



制冷学科进展研究与发展报告

Advances in Refrigeration and HVAC

中国制冷学会 组编

王如竹 主编



科学出版社

www.sciencep.com

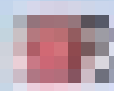


制冷学科进展研究与发展报告

Research and Development Progress Report of Refrigeration Discipline

中国制冷学会 编撰

高国青 主编



中国制冷学会
CHINA REFRIGERATION SOCIETY

制冷学科进展研究 与发展报告

Advances in Refrigeration and HVAC

中国制冷学会 组编

王如竹 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了制冷学科中的前沿科学和技术,主要内容有制冷空调新工质与自然冷媒、制冷与空调压缩机技术、压缩式制冷系统和能效、吸附式制冷、制冷系统建模与仿真、分布式冷热电联产系统、蓄冷和蓄热、大型建筑群的能源系统和设备、人体热舒适、回热式低温制冷机、零费用冷却技术、食品冷冻冷藏新技术、除湿空调、建筑物复合能量系统等。所有章节均由国内制冷空调行业知名专家执笔,反映了制冷空调行业的最新进展和热点问题。

本书适于制冷空调企业研究开发人员参考,也可以作为有关大专院校热能动力工程(制冷)和建筑环境与设备、食品加工专业的研究生和本科生的学科前沿教学参考书。由于本发展报告涉及面宽,而且具有一定的预见性,因而对于制冷空调与能源利用领域的技术干部和企业家也有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

制冷学科进展研究与发展报告 = Advances in Refrigeration and HVAC / 中国制冷学会组编;王如竹主编. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018779-6

I. 制… II. ①中…②王… III. 制冷工程-技术发展-研究报告 IV. TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 041020 号

责任编辑:刘宝莉 周 炜 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 4 月第一次印刷 印张:41 3/4

印数:1—4 000

字数:963 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

制冷学科进展研究与发展报告

编写委员会

主编：王如竹

编委：（按编写章节的顺序排列）

杨 昭	李连生	马一太	王丽伟	丁国良
吴静怡	张寅平	龙惟定	朱颖心	陈国邦
黄 翔	李云飞	代彦军	翟晓强	

序

2007年,中国制冷学会迎来了成立30周年的大喜日子,也迎来了第22届国际制冷大会在北京举行的全球行业盛事。

作为一个制冷空调制造大国,我国已经形成了较为完整的制冷空调及制冷应用产业链,中国制冷学术界对国际制冷空调行业的贡献日益显现。例如在高等院校中具有制冷与低温工程本科专业方向的学校就有100余所,具有建筑环境与设备本科专业方向的学校则达到了140余所,设置食品冷冻冷藏专业方向的学校也在不断增加;在各类制冷空调企业中,研发中心正不断诞生。整个制冷空调行业迫切需要有关介绍制冷学科前沿新技术发展的书籍,以促进学科发展。

响应中国科协建议,中国制冷学会决定组织专家学者定期编写学科进展研究与发展报告,为此邀请了教育部长江学者奖励计划特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、上海交通大学制冷与低温工程研究所所长王如竹博士担任《制冷学科进展研究与发展报告》的主编,由王如竹教授自主选题组稿,邀请国内知名的专家教授,结合各自的研究专长,介绍该学科的前沿技术,并对未来的发展进行展望,以出版《制冷学科进展研究与发展报告》的形式推进本项工作。此报告拟每三年作一次修订,使内容不断更新,以成为反映学科发展的重要系列参考书。

《制冷学科进展研究与发展报告》一书具有以下几个显著特点:

- (1) 综合性:选择制冷学科前沿专题进行进展介绍和前沿评述。
- (2) 权威性:各章均由教学科研第一线的相应学术领域的专家编写,内容真实客观,具有权威性。
- (3) 实时性:选择热点方向实时报道分析。
- (4) 预见性:编写的内容既反映历史进展和现在的研究热点,又预见将来5~10年的发展。
- (5) 可阅读性:所选内容主要针对制冷空调行业专业技术人员、大专院校本科生和研究生,可以作为高校学科前沿课程教学参考书。
- (6) 系列性:将根据制冷学科发展需要进行定期修订,逐步覆盖本学科行业领域。

中国制冷学会期望,《制冷学科进展研究与发展报告》将直接服务于中国制冷学科及行业发展,为我国从制冷空调制造大国向制冷空调制造强国迈进作出贡献。

中国制冷学会

2007年2月

前 言

受中国制冷学会委托,我很荣幸地担任了《制冷学科进展研究与发展报告》的主编。本学科发展报告涉及领域非常广阔,我只能选择其中发展较快、前景较好、研究比较活跃的一部分主题,邀请我国相应主题领域的优秀专家负责完成。

主要内容涉及的主题和撰稿专家为:制冷空调新工质与自然冷媒(天津大学杨昭教授)、制冷与空调压缩机技术(西安交通大学李连生教授)、压缩式制冷系统和能效(天津大学马一太教授)、吸附式制冷(上海交通大学王如竹教授等)、制冷系统建模与仿真(上海交通大学丁国良教授)、分布式冷热电联产系统(上海交通大学吴静怡教授等)、蓄冷和蓄热(清华大学张寅平教授等)、大型建筑群的能源系统和设备(同济大学龙惟定教授等)、人体热舒适(清华大学朱颖心教授等)、回热式低温制冷机(浙江大学陈国邦教授)、零费用冷却技术(西安工程技术大学黄翔教授)、食品冷冻冷藏新技术(上海交通大学李云飞教授)、除湿空调(上海交通大学代彦军教授)、建筑物复合能量系统(上海交通大学王如竹教授等)。这些专家长期围绕相应研究主题做了大量深入细致的研究工作,已经取得了显著科研和学术成果。这些工作不仅反映了近 10 余年来制冷空调技术的发展,也包含了作者团队的一线科研成果与心得,编写的内容也为未来 5~10 年的发展指明了方向。期望这些内容能给我国制冷界的学术研究、产品开发及教学带来营养。

参加《制冷学科进展研究与发展报告》编写工作的各位专家都是高校的制冷空调等领域的主要学科带头人,有的还担任着很重要的行政职务,但是大家非常支持本书的编写工作,为本书在中国制冷学会成立 30 周年之际出版作出了努力。在此我对参加本书编写工作的各位老师深表谢意!

真诚希望本书的出版能为我国制冷学科及行业的发展作出一份贡献!

由于时间仓促,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

王如竹

2007 年 2 月

目 录

序

前言

第 1 章 制冷空调新工质与自然冷媒	1
1-1 制冷剂历史	1
1-2 CFCs 和 HCFCs 问题	3
1-2-1 臭氧层消耗及相关协定	3
1-2-2 温室效应及相关协定	5
1-3 制冷剂替代要求	7
1-4 制冷剂替代方案	7
1-4-1 CFCs 替代物	9
1-4-2 HCFCs 替代	13
1-4-3 自然工质	20
1-4-4 制冷剂可燃性及安全问题	35
1-5 结束语	37
参考文献	38
第 2 章 制冷与空调压缩机技术	43
2-1 国内外制冷与空调压缩机行业现状	43
2-1-1 海外制冷与空调压缩机行业现状	43
2-1-2 我国制冷与空调压缩机行业现状	48
2-1-3 国内外制冷与空调压缩机研发现状	50
2-2 冰箱压缩机	56
2-2-1 我国冰箱压缩机生产状况	56
2-2-2 国外冰箱压缩机的生产状况	58
2-2-3 冰箱压缩机新技术	59
2-3 家用空调压缩机	63
2-3-1 我国家用空调压缩机的基本状况	63
2-3-2 国外家用空调压缩机的基本状况	68
2-3-3 滚动活塞式压缩机	72
2-3-4 涡旋式压缩机	75
2-3-5 家用空调压缩机的发展方向	77
2-4 中央空调压缩机	77

2-4-1	国内外中央空调压缩机发展现状比较	77
2-4-2	往复(活塞)式压缩机	78
2-4-3	涡旋式制冷压缩机	79
2-4-4	螺杆式压缩机	79
2-4-5	离心式压缩机	80
2-4-6	燃气中央空调压缩机	82
2-4-7	中央空调压缩机的发展方向	83
2-5	冷冻冷藏压缩机	83
2-5-1	小型冷冻冷藏压缩机	83
2-5-2	大中型冷冻冷藏压缩机	85
2-6	汽车空调压缩机	88
2-6-1	汽车空调压缩机现状	88
2-6-2	斜盘式汽车空调压缩机	89
2-6-3	旋叶式汽车空调压缩机	90
2-6-4	涡旋式汽车空调压缩机	90
2-6-5	汽车空调压缩机的发展动向	90
2-7	制冷空调压缩机的节能与环保	93
2-7-1	制冷空调压缩机的节能技术	94
2-7-2	制冷空调压缩机的 CFC 替代	98
2-7-3	直线压缩机	102
2-7-4	二氧化碳压缩机	104
2-7-5	氨压缩机的复苏	106
2-7-6	HC 压缩机	108
2-8	小结	110
	参考文献	112
第 3 章	压缩式制冷系统和能效	114
3-1	电冰箱及其能效分析	114
3-1-1	电冰箱类型及其应用现状	114
3-1-2	电冰箱能效等级标准	116
3-1-3	电冰箱制冷剂研究进展	118
3-1-4	电冰箱发泡剂的替代研究	119
3-2	房间空调器、单元式空调机及其能效分析	123
3-2-1	房间空调器系统及应用现状	123
3-2-2	单元式空调系统及应用现状	124
3-2-3	房间空调器和单元式空调系统能效水平研究	125
3-2-4	房间空调器和单元式空调节能新技术	127

3-2-5 空调制冷剂替代研究	139
3-2-6 空调器季节能效分析	140
3-3 冷水机组及其能效分析	145
3-3-1 冷水机组能效综合分析	146
3-3-2 冷水机组综合部分负荷值 IPLV 的研究	149
3-4 燃气热泵及其能效分析	157
3-4-1 燃气热泵原理及应用	157
3-4-2 燃气热泵能效分析	158
3-5 结论	159
参考文献	159
第 4 章 吸附式制冷技术的发展	162
4-1 吸附式制冷的发展	162
4-2 吸附制冷工质对及吸附理论	166
4-2-1 吸附制冷工质对	166
4-2-2 吸附理论研究	167
4-3 吸附式制冷循环的研究	169
4-3-1 吸附床温度受限的热量回收过程	170
4-3-2 热波循环	171
4-3-3 分步再生循环	173
4-3-4 回质循环	173
4-4 吸附床技术	173
4-4-1 增加热交换器的面积	174
4-4-2 固化的吸附床	175
4-4-3 涂层换热器	175
4-4-4 热管技术	176
4-5 太阳能吸附式制冷	176
4-5-1 太阳能吸附式制冷系统的特点及其分类	176
4-5-2 集成型太阳能驱动的吸附式制冷系统	178
4-5-3 分离型太阳能驱动的吸附式制冷系统	187
4-5-4 其他形式的太阳能吸附式制冷系统	191
4-6 吸附式制冷系统的余热利用	194
4-6-1 汽车余热驱动的分质筛——水吸附空调	194
4-6-2 硅胶-水吸附式制冷机	195
4-6-3 发动机尾气余热驱动的吸附式冷冻系统	196
4-6-4 上海交通大学研制的船用吸附式制冷系统	196
4-6-5 沸石分子筛-水吸附式蓄能系统在机车空调中的应用	199

4-6-6 基于燃气内燃机和固体吸附式制冷机的微型冷热电联供系统	201
4-6-7 德国克曼斯与日本名古屋的冷热电三联供系统	202
4-7 吸附式制冷技术发展展望	202
参考文献	203
第5章 制冷系统建模与仿真	209
5-1 制冷系统及其主要部件的基本建模方法	209
5-1-1 压缩机模型	210
5-1-2 毛细管模型	211
5-1-3 蒸发器和冷凝器模型	213
5-1-4 围护结构模型	213
5-1-5 系统模型与算法	215
5-2 适用于系统仿真的制冷剂物性快速稳定计算方法	216
5-2-1 制冷系统仿真对于制冷剂物性计算的要求	216
5-2-2 制冷剂物性的常用快速算法	217
5-2-3 隐式拟合显式计算方法	217
5-3 基于模型的制冷系统智能仿真技术	219
5-4 基于图论的制冷系统仿真技术	222
5-4-1 基于图论的制冷系统稳态仿真算法的构建	223
5-4-2 基于图论的换热器仿真方法	224
5-5 总结与展望	229
参考文献	229
第6章 分布式冷热电联产系统	235
6-1 分布式冷热电联产能源系统介绍	235
6-1-1 分布式冷热电联产系统的分类与特点	235
6-1-2 冷热电联产系统主要设备的发展	238
6-1-3 冷热电联产系统的集成与发展	241
6-2 冷热电联产系统中热驱动制冷装置的发展	247
6-2-1 吸收式制冷装置	247
6-2-2 固体吸附式制冷装置	251
6-2-3 热驱动除湿设备	255
6-2-4 其他技术	257
6-3 冷热电联产系统在建筑供能中的应用	257
6-3-1 微型冷热电联产系统在户式供能中的应用	257
6-3-2 小型冷热电联产系统在商用建筑中的应用	261
6-3-3 冷热电联产系统在区域供热供冷中的应用	265
6-4 CCHP 在全球的发展	267

6-4-1 美国	267
6-4-2 欧洲	270
6-4-3 亚洲和太平洋地区	274
6-5 冷热电联产的发展及所存在的障碍	280
参考文献	282
第7章 蓄冷和蓄热	287
7-1 引言	287
7-2 新型相变蓄冷和蓄热材料及其热性能研究	287
7-2-1 “高温”空调蓄冷材料	287
7-2-2 接触式空调蓄冷系统用新型相变蓄冷材料	289
7-2-3 定形相变蓄热材料 (shape-stabilized PCM) 和固-固相变材料	291
7-2-4 长期蓄热用相变材料	293
7-2-5 采用石墨多孔基材改善相变材料性能	293
7-2-6 相变材料热物性测定	293
7-3 相变储能系统性能研究	293
7-3-1 不考虑相变材料固液密度差的相变储能换热器热性能研究	293
7-3-2 考虑相变材料固液密度差的相变储能堆积床热性能研究	295
7-3-3 相变管、相变板—维储、传热问题的无量纲解	295
7-3-4 圆管内、外融冰的理论和实验研究	295
7-3-5 汽液固系统储换热性能的理论 and 实验研究	297
7-4 蓄冷和蓄热在建筑节能和暖通空调领域的应用	297
7-4-1 被动式相变材料蓄能式建筑围护结构	298
7-4-2 相变蓄能墙	303
7-4-3 吸收太阳辐射热的相变蓄热地板	306
7-4-4 相变蓄能式电热膜地板采暖系统	307
7-4-5 利用楼板蓄热的吊顶空调系统	310
7-4-6 夜间通风蓄冷的相变吊顶系统	312
7-4-7 利用热泵技术的相变蓄能式地板采暖系统	312
7-4-8 相变蓄热电取暖器	315
7-4-9 太阳能相变蓄热系统	316
7-4-10 空调冰蓄冷系统	316
7-5 相变储能领域的一些研究方向	320
参考文献	320
第8章 大型建筑群的能源系统和设备	326
8-1 区域供热供冷系统概述	326
8-1-1 区域供热供冷系统的概念	326

8-1-2	DHC 和 DH、DCS 系统的关系	327
8-1-3	DHC 系统的优点	328
8-1-4	DHC 系统的缺点	332
8-1-5	DHC 系统在国内的应用现状	334
8-1-6	DHC 系统在我国的应用前景	339
8-2	DHC 的负荷计算	339
8-2-1	建筑空调负荷特点	340
8-2-2	区域空调负荷的特点	342
8-2-3	同时使用系数的计算方法	343
8-3	区域供热供冷系统的冷热源	347
8-3-1	DHC 系统冷热源的重点	347
8-3-2	基本热源系统及其特性	348
8-3-3	组合化的 DHC 系统冷热源形式	348
8-3-4	冷热源的综合评价优选方法进展	354
8-3-5	冷热源对环境的影响	355
8-4	制冷机组	355
8-4-1	机组性能系数	355
8-4-2	制冷机组焓效率分析	357
8-4-3	负荷和冷却水温变化对冷水机组性能的影响	361
8-5	区域供热供冷系统的输配管网	362
8-5-1	DHC 管网与供热管网的差别	362
8-5-2	输配媒介的种类	362
8-5-3	管网材料	364
8-5-4	输配管网的配管	365
8-5-5	管网参数的确定	365
8-5-6	区域管道的铺设方式	368
8-5-7	变流量输配水系统	371
8-5-8	输配管网节能技术	374
8-6	区域供热供冷系统实例介绍	375
	参考文献	380
第 9 章	人体热舒适	382
9-1	动态热舒适研究	383
9-1-1	动态热舒适研究内容	383
9-1-2	人体在动态热环境下的热反应实验研究	384
9-1-3	动态热环境下人体热反应影响机理研究	393
9-1-4	动态热舒适预测评价模型	396

9-1-5 总结	400
9-2 非空调环境下的热舒适研究	401
9-2-1 非空调环境下的现场调查	401
9-2-2 非空调环境人体热舒适影响机理	404
9-3 自然风与机械风的动态特征研究	408
9-3-1 表征气流动态特征的代表性参数	408
9-3-2 自然风与机械风动态特性的差异	410
9-3-3 人工动态化气流产生及应用研究	413
9-4 局部热暴露的舒适性研究	420
9-4-1 研究背景	420
9-4-2 局部热暴露的舒适性研究	420
9-4-3 局部热暴露的生理学机理研究	425
9-4-4 局部热暴露的应用性研究	426
9-5 室外热舒适研究	428
9-5-1 研究背景	428
9-5-2 室内外热舒适反应的差异	428
9-5-3 室内外热舒适反应差异的形成原因	429
9-5-4 室外热环境评价指标	430
参考文献	431
第 10 章 回热式低温制冷机的研究与发展	438
10-1 斯特林低温制冷机的研究与发展	438
10-1-1 前言	438
10-1-2 整体式斯特林制冷机	439
10-1-3 分置式斯特林制冷机	442
10-1-4 讨论与展望	449
10-2 吉福特-麦克马洪循环制冷机	450
10-2-1 制冷原理	450
10-2-2 磁性蓄冷材料的应用	452
10-2-3 结论	462
10-3 脉管制冷机的研究进展	463
10-3-1 高频脉管制冷机	463
10-3-2 多级脉管制冷机研究进展	472
10-4 热声发动机驱动的脉管制冷技术	485
10-4-1 热声学的发展历史	486
10-4-2 理论研究进展	487
10-4-3 热声发动机的实验研究	489

10-4-4 热声驱动脉管制冷机	494
10-4-5 展望	496
10-4-6 结束语	497
参考文献	497
第 11 章 零费用冷却技术	498
11-1 直接蒸发冷却器	498
11-1-1 填料的传热传质性能	499
11-1-2 填料的净化性能	500
11-1-3 直接蒸发冷却器的应用	501
11-2 间接蒸发冷却器	503
11-2-1 板翅式间接蒸发冷却器	503
11-2-2 管式间接蒸发冷却器	505
11-2-3 热管式间接蒸发冷却器	506
11-2-4 露点式间接蒸发冷却器	510
11-2-5 半间接式蒸发冷却器	512
11-3 多级蒸发冷却空调系统	512
11-4 多级蒸发冷却空调工程应用实例	515
11-5 除湿与蒸发冷却相结合的空调系统	518
11-6 半集中式蒸发冷却空调系统	518
11-6-1 间接蒸发式供冷装置	519
11-6-2 蒸发冷却与干式(干工况)风机盘管相结合的半集中式空调系统	519
11-6-3 蒸发冷却与辐射板相结合的半集中式空调系统	521
11-7 半集中式蒸发冷却空调工程应用实例	523
11-8 建筑物被动蒸发冷却技术	525
11-9 蒸发冷却自动控制系统	526
11-10 蒸发冷却水质处理	528
11-11 纳米光催化与蒸发冷却相结合的空调系统	528
11-12 结论	529
参考文献	529
第 12 章 食品冷冻冷藏新技术	534
12-1 水、冰晶与玻璃体	534
12-1-1 关于玻璃化问题的研究进展	534
12-1-2 高压冻结问题	546
12-1-3 冰晶形态研究	554
12-2 食品冷冻装备设计与控制	556
12-2-1 冻结时间	556

12-2-2 冻结装备与控制	558
12-3 食品冷藏与配送技术	560
12-3-1 预冷技术与装备	560
12-3-2 食品冷链技术	562
12-3-3 食品冷藏技术	563
参考文献	564
第 13 章 除湿空调	571
13-1 除湿空调循环热力过程分析	571
13-2 固体除湿空调	572
13-2-1 除湿空调系统	572
13-2-2 干燥剂材料	580
13-2-3 除湿器性能分析的理论方法	581
13-2-4 一种复合除湿空调系统	584
13-3 液体除湿空调	588
13-3-1 液体除湿系统	588
13-3-2 液体除湿空调装置	602
13-4 除湿空调技术的未来发展	606
参考文献	607
第 14 章 建筑物复合能量系统	614
14-1 建筑物围护结构	614
14-2 个性化热环境舒适性控制与建筑节能	617
14-3 建筑物自然通风节能	618
14-4 空调系统换新风过程中的热回收	620
14-5 太阳能合理利用与建筑节能	621
14-5-1 太阳能采暖和热水供应集成系统	622
14-5-2 太阳能空调制冷	624
14-5-3 直膨式太阳能热泵热水、采暖、空调复合能量系统	628
14-5-4 太阳能热水及水源热泵综合集成系统	630
14-5-5 太阳能热利用与 PCM 蓄能热泵	632
14-6 热原动机及其电、热、冷三联供建筑物用能综合集成系统	634
14-7 建筑物复合能量系统的集成建模	639
14-8 太阳能建筑一体化复合能量系统实例	644
14-8-1 太阳能生态建筑一体化结构	644
14-8-2 太阳能复合能量系统的构建	646
14-9 建筑物复合能量系统的未来发展方向	648
参考文献	649

第 1 章 制冷空调新工质与自然冷媒

1-1 制冷剂历史

一个多世纪以来，制冷剂经历了一个不断发展的过程。1805 年，Oliver Evans 最早提出了在封闭循环中使用挥发性流体将水冷冻成冰的思路。1824 年，Richard Trevithick 首先提出了空气制冷循环的设想，但未建成此装置。1834 年居住在伦敦的美国人 Jacob Perkins 研制成功采用挥发性液体乙醚（R610）作为制冷剂的蒸气压缩制冷装置，并获得英国专利（6662 号）。他的助手约翰·黑格对这套设备进行了改造并尝试更换一种特殊制冷剂——生橡胶，这是一种从天然橡胶分解蒸馏后得到的挥发性溶液。1844 年，美国人 John Gorrie 医生为了减轻夏季湿热气候对病人造成的痛苦，建造了空气循环制冷机用来制作冰块。

用二氧化碳实现蒸气压缩式制冷循环的观点最早由美国康涅狄格州新港的 Alexander Catlin Twining 于 1850 年提出。但是，第一次成功将二氧化碳应用于商业的却是二氧化碳气体军用气球专家、新罕布什尔州的 Thaddeus Sobeski Carlincourt Lowe。1866 年前后，他在得克萨斯州的达拉斯及密西西比州的杰克逊等地使用二氧化碳制冷机制取商业用冰，还在船上安装了二氧化碳制冰机用于在墨西哥湾运输冷冻肉类。1867 年，他获得了二氧化碳制冰机英国国家专利。尽管二氧化碳得到了一定程度的应用，但是直到 1886 年德国布鲁斯维克的 Franz Windhausen 成功设计出二氧化碳专用压缩机以后，二氧化碳制冷工质才得到了显著的发展。据统计，1900 年全世界共有 356 艘轮船，其中 38% 用空气压缩循环制冷机，37% 用氨吸收式制冷机，25% 用二氧化碳蒸气压缩式制冷机。发展到 1930 年，全世界 80% 的轮船采用二氧化碳制冷机，其余的 20% 则用氨制冷机。后来，由于 CFCs（氟氯烃类物质）的兴起，二氧化碳制冷机的生产开始缩减，最后一艘二氧化碳制冷船在 1950 年左右停止服役。

氨制冷剂 1869 年首次应用于美国新奥尔良一家酿造厂的冷冻设备，设计者是两个法国人。最初没有氨气来源，只能使用氨水，而水容易对制冷系统造成损害，故早期的制冷设备不得不采用一些临时性的应急手段，如用生石灰和氢氧化钠对氨进行干燥处理。直接用于制冷设备的氨制冷剂于 1876 年由克利夫兰的麦克米兰公司推出，不久，许多制造商都竞相生产无水氨。氨制冷剂在 1900 年左右达到应用高峰，后来其市场日渐萎缩。氨制冷剂属于高压制冷剂，不宜在热带地域工作，而乙醚则为低压制冷剂，其设备容易渗入空气致使系统失效。为克服上述缺陷，瑞典人劳·皮克特（Lau Picket）于 1875 年开发出一种新型制冷剂——二氧化硫，其工作压力适中，既适于热带环境，

本章作者：杨昭，天津大学。