

0-2011

*Report on Advances in Refrigeration and
Cryogenic Engineering Science and Technology*

中国科学技术协会 主编
中国制冷学会 编著

制冷及低温工程
学科发展报告

中国科学技术出版社





2010-2011

制冷及低温工程

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN REFRIGERATION AND CRYOGENIC ENGINEERING
SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国制冷学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

2010—2011 制冷及低温工程学科发展报告/中国科学技术协会主编;
中国制冷学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2011.4

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-5828-9

I. ①2… II. ①中…②中… III. ①制冷工程-学科发展-研究报告-
中国-2010—2011 ②低温工程-学科发展-研究报告-中国-2010—2011
IV. ①TB6—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 036845 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京凯鑫彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:18.5 字数:450 千字

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:56.00 元

ISBN 978 7 5046-5828 9/TB • 83

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

2010—2011 制冷及低温工程学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN REFRIGERATION AND CRYOGENIC ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY

首席科学家 江 亿

专 家 组

组 长 江 亿

副组长 吴剑峰 徐 伟 王如竹 李连生

申 江 史 琳 罗二仓 韩 颖

成 员 (按姓氏笔画排序)

王 乐	王丽伟	王捷熙	王 鑫	巨小平
公茂琼	石文星	田长青	付 林	冯小梅
权国波	毕胜山	吕晓晨	朱清宇	刘广海
刘兴华	刘宝林	刘晓华	刘 斌	刘 静
安青松	孙宗宇	杜国富	杨一凡	杨灵艳
杨 昭	李 骥	肖 龙	何国庚	邱利民
沈 亮	张小斌	张志刚	张时聪	张建一
陈光明	陈敬良	陈燕燕	林文胜	季阿敏
赵远扬	段远源	胥 义	顾安忠	夏建军
钱 程	高 婷	唐 斌	曹 锋	谢如鹤
谢晓云	谢 晶	漆鹏程		

学 术 秘 书 常 琳 杨一凡

序

当前,诸多学科发展迅速,学科分化、交叉和融合愈加明显,新的学科不断涌现。开展学科发展研究,探索和总结学科发展规律,明确学科发展方向,有利于促进学科内部、学科之间的交叉和融合,汇聚优势学术资源,推动学科交叉创新平台的建立。

开拓和持续推进学科发展研究,促进学术发展,是中国科协作为科学共同体的优势所在。中国科协自 2006 年开始启动学科发展研究及发布活动,至今已经编辑出版“学科发展研究系列报告”108 卷,并且每年定期发布。从初创到形成规模和特色,“学科发展研究系列报告”逐渐显现出重要的社会影响力,越来越受到科技界、学术团体和政府部门的重视以及国外主要学术机构和团体的关注。

2010 年,中国科协继续组织了中国化学会等 22 个全国学会分别对化学、心理学、机械工程、农业工程、制冷及低温工程、控制科学与工程、航空科学技术、兵器科学技术、纺织科学与技术、制浆造纸科学技术、食品科学技术、粮油科学与技术、照明科学与技术、动力机械工程、农业科学、土壤学、植物保护、药学、生理学、药理学、麻风病学、毒理学 22 个学科进行学科发展研究,完成了近 800 万字、22 卷学科发展研究系列报告以及《2010—2011 学科发展报告综合卷》。

本次出版的学科发展研究系列报告,汇集了有关学科最新的重要研究成果、发展动态,包括基础理论方面的新观点、新学说,应用技术方面的新创造、新突破,科技成果产业化转移的新实践、新推进等。一些学科发展报告还提出了学科建设的对策和建议。从这些学科发展报告中可以看出,近年来,学科研究课题更加重视服务国家战略,更加重视与民生关系密切的社会需求,更加重视成果的产业化转移;学科间的交叉融合更加明显,理论创新与技术突破的联系结合更加紧密。

参与本次学科发展研究和报告编写的专家学者有 1000 余人。他们认真探索,深入研究,披沙拣金,凝练文字,在较短的时间里完成了研究课题。这些工作亦是对学科建设不可忽略的贡献。

在本次“学科发展研究系列报告”付梓之际,我由衷地希望中国科协及其所属全国学会不断创新思路,坚持不懈地推进学科建设和学术交流,以学科发展研究以及相应的发布活动带动各个学科整体水平的提升,在增强国家自主创新能力中发挥强有力的作用,以推进我国经济持续增长和加快转变经济发展方式。

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Moxing, positioned above the date.

2011 年 3 月

前 言

制冷科学与技术是伴随人类社会进入工业化、现代化而诞生、并迅速发展起来的一门应用学科。从认识物质低温下性态的基础研究,到超导、红外探测成像等现代前沿科技,从易腐食品冷藏链、空调制冷、冷冻医学手术刀等与百姓医、食、住、行都密切相关的日常生活,到天然气输运、三峡大坝、地铁工程等大型能源与基础设施建设工程,制冷科学与技术都担当着十分重要的角色。制冷涉及千行百业,貌似繁杂,但有共性,共同的基础理论及独特的应用技术。通过百余年的发展及应用领域的不断扩展,制冷科学与技术已形成完整清晰的学科体系。

中国制冷学会组织该学科二十余名权威专家组成研究编写组,历经一年半的调研、广泛征求业内意见、研究讨论,完成了该报告的编写工作。该报告根据制冷科学技术及学科发展现状,从新型制冷技术、制冷工质、低温生物学、低温工程技术、压缩机和制冷设备、冷冻冷藏贮运技术、热泵空调技术、空调制冷系统、吸附制冷技术和吸收式热泵等方面在调研国内外制冷技术发展现状的基础上,比对国外该领域的发展情况,并根据我国现有制冷技术涉及众多学科的情况,提出了我国制冷学科的发展趋势。为了使该报告更全面地反映这一学科的全貌,并有一定的科学预见性,每个主题在完成各自的初稿后都组织了专门的研讨会,邀请学术界、产业界和政府部门的专家与应用代表进行研讨,并反复修改后,又由中国制冷学会组织了专门的报告会和研讨会,由全国学术界与产业界多个领域的专家参加,对各个报告进行了深入的讨论,经过编写组的多次研讨和深入工作,汇总编写了制冷科学与技术综合报告及各分报告。因此,该报告在一定程度上反映了我国制冷领域学术界、产业界对制冷学科的认识,具有足够的代表性和广泛性。该报告可以说是我国制冷界学术界和企业界集体辛勤劳动的结晶。

该报告的初稿曾是一部庞大的巨著。由于篇幅所限,编写组下大力进行了删节,缩编。制冷领域实在是涉及了太广泛的内容,这真是一个既有清晰的主干,又有宏大繁杂的支脉,既涉及前沿科学与现代技术,又与百姓生活各行各业息息相关的大学科。删节是一件很难和痛苦的事,希望我们没有删掉太多的精华和关键内容,希望我们能够呈现给读者一个较好地反映了制冷学科全貌的清晰画面。

这是第一次向全社会系统地介绍制冷科学与技术。希望这样的活动能够持续下去,不断向全社会汇报制冷领域的最新进展和状况,使全社会更清楚地

认识制冷,也促进制冷更好的全方位地为社会发展、科学进步、经济繁荣和环境改善做出其应有的贡献。

感谢中国科学技术协会精心的组织计划,第一次把这一学科收入"学科发展研究系列报告",作为中国科协的研究项目。感谢参加编写工作全体专家的辛勤的劳动和无私的奉献;感谢参加各次研讨会的专家和代表发表的真知灼见,这些意见和建议为本报告的产生作出了重要的贡献。

中国制冷学会

2011 年 1 月

目 录

序	韩启德
前言	中国制冷学会

综合报告

制冷学科的研究现状与发展前景	(3)
一、制冷学科的定义、范围及重要性	(3)
二、制冷学科的发展现状及重要进展	(6)
三、制冷学科的国内外比较分析	(19)
四、制冷学科发展展望和预测	(24)
五、制冷学科发展的战略和策略	(29)

专题报告

新型制冷技术发展研究	(35)
制冷工质发展研究	(59)
低温生物医学发展研究	(74)
低温工程技术发展研究	(87)
压缩机和制冷设备发展研究	(119)
冷冻冷藏贮运技术发展研究	(137)
热泵空调技术发展研究	(156)
空调制冷系统发展研究	(192)
吸附制冷技术发展研究	(213)
吸收式热泵发展研究	(241)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Current Situation and Future Prospects of the Research on Refrigeration Science and Technology	(257)
--	-------

Reports on Special Topics

Advance in Novel Refrigeration Science and Technology	(269)
Advance in Refrigerants Science and Technology	(270)
Advance in Cryo-biomedicine Science and Technology	(271)
Advance in Cryogenic Engineering Science and Technology	(273)

Advance in Refrigeration Compressor and Refrigeration Equipment Science and Technology	(276)
Advance in Frozen and Refrigerated Storage-Transport Science and Technology	(276)
Advance in Heat Pump Science and Technology	(278)
Advance in Refrigeration in Air-conditioning Science and Technology	(279)
Advance in Adsorption Refrigeration Science and Technology	(281)
Advance in Absorption Heat Pump Science and Technology	(281)

综合报告

制冷学科的研究现状与发展前景

一、制冷学科的定义、范围及重要性

制冷学科的中心任务就是营造不同于自然界环境温度的微环境或物质状态,从较低的温度状态下提取热量,并在较高的温度状态下释放这部分热量。通过这种方式营造低于自然界环境温度的低温状态,称为狭义的制冷;通过这种方式获得高于自然界环境温度的高温状态,称为“热泵制热”。实际上这两种目的的物理过程相同,同属于制冷学科的基本任务。

制冷技术是伴随工业革命而诞生、并逐渐发展起来的传统技术,而同时又随着科学技术的发展和人类文明、社会进步、经济发展而不断发展、产生新概念、萌发新技术、扩充新领域。

(一)制冷学科的应用

在现代科学技术的发展中,制冷学科提供重要的技术支撑和研究平台。无论是正负电子对撞的现代物理学研究还是受控热核聚变或低温超导等现代技术前沿,都需要制冷技术产生极端低温环境或提供精准的热环境状态。制冷技术已经成为现代科学发展不可或缺的关键技术。

制冷学科提供各种气体分离、气体液化技术,是诸多重化工业、能源产业的关键技术;所提供的多种冷冻技术又是大型水利工程、地下工程的重要施工技术;而为超大规模集成电路、超级计算机、大功率激光器等前沿技术装备提供有效的冷却方式,则成为这些技术进一步发展的关键。

制冷学科还应用于低温生物医学,提供有效的外科手术措施,保存和运送细胞、血浆、皮肤、软骨和各类器官等生物材料,成为现代医学不可替代的技术和方法。

而制冷学科最大的应用领域则是食品(包括农产品、水产品、禽类产品等)储藏保鲜和冷藏链。包括粮食在内的食品安全和可靠供应是关系人民生活和国家安全的的大事,而安全、保质、保量的储藏则是调节供需,保证食品安全可靠稳定供应的关键。随着食品供应模式从小规模就地产销的手工业方式向大规模生产加工和异地产销的现代工业模式的转变,食品冷藏冷冻储运和冷藏链系统成为现代食品工程中决定食品安全、优质与低损耗的最重要的环节。

空调制冷与热泵工程则是另一项制冷学科的重要和广泛的应用。以满足人的舒适要求为目标的空调制冷系统已经成为各种现代化民用建筑必须具备的条件。而为各种工业生产、科学研究营造各种恒温、低温、恒湿、干燥环境的空调制冷又成为现代科学研究和工业生产过程的基本要求。制冷技术不仅用于降低温度排除热量,还越来越广泛地用于从较低温度下提取热量以满足对较高温度的热量的需求。用这一方式替代直接燃烧化石燃

料制备生活热水、冬季为建筑供热以及满足其他一些对常温热量的需求。

此外,航天、航空、航海、潜海以及各类陆地交通工具中的生命保障系统或人工环境系统的主要构成部分也是制冷空调。

21 世纪初,美国国家工程院曾通过广泛征集评比,得出“二十世纪最伟大的 20 项工程技术成就”,空调和制冷技术被列为其中的第 10 项。

(二) 制冷学科的分类

为实现上述各种应用,制冷学科可按照其低温侧工作温度划分为低温和普冷两大类。

低温的制冷范围是零下 153°C (或绝对温度 120K 以下) 到接近于绝对零度,这主要服务于低温超导研究和相关的工程装置,并为现代科学研究提供各种所要求的低温环境与状态。各种气体分离、液化,以及一些特殊的工业与科研应用的制冷温度也属于这一范围。

普冷的工作范围是零下 153°C 到常温,这主要服务于各类生物制品、食品的储藏保鲜,为各类空调系统提供冷源。一些工业生产过程也需要这个范围的冷源用于工艺过程冷却,同时这也是低温生物医学所需要的温度范围,还是土木工程冷冻法施工所要求的温度范围。

实现上述温度范围的制冷所要求的系统容量,即在冷侧提取热量的规模也覆盖很大的范围。用于医学和某些科学研究任务的制冷装置的制冷量最小不足 1W ; 而大型气体分离与液化设备、大规模食品储藏和空调制冷系统,其制冷量可高达近 10^8W 。最大制冷容量与最小制冷容量相差亿倍,由此也需要采用不同的制冷原理和制冷工艺。

制冷温度范围不同,面对的核心问题也不相同,要求的制冷容量不同,就需要不同的制冷原理、工艺和设备。制冷工艺主要可以划分为如下几种方式:

蒸汽压缩制冷:通过压缩机驱动制冷工质循环,实现逆的热—功转换过程,从冷侧提取热量在热侧释放。这是目前使用最广泛的制冷方式。

吸收和吸附式制冷:由两种流体(吸收式)或一种流体一种固体(吸附式)组成工质对,通过工质对在不同温度下可以互溶或可以相互吸附的程度不同,实现制冷。这类制冷方式的驱动动力为高温热源,这种方式被广泛地用在由各种工业余热、太阳能热量和其他热源制冷或进行不同温度的热量之间的转换过程中。

气体回热式制冷:通过气体的等熵膨胀或焦耳—汤姆逊等焓膨胀来获得低温(-120°C 左右)。同时,为了降低膨胀前的压力,一般都要采用回热技术,根据回热方式的不同有回热式透平膨胀制冷技术、回热式节流制冷技术以及交变流动回热式制冷技术(斯特林制冷机、G—M 制冷机以及脉冲管制冷机等)。回热式透平膨胀机技术在空分、大型氢氮制冷与液化方面获得广泛应用;而采用深冷混合工质的回热式节流制冷技术则在大型天然气液化、超低温冰箱等方面获得大量应用;交变流动回热式制冷技术则是微小型低温制冷的主要方式,在红外探测器、超导电子器件等低温电子器件的冷却以及半导体行业大规模使用的超高真空低温冷凝泵方面获得大量应用。

其他制冷方式:利用其他的一些物理过程与热过程的转换来实现制冷。目前主要有:半导体制冷、热声制冷、磁制冷、激光制冷以及铁电制冷等。

随着人类对自然现象认识的不断深化和社会与科技发展对制冷学科不断提出的新需求,各种新的制冷方式也在不断涌现,并有可能成为某个应用领域的主导方式。

(三)制冷学科面临的任务和挑战

目前,上述各类应用于不同领域的制冷系统和相关的辅助系统的运行所消耗的能源占我国全年能源使用总量的 20% 以上。在满足制冷功能要求的同时,降低运行能耗,从而减少由于能源消耗带来的碳排放,已经成为这一领域发展的主要任务和重要目标。近 20 年来,依靠这一领域的科学进步与技术创新,各类制冷系统运行的能源利用效率普遍提高了 20%~30%,但在理论上和可行性上还存在继续提高 30% 以上能源利用效率的潜力。制冷学科担负着节能减排的重要责任。

除了降低运行能耗和减少相应的碳排放,制冷学科还面临停止使用破坏大气臭氧层并且加剧大气温室效应的 HCFC 物质的严峻挑战。目前作为最主要的制冷方式的蒸汽压缩制冷所使用的循环工质主要还是以 HCFC 物质为主,从 20 世纪末的《蒙特利尔议定书》开始,全球逐渐要取消含有 HCFC 物质的各类应用,以保护地球臭氧层不受破坏。这意味着要全面取消目前普遍应用的制冷工质,采用新的制冷工质或新的制冷方式来替代。近 10 年来国内外制冷领域学术界和企业界都投入了巨大的人力财力解决这一问题,但尚未找到全面符合安全、环保、节能、经济各方面要求的替代工质或替代方式。满足社会各领域对制冷的需求,又不使制冷行业造成对环境的污染和破坏,这也是制冷学科在节能减排、保护环境这样的社会发展趋势下的责任与挑战。

同时,制冷学科又是发展前沿科学的重要支撑技术,是现代化产业赖以发展的基础。制冷技术还关系到医疗系统的完善,是现代医疗工程发展的重要方向;关系到食品的安全、高质、低损耗,是现代化食品保障系统健全的标志;关系到建筑室内环境质量,是营造舒适的居住环境,提高人民生活水平的重要环节。因此,是建立和完善医、食、住三大民生保障系统的重要组成部分。制冷技术被应用的深入程度和广泛程度,反映出一个社会的现代化程度。随着我国经济的持续发展、民生建设的日益完善和文明程度的不断提高,对制冷技术将有更广泛、更深入和更精准的需求,同时又要将其建立在低能耗、低排放、更环保的基础上。这是对制冷学科和制冷行业的巨大挑战。

另一方面,制冷行业本身又是我国制造业的重要组成部分。改革开放以来,我国制冷行业在技术水平和生产与应用规模上都有了突飞猛进的发展。目前在家用空调和家用冰箱产品上我国都是世界产量第一,在其他的制冷相关设备制造上我国也有许多类产品产量处于世界第一。同时,我国还是世界上制冷相关设备需求量最大的市场,也是国际市场上多种制冷设备的主要供货商或代工制造者。制冷行业的健康稳定发展对我国经济发展有着十分重要的意义。

综上所述,制冷学科既是前沿科学发展的技术保障,也关系到医、食、住、行和保障人民生活的健康、幸福。制冷学科同时还必须应对节能减排和保护环境问题,在这一人类文明发展新的主题中负有特殊和重要的使命。另外,在我国经济发展与对外出口中制冷行业也具有重要地位。

二、制冷学科的发展现状及重要进展

从学科发展和科学研究的角度看,可以从新的制冷过程机理与装置,制冷的替代工质;制冷压缩机;吸收式、吸附式制冷系统;和制冷的几个主要应用系统的发展现状和进展来对制冷学科进行归纳总结。这些主要的应用包括低温生物医学,食品冷冻冷藏贮运,空调制冷及热泵,气体分离与液化,吸收式换热与工业余热利用,以及在大型工程建设中制冷技术的应用。

下面,分别介绍我国在上述各分支的发展现状及重要进展。

(一)新的制冷过程机理与装置

随着科技的发展和社会需求的提高,新的制冷装置不断出现和发展,新的制冷机理也在不断被提出和被重新认识和深化。目前发展较快的制冷技术有热声制冷、磁制冷、激光制冷、半导体制冷,斯特林制冷。国内近年来有显著进展和成就的主要是热声制冷,其发展处于国际领先地位:

首先提出交变流动热机的介观热力学循环理论,揭示了热声热机是一种新的热力学循环形式。这一理论纠正了 200 年来学术界对交变流动热机的错误认识,并且表明存在一种新的宏微观热力过程和循环,它可以达到同温限的卡诺循环效率。指出了热声效应非线性本质,建立了系统的弱非线性理论框架,解决了经典热声理论所碰到的困惑。提出并建立适用于交变流动制冷机传热设计的“复传热学理论”框架。

在上述理论指导下,我国在热声制冷样机研制方面也处在国际前列。包括热声发动机、低温热声制冷机、室温热声制冷机以及高频率热声驱动低温制冷机。我国提出并研制的聚能行波热声发动机获得高于 32% 的热功转换效率;发明声压放大器;率先研制成功完全无机械运动部件的液氮和液氢温度区热声制冷机;提出并研制出室温高效的双行波热声制冷机,突破了驻波热声低效率的瓶颈;研制出工作频率达到 300Hz 以上的高频低温热声制冷机。

在磁制冷方向,我国的磁制冷材料研究也有一些原创性工作。如近年发明的铁基磁制冷材料既有较大的磁热效应,又可调节其居里温度,原料和成本还显著低于其他材料。这使得我国在磁制冷材料的研究上与国际先进水平相当。

(二)蒸汽压缩制冷的替代工质研究

制冷工质影响制冷系统的能力、效率、可靠性、安全性,不同的制冷工质又对制冷压缩机和其他部件以及润滑油有不同要求。因此,制冷工质的选择和配置、性能测试与研究长期以来就是制冷领域的基础课题,并且带动了蒸汽压缩制冷方向研究的发展。近年来由于发现最常用的 CFC、HCFC 类制冷工质会破坏大气臭氧层,并且属于强温室效应气体,必须逐渐替换。制冷工质问题就更成为制冷学科的重大问题,并将引起制冷技术的重大演变。

我国政府积极参与制冷工质限制和替代的各项国际行动,是各相关协议的签约国,积

极研究替代工质和相关技术,并且同步地促进了制冷行业的发展。发达国家把制冷工质的替换作为制冷业发展重新洗牌的机遇,通过主导替代工质的相关技术重新恢复其在这一领域的领先地位。而为了保证中国制冷业的发展,并且不造成由于工质的替换而全面转向国外技术,失去我国目前在制冷领域的地位,必须发展一条有中国特色的自主创新性制冷工质替代路线,如天然工质 HC600a 在冰箱上的成功应用,提出 HC290 和 HFC32 在空调上替代 HCFC22 的路线。在相关政府机构、研究机构和企业的努力下,目前初步形成我国的工质替代路线,形成如下表的国家方案框架。

表 1 我国主要制冷工质替代的参考方案

家用制冷			
机组	被替代物	近期成熟替代物	潜在和长期替代物
冰箱、冷柜		HC600a、HFC134a	HC290
家用、工商用空调器			
家用空调器	HCFC22	R410A	HC290,HFC161 ,HFC32
单元式空调机	HCFC22	R410A	HFC32,HC290,HFC161
多联式空调机组	HCFC22	R410A	HFC32,HFC1234yf 及其混合物
工商用冷水(热泵)机组	HCFC22 HCFC123	涡旋和螺杆式:R410A 和 HFC 134a	HFC32,HFC1234yf 及其混合物
		离心式:HFC134a	
冷水(热泵)机组	HCFC22	R410A 和 HFC 134a	HFC32,HC290,HFC1234yf 及其混合物,HFC161
汽车空调		HFC134a	HFC1234yf ,HFC152a , CO ₂ ,HFC32
工商用制冷设备			
中小型商业冷冻冷藏	HCFC22	NH ₃ , HFC134a, R404A	CO ₂ ,HFC32
大中型商业冷冻冷藏、工业冷冻		NH ₃ , HFC134a ,R507 等	CO ₂
超市冷冻冷藏			CO ₂ ,HFC32
运输冷藏		R404A ,HFC134a	HFC32,HFC1234yf
热泵热水器			
热泵热水器	HCFC22	HFC134a,R410A,R417	CO ₂ ,HFC32, HC290,HFC161

在这个整体规划下,正在积极开展相关技术与攻关。在混合工质方面已取得了国内外认可的成果,如我们所研制的新型混合工质取得了 R425A 等国际制冷剂编号。我国已有了一系列具有自主知识产权的共沸和非共沸混合物专利。