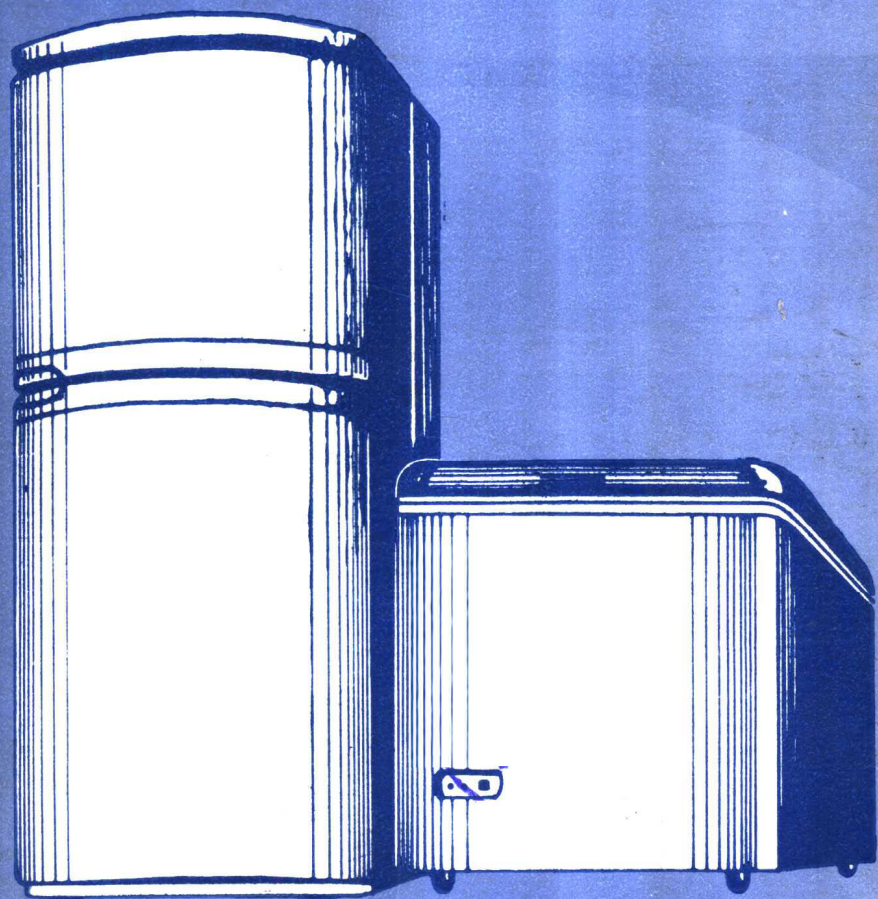


电冰箱空调机及各类制冷机 原理与维修

黎夏生 熊予莹



光明日报出版社

电冰箱、空调机及各类制冷机

原理与维修

黎夏生 熊予莹 编著

光明日报出版社

(京)新登字101号

电冰箱、空调机及各类制冷机原理与维修

黎夏生

熊予莹 编著

光明日报出版社发行

(北京永安路106号)

邮政编码: 100050

电话: 3017733-484

新华书店北京发行所经销

燕山向阳印刷厂印刷

850×1168

787×1092 1/16 印张12.75 字数260千字

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数1—5000册

ISBN 7-80091-437-2/Z·165

定 价: 7.80元

前 言

近年来，随着国民经济的发展，制冷技术被广泛应用于各部门，因此社会上迫切地需要大批有关这方面的专业技术人员。本书是为培养这方面的大专、本科专业人材而编写的教材；适当地减少部分章节，也可作为有关方面的专业技术人员培训教材。

本书从整体上较为全面地介绍了制冷工程中常用的制冷方法和制冷循环的基本原理，设备基本结构和使用性能以及维修的基本知识并着重于实际应用。考虑到某些专业的学生，没有专门系统地学过热力学课程，故在前面有一定的篇幅介绍一些相关的基本原理和概念，一些虽不属制冷范畴但与系统正常运行有关的重要设备，都从实际使用原理上作适当介绍，使得全书形成一个较为完整的体系。整书所需课时约70学时，但如果已有热力学和传热学基础或有电工基础，则这些章节可以删减不讲。另外考虑到有些专业的学时较小也可以适当地删减一些带*号的章节并不会影响再下一章的学习，因此学时数可以减至60~40学时。

在编写和教学实践过程中，曾得到一些教授和同行的有益指导，在此一一致谢。由于编者水平有限，难免有不足或错误之处，恳请读者批评指正。

本书在出版过程中，承蒙黄小钟、徐青、丁红、谭成茵等同志审订及校对，谨此致谢。

编 者

目 录

第一章	热力学基础	(1)
1	系统的状态参量	(1)
2	相变	(4)
3	气体状态方程	(6)
4	热力学第一定律	(8)
5	热力学第二定律	(10)
第二章	传热基础	(12)
1	传热方式	(13)
2	传热的计算	(15)
3	温差的计算	(20)
第三章	制冷的方法和原理	(22)
1	相变制冷	(22)
2	绝热等焓节流制冷	(25)
* 3	绝热等熵膨胀制冷	(29)
4	热电制冷	(32)
第四章	蒸气压缩式制冷循环	(37)
1	制冷循环	(37)
2	单级蒸气压缩式制冷理论循环	(39)
3	单级蒸气压缩制冷实际循环	(50)
* 4	两级蒸气压缩制冷循环	(51)
5	复叠式制冷循环	(55)
第五章	制冷剂、载冷剂和润滑油	(58)
1	制冷剂	(59)
2	几种常用制冷剂性质	(63)
* 3	载冷剂	(63)
4	冷冻润滑油	(68)
第六章	制冷压缩机	(84)
1	活塞往复式制冷压缩机	(84)
2	活塞往复式制冷压缩机的工作性能	(88)
3	回转式制冷压缩机	(92)
* 4	离心式制冷压缩机	(95)
第七章	冷凝器、蒸发器及其它部件	(96)
1	冷凝器	(96)
2	蒸发器	(101)
3	小型系统中辅助部件	(108)

第八章	制冷系统中的节流机构	(110)
1	节流机构与节流阀	(110)
2	热力膨胀阀	(111)
3	毛细管	(115)
第九章	电动机与启动	(117)
1	交流异步电动机的结构特点	(118)
* 2	三相异步电动机	(118)
3	单相交流电动机	(121)
4	单相电动机与启动器的配合	(124)
5	电动机使用中几个注意事项	(129)
第十章	温度、化霜和压力控制	(131)
1	蒸气压力式温度控制器	(131)
2	电子型温控器	(137)
3	化霜控制	(139)
* 4	制冷系统压力控制	(141)
第十一章	空调与空调器	(143)
1	空气调节	(143)
2	空调处理中空气的状态变化与焓湿图	(146)
3	空调机组	(150)
第十二章	电冰箱及商用小型制冷设备	(160)
1	家用电冰箱	(160)
2	电冰箱的结构组成及其工作特性	(164)
* 3	低温电冰箱	(173)
4	商用小型制冷机组	(175)
第十三章	制冷系统检修与故障分析	(178)
1	系统故障分析	(178)
2	小型系统压力试验	(183)
3	系统干燥抽空与充注制冷剂	(187)
附图 1	R_{12} 压—焓图	(194)
附图 2	R_{22} 压—焓图	(195)
附图 3	R_{502} 压—焓图	(196)
附图 4	湿空气的焓—湿图	(197)
附表 1	主要单位换算表	(198)
附表 2	常用符号表	(199)
	主要参考文献	(200)

第一章 热力学基础

制冷技术的目的是为了获得并保持比外界环境更低的温度，无论冷量以何种方式获得和输出，都是以热力学作为主要理论基础。任何一个制冷循环基本过程的计算，都要依据和运用热力学第一定律和第二定律，以及由这两个基本定律建立的能量方程和熵方程。通过对系统的热力学计算，才能确定它的性能指标和经济性，同时为各个设备的设计和材料的选用提供可靠的数据资料。

由此可见，热力学与制冷技术的关系是非常密切的，制冷技术总离不开热力学的知识、理论和方法。本章我们着重讨论与制冷技术密切相关的几个热力学问题。

1. 系统的状态参量

一个热力学系统在不外界的影响下，宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态。系统处于平衡态时具有一些可以确定的物理量来表征的属性，我们选择其中几个量作为描述系统状态的变数，就称之为状态参量。热力学中常用的状态参量有压强、体积和温度等。下面我们仅介绍几个与制冷技术密切相关的状态参量。

〔压强〕

一、压强的定义与单位

垂直作用在物体表面上的力称为压力，而物体单位面积上的压力称为压强，用符号 P 表示。工程上常把物理学中的压强称为压力。如物体的受力面积为 S ，压力大小为 F ，则压强为

$$P = \frac{F}{S} \quad (1-1)$$

在国际单位制中， F 的单位用牛顿，面积单位用平方米，则压强单位为牛顿/米² (N/m²)，在国际单位制中，也称为1帕斯卡 (Pa)，即1牛顿/米² = 1帕斯卡。

在工程单位制中，力的单位为公斤力 (Kg·f) 而面积单位用平方厘米，则压力的单位为公斤力/厘米² (kg·f/cm²)。当压力较小时，常用相当的水银柱高度来表示，1 mmHg = 0.0013595 kg·f/cm²。

压强还有一个常用单位，称为大气压强，简称大气压，用符号 B 表示。由于地球表面上大气层的厚度和密度是随时间、地点和气候条件不同而不同，因此历史上曾规定北纬45°海平面上常年的平均大气压为1个标准大气压 (1 atm)。这个标准并不严格。严格的规定如下：在重力加速度为980.665厘米/秒²的地方，若使用的水银密度在0℃时为13.595克/厘米³，则对760毫米汞柱高度所表示的压力进行换算，并省去尾数，得1标准大气压 (atm) = 1.01325×10^5 (N/m²)，(或Pa)。虽然这时1 atm并不是严格地等于760 mmHg，但一般情况下还可以认为1 atm = 760 mmHg = 1.0332 kg·f/cm²。

二、绝对压力与表压力

物质在密封容器中的真实压力称为绝对压力，用 P_{abs} 表示，或把压力单位写为kg·f/cm² (abs) 表示是绝对压力。当密封容器中没有任何气体分子时，密封容器内的绝对压力值为零，称密封容器内处于真空状态。

在制冷工程中，常用压力表测量制冷系统的压力，所测得的压力数值称为表压力，记为 P_G ，单位为Pa (G) 或 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ (G)。由于压力表的参考点为1 atm，即当压力表读数为零值时，所测量的系统绝对压力为当时当地的大气压 B ，因此压力表指示的压力值并不是密封容器内的真实压力。当表压值为 P_G 时，系统的真实压力即绝对压力 P_{abs} 应为：

$$P_{\text{abs}} = B + P_G \quad (1-2)$$

在工程实际应用上，常把1 atm近似取值为 $1 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ 或 0.1 MPa ，即 $P_{\text{abs}} \approx 1 + P_G$ ($\text{kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$) 或 $P_{\text{abs}} \approx 0.1 + P_G$ (MPa)。

三、真空度

当(1-2)式中的 P_G 为负值时，表示密封容器内的真实压力小于外界的大气压，这时大气压力与真实压力之差称为真空度。在真实压力表计上， P_G 的值以 $0 \sim 760 \text{ mmHg}$ 标示，因此由(1-2)式决定的差值 $B - |P_G|$ 用 H 表示，人们也常把这个值称为真空度，这时 H 的读数事实上也就是系统的绝对压力值。真空度 H 的单位为 mmHg ，工程上惯用 mm (torr) 来表示真空度， $1 \text{ mm} = 1 \text{ mmHg}$ 。由(1-2)式可得真空度 H 为

$$H = P_{\text{abs}} = B - |P_G| = 760 - |P_G| \quad (\text{mmHg}) \quad (1-3)$$

实际应用中的真空计具有各种不同的类型，它们的灵敏度、量程和用途各有不同，它们既有相对真空计也有绝对真空计。

〔比容〕

一定质量的物质具有一定的体积。在不同的状态下，物质所具有的体积可以不同。因此体积 V 可以作为描述系统状态的参量。

还有一个常用的状态参量——比容 v ，它是指一个单位质量（工程上也常认为是单位重量）的物质所具有的体积，设物质的总质量为 M ，体积为 V ，则比容 v 为

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

物质的比容与压力、温度有关。

比容的倒数称为密度或重度 ρ ，它实际是指单位容积的物质所具有的质量：

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

以上的状态参量分别属于力学参量和几何参量，热力学上还有两类状态参量——化学参量和电磁参量。一般而言，热力学系统需要用这四类参量描述才能完全。但是这四类参量都不是热力学所特有的参量，它们与系统的冷热程度没有直接的关系。热力学所特有的一个物理量是温度。

〔温度〕

一、温度与温标

温度是表征物体冷热程度的物理量。我们知道，任何物质都是由大量分子组成，它们总是作无规则的热运动。实际上，温度反映了组成系统的大量分子无规则运动的剧烈程度，它是对物质分子热运动平均动能的度量，因此温度是描述系统热平衡宏观性质的一个物理量。

温度的数值表示法称为温标。一般来说任何物质的任何特性，只要它随温度的改变而发生单调的、显著的变化，都可以选用来标志温度。例如一定容积的气体压强，一定压强的气

体体积和金属导体的电阻等，都会随温度的变化而单调变化，它们都可以被选作温度计。建立任何一种温标都必须满足以下三个要素：选择某种物质（叫做测温物质）的某一随温度变化属性（叫做测温特性）来标志温度；选定固定的参考点；对测温属性随温度的变化关系作出规定。例如水银温度计，是利用水银（测温物质）的体积（测温特性）随温度的改变而改变制成的，为了给出温度的读数，可以这样规定，在一个标准大气压下，纯水的冰点为0度，纯水的沸点为100度（两个固定参考点），然后在两个固定点之间分为100等分，每一等分为1度（规定测温属性随温度作线性变化），这就是常用的摄氏温标。显然，当选用不同的测温物质或同一物质的不同测温特性来建立温标时，除固定点外其它各点温度并不严格一致，这类温标称为经验温标。

为了使温度测量统一，需要建立统一的温标，以此为标准校正其它各种温标。这个基本温标必须不依赖任何具体物质的性质。由热力学第二定律可以证明，的确存在这种温标，它就是热力学温标。不过热力学温标只是一种理想温标，它可以通过理想气体温标来实现。有了绝对温标作为标准温度后，其它各种温标如摄氏温标和华氏温标即可从绝对温标换算出来。

二、热力学温标

根据热力学第二定律可以建立一个与测温物质和测温特性完全无关的温标，称为热力学温标，根据这一温标可以建立绝对零度（ $T = 0$ ）的概念：当物质分子的无规则运动完全停止时，所对应的温度为绝对零度。绝对零度只是一个理论值，实际上是不可能达到的，只能随低温技术的发展而不断接近它。热力学温度用 T 表示，单位为开尔文（K）。由热力学第二定律不能完全确定绝对温标，必须另外加一个条件才能确定，1954年国际权度会议决定的条件是选水的三相点为273.16K。

三、理想气体温标和国际实用温标

所谓理想气体是指实际气体在压强趋于零时的极限。用理想气体作为测温物质所确定的温标称为理想气体温标，它不依赖于任何一种气体的个性。理论上可以证明理想气体温标与热力学温标是一致的，因此在理想气体温标所能确定的温度范围内，热力学温标是通过它来实现的。

理想气体温标可以通过气体温度计来实现。对于一定质量的理想气体，当气体体积一定时，其压强与热力学温度成正比；当气体压强一定时，其体积与热力学温度成正比。根据以上原理可以做成定容或定压气体温度计。但是由于任何实际气体都不是真正的理想气体，所以在利用气体温度计测温时，必须对测量值进行修正才能得到热力学温度值。

任何气体都有其共同的特性。在极低温度下（1K以下）所有的气体均已液化，因而不存在任何理想气体，因此对于理想气体温标，低于1K的温度是没有物理意义的，也就是说低于1K的热力学温标不能由理想气体温标来确定。这种情况下，热力学温标的实现还依赖于其它温度计，例如声学温度计、噪声温度计和磁温度计等。事实上，热力学温标仅是给出了温度值的客观绝对标准，但由于我们不能把实际系统的可测性质与热力学温度联系起来写出一个完善的表达式，所以在实际应用中不能直接应用热力学温度。为此，我们只能采用实际的系统去逼近理想行为，符合这一要求的温度计称为基准温度计，如上述的气体温度计、声学温度计和噪声温度计等均属此系统。用于实现热力学温标的基准温度计往往比较复杂，使用非常不方便，一般只在少数国家的计量机构中建立这类装置。还有另外一种温度

计。它不是基于严格的理论公式，而是依靠较为简单的经验公式，以便和实验数据相符合，它们称为次级温度计，如电阻温度计和热电偶等。除了在极低温下（1 K 以下），基准温度计比最好的次级温度计难于使用而且复现性差。在实际应用的大多数情况下，使用方便和具有良好的复现性往往比绝对准确更为重要。因此，为了便于测量和复现热力学温度，人们提出一种国际实用温标（International Practical Temperature Scale——ITS）。实用温标的原则是：它偏离热力学温度是以光滑缓慢变化量作为热力学温度的函数的。ITS 主要包括以下几个内容：（1）定义固定点，即利用纯物质各相之间可复现的平衡状态来定义国际实用温度的指定值。（2）规定测温标准仪器。把温度划为三个温区，在不同的温区采用不同的测温标准仪器来校准固定点以及这些温度点上的分度。（3）规定各固定点之间的内插公式。各固定点温度之间，由内插公式使标准仪器的指示值与国际实用温度值相联系。

四、摄氏温标与华氏温标

为了统一摄氏温标与热力学温标，国际计量大会1960年对摄氏温标作了新的定义，规定它由热力学温标 T 导出，摄氏温度 t 的定义为

$$t = T - 273.15 \quad (1-4)$$

它的单位是摄氏度，记为 $^{\circ}\text{C}$ 。

还有一个较为常见的温标是华氏温标，它也是导出温标。华氏温标所确定的温度用 t_F 表示，单位为华氏度，记为 $^{\circ}\text{F}$ 。华氏温度 t_F 与摄氏温度 t 的换算关系为

$$t_F = 32 + 9/5 \cdot t \quad (1-5)$$

值得注意的是，在新的定义下，摄氏温标的零点（ $t = 0$ ）与冰点并不严格相等。沸点的摄氏温度也不是严格地等于 100°C 。但在一定的测量精度下，新的定义与旧的规定是一致的。

2. 相变

〔相变与相图〕

自然界中许多物质都是以固、液、气三种凝聚态存在着的。在一定的条件下，各种凝聚态可以平衡共存，也可以互相转化。例如，在一个大气压下， 0°C 时水与冰可以平衡共存。这时如果冷却（提取热量），水可以凝结成冰；如果加热（提供热量），冰可以转化为水；如果继续加热使温度提高到 100°C ，水又可以汽化为水蒸气。这种由冰转化为水，或由水转化为水蒸气的变化，我们称为相变，它是一个不连续的质变过程。应该指出，相是指系统中物理性质均匀的部分。例如冰和水，尽管它们所含的化学组分相同，但是它们具有不同的物理性质，所以水和冰是两个相。即便是冰，在一定的条件下，还可以具有七种不同的晶格结构，因此，称之为七种不同的固相。这种只含一种化学组分的系统，我们称为单元系。如果单元系中的物理性质不是均匀的，但可以分为两个及两个以上的均匀部分，则称系统为单元复相系。若系统是由两种或两种以上的化学组分组成的，则称之为多元系，多元系可以是均匀系，也可以是复相系。例如水和酒精可以互溶，水与酒精的混合液只有一个相，但它含有两种不同的化学组分，故这系统称为二元均匀系。

对于单元系，我们可以用温度和压强为直角坐标来表示各相之间的平衡性质，称为相图。图1-1为单元系相图的一个示意图。三条曲线将图分为三个区域，分别是固相、液相和气相单相存在的温度和压力范围。固、液、气三相之间的分界线分别称为升华线、汽化线和溶解线。在曲线上任意一点，压力与温度具有一定的函数关系，它表示在一定的条件下，单元系的相应是两相共存。特别是相图中三条曲线交的点 O 称为三相点，它表示在确定的压强

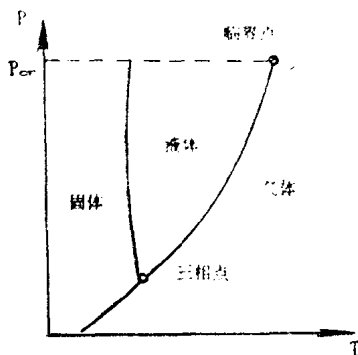


图1-1 单元素相图

和温度条件下，单元系的固、液和气相三相平衡共存。例如水的三相点是 $T^o = 273.16\text{K}$ (0.01°C)， $P_o = 4.581\text{mmHg}$ ，这个三相点温度是国际实用温标中最基本的一个固定点。

汽化线沿O点出发，终止于临界点C。在温度T小于临界点温度 T_{cr} ，压力小于临界点压强 P_{cr} 时，气相与液相的性质（如密度、比热、热导和粘度等）有明显的差异。当温度逐渐升高接近 T_{cr} ，压强逐渐增加到 P_{cr} 时，差异逐渐减少，在 $T \geq T_{cr}$ ， $P \geq P_{cr}$ 时，所有这些差异完全消失，液相不复存在，它表明当温度高于临界温度时，不能靠加压的方法使气体液化。由于有了临界点C，

气相与液相之间的转变就可能是连续的，在转变的过程中可以不经两相共存的情形，只要在改变温度和压强时不穿过汽化曲线OC即可。

〔显热和潜热〕

从相图可知，物质的相变过程是在一定的压力和温度下产生的状态变化过程。这个过程有两个特点：一个是相变时比容要发生改变；另一个是相变时伴随有相变潜热，即物质在加热（或冷却）的过程中，吸收（或放出）了热量，但物质仅是状态改变而温度不变，这种相变称为一级相变。这利由于物质状态改变而消耗的热量称为潜热或叫相变潜热，用符号r表示，单位是kcal/kg。如果参加相变的物质为Gkg，则所需的热量 $Q = r \cdot G$ (Kcal) 显然这相变热Q可以是吸热也可以是放热。

在制冷工程中，获得冷量和温降的一个重要方法就是利用制冷剂在蒸发过程中吸收汽化潜热来达到目的。用作制冷剂的汽化潜热显然是越大越好。表（1—1）列出几种常用制冷剂在不同温度下的汽化潜热（r）值。而图1—2为物质三种状态变化过程。特别指出的是液体汽化有蒸发和沸腾两种不同的形式。液体表面的汽化现象称为蒸发，它在任何温度下发生。沸腾是液体表面和内部同时发生汽化的现象，只有在一定的温度下液体才能沸腾，相应的温度称为沸点，沸点与压力有关，压力愈大沸点愈高。但是从相变的机构看，蒸发与沸腾并无根本区别：沸腾时相变仍在气液分界面上以蒸发的方式进行，只是液体内部这时涌现大量的小气泡从而增加了气液之间的分界面。在制冷工程中，汽化潜热的获得是通过制冷剂沸腾的方式，但习惯上称之为蒸发，相应的汽化潜热有时也称为蒸发潜热。

表1—1 几种氟利昂制冷剂汽化热

制 冷 剂	汽 化 热 (kcal/kg)	
	-20℃	0℃
R_{12}	38.66	36.43
R_{22}	52.45	48.90
R_{114}	34.15	32.95
R_{502}	39.00	35.83

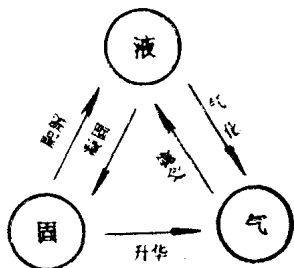


图1-2 物质状态变化过程

当物质被加热或冷却时,物质的状态不发生变化而只有温度变化,这过程所需要的热量称为显热。显热与过程有关。当物体在某一过程中温度升高(或降低)一度时所吸收(或放出)的热量,称为物体的热容量 C 。严格的定义如下,如在某个过程中,物体从外界吸热 ΔQ ,温度升高 ΔT ,则物体在该过程的热容量 C 为

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (1-6)$$

如物体在加热过程中体积不变,称为定容热容量 C_V ;如该过程是在恒压条件下进行,称之为定压热容量 C_P 。

热容量与物质的质量 M 有关,单位质量物质的热容量称为比热。定容比热的定义为:

$$C_V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{M} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_V \quad (1-7)$$

定压比热的定义为

$$C_P = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{M} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_P \quad (1-8)$$

3. 气体状态方程

一个热力学系统的平衡态可用状态参量描述,也就是说系统处于一定的平衡态下,其各种状态参量都具有确定的值,这时各状态参量并不是完全独立的,它们之间存在一定的函数关系。特别是在平衡态下,热力学系统具有确定的温度,因此温度与四类状态参量(几何参量、力学参量、磁参量和化学参量)之间必然存在一定的联系,状态方程就是给出温度与状态参量之间的函数关系的方程。

对于不考虑电磁性质和不考虑与化学成分有关性质的简单系统,可以只用压力和体积来描述它们平衡状态,这时简单系统的状态方程的一般形式为

$$f(P, V, T) = 0 \quad (1-9)$$

它的具体形式视不同的物质而异,它可以根据实验测定或理论分析来确定。

〔理想气体状态方程〕

实验证明,一定质量的气体,在温度不变时,其压强 P 与体积 V 的乘积是一个常数 C :

$$PV = C \quad (1-10)$$

常数 C 在不同的温度下具有不同的值。这定律称为玻意耳定律。精确的实验表明,玻意耳定律并不完全正确。不过气体压强愈低,玻意耳定律的偏差愈小。

根据玻意耳定律和理想气体温标,可以导出理想气体的状态方程为

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-11)$$

M —气体质量 μ —气体摩尔质量 R —普适气体常数

〔实际气体状态方程〕

在通常的压强和温度下,可近似地用理想气体状态方程来处理实际问题。但是在高压和低温的条件下,实际气体与理想气体的偏差非常显著,这情形下理想气体状态方程就不适用了。为了更精确地描述实际气体的行为,人们提出了许多状态方程,其中最常见的是范德瓦尔斯(Van der Waals)方程。对于摩尔(mol)的气体,范氏方程为:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \left(\frac{v-b}{v}\right) = RT \quad (1-12)$$

其中a、b是常数，其具体数值视不同的气体而异，可由实验测定。

从(1-12)式可见，当压力很低或温度很高时，气体的摩尔体积很大，修正项 a/v^2 和b值相对很微小，可以忽略不计，这时(1-12)式过渡回理想气体状态方程。

范氏方程是考虑了物质结构的某些因素从理论分析得出的，所以原则上适用于气体和液体。实际计算表明，范氏方程虽然比理想气体状态方程更接近实际气体，但仍然仅是定性地概括了实际气体的性质，而不能定量地精确反映实际气体状态参量之间的函数关系。

〔范氏方程与气液相变的临界参量〕

根据范氏方程(1-12)式可以在P—V图上作出一系列的等温线，如图1-3所示。当 $T < T_{cr}$ ，每条等温线上都有一个极大值F和一个极小值E；当T逐渐升高到 T_{cr} 时，两个极值F与E合二为一，在 $T = T_{cr}$ 等温线上，只有一个拐点C；而在 $T > T_{cr}$ 后，等温线上既没有极值点也没有拐点，形状类似玻意耳定律的双曲线。 $T = T_{cr}$ 曲线上的拐点C就是P—T相图中的临界点C，C点所相应的状态，称为临界状态，对应的状态参量称为临界参量 T_{cr} 、 p_{cr} 和 v_{cr} 。根据拐点处有

$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T=T_{cr}} = 0$ 和 $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T=T_{cr}} = 0$ 的条件可以求出临界参量。由以下三个方程

$$\begin{aligned} \left(p_{cr} + \frac{a}{v_{cr}^2}\right) (v_{cr} - b) &= RT \\ \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T=T_{cr}} &= -\frac{RT_{cr}}{(v_{cr} - b)^2} + \frac{2a}{v_{cr}^3} = 0 \\ \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T=T_{cr}} &= \frac{2RT_{cr}}{(v_{cr} - b)^3} - \frac{6a}{v_{cr}^4} = 0 \end{aligned}$$

可求出临界点的状态参量为

$$\left. \begin{aligned} T_{cr} &= \frac{8a}{27bR} \\ v_{cr} &= 3b \\ p_{cr} &= \frac{a}{27b^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

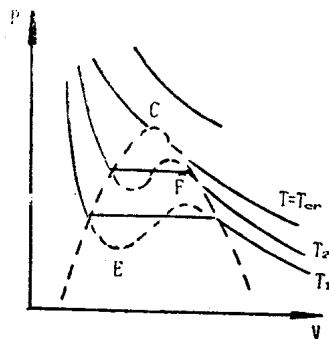


图1-3 范氏方程的等温线

只要给定常数a和b，即可求出临界参量 T_{cr} 、 p_{cr} 和 v_{cr} 。反之，由临界状态 T_{cr} 、 p_{cr} 和 v_{cr} 也可以确定系数a和b。

〔饱和气压、饱和温度和饱和湿度〕

在汽化曲线上，物质处于气、液两相共存的平衡状态，处于这状态下的蒸气称为饱和蒸气，相应的压强称为饱和蒸气压强（简称饱和气压），对应的温度称为饱和温度。饱和气压与饱和温度存在一定的函数关系。实验和理论分析都表明，在相图上的汽化曲线总是有 $dp/dT > 0$ ，即饱和温度总是随饱和压强的增加而升高的。在制冷技术中，通常就是利用制冷剂在不同的压力下进行冷凝或蒸发来实现制冷循环的。

由于两相达到平衡时，蒸气的密度具有一定的值，因此空气在一定的压强和温度下，只能容纳一定的水蒸气。在一定的温度下，当空气中所含的水蒸气达到最大值时，称此时的空气为饱和湿空气，相应水蒸气的含量称为饱和湿度。当空气达到饱和状态时，水分就不能向

空气蒸发，这时人会感觉到天气很潮湿。

在空调技术中常用到一个相对湿度的概念，它是指空气的实际绝对湿度 d_0 的比值。

所谓绝对湿度是指，在一立方米湿空气（含水蒸气的空气）中所含的水蒸气质量，符号用 d 表示，单位为克/立方米（ g/m^3 ）或千克/立方米（ kg/m^3 ）。显然，绝对湿度只说明湿空气在某一温度下实际所含水蒸气的量，而不能说明湿空气的吸湿能力。例如某天空气温度为 10°C 时，绝对湿度为 $9.0\text{g}/\text{m}^3$ ；另一天空气温度为 20°C ，绝对湿度为 $10.0\text{g}/\text{m}^3$ 。从绝对湿度上看，后者大于前者，可是是否后者比前者潮湿呢？前面已指出，是否潮湿，取决于湿空气是否处于饱和状态。通过查表或计算可知，温度为 10°C 时，饱和空气的饱和绝对湿度为 $9.4\text{g}/\text{m}^3$ ；而温度为 20°C 时，饱和空气的饱和绝对湿度 $17.2\text{g}/\text{m}^3$ 。显然，温度为 10°C 那天，由于空气接近于饱和状态（ $d_0 - d = 0.4\text{g}/\text{m}^3$ ），因此空气的吸湿能力很小，人们就感觉到较潮湿。而温度为 20°C 那天，空气远还没达到饱和状态（ $d_0 - d = 7.2\text{g}/\text{m}^3$ ），因此空气的吸湿能力很强，人们就感觉到干燥。所以仅从绝对湿度并不能表明空气的干燥或潮湿。只能用相对湿度的概念才能正确描述一定状态下空气的潮湿程度。

根据前面的定义，相对湿度 φ 可写为

$$\varphi = \frac{d}{d_0} \times 100\% \quad (1-14)$$

当 $\varphi = 0$ 时，为干空气； $\varphi = 100\%$ 时为饱和空气。

4 热力学第一定律

热力学第一定律就是能量转化和守恒定律：自然界一切物质都具有能量，能量有各种不同的形式，能够从一种形式转化为另一种形式，从一个物体传递给另一个物体，在转化和传递中能量的数量不变。

〔态函数——内能〕

要深刻理解能量守恒定律，就必须认识各种形式的能量。我们知道在力学里有机械能，电磁学里有电磁能，原子物理里有原子能等等。在热力学中，还有一种形式的能量，称为内能。

从微观的角度来看，物质内部所有组成物质的微观粒子总是不停地作热运动，而且微粒之间存在着相互作用，因此物质存在与热现象有关的能量，其中包括热运动动能和粒子相互作用势能，我们把它称为物质的内能。如果物质系统处在电磁场中时，内能还包括相应的电磁形式能量。对于产生化学反应的系统，内能还应考虑与化学反应相关的能量等。一般的情况下，内能只涉及与热现象有关的能量，而不包括系统的宏观机械能及一切与热力学过程无关的能量。

系统的内能用符号 U 表示。内能 U 是一个仅与系统的初、末状态有关的态函数，也就是说，系统处于平衡态时， U 由平衡状态参量单值确定；当系统从一个态（初态）过渡到另一个态（末态）时，两态之间的内能差 ΔU 是一个确定值，它与系统的变化过程无关。

〔热力学第一定律的数学表达式〕

一个系统内能的改变只能通过做功（包括机械功、电场功、磁场功等等）和热传递的方式进行。设系统从平衡态1经过某一过程变到平衡态2，在这过程中外界对系统做功 W ，系统从外界吸热量 Q ，根据能量转化和守恒定律，由做功和传热两种方式提供的能量转化为系统的态函数能量的增量

$$U_2 - U_1 = Q + W \quad (1-15)$$

其中规定, 当 $Q > 0$ 时, 表示系统从外界吸热; $Q < 0$ 时, 表示系统向外界放热; $W > 0$, 表示外界对系统作正功, $W < 0$, 表示外界对系统作了负功即系统对外界作了正功。

如果系统的初态和终态相差无限小时, 称经历一无限小的过程, 则这时内能变化为 dU , 外界对系统做功为 dW , 系统从外界吸热为 dQ , 则(1-15)式写为

$$dU = dQ + dW \quad (1-16)$$

注意, 式中 U 是全微分, 因为它是一个态函数。而 Q 和 W 不是态函数, 它的改变量与过程有关, 因此不能用全微分表示, dQ 和 dW 分别表示无限小过程的无限小量, 故写成 d 以示区别。

(1-15)式或(1-16)式就是能量守恒与转换定律的数学表达式。下面作为热力学第一定律的应用, 介绍理想气体在两个典型过程中的行为。

(1) 等压过程和态函数焓

系统状态改变时, 如果系统压力保持不变, 则该变化过程称为等压过程。等压过程的特性是系统压强 P 是一个常量。

设在等压过程中, 外界对系统仅做压缩功 $dW = -Pdv = -d(Pv)$ (设等压过程是非常缓慢进行的, 外界压力值等于系统内部压力值, 压力方向相反) 这时定压热容量 C_p 可以写为

$$\begin{aligned} C_p &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U - \Delta W}{\Delta T} \right) p \\ &= \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U + \Delta(Pv)}{\Delta T} \right) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta(U + Pv)}{\Delta T} \right) p \quad (1-17) \end{aligned}$$

$$\text{令 } H = U + Pv$$

H 称为焓, 它也是一个态函数。(1-17)式可写为

$$C_p = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta T} = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right) p \quad (1-18)$$

从焓的定义可知, 在等压过程中, 系统从外界吸收的热量, 等于系统态函数焓 H 的增量即等压过程中 $\Delta Q = \Delta H$, 这是态函数焓的重要特性。在制冷工程中, 态函数 H 很有用。为了方便计算和应用, 对于一些重要物质, 把不同压强下的焓值制成图, 称为压焓图。(详见第四章的4节)。

(2) 绝热过程

系统状态的改变过程中, 如系统与外界没有热量的交换, 即 $dQ = 0$, 则这一过程称为绝热过程。

如果理想气体在一绝热气缸中被压缩, 气体体积由 V_1 变为 V_2 , 由于体系与外界没有热量交换, 所以 $dQ = 0$ 。假定压缩过程是非常缓慢无摩擦进行的, 因此外界对气体所施加的压力大小等于气体内部的压力 P , 这时活塞对气体做的机械功为 $dW = -Pdv$, 根据(1-16)式有

$$dU = dQ + dW = -Pdv \quad (1-19)$$

它表示系统内能的改变完全由外界对系统做功引

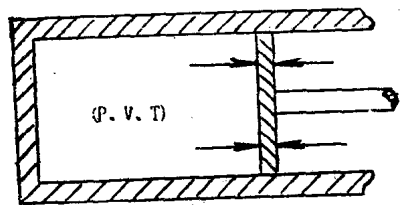


图1-4 理想绝热压缩

起。因为，气体被压缩的过程中， $P > 0$ ， $dv < 0$ ，所以 $dW > 0$ ，这时系统对外界作了负功。

另一方面，由定容热容量的定义

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_v$$

利用热力学定律，如果外界对系统之功为零，则 $\Delta U = \Delta Q$ ，所以 C_v 还可以写为

$$C_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (1-20)$$

实验表明，理想气体的内能 U 仅是温度的函数，因此(1-20)式可写为

$$C_v = \frac{dU}{dT} \quad (1-21)$$

即有 $dU = C_v dT$

把(1-21)式代入(1-19)式得

$$C_v dT = -P dv \quad (1-22)$$

根据理想气体状态方程 $pV/T = nR$ ， $n = M/\mu$ 为摩尔分子数。取微分有

$$P dv + v dP = nR dT \quad (1-23)$$

代入(1-22)式消去 dT 得

$$(C_v + nR) P dv + C_v V dP = 0 \quad (1-24)$$

另外，理想气体的 C_p 为

$$\begin{aligned} C_p &= \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p + \left(\frac{\partial (pV)}{\partial T} \right)_p \\ &= C_v + nR \end{aligned} \quad (1-24)$$

所以(1-24)式可以写为

$$C_p P dv + C_v V dP = 0 \quad (1-25)$$

令 $K = \frac{C_p}{C_v}$ ，称为绝热指数，则上式写为

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{V} = 0 \quad (1-25)$$

这就是理想气体在绝热过程所满足的微分方式。(1-25)式取积分(把 k 视为常数)得：

$$PV^k = \text{常数} \quad (1-26)$$

它是理想气体在绝热过程中压强与体积的变化过程关系。实际上气体在压缩过程是不能实现绝热压缩的，因此采常用如下形式来描述气体的实际过程

$$pV^m = \text{恒量}$$

式中 m ($1 < m < k$) 称为多方指数，当 $m = 1$ 时此式表示为等温过程，而 $m = k$ 时即为式

(1-26)的绝热过程。多方过程是介于上述两者之间。对于氨制冷剂 $m = 1.28$ ； R_{12} ， $m = 1.13$ ；而 R_{22} ， $m = 1.18$ 。

5. 热力学第二定律

热力学第二定律指出了各种形式的能量在相互转化过程中必须满足能量守恒的关系，但对于过程进行的方向没有给出任何限制。是否所有满足能量守恒的过程都能够实现呢？热力

学第二定律解决了这个问题，指出凡是与热现象有关的实际过程都具有方向性。

〔热力学第二定律〕

热力学第二定律有两种等效的表述方法。

(1) 克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其它变化。

(2) 开尔文表述：不可能从单一热源吸收热量，使之完全变为有用功而不引起任何其它影响。

注意这两种说法均强调“不引起任何其它变化（影响）”。如果存在其它变化（影响）的条件下，从单一热源吸热并完全转化为机械功或把热量从低温物体送到高温物体是可以实现的。例如，理想气体等温膨胀，就是从单一热源吸热并将之全部转化为机械功，因为由前面1—4节的讨论，理想气体等温膨胀时内能 U 不变（因为理想气体的内能仅由温度决定），即 $\Delta U = 0$ ，由热力学第一定律 $\Delta Q = -\Delta W$ 。但是在这过程中却产生了影响——理想气体的体积膨胀了。

因此在热力学中定义，如果一个过程发生后，不论用任何的方法都不可能将它产生的后果完全消除而使一切恢复原状，这个过程称为不可逆过程。反之，如果一个过程发生之后，它产生的后果可以通过某种方法使之完全消除，使得系统和外界完全恢复原状，则这个过程称为可逆过程。

〔态函数——熵〕

热力学第二定律是有关过程进行方向的规律，指出并非所有满足能量守恒的过程都能实现，过程具有方向性。为了给出一个判断一切过程进行方向的标准，由热力学定律可以确定一个新的态函数熵 S 。只要系统状态确定了，熵 S 的数值也就随之确定，并在一定条件下成为过程进行方向的标志。

由热力学第二定律，可以证明对于任意的可逆循环过程有

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (1-27)$$

积分号上的圆圈表示对整个循环过程求积分， dQ 为系统从温度为 T 的热源所吸取的热量，系统温度亦为 T 。

(1—27)式表明，对于可逆过程，尽管 dQ 是过程的函数而不是某个态函数的全微分，但乘上积分因子 $1/T$ 时，却是某个态函数的全微分，我们令这个态函数为 S ，称为熵：

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-28)$$

这就是可逆过程的热力学第二定律的数学表述的微分形式。它表示一个无穷小的可逆过程，系统的熵变等于该过程所吸收的热量与系统温度 T 之比。

对于不可逆过程，由热力学第二定律可以推出

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0 \quad (1-29)$$

再根据(1—28)表达式就以证明有

$$dS > \frac{dQ}{T} \quad (1-30)$$

(1—28)式和(1—30)式可以合写为

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (1-31)$$