

与空气以及煤气。同时火工工艺过程排出的二次能源种类很多，数量巨大^①。针对上述特点，冶金工厂的热能动力方面的工作者应完成三个主要任务：1）有效地供应工艺过程所需的能量（蒸汽，空气，煤气），并力求达到燃料的综合利用；2）合理地利用二次能源，并力求实现机组的工艺-动力联合化；3）适当地统一各类管网，力求节约优质燃料。根据上述任务，要求冶金工厂工程技术人员不仅应掌握热工学的基本知识，还应进一步了解热能动力在冶金工厂内具体应用的基本知识。即要求更好地把热工学的基本知识与冶金生产的特点相结合，并为强化冶金生产过程服务。这样便确定了冶金各专业的热工学的性质是基础技术课，而它的主要内容就有：1）热工学理论基础（工程热力学与传热学^②）；2）热能动力设备（锅炉，蒸汽机，汽轮机，燃气轮机，压气机等）；3）冶金工厂二次能源的利用与热动力厂。

旧中国是一个半封建半殖民地的国家，没有自己的动力工业，没有汽车，机车，飞机等制造业。我国在近代动力方面曾经处于极落后的境地。解放后，我国人民在党和政府的正确领导下，经过三年恢复与第一个和第二个五年计划的顺利完成，已建立了自己的动力工业基础——汽车，机车，锅炉，汽轮机，飞机等制造厂相继建成并投入生产；在全国各地新建许多发电厂与动力站；在动力机械制造方面，生产了各种中小型动力机械（蒸汽机，柴油机，汽油机，汽轮机，锅驼机等），拖拉机和中型以上的汽轮机（12000千瓦，25000千瓦，50000千瓦，100000千瓦），锅炉（75吨/时，120吨/时，230吨/时），大型机车，飞机与远洋货轮等；在发电方面，1959年发电量达415亿度，由1948年（旧中国最高发电年份，发电量为92亿度）的世界第26位跃进到第九位；在工业热工方面，我国建设的大型钢铁联合企业中，都设有热电鼓风站与统一的能量供应管网，并对二次能源已有初步的利用。综合上述，可以确信今后我国的热能动力与工业热工事业将有更大的发展。因此，热工学的基本内容将日益成为科学技术（包括冶金技术）工作者所必备的基础知识。

① 二次能源的种类与数量决定于工艺特性，详见第四篇。

② 根据课程分工，传热学在冶金炉等课程内叙述。

第一篇 工程热力学基本知識

第一章 基本概念

§ 1—1 工程热力学的对象和任务

热力学是研究伴有热效应发生的物理、化学和其他过程中能量轉換的規律的科学。它是人們在有关热現象方面的实践中积累和总结出来而且系統化了的理性知識。同时,也应该指出,热力学是热学的宏观理論,它与作为热学微观理論的統計物理学^①是互相补充的。因此,热力学的研究,基本上采用整体分析的方法,并不深入到物体的微观范围。

热力学所根据的基本定律是热力学第一定律和热力学第二定律。热力学第一定律是能量守恒与轉換定律在热現象上的应用,而且在应用时并不需要任何假設来补充,它是普遍的自然規律。热力学第二定律說明在我們周围自然界中所进行的宏观过程的方向及其規律性,它反映这些过程的特点,把它应用于所說明的范围内时也是可靠的自然規律,不过与第一定律相比,它有局限性。

依照研究問題的 范围和研究的 目的,近代热力学一般分作三个部分:普通热力学^②、化学热力学^③和工程热力学。

工程热力学的对象,和其他热力学一样,是热力学系統(以后简称系統)。所謂系統是指我們所研究的物体,系統以外周围的物体則称为外界。这些物体可以是多个或者是一个,甚至可以是某一物体的一个部分。系統內物体之間或系統与外界之間相互作用所发生的热能与机械能的相互轉換,就是工程热力学研究对象的范围。正由于这样,工程热力学便成为研究热力工程的理論基础之一。

对于热能与机械能的相互轉換,机械能可以連續地、全部地轉为热能,而热能則不可能連續地、全部地轉变为机械能,所以使热能得以更大的百分率轉变成机械能(热效率)的研究便成为工程热力学的主要任务。

要使热能轉变为机械能必須借助于一套設備和某种工作物质。这种設備就是通常所称的热机,而这种工作物质則通常简称它为工质。因此,对工质在平衡状态下的热性质以及因外界能量作用于工质所发生的过程进行研究,也都是工程热力学的任务。

热机工作时,以活塞式热机为例,工质要从燃料的燃烧热中吸取热能,并进入热机,推动活塞,使热能轉变为机械能,而且工质在热机中工作过后又要从热机中排出,以便让新的工质再次地进入热机。工质在这样的工作中,它本身的状态要不断地发生变

① 統計物理学应用几率理論和統計平均的方法来研究大量微观粒子的运动規律。它揭示了热現象的微观机理和物理实质。

② 普通热力学或称物理热力学研究热力学的一般理論基础,以及研究各种各样物理現象和物理过程中能量轉換的規律性。

③ 化学热力学研究热力学基本定律在化学和物理化学过程中的应用,即研究各种化学反应的热效应、化学平衡的計算和溶液的特性等。

化。为此，对工质的要求，它不但要具有良好的膨胀性，而且要具有良好的流动性。同时具有这两种良好性质的物体只能是气体。工程热力学所要研究的作为工质的物体也只是气体——空气、燃气、水蒸汽等。

§ 1—2 气体的基本状态参数

热机的工作是与工质状态的改变分不开的，而工质又都是气体。因此，要想研究热机的工作情况，就应该先明确气体的状态。

气体是由极大数量的分子所组成的，每个分子都处于所谓混乱的热运动中。分子的数量既多，分子的运动速度又各不相同。一个系统内气体的状态不能以单个分子或几个分子的运动速度等微观量来表明，而要以所有分子运动所产生的效应的平均值，如温度、压力等宏观量来表明。这些可从某一角度来说明气体状态特征的宏观物理量都称为气体的状态参数。

在热力学中常要用到平衡状态的概念。所谓平衡状态，是指系统在沒有外界能量作用的情况下所能长久保持的状态。气体在平衡状态下，各部分的温度和压力都均匀一致（即同时保持温度平衡和机械平衡），因而各部分的状态参数都是同一数值。也惟有这样的气体的状态才能用参数来表示。

在工程热力学中，常用的气体状态参数有六个：压力、比容、温度、内能、焓和熵。其中前列三个称为基本参数，都可以直接测量，后列三个则都须利用测得数值来计算。现在先把三个基本参数介绍如下：

一、压力：气体的压力是气体分子在混乱运动中对容器壁频繁撞击的结果，常用垂直作用在单位面积上的力来衡量。

在工程中，压力的单位采用工程大气压，简称大气压（有时也简称气压）。这一单位和其他压力单位的换算关系如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 10^4 \text{ 毫米水柱} = 735.6 \text{ 毫米汞柱。} \end{aligned} \quad (1-1)$$

上述的大气压不同于物理学上的大气压，后者可称为物理大气压。按规定，1物理大气压等于760毫米汞柱或1.0333大气压。

这几种压力单位在工程上各有其适用场合，例如锅炉中的蒸汽压力有几个、几十个大气压或更高，就不会表为几千、几万毫米汞柱。又如通风机所保持的压差（即压力升高）一般不大，只有几十或几百毫米水柱，就不会用大气压来表示。

在工程热力学的计算中，压力常用公斤/米²来表示，这一单位只等于一万分之一（10⁻⁴）的大气压，只相当于1毫米水柱。

说明容器内气体的压力，有二种不同的方法。一种是直接指明气体作用于容器壁上的压力的实际数值，这一数值称为绝对压力。另一种是指用压力表（图1—1）或真空表（图1—2）测量时那些表上的读数，这一数值分别称为表压力和真空度。表压力或真空度是绝对压力与当时当地大气压力之差，即：

$$p_{\text{表}} = p_{\text{绝对}} - B \quad \text{或} \quad p_{\text{绝对}} = B + p_{\text{表}}; \quad (1-2)$$

$$p_{\text{真空}} = B - p_{\text{绝对}} \quad \text{或} \quad p_{\text{绝对}} = B - p_{\text{真空}}; \quad (1-3)$$

式中 B ——大气压力； $p_{\text{绝对}}$ ——绝对压力； $p_{\text{表}}$ ——表压力； $p_{\text{真空}}$ ——真空度。

显然，如果大气压力发生变化，即使气体的绝对压力保持不变，压力表或真空表的读数也是要发生变化的。因此，只有绝对压力才能真正说明气体的状态，而绝对压力则必须通过表压力或真空度来取得。在工程实用上，常用 p_a 表示绝对压力，用 p_i 表示表压力。

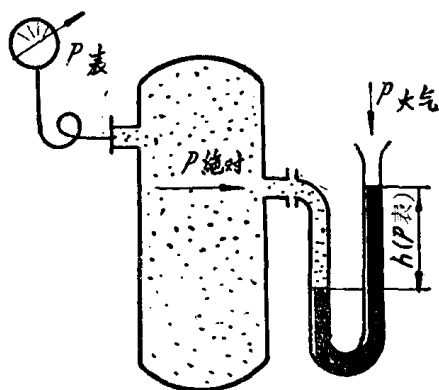


图 1—1 储气罐中气体表压力的测量

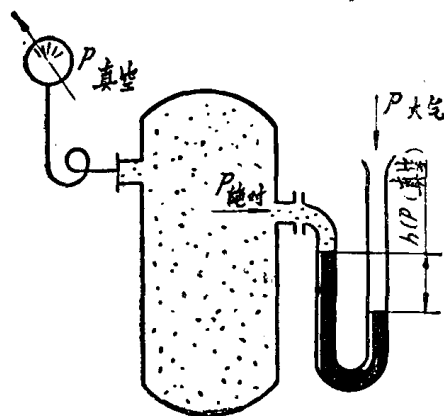


图 1—2 储气罐中气体真空度的测量

二、比容：在热力工程中，重量的单位一般为公斤，容积的单位一般为米³，比容就是单位重量的物体所占有的容积，以 v 来表示。设 G 公斤气体占有容积 V 米³，则比容为：

$$v = \frac{V}{G}, \text{ 米}^3/\text{公斤}。$$

比容的倒数称为重度，以 γ 来表示。重度就是单位容积的气体所具有的重量，即：

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ 公斤/米}^3。$$

由此，

$$v\gamma = 1。 \quad (1-4)$$

三、温度：温度表示物体的冷热程度，也就是分子热运动的强弱程度。

在热力工程中，一般都用摄氏温度，以“°C”来表示。在工程热力学中，常常要用绝对温度，以“°K”来表示。摄氏温度和绝对温度每一度的间隔是相同的，只是摄氏温度的零度比绝对温度的零度高出273度，因而它们之间的关系如下：

$$T = t + 273, \quad (1-5)$$

式中 T ——绝对温度； t ——摄氏温度。

§ 1—3 理想气体状态方程式

实验和理论都证明，气体基本状态参数 p ， v ， T 之间存在着一定的关系。在平衡状态下的这种关系可以用下列关系式来表示：

$$\varphi(p, v, T) = 0,$$

这一关系式称为状态方程式，它的具体形式要取决于气体的性质和气体的类别。

在工程热力学的研究中，把气体归纳为两个大类：1. 理想气体，它是被人为地假定

分子本身不占容积和分子之間沒有吸引力的气体，显然，实际不存在，它只是一种便于計算和分析的簡化了的气体；2. 实际气体，它又被归納为两个小类：1) 是距离液化点較远、在通常温度和压力下实际存在的气体，例如空气以及內燃机和鍋炉中的燃气、烟气等等都属于这一类，在很低压力或較高温度下的水蒸汽也属于这一类；2) 是蒸汽，即与变为这种蒸汽的液体接近或距离液化点不远的气体，通常作为热机工质或换热器介质的水蒸汽就属于这一类。蒸汽与其他实际气体之間并无本质上的区别，理想气体可以认为是距离液化点較远的实际气体的极限情况。

水蒸汽 p, v, T 之間的关系比較复杂，可以用于水蒸汽的状态方程式在实际应用上也很麻煩，在解决实际問題时一般都使用图表来取得数据。这方面的知識将在第四章內讲述。至于空气、燃气、烟气等則都是距离液化点較远的实际气体，它們的性质都很接近于理想气体。因此，这些实际气体 p, v, T 之間的关系都可近似地按理想气体状态方程式来确定。

从物理学中，理想气体状态方程式的具体形式为：

$$pv = RT, \text{ 公斤米/公斤} \quad (1-6)$$

式中 p —— 绝对压力，公斤/米²；

v —— 比容，米³/公斤；

T —— 绝对温度，度 (°K)；

R —— 气体常数，公斤米/公斤度。

上式不是用热力学方法找到的，而是最初从实验得出、后来被分子运动論证明的。它对理想气体的任何状态都适用；但其中的气体常数 R 与气体的类别有关，因而对不同的气体有不同的数值。

式 1-6 是对 1 公斤气体而言的。如果气体的重量不是 1 公斤而是 G 公斤，則由于 $Gv = V$ (其中， V 为容积)，式 1-6 变为：

$$pV = GRT, \text{ 公斤米。} \quad (1-7)$$

如果气体的重量是 1 摩尔^① (以 μ 来表示)，也就是式 1-7 中的 G 等于 μ ，則由于 $\mu v = V_\mu$ ，式 1-7 又可变为：

$$pV_\mu = \mu RT, \text{ 公斤米/摩尔，} \quad (1-8)$$

式中 $V_\mu = \mu v$ —— 摩尔容积，米³/摩尔。

根据亚佛加德罗定律，在标准状态下，任何理想气体的摩尔容积都等于 22.4 标米³。

由于式 1-6 中的 $\frac{pv}{T}$ 和式 1-7 中的 $\frac{pV}{T}$ 都等于常数，同样，式 1-8 中的 $\frac{pV_\mu}{T}$ ，

即

$$\mu R = \text{常数，}$$

式中 μR 称为通用气体常数，它对任何理想气体都是同一数值。

取标准状态 ($p = 10333$ 公斤/米², $V_\mu = 22.4$ 标米³/摩尔, $T = 273^\circ\text{K}$) 来考虑，則

① 摩尔或称公斤分子量是一种特殊的重量单位，它等于普通的重量单位 (公斤) 乘以被测量物质的分子量。因此，1 摩尔气体的公斤数要取决于它的分子量。

$$\mu R = \frac{pV_{\mu}}{T} = \frac{10333 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤米/模尔度。} \quad (1-8a)$$

因此，式 1—8 不但对某一种理想气体的任何状态都适用，而且对任何种理想气体也都适用。

由式 1—8a，个别理想气体的气体常数 R 就可用下式来求得：

$$R = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤米/公斤度。} \quad (1-9)$$

§ 1—4 混合气体

在热力工程中经常遇到混合气体，例如空气（由氧、氮、氩和其他成分组成），燃气（由氧、氮、二氧化碳、水蒸汽和其他成分组成）等等。每种由距离液化点较远的实际气体所组成的混合气体，和它的各种组成气体一样，也很近似地服从于理想气体的一切规律。本节的任务在于给出根据混合气体已知成分求混合气体的重度、平均折合分子量和气体常数的方法。

一、混合气体各组成气体的分压力和分容积：混合气体的各组成气体都处在和混合气体相同的温度下，并且散布在和混合气体相同的容积中。但是，它们各有单独地给予容器壁的压力和应该具有的容积。

每种组成气体在混合气体的温度和容积下单独地给予容器壁的压力，称为分压力。按道尔顿定律，混合气体的压力 p 等于各种组成气体的分压力 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 之和，即：

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_1^n p_i. \quad (1-10)$$

分压力的确定见本节第五小节。

任一组成气体在混合气体的温度和压力下所应该具有的容积，称为分容积 V_i 。为了确定分容积，由式 1—7，可列出以下两式：

$$p_i V = G_i R_i T;$$

$$p V_i = G_i R_i T,$$

从而得到：

$$p V_i = p_i V \text{ 或 } V_i = \frac{p_i}{p} V, \quad (a)$$

式中 V ——混合气体的容积。

上式说明，每种组成气体的分容积与它的分压力成比例。

二、混合气体的成分：混合气体的成分可以用重量表示，也可以用容积或模尔数表示（如用容积表示，应该指明是什么状态下的容积，一般都用标准状态下的容积）。成分的数量，以重量为例，可以是每种组成气体的重量，也可以是每种组成气体的重量对混合气体全部重量的比值（通常以百分率来表示），前者称为绝对成分，后者称为相对成分。

混合气体的重量 G 等于各组成气体的重量 $G_1, G_2, \dots, G_n$ 之和，即：

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n.$$

以 g 表示相对重量成分, 則

$$g_1 = \frac{G_1}{G}; g_2 = \frac{G_2}{G}; \dots g_n = \frac{G_n}{G},$$

由此,

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1 = 100\%。$$

混合气体的容积 V 等于各組成气体的分容积 $V_1, V_2, \dots V_n$ 之和, 即

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n。$$

以 Γ 表示相对容积成分, 則

$$\Gamma_1 = \frac{V_1}{V}; \Gamma_2 = \frac{V_2}{V}; \dots \Gamma_n = \frac{V_n}{V},$$

由此,

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \dots + \Gamma_n = 1 = 100\%。$$

設混合气体的模尔数为 M , 它的绝对模尔数成分为 $M_1, M_2, \dots M_n$, 則:

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n。$$

根据气体模尔的定义, 每种气体的重量 G , 模尔 μ 和模尔数 M 之間有下列的关系:

$$M = \frac{G}{\mu}; M_1 = \frac{G_1}{\mu_1}; M_2 = \frac{G_2}{\mu_2}; \dots M_n = \frac{G_n}{\mu_n}。 \quad (6)$$

根据亚佛加德罗定律, 在混合气体的温度和压力下, 所有組成气体和混合气体的模尔容积 V_μ 都相同, 我們可以列出以下两式:

$$V_1 = V_\mu M_1 \quad \text{和} \quad V = V_\mu M,$$

从而得到,

$$\Gamma = \frac{V_1}{V} = \frac{M_1}{M}, \quad (B)$$

这式說明, 相对模尔数成分与相对容积成分在数值上相同, 因而也可以用 Γ 来表示。实际上, 这两种相对成分的规定方法也是相同的。

三、混合气体的重度、相对重量成分和相对容积 (模尔数) 成分之间的关系: 混合气体的重度可用下列方法来求:

$$\begin{aligned} G &= G_1 + G_2 + \dots + G_n, \\ rV &= r_1 V_1 + r_2 V_2 + \dots + r_n V_n, \\ r &= r_1 \Gamma_1 + r_2 \Gamma_2 + \dots + r_n \Gamma_n = \sum_1^n r_i \Gamma_i。 \end{aligned} \quad (1-11)$$

当混合气体的平均折合分子量为已知时, 混合气体的重度也可用下式来求:

$$r = \frac{\mu}{22.4}。 \quad (1-11')$$

相对重量成分和相对容积 (模尔数) 成分之間的关系可用下列方法来求:

$$g_i = \frac{G_i}{G} = \frac{r_i V_i}{rV} = \frac{r_i}{r} \Gamma_i = \frac{r_i \Gamma_i}{\sum_1^n r_i \Gamma_i}; \quad (1-12)$$

$$\Gamma_i = \frac{M_i}{M} = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}。 \quad (1-13)$$

四、混合气体的平均折合分子量和气体常数: 如果假想混合气体不是由几种不同种

类的气体所組成，而是由这样的同类气体所組成，它們与实际的混合气体在总重量相同时具有相同的摩尔数，則式6中所表示的关系就可用来求混合气体的分子量：

$$\mu = \frac{G}{M} = \frac{\sum_1^n G_i}{\sum_1^n \frac{G_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}, \quad (1-14)$$

式中的 μ 称为混合气体的平均折合分子量。注意，摩尔和分子量在数值上是相等的。

利用式6和B的关系，也可求出混合气体的平均折合分子量：

$$\begin{aligned} G &= G_1 + G_2 + \dots + G_n, \\ \mu M &= \mu_1 M_1 + \mu_2 M_2 + \dots + \mu_n M_n, \\ \mu &= \mu_1 \Gamma_1 + \mu_2 \Gamma_2 + \dots + \mu_n \Gamma_n = \sum_1^n \mu_i \Gamma_i. \end{aligned} \quad (1-15)$$

混合气体的气体常数可利用式1—9来求：

$$R = \frac{848}{\mu}$$

式中 R 为混合气体的气体常数。

五、组成气体分压力的确定：确定各种組成气体分压力的式子可从式a导出：

$$p_i V = p V_i,$$

$$p_i = p \frac{V_i}{V} = p \Gamma_i. \quad (1-16)$$

以式1—13和1—14中的关系代入上式，又可得到：

$$p_i = p \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}} = p \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\frac{1}{\mu}} = g_i p \frac{\mu}{\mu_i}. \quad (1-17)$$

§ 1—5 气体的比热

一、比热的定义和总的类别：在热力工程中，热量的計算习惯上常常利用比热。所謂比热就是使一单位量气体的溫度升高或降低 1°C 所需加入或放出的热量。对1公斤气体而言，便是重量比热 (c ，大卡/公斤度)；对1摩尔气体而言，便是摩尔比热 (μc ，大卡/摩尔度)；对1标准米³气体而言，便是容积比热 (c' ，大卡/标米³度)。三者之間的关系如下：

$$c = \frac{\mu c}{\mu}; \quad c' = \frac{\mu c}{22.4}, \quad (1-18)$$

式中 22.4 标米³/摩尔——标准状态下的摩尔容积。

二、定容比热和定压比热：气体的比热和气体进行加热或放热的情况有关。热力工程中最常遇到的情况有两种：一种是气体的加热或放热在容积不变的情况下进行，另一种是气体的加热或放热在压力不变的情况下进行。由第一种情况得到的比热称为定容比热，用下角碼“v”作标记；由第二种情况得到的比热称为定压比热，用下角碼“p”作标记。就定容重量比热 c_v 和定压重量比热 c_p ，或者定容摩尔比热 μc_v 和定压摩尔比热 μc_p 來說，它們两者之間的差額可以根据物理学中的迈耶公式來說明：

$$c_p - c_v = A^0 R, \text{ 大卡/公斤度}$$

$$\text{或} \quad \mu c_p - \mu c_v = A \mu R = \frac{1}{427} \times 848 \approx 1.99, \text{ 大卡/模尔度}, \quad (1-19)$$

这是因为在定压情况下对气体加热时，气体所需的热量不但要用来增强气体分子的热运动，同时也要用来使气体膨胀而作功。

在工程热力学中，经常用到这两种比热的比值。这一比值通常以 k 来表示，即

$$k = \frac{c_p}{c_v}。$$

根据物理学，气体分子运动中的气体动能按自由度分布的规律，对于原子数目相同的气体，它们的模尔比热也是相同的（即所谓定比热）。现在把这种定比热的数据以及由它得出的 k 值一併列示于下，在作一般的分析时是有实用意义的。

	μc_v	μc_p	k
单原子气体.....	3	5	1.6
双原子气体.....	5	7	1.4
多原子气体.....	7	9	1.3

三、真实比热和平均比热：上面所说的定比热是把比热当作是定值，实际上这是不够准确的。理想气体的比热与压力无关，或与压力关系很小，可以忽略不计，但与温度有密切的关系。一般情况是温度愈高，比热愈大，即 $c = f(t)$ 。在一定温度下，气体比热称为真实比热。设在某一温度下给予 1 公斤气体无限小的热量 dq ，使气体升高无限小的温度 dt ，则气体在温度 t 时的真实比热为：

$$c = \frac{dq}{dt} \quad \text{或} \quad dq = c dt. \quad (1-20)$$

因此，当已知比热与温度的关系时，在温度从 t_1 变到 t_2 范围内加给 1 公斤气体的热量，就可用上式积分来求得：

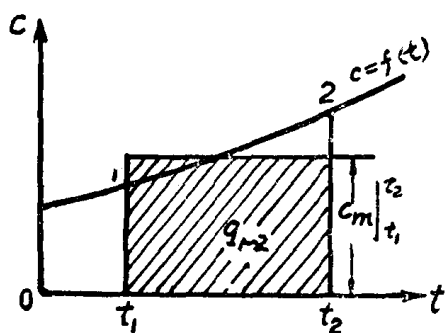


图 1-3 气体的平均比热

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (1-21)$$

为了避免积分的麻烦（尤其是当比热和温度的关系比较复杂时），在计算热量时，经常采用平均比热。所谓平均比热，就是在某一温度变化范围内所有各点比热的平均值，也就是在此范围内单位量气体所吸收或放出的热量和温度差的比值（图 1-3）：

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}, \quad (1-22)$$

式中 $c_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ —— 在温度 $t_1 - t_2$ 范围内的平均重量比热。

知道了平均比热，计算热量就非常方便了：

① $A = \frac{1}{427}$ 大卡/公斤米，称为功的热当量，见 § 2-1。

$$q_{1-2} = c_m \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (1-23)$$

各种气体的平均比热值可以从表查得，但表中给出的通常都是从 0 °C 到某一温度 t 之间的平均比热值（表 1-1 和 1-2）。

应用这种以 0 °C 作为起点温度的平均比热，不但能够按式 1-24 计算出从 0 °C 到任意温度 t 之间的热量，而且还可以按式 1-25 计算出任意温度变化范围 t_1-t_2 内的热量（图 1-4），即：

$$c_m \Big|_0^t = \frac{q_{0-t}}{t-0} = \frac{q_{0-t}}{t},$$

$$q_{0-t} = c_m \Big|_0^t t \quad (1-24)$$

$$q_{1-2} = \text{面积} B = \text{面积} (A+B) - \text{面积} A = c_m \Big|_0^{t_2} t_2 - c_m \Big|_0^{t_1} t_1 \quad (1-25)$$

表 1-1 各种气体的平均定压比热 $c_{pm} \Big|_0^t$

(大卡/公斤度)

$t^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	空 气	CO	CO ₂	H ₂ O
0	0.2185	0.2482	0.2397	0.2483	0.1946	0.4441
100	0.2205	0.2485	0.2403	0.2488	0.2068	0.4473
200	0.2234	0.2492	0.2416	0.2499	0.2174	0.4523
300	0.2269	0.2505	0.2434	0.2517	0.2266	0.4584
400	0.2305	0.2524	0.2456	0.2540	0.2347	0.4652
500	0.2339	0.2556	0.2481	0.2567	0.2419	0.4724
600	0.2371	0.2570	0.2507	0.2595	0.2483	0.4799
700	0.2400	0.2596	0.2533	0.2622	0.2541	0.4877
800	0.2426	0.2621	0.2558	0.2649	0.2592	0.4957
900	0.2450	0.2646	0.2583	0.2675	0.2638	0.5039
1000	0.2472	0.2670	0.2605	0.2700	0.2681	0.5120
1100	0.2492	0.2692	0.2627	0.2723	0.2719	0.5200
1200	0.2510	0.2713	0.2647	0.2745	0.2754	0.5280
1300	0.2527	0.2734	0.2667	0.2765	0.2785	0.5357
1400	0.2543	0.2753	0.2685	0.2784	0.2814	0.5432
1500	0.2559	0.2771	0.2702	0.2802	0.2841	0.5505
1600	0.2573	0.2788	0.2718	0.2818	0.2865	0.5576
1700	0.2587	0.2803	0.2733	0.2834	0.2888	0.5644
1800	0.2600	0.2818	0.2747	0.2848	0.2909	0.5710
1900	0.2613	0.2832	0.2761	0.2862	0.2928	0.5772
2000	0.2625	0.2845	0.2773	0.2874	0.2946	0.5833
2100	0.2637	0.2858	0.2786	0.2886	0.2963	0.5891
2200	0.2648	0.2869	0.2797	0.2897	0.2978	0.5946
2300	0.2660	0.2880	0.2808	0.2908	0.2993	0.6000
2400	0.2671	0.2891	0.2819	0.2918	0.3006	0.6051
2500	0.2682	0.2900	0.2828	0.2928	0.3018	0.6101

表 1-2 各种气体的平均定容比热 c_{vm} (大卡/公斤度)

$t^{\circ}\text{C}$	O_2	N_2	空 气	CO	CO_2	H_2O
0	0.1564	0.1773	0.1711	0.1774	0.1495	0.3339
100	0.1584	0.1776	0.1718	0.1779	0.1617	0.3371
200	0.1613	0.1783	0.1730	0.1790	0.1723	0.3421
300	0.1648	0.1796	0.1748	0.1808	0.1815	0.3481
400	0.1684	0.1815	0.1771	0.1831	0.1896	0.3550
500	0.1718	0.1837	0.1796	0.1857	0.1968	0.3621
600	0.1750	0.1861	0.1821	0.1885	0.2032	0.3696
700	0.1779	0.1887	0.1847	0.1913	0.2089	0.3775
800	0.1805	0.1912	0.1873	0.1940	0.2141	0.3855
900	0.1829	0.1937	0.1897	0.1966	0.2187	0.3937
1000	0.1851	0.1961	0.1920	0.1991	0.2229	0.4018
1100	0.1871	0.1983	0.1941	0.2014	0.2268	0.4098
1200	0.1890	0.2095	0.1962	0.2046	0.2302	0.4177
1300	0.1907	0.2025	0.1981	0.2056	0.2334	0.4255
1400	0.1923	0.2044	0.1999	0.2075	0.2363	0.4330
1500	0.1938	0.2062	0.2016	0.2093	0.2390	0.4403
1600	0.1952	0.2079	0.2032	0.2109	0.2414	0.4473
1700	0.1966	0.2095	0.2047	0.2124	0.2437	0.4542
1800	0.1979	0.2109	0.2062	0.2139	0.2458	0.4608
1900	0.1992	0.2123	0.2075	0.2153	0.2477	0.4670
2000	0.2004	0.2136	0.2088	0.2165	0.2495	0.4730
2100	0.2016	0.2149	0.2100	0.2177	0.2512	0.4789
2200	0.2028	0.2161	0.2112	0.2188	0.2527	0.4844
2300	0.2039	0.2172	0.2123	0.2199	0.2541	0.4897
2400	0.2050	0.2182	0.2133	0.2209	0.2555	0.4947
2500	0.2061	0.2192	0.2143	0.2219	0.2567	0.4998

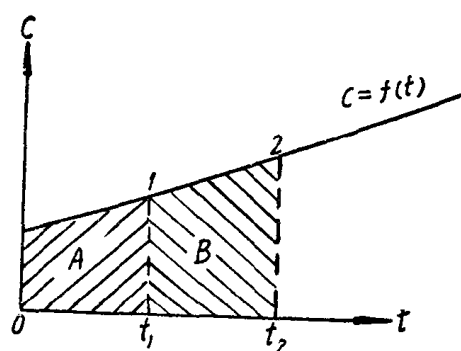


图 1-4 平均比热表的应用

此，在温度变化从 t_1 到 t_2 的范围内，混合气体的平均重量比热为：

$$c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q_{1-2}}{t_2 - t_1} = \sum_i^n g_i c_{im} \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (1-26)$$

混合气体的平均摩尔比热为：

对于实际气体，特别是过热蒸汽^①，由于它们的比热与压力和温度都有关系，即 $c = f(p, t)$ ，用数学公式表示这个函数相当复杂，一般都从在实验的基础上所编制的比热表或曲线图取得它们的比热值。

四、混合气体的比热：要使混合气体温度升高 1°C 所需的热量应该等于使各组成气体都各升高 1°C 所需热量的总和。因

① 见 §1-4。

$$\mu c_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \sum_1^n \Gamma_1 \mu c_{1m} \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (1-27)$$

混合气体的平均容积比热为:

$$c'_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \sum_1^n \Gamma_1 c'_{1m} \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (1-28)$$

§ 1—6 內能、焓和熵

現在, 讓我們来简单地介紹其他三个常用的气体状态参数——內能、焓和熵。如已指出, 这些参数都不能直接测量, 而要利用测得的数量来計算。我們所感兴趣的不是它們的絕對值, 而是它們的变化量。一般假定以标准状态下的数值为零。

一、內能: 內能是任何物体, 包括气体在內, 所具有的一种能量。对 1 公斤物体而言, 以 u 来表示, 单位是大卡/公斤; 对任意量物体而言, 以 U 来表示, 单位是大卡。

根据分子运动論, 实际气体的內能是分子运动的动能与由分子相互間的吸引力所形成的位能的总和。內能中的动能取决于气体的絕對溫度, 而內能中的位能則取决于气体的比容或压力。內能与两个基本参数之間有下列的函数关系:

$$u = f_1(v, T) \quad \text{或} \quad u = f_2(p, T)。$$

因此, 內能是可以用来說明气体状态的一种物理量, 也是气体的一个状态参数。

由于理想气体分子不具有相互作用的吸引力, 它的內能只是由气体分子的动能所組成。所以理想气体的內能只是溫度的单函数, 即:

$$u = f(T)。$$

設一系統接受外界的热量, 則該系統內气体的状态将发生变化, 气体的內能也将发生变化。理想气体內能的变化量可用下式来表示:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = f(T_2) - f(T_1)。$$

按比热的定义, 气体在定容下所接受的热量 $q_v = c_v (T_2 - T_1)$ 。由于在定容下气体不对外作功, 气体所接受的热量将完全轉变为內能的变化量, 即 $\Delta u = q_v$ 。由此可得:

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1), \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-29)$$

对微元过程:

$$du = c_v dT, \quad (1-30)$$

式中 c_v ——在溫度 $T_1 - T_2$ 范围内的平均定容重量比热的簡写。

把式 1-30 和式 $u = f(T)$ 对比, 就可看到, 理想气体的內能变化量与过程无关, 只和初終两态的溫度有关。因此, 式 1-29 和 1-30 对任何过程都适用。

二、焓: 焓是一个綜合的状态参数。对于 1 公斤气体, 焓的表示式为:

$$i = u + Apv, \text{ 大卡/公斤,} \quad (1-31)$$

式中 pv ——推进功, 公斤米/公斤。

对于任意公斤气体, 它的表示式为:

$$I = Gi = U + ApV, \text{ 大卡。}$$

焓这一概念的引用, 在頗大程度上簡化了许多热力过程的計算和某些公式的形式和结构。对于使可能采用图解法来研究过程方面, 焓的引用更具有特別重大的意义。

为了說明推进功, 參看图 1-5。設有参数为 p, v, u 的气体 δG 公斤 (即图中用影綫表示的部分) 从左边的管道跨越界限 $a-a$ 而不断流进右边的空間。气体在这种流动的情况下,

由部分气体带入該空間的能量,除了內能,即 δGu 大卡外,还有为了克服前方所存在的数值为 pF 的总抵抗力所必須在背后作出的功。如图所示,使这部分气体完全跨越界限需要流过 δs 米的距离,則由于气体的比容是 v 米³/公斤,管道的横断面积是 F 米²,这段距离應該等于 $\frac{\delta Gv}{F}$ 米,因此,在 pF 公斤的总抵抗力下向前方流过 δs 米距离所需要的推进功應該是:

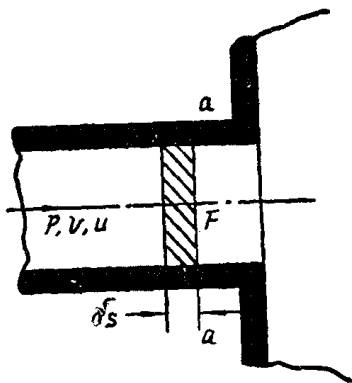


图 1-5 气体流过指定界限时的情况

$$pF\delta s = pF \frac{\delta Gv}{F} = \delta Gpv, \text{ 公斤米,}$$

而1公斤气体所需的推进功就應該是 pv 公斤米/公斤。

由此可見,推进功,和內能一样,也是能够由气体状态所决定的一种能量,因而就有条件和內能綜合在一起。显然,这个綜合量——焓仍然保留着只取决于气体状态的特性,可以当作是扩大的內能。只要状态一定,它就有确定的数值。因此,这个綜合量——焓也是气体的状态参数。

通过下面理想气体焓的計算,不难看到,理想气体的焓也只是溫度的单函数。按焓的定义,焓的微量变化为:

$$di = d(u + Apv) = du + Ad(pv)。$$

按式1-6, $d(pv) = RdT$, 上式变为:

$$di = du + ARdT。$$

按式1-30, $du = c_v dT$, 上式又变为:

$$di = c_v dT + ARdT = (c_v + AR) dT$$

按式1-19, $c_v + AR = c_p$, 就可从上式得到:

$$di = c_p dT,$$

$$\text{或} \quad \Delta i = c_p (T_2 - T_1), \text{ 大卡/公斤,} \quad (1-32)$$

式中 c_p ——在溫度 t_1-t_2 范围内的平均定压重量比热的簡写。

和內能同样,理想气体任何过程的焓变化永远可以按照式 1-32 来計算。

三、熵: 熵是一个导出的状态参数,它可以利用某些直接測得的数值間接地計算。对1公斤气体而言,以 s 来表示,单位是大卡/公斤度;对任意公斤而言,以 S 来表示,单位是大卡/度。熵与热量和絕对溫度之間的关系如下:

$$dq = Tds, \quad (1-33)$$

$$\text{或} \quad q = \int_{s_1}^{s_2} Tds, \quad (1-34)$$

式中 q ——气体所获得的热量,大卡/公斤;

T ——气体在获得热量时的絕对溫度, °K。

熵这一概念的引用,可使我們有可能用絕对溫度为纵座标和熵为横座标画成溫熵图 (Ts 图),来表示状态和热力过程^①。利用这种图,对于有关热交换的分析就方便得多

^① 熵在热力学中的用处还不止这一点,例如有关热力学第二定律的理論闡明等方面,熵都有着某些特殊的意义。对于熵,本书还将在 § 3-4 中讲到。

(参看图 1—6)。

在工程热力学中,以将要在第三章中讲到的热力学第二定律为基础,可以证明熵是一个状态参数,只要状态定了,它的值就跟着被确定。当气体由状态 1 变化到状态 2 时,它的熵变化量可以通过对式 1—33 的变换形式

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

进行积分而求得,即:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}, \text{大卡/公斤度。} \quad (1-35)$$

以式 1—20 中 dq 值代入上式,并认为比热是定值,则

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1}, \text{大卡/公斤度。} \quad (1-36)$$

每一过程中所需加入或放出的热量要看过程所遵循的条件而定。对于不同过程中熵变化量的计算式将在 § 2—4 中给出。

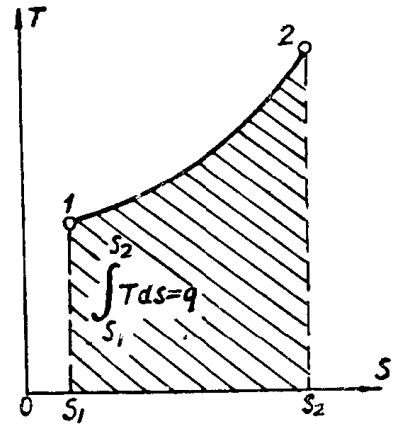


图 1—6 温熵图

§1—7 热力过程、可逆过程和不可逆过程

热能是物体分子运动时所具有的能,它的传递方式是当物体接触时由较热物体向较冷物体的直接传递。机械能是物体整体运动时所具有的能,它的传递方式是借一个物体对另一物体的作用。由于热能与机械能有着这样的质的区别,所以从热能转变为机械能只能借助于热机中的工质来实现,也就是由气体与热物体接触而获得热量,再由气体膨胀而推动热机的某一部件(例如气缸中的活塞)。相反地,如果气体受到压缩,机械能就转变为热能。由此可见,热能与机械能的相互转变,尤其是从热能转变为机械能,必然是由于系统受到外界热的或机械的作用,而这种作用必然引起气体状态的变化。气体状态这样连续地发生变化就要形成一种过程,这种过程就称为热力过程。

在热力学中,依照热力过程的特性,热力过程可以分成两类:可逆过程和不可逆过程。

所谓可逆过程是指这样的一种过程,这种过程既可以正向进行也可以逆向进行,而且在逆过程时,系统经过的全部状态与正过程时所经过的状态相同,只是次序相反,同时在系统本身和在外界中都不留下任何变化。

实际上,这样的条件都是不能满足的,所以在自然界中发生的一切实际过程都是不可逆过程。但是热力学采用了可逆过程这一概念以后,不但在过程的研究上得到很大的方便,而且由长期的实践证明,凡是在外界和系统的温度差和压力差不大的情况下所进行的实际过程都非常接近于可逆过程。因此,你可以把研究可逆过程所获得的结论看作是这些实际过程的一种极限情况,是有实际意义的。

使可逆过程的条件可能实现的基础是,气体必须只经过无限多的平衡状态。这是因为,当外界和系统之间不存在机械平衡时,由于过程结果所产生的功,除消耗于摩擦力

外，將不足以使氣體回復到初始狀態；或當外界和系統之間不存在溫度平衡時，傳熱過程在不消耗外熱下不能逆向進行。

但是，平衡狀態只有在外界和系統沒有溫度差和壓力差時才建立，而狀態變化則只有在外界和系統有溫度差和壓力差時才發生。熱力學對於這兩個相反的原則是用另一概念——“准靜態過程”來使它們統一在一起的。由實踐證明，當外界和系統的溫度差和壓力差無限小，也就是狀態變化無限緩慢時，由於狀態變化所破壞的平衡，可以一個接着一個地立刻恢復。在整個過程中，系統的狀態實際上和平衡狀態幾乎沒有差別。於是，可逆過程便是平衡狀態的更替，因而一般稱它為平衡過程或准靜態過程。有了准靜態過程這一概念以後，我們就有理由相信，當正過程進行到了終了狀態時，只要外界的作用有了微量的變化，過程就能够在消耗於摩擦力或使傳熱過程逆向進行的功小到幾乎等於零的情況下，沿着正過程所經過的狀態逆向進行而回復到初始狀態，同時在系統本身和在外界中都不留下任何變化。

不可逆過程則與可逆過程不同，首先，過程要經過一系列的不平衡狀態，其次，系統在正過程中所產生的功必然要有一部分消耗於摩擦力或使傳熱過程逆行。如果使系統在經過正過程後再由逆過程回復到初始狀態，必然要消耗一定量的外功而在系統本身和在外界中留下變化。因此，在過程回復到初始狀態以後，所有在系統本身和在外界中留下的變化量，都可以作為衡量不可逆性的尺度。

§1—8 過程的功和熱量

功是機械能的度量尺度，而熱量則是熱能的度量尺度。正如在上節中所指出的，任何熱力過程的進行都是由於外界對系統有了機械的或熱的作用。在第一种情況下，由於外界物體發生位移，系統氣體要發生容積的變化，並對外界作出膨脹功或接受外界的壓縮功。在第二種情況下，由於外界物體和系統氣體的相互接觸，系統氣體要接受或放出熱量。

由此可見，功和熱量的概念是能量表達的兩種不同的形式。它們彼此之間和能量本身一樣有着質的差別，却共同地作為熱力過程特性的基礎。

功的工程單位採用公斤米。功的較大工程單位是馬力時。1馬力等於75公斤米/秒，所以

$$1 \text{ 馬力時} = 75 \times 3600 = 270,000 \text{ 公斤米。}$$

功的電工單位是千瓦時。1千瓦等於102公斤米/秒，所以

$$1 \text{ 千瓦時} = 102 \times 3600 = 367200 \text{ 公斤米} = 1.3 \text{ 馬力時。}$$

熱量的工程單位是大卡。大卡是使1公斤純水的溫度從19.5°C升高到20.5°C所需的熱量。

1公斤米等於 $\frac{1}{427}$ 大卡，所以功的較大工程單位又可表為：

$$1 \text{ 馬力時} = 270000 \times \frac{1}{427} \approx 632 \text{ 大卡}$$

$$1 \text{ 千瓦時} = 367200 \times \frac{1}{427} \approx 860 \text{ 大卡。}$$

一、膨胀功的计算：設在一带有活塞的气缸里，装有气体 1 公斤，用某种方式对气体加热，则当气体的力超过外界的力时，气体将开始膨胀，并对外作功。这种功称为过程的膨胀功。在一般情况下，压力在膨胀过程中将有所改变。設把整个膨胀过程分为无限多的微段，活塞在每一微段中的移动为 dh ，则每一微段的膨胀功 dI 为气体的力 pf 和距离 dh 的乘积，即：

$$dI = pf dh = p dv, \quad (1-37)$$

式中 p —— 气体的绝对压力，公斤/米²；

f —— 活塞的面积，米²。

設这膨胀过程初状态的比容为 v_1 ，終状态的比容为 v_2 ，则

$$I = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \text{ 公斤米/公斤。} \quad (1-38)$$

只要知道函数 $p=f(v)$ ，就可用上式来计算过程的膨胀功。

如果装入气缸的气体不是 1 公斤而是 G 公斤，则式 1-38 变为：

$$L = GI = G \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV, \text{ 公斤米。} \quad (1-39)$$

把这过程的膨胀功表示在压容图 ($p-v$ 图) (图 1-7) 上，就是过程曲线 1-2 下的面积 12341，这是因为，如果 p 与 v 的关系为 $p=f(v)$ ，并令 F 代表面积，可得：

$$F = \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv = \int_{v_1}^{v_2} p dv,$$

这式与式 1-37 的积分形式相同。由此可以确定压容图中过程曲线下的面积所表示的性质，而这样的压容图也可以称为示功图。同时，从式 1-37 和图 1-7 可以看到，功是过程的函数，不是状态的函数。

过程的压缩功，即外界在过程中对气体所作的功，也可以用式 1-37 或 1-38 来计算。

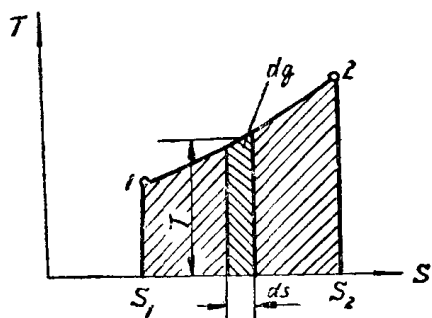


图 1-8 热量在熵温图上的表示

温度升高时，气体的熵也就增加（参看图 1-8）。如果把整个过程分为无限多的微段，则每一微段当然也和活塞的微小移动对应着。設气缸中的气体仍为一公斤，而每一微段的熵变化为 ds ，则加給每一微段的热量按式 1-33 为：

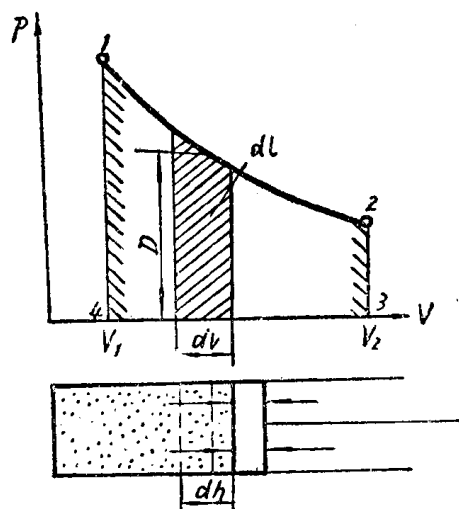


图 1-7 膨胀功在压容图上的表示

在工程热力学中，常以系统对外界所作的功为正，而以外界对系统所作的功为负，正因为这样，过程的压缩功应该是一个负值。

二、热量的计算：加給图 1-7 所示气缸中气体的热量，可以用两种方法来计算。

1. 用熵：对气体加热可以使气体内部的热运动加剧，也就使气体的温度升高。当

$$dq = Tds,$$

而加給整个过程1—2中的热量則为：

$$q = \int_{s_1}^{s_2} Tds, \text{ 大卡/公斤。}$$

只要知道函数 $T=f(ds)$ ，就可用上式来计算加給过程的热量。

因为熵图 (Ts 图) 上所示过程曲线 1—2 下的面积 $|2s_2s_11|$ 等于 $\int_{s_1}^{s_2} Tds$ ，所以这样的熵图也可以称为示热图。同时，从式1—33和图1—8可以看到，热量是过程的函数，不是状态的函数。

2. 用比热：加入过程的热量习惯上常用比热来计算。按式1—23，得：

$$q = c(t_2 - t_1), \text{ 大卡/公斤，}$$

式中 c ——在温度 t_1-t_2 范围内的平均重量比热，

如果气体的比热为已知，则只要知道温度变化就能计算加入过程的热量。但是这一方法对于定温过程不能应用。

当工作的气体是 G 公斤时，加入过程的热量等于上述 q 的 G 倍，以 Q (大卡) 来表示。

在工程热力学中，常以加入系统的热量为正，而以从系统放出的热量为负。

例 1—1：已知空气的相对重量成分为 $g_{O_2} = 0.232$ 和 $g_{N_2} = 0.768$ ，求空气的平均折合分子量、气体常数和标准状态下的重度。

解：空气的平均折合分子量：根据式 1—14，

$$\mu = \frac{1}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{0.232}{32} + \frac{0.768}{28}} = 28.96。$$

空气的气体常数：根据式1—9，

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{28.96} = 29.27 \text{ 公斤米/公斤度。}$$

空气在标准状态下的重度：根据式1—11'，

$$\gamma = \frac{\mu}{22.4} = \frac{28.96}{22.4} = 1.293 \text{ 公斤/标米}^3。$$

例 1—2：具有压力为 $p_1 = 5$ 表气压和容积为 $V_1 = 3$ 米³ 的空气，它的温度在定压下从 $t_1 = 400^\circ\text{C}$ 下降到 $t_2 = 100^\circ\text{C}$ 。求空气的重量和在此过程中空气内能的变化。

解：空气的重量：根据式 1—17，

$$G = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{(5+1) \times 10^4 \times 3}{29.27 \times (400+273)} = 9.14 \text{ 公斤。}$$

空气在温度 $100^\circ-400^\circ\text{C}$ 范围内的平均定容比热：根据式1—25和表1—2，

$$\begin{aligned} c_{vm} &= c_{vm} \Big|_{t_2}^{t_1} = \frac{c_{vm} \Big|_{t_1}^{t_1} \times t_1 - c_{vm} \Big|_{t_2}^{t_2} \times t_2}{t_1 - t_2} \\ &= c_{vm} \Big|_{100^\circ\text{C}}^{400^\circ\text{C}} = \frac{c_{vm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{400^\circ\text{C}} \times 400 - c_{vm} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{100^\circ\text{C}} \times 100}{400 - 100} \\ &= \frac{0.1771 \times 400 - 0.1718 \times 100}{300} = 0.1788 \text{ 大卡/公斤度。} \end{aligned}$$