

热 工 学 讲 义

北京鋼鐵工業學院

热工及水力学教研組

1960. 1

目 錄

第一編 工程熱力學基本知識

第一章 基本概念.....	I-3~I-6
1-1 工程熱力學的研究對象與基本任務.....	I-3
1-2 熱及其本質.....	I-3
1-3 能的量度單位.....	I-3
1-4 熱機與工質.....	I-4
1-5 工質的基本狀態參數.....	I-4
1-6 平衡狀態.....	I-6
第二章 理想氣體諸定律.....	I-7~I-12
2-1 實際氣體和理想氣體.....	I-7
2-2 理想氣體定律.....	I-9
2-3 理想氣體狀態方程式.....	I-9
2-4 通用氣體常數.....	I-9
2-5 理想混合氣體.....	I-10
2-6 氣體的比熱.....	I-11
第三章 熱力學第一定律.....	I-13~I-22
3-1 能量守恆與轉換定律和熱力學第一定律.....	I-13
3-2 壓容圖和膨脹功.....	I-13
3-3 內能.....	I-14
3-4 熱力學第一定律的解析式.....	I-16
3-5 氣體流動能量方程式.....	I-17
3-6 氣體流動能量方程式應用舉例.....	I-18
3-7 理想氣體的內能和焓.....	I-19
3-8 理想氣體定壓比熱和定容比熱的關係.....	I-21
第四章 氣體的热力过程和熱力學第二定律.....	I-23~I-42
4-1 氣體热力过程的一般概念.....	I-23
4-2 可逆过程与不可逆过程.....	I-23
4-3 过程的分析.....	I-24
4-4 熱力學第二定律.....	I-26
4-5 热力循环及其热效率.....	I-31
4-6 卡諾循环.....	I-32
4-7 熵.....	I-33
4-8 溫熵圖.....	I-38
4-9 过程和循环在溫熵圖上的表示.....	I-39
第五章 水蒸气.....	I-43~I-55
5-1 蒸气的概念.....	I-43

5-2 蒸气的形成	I-43
5-3 饱和曲线	I-45
5-4 湿蒸气的性质	I-46
5-5 蒸气表、蒸气图	I-56
5-6 蒸气的热力过程(状态变化过程)	I-58
5-7 蒸气动力厂的基本热力循环及其热效率	I-49
5-8 气体通过喷嘴的出流	I-51

第二編 傳热学基本知識

第一章 导 热	I-2~I-8
1-1 导热的基本定律	I-2
1-2 导热系数	I-3
1-3 平壁导热	I-4
1-4 圆筒壁导热	I-6
第二章 对流换热	I-9~I-17
2-1 对流换热过程	I-9
2-2 放热系数	I-9
2-3 相似理論的一般概念	I-10
2-4 相似理論应用于对流换热問題	I-14
2-5 相似准則中的定性温度和定型尺度	I-15
2-6 几种准則型式的經驗公式	I-15
第三章 热輻射	I-18~I-21
3-1 热輻射的一般概念	I-18
3-2 热輻射的基本定律	I-19
3-3 物体之間的輻射换热	I-20
第四章 傳热和換热器	I-22~I-30
4-1 复杂换热的概念	I-22
4-2 傳热和傳热系数	I-22
4-3 換热器的基本原理	I-24
4-4 平均温度差	I-25
4-5 換热面积的計算	I-25
4-6 工作流体終温度的計算	I-27

第三編 热力設備

第一章 往复式內燃机	II-1~II-23
1-1 內燃机的燃料及內燃机的分类	II-1
1-2 四冲程內燃机的工作循环	II-2
1-3 內燃机的理想循环	II-4
1-4 二冲程內燃机的工作循环	II-8
1-5 內燃机的功率、效率及燃料消耗率	II-10

1-6 內燃机的气閥机构和配气定时图	II-12
1-7 柴油机的噴油設備和調速方法	II-18
1-8 柴油机的燃爐室	II-15
1-9 汽油机的化油器和点火設備	II-16
1-10 煤气机的混气設備	II-18
1-11 內燃机的潤滑、冷却和起勁	II-18
1-12 內燃机構造举例	II-20
第二章 鍋爐設備	II-24~II-41
2-1 蒸气制造过程和鍋爐設備一般情况	II-24
2-2 鍋爐設備的基本性質	II-25
2-3 鍋爐設備所用的燃料	II-26
2-4 燃燒过程和爐子的型式	II-26
2-5 自然循环的汽鍋型式	II-28
2-6 过热器、省煤器和空气予热器	II-30
2-7 鍋爐設備的輔助机构和操縱仪表	II-30
2-8 通风設備的烟囱	II-31
2-9 鍋爐主要型式举例	II-33
2-10 鍋爐設備中的各种热損失及鍋爐热效率	II-40
第三章 蒸汽机	II-42~II-52
3-1 引 言	II-42
3-2 蒸汽机的構造概要及其工作原理	II-42
3-3 蒸汽机的理論示功图和实际示功图	II-43
3-4 蒸汽机的功率、效率和汽耗率	II-44
3-5 蒸汽机的配汽	II-45
3-6 汽蒸汽机的調节	II-47
3-7 蒸汽机的轉向机构	II-48
3-8 鍋駝机	II-50
第四章 汽輪机	II-53~II-74
4-1 汽輪机的基本工作原理和構造概要	II-53
4-2 蒸汽在噴咀中能量的轉变	II-54
4-3 蒸汽在工作叶片中的工作	II-55
4-4 噴咀叶片合併相对效率	II-59
4-5 速度多級及压力多級式汽輪机	II-60
4-6 冲击反击合併式汽輪机	II-62
4-7 按热力特点汽輪机的分类	II-63
4-8 汽輪机的損失、效率与汽耗率	II-62
4-9 汽輪机的調节	II-66
4-10 汽輪机主要型式举例	II-68
4-11 凝汽器的作用和構造	II-72
4-12 凝汽式汽輪机裝置系統	II-73

第五章 燃气轮机	II-75~II-87
5-1 引言	II-75
5-2 燃气轮机的构造概要和工作原理	II-75
5-3 燃气轮机的理想热力循环	II-78
5-4 燃气轮机构造举例	II-80
5-5 燃气轮机的应用概况	II-82
5-6 自由活塞燃气发生器—燃气轮机联合装置	II-87
第六章 热力厂	II-88~II-98
6-1 热力厂的型式	II-88
6-2 汽轮机发电厂的生产系统	II-89
6-3 蒸汽动力厂的热力过程及提高其热效率的途径	II-90
6-4 热化(热电联合供应)	II-94
6-5 燃气轮机发电站	II-95
6-6 原子能在动力装置上的应用	II-96
6-7 热力厂的发展趋势	II-97
附录 表1. 饱和蒸汽表(依温度排列)	
表2. 饱和蒸汽表(依压力排列)	
表3. 水和过热蒸汽表	
水蒸汽焓熵图	

緒 言

凡以各种不同形式存在于自然資源中的燃料的化学能、水的落能、太阳能、原子能等等統称为能。

人类为了满足生活上的要求，不断地努力于自然能源的寻求与利用，经过实践、認識、再实践的反复过程，开始建立这方面的科学理論，进而控制自然，改造自然，使之为人類的物質文化生活等各方面服务。

早期的机械运转是依靠人力或兽力的，后来也运用了风力和水力，但由于条件限制，以及科学知識的不足，沒有很快的改善与提高生活，只是到了蒸汽机的出现，也就是开始利用燃料的化学能之后，人类社会的生产力才迅速的向前发展，这說明了能的利用和动力工程的发展具有重大的意义。

动力工程是从事取得与分配工业用能（电能、机械能、热能）的工业部門，而热力工程是动力工程最重要的組成部分。研究热力工程的科学称为热工学。工程热力学和傳热学是热力工程最直接的理論基础。

在热能理論方面，首先正确建立科学概念的是俄国天才学者罗蒙洛索夫，他在18世紀中叶。駁斥了“热素說”，奠定了现代的“物質分子运动学說”的基础，並确定了热能和机械能間的互相关系为能量守恒和轉換定律的表现之一。紧接着罗蒙洛索夫之后，俄国发明家波尔松諾夫在1764~1766年創造成功了世界上第一台蒸汽机，也就是世界上第一台热机，这比英人瓦特的蒸汽机大約早了廿年。

蒸汽机的应用促进了工业的发展，迫切要求解决热能最有利的变成机械能的問題。1824年，法国工程师卡諾研究了这問題，建立了卡諾循环，对提高热机的效率，提供了一个正确的途徑，十九世紀和廿世紀又发展了內燃机、汽輪机、燃气輪机和高参数的鍋爐。

在罗蒙洛索夫和波尔松諾夫之后，俄国学者对这方面曾作出了巨大的貢獻，例如：奥卡託夫創作了古典热力学教程，基尔皮切夫建立了傳热学方面有关的相似理論的基础，門德列也夫对燃料的研究。苏联科学院院士 A. A. 拉德齐克在汽輪机和冷凝器方面的著作，是对热工学的宝贵貢獻。现在全苏热工研究所（ВТИ），莫斯科动力学院（МЭИ）以及苏联科学院的克尔日讓諾夫斯基动力研究所等正进行着气体和蒸汽热力性質的研究。苏联科学家 М. Л. 武卡罗維契的水蒸汽图表是一种重要著作。

我国人民在热工方面的貢獻，根据中外書籍的記載，也不在少，例如：在1150年中国就有了走馬灯，它的工作原理和燃气輪机相似，这要比歐洲的燃气輪机雛型要早 400 年，因之走馬灯可以說是燃气輪机的始祖。十三世紀我国已有利用火葯的各种爆竹和烟火，这是火箭的雛型，后来並广泛地用于軍事上，这种知識不久又傳到歐洲去，外国書籍上曾記載有中国人王和（譯音）曾首次企图用火箭作噴射飞行。1678—1679 年南怀仁曾首次在北京試驗由一种蒸汽輪推动的汽車和汽船模型，南怀仁出生在比利时，但久住中国，而这种試驗又是在中国进行的，因之外国書籍上都記載汽車汽船发明于中国。其他关于热工理論的建立，零星地散見于書籍的尚不胜枚举。

一个国家工业发展的水平常常可以用他的动力工程的发展的程度来衡量。苏苏仍在大力

地发展着火力发电站和热力网来充裕供应工业企业以热力。近年来由于掌握了原子能技术,也正大量地建设着原子能发电站。在顺利地发射三颗人造地球卫星之后,接着又成功地发射了人造行星。这不但清楚地说明了苏联热力工程的迅速发展与达到世界最先进的技术水平,同时也说明了苏联整个工业的巨大成就。

我们伟大的祖国,在中国共产党正确领导下的短短十周年中,在热力工程发展方面已经取得了辉煌的成就。在汽轮机,燃气轮机,锅炉,汽车,飞机等制造业方面,不但是从无到有,而且很快地就要达到世界先进技术水平。在1959年国民经济更大更全面的跃进计划中,动力机械的总产量比1858年增加百分之五十五以上,同时,1858年我国只能生产发电设备八十万千瓦,而1959年将生产二百八十万到三百万瓩。1959年进行建设的限额以上的项目中有一百八十四个电站。这说明了在中央和毛泽东主席制定鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义总路线的照耀下,我们正以空前的速度发展我国的工业,特别是动力工业。因而我们相信,在社会主义大建设的实践中,热力工程新技术必定会迅速地得到发展,而其理论也将更加丰富起来。

冶金工厂是消耗能量最大的工业部门之一,消耗庞大数量的燃料、压缩空气、蒸汽、水和电能等。同时,它的整个生产过程又产生出大量的煤气、炽热的废气。这些大量的再生能源的合理利用,对于提高冶金生产的经济性有着重大的意义,这要靠具备有一定的热力工程技术知识的干部,才能完成这项任务。譬如,研究如何在冶金工厂中应用燃气轮机装置,对高炉鼓风的加压加热,就是一个很有经济意义的问题。因此,热力工程的知识也是冶金工作者业务中所必不可少的基本知识。

第一編 工程热力学基本知識

第一章 基本概念

1-1 工程热力学的研究对象与基本任务

工程热力学是热力学的一个部分。热力学和其他自然科学一样，研究我們周围世界的某些客观性质和规律；热力学是研究热能与其他各种能（如机械能、电能、化学能等）之间相互转变的科学。工程热力学的研究对象则仅限于热能与机械能（或简称功）之间相互转变。

因此，工程热力学的基本任务是（一）研究热能和机械能之间相互转变的关系和规律，（二）研究如何有效地利用能量和（三）研究做工的媒介物质（工质）的性质。同时，工程热力学便成为要了解和研究热机工作情况和工作条件所必修的理论基础。

1-2 热及其本质

以前，科学界始终把热看作是一种无重量的、看不见的、不生不灭的东西，称为“热素”，当它由热物体移向冷物体时，就构成了传热现象。尽管这种看法不能解释摩擦生热的自然现象，它差不多一直维持到十九世纪的中叶才被打破。但在俄国，M. E. 罗蒙诺索夫早在1744-1760年间就首先指出了这种看法的谬误，断定热并不是什么看不见的东西，而是物体内部分子和原子混乱运动的结果，也称热运动；这种运动的剧烈程度决定了物体的冷热程度，对外表现为温度的高低。当然热物体和冷物体相接触，或物体一端加热时，运动比较剧烈的分子，由于分子间的不断碰撞，就影响了与它相接或与之相邻的分子，因而表现为传热的现象。这就是现代所公认的“物体的分子运动学说”，它肯定了热是运动的一种形式，也就是能的一种形式。И. И. 波尔松诺夫掌握了这种理论以后，就把它应用到实际中去，制造出世界上第一架实用的万能蒸汽机来。尽人皆知，摩擦可以使机械能转变为热，而蒸汽机的成功说明热也可以转变为机械能，因此说明了“热也是能”的辩证性。

1-3 能的度量单位

在工程上，热能的度量单位是仟卡；1仟卡相当于在标准大气压力（760毫米水银柱）下使1公斤纯水的温度由19.5°C升高到20.5°C所需吸收的热量。机械能的度量采用公斤一米，电能采用仟瓦小时。

这种人为的区别常易使人误解。其实，根据能量守恒与转变定律，若一种形式的能消失而转变成另一种能，数量是不变的。这就是为什么各种能可以用同样的单位来量度的理由，也就是说，机械能和热能可以用仟瓦小时来量度，而电性也可以用大卡或公斤一米来量度。

在绝对制的量度中各种能的量度采用仟焦耳。

功的量度与能的量度相同。

表1-1示出各种不同的能的量度单位之间的相互关系，其精确度足可供实用上计算之用。在表中所示的关系中，我们特别注意仟卡与公斤一米间的相互关系：

$$1\text{仟卡} = 427\text{公斤一米},$$

这个数量称为热的功当量，用字母J表示，即

$$J = 427\text{公斤一米/仟卡}.$$

它的倒数： $A = \frac{1}{J} = \frac{1}{427}\text{仟卡/公斤一米}$ ，这个数量称为功的热当量。

表1-1 能的量度單位及其关系

	仟 焦 耳	仟 卡	公斤-米	仟 瓦 小 时	馬 力 小 时
仟 焦 耳	1	0.239	102	0.000277	0.000378
仟 卡	4.185	1	427	0.00116	0.00158
公斤-米	0.00981	0.00234	1	0.00000272	0.0000037
仟 瓦 小 时	3.600	860	367200	1	1.36
馬 力 小 时	2.648	632.2	270000	0.735	1

另外两个重要数量， $E=860$ 仟卡/仟瓦小时和 $E=632.2$ 仟卡/馬力小时；分别称为仟瓦小时的热当量和馬力小时的热当量，这是由每馬力等于75公斤-米/秒和每仟瓦等于102公斤米/秒推算出来的。

在工程热力学中，各种不同形式的能是用它自己的度量單位的，因此常需加入换算的乘数。

1-4 热机與工質

能够把热能轉化为机械能而代人做工的机器，例如蒸汽机、汽轮机、內燃机等等，都称为热机。在热机里，热能的主要来源是燃料，由热能轉变为机械能是利用媒介物質来实现的，也就是說，由热能轉变为机械能这一过程的实现需借助于一种能受热而做功的媒介物質，例如蒸汽、燃燒产物，这种媒介物質称为工質。

就物理的属性來說，气态物質是最合适的工質，因为在各种物态中，当受热时，气体的膨胀性是最大的，人們正利用气体膨胀来得到功。

1-5 工質的基本状态参数

有一些数量可以用来表示工質的每一种存在状态的特征，这些数量称为工質的状态参数；其中我們要首先研究的是三个基本的参数，即压力、比容和温度。

如上节所述，工質都是气体。我們知道，組成气体的分子是处于所謂混乱的热运动中的。因为分子很小而分子的数目很多，所以工質的状态不能以单个分子的运动来表示，而要以量出的所有分子作用結果的平均值来表示。

压力 組成气体的大量分子对于容器壁撞击的結果就是气体作用在容器壁上的总压力。压力可直接用在單位面积上所受的力来表示，也可用液体柱的高度来表示。

在工程上，压力 p 的單位为公斤/米²，因为在該量度制中采用公斤为力的單位，而采用米²为面积的單位。但是公斤/米²是一个很小的單位，故在热工中量度压力常采用比这大10000倍的單位（公斤/厘米²）。这單位称为工程大气压（或简称大气压）；它等于1厘米²上1公斤的压力。

由上述的关系我們可以求得1大气压等于735.6毫米水銀柱（当水銀的温度为0°C时，水銀重度=13600公斤/米³）或等于10米水柱（水的重度=1000公斤/米³），即

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤/米}^2 = 735.6 \text{ 毫米水銀柱} \\ = 10000 \text{ 毫米水柱。}$$

在物理学上通常采用稍大一些的值作为量度压力的单位，以760毫米水银柱为标准。这种压力近似于海面上大气的平均压力，这压力称为物理大气压。在工程上不用它。可是，压力等于1物理大气压是合于所谓气体标准状态的规定的，因此，

$$1 \text{ 物理大气压} = 1.0333 \text{ 大气压} = 1.0333 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$= 10333 \text{ 公斤/米}^2 = 760 \text{ 毫米水银柱} = 10333 \text{ 毫米水柱。}$$

比容 气体容积是气体分子所在运动的范围。比容是单位重量气体的容积。比容与重度有着相互的关系，重度就是单位容积气体的重量。

相当于力及长度的量度单位，在热工中比容的量度单位是米³/公斤，而重度则用公斤/米³；所以比容表示每1公斤气体所佔容积的米³数，而重度表示每1米³气体重量的公斤数。

比容与重度间的关系可用以下公式求得。假如用 γ 表示重度， v 表示比容， V 表示气体的容积， G 表示气体的重量，则，

$$G = V\gamma; \quad (1-1)$$

$$V = Gv。$$

把上两式互乘得

$$\gamma v = 1, \quad (1-2)$$

即数量 v 与 γ 互为倒数。

温度 在气体中，分子作直线的和均匀的运动，每一个分子具有直线运动的动能，动能的大小与分子的速度和质量有关。气体在同一温度下，它的分子有不同的速度，而该气体所有分子的平均速度则与其温度有关，因此，分子的直线运动的平均动能是与温度有关。或者可以这样说：温度即表示气体受热的程度，它又是气体分子直线运动所具有的平均动能的一种量度。

这种气体温度与分子运动的关系是和日常所见的热现象，首先是热由一物体传至另一物体的现象完全符合。我们假定分子直线运动平均动能不同的两物体相接触，则当在表面上的分子相碰撞时，能量应由平均动能大的物体传至平均动能小的物体上；当平均动能的值相等时，能量的传递即行停止。这种能量的传递与我们日常所见到的当两物体相接触时高温物体的热传到低温物体上的现象是完全相符合的。当两物体的温度相等时，热的传递便行停止。

上面所提出的关于分子动能与温度的关系即是气体动力论的基本原理，它可用数学式来表示如下：

$$\frac{m\omega^2}{2} = \beta T \quad (1-3)$$

式中， m 是一个分子的质量；

ω 称为开方平均速度；

$\frac{m\omega^2}{2}$ 是一个分子作直线运动的平均动能；

β 是比例常数。

开方平均速度的求法如下：按气体动力论，每一个分子都有它自己的速度 $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$ 。为了计算方便起见，关于每一个分子的速度常用开方平均值来表示，如下式所示：

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}{n}}$$

式中, n 为分子数。

当测量温度时, 一般取冰的融解温度作为起点, 定为 0°C (国际百度温度计的零度)。当大气压力为 760 毫米水银柱时, 水的沸腾温度在该温度计上定为 100°C 。由此二定点得出百度温度计上的度数, 这度数用字母 C 来表示。

有时把理论上绝对零度的状态定为温度的起点。在此状态下, 分子是没有热运动的, 是物质实际上所达不到的状态。这种极限是罗蒙洛索夫根据他所研究出来的对于热的本质的分子运动概念而发现的。这种理论从物理学我们知道, 这状态是相当于 -273°C 。

在热力学上, 一般是以 t 代表距冰的融解点的温度, 而以 T 代表距绝对零点的温度。由上边的定义得出下列的关系:

$$T = (273 + t)^{\circ}\text{K} \quad (1-4)$$

为了区别绝对温度与百度温度计所测得的温度, 一般是用 凯尔文温度 ($^{\circ}\text{K}$) 来表示前者。但在这二种温度计内, 度的大小是相同的; 因而假使 t_1 和 T_1 以及相当的 t_2 和 T_2 的热状态都是相同的, 则它们的温度差应完全相同, 即

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1$$

1-6 平衡状态

假如我们把两种彼此不起化学作用而不同温度的物体放在一起。在它们的相互不接触面上, 这两种物体的不同分子必生互撞而有能的交换, 正象同一物体内部的个别分子彼此互撞一样。这种能的交换 (气体更明显) 只有等到两种物体内部分子的直线运动动能彼此一致时才停止, 这称为热力学平衡。

又假如我们把两种不同压力的气体放在同一密闭的容器中, 其结果也相类似, 即气体中各部分的压力达到一致, 这称为机械平衡。

气体的压力、比容与温度是互相影响着的而不是各自孤立的。只要其中有二种在各部分达到一致, 其他一种也必定可以达到一致。所以当温度和压力达到一致时比容也达到一致。

这种压力, 比容与温度在气体中各部分各自已经达到一致即热力和机械都平衡的状态, 称平衡状态。

由此可见, 整个气体如处于不平衡状态下, 其本身即具有一种产生变化的本能, 而趋向于平衡, 在达到平衡之后, 如果受到外界的影响, 例如由外部加热或向外部放热, 则将从一种平衡状态变更至另一种平衡状态, 也就是说: 平衡状态是随外界的影响而变更的。

对于整个气体, 只有在平衡状态下才能正确地说明它的压力、比容、温度等的数值; 否则因为各部分都不一致, 对于任何物性实在无法予以说明。热力学在基本上是一种整体分析法, 并不深入到物体内部中去, 所以平衡状态的概念在研究热力学上具有相当的重要性。

这里也应附带指出: 处理或研究热力学的观点原有两种, 即统观和微观。统观观点是从实验测出的整体出发, 求出其间的数学关系, 推论出一些定则, 供普通应用。上面所说的整体分析法即是统观观点的研究方法。微观观点是从物质分子构造的假设出发, 我们需先假设一些简化的条件, 把推算结果与实验结果比较, 再修改条件作进一步的推算与比较。其实, 我们直接观察到的统观性质就是极大数目的微观性质在相当长的时间内的统计平均值。所以, 这两种观点实际上是殊途同归、互相充实的, 都正确地反映了物质的客观性质。

由于热力学研究热能的转变时, 利用工质的状态变化, 所以说基本上是统观的, 但有时 (如研究热的本质——分子运动时) 也采用微观的观点, 以便互相充实。

第二章 理想氣體諸定律

2.1 實際氣體和理想氣體

氣體性質的研究常用兩種方法結合着來進行的。一種方法是實驗，由觀察直接得出氣體的性質。另一種方法是理論研究，根據有關物體構造的数据來建立氣體運動的各種定律。

在對氣體作理論研究時，首先規定出一種假想的氣體。所謂假想就是當作構成這種氣體的各分子之間沒有內聚力而分子本身可視為沒有容積的質點。這種假想的氣體稱為理想氣體。但在自然界中存在的每一種氣體，根據物體構造的概念，是由微小的分子組成的，而各分子之間有內聚力在作用着。儘管如此，研究上述假想的氣體是具有很大的實際意義的，因為就我們常見的實際氣體狀態來說，其分子間的內聚力與分子本身的容積都是很小的。由於這樣，我們就可以把理想氣體這一概念加以推廣：所謂理想氣體也可以理解為在自然界中實際存在的而其分子間的內聚力和分子本身的容積可以不計的任何氣體。

經驗告訴我們，氣體距液體狀態愈遠，愈接近於理想氣體；也就是說氣體的壓力愈低，溫度愈高，愈接近理想氣體。

因此，在計算熱工中所遇到的一切氣體都可以看作是理想氣體，只有以兩種物態存在的水蒸汽為例外。

在蒸汽鍋爐的爐膛、空氣預熱器和火爐之內或內燃機的气缸中，燃料燃燒所產生的混合氣體都含有小量的水蒸汽。這種水蒸汽的壓力很小而溫度很高，可以看作是理想氣體。同理常常把大氣中所含有的水蒸汽也當作理想氣體。

當水蒸汽作為蒸汽原動機的工質或熱交換器的熱媒時，它是處於一種非常接近液體的狀態，很容易變成液體。在這種情況下，分子間的內聚力與分子間的本身的容積已不能再忽畧，所以不能應用理想氣體的諸定律或關係式。具有這種狀態的水蒸汽稱為實際氣體，我們將在第五章內另作研究。

2-2 理想氣體定律

如前所述，實用上許多場合是把氣體（工質）當作理想氣體，所以在工程熱力學中可以廣泛地應用在物理學上已熟知的理想氣體定律來解決有關問題。這些定律是用實驗方法得到的，但也可以根據分子運動學說，即物理學上所研究的氣體動力論來建立。

按分子運動學說，處於混亂運動中的氣體分子具有不同的速度和方向。由於龐大數量分子的混亂運動，同時在這運動中分子向各方面運動的情況均等，產生兩種結果：（一）在容器內，氣體分子的分佈是均勻的；（二）在容器內的氣體對器壁所作用的壓力是均等的。

根據這些概念和應用物理學上運動分子學定律可以導出氣體動力論的基本方程式：

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

式中， p 為氣體對容器壁作用的絕對壓力；

n 為單位容積內的分子數，即分子濃度；

$\frac{m\omega^2}{2}$ 表示一個分子直線運動的平均動能，它的意義已在方程式（1-2）中討論過。

因此，由方程式(2-1)我們得知，气体对容器壁的压力在数值上等于单位容积内分子全部平均移动动能的三分之二。

波义耳—馬略特和蓋呂薩克聯合定律 假使单位重量气体的分子数是 N' 个，它的容积为 v ，则单位容积内的分子数为：

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

把上式代入方程式(2-1)得：

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

用方程式(1-3)的关系，又得

$$pv = \frac{2}{3} N' \beta T_0$$

把这个方程式用到气体的两个状态 1 和 2 上去，各得：

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

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

把上二式互除並移項即得到下列一种关系，称为波义耳—馬略特和蓋呂薩克的联合定律：

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (2-2)$$

显然，这个方程式里不用比容 v 而用气体的总容积来代替也可以，因为这只要在等号的兩側各乘以气体的重量 G 。

波义耳—馬略特定律 如果在同一温度 ($T_1 = T_2$) 下，气体由状态 1 变到状态 2，则关系式(2-2)成为：

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (2-3)$$

因为 1 与 2 两个状态是任意取的，所以方程式(2-3)又可写为：

$$pv = \text{常数}$$

也可以說，在定温下，气体的压力与它比容的乘积是一个常数。这个关系是波义耳(1661年)和馬略特(1678年)根据实验确立的，称为波义耳—馬略特定律。

蓋呂薩克定律 如果气体由状态 1 变为状态 2 是在定压 ($p_1 = p_2$) 下进行的，或是在定容 ($v_1 = v_2$) 下进行的，则方程式(2-2)便成为：

当 $p = \text{常数}$ 时，

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2-4)$$

即在定压下，比容与绝对温度成正比变化；

当 $v = \text{常数}$ 时，

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2-5)$$

即在定容下，压力与绝对温度成正比变化。

式(2-4)和(2-5)所表示的两种关系称为盖吕萨克(1802年)定律。

2-3 理想气体状态方程式

方程式(2-2)里所说的1、2两种状态完全是任意的，因此，理想气体在任何状态下都可以写下这样一个关系：

$$\frac{pv}{T} = \text{常数}。$$

显然，这个常数与气体的状态是无关的，仅决定于气体的特性；这个数称为气体常数，记作R，这样，

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

或

$$pv = RT。 \quad (2-6)$$

这式称为理想气体状态方程式，又称为克拉贝龙方程式。

把气体重量乘方程式两侧，得

$$pvG = GRT，$$

但

$$Gv = V，$$

于是

$$pV = GRT。 \quad (2-7)$$

这是在给定气体重量时理想气体状态方程式的形式。

方程式(2-6)有时又称为理想气体的特性方程式。因为这个方程式使我们得以根据两个任意给定的参数去求第三个(未知)参数。对于实际气体，这样方程式的形式要复杂得多，因为我们必须考虑到它的内聚力和分子本身的体积；但无论在那种场合下，参数p, v及T之间应有关系：

$$F(p, v, T) = 0。 \quad (2-8)$$

在物理学课程里，引到许多关于气体的实验数据，这些气体在物理属性上和理想气体很相接近。实验证明，上面所得到的关系与事实是很接近的，由这一点可以判定分子运动学说的可靠性，这个学说就是上列关系的基本结论。

2-4 通用气体常数

从理想气体状态方程式(2-6)，可知

$$\frac{pv}{T} = R，$$

上式关系对任何理想气体的任意状态都是适用的。唯对不同的理想气体，式中的气体常数R的数值是不同的。

把上式的左右乘以理想气体的分子量 μ ，则等式仍然成立：

$$\frac{p\mu v}{T} = \mu R。 \quad (2-9)$$

我们知道：“ μv ”代表着 μ 公斤的气体的体积，即一摩尔(公斤分子量)气体的体积，既然这个公式适用于任何理想气体的任何状态，则我们取标准状态来考虑，此时

$$p = 10333 \text{ 公斤/米}^2； \quad T = 273^\circ\text{K}，$$

同时,在标准状态下,各种理想气体的摩尔容积“ μv ”都相等,且等于22.4米³/摩尔,这就说明了任何理想气体的“ μR ”之值都相等,且等于:

$$\mu R = \frac{p \mu v}{T} = \frac{10333 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤-米/摩尔-度。}$$

μR 这个数值称为通用气体常数,由此可知理想气体状态方程式可写为下列形式:

$$p \mu v = 848 T \quad \text{或} \quad p v = \frac{848}{\mu} T, \quad (2-10)$$

而 $R = \frac{848}{\mu}$ 。只要知道理想气体的分子量 μ , 就可以根据它计算出气体常数之值, 这就方便得多。

2-5 理想混合气体

相互不起化学作用的数种理想气体的混合气体仍为理想气体, 並服从于上述有关理想气体的一切规律。在混合气体中每一种气体中的存在情形和该气体在同温度同容积独立存在时的情形是一样的。在这种情况下, 组成混合气体的每一种气体所作用在容器壁上的压力称为分压力, 而混合气体的压力等于各分压力之和。这就是所谓道尔顿定律。假令 p_k 为 n 种不同气体所组成的混合气体中的某一种气体的分压力, 则这混合气体的压力为

$$p = \sum_{k=1}^n p_k, \quad (2-11)$$

式中, 符号 $\sum$ 表示以 1, 2, ..., n 代替 k 时所有 p_k 值之和。

在热工中所遇到的混合气体都是燃料燃烧的产物, 它的组成的成分各有不同, 视燃料的成分及燃烧进行时的情况而定, 特别是与供给的空气量有关。

混合气体的其他性质可如下述逐一推求:

对于每种单独气体来说, 分子量是一个抽象的数字, 它表征着实际存在的分子的质量。由于混合气体是不同种类的集合体, 它的分子量的确定就比较困难。假使我们把混合气体看作是事实上平均的某种同类分子的集合体, 并且这种分子在数量及总重量方面都与实际混合气体相当, 则与混合气体有关的计算可以大大地简化。在此情形下, 表示混合气体性质的一些数值就可以和对同类气体一样来求。所以, 混合气体分子的质量常用平均分子量来表征。

我们知道同类气体的摩尔数是 $k = \frac{G}{\mu}$, 而混合气体的摩尔数等于它的各组成气体摩尔数之和, 如以 k_{cm} 来表示, 则

$$k_{cm} = k_1 + k_2 + \dots + k_n = \sum_{k=1}^n k_k. \quad (2-12)$$

如以 G_{cm} 表示混合气体的重量, 和以 μ_{cm} 表示混合气体的平均分子量 (或称折合分子量), 则

$$\mu_{cm} = \frac{G_{cm}}{k_{cm}} = \frac{G_{cm}}{\sum_{k=1}^n k_k}. \quad (2-13)$$

按式 (2-13) 算出 μ_{cm} 后, 象对一种单独气体一样, 求出在标准状态下的重度 γ_{cm} , 比容 v_{cm} 和气体常数 R_{cm} , 即

$$\gamma_{CM} = \frac{\gamma_{CM}}{22.4}, \quad (3-14)$$

$$V_{CM} = \frac{22.4}{\mu_{CM}}, \quad (2-15)$$

$$R_{CM} = \frac{848}{\mu_{CM}}, \quad (2-16)$$

而

$$G_{CM} = \sum_1^n G_k = \sum_1^n k_k \mu_k. \quad (2-17)$$

在此还必须知道混合气体的总压力、分压力、容积以及相当于在总压力作用下组成混合气体的每一种气体的容积 v_k （分容积），这可根据波义耳—马略特定律来算，即

$$pV_k = p_k V \quad \text{或} \quad V_k = \frac{p_k}{p} V,$$

$$\text{因之} \quad V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_1^n V_k = \frac{V}{p} (p_1 + p_2 + \dots + p_n) = V. \quad (2-18)$$

2-6 气体的比热

使气体温度升高 1°C 所需加入的热量称为热容量。使1公斤气体温度升高 1°C 所需加入的热量称为比热容量，在工程上也简称比热，用符号 c 来代表，其单位为仟卡/公斤一度。

实验与理论证明：理想气体的比热与压力的大小无关，但是在不同的温度范围内其值也不同。在一定温度下的气体比热称为真实比热。假如在某一温度之下给予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：

$$c = \frac{dq}{dt}, \quad (2-19)$$

由此

$$dq = c dt.$$

在温度由 t_1 变到 t_2 的范围内所加入气体的热量可用积分来表示：

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt, \quad (2-20)$$

也就是在已知比热与温度的关系时可通过比热算出热量。

在实际应用比热时，常需考虑比热随温度而变的关系而求出其在某一温度范围内比热的平均数，称为平均比热。这一比热普通用 c_m 来表示，如温度范围很明显可简单地用 c_m 来表示。因此从式(2-20)可得：

$$q = c_m(t_2 - t_1) = c_m(t_2 - t_1). \quad (2-21)$$

热工手册中通常给出的公式都不是求真实比热用的，而是为求由 0°C 到 t 的平均比热用的。

上面所说的比热是对1公斤气体而言的，故也称重量比热。如以1立方米容积的气体为单位，则称为容积比热，用 c' 来表示，单位为仟卡/米³一度。如以1摩尔的气体为单位，

即称为摩尔比热, 用 μc 来表示, 单位为仟卡/摩尔一度。

由式 (2-19) 可以看出, 比热 c 是视所加入的热量而定的, 而在不同的过程中同样气体温度升高 1°C 所需加入的热量是不同的, 因此, 比热的数值也将视气体变化所经过的过程而定。因为定容过程和定压过程在热工上有重要的意义, 所以比热有定容比热和定压比热两种, 分别用 c_v 和 c_p 来表示。

在不需要精确的计算中, 一般可不考虑比热随温度而变的关系。在这种情况下, 可设比热为不变的, 即用所谓定比热。

按比热的分子运动学说, 原子数目相同的气体的定值摩尔比热是相同的, 其数值很容易记忆, 现在把它们列在表 2-1 中。

表2-1 摩尔比热

原 子 数	μc , 仟卡/摩尔一度	μc_p , 仟卡/摩尔一度
单 原 子 气 体	3	5
双 原 子 气 体	5	7
三原子和多原子气体	7	9

重量比热 c , 容积比热 c' 和摩尔比热 μc 之间有下列关系:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} \text{ 和 } c' = \frac{\mu c}{\mu v} \quad (2-22)$$

$$\text{在标准情况下,} \quad c' = \frac{\mu c}{22.4} \quad (2-23)$$

使 1 公斤混合气体温度升高 1°C 所需要的热量等于组成 1 公斤混合气体的各种气体温度升高 1°C 所需要的热量之和。因此, 混合气体的重量比热可用下式决定:

$$c_{cm} = \frac{\sum_1^n c_k G_k}{G_{cm}} \quad (2-24)$$

对于混合气体的容积比热则为:

$$c'_{cm} = \frac{\sum_1^n c'_k v_k}{v_{cm}} \quad (2-25)$$