

制冷工程设计手册

本书叙述了制冷技术的理论基础，详细地介绍了活塞式压缩制冷、离心式压缩制冷、溴化锂吸收式制冷和氨吸收式制冷的基本原理、设备、管道、隔热及制冷站的设计计算方法、数据、图表等，并列举了一些计算实例和站房设计方案。书中还介绍了低温环境试验设备、冷藏库的设计和计算方法，对制冷用自控仪表、元件和制冷设备的安装、运行、维护也作了简要的介绍。

另附制冷剂热力性质图壹袋

制冷工程设计手册

《制冷工程设计手册》编写组

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

开本：787×1092毫米^{1/16} 印张：66 插页 21 字数：1606千字

1978年9月第一版 1978年9月第一次印刷

印数：1—20,580册 定价：7.40元

统一书号：15040·3403

前 言

随着我们伟大祖国的社会主义革命和社会主义建设日益蓬勃的发展，制冷工程在各个领域——工业、农业、商业、运输以及科学研究中，充分显示出它的重要作用，在生产上和生活上已经成为不可缺少的建设项目。

为了适应我国建设事业不断发展的需要，尽量给有关设计单位提供必要的设计资料，我们编写了这本《制冷工程设计手册》，供从事制冷工程设计的广大工农兵、技术人员以及高等院校有关专业的师生使用参考。

本书的选材和内容，主要是从我国的实际情况出发，总结我们自己的实践经验，同时根据“洋为中用”的方针，适当地选用了一些对我国有参考价值的国外资料。为了使初学的广大工农兵容易阅读，我们是围绕着制冷站工艺设计所需要的知识，理论联系实际，以实用为主加以阐述的。

本书介绍的是压缩式制冷和吸收式制冷，至于蒸汽喷射制冷已有专著出版（蒸汽喷射制冷设计手册，中国建筑工业出版社，1972年出版），故未纳入。

为便于读者工作中应用，本书附有“制冷剂热力性质图”三十七幅（另袋装），随书发行。

本书是由第七机械工业部第七设计院、第二机械工业部第七设计院、第三机械工业部第四设计院、第四机械工业部第十设计院、石油化工部化工设计院、商业部设计院、第一机械工业部通用机械研究所和第六机械工业部第九设计院等八个单位有关专业人员参加编写的。在编写过程中，虽经集体讨论，亦向有关单位征求了意见，并作了多次修改，但由于我们调查研究不够，手册还不能完全反映我国制冷工程的成就和水平，书中还会存在不少缺点和错误，请读者批评指正，以便修订再版时，不断充实完善。

本书在编写过程中，曾得到很多工厂、设计院、使用单位、高等院校和许多同志的大力支持、帮助，他们提供了不少技术资料和宝贵意见，在此谨致谢意。

《制冷工程设计手册》编写组

一九七六年三月

目 录

第一章 制冷原理	1
第一节 制冷的热力学基础	1
第二节 传热学基础	16
第三节 制冷循环	36
第二章 制冷剂与载冷剂	40
第一节 制冷剂	40
第二节 载冷剂	160
第三章 活塞式制冷压缩机及辅助设备的选择计算	185
第一节 压缩机的实际工作过程及制冷工作系统	185
第二节 单级制冷压缩机及辅助设备的选择计算	194
第三节 双级制冷压缩机及辅助设备的选择计算	232
第四节 复叠式制冷压缩机及辅助设备的选择计算	264
第五节 载冷剂系统的确定和设备选择计算	290
第四章 活塞式压缩制冷站设计	300
第一节 活塞式压缩制冷站工艺设计	300
第二节 制冷管道设计	317
第三节 活塞式制冷装置的安装及试运转	386
第五章 离心式制冷机	418
第一节 离心式制冷机的原理	418
第二节 离心式制冷机的选择设计	454
第三节 离心式制冷机的流程和构造	487
第四节 离心式制冷机的特性和调节	515
第五节 离心式制冷机的站房设计和安装	541
第六节 离心式制冷机的运转和维护	563
第六章 氨吸收制冷	568
第一节 氨吸收制冷原理	568
第二节 氨吸收制冷工艺设计	582
第三节 设备计算和选择	598
第四节 氨吸收制冷装置的特性与控制	649
第五节 氨吸收制冷系统和安装	655
第六节 运行与操作	660
第七章 溴化锂吸收式制冷机	670
第一节 溴化锂吸收式制冷机的简况及特点	670
第二节 溴化锂吸收式制冷机的工作原理和循环	671
第三节 溴化锂吸收式制冷机的型式、结构、参数及热工计算	673
第四节 溴化锂水溶液	690
第五节 溴化锂吸收式制冷机的腐蚀及防腐蚀	700
第六节 不凝性气体对溴化锂吸收式制冷机性能的影响和抽气系统	705
第七节 溴化锂吸收式制冷机的试验方法	706

第八节	溴化锂吸收式制冷机的性能调节	711
第九节	制冷站的设计和施工安装	715
第十节	溴化锂吸收式制冷机的运转调试及维护保养	722
第十一节	两级发生的溴化锂吸收式制冷机	729
第八章	冷却水	736
第一节	冷却水供水系统的分类及选择	736
第二节	循环供水系统冷却构筑物的类型及工艺结构介绍	737
第三节	冷却构筑物的选择及布置	751
第四节	冷却构筑物的运行及维护	754
第五节	循环水泵房设计	756
第六节	冷、热集水池设计	764
第七节	冷却水管道设计与计算	765
第八节	冷却水的水质稳定处理	768
第九章	制冷设备和管道的隔热	772
第一节	隔热(保冷)的目的和意义	772
第二节	隔热工程的热工计算	773
第三节	隔热材料和辅助材料	778
第四节	隔热结构各层的作用、材料选择、构造和施工	802
第五节	材料耗用量的计算表	827
第六节	隔热工程施工用的机具和工具	839
第十章	低温低压环境试验装置	842
第一节	概述	842
第二节	低温低压环境试验室(箱)结构	843
第三节	低温低压环境试验室(箱)冷负荷计算	893
第四节	低温空气冷却器	895
第五节	消耗制冷剂	902
第六节	双级低温制冷系统	903
第七节	复叠低温制冷系统	909
第八节	真空系统	912
第九节	低温低压环境试验设备的自动控制	918
第十一章	食品冷藏库库房制冷设计	924
第一节	食品冷藏库概述	924
第二节	冷藏库库房制冷设备设计	928
第三节	食品冷藏库库房容量、耗冷量和制冷设备计算	943
第四节	制冰设备	958
第五节	食品冷藏库库房制冷系统设计	965
第六节	冷藏库对各专业的设计要求	973
第十二章	检测仪表与控制装置	989
第一节	检测仪表	989
第二节	控制装置	999
附录		1029
	制冷剂热力性质图(袋装)	

第一章 制冷原理

第一节 制冷的热力学基础

一、基本定义

(一) 温度

温度是物体冷热程度的度量，从微观的观点来看，温度是物质分子热运动平均动能的度量。它是确定物质状态的基本参数之一。

在热力学中规定温度读数的方法，称为温标。

温标的规定是选取某种物质两个恒定的温度点，在这两个基准点之间分成若干等分，称为度。由于某种物质的不同和温度数等分的不同，所以有好几种温标。

摄氏温标：它是把水的凝固点定为 0° ，沸点定为 100° ，中间分成 100 等分，以符号 $^\circ\text{C}$ 表示，以 t 代表其读数。

华氏温标：它是以水的凝固点定为 32° ，水的沸点定为 212° ，中间分成 180 等分，以符号 $^\circ\text{F}$ 表示，也用 t 代表其读数。

这种温度刻度的分法，其缺点是温度计的度数随物质(水、水银和酒精)的种类而变，其测温性质随温度的变化而异。为此，根据热力学第二定律制定了热力学温度分法，称为绝对温标。

绝对温标：以摄氏温标为根据，利用理想气体定律外推到气体分子热运动停止的状态，把这个状态的温度定为零度，这样定出的温度称为绝对温度。以符号 $^\circ\text{K}$ 表示，以 T 代表其读数。

绝对温度和摄氏温度之间的关系是：

$$T = t + 273.16 \text{ }^\circ\text{K}$$

或用近似值表示：

$$T = t + 273 \text{ }^\circ\text{K}$$

摄氏温度和华氏温度之间的换算关系是：

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

$$t = \frac{5}{9}(t_1 - 32) \text{ }^\circ\text{C} \quad (1-2)$$

(二) 热能

热是自然界能量的一种形式，热能是物质分子热运动强度的度量。热量是物质热能转移时的度量。热能是可以随物质运动由这种形态转换成另一种形态的能量。也可随着运动由这个物体传到另一个物体。所以热量只有在热能转移过程中才有意义。计量热量的单位是卡或千卡。按规定 1 千卡是指 1 公斤纯水在标准大气压下，自 $+19.5^\circ\text{C}$ 加热至 $+20.5^\circ\text{C}$ 所需加入的热量。同样，如将 1 公斤水与上述相同条件下冷却时，也需移去相等的热量。

热能与机械能及电能的当量关系是：

$$1 \text{ (千卡)} = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

$$1 \text{ (千瓦)} = 860 \text{ 千卡/小时}$$

$$1 \text{ (马力)} = 632.3 \text{ 千卡/小时}$$

若将相等重量的不同物体，从同一初温加热或冷却至相同的终温，所需加入或放出的热量是不相等的，加入或放出热量的多少，称为物体的热容量(简称热容)。不同物体的热容是不相等的，这与其物理性质不同有关。

(三) 比热

单位物量的物质(譬如 1 公斤)加热时，温度升高 1 度所需加入的热量，称为物质的比热，以符号 (c) 表示，单位是(千卡/公斤·°C)。一些物质和一些气体的比热列于表 1-1 和表 1-2。

一些物体的比热

表 1-1

物 质	比 热 (卡/克·°C)	物 质	比 热 (卡/克·°C)	物 质	比 热 (卡/克·°C)	物 质	比 热 (卡/克·°C)
锌	0.094	铁	0.115	软木	0.49	甘油	0.58
铝	0.22	铅	0.031	木材	0.60	挥发油	0.70
金	0.031	硫磺	0.18	木炭	0.20	石油	0.50
银	0.056	玻璃	0.20	大理石	0.21	机械油	0.40
铜	0.094	焦炭	0.20	乙醚	0.54	盐 酸	0.60
锡	0.056	冰	0.50	酒精	0.58	硫 酸	0.34

一些气体的比热与比热比

表 1-2

名 称	定压比热(c_p) (千卡/公斤·°C)	定容比热(c_v) (千卡/公斤·°C)	比 热 比 $K=c_p/c_v$	名 称	定压比热(c_p) (千卡/公斤·°C)	定容比热(c_v) (千卡/公斤·°C)	比 热 比 $K=c_p/c_v$
空气	0.2375	0.1690	1.40	过热蒸汽	0.4905	0.3460	1.41
氧气	0.2175	0.1550	1.40	二氧化碳	0.2170	0.1535	1.41
氮气	0.2438	0.1727	1.41	氢	0.5080	0.3003	1.69
氢气	3.4090	2.4122	1.41	二氧化硫	0.1553	0.1246	1.25
氩气	0.125	0.0746	1.68	硫化氢	0.2530	0.1920	1.32

气体的比热，由于物量单位取法的不同，经历过程的不同以及温度范围的不同，所以有不同名称的比热。

1. 重量比热、容积比热和莫尔比热：工程上气体的单位可以取为 1 (公斤)；1 (标准米³)或 1 (莫尔)，相应地有重量比热“ c (千卡/公斤·°C)”；容积比热“ c' (千卡/标准米³·°C)”或莫尔比热“ μc (千卡/莫尔·°C)”。因为 1 莫尔物质重 μ (公斤)，而且不管什么气体总是占 22.4(标准米³)的容积。从而可知：

$$\mu c = 22.4 c' \text{ 千卡/莫尔} \cdot \text{°C}$$

2. 定压比热和定容比热：气体在压力不变或容积不变的过程中的比热，分别称为：定压比热 c_p (千卡/公斤·°C) 和定容比热 c_v (千卡/公斤·°C)。气体在定压下受热，由于在温度升高的同时，还要克服外界抵抗力而膨胀作功，所以同样升高 1 (°C)，比在定容下受热

时需要更多的热量。因而比热 $c_p > c_v$ ，二者之比 $K = c_p / c_v$ 称为绝热压缩指数或比热比。表 1-2 列出了一些气体的比热和比热比。

3. 真实比热和平均比热：由实践得知，压力和比容对气体的比热影响不大，往往可忽略不计，而温度对气体的比热影响显著，可以用下式表示：

$$c = a + bt + ct^2 + \dots \text{ 千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C} \quad (1-3)$$

式中 a, b, c 等都是实验确定的常数，除非温度很高，一般都可以把气体的比热当作温度的线性函数来处理。

即：
$$c_p = a_p + bt; \quad c_v = a_v + bt$$

例如：空气可按下式计算：

$$c_p = 0.2377 + 0.00004466t \text{ 千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$c_v = 0.1692 + 0.00004466t \text{ 千卡/公斤} \cdot ^\circ\text{C}$$

这种相应于每一个温度下的比热称真实比热，因此，气体由温度 t_1 升高到 t_2 所需的热量可由下式计算：

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = \bar{c}_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \text{ 千卡/公斤}$$

式中 $\bar{c}_{t_1}^{t_2}$ 称为该气体在 t_1 和 t_2 温度范围内的平均比热，简写为 \bar{c} 。当 $c = f(t)$ 是线性关系时，则 \bar{c} 为 $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ 时对应的比热 c 。

(四) 压力

压力是物质垂直作用在其边界单位面积上的力，它是确定物质状态的基本参数之一。在普通物理学中称为压强，在工程上称为压力。

压力的单位在工程热力学的计算中用公斤/厘米²，称为工程气压(简称气压)。此外，还有用毫米汞柱、毫米水柱作为压力单位的。它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2 = 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10^4 \text{ 毫米水柱}$$

在物理学中有物理气压，按规定等于 760 毫米汞柱或等于 1.0332 工程气压。

物质在容器内的压力，在实际应用中两种不同的表示方法。一种是直接指明物质施于容器壁上压力大小的实际数值，称为“绝对压力”。另一种是指明用压力表测量这一压力时在压力表上的读数，称为“表压力”。分别记作 P_j 和 P_b 。当绝对压力高出于当时当地的大气压力时，有下列关系式：

$$P_j = B + P_b \quad (1-4)$$

式中 P_j ——绝对压力；

B ——当时当地大气压力值；

P_b ——表压力。

当容器内物质的绝对压力比当时当地的大气压力还低时，表压力是一个负值。这时我们只取它的绝对值，称为“真空度”，记为 H 。

即：

$$P_j = B - H$$

这样可以看出，绝对压力的数值一般不能简单地直接测出来。压力表或压力计所读出的压力，是计量容器内绝对压力与当时当地大气压之间的差额。很明显，只有绝对压力才能真正说明工质状态的热力参数。但是，只有大气压力可以用专门的“大气压力计”直接来

测得。

(五) 比容

1 公斤的物质所占据的总体积，称为某物质的“比容”。比容是确定物质状态的基本参数之一。比容与压力、温度有关。当压力一定时，物质在不同的温度下有不同的比容；同样，当温度一定时，在不同的压力下也有不同的比容。

设有 G (公斤) 物质占据的总体积为 V (米³)，其比容为：

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

比容的倒数，即单位容积中所容纳的物质重量，称为“重度”，以符号“ γ ”表示。即：

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-6)$$

二、物质的集态和集态变化

(一) 物质的集态

物质以三种集态形式存在于自然界，即气态、液态和固态。

气态：物质呈气态时，其分子处于不规则的运动状态中。分子能均匀地充满所给予的空间，并且分子密度特别小。在实际气体中，气体分子具有一定的体积，分子间有着相互的作用力。若分子的大小与分子间的距离相比较是极微小的；分子间相互作用力与热运动能量相比较是极微小的，都忽略不计，这种气体称为理想气体。

液态：组成其物质的分子较气体为密集，分子间并具有相互移动位置的趋势。但又没有固态物质所具有的规则晶格组合。

气态和液态在分子结构上没有根本区别，因此严格区分气态和液态是很困难的，但二者的主要区别是，液态物质的分子密度远比气态的大。气态物质没有规则的自由界面，而液态物质具有自由的边界。

固态：组成其物质的分子构成有规则的布置，分子处于一定的晶格节点上振动。在近距离内，分子振动的调整主要受分子间作用力主导，而热运动使分子不规则布置的作用影响很小。

(二) 集态变化

物质的某一种集态只能在一定的外部条件下存在，即在一定的温度和压力条件下存在。当外部条件改变，分子间相互位置随之而改变。外部条件变到某一定值时，物质的分子结构发生根本的变化，物质集态就发生转变。

物质的集态变化，就是物质分子发生重新排列、密度突变和其它物理性质发生变化，而没有化学的变化在内。

物质由固态变至液态和由液态变至气态之转化，可以用相的平衡图表示。如图 1-1。

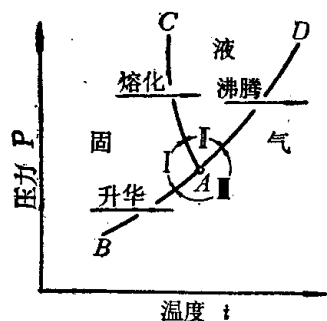


图 1-1 相的平衡及三相点图
I—固相；II—液相；III—气相；
A—三相点。曲线：AB—升华；
AC—熔化；AD—沸腾

图中 AB 线划出固体与气体的范围， AC 线划出固体与液体的范围， AD 线划出液体与气体的范围。在 AB 线的任何一点上，物质可以同时以两相(固相与气相)存在。 AC 线为固相与液相并存。而 AD 线则为液相与气相共存。在 A 点上，物质可以三种形态同时存在，因此称为“三相点”。处

于三相点时，每种物质均具有一定的参数。

随着物质集聚态的变化，由于内部分子重新排列需要消耗功，即需要吸收或放出热量，这种热量称为相变潜热。物质集态变化是依据物质的物理性质，以及由一种形态转换成另一种形态的转换条件，并在一定的温度条件下进行。在转换的同时也产生体积的突变，它和分子重新排列的性质有关。

在制冷工程中，研究这种集态变化很有意义，例如：在冷凝器中，制冷剂在较高压力和较高温度下放出热量，由冷却水或空气带走，使制冷剂汽体液化。在蒸发器中，液态制冷剂在低温低压下，从载冷剂或周围介质中吸热，而达到汽化。

熔化：固体物质在一定的温度下转变成液体称为熔化，1公斤这种物质在定温下熔化所需要的热量称为熔化热，当物质从液态转变为固态时，也放出同量的热。若在熔化过程中增加压力，通常会使相变困难，并使转换的温度升高。

升华：在压力或分压力低于三相点压力时，物质被加热可直接由固态转变成气态，这种现象称为“升华”，它取决于挥发性固体的物理性质。例如：干冰制冷就是这种现象的利用。

汽化：液体转化为汽体称为汽化，它包括两个过程。即：蒸发和沸腾。

蒸发：蒸发是指在某种温度下，液体的外露界面上不断汽化的过程。液体的蒸发是在汽体侧蒸汽分压力低于饱和蒸汽压力时进行的。

沸腾：沸腾是在一定温度下，蒸汽的形成不仅由液体表面产生，而大部分来自液体的内部。此时液体内部形成许许多多蒸汽小泡，并迅速上升突破液体表面转化为汽体的过程。沸腾是在蒸汽侧蒸汽分压力等于饱和蒸汽压力时进行的。这时的温度称为“沸点”。沸点与液体的物理性质有关。并随汽体侧蒸汽分压力降低而降低。

单位重量的液体在一定的温度和压力下，完全转化为干燥的饱和蒸汽，所需的热量称为“汽化潜热”，单位是(千卡/公斤)。

一些液体的汽化潜热和沸点见表 1-3。

一些液体的汽化潜热和沸点(在 1 个大气压下)

表 1-3

液体名称	汽化潜热 (千卡/公斤)	沸 点 (°C)	液体名称	汽化潜热 (千卡/公斤)	沸 点 (°C)
酒精	210	78	植物油	—	310
苯胺	105	184	水银	68	357
汽油($\gamma=0.67$)	—	75	松节油	70	159
苯	94.14	80	甲苯	85	110
水	539	100	甲烷	122	-161.3
液态空气	47	-194.2	乙烯	116	-103.5
煤油	70	150	乙炔	191(升华)	-83.8
甘油	—	290	乙醚	90	35

在制冷工程中，实际的沸腾过程往往被人们称为蒸发的过程。例如：在蒸发器中主要进行的过程是沸腾过程，而人们还称它为蒸发器，不称沸腾器。

液化：包括冷却和冷凝两个过程。将气体冷却，或冷却与压缩同时进行，使汽体转变成液体的过程称为液化。饱和蒸汽完全转变成饱和液体的过程称为冷凝。1公斤蒸汽冷凝

成液体所需移去的热量称为“冷凝热”。冷凝过程中，冷凝温度是与冷凝时的蒸汽压力有关。在这种相的变化中，汽体的温度和压力都必须低于临界值。若蒸汽温度高于临界温度时，则该物质汽体不可能变化为液体，即使加以很高的压力也无法使之液化。对于液化温度较低的汽体和实际汽体，液化时适当增加压力以提高冷凝温度是有利的。

气体和蒸汽：气体和蒸汽二者之间并无绝对界线可分。一般情况下气体是指远离液体状态，在常温和常压下不以雾状或液态出现。若将气体液化必须加强冷却，同时还须大大增加压力。蒸汽是指接近饱和状态，由液体刚刚转变过来的真实气体。显然，它是比较容易液化的。

蒸汽有饱和、过热和湿蒸汽之分。饱和蒸汽是蒸汽和液体处于相平衡状态，而且从液体中蒸发出来后在其压力下具有最大的密度。过热蒸汽比饱和蒸汽在相同压力下具有更高的温度，其密度低于饱和蒸汽的密度。过热蒸汽的密度大小由其压力和温度而定。湿蒸汽是干燥的饱和蒸汽和许多悬浮在其中的极细小液滴的混合物。湿蒸汽的状态取决于蒸汽所处的压力、温度及干燥程度。单位重量的湿蒸汽中所含饱和蒸汽的重量称为“干度”，用符号“ x ”表示，可按下列式计算：

$$x = \frac{G_g}{G_g + G_{sh}} \quad (1-7)$$

式中 G_g ——饱和干蒸汽重量，公斤；
 G_{sh} ——混合的液体重量，公斤。

三、气体状态方程式

由实践中得知，物质在热机中工作的状态，人们可以通过工质的绝对压力 P_j ，温度 t 或绝对温度 T 和比容 v 来表明。当这些参数一经确定，工质实际所处的热力状态就再也不会被曲解。

同样由实践结果还发现，对于气体、液体和不引起化学变化的混合物，三项参数中任意给定两项，则第三项值跟着就被确定了。也就是说： P_j 、 T 和 v 这三个热力参数，只有两个是彼此独立的，用公式表示时可写成下式：

$$F(P, T, v) = 0 \quad (1-8)$$

函数 F 的具体形式由物质的种类而定。上式仅指明，在每一个状态下，压力、温度、比容相互间有着一定的内在联系。式 (1-8) 是一个反映物质特性的客观规律的式子。称为气态物质的状态方程式。

对于理想气体，人们通过实验发现，定量气体的温度不变时，气体的比容与压力成反比，称为玻义尔-马略特定律；当定量气体的容积保持不变时，其压力与绝对温度成正比，称为查理定律；当定量气体的压力维持不变时，其容积与绝对温度成正比，称为盖-吕萨克定律。把这三条定律综合起来可表示为下式：

$$Pv = RT \quad (1-9)$$

式中 $R = \frac{848}{\mu}$ 是个常数，称“气体常数”，它与气体的分子量 μ 有关。

这个式子是式 (1-8) 的最简单形式，称为“理想气体状态方程式”。

对于实际气体，由实验提出了许多状态方程式，具有典型代表性的是范德瓦耳斯方程，具体可写为：

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = \bar{R}T \quad (1-10)$$

式中 a, b ——是对于不同气体具有不同数值的常数。

例如：对于氮气可以查得：

$$a = 18.35 \text{ 米}^4/\text{公斤}$$

$$b = 0.0014 \text{ 米}^3/\text{公斤}$$

在工程上往往是多种气体的混合物，例如：空气；制冷剂中的混合工质。因此，掌握道尔顿定律是很有意义的。这个定律指出：相互不起化学作用的混合气体，其压力等于各组成气体所产生的分压力的总和。即：

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (1-11)$$

式中 P ——总压力；

P_1, P_2, P_n ——各组分的分压力。

当压力不是很高时，混合气体都可以根据道尔顿定律来处理。

四、热力学基本定律

(一) 热力学第一定律及内能、焓的概念

热力学第一定律就是能量守恒及转换定律在热力学中的具体体现。它建立起热力过程能量平衡的基本关系，也是数量计算的基础。

热力学第一定律说明：工质在受热做功的热力过程中，工质从外界接受的热量；工质因容积膨胀而向外作的外功；以及工质内部储存或付出的能量，三者之间必须取得收支上的平衡，否则就违背能量守恒的原则。

如图 1-2 所示，当有 G 公斤工质在具有活塞的气缸里受热膨胀而推动活塞，使活塞位置由 A 最后达到 B 。在某一瞬间工质的压力为 P 公斤/米²。设活塞的顶面积为 f 米²，如果这时活塞被向前推进一微小距离 dx ，这时工质对活塞所作的功为：

$$dL = P f dx \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

很明显， $f dx$ 是表示容积 V 的增加，可记作 dV ，活塞由 A 到 B 的总功就是：

$$L = \int_{V_1}^{V_2} P dV \text{ 公斤} \cdot \text{米} \quad (1-12)$$

角码 1 和 2 代表 A 和 B 时工质初态和终态。如果工质重量 G 不变， $V = Gv$ ，则每公斤工质所作的功为：

$$dl = P dv$$

或
$$l = \int_{v_1}^{v_2} P dv \text{ 公斤} \cdot \text{米}/\text{公斤} \quad (1-13)$$

从图和上式中可以看出，膨胀做功的大小可以用 $P-v$ 图中的面积表示。这种图称为压容图或示功图。这种图对讨论和分析热机的工作时很方便。

对工质加热，工质除膨胀做功外，工质比容发生变化，亦即工质的热力状态发生变化。也就有内能的变化。内能是工质内部所具有的各种能量的总称。在工程热力学中，不考虑

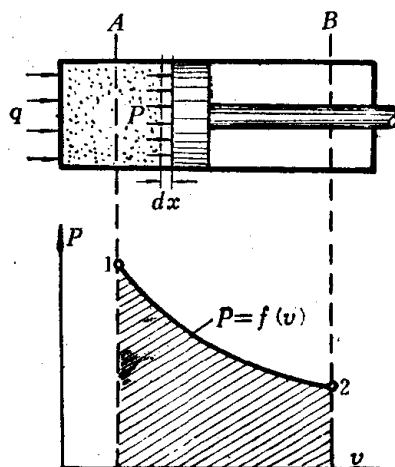


图 1-2 工作工质的膨胀功

其他内能(例如:化学能;原子能等)。因此工质的内能就只有包括分子乱运动的动能和分子间相处的位能。这就是说,工质的内能取决于工质的温度和比容,或者工质的热力状态。单位数量工质的内能,常用符号“ u ”表示,单位是千卡/公斤。

工质内能的多少只能是相对的,这是因为不会有那么一种状态,这时工质内部一切运动都停止,从而使内能变为零。所以内能的数值只能是相对于某一基准而言,此基准状态时的内能是人为的当作零,例如:取1(物理大气压)和 0°C 时气体的内能为零。

内能和热量有本质的区别,在给定某一状态下,工质具有一定的内能,却不能说工质在该状态下具有多少热量,因为热量和功一样,都不是热力状态参数,而是在工质状态发生改变时对外表现的效应。这样就把内能、外功和热量严格区分开来。

图1-2中根据能量守恒定律,外界加入的热量就等于工质内能的增加和工质膨胀所做的外功。即:

$$dq = du + Adl \quad (1-14)$$

式中 dq ——外界加给每公斤物质的热量,千卡/公斤;

l ——每公斤工质对外作的功,公斤·米/公斤;

du ——每公斤工质内能的增加,千卡/公斤。

A 是常数,表示1(公斤·米)的功转变为热量的数值,称为“功的热当量”。

$$A = \frac{1}{427} \text{ 千卡/公斤·米}$$

或 $A = 632 \text{ 千卡/马力·小时} = 860 \text{ 千卡/千瓦·小时}$

式(1-14)叫做“热力学第一定律的数学式”。

图1-2所示的情况,是不考虑气缸与外界的物质交换。实际上,工质不是永远被封闭在气缸中,而是连续地或周期地将已作过功的工质排出,并重新吸入新工质,工质将周而复始地组成一个热力循环。当工质流动情况不随时间而变时,这种系统称为稳定流动系统。

对于稳定流动,若流速为 w ,位能略去不计,那么可写出稳定流动能量方程式为:

$$dq = du + Ad(Pv) + \frac{A}{2g} d(w^2) + AdL \quad (1-15)$$

上式中 $du + Ad(Pv)$ 是取决于热力状态参数的项, $\frac{A}{2g} d(w^2)$ 是流动动能, AdL 是输出的工程功。前两项合并,用 i 表示为下式:

$$i = \Delta u + APv \quad (1-16)$$

这一新参数就称为“焓”,单位是千卡/公斤。所以焓就是代表流动的单位重量工质在沿流动方向向前传递的总能量中,取决于热力状态的部分。和内能一样,在热工计算中,焓值只求其变量,不必追求其绝对值大小。

(二) 热力学第二定律及熵的概念

从日常生活中知道,发动机作功可以因机器的制动而全部转换为热。但是,热并不能全部转换为功。热力学第一定律只告诉了热和功二者转换的当量关系,而没有指明热能在什么情况下才可以作功。热力学第二定律则要说明,热能转换为机械能的条件,或者是能量转换的方向性和转换的深度。

热力学第二定律有许多种说法,但是归纳起来主要有以下两种:

1. 使热能全部而且连续地转变为功是不可能的。因为由热转变为功时,伴随而来的必然有热量损失。

2. 热量不能自发地从冷物体转移到热物体。因为热量由冷物体转移到热物体时，必然要消耗外界的功，而这部分功又重复变为热。

从以上的说明可以看出，热功相互转变必须要有能量损失，因此，研究热机时提高效率是一项重要任务。

若总热量为 q_1 ，损失的热量为 q_2 ，那么所被利用的热量为： $q_1 - q_2$ 。

故：
$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad \text{称为热效率} \quad (1-17)$$

从大量的实践证明，热源温度越高，热机的效率也越高。若热源为恒温热源，热源的温度为 T_1 ，冷源的温度为 T_2 ，故热效率也可表示为下式：

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-18)$$

比较以上二式可得：

$$\frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

简化后得：

$$\frac{q_1}{T_1} = \frac{q_2}{T_2} \quad (1-19)$$

考虑到热量流动方向，以工质吸入热量时为正号，反之为负号，则 q_1 是加入热量为正； q_2 是排出热量为负。则得：

$$\frac{q_1}{T_1} + \frac{q_2}{T_2} = 0 \quad (1-20)$$

这是说明， $\left(\frac{q}{T}\right)$ 的代数和为 0，若用 Σ 表示代数和。有：

$$\Sigma \frac{q}{T} = 0 \quad (1-21)$$

对于工作循环中，在一个微小阶段内加入微小的热量，同样排出微小的热量。对于整个循环求其总和，则可用积分方程写成下式：

$$\int_+ \frac{dq_1}{T_1} + \int_- \frac{dq_2}{T_2} = 0$$

对于整个循环工质由初态经过变化再回到初态时，则有：

$$\oint \frac{dq}{T} = 0$$

令

$$\Delta S = \oint \frac{dq}{T} = 0$$

由此可知，数值 ΔS 与工质在工作循环中所走的途径无关，只决定于热源和冷源的状态。若热源为 S_1 ；冷源为 S_2 ，则：

$$\Delta S = S_1 - S_2$$

所以 S_1 与 S_2 也是工质的状态参数之一，故：

$$S = \int \frac{dq}{T} \quad (1-22)$$

数值 S 就称为“熵”，对于任一孤立系统，根据无数实例的分析，系统中进行的无非是可逆过程或不可逆过程。依据对热力学第二定律的叙述，可以写出如下不等式：

$$\Delta S \geq 0 \quad (1-23)$$

这一关系式乃是热力学第二定律的数学表达式，式中等号是对可逆过程而言，不等号是对不可逆过程而言的。这也就是说，在孤立系统中整个过程的熵只会增加或不变，但不会减少。熵和焓一样，只用两状态间数值的改变，而与某一状态时其绝对值无关。

熵在热工分析和计算中有极为重要的意义。如一切自发过程都会促使系统的熵增加，但实际上人们往往希望的是非自发过程。例如要把热量由低温物体传到高温物体，这是一非自发过程。若要使这一过程得以实现，必须辅以补偿过程，以促使系统总的熵增加。所以也可以说，熵的增加是过程不可逆性的度量。熵是一个无效能的指数，熵增也就是无效能增。

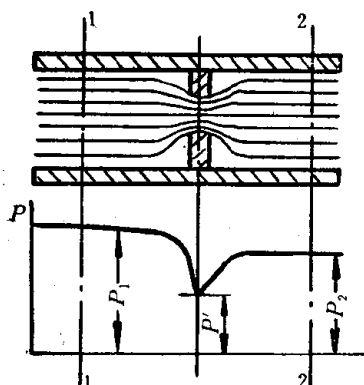


图 1-3 气体流过孔板时的节流

能增。

(三) 绝热节流

节流过程是指流体通过狭小截面时压力降低，不作外功，而且节流前后一定距离处的速度不变的过程，如图(1-3)所示，节流时压力降低的程度视缩口大小而异，缩口面积愈小，压力降就愈大。

在工程中发生的一些节流过程，例如流体通过阀门截面，这时流体流速很大，通过阀门截面时的时间又短，工质甚至来不及与外界进行热交换。这样就可以把这些节流过程，近似地当作绝热过程来处理。因而绝热节流在工程中是大量存在的。在制冷技术中更具有重要的意义，因为它是组成制冷循环的过程之一。

由前所述，绝热节流应有如下一些特点，节流后压力降低 $P_2 - P_1 < 0$ ；节流过程中没有热交换， $q = 0$ ；不作外功， $L_j = 0$ ；节流前后流体速度应不变， $w_2 - w_1 = 0$ 。同时节流过程也必然服从热力学第一定律和第二定律。掌握节流前后参数变化的规律，对应用分析节流过程是重要的。因此对绝热节流作如下概略叙述。

对于稳定流动の場合，热力学第一定律的数学表达式为：

$$dq = di + A \frac{dw^2}{2g} + Adl_j \quad (1-24)$$

由绝热节流的特点得知，式中 $dq = 0$ ； $\frac{dw^2}{2g} = 0$ ； $dl_j = 0$ 。从式中看出 $di = 0$ ，即绝热节流前后流动工质的焓是不变的。但是绝不能称绝热节流为定焓过程，这是由于节流过程的中间状态是复杂的，工质的流速在过程中是不断变化的，焓值也是不断变化的。

由热力学第二定律数学式(1-23)及式(1-22)可得：

$$dS = \frac{dq}{T}$$

对于绝热节流时，考虑式(1-15) dS 可用下式表示：

$$dS = \frac{dq}{T} = \frac{du + APdv}{T} = \frac{di - AvdP}{T}$$

但 $dP < 0$ ；
$$dS = -\frac{AvdP}{T} > 0 \quad (1-25)$$

从式(1-25)看出，绝热节流过程肯定是一不可逆过程，节流以后的熵值增加了。虽然节流前后焓值不变，但流体在节流过程中，摩擦和旋涡所产生的热不能全部逆变为另一形

式的能。因此流体的工作能力便降低了。

绝热节流前后温度的变化是复杂的，对于不同气体会会有不同的结果。对于理想气体，因为它的焓值仅是温度的函数，节流前后焓是不变的，所以它的温度也不变。而对于实际气体经绝热节流后，其温度可以减小，可以增加，也可以不变。这样，就要看节流的是什么气体、节流前的温度如何而定。

实际气体经节流后温度变化的规律，是从实验中发现的。总结实验结果得知，节流后温度的变化可以用 $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i$ 数值的变化来确定，用“ α ”表示，称为焦耳-汤姆逊系数。即：

$$\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i \quad (1-26)$$

因为节流后压力总是降低的，则 (∂P) 恒为负值。所以当 $\alpha > 0$ 时，节流后的温度就要减小，工质变冷称为冷效应。反之，当 $\alpha < 0$ 时，节流后温度增加，工质变热称为热效应。当 $\alpha = 0$ 时，节流后温度不变。

(四) $T-S$ 图和 $\log P-i$ 图

工质热力状态发生变化时，就会引起功量和热量的交换。对外交换的功量和热量的多少，取决于工质由初态到终态的过程。如前所述，工质对外所作的功或者外界对工质所作的功，都可以用 $P-v$ 图表示。由于热量的性质和功相当，热量交换应该同样可以用图表示。这样的图就是以绝对温度为纵座标 (T)；而以熵为横座标 (S) 的“温熵图”。

对可逆过程而言：

$$dq = TdS$$

当物质状态从 1 改变到 2 时，物质吸热或放热量为：

$$q_{1-2} = \int_1^2 TdS \quad \text{千卡/公斤}$$

所以工质在可逆过程中，吸收或放出的热量可以用图上过程线下方的面积表示，如图 1-4。

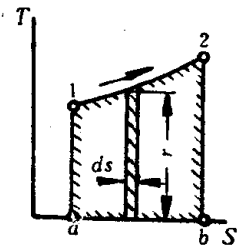


图 1-4 温熵图中物质的状态变化

$T-S$ 图和 $P-v$ 图完全具有相对比的性质。 $T-S$ 图中一个点代表一个相应的热力状态，一条曲线代表一个相应的热力过程，一个闭合曲线所围面积，代表一个全循环中工质的净热量交换。从而看出， $T-S$ 图可以决定工质的状态参数和交换的热量。同时，热量用面积表示还可决定可逆循环的热效率。

若以某种物质为例，在相应的 $T-S$ 座标图中划出一系列曲线。左边划以液态 ($x=0$) 的边界线，右边划以气态 ($x=1$) 的边界线，边界曲线之间绘以等干度线，两边界线的交点是临界点，在饱和蒸汽的范围外绘以等压线，该线在边界曲线之间时与等温线重合。此外还有等焓线和等容积线。如图 1-5。

在动力工程上，物质在过程中焓的变化是非常重要的。而要在 $T-S$ 图上求 Δi 就得求 i_1 和 i_2 的两块面积之差值，这样很麻烦。为此绘制了以 P (压力) 为纵座标，以 i (焓) 为横座标的 $P-i$ 图，如图 1-6。在实用上为了清楚地表示热过程，通常以 $\log P$ 代替 P 的座标，即为 $\log P-i$ 图。同样，在此坐标系中绘以一系列基本曲线，这样组成的线图与 $P-v$ 图相比其优点是：把吸入和放出的热量不以面积表示，而以横座标上的线段表示。在热工计算和分析中这些图具有很重要的意义。在工程计算中提供了许多方便。

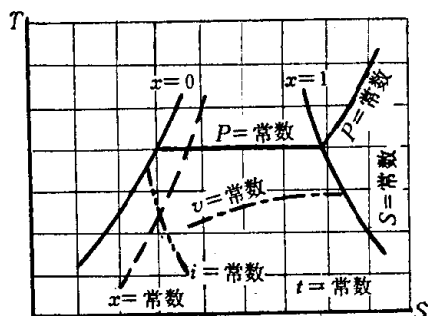


图 1-5 T-S 图中基本曲线

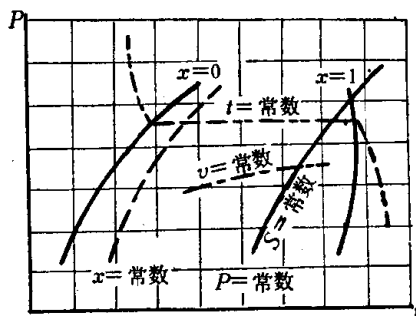


图 1-6 P-i 图中基本曲线

五、湿空气的性质

干燥的空气和水蒸汽的混合物称为湿空气。自然界中的空气都或多或少地含有若干水蒸汽，因此都是湿空气。湿空气的物理性质列于表 1-4。

一般情况下，湿空气中的水蒸汽都处于过热状态，因而湿空气可近似地当作理想气体的混合物来处理。但对于一些水蒸汽起主要作用的过程，例如烘干，冷却塔鼓风就不得不考虑水蒸汽的含量。当按理想气体的混合物处理时，其压力可按道尔顿定律计算，即：

$$P_d = P_g + P_s, \text{ 毫米水银柱} \quad (1-27)$$

式中 P_d ——湿空气压力，毫米水银柱；

P_g ——干空气分压力，毫米水银柱；

P_s ——水蒸汽的分压力，毫米水银柱。

1. 绝对湿度、相对湿度和含湿量

(1) 绝对湿度：每立方米的湿空气所含水蒸汽的重量，称为湿空气的绝对湿度。这也就是水蒸汽在其分压力及湿空气温度下的重度，可用符号“ γ_d ”表示，单位是公斤/米³。当湿空气温度(t)低于其饱和温度(t_{bh})时，湿空气的最大绝对湿度，等于湿空气温度下饱和水蒸汽的重度。这可由饱和水蒸汽表中查得。当湿空气温度高于其饱和温度时，湿空气的最大绝对湿度等于湿空气总压力(P_d)与温度(t)时的水蒸汽重度。

绝对湿度仅仅表示每立方米湿空气中所含水蒸汽的重量。并不能说明湿空气所具有的吸水能力。

(2) 相对湿度：湿空气的绝对湿度与在同一参数下的最大的绝对湿度即饱和绝对湿度之比，称相对湿度，用符号“ φ ”表示，显然，是一无因次项。

即：
$$\varphi = \frac{\gamma_d}{\gamma_{bh}} \quad (1-28)$$

若将湿空气中的水蒸汽看作理想气体，则有：

$$\varphi = \frac{\gamma_d}{\gamma_{bh}} = \frac{P_d}{P_{bh}}$$

式中 γ_{bh} 和 P_{bh} 是湿空气在给定温度下达到饱和时蒸汽的重度和分压力，也就是相同温度和相同总压力下 γ_d 和 P_d 的最大值。

(3) 含湿量：每公斤干空气中含有的水蒸汽重量称为含湿量，以符号“ d ”表示，单位是(克/公斤)，即：

$$d = \frac{G_s}{G_g} \times 10^3 \text{ 克/公斤} \quad (1-29)$$