

中等专业学校试用教材

拖拉机构造、原理 与 计 算

中 册

翁家昌 高宗英 譚正三 刘星荣 編



中国工业出版社

中等专业学校试用教材



拖拉机构造、原理与计算

中 册

翁家昌 高宗英 譚正三 刘星荣 編

中国工业出版社

本书是中华人民共和国农业机械部教育司組織編写的中等专业学校的試用教材。

本书是根据 1962 年 10 月农业机械部教育司审訂的教学大綱編写。可作为拖拉机专业“拖拉机构造、原理与計算”課程的教材。

全书分上、中、下三册。上册包括緒論及第一篇“拖拉机及其发动机的构造”部分；中册包括第二篇“发动机原理与計算”；下册包括第三篇“拖拉机原理与計算”部分。

本书由鎮江农业机械学院翁家昌、高宗英、譚正三、刘星荣四位同志分章編写，由翁家昌同志主編。上册由唐宇明同志审閱，中册、下册由常佑武同志审閱。

拖拉机构造、原理与計算

中 册

翁家昌 高宗英 譚正三 刘星荣 編

*

农业机械部教育司編輯（北京东华門北河沿 54 号）

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙 10 号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第 110 号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $8\frac{7}{8}$ ·字数 199,000

1964 年 10 月北京第一版·1964 年 10 月北京第一次印刷

印数 0001—1,940·定价（科四）0.95 元

*

統一书号：K15165·3262（农机-63）

目 录

第二篇 发动机原理与计算

第一章 工程热力学基础	1
§ 1-1 工质的基本状态参数	1
§ 1-2 理想气体的基本定律	3
§ 1-3 热力学第一定律	7
§ 1-4 气体的热力过程	11
§ 1-5 热力学第二定律	17
第二章 发动机的燃料和燃烧	20
§ 2-1 拖拉机发动机燃料的要求和种类	20
§ 2-2 液体燃料的成份、性能和评定指标	20
§ 2-3 燃料燃烧前气缸中气体的成份和数量	22
§ 2-4 燃料燃烧后气缸中气体的成份和数量	26
§ 2-5 燃料的热值和气体的比热	28
第三章 四冲程发动机的理论循环和实际循环	30
§ 3-1 理论循环和实际循环	30
§ 3-2 进气和排气过程	33
§ 3-3 压缩过程	40
§ 3-4 燃烧过程	42
§ 3-5 膨胀过程	48
第四章 发动机的工作过程	50
§ 4-1 柴油机的工作过程	50
§ 4-2 电火花点火发动机的工作过程	52
第五章 发动机的性能参数与热平衡	55
§ 5-1 表示工作循环的参数	55
§ 5-2 表示整个发动机工作的参数	59
§ 5-3 发动机的热平衡	62
第六章 发动机的热计算	64
§ 6-1 热计算的目的和程序	64
§ 6-2 拖拉机发动机的热计算举例	64
第七章 拖拉机发动机的特性曲线	69
§ 7-1 特性曲线的意义和种类	69
§ 7-2 调整特性	70
§ 7-3 负荷特性	72
§ 7-4 速度特性	74
§ 7-5 调速特性	77

第八章 发动机曲柄连杆机构的运动学及动力学	80
§ 8-1 曲柄连杆机构的运动学	80
§ 8-2 曲柄连杆机构的动力学	84
§ 8-3 发动机的平衡	97
§ 8-4 发动机转速的均匀性和飞轮的計算	103
第九章 发动机曲柄连杆机构的計算	107
§ 9-1 发动机零件强度計算的基本原則	107
§ 9-2 活塞組件的計算	109
§ 9-3 连杆組件的計算	116
§ 9-4 曲軸的計算	120
第十章 发动机配气机构的計算	127
§ 10-1 配气机构主要参数的确定	127
§ 10-2 分配軸凸輪的外形	130
§ 10-3 平面挺杆的运动学和动力学	132
§ 10-4 配气机构零件的計算	134
主要參考資料	138

第二篇 发动机原理与计算

第一章 工程热力学基础

工程热力学是普通热力学的一个分支。普通热力学是研究热能与其他各种能量相互转换关系的科学；而工程热力学，由于工程上实际生产的需要，则仅仅只研究热能与机械能之间相互的转换关系。在实际生产领域内，利用热能转换为机械能而工作的机器是十分广泛的，拖拉机发动机就是其中的一种。因此，在我们学习发动机原理之前，必须首先学习一下有关工程热力学的基本知识。通过学习，可以使我們了解热能和机械能之间转换的客观规律，并且可以找出由热变成功的最有利条件，从而为我们更深入地了解在发动机内发生的热力过程打下必要的初步基础。

§ 1-1 工质的基本状态参数

一、工 质

热能和机械能都是物质运动的一种表现形式。因此，当由热能变为机械能时，必须用物质来做媒介物，这种媒介物就称为工质。通常所用的工质，大都是气体，原因是，气体的膨胀性能及压缩性能都比液体与固体的好。

二、理想气体与实际气体

理想气体所指的是这样一种气体，即它是由具有完全弹性的分子组成，在分子之间没有互相吸引的作用力，而且分子本身又不占有容积。在自然界中，绝对的理想气体是不存在的。但是，如果实际气体的性质很接近上述有关理想气体的假定的话，那末，为了便于在热力学中研究起见，也可以将它们看成为理想气体（如处在压力不太高、温度不太低的情况下的一般气体）。

水蒸汽和那些处在高压、低温下的气体，则不能当作理想气体来处理。因为，这时气体分子间的距离很小，分子之间的吸引力很大，并且分子本身所占的容积也不能忽略。于是，我们就把这些气体叫做实际气体。

三、状 态 参 数

气体的分子是处在不间断的、无规则的运动中。在一定的状态下，它具有一定的特征；这些特征可以用一些宏观的数量来描述。于是，我们就把这些从宏观上描述其特征的量叫做状态参数。在热力学中，最基本的状态参数有：温度、压力和比容三项。

1. 温度

温度是衡量物体冷热程度的一种参数。根据分子运动学说，物体的冷热程度实际上表示了物体内部分子运动的强烈程度。并且绝对温度的数值还与物体分子直线运动的平均动

能成正比，即

$$BT = \frac{m'w^2}{2}, \quad (1-1)$$

式中 m' ——分子的平均质量；

w ——分子直线运动的均方根速度；

B ——比例常数；

T ——绝对温度。

在工程上，系采用国际百分温标（摄氏温标）来度量温度。这种温标是以标准大气压条件下，水的相变温度作为固定点，即以大气压为 760 毫米高度水银柱时冰的融解温度作为零度；以水的沸腾温度为一百度。其间分成一百等分，每一等分叫做一度。以后，摄氏温度的数值用符号 $t^{\circ}\text{C}$ 来表示（如 0°C 和 100°C ）。

除了百分温标以外，在热力学上还采用绝对温标来度量温度。这种温标分度的依据和方法与国际百分温标相同，即也是以冰的融解点和水的沸腾点作为固定点，并将它们之间的范围分成一百等分。但不同的是：在这种温标中，是以冰的融解点以下 273 度作为零度，在这个温度下，分子直线运动的速度为零。因此，绝对温标的零度实际上就是表示了物体最冷的极限。绝对温度的数值用 $T^{\circ}\text{K}$ 表示。

由上所述，这两种温标之间，具有以下的关系：

$$T^{\circ} = t^{\circ} + 273. \quad (1-2)$$

2. 压力

物体单位面积上受到的气体作用力叫做气体的压力，在热力学上用符号 p 来表示。根据分子运动学说，气体的压力是由于分子运动时碰撞容器壁面而产生的，其数值等于单位容积内全部气体分子直线运动动能的三分之二。

在实际工程应用中，都采用工程大气压来作为压力的度量单位，

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,000 \text{ 公斤/米}^2;$$

在物理学上，则采用物理大气压来作为度量单位，

$$1 \text{ 物理大气压} = 1.0333 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,333 \text{ 公斤/米}^2.$$

在测量比较小的压力时，还常采用液柱高度来作为度量标准，即采用 0°C 时的水银柱或水柱的高度来度量压力，这时，

$$1 \text{ 工程大气压} = 735.6 \text{ 毫米水银柱高度} = 10,000 \text{ 毫米水柱高度};$$

$$1 \text{ 物理大气压} = 760 \text{ 毫米水银柱高度} = 10,333 \text{ 毫米水柱高度}.$$

作用在容器壁上的真实压力称为绝对压力，但是，在大多数情况下，用仪表测出的压力并不是绝对压力，而是绝对压力和外界大气压力之间的差值。

如果绝对压力高于大气压力，仪表（压力表）上的读数将称为过剩压力或表压力（图 1-1, a)

$$P_{\text{绝对}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}}. \quad (1-3)$$

如果绝对压力低于大气压力，仪表（真空表）上读出的将是绝对压力低于大气压力的差值，这个差值称为真空度（图 1-1, b)

$$P_{\text{绝对}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{真空}}. \quad (1-4)$$

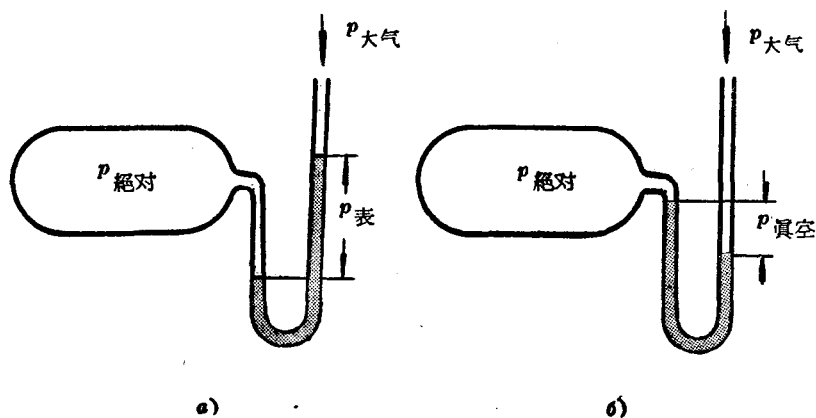


图 1-1 气体压力测量的示意图

a. 表压力; b. 真空度

3. 比容

所谓比容，就是单位重量气体所占的容积，用符号 v 来表示。如果重量为 G 公斤的气体占有 V 立方米的容积，则比容为：

$$v = \frac{V}{G} \text{米}^3/\text{公斤}。 \quad (1-5)$$

比容的倒数称为重度，用符号 γ 表示：

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{公斤}/\text{米}^3。 \quad (1-6)$$

§ 1-2 理想气体的基本定律

在物理学中，已对气体状态变化的基本规律，也就是对气体的压力、比容和温度三者之间的关系进行了讨论，由于这些关系在工程热力学中应用很广，现在仍将它们简述如下：

一、波义耳-马略特定律

当温度不变时，气体的压力与比容的乘积为一常数；或是：压力和比容成为反比。上述定律称为波义耳-马略特定律，可写为，当 $T = \text{常数}$ 时，

$$pv = \text{常数} \quad \text{或是} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}。 \quad (1-7)$$

二、给-吕萨克定律

当压力不变时，气体的比容与其绝对温度成正比。上述定律称为给-吕萨克定律可写为，当 $p = \text{常数}$ 时，

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{或是} \quad \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{T_2}{T_1}。 \quad (1-8)$$

三、查理定律

当比容不变时，气体的压力与其绝对温度成正比。上述定律称为查理定律。可写为，当 $v = \text{常数}$ 时，

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-9)$$

四、联合定律

上述各项定律，最初是从试验中总结出来的。但是现在，我们也可以根据分子运动学说将它们推导出来。例如在 § 1-1 中已经指出，按照分子运动学说，可以把气体的压力看成是气体分子碰撞容器壁的结果。所以压力的大小，将与分子的数目及分子运动的速度有关，因此，在数值上可表示为：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m' w^2}{2} \quad (1-10)$$

式中 n —— 分子浓度，即单位容积内气体的分子数；

$\frac{m' w^2}{2}$ —— 气体分子直线运动的平均动能。

这个公式也称为气体分子运动学说的基本方程式。式中，分子浓度 n 也可改写为：

$$n = \frac{N'}{v}$$

式中 N' —— 单位重量气体中的分子数；

v —— 气体比容。

将上式代入 (1-10) 式，得：

$$pv = \frac{2}{3} N' \frac{m' w^2}{2}$$

由式 (1-1) 中得知 $\frac{m' w^2}{2} = BT$ ，故可得：

$$pv = \frac{2}{3} N' BT \quad (1-11)$$

如果气体在状态 1 时的参数为 p_1, v_1 和 T_1 ，则由于某种原因，气体由状态 1 转变为另一状态 2 以后，它的参数变为 p_2, v_2 和 T_2 ，那末，根据式 (1-11) 可以写作：

$$p_1 v_1 = \frac{2}{3} N' B T_1,$$

$$p_2 v_2 = \frac{2}{3} N' B T_2;$$

将两式相除，得：

$$\frac{p_1 v_1}{p_2 v_2} = \frac{T_1}{T_2}; \text{ 或是 } \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (1-12)$$

十分明显，如果使 (1-12) 式中 p, v, T 三个参数中任一个保持不变，就可以分别得到以上的波义耳-马略特、给-吕萨克和查理定律。因此，我们也就把 (1-12) 式称为波义

耳-馬略特和給-呂薩克联合定律。

五、理想气体的状态方程式

根据理想气体的联合定律，可知：

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \text{常数}$$

或

$$\frac{pv}{T} = \text{常数}。$$

如果气体的重量为 1 公斤，那末，通常就用符号 R 来表示这个常数。于是可得：

$$\frac{pv}{T} = R$$

或

$$pv = RT。 \quad (1-13)$$

式 (1-13) 决定了理想气体的基本状态参数，即压力、比容和温度三者之间的关系，因此就叫做理想气体的状态方程式。

如果气体的重量是 G 公斤，而不是 1 公斤，则式 (1-13) 的两端应同时乘以 G，因此得：

$$pvG = GRT$$

或

$$pV = GRT \quad (1-14)$$

式 (1-14) 适用于任何重量的气体，该式和 (1-13) 式中的 R，对于一定的气体来说是一个常数，因此称为气体常数。

当应用状态方程式时，必须注意各个参数之间的单位应当一致。通常，压力 p 的单位取为公斤/米²；比容 v 的单位取为米³/公斤；容积 V 的单位取为米³；温度的单位取为 °K。因此，气体常数 R 的单位则是公斤米/公斤度。

六、阿佛加特罗定律

阿佛加特罗定律可以叙述为：在同温、同压下，同体积的各种不同气体内，含有的分子数目相同。

最初，这个定律也是从试验中总结出来的，但是现在同样也可以根据分子运动学说将它推导出来。

现假定有两种不同的气体，若分别写出它们的气体分子运动学说的基本方程式，可得：

$$p_1 = \frac{2}{3} \frac{N'_1}{v_1} \frac{m'_1 w_1^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{N_1}{V_1} \frac{m'_1 w_1^2}{2} \text{ 和 } p_2 = \frac{2}{3} \frac{N'_2}{v_2} \frac{m'_2 w_2^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{N_2}{V_2} \frac{m'_2 w_2^2}{2}$$

式中， N_1 和 N_2 表示两种不同理想气体的分子数。

如果对于这两种理想气体，压力、温度和所占的容积都相同的话，即

$$p_1 = p_2, \quad T_1 = T_2 \text{ 和 } V_1 = V_2$$

其中, $T_1 = T_2$ 也就是 $\frac{m_1' w_1^2}{2} = \frac{m_2' w_2^2}{2}$, 将这些关系式代入上述气体分子运动学說基本方程式以后, 可以十分清楚地看到,

$$N_1 = N_2$$

七、莫尔和气体常数

根据阿佛加特罗定律, 可以断言, 在同样的温度和压力下, 气体的重量和它的分子量成正比, 也就是說,

$$\frac{m}{r} = \text{常数}$$

式中 m ——气体的分子量。

因为 $r = \frac{1}{v}$, 所以

$$mv = \text{常数}。 \quad (1-15)$$

式 (1-15) 說明, 在相同的压力和温度下, 所有气体的 mv 乘积都相同。

如果气体重量的公斤数, 恰与它的分子量 m 相等, 那末这么多的公斤数就称为 1 个莫尔或是 1 公斤分子。例如, 氧的分子量等于 32, 則 1 莫尔的氧就是 32 公斤的氧。很明显, 由于 1 莫尔的气体重量是 m 公斤, 故乘积 mv 也就表示了 1 莫尔气体所占的容积。

根据式 (1-15), 可将阿佛加特罗定律改写为: 当压力和温度相同时, 同莫尔量的任何气体具有相同的容积。

如果已知某种气体在某一状态时的重量或比容, 那末就能根据式 (1-15) 很容易地求出在这种状态下每 1 莫尔气体所占的容积。試驗指出, 在标准状态 ($p=1$ 个物理大气压, $t=0^\circ\text{C}$) 下, 每 1 莫尔理想气体的容积为 22.4 米³。

对于 1 莫尔气体來說, 应将状态方程式 (1-13) 的两边同乘以分子量 m , 因此得:

$$pmv = mRT, \quad (1-16)$$

移項后,

$$mR = \frac{pmv}{T} \quad (1-17)$$

在标准状态下进一步可得

$$mR = \frac{10,333 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤米/公斤度}。$$

由此可知, 乘积 mR 对于任何理想气体都是相同的, 并且皆等于 848, 我們把这个乘积称为通用气体常数。

如果气体量不是 1 个莫尔, 而是 M 莫尔或是 G 公斤 (这时, $G = Mm$), 則式 (1-16) 的两边应再乘以 M , 于是, 可得下列公式:

$$pMmv = MmRT = 848MT$$

或是

$$pV = 848MT。 \quad (1-18)$$

§ 1-3 热力学第一定律

一、基本概念

根据能量守恒定律，能量的形式可以转变，但总的能量不会改变。因此，在气体受热做功的过程中，气体由于受热而自外界得到的能量，应该等于对外界做功所付出的能量与贮存在气体内部的能量之和。这就是热力学第一定律的基本内容。因此，热力学第一定律也就是能量守恒定律在热力学方面的具体应用，它指出了热能和功能之间在相互转换时的当量关系。

为了深入了解它的正确内容，以下将对功量、热量和内能等有关概念逐一进行解释，最后，再写出热力学第一定律的一般数学表达式。

二、气体的膨胀功和压缩功

假定在一个封闭的气缸(图1-2)中存在着G公斤某种气体，如果向气体加热，气体的压力就会增大。当气体作用在活塞上的总力大于外力时，气体就迫使活塞右移，并对外界做功。这种由于气体体积增加所作的功，就叫做气体的膨胀功。反之，如果外力大于气体作用的总力，那末活塞就会向左移动，气体也就受到压缩。这时我们认为外界在对气体做功，这个功叫做压缩功。

如果气缸中气体的压力为 p 公斤/米²，活塞的面积为 F 米²，则作用在活塞上的气体总力就是 pF 公斤。假定活塞在某一瞬间由于气体力的作用，克服外力向右移动了一段微小的距离 ds 米，并且，由于在这一瞬间内气体容积变化极微，故气体压力 p 和总力 pF 可以看成是几乎不变的，因此，在这一瞬间内，气体对活塞所作的功，即为：

$$dL = pFds \text{ 公斤米}$$

但 Fds 代表在这个期间内气体容积 V 的增加，亦可用 dV 表示，因此

$$dL = p dV \text{ 公斤米。}$$

于是，在活塞由位置 I 移动到位置 II 的整个过程(这时，气体的状态相应地由 1 变化到 2)中，气体推动活塞所作功的总量是：

$$L = \int_1^2 dL = \int_{V_1}^{V_2} p dV \text{ 公斤米。} \quad (1-19)$$

如果存在于气缸内的气体重量不是 G 公斤，而是 1 公斤。那末气体的膨胀功应该是：

$$l = \frac{L}{G} = \frac{1}{G} \int_{V_1}^{V_2} p dV \text{ 公斤米/公斤}$$

考虑到 $V = Gv$ ， $V_1 = Gv_1$ 和 $V_2 = Gv_2$ 以后，可得下列计算气体膨胀功的一般公式：

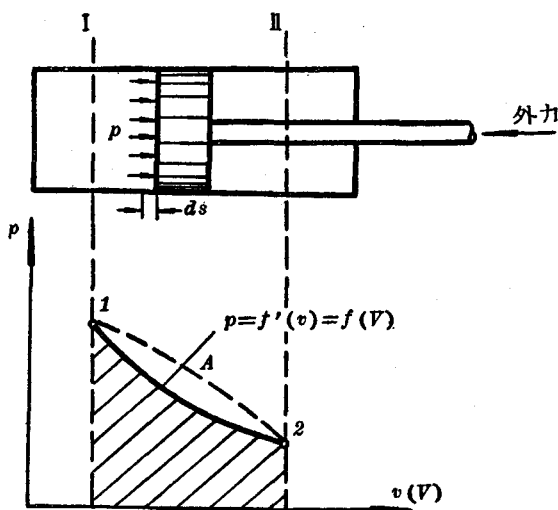


图 1-2 气体的膨胀功和压容图

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv \text{ 公斤米/公斤。} \quad (1-20)$$

当气体不是膨胀，而是受到外界压缩时，同样可以用上式来进行计算。这时，不是 $v_2 > v_1$ ，而是 $v_1 > v_2$ ，故按上式 (1-20) 求出的 l 将为负值。膨胀功是负值时，实际上就是表示外界在压缩气体而作功。

上述气体由状态 1 到状态 2 的变化过程，在工程热力学中就叫做热力过程。热力过程所进行的情况，可以在压容图 (p - V 图或 p - v 图) 上形象地表示出来。所谓压容图，就是以容积 V 或比容 v 为横坐标，以压力 p 为纵坐标所画出的图形。气体的每一个状态可以用压容图上的一点来表示；因此，压容图上的一条曲线就能代表所进行的一个热力过程。

图 1-2 下图表示的就是一个压容图，设图中实线 1-2 所代表的即为某一种条件下的气体膨胀过程，这条曲线的形状也就反映了 p 和 V 或 v 之间的变化关系，即 $p=f(V)$ 或 $p=f'(v)$ 。根据微积分原理，曲线下面的面积 (阴影线部分) 就代表 $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ 这一积分式的数值。这样，在压容图上，每一个点不仅代表一个状态，一条曲线代表一个过程；而且气体经历该过程的膨胀功或压缩功也能用曲线下的一块面积来代表。基于这种特点，压容图有时也叫示功图。

根据以上所述，可知：当计算功量时，不仅要知道气体的初始状态和最终状态，而且还要知道这两个状态之间，气体压力 p 的具体变化规律。例如，在图 1-2 中，实线 1-2 和虚线 1A2 都是代表由状态 1 变化到状态 2 的。但是，由于 p 的变化规律不同，故在整个过程中所作的功也不同。由此可见，功量不是状态的函数，而是一个过程的函数。

功量的基本单位是公斤米。除此以外，在工程上为了度量实际热机的作功能力，还采用以下较大的有关功率和功的单位：

功率的单位：1 马力 = 75 公斤米/秒

1 千瓦 = 102 公斤米/秒 = 1.36 马力。

功的单位：1 马力小时 = $75 \times 3,600 = 270,000$ 公斤米

1 千瓦小时 = $102 \times 3600 = 367,200$ 公斤米。

三、热量和比热的概念

热量和功量一样，也是能量的一种形式。在工程上，常用的度量热量单位叫做大卡。所谓 1 大卡的热量，就是指在标准大气压下 (760 毫米水银柱)，加热 1 公斤水，使它的温度自 19.5°C 上升到 20.5°C 时所需加入的热量。

具体的说，气体在热力过程中接受或放出热量的多少，取决于三个因素：

第一个因素是气体本身的性质。不同的气体，吸收热量的能力也不同。表现为同样数量的气体，当温度同样升高 1°C 时，所需吸收的热量不同。每单位量气体当温度升高 1°C 时所需吸收的热量，叫做该气体的比热。常用的比热为重量比热和莫尔比热。重量比热的单位是大卡/公斤度，符号为 c ，它表示 1 公斤气体温度升高 1°C 时所需的热量。莫尔比热的单位是大卡/莫尔度，符号为 c' ，它表示 1 莫尔气体温度升高 1°C 时所需的热量。

第二个因素是热力过程的性质。对同一种气体而言，如果加热的过程不同，它吸收热量的能力也不同。因此，当过程不同时，同一气体具有不同的比热数据。例如，在等压过

程（压力維持不变的热力过程）中的比热就不同于在等容过程（容积或比容維持不变的过程）中的比热。前者叫做等压比热，用符号 c_p 或 c_p' 表示；后者叫做等容比热，用符号 c_v 或 c_v' 表示。由于气体在等容过程中并不膨胀做功，而在等压过程中还要膨胀做功，所以当温度同样升高 1°C 时，气体在等压下就比在等容下需要接受較多的热量，因此 $c_p > c_v$ 。至于 c_p 和 c_v 之間的具体数量关系，将在以后說明。

第三个因素是气体状态变化的范围。对于像空气这样的气体，压力或比容的不同对比热的影响很小，可以忽略不計；但是，温度的影响却比較显著，随着温度的增高，比热的数值将会增大（图 1-3），即 $c=f(t)$ 。在工程上，为了便于計算，可以近似地认为比热与温度之間保持直线的比例关系，即

$$c=a+bt \quad (1-21)$$

式中 a 和 b ——随气体种类不同而異的系数（具体数值可用实验方法来确定）。

四、热和功的当量原理

在实际生产领域中，我們最感兴趣的是热能与机械功之間的轉換問題。根据能量不灭定律，当其他各种能量不变时，一定量的热能消失，必产生与之对应的一定数量的功；反之，消耗了一定量的功，也必定产生与之对应的一定量的热能。这就是說，热和功之間可以相互地按一定比例进行轉換，即

$$Q=AL$$

式中 L ——轉变为热能的热功（公斤米）；

Q ——消耗了机械功 L 以后所得的热量（大卡）；

A ——比例常数。

比例常数 A 表示相当于 1 公斤米机械功的热量，称为功的热当量，根据試驗，其数值为：

$$A=\frac{1}{427} \text{大卡/公斤米。}$$

功的热当量的倒数称为热功当量，它表示相当于 1 大卡热量的功量，通常用符号 J 表示：

$$J=\frac{1}{A}=427 \text{公斤米/大卡。}$$

在工程上常用的功的单位与热量之間的关系为：

$$1 \text{ 馬力小时}=632 \text{ 大卡；}$$

$$1 \text{ 千瓦小时}=860 \text{ 大卡。}$$

这些关系可以由热和功的基本当量关系直接导出。

五、內 能

在一般情况下，某一个封閉系統，当发生功与热之間的轉換时，往往同时还伴随着其

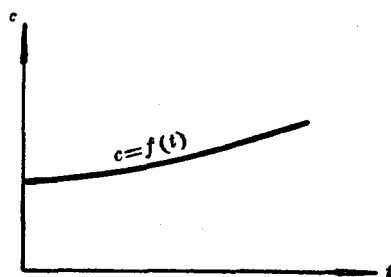


图 1-3 温度对比热的影响

它形式的能量变化。例如，对前述封闭在气缸内的定量气体加热时，除了因气体的体积膨胀而作功以外，在一般情况下气体的温度还会升高，按照气体分子运动学说对于温度本质的说明（见§1-1），温度的升高就代表气体分子运动速度的增加，也就是分子平均动能的增加。这个动能包括分子直线运动的动能、迴转运动的动能以及分子内部原子的振动能。

对于实际气体而言，除上述动能外，因为它们的分子之间存在着吸引力，因此，还具有一定的位能。当气体膨胀时，为了克服分子之间的吸引力以增大其间的距离，必须消耗一定的功，这个功就增加了气体内部的位能。

在热力学中，我们把上述气体内部分子动能与位能的总和称为内能并用符号 U 来表示。通俗地说，内能就是贮存在气体内部的能量。它的单位和热量的单位一样，也是大卡。

由于气体内部分子的动能和温度有关，内部分子的位能和压力或比容有关。因此，气体的内能可以由两个状态参数（压力和温度或比容和温度）来决定，也就是说，内能本身也是一个状态参数。

对于理想气体而言，因为假定在气体分子之间不存在吸引力，也就是不存在位能。因此，它的内能只是由气体内部的动能来决定，即仅由温度来决定。

六、热力学第一定律的普遍式

根据以上有关热和功的基本当量关系和内能的分析，再根据能量不灭定律，我们可以将热力学第一定律写成下列的数量上的关系式

$$Q = \Delta U + AL \text{ 大卡} \quad (1-22)$$

式中 Q ——在变化过程中加给气体的热量（大卡）；

$\Delta U = U_2 - U_1$ ——在变化过程终了和变化过程开始时，气体内能的差（大卡）；

L ——在变化过程中气体所作的功（公斤米）。

这个关系式指出，对于任何热力过程加给气体的热量 Q ，是用来改变气体的内能，并使气体对外界作功的。

对于1公斤气体而言，式（1-22）可改写成

$$q = \Delta u + Al \text{ 大卡/公斤}, \quad (1-23)$$

对于1公斤气体微小的变化过程而言，还可进一步改写为微分的形式

$$dq = du + Adl \text{ 大卡/公斤}。 \quad (1-24)$$

以上三种表达形式通常称为热力学基本方程式或热力学第一定律的普遍式。

根据热力学第一定律，可以明确：要想得到机械功，就必须消耗相应数量的热能或其它能量。不依靠任何能源，而能作出机械功的所谓“永动机”（称为第一类永动机）是绝对不存在的。

七、等容比热和等压比热的关系

应用热力学第一定律，可以进一步计算内能，并求出等容比热和等压比热的关系。

如果对贮存在容积不变的密封容器中的1公斤气体加热，使气体温度从 t_1 （或 T_1 ）升高到 t_2 （或 T_2 ），则所加入的热量应为

$$q = q_v = c_v(t_2 - t_1) = c_v(T_2 - T_1)。(1-25)$$

因为这是一个等容加热过程，气体比容不发生变化，也就是不对外界做功。因此，根据热力学第一定律可知，加给气体的热量 q 完全用来改变气体的内能，即

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(t_2 - t_1) = c_v(T_2 - T_1)。(1-26)$$

由于内能是一个状态参数，只决定于气体的状态，而与变化的过程无关。对于理想气体而言，其值只决定于温度。因此，上式不仅适用于等容过程，而且也适用于其它任何过程。可以用来计算在任何过程中，气体温度从 t_1 （或 T_1 ）变化到 t_2 （或 T_2 ）时的内能变化。

再如在一个带有活塞的气缸中，贮存着 1 公斤气体（参见图 1-2），在外界作用力不变的情况下，对它加入热量，使气体温度从 t_1 （或 T_1 ）升高到 t_2 （或 T_2 ），则所加入的热量应为：

$$q = q_p = c_p(t_2 - t_1) = c_p(T_2 - T_1)。(1-27)$$

因为这是一个等压加热过程，所以不仅气体的内能产生变化；而且气体还在等压下膨胀做功，所作的功是 $p(v_2 - v_1)$ （参见 § 1-4 中的等压过程）。因此，根据热力学第一定律可以写出：

$$c_p(t_2 - t_1) = u_2 - u_1 + Ap(v_2 - v_1)。$$

对于理想气体而言， $u_2 - u_1 = c_v(t_2 - t_1)$ ；且 $Ap(v_2 - v_1) = AR(T_2 - T_1)$ ，于是，上式可写成：

$$c_p(t_2 - t_1) = c_v(t_2 - t_1) + AR(T_2 - T_1)，$$

简化后，可得

$$c_p = c_v + AR \quad (1-28)$$

式中 A ——功的热当量，等于 $\frac{1}{427}$ 大卡/公斤米；

R ——气体常数，等于 $\frac{848}{m}$ 公斤米/公斤度。

如果将式 (1-28) 两边同乘以气体分子量 m ，则得

$$mc_p = mc_v + mAR = mc_v + \frac{848}{427} = mc_v + 1.985，$$

由于 mc_p 和 mc_v 表示的就是气体的等压莫尔比热 c'_p 和等容莫尔比热 c'_v ，因此，可得

$$c'_p = c'_v + 1.985。 \quad (1-29)$$

§ 1-4 气体的热力过程

前已说明，热力过程就是气体状态变化的过程。因此，它可以在以气体状态参数为座标的直角坐标系（例如， $p-v$ 坐标系^①）中，用一条相应的线段来表示。

在发动机气缸内，实际上发生的热力过程是十分复杂的。但是，为了分析方便起见，通常也可以将它们简化为一些特殊的热力过程。在工程热力学上，常见的热力过程是：

① 为了简化起见，以下我们都是研究 1 公斤气体的变化情况，因此，采用 $p-v$ 坐标系，所得出的有关功量和热量的公式也都是对于 1 公斤气体而言。如果在实际的发动机中，气体的重量不是 1 公斤，而是 G 公斤或 M 个莫尔。那时，只需将 $p-v$ 坐标系改为 $p-v$ 坐标系，并将有关功量与热量的公式乘以 G 或是 M 即可。

1. 等容过程——容积（或比容）保持不变的过程，即 $V = \text{常数}$ 或 $v = \text{常数}$ ；
2. 等压过程——压力不变的过程，即 $p = \text{常数}$ ；
3. 等温过程——温度不变的过程，即 $T = \text{常数}$ ；
4. 绝热过程——没有热交换的过程，即 $dq = 0$ ；
5. 多变过程——凡符合 $p v^n = \text{常数}$ 的过程，都叫多变过程。式中 n 对于一定的过程是一个常数，以后将加以说明。前四个过程都为多变过程的特殊情况。

分析一个热力过程，主要是确定这个过程中气体对外的热量交换和功量交换。功量可按式 (1-20) 或 (1-19) 计算；热量则可按式 (1-25)、式 (1-27) 或式 (1-23) 计算。为了进行热量与功量交换的计算，首先要掌握气体的状态参数在热力过程中的变化情况。因此，状态参数的计算也是分析热力过程的首要内容之一。

一、等 容 过 程

1. 状态参数的关系和过程曲线

由于过程中比容保持不变 ($v = \text{常数}$)，故当气体由初态 1 变化到终态 2 时，

$$v_2 = v_1,$$

因此，根据理想气体状态方程式 $p v = R T$ 以及等容的条件，可得出，

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}。$$

在 $p-v$ 图上，等容过程可用一条垂直于 v 座标轴的直线（等容线）来表示（图 1-4）。图中，等容线 1-2 表示加热气体的过程（ p 和 T 上升）；等容线 1-2' 表示冷却气体的过程（ p 和 T 下降）。

2. 功量交换

根据式 (1-20) 可知，在任何过程中，1 公斤气体所作的功 l 应为：

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv,$$

因为在等容过程中 $dv = 0$ ，所以

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0$$

由此可知，在等容过程中，气体不作功。

3. 热量交换

根据式 (1-25)，

$$q = c_v (T_2 - T_1) \text{大卡/公斤。}$$

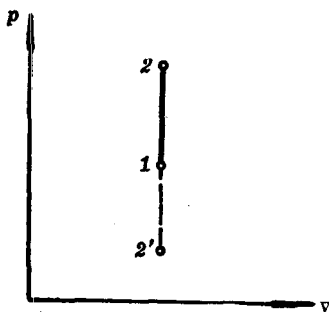


图 1-4 等容过程

二、等 压 过 程

1. 状态参数的关系和过程曲线

由于过程中压力保持不变 ($p = \text{常数}$)，故当气体由初态 1 变化到终态 2 时，

$$p_2 = p_1,$$

根据 $p v = R T$ 以及等压条件，可得出：