂充注量，提升低温制热性能。

浙江新金宸机械有限公司展出了一系列微通道换热器（图2.3-10），其中包括有储能式微通道换

热器和微通道过冷器，过冷器是基于复叠式多孔微通道扁管散热的热管理技术，将多个微通道扁管贴合形成不同流道，同时将扁管与电控散热铝板焊接在一起，实现电控散热和系统过冷度提升多功能整合，使电控盒内温度的相对恒定。

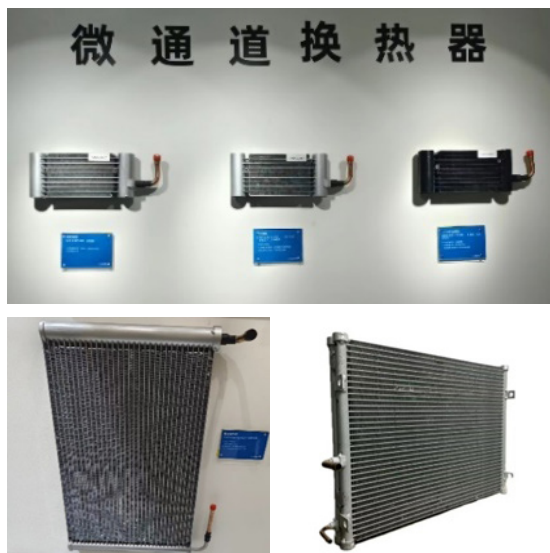


图2.3-9 不同涂层微通道换热器



图2.3-10 浙江新金宸微通道换热器及过冷器

浙江三可热交换公司专注于微通道换热器的研究，可应用在商用空调风冷冷水机组、冷凝机组、机房空调、轨道交通等多种场景。所研发的微通道换热器（图2.3-11）采用一体化NOCOLOK钎焊焊接，翅片与铝合金扁管冶金结合，接触热阻小，能显著提高传热性，铝扁管与铝翅片间，无电位差腐蚀，抗腐蚀性强。同时其可以提供电泳、达克罗、表面钝化、环氧树脂、喷粉以及喷漆等表面处理以

应对不同的应用场景。

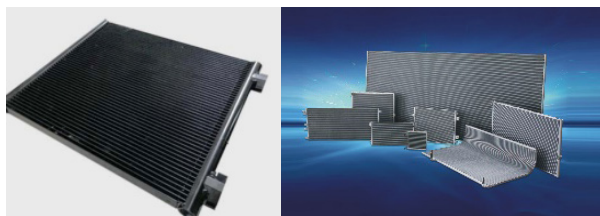


图2.3-11 浙江三可微通道换热器

浙江富源制冷设备有限公司展示了一系列微通道换热器新体，其中一款双排高效微通道换热器（图2.3-12），可以超越传统铜管换热器的能效要求，采用波浪形翅片设计增大了换热面积减小了风阻，同时平行流扁管内部增加了齿肋结构，进一步提升换热效率。

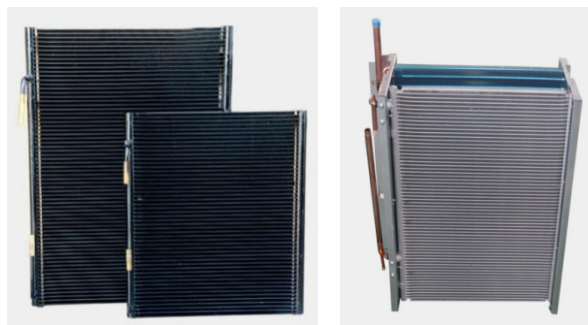


图2.3-12 浙江富源高效微通道换热器

（2）板式换热器

丹佛斯（上海）投资有限公司展示了C12L-EZ-22微板换热器（图2.3-13），其生产的钎焊板式换热器已被广泛应用于中央空调、热泵、冷水机组、油冷却、采暖热水器等热交换器。其采用了Z型通道板片技术，充分混合气态和液态制冷剂，提升了换热器的性能，在同样蒸发压力下其换热效率比传统鱼骨型板式换热器高出40%。其优势主要在于：采用非对称的结构，减小水侧流道的压降，增加氟侧的传热系数；“Z”流动结构优化氟侧制冷剂两相流分配，提高传热系数；“Z”产品设计压力更高；“Z”产品结构紧凑，降低冷媒充注量。

浙江三花有限公司展示了一系列钎焊板式换热器（图2.3-14），主要拥有3项技术设计创新：利用红外热成像仪判断分配效果解决高效分配器设计；利用非对称设计提升换热效率的同时将压降控制在

合理的范围内；利用阻断水的方式将易结冰的部位和流速较慢的区域分隔开来，从而使得板式换热器具有更高的效率和防冰冻能力。

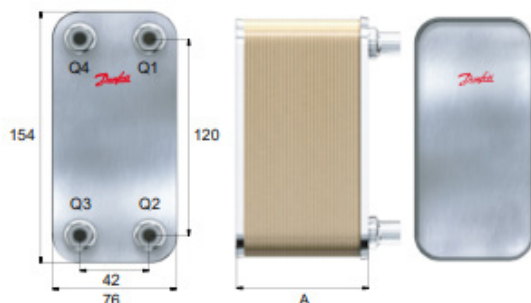


图2.3-13 丹佛斯C12L-EZ/-R微板换热器



图2.3-14 浙江三花钎焊板式换热器

(3) 套管式换热器

套管式换热器结构简单，传热面积增减方便且工作适应范围较广，因此广泛应用于制冷空调、石油化工等领域。杭州沈氏展出了几款同轴套管式换热器（图2.3-15），其中CO₂换热器抗压性强、抗冻性好，可适用于二氧化碳热泵或二氧化碳制冷（冷冻）主机。螺旋管式换热器采用螺旋槽纹结构，使流体在管内既有沿轴向的流动，也有沿着螺旋旋转流动，产生局部二次流以增强流体湍动，使传热系数增大。



(a) CO₂换热器 (b) 螺旋管式套管换热器

图2.3-15 沈氏套管换热器

(4) 壳管式换热器

壳管式换热器具有使用寿命长、在高温高压下运行稳定等优点，被广泛应用于冷水机组中。杭州沈氏节能科技股份有限公司展示了他们在冷水机组中应用的壳管式换热器（图2.3-16），在管侧采用内管强化的高效换热管，同时采用螺旋折流板增强换热，此外组合使用多种分配器，换热效率较高。



图2.3-16 沈氏壳管式换热器

(5) 翅片管换热器

翅片管式换热器是目前应用最广泛的换热器型式，由换热管与换热翅片构成，主要用于制冷剂与空气的换热。家用空调器的蒸发器和冷凝器基本上都采用翅片管式换热器。目前翅片管式换热器的主要研究目标是高效紧凑化，小管径的换热器具有更高的传热系数的同时还能够节约制造成本，有利于提高空调器的整机性能。浙江海亮股份有限公司致力于铜管的研究，在本次展会中展示了多款用于不同场景的铜管（图2.3-17），生产的产品规格包括规格Φ4~Φ30 mm的盘管、蚊香管以及不同材质和不同螺纹加工的直铜管。

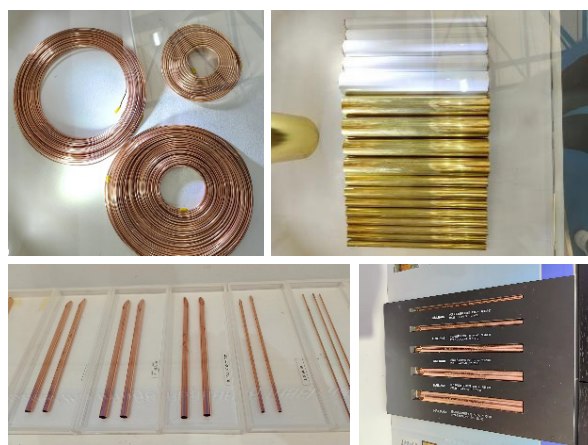


图2.3-17 海亮铜管

金龙精密铜管集团采用了新工艺、提升了模具精度后，将模具尺寸精度误差严格控制在0.01 mm以内，模具精度提高使得铜管尺寸精度大幅提高，使得制冷空调换热效率得到极大提升。

翅片管式换热器的热阻主要是在空气侧，强化空气侧换热能力主要是加强空气流过换热翅片时的扰流。无锡海特精密模具有限公司展出其翅片加工模具和翅片加工工艺。针对翅片不同模具规格和片型尺寸，设计出高效率的模具。

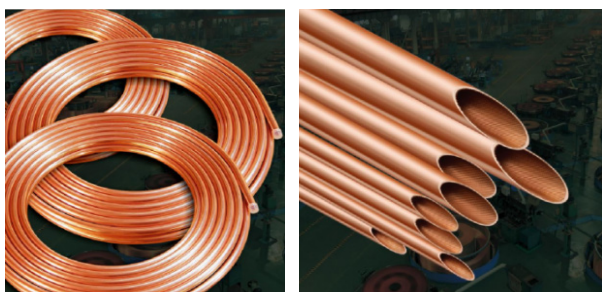


图2.3-18 金龙铜管

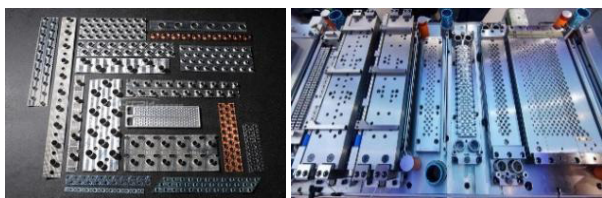


图2.3-19 海特翅片模具及加工工艺

(6) 印刷电路板式换热器

印刷电路板式换热器是利用化学腐蚀在换热版上蚀刻出微细通道，扩散连接后形成的换热器芯体和封头组成，降低了接触热阻。具有紧凑高效、安全可靠等优点，传热面积密度远远高于紧凑换热器的标准。不易泄漏，安全性高，被多用在液化天然气和超高温气冷核反应堆领域。



图2.3-20 印刷电路板式换热器

杭州沈氏展示了一种集成式微通道换热器，其研制的印刷电路板式换热器，利用化学蚀刻技术，能蚀刻出毫米量级的换热单元通道，可以有效冷却功率器件，该换热器具有极高的紧凑性以及高效换热能力，紧凑度达到5 000 m²/m³，可以满足200~300 W/cm²的散热需求。

(7) 制冷剂冷板

冷板是通过机械加工在金属板材内形成制冷剂通道后的板块，通常在制冷剂通道内加工出拓展换热表面以提高换热效率，发热的电子元件安装在相变冷板的表面，通过液态金属、导热硅脂、导热垫片等接触，制冷剂从冷板入口进入冷板，在冷板内的制冷剂通道内吸收电子元件散出的热量，在出口处流出，从而达到为电子元件降温的效果。

宁波哈雷换热设备有限公司所设计的冷板（芯片冷却器）板材采用SUS304不锈钢材料，铜管直接连接，冷媒直接冷却，体积小、重量轻、安装方便、冷却效率高、冷却性能稳定，不受外界环境影响，具有高传热系数的通道技术和高强度。



图2.3-21 哈雷不锈钢冷板

(8) 湿帘

水喷淋在湿帘上形成水膜，热空气在风机作用下强制通过湿帘，在这个过程中，水通过吸收空气中的热量而蒸发，空气实现等焓降温增湿。湿帘由于其吸水性能好、蒸发效率高等优点，被广泛应用于工业厂房和数据机房等场所的冷却。

澳蓝（福建）实业有限公司展示了阻燃型湿帘，该湿帘具有B1级阻燃特性，阻燃性能不随淋水衰减，随着湿帘厚度的增大，最大蒸发效率可达94%。



图2.3-22 澳蓝防火湿帘

蒙特空气处理设备（北京）有限公司展示了应用GLASdek GX40加湿介质的FA6蒸发式加湿器。该介质由无机阻燃材料制成，耐火性可达A1级水平，其独特的陶土涂层使其适用于pH3~10之间的工质，便于采用化学试剂定位清洗以提高使用寿命与降低成本。FA6蒸发式加湿器加装了DropSTOPTM挡水装置，在低压损的同时可使最大迎面风速达5 m/s。



(a) GLASdek GX40
蒸发介质



(b) FA6蒸发式加湿器

图2.3-23 蒙特蒸发式加湿器与蒸发介质

(9) 冷却塔

在制冷空调系统中，冷却塔基本承担了空调冷却水系统的负荷，是冷却循环水的重要设备。广东新菱空调科技有限公司展示了SCH系列横流冷却塔与CEF系列逆流冷却塔，SCH横流塔采用变流量技术，在冷却水量为30%~110%范围内均可实现均匀布水，避免了填料出现缺水区域导致的换热效率下降问题。此外，变流量技术可应用于一台机组对应多台冷却塔，从而有效降低出水温度，提高机组能效。CEF逆流塔将风机下置，有效减小了冷却塔噪音，同时通过散流器使空气更均匀地通过填料，提高了换热效率。



(a)SCH系列横流冷却塔 (b)CEF系列逆流冷却塔

图2.3-24 新菱冷却塔

广东览讯科技开发有限公司展示了LXWD干湿联合防白烟逆流闭式塔，采用干湿联合运行，有效缓解了干式冷却塔夏季冷却不达标与湿式冷却塔耗水量高的问题。冬季可将喷淋泵停泵使用，只采用干式冷却，有效防止冷却塔挂冰风险。

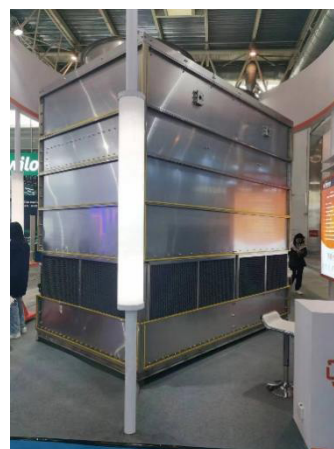


图2.3-25 览讯LXWD干湿联合逆流塔

2.3.3 水泵

在各类建筑中空调系统能耗约占整个建筑能耗的40%以上，空调水力输配系统能耗在空调系统总能耗中占比达20%~30%，因此，空调水力输配系统的节能手段和设备的研究和开发变得非常重要。

1) 研究进展

水泵的研究主要集中在提高效率、降低能耗、智能化控制、材料创新以及多功能化等方向。首先，随着能源节约和环保需求的不断增强，水泵的效率提升成为研究的核心。通过优化叶轮、水泵内部流道的水力设计，利用计算流体力学等现代仿真技术，水泵的水力性能得到了显著改善。叶轮形状

的创新设计、流道结构的优化，以及泵体和叶轮的精密加工，都有效提高了水泵的水力效率。此外，采用IE4、IE5等超高效电机以及变频驱动技术，进一步降低了水泵的能耗，并且提高了系统的能效比^[6]。

其次，模块化设计成为近年来的重要研究方向。水泵的模块化设计可以大幅提高产品的灵活性和可维护性，便于与现有设备的替换和升级。通过标准化泵头、电机等组件的设计，研究者能够实现产品的互换性，满足不同应用场景的需求。此外，模块化接口设计还使得客户能够根据实际需求，选择适合的零部件材质、轴封类型及联轴器形式，进一步提升了水泵的定制化和适用性。撒世忠等^[7]介绍了一种智能模块集成泵组的原理和应用，其集成若干台扬程相同、流量不同的水泵，并采用低阻力的冷水泵附件，通过若干台小流量水泵并联组合成一台大流量变流量泵组，并收获较好的宽频高效率区，和变频水泵一样能较好地诠释一级泵变水量在冷水泵节能环节的优势，为高效制冷机房提供冷水泵节能解决方案。随着物联网技术的快速发展，智能振动和温度监测装置的应用使得水泵能够实时监控运行状态，预测潜在故障，并实现提前报警和远程管理。这种智能化技术不仅提高了水泵的运行可靠性，还减少了系统停机风险和维护成本^[8]。

另一个重要的研究方向是水泵材料的创新，耐高温、耐腐蚀的新型材料的应用，提升了水泵在极端工作环境下的耐久性和可靠性。例如，耐高温纳米涂层和复合材料的使用，使得水泵能够在高温、高腐蚀性环境下稳定运行，拓宽了水泵的应用领域。

2) 优秀产品介绍

(1) 威乐高温端吸泵

威乐开发的新型水泵应用于工业换热，热水循环，高温冷却等领域，结构为卧式单级端吸离心泵，水泵与电机通过联轴器连接。配有易拆卸短接，在移动转子组时留有足够的拆卸空间，无须移动电机。独特高温冷却腔设计，使机械密封快速降温，提升了产品稳定性，同时匹配滑动轴承，在高温下降低了产品振动，以满足更苛刻的运行工况。呈现5方面的技术特征：

①高效率设计：通过优化泵体内腔和叶轮水力设计，提升水力效率。采用先进铸造和加工工艺，确保光洁度和水力效率，全系列产品的MEI值均超过0.7，性能处于全球领先水平。同时，可配备IE4或IE5超高效电机，进一步降低能耗。

②模块化设计：泵头采用EN733标准设计，电机为标准IEC电机，实现与现有产品的直接替换。铸造一体化底板和预钻孔的电机垫铁设计，提高安装效率。模块化接口设计可根据客户需求选配轴封、零部件材质和联轴器类型。

③易安装与维护：泵壳、叶轮、泵盖等水力零件表面采用耐高温纳米涂层，确保可在350℃高温下运行，创新叶轮设计提高水力效率，后抽式设计便于拆卸，简化安装和维护。

④高温冷却腔设计：独立空气冷却腔确保介质从350℃降温至100℃，辅助自动排气阀避免气泡堆积，降低维护成本。低温区域可配常规机械密封和密封垫，进一步优化运行。

⑤数字互联：可配置智能振动和温度监测装置，实时监测水泵运行状况，预测故障，减少停机风险，提前发现异常以实现及时维护。

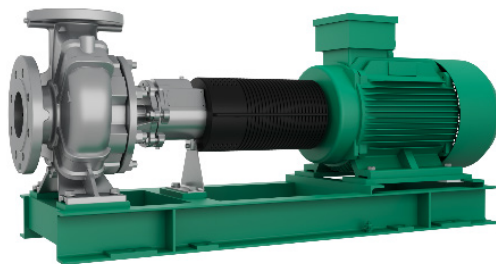


图2.3-26 威乐高温端吸泵

(2) 一种基于离心增压和动压润滑效应的新型水力悬浮微型泵

华中科技大学能源与动力工程学院罗小兵教授课题组首次提出了一种新型的水-磁耦合悬浮微型泵，利用独特的悬浮原理使得离心泵转子全自由度悬浮，彻底摆脱了接触磨损，工作转速超过20 000 r/min，服役寿命可提升至10年。悬浮微型泵通过精巧的流道设计使转子周围产生流体动压，并耦合电机的电磁力，在不借助止推环的情况下实现了转子

全工况、全自由度悬浮。样机测试实验表明，搭载优化后悬浮轴系的微泵样机整体尺寸仅为 $34\text{ mm} \times 34\text{ mm} \times 31\text{ mm}$ ，在 $20\,000\text{ r/min}$ 时可提供 $3\,230\text{ mL/min}$ 和 96.3 kPa 的水力性能，其功率密度是传统离心泵的数倍，可提供的悬浮力比转子重力大一个量级，转子在各个方向上均稳定悬浮不碰壁。

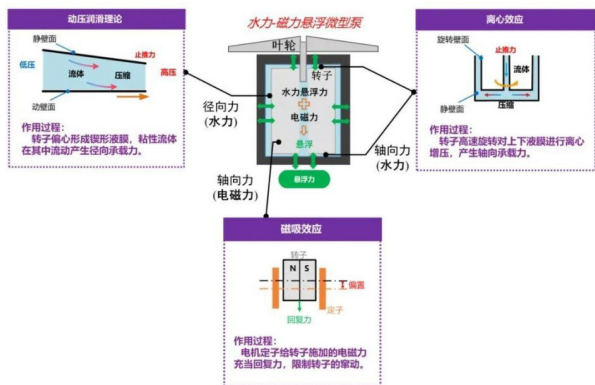


图2.3-27 水-磁耦合悬浮微型泵

2.3.4 风机

风机是暖通空调系统中主要的耗能设备，特别是在低负荷时其能耗占比更显著，且风机普遍效率较低，因此风机的节能降耗也尤为重要。

1) 研究进展

近年来，空调风机技术的研究进展主要集中在提升能效、降低噪音、优化气流分布和智能控制系统的集成等方面。研究人员通过优化风机的气动设计和叶片形状，显著降低了能量损失，并提高了气流性能。高效电机（如IE4/IE5）和变频驱动技术的应用，使风机能够根据负荷变化动态调整转速，进一步提高了能效，降低了能源消耗。在噪音控制方面，研究通过改进叶片设计及风机结构，成功降低了运行噪音，提升了舒适性。同时，智能控制技术的引入，结合实时温湿度变化自动调节风速和风量，优化了空调系统的运行效率和舒适性。这些技术创新不仅满足了节能减排的需求，还为空调系统的智能化和绿色发展提供了技术支持。

2) 优秀产品介绍

(1) 依必安派特电机（上海）EC离心风机 RadiPac 3C系列

新型 RadiPac3c系列产品关键技术创新主要表现在叶轮设计方面，采用了领先的空气动力学和自适应混合优化算法。叶轮由5个复杂曲面的叶片组成，利用高强度的玻璃纤维增强复合材料，并通过注塑成型工艺实现了批量生产应用。该设计对空气处理单元（AHU）的使用进行了优化，显著降低了流动损失，同时也降低了运行噪音。

另一方面，新型的RadiPac采用功率范围从 500 W 至 8 kW 的高效GreenTechEC电机驱动。这些电机采用成熟的外转子设计，其能效水平符合IEC/TS60034-30-2中规定的IE5能效要求，结构紧凑与上一代RadiPac airfoil相比，新一代RadiPac 3c系列离心风机在性能上有显著提升，体现在效率、功率密度和噪音等方面。新型RadiPac3c系列效率比上一代产品提高了 $4\%\sim 6\%$ ，降低了运行成本。



图2.3-28 EC离心风机RadiPac 3C系列

(2) 施乐百机电设备（上海）ZAplus第2代EC轴流风机



图2.3-29 ZAplus第2代EC轴流风机

ZAplus 系列风筒通过CFD 优化设计及风洞测试，优化了风筒的母线和型面（包括 α 、 β 角，进气

结构等)，3D 造型可实现更优的气流组织，从而实现更高的静压效率和更低的噪音。相较于空调中最常用的910 mm 风机，ZAplus 第2代产品性能提升10%，最高节能17%，噪音下降5 dB(A)。同时ZAplus 第2代产品在同规格下使用原材料更少，且ZAplus 产品运输和储存都不需要额外的包装材料，所以ZAplus 第2代产品更加绿色环保。

2.3.5 控制阀件

制冷阀件在确保系统稳定运行和优化性能方面发挥着至关重要的作用，广泛应用于截止、调节、导流、防逆流、稳压、分流和溢流泄压等多个功能。当前，制冷阀件种类繁多，包括球阀、蝶阀、热力膨胀阀、电磁阀、电子膨胀阀及四通阀等，各种阀件产品在精度、特定化和智能化方面不断发展。随着技术的不断进步，这些阀件的优化不仅显著提升了制冷系统的性能，而且在能效、可靠性和控制精度等方面展现了更加显著的优势。

1) 研究进展

电子膨胀阀是空调系统中的关键部件之一，其运行过程中可能会产生噪声，尤其在制冷剂流动状态为不稳定的气液两相流时，电子膨胀阀入口常伴随显著的流动噪声^[9]，对空调系统的舒适性产生负面影响。刘艳涛等^[10]通过仿真分析，研究了在典型的制冷剂不稳定弹状流入口条件下，流型调整器孔间隔、孔径和厚度等参数对流动噪声的影响。通过优化流型调整器的结构参数，提出了最适合降噪的流型调整器设计，最终实现了空调系统流动噪声降低6.88 dB(A)的效果。戴磊等^[11]则针对双向节流元件电子膨胀阀的流动特性，提出通过在阀门管路上增设沟槽结构来降低制热方向的噪声，并通过对阀座进行倒角处理，进一步优化制冷方向的降噪效果。上述研究为电子膨胀阀的噪声控制提供了理论依据和技术支持，为进一步提升空调系统的舒适性和性能提供了有效的解决方案。

针对电子膨胀阀的控制策略优化的研究也取得了显著进展，为提升空调系统的性能和舒适性提供了有力支持。禹志强等^[12]对电子膨胀阀吸气过热度控制策略进行优化。通过引入补气过热度、冷凝压力等作为补偿信号对膨胀阀开度进行补偿纠偏，调

整吸气侧和补气侧制冷剂流量。优化后，经济器过冷度从7℃提升至23℃，机组制热量提升10.3%，制热COP提升8.3%，提高了低温环境下空气源热泵机组制热性能和运行稳定性。在跨临界二氧化碳热泵在热水器中，排气压力是影响系统高效运行的重要因素，为了使系统在运行状态下实现最优排气压力，郭亚宾等^[13]针对电子膨胀阀的控制策略进行了多方面的优化改进，减弱电子膨胀阀基于排气温度的控制力度可提高排气压力下限0.45 MPa；增加压缩机频率有助于提升制热量并缩短加热时间。丁夏杰等^[14]基于一台跨临界CO₂空气源热泵，研究了在恒定气冷器进口水温及水流量工况下，电子膨胀阀对65~80 Hz的高频热泵系统的调节特性。研究结果表明，频率一定时，随着膨胀阀开度的减小，制热量、出口水温和排气压力先增大后减小；性能系数COP和蒸发压力则不断减小。

2) 优秀产品

(1) 电子膨胀阀

浙江三花智能控制股份有限公司展示的ZPF电动电子膨胀阀，该阀门作为离心式冷水机组的节流装置，最大容量达1 800冷吨；适用于磁悬浮、气悬浮等无油系统；调节部分采用蝶阀设计，通过进步电机驱动阀瓣转动，实现9 600步高精度调节。



图2.3-30 三花ZPF电动电子膨胀阀

丹佛斯（天津）有限公司展示ETS蜂鸟系列电子膨胀阀，ETS蜂鸟是一种步进电机电子膨胀阀，应用于制冷空调设备，精确控制喷入蒸发器的制冷剂流量。阀门采用同轴设计，通过电机直接驱动，带动滑块动作，调节平衡式笼罩流口的开度，实现制冷

剂双向的流量调节。与此同时，双向电磁阀级别的关断功能，保障了系统的可靠运行。阀门所采用的高效双极电机，能够精确地控制制冷剂流量。

浙江鸿森机械有限公司研发的DSV系列电动三通调节阀用于冷冻、冷藏和空气调节装置的液体、吸气和热气管路上，热氟化霜管路上，专为工业应用场合设计，阀门口径大，设计紧凑，重量轻。可根据应用场合选择一进二出和二进一出两种连接方式。该阀门适用于系统低压差或零压差状态，不会出现不开阀或卡死现象。



图2.3-31 丹佛斯ETS蜂鸟电子膨胀阀



图2.3-32 鸿森DSV系列电动三通调节阀

(2) 四通换向阀

浙江三花智能控制股份有限公司展示的SHF(GF)系列方形四通阀采用大间隙和柔性密封避免了阀门卡死的问题；而方形滑块采用的柔性密封，高压枪与控制阀之间设置密封活塞，有效地降低控制阀内漏，内漏水平较圆柱阀体低50%；该阀的柔性流道设计使得活塞不会因为积液而影响换向，整个换向过程流量平缓，换向丝滑。

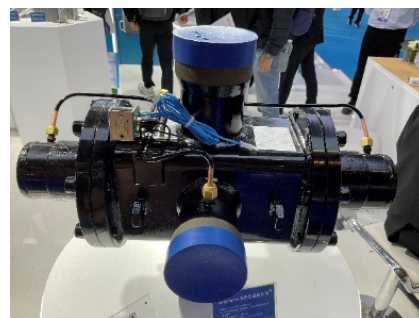


图2.3-33 三花SHF(GF)系列方形四通阀

(3) 组合阀

丹佛斯（天津）有限公司展示的OFC单向及截止组合阀设计用于提供排放解决方案，通过采用阻尼止回阀，提高带磁浮轴承的无油离心式压缩机的性能和可靠性，作为组合式分割弯头、截止阀和带有集成分级端口和压力端口的止回阀。该设备包含：集成停止功能和阻尼止回阀功能。该阀的气体阻尼器和特殊的开启特性可防止湍流条件下的剧烈运动；阻尼喷嘴止回阀可降低颤振噪音。

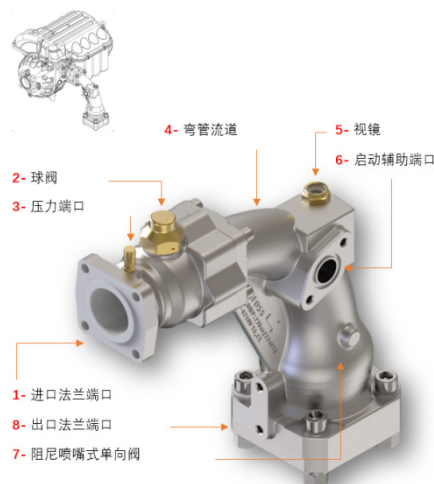


图2.3-34 丹佛斯OFC单向及截止组合阀

(4) 智慧阀

西门子有限公司展示的EVF4U20E智慧阀具有极大灵活性。例如，可将流量计安装在供水管路，将阀门安装在回水管路，以节省安装空间；控制器可平行或垂直安装在流量计上，为简化保温，控制器在管道上略微抬高，以便轻松连接或移除。该阀借助彩色编码的插入式接线端子，可快速、轻松连接设备。控制器易于连接，可自动检测流量计和执行

器，根据设置进行调整。充分利用数字化技术：将所有数据实时上传到云端，从而随时检查和验证数值，且实现了设置的直观可视化。



图2.3-35 西门子EVF4U20E智慧阀

北京海林自控科技股份有限公司展示的SRV系列智慧调节阀（图2.3-36）应用于温度、压力变化频率相对较高或者有明显峰值或谷值的环境中。该阀门通过收集到的实际温度、温差、压力、压差流量或能量变化，实时调整阀门的开度，确保参数在设定范围内起到节能环保的作用。



图2.3-36 海林SRV系列智慧调节阀

(5) 能量阀

搏力谋自控设备（上海）有限公司展示的新一代能量阀集能量计量（MID）和压力无关型控制及 ΔT 管理于一体。集成于搏力谋能量阀的 ΔT 管理器持续地测量温度分布，并将其与用户定义的固定限值进行比较。如果温度低于限值，搏力谋能量阀会自动调整流速，以消除溢流。当供暖或制冷系统的水流量过量，无法将这些过量的水转化为更高的供暖或制冷能力，一般会导致机组设备出现小温差综合征。测量和控制每一个热交换器的进、回水之间的温度分布，是确保低泵送成本的关键。其集成逻辑

在保持舒适性的同时，可防止热交换器处出现小温差。



图2.3-37 搏力谋新一代能量阀

2.3.6 保温材料

中央空调系统的管道有送风管道、散热水管道、冷凝排水管道等，空调系统运行需要消耗大量的能量，合理选择管道的保温材料、进行严格的保温施工控制，可以降低建筑物的热传递，减少对暖通空调系统的依赖、能源消耗、碳排放，有助于中央空调系统节约能源、节省运行投入，为促进相关行业朝着创新、环保、可持续方向全面发展奠定坚实基础。

1) 研究进展

中央空调常用的管道保温材料包括岩棉、玻璃棉和橡塑材料，其中岩棉材料主要用于石油、供暖、电力等行业管道的保温、隔热，以防止管道冻裂；玻璃棉被广泛用于空调、制冷设备、电力管线的全面保温，以防止风管、冷冻水管和冷凝排水管的热传递损失和结露保温，玻璃棉在空调系统保温材料中的应用占比较大；空调水管多采用橡塑材料保温，需要使用橡塑专用胶将橡塑板粘在未保温的管道外，经久耐用。空调风管如果是镀锌板的，通常使用内岩棉、超细玻璃棉、橡塑板等保温材料。近年来，空调保温材料在保温隔热性、耐火性和环保性等方面取得了显著进展，气凝胶材料因其超低的热导率成为研究热点。相关研究表明：添加7%的气凝胶、以40 mm厚度和120 kg/m³密度的岩棉板制备的复合保温材料保温性能最佳；添加一定量的SiO₂气凝胶，有助于提高复合保温材料的抗压强度^[15]。同时，随着环保法规的日益严格，开发无毒、可回收的保温材料成为趋势。空调系统的节能需求促使研究者探索相变材料在保温中的应用，以实现热能的有效存储和释放。

2) 优秀产品

(1) B1级低导热新型节能PIR冷库板

目前市场主流冷库保温板芯材燃烧性能为可燃B2级甚至易燃B3级，南通四方节能科技有限公司研制的低导热新型节能PIR冷库板采用环保戊烷（HC）发泡体系，燃烧性能达到了国家标准GB 8624规定B1级（难燃级），提高了冷库板防火性能，为市场提供满足生态环境要求、防火等级要求的建筑用冷库保温板。同时组合多元醇中再加入软质聚氨酯用的胀气慢回弹聚醚多元醇 B（ZS-3602），优化聚氨酯泡孔结构、加快泡沫熟化，改善高阻燃泡沫的形变和烧芯现象，在行业内首次研制出厚度达250 mm的B1级PIR板材。从整体设计理念出发，采用专利技术新结构，对接分节滑动保温门、装卸货平台、保温门封，从设计源头避免保温隔热死角，减少冷库能耗，达到同类产品的最先进水平。



图2.3-38 B1级低导热新型节能PIR冷库板

参考文献

- [1] 王皓宇, 段欢欢, 刘群生, 等. 适用于冷藏陈列柜的小管径冷凝器的可行性分析[J]. 冷藏技术, 2022, 45(3): 17-21.
- [2] 盛伟, 孙好雷. 微通道冷凝器在展示柜上的应用研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(1):112-117.
- [3] 樊翔宇, 张周卫, 汪雅红, 等. 凸起结构对微通道换热器流动换热特性的影响[J]. 化工机械, 2022, 49(6): 920-928.
- [4] 张秀平, 刘晓红, 周到, 等. 工商制冷空调用换热器技术现状与发展趋势[J]. 流体机械, 2024, 52(6):67-75.
- [5] 赵日晶, 位兴华, 黄东, 等. 竖插翅片微通道换热器空气侧流动换热分析及参数优化[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 87-94.
- [6] 陶根泉. 中央空调循环水泵现状调查和节能分析[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(1):173-176.
- [7] 撒世忠, 吕铁骑, 施勇, 等. 基于高效智能泵组的一级泵变水量空调系统应用探讨[J]. 暖通空调, 2023, 53 (增刊2): 119-123.
- [8] 万尚军, 费章君, 管相东. 基于物联网技术的智能水泵控制系统[J]. 物联网技术, 2022, 12(7):80-82.
- [9] ZHOU Shaohua, ZHAN Feilong, DING Guoliang. Experimental investigation on two-phase flow noise characteristics of R410A through electronic expansion valve of multi-split air conditioner[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 146:327-340.
- [10] 刘艳涛, 朱天杰, 詹飞龙, 等. 基于流型调整器结构优化的电子膨胀阀降噪设计[J]. 制冷学报, 2024, 45(5): 114-122.
- [11] 戴磊, 王均宇, 王旭飞, 等. 基于CFD电子膨胀阀空化及噪声特性分析[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(6): 526-536.
- [12] 禹志强, 程振军, 孙钰雁, 等. 低环境温度空气源热泵机组电子膨胀阀控制策略优化[J]. 制冷与空调, 2023, 23(10):17-20.
- [13] 郭亚宾, 汪玉华, 张政, 等. 二氧化碳热泵热水器压缩机频率及电子膨胀阀的控制优化研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(12):3618-3625.
- [14] 丁夏杰, 陶乐仁, 虞中旸, 等. 电子膨胀阀对变频CO₂热泵调节特性的研究[J]. 化学工程, 2023, 51(11):78-83.
- [15] 赵二庆. 中央空调气凝胶岩棉复合保温材料[J]. 塑料助剂, 2023(6):25-28.

2.4 融合其他领域技术的制冷产品

陈焕新¹ 杜志敏²

(1. 华中科技大学; 2. 上海交通大学)

2.4.1 新材料在制冷产品中的应用

1) 高效热交换材料

低温超导材料应用于制冷领域能够提高设备的性能、效率和可靠性。低温液体泵主要用于石油、空分和化工装置中低温液体产品（如液氧、液氮、液氢、液态烃和液化天然气等）的输送或循环。将超导磁悬浮轴承应用到低温液体泵中，可以解决现有低温液体泵中与轴承故障相关的技术难题，提高低温泵系统工作的可靠性。中国科学院广州先进技术研究所和西南交通大学采用径向高温超导磁悬浮轴承的低温液体泵，研究改善泵的运行性能^[1]。同时，低温泵固有的低温工作环境也为超导部件提供了冷却条件。

辐射制冷是一种被动冷却技术，其基本原理是利用物体表面向外辐射热量，以降低物体的温度。为实现有效的辐射制冷，辐射制冷材料通常设计为具有光谱选择性，即能够在特定波长范围内有效辐射热量，而在其他波长范围内反射太阳辐射。一些高性能辐射制冷材料会采用多层结构设计，通过不同的材料层组合来优化辐射特性，从而实现高效的辐射冷却。在建筑外墙、屋顶和窗户上应用辐射冷却材料，可以降低建筑物的能耗，减少空调负荷，提高室内舒适度。辐射冷却材料应用于电子设备能够帮助散热，提高设备的性能和寿命。上海交通大学提出了一种AsymSkyCool方法（不对称尺寸的热源在辐射天空冷却涂层基板上）用于辐射天空冷却热浓度（tcRC），通过利用辐射能量集中和定位的先进热管理，该方法与最先进的基于天空冷却的集中器相比，tcRC提高了近十倍^[2]。

在传统制冷剂中分散纳米颗粒能够改善其热物理特性和制冷性能，纳米制冷剂在制冷过程中起到增强热传导、改善流体动力学性能和提高热交换效率的作用。田东民等^[3]分析了基于纳米增强相变材料的铜-水热管传热性能，结果表明，纳米增强相变材

料能够显著提高热管的传热效率，使制冷系统在运行过程中能够更快速地吸收和释放热量，提升制冷效果。在建筑物的制冷和供暖系统中，纳米制冷剂可以实现更高效的热交换，改善室内舒适度。纳米材料和相变材料结合可用于建筑物的温控，通过储存和释放热量来维持室内温度的稳定，减少空调和取暖设备的能耗。

2) 柔性智能材料

柔性材料通常具有低导热系数，能够有效阻挡外部热量的传入。武汉理工大学利用丝网印刷法在聚酰亚胺基板上制备了Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃/环氧树脂柔性复合热电厚膜，通过优化Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃粉末含量提高了其电输运性能。利用红外热成像技术，发现当工作电流为0.01~0.05 A时，复合厚膜热电臂两端可以形成4.2~7.8 °C的温差，结果表明该柔性复合热电厚膜在制冷领域应用的可能性^[4]。柔性材料可以用于建筑物的外部和内部隔热层，保持室内温度稳定，减少空调和制冷系统的能耗。此外，柔性材料应用于便携式冰箱、冷藏箱等产品中可以使得设备更好地适应不同的形状和使用场景。

智能材料（如形状记忆合金、压电材料等）能够根据外部环境的变化调节其性质，从而实现更高效、更智能的制冷解决方案。形状记忆合金被加热到一定温度时可以自动恢复到预先设定的形状。该特性可以用于控制制冷系统中的流体流动，特别是在需要通过温度变化来调节系统工作状态的应用中。形状记忆合金作为驱动元件用于制冷压缩机的控制系统，通过温度变化调节合金的形状，可以有效地调节压缩机的工作状态，提高制冷效率。压电材料可以与温度传感器结合，形成自适应的温度控制系统。在温度变化时，压电材料能够自动调节形状，从而实现有效的冷却。在建筑物的HVAC（供暖、通风与空调）系统中，压电材料可以用来优化温度控制，提升能效。

3) 环保制冷剂

传统制冷剂虽然在制冷效果上表现优异，但其GWP（全球变暖潜值）高，对全球变暖的影响显著。新型低GWP制冷剂（如R32、R454B、R1234yf等）被研发和推广，作为这些传统制冷剂的替代品，广泛应用于空调和制冷设备中。西安交通大学对碳氢制冷剂R290和R600a，氢氟烯烃制冷剂R1234yf、R1234ze（E）和R1233zd（E）5种低GWP制冷剂在单效压缩辅助吸收式系统中的性能进行了研究。分析发生温度和吸收温度对5种工质对COP、焓效率及循环倍率的影响，结果表明5种工质中R290的性能最优，而R1233zd（E）最差^[5]。

无氟制冷剂是指不含氟元素的制冷剂，天然制冷剂通常指从自然界中获取的制冷剂。无氟制冷剂和天然制冷剂主要包括碳氢化合物、二氧化碳和氨等，这些制冷剂均具有低毒性、低GWP以及更高的热力学效率。其中，碳氢化合物如R290和R600a主要用于一些小型制冷设备和家用空调中；二氧化碳（R744）被广泛应用于商用制冷系统、超市冷藏和热泵系统；氨（R717）用于工业制冷系统。

2.4.2 新工艺在制冷产品中的应用

1) 3D打印与快速成型技术

随着3D打印技术的发展，其在制冷产品中的应用逐渐得到了广泛关注，尤其在热交换器及其关键部件的制造中。与传统制造技术相比，3D打印技术能够高精度制造出各种复杂、薄壁、轻质的结构件，使得更加复杂精细的紧凑换热器结构设计成为可能，同时使得新型换热器的研制周期大幅缩短，有效提升热交换效率，并减少材料浪费。通过3D打印技术，制冷系统中的零部件设计可以实现更加灵活和优化的结构，例如定制化的流道设计和高效的热交换表面。这些设计优化能够直接提高热交换器的性能，提升制冷系统的整体效能。

在航空发动机的热管理技术中，紧凑高效的换热器设计与研制对提升航空发动机热管理技术水平具有重要的意义。3D打印技术的应用可以丰富对换热器的设计，有助于提高换热器的换热性能和紧凑度，从而满足现代航空应用中对换热器轻质高效的要求。张声宝^[6]研究使用3D打印技术优化设计了一

款航空发动机换热器，能够在原有的板式换热器基础上不降低换热性能的前提下实现体积及重量降低20%，设计的紧凑空-空换热器同时满足工况要求和3D打印要求。

不仅如此，3D打印技术的优势还能进一步推动新材料的应用与创新。随着新型复合材料的引入，3D打印技术在制冷领域的潜力得到更加充分的发挥，尤其在辐射制冷方面。王政涛等^[7]提出用墨水直写3D打印方法，制备得到了具有良好辐射制冷性能的羧基化纤维素纳米纤维（CNF）/六方氮化硼（h-BNNS）多孔复合材料。CNF作为一种可从天然材料中提取的绿色资源，由丰富的、在大气透明窗口波段具有高吸收峰的C-O等官能团组成，成为了辐射制冷材料良好的构筑单元。所构筑的复合材料获得了较高的太阳光散射（96%）、较高的大气窗发射率（94%）。在太阳光直射条件下，该纤维素纳米纤维复合材料可最高实现12℃的冷却温度和90.1 W/m²的平均冷却功率。

2) 全能制冷系统集成

全能制冷系统集成是近年来制冷领域的一个重要发展方向，其旨在将多种制冷技术，如压缩式制冷、吸收制冷、热泵等集成在同一系统中，通过智能控制技术实现系统的最优运行模式和能效管理。该集成方式的核心优势在于能够根据不同的负载需求和环境条件，自动切换或同时运行不同的制冷技术，从而实现能源的高效利用、节省成本，并减少对环境的影响。



图2.4-1 智能多循环机房精密空调

由珠海格力电器股份有限公司，针对数据中心持续提升的高热流密度机房热环境带来的更高需求的温湿度控制问题，研发了基于“氟泵&压缩机耦合循环技术”和“宽温跨智能变频控制技术”的精密

数据机房空调机组。

其中氟泵&压缩机耦合循环技术将动力热管制冷循环系统与传统压缩式制冷循环系统相结合，使产品按照室外环境温度自动切换制冷模式（压缩制冷模式、动力热管（氟泵）制冷模式、混合制冷模式），大幅提高产品的全年能效。

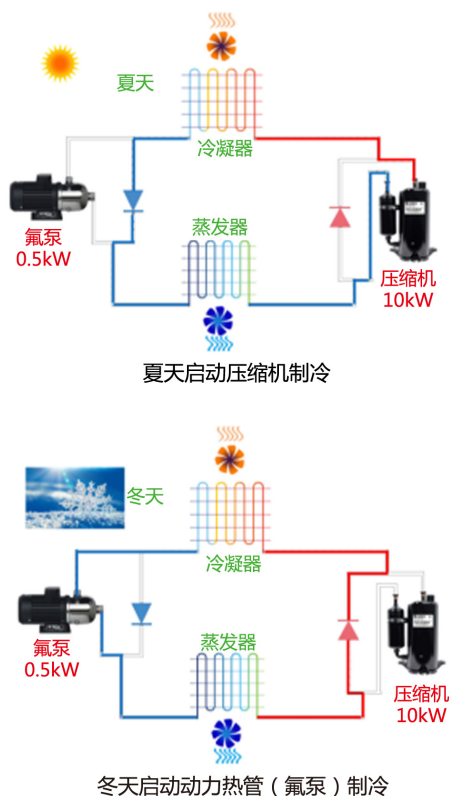


图2.4-2 双循环系统冬夏季独立运行模式原理图

如图所示，夏季工况下室外环境温度处于较高水平时，室外机冷凝压力较高，采用压缩制冷卡诺循环，将室内热量转移到室外；过渡季节或者冬季寒冷工况下室外环境温度处于较低水平时，采用动力热管（氟泵）循环，将室外低温冷源循环到室内热交换进行降温。当室外环境温度跟室内温度接近时，创新地采用混合制冷模式（压缩循环+氟泵增压）提高压缩制冷的能效比。

搭载宽温跨智能变频控制技术的智能多循环精密机房空调在运行过程中，可实现室内环境温度控制范围跨度超过10℃，温度控制精度≤0.2℃。智能多循环空调机组始终保持精密温湿度感应机制，根据模块机房内冷负荷实际需求调整压缩机/氟泵运

行频率，同时调整室内机风机与室外机风机转速以保证制冷循环稳定。在该技术的支持下，变负荷数据机房始终精准维持目标用户需求的环境温度，空调机组在满足制冷能力的基础上降低了系统功率耗能，进一步降低数据机房PUE值。

经测试，机组全年能效10.03，比国标要求1级能效（≥4.0），提高150%以上，大于等于名义制冷量的95%，显热比大于等于90%，整机制冷功耗均小于等于10kW，噪声显著小于国标限定值。现投入使用的产品每年可节约电能1.67亿kW·h，每年可降低CO₂排放量约9.55万t。

3) 新型制冷技术工艺

(1) 电卡效应制冷技术

电卡制冷技术是一种基于电场调控的固态制冷技术，该技术利用电卡材料在电场作用下产生的温度变化来实现制冷效果。该技术因无直接碳排放、高效率等优点，在全球变暖和碳减排目标的背景下，受到广泛关注。自2006年巨电卡效应发现以来，电卡制冷技术经历了快速发展，尤其在电卡材料和器件的改进方面取得了显著进展^[8]。

电卡制冷技术的实现依赖于电卡材料的制备工艺和制冷器件的制造工艺。虽然电卡制冷具有潜力，但目前的技术仍面临一些挑战，例如现有的基于主动回热的电卡系统需要外部驱动设备来促使工质与回热介质之间的相对运动。这意味着，除了供电设备，系统还需要独立的泵、阀门、管路、活塞或电机等组件。这使得电卡制冷系统的集成性和小型化面临困难，难以达到轻量化和紧凑化的目标。A. Bradeško等^[9]利用PMN-35PT的电致伸缩效应进行仿真研究。通过电卡制冷陶瓷本身的电致伸缩效应，实现电卡制冷循环的工质驱动。然而由于陶瓷材料的电致伸缩应变小，机械强度低，材料易碎，该设计始终未能被制作成样机。高分子具有柔性，在静电驱动下能够轻易实现高分子薄膜的驱动。基于此，Ma Rujun等^[10]提出一种静电驱动的电卡制冷器件，该器件无需额外的驱动器，即能实现热量搬运的效果。该器件使用柔性电卡聚合物薄膜和静电驱动机构，产生的“材料比制冷功率”（仅计算主动制冷材料的质量）为2.8 W/g，在0温跨下，能效

比COP为13。2020年, Meng Yuan等^[11]设计了一种级联电卡制冷装置, 可以提升温度跨度。该装置整合了多个电卡聚合物单元和一个静电驱动源, 它们能够协同运作。相邻的两个电卡元件的制冷循环具有 180° 相位, 使热流可以连续地从热源传递至散热器。该反向操作还促使内部电荷循环, 提高了能源效率。在电场下, 材料的绝热温度变化为3.0 K。通过将4个级联装置连接在一起, 在空载条件下, 实现了8.7 K的最大温跨。根据其仿真结果, 该器件在温跨为2.7 K的情况下, COP 估计为9.0, 而在0温跨的条件下, COP为10.4。该设计为可穿戴设备的热管理提供了潜在的解决方案。

(2) 压卡效应制冷技术

压卡效应是在给材料施加流体静压力时, 等静压诱导原子或分子系统有序度变化, 从而引起熵变, 致使材料温度发生变化的现象。压卡制冷技术的实现需要对塑晶材料进行精确的压力控制和热管理, 这涉及新型的加工工艺和设备。例如, 需要开发能够精确施加压力并测量材料温度变化的实验装置, 以及能够实现材料快速冷却和加热的工艺技术。

要将塑晶压卡材料应用于室温制冷, 仍需全方位改善材料的综合性能。此外, 压卡制冷样机的设计十分复杂, 既要施加以及卸去等静压使塑晶完成相变过程, 又要实现冷热端热量的有效交换, 其中的力-热有效耦合方法还尚待发掘。在2022年第四届中国磁产业发展论坛上, 中国科学院金属研究所李昂研究员指出, 压卡效应的制冷样机正在研制中, 计划不仅要实现冷端热交换的有效性, 也要将热端释放的潜热利用起来^[12]。

(3) 磁卡效应制冷技术

磁制冷技术的实现需要对磁制冷材料进行精确的磁化和退磁控制, 以及对制冷系统的优化设计。这涉及新型的磁体设计工艺、材料加工工艺和系统集成工艺等。例如, 需要开发能够产生高磁场强度和高磁场均匀性的磁体, Mei Y.等^[13]提出利用一种新颖的混合优化算法, 即将线性规划(LP)、遗传算法(GA)和非线性规划(NLP算法(GA)和非线性编程(NLP)相结合以实现高均质超导磁体的优化

设计, 并对磁体做了相应的电磁分析和应力分析。

磁制冷设备的热工水力机制目前也存在较大的优化空间。分类梳理并加以对比分析众多磁制冷原型设备后, 发现其中直线往复式与旋转式设备是最为主要的两种类型。研究发现, 旋转式设备因其自平衡运动特性, 能够实现更高的运行频率, 其运动状态相较于往复式设备更为稳定和平滑, 在效率方面似乎也更具内在优势。旋转式设备的实际应用需要更为复杂的设计方案, 同时还可能面临一些水力相关的问题。

约十年前, A. Kitanovski 等^[14]提出了一系列旨在突破磁制冷技术瓶颈的设想, 涵盖了混合可渗透磁热材料、液态金属、铁磁流体与悬浮液、磁性高渗透传热流体、磁热流体、基于固态物理原理的磁热设备, 以及混合蒸发 - 磁热系统等多个方面。尽管如此, 当前大多数磁制冷原型设备, 依旧采用传热流体以及可移动的磁热材料或磁体^[15]。为推动主动式磁回热制冷机(AMRR)实现工业化生产与商业化应用, 在系统设计、高强度磁场研发以及先进磁热材料探索等方面, 亟需取得重大的研究突破, 从而提升系统整体性能^[16]。主动式磁回热制冷机的可行性, 在很大程度上取决于成本的降低与效率的提升, 以增强其市场竞争力。针对主动式磁回热制冷机设备及其零部件, 国际上制定了多种衡量指标, 其中主要成本涉及磁体与磁热材料。使用永磁体, 不仅是一种经济高效的电磁铁替代方案, 还有助于实现设备的紧凑化设计。在评估磁路设计时, 必须综合考量高、低磁场强度、磁体体积, 以及可安装磁热材料的空间体积。

目前已发展出多种数值计算方法, 用于研究主动式磁回热制冷机设备的性能表现。其主要途径是借助制冷机的一维或二维模型, 求解能量平衡方程^[17]。模拟结果显示, 主动式磁回热制冷机在性能系数(COP)方面, 具备超越蒸气压缩式制冷设备的潜力^[18]。这些数值模型, 被广泛应用于探究不同参数及损耗机制的影。研究人员还运用数值模型, 对主动式磁回热制冷机的设计进行优化。例如, B. Monfared等^[19]通过模拟磁热材料在主动式磁回热制冷机中的性能表现, 来评估不同材料的适用性; B.

Monfared^[20]还利用数值模型设计完整的旋转式设备，具体包括应用永磁体设计的数值模型结果，并对带黏结的填充床进行研究。

磁制冷技术近年来一直备受关注，不断有新型原型设备问世。J. A. Bocanegra等^[21]设计了一种室温下可供家庭使用的新型旋转式磁制冷器，并利用数值模型对再生器、磁体结构和外部热交换器等关键部件进行了优化。通过参数扫描研究确定了控制参数的最佳值。

2.4.3 新能源在制冷产品中的应用

在全球能源危机与生态环境恶化的双重压力下，传统暖通空调系统因高能耗、高排放等问题备受诟病。新能源凭借清洁、无污染、可再生等优势，为制冷产业的转型升级提供了全新动力。太阳能三联供系统、地热能、风能等新能源技术在制冷领域的应用，为实现制冷产业的可持续发展注入了强劲活力，推动产业向绿色、高效、智能方向迈进。目前新能源在制冷产品中的应用主要包括新能源发电驱动制冷、太阳能制冷、地源热泵以及多能互补制冷系统。

1) 新能源发电驱动制冷

新能源发电驱动制冷指利用太阳能、风能、潮汐能等新能源进行发电，为压缩式制冷系统提供电力驱动，驱动压缩机运转，实现制冷循环。

太阳能光伏发电技术基于光电效应原理，通过光伏电池将太阳能直接转换为电能。光热发电技术通过聚光系统将太阳光聚焦于吸热器上，加热工质产生蒸气，驱动涡轮机发电。

风能制冷主要通过风力发电机组将风能转化为电能，再利用这些电能驱动制冷设备运行，该方式适用于风能资源丰富的地区，如沿海城市的大型建筑、工业厂房、数据中心等。此外，风能还可用于通风系统，利用自然风压差实现建筑内部的空气流通和换气，辅助制冷系统降低室内温度。

潮汐能可以驱动发电机产生电力，然后利用电能来驱动制冷循环达到制冷效果，这种方法可以在没有传统电网供电的地区或者需要清洁能源的地方提供制冷服务。

2) 太阳能制冷技术

太阳能制冷方法包括吸附式制冷和吸收式制冷。太阳能吸附式制冷是利用吸附剂对制冷剂气体的吸附和解吸过程实现制冷，吸附剂在高温下解吸制冷剂气体，在低温下吸附制冷剂气体，从而实现制冷循环。太阳能吸收式制冷是通过吸收剂对制冷剂的吸收和蒸发过程实现制冷，吸收剂吸收制冷剂后，通过加热使其释放制冷剂气体，再通过冷凝和蒸发过程实现制冷循环。两种利用太阳能制冷的方法均可有效利用低品位热能，系统相对稳定，且对环境友好，无氟利昂等制冷剂的使用，减少对臭氧层的破坏。

目前太阳能三联供系统被广泛应用于住宅小区、酒店、办公楼等建筑。太阳能三联供系统是一种综合利用太阳能资源，实现制冷、供暖和热水供应的高效能源系统。其核心是太阳能集热器，通过集热器将太阳辐射能转化为热能，驱动制冷机、供暖设备和热水系统运行。制冷时，采用吸收式制冷或吸附式制冷技术，利用太阳能集热器产生的高温热水或热空气作为热源。

3) 地源热泵制冷

地源热泵制冷是一种利用地下浅层地热资源进行制冷的高效节能环保技术。地源热泵系统主要包括地源热泵主机、地埋管换热器和循环水系统。在制冷状态下，地源热泵机组内的压缩机对冷媒做功，使其进行汽-液转化的循环。通过蒸发器内冷媒的蒸发将由风机盘管循环所携带的热量吸收至冷媒中，在冷媒循环同时再通过冷凝器内冷媒的冷凝，由水路循环将冷媒所携带的热量吸收，最终由水路循环转移至地水、地下水或土壤里。在室内热量不断转移至地下的过程中，通过风机盘管，以13℃以下的冷风的形式为房间供冷。由于地下温度相对稳定，通常在13~20℃，因此地源热泵在制冷时的效率较高，制冷效率比传统空调系统高约40%。

据报道，国内首台磁悬浮离心式地源热泵机组于2024年在山东省潍坊市某住宅小区成功开机运行，节电率达53.4%，为小区住户提供了稳定可靠、低噪舒适的供暖供冷环境。

4) 多能互补制冷系统

多能互补制冷系统是一种将多种新能源（如太阳能、风能、地热能等）结合使用的系统，旨在提高制冷系统的整体效率和稳定性。通过能源耦合装置，将不同能源介质进行转换和互补。如利用光伏发电产生的电能驱动热泵，同时使用太阳能光热系统为制冷机提供热源。

以雄安新区某综合能源项目为例，其包括酒店、会展中心、公寓、学校、商业办公等建筑。能源需求包括供热、供冷、燃气及生活热水。项目采用太阳能、中深层地热、浅层地热、燃气、电力等多种能源耦合运行模式，通过智慧能源系统进行调控，实现可再生能源的高效利用。在供冷运行方案中，通过最大化利用浅层地热供冷，负荷不满足需求时启动电制冷机提供冷水。项目中可再生能源供冷比例达到35.14%，很大程度上实现清洁供能。

参考文献

- [1] LIN Q X, JIANG D H, DENG Z G, et al. Operation and improvement of liquid nitrogen pumps with radial high-temperature superconductor bearings[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2015, 180(5): 416-424.
- [2] POREDOŠ P, SHAN He, WANG Chenxi, et al. Radiative sky cooling thermal concentration with cooling power exceeding one kW per square meter[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(6): 2336-2355.
- [3] 田东民, 吴延鹏, 陈凤君. 基于纳米增强相变材料的铜-水热管传热性能分析[J]. *化工学报*, 2020, 71(增刊1): 220-226.
- [4] 李鹏, 聂晓蕾, 田烨, 等. Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃/环氧树脂柔性复合热电厚膜的制备及其面内制冷性能（英文）[J]. *无机材料学报*, 2019, 34(06): 679-684.
- [5] 贾秀臻, 路程, 王晓坡, 等. 低GWP制冷剂/[P6, 6, 6, 14]工质对的压缩辅助吸收式制冷循环性能分析[J]. *制冷学报*, 2023, 44(1): 35-42.
- [6] 张声宝. 航空发动机新型3D打印紧凑换热器设计与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [7] 王政涛, 陈惠芳, 张超. 3D打印构筑羧基化纤维素纳米纤维基辐射制冷复合材料[J]. *山东化工*, 2024, 53(20): 64-67.
- [8] 杨世豪, 钱小石. 电卡制冷技术: 器件发展现状与高熵铁电材料前瞻[J]. *制冷学报*, 2024, 45(6): 14-22.
- [9] BRADEŠKO A, JURIČIĆ Đ, SANTO ZARNIK M, et al. Coupling of the electrocaloric and electromechanical effects for solid-state refrigeration[J]. 2016, 109(14): 143508. [LinkOut]

- [10] MA Rujun, ZHANG Ziyang, TONG K, et al. Highly efficient electrocaloric cooling with electrostatic actuation [J]. *Science*, 2017, 357(6356): 1130-1134. [PubMed]
- [11] MENG Yuan, ZHANG Ziyang, WU Hanxiang, et al. A cascade electrocaloric cooling device for large temperature lift[J]. *Nature Energy*, 2020, 5: 996-1002. [LinkOut]
- [12] 范晓燕, 赵雪婷, 欧志强. 塑晶材料及其压卡效应研究发展与展望[J]. *材料导报*, 2024, 38(5): 276-283.
- [13] MEI Yunhao, LIU Qingyun, DU Huiyu, et al. Electromagnetic design of MRI superconducting magnet based on novel hybrid optimization methods[J]. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2024, 617: 1354425.
- [14] KITANOVSKI A, EGOLF P W. Innovative ideas for future research on magnetocaloric technologies [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(3): 449-464.
- [15] ALAHMER A, AL-AMAYREH M, MOSTAFA A O, et al. Magnetic refrigeration design technologies: state of the art and general perspectives[J]. *Energies*, 2021, 14(15): 4662.
- [16] KAMRAN M S, AHMAD H O, WANG HUA sheng. Review on the developments of active magnetic regenerator refrigerators—Evaluated by performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110247.
- [17] NIELSEN K K, TUSEK J, ENGELBRECHT K, et al. Review on numerical modeling of active magnetic regenerators for room temperature applications[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(3): 603-616.
- [18] APREA C, MAIORINO A. A flexible numerical model to study an active magnetic refrigerator for near room temperature applications[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(8): 2690-2698.
- [19] MONFARED B, PALM B. Optimization of layered regenerator of a magnetic refrigeration device[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 57: 103-111.
- [20] MONFARED B. Design and optimization of regenerators of a rotary magnetic refrigeration device using a detailed simulation model[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 260-274.
- [21] BOCANEGRA J A, SCARPA F, FANGHELLA P, et al. Optimization and development of a new rotary magnetic refrigerator[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024: 1-14.
- [22] 钟永华. 可再生能源在空调制冷中的应用[J]. *电子世界*, 2018, (3): 74.
- [23] 路学明. 新能源与可再生能源在暖通空调系统中的实践探究[J]. *居业*, 2022, 14(1): 180-182.
- [24] 范兴龙, 袁久旺, 姬铭泽. 地热能建筑节能中的应用研究[J]. *中国建筑装饰装修*, 2023(18): 90-92.

2.5 新型制冷技术的整机设备

2.5.1 热声制冷和热泵技术

(罗二仑 杨睿 中国科学院理化技术研究所)

随着我国“双碳”重大战略的稳步推进，传统制冷和热泵技术面临强制性更新换代，环保、高效的新技术备受期待。热声制冷和热泵技术基于热声效应通过消耗声功实现泵热，其循环在理论上高度可逆，系统没有或极少运动部件，采用的工质一般为氦气、氩气等惰性气体以及氮气等自然工质气体，因而具有潜在高效性、高可靠性和环保等优势^[1]，非常符合“双碳”背景下的发展要求。

1) 研究进展

(1) 热声制冷

热声制冷研究始于上个世纪70年代，在很长一段时间内由以美国Los Alamos国家实验室为代表的欧美研究机构主导。国内在该方面的研究起步稍晚，但经过二十余年的技术积累，研究水平目前已经处于国际领先。

在热声制冷机理方面，中国科学院理化技术研究所提出了以可压缩液体作为热声制冷系统工质的研究思路，相较于传统气体系统，采用可压缩液体为工质的热声制冷系统有望具备更大的制冷功率密度^[2]。气液相变对热声制冷在内的热声转换的强化作用同样是研究热点，浙江大学和北京理工大学均做了相关理论和实验研究^[3,4]，观察到了气液相变对声功的显著增强作用。特别是，多场协同的新流程提出为高性能热驱动热声制冷系统的研制奠定了理论基础^[5]（图2.5-1所示），实验也取得制冷效果的突破性进展，在空调制冷温区COP达到1.34。东南大学开展了电驱动热声制冷机与热泵模式切换研究，发现通过改变驱动器频率，可调节声场分布和热量传输方向，实现制冷和热泵模式切换^[6]。

谐振管是热声制冷系统的主要部件之一，对系统声场构成有决定性作用。北京理工大学提出采用钢丝增强柔性管取代传统的金属材质刚性管作为行

波谐振管，以减小系统的设计和装配难度，并提升系统紧凑性^[7]。他们在一台双行波式热驱动热声制冷机上测试了该谐振管，验证了柔性谐振管的可行性。此外，他们还研究了谐振管弯曲度对热声制冷系统性能的影响机制^[8]，结果表明，谐振管的弯曲会导致系统内声场的变化，进而导致声功率及声功率损耗的增加。

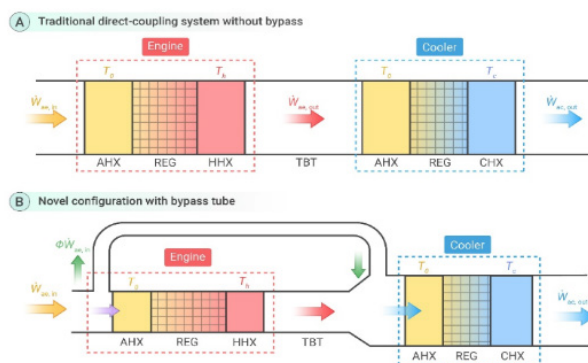


图2.5-1 多场协同的热驱动热声制冷流程

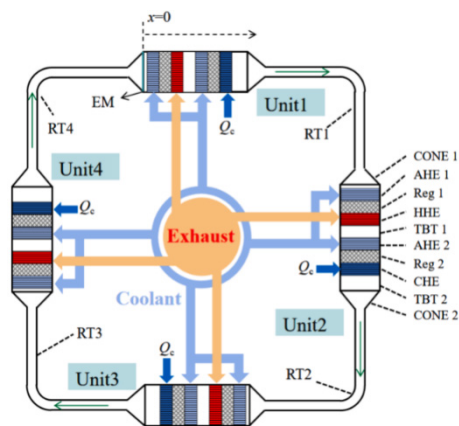


图2.5-2 具有4个对称制冷单元的双行波热驱动热声制冷系统

在系统构型层面，当前研究集中在效率更高的双行波型热声系统上。这里的“双行波”是指发生热声转换的回热器和传输声功的谐振管均处在以行波为主的声场。近期，北京理工大学研制了一台具有四个对称热驱动热声制冷单元的热驱动双行波制冷系统^[9]，结构见图2.5-2。该系统以车辆尾气为热源，系统内充注8.7 MPa氦气，平均加热温度为250℃，环境温度为30℃，制冷温度为10℃，产生的制

冷量达3.4 kW，发动机单元的效率和制冷机单元的COP分别为20.8%和2.34。中国科学院理化技术研究所近期研制了多台高性能双行波热驱动热声制冷系统，当采用不同制冷单元级数、不同类型谐振管和不同加热温度时，在空调温区可达到0.43~1.34不等的热制冷系数^[5,10,11]。图2.5-3所示为一台包含一个直连式热声核心单元的系统^[10]。

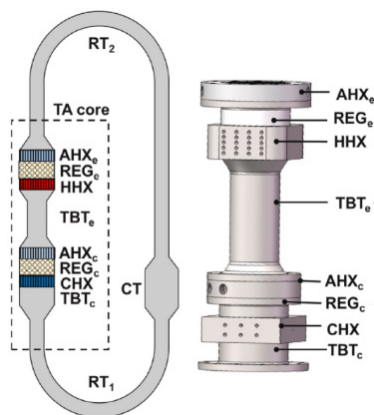


图2.5-3 单极环路双行波热驱动热声制冷系统

(2) 热声热泵

与传统蒸汽压缩式热泵相比，热声热泵的特征是采用气体热声循环，不涉及气液相变，因此尤其适用于极寒温区或超高温区泵热。

在电驱动热泵方面，热声斯特林热泵因其高效性和紧凑性，成为研究热点。中国科学院理化技术研究所研制了一台由4个斯特林子单元构成的双作用自由活塞热声斯特林超高温热泵系统。实验结果表明，该系统实现了25~166 °C大温度跨度泵热，并在45~119 °C的74 °C温度跨度时COP达到了1.68。当环境温度升至67 °C时，系统的供热温度达到了214 °C，相应的COP和相对卡诺效率分别为1.5和45.2%。该研究为工业蒸气应用中的高温热泵提供了一种新的解决方案，在实现大温度跨度和高供热温度方面具有独特优势。此外，他们还研制了一台面向极寒地区供热的电驱动大温差热声斯特林热泵，具体介绍见第3部分。

与电驱动热泵相比，热驱动热声热泵由热声发动机驱动，全系统无机械运动部件，因此适用于更高温度的供热。中国科学院理化技术研究所研制了一台热驱动热声热泵系统，该系统包括热声发动机

单元和制冷机单元，可通过消耗一部分热量泵升另一部分热量的温度。该系统的泵热温度高达270 °C，泵热温差超过125 °C，COP和相对卡诺效率分别为0.41和32.8%，泵热量为2.55 kW。这一研究思路有望应用于200~600 °C的超高温供热，为工业余热的升温利用探索一条可行的技术路径。

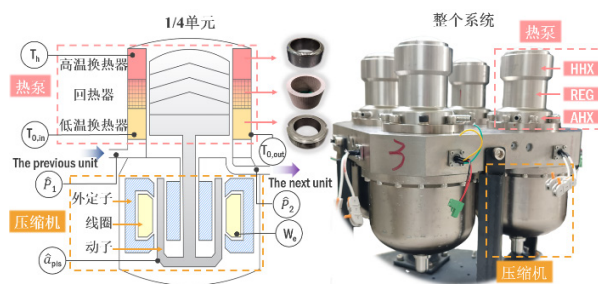


图2.5-4 电驱动超高温热声斯特林热泵

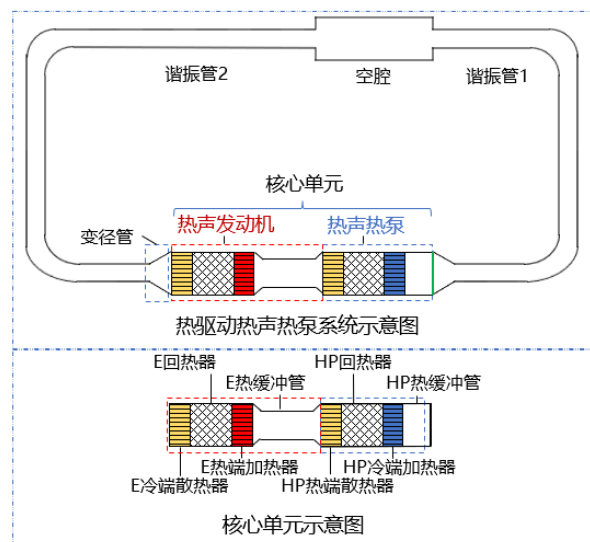


图2.5-5 热驱动超高温热声热泵

2) 关键技术

从热声制冷和热泵近期的发展上看，尽管在技术上已取得一定进步，但一些关键技术仍需进一步突破，才能达到规模化应用的需求。这些关键技术主要包括两大方面：

(1) 在电驱动热声制冷和热泵方面，自由活塞斯特林系统具有效率高、结构紧凑的优势。然而，当冷端温度升至0 °C附近的普冷温区时，冷热端温差减小，带来两个问题：一是排出器尺寸难以缩小。由于制冷机核心单元出口声功占入口声功比例大，现有排出器回收声功方案尺寸难以减小，不利于未

来降低成本、提高紧凑性。如何降低回收声功的量是关键问题之一。二是较大功率直线压缩机技术不成熟。现有电驱动热声制冷都应用在冰箱，功率较小。对于空调应用，通常功率在几千瓦至数十千瓦以上，因此还需进一步完善。而对于高温热泵，运动部件的高温运行也带来了一定的技术挑战。

(2) 在热驱动热声制冷和热泵方面，仍需要进一步提升性能。一方面需进一步降低谐振损失。可采用气-液耦合或气-固耦合谐振器，通过大幅减小谐振机构尺寸来减小损失。目前，采用气-液耦合谐振器系统的性能仍需进一步提升，而气-固耦合谐振器的引入则会大幅增加系统的机械复杂度，这些问题都需要解决。另一方面还需要研发高性能的交变流动换热器。在热声系统的换热器中，换热依赖于气体工质与固体壁面的对流作用，其传热系数远低于依靠相变换热的蒸气压缩制冷系统中的换热器。这导致换热温差很大，严重影响系统性能。由于交变流动的特性，换热器的性能很难通过增大流动方向尺寸来提高。解决该问题的潜在技术方案包括采用自泵式换热器等。

3) 代表性样机

(1) 多场协同的功流旁通型热声驱动制冷机

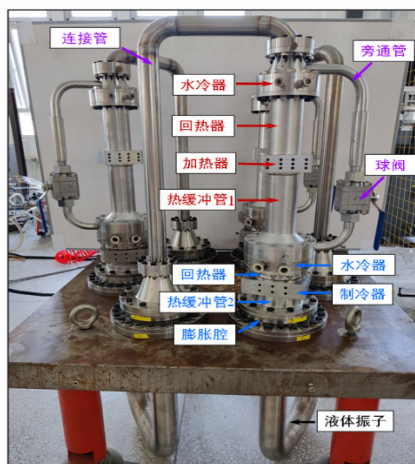


图2.5-6 多场协同的功流旁通型热声驱动制冷机

针对当前热声驱动制冷技术的热制冷系数较低的痛点，中国科学院理化技术研究所提出了一种多场协同的功流旁通型热声驱动制冷机新流程^[11]。通过旁通部分发动机入口的功流，在高加热温度下取得了发动机和制冷机良好的功流匹配，实现了压力

场-速度场以及功流场-温度场的良好协同，进而大幅提高了系统性能。实验表明，在标准空调制冷工况下，系统的热制冷系数可达1.34，超过公开报道同类型样机最高水平的3.4倍，可媲美双效吸收式制冷系统，显著提高了热声驱动制冷系统的竞争力，有望推动热声驱动制冷技术的工程化。相关研究成果被中国科学院、科技日报、中国制冷学会、美国物理联合会、美国科学促进会等国内外科研机构和媒体广泛报道。在该工作的基础上，后续计划推进兆瓦级功流旁通型热声驱动热泵工程样机的研制工作。初步理论研究表明系统在70℃的温跨下的泵热系数可达2.0，相对燃气锅炉热效率大幅提升。

(2) 面向极寒温区的大温跨热声斯特林热泵

针对极寒温区传统热泵运行困难的问题，中国科学院理化技术研究所研制了一台自由活塞斯特林热泵，结构如图2.5-7所示。相较于传统热泵，该热泵采用氦气作为工质、并用固体活塞进行调相，可以有效实现进行极低温环境下的大温跨泵热。实验结果表明，该系统在平均压力8 MPa、频率75 Hz、压比1.15的条件下，可以实现将热量从-65℃泵至70℃的大温跨泵热，制热量达944.67 W；当低温热源温度升至-40℃而供热温度在50℃时，系统的制热系数仍然可以达到1.5以上，该结果表明了自由活塞斯特林热泵在极低温、大温跨条件下的巨大应用潜力。依托该技术，中国科学院理化技术研究所联合海尔集团提出“极低温温室效应高效大温跨热声热泵”项目，在工信部主办的第十三届中国创新创业大赛颠覆性技术创新大赛中荣获最高奖项——“优胜奖”。

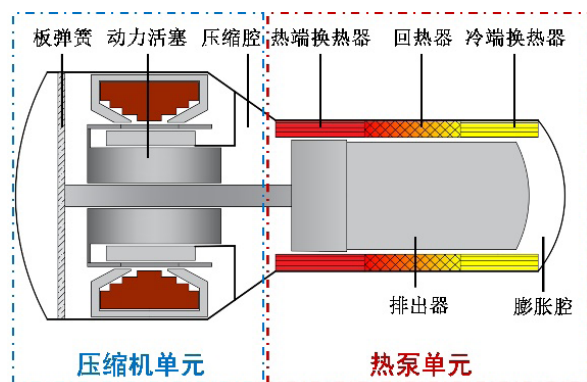


图2.5-7 面向极寒温区的大温跨热声斯特林热泵

参考文献

- [1] CHEN Geng, TANG Lihua, MACE B, et al. Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111170.
- [2] YANG Rui, YANG Yupeng, XU Jingyuan, et al. Thermoacoustic refrigeration with compressible liquid as working fluid[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 162: 1-11.
- [3] ZHANG Lingxiao, KANG Huifang, DING Xiachen, et al. Synthetical performance analysis of phase-change thermoacoustic regenerators and stacks[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121607.
- [4] ZHOU Qiang, CHEN Yachun, SHENG Shijie, et al. Experimental study on a wet thermoacoustic Stirling engine for water pumping[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 265: 125558.
- [5] XIAO Lei, LUO Kaiqi, WU Zhanghua, et al. An efficient and eco-friendly heat-driven thermoacoustic refrigerator with bypass configuration[J]. 2024, 124(2): 023902.
- [6] SUN Wenpeng, CHEN Geng, TANG Lihua, et al. Mode switching between electric-driven thermoacoustic refrigerator and heat pump[J]. Energy, 2025, 317: 134607.
- [7] ZHANG Lingxiao, DING Xiachen, KANG Huifang, et al. A loop thermoacoustic refrigeration system using flexible resonance tubes. Part I: Inner diameter variation and simulation analysis[J]. Applied Energy, 2024, 374: 123886.
- [8] DING Xiachen, KANG Huifang, SUN Xiaoxia, et al. Research on the effects of resonance tube bending in loop thermoacoustic refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 246: 122985.
- [9] JIANG Yifan, KANG Huifang, UMAR M, et al. Research on engineering technology of compact thermoacoustic air conditioner for vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 251: 123593.
- [10] HU Yiwei, WU Zhanghua, XU Jingyuan, et al. Investigation on a heat-driven thermoacoustic refrigerator with minimal complexity[J]. Energy, 2024, 304: 131977.
- [11] XIAO Lei, LUO Kaiqi, WU Zhanghua, et al. Sustainable heat-driven sound cooler with super-high efficiency[J]. The Innovation Energy, 2024, 1(2): 100027.

2.5.2 磁制冷

(李振兴 刘亚坤 沈俊 北京理工大学)

近年来,随着科技的高速发展,能源高效利用

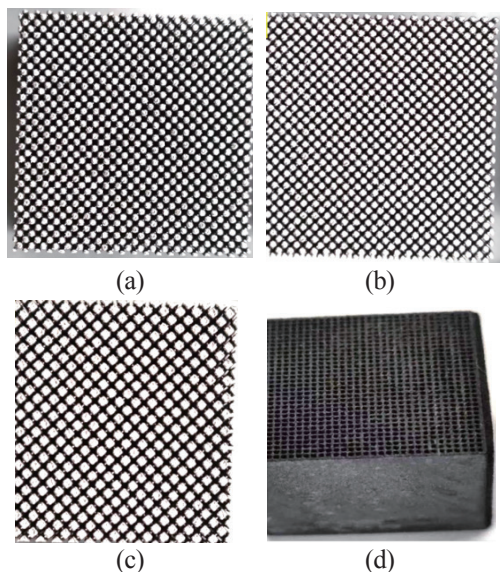
及环境保护越发受到重视,制冷与低温技术在人类生活和科技发展中的作用愈发明显。基于蒸汽压缩制冷循环的制冷技术仍然是目前的主流制冷技术^[1],但存在诸如臭氧层破坏、温室效应加剧以及易燃易爆的安全隐患等,对可持续发展构成了挑战。磁制冷技术^[2](Magnetic Refrigeration)因具有良好的环保性能、小型紧凑、无制冷剂泄漏风险、可靠性高、温区覆盖广等优势受到了越来越多学者的关注。作为可覆盖室温、低温与极低温的典型制冷技术,重点研究各温区下磁制冷技术特点,拓展其应用范围及场景成为当前的研究热点。

1) 关键研究及技术进展

磁制冷技术覆盖温区范围广,不同温区的磁制冷技术发展程度各不相同,因此研究侧重点也有所不同。近期,为了进一步提升整机系统性能,室温与低温磁制冷主要围绕高性能工质开发及成型工艺开展攻关研究,极低温磁制冷技术主要围绕磁热模块结构、减震结构以及热开关等关键部件进行优化研究。具体如下:

室温磁制冷技术自GdSiGe^[3]等一系列巨磁热材料发现以来发展迅速,但其整机性能仍未达到宽温跨下百瓦级以上制冷量的商业化需求。结合当前新型材料制备工艺(如3D增材制造技术),开展高比表面积、低流阻的回热器结构制备研究是提高磁制冷系统传热效率的关键因素。沈俊团队围绕常用的磁制冷材料Gd,结合增材制造(3D打印)技术,对回热器打印的工艺参数优化、尺寸精度控制以及应用展开了研究^[4],应用SLM打印工艺,优化得到最佳打印工艺参数为:激光频率 P 为71 W、扫描速度 v 为796 mm/s、扫描间距 d 为0.076 mm,打印了4种结构的回热器,如图2.5-8所示,在相似水力直径及相同原材料的情况下,对比了Gd球填充回热器和SLM打印回热器的性能,发现Gd球填充回热器的制冷量更大,打印回热器的流阻更低。为扩展磁制冷材料的制冷能力,团队还搭建了多回热器的高效磁制冷系统^[5],该系统获得了17.5 K的最大无负荷温跨和126 W的最大制冷量。来自日本Fujita团队^[6]等也利用激光粉末床熔合技术(LPBF技术)制造基于La(FexSi1-x)13的3D通道/柱状结构,优化后的LPBF工艺可以制备出在1 T下磁熵变化为-17 J/kg K的3D通

道/柱状结构。中国科学院物理研究所林源等人^[7]提出一种新型的混合式磁回热器，在10 Hz的工作频率下，使用Gd和Cu的组合，实现了26 K的最大温跨、8.3 kW/kg的制冷功率和54.2%的卡诺效率。

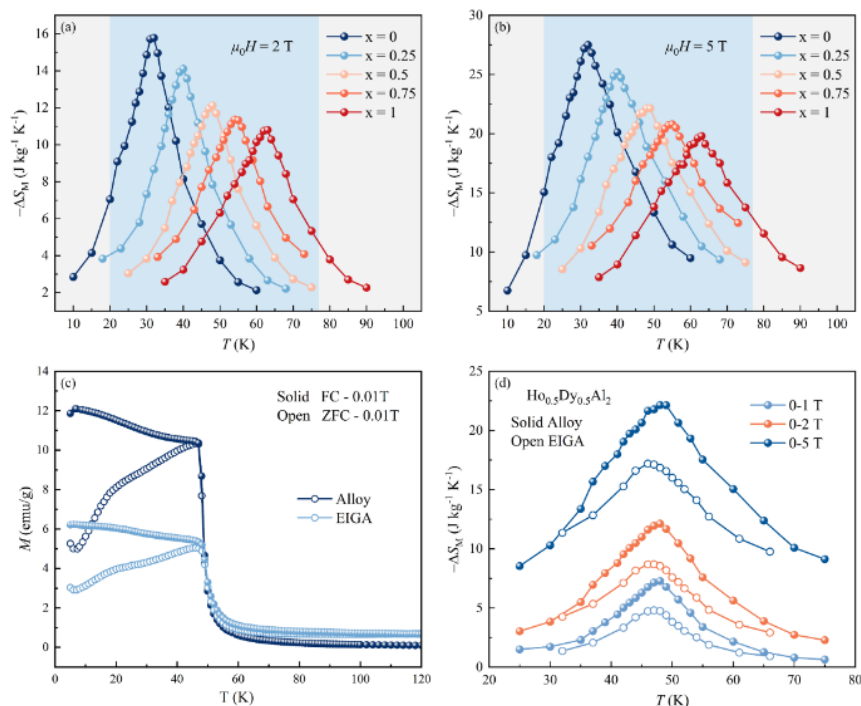


(a) 圆形翅片回热器; (b) 大孔隙率方形翅片回热器; (c) 小孔隙率方形翅片回热器; (d) 微通道回热器。

图2.5-8 SLM打印回热器宏观图

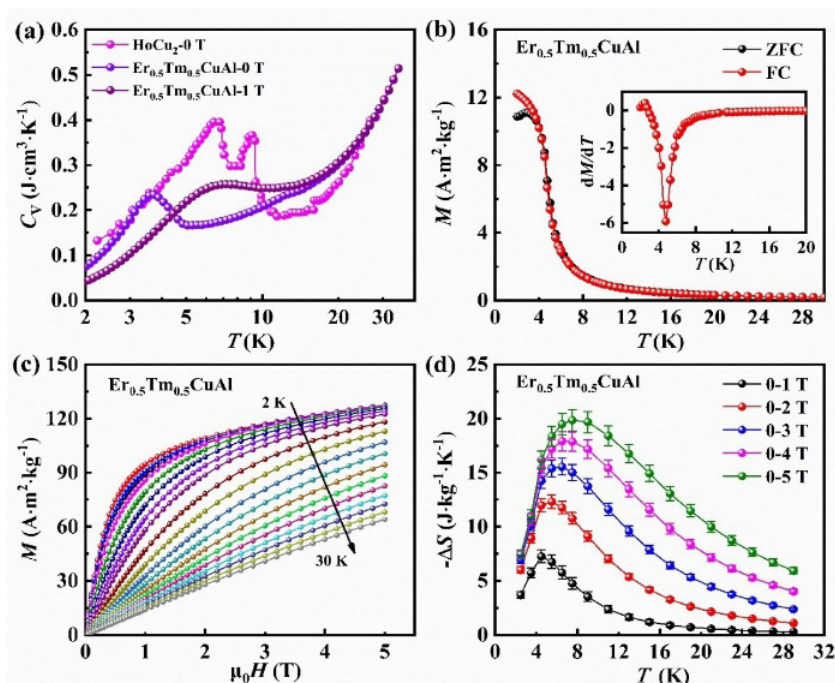
此外，基于磁热效应的铁磁-顺磁相变，构建了新型低品位余热回收技术-热磁发电（TMG）技术，其余热回收效率极限理论可以达到55%的卡诺效率^[8]，被认为是低品位余热回收中最有潜力的技术之一。目前基于磁热材料的热磁发电技术研究处于起步阶段，主要集中在热磁发电流程设计及机理研究方面。山东大学刘峤和高目其等人^[9]开发了一种全固态热磁开关新型热磁发电模型，开展了不同工作温度下工作周期、软磁材料厚度、剩磁等参数对热磁发电的性能研究，为热磁发电设备装置设计和参数优化提供了重要理论依据。

目前低温磁制冷的研究更多关注于高性能磁制冷工质开发及实验性能验证等方面。为了探索元素取代对于稀土基化合物中低场及低温磁热效应的调节作用以及物理机制。沈俊团队基于真空电弧熔炼法，制备了几乎涵盖液氮至液氢温区的 $\text{Ho}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Al}_2$ ($x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) 系列金属间化合物^[10]。并基于制备的合金铸锭，通过电极感应熔化雾化法制备球形颗粒，气体雾化颗粒表现出较好的球形度。对比分析结果表明合金铸锭和球形颗粒的居里



(a) $\mu_0\Delta H=2$ T; (b) $\mu_0\Delta H=5$ T; (c) $\text{Ho}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}\text{Al}_2$ 球形颗粒的ZFC和FC曲线图; (d) $\text{Ho}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}\text{Al}_2$ 合金铸锭和球形颗粒的 $-\Delta S_m$ vs T 曲线对比图

图2.5-9 $\text{Ho}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Al}_2$ ($x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) 系列合金的 $-\Delta S_m$ vs T 曲线图



(a) 比热容曲线；(b) ZFC和FC曲线；(c) 等温磁化曲线；(d) 磁熵变化曲线。

图2.5-10 $\text{Er}_{0.5}\text{Tm}_{0.5}\text{CuAl}$ 微球随不同磁场和温度变化的

温度与磁相变类型保持一致，如图2.5-9所示。合金铸锭和球形颗粒的出色磁热特性有助于开发在液氢温度范围内运行的磁制冷工质。同时，中国科学院赣江创新研究院莫兆军团队基于单分散金属球化工艺开发了在液氢温度区应用下粒径均匀、球形度高、磁热效应大的 $\text{Er}_{0.5}\text{Tm}_{0.5}\text{CuAl}$ 微球^[11]，如图2.5-10所示。并使用该材料在独立构建的复合GM磁制冷机，实现了3.22 K的最低制冷温度和0.76 W的制冷量。相较于单GM模式，制冷量提高了20.6%。此外在4.2 K的GM模式下， $\text{Er}_{0.5}\text{Tm}_{0.5}\text{CuAl}$ 微球回热填料相较于 HoCu_2 回热填料，制冷量提高了22.6%。结果表明，复合GM磁制冷对提高GM磁制冷效果起着显著作用，同时也为液氢温度区域其他磁制冷材料在复合GM磁制冷机上的实验应用提供了有价值的参考。

理想的磁制冷材料应在制冷系统的整个工作温区内展现出稳定的磁热效应特性。即类似于“平台状”的最大磁熵变。波兰科学院低温与结构研究所ĆwikJ等人通过放电等离子烧结（SPS）及高静压（HIP）合成技术，成功制备出一种由磁性金属间化合物 HoNi_2 、 DyNi_2 和 TbNi_2 组成的新型三层复合磁性制冷材料^[12]，如图2.5-11所示。其独特的成分设计

使得该复合材料在30 K的温度区间内表现出优异的“平台状”磁热效应，为开发高性能磁性复合材料开辟了新的途径，拓展了磁制冷技术的应用潜力。

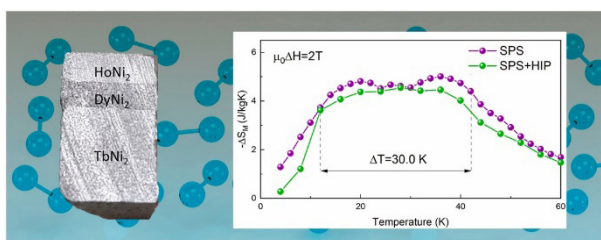


图2.5-11 新型三层复合磁性制冷材料示意图及其 $-\Delta S_m$ vs T 曲线图

绝热退磁制冷（Adiabatic Demagnetization Refrigeration, ADR）作为唯一可以在无重力条件下实现极低温（ ≤ 1 K）的低温制冷技术，主要用于亚开尔文温区冷却测辐射热红外探测器和低温X射线探测器。在极低温磁制冷技术研究中，目前如何准确预测极低温磁制冷工质的磁有序温度 T_0 仍然是一个巨大的挑战，厦门大学龙腊生等^[13]通过将平均场近似与量子蒙特卡罗模拟相结合来预测的具有非常弱的磁相互作用和小各向异性的磁制冷工质的磁有序温度 T_0 ，对未来极低温磁制冷工质性能的合理设计和

制备具有重要帮助。

在极低温制冷技术中在对磁热模块及附加结构的体积质量控制极为严格，尤其应用在航天领域中，如何在维持高效冷却性能的同时减轻磁热模块及其附加结构质量成为关键挑战之一。因此，开展磁热模块中盐丸几何形状及内部构造对整机冷却性能和系统总质量影响的研究显得尤为必要。沈俊团队基于在4 K和50 mK之间运行的四级连续ADR系统，建立了ADR的二维瞬态模型^[14]，如图2.5-12所示。通过数值仿真研究，确定了各级盐丸的最佳长径比，并基于各级盐丸的最佳长径比，研究了热总线直径和磁热材料的体积比对ADR冷却性能的影响，为进一步优化多级连续ADR系统的结构设计提供了理论依据和技术支持。

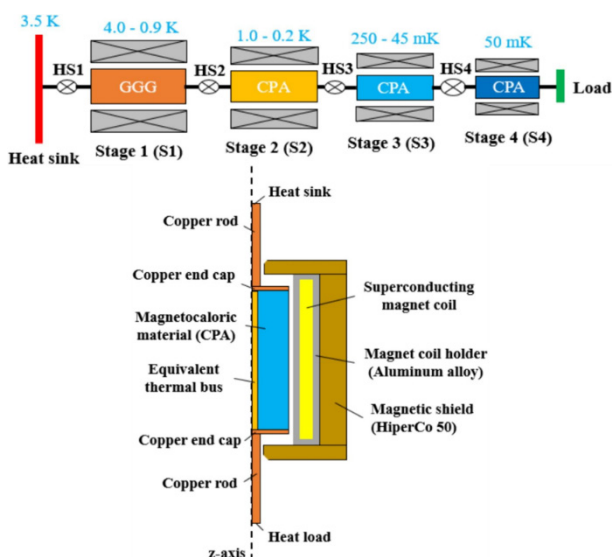


图2.5-12 四级连续ADR示意图及二维仿真模型几何示意图

与此同时，在不同极低温应用场景下对系统热泄漏和抗振动的需求也有不同的侧重点，因此必须对此进行权衡。沈俊团队针对ADR系统中凯夫拉悬挂策略的热-机械耦合普遍规律进行了数值模拟研究^[15]。通过引入无量纲参数 ϕ ，定量评估了悬挂系统的细长程度及其对热泄漏和振动响应的影响。根据 ϕ 与热泄漏及振动影响之间的关系可以优化凯夫拉悬挂设计，进而在ADR热设计允许的最大约束范围内实现最佳稳定性，从而确保高效的冷却性能和结构完整性。

此外，高性能热开关在极低温系统中起到控制热力学循环、加速降温等作用，凭借高可靠性以及小巧便携等优势成为了整机系统的关键角色，其性能优劣直接决定了整机性能。其中，气隙式热开关的关键难点在于极低温与极低压环境下的氦气吸附、流动与导热机理认识不明，作用规律复杂，缺乏系统性研究，难以实现高稳定性、大开关比、快速响应的高性能热开关。针对上述难题，沈俊团队开展了低温氦气吸附机理研究^[16]，解释了复杂工况下的氦气的吸附与导热作用规律，实现了热开关状态的精准调控与特定优化，并进一步设计研发了适用于不同需求的多种高性能热开关，解决了开关比过小、响应速度较长、mK温区意外导通等问题，为极低温制冷整机技术的研制与高效运行提供了坚实的基础。

2) 整机设备

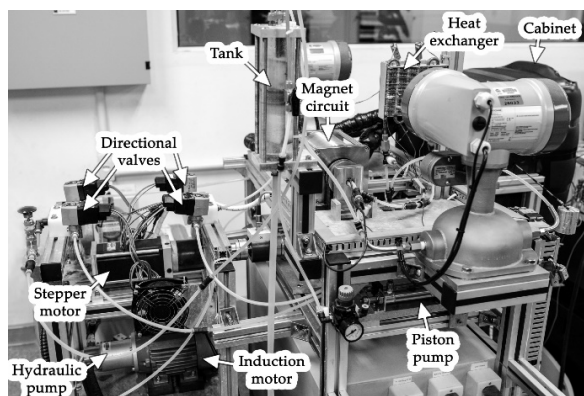


图2.5-13 巴西圣卡塔琳娜联邦大学 C. C. Rodolfo Flesch等AMR试验装置实物图

尽管近年来室温磁制冷技术取得了显著进展，研究人员基于室温整机稳定运行控制策略方面开展了系统性研究。其中，巴西圣卡塔琳娜联邦大学Rodolfo C. C. Flesch等基于Trevizoli等于2016年设计搭建的AMR样机为基础，如图2.5-13所示。根据系统运行参数，表征了磁制冷样机温度的动态和稳态行为及其能耗特性^[17]。基于实验结果，识别出了一种面向控制的静态和动态模型，用于描述实际磁制冷系统的特性，为进一步优化磁制冷系统的性能提供了理论依据。同时，北京科技大学张虎团队基于室温磁热材料的热-磁转化效应研制了一台新型热磁发电装置。该装置借鉴“椒盐卷饼”（pretzel-like）拓扑

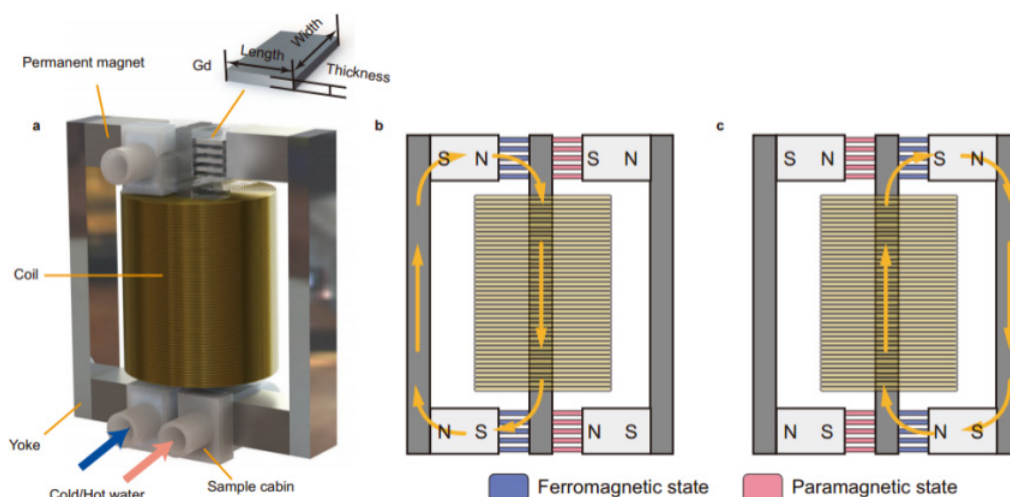
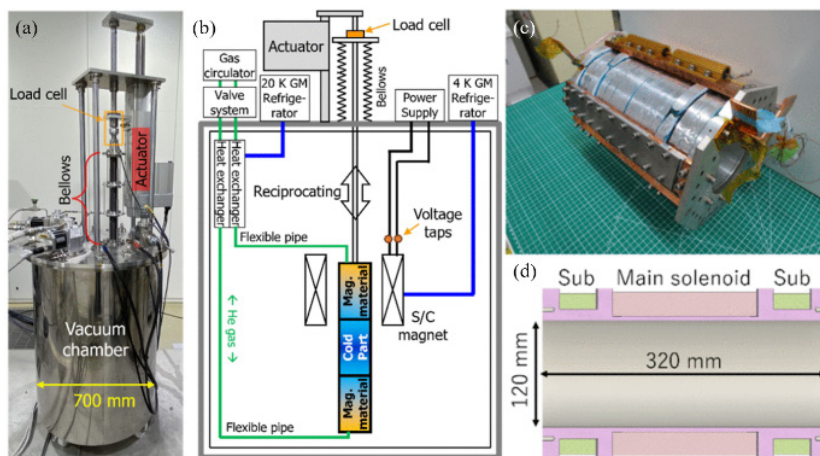


图2.5-14 张虎等基于“椒盐卷饼”磁路优化的热磁发电装置



(a) 实物图；(b) 结构图；(c) 磁体组实物图；(d) 磁体组结构参数示意图

图2.5-15 日本Kamiya等往复式AMR样机

磁路，设计了更简单、杂散磁场更弱的静止式热磁发电机^[18]，如图2.5-14所示。填充LaFeSiH/In的样机获得了0.034 V/g的单位峰值电压，4 mW/cm³的最大功率密度以及232 μW/cm³的平均功率密度。

在低温磁制冷整机方面，日本国家材料研究院 Kamiya 团队基于 NbTi 超导线圈搭建了一台往复式低温磁制冷样机，如图2.5-15所示，并成功验证了其在低温氢液化领域的可行性和应用前景。往复式结构需要磁性材料频繁进出超导磁体，导致磁体中产生感应电压和电磁力，从而影响系统稳定性和磁体寿命。因此，量化这些电磁效应并建立与电磁力相关的 AMR 系统设计准则，成为优化 AMR 样机的关键。2024 年，该团队 Natsume 等采用实验与数值模拟相结

合的方法，研究了往复式 AMR 样机中磁热工质周期性进出超导磁体时产生的电磁效应及其对系统性能的影响^[19]。结合有限元模拟与实验测量，分析了磁场强度与运动速度对感应电压及电磁力的影响，并提出需进一步整合三维多物理场分析以优化磁体设计、材料分布及机械校准，为高可靠性低温磁制冷系统的工程化设计提供了理论依据。

在极低温磁制冷整机方面，中国科学院理化技术研究所李珂和刘萍等在此前 50 mK 多级 ADR 样机的基础上，进一步开展了四级单冲程式 ADR 研究^[20]，如图2.5-16所示。该四级单冲程式 ADR 相较于三级 ADR 样机，增加第四级的 CPA 磁热模块和一个超导热开关。该四级单冲程式 ADR 在 3.5 K 热沉的预冷

下, 最低制冷温度仅达到181 mK, 相较此前三级单冲程式ADR获得的最低38 mK差距较大。其原因在于前三级磁热模块产生的冷量难以将第四级冷却下来, 且系统中存在较大漏热导致。在复合极低温制冷方面, 韩国科学技术院的D. Kwon等成功搭建了一台耦合吸附制冷和单冲程式ADR的制冷系统^[21], 如图2.5-17所示。该制冷系统通过G-M制冷机+吸附制冷的方式将ADR中的GGG磁热模块预冷至约1.94 K, 再通过单级单冲程式ADR进行退磁降温(最大磁场为3 T), 最终获得约0.55 K的最低制冷温度。

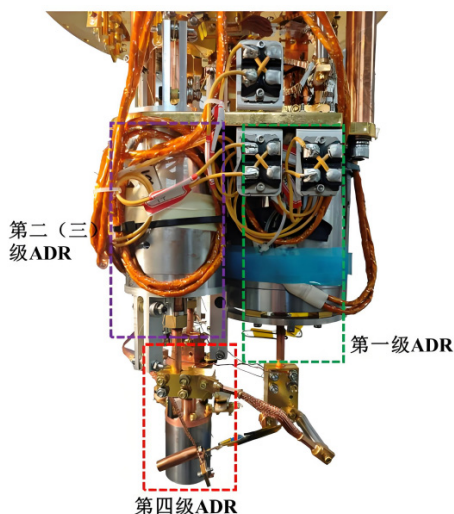


图2.5-16 中国科学院理化技术研究所李珂和刘萍等四级单冲程式ADR

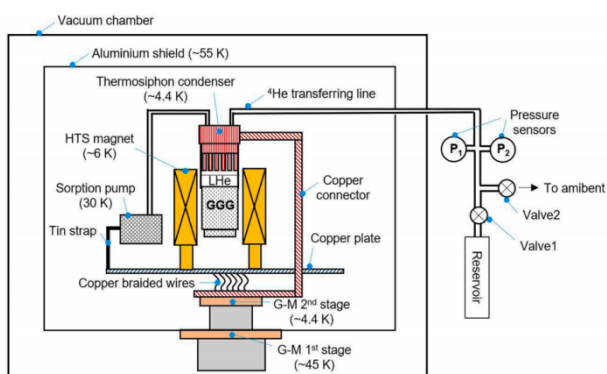
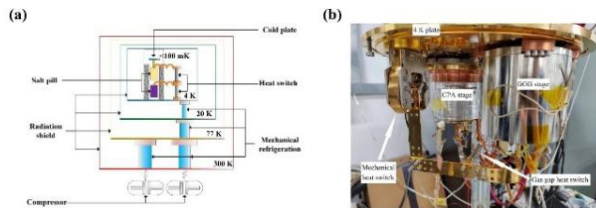


图2.5-17 韩国D. Kwon 等耦合吸附制冷和单冲程式ADR的制冷系统

为满足我国HUBS任务中软X射线探测器的冷却需求(工作温度低于100 mK), 清华大学金海等从2020年开始开展两级单冲程式ADR的相关研究, 其ADR实物图如图2.5-18所示。2023年, 采用CPA作为

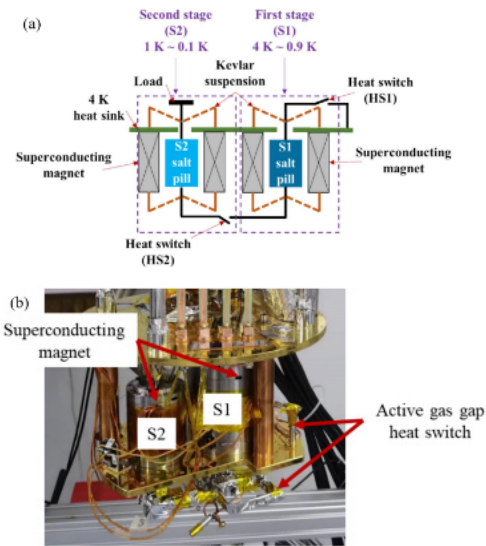
低温级时, 该两级单冲程式ADR的最低制冷温度达到44 mK, 在100 mK的保持时间超过3 h, 相对卡诺效率为95.3%^[22]。



(a) 示意图; (b) ADR样机的实物图。

图2.5-18 HUBS冷却系统的初步设计

目前关于ADR样机的研究偏向于整体性能, 对样机的细节研究不足, 因此沈俊团队成功搭建了两级ADR^[23], 研究了其相对卡诺效率及温度稳定性。两级ADR结构示意图如图2.5-19所示, 该样机在没有额外热负荷的情况下, 最低制冷温度为63 mK, 恒温时间为3 h 40 min@100 mK。温度均方根误差为1 h/15.5 μ K@100 mK。此外, 研究了放热温度和退磁斜坡速率对S1 ADR的相对卡诺效率和净制冷功率的影响。该样机基于4 K热沉实现了低于100 mK的冷却, 可以直接冷却应用负载, 或在低温阶段起到预冷平台的作用。



(a) 示意图; (b) 实物图。

图2.5-19 两级ADR

磁制冷技术涉及多学科间的交叉与融合, 其关键技术、整机系统设计理论与实验方法逐步被完善。尽管当前室温磁制冷仍面临着成本高与制冷性

能尚不能满足商业应用等问题，新材料及成型工艺等技术发展也推动着室温样机朝着宽温跨大冷量的产业化方向发展；低温磁制冷技术也呈现快速发展趋势，宽温区材料的开发为构建低温磁制冷技术提供了基础；随着空间探测及量子计算等尖端前沿科学需求，对传统极低温磁制冷技术提出更高的要求，尤其系统质量与减震等方面。随着磁制冷技术的不断革新与进步，该技术必将在制冷与低温工程领域发挥重要作用，为我国低温制冷技术的创新发展与性能提升提供有力支撑。

参考文献

- [1] 陈光明, 陈国邦. 制冷与低温原理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 李振兴, 李珂, 沈俊, 等. 室温磁制冷技术的研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(11):13-29.
- [3] PECHARSKY V K, GSCHNEIDNER K A. Giant magnetocaloric effect in $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ [J]. Physical Review Letters, 1997, 78(23): 4494-4497.
- [4] 海鹏. 基于磁制冷材料Gd的增材制造成型工艺及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- [5] HAI Peng, SHEN Jun, LI Zhenxing, et al. Development and experimental analysis of a multi-bed active magnetic regenerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 162: 169-178.
- [6] IMAIZUMI K, FUJITA A, SUZUKI A, et al. Additive manufacturing for 3D microchannel structure using $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ magnetic refrigerant via laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2024, 83: 104076.
- [7] LIN Yuan, WANG Jing, DAI Wei, et al. A full solid-state conceptual magnetocaloric refrigerator based on hybrid regeneration[J]. The Innovation, 2024, 5(4): 100645.
- [8] BRILLOUIN L, ISKENDERIAN H. Thermomagnetic generator [J]. Electrical communication, 1948, 25(3): 300-311.
- [9] 高目前. 基于热磁发电的低品位余热回收系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- [10] LIU Yakun, SU Xiu, FANG Linfang, et al. Large cryogenic magnetocaloric effect of the Laves-phase $\text{Ho}_{1-x}\text{D}_x\text{Al}_2$ compounds within liquid hydrogen temperature range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 178324.
- [11] LI Yan, SUN Hao, WANG Junfeng, et al. Experimental application study of the $\text{Er}_{0.5}\text{Tm}_{0.5}\text{CuAl}$ magnetocaloric material in the liquid helium temperature region refrigerator[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2025, 614: 172731.
- [12] JACEK Ć, KOSHKID'KO Y, PUTYRA P, et al. Layered composite magnetic refrigerants for hydrogen liquefaction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 87: 485-494.
- [13] XU Qiaofei, CHEN Manting, YE Mingyu, et al. Accurate prediction of the magnetic ordering temperature of ultralow-temperature magnetic refrigerants[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(25): 32394-32401.
- [14] ZHENG Wenshuai, SHEN Jun, ZHAO Ya' nan, et al. Optimization research of salt pill in an ultra-low temperature adiabatic demagnetization refrigerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124085.
- [15] LU Yian, SHEN Jun, ZHAO Ya' nan. A study of Kevlar suspension system in ADR for future mission[J]. Cryogenics, 2024, 140: 103855.
- [16] PAN Teng, YU Fangqiu, LI Ke, et al. A modified dubinin-radushkevich model describing the cryogenic adsorption of 4He on carbon materials[J]. Cryogenics, 2024, 144: 103977.
- [17] HOFFMANN G, NAKASHIMA A T D, PEIXER G F, et al. Static and dynamic modeling and identification of a magnetic refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 158: 303-312.
- [18] LIU Xianliang, CHEN Haodong, HUANG Jianyi, et al. High-performance thermomagnetic generator controlled by a magnetocaloric switch[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 4811.
- [19] NATSUME K, SHIRAI T, UCHIDA A, et al. Effects of moving magnetic materials in and out of superconducting magnet for active magnetic regenerative refrigeration system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(5): 3801005.
- [20] 刘萍. 绝热去磁制冷机关键部件及系统的设计与实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2024.
- [21] KWON D, BAE J, JEONG S. Development of the sorption-integrated adiabatic demagnetization refrigerator (ADR) without active heat switches[J]. Cryogenics, 2024, 137: 103777.
- [22] JIANG Chunyang, LI Chengzhe, JIN Hai, et al. Development of adiabatic demagnetization refrigerator for the HUBS mission[J]. Science Bulletin, 2023, 68(22): 2709-2711.

- [23] CHEN Zhuo, SHEN Jun, ZHAO Ya' nan, et al. Experimental research on a high efficiency adiabatic demagnetization refrigerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 265: 125562.

2.5.3 弹热制冷

(钱苏昕 西安交通大学)

在寻找低GWP替代制冷剂的道路上,考虑到固体不会挥发,具有零GWP、可绿色回收、安全无毒、内禀高效特性的固态相变制冷近年来受到了广泛关注,已成为制冷领域的科学前沿。其中,弹热制冷(elastocaloric cooling)可利用现有的商用级材料,具有高导热率、高制冷能量密度、高效率等突出优势,在液氮至室温的宽温域具有潜在的应用价值。

弹热制冷使用应力驱动固态工质在两种(及以上)不同晶格结构之间发生准可逆相变,使用固态结构相变过程的潜热进行制冷:加载应力时,释放潜热,固态工质温度升高;卸载应力,吸收潜热,固态工质温度降低。当加载/卸载应力的过程绝热时,固态工质的温度变化被称为绝热温变。商用级镍-钛二元合金弹热工质的绝热温变可达20 K以上,制冷效应显著。使用中空结构的弹热工质,在液态传热流体交变流动与周期性加、卸载的作用下,可产生远超过工质绝热温变的制冷系统温差。一般将中空结构液-固换热的弹热工质与内部传热流体、外部围护结构构成的关键部件称为弹热回热器(elastocaloric regenerator);与低温制冷机中的回热器不同,弹热工质可在回热器内产生热量,因此也被称为主动弹热回热器。本文简称为弹热回热器。

经过十余年的发展,已有多台百瓦级至千瓦级弹热制冷机的报道,制冷量已发展至可讨论比较制冷功率密度和制冷性能系数(COP)的体量^[1]。本节重点介绍弹热制冷在2024年取得的关键研究进展,并展望弹热制冷的应用前景。

1) 多相变温度的高性能弹热回热器

香港科技大学报道了使用三组不同相变温度NiTi二元合金管状结构弹热工质的高性能回热器^[2]。弹热回热器温度梯度增大时,其冷热端的相变程度

将产生显著不同,制约其制冷(热)性能,特别是制冷温差。本项研究提出将三组不同相变温度的弹热工质串联使用,在低温端使用低相变温度(-2.5℃)弹热材料,高温端使用高相变温度(48℃)弹热材料,将工质的相变温度与弹热回热器内的温度梯度匹配,减少相变不均匀性,最大化地利用弹热效应,提升系统制冷(热)性能。

在相同弹热材料质量约束条件下,使用均匀相变温度的弹热回热器最大可产生51 K的制冷温差,而使用三组不同相变温度弹热材料产生了74.7 K的制冷温差,提升幅度约为47.6%。另一方面,在启动阶段温度梯度尚未建立之时,或系统工作在小温差工况条件下,弹热工质的温度梯度偏离了其相变温度分布的最佳工况,使得部分弹热材料无法完全相变。因此,使用三组不同相变温度弹热回热器在小温差下的制冷量和COP均显著低于均匀相变温度的弹热回热器。只有在制冷温差大于20 K时,使用3组不同相变温度的COP才具有优势,只有在制冷温差大于40 K时,其制冷量才具有优势。本项工作对于解决弹热回热器的相变不均匀问题提供了新的思路,对于发展高性能水冷弹热回热器和弹热制冷系统具有重要意义。

2) 动能回收的弹热制冷系统

卸载阶段的机械能如不能有效回收,将导致能效降低,特别是对高COP的制冷材料,如果无法回收卸载机械能,则其材料层面COP优势无法发挥。卸载弹热材料时,机械能以两种形式存在,部分势能转化为动能,加速运动部件,部分势能用于减少输入功率。伴随着系统运行频率的提升,动能部分占比逐渐增大,但传统的对偶布置机械能回收方法仅能回收势能,无法回收动能,针对高效TiNiCu材料的理论最高回收效率仅为65%。

为此,西安交通大学研制了通过滚轮结构回收动能的高效弹热制冷系统。通过合理匹配转动惯量的滚轮结构,将弹热材料卸载初始阶段释放的动能储存起来,在卸载接近结束的减速阶段释放,可回收约30%的动能,实现了78%的卸载功回收效率^[3]。相比只加载卸载一组弹热材料的基准条件,加载卸载两组弹热材料并回收卸载功的条件下输入功率基本一致,系统COP约提升一倍。同时,本项工作是

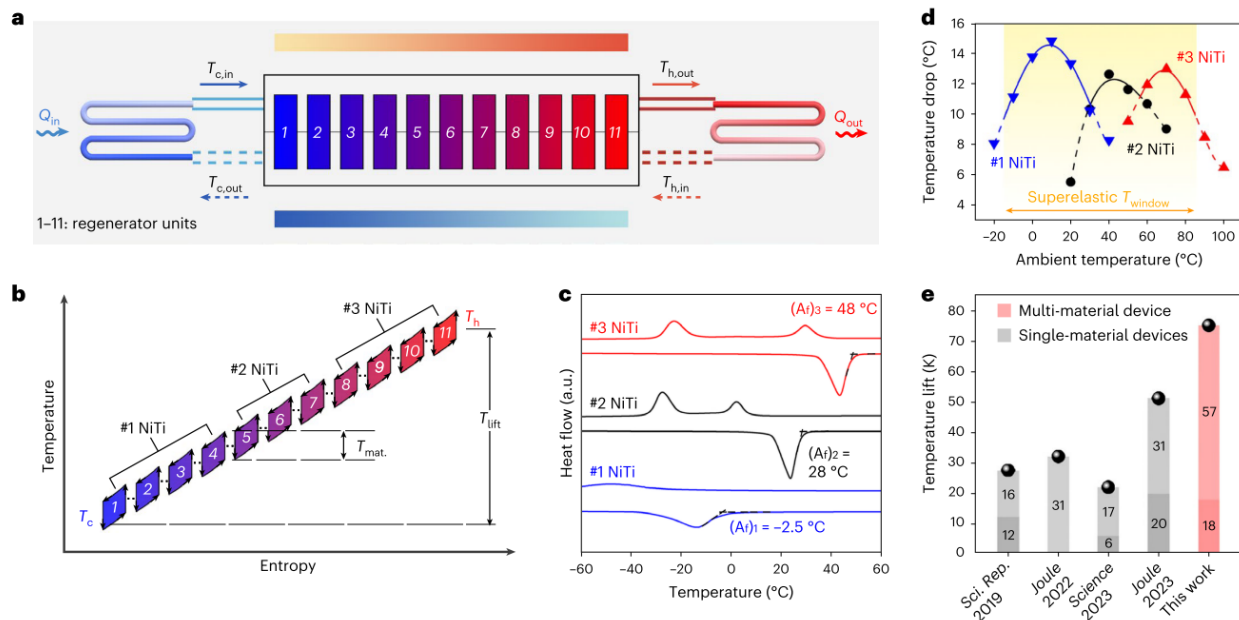


图2.5-20 (a) 多相变温度的高性能弹热回热器; (b) 三种相变温度弹热材料分布示意图; (c) 三种相变温度弹热材料相变温度对比; (d) 三种相变温度的弹热材料热效应及温区; (e) 制冷温差。

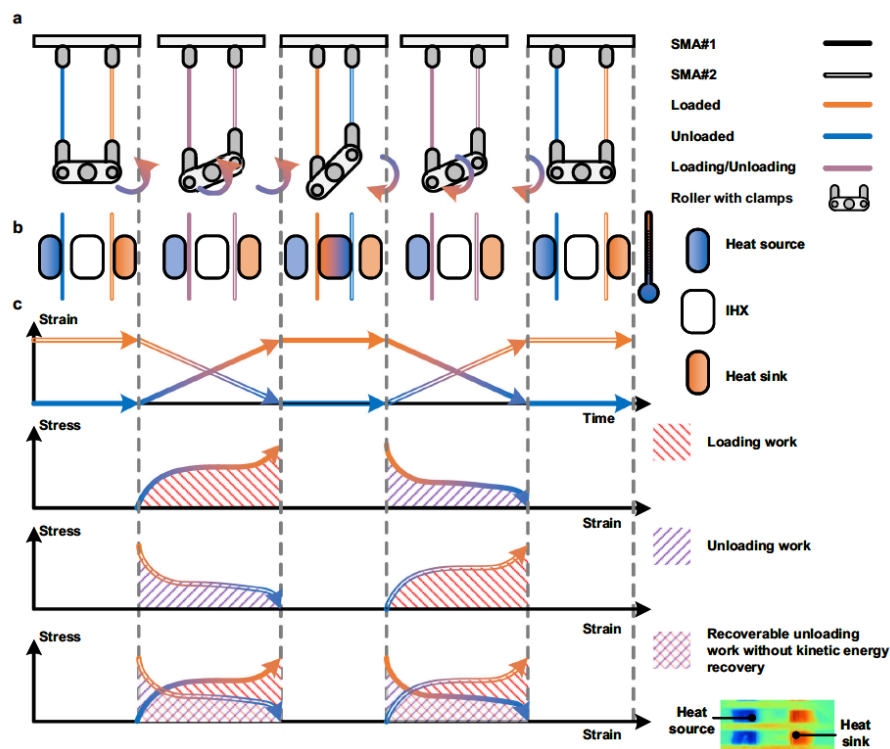


图2.5-21 (a) 动能回收的弹热制冷系统结构简图; (b) 换热结构简图; (c) 卸载功回收原理图。

首次使用大批量kg级TiNiCu三元合金制备的片状弹热材料，相比商用级NiTi二元合金，系统的制冷温差可从19.9 K提升至25.4 K，制冷量从3 W提升至4.5

W，提升幅度与材料通过微观组织调控获得的潜热提升量保持一致。本项工作为提升弹热制冷系统的制冷能效提供了理论基础。

3) 极低温弹热制冷材料

室温弹热制冷利用了马氏体结构相变的潜热，而马氏体结构相变从室温到液氦温区均有报道。但进一步降低温度至亚开温区需要新的物理机制。

斯坦福大学报道了 TmVO_4 中基于Jahn-Teller效应的四铁极子结构相变及其制冷效应直接测量结果^[4]。该结构相变会导致剪切应变，反过来，在2.15 K相变温度以上，利用剪切应变可诱发四铁极子无序至有序的结构相变，从而在去除应变时制冷。单晶 TmVO_4 在0.18%应变条件下，可从5 K降至2.6 K，降幅接近一半。基于非马氏体结构相变热效应的制冷机制，特别是在亚开温区制冷效应的研究，对于发展零³He的新型极低温制冷方法及对量子计算技术具有重要意义。

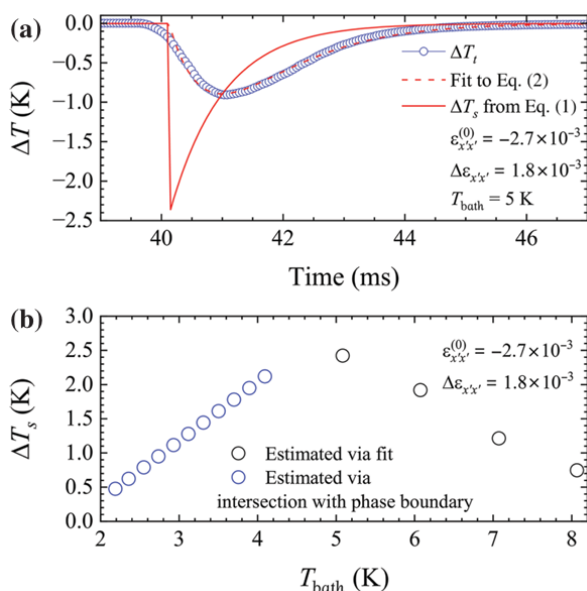


图2.5-22 TmVO_4 弹热效应的准直接测量结果及其与起始温度的关系

4) 用于弹热制冷的高效率驱动系统

驱动弹热制冷材料相变需要大应力和小位移，而目前的原动机的驱动力和驱动位移较为均衡，没有与之完全匹配的，这些驱动器工作在大应力条件下往往显著偏离其最优工况，即使通过减速器等辅助机构改善其工况，也会造成额外损失，导致驱动效率偏低。

为此，德国弗劳恩霍夫研究所构建了一种基于

多组直接往复运动衔铁结构的直线电机^[5]。运动的衔铁由弹簧横向支撑，无需额外的轴承，以最小化摩擦损耗；衔铁的径向外侧被静止的电磁线圈及软铁构成的磁阻包围，中间为空气间隙，通过电磁线圈的激励改变衔铁的受力和运动。为了使其工作在最高效率，以弹热回热器所需的频率范围选定衔铁谐振的共振频率和线圈的共振频率，通过上下两组对偶布置的磁阻结构进行电能回收，实现高效。在使用两组反相位的高刚度弹簧作为模拟弹热材料的条件下，使用两组对偶布置的磁阻及衔铁构成直线电机，在18.8 Hz运行频率条件下，实现了95.7%的效率，为弹热制冷技术发展匹配的高效驱动器提供了新的思路。

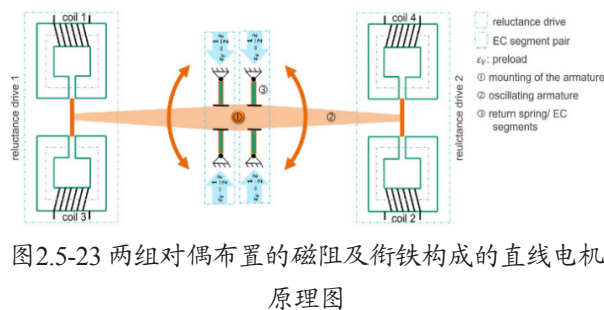


图2.5-23 两组对偶布置的磁阻及衔铁构成的直线电机原理图

5) 基于扭转驱动的弹热制冷系统

通过轴向拉伸或压缩应力驱动弹热材料马氏体相变往往需要百MPa量级的强度，对应的驱动力大，导致系统驱动器体积和重量一般较大。扭转可以产生非均匀的应力，特别使用扭转驱动丝状或绳状结构，可以在较小的扭矩条件下获得均衡的能量密度和能量转化效率，为降低弹热制冷系统驱动器的体积和重量提供了新的技术途径。

为此，南开大学报道了首个采用扭转方式驱动的弹热制冷系统^[6]。系统内采用了两组绳状回热器，每组回热器采用管壳式结构，内有三根0.7 mm外径、265 mm长的镍钛二元合金丝，外部为4.5 mm外径的密封桶，内部通液态载冷剂换热。在绝热条件下，系统的热源热汇之间实现了10.1 K的制冷温差；当热汇侧风机开机，采用强制对流散热时，无负载的冷端温度比环境温度低4.7 K。作者通过载冷剂的温度变化来间接估算制冷量和制冷性能系数，得到了制冷性能系数相比单轴压缩和拉伸更高的结论。本项工作证明了扭转驱动结合液冷回热器可行，为

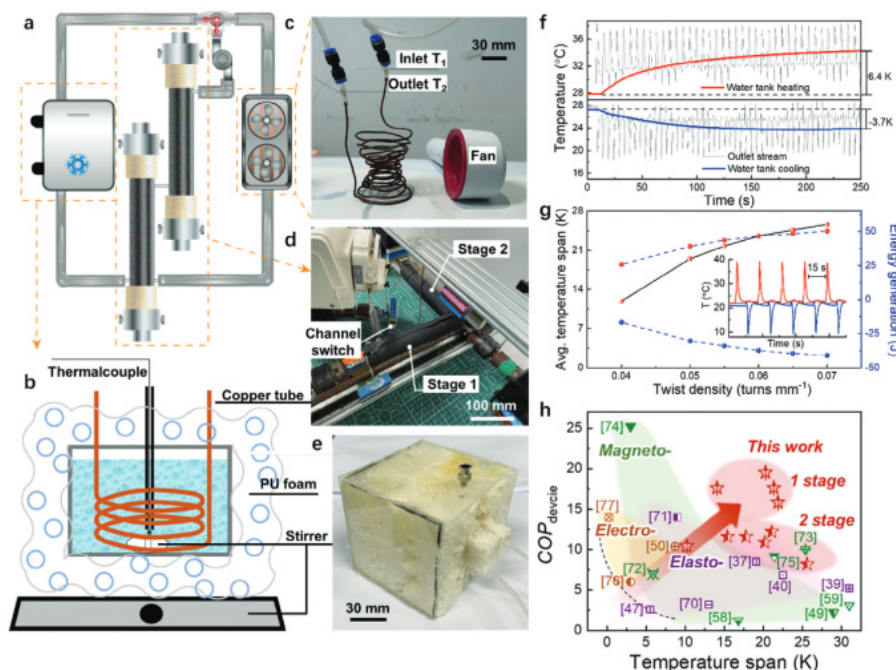


图2.5-24 (a) 扭转驱动的弹热制冷系统原理图; (b) 绝热条件的冷端水箱结构原理图; (c) 强制对流散热的热端换热实物图; (d) 扭转驱动的双回热器; (e) 冷端水箱围护结构; (f) 绝热条件下系统制冷温差; (g) 制冷温差与捻度的关系; (h) 制冷温差及制冷性能系数。

弹热制冷系统驱动方式和系统架构提供了新的发展方向。

non-linear stress for low hysteresis and high Carnot efficiency[J]. Advanced Materials, 2024, 36(46): e2407009.

参考文献

- [1] QIAN Suxin, TAKEUCHI I. Sizing up caloric devices[J]. Science, 2024, 385(6708): 493-494.
- [2] ZHOU Guoan, LI Zexi, WANG QiuHong, et al. A multi-material cascade elastocaloric cooling device for large temperature lift[J]. Nature Energy, 2024, 9: 862-870.
- [3] YAO Sijia, DANG Pengfei, LI Yiming, et al. Efficient roller-driven elastocaloric refrigerator[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 7203.
- [4] ZIC M P, IKEDA M S, MASSAT P, et al. Giant elastocaloric effect at low temperatures in TmVO_4 and implications for cryogenic cooling[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(25): e2320052121.
- [5] UNMÜBIG S, BURGHARDT A, SCHÄFER-WELSEN O, et al. Highly efficient drive system for elastocaloric heat pumps and cooling systems[J]. Shape Memory and Superelasticity, 2024, 10(2): 177-188.
- [6] XIAO Yicheng, MEI Guangkai, FENG Danyang, et al. Elastocaloric heat pump by twist induced periodical

2.5.4 电卡制冷技术

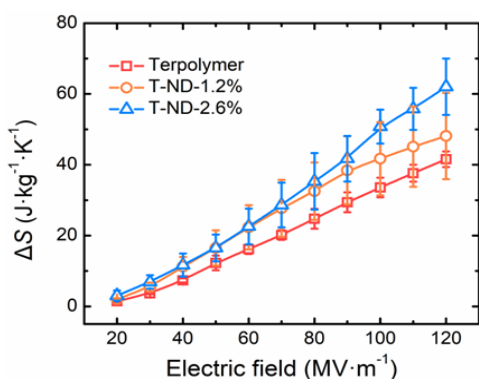
(钱小石 上海交通大学)

电卡效应和其他的固态相变制冷效应类似，是由外加广义力驱动的材料热效应。在外加电场作用下，材料的熵变化，从而表现出吸放热的行为。电卡效应相对磁热效应、弹热效应等有独到的优势。其直接使用电能驱动热力学循环，具有极低的不可逆能量损失，因此可以提供较高的理论循环效率和较低的碳排放量。同时，直接的电场驱动也使得制冷系统便于设计，且具有小型化、可穿戴的潜力。随着巨电卡效应在2006^[1]和2008^[2]年被发现，电卡制冷迅速获得了学术界和工业界的广泛关注。经过十余年的发展，电卡制冷技术已成为一种颇具潜力的新型高效制冷技术，且在一些特种领域可作为传统蒸汽压缩制冷技术的补充和替代。本章着重介绍了2024年度电卡制冷技术的最新进展，从材料改进到

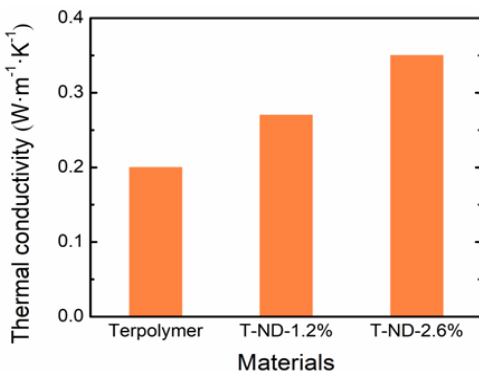
器件论证、设计与制造，并对该技术的环境影响和能源效率进行了评价。

1) 电卡制冷材料

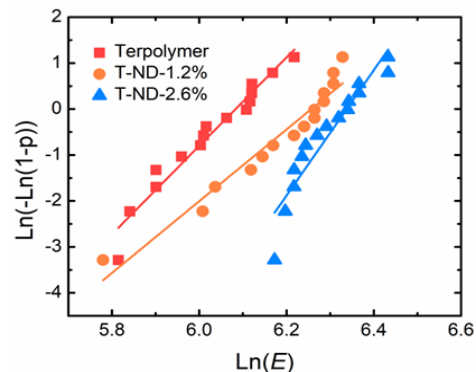
电卡材料的发展则主要有两个重要的方向：一是追求在同等电场强度下更高的电卡效应强度；二是拓宽电卡材料的工作温区。高的电卡效应强度一方面可以提高器件的制冷能力；另一方面也可在保持制冷能力的同时降低驱动电场强度，改善电卡器件的运行寿命。



(a) 复合材料电卡效应对比



(b) 复合材料导热性能对比



(c) 复合材料抗击穿性能对比

图2.5-25 金刚石纳米复合材料的综合性能

电卡制冷材料主要分为有机和无机两类，分别是PVDF（聚偏氟乙烯）基为主的有机高分子体系^[2]和以无机钙钛矿^[3]为主的陶瓷体系。上海交通大学针对以往有机无机复合材料电学击穿性能显著下降这一难题^[4]，通过引入低介电高导热的金刚石纳米填料，实现电卡材料的综合性能改善^[5]，结果如图2.5-25所示。

仅引入微量（2.6%体积分数）的纳米金刚石作为填料，复合材料的电卡制冷性能（提升60%）、导热性能（提升75%）和抗击穿能力（提升25%）均有改善。此外，该复合材料在宽温区内（0~70℃）的展现出优异的电卡效应，如图2.5-26所示，使其更适用于实际电卡器件设计。

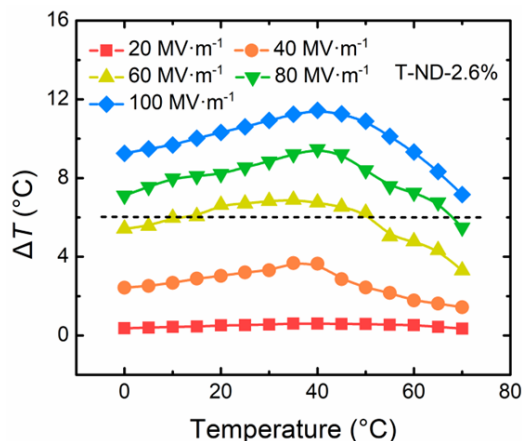


图2.5-26 金刚石纳米复合材料不同温度下的电卡效应

在无机陶瓷材料方面，为了在无铅陶瓷中同时获得较大的电卡制冷能力和较宽的工作温度范围，广东工业大学设计了一种Tm（最大介电常数对应的温度）接近室温的弛豫铁电体^[6]。通过添加质量分数为1% BaO-B₂O₃-SiO₂玻璃到无铅0.76NaNbO₃-0.24BaTiO₃ (NN-24BT) 陶瓷中，它显示出明显的弛豫铁电特性，具有强弥散相变且Tm接近室温。使用直接测量方法，在11.0 kV/mm的高电场下，室温下可获得1.3 K的绝热温度变化，如图2.5-27所示。

此外，在23~69℃的宽温区内，该陶瓷材料都能保持较大的电卡温变。此外，它还具有出色的循环稳定性，在100个测试周期内，电卡温变的变化低于±7%。该方案为设计无铅、高性能的电卡陶瓷提供了一种通用而有效的方法，而且该方法还有可能用于提高其他无铅铁电陶瓷体系的电卡制冷性能。

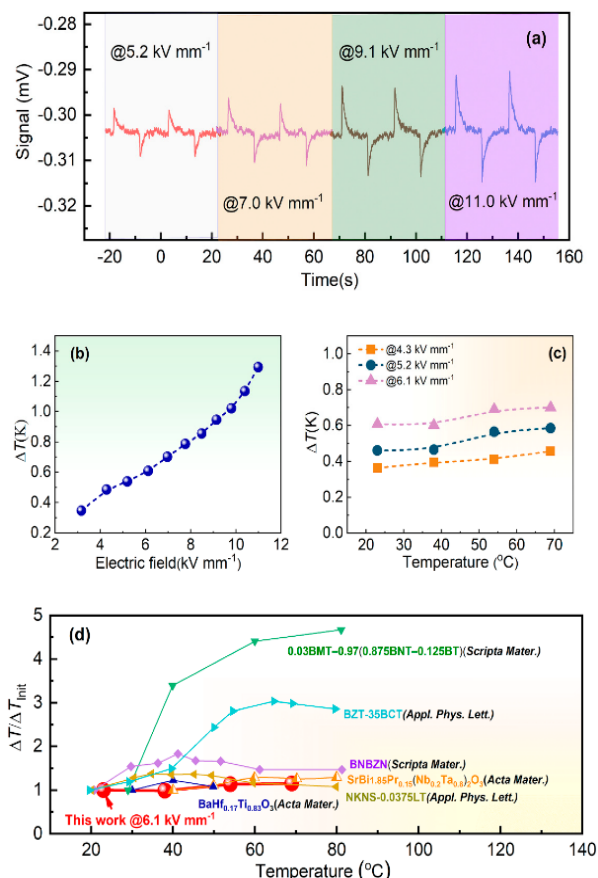


图2.5-27 无铅陶瓷的电卡制冷性能

2) 电卡制冷器件

任何制冷器件都需要通过移动某种介质来传递热量。以电子、空穴为介质的热电制冷器为产生制冷效果产生了很高的能量损失，但热电技术继承了实现真正的“固态”器件的优点，其中没有宏观尺度上的运动部件。而电卡式制冷器件则要求某些部件作周期性运动来实现连续泵热。一般来说，运动部件可以是整个电卡制冷核心部件或者流体/固体工质^[7]。

上海交通大学在2021年发表的研究论文中已证实，通过高分子链内分子修饰手段，可以大幅提升弛豫铁电高分子材料在低电场下的熵变性能^[8]。这类材料被称为双键调控高分子（double-bond modified polymer, DMP）。通过进一步优化各项单体比例，使得目标高分子兼具高“电致熵变”与高“电致伸缩应变”的性能。在幅值为66.7 MV/m的电场下，DMP表现出9 K的绝热温变和1.9%的面内应变^[9]。得益于显著提升的机-电-热耦合性能，DMP薄膜无需额

外的机械驱动力输入，便能在电场作用下同步产生足够大的空间位移和冷热变化，仅凭自身本征物理效应即组成了完整的热力学循环。其中，依赖电致伸缩性能驱动电卡薄膜工作的原理如图2.5-28所示。

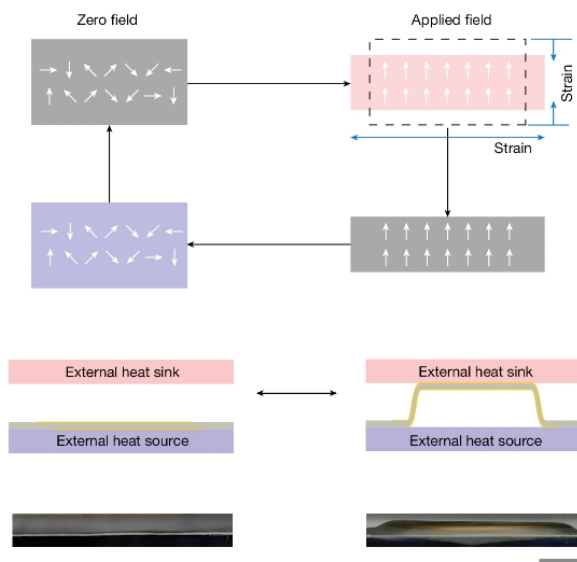


图2.5-28 电卡效应和电致伸缩效应示意图

根据系统的运行逻辑针对性地搭建了系统温跨测试平台，并分别在热泵工况和制冷工况下对系统拉开温跨的能力进行了测试。如图2.5-29所示，在66.7 MV/m的电场和0.5 Hz的运行频率下，系统在两种工况下均能拉开接近4 K的温跨，这表明系统的能量损耗相对较低。

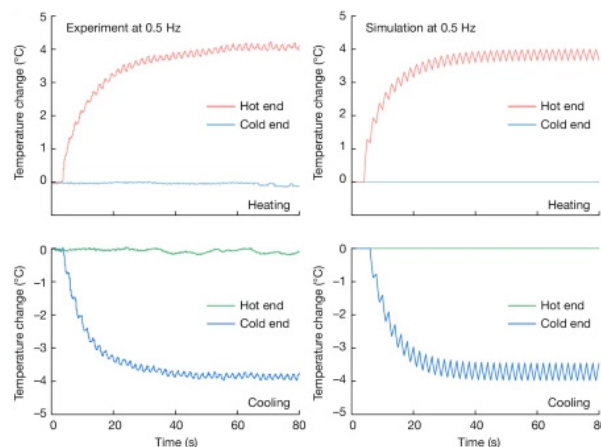


图2.5-29 自驱动电卡制冷器件冷热端温度变化

如图2.5-30所示，在零温跨下，该系统可以输出6.5 W/g的比制冷功率，瞬时制冷量与耗电量比值高达58（在电荷回收效率为80%的条件下）。在4 K

的系统温跨下,该系统可以输出2.7 W/g的比制冷功率,对应的COP为24,实现了约32%的热力学完善度,这是迄今为止在电卡制冷系统研究中所报道的最高的热力学完善度。值得注意的是,系统的COP与所处温跨和能量回收效率息息相关,若提升电荷回收效率至99.7%以上,系统在零温跨下实现的COP将达到约210。

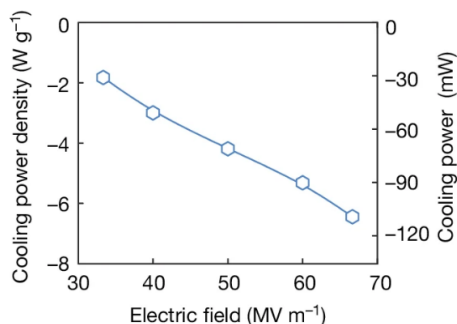


图2.5-30 自驱动电卡制冷器件冷零温跨下制冷功率密度

在此基础上,加州大学洛杉矶分校(UCLA)裴启兵教授课题组发明了一种多级自驱动再生式热泵(self-regenerative heat pump, SRHP)^[10],充分利用了P(VDF-TrFE-CFE)薄膜的电致伸缩形变,形成与材料的电卡循环天然同步的热传输机制,从而实现高效且紧凑的固态制冷。SRHP由6个单元级联组成,如图2.5-31所示,其总厚度小于6 mm。每个薄膜组上的

背层(backing layer)将薄膜在外部电场下的较大平面膨胀转化为规则的垂直形变和较大的下压力,以便与相邻单元成良好的热接触。当邻近单元被设定为反向工作时,热量可顺畅地从级联制冷器的一端被逐级传输到另一端。

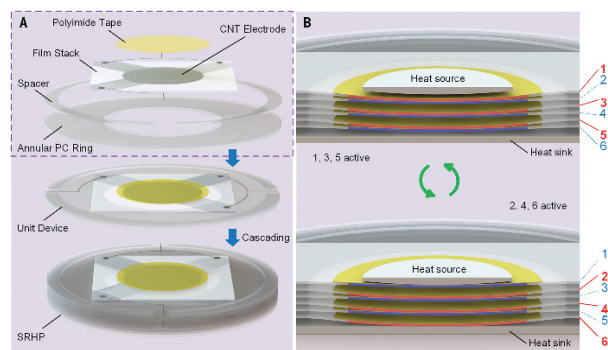


图2.5-31 多级自驱动电卡器件结构和工作原理

该器件的有效制冷面积约为4.52 cm²,导热通路上除电卡材料外,仅有厚度为25 μm的聚酰亚胺背层作为力学引导和电学绝缘层。如图2.5-32所示,六单元级联制冷器件可在30s的时间内将温度降至低于室温8.8 K,器件顶层与底层温差可达14.2 K。器件最大制冷功率为0.78 W。在取得较大的制冷温差的同时,还能保持较高的制冷功率。该研究提供了一种可规模化的电卡聚合物薄膜及单元器件的制造工艺,对实现电卡制冷技术高产能和高性能至关重要。

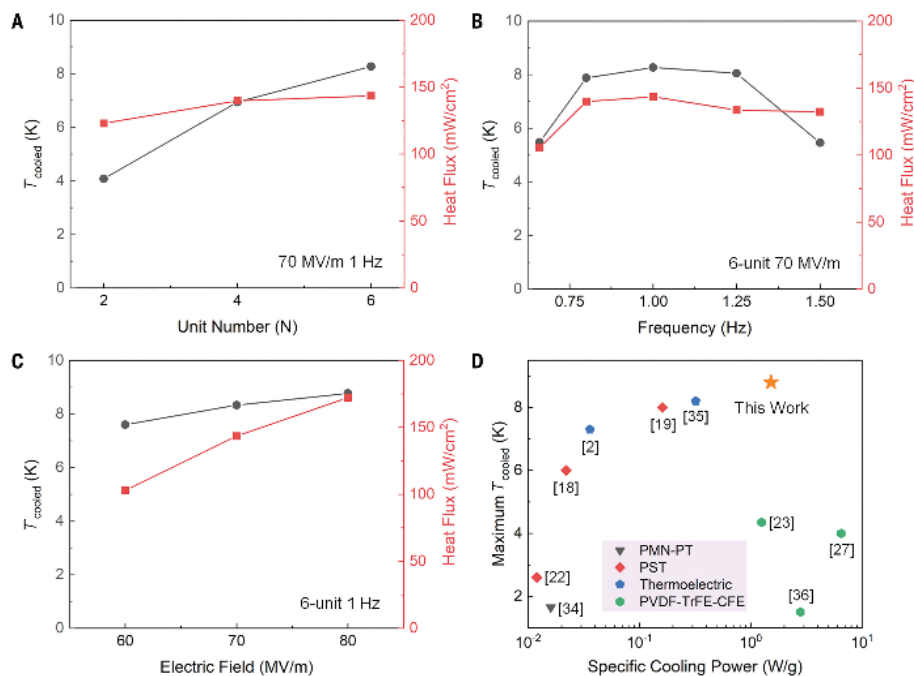


图2.5-32 多级自驱动电卡器件参数优化与性能对比

华中科技大学和清华大学等团队联合开发了一种电卡制冷和热释电效应耦合的电子设备热管理装置^[1]。通过将钛酸锆钽纳米纤维（BST NFs）和[6,6]苯基-C61-丁酸甲酯（PCBM）引入P（VDF-TrFE-CFE）中，以提高聚合物的电卡制冷性能，同时抑制导电，以最大限度地减少高场和高温度下焦耳热造成的能量损失。如图2.5-33所示，这种聚合物复合材料在0~80℃的宽温区内显示出优异的电卡制冷性能，绝热温变为18 K。并且在80℃、150 MV/m的外加电场下可循环100 000次，显示出良好的运行寿命。

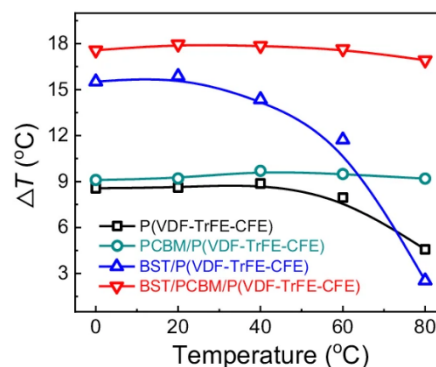


图2.5-33 各类聚合物材料不同温度下的电卡制冷性能

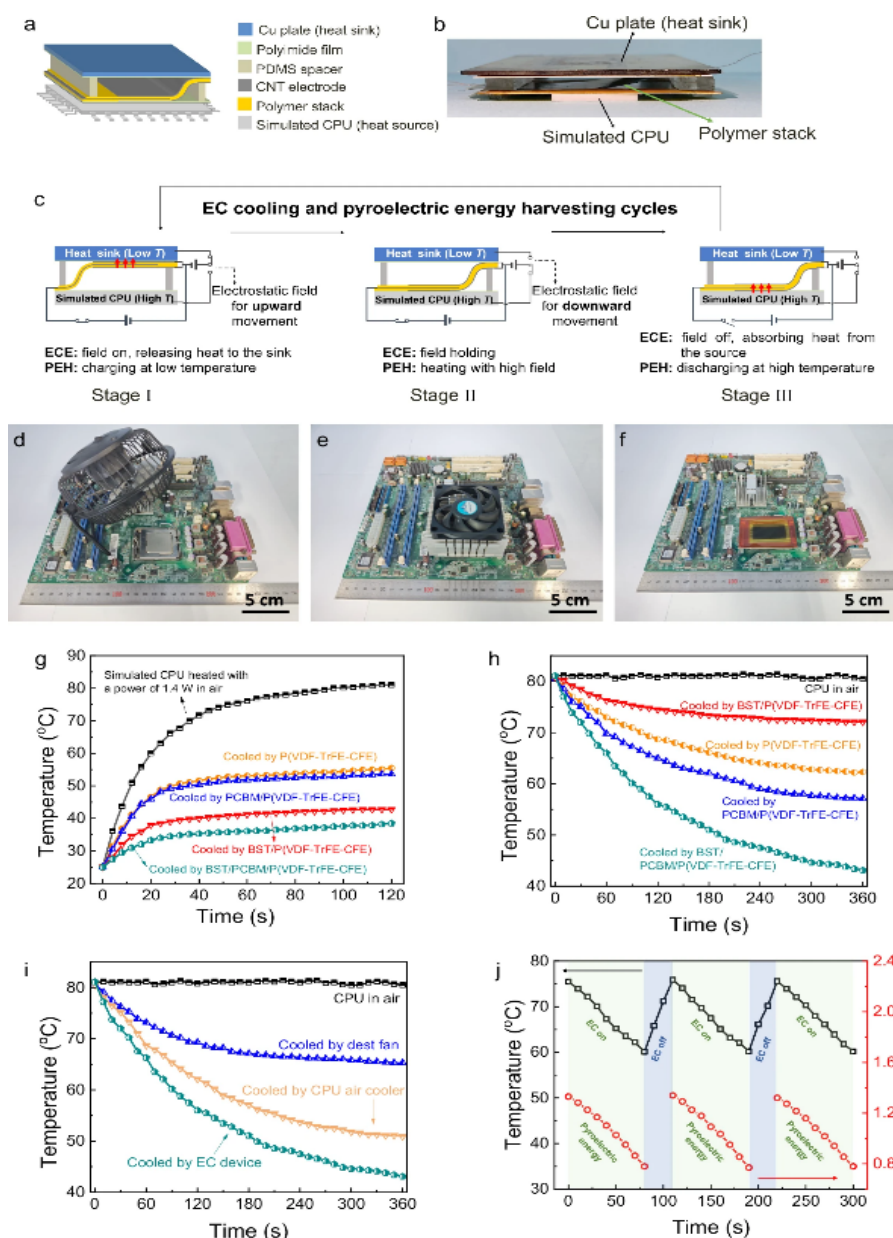


图2.5-34 模拟电子器件的散热性能对比

将该类复合材料用于电子设备热管理时，通过静电驱动，聚合物膜可以实现往复运动并实现热量搬运。在100 MV/m的外加电场和1 Hz的工作频率下，P(VDF-TrFE-CFE)和PCBM/P(VDF-TrFE-CFE)叠层的电卡设备能够将CPU的温度限制在55 °C以下，而含有BST NFs的复合叠层则能够将CPU的温度限制在40 °C以下，如图2.5-34所示，其散热效果显著提升。

综上，本年度电卡制冷技术围绕材料和器件发展取得了一定进展。然而，在低电场高电卡性能的有机和无机电卡材料以及紧凑式电卡制冷器件层面仍有很大的发展空间。此外，当前电卡制冷器件的实测制冷量仍仅为瓦特级，发展大制冷功率的电卡器件任重道远。

参考文献

- [1] MISCHENKO A S, ZHANG Q, SCOTT J F, et al. Giant electrocaloric effect in thin-film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ [J]. Science, 2006, 311(5765): 1270-1271.
- [2] NEESE B, CHU Baojin, LU Shengguo, et al. Large electrocaloric effect in ferroelectric polymers near room temperature[J]. Science, 2008, 321(5890): 821-823.
- [3] TORELLÓ A, LHERITIER P, USUI T, et al. Giant temperature span in electrocaloric regenerator[J]. Science, 2020, 370(6512): 125-129.
- [4] ZHANG Guangzu, FAN Baoyan, ZHAO Peng, et al. Ferroelectric polymer nanocomposites with complementary nanostructured fillers for electrocaloric cooling with high power density and great efficiency[J]. ACS Applied Energy Materials, 2018, 1(3): 1344-1354.
- [5] LI Qiang, WEI Luqi, ZHONG Ni, et al. Low-k nanodielectrics facilitate electric-field induced phase transition in high-k ferroelectric polymers for sustainable electrocaloric refrigeration[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 702.
- [6] ZHAO Xiaobo, ZHOU Zhiyong, LIANG Bo, et al. Large room-temperature electrocaloric effect in lead-free relaxor ferroelectric ceramics with wide operation temperature range[J]. Materials, 2024, 17(21): 5241.
- [7] LI Qiang, SHI Junye, HAN Donglin, et al. Concept design and numerical evaluation of a highly efficient rotary electrocaloric refrigeration device[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116806.
- [8] QIAN Xiaoshi, HAN Donglin, ZHENG Lirong, et al. High-entropy polymer produces a giant electrocaloric

effect at low fields[J]. Nature, 2021, 600: 664-669.

- [9] HAN Donglin, ZHANG Yingjing, HUANG Cenling, et al. Self-oscillating polymeric refrigerator with high energy efficiency[J]. Nature, 2024, 629: 1041-1046.
- [10] WU Hanxiang, ZHU Yuan, YAN Wenzhong, et al. A self-regenerative heat pump based on a dual-functional relaxor ferroelectric polymer[J]. Science, 2024, 386(6721): 546-551.
- [11] ZOU Kailun, BAI Peijia, LI Kanghua, et al. Electronic cooling and energy harvesting using ferroelectric polymer composites[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6670.

2.5.5 空气制冷

(马国远 北京工业大学)

空气制冷是一种以空气为工质的制冷技术，空气因其安全、环保、无毒、不易燃等特性而成为理想的制冷介质。空气制冷循环也称为逆布雷顿循环，其核心部件包括压缩机、高温换热器、膨胀机和低温换热器。循环过程包含4个基本阶段：等熵压缩、等压放热、等熵膨胀和等压吸热。具体工作流程为：空气首先在压缩机中被压缩，随后通过高压换热器冷却并释放热量；冷却后的高压空气进入膨胀机，膨胀降压并降温，同时膨胀机对外输出功；低压冷空气接着在低压换热器中吸收热量，最后重新进入压缩机完成循环。

1) 关键研究和技术进展

(1) 关键部件开发

空气制冷系统的核心组件包括压缩机、膨胀机以及换热器，其中压缩机和膨胀机作为系统的关键部件，其效率对整体性能具有决定性影响。由于空气的单位制冷量较小，系统通常需要处理大流量和中低压力比的工作条件，这使得透平式或涡轮式机械相较于容积式机械更具优势，成为研发的重点方向。此外，回收膨胀功是提升空气制冷性能的关键策略，通过将压缩机与膨胀机设计为共轴一体化结构，可以高效利用膨胀功，因此，透平压缩膨胀机成为新一代空气制冷技术的标志性特征。

图2.5-35为电驱透平膨胀-压缩一体机高速转子和整机结构。单级离心压缩机叶轮和径轴流透平膨

胀机叶轮分置在同一主轴的两端，并与位于二者中间的高速永磁同步电机集成。一体机通过配套的高速变频器输出高频正弦波实现电机驱动和变频控制。一体机研发时着重在压缩机与膨胀机气动匹配设计、高速转子动力学设计和轴承设计、高速电机及整机热设计等方面开展设计与优化，开发一体机的额定工作转速为117 000r/min，采用无油润滑的动压箔片气体轴承为高速转子提供无接触支撑，该技术保障了一体机无磨损、低振动、高可靠及长寿命运行^[1]。

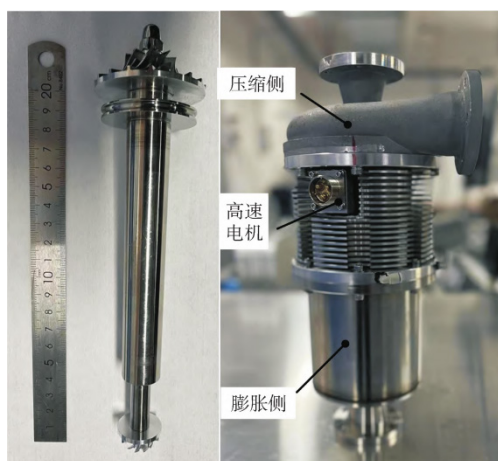


图2.5-35 电驱透平膨胀-压缩一体机高速转子和整机结构

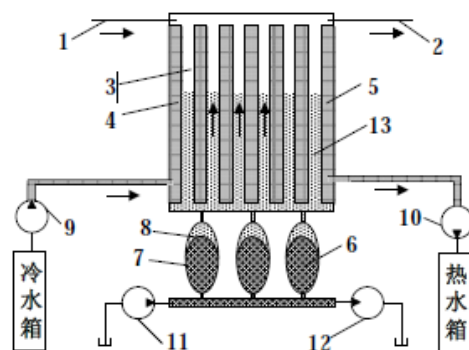
(2) 技术进展

与传统制冷系统不同，对于逆布雷顿循环来说，可以通过回收气体膨胀功以提高循环效率的潜力。与往复机械相比，转动机械具有显著优势。众多学者对开式布雷顿循环、透平膨胀机-压缩机设计、等温压缩等进行了研究。

王鹤兴^[2]基于EBSILON 软件建立了简单循环、简单回热循环、再热回热循环和间冷回热循环4种开式布雷顿循环构型的系统仿真模型，对循环关键参数进行热力学分析，以循环效率、功率密度为性能指标进行了循环参数优化，并与闭式布雷顿循环进行了对比分析。结果表明，4种开式循环构型中再热回热循环效率最高，可达25.44%；简单回热循环功率密度最高，可达171.13 kW/m³；将开式循环改进为空冷闭式空气布雷顿循环，最高循环效率提高12.56个百分点，最高功率密度增加11.87 kW/m³。

田雨等^[3]提出了一种用于空气制冷的透平膨胀机-压缩机的新设计方法。作为逆布雷顿循环的关键部件，透平膨胀机-压缩机的效率对整个循环性能有着重要的影响。膨胀机部分使用帝国主义竞争算法针对不同流量下的多目标效率进行了优化，以在所有操作条件下实现高性能。为了实现高效膨胀机输出功率的高效利用，压缩机部分采用了包括喷流尾流模型和参数方程的组合方法。通过公共模型、计算流体动力学模拟和实验验证了所提出的设计。对代表压缩机和膨胀机两者的综合操作场景的测试案例进行模拟和分析，确认基于该方法得出的结论与潜在的理论原理一致。在设计质量流量下，膨胀机效率为89%，压缩机以90%的效率利用膨胀机的输出功率。在设计流量附近，膨胀机效率大于85%，压缩机利用膨胀机的输出功率，效率超过80%。

郑俊等^[4]提出将传统空气制冷机的绝热压缩过程改进为多管束空气压缩机进行等温压缩，分析了改进后基于逆布雷顿循环的空气制冷机的压缩过程、制冷循环过程以及性能系数。图2.5-36为先进等温压缩机的设计结构，先进等温压缩机采用液体活塞与多管束阵列换热器耦合的形式。低压的空气从进口进入，先进等温压缩机，待压缩至指定压力时从出口排出。



1 进气口；2 出气口；3 压缩腔；4 换热腔；5 水；6 液压油；7 囊式蓄能器；8 弹性气囊；9 第一液压泵；10 第二液压泵；11 第三液压泵；12 第四液压泵；13 液体活塞。

图2.5-36 先进等温压缩机的设计结构

系统中的压缩腔是由多根管束并联构成的，管束之间形成互通。压缩过程中液压油在第三液压泵和第四液压泵的作用下注入囊式蓄能器的下部，液压油向上运动，推动液体活塞在压缩腔中对空气进行压缩，使空气温度上升。囊式蓄能器内部设有弹

性气囊，该弹性气囊由橡胶制成，可以将液压油和液体活塞分离，避免了空气在液压油中溶解。在压缩开始前，包裹在压缩腔管束外的换热腔内充满冷水作为能量储存介质，冷水与管外壁接触。储热和压缩同时发生，管内压缩空气的温度升高。因为空气被压缩并集中在管子的上部，这就导致了管壁上的温度不均匀，外管壁将热量传递给冷水，冷水也有不均匀的温度，导致密度差，因此对流换热。冷水的自然对流降低了管子的温度，管内外的对流换热将空气压缩的热量传递给冷水，冷水温度上升并在第一液压泵和第二液压泵的作用下冲入热水箱。先进等温压缩机的压缩过程和传热同时发生。测试结果表明：相较于传统的空气制冷机，改进的空气制冷机压缩机出口温度可降低144.55 K，做功可以减少52.48 kJ/kg，性能系数（COP）可以提高0.375。如果考虑回收膨胀功，改进的空气制冷机COP可以达到1.33。

J. R. Serrano等^[5]搭建了一个由离心式压缩机、径流式涡轮机和中间冷却器等组成的试验台，并测试了系统的运行性能，结果表明：可在-100℃时优化性能系数（COP），同时功耗为2 kW。关键控制参数包括离心压缩机的压力比和可变几何涡轮（VGT）中定子叶片的位置，优化过程使COP提高了28%。此外，1D气体动力学模型验证了这些结果，表明与实验最佳点相比，不同的组件选择可以将性能提高17%。使用汽车部件的基于空气的RBC系统可以有效地实现-40℃以下的温度，为传统制冷剂提供了一种可行、环保的替代方案。

2) 整机设备

宋书建^[1]为了验证以电驱透平膨胀-压缩一体机为核心部件的闭式逆布雷顿空气制冷系统在深冷冰箱中应用的可行性，探究闭式空气制冷系统在深冷冰箱温区的工作特性，开发了制冷量为200 W制冷温度为-120℃的空气制冷深冷冰箱原理样机，开展了原理样机降温过程及不同热负荷条件下的变工况特性研究。

图2.5-37为带回热单级闭式逆布雷顿循环示意图，如图2.5-37所示，系统运行时，单级离心压缩机提供循环压比，压缩后的工作气体通过后冷却器

向环境排放压缩热；后冷却完全至接近室温的工作气体接着在回热器中被低压侧低温返流预冷，然后进入膨胀机中膨胀做功并产生温降；膨胀后具有最低温度的气体在负荷换热器（或用冷器）中吸收热负荷，从而实现低温冷量供应。图2.5-38为-120℃空气制冷深冷冰箱原理机实物图，该样机设计时要求在名义制冷温度-120℃下提供不低于200 W的制冷量，以满足300 L容积的深冷存储需求。

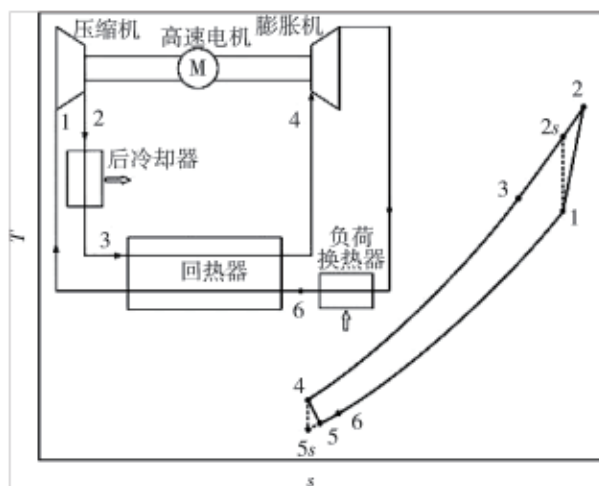


图2.5-37 带回热单级闭式逆布雷顿循环示意图



图2.5-38 -120℃空气制冷深冷冰箱原理机实物图

通过实验验证了空气制冷深冷冰箱的可能性，系统具有良好的降温特性，采用无相变的回热式单级逆布雷顿气体制冷循环，具有很宽的深冷温区，制冷温度和制冷量调节非常灵活。在27℃的室温条件下达到了最低-126℃的制冷温度，且降温速度快，3 h内达到-100℃，系统在设计制冷温度-120℃下的制冷量达到了215 W，同时系统COP约为0.08。

José Ramón Serrano等^[6]的研究介绍了配备径向

涡轮的逆布雷顿循环，系统为了各种低温应用而设计，使用天然工质空气（R-729），避免了高GWP制冷剂。

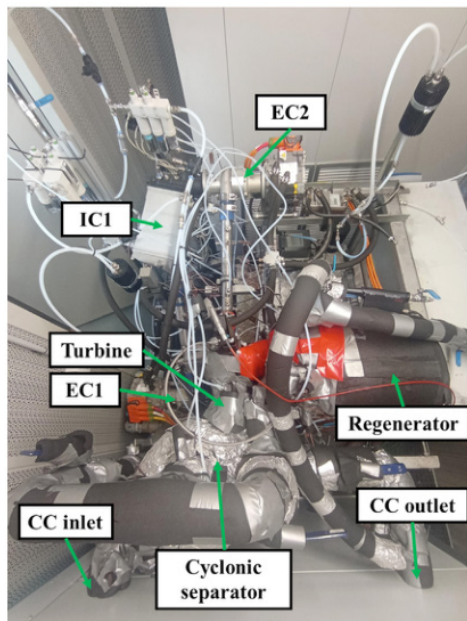


图2.5-39 逆布雷顿循环试验台

图2.5-39为逆布雷顿循环试验台。两台电动压缩机（Rotrex型号分别为EC15-60和EC15-20）负责向系统提供动力。热交换器是空气-水冷却器，尺寸紧凑，由环境温度下的供水系统供水。它们放置在两个电动压缩机之间和涡轮增压器压缩机之后，通过利用涡轮（由BorgWarner BV38型制造）产生的动力来提高压力。回热器是阿法拉伐（AlfaNova HP 76-100H型）的空气-空气热交换器，其中高压流体与在径流式涡轮机中膨胀的低压（和低温）流体切换温度。该闭环允许达到低温，该低温在系统的总功率和再生器效率中找到其极限。涡轮机配有可变喷嘴叶片系统。膨胀后，空气通过离心旋风分离器，当空气达到露点时，该分离器收集新鲜空气的湿度，以及任何旋转机器中任何可能的润滑油滴泄漏。测试结果表明：涡轮机是循环中关键部件，达到80%峰值效率的涡轮机将使循环COP与其他气体技术如CO₂或氨竞争。

空气制冷因其卓越的环境友好性，成为推动其发展的关键动力。为了促进其持续发展，研究重点主要集中在提升系统性能和拓展应用领域两个方面。在提高系统性能方面，研究内容包括：开发压

缩膨胀一体机、优化部件耦合、回收膨胀功、实现宽工况范围运行以及研发降噪技术等。在扩大应用领域方面，研究则聚焦于开发具有竞争力的产品以适应不同领域需求，以及探索与其他制冷系统结合形成复合系统的可能性。这些研究方向共同推动空气制冷技术的进步与应用普及。

参考文献

- [1] 宋书建, 陈双涛, 周晓聪, 等. -120 °C 空气制冷深冷冰箱样机开发及性能测试[J]. 低温与超导, 2024, 52(7):1-6.
- [2] 王鹤兴, 钱奕然, 代晏冰, 等. 开式布雷顿循环构型对比及优化设计[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(7): 1890-1896.
- [3] TIAN Yu, MA Guoyuan, WANG Lei, et al. A design method of turboexpander-compressors based on multi-objective optimization applied to reverse brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123836.
- [4] 郑俊, 李吉冬, 许未晴, 等. 基于逆布雷顿循环的空气制冷机的优化与性能分析[J]. 制冷技术, 2024, 44(3): 44-51.
- [5] SERRANO J R, GARCÍA-CUEVAS L M, GÓMEZ-VILANOVA A, et al. Experimental COP optimization procedure in an air-based reverse Brayton cycle for cryogenic applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 123946.
- [6] SERRANO J R, DOLZ V, GÓMEZ-VILANOVA A, et al. Advanced exergy analysis of a Reverse Brayton cycle using air as working fluid for cryogenic purposes[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 159: 50-63.

2.5.6 辐射制冷

（赵东亮 东南大学）

随着全球变暖，制冷需求及其相关能耗快速增长，辐射制冷作为一种无能耗的被动制冷技术受到广泛关注。辐射制冷材料在太阳辐射波段具有高反射率，同时通过“大气窗口”波段（主要在8~13 μm）向宇宙发射红外辐射以实现亚环境温度降温。辐射制冷材料的应用领域广泛，在建筑节能、个人热管理、缓解城市热岛效应等方面显示出巨大潜力。近年来，为满足实际应用需求，相关研究已就提高辐射制冷材料的耐候性、自清洁性及环保性展开深入探索，同时根据应用场景的特点按需调控材

料的辐射特性，进一步推动了辐射制冷技术在不同领域中的规模化应用。

1) 关键研究和技术进展

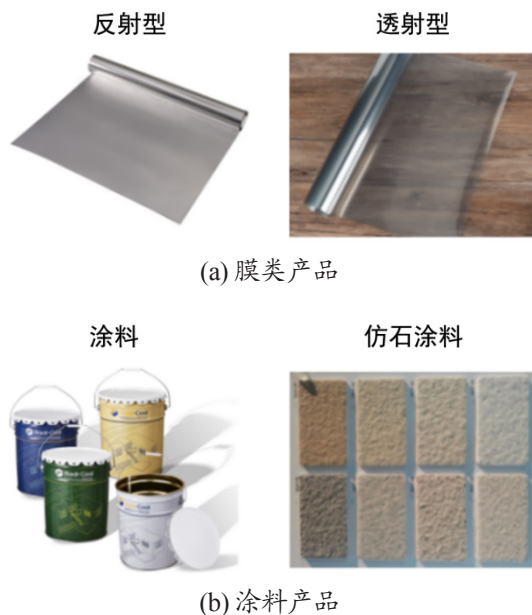
聚合物作为一种成本较低且加工工艺简单的材料，选用其作为辐射制冷材料的基材逐渐成为辐射制冷技术研究的主流^[1, 2]。然而，聚合物基辐射制冷材料在户外应用时其性能无法避免地受到污染、老化等外界因素的影响，且不可降解聚合物的广泛使用将加剧环境污染^[3]。最近的研究中提出了一种由明胶和DNA组成的本征光致发光生物气凝胶^[4]，其具有显著的磷光和荧光特性，而气凝胶结构精细、层次分明，两者的协同作用使其表现出高效的辐射制冷性能。此外，这种生物气凝胶可通过水焊法规模化生产，其出色的可回收性和可生物降解性有助于推动环保辐射制冷材料的发展。

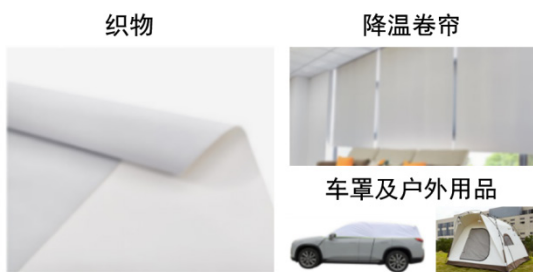
以往报道的低于环境温度的日间辐射制冷技术通常只能应用于直接面向天空的表面，然而，在许多需要冷却的场景中，例如建筑物、车辆和可穿戴织物，大多数表面为不直接面向天空的垂直面，从而难以通过红外热辐射有效冷却，因此实现垂直表面的亚环境温度日间辐射制冷仍具有挑战性^[5, 6]。鉴于此有研究设计了一种角度不对称、光谱选择性热辐射器，可在强太阳辐射下实现垂直表面的亚环境温度日间辐射制冷^[7]。该热辐射器由覆盖有紫外-可见光反射红外透明纳米聚乙烯薄膜的锯齿型光栅组成，锯齿光栅包括水平表面和倾斜表面，倾斜表面为中间氮化硅夹层的两层银。其中，在倾斜表面上的最外层银层能够保证阻碍热量向下发射到地面，水平表面上的氮化硅层能够将热量向上发射到天空，热辐射的角度覆盖范围则可通过改变锯齿光栅的倾斜角调节。在演示实验中，该辐射制冷器在 920 W/m^2 的太阳辐射强度下，其温度比环境温度低 2.5°C ，相较于 SiO_2 聚合物混合型辐射制冷器和商用白色涂料温度分别降低 4.3°C 及 8.9°C 。此外，在可穿戴织物方面，由于城市地区存在热岛效应，对地面和附近建筑物的热辐射吸收大幅降低了辐射制冷纺织品的有效性，难以保证人体热舒适。为应对这一挑战，有研究开发了一种中红外光谱选择性分层织物^[8]，其在“大气窗口”波段展现出高发射率，促进了热量向外太空辐射，而在非“大气窗口”波

段，则通过高反射的策略最大限度地减少来自周围环境的净热增益。当垂直放置在模拟室外城市场景中时，该织物温度比宽谱辐射冷却器低 2.3°C ，且具有出色的可穿戴性能。

2) 规模化应用前景

目前，多种类型的辐射制冷产品，如辐射制冷薄膜、涂料、织物及其衍生品等（图2.5-40）已实现规模化制造，在大型公共建筑、办公楼宇建筑、粮食低温仓储、石化存储、电力与通讯设施等领域得到广泛应用，有效提升舒适性和安全性，助力各行业低碳高质量发展。近年来，辐射制冷技术及产品已在全国15个省份实现了50多个粮库的示范应用，应用面积达到40多万 m^2 ，效果获得国家粮食和物资储备局及中储粮集团的高度认可和推荐。此外，随着新能源汽车的推广，为减少夏季空调使用对纯电动汽车续航里程的影响并提高车内空间的热舒适性，辐射制冷技术可应用于车体表面以改善车内热环境。对应用辐射制冷技术前后车内空气的平均温度和空调系统制冷量以及车内的热舒适性进行模拟评估^[9]，结果显示汽车内部空气的平均温度最高可降低 21.1°C ，提高车内人员热舒适性满意度22.8%，最高节省空调系统能耗5.7%。对喷涂普通涂料和辐射制冷涂料的车辆进行降温效果对比测试^[10]，与喷涂普通涂料车辆相比，喷涂辐射制冷涂料的车辆驾驶室头部气层温度最高降低 8.3°C 。





(c) 织物及其衍生品

图2.5-40 辐射制冷产品

参考文献

- [1] ZHAI Yao, MA Yaoguang, DAVID S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329): 1062-1066.
- [2] MANDAL J, FU Yanke, OVERVIG A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. Science, 2018, 362(6412): 315-319.
- [3] SHEN Changyu, LIU Xianhu. DNA and gelatin-a cool aerogel mix[J]. Science, 2024, 385(6704): 30.
- [4] MA Jianwen, ZENG Furong, LIN Xincen, et al. A photoluminescent hydrogen-bonded biomass aerogel for sustainable radiative cooling[J]. Science, 2024, 385(6704): 68-74.
- [5] MANDAL J, ANAND J, MANDAL S, et al. Radiative cooling and thermoregulation in the earth' s glow[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(7): 102065.
- [6] ZHOU Jiawei, CHEN T G, TSURIMAKI Y, et al. Angle-selective thermal emitter for directional radiative cooling and heating[J]. Joule, 2023, 7(12): 2830-2844.
- [7] XIE Fei, JIN Weiliang, RYAN NOLEN J, et al. Subambient daytime radiative cooling of vertical surfaces[J]. Science, 2024, 386(6723): 788-794.
- [8] WU Ronghui, SUI Chenxi, CHEN T H, et al. Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands[J]. Science, 2024, 384(6701): 1203-1212.
- [9] 费键丽, 杨剑, 吕银燕, 等. 辐射制冷对汽车热舒适性和能耗影响研究 [J]. 节能技术, 2021, 39(3): 274-280.
- [10] 方艳, 文凤, 万亚飞, 等. 水性辐射制冷涂料在新能源汽车上的降温应用研究[J]. 涂层与防护, 2024, 45(10): 19-23.

第三章

重点细分领域应用进展

3.1 家用及商用制冷及供热

杨子旭¹ 黄龙² 周宇珏³ 温程宇³ 石文星³

(1. 北京科技大学; 2. 西交利物浦大学; 3. 清华大学)

房间空调器、多联机等空气源热泵和冷热水机组是住宅和公共建筑的主要空调系统或设备,在2022年度的“双碳”报告^[1]中,总结的空调系统的年碳排放量表达式(公式(3.1-1))为家用及商用制冷及供热领域推动“双碳”目标持续发展提供了碳减排技术思路。2023年度,笔者针对舒适性空调末端技术、R290环保冷媒空调器、集成式压缩机技术、压缩机油气分离技术、高效冷(热)水机组技术等几方面从设备角度重点论述了节能减碳方法。随着人工智能的发展以及企业用户对使用实际效果的关注,面向实际使用工况的测试、评价、控制和性能改善方法备受关注,实际使用过程的节能舒适更能保证人民美好生活和“双碳”目标。

本节将从实验室测试、评价方法,人工智能在空调领域的发展,空调实际运行性能和家庭能源系统几个角度论述2024年度家用及商用制冷及供热关键研究和进展。

$$C = \varepsilon \sum_{j=1}^{j=8760} \left(\sum \frac{q \cdot A \cdot T}{COP_{sys}} - \Delta E \right) + \frac{GWP \cdot G \cdot \beta}{N} \quad (3.1-1)$$

其中:

ε ——碳排放因子, kg/(kW·h), 现有水平电网的碳排放因子可取0.577;

q ——建筑的冷热负荷强度, kW/m²;

A ——空调系统对应的服务面积, m²;

T ——空调系统的服务时间, h;

ΔE ——太阳能、风能和水利势能等可再生能源生产电能的使用量, kW·h;

G ——空调系统的制冷剂充注量, kg;

β ——制冷剂泄漏率, 指空调系统在使用年限内制冷剂的总泄漏量与初始充注量之比, kg/kg, $0 \leq \beta \leq 1$ 。

3.1.1 关键研究和应用进展

1) 面向实际的机组性能测量与评价

(1) 基于负荷的虚拟建筑测试法

传统空调器的性能评价指标主要包括基于稳态实验室测量的名义工况性能指标和季节性能指标（SEER、HSPF和APF）。随着变频压缩机、风机和控制算法的迅猛发展，稳态测试无法反映空调器在大范围变工况下运行的控制水平^[2]。目前国际上出现了空调器动态性能测量方法^[3-4]，用于获得空调器在真实工况下的性能。

空调器动态性能测量原理：在实验测量时段内，室外侧空调设备运行以模拟室外工况，并在室内侧投相对应的热、湿负荷，用被测空调器作为室内环境调控设备，调节室内温湿度在合理范围内，并测量其动态运行性能。测试过程中，房间温度响应速率受房间热容影响，不同实验室结果差异较大，因此研究提出虚拟负荷法，将当前负荷和机组能力对室内环境的影响，通过虚拟建筑响应的室内温度变化投入房间，反映了房间对空调器调控的响应，来反映动态的投入负荷和环境^[5]。虚拟建筑法可通过在同一实验室，模拟不同类型房间的热响应速率，进行空调器在多种房间的测试，节省测试时间和成本，尤其是避免了在传统焓差室采用预先设定固定的压缩机频率、风机风速的方法，反映了空调器真实的性能和调控水平。

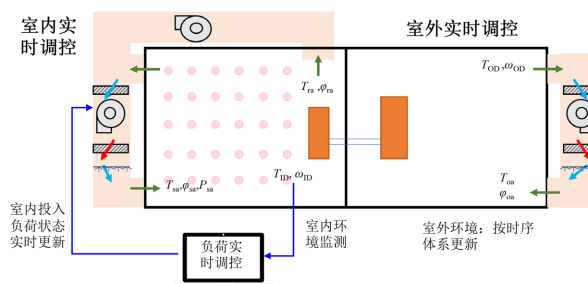


图3.1-1 空调器动态测量实验室原理

(2) 多联机工程能效比研究

直燃机组均应当构建面向真实工况的实验室性能测量方法。区别于空调器，多联机在应用于实际建筑中，系统在实际建筑中的性能还受到连接管管长、高差的影响，而且多联机系统运行的室外气象、负荷特征、运行作息、室内外工况也不尽相同，从而导致负荷发生小时数不同。为此，研究确定了多联机工程性能评价方法，其核心思路是，基于多联机在实验室环境下的测量数据，结合实际工程条件，预估系统应用于具体工程后的性能。针对应用于实际建筑的风冷多联机、低环境温度多联机，根据建筑设计负荷确定负荷线，依据具体工程项目实际作息统计或预估负荷发生小时数，基于实验室测试的制冷（热）工况性能建立性能曲线，兼顾室内外机连接管管长、高差对系统性能的影响，并利用多联机“负荷率-容量率”（PLR-CUR）性能模型修正，最终确定实际工程中多联机系统的能效指标APF、SEER和HSPF^[6]。

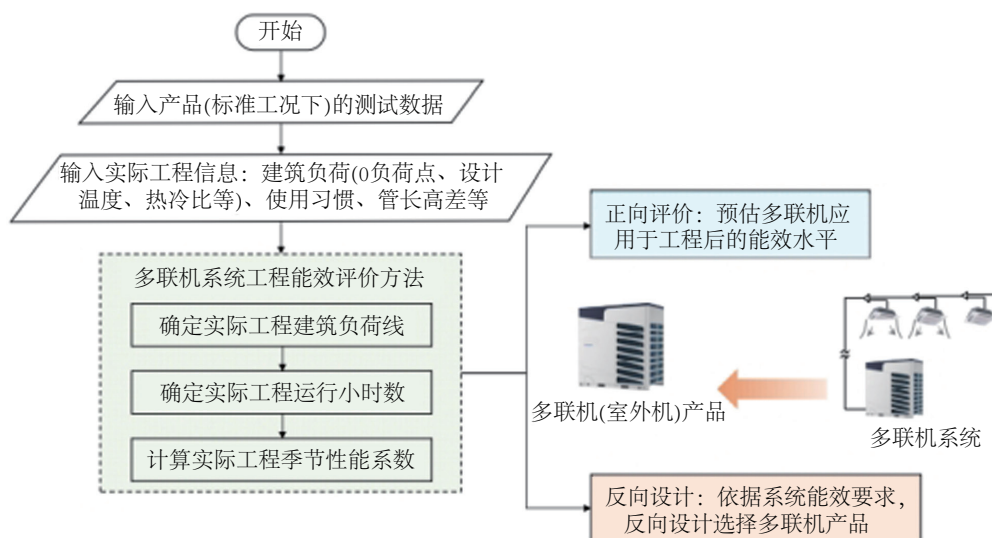


图3.1-2 多联机系统工程能效评价技术路线

2) 人工智能与空调系统

(1) 互联网与空调

在智能家居概念的推动下，互联网技术正深度融入空调系统，使其不仅仅是一个独立的温控设备，更是大能源系统的一部分，通过远程操控、大数据分析、智能调控和能耗优化，提高整体能源网络的能效。2024年，空调制造企业加快了物联网（IoT）空调产品的研发与应用，以满足用户对智能舒适和节能环保的需求。

最新的IoT空调系统能够实时监测环境温度、空气质量、湿度及用户习惯，并基于机器学习算法自动调整运行模式，以最大化节能效果。实验证明，相比传统空调，全年平均能耗可降低20%，同时提高30%的舒适度。基于AI学习的自适应控制技术，实现室内环境智能调控，并与区域能源管理系统对接，通过需求响应技术优化电力使用，使空调系统能够根据能源供应情况灵活调整，减少高峰时段的电网负荷，提高整体能源利用效率。此外，结合边缘计算与大数据分析的云端空调管理平台正在推广应用。用户通过手机APP或语音助手远程控制空调，查看运行状态和能耗数据。智能自适应控制算法能够基于天气情况和居住者习惯进行实时调整，使得空调运行更加节能高效，室内温差波动降低35%。

(2) 人工智能与空调

人工智能（AI）技术在空调智能预测和控制中的应用日益广泛。通过深度学习算法，AI能够分析环境数据，并智能调节温度、湿度和风速，以提升空调系统的效率和用户舒适度。同时，AI技术的应用使空调系统能够与建筑能源管理系统（BEMS）协同工作，提高整个建筑的能源使用效率，成为综合能源管理体系中的关键环节。

基于AI的智能负荷预测技术在优化空调能耗方面发挥了关键作用，系统可通过历史运行数据、天气预报和用户使用习惯，预测未来的空调需求。例如，最新的AI负荷预测系统，通过长短时记忆（LSTM）神经网络分析温度变化趋势，使空调提前适应环境变化。此外，空调设备能够利用AI算法优化与本地储能设备的互动，降低能源浪费，并在新能源波动时段进行动态调整，减少对传统电力系统的依赖。

空气质量调控已成为AI应用的重要方向。智能空气管理系统可实时监测PM2.5、二氧化碳浓度和甲醛含量，并智能调节新风系统和过滤装置，以保证空气质量达标。同时，系统能够通过数据共享，与智能楼宇系统协同优化通风与制冷策略，最大程度减少能源浪费。

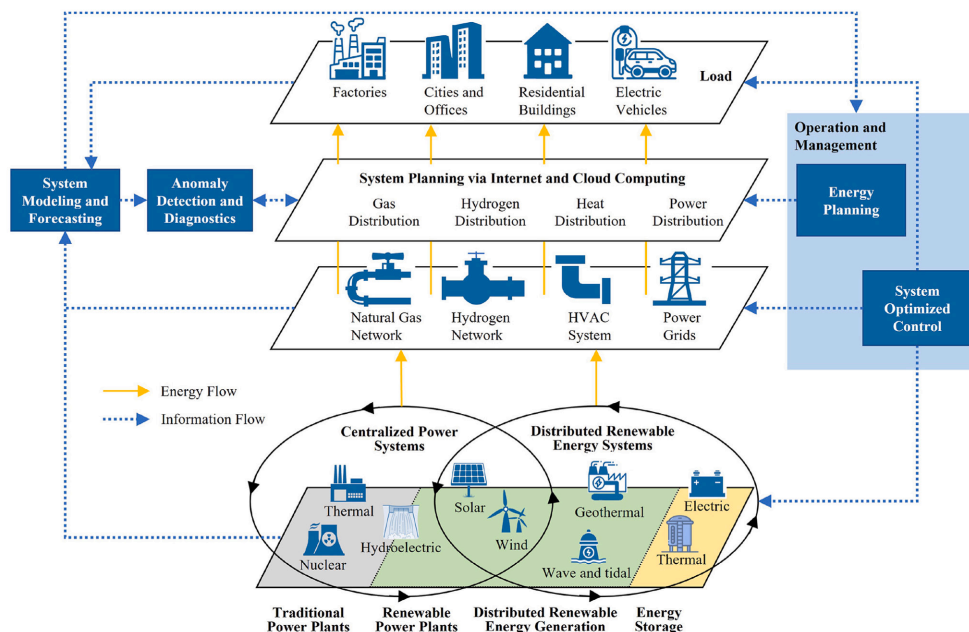


图3.1-3 AI与制冷系统在未来能源管网中的角色^[7]

(3) 新型控制算法

新型控制算法是提升空调性能、优化能耗和提高用户体验的重要手段。近年来，空调控制技术不断升级，从传统PID控制向基于AI和深度学习的智能控制转变，使其更好地融入整个建筑能源管理系统，实现更加智能、高效的运行。

例如，智能空调系统中采用了基于深度强化学习（DRL）的自适应控制算法，使空调能够自主学习用户行为，并根据不同使用场景调整运行策略，同时结合能量管理系统（EMS），动态调整空调的运行功率，以匹配新能源供应的波动，优化整体能源系统的负荷分配。相比于传统温控系统，该算法减少了23%的温度波动，提高了18%的系统效率。此外，AI自适应控制系统采用模糊逻辑控制算法，结合多传感器数据，实现空调的精细化调控。该系统能够根据室内外温差、空气湿度、用户活动状态等变量动态调整运行模式，确保最佳节能效果。在2024年的测试中，该系统使得空调能耗降低20%，用户舒适度提高25%。

此外，“预测控制+边缘计算”结合的智能空调调控系统正在推广应用。该系统通过多目标优化算法，能够在不同环境条件下自动调节能耗，兼顾节能与舒适度，并能主动与建筑智能能源管理系统对接，实现与光伏、储能、电动车充电等智能设备的协同优化调度。在分布式能源管理场景中，智能空调能够主动降低用电需求，减少对传统能源的依赖，同时利用低谷电价时间段提前降温/加热，实现节能与经济性的最佳平衡。

3) 优化实际运行性能

(a) 自然风与送风导板设计

实际使用的舒适性是影响空调器实际使用效果的关键因素，空调器通过对流传热，风感差，冷风直吹毛孔，会引起体表血管收缩、皮肤发紧发干、肌肉酸痛等不适感的“空调病”。而自然通风环境是一种人们乐于接受的室内动态化环境，其中最主要的特征就是自然通风气流始终处于动态变化之中。

将空调风还原自然风的脉动特性，是目前的研究热点。研究通过运用康达效应原理，设计具有空

间三维导向的送风形态导叶，有效降低出风强度，提高了气流的湍流度，使气流特性更接近自然风，摆脱线性出风特性，降低气流的吹风强度，提升用户的吹风感体验。基于康达效应，对于室内空调器的水平出风导叶进行非规则曲面形态设计。将导流装置的内侧与外侧均基于曲线特征形成光滑曲线，形成非规则的曲面特征，如图3.1-4所示。送风气流沿着多维的流道方向与原气流流向分离，另外导叶末端两侧气流也会由于速度和静压的差异而发生不同程度的掺混，以此实现气流的分散、气流强度的降低和湍流度的增强。对比普通与曲面导叶的平均风速、湍流度与吹风感指数，相较于普通导叶、曲面导叶可以使气流产生强烈的风速波动，曲面导叶较普通导叶平均风速降低22.9%，湍流度提升46%，不适吹风感指数降低16.4%，从而使气流更舒适多变。

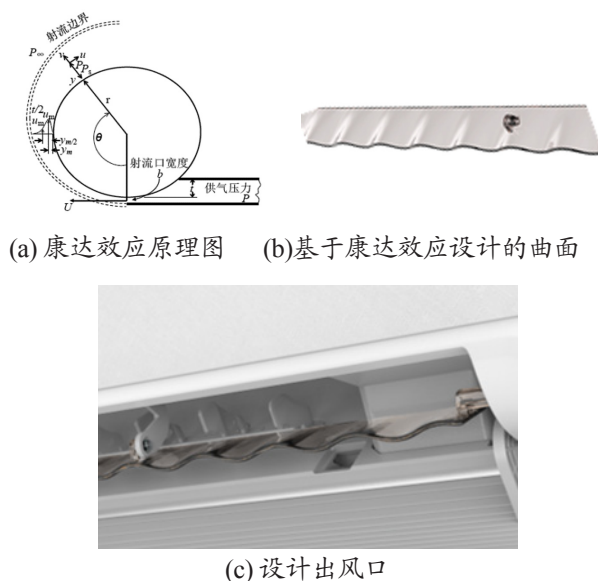


图3.1-4 康达效应和曲面特征图

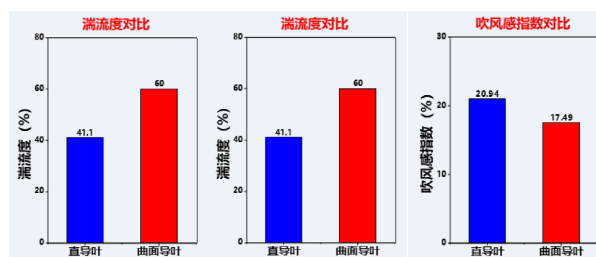


图3.1-5 两种导叶的平均风速、湍流度、吹风感指数对比图

(b) 结霜与除霜问题

家用和商用空调在低温高湿环境下运行时的结霜问题已成为制约其实际运行高效运行的瓶颈。如何能够及时高效地去除室外蒸发器表面的霜层，同时减小除霜对室内环境造成的不利影响，是当前持续的研究重点。影响结霜能效和除霜效果主要包括进入除霜的时间、除霜方式和结束除霜的时间。

进入除霜时间判断是影响空调性能的关键，避免“有霜不除、无霜除霜”。研究基于变频空气源热泵结霜工况原理和规律^[8]，通过改变聚集态（物态），从原来的厚霜除霜，转变为薄霜速融。在空

调室外机换热器呈现薄霜状态时通过迅速提高室外机换热器温度，使得霜层快速融化，化霜同时室内机持续输出热风向室内供热，使空调的持续制热时长得到大幅提升。研究通过压缩机频率动态变化、电子膨胀阀开度动态控制和室内侧风机动态变化相结合以实现除霜期间室内外热量配比最优化^[9]。此外，由于薄霜速融与之前的除霜控制策略有较大的区别，提出了用于表征空调室外机结霜厚度的计算方法——结霜度分钟数（FDM），经大量实验工况验证该参数可准确用于评估空调结霜程度，从时间、室外环境温度、室外换热器管温、室内侧环境温度和次数等多个维度判断薄霜速融进入的时机。

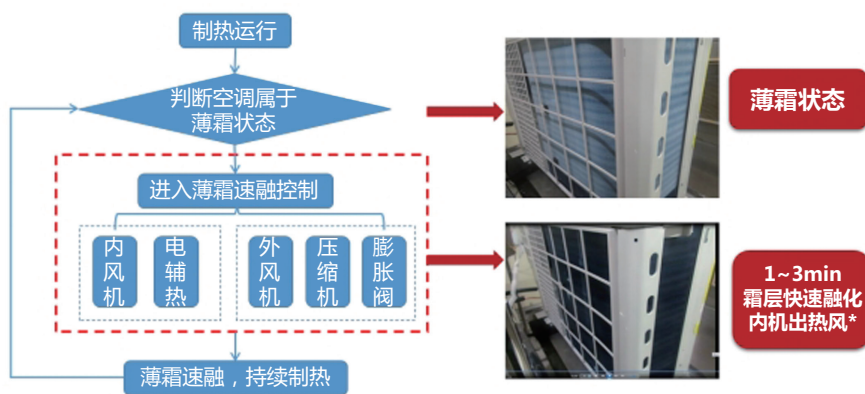


图3.1-6 薄霜速融高效除霜方案图

为解决除霜过程中房间温降大的问题，在热气旁通除霜的基础上，设计了带有旁通支路的膨胀阀，在空调制热的同时进行除霜，避免空调结构复杂。为解决由于除霜与制热时进入膨胀阀的制冷剂状态不同，膨胀阀流量调节需求存在较大差异的问题，设计了变流量曲线制热除霜共用膨胀阀，发明了双锥面阀针结构，满足空调制热与除霜对制冷剂

不同的调节需求。

为了结合逆循环除霜和热气旁通除霜的优点，王现林等^[10]提出了采用热气直通除霜方法对空气源热泵进行除霜。其除霜流程如图3.1-8(a)所示。该方法通过化霜时增加电子膨胀阀开度，减小冷媒在电子膨胀阀的节流热损失，让较高温度的冷媒到室外机进行除霜，其系统配置与逆循环除霜相同，并无

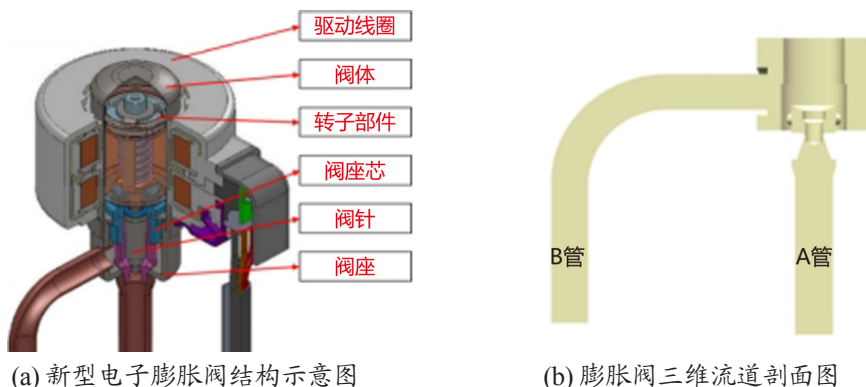
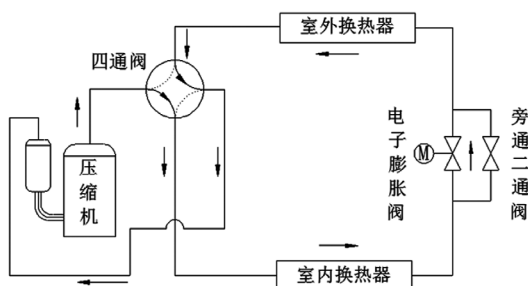
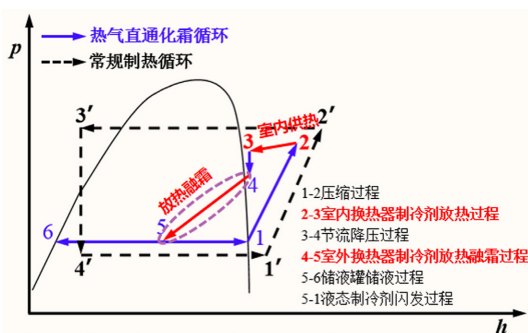


图3.1-7 带有旁通支路的新型电子膨胀阀

成本增加。该方法的压焓图如图3.1-8 (b)所示，对比常规制热循环，热气直通化霜循环和常规制热循环的压缩过程一致，主要不同点是冷媒在室内换热器、电子膨胀阀和室外换热器内的相态变化过程。在实际使用中，根据需求热气直通除霜可以与逆循环除霜进行切换；除霜过程中四通阀无需换向，压缩机也无需停机，通过室内换热器的制冷剂为高温高压制冷剂，对房间温度影响小。



(a) 热气直通除霜流程



(b) 压焓图

图3.1-8 热气直通除霜示意图及压焓图

此外，传统的逆循环除霜结束时刻四通阀切换，热气态冷媒与冷两相冷媒交汇，液态冷媒瞬时蒸发并急速窜动，冷媒冲击会引起室内机的剧烈抖动，在室内侧表现为一种持续时间约为5~10s的瞬态冷媒冲击噪声，严重影响用户体验。在此基础上，提出了前置冷媒迁移技术，将压缩机管路中的气态冷媒提前迁移到冷凝器，除霜停机阶段膨胀阀开度全开，外风机提前运转，加速室内外压力平衡，降低压缩机瞬时启动短时运转时的排气温度。压缩机在四通阀切换前瞬时启动短时运转，将压缩机到四通阀D口的热气态冷媒迁移至冷凝器，减少联机管内液态制冷剂的瞬时蒸发，从而大幅降低冷媒冲击音。

(c) 空调器长效运行

空调器长期运行后，会因换热器性能衰减、压缩机磨损、风机功率下降、制冷剂泄漏等原因出现制冷量或制热量明显下降、耗能大幅上升的问题，因此除了新空调的节能高效外，空调器长效节能也尤其重要。丁国良等^[11]研究了空调换热器表面积灰原因，当换热器表面附着有纤维时，换热器表面的粉尘沉积量将显著提高，揭示了空调器长期运行过程中的性能衰减机制，提出了性能衰减预测模型；在测试方法方面提出了空调器加速积灰与性能测试的一体化方法，实现了长期运行性能衰减的快速准确测试。发明了高浓度含尘气流供应装置、粉尘浓度均匀稳定分布的控制方法以及换热器不移动条件下积灰实现与传热性能测试的一体化方法；实现积灰测试速度较实际工况提升4个数量级，测试结果的一致性偏差小于3%。

4) 家庭能源系统

制冷行业愈发关注空调系统、水系统、太阳能与储能系统的深度融合与综合调度，这一趋势显著推动了家庭能源管理系统的快速发展。这些系统旨在解决光伏直流电驱动空调、储能直流对接以及供需联动等多能互补的供电难题，为家庭提供智能化、可持续的能源解决方案。作为能源领域的重要研究方向，家庭能源系统集成了多项关键技术和应用进展，包括不同末端设备的耦合、光储直柔系统及负荷预测技术等。这些技术的协同创新显著提升了能源利用效率，为构建绿色、低碳的家庭能源体系奠定了坚实基础。

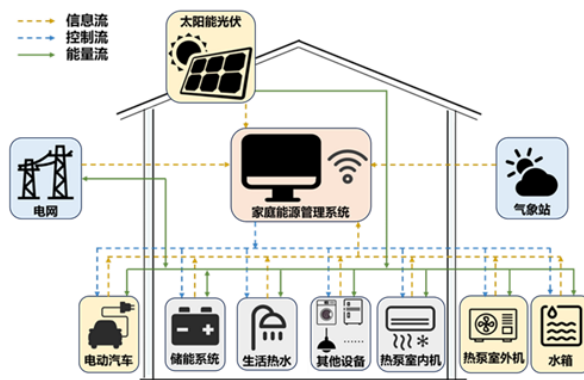


图3.1-9 典型家庭能源系统基本结构图

(a) 多末端设备的耦合与集成

在现代家庭能源系统中，空调、采暖及热水系统等末端设备的集成化应用已成为提升能源利用效率的关键策略。通过有效耦合不同末端设备，不仅能够显著提高能源利用效率，还能全面优化系统的整体性能。例如，多联机系统与水系统的结合实现了制冷、采暖和热水供应的多功能集成。在制冷模式下，空调系统回收室内释放的热量作为水箱加热水，从而减少了传统电辅热的需求，降低能耗。在采暖模式下，热水系统为空调提供除霜所需的热量，既加速了除霜过程，又有效减少了室内温度波动，提升居住舒适性。然而，在不同运行模式间的平稳切换、冷媒流量的合理分配及系统在多种工况下的高效稳定运行仍然是技术难题。为此，优化冷媒流量控制与系统协调运行机制将成为提升整体效能的关键。

(b) 光储直柔系统的智能化应用

光储直柔系统通过光伏发电板将太阳能高效转化为电力，用于家庭日常用电，并将多余电能存储在高性能储能电池中，以备在用电高峰或光伏发电不足时释放电力，从而确保家庭供电的稳定性与持续性。该系统依托智能调控技术，能够根据光伏发电实时状况、储能电池电量水平及家庭用电需求，动态调整供电策略，实现能源供需的精准平衡，不仅满足了家庭能源的自给需求，还通过与电网的深度联动显著提升了灵活性和经济效益。例如，在光伏发电量充足或电价较低时，系统会将多余电能存储于电池；而在电网负载较高或电价高峰时，则可将存储的电能反馈至电网，从而缓解电网压力，同时利用峰谷电价差为用户创造额外收益。此外，光储直柔系统具有高度扩展性，能够根据家庭实际用电需求灵活调整储能容量，或接入风力发电装置、电动汽车充电桩等其他能源设备。

(c) 负荷预测技术

空调能耗在家庭总能耗中占据重要比例，尤其在夏季和冬季的极端天气条件下，空调系统的负荷波动对整体能源消耗的影响尤为显著。因此，精准的负荷预测不仅有助于优化空调系统的调度，还在系统集成与能源优化中发挥着关键作用。在建筑

运行过程中，空调负荷受多种因素影响，包括室外气象条件、建筑围护结构、使用模式等，同时还与空调系统的容量、控制策略密切相关。当前，国内的研究主要聚焦于两个方面：一是模型输入变量的选择，涉及气象参数、时间特征、建筑使用状况、冷冻水温度等因素；二是建模方法的优化，包括统计多元回归模型、浅层网络模型和深度多层网络模型。随着人工智能技术的持续进步，未来负荷预测技术有望进一步提升预测精度，并在家庭能源系统的智能管理中发挥更大作用。

3.1.2 优秀案例

1) 面向实际的机组性能测量与评价

美的公司与清华大学合作改造的空调器动态性能测量实验室，是面向真实工况机组性能测量的成功案例。该实验室利用现有焓差室进行改造，通过模拟房间对空调器调控的响应，来投入对应负荷。对空调器在不同制冷工况下进行动态测试，并按照GB 21455给定的负荷发生小时数和性能模型，计算得到动态能效比较稳态测试方法下降了31.8%，但是这一结果与长江流域空调器现场实际性能测量值接近，这表明空调器性能动态测量方法更反映了其实际运行性能。

2) 人工智能与空调系统

(1) 基于物联网的空调系统协同优化技术

小米空调基于物联网（IoT）技术，提出了家用空调节能与健康管理的方案，核心技术围绕智能温湿度调控、洁净空气管理及智能用户环境自定义控制展开，通过物联网（IoT）技术实现高效节能与空气质量的协同优化。在节能方面，系统通过温湿度传感器和智能算法动态调整运行模式，夏季高温环境下能耗减少17.4%，并有效防止过度除湿。在空气质量管理上，采用模块化除尘和双热源脉动杀菌技术，30分钟内去除90%以上细菌，保持出风口洁净。用户可通过智能手机APP远程控制，实现房间面积的智能适配与能效优化，制冷和制热模式温度超调分别改善1.3℃和2.3℃，初期运行能耗降低20%以上。该技术已应用于米家新风空调系列，市场反馈良好，为家居智能控制的发展提供了新方向。

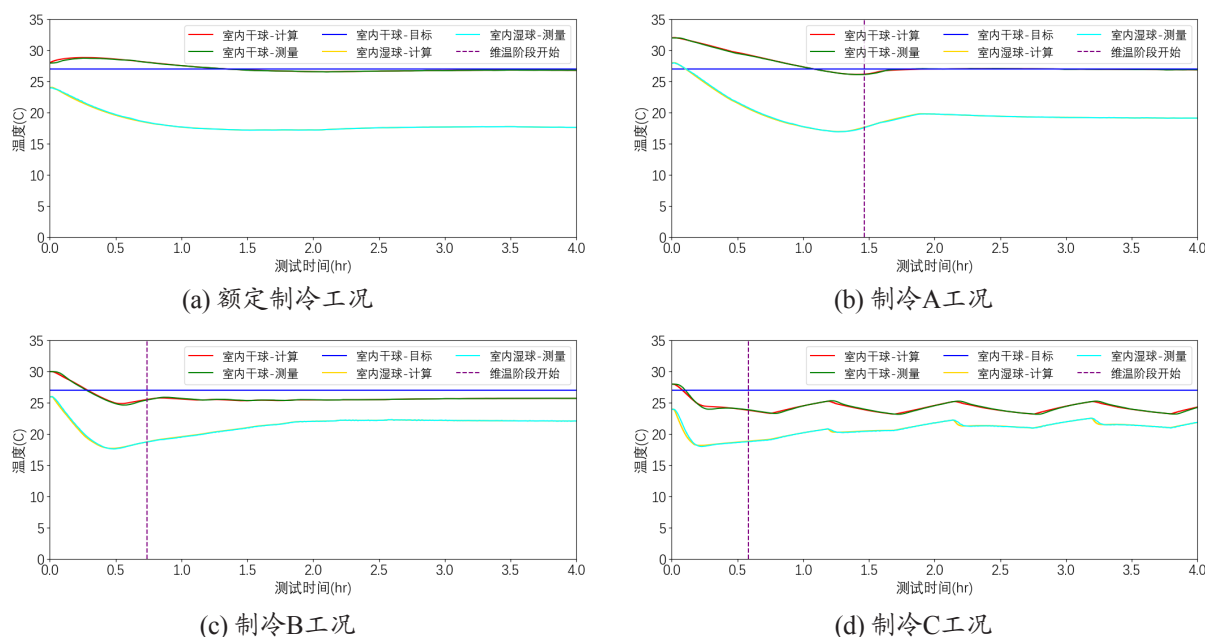


图3.1-10 面向真实工况机组性能测量结果



图3.1-11 海尔MX物联多联机

海尔空调推出的节能舒适物联多联机技术，通过智能物联、精准负荷调节以及高效换热等关键技术，实现了高效节能与用户舒适度的双重提升。该系统的核心亮点在于物联网（IoT）深度集成，实现了远程监控与智能调节。通过云端大数据分析，系统可以实时监测各个终端设备的运行状态，并根据不同空间的负荷需求进行优化调控。例如，基于AI预测算法，该系统可动态分析用户的使用习惯，并自动调整压缩机、风机、电子膨胀阀的运行参数，以确保各区域温湿度的均衡，同时避免不必要的能耗浪费。此外，机组采用高热流密度梯级换热器使热效率提升14.2%，支持-20~43℃宽温域稳定运行。物联智能控制技术是该系统的一大特色。用户可以通过手机APP或云端管理平台，远程监测和调整空调运行状态。例如，在办公楼宇或酒店环境中，该系统能够依据实时人员流动情况，自动调节空调功

率，确保各区域的舒适度同时优化能耗。在实验环境中，该智能调节策略可使舒适时间增加47%，整体节能28%。

(2) 人工智能驱动的调控技术

格力的变频空调低碳动态运行关键技术则聚焦于AI控制在空调系统中的应用，其核心创新包括AI动态能效优化控制和房间负荷自学习自适应调节。通过人工智能算法，实时分析空调内部各执行部件的协同效率，动态调整压缩机、风机、电子膨胀阀等组件的工作模式，确保系统在不同环境条件下的动态能效最优。实验数据显示，该技术使变频空调全年节能率提高13.6%，动态能效提升15.8%。此外，基于大数据云平台的房间负荷自学习自适应调节方法，能够精准匹配实际使用负荷，减少温度波动（降低1.4℃）和能耗（减少22.2%）。在节能变频控制方面，该技术开发了行业首款AI芯片，突破了传统DSP或MCU控制芯片的计算能力限制，实现更精确的动态节能优化。该芯片具备高算力和低功耗特点，可在毫秒级时间内计算最优能效策略，使变频空调在部分负荷运行状态下的能效提升136%。

(3) 新型智能控制技术创新

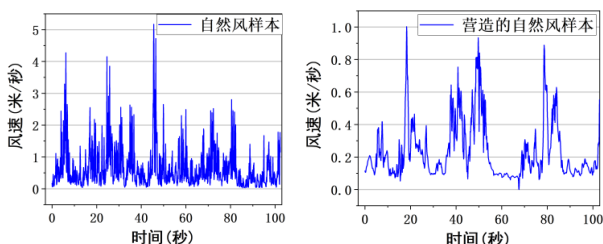
美的厨卫提出的电热混动热泵系统A++超高

能效关键技术在控制策略上实现了多项突破。于SMART逻辑控制系统和CFD多物理场仿真优化平台的结合,通过微小通道表面强化换热技术和R290高能效混动热泵的优化设计,显著提升了系统换热效率(蒸发换热量提升27.3%)和COP(提升9.4%)。SMART逻辑控制系统通过动态调整运行时序、设定温度和加热回差,实现了精准调控,使能效因子(SCF)从131.7%提高至157.6%,年耗电量降低16.4%。此外,CFD多物理场仿真优化平台的应用,缩短了研发周期(减少60天),提高了产品开发效率。

3) 优化空调器实际运行性能

(1) 空调器舒适自然气流营造技术

海信集团和清华大学合作研发的空调器舒适自然气流营造技术,营造出的仿自然风功率谱指数为1.60,达到了室外舒适自然风功率谱指数1.40的水平,偏斜度与湍流强度也实现与室外自然风相近,优于空调机械风的水平。基于气流与温度对人体热舒适影响的耦合机制,建立了空调器随环境温度变化的可变参数舒适算法,运用自然风对流降温原理,设计了随环境温度变化的转速与压机频率的可变参数控制模式,通过控制风扇转速实现在不同环境温度下,人体吹风舒适,实现房间换热效果的提升,全程压机频率以低频运行设置,实现节能效果。以上技术实现吹风感指数降低37.4%,全天耗电量由2.89 kW·h降低到2.23 kW·h,环境温度由35℃降至26℃所需的时间由23 min降低到15 min,实现了吹风体感舒适、节能降耗、换热效果的突破。



(a) 室外自然风时域图 (b) 营造的自然风时域图

图3.1-12 室外自然风和营造的自然风的 β 值对比

(2) 运行制冷剂流量控制关键技术

四川长虹空调开展了制冷剂流量控制的关键技

术研究,重点攻克制冷剂流量匹配、膨胀阀开度控制和空调性能匹配试验等技术难题,形成了基于制冷剂流量自适应调节的空调节能技术。该技术在不断增加成本的前提下显著提升了产品能效,应用于巨能省系列Q7V/EV空调,实现了能效比提升17%~20%。该技术有效解决了传统空调ECO模式的低频运转限制,并优化了转矩控制、应力应变分析及噪音振动问题,提升了用户舒适性。超低频运行模式下26机型实现了连续8 h运行的能耗低于1 kW·h。同时,长虹还推出了0.1℃精确控温技术,提升了温控精度,减少温度波动,达到快速制冷、节能和提高舒适度的目标。此外,基于直流电机温度变化的算法,首次实现对变频压缩机内部温度的实时动态精准获取,在缺氟状态下实现空调的安全、高效运行,为解决制冷行业难题提供了新的技术路径。

(3) 室外机低噪音技术

海信研发的高效低噪空调室外机,通过优化风扇设计,降低了同风量下的宽频噪音1.5dB。同时,通过压机频率、环境温度与膨胀阀开度的关联控制逻辑,实现了开机阶段的膨胀阀开度动态最优控制,降低了5dB的冷媒宽频噪声,几乎消除了节流音。在制热除霜再启动阶段,创新提出冷媒前置迁移控制技术,减少冷媒温差,降低了冷媒瞬态冲击噪声3~7dB。

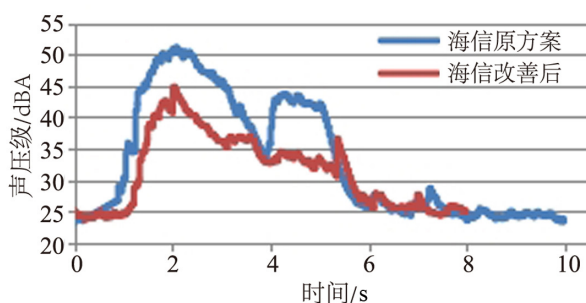


图3.1-13 制热除霜再启动冷媒音改善效果图

(4) 薄霜速融高效除霜控制技术

应用薄霜速融高效除霜控制技术的格力I耀系列产品、冷静风系列产品,根据企业技术要求,超过10小时持续制热不化霜,融霜期间的平均出风温度不低于35℃,融霜前后室内温度波动1.1℃,达到行业先进水平。本技术将双流量曲线电子膨胀阀技

术、基于霜层动态生长规律和热泵系统参数的薄霜速融高效除霜控制技术、融霜进入时机的多参数耦合精确控制技术进行标准化，形成团体标准T/CAS 552—2021《具有持续制热功能的房间空气调节器》。

(5) 新风双重热回收的变温调湿技术

针对新风引入室内导致的湿度调控难题，海信日立首创了双重热回收变温除湿技术，除新、排风全热交换外，在新风机组除湿蒸发器后增设与排风冷凝器串联的变容调节再热器，解决了除湿量受限于低风量的难题，实现了送风参数的精确控制，其除湿量提升150%。发明了喷淋/储水虹吸复合加湿技术，新风经过全热回收芯体预热、冷凝器和再热器加热后再流过加湿器，其加湿量提升30%，湿度控制精度为 $\pm 5\%$ ，解决了加湿器因频繁启停带来的湿度波动大、舒适性差和能耗高问题。

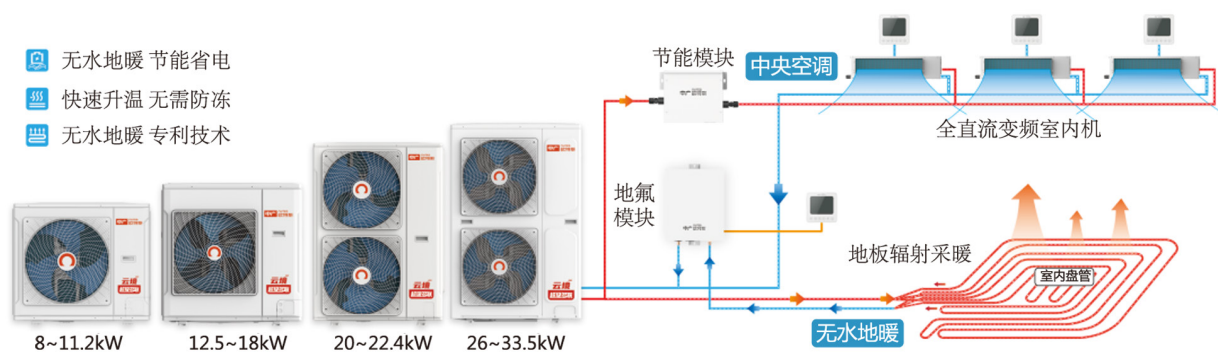


图3.1-14 多联直膨式辐射热泵系统

(2) 光储直柔系统的智能化应用

海尔“零碳光驱储能方案”通过光伏发电与储能管理系统结合，支持空调优先使用储存的电力，并通过光热光伏系统与热水水箱及蓄热单元优化热量储存，实现热水供应与电网削峰填谷，展现了多设备的耦合与协同优化，此外，通过光伏与储能系统的智能化调度，实现电力储存与优先供空调使用。该系统可根据电价与光照条件自动调整储能与供能策略，降低电力成本并提升能源自给能力。

格力“光伏直驱”变频空调机组采用光伏直驱技术直接驱动空调，具备五种工作模式：纯空调模式、光伏空调模式、光伏空调及系统用电模式、纯

4) 家庭能源系统

(1) 多末端设备的耦合与集成

维克超低温三联供机组集成制冷、制热与生活热水等多个末端需求，采用智能冷媒量调节、模糊控制及多模式动态切换技术，可在多种温度条件下高效稳定运行，尤其在制冷+热水模式下回收废热，提升能源利用效率。

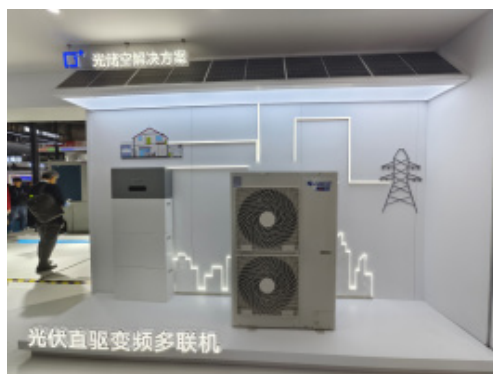
浙江中广电器多联直膨式辐射热泵系统采用毛细管辐射散热技术与自给式低品位热源供给装置，实现了多能源互补的高效运行，并在不同模式下精准调控温湿度，成功结合了多种末端设备，实现了独立控制和高效整合。该系统在制热模式下，通过毛细管辐射散热技术提供高效采暖；在制冷模式下，利用毛细管辐射去除显热，并结合新风除湿机去除潜热，确保温湿度的独立精确控制。

光伏发电模式以及光伏空调及系统发电模式。并在5ms内通过智能换流逻辑无感调节不同能源变化情况，展现了光储系统在空调领域的智能调节与高效应用。

美的制冷提出的户用光储冷热系统能源高效利用技术，将光伏系统与储能、热泵等设备耦合，通过柔性储热与家庭负载联合调度机制，优化了光伏发电与家庭用能的匹配，提升了能源自给率。利用磁性元件与半导体器件串并联技术及自适应控制调制策略，确保系统在极端条件下稳定运行，并通过智能调度优化储热与家庭能源的结合，提升系统可靠性与能效。



(a) 海尔零碳光驱储能方案



(b) 格力光伏直驱变频多联机

图3.1-15 光储直柔系统的智能化应用方案

(3) 负荷预测技术

海信日立、清华大学与中国家用电器研究院合作研究的多联机与新风调湿机结合的整体系统，采用集中式管理与分布式控制架构通过精准预测控制技术，系统能预测用户设定的参数和使用场景，控制误差小于15min。该技术能实时调节空调与新风系统的运行，以最佳方式满足用户需求，提升能效。此外，基于多联机在线性能测量技术，突破了多联机与新风机组之间的跨模块热湿耦合控制技术，实现了空调系统的快速启动与高效节能，能效提升了19.8%。



图3.1-16 室内微气候环境智能高效调控的多联机和新风系统

参考文献

[1] 石文星, 杨子旭. 家用和商用空调与供暖低碳技术研究

及应用进展[C]// 2022年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛会议论文集. 北京: 中国制冷学会. 2023.

- [2] 杨子旭, 高玉平, 周宇珏, 等. 空调器动态性能测量用建筑负荷特征研究[J]. 家电科技, 2024, (增刊1): 74-79.
- [3] CHENG Li, DHILLON P, HORTON W T, et al. Automated laboratory load-based testing and performance rating of residential cooling equipment[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 123: 124-137.
- [4] 杨子旭, 石文星, 王宝龙, 等. 空调热泵设备性能测量与评价: 从稳态到实际[J]. 家电科技, 2023, (增刊1): 216-220.
- [5] CHENG L, PATIL A, DHILLON P, et al. Impact of virtual building model and thermostat installation on performance and dynamics of variable-speed equipment during load-based tests[C]// International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2018: 2078.
- [6] 肖寒松. 多联机系统实际运行特征与应用设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2024.
- [7] CHEN Dongyu, LIN Xiaojie, QIAO Yiyuan. Perspectives for artificial intelligence in sustainable energy systems[J]. Energy, 2025, 318: 134711.
- [8] 田雅颂, 夏光辉, 徐耿彬, 等. 变频空气源热泵结霜工况下运行特性试验研究[J]. 制冷与调, 2021, 21(1): 71-75.
- [9] 吴俊鸿, 廖敏, 王现林, 等. 热泵空调器持续制热除霜技术试验研究[J]. 制冷与空调, 2021, 21(9): 81-83.
- [10] 王现林, 李亚飞, 连彩云, 等. 热气直通化霜技术及电子膨胀阀设计研究[J]. 制冷与空调(四川), 2023, 37(2): 187-193.
- [11] 丁国良, 詹飞龙, 庄大伟, 等. 制冷空调换热器的研究进展(三)——换热器长效能[J]. 家电科技, 2019, (6): 44-51.

3.2 工业余热利用

徐震原 冯佳雨

(上海交通大学)

由于全球经济的快速发展,能源的消耗量快速增加,约72%的全球总能耗以废热的形式直接耗散。其中,工业生产过程中的所剩余但无法被生产再利用的热能被称作工业余热,在2020年中国提出“碳达峰”和“碳中和”目标后,工业余热利用的重要性愈发凸显。有效的余热回收能够替代部分供热需求,企业不仅可以降低运营成本,还能为清洁能源转型贡献力量。我国的《“十四五”节能减排综合工作方案》强调了低碳化发展的重要性,推动企业采用新技术进行余热回收以实现能效优化和资源循环利用。因此,探索和实施工业余热利用方案,不仅是企业提升竞争力的重要途径,也是助力国家实现绿色可持续发展的关键举措。

余热回收可以通过有机朗肯循环、热电系统、热泵循环和直接换热等来实现。有机朗肯循环和热电系统是将热能转化为电能的技术,需要热能达到100~300℃,直接应用受到余热品位限制。直接换热回收也受限于温度,中低温、大温度滑移的余热热能难以被再次利用。热泵技术可以调节余热热能的品位和容量,具有简单紧凑的系统结构,可以与其他工艺过程结合进行余热回收^[1-2]。上海交通大学胡斌负责编撰的《中国中低温工业过程用热电气化替代技术及低碳化路线图研究(征求意见稿)》从技术、意义、成本等方面论述了通过热泵技术实现低温工业过程电气化供热的技术路线和发展潜力。作为热能的调质过程,热泵需要因地制宜地与工业流程紧密结合,配合排放需求和生产需求。而发展低温余热回收和高温输出的热泵系统能够扩展热泵的应用场景,近年来也受到不同单位的研究和关注。除了对工业余热源热泵的研究外,空气源热泵技术也可以通过调整,迁移应用于工业余热利用,为小容量的余热回收需求提供启发。

3.2.1 关键研究及应用进展

1) 多元化余热利用

工业余热来源包括发电、陶瓷、水泥、食品等

产业,由于产生余热的工业流程不同,余热载体包括烟气、废料、废渣、废水等。针对工业余热来源广泛、温度区间大、存在形式多样的特点,在回收过程中需要结合其他处理流程、能源利用需求及用热特点,针对性地设计回收方案。

燃煤电厂烟气的碳、硫含量高,排放前需要额外经过脱碳脱硫的流程。针对湿法脱硫后高水蒸气含量的烟气,山西大学提出了结合开式和闭式吸收式热泵的复合热泵系统。该系统水回收率和热回收率都较高,消除烟羽的能耗由41.97MW降至13.59MW, COP最高可达1.9^[3]。荏原打造了国内首台350MW机组“脱硫浆液闪蒸取热供热”示范工程,利用脱硫浆液闪蒸提取烟气热量,再通过吸收式热泵机组加以利用,实现供暖期单机降低煤耗不低于4.0克/千瓦时。浙江大学利用汽轮机级间蒸汽驱动热泵扩大热容,为碳捕集的解析过程提供热量,可以提高碳捕集燃煤电厂的整体能效^[4]。

针对工业园区余热品位不等的问题,梯级利用不同品位的余热能够最大程度地优化能源的利用效果。东南大学以某工业园区为范例构建低碳能源体系,针对工业园区热流量多样、电-冷-热需求复杂、能源耦合机制不明确等核心问题设计了以热泵为中心的余热回收利用系统。该系统通过建模优化进行系统能量集成分析,与传统热网相比,能源需求成本降低33%,蒸汽耗电量降低39%,投资回收期为6年,具有高经济性和工程适用性^[5-6]。

2) 低温余热利用

和易于利用的中、高温余热相比,占我国工业余热资源总量54%的低温余热资源具有品位低、分布不集中、回收效率低等特点,难以直接利用。充分利用低温余热可以满足部分用热需求,而利用低温余热满足高温需求需要根据工作范围选择能够实现大温升的热泵构型,也需要根据工作温度区间选取合适的工质。上海交通大学对不同构型的压缩式热泵及其工质进行了梳理和分析。当温升需求高于

70℃时，两级热泵较单级热泵和带喷射器的单级热泵更有竞争优势，所比较的289种工质在不同评价标准下各有优劣，需要根据实际要求进行选择^[7]。根据低温余热的载体不同，余热回收方式也有所不同。针对工业企业的二次蒸汽回收需求和低压蒸汽供热需求，中国科学院广州能源研究所开发了耦合高效换热和机械再压缩蒸汽（MVR）热泵增焓技术的供热系统，实现了蒸发潜热循环利用，MVR系统COP达到14~21，提高了20%~40%，吨蒸汽蒸发能耗仅为35~70kWh/蒸吨。东南大学通过具有大温度滑移的二氧化碳非共沸混合工质实现了工业废水的余热深度回收。结果表明与R290单工质对比，由启发式算法筛选出的几种混合工质在大部分充注比下的COP和单位容积制热量均有明显提升，其中质量分数0.17/0.83的非共沸工质混合工质CO₂/R1234yf的最优COP可达到7.46^[8-9]。

3) 高温热泵系统

工业生产对100℃以上的热能需求较大，利用热泵生产高温热能尽管前期投资较高，但是能源成本低，在利用余热回收的环境下相比燃煤锅炉等传统加热方式具有经济优势^[10]。然而达到100~200℃输出的高温、超高温热泵^[11]仍受到压缩机性能、工质性质等技术难点限制，通过热泵达到高温输出是近年的热点研究领域。

在提高高温热泵能效方面，北京理工大学在自复叠热泵循环中采用两级分离和双压力蒸发技术，与基本自复叠循环相比COP提高了24.48%^[12]。而在提高热能输出温度方面，上海交通大学通过焓分析对热耦合的吸收-压缩复合式热泵中不同部件进行了强化换热分析，降低了内部热回收的换热不可逆性^[13]。除热耦合方式外，也提出了单级质耦合的吸收-压缩复合热泵，利用150℃余热实现了200℃输出，COP可达到3.01，扩展了超高温热泵的应用范围^[14]。美的和上海交通大学、上海诺通合作完成了超高温单机双级变频离心工业热泵技术成果。美的针对关键技术难题提出了全三维降阶气动优化设计方法、管外沸腾换热复合强化技术，自适应联合调控技术和蒸发器工质空间分布原则，保证了机组运行可靠性。所研发的超高温工业热泵机组可以回收工业余热和废热生产130℃蒸汽级超高温热水，相比传统工

业锅炉节能75%以上，对节能降碳具有重要意义。Jeßberger等^[15]针对热泵的尺度效应问题，利用两个供热能力比例为3.2的两级热耦合高温热泵进行实验，大容量热泵的热损失相比小容量热泵低15%，换热器夹点温度也相对低3~5K，论证了将实验室结果放大到更大热容量的工业应用尺度的可行性。

热能储存可以作为可再生能源供热管理的重要技术，解决热泵利用低品位热源的时空不平衡问题^[16]。湖南大学在研究中利用谷电驱动热泵回收余热，通过热泵的高温输出结合储热和有机朗肯循环实现余热利用，并建立了选择合适工质对的双层优化方法，提出了包括纯流体和非共沸流体在内的工质对选择策略^[17]。Kim等^[18]建立了多级压缩高温热泵结合光伏发电、储热、储电的瞬态模型，结果表明光伏和电网共同供能的高温热泵与储电、储热结合时，分别具有二氧化碳排放量低和并网成本低的优点。

4) 中小体量余热利用

除上述传统意义上的工业余热可利用高温热泵进行回收以外，利用空气热源的高温热泵技术同样发展迅速，可以被迁移应用于中小体量的余热回收场景。上海交通大学与美的、诺通等合作完成的空气源热泵多品位热能高效供应关键技术与应用项目经过多年校企联合攻关，实现了热源品位适应性强、供热效率高、应用范围宽的多项关键技术突破。其提出的空气源热泵热水器性能系数达到4.73的国际最高水平，项目首创了空气源热泵闭式预热耦合开式闪蒸压缩及压缩-吸收耦合变温提质大温升热泵循环，首次将空气源热泵供热温度从90℃提升至150℃，将单位蒸汽电耗降至电锅炉的一半，为工业蒸汽的高效低碳供应开创了变革性路径。该项目具有重要国际学术影响，孵化了多家科技企业，并荣获国家科技进步奖二等奖、教育部科学技术进步奖一等奖、广东省科技进步奖一等奖等奖励。相关产品已成功应用于严寒地区热水供应及工业企业的蒸汽供应。

广州能源所团队与东方锅炉合作研发的直接蒸发式热泵蒸汽技术，解决了高温高效双侧相变蒸发分离、宽温域环境自适应性调节、级间循环热量高效耦合、170℃蒸汽稳定制备控制等一系列技术难

题。项目示范机组在27℃空气热源条件下制取170℃蒸汽，平均COP可达到1.58，制热量达到760kW，通过提高高温升热能提质的能源利用效率拓宽了热泵的供热范围。

3.2.2 优秀案例

1) 高温热泵在电泳前处理环节的应用

福田领航工厂车架部生产工艺主要为电泳工

艺，在前处理环节中需要保持在40~60℃左右的温度。改造电泳前处理线采用管道蒸汽进行加热，通过板式换热器分别供热给生产线中需要加热水的水槽，年蒸汽的使用量约为2500吨，同时因蒸汽输送距离、生产规律的影响，车架部蒸汽有20%左右的热损，实际用热蒸汽成本最高可达437.5元/吨。因工厂节能降碳的需求，由诺通科技针对原供热系统进行以空气源高温热泵供热的改造工作。

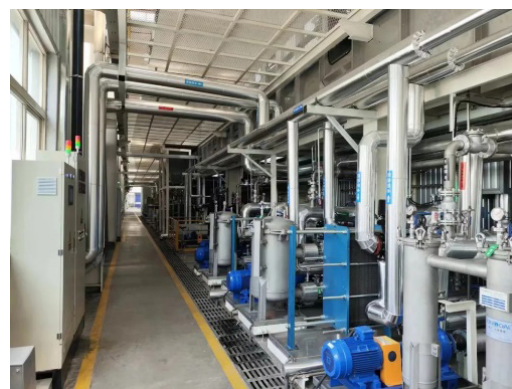
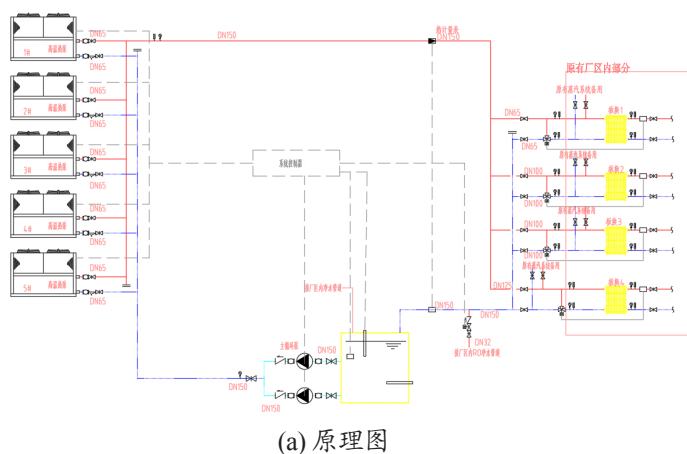


图3.2-1 空气源高温热泵供热系统

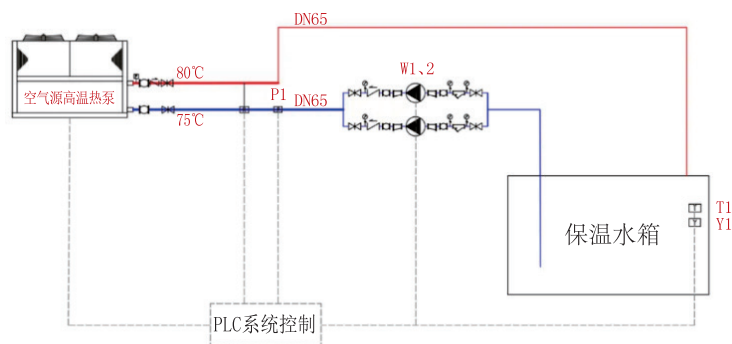
本次设计根据项目所在地最低温度、生产负荷变化等因素综合考虑，采用5台NT-AS-110FGBW空气源高温热泵热水机组替代管道蒸汽。热泵机组额定出水温度80℃，可根据环境温度及生产负荷的变化在60~85℃区间内实时调节出水温度，以满足前处理线用热需求。改造过程中，将热泵系统就近安装在车架部车间外围，通过管路连接至各功能槽热水板式换热器，中温热水通过管路在板式换热器不断循环，加热另一侧的功能槽循环溶液，同时保留原有蒸汽系统，实现蒸汽供热系统和热泵供热系统的互为备用。本项目由诺通科技采用EPC总包的形式承接设计、供货、施工、调试等工作，项目于2024年1月开始建设，3月建设完成。目前所有设备运行状态稳定，供热效果良好，运行至今系统能效约为2.6，节能降费率约为40%。

2) 高温热泵冷热联供应用

浙江某集团主要生产各种高档面料。改造前厂区采用的是独立的传统冷热供给方式，车间用空调制冷降温，制冷量需求约56kW；室外采用自备电

厂的蒸汽加热热水。由于该方式存在供需温度不匹配、碳排放强度大、运行成本较高等问题，企业面临节能减排的巨大压力。

为此，诺通科技经过前期的数据收集、现场踏勘、测算评估等一系列步骤设计了工业热泵冷热联供方案，选取1台NT-AS-110FGBW型号110kW额定制热量空气源高温热泵热水机，替代原有的室内空调给车间降温，同时通过循环加热的方式，把室外水箱里收集的约55℃冷凝冷却水加热至80℃，用于工艺生产。在细节方面：为了预防冷凝水或可能产生的渗漏，在设备出风系统旁加装挡水板和接水盘，同时做好防水，确保通过管路把冷凝水和可能产生的渗漏排到室外，从而不影响室内美观和使用效果。本套设备采用智能化全自动运行，可在有效降温的同时，给外面水箱加热，实现一机两用。本项目由诺通科技承接设计、供货、安装、调试工作，项目于2024年7月开始实施，9月建设完成。目前空气源高温热泵冷热联供系统运行状态稳定，冷热联供效果良好，运行至今系统能效为2.3，节能降费率达40%左右。



(a) 原理图



(b) 现场图

图3.2-2 空气源高温热泵冷热联供系统

参考文献

- [1] SU Wei, HAN Yuhao, LIU Zhaoyang, et al. Absorption heat pumps for low-grade heat utilization: a comprehensive review on working pairs, classification, system advances and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 315: 118760.
- [2] XU Z, WANG R. Prospects of heat pump for thermal energy decarbonization[J]. The Innovation Energy, 2024, 1(3): 100032.
- [3] BAI Tao, YAO Yuhu, HU Bowen, et al. Thermodynamic analysis of exhaust waste heat recovery in a compound open absorption heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124387.
- [4] LIU W, HUANG Y, ZHANG X J, et al. Heat pump assisted sorption carbon capture with steam condenser heat recovery in a decarbonised coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 319: 118919.
- [5] WU Wencong, DU Yuji, QIAN Huijin, et al. Industrial Park low-carbon energy system planning framework: Heat pump based energy conjugation between industry and buildings[J]. Applied Energy, 2024, 369: 123594.
- [6] WU Wencong, DU Yuji, QIAN Huijin, et al. Enhancing the waste heat utilization of industrial park: a heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 306: 118306.
- [7] DONG Yixiu, WANG Ruzhu. When and how to use cascade high temperature heat pump—Its multi-criteria evaluation[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 309: 118435.
- [8] ZHOU Fang, ZHANG Tao, WEI Dianhang, et al. Optimal refrigerant selection and parameter analysis of a wastewater heat pump using CO₂ zeotropic mixtures[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123789.
- [9] 张涛, 吴嘉峰, 刘剑, 等. 大位移温度CO₂非共沸工质余热回收热泵热水系统实验研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 21-27.
- [10] SADEGHI M, PETERSEN T, YANG Zhenyu, et al. Thermal and economic performance assessment of different high temperature heat pump layouts for upgrading district heating to process heating of steam production at 160°C[J]. Energy, 2024, 313: 133832.
- [11] MA Xudong, DU Yanjun, ZHAO Tian, et al. A comprehensive review of compression high-temperature heat pump steam system: Status and trend[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 164: 218-242.
- [12] 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.
- [13] YOU Jinfang, ZHANG Xi, GAO Jintong, et al. Entransy based heat exchange irreversibility analysis for a hybrid absorption-compression heat pump cycle[J]. Energy, 2024, 289: 129990.
- [14] FENG Jiayu, GAO Jintong, HU Bin, et al. A mass-coupled hybrid absorption-compression heat pump with output temperature of 200 °C[J]. Energy, 2024, 312: 133608.
- [15] JEBBERGER J, ARPAGAU C, HEBERLE F, et al. Experimental investigations of upscaling effects of high-temperature heat pumps with R1233zd(E)[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 164: 243-256.
- [16] 杨耿, 肖鑫, 王云峰. 压缩式热泵耦合相变储热的研究进展[J]. 制冷学报, 2025, 46(1): 32-45.
- [17] WU Ding, MA Bo, ZHANG Ji, et al. Working fluid pair selection of thermally integrated pumped thermal electricity storage system for waste heat recovery and energy storage[J]. Applied Energy, 2024, 371: 123693.
- [18] KIM H S, SEO J, MOON S, et al. Numerical study on carbon emissions and economics of a high temperature heat pump system for an industrial process[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 322: 119150.

3.3 食品、药品冷链与干燥技术

孙志利¹、赵松松¹、李晓琼²、剧成成³

(1 天津商业大学; 2 中国科学院理化技术研究所; 3 冰轮环境技术股份有限公司)

冷链技术是保障食品、药品安全与品质的核心环节, 涉及预冷、快速冻结、冷冻冷藏等关键装备。食品、药品冷链行业在技术创新与产品开发方面取得一定的进展, 尤其是在预冷装备、快速冻结装备及新型复合能源冷库(含蓄冷材料)三个方面。此外, 食品和药品的干燥也是制冷/热泵技术应用的重要领域, 尤其是真空冷冻干燥装备, 是食品和药品生物活性物质最理想的干燥方法之一, 消费市场的变化也使得对相应的设备需求愈加旺盛。

3.3.1 真空预冷装备

真空预冷通过低压环境下水分蒸发吸热实现快速降温, 核心在于平衡蒸发效率与失水控制。失水控制方面, 可采用喷雾补水系统或纳米涂层保鲜等方式减少水分蒸发, 其中, 喷雾补水系统通过高压雾化向真空室注入微量水(3%~5%质量比), 使叶



图3.3-1 真空预冷装备

菜失水率从10%降至2%以下。纳米涂层保鲜是通过在食品表面喷涂可食用纳米膜(如壳聚糖/纤维素复合膜), 减少水分蒸发同时抑制微生物。

在新技术进展主要围绕节能低碳技术、智能控制技术和融合改进三个方面开展。在节能技术方向, 日本三菱电机开发的双级变频真空泵能耗降低30%。在智能控制方面, 中国农科院基于AI的动态调控系统实现真空度与补水的实时优化; 荷兰瓦赫宁根大学利用数字孪生技术预演设备性能, 从而为开发智能控制策略奠定了基础。在设备改进方面, 我国多家企业和研究机构推出了移动式的真空预冷装备, 满足了实际使用中的设备高效利用需求。

目前, 真空预冷的相关实验证明, 其在未来的冷链发展中将发挥重要的作用, 其常见的设备型式如图1所示, 典型的应用案例如下:

叶菜类: 上海生菜预冷(8min降温至4℃, 货架期延长3天);

食用菌: 云南松茸预冷结合气调包装(褐变率降低50%);

烘焙食品: 日本山崎面包蛋糕预冷(12min降温至10℃)。

3.3.2 快速冻结技术与装备

食品冻结技术是影响冷冻食品高品质储藏期的关键技术点之一, 食品冻结速度越快, 生成的冰结晶越小, 食品的微观结构保持越完整, 冷冻食品的品质越高。因此, 如何快速通过食品冻结过程的最大冰结晶生成带和加速冰晶生成是研究的热点问题。

按照食品冻结速度来分为快速冻结(5~20 cm/h)、中速冻结(1~5 cm/h)和慢速冻结(0.1~1 cm/h), 三种冻结速度对食品冻结后内部的冰晶大小、形状和分布均匀情况均有差异; 按冷却介质可以分

为4类，即空气循环式冻结、喷淋式冻结、接触式冻结和浸渍式冻结。对于大多数食品，导热系数在0.5~1.5 W/(m²·K)，导热系数低，严重阻碍了冷量向食品内部的传递过程，降低了食品的冻结速度。从研究的角度出发，研究人员更关心如何在采用合理快速冻结技术的基础上，增加辅助冻结技术，提高食品冻结速度。

近年来，为加快冷冻速度，提高冷冻食品品质，研究和应用领域涌现出了高压冻结技术（HPF）、超声波辅助冻结技术（UAF）、电磁辅助冻结技术（电场辅助冻结技术（EF）、磁场辅助冻结技术（MF））、射频（RF）/微波（MWF）辅助冻结技术和脱水辅助冻结技术（ODF）等新型加速食品冻结过程的辅助技术。图3.3-1和图3.3-2分别为高压辅助冻结技术和超声辅助冻结技术的应用效果。

表3.3-1 高压辅助冻结技术应用效果

应用领域	研究方法 & 典型数据	应用效果及结论
水产品工业	以龙虾、比目鱼片为研究对象，分别在200MPa、-18℃，140MPa、-14℃下冻结，将龙虾、比目鱼试样与传统冻结处理效果进行对比	高压冻结后龙虾试样的韧性明显增高。比目鱼片其质地要比传统冻结处理的明显改善，对其色泽、脂质体及蛋白质稳定性影响较小，且解冻或熟化后汁液损失也显著减少
	以鳕鱼为研究对象，在200MPa/400MPa、7℃、5min，3次循环高压处理条件下	高压处理后微生物数目均明显减少，200MPa处理下，微生物数目减少一个数量级；400MPa高压处理下微生物减少两个数量级，但表明有熟化
肉制品工业	以牛肉为研究对象，分别进行高压冷冻和传统冷冻试验，分析冷冻过程中的热变化（见表3.3-2）和形成冰晶形态	传统冷冻形成的冰晶多数位于组织细胞外，冰晶粗大且不均匀，对组织细胞造成机械损伤较大；高压冷冻形成的冰晶体积较小，在样品中分布较均匀，且压力越大，位于胞内的冰晶越多,对样品组织的破坏程度越小
	以猪肉为研究对象，在200MPa、-20℃条件下高压冻结处理与常压下空冷冻结进行对比	高压冻结得到的冰晶尺寸细小而均匀，对试样的微观结构影响不大。而常压空冷冻结，由于试样中温度梯度的存在产生了不同晶核生成与长大的条件，从而形成了不均匀的冰晶尺寸，由此形成的内应力会损坏试样的微观结构
	以猪肉为研究对象，分别对比了50、100、150、200 MPa压力及-4、-9、-14、-21℃温度条件下猪肉的冻结时间、温度及压力相关曲线见图3.3-3	当压力<50MPa时，冷冻效果与常压相同；当压力>150MPa时，猪肉品质出现恶化。在100MPa冷冻时猪肉解冻后可保持品质新鲜
果蔬工业	以马铃薯为研究对象，在400 MPa、-15℃下高压冻结与空冷冻结对照比较马铃薯质地、颜色、微观结构的差异	高压冻结处理的马铃薯试样其质地基本没有变化，试样的破裂强度明显下降。对色泽参数的比较表明，高压冻结要比空冷冻结影响小
	以豆腐为研究对象，在200MPa，-18℃高压冻结和-10℃和-18℃常压空冷冻结对比豆腐的品质	高压冻结的豆腐在形状和质地上与冻结前相比几乎没有改变，而且没有汁液的损失，高压冻结时形成很细的冰晶，而在空冷冻结中出现了粗大的冰晶

其他领域	采用高压冻结技术保存球虫卵囊的超微结构	冷冻替代和电子包埋预处理的高压冻结法是一种适合球虫卵囊超微结构分析的方法，优于传统的保存处理
	将高压冷冻与过氧化酶催化细胞化学相结合，利用两者协同作用的功效展示了一种探索内分泌系统隔间的新方法	高压冻结与过氧化物催化的细胞化学结合可以提供良好的结构保存，可以清楚地识别内分泌隔间的复杂三维结构细节
	在400MPa、0~22℃高压冻结条件下对酶的活性进行研究	高压冻结后过氧化酶、多酚氧化酶和淀粉酶不会发生不可逆失活，戊甲基酯酶仅发生轻度不可逆失活，而脂肪氧合酶会发生较严重的失活（达45%）

表3.3-2 超声辅助冻结技术的应用

序号	实验对象	研究方式	结论
1	新鲜马铃薯样品	25 kHz和15.85W超声波辅助浸泡冷冻马铃薯组织	整个马铃薯样品产生了小的细胞间冰，其微观结构得到了很好的保存，提高了冷冻率，而且避免了细胞破坏的发生
2	面团	25 kHz、288W或360W超声作用	冷冻时间明显缩短，冷冻面团内部产生大量微小冰晶
3	西兰花	20 kHz或30 kHz频率；60s周期；0、125、150、175、190W功率水平超声作用	超声波辅助冷冻西兰花组织的微观结构和硬度明显优于传统浸泡冷冻西兰花组织，且冷冻样品的滴水损失显著降低
4	水和蔗糖溶液	研究在0.21 W/cm ² 和20 kHz的水和蔗糖溶液中，预先存在的气泡对冰成核和结晶的影响	表明预先存在的气泡可能转化为空泡，从而促进和控制冰核过程
5	液体（蔗糖溶液）和固体（琼脂凝胶）样品	25 kHz，0.25W/cm ² 超声波对样品的冷冻机制	超声波在液体样品中比在固体样品中更有效地使冰成核。超声辐照温度与液体样品的成核温度呈线性关系。此外，超声由于其均匀性，在液体样品冻结过程中对传热速率的影响更为突出
6	猪肉	分别进行18、36、54、72、90W超声波功率；间隔时间10、20、30、40、50s；持续工作时间5、10、15、20、25s实验，对比速冻效果	猪肉从0℃降至-7℃所需要的时间随着超声波功率的变化而变化。随着功率的增加，作用时间先增加后减小，在36W时作用时间最短，并且确定超声波处理在功率36W、间隔时间30s、持续工作时间12s时，冷冻效果最佳

3.3.3 非热物理加工技术在冷链中的应用

伴随着非热物理加工技术在食品杀菌钝酶和分离提取等领域的快速发展，以及在理论研究、方法创新、装备研发、产品化应用等方面取得的一系列重大进展，其在食品保鲜、抑制微生物增殖、大分

子改性修饰等领域展现出更加广阔的应用前景。新兴的非热物理加工技术（超高压、辐照、电磁场、超声、低温等离子体等）在抑制微生物增殖、提高抗氧化酶活性等层面表现出较好的效果。食品电磁加工技术是近几年快速发展的一种新技术，外加磁

场可能通过作用于鲜肉内部的极性分子，影响冻结过程形核条件（过冷度）、能量变化与晶核生长速率；此外，电磁场还可以通过影响生物组织液、蛋白质分子、DNA及生物膜等微观物质的电磁特性，提高抗氧化酶活性，抑制腐败微生物的繁殖，降低细胞膜渗透性，进一步提高保鲜品质。其不仅可以杀菌驱虫，而且能保持鲜肉原有的色泽，口味及营养成分，同时兼具功耗小，便于实现等优点，具有广泛的应用前景，在保障高品质食品供应，满足人民的美好生活需求，提高“双碳”经济效益等方面具有重要的经济价值和社会意义。

研究团队现已构建了小型果蔬低温电磁水预冷装备、电磁辅助食品低温冻结及贮藏系统，开展了电磁作用强化传热、提高预冷效率的机理分析及试

验研究、电磁预处理及贮藏过程电磁作用影响感官品质及生理生化指标的试验研究及电磁处理影响食品冻结机理分析及试验研究，为进一步深入探索电磁作用影响生理特性、抑制品质劣变的机理研究奠定了坚实的硬件支撑和理论基础。针对解决果蔬、鲜肉等易腐农产品的供应链高损耗问题，基于超冰温保鲜技术开发了新一代农产品多物理场耦合保鲜装备（如图3.3-2所示），创制了智慧型冷链物流监控系统，实现农产品贮藏、运输、销售的全链条智能品质监控。冻结能力提升10%以上，贮藏期延长80%~120%，经济效益显著。具备速冻、保鲜及解冻等多功能农产品贮藏及加工工艺；包含电场、磁场、光波及等离子体，可实现多物理场耦合杀菌及贮藏保鲜；能满足-25~-10℃宽温区的高精度温湿度智能控制。



图3.3-2 新一代农产品多物理场耦合保鲜装备

3.3.4 蓄冷型排管蒸发器及相变蓄冷材料开发与应用

蒸发器是制冷循环中的主要换热设备。其中采用自然对流方式换热的排管蒸发器被广泛应用于食品冷库、天然气气化及热泵等领域，其由圆管及纵翅片直接轧制而成。翅片结构不合理导致排管蒸发器管材消耗量大及传热性能差。同时机组长时间运行，由于电价过高导致消费及耗能较大，从而使冷库的机组运行无法与峰谷电价相匹配。

对单管多翅片排管蒸发器而言，影响换热的因素有很多，既有几何结构参数、排管材质，也有热边界条件以及周围换热环境的影响。从工业应用角度出发，主要对单管多翅片排管蒸发器的几何参数

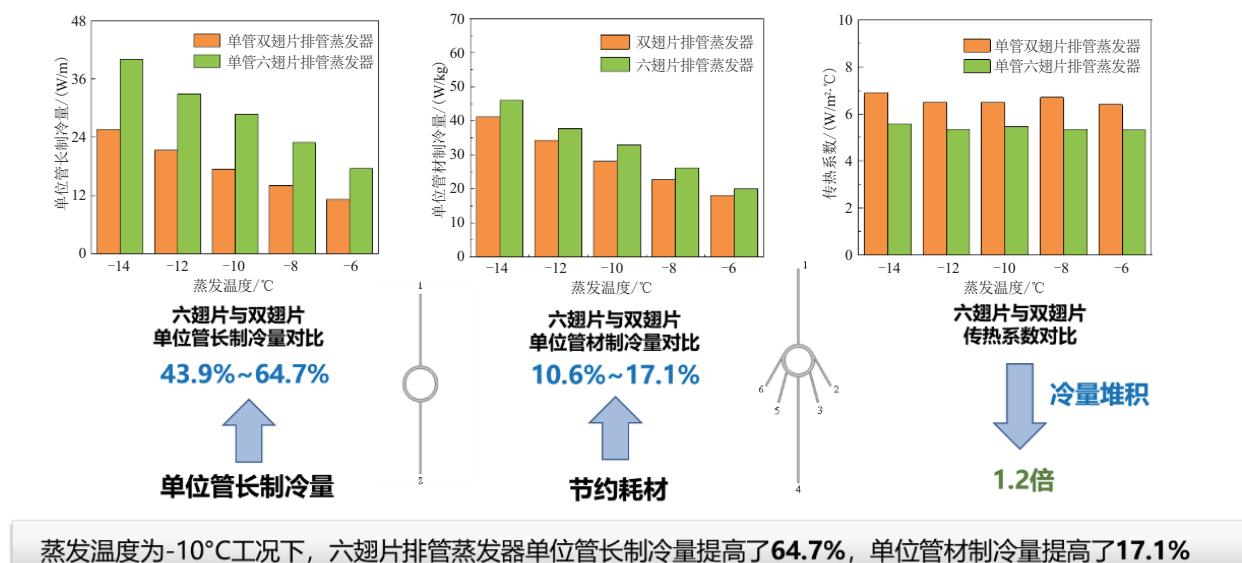
进行研究，以单位管长制冷量和单位管材制冷量为评价标准，优化排管蒸发器的几何结构，在保证制冷量不变的情况下节省耗材。同时也可在排管上增加蓄冷结构，优化排管蒸发器的运行模式。

单管多翅片排管蒸发器的翅片结构大多数采用平直翅片结构，改进翅片结构作为提高排管蒸发器换热性能的有效措施，已得到广泛的应用。通过优化排管蒸发器的翅片结构，增大换热面积强化空气侧换热，提高换热效率。蓄冷型双翅片排管蒸发器在排管中间增加了蓄冷腔，添加体积占比为70%的水作为蓄冷材料，在降温过程中储存冷量，实现在停机后仍能维持冷库所需温度的需要。基于相变材料的冷能储存热交换器因增加储能功能，在机组停

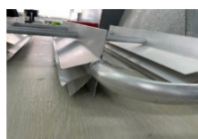
机后冷库内温度可维持在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 温度区间的时间长达12h以上，大幅度减少温度波动。蓄冷型双翅片排管蒸发器将换热及蓄冷技术相结合，提高了单管多翅片排管蒸发器的实用性，同时根据峰谷电价调节制冷机组启停时间，实现移峰填谷的效果。

天津商业大学研究团队研发了单管六翅片排管蒸发器及单管八翅片排管蒸发器，其特点在于，传热性能高、降温速率快、减少食品的干耗，同时在相同制冷量下可节约10.3%~29.1%的耗材。提出的蓄冷型双翅片结合了现有双翅片的简单结构，具有70%

体积占比的蓄冷腔，采用水蓄冷，对铝材无腐蚀，又可储存大量冷量，当机组停机后释放冷量，维持冷库贮藏温度12小时以上，实现了移峰填谷节能减排的效果。此外，研究团队还开发出了甘露醇复合水溶液、乳酸钙复合水溶液、甲酸钠复合水溶液以及甲酸钠水溶液四种复合相变材料，提高了蓄冷腔蓄冷材料性能，更好地匹配冷库对应工况条件。对铝排市场提供了更好的技术支持，同时有利于高效、低能耗、低耗材的铝排的应用推广，有利于贮藏品质的提高及保险时间的延长。



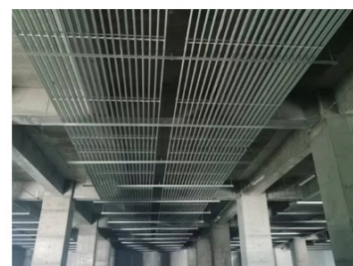
单管八翅片排管蒸发器



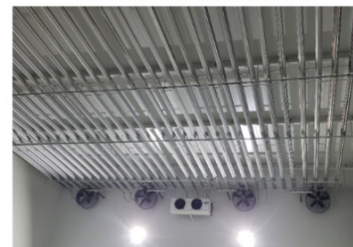
蓄冷型双翅片排管蒸发器



单管六翅片排管蒸发器



冷库实际应用图



冷库实际应用图

图3.3-3 蓄冷型排管蒸发器及其工程化应用

3.3.5 智能化高效真空冷冻干燥技术

真空冷冻干燥是生物活性物质和某些医药产品及营养保健品等最理想的干燥方法。消费市场的需求变化也使得对相应的冻干设备需求旺盛，冻干是把含水物质，预先降温冻结成固体，然后在真空的状态下，使水分从固体直接升华成水蒸气而获得干燥的一种方法。冻干技术是一种先进的干燥和保存方法，它可被广泛应用于生物、医药、食品等领域，为人类的健康和生活带来便利和福祉。

物料在冻干之后进行真空或氮气封口，以隔绝氧气，若再在低温下存放，则水分、空气、温度三个影响物质变性的因素均得到有效控制，使物质能在较长的时间内获得良好的保存。冻干食品不存在表面硬化的问题，复水时水分可迅速渗入到冻干食品内部。此外，冻结后均匀分布的细小冰晶在升华后留下大量的空穴，致使冻干食品呈多孔海绵状，渗入的水分与干物料充分接触，冻干食品在几

分钟甚至数十秒钟内完全复水。冻干食品优异的复水性能，决定了它在即食方便食品具有非常重要的地位。食品物料中的许多成分具有热敏性和易氧化性。由于冷冻干燥是在低温和高真空度下进行的，避免了加工时常见的食品中的热敏性成分被破坏、易氧化成分被氧化的现象。所以，冻干食品的营养成分及生理活性成分保留率最高，这也是某些功能性食品采用冻干食品为基料的主要原因。低温下各种化学反应的速率较低，冷冻干燥时由于各种色素分解所造成的退色、酶和氨基酸所引起的褐变现象几乎不发生，所以冻干食品不需添加任何色素，其色泽依然赏心悦目，鲜艳如初。由于低温下芳香成分的挥发性较低，故冷冻干燥时其挥发损失率相对较低。干燥过程无氧化等劣变反应，无异臭产生。此外，干燥后产品中的芳香成分浓度相对增加，冻干食品风味不变，香气更加浓郁。

在冷冻阶段，将物质冷冻成固态，使水分凝

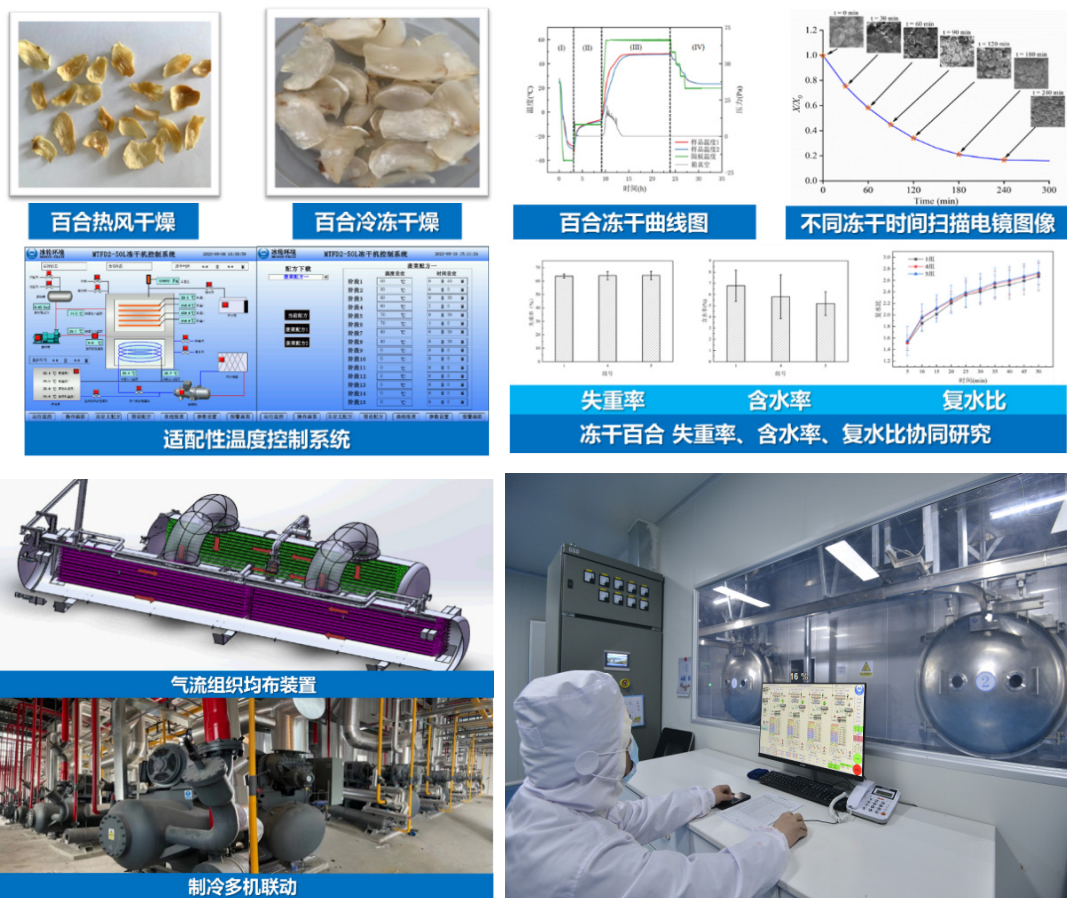


图3.3-4 智能化高效真空冷冻干燥技术

固成冰晶。冷冻温度和速度会影响冰晶的大小和分布，进而影响升华速率和产品质量。在升华阶段，将冷冻的物质置于真空环境中，使冰晶直接升华成水蒸气，从而达到脱水的目的。升华过程中需要提供热量，以维持物质的温度和压力。升华速率和均匀性会影响干燥时间和产品的形态和结构。在解析阶段，在升华完成后，将物质的温度升高，使残留的水分进一步蒸发，提高产品的干燥度和稳定性。解析温度和时间会影响产品的色泽和营养成分。

虽然冻干食品的优势特别明显，但目前冻干技术及装备仍存在食品冻干品质调控工艺不清晰、冻干设备运行效率低和冻干设备智能化程度及工艺匹配度不高等问题。导致冷冻效果不理想，冰晶过大或过小，影响升华效率和冻干物料品质。为了解决这个问题，需要根据不同的物质特性，选择合适的冻结方式和参数，以及与之相配套的制冷系统和智能化工艺匹配技术，以实现最佳的冷冻干燥效果。

冰轮环境联合天津商业大学开发了新一代智能化高效冷冻干燥技术（技术与设备如图3.3-4所示），融合了自主研发的食品冻干品质调控技术、设备节能优化与工艺匹配技术和智能化高效冻干设备集成技术。解决了传统冷冻干燥设备的冻干产品品质差、设备运行效率低和智能化运行问题。

值得特别关注的是，近期中国科学院理化技术

研究所开发了耦合MVR技术与真空脉宽脉幅调制干燥技术，创制了多功能、模块化可组合、介质状态可控的低碳、智能多场协同存性干燥装备。在干燥中仅采用单层托盘时，系统的处理量为14.56 kg/h，该系统同时可实现三层6个托盘的组合干燥。基于JB/T 10285—2017《食品真空冷冻干燥设备》，通过三方检测进行数据对比，开发的设备相比传统冻干设备单位除湿比能耗降低27.20%，碳排放量降低23.36%。通过研究发现，MVR-PVD系统的节能效率在8.1%~10.5%之间，对应的减少碳排放量在2.9~3.3 kg/h之间。MVR-PVD系统的最大节能效率为10.5%，对应减少碳排放量为3.3 kg/h。在相同真空干燥条件下，MVR-PVD系统的SMER值均大于VD系统，MVR-PVD系统的SMER范围为0.33~0.95 kg/(kW·h)，而VD系统的SMER在0.29~0.85 kg/(kW·h)之间，说明采用MVR技术后，甘草真空脉宽脉幅调制干燥系统除去相同水分所消耗的能耗更少。基于“模糊+积分控制”算法对系统温度进行调控时，超调量变小，调节时间缩短，系统趋向于稳定，其波动范围在[-2, 2]之间，相比PID控制器的[-4, 4]有很强的抗干扰能力。从经济性角度讲，将VD系统升级为MVR-PVD系统的成本可以在较短的时间内收回，MVR-VBD系统具有较好的经济性。开发的相关技术在新疆昌吉盛源中药材有限责任公司进行了推广应用。



图3.3-5 MVR真空脉宽脉幅调制干燥装备

3.4 数据中心及算力中心冷却

邵双全

(华中科技大学)

数据中心是数字经济发展的引擎和载体，有效支撑经济的稳定增长，2023年我国数字经济规模已经达到53.9万亿元，占全国GDP的42.4%，数字经济增长对GDP增长的贡献率达66.45%^[1]。

2024年国内外在人工智能和大模型方面取得了快速发展，对算力需求持续增长，助推单芯片功率超过1000W。DeepSeek的发布，虽然大幅度提升了大模型的算力效率，但也因此助推了大模型的普及，释放了巨大的算力需求。数据中心特别是算力中心高能耗、高碳排放、高功率密度的“三高”问题日益凸显。因此，数据中心的绿色低碳转型也变得越来越迫切。新技术、新产品、新标准、新政策快速推出，技术交流与行业探讨更为活跃。因此，本文总结了数据中心冷却系统高效低碳技术的最新进展，为数据中心绿色低碳发展提供参考。

3.4.1 节能降碳技术装备

为加快推广应用先进适用节能降碳技术装备，工信部发布了《国家工业和信息化领域节能降碳技术装备推荐目录（2024）》^[2]，其中适用于数据中心及通信基站与机房的节能降碳技术如下：

1) 间接蒸发冷却制取冷水技术

该技术以内冷式间接蒸发冷却器为核心，利用水蒸发吸热效应通过热交换制取冷水。制取冷水过程中蒸发过程与所制取冷水无直接物理接触，无机械制冷参与，所制取冷水出水温度可低于环境空气湿球温度 2~3℃。

2) 智能微模块技术

该技术采用模块化设计，将供配电、温控、机柜、通道、布线、监控等系统集成在一个模块内，并具体采用可提高数据中心能效的内部通过近端制冷、冷热隔离密闭通道、高效不间断电源（UPS）、智能优化温控系统等集成设计提高数据中心能效，实现智能化运维管理。

3) 基于间接蒸发冷水机组的综合冷源技术

该技术通过水循环回路工艺设计，将间接蒸发冷水机和压缩式冷水机组合成综合制冷系统，实现冬季间接蒸发冷水机组在北方寒冷地区数据中心安全运行。通过采用机组群控、系统自控等技术自动切换运行模式。

4) 全自然冷却冷源液冷温控技术

该技术采用热管散热和水冷散热技术，在高热流密度场景下，通过液冷内外循环系统将电子芯片产生的热量传递至冷却塔散热，无须配置机械制冷设备，实现对电子芯片的温度控制。

5) 全直流变频氟泵空调技术

该技术采用全变频架构，根据机房负载变化和室外环境温度进行系统寻优，自动调整压缩机、室内风机、室外风机等转速与电子膨胀阀的开度。在室外环境温度较低时，由氟泵驱动实现自然冷却循环，无须压缩机运行。

6) 全变频三驱相变制冷技术

该技术使用相变工质，通过压缩机、气泵、液泵三种驱动模式实现相变冷却循环。结合全变频智能控制策略，在过渡季节运行气泵驱动模式，低温季节运行液泵驱动模式，高温季节运行压缩机驱动模式。

7) 模块化微型一体机技术

该技术采用模块化设计，将制冷模块、智能供配电模块、储能模块、监控模块等融合为一体，单一模块即是功能完整数据机房，并提供支持无人值守的智能化集中监控和可视化管理。

8) 气体增压型氟泵空调技术

该技术采用氟泵和压缩机串联设计，通过低压缩比变频压缩机与智能算法软件控制相结合，可在

同一系统中实现压缩机模式、气体增压模式、氟泵模式三种模式自动切换运行。

9) 预制式智能模块技术

该技术由密闭冷通道、机架式模块化不间断电源(UPS)、全变频自然冷却等技术组成,通过预制方式形成模块化数据中心。机架式模块化不间断电源(UPS)技术可依据实际负载情况智能控制功率模块工作状态。全变频柔性制冷技术可根据室外温度智能切换混合节能模式或自然冷模式。

10) 数据中心预制模块化技术

该技术采用工程预制化、产品模块化设计理念,将供配电、制冷、机柜、管理等子系统集成在一定尺寸的箱体模块内,模块在工厂完成生产及测试,整体运到现场后进行拼装。

11) 智能化综合能耗管理平台及综合改造技术

该技术针对动力环境、暖通系统、供配电系统等关键用能因素,通过跨系统数据统一采集,实现对数据中心各模块运行效率集中监控和运行策略自动优化。在此基础上进行分析研究,优选多种技术形成数据中心综合改造方案。

12) 风冷、液冷整体机房模块技术

该技术采用智能化电源、冷电联动、冷板式液冷、智能化运维管理、模块化设计、预制化集成等技术,形成包括供配电系统、制冷系统、监控管理系统、机柜及封闭通道等系统的风冷、液冷整体机房模块。

13) 基于机理模型的数据中心暖通空调能效提升技术

该技术通过对机房温度、气象环境、设备运行状况等数据进行采集和分析,利用时序预测算法确定机房各区域精确制冷需求,采用制冷能效模型对精密空调、冷水机组、水泵、冷却塔等设备运行工况进行分析,从全局维度推理进行能效寻优,通过动环、群控等系统完成自动控制。

14) 磁/气悬浮压缩机及氟泵双擎驱动多联热管空调技术

该技术综合采用多联热管、磁/气悬浮无油压缩

机和氟泵技术,室外侧可根据气候类型选择蒸发冷或风冷冷凝器,室内侧可选背板末端、列间末端、房级末端、风墙末端等多种形式。液态制冷剂在室内末端吸热蒸发为气态,气态制冷剂在室外冷凝器冷凝成液态,液态制冷剂在氟泵作用下送回室内末端完成制冷循环,系统可智能切换压缩机、液泵驱动模式。

15) 智算中心复合液冷技术

该技术面向高功率密度人工智能(AI)计算服务器,由室外冷源系统、冷量分配单元(CDU)、环状管网、微负压冷却工质供回歧管、液冷板、监控模块、配电模块等组成,可满足高功率密度机柜散热需求,提高空间利用率。可灵活兼容冷却水、相变工质等多种形式冷源,适应匹配液冷与风冷部分对冷源不同需求,实现液冷数据中心单冷源设计。

16) 智能微型模块化技术

该技术采用模块化及封闭冷/热通道设计,集成高效供配电系统、全变频氟泵制冷系统、综合布线系统、动环监控系统、消防联动系统等子系统。各子系统可无缝衔接,具备按需扩展的复制能力,通过动力环境监控系统实现统一监管。

17) 风侧间接蒸发冷却技术

该技术利用湿球温度低于干球温度的原理,通过非直接接触式换热器将室外空气或者经加湿预处理室外空气冷量传递给数据中心内部较高温度回风,实现风冷和蒸发冷却相结合。

18) 浸没式液冷用零臭氧消耗潜能值、低全球变暖潜能氟化冷却液技术

该技术将服务器或芯片等发热器件设备全部或部分浸没在单相或相变氟化冷却液中,依靠冷却液显热变化或潜热变化传递热量,替代传统风冷散热技术,解决高热流密度器件散热问题。

19) 蒸发冷凝式氟泵双循环多联高功率背板空调技术

该技术综合采用高效油分离器及无油氟泵。室内机为背板空调形式,采用高效换热器技术实现轻

薄化，并实现对高功率机柜精准制冷。室外主机采用两级蒸发冷却闭式蒸发式冷凝器，支持500米超长冷媒连管，可在负30米至正50米落差范围内安装。

20) 一体式预制化氟泵空调技术

该技术基于变频氟泵技术，采用内外机集成一体化、并联压缩机制冷、低风阻风墙送风及高回风温度设计等技术，具有氟泵空调冷量大型化、机组全预制化、无长连管、无管网及无室内末端等特点，可不占用室内空间，整体易维护。空调搭载智能化控制系统，根据机房负载率和室外环境温度变化，实现氟泵自然冷、双擎混合、压缩机制冷三种模式智能切换。

21) 流场优化通风冷却技术

该技术通过叶轮流场优化、电机效率提升、智能调整转速等技术，在宽载荷、宽转速范围内，实现流场整体优化和电机速度可控。

22) 智能变频双循环氟泵空调技术

该技术采用智能变频双循环设计，仅在室外温度较高时，采用压缩机对制冷剂进行压缩循环换热，降低空调能耗。在室外温度较低时，利用制冷剂泵（氟泵）对制冷剂进行室外循环换热。

23) 通信基站自驱型回路热管散热技术

该技术包含散热系统、智能控制系统、空调系统。散热系统在基站室内外小温差驱动下利用室外自然冷源降低室内温度；智能控制系统依托机器学习技术及自适应控制算法，可实现散热系统与原有空调联动运行和平滑切换。

24) 智能双循环（氟泵）多联模块化机房空调技术

该技术采用氟泵双环路技术及室外机集成技术，系统根据冷负荷总体需求，由室外主机模块集中制冷，压缩机循环和氟泵组件各设置一套独立的控制器，控制总制冷量，通过电子膨胀阀及控制器，精确控制制冷剂流量，经第一环管和第二环管，将制冷剂按需分配至多个室内制冷末端，保证空调系统多场景适配性。

25) 基于低阻无耗材净化系统的新风自然冷却节能技术

该技术充分利用自然冷源，减少空调使用时间，降低通信机房的冷却能耗。使用低阻、无耗材的空气洁净系统，直接利用自然冷源，保证机房室内的空气洁净度，空气阻力更小、后期运维成本低。

26) 智能化能碳综合管控技术

该技术运用大规模采控技术对场景中温场传感器、能耗计量设备、制冷设备等进行数据采集和调控，运用气流组织优化技术对现场环境进行综合整治，提高温场交换效率；定制化配置蒸发冷空调，氟泵空调进行老旧设备改造或替换，支撑远程采控；通过人工智能调控制冷设备运行，协同运用光伏、储能等，实现一体化节能降碳管理能力。智慧能碳管控平台以大数据、数字孪生等技术为支撑，实现对能量流、碳足迹等信息的采集监控、智能分析，支撑运营管理、事件预警、辅助决策。

27) 基于运维策略模型的空调精准调控技术

该技术通过机架实时功率、冷通道压差与温度等信息，调入通信机房节能运维策略模型，按照模型专家逻辑与边界条件自动生成动态优化控制策略，调整开度、频率等关键控制参数，对空调系统的风量和冷量进行合理控制，实现贴合 IT 设备负载的整体动态调优。

3.4.2 《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》（2023版）发布

2024年3月，在广州召开的“2024数据中心冷却高峰论坛（大湾区）”会议上，中国制冷学会数据中心冷却工作组发布《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》（2023版）^[3]，该系列报告已连续8年发布。《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》（2023版）包括了数据中心发展进展、中小型数据中心冷却系统末端气流组织问题分析与优化、中小型数据中心冷却系统节能诊断与改造方案、数据中心冷却系统运维技术研究进展、中小型数据中心冷却系统优化案例研究进展等主要内容。在总结国内外数据中心冷却技术、标准及应用发展状况的

基础上，重点针对中小型数据中心冷却系统，从室内末端气流组织、冷却系统节能诊断与改造、冷却系统运维等几个环节进行论述，并给出了多个节能改造案例供参考。

3.4.3 中国制冷展“数据中心冷却低碳技术”专题研讨会召开

2024年4月，在北京举办的中国制冷展期间，中讯邮电咨询设计院有限公司李红霞教授级高工和华中科技大学邵双全教授组织召开“数据中心冷却低碳技术”专题研讨会。会议主要报告人及报告包括华中科技大学教授邵双全的“数据中心低碳冷却技术研究进展”、江森自控日立空调集团中国区解决方案业务发展总监任宇宙的“数据中心传热路径及技术措施可行性分析”、珠海格力电器股份有限公司件数环境与节能研究院院长王升的“低碳数据中心环控技术研究与应用”、海尔智慧楼宇数据中心行业推广陈树栋的“高校冷却技术路径与时间——无油悬浮”、澳蓝（福建）实业有限公司总工程师何华明的“数据中心蒸发冷却关键技术开发及典型应用”、威乐（中国）水泵系统有限公司高级技术支持工程师罗敏华的“数据中心应用场景中的高效水泵解决方案”、丹佛斯（中国）投资有限公司系统技术高级经理张乐平的“丹佛斯低PUE数据中心综合应用方案”、青岛海信日立营销有限公司行业推进技术总监（水机）李彩霞的“集成智慧冷站中数据中心的应用”等。报告内容包括数据中心冷却系统的传热路径、水泵/压缩机等核心部件、冷水机组、蒸发冷却、集成冷站到整体解决方案，全景展示了数据中心冷却系统各个环节的最新低碳节能技术与产品。

3.4.4 国家标准《数据中心和通信机房用空气调节机组》发布

2024年10月，由合肥通用机电产品检测院有限公司等单位起草的国家标准《数据中心和通信机房用空气调节机组》（GB/T 19413—2024）^[4]发布，并

将于2025年5月开始实施。该标准重点针对数据中心和通信机房用空气调节机组的新技术、新方式完善了术语定义，比如“自然冷却”“压缩机制冷型机房空调”“复合制冷型机房空调”“冷冻水型机房空调”“回路热管”等；并更新了能效要求及相应的测试工况。为相关空调产品的性能提升提供了指导和具体要求。

3.4.5 总结与展望

数据中心是支撑国家经济发展的重要基础实施，保障了人工智能、大数据、工业互联网等新型产业的高速发展所必需的数据资源和算力资源，其市场规模还将保持快速增长，功率密度的需求也不断增高。

冷却系统是数据中心高效稳定运行的保障，在高能耗、高碳排放、高功率密度的背景下，在传统风冷数据中心室内末端、水泵、冷水机组、蒸发冷却与集成冷站在不断改进以提升数据中心整体能效的同时，液冷技术也取得了突破性的增长，大幅度提升了数据中心能效。

高效低成本的蓄冷技术在提升数据中心可靠性的同时也提高了数据中心消纳绿色可再生能源的能力；余热回收利用更是突破数据中心能效瓶颈、建立智慧能源管理新范式，形成“产消型”数据中心的關鍵。以上两点是实现绿色数据中心的重要途径。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告（2024年）. 2024年8月
- [2] 中华人民共和国工业与信息化部. 国家工业和信息化领域节能降碳技术装备推荐目录（2024）. 2024年5月.
- [3] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告（2023年）. 2024年3月
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB/T19413—2024：数据中心和通信机房用空气调节机组.

3.5 储热（冷）技术研究及应用进展

吴玉庭¹ 李传¹ 杨焘² 肖鑫³

（1 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室，国家能源用户侧储能创新研发中心；2 北京理工大学机械与车辆学院；3 东华大学环境科学与工程学院）

储热（冷）就是利用固体、液体或者相变储热（冷）材料作为储热（冷）介质，通过各种能量与热能的相互转化，实现能量的储存和管理。储热（冷）介质吸收辐射能、电能或其他载体的热量蓄存于介质内部，环境温度低于储热（冷）介质温度或者取热载体温度低于储热介质温度时储热介质热量即可释放到环境或取热载体。全社会能耗中以热能形式使用的能源占全社会能耗的51%，储热/冷首先能够用于使用建筑供暖供冷、工业供热（冷）/供汽，首先能够满足全社会51%的能耗需求。

2024年，我国学者在储热储冷技术领域持续取得重要进展，涵盖材料制备及性能调控、装置设计与优化、系统集成及工程应用等多个方面。热能储存的研究重点仍然围绕熔盐储热、相变储热和热化学储热技术展开，并在材料稳定性、热循环寿命及大规模应用方面取得新突破。冷能储存方面，冰/冰浆蓄冷与相变储冷技术的研究进一步深化，聚焦于储冷材料的导热性能优化、高效换热结构设计、系统能效提升及低碳应用拓展等关键问题。

3.5.1 熔盐储热

熔盐一般需把几种不同的无机盐混合在一起形成共晶混合熔盐，可降低熔点，提高分解温度。混合熔盐具有液体温度范围大（是水的3~5倍）储能密度高、成本低、使用温度高、传热性能好和黏度小的优点^[1]。熔盐储热系统一般采用双罐熔盐液体显热储热系统进行储放热，如图3.5-1所示。与固体储热和相变储热相比，双罐熔盐储热具有储/释热换热器进出口参数恒定，可精准调控熔盐的储/释热速率，储/释热换热器成本低的优点，目前已在30余座太阳能热发电系统（总装机容量达到了350万千瓦，储热容量达到了100GWh）中得到了大容量的配备和长期运行，最长的已有18年的成功运行经验，充分证明熔盐双罐储热是一种低成本大容量长寿命的长时储

能技术。

1) 熔盐材料的进展与趋势

提高熔盐储热密度是熔盐储热的发展方向，熔盐储热属于显热储热，因此提高熔盐储热密度的途径包括提高熔盐储热温差和提高熔盐比热，如图3.5-2所示。降低熔盐最低使用温度可最大限度吸收热源的热量以及满足熔盐储热耦合能源系统动力循环工质的温度下限要求。低熔点还可以降低熔盐储热系统的冻堵风险和防冻堵代价，提高熔盐储热系统的可靠性。熔盐腐蚀性大会导致熔盐储罐和熔盐换热设备使用昂贵的耐腐蚀金属，从而大幅提高了熔盐储热成本。因此研发低熔点、高分解温度、宽液体温度域低腐蚀的混合熔盐配方是熔盐储热材料的研究发展方向。

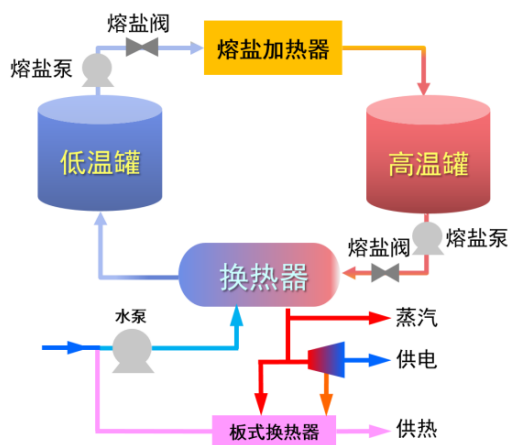


图3.5-1 熔盐双罐显热储热系统的原理及构成



图3.5-2 熔盐储热密度提高的途径

目前熔盐储热均采用二元硝酸盐（太阳盐），存在熔点高达220℃、易冻堵管路、最高使用温度570℃以内、储热温差小，储热密度低的缺陷。少数熔盐储热采用熔点142℃的三元硝酸盐（Hitec）盐，但存在分解温度低（高于450℃，亚硝酸盐就开始被氧化），储热密度低的缺陷，如表3.5-1所示。为了降低熔盐储热系统冻堵的风险，近年来国内外学者一直在进行低熔点熔盐的研发，特别是北京工业大学先后开发出了低熔点二元盐、低熔点三元盐和低熔点四元盐，混合熔盐的熔点降为90~140℃左右，分解温度在560~630℃之间，熔盐的长期最低使用温度降到150~200℃，最高使用温度在500~600℃，大幅提高了储热温差和储热密度，从而显著降低了储热材料和储热系统的成本^[2-4]。上述混合熔盐配方都经过了长期的恒高温和高低温热冲击实验的验证，并已在大容量熔盐储热工程中得到了应用。近年来，随着超临界CO₂发电技术的提出，对能在600~700℃下使用的高温熔盐提出了迫切的要求，美国能源部通过Coal FIRST initiative 计划、DAYS 计划和第三代太阳能热发电计划投入经费8451 万美元支持了高温氯化盐研发，我国国家重点研发计划也支持了氯化盐的研发，但氯化盐存在熔点高达400℃，腐蚀性大的技术瓶颈。国内外也曾开发了高温混合碳酸盐，但配方中都含有贵金属锂盐，存在成本高、熔点高达400℃和黏度大的缺陷。北京工业大

学近年来采用阴离子混合法，成功配制了熔点在120~300℃之间，分解温度高达650~740℃的系列低熔点宽液体温域的高温低腐蚀低成本混合熔盐，并在熔盐传热储热工程中得到了应用^[5-7]。北京工业大学研制的低熔点系列宽温域混合熔盐跟目前国内外常用的太阳盐、Hitec盐性能对比如表3.5-2所示。

近年来，国内外学者开展了熔盐纳米流体的研究，分别在太阳盐、HITEC盐、低熔点二元盐、低熔点四元盐、碳酸盐等混合熔盐中添加SiO₂等纳米颗粒，可以显著提高混合熔盐的比热和储热密度^[8-10]。北京工业大学还进行了低熔点二元盐、低熔点四元盐纳米流体对流传热的研究，发现添加纳米颗粒的熔盐纳米流体对流传热系数比混合熔盐提高40%以上^[11-12]。

表3.5-1 现有熔盐配方的参数

熔盐种类	熔点（℃）	分解温度（℃）	腐蚀性（mm/y）	价格（元/吨）
太阳盐	220	585	0.0086 (550℃)	6000
HITEC	142	535	0.019 (530℃)	6600
碳酸盐	390	850	0.157 (600℃)	100000
氯化盐	380	≥800	3.9 (500℃)	2000

表3.5-2 北京工业大学研发与国内外现用混合熔盐性能对比

盐种类	熔点(℃)	分解温度(℃)	蓄热密度(kWh/t)	蓄热材料成本元/kWh	蓄热系统成本元/kWh
Solar Salt	220	584	110	41~59	120~200
Hitec salt	142	535	113	44~62	122~202
LMPS I	89	612	190	63~578	115~750
LMPS II	94	625	199	25~34	68~113
LMPS III	117	576	157	28~41	83~139
LMPS IV	98	582	167	30~38	80~122
LCBS I	216	576	141	20~29	78~140
HLMPS I	323	800	249	80~923	123~900
HLMPS II	132	734	208	22~32	65~110
HLMPS III	302	652	110	23~38	66~116

在熔盐材料腐蚀特性方面,北京工业大学先后开展了太阳盐、低熔点二元盐、低熔点三元盐、低熔点四元盐、低熔点高温熔盐等混合熔盐及其纳米流体对碳钢和不锈钢的静态、动态和应力腐蚀机理的研究^[13-15]。中山大学对氯化熔盐中铬的价态对镍基合金的腐蚀性进行研究^[16-17]。Guo等^[18]研发了碱金属和碱土金属的氯化物熔盐体系,实现了700℃下氯化物熔盐对316不锈钢的腐蚀速率低于205 μm/年。

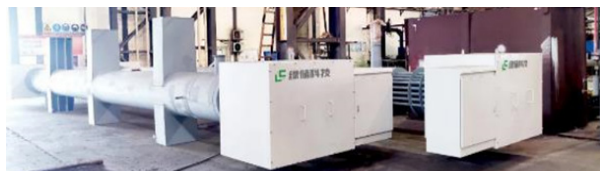
2) 熔盐储能部件的进展与趋势

熔盐换热器的作用是利用熔盐从高温热源吸收热量或将熔盐携带的热量传递给用热户,是熔盐储热系统的关键部件之一。北京工业大学吴玉庭、鹿院卫和张灿灿等对熔盐及其纳米流体在光滑管和强化传热管内的受迫对流传热、在熔盐罐内、浸没管束中的自然对流、对非均匀加热的管内熔盐混合对流传热、表面射流冲击传热等进行了系统的实验和数值模拟研究,获得了熔盐对流传热的通用计算关联式^[19-25];北京工业大学吴玉庭、张灿灿、鹿院卫、苑中显等还研制了熔盐-水/水蒸汽/压缩空气/二氧化碳/有机工质等系列换热器样机,并进行了实验和数值模拟研究^[26-27]。华北电力大学、北京工业大学和西安交通大学等对印刷电路板熔盐-超临界二氧化碳换热器进行了数值模拟和试验研究^[28-29]。Yao等^[30]对一种枕头板式换热器内熔盐与超临界二氧化碳的换热性能进行研究;北京工业大学鹿院卫等研发出了浸没盘管的单罐熔盐传热装置,并在呼和浩特进行了示范^[31]。

熔盐储罐作为储热系统中的关键设备,储罐设备本体不仅决定了系统的蓄热能力,而且对系统的安全运行也有重要影响。韩伟等对太阳能热发电站熔盐储罐首次充盐策略进行了研究^[32];张晓明、吴玉庭等开展了大型熔盐储罐及其地基内温度应力分布的数值模拟和实验研究^[33]。华东理工大学曾鑫、蔡君等针对某按常规设计的100 MW塔式光热电站高温熔盐储罐,以储罐泄漏事故主要风险源作为设计条件,通过Abaqus软件进行有限元分析,结合高温结构强度设计技术对储罐进行风险指引型设计优化,采用瞬态热-机械应力分析结果,对储罐进行棘轮和蠕变-疲劳失效评估^[34]。中建三局胡卫兵等依托迪拜700MW光热与250MW光伏混合电站项目进行了

熔盐罐基础施工研究,研究了一种陶粒面层预铺钢板以小型机械夯实的回填压实方法,解决了熔盐罐陶粒回填易破坏和压实施工难题,并采用动态和静态两种荷载平板进行试验检测^[35]。崔凯平等^[36]通过数值模拟证明了利用再循环管道和分配环进行扰动可以有效改善熔盐储罐热分层现象,用以减少罐体长时间停用导致的温差过大问题,避免因温差应力导致的设备故障隐患。中电建西北勘测设计研究院贺志宝等^[37]以实际熔盐储热项目的熔盐储罐内布液环为研究对象,采用分层液位计算方案,对储罐的布液系统进行数值模拟,探究了罐体布液环结构在不同液位条件下,罐内熔盐的混合情况和出口液体喷射高度。王锐^[38]对比分析了光纤测温与常规点式温度监测在双壁熔盐储罐表面温度及泄漏监测上的技术优劣,研究结果表明光纤温度及泄露检测具有实时在线、覆盖面广、精确测量、安装方便、寿命长、经济价值高等优点。赵辉等^[39]提出利用电极片检测熔盐储罐泄漏的方法并实验研究其可行性。

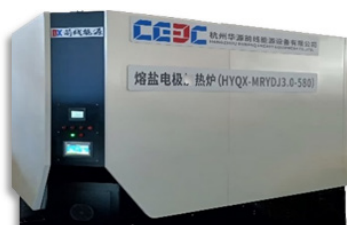
近年来,随着熔盐储热供热和火电厂熔盐储热调峰项目的实施,对大容量熔盐电加热器提出了迫切的需求。目前市场上380V熔盐电加热器存在电流大、线损大、铜排用量大、成本高的缺陷,无法满足市场的需求。北京工业大学吴玉庭、鹿院卫、张灿灿等开展了电阻、电极及电磁感应高压熔盐电加热器的关键技术攻关、理论研发、样机研制与实验等^[40-41]。浙江可胜有限公司成功研发了电阻式6.3kVAC熔盐电加热器,产品已通过功能、性能及长期可靠性测试,并已小规模应用。华源前线成功研发以高温熔盐为介质的高压电源(6.6kV、10kV)大容量(单机功率可达50MW以上)高温(最高可达800℃)电极式熔盐加热炉。西安慧金科技有限公司成功研发了6kV电磁感应熔盐电加热器,并在熔盐储能供暖项目中进行了成功示范。法国VULCANIC公司研发出了中电压6600VAC电加热器,单台电加热器功率从5MW到25MW。



(a) 浙江绿储6kV/20MW高压熔盐电阻加热器



(b) 西安慧金高电压电磁感应熔盐加热器



(c) 杭州华源前线10kV10MW熔盐电极加热炉

图3.5-3 国内研制的高电压熔盐电加热器

3) 熔盐储能耦合能源系统的进展与趋势

华北电力大学韩瑞等^[42]比较了直接电加热和利用热泵循环加热熔盐的两种不同电转热形式的储能系统变工况效率，结果表明采用热泵的储能系统额定工况的往返效率可达61.46%，相比于直接电加热的系统往返效率提高了45.16%。哈尔滨锅炉厂赫广迅等^[43]基于300MW等级亚临界参数燃煤电站向储能电站转型的应用场景，搭建了超高温热泵及熔盐储换热系统，本系统在550℃制热温度下获得了1.2623的制热效率，“电-热-电”系统循环转化效率可达到57.162%。北京工业大学刘金恺等^[44]针对600MW燃煤机组，提出了8种熔盐储热辅助调峰系统设计方案，并对比分析了各方案的调峰能力和热力性能。结果表明：储热时发电机输出电能直接加热熔盐，释热时熔盐加热旁路给水方案可获得最大调峰容量，调峰深度可达17.83%；储热时中压缸排汽抽汽加热熔盐，释热时熔盐加热旁路给水的方案可获得最高系统效率和经济性，系统热效率为40.95%。华北电力大学彭家辉等^[45]针对某亚临界300MW燃煤机组，进行熔盐储能改造，提出了6种储热策略和2种放热策略，并进行了技术经济比较，结果表明抽再热蒸汽储热策略调峰效果最好，调峰深度能到58.9%。放热时，加热给水产生蒸汽做功的发电增量最大，能达到额定发电量的11.3%。河南省电力勘测设计院周信华^[46]针对2×660MW燃煤供热发电机组，提出了抽取主蒸汽和再热蒸汽加热熔盐储热供汽调峰，实现了

15%的深度调峰，同时满足了1400MW的供热负荷及200t/h的工业供汽需求，项目投资回收期5.9年，具有较好的经济性。西安热工研究院宋晓辉等^[47]针对670MW电厂提出了4种抽汽耦合电加热熔盐储热调峰系统方案，并对比分析了各种方案的热力性能、调峰性能、环保性能及改造难度。结果表明：高温熔盐和低温熔盐储热组合方式有效克服了单种熔盐工作温度受限的问题，能够增强燃煤机组的调峰能力和循环效率；配置电加热器后熔盐能够以目标温度存储于热罐，热电转化效率得到提高，还额外平抑了部分可再生能源的不稳定性。上海电力大学刘亨等^[48]针对300MW燃煤热电联产机组，进行了电加热高温熔盐储热供热调峰系统的分析，结果表明耦合熔盐储热系统后实现了热电解耦，拓宽了调峰运行区间，获得额外收益，大幅提高了运行经济性。西安热工研究院马汀山等^[49]给出了燃煤发电机组电加热熔盐储热调峰系统的设计方法和容量计算方法。西安交通大学苗林等^[50]结合600MW亚临界机组案例，建立了集成电制热熔盐储热的燃煤发电系统模型，对不同释热方案下耦合系统的性能进行了分析，结果表明利用熔盐-水换热器承担部分锅炉热负荷或加热给水可提高系统热力性能，系统的等效往返效率（电-热-电）最高为49.36%。景德镇陶瓷大学汤永智等^[51]提出了熔盐储热技术以实现间歇式窑炉高温烟气的回收、储存和错时空利用，并对高温烟气熔盐储热特性以及烟气换热管布局、烟气流速和温度对熔盐储热速率的影响进行数值研究。赛迪环工环保工程技术公司吴娅等^[52]对熔盐储热在钢铁发电系统的应用场景、规划设计评估思路以及未来研究方向进行了总结归纳。哈尔滨锅炉厂郑麒麟等^[53]设计了一种基于三元熔盐储热的非补燃式压缩空气储能系统方案，充分利用了压缩热，提高了系统整体效率。

4) 熔盐储热示范工程的进展

2022年12月15日，由江苏国信靖江发电有限公司联合西安热工研究院自主研发，全球首个与煤电耦合的熔盐储热调频调峰及安全供汽技术示范工程投运；2023年5月15日，国内首套66万千瓦煤电机组耦合蒸汽熔盐储热调峰调频示范项目在华能魏家峁煤电公司成功投运，使用北京工业大学研发的260吨

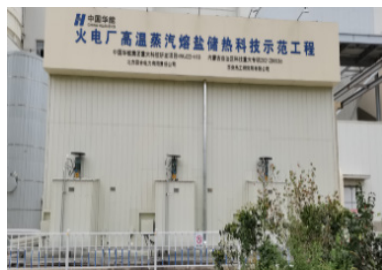
低熔点四元熔盐，储热容量为80兆瓦时，机组最低可调峰至20%额定负荷，负荷响应速率可增加每分钟0.5%额定负荷以上，同步大幅提升机组的调频能力。2024年6月30日，全国首个“汽电”联合加热的熔盐储能项目——华能山东华源热电厂熔盐储能辅助煤电机组调频调峰项目建成投运，该项目使用锅炉再热蒸汽作为汽源，使用高厂变作为电源，对熔盐进行加热储能，再利用换热系统进行放热，实现工业供汽，最大充/放能功率可达5万千瓦，储能容量10万千瓦时，蒸发量75吨/小时。该储能系统可拓宽火电机组灵活调节容量约8.5万千瓦。2024年9月20日，由华能山东公司与西安热工院联合研发建设的全国首个火电机组调峰调频模块化熔盐储能项目在德州电厂成功商运。项目总储热量为180MWh，共建设12个储热单元，核心系统占地面积约600平方米，运行可分为直供汽和最大调峰运行两种模式，可实现 $50\text{MW} \times 4\text{h}$ 的调峰目标。2024年10月，全国首个百万机组熔盐储热示范项目在华能海门电厂成功投运，熔盐电加热功率高达60兆瓦，储能能力达到120兆瓦时，每小时可产生90吨的蒸汽。2024年12月28日，国能河北公司龙山电厂“抽汽蓄能”熔盐储热

灵活性调峰科技示范项目正式开始试运行。本项目是全国首个采用多汽源抽汽-配汽调控技术，同时抽取火电机组主、再热蒸汽进行熔盐储热的新型储能项目，于2024年3月份开工，储热容量730MWh，对外供汽参数为压力3.35~4.35Mpa，温度320~325℃，流量188t/h。项目建成后，机组调峰能力将在现有基础上增加100MW，至机组额定负荷9%，时长不低于4小时，顶峰能力增加47MW，时长不低于6小时。目前，宿州电厂、华润电力（菏泽）等28个熔盐储热火电调峰项目正在建设或推进中。

2016年在河北建成一个谷电加热熔盐储热供暖示范工程，供暖建筑面积75000平方米，使用北京工业大学研制的低熔点二元熔盐450吨，蓄热容量37MWh，电加热功率6.3MW。2017年在河北建成另一个谷电加热熔盐储热供暖示范工程，是一个车间、办公建筑和宿舍楼混合的建筑，折合标准建筑面积30000平米，使用低熔点二元熔盐200吨，蓄热容量20MWh，电加热功率2.8MW。目前在河北建成两个熔盐储热供暖的示范工程，已经成功运行几个采暖季。2021年，西子航空公司建成一个屋顶光伏电加热熔盐储热供蒸汽的示范工程，该项目熔盐储



江苏国信靖江电厂电加热熔盐储热供蒸汽调峰示范工程



华能北方魏家峁电厂抽汽加热熔盐储热调峰示范工程



华能华源电厂电汽耦合加热熔盐储热调峰调频示范工程



华能德州电厂电加热模块化熔盐储能调峰调频示范工程



华能海门电厂百万机组熔盐储热调峰示范项目



龙山电厂抽汽加热熔盐储热供汽调峰示范工程

图3.5-4 已建成投运的火电厂熔盐储热调峰示范项目



> 供暖面积7.5万 m^2 ，2016年11月建成运行
 > 450 t低熔点熔盐
 > 热（冷）盐罐： $\Phi 8 \times 4.5\text{m}$
 > 蓄热容量：37 MWh
 > 电加热器功率：6343kW
 > 熔盐-蒸汽发生器功率：2642kW

河北谷电加热熔盐储热供暖示范项目（7.5万平米，500吨熔盐）



> 200 tons 低熔点熔盐
 > 热（冷）盐罐： $\Phi 3.4 \times 5\text{m}$
 > 蓄热容量：20MWh
 > 电加热器：2800kW

临城谷电加热熔盐储热供暖示范项目（2万平米，200吨熔盐）



西子航空屋顶光伏电加热熔盐储热供蒸汽的示范工程



绍兴绿电熔盐储能示范项目



辽河油田电加热熔盐储热供汽示范工程



建龙实业高炉煤气加热熔盐储热调峰示范项目

图3.5-5 已建成投运的电加热熔盐储热供热供汽示范项目

热量28MWh，年供蒸汽10000吨以上。2023年12月，世界首座电热熔盐储能注汽试验站在中国石油辽河油田竣工投产。该项目储热规模15MW，年产蒸汽4.8万吨。桐乡聚能启泰储能科技有限公司的混合储能多能耦合智慧低碳供能示范项目于2024年启动建设，预计2025年投运。该项目拟新建一套熔盐储能系统，有效存储热量达343MWh，并配备1 $\times$ 5MW发电机及相应辅助设施。在谷电阶段，通过熔盐电加热系统进行储能，预计用电量约为70MW；而到峰电阶段，熔盐换热系统将产生高温高压蒸汽，驱动汽轮机发电。项目投产后，预计每年将消纳谷电362亿度，对外供应蒸汽4万吨，同时上网供电2245万千瓦时。2024年5月，由山西建龙实业有限公司与思安新能源股份有限公司合作开发的5MW熔盐储能项目成功实现并汽发电。项目核心是一套燃烧高炉煤气加热熔盐进行调峰和消纳新能源光伏发电系统，其设计使用寿命超过20年，储热量79.5MWh，储热时长6小时，全生命周期内可实现碳减排约18万吨、预估收集短时煤气放散约5000万 m^3 。

3.5.2 相变储热

相变储热是利用材料发生相变过程释放/吸收

潜热来进行热能的储存和释放，具有储热密度高、储放热过程中温度稳定及安全性好等优点受到国内外学术界和工业界的广泛关注。然而，相变材料存在的固有缺陷如导热系数低、液相泄露、过冷及与封装材料不兼容等，严重制约和影响相变储热技术的大规模应用，所以目前对高性能相变储热材料及装置的研发是科研人员的主要工作。根据相变材料的成分，可将其分为两类：有机相变材料 and 无机相变材料。有机相变材料大多为中低温储热材料，主要有醇类、石蜡、脂肪酸、芳香烃类及高分子聚合物等，相变储热约150~240J/g。有机类储热材料具有单位质量储热密度高、循环稳定性好、固态成型好、化学性质稳定、过冷度小、腐蚀性低、热稳定性较好、不存在相分离与过冷、成本较低等优点；但是其单位体积储热密度低、相变点较低、导热系数小、密度较小且部分材料存在一定的毒性，不适于高温场合使用。无机类相变材料包括结晶水合盐、熔融盐和金属合金等。无机盐是中高温领域的主要储热材料，具有潜热密度大、温度涵盖范围广、成本低、热稳定性好、易于控制和管理、饱和蒸汽压低等优点，常用的相变无机盐有碳酸盐、氯化盐、硝酸盐、氟化盐，其中硝酸盐相较于其他类

熔融盐，具有熔点低、价格低、腐蚀性小等优点，已广泛应用。

1) 有机相变储热材料的研发进展

国内外学者2024年对有机相变材料的研究主要集中在配方体系优选和性能提升上面。贵州大学Lu等^[54]设计并制备了MXene/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}@\text{SiO}_2$ 复合相变微胶囊，所制备的微胶囊具有较明显的储热和放热特性，潜热达到169.62 J/g，且水合盐被包覆在二氧化硅壳层中后，水合盐的过冷度从14.2℃降低到10.1℃。天津大学Jia等^[55]为解决三水醋酸钠（SAT）无机水合盐相变材料在长期循环下热性能退化的问题，提出了一种以十二水磷酸氢二钠（DHPD）为成核剂、黄原胶（XG）为增稠剂、亲水改性膨胀石墨（MEG）为高导热添加剂的复合相变材料。结果表明，在SAT相变材料中加入1 wt%的DHPD、2 wt%的XG和8 wt%的MEG可以有效地将过冷度从10.6℃降低到0.3℃，导热系数提高了71%，且循环稳定性提高了近50%。上海工业大学Lei等^[56]以多孔膨胀石墨为载体材料，正二十烷为稳定剂，三水醋酸钠为相变储能材料，采用熔融共混法制备了新型相变储能材料。当膨胀石墨含量为3.3 wt%时，相变焓为266.54 J/g，光热转换效率为91.14%，过冷度为2.2℃，在90℃时几乎没有泄漏。内蒙古工业大学Yan等^[57]以硬脂酸-棕榈酸二元混合物为相变材料，以高比表面积的六方氮化硼为支撑结构，以纳米 TiO_2 和CuO为导热增强剂，通过熔融共混法制备了一种具有高潜热、高热导率和良好热稳定性的复合相变材料。辽宁石油化工大学Liu等^[58]采用微波辐射改性膨润土稳定的癸酸-月桂酸以及癸酸-棕榈酸作为内、外蓄热材料的主要成分，提出了一种新型双层结构定形蓄热材料。辽宁石油化工大学Wang等^[59]以膨胀蛭石为基质，癸酸-月桂酸为吸附剂，采用真空浸渍法制备了一种新型复合相变材料，所设计的复合材料具有60%的癸酸-月桂酸负载量，并且在18.42℃下熔化，潜热为66.08 J/g。英国纽卡斯尔诺森比亚大学Elisangela等^[60]研究两种粒度（20和200 μm ）的EG对三种商用相变材料的影响。结果表明，当200 μm EG含量为6 wt%时，复合相变材料的导热系数提高156%。石蜡（RT64HC）中20 μm 的颗粒和脂肪酸（RT62HC和OM65）中200 μm 的颗粒的固体导热

率结果更好。内蒙古科技大学Tian等^[61]以1-十八醇（OD）为基体材料，引入膨胀石墨（EG）和金刚石（Diamond）作为导热增强剂，成功制备了一系列高导热、高潜热的OD/EG/Diamond复合材料。研究表明，OD/EG 7/Diamond复合材料的热导率比纯OD提高了900.67%，储热率和放热率分别提高了135.4%和84.04%。200次热循环后，OD/EG7/Diamond3相变潜热增加1.29%~2.85%，达到216.97 J/g~227.83 J/g，表现出良好的热循环稳定性。西安交通大学Wang等^[62]开发了甘蔗渣生物质衍生碳（BBC）材料，是一种易于获得、成本效益高和环境友好的支撑材料。采用高温炭化法制备的蔗渣具有高度取向和堆积的层状结构，不仅大大降低了成本，而且使水合盐的储存更容易。采用直接真空浸渍技术成功制备了SSD-SC/BBC相变复合材料，与十水硫酸钠相比，具有更高的储热容量（161.5 J/g），更高的热导率（1.79 W/(m·K)）、更高的热可靠性和更强的太阳能-热能转换能力。

2) 无机相变储热材料的研发进展

对无机相变材料的研究，国内外学者除了对材料配方体系进行优选外，还对材料结构进行了定向优化设计。中国矿业大学Zhang等^[63]以NaCl-KCl二元盐为相变材料，提出了内层为膨胀石墨、外层为陶瓷的双层包覆策略，制备了具有良好储热性能的氯化物相变微胶囊。采用原位熔融法，直接以NaCl和KCl的混合物为原料，在烧结过程中将其转化为胶囊内的共晶二元盐，简化了双壳共晶盐大胶囊的制备工艺。吉林建筑大学Yu等^[64]将 Na_2CO_3 -NaCl与莫来石陶瓷粉混合，并加入纳米SiC颗粒以提高材料的导热性能，复合材料和添加SiC样品的熔化潜热分别为266.97 J/g和217.63 J/g，添加20%SiC的样品的热导率为1.83 W/(m·K)，比PCM的热导率增加了8.7倍。齐鲁工业大学Wang等^[65]以黄金尾矿为基体材料，以太阳能盐为相变材料，采用混合烧结法制备了一种新型的中高温复合相变储能材料。该材料能够保留高达45 wt%的太阳盐而没有泄漏，最大抗压强度为36.66 MPa，且在100次热循环后具有良好的循环可靠性，这种新型相变材料的机械和热性能使其成为废热回收的理想选择。南京师范大学Jiang等^[66]以粉煤灰为骨架材料， Na_2SO_4 - K_2SO_4 二元硫酸盐为相变储

热材料，成功合成了高温粉煤灰基相变储热材料，CPCM 60-A表现出最高的相变潜热为60.43 J/g和导热系数为0.61 W/(m·K)。北京建筑大学Xiong等^[67]以钢渣和碳化物渣为骨架材料，NaNO₃为相变材料，采用冷压热烧结法制备了7种不同质量分数的定形相变材料。结果表明，当钢渣、碳化物渣和NaNO₃的质量比为2.5:2.5:5时，其机械强度为131.2MPa，在100℃~400℃温度范围内的最佳储热密度为371.1 J/g，且经过1307次加热和冷却循环后，其最大热导率为1.263 W/(m·K)。北京建筑大学Xiong等^[68]以固体废弃物半焦炭为骨架材料，Na₂CO₃为相变材料，半焦炭与Na₂CO₃粉末的最佳质量比被确定为52.5:47.5，该样品表现出961.58 J/g的热能储存密度和1.306 W/(m·K)的最大热导率，显示出23.57MPa的机械强度，且其生产的CO₂排放显著低。南京工业大学Jiang等^[69]将改性钢渣用于制备用于高温热能储存(>500℃)的形状稳定型氯化物盐基相变材料，研究了CFA对钢渣的物相组成的改性作用，添加30 wt%CFA改性钢渣为最佳骨架。所制备的含盐量为50 wt%复合材料的相变温度为653℃，相变潜热高达139 J/g，导热系数达到1.46W/(m·K)，比纯盐提高了180%，复合材料的抗压强度可达119 MPa。武汉科技大学Cai等^[70]采用发泡法制备了氧化铝泡沫陶瓷(AFC)，并以AFC为骨架材料，采用熔体渗透法制备了AFC/盐复合相变材料。研究发现，AFC与Na₂SO₄具有较好的润湿性，形成嵌合结构，具有较好的结合力和键合强度，不易发生熔盐渗。华北电力Liu等^[71]以太阳能盐为相变材料，以新型环保型钢渣-煤矸石多孔陶瓷为骨架材料，采用直接浸渍法制备了复合相变储热材料。结果表明，在真空浸渗时间为90 min时，浸渗效率可达96.1~98.0%，所制备的复合材料显示出146.9 MPa的抗压强度，具有高达692.6 kJ/kg的能量存储密度以及3.16 W/(m·K)的热导系数。北京科技大学Zhang等^[72]通过高温预处理得到了稳定化的成型钢渣粉，并确定了最佳的高温预处理温度为850℃。当预处理后的钢渣掺量为60 wt%，烧结温度为1200℃时，钢渣蓄热材料的抗压强度稳定在80 MPa左右，热导率为1.13 W/(m·K)，在50~1000℃范围内的热密度为1222.168 J/g，具有良好的热循环稳定性。此外，样品的成本仅为0.58美元/千瓦时。北京科技大学Lu等^[73]以固体废弃物

钢渣、粉煤灰和高岭土为原料制备钢渣改性多孔陶瓷(SSMPC)，以石蜡为相变材料，采用自发渗透法制备了石蜡/SSMPC复合相变材料。结果表明，与纯石蜡相比，复合相变材料的导热系数提高了212.1%，过冷度降低了0.45℃，熔融和凝固温度降低了96%。北京科技大学Zhou等^[74]在微尺度下研究了由二元氯化物盐和多孔陶瓷骨架组成的复合相变材料的传热特性。结果表明，多孔SiC骨架的集成可以显著提高二元熔盐NaCl/KCl的热导系数，在1000 K时热导率提高了625.74%，表面电荷改性方法可以有效地改善界面传热的原因可以归因于额外的导热路径和大量的颗粒参与界面传热。英国诺丁汉大学Zhang等^[75]以蛭石为基体，研究了不同浸渍方法合成蛭石-氯化钙复合材料(VCMs)以及这些方法对VCMs热化学性能的影响。结果表明，真空浸渍是合成热化学复合材料的首选方法。英国伯明翰能源存储中心Benjamin等^[76]研究了一种以亚硝酸钠-硝酸钠为相变材料，氧化镁为骨架材料，膨胀石墨为导热增强剂的新型复合相变材料，其表现出可逆的固-固转变(175℃)和可逆的固-液转变(223℃)，总熔化潜热为120 J/g，在高达350℃的空气中热循环期间具有足够的热稳定性。北京工业大学Li等^[77]采用冷烧结技术，首次证明了通过冷烧结工艺通过氢氧化钠溶液作为烧结添加剂生产盐-硅藻土复合材料的可行性，揭示了盐和粘土的结构形成和致密化机理。结果表明，该复合材料可以在180℃的温度下烧结，在50~600℃的温度范围内，熔融温度约为278℃，储能密度超过650 kJ/kg，抗压强度超过210 MPa，且该复合材料具有优异的机械强度和优异的热循环性能。同时，该团队^[78]还制备了以NaCl-KCl-MgCl₂三元氯化物盐为相变材料、膨胀蛭石为陶瓷骨架、碳化硅为导热增强剂的新型复合相变材料。结果表明，膨胀蛭石可以容纳超过70 wt%的盐和12 wt%的碳化硅，复合材料的相变温度为377℃，潜热为229.3 kJ/kg，热导率为1.66 W/(m·K)，且与纯三元氯化物盐740℃的分解温度相比，该复合物的分解温度提高到800℃。

3) 相变储热装置的性能强化

在相变储热装置层面，国内外学者的研究主要聚焦于装置结构优化设计和性能提升。分别对管

式、板式和填充床式相变储热装置进行了深入研究。分别提出了通过添加强化传热翅片、分散高导热载体和3D增材制造等技术手段来对装置进行强化优化。其中代表性的研究工作包括有：东南大学Shi等^[79]采用数值模拟的方法对无机盐/膨胀石墨填充相变换热器的传热性能进行了研究。提出了“综合评价指数”的概念，用于量化相对于基准相变换热器质量变化的储/放热性能的总体变化。通过正交试验，得出翅片高度对换热性能的贡献最大，而管材的影响较小。上海交通大学Du等^[80]提出了一种将热泵（HP）与相变材料（PCM）相结合的新型高效节能TES系统。所提出的系统表现出高储存容量（约3.29 kWh）、高能量储存密度（约64.5 kWh/m³）和高加热功率（约2.60 kW）。与传统的TES装置相比，能量效率可提高151.6%，运行成本可降低到传统电加热系统的15.1%。青岛大学杨斌等^[81]设计了三种不同的新型翅片结构（三角形、波纹形、方形），选取三种不同偏心程度的翅片管位置（向下偏心10、15、20 mm），然后将最优翅片结构与偏心程度相结合，对上述模型进行模拟。结果表明，将方形翅片与向下偏心15 mm翅片相结合，储热速率相比于原始直翅片提升了28.2%。内蒙古工业大学鲍伟等^[82]将纳米金属颗粒添加至混合有机相变材料，制备了高导热的有机复合相变材料，提出了一种弧形翅片与直翅片组合的结构，针对该翅片结构的储热装置进行了三维数值模拟研究，并基于该模型采用无量纲量拟合了熔化时间与斯蒂芬（Ste）数的关系函数。华北电力大学Zhang等^[83]提出了一个新的参数“偏心面积比”，可以用来评价双管LHS机组的热力性能以及真实的应用中的几何结构优化，并对不同管径比和传热流体入口温度下偏心结构的熔化特性和焓效率进行了数值研究。

4) 相变储热供热技术

制冷领域与储热相关的研究主要以热泵为主，为了实现热泵的稳定高效运行，结合储热的研究是发展趋势。上海交通大学制冷与低温工程研究所王如竹教授ITEWA创新团队^[84]提出了与双效能准两级热泵耦合的中间储热方案，使单一相变储热装置同时实现冬季储热与夏季储冷。采用了适用于全球的储存温度为10.5~22℃的中间相变材料，实现了能源

成本的最佳权衡。与阿肯色州、北京、明尼苏达州和上海的非集成热泵相比，它的年度性能系数增益高达21.99%。与热泵相比，前期资本支出预计将下降15.7%~22.8%。数据中心余热供热是提高数据中心能源利用效率和实现冬季清洁供暖的重要途径。清华大学江亿院士团队^[85]提出了一种适用于数据中心的长距离供热系统，在热源和热汇处设置多级热泵以增大供热管网供回水温差，并使用储热装置保障数据中心和供热系统的安全性，提高数据中心余热利用率。研究指出，建立合理规模的储热装置是作为数据中心余热供热系统不可缺少的环节。太阳能热泵系统与热能储存（TES）装置相结合，通常被认为是一种热管理的有效解决方案。东华大学肖鑫团队针对高寒地区设计了一套干燥藏药的太阳能水源热泵干燥系统^[86-87]。该系统集成了级数为3的梯级潜热储能（CTS）装置，该装置利用火用优化理论得到相变温度，且用于热泵能源侧的热管理。相变材料的热物性参数源于制备的三种以三水合乙酸钠为基材的定型复合相变材料，通过COMSOL数值模拟得到CTS的热响应特性，依靠TRNSYS的动态仿真平台进行系统的模拟分析。系统在集成CTS装置前后结果表明：集成CTS装置后，干燥区域内的平均温度升高7.76℃，平均相对湿度降低8.5%，室内最大昼夜温差和最大昼夜相对湿度分别减小了5.35℃和14.67%；热泵的平均COP达到3.40，较未集成CTS装置的热泵提升了8.9%。CTS装置将日间太阳辐射热量储存并转移至夜间使用的循环模式，有助于提升太阳能热泵系统运行效能和稳定性。

3.5.3 冰蓄冷

冰蓄冷技术是一种高效的储冷技术，近年来在能源管理和节能领域受到广泛关注。其核心原理是利用水冰的相变特性，在低电价时段制冰储存冷量，并在高电价时段或冷负荷高峰期释放冷量，以优化能源利用效率、平衡电网负荷并降低运行成本。随着技术的演进，冰蓄冷系统经历了三个重要的发展阶段：上世纪80年代的冰球制冷方式、90年代兴起的盘管制冰技术，以及2020年后的第三代冰浆蓄冷技术。自1994年我国引进冰蓄冷技术以来，该技术已在全国范围内得到广泛应用，已有数百家单位采用。2010年，我国自主研发的首台板式制冰

蓄冷空调在实际应用中获得权威机构认定,其能效相比传统空调提高40%以上,达到国际领先水平。近些年随着冰浆蓄冷技术研究不断深入,推动了系统性能的进一步提升,并拓展了其在中央空调、食品冷藏、冷链物流以及建筑节能等应用场景下的适应性。Chen等^[88]提出了一种新型独立跨临界泵送热能储存系统,采用冰浆作为冷能储存介质,并对冰浆生成方法及性能进行了系统分析。Yang等^[89]研究了冰浆在大口径管道中的流动特性,对冰堵塞问题进行了定量分析。Yan等^[90]通过超声波辅助动态融冰技术提升蓄冰系统的冷却性能,研究表明超声波可有效提高系统的冷却速率。Lei等^[91]重点分析了不同气候条件下蓄冰系统的适应性,评估了长期气候变化对冰蓄热系统运行能耗的影响。大连理工大学王继红等^[92-93]对冰浆蓄冷系统的优化设计、流动传热特性以及在实际应用中的性能提升进行了大量研究推进了冰浆蓄冷技术的实际应用。上海理工大学武卫东等^[94,95]围绕冰浆湿冷系统在果蔬预冷的冷能储存和利用展开深入研究。Zhang等^[96]采用负压闪蒸法制备了冰浆储冷乳液,并测试其热学性能、力学性能、蓄冷性能及其对荔枝保鲜的应用效果。

中国科学院广州能源研究所自2006年起,在科技部863计划及广东省科技计划项目的支持下,率先在国内开展流态化冰浆蓄冷技术的研发,并建设了多个示范工程,完成了技术验证^[97]。在此基础上,他们进一步提出了多种创新制冰方法,包括过冷法海水制冰^[98]、冰浆机与砖冰机结合制冰^[99]以及动态冰浆无预热制冰^[100]等。此外还开发了一种新型冰源热泵系统^[101],其核心是在蒸发器内采用可控相变技术,使热泵系统能够连续提取水源凝固热,从而克服了传统水源热泵进口水温下限高、显热可用能量密度低等问题。他们还提出了以冰源热泵为核心的跨季节蓄冷技术^[102],通过在寒冷季节回收低成本冷能,并在炎热季节加以利用,实现全年显著降低采暖和制冷的能耗。

中国绿发投资集团吴泽江等^[103]深入考察了国内冰蓄冷应用案例,并对关键技术设备的市场与技术发展进行了系统调研。研究团队建立了冰蓄冷系统的评价指标体系,重点分析了蓄冰密度、融冰率和释冷速率等关键参数的影响因素。通过智能调试

与编程优化,解决了系统运行效率低的问题,有效降低了运行电费,并缩短了投资回收期,进一步推动了冰蓄冷技术在国内的推广与应用。20世纪90年代初,我国开始建造水蓄冷和冰蓄冷空调系统,主要是集中在城市建设和经济发展迅速、同时还有电力紧缺的北京市和东南沿海地区,至今已有建成投入运行和正在施工的工程600多个,分布在4个直辖市和19个省,全国2/3的省市都建造了蓄冷空调系统,蓄冷空调最多的依次是浙江省(67项)、北京市(64项)、江苏省(57项)、广东省(29项)、山东省(28项)和上海市(27项)。国内多个城市已开工建设并运行了大型集中冰蓄冷供冷系统,极大提升了能源利用效率。上海耀雪冰雪世界项目在地下室设置了容量为27000kWh的融冰蓄冰槽,利用低谷蓄冷高峰释冷的策略,有效减少夏季电网负荷,提高能源利用效率。珠海横琴冷站项目是全球规模最大的区域能源项目之一,现已采用30余台格力永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组,总冷量高达70000RT,系统在-6℃出水制冰工况下,COP达4.59,空调工况COP达6.6,IPLV达11.17,全工况综合能效提升40%以上,节能效果显著。济南CBD已建成集中冰蓄冷供冷系统,覆盖约21万平方米供冷面积;深圳前海规划建设了10个冰蓄冷供冷站和90公里市政供冷管网,预计为1500万平方米的建筑提供供冷服务,目前已有3个冷站投入运行,覆盖216万平方米建筑面积。海南三亚海棠湾区的集中供冷项目具备130万平方米的供冷能力。此外,广州大学城和北京中关村已开始采用集中冰蓄冷供冷模式,河北大学新校区和石家庄职教园区也引入了中央冰蓄冷冷站。深圳湾超级总部基地、广州金融城等地也正在规划或建设集中供冷项目。西安咸阳国际机场现已建成全国最大的冰蓄冷机场能源站,总建筑面积2.96万平方米,采用“电制冷+冰蓄冷”的制冷方式,夜间制冰储能,白天高峰释冷,承担约125MW尖峰空调冷负荷及95MW尖峰热负荷需求。

格力珠海横琴冷站项目总装机规模达45万冷吨,建成后将成为全球规模最大的区域能源项目。该项目采用的格力永磁同步变频离心式冰蓄冷双工况机组,具备优异的能效表现和稳定的运行特性。在-5.6℃出水制冰工况下,COP高达4.21,而在1℃

出水制冷工况下，制冷NPLV高达7.318，相较传统系统，全工况综合能效提升30%以上。机组采用高效双工况多点气动设计、大功率高转速永磁同步电机、智能制冰控制等先进技术，确保即便在制冰出水温度低至 -8°C 、冷却水进水温度高达 34°C 的严苛条件下，仍能保持稳定运行。机组配备中高压大功率变频系统，可支持1500RT以上超大冷量蓄冰，充分满足横琴新区庞大的制冷需求。截至目前，格力已为横琴能源站项目提供30余台变频离心机，总冷量高达70000RT。机组采用“冰蓄冷”双工况模式，在夜间低电价时段运行制冰，白天高峰时段融冰供冷，有效实现电力移峰填谷，优化能源结构，显著提升整体能效。经测算，该系统在 -6°C 出水制冰工况下，COP高达4.59，空调工况COP高达6.6，IPLV高达11.17，远超国家一级能效标准，全工况综合能效提升40%以上，节能效果显著。

3.5.4 相变储冷

相变储冷技术的核心原理是利用相变材料（PCM）在固液相变过程中吸热或释放热量的特性。材料在温度变化过程中通过吸收和释放潜热来储存和释放冷量。相变材料通常具有较高的相变潜热，因此可以在相对较小的体积内储存大量的热量，从而达到储冷的效果。相较于传统运输方式，相变储冷技术可以有效减少碳排放，并且潜热蓄冷具有储能密度较高、热效率高、储/放冷过程中温度恒定或近似恒定等优点。因此相变储冷技术被广泛应用在制冷领域并越来越受到关注。相变蓄冷材料根据化学成分可分为无机相变材料、有机相变材料和复合相变蓄冷材料三类^[104]。

无机相变材料主要包括结晶水合盐、熔融盐和金属合金等。结晶水合盐材料具有较高的储能密度、稳定的相变温度、良好的导热性和较低的成本，因此被广泛应用于储能技术。然而，大多数结晶水合盐材料存在腐蚀性、过冷度较大和相分离等问题。为了解决这些问题，国内多个研究团队开展了相关的优化研究。长沙理工大学李传常等^[105]开发了一种新型三元盐水共晶相变凝胶（ $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ），优化后的复合材料中最优凝胶基体的含量为12%，复合材料的相变温度为 -12.44°C ，潜热为138.9 J/g。江苏大学唐爱坤等

^[106]针对冷链物流，选择基于氯化钠（NaCl）盐水共晶溶液作为相变材料，研究并优化了其在冷库制冷机中的冷藏性能。此外，华南理工大学孙婉纯等^[107]以六水氯化钙（ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）为主要成分制备了无机相变储冷材料，并研究了该材料与新风机的耦合应用，实验表明在 $18\sim 22^{\circ}\text{C}$ 的冷水工况下，该装置能够节约54.8%的电力成本。在测试方法方面，天津商业大学陈爱强等^[108]提出一种改进后的无机相变蓄冷材料物性参数简易测试方法，与原有方法相比，该改进方法的相变潜热值精确度提高了2%，为蓄冷剂物性参数的测定提供了更加准确的解决方案。

有机相变蓄冷材料主要包括烷烃类和非烷烃类，如石蜡、脂肪酸、醇类化合物等。相对于无机相变蓄冷材料而言，有机相变材料的优势在于不易腐蚀、不易发生相分离和过冷现象，具有更好的化学稳定性。然而，这些材料的相变潜热和导热系数较低，并且容易燃烧，因此在实际应用中通常需要与高导热材料复合使用。针对这些问题，国内多个高校开展了相关研究。例如，上海理工大学张冠华等^[109]开发了一种十四烷、癸酸和十二烷醇组成的冷藏材料（TDDA），实验结果表明该材料具有良好的热可靠性和稳定性，潜热达258.3 J/g，相变温度为 1.1°C ，导热率为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。此外，西安理工大学郭彦峰等^[110]通过实验制备了多种二元有机复配物，并验证了这些材料在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 的相变温度范围内无过冷和相分离现象，同时具备可逆的熔化和凝固性能，能够满足果品保鲜包装的储冷需求。华北水利电力大学Kang等^[111]建立了一个中型冷藏卡车箱的数值模型，研究了石蜡作为相变材料的类型、数量和注入形状对冷链运输的影响，表明相变材料能够有效降低车内温度波动提升冷藏效率。另外，北部湾大学罗孝学等^[112]针对海洋运输中的果蔬冷链保鲜问题，研究了添加成核剂优化结晶行为的乙二醇基相变材料，并改进了其蓄冷性能。天津城建大学曹为学等^[113]则研究了医用防护服与相变蓄冷材料的耦合效果，结果表明该材料可有效降低温度波动，提高穿戴者的热舒适度，尤其在高温环境下具有重要应用价值。

复合相变蓄冷材料是在无机和有机相变蓄冷材料的基础上发展而来的新型材料，兼具两者的优

点。通过引入高导热材料（如石墨、金属或导热塑料），可有效提高相变材料的热导系数，减少热滞效应，从而提升储冷和释冷效率。此外，复合相变材料在相稳定性、循环使用寿命等方面均表现优异，使其在冷链物流、建筑节能和工业冷却等领域具有广泛的应用前景。大连理工大学张宇昂等^[114]采用棕榈酸甲酯、十二水合磷酸氢二钠和十水合碳酸钠作为主要相变材料，并结合羧甲基纤维素钠（作为乳化剂和增稠剂）及二氧化硅气凝胶（作为包埋材料），成功制备了一种新型形状稳定的有机/无机复合相变材料（CPCM）。云南师范大学张莹等^[115]研发了水基甘氨酸-山梨酸钾-甲基溴化铵改性膨胀石墨复合相变蓄冷材料，该材料熔点为 -5.06°C ，熔化潜热 243.8 kJ/kg ，导热系数 $1.836\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。此外，该团队^[116]还通过非共价官能化方法制备改性膨胀石墨（SMEG），并将其与GMP相变材料熔融共混，进一步开发出新型水性复合相变材料（SMEG3/GMP），拓展了相变储冷材料在冷能储存领域的应用。北京建筑大学邢美波等^[117]研制了一种包含酒精和盐的水基三元储冷材料，并结合实验和分子动力学模拟，研究了添加剂浓度与类型对复合相变材料冷藏性能的影响。常熟理工学院陆高峰等^[118]提出了两种新颖的球形胶囊堆积结构（面心立方与六边形密布排列），并将其应用于圆柱形堆积床相变材料冷库，进行储冷性能的数值模拟和实验研究。中原工业大学郑慧凡等^[119]研究了相变石蜡冷球中添加碳纳米管对储冷过程的影响，采用计算流体力学方法（CFD）分析球体直径、壳体材料、翅片结构以及制冷介质流速对储冷效率的作用，以优化封装冷球系统的导热性能。郑州轻工业大学张琦等人^[120]采用热塑性弹性体SEPS与OP10E的物理交联机制和熔融共混法，制备了一种可形变且力学性能优异的定型复合相变材料，该材料在冷链运输中表现出良好的蓄冷保温性能，有效降低了储热材料的空间占比，提高了蓄冷箱的控温能力和保冷性能。此外，国网陕西省电力有限公司电力科学研究院相关研究人员发明了一种基于十水合硫酸钠的新型复合相变蓄冷材料制备方法和应用，制备获得的相变蓄冷材料克服了单一水合无机盐相变材料十水合硫酸钠熔点与工况温度不匹配、导热系数低、过冷度大、相分离与循环稳定性差等问题，能够与空调机组耦合

使用或应用于设备散热^[121]。国电南瑞科技股份有限公司刘杨等^[122]提出一种基于有机-无机纳米掺杂工艺，采用分散改性导热鳞片石墨与花状纳米氧化铝作为改性材料的低过冷高导热相变蓄冷材料制备方法，该方法使得导热系数提升了70%以上。

在此基础上，企业也在推动技术的实际应用。中国中车集团石家庄车辆有限公司现已构建完整的蓄冷式冷链运输体系，包括蓄冷式节能冷库、公铁联运干线运输装备、新能源城市物流车及蓄冷式恒温温控系统，目前，该技术已成功应用于35000km的公路运输和1000km的铁路运输，并在冷链物流行业实现市场化应用。在建筑领域，相变储冷技术通常与供热系统或建筑材料相结合，使其成为建筑组成中的一部分（如内墙和楼板）。目前，国内已经研发出一系列相变储冷产品，如相变砂浆、相变水泥、相变混凝土和相变石膏板等，用于提升建筑的保温节能效果。在冷链物流领域，通常运用相变储冷材料替换现在市面上的水蓄冷冰袋，加工成不同温度区间的冷链物流产品，新型相变储冷材料可用于食品、药品、航空冷链和工业冷却等领域，提高热舒适度和安全性。

参考文献

- [1] 陈海生, 吴玉庭. 储能技术发展及路线图[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [2] 张灿灿, 吴玉庭, 鹿院卫. 低熔点混合硝酸熔盐的制备及性能分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 435-439.
- [3] ZHANG Cancan, HAN Yan, WU Yuting, et al. Comparative study on high temperature thermal stability of quaternary nitrate-nitrite mixed salt and Solar salt[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 230: 111197.
- [4] HAN Yan, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Investigation on thermal performance of quaternary nitrate-nitrite mixed salt and solar salt under thermal shock condition[J]. Renewable Energy, 2021, 175: 1041-1051.
- [5] SANG Lixia, LV Xiaoyuan, WANG Yuancong, et al. Investigation of $\text{KNO}_2\text{-KNO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$ mixed molten salts with higher working temperature for supercritical CO_2 concentrated solar power application[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106724.
- [6] NA Heya, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Investigation on thermal performance of eutectic binary

- nitrate-carbonate molten salt under thermal shock condition[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 255: 112314.
- [7] NA Heya, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Effect of Na_2CO_3 content on thermophysical properties, corrosion behaviors of $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2$ molten salt[J]. *Energy*, 2024, 311: 133378.
- [8] CHEN Xia, ZHANG Mingxuan, WU Yuting, et al. Advances in high-temperature molten salt-based carbon nanofluid research[J]. *Energies*, 2023, 16(5): 2178.
- [9] YU Qiang, LU Yuanwei, ZHANG Xiaopan, et al. Comprehensive thermal properties of molten salt nanocomposite materials base on mixed nitrate salts with $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nanoparticles for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111215.
- [10] ZHANG Xiaopan, LU Yuanwei, YU Qiang, et al. Study on preparation and thermophysical characteristics of molten salt nanocomposite by microwave method[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 220: 110846.
- [11] ZHANG Cancan, HAN Songtao, WU Yuting, et al. Investigation on convection heat transfer performance of quaternary mixed molten salt based nanofluids in smooth tube[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 177: 107534.
- [12] CHEN Hu, CHEN Xia, WU Yuting, et al. Experimental study on forced convection heat transfer of $\text{KNO}_3\text{-Ca(NO}_3)_2 + \text{SiO}_2$ molten salt nanofluid in circular tube[J]. *Solar Energy*, 2020, 206: 900-906.
- [13] XU Ruotong, ZHANG Cancan, MA Lina, et al. Comparative investigation on dynamic hot corrosion behavior of 347H in quaternary molten salt and its nanofluids[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 280: 113263.
- [14] GAO Qi, LU Yuanwei, WANG Yuanyuan, et al. Electrochemical study on the corrosion behavior of 316L stainless steel in quaternary nitrate molten salt nanofluids for thermal energy storage applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 83: 110491.
- [15] MA Lina, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Effect of flow rate and SiO_2 nanoparticle on dynamic corrosion behavior of stainless steels in molten salt for thermal energy storage[J]. *Corrosion Science*, 2022, 194: 109952.
- [16] XU Zhihao, LU Jianfeng, WEI Xiaolan, et al. 2D and 3D cellular automata simulation on the corrosion behaviour of Ni-based alloy in ternary molten salt of NaCl-KCl-ZnCl_2 [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 240: 111694.
- [17] XU Zhihao, GUAN Bang, WEI Xiaolan, et al. High-temperature corrosion behavior of Inconel 625 alloy in a ternary molten salt of $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ in air and N_2 [J]. *Solar Energy*, 2022, 238: 216-225.
- [18] GUO Lili, LIU Qi, YIN Huiqin, et al. Excellent corrosion resistance of 316 stainless steel in purified NaCl-MgCl_2 eutectic salt at high temperature[J]. *Corrosion Science*, 2020, 166: 108473.
- [19] WU Yu-Ting, CHEN Cong, LIU Bin, et al. Investigation on forced convective heat transfer of molten salts in circular tubes[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39(10): 1550-1555.
- [20] WU Yu-Ting, LIU Shan-Wei, XIONG Ya-Xuan, et al. Experimental study on the heat transfer characteristics of a low melting point salt in a parabolic trough solar collector system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 748-754.
- [21] WANG Bingtao, CHEN Yongchang, CAI Jianbo, et al. Experimental investigation of circular submerged jet impingement heat transfer with mixed molten salt[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 98: 30-37.
- [22] YU Qiang, LU Yuanwei, ZHANG Cancan, et al. Experimental and numerical study of natural convection in bottom-heated cylindrical cavity filled with molten salt nanofluids[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 141(3): 1207-1219.
- [23] FU Dianwei, NIU Junnan, ZHANG Cancan, et al. Investigation on thermal-hydraulic performance of nitrate molten salt nanofluids in enhanced tube with converging-diverging bulge[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024, 149(15): 8617-8629.
- [24] WANG Yanquan, LU Yuanwei, GAO Qi, et al. Numerical study on heat transfer and frictional resistance of two types of molten salts in straight channels and supercritical carbon dioxide in airfoil channels[J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(4): 1443-1457.
- [25] ZHANG Cancan, HAN Songtao, WU Yuting, et al. Experimental and numerical study on heat transfer characteristic of nitrate molten salt-based nanofluids in tube with twisted tape[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(3): 955-964.
- [26] DONG Xiaoming, WU Yuting, ZHANG Cancan, et al. Experimental and numerical study on heat transfer and flow characteristics of molten salt nanofluids in spiral-wound tube heat exchanger[J]. *International Journal of*

- Thermal Sciences, 2023, 191: 108343.
- [27] HAN Songtao, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Study on flow and heat transfer performance of molten salt based nanofluids in shell and twisted tube heat exchanger with shutter baffle[J]. International Journal of Thermophysics, 2022, 44(2): 30.
- [28] YANG Yanchun, LU Yuanwei, WU Yuting. Heat transfer and flow friction performance of molten salt and supercritical CO₂ in printed circuit heat exchanger[J]. Heat Transfer Engineering, 2024, 45(7/8): 642-656.
- [29] SHI Hong-Yuan, LI Ming-Jia, WANG Wen-Qi, et al. Heat transfer and friction of molten salt and supercritical CO₂ flowing in an airfoil channel of a printed circuit heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119006.
- [30] YAO Yecheng, DING Jing, ZHANG Yuanyuan, et al. Heat transfer performance of pillow plate heat exchanger with molten salt and supercritical carbon dioxide[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2022, 183: 122211.
- [31] ZHANG Cancan, LU Yuanwei, SHI Suli, et al. Comparative research of heat discharging characteristic of single tank molten salt thermal energy storage system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 161: 106704.
- [32] 韩伟, 崔凯平, 刘欣, 等. 太阳能热发电站熔盐储罐首次充盐策略研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43 (3): 282-287.
- [33] ZHANG Xiaoming, WU Yuting, MA Chongfang, et al. Experimental study on temperature distribution and heat losses of a molten salt heat storage tank[J]. Energies, 2019, 12(10): 1943.
- [34] 蔡君, 刘长军, 郭洪辛, 谈建平, 曾鑫, 叶冬挺. 循环载荷作用下的高温熔盐储罐设计分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 516-521.
- [35] 胡卫兵, 张锋凌, 缪勇, 等. 光热电站熔盐罐基础陶粒土回填施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(18):99-103.
- [36] 崔凯平, 韩伟, 倪煜, 等. 熔盐储罐热分层混温过程研究[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 8-13.
- [37] 贺志宝, 江力, 周卫. 基于CFD方法的熔盐储罐布液系统分析[J]. 西北水电, 2022(6): 156-167.
- [38] 王锐. 实时在线温度及泄漏监测在熔盐储罐上的应用[J]. 化工设计, 2023, 33(4): 48-50.
- [39] 赵辉, 黄中华, 左宇航, 等. 电极片检测熔盐储罐泄漏的实验研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 109-113.
- [40] ZHANG Yi, ZHANG Cancan, WU Yuting, et al. Experimental study of AlN powder filled high voltage molten salt electric heater for large scale thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 91: 112143.
- [41] ZHANG Cancan, WU Yuting, LU Yuanwei. Experimental and numerical study on induction heating performance of quaternary nitrate-nitrite molten salt[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(2): 2211-2221.
- [42] 韩瑞, 廖志荣, 于博旭, 等. 面向火电厂改造的熔盐卡诺电池储能系统仿真研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3605-3615.
- [43] 赫广迅, 宋业琛. 基于火电站转型储能电站的超高温热泵及熔盐储换热系统工程应用设计[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 93-96, 146.
- [44] 刘金恺, 鹿院卫, 魏海蛟, 等. 熔盐储热辅助燃煤机组调峰系统设计及性能对比[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 111-118.
- [45] 彭家辉, 倪永中, 王元良, 等. 基于熔盐储热的燃煤机组调峰可行性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 99-106.
- [46] 周信华, 郑祯晨, 胡远庆. 抽汽熔盐蓄热技术在煤电灵活性改造中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2023(22): 53-56.
- [47] 宋晓辉, 韩伟, 王兴, 等. 基于高温熔盐储热系统的火电机组深度调峰方案对比及分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 63-74.
- [48] 刘亨, 赵大周, 张钟平, 等. 高温熔盐储热耦合煤电机组供热调峰系统分析[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(3): 292-296.
- [49] 马汀山, 王伟, 王东晔, 等. 基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 113-118.
- [50] 苗林, 刘明, 张可臻, 等. 集成电制热熔盐储热的燃煤发电系统热力性能研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(11): 2999-3007.
- [51] 汤永智, 赵元栋, 冯青, 等. 间歇式窑炉高温烟气熔盐储热特性的数值研究[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(3): 571-580.
- [52] 吴娅, 王方明, 王毅. 熔盐储能在钢铁发电系统中的应用[J]. 冶金动力, 2023(4): 1-16.
- [53] 郑麒麟, 苗闪闪, 殷亚宁. 基于熔盐储热的非补燃式压缩空气储能系统研究[J]. 锅炉制造, 2023(6): 33-35.
- [54] LU J, DENG Y, LUO D, et al. Preparation and performance enhancement of MXene/Na₂HPO₄·12H₂O@SiO₂ phase change microcapsule[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 91: 112079.
- [55] JIA Hanxi, LU Shilei, WU Wenze, et al. Synthesis and thermal properties of sodium acetate trihydrate-based composite phase change materials with modified expanded graphite[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113: 115628.

- [56] LEI Hui, WANG Xuezi, LI Yifan, et al. Organic-inorganic hybrid phase change materials with high energy storage density based on porous shaped paraffin/hydrated salt/expanded graphite composites[J]. *Energy*, 2024, 304: 132169.
- [57] YAN Shuo, FENG Chaoqing, YUAN Guanghao, et al. Preparation and thermal properties of stearic acid-palmitic acid/boron nitride/nanoparticle composite phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 114: 115853.
- [58] LIU Songyang, GAO Wei, DENG Jing, et al. Capric-lauric & capric-palmitic/modified bentonite composite as phase change materials for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113315.
- [59] WANG Mengqing, LIU Songyang, GAO Wei, et al. Synthesis and characterization of Capric acid-Lauric acid/expanded vermiculite as a phase change composite for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 78: 110091.
- [60] JESUS D' OLIVEIRA E, AZIMOV U, COSTA PEREIRA S C, et al. Effect of particle size on the thermal conductivity of organic phase change materials with expanded graphite[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 92: 112090.
- [61] TAN Xin, WANG Yunfei, ZHAO Maosen, et al. Experimental study of 1-octadecanol composite phase change materials for solar energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 114: 115763.
- [62] WANG Ting, CUI Wei, LI Xiangxuan, et al. Economical and shape-stabilized hydrated salt/bagasse biomass-derived carbon phase change composite for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111083.
- [63] ZHANG Lijuan, ZHU Hongwei, ZENG Lingxiao, et al. Preparation and heat storage characteristics of high-temperature phase change macrocapsules of chloride eutectic salt[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 274: 112972.
- [64] YU Zhenqi, LI Xiaodong, WANG Jing, et al. Form-stable $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaCl}$ /mullite phase change composite with SiC enhanced thermal conductivity for high temperature thermal storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111511.
- [65] WANG Xiaoyu, ZHANG Weiyi, SHAO Yanqiu, et al. Gold tailings-solar salt shape-stabilized phase change materials for medium-high temperature thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109810.
- [66] JIANG Tong, HU Jun, WU Shiliang, et al. A shape-stable phase change material for high-temperature thermal energy storage based on coal fly ash and $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ [J]. *Solar Energy*, 2024, 280: 112868.
- [67] XIONG Yaxuan, YANG Yang, ZHANG A, et al. Investigation on low-carbon shape-stable phase change composite by steel slag and carbide slag for solar thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109736.
- [68] XIONG Yaxuan, FAN Yanbo, WU Yuting, et al. Low-carbon shape-stable phase change composite utilizing semi-coke ash for building thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 270: 112823.
- [69] JIANG Feng, TAO Mengxiao, CAI Jinlong, et al. Modification of steel slag to prepare chlorides based composite phase change materials with shape stability for high-temperature thermal energy storage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 491: 152062.
- [70] CAI Zhen, LI Yuanbing, LI Shujing, et al. Novel high thermal conductivity alumina/salt composites for thermal energy storage: Effect of wettability on microstructure and properties[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, 44(6): 3953-3964.
- [71] LIU Wenjie, ZHANG Shidong, YANG Liu, et al. Phase change thermal storage composite synthesized by impregnating steel-slag-derived porous ceramics with the molten solar salts[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 94: 112426.
- [72] ZHANG Jingcen, GUO Zhi, ZHU Yazheng, et al. Preparation and characterization of novel low-cost sensible heat storage materials with steel slag[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109643.
- [73] LU Yi, LIU Ke, YUAN Zhangfu, et al. Innovative strategies for thermal storage of steel slag-modified porous ceramic-based low-temperature composite phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 113: 115622.
- [74] ZHOU Wenning, YANG Zhixin, LIN Lin, et al. Molecular insights into thermal conductivity enhancement and interfacial heat transfer of molten salt/porous ceramic skeleton composite phase change materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 232: 125934.
- [75] ZHANG Yong, CHEN Ziwei, ZHANG Yanan, et al. Parameter control in synthesis of Vermiculite- CaCl_2 composite materials for thermochemical adsorption heat storage[J]. *Energy*, 2024, 291: 130478.
- [76] GRÉGOIRE B, MA Hongkun, PALACIOS A, et al. Sodium nitrite-sodium nitrate eutectic based composite

- phase change material (CPCM) for medium-temperature thermal energy storage (TES): Exploring the relationship between microstructures and thermal properties[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 101: 113922.
- [77] LI Chuan, HAN Li, LI Qi, et al. Development and investigation of salt based composite phase change material containing diatomite as skeleton substance by cold sintering technology for medium and high temperature thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 271: 112821.
- [78] LI Chuan, LU Haitao, LI Qi, et al. Fabrication and investigation of chloride salt based shape stabilization phase change composite with excellent thermal properties for medium and high temperature thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 278: 113200.
- [79] SHI Juan, WANG Lei, CHEN Shengpeng, et al. Thermal performance of phase change material based heat exchanger filled with inorganic salt/expanded graphite[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111240.
- [80] DU Ruxue, WU Minqiang, WANG Siqi, et al. Integrated heat pump with phase change materials for space heating[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203: 114769.
- [81] 杨斌, 于祥京, 郑洋, 等. 管壳式相变储能换热器翅片优化模拟分析[J/OL]. *储能科学与技术*, 1-18[2025-04-11]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0933>.
- [82] 鲍伟, 王胜捷, 蒲万兴, 等. 复合相变材料导热性能与套管式相变储热单元翅片结构优化[J/OL]. *农业工程学报*, 2024: 1-10. (2024-11-29). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NYGU2024112801R&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [83] ZHANG Ludi, ZHOU Guobing. Optimal eccentricity and exergy analyses of a horizontal double-tube latent heat storage unit for melting processes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 88: 111647.
- [84] KOU Xiaoxue, JIANG Jiatong, XIE Baoshan, et al. Fewer temperature ties: scalable integration and broad selection of phase change materials for both heating and cooling[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(5): 2499-2510.
- [85] 井洋, 谢晓云, 江亿. 利用数据中心余热供热的系统设计与分析[J]. *暖通空调*, 2024, 54(7): 152-158.
- [86] Yang G, Xiao X, Wang YF. Preparation and thermal characterization of composite PCMs with modified melting temperature encapsulated in cascade energy storage device for solar heat pump[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 106: 114500.
- [87] 肖鑫, 杨耿, 王云峰. 基于TRNSYS的太阳能梯级蓄热热泵系统的模拟研究[J]. *化工学报*, 2024.
- [88] CHEN Jiaxiang, ZHAO Bin, HE Meizhi, et al. Construction and thermodynamic optimization of a transcritical pumped thermal energy storage system using ice slurry for cold storage[J]. *Energy*, 2025, 319: 134829.
- [89] YANG Bo, TANG Daoke, YUAN Weixing, et al. Experimental study on pressure drop and ice blockage characteristics of ice slurry flow in big-diameter pipes[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, 169: 214-225.
- [90] YAN W M, YEH R S, SAJJAD U, et al. Performance evaluation of ultrasonic-assisted dynamic ice melting in ice storage systems: an experimental study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 103: 114045.
- [91] LEI Ting, YANG Teng, YAO Wanxiang, et al. Mechanism analysis of climate change impacts on the performance of ice storage systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113184.
- [92] WANG Jihong, BATTAGLIA F, WANG Shugang, et al. Flow and heat transfer characteristics of ice slurry in typical components of cooling systems: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 922-939.
- [93] LI Yanbo, WANG Shugang, WANG Jihong, et al. CFD study of ice slurry heat transfer characteristics in a straight horizontal tube[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 146: 504-512.
- [94] LI Xiang, WU Weidong, LI Kun, et al. Experimental study on a wet precooling system for fruit and vegetables with ice slurry[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 133: 9-18.
- [95] YANG Yingying, YANG Qingyu, WU Weidong, et al. Effect of dispersant on the performances of an ice slurry-wet precooling system[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 52: 103744.
- [96] ZHANG Yuang, XU Yanqun, LU Rongwen, et al. Form-stable cold storage phase change materials with durable cold insulation for cold chain logistics of food[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 203: 112409.
- [97] 宋文吉, 冯自平, 肖睿. 冰浆技术及其应用进展[J]. *新能源进展*, 2019, 7(2): 129-141.
- [98] 宋文吉, 黎福超, 陈明彪, 等. 过冷法海水冰浆制备系统能耗特性分析[J]. *新能源进展*, 2023, 11(6): 491-498.
- [99] 杜群, 宋文吉, 肖睿, 等. 基于冰浆机与砖冰机结合的制冰方法及能耗研究[J]. *低温与超导*, 2021, 49(12): 78-84.
- [100] 肖睿, 黄冲, 宋文吉, 等. 动态冰蓄冷系统的无预热制冰

- 运行研究: 第九届海峡两岸制冷空调技术交流会[C]. 中国浙江杭州, 2009.
- [101] 王瑛滢, 傅德坤, 陈明彪, 等. 冬冷地区冰源热泵系统清洁供暖的经济性[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(4): 1380-1387.
- [102] 陈明彪, 宋文吉, 王瑛滢, 等. 跨季节蓄冷特性与系统设计优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 1-7.
- [103] 吴泽江, 庞峰, 蒋能飞, 等. 冰蓄冷系统应用评估与策略[J]. 制冷, 2023, 42(2): 24-29.
- [104] 焦峰, 李晓凤, 马臻, 等. 相变蓄冷材料研究进展和应用综述[J]. 冷藏技术, 2023, 46(2): 71-79.
- [105] ZHU Aochang, XIE Baoshan, CAO Penghui, et al. Novel ternary inorganic phase change gels for cold energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113482.
- [106] XIANG Jiuxuan, TANG Aikun, PAN Yuting, et al. Development of inorganic phase change material and cold charging performance analysis based on cold storage refrigerator[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 259: 124780.
- [107] 孙婉纯, 梁国浩, 吴治将. 基于无机水合盐相变材料的相变蓄冷新风机实验研究[J]. 广东化工, 2024, 51(5): 1-4.
- [108] 王涛涛, 陈爱强, 顾亚龙, 等. 基于T-history方法的蓄冷材料物性改进测量方法研究[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 241-249.
- [109] ZHANG Guanhua, CHEN Licheng, LU Wei, et al. Production of ternary organic phase change material combined with expanded graphite and its application in cold chain transportation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 46: 102204.
- [110] 李妍, 郭彦峰, 付俊, 等. 冷链物流中二元有机相变储能材料的制备与热物性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2679-2689.
- [111] KANG Zhangyang, TAN Rufe, QIU Kaijie, et al. Numerical simulation of a medium-sized refrigerated truck box with low-temperature phase change cold storage material[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113175.
- [112] 竞浩通, 罗孝学, 万红, 等. 海运果蔬保鲜相变蓄冷材料的制备与研究[J]. 北部湾大学学报, 2024, 39(4): 22-28.
- [113] CAO Weixue, ZHANG Xudong, YAO Wanxiang, et al. Experimental study on the cooling performance of medical protective clothing coupled with phase-change cold storage materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 243: 122607.
- [114] CAO Feng, LI Zaichao, ZHANG Yuang, et al. Silica-based aerogels encapsulate organic/inorganic composite phase change materials for building thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112858.
- [115] LIU Yali, LI Ming, EMAM HASSANIEN R H, et al. Fabrication of shape-stable glycine water-based phase-change material using modified expanded graphite for cold energy storage[J]. Energy, 2024, 290: 130306.
- [116] LIU Yali, ZHANG Ying, LI Ming, et al. Novel water-based composite phase change materials for cold energy storage applications[J]. Renewable Energy, 2025, 240: 122174.
- [117] ZHANG Zhongtian, XING Meibo, LIAN Xu. Experimental and numerical study on cold storage properties of organic/inorganic composites in thermal energy storage[J]. Energy, 2025, 316: 134477.
- [118] LU Gaofeng, SU Juan, ZHU Haimin. Cold energy storage in a packed bed with novel structured PCM capsule layouts[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 197: 108831.
- [119] ZHENG Huifan, ZHANG Zhehui, TIAN Guoji, et al. Study on performance of carbon nanotube composite phase change cold storage sphere with annular fins[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 110074.
- [120] 张琦, 王玉静, 李银雷, 等. 一种新型蓄冷储热复合相变材料及其应用[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3133-3141.
- [121] 李华, 朱超, 董乐, 等. 一种复合相变蓄冷材料及其制备方法和应用: CN118360031A[P]. 2024. 04. 02.
- [122] 刘杨, 杨波, 杨肖, 等. 高效节能低过冷高热相变蓄冷材料[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(1): 119-124.

3.6 电化学储能电池的热管理

田镇¹ 吴玉庭²

(1 上海海事大学商船学院; 2 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室, 国家能源用户侧储能创新研发中心(筹))

储能热管理是指对储能系统在运行过程中产生的热量进行有效控制和管理, 防止储能系统过热, 确保其工作在适宜温度范围内, 以确保储能系统高效、安全、稳定运行, 并延长其使用寿命的技术和措施。目前, 储能的技术类型有多种, 按不同技术路线分为抽水蓄能、压缩空气储能、电化学储能、超级电容器、飞轮储能和超导储能等。考虑不同类型储能系统的运行机理和特性, 当下热管理的概念主要应用在电化学储能系统, 即储能电池热管理。

电化学储能系统一般由储能电池系统、监控系统、电池管理单元、专用消防系统、储能变流器及隔离变压器组成。电池单体通过串并联组成电池模组, 数个模组被统一管理组成电池包或箱体, 如图3.6-1所示。电池本体因素是储能系统安全的核心, 在储能电池充放电的过程中, 一部分化学能或电能转化成热能, 如储能系统散热不佳, 导致超出电池正常工作温度范围(25~50℃), 造成电池短路、鼓包、出现热失控, 最终引发火灾、爆炸等安全事故。热管理是保证储能系统持续安全运行的关键。

储能系统的热管理系统设计包括两项指标: 一是电池最高温度, 二是电池温度均匀性。如图3.6-2所示, 储能热管理技术路线主要分为空冷、液冷、相变材料PCM冷却、热管冷却等。各类热管理技术的优缺点如图3.6-3所示。目前储能热管理的主流技术路线是空冷和液冷。近年来, 随着储能电站向大

容量、高密度、长循环、超安全方向发展, 如何实现高效热管理、精准控温、快速响应散热以及与储能系统的集成, 成为当前及未来储能热管理的核心课题。

3.6.1 研究进展

1) 空气冷却

空气冷却是以气体为传热介质的一种热管理技术, 简称空冷。空气冷却原理在于, 将低温介质送入系统内部, 介质流过电池表面, 利用热传导和热对流两种方式带走电池产生的热量。根据是否存在外界设备主动提供能量, 空气冷却分为自然冷却(被动式)和强制冷却(主动式)两大类。空冷以其结构简单、安全可靠且易于实现的特点, 在功率密度较小的集装箱储能系统和通信基站储能系统中得到了广泛应用。然而, 空冷的散热效果相对较差, 主要适用于对能量密度和空间要求不高的场景。

对于高密度、中大规模商用储能电池系统的热管理, 空冷研究的重点是对比不同空调风管位置、气流路径、电池几何布置, 并结合送风温度、流量等因素进行对比, 以增加气流分布平衡、增强换热、改善冷却性能。具体措施包括合理布局电池排列方式、安装绕流翅片、增加负压旁通风管、设计二次出口和挡板的综合优化方案、开发“X”型对称空冷双进出口结构、优化电池纵向和横向间距^[3-6]等。

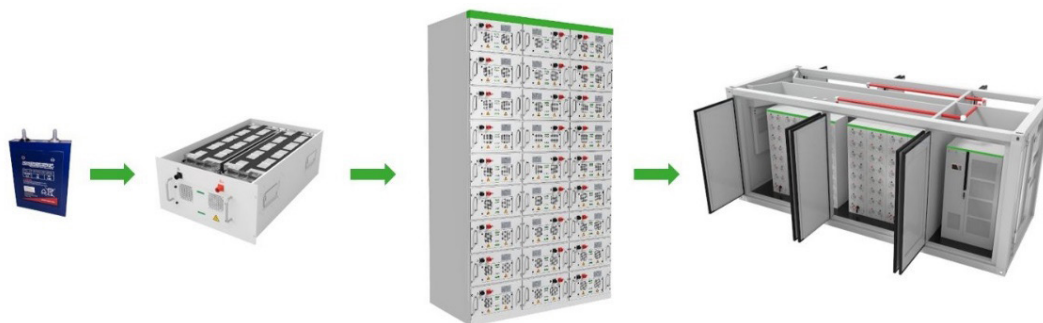
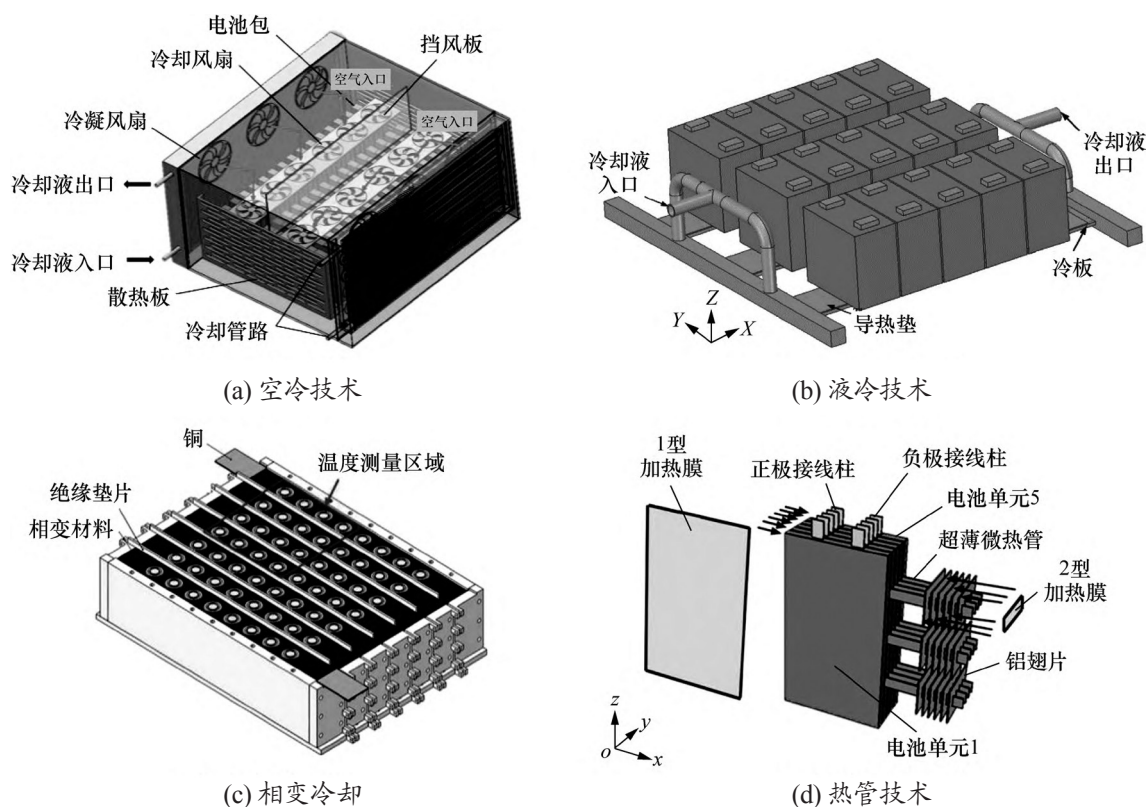
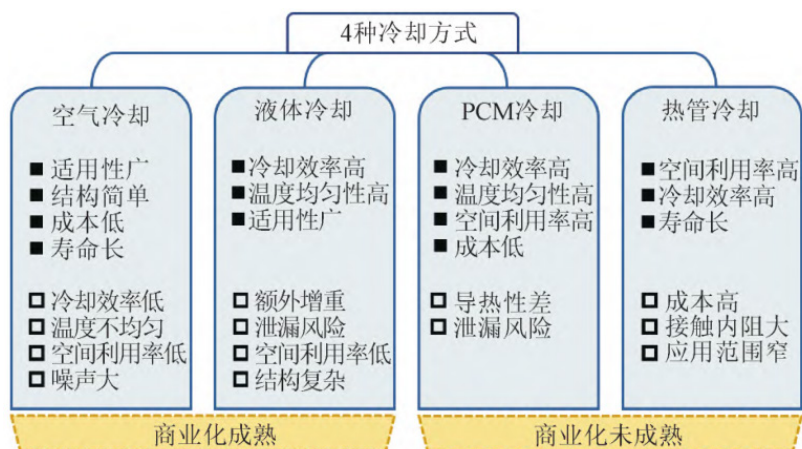


图3.6-1 储能系统电池箱组成示意图

图3.6-2 各类热管理技术原理简图^[1]图3.6-3 热管理系统冷却方式及优缺点^[2]

Lin等^[7]受数据中心通风系统的启发,提出了一种改善储能电池系统气流分布的解决方案,显著加快设计和优化迭代;采用新的设计方案电池单体最大温差由31.2℃降至3.5℃,平均温度由30.5℃降至24.7℃,性能系数(COP)提高4倍。

康芳明等^[8]开发了一种新型微多孔板空冷热管理单元,通过数值模拟对比研究了“Z”型和“U”

型风道结构对储能电池热管理性能的影响;选定以“U”型风道结构探究有无多孔板,不同多孔板厚度、入口风速、环境温度以及放电倍率下电池组温度场和流场分布;所设计的风道结构能够快速释放方块状电池大倍率工作时产生的热量,显著提升储能电池组的使用寿命和安全性。

白晓辉等^[9]提出了一种分层多风道空冷式冷却

方法,如图3.6-4所示。基于挡风板将单风道系统分割为多风道系统,建立了多风道动力电池热管理系统;实验结果表明,冷却空气流速为0.5 m/s时,三风道U型电池热管理系统的最高温度降低8.4 K,最大温差减小12.4 K;冷却空气流速为5 m/s时,三风道U型电池热管理系统的最高温度及温差均可以降低5.3 K。三风道U型热管理系统的散热效果优于其他热管理系统。

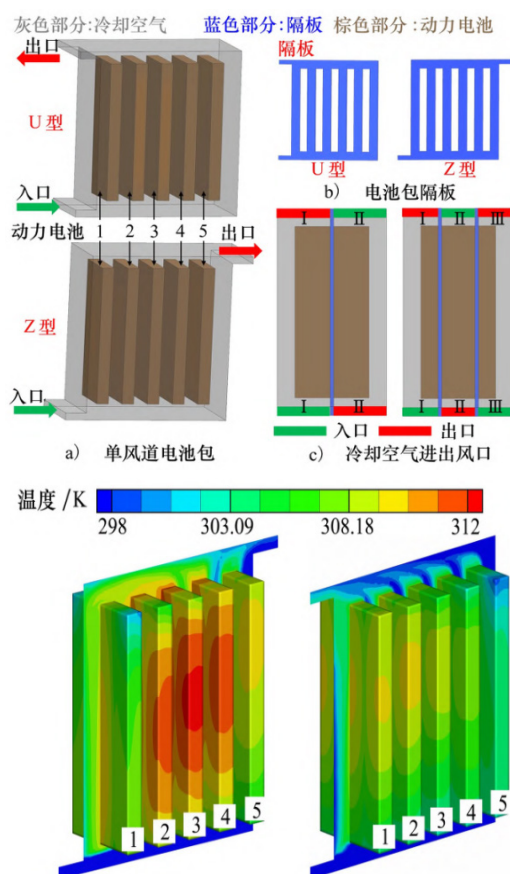


图3.6-4 U型和Z型风道结构及电池组温度云图
(冷却风速5 m/s)^[4]

Hosseini等^[10]研究了32个常规规则、之字和交错排列的锂离子电池组圆柱单元,并评估了不同空气速度和放电速率下锂电池组空冷系统的热管理性能;结果表明,沿水平方向流动的常规布置具有最有效的冷却性能和最佳的散热效果,其次是之字排列和交错排列。当速度从2 m/s增至5 m/s时,常规、之字形和交错排列方式下的电池组最高温度分别降低了2.05、1.68和2.31 K,提供冷却空气的能量分别增加了80.32%、75.48%和78.36%;在常规排列下,

1C时最高温度增加301.64 K,1.5C时最高温度增加305.67 K,2C时最高温度增加310.84 K,可以保证空冷热管理的有效性。

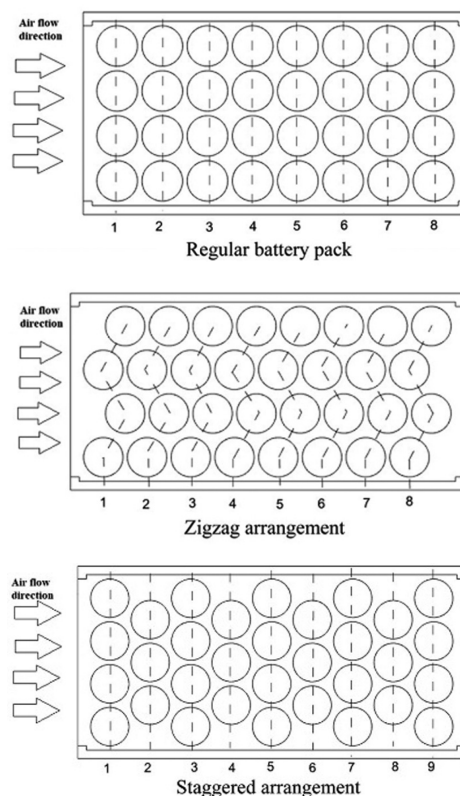


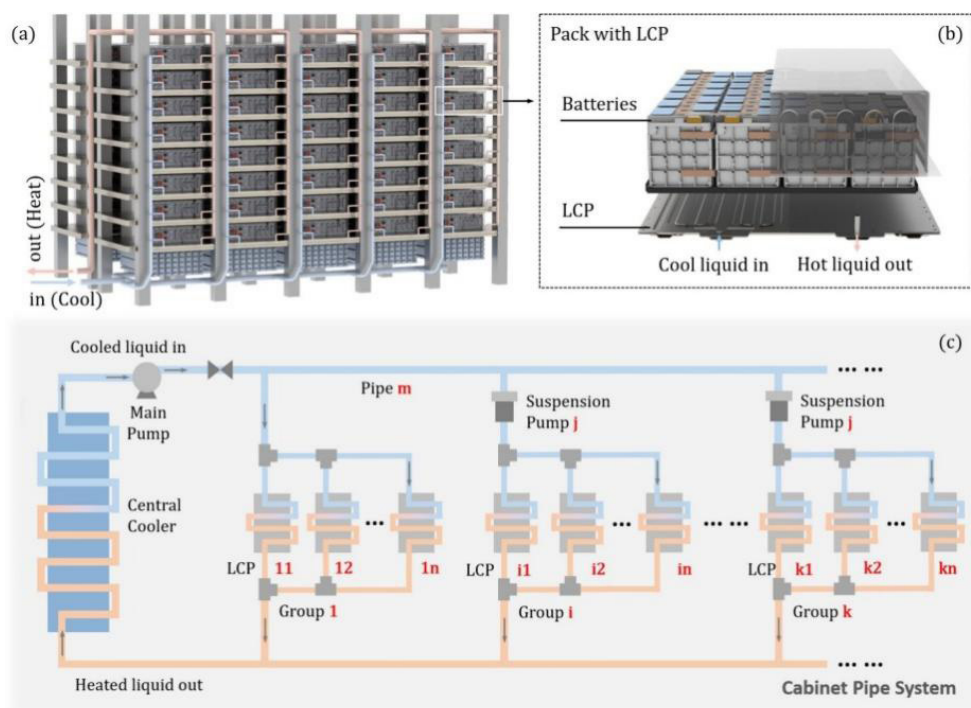
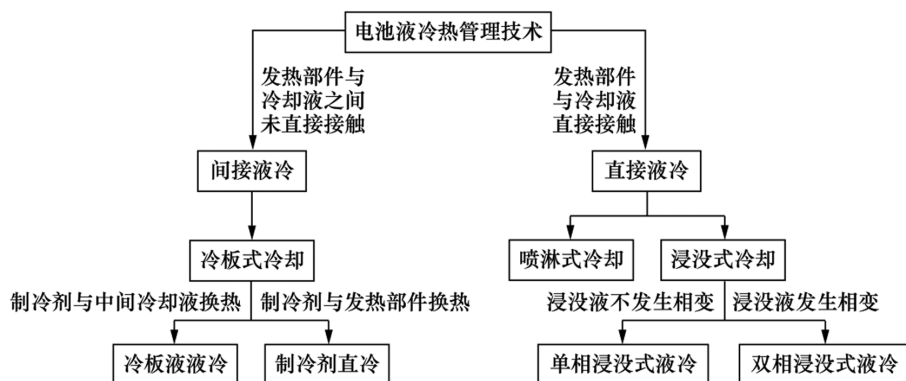
图3.6-5 三种电池单元布局:常规排列、之字排列和交错排列^[10]

2) 液体冷却

应用于储能系统的液冷技术主要可分为直接与间接式,具体分类方式如图6所示。考虑基于液冷的储能热管理系统的成熟度,本文主要介绍冷却板冷却技术和浸没式冷却技术。

冷却板液冷技术发展较为成熟,液冷板的材质一般是铝及铝合金,成本负担小。目前,对于液冷板系统的研究主要集中在液冷板结构、流体流动分布、冷却液通道几何和参数的优化上,旨在进一步简化制造工艺,增强均温性和冷却性能^[11]。

Zuo等^[12]设计了一种储能电站液冷系统,如图7所示;基于图论原理建立了液冷网络的水力求解模型,采用遗传算法对系统进行自动优化,实现了高性价比和理想的温度分布;通过实验验证了水力模型的准确性,并评价了优化策略的有效性;水



力模型计算的流量与试验结果吻合较好，误差小于3.5%，优化后的流量均匀性可达70%以上。

为了改善液冷板热平衡，减少温度差异和压力问题，Zhang等^[13]设计了双层增强型液冷板，如图3.6-8所示，重点研究了垂直方向对电池模块温度的影响；结果表明，采用双层强化液冷板的电池模块峰值温度下降了2.41%，电压下降了80.6%，能将电池模块的最高温度控制在30.43℃以下，温度不均匀性限制在3.48℃以内。Saha等^[14]开展了液冷板结构的拓扑优化，Telli等^[15]对储能电池液冷系统的顶盖和底部液冷板结构进行了设计优化，如图3.6-9所示。

陈永康等^[16]基于遗传算法对传统蛇形流道的冷板结构开展了优化设计，并确定了流道宽度12 mm、高度2 mm、数量9；以优化后的蛇形流道结构冷板作为初始解，进一步对冷板结构进行了拓扑优化；结果表明：优化后的蛇形冷板最高温度降低1.335%，表面温差减少1.982%，压降降低93.476%。杨智颖等^[17]针对传统蛇形液冷板散热流道，提出了基于变密度拓扑优化的液冷板散热流道设计，拓扑流道最优方案与蛇形流道相比，进出口压降从4 863 Pa降至822 Pa，下降490%；电池模组最高温度从27.88℃降至27.21℃，下降2.4%；温差从5.7℃降至4.95℃，

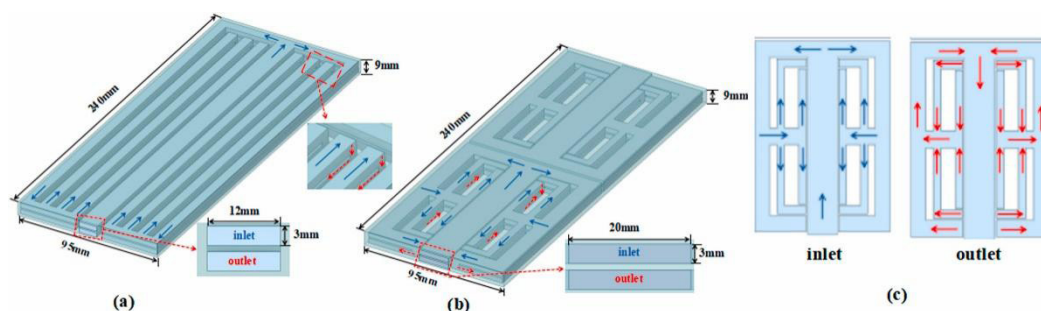


图3.6-8 双层液冷板设计示意图^[13]

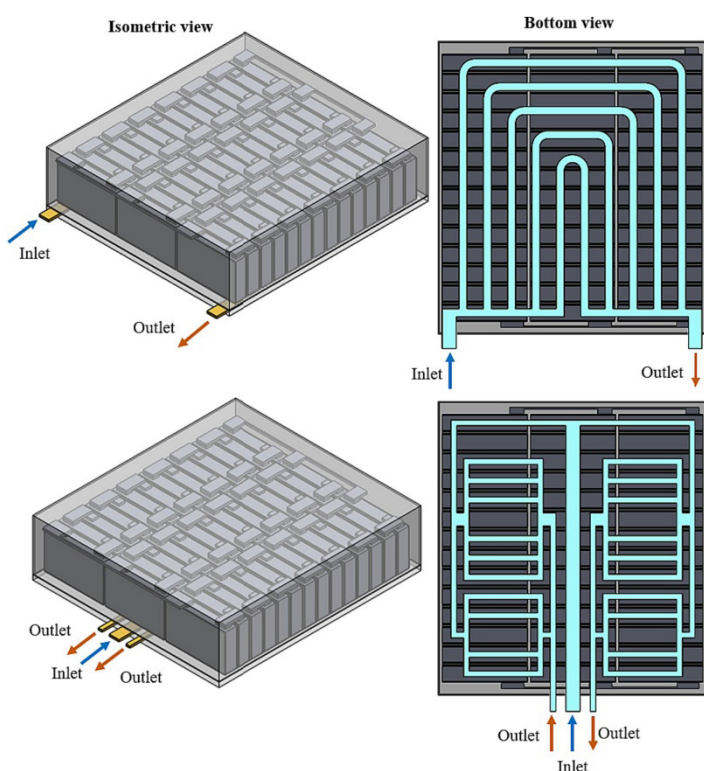


图3.6-9 逆流式顶盖和U型底部设置的液冷系统架构^[15]

下降13.2%。樊旭等^[18]提出了并联-倾斜流道液冷板，如图3.6-10所示。对两种液冷板下6C大倍率放电的电池组散热性能进行对比，研究了不同冷却液质量流量和液冷板结构参数（流道宽度、入口宽度和流道倾斜角度）下对电池组散热性能的影响；结果表明，并联-倾斜流道最优结构参数组合下电池组的最大温度、最大温差和液冷板的压降相比并联流道液冷板结构分别下降了0.45%、2.96%和29.08%。

张雅新等^[19]实测了大型集装箱储能的新型两相冷板液冷系统热管理性能；结果表明，两相冷板液冷系统在整个充、放电过程中能够将全舱电池的最大温差从传统液冷系统的4.17℃降至3℃以内；在同等充、放电条件下，充电时电池散发的热量高于放电时电池散发的热量；无冷却情况下，静置阶段储能电站内部电池会出现80min及更长时间持续高温的现象。

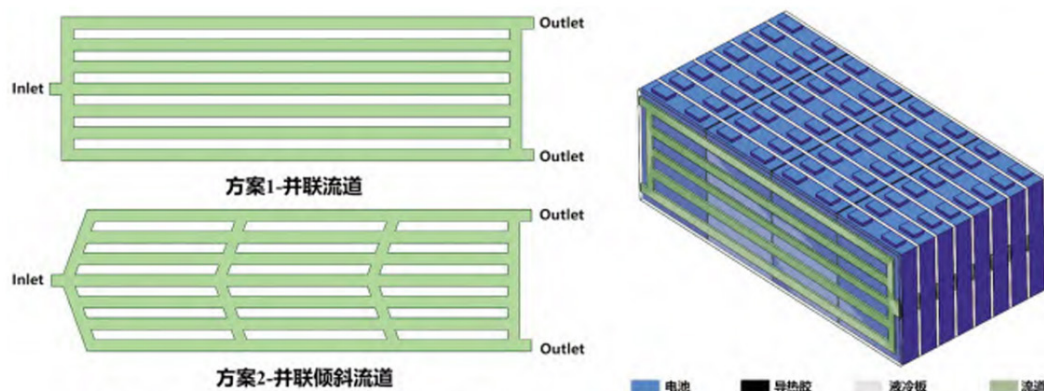


图3.6-10 液冷板设计和电池组液冷系统示意图^[7]

唐友名等^[20]设计了一种带截流阀的液冷板,通过数值模拟对比分析了新型液冷板与传统平行流道液冷板的性能;结果表明,具有截流阀新型液冷板对的电池最高温度降低了4.185%,最大温升降低了5.431%,但液冷板进出口压降上升了0.723%;液冷板性能随出口大小、出口对称位置L的增大先提高后降低。

李君浩等^[21]基于欠阻尼的二阶系统单位阶跃响应曲线设计了一种新型波形流道,通过数值模拟研究了流体流速、波形频率、阻尼和区间与液冷板冷却性能及流体压降的关系;结果表明,优化后的流道最大温度、最大温差和压降分别为35.368℃、2.125℃和6.121 kPa,相比原始余弦流道分别增加了1.99%、减小42.61%和39.96%,显著提高了液冷板的热传递效率和电池组温度均匀性,提高电池组稳定性和寿命的同时降低了能耗。

浸没式冷却散热原理是将设计好的几个或单个锂电池模块浸没于充满冷却液的箱体中,当电池模块快充快放产生大量的热量时,利用冷却液快速吸收热量稳定电池模块的温度,吸收了电池模块热量的冷却液通过循环泵循环到外部冷却散热器中,冷却后的冷却液存储在储液罐中,然后通过循环泵打回到电池箱中,从而达到散热循环保护作用,确保锂电池模块在温度均衡的系统中正常工作。目前,针对储能系统的浸没式冷却研究热点主要集中在冷却工质改性、调整结构参数以强化系统的冷却性能、浸没式冷却抑制热失控机理的研等方面^[22-23]。

根据不同的换热机理,浸没式液冷系统可分为单相和两相浸没式液冷系统。单相浸没式液冷可应用的工质包括氢氟醚、硅油和烃类等;两相浸没式液冷通常采用低沸点的Novec介质,有研究者将多种冷却剂混合使用作为相变工质。

周海洋等^[24]针对户储用5 kWh 电池插箱在工作过程中温升和温差过大的问题,设计了一种浸没式内胆箱体模型,研究了静态浸没下电池间距、浸没高度比以及放电倍率对常规冷却性能的影响;结果表明,电池间距增大至2.5 mm时,电池模组的最大温度和温差显著降低;完全浸没时效果最佳,最大温度和最大温差较无浸没状态降低了6.41%和17.81%;完全浸没冷却方式显著降低了电池模组

在1C和1.5C 放电时的最大温度,分别减少6.60%和10.47%。

李岳峰等^[25]设计了一种新型的直接浸没式电池包冷却系统,探究了浸没冷却液流量、电芯间距和喷射孔数量对于浸没电池包温度场的影响;研究发现,相比于冷板冷却系统,浸没式冷却系统下电池包顶面最高温度和最大温差均明显下降,系统整体冷却性能显著提升;同时浸发电芯顶底区域最大温差大幅缩小,有效解决了冷板冷却时存在的顶底区域温差过大的问题;随着冷却液流量和电芯间距的增加,电池包顶面最高温度和最大温差均不同程度下降,但其温度下降率逐渐下降;喷射孔数量的增加使得电池包顶面最高温度略微下降,但最大温差明显提升。

陈岳浩等^[26]对280 Ah大容量电池组浸没式液冷系统进行研究,探讨了电池间距,冷却液进出口方式、进口流速、种类对冷却性能的影响,进一步分析了冷却液热物性参数对冷却效果的影响权重。结果表明,适当增加电池间距对浸没式液冷电池组冷却效果有积极影响,当电池间距由0 mm增至5 mm时,电池组最大温差 $\Delta T_{\max}$ 、最高温度 $T_{\max}$ 分别降低14.3%、15.0%;冷却液进口位置对 $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 影响大于出口位置的影响,进口位置对电池箱体内流场影响大于出口位置的影响; $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 随进口流速增加而降低,进口流速由0.2 m/s增至0.4 m/s时, $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 分别降低21.1%、8.2%;去离子水冷却效果最佳,硅油冷却效果最差去离子水相较于硅油 $\Delta T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 分别降低5.17℃、5.99℃;冷却液热物性参数对电池组冷却效果影响权重依次为密度、比热容、导热系数和动力黏度。

廖晓怡等^[27]以实际储能集装箱先串后并组成电池模组的形式为例,搭建两串三并的电池模组浸没冷却热管理实验平台及Matlab/Simulink理论解析模型,研究浸没冷却方式对电池电热性能的影响。结果表明,3C放电倍率下,浸没冷却方式可以使模组最高温度保持在40℃;电池不一致时,模组的温度均衡效果呈现自然空冷<静态浸没<强制流浸没的趋势。

3) 相变材料冷却

相变材料冷却是指依靠材料的潜热储能能力,

在材料温度不变的情况下改变物质状态的过程，这个过程会吸收大量的热，不仅潜热储能的储能能力较强，而且通过选用合适相变温度的材料来控制温。相变冷却不需要额外的能量、没有运动的部分、维护成本低，而且它能够很好地确保电池温度均匀，但是相变材料本身不具备散热能力，吸收的热量需要依靠液冷系统、风冷系统等导出，否则相变材料无法持续吸收热量。此外，相变材料本身的热导率并不高，因此通常要加入其他材料如泡沫铜、膨胀石墨和纳米颗粒，以提高其热导性。

热管理中常用的相变材料有：有机材料，如石蜡、烷烃和有机酸；无机材料，如水溶液、盐类水合物和熔融盐；共晶材料等。选择相变材料时还需要考虑其他因素，如其熔化温度、安全性以及厚度等。在实际应用中，为了提高效果，相变常与其他冷却方法结合。比如相变材料耦合风冷^[28]、耦合微通道液冷^[29]、耦合风冷及液冷^[30]、复合3D翅片管液冷^[31]、耦合蜂窝状翅片结构^[32]等。

赵文飞等^[33]提出了一种内嵌微柱群的渐扩液冷板（微柱群-渐扩液冷板）耦合相变材料冷却的新型电池热管理系统。熊慧敏等^[34]研究了基于热管耦合相变材料的电池热管理系统，可实现全气候条件下电池保温与散热一体化，有效保障了锂离子电池在放电倍率0.5C~2.0C下的安全稳定运行。

4) 热管冷却

相比于上述的几种冷却方式，具有极高的传热系数，可以将电池内的热量很快地带到冷源进行散热。其换热效果受多种因素影响，如充液率、通道的尺寸以及毛细结构的设计等^[35]。在电池热管理应用中，出现了多种种类的热管，例如烧结热管、重力热管、脉动热管、平板微热管以及平板环路热管等。在热管的冷凝段结合直接风冷是最简单的电池散热方式，但由于空气冷却的效率不高，因此热管耦合液体冷却的方法能够有效提高热管的散热效率^[36, 37]，可分为接触式液体冷却和非接触式液体冷却。热管的价格与其他冷却方式相比较为昂贵且多处于实验阶段。对于储能电池而言，大容量方形电池逐渐成为主流。平板热管能更加贴合电池的表面，是用于储能电池热管理的首选^[38, 39]。

3.6.2 优秀案例

2024年，主流厂商密集推出液冷储能系统产品，产品性能较风冷有较大提升。相较于风冷产品，新推出的液冷产品在能量密度、电池寿命上有了显著提升。储能系统热管理的典型应用案例及相关技术如下：

1) 海尔智慧楼宇储能温控解决方案

2024年6月13日，海尔智慧楼宇发布了储能温控解决方案，由风冷和液冷两大系列产品组成，冷量段跨度从5~100 kW，能够满足发电侧、电网侧、用户侧的个性化客户需求，覆盖工商业储和集装箱大储等不同应用场景。针对10 kW以下储能系统，有门装型、插框型的液冷一体机，针对15~60 kW容量储能系统，还有顶出风、侧出风的液冷一体机。该方案可以对储能柜/仓内的电池及设备进行冷却、加热，适用于工商业储能柜、户外式分布储能、储能集装箱、储能电池柜等各大储能系统中，具备安全稳定、高效节能、节省空间、智慧控制等优势。

海尔智慧楼宇储能温控空调凭借先进的热管理系统，通过全面的热仿真，热管理系统控制技术，优化了能量管理与储存过程，可支持极端环境条件下，系统安全稳定可靠运行。同时，凭借智能化的电池和能源管理系统，精确监控电池状态，优化电力分配，从而降低运维成本并延长系统寿命。在储能电池生产场景中，推出转轮除湿+高温热泵再生的一体式热回收集成方案，达到-40℃到-80℃的露点温度，保障安全的生产环境。此外，该方案中应用的热泵技术更加节能环保，实现系统节能50%，也降低了企业运行成本。在温控场景中，海尔智慧楼宇发布四大液冷机组新品，可确保24 h不间断运转下，温度稳定在±0.2℃，提供可靠高效的控温解决方案；在能源应用场景中，以全直流变频物联多联机、楼宇能源智控平台为核心，融合光驱储能等新型能源技术，实现多能互补和综合能源利用，满足用户热水及冷暖需求，助力建筑降本提效。

2) 蜂巢能源6.9 MWh超大容量短刀液冷储能系统

2024年4月11日，第12届储能国际峰会暨展览会上，蜂巢能源发布了储能专用短刀电芯、家庭储

能、工商业储能、电力储能等全系列储能产品解决方案。其中最亮眼的包括：针对储能场景正向开发的350 Ah和730 Ah大容量储能短刀电芯，以及全球首款6.9 MWh-20尺短刀液冷储能系统。

蜂巢能源采用自主研发的L500-325 Ah/350 Ah大容量储能短刀电芯，在业内率先推出极致安全、极致成本的电力储能产品-6.9 MWh短刀液冷储能系统。该系统采用CTR精简设计，零部件减少15%，占地面积较市场主流5 MWh储能系统节省20%；采用单开门方案，支持背靠背布置，极大提升项目利用率。蜂巢能源通过材料与设计改良创新，实现热扩散的有效抑制、膨胀的极致约束，具备更优的成组率、更灵活的消防切换形式。依托极致安全的飞叠短刀电芯，并采用CTR设计可实现双面强效液冷，实现高效温控策略，电芯本体温差降低40%，进而实现电芯寿命提升15%。

3) 科创储能10 MWh浸没式液冷储能系统

2024年4月11日，第12届储能国际峰会暨展览会上，科创储能发布了科创2.0全浸没液冷储能系统，采用领先业界的全液冷控温技术，全浸没PACK，4S融合，交直流一体，推出10 MWh浸没式液冷储能系统、150 kW/261 kWh及150 kW/522 kWh浸没式工商业一体机等新产品，创新技术加持，打造极致安全的储能系统。10 MWh全浸没液冷储能系统的能量密度286 kWh/m³对比6.7 MWh液冷方案提升35%，对比5.2 MWh风冷方案提升132%。

4) “大”储时代，派沃储能液冷技术

派沃储能液冷机组是一种创新的热管理解决方案，它通过使用液体介质对电池进行温度控制，解决了传统风冷方案在高功率、高密度应用场景中的散热难题。储能液冷系统采用液体冷却剂为电池包提供最佳工作温度条件。液冷系统采用了先进的技术来优化流量分配，使得温差可以得到精准控制，从而减少热失控现象的产生，电芯最高温升下降39.2%，电芯温差下降200%，电池包间电芯温差能控制在3℃以内，达到更低的温升和更好的温度一致性，有效提高储能系统的安全性和延长使用寿命。派沃液冷机组采用标准化的模块集成，可根据不同应用场景的需求进行灵活配置和部署，满足不同规

模和类型的储能需求，后期维护便捷、高效；液冷适应严苛的高温、高湿、高盐雾、风沙等环境要求。在降本层面，一体化集成设计，减少箱体内部管路及装配工序，生产安装更便捷，降低成本同时空间利用率提升10%。此外，液冷系统集成化设计可减少导热胶的用量和厚度，降低热阻，让每个电芯的热交换更一致，延长电池使用寿命，降低运维成本。在增效层面，空间利用率的提高使系统体积能量密度提升10%。低能耗智能调节，降低全生命周期度电成本。

参考文献

- [1] 冯杰, 武卫东. 储能液冷热管理技术研究进展[J]. 制冷与空调, 2024, 24(11):1-11.
- [2] 徐俊, 郭喆晨, 谢延敏, 等. 储能锂电池系统综合管理研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10):1-23.
- [3] DANIELS R K, PRABHAKAR A. Experimental and numerical investigation on the effect of cell arrangement on thermal runaway propagation in air cooled cylindrical Li-ion battery modules[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108191.
- [4] HAN Peng, WANG Jiayun, ZHAO Xuemin, et al. Performance study of fin structure in air-cooled thermal management system for column power battery[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 104: 114697.
- [5] ALTUNTOP E S, ERDEMIR D, KAPLAN Y, et al. Enhancing Li-ion battery efficiency: an experimental study on hybrid cooling approach with paraffin and forced air convection[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 56: 103048.
- [6] HASAN H A, TOGUN H, MOHAMMED H I, et al. CFD simulation of effect spacing between lithium-ion batteries by using flow air inside the cooling pack[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108631.
- [7] LIN Y, CHEN Yiwen, YANG Jingtang. Optimized thermal management of a battery energy-storage system (BESS) inspired by air-cooling inefficiency factor of data centers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 200: 123388.
- [8] 康芳明, 苏庆宗, 王亚雄. 基于280A·h方块电池组风冷热管理单元的仿真研究[J]. 化工进展, 2024, 43(12): 6711-6722.
- [9] 白晓辉, 高渊博, 张玉碧, 等. 方形动力电池组多风道热管理研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(2): 260-268.

- [10] HOSSEINI Z S, JAFARI M, RANJBAR S F, et al. Three-dimensional numerical investigation of the effect of various parameters on the cooling performance of Li-Ion battery packs with three arrangements[J]. *International Journal of Thermofluids*, 2024, 24: 100971.
- [11] WU Chunxia, SUN Yalong, TANG Heng, et al. A review on the liquid cooling thermal management system of lithium-ion batteries[J]. *Applied Energy*, 2024, 375: 124173.
- [12] ZUO Huaiyu, HAN Jiacheng, XUE Song, et al. High-uniformity liquid-cooling network designing approach for energy storage systems by graph-coupled genetic algorithm[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 101: 113866.
- [13] ZHANG Bao, LI Yan, CHEN Zhanfeng, et al. Numerical study on heat dissipation of double layer enhanced liquid cooling plate for lithium battery module[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 206: 109329.
- [14] SAHA S, BOSE B, GARG A, et al. A topology optimization for design of double input-single output battery module liquid cooling plate with improved thermal performance[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112750.
- [15] DAMBROS TELLI G, GUNGOR S, LORENTE S. Counterflow canopy-to-canopy and U-turn liquid cooling solutions for battery modules in stationary Battery Energy Storage Systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121997.
- [16] 陈永康, 罗少华, 詹森, 等. 电池热管理系统蛇形散热冷板结构设计及拓扑优化[J/OL]. *汽车工程学报*, 1-13[2025-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1206.u.20241213.1612.004.html>.
- [17] 杨智颖, 卢伟, 姚嘉, 等. 基于变密度拓扑优化的液冷板散热流道设计[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(2):702-713.
- [18] 樊旭, 孟超, 张鹏, 等. 基于并联-倾斜流道液冷板的锂电池组大倍率放电液冷散热研究[J]. *电源技术*, 2024, 48(4): 655-664.
- [19] 张雅新, 张泉, 娄旭静, 等. 集装箱式储能电站两相冷板液冷系统的温控效果研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(6): 1921-1928.
- [20] 唐友名, 胡义, 王平, 等. 基于流道流量可调的锂电池散热特性研究[J]. *低温与超导*, 2024, 52(11): 33-39, 89.
- [21] 李君浩, 任晓龙, 杨炯, 等. 锂电池冷板新波形微流道传热特性研究及结构优化[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(11): 14-26.
- [22] 李岳峰, 丁纬达, 韦银涛, 等. 关键因素对储能浸没式锂电池包温度特性影响的研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(1):152-161. DOI:10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2024. 0638.
- [23] 钟恺为, 王长宏, 吕琪铭, 等. 锂离子电池浸没式冷却的研究进展[J]. *电池*, 2024, 54(2):265-270. DOI:10. 19535/j. 1001-1579. 2024. 02. 026.
- [24] 周海洋, 张振东, 盛雷, 等. 储能用锂电池浸没式热性能调控仿真及热安全实验研究[J/OL]. *储能科学与技术*, 1-11[2025-04-11]. [https://doi.org/10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2024. 1056](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1056).
- [25] 李岳峰, 徐卫潘, 韦银涛, 等. 储能锂电池包浸没式液冷系统散热设计及热仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(10):3534-3544. DOI:10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2024. 0186.
- [26] 陈岳浩, 陈莎, 陈慧兰, 等. 储能电池组浸没式液冷系统冷却性能模拟研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(2):648-658. DOI:10. 19799/j. cnki. 2095-4239. 2024. 0751.
- [27] 廖晓怡, 王长宏, 张志会, 等. 基于浸没式热管理系统的锂电池模组性能研究[J]. *节能*, 2024, 43(9): 1-5.
- [28] ZHOU Haobing, LI Weifeng, YANG Weibo, et al. A hybrid battery thermal management strategy that couples internal PCM with external air-jet cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 98: 113127.
- [29] WANG Yuan, WANG Yutao, HE Tianbiao, et al. A numerical study on a hybrid battery thermal management system based on PCM and wavy microchannel liquid cooling[J]. *Renewable Energy*, 2024, 235: 121273.
- [30] ZHOU Haobing, GUO Xiaofeng, XU Lipeng, et al. Thermal performance of a hybrid thermal management system that couples PCM/copper foam composite with air-jet and liquid cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74: 109408.
- [31] LI Zhaoran, LIANG Gaoning, DING Yudong, et al. Experimental study on the thermal management performance of lithium-ion battery with PCM combined with 3-D finned tube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122794.
- [32] SUTHEESH P M, JOSE J, HOTTA T K, et al. Numerical investigations on thermal performance of PCM-based lithium-ion battery thermal management system equipped with advanced honeycomb structures[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 158: 107937.
- [33] 赵文飞, 李勇铜, 王玮铂, 等. 内嵌微柱群的渐扩液

- 冷板电池热管理性能研究[J]. 电源技术, 2024, 48(7): 20253-20259.
- [34] 熊慧敏, 彭跃中, 何励学, 等. 热管耦合相变材料全气候锂离子电池热管理系统性能分析[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 27-36.
- [35] 于采薇, 洪锦倍, 戚乙明, 等. 集装箱储能电站用热管自然冷却模块的节能效益分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 846-853.
- [36] HUANG Hai, LI Wei, XIONG Shusheng, et al. Single-phase static immersion-cooled battery thermal management system with finned heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123931.
- [37] FANG Hui, LIU Changhui, ZHANG Xuan, et al. Numerical study of a novel battery thermal management system coupled with heat pipe and cold plate[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124096.
- [38] ZHU Futang, WANG Yueqi, XIE Yi, et al. Analysis on battery thermal management system based on flat heat pipe at high discharging rate[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123798.
- [39] 蔡子扬. 基于热管技术的储能用锂离子电池热管理仿真分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.

3.7 制冰造雪技术

宋孟杰¹ 徐荣吉² 甄泽康¹ 杨西茹² 张龙¹ 王志学²

(1 北京理工大学; 2 北京建筑大学)

3.7.1 制冰技术

在现代工业与日常生活的众多领域中, 制冰技术均占据着不可或缺的地位。目前, 我国制冰技术已应用于冷链运输、商超餐饮、远洋捕捞、医学科研、人工冰场等领域, 制冰技术应用十分广泛^[1]。传统的制冰技术在制冰过程中能耗较大, 制冰效率较低, 并且目前制冰系统采用的R22、R134a、R404A等制冷剂, 全球变暖潜值(GWP)普遍较高, 导致温室气体排放量增加, 全球变暖程度加剧, 采用氨为制冷剂, 若出现制冷剂泄漏, 则会导致爆炸、中毒等安全问题。

在“双碳”政策的背景下, 如何减少对环境的影响, 开发低碳、高效、高质量的制冰技术成为了当今学界的研究重点之一^[2]。现代社会对冰的要求不再局限于简单的冷却功能, 而是追求更高品质、更专业的冰制品。采用高效制冷剂, 优化制冷循环系统等逐渐成为现代制冰机的发展趋势。如变频调速技术、真空闪蒸制冰技术、CO₂跨临界制冰技术等的应用, 使制冰机在能耗和环保性能上取得了巨大进步。物联网技术的融入使制冰设备更加智能化, 可实现远程控制和自动调节。磁制冷、热声制冷等新型制冷技术也在不断突破, 有望在未来实现商业化应用。

1) 冰的评估参数及要求

(1) 冰的评估参数

冰在各种场景中的功能与危害根源在于其固有的物理特性, 了解和评估冰的特性参数对于确保其不同应用场景中的适用性至关重要。冰作为一种常见的固态物质, 主要特性参数包括晶体结构、透明度、导热系数、密度、硬度、粘附力、强度、透明度、电导率和介电常数等。其中, 透明度体现冰的清澈程度, 冰中杂质和气泡越少, 其透明度越高。密度决定了冰的强度和耐久性, 密度会受到冰中杂质含量、气泡数量等因素的影响。一般而言,

低温环境下形成的冰硬度较高。通过全面评估这些参数, 可确保冰在商业娱乐、体育、航空航天、极地探险、交通运输等领域的应用中满足特定的性能要求, 从而提高安全性、效率和可靠性。冰的不同特性参数及测量方法如表3.7-1所列。

表3.7-1 冰的评估参数及其对应测量装置与方法

序号	评估参数	测量装置/方法
1	晶体结构	费氏旋转台 ^[3]
2	透明度	图像灰度分析 ^[2] /透光率测试仪 ^[4]
3	导热系数	热特性分析仪 ^[5] /稳态法/瞬态法 ^[6]
4	密度	体积法/排液法 ^[7]
5	硬度	落球法 ^[8] 布氏硬度计 ^[9] /里氏硬度计 ^[10]
6	粘附力	直接机械作用法、离心法 ^[11]
7	强度	电子万能试验机 ^[12]
8	电导率	直流和交流导电测量 ^[13]
9	介电常数	介电常数测试仪 ^[14]

(2) 不同领域对冰的要求

不同领域对冰的要求存在显著差异。例如在餐饮领域, 冰主要用于饮品调制和食物保鲜, 冰块必须符合卫生标准, 无异味、无污染, 确保食用安全^[15]。在酒店、酒吧、餐厅、冷饮店等场所, 则更加追求耐用和美观的透明冰^[3], 以保持饮品的美观和口感。冰块的形状和大小需求根据饮品和食物的不同而有所差异。而在娱乐场所, 如冰吧、主题公园的冰雕和装饰用冰同样需要高透明度的冰, 以增强视觉效果。同时冰雕和冰建筑需要较高硬度的冰, 以确保结构的稳定性和耐久性。在体育领域, 如冰球场和滑冰场, 需要坚硬、平整且温度均匀的冰面, 以确保运动员的安全和比赛公平性。冰面温度应为-7~-3℃, 冰层厚度应为3~5 cm, 冰场内任意位置处3 m区域内的冰面起伏应小于2 mm, 不同运动对于冰体要求有所差异^[16]。

在航行和交通领域, 飞机在飞行过程中, 机

翼、发动机进气道等部位容易结冰。这种冰会改变飞机的气动外形，增加飞行阻力^[17]。因此，飞机防冰系统要求冰的附着力尽可能小，以便在除冰时能够快速有效地去除。路面结冰会降低轮胎与路面之间的摩擦力，容易引发交通事故。因此，路面冰同样要求冰与路面的附着力小。极地船舶在航行过程中，需要了解海冰的厚度、硬度和强度和稳定性等，以设计合适的破冰船和规划航行路线。在极地研究中，需要精确测量海冰的厚度、密度、强度等物理特性，以评估海冰对气候和生态系统的影响。在电力领域，输电线路覆冰会增加线路的重量，导致线路下垂甚至断裂，影响电力供应。对于线路来说，要求冰的密度小、附着力弱，以减少其危害。

2) 制冰方式分类及评估

(1) 制冰方式的分类

由于制冷技术的不断进步，制冰技术可按照不同的分类标准进行分类。如按照制冷原理分类，制冰机可分为直接蒸发式制冷和间接蒸发式制冷两种

^[1]；按照出冰方式分类可分为连续型制冰机和间歇式制冰机；按照受用对象可分为工业制冰机、商业制冰机、家庭制冰机等^[18]；根据制冰冷能来源不同可分为两大类，如图3.7-1所示：一是直接冷源，即利用温度低于冰点冷源的冷能，与水进行热交换直接制冰，如河海自然冰和LNG冷能直接换热制冰。二是以太阳能为主的一次

能源和余热驱动的制冷设备制冷将水转化成冰，如吸收式制冷^[19]，吸附式制冷^[20]等，以及电能驱动的蒸汽压缩制冷^[21]、热电式制冰^[22]等。机械压缩式是最常见的制冰方法，利用制冷剂的相变循环实现制冷，具有效率高、成本低的优点，但存在噪音和环境污染问题。吸收式制冰利用热源驱动制冷循环，适合有余热可利用的场合，但效率相对较低。热电制冰基于珀尔贴效应，具有无噪音、无污染的优点，但成本较高且效率有限。四种典型制冰系统的示意图如图3.7-2所示。

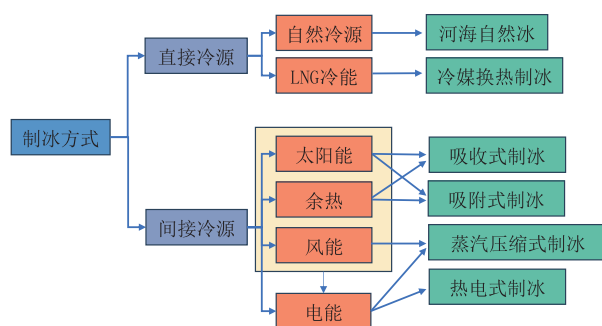


图3.7-1 制冰方式的基本分类

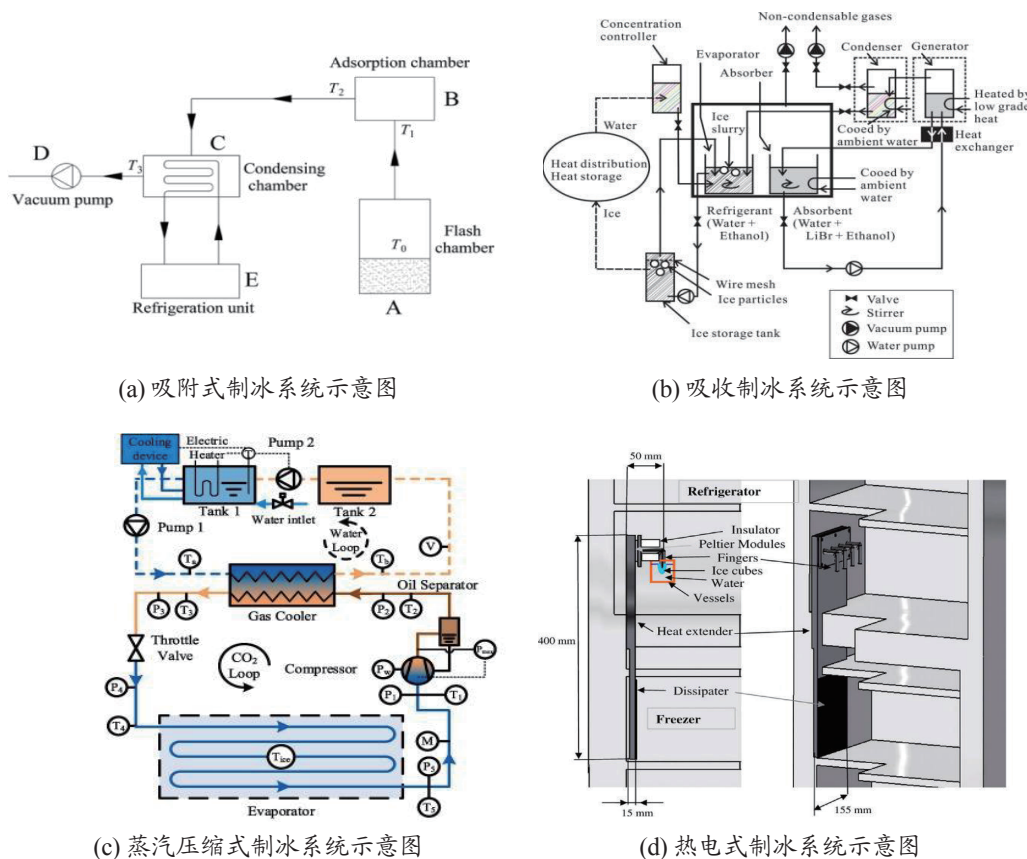


图3.7-2 四类典型制冰系统示意图

(2) 制取冰的类型

由于不同行业和应用场景对冰块的多样化需求，制冰机制取冰的类型有多种，主要包括冰块的颜色、形状、大小、硬度、融化速度等，如表3.7-2所示。目前常用的分类方法是按照冰的形状进行分类，如颗粒冰机、管冰机、片冰机、板冰机、块冰机和浆冰机^[18]等，制得不同大小和形状的冰如图3.7-3所示。形成区别的主要原因是蒸发器的不同，同时所制冰与蒸发器的成形、分离需要机械刮削破

碎，或间歇制热融化等方式，需要在蒸发器上另外设计一套辅助产冰系统。其中，浆冰含有直径为0.2~0.8 mm的小颗粒，与其他形式的冰相比，冰浆具有更好的热物理优势和良好的流动性，可以提高能效，降低建筑能耗^[23]。冰浆已成功应用于空调系统、制冷系统、食品储存、医疗领域、矿山冷却等诸多领域^[24]。人工方法制取冰浆方法，可分为静态制冰和动态制冰。静态制冰方法包括冰盘管式和容积式；动态制冰方法包括刮壁法、流化床法、真空法、直接接触法和过冷水法^[25]。

表3.7-2 冰的分类方法及其制取技术特点

序号	分类方法	冰类型	冰的制取特点
1	按成分分	淡水冰	用淡水制取的冰
		盐水冰	用盐水或海水制取的冰
2	按颜色分	白冰	由于冰晶间的汽泡，形成不透明的白色
		透明冰	生产过程中，增加吹气和搅拌所制得的冰
		彩色冰	增加食用色素所制得的冰，冰雕工艺用冰
3	按形状	颗粒冰	有圆形、方形、雪花和鳞形等各种形状的冰
4		管冰	圆柱形中心透空的冰
5		片冰	约3 mm厚的片状冰
6		板冰	约5~10 mm的平板形或圆弧形冰
7		块冰	罐式模具内冷却，外形尺寸较大的块状冰
8		浆冰	约100μm的微小冰晶

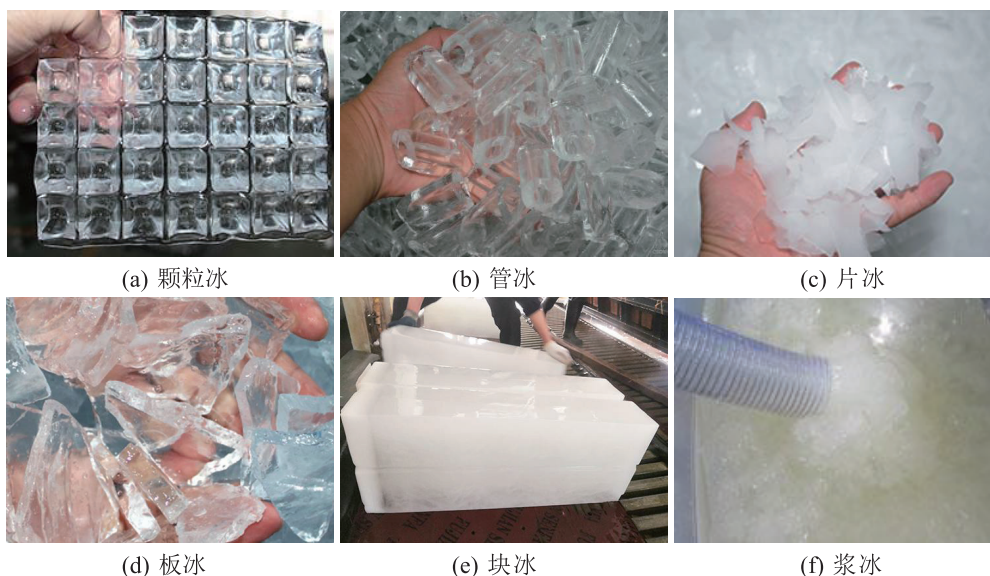


图3.7-3 制冰机制取的不同形态的冰

(3) 制冰方法的评估

评估制冰方法的主要指标包括能效比、制冰速度、冰质特性、环境友好性和经济性等^[26]。能效比反映了制冰的能量利用效率；制冰速度决定了生产效率；冰质特性影响冰的适用性；环境友好性评估对臭氧层和温室效应的影响；经济性则考虑设备投资和运行成本。提高制冰效率和质量的主要途径包括：优化制冷循环系统，采用新型环保制冷剂，改进热交换器设计，应用智能控制系统等。如采用变频技术可以根据实际需求调节压缩机功率，提高能效；采用高效的传热技术，如使用纳米流体作为制冷剂可增强传热效果；优化冷凝器和蒸发器的结构设计可以提高热交换效率；引入人工智能算法可以实现制冰过程的精确控制。

3) 特种冰的制备技术

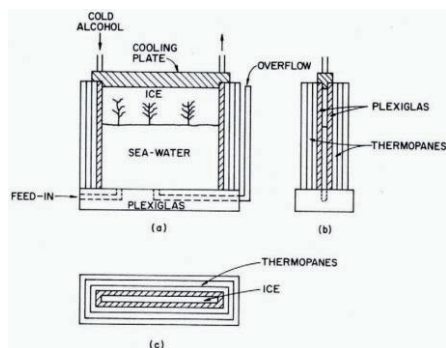
(1) 透明冰的制备技术

透明冰具有透明度高、形态完整、冻结坚实、

融化速度慢等优点，广泛应用于餐饮、旅游等行业。然而，透明冰的制作是制冰技术中的一个重要挑战，传统方法通过缓慢冻结和定向结晶来保证冰的透明度^[27]，但制冰时间较长，效率低，且所得冰体的透明度有限。单向冻结下，冻结速率小于 $3\text{ }\mu\text{m/s}$ 时，可以得到无气泡透明冰^[28]。为了加速冻结过程，虽然已尝试采用循环水法、鼓气法及搅拌法等手段来扰动水体以提升透明冰的制作速度，但这些方法仍面临设备繁琐、制冰效率低等挑战。目前通过搅拌法制备透明冰的最大速率可达 $7.5\text{ }\mu\text{m/s}$ ，平均速率可达 $4.17\text{ }\mu\text{m/s}$ ，制取长宽高为 $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的透明冰，需要约 200 min ^[4]。

(2) 极地海冰的模拟制备技术

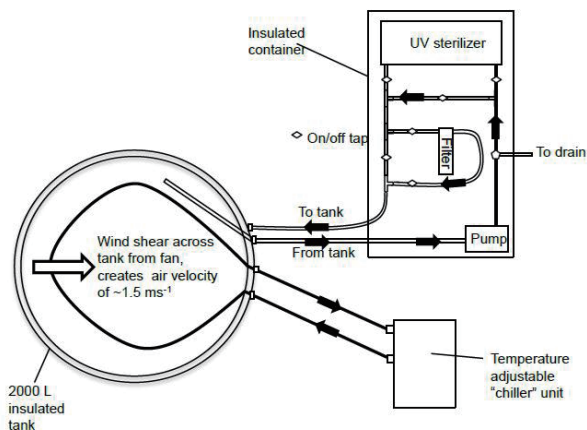
极地海冰是一种复杂的、多组分、多相的物质，由含有液体盐水包裹体的固体冰、固体盐和气泡组成。极地冰的模拟制备对于研究极地船舶的破冰性能、极地生态环境等具有重要意义。在实验室



(a) 二维Hele-Shaw ($50\text{ cm}\times 35\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$)



(b) 方形实验舱($2.35\text{ m}\times 1.35\text{ m}\times 1.7\text{ m}$)



(c) 圆柱形实验舱($1.32\text{ m}\times 1.39\text{ m}$)

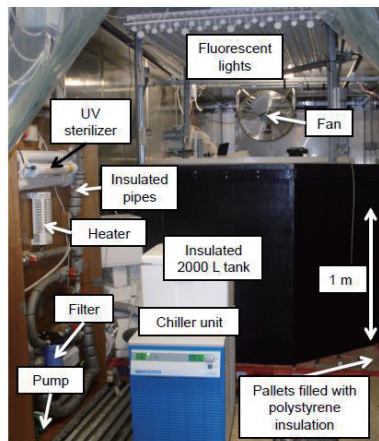


图3.7-4 不同结构的极地海冰模拟实验舱

中模拟极地环境条件，需要建造低温试验舱，控制环境温度、水温、盐度、水流和风速等参数，使其能够在严格可调节的环境条件下受控生长^[29]。现有的实验室设施差别很大，设计时往往考虑到特定的观察结果。试验舱的长度从至几十厘米至几十米不等。较大的储罐最大限度地减少了边缘效应，并允许采取更多的样品。小型储罐的建造和运行成本更低，边界条件也能得到更好的控制。用于形成人工海冰的冷却方法包括冷板和冷气环境控制^[30]。试验舱可设置为长方体，圆柱体，或准二维Hele-Shaw单元，在长方体容器中产生波浪更容易，而圆柱形容器的边缘效果更简单。Hele-Shaw单元允许对内部海冰结构进行可视化，如图3.7-4所示。

(3) 速度滑冰的分层制备技术

速度滑冰的分层制备技术是一个复杂而精细的过程，它确保了冰面的质量、平整度和硬度，为运

动员提供最佳的比赛和训练环境。速度滑冰的冰面结构如图3.7-5 (a) 所示，在基础冰之上按照预定的厚度和层数逐层浇筑冰层。每一层冰都需要经过充分地冷却和固化，以确保其稳定性和硬度。在冰层达到一定厚度后，需要在冰面上进行喷漆和划线工作，为运动员提供清晰的比赛路线和区域划分。目前对速度滑冰冰面制备过程多是依靠制冰师的经验对相关参数进行调整，尚无理论支持。速度滑冰冰面的制备过程受分层浇注厚度、制冰用水电导率、冷板温度等较多因素的影响，在实验室中模拟制备需要严格控制相应参数。冰内的气泡是影响速滑质量的主要因素，空气在冰中的溶解度低于在水中的溶解度，在冷冻过程中，水中的气泡会被冰挤出^[31]。随着冻结锋的移动，冻结锋处的空气浓度增加，当达到临界值时发生成核。当气泡生长速率大于 $20 \mu\text{m/s}$ 时，冰中只有蛋形气泡，当小于 $10 \mu\text{m/s}$ 时

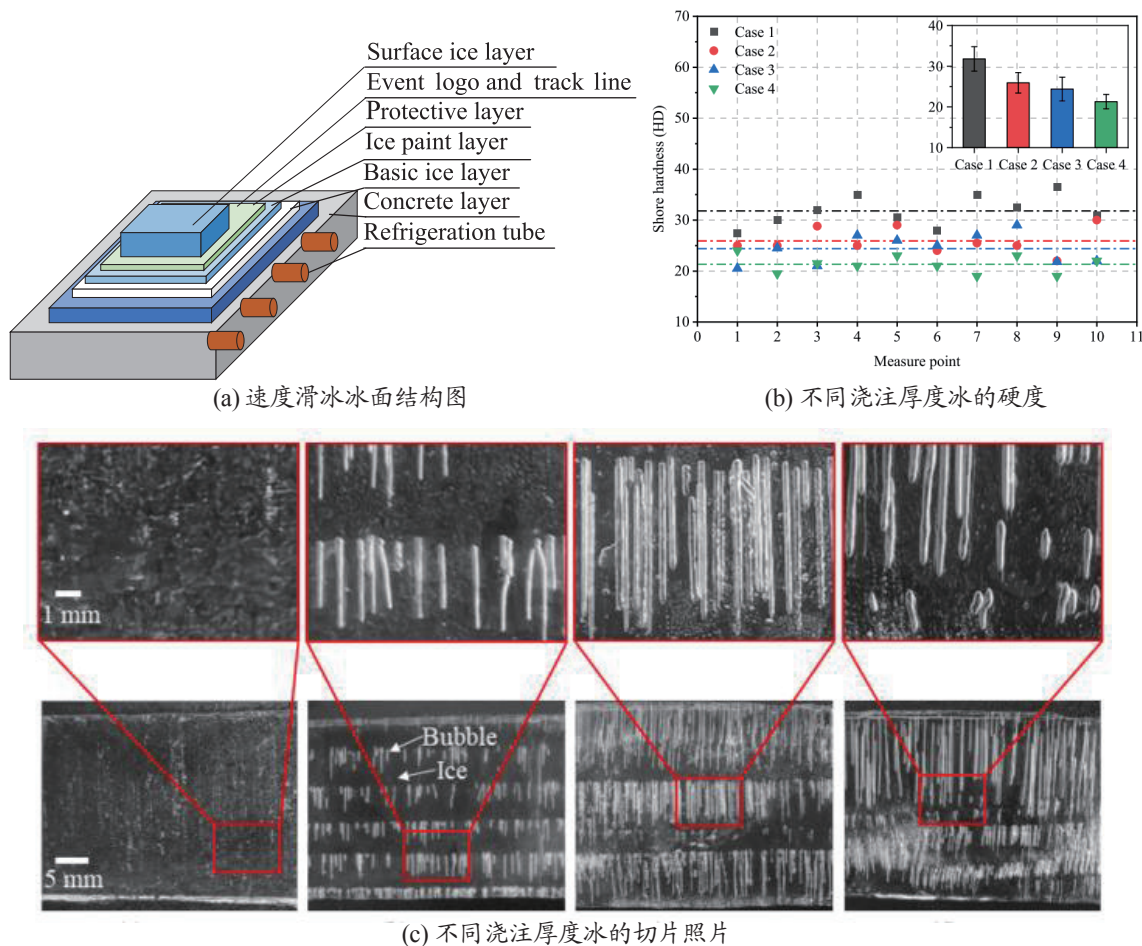


图3.7-5 不同结构的极地海冰模拟实验舱

只有针状气泡^[4]。采用实验研究不同浇注厚度对速度滑冰冰面的影响可以得到,冰内部的气泡出现明显的分层现象。如图3.7-5,每次浇注1 mm与直接冻结30 mm的冰相比,透明度从25.30%提高到65.67%,冰的硬度也增加了49.3%^[8]。

4) 制冰过程的数理模型

制冰过程的数学物理模型是理解和优化制冰技术的重要工具。通过模型可以预测冰在不同温度、湿度和流场条件下的生长速度和形态。常用的模型包括晶体生长模型、热传导模型和流体动力学模型等。晶体生长模型详细刻画了冰晶体的成核、生长过程和晶体结构变化,有助于深入理解冰的微观结

构形成机制,进而实现对冰的物理性质,如透明度、硬度等的有效控制。如图3.7.6(a)所示为实际生长的晶体和模型示意图^[32]。热传导模型描述热量在冰层中的传递过程,是预测冻结速度的基础。流体力学模型则聚焦于制冰过程中水流的流动特性,分析水流速度分布、压力变化等因素,对于采用循环水制冰等方法的设备设计具有重要意义。如图3.7-6(b)所示为层流降膜制冰模型示意图^[33],可通过优化水流路径和流速来提高制冰效率和冰的质量。然而,模型的误差和局限性也不容忽视,未来需要进一步发展多物理场耦合模型和高精度数值模拟方法,以提高模型的准确性和适用性。

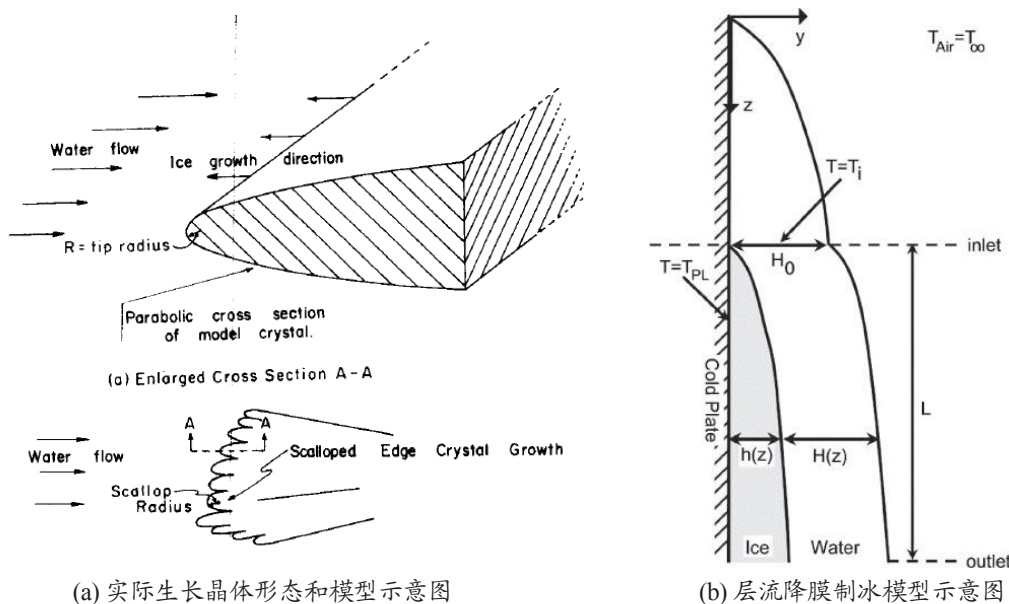


图3.7-6 冰生长模型示意图

3.7.2 造雪技术

“冰天雪地也是金山银山”。在北京冬奥会成功举办的带动下,冰雪产业装备、旅游经济迅猛发展。《2024中国冰雪旅游发展报告》指出,在政策红利、需求释放和产品创新等因素激励下,2023—2024冰雪季全国冰雪休闲旅游人数有望首次超过4亿人次,冰雪休闲旅游收入有望达到5 500亿元。阿尔卑斯山地区的冬季旅游和滑雪运动已成为当地经济增长的重要驱动力^[34]。2024年元旦期间,哈尔滨共接待游客304.79万人次,旅游总收入达到59.14亿元^[35]。然而,全球气候变暖正对冰雪旅游业带来挑

战,特别是在中低海拔地区,降雪量的下降趋势愈发明显^[36-37]。为应对自然降雪不足的问题,人工造雪技术逐渐成为保障滑雪场正常运营的重要手段。

当前的人工造雪技术在实际应用中存在运行能耗高、水资源浪费、雪质不易控制等问题。同时,在边缘气候条件下的造雪效率也会降低^[38]。且随着气候变暖,人工造雪的电力需求和碳排放将显著增加。预计在全球气温上升2℃和4℃的情境下,电力需求将分别增加18%和24%^[39]。常见的造雪设备包括雪枪和雪炮(塔式造雪机)^[40]。雪枪利用高压空气将水雾化为晶核,并与通过喷嘴雾化喷射到空气

中微小水滴碰撞成雪；而雪炮则通常结合强风力作用，将水雾化后的水滴远距离喷射，从而提高造雪效率^[41]。目前，自主人工造雪设备已从最初的引进仿制转向自主设计与创新，相关技术水平也已取得了显著进展。许多企业与研究机构不断优化造雪技术，致力于降低能耗、提高造雪效率。例如，通过改进喷嘴、核子器的结构设计、优化气动系统以及引入智能控制系统^[42-45]。这些技术支撑了冰雪装备产业的可持续发展，也为冰雪运动、冰雪旅游产业可持续发展提供了有力支撑。

1) 造雪机核心部件的研究

人工造雪的基本原理是在核子器内通过压缩空气与水的混合作用将水雾化成细小液滴，液滴在低温环境下迅速冻结，形成雪花生长的关键要素——晶核；这些晶核再聚集经喷嘴雾化的水汽（滴），在落地之前继续生长生成雪花^[46]。核子器和喷嘴是造雪机的核心部件，如图3.7-7所示。核子器则提供晶核，承担着提升造雪效率的作用，在极端环境下甚至可以担负主要造雪任务。喷嘴用来雾化液滴，承担着提升造雪量的作用。其中，喷嘴为压力旋流的单相流动，而核子器是一种空气助力喷嘴，其内部为气液两相流。核子器混合腔内液体受压缩空气影响并在相互作用下破碎成细小液滴群，通过泄压口，产生的微小液滴在低温环境下凝结成冰晶^[47]。国产自主开发的喷嘴、核子器在实际应用中仍存在雾化效率较低、成核均匀性难以保证、使用寿命较短等问题^[48]。Dong等^[49]研究发现适当增加喷孔直径和旋流槽面积可有效减小雾化液滴粒径，提高喷雾流量。当入口压力为0.6~1.4 MPa、喷孔直径为4.0 mm、旋流槽宽度为2.25 mm时，旋流喷嘴的雾化液滴尺寸最好，流量最大。Duan等^[50]研究发现，随着气液压力比的增加，流态从扰动波浪型到稳定环状流的转变增强了液滴分布的均匀性和喷雾的稳定性。当气液压力比从20%增至67%时，液滴分布的均匀性提高了17%，稳定性提高了60%。核子器出口速度越大，射流温度越低，成核性能也就越高。黄志电^[51]设计了新型拉瓦尔核子器，在模拟中发现，出口速度提升了92%且出口射流的平均温度最大可降低70%，成核性能大幅提升。

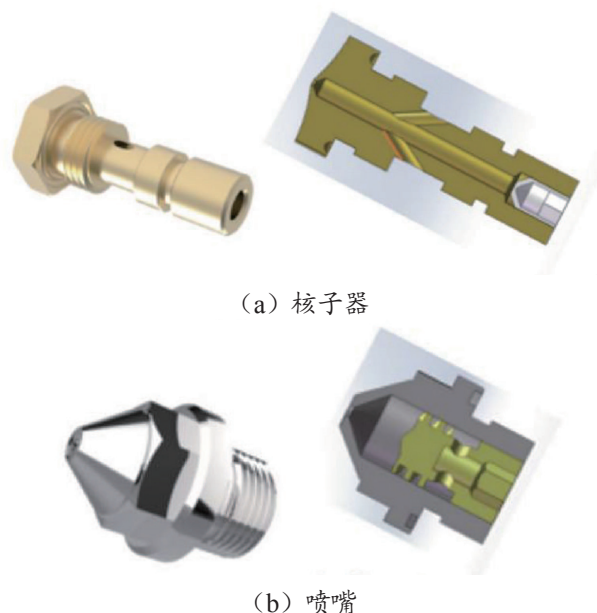


图3.7-7 造雪机核心部件^[15]

2) 核心部件匹配及整机性能提升

造雪过程依赖水路、气路和风路的物质流供应，以及“喷嘴-喷嘴”和“核子器-喷嘴”多部件之间的协同作用。其中，核心部件的输入参数直接影响造雪机的整体性能。因此，优化多喷嘴间的雾化规律、合理布局核子器与喷嘴的位置是提升整机性能的关键。Zhang等^[52]研究发现了双喷嘴协同作用可以显著降低索特平均直径（SMD），提高液滴的碰撞与分离概率，从而优化雾化效果。李睿等^[53]研究进一步证明，双喷嘴间的干涉作用导致韦伯数（ We ）提高，液滴粒径沿轴向方向先减小后增大。当喷嘴间距 $d=15$ cm、气液质量混合比为0.10时，液滴粒径分布最均匀。黄志电^[51]对核子器和喷嘴的匹配数量进行了模拟研究，并对两者的匹配数量进行了优化，结果表明雪密度随液滴粒径的增大而增大，适宜造雪的液滴数量占比最大可提升30%，拓展了造雪机的适用范围，可满足滑雪场中初、中、高和竞速级滑雪道的要求。此外，不同的布局和配置对人造雪的雪质特征也具有显著影响。Yang等^[54]通过实验研究了在不同喷嘴数量、不同喷嘴口径等情况下的雪质特征，结果发现使用24个1.9 mm喷嘴或72个混合直径喷嘴时能显著提高人造雪密度分布的均匀性。

3.7.3 制冰造雪技术的优秀案例

1) 2022年北京冬奥会国家速滑馆(冰丝带)

国家速滑馆是2022年北京冬奥会标志性场馆，拥有亚洲最大的全冰面设计，面积达1.2万 m^2 ，如图3.7-8(a)所示。通过冰面的分区控制，可满足速度滑冰、短道滑冰、花样滑冰、冰壶、冰球等5大类冰上运动项目的竞赛要求。国家速滑馆是世界上首个采用 CO_2 跨临界直冷制冰技术的冬奥速滑场馆。该技术是目前世界上最先进环保的制冰技术，碳排放值趋近于零，在极大幅度降低对环境造成破坏的同时相比较传统冰场可有20%以上的能效提升。全冰面模式下每年仅制冷部分就能节省200多万度电，相当于约120万棵树实现的碳减排量，整个制冷系统的碳排放趋近于零。通过场馆的智能能源管理系统，还能够把制冰过程产生的废热用于除湿、冰面维护、场馆生活热水等，具有较强的示范引领作用和显著的节能环保意义。

国家速滑馆首次使用40~50 m的不锈钢盘管制作制冰排管，管道焊口多达11 098道，创造性运用自融型自动焊接工艺和三维激光扫描技术，实现焊接一次合格率达到99.27%，制冰管道位置偏差小于5 mm；解决了120 km制冰排管抽真空分次大体量充注 CO_2 的技术难题。通过精准的系统调试，冰面温差控制在0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内，远超国际滑联1.5 $^{\circ}\text{C}$ 的要求。1.2万 m^2 全冰面4个单元可独立控温，实现冰面“同时运行、不同使用”。场馆于2021年1月启动首次制冰，经底板清洁、底冰浇筑、喷漆划线、分层多次浇冰、冰眼敷设、防撞垫安装等多道工序，场馆制冰

顺利实施，如图3.7-8(b)所示。冰面质量得到了国际奥委会、国际滑联的高度认可，为制作“最快的冰”打下坚实基础。

2) “全球最大的室内滑雪场”——上海耀雪冰雪世界

上海耀雪冰雪世界位于临港新城，是一个集餐饮、住宿、娱乐、购物和休闲度假于一体的大型综合度假区，拥有全球最大的室内真雪滑雪场。滑雪场的总面积超过9万 m^2 ，相当于12个标准足球场的大小，垂直落差接近60 m。该滑雪场全年维持在-5~-3 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境。滑雪场内设有3条雪道：高级雪道、中级雪道和1条S形雪道，总长度接近1200 m。其中，最长的S形雪道达到460 m，坡度为12 $^{\circ}$ ，专为提升滑雪者的技术水平和滑行体验而设计。

雪场自2024年5月开始进行造雪作业，造雪机采用的主要是天冰S6型号造雪机和森林雪XFY-06造雪机，如图3.7-9(a)和(b)所示。S6型号造雪机适用于室温低于-2 $^{\circ}\text{C}$ 的滑雪场，其单日最大造雪量可达30 m^3 。该设备的最低安装高度为6 m，无须额外的制冷系统即可正常造雪运行。该机配备的智能控制系统使操作员能够远程调节雪质、自动控制造雪过程。此外，由于其造雪质量稳定、雪层均匀，整机可靠性较高，可保障雪场365天连续运营，属于国际一流造雪装备。XFY-06型造雪机适用于室温在-5~-3 $^{\circ}\text{C}$ 的环境，该设备配有6个喷嘴，单位时间的造雪量为3~6 m^3 。设备仅设气管和水管2个接口，且主要消耗空气和水，因此具有很高的节能效果。



(a) 国家速滑管内景



(b) 制冰师浇冰过程

图3.7-8 国家速滑馆内景及浇冰过程



(a) 天冰S6型号造雪机



(b) 森林雪XFY-06型号造雪机

图3.7-9 上海耀雪冰雪世界所用造雪机

3) 亚布力阳光度假区滑雪场

亚布力滑雪场是2025年第九届亚洲冬季运动会的雪上赛事举办地，位于中国黑龙江省哈尔滨市尚志市亚布力镇。作为中国规模最大、功能最完善的综合性滑雪场之一，亚布力滑雪场占地面积达2 255公顷，配备高、中、初级滑雪道及越野滑雪道，总长度达50公里，其中最长单条雪道可达5 000 m。如图3.7-10所示，滑雪场采用诺泰克（N-07S）造雪机，该机型属于零度出雪的全新一代制雪设备，隶属于诺泰克N-07系列。其工作环境温度范围为-30~0℃，供水温度需低于5℃，单位时间造雪能力介于30~90 m³/h之间。该设备造雪性能稳定，所生成的雪质细腻均匀，对环境适应性强，能够在相对较高的气温条件下稳定运行，从而满足高温造雪需求。



(a) 亚布力滑雪场造雪过程

4) 2022年北京冬季奥运会延庆高山滑雪中心

国家高山滑雪中心是冬奥会高山滑雪系列项目的主要场馆，也是国内首个按照冬奥赛事标准建设的高山滑雪场。该中心拥有9.2公里长的滑道系统，包括3条正式竞赛雪道和4条训练雪道，赛道落差接近900 m。如图3.7-11所示，国家高山滑雪中心投入了170余台天冰TF10炮式造雪机，进行24 h不间断作业，以完成高质量的赛道雪层建设。天冰为比赛雪场提供了包括全自动枪式造雪机、全自动化泵站、全自动化造雪控制系统等技术支持，保障了造雪工作的高效和精准。

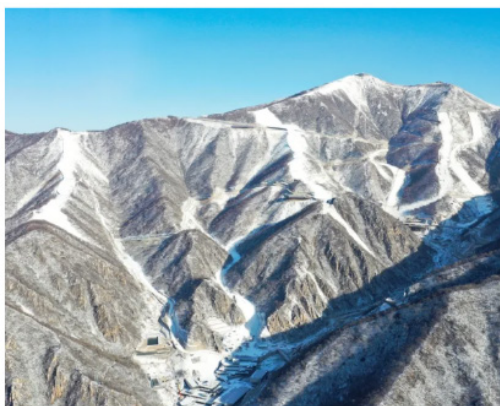
TF10造雪机支持全自动控制系统，可远程调节水量、气压和核子器参数，适应-30~-5℃的环境变化。其配备24个四孔喷嘴和8个核子器，提供16个调



(b) 诺泰克（N-07S）造雪机

图3.7-10 亚布力阳光度假区滑雪场及所用造雪机

节档位，确保在不同环境条件下始终保持最佳工作状态。此外，配置新型风机转速为1 500 r/min，有效降低振动和噪音。楔形丝式水过滤器采用高质量镍铬钢制成，无焊缝设计，三角形不锈钢丝替代传



(a) 国家高山滑雪中心全景

统网格结构，便于清洁并增强耐用性。造雪机配备冷却回路的铝制无油活塞式压缩机，确保无油泄漏风险。内置气象站，能够精准测量温湿度等天气信息，实时反馈环境数据，便于调控造雪参数。



(b) 天冰TF10型号造雪机

图3.7-11 北京冬季奥运会延庆高山滑雪中心全景及所用造雪机

参考文献

- [1] 董庆鑫. 超声辅助制冰机制冰过程传热特性及制冰性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2024.
- [2] 李晓燕, 矫佳伟, 丁奕涵, 等. “双碳”背景下制冰新技术研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 245-254.
- [3] MELO F S, CARDOSO R P, HERMES C J L. Quality and quantity trade-offs in clear ice making[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 161: 94-100.
- [4] SHAO Keke, ZHEN Zekang, GAO Runmiao, et al. Comparative experimental study of the effect of loading rate on the typical mechanical properties of bubble and clear ice cubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2024, 159: 111264.
- [5] 于俊. 考虑辐照影响的人工冻结冰物理力学性质试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [6] 黄嘉豪, 王英连, 廖旭辉, 等. 稳态法测量冰导热系数的实验研究[J]. 大学物理, 2023, 42(11): 28-31.
- [7] 徐梓竣. 乌梁素海湖冰单轴压缩强度试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [8] LIANG Yonghui, SONG Mengjie, UGLANOV D A, et al. Experimental study of the effect of different pouring thicknesses on ice surface characteristics in the layered ice making process for speed skating[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 264: 125461.
- [9] 范晓鹏, Pavel Talalay, 张楠, 等. 冰硬度试验台设计与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 67-70.
- [10] 吴姣姣. 冰粒空气射流冰粒即时制备与参数调控研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- [11] WORK A, LIAN Yongsheng. A critical review of the measurement of ice adhesion to solid substrates[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 98: 1-26.
- [12] WANG Qingkai, LI Zhaoquan, LU Peng, et al. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay, East Antarctic[J]. The Cryosphere, 2022, 16(5): 1941-1961.
- [13] 傅恬. 冰冻NaCl溶液的导电性及腐蚀机理研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.
- [14] EVANS S. Dielectric properties of ice and snow—a review[J]. Journal of Glaciology, 1965, 5(42): 773-792.
- [15] 现制现用食用冰卫生规范: T-XMSSAL081-2022.
- [16] 体育场地使用要求及检验方法 第8部分: 运动冰场: GB/T 22517. 8—2024[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [17] YU Sirui, SONG Mengjie, GAO Runmiao, et al. A review of icing prediction techniques for four typical surfaces in low-temperature natural environments[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122418.
- [18] 顾建中. 我国制冰设备概述[J]. 制冷技术, 2005, 25(1): 26-30.
- [19] ZOU Lingeng, ZHANG Xuelai. Exergy analysis of vacuum ice production device by solid adsorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 136: 46-52.
- [20] ASAOKA T, ENDO Y. Experimental study on

- absorption ice slurry generator with ethanol solution as the refrigerant[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 162: 120333.
- [21] ZHANG Zhenying, WANG Shiqi, ZHANG Paiwei, et al. Effect of the refrigerant charge on transcritical CO₂ direct evaporation ice-making system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123283.
- [22] RODRÍGUEZ A, VIÁN J G, ASTRAIN D. Development and experimental validation of a computational model in order to simulate ice cube production in a thermoelectric ice-maker[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(14/15): 2961-2969.
- [23] WANG Hong, FENG Rongzhen, DUAN Huanlin, et al. Study on sub-cooler based on the characteristics of the super-hydrophobic surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 76: 205-210.
- [24] SHAO Jingjing, DARKWA J, KOKOGIANNAKIS G. Review of phase change emulsions (PCMEs) and their applications in HVAC systems[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 94: 200-217.
- [25] HU Rui, ZHANG Chong, ZHANG Xuelai, et al. Research status of supercooled water ice making: a review[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 347: 118334.
- [26] JABARI F, MOHAMMADI-IVATLOO B, LI Guiqiang, et al. Design and performance investigation of a novel absorption ice-making system using waste heat recovery from flue gases of air to air heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 782-792.
- [27] ZHEN Zekang, GAO Runmiao, SONG Mengjie, et al. An experimental study on the effect of CO₂ laser powers on melting characteristics of clear ice—Part II: Vertical irradiation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 246: 122946.
- [28] SHAO Keke, SONG Mengjie, SHEN Jun, et al. Experimental study on the distribution and growth characteristics of trapped air bubbles in ice slices at different freezing temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122600.
- [29] THOMAS M, FRANCE J, CRABECK O, et al. The Roland von glasow air-sea-ice chamber (RvG-ASIC): an experimental facility for studying ocean–sea-ice–atmosphere interactions[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(3): 1833-1849.
- [30] HARE A A, WANG F, BARBER D, et al. pH evolution in sea ice grown at an outdoor experimental facility[J]. *Marine Chemistry*, 2013, 154: 46-54.
- [31] SHAO Keke, SONG Mengjie, ZHANG Xuan, et al. Growth and distribution characteristics of trapped air bubbles in ice slices[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(11): 113319.
- [32] VLAHAKIS J G, BARDHUN A J. Growth rate of an ice crystal in flowing water and salt solutions[J]. *AIChE Journal*, 1974, 20(3): 581-591.
- [33] CLICHE A, LACROIX M. Optimization of ice making in laminar falling films[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15/16): 2260-2270.
- [34] WITTING M, SCHMUDE J. Impacts of climate and demographic change on future skier demand and its economic consequences—Evidence from a ski resort in the German Alps[J]. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 2019, 26: 50-60.
- [35] ZHANG Yong, GUO Junhao, ZHU Yifan, et al. Snow resource reutilization: design of snow collection and compression equipment based on functional analysis method[J]. *Sustainability*, 2024, 16(21): 9564.
- [36] WANG Xing, WANG Feiteng, REN Jiawen, et al. Assessing the key concerns in snow storage: a case study for China[J]. *The Cryosphere*, 2024, 18(7): 3017-3031.
- [37] HOCK R, RASIL G, ALER C, et al. High mountain areas[M]//IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019: 131-202.
- [38] SCOTT D, MCBOYLE G. Climate change adaptation in the ski industry[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(8): 1411-1431.
- [39] FRANÇOIS H, SAMACOÏTS R, BIRD D N, et al. Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 935-942.
- [40] FAUVE M, RHYNER H. Physical description of the snowmaking process using the jet technique and properties of the produced snow[J]. *Snow Engineering*, 2004: 215-218.
- [41] NORDBØ M. Experimental investigation of artificial snow production in marginal geographic conditions[D]. University of South-Eastern Norway, 2021.
- [42] 吴海峰, 刘佳维, 王瑞祥, 等. 造雪机用旋流式喷嘴的雾化性能研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(6): 65-73.
- [43] 赵巍, 潘书毅, 张华, 等. 一种新型造雪核子的数值模拟研究[J]. *上海理工大学学报*, 2023, 45(3): 260-270.
- [44] 白鹏程, 金向阳, 王莎莎, 等. 风扇叶型对造雪机气动性能的影响研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(5): 574-579.

- [45] 熊通, 董佩文, 刘国强, 等. 造雪机高效原理及其自动化技术分析[J]. 制冷与空调, 2023, 23(2): 19-24.
- [46] 董佩文, 刘国强, 张博文, 等. “冰雪魔术”变水成雪: 人工造雪技术[J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2447-2449.
- [47] 郝亚辉, 吴海峰, 张博文, 等. 室外造雪机用核子器雾化性能规律实验研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 88-93.
- [48] 刘国强, 熊通, 晏刚, 等. 人工造雪技术现状与研究进展[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 1-16.
- [49] DONG Peiwen, CHEN Qi, LIU Guoqiang, et al. Effects of geometric parameters on flow and atomization characteristics of swirl nozzles for artificial snowmaking[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 56-65.
- [50] DUAN Kaiqiang, WU Haifeng, HAO Yahui, et al. Experimental study on spraying mechanisms of the gas-liquid internal flow in an air-assisted nozzle[J]. 2024, 36(10): 104116.
- [51] 黄志电. 造雪机核心部件流场数值模拟与系统匹配优化[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- [52] ZHANG Bowen, WANG Ruixiang, WU Haifeng, et al. Atomization characteristics of twin nozzles for outdoor snow-makers application[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 139: 60-69.
- [53] 李睿, 刘斌, 胡恒祥, 等. 人工造雪过程中喷嘴雾化特性的研究[J/OL]. 制冷学报, 1-11[2025-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20241223.1657.004.html>.
- [54] YANG Xiru, WU Haifeng, WANG Ruixiang, et al. Experimental study on the effect of nozzle configurations on snow quality for outdoor snow-makers[J]. 2024, 36(12): 127125.

3.8 AI+大数据

陈焕新¹ 杜志敏²

(1 华中科技大学; 2 上海交通大学)

随着大数据技术的飞速发展, 制冷领域正经历一场前所未有的智能化变革。在这一过程中, AI与大数据的深度融合为制冷系统的优化、节能、故障诊断与预测带来了全新的机遇。通过实时收集运行数据和环境参数, 结合大数据分析与AI算法, 不仅可以实现对制冷空调系统的精准控制与管理, 还能在能耗优化、故障预防、系统可靠性提升等方面发挥重要作用。本文将探讨AI与大数据在制冷领域的应用现状与进展, 旨在为制冷行业的智能化转型提供参考与借鉴。

3.8.1 大数据分析

1) IoT平台

随着物联网 (Internet of Things, IoT) 和大数据技术的飞速发展, 制冷空调领域迎来了前所未有的变革机遇。通过将传感器网络与大数据分析相结合, 不仅能够实现对设备的实时监控与精准控制, 还能在环境管理和城市能源优化等方面发挥重要作用, 为制冷空调系统的智能化升级提供了坚实的技术支撑。

在制冷空调设备、建筑物和周围环境中部署各类传感器可收集制冷空调设备的运行数据与环境数据。例如, 温度传感器可以精确测量制冷空调设备内部及周围环境的温度, 为温度控制和调节提供基础数据; 压力传感器实时监测制冷剂的压力变化, 有助于判断设备的运行状态是否正常; 流量传感器则对制冷剂的流量进行监测, 确保制冷系统的循环正常。在建筑物周围环境中部署气象传感器监测室外温度、湿度、风速、风向等气象参数, 可以为后续的环境分析和调控提供全面的数据支持。利用物联网技术, 将传感器采集到的大量实时数据通过有线或无线通信方式传输到数据中心或云端服务器, 通过环境数据与制冷空调设备的运行数据来了解环境因素对设备运行的影响以及设备在不同工况下的运行状态。

2) 大数据分析

制冷大数据分析是利用大数据、云计算、物联网等技术手段, 对制冷设备运行数据和能耗数据进行采集、分析、建模和管理, 挖掘数据价值。其在生产、使用、维护各个环节都发挥重要作用。

在生产环节, 大数据可用于分析市场需求的变化趋势, 预测未来制冷空调产品的市场需求和发展趋势, 并且通过分析用户的购买行为和使用习惯, 了解用户的需求和偏好, 为企业的产品推广和市场营销提供依据。在使用环节, 利用大数据技术对制冷空调系统的能耗进行实时监测和分析, 识别能耗浪费的环节, 制定节能措施, 如构建空调能耗预测模型, 优化空调系统的运行参数。并且, 结合大数据和物联网技术, 实现对制冷空调系统的智能控制, 根据室内外环境参数和用户需求, 自动调节空调的运行状态, 提高系统的能效, 保证用户的热舒适性。在维护环节, 大数据技术通过收集和分析空调设备的运行数据, 建立故障诊断模型, 实现对设备故障的早期预警和准确诊断。

3) 相关产品

目前国内多家空调企业都在极力建立楼宇空调数据云平台, 打造一个服务于空调及暖通系统、智能楼宇系统的综合性楼宇自动化管理平台。

冰轮环境借助边缘侧运行控制平台和云端大数据平台, 打造出“双核引擎”协同工作的智能互联系统, 为客户提供涵盖能源管理、节能控制、故障诊断的一站式解决方案。该系统通过构建云边端一体化框架, 实时监测能耗和碳排放, 将粗放式能源管理转化为精细化管理, 显著减少人工运维需求。同时, 采用“边缘计算+云端平台”架构, 实现制冷系统运行的自适应最优节能控制, 平均节能率超25%, 负荷峰值降低20%以上。自研复合模型故障诊断技术则实现精准故障预测与诊断, 保障系统高可靠连续运行。目前, 该系统已成功推广应用于伊利

集团等十几家单位，助力制冷行业向数字化、智能化转型迈进。

海信日立推出的ECO-B智慧楼宇综合管控平台，集空气管理、能源管理、运维管理三大子系统于一体，全面满足机房与末端设备的集控/群控、能耗监测与分析等需求。空气管理系统涵盖高效机房、多联机集控、末端自控及环境监测功能，基于机器学习技术为用户提供健康舒适的空气环境；能源管理系统包含光伏储能、峰值响应等功能，通过拓扑结构动态识别技术提升水末端运行能效；运维管理系统以设备台账为核心，实现运维全过程闭环管理，提升后勤运维效率。该平台针对企业商业、政府公建、教育培训、医疗卫生以及工矿厂房五大行业领域提供定制化解决方案，有效降低楼宇能源消耗，减少碳排放和环境污染，同时通过故障预诊断技术降低设备故障率和维修成本。

海尔智慧楼宇通过构建实时流处理和离线处理相结合的大数据系统，实现了对几十万个空调相关设备的云端物联网管理。实时流处理负责设备数据的实时解析、标准化、监控以及高并发支撑，并提供实时数据看板；离线处理则专注于历史数据存储、能耗定额分析和离线数据分析看板等。数据中台通过数据转换、清洗、存储和离线数仓集成，打破数据孤岛，支持复杂数据分析与决策。技术实现上，采用Kafka、Redis、InfluxDB等工具进行数据存储与管理，Flink实现实时流计算，Spark和Hive等技术进行离线处理，确保了系统的高效性和可扩展性。

3.8.2 AI预测性维护

1) 基于AI的故障诊断与预测

暖通空调（HVAC）系统，作为建筑、工业及数据中心等领域的关键组成部分，其能源消耗占据了建筑总能耗的50%~60%。鉴于系统的复杂性，故障类型多样，不仅影响了环境的温湿度调控，还导致了能源的过度消耗、设备使用寿命的缩减，甚至可能触发安全事故。这些故障往往发展缓慢，在出现明显迹象或触发报警系统之前，已经造成了能源的浪费与设备的损害。人工检测手段不仅效率低下，还要求检测人员具备较高的专业技能。然而，随着

自控系统的广泛应用，实时监测系统故障成为了可能，有助于提前识别异常状态，提升能源利用效率，从而有效缓解能源浪费问题，促进节能减排目标的实现^[1]。

近年来，AI技术在设备维护领域引发了显著的变革。传统的设备维护策略主要依赖于定期的人工检查与经验判断，而AI技术则通过分析历史数据、实时传感器信息及设备运行状态，能够实现对潜在故障风险的提前识别与预测，进而推动维护策略向主动方向转变。这一转变不仅显著降低了设备故障的发生率，还有效避免了生产中断，减少了维修成本，提升了系统的整体运行效率。

在AI预测设备故障的过程中，首先需收集并处理来自各类传感器的数据，包括但不限于温度、压力、振动等监测指标。AI系统利用这些历史故障数据与设备的工作参数，构建预测模型，以识别潜在的故障事件。常用的技术涵盖机器学习（如监督学习、无监督学习）与深度学习等领域。这些技术通过对数据进行特征提取、模式识别与异常检测，能够精确预测设备故障的发生时间与类型。

相较于传统方法，基于AI的故障诊断与预测展现出显著的优势。一方面，AI技术能够高效处理海量数据，并从中提取复杂模式，使得在识别潜在问题方面更加精确。另一方面，AI预测不仅能够确定故障的类型，还能提供故障可能发生的时间范围，从而协助维护人员提前做好准备，实施预防性维护措施，减少非计划停机时间。此外，AI技术具备在不同工作环境中实时更新预测模型的能力，随着数据的不断积累，预测结果的准确性也将持续提升。

2) AI故障诊断与定位的机器学习方法

AI预测设备故障需要收集并处理来自各类传感器的数据，即数据驱动的方法，借助机器学习算法，从历史正常运行数据中提取特征，并通过当前数据与历史特征匹配度的分析，实现HVAC系统故障的检测与诊断。该方法近年来在HVAC系统故障检测领域崭露头角，尤其适用于训练数据充足的情况。

相较于传统的基于专家规则和物理模型的检测方法，这些方法在传感器故障检测的准确性上展现出显著优势。不过，它们通常局限于传感器故障的

考虑，未将硬件故障纳入考量范围。总体而言，AI在故障诊断与定位方面依赖于多样化的机器学习方法，其中主要涵盖以下几种：

(1) 无监督学习

无监督学习则不依赖标注数据，通常用于从设备的历史数据中挖掘出异常模式或不寻常的设备行为。常用的无监督学习算法有主成分分析（PCA）方法、聚类算法（如K-means）和自编码器，这些方法可以有效识别设备的潜在故障和异常。

主成分分析作为一种常用的数据降维技术，在HVAC系统故障检测与诊断任务中表现出色^[2]。它通过正交变换，将原始高维数据投影到主成分空间和残差空间。无故障样本主要投影于主成分空间，同时因噪声的存在，在残差空间也会有少量投影。而故障样本在残差空间的投影则明显大于无故障样本。因此，通过对比样本在残差空间的投影大小，可以有效区分故障样本与无故障样本。

香港理工大学的Wang等^[3]提出了基于PCA的空气处理单元传感器故障检测与诊断技术。天津大学的李冬辉等^[4]则研究了PCA在定风量空调系统中传感器故障诊断的应用。上海交通大学Du等^[5]提出了结合PCA与联合角度分析的变风量通风系统故障检测与诊断方法，并探索了该方法在HVAC系统传感器故障检测中的应用。此外，华中科技大学的胡云鹏^[6]也对PCA在冷水机组传感器故障检测中的效率进行了深入研究。

(2) 监督学习

监督学习通过将已标注的故障数据（如设备状态与故障类型）输入算法进行训练，使AI能够根据设备的实时数据预测故障类型。这种方法常用的算法有支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等。

在暖通空调系统的故障检测与诊断研究中，支持向量机（SVM）作为一种高效的机器学习算法，因其在小样本数据集上的优异表现而备受青睐。该算法的核心思想是通过构建一个最优超平面，使得两类样本之间的间隔最大化，从而实现故障样本与正常样本的有效区分。SVM的理论基础建立在样本线性可分的假设之上，当低维空间中样本呈现非线性

分布时，可通过核函数将数据映射到高维特征空间，实现非线性问题的线性化处理。

在具体应用方面，国内外学者开展了大量创新性研究。上海交通大学的Han等^[7-8]将SVM多类分类器应用于冷水机组的故障诊断；浙江大学的Zhao等^[9-10]则采用支持向量数据描述（SVDD）方法进行冷水机组的故障检测。此外，华中科技大学的Li等^[11]通过主成分分析（PCA）与SVDD的结合，深入探讨了冷水机组早期故障的识别与诊断方法。

(3) 深度学习

在暖通空调系统智能诊断领域，传统机器学习方法由于固有的算法局限性，难以有效捕捉高维数据中复杂的非线性关联规律。随着信息技术的快速发展，计算效能的持续提升为深度学习技术的突破创造了条件。这类具备多层次非线性映射能力的智能算法，凭借其卓越的特征学习能力，在计算机视觉、语音处理等领域取得突破性进展后，设备故障诊断领域也开始应用。

近些年，深度学习算法也开始在暖通空调系统故障检测与诊断领域崭露头角。根据算法原理之间的差异性，暖通空调系统故障检测与诊断领域常用的深度学习算法主要有深层神经网络、卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN），通过训练神经网络，AI能够从原始传感器数据中自动学习故障模式，提供高精度的故障诊断与定位。这些模型通过端到端学习方式，直接从设备运行数据中提取故障特征，显著提升了诊断的智能化水平。研究表明，深度神经网络通过增加隐含层数量，可有效增强非线性建模能力。Lee等^[12]采用五层网络结构对空气处理机组三类典型故障进行辨识，获得95.16%的准确率；Han等^[13]建立的二层网络在冷机七类故障识别中达到99.3%的优异性能；Zhou等^[14]通过对比实验证实，深层网络在多联机系统诊断任务中较浅层网络具有明显优势。

卷积网络通过局部感受野和权值共享机制，在降低参数数量的同时实现了深层特征提取。Yan等^[15-16]学者分别采用一维卷积架构对冷机七类故障进行检测，结果表明其性能显著优于传统反向传播网络。Li等^[17]团队进一步引入类激活热图技术，构建可解释

性卷积模型，在保持98.6%准确率的同时增强了诊断透明性。Eom等^[18]将卷积网络应用于热泵制冷剂故障诊断，获得99.9%的识别精度。Sun等^[19]针对热泵典型故障的检测实验，以及Cheng等^[20]开展的横向对比研究，均验证了卷积网络较传统方法的优越性。

针对设备运行数据的时序特性，递归网络展现出独特优势。宋海川等^[21]开发的长短期记忆网络在风冷机组故障诊断中，准确率显著超越传统分类器。李冬辉等^[22]将该模型应用于冷水机组传感器故障检测，取得良好效果。花君等^[23]系统对比了不同递归架构的性能差异，发现长短期记忆网络在冷机诊断任务中具有最佳表现。

当前智能诊断技术已实现从故障识别到精确定位的跨越式发展，有效提升了设备运维效率。但需注意的是，这类方法普遍面临数据依赖性强的问题：一方面，数据驱动模型对训练样本的数量和质量要求较高，而实际工程中故障数据的获取成本较大；另一方面，模型的有效性受限于训练数据覆盖的工况范围，在动态运行条件下可能出现误报率升高现象。统计显示，基于深度学习的诊断方法对冷水机组轻度故障的检出率可达95%以上^[2]，较传统物理模型方法提升显著，但其鲁棒性和泛化能力仍需进一步改善。

3) 相关产品

美的楼宇科技凭借 AI 技术，在楼宇管理领域实现了从故障检测诊断到系统运行优化的全方位技术突破，为提升楼宇管理效率开辟了全新路径。

在故障检测与诊断这一关键领域，美的楼宇科技创新性地采用神经网络与专家系统融合技术。利用深度学习算法对海量历史数据进行深度挖掘，探寻数据之间复杂的关联和潜在模式。同时，将多年积累的丰富行业经验进行规则化处理，转化为计算机能够理解并运用的知识体系。通过这种独特的技术融合，系统能够精准识别潜在故障，提前发出预警信号，并依据智能算法提供针对性的解决方案，有效保障设备的稳定运行。美的硬件设备搭载的AI自适应技术是一大技术亮点。该技术运用先进的传感器技术，对环境参数和设备运行状态进行实时、精准地监测。基于实时采集的数据，AI算法能够动

态调整设备运行模式，实现卓越的双一级能效。在该技术的驱动下，全负荷COP最高可提升 7.41%，国标PLV最高提升10.2%，运行费用降低约 50%，展现出AI技术在能源管理方面的巨大优势和节能潜力。美的核心的KONG Smart Control系统，依托先进的数据挖掘算法，对系统运行数据进行深度分析。该系统不仅能够对楼宇设备进行实时优化调节，在现有BA系统基础上平均再节能10%~30%，还具备强大的AI智能健康诊断功能，能够提前发现系统中潜在的隐患，并主动采取措施解决问题，确保楼宇系统始终处于高效、稳定的运行状态。

3.8.3 AI节能减碳及智能控制

随着全球能源危机和气候变化问题日益严峻，节能减碳已成为全球关注的焦点。制冷空调系统作为能源消耗和碳排放的主要领域之一，亟需采取更加高效的技术手段来优化其能效，降低能源使用与碳排放。群体智能算法（Swarm Intelligence, SI）模拟了自然界中生物群体的行为，其自组织、适应性和协作性等特性使其成为优化复杂系统的有效工具。在制冷空调领域，群体智能算法已被广泛应用于系统优化、能源调度、故障诊断和智能控制等方面。以下将详细介绍几种常见的群体智能算法，并探讨它们在制冷空调系统中的应用。

1) AI智能控制的机器学习算法

(1) 遗传算法（Genetic Algorithm, GA）

遗传算法是一种基于自然选择和遗传学原理的优化算法。其基本思想是通过模拟自然界生物的繁殖、变异、选择和遗传等过程，逐步搜索问题的解空间，寻找最优解。GA的基本操作包括选择、交叉、变异等，能够在复杂的多维搜索空间中找到全局最优解。颜永民等^[24]利用遗传算法，针对空调系统运行过程中的参数进行了全局优化，并且利用某建筑中的空调冷源系统对优化算法进行了验证。由结果可知，运用遗传算法对运行参数进行优化后的系统可以减小7%的能耗。刘志斌^[25]以某商场空调系统中的冷冻水循环为研究对象，运用改进的遗传算法控制模块在 TRNSYS上建立了该商场空调系统中冷冻水侧的仿真平台，并结合历史数据分析，在仿真平台上对冷冻水侧的运行参数和特性进行了优化

研究,由优化结果可知,冷冻水侧平均节能率约为5.70%,平均能效提升约为0.27。

(2) 粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)

粒子群优化算法是由Kennedy和Eberhart于1995年提出的一种模拟鸟群觅食行为的优化算法。PSO通过模拟鸟群在寻找食物过程中的群体行为,利用粒子的位置和速度更新策略,在搜索空间中寻找最优解。PSO的基本思想是,每个粒子代表一个解,所有粒子通过相互之间的信息交流,不断调整自己的位置,从而达到优化目标。赵泽华^[26]将多目标粒子群优化算法经过改进后应用于某机场航站楼供冷系统,其以热舒适性、系统总能耗和航站楼内空气的品质作为优化目标,建立了改进的多目标粒子群优化模型,经过验证,该模型的区域供冷系统总能耗可降低13.72%,同时,航站楼内热舒适性提升了62.83%,空气品质提升了23.42%。Ardakani等^[27]采用了粒子群算法与遗传算法来处理空调系统中冷水机组的最佳负荷问题。将机组的功率作为遗传算法中对搜索进行指导的评价函数,相应的优化目标是机组的部分负荷率。已有方法相比,该方法可以解决局部最优的问题,同时有着较快的收敛速度。

(3) 蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO)

蚁群算法是一种受蚂蚁觅食行为启发的优化算法。蚂蚁在寻找食物的过程中通过释放信息素与其他蚂蚁进行信息传递,逐渐形成一条最短路径。ACO算法通过模拟蚂蚁群体在搜索最优路径的过程中,结合局部搜索与全局搜索能力,找到问题的最优解。刘少博等^[28]基于PID技术并结合蚁群算法作为空调压缩机的柔性控制模型,其控制目标是空调末端的温度与湿度。经过相应的测试表明,与传统的空调压缩机控制策略相比,该柔性控制方法在半个月内可实现节能3 103 kW·h。

(4) 人工鱼群算法 (Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)

人工鱼群算法是一种模拟鱼群行为的优化算

法,由李晓晶等^[29]在2002年提出。AFSA通过模拟鱼群在水中觅食、群聚、追尾和随机游动等行为进行位置更新,从而寻找最优解。该算法具有较强的全局搜索能力和局部搜索能力,能够有效避免陷入局部最优。Zheng等^[30]为降低冷水机组功耗与冷却塔功耗,提出了一种改进的人工鱼群算法,所提出的算法融合了全局搜索与局部搜索,经过测试表明,所提出的算法有一定的收敛能力与节能效果。

2) 相关产品

珠海格力电器股份有限公司的变频空调低碳动态运行关键技术研究及应用项目,通过创新性地将人工智能算法应用于制冷空调系统,实现了智能化、节能化与低碳运行的突破。通过AI驱动的动态能效寻优控制技术,空调能够在确保用户舒适度的同时,实时优化能效,最大程度降低能耗。房间负荷自学习与自适应调节技术使空调能够根据环境变化智能调整运行方式,进一步提升节能效果。研发的专用AI芯片为智能控制提供强大算力支持,解决了传统硬件的限制。经过测试,与传统空调相比,AI空调在全年最低节电量约92.73度,节能率达13.6%,动态能效提升至少15.8%。截至2024年11月,技术已在331.79万台空调中应用,年节电量达到3.08亿度,累计减少CO₂排放约30.67万吨。

海尔智慧楼宇通过专家系统、白箱模型和大数据驱动的黑箱模型,将AI技术深度应用于多联机、热泵、高效机房和风水联动系统等空调产品。其AI技术可实现精准负荷预测、设备建模与动态控制优化,使系统运行与实际负荷精准匹配,达到能效最优。同时,AI支持全局寻优、故障预测等功能,降低能耗,延长设备寿命。在高效机房和风水联动系统中,AI赋能实现极致节能,其中系统设计和设备节能贡献70%的节能效果,优化控制策略贡献20%,AI智慧节能贡献10%。海尔的AI多联机及热泵系统通过云边协同、负荷寻优和故障监测技术,提升运行效率,降低能耗成本,保障系统稳定运行。目前,海尔AI赋能的高效机房综合EER已进入7时代,多联机及热泵项目节能效果达20%以上,COP提升10%以上。

3.8.4 能源系统智能规划与控制

1) 源网荷储系统

现代能源系统普遍展现出大规模性、非线性特征、时变性以及不确定性，这些特性对各类能源管理任务构成了显著挑战^[31]。传统基于物理学的模型虽然依赖于详尽的物理知识和特定能源系统参数的精确把握，但在模型的精度与可扩展性层面仍存有明显的局限。人工智能技术的兴起为能源管理领域开辟了新的解决方案路径，借助机器学习与深度学习模型，能够高效且自动化地从庞大的历史能源数据库中提取有价值的知识信息。近十年来，人工智能已成为推动能源领域发展的关键技术，广泛应用于能源系统的智能化设计、高效运行以及精细维护等多个方面^[32]。

(1) 源

作为能源系统的核心驱动力，发电源（涵盖火力发电厂、核电厂及可再生能源资源）的效能至关重要。有效的电厂设计与配置策略、高精度的可再生能源发电预测能力以及科学的电厂运行风险评估机制，均是影响能源系统整体效率与稳定性的关键要素。近年来，众多研究致力于运用多样化的人工智能技术来优化能源系统中的供应端组件。

Zhang等^[33]将机器学习回归算法融合应用于地理空间数据，成功识别中国潜在的屋顶光伏安装区域。类似地，开发机器学习框架以估算太阳能发展密度，有助于合理规划太阳能电厂或分布式能源资源的规模与布局^[34]。此外，Wang等^[35]基于长短期记忆（LSTM-RNN）的日光伏发电预测方法，结合时间相关性修正技术，进一步提升了预测精度。同时，基于集成学习的深度学习模型也被广泛应用于小时级太阳能发电量的预测^[36]。在风能领域，Peng等^[37]将深度学习算法与数值天气预测的结合使用，显著提高了风能发电预测的准确性。另外，合成少数类过采样技术与机器学习的结合应用，为风力发电机的故障检测提供了新的解决方案^[38]。这些先进的人工智能技术同样在其他类型电厂的运营风险监控中发挥了重要作用^[39]。

(2) 网

高效且稳定的能源网络（包括电网、区域供热/供冷网络及天然气网络）对于实现能源的无缝传输至关重要。人工智能技术能够显著提升能源网络的综合性能，通过优化网络拓扑设计、改进定价机制以及增强故障检测与诊断能力，推动能源网络管理的全面升级。

例如，Jiang等^[40]采用高斯原子发现方法、结合频率和电压特征的隐马尔可夫模型以及机器学习算法生成的故障等高图，为智能电网中的故障识别与定位提供了有力支持。Li等^[41]通过深度强化学习算法的应用，成功研发出一种可解释的终端用户定价政策，有助于实现能源市场的公平与高效。此外，Wang等^[42]采用双阶段注意力机制的递归神经网络（RNN）在短期碳价预测方面展现出显著优势。

(3) 荷

在能源系统的需求端，人工智能技术主要应用于能源设备的智能控制、预测性维护及负荷预测等方面。Zsembinski等^[43]运用深度学习技术在多家庭建筑运营成本最小化方面取得了显著成效。Zhuang等^[44]通过强化学习与时间序列预测技术的结合使用，有效优化了供暖、通风和空调（HVAC）系统的控制策略。此外，Zeng等^[45]通过智能优化算法的应用进一步提升了多区域HVAC系统的整体运行效果。除了HVAC系统外，基于人工智能的控制优化方法还广泛应用于照明系统和电动汽车的充电管理。在照明控制领域，Shen等^[46]采用深度学习技术结合物体检测方法，实现了人员与灯光相对位置的精准测量，并根据人员分布动态调整控制策略，有效降低了能源消耗。同时，深度强化学习在电动汽车充电控制中的应用，不仅提高了可再生能源的自消耗率，还优化了充电状态管理^[47]。这些研究成果充分展示了人工智能在能源系统控制优化中的重要作用。

在能源设备的预测性维护方面，包括机器学习、深度学习和迁移学习在内的先进人工智能算法被广泛应用于构建故障检测与诊断模型。此外，准确的用户负荷预测对于能源系统的日常计划优化至

关重要。基于时间序列的深度学习模型（如LSTM神经网络^[48]、卷积神经网络^[49]及注意力机制^[50]等）及其组合应用，在负荷预测问题上取得了显著成果。同时，可解释的人工智能^[51]、可信赖的人工智能^[52]以及人工智能的安全性和隐私问题^[53]等研究主题也在积极进行中，以期推动人工智能技术在各种能源系统中的实际应用。

(4) 储

随着可再生能源资源的逐步整合，能源存储设备在能源系统中的地位日益凸显。电池、超级电容器、抽水蓄能及压缩空气储能等设备不仅增强了可再生能源的利用效率，还为电网提供了必要的灵活性。人工智能技术的引入进一步提升了能源存储设备的设计水平、运行效率及维护能力。

在优化电池快速充电协议方面，Attia等^[54]在贝叶斯优化与机器学习回归模型的结合应用取得了显著成效。Lu等^[55]通过深度学习算法的有效运用促进了锂电池健康状态（SOH）的精准估算。同时，Zhu等^[56]通过机器学习与迁移学习策略的结合使用，实现了锂电池容量的准确预测。此外，Severson等^[57]采用从电池初期循环数据中提取高性能时间序列特征的方法为电池循环寿命的预测提供了新的思路。

尽管人工智能在能源系统中的应用已取得诸多进展，但仍存在一些不足之处。首先，现有的能源人工智能模型通常具有任务特定性和模态特定性。大多数模型针对特定任务（如负荷预测）进行设计，在处理其他类似任务时面临挑战。随着能源系统规模的扩大，维护大量任务特定模型进行训练变得愈发困难。其次，当前模型在处理模态种类方面存在局限，通常仅依赖传感器值作为输入特征，而忽视了图像、视频和声音等其他信息形式的重要性。此外，人工智能模型与人类之间的互动问题尚未得到充分解决。目前的人工智能模型主要依赖于开放环路机制，忽视了领域专家和操作员的反馈意见。引入强化学习和人类在环机制有助于促进模型的持续学习与优化。最后，如何整合领域知识并提高能源人工智能的可解释性仍是未来研究的重要方向。

2) 相关产品

美的楼宇科技凭借其先进的“光储热柔”解决方案和虚拟电厂技术，在源（新能源）、网（电网）、荷（负荷）、储（储能）协同互动方面取得了显著成效，有力推动了新型电力系统的转型。

美的楼宇科技的“光储热柔”系统，是能源供给侧的核心技术。该系统巧妙地整合了光伏发电、储能设备以及热泵空调，形成一个高效的能源生产与管理体系。通过 iEasyenergy 云平台，整个系统能够实现动态调优，实时监测和调整能源的生产与分配。以“流动的绿盒子”项目为例，这一技术的应用效果显著。在采用美的“光储热柔”系统之前，该项目的能源自给率仅为 30%，在接入系统后，能源自给率大幅提升至 90%。这不仅意味着项目对外部电网的依赖大幅降低，同时也极大地增强了项目抵抗电网波动的能力，保障了能源供应的稳定性和可靠性。

在负荷侧，美的楼宇科技的虚拟电厂技术发挥着重要作用。虚拟电厂并非传统意义上的发电厂，而是通过先进的信息技术和通信手段，将分散的空调负荷资源进行聚合。利用其独有的分钟级调控能力，能够快速响应电网的需求变化。

在浙江省试点项目中，美的虚拟电厂展现出了强大的调控能力，实现了20.6万千瓦的调控容量。这一技术有效地参与了电网的需求响应，极大地缓解了电网峰谷差问题，提升了电网的整体运行效率，保障了电力系统的稳定运行。

储能技术是能源存储与稳定供应的关键环节。美的楼宇科技在这一领域取得了重要突破，开发出适应极端环境的液冷机组。该机组能够在-40~80℃的宽温环境下稳定运行，解决了传统储能设备在极端温度下性能下降的问题。

同时，美的通过热管理算法的优化，进一步提升了电池的寿命与安全性。这些技术创新不仅提升了储能设备的性能，还为储能技术的广泛应用奠定了基础。美的在储能技术方面的成果，已牵头制定了相关国家标准，彰显了其在行业内的技术领先地位。

美的楼宇科技通过“光储热柔”解决方案和

虚拟电厂技术，以及在储能技术上的创新，构建了一个以用户为中心的能源生态。这些技术的协同应用，不仅为用户提供了高效、稳定的能源解决方案，也为实现“双碳”目标下的新型电力系统转型提供了有力的技术支持。

3.8.5 大模型及应用

1) 大模型概述

大模型是指包含大量参数且通过海量数据进行训练的人工智能模型。随着计算能力的提升和数据的增加，大模型能够处理更复杂的任务，并表现出卓越的能力。大模型通常采用 Transformer 架构，其中如 GPT（生成预训练变换器）和 LLM（大语言模型）都是基于此技术。GPT 系列和类似的模型通过无监督学习方法在海量文本数据上进行预训练，然后进行特定任务的微调，能够有效地理解和生成语言。LLM 则是指训练在海量数据集上，能够理解并执行多种任务的大型语言模型。此外，Transformer 架构以其高效的计算方式和强大的并行处理能力，成为了现代大模型的基础。

截至2022年末，OpenAI推出的ChatGPT语言大模型在社会上引起了广泛瞩目。凭借“大模型+大数据+大算力”的综合优势，ChatGPT能够通过自然语言交互高效完成多样化任务，展现出跨场景、多功能及跨学科的任务处理能力。

近年来，大模型服务平台正逐步向个人用户开放，并加速向商业应用领域拓展。各家公司在此领域各有侧重：例如，国内百度基于其文心大模型开发了知识增强型语言大模型“文心一言”，提供APP、网页版及API接口等多种服务形式。讯飞星火认知大模型则具备开放式知识问答、多轮对话、逻辑推理及数学运算能力，且对代码和多模态信息具有较强的理解能力。值得一提的是，讯飞与华为联合发布了国内首款支持大模型训练私有化的全国产化产品——“星火一体机”，该产品助力企业迅速实现讯飞星火大模型的私有化部署、场景应用及专属大模型的训练优化。近期，由杭州深度求索人工智能基础技术研究有限公司研发的深度求索（DeepSeek）大模型在网络上广受关注，DeepSeek不仅开源了其生成式人工智能算法、模型及训练细

节，还允许用户免费使用、修改、浏览及构建相关代码。截至2025年1月27日，DeepSeek-R1已在美区iOS应用商店免费应用排行榜上超越ChatGPT，位居榜首。

在大模型开源生态方面，同样呈现出“百花齐放”的态势，主要包括开源框架与开源大模型两大类。开源大模型能够显著降低大模型研究的门槛，进而推动大模型应用的繁荣发展。例如，飞桨作为国内自主研发的深度学习框架，早在内部阶段便支持了大规模分布式训练，并涵盖了计算机视觉、自然语言处理等多个领域的模型。微软推出的DeepSpeed大模型训练框架，则通过ZeRO技术减少了冗余内存访问，使得万亿级模型的训练成为可能。此外，百川智能开发的Baichuan系列模型，支持中英双语，采用高质量训练数据，在多个基准测试中表现出色，并且该系列模型还开源了多种量化版本，以供研究者参考与利用。

2) 垂类大模型

在暖通空调和制冷领域，垂直类大模型通过特定行业数据的训练，能够提供更加精准、定制化的服务，其核心价值在于优化效率、降低成本、提升智能化水平，并推动行业向绿色低碳方向转型。AI智能助手可以提供制冷产品的远程维护支持。首先自然语言处理技术可辅助工程师通过语音或文字交互快速获取维修建议，缩短故障处理时间。并且基于AI智能助手的客服系统，能够指导用户排查制冷产品常见问题，同时分析用户反馈数据，指导产品迭代。上海交通大学制冷与低温工程研究所研发的“建筑能源领域大模型e-GPT 1.0”，是基于AI代理（AI Agent）技术的交互式人工智能工具平台。该平台为建筑能源、暖通空调及制冷行业提供智能化技术服务，通过AI深度学习算法模型，进行能源大数据分析、预测，支持建筑节能、高效机房能效提升、能源设施的预测性维护等任务。

e-GPT 1.0，作为一款大规模预训练语言模型，依托于强大的AI智能检索与深度学习能力，能够为建筑能源行业提供专业的故障诊断、能效评估、节能控制策略推荐等服务。目前，该平台已上线暖通空调与制冷机组的能效评估、高效机房节能控制建

议、数据中心智能运维等功能，为行业提供全周期智能化管理解决方案，助力推动建筑行业的碳达峰碳中和目标。



(扫码进入)

图3.8-1 建筑能源领域大模型e-GPT 1.0

用户可通过访问 <http://8.133.193.141:3000> 或扫描图中的二维码使用。

据Gartner预测，到2026年，30%企业将常态化使用AI助手处理核心业务流程。而在制冷产业，AI渗透率已从2021年的7%增长至2024年的23%，其中AI助手类工具贡献超40%增量价值。这一变革不仅带来效率提升，更推动行业向知识驱动型模式转型。

参考文献

- [1] 赵阳, 端木琳. 暖通空调系统智能化故障检测诊断研究综述与展望[J]. 区域供热, 2018(2): 58-63.
- [2] 章超波. 知识—数据驱动的暖通空调系统故障检测与诊断方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [3] WANG Shengwei, XIAO Fu. AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(2): 147-160.
- [4] 李冬辉, 王乐英, 李晟. 基于PCA的空调系统传感器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 130-136.
- [5] DU Zhimin, JIN Xinqiao, WU Lizhou. Fault detection and diagnosis based on improved PCA with JAA method in VAV systems[J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3221-3232.
- [6] 胡云鹏. 基于主元分析的冷水机组传感器故障检测效率研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] HAN Hua, GU Bo, HONG Yingchun, et al. Automated FDD of multiple-simultaneous faults (MSF) and the application to building chillers[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(9): 2524-2532.
- [8] HAN Hua, CAO Zhikun, GU Bo, et al. PCA-SVM-based automated fault detection and diagnosis (AFDD) for vapor-compression refrigeration systems[J]. HVAC&R Research,

- 2010, 16(3): 295-313.
- [9] ZHAO Yang, WANG Shengwei, XIAO Fu. Pattern recognition-based chillers fault detection method using Support Vector Data Description (SVDD)[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1041-1048.
- [10] ZHAO Y, WANG S, XIAO F. . A novel fault detection strategy for centrifugal chiller based on support vector data description (SVDD)[C]//International Conference on Applied Energy [ICAE]. 2012.
- [11] LI Guannan, HU Yunpeng, CHEN Huanxin, et al. An improved fault detection method for incipient centrifugal chiller faults using the PCA-R-SVDD algorithm[J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 104-113.
- [12] LEE K P, WU B H, PENG Shilin. Deep-learning-based fault detection and diagnosis of air-handling units[J]. Building and Environment, 2019, 157: 24-33.
- [13] HAN Hua, XU Ling, CUI Xiaoyu, et al. Novel chiller fault diagnosis using deep neural network (DNN) with simulated annealing (SA)[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 121: 269-278.
- [14] ZHOU Zhenxin, LI Guannan, WANG Jiangyu, et al. A comparison study of basic data-driven fault diagnosis methods for variable refrigerant flow system[J]. Energy and Buildings, 2020, 224: 110232.
- [15] YAN Ke, ZHOU Xiaokang. Chiller faults detection and diagnosis with sensor network and adaptive 1D CNN[J]. Digital Communications and Networks, 2022, 8(4): 531-539.
- [16] GAO Jiaqing, HAN Hua, REN Zhengxiong, et al. Fault diagnosis for building chillers based on data self-production and deep convolutional neural network[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 34: 102043.
- [17] LI Guannan, YAO Qing, FAN Cheng, et al. An explainable one-dimensional convolutional neural networks based fault diagnosis method for building heating, ventilation and air conditioning systems[J]. Building and Environment, 2021, 203: 108057.
- [18] EOM Y H, YOO J W, HONG S B, et al. Refrigerant charge fault detection method of air source heat pump system using convolutional neural network for energy saving[J]. Energy, 2019, 187: 115877.
- [19] SUN Zhe, JIN Huaqiang, GU Jiangping, et al. Gradual fault early stage diagnosis for air source heat pump system using deep learning techniques[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 107: 63-72.
- [20] CHENG Fanyong, CAI Wenjian, ZHANG Xin, et al. Fault

- detection and diagnosis for Air Handling Unit based on multiscale convolutional neural networks[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 236: 110795.
- [21] 宋海川, 顾明伟, 张弘韬, 等. 长短期记忆神经网络用于空调系统故障时间序列分析[J]. *制冷技术*, 2020, 40(6): 24-30.
- [22] 李冬辉, 尹海燕, 郑博文, 等. 改进的LSTM方法在冷水机组传感器故障检测中的应用[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(11): 2324-2332.
- [23] 花君, 严珂, 陆慧娟, 等. 基于深度学习LSTM的空调故障诊断[J]. *中国计量大学学报*, 2019, 30(2): 197-202.
- [24] 颜永民, 张国强. 空调冷热源系统优化控制模型的研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2013, 32(4): 7-10, 14.
- [25] 刘志斌. 大型商场建筑中央空调冷冻水系统运行能效及参数优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [26] 赵泽华. 某机场航站楼区域供冷系统多目标优化与节能策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [27] ARDAKANI A J, ARDAKANI F F, HOSSEINIAN S H. A novel approach for optimal chiller loading using particle swarm optimization[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(12): 2177-2187.
- [28] 刘少博, 陈丽, 徐鹏. 基于PID技术的精密空调压缩机柔性控制节能系统设计[J]. *机械与电子*, 2022, 40(11): 25-29.
- [29] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(11): 32-38.
- [30] ZHENG Zhixin, LI Junqing, DUAN Peiyong. Optimal chiller loading by improved artificial fish swarm algorithm for energy saving[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, 155: 227-243.
- [31] ZHU Xu, CHEN Siliang, LIANG Xinbin, et al. Next-generation generalist energy artificial intelligence for navigating smart energy[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2024, 5(9): 102192.
- [32] LU Wen, SUN Yong, LI Baoju, et al. Research and application of “source-network-load-storage” coordination optimization technology based on cloud platform[C]// 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). Chongqing, China. IEEE, 2021: 813-818.
- [33] ZHANG Zhixin, CHEN Min, ZHONG Teng, et al. Carbon mitigation potential afforded by rooftop photovoltaic in China[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2347.
- [34] YU Jiafan, WANG Zhecheng, MAJUMDAR A, et al. DeepSolar: a machine learning framework to efficiently construct a solar deployment database in the United States[J]. *Joule*, 2018, 2(12): 2605-2617.
- [35] WANG Fei, XUAN Zhiming, ZHEN Zhao, et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 212: 112766.
- [36] SHAN Shuo, LI Chenxi, DING Zhetong, et al. Ensemble learning based multi-modal intra-hour irradiance forecasting[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116206.
- [37] PENG Xiaosheng, WANG Hongyu, LANG Jianxun, et al. EALSTM-QR: Interval wind-power prediction model based on numerical weather prediction and deep learning[J]. *Energy*, 2021, 220: 119692.
- [38] YI Huaikuan, JIANG Qingchao, YAN Xuefeng, et al. Imbalanced classification based on minority clustering synthetic minority oversampling technique with wind turbine fault detection application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(9): 5867-5875.
- [39] PATNAIK B, MISHRA M, BANSAL R C, et al. MODWT-XGBoost based smart energy solution for fault detection and classification in a smart microgrid[J]. *Applied Energy*, 2021, 285: 116457.
- [40] JIANG Huaiguang, ZHANG J J, GAO Wenzhong, et al. Fault detection, identification, and location in smart grid based on data-driven computational methods[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2947-2956.
- [41] LI Xiangyu, LIU Hangyue, LI Chaojie, et al. Deep reinforcement learning-based explainable pricing policy for virtual storage rental service[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(6): 4373-4384.
- [42] WANG Yanfeng, QIN Ling, WANG Qingrui, et al. A novel deep learning carbon price short-term prediction model with dual-stage attention mechanism[J]. *Applied Energy*, 2023, 347: 121380.
- [43] ZSEMBINSZKI G, FERNÁNDEZ C, BORRI E, et al. Application of deep learning techniques to minimize the cost of operation of a hybrid solar-biomass system in a multi-family building[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 288: 117152.
- [44] ZHUANG Dian, GAN V J L, DUYGU TEKLER Z, et al. Data-driven predictive control for smart HVAC system in IoT-integrated buildings with time-series forecasting and reinforcement learning[J]. *Applied Energy*, 2023, 338: 120936.

- [45] ZENG Yaohui, ZHANG Zijun, KUSIAK A. Predictive modeling and optimization of a multi-zone HVAC system with data mining and firefly algorithms[J]. Energy, 2015, 86: 393-402.
- [46] SHEN Dongdong, NING Chenguang, WANG Yingjie, et al. Smart lighting control system based on fusion of monocular depth estimation and multi-object detection[J]. Energy and Buildings, 2022, 277: 112485.
- [47] DOROKHOVA M, MARTINSON Y, BALLIF C, et al. Deep reinforcement learning control of electric vehicle charging in the presence of photovoltaic generation[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117504.
- [48] WANG Zhe, HONG Tianzhen, PIETTE M A. Building thermal load prediction through shallow machine learning and deep learning[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114683.
- [49] HUANG Qian, LI Jinghua, ZHU Mengshu. An improved convolutional neural network with load range discretization for probabilistic load forecasting[J]. Energy, 2020, 203: 117902.
- [50] LI Ao, XIAO Fu, ZHANG Chong, et al. Attention-based interpretable neural network for building cooling load prediction[J]. Applied Energy, 2021, 299: 117238.
- [51] CHEN Zhe, XIAO Fu, GUO Fangzhou, et al. Interpretable machine learning for building energy management: a state-of-the-art review[J]. Advances in Applied Energy, 2023, 9: 100123.
- [52] LIANG Xinbin, ZHU Xu, CHEN Kang, et al. Endowing data-driven models with rejection ability: Out-of-distribution detection and confidence estimation for black-box models of building energy systems[J]. Energy, 2023, 263: 125858.
- [53] LI Junyang, ZHANG Chaobo, ZHAO Yang, et al. Federated learning-based short-term building energy consumption prediction method for solving the data silos problem[J]. Building Simulation, 2022, 15(6): 1145-1159.
- [54] ATTIA P M, GROVER A, JIN N, et al. Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning[J]. Nature, 2020, 578(7795): 397-402.
- [55] LU Jiahuan, XIONG Rui, TIAN Jinpeng, et al. Deep learning to estimate lithium-ion battery state of health without additional degradation experiments[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2760.
- [56] ZHU Jiangong, WANG Yixiu, HUANG Yuan, et al. Data-driven capacity estimation of commercial lithium-ion batteries from voltage relaxation[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 2261.
- [57] SEVERSON K A, ATTIA P M, JIN N, et al. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation[J]. Nature Energy, 2019, 4: 383-391.



第四章

2024年国家、省部、行业 科技奖励部分行业获奖项目 介绍

(以项目名称首字母排序)

空气源热泵多品位热能高效供应关键技术与应用

所获奖项名称：国家科技进步奖二等奖

主要完成人：王如竹、骆名文、胡斌、翟晓强、张光鹏、吴静怡、黄永伟、马光柏、杨国用、雷俊杰

主要完成单位：上海交通大学、广东美的暖通设备有限公司、上海诺通新能源科技有限公司、广东美的制冷设备有限公司、山东力诺瑞特新能源有限公司、广东美芝制冷设备有限公司、江苏省华扬太阳能有限公司

项目介绍：

我国的供热以化石燃料为主，碳排放高，燃煤供热曾经造成了严重的雾霾。面向国家“双碳”目标，热能减碳任务艰巨，随着可再生电力占比的提高，供热技术正逐步从传统化石燃料燃烧转型为电气化低碳供热。热泵可以通过消耗一份电，供应多倍于消耗电能的热量，是一种极具发展潜力的电气化高效供热技术。空气源热泵主要存在季节适应性差、低环温吸热提升难、无法突破供蒸汽三大瓶颈。项目团队历经20年的校企联合攻关，创新突破了季节适应性宽流量调控、超低环温气液混和喷射压缩和大温升热泵蒸汽循环，形成了热能品位广、供热效率高、应用范围宽的空气源热泵多品位高效供热系列关键技术，实现了热水、采暖以及工业蒸汽的高效供应。主要创新内容如下：

1. 针对季节适应性差问题，提出了空气源热泵季节适应性变流量控制方法，率先研发高效空气源热泵制取生活热水的新技术，研发的空气源热泵热水器的性能系数达到4.73的国际最高水平，推动了空气源热泵热水器产业的形成与发展。

2. 针对低环温下难运行问题，发明了超低环温空气源热泵的气液混合喷射压缩和小温差换热末端

技术，将机组可靠运行环温从-25℃拓宽至-35℃，实现了我国全气候区覆盖。

3. 针对输出温度低问题，首创了空气源热泵闭式预热耦合开式闪蒸压缩及压缩-吸收耦合变温提质大温升热泵循环，首次将空气源热泵供热温度从90℃提升至150℃，将单位蒸汽电耗降至电锅炉的一半，为工业蒸汽的高效低碳供应开创了变革性路径。

项目组研发的产品成功应用在鸟巢、京津冀寒冷地区、黑龙江和西藏等严寒地区的采暖，以及制药、食品等工业企业的蒸汽供应。通过率先研发、产业化，牵头制订标准等带动了空气源热泵供热产业的形成与发展。项目团队孵化了中国第一家空气源热泵热水器企业、世界第一家空气源热泵蒸汽供应科技企业，支撑了空气源热泵供热市场份额最大的龙头企业。

基于本项目成果的重要国际学术影响，项目负责人作为首位中国籍学者获得了全球能源奖、国际能源署热泵奖、国际制冷学会最高荣誉奖章。该项目还曾获教育部、广东省科技进步奖一等奖、中国节能协会和中国制冷学会科技进步奖一等奖等奖励。



超低温空气源热泵在黑龙江漠河（-35℃）空气源高温热泵蒸汽发生系统酿酒项目

温湿氧磁多维精准控制家用保鲜电器技术创新与产业化

所获奖项名称：国家科技进步奖二等奖

主要完成人：罗自生、马坚、郭慧媛、黄东、赵弇锋、朱小兵、李晓峰、陈虹、李春阳、姜波

主要完成单位：海尔智家股份有限公司、浙江大学、中国农业大学、清华大学、西安交通大学、青岛海尔电冰箱有限公司

项目介绍：

一、项目研发背景

在当今社会，饮食对于人类的重要性不言而喻。然而，尽管电冰箱已历经了长久的发展，但在食材保鲜这一关键领域，仍存在诸多不足，难以充分满足人们日益增长的高要求。

全球范围内，每年都有大量食物因保鲜不当而被浪费，这不仅是资源的巨大损失，更凸显出当前保鲜技术的局限性。面对人们对新鲜、营养、美味食物的强烈渴望，以及食物浪费带来的严峻挑战，深入研究保鲜技术、寻求创新突破已迫在眉睫。

同时，随着科技的快速进步和生活水平的不断提升，消费者对于冰箱保鲜功能的期待不再仅仅停留在简单的冷藏和冷冻上，他们需要更精准、更智能、更有效的保鲜方式来确保食材的品质。这就使得对保鲜技术的研究具有前所未有的重要性和紧迫性。

此外，从行业发展的角度来看，只有不断攻克保鲜技术难题，才能推动整个冰箱行业迈向更高的台阶，在激烈的市场竞争中占据优势地位。而实现精准保鲜的代际跨越，更是关系到行业的未来走向和可持续发展。因此，开展针对保鲜技术的深入研究，是顺应时代需求、满足用户期望、推动行业进步的关键之举，其重要性和紧迫性不言而喻。

二、主要创新点

该项目围绕不同保鲜科技方向展开深入研究，致力于延长食物的保存时间并留存食物营养。该项目不仅大幅升级了家庭储鲜体验，让食材存得新鲜、存得健康、存住营养；同时，也促使行业的评价体系从以往的制冷、节能硬件参数向更加贴近用户感知的保鲜效果和用户体验转变，引领行业围绕“用户价值”开展良性科技竞争，推动行业健康有

序发展。

1. 揭示了环境因子对食品失鲜和营养损失的调控机制，创新了温湿氧磁多维保鲜路径和柔性分区策略，解决了精准保鲜和储存空间高效利用的矛盾。

2. 创制了低热能匀强磁场、微型膜分离降氧、快速精确测温 and 自触发精准控湿装置，攻克了柔性分区内温湿氧磁多维精准控制难题。

3. 创新了冷量独立分配结构系统和多维协同控制系统集成，创制了可实现温湿氧磁多维组合和柔性转换的新一代家用保鲜电器，保鲜和节能效果双提升。

三、应用效果

依托于保鲜科技的突破，海尔冰箱主导制定了全球首个 IEC 冰箱保鲜国际标准，目前已经被 20 多个国家转化采纳，有力增强了中国品牌在国际上的话语权。同时，海尔冰箱已拥有 3500 种食材数据、50 万条领域专业数据库，涉及冰箱本机、食材健康等方面，显著提升了食品保鲜效果。2023年，海尔全空间保鲜冰箱市场销量达 150 万台，零售额破 100 亿元，市场份额达到 16.7%，充分展现了其在市场上的强大竞争力和用户认可度。



地源热泵系统性能提升关键技术及应用

所获奖项名称：湖南省科技进步奖三等奖

主要完成人：陈晓、郝小礼、李明、苏欢、林宣军、林汉柱、曾丽萍

主要完成单位：湖南工程学院，湖南凌天科技有限公司，湖南科技大学

项目介绍：

地源热泵利用了蕴藏在岩土、地表水及地下水中的浅层地热能，用于建筑供热、空调等，目前应用较多的是土壤源热泵与地表水源热泵。不少地源热泵系统存在能效偏低、节能效果不明显的问题，系统的技术性能有待提升。本项目“产-学-研-用”团队依托湖南省地源热泵工程技术研究中心和绿色低碳建筑节能与材料技术湖南省工程研究中心，针对地源热泵系统设计与建造环节中能效提升的技术难点与瓶颈，开展系统性能提升关键技术研究，主要的科技创新有：

1. 研发出不用回填的埋地管换热器及土壤源热泵系统整体性能优化技术

针对常规埋地管换热器存在的换热性能瓶颈问题，研发出不用回填的埋地管换热器技术，充分利用地下水与埋地换热管进行换热，每延米换热量比常规埋地管换热器提高20%~32%。研发出基于传热及能流、烟流分析的土壤源热泵系统整体性能优化技术，能够使系统在能量效率与造价两方面实现最优平衡。

2. 开发出地源热泵与蓄能、太阳能相结合的多能互补节能技术

开发出地源热泵与土壤、相变材料蓄能相结合的新风多级处理系统，可减少热泵运行时间，显著降低新风处理能耗。开发出地源热泵与太阳能相结合的多能互补装置，可降低地源热泵运行能耗，实现稳定的供冷、供热及供热水。

3. 建立了两类地表水换热器的优化设计方法

建立了基于保证率的地表水源热泵中间换热器优化设计方法，使设计人员在可接受的保证率下对换热面积做出优化决策。建立了地表水盘管换热器

的换热模型，明确了换热管长度、换热量与出口温度之间的量化关系，可用于优化地表水盘管换热器的换热管长度。

4. 提出了直接式与间接式地表水源热泵系统节能状态的评价方法，采用该方法可根据热泵机房与地表水面之间的高差评价采用何种系统更节能。

5. 建立了热泵作用下地表水体热承载能力评价模型与方法，为地表水源热泵系统设计提供了水体热承载能力的基础数据与评价方法。

本项目授权发明专利3项，软件著作权1项，参编国家标准及湖南省工程技术导则各1项，出版国内首部关于地表水源热泵的专著，发表论文9篇（SCI收录3篇，EI收录3篇）。技术成果先后应用于18个地源热泵系统的设计或建造环节，建成的地源热泵系统比传统燃煤锅炉供热减少45.8%的煤炭消耗。近3年应用的建筑面积达36万m²，实现直接经济效益7003万元，这些建筑的地源热泵系统替代常规能源12366吨标准煤，节能减碳效果明显，取得了良好的经济效益、社会及环境效益。部分研究成果曾荣获中国制冷学会科技进步奖三等奖。



轨道交通大型地下空间贴附通风理论、关键技术及应用

所获奖项名称：湖北省技术发明奖一等奖

主要完成人：蔡崇庆、尹海国、杨礼桢、甘甜、杨长青、孙兆军

主要完成单位：中铁第四勘察设计院集团有限公司、西安建筑科技大学、中国铁路设计集团有限公司、江苏荣邦机械制造有限公司

项目介绍：

室内空气污染被世卫组织列为威胁人类健康的十大杀手之一，通风是营造室内空气品质的关键。轨道交通大型地下空间具有环境封闭、净空较高、人员密集的特点，既有全空间混合通风技术气流掺混大，导致2m以下工作区（人员主要活动区）有效新风少、空气品质差，威胁人员健康，难以满足后疫情时代人们对健康的需求，亟需研发清洁空气直接送至工作区的通风技术。项目组结合轨道交通大型地下空间固有结构特征，提出将送风气流沿柱壁面贴附、分离转向、在工作区形成空气湖的新方法，在国家重点研发计划项目课题、国家自然科学基金等支持下，“产-学-研-用”联合攻关，取得了柱壁面贴附通风理论、技术及装置的系统性成果，主要发明点如下：

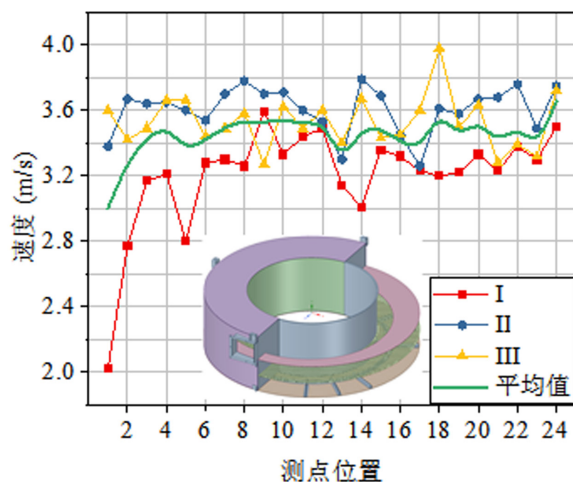
1. 建立了气流竖向分离-水平转向的贴附通风理论：发现了送风气流沿“竖壁贴附→分离转向→水平流动”的运动特征，建立了分离转向区流场与力学性能之间关系和分离点的判据准则，构建了水平空气湖区气流特征参数通用模型，为分离点精准控

制技术和送风装置研发提供了理论支撑。

2. 发明了气流竖向分离转水平流动的精准控制技术：构建了工作区控制点风速、垂直温度梯度、空气分布特性等多评价指标体系，发明了基于射流初始特性的气流分离点和参数精准控制技术以及绕柱壁面宽度、角度、间隙三维度可控的横向约束分流双水平空气湖控制技术，解决了气流分离、水平转向的精准控制难题，大幅提升空气品质。

2. 研发了变截面稳压均流与模块化系列贴附送风装置：针对因大长宽比气流特性导致射流出口均匀度差的固有难题，揭示了近远端气流静压变化规律，建立了射流出口流速与射流宽度、长度的量化模型，发明了变截面稳压均流装置和人造柱模块化集成系列送风装置，实现了工作区新鲜空气的按需供给和核心装置产业化应用。

项目成果已应用于多项国家重大轨道交通工程，引领了通风技术的升级换代，促进健康中国战略实施。



降膜式半封闭螺杆冷水机组关键技术研发与产业化

所获奖项名称：辽宁省科技进步奖二等奖

主要完成人：王恕清、张颖、张为民、何茂刚、单永明、刘向阳、谭锋、刘光华、姜远新

主要完成单位：冰山冷热科技股份有限公司、西安交通大学、冰山松洋冷机系统(大连)有限公司

项目介绍：

面对我国工业制冷领域节能降耗和低碳环保的迫切需求，为了解决困扰我国工业制冷领域节能降耗需求与传统冷水机组效率不佳的矛盾，项目团队成功突破了降膜蒸发、油平衡、循环控制、故障预知等多项关键技术难关，提出了降膜蒸发为核心、多项关键技术深度融合以解决传统冷水机组能效低、制冷剂用量大的新思路，建立了降膜式蒸发器设计新方法，研发了低流阻高效的制冷系统油平衡和计算开度法供液控制新技术，研制出能效较干式机组提高30%、制冷剂用量比满液机组降低30%的新型高效降膜式半封闭螺杆冷水机组，整体技术达到国内领先、国际先进水平。产品自2016年面市以来，在国际上首次将降膜蒸发技术从与中央空调类似应用场景工况拓展至包括0.5℃冰水、-25℃低温及+25℃高温冷水在内的工业制冷三种典型极限工况，并凭借其稳定、可靠、高效的显著特点，在工业制冷领域逐渐建立了技术优势，在伊利、蒙牛、嘉士伯、中石油等超过700家乳品啤酒和医药化工企业得到大量应用，有力推动了工业制冷领域的科技创新和产业升级，为我国节能减排事业发挥了重要的引领作用。

该成果的主要创新点有：

1. 发明了迷宫式气液分离新结构和带缓冲槽的喷雾式布液器新结构，重构了气流通道布局。传热系数提高30%，助力冷水机组COP提高3%。

2. 提出了含油制冷剂热物性测试技术并获取了高精度数据，提出了制冷系统油平衡新技术，机组运行的稳定性可靠性大幅提升。

3. 研发了低流阻高效的制冷系统优化匹配技术和包括温度矩阵法增减载、电流法能级指示、计算开度法供液控制技术在内的制冷系统循环控制技术，大幅提升冷水机组运行稳定性和可靠性。

4. 发明了基于机理模型和多模态融合神经网络相结合的制冷机组健康诊断技术与按需供给的制冷系统节能算法，助力冷水机组实现智慧运维，显著降低设备维护保养难度和成本。

该项目成果丰硕，获得专利授权超20项（发明10项）、发表论文超20篇（SCI/EI索引8篇）。该产品2020年获得辽宁省“专精特新”称号，并于2023年入选“中国制冷学会节能产品”和“辽宁省创新产品”目录，2024年入选国家制冷空调领域节能降碳产品推荐目录，2024年获辽宁省“科技进步奖二等奖”及中国商业联合会“全国商业科技进步二等奖”。



严寒地区低碳建筑节能及储供热关键技术与应用

所获奖项名称：辽宁省科技进步奖一等奖

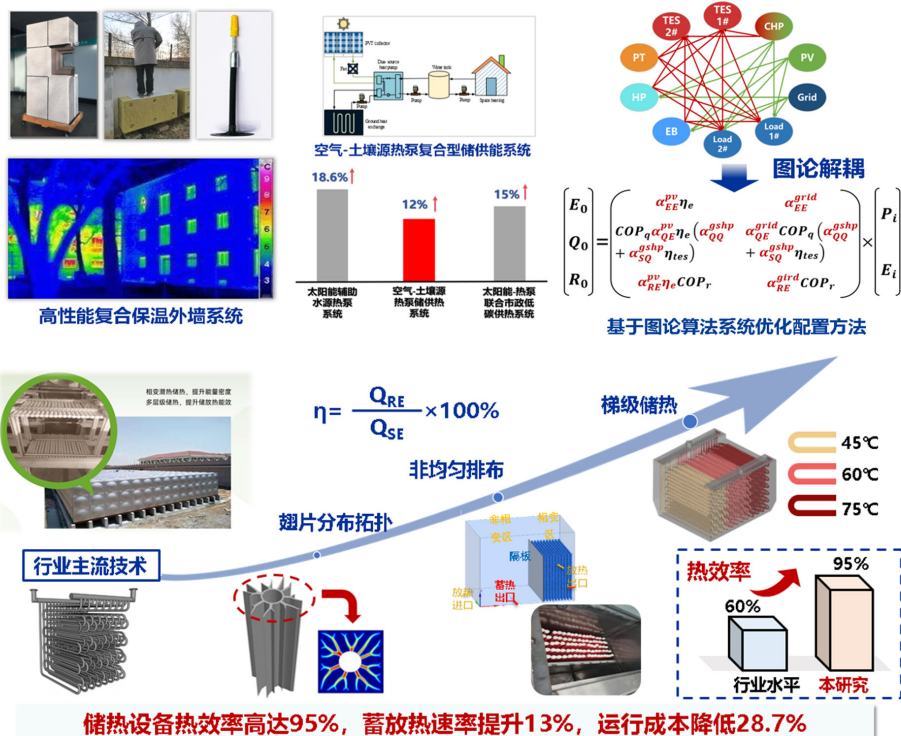
主要完成人：冯国会、吕石磊、黄凯良、宋波、夏晓东、江明志、杨德福、梁传志、常莎莎、张磊、李环宇

主要完成单位：沈阳建筑大学，天津大学，中国建筑科学研究院有限公司，大连建大建筑节能科技发展有限公司，辽宁省建筑设计研究院有限责任公司，日出东方控股股份有限公司，国惠环保新能源有限公司

项目介绍：

建筑领域是全球能耗和碳排放的重点领域，严寒条件下建筑能耗更高且低碳供热面临间歇性、波动性等难题。针对严寒地区面临的建筑低碳设计方法粗放、储供热装备低效、系统协同差等瓶颈问题，本项目建立了融合多源不确定信息的建筑低碳设计新方法，研发了增效蓄热型围护结构一体化设计方法、高性能复合保温外墙系统和新型断桥桥方法；开发了适合严寒地区的太阳能集热器与改进型热泵机组；研制了复合热源装置及低成本高效相变储能等装备，构建了基于储能的太阳能、空气能、地热能低碳储供热技术体系；开发了全方位智慧化运行管控平台，实现了区域能源系统智慧运维、热负荷精准预测、供需匹配、精准运维的目标，专家鉴定成果达到了国际领先水平。

项目从建筑本体设计新方法、储供热装备新技术和储供热系统智慧化三个方面攻克了严寒地区节能降碳的行业痛点。获授权发明专利14项、软件著作权15项，主编国家标准、地方和团体标准6部，参编国家与地方标准等5部，完成著作7部，发表高水平学术论文40余篇。应用案例覆盖学校、住宅、办公、工厂等建筑类型，成功应用于沈阳航空动力产业园、沈阳建筑大学超低能耗宿舍楼等一批代表性工程，推广应用面积超1000万平方米，推动大连建大建筑节能科技发展有限公司、日出东方控股股份有限公司、国惠环保新能源有限公司等一批企业的转型升级，将极大地促进低碳建筑领域关键技术的应用和推广。



变频空调低碳动态运行关键技术研究及应用

所获奖项名称：中国轻工业联合会科技进步奖一等奖

主要完成人：夏光辉、梁博、王现林、连彩云、陈志伟、田雅颂、李亚飞、徐耿彬、徐娟、李辉武

主要完成单位：珠海格力电器股份有限公司、珠海格力节能环保制冷技术研究中心有限公司

项目介绍：

随着空调产品的进一步普及，空调碳排放量将持续上升，《中国制冷行业发展规划》明确提出要加快推广高效节能空调技术。空调耗电量大一直是空调行业重点关注持续研究的关键难题，目前行业通常是牺牲空调的部分舒适性来换取节能效果，这与用户的舒适环境需求是相悖的。因此研发先进的空调节能技术不仅关系到我国“双碳”目标的实现，也关系到用户在空调使用中“不敢开、不舒适”的痛点问题。本项目针对以上技术难题：

1. 发明了基于人工智能算法的空调动态能效寻优控制技术，解决了用户使用过程中各执行器协同度低，难以达到实时能效最优能耗最低的问题，保证空调内部配合的高效节能。

2. 创新性提出了房间负荷自学习自适应技术，解决了多场景下空调能力与负荷不匹配、控温不舒适的问题，实现空调与环境的匹配舒适节能运行。

3. 开发了行业首款空调节能高适用性AI芯片，解决了空调现有DSP或MCU等控制芯片无法满足AI算法的需求问题，建立了满足空调算力的动态节能硬件平台。

4. 首次建立了空调实际负荷模拟的动态能效测

试方法，实现了空调近实际运行过程中的能效、能力、耗电量和控温水平测试，形成了准确衡量空调产品控制策略和低碳节能水平的测试方法。

本项目突破了传统控制算法的限制，首次将AI算法应用于空调节能技术，弥补了实际使用中动态能效测试的空白。经合肥通用机电产品检测院有限公司检测，与常规空调相比，在保证舒适性的前提下，AI空调全年最低省电量约92.73度，节能率至少达13.6%，动态能效至少提升15.8%。目前已申请专利136项，授权发明专利68项，获得了“第76届德国纽伦堡国际发明展金奖”“中国轻工业联合会科技进步奖一等奖”“创新珠海科技进步特等奖”等。经鉴定，成果技术应用于空调器，整体达到“国际领先”水平。

本技术已在格力8个系列45款空调上推广应用，截至2024年11月，累计销售331.79万套，新增销售收入89.76亿元，新增税收7.31亿元。按照已售数量评估，每年可节约3.08亿度电，累计可减少CO₂排放量约30.67万吨。本技术引导了整个行业对人工智能算法、动态能效评价、智能化控制，以及运行节能技术的关注研究，促进了整个行业的技术升级，大力推动了空调行业的低碳减碳发展。

电热混动热泵系统A++超高能效关键技术研究及产业化

所获奖项名称：中国节能协会节能减排科技进步奖二等奖

主要完成人：李忠华、高乃平、徐象国、刘小文、高鹏飞、辛森森、赵仁壮、林瑜、钟国荣、袁潇

主要完成单位：芜湖美的厨卫电器制造有限公司、同济大学、浙江大学、广东美的厨卫电器制造有限公司、佛山市顺德区美的洗涤电器制造有限公司、广东美的制冷设备有限公司

项目介绍：

项目所属科学技术领域为能源动力系统节能与减排技术。针对欧洲电储热热水器无法突破A级以上能效瓶颈的行业难题，本项目首次从系统集成创新维度，深入探究了热泵集成于电储热热水器的强化传热机理和系统性能。

本项目主要科技内容如下：

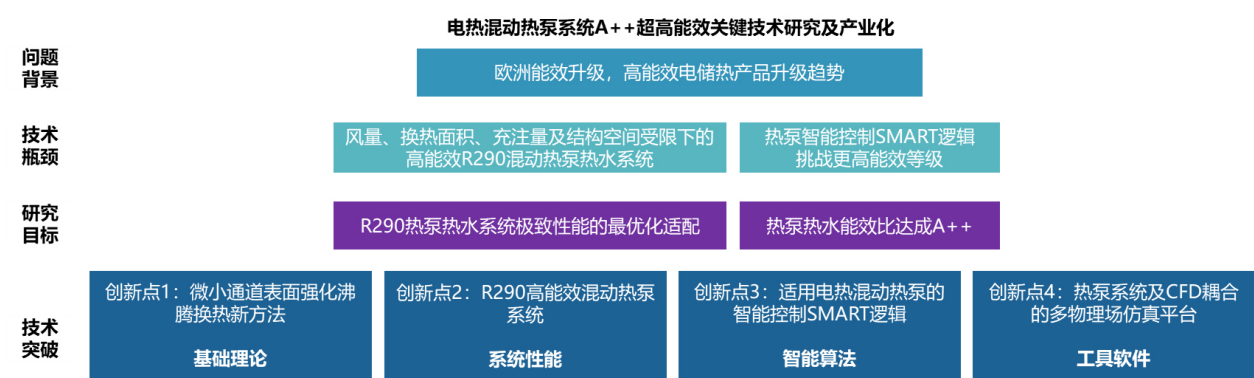
1. 创新提出微小通道表面强化沸腾换热新方法，研制出新型微小通道气液分离表面结构，实现了微小通道表面换热能力的大幅提升（临界热流密度提高1倍，换热系数提升3倍）。创新运用微尺度数值模拟方法，发现了微尺度下沸腾气泡的动力学规律，明确了微小通道表面强化沸腾换热的复杂机理，显著优化了微小通道蒸发器的强化传热性能。

2. 研发了R290高能效混动热泵系统，突破了低风量、蒸发面积小的行业挑战，研究出新型弧形铝翅铜管蒸发器结构，蒸发换热量提升27.3%；探究了热泵性能随冷凝器微通道扁管数及冷媒量的变化规律，R290冷媒充注量下降7.1%，20℃/15℃工况COP提升9.4%，制热量增大8.0%，V40热水量提升5.2%；研制出R290转子式微型压缩机并实现产业化。

3. 创建了适用电热混动热泵的智能控制SMART逻辑，提出了动态“运行时序-设定温度-加热回差”耦合模型，突破了电储热热水器A++级的能效瓶颈，能效控制因子SCF为15.4%，能效比从131.7%提升至157.6%，年耗电量从390kWh下降至326kWh，技术指标达到国际领先水平。

4. 自主开发了热泵系统及CFD耦合的多物理场仿真工具平台，明晰了产品吹冷风对室温及负荷的影响规律，创建了热泵系统性能预测、冷凝器微通道CFD设计等仿真预测技术，结合智能控制SMART逻辑仿真，实现了产品正向开发设计，仿真工具平台的应用缩短研发周期至少60天，极大提升了产品开发效率。

项目申请专利55项，授权发明专利25项，发表论文22篇（SCI等三大检索论文16篇），制定企业标准3项，产品近三年累计销售额5.5亿元，利税3078.3万元。项目产品引领和推动电储热热水器市场由B级能效向A级、A+级及A++跃迁，大幅降低用户能源费率，助力欧洲电气化转型，影响深远。



公共机构中央空调末端去中心化自主式节能管控器（TN3000）

所获奖项名称：中国节能协会创新奖科技进步奖（节能服务产业）

主要完成人：李宏

主要完成单位：湖南同能机电科技有限公司

项目介绍：

1. 项目背景

当前中央空调节能关注点都在大功率机房上，就像节约食堂费用，一门心思在厨房搞高效炉具、降低食材成本，却对餐桌上浪费的视而不见。由于空调末端其公共属性，相比专人值守的机房更难管理。温控面板因单价低，基本大家所忽略，从简单的三速开关，到液晶触摸面板，功能完全雷同，30年几乎没有技术创新！以至于出现要靠行政命令来干预空调温度的现象：

也有采用末端联网温控面板系统来解决管理问题，但系统复杂，初投资和后续维护费用都较大，而主要功能只是实现下班统一关机，所以很多项目几年后基本成摆设。

2. 技术内容

TN3000源自30多年的一线运维实践经验，采用去中心化、去网络化思维，通过内部独有算法和芯片，如同在每间办公室设立一个隐形的“节能管家”，可根据室内人员行为自主进行隐形的节能管理，巧妙地以智能化的隐形管理来轻松化解中央空调末端的隐形浪费。

具体包括以下技术：四级温度管理、包含人员行为深度学习的多维关机管理、风盘电动阀自洁技术、电动阀柔性控制技术、风盘辅助清洗技术、多机联控技术、单火线技术。

3. 与同类产品对比技术优势

- 低成本。外观尺寸、价格、安装费与普通中档温控面板一样，可轻松实现零成本节能。
- 简单可靠性。无需电脑、无需手机等任何其他软硬件，各个房间的空调管控器完全相互独立，互不影响。
- 免维护。零技术门槛、零维护成本：水电工能安装，保安能调试。
- 零网络风险。采用去网络化、去中心化思维，无网络安全隐患。而网络型温控系统存在网络攻击、数据泄密风险。

4. 实际节能案例

2023年将株洲市石峰区政府办公楼大楼内中央空调末端的460台风机盘管三速开关全部更换为单火线TN3000管控器。仅仅一个冬季共节约7.5万元，节能率 $7.5/32.7=23\%$ 。

5. 总结

TN3000不仅可以用于新建项目，而且也非常适合既有建筑提质改造，是全世界唯一单火线温控器，不用改线路，可以直接替换老旧的三速开关和机械式温控面板。该产品包含2项发明专利、1项美国专利在内的十多项专利，已列入2022年湖南省工信厅节能节水产品目录，发起起草和颁布了世界首个中央空调温控器标准-中央空调温控面板的绿色设计产品评价标准。



基于智能温湿分控多场景送风技术的舒适空调器研究及产业化

所获奖项名称：中国轻工业联合会科技进步奖一等奖

主要完成人：陈守海、曹彬、徐象国、别清峰、朱颖心、张然、曹锐、李永彬、徐超、王军

主要完成单位：海信空调有限公司、清华大学、浙江大学

项目介绍：

随着用户消费升级，空调舒适性研究已成为行业技术创新的风向标，新风空调也成为市场热点。空调舒适性方面，冷风下沉直吹人/热风上浮不落、低温高湿场景下无法将温湿度调控至舒适区、新风量小噪声大及对房间温度扰动等问题是行业技术瓶颈。针对以上痛点，本项目从气流舒适性、温湿度舒适性和新风舒适性三个维度进行研究，主要创新成果包括：

1. 基于康达原理的多场景冷热分送风技术

提出行业首个基于康达原理的出风流道设计模型，发明了柔性双驱多自由度全域舒适送风机构，开发了复合康达效应风道冷上热下分送风技术。制冷运行，在不损失制冷量的前提下实现全域防直吹，全域风速 0.12m/s 以下，低于标准定义的无风感 0.3m/s 。制热运行，热气流贴附墙壁和地面流动，实现足部温度高于头部温度，垂直温差突破 0°C 做到 0.32°C ；在GB/T 33658制热工况下，足部温度达到 22°C 的升温速率较行业先进水平提升26%、省电42%。

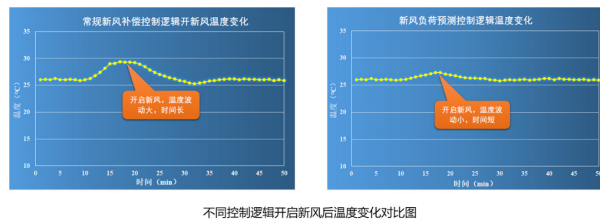
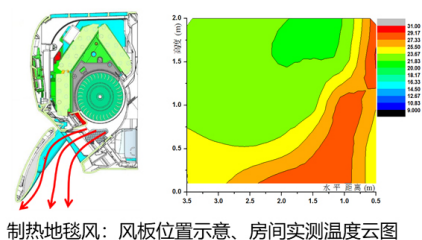
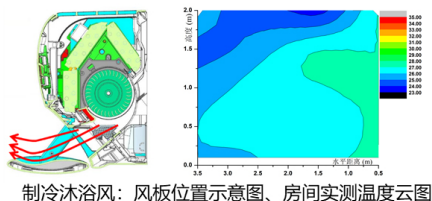
2. 基于软解耦控制算法的温湿分控及PMV舒适节能控制技术

创立了热湿耦合数据平面的概念，充分揭示

了变频空调在全频域内的温湿处理能力。研究出温湿分控软解耦控制算法，攻克了空调系统传热传质之间非线性强耦合无法解耦与控制的技术难点，空调输出覆盖热湿平面面积扩展了19.71%，在相同目标温度下相对湿度调控范围较常规除湿最大提升28.9%。提出快速运行、稳定运行、节能运行三阶段舒适控制方法。首次将复杂的PMV方程解耦成可工程化应用的温湿度模型，创新温湿度自寻优控制算法求解出每阶段最佳温湿度设定值，将温湿度控制到舒适区间的同时节能18.4%。

3. 智能衡温的静音舒适新风技术

创新研发新风离心风叶扇形导流前缘和渐变圆弧拱桥风圈技术，解决了离心风扇在高静压场景下动静旋转区域泄漏大的问题，同时增大了气流速度，提高新风量并降低噪声。提出新风蜗壳参数化分析模型，设计非对称偏心蜗壳，解决流道阻力大问题的同时增大新风量。在卧室睡眠场景首次实现新风量 $25.3\text{m}^3/\text{h}$ 时，运行噪声仅为 27.8dB(A) ，较行业先进水平降低 2.9dB(A) 。开发了新风热负荷智能预测的衡温控制技术，采用人工智能神经网络的方式建立冷量、室内温湿度、压缩机及风机频率之间的关系，通过对新风热负荷变化预测主动补偿，使新风对室内温度的扰动由行业的 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 降低为 1°C 。



该项目授权专利43件，其中授权发明专利17项，发表论文7篇，发布标准11项；创新技术产品取得日本JQA等国际权威认证等。

空调器长效运行节能的关键技术及产业化应用

所获奖项名称：中国节能协会节能减排科技进步奖特等奖

主要完成人：丁国良、张浩、王飞、詹飞龙、古汤汤、袁雅青、庄大伟、何曙、亓新、邵艳坡、劳春峰、曹昊敏、袁俊军、曹磊、陈伟

主要完成单位：上海交通大学，广东美的制冷设备有限公司，青岛海尔空调器有限总公司，中国质量认证中心有限公司，奥克斯空调股份有限公司，上海市质量监督检验技术研究院，中家院（北京）检测认证有限公司

项目介绍：

空调器在使用过程中发生的能效衰减致使能耗上升。但空调行业的能效评定，传统上只针对全新空调这一“时间点”，无法反映实际使用过程整个“时间线”的能效。该项目面向空调器实际长期使用过程的能效提升需求，取得了如下创新成果：

1. 揭示了空调器长期运行过程中的性能衰减机制，提出了性能衰减预测模型。建立了空调器性能衰减数据库，覆盖国内所有气候区域类型和全球70%以上产量的空调器品牌；揭示了空调器性能衰减机制，建立了换热性能衰减与空调能效衰减的预测模型，实现了对空调长效性能衰减的预测偏差小于5%。

2. 提出了空调器加速积灰与性能测试的一体化方法，实现了长期运行性能衰减的快速准确测试。发明了高浓度含尘气流供应装置、粉尘浓度均匀稳定分布的控制方法，以及换热器不移动条件下积灰实现与传热性能测试的一体化方法；实现了加速积灰测试速度较实际工况提升4个数量级，测试结果的一致性偏差小于3%。

3. 提出了抑制空调器性能衰减的新型结构与自清洁控制技术，实现了长期运行能效的提升。发明了换热器表面冰胀脱实现积灰剥离的自清洁技术、过滤网逆向滚刷水洗除尘技术，以及室内外机除灰-水洗-干燥-杀菌联动的智能清洁运行控制技术；实现

了单次除尘率达99%以上，清洁时间减少25%、耗电量降低3%以上。

项目获授权中国发明专利72件、国际发明专利2件、软件著作权3件；发表SCI论文49篇，SCI他引1119次；制定标准8项。近三年，全新开发了970款/4144万套长效节能型空调器，实现销售收入969.9亿元、利润145.7亿元。利用项目技术成果实现年节电量30亿千瓦时、年二氧化碳减排201万吨。项目成果被江亿院士、王浚院士、陈学东院士等专家鉴定认为“研究技术难度大、创新性强，具有完全的自主知识产权，整体技术达到国际领先水平”。

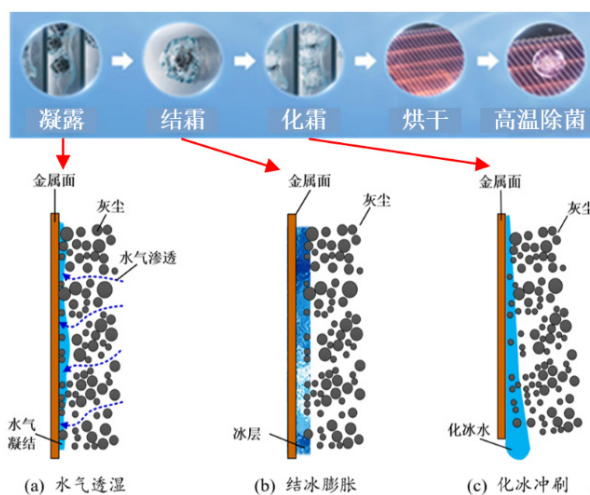


图1 结冰胀脱诱导灰尘剥离的自清洁工作原理

冻冷藏用宽温区单机双级螺杆压缩机开发与应用

所获奖项名称：“机械工业科学技术奖”——科技进步奖二等奖

主要完成人：丁石川、谢鹏、张秀平、周华、杭俊、高月明、孙云、郑庆伟、吴俊峰、李伟

主要完成单位：上海汉钟精机股份有限公司、安徽大学、合肥通用环境控制技术有限公司

项目介绍：

冷链物流是利用温控、保鲜等技术工艺和冷库、冷藏车、冷藏箱等设施设备，确保冷链产品在初加工、储存、运输、流通加工、销售、配送等全过程始终处于规定温度环境下的专业物流，是建设国家现代化经济体系的关键环节。以低温冷藏库、速冻库、单冻机、低温盐水泵机等为代表的冷源供给装备是冷链物流产业的最关键硬件构成。作为制冷系统的核心部件，传统螺杆式制冷压缩机应用于在冷冻冷藏库中已暴露出蒸发温度工作区间窄、产品能耗高且容错能力弱、极端工况运行可靠性差等重大缺陷。在此背景下，如何适应宽温区范围和负荷瞬态多变的冷库使用环境，应对冷源供应设施大跨度、长周期的温度调节硬需求和强烈的节能要求，实现冷冻冷藏库压缩机装备安全高效运行，保障冷链食品药品供应安全不断链，已成为螺杆式制冷压缩机产业亟待解决的重大难题。

为此，本项目组织行业企业和高等院校联合开展技术攻关，在单机双级螺杆式制冷压缩机的应用基础研究、关键装备开发、性能测试评价等方面取得突破，建立了单机双级螺杆式制冷压缩机技术体系，实现了高端核心压缩机产品在我国冷链装备中的大规模推广应用。创新成果主要包括：

1. 建立宽温区双级螺杆式制冷压缩机开发及可靠运行策略：提出满足宽温区双级螺杆压缩机设计基准与产品构型方案，掌握宽工况下压缩机内容积比及电机匹配特性；建立压缩机可靠性评价模型，提出非稳态运行工况的电机故障特征提取方法，形成基于全电信号的压缩机电机分层故障诊断方法，开发出负荷瞬态响应的变频压缩机电机高性能容错控制策略，为螺杆式制冷压缩机宽工况高可靠运行提供了理论支撑。

2. 研发高效、高可靠性单机双级螺杆式制冷压缩机产品：突破压比自适应级间补气、吸气喷液量调节、排气过热度稳定控制等关键技术；提出压

缩机电机冷却流道优化、温度可视化及高可靠逆向设计方案，保障变工况运行安全；研发集自卸载机构、中压止回阀、关断阀及经济器过滤器等配件一体化设计方案，研制出高可靠性单机双级螺杆式压缩机产品，实现蒸发温度 -10°C 满载运行，中低温运行能效较单级螺杆压缩机提高20%以上，填补覆盖冷冻冷藏库用宽温区单机双级螺杆压缩机装备产业化空白。

3. 构建单机双级螺杆式制冷压缩机性能测试评价体系：提出单机双级制冷压缩机容积流量开式及闭式试验标准化方法，明确压缩机高蒸发温度适应性测试评价要求，掌握压缩机性能智能化检测技术，开发压缩机经济器自动补气调节测控软件，研制出适用于多工质的单机双级压缩机性能检测装置，为产品出厂性能测试及质量合格评定奠定了基础。

项目授权发明专利5项、实用新型专利3项，制定国家标准1项，登记软件著作权1项，发表学术论文30余篇，项目开发的冷冻冷藏用宽温区高效单机双级螺杆式制冷压缩机技术总体水平达到国际先进水平，其中单机双级螺杆式制冷压缩机宽温区全载运行特性、性能测试评价技术、电机分层故障诊断及容错控制策略达到国际领先水平。

项目成功实现了宽温区单机双级螺杆式制冷压缩机开发与产业化，近三年新增销售6.51亿元。研究成果大幅提高了冷冻冷藏领域高端压缩机装备的开发能力、技术水平和国际竞争力，为我国单机双级螺杆式制冷压缩机优势产业地位的形成提供了有力支撑，为冷链领域国家高水平基础设施建设、经济循环新发展格局构建和“双碳”战略落地做出了重要贡献，经济和社会效益显著。



区域能源系统高效直流组网及电热协同关键技术与应用

所获奖项名称：中国节能协会科技进步奖特等奖

主要完成人：张宸宇、张小松、袁俊球、袁宇波、施娟、刘瑞煌、喻建瑜、王迪、王议峰、杨成国、吴炜、黄世芳、张茜颖、徐刚、刘如帆

主要完成单位：国网江苏省电力有限公司、东南大学、天津大学、日出东方控股股份有限公司、国电南瑞南京控制系统有限公司

项目介绍：

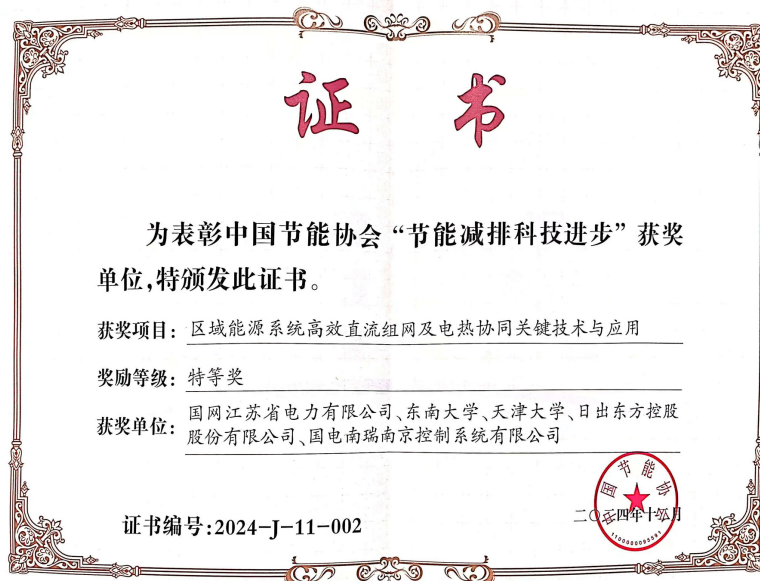
工业和建筑是全社会能耗与碳排的主要来源，用热需求量大且电气化率低。海量分布式光伏接入为终端电能替代提供了清洁电源，但光伏直流化、波动性特征，让区域电网经济消纳成为难题。迫切需要发展一种既能提升光伏弃电消纳能力，又能满足工业和建筑清洁用热需求的技术方案。

在国家重点研发计划、自然科学基金等项目支持下，历经十年产学研用协同攻关“绿电制热”，攻克直流组网和电热协同两大关键技术，形成了理论、方法、装备及系统的闭环，实现了产业化和规模化应用：首创多场景电热协同的直流组网技术；创新高效宽增益的直流电能变换技术；发明高效宽温域的电热高效转化技术；提出高密度储热与电热协同调控技术，实现新能源经济消纳和建筑/工业高

效供热。

授权发明专利40件（国际专利2件），软著7件，发表高水平论文67篇，出版专著2部，牵头编制IEC国际标准2项，参编标准9项。刘吉臻、吕俊复、李立涅、罗安等多名院士领衔的鉴定委员会均认为，成果居“国际领先水平”。

成果在江苏、山西等15省市300余项重大工程应用，关键装备远销美日澳等海外国家，获评“一带一路”国际能源变革典范样板，获国家住建部和国家电网高度认可。经济社会效益显著，近三年直接效益36.7亿元，新增利润3.7亿元，创收外汇0.28亿美元。年减碳排近10万吨，对构建清洁高效的现代能源体系具有重大意义，有力推动双碳战略实施落地。



室内微气候环境智能高效调控的多联机和新风系统

所获奖项名称：中国轻工业联合会科学技术进步奖一等奖

主要完成人：张文强、石文星、焦利敏、任兆亨、杜永、王晓鹏、王战术、石靖峰、迟丽华

主要完成单位：青岛海信日立空调系统有限公司、清华大学、中国家用电器研究院

项目介绍：

在“双碳”目标背景下，空调作为建筑的能耗大户，其低碳技术变革迫在眉睫、意义重大。新时代，空气清新、温湿合宜、操作便利都是空调用户关注的重点。如何兼顾节能和舒适运转，智能调控室内温、湿度和空气品质已成为行业亟待突破的难题。

项目针对室内微气候营造难题，将多联机+新风调湿机作为一个整体系统，率先采用集中式管理和分布式控制架构，发明了多项关键技术并研发了系列产品，在多联机系统调控方面取得了技术突破。主要创新成果如下：

1. 首创了多联机用户精确分类和需求精准预测技术。针对设置繁琐、学习成本高、无法精准控制等行业难题，首创了精准预测控制技术，根据用户所在位置、室内外环境状态，对用户设定参数进行预测；创新提出了用户习惯学习预测算法，根据用户历史数据分析使用规律，采用增量化模型对下次使用场景进行预测，其预测准确率 $>90\%$ ，预测控制时间误差 <15 分钟。

2. 发明了基于新风双重热回收的变温调湿技术。针对新风引入室内导致的湿度调控难题，首创了双重热回收变温除湿技术，除新、排风全热交换外，在新风机组除湿蒸发器后增设与排风冷凝器串联的变容调节再热器，解决了除湿量受限于低风量的难题，实现了送风参数的精确控制，其除湿量提升 150% ；发明了喷淋/储水虹吸复合加湿技术，新风经过全热回收芯体预热、冷凝器和再热器加热后再流过加湿器，其加湿量提升 30% ，湿度控制精度为 $\pm 5\%$ ，解决了加湿器因频繁启停带来的湿度波动大、舒适性差和能耗高问题。

3. 突破了基于负荷和能力预测的跨模块热湿耦合控制技术。针对室内热湿负荷处理能耗高、舒适

性差问题，基于多联机在线性能测量技术实现了房间负荷的快速预测，进而突破了多联机与新风机组之间跨模块热湿耦合控制技术，根据室内目标参数与当前室内温湿度状态控制多联机的蒸发温度，实现了空调系统的快速启动和高显热节能、舒适运行的自动切换，系统能耗降低 19.8% 。

基于以上技术，智能调控多联机与调湿新风机组，实现了室内温度、湿度、空气品质、洁净度等参数的智能控制，为用户提供健康、舒适的室内“微气候”环境，并保障系统的节能低碳运行。

项目拥有完整知识产权，获授权发明专利45项、国际发明专利2项，主导或参与制定团体标准6项，发表期刊论文11篇，参编英文专著1部。项目主要创新成果经中国轻工业联合会组织的专家委员会鉴定，达到国际领先水平。

项目成果自2021年2月开始产业化，近3年销售额235.3亿元，利润39.95亿元，税收24.7亿元，项目产品累计超过140万套投入运行，经测算每年减排 CO_2 约200万吨，具有显著的经济和社会效益。



小型高效低噪变频转子式压缩机技术开发及产业化

所获奖项名称：中国轻工业联合会科技进步奖三等奖

主要完成人：黄之敏、刘妮、白桂培、周易、谢酃卿、刘春慧

主要完成单位：上海海立电器有限公司、上海理工大学、南昌海立电器有限公司

项目介绍：

本项目深耕于制冷空调领域，专注于商用制冷与空调关键设备的研发与创新。当前，中央空调行业正以前所未有的速度蓬勃发展，2023年国内市场规模已攀升至约1200亿元，其中单元机和小多联产品的市场占有率更是超过了40%。然而，随着空调整机企业竞争的日益激烈，市场对核心零部件——变频转子压缩机的技术要求也愈发严苛。

为应对这一挑战，本项目团队聚焦压缩机的轻量化、降噪提效及可靠性等关键技术难题，采用了理论、实验与仿真相结合的综合性研究方法。经过不懈努力，团队成功研发出小壳径的4~6HP规格高效低噪变频转子式压缩机，显著提升了压缩机的“冷重比”，为商用单元机、小多联、热泵两联供等市场带来了技术上的飞跃与进步。

本项目的创新成果颇丰：

团队提出了创新的八极电机新结构，成功实现了大功率电机的小型化，为压缩机的轻量化设计开辟了新路径；研发了全域气流脉动抑制技术，有效降低了压力脉动，提升了压缩机的运行稳定性；应用了先进的激光焊接技术，确保了压缩机在全频段内的低噪声运行，提升了用户的使用体验；开发了重载油膜压力均衡技术和快速自回油润滑技术，保障了压缩机在全转速范围内的可靠稳定运行，延长了使用寿命。

基于这些关键技术突破，团队成功开发并量产

了新款压缩机。在保证卓越性能的同时，整机重量降低了30%，赢得了行业与客户的广泛认可。

此外，本项目还针对相关应用领域开发了一系列小型高效低噪变频转子式压缩机，并取得了显著的知识产权成果。目前，项目已获得27项授权专利，其中包括8项发明专利。同时，团队还主持和参与3项国家标准的制定，发表4篇学术论文，为行业的规范化发展和技术交流做出积极贡献。

经权威检测与评价，本项目具有自主知识产权和实质性的技术进步，在4~6HP转子式压缩机的小型轻量化方面达到国际领先水平。填补国内相关技术的空白，有力推动压缩机国产化进程及行业技术的整体发展。



新型能源系统中有机工质安全性评价关键技术及应用

所获奖项名称：中国安全生产协会安全科技进步二等奖

主要完成人：戴晓业、史琳、李建、李辉、姚文清、任飞、李俊毅、刘志颖、王东泽、段建霞

主要完成单位：清华大学、中国安全生产科学研究院

项目介绍：

随着碳达峰碳中和目标的提出，我国正面临能源结构革命，热泵等新型低碳能源系统技术具有广阔应用前景。工质是能源系统的“血液”，在新型能源系统中有机工质有着更广泛的应用。以往有机工质主要用于低温领域，随着新型能源系统中使用温度大幅提高，有机工质的安全性缺少针对性、系统性研究，已经严重影响新型能源系统的研发和推广应用。针对有机工质安全性研究存在的测量不准确、机理不清晰、评价难量化的关键技术难题，研究团队经多年攻关，实现了有机工质安全性测试技术、机理研究和评价方法上的突破，填补了有机工质热稳定性、材料相容性和超临界换热的数据空白，形成了新型能源系统中有机工质安全性评价关键技术并成功工程应用。主要创新成果如下：

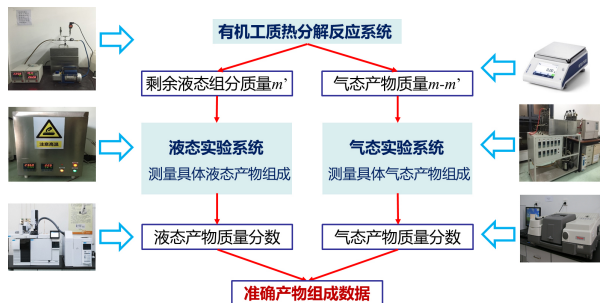
1. 建立了有机工质热稳定性高精度直接测量方法，获取了典型有机工质热稳定性基础数据，其中多套为国际上首次发表；阐明了有机工质热分解微观反应机理，构建了有机工质的热分解表观动力学模型，解决了含时间项的热稳定性定量评价难题；发展了耦合热分解的非设计工况系统仿真技术，实现了有机工质热分解对系统性能影响的定量评价。

2. 明确了新型能源系统中“系统参数-部件位置-材料种类”对应关系，开发了有机工质材料相容性实验和评价方法；实验获取了中高温条件下典型有机工质的材料相容性基础数据，其中多套为国际上首次发表；揭示了环境因素对有机工质材料相容性的影响机制和规律，完善了中高温条件下材料相容性研究评价体系，为新型能源系统的材料筛选提供了重要的理论指导。

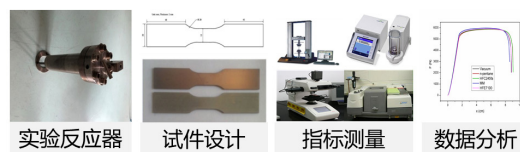
3. 获得了超临界条件下典型有机工质水平对流换热基础数据，创新性地提出了超临界有机工质水平流动换热的浮升力定量评价判据，构建了适用于超临界有机工质水平流动的换热预测关联式，揭示

了新型能源系统水平管内超临界有机工质换热恶化的产生机理。

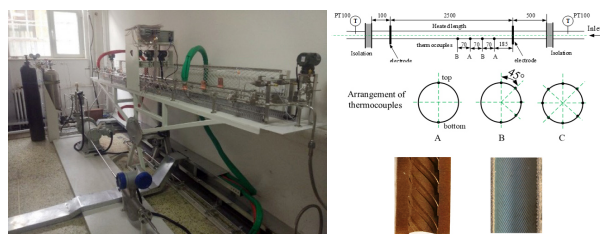
项目发表论文43篇，其中SCI收录26篇；授权发明专利12项，实用新型专利3项；参编国家标准4项。项目成果已经在大金工业、同方人环、太原锅炉和黑龙江爱科德等公司得到应用，为热泵和环保制冷剂研发和推广提供了理论支撑和有力保障。项目已实现直接经济效益3498万元，应用企业经济效益5200万元，取得了显著的社会和经济效益。中国安全生产协会组织的科技成果评价会认为，项目成果达到国际领先水平。



(a) 有机工质热稳定性高精度直接测量技术



(b) 有机工质中高温材料相容性实验与评价方法



(c) 有机工质超临界水平换热实验平台

图1 有机工质安全性评价关键技术及测试方法

丹佛斯绿色冷链

丹佛斯绿色冷链解决方案，
打造低能耗、数字化和智能化的冷链物流

投资回报
周期
<1年



云监控平台

支持能源管理、风险预警及售后服务派单等功能，实现冷库的可视化管理



集中控制器

系统主控器与各末端通讯串接，打通各末端信息孤岛，实现协调化霜及多温区控制

机组及冷凝器控制



机组控制
人机界面



Alsmart
机组控制器

冷风机控制

集成融霜、风扇、
电子膨胀阀控制的控制模块
AK-CC55系列

系统功能控制



Alsmart
机组控制器



湿度控制



照明管理



制冷剂泄漏报警



门开关监控



地坪加热



热回收

·AK-UI55
蓝牙显示屏

·移动端APP

冷库

制冷供液管路
制冷回气管路
热氟供气管路
热氟排液管路



蒸发冷模块化机组



丹佛斯BOCK® 博客压缩机

高效：专利mexxFlow阀板设计
高可靠：全系标配油泵，跑油率低
高可维护：完全可拆卸，售后维修方便



MLZ大涡旋冷冻压缩机

低蒸发温度：专为冷冻行业设计的低温涡旋
低故障率：大油池，抗回液能力
低用电量：压缩机柔性输出，确保制冷系统较高的IPLV系数



电子油位控制器

卓越的油位管理解决方案
大幅提升系统可靠性