

1

工程热力学基础

知识目标

1. 了解工质、比热容的概念及理想气体状态方程式。
2. 熟悉热力系统、平衡态、热力过程的概念。
3. 熟悉表征工质热力状态的状态参数及基本热力过程。
4. 掌握气体的基本热力过程（过程方程式、状态参数的变化、能量变化）。

能力目标

能根据热力学基础知识分析现代发动机提高其性能的理论依据。

热力学是研究物质的能量（特别是热能）、能量传递和转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个工程分支。研究的内容主要包括三部分：

（1）介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。

（2）介绍常用工质的基本性质。

（3）根据热力学基本定律，结合工质的热力性质，分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环，阐明提高转换效率的正确途径。

本章仅就工程热力学基础知识作一简要阐述，为学习汽车发动机原理提供必要的理论基础和分析计算方法。

1.1 热功转换的基础知识

1.1.1 工质的热力状态及其基本状态参数

工程热力学中，把实现热能与机械能相互转换的工作物质称为“工质”。

在热机中，热能向机械能的转换是通过气态工质热力状态的变化来实现的。常用的气态工质有气体和蒸汽两类，汽车发动机的工质是气体（空气和燃气），所以我们仅讨论气体的性质。

1. 热力系统

在热力学中，通常选取一定的工质作为研究的具体对象，称为热力系统，简称系统。与该系统有相互作用的其他系统称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界。边界可以是真实的，也可以是假想的。系统通过边界与外界相互作用，进行物质和能量的交换，根据边界上的物质和能量交换情况，热力系统可分为以下几类：①开口系统，指与外界有物质交换的系统；②封闭系统，指与外界无物质交换的系统；③绝热系统，指与外界无热交换的系统；④孤立系统，指与外界既无物质交换，也无能量交换的系统。

2. 平衡状态及状态参数

平衡状态是指在没有外界宏观作用的情况下，系统中工质各部分的温度和压力均匀一致，其性质不随时间而变化的状态。处于平衡状态时，工质所有状态参数具有确定的数值。

气体的状态参数是指标志气体热力状态的物理量。常用的状态参数主要有6个，即压力 p 、温度 T 、比体积 v 、内能 U 、焓 H 、熵 S 。其中 p 、 T 、 v 可以直接用仪表测量，且其物理意义易被理解，所以称为描述工质状态的基本状态参数。

(1) 压力 p

气体在单位面积容器壁上所施加的垂直作用力称为压力 p 。按照分子运动论，气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量，是气体施加于容器壁面上的实际压力，称为绝对压力，其单位为 Pa，或计作 N/m^2 ，工程上亦常用 kPa 与 MPa 作单位。

压力一般用压力计测量，由于测量时处于大气环境中，故只需测得绝对压力和当地大气压力的差值，即相对压力。若绝对压力记作 p ，压力计的读数压力即表压力，记作 p_g 。由图 1-1 可知，表压力是绝对压力高出当时当地大气压力 p_0 的数值。其关系式为

$$p = p_0 + p_g \quad (1-1)$$

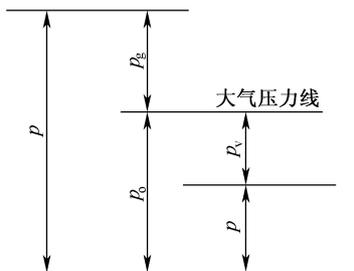


图 1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时，表压力为负数，仅取其数值，称之为



真空度，记作 p_v 。即

$$p = p_0 - p_v \quad (1-2)$$

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的。显然，只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

(2) 温度 T

温度表示气体冷热的程度。温度表示气体内部分子不规则运动的激烈程度，是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体的温度越高，表明气体分子的平均动能越大。

国际单位制采用热力学温度（也称为开尔文温度或绝对温度），用符号 T 表示，单位为 K。常用的另一温度为摄氏温度，用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.15$ 。SI 容许使用摄氏温度 t ，并定义

$$T = t + 273.15 \quad (1-3)$$

必须指出，只有热力学温度才是状态参数。

(3) 比体积 v

比体积是单位质量的物质所占有的体积

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

$$V = mv$$

式中 v ——比体积； V ——体积； m ——质量。

单位体积物质的质量称为密度 ρ ，显然比体积和密度互为倒数，即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

比体积的单位为 m^3/kg ；密度的单位为 kg/m^3 。

1.1.2 状态参数坐标图

为了分析问题方便，工程上通常采用两个独立状态参数组成坐标图来确定气体所处的状态，如图 1-2 所示，图中给出了用压力和比体积组成的压力—比体积坐标图，简称压容图或 p - v 图，还有 T - s 图（温—熵图）。因为当热力系统处于某一平衡状态时，状态参数是一确定值，故任一平衡状态在所有状态参数坐标图上均有对应的一点。

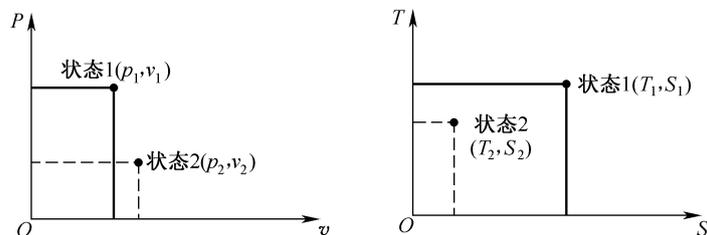


图 1-2 状态参数坐标图

1.1.3 理想气体状态方程式

所谓理想气体就是假设在气体内部其分子不占有体积，分子间又没有吸引力，这样的气

体称为理想气体。在热力学计算和分析中,常常把空气、燃气、烟气等气体都近似地看作理想气体,因气体分子之间的平均距离通常要比液体和固体的大得多,所以,气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多;气体分子之间的相互吸引力也很小。通常把实际气体近似地看作理想气体来进行各种热力计算,其结果极其相似。所以对理想气体性质的研究在理论上和实际上都是很重要的。

根据分子运动论和对理想气体的假定,结合实验所得的一些气体定律,并综合表示成理想气体状态方程式(或称克拉贝隆方程式)。对 1kg 理想气体,其状态方程为

$$pv = RT \quad (1-6)$$

对 m kg 理想气体,其体积 $V = mv$

其状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-6')$$

式中 R ——气体常数[J/(kg·K)]。其数值取决于气体的种类。

对于 1 千摩尔(kmol)理想气体,其质量为 μ kg (μ 为其相对分子质量),其体积为 $\mu v = V_m$ (m^3/kmol),按式(1-6)可以得出 1kmol 理想气体的状态方程为

$$p\mu v = \mu RT \quad (1-6'')$$

即

$$pV_m = R_m T \quad (1-6''')$$

根据上式可得

$$R_m = \mu R = \frac{pV_m}{T} \quad (1-7)$$

根据阿佛加德罗定律可得同温同压下,相同体积的任何气体都具有相同数目的分子。因此,在同温同压下任何气体的千摩尔体积相等。在物理标准状况($p_0=1011325\text{Pa}$, $T_0=273.15\text{K}$)条件下,千摩尔体积气体的 V_m 的数值等于 $22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$,故对于任何理想气体 R_m 的数值都相同,因此将 R_m 称为通用气体常数, p_0 、 T_0 及 V_m 值代入式(1-7)可得 $R_m=8314.3\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 或

$$R = \frac{8314.3}{\mu} \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-7')$$

理想气体状态方程式反映了理想气体三个基本状态参数间的内在联系:只要知道其中的两个参数就可以通过该方程求出第三个参数。

1.1.4 工质的比热容

在热力工程中,热量的计算常用到比热容。工质的比热容是指单位量的物质作单位温度变化时所吸收或放出的热量。用符号 C 表示。根据定义

$$C = \frac{dq}{dT} \quad (1-8)$$

式中 dq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 时所吸收或放出的热量。单位是 kJ 或 J。

比热容是物质的一个重要热力学性质。气体比热容数值与气体的性质、热力过程的性质和加热的状态等有关。

1. 比热容与物量单位的关系

因为工质的计量单位可用 kg、kmol、 m^3 ,故工质的比热容也有如下三种:



比质量热容 C $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

比摩尔热容 ϕ_c $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$

比容积热容 C' $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

2. 比定压热容 C_p 和比定容热容 C_v

气体在压力不变或体积不变条件下被加热时的比热容，分别称为比定压热容和比定容热容。比定压热容记作 $C_p[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ ，比定容热容记作 $C_v[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ ，而比定压千摩尔热容记作 $C_{p,m}[\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$ ，比定容千摩尔热容记作 $C_{v,m}[\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$ 等。定义比热容比为

$$K = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}} = \frac{\mu C_p}{\mu C_v} \quad (1-9)$$

比热容比 K 又称绝热指数，它在工程热力学中有很重要的作用，将在以后用到。

气体定压加热过程中，在受热温度升高的同时，还要克服外界抵抗力而膨胀做功，所以同样升高 1°C ，比在定容加热时需要更多的热量。实验表明，理想气体的比定压热容值和比定容热容值的差是一个常数，即梅耶公式

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R_m \quad (1-9')$$

$$R_m = 8.3143 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K}) \quad (1-9'')$$

如果用 K 和 R_m 来表示 $C_{p,m}$ 、 $C_{v,m}$ ，由梅耶公式可得

$$C_{v,m} = \frac{1}{K-1} R_m \quad (1-9''')$$

$$C_{p,m} = \frac{1}{K-1} R_m \quad (1-9''')$$

3. 真实比热容和平均比热容

根据大量精确的实验数据和比热容的量子力学理论，理想气体的比热容与压力无关，是温度的单值函数，可表示成下式

$$C = a + bt + ct^2 + \dots \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-10)$$

式中， a 、 b 、 c 是常数，它们的数值随气体的种类及加热过程的不同而异，可由实验确定。

这种相应于每一温度下的气体比热容就叫作真实比热容。

已知气体的真实比热容随温度变化的关系为 $C = f(t)$ 时，气体由 t_1 升到 t_2 所需的热量可按下式计算

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= \int_{t_1}^{t_2} C dt = \text{面积 } 12t_2t_1 \\ &= C_m \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = \text{面积 } 1'2't_2t_1 \end{aligned} \quad (1-11)$$

$C_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ 称为该气体在 t_1 到 t_2 温度范围内的“平均比热容”，如图 1-3 所示。根据真实比热容编制由 0°C 到 $t^\circ\text{C}$ 的平均比热容 $C_m \Big|_0^t$ 的数据表，将给计算（因温度变化所引起的）比热容变化而导致的热量变化带来很大方便。

4. 定比热容

在实际应用中，当温度变化不大或不要求很精确的计算时，常忽略温度的影响而把理想气体的比热容当作常量，只按理想气体的原子数确定比热容，称为定比热容，如表 1-1 所示。

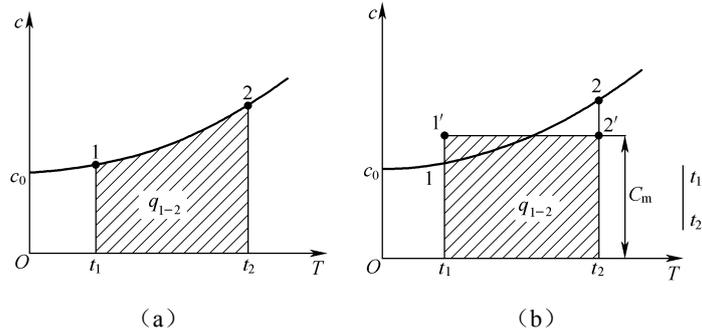


图 1-3 真实比热容与平均比热容

表 1-1 理想气体的定值比摩尔热容和比热容比

	单原子气体	双原子气体	多原子气体
$C_{v,m}$	$3/2R_m$	$5/2R_m$	$7/2R_m$
$C_{p,m}$	$5/2R_m$	$7/2R_m$	$9/2R_m$
K	1.66	1.40	1.29

1.1.5 热力过程

热力过程是指热力系统从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。其在状态参数坐标图中表示为一条连续曲线，如图 1-4 (a) 中的 1—2 曲线。当工质从某一状态开始，经过一系列中间状态，又回复到原来状态时，则是封闭的热力过程，如图 1-4 (b) 中的闭合曲线，称为热力循环。

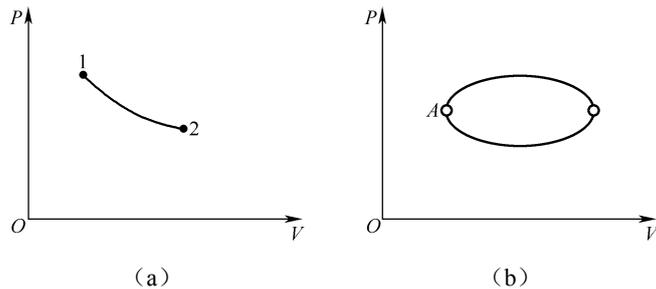
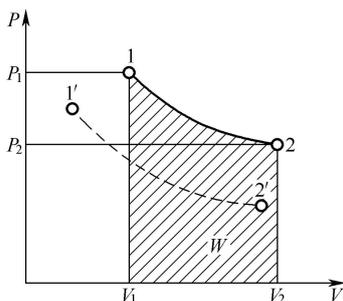


图 1-4 热力过程和热力循环

热力系统从一个平衡（均匀）状态连续经历一系列（无数个）平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为内平衡过程；否则便是内不平衡过程。

在热力学中，常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图，例如以 p 为纵坐标、 v 为横坐标组成的坐标图（简称压容图）来进行热力学分析，如图 1-5 所示。图中 1 点、2 点分别代表 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态；1—2 曲线代表一个内平衡过程。如果工质由状态 1' 变化到状态 2' 所经历的不是一个内平衡过程，则该过程无法在 p - v 图上表示，仅可标出 1'、2' 两个平衡态，其过程用虚线表示。

图 1-5 内平衡过程在 p - v 图上的表示

可逆过程：假设系统经历平衡过程 1—2，由状态 1 变化到状态 2，并对外作膨胀功 W （见图 1-5）。如果外界给以相同大小的压缩功 W 使系统从状态 2 反向循着原来的过程曲线经历完全相同的中间状态回复到原来的状态 1，外界也回复到原来的状态，即没有得到功，也没有消耗功，这样的平衡过程称为可逆过程。

只有无摩擦、无温差的平衡过程才有可逆性，即可逆过程就是无摩擦、无温差的平衡过程。

可逆过程是没有任何损失的理想过程，实际的热力过程既不可能是绝对的平衡过程，又不可避免地会有摩擦。因此，可逆过程是实际过程的理想极限。今后我们所讨论的主要是可逆过程。

1.2 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力系统中的具体应用。它建立了热力过程中的能量平衡关系，是热力学宏观分析方法的主要依据之一。

热力学第一定律可表述为：在热能与其他形式能的相互转换过程中，其总能量保持不变。根据热力学第一定律要想得到机械能就必须花费热能或其他能量，那种不花费任何能量就可以产生动力的机器是不可能存在的。因此热力学第一定律也可以表述为：不花费任何能量就可以产生功的第一类永动机是不可能制造成功的。

因热力学第一定律主要表达：工质经历受热做功的热力过程时，工质从外界接收的热量、工质因受热膨胀而对外界做出的功、同时间内工质内部储存或付出的能量三者之间的平衡关系，因此下面对功、热量和内能作必要的介绍。

1.2.1 功、热量和内能

1. 工质的膨胀功 W

功是系统在热力过程中与外界交换的能量。图 1-6 表示 1kg 工质封闭在气缸内进行一个可逆过程的膨胀做功情况。假设活塞截面面积为 A ，工质作用在活塞上的力为 pA ，活塞被推进一微小距离 dx ，在这期间，工质的膨胀极小，工质的压力近乎不变，因而工质对活塞作的功为

$$dW = pAdx = pdv \quad (1-12)$$

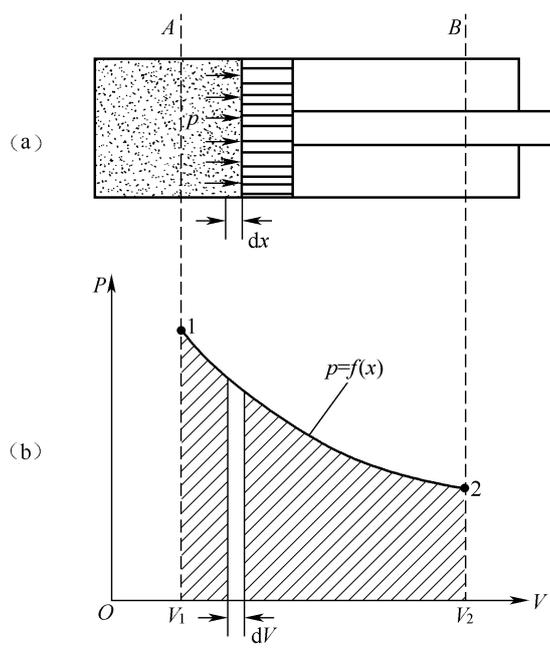


图 1-6 可逆过程的膨胀功

对可逆过程 1-2，工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-13)$$

如果已知工质的初、终态参数，以及过程 1-2 的函数关系 $p = f(v)$ ，则可求得工质的膨胀功 W ，其数值等于 $p-v$ 图上过程曲线 1-2 下面所包围的面积。因此 $p-v$ 图也叫示功图。

若气缸中的工质为 m kg，其总容积为 $V=mv$ ，膨胀功为

$$W = mw = \int_{V_1}^{V_2} p m dv = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-14)$$

由此可见：

(1) 功可以用 $p-v$ 图中热力过程曲线下的面积表示，即 W_{1-2} 可用面积 1234 表示，如图 1-6 (a) 所示。

(2) 功是一个过程量，而不是状态参数，过程沿不同路径，则有不同的功量。如 $W_{1-a-2} \neq W_{1-b-2}$ ，如图 1-7 (b) 所示。



图 1-7 过程的功量和热量



(3) 当热力系统对外界做功时, 工质膨胀, 因 $dv > 0$, 故 $w > 0$; 同理, 当 $W > 0$ 时, 表示热力过程中工质膨胀, 热力系统对外界做功。

当外界对热力系统做功时, 工质被压缩, 因 $dv < 0$, 故 $w < 0$; 同理, 当 $W < 0$ 时, 表示热力过程中工质被压缩, 外界对热力系统做功。

当热力系统容积不变时, 因 $dv = 0$, 故 $w = 0$; 同理, 当热力系统与外界无功量交换时, 表示热力过程中工质容积不变。

(4) 热工计算中功的单位为焦耳 (J)。

2. 热量 Q

热量定义为系统在热力过程中由于与外界的温度不同而与之交换的能量。

热量和功一样不是热力状态的参数, 而是工质状态改变时对外的效应, 即传递中的能量。因此不能说: “工质在该状态下具有多少热量。”

热量和功的不同之处在于: 功是两个物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量; 热量则是两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

按习惯, 规定外界加给系统的热量为正, 而系统放给外界的热量为负。国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳 (J)。

3. 工质的内能 (热力学能)

热力系统处于宏观静止状态时系统内所有微观粒子所具有的能量之和, 总称为工质的内能。用符号 U 表示, 单位用 J 或 kJ。

由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换, 不考虑化学变化和原子核反应的热力过程, 故可认为这两部分能量保持不变, 而认为工质内能是分子热运动的动能和克服分子间作用力的分子位能的总和。分子动能是由分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动动能、原子内电子振动动能等组成, 由于工质内动能与内位能都与热能有关, 故也称工质内部的热能。分子热运动的动能是温度 T 的函数; 分子间的位能是比体积 v 的函数。因此工质的内能取决于工质的温度和比体积, 即与工质的热力状态有关。一旦工质的状态发生变化, 内能也就跟着改变。单位质量工质的内能 u 也是状态参数, 其单位是 J/kg 或 kJ/kg。 m kg 工质的总内能 $U = mu$ 。

工质内能的变化值 $\Delta U = U_2 - U_1$ 只与工质的初、终状态有关, 而与工质由状态 1 变化到状态 2 所经历的过程无关。在热工计算中, 通常只需计算内能变化值, 对内能在某一状态下的值不予考虑。

对于理想气体, 因假设其分子间没有吸引力, 故理想气体分子间的位能为零, 其内能 u 仅是温度的单值函数。

1.2.2 封闭系统能量方程式

热力学第一定律应用到不同系统的能量转换过程中去, 可得到不同的能量平衡方程式。现在讨论最简单的封闭系统的能量转换情况。

封闭在气缸中的定量工质, 可作为封闭系统的典型例子, 如图 1-8 所示。假设气缸中的工质为 1kg, 热力学第一定律可表达为

$$q = \Delta u + w \quad (1-15)$$

式中 q ——外界加给每 kg 工质的热量 (J/kg); w ——每 kg 工质对外界所做的功 (J/kg); Δu

——每 kg 工质内能的增加 (J/kg)。

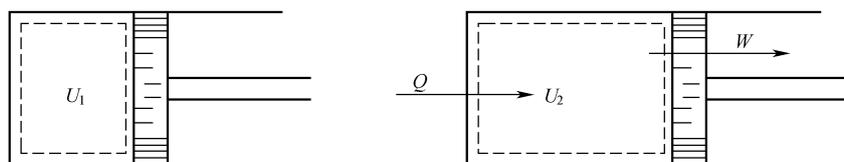


图 1-8 封闭工质的能量交换

对于 m kg 的工质，能量平衡方程式为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-15')$$

式 (1-15) 叫作热力学第一定律解析式或封闭系统能量方程式。式中各项可以是正数、零或负数。若 q 为负，表明工质对外界传出热量； w 为负，表明工质接受了外界的压缩功； Δu 为负，表明工质的内能减少。

以上公式是从热力学第一定律直接用于封闭系统而导出的，所以它们对于任何工质和任何过程都适用。

式 (1-15) 清楚地表明热量和功的转换要通过工质来完成。如果让热机工质定期回到它的初状态，周而复始，循环不息，就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力过程（热力循环）工质的内能不变，即 $\oint du = 0$ 。根据式 (1-15)，在该周期内，工质实际所得到的热量将全部转变为当量的功。这正是热机工作的根本原理。由此可见，不消耗热量，或少消耗热量而连续作出超额机械功的热机是不存在的。热力学第一定律直接否定了这种创造能量的“第一类永动机”。

在上面讨论的封闭系统的能量平衡方程中，如果系统是经历比体积不变的等容过程，则由式 (1-12) 得

$$dw = pdv = 0$$

由式 (1-15) 得

$$dq = du + dw = du$$

即证明了对于理想气体，内能仅是温度的单值函数。也就是工质在等容过程中吸收或放出的热量，全部变为工质的内能增加或减少。同时根据比定容热容的定义有

$$dq = C_v dT$$

故

$$dq = C_v dT = du$$

1.2.3 开口系统稳定流动能量方程式与焓

实际上许多热机工作时，工质通常都不是永远封闭在热机中，而是连续地（气轮机、燃气轮机）或周期地（内燃机、蒸汽机）将已做功的工质排出，并重新吸入新工质，工质的热力循环要在整个动力装置内完成，对于有工质流入流出的热力设备，作为开口系统分析研究比较方便。

工质在开口系统中的流动可分为稳定流动和不稳定流动。对于工程上常见的各种热工设



备来说, 在正常运动 (即稳定工况) 时, 工质的连续流动情况将不随时间变化, 表现为流动工质在各个截面上的状态和对外热量和功量的交换都不随时间变动, 并且同时期内流过任何截面上的工质流量均保持相同。此工况就叫作稳定流动。严格地说, 工质出入内燃机的气缸并不是连续的, 而是重复着同样的循环变化, 每一循环周期出入气缸的工质数量相同, 也可以按稳定流动的情况分析。

如图 1-9 所示, 1kg 工质在开口系统中作稳定流动, 设系统在过程中从外界吸收热量 q 并对外输出可利用的机械功 (技术功)。

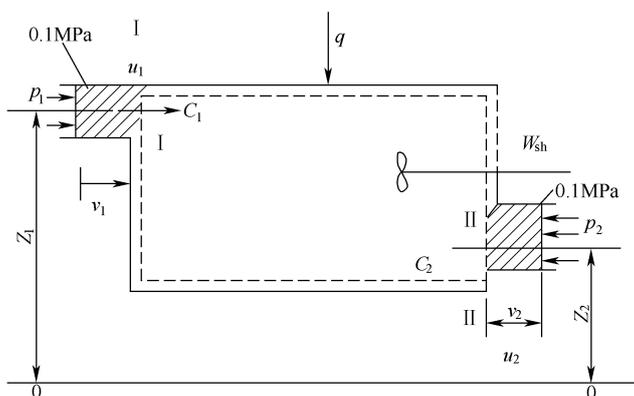


图 1-9 开口系统示意图

由图可见, 1kg 工质流进界面 I-I 所携带进去的能量为: 动能 $\frac{C_1^2}{2}$ (J/kg) (C_1 为流速), 位能 gZ_1 (J/kg) (Z_1 为高度), 内能 u_1 (J/kg), 流动功 (推进功) p_1v_1 (J/kg)。系统从外界吸收的热量为 q (J/kg)。

1kg 工质流出界面 II-II 所携出的能量为: $\frac{C_2^2}{2}$, gZ_2 , u_2 , p_2v_2 , 系统对外输出功 W_{sh} 。

根据能量转换与守恒定律, 稳定流动时输入能量等于输出能量, 即

$$q + gZ_1 + \frac{C_1^2}{2} + u_1 + p_1v_1 = W_{sh} + gZ_2 + \frac{C_2^2}{2} + u_2 + p_2v_2$$

整理后可得

$$q = (u_2 + p_2v_2) - (u_1 + p_1v_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + W_{sh} \quad (1-16)$$

$$q = \Delta u + \Delta(pv) + \frac{1}{2}\Delta C^2 + g\Delta Z + W_{sh}$$

式 (1-16) 就是开口系统稳定流动能量方程式, 它广泛应用于汽轮机、燃气轮机、喷管、锅炉、泵、压缩机以及节流装置等热力设备的热工计算中。

由于流动工质除了自身内能 u 之外, 总随带推进功 pv 一起转移, 热力学中定义两者之和为焓 h , 即

$$h = u + pv \quad (\text{J/kg}) \quad (1-17)$$

m kg 工质的焓用 H 表示

$$H = U + pV \quad (\text{J}) \quad (1-17')$$

h 是 1kg 工质的内能 u 和工质在流动时, 由机械移动而携带的功 pv 的总和, 其中 pv 又称为流动功或推进功, 既然 p 、 u 、 v 都是工质的状态参数, 因此由 p 、 u 、 v 所决定的焓 h 也是工质状态参数, 焓被称为复合的状态参数。将式 (1-17) 代入式 (1-16) 得

$$\begin{aligned} q &= h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + W_{sh} \\ &= \Delta h + \frac{1}{2}\Delta C^2 + g\Delta Z + W_{sh} \end{aligned} \quad (1-18)$$

1.2.4 熵及温熵图

在应用热力学第一定律建立的各种能量平衡方程中, 我们知道功和热量都是能量, 只不过是两种不同形式的能量, 功量和热量都是工质在状态变化过程中与外界进行能量交换的度量, 工质膨胀对外输出膨胀功, 在可逆过程中其大小为

$$dw = pdv$$

在这里压力 p 起着动力的作用, 然而只有压力, 没有位移, 即没有比体积 v 的变化 dv , 则不可能有功的交换。根据 dv 的增大或减小, 则可以确定功量的正负。

可见功量的交换是通过工质的两个状态参数 p 、 v 来进行计算的。并且可以在由 p 、 v 坐标组成的压容图上用一块面积来图示功量的大小。如图 1-10 (a) 所示, 即曲线 1-2 下的面积 $12v_2v_1$ 所示。

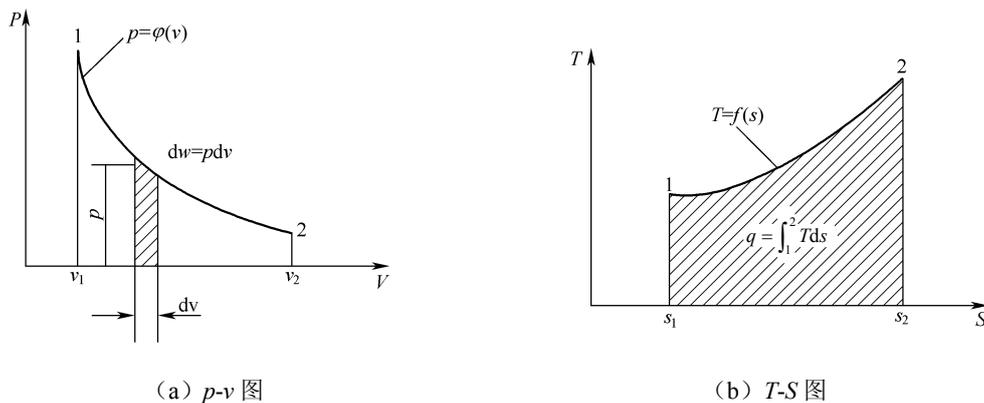


图 1-10 可逆过程的 p - v 图和 T - S 图

热量 q 与功量 w 一样同是过程量, 它们有同一性, 对比起来分析, 系统与外界发生热量交换时, 起动力作用的是温度 T , 没有温差就不可能发生实际的传热, 在极限的情况下, 系统与外界发生热量交换的温差为无穷小时, 则属于可逆的传热过程。显而易见, 有一个状态参数, 它的变化可以判断热量的正负, 并且与功量相仿可以构成类似的表达式和坐标图, 并在类似的坐标图上用一块面积来图示热量。这个状态参数就是熵。

熵是一个导出的状态参数, 它的定义式是

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-19)$$



式中 dq ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量； T ——可逆过程时的温度（可逆过程中工质与外界的温度随时保持相等）。

熵的定义是：熵的增量等于系统在可逆过程中交换的热量除以传热时的绝对温度所得的商。

1kg 工质的熵 s 的单位是 (J/kg·K)。 m kg 工质的熵 $S=ms$ 的单位是 (J/K)。

下面证明熵是工质的一个状态参数。对任何工质来说，都可以严格地加以证明。这里仅针对理想气体作如下证明

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

1kg 理想气体在可逆过程中的能量平衡为

$$dq = du + dw$$

$$\therefore du = C_v dT, \quad dw = p dv$$

$$\therefore dq = C_v dT + p dv$$

$$\text{又} \quad pv = RT$$

$$\text{则} \quad ds = \frac{dq}{T} = \frac{C_v dT + p dv}{T} = \frac{C_v dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

当理想气体由状态 1 (p_1 、 v_1 、 T_1 、 s_1) 经历可逆过程变化到状态 2 (p_2 、 v_2 、 T_2 、 s_2) 时，积分上式得：

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

其中，第二项只与初终态的比体积 v_1 、 v_2 有关而与过程的性质无关；第一项中 C_v 是温度的函数，故该项积分也仅与初终态的温度 T_1 、 T_2 有关而与过程性质无关。

当比热容 C_v 为定值时，则上式可简化为

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1-20)$$

既然，参数 s 从状态 1 到状态 2 的变化只与初态 1 和终态 2 有关，而与中间所经历的过程无关，这就说明 s 是状态参数。

同功量的图示相仿，也可用两个独立的状态参数 T 、 S 构成的状态图来表示热量。在 T - S 图上的一点表示一个平衡状态，一条曲线表示一个可逆过程，如图 1-9 (b) 所示的曲线 1-2。

$$dq = T ds$$

$$q = \int_1^2 T ds = \text{面积 } 12S_2S_1$$

因此 T - S 图上曲线 1-2 下的面积表示该过程中的传热量 q 的大小，故 T - S 图又称为“示热图”，它在热工分析中有重要的作用。

对于 m kg 工质的热量 Q ，可按下式计算

$$Q = m \int_1^2 T ds = \int_1^2 T ds$$

从表 1-2 的对比中，可以清楚地看到熵与比体积是相互对应的一个状态参数。

表 1-2 熵与比体积对比表

	功量 w	热量 q
表达式	$dw = p dv, w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$	$dq = T ds, q = \int_1^2 T ds$
动力	p	T
能量传递的方向	$dv > 0, dw > 0$, 对外做功 $dv = 0, dw = 0$, 不做功 $dv < 0, dw < 0$, 外对内做功	$ds > 0, dq > 0$, 工质吸热 $ds = 0, dq = 0$, 绝热 $ds < 0, dq < 0$, 工质放热
图示	$p-v$ 图	$T-s$ 图

熵是导出的状态参数，有如下性质：

- (1) 熵是一状态参数，如已知系统两个独立的状态参数，即可求出熵的值。
- (2) 只有在平衡状态下，熵才有确定值。
- (3) 与内能和焓一样，通常只需求熵的变化值 Δs ，而不必求熵的绝对值。
- (4) 熵是可加性的量， m kg 工质的熵是 1kg 工质熵的 m 倍， $S=ms$ 。
- (5) 在可逆过程中，从熵的变化中可判断热量的传递方向—— $ds > 0$ 系统吸热； $ds = 0$ 系统绝热； $ds < 0$ 系统放热。
- (6) 熵可以判断自然界一切自发过程的熵变， $ds_{\text{孤立系}} \geq 0$ 。

1.3 气体的热力过程

在发动机中热能向机械能的转换是通过工质状态的变化即热力过程来实现的，因此对气体热力过程基本规律进行分析是很重要的。通过对热力学过程进行分析，确定过程中气体状态参数的变化规律，揭示出热力过程能量转换的特性。

热力过程的分析方法是：首先研究理想气体的可逆过程，导出过程方程式，利用过程方程和理想气体状态方程求出过程的初、终态参数（主要是 p 、 v 、 T ）之间的关系式，并按热力学第一定律研究热力过程中气体吸收或放出的热量、内能的变化以及对外所做的功；然后引进各种有关的经验修正系数，将这种可逆过程的分析结果，换算成实际气体的不可逆过程。

工程热力学中把热机的工作循环概括为工质的热力循环，把整个热力循环分成几个典型的热力过程。由于定容、定压、定温和绝热过程中各有一个状态参数（分别为 v 、 p 、 T 和 S ）保持不变，且这四个过程与实际热力设备中工质的状态变化较为接近，称其为基本的热力过程，所以为讲解发动机的热力循环，首先要介绍基本的热力过程。

1.3.1 定容过程

定容过程就是气体的比体积 v 保持不变的热力过程，如图 1-11 (a) 所示。

1. 定容过程方程式

$$v = \text{常数}$$



定容过程曲线如图 1-11 (b) 中的线 1-2 或 1-2' 所示。即在 $p-v$ 图上是一条垂直于 v 轴的铅垂线。

2. 气体状态参数的变化

按照 $v=\text{常数}$ 和状态方程 $pv=RT$, 可求得初、终态参数之间的关系为

$$v_1 = v_2 \text{ 或 } \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-21)$$

即在定容过程中, 气体的绝对压力与绝对温度成正比。

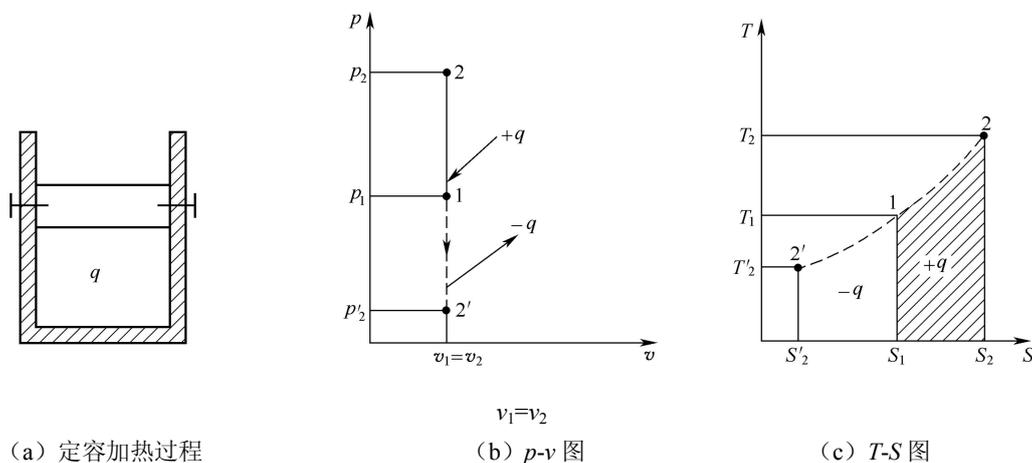


图 1-11 定容过程在 $p-v$ 图和 $T-S$ 图上的表示

终止状态 T_2 与初始状态 T_1 的关系

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{p_2}{p_1} T_1 \\ T_2 &= \lambda T_1 \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中 λ 为压力升高比。

3. 能量变化

(1) 功量

定容过程的膨胀功 $w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$, 因 $dv=0$, 所以 $w=0$ 。

(2) 热量

根据比热容的定义 $C_v = \frac{dq}{dT}$, 可得 $q = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$, 若假定 C_v 为定值, 故定容过程中工质吸入 (或放出) 的热量为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = C_v (T_2 - T_1) \quad (1-23)$$

(3) 内能

根据能量平衡方程式: $q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv$

$$q = \Delta u = u_2 - u_1 = C_v (T_2 - T_1) \quad (1-24)$$

即定容过程中工质吸入（或放出）的热量全部转换为工质内能的增加（或减少）。

4. 熵的变量

根据熵的定义式 $ds = \frac{dq}{T}$ ，又 C_v 为定值，故熵的变量 Δs 为

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{C_v dT}{T} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

在 T - S 图上（如图 1-11 (c) 所示）过程 1-2 或 1-2' 为一条对数曲线。

1.3.2 定压过程

定压过程就是气体的压力 p 保持不变的热力过程，如图 1-12 所示。

如图 1-12 (a) 所示表示定压加热过程，活塞上的载质量 mg 保持不变。

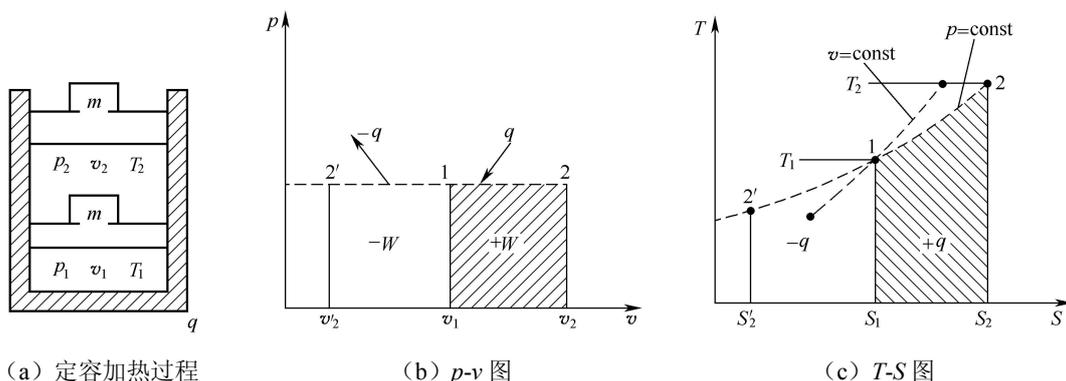


图 1-12 定压过程的 p - v 图和 T - S 图

1. 定压过程方程式

$$p = \text{常数}$$

在 p - v 图上，定压过程曲线为一条平行于 v 轴的水平线如图 1-12 (b) 所示。

2. 气体状态参数的变化

根据 $p = \text{常数}$ 和 $pv = RT$ ，可求得定压过程初、终态参数关系为

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-25)$$

即在定压过程中气体的比体积与绝对温度成正比。

终止状态 T_2 与初始状态 T_1 的关系

$$T_2 = \frac{v_2}{v_1} T_1$$

$$T_2 = \rho T_1 \quad (1-26)$$

式中 ρ 为预膨胀比。

3. 能量变化

(1) 功量

定压过程中气体所做的膨胀功为



$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) \quad (1-27)$$

在 p - v 图上, 1-2 直线下的面积即为气体所做的膨胀功。同理, 直线 1-2' 下的面积为压缩功。

(2) 热量

根据比热容的定义 $C_p = \frac{dq}{dT}$ 及 $C_p = \text{常数}$, 可求得定压过程中的热量为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = C_p (T_2 - T_1) \quad (1-28)$$

(3) 内能

根据内能的计算公式 $\Delta u = C_v dT = C_v (T_2 - T_1)$

4. 熵的变量

根据熵的定义式 $ds = \frac{dq}{T}$ 及 $C_p = \text{常数}$, 则熵的变量 Δs 为

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{C_p dT}{T} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

因为 $C_p > C_v$, 故在 T - S 图上, 定压过程曲线与定容过程曲线相比较, 它是一条较为平坦的对数曲线 (如图 1-12 (c) 所示)。在达到相同气体温度情况下, 需要吸入更多的热量, 以便转变为对外的功量。

1.3.3 定温过程

定温过程就是温度保持不变的热力过程。

1. 定温过程方程式

$$T = \text{常数}$$

$$pv = \text{常数}$$

在 p - v 图上定温过程为一条等边双曲线, 如图 1-13 (a) 中曲线 1-2 或 1-2' 所示。

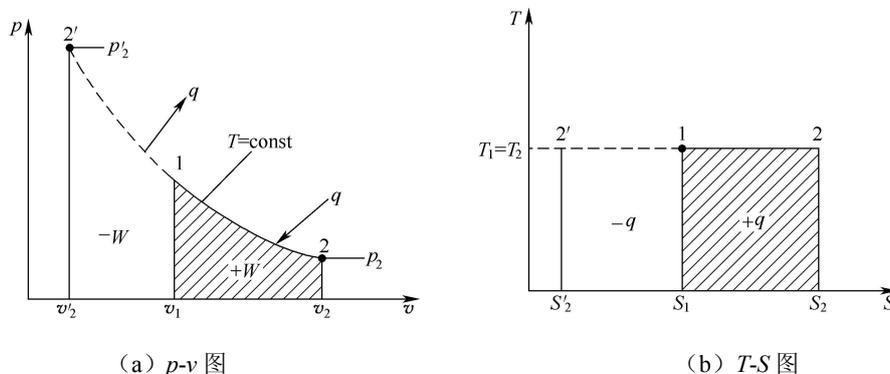


图 1-13 定温过程

2. 气体状态参数的变化

在定温过程中, 气体初、终态参数的关系为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1-29)$$

即在定温过程中, 气体的绝对压力与比体积互成反比。

3. 能量变化

(1) 功量

$$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-30)$$

(2) 内能

定温过程中, $\Delta T = 0$, 即 $\Delta u = 0$

(3) 热量

根据能量平衡方程得:

$$q = \Delta u + w = w = \int_1^2 p dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (1-31)$$

可见, 在定温过程, 外界加给工质的热量全部转变为工质对外所做的膨胀功; 反之, 外界对工质所做的压缩功全部转换为热量释放给外界。

4. 熵的变量

根据熵的定义式 $ds = \frac{dq}{T}$ 及 $T = \text{常数}$, 则定温过程中气体熵的变化为

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dq = \frac{1}{T} RT \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}$$

在 $T-S$ 图上, 定温过程为一条水平线, 如图 1-13 (b) 所示, 曲线 1-2 下面的面积表示了定温过程中气体所吸收的热量。

1.3.4 绝热过程

在绝热过程中的每一时刻, 工质与外界均不发生热交换, 即 $dq = 0$ 。

1. 绝热过程方程式

根据热力学第一定律解析式、理想气体的性质和 $dq = 0$, 可以导出绝热过程方程式为

$$pv^k = \text{常数} \quad (1-32)$$

式中 k 为绝热指数。

根据热力学第一定律解析式、理想气体的性质和 $dq = 0$, 可以导出绝热过程方程为

$$dq = du + dw = C_v dT + p dv = 0$$

对理想气体状态方程取全微分, 则

$$p dv + v dp = R dT$$

把这个结果代入上式, 整理后得

$$(C_v + R) p dv + C_v v dp = 0$$

因 $C_v + R = C_p$, 故 $v dp + \frac{C_p}{C_v} p dv = 0$



令 $\frac{C_p}{C_v} = k$ ，则： $vdp + kpdv = 0$

两边同乘 $\frac{1}{pv}$ ，得： $\frac{dp}{p} + k\frac{dv}{v} = 0$

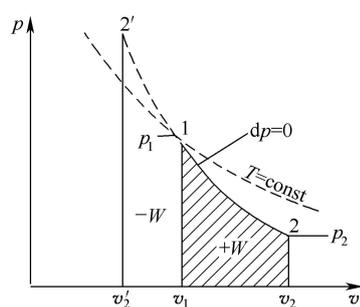
对上式积分，可得： $\ln p + k \ln v = \text{常数}$

即： $\ln(pv^k) = \text{常数}$

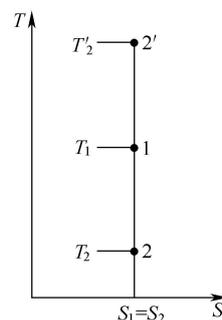
即： $pv^k = \text{常数}$ 或 $p_1v_1^k = p_2v_2^k$

上式即为绝热过程方程式。 k 为绝热指数或比热比，其数值随气体的种类和温度而变。当 C_p 、 C_v 取常数时， k 也是定值。对于空气和燃气， $k=1.4$ 。

绝热过程曲线在 $p-v$ 图上是一条较定温线斜率大的不等边双曲线(高次双曲线)，如图 1-14 (a) 所示。



(a) $p-v$ 图



(b) $T-S$ 图

图 1-14 绝热过程

2. 状态参数的变化

由绝热过程方程式和理想气体状态方程式，可以得到绝热过程气体初、终态参数的如下关系式

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k \quad (1-33)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} \quad (1-33')$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-33'')$$

3. 能量变化

(1) 功量

根据能量平衡方程式 $w = -\Delta u$

$$\begin{aligned}
 w &= C_v(T_1 - T_2) \\
 &= \frac{1}{k-1}R(T_1 - T_2) \\
 &= \frac{1}{k-1}(p_1v_1 - p_2v_2)
 \end{aligned} \tag{1-34}$$

在 $p-v$ 图上, 绝热过程的膨胀功可用曲线 1-2 下面的面积表示。

(2) 内能 $\Delta u = C_v\Delta T$

(3) 热量 绝热过程中工质与外界没有热交换 ($dq = 0$)。

4. 熵的变量

绝热过程中熵的变量为: $ds = \frac{dq}{T} = 0$, 即绝热过程是熵不变的过程, 也称为定熵过程, 因此

此在 $T-S$ 图上绝热过程曲线是一条平行于 T 轴的垂直线, 如图 1-14 (b) 所示。

1.3.5 多变过程

实际热机中工质进行的各种热力过程通常可表示为

$$pv^n = \text{常数} \tag{1-35}$$

式中 n 称为多变指数, 在某一多变过程中, n 为一定值, 但不同多变过程的 n 值各不相同, 可在 $0 \sim \pm \infty$ 间变化。前述的四种基本热力过程都是多变过程的特例。

当指数 $n=0$ 时, $pv^0=p=\text{常数}$, 为定压过程;

当 $n=1$ 时, $pv=\text{常数}$, 为定温过程;

当 $n=k$ 时, $pv^k=\text{常数}$, 为绝热过程;

当 $n=\infty$ 时, $p^{\frac{1}{\infty}}v = p^0v = v = \text{常数}$, 为定容过程。

当 n 等于 0 、 1 、 k 、 ∞ 以外的某一数值时, 它表示了上述四种基本过程之外的热力过程。 n 的数值可以根据实际过程的具体条件来确定。

将式 (1-32) 中的 k 换成 n , 即变成式 (1-35), 因此上面讨论的绝热过程初终状态之间的关系式 (1-33) (1-33') (1-33'') 及计算对外功量变换的关系式 (1-34) 都将直接适用于多变过程。表 1-3 列出经替换指数后的有关公式。

表 1-3 理想气体的各种热力过程 (定比热)

	定容过程	定压过程	定温过程	绝热过程	多变过程
多变指数 n	∞	0	1	k	n
过程方程式	$v=\text{定值}$	$p=\text{定值}$	$pv=\text{定值}$	$pv^k=\text{定值}$	$pv^n=\text{定值}$
p 、 v 、 T 之间的关系式	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$



续表

	定容过程	定压过程	定温过程	绝热过程	多变过程
热力学能变化 Δu	$C_v(T_2 - T_1)$ (C_v =定值)	$C_v(T_2 - T_1)$ (C_v =定值)	0	$C_v(T_2 - T_1)$ (C_v =定值)	$C_v(T_2 - T_1)$ (C_v =定值)
焓变化 Δh	$C_p(T_2 - T_1)$ (C_p =定值)	$C_p(T_2 - T_1)$ (C_p =定值)	0	$C_p(T_2 - T_1)$ (C_p =定值)	$C_p(T_2 - T_1)$ (C_p =定值)
比熵变化 Δs	$C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$ (C_v =定值)	$C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$ (C_p =定值)	$\frac{q}{T}$ $R \ln \frac{v_2}{v_1}$ $R \ln \frac{p_1}{p_2}$	0	$C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$ $C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$ $C_v \ln \frac{p_2}{p_1} + C_p \ln \frac{v_2}{v_1}$ $C_n \ln \frac{T_2}{T_1}$ (C_v, C_p =定值)
过程功 $w = \int_1^2 p dv$	0	$p(v_2 - v_1)$ $R(T_2 - T_1)$	$RT \ln \frac{v_2}{v_1}$ $RT \ln \frac{p_1}{p_2}$ $p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$\frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $\frac{R}{k-1}(T_1 - T_2)$	$\frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $\frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$
过程热量 q	$C_v(T_2 - T_1)$	$C_p(T_2 - T_1)$	w	0	$\frac{n-k}{n-1} C_v(T_2 - T_1)$
过程比热 C	C_v	C_p	∞	0	$\frac{n-k}{n-1} C_v$

多变过程对外热量交换与绝热过程有所不同。根据公式 (1-15), $q = \Delta u + w$, 既然多变过程的外功为

$$w = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$$

同时

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1)$$

则

$$q = \left(C_v - \frac{R}{n-1} \right) (T_2 - T_1) \quad (1-36)$$

如果用 C_n 来表示多变过程定比热容, 则

$$q = C_n(T_2 - T_1) = \left(C_v - \frac{R}{n-1} \right) (T_2 - T_1)$$

故

$$C_n = \left(C_v - \frac{R}{n-1} \right) \quad (1-37)$$

由式 (1-37)、 $C_p - C_v = R$ 和 $C_p/C_v = k$, 可得

$$C_n = C_v - C_v \frac{k-1}{n-1} = C_v \frac{n-k}{n-1} \quad (1-37')$$

上式说明多变过程比热容 C_n 的数值不仅取决于气体本身 (C_v 、 k 值), 还和过程性质 (n) 有关。

图 1-15 表示四种基本热力过程曲线画在同一个 $p-v$ 图和 $T-S$ 图上的情况。

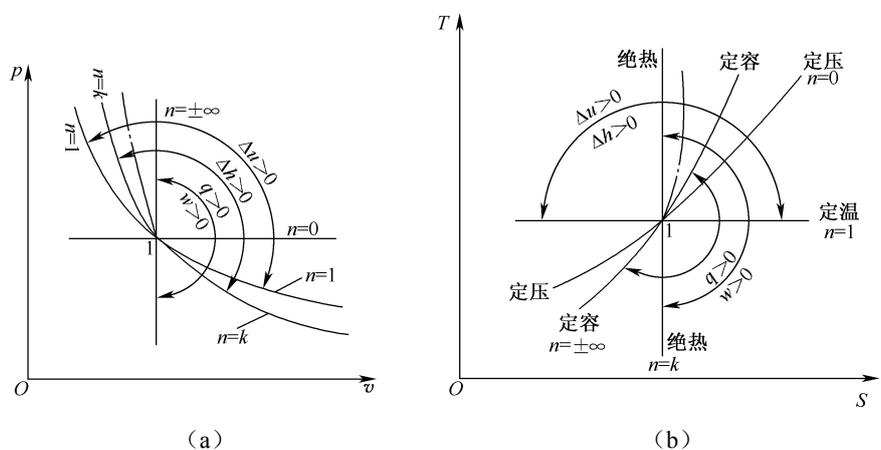


图 1-15 多变过程在 $p-v$ 图和 $T-S$ 图的规律定性分析

由图可见, 多变指数 n 在坐标图上的分布有以下规律: 由 $n=0$ 开始沿顺时针方向看, n 由 $0 \rightarrow 1 \rightarrow k \rightarrow \infty$ 是逐渐变化的。因而, 对于任意多变过程, 只要知道多变指数 n 的值, 就能确定该过程在 $p-v$ 图及 $T-S$ 图上的相对位置。例如, 当已知一多变过程的 $n=1.2$ 时, 过程线在 $p-v$ 图及 $T-S$ 图上位于 $n=1$ 及 $n=k$ 之间。

根据 $p-v$ 图及 $T-S$ 图能较容易地分析某一热力过程的热功转换情况并比较不同热力过程功及热量的大小, 由图 1-15 可分析如下。

(1) 在过程中热力学能及焓的增减以定温线为分界线。在定温线上方 ($T-S$ 图) 或者右上方 ($p-v$ 图) 的各过程由于 $\Delta T > 0$, 则有 $\Delta u > 0$, $\Delta h > 0$; 而在定温线下方 ($T-S$ 图) 或左下方 ($p-v$ 图) 的各过程由于 $\Delta T < 0$, 则有 $\Delta u < 0$, $\Delta h < 0$ 。

(2) 在过程中功量的正负以定容线为分界线。在定容线的右方 ($p-v$ 图) 或者右下方 ($T-S$ 图) 的各过程由于 $\Delta v > 0$, 则有 $w > 0$, 工质对外做功; 而在定容线左方 ($p-v$ 图) 或左上方 ($T-S$ 图) 各过程由于 $\Delta v < 0$, 则有 $w < 0$, 外界对工质做功。

(3) 在过程中热量的正负以绝热线为分界线。在绝热线的右方 ($T-S$ 图) 或者右上方 ($p-v$ 图) 的各过程由于 $\Delta s > 0$, 则有 $q > 0$, 工质从外界吸热; 而在绝热线左方 ($T-S$ 图) 或左下方 ($p-v$ 图) 的各过程由于 $\Delta s < 0$, 则有 $q < 0$, 工质对外放热。

有了以上判定标准, 就可方便地从坐标图上分析一个过程中能量转换和状态变化情况或者根据能量转换和状态变化情况在坐标图上绘出该热力过程。

1.4 热力学第二定律

热力学第一定律确定了热功转换之间的数量关系, 而热力学第二定律则指明了实现热功



转换的条件、限度以及自发过程进行的方向性。

1.4.1 热力循环与热效率

1. 热力循环

热变功的根本途径是依靠工质的膨胀。为了连续不断地将热转换为功，工程上是通过热机来实现的，工质在热机气缸中仅仅完成一个膨胀过程不可能连续做功。为了重复地进行膨胀过程，工质在每次膨胀做功之后，必须进行某种压缩过程，使它回复到初态，以便重新膨胀做功，这种工质从初态出发，经过一系列变化又回到初态的封闭过程，称为热力循环（简称循环）。

根据效果的不同，将热力循环分为正向循环和逆向循环。把热能转换为机械功的循环叫正向循环（或热机循环）；依靠消耗机械功而将热量从低温热源传向高温热源的循环叫逆向循环（或热泵循环）。

如图 1-16 所示，设 1kg 工质进行一个可逆的正向循环。在 $p-v$ 图上可看出，膨胀过程 1-a-2 曲线高于压缩过程 2-b-1 曲线，即过程 1-a-2 所做的膨胀功大于过程 2-b-1 所消耗的压缩功，整个循环中工质作出的净功 $\oint dw$ 为正，用 w_0 表示净功的绝对值，在 $p-v$ 图上封闭曲线 1-a-2-b-1 所包围的面积表示 w_0 的数值。在 $T-S$ 图上看出，工质的吸热过程曲线 1-a-2 高于工质的放热过程曲线 2-b-1，即过程 1-a-2 中工质的吸热量 $\int 1a2dq$ 大于过程 2-b-1 中工质放出的热量，整个循环中工质从高温热源中接受的净热量 $\oint dq$ 为正。用 q_1 表示循环中工质从高温热源中接受热量的绝对值，用 q_2 表示工质向低温热源放出热量的绝对值，则循环中工质接受的净热量为 $q_1 - q_2$ ，它可用 $T-S$ 图上曲线 1-a-2-b-1 所包围的面积表示。按热力学第一定律，循环中工质所接受的净功为 $\oint dq = \oint du + \oint dw$ ，因为 $\oint du = 0$ ，所以，循环净功等于循环净热

$$q_1 - q_2 = w$$

即热力循环中工质从高温热源所接受的热量 q_1 ，只有一部分热量变成循环净功 w_0 ，而另一部分热量放出给低温热源。

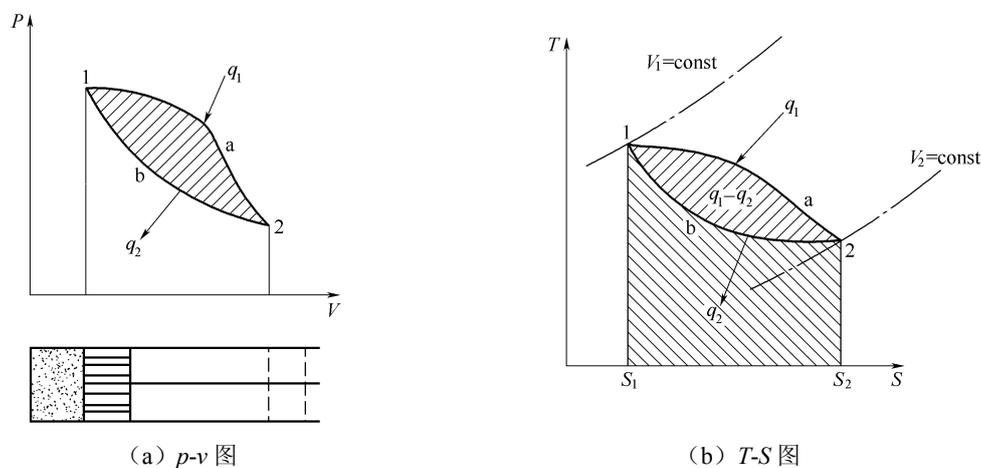


图 1-16 正向循环