

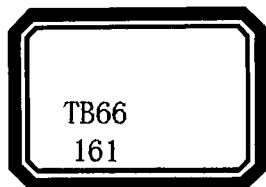


高职高专规划教材

现代空调用 制冷技术

易新 梁仁建 编著





高 职 高 专 规 划 教 材

现代空调用制冷技术

易 新 梁仁建 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书全面系统地阐述了空调用制冷技术的基本原理、主要设备和系统。全书主要包括蒸气压缩式制冷原理、中央空调用冷热水机组、热泵技术、VRV 空调系统、冰蓄冷技术、空调用冷冻站设计等共 14 章,着重介绍了中央空调用的各种先进的冷热水机组的系统结构、油系统及能量调节方法,以及中央空调冷冻站设计的方法步骤。每章后附有本章要点和思考题与习题。

本书可供普通高等学校的本科、大专学生、业余大学和函授大学的学生及专业培训使用,也可供专业技术人员、管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代空调用制冷技术/易新,梁仁建编著. —北京:机械工业出版社, 2003.6

高职高专规划教材

ISBN 7-111-12126-0

I. 现... II. ①易...②梁... III. 空气调节设备—制冷技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 036078 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘小慧 李永联 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:饶 薇 责任印制:路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·14 印张·316 千字

定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是为满足高等教育空调制冷专业的大专以上层次的“制冷技术”课而编写的。全书分 14 章，具有以下几个鲜明的特色：

1. 本书在理论知识方面突出必需、够用的原则，根据毕业生就业岗位所需的知识和技能要求来安排内容，省略了比较陈旧的内容和繁琐的理论分析及部分理论计算，比如制冷剂的化学成分及混合溶液性质、压缩机的零部件细部构成等内容。

2. 本书强调教学内容与实际应用的结合。如在内容的安排上，强调目前中央空调系统中广泛使用的冷水机组，并增加了风冷冷水机组、热泵机组、模块机组等，还介绍了目前使用的最先进的设备。

3. 目前的制冷技术书中，未涉及中央空调系统冷冻站的设计，而这方面内容无论对于从事运行管理、安装检修的人员，还是对于从事制冷空调行业的其他人员，都是必需要了解或者掌握的。所以本书专门以一章的篇幅介绍这一内容，使本教材具有更好的实用性。

4. 在书的内容上尽量体现目前国内本行业的最新发展，比如增加了 VRV 直联式空调系统、冰蓄冷技术、热泵技术等，突出了节能环保的主题。

5. 本书在内容的编排上力图做到将理论知识的讲解与相关的实践环节相结合，比如空调用制冷机房设计部分，以设计步骤为序编写相关内容，更适宜“教、学、做”的三明治式的教学。

6. 按照由浅入深，由易到难，由简到繁的原则编排内容，避免难点集中。本书力求图文并茂，增加了大量的设备图片。

本书由易新（深圳职业技术学院）、梁仁建（广东轻工学院）编写。其中第 3、4、5、6、11、12 章由梁仁建编写，其余章节由易新编写。全书由易新统稿，由重庆大学刘宪英教授审稿。由于编著者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评、指正。

编者

目 录

前言

第 1 章

绪 论	1
1.1 空调用制冷技术基本概念	2
1.2 空调用制冷设备简介	2
1.3 空调用制冷技术发展简介	4
本章要点	6
思考题与习题	7

第 2 章

蒸气压缩式制冷原理	9
2.1 基础知识	10
2.2 单级蒸气压缩式制冷循环	13
2.3 单级蒸气压缩式实际制冷循环热力 计算	15
2.4 单级蒸气压缩式制冷循环实际供冷 系统的主要设备	18
2.5 空调用多级蒸气压缩式制冷循环	19
2.6 工况变化对制冷机性能的影响	21
本章要点	22
思考题与习题	23

第 3 章

制冷剂、载冷剂、润滑油	25
3.1 制冷剂	26
3.2 载冷剂	36
3.3 润滑油	38
本章要点	40
思考题与习题	40

第 4 章

制冷压缩机	41
4.1 制冷压缩机的分类与作用	42
4.2 活塞式制冷压缩机	42
4.3 螺杆式制冷压缩机	51
4.4 滚动转子式制冷压缩机	54
4.5 涡旋式制冷压缩机	56

4.6 离心式制冷压缩机	57
本章要点	61
思考题与习题	61

第 5 章

换热设备	63
5.1 冷凝器	64
5.2 蒸发器	66
5.3 影响冷凝器与蒸发器传热的主要 因素	69
5.4 板式换热器	70
本章要点	71
思考题与习题	71

第 6 章

节流机构与辅助设备	73
6.1 节流机构	74
6.2 辅助设备	81
本章要点	87
思考题与习题	87

第 7 章

冷水机组	89
7.1 冷水机组的分类	90
7.2 活塞式冷水机组	90
7.3 螺杆式冷水机组	95
7.4 离心式冷水机组	101
7.5 涡旋式冷水机组	110
7.6 风冷冷水机组	112
7.7 模块化冷水机组	114
本章要点	115
思考题与习题	115

第 8 章

热泵技术简介	117
8.1 热泵的基本概念及分类	118
8.2 空气源蒸气压缩式热泵的工作 原理	121

8.3 水环路热泵制冷空调系统	125
8.4 热泵技术的发展趋势	127
本章要点	127
思考题与习题	128

第 9 章

整体式空气调节机组	129
9.1 整体式空气调节机组基本概念	130
9.2 整体式空调机组的系统结构与 原理	131
9.3 计算机房恒温恒湿空调机组	135
9.4 除湿机组	137
本章要点	138
思考题与习题	139

第 10 章

直接蒸发式制冷空调系统	141
10.1 直接蒸发式多联空调系统	142
10.2 直接蒸发式 VRV 空调系统	142
本章要点	144
思考题与习题	144

第 11 章

吸收式冷热水机组	145
11.1 吸收式冷热水机组的特点和应用 及发展概况	146
11.2 吸收式制冷原理	146
11.3 溴化锂吸收式冷热水机组的主要 设备结构	148
11.4 远大 VI 型直燃型溴化锂吸收式冷 热水机组设备简介	150
本章要点	153
思考题与习题	153

第 12 章

冰蓄冷空调系统简介	155
12.1 冰蓄冷空调技术基本概念	156
12.2 冰蓄冷空调系统简介	158
12.3 发展冰蓄冷空调系统的意义	163
本章要点	163
思考题与习题	163

第 13 章

空调用冷冻站	165
--------------	-----

13.1 空调用冷冻站水系统	166
13.2 冷冻站系统的主要设备与附件	168
本章要点	175
思考题与习题	175

第 14 章

空调用冷冻站的初步设计	177
14.1 设计用资料的组成	178
14.2 冷负荷的概算方法	179
14.3 冷热源与空调方案的确定	181
14.4 初选空调设备、主机	183
14.5 空调用冷冻站水塔与水泵选型 方法	184
14.6 确定机房面积及用电量等参数	186
14.7 空调用冷冻站其他辅助设备的 选型与设计	187
14.8 空调用冷冻站机房的布置方法	188
14.9 机房平面布置图、机房剖面图、机 房制冷原理图的画法	189
14.10 编制设备明细表和写初步设计说明 书的方法	190
本章要点	191
思考题与习题	191

附录

附表 A 制冷和空调工程中常用计量单位 及其换算	192
附表 B 饱和水和饱和水蒸气的热力性质	192
附表 C 氯化钠水溶液的热物理性质	194
附表 D 氯化钙水溶液的热物理性质	195
附表 E R717 饱和液体和饱和蒸气的热力 性质	197
附表 F R11 饱和液体和饱和蒸气的热力 性质	199
附表 G R12 饱和液体和饱和蒸气的热力 性质	203
附表 H R22 饱和液体和饱和蒸气的热力 性质	205
附表 I R134a 饱和液体和饱和蒸气的热力 性质	207
附表 J 制冷剂的—般特性	208
附图 1 R12 的压焓图	209
附图 2 R22 的压焓图	210

VI 目 录

附图 3 氨的压焓图	211	附图 6 R407c 的压焓图	214
附图 4 R134a 的压焓图	212	参考文献	215
附图 5 R600a 的压焓图	213		

第 1 章

绪 论

- 1.1 空调用制冷技术基本概念
- 1.2 空调用制冷设备简介
- 1.3 空调用制冷技术发展简介

1.1 空调用制冷技术基本概念

随着人民生活水平的不断提高,家用窗式、分体式、甚至于柜式空调器的普及率越来越高。特别是近十几年来随着改革开放的进行,高层、超高层建筑迅速在神州大地上崛起,使服务于这些高档楼宇的中央空调系统也在我国得到迅速发展。与此同时,我国高科技产业也得到大力发展,一些通信、电子产业、高科技的生物工程产业迅速发展,而为之提供工艺环境的中央空调系统更成了其产品品质保证的重要条件。这些空调系统中所用到的制冷设备或部件,是制冷技术在空调领域广泛应用的成果。

制冷技术是指用人工的方法在一定的时间、空间内从低于环境温度的物体中吸取热量,并将热量不断地转移给外界环境,使该物体保持低温的一门科学技术。

由于热量不能自发地从低温物体传向高温物体,所以采用人工制冷的方法必定要消耗一定的能量,如电能、热能、太阳能等。人工制冷的方法有多种,表 1-1 反映了人工制冷的方法及所能达到的温度范围。

表 1-1 人工制冷方法及所能达到的温度范围

人工制冷方法	温度范围	制冷工质	制冷范围
蒸气压缩式制冷 吸收式制冷 ^① 蒸气喷射式制冷 ^②	环境温度 ~ -153.15℃	氟里昂 氨水、溴化锂溶液 碳氢化合物等	普冷
气体绝热膨胀制冷 ^③ 绝热放气制冷 ^④ 半导体制冷 ^⑤ 磁制冷	-153.15 ~ -268.94℃	空气 甲烷 氮气 氧气等	低温
磁制冷 ^⑥	-268.94℃ 以下	氦气等	超低温

注:吸收式制冷、蒸气喷射式制冷和蒸气压缩式制冷都是利用液体气化时要吸热的原理来制冷。

① 吸收式制冷是利用溶液泵来提升压力。

② 蒸气喷射式制冷是利用喷射器来引射气体以提高蒸气的压力。

③ 气体绝热膨胀制冷是利用高压气体膨胀时的吸热来使空间温度降低以实现制冷,它只适用于空调系统和 0℃ 以上的低温水系统。

④ 绝热放气制冷是指在刚性容器中高压气体绝热放气时其温度要降低的原理来制冷。

⑤ 半导体制冷也叫热电制冷,是利用金属的温差电效应,即在两种不同的金属组成的热电偶中通以电流则在不同的结点中产生吸热和放热效应来制冷。

⑥ 磁制冷是利用顺磁性物质绝热去磁的过程中温度会降低的磁热效应来制冷。

空气调节系统所用的人工制冷方法主要是蒸气压缩式制冷和吸收式制冷,所能达到的温度范围也在普冷的温度范围内。

1.2 空调用制冷设备简介

蒸气压缩式制冷机:采用蒸气压缩式的制冷方式,由压缩机、蒸发器、冷凝器及节流机构四大基本部件组成的制冷机。

这种制冷机与风机结合在一起，形成一个整体，可为某个室内环境提供冷风。所以又叫做整体式空调器或空调机组，我们常见的窗式、柜式、分体式空调器都属于这一类设备。

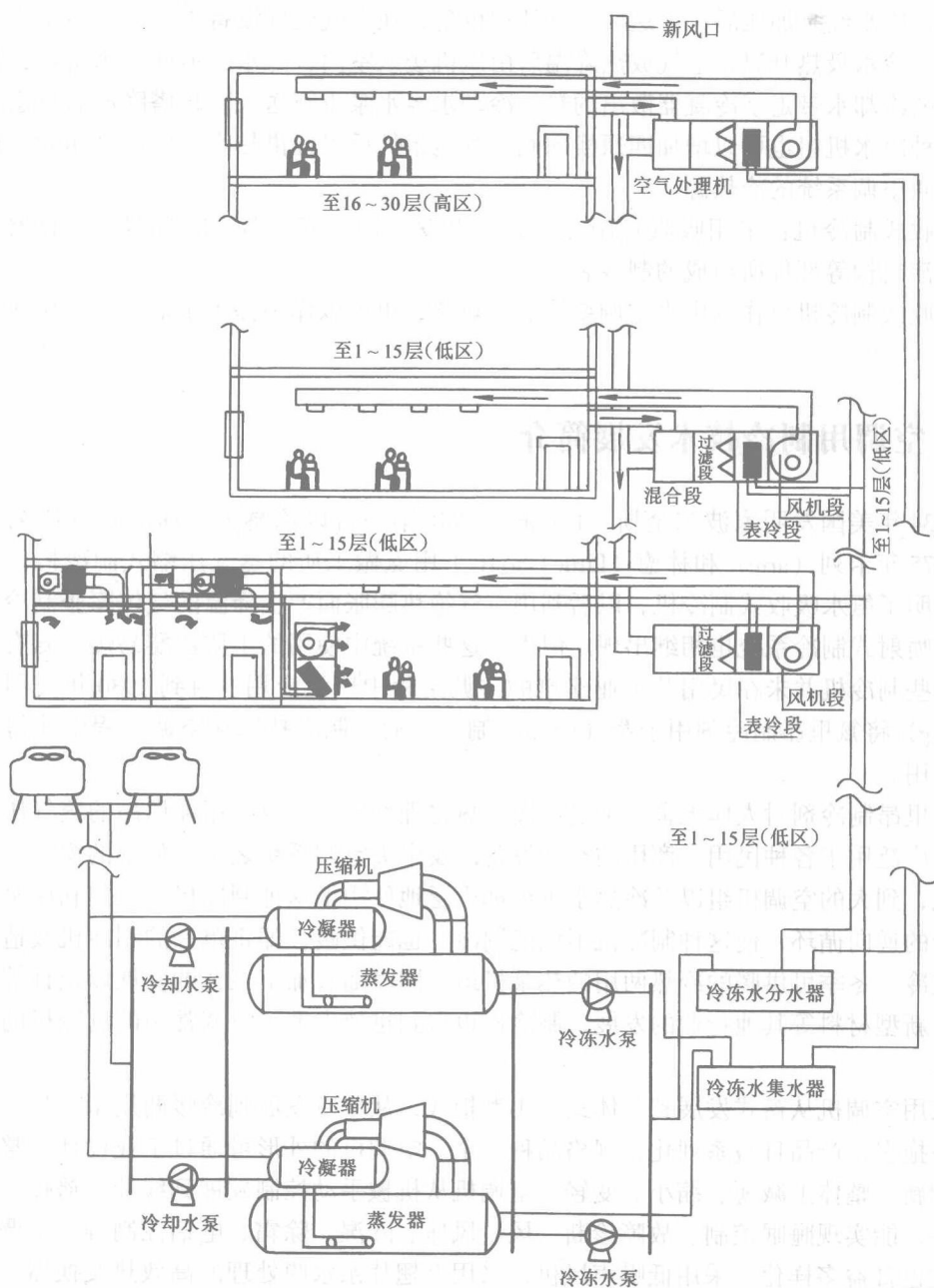


图 1-1 冷水机组供冷示意图

若在该制冷机中增加一个四通换向阀,与风机结合在一起,则既可为室内环境提供冷风,也可以提供热风,所以又叫做冷热两用空调机或风冷热泵机组(见第8章热泵技术简介)。

这种制冷机若用在一个中央空调系统中,与水泵及其他设备一起可为空调系统的其他空气处理设备提供冷水,这种制冷机又称为冷水机组,其供冷示意图如图1-1所示,图中的压缩机、蒸发器、冷凝器与节流机构共同组成的冷水机组将从空气处理设备中返回的冷水降温,冷水经泵加压后,再送回空气处理设备,在空气处理设备中,冷水与室内空气交换热量,冷水吸热升温,空气放热降温后由风机送入室内,冷水又返回冷水机组;从冷却塔流来的冷却水带走了冷凝器散出的热,冷却水经水泵重新送入冷却塔降温后再送入冷凝器。这种冷水机组也可以增加四通换向阀及其他组件后可提供热水,所以又叫做冷热水机组,或叫空调系统的冷热源。

吸收式制冷机:采用吸收式制冷方式,由发生器、蒸发器、冷凝器、吸收器、溶液泵、节流机构等部件所组成的制冷装置。

吸收式制冷机可作为中央空调系统的冷热源,也可以作为提供生活、卫生用热水的设备。

1.3 空调用制冷技术发展简介

1834年美国发明家波尔金斯(Perkins)造出第一台以乙醚为工质的蒸气压缩式制冷机,1875年卡列(arre)和林德(Lirde)造出了用氨做工质的蒸气压缩式制冷机;1859年卡列发明了氨水吸收式制冷机,以后利用空气绝热膨胀而产生降温的气体膨胀制冷系统以及蒸气喷射式制冷系统也相继出现。但由于这些系统中使用的工质乙醚易爆、氨有毒等原因,这些制冷机并未在民用及工业建筑的空调工程中广泛应用。直到1930年美国米杰里(Midleg)将氟里昂制冷剂用于蒸气压缩式制冷机后,制冷技术在空调工程中才得到了广泛的应用。

氟里昂制冷剂对人体无害,不易燃爆、热物理性质好,故采用氟里昂的蒸气压缩式制冷机被广泛用于各种民用、商用的空调设备以及中央空调系统之中,从小的窗式、分体式空调机,到大的空调机组以及冷热水机组都广泛地使用了这种制冷机。人们利用蒸气压缩式制冷的逆向循环,使这种制冷机不仅能制冷,也能供暖,即将单一的制冷机改造成了夏季可供冷、冬季可供暖的冷热两用的热泵机组。同时随着加工工艺的发展以及计算机、微电子、新型材料等其他行业的发展,制冷机也得到迅速发展。空调常用的制冷机的分类见表1-2。

家用空调机从窗式发展到分体式、小型柜式,从单冷发展到冷暖两用型,从一拖一发展到一拖多,产品日益系列化,规格品种齐全。空调机的外形可通过工业设计,整机造型不断翻新,整体上减薄、缩小、变轻。空调机从机械手动控制发展到线控、遥控,控制功能增多,能实现睡眠控制、故障诊断、风量风速、除湿、除霜、电话控制等。空调机的结构形式也日益多样化,采用低噪声风机,采用有翅片亲水膜处理的高效热交换器。换热器采用三折式、五折式以提高换热效率,减小空调机体积。空调机能效比逐渐提高。采用的压缩机从活塞式发展到滚动转子式,近年来涡旋式压缩机、双转子旋转式压缩机也得到了

广泛的应用,极大地提高了空调机的效率,降低了耗电量。近年来变频技术得到迅速推广,采用变频压缩机与智能控制技术相配合,使整个空调机降温快、舒适性好,节约约30%左右,冬季制热效果也好。通过改进室内外风机叶片叶型,加大风机直径降低转速,采用振动小的涡旋式压缩机或双转子旋转式压缩机,采用一系列隔音减振措施,降低了空调机噪声。空调机输送空气品质进一步提高,除了通过增设过滤器,活性炭、光触媒、冷触媒吸收剂来吸收室内空气异味,清除空气之中的灰尘、细菌、有害物质等颗粒外,还增加了负氧离子发生器,增加空调机换气功能,以提高空气品质。另外,为了提高空调的舒适性还采用了立体送风技术,个性化送风技术等等。

表 1-2 常用制冷机分类

制冷机的种类			特点及应用
蒸气压缩机式	容积式	往复式	全封闭式 半封闭式 开启式 生产和使用时间长,维修经验丰富,受工况变化影响小,加工容易,造价低,结构复杂,零配件多,噪声较大,适用于中小制冷量的场合
	回转式	滚动转子式	零部件少,结构简单,运动部件少,噪声低,振动小,运行可靠,效率高,对湿冲程不敏感,可实现无级能量调节,对加工工艺和装配精度要求高,螺杆机油系统复杂,耗油量大,用于中小型制冷量的场合
		涡旋式	
		单螺杆式	
		双螺杆式	
	离心式	开启式	制冷量大,效率高,运行平稳,振动小,噪声低,寿命长,可实现无级能量调节,对工况要求高,在高冷凝温度和低负荷时易发生喘振现象,适用于大型制冷量的场合
		半封闭式	
溴化锂吸收式			机组节电,可利用低品位热能,机组运动部件少,振动小,噪声低,采用无公害工质,能实现无级能量调节,能同时供冷和供暖,也能提供卫生用热水,机组耗气量大,寿命较短,体积较大,用于大型制冷量的场合

大型中央空调系统中的冷热水机组也得到迅速发展。从品种上看,不光有活塞式冷水机组,还有螺杆式、离心式冷水机组。在螺杆式冷水机组中,有双螺杆式、单螺杆式和立式冷水机组。在离心式冷水机中,有单级压缩式的,也有二级、三级压缩离心式冷水机。还有风冷热泵型的冷热水机组、模块化机组,近年来还开发了热回收型的冷水机组和热泵机组。品种多,制冷量范围较大,为客户提供多种选择,从产品的质量上看,随着制造业,机电一体化发展,产品的零部件加工工艺得到较大提高,各厂家还积极研究新型的阀片、叶轮叶片,螺杆齿形等,提高机器的寿命及效率,降低噪声。在润滑方式及能量调节上进一步方便灵活,同时简化系统,缩小机组外形尺寸。随着微电脑技术的发展,各种冷热水机组普遍采用全计算机控制,实现运行管理的全自动化,能自动进行故障诊断、能量调节、资料打印与显示及远程监控。

1987年《蒙特利尔议定书》签订之后,氟里昂中的CPC制冷剂逐步被禁用,使采用

CFC、HCFC 类氟里昂做制冷剂的蒸汽压缩式制冷机面临严峻考验。各厂家一方面要寻找无公害的新制冷剂用于原有的蒸汽压缩式制冷机中实现制冷剂替代, 另一方面, 开发采用其他制冷方式的制冷机。因此, 20 世纪 80 年代到 90 年代, 蒸气喷射式制冷、热电制冷、吸收式制冷得到重视, 尤其是吸收式制冷机发展迅速, 开始被广泛应用于商业、民用、工业的空调工程之中。

溴化锂吸收式制冷机, 有蒸气型、热水型、直燃型, 特别近年来, 直燃机发展迅速, 在民用、商用等建筑的空调工程的冷热源中所占比例日益增加。这几年各吸收式制冷机厂家也做了大量工作, 例如采用高性能的传热管, 减少机组体积与重量。目前吸收式制冷机重量体积比较十年前少了 50% 以上, 采用高性能的自动抽气系统与抽气自动监测装置, 提高了系统真空度, 延长了机组寿命。采用微电脑控制制冷量, 自动防结晶保护, 自动资料认定, 使运行管理简化。在机组制造上所用材料及加工工艺方面都得到很大改善, 为了提高机组效率, 降低燃料消耗, 采用变频电机, 缩短开停机时间。吸收式制冷机已成为中央空调冷热源的一个重要组成部分。

随着城市用电白天与夜晚的峰谷差日趋增大, 为了均衡用电负荷, 提高供发电设备的利用率和能效, 同时也为了提高空调系统的整体能效, 大温差供冷送风的蓄冷空调得到迅速发展。在蓄冷空调中, 尤其以冰蓄冷空调发展应用较快。冰蓄冷空调系统, 采用双工况的制冷机和冰盘管完全冻结式、冰球式、容器式等蓄冰设备, 以及板式热交换器和水泵等, 实现了制冰工况、供冷工况、融冰供冷工况之间的转换。采用蓄冷空调之后, 可以减少制冷机容量, 节省运行费用, 制冷机启动次数也可减少, 从而延长机器的寿命, 同时可以实现大温差供冷, 有利于改善室内空气品质。

随着能源供应趋于紧张, 另一项节能的热泵技术在空调工程中得到广泛应用。热泵技术不仅通过切换制冷循环能实现冬季供热, 更重要的是它能利用废水热量、廉价电力及其他低品位的能源。热泵有水源热泵、地源热泵、空气源热泵; 有蒸汽压缩式, 也有吸收式等多种类型。美国是最早研究利用热泵技术的国家, 20 世纪 60 年代初安装热泵机组近 8 台, 到 20 世纪 90 年代空气源热泵近 114 万台。欧洲、日本也在能源危机之后, 迅速发展热泵技术。我国从 20 世纪 80 年代起, 先后自行设计了第一台空气水热泵、吸收式热泵等, 到 20 世纪 90 年代热泵型房间空调器占空调器年产量的 6%, 热泵型冷水机组的产量及质量与欧美相比尚有一定的差距。近年来地源热泵由于其节能和环境保护方面的优势在一些发达国家得到发展和应用, 我国也将大面积使用地源热泵和一些采用天然清洁能源的空调设备。

总之, 随着人们节能、环保意识的增强和对室内环境舒适性要求的提高, 空调用制冷技术配合其他新兴的科学技术将会有更加广阔的发展前景。

本章要点

1. 制冷技术的定义
2. 人工制冷方法及所达到的温度范围
3. 构成制冷机的主要部件
4. 空调用制冷技术发展简要历史及近年来的研究方向

思考题与习题

1. 什么叫人工制冷技术?
2. 人工制冷的温度分为几个区域?
3. 制冷机由哪几部分组成?
4. 查阅有关参考书并回答蒸气喷射式制冷、膨胀制冷、半导体制冷、磁制冷的基本原理。
5. 简要说明目前空调用制冷技术的发展方向。

第 2 章

蒸气压缩式制冷原理

2

- 2.1 基础知识
- 2.2 单级蒸气压缩式制冷循环
- 2.3 单级蒸气压缩式实际制冷循环热力计算
- 2.4 单级蒸气压缩式制冷循环实际供冷系统的主要设备
- 2.5 空调用多级蒸气压缩式制冷循环
- 2.6 工况变化对制冷机性能的影响

2.1 基础知识

2.1.1 描述工质的状态参数及状态变化过程

蒸气压缩式制冷系统由压缩机、冷凝器、节流机构、蒸发器等四大部件组成，各部件间由管道相联结，并充注制冷剂。制冷剂在这四大部件内循环流动，在压缩机内从低压气体被压缩变为高压气体，在冷凝器中冷凝放热变为高压饱和液体，经过节流机构之后变为低压的气液混合物，在蒸发器内吸热气化变为低压蒸气后再进入压缩机，伴随着制冷剂的状态变化，制冷系统与外界环境进行了能量交换，消耗了外界输入的功，实现了将热量从低温环境向高温环境的转移。

1. 状态参数

描述制冷剂状态变化的参数主要有：温度、压力、比体积、内能、熵、焓等，主要的状态变化过程有绝热压缩、定压冷凝、节流、定压气化等。

(1) 温度：温度是表示物体冷热程度的一个物理量。若两个物体温度相等，则不发生热量的交换。温度的表示方法称为温标。国际单位制中采用热力学温标，用 T 表示，单位为 K，常用的还有摄氏温标，用 t 表示，单位为摄氏度 $^{\circ}\text{C}$ ，它们间的换算关系如下：

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

物体温度的高低常用温度计来测量，常用的温度计有水银温度计、铂电阻温度计、热电偶温度计等。

(2) 压力：压力是表示均质的液体或气体对其容器壁的单位面积上的垂直作用力的一个物理量，又称为压强。压力（强）用符号 p 表示，单位为 Pa。

表示容器内工质压力的大小有下列几种方法：

绝对压力 p ——容器内工质的实际压力，在热力计算中所用到的压力均为绝对压力。

表压力 p_g ——由压力表测出的压力。一般指高于大气压的相对压力。

真空度 p_v ——由真空计测出的压力。一般指低于大气压的相对压力。

大气压 p_b ——因地球上空的大气质量所造成的压力，是气压计指示的压力。

绝对压力 p 、表压力 p_g 、真空度 p_v 与大气压 p_b 之间的关系如下：

$$p = p_b + p_g (\text{当 } p > p_b \text{ 时})$$

$$p = p_b - p_v (\text{当 } p < p_b \text{ 时})$$

压力通常由各种测压计来测定，常用的有 U 形管测压计、比压计、微压计等。

(3) 比体积与密度：比体积是表示单位质量的工质所占的体积大小的一个物理量。比体积用小写的英文字母 v 表示，单位符号为 m^3/kg 。

密度是表示单位容积中所容纳的工质的质量多少的一个物理量。密度用字母 ρ 表示，单位符号为 kg/m^3 。

比体积与密度呈倒数关系：

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

式中， V ——工质所占总容积 (m^3)；