

# 工程热力学

李宣子編

高等教育出版社

本書适用于高等工业学校时数較少的非动力类专业教学参考之用。內容簡明扼要，主要包括：1. 概論；2. 理想气体的性質及其基本定律；3. 热力学第一定律；4. 各种热力过程中功和热量的計算；5. 热力学第二定律；6. 水蒸汽；7. 气体混合物；8. 穩流过程及其能量方程式；9. 气体与蒸汽的外射流动与节流；10. 蒸汽动力厂的循环；11. 內燃机和燃气輪机的循环；12. 压气机的工作原理；13. 制冷装置循环。

本書亦可供动力性質各专业的业余高等学校及中等技术学校教学参考及一般工程技术人员自修之用。

## 工 程 热 力 学

---

李 宜 予 編

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第054号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店发行

---

統一书号 15010·590 开本 850×1168 1/32 印张 7 12/16

字数 189,000 印数 1—8,500 定价(5) 1.20

1959年2月第1版 1959年2月上海第1次印刷

# 目 录

## 主要符号表

第一章 概論	1
§ 1-1. 工程热力学的意义	1
§ 1-2. 热力学發展过程	2
§ 1-3. 研究热能变化的方法和步骤	3
第二章 理想气体的性質及其基本定律	7
§ 2-1. 气体状态的基本参数	7
§ 2-2. 理想气体的性質	9
§ 2-3. 理想气体的基本定律	11
第三章 热力学第一定律	15
§ 3-1. 热力学第一定律	15
§ 3-2. 功	19
§ 3-3. 热量、热容量和比热	22
§ 3-4. 內能	30
§ 3-5. 焓	34
第四章 各种热力过程中功和热量的計算	37
§ 4-1. 定容过程	37
§ 4-2. 定压过程	39
§ 4-3. 等温过程	40
§ 4-4. 絕热过程	44
§ 4-5. 多变过程	49
第五章 热力学第二定律	58
§ 5-1. 热力学第二定律	58
§ 5-2. 可逆与不可逆过程	62
§ 5-3. 热力循环	64
§ 5-4. 熵	74
第六章 水蒸汽	91
§ 6-1. 水蒸汽的产生过程及其特性	91

§ 6-2.	水的三态图	95
§ 6-3.	水蒸汽状态参数的计算	98
§ 6-4.	水蒸汽的焓( $T_s$ )图和焓熵( $s$ )图	110
§ 6-5.	水蒸汽的状态变化过程	118
<b>第七章</b>	<b>气体混合物</b>	<b>122</b>
§ 7-1.	道尔顿定律	122
§ 7-2.	混合气体容积成分与重量成分的换算法	125
§ 7-3.	混合气体的折合分子量(或称“平均”分子量,或拟似分子量)的计算法	127
§ 7-4.	混合气体的比热	128
§ 7-5.	空气与水蒸汽的混合物——湿空气	129
§ 7-6.	空气的绝对湿度和相对湿度及湿量	131
<b>第八章</b>	<b>稳流过程及其能量方程式</b>	<b>134</b>
§ 8-1.	流动过程	134
§ 8-2.	稳流和稳流过程的定义	136
§ 8-3.	简单稳流过程中质量平衡和能量平衡	137
§ 8-4.	稳流能量方程式的应用及其有效范围	142
<b>第九章</b>	<b>气体与蒸汽的外射流动与节流</b>	<b>145</b>
§ 9-1.	热力机械中热能的转化方法	145
§ 9-2.	气体与蒸汽的外射流动	147
§ 9-3.	气体的最大流量与临界速度	154
§ 9-4.	拉伐尔喷管	158
§ 9-5.	气体与蒸汽的节流	161
<b>第十章</b>	<b>蒸汽动力厂的循环</b>	<b>165</b>
§ 10-1.	郎肯循环	165
§ 10-2.	蒸汽的重热循环	174
§ 10-3.	再生预热循环——给水的回热	176
§ 10-4.	两气循环	179
§ 10-5.	发电供热相结合的循环	183
<b>第十一章</b>	<b>内燃机和燃气轮机的循环</b>	<b>184</b>
§ 11-1.	内燃机的循环	184
§ 11-2.	燃气轮机的理想循环	200
<b>第十二章</b>	<b>压气机的工作原理</b>	<b>206</b>
§ 12-1.	基本概念	206
§ 12-2.	压气机的工作过程和压缩所消耗的功	208
§ 12-3.	压气机的效率	214

目 录	5
§ 12-4. 多级压缩.....	215
<b>第十三章 制冷机循环</b> .....	<b>220</b>
§ 13-1. 逆向热力循环.....	220
§ 13-2. 压缩蒸汽的制冷循环.....	221
§ 13-3. 制冷设备的容量.....	224
§ 13-4. 氨吸收式制冷装置.....	228
§ 13-5. 热泵.....	229
<b>附录</b> .....	<b>230</b>
<b>参考书目</b> .....	<b>242</b>

# 第一章 概論

## § 1-1. 工程热力学的意义

人类在技术上最大的成就在于能够控制大量的动力。任何科学成果的普遍推广,都离不了广泛地应用动力;工业、运输、农业乃至文化卫生事业,若不直接或间接利用动力运转的机械,今天就都可能仍停留于数世纪以前的状况。热能是各种动力的主要源泉,所以热能的研究成为动力部门的重要学科之一。为了便于了解起见,我们先从“能”这个基本概念讲起。

**能** 一个物体或一部分物质当其状态或位置发生变化时能产生功,则此物体或此一部分物质即称为含有能量。

各种“能”常能互相变化,由一种形式变为另一种形式,由一个地方转到另一个地方。“能”并且可以储存于各种形式中。例如在一动力厂中,煤中所含之化学能经燃烧而变为热能,加入水中使发生蒸汽,再由蒸汽机或汽轮机,变其一部分为机械能,倘用蒸汽机或汽轮机带动发电机,则又可由机械能变为电能。

凡变热能为机械能之机械称为热机。

**热力学与工程热力学** 研究热能与他种能,例如机械能、电能、化学能间相互转变的原理的科学叫做热力学。其中专门着重研究热力学在机械工程上应用的那一部分(即研究热能与机械能及热能与化学能间相互变换的定律,例如热与功的关系,热循环的效率等问题的那一部分)叫做工程热力学。工程热力学是热机的理论基础,是从热力学的观点来分析控制能力和利用能力的过程

的科学。机械工程师设计蒸汽机、汽轮机、内燃机、喷气式发动机及制冷机等都必须从热力分析开始。

### § 1-2. 热力学发展过程

在十九世纪中叶以前,科学界都把热看作是一种特殊的、无重量的、不生不灭的东西——称为热质。但是由观察热力现象得到的一系列事实,特别重要的是作功时所生的热,无法用热质说来解释。例如两块冰互相摩擦时可以完全融化,就无法用热质说来解释。这样热质的说法被打破了,而建立了另一种理论,即物质分子运动论。最早相信热是一种分子运动的表现的是罗蒙诺索夫(1711—1765),但这个理论到十九世纪中叶才获得实验证实和广泛的承认。接着就发展出热力学的第一和第二两条定律。这个热的运动学说与物质构造的科学——分子学说,二者合成一套整体的科学世界观——物质的分子运动学说。

按照这个学说,热是起源于物质分子的运动。气态物质的分子经常处在不断的不规则运动中,彼此时而接近,时而分离,经常在碰撞着。从这种运动的一系列现象(蒸发、热传导、融化)看,可以断定它是决定物体的热力状态(温度、压力、比容等)变化的主因。因此这种分子及原子的不规则运动称为热力运动。这种运动便是热能的本质。

机器的发明与热力学理论的研究互相推进。十八世纪中叶,俄国的波尔宗诺夫(在1763—1765年)以及后来英国的瓦特(1763—1786年)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的热能转变来的。从此工厂中的机械体系才开始利用动力运转来代替人力。后来,工人和工程师们又设计制成了燃料在发动机气缸内进行燃烧的内燃机(1860年起),而在蒸汽原动机方面又发明了迴转式的汽轮机(拉伐尔,1845—1913年)。随后,电机

的發明使人們得以把機械能轉變為電能或把電能轉變為機械能，這樣又解決了長距離傳輸機械能的困難問題。這些機器的發明使生產發生了變革，並引起了所有工業、採礦業和運輸業的迅速發展。這樣熱能及熱機的应用範圍就迅速推廣起來了。同時這也促成了热力学的進一步研究。

實際上，熱機的每一步進展都是和热力学的研究發展相伴隨的。例如由蒸汽狀態的研究證明了提高汽缸中蒸汽的初壓力和降低排汽壓力可以提高汽缸的熱效率，以及由熱循環的研究找出了熱能變功的更佳條件，可以降低熱機的耗汽率和提高熱效率，就都促成了新型鍋爐和蒸汽機、汽輪機和內燃機的設計製造。

近二十年來燃氣輪機也已越過試驗階段而逐漸在工業和運輸上应用，其中噴氣式發動機尤其獲得了迅速發展。原子能的發現和利用更為熱機的發展開辟了一個無比巨大的新領域。這些都无一不是与热力学的研究發展有密切關係的。

### § 1-3. 研究熱能變化的方法和步驟

研究工程热力学的目的是要了解熱能與各種能間相互轉化的現象，以求獲得熱能的充分利用。但熱現象是很複雜的，應該采用什麼方法和哪些步驟來研究這些複雜現象，是首先要考慮的問題。

描寫物體狀態的方法有宏觀描寫和微觀描寫兩種，宏觀方法所用描寫物體性質的變數都是可以直接觀測的。在熱的分子學說中對物體性質的描寫則用所謂微觀描寫。微觀描寫所用的變數非常之多，它包含每一個分子的坐標和動量。宏觀變數就是相應的微觀變數的函數的統計平均值。現在在熱力学分析中所用的是宏觀方法，就是只考慮大群分子的特性的統計平均值或稱統計平均特性，而不研究各個分子的各別特性。



研究热能变化一般地从分析热能变化过程和变化的条件开始到计算热能变化的数量以及其在热机中的应用为止。其中主要步骤是：

### 一、选择热力体系

研究热能变化须了解所要计算的热能变化的物体范围，这个范围称为热力体系。热力体系是指所分析的问题中的一个物体或一群物体。热力分析是以进出这一体系界限的能量为计算根据的，所以首先必须选择一个一定的体系，并注意将所分析的全部过程中的所有能量都适当地计入。所谓一个体系应该在全过程中都指同一物体，在质量上无所增减。为了研究方便起见，在热力学中常把一个热力体系视为一个固定质量的、装在一个封闭的容器里的物质。这个容器可以是一个具有周边的真容器，例如装有一定质量的压缩氧气的罐子，或者是一个假想的周边界限，例如连续沿一条管路流通的一定质量的液体的界限。这个容器的外界不一定保持固定的外形和容积。这个体系的适当选择是热力分析工作中一个最重要的步骤。

许多热能变化过程中或由于作机械功，或由于热的传导，都包含一个体系和另一个体系之间的能量交换。划分了两个体系的界限，才好计算所交换的能量的数值。

### 二、找出工质的状态参数

(1) 工质 在各种热机中将热能转变为机械能的过程是借助于一种媒介物即是借助于能受热而作功的物质来实现的，这种媒介物称为工质。物质的气体状态最适合于充作工质，因为气体受热时膨胀能力最大，最容易使其吸收和放出能量并且容易在管道中传输。内燃机与燃气轮机中的气态燃烧产物与空气混合体、蒸

汽机与汽輪机中的水蒸汽都是气态工質的例子。除气体外，液态物質也可充作工質，制冷机中用的液态氨及調节温度装置中的水就是液态工質的例子。液态工質在热机的工質中比重很小，故本書主要只研究气态工質。

(2) 气态工質的状态参数 要研究热能变化过程，必須首先研究工質的状态，而研究工質状态又必須首先知道它的状态参数(变数或函数)。气体的状态参数是指可以描写一个体系的物体的物理状态的某些特性数量，例如温度、压力、比容、内能等。状态参数的第一个特点是一个物系的每个状态都有其一定的状态参数。状态参数的第二个特点是它們是点函数，因在表示气体状态变化的坐标圖上，圖綫上的任一点都对应于每一状态参数的一定值。这些参数数值在过程中的变化只看其始点和終点，与其变化所經路綫无关，例如压力、比容、温度都是点函数。功和热量則是路程函数，与状态参数有所区别，以后講功和热量时将要詳細說明。

状态参数有两种情况：一种是能直接用仪表測出的变数，例如温度、压力，另一种是可以由測出的变数算出的，例如密度就是一个物体的質量对容积之比。内能和熵是从两条热力学定律导出的，内能是从第一定律导出的，熵是从第二定律导出的，它們是不能直接用仪表測量的。这两种参数都同样具有状态参数定义所說的特性，因此知道了物体变化的始点和終点的状态参数，就可以知道这体系的状态变化，也就很容易計算其热能变化了。

### 三、根据两条基本定律研究热能变功的数量和条件

知道了工質的状态以后，次一步驟就是如何利用由工質状态变化所产生的力量来作功。一定質量的工質能作出多少有用的功？完成一定数量的功需要多少工質？需要在什么条件下才能实现热能变功？同样的热量在什么条件下能得到最多的功？这些

問題都是我們必須研究的，也是热力學研究的中心問題。前代的人對於這些問題已找到了兩條基本定律，現在我們就來仔細研究這兩條定律根據它們來找出氣體工質與外界，即一個體系與另一個體系間交換的熱量、工質、內能的变化、以及工質所作的功之間的数量關係，並找出熱能變功的最佳條件。

#### 四、分析熱力過程，從平衡狀態推导出全部過程的計算公式

一個物體佔據一定的空間，並可能隨時間而改變它的形狀和地位。熱機中的實際熱力狀態是經常變動的。但為了研究方便起見，在熱力學中常從一個平衡狀態或假定近似的平衡狀態着手。

**平衡狀態**是這樣一種狀態：它在沒有外界影響的條件下，各部分在長時間內不發生任何變化。但熱力學中的平衡狀態不只限於力學的平衡，即不但要靜止，而且要所有能測量的狀態參數值都不隨時間改變。為了區別於單純的力學平衡，我們稱這種平衡狀態為**熱力學平衡**。實驗證明，當沒有外界影響時，一個物體在夠長的時間內必將趨近於平衡狀態。假若把兩個物體擺在一起讓它們接觸，互相影響，它們將改變它們的狀態，最後達到一個共同的平衡。兩個以上的物體互相接觸，互相影響，最後的結果也是一樣。

既然在熱力學平衡狀態中所有能觀測的性質都不隨時間改變，換句話說，各狀態參數都有一定的數量，那麼由一個平衡狀態到另一個平衡狀態過程中的熱能變化就易於計算了。

有了計算熱力平衡狀態的方法之後，我們可以假想把熱力變化過程分解成許多平衡或接近於平衡的狀態。這樣，我們就能夠解決熱力學中所遇到的許多熱力平衡體系及從一個平衡狀態到另一個平衡狀態的變化中的問題了。

以下各章將循序分類來講述熱能變化和其應用的原理及計算方法。

## 第二章 理想气体的性质 及其基本定律

上一章曾提到,研究热能变化过程时須先研究工質的状态。气体是热机中最适合的工質,所以本章先研究气体的性质和其基本定律。

### § 2-1. 气体状态的基本参数

描写气体状态最基本的参数是温度、压力和比容。现在就从这几个参数开始来研究气体的性质。

#### 一、温度

热学的第一个目的是要知道物体的热冷状态,温度就是用来量度物体受热程度的。实际测量温度时各国多采用国际百度温标。这种温标当大气压力为 760 公厘水銀柱时取水的冰点为零度,沸点为 100 度,称为摄氏温度,用  $t$  表示,度数后注以  $^{\circ}$ 。

在热力学的基本公式中常采用绝对温度,用  $T$  来表示,并在度数后注以 K。绝对温标的零度位于百度温标零下 273 度。百度温标与绝对温度之间的换算,用下列等式表示:

$$T = 273 + t.$$

绝对温度的物理意义,可以这样来理解:物質的温度既由其分子运动而来,故当分子的热力运动完全停止时所显示的温度叫做绝对零度。自绝对零度起算的温度叫做绝对温度。

#### 二、压力

(1) 压力的概念 按照气体分子运动論,气体分子撞击容器

壁的结果就是气体作用在器壁上的压力。这种压力是以作用在单位面积上的力来衡量的。可以公式表示如下：

$$p = \frac{F}{a},$$

式中， $p$ —作用在单位面积上的力，或称压强；

$F$ —总力；

$a$ —面积。

计算压力的起始点有二：（1）由大气压力起；（2）由真空起。大气压力的大小，按纬度、海拔及温度的高低而有所不同。物理学上常采用在北纬 45° 海平面处

温度摄氏 0° 时大气压力 = 760 公厘水银柱为大气压力的平均值。自大气压力起算的压力称为表压力。自真空起算者则称为绝对压力。绝对压力等于表压力与大气压力之和。

假若所测的绝对压力较大气压力低，则所低之数，称为真空度。它通常用真空表来度量。各种压力之间的关系如图 2-1 所示。

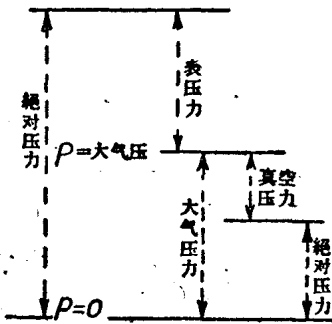


图 2-1.

假若所测的绝对压力较大气压力低，则所低之数，称为真空度。它

通常用真空表来度量。各种压力之间的关系如图 2-1 所示。

$$P_{表} = P_{绝对} - P_{大气},$$

$$P_{真空} = P_{大气} - P_{绝对},$$

或

$$P_{真空度} = P_{大气} - P_{绝对}.$$

（2）压力计量单位 在物理学上常采用大气压为压力单位。一个大气压等于 760 公厘水银柱 ( $h$ ) 的压力。热力学中除大气压力外；有时也采用另一种压力单位，即以公斤/公分<sup>2</sup>为一个压力单位，这称为工程气压。

工程气压(简称气压)与大气压(亦称物理气压)之间的关系

如下：

在水銀的密度( $\gamma$ )=13.595 克/公分<sup>3</sup>的条件下，

$$1 \text{ 大气压 } p = h\gamma = 760 \times 13.595 = 1.0333 \text{ 公斤/公分}^2 = \\ = 10.333 \text{ 公尺水柱} = 14.7 \text{ 磅/吋}^2;$$

$$1 \text{ 工程气压} = \frac{760}{1.033} = 735.6 \text{ 公厘水銀柱};$$

$$1 \text{ 工程气压} = \frac{1}{1.033} \text{ 大气压} = 0.968 \text{ 大气压}.$$

### 三、比容和密度

比容是單位質量的物体所占的容积。在工程热力学中質量單位用公斤，所以比容就是一公斤气体所占的容积。密度是每單位容积里的物質的質量。比重是單位容积的某物質的重量与同容积的水的重量之比，在公制中它在数值上与物質的密度相等。在热力学中，容积的單位用立方公尺，所以气体的密度就是一立方公尺的質量。

用  $v$  代表比容， $\gamma$  代表密度，則

$$v\gamma = 1.$$

由此可見， $v$  与  $\gamma$  互为倒数。假如有  $G$  公斤的某种气体占  $V$  公尺<sup>3</sup>的容积，則

$$v = \frac{V}{G} \text{ 公尺}^3/\text{公斤}; \quad \gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/公尺}^3.$$

气体比容和密度的标准状态常采用  $t=0^\circ\text{C}$  (或  $273^\circ\text{K}$ ) 及  $h=760$  公厘水銀柱的压力。

其他状态参数待以后在适当的時間內再講。

## § 2-2. 理想气体的性質

为了便于从复杂的現象中找出气体的規律起見，在热力学中

假定有一种气体,它的分子本身所占容积等于零(与分子間的距离比較而言),且分子間沒有內聚力(相互吸引力)。这种气体可以适用物理学上所公認的由气体分子运动学說所推导出的气体諸定律,这种气体称为理想气体。

严格的說,沒有一种实际气体能完全符合于这种条件,但理想气体可以作为实际气体的極限状态看。它的性質和实际存在的气体很接近。这种理想气体的研究,对于說明气体状态的变化有極大的作用。

处在不同物态的物体——固态,液态,气态,分子之間的內聚力(分子間的互吸力)及分子間的距离是各不相同的。

在固体里,原子与原子之間彼此挨得很近,內聚力最大,原子在那里不作移动运动,只在它的平均位置附近振摆。

液体的內聚力較小,分子在液体內有移动运动,但这种运动很受限制,因为分子之間的距离很近。

物体轉变为气体之后,它的体积,也就是分子之間的距离,就大大增加,而內聚力則减小,而且气态离液态愈远,这种特性愈强。同一气体,分子間的內聚力將随温度的增加及压力的下降而减小。这两个因素使气体的体积增大,因而分子間的距离增大,內聚力减小。同时分子本身体积和气体分子运动所占的体积比起来,作用就小得多了。气体运动所占的体积就是气体的体积。

远离液态的气体,它分子間的內聚力及分子本身的体积因为很微小,都可以略去不計。这时的气体按性質說已經就等于我們称为理想气体的东西了。这就是我們可以把自然界中每一种实际存在的气体略去它的微小內聚力以及分子本身体积而称之为理想气体的基础。由此可知,这种假設在温度愈高,压力愈小时,愈正确。所以理想气体是任何一种实在气体在其压力趋于零( $p \rightarrow 0$ ),体积趋于无限大( $v \rightarrow \infty$ )时的極限状态。

在热力計算里，热力学中所遇見的一切气体，除湿水蒸汽外，大都可以認為是理想气体。与燃料燃后产物組成的混合气中的水蒸汽及大气中所包含的水蒸汽也都可以当作理想气体看。只有蒸汽动力机里和加温器里和液态很接近的水蒸汽不能当作理想气体。

凡是分子之間的内聚力及分子本身的体积不能略去的，我們称它为实际气体。

找出了理想气体的一般規律之后，对于实际气体可把用实验方法所得出的实际气体規律归納成与理想气体公式形式相似而附加某些修正系数的公式。且在某些实际问题中假若計算所需精密度不太高，这种修正也可略而不計。

### § 2-3. 理想气体的基本定律

在物理学中已講过，理想气体的变化是符合于波义耳-馬略特定律，盖呂薩克和查理定律的。現在讓我們把这些定律再提一下：

#### 一、波义耳-馬略特定律

定量的某种理想气体倘温度不变，其容积恒与其絕對压力成反比，或者说絕對压力与容积之乘积恒等于一常数。用公式表示，則：

当  $T = \text{定值时}$ ，

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{或} \quad p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{常数。}$$

#### 二、盖呂薩克定律

盖呂薩克在 1802 年作試驗获得如下的結論，即

在压力一定时，气体的容积随温度的升降而膨脹或收縮，其变



化量恒等于此定量气体在冰点时容积的一定百分数。以公式表示则为

$$v = v_0(1 + \alpha t), \quad (2-1)$$

式中  $v$  代表温度为  $t^\circ\text{C}$  时气体的容积;  $v_0$  代表在基准温度  $t_0(0^\circ\text{C})$  时的容积;  $\alpha$  为气体的热膨胀系数, 约等于  $\frac{1}{273}$ 。

### 三、查理定律

若容积保持不变, 则压力随温度变化, 其关系为

$$p = p_0(1 + \beta t), \quad (2-2)$$

式中  $p$  为温度  $t^\circ\text{C}$  时的气体压力;  $p_0$  为在基准温度  $t_0(0^\circ\text{C})$  时的压力;  $\beta$  为压力随温度增加的系数。

根据实验的数据, 实际气体在低压下,

$$\alpha = \beta = 0.00366 = \frac{1}{273.16}。$$

这个值是趋近于理想气体的极限值。

用  $T_0$  和  $t_0$  表示冰点在绝对温度和摄氏温度上的度数。

因

$$T^\circ\text{K} = t^\circ\text{C} + 273.16^\circ,$$

所以

$$T_0 = 273.16^\circ\text{K}$$

$T^\circ\text{K}$  是由绝对零度算起的温度——绝对温度。

所以

$$\alpha = \beta = \frac{1}{T_0}。$$

盖吕萨克定律和查理定律也可以表示为如下的公式:

当  $p = \text{定值}$  时,

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

即在定压下, 比容与绝对温度成正比变化。

或  $v = \text{定值}$  时,