

化学工人自学丛书



化工单元操作

制冷原理及设备

中国化工学会科普工作委员会组织编写
顾延安 编

5.3

化学工业出版社

化学工人自学丛书

化工单元操作

制冷原理及设备

中国化工学会科普工作委员会组织编写

顾延安 编

化学工业出版社

内 容 提 要

本书着重叙述了制冷的热力学基础、制冷压缩机的工作原理、蒸汽压缩式制冷循环的分析与计算、制冷装置系统及其设备。还对制冷装置的运行及安全技术进行了适当讨论。另外，对蒸汽喷射式和吸收式制冷的工作原理和应用情况，本书也作了简要的介绍。

本书可作为制冷工人培训教材或业余教育教材，也可供制冷技术人员以及从事化工、化纤、石油化工、食品工业和医药生产等有关人员参考。

化学工人自学丛书

化工单元操作

制冷原理及设备

中国化工学会科普工作委员会组织编写

顾延安 编

责任编辑 朱 东

封面设计 季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $6 \frac{3}{4}$ 插页2 字数139千字

1988年10月第1版 1988年10月北京第1次印刷

印 数 1—7,400

ISBN 7-5025-0086-3/TQ-48

定 价 2.00元

《化学工人自学丛书》

出版说明

为了普及化工生产技术知识及理论知识，提高我国化工企业广大工人的科学技术水平，以适应加速实现化学工业现代化的需要，特组织编写出版这套《化学工人自学丛书》。

这套丛书的内容包括化学、化工技术、基础理论以及化工生产工艺和设备，并反映当代新技术、新工艺、新设备、新材料。叙述力求深入浅出，理论联系化工生产实际，便于自学。根据化学工业多行业、多工种的特点，本丛书除分册出版无机化学、有机化学、化工生产原理等基础理论和基础技术读物外，还将陆续出版主要化工生产的工艺操作、主要化工设备机器的安装和检修、生产分析、化工仪表及自动化等方面的图书。

本丛书主要供化工企业具有初中以上文化程度的工人和其他有关人员自学。通过自学，达到或接近中等专业学校毕业的水平。也可作为各化工企业的技工学校教学参考书和考工评级的参考读物；还可供化工中等专科学校教师和学生学习参考。

前 言

提高全国人民的科学文化水平是实现我国社会主义现代化建设的当务之急。化学工业及化工类型生产的操作工，在进行安全教育及熟悉工艺流程与反应条件，能按操作规程于本岗位进行熟练操作后，都必须进一步地具备化工单元操作知识。

化工单元操作是从各种化工生产过程中，将以物理变化为主的处理方法，概括出其共同特点的基本操作。其内容可归纳为：流体流动过程；传热过程；传质过程，机械过程等操作。目前这方面的书籍大都是各级教材，内容侧重于理论和计算。这套化学工人自学丛书中的《化工单元操作》则以具有初中水平的在职操作工为对象，使他们以多年实践经验，结合化工单元操作的理论学习，可提高生产操作水平，而且可应用本岗位的数据，验算设备能力，既能挖潜，又能避免超负荷运转，做到心中有数。

由于我们初次组织编写这类图书，缺点与不妥之处在所难免，希广大读者提出宝贵意见，以便今后再版时修订。

拟出版的这套《化工单元操作》书有：《化工计算》、《流体输送》、《传热及换热器》、《蒸馏和吸收》、《萃取》、《干燥》、《冷冻》。

目 录

绪论	1
第一章 制冷的热力学基础	4
第一节 工程热力学的基本知识	6
一、工质的基本状态参数	6
二、理想气体状态方程式	11
三、热量与功量的计算	15
四、工质的导出状态参数	20
五、绝热过程的初、终态参数关系式	26
六、能量方程式	28
第二节 蒸汽的性质和热力图表	33
一、液体的汽化	34
二、定压下蒸汽的形成过程	38
三、蒸汽的状态参数确定和热力图表	45
第三节 绝热节流过程	54
一、节流过程的一般分析	54
二、理想气体的节流过程	56
三、蒸汽的节流过程	57
四、液体的节流过程	58
第二章 制冷压缩机的工作原理	60
第一节 单级活塞式制冷压缩机的工作原理	60
一、单级活塞式压缩机的循环分析	61
二、单级活塞式压缩机的理论功量	64
三、单级活塞式压缩机的实际示功图	65
第二节 制冷压缩机的生产能力	66
一、活塞排量和理论输汽量	66
二、实际输汽量和输汽系数	67
第三节 多级压缩与级间冷却	69
第四节 活塞式制冷压缩机的功率计算	73

第五节 离心式制冷压缩机的工作原理	75
一、单级离心式制冷压缩机	76
二、多级离心式制冷压缩机	77
第三章 制冷循环的分析与计算	81
第一节 蒸汽压缩式制冷的工作原理	81
第二节 制冷剂	84
第三节 单级蒸汽压缩式制冷循环的分析与计算	88
第四节 单级蒸汽压缩式制冷装置的制冷量与工况的关系	102
第五节 两级蒸汽压缩式制冷循环	108
一、一次节流中间完全冷却循环	111
二、一次节流中间不完全冷却循环	114
第六节 复迭式制冷循环	118
第七节 蒸汽喷射式制冷	123
第八节 吸收式制冷	125
一、氨—水吸收式制冷	126
二、溴化锂—水吸收式制冷	128
三、氨水吸收—扩散式制冷	133
第四章 制冷装置系统及其设备	139
第一节 制冷装置系统	139
一、单级压缩氨制冷装置系统	139
二、两级压缩制冷装置系统	144
第二节 制冷装置的辅助设备	147
一、冷凝器	147
二、蒸发器	151
三、贮液桶	159
四、油分离器	160
五、集油器（贮油器）	164
六、空气分离器	164
七、紧急泄氨器	168
第三节 载冷剂系统	168
一、载冷剂的性质	169
二、载冷剂系统	172
第四节 低温设备和管道的隔热	175

第五章 制冷装置的运行及安全技术	178
第一节 制冷装置的运行参数分析	178
第二节 制冷装置的故障及排除	183
第三节 制冷装置的安全技术	186
参考文献	190
附录	191
附表 1 氨的热力性质表	191
附表 2 F-12的热力性质表	192
附表 3 氨的单位容积制冷量 q_v (千卡/米 ³)	194
附表 4 F-12的单位容积制冷量 q_v (千卡/米 ³)	195
附表 5 立式和V型氨压缩机的输汽系数 λ	196
附表 6 立式和V型F-12压缩机的输汽系数 λ	196
附图 1 氨的温—焓图	插页
附图 2 氨的压—焓图	插页
附图 3 F-12的压—焓图	插页

绪 论

制冷是指人为地控制某一空间的温度低于周围环境介质的温度，这里所说的环境介质就是指自然界中的空气和水。环境介质的温度高于某空间的温度，根据热量由高温物体自发地传给低温物体的客观规律，则必然有热量不断地往该空间传递，为了使该空间内物体达到并保持所需的低温温度，就得不断地从某空间取出热量并转移到环境介质中去，这种使热量从低温物体转移到高温物体的过程，叫做制冷过程。要实现上述目的，可以有二种途径：天然制冷和人工制冷。

所谓天然制冷是指利用深井水和天然冰等天然冷源对某物体进行冷却以达到一定的低温温度，如用深井水防暑降温 and 用天然冰冷藏食品，这种方法至今还在使用。这种天然制冷的特点是简单、价廉，但得到的温度通常不低于 0°C ，而且还受季节和地区的限制，也不易控制和调节。由于天然制冷远不能满足人民生活、工业生产和科学实验对低温条件提出的要求，所以人工制冷技术便随着国民经济和科学技术的发展而发展起来。所谓人工制冷就是以消耗机械能或其它形式的能量为代价使某空间达到并保持所需的低温温度。其所用的设备，叫做制冷装置。

目前人工制冷技术的应用十分广泛。例如工业、民用建筑的空调装置，商业及家用的食品冷藏，产品的性能试验和科学研究，石油、化工、化纤、纺织、造纸和医药生产，以及现代技术都需要人工制冷。

根据所要获得的低温温度，习惯上把人工制冷技术分为普通冷冻（普通制冷）和深度冷冻两个体系。一般把制取温度高于 -100°C 的称为普通制冷，而低于 -100°C 的称为深度冷冻。必须指出，深度冷冻技术实质上就是气体的液化分离技术，本书不涉及这方面的内容。

普通制冷的的方法很多，一般都是利用液体在低温下蒸发吸热来实现制冷，这种制冷称为蒸汽制冷。蒸汽制冷可以分为蒸汽压缩式、蒸汽喷射式和蒸汽吸收式三类，本书主要讨论应用较为普遍的蒸汽压缩式制冷。

为了使读者了解要学好《制冷工程》，必须学习一些热力学基础知识，所以下面对蒸汽压缩式制冷过程先作简略介绍。

如图0-1所示，蒸汽压缩式制冷装置由压缩机、冷凝器、

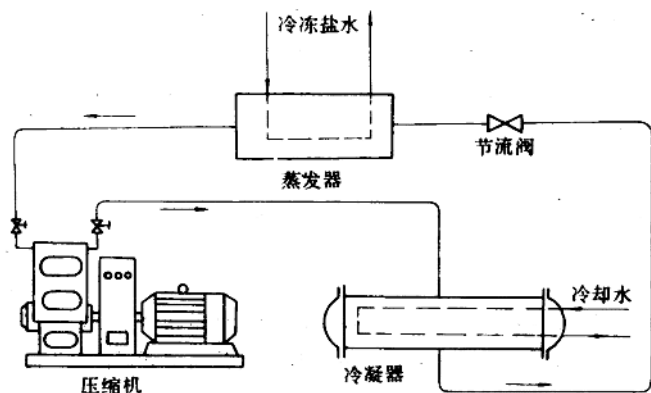


图 0-1 蒸汽压缩式制冷装置示意图

节流阀（或称膨胀阀，调节阀）和蒸发器等四个主要设备组成。这些设备由管道联接组成一个封闭系统。在系统中注有一种能够实现制冷的工作物质，一般称它为制冷剂，如氨和

氟利昂等。

蒸汽压缩式制冷装置在工作时是这样来实现制冷的：压缩机将蒸发器内出来的低压低温制冷剂蒸汽吸入汽缸内进行压缩，使蒸汽的压力和温度均不断升高，待压力稍大于冷凝器内压力时，就将高压高温制冷剂蒸汽排入冷凝器。在冷凝器中，高压高温制冷剂蒸汽在定压下（即压力不变的情况下）把热量传给温度较低的冷却水后，而自身凝结成液体。该制冷剂液体（高压高温）经节流阀膨胀降压降温后进入蒸发器。在蒸发器中，低压低温制冷剂液体在定压下吸收冷冻盐水的热量再汽化为蒸汽。此时冷冻盐水受到冷却，其温度降低，这样便达到了制冷目的。从蒸发器出来的低压低温制冷剂蒸汽又被压缩机吸走，如此循环制冷。通常我们把制冷剂蒸汽在冷凝器中的凝结温度叫做冷凝温度；把制冷剂液体在蒸发器中的沸腾温度叫做蒸发温度。

由上可知，显然制冷过程是一种比较复杂的物理变化过程，它包括物态变化（汽化、冷凝）和状态变化（压缩、膨胀）。这些属于热力学的内容，我们将在本书第一章中作适当介绍。

第一章 制冷的热力学基础

为了说明热现象的本质，我们对分子运动的概念作一粗浅的介绍。

打开盛有汽油或酒精的瓶塞子，很快就可以闻到汽油或酒精的气味。在氨制冷车间，由于系统有泄漏，常常会闻到氨的臭味。把蓝墨水滴入一杯清水中，经过一段时间后，整杯水都会变成蓝色。由于各种物质都是由分子组成的，所以上述这些现象称为分子扩散。扩散是分子由浓度较大的地方向浓度较小的地方运动的现象。

分子扩散现象说明组成物质的分子在不停地运动着。由于分子太小，不易直接观察到它的运动情况。但是通过实验可以间接地了解到物质的分子运动是无规则的，它的运动情况和悬浮在空气中灰尘的运动差不多。

1827年英国植物学家布朗，用显微镜观察到悬浮在水中的植物微粒（例如花粉），不停地在作无规则的运动，这种现象叫布朗运动。那么布朗运动是怎样产生的呢？因为水分子本身是在不停地无规则运动着，所以花粉微粒受到水分子的碰撞而不断改变运动方向，这样就造成花粉微粒的运动也是不规则的。

从布朗运动实验还发现，水温愈高，花粉微粒的运动愈剧烈。这说明水分子运动的剧烈程度与水的温度有关。于是得出结论：温度高，物质分子的运动速度快，其平均动能就大；温度低，物质分子的运动速度慢，其平均动能就小。所

以通常用温度作为衡量物质分子平均动能大小的尺度。

物体作机械运动，就会产生机械能。由此可想，物质分子无规则的运动，也必然会产生某种能量，这就是热能，所以物质分子运动也叫热运动。

热能可以由这个物体转移到另外一个物体，热能和机械能还可以相互转换。热能由高温物体转移到低温物体是自发进行的，例如杯中的热水会自发地将热量传给周围的空气。相反，热能由低温物体转移到高温物体是不可能自发进行的，但是若消耗一定的能量（例如机械能或其他能量），则可以使热能由低温物体转移到高温物体中去，例如冷藏库要保持一定的低温，就需要用制冷装置将库内的低温热能不断地转移到冷却水或大气中，然而制冷装置工作时要消耗一定的能量。

热能转移时的度量，叫做热量。工程上热量的单位是千卡或大卡。按规定1千卡是指1公斤纯水在1物理大气压下，温度由19.5℃升高到20.5℃所需加入的热量。

由上可知，热不能脱离物质而存在。因此，要实现热能和机械能的相互转换，就必须利用某种工作物质，这种物质叫做工质。例如在汽油机中，汽油和空气燃烧产生的热能变为机械能是靠高压高温燃烧气体膨胀来实现的；又如在制冷压缩机中，把加入的机械能变为热能是靠压缩制冷剂蒸汽来实现的。由于气体和蒸汽既具有流动性，又具有膨胀和压缩能力，所以它们是实现热能和机械能相互转换的最好工质。另外，要实现热能的转移过程，也需要利用工质。例如在冷凝器中利用冷却水吸热使氨蒸汽凝结成为液氨；在蒸发器中利用低温液氨汽化吸热来冷却盐水。

本章的任务是分析研究工质（气体和蒸汽）的热力性质

以及热能和机械能相互转换的客观规律，其目的为学习第二章和第三章打好基础。

第一节 工程热力学的基本知识

一、工质的基本状态参数

前面已经述及，在制冷系统中，制冷剂蒸汽（工质）由低压、低温经压缩机压缩变为高压、高温，这表示制冷剂蒸汽的状态发生了变化，而压力和温度这两个物理量的数值大小标志着制冷剂蒸汽所处的一个确定的状态。我们把用来描述工质状态特征的某些物理量，叫做工质的状态参数。在工程热力学中，气体工质的状态参数有压力、比容、温度、内能、焓和熵等六个。其中压力、比容和温度可以直接或间接地用仪器测量出来，称为基本状态参数；而其余参数，因都取决于基本状态参数，所以称为导出状态参数。下面先对基本状态参数逐个加以讨论：

1. 压力

压力是指工质对单位面积容器壁的垂直作用力。压力的符号用 P 表示。压力的工程制单位有公斤力/厘米²，公斤力/米²，毫米汞柱，毫米水柱，和米水柱等，1公斤力/厘米²的压力称为1工程大气压，因此

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤力/厘米}^2 \\ &= 10000 \text{ 公斤力/米}^2 \end{aligned}$$

在物理学上，把地球纬度45°地区海平面上大气的年平均压力定为标准大气压，亦叫物理大气压，它的值等于1.0332公斤力/厘米²，因此

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= 1.0332 \text{ 公斤力/厘米}^2 \\ &= 10332 \text{ 公斤力/米}^2 \end{aligned}$$

显然,物理大气压略大于工程大气压,而工程大气压是为了在工程上应用简便起见而制定的,故除非特别指明外,工程计算上一般所用的大气压均指工程大气压而言。

测量工质的压力 P 也可以用水柱或汞柱的高度来表示。如图1-1所示, f 表示容器的底面积, h 表示液柱的高度, γ 表示液体的重度,即 1米^3 液体的重量,则液柱的重量 $G = f \cdot h \cdot \gamma$ 。如用 F 表示液柱作用在底面积 f 上的总压力,则 $F = P \cdot f$ 。若不计液面上的大气压力,则 $F = G$, 即

$$P \cdot f = f \cdot h \cdot \gamma$$

经整理后得 $P = h \cdot \gamma$ 或 $h = \frac{P}{\gamma}$ (1-1)

水的重度为 1000公斤/米^3 , 汞的重度为 13593.9公斤/米^3 , 这样相当于 1 工程大气压和 1 物理大气压的水柱和汞柱高度分别为 (按 $h = \frac{P}{\gamma}$)

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 10 \text{ 米水柱} \\ &= 1 \times 10^4 \text{ 毫米水柱} \\ &= 0.7356 \text{ 米汞柱} \\ &= 735.6 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= 10.332 \text{ 米水柱} \\ &= 1.0332 \times 10^4 \text{ 毫米水柱} \\ &= 0.76 \text{ 米汞柱} \\ &= 760 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

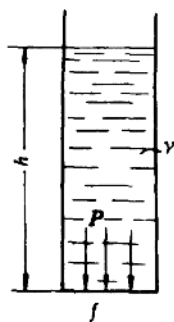


图 1-1 用液柱高度表示压力

测量容器中工质的压力有两种情况:

a、若容器中工质的绝对压力（即压力的绝对值）比外界的大气压力 B 高，则可用压力表来测量。由于压力表的表盘上刻度“零”表示外界大气压力 B ，所以压力表所测得的压力读数为高于外界大气压力 B 的部分，通常叫表压力，以符号 $P_{\text{表}}$ 表示，所以容器中工质的绝对压力为

$$P = B + P_{\text{表}} = B + h_1\gamma \text{ (见图 1-2a 所示)} \quad (1-2)$$

b、若容器中工质的绝对压力 P 比外界大气压力 B 低，则可用真空表来测量。由于真空表的表盘上刻度“零”亦为外界大气压力 B ，所以真空表所测得的压力读数为低于外界大气压力 B 的部分，通常叫真空度，以符号 $P_{\text{真}}$ 表示，所以容器中工质的绝对压力 P 为

$$P = B - P_{\text{真}} = B - h_2\gamma \text{ (见图 1-2b 所示)} \quad (1-3)$$

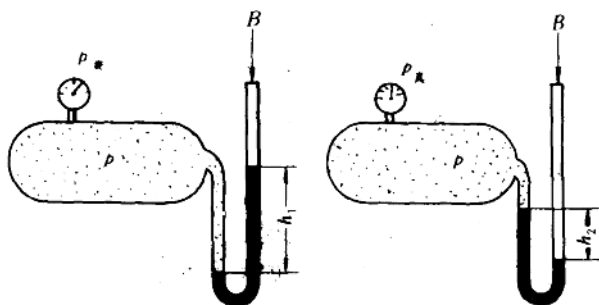


图 1-2 压力换算关系示意图
(a) 高于大气压 (b) 低于大气压

必须指出，在工程计算中除非另加说明，一般所指的压力，均指绝对压力而言，而压力的单位总是用公斤力/米²。另外，由于外界大气压力 B 随着各地区海拔高度不同而变化。

例如，北京、天津地区的大气压力约为760毫米汞柱，兰州地区的大气压力为635毫米汞柱，而拉萨市的大气压力为487毫米汞柱，等等。因此在工程计算中，当压力较高时，可以把大气压力 B 取为1工程大气压，这样所引起的计算误差可以忽略不计，但当压力较低时则会引起较大的误差。

在国际单位制 (SI) 中，压力的单位用“帕斯卡”简称 (Pa)，或用巴 (bar) 来代替上述所有的压力单位。

$$1 \text{ 帕 (Pa)} = \frac{1 \text{ 牛顿 (N)}}{\text{米}^2 (\text{m}^2)} = 1 \left(\frac{\text{kgm/s}^2}{\text{m}^2} \right) \\ = 1 (\text{kg/ms}^2)$$

或 $1 \text{ 巴 (bar)} = 10^5 \text{ Pa}$

2. 比容

1公斤的工质所占有的容积叫做比容，用符号 v 表示，其单位是米³/公斤。如果用 V 表示 G 公斤工质所占的容积，则该工质的比容为

$$v = \frac{V}{G} \text{ 米}^3/\text{公斤} \quad (1-4)$$

1米³工质的重量叫做重度，用符号 γ 表示，其单位是公斤/米³。重度的表达式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-5)$$

根据上面二式的关系得出

$$v = \frac{1}{\gamma} \text{ 或 } \gamma = \frac{1}{v} \quad (1-6)$$

3. 温度

温度表示物体的冷热程度。根据气体分子运动的理论，温度乃是物质分子热运动平均动能的一种表现，而温度的高