

中国制冷学会制冷专业

工程师继续教育系列 丛书



制冷

技术及其应用

彦启森 主编

申江 石文星 副主编

中国建筑工业出版社

中国制冷学会制冷专业

工程师继续教育系列 **丛书**



制冷 技术及其应用

彦启森 主编

申江 石文星 副主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术及其应用/彦启森主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006

(中国制冷学会制冷专业工程师继续教育系列丛书)

ISBN 7-112-08386-9

I. 制… II. 彦… III. 制冷技术 IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 053050 号

中国制冷学会制冷专业工程师继续教育系列丛书

制冷技术及其应用

彦启森 主编

申江 石文星 副主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 40½ 字数: 1000 千字

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 82.00 元

ISBN 7-112-08386-9

(15050)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

《制冷技术及其应用》是“中国制冷学会制冷工程师继续教育系列丛书”的基础，内容包括热工基础、制冷技术、冷冻冷藏、空调与热泵四个部分，基本涵盖了普冷技术的各个方面。本书以蒸气压缩式制冷装置为主，适当介绍了吸收式制冷装置，突出制冷装置的“原理、构造、特性”，重视产品的“实验”、“规范、标准”的讲解，以适应制冷工程技术人员的基本需求。

本书适用于从事制冷机械设备、冷藏冷冻、冷藏运输以及空调热泵专业的技术人员阅读，亦可供相关专业的在校学生参考与自学使用。

* * *

责任编辑：姚荣华

责任设计：崔兰萍

责任校对：张景秋 关 健

中国制冷学会
制冷专业工程师继续教育系列丛书编委会

主 编：彦启森

副主编：王如竹 李连生 申 江

编 委：（以姓氏笔画排列）

于志强	马国远	王如竹	申 江	由世俊	闫泽生
何国庚	李百战	李先庭	李连生	张 旭	张 华
张 桃	张小松	张秀平	张晓兰	张建一	陈光明
陈汝杰	杨利民	赵之海	胡松涛	彦启森	郭开华
姚 杨	黄 翔	曹小林	谢 晶	解国珍	

序 言

为适应我国制冷行业的迅猛发展，提高国际竞争能力，中国制冷学会经常务理事会讨论通过，于2006年4月成立中国制冷学会继续教育工作委员会。

继续教育工作委员会的宗旨是开展制冷专业技术人员的继续教育，促进在职专业技术人员知识更新，及时掌握新知识、新技术、新技能，提高在职专业技术人员的素质和能力，加速制冷专业高层次技术人员队伍建设和青年人才的培养。继续教育工作委员会将在调查研究我国制冷专业技术人员继续教育状况的基础上，促进高等院校、科研单位、企业在制冷专业发展与继续教育方面的研讨与合作，实施中国制冷学会制冷专业技术人员资格认证的教育培训，并举办高级技术人员培训班。

为实现上述目标，继续教育工作委员会成立了以彦启森教授为主编，王如竹教授、李连生教授、申江教授为副主编，中国制冷学会继续教育工作委员会全体委员为编委的制冷专业技术人员继续教育系列教材编委会，负责制冷专业技术人员继续教育系列教材的编写工作。《制冷技术及其应用》是该系列教材第一批编写的教材之一。

相信在广大编委、作者和读者的共同努力下，中国制冷学会的继续教育工作会议会有一个美好的明天。

制冷专业技术人员继续教育系列教材编委会

2006年5月

前 言

为构建我国制冷专业技术人员终身教育体系，培养专业技术人员的学习能力、实践能力和创新能力，提高整体素质，实现我国制冷工业的可持续发展，中国制冷学会组织高等院校、科研院所和生产一线专家，编写适应科技发展的制冷知识体系的继续教育系列丛书。丛书对象为广大从事制冷(包括：制冷机械设备专业、冷藏冷冻专业、冷藏运输专业及空调热泵专业)工作的专业技术人员。

《制冷技术及其应用》是制冷工程师继续教育系列丛书的基础，包括热工基础、制冷技术、冷冻冷藏、空调与热泵四个部分共计二十章，基本涵盖普冷技术的方方面面，是制冷工程师必需具有的专业知识。本书的特点是突出“原理、构造、特性”，重视对“实验”和“规范、标准”的讲解，适应广大制冷专业人员的基本需求。

本书由彦启森、申江和石文星组织编写。参加编写的成员有：清华大学彦启森教授(序论、第四章、第七章第四节)，北京建筑工程学院张世红教授(第一章)、王随林教授(第二章)，清华大学石文星博士(第三章、第十章第二节、附录)，北京工业大学马国远教授(第五章)，中国科学院田长青博士(第六章、第二十章第一节)，丹佛斯公司陈华俊硕士(第七章第一至三节、第八章)，天津工业大学何耀东教授(第九章、第十章第一、三、四节)，天津商学院杨永安副教授(第十一章)、刘斌博士(第十二章第一节、第十三章第三、四节、第十四章)、邹同华博士(第十二章第二节、第十六章)、李慧宇副教授(第十三章第一、二节)、彭苗(第十五章第一、二节)、申江教授(第十五章第三、四节)，清华大学李先庭教授(第十七章、第十八章)、王宝龙博士(第十九章、第二十章第二、三节)。全书由彦启森教授、石文星博士统稿。

本书在编写过程中，参考了大量的新近文献。同时，得到了中国制冷学会继续教育工作委员会、以及中国制冷学会资格认证委员会主任潘秋生教授、荆华乾副秘书长、王从飞副主任的大力支持；清华大学建筑技术科学系吴俊、赵恒硕士、潘品毅、陈毅兴等同学在本书编写过程中帮助查阅、整理了大量资料，并进行了大量的文字处理工作；中国建筑工业出版社姚荣华副编审为本书及早出版付出了辛勤劳动；本书得到了国家“985工程”二期教材建设的资助。在此，对引文作者以及给予编者大力支持和帮助的各位人士表示衷心感谢！

由于本书内容涉及面广，并引入较多新内容，如有不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

主要符号表	1
序论	3
第一部分 热工基础	5
第一章 制冷热力学	6
第一节 基本概念	6
第二节 热力学第一定律	10
第三节 热力学第二定律和熵	14
第四节 理想气体及其热力过程	17
第五节 实际气体的性质	21
参考文献	26
第二章 热传递	27
第一节 热传递现象	27
第二节 对流换热	33
第三节 凝结与沸腾换热	44
第四节 传热和换热器	49
参考文献	60
第二部分 制冷技术	61
第三章 制冷循环	62
第一节 蒸气压缩式制冷循环	62
第二节 吸收与吸附式制冷循环	87
参考文献	106
第四章 制冷剂与载冷剂	107
第一节 蒸气压缩式制冷机用制冷剂	107
第二节 润滑油	116
第三节 载冷剂	118
参考文献	120
第五章 制冷压缩机	121
第一节 概要	121
第二节 活塞压缩机	132
第三节 滚动活塞压缩机	151
第四节 涡旋压缩机	159
第五节 螺杆压缩机	167
第六节 离心压缩机	180

参考文献	186
第六章 热交换器	187
第一节 冷凝器	187
第二节 蒸发器	203
第三节 冷却塔	223
参考文献	231
第七章 制冷系统及辅助设备	233
第一节 制冷系统原理图	233
第二节 节流装置	235
第三节 辅助设备	251
第四节 制冷剂管路设计	262
参考文献	268
第八章 控制机构	270
第一节 电磁阀	270
第二节 制冷剂压力调节阀	273
第三节 压力开关	278
第四节 温度开关	280
第五节 其他控制部件	283
参考文献	285
第九章 制冷系统的安全装置与安全操作	286
第一节 制冷系统的安全装置	286
第二节 制冷系统的压力试验	292
第三节 制冷系统的安全操作	295
参考文献	299
第十章 制冷机组及其性能调节	300
第一节 蒸气压缩式制冷机组的类型与构造	300
第二节 蒸气压缩式制冷机组的性能与调节	304
第三节 蒸气压缩式制冷系统的运行调试	320
第四节 吸收式制冷机组的构造与性能调节	326
参考文献	334
第三部分 冷冻冷藏	335
第十一章 食品冷冻冷藏工艺	336
第一节 食品原料特性与冷冻冷藏原理	336
第二节 食品冷冻冷藏方法	339
第三节 食品冷藏链与食品安全	349
参考文献	352
第十二章 预冷与快速冻结	353
第一节 果蔬预冷	353
第二节 快速冻结	361
参考文献	373
第十三章 冷库	374

第一节	冷库的分类与容量	374
第二节	土建冷库	377
第三节	装配式冷库	414
第四节	气调式冷藏库	417
	参考文献	422
第十四章	冷藏运输	423
第一节	冷藏运输装置的特点与要求	423
第二节	铁路冷藏车	426
第三节	冷藏汽车	430
第四节	水路冷藏船	433
第五节	冷藏集装箱	433
	参考文献	435
第十五章	家用与商用冷藏设备	436
第一节	家用冰箱	436
第二节	冷柜	449
第三节	陈列柜	455
第四节	冷藏设备的试验	467
	参考文献	472
第十六章	食品的真空干燥	473
第一节	真空干燥原理	473
第二节	真空干燥过程	475
第三节	真空干燥装置	477
第四节	冻干机的制冷系统设计	484
	参考文献	487
第四部分	空调与热泵	489
第十七章	焓湿图和空气的热湿处理过程	490
第一节	湿空气组成和状态参数	490
第二节	湿空气焓湿图	495
第三节	空气与水接触时的热湿交换	501
第四节	常见空气处理过程	504
	参考文献	523
第十八章	集中式空气调节系统	524
第一节	集中式空调系统组成与分类	524
第二节	集中式空调的冷热源	525
第三节	集中式空调的水系统	532
第四节	集中式空调的风系统	539
第五节	集中式空调系统的调试与运行调节	546
	参考文献	554
第十九章	直接蒸发式空调系统	556
第一节	直接蒸发式空调系统特点与分类	556
第二节	房间空气调节器	556

第三节	单元式空气调节机组	566
第四节	多联式空调系统	571
第五节	专用空调机组	580
参考文献	.....	582
第二十章	运载工具的空调系统	584
第一节	汽车空调	584
第二节	列车空调	594
第三节	船用空调	602
参考文献	.....	607
附录	.....	608
附图	.....	609
附表	.....	616

主要符号表

主要符号

符号	符号意义, 单位	符号	符号意义, 单位
A	面积, m^2	n	转速, r/min ; 数量
a	低压与高压级压缩机输气量之比, %	P	功率, W 或 kW
B	大气压力, Pa	p	压力, Pa 或 bar
C	热容量, kJ/K	Q	热量, J 或 kJ
c	比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; 相对余隙容积	q	单位质量热流量, kJ/kg ; 热流密度, W/m^2
COP	性能系数, kW/kW	R	潜热, kJ ; 热阻, $m^2 \cdot K/W$; 气体常数, $J/(kg \cdot K)$
c_p	定压比热, $kJ/(kg \cdot K)$	R_0	通用气体常数, $J/(kmol \cdot K)$
c_v	定容比热, $kJ/(kg \cdot K)$	r	比潜热, kJ/kg ; 半径, m
D, d	直径, m	S	熵, kJ/K ; 活塞行程, m
E	储存能, kJ	s	比熵, $kJ/(kg \cdot K)$
e	偏心距, mm ; 肋片间距, mm	T	绝对温度, K
EER	能效比, kW/kW	t	摄氏温度, $^{\circ}C$; 厚度, m ; 时间, s
F	力, N	$\Delta T, \Delta t$	温差, K 或 $^{\circ}C$
f	循环倍率; 面积, m^2 ; 频率, Hz	U	内能, kJ ; 周长, m
G	质量流量, kg/h 或 kg/s ; 重量, kg	u	比内能, kJ/kg ; 圆周速度, m/s
g	重力加速度, $9.8m/s^2$; 质量, kg	V	体积, m^3 ; 体积流量, m^3/s
H	焓, kJ ; 真空度, Pa ; 高度, m	v	流速, m/s ; 比容, m^3/kg
h	比焓, kJ/kg ; 换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	v_m	质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$
i	数量	W	功, J 或 kJ
K, k	传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	w	比功, J/kg 或 kJ/kg
k	绝热指数	X	辐射角系数
L	长度, m	x	湿蒸气的干度, %
M	质量流量, kg/s	Z	转子齿数; 管排数; 系数
m	质量, kg ; 多变指数; 数量	z	水平管束上、下重叠的排数; 数量
N	压缩腔室对数; 数量	α	放热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; 渐开线初始角, rad

符号 符号意义, 单位

β	渐开线展角, rad
δ	厚度, m
ϵ	制冷系数; 压力比; 修正系数; 黑度
ζ	热力系数
η	效率
λ	导热系数, W/(m·K)
μ	供热系数; 动力黏度, N·s/m
ν	运动黏度, m ² /s
θ	过余温度, °C
ξ	析湿系数; 浓度, kg/kg 或 %
ρ	密度, kg/m ³ ; 浓度, %
σ	传湿系数, kg/(m ² ·s); 斯蒂芬—玻耳兹曼常数, 5.67×10^{-8} W/(m ² ·K ⁴)
τ	肋化系数
Φ	热流量, W 或 kW
φ	容积利用系数
φ_0	空气的相对湿度, %
ψ	热流密度, W/m ² 或 kW/m ² ; 相对偏心距

准则数

Bi	毕渥数
Bo	沸腾特征数
Co	对流特征数
Fo	傅里叶数
Fr	弗劳德数
Gr	格拉晓夫数
Nu	努谢尔特数
Pr	普朗特数
Re	雷诺数

符号

符号意义

下角标

0	蒸发
1, 2,	表示一个系统或一个循环的不同点,
3...	或不同时间间隔
a	空气; 绝热过程
b	沸腾
c	逆卡诺循环; 压缩或冷凝
d	传动
e	蒸发, 电机
f	介质; 肋片; 附加
fou	污垢
g	气体
H	高压级, 高温级
i	指示值, 内部
in	输入, 内部
k	冷凝
L	低压级, 低温级
l	液相
m	平均, 中间, 湿球; 摩擦
o	外部
out	输出; 外部
p	定压; 旁通
r	制冷剂; 浓(溶液)
s, c	再冷
s, h	过热
t	稀(溶液)
th	理论
v	定容; 容积
w	冷却水; 水; 外表面
z	管束

序 论

“制冷”就是使自然界的某物体或某空间达到低于周围环境温度，并使之维持这个温度。人类就是依靠“制冷”，从自然环境开创了人工环境，促进人类文明进步，满足不断发展的要求。当然，随着大量人工环境的需求，也要付出大量的能源环保代价，因而，提出应充分利用自然环境，以减少能源需求，还应创造更优质的人工环境。

人类对环境的需求可以分为两个方面，其一是人类生活生产环境，包括居住环境、交通环境、医疗环境和工农业生产环境；其二是人类饮食的保障，包括冷藏、冻结、保鲜、真空升华干燥和冷藏物流与冷藏链。而从创造人工环境观点而言，则可分为空间人居环境和生产环境。空间人居环境包括人体安全极限环境、工业卫生环境和健康舒适环境，主要是创造健康舒适环境，它涉及生理学和心理学，客观因素和主观因素。生产环境包括生产要求、检测要求和物品储运要求，它纯属客观因素，对环境温湿度要求范围大，对环境参数要求内容广。例如：生产要求热湿控制、有害物控制、甚至恒温恒湿、工业洁净、生物洁净，贮运环境的空气温度范围为 $10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 、甚至空气组分，检测要求空气温度范围可达 $-85\sim 70^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度控制精度可达 2% 、甚至要求变温环境和高低压环境。此外，现代科学的许多部门，如宇宙空间的模拟、高真空的获得、半导体激光、红外线探测以及金属和合金“超电导”的实现，还需要 20K 以下的温度的低温和超低温技术。

实现制冷可以通过两种途径：一是利用天然冷源；另一则是利用人造冷源。

天然冷源时代。《诗经》就有“二之日凿冰冲冲，三之日纳于凌阴”的诗句，《周礼》有“凌人，掌冰正。岁十有二月，令斩冰，三其凌。春始治鉴，凡内外饗之膳羞，鉴焉，凡酒、浆之酒醴亦如之。祭祀，共冰鉴。宾客，共冰。大丧，共夷槃冰。夏，颁冰掌事。秋，刷。”的记载，《艺文志》则有“大秦国有五宫殿，以水晶为柱拱，称水晶宫，内实以冰，遇夏开放。”的记载，所以，公元前 1000 年人类就有计划的存储和应用天然冰，用于食品储存和环境降温。 14 世纪后，冷却混合物出现冰和氯化钠的混合物，用于冻结食品。 16 世纪后出现水蒸发冷却空气。 1890 年左右空气调节获初步发展，既有工业空调又有舒适空调。 1906 年出现“空气调节”名词，从而形成巨大的企业——天然冰的储配，同时实现一些人类所需的温湿环境。

直至 19 世纪中叶开始开创人工环境时代。 1834 年冬第一台乙醚活塞制冷机问世， 1844 年出现空气制冷机， 1859 年出现吸收式制冷机， 1890 年制冰工业开始，从而开创了制冷空调工业。例如： 1911 年Carrier的湿空气图表， 1918 年自动冰箱问世， 1923 年发明食品快速冻结， 1927 年生产出空调器、空气源热泵， 1930 年汽车空调逐渐发展， 1935 年出现卡车自动冷藏装置、飞机发动机低温试验装置。

此外，由于 1928 年制出氟利昂 12 ，人类从采用天然制冷剂迈向采用合成制冷剂，它解决了人类对制冷剂的各种要求。这样，人类从采用天然冰到采用人造冰，从采用天然冷源迈向采用人造冷源，创造出各种人工环境，人类生活发生了重大变化。但是此时，用于

创造人类生活生产环境——也就是空调所需求的制冷量只接近总人工制冷产量的 10%。

直至 20 世纪 70 年代以后，随着科学技术的发展，特别是信息技术的迅猛发展，以及人们对健康舒适环境要求的不断提高，民用与工业空调所消耗的制冷量，达到总人工制冷产量的 60%， “制冷” 展现出 “制冷造福人类”、 “制冷开创未来” 的作用。

“制冷” 领域，可以说包括制冷技术与设备、人工环境、冷藏与冻结以及低温与气体工业。根据制冷温度的不同，制冷技术大体可划分为三类，即

普通制冷：高于 -120°C ；

深度制冷：20K 至 -120°C ；

低温和超低温：20K 以下。

实现人工制冷的方法有多种，按物理过程的不同有：液体气化法、气体膨胀法、热电法、固体绝热去磁法等。不同制冷方法适用于获取不同的温度。

广大从事制冷的技术人员涉及普通制冷范围，主要采用液体气化制冷法，其中以蒸气压缩式制冷、吸收式制冷应用最广。所以，本书重点讲述单级蒸气压缩式制冷技术、系统、装置及其应用，同时，对利用热能制冷的吸收式制冷装置作一般介绍，至于其他各种制冷方法，请阅读有关书籍。

第一部分 / 热工基础

热力学和传热学是制冷技术的基础。该部分分两章分别讲述热力学和传热学的基本概念和基础理论，为制冷技术及其应用奠定基础。

在热力学部分，重点阐述热力学基本定律，包括热力学第一定律和第二定律，明确理想气体及其热力过程，结合蒸气压缩式制冷技术的特点，适当讲述实际气体即制冷剂气液相变过程的特点。

在传热学部分，重点阐述制冷技术中广泛的对流换热和相变换热过程及其规律，结合热量传递基本规律，讲述换热器的基本类型和传热计算方法。

第一章 制冷热力学

第一节 基本概念

将热能转换为机械能的设备统称为热力发动机，简称热机，例如蒸汽机、蒸汽轮机（也称蒸汽透平）、燃气轮机（也称燃气透平）和内燃机（汽油机、柴油机）等皆为热机；而将消耗机械能把低温热源的能量转移到高温热源中去的设备称为制冷机，简称冷机，例如电冰箱、空调器、冷水机组等。

热能和机械能之间的相互转换是通过一种媒介物质在热机中的一系列状态变化过程来实现的，这种媒介物质称为工质。例如空气、水、氨等都是常用的工质，在制冷系统中，通常将工质称为制冷剂。

选取热力系统是热力学分析方法中的首要步骤，选定了热力系统就明确了研究对象所包含的范围和内容，同时也清楚地显示出它与周围事物的相互关系，便于针对热力系统建立定性和定量的关系。

一、系统、边界与外界

1. 系统

为了便于研究与分析问题，将所要研究的对象与周围环境分隔开来，这种人为分隔出来的研究对象，称为热力系统，简称系统。如图 1-1 所示，气缸中虚线包围的气体就是我们的研究对象，则气体便是热力系统。

2. 边界

分隔系统与外界的分界面，称为边界，其作用是确定研究对象，将系统与外界分隔开来。

系统的边界可以是实际存在的，也可以是假想的；可以是固定不变的，也可以是运动的或可变形的。如图 1-1 中的边界就是气缸壁及活塞端部表面等实物界面相一致的实际边界。又如图 1-2 所示，一个真空的容器，当与外界连接的阀门打开时，外界空气在大气压力作用下将流入容器，直至它们的压力与外界大气压力平衡为止。我们可以把大气中流入

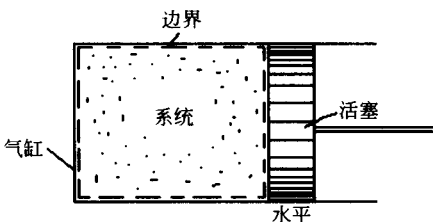


图 1-1 热力系统

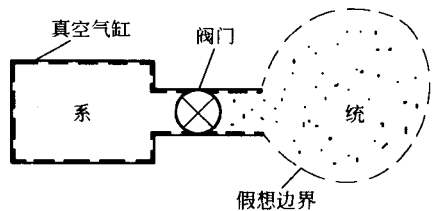


图 1-2 边界可变形系统