

目 录

单元一 工程热力学基础	1
学习任务 1 工程热力学的基本概念	2
学习任务 2 热力学定律	20
学习任务 3 理想气体热力过程	26
学习任务 4 蒸气的性质与基本热力过程	34
单元二 流体力学基础	46
学习任务 1 流体的基本性质及帕斯卡定律	47
学习任务 2 流体动力学基础	54
学习任务 3 流体的能量损失	60
单元三 传热学基础	70
学习任务 1 基本传热方式	71
学习任务 2 传热的基本方程	75
学习任务 3 传热过程与换热器	82
单元四 制冷剂、载冷剂与冷冻机油	90
学习任务 1 制冷剂	91
学习任务 2 载冷剂	101
学习任务 3 冷冻机油	105
单元五 蒸气压缩式制冷原理	110
学习任务 1 单级压缩式制冷循环	111
学习任务 2 双级蒸气压缩式制冷循环	132
学习任务 3 复叠式制冷循环	142
单元六 吸收式制冷循环	151
学习任务 1 吸收式制冷循环的工作原理	152
学习任务 2 溴化锂吸收式制冷循环	167
学习任务 3 氨水吸收式制冷循环	184

单元七 其他制冷循环及制冷方法	200
学习任务 1 蒸气喷射式制冷循环与空气压缩式制冷循环	201
学习任务 2 混合制冷剂制冷循环	211
学习任务 3 热电制冷、热声制冷、热管制冷	217
学习任务 4 磁制冷、太阳能制冷	231
附录	243
附录1 NH ₃ 、R12、R22、R134a 的液体和饱和蒸气热力性质	243
附录2 常用单位换算	247
附录3 NH ₃ 、R12、R22、R134a 的压焓图	248
参考答案	252
参考文献	266

单元一

工程热力学基础

单元概述：工程热力学是关于热现象的宏观理论，研究的方法是宏观的，它以归纳无数事实所得到的热力学第一定律、热力学第二定律和热力学第三定律作为推理的基础，通过物质的温度 T 、压力 p 、比容 V 、内能 U 、焓 H 和熵 S 等宏观参数和受热、冷却、膨胀、收缩等整体行为，对宏观现象和热力过程进行研究。工程上常把蒸气表变成蒸气图。常用的蒸气图有压焓图 ($p-H$)、温熵图 ($T-S$)、焓熵图 ($H-S$) 等。理想气体的基本热力过程包括定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程。

单元目标：

1. 能了解热力系统的基本状态参数；
2. 能理解卡诺定理，掌握卡诺循环的基本组成；
3. 会叙述热力学第一、二、三定律的内容；
4. 能了解热力过程和热力循环；
5. 能准确计算气体的内能、焓、熵；
6. 能记住蒸气的等压产生过程中的三个阶段、五种状态；
7. 会认识蒸气的压焓图、温熵图、焓熵图；
8. 能熟练掌握物质的三种状态变化过程。

学习任务 1

工程热力学的基本概念

任务概述 >>

在工程热力学中为实现热能与机械能或其他能量的转换或传递过程中所用的工作介质,称为工质。在相互作用的各部分物质中,人为选取某个空间内的物质作为研究对象,这种作为研究对象的某指定空间内的物质称为热力学系统或热力系统,简称系统或体系。工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。描述制冷剂状态的物理量称为状态参数。常用的状态参数有六个,如温度 T 、压力 p 、比容 V 、内能 U 、焓 H 和熵 S 等,其中温度、压力和比体积三个物理量为热力学状态的基本参数。热力循环引入了卡诺循环与逆卡诺循环。

任务目标 >>

1. 能叙述开口系统与闭口系统的区别。
2. 会根据三种温标的换算关系式进行三种温标的换算。
3. 能准确把握卡诺定理的实质。

知识链接 >>

一、工质与热力系统

1. 工质

在工程热力学中为实现热能与机械能或其他能量的转换或传递过程中所用的工作介质,称为工质。工质是实现能量转换与传递的内部条件,选用合适的工质可以提高热力设备的效率。工质一般是流体,较为理想的工质是气体或水蒸气,因为气态物质有良好的流动性和可压缩性,便于吸收、输送、释放或转换能量。例如空气、水和水蒸气容易获得,成本低廉,并具有无腐蚀性、比热容和汽化潜热较大等优良性能,所以是最常用的工质。在制冷系统中通常将工质称为制冷剂,如氨、氟利昂等。

2. 系统、边界与外界

(1) 系统

热力学中,为了便于研究与分析问题,通常根据所研究问题的需要,在相互作用的各部分物质中,人为选取某个空间内的物质作为研究对象,这种作为研究对象的某指定空间内的物质称为热力学系统或热力系统,简称系统或体系。或者说,把包含在规定边界之内的物质的总和称为热力系统。如图 1-1-1 所示,气缸中虚线包围的气体

就是我们的研究对象，则气体便是热力系统。

(2) 边界

系统与外界之间的分界面称为界面或边界，其作用是确定研究对象，将系统与外界分隔开来。所以说热力系统是由界面包围着的作为研究对象的物质的总和。系统和外界之间，通过边界进行能量的传递与物质的转移。系统的边界可以是实际存在的，也可以是假想的；可以是固定不变的，也可以是运动的或可变形的。如图 1-1-1 中的边界就是气缸壁及活塞端面表面等实物界面相一致的实际边界。又如图 1-1-2 所示，一个真空的容器，当与外界连接的阀门打开时，外界空气在大气压力作用下将流入容器，直至它们的压力与外界大气压力平衡为止。我们可以把大气中流入容器的那部分空气用一个假想的边界从大气中划分出来，那么，容器内壁以及假想的边界所包围的空气便是我们研究的热力系统。当阀门打开后，随着空气流入容器，假想的边界受边界空气压缩，这时边界及整个系统都发生收缩。

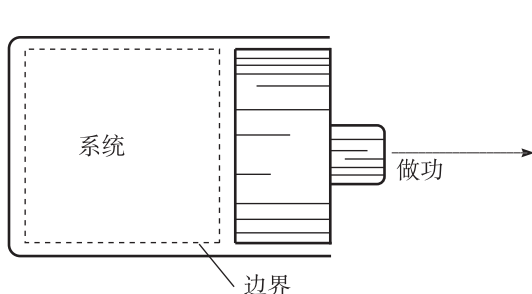


图 1-1-1 热力系统

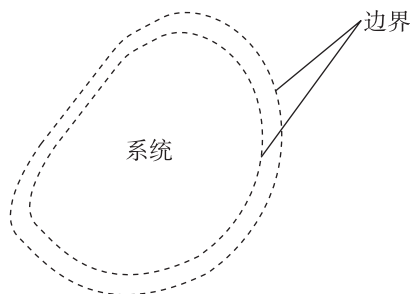


图 1-1-2 可变形热力系统

(3) 外界

边界以外与系统相互作用的周围物质，称为外界或环境。系统与外界相互作用通常有三种形式，即功、热和物质的交换。于是可以设想外界是能够分别接收或给予系统热量、功和质量的热力源或物体。

3. 闭口系统与开口系统

在热力过程中，系统与外界之间通过边界可以有能量的传递（例如功或热量），也可以有物质的流入或流出。按照系统与外界有无物质交换的情况，系统可分为开口系统和闭口系统。

(1) 开口系统：系统和外界有物质的交换，这种系统称为开口系统或流动热力系统，如图 1-1-3 所示。这类系统的特点是有物质穿过边界，其内部的质量可以保持恒定或发生变化，系统边界所占空间的范围相对固定，故又可称为控制容积或控制体。如果开口系统内的工质质量与参数随时间变化，则称为不稳定流动开口系统；如果开口系统内的工质质量与参数不随时间变化，则称为稳定流动开口系统。

(2) 闭口系统：系统和外界可以有能量的交换，但没有物质的交换，这种系统称为闭口系统，如图 1-1-4 所示。这类系统的特点是没有物质穿过边界，其内部的质量

恒定不变，故又可称为定质量热力系统或控制质量。又因无物质流过边界进出热力系统，故也称为不流动热力系统。如果系统的边界可以移动，那么闭口系统的体积就能够改变。注意，闭口系统具有恒定的质量，但具有恒定质量的系统未必都是闭口系统。

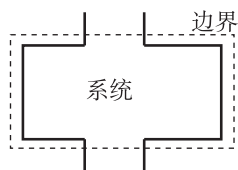


图 1-1-3 开口系统

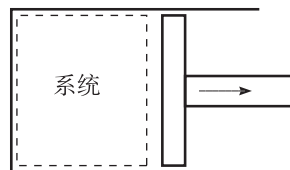


图 1-1-4 闭口系统

区分闭口系统和开口系统的关键是有没有物质穿过边界，并不是系统的质量有没有发生变化。控制质量或控制容积与外界的分界面称为控制面。热力工程中遇到的开口系统多数都有确定的空间界面，界面上可以有一股或多股工质流过。闭口系统与开口系统都可能通过边界与外界发生能量（功或热）的传递。

4. 简单系统、绝热系统与孤立系统

根据系统与外界之间所进行的能量交换情况不同，可以将系统分为简单系统、绝热系统与孤立系统三种。和外界不进行热交换的热力系统称为绝热系统；和外界既无能量交换又无物质交换的系统称为孤立系统；和外界只交换热量和一种形式的准静态功的系统称为简单系统。在简单系统中，表面现象、重力、电和磁的效应都不呈现出来。绝对的绝热系统和孤立系统是不存在的。孤立系统一定是闭口的和绝热的，但闭口系统或绝热系统不一定是孤立的。

5. 均匀系统与非均匀系统、单元系统与多元系统、可压缩系统

系统也可按其内部状况的不同而分为以下几种：内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致的系统称为均匀系统；由两个或两个以上的相所组成的系统称为非均匀系统；只含有一种化学成分物质的系统称为单元系统；由两种或两种以上物质组成的系统称为多元系统；由可压缩流体组成的系统称为可压缩系统；与外界只有热量和准静态容积变化功（膨胀功或压缩功）交换的可压缩系统称为简单可压缩系统。工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。

二、热力系统状态及基本参数

工程热力学以工程技术的理论研究物质的热力学性质、热能与机械能相互转换的规律以及有效利用热能的途径。此任务主要介绍制冷技术中经常用到的一些热力学概念。

在制冷设备中，热能与机械能的转换或热能的转移，都要借助于某种携带热能的工作物质的状态变化来实现，这类工作物质被称为制冷剂或制冷工质。

制冷工质在制冷系统中不断进行着热力学状态的变化，用于描述制冷剂状态的物理量称为状态参数。常用的状态参数有六个：温度 T 、压力 p 、比容 V 、内能 U 、焓 H 和熵 S ，其中温度、压力和比容三个物理量为热力学状态的基本参数。

1. 温度

(1) 温度的含义

物体温度的高低反映了物质内部分子热运动的剧烈程度，是大量分子运动动能的平均值，表示物体的冷热程度。

(2) 常用的温标及换算

衡量温度的标尺称为温标。在日常生活和制冷技术中常用的是摄氏温标、华氏温标和热力学温标（绝对温标）三种。常用的三种温标制（摄氏、华氏和绝对温标制），其内容见表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 常用的三种温标制

温标制	单位	说明	换算关系
摄氏温标 t (又叫国际百 度温标)	$^{\circ}\text{C}$	它是以纯净的水，在一个标准大气压下的冰点为 0 度，沸点为 100 度，其间 100 等分，每一等分定为 1 摄氏度，记作 1°C 。摄氏温标制为十进制，简单易算。我国与俄罗斯等国多采用。相应温度计为摄氏温度计	$F = (1.8t + 32)(^{\circ}\text{F})$ $t = (F - 32) / 1.8(^{\circ}\text{C})$ $T = (273 + t)(\text{K})$ $t = (T - 273)(^{\circ}\text{C})$
华氏温标 F	$^{\circ}\text{F}$	它是以纯净的水，在一个标准大气压下的冰点为 32 度，沸点为 212 度，其间 180 等分，每一等分定为 1 华氏度，记作 1°F 。因其分度较细，故准确性较高，但使用不便。英美各国仍采用。相应的温度计为华氏温度计	
绝对温标 T (也叫热力学 温标，是国 际制温标)	K	它规定以纯水的三相点作为基点。为了便于记忆，我们把纯净的水，在一个标准大气压下的冰点定为 273 度，沸点为 373 度，其间 100 等分，每一等分为 1 开氏度，记作 1K。在热力学中规定，当物体内部分子的运动终止，其绝对温度为绝对零度，即 $T = 0\text{K}$	

按国际规定，当温度在零上时，温度数值前面加“+”号（可省略）；当温度在零下时，温度数值前面加“-”号（不可省略）。三种温标的比较，如图 1-1-5 示。

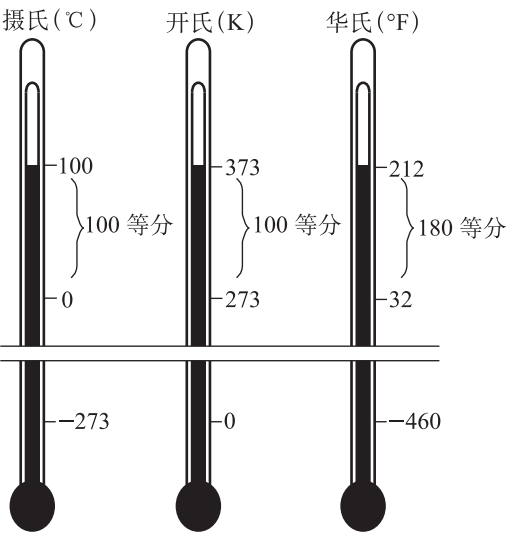


图 1-1-5 三种常用温标的比较

测量温度所使用的温度计种类很多，制冷技术中常用的有玻璃温度计、热电偶温度计、电接点式温度计、电阻温度计和半导体温度计等。

2. 压力

(1) 压力的定义及单位

在制冷技术中，压力是指单位面积所承受的垂直作用力，也叫压强，用 p 表示。压力的国际单位是帕（帕斯卡）Pa，或者牛顿/米²，1Pa 表示每平方米面积上所受的垂直作用力为 1 牛顿，即

$$p = F/S \tag{1-1-1}$$

式中： p 为压力，Pa；
 F 为作用力，N；
 S 为作用面积，m²。

由分子物理学可知，气体的压力是由于大量气体分子在无规则运动中对容器壁进行频繁撞击所产生的。

压力的单位还有几种表示：一种是以千克力表示，如千克力/厘米²（kgf/cm²）；一种是以液柱高度表示，如毫米水银柱高（mmHg）或毫米水柱高（mmH₂O）；还有大气压（atm）和“巴”（bar）等。

各种压力单位的换算关系为：

	Pa 帕	bar 巴	kgf/cm ²	atm	at	Torr	mm H ₂ O	mmHg	Psi
1 Pa 帕	1	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.0075	0.10197	0.0075	0.00014
1 bar 巴	100000	1	1.01972	0.9869	1.01972	750.062	10.1972	750.062	14.504
1 kgf/cm ²	98066.5	0.98067	1	0.9678	1	735.6	10.000	735.6	14.22
1 atm 标准 大气压	101325 (约 0.1MPa)	1.01325	1.033	1		760	10.332	760	14.7
1 at 工程大 气压	98067 (约 0.1MPa)	0.98067	1	0.9678	1	735.6	10.000	735.6	14.22
1 Torr 托	133.3	0.00133	0.00136	0.00132	0.00136	1	13.6	1	0.01934
1mm H ₂ O 毫米水柱	9.8067	0.000098	0.0001	0.0000968	0.0001	0.07356	1	0.07356	0.00142
1 mmHg 毫米汞柱	133.322	0.00133	0.00136	0.00132	0.00136	1	13.5951	1	0.01934
1 Psi 磅/寸 ²	6894.76	0.06895	0.07031	0.06805	0.07031	51.7149	703.07	51.7149	1

(2) 表压力和绝对压力

表压力是通过压力表上的数值表示的，是以一标准大气压作为基准，被测气体的实际压力与当地大气压力的差值。如果压力比大气压力低时，就是负值，称真空度（B）。表压力是为制冷系统运行和操作时直接观察得到的。

绝对压力是表示气体实际的压力值，等于表压力和大气压力之和，即

$$P_a = P_0 + P_g \tag{1-1-2}$$

式中： p_a 为绝对压力；

p_0 为大气压力；

p_g 为表压力。

凡是气体压力低于 10^5 Pa 的状态称为真空。真空分为低真空、高真空和超高真空。真空系统内的压力值与大气压力的差值称为真空度。差值越大，负压就越大，系统内的绝对压力则越小，真空度就越高。

绝对压力、表压力和真空度的关系如图 1-1-6 所示。

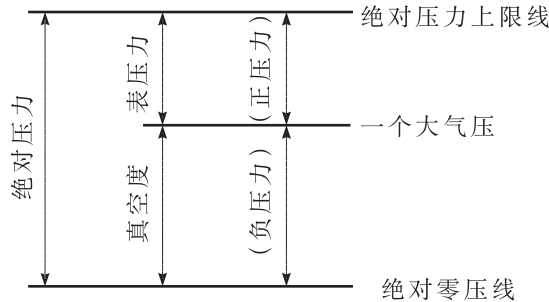


图 1-1-6 绝对压力、表压力和真空度的关系

3. 比容

比容是指单位质量的制冷剂所占的容积，用 V 表示，其单位是 m^3/kg ，或升/千克 (L/kg)。制冷剂蒸气的质量体积是决定压缩机制冷量的重要参数。例如：1kg 氟利昂 12，在标准状态下（绝对压力为 $101\,325 \text{ Pa}$ ，温度为 0°C ），其蒸气的容积是 155.97 L ，它的比容则为 $155.97 \text{ L}/\text{kg}$ ；其液体的容积是 $0.672\,7 \text{ L}$ ，比容为 $0.672\,7 \text{ L}/\text{kg}$ 。

比容是物质分子之间密集程度的物理量。对于气体而言，分子间距离大，比容也大，密集程度就小，可压缩性就大；反之，比容小，则分子间的密集程度大，可压缩性就小。

4. 内能和焓

当施加外力对气体压缩时，它从外界得到一定的压缩功，由热力学第一定律知道，有一定的外界能量输入，它不会自行消失，一定贮存在气体内部。这种贮存在气体内部的能量被称为内能。从分子运动的观点来分析，气体的内能与分子的运动和分子间的作用力有关，即内能是分子动能和势能的总和。内能是一个气体状态参数，但它不能直接测量，而是用热力学第一定律推论来的。对于 1kg 气体而言，内能用 ν 表示，单位为 J/kg 。由于 ν 无法测出，实际计算中只用其相对变化值，一般假定 0°C 状态下的气体内能为零。

在热力工程计算中，经常碰到气体内能和推动功 pV 两项，它们的和称为焓，用符号 h 表示为

$$h = \nu + pV \quad (1-1-3)$$

从上式可看出，焓由三个状态参数 ν 、 p 、 V 复合而成，因此它也是气体状态参数。

在热机工程和制冷工程中，焓经常用到，而且使计算大大简化。

与内能一样，焓值也不能直接测量，只能用其相对值。制冷工程中一般假定 0℃ 饱和液体的焓为 200 或 500，由此各种状态下的焓值便可确定。

由于焓包含在气体内部，因此它是随气体（制冷剂）流动的能量。这对换热器热力计算很重要。

5. 熵

熵是表征工质状态变化时，与外界换热程度的一个导出的热力状态参数。对 1kg 工质而言，熵用符号 S 表示，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。与焓一样，熵的绝对值也无法测定，只需了解工质状态变化时熵的变化情况，即用其相对值。

1kg 工质在等温加热过程中，从外界加入热量 Q ，加热时的温度为 T （绝对温度），加热前后的熵分别为 S_1 、 S_2 ，对于理想过程可得到

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (1-1-4)$$

或
$$Q = T(S_2 - S_1) \quad (1-1-5)$$

因此，引入状态参数熵以后，理想过程的热力计算就很方便，在制冷技术中也很有用处。

当 $S_2 > S_1$ 时， $Q > 0$ ，表示工质从外界吸收热量；当 $S_2 < S_1$ 时， $Q < 0$ ，表示工质对外界放热；当 $S_2 = S_1$ 时， $Q = 0$ ，表示等熵过程，即绝热过程。显然，对于制冷剂的理想绝热过程来说，是一个等熵过程。

三、热量、热能和功

一切物体都由大量的分子组成，这些分子总是永不停息地做无规则运动，分子间存在作用力。这就是分子运动论的基本观点。由于分子运动，使分子具有动能；由于分子间的作用力，使分子具有势能。物体内动能和势能的总和，称作物体的内能。内能与物体的温度、体积、质量和组成有关。对于一定质量的某种物体（如冰箱中的制冷剂）来说，当它的体积或温度变化时，都将会引起物体内能的变化。

1. 热能

物质分子热运动的动能，是能的一种形式，可以随着物质分子的运动由一种形态转换为另一种形态，也可以随着物质分子的运动从这一个物体转移到另一个物体，或从物体的这一部分转移到另一部分。

2. 热量

热量是物质热能转移时的度量，只有在热能转移过程中才有意义，是表示某物体吸热或放热多少的物理量。热量在热力学中用符号“ Q ”表示，工程单位是“cal（卡）”。

在实行法定计量单位之前，在热力学工程上把 1 g 水温度升高或降低 1℃ 时变化的热量定为 1 cal。在法定计量单位制中规定，热量的单位与功一样，用“J（焦耳）”或

“kJ（千焦耳）”。

(1) 热量与温度

物体温度升高时要从外界吸收热量，而温度降低时则要向外界放出热量。要使水的温度升高，必定要用燃料对其加热，或用电能及其他能对其供热。热量是表示物体吸热或放热多少的物理量，也是能量的一种表现形式。物质具有的热能，是指物质分子所具有的动能和位能的总和。物质的热动能是由分子的无规则运动产生的，物质受压力、日光照射、通电、化学作用或燃烧等，均可使分子运动加剧，引起热动能的增加。物质的热位能是由物质分子间的相对位置决定的，物质接收外界能量而膨胀或改变其形态，例如由液态变为气态，将使分子间的距离加大，这就转换为物质的位能。

热量只在热能转移过程中才有意义，制冷技术就是研究和利用热能的转移过程及其数量的科学。例如电冰箱，我们研究的是制冷机从箱内移出多少热量到箱外，而没必要研究箱内具有热量的绝对值。如果要研究箱内热量的话，也只是讨论箱内移出或进入多少热量后，将产生什么变化。

热量和温度是两个不同的物理量，它们之间有着密切的联系，但概念不同。对于冷库我们要获得一定的低温温度，就必须从冷库中转移出足够的热量，但由于冷库大小不同、货物多少不等等因素，要得到同一温度，显然移出的热量是不等的。

(2) 热量的单位与换算

工程单位制中热量的单位为大卡（kcal），1 大卡为 1kg 纯水，在 101 325Pa 压力（在一个标准大气压）下温度升高 1℃ 所需要的热量。1g 纯水升高 1℃ 所需的热量为 1 卡。

$$1 \text{ 大卡 (kcal)} = 1000 \text{ 卡 (cal)}$$

在法定计量单位中热量的单位为焦耳，用符号 J 表示。

$$1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal} \quad (1 \text{ kJ} = 0.24 \text{ kcal})$$

或
$$1 \text{ kcal} = 4.18 \text{ kJ}$$

在英制单位中热量的单位为“英热单位”。1 磅纯水升高或降低 1 °F 所吸收或放出的热量，称为一个英热单位（British thermal unit）。

$$1 \text{ Btu} = 0.25 \text{ kcal} = 1.05 \text{ kJ}$$

热量单位间的换算关系见表 1-1-2。

表 1-1-2 热量单位换算

单位	kJ	kcal	Btu
kJ	1	0.24	0.95
kcal	4.18	1	3.97
Btu	1.05	0.252	1

(3) 比热

物体的温度发生一定量的变化时，物体所吸收或放出的热量，不仅与物体的质量有关，还与物体的性质有关，而与物体的数量无关。把单位质量的某物质升高或降低 1℃ 所吸收或放出的热量，称为这种物质的比热，比热用符号 “ c ” 表示，在工程上使用的单位是 “ $\text{cal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ” 或 “ $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ”。

物质不同，其比热不同，同类物质状态不同，其比热也不同。例如水的比热为 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，而冰的比热为 $2.09 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。又如瘦牛肉的比热为 $3.21 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，而瘦牛肉冻结后的比热为 $1.71 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。各种物质的比热可从制冷手册中查出。表 1-1-3 列出了几种物质的比热。

表 1-1-3 几种物质的比热

物质	铜	铝	玻璃	软木	空气	油
比热 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	0.39	0.88	0.75	2.10	1.006	1.68

物体温度的变化将伴随着热量的转移，即得到热量或失去热量。得到或失去热量的数值，与该物质的比热、质量及温度变化值成正比。计算式为

$$Q = cm (t_2 - t_1) \tag{1-1-6}$$

式中： Q 为热量， kJ ；

c 为物质的比热， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

m 为物质的质量， kg ；

t_1 为物体初始温度， $^\circ\text{C}$ ；

t_2 为物体终止温度， $^\circ\text{C}$ 。

例 1 现有西瓜 3.5kg，温度 34°C ，放入电冰箱冷藏室，待其温度下降至 6°C 时，问西瓜向电冰箱内放出多少热量？

解：查资料得知，西瓜的质量热容是 $3.76 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，由式 $Q = cm (t_2 - t_1)$ 计算：

$$Q = 3.76 \times 3.5 \times (34 - 6) = 368.5 \text{ (kJ)}$$

例 2 现有瘦牛肉 1.5kg，温度为 32°C ，将牛肉冷却到 0°C ，问牛肉放出多少热量？

解：牛肉的比热为 $3.21 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，

$$Q = 1.5 \times 3.21 \times (32 - 0) = 154.1 \text{ (kJ)}$$

食品向电冰箱内放出的热量，就是制冷机向箱外转移的热量，即电冰箱制取的冷量。当物质放热时，温度下降， $t_1 < t_2$ ， $Q < 0$ ，为负值；当物质吸热时，温度上升， $t_2 > t_1$ ， $Q > 0$ ，为正值。但通常不区分热量的正、负，根据 t_1 和 t_2 的温差 Δt 计算出热量值即可使用，因为计算热量的内容早已明确。

①定容比热：一定量的气体在一定体积下吸热或放热，温度升高或降低而体积保持不变，这一过程中气体的比热称为定容比热，用符号 “ c_v ” 表示。

②定压比热：一定量的气体在一定压力下吸热或放热，温度升高或降低而压力保持不变，这一过程中气体的比热称为定压比热，用符号“ c_p ”表示。

由于温度升高时，气体尚需克服外界抵抗力而做膨胀功，因此，同样升高 1°C ，在定压情况下比在定容情况下加热时需要更多的热量，所以定压比热总是大于定容比热，即

$$c_p > c_v \quad (1-1-7)$$

③绝热指数：同一气体的定压比热与定容比热之比称为这种气体的比热比，也称作这种气体的绝热指数，用符号“ K ”表示。

$$K = c_p / c_v \quad (1-1-8)$$

3. 功和功率

功：也是能的一种。当对物体施加外力使物体产生移动时，就表示外力对物体做了功。施加的外力越大，或物体移动的距离越远，就表明对物体做的功越大。功的符号是“ W ”，单位“ J （焦耳）”或“ kJ （千焦耳）”。

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 牛} \cdot \text{米})$$

功率：单位时间内所消耗的功称为功率，符号“ P ”，单位“ W （瓦）”或“ kW （千瓦）”。

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} \quad (1 \text{ 瓦} = 1 \text{ 焦耳/秒})$$

热功当量：热和功都是能，它们彼此之间可以相互转换。在转换过程中，始终保持着一定的当量关系，且能量的总和不变。

实验证明， 1 cal 的热量与 4.184 kJ 的功相当，这个当量关系就是热功当量，即

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ kJ}$$

四、热力过程与热力循环

1. 热力过程

如果一个热力系一直处于平衡态，不发生状态变化，也就是与外界没有任何相互作用，既不做功，也不传热，这样也就达不到热功转换的目的。因此，热力学研究的热力系，应该是状态不断变化的热力系。热力系状态连续的变化称为热力学过程，简称热力过程，如图 1-1-7 所示。热力系与外界只有通过热力过程才能发生相互作用，即交换热量和功，因此只有通过热力过程才能实现热能与机械能之间的转换，达到热力学的研究目的。

但是，要让热力系经历热力过程，就必须存在某种不平衡势差，破坏热力系原有的平衡，从而使热力系的状态发生变化。不平衡势差是热力系经历热力过程的必要条件。但这样一来，热力系经历的实际过程必将是一系列的非平衡态。这些非平衡态实际上已无法用状态参数来描述，因此需要对实际过程进行简化，建立热力过程理想化的物理模型。准静态过程和可逆过程就是两种理想化的模型。

(1) 准静态过程

图 1-1-7 中由气缸中的工质组成一个封闭热力系。当移去一块重物时, 活塞因受气体压力推动而升起, 这时气体体积膨胀, 压力下降, 工质又达到一个新的平衡状态。在这一热力过程中, 由于气缸内靠近活塞的气体先膨胀, 故这一部分气体压力比热力系其他部分的气体压力先降低, 因此, 整个热力系在这一瞬间不能用一个相同的压力来描述其变化, 在状态参数坐标图上也不能用一连续曲线来表述这一过程。

如将图 1-1-7 所示的装置中, 用大量的微小颗粒代替重物, 并一粒一粒地慢慢地将它们取下, 则气体的体积和压力将一次一次地发生微小的变化。由于其偏离原平衡状态不远, 并每次微小变化后又及时地建立新的平衡状态, 这样的热力过程是由一系列中间平衡状态所组成的, 我们称之为准静态过程或拟平衡态, 如图 1-1-8 所示。

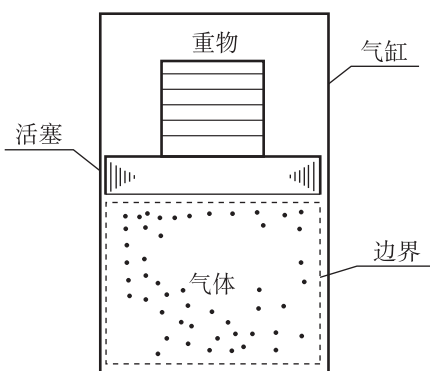


图 1-1-7 热力过程示意图

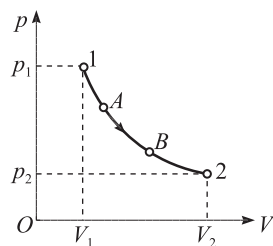


图 1-1-8 准静态过程

准静态过程的特征是：

①在过程中, 工质内部不断存在力平衡和热平衡, 或者说平衡被破坏的程度无限小。

②由于要保证热力系随时处于平衡状态, 所以过程进行得无限缓慢。

③在坐标图上可用连续的曲线来描述准静态过程, 如图 1-1-8 所示的 1、2 过程。而对移去重物的热力过程, 其过程曲线就不是连续曲线, 而只能用点 1、A、B、2 来描述。

准静态过程在热力学中有很重要的意义, 由于只有在平衡状态时, 工质的状态才能用状态参数来描述, 因此, 热力学所研究的热力过程, 一般均指准静态过程。

(2) 可逆过程

所谓可逆过程是指热力系内的工质在经历某一热力过程后, 不但能按原过程的反方向逆行至起点, 而且逆行时所经过的状态与顺行时完全相同; 逆行终了时, 不但工质能恢复到原来的初态, 而且与热力系相关的外界也要恢复到原来的初态。

若热力过程是可逆的, 则必须满足下述条件:

①传热时热力系内部、热力系与外界之间不存在温差;

②膨胀 (或压缩) 时热力系内部、热力系与外界之间不存在压力差;

③不存在机械摩擦。

显然，在工程中所谓的可逆过程是不存在的。然而，可逆过程中没有能量的损耗，在理论上是热变功最有效的过程。在工程热力学中，往往引用可逆过程的概念来研究热力系与外界产生的总效果。在研究热力过程和求解热力学问题时，应首先注意过程可逆与否。

准静态过程和可逆过程的区别主要在于：准静态过程只注重热力系统内部的状态参数是否随时能保持一致，而可逆过程不但要满足准静态过程的条件，而且对热力系统以外的环境也有要求。

2. 热力循环

(1) 可逆循环和不可逆循环

能量之间的转换，通常都要经过工质在相应的热力设备中进行循环来实现的。为此，工质在经历了一系列状态变化过程后，必须能回到原来状态。这种工质从某一状态出发，经过一系列中间状态的变化过程，最后又回到原始状态的全过程，称为热力循环，简称循环。若将循环过程表示在状态参数坐标图上，如压容图，则为一封闭的曲线。

[压容图是以 p （压力）为纵坐标， V （比容）为横坐标的热力图] 如图 1-1-9 所示。

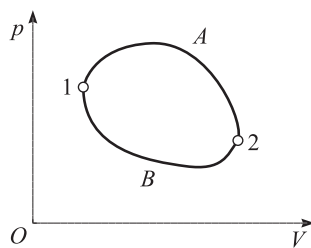


图 1-1-9 热力循环压容图

全部由可逆过程组成的循环称为可逆循环；若循环中有部分过程或全部过程是不可逆的，则该循环为不可逆循环。在状态参数的平面直角坐标系上，可逆循环的全部过程构成一条封闭曲线。

热力循环根据循环效果及进行方向的不同，可以把循环分为正向循环和逆向循环。将热能转化为机械能的循环叫作正向循环，它使外界得到功；将热量从低温热源传给高温热源的循环叫作逆向循环，一般来讲逆向循环必然消耗外功。根据可逆性又可分为可逆循环和不可逆循环。

热力循环的经济指标通常用工作系数来表示，即获得的收益与付出的代价的比值。

(2) 热力循环的特征

无论是正循环还是逆循环都具有下述特征：

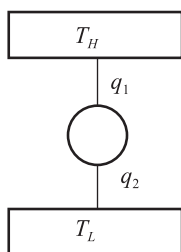
- ①工质的任意一个状态参数的净变化为零。
- ②循环的净功等于循环的净传热量。

五、卡诺循环与逆卡诺循环

1. 卡诺循环

(1) 卡诺循环的组成

1824 年法国工程师卡诺描述了一个工作于两个热源之间，实现机械能与热能相互



转换的一个循环，即卡诺循环。当循环逆向进行时称为逆卡诺循环。

卡诺假设工作物质只与两个恒温热源交换热量，没有散热、漏气、摩擦等损耗。为了使循环过程简单，理想的卡诺循环只有一个高温热源 (T_H) 和一个低温热源 (T_L)，在循环过程中工质只和这两个热源交换热量，由于此过程要求传热是可

图 1-1-10 无温差传热系统逆的，传热就要无温差。其示意图如图 1-1-10 所示。

要实现无温差传热，就要求工质从高温热源吸热时做等温膨胀；向低温热源放热时做等温压缩。要构成循环，在两个温度不同的等温过程之间，还必须有其他温度可变的过相连接。由于只允许和两个热源交换热量，同时考虑可逆要求，则使工质温度由 T_H 降至 T_L 和由 T_L 回升到 T_H 的过程，只能是绝热等熵膨胀过程和绝热等熵压缩过程。于是，理想的可逆热力循环，应由等温膨胀、等熵膨胀、等温压缩和等熵压缩四个可逆过程组成。正向卡诺循环温熵图（以气温为纵坐标，熵为横坐标的热力图）如图 1-1-11 (a) 所示。

在图 1-1-11 (a) 中， T 为热力学温度， S 为熵，高温热源的温度为 T_H ，低温热源的温度为 T_L 。图中 1—2 为等温吸热过程，2—3 为等熵压缩过程，3—4 为等温放热过程，4—1 为等熵膨胀过程。

图 1-1-11 (b) 为逆卡诺循环，其过程与正卡诺循环正好相反。

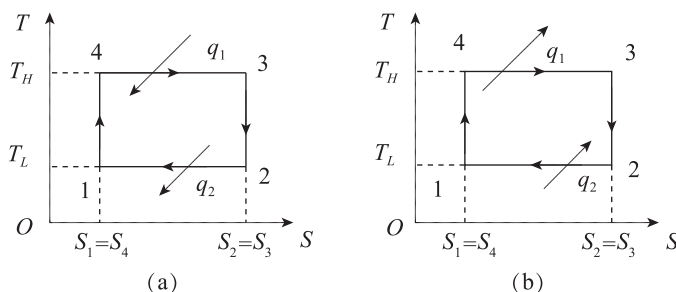


图 1-1-11 卡诺循环的温熵图

(2) 制冷系数和供热系数

制冷循环是从低温热源吸热，向高温热源放热，即逆卡诺循环。应用逆卡诺循环的目的有两种：一是制冷，即获得需要的低温环境，如电冰箱、空调等；二是供热，如在冬季使用的热泵型房间空调器，就是从温度相对要求低的室外大气环境吸热，向温度相对较高的室内供热，以达到取暖的目的。

制冷循环从低温热源吸收的热量用 q_2 表示，向高温热源放出的热量用 q_1 表示，消耗的外功用 W 表示。为简便起见， q_1 和 W 都代表放热和外功的绝对值。在制冷循环中，输入系统的能量为 $q_2 + W$ ，输出系统的能量为 q_1 ，并且由于通过循环工质恢复到初态，系统贮存的能量不变。根据能量守恒定律可知

$$q_1 = q_2 + W \quad (1-1-9)$$

制冷机工作的好坏用制冷系数来衡量, 制冷系数 ε 表示工质从低温物体吸取的热量与外界消耗的机械功之比。制冷循环从热源吸收的热量为 q_2 , 消耗外功为 W , 因此制冷系数的计算通式为

$$\varepsilon = \frac{q_2}{W} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \quad (1-1-10)$$

对于逆卡诺循环, 由图 1-1-11 (b) 可见, $q_1 = T_H(S_2 - S_1)$, $q_2 = T_L(S_2 - S_1)$, 代入上式可得逆卡诺循环制冷系数

$$\varepsilon_c = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (1-1-11)$$

可见, 提高低温热源的温度和降低高温热源的温度, 都可提高逆卡诺循环的制冷系数。

热泵工作的经济性用供热系数 μ 来衡量, 供热系数 μ 指所获得的热量与所消耗的功之比。热泵工作循环向高温热源放出的热量为 q_1 , 消耗外功仍然是 W , 因此供热系数的计算通式为

$$\mu = \frac{q_1}{W} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} \quad (1-1-12)$$

对于逆卡诺循环, 同样有 $q_1 = T_H(S_2 - S_1)$, $q_2 = T_L(S_2 - S_1)$, 代入上式可得逆卡诺循环的供热系数为

$$\mu_c = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (1-1-13)$$

对于同一制冷循环, 其供热系数与制冷系数有如下关系

$$\mu = \varepsilon + 1 \quad (1-1-14)$$

此关系对逆卡诺循环同样成立, 即

$$\mu_c = \varepsilon_c + 1 \quad (1-1-15)$$

可见, 制冷循环的制冷系数越高, 其供热系数也越高。提高低温热源的温度和降低高温热源的温度同样可提高逆卡诺循环的供热系数, 并且, 制冷系数不一定大于 1, 供热系数总是大于 1 的。热泵将从低温热源吸收的热量及消耗外功的热量一同排放给高温热源, 因此供热系数恒大于 1。热泵是一种很经济的供热方式。

逆卡诺循环是一种理想的制冷循环, 一切实际的制冷循环的制冷系数和供热系数都小于逆卡诺循环的制冷系数和供热系数。因此, 改进一切制冷循环的方向是使它们的制冷系数尽量接近逆卡诺循环, 方法是尽量提高低温热源的温度和降低高温热源的温度。

例 3 若家用空调在夏季制冷时, 在 10°C 的低温热源和 30°C 的高温热源之间工作, 并假定其循环为逆卡诺循环, 求它的制冷系数。

$$\text{解: } \varepsilon_c = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{10 + 273}{(30 + 273) - (10 + 273)} = 14.15$$

例 4 冬天用一热泵对房屋供热, 若房屋热损失是每小时 40 000 kJ, 室外环境温度 为 -5°C , 问要使房屋内部保持室温为 20°C , 则带动该热泵所需的最小功率是多少? 若 直接采用电炉采暖, 则需消耗多少功率?

解: 当热泵按逆卡诺循环工作时, 其供热系数最高, 带动热泵所需功率就最小, 因此, 应按逆卡诺循环计算。

现热泵工作于 -5°C 和 20°C 两个热源之间, 当它按逆卡诺循环工作时, 其供热系 数为

$$\mu_c = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{20 + 273}{(20 + 273) - (-5 + 273)} = 11.7$$

$$\text{根据 } \mu_c = \frac{q_1}{W}, \text{ 则 } W = \frac{q_1}{\mu_c} = \frac{40\,000}{11.7} = 3\,418.8 \text{ (kJ)}$$

因此, 带动该热泵所需最小功率为

$$P = \frac{W}{t} = \frac{3\,418.8}{3\,600} = 0.95 \text{ (kW)}$$

若直接采用电炉采暖, 电炉每小时电流所做的功应为 40 000 kJ, 则电炉所需功率为

$$P_{\text{炉}} = \frac{W_{\text{炉}}}{t} = \frac{40\,000}{3\,600} = 11.11 \text{ (kW)}$$

可见, 用热泵供暖较之电炉要经济得多。

2. 卡诺定理

以理想气体为工作物质的可逆卡诺循环, 其热效率仅取决于高温及低温两个热源的 温度。将之推广为适用于任意可逆循环的普遍结论, 即“所有工作于同温热源与同 温冷源之间的热机, 其效率都不能超过可逆机”, 这就是卡诺定理。

由卡诺定理可以得出两个推论:

推论一: 在两个不同温度的恒温热源间工作的一切可逆热机, 具有相同的热效率, 且与工质性质无关。

推论二: 在两个不同温度的恒温热源间工作的任何不可逆热机, 其热效率总小于 在这两个热源间工作的可逆热机的热效率。

根据卡诺定理, 对于工作于高温热源 T_1 和低温热源 T_2 之间的一切热机的效率可表 示为: $\eta \leq \eta_R = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 。

式中, η_R 为卡诺机的效率, 等号对可逆机成立。小于号对不可逆机成立。对于可 逆机而言, 它们的效率都等于卡诺机的效率。

同样, 根据卡诺定理, 对于工作于高温热源 T_1 和低温热源 T_2 之间的一切制冷机的 制冷系数可表示为: $\varepsilon \leq \varepsilon_r = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ 。

卡诺定理虽然讨论的是可逆机与不可逆机的热机效率问题, 但它具有非常重大的 意义。它在公式中引入了一个不等号, 这对于其他过程 (包括化学过程) 同样可以使

用。就是这个不等号解决了化学反应的方向问题。同时，卡诺定理在原则上也解决了热机效率的极限值问题。

卡诺循环和卡诺定理在历史上首次奠定了热力学第二定律的基本概念，对提高各种热动力机的效率指出了重要方向，即尽可能提高高温热源的温度和降低低温热源的温度。

3. 逆卡诺循环

工作在两个热源之间的所有热力循环，以卡诺循环的热效率为最高。由此可以推论，工作于高温热源（通常为大气环境） T_1 与低温热源（通常为被冷却物体或空间） T_2 之间的一切制冷循环，以逆卡诺循环的制冷系数为最高。逆卡诺循环是由图 1-1-12 所示的四个过程所组成的，其中 1—2 为定熵压缩过程，2—3 为定温放热过程，3—4 为定熵膨胀过程，4—1 为定温吸热（制冷）过程。

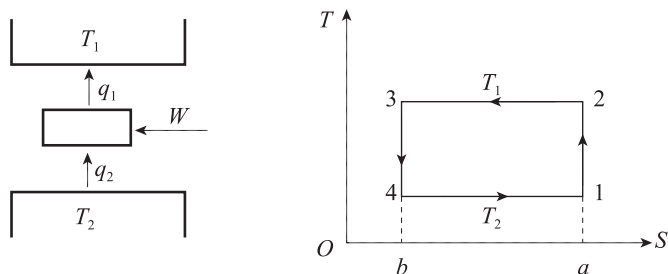


图 1-1-12 逆卡诺循环的温熵图

循环的制冷量（即 1kg 工质从低温物体或空间吸收的热量）为： $q_2 = T_2 (S_a - S_b)$

循环放热量为： $q_1 = T_1 (S_a - S_b)$

循环所消耗的净功 $W_0 = q_1 - q_2 = (T_1 - T_2) (S_a - S_b)$

循环的制冷系数 $\varepsilon = q_2 / W_0 = T_2 / (T_1 - T_2)$

由上式可知：（1）逆卡诺循环的制冷系数只与热源和冷源的温度 T_1 和 T_2 有关，而与工质的性质无关；（2）在一定的环境温度 T_1 下，制冷系数只与被冷却的物体（或空间）的温度 T_2 有关。 T_2 越低， ε 越小，循环所消耗的净功越大。为了省功，应在满足所需低温要求的情况下，不过分追求更低的温度。例如， -8°C 就能满足冷藏物品的要求，就不必把冷库的温度维持在 -8°C 以下。这一原则同样也适用于各种实际制冷循环。

实际制冷循环的形式与制冷工质的性质有关，故实际制冷循环并不按逆卡诺循环工作。

拓展提高 >>

1. 卡诺定理验证

设可逆机 R （即卡诺机）和任意的热机 1 工作在两个热源之间，如图 1-1-13（a）所示。调节两个热机，使它们所做的功相等。设可逆机 R 从高温热源吸收热量为 Q_1 ，做功为 W ，向低温热源释放的热量为： $Q_1 - W$ ，则其热机效率为

$$\eta_R = \frac{W}{Q_1} \quad (1-1-16)$$

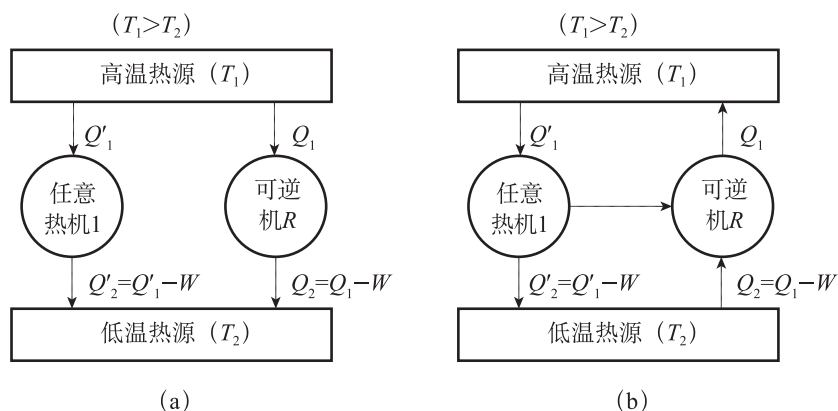


图 1-1-13 卡诺定理的证明

设另一任意热机 1, 从高温热源吸收的热量为 Q'_1 , 做功为 W , 向低温热源释放热量为: $Q'_1 - W$, 则热机 1 效率为

$$\eta_1 = \frac{W}{Q'_1} \quad (1-1-17)$$

先假设热机 1 的效率大于可逆机 R , 即 $\eta_1 > \eta_R$, 由于可逆机与任意热机 1 所做功相等, 所以可得 $Q_1 > Q'_1$ 。

现在用任意热机 1 带动卡诺可逆机 R , 使卡诺机 R 逆向转动, 则卡诺机成为制冷机, 所需的功 W 由热机 1 供给, 如图 1-1-13 (b) 所示, 卡诺机从低温热源吸收热量为: $Q_1 - W$, 向高温热源释放热量为 Q_1 。热机 1 向低温热源放出的热量为: $Q'_1 - W$, 向高温热源吸收的热量为: Q'_1 。循环工作一周后, 在两机中工作的物质均恢复为原态, 系统除与热源之间有热量交换外, 状态无其他变化。在此过程中, 易知系统从低温热源吸收的热量为

$$\Delta Q = (Q_1 - W) - (Q'_1 - W) = Q_1 - Q'_1 > 0 \quad (1-1-18)$$

系统向高温热源释放的热量为: $\Delta Q = Q_1 - Q'_1 > 0$

可见, 系统从低温热源吸收的热量等于向高温热源释放的热量, 系统的状态无任何变化, 无消耗外功, 却实现了热量从低温物体向高温物体的转移, 很显然违反了热力学第二定律, 所以最初的假设 $\eta_1 > \eta_R$ 不能成立。

因此应有: $\eta_1 \leq \eta_R$ 。即所有工作于同温热源与同温冷源之间的热机, 其效率都不能超过可逆机。这就证明了卡诺定理。

2. 多热源的可逆循环

可以证明, 热源多于两个的可逆循环, 其热效率低于同温限间工作的卡诺循环。如图 1-1-14 所示, 在吸热过程 $e-h-g$ 和放热过程 $g-l-e$ 中工质的温度都在变化, 要使循环过程可逆, 必须有无穷多个热源和冷源, 热源的温度依次自 T_e 逐个连续升高到 T_h , 再降低到 T_g ; 冷源则从 T_g 逐个连续降低到 T_l , 再升到 T_e 。任何时候工质和热

源间均保持无温差传热。

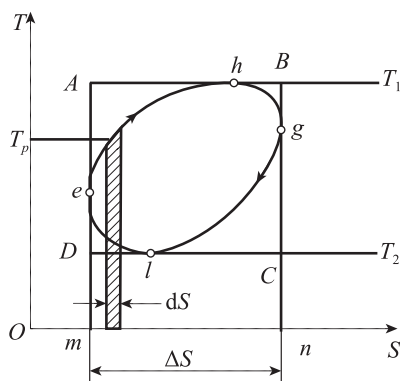


图 1-1-14 多热源可逆循环

例如工质温度变化到 T_p 时向温度为 T_p 的热源吸取热量, $\delta q = T_p dS$, 从而保证了循环 $e-h-g-l-e$ 实现可逆, 可逆循环的热效率

$$\eta_1 = 1 - \frac{q'_2}{q'_1} = 1 - \frac{\text{面积 } gnmelg}{\text{面积 } ehgnme} \quad (1-1-19)$$

工作在 $T_1 = T_h$ 、 $T_2 = T_l$ 的卡诺循环 $A-B-C-D-A$ 的热效率

$$\eta_c = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\text{面积 } DCnmD}{\text{面积 } ABnmA} \quad (1-1-20)$$

因为 $q'_1 < q_1$, $q'_2 > q_2$, 所以 $\eta_1 < \eta_c$ 。

得出结论: 工作于两个热源间的一切可逆循环 (包括卡诺循环) 的热效率高于相同温限间多热源的可逆循环。

任务小结

本任务主要构筑工程热力学的基本概念。首先引进热力系统, 为描述系统, 引进了平衡态、状态参数、状态参数坐标图、温度、压力、质量、体积等概念和术语。能量转换是通过过程来实现的, 所以又有准静态过程、可逆过程、循环以及过程的功和热量等, 另外需要强调的是, 对概念的理解并不意味着死记硬背, 而是正确地把握和应用, 例如状态参数只是状态的函数, 与达到指定状态的中间过程无关, 因而可以建立起不论过程是否可逆, 只要初、终态相同, 其变化量就相同, 进行循环后状态参数必定恢复到原值等。

思考练习

一、填空题

1. _____ 是由界面包围着的作为研究对象的物质的总和。

2. _____表示了物体的冷热程度。
3. 在日常生活和制冷技术中常用温标有____、____、____等三种。
4. 工程热力学中讨论的大部分系统都是_____。
5. 热力学系统常用的状态参数有六个，如____、____、____、____、____、____等。

二、选择题

1. 对于反映流体压力的压力表示值读数有下列说法，其中（ ）不正确。
A. 表压力 B. 相对压力 C. 绝对压力 D. 真空度
2. 闭口系统是指系统与外界（ ）。
A. 无质量交换 B. 无热量交换 C. 无功的交换 D. 无任何交换
3. 工质的质量体积与工质的（ ）。
A. 温度成正比 B. 体积成反比 C. 密度成反比 D. 所受压强成反比
4. 与 36°C 相对应的绝对温标为（ ）。
A. -237K B. 309K C. -309K D. 237K
5. 与 30°C 相对应的华氏温标为（ ）。
A. -86°F B. 54°F C. -54°F D. 86°F

三、简答题

1. 什么是工质？什么是热力系统？什么是热力过程？
2. 常用的热力学基本状态参数有哪些？
3. 开口系统和闭口系统有什么区别？
4. 简述三种温标的换算关系。

学习任务 2

热力学定律

任务概述 > >

热力学共有四个定律。热力学第零定律定义了温度，给出了温度的测量方法。热力学第一定律是工程热力学的理论基础，是能量守恒定律在热力学上的应用，确定了热能和机械能之间转换时的数量关系，从能量“量”的方面揭示了能量转换的基本规律。热力学第二定律揭示了能量传递与转换过程进行的方向、条件和限度。热力学第

一定律和第二定律是热力学的两个基本定律。热力学第三定律揭示了绝对零度不可能达到，只能无限接近的规律。

任务目标 >>

1. 能叙述热力学第零定律、第一定律、第二定律、第三定律的内容。
2. 能用热力学定律解决热力系统的实际问题。
3. 准确把握热力学第零定律、第一定律、第二定律、第三定律的实质。

知识链接 >>

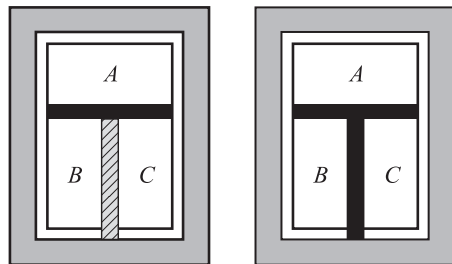
一、热力学第零定律

1. 热力学第零定律内容

如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡（温度相同），则它们彼此也必定处于热平衡。这一结论称作热力学第零定律。热力学第零定律的重要性在于它给出了温度的定义和温度的测量方法。定律中所说的热力学系统是指由大量分子、原子组成的物体或物体系。它为建立温度概念提供了实验基础。这个定律反映出：处在同一热平衡状态的所有的热力学系统都具有一个共同的宏观特征，这一特征是由这些互为热平衡系统的状态所决定的一个数值相等的状态函数，这个状态函数被定义为温度，而温度相等是热平衡的必要条件。

2. 热力学第零定律示意图

热力学中以热平衡概念为基础对温度作出定义的定律，通常表述为：与第三个系统处于热平衡状态的两个系统之间，必定处于热平衡状态。如图 1-2-1 中热力学第零定律示意图， A 、 B 、 C 为 3 个质量和组成固定，且与外界完全隔绝的热力学系统。将其中的 B 、 C 用绝热壁隔开，同时使它们分别与 A 发生热接触。待 A 与 B 和 A 与 C 都达到热平衡时，再使 B 与 C 发生热接触。这时 B 和 C 的热力状态不再变化，这表明它们之间在热性质方面也已达到平衡。第零定律表明，一切



B 与 C 热绝缘，却
同时与 A 热接触

B 与 C 也发生
热接触

图 1-2-1 热力学第零定律示意图

互为热平衡的系统具有一个数值上相等的共同的宏观性质——温度。温度计之所以能够测定物体温度正是依据这个原理。

二、热力学第一定律

1. 热力学第一定律的内容

阐述能量相互转换与守恒的热力学第一定律可表达为：在任何发生能量转换的热力过

程中，转换前后能量的总量维持恒定。它是自然界中的一个普遍规律，是对参与热力过程的各能量之间量的关系进行分析的基本依据。在制冷技术中，它可确定制冷循环中各种能量在转换过程中的数值，制冷系统与外界的能量交换的主要形式是做功和热量传递。

2. 气体的压缩功及压容图（ $p-V$ 图）

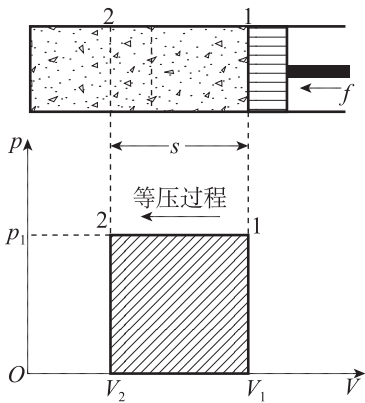


图 1-2-2 等压过程 $p-V$ 图

气体压缩时，外力对气体做功。如图 1-2-2 为一个理想的气缸，活塞在气缸里可做无摩擦运动，气体的压力为 p ，比容为 V ，当活塞在外力作用下使活塞向左移动，气体的比容减小，外力对气体做功，这功称为压缩功；反之，当气缸内压力大于外部大气压力时，活塞要向右移动，气体膨胀使比容增大，气体对外界做功，这功称为膨胀功。在热力学中规定：膨胀功为正功，压缩功为负功。

假设气缸里 1kg 气体，其压力为 p_1 ，所占的容积为 V_1 ，在 $p-V$ 图上用 1 点表示它所处状态。如果对活塞施加外力 f ，使活塞向左移动，如果保持气缸压力 p_1 不变，活塞移动后到达 2 点，气缸里气体比容减小到 V_2 ，其压缩过程在图 1-2-2 中为一横线 1—2。

在活塞无摩擦的理想情况下，对 1kg 气体而言的压缩功为

$$L = Fps = p(V_1 - V_2) \tag{1-2-1}$$

式中： L 为压缩功，J。

F 为活塞面积， m^2 。

p 为压力，Pa。

s 为活塞行程，m。

V_1 、 V_2 为比容， m^3/kg 。

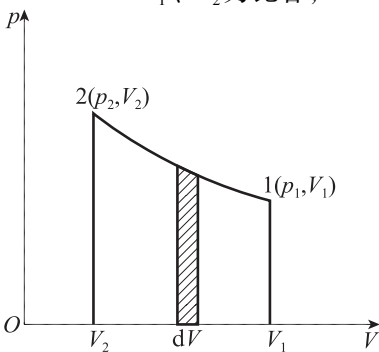


图 1-2-3 非等压过程 $p-V$ 图

因此，利用 $p-V$ 图可非常方便地计算出压缩功。 $p-V$ 图在热力工程中又叫作示功图。

3. 功热当量和热功当量

根据热力学第一定律，能量能够从一种形式转化为另一种形式，可以由热转换为功或由功转换为热。在国际单位制中，热量和功的单位都是焦耳（J）或千焦（kJ）。

上式中的压缩功 L 值，在如图 1-2-2 上正好是过程线 1—2 下的一块面积。在实际的压缩过程中，由于气体压力的不断升高，如图 1-2-3，使计算就变得更复杂了。但还是可以利用 $p-V$ 图，将压缩过程分成许多微小的压缩过程来计算，在这个微小的过程中，压力变化相当小，就可以近似地看成是等压过程，那么还是可以用公式表示为

$$L = \int_s Fpds = \int_{V_1}^{V_2} p dV \tag{1-2-2}$$

在非国际制单位中，习惯用热量的单位卡（cal）。两单位制之间，必有一个比例系数即热功当量 A ，它应满足

$$W = AQ \quad (1-2-3)$$

式中： W 为机械功， $\text{N} \cdot \text{m}$ ；

Q 为热量，cal 或 kcal；

A 为热功当量，J/cal 或 kJ/kcal。

国际上对热功当量有两种规定：1 热化学卡 = 4.184 焦耳（ $A = 4.184 \text{ J/cal}$ ）

1 热工程卡 = 4.186 8 焦耳（ $A = 4.186 8 \text{ J/cal}$ ）

功热当量为 A 的倒数，在热工程中 $A^{-1} = 1/4.186 8 = 0.238 85 \text{ (cal/J)}$ 。应当指出，随着国际单位制的普及，采用国际单位制已是大势所趋。

三、热力学第二定律

1. 热力学第二定律的内容

热力学第二定律是关于内能与其他形式的能量（如机械能、电磁能等）相互转化的独立于热力学第一定律的另一基本规律。热力学第二定律的开尔文表述为：不可能从单一热源吸取热量，使之完全变为有用功而不产生其他影响。热力学第二定律的克劳修斯（Clausius）表述为：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不产生其他影响。虽然两种表述文字不同，但实质上是等效的。

2. 热力学第二定律的意义

根据热力学第二定律，我们可以确定：

（1）在自然条件下，热量只能从高温传向低温，而不能由低温传向高温。一切与热现象有关的宏观过程都是不可逆的，要使热传递方向倒转，只能靠消耗能量或做功来实现。

（2）自然界中任何形式的能都会很容易地变成热量，而热却不能完全变成其他形式的能而不产生其他影响。在热机工作中，将热变为机械能的同时，一定伴有热量损失。

在制冷设备的工作过程中，正是消耗了一定的外部能量，通过做功，才能把热量从低温物体转移到高温物体中去，达到空调制冷或制热（如空调中的热泵）的目的。

3. 热效率和制冷系数

动力工程中将热能转变为机械功的设备称为热力发动机或热机。如果一热机从一热源吸取了 Q 的热量，根据热力学第二定律，只能把其中的一部分能量转变成机械功 L 。热机输出功与吸取热量之比称为热效率，即

$$\eta_t = \frac{L}{Q} \quad (1-2-4)$$

根据热力学第二定律， η_t 总是小于 1，因为吸热 Q 中的一部分（ $Q - L$ ）不能被利用，而要转移到周围环境中去。

对于制冷机来说，根据热力学第二定律，要把低温库中的热量 Q_0 转移到高温的环

境中，必须消耗一定的机械功 L 。为了评定制冷机的性能，便引出了制冷系数 ε ，即

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L} \tag{1-2-5}$$

ε 的值可以大于 1， ε 越大，则在相同的条件下，该制冷机的性能越好。因此，制冷技术的重要任务之一是不断提高制冷系数 ε 。

四、热力学第三定律

1. 热力学第三定律的内容

热力学第三定律是对熵的论述，一般当封闭系统达到稳定平衡时，熵应该为最大值，在任何过程中，熵总是增加，但理想气体如果是等温可逆过程熵的变化为零，可是理想气体实际并不存在，所以现实物质中，即使是等温可逆过程，系统的熵也在增加，不过增加得少。

在绝对零度，任何完美晶体的熵为零称为热力学第三定律。即当系统趋近于绝对温度零度时，系统等温可逆过程的熵变化趋近于零。第三定律只能应用于稳定平衡状态，因此也不能将物质看作是理想气体。绝对零度不可达到这个结论称作热力学第三定律。

1912 年，能斯特又将当绝对温度趋于零时，固体和液体的熵也趋于零这一规律表述为绝对零度不可能达到原理：“不可能使一个物体冷却到绝对温度的零度。”这就是热力学第三定律。

1940 年 R. H. 否勒和 E. A. 古根海姆还提出热力学第三定律的另一种表述形式：任何系统都不能通过有限的步骤使自身温度降低到 0K，称为 0K 不能达到原理。

2. 热力学第三定律的意义

热力学第三定律反映了微观运动的量子化。在实际意义上，第三定律并不像第一、二定律那样明白地告诫人们放弃制造第一类永动机和第二类永动机的意图，而是鼓励人们想方设法尽可能接近绝对零度。目前使用绝热去磁的方法已达到 10K，但永远达不到 0K。

拓展提高 > >

1. 热力学第二定律的证明

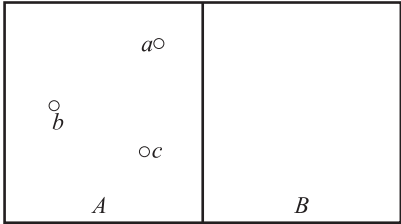


图 1-2-4 气体的自由膨胀

对热力学第二定律，我们可以分子运动的统计规律来证明，例如气体分子的自由膨胀过程。如图 1-2-4 所示，容器被隔板分成 A、B 两部分，A 充满气体，B 保持真空。

在抽掉隔板之前，分子只能在 A 边运动，在抽掉隔板之后，它可以在整个容器内运动。因此，一个分子 a 在运动中处于 A、B 两边的机会是均等的，

回到 A 的概率为 1/2。如果考虑三个分子 a、b、c 抽掉隔板后，分子在运动中处于 A、B 两边可能的分布为：abc/0、ab/c、ac/b、bc/a、a/bc、b/ac、c/ab、0/abc，显然，三

个分子同时回到 A 的概率为 $1/8$ ，比一个分子时的概率减少了。如果有 N 个分子，在 A 、 B 两边分配，共有 2^N 种可能，全部都在 A 边的概率为 $1/2^N$ 。对 1 摩尔气体， $N \approx 6.02 \times 10^{23}$ ，全部在 A 边的概率为 $1/2^{6.02 \times 10^{23}}$ 。由此可以看出，气体自由膨胀是不可逆的，扩散现象是不可逆的，热传递过程也是不可逆的。

2. 热力学第三定律的理论发展

是否存在降低温度的极限？1702 年，法国物理学家阿蒙顿已经提到了“绝对零度”的概念。他从空气受热时体积和压强都随温度的增加而增加设想在某个温度下空气的压力将等于零。根据他的计算，这个温度即后来提出的摄氏温标约为 -239°C ，后来，兰伯特更精确地重复了阿蒙顿实验，计算出这个温度为 -270.3°C 。他说，在这个“绝对的冷”的情况下，空气将紧密地挤在一起。他们的这个看法没有得到人们的重视。直到盖-吕萨克定律提出之后，存在绝对零度的思想才得到物理学界的普遍承认。

1848 年，英国物理学家汤姆逊在确立热力温标时，重新提出了绝对零度是温度的下限。

1906 年，德国物理学家能斯特在研究低温条件下物质的变化时，把热力学的原理应用到低温现象和化学反应过程中，发现了一个新的规律，这个规律被表述为：“当绝对温度趋于零时，凝聚系（固体和液体）的熵（即热量被温度除的商）在等温过程中的改变趋于零。”德国著名物理学家普朗克把这一定律改述为：“当绝对温度趋于零时，固体和液体的熵也趋于零。”这就消除了熵常数取值的任意性。1912 年，能斯特又将这一规律表述为绝对零度不可能达到原理：“不可能使一个物体冷却到绝对温度的零度。”这就是热力学第三定律。

1940 年 R. H. 否勒和 E. A. 古根海姆还提出热力学第三定律的另一种表述形式：任何系统都不能通过有限的步骤使自身温度降低到 0K ，称为 0K 不能达到原理。此原理和前面所述及的热力学第三定律的几种表述是相互有联系的。

任务小结

1. 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡（温度相同），则它们彼此也必定处于热平衡。这一结论称作热力学第零定律。热力学第零定律给出了温度的定义和温度的测量方法。

2. 热力学第一定律其实质是能量守恒定律，可表达为：在任何发生能量转换的热力过程中，转换前后能量的总量维持恒定。能量能够从一种形式转化为另一种形式，可以由热转换为功或由功转换为热。气体压缩时，外力对气体做功，称为压缩功。反之，气体对外界做功，称为膨胀功。在热力学中规定：膨胀功为正功，压缩功为负功。贮存在气体内部的能量被称为内能，在热力工程计算中，气体内能和推动功的和称为焓。

3. 热力学第二定律的开尔文表述为：不可能从单一热源吸取热量，使之完全变为有用功而不产生其他影响。克劳修斯表述为：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不产生其他影响。虽然两种表述文字不同，但实质上是等效的。其实质是能量的传递和转换过程是有方向性的。

4. 热力学第三定律可以表述为：任何系统都不能通过有限的步骤使自身温度降低到 0K。但人们可以想方设法尽可能接近绝对零度。这也是制冷永远追求的目标。

思考练习

一、填空题

1. 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡（温度相同），则它们彼此也必定处于_____。
2. 热力学第一定律可表达为：在任何发生能量转换的热力过程中，转换前后能量的总量维持_____。
3. 在绝对零度，任何完美晶体的_____为零，称为热力学第三定律。
4. 动力工程中将热能转变为机械功的设备称为_____。
5. 不可能从单一热源吸取热量，使之完全变为_____而不产生其他影响。

二、判断题

1. 热力学第零定律的重要性在于它给出了温度的定义和温度的测量方法。（ ）
2. 热平衡是温度相等之必要的条件。（ ）
3. 在热力学中规定：膨胀功为负功，压缩功为正功。（ ）
4. 在热力工程计算中，气体内能和推动功的和称为熵。（ ）
5. 任何系统都可以通过有限的步骤使自身温度降低到 0K。（ ）

三、简答题

简述热力学第二定律的意义。

学习任务 3

理想气体热力过程

任务概述 > >

实际的热力过程比较复杂，理想气体的热力过程可归纳为四个基本过程和一个多

变过程。实际过程可看作是它们的组合。四个基本过程包括定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程。制冷系统通常利用制冷工质的循环变化将热量由低温物体传给高温环境。往复活塞式空气压缩制冷循环完成一个工作周期经历吸气、压缩、排气、膨胀四个过程，活塞在气缸中相应地由下止点运动到上止点。制冷系统的实际压缩过程中吸气量和输气量都较理论压缩的小，在实际的压缩过程中不可避免地有热量交换，吸、排气过程也不是定压过程。尽量使实际压缩过程接近理论压缩过程，可提高压缩机的能效比。

任务目标 > >

1. 能灵活运用理想气体的状态方程式求解基本状态参数。
2. 会叙述理想气体的热力过程的四个基本过程和一个多变过程的内容。
3. 能正确区别往复活塞式压缩机的实际压缩与理论压缩的差别。

知识链接 > >

一、理想气体及状态方程

1. 理想气体

所谓理想气体，是人们经过长期观察研究自然界的气体以后，所提出的一种假想的气体模型：假定它的分子是一些弹性的、本身不占有体积的质点，且分子间除碰撞外相互之间不存在作用力。

自然界中并不存在真正的理想气体，常见的氢气、氮气、氧气、二氧化碳、空气、烟气等，在压力不是很高和温度不是很低的条件下，它们的性质都非常接近于假想的理想气体，在工程应用所要求的精度内，完全可以把这些气体当作理想气体看待，而不致引起很大的误差。空气及烟气中所含有的水蒸气，因其分压力小、比体积大，亦可当作理想气体看待。锅炉产生的水蒸气以及制冷剂（如氨、氟利昂等）蒸气、石油气等，在计算中将它们当作理想气体看待将会产生很大的误差，工程上把它们称为实际气体。任何真实气体在压力趋于零，比体积趋于无穷大时均具有理想气体性质。本书中以后所提到的“气体”，若不特别指明其含义，指的就是理想气体。

2. 状态方程

处于平衡状态的简单可压缩系统，各部分具有相同的状态参数，且这些参数服从一定关系式，温度 T 、压力 p 和比容 V 这三个基本状态参数之间的关系式 $T = T(p, V)$ 、 $p = p(T, V)$ 、 $V = V(p, T)$ 叫作状态方程式。

克拉贝龙根据前人的大量实验，提出了理想气体的状态方程式

$$pV = R_g T \quad (1-3-1)$$

上式也称克拉贝龙方程式。

式中： p 为压力，Pa；

V 为比容, m^3/kg ;

T 为热力学温度, K ;

R_g 为气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

气体常数决定于气体的性质, 即 R_g 的值只随气体种类而变, 与气体的状态无关。

从上式 $pV = R_g T$ 还可看出, 描述气体状态的三个基本状态参数 p 、 V 、 T 中, 只有两个是独立的, 只要给定三个基本状态参数中的任意两个, 另一个状态参数就可以确定了。

将式 $pV = R_g T$ 两边各乘气体的质量 m , 则得

$$mpV = mR_g T \quad (1-3-2)$$

式中: V 为质量为 m 的气体的体积, m^3 。

式子 $pV = R_g T$ 两边各乘气体的摩尔质量 M (1mol 物质的质量, 单位为 kg/mol , 在数值上恰好等于该物质的相对分子质量), 则得

$$(MV)p = (MR_g)T \quad (1-3-3)$$

式中: $MV = V_m$ 为气体的摩尔体积, m^3/mol ;

$MR_g = R$ 称为摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

故上式可改写为

$$V_m p = RT \quad (1-3-4)$$

所以, 物质的量为 n 的理想气体状态方程可写成

$$Vp = nRT \quad (1-3-5)$$

式中: V 为物质的量为 n 的气体的体积, m^3 。

根据阿伏伽德罗定律, 在同温、同压下 1mol 任何气体都具有相同的体积。实验测得, 标准状态 (压力为 $101\,325\text{Pa}$, 温度为 273.15K) 下, 1mol 气体的体积为 $22.414 \times 10^{-3}\text{m}^3$ 。若将标准状态下的压力 p_0 、温度 T_0 及摩尔体积代入式 $V_m p = RT$ 得

$$R = V_m p_0 / T_0 = 8.314\,5\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

所以各种气体的 R 值都等于 $8.314\,5\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。它与气体的性质和状态均无关, 通常也把 R 称为通用气体常数。

二、理想气体的基本热力过程

系统与外界之间存在相互作用时, 系统的状态将发生变化。系统从一个状态向另一个状态变化时, 所经历的全部中间状态的集合, 称为热力过程, 简称过程。热力学过程, 按其所经历的各个状态的性质可以分为两类: 如果在系统的变化过程中, 每个中间状态都无限地接近于一个平衡态, 这种过程就称为平衡过程, 或叫准静态过程; 反之, 如果在系统变化过程中, 系统的中间状态不是平衡态, 这种过程称为非平衡过程或非静态过程。实际的热力过程, 做功有摩擦, 传热有温差, 都是不可逆过程, 理论上要对不可逆过程进行精确分析计算是非常困难的。只要实际的热力过程接近准静态过程, 并且在过程的进行中, 运动摩擦和传热温差相对很小可以忽略不计时, 就可

近似当作可逆过程来研究。

理想气体不考虑分子本身的体积，分子之间无相互作用力，分子之间的碰撞为弹性碰撞，而且理想气体严格遵守气体实验三大定律（玻—马定律、盖—吕萨克定律和查理定律），因此理想气体的热力过程是一种理想过程。

理想气体的基本热力过程包括定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程。

1. 定容过程

一定质量的理想气体，在状态变化时如果容积保持不变，因而比容不变（ $dV = 0$ ），称为定容过程。例如一个气缸，它的活塞被固定，用热源向气缸中的气体缓慢地加热，则气体所经历的平衡过程，就是定容过程。

定容过程的 $p-V$ 图如图 1-3-1 所示，图中线段 1→2 表示等容线。

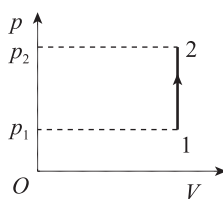


图 1-3-1 定容过程 $p-V$ 图

定容过程中，气体体积不变， $\delta W_V = p dV = 0$ ，即无容积功。由闭口系能量方程可得

$$\delta q_V = dU \quad (1-3-6)$$

即在定容过程中，系统对外不做功，系统传递的热量，完全用于改变工质的内能。

定容过程的热量也可用定容比热 c_V 计算

$$\delta q_V = c_V dT \quad (1-3-7)$$

比较上面二式可得理想气体的内能变化计算通式为

$$dU = c_V dT \quad (1-3-8)$$

$$c_V \text{ 取定值时, 则 } \Delta U = U_2 - U_1 = c_V(T_2 - T_1) \quad (1-3-9)$$

可见，在定容过程中，内能的增量由理想气体的初、末温度 T_1 、 T_2 来确定。

2. 定压过程

一定质量的理想气体，在状态变化时，气体的压强保持不变，（ $dp = 0$ ），称为定压过程。例如，向气缸中的气体缓慢地加热，同时把活塞缓慢地向外移动，使气体的压强保持不变，则气体所经历的过程就是定压过程。

定压过程的 $p-V$ 图如图 1-3-2 所示，图中线段 1→2 表示等压线。

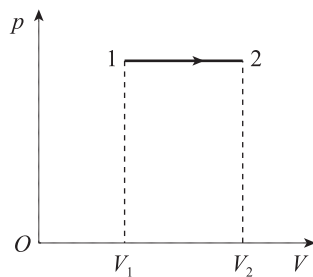


图 1-3-2 定压过程 $p-V$ 图

定压过程的容积功 $W_p = p(V_2 - V_1)$ 。由闭口系能量方程有

$$\begin{aligned} q_p &= \Delta U + W_p = (U_2 - U_1) + p(V_2 - V_1) \\ &= (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) = H_2 - H_1 \end{aligned} \quad (1-3-10)$$

可见，在定压过程中传递的热量等于工质的焓差变化。

$$\text{定压过程的热量也可用定压比热计算 } q_p = c_p(T_2 - T_1) \quad (1-3-11)$$

3. 定温过程

在气体状态变化时, 气体的温度保持不变 ($dT = 0$) 的过程, 称为定温过程。

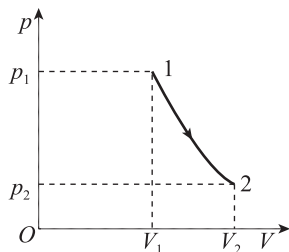


图 1-3-3 定温过程 $p-V$ 图

对于理想气体, 当温度不变时, $pV = \text{常量}$, 即 $p_1 V_1 = p_2 V_2$, 所以等温过程在 $p-V$ 图上是反比关系曲线, 如图 1-3-3 所示。

理想气体的定温过程中, 由于温度保持不变, 内能和焓也都保持不变, 由能量方程可得

$$q_T = W_T \quad (1-3-12)$$

即定温过程加给系统的热量, 完全用于工质对外膨胀做功, 反之当气体定温压缩时, 外界对气体所做的功全部转变为气体所放出的热量。

4. 定熵过程

在状态变化过程中, 若气体与外界没有热量交换 ($\delta q = 0$), 此过程称为绝热过程。此外, 如果一个过程进行得非常快, 系统没有来得及与外界交换热量, 此过程可近似看成绝热过程。

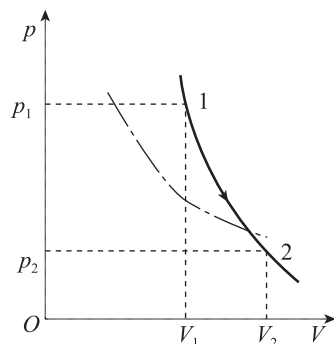


图 1-3-4 定熵过程 $p-V$ 图

理想气体如经历可逆的绝热过程, 由熵的定义式 $dS = \delta q/T$ 可知, 绝热过程 $dS = 0$, 即熵不变化。因此, 理想气体的可逆绝热过程是定熵过程。

定熵过程用曲线表示, 如图 1-3-4 所示, 其中实线表示定熵线, 虚线表示定温线。

从图 1-3-4 中可看出, 定熵曲线比定温曲线陡些, 这是因为定温膨胀过程中, 随着气体压强的降低, 气体分子间隔距离增大, 分子密度减小。而在定熵膨胀过程中, 随着气体压强的降低, 不仅气体分子密度减小, 气温也同时降低。

可以证明, 在理想气体定熵绝热过程中, 任意两个状态的物理量满足

$$p_2 V_2^{\gamma} = p_1 V_1^{\gamma} \quad (1-3-13)$$

$$\text{或} \quad T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \quad (1-3-14)$$

$$\text{或} \quad p_2^{1-\gamma} T_2^{\gamma} = p_1^{1-\gamma} T_1^{\gamma} \quad (1-3-15)$$

以上三个方程为定熵绝热方程。

定熵过程 $\delta q = 0$ 或 $q = 0$, 由能量方程可得:

$$\delta W_{(s)} = -du \quad (1-3-16)$$

可见, 在定熵过程中, 系统对外做的容积功等于工质内能的减少, 而外界对系统做的容积功则完全用于工质内能的增加。

取定值比热时, 定熵过程的容积功还可表示为:

$$W_{(s)} = \Delta U = c_V(T_1 - T_2) \quad (1-3-17)$$

5. 多变过程

前述的几个过程如定温、定压过程等，它们的共同特点是在过程进行中，系统中工质的某个参数值始终不变，这种过程称为定值过程。实际的热力过程中，由于完全绝热的系统不存在，系统中工质的参数随时间变化，如何来定性系统的工作过程呢？人们在前述几个典型过程的特性的基础上，归纳出更为接近实际的多变过程方程，即

$$pV^n = \text{常数} \quad (1-3-18)$$

式中： n 为多变指数，它是在 $-\infty$ 和 $+\infty$ 间的任意一个指定值。

当 $n = 0$ 时， $p = \text{常数}$ ，为定压过程；当 $n = 1$ 时， $pV = \text{常数}$ ，为定温过程； $n = k$ 时， $pV^k = \text{常数}$ ，为定熵过程；将式 $pV^n = \text{常数}$ 变形为 $p^{\frac{1}{n}}V = \text{常数}$ ，当 $n = \pm\infty$ 时， $\frac{1}{n} = 0$ ，有 $V = \text{常数}$ ，为定容过程。

可见，前面讨论的几个典型过程可作为多变过程的几个特例。

与定熵过程类似，多变过程基本状态参数间的关系为：

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^n \quad (1-3-19)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} \quad (1-3-20)$$

多变过程是更一般化的过程，任何复杂的热力过程都可看作是多个 n 不同的多变过程的组合。在制冷压缩中，多变指数 n 一般介于 1 和 k 之间，即是介于定温压缩和定熵压缩之间的多变压缩过程。

当多变指数 n 取不同的数值时，相应的热力过程及特征如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 理想气体的基本热力过程公式汇编表

热力过程	定容过程 ($n = \infty$)	定压过程 ($n = 0$)	定温过程 ($n = 1$)	定熵过程 ($n = k$)	多变过程 (n)
过程特征	$V = \text{定值}$	$p = \text{定值}$	$T = \text{定值}$	$S = \text{定值}$	
T 、 p 、 V 之间的关系	$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}$	$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2}$	$p_1 V_1 = p_2 V_2$	$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$ $T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1}$ $T_1 p_1^{\frac{k-1}{k}} = T_2 p_2^{\frac{k-1}{k}}$	$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$ $T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1}$ $T_1 p_1^{\frac{n-1}{n}} = T_2 p_2^{\frac{n-1}{n}}$
ΔU	$c_V(T_2 - T_1)$	$c_V(T_2 - T_1)$	0	$c_V(T_2 - T_1)$	$c_V(T_2 - T_1)$
ΔH	$c_p(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	0	$c_p(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$

拓展提高 >>

一、往复式活塞式压缩机的理想压缩过程

往复式活塞式压缩机是通过一定的传动机构（如曲轴连杆、曲柄连杆、曲柄滑管等），将原动机的旋转运动转换成压缩机活塞的直线运动，利用活塞在气缸内做往复直

线运动来改变被封存的气态制冷工质的容积，完成压缩和输送气态制冷工质的过程。

往复活塞式压缩机完成一个工作周期经历吸气、压缩、排气、膨胀四个过程，活塞在气缸中相应地由下止点运动到上止点。

1. 吸气过程

当气缸内的气体压力小于吸气腔内气体压力时，吸气腔内气体推开进气阀片，吸气过程开始。随着吸气过程的进行，活塞逐步下移，直至活塞移至下止点时，进气阀片关闭，吸气过程结束。

2. 压缩过程

当活塞由下止点向上止点运动时，由于进、排气阀都关闭，气缸容积逐渐变小，缸内气体被压缩，压力和温度逐渐升高。当缸内气体压力稍高于排气压力时，排气阀片被推开，压缩过程结束。

3. 排气过程

当排气阀片被推开时，排气过程开始，随着活塞继续向上运动，压缩气体逐渐被排出气缸，直至活塞运动至上止点时，排气阀片关闭，排气过程结束。

4. 膨胀过程

排气结束后，活塞开始由上止点向下运动，气缸容积逐渐变大，残留在余隙容积中的气体开始膨胀，其压力和温度逐渐下降，直至压力低于吸气腔中气体压力时，进气阀片被推开，膨胀过程结束。至此，压缩机完成了个工作循环，然后开始下一个循环过程的吸气。

可见，活塞在气缸中每往复运动一次，压缩机完成一个工作周期，气缸中的气体经历吸气、压缩、排气和膨胀四个过程。现将此过程作如下假设：

(1) 假设活塞处于上止点时，活塞顶面与气缸盖之间没有空隙存在，因而在排气结束时，缸内没有残留气体，整个气缸的容积 V_1 就是工作容积。

(2) 假设压缩过程是可逆过程。活塞做往复运动时，活塞与缸壁之间没有摩擦，气体与缸壁交换热量忽略不计，因而压缩过程为绝热过程；同时，气体流经进、排气阀时也没有阻力损失，因而吸气过程和排气过程都是等压过程，分别保持吸气压力 p_1 和排气压力 p_2 不变。

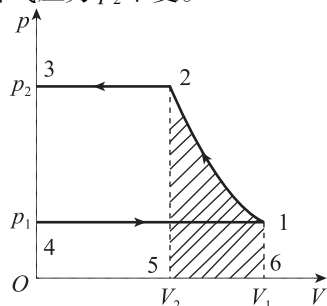


图 1-3-5 理论压缩过程 $p-V$ 图

压缩机如按上述假设情况工作，其工作的循环过程，称为理论压缩过程，或称为理论工作循环。

压缩机的理论工作循环用 $p-V$ 图表示，如图 1-3-5 所示。

图中 4→1 为等压吸气过程；1→2 为压缩过程；2→3 为等压排气过程。吸气开始和排气终了的 4、3 两点都在纵轴上，反映排气终了时缸内无残留气体。

此过程中，曲线 1→2 与横轴所围的面积，即图中

5—6—1—2—5 所围的阴影部分的面积即为压缩机压缩气体过程中所做的功。

二、往复式活塞式压缩机的实际压缩过程

在制冷压缩机实际的压缩制冷气态工质的过程中, 气体流经进、排气阀时, 由于流道截面突然变小, 不可避免会有压力损失, 吸、排气过程都不可能是定压过程; 运动机构之间都有摩擦, 产生热量, 气态制冷工质与气缸壁也不可避免地会交换热量, 不可能是绝热过程; 为了运转平稳, 避免活塞与气缸盖撞击, 制冷压缩机活塞顶面与气缸盖之间必须留有余隙, 由于有余隙, 在排气过程结束时, 残留气体膨胀, 至压力降至吸气压力时, 才重新吸气, 这都导致压缩机的吸气量要小于理论压缩循环中的数值; 由于吸气量的减少, 输气量也会跟着减少, 同时由于压缩机的进、排气阀及活塞与气缸之间不可能装配得绝对严密, 因此实际压缩时, 不可避免会有少量气体从高压部分向低压部分渗透, 从而使压缩机输气量进一步减少。

综上所述, 制冷系统的压缩机在实际压缩过程中吸气量和输气量都较理论值小, 在实际的压缩过程中不可避免地有热量交换, 吸、排气过程也不是定压过程。

压缩机的实际压缩过程用 $p-V$ 图表示如图 1-3-6 所示。

在实际的压缩过程中, 提高电动机效率、减少吸入气体的过热度、降低气体通道压力损失及减小进、排气阀阻力等, 尽量使实际压缩过程接近理论压缩过程, 可提高压缩机的能效比。

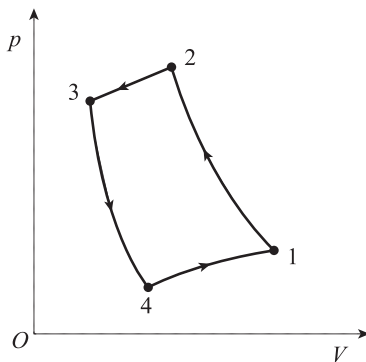


图 1-3-6 实际压缩过程 $p-V$ 图

任务小结

1. 定压过程、定容过程、定温过程和定熵过程这四种典型的可逆过程称为基本热力过程。分析热力过程的目的是确定变化过程中工质参数及与外界交换的功和热量。工质基本热力过程的分析 and 计算是热力设备设计计算的基础和依据。

2. 分析计算理想气体热力过程的步骤:

(1) 根据过程的特点, 结合状态方程式找出不同状态时状态参数间的关系式, 从而据已知初态确定终态参数, 或者反之。

(2) 在 $p-V$ 图和 $T-S$ 图中画出过程曲线, 以直观地表达过程中工质状态参数的变化规律及能量转换情况。

(3) 确定工质初、终状态热力学能、焓、熵的变化量。

(4) 确定工质对外做的功和过程热量。

思考练习

一、填空题

1. 理想气体的基本热力过程包括_____、_____、定温过程和定熵过程。
2. 往复式活塞式压缩机完成一个工作周期经历_____、_____、_____、_____四个过程，活塞在气缸中相应地由下止点运动到上止点。
3. 制冷系统常用的压缩机有_____、_____、_____等多种类型。
4. 压缩机的理论工作循环用_____表示。
5. 所谓_____，是人们经过长期观察研究自然界的气体以后，所提出的一种假想的气体模型。

二、判断题

1. 在实际的压缩过程中，尽量使实际压缩过程接近理论压缩过程，可提高压缩机的能效比。 ()
2. 制冷系统的压缩机在实际压缩过程吸、排气过程是定压过程。 ()
3. 理想气体在自然界中真正存在。 ()
4. 理想气体的可逆绝热过程是定熵过程。 ()
5. 理想气体的定温过程中，由于温度保持不变，内能和焓也都保持不变。 ()

三、简答题

1. 往复式活塞式压缩机的实际压缩与理论压缩的差别是什么？
2. 简述往复式活塞式压缩机的理论压缩过程。

学习任务4

蒸气的性质与基本热力过程

任务概述 > >

物质状态的变化，必然伴随着热量交换的过程和结果，但物质的基本化学性质不变。物质相变制冷是利用液体在低温下的蒸发过程及固体在低温下的熔化或升华过程向被冷却物体吸收热量——即制冷量。因此，相变制冷分为液体汽化制冷与固体熔化与升华制冷，由于液体自身具有流动性，液体汽化制冷是广泛应用的。液体汽化成蒸气的过程吸收热量，从而达到制冷的目的，为了使其连续不断地工作，成为一个循环，