

制冷与空调应用技术丛书

# 制冷空调基础知识

韩宝琦 编著

科学出版社

2001

## 内 容 简 介

本书主要介绍制冷与空调技术的基本概念、基础知识,深入浅出地阐述了制冷与空调技术中必须掌握的热力学、传热学和流体力学的基本知识和原理,对制冷剂、载冷剂及空气调节等专业性知识做了详细介绍,同时对各种制冷的机理及方法进行了剖析。书中还对现有制冷剂对环境的污染、大气臭氧层破坏的现状与动态,以及制冷剂替代动向等敏感问题做了翔实的论述。

本书可供从事制冷与空调的技术人员、维修人员、培训班学员学习,亦可供制冷专业的有关院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

制冷空调基础知识/韩宝琦编著.-北京:科学出版社, 1999.7

(制冷与空调应用技术丛书)

ISBN 7-03-006727-4

I.制… II.韩… III.①制冷-基本知识②空气调节-基本知识 N.TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 11557 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1999年7月第一版 开本:787×1092 1/32

2001年4月第二次印刷 印张:7 3/8 插页:1

印数:4 001—6 000 字数:157 000

定价:12.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 《制冷与空调应用技术丛书》编委会

- 主 编** 杨 磊
- 副主编** 俞炳丰 王天富 陶慰祖 黄 翔  
张华俊 买宏金
- 编 委** (按姓氏笔画为序)
- |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 马鸿鸣 | 王天富 | 史美耀 | 刘卫东 |
| 买宏金 | 米新生 | 李安桂 | 李树林 |
| 李夏莉 | 李振斋 | 李彩琴 | 连之伟 |
| 杨启华 | 杨栓平 | 杨 磊 | 张子慧 |
| 张华俊 | 张 欧 | 张景春 | 郑爱平 |
| 哈 文 | 赵 忭 | 赵家禄 | 俞炳丰 |
| 南晓红 | 陶海澄 | 陶慰祖 | 黄清华 |
| 黄 翔 | 韩宝琦 |     |     |

## 序 言

随着国民经济与科学技术的发展,以及人民生活水平的提高,制冷空调技术的应用日益广泛,相应从事这一技术的教学、科研、生产、工程等从业人员也日益增多。为了适应形势发展的需要,有关制冷空调的教学用书、专著、工程手册、期刊杂志、科普书籍等陆续问世,但至今尚未发现一套既偏重应用又成系列的制冷与空调技术方面的丛书,鉴于此,西安制冷学会编写了《制冷与空调应用技术丛书》。

由于制冷与空调技术应用的领域较宽,所以我们挑选了较常应用的内容进行组织编写,全书共 13 分册,每一分册都由学术水平较高且有丰富实践经验的专家撰写。在撰写过程中,他们不仅介绍了国内外的先进技术、设备,以及使用、维修的知识和宝贵经验,同时还提出了自己的见解。由于作者水平所限,书中缺点及不足之处在所难免,尚希读者批评指正。

西安制冷学会理事长

西安建筑科技大学教授 杨磊

1999 年 4 月

# 前 言

制冷与冷却是两个不同的概念。冷却可以自发地进行,但高温物体的温度不可能降低到低于环境介质(空气)的温度。所谓制冷,就是把某一物体或空间(包括空间内的物体)的温度降低到低于环境介质的温度,并保持这一低温状态的过程。为了达到这一目的,就应不断地将该物体或空间的热量以及由外界传入或内部产生的热量转移到外界环境中去。这是一个非自发过程,需要消耗外界能量(电能、机械能、热能等)进行补偿。为实现热量由低温传至高温这一过程所需要的设备称为制冷机。制冷机中使用的工作介质称为制冷剂。制冷剂在制冷机中循环流动。

空气调节顾名思义是对空气的参数进行调节,使室内空气的温度、湿度、流动速度及清洁度等参数维持在一定范围内,以满足生产工艺或人们对舒适环境的需求。因而空气调节又分为工艺性空调和舒适性空调两大类。

制冷技术与空调技术是两个密切相关的学科。空气调节是制冷技术的重要应用方面之一。

制取冷量的方法很多,可归纳为利用天然冷源和人工制冷两大类。

利用天然冷源(如冬天贮冰、深井水)可达到获取较低温的目的,但它受季节、地区、贮存条件等限制,一般只能制取 $0^{\circ}\text{C}$ 以上的低温,远不能满足生产和科研的需要。

人工制冷的的方法主要有相变制冷、气体膨胀制冷、热电制

冷等。相变制冷是利用物质由液态变为气态时的吸热效应来获取冷量的。例如,用酒精擦皮肤或游泳刚上岸,人体都有凉爽感觉,其原因都是因为酒精(液)或水汽化时吸取了人体热量而产生凉感所造成的。在标准大气压下,1kg液氨汽化时可吸收1371kJ的热量,且气体温度低达 $-33.4^{\circ}\text{C}$ ;如果将压力降为870Pa,水在 $5^{\circ}\text{C}$ 下即可沸腾,吸收2489kJ/kg的热量。由此可知,只要选择合适的物质,创造合适的气体条件(如压力),就可获得不同的低温并吸取不同的热量。

气体膨胀制冷是将高压气体作绝热膨胀,使它的压力、温度下降,利用降温后的气体来吸取被冷却物体的热量,从而达到制冷的目的。

热电制冷又称温差电制冷或半导体制冷。它是建立在珀尔帖效应原理上的。如果把两种不同材料的一端彼此连接起来,另一端接上直流电源,则一端将会产生吸热(制冷)效应,另一端产生放热效应。

目前,在制冷与空气调节技术中,相变制冷方法占绝对优势。根据补偿过程的不同,它又可分为蒸气压缩式、吸收式、蒸气喷射式、吸附式等四种制冷方式,其中又以蒸气压缩式和吸收式制冷应用最为普遍。因此,本书将从热力学观点重点介绍和分析蒸气压缩式和吸收式制冷的原理及其循环过程。

制冷技术是从19世纪中叶开始发展起来的,早在1834年,美国人波尔金斯试制成功了第一台以乙醚为工质、闭式循环的蒸气压缩式制冷机。1844年,美国医生高里建立了第一座空调室。1875年,林德提出了氨蒸气压缩式制冷机。1918年,美国工程师考布兰发明了世界上第一台家用电冰箱。1930年,密其莱首次发现了氟利昂,它给制冷技术带来了新的变革,使氟利昂制冷机得到飞速发展。但近年来,由于发现部分

氟利昂工质(CFC<sub>s</sub>)对大气臭氧层有严重破坏作用,对人类赖以生存的环境造成严重威胁,因此提出了禁用 CFC<sub>s</sub> 类氟利昂。开发研究新的无污染的制冷剂已成为国内外的研究课题。可以预见,它将进一步促进制冷与空调技术的发展。

早在 3000 多年前,我国人民就已开始利用天然冷源来获取低温,即在冬季采集、贮藏天然冰,出现了冰窑、冰房,供夏季使用。到了唐朝,已开始生产冰镇饮料。目前,国内已拥有遍布全国的制冷与空调机生产企业,它的应用早已渗透到国民经济的各个部门及人民的日常生活之中。它主要应用于食品的冷加工、冷藏及冷藏运输;工艺性空调或舒适性空调;工业生产中的某些生产工艺过程;产品低温性能试验;建筑业(如冻土法开采土方);医药生产及医疗卫生。此外,农牧业、轻工业、文化体育事业、微电子技术、卫星通信、激光、红外技术等学科领域,均需应用制冷技术。

全书由西安建筑科技大学刘咸定教授审校,在此致以真挚的谢意。

由于作者水平有限,而且成稿时间较短,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1999 年 5 月

# 目 录

## 序 言 前 言

1 热工基础 .....	1
1-1 热力学基础 .....	1
1-1-1 工质的热力状态参数 .....	1
1-1-2 热能与比热 .....	4
1-1-3 基本热力过程和状态方程 .....	6
1-1-4 热力学基本定律在制冷技术中的应用 .....	9
1-1-5 逆向可逆循环 .....	11
1-1-6 物质的集态与集态变化 .....	12
1-1-7 溶液的基本性质 .....	16
1-1-8 溶解与结晶、吸收与解析 .....	17
1-1-9 稳定流动下溶液的混合和节流 .....	18
1-2 传热学基础 .....	19
1-2-1 传热的基本方式 .....	19
1-2-2 传热过程及传热系数 .....	21
1-2-3 传热温差的计算 .....	25
1-3 流体力学基础 .....	30
1-3-1 流体的主要物理性质 .....	30
1-3-2 管内稳定流动连续性方程 .....	30
1-3-3 流体稳定流动能量守恒 .....	31
1-3-4 流体流动的阻力 .....	32

<b>2</b>	<b>制冷原理</b> .....	34
2-1	各种制冷方法 .....	34
2-1-1	蒸气压缩式制冷 .....	34
2-1-2	吸收式制冷 .....	36
2-1-3	蒸气喷射式制冷 .....	37
2-1-4	固体吸附式制冷 .....	39
2-1-5	热电制冷 .....	42
2-1-6	气体制冷机 .....	44
2-1-7	涡流管制冷 .....	46
2-2	蒸气压缩式制冷循环 .....	47
2-2-1	单级蒸气压缩式制冷循环 .....	47
2-2-2	热泵循环 .....	82
2-2-3	多级压缩及复叠式制冷循环 .....	85
2-3	溴化锂吸收式制冷机 .....	95
2-3-1	溴化锂-水溶液 .....	95
2-3-2	溴化锂吸收式制冷机原理 .....	102
2-3-3	溴化锂吸收式制冷机的性能及特点 .....	116
<b>3</b>	<b>制冷剂与载冷剂</b> .....	122
3-1	制冷剂概述 .....	122
3-1-1	对制冷剂的要求 .....	122
3-1-2	制冷剂的种类及分类 .....	124
3-1-3	制冷剂编号表示方法 .....	125
3-1-4	制冷剂的选择及使用安全技术 .....	127
3-2	常用制冷剂的性质 .....	130
3-2-1	氨(R717) .....	130
3-2-2	氟利昂 .....	131
3-2-3	碳氢化合物 .....	136

3-3	混合制冷剂 .....	137
3-3-1	共沸混合制冷剂 .....	137
3-3-2	非共沸混合制冷剂 .....	138
3-4	CFC <sub>s</sub> 的禁用、限制与替代动态 .....	139
3-4-1	问题的提出 .....	139
3-4-2	CFC <sub>s</sub> 的限用与禁用 .....	140
3-4-3	家用电冰箱与空调器中的制冷剂替代动向 .....	142
3-5	载冷剂 .....	145
3-5-1	对载冷剂的要求 .....	146
3-5-2	常用载冷剂 .....	146
3-5-3	蓄冷剂 .....	155
4	空气调节基本原理 .....	158
4-1	湿空气的性质 .....	158
4-1-1	空气调节的任务 .....	158
4-1-2	湿空气的组成及基本状态参数 .....	159
4-2	湿空气的 $h-d$ (比焓-含湿量) 图及其应用 .....	163
4-2-1	焓湿图的构成 .....	164
4-2-2	$h-d$ 图的应用 .....	165
4-2-3	空气状态变化过程在 $h-d$ 图上的表示 .....	177
4-3	空调房间热、湿负荷的组成 .....	182
4-3-1	室内、外空气计算参数 .....	182
4-3-2	空调房间热、湿负荷的组成 .....	186
	参考文献 .....	188
	附录一 部分制冷剂的热力性质表 .....	189
	表 1 NH <sub>3</sub> 饱和液体及蒸气的热力性质 .....	189
	表 2 R22 饱和液体及蒸气的热力性质 .....	192
	表 3 R134a 饱和状态下的热力性质 .....	195

表 4	R12 饱和液体及蒸气的热力性质 .....	197
表 5	饱和水及饱和水蒸气的热力性质 .....	200
表 6	我国主要城市空调室外空气计算参数 .....	202
表 7	湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓(大气压力 $B=101325\text{Pa}$ ) .....	203
图 1	$\text{NH}_3$ 的 $p-h$ 图 .....	206
图 2	R22 的 $p-h$ 图 .....	207
图 3	R134 <sub>a</sub> 的 $p-h$ 图 .....	208
图 4	R12 的 $p-h$ 图 .....	209
图 5	LiBr-H <sub>2</sub> O 溶液的 $h-\xi$ 图(1) .....	210
图 6	LiBr-H <sub>2</sub> O 溶液的 $h-\xi$ 图(2) .....	211
图 7	湿空气焓湿图( $B=101325\text{Pa}$ )(插页)	
<b>附录二</b>	<b>国际单位制、工程单位制与英制的换算 .....</b>	<b>212</b>
表 1	压力单位换算 .....	212
表 2	能量单位换算 .....	213
表 3	功率单位换算 .....	214
表 4	换热系数及传热系数单位换算 .....	214
表 5	导热系数单位换算 .....	214
表 6	冷量单位换算 .....	214
表 7	动力粘度单位换算 .....	215
表 8	运动粘度单位换算 .....	215
<b>附录三</b>	<b>产品介绍.....</b>	<b>216</b>

# 1 热工基础

## 1-1 热力学基础

### 1-1-1 工质的热力状态参数

在热力工程中,决定物质状态的物理量称为物质的热力状态参数。基本的热力状态参数有温度、压力和比容。

#### (1) 温度

温度是衡量物体冷热的尺度。从微观的观点看,温度是物质分子热运动平均动能的度量。衡量温度高低的尺度称温标。目前国际上通用的温标有摄氏温标和绝对温标两种类型。

摄氏温标是指把在 1 个标准大气压下纯水的冰点定为  $0^{\circ}\text{C}$ ,沸点定为  $100^{\circ}\text{C}$ ,在这个温度区间划分 100 等分,每一等分称为 1 度,单位以  $^{\circ}\text{C}$  表示。常用符号为  $t$ 。

绝对温标又称热力学温标,其每一度的大小与摄氏温标相等,但起点是以物质内分子热运动完全停止时的温度 ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) 作为零点,叫做绝对零度。单位以 K 表示,常用符号为  $T$ 。

绝对温度与摄氏温度之间的换算关系是:

$$T = t + 273.15 \approx t + 273(\text{K}) \quad (1-1)$$

在欧美国家,经常采用“华氏温标”来表示物质温度的高低。它是把在 1 个标准大气压下纯水的冰点定为  $32^{\circ}\text{C}$ ,沸点定为  $212^{\circ}\text{C}$ ,中间分成 180 等分,以符号 F 表示其单位。摄氏温度  $t$  与华氏温度  $t_1$  之间的换算关系是

$$t_1 = \frac{9}{5}t + 32(\text{F}) \quad (1-2)$$

$$t = \frac{5}{9}(t_1 - 32)(\text{C}) \quad (1-3)$$

**例 1-1** 摄氏 37°C 相当于多少绝对温度及华氏温度?

**解**  $T = 37 + 273.15 = 310.15(\text{K})$

$$t_1 = \frac{9}{5} \times 37 + 32 = 98.6(\text{F})$$

温度常用温度计测量。常用温度计有液体(水银、酒精等)温度计、电阻温度计、热电偶温度计等。使用时可根据温度范围、精度要求选择不同量程及不同类型的温度计。

## (2) 压力

容器中大量气体分子撞击容器壁面形成了气体对壁面的作用力,压力就是单位面积的容器壁面上所受的垂直力,用符号  $p$  表示。

压力的单位为牛顿/米<sup>2</sup>(N/m<sup>2</sup>),称为帕,符号为 Pa。由于 Pa 的单位很小,故工程上又常以千帕(kPa)、兆帕(MPa)或巴(bar)表示。它们之间的关系为

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa} = 10\text{bar}$$

工程单位制中,常以 kgf/cm<sup>2</sup>(工程大气压)、mmHg(毫米汞柱)、mmH<sub>2</sub>O(毫米水柱)等单位表示。它们之间的换算关系如下:

$$\begin{aligned} 1\text{kgf/cm}^2 &= 735.6\text{mmHg} = 10^4\text{mmH}_2\text{O} = 9.81 \times 10^4\text{Pa} \\ &= 98\text{kPa} = 0.098\text{MPa} \end{aligned}$$

包围在地球表面一层很厚的大气层对地球表面所造成的压力称为大气压力,简称大气压,用符号  $B$  表示。大气压的大小随所处地理位置、海拔高度及气候条件的不同而改变。工程上常将大气压看作 1 个工程大气压或 0.1MPa,即  $B = 1\text{kgf/}$

$\text{cm}^2$ , 或  $B=0.1\text{MPa}$ 。

压力通常用压力表、真空表、液柱高度等来测量,其读数称为表压力。

直接指明物质施于容器壁面上的压力,称为绝对压力。图 1-1 所示是用液柱的高度来表示容器中压力的相对值。

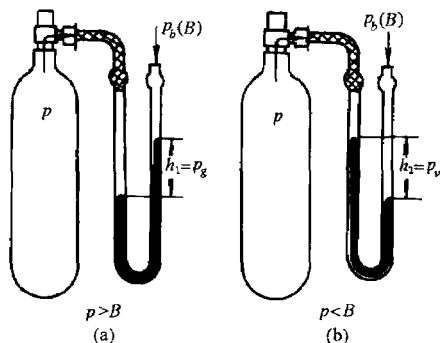


图 1-1 用液柱高度表示容器中压力值

图 1-1(a)表示容器中的气体压力(绝对压力) $p$ 比外界大气压力 $B$ 大了 $h_1$ 的液柱高度,高出的这部分压力称为表压力,用 $p_g$ 表示,它们之间的关系是

$$p = B + p_g \quad (1-4)$$

图 1-1(b)表示容器中的气体压力 $p$ 比外界大气压力 $B$ 低了 $h_2$ 的液柱高度,这段高度称为真空度,用 $p_v$ 表示,它们之间的关系是

$$p + p_v = B \quad (1-5)$$

表压力 $p_g$ 和真空度 $p_v$ 都是相对值,只有绝对压力 $p$ 才是真正的说明工质状态的热力参数值。

绝对压力、表压力、真空度和大气压力之间的关系如图

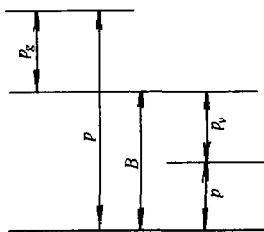


图 1-2 绝对压力、表压力和真空度的关系图

1-2 所示。

绝对压力的数值不能简单地直接测量出来,工程实际中常用压力表测得其表压力,而工程计算及查阅图表时又必须采用绝对压力值,因此,由压力表测得的读数必须换算成绝对压力。

**例 1-2** 已知表压力为 0.26 MPa,问其绝对压力是多少?

**解**  $p = p_{\text{表}} + 0.1 = 0.26 + 0.1 = 0.36(\text{MPa})$

**例 1-3** 如果绝对压力为  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ ,其真空度为多少毫米汞柱?

**解** 
$$p_v = (1 - p) \times 735.6 = (1 - 0.1) \times 735.6 = 662.04(\text{mmHg})$$

### (3) 比容

1kg 的物质所占据的体积称为该物质的比容,用  $v$  表示,单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

设有  $m(\text{kg})$  的物质占据的体积为  $V(\text{m}^3)$ ,它的比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-6)$$

工程上还常用到比容的倒数,即单位容积中所容纳的物质质量,称为该物质的密度,用符号  $\rho$  表示,单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。即

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-7)$$

## 1-1-2 热能与比热

### (1) 热能

热是能量的一种形式。热能是物质分子热运动强度的度

量。热量是依靠温差传递的能量。热量用符号  $Q$  或  $q$  表示，其单位是焦耳(J)或千焦耳(kJ)。1J 是指 1 牛顿(N)力的作用下产生 1m 位移所需要的能量。

工程上也常用工程单位制卡(cal)或千卡(大卡,kcal)来作为热量的单位,1kcal 指 1kg 纯水温度升高或降低  $1^{\circ}\text{C}$  所吸收或放出的热量。千卡与千焦耳之间的换算关系是

$$1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ}$$

## (2) 比热

单位质量的物质,温度每升高或降低  $1^{\circ}\text{C}$  所需加入或放出的热量称为该物质的比热,以符号  $C$  表示。单位是  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,工程上也常用  $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$  表示。

气体在加热或冷却过程中,如果保持压力不变,则其比热称为定压比热,用符号  $C_p$  表示;如保持容积不变,则称为定容比热,用符号  $C_v$  表示。

气体在定压加热时,吸收的热量一方面使气体本身温度升高,另一方面还要克服外力而膨胀做功,所以单位质量的气体温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  时要比定容加热吸收的热量多,即  $C_p > C_v$ 。

气体的定压比热与定容比热之比称为气体的绝热压缩指数,用  $k$  表示,即

$$k = C_p/C_v \quad (1-8)$$

不同物质的比热及绝热指数均不相同。表 1-1 列出几种物质在常温下的定压比热。

某物体的质量为  $m\text{kg}$ ,定压比热为  $C_p[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,当温度从  $t_1^{\circ}\text{C}$  定压下升高到  $t_2^{\circ}\text{C}$  时,物体吸收热量为

$$Q = mC_p(t_2 - t_1)(\text{kJ}) \quad (1-9)$$

若热量  $Q$  为物体每小时吸收或放出的热量,则热量  $Q$  的单位就应写成  $\text{kJ}/\text{h}$  或  $\text{W}, \text{kW}$  等,它们之间的关系为  $1\text{J}/\text{s} = \text{W}$ 。

表 1-1 某些物质的定压比热

名称	$C_p$ [kJ/(kg·K)]	名称	$C_p$ [kJ/(kg·K)]
水	4.19	铝	0.92
空气	1.0	R22(0℃、液态)	1.18
冰	2.26	R22(0℃、饱和气态)	0.64
铜	0.39	氨(0℃、液态)	4.60
钢	0.46	氨(0℃、饱和气态)	2.72

1kJ/s=kW。用工程单位制表示则为 kcal/h。两者之间关系是

$$1\text{kW} = 860\text{kcal/h}$$

$$1\text{kcal/h} = 1.163\text{J/s} = 1.163\text{W}$$

通常把物体的比热  $c$  与它的质量  $m$  的乘积叫做物体的热容量,它表示该物体温度升高或降低 1℃时所吸收或放出的热量。

### 1-1-3 基本热力过程和状态方程

制冷是依靠制冷剂的状态变化来实现的。制冷剂的每一状态取决于基本热力状态参数压力、温度和比容。这三个参数是相互关联的,具有一定的关系式(状态方程式)。

工程上多用压-容图(又称  $p$ - $v$  图)来表示工质在状态变化中  $p, v$  参数之间的关系。下面我们依据气体工质的  $p$ - $v$  图来讨论几个典型的热力过程,并导出理想气体状态方程式。

#### (1) 等容过程

一定量的理想气体,如果在容积不变(即  $v$ =常数)的情况下加热,压力与温度都将发生变化,它们之间的关系符合下列关系式: