

熱工學講義

(煉廠類)

熱工教研室編

北京石油學院

1959年9月

在人类与自然斗争的过程中，在生产发展的过程中有两件占有特重要地位的事：就是（1）学会了使用工具制造工具，（2）学会了从人本身的体力以外寻求能量为自己服务。

首先人类学会了使用牲畜的力量，风力和水力，以后，人类又企图利用热力，约从18世纪中叶起，人类长久以来的企图，利用热能以取得机械能的企图才得实现。俄国的包尔苏诺夫（1723—1766），稍后，英国的瓦特（1736—1819）都造成了蒸汽机，这种发动机的机械能是利用燃料燃烧时所放出来的热能产生的，这样便产生了第一批热力发动机。

蒸汽机的出现，使工厂中的机器得到了充分的动力，大大的推动了工业生产的发展。

随着工业和交通事业的发展，迫切需要效率高而结构较便的热机，在十九世纪末二十世纪初出现了内燃机，在同一时期在蒸汽热机方面又出现了汽轮机，这种机器以它的马力大，工作可靠和效率高的特点而在热力发电厂中得到广泛的应用。

近年来，燃气轮机已走出了试验阶段，开始用在工业上了，而喷气发动机则广泛应用在航空工业上。

热力发动机的问世使自然界的广大动力资源——煤，石油，页岩，天然气等得以为人类广泛的应用。1954年苏联第一个原子能发电站的建成又开辟了能量新的来源，原子能的储量实际上是无穷无尽的。

整个19世纪，工业上用的机械能主要的得自热力发动机。这种形式的能量的缺点就是难以作长距离的输送。二十世纪初期电机和汽轮机的出现和进步为工业电气化提供了条件，在热力发电站中，汽轮机拖动发动机，将由热能转变成的机械能又转变为电能，而电能输送上是非常方便的。

动力工业是国民经济中的先行工业，只有在热力机械得到发展，建立起强大的火力发电站以后，其他工业的发展才得到保证，所以一个国家动力工业的规模也就说明了这个国家的生产水平。

在解放前我国的动力工业是非常落后的，没有动力机械制造工业，仅有的不满100万瓩的发电厂也很多掌握在外国资本家手里，更没有制造过成套的动力设备，而一些修配工业技术也非常落后，解放以来，在苏联的无私帮助下在党和政府的领导下，动力工业取得了很大的成绩：发电厂方面进行成功提高了出力，烧本地煤，省煤降低煤耗和安全供电的工作，动力机械制造方面不但制成了各种功率的内燃机而且制成了功率达25000瓩的汽轮发电机全套设备，100大气压500°C的蒸发量达230吨的高压高温锅炉，而使我国的动力工业初步的有了规模，去年大跃进中，动力工业有了更大的发展，不但产量有了增加，而且在质量上也有所提高，甚至有些产量已经超过了动力工业先进国家的水平。

在中国建设社会主义和共产主义的事业中，作为先行官的动力工业将更多更好的贡献出自己的力量。

第一章 工程熱力學

序 言

熱能，和機械能，電能和化學能一樣，也是能量的一種形式。熱能是分子和分子內部運動的能，即分子和原子運動的能。按照能量不減定律，任何一種形式的能可以變為另一種形式的能，故熱能可以變為機械能，機械能也可變為熱能，現代動力工業主要建築於熱能變為機械能的基礎上，因為電能便於遠距離輸送，又在發電機中將機械能變為電能。這種能量的轉化必須在蒸汽鍋爐或直接在內燃機中燃燒了燃料來達到，將燃料的化學能變為熱能。

利用熱能以獲得機械能早就引起物理學家的注意了，十九世紀中葉，焦耳，邁耶，卡諾，克勞修斯等觀察了熱的現象及熱機的工作，建立了熱力學第一和第二定律，這兩條定律是研究熱能與機械能互相轉換的，是工程熱力學的基本定律。

工程熱力學的对象是研究宏觀的物理現象，即與個別分子無關的現象，工程熱力學的任务是尋求變熱為功的最有利條件，工程熱力學與傳熱學合起來成為熱工學的理论基礎，它們為學習蒸汽鍋爐，蒸汽機，汽輪機內燃機等作為準備所以，工程熱力學將主要重點放在工程實用問題上。

差不多到十九世紀中葉，科學界始終把熱看作一種特殊的，無重量的，不生不滅的東西——稱為熱素。但，由觀察熱力現象得到的一系列的事實，最重要的是做功時所生的熱，打破了对熱能本質的看法，終於拒絕了熱素的理論，而建立起對於熱能本質的新觀念。克勞修斯，馬克思威和喀爾文的研究指出，熱的本質是和組成物體的分子運動能有直接關係。（註）

這種熱力本質觀念的發展，產生了一門新科學——熱的運動學說，這一理論和物質構造的科學——分子學說。二者合成了一套整體的科學世界觀——物質的分子運動學說。

工程熱力學可以用嚴格的公式來敘述。這種敘述方法就是用數學式子研究熱力學的兩條定律。這種方法有許多方便，但缺點是不能給所研究的現象以物理意義，它的最終結論在方法論方面往往引到不正確的方向上去。從物質結構的觀點去看問題，結果，對物質的了解以及從物理方面對熱力學諸定律的了解，得到科學的根據。只有這樣，這些定律才會清楚，這種清晰性在作形式的敘述時是沒有的。

根據以上所述，可見全部工程熱力學中的計算都是以熱力學中的兩條定律為依據的，而在解釋這些現象的本質時則以物質構造為依據。

註：首先拒絕熱素論的諸人中，包括羅蒙諾索夫在內，在他的論文「論固体物與液体物」中，他說：「我首先說明，阿里斯多德之火，或者按某些新學者的說法，所謂特殊的熱質，說這種熱質是由一個物體走入另一個物體，這是完全沒有道理的，這種說法是虛構的，我斷言火和熱就是構成物質的微小部份的旋轉運動，特別是質點本身的旋轉運動」。

熱工學目錄

- 第一篇 工程熱力學
- 第二篇 傳熱學
- 第三篇 鍋爐
- 第四篇 蒸汽機
- 第五篇 汽輪機
- 第六篇 內燃機
- 第七篇 燃汽輪機
- 第八篇 自由活塞發動機
- 第九篇 熱力發電廠
- 第十篇 壓縮機
- 第十一篇 噴射泵

第一章 气体及其基本定律

1. 几个基本定义：

(1) 工质 工程热力学是研究热能和机械能之间互相转换的科学。蒸汽机，内燃机都是藉消耗热能而得到功的热力机械（简称热机）消耗热能得到功一定需要有某种介质存在，以它为媒介，将外界加给它的热量转变为功，这种介质，便是工质，工质可以是气体，也可以是蒸汽。

(2) 状态参数及其度量

气体的物理性质由压力，温度以及其他的数量所表征，气体的每一个状态具有一些一定数值的物理量，这些量叫做状态参数。在研究热力过程时采用压力，温度和比容（或比重）作为气体的基本状态参数。

a. 压力 气体的压力是分子不断撞击器壁的结果。故：压力的大小，也就是分子撞击器壁程度的大小。

压力用每单位面积上所受的力来表示，其方向是垂直于器壁的。

测量气体压力时通常采用着二种仪器，一种叫做气压表，它量出的是绝对压力，是通常用来测量大气压力的；另一种叫做压力表，它量出的是气体压力和大气压力的差数，通常称为表压力。图1所示为气压表。在物理学上，大气压力是指海平面上大气的平均压力。在 0°C 时它相当于760公厘水银柱。已知水银的比重 $\gamma=13595$ 公斤/立方公尺，故：1物理大气压（AT） $=0.76 \cdot 13595=10332$ 公斤/平方公尺 $=1.0332$ 公斤/平方公分，工程上常将1公斤/平方公分称为工程大气压（at），故：

$$1\text{AT}=1.0332\text{ at 或}$$

$$1\text{at}=10000\text{ kg/m}^2=735.6\text{ 公厘水银柱}$$

图2所示为压力表，当被测量气体的压力大于大气压力时（a），相当于液柱H之压力是气体的绝对压力大于大气压力之数。通常称它为表压力，以 P_M 表示。

$$P=P_a+H\gamma$$

$$P_M=H\gamma$$

$$\text{或 } P=P_a+P_M \quad (1)$$

若所量气体压力小于大气压力时（b）相当于液柱 H_1 之压力是气体的绝对压力小于大气压力之数，它通常被称为真空度

$$P=P_a-H_1\gamma$$

$$\text{式中 } P_a=H_1\gamma$$

$$\text{故 } P=P_a-P_b \quad (2)$$

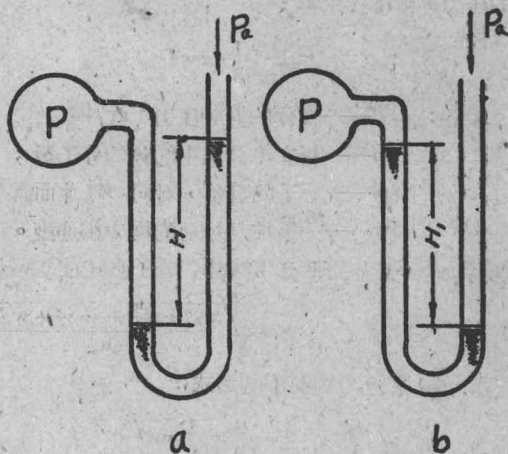
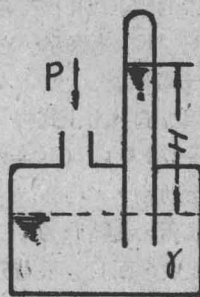
只有绝对压力才是气体的状态参数，因为它说明分子撞击器壁的程度，在绝对真空时，器壁不受气体分子之撞击，而其绝对压力即为零。

图2所示的压力表是液柱压力表，在工程上最常见的是弹簧压力表（图3）。椭圆断面的弯管一端密闭，而开口端与被测量的气体相通，并固定在表壳上。管内作用气体压力 P ，管外作用大气压力 P_a 。 P 与 P_a 之差值愈大，管子愈要伸直，表上指针读数 P_M 就随着改变，若所测气体压力大于大气压，则

$$P=P_a+P_M$$

若所测气体压力小于大气压，则

$$P=P_a-P_b$$



上圖 1-1

下圖 1-2

b. 比容：比容是單位重量物質的容積，以 U 表示，其單位是 $[m^3/kg]$ 若一物體，其體積為 V_{m^3} ，重量為 G_{kg} 則得其比容

$$v = \frac{V}{G} \quad m^3/kg$$

比容的倒數稱為比重 γ 是單位體積物質的重量

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \quad kg/m^3$$

顯然

$$\gamma v = 1$$

(3)

c. 溫度：溫度是說明物體冷和熱的程度的參數。按照氣體分子運動的理論，絕對溫度與分子的平均直線運動的動能成正比。實際上所有的氣體分子是以各種不同的速度運動著的，因此，溫度乃是與氣體分子平均速度有關的某種統計量。



圖 1-3

在工程上常用國際百度溫標 $^{\circ}C$ 來度量溫度。 $0^{\circ}C$ 是相當於 1 個物理大氣壓時冰的融點，而 $100^{\circ}C$ 是那時水的沸點。在熱力學中採用絕對溫標，它的兩固定點（冰的融點與水的沸點）之間與國際百度溫標一樣，也分為 100 分。但絕對零度則在冰的融點以下 273 度。按照羅蒙諾索夫的定义，絕對零度是冷的最高和最後程度。按絕對溫標計的溫度 (T) 以 ($^{\circ}K$) 來表示，它比由冰的融點開始計算的百度溫標溫度 $t^{\circ}C$ 高 273 度，即

$$T = t + 273$$

兩種溫標中每度的量是相等的，由上式得

$$0^{\circ}K = -273^{\circ}C; \quad 0^{\circ}C = 273^{\circ}K; \quad 100^{\circ}C = 373^{\circ}K$$

2. 理想氣體，氣體分子運動論。

理想氣體是一種假想的氣體，其特點為：

a. 它由完全彈性的分子組成，而且分子與分子間沒有吸引力。

b. 分子本身所佔的體積與分子間之空間相比非常微小，這就是說，分子本身只是一些微小的質點。

分子處在不停的不規則的運動中，即使在很小的容積中分子的數目也是非常多的。這樣，當沒有外力作用時每個分子都作等速的直線運動，直到它與別的分或器壁相碰撞為止。分子不斷撞擊器壁造成了氣體作用在器壁上的壓力。此壓力均勻分布而且垂直於器壁，按照物理學中氣體分子運動論的結論，理想氣體作用在器壁上的壓力可由下式求得：

$$P = \frac{1}{3} n m w^2 \quad (4)$$

式中： P ——氣體的絕對壓力 kg/m^2

n ——每立方公尺中氣體的分子數；

m ——分子的質量，對同一氣體而言分子的質量都相等。

w ——分子往復運動的均方根速度。

實際上，在一定狀態下氣體各分子直線往復運動的速度是不同的，公式中的速度採用均方根速度：

$$w = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2}{n}}$$

式 (4) 又可為寫如下的形式：

$$P = \frac{2}{3} n \frac{1}{2} m w^2 \quad (5)$$

式 (5) 說明：氣體的壓力在數值上等於 $\frac{2}{3}$ 單位容積中氣體往復直線運動的動能。

以氣體的容積 V 乘式 (5) 得：

$$PV = \frac{2}{3} n V \frac{1}{2} m w^2 = \frac{2}{3} N \frac{1}{2} m w^2 \quad (6)$$

式中

$$N = nV$$

為已知氣體之分子數。

按照气体分子运动论的基本假设, 气体分子平均动能与其绝对温度成正比:

$$\frac{1}{2}mw^2 = aT \quad (7)$$

a ——比例常数, 对所有气体都一样。

这样, 分子往复运动的动能就可用绝对温度来衡量。当 $T=0^\circ\text{K}$ 时, 则 $w=0$, 即此时分子的热运动消失了。显然 $T<0$ 不可能的。

3. 理想气体基本定律

a. 波义耳——马略特定律

将方程式 (7) 代入 (6) 得

$$PV = \frac{2}{3}NaT \quad (8)$$

因为 a = 常数, 对于一定重量的气体而言 N = 常数, 则当 T = 常数时

$$PV = \text{常数}$$

对 1 公斤气体来说

$$Pv = \text{常数} \quad (9)$$

这个由气体分子运动论得出的结论便是波义耳马略特定律的内容。在分子运动论制定出以前就由纯实验的方法证实了, 此定律可说明如下:

对于一定重量的气体而言, 当温度不变时其绝对压力与其体积成反比, 或

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

b. 给吕萨克定律

由式 (8) 所得出的第二个结论便是给吕萨克定律的内容, 这个定律也早在分子运动论制定前就由纯实验的方法证实了, 此定律可说明如下:

i 对一定重量气体而言当气体压力不变时, 其容积与绝对温度成正比:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{当 } P_1 = P_2 \text{ 时})$$

$$\text{或} \quad \frac{v}{T} = \text{常数} \quad \gamma T = \text{常数} \quad (10)$$

ii 对一定重量的气体而言当气体的容积不变时, 气体的绝对压力与其绝对温度成正比:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{当 } v_1 = v_2 \text{ 时}) \quad (11)$$

c. 亚佛加得罗定律:

由式 (8) 所得的第三个结论便是亚佛加得罗定律的内容:

在同样的温度和压力下, 同样容积的气体含有同样多的分子数。这就是说, 在这种情形下, 气体的比重只与气体分子的质量 (或分子量) 有关:

$$\gamma \propto \mu$$

$$\text{或} \quad \frac{\mu}{\gamma} = \text{常数}$$

$$\text{或} \quad \mu v = \text{常数} \quad (12)$$

式 (12) 说明在同样温度和压力下所有气体的 μv 乘积是相同的。

重 μ 公斤的气体称为公斤分子或摩尔。此处 μ 为气体的分子量。每个摩尔的各种气体的公斤数均有定值, 例如, 一摩尔氧等于 32 公斤, 一摩尔氢等于 2.016 公斤。 μv 的乘积是一摩尔气体的容积, 在标准状态时:

$$\mu v = 22.4 \text{ m}^3$$

由此, 亚佛加得罗定律可表示为: 在同样的温度和压力下各种气体的摩尔容积相等。

d. 理想气体状态方程式。

对于一摩尔气体, 式(8)可寫为如下形式:

$$PV\mu = \frac{2}{3} N\mu aT$$

式中 $V\mu = \mu v$, 一摩尔气体之容积, m^3

$N\mu$ ——一摩尔气体所有的分子数。

上式又可寫为:

$$PV\mu = R\mu T \quad (13)$$

式中 $R\mu = \frac{2}{3} N\mu a = \text{常数}$, 为一摩尔气体的气体常数, 对所有的气体都一样, 称为通用气体常数, 其数值

可由式(13)求得:

取在标准状态时:

$$P = 10332 \text{ kg/m}^2$$

$$T = 273^\circ K$$

$$V\mu = \mu v = 22.4 \text{ m}^3$$

$$\text{*故} \quad R\mu = \mu R = \frac{10332 \cdot 22.4}{273} = 848 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

对于 1 公斤气体而言, 理想气体状态方程式可寫为:

$$Pv = RT \quad (14)$$

式中 $R = \frac{R\mu}{\mu} = \frac{848}{\mu} \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$ 它与气体的分子量 μ 有关, 因此对每种气体不一样, 而称为气体特性常数。

R 的單位中分子分母上的公斤沒有消去。因为这使我們注意 R 是对 1 公斤气体的气体常数; 同时使我們看出 R 的單位应当是功的單位 (見等压过程)。

对于 G 公斤气体, 則理想气体状态方程式可寫为

$$PV = GRT \quad (15)$$

式中: $V = Gv$ ——它是 G 公斤气体之容积。

理想气体用于气体状态發生变化时有下列关系:

在第一种状态时:

$$P_1 V_1 = GRT_1 \quad (16)$$

在第二种状态时:

$$P_2 V_2 = GRT_2 \quad (17)$$

由式(16)和(17)得

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (18)$$

4. 混合气体

在热力工程中所遇到的气体往往不是一种單純的气体, 而是多种气体的混合物, 例如鍋爐中燃料燃燒產物及內燃机之排气都是 CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , O_2 及 N_2 等好多种气体混在一起的混合物, 在高溫 低压时, 也可將混合气体当理想气体去計算。

欲确定混合气体之状态, 單知道二个参数是不够的, 还必须知道它的成份。

* 采用不同單位, 通用气体常数有不同的数值, 如在物理中在化学中均不用工程單位, 那里所用的單位是: P ——物理大气压, μv ——22.4 升, T ——273°K

$$\text{故} \quad \mu R = \frac{1 \times 22.4}{273} = 0.082 \left[\frac{\text{物理大气压} \cdot \text{升}}{\text{摩尔} \cdot \text{度}} \right]$$

無論采用哪种單位, 在計算上, 結果相同, 但工程上多用工程單位。

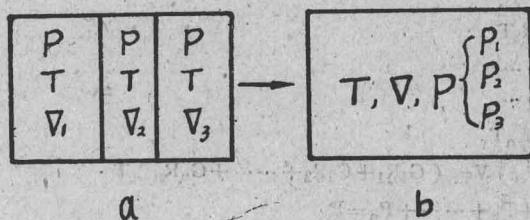
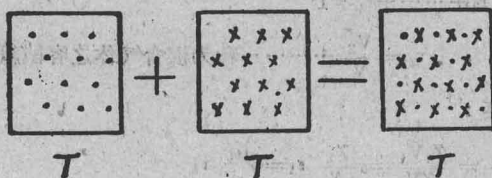
(1) 道尔顿定律

混合气体是二种或二种以上气体的混合物，参加混合气体中的各个气体，彼此不發生化学变化，它們都佔有整个容器的容積，并以其分压力作用到器壁上。

混合气体作用到容器壁上的总压力等于各个气体压力之和，或

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (19)$$

这就是道尔顿定律。



上圖 1-4

下圖 1-5

(2) 混合气体的重量組成和容積組成

i 重量組成：混合气体总重 G 公斤，由 G_1 公斤第一种气体， G_2 公斤第二种气体， G_3 公斤第三种气体……組成，則

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n$$

$$\frac{G_1}{G} + \frac{G_2}{G} + \frac{G_3}{G} + \dots + \frac{G_n}{G} = 1$$

或

$$g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n = 1 \quad (20)$$

式中

$$g_1 = \frac{G_1}{G}, \quad g_2 = \frac{G_2}{G}, \quad g_3 = \frac{G_3}{G}, \quad \dots, \quad g_n = \frac{G_n}{G} \text{ 称为混合气体之重量組成。}$$

ii 体積組成

假想混合气体在混合前分別处于容器中（圖5a），若將隔板抽去，則气体混合。此时，溫度不变，容器所受气体总压力不变，但每种气体的体積均膨脹而充滿整个容器，并以其分压力作用于器壁上。

这个混合前后的变化可用波义耳—馬略特定律表示如下：

混合前

$$PV_1 = P_1 V$$

$$PV_2 = P_2 V$$

.....

.....

$$PV_n = P_n V$$

混合后

$$V_1 = \frac{P_1}{P} V$$

$$V_2 = \frac{P_2}{P} V$$

.....

.....

$$V_n = \frac{P_n}{P} V$$

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = \frac{1}{P} (P_1 + P_2 + \dots + P_n) V$$

根据道尔顿定律, $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$, 故

$$V_1 V_2 + \dots + V_n = V$$

$$\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \dots + \frac{V_n}{V} = 1$$

或

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1$$

(21)

式中

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, \quad r_2 = \frac{V_2}{V} \dots \dots \dots \text{称为混合气体之容积组成}$$

重量组成和体积组成的关系:

$$g_1 = \frac{G_1}{G} = \frac{\gamma_1 V_1}{\gamma V} = \frac{\gamma_1}{\gamma} r_1 = \frac{\mu_1}{\mu} r_1$$

(3) 混合气体的假想分子量及折合气体常数

在混合气体中, 各组成气体适用理想气体状态方程式:

$$P_1 V = G_1 R_1 T$$

$$P_2 V = G_2 R_2 T$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$P V_n = G_n R_n T$$

相加, $(P_1 + P_2 + \dots + P_n) V = (G_1 R_1 + G_2 R_2 + \dots + G_n R_n) T$

因

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = P$$

而对于混合气体的状态方程是:

$$P V = G R T$$

比较上两式

得:

$$G R = G_1 R_1 + G_2 R_2 + \dots + G_n R_n$$

或

$$R = g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n$$

(22)

$$\mu = \frac{848}{R} = \frac{848}{g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n}$$

(23)

又由式(20)

$$\Sigma g = g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1$$

$$\frac{\mu_1 r_1}{\mu} + \frac{\mu_2 r_2}{\mu} + \dots + \frac{\mu_n r_n}{\mu} = 1$$

故

$$\mu = \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_n r_n$$

(24)

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{\mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_n r_n}$$

(25)

5. 实际气体:

严格地说, 上面所讲到的各方程式只适用于理想气体, 而自然界中是没有这种气体的。这些理想气体定律用于实际气体时或多或少均有偏差。

在物理学中已经说明, 所有实际气体当其加大压力降低温度(降至临界温度以下)时都能变为液体状态, 换句话说, 实际气体是某些液体的过热蒸汽。

在液体中分子间的吸引力很大, 因此气体愈接近于液体状态时, 其与理想气体之性质相差愈远; 而离液体状态愈远时愈接近于理想气体, 在工程中常用到的气体: 氧、氢, 空气, 一氧化碳等在很多情况下都是距液相很远的, 因此可以把它看作理想气体, 他们的临界温度为:

H ₂	-242°C
N ₂	-147.1°C
O ₂	-118.8°C

CO	-141°C
空气	-140.6°C

随着压力的增加和温度的降低，实际气体与理想气体之偏差越大。

凡得瓦而方程式，相当正确的考虑到实际气体分子吸引力的影响，其方程式如下：

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v-b) = RT \quad (26)$$

在理想气体状态方程式 $Pv=RT$ 中， v 应理解为是理想气体分子可压缩的空间，因为理想气体的分子本身体积小小到可以不计，所以它也就是一公斤气体占有容器的空间。但是实际气体的分子是有体积的，因此分子可压缩的空间应当由气体所佔容器空间中减去一个反映气体分子本身容体积的修正数 b 。

分子间吸引力的存在，决定了所谓气体的内压力 P_i ，减少了气体对器壁的压力 P ，因为每个分子都被邻近的分子吸引，在它接近器壁时速度降低，气体作用于器壁之压力减少，减少之数为 P_i ， P_i 的方向是由器壁向着气体的内部，其大小与撞击器壁之分子数和吸引撞击器壁之分子数成正比，即与作用于—平方公尺器壁上分子数的平方成正比。而分子数又与气体的比重 γ 成正比，因之亦即与气体的比容成反比，故内压力 P_i 应与 v^2 成反比，即 $P_i = \frac{a}{v^2}$ ，式中 a 为与气体性质有关的常数。

凡得瓦而方程式相当正确地反映了实际气体的性质，但在很多情况下，它与实验结果仍有显著偏差。人们曾不止一次的企图使凡得瓦而方程式更加准确，这将不可避免的使这方程式更加复杂化。

例题：

1. 锅炉中的压力用弹簧压力表量出为 $P_M=32.3$ 工程大气压，凝汽器中的真空表读数为 $P_b=710.6$ 公厘水银柱。

若大气压力=740 公厘水银柱，求锅炉及凝汽器内之绝对压力。

$$P = 32.3 + \frac{740.0}{735.6} = 33.31 \text{ 绝对工程大气压}$$

$$P = 740.0 - 710.6 = 29.4 \text{ mm Hg} = \frac{29.4}{735.6} = 0.0399 \text{ 绝对大气压}$$

2. 把二氧化碳压入 3 公尺³ 的贮气罐，起始时，贮气罐压力表上读数为 $0.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ，终了时为 $3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ，起始时温度为 45°C 终了时气体温度为 70°C，求压入 CO_2 之重，若大气压力 $B=700 \text{ mm 水银柱}$

$$P_1 = \frac{700}{735.6} + 0.3 = 0.95 + 0.3 = 1.25 \text{ kg/cm}^2 \text{ (绝对)}$$

$$P_2 = 0.95 + 3 = 3.95 \text{ kg/cm}^2 \text{ (绝对)}$$

$$T_1 = 273 + 45 = 318^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 273 + 70 = 343^\circ\text{K} \quad R = \frac{848}{44} = 19.2 \frac{\text{kgm}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

$$G_1 = \frac{P_1 V_1}{P_1 T_1} = \frac{1.25 \cdot 10^4 \cdot 4}{19.2 \cdot 318} = 6.15 \text{ kg}$$

$$G_2 = \frac{P_2 V_2}{P_2 T_2} = \frac{3.95 \cdot 10^4 \cdot 3}{19.2 \cdot 343} = 18 \text{ kg}$$

$$\Delta G = G_2 - G_1 = 18 - 6.15 = 11.85 \text{ kg}$$

3. 空气的重量组为 $g_{O_2}=23\%$ ， $g_{N_2}=77\%$ ，求在标准状况下空气的比重 (O_2 的分子量=32， N_2 为 28)

$$R = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2} = 32 \frac{848}{32} + 0.77 \frac{848}{28} = 6.1 + 23.2 = 29.3 \frac{\text{kgm}}{\text{kg}^\circ\text{K}}$$

$$Pv = RT$$

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{P}{RT} = \frac{1.033 \cdot 10000}{29.3 \cdot 273} = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

習 題

1. 鍋爐中的蒸汽压力用彈簧压力表量出为 $P_M = 32.3 \frac{\text{KГ}}{\text{cm}^2}$, 凝汽器中的真空度按真空表的讀数为 $P_B = 710.6 \text{ mm 水銀柱}$ 。

若大气压力 $P_a = 740 \text{ mm 水銀柱}$, 試求鍋爐及凝汽器中的絕對压力。

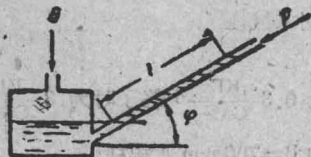
2. 在鍋爐設備的烟道中, 因受吸風机工作的影响, 它的压力略低于大气压力。烟道中的真空度可用如圖 2 所示的斜管式通風表來測量。斜角 $\varphi = 30^\circ$ 。通風表中所用的液体是比重 $\gamma = 0.8 \text{ g/cm}^3$ 的煤油。沿斜管上刻度的讀数 $l = 200 \text{ mm}$ 。求烟道中烟气的絕對压力 ($P_a = 760 \text{ mm 水銀柱}$)

3. 为了儲量貯藏在封閉容器內液体燃料的存量(液面), 常用圖 3 所示的由鐘形口 A 和 U 形压力表 C 所構成的設備。

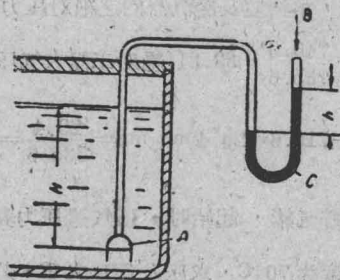
若压力表的讀数 $h = 220 \text{ mm 水銀柱}$, 燃料比重 $\gamma = 0.84 \text{ T/M}^3$, 試求燃料層的高度 H 。

4. 由于水銀蒸汽对于人体的組織有害, 故在水銀液面上常注入一層水, 以防止水銀蒸汽產生。

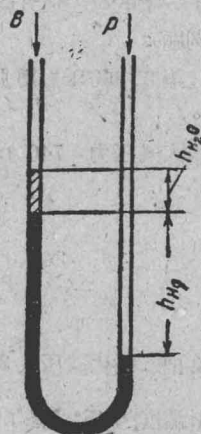
假定 U 形压力表 (圖 4) 的水銀柱高度 $h_{Hg} = 450 \text{ mm}$, 水銀液面上水柱的高度 $h_{H_2O} = 100 \text{ mm}$, 大气压力 $P_a = 740 \text{ mm 水銀柱}$, 試求空气管中的絕對压力为多少工程大气压?



習題圖 2



習題圖 3



習題圖 4

5. 內盛氮气的电灯泡, 当外界温度 $t_{cp} = 25^\circ\text{C}$ 和压力 $P_a = 760 \text{ 公厘水銀柱}$ 时, 灯泡內的真空度 $P_b = 200 \text{ mm 水銀柱}$ 。通电并当情况穩定后, 灯泡內球形部分的温度 $t_1 = 160^\circ\text{C}$, 而柱形部分的温度 $t_2 = 70^\circ\text{C}$ 。

假定灯泡球形部分的容積为 90 cm^3 , 柱形部分的容積为 15 cm^3 試求在穩定情况下灯泡內的压力。

6. 在用隔板分隔的容器中盛有二氧化碳, 已知二氧化碳的初参数为: $P_1 = 430 \text{ mm 水銀柱}$, $t_1 = 170^\circ\text{C}$; $P_2 = 940 \text{ mm 水銀柱}$, $t_2 = 210^\circ\text{C}$ 。

又已知兩部分二氧化碳初容積之比為:

$$V_1 : V_2 = 3$$

求取去隔板后, 在容器 ($V_1 + V_2$) 內的压力 P 和温度 t 。

7. 某發动机 (柴油机) 在發动前, 容積为 40 升 的儲气筒中应具有 2.8 KГ 的空气。假定在压缩站所在地的温度 $t_k = 10^\circ\text{C}$, 試求此儲气筒在压缩站充空气时应达到的压力。

又若将这儲气筒移到柴油机机器房中去, 在机器房中的温度 $t_m = 25^\circ\text{C}$, 求儲气筒中的压力应增加到多少。

8. 在一个用气体 A 所不能透过而气体 B 可以透过的隔板分隔开来的容器中, 有 $G_A = 1.44 \text{ KГ}$ 的气体 A 和 $G_B = 0.464 \text{ KГ}$ 的气体 B。气体 A 聚集在容器的左边部分, 其容積 $V_1 = 0.5 \text{ m}^3$ 。

又已知: $V_2 = 0.25 \text{ m}^3$, 气体 A 和 B 的分子量各为 $\mu_A = 28$ 和 $\mu_B = 2$ 。

試分別計算在容積 V_1 和 V_2 中的最初压力 P_1 和 P_2 , 以及取去隔板后容器 ($V_1 + V_2$) 中混合气体的压力 P_{CM} 。插在容積 V_1 中的温度表的讀数为 300°C 。气体 A 和 B 都是理想气体。



習題圖 5



習題圖 6



圖 14

習題圖 8

9. 制常用的气体物理性質表 (第一部分)

气 体 名 称	μ	R	γ	V
H_2				
O_2				
N_2				
C_2H_2				
CH_4				
空 气				

第二章 热力学第一定律

自从罗蒙诺索夫在1745—1746年提出「运动守恒」的概念后，经过许多科学家的实验和发展最后形成能量守恒转换定律。

能量守恒转换定律是自然界中的基本规律，恩格斯称之为大自然的绝对定律。它不是根据任何原则推论出来的，而是人类经验的总结。并经过无数实验之证实。热力学第一定律就是用于热和功的关系上的能量守恒与转换定律。

1. 热功当量

热与功可以互相转变，而且是按比例转变的，即

$$Q \propto L$$

$$\text{或} \quad Q = AL \quad (1)$$

式中：Q——变为功的热量，仟卡

L——消耗热量Q而得到的功，公斤—公尺

$$\text{很明顯：} \quad A = \frac{Q}{L} \text{ 仟卡/公斤—公尺}$$

以仟卡来表示，即1公斤公尺的功所相当的热量A称为功的热当量。经过大量的实验，得到：

$$A = \frac{1}{427} \text{ 仟卡/公斤公尺}$$

$$\text{或} \quad J = \frac{1}{A} = \frac{L}{Q} = 427 \text{ 公斤公尺/仟卡}$$

J称为热的功当量。即1仟卡的热量相当427公斤公尺的功。

工程上用的功率的单位是马力或仟瓦

$$1 \text{ 马力} = 75 \text{ 公斤公尺/秒 (功率)}$$

$$1 \text{ 马力小时} = 75 \cdot 3600 = 270,000 \text{ 公斤公尺} = 632 \text{ 仟卡 (功)}$$

$$1 \text{ 瓩} = 102 \text{ 公斤—公尺/秒 (功率)}$$

$$1 \text{ 瓩时} = 102 \cdot 3600 = 367200 \text{ 公斤公尺} = 860 \text{ 仟卡 (功)}$$

$$1 \text{ 瓩} = \frac{102}{75} = 1.36 \text{ 马力}$$

2. 热力学第一定律

设有一物体，重G公斤，容积V，温度T，其表面作用于一定的压力P。若由外界传给物体热量dQ，在一般情形下，物体的温度升高dt，体积膨胀dV。按分子运动的理论来分析这些现象：

温度的升高，意味着分子运动动能之增加，——内动能增加dK

体积的膨胀 { 增加分子间之距离(克服吸引力)——增加内部位能dP
反抗外压而作功dL'

若物体中不发生任何其他——化学，电，等变化，按照能量不灭定律可得能量之平衡方程式，

$$dQ = A(dK + dP) + AdL' \quad (2)$$

式中，dK和dP都是指的气体内部分子的动能和位能的增加，二者之和称为内能的增加。以热能的单位[仟卡]为内能之单位，则

$$dU = A(dK + dP)$$

由式(2)得：

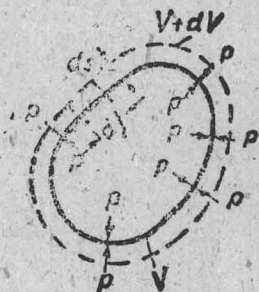


圖 2-1

$$dQ = dU + AdL' \quad (3)$$

对1公斤物体而言，上式可寫为：

$$dq = du + Adl' \quad (4)$$

式(4)中 $dq = \frac{dQ}{G}$, $du = \frac{dU}{G}$, $dl' = \frac{dL'}{G}$ 。

式(4)即热力学第一定律之解析式。它說明：加于物体之热用于兩方面：一部分用以增加物体的內能，其余部份，用以作相当于該热量的外功。

式中 dq ， du ， dl' 三项都可以为正，为負或为0，其意义：

$dq > 0$ 加热給物体

$dq < 0$ 物体放出热量

$du > 0$ 物体内能增加

$du < 0$ 物体内能减少

$dl' > 0$ 物体膨胀，物体对外界作功

$dl' < 0$ 物体被压缩，外界对物体作功。

若 $dq=0$ ，則 $du=-Adl'$ 。这就是說，当物体不吸热亦不放热时，欲得外功，只有减少物体本身之內能。这种物体与外界无热交换的过程，謂之絕热过程。

若 $dl'=0$ 則 $dq=du$ 。这就是說当物体体积不变时，加給物体的热，全部用以增加物体的內能，这样的过程謂之等容过程。

若 $du=0$ 則 $dq=Adl'$ ，所加之热，全部用以作外功。

顯然，热力学第一定律就是应用到热力过程上的能量不減定律。

历史上曾有人企图制造一种机器，使工質经过状态变化后又回到原始状态，如此連續不停作功而无須加給它能量。这种机器叫做第一类永动机。經多次嘗試終归失敗。这类嘗試的失敗引致热力学第一定律的發現。热力学第一定律就明确地指出：第一类永动机是不可能做成的。

3. 內能，內能是物体內部組成物体小質点（原子和分子）的动能与位能的总和，它的大小决定于：

(1) 小質点的質量和它运动的速度，(2) 他們之間存在的吸引力。

也就是决定于物体的状态。换言之，內能是物体的状态参数。因此，內能可寫为 P, v, T 的函数。

$$u = f(P, v, T)$$

內能既是状态参数，則內能之变化只由过程之始点和終点决定，而与过程之性質无关。

如圖2所示，始态为A，終态为B則a, b, c, d四过程，其內能变化均相等。即：

$$\Delta u_a = \Delta u_b = \Delta u_c = \Delta u_d = u_2 - u_1 = f(P_2, v_2) - f(P_1, v_1)$$

对于理想气体，分子內部无吸引力，內能只是內动能。因此，內能只是温度之函数；而与压力和比容无关。这时，內能的变化只与过程初終温度有关。如圖3 a, b, c, d四过程，因温度变化相同，則其內能变化也一样。即：

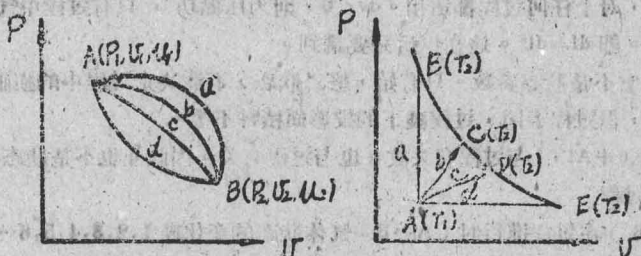


圖 2-2

圖 2-3

$$\Delta u_a = \Delta u_b = \Delta u_c = \Delta u_d = f(T_2) - f(T_1) \text{。对于理想气体，} du=0 \text{ 即为等温过程。}$$

在等容过程全部用于內能之增加，也就是温度之增加。

故

$$q = t_2 - t_1, q = C_v(t_2 - t_1) = \Delta u_a$$

C_v ——等容过程的热容量，是在等容过程中，使1公斤气体温度升高 1°C 所需之热。

既然在四个过程中，内能的变化都相等，全等于 u_2 ，故不论什么过程，其内能的变化都可用等容过程的内能变化来表示。

即：
$$\Delta u = c_v \Delta t$$

或对于微小过程写作微分形式：

$$du = c_v dt \quad (5)$$

在工程上，计算中，往往只需知道 Δu ，而不需知道其绝对值。取何处为 0 点都一样，一般取 0°C ， $u=0$ 。

4. 膨胀功

假设一公斤的气体在气缸中进行等压膨胀。在膨胀前气缸中气体之状态是平衡的，以 Pv 图上之 A 点表示。膨胀后，其状态以 B 表示。整个膨胀过程中，气体处于一连串的平衡状态。气体膨胀，推动活塞走了 S 距离，活塞之面积为 F ，按照力学原理：（图 4a）

功 = 力 $\times$ 距离

$$l = P \cdot F \cdot S = P \Delta v$$

它就是 Pv 图上过程线 AB 下面投影的面积。

若整个膨胀过程中，气体的压力是不断变化的，如图 4b 但对于过程的每一小段来说可认为是等压的

$$l = P_1 \Delta v_1 + P_2 \Delta v_2 + \dots + P_n \Delta v_n$$

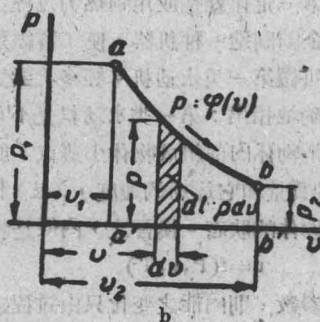
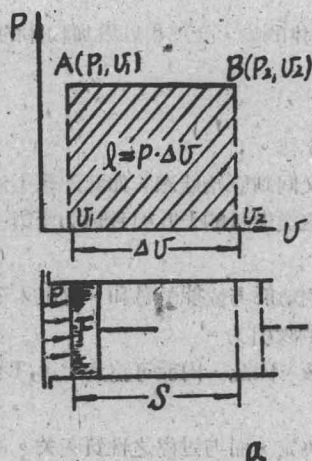


图 2-4

$$l = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n P_i \Delta v_i = \int_{v_1}^{v_2} P dv, \quad \text{或 } dl = P dv \quad (6)$$

上式是膨胀功的普遍公式，对于任何过程都适用。 $dv < 0$ ，则为压缩功，只有过程中气体处于一连串的平衡状态时，膨胀功才等于外功。即 $dl = dl'$ 。这在以后还要讲到。

功与 P, v, T, u 不同，它不是状态参数。只有始、终二状态，不能决定过程中的膨胀功。功与过程有关（如图 5）。初、终态均相同，但过程不同，过程线下的投影面积并不等。

加于气体的热量 $q = \Delta u + Al$ ， l 与过程有关故 q 也与过程有关。因此 q 也不是状态参数。

5. 可逆过程与不可逆过程

若有一过程 AB（图 6）在过程进行（ $A \rightarrow B$ ）时气体状态的变化经 1, 2, 3, 4, 5, 6……而达 B，并且在此过程中气体吸收了 q 单位的热量而对外做了 l' 单位的功。现在将过程反过来进行，外界对气体做 l' 的功，如果气体的状态仍按原路线……6, 5, 4, 3, 2, 1 而回至 A，并且仍放出 q 的热量，则此过程是可逆的，否则过程便是不可逆的。

换句话说，可以使工质和外界都回到原状态，如同没有发生过这样一件事一样的过程便是可逆过程。

实现可逆过程的条件是机械平衡，热力平衡和没有摩擦。

没有机械平衡的过程是不可逆的，在这样的过程下，气缸内气体的压力和外界压力有显著差别，这时气体

將急速膨脹或受壓縮，因此氣體內部便產生了騷動，經過相當時候才能平靜下來，而這種運動的動能又變成熱由氣體吸收。

這種過程之不可逆可用下面的例子來說明：假定有兩個相等容積 V 的容器，由帶有活門的管子相連接（圖 7）左邊的盛有壓力 P_1 溫度 t_1 的氣體，右面的為完全真空。當活門打開時，左面容器中的氣體急速膨脹以極大的速度流向右邊的容器，直到兩容器中的壓力相等為止。流動時所發生的嚴重的騷動經過一段時間便平息了而容器中的氣體達到了新的平衡狀態。

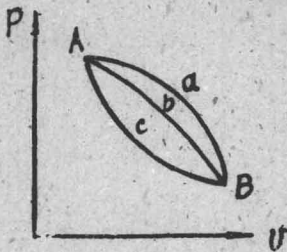


圖 2-5

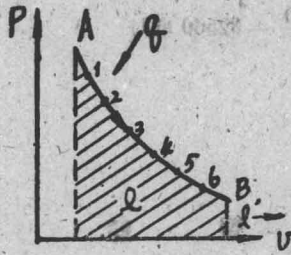


圖 2-6



圖 2-7

在這樣情形下，氣體要由終狀態回到初狀態，也就是由右邊的容器回到左邊的容器，不消耗外功是不可能的。而在正過程中氣體流到沒有壓力的空間並沒有作出任何的功。

可見，過程的不可逆性是与外功的损失相連系的，此处氣體容積膨脹了兩倍而沒有產生外功。

沒有熱平衡時過程也是不可逆的。實際上，假使在正過程中把熱交給溫度低於物體的外界，則在逆過程中便須自外界吸入熱，而這只有在外界溫度至少提高到等於物體的溫度時才有可能。

沒有摩擦是過程可逆的第三個條件，有摩擦的過程是不可逆的，因為假使在膨脹時功消耗於摩擦而生熱，則在逆過程壓縮時也同樣是功消耗於摩擦而生熱，這兩種現象完全是一致的，有摩擦需要消功，這是不可逆過程的特性。

達到機械平衡，熱平衡和沒有摩擦的過程實際上是一系列平衡狀態的連續變化，雖然氣體的狀態是隨時間變化的，但在氣體所佔的容積中每一點的氣體狀態都是一樣的，這樣的狀態就叫做平衡狀態，只有處於平衡狀態的氣體的狀態才能以 Pv 圖上的點表示出來，也只有可逆過程才能以 Pv 圖上的實線表示出來。

在一般的不可逆的情況中，即具有摩擦和處在非機械平衡下，物體的膨脹功 dl 除了克服外功外，還消耗於騷動運動的摩擦，後者以 dl_r 表示，則

$$dl = dl' + dl_r \quad (7)$$

在可逆過程中， $dl_r = 0$ ，而 $dl = dl'$ ，因此，對可逆過程來說，熱力學第一定律又可寫為：

$$dq = du + Adl$$

$$\text{或} \quad dq = C_v dt + APdv \quad (8)$$

可逆過程，實際上不存在，但在以後的研究中，過程都是按可逆過程來討論的，因為它的計算簡單，實際上，熱機上所遇到的過程與可逆過程偏差並不太大，在實際計算中可以忽略或乘以系數修正，當然，不可逆程度嚴重的那就例外了。

例題：

1. 將一只功率為 300 瓦特的電沸水器在放 1.5 公升水中去加熱，假如和周圍物質沒有熱交換，水的初溫度是 20°C 求將水加熱至沸點所需要的時間 x ，

將水溫升高至 100°C 所需之熱量

$$Q = 1.5(100 - 20) = 120 \text{ 仟卡}$$

300 瓦特電沸水器工作一小時放出的熱量為：

$$\frac{300}{1000} \cdot 3600 = 1080 \text{ 仟卡}$$

所需時間