



CHINESE REFRIGERATION NEWSLETTER

中国制冷简报

2022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



冰轮环境
MOON-TECH

智慧绿能生态
INTELLIGENT GREEN ENERGY ECOSYSTEM

共建绿色生态 JOINTLY BUILD GREEN ECOLOGY 共赢低碳未来 WIN-WIN LOW CARBON FUTURE

冰轮环境着力构建低碳技术支撑体系和运营管理体系
为全球客户提供智慧绿色能源互联互补的综合解决方案
携手共赴高质量发展之路

低碳发展支柱

- 进军低碳产业
- 研发低碳技术
- 完善低碳制造
- 打造低碳链条
- 拓展低碳服务
- 建设低碳文化

低碳科技变革

- 产业结构高端化
- 能源消费低碳化
- 资源利用循环化
- 生产过程清洁化



项目规划



技术咨询



工程设计



成套设备



安装调试



员工培训



系统维护



系统诊断升级



合同能源代管

冰轮环境技术股份有限公司
Moon Environment Technology Co., Ltd.

400-658-0811
中国烟台芝罘区冰轮路1号



官方网站



官方公众号

生而为盈 比绿色更出色 符合《巴黎协定》要求



谷轮™ 110cc变频涡旋压缩机

节能高效、卓越可靠、生态友好

出众性能，轻松应对部分负荷或满载需求

绿色产品助力行业能效升级

搭载全工况优化匹配变频驱动器，缩短调试周期

兼容多种环保制冷剂

与自然相宜，亦遂您心意

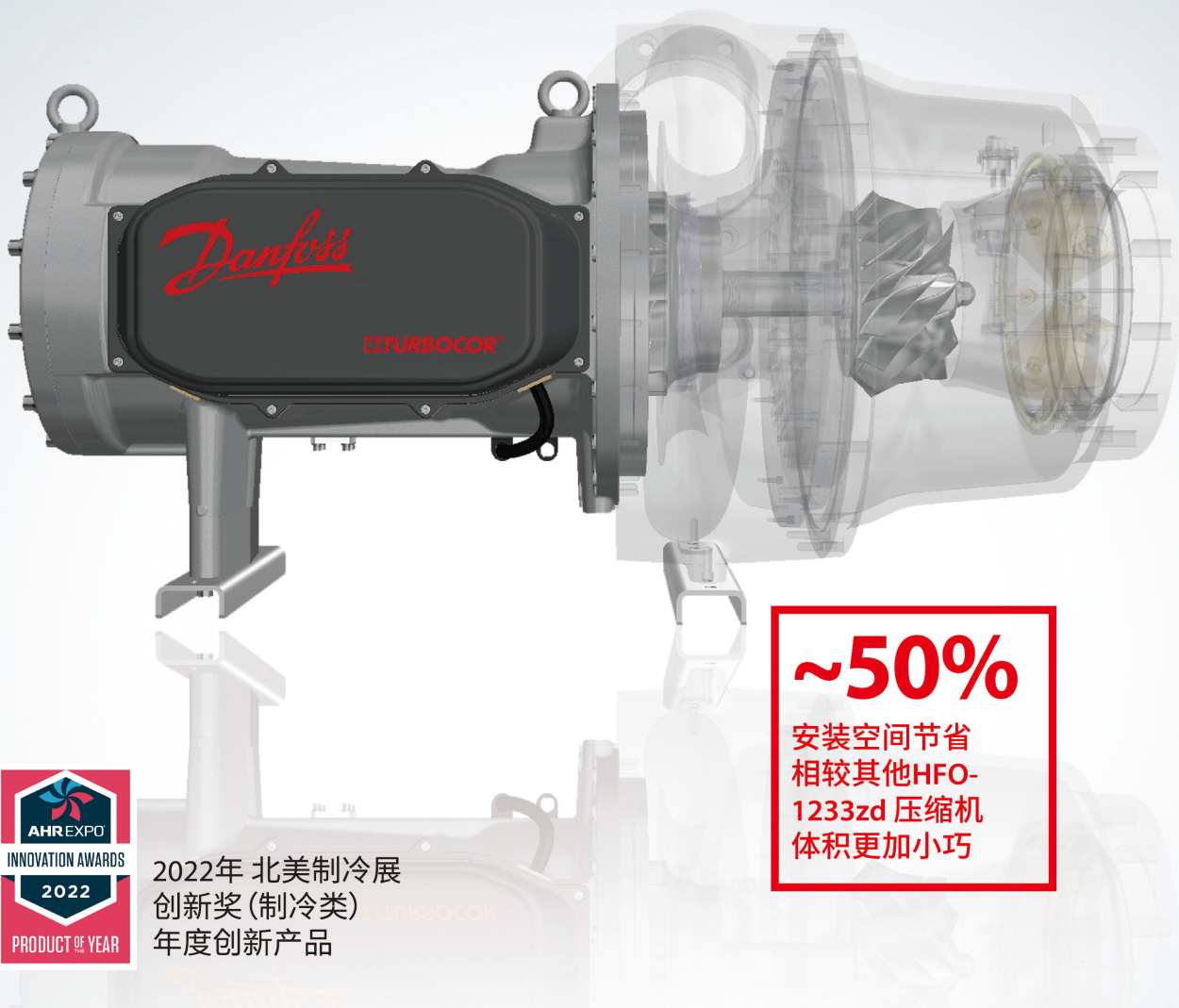
请微信扫码观看谷轮™ 110cc变频涡旋压缩机产品视频以及产品资料



COPELAND™



EMERSON™



~50%

安装空间节省
相较其他HFO-
1233zd 压缩机
体积更加小巧



2022年 北美制冷展
创新奖 (制冷类)
年度创新产品

Turbocor® 全新适用于低 GWP HFO-1233zd 制冷剂的磁悬浮压缩机

丹佛斯 Turbocor® VTCA400 磁悬浮压缩机

VTCA400压缩机是丹佛斯首款适用于低 GWP HFO-1233zd 制冷剂的无油离心式磁悬浮压缩机，采用全新的混合压缩式专利设计。

相较于其他适用于HFO-1233zd 制冷剂的压缩机，VTCA400体积更加小巧，可节省约50%的安装空间，进一步缩小机组整体体积。

同时VTCA400可满足多压缩机设计需求，以实现机组更优的部分负荷性能。

有关更多信息，请访问 turbocor.danfoss.com

磁悬浮压缩机，始于丹佛斯 **TURBOCOR®**

ENGINEERING
TOMORROW

Danfoss



冰山冷热科技股份有限公司

Bingshan Refrigeration & Heat Transfer Technologies Co., Ltd.

专注冷热 倾心自然

Better Refrigeration & Heat Tech For a Green Nature

92年

1930 - 2022

-272℃ -200℃ -160℃ -120℃ -80℃ -45℃ -30℃ 0℃ 7℃ 20℃ 65℃ 110℃ 230℃ 430℃

实现双碳目标是全社会的共同责任。针对石油化工、肉类屠宰加工、果蔬保鲜与水产加工、中央厨房、冷链物流、船舶、啤酒、乳品、天然气、工业节能、冰雪工程、建筑环境、深冷供热等冷热细分市场的客户实现双碳目标的发展要求，提供更加减碳、更有效益、更高质量的定制化方案、产品、工程以及全生命周期的智慧服务，是冰山冷热科技股份有限公司（原大连冷冻机股份有限公司）的时代使命。

冰山冷热坚持冷热平衡、数字赋能，耦合冷热技术和数字技术，自主创新的冷热技术涵盖天然工质制冷、流体冷却、低温除湿、气体压缩、余热/余压利用等，为客户提供从-272℃至430℃横跨700℃温区的深冷能源系统解决方案，开发并示范应用高效压缩机、绿色冷媒、空气源热泵、地源（水源）热泵、余能利用、储冷储热、CCUS、氢能源、光伏绿能、智慧能源管理等减碳、零碳、负碳技术，努力为不同应用场景的客户节能减碳提供专业服务。



大连经济技术开发区辽河东路106号

400-0411-777

www.bingshan.com



PREFACE

序 言

制冷空调产品不仅作为家用电器被人们广泛使用，并作为工业设备，在建筑、食品、电子信息、汽车、化工等行业广泛应用，由于其在各领域能源消耗占比较大，而成为“双碳战略”关注的行业。2021年《中国制冷简报》出版一期“碳中和”专刊，产生很好的社会影响。2022年8月，中国制冷学会在“科创中国”项目支持下，编撰《碳中和制冷技术发展路线》，对行业发展现状、技术、应用做了系统的总体分析总结，描绘了制冷空调行业碳中和技术基本路线、方法和实施路径。2022年10月，党的二十大提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”，对“双碳”目标的实施做出了重要部署。中国制冷学会抓住“双碳”发展机遇，强化知识、技术和应用案例的推广工作，以服务行业“双碳”技术进步和健康发展，并再次编辑出版《中国制冷简报》2022年碳中和专刊。

本期《中国制冷简报》专刊分8章，24万字，汇集“双碳”背景下国内外制冷空调技术发展趋势和政策要求，在低GWP制冷剂及系统节能减碳、家用和商用空调与供暖、工业余热及冷能利用、食品和药品冷链、氢和天然气液化及储运、数据中心及超算中心冷却、汽车空调和能源管理、储能、制冷设备及关键零部件、新能源、新材料、大数据与互联网、智能制造，以及新型制冷技术（磁制冷、弹热制冷、电卡制冷、空气制冷、辐射制冷）等方面撰写本期专刊内容，并将“双碳”技术和产品应用有机结合，在各章节尽可能汇集一些典型案例，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杨一凡、范薇等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。限于时间和疫情影响，以及编写水平所限，错漏之处恳请读者批评指正。

张华

2023年2月8日

C 目录

CONTENTS

1. 碳中和目标下的中国制冷行业	(1)
1.1 双碳背景介绍	(2)
1.2 双碳相关政策	(5)
1.3 双碳背景下制冷行业的重要作用	(6)
2. 低GWP制冷剂及系统节能减碳	(8)
2.1 低GWP制冷剂研究现状	(9)
2.2 低GWP制冷剂技术应用	(11)
2.3 优秀案例	(14)
3. 部分领域制冷技术研究及应用进展	(18)
3.1 家用和商用空调与供暖	(18)
3.2 工业余热及冷能利用	(27)
3.3 食品和药品冷链	(33)
3.4 氢、天然气液化及储运	(42)
3.5 数据中心及超算中心冷却	(48)
3.6 汽车空调及能源管理	(54)
3.7 储能	(65)
4. 制冷设备及关键零部件技术研究及应用进展	(75)
4.1 压缩机	(75)
4.2 换热器	(77)
4.3 风机和水泵	(80)
4.4 阀件及控制系统	(81)
5. 制冷产业与新技术的融合	(84)
5.1 新能源	(84)
5.2 新材料	(85)
5.3 人工智能	(85)
5.4 大数据与互联网	(87)
5.5 智能制造	(88)
6. 具有产业化潜力的新型制冷技术研究进展	(90)
6.1 热声制冷	(90)
6.2 磁制冷	(94)
6.3 弹热制冷	(100)
6.4 电卡制冷	(104)
6.5 空气制冷	(110)
6.6 辐射制冷	(116)
7. “双碳战略”企业家之声	(121)
7.1 冰山打造生物质与风光耦合的“美丽乡村”能源系统	(121)
7.2 冰轮双碳形势下冷冻冷藏技术发展的思考	(125)
7.3 丹佛斯多维并举加速“双碳”目标达成	(131)
7.4 艾默生以创新技术切实推动绿色低碳转型发展	(136)
7.5 威乐高效水泵节能与控制系统	(140)
8. 总结	(144)



中国制冷简报

CHINESE REFRIGERATION NEWSLETTER

主办单位：中国制冷学会

《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。

“双碳”专刊编委会

主 编：张 华

编 委：陈焕新、陈江平、丁 杰、范 薇、
刘金平、刘业凤、罗二仓、马国远、
邵双全、施 俊、石文星、田长青、
肖 伦、邢子文、徐震原、杨一凡、
杨 昭、殷光文、张会明
(按姓氏拼音排序)

执行主编：范 薇

编 辑：邵月月

封面设计：王 昊

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

封二 冰轮环境技术股份有限公司

封三 威乐（中国）水泵系统有限公司

首插页 艾默生环境优化技术（苏州）有限公司

目录前页 冰山冷热科技股份有限公司

插页 丹佛斯（中国）投资有限公司

声明

本印刷版本为去掉参考文献的精简版，如需完整版可关注上方微信公众号下载。

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。

碳中和目标下的中国 制冷行业



张 华 Zhang Hua

男，教授，现任上海理工大学副校长、制冷与低温工程研究所所长。主要从事环保制冷剂、自动复叠制冷系统、太阳能利用方面研究。担任中国制冷学会理事兼第二专业委员会副主任、中国工程师联合体咨询和决策委员会委员、全国冷冻空调标准委员会委员（TC238）；荣获国家有突出贡献中青年专家、全国优秀科技工作者称号；先后获国家科技进步二等奖，上海市、山东省和安徽省科技奖一等奖等科技奖。



刘 妮 Liu Ni

女，上海理工大学制冷与低温工程研究所教授。主要从事制冷与空调、相变材料及储能技术、新能源汽车热管理等方面研究。先后获上海市自然科学二等奖，教育部、上海市及浙江省科技进步二等奖，中国机械工业科学技术二等奖等科技奖7项。



周孟怡 Zhou Mengyi

女，上海理工大学能源动力专业硕士研究生，研究方向为家用制冷空调的全生命周期评价。

1.1 “双碳”背景介绍

实现“双碳”是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。我国力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和，是以习近平主席为核心的党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，是我们对国际社会的庄严承诺。前不久，在国家发展改革委举行的专题新闻发布会上，发布了相关数据：我国可再生能源装机规模已突破11亿千瓦，稳居世界第一；新能源汽车产销量连续7年位居世界第一，保有量占全球一半；与2012年相比，2021年我国能耗强度下降了26.4%，碳排放强度下降了34.4%。推进“双碳”

是推动高质量发展的内在要求。从建立统筹协调机制，到构建“1+N”政策体系；从稳妥有序推进能源绿色低碳转型，到大力推进产业结构优化升级；从优化完善能耗双控制度，到积极参与全球气候治理。“双碳”战略也深刻影响着制冷空调行业的变革。

能源、粮食、环境、气候变化（气变）是当今世界重大问题。数据表明，工业革命以来，地球气候系统长期升温，目前地球正以每10年0.2℃的速度不断攀升，冰川融化、海平面上升、极端天气频发等恶劣环境严重威胁人类生存。

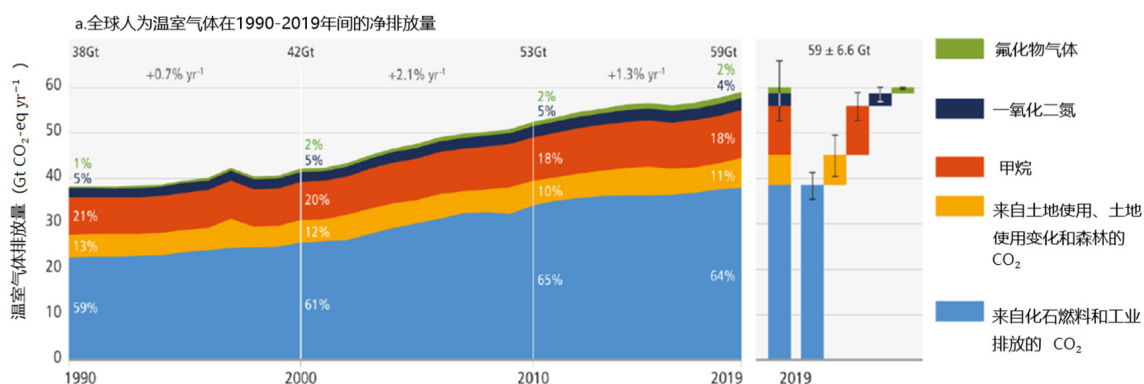


图1-1 全球各种温室气体净排放量总体情况（1990—2019）

地球气候变化主要由人类活动推动，特别是化石燃料的燃烧增加了地球大气中的温室气体含量。根据IPCC报告数据显示（如图1-1），2019年全球人为温室气体净排放量为59 ± 6.6 GtCO₂当量，比2010年高出约12%（6.5 GtCO₂ eq），比1990年高出54%（21 GtCO₂ eq）。2010—2019年十年间的年平均值为56 ± 6.0 GtCO₂ eq，比2000—2009年高出9.1 GtCO₂ yr⁻¹。这是有记录以来十年平均排放量的最高增幅。2020年，新冠肺炎使得全球二氧化碳排放量比2019年预计下降5.8%。除远程工作和家庭教育导致的住宅建筑能耗增加外，各个领域的能源需求都有所减少。交通领域受到的影响尤其严重，国际航空排放量下降了45%。温室气体主要是二氧化碳、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）和含氟气体等。为实现“碳中和”战略目标，需要在能源、工业、建筑、运输、农业和城市领域等展开快速和深远的改革。随着《<蒙特利尔议定书>基加利修正案》逐步在全球范围内生效，在氢氟碳化合物（HFCs）逐步淘汰期间，必将刺激制冷技术的广泛创新，制冷和空调

设备的能效也同时得以提高。在没有基加利修正案和国家法规的情况下，由于未来大气中HFCs的增长，到2100年温度升高预计在0.3~0.5℃之间，相比之下，随着修正案的全面实施，预计气温将上升约0.1℃以下。各个国家对替代制冷剂的选择可能取决于能效、成本、制冷剂毒性和可燃性，需要国家和地区法规来推动技术创新和发展。制冷空调行业是多元化的能源系统，制冷行业的排放一方面来自于用电、生产过程中的二氧化碳排放，另一方面来自于制冷剂等非二氧化碳温室气体的排放。制冷空调系统不仅可以提供“冷”，也可以提供“热”；其不仅消耗“电”，甚至与太阳能建筑一体化、燃料电池等结合，可以产生“电”。制冷广泛应用于建筑、食品、交通、科技，与人民生活、工业过程息息相关。当前，我国制冷空调行业具有全球影响，要实现“双碳”目标面临着压力大、任务重、时间紧的多重挑战。

制冷空调行业碳中和要符合中国特色，与中国方案一致。实现“碳中和”目标，一方面需要“做

减法”，即降低碳排放，包括能源碳强度的降低，主要依靠产业结构调整以及节能和提高能效，同时依靠清洁化和电气化。另一方面，需要积极“做加法”，即增加碳移除和“负排放”。从碳移除来看，主要依靠碳捕获、利用与封存（CCUS）；从增加“负排放”来看，主要依靠土地利用变化和林业碳汇以及提升生态系统碳汇能力。

2018年全球温室气体排放量超过550亿吨CO₂当量，其中包括化石燃料利用、土地利用，非二氧化碳温室气体排放等。这些排放量最终被陆地碳汇吸收31%，被海洋碳汇吸收23%，剩余的46%滞留于大气中。对于中国，能源领域碳排放总量大，是实现碳减排目标的关键。2019年中国总温室气体排放约120亿吨CO₂当量，其中二氧化碳排放约98.26亿吨，47%在发电端，53%在消费端；按照行业来分，51%来自电热能源、28%来自工业制造、10%来自交通，如图1-2所示。

目前，我国正在采取一系列措施减少碳净排放。在能源领域主要有风能、太阳能、生物质能、水力发电、地热能、核能、碳捕集和储存（CCS）、油气田减少CH₄、煤矿减少CH₄等，在农林及其他土地利用领域主要有农业碳封存、减少二氧化碳和甲烷排放、生态恢复、减少食物浪费、健康饮食等，在建筑领域主要有减少能源需求、提高用电效率、增加建筑节能特性、采用可再生能源等，在交通、工业领域也有很多措施。IPCC预计2030年前全球减排技术和减少温室气体的量及成本发展趋势如图1-3所示。

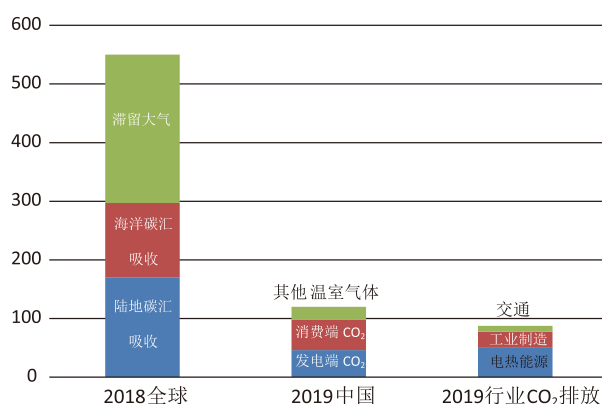


图1-2 温室气体排放概算

中国能源结构决定中国碳中和战略走向，我国“双碳”目标下碳中和技术路线见图1-4。能源系



图1-3 2030年削减碳排放领域、技术方法和成本预见

统电源、电网、负荷、储能各环节共同发力，加快推进能源供给三化（多元化、清洁化、低碳化）、能源消费三化（高效化、减量化、电气化）。发电端主要构筑无碳电源系统，消费端主要构筑消费电能、氢能、地热能等。在推进“碳中和”过程中有一些重要指标约束，预计中国2030年实现碳达峰时，单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上。推进能源清洁低碳转型，关键是加快发展非化石能源，尤其风电、太阳能发电等新能源，到2025、2030年，非化石能源占一次能源消费比重将达到20%、25%左右。能源消费达峰后，电气化水平提高，电力需求仍将持续增长，电力行业不仅要承接交通、建筑、工业等领域转移的能源消耗和排放，还要对存量化石能源电源进行清洁替代，预计我国95%左右的非化石能源主要通过转化为电能加以利用。

未来全球碳中和能源系统流程如图1-5，能源供给侧包括太阳能、风能、核能、水电、地热，还有

少量的煤、油、气等，能源使用侧包括电力、燃料和热能，全球能源367EJ，工业领域133EJ，家用和商业用137EJ，运输领域97EJ。

制冷空调主要属于能源消费侧，需要全面推进电气化和节能提效。预计2025、2030年，电能占终端能源消费比重将达到30%、35%以上。我们需推动全社会节能提效，着力提高终端消费电气化水平，拓展电能替代广度深度；推动智慧能源系统建设，挖掘用户侧资源参与需求侧响应的潜力。

这场能源系统的调整必然引起巨大的变化，电力将会成为未来能源系统的主要供能方式。终端能源用户需尽快全面电气化，尽可能少用燃料、多用电。这种变化将导致能源领域的整个链条发生变化，曾经的过程是燃烧燃料产生热能，热能驱动发电机产生电能，电处于最后一个环节；而未来，电力会成为一次能源，直接可以使用，而用户侧的冷热量，则需要由电动制冷、电动热泵或电力供热来提供，成为能源转换链的最后一个环节。

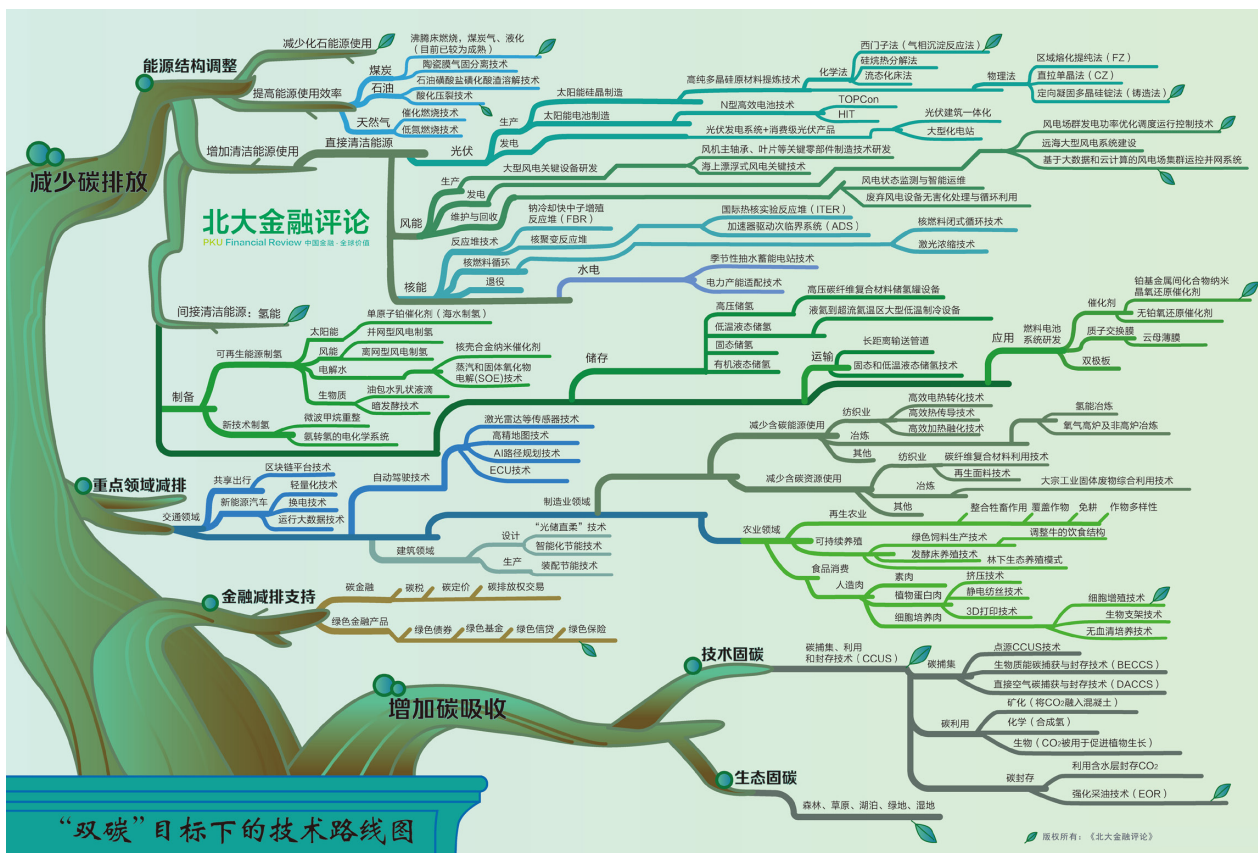


图1-4 “双碳”目标下碳中和技术路线图

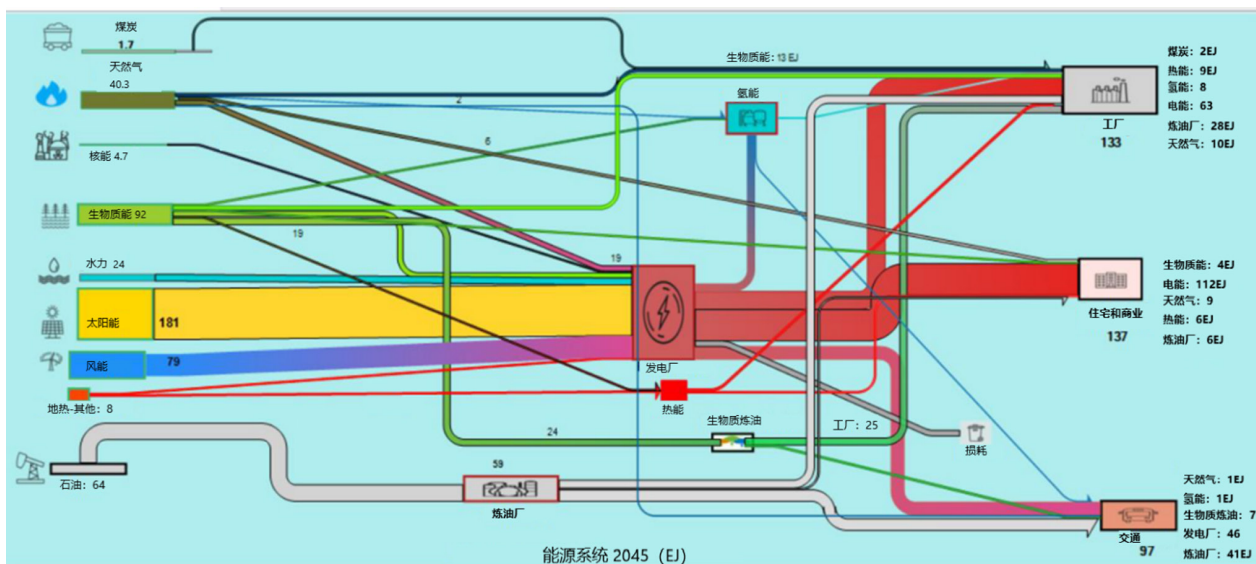


图1-5 未来全球净零排放能源系统的流程

1.2 “双碳”相关政策

2022年10月，党的二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰、碳中和”。二十大报告对“双碳”的部署，在我国建设生态文明，推动社会可持续发展方面起到了“举旗定向”的作用。当前，我国正在深入推动能源革命，有序推进“碳达峰、碳中和”，能源生产和消费稳步向清洁低碳、安全高效转变。实现“双碳”目标，关键是能源体系的绿色低碳转型。

国际上已有 130 多个国家和地区承诺实现“碳中和”，其中大部分将实现“碳中和”的目标期限定为 2050 年。对于能源消耗量占全球大部分份额的世界各主要经济体来说，2050 年实现“碳中和”都是一个极具挑战性的目标。自2020 年 9 月以来，习近平主席已经多次在联合国大会等国际会议上宣布我国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值（“碳达峰”），争取在 2060 年前实现碳中和的战略目标。2020 年 12 月，中共中央经济工作会议进一步将做好“碳达峰、碳中和”列入 2021 年我国经济工作要抓好的八大重点任务之一。2021 年 3 月，第十三届全国人民代表大会第四次会议又明确将做好“碳达峰、碳中和”工作写入政府工作报告。由此可见，力争实现“碳中和”目标成为了我国的一项重大战略决策。

此外，国家相关部委也相继出台《关于全面贯彻新发展理念 做好碳达峰碳中和工作的指导意见》《碳达峰行动方案》《科技创新支撑碳达峰碳中和

行动方案》《中国碳中和技术发展路线图》《完善能源消费强度和总量双控制度方案》等10多份文件，24个行业的《企业温室气体排放核算方法与报告指南（2021 年版）》以及《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》《建筑节能与可再生能源利用通用规范（GB55015—2021）》《城市和社区可持续发展 低碳发展水平评价导则（GB/T41152—2021）》等评价导则、各类指标体系也相继出台。

贯彻“双碳”目标，制冷行业的促进政策与法律法规的出台与执行是保证“碳中和”目标达成的必要条件。从“十四五”规划开始，各个五年规划中提出阶段性的节能减排目标，使中国“碳中和”的承诺有法可依、有据可循。节能标准是落实我国碳中和目标的主要措施之一，通过分析评估制冷空调器节能标准进展以及节能作用，可以筛选出开展节能减排工作的突破口和有效路径，对节能标准化未来工作进行展望。

为应对气候变暖，全球都在行动。近30年来国际社会不断颁布各种政策和法规，以求提高能源使用效率，缓解环境恶化。《联合国气候变化框架公约（UNFCCC）》为全球应对气候变化制定了明确目标，2016年11月正式生效的《巴黎协定》具有标志性意义，为2020年后全球应对气候变化行动作出安排，主要目标是到本世纪末将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内。2020 年以来众多发达国家制定了面向“碳中和”的战略计划，

其中新加坡公布《2030年新加坡绿色发展蓝图》、日本颁布《革新环境技术创新战略》《2050 碳中和绿色增长战略》、美国发布《清洁能源革命与环境正义计划》《变革性清洁能源解决方案》、英国以《绿色工业革命的十点计划》为基础推出《净零创新组合计划》等。

1.3 “双碳”背景下制冷行业的重要作用

我国是全球制冷空调产品制造第一大国、消费第一大国和国际贸易第一大国。制冷空调行业服务领域非常广，包括工农业生产和人民生活，诸如家电、商业、食品、国防、军工、航空航天、核工程、机械电子、化工、冶金、电力、交通、环保、轻工等领域。我国生产全世界80%的房间空调、50%以上冰箱冰柜、近50%的工商制冷设备、30%以上的汽车空调。2021年生产房间空调器13000万台、家用冰箱8450万台、家用冷柜2900万台。2021年，我国制冷空调行业（包括工商制冷空调设备及配件、家用电冰箱、冷柜、房间空调器等，但不包括家用制冷空调配件及配套设备）的工业总产值约7600亿元。行业企业营业收入大于100亿元数量为7家，在50~100亿元企业5家，在10~50亿元企业36家，5~10亿元企业20家，3~5亿元企业13家，1~3亿元企业18家，如图1-6所示。制冷空调行业已成为我国装备工业的有生力量和国民经济的重要组成部分。

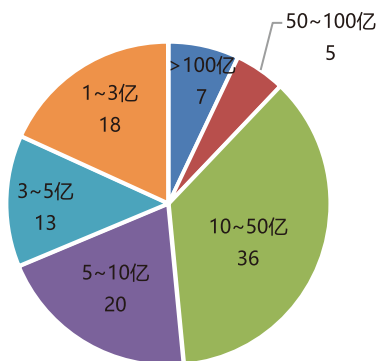


图1-6 行业企业营业收入分布

我国目前的能源结构仍保持以煤炭为主的一次能源消费结构，燃煤的60%用于发电和热电联产，每年为社会提供8.5万亿kWh的电力和1.5亿kWh的热量（蒸汽和循环热水）；其余40%燃煤中，22%作为能源或原材料用于冶金、有色、建材、化工等流程产业，18%通过中小规模的锅炉产生循环热水或低压蒸汽，为建筑采暖和非流程制造业（纺织、印染、

造纸、食品、制药、喷涂、光纤、印刷、各种干燥等）提供温度低于150℃的热量。燃煤导致的碳排放总量的23%用于150℃以下的中低品位热量的制备。制冷空调设备是国家经济生活中的能源消耗大户，其耗电量占全社会发电量20%以上。以冰箱为例，2019 年全社会拥有电冰箱量达4.29亿台，用电1252亿kWh。可见，制冷空调行业是当之无愧的能耗大户，与“双碳”目标息息相关。中国也是当今全球最大的制冷剂消费国，消费量超过全球的50%，各类制冷剂（HCFCs、HFCs、天然工质等）的年消费量超过35万吨，折合CO₂当量超过5.5亿吨。

此外，制冷剂泄漏导致的排放是我国温室气体排放的重要组成部分。政策管控是制冷剂减排的重要途径。目前，制冷行业制冷剂使用主要受《基加利修正案》等措施限制。依据该修正案，从2019年1月1日起建立HFCs进出口的许可证管理制度，包括中国在内的第5条缔约方可延长到2021年1月1日建立HFCs进出口许可证制度，此外，从2033年1月1日起，禁止缔约方同非缔约方进行HFCs进出口贸易，条件是届时应至少有70个国家加入修正案。我国于2021年9月15日正式接受《基加利修正案》。当日，国家生态环境部即发布《关于严格控制第一批氢氟碳化物化工生产建设项目的通知（征求意见稿）》，要求各地不得新建、扩建用作制冷剂、发泡剂等受控用途的R32、R134a、R125、R143a和R245fa化工生产设施。

制冷剂是制冷行业碳排放重要来源。当前，制冷行业常用的制冷剂大多是HFCs，如R134a、R32等，其GWP分别达到1430和675。我国每年生产HFCs大约占全球的67%，其中90%以上HFCs用于制冷设备（冷冻、冷藏、空调）。《基加利修正案》通过后，《蒙特利尔议定书》开启了协同应对臭氧层耗损和气候变化的历史新篇章。发达国家在过去20年已经基本完成了HCFCs淘汰转换。在这一转换过程中，R410A、R134a、R404A等HFCs制冷剂作为HCFCs的主要替代品，在许多发达国家获得了广泛的使用。随着全球范围内削减高GWP的HFCs的呼声日益高涨，发达国家在高GWP的HFCs削减与替换方面也做了大量的研究和评估工作。在低GWP制冷工质的应用和推广方面，发达国家也取得了一些重要的进展。

面向我国“双碳”战略，不同领域不同层级

的“碳中和”技术路线逐渐发布。中央发布的《绿色高效制冷行动方案》成为我国制冷领域碳中和的重要行动方案。改善能源体系结构、发展储能技术、环保制冷剂替代、热泵节能减排技术、提升产品和系统能效、电动汽车及热管理技术等是实现我国制冷空调行业碳中和的重要措施。当前，制冷空调行业“碳中和”意识渗透到行业各个环节，正处于转型发展阶段，从原材料采购、零部件生产、总装生产线、物流运输、使用、回收等全周期寿命中都得到体现。制冷空调行业面临优化产业结构和能源结构。通过采用环保制冷剂替代、拓宽热泵应用范围、强化电动汽车热管理、大力推广冷链物流管理、出台和执行产业促进节能减排的政策与法律法规等措施，为世界贡献了中国“碳中和”方案。

面向我国和世界“碳中和”未来发展趋势，制冷空调行业可以为我国能源、交通、建筑、工业、农业、食品等领域碳中和发展提供技术支撑，实现制冷空调装备降低碳排放峰值，实现“碳中和”目标。制冷技术“碳中和”案例是推动行业碳中和进步重要手段，起到引领作用。低碳能源系统要求制冷行业与低碳电力系统配合，汽车电动化成为很重要的问题，因为它在电源与用电方之间的平衡会发

挥重要的作用。工业制热最好的办法的就是电驱动热泵。热泵会使制冷行业发挥越来越大的作用，制冷行业不只提供冷源，未来同时也提供大量热源。

涉及制冷领域“碳中和”产业路径有：1) 可再生能源；2) 储能（储电、储热、储气）；3) 热能（冷量、热量）领域脱碳，如建筑节能减排、冷链物流、供热；4) 新能源车（动力电池、热泵等）；5) 新型燃料（氢气、氨气、甲醇、甲基环己烷等）等。“双碳”目标持续推进的两年时间里，制冷空调行业在助力这一目标的达成上，正走出一条极具特色的发展之路。行业绿色行动步伐不断加快，积极调动在绿色、节能、环保方面的实践经验，借助行业全球化布局，实现资源整合，为中国乃至全球实现低碳目标贡献积极力量。智能制造规模不断扩大，跨界多元化运营不断增大。数字化、大数据、物联网赋能制冷空调产品加快。因此，制冷空调行业实现“碳中和”，提升行业企业竞争力，需要在制冷剂超低GWP化、用电绿色化、供暖热泵化、产品节能化、冷链升级和信息化、区域能源解决方案整体化、物联网智能调控化、电动汽车热管理化、工厂绿色化、变频普及化、能效标准升级化等方面不断强化。

低GWP制冷剂及系统 节能减碳



杨 昭 Yang Zhao

女，天津大学教授，博士生导师，兼任国际制冷学会安全专家组成员、中国制冷学会理事、全国能量系统标准化委员会委员、天津市制冷学会副理事长及冷藏运输专委会主任委员。主要从事制冷及热泵新技术应用、新环保制冷剂及替代技术，承担国家863、国家自然科学基金重点及面上项目、省部级及成果转化项目70余项，获省部级以上奖励6项，编著出版教材及著作7部，主编教材获中国电力学会精品教材、主讲课程获天津市一流本科课程。



张 勇 Zhang Yong

男，天津大学机械工程学院制冷及低温工程专业博士研究生，从事新型环保制冷剂开发及阻燃防爆技术、新型环保制冷剂的性能评估等方向的研究。

近年来，由全球气候变暖引起的极端气候变化日益凸显，减少温室气体排放、降低温室效应已成为全球亟待解决的重要科学问题。《中国气候变化蓝皮书（2022）》显示：全球变暖趋势仍在持续，2021年中国地表平均气温、沿海海平面、多年冻土活动层厚度等多项气候变化指标打破观测纪录^[1]。2018年，全球制冷空调引起的CO₂当量约占11.8%。人工合成制冷剂的CO₂当量巨大，制冷行业的低碳应对成为降低温室效应的重要战场。

为此，世界各国签订并出台了多项公约和法案

（见表2-1），加速新型低碳工质的替代进程。2022年10月31日，美国正式加入《基加利修正案》，成为第140个缔约国，承诺将减少氢氟碳化物的生产和使用^[2]；日本在2021年发布《氟碳化合物生命周期管理倡议》，从碳氟化合物的整个生命周期内解决其排放问题^[3]。我国“双碳”目标的提出，将“低碳”纳入经济社会发展和生态文明建设整体布局，其本质就是为了更高质量地可持续发展^[4]。随着HCFCs工质的淘汰及HFCs工质产量的削减，低GWP制冷剂的开发和应用迫在眉睫。

表2-1 各国HFCs制冷剂削减政策

组织	法规/法案/政策	措施
欧盟	2022年4月，修正含氟温室气体指令 (EU) 2019/1937并计划废除(EU) No517/2014	修正含氟温室气体指令 (EU) 2019/1937并计划废除法规 (EU)No517/2014
美国	2020年，《新冠纾困法案》下的HFCs削减法案	2036年以后HFCs生产和消费水平不超过2011—2013年平均水平的15%
	2022年10月31日，美国正式加入《基加利修正案》	承诺美国将减少氢氟碳化物的生产和使用
日本	2021年，《氟碳化合物生命周期管理倡议》	从碳氟化合物的整个生命周期内解决其排放问题
加拿大	2018年，《消耗臭氧层物质和卤代烃替代物质法规》	采取不同措施积极削减HFCs
中国	2021年9月15日，《基加利修正案》正式生效	促进低GWP制冷剂的推广应用
其他	截至2022年12月5日，145个国家加入《基加利修正案》	明确了18种受控氢氟烃清单，制定各国淘汰HFCs的时间表

目前在全球范围内尚未找到“完全理想”的零ODP、低GWP、安全、高性能的替代制冷剂。从全球制造业同行的角度出发，明确提出在选择未来的替代制冷剂时，除满足零ODP、尽可能低的GWP外，还应综合考虑制冷剂的整个寿命期气候性能LCCP，选择对全球气候变化影响更低的替代物。对于未来可用的替代制冷剂，应当在综合考虑制冷剂本身的性质，制冷系统的节能性、环保性、安全性、经济性等各方面后做出选择。从目前的技术发展状况看，国际上在各个产品领域采用何种替代技术路线仍存在诸多争议。但是更低GWP的制冷剂在全球范围内的应用推广将是必然的趋势。当前的低GWP的替代制冷剂主要包括天然制冷剂（如NH₃、R600a、CO₂、R290、H₂O等）、低GWP的HFCs（如R32、R152a等及其混合物）、HFOs、HCFOs及混合物（如R1234yf、R1234ze(E)、R1234ze(Z)、R1233zd(E)、R1336mzz(Z)、R1132(E)、R513A、R514B、R515A等）。

大部分低碳替代制冷剂存在着可燃、高压或容积效率低等缺点，导致在一定时期内替代产品的成本会明显高于当前水平，市场对新的替代产品的接受度也是一个考验。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。建议通过对不同制冷剂存在的问题进行“缺陷管理”的模式加以处理，确保这些替代品在规定条件下的安全使用^[5]。

2.1 低GWP制冷剂研究现状

2.1.1 热力学性质研究

为优选新一代低碳制冷剂，国内外研究机构

从数万种物质中依据热力学性质（如临界温度、压力、沸点、气液相比热容等）和环境特性等条件进行筛选，并对其系统性能进行了模拟和实验研究。其中HCs及低GWP的HFCs的研究较为全面，但新型合成制冷剂HFOs的热力学参数还需补充。此外，基于现有研究数据，HFOs的热力学性质和系统性能并不非常理想，很多单一化合物难以同时满足环保、安全特性、热力学性能等要求，混合工质可作为一种有效的解决方案，有望直接替代现有系统中的高GWP工质。近年来，国内外关于工质热物性的研究主要集中在HFOs及以其为主要组分的混合工质。针对气液相平衡研究，多以实验测量或分子模拟的方式进行研究，并在此基础上开发出适用于二元或多元混合物的状态方程^[6-8]。对于工质热容、热导率、密度等热物性参数，国内外学者以实验手段进行测量，通过状态方程、人工神经网络的方式进行预测^[9-12]。对于新型换热器的开发则趋向于小管径、微通道和紧凑式，其对流动中的传热和压降特性会产生重要影响，因此黏度作为流体的迁移性质显得尤为重要。目前，黏度的测试方法主要包括毛细管法、振动弦法、表面散射光法、落球法、移动活塞法等，HFOs及其混合工质的物性测试仍为国内外的研究热点^[13-15]。

2.1.2 可燃性研究

现阶段，适用于制冷系统的新一代低碳环保制冷剂大多具有可燃性，随着易燃制冷剂使用标准的放宽，它们将被迅速推向市场。GB/T 9237—2017《制冷系统及热泵安全与环境要求》规定了可燃制冷剂新的使用门槛，当采取通风、安全阀等措施时，可以放宽制冷剂充注量。国际电工委员会于

2019年发布标准IEC 60335-2-89, 指出商用设备中A3制冷剂的充注限值从150g增加到500g, A2和A2L制冷剂的充注限值从150g增加到1200g。新一代低碳制冷剂具有广阔的发展前景^[16]。

HCS以丙烷(R290)、异丁烷(R600a)、丙烯(R1270)作为代表, 凭借其优异的环保性能和热力学性能受到了广泛关注, 其技术应用涵盖了家用空调、冰箱、热泵、冷水机组等领域。尤其是在欧洲国家, HCs接受程度更高, 但由于其可燃性较强, 属于A3类工质, 在安全性设计方面也有特殊要求, 如使用完全封闭和独立的电器面板, 管道连接中采用钎焊、洛克环或其他特殊的连接方式等。因此, 在实际应用过程中, 应当采用专用压缩机、微通道换热器等技术来减少制冷剂的充注量。同时建立从产品设计、制造到售后安装、维修和人员培训、认证的全流程安全标准及管控体系。

氨(NH₃)作为一种天然制冷剂, 环保性能优异, 具有较高的汽化潜热, 广泛应用于各种冷库系统中。然而, 氨具有毒性和弱可燃性, 一旦发生大量泄漏, 后果非常严重。当空气中氨的浓度达到5000 ppm时就会使人失去知觉, 造成窒息死亡; 浓度到150000至270000 ppm (15%~27%) 时, 就会发生剧烈爆炸。因此, 为了预防人身伤害及爆炸事故的发生, 保障冷库运行安全, 凡采用氨为制冷剂的氨制冷机房内均应设置氨气泄漏探测报警系统。此外, 包装间、分割间、产品整理间等人员较多房间的空调系统严禁采用氨直接蒸发制冷系统。

HFOs作为新型合成制冷剂是近几年的研究热点, 虽具有可燃性, 但已经得到了初步应用。其中R1234yf被认为是R134a在汽车空调中的替代制冷剂, 相较于R134a, R1234yf的系统性能略差但可以接受, 因此在欧洲汽车空调行业得到了普遍应用, 但在冰箱、房间空调器和热泵系统中应用的效果并不理想。R1234ze(E)可用于干衣机等小型机组, 并且其在冷水机组和亚临界中高温热泵及热水器使用时, 系统性能较R134a更为优异。此外, 部分低GWP的HFCs也具有不错的应用前景, 但它们当中的大多数仍具有可燃性。目前, R32在中小型空调设备中得到了广泛的应用, R152a也可作为汽车空调制冷剂。

近几年, 随着可燃制冷剂充注量的逐渐放宽和系统加工制造工艺的提升, 新一代环境友好型可燃工质将会有更多的应用。为进一步推广环保制冷剂

的实际应用, 可以从以下几个方面来应对低GWP制冷剂的可燃性问题, 以便在安全可控的前提下不断拓宽充注量限制: 1) 不断研究突破充注量限制的方法和技术, 研发更加高效的微通道换热器、更加安全可靠的专用压缩机; 2) 对可燃制冷剂的燃爆特性(最小点火能、燃烧极限、燃烧速度等)进行深入研究, 探索工质燃爆特性和抑制机理; 3) 在系统潜在泄漏点设置气体传感器等检测装置(需满足GB/T9237—2017的相关要求), 第一时间发现故障并及时处理; 4) 建立健全政策标准及安全规范, 完善制冷剂全生命周期的应对策略, 全面考虑制冷剂生产、运输、零部件制造、运行、维修等每个环节。

2.1.3 油溶性研究

在制冷系统中, 制冷剂和冷冻机油不可避免地相互接触, 一部分冷冻机油同制冷剂一起在系统中循环流动, 因此两者间要有良好的互溶性, 保证冷冻机油能够顺利地从系统返回压缩机, 以免在换热器中形成油膜影响换热性能。在两者互溶的前提下, 应该选择与制冷剂溶解度较低的冷冻机油, 这样可以避免制冷效率降低, 并使得制冷剂/冷冻机油混合物的黏度处于合适范围内, 保证润滑性能和泵体密封。此外, 制冷剂和冷冻机油必须与压缩机、换热器及密封材料等相互兼容, 以保证系统的安全运行和长期使用。制冷剂与冷冻机油的相互作用对压缩机的使用寿命和制冷系统的效率有着很大的影响。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。国外学者Bobbo和Beattie等则对制冷剂与多种商业润滑油的临界互溶温度及溶解度进行了对比研究^[17-18]。西安交通大学实验研究了R1234ze(E)和R1234yf与多种脂类油在不同温度下的溶解度关系, 并使用PR状态方程、HV混合规则和NRTL超额吉布斯自由能方程进行拟合^[19-20]。天津大学杨昭课题组测量和分析了多种二元混合制冷剂与矿物油及POE油的互溶特性, 并提出了一种混合制冷剂与润滑油在定含油率下的互溶程度判定方法及适用于混合制冷剂与润滑油互溶性判断的三角互溶图, 如图2-1和2-2所示^[21-22]。

目前看来, HCs、HFCs匹配冷冻机油的问题大部分得到了解决, 但某些制冷剂专用油的使用仍然受到国外知识产权制约, 需加大开发力度。此外, R290匹配冷冻机油仍存在问题, 主要由于R290与冷

冻机油过度溶解，也有必要开发出一种溶解度小，其它特性（如互溶性、黏度）也满足要求的专用冷冻机油。基于现有研究，新一代环保制冷剂HFOs可使用与HFCs类似的冷冻机油，但仍需测试两者间的相互作用参数，以筛选出合适的冷冻机油。而对于以HFOs为主要组分的混合工质，关于其匹配冷冻机油的相关研究较少，需进行更深入的研究。

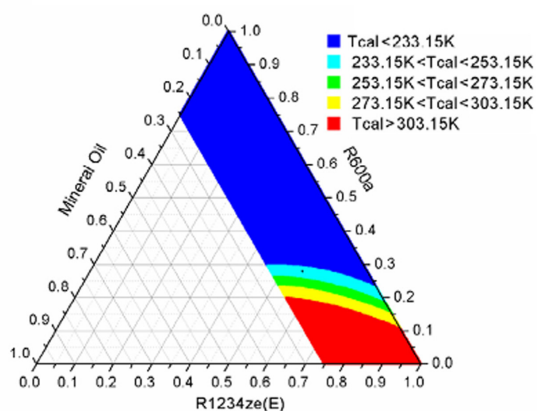


图2-1 R1234ze(E)/R600a与矿物油互溶特性

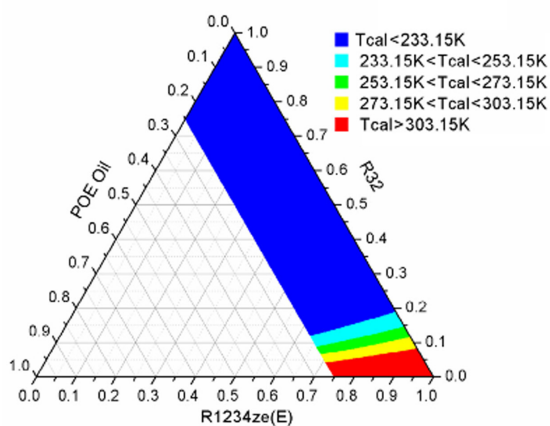


图2-2 R1234ze(E)/R32与POE油互溶特性

2.2 低GWP制冷剂技术应用

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，新一代制冷剂的选择必须在各方面权衡和折中。目前新一代制冷剂的替代主要存在两个方向，如日本和美国出于安全和能效的考虑，一直在寻找环保性能较好的合成类制冷剂，而欧盟一直积极地推行自然工质的替代方案。但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的非自然类工质，所以自然类工质HCs、CO₂、NH₃等则

显示出了独特的优势。近年来，随着新一代制冷剂替代进程的深入，依据制冷剂的不同特性涌现出一系列新技术、新应用及新产品。

2.2.1 HCs制冷剂的技术应用

碳氢类制冷剂价格便宜，易于获取，具有优异的环境性能和热力学性能，主要以丙烷（R290）、丙烯（R1270）和异丁烷（R600a）为代表。其中R290的饱和蒸汽压、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，可以用于小型制冷设备^[23]。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，主要应用于替代冰箱、冷柜以及其它小型制冷设备中，由于R600a易燃，通常只用于充流量较少的低温制冷设备中，也常用于作为混配冷媒的一种组分。对于R1270，其临界温度、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，主要用于替代R22、R502等制冷剂使用在低温制冷设备中；由于R1270易燃，通常只用于充流量较少的低温制冷设备中，或者作为低温混配冷媒的一种组分。图2-3为荷兰供应商Uniechemie研发的TripleAqua节能型热泵，制冷剂采用R290与R1270的混合物，已经在荷兰的两座办公楼和一家超市中得到了应用，与传统的热泵相比，该系统的COP为4~10，可以节省50%的供暖与制冷成本。此外，碳氢类工质在汽车空调中应用时，也显示出了优异的性能。



图2-3 TripleAqua节能型热泵

鉴于碳氢制冷剂优异的热力学性能及环境友好的特点，HCs受到了极力推崇，是目前最具希望的制冷剂之一。研究重点集中在新型压缩机的开发和系统的优化，相比R22压缩机，R290压缩机的内部的制冷剂和润滑油的含量更少，小型化的设计配合高

性能换热器使系统结构更为紧凑，充注量更低^[24]。碳氢制冷剂的技术应用涵盖了家用空调、冰箱、热泵、商业制冷和冷水机组等领域。尤其是在欧洲国家碳氢制冷剂的接受程度更高，75%的新冰箱产品使用这种自然制冷剂，而充注R290的热泵式干衣机（HPCD）、除湿机等小家电，也具有一定市场。由于碳氢制冷剂具有可燃性，在安全性设计方面也有特殊的要求。对于分体式空调的室外机，一旦压缩机发生泄漏，R290只能通过钢板之间连接缝隙和固定螺丝的缝隙漏到压缩机室外，极易造成压缩机室压力升高，导致R290漏入电气控制盒、电磁四通阀以及压缩机电气接头，从而带来R290引燃的危险。因此应在压缩机室设计R290泄漏后向机外的排放孔；此外还可以使用完全封闭和独立的电器面板，管道连接中采用钎焊、洛克环或其他特殊的连接方式等。

2.2.2 R744的技术应用

在常用的自然工质中CO₂（R744）最具潜力，尤其在可燃性和毒性有严格限制的场合，CO₂是最理想的。欧盟认为自然工质CO₂将是未来替代R134a的主要制冷工质。CO₂制冷剂在热泵热水器系统中的压力要比R410A系统高很多，系统这样的高压下运行，必须考虑系统承受高压的性能、高压保护、压缩机的选择、润滑油的选择等一系列问题。

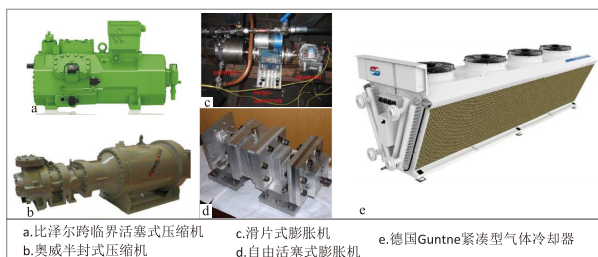


图2-4 CO₂制冷系统专用部件

与使用普通制冷剂的压缩机相比，CO₂跨临界循环压缩机具有工作压力高、压差大、压比小，此外其还有运动部件间隙难以控制、润滑较困难等特点。CO₂压缩机与现有其他冷媒压缩机相比，无论在生产线改造还是零部件统一上都存在较大困难。因此在应用过程中如何高效运行，在接近或超过临界温度时仍能具有较低的能耗，是研究的关键与难点。现如今针对CO₂制冷热泵系统开发的压缩机如亚临界涡旋式、跨临界活塞式和半封闭的螺杆式压缩机也都已问世并形成产品，高性能膨胀机、降膜式

冷凝器和气体冷却器的研发也使得CO₂系统的性能得到了提升，如图2-4所示。

2.2.3 R717的技术应用

氨（R717）属于第一代制冷剂，具有优良的环境性能和热力学性能，其标准沸点（-33℃）低，在蒸发器和冷凝器中的压力适中，单位容积制冷量大，蒸发潜热大。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133℃，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CO₂系统，也需对压缩机进行重新设计。目前针对氨系统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^[25]。世界上最大氨热泵系统在挪威首都奥斯陆的郊外建成，以海水作为热源，采用3组两级压缩的螺杆机组和壳管式不锈钢换热器，每组制热量高达4.5MW，图2-5为挪威奥斯陆氨热泵系统图。在氨小型机组中，常用的润滑油不溶于R717，因此需要复杂的油与制冷剂分离技术，而较高的汽化潜热使得质量流量较小（约为R22的13%~15%），供液量难以控制，因此系统推广的主要障碍是小型化较高的初始成本和政策限制。

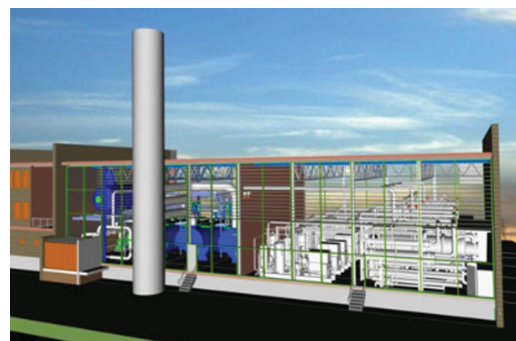


图2-5 挪威奥斯陆R717热泵系统平面图

2.2.4 R718的技术应用

水（R718）是自然界最为常见的物质，化学稳定性较好，安全易处理，制冷系数较高。在蒸气压缩式冷水机组中，与传统的制冷剂相比，理论COP相差不大，但是由于在热交换过程中采用直接接触的换热方式，换热温差仅为1℃，所以系统COP较高，此外较高的等熵指数也使得R718系统压缩机排气温度更高。

R718应用在高温工业热泵中，是最为理想的制冷剂，但是较小的容积制冷量使得系统需要较大的

体积流量，热泵系统庞大，初始成本较高。此外，采用R718涡轮压缩的热泵系统也可用于热电厂和冶金等工业领域进行余热的回收，能有效提高系统的经济性，而R718单级离心压缩系统并配合两相冷凝喷射器使用也显示出了优异的性能。上海交通大学对以水为工质的高温热泵系统进行了研究，如图2-6，采用带喷水降温的双螺杆压缩机，降膜式蒸发器和板式冷凝器，系统性能十分优越，在生产和生活中具有巨大的应用价值。此外，采用R718涡轮压缩的热泵系统也可用于热电厂和冶金等工业领域进行余热的回收，能有效提高系统的经济性。而R718单级离心压缩系统并配合两相冷凝喷射器使用也显示出了优异的性能。

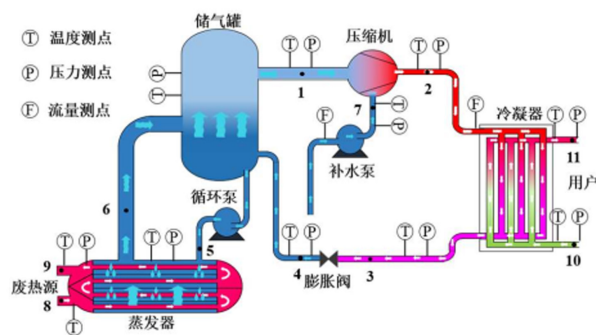


图2-6 自然工质水的高温热泵系统图

2.2.5 HFOs制冷剂的技术应用

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，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。

R1234yf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R1234yf，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。但是R1234yf的汽化潜热和蒸发温度较低，相比于R134a，其系统性能较差，在冰箱、房间空调器和热泵系统中应用时效果并不理想。此外，HFOs制冷剂在化工合成和分离过程中的能耗较高，所需的关键工艺均受国外公司专利保护限制，价格相对昂贵，经济性不佳。因此，各个厂商针对HFOs制冷剂推出的产品较少，尤其是在大型机组中使用时耗费巨大，所以并不适合

应用于商业制冷和工业制冷等领域。

R1234ze(E)价格较R1234yf便宜，可用于贩卖机和干衣机等小型机组。R1234ze(E)在给定工况（蒸发温度为7.2℃、冷凝温度为54.4℃、过冷度为8.3℃、吸气温度为18.3℃）下的理论COP略大于R134a，但单位容积制冷量约为R134a的78%，系统需要相应调整。同时，由于这两种制冷剂都属于A2L类范围，其充注量受到限制，会阻碍机组能力提升；若用于小型家用系统，充注量担忧则可规避。

目前全球的HFO专利数量多，截止2023年2月，全球HFOs专利数量达1927项，而中国企业的HFOs专利数量只有309项，约占全球总数的13.8%。此外，中国企业掌握核心专利数量更少（1.7%），大多数制备和应用技术的核心专利掌握在外国企业手中。R1234yf的技术专利大多被美国、日本和法国所控制，外企更是在我国大量进行专利布局，构建了严密的专利壁垒，给我国R1234yf制备和应用技术的开发带来了巨大障碍。我国授权的专利中，除了R1234yf的制备路线之外，还有很多含有R1234yf的混合制冷剂可以用于制冷热泵领域。天津大学与珠海格力电器股份有限公司获得发明专利权（CN 109810674 B）新型不可燃A1制冷剂，其基础物性和换热性能与R134a及R513A相近，GWP仅为R134a的39%、R513A的88.7%，滑移温度仅约0.22℃，用于替代R134a在水-水热泵和热泵干燥机系统实验成功，并在环境及安全特性、物理化学特性、油和材料的系统兼容方面经过了科学验证，效果令人满意。此外，天津大学与冰轮环境技术股份有限公司共同研发了一种替代R507A的不可燃的新型制冷剂（CN113025280 A），其GWP仅为R507A的17%，制冷量和COP高于R507A制冷剂，同时对热物性、油和材料的系统兼容性等方面进行了测试，在冷库、食品冷冻设备、船用制冷设备等低温制冷行业用于替代R507A具有一定的优势。江西天宇化工有限公司提出了一种由R134a、R1234yf和R1234ze(E)组成的三元共沸或近共沸混合制冷剂，可以在热泵系统中用作制冷剂，代替这些系统中常用的R134a、R22和R410A等制冷剂，该专利预计于2038年4月到期。

2.2.6 HCFOs制冷剂

HCFO1233zd(E) (亦称R1233zd(E))，分子内含有一个氯原子，其ODP仅有0.00034，在大气层中的寿命为26天，研究表明如此程度的ODP，并不会

造成臭氧层的破坏,所以R1233zd(E)并没有在《蒙特利尔议定书》中列为受控的物质。在物性方面,R1233zd(E)无毒不可燃,属于A1类制冷剂,在200℃暴露2周会有低于1%质量的制冷剂分解,分解产物主要是其同分异构体R1233zd(Z)。R1233zd(E)的物性与R245fa接近,作为R245fa的替代工质,可应用于双级变频离心式冷水机组、低温热回收系统、高温热泵系统和热泵热水器^[26-27]。其中由约克公司研发的R1233zd(E)双级变频离心式冷水机组,采用了降膜式蒸发器,在AHRI工况下运行满负荷性能(COP)高达7.3, IPLV高达12.2,可应用于各种高端酒店、数据中心、医院、办公楼、交通运输以及工业行业。此外格力、麦克维尔和江森自控等公司在大型机组中均有R1233zd(E)的产品推出。

2.2.7 混合制冷剂

HCs制冷剂具有优越的热力学性能和环保性能,但是绝大部分属于A3类物质,极易燃;HFCs制冷剂安全稳定,不可燃,性能良好,但有较高的GWP,环保性能不佳;HFOs类制冷剂具有良好的环保性能和较弱的可燃性,但是在热力学性能方面并不十分理想。由此可见,没有任何一种制冷剂可以完美的应用到制冷系统中,在可燃性、环保性、热力学性能三方面折中,采用混合制冷剂的替代方案,也是解决现阶段问题的一条途径。

在对众多混合制冷剂评估中,均含有低GWP的HFOs制冷剂,其中R1234yf和 R1234ze(E)为主要组元。作为R410A的替代物R446A和R447A,安全分类为A2L,容积制冷量和效率均与R410A相近,临界温度较R410A高,在高温环境下工作时更具优势。R450A是由霍尼韦尔公司研发,在系统中应用时制冷性能相比R134a略有降低。因为其GWP较低,安全分类为A1。R450A在制冷和空调设备中得到了大量的推广,可应用于新产品和系统改造。R450A作为R134a冷水机组的替代品或在CO₂复叠系统中作为中温制冷剂,显示出了非常良好的性能^[28]。但这些混合物温度滑移较大,系统性能有所降低。对于共沸制冷剂,R513A是由科慕公司开发的R134a与R1234yf的二元混合物,低毒不可燃,制冷能力略低于R134a,但具有较低的GWP,可直接应用于R134a的离心冷水机组中^[29-30]。R516A也属于共沸制冷剂,可兼容R134a系统,适用于水冷式和风冷式冷水机组及中温冷冻机组。在冷冻冷藏行

业,R455A、R454C、R457A、R459B、R407H、R448A、R449A、R452A等成为了R404A、R410A、R507A的潜在替代制冷剂,其中,R455A、R454C、R457A、R459B的GWP低于150,然而它们的主要成分包括R32和R1234yf,这使得它们易燃,安全级别为A2L。在实际应用中,它们的充注量是受到严格限制的。R407H、R448A、R449A、R452A为混合工质,安全等级为A1,但它们主要以R32和R125为重要组分,GWP大于1200,只能短期内作为替代工质。

2.3 优秀案例

2.3.1 案例1: 江森-约克HPS螺杆式高压热泵机组

图2-7为江森自控有限公司开发的HPS螺杆式高温热泵机组,采用江森自控新一代高效、高压双螺杆压缩机,全范围VSD容量控制,可满足单热应用、冷热两用和冷热联用三种应用场景,可回收用户工业废热和冷冻机组的冷凝热,高效节能、绿色环保、生命周期长,可作为传统锅炉的理想替代。

HPS螺杆式高温热泵机组以特有的余热回收技术,对热源进行全热回收,进一步提升热水出水温度,制取的热水可达90℃。该机组还高效利用排气显热和润滑油温度高的特性,不仅可以提高出水温度,还能够提高制热量,降低机组的轴功率,从而提升机组COP,最高可达6.8。



图2-7 HPS螺杆式高温热泵机组

2.3.2 案例2: 冰轮螺杆式水蒸气增压机组

冰轮在2018年推出了一款螺杆式水蒸气增压机组,如图2-8所示,采用水蒸气为制冷剂,额定工况下,吸气压力为1.2bar,排气压力为6bar,水蒸气增压热泵机组可回收废蒸汽、乏汽,通过压缩机提高废蒸汽和乏汽品位,并对外输送高品位饱和蒸汽。

该系列产品荣获2018年中国国际制冷展创新产

品奖。



图2-8 冰轮螺杆式水蒸气增压机组

2.3.3 案例3：R1234ze热泵在开创性废水处理方案中的应用

特灵（Trane）在苏格兰一个开创性的区域供热网络中提供了两台使用霍尼韦尔（Honeywell）低GWP的HFO制冷剂R1234ze的热泵制冷机。该技术是英国首个将污水和废水热回收技术与CHP发动机一起使用的技术，该技术可通过单个高效过程产生热量和电能。

该项目的总装机容量为800kW，将从污水和废水中提取热量。机组采用变频螺杆压缩机，并使用不锈钢钎焊板式热交换器作为冷凝器和蒸发器。这有助于防止在较高的加热温度下以及水的pH值不同时发生腐蚀。机组应用范围非常广泛，可以在80℃的温度下产生热水，但仍可用于冷却系统中，可以提供-12~6℃的冷冻水溶液。



图2-9 美国特灵新型螺杆式冷水机组

2.3.4 案例4：YORK®磁悬浮离心式冷水机组YZ

图2-10为约克公司研发的R1233zd(E)磁悬浮离心式冷水机组YZ。机组采用单级压缩磁悬浮轴承技术，应用高速封闭式感应电机匹配变频驱动，同时拥有专利降膜式蒸发器设计以及低温室变暖潜能值的R1233zd(E)环保冷媒，使得机组在AHRI工况下运行满负荷性能（COP）高达7.3，综合部分负荷性能

系数（IPLV）高达12.2。其超高生命周期效率及高额投资回报率也是各种行业空调冷水机组节能改造项目的最佳选择。

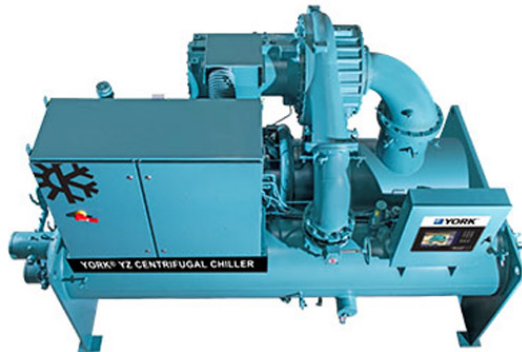


图2-10 约克R1233zd(E)磁悬浮离心式冷水机组

2.4 总结

制冷行业同时受到《蒙特利尔议定书》等国际公约和我国“双碳”目标的双重影响，中国作为全球最大的制冷空调设备制造国，同时也是全球最大的制冷剂生产和消费国，需要在履行《蒙特利尔议定书》的义务的同时，实现减碳目标。中国是HFCs的生产和消费大国，根据联合国环境规划署(UNEP)评估，与不受控情景相比，到2050年中国削减HFCs可带来300亿吨二氧化碳当量的气候效益，为全球降温0.5℃贡献1/3的力量。所以，制冷行业的碳减排，是助力我国“双碳”目标完成的重要战场。

尽管国家和行业围绕制冷剂的碳减排路径，如制冷剂替代、制冷剂管理、制冷设备能效提升等方面进行了详细发展布局 and 有效技术革新，但长期以来我国在制冷剂领域的被动应对的局面没有大的改变，较大的产业规模和涉及众多的产业领域给履约带来巨大挑战，要付出巨大的转型成本。在我国“双碳”目标的前提下，需要进一步探索全链条的制冷剂减排技术方案，挖掘新制冷剂碳减排路径、破局候选替代制冷剂自主研发难题，从多维度解决制冷剂的碳减排问题。

在我国双碳目标下，未来需要解决的和制冷剂直接有关的问题总结如下：

1) 全球范围内尚没有找到一种“完全理想”的零ODP、低GWP、安全、高性能的制冷剂。国际上在各个产品领域采用何种替代技术路线仍存在诸多争议，但是天然工质最大程度的拓展使用，更低GWP的制冷剂在全球范围内的应用推广将是必然的

趋势。绝大部分低GWP替代制冷剂存在着可燃、高压或容积效率低等缺点。通过对不同制冷剂存在的问题进行“缺陷管理”的模式加以处理,确保这些替代品在规定条件下的安全使用,将是长期需要面临的情景。

2) 低GWP替代制冷剂及其混合物的物性、燃爆特性、其匹配的冷冻机油与材料相容性,还需要深入研究,应全面考虑制冷剂生产、运输、零部件制造、运行、维修等每个环节,探索制冷剂燃爆特性和预警防护机理,建立健全政策标准及安全规范。

3) 针对我国的制冷剂开发与先进国家的较大的差距,需要从国家层面上组织实施,联合上下游企业开展产、学、研、用联合攻关,建立制冷剂开发与应用关键共性技术研究流程与方法,共同开展制冷剂开发、性能评价与应用技术研究,为应用技术开发及应用示范提供科学理论依据,以实现低GWP制冷剂的高效开发与应用,达到低碳环保的目标。建议鼓励研发具有自主知识产权的低碳制冷剂及替代配套应用技术,提高国际话语权,在自主知识产权低碳制冷剂新产品给与投入和激励政策,促进低碳制冷剂产品在市场竞争中占据有利地位,摆脱卡脖子被动局面。

参考文献

- [1] 《中国气候变化蓝皮书(2022)》发布[J]. 中国环境监察, 2022(8):4.
- [2] The Ozone Secretariat. United Nations Environment Programme. All ratifications. [N/OL] (2022-10-31) [2022-11-3]. <https://ozone.unep.org/all-ratifications>.
- [3] 生态环境部对外合作与交流中心. 落实氟碳化合物生命周期管理: 推进《氟碳化合物生命周期管理倡议》——将理念付诸行动. [N/OL]. (2021-02-01) [2022-11-3]. http://www.fecomee.org.cn/hjyw/202102/t20210201_819685.html.
- [4] 张朝晖, 刘璐璐, 王若楠, 等. “双碳”目标下制冷空调行业技术发展的思考[J]. 制冷与空调, 2022, 22(1): 1-10.
- [5] 陈敬良, 史琳, 李红旗, 等. 由制冷剂替代谈起[J]. 制冷与空调, 2017, 17(9): 1-5.
- [6] Kochenburger T M, Gomse D, Tratschitt I, et al. Vapor-liquid and vapor-liquid-liquid equilibrium measurements and correlation of the binary mixtures 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf)+(tetrafluoromethane (R14), trifluoromethane (R23), octafluoropropane (R218), nitrogen (R728) and argon (R740)) and ethane (R170)+trifluoromethane (R23)[J]. Fluid Phase Equilibria, 2017, 450: 13-23.
- [7] Madani H, Valtz A, Zhang F, et al. Isothermal vapor-liquid equilibrium data for the trifluoromethane (R23)+ 2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) system at temperatures from 254 to 348 K[J]. Fluid Phase Equilibria, 2016, 415: 158-165.
- [8] Juntarachat N, Valtz A, Coquelet C, et al. Experimental measurements and correlation of vapor-liquid equilibrium and critical data for the CO₂+ R1234yf and CO₂+ R1234ze (E) binary mixtures[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 47: 141-152.
- [9] Hulse R J, Basu R S, Singh R R, et al. Physical properties of HCFO-1233zd (E)[J]. Journal of chemical & engineering data, 2012, 57(12): 3581-3586.
- [10] Kano Y, Kayukawa Y, Fujii K, et al. Ideal-gas heat capacity for 2, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) determined from speed-of-sound measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(11-12): 2051-2058.
- [11] Tanaka K, Higashi Y, Akasaka R. Measurements of the isobaric specific heat capacity and density for HFO-1234yf in the liquid state[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2009, 55(2): 901-903.
- [12] Yamaya K, Matsuguchi A, Kagawa N, et al. Isochoric specific heat capacity of trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (HFO-1234ze (E)) and the HFO-1234ze (E)+ CO₂ mixture in the liquid phase[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(4): 1535-1539.
- [13] Bi S, Cui J, Zhao G, 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.
- [14] Cui J, Bi S, Meng X, et al. Surface tension and liquid viscosity of R32+ R1234yf and R32+ R1234ze[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61(2): 950-957.
- [15] Meng X, Wen C, Wu J. Measurement and correlation of the liquid viscosity of trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoropropene (R1233zd (E))[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2018, 123: 140-145.
- [16] Household and similar electrical appliances-Safety-Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motor-compressor: IEC60335-2-89: 2019[S]. IEC, .
- [17] Bobbo S, Zilio C, Scattolini M, et al. R1234yf as a substitute of R134a in automotive air conditioning. Solubility measurements in two commercial PAG oils[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40: 302-308.
- [18] Beattie R J, Karnaz J A. Investigation of low GWP refrigerant interaction with various lubricant candidates[C].

- International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette: Purdue University, 2012, pp. 1223.
- [19] Wang X, Sun Y, Kang K. Experimental investigation for the solubility of R1234ze (E) in pentaerythritol tetrahexanoate and pentaerythritol tetraoctanoate[J]. Fluid Phase Equilibria, 2015, 400: 38-42.
- [20] Sun Y, Wang X, Wang D, et al. Measurement and correlation for phase equilibrium of HFO1234yf with three pentaerythritol esters from 293.15 K to 348.15 K[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2017, 112: 122-128.
- [21] Yang Z, Tian T, Wu X, et al. Miscibility measurement and evaluation for the binary refrigerant mixture isobutane (R600a)+ 1, 1, 1, 2, 3, 3, 3-heptafluoropropane (R227ea) with a mineral oil[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(6): 1781-1786.
- [22] Zhai R, Yang Z, Feng B. Miscibility performance of trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene and its binary blends with lubricating oil[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 75: 95-103.
- [23] Devotta S, Padalkar A S, Sane N K. Performance Assessment of HC-290 as a Drop-In Substitute to HCFC-22 in a Window Air Conditioner[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(4):594-604.
- [24] Ruan J, Liu J, Xu X, et al. Experimental study of an R290 split-type air conditioner using a falling film condenser[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 325-333.
- [25] Khan T S, Khan M S, Chyu M C, et al. Experimental investigation of evaporation heat transfer and pressure drop of ammonia in a 60° chevron plate heat exchanger[J]. international journal of refrigeration, 2012, 35(2): 336-348.
- [26] Yang J, Sun Z, Yu B, et al. Experimental comparison and optimization guidance of R1233zd (E) as a drop-in replacement to R245fa for organic Rankine cycle application[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 10-19.
- [27] Yang J, Sun Z, Yu B, et al. Modeling and optimization criteria of scroll expander integrated into organic Rankine cycle for comparison of R1233zd (E) as an alternative to R245fa[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 386-393.
- [28] Makhnatch P, Mota-Babiloni A, Khodabandeh R. Experimental study of R450A drop-in performance in an R134a small capacity refrigeration unit[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 84:26-35.
- [29] Mota-Babiloni A, Belman-Flores J M, Makhnatch P, et al. Experimental exergy analysis of R513A to replace R134a in a small capacity refrigeration system[J]. Energy, 2018, 162: 99-110.
- [30] Makhnatch P, Mota-Babiloni A, López-Belchí A, et al. R450A and R513A as lower GWP mixtures for high ambient temperature countries: Experimental comparison with R134a[J]. Energy, 2019, 166: 223-235.

部分领域制冷技术研究及应用进展

3.1 家用和商用空调与供暖



石文星 Shi Wenxing

工学博士，清华大学建筑学院建筑技术科学系教授，博士生导师。兼任：全国冷冻空调设备标准化技术委员会（SAC/TC238）副主任委员，中国制冷学会理事、工程能力评价工作委员会副主任委员、学术工作委员会委员、小型制冷机低温生物医学专业委员会委员等职。主要研究方向：制冷与热泵技术、余热与可再生能源利用技术。



杨子旭 Yang Zixu

工学博士，清华大学建筑技术科学系博士后，研究方向为制冷与热泵技术、空调标准与性能评价。

房间空调器、多联机、冷热水机组等空气源热泵是居住建筑和商业建筑的主要空调供暖设备或系统（简称：空调系统），是建筑的碳排放大户。空调系统的碳排放包括间接碳排放（使用化石燃料生产空调运行耗电所排放的CO₂）和直接碳排放（因制冷剂泄漏和维修、拆除排放导致的CO₂排放当量）两部分。间接碳排放量可根据逐时耗电量获得，而直接碳排放则取决于空调系统使用年限内因制冷剂泄漏导致的CO₂排放当量。

空调系统的年碳排放量可以表达为：

$$C = \varepsilon \sum_{j=1}^{j=8760} \left(\sum \frac{qAT}{\text{COP}_{\text{sys}}} - \Delta E \right) + \frac{\text{GWP} G\beta}{N} \quad (3.1-1)$$

$$\text{COP}_{\text{sys}} = \alpha \left(\frac{1}{\text{COP}_{\text{SCE,term}}} + \frac{1}{\text{COP}_{\text{SCE,dis}}} + \frac{1}{\text{COP}_{\text{UNIT}}} + \frac{1}{\text{COP}_{\text{SINK,dis}}} + \frac{1}{\text{COP}_{\text{SINK,term}}} \right)^{-1} \quad (3.1-2)$$

式中， ε ——碳排放因子，kg/kWh，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, m^2 ;

T ——空调系统的服务时间, h ;

ΔE ——太阳能、风能和水力势能等可再生能源生产电能的使用量, kWh ;

G ——空调系统的制冷剂充注量, kg ;

β ——制冷剂泄漏率(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 , $0 \leq \beta \leq 1$ 。

COP_{sys} ——空调系统的逐时能效比, kWh/kWh , 包括: 冷热量采集与释放设备的逐时能效比($\text{COP}_{\text{SCE, term}}$ 、 $\text{COP}_{\text{SINK, term}}$)、冷热量采集与输配系统的逐时能效比($\text{COP}_{\text{SCE, dis}}$ 、 $\text{COP}_{\text{SINK, dis}}$)、空调设备的逐时能效比(COP_{UNIT}) ;

α ——实际工程环境对空调系统能效比的影响系数, $0 < \alpha \leq 1$ 。

下面将以年碳排放公式为基础, 分析家用和商业空调系统节能降碳技术的研究进展、关键技术及优秀案例。

3.1.1 研究进展

根据年碳排放量计算公式(3.1-1)可以看出, 降低家用与商业建筑空调系统的碳排放量、实现碳中和的主要技术途径如下: 1) 降低空调系统的间接碳排放, 在保障舒适性前提下, 降低空调系统的

冷热需求(qAT); 2) 提高空调系统的运行能效(COP_{sys}), 降低空调系统运行的耗电量; 3) 开发利用可再生能源(ε 与 ΔE), 并提高空调系统吸纳电网可再生电力的“柔性”; 4) 降低空调系统直接碳排放量, 使用低GWP制冷剂, 减少氢氟碳化物(HFCs)的充灌量, 延长设备的使用寿命, 减小运行周期内制冷剂泄漏, 做好制冷剂的回收利用工作。

(1) 可再生能源(ΔE)与空调系统“柔性”(ε)

图3.1-1给出了降低空调系统间接碳排放的技术途径。其中, 可再生能源是空调系统唯一的碳汇, 是实现空调系统碳中和的核心^[1](即图3.1-1中从下到上的第1层)。光伏直驱空调是空调系统利用可再生能源实现自发自用、即时就近消纳最为直接的模式^[2], 此外, 若通过建筑墙面、屋顶的光伏发电, 还可以通过余电上网、电网调节等实现建筑用电的低碳化, 并降低空调用电的碳排放因子; 另一方面, 通过空调与储能的有机结合^[3]以及基于需求侧响应的室内环境控制技术^[4], 预制冷、风机变频控制、冷却阀控制、优化送风温度、提高冷却水温度等技术手段, 实现可再生电能(水电、风电等)的消纳及错峰运行, 提升可再生电能的使用量, 从而为空调系统“碳中和”提供重要的 CO_2 负排放技术支撑。

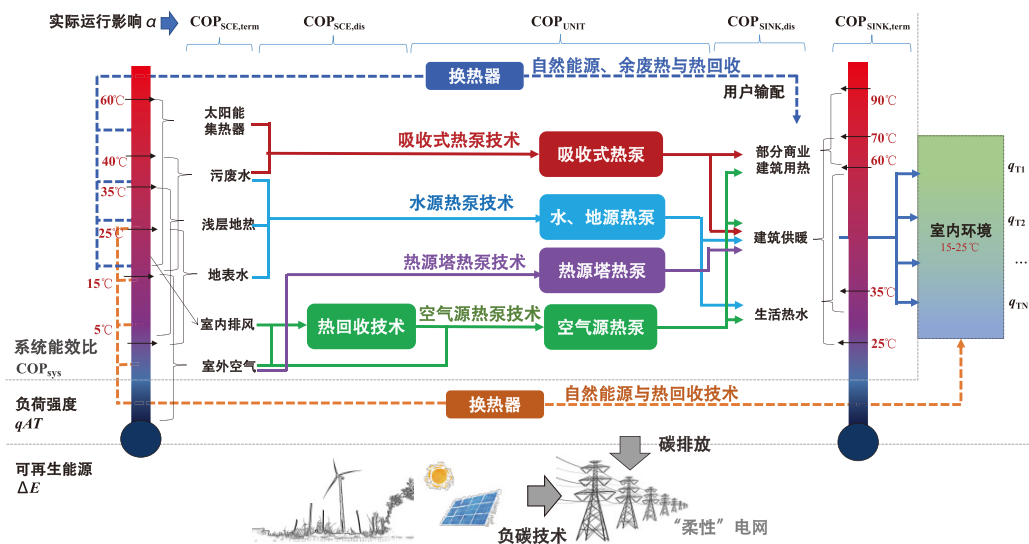


图3.1-1 利用热泵降低空调系统间接碳排放的思路（以制热为例）

(2) 降低空调系统承担冷热负荷(qAT)

降低空调系统承担冷热负荷的方式主要包括: 降低服务区域冷热负荷强度(q)、减小空调设备的

运行时间(T)与服务面积(A), 是实现空调系统碳中和的基础(即图3.1-1的第2层)。

1) 降低建筑围护结构的传热系数。降低围护结

构的传热量,是降低冷热负荷强度的重要方法。随着超低能耗建筑技术的发展,建筑保温特性近年来已有较大改善,不同地区非透光围护结构传热系数平均值下限已降低至 $0.1\sim 0.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[5];此外,在智能围护结构方面,除采用动态调节窗户、遮阳系统、玻璃幕墙实现可变传热系数外,Trombe墙^[6]、热管墙^[7]等围护结构的研发也为围护结构拦截室外负荷提供了新的方法。

2) 通过负荷分级处理降低空调系统处理的负荷。负荷除了具有热、湿品位外,还可根据空气分级处理所需冷热源温度的不同,可以分为多级品位负荷^[8]。根据负荷品位的不同,可采用与品位对应的冷热源进行处理,为采用自然能源、空气排风等低品位冷热源调控室内环境参数提供了重要途径,从而有效降低机械冷热源需处理的空调系统负荷。

3) 减少空调系统的运行时间和服务面积。发展具有“部分时间、部分空间”特征的空调系统^[9],可降低空调系统承担的冷(热)负荷,以降低其碳排放。此外,还可以通过优化室内气流组织、形成非均匀的室内环境以降低需求负荷,如采用置换通风、地板下送风、个性化送风^[10]等。

(3) 构建全场景高效热泵空调技术体系,提高空调系统能效(COP_{sys})

在家用与商用空调多样多变热源、热汇条件下,构建全场景高效热泵空调技术体系,研发满足不同温度需求的高效空调热泵系统,是实现空调系统碳中和的重点(即图3.1-1的第3层)。

1) 提高空调设备能效(COP_{UNIT})。根据环境适应性要求确定空调设备的设计工况^[11],是确保空调设备性能和适用性的基本前提,采用高效制冷循环形式、优化控制策略是提高空调设备的全工况性能的重要途径。对于中央空调系统,典型技术中磁悬浮离心机组无需润滑油、IPLV极高^[12],具有广泛的推广前景;而对于空调器、多联机等直膨式空调系统,研发高效转子压缩机^[13]、发展高性能蒸气压缩循环^[14]、优化系统设计方法也推动了技术发展。优质热源或热汇对于提升空调系统运行能效尤其重要。根据采集和使用侧特征,因地制宜地确定系统型式,应用不同采集源的水地源热泵、空气源热泵,包括地表水源热泵(地表水资源丰富)、地下水源热泵(确保100%回灌)、土壤源热泵(满足土壤冷热平衡)、污水源热泵等^[15];其中,无霜空

气源热泵采用直接接触式的全热交换过程,冬季无霜、夏季水冷^[16],复合源热泵可以充分发挥各种源/汇的优势,都是提升制冷(热泵)能效的关键。对于使用侧,除提高制冷、降低供暖室内温度以减小冷凝与蒸发之间的温差外,通过划分不同负荷品位,构建品位匹配、梯级利用的空调流程或处理方法^[8],也提高了空调设备的运行能效。此外,当存在合适的太阳能、余废热资源,利用吸收式热泵或太阳能集热器供暖也可大大降低空调运行碳排放。

2) 提高空调系统输配及采集使用能效($\text{COP}_{\text{SCE/SINK, term}}$ 、 $\text{COP}_{\text{SCE/SINK, dis}}$)。为提升冷热量采集与输配效率,对于家用空调、小型办公商业建筑宜发展直膨式空调系统,以取消能量输配环节。在具有输配系统的中央空调系统中,应发展变频调节技术,避免大流量、小温差现象发生,并通过台数与频率控制实现输配系统总能耗最低、效率最高。此外,提高热源采集及使用末端的能效,也将提升空调系统的能效,如优化土壤源热泵地盘管理管型式^[17]、优化冷却塔的填料布置及配水^[18]等。

3) 发展空调系统的调适技术(α)。由于系统的安装方式、使用工况及运行条件的差异,空调系统的实际使用性能与设计状态存在很大差异,因此,应当发展基于实际运行性能和大数据技术的智能控制、系统调适和健康诊断技术,使空调设备与系统发挥应有的效能,这是今后相当长的时间内必须高度重视的节能降碳措施。对于中央空调系统,需优化冷冻(却)水系统阻力、保障合理的供回水温差,同时改善冷却塔进口空气状态、以提升其换热效能^[19];而对于冷水机组,则应明确其最优负荷率,通过台数和频率的调节,使各台机组均能高效运行^[20];此外,还应充分挖掘空调系统运行中产生的大量运行数据,提高智能和智慧运维水平^[21]。对于直膨式空调系统,应研发具有高效气流组织的室内机,以在实际使用过程中提高舒适性的同时降低运行能耗;优化室外机安装平台,避免室外机的排风回流和风量衰减^[22];优化空调器实际控制水平,包括频率控制、回油控制、除霜控制等;对于多联机系统,还应尽可能缩短配管长度、提高低负荷率的能效比。

4) 使用低GWP制冷剂,减少充灌量,降低制冷剂泄漏,做好制冷剂回收。降低直接碳排放,应使用低GWP制冷剂,如自然工质、氢氟烯烃(HFOs)

等^[23]。此外，还可以减少制冷剂充注量 (G)，发展细管径、微通道换热器。进一步的，应当降低制冷剂排放比 (β)，需禁止空调维修、拆卸时的制冷剂直排，避免制冷剂在生产、运输等过程中的泄漏，健全制冷剂监管机制，推动制冷剂回收利用与再生技术的进步。此外，延缓空调系统的性能衰减，延长其使用寿命 (N)，也是减少碳排放、减少资源与能源消耗的重要措施。

3.1.2 关键技术

上述内容给出了空调系统使用过程降低碳排放、实现碳中和的主要原则及其主要研究进展，下面介绍面向碳中和的空调系统关键技术。

(1) 需求侧响应的空调系统控制技术

风能、太阳能等可再生能源是波动的随机能源，大规模接入电网后将给电网带来持续性的随机扰动。空调负荷是智能柔性典型框架下的重要资源，其主动错峰或主动消纳可再生能源电力，是调节可再生能源电网需求响应的有效手段。空调负荷建模及策略是目前研究热点，根据供电方与用户策略，直接负荷控制 (DLC)、峰值电价、实时电价等是空调负荷参与需求侧响应的主要方式。控制过程中，目标函数一般是以供电商、系统运营商以及用户三方的利益为主，进行系统资源的优化整合^[24]。如文献[25]研究了空调负荷特性及其影响因素，构建了地区电网调度空调资源DLC模型，通过适当削减空调负荷以缓解电网压力；进一步的，设计闭环控制策略动态调节，通过空调的温度设定值，在不影响人体舒适度的条件下精准控制空调的输出能力。

(2) 负荷品位分级与自然能源、低品位能源的高效利用技术

利用自然能源处理空调负荷是降低空调系统能耗的重要途径。针对目前负荷仅考虑数量而没有考虑品位的问题，文献[8, 26]等通过负荷分级方式将空气处理划分为若干级，并将负荷品位用恒温源温度表征，由此提出了基于负荷和能源品位匹配的空气冷热处理流程构建方法 (图3.1-2)。通过将自然能源拓展应用于新风处理、室内循环风处理、围护结构负荷拦截等，有效降低空调负荷强度。文献[27]提出了嵌管窗结构方案，并在其嵌管中通入从自然环境中采集的冷却水和低温热水可有效拦截室外负荷，使得高于室温的水可以用于室内供热、低于室

温的水可以用于室内供热，扩展了自然能源的利用范围、延长了自然能源的利用时间。将自然能源与机械冷热源高效协同也是降低空调系统运行能耗的重要形式。文献[28]提出的利用高焓低湿区和低焓高湿区新风实现显热与潜热的量质转换 (图3.1-3)，配合机械制冷的室内热湿环境营造方法，实现焓值高于室内、湿度高于室内的新风也能用于节能。此外，热虹吸与蒸汽压缩融合的基站空调和数据中心背板空调^[29]、露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调^[30]等产品都是自然能源与机械冷热源高效协同技术的典型应用。

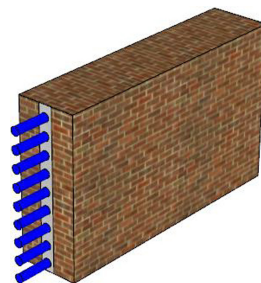
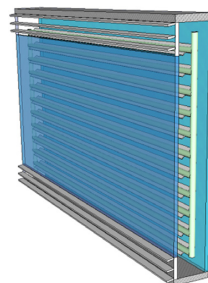
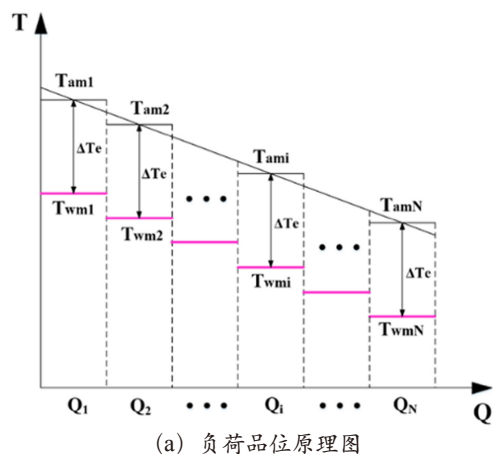
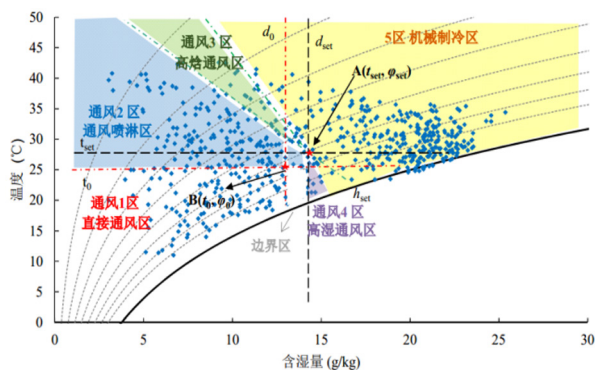
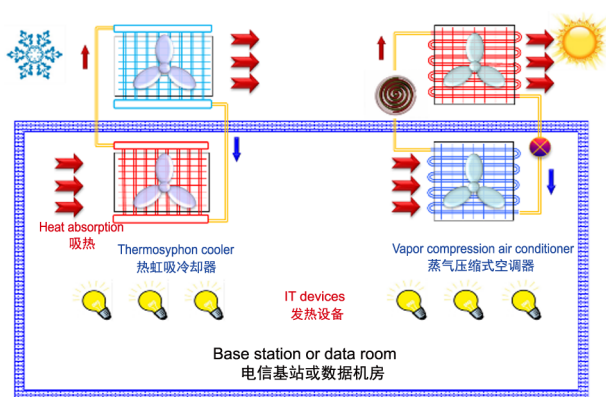


图3.1-2 利用自然能源处理低品位负荷





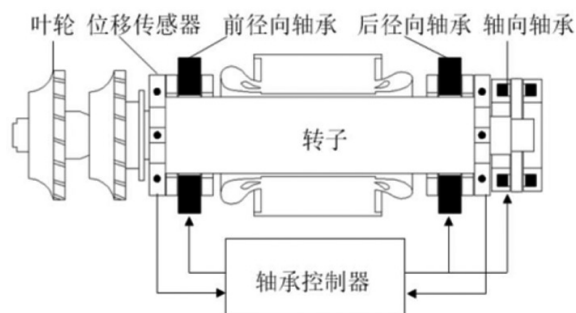
(b) 热虹吸与蒸气压缩技术原理

图3.1-3 自然能源与机械冷热源复合技术

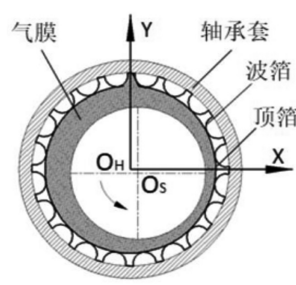
(3) 高效压缩机技术与复合热源热泵技术

离心式冷水机组具有单机冷量大、效率高、振动小等特点，是大型空调系统的重要设备。为进一步提升其能效，高速大功率永磁变频电动机取代了传统增速齿轮驱动叶轮高速旋转的离心压缩机，包括格力、美的、海信日立等企业研发出永磁同步高效直驱变频离心机^[31]，极大地提高了冷水机组的能效。以磁悬浮、气悬浮为代表的无油轴承可实现压缩机高速无油运行，与磁悬浮轴承相比，气悬浮技术无需复杂的传感器及控制系统，结构紧凑（图3.1-4），更适合离心机向高速、小型化方向发展^[32]。

另一方面，由于常规热泵系统通常采用单一低温热源，难以兼顾冬夏需求，而复合源热泵系统可充分利用低品位自然能源的互补性，实现其高效制冷/制热。常见的系统包括太阳能与地源复合、空气源与地源耦合、太阳能与空气源耦合热泵等系统型式^[33]（图3.1-5）。研发复合热源热泵必须探明各类热源的长短周期分布特性与冷热量的需求和匹配特性，必须解决多热源的高效采集、品位匹配、换热器结构优化与成本约束等关键技术问题。



(a) 磁悬浮轴承



(b) 气体轴承

图3.1-4 高效冷水机组与复合源热泵系统

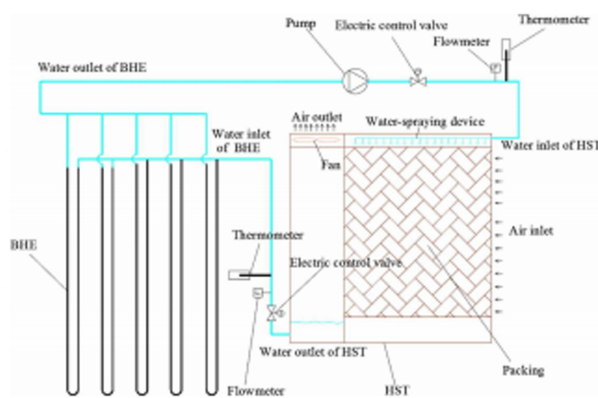


图3.1-5 复合源热泵

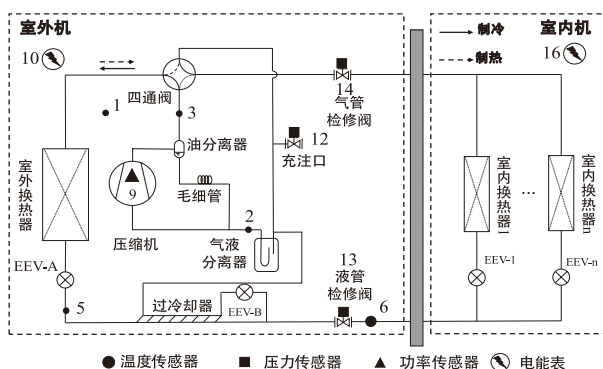
(4) 空调系统的调适技术

在满足实际工程需求的前提下，使空调系统的实际运行能效达到最优的运维管理技术，就是空调系统的调适技术。调适技术是针对具体服务对象的空调系统优化控制与管理技术，是实现空调系统低碳运行的重要技术途径。

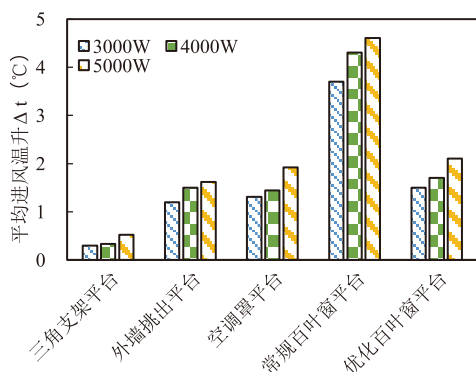
由于空调器、单元式空调机、多联机直接膨胀式空调系统没有专业的运维管理人员，故只能通过产品生产企业的技术人员进行在线调适，但其核心是实时获取系统能效参数和室内舒适性参数。针对现有直膨式空调系统无法直接测量制冷（热）量的问题，文献[34]提出了基于“广义压缩机”能量平衡动态修正的直膨式空调系统全工况现场性能测试方法（图3.1-6），研发出的性能传感器为空调系统大数据在线性能调适提供了技术基础。室外机安装位置、室内机运行条件对空气源热泵性能影响显著，因此，规范室外机安装平台尺寸并形成标准^[22]是保障空气源热泵系统性能的基本条件，也为其调适技术发展奠定了基础。

中央空调通常以水为媒介故通常直接利用水侧温差法进行测量，文献[35]通过实测发现，受工程设计、实际运行条件和冷站群控方法等因素的影响，

冷机的实际运行性能偏低。因而，在满足冷热需求的前提下最大限度地提高冷热站效率，是冷热源群控的重要任务。系统控制和高效运维是空调系统调适的重要组成部分^[21]。在大数据时代中，利用采集的温度、湿度、压力等数据，实现智能化运维管理和控制优化（包括：系统部件优化、系统故障检测与诊断、能耗预测、系统智能化控制等^[36]）是当前的研究重点，也为今后基于大数据的智能控制与数字化运维提供了基础条件^[37]，避免了传统集控设置操作复杂导致的推广困难，具有广泛的通用性、有效避免用户的非节能行为。



(a) “广义压缩机”能量平衡法在线性能测量技术



(b) 不同平台对空调器性能的影响

图3.1-6直膨式空调器在线性能测量与室外平台对性能的影响

3.1.3 优秀案例

(1) 自然能源与可再生能源的高效利用技术

格力公司与清华大学联合研发的“集成蒸发冷却和太阳能光伏的复合超高效空调器”，是实现直膨式空调系统碳中和的重要典范。该技术突破了超高效蒸气压缩制冷循环构建、并联三缸变频转子压缩机、低GWP制冷剂R152a应用和基于预测的多系统

融合调控等关键技术，提出了利用新风主动调节室内负荷的实现方法及其控制策略，实现了环境自然冷源利用、高效机械冷源制取、光伏直驱和先进控制等技术的全面融合（图3.1-7 (a)）。

与主流空调器产品相比，该技术全年运行气候影响（折合年碳排放量）减少85.7%，击败包括来自麻省理工、剑桥大学等国际知名高校的2100多支团队，获全球制冷技术创新大奖赛冠军。该技术被《人民日报》、新闻联播等多家媒体报道，并获评为我国“初步完成了从制冷大国向制冷强国的转变”的标志之一。

(2) 高效舒适型房间空调器

研发高效舒适的房间空调器，是满足“部分时间、局部空间”空调需求、节能降碳的重要方面，美的集团在此方面开展了广泛的研究。R290为自然工质，GWP极低、迁移性质好、循环效率高，但其压缩机排量大，系统能效低。针对这一问题研发的R290新型吸气补气独立压缩转子压缩机及其热泵空调器制冷循环，空调器的功耗显著降低，COP提升达4.5%；研发了室内机多矢量旋转风道技术，实现最大射流速度提升50%以上，空调器在制热模式下可实现垂直送风、热风直达地面（如图3.1-7 (b)），支撑了远距离送风和制热暖足效果，实现了上下导流角度扩大，制热工况导风损失由17.5%大幅下降至2%、暖足层温度从初始0℃升高到15℃比常规机型缩短50min，大幅改善了室内舒适性。

(3) 磁悬浮冷水机组

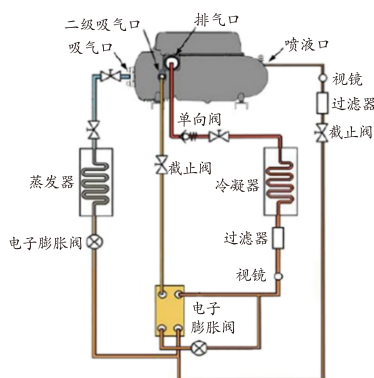
磁悬浮冷水机组是海尔中央空调的重要产品，是其绿色、低碳、节能技术的代表，获得“磁悬浮技术和变频智能控制在离心冷水机组中的应用”“高能效磁悬浮离心水冷冷水机组”等项目鉴定。压缩机采用磁悬浮无油变轨运转，从根本上解决了压缩机运动部件无油润滑问题（图3.1-7 (c)）；通过优化换热器的管群布局，研发了高效降膜式蒸发器，实现了高效传热，减少了制冷剂充注量；采用两级复叠过冷，过冷度高达15℃。多压缩机组合的机组结构方案，解决了运行工况范围较窄的问题，而智能能量调节机组可以在60s实现负荷10%~100%的连续能量调节。该技术在国家超算数据中心项目中实际使用中，全年数据中心电能比（PUE）<1.2，远优于超算中心严格的节能指标要求。



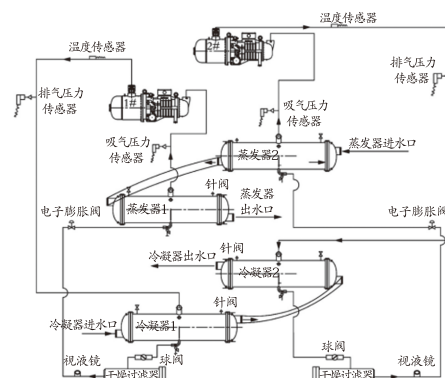
(a) 超高效空调器



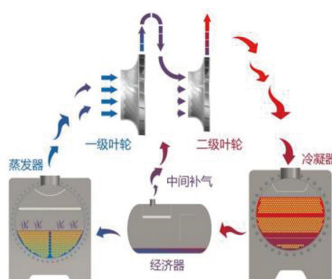
(b) 舒适性空调器



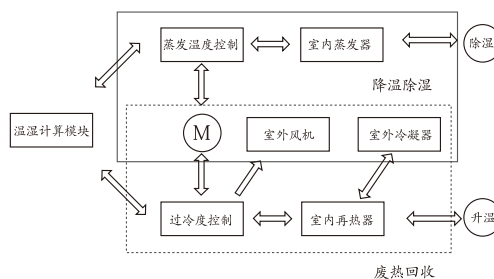
(c) 磁悬浮冷水机组



(d) 高效冷站的串联逆流子母配设计



(e) 双级压缩高温热泵



(f) 热回收湿温平衡控制框图

图3.1-7优秀案例

(4) 高效制冷机房

南京天加设计建造的高效制冷机房（图3.1-7（d）），采用了基于系统全生命周期综合评价的高效制冷系统综合节能技术，为商业建筑空调低碳化提供了重要支撑。其主要技术措施包括：1) 精细化负荷分析设计；2) 基于串联逆流技术、压缩机子母配技术的高效冷水机组；3) BIM建模预制装配的绿色安全建造；4) 基于能效检测与评价体系的运行监测；5) 基于云平台主动寻优、负荷预测压缩机控制的高效节能控制运维管理系统。其中，串联逆流及压缩机子母配技术确保机组在高出水温度、大冷量范围内均能高效运行，其运行能效提升了50%以上^[38]；在控制上，基于云平台的一体化主动寻优节

能控制系统应用了压缩机容量和台数的优化控制，实现了压缩机、制冷机组、冷源系统三位一体的高效运行。此外，为减小空调末端的全年运行能耗，研发了大幅降低风阻的可旁通换热器的节能型空调箱，攻克了大风量段空调箱漏风率高、过渡季运行风阻不能减少的技术难题。高效制冷机房和空调箱的联合运行，大幅度降低了空调系统的运行能耗。

(5) 高温热泵

针对建筑对高温热水和蒸汽的使用需求，格力集团研发了高温空气源热泵，优选低压绿色工质R1233zd(E) (ODP=0, GWP=1) 为制冷剂，基于工质特性建立了适合高压压缩比热泵工况的双级压缩、闪发式经济器、中间补气增焓的热力系统循环及其

压缩机。攻克了压缩机的大压比、小流量的高效气动设计,高速直驱转子与轴承设计以及高温工况永磁电机冷却散热等一系列技术瓶颈;在高温换热器设计方面,采用有限元分析方法开展蒸发器、冷凝器强化换热与流路优化研究;进而研发了380 kW制热量的高温热泵(图3.1-7(e)),其COP高达3.67 W/W(热源侧进水:50℃,使用侧出水:100℃),具备极高的推广应用价值。通过攻克高温热泵关键技术,提高热泵供水温度,极大地拓展热泵应用前景,全面覆盖采暖、热水、工农业烘干、生产流程用热需求,同时也为替代蒸汽锅炉的基于高温热水闪蒸和水蒸气压缩技术的中低压蒸汽热泵的发展奠定了技术基础。

(6) 多房间、多温湿场景多联机节能控制技术

面对多房间负荷需求差异大、多联机各末端的冷量分配不合理导致温度波动大、能耗高的难题,美的集团提出了基于房间负荷动态预测的多联机变蒸发温度控制方法,通过多房间动态负荷预测算法,实现了房间负荷需求与冷量预测高精度实时匹配。提出变蒸发温度-变过热度控制技术,使不同使用状态下的各台室内机的制冷量与冷负荷动态匹配,实现了自适应调节,解决了现有多联机因频繁开关机导致的室温波动大、能耗高问题。所研发的三管制多联机热回收温湿平衡控制技术(图3.1-7(f)),解决了低温、高湿情景下除湿过程导致的过度降温、冷感强烈的不舒适问题,实现了升温除湿和恒温除湿调节,大幅改善了多联机系统的制热舒适性。

参考文献

- [1] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J]. 暖通空调, 2021, 51(10):1-12.
- [2] BAKTHAVATCHALAM B, HABIB K, SAIDUR R, et al. Cooling performance analysis of nanofluid assisted novel photovoltaic thermoelectric air conditioner for energy efficient buildings[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118691.
- [3] 李泽阳, 孟庆龙, 孙哲, 等. 考虑需求响应的蓄能空调系统灵活用能实验研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 153-160.
- [4] 刘晓华, 张涛, 刘效辰. 如何描述建筑在新型电力系统中的基本特征?——现状与展望[J]. 暖通空调, 2023, 53(1): 1-10, 124.
- [5] 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [6] STAZI F, MASTRUCCI A, DI PERNA C. The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 217-229.
- [7] ZHANG Zhigang, SUN Zhijian, DUAN Caixia. A new type of passive solar energy utilization technology—The wall implanted with heat pipes[J]. Energy and Buildings, 2014, 84: 111-116.
- [8] ZHENG Gonghang, LI Xianting. Dividing air handling loads into different grades and handling air with different grade energies[J]. Indoor and Built Environment, 2021, 30(10): 1725-1738.
- [9] 姚润明, 喻伟, 王晗, 等. 长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统重点项目研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(2): 1-9.
- [10] 杨建荣, 李先庭, 彦启森, 等. 个性化送风波动对热感觉和室内空气品质的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(10): 1405-1407, 1419.
- [11] 石文星, 杨子旭, 王宝龙. 对我国空气源热泵室外名义工况分区的思考[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 1-12.
- [12] 刘华. 我国离心式制冷机组发展现状及趋势[J/OL]. 暖通空调, 2022: 1-10. (2022-03-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2832.TU.20220314.0921.002.html>.
- [13] WANG Baolong, LIU Xingru, DING Yunchen, et al. Optimal design of rotary compressor oriented to end-plate gas injection with check valve[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 516-522.
- [14] YANG Xufei, WANG Baolong, CHENG Zuo, et al. Upper-limit of performance improvement by using (quasi) two-stage vapor compression[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185: 116426.
- [15] 住房和城乡建设部. “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm, 2022.
- [16] 宋鹏远. 利用过冷热实现实时再生的溶液喷淋式热泵特性研究[D]. 清华大学, 2019.
- [17] 黄兵. 土壤源热泵地下换热器优化设计与运行研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [18] 王森, 王锦, 张超. 优化填料布置及配水对冷却塔性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 124-131.
- [19] 邓杰文, 何适, 魏庆芑, 等. 公共建筑空调系统运行调适方法研究(1): 冷水系统[J]. 暖通空调, 2019, 49(8): 85-91, 102.
- [20] 邓杰文, 何适, 魏庆芑, 等. 公共建筑空调系统运行调适方法研究(3): 冷水机组[J]. 暖通空调, 2020, 50(1): 103-109.
- [21] 张梦华, 周镇新, 刘念, 等. 应用人工神经网络算法的冷水机组能效提升策略[J]. 制冷技术, 2022, 42(2): 39-44,

- 52.
- [22] 杨子旭, 于洋, 石文星. 室外机安装平台对房间空调器性能的影响(二)——对空调器实际运行能耗的影响[J]. 家电科技, 2020(6): 39-44.
- [23] 张朝晖, 陈敬良, 高钰, 等. 《蒙特利尔议定书》基加利修正案对制冷空调行业的影响分析[J]. 制冷与空调, 2017, 17(1): 1-7, 15.
- [24] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
- [25] 胡晓青. 空调负荷参与电力系统需求响应的建模及控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [26] 郑功杭. 基于负荷品位的空气冷热处理流程构建及理论能耗研究[D]. 清华大学, 2022.
- [27] Chong Shen, Xianting Li. Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing low-temperature hot water in the heating season[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 318-331.
- [28] Yang Zixu, Zhao Jian, Wang Baolong, et al. Experimental performance analysis of hybrid air conditioner in cooling season[J]. Building and environment, 2021, 204: 108160.
- [29] 邱成, 陈占西. 一种模块化热管空调及通信基站用模块化热管空调系统: CN108870585A[P]. 2018-11-23.
- [30] 黄翔, 贺红霞, 何华明, 郭改英, 李朝阳. 数据中心用露点间接蒸发冷却及机械制冷空调机组[P]. 陕西省: CN210630108U, 2020-05-26.
- [31] 谭建明, 刘华, 张治平. 永磁同步变频离心式冷水机组的研制及性能分析[J]. 流体机械, 2015, 43(7): 82-87, 46.
- [32] 气悬浮! 国际领先! 又一“卡脖子”技术被格力攻克[EB/OL]. [2022-10-10]. <http://www.zhileng.com/news/mq/2020/0103/64381.html>.
- [33] LI Xianting, LYU W, RAN Siyuan, et al. Combination principle of hybrid sources and three typical types of hybrid source heat pumps for year-round efficient operation[J]. Energy, 2020.
- [34] YANG Zixu, DING Lianrui, XIAO Hansong, et al. All-condition measuring methods for field performance of room air conditioner[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115887.
- [35] DENG Jiewen, WEI Qingpeng, QIAN Yangyang, et al. Does magnetic bearing variable-speed centrifugal chiller perform truly energy efficient in buildings: Field-test and simulation results[J]. Applied Energy, 2018, 229: 998-1009.
- [36] GUO Yabin, TAN Zehan, CHEN Huanxin, et al. Deep learning-based fault diagnosis of variable refrigerant flow air-conditioning system for building energy saving[J]. Applied Energy, 2018, 225: 732-745.
- [37] 郑春元. 双碳目标下多联机的运行调控关键技术探讨[R]. 第三十三届中国制冷展, 碳中和制冷技术发展论坛•“空调系统碳中和发展路线”分论坛, 2022-08-01. 中国: 重庆.
- [38] 王颖, 吴疆, 张瑞, 等. 地铁用高效冷水机组的选型设计与试验验证[J]. 制冷与空调, 2017, 17(7): 38-42, 58.

部分领域制冷技术研究及应用进展

3.2 工业余热及冷能利用



王如竹 Wang Ruzhu

上海交通大学讲席教授、制冷与低温工程研究所所长，教育部太阳能发电及制冷工程中心主任，国家自然科学基金创新群体首席科学家。研究方向为热能的品位提升与高效转换技术，曾获国家自然科学基金二等奖、国家技术发明二等奖、国家教学成果二等奖；被授予2013国际制冷J&E Hall Gold Medal、2017年亚洲制冷Asia Academic Award、2018年国际热科学Nukiyama Memorial Award、2019年国际制冷最高奖Gustav Lorentzen Medal和2021年国际能源署Peter Ritter von Rittinger国际热泵奖。



董益秀 Dong Yixiu

上海交通大学制冷与低温工程专业博士研究生。研究方向为高温热泵的循环构建及应用适应性分析。

在中国当前的能源消耗结构中，化石燃料占比仍达到80%以上^[1]，能源使用结构的不合理会造成资源短缺和环境破坏。国家《“十四五”节能减排工作方案》^[2]中提到，要推动以工业余热等替代煤炭供热、供蒸汽，说明工业余热蕴含能量丰富、可用潜力大，需要被重视。中国作为一个制造业大国，在各用能部门中，工业能耗占到了66.8%^[1]，工业过程中15%~40%的能耗最终将排放到环境中成为废热，水泥、钢铁、玻璃等行业都蕴含着大量的余热^[3]。工业余热来源广、总量多，如能将其回收再利用，将

会有显著的节能效果。工业冷能的利用主要是液化天然气（LNG）的冷量利用。2021年我国LNG进口量为7893万吨，每千克LNG气化所释放的能量约为830 kJ^[4]，因此LNG接收站、卫星站的可用冷量十分可观。

3.2.1 研究进展

工业余热及冷能的利用分为直接热交换、膨胀对外作功实现动力输出以及余热的提质三种^[5]。直接热交换的研究主要集中在换热器的强化换热设计以

及换热网络的优化^[6]，该余热利用方式最为直接，但只能换取比热源温度低的热量。对外膨胀做功一般对热能品位要求较高，蒸汽轮机、有机朗肯循环都是比较成熟的技术^[7-8]。更低品位余热的再利用受到了其温度水平的限制，一般需要由热泵提质。当前的余热回收型热泵通常可以实现30~150℃范围内余热回收并提供50~160℃的热量输出或10℃以下的冷量输出。LNG冷能利用的方式主要有直接换热以及与其他热源联合发电两种^[9]。

3.2.2 关键技术

温度越低能量可用性越差，因此处理好低品位余热的回收对工业余热的利用至关重要。热泵是一种很有潜力的超低品位余热利用技术，其最关键的作用在于调质，能够协调热源与热需求之间的不匹配性。电驱动的蒸汽压缩式热泵和热驱动的吸收式热泵是常见的类型，二者都可以通过升温实现低品位热量的提质再利用。面向低温用热需求，工业余热经热泵提质后可提供民用供暖热水。为实现余热“取之于工业再用之于工业”的构想，高温热泵发展迅猛，面向80℃以上的工业用热需求，可供应蒸汽、高温热水。在供冷领域，吸收式热泵（制冷机）能提供比热源温度更低的冷量输出，具有压缩式热泵不具备的优势。

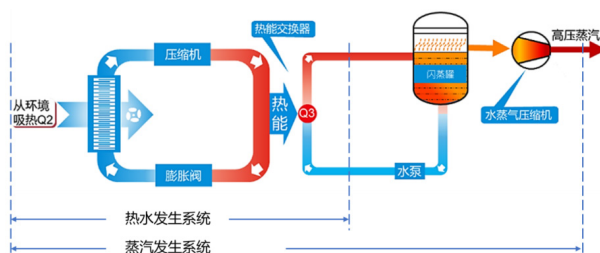
3.2.3 优秀案例

我们整理了工业余热及冷能利用的典型案例，从项目背景、技术原理、项目收益等方面展开描述，并突出了热泵在其中发挥的关键作用。

(1) 空气源/水源高温热泵蒸汽/热水供应系统^[10-12]

基于我国双碳目标，热泵替代小型燃料锅炉的趋势越来越明显。空气源/水源高温热泵蒸汽/热水供应系统以空气、水为热源，吸收环境中的低品位热能来实现高温蒸汽的发生或高温热水的产生，仅存在电力的输入。2020年，上海诺通新能源科技有限公司研发的空气源高温热泵蒸汽供应系统在山东宏济堂酒坊建立了样板工程，原理如图3.2-1(a)所示，通过复叠热泵技术实现前端温度的提升，利用负压闪蒸实现蒸汽的产生，再用水蒸气压缩机提升蒸汽的压力和温度；该系统能产出0.3 t/h的120℃蒸汽，在环境温度为20℃时能效达1.85；每产生1 t蒸汽比电锅炉节省46%的电能，减排319.04 kg二氧化碳；每

年能节省46.7万元运行费用。2021年，空气源复叠式热泵热水机组成功运用于河北邯郸某新材料公司的预制件产品烘干。该热泵热水机提供90℃热水，产出75℃热风进行产品烘干，在实际运行中吨蒸汽当量加热量的电费不到240元，相比电锅炉节省60%以上。2022年，研发团队对该系统进行了升级，两级复叠热泵可以直接产生125℃热水再闪蒸出蒸汽，无需水蒸气增压系统，COP可达到2以上，相比原系统再节电10%。目前，上海诺通科技围绕该领域共推出了4类产品：空气源蒸汽热泵、水源蒸汽热泵、复叠式热泵热水机以及水蒸气增压机组，能够广泛应用于化工、医药等需要微压蒸汽的工业领域以及供暖、食品加工等需要100℃以下热水的领域。



(a) 原理图



(b) 机组

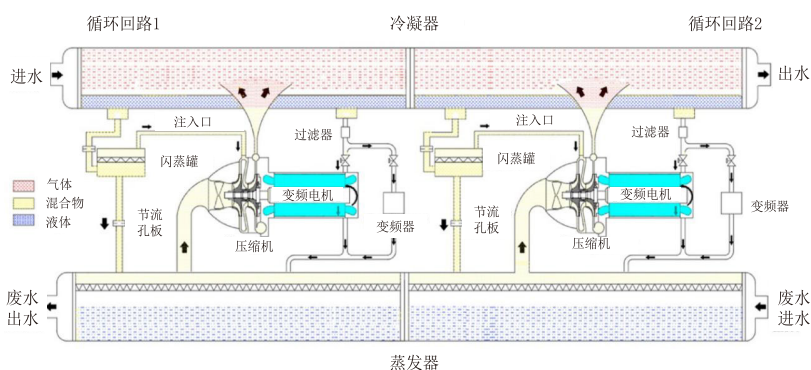
图3.2-1 高温热泵蒸汽/热水供应系统

(2) 压缩式热泵用于工业余热回收^[13]

工厂中有大量的废热排放，余热回收已被公认为一种有效的清洁供热方案，该方案可以利用压缩式热泵实现，并且热泵容量要能够满足区域热量需求。近年来格力联合上海交通大学开发单台大容量的热回收型热泵，离心式压缩机是合适的选择。该热泵机组采用如图3.2-2(a)所示的并联循环，两台压缩机布置在两个独立的回路中，水由两个蒸发器/冷凝器依次冷却/加热。该形式配置灵活，供热能力大，且能够实现较高的工作效率。2019年，双循环并联的离心式热泵系统在鞍山某钢铁厂安装并测试，此台热泵回收炼钢过程排放的废水中的热量，

用于建筑供暖，单台供热规模达到了10 MW，区域供暖的建筑面积约为180000 m²。该兆瓦机组的一次能源利用效率为2.53，该余热回收系统每年能提供 5.6×10^4 GJ的热量，节约 4.2×10^6 kg标准煤的使用，

减少 1.15×10^7 kg CO₂的排放，计算的投资回收期为1.7年。大容量离心式热泵回收低品位工业废热用于区域供热在中国北方城市颇具吸引力。



(a) 原理图



(b) 机组

图3.2-2 双循环并联离心式热泵

(3) 吸收式热泵用于工业余热回收^[14]

吸收式热泵不受制冷剂和压缩机等部件的限制，能够更灵活地回收和转换不同温度的废热，且无需消耗电能，在废热回收方面也得到了广泛的应用。2017年，上海交通大学与双良集团在兰州大唐西固电厂建立了一套大型的电厂凝汽余热回收系统，产出集中供暖用的热水，系统原理图如图3.2-3所示。来自汽轮机的高温高压蒸汽，驱动第一类吸收式热泵，回收来自蒸汽冷凝器的余热（35℃），热泵输出的热量将区域供热网络回水由45℃加热到80℃，随后回水被汽轮机的高温高压蒸汽进一步加热达到105℃。供回水之间的大温升由两台串联的吸收式热泵实现，如图3.2-4所示。现场安装了6组串联溴化锂吸收式热泵，每台额定供热能力为48.46

MW。根据一个供暖季的测试结果显示，该系统每年可回收1.27 PJ的废热，减少13万吨的碳排放，改进后的废热回收系统可节省约4369万元，且每年可获得约3495万元的利润，整个系统的投资回收期约为3.7年，同时实现了重大的经济和环境效益。

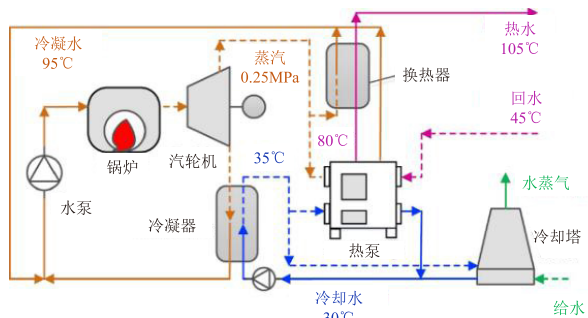
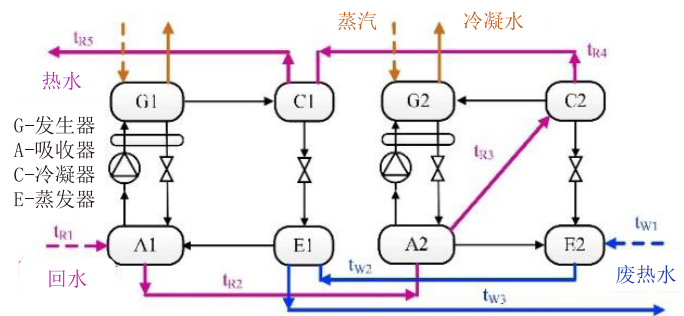


图3.2-3 电厂凝汽余热回收系统原理图



(a) 原理图

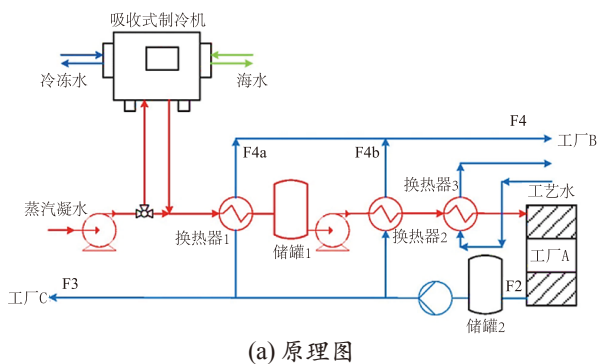


(b) 机组

图3.2-4 串联吸收式热泵

(4) 余热利用的换热网络优化^[15]

低品位工业余热的有效利用对提高能源利用效率、减少CO₂排放具有重要意义。但如果热回收系统的热量转化效率过低,则建造该系统的收益并不显著甚至得不偿失。根据当地余热的供给和需求情况进行换热网络的优化,可以使得热量损失最小,热能得到充分利用。上海交通大学、南洋理工大学为新加坡裕廊岛工业园区内的某公用工程公司提供了一套升级改造蒸汽凝水余热回收系统的方案,并在当地得以实施。原余热回收系统大量的蒸汽凝水余热仅用于预热部分冷物流,且换热平均温差较大,利用效率低。充分利用原有的换热网络设施,并结合实际需求,新系统增加了吸收式制冷机。在优化后的图3.2-5(a)换热网络中,温度较高的蒸汽凝水余热先驱动吸收式制冷机产生冷冻水,用于工业园区及园区办公楼的制冷,随后温度较低的余热再与工艺水进行梯级换热,产出不同温度的热水送到不同需求的工厂,实现了能量梯级、充分利用。改造后换热网络每个换热器的平均传热温差都显著减小,蒸汽凝水余热利用的热效率提高了55.8%,投资回收期小于2年。



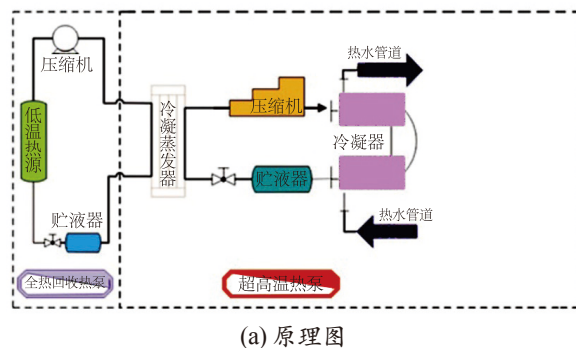
(b) 在工业园区中的应用

图3.2-5 优化后的余热利用换热网络

(5) 冷热联供^[16]

在畜禽屠宰、乳制品加工、啤酒酿造等食品加

工业行业中由于冷加工、食品保鲜等原因通常有比较大的制冷需求，同时又有高温清洗、熟制加工等热需求。在这类应用场景中，制冷设备的冷凝热是优良的可利用余热源，采用热泵提升其热量品位，并再次投入生产生活中，就能实现高效节能的冷热联供。冰轮集团开发了一系列的制冷空调冷凝热回收系统。在福建某大型屠宰企业热回收项目中，业主需要65℃的热水用于屠宰线的烫毛和喷淋、95℃热水用于烫锅补热和高温蒸煮。屠宰场的热回收方案如图3.2-6(a)所示，先由全热回收热泵回收氨制冷机冷凝废热将地下水加热至65℃并存入保温水箱，再由高温热泵将热量品位再次提升，制取95℃的高温热水存入另一保温水箱，再结合谷电蓄热，该项目相比原来外购蒸汽方案每年能节约545.6万元的费用。



(a) 原理图



(b) 机组

图3.2-6 热回收型热泵制取高温热水

(6) LNG冷能利用^[17,18]

LNG为液化天然气，温度约为 -162°C ，蕴含着大量的冷能。由于LNG温度较低，在进入城市燃气管网前需要加热升温气化，冷量流失，极度浪费。LNG可以将气化冷量传递到需要制冷的行业或者空间、设备。如图3.2-7所示，LNG在气化过程中可以多级换热（ $-162^{\circ}\text{C}/-85^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}/+5^{\circ}\text{C}$ ），为超低温

库、冷冻库、冷藏库梯级供冷，多余冷量还可用于制冰、空调供冷等。深圳金沙湾国际乐园的冷能来自广东大鹏LNG接收站，气化换热产生的冷量用于冰雪馆、海洋馆的制冰造雪以及中央空调供冷。通过该方式，园区每年能节约用电2000万度。因地制宜地利用冷能还体现在LNG动力船舶上，液化天然气是船舶的动力燃料，同时，其汽化产生的冷能可以用来制冷。图3.2-8描述了LNG冷能利用的过程，LNG先与中间介质乙二醇换热，吸收冷能后的乙二醇再与冷冻水换热，冷冻水根据负荷需求进入冰蓄冷装置或者直接进入风机盘管。此项应用减少了船舶空调系统设备的初投资费用，且无需额外消耗空调系统电量，每天可以节约近6000元的费用。

(7) 余热利用的集成示范^[17]

为了减少能量运输和传递过程中的损失，余热利用的理想场景是“就地取用、就地消耗”。某些农业产业能同时具备合适的余热（冷）源和匹配的热（冷）需求。冰山集团提出了“泛在热源耦合的深焓

能源综合解决方案”，旨在深度提取余热（冷）中的能量，图3.2-9描述了农产品产业园中能源耦合和能量高效利用的方案。该产业园中被回收的冷能主要是LNG，热能是各种泛在热源。在水产捕捞和加工产业链中，在渔船上，LNG作为燃料提供动力的同时还能对捕捞品进行快速冷冻保鲜；在陆地上，LNG气化产生的冷量输送到加工车间、冷库等处，用于水产品的保鲜和储存；冷水机组作为冷量供应的补充，其冷凝热可被热泵机组回收，用于水产加工区的供热。蔬果加工中，LNG膨胀冷能与冷水机组联合供应冷量，满足其预冷、速冻、冷藏等需求。肉品加工区域热需求较多，天然气燃烧和热泵为养殖、屠宰、肉品加工、供暖提供热量；冷水机组供冷，且其冷凝热由热泵机组回收；此外养殖业还会产生沼气，可以作为燃料的补充来源。该集成产业园区力求实现区域冷热平衡、区域能源自足、区域零碳排放，通过对余热及冷能的充分利用，提升整体能源利用效率，减少了化石燃料的使用。

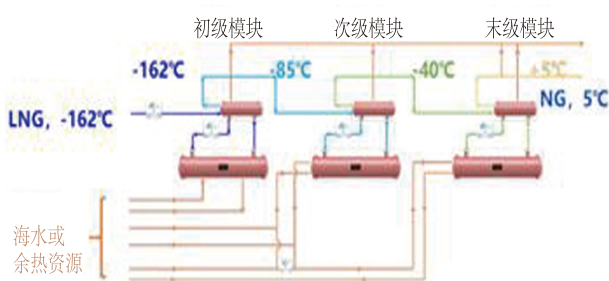


图3.2-7 LNG冷能梯级利用

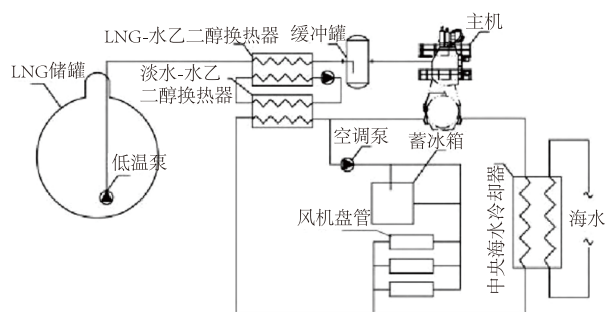


图3.2-8 LNG船舶的冷能利用

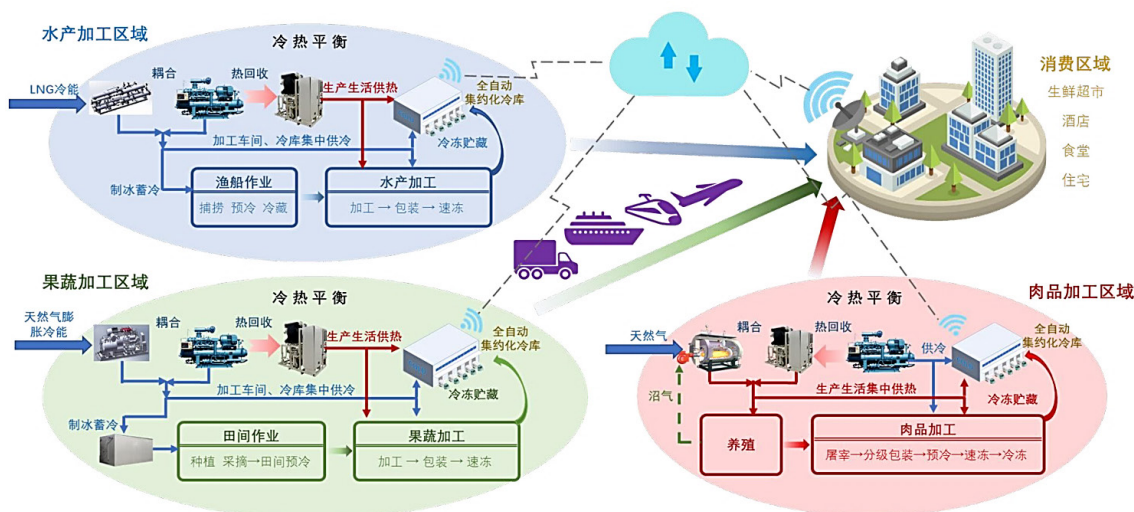


图3.2-9 农产品加工业中的余热冷能集成利用

本文介绍了七种类型的工业余热及冷能利用的案例,各项目均产生了显著的经济和环境效益。热泵在大部分案例中发挥了能量品质调节与转换的重要作用,热回收系统的最终收益很大程度上取决于热泵的性能表现,因此高性能余热回收型热泵的研发至关重要。此外,系统的整体设计,例如换热网络的规划等,也会影响能量效率。目前工业余热及冷能利用已经有了许多成功的案例,各工业企业可以充分挖掘周围可利用的热量和冷量,大胆进行节能改造,建立科学的能量回收系统,以实现长久的经济和环境效益。

参考文献

- [1] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2021[M].北京:中国统计出版社, 2022.
- [2] 国务院. “十四五”节能减排综合工作方案[Z].国发〔2021〕33号.
- [3] Lu H, Price L, Zhang Q. Capturing the invisible resource: analysis of waste heat potential in Chinese industry[J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 497-511.
- [4] 靳小静, 黄永. 现阶段我国LNG冷能回收利用现状及分析[J]. *江西化工*, 2022, 38(04):64-67.
- [5] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. *科学通报*, 2016, 61(17):1856-1857.
- [6] Klemes J J, Wang Q W, Varbanov P S, et al. Heat transfer enhancement, intensification and optimisation in heat exchanger network retrofit and operation[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120.
- [7] 连红奎, 李艳, 束光阳子, 顾春伟. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. *节能技术*, 2011, 29(02):123-128+133.
- [8] Fergani Z, Touil D, Morosuk T. Multi-criteria exergy based optimization of an Organic Rankine Cycle for waste heat recovery in the cement industry[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 81-90.
- [9] 王方,付一珂,范晓伟,朱彩霞.液化天然气(LNG)冷能利用研究进展[J].*化工进展*,2016,35(03):748-753.
- [10] 上海诺通新能源科技有限公司.诺通科技发布高温热泵及大温升水蒸气增压机组系列产品[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/-8HbGNLqUo3Bzm2vZ4mH3g>, 2022-07-27/2022-10-21.
- [11] 上海诺通新能源科技有限公司.高温复叠热泵“绿色节能”工业烘干应用示范[EB/OL].<https://mp.weixin.qq.com/s/pJU-cG9P-xaS9XWz96jrIg>, 2022-04-29/2022-10-21.
- [12] 上海诺通新能源科技有限公司.空气源高温热泵蒸汽系统应用案例:宏济堂酒坊蒸汽供应项目[EB/OL].<https://mp.weixin.qq.com/s/BQbt-0YuUQt90hOIOpWug>, 2022-01-22/2022-10-21.
- [13] Hu B, Liu H, Jiang J T, et al. Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: Onsite application research[J]. *Energy*, 2022, 238.
- [14] Xu Z Y, Mao H C, Liu D S, et al. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps[J]. *Energy*, 2018, 165: 1097-1105.
- [15] 杜帅, 徐震原, 王如竹, 杨纯. (火积)方法在低品位工业余热利用的换热网络优化中的应用研究[J].*中国科学:技术科学*, 2021, 51(10):1197-1207.
- [16] 冰轮环境技术股份有限公司.热能系统综合解决方案[EB/OL].http://www.moon-tech.com/service/doc_list.jsp, 2020-09-18/2022-10-21.
- [17] 冰山冷热科技股份有限公司.泛在能源耦合的深焓冷热解决方案[EB/OL].<https://www.car.org.cn/ueditor/php/upload/file/20200825/1598322961394040.pdf>, 2020-08-25/2022-10-21.
- [18] 杜长明, 朱国鑫, 徐鹤, 陈玲玉. 液化天然气双燃料动力船舶空调系统优化设计[J]. *节能*, 2021, 40(06):17-19.

部分领域制冷技术研究及应用进展

3.3 食品和药品冷链



孙志利 Sun Zhili

天津商业大学副教授，天津商业大学热能与动力工程实验教学示范中心副主任，天津市制冷学会副秘书长。主要研究方向为低碳智慧冷链技术、基于均匀分流和压力波震荡抑制的高效蒸发传热技术、清洁供暖技术及村镇循环经济研究。获天津市科技进步二等奖1项，主持国家级项目2项、省部级项目4项，发表论文40余篇，授权国际专利2项，发明专利13项。



王志强 Wang Zhiqiang

天津商业大学副教授。主要研究领域包括建筑节能、空气品质控制及冷链环境优化。主持国家级项目3项。发表研究论文30余篇，其中SCI收录18篇。



田 绅 Tian Shen

博士，天津商业大学副教授，主要从事蓄冷、蓄热以及离子风强化气体热质运输研究，主持完成省部级项目1项，参与国家级与省部级项目4项，以第一作者发表SCI论文10篇，获天津市科技进步二等奖1项，参与编写书籍2部，参与制定国家标准1项。



胡开永 Hu Kaiyong

天津商业大学教师，主要从事于低碳智能冷链技术研究。发表论文20余篇，主持国家重大专项子任务1项，省部级项目1项，2021年指导大学生获得“全国互联网+大学生创新创业大赛”银奖。



席肖桐 Xi Xiaotong

博士，天津商业大学教师，主要研究方向为低温下的吸附特性及极低温制冷技术，参与4项国家级项目和3项中科院项目。共发表论文25篇，以第一作者发表SCI论文5篇。



陈 兰 Chen Lan

博士，天津商业大学教师，主要从事果蔬采后生理与保鲜技术研究。参与完成国家重点研发等项目8项；获省部级科技奖励3项，其中天津市科技进步一等奖1项；授权发明专利6项，第一作者发表SCI/EI论文5篇，参与制定行业标准1项。

随着冷链物流的快速发展，冷库能耗大的问题日益突出，冷库主要能耗是制冷系统供冷用能和风机用能，约占总能耗80%以上^[1]，“双碳”目标的提出，对冷库的节能提出了更高的要求。除了进一步对制冷系统、保鲜冷冻工艺进行优化外，发展新型绿色能源及储能技术成为冷库发展的重要方向之一。信息技术的不断普及，智能冷库装备及冷链物流体系的发展也备受关注。另外，自2020年以来，COVID-19的传播对食品和药品冷链提出了新的挑战，新型的研发方向。

3.3.1 部分关注点

(1) 食品药品冷链中可再生能源与储能技术的应用

我国“双碳”目标赋予了冷链物流行业新的任务，除了坚持实现持续的装备节能外，利用可再生能源并结合储能技术应用，将有助于冷链物流领域的低碳发展^[2]。同时，由于冷链物流体系的“全程”化需求，冷链产业用能呈现明显的分布式特征。虽然我国发电的化石能源消费比例不断降低，从能源供给侧可逐步实现冷链用能的低碳化，但是，对于用户侧，特别是冷链的“最先一公里”，为了减小用能对电网协调匹配的影响，实现冷链装备和设施的可再生能源分布式利用也已成为行业发展的重点。

1) 可再生能源与冷链设施装备直接用能的匹配控制。可再生能源囊括太阳能、风能、潮汐能等多种绿色低碳能源。将可再生能源与冷链设施装备进行整合，是促进我国电力供应系统整体平衡的有力举措^[3]。

太阳能整合冷链设备系统是当今的研究热点，然而受到太阳辐射波动的影响，整合系统供能的稳定性会受到冲击，这导致系统的平稳运行受到干扰，极端情况下甚至会损坏系统部件。因此，有必要从能量供给的匹配控制角度进一步优化整合系统，提高系统的整体稳定性。

因此，Zhou等^[4]提出一种结合MPPT与V/F控制技术的新式控制算法，该算法被集成于一座功率为5.4 kW的光伏冷库中，使库体总能效提高9.18%。此外，Han等^[5]提出一种太阳能冷却系统集成控制策略，通过周期性扰动压缩机的运行频率来匹配光

伏阵列的最佳工作阻抗（即光伏阵列的总电阻），与无控制器的系统相比，平均光电转化效率提高了83.7%。以上研究表明能量调控技术在提升光伏制冷系统的能效方面有所成效，然而考虑可再生能源的分散与周期性分布，更加精准的供能控制技术与算法仍有待探索。



图3.3-1 光伏直驱移动冷库

2) 基于储能技术的冷链用能调控。在冷藏运输方面，Tassou等^[6]分析了使用共晶PCM蓄冷单元进行食品运输的优势。蓄冷单元可单独使用或与冷藏车中的蒸气压缩系统结合使用。蓄冷单元在夜间预先充冷，用于在白天运输期间保持卡车车厢内的温度。由于制冷系统占冷藏车油耗的近40%，因此，使用该技术可以显著减少冷藏车排放对环境的影响。

(2) 食品药品冷链中信息化技术的应用

冷链装备发展和冷链物流体系的建立和完善，是易腐食品、易变质药品流通时腐损率呈下降趋势的主要原因，这一进步依赖新兴信息化技术应用于冷链中各个过程。

装备智能化发展对于保障食品安全和品质至关重要。信息化应用常见于智慧零售、智能酒柜等，冷链过程结合智能采集设备（图3.3-2）能在任意时刻获取需要的环境数据，中、小型商用制冷设备的智能控制通常采用云服务器后台管理数据和发送命令，现场控制器与云服务器间采用无线网络，无线网络的稳定性是保证数据传输及时性的关键^[7]。冰箱配备内置摄像模块，帮助用户轻松管理食材。智能商用冷柜结合互联网发展，实现商用冷柜无人化管理和智能化操作。

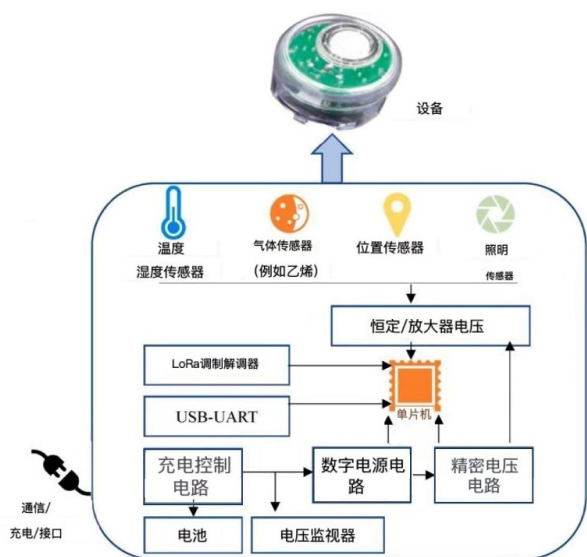


图3.3-2 环境智能采集设备

冷链物流体系中涉及到的智能化技术^[8]包括：定位技术、数据采集技术、可追溯技术、数据管理技术。定位技术是指对冷链物流各环节中的货物运输全程进行定位，卫星定位系统将货物的实时位置、行经路线等地理上可获取的信息及时地传输到监管平台或是目标客户。国产北斗卫星导航系统可在全球范围内全天候、全天时为高精度、高可靠定位、导航、授时服务，利用北斗系统与无线通信模块，对定位数据高频刷新，在低成本、低功耗的前提下，实现对物体的实时位置和轨迹进行记录^[9]。数据采集是冷链物流信息化、智能化建设中的重要一环，利用大数据采集技术可以在有限的时间范围内进行高效的捕捉和管理。文献[10]利用冷链运输过程中大量数据探究了一种车辆-库存调度模型，模型优化后有效提高了生鲜配送效率。此外，可追溯技术能够追溯货物在生产、加工、流通过程中的任意阶段，对出现问题的物品能快速、精准的环节定位溯源并解决，应用比较成熟的技术有条码技术和无线射频识别（电子标签，RFID）技术。数据管理在冷链物流的发展中也非常关键，当前使用广泛的数据库存储管理系统结构化程度、共享程度、独立性、安全性都比较高。为了便于对冷链运输过程中出现的病毒感染溯源，文献[11]中提出了一种结合物联网技术和区块链技术的冷链管理结构，将冷链物流全过程按阶段划分区块，并按时间顺序连接成链条，可以实现全过程的去中心化，具备极高的开放性、独立性、安全性，可以对冷链物流进行精准的

控制。

（3）食品药品冷链中低碳高效保温材料的应用

绝热材料是指能阻滞热流传递的材料，按照结构与成分通常可分为传统的无机绝热材料、有机绝热材料、复合绝热材料与新型的绝热材料。冷链物流通常使用硬质聚氨酯泡沫（PUF）、聚苯乙烯泡沫（EPS）以及挤塑聚苯乙烯保温板（XPS）等作为冷库、保温箱以及冷藏车的保温结构。这类有机材料具有导热率低、密度小、易于加工的优势^[12]。在室温条件下，PUF的热导率约为 $0.018\sim 0.024\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，是EPS热导率（ $0.031\sim 0.04\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ）^[13]的大约二分之一。XPS的热导率（ $<0.03\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ）虽略高于PUF，但具有优越的抗水、防潮性能，并在强度上具有显著的优势，常被用作冷库底板与冷藏车箱板以提高稳定性。但是有机保温材料存在易燃烧的弊端，安全隐患大，在实际工程中需要添加阻燃剂，因此相关的研究主要集中在性能优化与阻燃剂方面。上述材料无法循环利用，并且在制造过程中，使用氢氟烃、环戊烷等非环保型发泡剂会破坏臭氧层，造成温室效应。寻找更加高效环保的保温材料是低碳冷链保温技术的重要发展方向。

（4）食品药品冷链中低碳保鲜及冻结工艺的应用

食品低碳保鲜及冻结在冷链过程中至关重要。目前生鲜食品品质控制仍以温度控制为主要手段，主要包括低温贮藏、变温贮藏、冰温贮藏、相温贮藏等。

冷库低温贮藏是目前生鲜食品最常见的贮藏方式，但配套设施需循环加湿、除霜，能耗较大，库温波动大，产品贮藏期间易结露进而腐败变质^[14]。对于冷敏生鲜食品，可通过变温贮藏提高其抗冷性，使其能够在低于推荐温度下贮藏，从而有效延长可食期^[15]。类似的还有温度激化处理，即将冷敏型果蔬，短时间置于非致死高温或低温环境的一种贮藏前预处理方式，可有效抑制冷害，并延长贮藏期^[16]。冰温贮藏即将生鲜食品贮藏于 0°C 至其冰点的温度区域的一种贮藏方式，在此温度区域内，生鲜食品仍保持生命活性，但微生物繁殖和组织中的代谢得到有效抑制^[17]。相温贮藏即精准控温贮藏，设施依托为2010年天津科技大学李喜宏教授发明的相温库，该库体具有传热不传质、精准控温等技术特点^[18]。研究表明，果蔬等生鲜食品在相温库内的保鲜效果优于传统冷库，贮藏期也有效延长^[19]。

实际冷链过程中，低温贮藏一般会结合气调处理、保鲜剂处理一起用于生鲜食品保鲜。此外，低剂量辐射、高压静电场、低温等离子保鲜、磁场处理、负离子、超声波处理等多种新型保鲜技术目前也有研究^[20]，但由于投入大、成本高，目前仅限于实验室研究。未来在保证保鲜品质的前提下，降低成本，提高技术适用性，是这些新型保鲜技术的重点发展方向。

为了保证食品的营养及其品质，冻结技术成为重要的食品保鲜技术之一。冻结设备可以分为快速冻结设备、中速冻结设备和慢速冻结设备，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^[21]。在冻结过程中，物理场辅助冻结技术有利于控制水分冻结过程，形成尺寸细小的冰晶，对于速冻食品的品质控制具有重要意义^[22]。冻结速度、冻结装备内部空气参数分布均匀性、食品冻结点均对冻结食品品质造成影响。在冻结过程中，还应根据食品的理化特性、有无包装及包装性能等，对环境温湿度进行控制，提高技术水平。

(5) 食品药品冷链中低碳冷链消杀技术

自COVID-19传播以来，国内外^[23]频繁出现因冷链物流引起的疫情传播，冷链低温环境中的微生物污染不仅影响食品安全，甚至直接危及冷链从业、采购及消费人员的健康。

低温冷链环境杀菌技术包括超高压杀菌、臭氧杀菌、脉冲强光杀菌、紫外线杀菌、辐照杀菌等新型杀菌技术^[24]。现行冷链食品装卸、运输等物流过程中常用醇类、过氧化物类、季铵盐类以及含氯消毒剂进行生鲜食品外包装消毒^[25]。然而，过度接触消毒化学品可能会导致人类健康风险，并且被洗掉的大部分消毒剂可能存在于城市废水中，延伸到水生环境。因此，探究可同时用于食品表面及外包装的相对安全高效与低碳环保消毒杀菌技术对于冷链物流环境中的疫情防控及节能环保具有重要意义。

臭氧杀菌技术因具有高效、无残留以及经济适用性的特点，被广泛应用于食品行业^[26]。臭氧的强氧化作用使其成为了一种新型消毒剂与杀菌剂，对装载于冷藏集装箱内的入境食用动物产品外包装纸箱表面自然菌杀灭率达到99.7%^[27]，对食品冷库真菌和细菌杀灭率控制在80%以上^[28]。臭氧杀菌技术可用于冷库、冰箱等生鲜食品低温储藏场所的消毒，但

由于臭氧毒性的限制，应用时能够加速臭氧覆盖与挥发时间的消毒杀菌技术还需进一步研究。

此外，紫外线杀菌技术具有环保简便且不造成二次污染的优点，被广泛应用于食品贮藏、物质养护及水质洁净等方面。研究表明，260~270 nm紫外线波长能量能够被微生物的核酸强烈吸收，可有效消灭微生物^[29]。Kitagawa等^[30]研究表明222 nm紫外线照射对新型冠状病毒的灭活有效。因此紫外线杀菌技术可用于新冠肺炎的感染预防和控制，但紫外线波长、照射距离、照射强度以及照射时间等对于冷链外包装的病毒消杀的影响有待开展进一步的研究。

3.3.2 关键技术

(1) 食品药品冷链中可再生能源与储能技术的应用

冷链物流中对可再生能源应用和储存的技术包括：太阳能、天然工质冷能、自然冷能、蓄冷和氢能等。其中，太阳能是一种清洁能源，分布广阔，利用太阳能产生的能量驱动制冷系统，将减小冷链制冷系统对电网的依赖。目前在应用层面，已出现在冷库屋面和冷藏车（如图3.3-3所示）车厢顶部安装光伏电池板的实际系统^[31]。太阳能利用技术可以较好的实现分布式能源应用，但是根据目前的技术经济比较，该技术尚未得到广泛应用，不过在以“碳中和”为目标的未来具有良好的应用潜力。

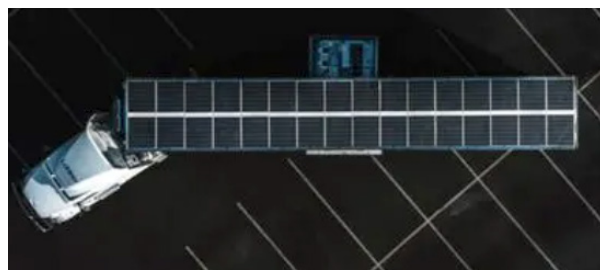


图3.3-3 光伏冷藏半挂车

利用天然低温工质（如液氮、LNG）进行速冻和低温储藏，具有冷却介质温度低、冻结速度快、食品保质品质高和设备简单等优点，主要用于高品质要求和高附加值的冷链商品^[32]。由于冷量的来源属于“废弃冷能”，天然工质冷能的低碳属性突出，但是，受限于其获取来源，推广应用时的介质输运和回收仍需进一步研究。

自然冷能技术是利用我国北方地区冬季室外冷

能，通过单相介质（如室外新风、冷冻水）或两相介质（如热管技术）的传热，可实现冷链装备的冷能利用。有报道指出，在一个贮藏期内，利用自然冷能进行的果蔬贮藏比传统机械制冷节约76.34%电能^[33]。

蓄冷技术可以有效衔接冷能供应和冷能利用间的不协调、不匹配，并且冷能储存相比于电能储存更加高效。但由于相变蓄冷装置的传热性能差、复合材料蓄冷时易出现相分离问题，其装置的充/释冷性能优化以及新型相变材料开发仍是蓄冷技术发展的重要问题。

最后，在氢能技术应用方面，为替代传统燃油冷藏车，氢燃料电池冷藏车（图3.3-4）已逐步走向应用。该技术重点针对远距离冷藏运输，在运输过程中可实现零碳排放。此外，随着液氢储藏技术的发展，随车配备的液氢储罐体积将有效减小，不仅有益于冷藏车的空间利用，而且还可以通过液氢的汽化冷量为车厢内供冷，在冷藏运输领域的低碳发展具有重要意义。



图3.3-4 氢燃料电池冷藏车

（2）食品药品冷链中信息化技术的应用

冷链货物可追溯技术是冷链信息化建设过程中物流体系安全，货物可溯源的重要手段之一。其不仅可以对食品从生产到消费全过程进行有效保障和精准控制，更可以对问题产品召回和责任追溯，对发生问题的环节进行重点关注和优化。

其中射频识别技术（RFID）是一种较为成熟的溯源应用技术，其工作是通过无线射频方式与数据进行非接触双向通信，利用无线射频方式对记录载体（电子标签或射频卡）进行读写，进而达到对目标的识别和数据交换的目的，射频识别技术依据其标签的供电方式可分为三类，即无源RFID、有源

RFID、半有源RFID。文献[34]对多种可追溯技术进行评估，有源射频识别技术在安全性、信息准确性等方面表现较好。此外根据客户需求的侧重不同，选择合适的识别技术，或对多种识别技术交叉利用是非常有必要的。

（3）食品药品冷链中低碳高效保温材料的应用

目前，冷链保温材料领域中关键技术包括新型绝热材料-真空绝热板与气凝胶的开发应用^[35]。

1) 真空绝热板（VIP）是一种新型的环保绝热材料，具有热导率低、密度小、强度高等特点。VIP板主要由芯材、真空保护层以及吸气材料组成，依据真空绝热的原理可以得到较低的导热系数，以玻璃纤维作为内芯时，导热系数约为 $0.0025\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，约为传统保温材料的1/10，因此在相同的绝热性能下，使用厚度也会减少80%~90%^[36]。VIP板的制备不使用消耗臭氧层的物质，不产生污染物，兼具节能与环保双重优势，是绿色低碳冷链行业中理想的保温材料，已经应用于白色家电、医药食品储运等领域。但VIP成本较高，并且随着使用时间的增加，板内部芯材会放气，外界水、气逐渐向内部渗透，导致VIP板工作寿命有限^[37]，因此对VIP的封装技术、成本优化仍需进一步探究。

2) 气凝胶被誉为“超级绝热材料”，是一种由纳米量级颗粒相互聚集而形成的多孔材料，较高的孔隙率与纳米级的孔结构有效抑制了内部的热传导与热对流，具有超轻、低热导率以及高孔隙率等优势^[38]，在冷链物流中具有很大的应用前景。气凝胶种类繁多，研究较为成熟的 SiO_2 气凝胶的室温热导率约为 $0.013\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，密度仅 $0.1\text{ g}/\text{cm}^3$ ，生物质气凝胶具有无毒、可降解与可再生的特点，非常契合“双碳”政策的需求。但气凝胶的应用受限于其力学性能与成本，如何利用材料复合技术提高气凝胶的综合性能以及优化制备工艺与原料有待进一步研究。

（4）食品药品冷链中低碳保鲜及冻结工艺的应用

以设施装备的技术特征为依据，冷链产品贮藏形成了以冷库、气调库、冰温库和相温库（见图3.3-5）为基础的四大贮藏技术。

1) 冷库低温贮藏技术。冷库由直筒式保温库体、制冷设备和加湿设备构成，目前仍然是食品药品最常见的贮藏方式，根据产品是否冻结，可分为冻藏和冷藏。由于冷风机需循环加湿除霜，能耗高，库温波动大，冻藏产品冻融循环造成干耗和品

质下降，冷藏产品易结露进而腐败变质。

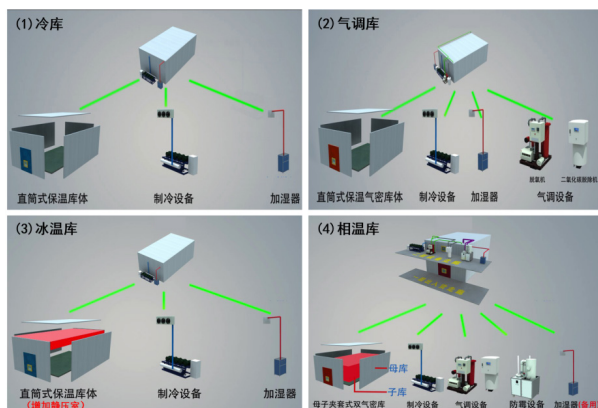


图3.3-5 四大贮藏技术配套设施结构示意图

2) 气调贮藏技术。气调库在冷库的基础上配套了气调设备。该技术可在控温保湿的基础上，灵活调控库内气体成分比例，更好的抑制果蔬等生鲜食品的生理活性，延长其保鲜期。根据实现方法可将气调贮藏分为自然降氧、快速降氧、混合除氧和减压降氧。

3) 冰温贮藏技术。冰温库在冷库的基础上增设了静压室和夹套夹层，使库内温度波动有效控制到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。可以将生鲜食品贮藏在冻结点至 0°C 的范围以内，在不破坏细胞结构的前提下最大程度的抑制产品生理活动进而延长贮藏期。然而，冰温带的设定和控制难度较大，对设备要求较高。此外，产品若长期处于冰点附近，后期易出现冷害和冻害。

4) 相温库贮藏技术。相温库由母库与子库组成，母库即外库，如同传统冷库，可以保温、制冷，子库为内库，气密却不保温，子库母库耦合辐射制冷，实现精准控温波动 $< \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，果温波动几乎为零，可实现冷敏性果蔬无冷害，非冷敏性果蔬无冻害，同时配套制冷、气调、防腐、差压预冷等设备，可做到控温、控湿、控氧以及防腐。此外，由于子库传热不传质，子母库之间没有水汽交换，密封子库后，冷风机将母库夹层空间残留水分冷凝结霜，并完成一次除霜后，冷风机不再结霜，进而降低除霜能耗和库温波动，有效避免冻藏产品干耗增加和冷藏产品结露腐败变质。此外，相温库还具有原位差压预冷、充分利用自然冷源等技术特征，具有节能效果，适于当前“双碳”新形势下的推广应用。

(5) 食品药品冷链中低碳冷链消杀技术

哥伦比亚大学放射医学研究中心主任大卫·布伦纳 (David Brenner) 教授的研究表明^[39]222纳米波被生物物质高度吸收，使其不能透射皮肤最外的角质层及眼睛的泪液层，所以对人体安全，而且222纳米波比传统254纳米消毒紫外线消毒更高效。222纳米波的能量，能破坏细菌、病毒的DNA或RNA的分子链结构，使其失去复制能力从而达到消杀效果。根据物理原理，波长越短能量越高。所以，相比传统消毒紫外线，222纳米波的消毒能力更强。此外，针对新冠病毒耐冷的性质，上海市重大传染病和生物安全研究院，主导完成了222纳米“光疫苗”常温 and 全球第一个冷藏环境的新冠消杀实验，意味着在 4°C 以上的温度，“光疫苗”都能应对自如，在短时间灭活数以百万计的新冠病毒，消杀率超过99.99%。

3.3.3 优秀案例

(1) 食品药品冷链中可再生能源与储能技术的应用



图3.3-6 光伏保温节能冷库

图3.3-6为成都银犁冷藏物流股份有限公司建设的光伏保温节能冷库，采用天然工质氨作为制冷剂，不破坏臭氧层，不引起温室效应，将能耗降至最低。该冷库在屋顶安装有大型分布式光伏电站，为冷库持续供给清洁能源，年发电量可达110万千瓦时，目前已累计发电700万千瓦时。

为防止冷量丢失，库内布置有快速隔热门以及软门帘，库体外部实施多层土建保温技术，与传统

内保温冷库相比，可节约能耗25%以上。

(2) 食品药品冷链中信息化技术的应用

天津天商酷凌科技有限公司利用大数据技术，搭建云平台（图3.3-7），采用物联网智能硬件COOLINK-BOX模块，串口设备模块，压缩机组采集模块，结合云计算等信息化技术链接冷链运输过程中的各个节点，聚焦冷库运行状态，可以对各类型冷库进行数据监控、档案智能分类、远程调试、能耗分析等，同时对海量数据进行秒级的数据采集及响应处理，将数据和算法应用在冷库能耗分析中，保障冷库智能高效运行。在冷库的节能改造中，通过对老旧冷库历史数据精细化分析、制定出科学合理的能耗解决方案，实现某大型冷冻库整体COP最大提升20%的效果，该技术平台对冷库的节能改造及日常运维有重大应用前景。



图3.3-7 天商酷凌云智冷平台

(3) 食品药品冷链中低碳高效保温材料的应用

图3.3-8为福建赛特冷链科技有限公司开发的直拼保温箱，该产品将硬质聚氨酯（PU）与VIP板相结合来作为箱板，其中VIP板的导热系数低于 $0.0025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，密度为 $280\sim 330 \text{ kg/m}^3$ ，热传递系数为1.5。整个保温箱可以拆卸、折叠，便于周转运输，非常适合冷链短途运输。

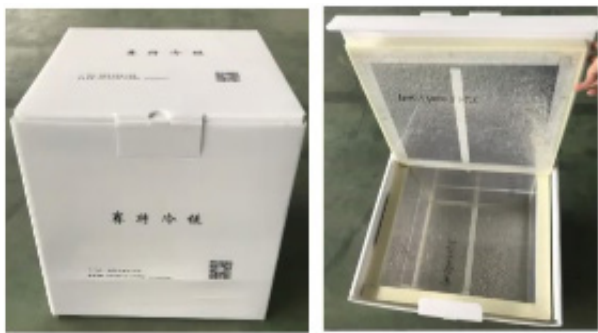


图3.3-8 PU-VIP直拼保温箱

(4) 食品药品冷链中低碳保鲜及冻结工艺的应用

图3.3-9为天津捷盛东辉保鲜科技有限公司在新疆伊犁承建的3万吨智能化立体相温气调保鲜库项目，可实现温度无扰动的高精度恒温，温度差 $\leq \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、湿度差 $\leq \pm 1\%$ 、气调气体差 $\leq \pm 0.2\%$ ，恒温恒湿、相场稳定，苹果保鲜期可达12个月。同时可实现果品预冷、贮藏、气调三种模式原位智能切换。



图3.3-9 新疆3万吨特大型相温库效果图与实景图

(5) 食品药品冷链中低碳冷链消杀技术

国内多家研究单位基于紫外线等物理消杀技术开发了针对进口冷链物品表面的消毒装备，已经通过第三方认证，并开展了相应的示范应用。

基于福建省科研应急公关项目“冷链产品外包装表面病毒的原位在线光催化/紫外消杀系统与装备”研发及生产的紫外光催化消杀机，是我国第一套冷链产品外包装表面病毒的在线紫外光催化复合消杀装备，也是国内在紫外和光催化技术应用研究领域的重大突破。经过多轮第三方P3实验室新冠病毒消杀效果实验证明，相比常见的冷链病毒消杀技术，紫外线联合光催化复合对光滑不渗透材质表面新冠病毒具有较好杀灭效果，且病毒滴度下降更显著，完全达到并符合《国家消毒技术规范》的要求，为冷链食品新冠病毒消杀提供一种便捷、快速、无害的技术手段。

与此同时，由天津商业大学牵头的天津市科委“冷链进口冷冻食品病毒消杀关键技术及系统”重大科技攻关项目，针对进口冷链食品外包装携带新冠病毒引发的疫情传播问题，提出涵盖一级冷库

的货物表面、冷藏集装箱内外、局部货物表面、穿堂空气消杀及人员工作区域的空气环境消杀等多个环节的进口冷链全流程消杀技术方案（图3.3-10）。基于此项目的研究成果，在天津港国际冷链物流基地开展了示范应用，优化了一级冷库进出库货品消毒作业流程，对比当前消毒作业流程，可实现-18℃低温环境下消毒成本降低40%~50%，消毒效率提高30%以上。在目前用户单位消毒工艺的基础上，货品平均消毒时间从30分钟/件降低到30秒/件以内，且物体表面指示微生物平均杀灭率 $\geq 99.9\%$ （图3.3-11），符合国家食品安全和冷链消毒相关标准与规范。

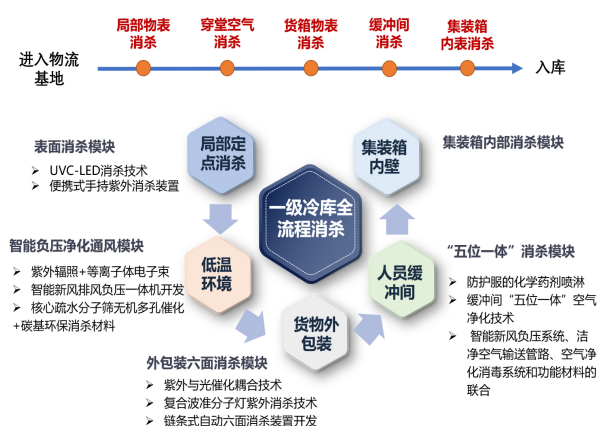


图 3.3-10 进口冷链一级冷库全流程消杀技术方案



图 3.3-11 冷链物品紫外消杀设备及应用检测效果证明

参考文献

- [1] 田绅, 徐洪波, 邵双全, 等. 冷库建筑能耗状况及评估方法[J]. 制冷与空调, 2015, 15(12):52-56.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所组编. 中国战略性新兴产业研究与发展[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] Fikiin K, Stankov B, Evans J, et al. Refrigerated warehouses as intelligent hubs to integrate renewable energy in industrial food refrigeration and to enhance power grid sustainability[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 60: 96-103.
- [4] Zhou X, Zhang Y, Ma X, et al. Performance characteristics of photovoltaic cold storage under composite control of maximum power tracking and constant voltage per frequency[J]. Applied Energy, 2022, 305: 117840.
- [5] Han Y, Li M, Wang Y, et al. Impedance matching control strategy for a solar cooling system directly driven by distributed photovoltaics[J]. Energy, 2019, 168: 953-965.
- [6] Tassou S A, De-Lille G, Ge Y T. Food transport refrigeration—Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8-9): 1467-1477.
- [7] 刘国强, 晏刚, 陆宇, 等. 中小型商用制冷设备的技术现状及发展趋势[J]. 制冷与空调, 2020, 20(7): 9-16.
- [8] 崔忠付. 点面结合 精准施策 迈向“十四五”冷链物流发展新征程——《“十四五”冷链物流发展规划》解读[J]. 中国经贸导刊, 2022(1):19-21.
- [9] 陈昌鑫, 赵亮, 谢冰. 北斗定位和ZigBee通信的运动轨迹监测方法[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23):37-40.
- [10] 郭润之, 周俊. 大数据视角下时变路网的生鲜冷链车辆-库存调度优化研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 37-39, 42.
- [11] Qian J, Yu Q, Jiang L, et al. Food cold chain management improvement: A conjoint analysis on COVID-19 and food cold chain systems[J]. Food Control, 2022, 137: 108940.
- [12] 许晓辰. 硬质聚氨酯泡沫塑料的发展及应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(3):3-4.
- [13] Margeirsson B, Gospavic R, Pálsson H, et al. Experimental and numerical modelling comparison of thermal performance of expanded polystyrene and corrugated plastic packaging for fresh fish[J]. International journal of refrigeration, 2011, 34(2): 573-585.
- [14] Kluge R A, Jomori M L L, Jacomino A P, et al. Intermittent warming in ‘Tahiti’ lime treated with an ethylene inhibitor[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 29(2): 195-203.
- [15] ARTES F, ESCRICHE A J. Intermittent warming reduces chilling injury and decay of tomato fruit[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(5): 1053-1056.
- [16] Aghdam M S, Bodbodak S. Postharvest heat treatment

- for mitigation of chilling injury in fruits and vegetables[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(1): 37-53.
- [17] 申江, 刘斌, 邹同华, 等. 冰温贮藏库及果蔬冰温贮藏效果研究[C]//全国冷冻、冷藏行业制冷安全技术、节能、环保新技术发展研讨会论文集. 大连, 2009: 5-14.
- [18] 李喜宏, 超节能智能精准特大型相温库研创及应用. 天津市, 天津捷盛东辉保鲜科技有限公司, 2021-09-01.
- [19] 李江阔, 果品精准相温保鲜技术与装备产业化开发. 天津市, 天津科技大学, 2019-02-20.
- [20] 邵海燕, 吴伟杰, 穆宏磊, 等. 食品新技术在生鲜农产品供应链绿色保鲜中的应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(09): 1-12.
- [21] 陈聪, 杨大章, 谢晶. 速冻食品的冰晶形态及辅助冻结方法研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 220-225.
- [22] 许子雄, 李保国, 罗权权. 速冻食品中冰晶的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(2): 63-67.
- [23] XIE Yongsheng, CHEN Yibo, MA Mulin, et al. Re-emergence of coronavirus disease in Chinese Cities associated with chilled and frozen food products[J]. The Journal of Infection, 2021, 82(4): 18-19.
- [24] 曲耀天, 张健, 朱秋华, 等. 冷杀菌技术在水产品贮藏与加工中的应用[C]//中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 西安, 2020: 496-497.
- [25] 交通运输部. 公路、水路进口冷链食品物流新冠病毒防控和消毒技术指南[J]. 中国水运, 2020(12): 28-31.
- [26] 莫琼, 方旭波, 袁高峰. 臭氧杀菌对水产冷冻调理品的研究利用[J]. 科学养鱼, 2012(1): 75-76.
- [27] 杨仕青, 陈娜, 吴欣荣, 等. 集装箱内食用动物产品外包装臭氧消毒方法的研究[J]. 广东畜牧兽医科技, 2014, 39(3): 36-38, 44.
- [28] 张小敏. 臭氧在冷库消毒中的效果测定[J]. 肉品卫生, 1999(1): 4-5.
- [29] Gurzadyan G G, Görner H, Schulte-Frohlinde D. Ultraviolet (193, 216 and 254 nm) photoinactivation of Escherichia coli strains with different repair deficiencies[J]. Radiation research, 1995, 141(3): 244-251.
- [30] Kitagawa H, Nomura T, Nazmul T, et al. Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination[J]. American journal of infection control, 2021, 49(3): 299-301.
- [31] 杨柳. 冷藏车光伏储能混合制冷系统设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. (YANG Liu. Design and research of photovoltaic energy storage hybrid refrigeration system of the refrigerator car[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.)
- [32] 赖威娜. 交通运输工具用液氮速冻机提高液氮利用率的设计研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学. 2017.
- [33] 孙颖, 刘雨晴, 王起霄, 等. 北方冬季乳品厂利用自然冷能换热器方案分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2019, 35(06): 723-726, 749.
- [34] Islam S, Manning L, Cullen J M. Selection criteria for planning cold food chain traceability technology enabling industry 4.0[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 1695-1704.
- [35] Fricke J, Heinemann U, Ebert H P. Vacuum insulation panels—From research to market[J]. Vacuum, 2008, 82(7): 680-690.
- [36] Di Xiaobo, Gao Yimin, Bao Chonggao, et al. Optimization of glass fiber based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes[J]. Vacuum, 2013, 97: 55-59.
- [37] Schwab H, Heinemann U, Beck A, et al. Prediction of service life for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover[J]. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2005, 28(4): 357-374.
- [38] 周星光, 柳世灵, 王通, 等. SiO₂气凝胶隔热性能的影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 94-99. (ZHOU Xingguang, LIU Shiling, WANG Tong, et al. Influence factor of thermal insulation performance of SiO₂ aerogel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 94-99.)
- [39] Welch D, Kleiman N J, Arden P C, et al. No evidence of induced skin cancer or other skin abnormalities after long-term (66 week) chronic exposure to 222-nm far-UVC radiation[J]. Photochemistry and Photobiology, 2023, 99(1): 168-175.

部分领域制冷技术研究及应用进展

3.4 氢、天然气液化及储运



王昊成 Wang Haocheng

现任中国科学院理化技术研究所项目副研究员，研究方向为混合工质制冷、氢液化、气体液化分离、VOCs回收等，主持国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金青年项目及重点项目子课题等。

随着能源低碳化发展，以天然气、氢气为主的清洁能源气体在世界能源格局中的地位愈加重要；其中氢气来源广泛、清洁无碳，是未来重要的清洁能源载体。天然气和氢气液化后密度大幅提高，是有效的大规模储运方法。以氢/氨透平膨胀制冷与混合工质制冷为代表的低温制冷技术是实现氢气与天然气低能耗、低成本致密化储运的关键，该类低温制冷技术的发展对于我国推广清洁能源应用、构建低碳清洁的能源体系、实现“双碳”目标具有重大意义。本节对国内氢气与天然气液化储存的研究进展、关键技术和优秀案例进行梳理，为清洁能源气体的液化储运行业的发展提供参考。

3.4.1 研究进展

(1) **氢液化储运** 在氢液化储运方面，国内研究起步相对较晚，长期受国外封锁。经过长期发展，我国已初步掌握中小型氢液化技术，并开展了大型

氢液化装置研制，在高效液化流程、低温透平膨胀机、低温换热器和正仲氢转化技术等方面取得了重要成果。

流程统领氢液化系统的研制，目前氢液化流程主要有Linde-Hampson节流制冷、氨膨胀制冷和氢膨胀制冷三类。Linde-Hampson制冷仅用于早期实验装置^[1-2]，由于能耗高，已少见应用。氨膨胀制冷循环通常应用于产能较小的装置，由于氨液化装置能耗高，因此更大产能的装置多采用氢制冷循环。对于中小型液化装置，浙江大学^[3]、上海交通大学^[4]构建了高效氨膨胀制冷液化流程，结合遗传算法优化流程参数，理论液化比功耗最低可降至10.25 kWh/kg。针对10 t/d级大型氢液化装置的研制，中国科学院理化技术研究所（以下简称中科院理化所）建立了连续转化氢膨胀液化流程，理论液化比功耗10.04~10.50 kWh/kg^[5]。

现有氢液化装置中液氮定温蒸发温差大，预冷

能耗高且使用不便；而采用闭式混合工质预冷可有效减小预冷换热器温差，降低能耗。为此，中科院理化所提出了单级油润滑压缩机驱动的混合工质预冷流程新构型代替液氮预冷，并针对已有氢液化系统的升级改造提出了高效闭式载冷循环，可将预冷能耗降低15%~40%（不同构型），并拓宽氢液化系统适应性，极为适合绿氢资源丰富但液氮供应不变的场景。上海交通大学^[6-8]构建并分析了多种新型氢液化流程，包括混合工质预冷的Joule-Brayton流程、新型氦气逆布雷顿流程等，最低氢液化理论比功耗降至7 kWh/kg以下。

低温膨胀机是氢液化系统产生冷量的核心部件，主要包括轴承、叶轮、蜗壳等几个关键部分。中科院理化所针对低温透平膨胀机的气体轴承进行优化设计，利用数值方法研究了动压、静压和动静压混合气体轴承承载特性，分析了结构参数以及工质对气体轴承动力学参数的影响^[9-10]，建立了高速气体轴承径向承载力普适性预测模型；通过摄动法结合试验研究了气体轴承-转子系统的稳定性和非线性，建立了失稳预测模型。针对膨胀机通流部分，提出修正的哈塞尔格鲁伯叶型设计方法^[11-12]，优化了叶片前缘几何形状，获取了适用于低温透平膨胀机最佳无叶间隙的经验参数^[13]，建立了叶轮叶型流道优化设计方法^[14]。

低温换热器是实现氢气冷却及液化的关键部件，而充分的正仲氢催化转化是液氢长期保存的必要措施。氢气冷却与转化耦合的连续转化换热器可有效降低能耗，是氢液化系统的发展方向。西安交通大学对氢液化系统的低温板翅式换热器的翅片表面流动传热特性^[15]、两相分配特性^[16]、入口流场特性以及翅片结构强度^[17]等开展了数值仿真和实验研究，并分析了连续转化型低温板翅式换热器流道中填充催化剂对氢气流动传热特性的影响^[18-19]，指出催化剂对原料氢的传热具有一定强化效果。

在正仲氢转化催化剂方面，中国科学院大连化学物理研究所（以下简称中科院大化所）于上世纪60年代率先开展正仲氢转化催化材料研究，成功研制了高性能水合氧化铁催化剂，在21~77 K温度下可制备出含量为50%~99%的仲氢^[20]，但受限于国内氢液化产能而未得到推广应用。目前，中科院大化所和北京航天试验技术研究所对氢正仲转化催化剂的使用和研究都处在国内前沿，自主研发的水合氧化

铁催化剂的催化活性、机械强度等主要性能指标也已达到国外同等水平^[21]。

（2）天然气液化储运 在天然气液化及储运方面，国内研究机构针对不同类型和规模的天然气资源的高效液化开展大量研究；尤其针对我国储量丰富但难度较高的伴生气、煤层气等非常规气源，开发了小型可移动式天然气液化技术，实现高效液化集输。

现有的天然气液化流程主要包括级联式流程、氮膨胀流程和混合工质流程（MRC）三类^[22]，其中MRC流程因其效率较高，是目前的主流流程。针对MRC流程中混合工质组分分配比及流程参数优化非线性强、难度较高的问题，中科院理化所^[23]、上海交通大学^[24]、中国石油大学^[25]、西安石油大学^[26]等单位通过揭示混合工质组分作用机理、流程焓分析、流程参数灵敏度分析等方法，结合遗传算法、神经网络算法等模型，建立了适应不同类型气源的液化流程优化方法；其中针对大型常规气源的双混合工质流程液化比功耗已降至0.2 kWh/Nm³左右^[26]，与国际先进水平相当。

常规大型天然气液化流程结构复杂、灵活性欠佳，难以适应非常规气源开发。而小型撬装液化装置尺寸紧凑、运输方便、维护简单，且初投资可控。中科院理化所基于MRC流程，通过引入R14实现组元间接力交叠^[27]，使混合工质在全温区获得较大节流效应，建立了由单级油润滑压缩机驱动的小型混合工质低压液化流程^[28]，将循环高压降至2.0 MPa以下，压比降至5~7。同时提出了分凝分离循环^[29-30]，利用低压工质供冷的冷表面对润滑油进行捕集，避免其进入低温端造成堵塞，显著提高系统可靠性。浙江大学^[31]提出了采用精馏塔分离润滑油的小型混合工质液化流程，解决了低温堵塞问题；基于该流程搭建的微小型液化装置在原料气压力0.14 MPa下的能耗为0.69 kWh/kg^[32]。

天然气与混合工质均为多元混合物，物性与传热传质特性复杂。而可靠的物性和传热数据是实现天然气液化系统准确设计的基础，为此中科院理化所^[33-35]针对甲烷、乙烷、R14、乙烯、丙烷等关键组元及其混合物的相平衡、密度、比热等开展了实验研究，积累了大量物性数据，有效支撑热力和传热计算。中科院理化所^[36-38]、华南理工大学^[39-40]针对低温混合工质及其组元的池沸腾、流动冷凝、流动沸

腾等传热和流动特性进行实验研究,建立适应多元两相流的预测关联式,并利用机器学习方法^[38]分析各关键无量纲数对传热和流动特性影响的灵敏度,指导传热和压降预测关联式的开发。

为进一步降低野外小型天然气液化场站的综合能耗,针对采用燃气发电的场站,中科院理化所提出采用变温发生和内部回热的烟气余热驱动氨吸收式预冷循环^[41],代替蒸汽压缩式丙烷预冷循环,综合燃料消耗降低20%;同时对驱动热源要求不高于常规,余热利用效率可达常规吸收式制冷循环的1.7倍。

3.4.2 关键技术

(1) **氢液化储运关键技术** 氢液化储运的关键技术主要包括低温透平膨胀机设计和制造技术、低温氢/氨换热器及冷箱设计和制造技术、正仲氢转化催化剂制备及量产技术等。

低温膨胀机设计和制造技术长期被Linde等国外公司垄断,我国尚处于起步阶段。目前中科院理化所、杭州新亚、杭氧集团、西安交通大学等单位已成功研制出多规格高速氢透平膨胀机^[42-45],并应于氢膨胀制冷的氢液化装置,最高等熵效率约为75%。中科院理化所研制了采用动静压混合气体轴承^[46]的低温透平膨胀机,提高承载力并大幅减小耗气量,可实现静压启停、动压运行的优化工作模式,将应用于10 t/d大型氢液化装置的高速重载氢膨胀机。针对更大规模(如 ≥ 30 t/d)氢液化装置的需求,中科院理化所与中科富海^[47]研制了采用磁悬浮轴承氢气透平膨胀机,目前已完成高效叶轮叶型研究、轴承防氢脆技术研究和热冲击研究,最大可支撑100 t/d级氢液化装置的工作需求。

在换热器和冷箱设计、制造技术方面,国内苏州三川、中泰深冷^[48]等企业研制的铝制低温板式换热器最大尺寸可达12 m,最大工作压力可达12 MPa,漏率可以满足 1×10^{-9} Pa·m³/s,基本能够满足30 t/d级氢液化装置的需求,在国际上属于技术领先水平。然而,对于更先进的连续转化型板式换热器国内尚未突破,目前仍以绝热转化和等温转化为主。北京航天试验技术研究所和中科富海已研制成功1.5 t/d立式冷箱,并应用于氨制冷氢液化装置;5 t/d及以上氢液化器尺寸较大,多采用卧式冷箱结构,对冷箱内部热力学设计优化提出了更高的要求,目前中科富海^[49]、重庆三十三集团正在开发5 t/d级和10

t/d卧式冷箱系统,并将应用于氢膨胀制冷的中大型氢液化装置。

在正仲氢转化催化剂制备及量产技术方面,中科院大化所研制的水合氧化铁催化剂性能与国外产品相当^[20],但尚未实现大规模量产。北京航天试验技术研究所已系统掌握水合氧化铁催化剂制备和活化的关键工艺参数,并建成了一套1000 kg/a级催化剂生产线;虽然其产能同国外先进水平有一些差距,但是生产的正仲氢催化剂在外观、正仲氢转化活性、强度、流阻方面均已达到美国催化剂同等水平,后续将应用于中大型氢液化装置。

(2) **天然气液化储运关键技术** 天然气液化储运的关键技术主要包括高效液化流程优化技术、压缩机组制造技术、高效紧凑换热器设计制造技术、天然气预处理技术、撬装集成技术等。

中海油气电集团牵头开发了2套260万 t/a大型天然气液化工艺包以及配套设备^[50],并进一步开发混合制冷剂液化工艺,可覆盖1万t/a的微/小型液化装置直至500万 t/a的大型液化工厂,达到了国际先进水平。同时建立了混合工质配比模型和模拟计算方法,制冷剂工艺性能与实际运行情况基本吻合。

中科院理化所基于混合工质低压液化循环,研制了以半封闭螺杆压缩机驱动的系列小型撬装天然气液化装置^[51]。在压缩机方面,理化所联合冰轮环境提出内置水冷电机、外置独立油泵的半封式螺杆压缩机,将动密封改为静密封,大幅降低泄漏率并保证效率。针对传统液化系统冷箱高度大、难以适应撬装结构的问题,理化所提出与低温混合物传热流动特征相匹配的板式换热器流道翅型的优化结构,通过调节流道截面积来调控流速,压降不变但换热效率提高,将冷箱高度降至3 m以内,使压缩机组与冷箱能集成在同一撬体上。同时还结合分凝分离、离心分离、挡板变流向及多孔介质过滤研制了高效分离器,解决了压缩机润滑油分离问题,避免了润滑油在低温下析出固体所造成的堵塞。

对于原料气预处理技术,中海油气电集团^[50]针对不同杂质组分的天然气源,开发了自主胺液配方的工艺技术。中科院理化所提出了一种带预冷的分子筛脱酸脱水系统,大幅降低净化系统体积,实现车载移动;并可利用液化系统的尾气进行分子筛再生,回收冷量,并减小净化系统耗气量。

3.4.3 优秀案例

在氢液化储运方面，随着国家对发展氢能的重重视加大，相关政策不断出台，国内液氢项目快速增加。2020年以来，已有超过10个液氢项目落地，产能约28 t/d，预计将在数年内达到400 t/d，其中浙江能源的嘉兴1.5 t/d液化装置、中建氢能的定西1.5 t/d液化装置、华久氢能的洛阳8.5 t/d装置、齐鲁石化的淄博8.5 t/d装置、林德的嘉兴30 t/d装置等大中型氢液化项目陆续开工建设，部分已进入调试阶段^[52-53]。在此期间，中科院理化所、中科富海、北京航天试验技术研究所开展了氢液化系统流程研究、氢液化冷箱研制以及氢液化工厂建设工作，致力于氢液化设备国产化。

北京航天试验技术研究所基于氢膨胀流程研制的1.5 t/d级氢液化装置^[54]于2021年9月投产，实测满负荷工况产量为2.3 t/d，仲氢含量97.4%。中科富海（采用中科院理化所技术）基于氦制冷机/液化器研究成果，成功研制出1.5 t/d级氦制冷氢液化装置^[55]，于2022年12月开车成功，液氢产量与纯度均达标。目前，氢膨胀制冷的5 t/d级、10 t/d级大中型氢液化装置正在研制之中，中科院理化所、重庆三十三集团合作研制的10 t/d级大型氢膨胀液化装置预计于2025年完工。

在天然气液化储运方面，我国首套工业化天然气液化装置于2001年建成，液化能力30万 Nm³/d，采用阶式制冷工艺。然而，目前国内天然气液化装置绝大部分为中小型，大型液化装置仍有待发展。山东泰安260万 Nm³/d装置和湖北黄冈500万 Nm³/d装置^[56]是国内单套规模最大的两套在运行装置。

为满足非常规气源开发以及调峰等需要，国内小型撬装液化装置快速发展。中原油田液化装置采用丙烷预冷与乙烯制冷结合，利用天然气自身压力膨胀制冷后，节流降压至LNG储罐，处理量为30万 Nm³/d，液化率为50%^[57]。昆仑能源^[58]采用美国SALOF公司技术建设了一套10万 Nm³/d的装置，采用螺杆压缩机组驱动的氨预冷+混合工质制冷循环。山东科瑞^[59]研发了一套5万 Nm³/d的撬装液化装置，同样采用混合工质制冷，综合耗能折合1.87 kWh/Nm³。烟台杰瑞生产的30万 Nm³/d液化设备^[60]，达到0.32 kWh/Nm³的能耗水平。

中科院理化所自2009年起已成功研制1~10万 Nm³/d系列规格混合工质撬装天然气液化装置。其中

1.5万 Nm³/d装置比功耗为0.54 kWh/Nm³^[61]，与同期国际上10万 Nm³/d级调峰装置效率相当，优于同类小型装置；3×10⁴ m³/d装置的压缩机及冷箱集成于同一撬块，高度小于3 m，无须现场接管，接电即用，最低比功耗仅0.39 kWh/Nm³。多套装置可在一定区域内集群应用，形成分布式柔性液化中心。目前已有50余套装置在内蒙古、山西、陕西等地投入生产运营。

参考文献

- [1] Krasae-in S, Stang J H, Neksa P. Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4524-4533.
- [2] 陈双涛, 周楷森, 赖天伟, 等. 大规模氢液化方法与装置[J]. 真空与低温, 2020, 26(3): 173-178.
- [3] 唐璐. 基于液氮预冷的氢液化流程设计及系统模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [4] 殷靓, 巨永林, 王刚. 1000 L/h氢液化装置工艺流程分析及优化[J]. 制冷技术, 2019, 39(1): 39-44.
- [5] 王昊成, 杨敬瑶, 董学强, 等. 10t/d级氢液化装置流程热力分析与优化[J]. 化工学报, 2022, 73(11): 5106-5117.
- [6] Bi Y, Ju Y. Conceptual design and optimization of a novel hydrogen liquefaction process based on helium expansion cycle integrating with mixed refrigerant pre-cooling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(38): 16949-16963.
- [7] Bi Y, Yin L, He T, et al. Optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction process for circulating hydrogen refrigeration[J]. international journal of hydrogen energy, 2022, 47(1): 348-364.
- [8] Yin L, Ju Y. Process optimization and analysis of a novel hydrogen liquefaction cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 110: 219-230.
- [9] 李健, 李晓明, 李青. 结构参数以及工质对静压气体轴承动力学参数的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(1): 8-14.
- [10] 孙郁, 孙立佳, 程进杰, 等. 大功率氦气透平膨胀机的设计[J]. 低温工程, 2015 (5): 13-17.
- [11] Ke C, Xiong L, Peng N, et al. Numerical and experimental study of the performance effects of varying vaneless space in high-speed micro turbine stators[J]. Cryogenics, 2017, 88: 10-16.
- [12] 柯长磊, 熊联友, 彭楠, 等. 低温透平膨胀机的热力参数计算及数值模拟校核[J]. 低温与超导, 2018, 46(11): 20-25.
- [13] Li X M, Li J, Pan W, et al. Investigation on tip leakage flow characteristics of radial inflow micro turbine used in helium liquefying system[J]. International Journal of Refrigeration,

- 2019, 98: 51-60.
- [14] Li X, Lv C, Yang S, et al. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for a large-scale helium cryogenic system[J]. *Energy*, 2019, 167: 106-116.
 - [15] 文键, 李亚梅, 王斯民, 等. 板翅式换热器平直翅片表面流动及传热特性[J]. *化学工程*, 2012, 40(10): 25-28.
 - [16] 文键, 王斯民, 厉彦忠. 板翅式换热器二相流的分配特性[J]. *化学工程*, 2010, 38(12): 26-29.
 - [17] 文键, 李亚梅, 王少华, 等. 板翅式换热器板翅结构强度影响因素分析[J]. *低温工程*, 2013 (2): 52-59.
 - [18] 徐攀, 文键, 厉彦忠, 等. 氢正仲转化耦合流动换热板翅式换热器研究[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(12): 16-24.
 - [19] 李启铭, 张磊, 徐攀, 等. 氢液化流程中催化换热一体化可行性研究[J]. *化学工程*, 2021, 49(07): 26-30.
 - [20] 刘蕙芳, 沈惠华. 仲氢的制备与储存的研究[J]. *低温与特气*, 1988 (2): 17-20.
 - [21] 杨晓阳, 杨昌乐. 正仲氢转化催化剂性能研究[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2018, 16(3): 79-82.
 - [22] He T, Karimi I A, Ju Y. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 132: 89-114.
 - [23] Maoqiong Gong, Ercang Luo, Jianfeng Wu, et al. On the temperature distribution in the counter flow heat exchanger with multicomponent non-azeotropic mixtures. *Cryogenics*, Vol.42 No.12, 2002, pp.795-804.
 - [24] He T, Ju Y. Dynamic simulation of mixed refrigerant process for small-scale LNG plant in skid mount packages[J]. *Energy*, 2016, 97: 350-358.
 - [25] 张足斌, 范美玉, 王海琴, 等. C3/MRC 液化工艺中混合制冷剂组成选择及配比优化[J]. *低温与超导*, 2016, 44(3): 20-25.
 - [26] 肖荣鸽, 高旭, 靳文博, 等. 双循环混合制冷剂天然气液化流程的优化模拟[J]. *化学工程*, 2019, 3.
 - [27] 肖荣鸽, 高旭, 靳文博, 等. 双循环混合制冷剂天然气液化流程的优化模拟[J]. *化学工程*, 2019, 47(3): 62-67, 73.
 - [27] 公茂琼, 吴剑峰, 罗二仓. 深冷混合工质节流制冷原理及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
 - [28] 程遼伟, 公茂琼, 吴剑峰, 等. 液化压力对混合制冷剂液化循环性能的影响[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(6): 1022-1025.
 - [29] LI Mei, GONG Maoqiong, GUO Hao, et al. Steady-state thermodynamic simulation and structural design of the dephlegmator used in mixed-refrigerant Joule-Thomson refrigerators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 480-492.
 - [30] 李梅, 郭浩, 李冰, 等. 分凝分离技术研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(S1): 1-9.
 - [31] WANG Qin, SONG Qi, ZHANG Jingpeng, et al. Performance analyses on four configurations of natural gas liquefaction process operating with mixed refrigerants and a rectifying column[J]. *Cryogenics*, 2019, 97: 13-21.
 - [32] Zhang A M, Chen G M, Wang Q. Experimental study on a small-scale liquefied natural gas apparatus[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(11): 1973-1976.
 - [33] ZHU Hongbo, GONG Maoqiong, ZHANG Yu, et al. Vapor-Liquid equilibrium data of the methane + tetrafluoromethane system at temperatures from (159.61 to 178.93) K[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2007, 52(2): 463-467.
 - [34] ZHONG Quan, DONG Xueqiang, ZHAO Yanxing, et al. A simple generalized equation for compressed liquid isochoric heat capacity of pure and mixture refrigerants[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2019, 490: 33-38.
 - [35] LI Huiya, DONG Xueqiang, ZHANG Haiyang, et al. Saturated liquid density and pressure measurements for HFC134a + HC290 by a compact single-sinker densimeter[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 85: 376-382.
 - [36] WANG S, GONG M Q, CHEN G F, et al. Two-phase heat transfer and pressure drop of propane during saturated flow boiling inside a horizontal tube[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 41: 200-209.
 - [37] YAO Yuan, ZHONG Quan, CHEN Gaofei, et al. Statistical analysis of the sensitivity of bubble sample size during saturated nucleate boiling based on experimental data[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 1295-1304.
 - [38] NIE Feng, WANG Haocheng, SONG Qinglu, et al. Image identification for two-phase flow patterns based on CNN algorithms[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 152: 104067.
 - [39] LI Zhaobing, XUE Hanwen, SHEN Jun, et al. Experimental investigation and new correlation for the bubble departure diameter of methane and ethane binary mixtures during nucleate pool boiling[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 137: 129-140.
 - [40] LI Rixin, LIU Jinping, LIU Jiayao, et al. Measured and predicted upward flow boiling heat transfer coefficients for hydrocarbon mixtures inside a cryogenic plate fin heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 123: 75-88.
 - [41] XU Qingyu, LU Ding, CHEN Gaofei, et al. Experimental study on an absorption refrigeration system driven by temperature-distributed heat sources[J]. *Energy*, 2019, 170:

- 471-479
- [42] 刘立强. 大型氨低温制冷机研制进展[J]. 真空与低温, 2020, 26(6): 471-475.
- [43] 侯予, 杨山举, 陈兴亚, 等. 箔片动压气体轴承在低温透平膨胀机中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(4): 489-493.
- [44] 赖天伟, 马斌, 郑越青, 等. 低温透平膨胀机箔片气体轴承研究进展[C]//2013中国制冷学会学术年会论文集. 武汉: 中国制冷学会, 2013: 175.
- [45] 王恒, 熊联友, 侯予, 等. 全动压气体轴承低温透平膨胀机的开发[J]. 低温工程, 2002(2): 8-10, 33.
- [46] 张晓华. 低温氨透平膨胀机混合气体轴承静动特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [47] Chen J Y, Li X M, Dong X B, et al. A novel hydrogen turbo-expander with active magnetic bearings and an eddy current brake[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 755(1): 012033.
- [48] 杭州中泰深冷技术股份有限公司. http://zhongtaihangzhou.com/products_info.php?14.
- [49] 北京中科富海低温科技有限公司. <http://www.fuhaicryo.com/plus/list.php?tid=82>.
- [50] 单彤文. 中国LNG产业链核心技术发展现状与关键技术发展方向[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 190-196.
- [51] ZHAO Yanxing, GONG Maoqiong, WANG Haocheng, et al. Development of mobile miniature natural gas liquefiers[J]. Frontiers in Energy, 2020, 14(4): 667-682.
- [52] 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会. <http://cesa.es.cn.com.cn/news/show-1377128.html>.
- [53] 张振扬, 妙丛, 王峰, 等. 规模化氢液化装置现状及未来技术路线分析[J/OL]. 化工进展, 2022 :1-17[2022-12-31]. DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0279.
- [54] 付毅飞. 我国首套自主知识产权氨膨胀制冷氢液化系统调试成功[N]. 科技日报, 2021-09-22(5). DOI:10.28502/n.cnki.nkjrb.2021.005248.
- [55] 阜阳市颍东区人民政府. 全国首套民用工业级氢液化装置在颍东开车成功. <https://www.yd.gov.cn/content/detail/63b63231886688e8568b456d.html>.
- [56] 首座百万吨级国产LNG工厂通过大考, 能耗指标达到国内领先国际先进水平[J]. 深冷技术, 2017(1):44.
- [57] 王香增. 天然气液化工艺技术研究及应用[J]. 石油与天然气化工, 2004, 33(2): 91-92.
- [58] 李康林. 小型撬装LNG装置技术研究与实践[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(9): 100-101, 103.
- [59] http://www.gashome.cn/news/member_news/2015-04-01/22125.html.
- [60] <http://www.jereh.com/>.
- [61] GONG Maoqiong, WU Jianfeng, SUN Zhaohu, et al. Development and performance test of a small trailer-mounted moveable natural gas liquefier[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 57: 148-153.

部分领域制冷技术研究及应用进展

3.5 数据中心及超算中心冷却



陈焕新 Chen Huanxin

华中科技大学教授，博导，湖北省制冷学会常务副理事长。《制冷学报》《暖通空调》《制冷技术》编委。主持参与多项纵横项目，发表百余篇高水平SCI论文，获评爱思唯尔高被引学者。出版专著《制冷空调遇上大数据——行业大变革》《制冷空调新技术》。

数据中心作为行业数字化转型的算力根基，对于人工智能、5G、大数据、云计算等信息技术与传统产业都有着重要意义。在数字经济加速发展以及企业降本增效需求的多重刺激下，我国数据中心市场规模多年来呈现持续增长。数据中心高速发展的同时，生产算力所消耗电力带来的高额碳排放不容忽视。国家陆续出台了多项政策为我国数字基础设施建设提供指导，明确要求促进数据中心规模稳步提升，加快低碳高质、协同发展格局的形成。高效低碳的数据中心及超算中心建设对冷却系统提出了更高的要求，数据中心冷却设备耗电量大，约占数据中心总耗电量的20%~40%，是实现数据中心节能减排的重点。在“新基建”“双碳”“东数西算”三大政策的背景下，发展集约化、绿色化、高效化的数据中心冷却技术势在必行。

3.5.1 研究进展

数据中心作为承载各类数字化转型技术的根本

基础，其产业赋能价值逐步提升。根据科智咨询《2021—2022中国IDC行业发展研究报告》数据，如图3.5-1，2021年我国数据中心整体市场规模突破3000亿元大关，达到3012.7亿元左右，相较于2020年同比增长34.6%，增长率较2020年降低9%，近三年年均复合增长率达到35.03%。

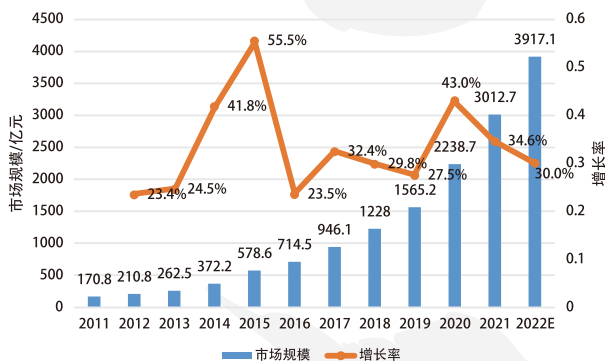


图3.5-1 我国数据中心市场规模及预测(2011—2022)

注：图中E表示预测值

随着“新基建”的发展及“十四五”规划的提出，我国数据中心产业发展步入新阶段，数据中心规模稳步提升，低碳高质、协同发展的格局正在逐步形成。根据工信部编制的《国家绿色数据中心先进适用技术产品目录（2020）》，目前数据中心高效制冷/冷却涵盖了包括冷水机组、自然冷源、间接蒸发冷却、机房空调、液冷等多达36种技术。

数据中心建设是新型基础设施建设的核心内容。当前，我国数据中心建设发展迅速，2020年市场规模达到39.2万亿，增速是GDP的3.2倍。数据中心不仅是我国数字经济发展的引擎和载体，同时也对人工智能、工业物联网等领域意义非凡。

数据中心的高速发展成果喜人，但同时带来的还有系统能耗的快速增长，图3.5-2所示为2014—2021年我国数据中心用电量及占比，到2021年，数据中心全年用电量已达到83128亿kWh，占全社会用电总量的2.6%。

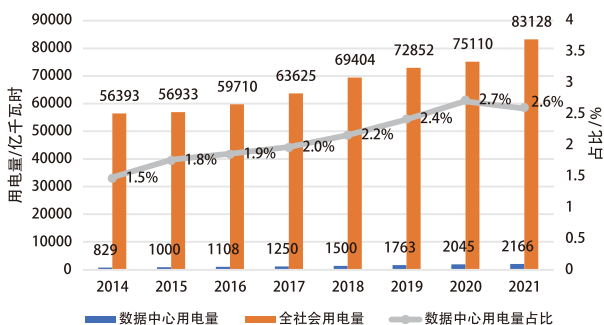


图3.5-2 2014—2021年全国数据中心用电量及占比

根据国家“双碳”目标及“东数西算”实施方案，未来数据中心的发展必然是以高效能、低排放为核心。《数据中心白皮书（2022年）》显示，未来数据中心能效方面将会有三大发展趋势：

(1) 新能源与储能技术的融合应用。通过提升风、光、水、氢等清洁能源对数据中心的供电占比，转变数据中心能源结构，提升绿色低碳水平，逐步实现数据中心零碳排放。融合储能技术有效提升新能源供电的稳定性，解决可再生能源系统应用过程中的供电不平衡、稳定性差等问题。数据中心可利用储能系统在波谷时存储电力，并在高峰期进行利用，以降低数据中心用电成本。

(2) 新型制冷技术应用。数据中心制冷方案供应商将进一步加强新型制冷方案的研究，包括氟泵、液冷、间接蒸发、自然冷源等制冷技术将变得

更加成熟，制冷效率将不断提升。

(3) 人工智能在数据中心的应用升级。人工智能将会在数据中心的各个领域实现全新的突破，包括能源调度与管理，节能运行控制，多系统耦合运行管理，智能化运维管理等。

数据中心的耗能部分主要包括IT设备、制冷系统、供配电系统、照明系统及其他设施(包括各类安防设备以及相关数据中心建筑的管理系统等)。如图3.5-3所示，IT设备能耗占比最大，达到45%，主要由服务器、存储设备以及网络通信设备组成。而空调系统仍然是数据中心提高能源效率的重点环节，它所产生的功耗约占数据中心总功耗的40%。

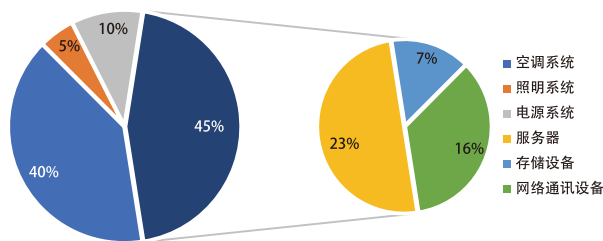


图3.5-3 数据中心各部分能耗占比

冷却系统是数据中心节能减排的突破口，根据前瞻产业研究院资料，如表3.5-1所示，我国数据中心制冷模式与机房功率密度存在较强的相关性，对于低密度功率数据中心，一般采用房间级风冷方式即可以达到冷却需求；而对于高密度数据中心，需要液冷的方式才能够达到更高的冷却需求。根据中国电子技术标准化研究院发布的《绿色数据中心白皮书》数据显示，目前我国的数据中心平均功率密度为8~10 kW，同时未来我国新建的数据中心向着较大密度和规模的方向发展，这也对未来数据中心冷却技术提出了新的考验。

表3.5-1 数据中心制冷方式

每平方米功率	数据中心密度	制冷方式
1.2 kW/机柜以下	超低密度数据中心	房间级-风冷
1.2~2.7 kW/机柜	低密度数据中心	房间级-风冷
2.7~7.5 kW/机柜	中、低密度数据中心	行间级-风冷/水冷
7.5~18 kW/机柜	中、高密度数据中心	行间级-水冷；液冷-冷板式
18~30 kW/机柜	高密度数据中心	液冷-冷板式；液冷-浸没式

3.5.2 关键技术

如图3.5-4所示，数据中心冷却系统从取热环节可分为风冷、液冷等形式，从输配环节可以分为空气、水或其他单相载冷剂、相变冷却液等形式，放热环节包括机械制冷、自然冷却等方式。主要差别在于其在数据中心的安装方式以及它们收集热量并将热量输送至室外的方式。

不同的冷却系统架构可以满足不同功率、密度、规模的数据中心冷却需求，适合不同的气候环境与应用场景。冷却系统的架构优化要立足于数据中心的冷却需求，充分利用周边的环境冷源与可再生能源，对整个系统进行综合优化，以实现数据中心冷却系统的可靠性、经济性、能效以及碳排放等多个维度的目标。

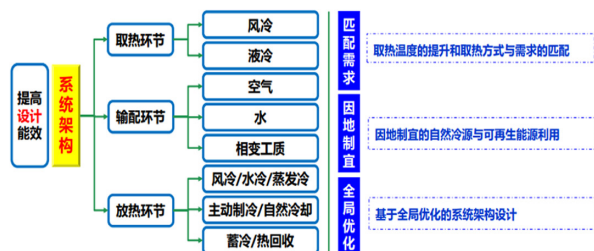


图3.5-4 数据中心冷却系统架构

技术路线1：取热温度的提升和取热方式与需求的匹配

通过提升取热温度，一方面可以提高冷机能效，根据估算，冷冻水温度每升高1℃，就可以节省约3%的冷机功耗。换言之，所需冷冻水温度越低，冷却冷冻水所需要的成本将大幅增加（这直接适用于冷冻水系统，这种趋势也同样适用于风冷式蒸汽压缩制冷系统）。另一方面，温度的升高将延长自然冷却时间，以15/21℃供回水温度为基础，针对不同地区，水温提高3℃，完全及部分自然冷却小时数将增加700~1200 h；水温提高7℃，完全及部分自然冷却时间增加1450~3200 h。

冷却系统的取热方式和取热温度要适应IT设备快速增长的功率密度需求。数据中心功率密度较大，空气冷却存在散热极限。如果散热不良，产生的过高温度会增加出错率，影响芯片的电性能、工作频率、机械强度及可靠性。研究和实际应用表明，电子元件的故障发生率是随工作温度的提高而呈指数关系增长的，单个半导体元件的温度每升高10℃，系统的可靠性降低约50%。为了确保大型数据中

心不断增加的冷却需求，液冷以及间接蒸发冷却技术已经开始逐步应用于大型数据中心。液体冷却技术拥有比空气更高的对流换热系数，可以提供更高的冷却能力，并具有降低系统能耗、减少故障率和突破环境局限等优势，已经成为数据中心发展的重要技术趋势之一。

数据中心冷却系统除了考虑其本身的制冷需求外，周边建筑设施的热需求也应纳入节能优化的范畴。由于数据中心可全年向外界提供稳定的热源，最合适的应用是供生活热水，或者用来满足工农业生产的需要。将数据中心的排热用来给周边用户提供生活热水或冬季采暖需要结合不同环境的需求，生活热水的温度一般在40~50℃即可，南方地区供暖或者北方地区的地板一般需要50℃以内的热水，北方地区集中供暖则希望热水在70℃以上。通过数据中心排热的回收利用不仅节约了能源，进一步减少碳排放，还能实现能源综合利用，为数据中心创造附加值。

技术路线2：因地制宜的自然冷源与可再生能源利用

数据中心冷却系统要充分利用所在地区空气自然冷源的利用。合理、有效、最大化利用室外自然冷源，降低冷却能耗是数据中心冷却系统搭建的基本原则，也是实现数据中心低碳节能的重要举措。室外空气温度越低，越有利于数据中心内部的热量向外部传递。机械制冷系统的能效随着室外温度的降低而升高。当室外温度低于自然冷却要求时，冷却系统可完全运行于自然冷却模式，无需开启机械制冷系统。室外温度越低，自然冷却系统的效率也越高，而且越是寒冷的地区，全年运行自然冷却模式的时间也就越长。

数据中心冷却系统要充分利用所在地区水体自然冷源的利用。如利用水库、湖水、海水等作为自然冷源，对数据中心进行冷却。广东省印发的《广东省海洋经济发展“十四五”规划》中，也提出支持海底数据中心关键核心技术突破，有序引导广州、深圳、珠海、汕头和惠州等地在海底布放高能耗数据中心的规划。

数据中心冷却系统要充分利用所在地区的可再生能源。大型数据中心是耗能大户，在可再生能源丰富的地区，充分利用可再生能源所制造的“绿电”，可以大幅度降低数据中心的碳排放。在高坝

水库附近建设数据中心可以充分利用水电站发电；建设海底数据中心，可以充分利用海上风电和潮汐能发电；在太阳能和陆上风能资源丰富的地区，也可以充分利用这些清洁能源，助力数据中心的“碳中和”。为实现数据中心高效供电和可再生能源有效消纳，降低数据中心园区PUE，未来可能会衍生出可接入新能源、储能装置的高效集群供电技术和能量管理系统。

技术路线3：基于全局优化的系统架构设计

数据中心冷却过程就是将内部IT设备等热源所产生的热量通过冷却系统中的多个传热环节最终散发到室外自然环境的过程。热源和冷源之间的温差是热量传递的驱动力，当这个温差足够时（提升热源耐受温度或者降低冷源温度），可以实现自然冷却；当这个温度不够时，还需要启动机械制冷系统，来提升温差以保证IT设备等热源产生的热量都及时散发到室外。各个传热环节采用的技术形式所产生的传热损失以及额外的能耗各不相同。需要对整个冷却系统的热量传递过程进行全局优化，以合理利用热源和冷源之间的温差资源，以使得整个系统的全年运行能耗最小，实现数据中心冷却系统整体节能降碳。图3.5-4展示了一些全局优化的数据中心冷却系统架构。

通过物理机理+大数据建立空调系统能耗模型——机器学习

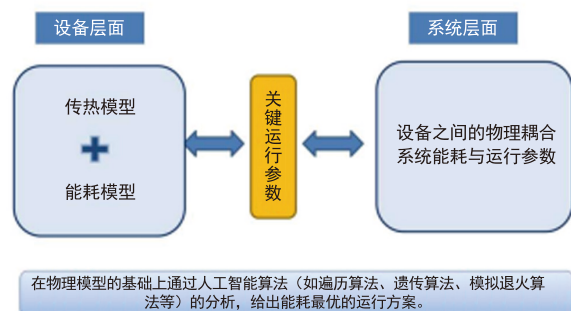


图3.5-5 基于机器学习的全局优化算法

当前，随着人工智能领域的高速发展，数据中心系统AI智能全局化正逐渐代替传统的控制策略。其中，基于机器学习的全局优化算法和基于深度学习的全局优化算法是较有代表性的两种方式。如图3.5-5所示，基于机器学习的全局优化算法是以物理原理为根据，对冷却系统进行物理建模，得到各个换热环节之间的数学关联式，再以系统整体能效最高为目标求解出运行参数，从而实现对系统的调

优。这种全局优化技术虽然不依赖于大量的历史数据，但其控制精度取决于物理建模的准确度，对于大型复杂系统的建模存在一定的难度。

基于深度学习的全局优化算法是依靠人工智能算法，如图3.5-6所示，其核心是以大数据为基础，通过计算机模拟训练出冷却系统运行参数与能效之间的数学关系，再以此指导冷却系统运行。常见的人工智能算法包括人工神经网络算法。对系统的复杂度兼容性高，其核心算法不随系统形式的不同而发生改变，但对数据数量和质量依赖度较高，且训练得到的模型在训练集外的准确度得不到保证，使得该项技术的应用存在一定的阻碍。

基于大数据建立的空调系统模型——深度学习

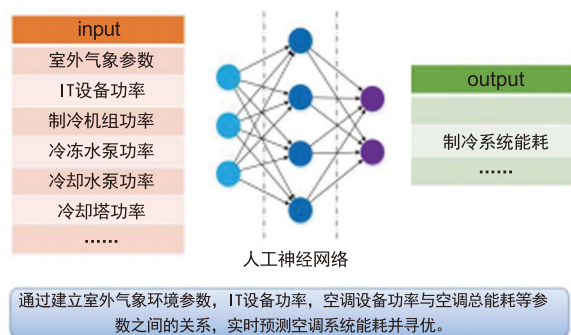


图3.5-6 基于深度学习的全局优化算法

3.5.3 优秀案例

（1）美的零碳数据生态的实践

数据中心制冷需求具有以下特点：1) 可靠性：要求设备不间断、连续无故障运行；并能断电快速重启；具有备用设备及应急冷源。2) 节能性：要合理利用自然冷源、峰谷电价等。3) 智能化：系统控制逻辑异于舒适性空调，智能化要求高，运维便利。4) 预制化：要能够快速部署，灵活建设、分期模块交付。5) 气流组织：要求风量大、焓差小，防止局部过冷或过热。

基于上述需求，美的创新性提出零碳数据中心构想，并率先在拉萨宁算大数据中心进行实践。该数据中心总体规划部署超过10万机架，所用全部为可再生能源，如水电、光伏等，预计每年可提供700万吨碳排放权。目前已经完成项目一期1万机架的建设。项目充分利用了西藏可再生能源丰富的优势。首先，拉萨具有得天独厚的气候条件，空气低温、干燥、洁净，适合采用“新风+蒸发冷却”为数据中心供冷；其次，数据中心海量不间断的废热资源利

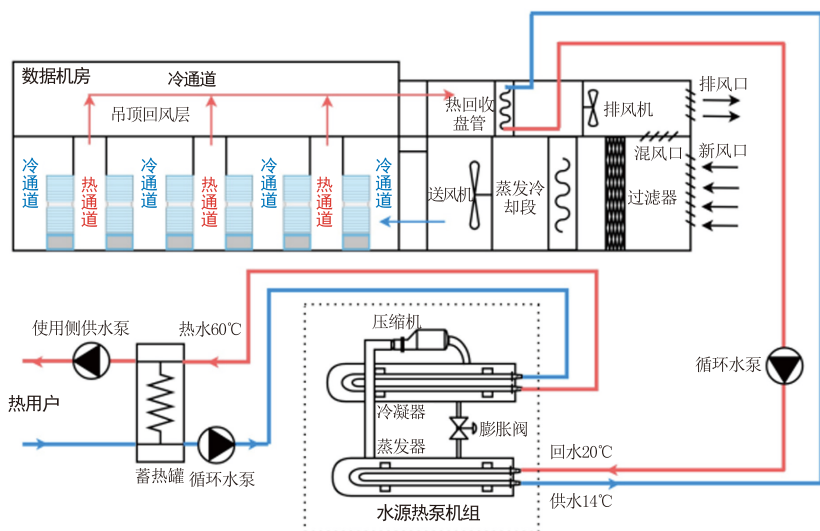


图3.5-7 宁算大数据中心综合空调方案

用率稳定，可采用热泵系统进行有效回收，可实现低碳供热；另外，当地种养殖业发展缓慢，常年冻土的地势地貌导致动植物生长缓慢，因此大型数据中心对当地生态环境影响较小。

宁算大数据中心采用蒸发冷却+热回收+热泵+储能的综合空调方案，如图3.5-7所示，其中热回收直接蒸发冷空调进行数据机房全年的自然冷却，同时机房余热可全额回收。水源热泵主机制热能效相较于传统热泵能效提升达到100%。储能系统通过均衡热量供需差异，移峰填谷。在热回收蒸发冷却空调机组中，使用了湿膜组件和比焓控制方法，湿膜组件使用高分子复合纤维材质并采取蜂窝结构设计，吸水性强，湿球效率高，在风速（4~4.5 m/s）下不易飘水。比焓控制方法相较于其他控制模式，能够精准控制送风干球和湿球状态，确保系统用水量和用电量始终处于最优点，实现系统综合高效运行。

在水源热泵主机中，采用高效双级降膜离心热泵机组，制冷EER为5.85~6.50，制热COP为5.67~6.38，等熵效率行业领先。通过补气增焓双级压缩，相较于传统热泵机组效率提高6%。除此之外，还具有全降膜式蒸发器和电机冷却喷嘴，进一步提升了换热效率。

目前，宁算数据中心已完成一期项目的建设，“宁算中心——高原现代农业”示范工程也已投入使用，在该模式下，通过绿色能源进行冷却保障了数据中心的高效节能运行，依托于余热又能够在青藏高原构建生态综合体。多元化的余热利用涵盖了

蔬菜种植、水产养殖等多个领域，大幅促进了当地产业的全面发展。这种低碳节能，同时促进当地产业发展的模式为数据中心的发展提供了新的思路。未来，零碳数据中心还将进一步扩大产业规模，预计全部投入使用后累计节能约2亿度，可降低二氧化碳排放量19.2万吨。

（2）“碳中和”背景下海尔数据中心冷源技术发展路线

随着数据中心行业的发展以及双碳政策的提出，对数据中心的能耗及碳排放提出了越来越高的要求，新建数据中心一方面需要满足不同的架构设计和定制需求，同时

还要能够利用更多的自然冷源，降低机械制冷时的能耗从而降低数据中心PUE。针对上述要求，海尔集团提出数据中心冷却技术专用化、无油化以及定制化的创新思路，以关键技术基础研究作为支撑，推动制冷设备朝着高效节能方向不断发展。

专用化：核心思路是以数据中心专用冷机替换国标工况常规冷机。数据中心专用冷机涵盖了超高蒸发温度技术、大温差换热技术、智能抗喘振技术、压缩机主动冷却技术、零延时重启技术以及串联逆流技术。除了能有效提升换热效率，数据中心专用冷机还具备常规商用场景连锁控制、快速启动及抗干扰等优势。

无油化：无油化技术顾名思义取消了部件的直接接触，通常应用场景较小时使用集中式水系统磁悬浮技术，而当应用场景较大时，则采用模块式氟系统气悬浮。相较于传统机组，无油化技术具有能效高、体积小、噪声低的特点，非常适用于解决目前数据中心高散热、整体布局有限与空调能耗高的痛点。不仅如此，悬浮离心机组无油的特性十分适合数据中心冷却、温湿度独立控制系统超低压比的应用，解决了传统机器在低压比下回油的问题，提高了可靠性，并大幅降低了整体运营成本。无油化利用的关键技术主要有多级复叠过冷技术、静压气悬浮轴承、高效叶轮设计、自然冷却耦合技术、多机头控制技术、高速电机技术等。

定制化：定制化涵盖冷却系统的各个环节，如自然冷却、直膨多联、余热回收、预制冷站等都可

以通过定制化的思路进行节能优化。以余热回收为例，通过利用多种余热回收模式和高设备使用率，目前可达到近零碳排放。定制额外全热回收冷凝器，可全年提供50℃热水，近距离可直接供暖。磁悬浮+高温热泵复合供热则可实现远距离输送。随着液冷、耐高温服务器、量子计算机等IT技术发展，冷源将朝着定制化继续转型，如液冷专用风冷极致自然冷却机组。同时，关键技术的持续研究与创新将解决与优化不同产品存在的问题。如直膨多联系统泄漏检测、超长管路、闪蒸等问题。未来数据中心冷却技术将更多利用自然冷源，并通过定制化不断适配数据中心的发展与需求。

(3) 碳中和背景下澳蓝数据中心蒸发冷却技术发展路线

澳蓝集团聚焦数据中心能耗中的散热环节，从蒸发冷却入手，降低冷源能耗，从而达到提升制冷效率，降低碳排放的目的。常用的蒸发冷却技术包括：直接蒸发冷却（DEC）、蒸发冷凝、间接蒸发冷却（IDEC）。直接蒸发冷却降温效率可以高达95%，阻力不超过150 Pa，但缺点是会增加湿度。蒸发冷凝可有效提升制冷COP或热管效率，但同时增加成本，且对PUE贡献有限。间接蒸发冷却能等湿冷却，不会增加湿度，缺点是相较直接蒸发，阻力大5~6倍以上，单位风量降温的体积比直接蒸发大10倍以上。由此可见，单一方式的蒸发冷却都有着自身的局限性，为解决这个问题，澳蓝提出DEC+DX减碳方案与IDEC+DX两种减碳方案，DEC+DX系统包括蒸发冷却空调机组（过滤段、翅片式蒸发器（表冷段）、直接蒸发段、风机段等）、排风系统、精密空调和联动控制系统，并采用数据采集器及能耗采集平台实时采集和监控机房耗电量及运行数据。通过监测室内外温湿度，当检测到蒸发冷却系统无法满足室内温湿度要求时，就自动联动精密空调运行，从而达到DX联动的效果。

自2009年首台设备投入使用后，目前全国已有超过万台DEC+DX减碳系统，根据实测数据，如图3.5-8所示，7个典型城市冬季节能率均在80%以上。

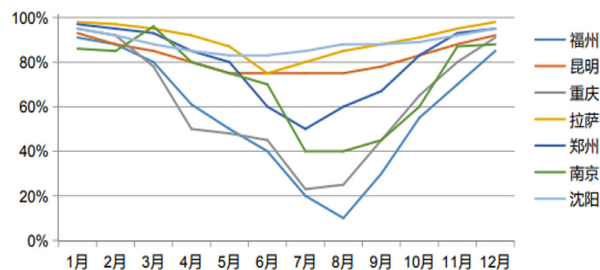


图3.5-8 典型城市DEC+DX减碳系统节能率

IDEC+DX系统包括间接蒸发冷却芯体及喷淋系统、制冷系统、送排风系统和智能控制系统；其中送排风机采用直流无刷EC无蜗壳风机墙；制冷系统采用部分变频或全变频压缩机；控制方面采用PLC控制；系统模式包括回风和新风节能模式，增大了温降，并将可利用的环境湿球温度提升至27℃。该方案全年绝大部分时间均可使用自然冷源，但总体节能率低于直接蒸发冷却+DX系统。

按三种蒸发冷却方案对五个气象分区的典型城市进行PUE模拟计算，如图3.5-9所示，对结果进行分下发现：1、直接蒸发冷却+DX方案最节能，PUE都能控制在1.25以下；2、间接蒸发+DX方案和冷水塔+冷水机+板换方案，严寒地区PUE贡献度相当，随着自然冷源利用时间减少，潮湿地区PUE值，风侧方案要好于水侧方案；3、除了夏热冬暖地区的水侧方案PUE达到1.3有难度外，其他地区三种方案都可以在1.3以下。

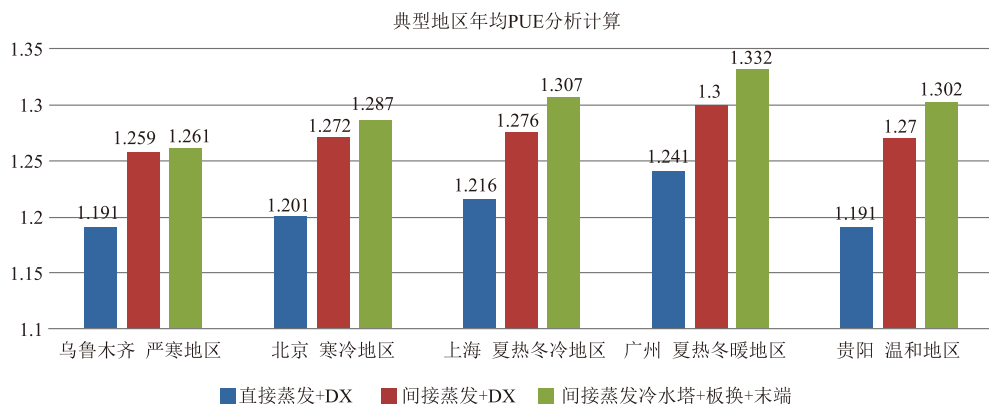


图3.5-9 典型地区年均PUE分析计算

部分领域制冷技术研究 及应用进展

3.6 汽车空调及能源管理



李安然 Li Anran

男，上海交通大学能源动力（低碳能源方向）专业硕士研究生，师从陈江平教授。



俞彬彬 Yu Binbin

男，上海交通大学博士后，曾获教育部博士生国家奖学金。研究方向包括新能源汽车热泵空调与热管理，低GWP制冷剂替代开发与应用，累计发表SCI论文二十余篇，申请发明专利十余项，谷歌学术被引600余次。



陈江平 Chen Jiangping

男，上海交通大学二级教授(长聘)，生物医学工程学院党委书记。主要从事微通道换热器技术，低温热泵和二氧化碳空调系统等研究，获国家科技进步二等奖1次，省部级科技进步一等奖2次，二等奖4次。

新能源汽车是实现双碳目标的有效手段之一。根据国际能源署（IEA）公布的《世界能源展望》研究表明，到2040年时3亿辆上路的电动轿车每天可替代300万桶的石油需求^[1]，并且届时中国的石油需求量可因此削减250万桶/天^[2]。根据严君华等^[3]基于生命周期评价方法，对电动汽车能耗与气体排放的分析，在全生命周期内纯电动汽车的环境成本仅为燃油汽车的36.04%，所以发展电动汽车可以极大的减小环境污染物的排放，降低环境治理成本。因此，新能源驱动的技术转型战略成为中国“十三五”产业规划的重要目标之一^[4]。虽然电动汽车发展势头迅猛，但其本身的缺陷如冬季续航问题等也不可忽视。随着人们对汽车舒适性要求的提高，目前全球生产的汽车均已配备空调系统^[5]。汽车空调作为电动汽车上除电机外最大的耗能设施，其能源转换效率对电动车续航里程的影响十分巨大，新能源汽车热泵空调因此成为目前主流的技术解决方案。然而汽车空调行业仍面临较大的减排压力和环保问题，一方面是如何实现环保制冷剂替代以减少直接排放量的不确定性，另一方面是如何提高热泵能效、优化整车热管理及能量管理以减少间接排放的挑战。

首先，传统的R134a热泵系统性能会随着环境温度降低而剧烈的降低，且在全球范围内，由于R134a的温室效应指数极高，其GWP（Global Warming Potential）达到1430，对HFC类制冷剂的限制使现有汽车空调制冷剂R134a的替代形势迫在眉睫。按照一辆乘用车热管理系统充注R134a约0.7 kg计算，全国乘用车的当量碳含量约为2.8亿吨^[6]，因此新能源车辆采用CO₂、R290、HFOs等环保制冷剂进行替代具有重要减排意义。在此背景下，2021年9月15日中国正式宣布加入《基加利修正案》，制定了一系列政策加强氢氟碳化物等非二氧化碳温室气体管控，如表3.6-1所示。生态环境部、发展改革委、工业和信息化部联合发布了《关于严格控制第一批氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》，规定自2022年1月1日起，各地不得新建、扩建附件所列用作制冷剂、发泡剂等受控用途的氢氟碳化物化工生产设施。已建成的附件所列氢氟碳化物化工生产设施，需要进行改建或异地建设的，不得增加原有氢氟碳化物生产能力或新增附件所列氢氟碳化物产品种类。我国对氢氟碳化物类制冷剂的替代已势在必行。

表3.6-1 中国管控HFCs排放的政策与工作

时间	中国管控HFCs排放的政策与工作
2014	• 国务院发布《2014—2015年节能减排低碳发展行动方案》，提出加强对HFCs排放管理，加快销毁和替代。 • 国家发改委同有关部门开展控制氢氟碳化物的重点行动，下发《关于组织开展氢氟碳化物处置相关工作的通知》。
2015	《强化应对气候变化行动-中国国家自主贡献》，提出制定重点行业碳排放控制目标和行动方案，HFC-23排放到2020年得到有效控制。
2016	《“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出，氢氟碳化物等温室气体控排力度进一步加大。
2017	《工业企业污染治理设施污染物去除协同控制温室气体核算技术指南（试行）》发布，提出开展含氟气体统计调查能力建设培训。
2019	• 《消耗臭氧层物质进出口管理办法》发布修订稿。 • 《绿色高效制冷行动方案》发布，提出空调制冷设备具体能效提升目标；引导企业加快转换为采用低GWP制冷剂的空调生产线，加速淘汰HCFCs制冷剂，严控HFCs的使用。
2020	《消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管理条例（修订草案征求意见稿）》发布，环办便函[2020]145号，拟将HFCs纳入《条例》管控。
2021	中国政府接受《<关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书>基加利修正案》，该修正案将于2021年9月15日对中国生效。
2021.9.29	《中国受控消耗臭氧层物质清单》（2021年第44号公告），增补《基加利修正案》提出的受控物质，并注明其主要用途和削减义务；明确受控物质应包括该类物质的异构体，也包括运输或储存容器中的相应物质或混合物。
2021.10.25	《中国进出口受控消耗臭氧层物质名录》（2021年第50号公告）。自2021年11月1日起，我国正式开始对HFCs进出口贸易实行进出口许可证制度。
2021.12.27	《关于严格控制第一批氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》，自2022年1月1日起，各地不得新建、扩建附件所列用作制冷剂、发泡剂等受控用途的氢氟碳化物化工生产设施（不含副产设施），环境影响报告书（表）已通过审批的除外。已建成的附件所列氢氟碳化物化工生产设施，需要进行改建或异地建设的，不得增加原有氢氟碳化物生产能力或新增附件所列氢氟碳化物产品种类。

其次,随着我国新能源汽车产业的发展,汽车空调系统与车用驱动(发动机、电机以及电池)系统的供热与综合管理将进一步深度融合,热泵空调系统成为新能源汽车的技术方案,汽车空调企业也正在积极地研究和开发车用热泵空调相关的零部件与整车系统。新能源汽车热泵系统与传统内燃机汽车空调相比,在制冷、制热模式和主要部件方面都产生了较大变革,如图3.6-1所示。在能量管理方面,从传统燃油车到电动车,能源的使用也逐渐发生变化,尤其是整车热管理的重要性逐步增强,热管理单车价值量相比传统系统大幅提高,热系统成为保障电动汽车安全、缓解里程焦虑、保证电动汽车又快又好发展的关键。新能源汽车的热管理除了空调系统外,增加了电机电控冷却和电池温度控制两个系统,主要零部件增量为电动压缩机、高压PTC、水泵、管路等。新型新能源汽车构架下的整车热管理设计将空调、电池、驱动等各个系统之间的冷热管理联系进一步加强,形成整体热管理系统工程概念,热管理系统由空调系统、电机和电池及功率电子冷却系统连接构成,将多个换热器、电子控制阀、电子水泵和贮罐的复杂系统连接以满足空调和设备的冷却。此外,随着汽车向电动化和智能化方向发展,整车能量管理内容增多,对汽车综合能量管理的要求也越来越高,从整车层面对各子系统进行能量统筹管理已经成为电动汽车的未来发展趋势。

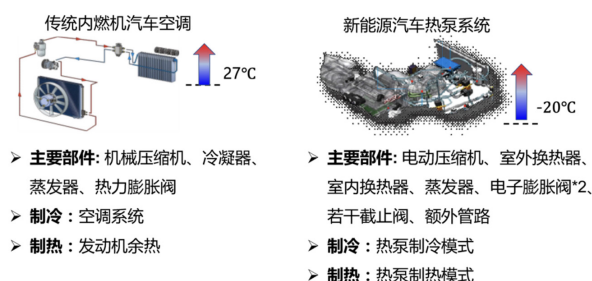


图3.6-1 传统内燃机汽车空调与新能源汽车热泵系统对比

3.6.1 研究进展

随着我国“双碳”目标的提出和《蒙特利尔议定书》基加利修正案的正式生效^[7],新能源汽车热泵的绿色高效发展成为必需的技术路线^[8]。汽车空调行业要想实现碳中和目标,一方面,迫切需要将目前广泛应用的HFC(hydrofluorocarbon)制冷剂R134a向低温室效应工质转换,减少直接排放;另一方面,

需要不断提高热泵能效以减少间接排放。

首先,制冷剂的替代可减少直接排放,汽车空调采用环保制冷剂进行替代具有重要减排意义,然而制冷剂行业减排路线的制定尚存在一系列问题,如新工质筛选难度大、新型制冷剂受知识产权制约严重以及新能源车热管理的热泵系统运行范围宽(-30~45℃)、切换模式多、系统集成度高和控制要求高等挑战。此外,传统燃油车的汽车空调制冷剂多采用R134a,但R134a热泵系统性能会随着环境温度降低而剧烈的降低,也给车用热泵系统的开发带来了挑战。Kwon等^[9]和Lee等^[10]的研究表明一套R134a的热泵系统在-20℃的环境下,不能给车厢提供足够的热量供给。因此,Zhang等^[11]提出了高效的R134a补气增焓热泵空调系统方案。根据他们的研究,R134a补气增焓系统可以在-20℃极低温环境下供给2097 W的热量,相较于传统R134a热泵系统提升57.7%,同时系统能效可以达到1.17。另外,为了达到《蒙特利尔议定书》基加利修正案的法规要求,由霍尼韦尔和杜邦公司联合推出的R1234yf,由于其热物理性质与R134a非常接近,只需要对现有系统进行一些微小调整便可正常运行。但是同R134a一样,R1234yf在低温下的制热效率也非常低,采用R1234yf的热泵空调系统并不能满足电动汽车的制热需求,因此全球各大汽车企业仍然需要寻找新的技术方案^[12]。CO₂作为一种天然工质,被认为是在汽车空调系统中极具希望及发展潜力的选择。Wang等^[13]通过实验研究了CO₂汽车热泵系统的制热性能,研究结果表明CO₂汽车热泵系统在-20℃的极低温环境,全新风的条件下可以供给3600 W的热量,同时系统效率可以达到3.1。但是,CO₂汽车空调系统的应用同时也存在一定的缺陷。多个学者的研究结果均表明在30℃以上的高温环境下,CO₂汽车空调系统的运行效率较低^[14-17]。Brown等基于半理论模型对CO₂汽车空调系统及R134a汽车空调系统性能进行了对比研究,研究结果表明CO₂汽车空调系统效率在32.2℃时相较R134a汽车空调系统衰减21%,在48.9℃时相较R134a汽车空调系统其衰减率达到了34%。同时,也表明CO₂汽车空调系统效率的衰减在更高温的环境下将变得更剧烈^[18]。CO₂汽车空调系统的另一个缺陷则是由于CO₂本身临界温度较低,这要求CO₂系统必须工作在跨临界循环,系统运行压力非常高,是现有R134a汽车空调系统运行压力的6~8倍^[19]。传统制

制冷剂在热泵系统遇到的一系列挑战如图3.6-2所示，这更加促进了新型制冷剂的开发和应用。

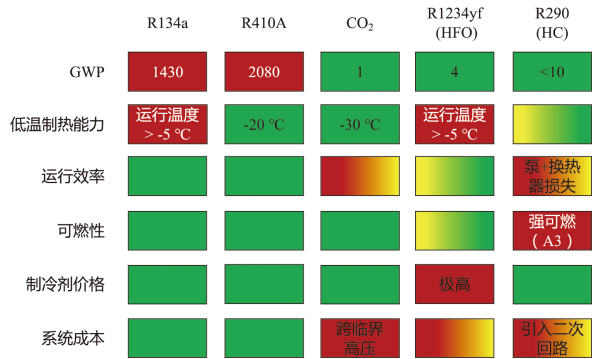


图3.6-2 车用热泵制冷剂的选择挑战

在新型车用制冷剂的开发上，国内外的厂商和高校进行了许多探索，如表3.6-2所示。大金研发出D1V140制冷剂（R1132-E/R1234yf为组合物），GWP<1，沸点-44.6 °C，同工况下，制冷/热量大于R134a和R1234yf（140%），COP与R1234yf相当；以及D2V-YF制冷剂，GWP<150，沸点-50 °C，制热量大于R1234yf（200%）且COP相当。AGC开发出HFO-1123组合物，对现有R1234yf系统仅做微小改变。科慕研发了H1G3热泵工质，GWP为148，相同制冷量下其制冷COP高于R1234yf和R744，且-30 °C制热性能优于R1234yf。霍尼韦尔的方案是R1234yf增强型热泵，其在寒冷工况需PTC加热。Koura基于YF工质研发新制冷剂，热物性与R407C接近，GWP<100，A2L，制冷量比R1234yf提升20%，-20 °C工况下的制热能力是R1234yf两倍，0 °C和10 °C制热量和COP优于R1234yf；此外LFR3是Koura基于R744混合工质研发的新型不可燃车用制冷剂，全温区制冷量和COP比R744提高10%~15%，压力降低20%，与CO₂相比对环境的影响更小。上海交大与中化蓝天共同研发了M2系列制冷剂，GWP为137，A2L，制冷/热量与R410A相当，COP略高。此外，无专利壁垒的天然工质正在被主机厂积极采用，如CO₂被大众、戴姆勒和奥迪采用，R290被上汽采用。

表3.6-2 新型低GWP车用制冷剂的研发进展

公司	替代制冷剂方案
大金	D1V140制冷剂（R1132-E/R1234yf为组合物），GWP<1，沸点-44.6 °C，同工况下，制冷/热量大于R134a和R1234yf（140%），COP与R1234yf相当

大金	D2V-YF，GWP<150，沸点-50 °C，制热量大于R1234yf（200%），COP相当
旭硝子	HFO-1123组合物，现有R1234yf系统仅做微小改变
科慕	H1G3热泵工质，GWP为148，相同制冷量下，其制冷COP高于R1234yf和R744；-30 °C制热性能优于R1234yf
霍尼韦尔	R1234yf增强型热泵，寒冷工况需PTC加热
Koura	基于yf工质，热物性与R407C接近，GWP<100，A2L，制冷量比R1234yf提升20%，-20 °C工况，制热能力是R1234yf两倍，0 °C和10 °C制热量和COP优于R1234yf
	LFR3：基于R744混合工质，不可燃，全温区制冷量和COP比R744提高10%~15%，压力降低20%，与CO ₂ 对比有更低的环境影响
中化蓝天&上海交大	M2系列，GWP约137，A2L，制冷/热量与R410A相当，COP略高，-30 °C运行
无专利壁垒	天然工质：CO ₂ （大众，戴姆勒，奥迪），R290（电装，上汽）

另外在能量管理方面，优化整车的能量管理、提高热泵能效等措施可以减少间接排放量。整车的能量管理可分为系统层的能量利用和热管理层的能量消耗。与传统燃油车不同，电动汽车的能源为电能，驱动单元为电机，热管理拓扑结构主要包括电池回路、电机回路、空调回路和暖风芯体回路等。新能源汽车的能量流如图3.6-3所示。其中空调系统主要是为乘员舱进行制冷、制热，另外在某些工况下通过冷却装置对电池回路进行冷却^[6]。在冬季寒冷环境的制热工况下，由于没有传统燃油车的发动机废热，暖风芯体若采用高压PTC进行加热，将直接消耗电能，造成新能源汽车冬季的续驶里程大幅度缩减，并且带来更多的间接碳排放。因此，由于热泵空调系统具有制热能效比高的特点，逐渐被广泛地应用于纯电动和插电式混合动力车型中，以缓解新能源汽车冬季续驶里程缩减的问题。新能源汽车的能量管理，是从整车层面对各子总成进行能量的综合优化利用，其对热管理系统设计的要求也逐渐由传统粗放型向精细化、集成化转变。优化整车能量管理需要对新能源车进行能量流的分析和优化，并建立新能源车能量流模型并采用实验数据对模型进行校准，实现新能源车各个负载的耗电情况可视化及续航里程分析。还要分析各个优化方案对系统性能及车辆续航里程贡献及评价，包括热泵空调

系统、电池热管理（保温）、余热回收、回风比例设定、热管理控制策略优化、局部控温等。另外上述的整车能量流系统也可以用于收集应用车型大数据，为新型电动汽车的开发，提供技术支持。



图3.6-3 新能源汽车能量流

再者，目前人们对于电动汽车热泵制冷剂环保特性的评价，还主要停留在GWP方面，对使用该制冷剂后系统性能的变化关注较少。因此，有必要采用全生命周期气候性能 (LCCP) 指标综合评估直接和间接两种影响，计算电动汽车热泵系统“从摇篮到坟墓”整个生命周期内产生的当量CO₂排放总量。区别于单一评价指标，LCCP可以综合考量制冷剂“环保”与其在系统中的“节能”效果，并综合评估两种影响。除直接排放部分外，LCCP还将间接排放部分计算在内，因此可以更精确有效地评估汽车空调、新型制冷剂的综合环保性能，并且能够评估不同系统、零部件和材料的环保差异。

上海交通大学团队为新能源汽车热泵系统开发一个全面的LCCP模型，通过对构成LCCP指标的每个模块进行详细分析，依据热泵系统台架实验数据、不同地域的气候条件、车辆行驶及热泵使用情况等信息，建立起一个适用于不同城市气候条件和行驶条件的LCCP模型，如图3.6-4所示。并利用LCCP模型对采用新型制冷剂的电动汽车热泵空调系统进行研究，比较系统的环境性能优劣，能够为选择新制冷剂技术的政策制定者提供决策依据。在整个热泵系统的使用寿命过程中，制冷剂及其在系统中应用所造成的等效二氧化碳排放总量EM_{total}，包括直接排放和间接排放，如公式3.6-1所示：

$$EM_{total} = DE + IE \quad (3.6-1)$$

其中，直接排放是基于制冷剂的GWP和排放到大气中的制冷剂质量进行计算，如公式3.6-2所示：

$$DE = (GWP + Adp.GWP) \times (RL_{reg} + RL_{irreg} + RL_{ser} + RL_{EOL}) \quad (3.6-2)$$

其中，Adp.GWP是用于评估制冷剂在大气中降解产物所造成的环境影响。RL_{reg}、RL_{irreg}、RL_{ser}、RL_{EOL}分别代表由于系统管路和连接处造成的常规制冷剂泄漏量，事故型非常规泄漏量，维修服务过程中造成的制冷剂泄漏量以及报废过程造成的二次泄漏量^[4]。

间接排放的计算公式如下：

$$IE = Mfg + EOL + OT + SO \quad (3.6-3)$$

其中，Mfg是指生产制冷剂和系统部件制造过程中造成的排放，包含了系统（部件）从工厂运输到组装工厂环节造成的排放；OT代表制冷系统运输过程中的当量CO₂排放；EOL是指制冷剂和系统部件报废处理及回收过程造成的当量CO₂排放；SO是指系统运行过程中造成的排放。考虑到Mfg和EOL排放和工业制造相关，汽车类型对其影响极少，因此采用已有方法对其进行计算^[4]。但是OT和SO的计算是区别于传统方法的，原因有以下几点：（1）电动汽车热泵系统是由电驱动的，因此，造成排放的主要原因是电消耗而非燃油消耗；（2）不同于皮带轮压缩机，其转速由内燃机决定，电动压缩机的转速是由车内空调负荷决定的；（3）由于不存在燃油燃烧造成的余热损失，在寒冷环境下，电动汽车空调系统向驾驶室供热需要消耗电力，这部分同样需要加入排放计算。

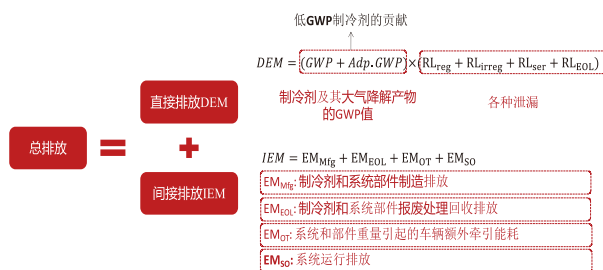


图3.6-4 LCCP的方法与模型

该研究评估了中国各省份2020—2060年使用各种低GWP制冷剂的新能源汽车热泵对环境的时空影响，结果表明低GWP制冷剂在不同气候区具有不同的减排潜力，即不同省份或气候区的新能源汽车全生命周期总排放与气候条件密切相关。其中CO₂/R41为混合工质，M2为上海交大与中化蓝天共同研发的新型工质，具体参数可见上文表3.6-2。值得一提的

是，直接排放取决于制冷剂的GWP并几乎不受气候影响，而间接排放受气候的影响显著。在间接排放中，生产制造和EOL处理仅占5%左右，而系统运行排放占85%。按照目前的技术路线，预计到2030年全国单辆车的平均生命周期排放量将减少14%，到2060年将减少45.4%。图3.6-5和图3.6-6即为该模型的结果分析，表明在研究涉及的5种低GWP制冷剂中，从国家层面看各制冷剂的减排潜力由高到低依次为R290>R1234yf>CO₂/R41>M2>CO₂。

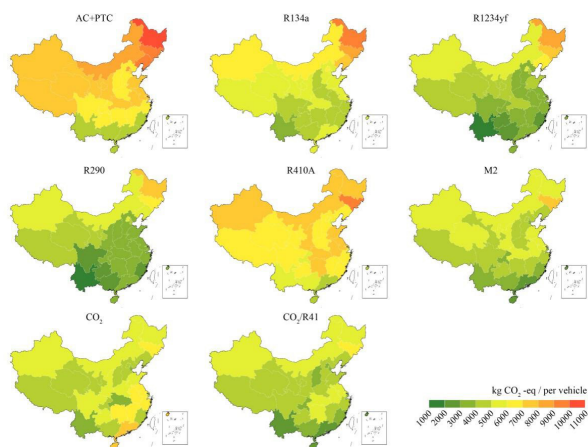


图3.6-5 单辆车不同制冷剂系统LCCP

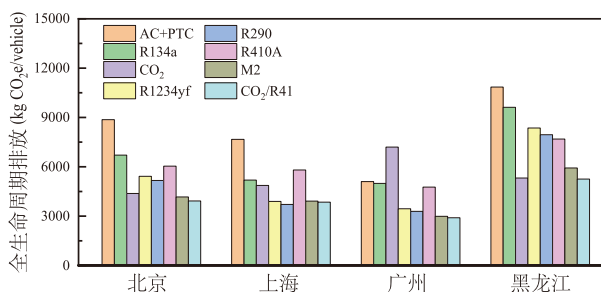


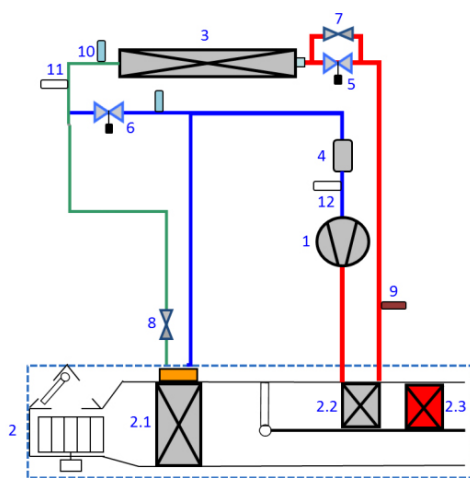
图3.6-6 LCCP模型下四个典型区域的碳排放

3.6.2 关键技术

针对新能源汽车的续航里程焦虑问题，为实现节能常用减少车内热负荷的方法，其一采用制热时内循环补偿，其二采用双层流空调箱设计^[20]，但仍不能解决空调制热功耗大问题。而利用热泵系统通过压缩机的驱动将环境中吸收的热量以及压缩机自身做功产生的热量转移到乘客舱内是非常有效的方法^[21-22]。这是由于相较于PTC加热器在工作时效率恒小于1，而正常工作的热泵系统效率恒大于1，因此制热效率的优势较为明显。如首款直接式热泵空调系统应用于尼桑LEAF车型，可实现环境温度0℃时，制热效率COP相对于电加热器提升至2.5，工作

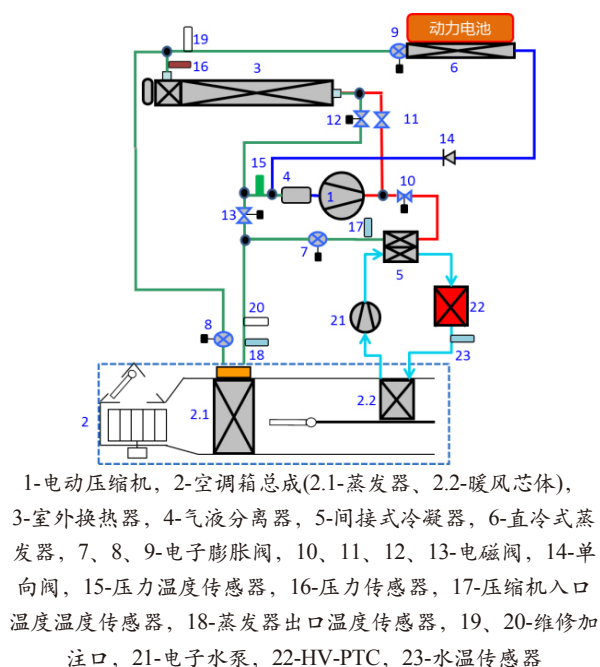
温度主要在0℃之上；之后宝马I3实现水侧间接式热泵空调系统，COP略低于空气侧热泵系统约为2。但是LEAF及I3热泵空调的主要适用是-5℃之上的环境温度。国内外专家基于实车测试机模拟分析指出，环境低于-5℃，热泵制热性能将大幅度下降^[22-23]，故目前已上市的汽车热泵系统工作温度很多都是在0℃附近。这是由于蒸发压力降低时，压缩机吸气的密度也会随之降低，从而导致系统中质量流量减小，制热性能衰减。同时，由于压缩机压比增大，压缩机容积效率下降，其系统的能效也会随之降低；且系统排气温度也会增加，影响系统工作的可靠性。若要提高系统在极端工况下的制热性能，必须解决以上问题。直接式与间接式热泵系统架构如图3.6-7所示。

为提升低温下热泵空调系统的性能，新的技术应用不断被尝试，比如双级压缩系统循环，压缩机前路旁通循环以及压缩机中间补气循环。第一种结构太过复杂，第二种系统制热性能及效率均低于压缩机中间补气循环^[22-23]。压缩机中间补气技术通过提高压缩机排气质量流量以及降低室外蒸发器前的焓值以提升系统制热性能^[24]。补气增焓技术是一种可以应对极端工况的系统形式^{[5][21-22]}。其核心是将中间压力的制冷剂气体引入压缩机的中间级，增加系统冷凝器流量的同时冷却了被压缩的气体，使得排气温度降低，在增加系统制热量的同时保障了系统的可靠性。



- 1-电动压缩机，2-空调箱总成(2.1-蒸发器、2.2-室内冷凝器、2.3-HV-PTC)，3-室外换热器，4-气液分离器，5-旁通阀，6-制热阀，7-制热节流短管，8-制冷节流短管，9-压力传感器，10-管路表面温度传感器，11、12-热泵系统维修加注口

(a) 直接式



(b) 间接式

图3.6-7 热泵系统架构

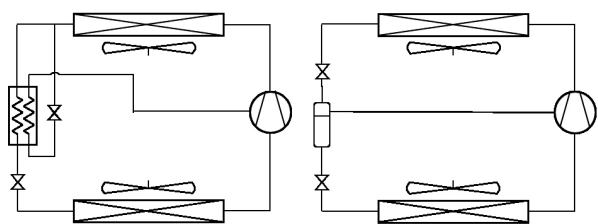


图3.6-8 经济器补气增焓系统（左）和闪蒸罐补气增焓系统（右）

从图3.6-8可以看出，两种补气增焓系统的主要差别在于中间级。在经济器补气增焓系统中，中间级的制冷剂由冷凝器后面分出，经节流后在经济器中过热，然后喷射到压缩机中间级中；而在闪蒸罐补气增焓系统中，由冷凝器流出的制冷剂首先经过第一级节流，然后在闪蒸罐中实现气液分离；气相进入压缩机中间级进行补气，液相经二次节流进入蒸发器进行蒸发。从性能角度而言，这两种系统形式的制热性能没有明显差距。有文献表明闪蒸罐系统的性能要稍微优于经济器系统^{[5][25]}，但该系统的控制逻辑非常复杂^{[5][27]}。经济器系统对于补气压力的调节范围和系统的控制成本都要优于闪蒸罐系统，因此得到了较为广泛的应用^[5]。国际上针对环境温度为-5℃的热泵系统技术已有储备，并应用于量产车上，针对更低温度的热泵系统的成熟应用仍在研究

开发阶段；国内在汽车热泵技术上储备较少，近两年随着电动汽车蓬勃发展，也带动热泵空调系统的研发投入。适应更低环境温度压缩机中间补气增焓回路的热泵系统，是未来纯电动汽车减少空调制热消耗的重要措施之一，同时对该技术的发展也会推动纯电动汽车国内外进一步开发适用于更低温度的热泵空调系统。基于新能源汽车热泵的功能需求，以及综合直接式热泵系统架构和间接式热泵系统架构回路的优缺点，上海交通大学开发的全功能热泵系统回路如图3.6-9所示。

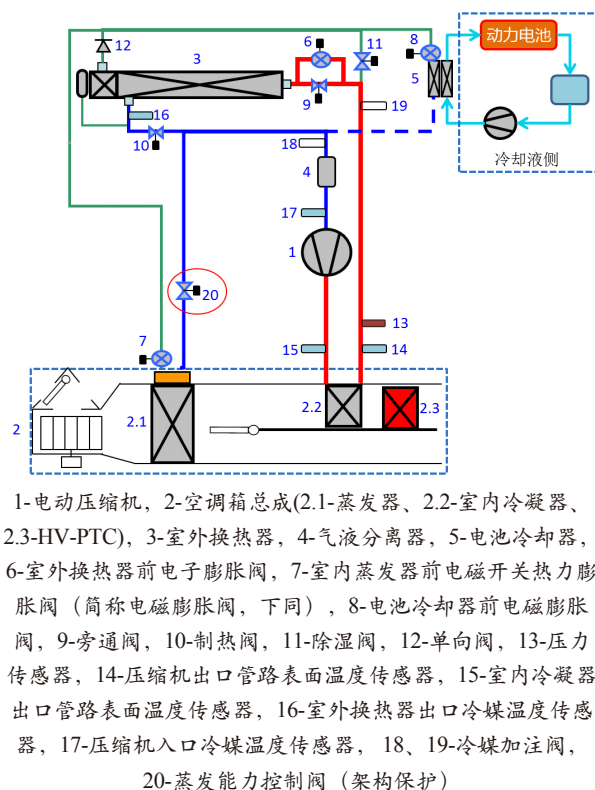


图3.6-9 全功能热泵系统架构设计示意图

另外，在产业界，我国新能源汽车主机厂及零部件供应商积极创新，技术方案紧追国外一线厂商，如表3.6-3所示。比亚迪的e平台3.0在热管理上采取了类似特斯拉集成化的阀岛方案，对冷媒回路进行了大规模集成，且采用集成的热泵技术，将驾驶舱制暖预热交给热泵电动空调系统以及来自“8合1”电驱电控系统的余热，取消对应PTC模组，动力电池低温需求则由热泵电空调支持，并由冷媒直接换热。华为的热管理系统TMS采用一体化设计，打通电驱、电池、乘员舱等领域，并降低热泵低压侧不可逆损失，可以实现热泵系统最低工作温度由业

界的-10℃降至-18℃，相比传统非热泵方案能效比提升至2，标定周期可缩短60%。蔚来2022款ES8取消了PTC的空调加热方式，使用了与ES6类似的热泵制热方式，利用电池、电机废热提供冬季空调系统，并使用四通阀链接空调回路、电池回路、电机回路，空调系统包含第一和第三通道，第二和第四通道分别串联至电池热管理和电机热管理系统，将

电池和电机废热提供给乘员舱以降低冬季耗电。小鹏P7的整车热管理系统采用一体化储液罐设计和单PTC加热方案，利用一个四通阀实现整车系统级的热循环，并将电机冷却水路与电池温控水路串接，使用电机余热加热电池，降低系统能量损失。小鹏P7整车热管理方案和比亚迪e平台3.0热管理方案实物图如图3.6-10所示。

表3.6-3 各主机厂热管理系统对比

主机厂	特斯拉	大众	比亚迪	蔚来	小鹏
车型	Model Y	ID4	海豚	ES8	P7
电池热管理	热泵系统+电机余热+电机/压缩机/鼓风机堵转低效制热	PTC+电机余热	热泵系统+低压PTC	独立电池热管理系统	PTC+电机余热
乘员舱热管理	热泵系统+低压PTC	PTC+CO ₂ 热泵	热泵系统+电机余热	热泵系统+电池电机余热	PTC

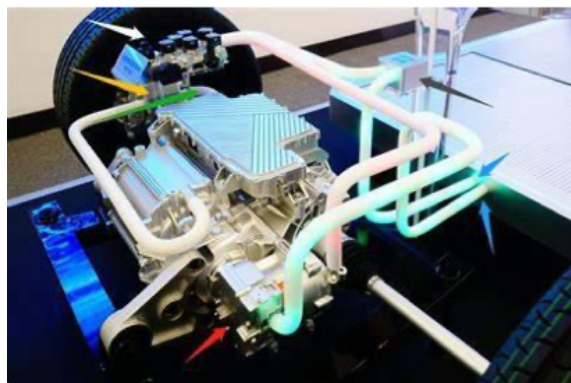
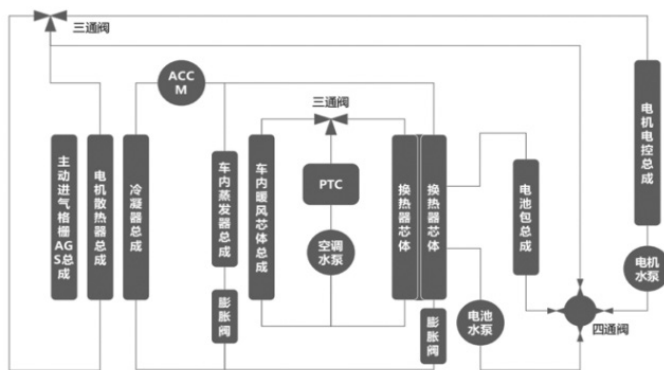


图3.6-10 小鹏P7整车热管理方案（左）和比亚迪e平台3.0热管理方案实物图（右）

汽车空调及整车热管理的零部件方面，三花智控深耕汽车热管理零部件的研发，积极布局新能源汽车领域所需的热管理部件及子系统更深层次的应用。截至2022年上半年，三花在建项目包括年产730万套新能源汽车热管理系统组件、年产150万套新能源热管理部件、年产400万套新能源汽车热泵部件以及年产1100万套新能源汽车用高效换热器等项目。美的威灵汽车部件去年宣布驱动系统、热管理系统和辅助/自动驾驶系统三大产品线全线投产，目前威灵热管理系统的产品包括R134a电动压缩机、CO₂电动压缩机、中功率电子水泵、大功率电子水泵等，热泵产品已经在小鹏汽车全线，蔚来ES6、ES8上使用。银轮股份的研发实力强劲，新能源汽车零部件技术储备完善，近年来致力于新能源汽车零部件方面的研究，实现了液冷板、泵阀类产品的生产，取

得了水路集成模块及系统集成和匹配技术的突破，实现了前端模块、冷媒冷却液集成模块、热泵空调箱总成模块的配套生产，拥有国内顶尖的热交换器批量化生产能力和系统化技术储备。三花与银轮的热管理汽零产品如图3.6-11所示。



(a)

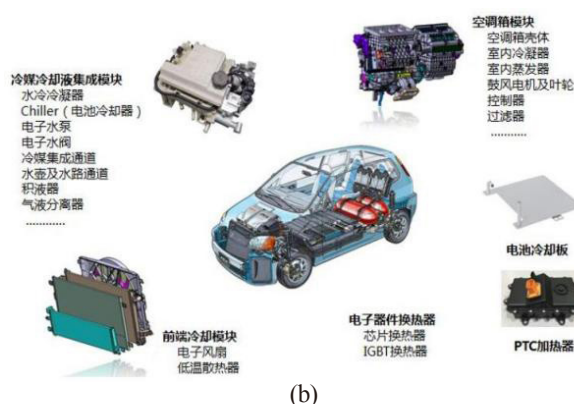


图3.6-11 三花的热管理汽车零部件产品 (a) 和银轮的汽车零部件产品 (b)

3.6.3 优秀案例

在新能源汽车热泵空调领域中，上海交通大学早在2003年即开始进行前瞻性布局并开展相关研究，目前已完成多个标杆项目，成为开发车用热泵

空调系统的优秀参考案例。图3.6-12介绍了CO₂车用热泵空调的研究历程，时间轴上方是国际上的研发进展，时间轴下方介绍了上海交通大学团队的进展及案例。上海交通大学在2003年与上汽集团合作开发了国内首台CO₂汽车空调系统，并在桑塔纳汽车实现了样车开发与测试，之后与长安汽车、上汽大众、一汽等制造商开发了针对整车的CO₂空调系统以及CO₂热泵空调系统，并于近期进行了ID4对标及面向量产的研发热域控制等相关研究。除了在乘用车领域外，CO₂热泵空调系统在客车空调领域、列车空调领域也备受关注。上海交通大学与宇通客车成功开发了国内首台CO₂热泵空调系统、与鼎汉技术开发了CO₂列车空调热泵系统，并成功出口德国。另外国内东风汽车集团、北汽新能源、蔚来汽车等在近几年也投入到开发CO₂热泵空调系统的工作中，先后开展了CO₂台架搭建和测试以及整车搭载和测试。



图3.6-12 CO₂热泵空调研发进展

此外，R290作为HFCs替代型制冷剂，其在传统家用空调中已经成为未来中国市场主要替代制冷剂选择之一。R290的ODP为0，GWP为3，完全满足各国法规的要求。同时R290的运行压力与R134a近似，现有部件的承压完全满足其运行要求。现有研究中针对R290易燃易爆的特性，构建基于载冷剂液体循环的二次回路系统，制冷剂回路完全处于乘员舱外的发动机箱中，是规避制冷剂安全风险的有效解决方案。还有研究表明，二次回路还具有降低系统充

注量，减少系统接头从而降低泄漏风险，实现系统集成化、小型化的优势，如电装、博泽、苹果等整车及零部件厂商已经开始进行相关的应用，部分厂商的二次回路空调系统结构如图3.6-13所示。但二次回路中由于中间载冷剂介质的引入，二次换热过程带来的性能衰减不可忽视，如图3.6-14所示。二次回路系统的能效提升仍是应用过程中的一大难题^[28-30]。

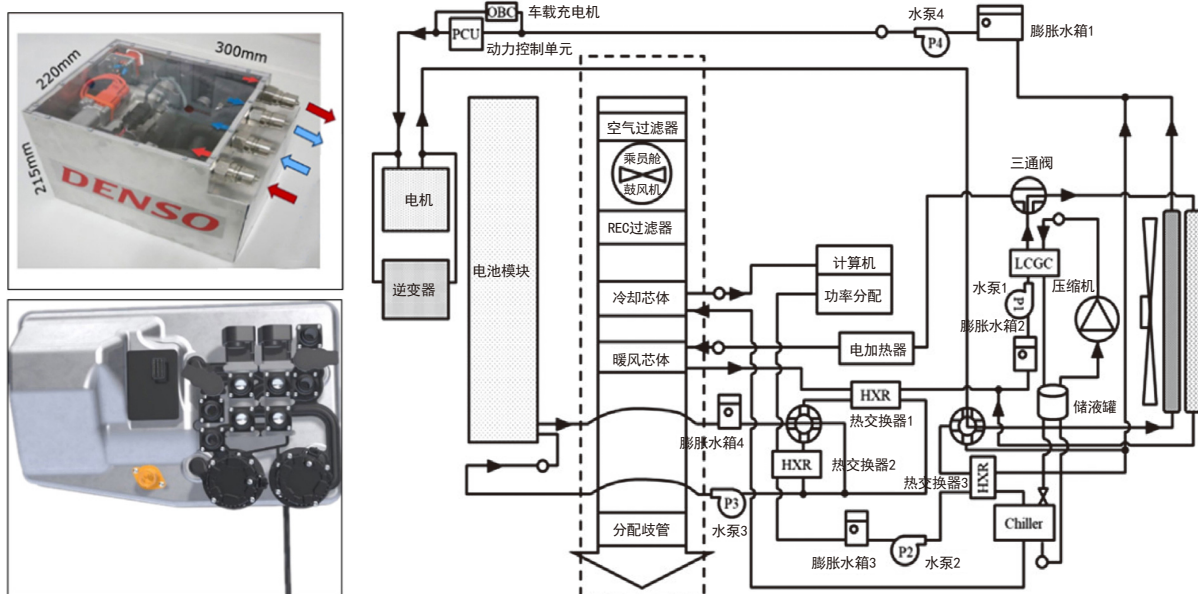


图3.6-13 部分厂商的二次回路空调系统结构

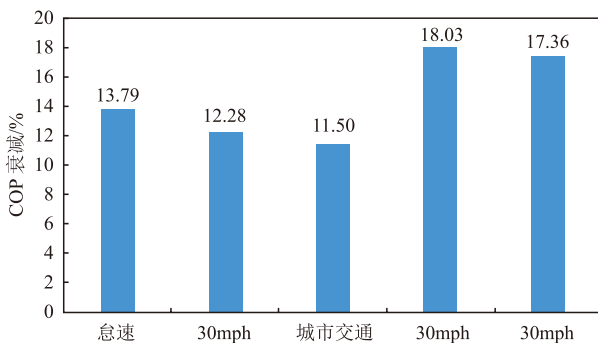


图3.6-14 不同车速下二次回路性能衰减

上海交通大学与上汽集团合作开发的R290二次回路电动汽车热泵系统，完成某车型R290二次回路系统实车改造及性能测试，完成制冷/制热性能测试，对比原车R134a系统，R290二次回路制冷性能与原车性能相当；制热性能提升明显，出风温度提升6℃以上，系统制热量提升1000 W，COP最高提升11%。目前，业界也已经广泛展开了基于二次回路的高效R290汽车空调系统设计，针对二次回路系统中的能效衰减问题进行研究，从两相流分析、换热器优化、系统架构设计等角度提出优化解决方案，可进一步的推动天然碳氢制冷剂R290在电动汽车热泵空调上的应用。

参考文献

[1] IEA, World Energy Outlook 2018. [2019-03-20]. <https://webstore.iea.org/download/summary/190?fileName>

=Chinese-WEO-2018-ES.pdf.

- [2] Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7666-7672.
- [3] LOHSE-BUSCH H.et al. Ambient Temperature (20° F, 72° F and 95° F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle[C]//2013.
- [4] SAMADANI E.et al. Evaluation of Air Conditioning Impact on the Electric Vehicle Range and Li-Ion Battery Life[C]//2014.
- [5] Direk M, Hosoz M, Yigit KS, Canakci M, Turkcan A, Alptekin E, et al. Experimental performance of an R134a automobile heat pump system coupled to the passenger compartment. In: World renewable energy congress, Sweden; 2011. 3605-12.
- [6] 胡志林, 张昶, 杨钊, 付磊. 基于整车能量管理的电动汽车热管理技术发展趋势[J]. 汽车文摘, 2019(05):1-5.
- [7] UNEP. Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Kigali, 15 October 2016. <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2016/CN.872.2016-Eng.pdf>.
- [8] Wang C F, Cao F, Li M J, et al. Research status and future development of thermal management system for new energy vehicles under the background of carbon neutrality (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4112-4128.
- [9] Kwon, C., Kim, M.S., Choi, Y., Kim, M.S., 2017. Performance evaluation of a vapor injection heat pump system for electric vehicles. International Journal of Refrigeration 74, 138-150.

- [10] Lee, D., 2015. Experimental study on the heat pump system using R134a refrigerant for zero-emission vehicles. *International Journal of Automotive Technology* 16, 923-928.
- [11] Zhang, Z., Li, W., Shi, J., Chen, J., 2016. A study on electric vehicle heat pump systems in cold climates. *Energies* 9 (12), 881.
- [12] SHIN Y. et al. Performance Characteristics of PTC Elements for an Electric Vehicle Heating System[J]. *Energies*, 2016, 9(10): 813.
- [13] Wang, D., Yu, B., Hu, J., Chen, L., Shi, J., Chen, J.P., 2018. Heating performance characteristics of CO₂ heat pump system for electrical vehicle in a cold climate. *International Journal of Refrigeration* 85, 27-41.
- [14] Kim, S.C., Won, J.P., Min, S.K., 2009. Effects of operating parameters on the performance of a CO₂ air conditioning system for vehicles. *Applied thermal engineering* 29(11-12): 2408-2416.
- [15] Liu, H., Chen, J., Chen, Z, 2005. Experimental investigation of a CO₂ automotive air conditioner. *International Journal of Refrigeration* 28(8): 1293-1301.
- [16] Martin, K., Lang, G., Rieberer, R., 2005. Mobile HVAC-system with CO₂ as refrigerant - simulations and measurements.
- [17] Yin, J., Park, Y.C., Boewe, D., Mcenaney, R., Beaver, A., Bullard, C. W., et al., 1998. Experimental and model comparison of transcritical CO₂ versus R134a and R410A system performance. *Science Et Technique Du Froid*.
- [18] Brown, J.S., Yana-Motta, S.F., Domanski, P.A., 2002. Comparative analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO₂ and R134a. *International Journal of Refrigeration* 25(1): 19-32.
- [19] Baek, C., Heo, J., Jung, J., Cho, H., Kim, Y., 2013. Optimal control of the gas-cooler pressure of a CO₂ heat pump using EEV opening and outdoor fan speed in the cooling mode. *International Journal of Refrigeration* 36:1276-1284.
- [20] Hagiwara, Y., Ito, K., Sakai, M. and Ioi, N., Feature and trend of an air-conditioning system for Electric Vehicles, Dec. 2011, DENSO Technical Review vol. 16, pp. 83-89
- [21] Hosoz M, Direk M. Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system. *Energy Convers Manage* 2006;47:545-59.
- [22] Xie Z. Research of electrical vehicle heat pump air conditioner and its automatic control. Shanghai Jiaotong University; 2006,37(7): 182-193.
- [23] Zou, H., Huang, G., Shao, S., Zhang, X., et al., 2017. Experimental study on heating performance of an R1234yf heat pump system for electric cars. *Energy procedia* 142, 1015-1021.
- [24] MA G-Y, ZHAO H-X. Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(5): 697-701.
- [25] XU X. Investigation of vapor injection heat pump system with a flash tank utilizing R410A and low-GWP refrigerant R32[D]. College Park, MD 20742-7011 (301)314-1328.: University of Maryland, 2012, 43(12): 67-71.
- [26] YUNHO HWANG et al. Control Strategy of Vapor Injection Cycle[C]//University of Maryland, College Park 3163 Glenn L. Martin Hall Bldg., MD 20742, USA: 2010: 1066.
- [27] XU X et al. Transient and steady-state experimental investigation of flash tank vapor injection heat pump cycle control strategy[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(8): 1922-1933.
- [28] Ghodbane, M., 1999. An investigation of R152a and hydrocarbon refrigerants in mobile air conditioning. In: *International Congress and Exposition, SAE Paper* 1999-01-0874, Warrendale, PA.
- [29] Ghodbane, M., Craig, T.D., Baker, J.A., 2007. Demonstration of an Energy-Efficient Secondary Loop HFC-152a Mobile Air Conditioning System. Delphi Thermal System Division Delphi Corporation for U.S. Environmental Protection Agency. December 17.
- [30] Li G, Eisele M, Lee H, et al. Experimental investigation of energy and exergy performance of secondary loop automotive air-conditioning systems using low-GWP (global warming potential) refrigerants[J]. *Energy*, 2014, 68: 819-831.

部分领域制冷技术研究 及应用进展

3.7 储能



吴玉庭 Wu Yuting

北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室主任，主要研究方向为传热储热、热泵制冷与有机朗肯循环、压缩机膨胀机、太阳能地热能利用等。近五年来发表学术论文300余篇，获得授权发明专利45项。先后完成国家重点研发计划项目、国家973计划课题等国家和省部级重点项目10余项，科研经费合计人民币4000多万元。



李 传 Li Chuan

工学博士，主要研究方向为热能存储和清洁能源高效转化利用。近五年来发表学术论文80余篇，英文专著（章节）1部，国内外专利5项。先后完成和参与全球能源互联网和英国工程与自然科学研究委员会相关储能项目10余项，合计人民币2000多万元。



鹿院卫 Lu Yuanwei

北京工业大学教授，博士生导师。主要研究方向为中高温熔盐储热及其应用研究。先后完成包括国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目及企业委托项目10余项，发表学术论文200余篇，申请专利40余项。



张灿灿 Zhang Cancan

北京工业大学校聘教授，博士生导师，美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校（UIUC）访问学者。主持国家重点研发计划子课题，国家自然科学基金等10余项。发表学术论文50余篇，其中SCI收录35篇，授权专利10余项，起草及参与国家标准2项，参与团体行业标准3项，Energy Storage and Saving (ENSS)、Carbon Neutrality 国际期刊青年编委，获得河南省科技进步二等奖，中国宝钢教育奖。

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。储热（冷）主要包括显热储热（冷）、相变储热（冷）和热化学反应储热（冷）。

要实现我国高比例可再生能源，2030年达到碳排放高峰和2060年达到碳中和的目标，必须在发电侧、电网和需求侧配备足够容量的储能装置。抽水储能电站由于具有低成本高效率的优势，是目前最主要的电网储能技术。但抽水储能由于需要特殊的地形条件，因此在我国可实现的最大容量不会超过1亿千瓦。而我国高比例可再生能源目标的实现需要数亿千瓦的储能电站，缺口很大，因此迫切需要发展各种低成本大容量储能技术。储热储冷是一种低成本、大容量和长寿命的储能技术，目前已在太阳能热发电、供热供冷用户侧、火电厂灵活性改造中实现了大容量的配备和应用，在实现高比例可再生能源接入、2030年达到碳排放高峰和2060年达到碳中和的目标实现中具有不可替代的作用。

2022年，我国学者在储热储冷材料制备及性能调控、装置设计与性能优化、系统集成应用等方面，取得了重要进展。热能储存聚焦在对熔盐储热、相变储热和热化学储热三大技术的研究上；而对冷能储存的研究，则主要聚焦于冰/冰浆储冷和相变储冷技术。

3.7.1 研究进展

在储热材料物性调控及其机理方面，形成从量子力学到牛顿力学，从纳米尺度到宏观的多尺度研究手段。基于第一性原理对物质电子和晶格的热运动规律进行研究，得到材料物性的调控方法；采用分子动力学对物质原子体系行为进行研究，得到物质的微观热物性机理，尤其是揭示了热化学储热的核壳结构^[1]。在温度对能垒的作用，材料原子间相互作用，热作用下晶格振动和电子运动规律等的研究方面取得了较大进展。研究了新工质和维持多孔物理吸附材料反应活性和吸附循环热稳定性的方法；利用相图理论发展了低熔点高分解温度混合熔盐的

设计方法^[2]。

在熔盐材料腐蚀特性方面，北京工业大学吴玉庭团队先后开展了硝酸盐和氯化盐对奥氏体不锈钢（304和316L）的动态和静态腐蚀特性和机理的研究^[3-7]；中山大学丁静团队对氯化熔盐中铬的价态对镍基合金的腐蚀性进行研究^[8-9]。

储热换热特性与机理方面，在相变材料中添加一维到三维的纳米尺度高导热材料，形成热输运通道，增加声子传输能力。开展了利用莫里定律的仿生储热换热研究^[10]；基于拓扑优化方法获得储热换热器新结构^[11]；对 Al_2O_3 、CNT、Mg纳米颗粒与硝酸盐、碳酸盐、氯化盐体系间的热导率提升机制进行研究，得出了纳米颗粒卷曲度和纵横尺寸比对熔盐体系热导率的影响机理^[12-14]；对 SiO_2 纳米颗粒电子和晶格的热运动规律进行研究，得出了纳米颗粒表面电荷是熔盐体系比热容提升的主要诱因^[15]；开展热作用下 SiO_2 原子间相互作用和晶格振动的研究，获得纳米太阳盐体系的最佳配比关系^[16]。Dong等^[17]采用火积耗散最小原理对熔盐-超临界换热器进行了分析和优化。Lin等^[18]研究了新型喷淋式填充床内渗流流动及储热特性；文献[19-21]研究了多种水合盐类、糖醇类和石蜡类储释热性能，并且开展多种复合强化、微胶囊化、翅片增强等方法研究；Chen等^[22]研究了相变材料储释热过程体积变化产生的缩孔缩松特征及其影响。Feng等^[23]在吸附式储热储冷、新工质和维持多孔物理吸附材料反应活性、吸附循环热稳定性等方面有较多研究。

3.7.2 关键技术

(1) 熔盐储热

北京工业大学吴玉庭、鹿院卫和张灿灿团队研制了不同温度段的系列混合熔盐配方：①熔点 $\leq 142^\circ C$ 、分解温度 $734^\circ C$ 的低熔点高分解温度混合熔盐；②熔点 $301^\circ C$ ，分解温度 $652^\circ C$ 的低成本高温混合熔盐；③熔点 $400^\circ C$ ，分解温度 $900^\circ C$ 左右的高温混合碳酸熔盐配方^[24]；④熔点 $117^\circ C$ ，分解温度 $576^\circ C$ ^[25]；⑤熔点 $83^\circ C$ ，分解温度 $625^\circ C$ ^[25-27]；⑥通过在上述混合熔盐中添加纳米二氧化硅粒子制成熔盐纳米流体，提高比热20%以上，提高受迫对流换热系数30%以上^[28-30]。Guo等^[31]研发了碱金属和碱土金属的氯化物熔盐体系，实现了 $700^\circ C$ 下氯化物熔盐对316不锈钢的腐蚀速率低于 $205.37 \mu m/年$ ；张灿灿等

^[32]实验研究了熔盐纳米流体在扭曲扁管内的对流换热系数,结果表明扭曲扁管内熔盐纳米流体的对流换热系数相比于圆管最高提升34.6%。鹿院卫等^[33-34]研制成功了能够稳定供热的浸没式换热器与隔板耦合单罐熔盐储热装置。Yao等^[35]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;Wang等^[36]实验研究了熔盐在卵石层通道内的对流换热特性;此外,研究者还对熔盐在直流套管和填充床等不同结构装置内的温度以及应力特性进行了研究^[37-38]。韩伟等^[39]对太阳能热发电站熔盐储罐首次充盐策略进行了研究;Zhang等^[40]对电磁感应熔盐电加热单元进行了数值模拟和试验研究;吴旺松等^[41]对熔盐罐体内加装电伴热装置时的熔化特性进行了研究;袁振国等^[42]对低熔点熔盐蓄热供热系统应用进行了分析研究;Wei等^[43-44]对火电厂熔盐储热深度调峰系统进行了模拟和优化。

熔盐储热是一种低成本大容量长寿命的长时储能技术,在光热发电、电/太阳能/余热加热熔盐储热供热供汽、火电厂深度调峰等方面都有重要的应用前景。本年度浙江省最大用户侧熔盐储能项目-绍兴绿电20 MW/240 MWh熔盐储能项目成功送电,发电量6500万kWh/年,年供蒸汽42万吨;江苏国信75MWh熔盐储热火电厂调峰供热和甘肃省金昌市600MW/3600MWh高温熔盐储能绿色调峰电站相继开建;中广核德令哈200万千瓦光热储一体化项目开工,项目总装机容量200万千瓦,其中光伏160万千瓦,光热熔盐储能40万千瓦;中国绿发新疆阜康鲁能100万千瓦绿色能源大基地项目开工,项目将建设10万千瓦光热熔盐电站;此外,截至2022年10月15日,我国正处于前期准备/可研/备案阶段的光热项目合计装机规模达2300MW,招投标项目规模1005MW。北方魏家峁电厂80MWh高温蒸汽熔盐储热工程、淮安150吨/h熔盐储热供热项目、郑州豫能热电熔盐储能灵活性改造项目、国神公司郭家湾电厂熔盐储能灵活性调峰改造项目、杭州医药港零碳电厂熔盐储能示范项目、浙江安吉天子湖热电有限公司熔盐储能零碳综合供能示范项目、山东泰安配套低熔点熔盐储热的350兆瓦盐穴压缩空气储能示范工程等熔盐储热工程也都启动招标。

(2) 相变储热

基于第一性原理分子动力学模拟,对高温相变熔盐材料进行定向设计;研发挤压成型法和冷烧结

法来分别对低温和中高温定型复合相变材料进行大规模和高效率制备;开发膨润土、埃洛石、树脂、氮化硼、炉渣回收物等新型骨架支撑介质,来制备定性复合相变材料^[45-47]。南京航空航天大学宣益民和刘向雷团队对仿生型复合相变材料开展了深入研究,先后以竹子和丝瓜为模板进行等级孔复合相变材料制备,所得复合材料有效热导率高达30~50 W/(m·K)^[48-49]。Wang等^[50]开展铝基金属相变胶囊的制备研究;Sheng等^[51]以铜为芯材和氧化铝为壁材,制备出可用于1000℃以上的高温金属相变胶囊材料。另外,文献还对带有杀菌和高效光热转化及磁力吸附的胶囊相变材料进行研究^[52-53]。在相变储热装置和单元研究方面,主要在相变材料侧和传热流体侧对装置性能进行强化,包括添加高热导纳米介质、引入新型(雪花、树杈、蜘蛛网)翅片结构和封装多级相变材料等手段进行性能优化^[54-56]。Li等^[57]基于拓扑优化设计手段,并结合金属3D打印技术,对比研究了一种拓扑结构翅片管壳式储热装置;Wang等^[58]报道研究一种仿生葫芦形胶囊作为储热单元,并对单元的储热强化性能进行试验和数值模拟研究,结果表明仿生胶囊单元的葫芦喉颈结构对相变材料的熔化过程有明显的促进作用;南京航空航天大学Tian等^[59]报道了一种仿线粒体型储热单元,其储热速率较传统胶囊单元可提高近50%。

基于相变储热技术的可再生能源消纳和供暖示范在本年度得到进一步发展,包括江苏金合能源公司等企业都已实现中高温复合相变材料规模化应用,在北京、河北先后建成一批基于相变储热技术的低碳清洁供热示范项目,代表工程包括在张家口建成冬奥会转播中心相变储热清洁供暖(8000m²)示范项目、国电投黄河公司海南州贵南源网荷储清洁供暖(16000kWh)示范项目、中国电建水电四局红原县城市相变储热供暖(26MW)示范项目。

(3) 热化学储热

对碱金属熔盐修饰MgO/MgCO₃体系^[60]、碳酸盐修饰CaO/CaCO₃体系^[61]以及氧化镁基硫酸钠复合熔盐材料修饰CaO/CaCO₃体系^[62]、金属颗粒修饰CoO/Co₃O₄体系^[63]的储放热性能展开研究,其中经碱金属修饰后的CaO/CaCO₃体系循环寿命可超100次;制备沸石骨架^[64]和改性石墨烯气凝胶复合材料^[65],来提高水合氯化盐储放热性能及循环寿命。研究生物炭基等级孔结构^[66]和共价有机框架^[67]对LiOH水合盐

材料进行包裹吸附,所制备复合材料储热密度可达1916kJ/kg;利用黑色 Ca_2MnO_4 ^[68]和改性氧化锌颗粒^[69]对 CaO/CaCO_3 体系进行修饰,实现太阳光热转化和热化学储热的一体化。基于有限元分析方法,Han等^[70]设计研究了一种分层分区固定床反应装置,用来提高钙基热化学反应体系的性能;Wang等^[71]对一种管壳式热化学装置的放热性能进行了实验和模拟研究;Shi等^[72]在固定床热化学反应器内填充一种仿生骨头多孔结构,实现热化学转换和储存效率近10%的提高;Ye等^[73]利用金属泡沫和增添水蒸气通道来提高填充床热化学反应器的储放热性能;Zhang等^[74]用金属网对填充床内热化学材料进行分区包装,将反应器的整体热效率提高近40%;Liu等^[75]研究单颗粒钙基材料在填充床反应器内的动态特性,建立了从单颗粒材料到装置整体性能的动态关联关系;另外,文献还对螺旋管型反应器^[76]、流化床反应器^[77]、波纹管反应器^[78]等热化学装置进行了研究。

当前热化学储热技术尚没有大规模商业应用,仍处于实验室研发阶段。北京热力集团联合北京科技大学开展了热化学储热技术的示范研究,以低谷电为加热热源,开发面向以建筑供暖为目的的中低温水合盐体系(氯化镁-水、碳酸钾-水、氧化铁-水、硫酸镁-水、氯化钙-水等),获得热化学储热系统的热吸收与传递规律,建成了200kWh的示范系统。

(4) 冰蓄冷

冰蓄冷技术发展至今主要经历了三个重要的发展阶段。首先是上个世纪80年代的冰球制冷方式,其次是90年代开始的盘管技术,2020年以后的第三代是冰浆的方式。采用负压闪蒸法制备了冰浆储冷乳液,并对其储冷性能进行研究^[79];研究颗粒熔化和微尺度对流对冰浆热导率的影响^[80];考察冰浆制备过程中微尺度气泡的形成对冰成核速率和过冷抑制的影响,以及制备一种壳聚糖冰浆乳液用于农产品的保鲜运输^[81];Gao等^[82]对添加有石墨烯纳米颗粒的冰浆乳液在水平圆管内的传热和流动性能进行研究。

中科院广州能源研究所从2006年开始了新一代蓄冷技术-冰浆蓄冷技术的研发。在科技部863计划以及广东省科技计划项目等的支持下,在国内率先研发成功了流态化冰浆蓄冷技术,并建设了多个示范工程,完成了技术验证^[83]。在此基础上,又提出了

基于流态冰的新型冰源热泵系统^[84],主要是在蒸发器中采用可控相变技术,实现了热泵系统连续提取水源凝固热的目的,解决了目前水源热泵存在进口水温下限高,显热的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^[85],在寒冷季节将低成本冷能进行回收,并在炎热季节将冷能利用的技术,全年可以大幅降低采暖供冷能量消耗。

在济南CBD地区建成集中冰蓄冷供冷系统,已覆盖约21万平方米的供冷面积;在深圳前海规划建设10个冰蓄冷供冷站、90公里市政供冷管网,供冷服务建筑面积1500万平方米,目前已有3个冷站投入运行,216万平方米建筑面积已使用集中供冷。海南三亚海棠湾区集中供冷项目已具备130万平方米的供冷能力;此外,在广州大学城和北京中关村也已开始使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采用了中央冰蓄冷冷站。深圳湾超级总部基地、广州金融城等不少地方也正在前期规划或建设集中供冷项目。

(5) 相变储冷

基于物理场干预(电场和磁场)手段,结合动力学刺激来引入异相成核点,降低成核位垒提高材料异相成核结晶概率,探究相变储冷材料过冷度调控机理^[86-87];采用金属纳米颗粒和陶瓷纳米颗粒作为成核剂和增稠剂来调节水溶液相变材料的过冷度和相分离^[88-89],以及用聚合物吸附和封装的方法来克服盐-水体系相变材料液相泄漏和对金属封装容器的高腐蚀性^[90];对非水相变材料,引入高导热的纳米颗粒和支撑材料来提高材料的热导率和防止液相泄漏^[91-92],并通过制备微纳胶囊和聚合物复合材料来降低过冷度和减弱材料潜热损失比例^[93-94];通过材料表面改性技术提高纳米颗粒和结构支撑材料与相变材料间的亲润性来避免纳米颗粒沉积和调节材料过冷度^[95]。Feng等^[96]基于水基改性膨胀石墨复合相变储冷材料,对一种带翅片的管壳式装置的储冷性能和储冷强化进行研究;Zheng等^[97]设计研究了一种板式相变储冷装置用于互联网数据中心冷却,并与传统水冷却方式进行对比;Liu等^[98]将复合盐水溶液相变材料用在智慧冷链物流领域,开发研究了系列的相变冰袋和冰盒,并配合GPS系统对整个冷链物流过程进行可视化监控。Dong等^[99]对一种可用于空调系统相变储冷球和填充床储冷装置的储放冷性能进行了

实验和模拟研究；Zheng等^[100]设计研究了一种基于相变微胶囊乳液的太阳能复合制冷储冷系统，发现采用相变胶囊后系统的储冷能力较纯水系统提高63%；Liu等^[101]研究一种相变温度为-30℃的相变储冷装置，并将其用于冷藏运输车的温度调控中，在外界温度为29℃的夏季环境中，该储冷装置可维持冷藏车中平均温度-15℃长达15 h。

中国中车集团研发的相变蓄冷式移动冷库已走向市场应用，冷库经过不到2 h的短时充冷，可保持低温5~12℃长达120h，目前相变蓄冷冷库技术已经横跨多个地区，实现了35000km的公路运行和1000km的铁路运行；将相变储冷技术与供热系统或建筑材料结合，使其成为建筑组成中的一部分，形成如内墙和楼板等建筑节能材料已经应用到我国南方部分省份；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，现也形成市场产品应用到食品、药品和航空冷链运输行业。

3.7.3 优秀案例

(1) 临城煤业熔盐储能供暖系统案例

① 总体情况介绍：冀中能源井陉矿业集团临城煤业项目采暖面积约18000m²（工矿企业老旧车间折算为普通建筑，供暖面积约40000m²），总投资508.8万元，采取集中蓄能分区供暖散热器对流采暖，采暖热指标60瓦/平方米，低谷电时段22:00—06:00共8个小时，谷电价格0.347元/千瓦时，为厂内8个建筑物分区供暖，利用原燃煤锅炉供暖系统及外线管道，不改变供暖方式及温度控制系统。本工程采用低熔点熔盐作为传热蓄热工质，利用8h的低谷时段电力，加热熔盐（熔盐的工作温度在200~500℃）进行储能。在冬季，熔盐储能系统可供建筑物全天24h采暖。根据建筑采暖设计热负荷，本系统蓄热能力16 h，总蓄热量17280kWh，熔盐用量200吨。

② 技术优势和技术特色：本项目采用了北京工业大学自主研发的谷电加热熔盐储热供热专利技术和低熔点二元熔盐技术，可实现供热的精准调控，具有储热密度大、熔点低、传热性能好、成本低等优势。

③ 运行情况。本系统在2017—2018年共计运行83天。供暖季电加热电费总计约90.3万元，非供暖季熔盐保温电费约为3.3万元，2018年运行费用约

为93.6万元，单位面积运行成本为52元/平方米，折算普通建筑单位面积运行成本为23.4元/平方米。本系统2018—2019年供暖季运行88天。供暖季熔盐加热电费为61.3万元；非供暖季熔盐保温电费为1.8万元；本年相关费用总计为63.1万元，单位运行成本为35.1元/平方米，折算普通建筑单位面积运行成本为15.8元/平方米。2019—2020年系统运行53天，受疫情影响年后未运行。熔盐加热电费约37万元，时间段内单位运行成本为20.6元/平方米，折算普通建筑单位面积运行成本为9.3元/平方米。

(2) 安徽合肥滨湖新区区域能源系统管网蓄冷案例

① 总体情况：滨湖新区区域能源站以地源热泵与管网蓄冷相结合的方式提供供能服务。该系统采用2台制冷量4000kW的地源离心制冷机组和8台制冷量1756.2kW的地源螺杆制冷机组。该区域能源项目的主管网单环总长度约9km，其管径为DN1100，埋深为2.6m，总水容量约为17106m³。能源站夏季供回水设计温度为5/12℃，整个供回水管网名义蓄冷量约为139MWh。

② 技术优势和技术特色：本项目利用管网中的水进行蓄冷，不需建设额外的冰蓄冷或水蓄冷设备，投资小，性价比高。

③ 运行情况：蓄冷策略供冷时，夜间蓄冷耗电量26.85MWh，白天07:00—09:00及12:00—17:00之间供冷耗电量为24.38MWh。09:00—12:00及17:00—22:00之间管网循环泵耗电量为2080kWh，当日耗电量合计为53.31MWh。非蓄冷策略供冷时，02:00—17:00之间的供冷耗电量为47.07MWh。17:00—22:00之间管网循环泵耗电量与蓄冷策略供冷时耗电量相等，均为1300kWh，当日耗电量合计48.37MWh。可得，蓄冷策略供冷较非蓄冷策略供冷耗电量多9.25%。由逐时电价及逐时耗电量可得，蓄冷策略供冷时运行成本为25268元，非蓄冷策略供冷时运行成本为30892元，蓄冷策略运行节费率可达22.26%。

(3) 相变蓄冷冷链集装箱案例

① 案例总体情况：集装箱采用国际标准（ISO）40英尺保温箱，外部尺寸（长×宽×高）为12.192m×2.43m×2.896m，其外壁为PU（聚氨酯）保温材料，平均厚度为100mm。单台集装箱内共安装10块蓄冷板，其中9块位于顶板，另一块位于前端墙上部。蓄冷板由铝合金材质的壳体和翅片管组

成, 嵌入的翅片管为充冷支路。蓄冷板的外部尺寸为1.8m (长度) × 1.0m (宽度) × 0.1m (高度), 每块蓄冷板填充相变材料为126kg, 填充完的单个蓄冷板总重为206kg。相变蓄冷材料为采购自德国 Rubitherm 公司的RT 5 HC, 其相变焓为220kJ/kg, 融化点为5℃, 热导率为0.2W/(m·K)。

②案例技术特色及技术优势: 本项目采用车载制冷设备和相变储冷技术相结合, 降低了集装箱的漏冷率, 减小车载制冷机的容量、尺寸和重量, 提高能量利用效率和降低温度波动, 具有明显的盈利潜力。此外, 较长的保冷时间使得蓄冷式集装箱能够灵活地在公路铁路等多种运输方式中转移, 增大了冷藏箱的适用性。

③运行情况: 运行区间为从昆明到成都(时间为2018年9月17日至21日), 箱内装有约10吨绿叶菜, 货物初始温度为8~10℃, 共550筐(规格为600mm × 400mm × 350mm); 实际运行距离874km, 历时14 h。集装箱运行14h后, 内部温度依然保持在12℃以下, 其内部湿度范围在85%~95%, 较高的相对湿度可以确保运送货物的质量。蓄冷箱充冷过程消耗总电量为32kWh, 电费为35.2元, 而同等条件下, 机械式冷藏箱使用车载柴油发电机驱动消耗量为6.6L, 费用为92.4元。由此可得, 蓄冷箱运行费用同比机械式冷藏箱下降了61.9%。

参考文献

- [1] 王琴, 徐会金, 韩兴超, 等. MgO/Mg(OH)₂热化学储热反应的第一性原理研究[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1242-1252.
- [2] 亢泽阳, 刘向阳, 何茂刚, 张颖. Li₂CO₃-Na₂CO₃-K₂CO₃相图的理论预测. 太阳能学报, 2022, 43(1): 284-287.
- [3] Qi Gao, Yuanwei Lu, Yanchun Yang, Yuting Wu, Cancan Zhang, Zhansheng Fan. Are unexpected chloride ions in molten salt really harmful to stainless steel? Journal of Energy Storage, 2022, 54: 105317.
- [4] Qi Gao, Yuanwei Lu, Qiang Yu, Yuting Wu, Cancan Zhang, Ruiping Zhi. High-temperature corrosion behaviour of austenitic stainless steel in quaternary nitrate molten salt nanofluids for concentrated solar power. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 245: 111851.
- [5] Lina Ma, Cancan Zhang*, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Effect of flow rate and SiO₂ nanoparticle on dynamic corrosion behavior of stainless steels in molten salt for thermal energy storage. Corrosion Science, 2022, 194: 109952.
- [6] Lina Ma, Cancan Zhang*, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Comparative review of different influence factors on molten salt corrosion characteristics for thermal energy storage. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2022, 235: 111485.
- [7] Xiaoming Zhang, Cancan Zhang*, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Experimental research of high temperature dynamic corrosion characteristic of stainless steels in nitrate eutectic molten salt. Solar Energy, 2020, 209: 618-627.
- [8] Zhihao Xu, Jianfeng Lu, Xiaolan Wei, Jing Ding, Weilong Wang. 2D and 3D cellular automate simulation on the corrosion behaviour of Ni-based alloy in ternary molten salt of NaCl-KCl-ZnCl₂. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 240: 111694.
- [9] Zhihao Xu, Bang Guang, Xiaolan Wei, Jianfeng Lu, Jing Ding, Weilong Wang. High-temperature corrosion behaviour of Inconel 625 alloy in a ternary molten salt of NaCl-KCl-MgCl₂ in air and N₂. Solar Energy, 2022, 238: 216-225.
- [10] TIAN Y, LIU X L, XU Q, et al. Bionic topology optimization of fins for rapid latent heat thermal energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117104.
- [11] YAO Q Y, ZHAO C Y, ZHAO Y, et al. Topology optimization for heat transfer enhancement in latent heat storage[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106578.
- [12] Lei Xian, Lei Chen, Heqing Tian, Wei-Quan Tao. Enhanced thermal energy storage performance of molten salt for the next generation concentrated solar power plants by SiO₂ nanoparticles: A molecular dynamics study. Applied Energy, 2022, 323: 119555.
- [13] Liu Cui, Qingsheng Yu, Gaosheng Wei, Xiaozhe Du. Mechanisms for thermal conduction in molten salt-based nanofluid. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122648.
- [14] Zhenzhou Rong, Jing Ding, Jianfeng Lu, Xiaolan Wei, Weilong Wang. Effect of metallic magnesium on enhanced specific heat capacity of chloride molten salts for solar thermal storage applications. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 239: 111658.
- [15] Fan Yuan, Ya-Ling He, Meng-Jie Li, Xiao-Yue Li. Study on the theoretical calculation method for the effective thermal conductivity of carbon nanotube composite molten salt for solar energy application. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 238: 111631.
- [16] H.R. Wen, S.C. Lin, C.Y. Zhao, E.L. Wang. Nanoparticle surface charge-enhanced heat capacity in molten salt phase change materials for thermal energy storage. Solar Energy

- Materials and Solar Cells, 2022, 243: 111795.
- [17] Xiaoming Dong, Cancan Zhang, Yuting Wu, Yuanwei Lu and Chongfang Ma. Thermodynamic analysis and optimization design of a molten salt supercritical CO₂ heat exchanger. Energies, 2022, 15: 7398.
- [18] LIN L, WANG L, LIN X P, et al. Experimental investigation on the distribution uniformity and pressure drop of perforated plate distributors for the innovative spray-type packed bed thermal storage[J]. Particuology, 2022, 61: 60-73.
- [19] DU P X, LIU C H, FANG B, et al. Experimental investigation on the stability and heat transfer enhancement of modified micro encapsulated phase change materials and latent functionally thermal fluids[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102846.
- [20] WANG G, DANNEMAND M, XU C, et al. Thermal characteristics of a long-term heat storage unit with sodium acetate trihydrate[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 187: 116563.
- [21] LIU Y H, WANG L, PENG L, et al. Effect of additives on the cyclic thermal stability and thermal properties of sodium acetate trihydrate as a phase change material: An experimental study[J]. Solar Energy, 2022, 231: 473-483.
- [22] CHEN L, WANG L, WANG Y F, et al. Influence of phase change material volume shrinkage on the cyclic process of thermal energy storage: A visualization study[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117776.
- [23] FENG C L, E J Q, HAN W, et al. Key technology and application analysis of zeolite adsorption for energy storage and heat-mass transfer process: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110954.
- [24] 吴玉庭, 明苏布道, 张灿灿, 鹿院卫. 三元混合碳酸熔盐热物性实验研究. 储能科学与技术, 2021, 10(4): 1292~1296
- [25] 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. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 435-439
- [26] Cancan Zhang, Yan Han, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Comparative study on high temperature thermal stability of quaternary nitrate-nitrite mixed salt and Solar salt. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 230: 111197.
- [27] Yan Han, Cancan Zhang, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Investigation on thermal performance of quaternary nitrate-nitrite mixed salt and solar salt under thermal shock condition. Renewable Energy, 2021, 175: 1041~1051.
- [28] YU Q, LU Y W, ZHANG X P, et al. Comprehensive thermal properties of molten salt nanocomposite materials base on mixed nitrate salts with SiO₂/TiO₂ nanoparticles for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 230: 111215.
- [29] Cancan Zhang, Songtao Han, Yuting Wu, Chunyu Zhang, Hang Guo. Investigation on convection heat transfer performance of quaternary mixed molten salt based nanofluids in smooth tube. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 177: 107534.
- [30] Xiaopan Zhang, Yuanwei Lu, Qiang Yu, Yuting Wu, Cancan Zhang. Study on preparation and thermophysical characteristics of molten salt nanocomposite by microwave method. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2021, 220: 110846.
- [31] GUO L L, LIU Q, YIN H Q, et al. Excellent corrosion resistance of 316 stainless steel in purified NaCl-MgCl₂ eutectic salt at high temperature[J]. Corrosion Science, 2020, 166: 108473.
- [32] 张灿灿, 韩松涛, 吴玉庭, 鹿院卫, 牛俊楠. 硝基熔盐纳米流体在扭曲扁管内流动与换热特性. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3641~3648
- [33] Cancan Zhang, Yuanwei Lu, Suli Shi, Yuting Wu. Comparative research of heat discharging characteristic of single tank molten salt thermal energy storage system. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 161: 106704.
- [34] 孔庆龙, 鹿院卫, 于强, 张灿灿, 吴玉庭. 熔盐单罐双盘管释热换热器布置方式优选. 太阳能学报, 2022, 43(8): 209-215.
- [35] Yecheng Yao, Jing Ding, Yuanyuan Zhang, Weilong Wang, Jianfeng Lu. Heat transfer performance of pillow plate heat exchanger with molten salt and supercritical carbon dioxide. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183: 122211.
- [36] S.W. Wang, C. Zhou, C.X. Cai, H.H. Zhu, N.X. Wang. Experimental research on convective heat transfer characteristics of molten salt in a pebble bed channel with internal heat source. Nuclear Engineering and Design, 2022, 387: 111619.
- [37] 马志远, 陈忠海, 潘柱, 陈吉. 直流套管式熔盐的传热研究. 河北建筑工程学院学报, 2022, 40(1): 127-131.
- [38] 杜保存, 黄丽娟, 雷勇刚, 宋翀芳, 王飞. 填充床熔盐蓄热器的动态温度与应力特性. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2141-2150.
- [39] 韩伟, 崔凯平, 刘欣, 韩振兴, Francisco Mangas. 太阳能热发电站熔盐储罐首次充盐策略研究. 太阳能学报, 2022, 43 (3): 282-287.
- [40] Cancan Zhang, Yuting Wu, Yuanwei Lu. Experimental and numerical study on induction heating performance of quaternary nitrate-nitrite molten salt. International Journal of Energy Research, 2021, 45(2): 2211-2221.
- [41] 吴旺松, 匡敬柱, 毛正江, 曾勇, 徐顺塔, 刘毫. 管内加装电伴热装置时熔盐熔化过程研究. 热力发电, 2022, 51

- (3): 79-87.
- [42] 袁振国. 新型低熔点熔盐蓄热供热系统应用分析. 能源与节能, 2022, (5): 187-191.
- [43] Haijiao Wei, Yuanwei Lu*, Yanchun Yang, Cancan Zhang, Cong He, Yuting Wu, Weidong Li, Dongming Zhao. Research on influence of steam extraction parameters and operation load on operational flexibility of coal-fired power plant. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117226.
- [44] WEI Haijiao, LU Yuanwei*, YANG Yanchun, ZHANG Cancan, WU Yuting, LI Weidong, ZHAO Dongming. Flexible Operation Mode of Coal-fired Power Unit Coupling with Heat Storage of Extracted Reheat Steam. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(2): 436-447.
- [45] Qi Li, Wenzhen Wei, Yuying Li, Chuan Li, Ruihuan Ge, Yanping Du, Xinjing Zhang, Yuting Wu. Development and investigation of form-stable quaternary nitrate salt based composite phase change material with extremely low melting temperature and large temperature range for low-mid thermal energy storage. *Energy Reports*, 2022, 8:1528-1537.
- [46] 徐众, 吴恩辉, 侯静, 李军, 黄平. 氮化硼/脂肪酸复合相变材料的形状稳定性和导热性分析. 包装工程, 2022, 43 (17): 20-28.
- [47] Chuan Li, Qi Li, Ruihuan Ge. Synthesis and investigation of form-stable myristic acid based composite phase change material containing styrene ethylene butylene styrene with enhanced properties for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104594.
- [48] Xianglei Liu, Meng Chen, Qiao Xu, Ke Gao, Chunzhuo Dang, Ping Li, Qingyang Luo, Hangbin Zheng, Chao Song, Yang Tian, Haichen Yao, Yi Jin, Yimin Xuan, Yulong Ding. Bamboo derived SiC ceramics-phase change composites for efficient, rapid, and compact solar thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 240: 111726.
- [49] Qiao Xu, Xianglei Liu, Qingyang Luo, Yang Tian, Chunzhuo Dang, Haichen Yao, Chao Song, Yimin Xuan, Junming Zhao, Yulong Ding. Loofah-derived eco-friendly SiC ceramic for high-performance sunlight capture, thermal transport, and energy storage. *Energy Storage Materials*, 2022, 45: 786-795.
- [50] Kaichen Wang, Tianying Zhang, Tieying Wang, Chao Xu, Feng Ye, Zhirong Liao. Microencapsulation of high temperature metallic phase change materials with SiCN shell. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 436: 135054.
- [51] Nan Sheng, Yunfei Ge, Yunqi Guo, Chunyun Zhu, Zhonghao Rao. Macro-encapsulated metallic phase change material over 1000 °C for high-temperature thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 239: 111655.
- [52] Meng Zhang, Haoshi Shen, Zhiqiang Qian, Huan Liu, Donglin Tian, Xiaodong Wang. Dual-purpose applications of magnetic phase-change microcapsules with crystalline-phase-tunable CaCO_3 shell for waste heat recovery and heavy metal ion removal. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105672.
- [53] Shuo Wang, Ke Lei, Zhiyuan Wang, Hao Wang, Deqiu Zou. Metal-based phase change material (PCM) microcapsules/nanocapsules: Fabrication, thermophysical characterization and application. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 438: 135559.
- [54] Fan Ren, Jun Du, Yufei Cai, Jing Guo, Yong Liu, Dongxing Zhang, Menghan Li. Study on thermal performance of a new optimized snowflake longitudinal fin in vertical latent heat storage. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104165.
- [55] Ruihuan Ge, Qi Li, Chuan Li, Qing Liu. Evaluation of different melting performance enhancement structures in a shell-and-tube latent heat thermal energy storage system. *Renewable Energy*, 2022, 187: 829-843.
- [56] Le-Li Wang, Liang-Bi Wang, Kun Zhang, Ye Wang, Weiwei Wang. Prediction of the main characteristics of the shell and tube bundle latent heat thermal energy storage unit using a shell and single-tube unit. *Applied Energy*, 2022, 323: 119633.
- [57] Chuan Li, Qi Li, Ruihuan Ge. Enhancement of melting performance in a shell and tube thermal energy storage device under different structures and materials. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214: 118701.
- [58] Fuqiang Wang, Guoliang Zhang, Xuhang Shi, Yan Dong, Yimeng Xun, Aoyu Zhang. Biomimetically calabash-inspired phase change material capsule: Experimental and numerical analysis on thermal performance and flow characteristics. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104859.
- [59] Yang Tian, Xianglei Liu, Hangbin Zheng, Qiao Xu, Zhonghui Zhu, Qingyang Luo, Chao Song, Ke Gao, Haichen Yao, Chunzhuo Dang, Yimin Xuan. Artificial mitochondrion for fast latent heat storage: Experimental study and lattice Boltzmann simulation. *Energy*, 2022, 245: 123296.
- [60] 郭亚飞, 吴佳毅, 檀畅, 郑宇航, 张李纪, 赵传文. 碱金属熔盐修饰MgO对其储热性能的影响研究. 电力科技与环保, 2022, 38(3): 157-165.
- [61] Rui Han, Shuang Xing, Xueqian Wu, Caihong Pang, Shuangchun Lu, Yun Su, Qingling Liu, Chunfeng Song, Jihui Gao. Relevant influence of alkali carbonate doping on the thermochemical energy storage of Ca-based natural minerals during CaO/CaCO_3 cycles. *Renewable Energy*, 2022, 181: 267-277.

- [62] Zhiwei Ge, Feng Jiang, Qicheng Chen, Liang Wang, Yulong Ding, Haisheng Chen, The role of MgO supported sodium sulfate molten salt for calcium looping thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 444: 136353.
- [63] Lei Liu, Zijian Zhou, Xiangkun Elvis Cao, Yue Zhou, Dejun Peng, Ying Liu, Xiaowei Liu, Minghou Xu. Screening of optimal dopants on cobalt-based ceramics for high-temperature thermochemical energy storage. *Ceramic International*, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.201>.
- [64] Wenjie Ji, Heng Zhang, Shuli Liu, Zhihao Wang, Shihan Deng. An experimental study on the binary hydrated salt composite zeolite for improving thermochemical energy storage performance. *Renewable Energy* 2022, 194: 1163-1173.
- [65] Hong Zhou, Dong Zhang. Investigation on PH/temperature-manipulated hydrothermally reduced graphene oxide aerogel impregnated with MgCl₂ hydrates for low-temperature thermochemical heat storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 241: 111740.
- [66] Xiangyu Yang, Shijie Li, Jianguo Zhao, Xiaomin Wang, Hongyu Huang, Yongzhen Wang. Construction of biomass waste derived hierarchical porous biochar framework based lithium hydroxide composites for highly efficient and durable low temperature thermochemical heat storage. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 359: 132047.
- [67] Xiangyu Yang, Shijie Li, Jianguo Zhao, Hongyu Huang, Lisheng Deng. Development of covalent-organic frameworks derived hierarchical porous hollow carbon spheres based LiOH composites for thermochemical heat storage. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 73: 301-310.
- [68] Yingchao Hu, Weizhen He, Jixue Cao, Guang Cheng, Ruicheng Fu, Long Huang. Decorating CaO with dark Ca₂MnO₄ for direct solar thermal conversion and stable thermochemical energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 248: 111977.
- [69] Qibin Zhu, Yimin Xuan, Xianglei Liu. Enhancing direct solar thermochemical performance of modified CaCO₃ with thermal transport networks composed of tetrapod-shaped ZnO whiskers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 248: 111981.
- [70] X.C. Han, H.J. Xu, C.Y. Zhao. Design and performance evaluation of multi-layered reactor for calcium-based thermochemical heat storage with multi-physics coupling. *Renewable Energy*, 2022, 195: 1324-1340.
- [71] Chengcheng Wang, Hui Yang, Binjian Nie, Boyang Zou, Zhongbo Li, Jingxiao Han, Lige Tong, Li Wang, Yulong Ding. Discharging behavior of a shell-and-tube based thermochemical reactor for thermal energy storage: Modelling and experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122160.
- [72] Xuhang Shi, Fuqiang Wang, Bachirou Guene Lougou, Hao Zhang, Xiudong Wei, Dong Li, Jie Xu. Experimental and numerical study regarding the biomimetic bone porous structure to match energy and mass flow in a solar thermochemical reactor. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105645.
- [73] H. Ye, Y.B. Tao, Z.H. Wu. Performance improvement of packed bed thermochemical heat storage by enhancing heat transfer and vapor transmission. *Applied Energy*, 2022, 326: 119946.
- [74] Heng Zhang, Shuli Liu, Ashish Shukla, Yuliang Zou, Xiaojing Han, Yongliang Shen, Liu Yang, Pengwei Zhang, Kanzumba Kusakana. Thermal performance study of thermochemical reactor using net-packed method. *Renewable Energy*, 2022, 182: 483-493.
- [75] Jingrui Liu, Yimin Xuan, Liang Teng, Qibin Zhu, Xianglei Liu, Yulong Ding. Solar-driven calcination study of a calcium-based single particle for thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138140.
- [76] Xiaoyi Chen, Xiaogang Jin, Zhihao Zhang, Danyang Song, Xiang Ling, Yan Wang, Liujuan Zhu. Experimental investigation of CaCO₃/CaO in a spiral coil reactor for thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 1319701.
- [77] J. Yan, B.W. Yang, C.Y. Zhao. Investigation of hydration/dehydration processes in a fluidized bed reactor using MgO/Mg(OH)₂ thermochemical energy storage system. *Solar Energy*, 2022, 231: 630-645.
- [78] Wei Li, Lianjie Zhang, Jiri Jaromir Klemes, Qiuwang Wang, Min Zeng. Thermochemical energy conversion behaviour in the corrugated heat storage unit with porous metal support. *Energy*, 2022, 259: 124966.
- [79] Shaolei Gai, Zhengbiao Peng, Behdad Moghtaderi, Jianglong Yu, Elham Doroodchi. LBM study of ice nucleation induced by the collapse of cavitation bubbles. *Computers and Fluids*, 2022, 246: 105616.
- [80] Sijia Qin, Yuankai Jin, Fuxing Yin, Zuankai Wang, Guoying Bai. Can solid surface energy be a predictor of ice nucleation ability? *Applied Surface Science*, 2022, 602: 154193.
- [81] Yuyun Lv, Xuelai Zhang, Jun Ji, Lingeng Zou. Preparation and experimental study of emulsion ice slurry under vacuum flash evaporation in solid adsorption. *International Journal of Refrigeration* 2022, 144: 55~64.
- [82] Yuguo Gao, Yilin Ning, Minghan Xu, Chengzhen Wu, Arun S. Mujumdar, Agus P. Sasmito. Numerical

- p>investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: Heat transfer and fluid flow characteristics.
- International Communications in Heat and Mass Transfer*
- , 2022, 134: 106022.
- [83] 宋文吉, 冯自平, 肖睿. 冰浆技术及其应用进展. *新能源进展*, 2019, 7(2): 129~141
- [84] 王瑛滢, 傅德坤, 陈明彪, 宋文吉, 冯自平. 冬冷地区冰源热泵系统清洁供暖的经济性. *储能科学与技术*, 2021, 10(4):1380-1387.
- [85] 陈明彪, 宋文吉, 王瑛滢, 傅德坤, 冯自平. 跨季节蓄冷特性与系统设计优化. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 1-7.
- [86] Liping Wang, Fuxin Wang, Chenlv Lu, Hong Liu. Nucleation in supercooled water triggered by mechanical impact: Experimental and theoretical analyses. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104755.
- [87] Mingrui Wei, Shuwen Yang, Hongling Ju, Guanlun Guo. Molecular dynamics simulation on micro-explosion of water-in-oil droplets in presence of solid particles or electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 196: 123263.
- [88] Kunlin Ma, Xuelai Zhang, Jun Ji, Lu Han. Development, characterization and modification of mannitol-water based nanocomposite phase change materials for cold storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 650: 129571.
- [89] Xinyu Zhai, Jinghang Wang, Xinwen Zhang, Hao Peng. Polyurethane foam based composite phase change microcapsules with reinforced thermal conductivity for cold energy storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 652: 129875.
- [90] Yue Pu, Jian Fang, Yifei Du. Preparation and characterization of reusable water/ethylcellulose phase change cold storage microcapsules with high latent heat. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 633: 127833.
- [91] Yanghui Chang, Zhigao Sun. Synthesis and thermal properties of n-tetradecane phase change microcapsules for cold storage. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104959.
- [92] Huifan Zheng, Guoji Tian, Yahui Zhao, Xin Xin, Chenwei Yang, Luhan Cao, Yuanqing Ma. Experimental study on the preparation and cool storage performance of a phase change micro-capsule cold storage material. *Energy and Buildings*, 2022, 262: 111999.
- [93] Niangzhi Lin, Chuanchang Li, Dongyao Zhang, Yaxi Li, Jian Chen. Emerging phase change cold storage materials derived from sodium sulfate decahydrate. *Energy*, 2022, 245: 123294.
- [94] Xiaohong Guo, Qianting Liu, Jiaming Du, Yidan Guo, Zhenlai Xiao, Liping Kou. Cold storage agent as a treatment to maintain quality of peanut sprouts in logistics. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022, 9: 100317.
- [95] Jinghang Wang, Xinyu Zhai, Zunrui Zhong, Xinwen Zhang, Hao Peng. Nanoencapsulated n-tetradecane phase change materials with melamine-urea-formaldehyde-TiO₂ hybrid shell for cold energy storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 636 (2022) 128162.
- [96] Jinxin Feng, Ziye Ling, Jiangchang Huang, Xiaoming Fang, Zhengguo Zhang. Experimental research and numerical simulation of the thermal performance of a tube-fin cold energy storage unit using water/modified expanded graphite as the phase change material. *Energy Storage and Saving* 1 (2022) 71-79.
- [97] Ziao Zheng, Bin Huang, Gaofeng Lu, Xiaoqiang Zhai. Design and optimization of an air-based phase change cold storage unit through cascaded construction for emergency cooling in IDC. *Energy*, 2022, 241: 122897.
- [98] Kai Liu, Zhifeng He, Pengcheng Lin, Xi Zhao, Qiyang Chen, Hua Su, Yingying Luo, Hongjiao Wu, Xinxin Sheng, Ying Chen. Highly-efficient cold energy storage enabled by brine phase change material gels towards smart cold chain logistics. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104828.
- [99] Xuan Dong, Guishu Gao, Xudong Zhao, Zhongzhu Qiu, Chunying Li, Jingkui Zhang, Puyan Zheng. Investigation on heat transfer and phase transition in phase change material (PCM) balls and cold energy storage tank. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104695.
- [100] Huifan Zheng, Guoji Tian, Chenwei Yang, Yahui Zhao, Luhan Cao, Xin Xin, Jin Zhou, Yunhan Zheng. Experimental study on performance of phase change microcapsule cold storage solar composite refrigeration system. *Renewable Energy*, 2022, 198: 1176-1185.
- [101] Guanghai Liu, Qingting Li, Junzhang Wu, Ruhe Xie, Yifeng Zou, Alessandro Marson, Antonio Scipioni, Alessandro Manzardo. Improving system performance of the refrigeration unit using phase change material (PCM) for transport refrigerated vehicles: An experimental investigation in South China. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104435.

制冷设备及关键零部件 技术研究及应用进展



邢子文 Xing Ziwen

西安交通大学教授，中国制冷学会常务理事，多个国家级领军人才计划入选者。主要研究方向：双螺杆压缩机特性研究与优化设计、制冷系统冷热耦合利用等。



刘金平 Liu Jinping

华南理工大学教授，中国制冷学会理事和学术委员会委员、广东省制冷学会理事长、全国冷冻空调设备标准化技术委员会委员、空调设备及系统运行节能国家重点实验室学术委员会委员。曾获华夏建设科学技术三等奖；获广东省科学技术一等奖。

4.1 压缩机

压缩机是制冷系统的核心部件之一，提高压缩机的技术水平成为制冷系统节能减排、响应碳中和政策的关键。近年来，我国制冷压缩机技术取得了巨大的发展，有力促进了制冷行业的技术进步。

4.1.1 研究进展

制冷压缩机种类繁多，目前在各种制冷系统中应用的压缩机主要型式有活塞压缩机、转子压缩机、涡旋压缩机、螺杆压缩机和离心压缩机等。

碳中和背景下，活塞压缩机的重心放在了轻商压缩机和跨临界CO₂压缩机的研发上。在生鲜电商、

新零售、无人零售市场快速发展的带动下，轻商用压缩机的销量增幅远高于家用压缩机，未来市场潜力巨大，相关研究也在不断增加^[1]。跨临界CO₂活塞压缩机的可靠性得到了提高，单机冷量更大的半封闭活塞压缩机扩大了应用范围。

转子压缩机主要用于空调/热泵、轻商冷冻冷藏等领域，是家用空调中的主流机型。近年来，滚动转子压缩机应用领域和冷量范围不断扩大，替代了部分全封式活塞压缩机和涡旋压缩机。目前，中间补气技术在热泵转子压缩机中得到了全面的应用，几乎成为了“煤改电”热泵产品的标配。转子压缩

机的主流转速范围已扩展到10~120 rps,并有着向更高转速扩展的趋势。R32和R290分别在家用空调器和轻商领域转子压缩机中的应用愈加广泛。

涡旋压缩机主要应用于空调热泵领域,在冷冻冷藏领域的应用也逐渐增多。由于加工技术发展,涡旋压缩机的冷量也逐渐增大,抢夺了一部分螺杆压缩机的市场份额。碳中和背景下,涡旋压缩机的研究主要集中在替代制冷剂及变频变容技术。天然制冷剂压缩机比如跨临界CO₂涡旋压缩机受到越来越多的关注,其相关技术研究也愈发成熟^[2]。变频变容涡旋技术提高了涡旋压缩机全工况性能和全年运行的能效水平,但也存在润滑油供给、油气分离元件设计、流动阻力控制等一系列问题,有待进一步的深入研究。

螺杆压缩机广泛应用于大中型制冷空调和冷冻冷藏设备,在北方小区集中式供热系统和天然气液化等领域也获得了广泛的应用。近年来,通过对高效转子型线、变频驱动和双级压缩等技术的研究,设计出的新型高效螺杆压缩机有效提高了机组的能效水平。螺杆压缩机对于特殊介质压缩具有不可或缺的作用,也有越来越多的学者投入到相关研究当中。螺杆水蒸气压缩机可以替代蒸汽锅炉,满足90~300℃的高温需求;氢气螺杆压缩机用于氢气的液化、储存和运输;碳捕集、利用与封存(CCUS)中的压缩机也适合使用螺杆压缩机。

离心压缩机主要用于大型公共建筑的舒适性空调冷水和热泵机组,以及石油、化工和核电站等领域的工业冷水和高温热泵机组。离心压缩机的主要研究方向为新型制冷剂离心压缩机和无油离心压缩机。在中大型空调、热泵等应用场合,目前离心压缩机的主流制冷剂仍是R134a,因此新型制冷剂离心压缩机的研究至关重要。无油技术不仅可以省去油路,简化整机系统,还可以消除润滑油膜在换热器内产生的热阻,提高系统能效,具有很大的研究价值。

4.1.2 关键技术

制冷压缩机节能减排的关键技术包括结构优化、容量调节、小型高速化及中间补气等。制冷压缩机的结构直接影响系统性能。在活塞压缩机中,特殊结构的直线式压缩机具有结构紧凑、机械效率高等优点,成为研究的热点,但由于成本过高,目前应用规模依旧很小^[3]。螺杆压缩机方面,相关公司一直致力于开发新的高效转子型线,提高螺杆压缩

机的效率;另外,变导程转子成为提高制冷压缩机能效水平的新兴技术^[4]。磁浮轴承和气浮轴承技术近年来获得了快速的发展,使离心压缩机可以实现整机无油,具有系统结构简单、换热效率高、日常维护费用低等一系列优点,大幅提高离心压缩机性能。

制冷压缩机目前常见的容量调节技术包括变频调节、滑阀调节和吸气节流调节等,变频技术因具有控制精度高、容量调节范围大、部分负荷效率高等优点,逐渐成为主流。涡旋压缩机主要有变频和数码涡旋两种容量调节方式,两者各有利弊,但就目前应用规模而言,变频技术已经超过了数码涡旋技术^[5]。高速永磁电机直联驱动的离心压缩机充分利用了永磁电机全工况的高效性,变频调节容量,省去了增速齿轮的机械损失。通过永磁变频技术调节冷量、滑阀调节内容积比的变频变容积比螺杆压缩机,实现了冷量和内容积比的相互独立调节,能精准高效地实时匹配制冷系统的运行工况和负荷,特别适合于负荷与工况变化范围要求很高的应用场合。

小型轻量化、超高转速不仅可实现压缩机材料使用的减少,显著降低压缩机制造过程中的碳排放,还可以提高同冷量下压缩机的运行能效,拓宽制冷压缩机的运行范围。但制冷压缩机在高速化后面临可靠性异常、高频性能衰减、噪声振动恶化等系列技术瓶颈问题。除提高转速外,制冷压缩机还可以通过多级压缩、中间补气、喷液及气缸冷却来拓宽制冷压缩机的运行范围并提高性能。

4.1.3 优秀产品

2022年,制冷压缩机有关技术取得巨大发展,多家公司研发出优秀的节能制冷产品,此处介绍螺杆压缩机、转子压缩机和离心压缩机的优秀案例各一项。

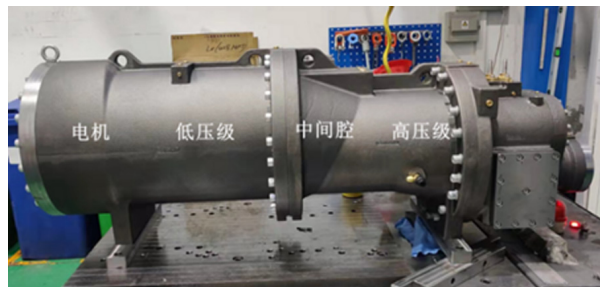


图4.1-1 格力冷水机组新型两级压缩螺杆制冷压缩机

格力设计开发了一款名义制冷量为175RT的两级压缩水冷螺杆式冷水机组(图4.1-1),通过新型

设计的转子型线和机体结构实现了螺杆压缩机的高效运行，最高容积效率和等熵效率可分别达到98.5%和84.4%，在名义工况下的COP与IPLV分别为7.01和10.45，比国家标准的一级能效限定值高出16.83%和39.33%^[6]。

海立研发的自适应泵体超高效变频转子压缩机（图4.1-2），不仅采用了对环境更友好的R32环保制冷剂，且拥有更小体积壳径，泵体专利高效化设计，结合直流变频技术，可达到更高能效，更低噪音的效果，完全满足市场主流空调需求，减少了系统的碳排放量，并在2022—2023中国空调行业高峰论坛上，获得了“2022—2023中国空调行业变频技术核芯奖”的荣誉^[7]。



图4.1-2 海立自适应泵体超高效变频转子压缩机

丹佛斯研发的天磁TTH/TGH高压比系列无油离心压缩机（图4.1-3）是全球首款针对高压比应用优化的无油压缩机，风冷冷水机组中压比最高可达6.2。噪声低至70 dB (A)。天磁TTH/TGH高压比系列产品不仅连续三年获得中国制冷展制冷部件类别“创新产品奖”，还荣获AHR EXPO美国制冷展的绿色建筑类别创新奖和意大利米兰制冷展（MCE）上的“创新效率之路奖”，充分证明了此产品的创新性^[8]。



图4.1-3 丹佛斯天磁系列高压比无油压缩机

4.2 换热器

在我国的制冷空调产品中，房间空调器和多联式空调（热泵）机组所占份额最大分别约为70%、15%，房间空调器和绝大多数的多联式空调（热泵）机组的室外侧和室内侧换热器均为翅片管式换热器，管外通过翅片扩展换热面积和开窗强化与空气

的强迫对流换热，管内通过微肋强化与制冷剂的相变换热。对于热泵型机组，管内换热要兼顾冷凝相变换热和沸腾相变换热，通常管内的冷凝换热性能优于沸腾换热性能，因此管内的沸腾换热性能是最主要的影响因素。热泵型机组室外侧翅片管式换热器性能对机组总体性能影响最显著。制冷空调行业中最具影响力的换热器是翅片管式换热器，该类换热器数量巨大因此对终端产品价格影响显著。室内侧的翅片管换热器，由于噪声的限制，风速偏小，空气侧是主要热阻。当室外侧的翅片管换热器作为热泵的蒸发器使用时，结霜产生的热阻是影响性能的主要因素。制冷剂在蒸发器中沸腾的过程含气率较高，冷凝过程中包含冷凝和过冷冷却，冷凝器是制冷剂液相积存的主要部分，也是影响制冷剂充注量的主要部分。微肋管有助于换热表面的湿润，有助于改善沸腾换热性能。减少制冷剂的充注量是减少制冷空调装置GWP排放量的技术措施之一，使换热器结构更加紧凑、制冷剂充注量更小（如减小管径、采用新型高性能翅片）是发展的方向。

微通道换热器由于结构紧凑、制冷剂充注量小，应用也愈来愈多。多联机过冷器、双级压缩中间冷却器采用的板式换热器应用也日趋广泛。

4.2.1 研究进展

随着国家空调新能效标准的推行和空调产业竞争的日益激烈，设计开发单管传热效率高，铜管单位长度重量轻（低米克重）的内螺纹铜管可大幅降低空调的制造成本。采用细径化的内螺纹铜管可显著降低铜管使用量，9.52mm及以上的内螺纹铜管（以前占主要地位）已经逐渐被各大空调企业停用，7mm内螺纹铜管已经基本完成了对9.52mm内螺纹管的替代，同时5mm内螺纹铜管的用量正在迅速增长。

内螺纹铜管齿形参数对其传热性能影响较大。影响参数主要有齿高、螺旋角、齿顶角、齿条数等。目前仅7mm内螺纹铜管就有上百种不同的规格。通过优化内螺纹齿形参数可以开发出兼顾铜管安全性、能效和米克重的高能效内螺纹铜管。如金龙铜管集团研究院为某客户开发的7mm内螺纹铜管，在现有7mm普通内螺纹铜管的基础上，底壁厚仍保持0.24mm不变，齿高由0.15mm降至0.14mm，螺旋角由16°增至30°，制成了新高效内螺纹铜管^[9]。单管传热性能对比测试结果表明：冷凝换热系数提高15%，蒸发换热系数提高2%，米克重降低3%。原因如下：增大螺旋角可使管道中流体产生与径向不

同的二次流，增加湍流的强度，从而使对流换热得到加强，换热系数随之增加。

唐华等^[10]采用空气焓差法做整机性能测试研究了内螺纹铜管齿形结构对整机性能的影响，结果表明加大螺旋角同时优化其它齿形参数可提升管内换热效果。作为冷凝器时的铜管螺旋角增加有利于提高换热效率，推荐范围约在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间；作为蒸发器时的铜管螺旋角减少有利于换热，减少压损，推荐范围约在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间；在室外冷凝器上，加大其内螺纹铜管的螺旋角，同时增加齿数，会提升内螺纹铜管的传热效率。

非绝热条件下R245fa在光滑和微细丝管中的流型特征研究结果表明，与光滑管相比，微肋管中蒸汽质量较低时，流型会出现从间歇流到波浪状环状流的转变。液膜在微肋管中扩散，受热薄膜的收缩受到抑制，有助于换热表面的湿润，因此微肋管可以显著改善管内蒸发传热性能^[11]。

4.2.2 关键技术

翅片管换热器：高效内螺纹铜管增大了螺旋角，使管内流体产生与径向不同的二次流，增加了湍流强度，使换热性能得到加强，此外瘦高齿、交叉齿和M型齿等强化齿形进一步强化了管内制冷剂的换热；同时降低了齿高，可减小管内制冷剂的流动阻力。

微通道换热器：采用了优化的翅片设计，使得外部排水性能进一步提升。

板式换热器：根据两侧流体的流动特征采用非对称的结构，水侧着重减小流动阻力；制冷剂侧着重减小积存量及充注量，增加制冷剂进口流量分配器，优化了制冷剂侧的两相流分配，使其分布更加均匀；此外点阵式板片的设计也提高了换热性能。纯铝板式换热器可减轻40%，材料减少30%，全铝材质可实现100%回收。

4.2.3 优秀产品

(1) 内螺纹换热铜管

金龙精密铜管集团股份有限公司生产的系列内螺纹铜管（图4.2-1），包括光面铜盘管、光面直铜管、蚊香盘管、内螺纹盘管以及无缝翅片管。

其内螺纹铜管具有普通齿、交叉齿、瘦高齿和M型齿等强化齿形（图4.2-2）。该产品具有组织均匀致密、尺寸精度高、齿型规范完整、内腔残留物低等特点，内表面积比同规格光面铜管增大65%~100%，传热系数高于同规格光管1.8~2.0倍，

广泛用于空调与制冷行业。该内螺纹铜管直径可达4mm，齿高最低可达0.1mm，能减少换热器的体积，降低换热器的成本。采用内螺纹管强化管内制冷剂侧湍流流动，强化管内换热。

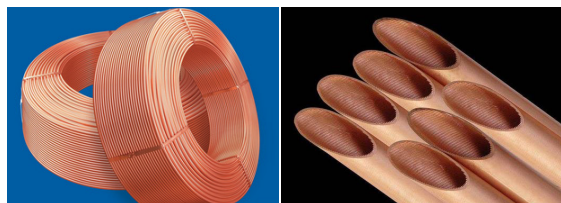


图4.2-1 金龙内螺纹铜管

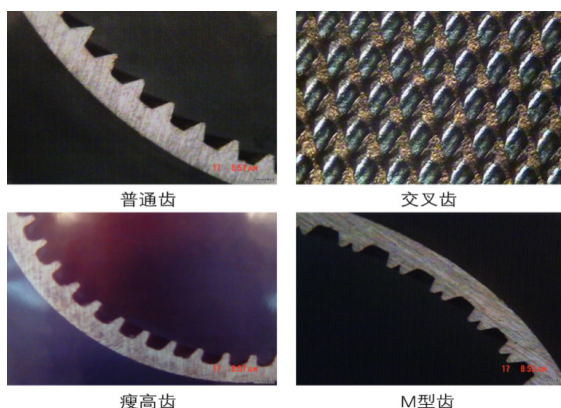


图4.2-2 内螺纹铜管普通齿、交叉齿、瘦高齿和M型齿等强化齿形

(2) 规格繁多的翅片模具

翅片管式换热器的最大传热热阻发生在空气侧，所以强化空气侧的换热性能显得特别重要。国内无锡海特精密模具有限公司、无锡科佳科技有限公司、黄山三佳谊华精密机械有限公司等多家模具制造公司可针对翅片模具规格繁多，片型多变的特征，设计出高效率的模块。满足量产需求，为高效翅片管换热器的生产和发展提供了必要的技术支持。

(3) 微通道换热器

杭州三花微通道换热器有限公司生产的Interlaced双系统微通道换热器、横插翅片微通道换热器以及微通道热水器内胆冷凝器换热器如图4.2-3、图4.2-4、图4.2-5所示。

Interlaced双系统蒸发器应用于双系统制冷空调机组，如商用屋顶机、空气源/地源热泵、风冷冷水机组等多种应用场景。换热器具有体积小、制冷剂充注量小、重量轻等优点。在部分负荷运行时，充分使用了整个迎风面积的翅片，使得整机在部分负荷时能力大幅提升。使用Interlaced微通道换热器后，可使整机综合能效提升15%以上；各工况能力均

有3%~10%的提升。

横插翅片微通道换热器应用于家用热泵室外机、商用热泵室内/室外机、机房空调蒸发器和冷凝器等场景，换热器保留了微通道扁管的高效传热特点，同时采用优化的翅片设计，使排水性能进一步提升，且保留了常规微通道换热器制冷剂充注量小，重量轻等优点。

微通道内胆冷凝器应用于家用热泵热水器，具有接触面积大、换热性能好、制冷剂充注量低、无需反复缠绕加工便利等特点，使用该换热器后，热水器平均能效水平可提升6%以上，平均加热时间缩短4%，平均出水温度提升4%以上；外机椭圆管蒸发器可用于家用热泵、商用热泵内外机、机房冷凝器/蒸发器、热泵热水器外机、驻车热泵外机等场景，具有传热性能好、内容积小、制冷剂充注量更低、可靠性高、排水速度快等特点，风阻衰减特性优于翅片管换热器。



图4.2-3 三花Interlaced双系统微通道换热器

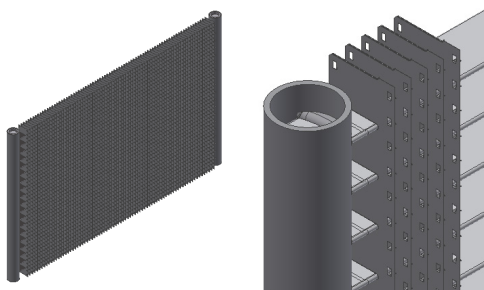


图4.2-4 三花横插翅片微通道换热器

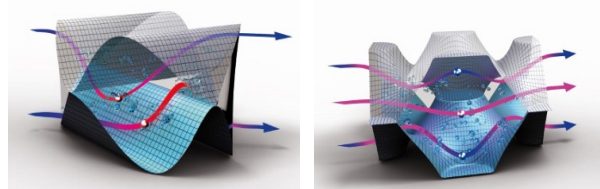


图4.2-5 三花内胆微通道冷凝器

(4) 板式换热器

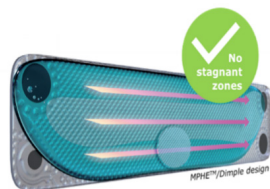
丹佛斯板式换热器（嘉兴）有限公司的Dimple产品采用非对称的结构，减小水侧流道的压降，点

阵式板片设计，如图4.2-6（a）所示。优化了制冷剂侧两相流分配，使流体在换热板片上分布更加均匀，见图4.2-6（c），相比于传统的鱼骨型换热单元（图4.2-6（b）），提高了换热系数、减少制冷剂的积存量以及充注量。典型产品C129L-CZ（图4.2-6（d））可提升传热效率高达10%~20%。



(a) 点阵式换热单元

(b) 鱼骨型换热单元



(c) 换热板片上均匀分布流体示意图



(d) 典型产品 C129L-CZ 实物图

图4.2-6 丹佛斯Dimple板式换热器

宁波哈雷换热设备有限公司生产的热泵系统专用双板换热器可以使因板换失效泄漏的工质极容易被检测到，在保障高效传热性能的同时，大幅提高了系统运行的安全性，如图4.2-7所示。

宁波哈雷换热设备有限公司生产的经济器专用补气增焓系列板式换热器（图4.2-8），采用了不等截面通道设计，精确匹配用户对冷热流体的不同压降和传热要求，减小了换热面积和流动阻力，并有效提高了换热性能；采用大通道截面比的设计，经济器两侧流道的质量流量比高达1:6，满足经济器的使用特点，便于经济器的流量分配与系统工况调节，从而减少压缩机运行功耗，使热泵系统始终在最优工况下运行。

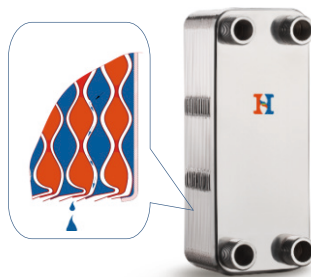


图4.2-7 哈雷系列热泵专用双板板式换热器

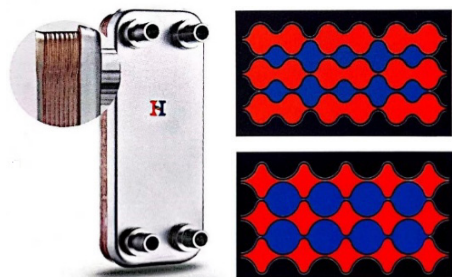


图4.2-8 哈雷R系列经济器专用板式换热器

杭州三花微通道换热器有限公司生产的纯铝板式换热器（图4.2-9），可用于多联机经济器、汽车热管理液冷系统、油冷器、低温热泵系统等场景。创新的板片设计和生产工艺，使得爆破压力达到13.5MPa以上。采用高强度、易钎焊的材质，同等性能下重量比不锈钢板换轻40%，材料成本可减少30%。通过自主开发的软件对板型进行模拟优化，同等尺寸大小下比不锈钢板换性能提升30%；全铝材质更环保，可实现100%回收。



图4.2-9 三花纯铝板式换热器

4.3 风机和水泵

4.3.1 风机

在冷水/制冷机组效率逐渐提高、系统逐步采用高水温设计、空气能量密度较低、输送能耗与输送能力相比较、末端送风机能耗占比增加的背景下，降低送排风机的能耗愈显重要。因此在不提高噪声的前提下提升风机效率对制冷空调系统的能效具有重要的意义。

(1) 关键技术

结合风机流道内的流动状态与气动性能对风机叶型、叶片安装角等关键参数进行优化设计，以减少湍流强度和边界层分离，减少流动损失。基于整机结构振动强度应力分析的减振降噪优化技术，来提高效率，降低噪声。

(2) 优秀产品介绍

图4.3-1所示为亿利达公司自行开发生产的SYT系列离心式空调风机，通过了AMCA国际认证并取得AMCA印章，共12种规格，风机的流量范围

1000~40000 m³/h，采用前向多翼叶轮，具有通用性强、效率高、噪声低、耗能少等特点。多款产品达到1级能效标准。

图4.3-2所示的SYP离心式空调风机是亿利达公司生产的风机盘管专用前向多翼离心式金属风机。它具有效率高、噪声低、结构精巧等特点，风量和压力能满足宽广的运行范围，叶轮直径为130~250mm，风量为250~3000m³/h。产品达到国内领先水平，首家代替进口。

图4.3-3所示为亿利达公司生产的风机盘管SYD系列离心式空调风机，通过了AMCA国际认证并取得AMCA印章，共15种规格，风机流量范围1000~100000m³/h。它采用前向多翼叶轮，具有通用性强、效率高、噪音低、耗能少等特点。

图4.3-4所示为亿利达公司自行开发生产的SYQ系列后向离心式空调风机，通过了AMCA国际认证并取得AMCA印章，共15种规格，风机流量范围1000~120000m³/h，全压200~3000Pa。它采用直板式叶轮，具有效率高、噪音低、耗能少、通用性强，安全性好等特点。



图4.3-1 SYT离心式空调风机



图4.3-2 SYP离心式空调风机



图4.3-3 SYD离心式空调风机



图4.3-4 SYQ离心式空调风机实物图

4.3.2 水泵

在冷水/制冷机组效率提高，部分负荷能效显著提升，冷水系统逐步采用大温差、低流阻设计，水系统的能耗（特别是在低负荷时）占比增加，大多数空调工程项目存在阀门、过滤器阻力偏大，在非满负荷的工况下存在流量与实际负荷不匹配，水泵

长期在偏工况下工作导致能耗较高的背景下，提高水泵效率，特别是低负荷的变工况调节能力和效率对提高制冷空调系统的能效具有重要意义。

(1) 关键技术

通过CFD三维流体仿真技术改进水泵泵体及叶轮三维结构，提升水泵基础效率；通过叶轮材质改进及耐磨铜合金口环的配置，缓解水泵长期运行后的效率下降问题；进行水泵宽高效区设计，提升水泵整体效率，降低水泵全生命周期耗电量。采用大小泵并联的运行方式，解决空调水系统在部分负荷下水泵运行效率低的问题，根据实际需求切换运行泵的台位及调节频率，提升泵组整体运行效率。优化泵组内部管件过滤器和止回阀的结构，降低泵组内部阻力损失0.04~0.06MPa，降低泵组运行电耗。采用背包式变频器配置，变频器与水泵一体化设计，提升变频器环境适应性。泵组整机防护等级达到IP55，可适应多种环境下的水力输配需求。

(2) 优秀产品介绍

上海凯泉泵业（集团）有限公司的 GXS 高效智能模块泵组（图4.3-5）实测性能达到单位吨水能耗值为0.39~0.42 kWh/(m³·MPa)。为暖通空调及供热水系统工况匹配提供了宽高效、低阻力高度智能化的解决方案。高效智能模块泵组符合设计规范，较传统泵组能效提升30%以上，与高效智能模块泵组建立的物联网管理平台，可从研发、生产到施工、运维全过程监控，社会效益显著。



图4.3-5 GXS高效智能模块泵组

4.4 阀件及控制系统

4.4.1 研究进展

电子膨胀阀在制冷空调系统中与变转速压缩机协调控制制冷剂流量，可使制冷空调系统始终保持在最佳的工况下运行，达到快速制冷(热)、精确控制温度、节能省电的目的。主要体现两点趋势：1) 产品趋于高效化、静音化，2) 产品更趋于智能化、集

成化。电控阀件在控制精度上不断提高，在与其他的元器件的关联性及与用户的交互性上有很大的突破，控制平台趋于人性化与多功能化。

四通换向阀，实现了热泵型空调中的制冷工况和制热工况的转换。但四通换向阀的压降、传热及泄漏损失会导致热泵系统的性能损失。这个损失不仅存在于四通阀换向过程中，而且存在于系统整个运行过程的始终，从而导致四通换向阀损失对于热泵型空调器的损失不可忽略。不锈钢四通换向阀可有效降低系统热损失，相对于黄铜四通阀能有效提升系统能效，四通换向阀的不锈钢化是未来主要的发展方向。

4.4.2 关键技术

(1) 电子膨胀阀关键技术

1) 内平衡技术。内平衡式电子膨胀阀，阀头采用内平衡设计，可提升产品逆向工作压差，使得电子膨胀阀正、反向MOPD均大于3.5MPa，实现电子膨胀阀小开度下的稳定精准控制，同时实现产品小型化（体积为常规产品体积的60%）。

2) 超静音技术。采用流道降噪优化和小开度流量控制技术，创新设计了内置轴承结构和导向套旁流通道切边结构，降低了全工况运行下的噪音。

(2) 四通换向阀关键技术

1) 材料替代技术。不锈钢四通阀由于其低热损、低内漏的特点，可有效降低系统热损，提升系统能效，但是需要攻克焊接等加工制造难点，四通换向阀的不锈钢化是未来主要发展方向。

2) 大容量电动四通换向阀软密封技术。通过弹性密封块实现软密封，在活塞与壳体存在较大配合间隙的情况下，使密封块和壳体持续贴合，使产品具有更低内漏，同时解决了壳体变形带来的换向失效问题。采用电机驱动，自带故障检测功能，可实现零压差换向，使整机系统更加节能、可靠、智能。

(3) 低温排水阀机械式防冻技术

低温排水阀采用温包作为驱动，采用机械式水温传感装置，当水温介于0~3℃时，低温排水阀开启，当水温介于3~5℃或者更高时，低温排水阀迅速关闭，防止意外排水，可实现水结冰前自动排水，水温高时自动关闭，防冻过程无需电源驱动，可靠性高。

(4) RSV双向电磁阀关键技术

1) 双向流通技术。结构上采用双阀座与双滑块相配合结构，实现主阀任何方向上的开/关功能。

2) 低流阻技术。通过优化主阀进出口和流道结构设计,减少流体局部阻力损失及沿程压力损失,使产品具有更低流阻。

4.4.3 优秀产品介绍

(1) 电子膨胀阀

浙江盾安人工环境股份有限公司的P系列电子膨胀阀(图4.4-1)通过阀体结构内平衡创新设计,实现正反向最大工作压差均可达3.5MPa,解决了热泵在低温低负荷工况下制冷剂流量的精确调节,即实现了对可逆系统制冷剂的双向精确调节。

浙江盾安人工环境股份有限公司的N系列电子膨胀阀(图4.4-2)使用微米级的加工和装配精度确保了最严苛的小开度微流量调节精度,实现了超静音(噪音值为行标的73%)、长寿命,广泛用于多联机内机以及有低噪音要求的家用空调和单元机内机。



图4.4-1 盾安P系列
电子膨胀阀



图4.4-2 盾安N系列
电子膨胀阀

浙江三花智能控制股份有限公司生产的LPF系列电子膨胀阀(图4.4-3)主要用于冷冻冷藏系统中。当LPF系列电子膨胀阀完全关闭时,系统内漏量低于1mL/min,效果等同于电磁阀。当LPF系列电子膨胀阀用于冷冻冷藏时,可完全替代电磁阀,节约安装空间和成本。LPF-T系列可承受9MPa工作压力,适用于CO₂系统。



图4.4-3 三花LPF系列电子膨胀阀

(2) 不锈钢四通阀

浙江盾安人工环境股份有限公司的不锈钢四

通阀(图4.4-4)采用不锈钢材料作为元件主体,使得产品轻量化(重量相比黄铜四通阀下降20%以上),且减少了热损和内漏,可使空调整机能效提升0.5%~2%。



图4.4-4 盾安不锈钢四通阀

(3) 大容量电动四通阀

浙江盾安人工环境股份有限公司的电动大容量四通阀(图4.4-5)主要应用于大型热泵系统。其刚性主体采用大间隙,结合软密封设计,实现低内漏的同时有效解决壳体变形带来的换向失效问题,同时采用电机驱动,自带故障检测功能,可实现零压差换向,使整机系统更加节能、可靠、智能。

浙江三花智能控制股份有限公司生产的旋转四通阀(图4.4-6)广泛应用于大型热泵型制冷系统。其结构为“等径流道设计”,压损较同类型旋转阀降低40%。具有防卡死设计,刚性主体采用大间隙,结合软密封设计,有效解决阀芯动作卡死问题。该阀直接由电机驱动,无需建立压差,系统控制可实现多样化。



图4.4-5 盾安电动大容量
四通阀



图4.4-6 三花旋转四通阀

(4) 低温排水阀

浙江盾安人工环境股份有限公司研发的低温排水阀(图4.4-7)可用于二联供、三联供、空气源热水器、中央空调等水系统回路,通过机械式温包感知水温,在水温0~3℃阀打开自动排水,起到防冻功

能，水温3~5℃阀关闭，避免系统意外排水。集成进气阀功能，防止管路内产生负压而影响排水效果。可实现空调整机系统自动防冻功能，替代手动排水防冻，提高系统的防冻可靠性和智能性。



图4.4-7 盾安低温排水阀

(5) RSV双向电磁阀

浙江盾安人工环境股份有限公司研发的RSV双向电磁阀（图4.4-8）广泛应用于二联供、三联供、热泵回收等系统中。具有驱动控制简单、流通能力强、低流阻、双向流通等特点。可替代常规电磁阀产品，实现系统的双向流通控制、更低压损。RSV双向电磁阀采用全不锈钢材料设计，强度高、传热损失小、体积小、轻量化、更环保，较行业内同类产品尺寸减小36%，可安装在空调系统的排气管路、液态管路、回气管路。



图4.4-8 盾安RSV双向电磁阀

(6) 截止节流阀

浙江盾安环境股份有限公司的截止节流阀（图4.4-9）是一款组合阀，同时具备节流、制冷剂通断和系统杂质过滤的功能，替代了传统制冷系统中的截止阀、主毛细管、副毛细管、单向阀和过滤器，可用于家用空调、热泵热水器和单元式空调等分体式制冷设备。该组合阀解决了传统截止阀毛细管组件焊点多、泄漏风险大、占用空间大等问题，降低空调厂家成本的同时提高了产品的稳定性和可靠性。



图4.4-9 盾安截止节流阀

感谢金龙铜管集团程大勇先生、杭州三花微通道换热器有限公司高强先生、丹佛斯集团公司魏翔先生、宁波哈雷换热设备有限公司颜爱斌先生、浙江亿利达风机股份有限公司叶学信先生、上海泉凯泵业集团有限公司施勇先生、浙江盾安人工环境股份有限公司冯忠波先生提供相关资料。

参考文献

- [1] 赵明. 坚持技术创新、有序竞争，轻型商用压缩机发展前景一片光明[J]. 电器, 2022(9): 22-23.
- [2] 马国远, 隋秋玉, 宫悦轩, 等. 小型制冷压缩机技术现状与未来发展趋势分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 63-71.
- [3] 洪昊, 赵志康, 陈曦, 等. 小型对置式直线压缩机模拟及实验研究[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(4): 187-192, 206.
- [4] 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, 83.
- [5] 张秀平, 刘晓红, 李昊, 等. 工商用制冷剂压缩机产品及技术现状与发展趋势[J]. 制冷与空调, 2017, 17(2): 49-57.
- [6] 张治平, 王鹏, 王闯, 等. 超高效两级压缩水冷螺杆式冷水机组开发[J]. 制冷学报, 2023.
- [7] 贾琼. 聚焦低碳高效, 海立助推空调产业绿色品质转型[EB/OL]. 国家电网, (2022-09-06)[2022-10-27]. <http://he.zdwang.com/a/202209/0678415.html>.
- [8] 丹佛斯中国. 丹佛斯天磁高压比TTH/TGH系列屡获国际殊荣[J]. 制冷技术, 2018, 38(2): 50.
- [9] 李红安, 王世中, 鲁长建, 等. 制冷空调设备用铜管的发展趋势[J]. 制冷与空调, 2014, 14(12): 13-16.
- [10] 唐华, 李成恩, 武滔. 强化内螺纹铜管传热的试验研究及分析[J]. 家电科技, 2019(1): 114-117.
- [11] LIU Jiayao, LIU Jinping, XU Xiongwen. Diabatic visualization study of R245fa two phase flow pattern characteristics in horizontal smooth and microfin tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152: 119513.

制冷产业与新技术的融合



陈焕新 Chen Huanxin

华中科技大学教授，博导，湖北省制冷学会常务副理事长。《制冷学报》《暖通空调》《制冷技术》编委。主持参与多项纵向项目，发表百余篇高水平SCI论文，获评爱思唯尔高被引学者。出版专著《制冷空调遇上大数据——行业大变革》《制冷空调新技术》。

制冷对现代社会至关重要，联合国统计数据表明，全球每年25%~30%的电力被用于制冷。随着科学社会的发展，越来越多的新技术应用于制冷领域，致力于提高能源效率，减少能源消耗。

5.1 新能源

目前技术条件下，为了满足人们的舒适室内环境需求，大多数的暖通空调系统需要长期保持高负荷运转状态，其产生的能耗是相当大的。由于目前社会电能有很大一部分都是通过消耗常规能源生成的，过高消耗电能，意味着对自然资源的消耗量十分巨大，不利于生态健康和可持续发展。新能源及可再生能源主要是指有别于常规能源的能源类型，这类能源的典型特征在于，无论是能源获取，还是投入到实际应用环节中，对生态环境的影响都非常小。同时，这类能源在目前的应用环境下，是可以再生的，可以支持人类社会的可持续发展。

新能源逐渐广泛应用在制冷领域中，主要新能源制冷方法有两种^[1]，一种是基于新能源发电驱动压缩式制冷，另一种是基于可再生热能驱动吸附式和吸收式制冷。

太阳能是现代人类社会关于新能源及可再生能源的主要研究对象，因为就目前的人类历史发展进程来看，太阳能是取之不尽用之不竭的，同时这种能源是足够清洁无害的。太阳能在暖通空调系统中的直接应用分为主动式和被动式。被动式应用依靠建筑材料的选择和内部空间布局的控制，充分利用不同季节太阳辐射的作用实现夏季降温冬季保暖的作用。主动式应用是指利用一系列物理元件组成供热系统，利用太阳辐射热能为建筑采暖系统供热。太阳能的间接应用也有两种方式^[2-4]，一种是利用太阳能转化为热能驱动制冷机工作产生冷量，另一种是通过太阳能转化板，将太阳能转化为电能，再驱动压缩制冷设备运转。

地热能在暖通空调系统中的应用具体形式有两种。一种是地源热泵系统，利用地下土壤资源的蓄热能力，将暖通空调系统吸收的室内热量通过地源热泵传输到地下。热量交换的介质是土壤和水。在冬季，把土壤的热量转到地上室内建筑物内；在夏季，将地下土壤的制冷量转移到地上室内建筑物内，形成冷却和加热循环系统，达到节约能耗的目的。另一种是地道风系统，利用土壤的蓄存能量，为建筑物提供维持室内热湿环境所需的冷热量。无论是地源热泵系统还是地道风系统，由于利用了土壤的能量，就降低了暖通空调系统的能耗。

风能在暖通空调系统中的应用可以分为两部分，一部分是通风系统，一部分是空调系统。在通风系统中，利用热压和风压的原理，可用自然风解决通风问题。在空调系统中，自然风在过渡季节具有天然冷量，根据地域不同，有些地方的过渡季节自然风冷量可直接满足室内设计温湿度要求，就可以完全节省这部分空调消耗能源。有些地方过渡季节自然风冷量无法直接满足室内要求，需要额外补充冷量来满足，即使这样，也节约了很大一部分能耗。

潮汐能的主要利用方式是潮汐发电。潮汐发电与普通水力发电原理类似，即在河口或海湾筑坝，与外海隔开形成水库，利用涨落潮时库内水位和外海水位差推动水轮机发电。潮汐电站由于受潮差变化影响，发电具有间歇性的特点，装机的年利用小时数不高，其应用还需要随着技术的发展不断提高。

目前，经过大量研究，并且成功投入到实际应用中的新能源、可再生能源包括太阳能、地热能、风能、潮汐能等多种新能源。随着技术水平的不断提升，未来这些新能源将会更好的投入到实际应用中。

5.2 新材料

新型材料的研发与应用也为制冷系统的节能开拓了新的发展思路。现研发出的新材料涉及制冷领域的各个方面，从新型节能设备材料到新制冷剂材料，都为制冷领域的发展奠定基础。

在工业生产中，冷却塔是热量及质量的重要交换设备，作为循环冷却系统中重要的热力设备，其冷却性能对机组能耗和发电效率有很大的影响。在大型化冷却塔中，填料是提高冷却塔性能的关键部位，具有很大的节能潜力。据数据显示，不同热力性能的填料对出塔水温的影响差值可达 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ^[5]。新兴的点滴薄膜式填料——竹材填料，具有广泛应用

前景。在实际应用中，厂家也会对竹材填料进行结构上的优化与改良，投入使用后，冷却效果反映良好。

在热电制冷技术中，材料的热电转换效率一直是热电制冷的发展瓶颈。武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室创造性提出将磁性纳米粒子引入到热电材料中，建立纳米尺度微磁场，产生电子磁性散射和声子界面散射，实现纳米-介观尺度上协同调控电子/声子输运，研制出了系列制冷性能显著提升的热电磁能量转换新材料^[6]，有望为发展采用电子熵流和磁熵流作为制冷循环介质的高效绿色全固态制冷变革性技术提供关键材料。

在新型制冷剂的研究方面，含氟烯烃(HFO)系列产品作为第四代制冷剂、发泡剂，具有GWP低、大气暴露存活期短、沸点较低、物化性能优良、常温时具有较高饱和蒸气压等“三低二优”五大特性，被认为是HFCs的最佳替代品。但在HFOs的研发工艺中，催化剂易失活是一个严重的问题。巨化集团^[7]系统地研发了催化剂和反应器，掌握了“多覆盖、重核心、低能耗”三优型自主知识产权的HFOs生产技术，掌握了催化剂的特殊改性和制备技术，成功研发了高抗积碳、高抗烧结性能的“双超越”催化剂，实现了新型制冷剂HFOs研发工艺的新突破。

辐射制冷是物体通过发射热辐射降低自身温度至环境温度以下的一种新型制冷技术。基于这样的被动冷却技术，上海交通大学电气材料与绝缘研究中心黄兴溢教授与该校密西根学院鲍华教授合作，开发出一种具有高导热率的辐射制冷绝缘材料——基于填充有聚合物基体的二维六方氮化硼(h-BN)介电纳米板的可扩展光子膜^[8]，这种材料具有高达98%的阳光反射率，可以实现全天辐射制冷效果，其高导热特性还可用于户外设备的高效热管理，有效降低器件、装备的工作温度。打破了传统辐射制冷材料实现高阳光反射率与高导热率的制约，极大拓展了辐射制冷材料的应用领域，为进一步推动辐射制冷技术在户外电力设备、电子器件中的热管理应用作出了开创性贡献。

5.3 人工智能

人工智能(Artificial Intelligence)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能目前属于计算机科学的一个分支，该领域的研究囊括了许多方面，包括机器人、语言识别、图像识别、自

然语言处理和专家系统等。人工智能自诞生以来,理论和技术日益成熟,应用领域也不断扩大,目前,专用人工智能的发展已经到了超前水平。制冷行业作为一个高度现代化的产业,其中大部分的应用方向均已与人工智能领域的知识相结合,并有了许多优秀的研究成果与应用成果,带来了很好的经济效益和社会效益。

5.3.1 人工智能与数据挖掘

目前在制冷行业中,数据挖掘技术的应用十分广泛。数据挖掘的目的在于从大量的、复杂的数据中获取潜在的、有价值的信息和知识。数据挖掘涉及多学科交叉融合,综合了机器学习、人工智能、数据库技术、统计学和信息检索等方面的前沿技术。制冷空调行业与数据挖掘技术结合,可以在多方面得到广泛应用:对于制冷空调产品,可用于故障检测与诊断、建筑能耗预测、空调系统的控制决策和性能优化等;对于制冷空调企业,可实现产品运营数据化、线上线下营销差异化、销售地域化及库存与物流的优化匹配等;对于用户,企业可为其提供个性化定制产品、空调系统自适应控制等服务。

常用的数据挖掘算法可以被分为有监督学习算法和无监督学习算法两类。有监督学习是指部分输入与输出的对应关系已知,在此基础上建立数学模型,将输入映射到我们期望的输出中,再利用训练模型对未知输出的数据进行分析。在制冷行业中,常用的有监督学习算法有决策树、支持向量机等。

决策树是通过一系列规则建立的树形结构,用于分类和预测。决策树最上面的节点为根节点,每个节点向下分支形成一个新的节点,没有分支的节点为叶节点,每个叶节点对应一个决策,即某一可能的分类结果。计算时从决策树根节点自顶向下遍历,每个内节点对应一个属性,对于不同的属性值选择不同的分支,最后到达叶节点完成分类。决策树算法包括ID3算法、C4.5算法、CART算法、PUBLIC算法和SLIQ算法等。决策树算法结构简单,分类准确度较高,对噪声数据的处理具有较好的鲁棒性,但处理大规模数据时受计算机内存容量的限制。决策树在制冷空调行业中可以用于故障预测。

支持向量机是基于结构风险最小化准则并实现置信范围和经验风险最小化的监督学习方法,广泛用于统计分类和回归分析中。它对所学习的样本求解,得出样本的最大边距超平面,以实现了对数据进行二元分类的目的。支持向量机算法在暖通空调故

障检测与诊断领域已得到广泛的应用,并能灵活地与其他的方法结合,如小波分析理论、特征选择、专家知识等,进而得到一个更为有效的故障检测与诊断模型。

而无监督学习是指输入与输出的关系未知,直接对输入数据建立数学模型,分析数据特征。在制冷行业中,常用的无监督学习算法有关联规则分析以及聚类分析等。关联规则分析是一种简单、实用的分析技术,是指发现存在于大量数据集中的关联性或相关性,从而描述一个事物中某些属性同时出现的规律和模式。关联分析可从大量数据中发现事物、特征或者数据之间的、频繁出现的相互依赖关系和关联关系。

聚类分析是一种多元统计分析方法,基于某种原则建立数学模型,将具有相似特征的数据划分在同一类或簇中,使同一类或簇中的数据具有较高的相似度,而不同类或簇之间的数据具有较大的相异性。聚类分析方法分为层次法和划分法,层次法主要包括BIRCH算法、DBSCAN算法等,划分法主要包括K-means算法、K-medoids算法等。聚类分析在制冷空调行业中主要用于空调系统的故障检测与诊断,根据不同故障之间的数据具有的不同特征,将不同故障状态下的数据区分开。

5.3.2 人工智能与系统自动控制

随着制冷行业及技术的高度发展,制冷系统和设备复杂性也越来越高,再加上制冷系统中各参数往往存在时变性,导致数学模型难以建立,传统经典控制方法和现代控制理论难以实现有效的控制,因此基于人工智能算法的控制策略成为了时下研究热点。

在空调系统的自动控制研究中,许多人工智能优化算法已得到了应用,构成了过程优化控制、参数寻优等相关工作的关键部分。其中典型的算法有遗传算法、模拟退火算法等。遗传算法是模拟自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,利用仿真计算通过模拟自然进化过程搜索最优解。模拟退火算法一种随机寻优算法,其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。模拟退火算法从某一较高初温出发,伴随温度参数的不断下降,结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解,即在局部最优解时能概率性地跳出并最终趋于全局最优。

智能控制方法也已在空调系统的自动控制上得到研究与应用。智能控制主要包括模糊控制、神经

网络控制和专家控制等，近年来研究较多的智能控制技术主要是模糊控制和神经网络控制。

模糊逻辑控制，又称模糊控制，属于智能控制方法的一种。模糊控制近20多年来在理论上、技术上都有良好的发展，成为自动控制领域一个非常活跃的分支。模糊控制作为一种非线性系统控制策略，最大的特点是无需建立系统的精确数学模型，可以将操作者的经验知识直接转化为模糊规则，通过模糊推理过程对系统实施控制。仿真和实验研究表明，模糊控制可以实现暖通空调系统的有效控制，比常规的PID控制具有更强的鲁棒性。

神经网络控制是人工神经网络（Artificial Neural Networks, ANN）与系统控制理论相结合的产物，它是智能控制的一个新的分支。神经网络模仿人脑的神经系统，以一种简单的处理单元——神经元为节点，采用某种结构构成的活动网络。神经网络建模时间短、易于进行计算机模拟，具有模拟高度非线性系统的优点，且具有较强的学习能力、容错能力和联想能力。此外，神经网络还具有较强的自适应能力，例如可通过重新训练网络进行设备特性的动态校准功能，这也是它优于其它控制方法的主要特点。

5.4 大数据与互联网

5.4.1 大数据与互联网和制冷行业的关系

互联网与大数据已经深入影响到人们生活、工作的每个角落，它们的应用对制冷行业同样产生了深远的影响。物联网、云计算、移动互联网、车联网、手机、平板计算机、PC，他们无一不是数据的来源及承载方式，人们早已生活在网络时代、数据爆炸的时代。在制冷空调行业中，运用大数据技术及互联网技术进行的生产、销售、运行维护以及故障检测与诊断等正在潜移默化地改变整个行业。我国人口众多，互联网用户数在2015年已经超过6亿人。海量的互联网用户创造了大规模的数据量。在制冷空调行业中通过数据挖掘和关联规则可以从数据中挖掘出有用的信息，截至目前，全球有超过半数的财富500强企业在大数据竞争中失去优势。这种发展趋势在国内同样不可避免，在未来的市场竞争中，能在第一时间从大量互联网数据中获取最有价值信息的企业才最具有优势。

目前，制冷产业正形成工厂、最后一公里服务商、终端用户组成的“等边三角形”新模式。最

后一公里服务商即提供安装和售后的工程、贸易服务商。而当下，消费者采购产品时，往往先通过互联网查询、对比。就机械设备类而言，终端用户更希望直接向厂家采购，从而获得量身定做、价格优势、正品保障以及服务保障。这一新模式借助互联网，融合线上与线下，满足了终端用户需求，符合未来电子商务趋势，为制冷产业的发展带来颠覆性的革命。用户通过互联网发起需求，线上平台将需求转接给相应线下服务商，由线下商家去满足用户需求。在制冷产业与大数据和互联网相结合的探索中，海尔产业园中德互联网灯塔工厂做出了很好的示范。

5.4.2 海尔产业园中德互联网灯塔工厂

数据显示，目前全国各类产业园区已超两万个，园区经济对全国经济贡献的增长率超过30%，但同时工业园区的耗能约占全社会总耗能的69%，碳排放占全国总排放约31%。因此，将工业园区定为精准减排降耗的落脚点、攻坚区，确保节能、减耗、提质、减碳工作的落实，是建成“双碳园区”迈向“零碳时代”的重要路径。

作为海尔重要的生产园区，位于西海岸新区中德生态园的海尔中德智慧园区承担着中央空调、滚筒洗衣机、特种冰箱、热水器等产品的生产。为建设“双碳园区”，海尔推出了卡奥斯COSMOPlat工业互联网平台。互联网平台相当于一个起统揽作用的“智慧大脑”，来实现园区多能互补、多场景交互。在海尔中德智慧园区中，卡奥斯COSMOPlat可以通过部署智慧能源总控平台，以探索出提升能效、清洁能源、净零排放的可持续性发展标准化模式，进而让“双碳园区”建设落地为现实。

结合能源互联网、大数据、云计算、5G网络等技术，卡奥斯COSMOPlat智慧能源可助力园区实现能源流、数据流、信息流、碳追溯流的“四流合一”，并通过对园区能源动力生产、输送、配用的全环节进行集中、直观的动态监控和数字化管理，改进和优化能源平衡，大幅提高了能源的综合利用效率。此外，园区年二氧化碳的减排约3.22万吨，成为了全球首个碳中和“灯塔基地”。

海尔中德智慧园区从设计到建设，再到运行，每一个环节都充分考虑到了低碳、低能耗。例如，卡奥斯智慧能源为园区设计的空压站云控制系统，将园区内几个厂区的供气管网统一配置，按生产强度需求启动相应设备，并装配了高精度的检测模块

和测量仪表，实现了空压站恒压供气，提高运行效率。卡奥斯智慧能源搭建的智慧能源平台可以对园区电、水、气、热、压缩空气、污水处理、喷泉、光伏、照明、电梯等能源动力的产输配用全环节进行集中、直观的动态监控和数字化管理，提升了整体效率。

目前，海尔卡奥斯智慧能源平台已布局海尔全国15个工业园区。在青岛海尔总部，通过相应工作人员的手机App上，可以随时掌握全国55个工厂的实时能耗情况。平台会在当地减排要求的基础上设定标准更加严格的安全线，一旦监测结果接近安全线，系统就会报警并进行相应调整。

在推进园区“零碳”进阶的同时，卡奥斯COSMOPlat还将能源替代与碳资产管理运营相融合，重塑能源服务场景。目前，卡奥斯COSMOPlat智慧能源方案已赋能海尔推进绿色供应链体系建设，实现了全国18个工业园区、55个互联工厂全覆盖，探索出了560多个场以及1000余套定制化能源解决方案，构筑起以“零碳”为要义的绿色生态圈，可让更多园区企业共享绿色低碳助益。

5.5 智能制造

智能制造（Intelligent Manufacturing, IM）是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统，它在制造过程中能进行智能活动，诸如分析、推理、判断、构思和决策等。通过人与智能机器的合作共事，去扩大、延伸和部分取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。它把制造自动化的概念更新，扩展到柔性化、智能化和高度集成化。

毫无疑问，智能化是制造自动化的发展方向。在制造过程的各个环节几乎都广泛应用人工智能技术。专家系统技术可以用于工程设计、工艺过程设计、生产调度、故障诊断等。也可以将神经网络和模糊控制技术等先进的计算机智能方法应用于产品配方，生产调度等，实现制造过程智能化。目前，已有多家企业在智能制造领域做出了重大突破，创造出了多样的智能制造生产线，并已经投入应用，为行业做出了良好的示范。

5.5.1 格力智能制造空调生产线

格力智能制造空调生产线包含空调外机线与空调内机线，两条生产线均结合CPS系统和销售端直接对接，通过APS自动排产到线，MES与ERP系统自动导出物料需求信息，指导WMS实现物料的拉式精准

配送到岗。生产线智能制造的流程涉及产品全生命周期的协同与融合，包括智能设计、智能设备、智能生产、智慧物流、智慧服务、智能决策等重点环节。

格力生产线中主要的智能制造技术包括制造技术以及新一代信息与传感器技术。在制造方面，生产线中应用了CPS、APS等系统，实现了单元级、系统级、系统之系统级（SoS）三个不同层次的数据流状态感知、实时传递、精确分析、科学决策、精准执行的全流程闭环管理。应用了高效能自动加工设备、格力机器人、机械手、自动传输线、五轴加工中心等智能装备，特别是机器人编程控制与PLC编程控制技术的应用，实现了制造过程的自动化、少人化。

在信息与传感技术方面，格力引入了许多新一代的技术：人工智能技术结合机器视觉被应用于产品的外观检测等岗位，有效释放了人力，提升了产品品质和检测效率；区块链技术与ERP、MES、PLM、APS、WMS等系统有机结合，对每个环节数据的真实性进行长期有效的监控，提升了客户响应能力和服务质量；云计算技术结合边缘计算和区块链技术，将现场产生的数据实时上传到云端，实现数据的高效分析与管理，提升数据的安全性和应用能力；大数据技术结合边缘计算、工业物联网以及5G技术，实现了智能制造全流程的状态感知、实时传递、精确分析、科学决策、精准执行。

5.5.2 汉钟黑灯压缩机生产线

上海汉钟精机股份有限公司成立于1998年，公司专门从事螺杆式压缩机、真空泵相应技术的研制开发、生产销售及售后服务，是中国大陆具有实力的压缩机生产厂家之一。

随着近年来云计算、工业4.0的发展和信息技术的不断进步，汉钟公司已具备ERP管理、自动仓储等相应系统平台，MES制造执行系统、PLM全生命周期管理系统、FMS柔性生产线、自动化生产线等系统，以提高公司的智能化水平、降低能耗、提高生产效率、节能环保。



图5.5-1 汉钟智能制造生产线

为此，汉钟公司通过采用绿色建筑技术建设改造厂房、合理布局厂区内能量流、物质流路径、推广绿色设计和绿色采购、开发生产绿色产品、采用先进适用的清洁生产工艺技术和高效末端治理装备、淘汰落后设备、建立资源回收循环利用机制、推动用能结构优化等策略，来实现工厂的绿色发展。此外，汉钟公司聚焦重点用能工艺、重点用能区间和设备、逐步进行节能改造，提升终端用能设备能效。通过改善工厂的环境和实施先进适用的绿色制造工艺等清洁生产技术，积极控制生产全过程中产品CO₂的排放量，并对再生资源进行有效利用，以降低污染物排放强度，落实清洁生产技术改造。



图5.5-2 汉钟智能制造车间环境

5.5.3 冰轮智能制造车间

哈特福德压缩机数字工厂由冰轮环境技术股份有限公司投资建设，是一座复杂离散型压缩机智能原生工厂，同时也是冰轮环境建设的具有自主知识产权的绿色低碳制造示范园区。

压缩机数字工厂是冰轮对典型多品种小批量离散行业智能制造的深入探索和技术上的重大突破。工厂主要由壳体精加工智造单元、转子柔性智造单元、自动零件清洗线、精细化物流作业系统、螺杆压缩机自适应智能装配线、离心压缩机生产线、离心压缩机组装配线等组成，涵盖了毛坯、机加工、装配、后处理等完整的制造过程。工厂的智能系统中汇聚了50多个系统的数据，基于数字技术与工业知识的融合，利用数字孪生体+智能决策优化算法进行自动排程和任务分派，智能化工艺设备与数字化平台一体化集成，可实现人机物数高度协同；此外，工厂依托基于MICC的综合能效管控平台，智能装备与数字化系统平台一体化集成，实现了纵向、横向、端到端的全域集成和深度融合。这些智能制

造相关技术为订单交付、产品的全生命周期以及工厂的运行提供了坚实的保障。

不同于大批量制造企业，哈特福德压缩机数字工厂目前承担着螺杆、离心两大类上千种产品全品类定制生产，不同客户需求不同，投产的产品没有批量，很难形成规模效应，过度的追求自动化，成本压力和技术难度都很大。针对这种多品种小批量离散行业智能制造，冰轮在建设智能压缩机工厂中，探索数智化环境下生产方式和制造模式，不为了数字化而数字化，将数字化与精益相结合，从精益运营和数字系统融合架构入手，搭建了整个智能工厂。

数智驱动、构建共生、赋能超越，冰轮在满足自身数字化建设需要的同时，积极面向数字工厂规划建设、智能制造咨询服务、离散制造企业数字化运营平台建设、业务协同平台建设、供应链协同平台建设、产品全生命周期服务平台建设、工业互联网平台建设等领域，为客户提供数智化解决方案，构建共享共建共赢的价值共创生态共同体。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张滕静, 贾玲玉, 韩好许. 可再生能源在暖通空调系统中的具体应用分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(20): 168-171.
- [3] 李旭. 可再生能源在暖通空调中的应用分析[J]. 住宅与房地产, 2018(24):280.
- [4] 简晓敏. 新能源和可再生能源在暖通空调系统中的应用[J]. 江西建材, 2020(4):78-79.
- [5] 费本华, 马欣欣, 覃道春, 等. 工业冷却塔制冷新材料——竹材[J]. 世界竹藤通讯, 2016, 14(1):31-35.
- [6] 赵文俞, 桑夏晗, 魏平, 等. 热电制冷向热电磁制冷变革的关键材料研究进展[C]//: 中国稀土学会2020学术年会暨江西(赣州)稀土资源绿色开发与高效利用大会. 赣州: 中国稀土学会, 2020.
- [7] WANG Shuhua, ZHU Weidong, ZHANG Yan, et al. A breakthrough in the industrialization of manufacturing technology for new mainstream low-GWP refrigerants in China[J]. Engineering, 2017, 3(3): 280.
- [8] Li P, Wang A, Fan J, et al. Thermo-optically designed scalable photonic films with high thermal conductivity for subambient and above-ambient radiative cooling[J]. Advanced Functional Materials, 2022,32(5):2109542.

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.1 热声制冷



罗二仓 Luo Ercang

男，中国科学院理化技术研究所副所长，研究员，博士生导师，国家杰出青年基金获得者，新世纪百千万人才工程国家级人选，国务院政府津贴获得者。主要研究方向为：新型制冷与低温技术、热声斯特林制冷/发电技术等。研究成果曾获得国家技术发明二等奖以及中国物理学会胡刚复实验物理奖等国家、省部级奖励。发表论文300余篇，有近200篇为SCI、EI及ISTP收录，申请专利100余项。所培养的博士研究生中有多名获得国际会议优秀论文奖励、中科院院长奖等。



吴张华 Wu Zhanghua

男，博士，中国科学院理化技术研究所高级工程师，主要从事热声发动机与热声制冷机等研究工作。迄今为止发表论文50余篇、申请专利30余项。

双碳目标的提出将推动我国制冷行业的技术变革，是新兴制冷技术发展的重要契机。热声制冷是一种新型的环保制冷技术，其工作原理是可压缩气体在交变压力作用下气体与固体介质复杂的热相互作用（压缩、膨胀、吸热、放热）而产生制冷泵热效应，该效应可用于制冷或热泵。由于工质气体为氦气、氮气等不活泼的自然工质，因此热声制冷是一种环境友好、工作温度范围宽、制冷性能好、完全环保的制冷技术，非常符合双碳背景下的发展要求。

图6.1-1所示为热声制冷机核心单元。按照热声

学原理，回热器（也称热声换能器）是发生热声效应的场所，其内部工质气体微团在交变压力波作用下，不断经历压缩与膨胀过程，同时气体微团往复运动，与周围固体产生热量交换，最终实现将冷端的热量接力泵送至热端的“泵热效应”。如果热端为环境，利用冷端冷量的机器即为制冷机；如果冷端为环境，利用热端热量的机器则为热泵。驱动热声制冷机的压力波动可由电驱动或热驱动压力波发生器产生，前者通常为直线压缩机，后者为热声压力波发生器。压力波动发生器与热声制冷机结合分

别组成电驱动或热驱动的热声制冷机或热泵。

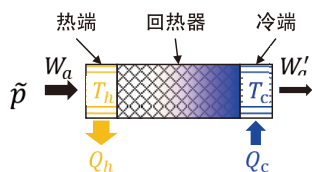


图6.1-1 热声制冷机核心单元示意图

追求高效率是双碳背景下制冷技术的第二个重要需求。实现高效热声制冷的关键主要有两个方面：1) 热声制冷机回热器处于行波为主的声场且声阻抗大，行波声场可使热声制冷机实现可逆的热力循环，而大的声阻抗可以减少回热器损失；2) 对热声制冷机核心单元出口声功加以回收。热声制冷机核心单元出口声功大致等于制冷量，且随着制冷温度的升高出口声功占入口声功的比例不断增加，例如在液氮温区该占比约为20%，但在0℃附近该占比将升至80%左右。可见声功回收对于效率提升的重要性。

本部分主要介绍可回收声功的行波热声制冷机的发展。

6.1.1 研究进展

行波热声制冷机的声功回收同时伴随着相位的调节，因此常被称作调相机构。按照声功回收方式的不同，行波热声制冷机可分为机械型与声学型两种。机械型声功回收利用固体调相器组件的质量、刚度、面积等实现调相；声学型声功回收利用管道的声感、声容等声学特性实现调相。按照回收声功的用途不同，行波热声制冷机还可分为单作用与双作用两种。单作用行波热声制冷机回收的声功经调相后反馈至自身入口端，与压力波发生器输出的声功汇合后一起进入制冷机核心单元；双作用行波热声制冷机回收的声功经调相后反馈至其它核心单元的入口端。声功回收使得行波热声制冷机在结构上都呈首尾相连的回路形状。

(1) 单作用行波热声制冷技术

图6.1-2(a)所示为单作用行波热声制冷机示意图，图中行波热声制冷机核心单元出口声功经调相机构调相后反馈到入口，从而减少了输入功、提高了效率。当调相机构为机械的弹簧振子结构（又称排出器）时，即为图6.1-2 (b)的自由活塞斯特林制冷机；当调相机构为声学管道时，即为图6.1-2 (c)的经典行波热声制冷机。

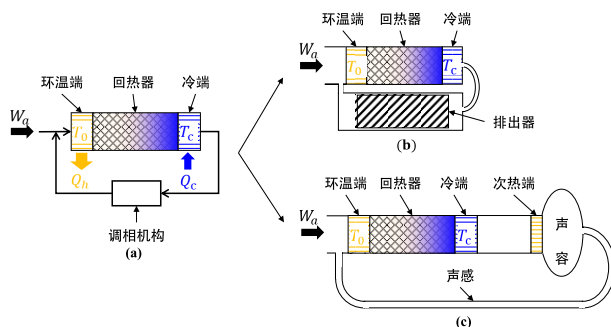


图 6.1-2 (a)带声功回收的行波热声制冷机；(b)固体自由活塞调相斯特林制冷机；(c)经典行波热声制冷机

在深冷温区，直线压缩机驱动的自由活塞斯特林制冷机替代工作在较低制冷温度的复叠蒸气压缩制冷技术应用是当前的热点之一。美国Stirling Ultracold公司（其前身是荷兰Global Cooling公司）在2010年前后推出了三款基于自由活塞斯特林制冷机的冰箱，可提供低至-80℃的低温环境。同时，该公司比较了采用自由活塞斯特林制冷机及传统复叠制冷机的冰箱能耗，结果表明前者的制冷系数是后者的1.5倍多。日本的Twinbird公司研制了多款基于自由活塞斯特林制冷机的便携式冰箱，制冷温度在-100~-80℃、制冷量在15~45W。在国内，宁波华斯特林公司研发了多款便携式冰箱，其制冷温度与制冷量与Twinbird公司产品相似。此外，中科院理化所、中国电子科技集团第16研究所、上海理工大学等机构也开展了类似的研究，其中中科院理化所研究的在-80℃温区的电驱动自由活塞斯特林热声制冷机的制冷系数可以超过0.5以上，比传统复叠蒸气压缩制冷技术的效率高40%以上。

热驱动自由活塞斯特林制冷机可利用高温热能实现制冷或热泵，是一种新型分布式供能技术，对于降低一次能源消耗有着重要意义。该系统包含自由活塞斯特林发动机及自由活塞斯特林制冷机，在结构上衍生出了双效自由活塞斯特林制冷机及自由活塞式VM制冷机两种，如图6.1-3所示。美国Sunpower公司首先提出了双效自由活塞斯特林机/热泵概念，并开展了一些初步研究。2020年，中科院理化所在双效自由活塞斯特林机研究方面取得一定突破，研制的样机在加热温度为500℃，冷端和供热温度分别为-20℃和45℃时，实现热制冷系数0.2、整机性能系数1.39（供热2840W、发电121W）。1992年，德国多特蒙德大学最早提出了自由活塞式VM制冷机概念，此后川崎重工、三洋电气、三菱及三星

电子等公司开展了较多的研究工作。近年来，美国 ThermoLift 公司研制了一台自由活塞 VM 空调，可实现 12kW 的制冷量，对应的制冷系数 1.0，显示出了很好的应用前景。

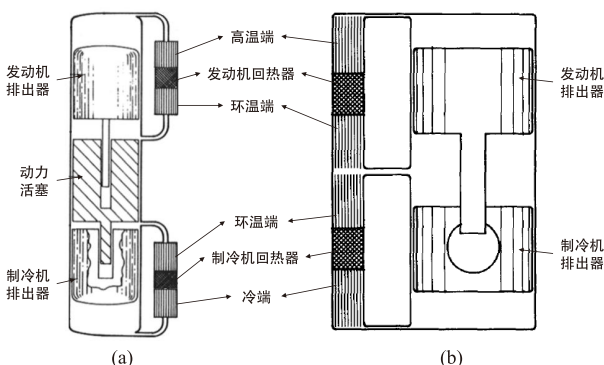


图6.1-3 (a)双效自由活塞斯特林制冷机；(b)自由活塞 VM 制冷机

经典行波热声制冷机利用管道的声学特性进行调相，消除了排出器运动部件，提高了可靠性及寿命。为了追求压力波发生器也无运动部件，经典行波热声制冷机的研究主要集中在热驱动方向，即采用热声发动机作为驱动源。2006年，中科院理化所采用行波热声发动机驱动的行波热声制冷机，实验达到的最低制冷温度为 -64.4°C ，在 -22.1°C 制冷温度下获得了 250W 制冷量，热制系数约 0.11。

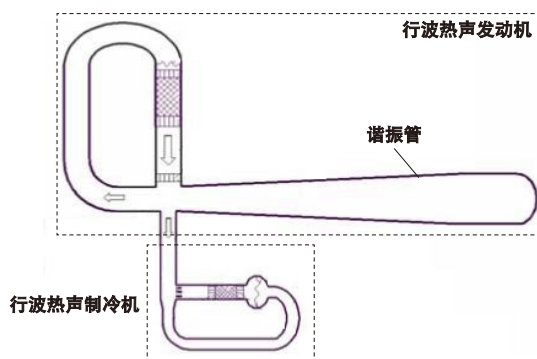


图6.1-4 行波热声发动机驱动的行波热声制冷机示意图

(2) 双作用行波热声制冷技术

双作用行波热声制冷的研究主要集中在热驱动方向。同时，为了追求紧凑性，将一个或多个热声发动机核心单元与热声制冷机核心单元布置在同一个回路中，制冷机出口的声功不直接反馈到自身入口，而是经调相后输运至其它发动机或制冷机核心单元加以利用。调相机构可以是管道（谐振管）或者液体振子。与单作用的经典行波热声制冷流程不

同，这里的管道或振子质量还决定着系统的工作频率，通常长度较长。

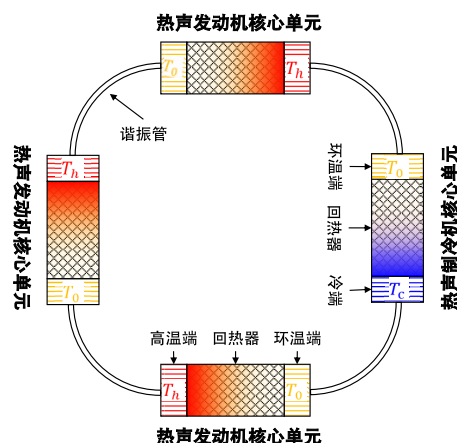
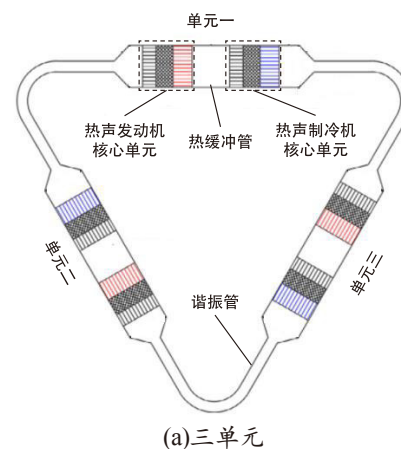
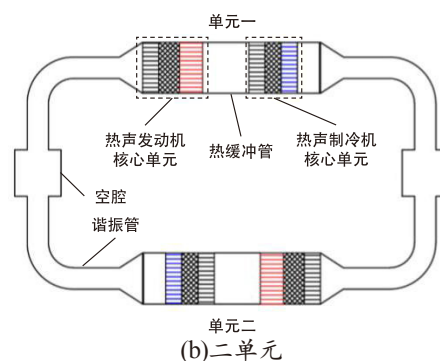


图6.1-5 热驱动双作用行波热声制冷机

2012年，荷兰的 K. De Blok 提出了三个热声发动机核心单元驱动一个热声制冷机核心单元的热驱动双作用行波热声制冷机流程（图6.1-5），并在此基础上研发了 25~40kW 冷量的空调产品。2017年，中科院理化所采用相似流程实验获得了 130K 下 670W 制冷量、相对卡诺效率 8.3%。



(a)三单元



(b)二单元

图6.1-6 直连型热驱动双作用行波热声制冷机

为了减少谐振管的声功损失、进一步提高性能，2018年中科院理化所提出了直联型的三单元热驱动双作用热声制冷机流程，将热声发动机核心单元与热声制冷机核心单元通过热缓冲管直接相连，如图6.1-6(a)所示。实验在加热温度为300℃、环境温度为50℃、冷端温度为10℃的工况下，获得3.3kW制冷量、热制冷系数0.22。在此基础上，2022年又研制了两单元制冷系统，在加热温度为300℃、冷端温度为0℃、环境温度为50℃时，获得3.9kW制冷量、热制冷系数0.31。此外，还提出了采用液体谐振子替代谐振管的方案，进一步减少了谐振管声功损失，同时还可以降低加热温度。实验在加热温度为300℃、冷端温度为0℃、环境温度50℃时，获得制冷量5.14kW、热制冷系数0.455。近期，中科院理化所提出了热驱动液体活塞制冷机新流程，其空调制冷温区或热泵供暖温区的性能有突破性提高，二者在理论上均有达到2.0以上的发展潜力。

6.1.2 关键技术

从热声制冷的发展上看，尽管在技术上已取得很大的发展，但一些关键技术仍需要进一步创新突破，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) 在电驱动热声制冷方面，自由活塞斯特林制冷机具有效率高、结构紧凑的优势，已经在低温及深冷温区率先获得应用。然而，当冷端温度升至0℃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约占入口声功比重大，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。相关直线压缩机技术还有待进一步完善。

2) 在热驱动热声制冷方面，对于带有运动部件的双效自由活塞斯特林制冷机与自由活塞VM制冷机

来说，面临着尺寸大、运动部件多的问题，未来减小尺寸、提高可靠性是关键。对于无运动部件的热驱动热声制冷机来说，仍需要进一步提升性能，一方面可通过液体谐振子等来减小谐振机构的声功损失，另一方面还要依赖于整机声场的构建以及流程的创新。

6.1.3 产业化应用

随着双碳目标的提出，我国制冷行业将迎来重大变革，为新技术的发展带来了机遇。针对现有制冷技术工质不环保、工作温区受限、极端条件下制冷性能不高等缺点，热声制冷技术在突破上述关键技术后，有可能在以下场合获得应用：

1) 深冷温区电驱动制冷机。现有研究表明，相比已有的复叠制冷技术，热声制冷技术在性能上可提高50%以上。同时，还可以摆脱现有对环境有影响的工质。相关技术国外已经有产品，国内实验室已完成性能技术上的突破，下一步是实现工程化研究。

2) 电驱动大温差热泵，包括用于寒冷区域的移动或非移动式电驱动热泵、用于工艺过程的电驱动高温热泵等。大温差热泵应用范围广，节能空间大，但传统蒸气压缩制冷技术难以满足需求，热声制冷技术在实现大温差制冷和供热方面具有优势，是发展的重要方向。

3) 燃烧热驱动的高效率热声空气源热泵。相比现有利用天然气等燃料直接燃烧采暖，燃料燃烧热驱动的空气源热泵技术可在满足相同需求下大幅减少燃料消耗，减少一次能源消耗，实现节能与减排。采用新型流程的液态活塞热声制冷和热泵有很大发展潜力，具有实现制冷系数和制热系数2.0以上的发展潜力。

4) 中低品位太阳能、动力余热等驱动的热声制冷。太阳能是清洁能源，利用集热器汇集后可得到中低品位的热，进而实现制冷，可以减少一次能源消耗。动力余热利用也可以减少一次能源的消耗。

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.2 磁制冷



沈 俊 Shen Jun

北京理工大学机械与车辆学院教授。2019年获得国家杰出青年科学基金项目，2017年入选中组部万人计划“青年拔尖人才”。长期从事新型制冷与极低温技术的基础和应用研究，开展了“材料、关键技术和工程应用”的全链条研发工作。

（发表第一/通讯作者论文80余篇，获授权国家发明专利65项，国际发明专利2项。先后获科学探索奖、中国青年科技奖、中国青年女科学家奖，吴仲华优秀青年学者奖等。目前担任国际学术期刊Applied Thermal Engineering副主编，中国制冷学会低温专业委员会委员等。）



李振兴 Li Zhenxing

北京理工大学助理研究员。围绕最具潜力制冷技术—磁制冷，揭示了主动磁制冷循环的高效热功转换和输运机理，解决磁制冷中高效器件及多级制冷的难题，研制出一系列实用化且达到了产业化测评标准的磁制冷样机。

（累计发表SCI/EI论文30余篇；申请国家发明专利30余项，授权10余项；国内外学术分会报告8次（国际2次）。荣获北京市科学技术二等奖、第五届全国工程硕士实习实践优秀成果、中国制冷学会制冷创新大赛优胜奖等。）

磁制冷是一种基于磁性材料热效应的固态制冷技术，具有作用温区广泛、本征制冷效率高、材料资源广泛的优点，是低温与制冷领域中最具潜力制冷技术之一。近年来，大量不同温区磁热材料被发现与合成，磁制冷逐步发展成可覆盖全温区的制冷与低温技术。尤其在极低温领域，极低温磁制冷（又称为绝热去磁制冷）不受重力影响、不依赖稀缺工质³He等突出优点，逐步成为空间探测、量子计算等前沿科学的主流低温技术。

6.2.1 研究进展

磁制冷是基于磁性材料在励磁状态时释放热量、退磁状态时吸收热量的磁热效应发展而来的固态制冷技术，其本质是磁性材料内部磁矩有序度的变化^[1-3]。拥有该效应的材料被称为磁热材料，又称为磁制冷材料。磁热材料的性能表征参数主要包括绝热温变 ΔT_{ad} 、等温磁熵变 ΔS_M 、相变温度与半峰宽等。根据磁热材料的相变温度的不同^[4]，通常可将磁制冷分为室温、低温与极低温磁制冷。表6.2-1所示

为不同温区磁制冷技术特点及典型研究机构。

表6.2-1 不同温区磁制冷技术特点及典型研究机构

名称	技术特点	典型研究机构
极低温磁制冷 ($\leq 1\text{ K}$)	利用顺磁盐水合物等磁性材料，构建磁制冷卡诺循环，利用磁热模块中热总线等结构强化传热，获取冷量	中科院理化所、北京理工大学、清华大学、中科院赣江院、美国航天局、欧洲航天局等 ^[5-10]
低温磁制冷 ($4\sim 20\text{ K}$)	利用RFeSi (R为稀土) 基为代表的磁性材料，构建主动磁制冷或者复合制冷循环，传热介质通常为氦气等	中科院理化所、北京理工大学、中科院物理所、中科院赣江院、日本国立材料研究所、美国太平洋西北实验室等 ^[11-16]
室温磁制冷	利用Gd基、LaFeSi基等磁性材料，构建主动磁制冷循环，传热介质通常为水等介质	中科院理化所、包头稀土研究院、中科院物理所、丹麦技术大学、加拿大维多利亚大学等 ^[17-21]

极低温磁制冷技术发展较早，20世纪初P. Langevin^[22]在顺磁材料中观察到了励磁放热与退磁吸热的磁热效应，随后P. Debye^[23]和W.F. Giauque^[24]开展了基于顺磁盐中磁无序到有序转变过程获取低温研究，并利用 $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 顺磁盐获得了250 mK最低温度^[25]。随着空间探测等前沿科学应用需求增加，极低温绝热去磁制冷凭借不依赖重力、结构紧凑、制冷效率高、不依赖稀缺 ^3He 等优点，已成为空间探测、量子技术、凝聚态物理等前沿科学中主流极低温制冷技术^[26-29]。近年来，极低温绝热去磁制冷机(ADR)逐步由单级向多级、由间歇制冷向连续制冷发展^[30-33]。以美国宇航局与欧洲航天局为代表的研究机构，开展了多级连续制冷ADR的设计与研制工作，并通过各级间的时序匹配实现了50 mK低温^[32]。以美国HPD、德国Kiutra为代表的仪器公司，相继推出商用ADR低温恒器，广泛应用前沿科学发展。近年来，我国的极低温应用需求快速增长，目前国内所使用的极低温设备几乎全部来自进口。尽管我国极低温磁制冷在上世纪80年开展研究，与国际水平仍存在较大差距，前期研究主要围绕绝热去磁现象展开^[34-35]。直至2019年，沈俊研究团队开展了自主可控绝热去磁样机研制工作^[36-37]，先后构建了单级、复叠式和连续制冷ADR系统，其中复叠式ADR实现了宽制冷温跨下运行，最低制冷温度获得了50mK以下的最低温度。

低温磁制冷技术研究起步较晚，当前主要集中在磁热材料成份调控磁热性能研究中^[4,38]，低温整机流程与架构研究相对较少。由于磁热材料的绝热温

变有限，在液氦温区附近通常将磁制冷与其它制冷技术相结合，构建复合磁制冷技术^[39-44]。与此同时，液氢温区磁制冷技术也逐步被重视，更多集中在流程设计与数值优化方面，如2020年起，沈俊研究团队开展20~77 K温区多级磁制冷系统的制冷流程优化工作^[45-46]。相比其他温区磁制冷技术，室温磁制冷技术发展相对成熟，已有上百台磁制冷原型机与整机系统^[47-49]。当前室温磁制冷样机普遍采用了性能优异、磁路结构多样的永磁磁体组作为其磁场源，由此构成了不同运动部件或者形式的磁制冷样机。2017年起，沈俊研究团队采用嵌套式Halbach永磁磁体组研制出旋转式室温样机^[50-51]，在10 K温跨下获得7.4的性能系数(基于实际压降与扭矩评测所得)，其比制冷量约122 W/kg^[52]。为了增加回热器的填充质量与所经历的制冷循环个数，多磁极-多回热器式样机结构逐步被采纳，丹麦技术大学采用内含2个强磁区和2个弱磁区的磁体组^[53]，研制出具备11个回热器的磁制冷机，在10 K制冷温跨下获得了约103 W的制冷量，改进后热力学第二效率为19.1 %^[54]。

6.2.2 关键技术

虽然磁制冷技术的基本原理相同，但不同温区的磁制冷系统组成与关键技术各不相同。采用磁制冷基本热力学循环(如卡诺循环)的极低温磁制冷系统(图6.2-1(a))主要由超导磁路系统、磁热模块及热开关等部件组成^[30-33]采用主动磁制冷循环的室温/低温磁制冷系统(图6.2-1(b))主要由磁体组、主动磁回热器、换热器及流路系统等部件组成^[47-49]。

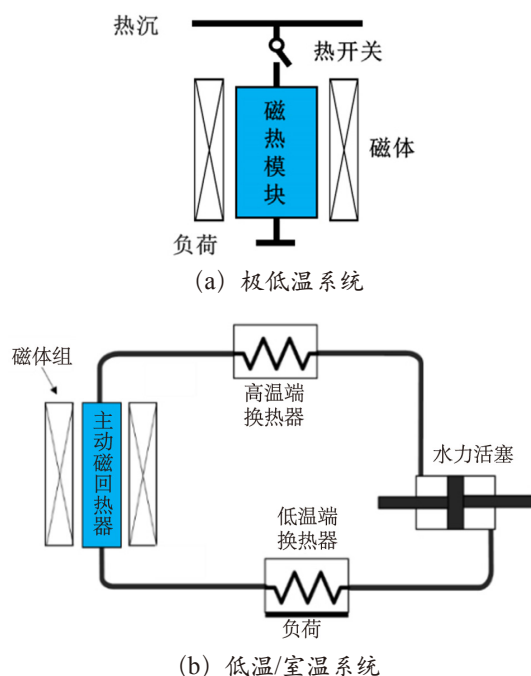


图6.2-1 磁制冷系统基本结构

在极低温磁制冷方面，关键技术难点主要在于磁热模块、热开关及多级流程架构与控制等方面。磁热模块是系统的冷量来源，由高性能磁热材料和高效传热结构两部分构成^[55-64]。极低温磁热材料通常为含磁性原子或离子的顺磁性金属化合物，导热性能不佳，大熵变密度与高传热速率的磁热模块的制备工艺是其关键技术之一^[62-67]。热开关用于控制磁热模块与外界传热状态，其性能的优劣很大程度上决定了整机设计^[68-73]，因此亟需开展更大开关比、更低寄生热和更快响应速度的高性能热开关。为了实现更宽制冷温跨、更高制冷功率与更低制冷温度，构建多级流程架构需要考虑级间温区划分、材料选择及运行时序等参数^[9,10,32,74-77]间优化匹配，这是实现多级连续制冷的最为关键的技术之一。

在低温与室温磁制冷方面，由于整机系统普遍采用了主动磁回热器，其流固间的传热性能是整机性能提升的关键技术之一^[49]。由于低温磁制冷技术起步较晚，尚未建立起成熟的完整研究理论体系，仍需要从材料的筛选、回热器制备及整机流程架构上面开展相关攻关研究^[15,78,79]。室温磁制冷技术相对成熟，提高整机的制冷功率密度仍是当前的研究重点，尤其是多磁极-多回热器式的整机架构将会是室温磁制冷实用化发展趋势^[18,49,54,80-83]。尽管当前有若干多磁极-多回热器式样机被研制成功，如何保证单个

回热器的时序匹配仍然是室温磁制冷的难点之一^[83-85]。沈俊团队开展了磁场-流场时序匹配研究^[51-52]揭示了间歇式与连续式磁场-流场时序的作用规律，为高效室温磁制冷整机运行提供了重要的指导。

6.2.3 产业化应用

作为最具应用前景的固态制冷技术之一，磁制冷涉及磁学、热力学、传热学等多学科间的交叉与融合，整机系统的设计理论与实验方法逐步被完善。当前具有较大产业化应用前景的是室温与极低温磁制冷技术，低温磁制冷技术仍需继续完善材料匹配及整机架构优化等基础研究工作。对于室温磁制冷来说，已有多家知名机构与企业对室温磁制冷产业化进行了探索研究^[86]，室温磁制冷系统仍面临着成本高、制冷系统体积偏大、增加制冷温跨时制冷性能低、磁路设计不合理等问题。对于极低温磁制冷来说，我国起步较晚，尽管国际上已出现以美国HPD (High Precision Devices) 公司为代表的商业ADR产品^[87]，我国仍需大力推进极低温磁制冷基础研究及其相关产业发展，为我国量子科学、深空探测等尖端前沿科学提供自主可控的系统级低温保障。随着磁制冷及其相关技术的迭代，相信磁制冷在制冷与低温领域注定占据一席之地，为推动我国低温制冷技术的发展与升级优化贡献力量。

参考文献

- [1] TISHIN A M, SPICHKIN Y I. The magnetocaloric effect and its applications [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2003.
- [2] PECHARSKY V, GSCHNEIDNER K, PECHARSKY A, et al. Thermodynamics of the magnetocaloric effect[J]. Physical Review B, 2001, 64(14): 144406.
- [3] OESTERREICHER H, PARKER F T. Magnetic cooling near Curie temperatures above 300 K[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(12): 4334-4338.
- [4] 郑新奇, 沈俊, 胡凤霞, 等. 磁热效应材料的研究进展[J]. 物理学报, 2016, 65(21): 7-40.
- [5] XIE Huicai, TIAN Lu, CHEN Qi, et al. Giant and reversible low field magnetocaloric effect in LiHoF(4) compound[J]. Dalton Transactions (Cambridge, England: 2003), 2021, 50(47): 17697-17702.
- [6] LIU Ping, LI Ke, WANG Chang, et al. Requirement of the on/off ratio of superconducting heat switch used for the continuous stage of cADR [C]//Cryogenic Engineering Conference, 2021, Hawaii, USA.

- [7] JIN Hai, SHEN Jun, LI Chengzhe, et al. Development of adiabatic demagnetization refrigerator for future astronomy missions[C]// Cryogenic Engineering Conference, 2021, Hawaii, USA.
- [8] SHIRRON P, CANAVAN E, DIPIRRO M, et al. A multi-stage continuous-duty adiabatic demagnetization refrigerator[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 2000: 1629-1638.
- [9] DUVAL J, ATTARD A, BRASILIANO D. Experimental results of ADR cooling tuned for operation at 50 mK or higher temperature[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 755(1): 012122.
- [10] BETANCOURT-MARTINEZ G, PAJOT F, BEAUMONT S, et al. A test platform for the detection and readout chain for the Athena X-IFU[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 2(55): 41-42.
- [11] ZIMM C B, BARCLAY J A, HARKNESS H H, et al. Magnetocaloric effect in thulium[J]. Cryogenics, 1989, 29(9): 937-938.
- [12] WADA H, TOMEKAWA S, SHIGA M. Magnetocaloric properties of a first-order magnetic transition system ErCo₂[J]. Cryogenics, 1999, 39(11): 915-919.
- [13] TISHIN A M, SPICHKIN Y I. The Magnetocaloric effect and its applications[J]. Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia, 2003, 475.
- [14] ZHENG X Q, CHEN J, SHEN J, et al. Large refrigerant capacity of R_{Ga} (R=Tb and Dy) compounds[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7): 07A917.
- [15] NUMAZAWA T, KAMIYA K, UTAKI T, et al. Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction[J]. Journal of Physics Conference Series, 2014, 62: 185-192.
- [16] FENG T S, CHEN R K, IHNfeldt R V. Modeling of hydrogen liquefaction using magnetocaloric cycles with permanent magnets [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 119:238-246.
- [17] HE X N, GONG M Q, ZHANG H, et al. Design and performance of a room-temperature hybrid magnetic refrigerator combined with Stirling gas refrigeration effect[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(5): 1465-1471.
- [18] APREA C, GRECO A, MAIORINO A, et al. Initial experimental results from a rotary permanent magnet magnetic refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 43: 111-122.
- [19] ARNOLD D, TURA A, RUEBSAAT-TROTT A, et al. Design improvements of a permanent magnet active magnetic refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 37: 99-105.
- [20] GSCHNEIDNER K A J. Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂)[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(23): 179-184.
- [21] HU Fengxia, SHEN Baogen, SUN Jirong, et al. Influence of negative lattice expansion and metamagnetic transition on magnetic entropy change in the compound LaFe_{11.4}Si_{1.6}[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(23): 3675-3677.
- [22] LANGEVIN P. Une formule fondamentale de theorie cinetique[J]. Annales De Chimie Et De Physique, 1905, 5245-288.
- [23] DEBYE P. Einige bemerkungen zur magnetisierung Bei tiefer temperatur[J]. Annalen Der Physik, 1926, 386(25): 1154-1160.
- [24] GIAUQUE W F. A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. a proposed method of producing temperatures considerably below 1° absolute[J]. Journal of the American Chemical Society, 1927, 49(8): 1864-1870.
- [25] GIAUQUE W F, MACDOUGALL D P. Attainment of temperatures below 1° absolute by demagnetization of Gd₂(SO₄)₃·8H₂O[J]. Physical Review, 1933, 43(9): 768.
- [26] TUTTLE J, SHIRRON P, DIPIRRO M, et al. The HAWC and SAFIRE adiabatic demagnetization refrigerators[J]. Cryogenics, 2001, 41(11/12): 781-787.
- [27] DUVAL J M, PROUVÉ T, SHIRRON P, et al. LiteBIRD cryogenic chain: 100 mK cooling with mechanical coolers and ADRs[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2020, 199(3): 730-736.
- [28] SERLEMITSOS A T, MELUGIN R K, PRUITT G R, et al. Spaceworthy ADR: recent developments[C]. Proceedings of SPIE-International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [29] SHIRRON P, KIMBALL M, WEGEL D, et al. ADR design for the soft X-ray spectrometer instrument on the astro-H mission[J]. Cryogenics, 2010, 50(9): 494-499.
- [30] SERLEMITSOS A T, SANSEBASTIAN M, KUNES E S. Final design of the XRS/Astro-E ADR[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1998, 43:957-963.
- [31] WHITEHOUSE P L, SHIRRON P J, KELLEY R L. The X-ray microcalorimeter spectrometer (XMS): a reference cryogenic instrument for Constellation-X[J]. Cryogenics, 2004, 44(6-8): 543-549.
- [32] SHIRRON P, WEGEL D, DIPIRRO M. A continuous adiabatic demagnetization refrigerator for cooling to 10 mK and below [J]. American Institute of Physics, 2006, 850(1): 1573-1574.
- [33] JAMES B, MARTINEZ R, SHIRRON P, et al. Mechanical design of a 3-stage ADR for the Astro-H mission[J]. Cryogenics, 2012, 52:102-113.
- [34] 万绍宁, 容锡桑. 顺磁盐绝热去磁超低温实验装置及其

- 温度测量[J]. 低温物理学报, 1987, 9(2): 133-138.
- [35] 冉启泽, 李金万. 内预冷顺磁盐绝热去磁装置和国产 RS-11 型实芯碳电阻的极低温电阻特性[J]. 低温物理学报, 1990, 12(2): 131-134.
- [36] 王昌, 李珂, 沈俊, 等. 用于亚开温区的极低温绝热去磁制冷机[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 263-269.
- [37] 王昌, 李珂, 刘萍, 等. 亚开温区无间歇绝热去磁制冷机[J]. 工程热物理学报, 2022.
- [38] ZHANG H, GIMAEV R, KOVALEV B, et al. Review on the materials and devices for magnetic refrigeration in the temperature range of nitrogen and hydrogen liquefaction[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2019, 558: 65-73.
- [39] JEONG S, SMITH J L. Magnetically augmented regeneration in stirling cryocooler[M]. Boston, MA: Springer US, 1994: 1399-1405.
- [40] YAYAMA H, MAKIMOTO Y, TOMOKIYO A, et al. Hybrid cryogenic refrigerator: Combination of Brayton magnetic-cooling and Gifford-McMahon gas-cooling system[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(7A): 4220-4224.
- [41] KIM Y, PARK I, JEONG S. Experimental investigation of two-stage active magnetic regenerative refrigerator operating between 77K and 20K[J]. *Cryogenics*, 2013, 57: 113-121.
- [42] 和晓楠, 公茂琼, 张弘, 等. 一种耦合斯特林制冷效应的复合式磁制冷循环的数值模拟[J]. 低温与超导, 2013, 41(4): 13-18, 44.
- [43] SHEN J, GAO X, LI K, et al. Experimental research on a 4 K hybrid refrigerator combining GM gas refrigeration effect with magnetic refrigeration effect[J]. *Cryogenics*, 2019, 99: 99-104.
- [44] LI K, GUO X, DAI W, et al. Numerical simulation of a low temperature hybrid refrigerator combining GM gas expansion refrigeration with magnetic refrigeration[J]. *Cryogenics*, 2021, 113: 103235.
- [45] 郑文帅, 李振兴, 李珂, 等. 60 K-80 K 温区主动磁回热器性能影响因子的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2022(11): 2904-2913.
- [46] ZHENG Wenshuai, LI Zhenxing, LI Ke, et al. Numerical optimization of multistage magnetic refrigeration system in the temperature range of liquid hydrogen[C]// The 23th Word Hydrogen Energy Conference. Istanbul, Turkey, June 26th-June 30th, 2022.
- [47] YU B, LIU M, EGOLF P W, et al. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(6): 1029-1060.
- [48] SCARPA F, TAGLIAFICO G, TAGLIAFICO L A. A classification methodology applied to existing room temperature magnetic refrigerators up to the year 2014[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 497-503.
- [49] 李振兴, 李珂, 沈俊, 戴巍, 高新强, 郭小惠, 公茂琼. 室温磁制冷技术的研究进展% Progress of room temperature magnetic refrigeration technology[J]. 物理学报, 2017, 66(11): 1-17.
- [49] 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.
- [50] 李振兴, 李珂, 沈俊, 等. 小型室温磁制冷系统的改进及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(3): 521-525.
- [51] LI Zhenxing, SHEN Jun, LI Ke, et al. Assessment of three different gadolinium-based regenerators in a rotary-type magnetic refrigerator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 153: 159-167.
- [52] HAI Peng, SHEN Jun, LI Zhenxing, et al. Influence of different magnetic field profiles on the performance of a rotary magnetic refrigerator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022.
- [53] ERIKSEN D, ENGELBRECHT K, BAHL C, et al. Design and experimental tests of a rotary active magnetic regenerator prototype[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 58: 14-21.
- [54] FORTKAMP F, ERIKSEN D, ENGELBRECHT K, et al. Experimental investigation of different fluid flow profiles in a rotary multi-bed active magnetic regenerator device[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 91: 46-54.
- [55] LIU Wang, LIANG Fei, CHEN Yuwei, et al. Large magnetocaloric effect in $\text{Li}_3\text{K}_9\text{Gd}_3(\text{BO}_3)_7$ crystal featuring sandwich-like three-dimensional framework[J]. *Inorganic Chemistry*, 2021, 60(9): 6796-6803.[PubMed]
- [56] MCMICHAEL R D, RITTER J J, SHULL R D. Enhanced magnetocaloric effect in $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{-xFexO}_{12}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(10): 6946-6948.
- [57] LEVITIN R, SNEGIREV V, KOPYLOV A, et al. Magnetic method of magnetocaloric effect determination in high pulsed magnetic fields[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1997, 170(1/2): 223-227.
- [58] BARCLAY J A, STEYERT W A. Materials for magnetic refrigeration between 2 K and 20 K[J]. *Cryogenics*, 1982, 22(2): 73-80.
- [59] GARETT C. The thermal conductivity of potassium chrome alum at temperatures below one degree absolute[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1950, 41(318): 621-630.
- [60] PARPIA J M, KIRK W P, KOBIELA P S, et al. A comparison of the ^3He melting curve, $T_c(P)$ curve, and the susceptibility of lanthanum-diluted cerium magnesium nitrate below 50 mK[J]. *Journal of Low Temperature*

- Physics, 1985, 60(1-2): 57-72.
- [61] PAULSON D N, KRUSIUS M, WHEATLEY J C, et al. Magnetic thermometry to below one millikelvin with lanthanum-diluted cerium magnesium nitrate[J]. Journal of Low Temperature Physics, 1979, 34(1): 63-82.
- [62] HOSHINO A, TOKOI K, ISHISAKI Y, et al. Fabrication of CPA salt pill with circulating solution method[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2008, 151(3): 655-661.
- [63] HORNUNG E W. Magnetothermodynamics of gadolinium gallium garnet. II. Heat capacity, entropy, magnetic moment from 0.5 to 4.2° K, with fields to 90 kG, along the [111] axis[J]. Journal of Chemical Physics, 1974, 61(1): 282-291.
- [64] BRODALE G E. Magnetothermodynamics of gadolinium gallium garnet. III. Heat capacity, entropy, magnetic moment from 0.5 to 4.2° K, with fields to 90 kG along the [110] axis[J]. Journal of Chemical Physics, 1975, 62(10): 4041.
- [65] HAGMANN C, BENFORD D J, RICHARDS P L. Paramagnetic salt pill design for magnetic refrigerators used in space applications[J]. Cryogenics, 1994, 34(3): 213-219.
- [66] SHIRRON P, DIPIRRO M J, CANAVAN E R. Improved design and fabrication of hydrated-salt pills[J]. Nasa Tech Briefs, 2011.
- [67] JANG D, GRUNER T, STEPPKE A, et al. Large magnetocaloric effect and adiabatic demagnetization refrigeration with YbPt₂Sn[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8680.
- [68] CHILDS G E, ERICKS L J, POWELL R. Thermal conductivity of solids At room temperature and below: A review and compilation of the literature[J]. Journal of Chemical Physics, 1973, 45(12): 4634-4639.
- [69] SERLEMITSOS A T, SANSEBASTIAN M, KUNES E. Design of a spaceworthy adiabatic demagnetization refrigerator[J]. Cryogenics, 1992, 32(2): 117-121.
- [70] DUBAND L. A Thermal switch for Use at liquid helium temperature in space-borne cryogenic systems[M]. Springer US, 1995: 731-741.
- [71] DIETRICH M, EULER A, THUMMES G. A lightweight thermal heat switch for redundant cryocooling on satellites[J]. Cryogenics, 2017, 83: 31-34.
- [72] 王昌, 王亚男, 刘远威, 等. 极低温绝热去磁制冷系统中的热开关[J]. 真空与低温, 2019, 25(5): 317-323.
- [73] CATARINO I, PAINE C. ³He gas gap heat switch[J]. Cryogenics, 2011, 51(1): 45-48.
- [74] SHIRRON P J, DIPIRRO M J, JIRMANUS M, et al. A portable, cryogen-free ultra-low temperature cooling system using a continuous ADR[J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 710(1): 1746-1753.
- [75] SHINOZAKI K, MITSUDA K, YAMASAKI N Y, et al. Development of double-stage ADR for future space missions[J]. Cryogenics, 2010, 50(9): 597-602.
- [76] SHIRRON P J. Applications of the magnetocaloric effect in single-stage, multi-stage and continuous adiabatic demagnetization refrigerators[J]. Cryogenics, 2014, 62: 130-139.
- [77] SHIRRON P J, KIMBALL M O, DIPIRRO M J, et al. Performance testing of the Astro-H flight model 3-stage ADR[J]. Physics Procedia, 2015, 67: 250-257.
- [78] HOLLADAY J, MEINHARDT K, POLIKARPOV E, et al. Annual progress report DOE hydrogen and fuel cells program[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2017, III.6, 1-8.
- [79] TEYBER R P, HOLLADAY J D, MEINHARDT K D, et al., Performance investigation of a high-field active magnetic regenerator[J]. Applied Energy 2019, 236: 426-436.
- [80] VUARNOZ D, KITANOVSKI A, GONIN C, et al. Modeling of a two-stage magnetic refrigerator with wavy-structure gadolinium heat exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 33(4): 745-752.
- [81] BJORK R, SMITH A, BAHL C R H. Analysis of the magnetic field, force, and torque for two-dimensional Halbach cylinders[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2010, 322(1): 133-141.
- [82] YOU Yonghua, GUO Yue, XIAO Shuifang, et al. Numerical simulation and performance improvement of a multi-polar concentric Halbach cylindrical magnet for magnetic refrigeration[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2015, 405: 231-237.
- [83] BAHL C, ENGELBRECHT K, ERIKSEN D, et al. Development and experimental results from a 1 kW prototype AMR[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 37: 78-83.
- [84] TEYBER R, TREVIZOLI P, NIKNIA I, et al. Experimental performance investigation of an active magnetic regenerator subject to different fluid flow waveforms[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 74: 38-46.
- [85] NAKASHIMA A D N, HOFFMANN G, LOZANO J A, et al. Performance assessment of solenoid valves as flow distributors for an active magnetic regenerator[C]. Thermag VIII-International Conference on Caloric Cooling, 2018 : 232-237.
- [86] SERGIU L, MICHEL R, CHRISTIAN M. A 15kW magnetocaloric proof-of-concept unit: Initial development and first experimental results[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 256-265.
- [87] CARTER F W. HPD olympus ADR cryostat control[M]. New York: 2010.

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.3 弹热制冷



钱苏昕 Qian Suxin

博士，西安交通大学能动学院副教授，博导，兼任国际制冷学会B1专委会青年委员，《Energy Storage and Saving》期刊青年编委。主要研究方向为新型固态制冷技术、制冷热泵系统节能与仿真技术。入选中国科协青年人才托举工程。

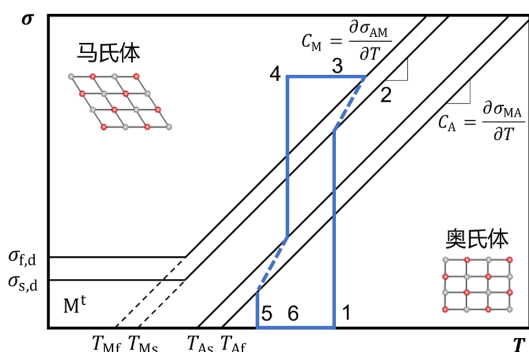
弹热制冷是利用单轴应力驱动弹热工质在卸载阶段产生制冷效应的制冷技术^[1]。弹热制冷现象的研究虽然起源于天然橡胶，但弹热制冷机在具有更高导热率和机械性能的形状记忆合金中得到了更快的发展。弹热制冷机的研究始于2010年，截至目前，全球范围已有接近20台弹热制冷、热泵原型机，系

统的制冷温差已超过30 K^[2]，最大制冷功率也已经超过100 W^[3]。绝大部分弹热制冷机使用镍钛形状记忆合金作为工质，也有个别采用天然橡胶为工质的系统^[4]。

6.3.1 研究进展

弹热制冷与磁制冷技术最大的区别在于材料的性能：基准弹热材料是商用的多晶镍钛二元合金，其加载、卸载过程的温变普遍在15 K以上，部分优异性能的商用合金可达30 K以上^[5]，是永磁体驱动的基准磁工质-钆的加磁、退磁温变的5~10倍。因此，弹热制冷、热泵系统不完全依赖主动回热循环，仍可采用单级循环或复叠循环。

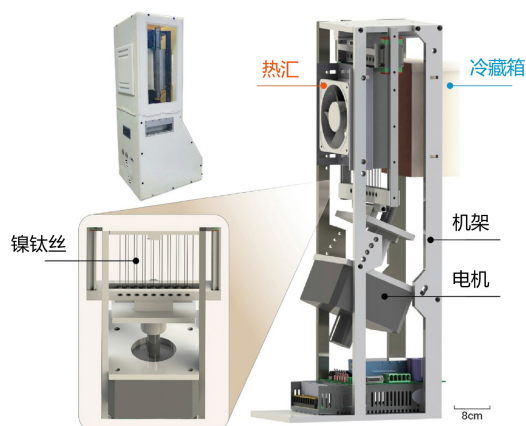
在单级和复叠弹热制冷循环中，弹热材料内部的温度基本是均匀的，不存在温度梯度，可以使用传统的热力学状态参数和循环过程描述方法。早期的单级弹热制冷机普遍采用固-固接触的传热设计，为了获得良好的传热性能，一般采用薄壁的形状记



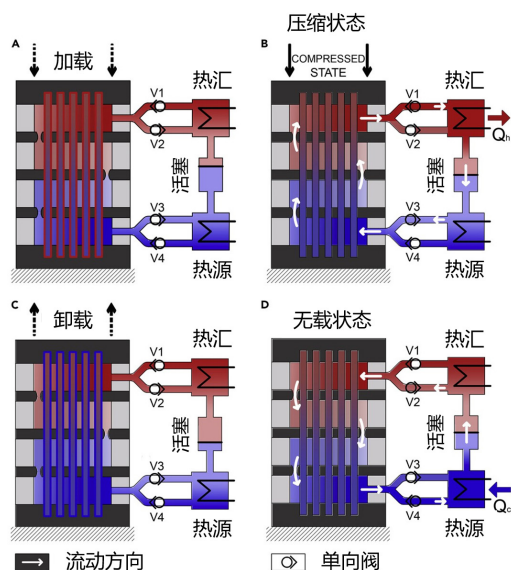
(1→3: 绝热加载、3→4: 等应力放热、
4→6: 绝热卸载、6→1: 等应力制冷)

图6.3-1 应力-温度状态参数图上的弹热制冷循环

忆合金板。例如德国卡尔斯鲁厄大学研发的弹热制冷机，使用0.03 mm Ti-Ni-Cu-Co四元合金薄板，实现了4 Hz的高频运行，得到了14 K的制冷温差和19 W/g的制冷功率密度^[6]。在此基础上，西安交通大学研发了全球首台全集成的弹热制冷冰箱原型机，其中的制冷机部分采用了单级循环设计，使用0.7 mm的商用镍钛二元合金丝组，提出了倾斜大扭矩电机直驱的机械设计方案，显著简化了驱动机构的复杂性和体积。冰箱原型机实现了9.2 K的制冷温差，由于改善了驱动机构设计方案，系统的紧凑性达到了目前为止的最优水平^[7]。采用相同的系统架构，德国卡尔斯鲁厄大学将单级弹热制冷机升级为四级复叠之后，在驱动系统不变的条件下，实现了27.3 K的制冷温差，证明了从单级到复叠改善系统制冷温差的有效性^[8]。



(a) 利用拉伸镍钛丝组固-固传热的单级弹热制冷冰箱^[7]



(b) 利用压缩镍钛管束流体传热的主动回热弹热制冷系统^[2]

图6.3-2 典型的弹热制冷原型机

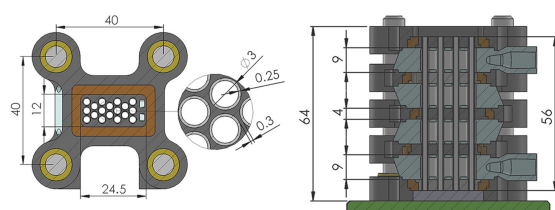
自丹麦技术大学在2016年首次验证了使用镍钛片可运行主动回热循环的概念后，主动回热式弹热制冷、热泵系统得到了快速发展。丹麦技术大学的回热式原型机中拉伸0.5 mm商用镍钛二元合金片，实现了19.9 K的系统制冷温差^[9]。考虑到压缩形状记忆合金可以获得更好的寿命，马里兰大学使用0.5 mm厚度的商用镍钛光管，将管内流动的镍钛管束单级制冷机改造为管束式回热器，实现了21 K的制冷温差和超过100 W的制冷量，研究结果表明管内流动必须增加填充结构，以优化固态制冷工质和传热流体的热容比^[3]。2020年，仿照壳管式换热器管外扰流的结构特征，马里兰大学和斯洛文尼亚大学独立提出了轴向压缩管束、管外径向绕流的回热器结构设计。马里兰大学延用4.7 mm外径和0.5 mm厚度的商用镍钛管，实现了单流程回热器16.6 K的制冷温差^[10]；斯洛文尼亚大学采用3 mm外径、0.25 mm的薄壁管构建了四流程回热器，实现了31.3 K的制热温差和50 W的制热功率^[2]。延用该技术方案，西安交通大学在进一步优化了回热器内流道和管束传热结构后，实现了单流程20 K的制冷温差，多流程的回热器正在研发和测试。

6.3.2 关键技术

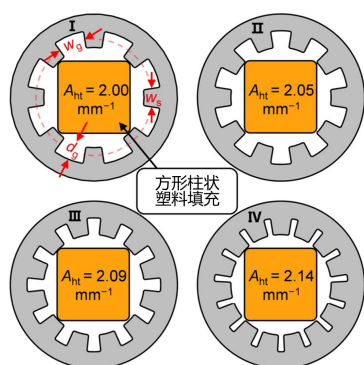
1) 低成本、高性能、长寿命弹热工质（材料）：现有的原型机几乎全部采用镍钛合金，且为了保证室温段的弹热效应，合金组分差异不大。目前，在实验室级别可以制备一些高性能的多元合金，例如北京科技大学研发的Ni-Mn-Ti-B实现了31.5 K的绝热温变，但其寿命和力学性能仍有待提高^[11]；中科院宁波材料所研发的Ni-Fe-Ga-Co合金可以显著降低驱动应力和相变回滞，但其相变潜热存在不足^[12]。在保持合金相变潜热的约束下降低驱动应力和相变回滞，得到无短板的弹热工质，是弹热制冷技术发展必须要解决的问题。

2) 高换热比表面积、高强度弹热回热器：现有的弹热回热器的标准技术路径是压缩小管径、大比表面积的管束，采用管内或管外单相传热流体换热。2021年，德国弗劳恩霍夫研究所提出了使用低沸点有机液体气-液相变传热的方式改善管束回热器换热性能的全新技术路线，并验证了管外沸腾换热可以有效提高换热效率，因此可将回热器运行频率提高到1.5 Hz，在约10 W的有效制冷功率下实现了

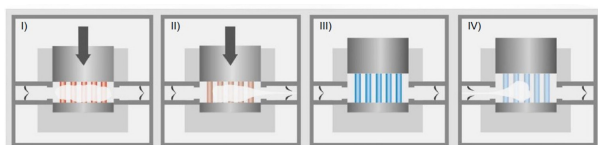
6.27 W/g的功率密度^[13]。最近, 香港科技大学提出了使用微肋结构和“回”字型结构强化传热的方法, 在保持管束强度和压缩力学性能的条件下显著增大了换热面积, 实现了27 K的制冷温差^[14]。该团队正在研究螺旋形换热通道的管内流动高效回热器的性能, 有望实现百瓦级的制冷功率和30 K以上的制冷温差。美国马里兰大学验证了通过增材制造技术制备蜂窝状多孔镍钛二元合金的可行性, 并通过材料微观组织设计, 在增材制造的样品中实现了超低相变滞后和超过百万次的寿命^[15]。



(a) 管束绕流单相换热^[2]



(b) 管内强化传热结构单相换热^[14]



(c) 管束绕流两相沸腾/冷凝换热^[13]

图6.3-3 高效弹热回热器结构

3) 高效、紧凑、低成本驱动装置: 固态弹热工质在进行马氏体相变时对应的轴向形变量变化一般不超过10%。但需要驱动装置给弹热工质提供大于100 MPa的应力。因此, 弹热制冷系统应选用具有大驱动力、小位移特性的驱动装置。现有弹热制冷原型机使用的驱动电机一般运行在稳态、高转速(>1000 rpm或>100 mm/sec)、适中负载(一般小于10 kN)的工况, 与弹热制冷系统中需求的交变运行(频繁启停)、低转速(<10 rpm或<10 mm/sec)、

大负载(几十或上百kN)的输出特性并不匹配。从驱动器匹配的角度, 西安交通大学提出了使用高温形状记忆合金驱动器带动弹热制冷回热器的新循环方法, 并使用高温镍钛驱动丝, 验证了在90℃热源驱动条件下周期性驱动制冷的可行性^[16]。

6.3.3 产业化应用潜能

弹热制冷的工质镍钛合金已有成熟的生产工艺、行业标准、市场(主要是医用)和供应链体系, 保证了实验室研发的新材料可以快速、大规模的推广应用。磁制冷在技术发展过程中攻克的核心技术可以快速移植到弹热制冷技术, 并且在制冷能量和功率密度上, 弹热制冷工质和制冷、热泵系统已经展示出了优异的材料和系统性能(其中商用镍钛合金绝热温变大于30 K, 而基于传热流体的可扩容的系统展示出了5 W/g以上的功率密度)。根据弹热制冷机的结构特性及材料的性能潜力, 这项技术在冷藏、房间空调、汽车热泵空调、除湿机等场景都有应用潜力。2021年, 爱尔兰Exergyn公司在多个展览和学术会议宣称正在研发10 kW制热功率的地源弹热热泵机组, 如果成功, 将是弹热制冷技术的第一个商用场景。

参考文献

- [1] 钱苏昕, 袁丽芬, 晏刚, 等. 弹热制冷技术的发展现状与展望[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 1-12.
- [2] AHČIN Ž, DALL'OLIO S, ŽEROVNIK A, et al. High-performance cooling and heat pumping based on fatigue-resistant elastocaloric effect in compression[J]. Joule, 2022, 6(10): 2338-2357.
- [3] TAKEUCHI I. Compression-based elastocaloric cooling: recent advances in materials and systems[C]/8th International Conference on Caloric Cooling. Darmstadt, Germany: 2018.
- [4] ZHANG Shixian, YANG Quanling, LI Chenjian, et al. Solid-state cooling by elastocaloric polymer with uniform chain-lengths[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 9.
- [5] KABIRIFAR JONAS AND BROJAN, MIHA AND TUŠEK, JAKA P and T. From the elastocaloric effect toward an efficient thermodynamic cycle[J]. Journal of Physics: Energy, 2022, 4(4): 044009.
- [6] BRUEDERLIN F, BUMKE L, CHLUBA C, et al. Elastocaloric cooling on the miniature scale: A review on materials and device engineering[J]. Energy Technology, 2018, 6(8): 1588-1604.
- [7] CHEN Y, WANG Y, SUN W, et al. A compact elastocaloric

- refrigerator[J]. The Innovation, 2022, 3: 100205.
- [8] BRÜEDERLIN F. Advanced elastocaloric cooling devices based on shape memory alloy films[D]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020.
- [9] TUŠEK J, ENGELBRECHT K, ERIKSEN D, et al. A regenerative elastocaloric heat pump[J]. Nature Energy, 2016, 1: 16134.
- [10] EMAIKWU N, CATALINI D, MUEHLBAUER J, et al. Experimental investigation of A staggered-tube active elastocaloric regenerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2022.
- [11] CONG Daoyong, XIONG Wenxin, PLANES A, et al. Colossal elastocaloric effect in ferroelastic Ni-Mn-Ti alloys[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(25): 255703.
- [12] LI Yang, ZHAO Dewei, LIU Jian, et al. Energy-efficient elastocaloric cooling by flexibly and reversibly transferring interface in magnetic shape-memory alloys[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(30): 25438-25445.
- [13] BACHMANN N, FITGER A, MAIER L M, et al. Long-term stable compressive elastocaloric cooling system with latent heat transfer[J]. Communications Physics, 2021, 4: 194.
- [14] ZHANG J, ZHU Y, CHENG S, et al. Enhancing cooling performance of NiTi elastocaloric tube refrigerant via internal grooving[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118657.
- [15] HOU Huilong, SIMSEK E, MA Tao, et al. Fatigue-resistant high-performance elastocaloric materials made by additive manufacturing[J]. Science, 2019, 366: 1116-1121.
- [16] QIAN S, WANG Y, XU S et al. Cascade utilization of low-grade thermal energy by coupled elastocaloric power and cooling cycle[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117269.

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.4 电卡制冷



钱小石 Qian Xiaoshi

上海交通大学教授，长期从事功能材料与智能系统研究，参与了多款高分子、陶瓷功能材料设计与制备工艺研发，研制世界首台利用塑料制冷的芯片制冷系统，现任国际能源署53号附件组专家，中国“相变制冷材料与技术专业委员会”委员。入职上海交通大学以来，以第一或通讯作者在Nature、Joule (2)、Nature Nanotechnology、中国科学：技术科学（英文版）、国际制冷学报等学术刊物发表多篇论文，主持国家重点研发计划专项课题、自然科学基金面上项目、上海市科委“原创探索”项目等多项原创、学科交叉型科研项目。

电卡效应是科贝科和库尔恰托夫于1930年在罗西盐中首次发现的一种物理现象^[1]，其描述了在循环电场作用下极化介电材料的可逆极化循环。由于材料产生的温差较小（小于1 K），直至巨电卡效应被发现之前，早期研究认为电卡效应并不适用于制冷。随着巨电卡效应在2006年^[2]和2008年^[3]被发现，电卡效应迅速获得了学术界和工业界的广泛关注，由于电卡制冷拥有着高效、可直接电力驱动、低成本和较为成熟的可大批量生产的工艺，被广泛认为是一种极有前景的新型制冷方式。

6.4.1 研究进展

(1) 热力学基础

在电场作用下，电卡材料发生偶极熵变 ΔS ，根据麦克斯韦恒等式，电卡材料在非等温环境中相应的会发生温度变化 ΔT_{EC} 。根据朗道-德文希尔（L-D）理论^[4]，电卡材料的等温偶极熵变与绝热温变可分别由

公式(1)与公式(2)计算得出。

$$\Delta S = -\frac{1}{2}\beta[P^2(E_H) - P^2(E_L)] = -\frac{1}{2}\beta P^2 \quad (1)$$

$$\Delta T_{EC} = \frac{1}{2C_E} \beta T P^2 \quad (2)$$

式中： E_H 为电场最大值、 E_L 为电场最小值、 C_E 为热容、 T 为环境温度。为简单起见，取 $E_L=0$ 。 β 系数可以通过表征电卡材料的居里常数来获得，极化强度 P 可以通过Sawyer-Tower电路测量。

(2) 表征方法

电卡效应的表征方法如图6.4-1所示，主要分为如下两种：

1) 极化推导法（间接测量法）。大多数的间接测量法由公式(3)和公式(4)推导计算得出。

$$\left(\frac{\partial S}{\partial E_i}\right)_{T,X} = \left(\frac{\partial P_i}{\partial T}\right)_{E,X} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial E}\right)_{S,X} = -\frac{T}{C_E} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{E,X} = -\frac{T}{C_E} P_E \quad (4)$$

式中： p_E 为材料热电相关系数、 C_E 为热容。在恒定的应力 X 下，随着 E 的变化，电卡材料的等温熵变 ΔS 和绝热熵变 ΔT 可以被分别表示为公式(5)和公式(6)。

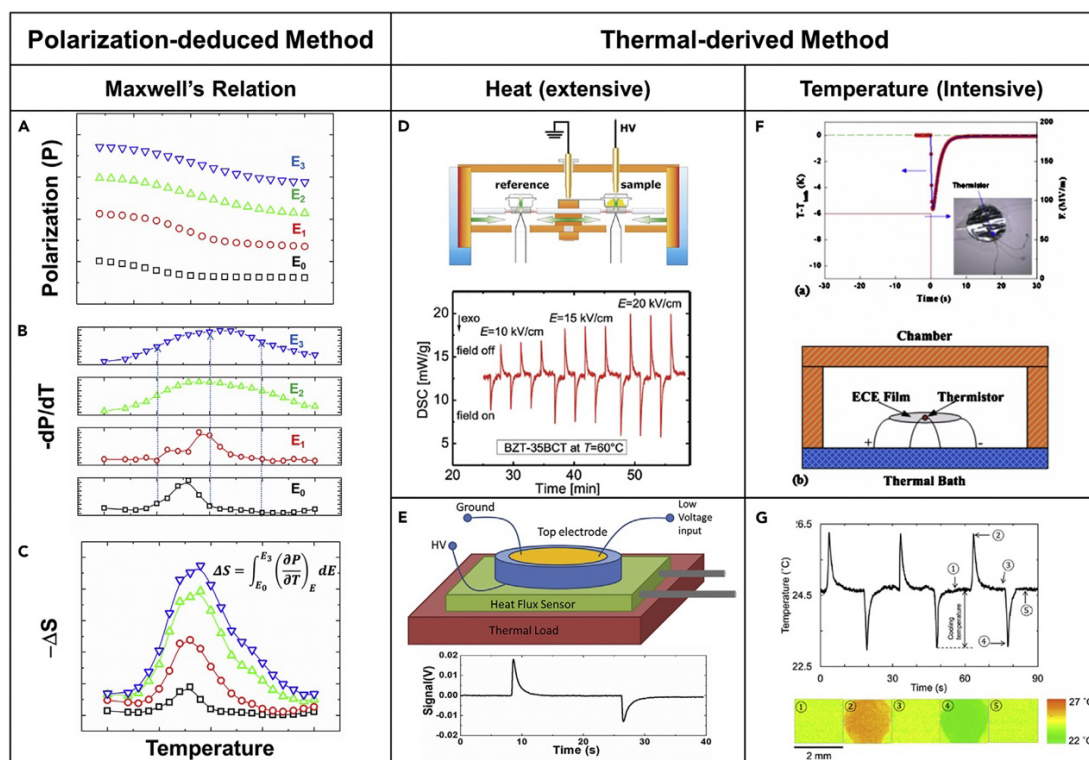
$$\Delta S = \int_{E_1}^{E_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E,X} dE \quad (5)$$

$$\Delta T = - \int_{E_1}^{E_2} \frac{T(E)}{C_E(T)} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E,X} dE \quad (6)$$

在实际的熵变推导中，极化强度可以由实验测试得出，拟合后可以得到极化强度对温度的偏导数，从而进一步对电场积分。值得注意的是，在许多使用间接测量法表征电卡效应的报道中，为简便计算， C_E 被作为恒定值放在积分项前面。这样的简

化可能会引起误差，因为许多材料在居里温度附近的热容受温度的影响是不可忽略的。

2) 热力测量法(直接测量法)。一般来说，热力测量法涉及到直接的热流和温度测量，需使用高灵敏度、高精度的量热计或温度传感器。当直接测量在电场脉冲下电卡效应导致的热流密度时，差示扫描量热计(DSC)凭借其高灵敏度成为理想的量热仪。另外，高灵敏度、超短响应时间的温度传感器能够对样品在极小时间梯度内的温度变化进行清晰表征。目前，研究人员利用热敏电阻、热电偶、热流传感器、红外温度摄像机等不同的传感器，开发了多种电卡效应测量方法，且在不同的测量平台测得的数据相互吻合。



(A)(B)(C)为极化推导法(间接测量法)、(D)^[5]和(E)^[6]为热力测量法(直接测量法)中的热流测试、(F)^[7]和(G)^[8]为热力测量法(直接测量法)中的温度测试。

图6.4-1 电卡效应的表征方法

(3) 巨电卡材料研究进展

目前最优的制冷电介质仍需极高外加电场方能产生工业化可用的降温效果，而高电场在实际样机工作过程中极易造成材料老化与击穿，因而如何提升材料在低电场下的电致熵变是领域内重要研究方向。研究人员在很多无机和有机材料中发现了巨电卡效应。其中，无机材料主要分为陶瓷和单晶体^[9]

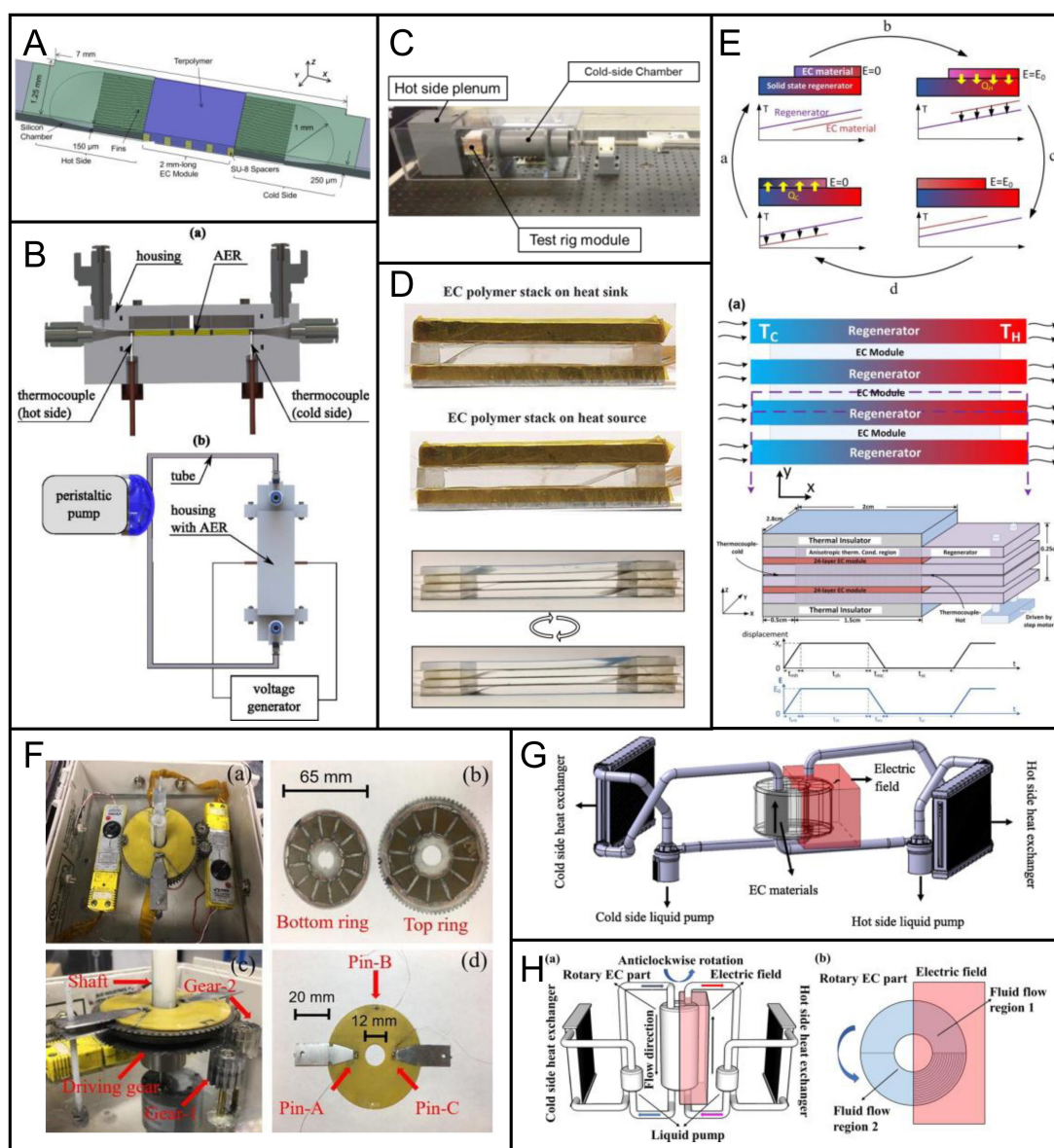
^[10]、厚膜^[11-17]和薄膜^[18-21]，材料体系主要包括PbTiO₃(PT)，BaTiO₃(BT)，KNbO₃(KN)，SrTiO₃(ST)基的单晶、陶瓷、固体溶液和二维无机材料。对有机物的研究大多局限于PVDF基铁电膜^[22-23]，此外还有对液晶^[24]的研究。

考虑到制冷器件的安全运行，施加在电卡材料上的电场通常约为击穿电场的25%~40%。在这个电

场限制下，电卡材料表现出的电卡效应很小。因此研发成熟的低电场下的巨电卡效应，是电卡效应被应用在制冷器件上之前必须要克服的至关重要的内容。理想的电卡材料首先应该满足其在偶极方向上的分子取向自由度尽可能大，并且在外部施加电场后能分子排列尽可能的有序，才能保证在尽量小的电场作用下获得更大的熵变。此外，如果材料的电卡效应与外加场强呈现出二次关系，增加内建电场

可以有效的增强电卡效应，这种内建电场通常由纳米填料和排列良好的二维材料等诱导^[22, 25-27]。

电卡材料的微观状态数同样在巨电卡效应的诱导过程中起到关键作用。在近期的报道中，研究人员通过在P(VDF-TrFE-CFE)三元共聚物中引入少量缺陷的方式，显著增强了高分子的本征电致熵变，无需异质材料掺杂^[28]。多种结构表征测试结果表明，高熵高分子同时具备更高的结晶度与更小的



(A)为Guo Dongzhi等^[30]设计的电卡制冷薄膜与流体之间换热的回热式制冷器件；(B)为U. Plaznik等^[31]使用陶瓷作为电卡制冷材料设计的回热式制冷器件；(C)为美国联合技术研究中心的设计^[32]；(D)为Ma Rujun等^[33-34]设计的静电吸附电卡制冷器件；(E)为文献[35-36]报道的多层电容器电卡制冷器件设计；(F)为Zhang Tian等^[37]设计的旋转式回热电卡制冷器件；(G)为Shi Junye等^[38]设计的千瓦级别的旋转式电卡制冷设备；(H)为Li Qiang等^[39]对旋转式电卡制冷设备进行的进一步分析。

图6.4-2 以巨电卡效应为基础的电卡制冷器件设计

晶粒尺寸，材料内呈现极化基元数量的显著增长，系统具有更高的自由度与极化熵。

6.4.2 关键技术

电卡领域的关键技术主要集中在制冷器件的设计。Y. V. Sinyavsky等^[29]在1992年展示了第一个以陶瓷为工作体的电卡制冷器件，并采用了主动式电卡回热（active electrocaloric regeneration, AER）来扩大其工作温区，在6 MV/m电场下装置实现了5 K的温差。自巨电卡效应被发现以来，电卡制冷器件的设计备受研究人员的关注，且研究人员普遍认为主动回热技术是提升制冷器件性能的有效途径。Guo Dongzhi等^[30]设计的器件中，固体EC薄膜与流体介质之间换热以实现回热，其最大冷却功率为4.7 W/cm²，热力学完善度约为30%。U. Plaznik等^[31]使用陶瓷作为电卡制冷材料，构建了一个通过流体往复流动实现回热的制冷器件。当陶瓷的绝热温变为1 K时，这个器件可以产生近3.3 K的温差。美国联合技术研究中心也对类似的器件进行了测试，在室温下得到了14 K的温差^[32]。Ma Rujun等^[33-34]利用静电吸附效应实现电卡材料与冷热端的交替换热，依此设计了单层和多层电卡制冷器件。

文献[35-36]报道的一个多层电容器电卡制冷器件在1 Hz的工作频率下可以产生6.6 K的温宽，且可以实现9 W/cm³的制冷功率密度，实现约50%的卡诺COP。Zhang Tian等^[37]还设计了一种旋转式的电卡制冷器件，这个器件中两层电卡材料以相反的方向持续旋转以实现回热效果。Shi Junye等^[38]设计了一种千瓦级别的旋转式电卡制冷设备，其在10 s周期和10 K的温差下可以输出1729.9 W的制冷功率。Li Qiang等^[39]对这个器件的运行工况进行分析，得出在10 K温度范围内，器件的制冷功率密度可达9.89 W/cm³，COP可达10.48。

6.4.3 产业化应用潜能

电卡制冷技术基于固态制冷，具有环保、易于小型化/轻量化、高能效等特点。在环保性方面，总当量变暖影响（TEWI）指数可以用来评估制冷技术的二氧化碳排放量，一般由两部分组成：1) 强GWP制冷工质的等效CO₂直接排放；2) 制冷技术所消耗电能的等效CO₂排放。TEWI指数的计算如公式（7）至公式（9）所示。

$$TEWI = CO_{2,direct} + CO_{2,indirect} \quad (7)$$

$$CO_{2,direct} = x \text{ GWP} \quad (8)$$

$$CO_{2,indirect} = \frac{Q}{COP} T_{CO_2} L \quad (9)$$

式中： x 为制冷工质的排放量、 Q 为制冷系统的年制冷量、COP为制冷技术的能耗比、 T_{CO_2} 为发电厂每千瓦时电能平均释放的二氧化碳量、 L 为制冷系统的使用年限。

一方面，电卡制冷中极化-去极化过程是最有效的能量转换形式之一，理论效率接近100%^[40-41]。另一方面，在没有中间换热器的情况下，电卡材料可以直接进行换热^[24, 42]。因此，电卡制冷的能量利用率极高^[30, 43]。综合来看，如图6.4-3所示，电卡制冷技术没有直接的温室气体排放，且具有很高的材料COP，因此TEWI总量极小。

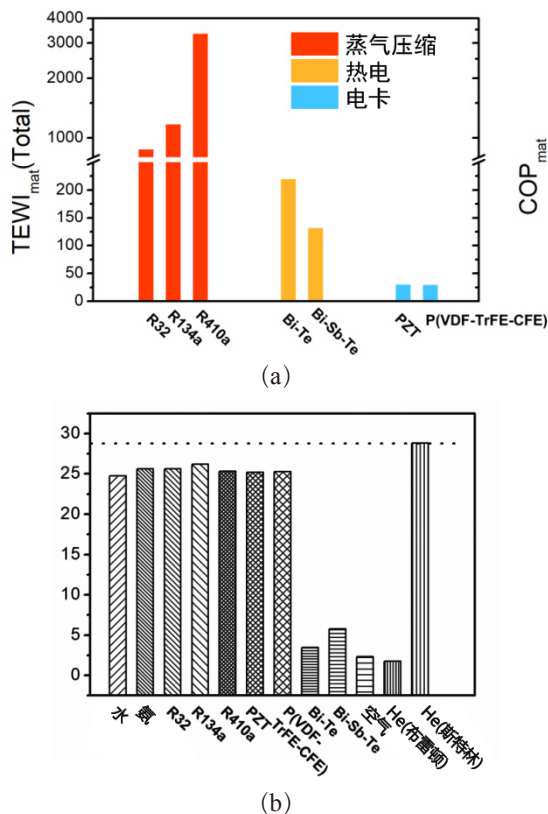


图6.4-3 不同制冷技术的TEWI与COP对比，其中电卡制冷技术凭借零直接排放量和材料COP，展现出极低的TEWI。

参考文献

- [1] KOBECO P, KURCHATOV I. Dielectric properties of Rochelle salt crystal. Z. Phys, 1930. 66: 192-205.

- [2] 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.
- [3] NEESE B, CHU Baojin, LU Shengguo, et al. Large electrocaloric effect in ferroelectric polymers near room temperature[J]. Science, 2008, 321(5890): 821-823.
- [4] LINES M, GLASS A Q M, Principles and applications of ferroelectrics and related materials[J]. Oxford University Press Inc, New York. 1977.
- [5] SANLIALP M, SHVARTSMAN V V, ACOSTA M, et al. Strong electrocaloric effect in lead-free $0.65\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3-0.35(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$ ceramics obtained by direct measurements[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(6): 062901.
- [6] SHI Junye, HAN Donglin, LI Zichao, et al. Electrocaloric cooling materials and devices for zero-global-warming-potential, high-efficiency refrigeration[J]. Joule, 2019, 3(5): 1200-1225.
- [7] LU S G, ROŽIČ B, ZHANG Q M, et al. Comparison of directly and indirectly measured electrocaloric effect in relaxor ferroelectric polymers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(20): 202901.
- [8] GUO Dongzhi, GAO Jinsheng, YU Yingju, et al. Electrocaloric characterization of a poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) terpolymer by infrared imaging[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(3): 031906.
- [9] QIAN Xiaoshi, YE Huijian, ZHANG Yingtang, et al. Giant electrocaloric response over a broad temperature range in modified BaTiO_3 ceramics[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(9): 1300-1305.
- [10] MOYA X, STERN-TAULATS E, CROSSLEY S, et al. Giant electrocaloric strength in single-crystal BaTiO_3 [J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2013, 25(9): 1360-1365.
- [11] YE Huijian, QIAN Xiaoshi, JEONG D Y, et al. Giant electrocaloric effect in $\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$ thick film[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(15): 152908.
- [12] KAR-NARAYAN S, CROSSLEY S, MOYA X, et al. Direct electrocaloric measurements of a multilayer capacitor using scanning thermal microscopy and infra-red imaging[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(3): 032903.
- [13] HOU Ying, YANG Lu, ZHAO Xiaobo, et al. Sintering aids modified electrocaloric response in $\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$ bilayer films[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 724: 8-13.
- [14] HOU Ying, YANG Lu, QIAN Xiaoshi, et al. Enhanced electrocaloric effect in composition gradient bilayer thick films[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(13): 133501.
- [15] YE Huijian, QIAN Xiaoshi, LU Jinhuang, et al. Dielectric and electrocaloric responses of $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ bulk ceramics and thick films with sintering aids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1501-1505.
- [16] MOYA X, DEFAY E, MATHUR N D, et al. Electrocaloric effects in multilayer capacitors for cooling applications[J]. MRS Bulletin, 2018, 43(4): 291-294.
- [17] HIROSE S, USUI T, CROSSLEY S, et al. Progress on electrocaloric multilayer ceramic capacitor development[J]. APL Materials, 2016, 4(6): 064105.
- [18] CHEN Zuhuang, CHEN Zhanghui, KUO Changyang, et al. Complex strain evolution of polar and magnetic order in multiferroic BiFeO_3 thin films[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3764.
- [19] CORREIA T M, KAR-NARAYAN S, YOUNG J S, et al. PST thin films for electrocaloric coolers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(16).
- [20] LIU P F, WANG J L, MENG X J, et al. Huge electrocaloric effect in Langmuir-blodgett ferroelectric polymer thin films[J]. New Journal of Physics, 2010, 12.
- [21] SARANYA D, CHAUDHURI A R, PARUI J, et al. Electrocaloric effect of PMN-PT thin films near morphotropic phase boundary[J]. Bulletin of Materials Science, 2009, 32(3): 259-262.
- [22] 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.
- [23] QIAN Xiaoshi, et al. Internal biasing in relaxor ferroelectric polymer to enhance the electrocaloric effect[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 25(32): 5134-5139.
- [24] QIAN Xiaoshi, LU Shengguo, LI Xinyu, et al. Large electrocaloric effect in a dielectric liquid possessing a large dielectric anisotropy near the isotropic-nematic transition[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(22): 2894-2898.
- [25] ZHANG Guangzu, LI Qi, GU Haiming, et al. Ferroelectric polymer nanocomposites for room-temperature electrocaloric refrigeration[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2015, 27(8): 1450-1454.
- [26] LI Guangzu, ZHANG Xiaoshan, JIANG Shenglin, et al. Relaxor ferroelectric-based electrocaloric polymer nanocomposites with a broad operating temperature range and high cooling energy[J]. Advanced Materials, 2015, 27(13): 2236-2241.
- [27] ZHANG Guangzu, ZHANG Xiaoshan, YANG Tiannan,

- et al. Colossal room-temperature electrocaloric effect in ferroelectric polymer nanocomposites using nanostructured Barium strontium titanates[J]. ACS Nano, 2015, 9(7): 7164-7174.
- [28] QIAN Xiaoshi, HAN Donglin, ZHENG Lirong, et al. High-entropy polymer produces a giant electrocaloric effect at low fields[J]. Nature, 2021, 600(7890): 664-669.
- [29] SINYAVSKY Y V, BRODYANSKY V M. Experimental testing of electrocaloric cooling with transparent ferroelectric ceramic as a working body[J]. Ferroelectrics, 1992, 131(1): 321-325.
- [30] GUO Dongzhi, GAO Jinsheng, YU Ying-Ju, et al. Design and modeling of a fluid-based micro-scale electrocaloric refrigeration system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 559-564.
- [31] PLAZNIK U, KITANOVSKI A, BRIGITA R, et al., Bulk relaxor ferroelectric ceramics as a working body for an electrocaloric cooling device[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(4).
- [32] ANNAPRAGADA S R. High-efficiency solid-state heat pump module. 2017. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/7_312111_Annapragada_031517-1430.pdf.
- [33] MA Rujun, ZHANG Ziyang, TONG K, et al. Highly efficient electrocaloric cooling with electrostatic actuation[J]. Science, 2017, 357(6356): 1130-1134.
- [34] MENG Yuan, ZHANG Ziyang, WU Hanxiang, et al. A cascade electrocaloric cooling device for large temperature lift[J]. Nature Energy, 2020, 5(12): 996-1002.
- [35] GU Haiming, CRAVEN B, QIAN Xiaoshi, et al. Simulation of chip-size electrocaloric refrigerator with high cooling-power density[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(11): 112901.
- [36] GU Haiming, QIAN Xiaoshi, LI Xinyu, et al. A chip scale electrocaloric effect based cooling device[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(12): 122904.
- [37] ZHANG Tian, QIAN Xiaoshi, GU Haiming, et al. An electrocaloric refrigerator with direct solid to solid regeneration[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(24): 243503.
- [38] SHI Junye, LI Qiang, GAO Tianyuan, et al. Numerical evaluation of a kilowatt-level rotary electrocaloric refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 121: 279-288.
- [39] 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.
- [40] CAMPOLO D, SITI M, FEARING R S. Efficient charge recovery method for driving piezoelectric actuators with quasi-square waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(3): 237-244.
- [41] DEFAY E, CROSSLEY S, KAR-NARAYAN S, et al. The electrocaloric efficiency of ceramic and polymer films[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2013, 25(24): 3337-3342.
- [42] GU Haiming, QIAN Xiaoshi, YE Huijian, et al. An electrocaloric refrigerator without external regenerator[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(16): 162905.
- [43] QIAN Suxin, NASUTA D, RHOADS A, et al. Not-in-kind cooling technologies: A quantitative comparison of refrigerants and system performance[J]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid, 2016, 62: 177-192.

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.5 空气制冷



马国远 Ma Guoyuan

北京工业大学教授，兼任制冷与低温工程系主任，主要研究方向为制冷与空调系统环保节能技术、热泵新技术、数据机房节能技术。



荣维来 Rong Weilai

北京工业大学动力工程及工程热物理专业在读博士生，研究方向为空气制冷系统性能优化。



刘帅领 Liu Shuailing

北京工业大学动力工程及工程热物理专业在读博士生，研究方向为热泵与热管复合回路的循环机理及节能潜力分析。



许树学 Xu Shuxue

北京工业大学副研究员，兼任制冷与低温工程系副主任，主要研究方向为空气源热泵技术及其应用、自然工质制冷新技术及制冷测量技术。

空气是一种使用不受限制的天然工质，具有安全、环保、无毒、不燃等优点，空气制冷在航空工业、军事运输、食品冷冻等特殊应用场合得以广泛应用。其循环为逆布雷顿循环，该循环由等熵压缩、等压放热、等熵膨胀及等压吸热4个基本过程组成，系统流程图及 T - s 如图6.5-1所示。其工作过程为：空气先进入压缩机中升压，之后进入高压换热器冷却放热，随后在膨胀机降压降温，再后进入低压换热器中吸热，最后再次进入压缩机完成工作循环。

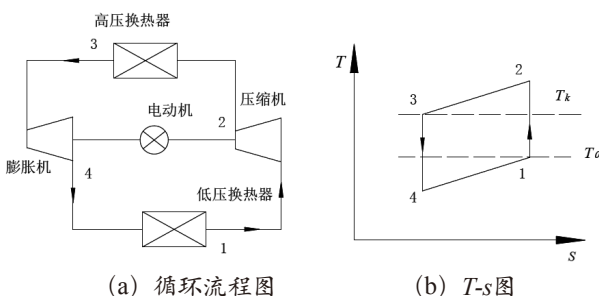


图6.5-1 空气制冷循环

空气制冷循环有闭式和开式两种循环型式。其中，闭式循环如图6.5-1所示，空气在封闭管路中循环，避免受到外部环境的影响；开式循环省去了低压换热器，将冷风直接送入用冷空间，简化了系统构成，但易受外部环境的影响。

6.5.1 研究进展

(1) 回热

回热是指在基本循环基础上增加回热热交换器，把高压换热器排出的高温气流用来加热进入压缩机的低压常温气流，以提高压缩机入口气流的温度，降低压缩机功耗。回热循环降低了压缩机压比和膨胀比，有利于提高空气制冷机的实际制冷系数^[1]。研究表明，系统采用回热器时，COP最大值为1.36，不采用回热器时，最大值为1.25，同比增加8.8%^[2]。

(2) 两级压缩

两级压缩系统如图6.5-2所示，一级压缩由电机驱动，二级压缩由膨胀机驱动，相同压比下，两级压缩功耗比单级更小，可以提高压缩过程的整体效率。压比为1.8时，两级压缩系统的COP比单级高10.2%，并且随着压比的增加之间的差值增加^[3]。

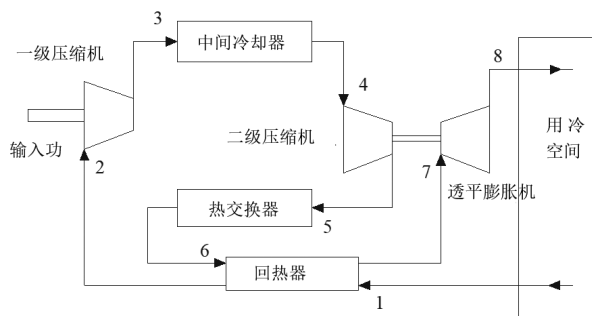


图6.5-2 两级压缩中间冷却系统

(3) 双级膨胀

双级膨胀空气制冷系统比普通空气制冷系统多一个膨胀机，多一次膨胀过程，主要应用于飞机空调的四轮升压制冷系统。上海理工大学张华等^[4]介绍了四轮升压制冷循环原理，流程图如图6.5-3所示。除水后的高压干空气经一级膨胀机膨胀降温，变为中压干冷空气；进入冷凝器侧与高压湿空气换热升温，最后经过二级膨胀变成常压干冷空气。杨涵等^[5]对分体四轮升压式高压脱水原理机进行测试，最大制冷量可达12kW，COP约为0.21~1.15。

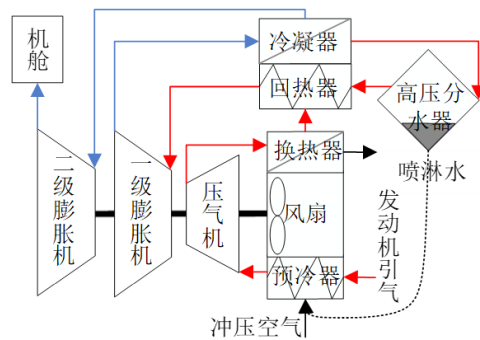


图6.5-3 四轮升压制冷循环（高压除湿）

(4) 湿压缩

湿压缩是指在压缩机入口或级间向气体喷入冷却液体，可使压缩过程更接近等温过程，降低压缩机功耗。李豪等^[6]分析了空气/水混合工质循环，在膨胀功充分利用情况下，其制冷循环COP可达6~7。

(5) 负压流程

系统有正增压和逆增压两种增压方案，两者流程上的主要区别在于先压缩还是先膨胀，如图6.5-4所示。研究结果^[7]表明，随着压缩比增大，正增压系统的COP先大于逆增压系统，后小于逆增压系统，在压比较大时，逆增压系统有优势。

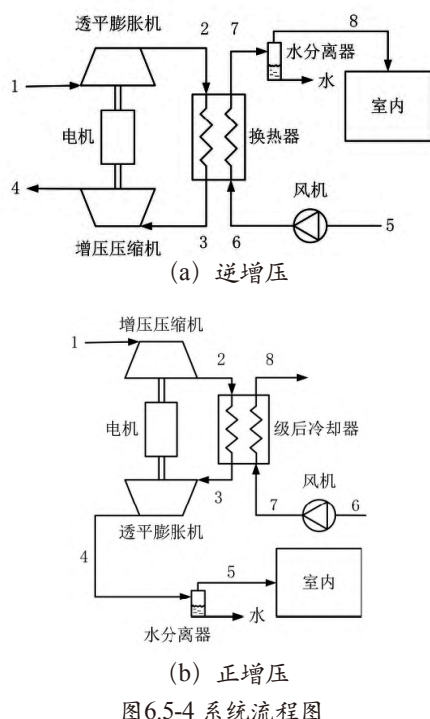


图6.5-4 系统流程图

(6) 复合系统

图6.5-5为空气循环与干燥剂冷却循环的复合系统图，干燥剂冷却系统为上层循环，空气循环系统为底层循环，利用空气制冷系统排出的热量使干燥剂再生，该系统可分别处理湿负荷和热负荷^[8]。Elsayed等^[9-10]将该复合系统用于仓库的制冷和除湿，在相同的条件下，系统的性能系数大于常规系统，可以提高100%以上。

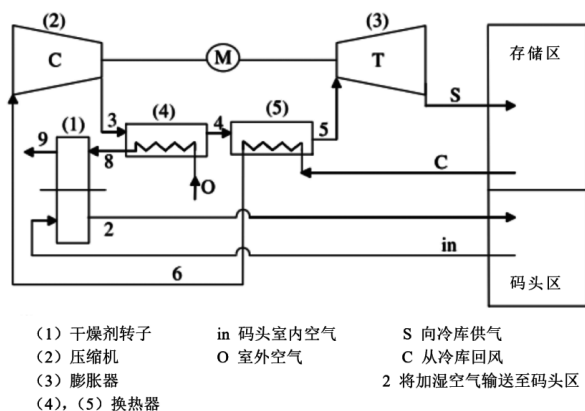


图6.5-5 空气循环与干燥剂冷却循环的复合系统

此外，Niccolò Giannetti等^[11]提出了蒸气压缩循环和逆布雷顿循环相结合的复合系统，如图6.5-6所示。上层循环是蒸气压缩系统，底层循环使用的空气制冷系统省去了冷端换热器，在-50℃的温度下，

复合系统的COP比简单逆布雷顿循环高50%。

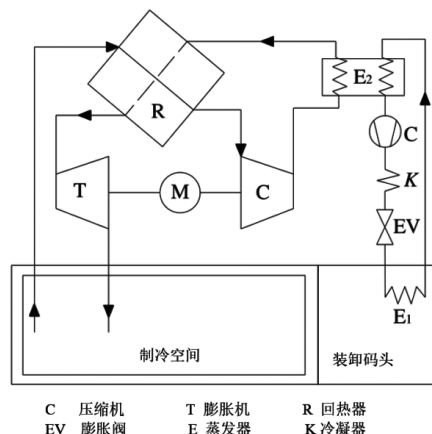


图6.5-6 蒸气压缩/逆布雷顿复合系统

6.5.2 关键技术

空气制冷系统的关键部件为压缩机、膨胀机及换热器。压缩机和膨胀机是其核心部件，其效率直接影响整机的性能。空气单位制冷量小，大流量、中低压力比是其基本需要，透平式或涡轮式机器比容积式更具有优势成为研发重点；另一方面，回收膨胀功是空气制冷性能显著提升的核心途径，压缩机与膨胀机共轴一体化可以充分利用膨胀功，因此，透平压缩膨胀机成为新一代空气制冷技术的标识。其换热器是特殊的空气-空气换热器，其一侧为高压空气，另一侧为大气或其它介质，满足承压、结构紧凑的情况下进行其传热性能强化是其基本需要。

(1) 压缩膨胀机

如图6.5-7所示，压缩膨胀机由压缩端、膨胀端和轴等三部分组成，膨胀端产生的输出功可以传给同轴的压缩端，其中压缩效率、膨胀效率、压力比、膨胀比、转速、质量流量和能量之间的关系非常复杂，存在一定的耦合特性。研究表明，对于压缩膨胀机，首先应充分利用膨胀端效率，其次是压缩端压力比。目前，压缩膨胀机的总效率可达67.2%^[12]。

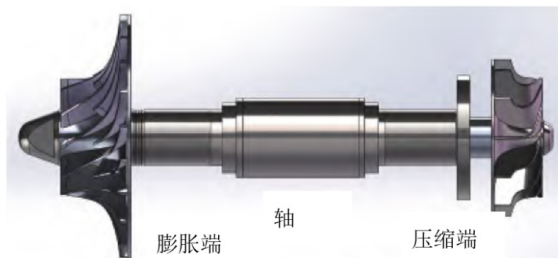


图6.5-7 压缩膨胀机结构图

(2) 涡轮增压器

应用于汽车领域的涡轮增压器，是压缩膨胀机的另一种结构，如图6.5-8所示，主要由膨胀涡轮、压缩涡轮和轴等组成。研究人员测试了带有涡轮增压器的汽车冷却系统。当转子的速度接近11000r/min时，压力比为1.7，制冷COP接近0.38^[13]。

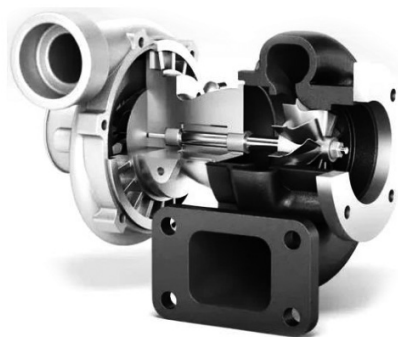


图6.5-8涡轮增压器

(3) 热交换器

空气定压比热容较小，循环流量较大，因此多采用紧凑式换热器。板式换热器是最常用的换热器型式，其结构紧凑、传热效率高、重量轻，适用于空气制冷机^[14]。

(4) 除湿装置

在空气制冷系统中，若空气含湿量过高，水蒸气会在膨胀机出口凝结，产生大量冰粒，对系统造成严重影响。因此，在空气制冷系统中设置除湿装置很有必要，一般有低压分水器、高压分水器、吸附式除湿和膜除湿技术。低压分水器结构简单，经济可靠；高压分水器除水效率高，可达98%，引气量小，有助于提升系统制冷量^[15]。吸附式除湿技术使用液体吸湿剂和固体吸湿剂来除湿。液体吸湿剂一般为盐类溶液，如氯化钙、氯化锂和三甘醇等，固体吸湿剂选用材料活性炭、硅胶和氯化钙等。膜除湿利用中空纤维丝对水蒸气的选择透过

性，及两侧的水蒸气分压力差来除湿。膜除湿具有节能、除湿稳定和设备简单的优点，应用于压缩空气干燥^[16]、空气除湿等领域。

何升等^[17]分析了各部件效率对空气制冷COP的影响，透平膨胀机效率影响最大，其次是第二压缩机的增压端、第一压缩机，最后是回热器。

图6.5-9展示了环境温度（室外环境温度 T_k 、室内制冷温度 T_0 ）、膨胀机效率 η_t 和压缩机效率 η_c 对循环性能的影响。制冷COP随 T_k 的降低或 T_0 的升高而增加，在 $T_0=297\text{K}$ 时，最佳压比下系统制冷COP为0.9。提高 η_t 、 η_c 均可不同程度提高机组性能， η_t 、 η_c 由0.6增至1.0时，对应制冷COP分别由0.46增至1.91和0.52增至1.70，分别提升了3.1倍和2.8倍。可见膨胀机效率 η_t 对制冷COP的影响更显著^[18]。

6.5.3 产业化应用潜能

(1) 食品冷冻冷藏

空气制冷机具有较宽温度调节范围（-100~0℃及以上），在低温领域更有优势。就空气制冷循环方式而言，冷空气直接进入需要冷却的环境，直接冷却食品，省去了换热器和风机，还可以根据冻结

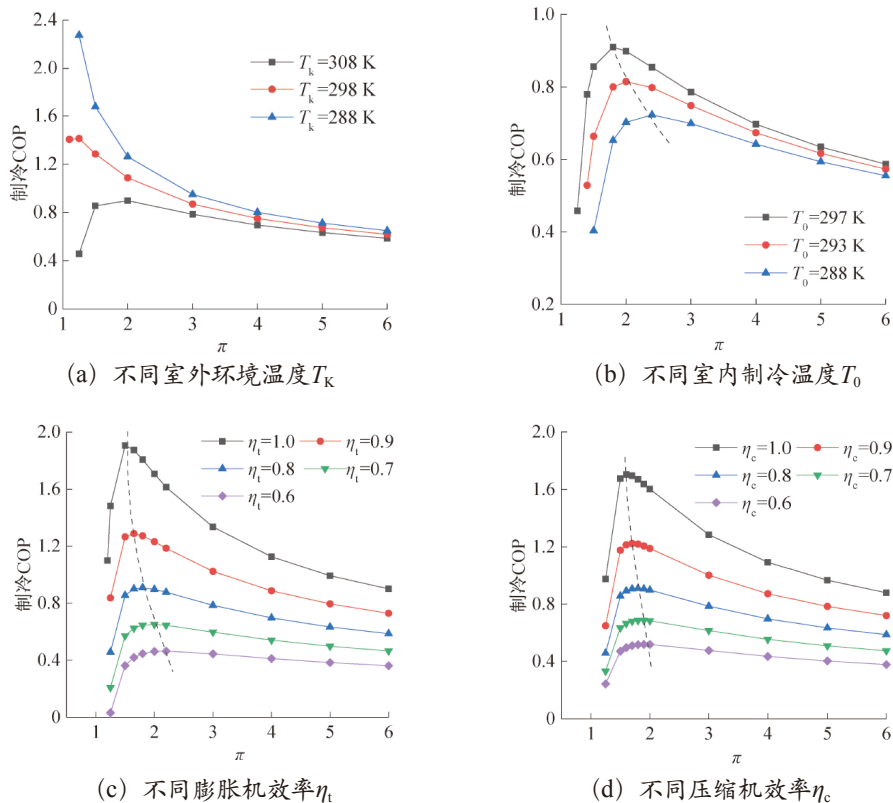


图6.5-9 不同影响因素下制冷COP随压比的变化

食品的形状,合理地组织气流,提高冻结效率^[19]。新型空气食品冷冻系统的性能取决于其压力水平、冷端换热器的温差和蓄热式换热器效率^[20]。日本已经将开式空气制冷系统应用到超低温冷库中,与传统的双级蒸气压缩系统和复叠制冷系统相比,非设计工况下性能衰减不明显,在-100~-50℃的温度范围内空气制冷系统有明显的优势^[21]。

(2) 热泵

空气循环热泵在低温下有一定的优势。李双双等^[22]实验研究了一个使用涡轮增压和两个鼓风机的空气循环热泵的运行性能。供水温度为40℃时,环境温度从5℃降低到-15℃,制热COP提高了15%~21%,系统制热COP在实测过程中基本维持在1.12~1.22的范围内,受热水供应温度和环境温度的影响较小。采用电驱动的涡轮增压器可明显提高系统运行效率,模拟仿真预测出制热COP将提高至1.6。

(3) 数据中心机房全年冷却

空气制冷系统经合理设计可兼具自然冷却功能,将空气制冷和自然冷却相结合的复合系统,可以满足数据中心全年冷却的要求,该复合系统应用在呼和浩特的全年能效为14.61^[18]。

(4) 全新风空调系统

空气制冷机非常适用于全新风空调系统。王喆锋等^[23]搭建了采用开式逆增压循环的全新风家用空气系统实验台,系统可将室外新鲜空气经换热器后直接送入室内。转速在38000r/min时,其制冷量和出风温度分别为1.6kW和16.2℃,基本满足房间空调器的参数要求。

(5) 新能源车热泵

R134a热泵虽然效率高,但制冷剂GWP较高,CO₂热泵空调对管道密封和质量要求较高,存在成本高、运行较危险的缺点。空气循环热泵虽然COP较低,但工质安全环保,无泄漏风险。在-20℃环境下对电动汽车进行传统热泵和空气循环热泵性能测试结果表明,前者COP为1.5,后者可达1.3^[22],并且空气循环热泵的性能受环境温度波动影响较小。因此,逆布雷顿空气热泵系统更适用于新能源汽车。

空气制冷优越的环境友好性,是推动其发展的核心驱动力,进一步提高其性能和扩大应用领域是其持续的研发方向。提高系统整体性能的研究主要包括:制冷循环型式改进与创新、透平压缩膨胀机

为代表关键部件及其降噪技术的研发等,扩大应用领域研究主要包括:适用领域有竞争力的产品研发与示范应用、应用效果测评等。随着我国和全球“双碳”目标推进,空气制冷将会进一步“焕发青春”,应用会越来越普遍。

参考文献

- [1] 刘帅领, 马国远, 张海云, 等. 空气制冷技术原理及发展现状[J]. 制冷与空调(四川), 2021, 35(3): 444-450.
- [2] 任金禄. 空气制冷机[J]. 制冷与空调, 2008, 8(6): 15-21.
- [3] 刘云霞, 赵远扬, 王尚锦. 列车空调用空气制冷系统的方案设计[J]. 流体机械, 2003(6): 48-51.
- [4] 段场, 张华, 盛健, 等. 逆布雷顿空气制冷系统研究进展[J]. 制冷学报, 2022(6): 1-10.
- [5] 杨涵, 张兴娟, 王超, 等. 分体四轮式空气循环制冷系统仿真及试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2203-2210.
- [6] 李豪, 高洪涛. 空气/水混合工质制冷循环理论计算[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(2): 117-120.
- [7] 李金波, 王喆锋, 侯予, 等. 采用空气制冷技术的家用空调性能影响因素分析[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(3): 508-512.
- [8] C.E.L. Nóbrega, L.A. Sphaier, Modeling and simulation of a Desiccant-Brayton Cascade refrigeration cycle[J]. Energy and Buildings, 2012, 55: 575-584.
- [9] ELSAYED S S, MIYAZAKI T, HAMAMOTO Y, et al. Performance analysis of air cycle refrigerator integrated desiccant system for cooling and dehumidifying warehouse[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(2): 189-196.
- [10] ELSAYED S S, HAMAMOTO Y, AKISAWA A, et al. Analysis of an air cycle refrigerator driving air conditioning system integrated desiccant system[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(2): 219-228.
- [11] Niccolò, Giannetti, Adriano, Milazzo, Andrea, Rocchetti, et al. Cascade refrigeration system with inverse Brayton cycle on the cold side[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 986-995.
- [12] Chen Shuangtao, Fan Yufeng, Yang Shanju, et al. Evaluation and analysis on the coupling performance of a high-speed turboexpander compressor[J]. Cryogenics, 2017, 88: 81-90.
- [13] H. Perez-Blanco, Edward Vineyard, Feasibility and operating costs of an air cycle for CCHP in a fast food restaurant. Applied Thermal Engineering 2016, 104: 818-828.
- [14] 郭宪民, 徐泽鹏, 赵硕. 空气制冷机的研究和发展[J]. 制冷学报, 2022, 43(4): 44-58.

- [15] WANG X, YUAN X. Reuse of condensed water to improve the performance of an air-cycle refrigeration system for transport applications[J]. Applied Energy, 2007, 84(9): 874-81.
- [16] 王倩. 膜除湿技术在压缩空气干燥及空调领域的应用[J]. 煤气与热力, 2014, 34(3): 31-36.
- [17] 何升, 庄明, 蒋庆峰, 等. 空气循环制冷机的有用能分析及优化[J]. 低温工程, 2019(1): 31-34, 40.
- [18] 隋秋玉, 马国远, 刘帅领, 等. 应用于数据中心冷却的空气制冷循环系统性能分析[J]. 制冷学报, 2022, 43(5): 16-23.
- [19] 黄艳玲, 陈汝东. 空气制冷循环在冷藏库中的应用[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(4): 32-34, 41.
- [20] Biglia A, Comba L, Fabrizio E, et al. Reversed Brayton cycle for food freezing at very low temperatures: Energy performance and optimization [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 81: 82-95.
- [21] 钱振翼, 浅野英世, 忽那都志夫. 日本物流冷库的发展及自然工质在冷库中的应用[J]. 冷藏技术, 2017, 40(3):1-7.
- [22] 李双双. 带涡轮增压器的空气逆布雷顿热泵制热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [23] 王喆锋, 李金波, 陈双涛. 全新风家用空气制冷系统性能测试[J]. 制冷学报, 2021, 42(6):15-20.

具有产业化潜力的新型 制冷技术研究进展

6.6 辐射制冷



杨荣贵 Yang Ronggui

华中科技大学能源学院教授。1996年西安交通大学获得学士学位，1999年清华大学获硕士学位，2006年麻省理工学院获得博士学位。2006年1月起在美国科罗拉多大学博尔德分校机械工程系历任助理教授、副教授、终身正教授。目前，主持国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划；在Science、Nature Materials、Joule、Review of Modern Physics等国际期刊上发表论文200余篇，引用26000余次，H指数80，入选科睿唯安“全球高被引科学家”榜单。获得《科技评论》TR35“世界顶尖青年发明家”，美国科学基金委杰出青年教授奖，美国国防部高级研究计划署青年学者奖，美国机械工程师学会Bergles-Rohsenow青年学者奖，国际热电学会青年学者奖和戈德史密斯奖，美国机械工程师学会会士（ASME Fellow），国际热科学纪念奖Nukiyama Memorial Award等荣誉。



谭 刚 Tan Gang

浙江大学建筑工程学院教授。1998年清华大学获得学士学位，2001年清华大学获硕士学位，2005年麻省理工学院获得博士学位。2005年5月起先后在美国Nexant和KEMA能源咨询公司任职。自2009年8月起在美国怀俄明大学土木建筑工程系任教，获得终身教授职位。研究领域包括新型建筑材料、节能减排技术、建筑环境营造与控制以及可再生能源应用。发表论文90余篇，包括在Science、Joule、ACS Energy Letters, Nature Communications、Advanced Functional Materials, Nano Energy等影响力的国际期刊上发表多篇论文，引用5000余次，兼任《Building Simulation》国际期刊副主编，美国注册工程师（P.E.）。



徐静涛 Xu Jingtao

宁波瑞凌新能源科技有限公司研究员。2004年中国科学技术大学获得学士学位，2009年中国科学技术大学获得博士学位。2009年至2013年在日本东北大学任Research Associate。2013年至2019年在中国科学院宁波材料技术与工程研究所历任副研究员，项目研究员。2019年起进入宁波瑞凌新能源科技有限公司。目前从事辐射制冷材料产业化推广相关研究工作。主持国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金青年基金、宁波市重大科技计划项目等多项纵向项目，在Nano Letter、Materials Today Nano等国际期刊上发表SCI论文87篇，引用2000次，H指数26。

辐射制冷是一种通过光谱调控来实现降温的技术，相比于传统的主动制冷技术，这种被动式技术具有不消耗额外电能的特点，可应用于各类建筑物、构筑物外表面，因此被认为是可降低空调制冷碳排放的新兴技术。近年来，我国辐射制冷技术研究突飞猛进，从材料性能到应用技术全面发展，已有多项成果实现应用示范。

6.6.1 研究进展

辐射制冷技术要求材料在太阳光波段接近白体，而在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ “大气透射窗口”波段接近黑体。

《Nature》于2014年报导了一种由 SiO_2 、 HfO_2 和Ag层组成的纳米光子晶体材料，可反射97%的入射太阳光并在入“大气透射窗口”波段具有高发射率，在 $850\text{W}/\text{m}^2$ 的太阳辐照强度下其冷却功率可达 $40.1\text{W}/\text{m}^2$ ，首次实现了太阳直射下低于环境温度的日间辐射制冷^[1]。然而这种光学超构材料制造成本高，难以大规模应用。针对这个问题，2017年《Science》报道了一种可卷对卷制造的低成本TPX聚合物-颗粒物复合薄膜材料，如图6.6-1(a)所示^[2]。该材料利用纳米银层作为反射层，可以反射96%的太阳辐射，同时在聚合物中添加玻璃微珠，通过高阶Fröhlich共振增强红外发射，在“大气透射窗口”波段的红外发射率可达到0.93，其连续3天平均冷却功率大于 $110\text{W}/\text{m}^2$ ，正午平均冷却功率 $93\text{W}/\text{m}^2$ 。

除采用金属层反射太阳光的方法外，在高分子材料中设计全尺寸孔洞结构，也可以获得光学性能优异的辐射制冷材料。2018年《Science》报道了一种利用水和丙酮不同挥发速度形成的随机分布微米-纳米全尺寸孔洞网络结构涂层（图6.6-1(b)），该结构通过多重散射高效反射太阳光^[3]。2020年，上海交通大学范同祥、周涵^[4]团队采用多孔纤维结构获得了高反射的膜布材料（图6.6-1(c)）。2021年，复旦大学武利民^[5]团队通过在聚合物薄膜表面设计密集排列的微米多孔阵列结构，并在其内部引入大量随机分布的纳米级孔洞（图6.6-1(d)），同样实现了日间辐射制冷。

除了光学性能外，户外应用场景要求辐射制冷材料性能可靠，氟碳材料由于良好的户外耐候性，同时C-F键特征振动频率正处于“大气透射窗口”波段，因此成为了辐射制冷材料的良好基材。例如将未掺杂的PVDF薄膜直接应用于纳米银层表面，实现日间辐射制冷的同时可提升薄膜耐候性能^[6]。上述全尺寸孔洞网络结构涂层和多孔纤维膜布也以PVDF共聚物为基础材质^[4-5]。

为满足建筑物、构筑物设计美观及在冬季的供暖需求，人们对辐射制冷材料的颜色、不同环境的适应性调节等功能属性开展了进一步研究。徐静涛等^[7]采用窄吸收荧光颜料对涂料进行调色，获得了系列的彩色辐射制冷涂料（图6.6-2(a)），太阳光反射比大于0.90，在峰值辐照 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的日照下可低于

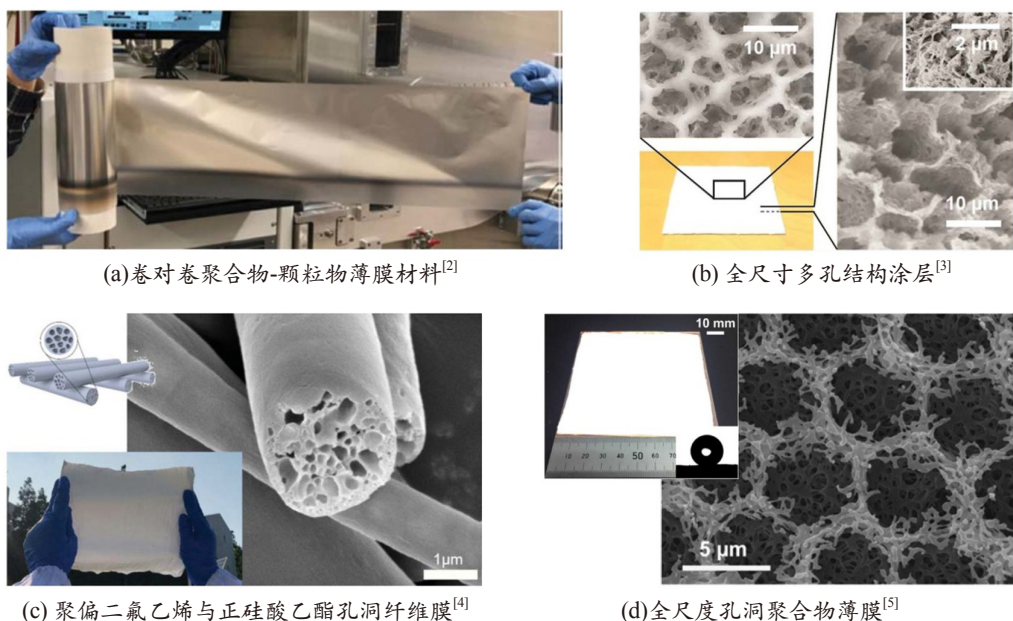


图6.6-1 辐射制冷超材料

环境温度，并可用于金属、织物等多种介质表面。电子科技大学崔嘉喜^[8]团队利用多孔材料开闭孔的效果，提出了一种应力响应的辐射制冷/光热转换材料，在被刮擦或者拉伸时材料呈现高反射的制冷状态，而被压缩时材料呈现黑色的制热状态，如图6.6-2(b)所示。复旦大学和国防科技大学分别报道了采用热敏变色微囊作为表面层，实现了辐射制冷材料温度自适应和颜色变化^[9-10]。该类材料在高温时呈现出高反射率的辐射制冷状态，当温度下降时呈现出不同的颜色，并具有吸收太阳光制热的功能，如

图6.6-2(c)所示。华中科技大学杨荣贵^[11]与国外研究团队合作，实现了玻璃光学性能在可见光-近红外-长波红外不同波段的独立调节，经理论模拟在炎热国家使用节能效果可达400MJ/m²。此外，杨荣贵^[12]团队还采用不同电场加以调控，可使玻璃面板实现0.17~0.89的太阳光反射率，如图6.6-2(d)所示，同时采用BOPET增强玻璃外表面的长波红外辐射率，在夏季560~970W/m²直接日照条件下，可实现20~60W/m²的净冷却功率；而在冬季可以让70%阳光进入室内。

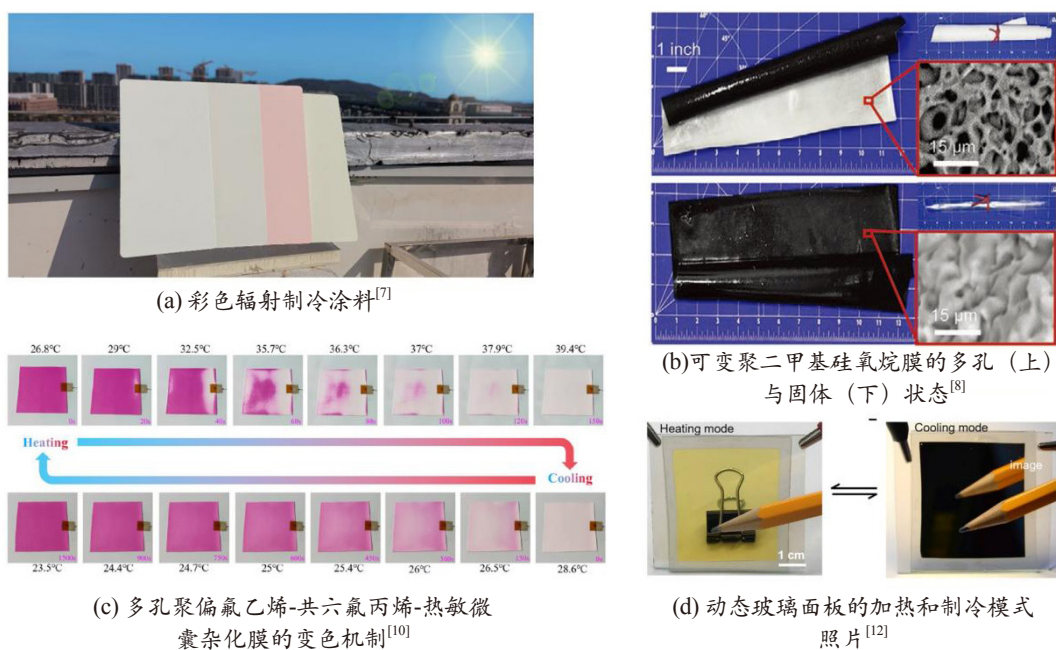


图6.6-2 可变辐射制冷材料

在应用端，辐射制冷技术在建筑、电力通信、储粮、储油等领域的节能降碳效果也得到了深入的研究。在建筑领域，王宁生等^[13]基于实际测试和模拟分析指出在大型阴凉库上应用辐射制冷材料大幅降低了空调能耗，而且还削弱了室内的温度波动与温度分层现象。东南大学赵东亮^[14]团队对国内通信基站应用辐射制冷技术进行了能效与经济性评估，结果表明除了少数寒冷地区，通讯基站应用辐射制冷技术的年节能率在6.77%~64.29%，年总节电量在21.94~52.74度/平方米。浙江省粮食局直属粮油储备库平房仓应用辐射制冷材料的对比测试结果表明：粮温上升阶段，应用了辐射制冷材料的试验仓粮温上升速率仅为对照仓的1/4；粮温下降阶段，试验仓粮温下降速率却是对照仓的1.25倍；持续高温天气

条件下，仓温和上层粮温(局部)降幅最高分别可达8.8℃和3.1℃；在开启谷冷机12天内，空调日节电率在33.4%~43.3%，平均节电率可达39.5%，平均日节电量达到100度^[15]。在储油罐上应用辐射制冷材料的测试结果表明应用后罐壁温度可下降15℃，同时降低储罐内部压力，减少“小呼吸”作用带来的损耗和碳排放^[16]。

6.6.2 关键技术

(1) 规模化制备、应用技术

宁波瑞凌新能源科技有限公司作为最早从事辐射制冷技术产业化推广应用的主体，已实现辐射制冷产品的规模化制备，辐射制冷薄膜年产能达到300万平方米，辐射制冷涂料年产能1万吨，还推出了覆

膜降温金属板、降温布等系列产品。在工程应用方面，宁波瑞凌开发出辐射制冷压型金属板产品，并与中建八局合作开发了辐射制冷金属屋面系统的施工工艺，已成功应用于杭州萧山国际机场冷屋面系统中^[17]。

(2) 建筑能效模拟设计

在建筑设计阶段，清华大学燕达^[18]团队针对原有建筑能效计算模拟软件无法描述选择性发射率特性的问题，采用分段计算的方法对Dest软件进行了补充，并指出在商业综合体类型的公共建筑上应用辐射制冷技术，年度综合节能率可达42%。

(3) 标准化

辐射制冷领域首个团体标准T/ZZB 2304—2021《辐射致（制）冷膜》已于2021年8月发布实施，首个行业标准《金属复合用辐射制冷膜》也已发布征求意见稿，同时中国粮油学会团体标准《粮仓辐射制冷材料应用技术规范》和中国工程建设标准化协会团体标准《绿色建材评价 辐射制冷材料》均已通过立项。

6.6.3 产业化应用潜能

截止2022年9月，中国辐射制冷技术已在建筑、粮储等领域应用面积超过30万平方米，图6.6-3为部分案例照片。其中杭州西站站房金属屋面系统全面应用辐射制冷膜10万平方米，2022年整体项目已通过验收并投入使用，如图6.6-3(a)。在粮食储藏领域，辐射制冷材料的降温节能效果已经过多方评估：夏季减少架空层内侧温度最高达13.9℃；可减少仓内空调开启时间，夏季空调平均节电率30%以上，控温效果显著。已被写入2021年国家粮食和物资储备局优质粮食工程“六大提升行动”方案支持应用，目前已在浙江、安徽、河南、福建、广西、海南等10省的近30个粮库应用，应用仓容达36万吨，实施面积超过10万平米。在电力领域，辐射制冷薄膜入选2020年国家工信部《全国工业领域电力需求侧管理第三批参考产品（技术）目录》，并已在16个省/自治区进行示范应用。



(a) 杭州西站站房屋面



(b) 浙江省粮食局直属粮油储备库平房仓



(c) 某330KV变电站风冷控制柜



(d) 某5G汇控柜



(e) 山东东营石化储罐

图6.6-3 辐射制冷技术应用示范项目

参考文献

[1] Raman A P, Anoma M A, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight

[J], Nature, 2014, 515: DOI: 10.1038/nature13883

[2] Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime

- radiative cooling [J], *Science*, 2017, 355: DOI: 10.1126/science.aai7899originally.
- [3] Mandal J, Fu Y K, Overvig A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling [J], *Science*, 2018, 362: DOI: 10.1126/science.aat9513.
- [4] Wang X, Liu X H, Li Z Y, et al. Scalable Flexible Hybrid Membranes with Photonic Structures for Daytime Radiative Cooling [J], *Advanced Functional Materials*, 2020, 30: DOI: 10.1002/adfm.201907562.
- [5] Wang T, Wu Y, Shi L, et al. A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling [J], *Nature Communications*, 2021, 12: DOI: 10.1038/s41467-020-20646-7.
- [6] Aili A, Wei Z Y, Chen Y Z, et al. Selection of polymers with functional groups for daytime radiative cooling [J], *Materials Today Physics*, 2019, 10: DOI: 10.1016/j.mtphys.2019.100127.
- [7] Xu J, Wan R, Xu W, et al. Colored radiative cooling coatings using phosphor dyes [J], *Materials Today Nano*, 2022, 19: DOI: 10.1016/j.mtnano.2022.100239.
- [8] Zhao H X, Sun Q Q, Zhou J, et al. Switchable Cavitation in Silicone Coatings for Energy-Saving Cooling and Heating [J], *Advanced Materials*, 2020, 32: DOI: 10.1002/adma.202000870.
- [9] Wang T, Zhang Y N, Chen M, et al. Scalable and waterborne titanium-dioxidefree thermochromic coatings for self-adaptive passive radiative cooling and heating [J], *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3: DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100782.
- [10] Wang J, Xie M, An Y Z, et al. All-season thermal regulation with thermochromic temperature-adaptive radiative cooling coatings [J], *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 246: DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111883.
- [11] Wang S C, Jiang T Y, Meng Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation [J], *Science*, 2021, 374: DOI: 10.1126/science.abg0291.
- [12] Zhao X P, Aili A, Zhao D L, et al. Dynamic glazing with switchable solar reflectance for radiative cooling and solar heating [J], *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3: DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100853.
- [13] Wang N S, Lv Y Y, Zhao D L, et al. Performance evaluation of radiative cooling for commercial-scale warehouse [J], *Materials Today Energy*, 2022, 22: DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100927.
- [14] Cui Z K, Guo C Y, Zhao D L. Energy-saving and economic analysis of passive radiative sky cooling for telecommunication base station in China [J], *Building Simulation* 2022, 15: DOI: 10.1007/s12273-022-0894-z.
- [15] 黄志军, 金建德, 徐绍禹, 等. 辐射制冷材料平房仓控温试验研究[J]. *粮食储藏*, 2021, 50(02):25-29. Gao B B, Shen B, Ji X G, et al. Research of Radiation Refrigerating Material on Temperature Controlling in Waregiyse [J], *Grain Storage*, 2021, 50(02):25-29.
- [16] 袁玉磊, 杨剑, 杨荣贵. 辐射制冷涂料在油气储罐中的应用 [J]. *石油化工设计*, 2021, 38(3):33-36. Yuan Y L, Yang J, Yang R G, Application of Radi-cool Coating in Oil and Gas Storage Tanks [J]. *Petrochemical Design*, 2021, 38(3): 33 -36.
- [17] 陈华, 鄢全科, 刘鹏, 等. 辐射制冷金属屋面系统施工技术研究 [J], *建筑结构*, 2021, 51(23): 38-41. Chen H, Yan Q K, Liu P, et al. Research on construction technology of radi-cool metal roof system [J], *Building Structure*, 2021, 51(23): 38-41.
- [18] Bu F, Yan D, Tan G, et al. Systematically incorporating spectrum-selective radiative cooling into building performance simulation: Numerical integration method and experimental validation [J], *Applied Energy*, 2022, 312: DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118733.

“双碳战略”企业家之声

7.1 冰山打造生物质与风光耦合的“美丽乡村”能源系统



丁杰 Ding Jie

大连冰山集团有限公司CTO（首席技术官），华中科技大学及西安交通大学兼职教授，湖北省空调制冷行业协会会长，中国制冷学会首届资深工程师，中国制冷学会副理事长，中国制冷空调工业协会副理事长。

7.1.1 美丽乡村的“双碳”思考

我国提出了“双碳”目标，中央及地方政府各类相关政策相继出台，各行业“十四五”规划内容中均将“双碳”目标纳入统筹范围，一场“碳中和”运动正如火如荼的全面展开。长期以来，节能降碳的主战场在工业、交通、能源等相关领域，且主要集中在城市地区，对于乡村地区的节能减排问题并未给予足够重视。在我国，“三农”问题解决的好坏事关社会的稳定和人民生活水平的全面提高，“三农”排碳次序为能源消耗、化肥的使用、畜禽养殖、农业机械等。据联合国粮农组织（FAO）的相关统计数据显示，农业用地释放出的温室气体（主要是CO₂、CH₄）超过了全球人为温室气体排放总量的30%，但同时农业生态系统也可以抵消掉80%的因农业导致的温室气体排放^[1]。可以说，农业既是全球温室气体重要的排放源，同时又是一个巨大的碳汇系统，其对于“双碳”战略目标的实现有至关重要的作用。我国作为世界农业大国，农

业温室气体排放量约占全球农业总排放量的12%，农业农村领域的节能减碳空间巨大^[2]。党的十六届五中全会在提出建设社会主义新农村的历史性任务时提出了建设“美丽乡村”的总体规划，党的十八大以来，农业农村部对“美丽乡村”建设提出了总体要求，概括为“乡村文明”“生态宜居”“产业发展”“生活富裕”“村容整洁”“管理民主”等，规划了“产业发展”和“生态保护”等十大模式，因地制宜的推进美丽乡村能源系统的建设必将为我国“双碳”目标的实现作出重要贡献。

将“双碳”目标纳入乡村振兴全局已经引起国家重视，近期中央陆续发布了系列指导性政策。2021年10月，中办、国办印发了《关于推动城乡建设绿色发展的意见》，明确提出“打造绿色生态宜居的美丽乡村”，确立了“城乡建设全面实现绿色发展，碳减排水平快速提升”的总体目标；2022年5月，农业农村部与国家发展改革委联合印发了《农业农村减排固碳实施方案》，提出实施稻田甲烷减排、

化肥减量增效、畜禽低碳减排、渔业减排增汇、农机绿色节能、农田碳汇提升、秸秆综合利用、可再生能源替代、科技创新支撑、监测体系建设等10大行动。

“双碳”目标正一步步和“美丽乡村”建设相契合，而“美丽乡村”建设又是解决“三农”问题的关键。“三农”碳排放占比巨大的同时，由于其生态系统具有极强的碳汇能力，所以碳中和的缺口并不大，鉴于“三农”的能源消耗又占据50%以上的排碳权重，且乡村资源禀赋中生物质能、风、光作为一次能源又极易获取，因此，本文提出基于生物质能与风光资源耦合的“美丽乡村”能源系统，在实现零碳负碳的同时甚至可以实现能源外输，构建新型“美丽乡村”能源系统。可以预见，基于生物质能与风光耦合的能源系统是我国“美丽乡村”能源系统建设的必由之路。

7.1.2 生物质能利用方法

生物质能是唯一一种可再生的碳源，其直接或间接来源于植物的光合作用，可以人为转化为固态、液态、气态燃料。地球每年产生的生物质能总量相当于能源消耗总量的10~20倍，但利用率还不到3%^[3]。

我国生物质能资源十分丰富，理论上生物质能资源50亿吨左右^[4]，主要包括农林业废弃物、禽畜粪便、城市生活垃圾等。其中农业生物质资源（农林废弃物、禽畜粪便）是主要形式的生物质能资源，每年可利用的总量约合4.6亿吨标准煤。另一方面，据统计^[5]，我国农村生活及生产总能耗约3.34亿吨标准煤。因此，从能源平衡角度来说，生物质能是构建“零碳”甚至“负碳”“美丽乡村”能源系统最重要的一环。生物质能技术主要包括：生物质发电、生物质燃料（固、液、气）。

（1）生物质发电

生物质发电是最成熟的生物质能利用技术。我国的生物质发电以直燃发电技术为主^[6]，图7.1-1所示为我国近几年生物质发电的装机容量。2015年至2020年总装机容量持续增长，2020年总装机容量达2952万kW，但新增装机容量较2019年略有下降。最近几年的生物质发电装机容量中，垃圾焚烧发电约占比61%、农林生物质发电约占比37%、沼气发电约占比2%^[7]。直燃式发电（垃圾焚烧发电、农林生物质发电）占比生物质能发电总装机容量的98%左右。

随着生物质能转换技术的不断发展，直燃式的

生物质发电技术已有巨大进步，有害污染物排放明显减少。但从根本上来说，生物质热值低、焚烧产生的有害物质亦无法彻底消除，直接燃烧的排碳量并没有减少，因此在“双碳”战略背景下，直燃式技术并不是生物质能发展的最优路径，经过生物质发酵转化的沼气（甲烷含量60%~80%）燃烧发电技术将是更好的生物质能源化的选择。

沼气发电是随着沼气综合利用技术的不断发展而出现的一项沼气利用技术，其主要原理是利用工农业或城镇生活中的大量有机废弃物经厌氧发酵处理产生的沼气燃烧驱动沼气燃气发电机组发电。发酵后的沼液、沼渣可作为生物基肥料进一步资源化利用。由于生物质发酵技术在国内外已经逐渐成熟，发酵过程连续、环保、可控，产生的主要成分是甲烷（CH₄），同时沼气发电以及余热利用技术稳定可靠，相比于直燃式发电排碳量大幅度降低，因此，生物质发酵生产沼气发电是未来生物质资源化转换的主要方式。

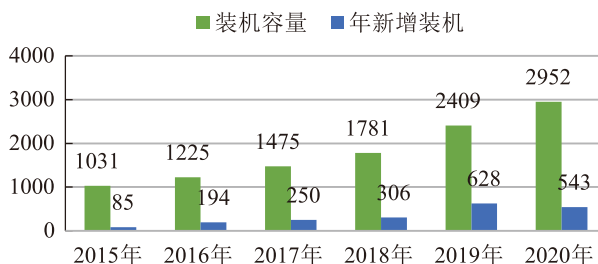


图7.1-1 生物质发电累计装机容量（万kW）

（2）生物质燃料

生物质燃料主要分为固、液、气三种。固体燃料是指农林废弃物经粉碎、混合、挤压、烘干处理后制成的块状或颗粒状可直接燃烧的燃料；液体燃料是指利用生物质发酵产生醇类或经化学反应制成生物柴油等液体燃料的方法，一般无法从农林废弃物中大量提取；气体燃料是利用微生物发酵产生沼气，沼气经提纯为CH₄用于燃料的技术，生物质发酵制沼气技术如图7.1-2所示。研究证明，利用农林废弃物发酵提纯制取CH₄燃料的方式是最清洁的生物质燃料制取方式。

我国生物质能资源特别是乡村地区的农林废弃物资源十分丰富。而无论是发电还是制取燃料，生物发酵制取沼气的方式都是最清洁的能源化利用方式。生物质发酵制沼气是未来建设“美丽乡村”能源系统的主要技术手段之一。

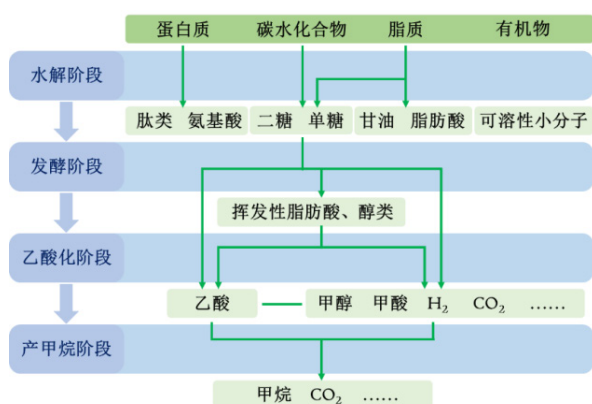
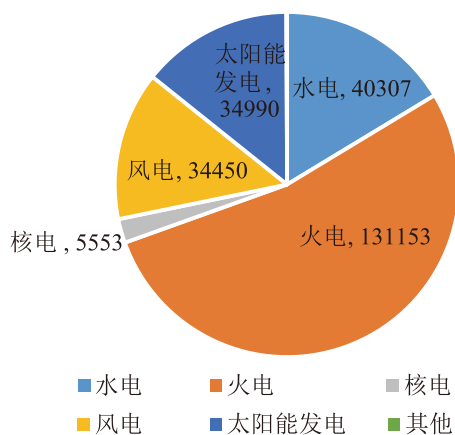


图7.1-2 生物质发酵制甲烷流程图

7.1.3 风能与太阳能利用特点

据全国电力工业统计数据^[8]，截至2022年8月份，全国发电装机容量如图7.1-3所示，总装机容量达246631万kW，其中火电131153万kW、风电34450万kW、太阳能发电34990万kW，火电占比约53%，风电和太阳能发电合计占比约28%。

图7.1-3 我国发电装机容量图
(单位：万kW，截至2022年8月)

近年来，在我国电力供应中，火电占比逐年降低，同时水电、核电、风电、太阳能发电等“绿电”占比逐年增加。受地理等环境因素影响，水电、核电供应量逐渐趋于稳定，风电、太阳能发电是主要增长点。由此可见，太阳能资源和风能资源开发潜力巨大。需要特别指出的是，在“双碳”战略背景下，清洁能源的缺口将持续增大，而绿色电力供应的主要突破口只能是生物质能、风能和太阳能。我国农村地区约占全国土地总面积的94%，在广大农村地区，可以因地制宜的发展风电和光伏，农村地区是未来太阳能和风能发电的主要开发地区。

7.1.4 “美丽乡村”生物质与风光耦合的能源系统

“双碳”目标下的建设是我国农村长远发展的战略方向，这就使建立更加优化的乡村能源系统成为必然。生物质能、风能、太阳能是乡村能源资源禀赋中资源充沛的可再生清洁能源，在国家能源结构中的占比逐年增加。如何合理高效因地制宜地利用乡村能源资源构建乡村能源系统是“双碳”战略和“美丽乡村”战略相结合的核心问题。

目前我国乡村能源供应特点：1) 电网供电为主，燃气、柴草、燃煤供热为主；2) 偏远村落输电成本高、输气成本高；3) 乡村生物质资源未有效利用。就地取材、充分利用可再生能源、减少低效高污染的供能方式，建立多种绿色能源耦合的乡村能源供应系统是“美丽乡村”建设的首要内容。

“美丽乡村”能源系统如图7.1-4所示，基于生物质与风光耦合的冷热电联供系统如图7.1-5所示，乡村供电主要由生物质发电（包括直燃发电和沼气发电）、光伏发电、风电以及大电网补充耦合组成，按照乡村能源平衡情况，生物质与风、光耦合的电力系统不仅完全能够满足乡村地区的电力负荷需求，同时可以实现绿电外输，为城市电网供电。乡村供热主要由生物质热电联产（包括直燃发电和

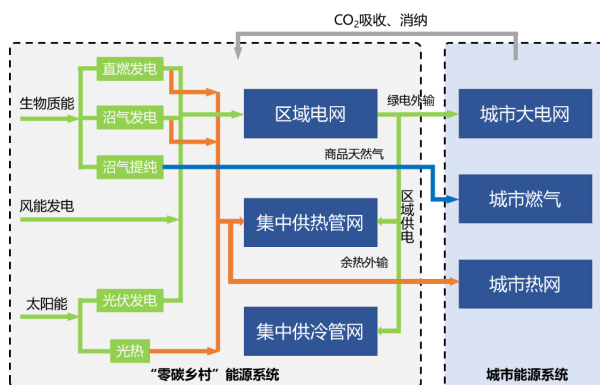


图7.1-4 “美丽乡村”能源系统示意图

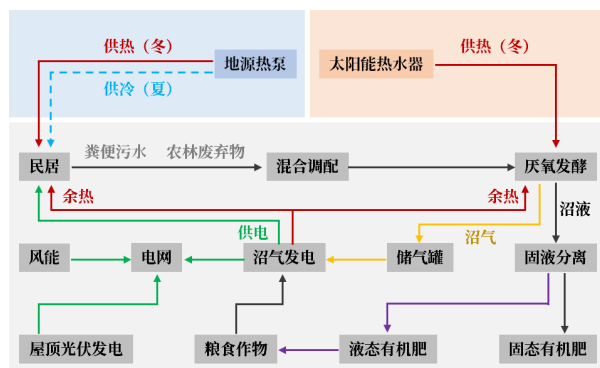


图7.1-5 基于生物质与风光耦合的冷热电联供系统

沼气发电)供热、太阳能供热组成,此外还可以耦合沼气GHP(燃气热泵)技术和水地源热泵技术等热源联合供热形式,除为“美丽乡村”能源系统集中供热外,多余的热源可采用大温差长距离供热技术为附近城镇热网供热。乡村供冷主要由电空调制冷、水地源热泵供冷组成,采用集中供冷形式,可极大的提高制冷系统的能效,降低电力消耗,所需的电负荷由乡村区域电网供给。此外,多余的沼气经分离提纯后制成高纯度 CH_4 气体,成为优质的清洁能源,经过加压或液化后可直接供应至城市燃气系统,逐步降低城乡天然气用气负荷。

农业生态系统可以抵消掉80%的因“三农”导致的温室气体排放,而建立“美丽乡村”能源系统后农村生活生产所产生的碳排放量将极大减少,这意味着乡村生态系统又可吸收、消纳部分城市产生的 CO_2 气体,对于国家“双碳”战略总体目标的实现意义重大。

生物质能与风、光耦合的“美丽乡村”能源系统是完整的基于绿色可再生能源的冷、热、电、气综合能源系统。需要指出的是,“美丽乡村”能源系统是因地制宜嵌入了清洁能源和可再生能源的区域能源联供的特殊形式,目标市场是“三农”,因而需要在政府的主导和支持下进行试点,成熟后进行推广。在“双碳”背景下,生物质能、风能、太阳能是乡村振兴战略的重要能源构成,构建冷、热、电、气综合利用的能源系统不仅可实现区域的减碳、零碳,甚至可实现能源外输。可以预见,在不久的将来,基于生物质与风光耦合的“美丽乡村”能源体系将成为我国能源体系的重要组成部分。

在构建“美丽乡村”能源系统的技术及设备方面,制冷制热领域相关的技术及设备包括:1)智能化控制系统。区域能源平稳供给的关键是智能化的能源综合利用,因此智能化且具备自主学习功能的能源控制系统非常重要;2)200~500kW微型沼气直燃式发电机组及余热回收装置;3)蒸汽压缩式热泵技术,包括GHP沼气燃气热泵、水地源热泵、冷热双效空调热泵等,热泵技术及机组是实现区域供冷/热的关键;4)溴化锂吸收式制冷/热技术及设备,溴化锂吸收式制冷技术及设备可利用热电联产的余热制冷,也是实现大温差长距离输热的关键;5)天然气提纯液化技术及设备,可实现沼气转换为 CH_4 气体的产品化及液化;6)天然气增压技术及设备,可实现沼气转换为 CH_4 气体的跨区域输送。

7.1.5 生物质能与风光耦合的“美丽乡村”能源系统总结

生物质能与风光耦合的“美丽乡村”能源系统,是充分利用乡村清洁能源和可再生能源建立的区域冷、热、电、气综合利用的能源系统,不仅可实现乡村区域的减碳、零碳,甚至可实现能源外输。

“美丽乡村”能源系统的核心技术中,大部分属于制冷制热领域,包括:具备自主学习功能的智能化控制系统、电制冷制热装置、沼气发电机及余热回收装置、沼气GHP热泵、溴化锂吸收式制冷/热设备、天然气提纯及液化、天然气增压设备等。

“双碳”战略和“美丽乡村”战略均是我国重要的战略规划,对于整个国家的能源结构调整具有重要的战略意义,对制冷制热行业尤其是重大的机遇与挑战。我国乡村区域幅员辽阔,生物质能资源丰富,加快推进研发实施基于生物质与“风、光”耦合的“美丽乡村”能源系统将是我国“美丽乡村”能源系统建设的必由之路。

参考文献

- [1] <https://www.fao.org/climate-change/zh/>.
- [2] https://mp.weixin.qq.com/s/?__biz=MzA4MjlyNzAxOA==&mid=2651438306&idx=2&sn=1cf6754cd7bc90bf0e07ecf84b259bb8&chksm=8475e6c7b3026fd173c6f6013f7383cf177296cfc206b59e69d5918a6af18b8212db3980b253&scene=27.
- [3] 梁志松,何楠,周旺,等.双碳目标下生物质能发展现状及应用路径研究[J].科技视界,2022(18):5-7. DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2022.18.01.
- [4] 李丹,李明洋.双碳目标下生物质能发展现状 & 前景分析[J].缔客世界,2021(12):180-181.
- [5] 付鹏,徐国平,李兴华,等.我国生物质发电行业发展现状与趋势及碳减排潜力分析[J].工业安全与环保,2021,47(S1):48-52. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2021.z1.013.
- [6] 石元春.我国生物质能源发展综述[J].智慧电力,2017,45(7):1-5,42. DOI:10.3969/j.issn.1673-7598.2017.07.001.
- [7] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴2021[M].北京:中国统计出版社,2022.
- [8] 国家能源局.全国电力工业统计数据[M].北京:中国统计出版社,2022.

“双碳战略”企业家之声

7.2 冰轮双碳形势下冷冻冷藏技术发展的思考



张会明 Zhang Huiming

冰轮环境技术股份有限公司副总裁，高级工程师。长期致力于二氧化碳复合制冷、特殊工艺气体压缩、工业热管理、系统数字化绩效管控等低碳创新技术的研发与推广应用。曾荣获中国制冷学会科技进步奖、中国机械工业科技进步奖、山东省科技进步奖、保护臭氧示范项目奖等多项荣誉。

制冷空调、冷冻冷藏行业是国民经济的耗能大户。在“双碳”政策的挑战与机遇并存的背景下，冷冻冷藏行业需要积极构建自己的“双碳”战略组织架构，实现产业结构高端化、能源消费低碳化、资源利用循环化、生产过程清洁化、产品供给绿色化、制造过程数字化，助力冷冻冷藏行业“碳中和”目标的实现。

7.2.1 冰轮采用绿色制冷剂和绿色能源

(1) 绿色制冷剂

对于制冷剂的探讨由来已久，制冷空调行业使用的HCFCs以及HFCs制冷剂，会造成臭氧层破坏，引发温室效应。自1985年起，国际社会也制定了《维也纳公约》《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》等一系列文件。2021年，生态环境部发布《中国含氢氯氟烃替代品推荐名录》，力推R290、R600a、R744及R717在热泵、工商用制冷设备、冷库用制冷设备中的应用^[1]。此外，我国已于2021年接受

《基加利修正案》，根据其要求，常用的HFCs制冷剂，如HFC-134a、HFC-245fa、HFC-125、HFC-152等均在受控之列^[2]，未来更低GWP的制冷剂（CO₂、NH₃、HFOs、HCs、H₂O……）在全球范围内的应用推广将是必然的趋势。

绿色制冷剂在应用过程中需要考虑效率和安全等多重因素。经过市场的考验，对于冷冻冷藏行业，推荐采用NH₃/CO₂复叠制冷系统、NH₃/CO₂载冷剂制冷系统，乳品和啤酒行业可采用微充注的氨分板换机组。对于工业制冷中的石油、天然气用特殊工艺冷却，可采用R290、R1270以及HCs制冷剂的复叠系统。

NH₃/CO₂复合制冷系统或者NH₃单一工质制冷系统，不仅GWP较低，不同的温区采用不同的系统型式，可获得最佳的系统效率。以NH₃/CO₂复叠制冷系统为例，在大压差、大温差工况采用复叠系统可以使高低温的压缩机工作在最佳的压比范围内，压缩机效率高，CO₂的优异流动换热性可减少低温制

冷剂的输送功耗。经实际工程测试，在-42℃蒸发温度时，NH₃/CO₂复叠制冷系统COP比NH₃两级压缩制冷系统高12%，在-18℃蒸发温度时，NH₃/CO₂载冷剂制冷系统COP比NH₃单级带经济器单级制冷系统高4%，与普通乙二醇载冷剂制冷系统相比COP提高30%^[3]。

传统的石油、化工、特殊气体行业用冷多采用R22制冷，如生产工艺过程用冷水及低温盐水、工艺过程反应产物的冷却、冷凝（天然气冷却、天然气

液化、轻烃回收等）。HCs制冷剂是一类优良的自然工质，其ODP=0，GWP均很低，接近于零，符合环保制冷工质的要求。HCs制冷剂主要包括R50（甲烷）、R170（乙烷）、R290（丙烷）、R600（丁烷）、R600a（异丁烷）、R601（戊烷）、R601a（异戊烷）、R1150（乙烯）、R1270（丙烯）等天然制冷剂，来源广泛，价格便宜。HCs制冷剂与其它新型环保制冷剂的比较如表7.2-1。

表7.2-1 HCs制冷剂与其它新型环保制冷剂的比较

	R1234yf	R1234ze	R290	R1270	R170	R1150	R32	R507	R452A	R449
沸点（℃）	-28	-19	-42.2	-47.7	-88.9	-104	-51.7	-46.7	-46.9	-45.7
临界温度（℃）	95	109	96.7	92.4	32.3	9.2	78.1	70.9	75.1	82.2
GWP	1	6	3				670	3900	2141	1397
ASHRAE安全分类	A2L	A1	A3				A2	A1		
使用情况	美国汽车空调行业	美国热泵行业	国内空调业大力扶持石油炼化产品	石油化工副产物	低温复叠系统的低温段石油、化工副产品	日本主流制冷剂	主流低温制冷剂	欧洲新开发		
分析	不适用于低温制冷		最大障碍可燃性，需要防爆				有可燃性，需要考虑防爆	R125 R143	R32 R125 R1234yf	R32 R125 R134A R1234yf
淘汰情况	最新HFO，符合要求		天然工质，符合要求				属于淘汰范围		部分组分属于淘汰范围	

HCs制冷剂应用于石化行业优势众多，虽易燃易爆，需要按照防爆等级dⅡBT4或以上进行设计，但非常符合化工防爆安全性，机组防爆设计无需增加额外成本；HCs是工业过程副产物，自有产品，易获得，价格低；HCs制冷剂的绝热指数较低，排气温度低，油冷负荷小，绝热效率高。



图7.2-1 辽宁某油田轻烃回收(R290/R170复叠-68℃蒸发)



图7.2-2 新疆某多晶硅(复叠系统R1270/R1150-87℃蒸发)

(2) 绿色能源

能源转型是各行业都在探索的减碳技术，新型的能源形式包括太阳能、风能、水能、核能以及氢能。近十年，我国清洁能源发电占比逐年增长，从18%增长到31%，预测未来风能和光能的装机功率将达12亿千瓦以上，到2060年，新能源发电占比将有

望超过50%^[4]。

太阳能具有来源广泛、储量大的优势，是最易与冷冻冷藏行业耦合的绿色可再生能源。冷冻冷藏与光伏耦合具有以下优势：冷冻冷藏行业的耗能设备，如风机、水泵、油泵、压缩机、电动阀门等可就地消纳绿色光伏的发电，减少电网用电负荷；冷库、车间的屋顶、外立面等拥有安装光伏的表面，无新增用地，在既有场地进行改造即可；光伏发电和冷库耗电的季节匹配性好，炎热夏季的围护结构热负荷大，冷凝温度高，制冷系统耗功大，用电量大的同时光伏的日有效光照时间长，发电量大。

由于光伏发电在时间上的不连续性和不可预测性，需要解决供电侧和用电侧的高效匹配问题。针对制冷系统的特点，可以采用交流耦合和直流耦合两种方式，对于电流逆变、转换次数越少，电能损耗越低，效率越高。以下是交流耦合（图7.2-3）和直流耦合（图7.2-4）两种耦合太阳能的系统布置型式。

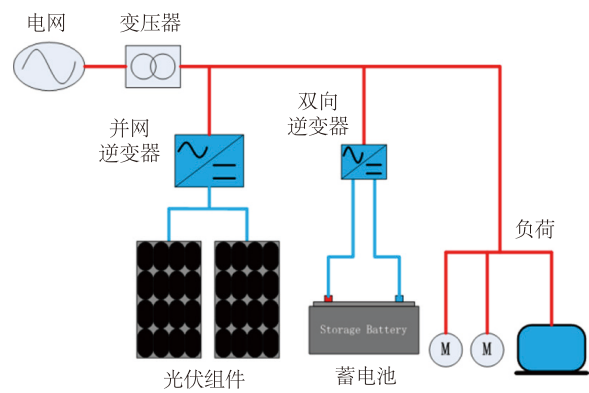


图7.2-3 交流耦合系统

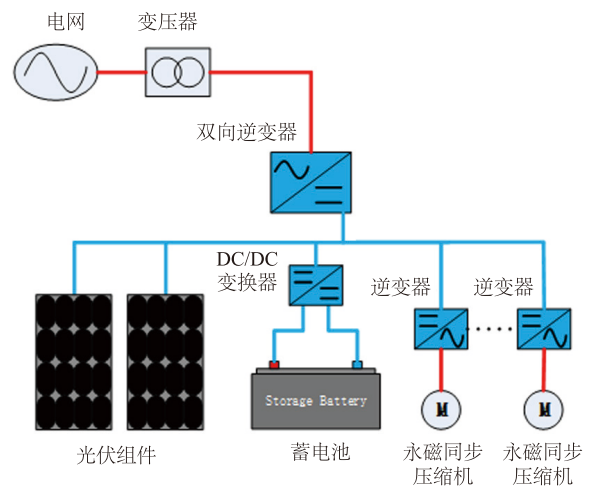


图7.2-4 直流耦合系统

能源系统的顶层设计是实现零碳园区的必要前提，针对冷冻冷藏行业园区的用能特点，冷冻冷藏行业可采用基于光伏等新能源的源网荷储用一体化系统，该系统具有低碳运维、安全洁净、智能高效、经济可靠的特点。

光伏发电量大、分散、波动性强，宜分布式管理，避免电能的远距离传输和多次转化。对于冷冻冷藏行业，最佳的储能型式建议采用消防水池或其它容器进行蓄能，不同工艺场景的储能建议详见表7.2-2。

表7.2-2 冷冻冷藏蓄能方式建议

细分行业	温度需求	储能型式
果蔬库、乳品、化工原料冷却等	-1~7℃	动态冰浆蓄冷/水蓄冷（利用消防水池）
低温冷藏库	-18℃	低温高潜热无机盐溶液相变蓄冷
速冻库（NH ₃ /CO ₂ 复合制冷系统）	-35℃	光蓄电池储调峰/整流直驱
肉食、水产	冷热同需	制取高温热水、蒸汽蓄热

冷库按照应用场景分为冻结间、冻结物冷藏间和冷却物冷藏间三种，相同的地理位置，单位面积发电量基本相当，但是单位面积功耗相差很大，其中冻结间的功耗最大，根据多年的冷库建设、运维经验，常规冻结间单位面积功耗约1000W/m²、常规冻结物冷藏间25W/m²、常规冷却物冷藏间46W/m²。对于速冻库，其用电量远高于光伏发电量，光伏发电可以被就地消纳；对于冻结物冷藏间，日有效发电6小时左右，通过蓄能可满足当天的自发自用。

需要注意的是，冷库系统和光伏匹配性好，但仍需配置蓄能或蓄电，因为瞬时发电量有可能会超过瞬时有用电量。以东营某一综合保税物流园区冷库项目（以低温冷藏间为主）为例进行测算：1#、2#、3#冷库总有效建筑面积4320m²、冷库容量17820t、总需冷量936kW、日最大耗电量5000kWh，在屋顶安装光伏后，全年累计发电量在43.4万kWh，光伏发电约占全年用电量的24%。

光伏冷库可优化冻结模式，改善冻品品质。传统冷库为降低耗电成本，多采用晚上开机拉低库温，白天停机维持库温的操作，采用光伏供电后，为避免电力多次转化，白天适时开机，使库温回升

得到有效控制，利于精准控制库温，改善冻品品质。传统用户负载和光伏发电如图7.2-5所示：

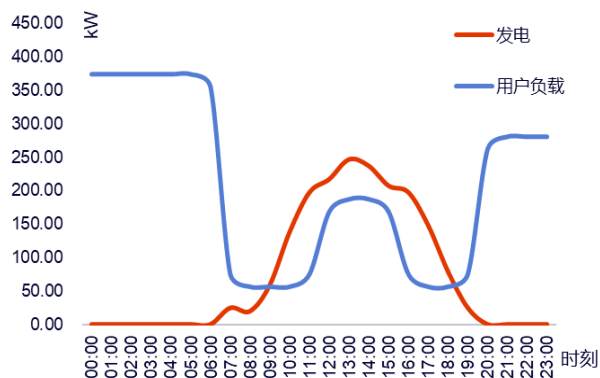


图7.2-5 低温冷藏库用户负载与光伏发电曲线图

7.2.2 冰轮持续推进冷冻冷藏系统效率提升

在能源和环境的双重压力下，政策推动冷冻冷藏行业向着高效、节能、环保的方向发展已成为行业的共识，“节能是第一能源”已是政府和社会公认的基础理念。从《国家重点节能技术推广目录》、节能产品认证、《“能效之星”装备产品目录》、《绿色高效制冷行动方案》^[5]到2020年的新版《房间空气调节器能效限定值及能效等级》国家标准，各种能效等级指标不断提升。

行业发展，标准先行。目前，行业上对于冷库及附属设备的能效限定值并不严格。如GB/T 19410《螺杆式制冷压缩机》，仅规定压缩机制冷量不小于明示值的95%，制冷性能系数不小于明示值的95%。但各家主机排量不同，制冷量各不相同。我们应倡导冷冻冷藏行业导入高效机房的概念，完善评价标准及能效限定标准。提升冷冻冷藏系统能效，可通过以下方法：1) 提升冷冻冷藏“心脏”压缩机的效率，围绕新型环保制冷剂进行压缩机的改进设计或重新开发；2) 采用高效电机或者永磁同步高效电机；3) 提升换热器的效率，减小换热温差；4) 提升附属风机、水泵的能效水平；5) 优化管路布置，降低系统阻力降；6) 加载数字化技术，精准控制系统能效在最高水平。

以压缩机效率提升为例，从设计、制造、运行全流程进行能效提升。从理想的绝热压缩到实际压缩，受型线设计、间隙密封、孔口阻力、机械摩擦损失、电机效率以及传动效率的逐级影响，等熵绝热压缩功率逐渐放大为实际功耗。西安交通大学

压缩机研究所开展了螺杆压缩机关键技术的研发工作，提出了高效螺杆压缩机的设计方向：1) 型线提升；2) 变导程、自平衡转子结构；3) 转子变形、最小间隙控制技术；4) 多孔封严涂层、喷油精细化管理；5) 高速精定磁悬浮、气悬浮轴承技术。通过压缩机精细化设计，压缩机的容积效率和绝热效率均可得到大幅提升。

主电机作为冷冻冷藏制冷系统最大的用能部件，新国标2级及以上能效的主电机在石化行业已经成为行业的通用要求。但在冷冻冷藏行业，由于市场以价格竞争为主导，客户对于电机的能效并无要求。据测算，对于一台200kW的三相异步电动机，2级能效电机效率96.5%，3级能效电机效率95.8%，以年运行8000小时计，每年的节电量在11200kWh。

永磁同步电动机以永磁体提供励磁，电动机结构简单，体积小、重量轻，降低了加工和装配费用，且省去了容易出问题的集电环和电刷，提高了电动机运行的可靠性；又因无需励磁电流，没有励磁损耗，提高了电动机的效率和功率密度^[6]。

针对冷冻冷藏行业电机的应用特点所开发钕铁硼永磁同步电机，经测试，电机效率高达97.1%，相当于GB 18613标准中的一级能效（IE5）；功率因数 $\cos\phi$ 超过0.97，除此以外，电机在部分负荷仍能保持较高的效率，比传统异步电机高20%以上。

对于细分领域，针对其工艺用能特点，推荐几种低碳应用实践：

1) 针对制冷冷凝热回收的宽温区高效制冷供热耦合集成系统。我国余热资源丰富，一方面工艺流程本身产生的反应热厂区自身难以消化，另一方面，热源的品味较低，不能直接利用。热泵技术通过提取环境介质、余热废热资源中的低品位余热，提升至可被直接利用的高品味余热，是“双碳”进程中减碳潜力巨大的一项技术。对于冷冻冷藏行业中的肉类屠宰以及乳品、啤酒等行业，存在大量不同梯级品味热量的需求，采用显热回收、高温热泵、蒸汽热泵、蒸汽增压等技术回收制冷系统的油冷排热、冷凝热，制取中温热水、高温热水或蒸汽，满足工艺热水、采暖、储能、杀菌以及热量补给各种用热需求。

2) 针对畜禽屠宰行业胴体预冷的红水机组。家禽屠宰在经过致昏、褪羽、浸蜡、净膛等流程后，就会进入预冷环节。因宰杀过程中使用热水，胴体

温度较高，分割前需进行预冷降温。胴体预冷主要采用分段螺旋预冷装置，因宰杀褪毛过程中常存在大量的血污、羽毛，所以采用一次性溢流冰水+片冰的模式进行胴体换热。一次性冰水需求量大且溢流水常带走部分未完全换热融化的片冰，造成了屠宰线运行成本大大增加。此外，片冰机组运行蒸发温度在 -23°C ，系统COP较低。采用红水预冷机组，代替螺旋预冷+片冰的方式，机组对预冷池的水循环制冷重复利用，减少了冷能以及水的损耗，同时蒸发温度提升至 -7°C ，系统COP显著提升，节水节电。

3) DISU动态制冰技术。传统的制冰方式包括管冰、块冰、片冰等，制冰蒸发温度多在 -18°C 以下，蒸发温度每升高 1°C ，COP可提升约3%~5%。动态高效制冰技术制冷蒸发温度维持在 -3°C ，采用稳态制冷，亚稳态制冰，制冷和制冰相分离，解决了传统制冰随着制冰时间延长效率急剧衰减的换热难题，单吨制冰能耗可降低为传统制冰的50%左右。此外冰的单位体积需冷量大，是最好的蓄冷载体。当需要用冷时，动态制冰比片冰的放冷速率高4倍以上。DISU动态制冰是一种高效制冰、蓄冷、放冷的技术，其大容量蓄冷及所提供的 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 恒温冰水可广泛应用于：执行峰谷电价时期或电费差价较大的区域、中央空调系统低温蓄冷冷源、车间空调、水产加工以及大中型制冰等众多领域。

4) 用于替代速冻库的智能隧道（低能耗智能化隧道式连续冻结速冻设备）。传统速冻库采用人工作业，智能化水平低，生产连续性差，采用谷电运行，冻品损耗大，能耗大。在高效率、低损耗、智能化、流水线、智能仓储、无人工厂的需求下，智能隧道应运而生。智能隧道与传统速冻库相比，可实现全流水线，且有多种操作模式可选，满足多种冻结工艺和冻结习惯。通过优化内部气流组织、加载防结霜及高效除霜技术、图像识别、智能运维的实施，单位冻品冻结能耗可以降低12%以上。

7.2.3 冰轮持续开展智慧赋能的智能制造、智能产品和智能运维

(1) 智能制造

打造智能制造智慧工厂的意义在于，淘汰落后产能，实现产业的数字化，提高厂区的能源利用效率，降低制造环节的碳排放。

铸造一直被认为是高能耗高污染的行业，我国

铸造行业的能耗占机械工业总能耗的25%~30%，是铸造发达国家的2倍。我国每生产1t合格铸铁件的能耗为550~700kg标准煤，国外则为300~400kg标准煤，我国每生产1t合格铸钢铁件的能耗为800~1000kg标准煤，国外为500~800kg标准煤^[7]。为解决铸造能耗高的问题，2019年11月，冰轮尝试打造一座全流程智能化3D打印铸造工厂。通过对各耗能环节的分析，工厂采用3D打印、AGV机器人、智能仓储等智能装备，实现包括砂芯制作、自动浇注、智能清理等铸造工艺全过程智能化，最终工厂吨铸件能耗指标达到342kg标准煤，赶超国际一流水平。为此，工厂也成功入选2020年中国标杆智能工厂榜单。

冷冻冷藏行业所用中大型压缩机涉及螺杆式、离心式、开启式、半封闭式，不同排量对机型大小需求不同，不同工况对滑阀口配置要求不同，不同压缩介质对材料要求不同，多品种小批量混流生产不仅造成生产准备复杂，生产效率低下，也造成了压缩机效率一致性、可靠性差。2021年，冰轮开始探索冷冻冷藏行业首座复杂离散型智能压缩机原生工厂的建设，通过用数字技术统一大脑、统一执行、统一物联、统一协同，实现全流程的数字化，硬件上配置含AGV、智能货柜在内的压缩机柔性定制生产线，与传统的压缩机制造模式相比，员工可减少50%、产能增加40%、交期缩短60%、设备物联100%、数据打通率100%、质量一致性显著提升，生产效率提升3倍以上。

(2) 智能装备

装备以产出为目的，可以看成是小型化的加工厂，数字化变革使得智能装备具有以下几个维度的特征：最底层的维度，可以被感知，从压力、温度、流量、振动、噪声等全系统参数被采集；向上一层，可沟通、可交互；顶层，智慧、有想法、有算法，自动寻找最优路径。

以替代传统速冻库的智能隧道为例，兼具图像识别功能的入料口，可以识别货盘的产线、种类；在隧道内部进行智能分区，依据后端产线的出货需求，结合历史数据，精确计算每个货盘最佳位置；智能隧道植入了海量冻结曲线，精准识别不同冻品的冻结时间，用颜色示踪冻品的冻结状态；对于完成冻结又不着急出货的冻品会划分出一个低温冷藏休眠仓，保证冻品在最小消耗的休眠状态维持冷藏需求。

智能隧道可节省90%以上的人力,实现屠宰场全产业链条的流水线制造,通过气流组织优化、主动防结霜及高效除霜技术加载、智能智维,单位冻品冻结能耗降低12%~20%。

(3) 智能运维

在设备交付客户之后,操作习惯也会造成运行能耗的差异。传统的操作工在权衡设备的可靠性运转和节能运转方面,往往倾向于可靠性运转,所以要实现低碳运维,可尝试加载专家库智慧算法的远程智能运维,使用数字技术减少设备运行中的碳排放。

智慧运维的整体架构主要包括机电设备层、大数据层、人工智能层以及智慧运营管理层四层。以冷库的运维为例,通过采集环境以及影响库内温度的相关因素,基于气象条件和运行工况,构建最短必要开机时间和最大化下限温度的具有深度学习构架的数学仿真模型。运行过程中,不断导入历史数据,利用自适应梯度算法与均方根传播优化算法,对数据进行拟合,对模型进行训练和优化。实践证明,采用基于最短必要开机时间原则的频繁调节方案,冷库运维的节能率在20%左右。此项提升不需要对设备进行改造,仅将部分参数上云即可。

7.2.4 冷冻冷藏行业如何进行低碳转型?

1) 应当关注制冷工质的温室气体排放问题,制冷系统可尽量采用GWP较低天然工质,减少当量CO₂排放;除单纯依靠电网供电外,我们应当尝试结合自身的建筑和地域优势发展低碳能源,如通过太阳能与制冷系统的结合消纳可再生能源,减少主电网的化石能源消耗,此外可以通过蓄能的方式解决太阳能电力时段和量的匹配问题,优化电力需求侧

的响应。

2) 应当从耗电侧和供电侧同步提升效率。例如耗电侧提升压缩机、泵等耗电设备的效率,供电侧通过采用永磁同步技术提升电机的效率和功率因素,减少电网向动设备转化过程中的电力损失,采用变频技术提升部分负荷下的效率等。

3) 应当积极创新,通过新的技术和工艺替代传统的高耗能工艺,如采用冷凝热回收的宽温区高效制冷供热耦合集成系统替代肉类加工行业中的锅炉,通过红水机组替代畜禽屠宰行业中的板换片冰机组,通过DISU高效动态制冰技术替代传统的制冰技术,通过智能隧道这种连续冻结装备替代传统的速冻库。

4) 应当拥抱数字变化,从制造、装备、运维实现全流程的智能化、智慧化、高效化、低碳化发展。

参考文献

- [1] https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202111/t20211123_961266.html.
- [2] https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202106/t20210621_841062.shtml.
- [3] 王强,朱永宏,剧成成,等.新一代AIST模块化CO₂复叠制冷系统[J].制冷与空调,2017,17(9):76-79.
- [4] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1706392019178039365&wfr=spider&for=pc>.
- [5] https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201906/t20190614_962461.html?code=&state=123.
- [6] 陈磊,李洪章.永磁同步电动机的结构特点分析[J].电站系统工程,2011,27(4):34.
- [7] 周惦武,李娄明,张福全.“绿色铸造”与铸造行业环保[J].铸造设备与工艺,2011(1):49-53.

“双碳战略” 企业家之声

7.3 丹佛斯多维并举加速“双碳”目标达成



施 俊 Shi Jun

丹佛斯气候方案事业部中国区负责人，担任过不同部门的专家及管理岗位，在技术、市场以及销售领域都积累了丰富的经验。2021年1月1日，丹佛斯制冷事业部和供热事业部合并为丹佛斯气候方案事业部，施俊先生出任丹佛斯气候方案事业部中国区负责人，领导中国区气候方案事业部的运营。

2022年，丹佛斯集团启动全新的2030 ESG（环境、社会和公司治理）目标，战略专注脱碳、循环性、多样性和包容性，致力于在实现自身碳中和的同时，帮助客户实现高效脱碳。目前，丹佛斯已成为供应商和客户的首选脱碳合作伙伴。借此次机会，从以下四个应用场景来分享丹佛斯对于加速“双碳”目标的达成所作出的积极尝试。

7.3.1 数据中心冷却系统应用场景

如同数字时代日新月异的发展速度一样，数据中心作为承担数据储存和交互的重要载体，其所肩负的责任重大。然而，在“双碳”目标的要求下，数据中心的节能需求又同样迫在眉睫，这也给数据中心冷却产品提出了更高的要求。再加上各地对于数据中心能耗的限制和关注，实时监控数据中心实际能耗正在逐步实行，全年运行能效也得到了更多的重视。所以，在全年运行下、不同负载下，数据

中心冷却系统高效运行成为了行业从业者关注的焦点。作为数据中心冷却系统核心设备的提供商，丹佛斯已经率先预判市场的发展趋势并进行针对性的提前布局，无论是在直膨式冷却系统还是冷冻水冷却系统上，丹佛斯都已经有了应对数据中心行业发展趋势的解决方案。

针对冷冻水冷却系统，丹佛斯为数据中心冷却系统可以提供全面的核心技术解决方案，包括从磁悬浮无油高效全配置冷源，到管网精确输配的变频器、水力平衡阀与调节阀以及末端温度精确控制等系列高效产品。其中Turbocor®系列磁悬浮压缩机（图7.3-1），新推出支持高蒸发温度和低压比运行的压缩机，允许最高蒸发温度到30℃，最低压比可到1.1，从而为更高的冷水温度、更长时间利用自然冷却带来了核心技术上的突破；结合多机头并联应用，磁悬浮无油离心式冷水机组在10%以上的宽泛部分负载运行区间，具有全负载超高能效特点，较普

通离心机组大幅度减少耗电量，满足低PUE设计要求，并与数据中心分期上架、长时间部分负荷运行相匹配。



图7.3-1 适用于数据中心的Turbocor®磁悬浮TTS压缩机

针对直膨式冷却和氟泵热管系统，丹佛斯推出了全系列定频和变频器涡旋压缩机，最高运行蒸发温度可高达30℃，拥有专利的IDV技术能最大提升机房空调全年运行综合能效20%。最新推出的VCH115机房空调专用变频压缩机（图7.3-2），允许最低压比可达1.1，从而延长自然冷却利用时长40%，并全面优化低压比运行下的能效，全年能效AEER值提升40%，契合氟泵多联热管系统以及间接蒸发冷却应用需求，切实助力低PUE1.2实现路径。



图7.3-2 VCH115变频涡旋低压比（数据中心专用）压缩机

在快速增长的液冷解决方案上，丹佛斯也有多种新产品和新技术能助力液冷系统实现更高的能效和性价比。丹佛斯具有20多年液冷应用经验，100多年快换和软管生产经验，为液冷方案提供服务器和分集水器上的多种快速连接件和软管连接。在CDU内提供独有专利技术——三维波点设计的钎焊式板式换热器，采用Z型非对称流道设计，优化流体压降，增加传热系数，实现提升换热效率20%的同时，降低CDU水压降40%；为室外乙二醇或者氟化液干冷器设计的专用微通道产品，降低成本的同时提升换热效率30%。

另外，由于服务器技术的不断优化发展，机房内设计温度在逐步提高，而设计温度的提高又可以更大程度允许自然冷源的利用。当下，利用室外空

气低温热源为室内提供冷量（自然冷却）已成为数据中心节能减排的有效举措，丹佛斯一直致力于为合作伙伴提供高效、低碳的解决方案，在助力自然冷却应用解决方案上也有着自身成熟的见解。换热器是制冷设备的核心部件之一，高效能换热器将带来显著的节能减排的效益。丹佛斯针对水冷冷冻水系统和风冷冷冻水系统的自然冷却利用，分别提供了高效可拆板式换热器和自然冷却微通道产品。

丹佛斯于2022年初推出针对自然冷却系统用的高效微通道换热器（图7.3-3），其设计紧凑，相对于管翅式换热器传热效率更高，重量更轻。该新品适用于数据中心风冷冷水机组和干式冷却器，通过全新低压降扁管设计和优化的流路设计，完美平衡制冷剂传热及压力降。同时，换热器采用创新的马鞍型连接件设计，有效的降低制冷剂侧压降。而特殊翅片设计，有效平衡风侧传热及风阻。当然，全新合金材料的应用，加长了使用寿命，而可定制化的连接方式和特殊的支架设计，便于客户端系统管路连接和安装。

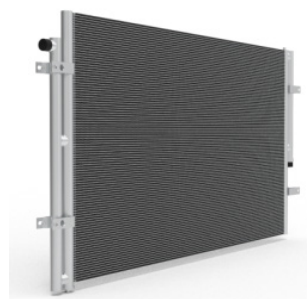


图7.3-3 微通道换热器

在2022年初，丹佛斯微通道冷凝器成功应用于特灵数据中心自然冷却系统，通过从客户端获取的关于自然冷却系统应用的深入经验，丹佛斯进一步开发了最先进的微通道换热器解决方案，该产品与目前的市场同类产品相比，传热性能提升了约6%，同时制冷剂侧压降降低了30%以上，在应用中得到了多方高度的好评。

7.3.2 屠宰场冷链能源综合智慧管理应用场景

屠宰企业在生产过程中都有冷却和加热（如烫毛、清洁等）需求。在加热应用上，中国大部分的屠宰企业仍在使用传统的燃煤锅炉工艺，与欧美热泵相比，燃煤锅炉在经济和环保效益上仍有较大的提升空间，特别是在“双碳”的目标下，针对节

能和环保指标将成为未来重点的发展方向。

深耕于屠宰工艺市场的丹佛斯，在热回收和热泵应用领域都有着自身独到的见解。一方面，余热回收技术实现了利用低品位热能进行清洗和烘干，相较于煤、燃气、电加热的方式其热量损失和环境污染等问题有着显著的改善。通过直接利用制冷系统的余热，相当于免费获得相应的热量，具有良好的经济和环境效益。另一方面，将低品位的制冷系统冷凝热经氨热泵机组提升，从而得到更高品质的热能。高温热泵机组不仅能够轻松制取60~90℃的高温热水，广泛应用于屠宰生产线的杀菌、烫毛等工序，而且COP较高，同时更加节能环保。

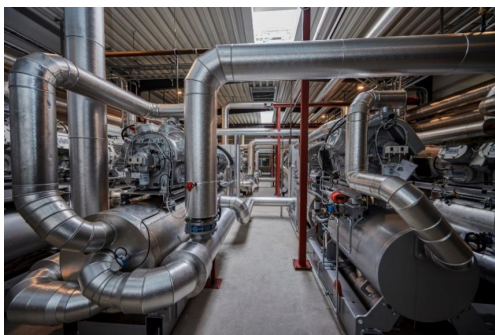


图7.3-4 氨热泵机组在屠宰生产线进行余热回收利用

多年间，丹佛斯长期致力于废热再生领域，在热回收和热泵应用上有着丰富的实践经验，在国内外的成功案例也不胜枚举。例如，欧洲最大的屠宰企业皇冠集团，其位于丹麦Horsen的工厂，早在2008年就安装了制热量1000kW的热泵机组，用于烫毛和清洗后的烘干等工艺。该项目已平稳运行13年，对比先前全部使用天然气制热的方案，热泵方案仅用2年多就收回了投资成本并且在接下来的时间内持续为该公司创造节能效益。进入中国市场后，针对多个屠宰工程中，丹佛斯也提供了满足系统制热要求的高温高压阀门产品和优化创新的解决方案。

屠宰中利用热回收可帮助在冷链的其中一个环节实现能源综合管理，节能降碳。但其实，冷库应用的智能控制将为行业的低碳发展带来更大潜力。

近年来，冷链行业的电子化、数字化、信息化和智能化的升级，成为实现更高效的管理，减少能源的消耗和碳排放的大趋势。但由于冷库行业的服务目标群体不断的发展，用户数量、冷库的功能、规模都在不断扩展，加上移动互联网、APP、微信、自助终端等访问渠道的增加，各种新业务、新需求

不断涌入，传统的垂直控制架构就遇到了各种各样的问题。比如，当客户的需求发生变化时，控制系统的升级成本随之增加。比如，随着用户访问量的增加、控制架构的复杂程度变高，系统负载压力变得越来越大。再比如后期增加的软/硬件扩容带来效果的边际效应递减明显，频发故障等。

基于以上种种问题，结合时下“双碳”对于节能降耗的要求，丹佛斯电子控制部门的产品系列——ADAP KOOL[®]就有效提供了平衡各方需求的解决方案。其采用分布式控制架构（见图7.3-5），用模块化的架构，配合丹佛斯AKV电子膨胀阀及其他阀组，解决了非标准化行业的标准化产品应用。简单说，就像乐高积木一般，每一个模块都是标准化的，但是拼装起来可以组成完全不同的控制系统。将原有竖直的控制架构改为分布式架构之后，可以大幅度提升冷库行业控制系统的稳定性、安全性和节能性。



图7.3-5 大中型制冷系统分布式控制架构

7.3.3 储能热管理综合解决方案

正如前文所述，“双碳”时代下，能源应用更是核心。电化学储能系统可以通过系统管理实现用化学电池将电能需要在需要时储存和释放，在时下风力和光伏发电装机容量大幅提升的背景下，为了满足集中式可再生能源并网产生平滑发电出力功率、减少弃风弃光的需求，多地制定了风光电站配置储能电站的要求。当然除发电侧的应用，储能在电网侧，用户侧也有多个应用场景。

由于目前电池储能90%以上都采用锂离子电池，但锂离子电池的性能、安全和生命周期受到工作温度的影响非常大，所以锂离子电池的热管理非常重要。目前储能系统热管理主要分为风冷和液冷两种方式，随着储能行业的发展，储能系统单机容量越来越大，需要散热效率更高的冷却系统满足电

池散热需求，所以液冷系统近年来发展迅速。液冷系统具有使电芯温度更低，运行能耗更低，电池温度一致性高，减少电池热失控的风险等优点，使其快速成为电池热管理的主流方案。

在丹佛斯看来，储能热管理方案，不应该只聚焦于冷却一个维度，所以丹佛斯根据储能应用的系统特点，结合储能应用的复杂气候条件，推出了多位一体的总体解决方案。在储能液冷系统中，丹佛斯可提供变频压缩机、膨胀阀、板式换热器、微通道换热器、冷凝压力调节阀、电磁阀等几乎所有的核心元器件，并结合丹佛斯的MCX系列控制器，帮助客户打造一套可具备制冷、热泵制热、自然冷却以及除湿功能的系统，多年的变频系统控制经验保证出水温度精确控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，高效率的压缩机、板换、微通道为系统高效打下坚实基础，同时热泵、自然冷却技术的应用最大可提升热管理30%以上的全年能效。丹佛斯还可提供优秀的水力平衡方案，极大减小电池间的温度差，为客户带来充分价值。

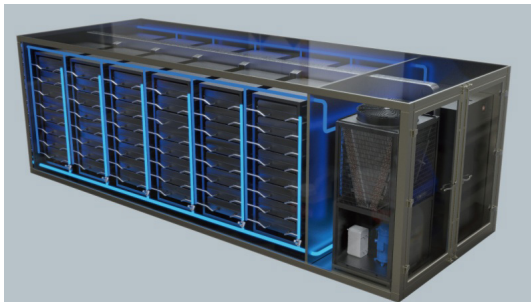


图7.3-6 丹佛斯储能液冷综合解决方案

7.3.4 区域供热综合利用解决方案

在用能上，如今的区域能源已经逐渐从碳基能源的应用走向可再生能源的应用上，通过采用电力驱动的热泵产品和热回收解决方案，不仅进一步提升了使用效率，更是大大降低了对于环境的影响。对此，丹佛斯通过磁悬浮无油热回收技术的应用，在提升设备能效的同时，也进一步实现了区域供热的绿色节能。同时，伴随着无油技术的成熟发展，压缩机整体性能的可持续性确保了运行效率的稳定无衰减，这同样符合“双碳”对于低碳节能的要求。

以一个丹佛斯提供解决方案的应用项目为例，该项目的落地对于处在“双碳”时期的中国区域能源建设和改造有着积极的参考意义：林斯泰兹区域供热公司（DHC）是丹麦的一家大型的区域供热公司，通过一个124公里的区域供热网络向林斯泰兹市

供热，并尽可能降低供热成本。在2019年之前，该公司的区域能源站采用以秸秆为燃料的生物质锅炉和燃气进行热电联产，75%的热量来自可再生能源。随着丹麦积极响应国际碳中和的号召，DHC公司还向该市承诺，到2020年，其供热所产生的二氧化碳排放量将降低95%。

在经过多轮的研讨与可行性模拟后，该公司决定引入电气化的水热泵与热回收系统，用于回收供热系统中的废热，以提高整个区域供热系统的供热能力与能效，最大限度地减少对化石燃料的依赖，同时最大限度地降低当地居民的采暖价格。而在该系统中，DHC采用了两台使用丹佛斯TGH系列无油压缩机的热泵机组，总制热量约1000kW，这些机组除了能有效回收系统中产生的废热外，还减少了洗涤器对外部水源的需求。

这些无油压缩机热泵机组需要稳定运行在冷凝器 $50\sim 67^{\circ}\text{C}$ 、蒸发器 $21\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的温度区间。丹佛斯TGH磁悬浮压缩机的应用，确保了机组高效运行的同时，还使其能稳定运行在10%~100%的负荷区间。在具体的系统配置上，其中一台无油热泵在较高的热回收温度下运行（ $28\sim 51^{\circ}\text{C}$ ，来自秸秆锅炉洗涤器的余热），提供962kW的制热量，COP可达到7.1。而另一台无油热泵机组则用于回收其他机组与冷却热电厂房间的余热，供热温度为 58°C ，提供约310kW的制热量，COP可达6.2。热回收系统的采用提高了整个区域能源站的COP和制热量（分别提高21%和31%）。此外，TGH系列压缩机（见图7.3-7）采用了超低GWP制冷剂HFO1234ze，直接降低了制冷剂的温室气体排放。可以说，得益于丹佛斯磁悬浮压缩机的紧凑设计（TGH系列压缩机的占地面积约为同等容量螺杆压缩机的30%），DHC有效解决了改造时有限空间的难题，两台热泵机组仅占地 $2.7\text{m}\times 1.2\text{m}$ ，同时新的磁悬浮热泵从安装、启动和调试也只用了不到一周的时间。



图7.3-7 Turbocor® TGH磁悬浮压缩机

目前来看，在建筑能耗中，由暖通空调及制冷相关机电设备带来的能耗占据了绝大多数，实现从部件、系统乃至区域方案的全范畴节能优化，对于“双碳”目标有着积极意义，特别是能源的合理利用以及高效管理，更是成为了减碳工作的重中之重。可以发现，在履行承诺的道路上，丹佛斯正积

极围绕“双碳”这一方向，通过自身对于建筑能源和能源应用节能优化的分析和理解，正在多领域、宽范围、多维并举的针对不同应用场景提出对应的解决方案。而未来，丹佛斯仍会坚持将中国视作“第二家向市场”的发展理念，为助推“双碳”目标的达成贡献更多的力量。

“双碳战略”企业家之声

7.4 艾默生以创新技术切实推动绿色低碳转型发展



殷光文 Yin Guangwen

艾默生商住解决方案环境优化技术中国区副总裁，负责管理和领导环境优化技术业务中国区的销售、市场、应用工程等工作。从业三十多年，对行业发展趋势有深刻洞察。在空调、制冷、压缩机的核心技术等方面进行了深入研究，学术成果显著，曾多次在行业权威期刊上发表技术文献，参与多项暖通空调制冷行业标准的制定。

艾默生作为推动经济高质量发展的生力军，积极全面地参与“双碳”目标的实现，践行“双碳”责任，以技术创新促进减碳减排。

7.4.1 艾默生提出可持续发展行动方案

艾默生始终重视推动企业的绿色发展、可持续发展，并持续丰富企业在“低碳”“绿色”“节能”等方面的内涵与实践。针对可持续发展和“双碳”议题，艾默生在2021年初就提出了“三绿（3G）”理念，也就是“绿色行动、绿色方案、绿色合作”（Greening Of、Greening By、

Greening With）的可持续发展框架。在该框架指导下，艾默生商住解决方案持续践行节能减排，通过热泵、电气化、变频技术、高能效环保制冷剂解决方案，助力行业降低碳排放，同时，持续与政府、协会、高校等紧密合作，开展多方面的实验和研究。艾默生商住解决方案还郑重承诺，通过“绿

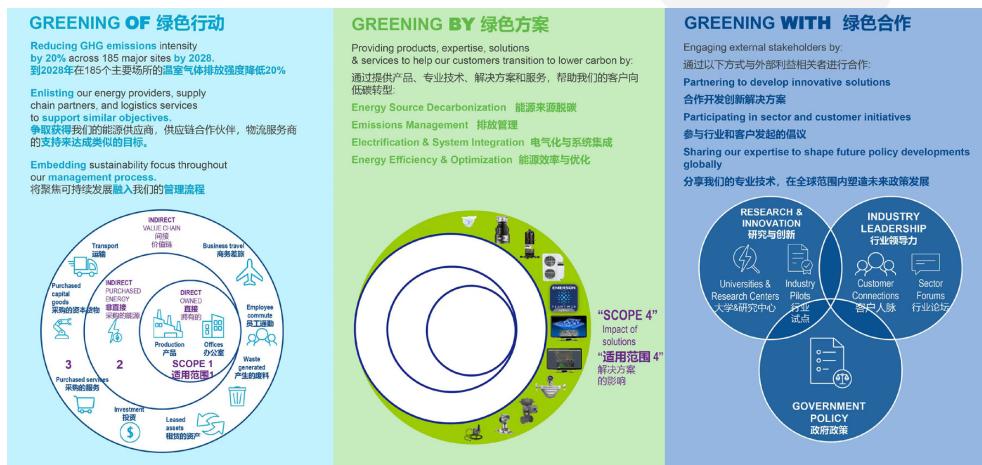


图7.4-1 艾默生环境可持续发展框架

色行动”，使包括中国在内的全球185家生产设施的温室气体排放量在2028年相比2018年降低20%。

同时，艾默生每年发布年度环境、社会和公司治理（ESG）报告，向公众展示我们在可持续发展方面的努力与成绩，并强调艾默生对于进一步赋能可持续发展的重视，显示我们切实以技术、软件和服务推动可持续发展的决心。

为了进一步推动净零排放运营进程以及净零价值链构建，艾默生将自身的可持续发展策略与科学碳目标倡议（SBTi）的净零排放标准相结合，提出了“30，45”的净零排放目标：预计到2030年，艾默生旗下所有公司将实现范围一和范围二的净零排放目标，并推动范围三价值链排放量较2021年基准值减少25%。2030年既定短期目标符合《巴黎协定》中努力将气温升幅控制在1.5℃之内的目标，因而获得了SBTi的认可。同时，艾默生还承诺将根据SBTi净零排放标准，制定2045年实现温室气体（GHG）范围一、范围二和范围三的长期净零排放目标（见图7.4-2）。



图7.4-2 艾默生净零排放目标

艾默生商住解决方案深耕于产品及解决方案，并在艾默生目标的指引下，通过丰富的产品线以及全面的解决方案，持续为制冷行业客户带去更加健康、更加安全、更加智能和可持续的创新产品及技术服务，助力行业转型升级。

7.4.2 艾默生超高温热泵助力工业低碳发展

在2021年11月发布的《深入开展公共机构绿色低碳引领行动，促进碳达峰实施方案的通知》中明

确提到，鼓励建筑供暖、生活热水和高温蒸汽等多个领域实施电气化改造，利用热泵替代锅炉，推动热泵电气化改造。作为热泵行业的领先企业，艾默生已经开发了完善的热泵解决方案，满足上述丰富的应用场景需求，并且从30℃到120℃以上的应用都有对应的产品及解决方案。

同时，艾默生也通过绿色合作与政府、协会、学会、高校等各界共同探索更多热泵电气化应用，积极践行低碳减排。在2021年，艾默生热泵解决方案协助合作伙伴共同减少了约630万吨二氧化碳排放当量，身体力行地为行业节能减排而努力。

针对工业领域超高温生产需求，艾默生创新性地推出了超高温热泵整体解决方案（见图7.4-3），这也是艾默生全球第一个应用于工业热泵领域的涡旋压缩机解决方案，能够轻松应对100℃以上的制热需求，相较传统电加热能够节能50%以上，并且可以为工业领域具体应用进行量身定制，大幅提升了工业领域的电气化水平和能源使用效率。



图7.4-3 谷轮™超高温热泵解决方案

其中，2021年7月，湖南长沙的某个锂电池干燥间项目就采用了艾默生超高温热泵整体解决方案，与转轮除湿系统结合，实现了节能增效。截止目前，项目运行良好，节能效果显著。针对锂电池生产中转轮除湿系统对于110~140℃的超高温环境和应用中严苛的工艺要求，艾默生经过大量的实验室测试，成功地将谷轮™超高温涡旋压缩机和整体解决方案与转轮除湿系统结合，以成熟可靠的控制逻辑，既满足严苛的工艺要求，且保障了压缩机和阀门可靠稳定的运行，使得在转轮除湿系统中应用热泵技术成为可能。

项目中应用的艾默生超高温压缩机ZW650最高冷凝温度可达135℃，排气温度限值为145℃，满

足转轮除湿系统应用要求。同时，压缩机所配备的喷气增焐功能，一方面能够增加系统的制热量，另一方面还可以通过经济器换热来提高热泵系统能效，从而让项目节能变得更加高效。采用超高温热泵系统后，对比纯电加热方案，一级转轮节省能耗达27.2kW，能耗降低38%；整套转轮设备能耗节省22%。一级转轮再生电加热及热泵碳排放量减少了14kgCO₂/h，减少碳排放38%左右，减排效果显著。并且，该系统再生排风空气中的水分在蒸发器侧即结露变水，经冷凝水排水口排出，将温度降低到22℃左右常温，不会对环境造成温升和湿度影响，在制备过程降低能耗浪费的同时，也对运作结束后的水分排出环节进行了绿色环保转化。

艾默生超高温热泵整体解决方案创新性的成功应用为未来有超高温生产需求的工农业项目提供了宝贵的经验，不仅满足生产工艺的严苛要求，也帮助生产企业更好地实现节能增效，践行“双碳”目标。

7.4.3 卓越谷轮™“碳”制冷，数据降温高效节能

2022年，中国宣布在京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝、内蒙古、贵州、甘肃、宁夏等8地启动建设国家算力枢纽节点，并规划了10个国家数据中心集群，“东数西算”工程由此正式全面启动。

“东数西算”着力于构建数据中心、云计算、大数据一体化的新型算力网络体系，不断优化数据中心建设布局，更好地为数字化发展赋能。

作为算力承载平台，同时也是“双碳”目标落地的关键环节，数据中心正在从高速发展向高质量发展方向演进。作为耗能大户，数据中心的绿色低碳发展也成为社会各界关注的焦点，其节能降耗、绿色转型的需求空前迫切。

数据中心降耗的突破点就在于机房空调。数据中心服务器在运行过程中会产生大量的热量，其中，空调能耗约占据总能耗的40%，减排空间十分可观。高效节能的机房空调系统对于数据中心的绿色建设来说可谓是“及时雨”。

艾默生旗下品牌谷轮™，在其百年的发展历程中，逐渐成为了节能、可靠压缩机设计和制造领域领导者的代名词。针对数据中心低PUE的需求，艾默生创新性地推出了“谷轮™110cc数据中心变频整体解决方案”（图7.4-4），以更高能效、更宽的高

蒸发温度运行范围，保障其在数据中心应用工况中的高效可靠，助推中国数字经济体系发展。

该解决方案搭载110cc变频压缩机以及36kW变频器，针对数据中心应用，扩展运行范围至高蒸发温度区域，将变频范围拓宽至20~130Hz，具有业界顶尖的部分负荷及全负荷能效；其变频器采用压缩机全运行范围高优化匹配，经过1000h持续的-65~-25℃冷热冲击试验，具有高可靠性，且优化了启动控制，达到10bar压差可靠启动，15bar压差5Hz/s的降速，让“过热”的数据中心高效“冷”下来。



图7.4-4 谷轮™ZDV系列机房空调解决方案

艾默生谷轮™ZDV系列机房空调专用压缩机及整体解决方案为运营商数据中心提供高效制冷手段，助力行业企业打造高效、节能的数据中心空调系统，其出色的性能表现得到了市场的广泛好评。在某运营商2019—2020年风冷型机房专用空调集中采购项目中，国内某知名精密空调产品制造商使用艾默生谷轮™涡旋机房空调整体解决方案中标，并迅速完成了近2000台变频机房空调产品的交付，获得了客户的好评。此外，在该运营商发布的2022—2023年风冷型机房空调的集采项目中，艾默生为OEM厂家提供了全方位的支持，在集采项目中拿到了超过95%的市场份额。

7.4.4 转型环保新冷媒，挑战制冷技术新高度

2022年夏，全球迎来罕见高温天气，多地都刷新了百年来最高温记录。世界气象组织（WMO）报告预测，未来五年间，至少有一年有93%的可能性成为有史以来最热的一年，且全球升温幅度有近半机率暂时达到1.5℃阈值。气候变暖将会对自然环境产

生一系列的“蝴蝶效应”，对地球生态环境到人类自身生存都会产生极大威胁。遏制全球气候变暖和臭氧层破坏的“元凶”，减少温室气体和消耗臭氧层物质排放，受到国际社会高度重视，成为全人类需共同承担的时代命题。

在全球变暖趋势下，制冷设备应用频率大幅提升，寻找“绿色制冷剂替代”迫在眉睫。而绿色替代制冷剂需要全面衡量综合考虑，既要满足臭氧层潜值（ODP）为零，全球变暖潜值（GWP）尽可能小等环境影响因素，又要兼顾考虑其毒性、可燃性以及制造成本与置换成本等安全与经济因素。

作为低GWP制冷剂的积极响应者、倡导者与引领者，艾默生正进一步增强在绿色制冷剂方面的研究、开发和测试能力。早在十多年前，艾默生就投入了大量资源对R32、R290、二氧化碳等环保制冷剂进行相关研究，目前已经开发了全系列的低GWP解决方案，帮助行业客户向节能高效、绿色低碳转型。2021年年底，艾默生在苏州研发与整体解决方案中心内设立A3实验室（即碳氢制冷剂），进一步增强了艾默生在绿色制冷剂方面的研究、开发和测试能力。

二氧化碳ODP为零、GWP为1、安全等级为A1、无毒且不可燃、大气中寿命极长，是一种兼具良好环保性、安全性、稳定性的天然工质。从热力学性能角度看，其单位体积制冷量大、液体密度较大、黏度低，这些都有利于减少系统管路和压缩机的尺寸，提高换热器的效率。



图7.4-5 谷轮™二氧化碳制冷机组

尽管二氧化碳具有多重优势，但其高临界压力（73.8bar）、低临界温度（31℃）的特性，对压缩机和换热器等关键部件的设计提出了较高要求。艾

默生将DVI技术与全新系列跨临界CO₂制冷（见图7.4-5）解决方案相融合，即使在炎热气候条件下也能高效连续运行，在环境温度高达44℃时仍能保证可靠制冷。DVI技术可以通过喷射阀将闪蒸气体从经济器或闪蒸气罐直接喷射到涡旋压缩机内部，消除并行压缩的需要，降低了系统设计的复杂性，同时保持了高能效。此外，通过省去并行压缩系统，如并联压缩机及配套的变频驱动或者管路等，系统仅需要保留少量的部件，因此也就降低了全生命周期成本，包括投资和运维成本。

在CO₂制冷领域，艾默生积极发力对前沿技术与其应用的探索与研发，在CO₂跨临界增压、CO₂亚临界复叠和CO₂跨临界中温制冷等方面都取得了不俗的研发成绩。在国际范围内，该解决方案已在超市、农场、食品加工、冷库等领域积累了一批成功应用案例。其中，艾默生商住解决方案公司及其合作伙伴携手安徽省徽商红府连锁超市，共同打造完成了“绿色低碳二氧化碳制冷技术示范店”项目，成为CO₂制冷系统在内资超市的首次落地。该超市示范门店营业面积约5700m²、中温冷柜及冷库共21个、低温冷柜及冷库14个。整个项目于2017年9月投入运营，上线五年来，系统运行平稳可靠，有效降低了全年碳排放和耗电量。

2022年7月，艾默生凭借多年来在CO₂制冷剂研发与应用中积累的专业知识与丰富经验，联合天津商业大学发布《绿色低碳制冷剂趋势及二氧化碳制冷技术与应用白皮书》，探究二氧化碳制冷剂作为新型环保制冷解决方案的优势与应用潜力，为行业的绿色发展提供了重要的示范价值。

作为协助开创环保制冷技术的全球性企业之一，艾默生长期致力于使其国际领先的技术、设备和专业知识的中国落地生根，同时凭借其在全球市场和前沿科技领域的深厚积淀，赋能中国本土人才培养和创新，携手客户、行业伙伴和研究机构，共同助力中国绿色环保产业的绿色升级。未来，艾默生将继续通过产品、软件和服务，帮助客户、供应商及合作伙伴实现可持续发展目标，持续推广和普及能源转型解决方案，坚持绿色低碳发展之路，助力建设更可持续的世界，以期打造净零排放的美好未来。

“双碳战略”企业家之声

7.5 威乐高效水泵节能与控制系统



陈华俊 Chen Huajun

威乐中国销售副总经理，负责公司在中国的销售业务，在机械制造行业有超过20年的工作经验。

7.5.1 解读“碳中和”，践行可持续发展

碳中和(carbon neutrality)是一个节能减排术语，“节能”和“减排”是碳中和的核心。

(1) 关于“节能”

在全球能源消耗中，有相当大的比例由水泵产生。威乐意识到高效水泵技术的巨大潜力并希望通过推广这种技术促进气候保护，并制定了通过使用高效水泵每年为地球节省1.8太瓦时的电量目标。

高效水泵通过电子装置控制来适应应用系统的实际需求。威乐高效水泵的巨大节能潜力来源于永磁电机。与没有控制装置的同类水泵相比，采用这种技术的水泵其耗电量最多可降低80%。威乐为各类楼宇服务、水务管理和工业应用提供高效的水泵技术和解决方案，助力我们的客户节约能源，从而实现气候目标。

2021年，威乐的高效水泵在全球实现了节约电量2.1太瓦时，远超1.8太瓦时的节电目标。这个数字是使用高效水泵与对应的前一代无控制装置型号相

比所节约的电量。

(2) 关于“减排”

威乐十分注重气候保护，作为“气候”转型领域的德国可持续发展奖得主和“全球50家可持续发展与气候领军企业”中的一员，威乐有义务为实现全球气候目标作出积极贡献。威乐的目标是到2025年威乐在世界各地的生产基地都实现“碳中和”运营，与基准年2018年相比，至少减少60%的排放。

我们首先根据《温室气体核算体系》进行了分析，针对由于消耗一次能源和采购电力而产生的排放，威乐在2020年制定并公布了一项覆盖整个集团的战略，目前正在逐步实施。该战略基于以下四大关键领域：提高能源效率、增加内部发电量、采购绿色电力和抵消其余的排放。与基准年2018年相比，2021年威乐集团的排放数字总共下降了23%。威乐在多特蒙德总部有四个生产基地，它们在2020年都实现了碳中和，到2025年，威乐集团在全球各地的所有其他生产基地都将陆续践行和实现这一承诺。

7.5.2 “碳中和”蓝图下，威乐水泵的节能贡献

(1) 聚势蓄能，推进建筑“双碳”战略

“双碳”目标已明确成为国家战略，建筑领域绿色低碳不仅是自身转型升级的迫切需求，更事关国家节能的降碳大计。为此，住建部陆续发布了《“十四五”住房和城乡建设科技发展规划》和《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》，对绿色低碳建筑做出全面部署和规划要求，各项配套政策和标准法规也随后发布。预计“十四五”期间，有望带来2.2万亿元的市场增量，绿色建筑的风潮已经到来，建筑节能低碳产业化已成趋势。

为贯彻落实“双碳”战略，全面实现“双碳”目标，加快提升建筑能效水平，推动建筑行业脱碳和可持续发展，助力建筑节能、绿色建筑发展和各类楼宇的高效、低碳、绿色、专业运行，威乐中国联合能源环境服务产业联盟（EESIA）、青岛海尔空调电子有限公司、北京海林自控科技股份有限公司共同发起的“2022年度建筑碳中和巡回研讨会”系列活动。此次巡回研讨会将先后登陆十个城市，邀请商用建筑企业、建筑工程公司、建筑能源服务公司、科研院所、行业媒体等相关负责人参与，聚势蓄能共同推进建筑“碳中和”战略。



图7.5-1 2022年度建筑碳中和巡回研讨会

水泵应用广泛，作为能耗大户，平均每年的全部能耗的10%来自于水泵的运行消耗。而在建筑领域，水泵所占的能耗比例更高，平均达到了15%以上。随着全球能源枯竭以及二氧化碳增加对全球环境造成的影响，如何节能减碳，早日实现“双碳”目标越来越被各行各业从业人员及政府提起并要求。如何快速实现节能减碳，见到成效，有研究表明（基于DIN V18599标准），对于建筑领域更换高效节能的水泵产品相比较更换建筑窗体、墙体保温

等，更富有成效，减少1公斤二氧化碳排放所需的成本更低。



图7.5-2 建筑节能的重要性

南京金斯利喜来登酒店节能改造项目，原有国产品牌空调水泵系统已经运行20余年，运行管理粗犷，能耗损失严重。通过威乐能源管理团队进行现场系统了解、数据采集、最终给到运营管理方合理可行的节能优化方案，不仅在水泵参数上二次校核，同时在水泵运行控制上给出建议，最终通过改造实现了每年24万kWh的节电量。真正从客户角度出发，既实现了设备的优化升级，又实现了空调系统的高效节能运行。

(2) 助力集中供热，推动热源清洁化

当前，在“双碳”战略的引领下，低碳转型已成为各行各业不可逆的大势，供热领域也不例外。要实现碳中和目标，就要求首先集中热源侧的清洁化，充分利用工业余热，使其成为供热的重要热源，在国家能源局发布的《2021年能源工作指导意见》中，要求实现北方地区清洁取暖率达到70%。针对输配系统，要积极发展跨区域长距离输热，智慧热网等技术；针对供热末端管理，发展用户自主，按需供热的弹性供热技术。

集中供热是建设现代化城市的重要基础设施，智慧供热是威乐公司重点的业务领域，针对集中供热的热源长输、大流量高扬程、水质恶劣等工况，匹配分布式变频控制、多能互补利用等趋势，为供热领域提供高效节能的水泵产品以及系统解决方案，并不断地完善和创新产品的设计和制作工艺，保障产品的稳定可靠，安装维护简单方便，以实现输配系统的节能降耗。

另外，建立智慧化管控平台，搭建“智慧热网”，实现精准供热，是实现碳中和目标的另一个

重要路径。通过监测水泵运行状态及环境变化，运用大数据分析、先进水泵节能运行模式及远程监控，实现水泵智能化运行，最终达到节能及满足智能运维的要求，助力热力公司降低供热能耗，提高能源利用率，降低运行费用，实现精准供热。

(3) 拥抱热泵，实现“双碳”的重要抓手

热泵技术作为可再生能源利用的典型代表备受瞩目，并在陆续发布的国际战略规划及各地“十四五”规划中被多次提及。作为热泵系统中长时间运转的关键动力部件，水泵的能耗值得高度关注。目前，户式两联供通过高效变频水泵的使用，可为系统带来非常可观的能耗节约。考虑到部分负荷时间占到整个运行时间的80%以上，因此对热泵系统进行变频水泵的控制优化后，水泵功耗在整个热泵采暖系统的能耗占比可以有效下降到10%以下，贡献非常显著。

	变更前	变更后
住宅面积	102 m ²	
机组型号	全直流变频热泵机组	
基本参数	额定制热量14.5kW，额定输入功率4.8kW	
水系统形式	一次泵系统	
水泵类型	定频多级离心泵	高效变频屏蔽泵
水泵安装方式	内置	内置
测试时间	2022.2.16-2.22	2022.2.22-2.27
水泵能耗平均占比(供暖)	21.7%	6.9%

图7.5-3 热泵系统更换高效水泵实测项目数据

威乐中国与中国节能协会热泵专委会(CHPA)、中国标准化研究院(CNIS)、中国建筑科学研究院(CABR)、国际电器标准标识合作组织(CLASP)及德国国际合作机构(GIZ)共同深入合作的《家用及类似用途供暖设备能效测试计算方法》标准制定及多个实测项目，意在将我国热泵产品的能效标准进行升级，将热泵系统中高效水泵的使用率进行提升，从而助力国家的“双碳”目标达成。

随着热泵产品的不断优化和迭代，威乐的 Wilo-MHI 系列卧式多级泵、Wilo-Para 系列屏蔽循环泵以及最新发布的Wilo-Para MAXO高效屏蔽循环泵等产品，为热泵两联供各种系统形式提供高效的水力输配，确保系统安静、可靠运行的同时实现系统能效的提升。



图7.5-4 Wilo-Para MAXO高效屏蔽循环泵

(4) 助力工业转型，新能源时代的智慧方案

在工业应用方面，威乐也在不断拓展产品系列和应用广度，来匹配各种新能源行业，包括国家战略的风光储、新能源汽车以及工业4.0智慧厂房建设等应用场景。

威乐与中航锂电、宁德时代以及亿纬锂能等行业巨头实现紧密合作，为厂区动力部分提供保障。在氢能应用领域，为中国首家大型氢燃料电池系统生产专用工厂“HTWO广州”，同时也是现代汽车集团首个海外氢燃料电池系统生产与销售基地，威乐提供了高效节能、可靠无忧的中开双吸泵、立式管道泵以及立式多级泵等多系列水泵，凭借自主研发设计和生产的威乐水泵专用节能电机，以及十二星级售后服务认证加持，得到了用户的高度评价。同时，威乐也在华为海思光、通富微电子等项目集群中，通过几款革新产品为客户提供了多种智能高效的解决方案。

(5) 高效产品，节能技术与创新

高效节能是威乐的品牌核心内涵之一，威乐通过各种途径来不断提升产品的品质及能效水平，并不断通过对节能技术的研究、开发和利用，优化产品结构、改进生产工艺，提高产品的能效水平，相关法律法规的要求是威乐产品设计的最低要求。

首先，在电机能效方面始终走在行业前列。早在2015年当国家还执行IE2能效标准的时候，威乐率先便将2.2kW以上的电机全部切换到IE3能效。随着2021年底国家发布《电机能效提升计划（2021—2023年）》，威乐则开始将IE4电机作为水泵产品的选配之一，达到电机能效始终领先国标一代的水准。

其次，水泵水力效率不断提升。2012年6月欧盟发布了“水泵生态设计要求”的法规（No547/

2012)，要求从2015年起MEI（最低效率指数）值需达到0.4以上，而威乐在最近几年新开发的产品中，无论是端吸泵、管道泵还是双吸泵产品，MEI基本已可达到0.7，这一数值是欧盟即将在2024年实施的标准。

最后，水泵控制系统的不断优化。水泵作为一款机械产品，其水力效率和电机效率都是有一定极限值的，因而提升空间在发展到一定高度后会面临瓶颈问题。对于整个水泵系统而言，也可通过优化控制来实现能效的大幅提升。威乐全系列的智能变频泵通过设置最优控制模式，来调整水泵转速从而匹配相应的负载，因此进一步大幅提升了整个系统的效率。

（6）从产品到解决方案

在讲数字时代，“算力”已经逐渐成为新的生产力。而大数据、人工智能、物联网等，所有这些数字技术，都将会依赖于数据中心的基础设施，国家也出台了很多相关政策，尤其是东数西算项目工程 and 全国一体化大数据中心体系的推行，数据中心行业进入飞速发展的阶段。

整个数据中心能耗有40%来自于制冷环节，除冷源侧和空调末端外，输配侧的节能也日益得到行业内的关注。从新能源、智能运维、预制模块化、液冷等方面出发，结合国内外数据中心技术发展趋势，威乐的技术理念与产品都在紧跟时代发展的步伐。

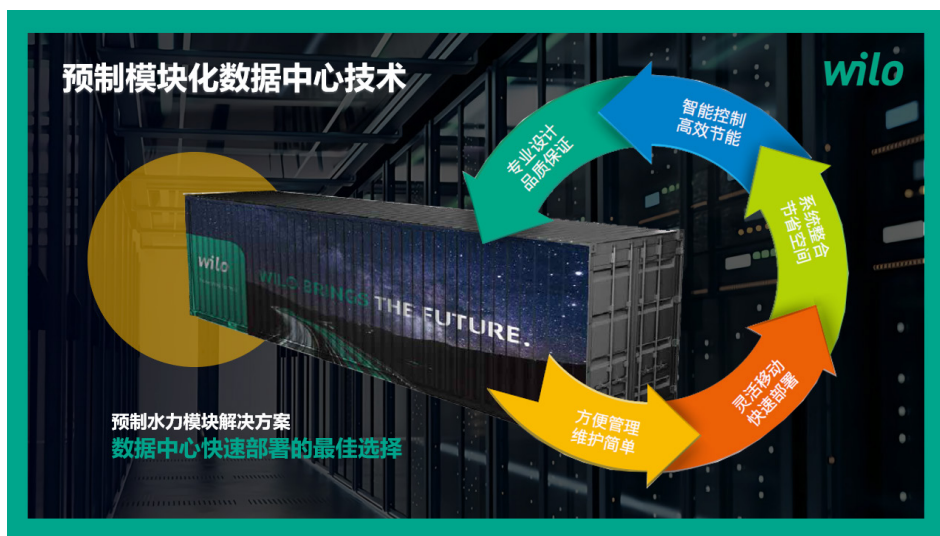


图7.5-5 ICE-CUBE威乐数据中心解决方案

在预制模块化方面，威乐开发了预制水力模块解决方案，将水泵、管路、阀门、控制柜、自动补水、自动加药等功能集为一体，即插即用，灵动移动，实现快速部署。信息技术的快速迭代及用户对数据中心交付工期要求的缩短，使得传统数据中心建设模式越来越难以满足现实需求，数据中心预制化成为实现数据中心快速建设关键技术之一。预制模块化建筑技术与模块化数据中心深度融合，新一代预制模块化数据中心可靠性及使用体验大幅提升。

7.5.3 结语

“双碳”战略其表象是环境问题，核心是能源问题，而本质是发展问题。如何逐步降低温室气体排放，实现气候变化的控制和能源结构转型？其主要的手段包括“节能”“采用可再生能源”及“电气化”，在此领域，节能高效的水泵均可发挥很大的作用。“双碳”目标是我国各大行业的重大机遇。未来的5~10年将是黄金发展期，行业和企业要从产品、技术等多个方面做足准备。

08 总结



张 华 Zhang Hua

男，教授，现任上海理工大学副校长、制冷与低温工程研究所所长。主要从事环保制冷剂、自动复叠制冷系统、太阳能利用方面研究。担任中国制冷学会理事兼第二专业委员会副主任、中国工程师联合会咨询和决策委员会委员、全国冷冻空调标准委员会委员（TC238）；荣获国家有突出贡献中青年专家、全国优秀科技工作者称号；先后获国家科技进步二等奖，上海市、山东省和安徽省科技奖一等奖等科技奖10项。



刘业凤 Liu Yefeng

女，上海理工大学制冷与低温工程研究所教授，上海市浦江人才。主要从事环保制冷剂替代技术、热泵技术、新能源汽车热管理技术的研究。以第一完成人获得上海市等省部级科技进步奖多项。

近几年，中国制冷空调行业机遇和挑战并存，行业规模总体平稳，“双碳”战略促进行业转型，冷链物流、工业热泵、新能源汽车热泵、数据中心冷却等行业快速发展，技术快速迭代。制冷空调与各个行业融合加速，创新产品和应用案例不断涌现。据统计，2021年度我国制冷空调行业（包括工商制冷空调设备及配件，家用电冰箱、冷柜、房间空调器等，但不包括家用制冷空调配件及配套设备）的工业总产值约7600亿元。行业企业营业收入

大于100亿元数量为7家、在50~100亿元企业5家、在10~50亿元企业36家、5~10亿元企业20家、3~5亿元企业13家、1~3亿元企业18家。我国许多制冷产品生产量世界第一，我国生产全世界80%的房间空调、50%以上冰箱冰柜、近50%的工商制冷设备、30%以上的汽车空调。2021年生产房间空调器13000万台、家用冰箱8450万台、家用冷柜2900万台；我国制冷空调产品用电量已占到全社会用电量25%以上。以冰箱为例，2019年全社会拥有电冰箱量达4.29亿台，

用电1252亿kWh。制冷空调行业是当之无愧的能耗大户，与“双碳”战略息息相关。

国家“双碳”政策不断出台，从2020年9月，习近平总书记提出“双碳”战略，到2022年10月，党的二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”，“双碳”工作持续推进的两年时间里，制冷空调科技工作者和行业企业在制冷工质超低GWP化、用电绿色化、供暖热泵化、产品节能化、冷链升级和信息化、区域能源解决方案整体化、物联网智能调控化、电动汽车热管理化、工厂绿色化等方面做了很多工作，服务我国能源、交通、建筑、工业、农业、食品等领域的技术越来越多，推动行业“碳中和”进步，很多案例可起到引领示范作用，并提升企业的竞争力。行业科技进步主要总结如下10个方面：

（1）加快开发和应用低GWP制冷剂

国际上在各个产品领域采用何种替代技术路线仍存在诸多争议，目前在全球范围内尚未找到“完全理想”制冷剂。日本和美国一直在寻找环保性能较好的合成类制冷剂，而欧盟一直积极的推行天然工质的替代方案。但是，更低GWP的制冷剂在全球范围内的应用推广将是必然的趋势。当前低GWP的替代制冷剂主要包括天然制冷剂（如 NH_3 、R600a、 CO_2 、R290、 H_2O 等）、低GWP的HFCs（如R32、R152a等及其混合物）、HFOs、HCFOs及混合物（如R1234yf、R1234ze(E)、R1234ze(Z)、R1233zd(E)、R1336mzz(Z)、R1132(E)、R513A、R514B、R515A等）。国际电工委员会发布标准IEC 60335-2-89指出，商用设备中A3制冷剂的充注限值从150g增加到500g，A2和A2L制冷剂的充注限值从150g增加到1200g。

全球的HFOs核心专利主要由国外企业掌握。我国HFOs制冷剂开发与先进国家相比还存在较大差距，还需要从国家层面上组织实施，联合上下游企业开展产、学、研、用联合攻关。

HCs以丙烷（R290）、异丁烷（R600a）、丙烯（R1270）作为代表，其技术应用往家用空调、冰箱、热泵、冷水机组等领域发展。HFOs作为新型合成制冷剂是近几年的研究热点，R1234yf被认为是R134a在汽车空调中的替代制冷剂，在欧洲汽车空调行业得到了普遍应用。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。新推出的R1233zd(E)双级变频离心式冷水机组，采用降膜式蒸发器，具有高能效特点，可应用于各种高端酒店、数据中心、医院、办公楼、交通运输以及工业行业。低GWP的HFCs也具有不错的应用前景，R32在中小型空调设备中得到了广泛的应用，R152a也可作为汽车空调制冷剂。冰轮推出了一款螺杆式水蒸气增压机组，采用水蒸气为制冷剂，额定工况下，吸气压力为1.2bar，排气压力为6bar，回收废蒸汽、乏汽，通过压缩机提高废蒸汽和乏汽品味，向外输送高品位饱和蒸汽。以水为工质，开发的带喷水降温的双螺杆压缩高温热泵机组，性能优越。 NH_3/CO_2 复叠机组应用进一步得到发展。

（2）工商业空调与热泵节能减排技术不断涌现

家用与商用空调主要采用光伏直驱、与储能结合、使用低GWP制冷剂、负荷品味分级与自然能源结合高效利用、高效压缩机技术、空调系统的智能化运维管理和优化控制方面等技术进行碳减排。

格力公司与清华大学联合研发的“集成蒸发冷却和太阳能光伏的复合超高效空调器”，利用新风主动调节室内负荷，实现了环境自然冷源利用、高效机械冷源制取、光伏直驱和先进控制等技术的全面融合，减碳效果显著。美的集团采用R290自然工质，研发的高效舒适的房间空调，利用室内机多矢量旋转风道技术提升射流速度，在制热模式下可实现垂直送风、热风直达地面，大幅改善了室内舒适性。

格力、美的、海信日立等企业研发出永磁同步高效直驱变频离心机，极大提高了冷水机组的能效。海尔研发的磁悬浮冷水机组和气悬浮冷水机组，压缩机采用悬浮无油变轨运转，从根本上解决了压缩机运动部件无油润滑问题，结合高效降膜式蒸发器、两级复叠过冷与智能能量调节等技术，节能效果显著。南京天加设计建造的高效制冷机房采用了基于系统全生命周期综合评价的高效制冷系统综合节能技术，为商业建筑空调低碳化提供了重要支撑。格力集团围绕建筑对高温热水和蒸汽的使用需求，采用R1233zd(E)制冷剂，建立了双级压缩、闪发式经济器、中间补气增焓的热力系统循环及其压缩机，研发出380 kW制热量、出水达100℃的高温空

气源热泵。美的集团提出了基于房间负荷动态预测的多联机变蒸发温度-变过热度控制方法,实现了房间负荷需求与冷量预测高精度实时匹配,解决了现有多联机因频繁开关机导致的室温波动大、能耗高问题。另外,研发的三管制多联机热回收温湿平衡控制技术,解决了低温、高湿情景下除湿过程导致的过度降温、冷感强烈的不舒适问题,大幅改善了多联机系统的制热舒适性。

工业余热及冷能利用已经有了许多成功的案例,均产生了显著的经济和环境效益。典型案例有:1)空气源/水源高温热泵蒸汽/热水供应系统。上海诺通以空气、水为热源,吸收环境中的低品位热能,采用复叠热泵技术,实现高温蒸汽的发生或高温热水的产生,可产生高达125℃热水再闪蒸出蒸汽,可应用于化工、医药等需要微压蒸汽的工业领域以及供暖、食品加工等需要100℃以下热水的领域。2)压缩式热泵用于工业余热回收。格力联合上海交通大学研发的大容量离心式热泵,回收钢铁厂炼钢排放的废水热量,用于中国北方城市的区域供暖,节能减排效果显著。3)吸收式热泵用于工业余热回收。双良联合上海交通大学用汽轮机的高压饱和蒸汽驱动第一类吸收式热泵,回收来自蒸汽冷凝器的余热,热泵输出的热量用于供暖。4)余热利用的换热网络优化。上海交通大学、南洋理工大学为新加坡裕廊岛工业园区内的某公用工程公司提供了一套升级改造蒸汽凝水余热回收系统的方案,并在当地得以实施。根据当地余热的供给和需求情况进行换热网络的优化,通过能量梯级利用等技术,使热量损失最小,热能得到充分利用。5)转轮除湿系统中应用超高温热泵的整体解决方案。艾默生针对锂电池生产中转轮除湿系统对于110~140℃的超高温环境和应用中严苛的工艺要求,成功将谷轮™超高温涡旋压缩机和整体解决方案与转轮除湿系统结合,保障了压缩机和阀件可靠稳定的运行,使得在转轮除湿系统中应用热泵技术成为可能。6)LNG冷能利用。深圳金沙湾国际乐园的冰雪馆、海洋馆等利用LNG冷能制冰造雪以及中央空调供冷,每年节约用电2000万度。在LNG动力船舶上,LNG冷能被因地制宜地利用在制取冷冻水,满足船上的制冷需求。既减少了船舶空调系统设备的初投资费用,又无需额外消耗空调系统电量,每天可以节约近6000元的费用。7)余热利用的集成示范。冰山集团提出

“泛在热源耦合的深焓能源综合解决方案”,在一些农产品产业园中建成了规模化的冷热回收系统,可作为区域化余热利用的集成示范。

(3) 冷链物流行业综合能源管理加快发展

食品和药品冷链技术在可再生能源、储能、大数据、高效保温技术、低碳消杀技术等方面取得不断进步。成都银犁冷藏物流股份有限公司建设的光伏保温节能冷库,在屋顶安装大型分布式光伏电站,年发电量可达110万千瓦时,目前已累计发电700万千瓦时。天津天商酷凌科技有限公司利用大数据技术,搭建云平台,对冷库进行节能改造及日常运维,取得很好的节能效果。福建赛特冷链科技有限公司开发的直拼保温箱,采用硬质聚氨酯(PU)与VIP板相结合作箱板,整个保温箱可以拆卸、折叠,便于周转运输,非常适合冷链短途运输。天津捷盛东辉保鲜科技有限公司在新疆伊犁承建的3万吨智能化立体相温气调保鲜库项目,可实现果品预冷、贮藏、气调三种模式原位智能切换。我国第一套冷链产品外包装表面病毒的在线紫外光催化复合消杀装备,比常见的冷链病毒消杀技术效果更好,符合《国家消毒技术规范》的要求,为冷链食品新冠病毒消杀提供一种便捷、快速、无害的技术手段。天津商业大学研发的“冷链进口冷冻食品病毒消杀关键技术及系统”在天津港国际冷链物流基地开展了示范应用,对一级冷库进出库货品消毒作业流程进行优化,在消毒成本及效率方面取得明显进步。

屠宰场冷链能源综合智慧管理体能增效,丹佛斯余热回收技术实现了利用低品位热能进行屠宰场清洗和烘干,相较于煤、燃气、电加热的方式需要面对热量损失和环境污染等问题有着显著的改善。通过直接利用制冷系统的余热,相当于免费获得相应的热量,具有良好的经济和环境效益。将低品位的制冷系统冷凝热经氨热泵机组提升,从而得到更高品质的热能。高温热泵机组不仅能够轻松制取60~90℃的高温热水,广泛应用于屠宰生产线的杀菌、烫毛等工序,而且COP较高,同时更加节能环保。冰轮集团开发了一系列制冷空调冷凝热回收系统,在大型屠宰企业通过高温热泵回收氨制冷系统的冷凝热,产生的95℃的高温热水用于烫锅补热和高温蒸煮,经济效益显著。

（4）氢气液化项目加速落地

在氢液化储运方面，随着国家对发展氢能的重重视加大，国内液氢项目快速增加。2020年以来，已有超过10个液氢项目落地，产能约28 t/d，预计将在数年内达到400 t/d。浙江能源、中建氢能、华久氢能、齐鲁石化、林德的中大型氢液化项目陆续开工建设，部分已进入调试阶段。中科院理化所、中科富海、北京航天试验技术研究所开展了氢液化系统流程研究、氢液化冷箱研制以及氢液化工厂建设工作，致力于氢液化设备国产化。北京航天试验技术研究所基于氢膨胀流程研制了1.5 t/d级氢液化装置于2021年9月投产，实测满负荷工况产量为2.3 t/d，仲氢含量97.4%。中科富海基于氨制冷机/液化器研究成果，成功研制出1.5 t/d级氨制冷氢液化装置。目前，氢膨胀制冷的5 t/d级、10 t/d级中大型氢液化装置正在研制之中，中科院理化所、重庆三十三集团合作研制的10 t/d级大型氢膨胀液化装置预计于2025年完工。

（5）行业大力推进数据中心及超算中心的余热综合项目

数据中心冷却设备耗电量大，约占数据中心总耗电量的20%~40%，是实现数据中心节能减排的重点，节能减排的主要技术路径包括：取热温度的提升和取热方式与需求的匹配、因地制宜的自然冷源与可再生能源利用、基于全局优化的系统架构设计。

美的提出零碳数据中心构想，率先在拉萨宁算大数据中心进行实践。项目利用西藏可再生能源丰富、得天独厚的气候条件优势，全部使用水电、光伏等可再生能源。采用“蒸发冷却+热回收+热泵+储能”的综合空调方案。“宁算中心——高原现代农业”示范工程也已投入使用，多元化的余热利用涵盖了蔬菜种植、水产养殖等多个领域，这种低碳节能，同时促进当地产业发展的模式为数据中心的发展提供了新的思路。海尔集团提出数据中心冷却技术专用化、无油化以及定制化的创新思路，推动制冷设备朝着高效节能方向不断发展。澳蓝数据中心采用蒸发冷却技术发展路线，提出DEC+DX减碳方案与IDEC+DX两种减碳方案，DEC+DX系统包括蒸发冷却空调机组（过滤段、翅片式蒸发器（表冷段）、直接蒸发段、风机段等）、排风系统、精

密空调和联动控制系统，并采用数据采集器及能耗采集平台实时采集和监控机房耗电量及运行数据。通过监测室内外温湿度，当检测到蒸发冷却系统无法满足室内温湿度要求时，就自动联动精密空调运行，从而达到DX联动的效果。目前全国已有超过万台DEC+DX减碳系统，实测显示：冬季节能率在80%以上。IDEC+DX系统包括间接蒸发冷却芯体及喷淋系统、制冷系统、送排风系统和智能控制系统，该方案全年绝大部分时间均可使用自然冷源，但总体节能率低于直接蒸发冷却+DX系统。

（6）行业加快研发低GWP制冷剂新能源汽车热管理系统

由于R134a的温室效应指数极高，新能源车辆采用CO₂、R290、HFOs等环保制冷剂进行替代具有重要减排意义。在新型车用制冷剂的开发上，国内外的厂商和高校进行了许多探索。大金、旭硝子、科慕等公司研发出不同的车用制冷剂。无专利壁垒的天然工质正在被主机厂积极采用，如CO₂被大众、戴姆勒和奥迪采用，国内东风汽车集团、北汽新能源、蔚来汽车等在近几年也投入到开发CO₂热泵空调系统的工作中。上海交通大学与宇通客车成功开发了国内首台CO₂热泵空调系统、与鼎汉技术开发了CO₂列车空调热泵系统，并成功出口德国。针对R290易燃易爆特性，构建基于载冷剂液体循环的二次回路系统，制冷剂回路完全处于乘员舱外的发动机箱中，可规避制冷剂安全风险。同时，还可降低充注量、减少泄漏，实现系统集成化小型化的优势。但二次换热带来性能衰减，能效提升仍是应用过程中的一大难题。电装、博泽、苹果、上汽等整车及零部件厂商已经开始进行相关的研究与应用。

在解决冬季供暖产生的里程焦虑问题上，国际上针对环境温度-5℃以上的热泵系统技术已有储备，并应用于量产车上，针对更低温度的热泵系统的成熟应用仍在研究开发阶段，适应更低环境温度的压缩机中间补气增焓回路的热泵系统，是未来纯电动汽车减少空调制热消耗的重要措施之一。

在热管理方面，我国新能源汽车主机厂及零部件供应商积极创新，技术方案紧追国外一线厂商。比亚迪、华为、蔚来、小鹏等在热管理系统上集合热泵、废热回热等各种降低系统能耗的新技术。

在汽车空调及整车热管理的零部件方面，三

花、美的威灵、银轮等研发出各种阀类、电动压缩机、电子水泵、液冷板等产品并得到推广应用。

(7) 行业不断布局储能和新能源项目

要实现我国高比例可再生能源，必须在发电侧、电网和需求侧配备足够容量的储能装置。抽水储能电站由于具有低成本高效率的优势，是目前最主要的电网储能技术。储热储冷是一种低成本、大容量和长寿命的储能技术，目前已在太阳能热发电、供热供冷用户侧、火电厂灵活性改造中实现了大容量的配备和应用。热能储存聚焦在对熔盐储热、相变储热和热化学储热三大技术的研究上；而对冷能储存的研究，则主要聚焦于冰/冰浆储冷和相变储冷技术。

2022年，我国在储热储冷方面取得了重要进展。临城煤业熔盐储能供暖系统采用谷电加热熔盐储热技术进行建筑供热，运行成本明显减低。安徽合肥滨湖新区区域能源系统管网蓄冷系统利用管网中的水进行蓄冷，不需要建设额外的冰蓄冷或水蓄冷设备，投资小，性价比高。

相变蓄冷冷链集装箱采用车载制冷设备和相变储冷技术相结合，降低集装箱的漏冷率，减小车载制冷机容量、尺寸和重量。较长的保冷时间使蓄冷式集装箱能够灵活地在公路铁路等多种运输方式中转移，增大了冷藏箱的适用性。相变储热技术的代表工程有张家口的冬奥会转播中心相变储热清洁供暖（8000 m²）示范项目，国电投黄河公司海南州贵南源网荷储清洁供暖（16000 kWh）示范项目和国电建水电四局红原县城市相变储热供暖（26 MW）示范工程。

丹佛斯锂电池储能热管理结合储能应用场景的复杂气候条件，推出了多位一体的总体解决方案。在储能液冷系统中可提供变频压缩机、膨胀阀、板式换热器、微通道换热器、冷凝压力调节阀、电磁阀等几乎所有的核心元器件，并结合丹佛斯的MCX系列控制器，帮助客户打造一套可具备制冷、热泵制热、自然冷却以及除湿功能的系统，多年的变频系统控制经验保证出水温度精确控制在±1℃，同时热泵、自然冷却技术的应用最大可提升热管理30%以上的全年能效。

大连冰山推出“美丽乡村”能源系统，基于生物质与风光耦合的冷热电联供系统主要由生物质

发电（包括直燃发电和沼气发电）、光伏发电、风电以及大电网补充耦合组成，按照乡村能源平衡情况，生物质与风、光耦合的电力系统不仅完全能够满足乡村地区的电力负荷需求，同时可以实现绿电外输，为城市电网供电。乡村供热主要由生物质热电联产（包括直燃发电和沼气发电）供热、太阳能供热组成，此外还可以耦合沼气GHP（燃气热泵）技术和水地源热泵技术等多热源联合供热形式，除为“美丽乡村”能源系统集中供热外，多余的热源可采用大温差长距离供热技术为附近城镇热网供热。乡村供冷主要由电空调制冷、水地源热泵供冷组成，采用集中供冷形式，可极大的提高制冷系统的能效，降低电力消耗，所需的电负荷由乡村区域电网供给。“美丽乡村”能源系统将农村生活生产所产生的碳排放量极大减少，这意味着乡村生态系统又可吸收、消纳部分城市产生的CO₂气体，对于国家“双碳”战略总体目标的实现意义重大。

(8) 制冷设备及关键零部件研发更加重视节能环保

2022年制冷压缩机有关技术取得巨大发展，多家公司研发出优秀的节能制冷产品。格力开发了一款名义制冷量为175RT的两级压缩水冷螺杆式冷水机组，通过新型设计的转子型线和机体结构实现了螺杆压缩机的高效运行。海立研发的自适应泵体超高效变频转子压缩机，采用R32环保制冷剂，拥有更小体积壳径，泵体专利高效化设计，结合直流变频技术，可达到更高能效，更低噪音的效果。丹佛斯研发的天磁TTH/TGH高压比系列无油离心压缩机是全球首款针对高压比应用优化的无油压缩机，风冷冷水机组中压比最高可达6.2。

强化换热管也取得进步，采用细径化的内螺纹铜管可以显著降低铜管使用量、减少制冷剂充注量，7 mm内螺纹铜管已经基本完成了对9.52 mm内螺纹管的替代，同时5 mm内螺纹铜管的用量正在迅速增长。金龙精密铜管集团股份有限公司开发出系列内螺纹铜管。无锡海特精密模具有限公司、无锡科佳科技有限公司、黄山三佳谊华精密机械有限公司等多家模具制造公司可针对翅片模具规格繁多、片型多变的特征，设计出高效率的模块。杭州三花微通道换热器有限公司生产的Interlaced 双系统微通道换热器、横插翅片微通道换热器以及微通道热水器

内胆冷凝器可适用多种类型制冷空调机组。丹佛斯板式换热器（嘉兴）有限公司的Dimple产品采用非对称的结构，可减小水侧流道压降，点阵式板片设计优化了制冷剂侧两相流分配，使流体在换热板片上分布更加均匀，提升传热效率达10%~20%。宁波哈雷换热设备有限公司生产的热泵系统专用双板换热器易于检漏，提高了系统运行的安全性，生产的经济器专用补气增焓系列板式换热器采用不等截面通道设计，精确匹配用户对冷热流体的不同压降和传热要求，可减小换热面积和流动阻力，提高换热性能。浙江三花板换科技有限公司生产的纯铝板式换热器可用于多联机过冷器、汽车电池冷却系统、油冷机、低温热泵系统等情景，重量材料成本明显减低、整机能效提高。

随着冷水机组逐步采用高水温设计，末端送排风机的能耗占比增加。在不提高其噪声的前提下，提高其效率对制冷空调系统的能效具有重要的意义。亿利达公司自行开发生产多个系列离心式空调风机具有效率高、噪声低、耗能少等特点，产品达到国内领先水平，首家代替进口。

高效节能是水泵核心工作，威乐在电机能效方面开发出IE5永磁电机，可以为合作伙伴提供IE3、IE4和IE5三个级别完善的电机高效节能解决方案。威乐在最近几年新开发的产品中，无论是端吸泵、管道泵还是双吸泵产品，MEI基本已可达到0.7，这一数值是欧盟即将在2024年实施的标准。在水泵控制系统方面，通过优化控制来实现能效的大幅提升。威乐全系列的智能变频泵通过设置最优控制模式，来调整水泵转速从而匹配相应的负载，因此进一步大幅提升了整个系统的效率。上海凯泉泵业（集团）有限公司的“GXS高效智能模块泵组产品”通过改进水泵结构、材质，并结合合理的运行控制技术，为暖通空调及供热水系统工况匹配提供了宽高效、低阻力高度智能化的解决方案，能效提升30%以上。

电子膨胀阀产品开始趋于高效化、静音化、智能化、集成化发展。浙江盾安人工环境股份有限公司的P系列电子膨胀阀通过阀体结构内平衡创新设计，实现正反向最大工作压差均可达3.5 MPa，解决了热泵在低温低负荷工况下制冷剂流量的精确调节，实现了对可逆系统制冷剂的双向精确调节；生产的N系列电子膨胀阀，使用微米级的加工和装配精度确保

小开度微流量调节精度，实现了超静音、长寿命，广泛用于多联机内机以及有低噪音要求的家用空调和单元机内机。浙江三花智能控制股份有限公司生产的LPF系列电子膨胀阀主要用于冷冻冷藏系统中，当阀完全关闭时，系统内漏量低于1 mL/min，效果等同于电磁阀，可完全替代电磁阀，节约安装空间和成本。LPF-T系列可承受9 MPa工作压力，适用于CO₂系统。

不锈钢四通换向阀由于其低热损、低内漏的特点，可有效降低系统热损，提升系统能效，但是需要攻克焊接等加工制造难点，四通阀的不锈钢化是未来主要的发展方向。浙江盾安人工环境股份有限公司的不锈钢四通阀，采用不锈钢材料作为元件主体，使得产品轻量化（重量相比黄铜四通阀下降20%以上），且减少了热损和内漏，可使空调整机能效提升0.5%~2%。盾安的另一款电动大容量四通阀，主要应用于大型热泵系统，其刚性主体采用大间隙，结合软密封设计，实现低内漏的同时有效解决壳体变形带来的换向失效问题，采用电机驱动，自带故障检测功能，可实现零压差换向，使整机系统更加节能、可靠、智能。浙江三花智能控制股份有限公司生产的旋转四通阀广泛应用于大型热泵型制冷系统。其结构为“等径流道设计”，压损较同类型旋转阀降低40%。具有防卡死设计，刚性主体采用大间隙，结合软密封设计，有效解决阀芯动作卡死问题。该阀直接由电机驱动，无需建立压差。盾安研发的低温排水阀可用于二联供、三联供、空气源热水器、中央空调等水系统回路，通过机械式温包感知水温，在水温0~3℃阀打开自动排水，起到防冻功能，水温3~5℃阀关闭，避免系统意外排水。集成进气阀功能，防止管路内产生负压而影响排水效果。可实现空调整机系统自动防冻功能，替代手动排水防冻，提高系统的防冻可靠性和智能性。盾安研发的RSV双向电磁阀采用全不锈钢材料设计，强度高、传热损失小、体积小、轻量化、更环保，可应用于二联供、三联供、热泵回收等系统中。盾安研发的另一款截止节流阀是一款组合阀，同时具备节流、制冷剂通断和系统杂质过滤的功能，替代了传统制冷系统中的截止阀、主毛细管、副毛细管、单向阀和过滤器，可用于家用空调、热泵热水器和单元式空调等分体式制冷设备。该组合阀解决了传统截止阀毛细管组件焊点多、泄漏风险大、占用空

间大等问题,降低空调厂家成本的同时提高了产品的稳定性和可靠性。

(9) 不断开拓热声制冷、磁制冷、弹热制冷、电卡制冷、空气制冷和辐射制冷等创新技术

1) 热声制冷由于工质气体为氦气、氮气等不活泼的天然工质,环境友好、工作温度范围宽、制冷性能好,是一种完全环保的制冷技术,非常符合“双碳”背景下的发展要求。日本的Twinbird公司研制了多款基于自由活塞斯特林制冷机的便携式冰箱,制冷温度在 $-100\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、制冷量在 $15\sim 45\text{ W}$ 。宁波华斯特林公司研发了多款便携式冰箱,其制冷温度和制冷量与Twinbird公司产品相似。此外,中科院理化所、中国电子科技集团第16研究所、上海理工大学等机构也开展了类似的研究,其中中科院理化所研究的在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的电驱动自由活塞斯特林热声制冷机的制冷系数可以超过0.5以上,比传统复叠蒸汽压缩制冷技术的效率高出40%以上。2020年,中科院理化所在双效自由活塞斯特林机研究方面取得一定突破,研制的样机在加热温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷端和供热温度分别为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,实现热制冷系数0.2、整机性能系数1.39(供热 2840 W 、发电 121 W)。

2) 磁制冷是一种基于磁性材料热效应的固态制冷技术,具有作用温区广泛、本征制冷效率高、材料资源广泛等优点。基于磁热材料的相变温度区间,磁制冷逐步形成了极低温、低温与室温的温区的相关技术研究体系。不同温区磁制冷技术发展状态不一,我国磁制冷与国际先进水平成呈逐步接近的趋势,尤其在极低温磁制冷方面,2022年沈俊研究团队所研制的多级连续式绝热去磁系统获得了 50 mK 以下的最低温度。在低温与室温磁制冷方面,部分磁制冷原型机获得了优异的制冷性能,且部分已初步达到了实用化指标,如丹麦技术大学研制的室温磁制冷机在 10 K 制冷温跨下获得了约 103 W 的制冷量,其改进后热力学第二效率为 19.1% ,仍待进一步解决成本高、系统结构复杂、磁场-流场时序耦合优化等实际问题。作为最成熟且最具前景的固态制冷技术之一,磁制冷有望实现制冷温度的全温区覆盖,为低温制冷技术革新贡献新的技术途径。

3) 弹热制冷是利用单轴应力驱动弹热工质卸载制冷的固态制冷技术。目前全球范围已有接近20台

弹热制冷、热泵原型机,系统的制冷温差已超过 30 K ,最大制冷功率也已经超过 100 W 。根据弹热制冷技术在探索低成本、高性能、长寿命工质,研制高性能弹热回热器和驱动装置等关键技术仍需进一步的研究。弹热制冷技术在冷藏、房间空调、汽车热泵空调、除湿机等场景都有应用潜力。2021年,爱尔兰Exergyn公司在多个展览和学术会议宣称正在研发 10 kW 制热功率的地源弹热热泵机组。

4) 电卡制冷是科贝科和库尔恰托夫于1930年在罗西盐中首次发现的一种物理现象,其描述了在循环电场作用下极化介电材料的可逆极化循环。由于材料产生的温差较小(小于 1 K),直至巨电卡效应被发现之前,早期研究认为电卡效应并不适用于制冷。随着巨电卡效应被发现,电卡效应迅速获得了学术界和工业界的广泛关注,由于电卡制冷拥有着高效、可直接电力驱动、低成本和较为成熟的可大批量生产的工艺,被广泛认为是一种极有前景的新型制冷方式。这项技术还处在研究阶段。

5) 空气制冷优越的环境友好性,是推动其发展的核心驱动力,进一步提高其性能和扩大应用领域是其持续的研发方向。提高系统整体性能的研究主要包括:制冷循环型式改进与创新、透平压缩膨胀机为代表关键部件及其降噪技术的研发等,扩大应用领域的研究主要包括:适用领域有竞争力的产品研发与示范应用、应用效果测评等。随着我国和全球“双碳目标”推进,空气制冷将会进一步“焕发青春”,应用会越来越普遍。空气制冷在航空工业、军事运输、食品冷冻等特殊应用场合得以广泛应用。日本已将开式空气制冷系统应用到超低温冷库中,与传统的双级蒸汽压缩系统和复叠制冷系统相比,非设计工况下性能衰减不明显,在 $-100\sim -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内空气制冷系统有明显的优势。采用空气制冷结合自然冷却的复合系统,可以满足数据中心全年冷却的要求,应用在呼和浩特达到全年能效14.61。

6) 辐射制冷不消耗额外电能,可应用于各类建筑物、构筑物外表面,被认为是可降低空调制冷碳排放的新兴技术。近年来,我国辐射制冷技术研究突飞猛进,从材料性能到应用技术全面发展,已有多项成果实现应用示范。中国辐射制冷技术已在建筑、粮储等领域应用面积超过30万平方米,其中杭州西站站房金属屋面系统全面应用辐射制冷膜10

万平米，2022年整体项目已通过验收并投入使用。在粮食储藏领域，辐射制冷被写入2021年国家粮食和物资储备局优质粮食工程“六大提升行动”方案支持应用，目前已在浙江、安徽、河南、福建、广西、海南等10省的近30个粮库应用，应用仓容达36万吨，实施面积超过10万平方米。在电力领域，辐射制冷薄膜入选2020年国家工信部《全国工业领域电力需求侧管理第三批参考产品（技术）目录》，并已在16个省/自治区进行示范应用。宁波瑞凌开发出辐射制冷压型金属板产品，并与中建八局合作开发了辐射制冷金属屋面系统的施工工艺，已成功应用于杭州萧山国际机场冷屋面系统中。

（10）大型企业全面推进智能制造水平

在大数据、智能制造方面出现了一批示范园区、生产线和工厂。青岛中德生态园的海尔中德智慧园区承担着中央空调、滚筒洗衣机、特种冰箱、热水器等产品的生产。海尔推出的卡奥斯COSMOPlat工业互联网平台，结合能源互联网、大数据、云计算、5G网络等技术，通过智慧能源总控平台助力园区实现能源流、数据流、信息流、碳追溯流的“四流合一”，并通过对园区能源动力生产、输送、配用的全环节进行集中、直观的动态监控和数字化管理，改进和优化能源平衡，大幅提高了能源的综合利用效率。园区年二氧化碳减排约3.22

万吨，成为全球首个碳中和“灯塔基地”。

格力智能制造空调生产线包含空调外机线与空调内机线，生产线智能制造的流程涉及产品全生命周期的协同与融合，包括智能设计、智能设备、智能生产、智慧物流、智慧服务、智能决策等重点环节。实现了制造过程的自动化、少人化。

汉钟黑灯压缩机生产线，采用绿色建筑技术建设改造厂房、合理布局厂区内能量流、物质流路径、推广绿色设计和绿色采购、开发生产绿色产品、采用先进适用的清洁生产工艺技术和高效末端治理装备、淘汰落后设备、建立资源回收循环利用机制、推动用能结构优化等策略，来实现工厂的绿色发展。此外，聚焦重点用能工艺、重点用能区间和设备、逐步进行节能改造，提升终端用能设备能效。

哈特福德压缩机数字工厂由冰轮环境技术股份有限公司投资建设，是一座复杂离散型压缩机智能原生工厂，同时也是冰轮环境建设的具有自主知识产权的绿色低碳制造示范园区。压缩机数字工厂是冰轮对典型多品种小批量离散行业智能制造的深入探索和技术上的重大突破。工厂的智能系统中汇聚了50多个系统的数据，基于数字技术与工业知识的融合，利用数字孪生体+智能决策优化算法进行自动排程和任务分派，智能化工艺设备与数字化平台一体化集成，可实现人机物数高度协同。

Pioneering for You

wilo

威乐中央空调、热泵解决方案 德国品质 能效先锋



威乐中国官方微信



威乐中国官方抖音

威乐(中国)水泵系统有限公司
www.wilo.com.cn

威乐解决方案



Wilo-Para
高效屏蔽循环泵



Wilo-Para MAXO
高效屏蔽循环泵



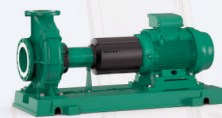
Wilo-IL-E
立式管道泵



Wilo-MHI/L
卧式多级离心泵



Wilo-Atmos GIGA-B
卧式端吸离心泵



Wilo-Atmos GIGA-N
卧式端吸泵

