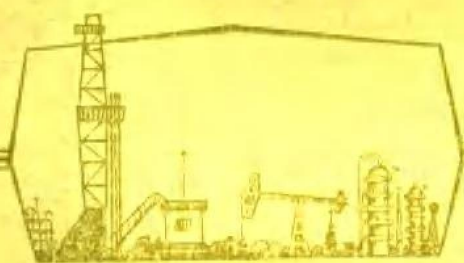


高等学校教学用书

热工与热机

张世康等编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合了石油工业使用的特点,从基本原理出发,编著的内容有工程热力学、传热学、内燃机构造、内燃机原理、燃气轮机装置等五部分。以国际单位制(SI)为主,但为适应我国目前情况,同时也使用工程单位,编有换算表,以便逐步过渡。

热 工 与 热 机

张 世 康 等 编

石油工业部教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

北京市通县印刷厂印刷

开本 $787 \times 1092^{1/4}$ 印张 $19^{3/4}$ 插页 1 字数491千字 印数 1—7,500

1981年11月北京第1版 1981年11月北京第1次印刷

书号15037·2255 定价2.35元

编 者 的 话

本书是根据1977年10月石油工业部教材会议的决议,由华东、大庆、西南三所石油学院的热工教研室合编的钻井、矿机专业使用的试用教材。

本书以国际单位制(SI)为主,但考虑目前我国仍在使用工程单位,对广泛使用的工程单位如大卡(kcal)、公斤·米(kg·m)、马力(hp)等也同时使用,并编入换算表,以便单位制的过渡。

本书由下列同志编写:

工程热力学	华东石油学院: 沈惠芳, 西南石油学院: 周孝生、黄建民;
传热学	大庆石油学院: 吴君理、袁荣坤;
内燃机构造	华东石油学院: 吉宗瑀;
内燃机原理	西南石油学院: 张世康;
燃气轮机装置	华东石油学院: 朱乃昭、吉宗瑀、史魁玺。

本书初稿经华东石油学院杨延昕同志、任瑛同志审阅校正,在此表示感谢;本书插图承石油部教材编译室多方协助,在此表示感谢。

由于编写水平和时间的限制,本教材存在问题在所难免,请兄弟院校广大师生随时提出批评指正。

绪 论

现代化的工农业生产中，需要强大的原动力，热力发动机是主要的动力来源。例如石油钻井设备用柴油机作为原动力，柴油机是一种热力发动机。工农业生产中，除了利用热能获得原动力外，许多生产过程中还存在直接用热的问题，例如原油加热等。热工学是用热的知识，包括工程热力学、传热学和热机三部分。

工程热力学的讨论对象是热和功的互相转变，是物理学中热力学第一定律和第二定律在工程上的应用，是热机工作原理的理论基础。

传热学是一门比较年轻的科学，它的讨论对象是热的传递和交换。只要关系到用热，无不存在热的传递和交换问题。

生产技术高度发展的今天，热和功的转变和热的传递和交换问题，越来越显出它的重要地位。工程热力学和传热学是工程技术人员不可缺少的基本理论知识。

热力发动机简称热机，石油工业和其它生产领域中大量使用的内燃机，热力发电厂中使用的蒸汽轮机和燃气轮机等等都是热机。在我们实现四个现代化的新长征途中，热能原动力的需要量将迅速增长，合理和经济地使用原动力，节约能源消耗，是每个工程技术人员的责任，这要求我们牢固地掌握热机的基本知识。

科学技术的发展是没有止境的，热工学仅仅是用热知识的一个入门。为了实现四个现代化，把我国建设成为现代化的社会主义强国，党中央号召我们向科学进军，我们必须以高度的责任感进行学习，并在今后的实践中，不断深入提高。

目 录

绪 论

第一篇 工程热力学

第一章 理想气体	(3)
第一节 基本概念	(3)
第二节 基本状态参数	(4)
第三节 理想气体	(7)
第四节 理想混合气体	(10)
思考题和习题	(13)
第二章 热力学第一定律	(15)
第一节 热力学第一定律的解析式	(15)
第二节 膨胀功和机械功	(19)
第三节 比热和热量	(21)
第四节 内能、焓和熵	(24)
第五节 可逆过程与不可逆过程	(26)
思考题和习题	(27)
第三章 理想气体的热力过程	(29)
第一节 研究热力过程的目的和方法	(29)
第二节 基本热力过程	(29)
第三节 多变过程	(35)
思考题和习题	(37)
第四章 循环及热力学第二定律	(39)
第一节 热力循环及热效率	(39)
第二节 热力学第二定律	(40)
第三节 卡诺循环	(41)
第四节 制冷原理	(44)
第五节 熵和不可逆过程熵的变化	(45)
思考题和习题	(47)
第五章 内燃机循环	(48)
第一节 内燃机的示功图和理论循环	(48)
第二节 内燃机理论循环分析	(49)
思考题和习题	(51)
第六章 压气机的压气过程	(52)
第一节 单级压气机的工作过程和压气功	(52)
第二节 余隙容积对压气机工作的影响	(53)
第三节 多级压气机的压气过程	(54)
思考题和习题	(56)
第七章 水蒸汽	(58)
第一节 定压下水蒸汽的发生过程, 水蒸汽的 $p-v$ 图	(58)

第二节 水蒸汽状态参数的确定, 水蒸汽表	(59)
第三节 水蒸汽的 T-S 图	(62)
第四节 水蒸汽的焓熵图及其应用	(63)
第五节 蒸汽动力装置的基本循环	(64)
思考题和习题	(66)
第八章 气体和蒸汽的流动	(68)
第一节 连续性方程	(68)
第二节 通过喷管和扩压管时气体流动的一般特性	(69)
第三节 气流通过喷管时的流速与流量	(70)
第四节 气体及蒸汽的节流	(74)
思考题和习题	(75)
参考书目	(76)

第二篇 传热学基础

绪 论	(77)
第一章 导热	(78)
第一节 温度场和温度梯度	(78)
第二节 导热定律	(79)
第三节 平壁导热	(81)
第四节 圆筒壁导热	(84)
思考题和习题	(89)
第二章 对流换热	(91)
第一节 对流换热过程简介	(91)
第二节 影响对流换热的因素	(92)
第三节 相似原理与量纲分析	(94)
第四节 工程上常用的对流换热计算	(97)
思考题和习题	(104)
第三章 辐射换热	(105)
第一节 关于热辐射的基本概念	(105)
第二节 热辐射的基本定律	(107)
第三节 两物体之间的辐射换热计算	(110)
思考题和习题	(116)
第四章 传热和换热器	(117)
第一节 复杂换热	(117)
第二节 传热	(118)
第三节 换热器的基本概念	(125)
思考题和习题	(132)
参考书目	(133)

第三篇 热 机

第一章 内燃机构造	(134)
第一节 概述	(134)
思考题	(137)
第二节 机体、曲柄连杆机构	(137)
思考题	(156)
第三节 配气机构	(157)

思考题和习题	(165)
第四节 柴油机燃料供给系统	(165)
思考题和习题	(184)
第五节 发动机的空气供给系统	(184)
思考题和问题	(192)
第六节 汽油机的燃料供给系统和蓄电池点火装置	(192)
思考题和问题	(205)
第七节 内燃机的润滑系统	(205)
思考题和问题	(213)
第八节 内燃机的冷却系统	(214)
思考题和问题	(218)
第九节 内燃机的启动	(219)
思考题	(223)
第十节 内燃机使用中的故障与排除	(223)
思考题	(228)
第二章 内燃机工作原理	(229)
第一节 内燃机的工作循环和示功图	(229)
第二节 换气过程	(232)
第三节 压缩过程	(237)
第四节 燃烧过程	(238)
第五节 膨胀过程	(244)
思考题一	(245)
第六节 内燃机的指示功、有效功、功率和燃料消耗	(246)
第七节 内燃机的效率和热平衡	(250)
思考题二	(252)
第八节 发动机的特性	(252)
思考题三	(259)
第九节 柴油机增压	(259)
第十节 双重燃料发动机	(261)
思考题四	(262)
第三章 燃气轮机	(263)
概 述	(263)
第一节 燃气轮机的工作原理	(264)
第二节 燃气轮机的主要部件	(268)
第三节 提高燃气轮机经济性的措施	(278)
思考题和习题	(281)
附 录	(282)
参考书目	(287)
附表一 一些气体的分子量、气体常数和低压下比热	(288)
附表二 气体的平均定压摩尔比热表	(288)
附表三 气体的平均定容摩尔比热表	(289)
附表四 气体的平均定压质量比热表	(289)
附表五 气体的平均定容质量比热表	(290)
附表六 气体的平均定压容积比热表	(291)

附表七	气体的平均定容容积比热表	(291)
附表八	饱和水与饱和水蒸汽热力性质表 (按温度排列)	(292)
附表九	饱和水与饱和蒸汽热力性质表 (按压力排列)	(294)
附表十	未饱和水与过热水蒸汽热力性质表	(296)
附表十一	各种不同材料的密度、导热系数、比热和导温系数	(303)
附表十二	空气的物性参数	(304)
附表十三	几种常用液体的热物理性质	(305)
附表十四	烟气的物理参数 (在 $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 下)	(305)
附表十五	饱和水的物性参数	(306)
附表十六	水蒸汽在饱和线上的物性参数	(307)
附 图	水蒸汽的焓—熵图	

第一篇 工程热力学

热力学(Thermodynamics)是分析研究具有热效应的各种变化过程中热能与其他各种能量(机械能、电能、化学能等)间的相互转换关系和规律的一门科学。它与其他科学一样,也是在科学实验和生产实践的基础上建立和发展起来的。

很早以前,人们只会利用简单的生产工具,依靠人力或畜力来进行生产取得生活资料。随着社会的发展和生产经验的不断积累,人类逐渐懂得利用自然界的能量(例如风的动能、水的位能等)并使之变为机械能以产生动力,供生产上和生活上的使用。

十八世纪初期,社会生产力发展到一定的水平,在英国出现了把热能转变为机械能的原始蒸汽机。1763~1784年间英国人瓦特(J. watt)对当时的原始蒸汽机作了巨大的改进,创制了具有和现代蒸汽机结构相类似的蒸汽机。

翌后,1824年法国人卡诺(Carnot)根据当时蒸汽机的实践经验,经过抽象,总结提出了热功转换时的重要客观规律,即卡诺定理与卡诺循环。后来,汤姆逊(Thomson)和克劳修斯(Clausius)等人在卡诺所作研究的基础上提出了热力学第二定律。这些规律指明:热能转变成机械能的根本条件是必须有温度不同的热源和冷源,热过程具有方向性。

1840~1851年间,迈耶(Mayer)、焦耳(Joule)等人提出能量守恒与转换定律在热力学上的表现,即热力学第一定律;通过热功当量的实验给热力学第一定律打下了基础。这个定律以后成为热力学及热工计算上最根本的依据。

热力学第一定律和第二定律的发现标志着热力学的建立。这两个定律以及一些其他基本概念构成了热力学的基础。

随着生产的不断发展,各种各样的热动力机不断地出现。十九世纪后半期,由于交通运输和电力工业发展的需要,先后制造出内燃机和汽轮机。二十世纪五十年代以来,由于高空高速飞行的要求,使得喷气发动机和火箭发动机的研究和使用得到进一步的发展。

总之,热动力机的发明与应用,推动了热能转变为机械能的理论方面的研究,促成了热力学的建立与发展。热力学的建立与理论研究上的成就反过来又促进了热动力机的不断改进。

历史上,热力学曾局限于只研究热能和机械能的转换关系。目前由于热能实际应用的需要及其他科学技术发展的相互促进,热力学得到很快地发展和充实,应用很广,几乎深入各种能量领域,每一领域的应用都构成一门独立的学科,如化学热力学、工程热力学等等。我们这里只研究工程热力学。

工程热力学(Engineering thermodynamics)专门研究热能和机械能相互转换的规律、条件和方法,把热力学原理应用于解决工程实际问题。它是进行热功转换的各类机器的理论基础,对合理运用这些机器,探索改善这些机器工作情况的途径,提高热能的有效利用等,都有着现实的指导意义。因此,工程热力学要研究:

1. 能量转换的关系和规律——热力学第一定律和热力学第二定律;
2. 能量转换的媒介物质——气体和蒸汽的性质;

3. 能量转换的具体方式——热力过程和热力循环。

需要指出，热现象是一种较复杂的物质运动形式，它是物质中大量分子的热运动的宏观表现。在工程热力学中对它的研究传统上采用热力学方法，即从宏观的能量观点出发，总结出几条基本定律，再加上几个基本实验结果，以分析研究物质在状态变化过程中有关热功关系等问题；它只研究物质的宏观现象，对物质的微观结构和运动形式不予考虑，或者不作深入讨论。为了便于理解和揭露物质的宏观现象（如温度、压力等）和热运动的本质，有时也用到以物质的原子分子结构概念为基础的分子物理学理论加以解释，与热力学方法相互补充彼此充实。

第一章 理想气体

第一节 基本概念

热力学中为了确切地说明问题和便于说明问题，经常用到一些术语和概念，我们必须清楚地懂得它们的含义。

一、热机与工质

在工程实用上，使热能转变为机械能时必须借助于一套具体的机械设备和某种工作物质。我们把这种具体的机械设备叫做**热力发动机**或简称为**热机**(Heat engine)，用以实现变热为功的工作物质称之为**工质**(Working Substance)。

现代工农业生产中广泛使用的内燃机、燃气轮机、汽轮机和蒸汽机等都是热机。热机中能够贮藏和传输能量，并导致能量转换即变热为功的流体即是工质。

所有热机，不论类型如何，所用工质有何不同，都是使工质先在一定条件下受热，提高温度和压力然后膨胀作功。工质的热力性质与作功能力的大小有着密切的关系。热机的工质应具备良好的受热膨胀作功的能力和流动性。气态物质满足这些要求，最适宜于作为工质。通常所用的工质有空气、燃气(燃烧产物)和蒸汽(如水蒸汽)等。

二、系统与外界

分析任何事物，均需选择一定的对象。在进行热力学研究时，与力学中取分离体一样，常把要分析研究的对象假设地从周围物体中分割出来。这种人为地分割出来作为热力学分析研究对象的那部分事物叫做**热力系统或简称系统**(System)。在系统以外与系统密切相关的物体或周围空间叫做**外界**。

热力学着重于研究系统的行为和系统与外界之间的能量交换。按系统与外界进行能量交换时有无质量交换，把系统分为开口系统和闭口系统。有质量交换的叫做**开口系统**(Open system)，无质量交换的叫做**闭口系统**(Closed system)。

系统的大小及类别，视研究分析问题的具体情况而定。例如，当要讨论空气和燃油进入内燃机起，到工作后又从排气管排出为止的整个过程，就把整台内燃机选作系统，是开口系统。倘若只研究气门关闭时工质受热膨胀作功的情况，就视工质为系统，是闭口系统。

三、状态与状态参数

在某给定瞬间系统的物理特性的综合表现称为**状态**(State)，用来描述系统物理特性、表征系统状态的物理量叫做**状态参数**(Properties)如温度和压力等。状态参数与状态有着一定的对应关系，状态一定则表明全部参数也都各有其确定的值，反之亦然。倘若全部或一部分状态参数发生变化，则表明物质所处的状态起了变化；物质的状态变化也必然由参数的变化标志出来。

热力学所说的状态，系指系统各处的温度、压力等参数都一致，没有外界影响时，各参数均不随时间而变的系统所处的状态。这也就是说系统各部分之间不会有能量的传递，整个系统处于热和力的平衡。这种状态叫做**平衡状态**(Equilibrium states)。显然，只有在平衡状态时系统性质才能用状态参数来描述和确定。

事实上，只要时间足够长，在不受外界影响下，系统总是从不平衡趋于平衡。例如，系统的温度和压力的任何不均匀都会逐渐趋于一致，而且时间不会太长，象在均匀的气体内部压力到达处处一致所需的时间约为 10^{-18} 秒，这就是假定系统经常能处于热力平衡状态的根据。当然，所讨论的平衡状态只是对宏观现象而言，在宏观的平衡状态下气体的分子和原子等微粒仍具有各种复杂的运动形式。

第二节 基本状态参数

热力学中常用温度、压力和比容(比体积)等一些物理量来描述和确定工质的状态。这三个参数是可以测量得到的，叫做基本状态参数。另外还有内能、焓和熵等导出参数，以后再介绍。

一、压 力

工程上所说的压力(Pressure)系指单位面积上所受到的法向作用力，物理学中它也叫做强，用符号P表示。

气态工质的压力是大量气体分子对容器壁面撞击的总结果。根据分子运动理论，在装有气体的容器中，气体的分子在不停息地、无规则地以相当高的速度运动着，在单位时间内撞击容器壁的分子数是非常多的，这使容器受到一个连续而均匀的平均力，这个力就是气体的压力。

1. 压力的单位

在国际单位制中压力的基本单位是 N/m^2 (牛顿/米²)，这个压力单位也叫做 Pascal (帕斯卡)缩写为Pa。压力数值比较大时，常使用它的倍乘单位 kN/m^2 (千牛顿/米²)和 MN/m^2 (兆牛顿/米²)， $1\text{ kN/m}^2 = 10^3\text{ N/m}^2$ ， $1\text{ MN/m}^2 = 10^6\text{ N/m}^2$ 。因为Pa这个压力单位太小，常用比它大 10^5 倍的值作为压力单位，记作bar(巴)。

压力有时也用atm(标准大气压)、mmHg(毫米汞柱)和 mmH_2O (毫米水柱)来计量。我们由物理学知道： 0°C 时纬度为 45° 的海平面上大气的平均压力为1atm，即1标准大气压(Standard atmospheric pressure)也称为1物理大气压(Physics atmospheric pressure)，相当于760mmHg。

在热工中过去还使用 kg_f/m^2 (公斤力/米²)作为压力的计量单位，实用上嫌这个单位太小，习惯使用 kg_f/cm^2 (公斤力/厘米²)为常用单位，后者称为工程大气压(Engineering atmospheric pressure)，简记作at。用工程大气压标量绝对压力和表压力时，分别简记为ata和atg。

各种压力单位之间的换算关系见表1-1。

2. 绝对压力、表压力、真空度

容器中的气体作用在器壁上的真实压力通常叫做绝对压力(absolute pressure)，用符号P表示。绝对压力的数值，除了大气压力可以用专门的气压计测定以外，一般均无法用仪表直接量测出来，如图1-1所示。

表1-1 压力单位换算表

帕 (p_a) N/m^2 (牛顿/米 ²)	工程大气压 kg/cm^2 (公斤/厘米 ²)	标准大气压 atm (760mmHg)	毫米汞柱 mmHg	毫米水柱 mmH ₂ O
1	1.0197×10^{-6}	0.9869×10^{-6}	0.7510×10^{-2}	0.10197
0.9807×10^5	1	0.9678	735.56	1.00003×10^4
1.0133×10^5	1.03323	1	760.00	1.0333×10^4
9.806	0.9997×10^{-4}	0.9673×10^{-4}	7.3554×10^{-2}	1
1.3332×10^2	1.3595×10^{-8}	1.3158×10^{-8}	1	13.5955

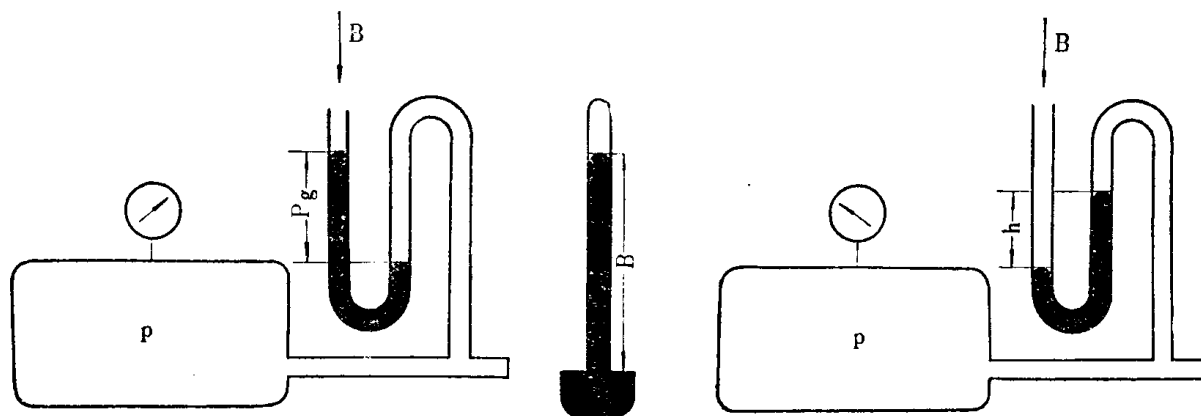


图 1-1 绝对压力、表压力、真空度和大气压力间的关系

p —绝对压力； h —真空度； p_g —表压力； B —大气压力

由图可以看出，由于各种测压仪表都处于大气之中，仪表测得的容器内气体的压力是绝对压力与大气压力之间的差值。我们把绝对压力高于大气压力时仪表测得的压力叫做表压力 (Gauge pressure)，用符号 p_g 表示；把低于大气压力时仪表测得的压力叫做真空度 (Vacuum)，用符号 h 表示。它们与绝对压力和大气压力 (Atmospheric pressure) B 之间的关系为：

$$p = p_g + B \quad (1-1)$$

$$p = B - h \quad (1-2)$$

由上列公式可以看出，即使是气体的绝对压力不变，因为大气压力会随当地海拔高度和气候条件而变，表压力和真空度也会随之而变。显然，只有气体的绝对压力才能真实反映气体的状态，作为状态参数。因此热力学中是以绝对压力作为计算基准，而表压力和真空度则是计算绝对压力时不可缺少的量。

例 1-1 从气压计上读得当时当地大气压是 755mmHg。将它换算成：(1) atm，(2) kg_f/m^2 ，(3) at，(4) kN/m^2 。

解：(1) $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$

$$B = \frac{755}{760} = 0.993 \text{ atm}$$

$$(2) 1 \text{ mmHg} = 13.6 \text{ kg}_f/m^2$$

$$B = 755 \times 13.6 = 10268 \text{ kg}_f/m^2$$

$$(3) 1 \text{ at} = 1 \text{ kg}_f/cm^2 = 10^4 \text{ kg}_f/m^2$$

$$B = \frac{10268}{10^4} = 1.027 \text{ at}$$

$$(4) \quad 1 \text{ at} = 0.981 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 98.1 \text{ kN/m}^2$$

$$B = 1.027 \times 98.1 = 100.8 \text{ kN/m}^2$$

例 1-2 某容器中气体压力用弹簧压力表量出为 1.75 MN/m^2 ，如果气压计上的读数（即大气压力）为 757 mmHg ，试求容器内气体压力；

解： $1 \text{ mmHg} = 1.3332 \times 10^2 \text{ N/m}^2$

$$757 \text{ mmHg} = 1.3332 \times 10^2 \times 757 = 101 \text{ kN/m}^2 = 0.101 \text{ MN/m}^2$$

$$P_s = 1.75 + 0.101 = 1.851 \text{ MN/m}^2$$

二、温 度

温度 (Temperature) 是表示物体冷热程度的一个宏观物理量，它是大量分子热运动的集体表现，反映着物体分子热运动的强弱程度。

根据分子运动理论，温度是量度物体分子平均移动动能的一个尺度，气体分子的平均移动动能与热力学温度 (Thermodynamic temperature) 有如下的关系：

$$\frac{1}{2} m \bar{c}^2 = BT \quad (1-3)$$

式中 m —— 气体分子的平均质量；

$\sqrt{\bar{c}^2}$ —— 气体分子平移移动的均方根速度；

B —— 比例常数；

T —— 热力学温度。

根据上式，理论上热力学温度为零时，气体分子的热运动停止（实际上这种状态是不存在的），用它表示的温度能反映出物体热运动的状态，故热力学中把热力学温度又叫做绝对温度 (Absolute temperature)，把它作为状态参数和计算的依据。

温度高低用温标来量度。所谓温标 (Temperature scale) 就是标有温度单位和温度高低数值的标尺。习惯上以摄氏温标 (Centigrade scale) 量度温度，它规定标准大气压下冰的融点和水的沸点为 0 度和 100 度，用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。热力学中规定采用绝对温标 (Absolute scale) 量度温度，国际单位制中其单位叫 kelvin (开尔文) 简称开氏度或开 (Degree kelvin)，用符号 K 表示。

开尔文绝对温标的计算起点是摄氏温标零度以下 273.15 度，由于两者的分度即每一刻度之间的间隔是相等的，所以存在下面的关系：

$$T \text{ K} = t \text{ }^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1-4)$$

式中 T —— 绝对温度的度数， K ；

t —— 摄氏温度的度数， $^{\circ}\text{C}$ 。

英美等国过去习惯采用华氏温标 (Fahrenheit scale) 量度温度，用朗肯度 (Degree Rankine) 表示绝对温度，分别以符号 $^{\circ}\text{F}$ 和 $^{\circ}\text{R}$ 表示。华氏温标规定标准大气压下冰的融点和水的沸点为 32°F 和 212°F ，它与摄氏温标和朗肯度之间的关系如下：

$$t \text{ }^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \times t \text{ }^{\circ}\text{C} + 32^{\circ} \quad (1-5)$$

$$T \text{ }^{\circ}\text{R} = t \text{ }^{\circ}\text{F} + 460^{\circ} \quad (1-6)$$

三、比容(比体积)

单位质量的体积叫比容或比体积(Specific volume), 用符号 v 表示。在国际单位制中和工程单位制中都是用 m^3/kg (米³/千克)作为单位。

假设气体质量为 m kg, 体积为 V m^3 , 其比容则为:

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-7)$$

比容与温度和压力一样, 是与物质数量(总量)无关的没有相加性的物理量。例如在 1 atm 和 0°C 时, 1 kg 氢气的比容是 $11.2 \text{ m}^3/\text{kg}$ 2 kg 氢气的比容也是这个数。容积 V 则不然, 它与物质数量有关, 具有加合性。如 1 kg 水的体积是 1 L (litre 升), 2 kg 水的体积便是 2L, 如果只给出物质的容积数不说明物质的量, 就不能说明状态。故比容是状态参数, 不能把容积作为状态参数。

必须注意, 在述及气体的比容时, 须说明气体所处的压力和温度, 因为同一气体在不同的条件下会有不同的比容数值。热工学中常提到处于标准状态的气体, 所谓标准状态 (Standard state) 就是气体在 1 atm 和 0°C 时的状态。

四、状态参数座标图

前已述及, 状态参数与状态有着确定的对应关系。经验与实验表明, 两个独立的状态参数足以确定气体工质的状态, 所以, 热工中常用两个参数构成的平面座标图表示系统的状态 and 状态变化过程。用得最多的是 p - v 图 (p - v diagram), 如图 1-2 所示, 点 1 表示工质在压力为 p_1 比容为 v_1 时的状态, 点 2 表示工质在压力为 p_2 和比容为 v_2 时的状态。曲线 1~2 表示状态由 1 到 2 的变化过程。这种状态的连续变化过程, 在热力学中叫做热力过程简称过程 (Process)。

显然, 在座标图上的任一点都表示着某一平衡状态, 也只有平衡状态时才能以座标图上的点表示系统的状态。由图可以看出, 若系统的始终态已经确定, 始终态的参数的差值便恒定, 与系统经过哪些中间状态无关。由此可以得出两个结论:

1. 状态参数的循环积分一定为零, 即 $\oint dx = 0$;
2. 如果函数 x 的微分符合 $\oint dx = 0$, 则函数 x 一定是状态参数。

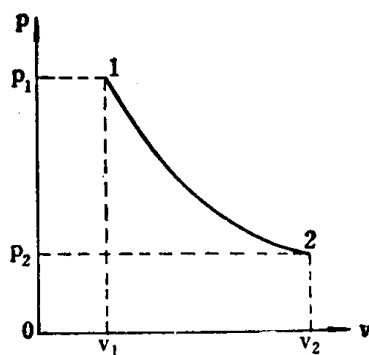


图 1-2 p - v 图

第三节 理想气体

热机为了实现变热为功, 必须以工质为媒介。在讨论热功转换规律之前, 需要了解工质——气体的性质和它的状态变化规律。

一、理想气体与实际气体

自然界中的物体一般都是由分子组成的。分子具有一定的体积和质量, 相互之间存在着吸引力(内聚力), 并且在不停息地运动着。分子所具有的能量和分子间的引力, 使物质处于

三种不同的物态——固态、液态和气态。

离液态较远的气体，分子本身的体积与气体所占的容积相比是非常小的，分子间的引力也是非常小的。因此，分子体积与相互引力对气体行为的影响也就非常微小，常可忽略不计，这就可以把气体分子假想成一些不占据容积，并且相互间没有吸引力、运动自由不受牵制的弹性质点。这样的气体叫做**理想气体** (Ideal gas)。工程实际中的气体，如氧气(O₂)、氮气(N₂)、氢气(H₂)、一氧化碳气(CO)和二氧化碳气(CO₂)，以及这些气体混合组成的空气或燃气等，一般情况下都可当作理想气体来处理。

离液态不远的气体，例如蒸汽动力装置中的水蒸汽和制冷装置中的氨蒸汽(NH₃)，以及高压低温下的空气等，由于接近液态，分子间的距离较小，分子本身体积和分子间的引力都不容忽略，不能当作理想气体看待。这种要考虑分子本身体积和分子间引力的气体叫做**实际气体** (Real gas)。对于这类气体，理想气体的一些规律和公式仍可应用，但要考虑分子本身体积和相互吸引力的影响，加以修正。通常解决实际气体的问题是运用图表，这在蒸汽一章中介绍。

显然，综上所述可知，理想气体是实际气体的一种极限情况，自然界中并不真正存在。但是当气体的比容大到足以使气体分子的体积和分子间的相互作用力可以忽略不计时，这种气体就可视为理想气体。提出理想气体的概念，正是为了忽略次要因素抓主要矛盾，简化问题便于研究看清本质，这在理论上和实用上都有很重要的意义。

二、理想气体的状态方程

气体在一定状态下就有确定的状态参数值。对于理想气体，早在十七、十八和十九世纪初期，就有许多物理学家对气体的状态变化进行了观察和实验，发现基本状态参数 p 、 v 、 T 之间存在着一定的关系。这些关系可以由波义耳—马略特定律 (Boyle and Mariotte's law) 和盖·吕萨克定律 (Gay-Lussac's law) 或查理定律 (Charles' law) 等来说明，即定量的气体，如果温度不变，其容积与压力成反比；如果压力不变，则其容积与绝对温度成正比。把这些关系结合起来，可以得到如下的关系：

$$pv = RT \quad (1-8)$$

式中 p ——气体的绝对压力，N/m²；

v ——气体的比容，m³/kg；

T ——气体的绝对温度，K；

R ——气体特性常数，其值随气体而异，J/(kg·K)〔焦耳/(千克·开)〕。

式(1-8)也可从理论上推得。根据分子运动学说，理想气体作用在器壁上的压力等于单位容积内所有气体分子平均移动动能的三分之二，即：

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \frac{m \bar{c}^2}{2}$$

式中 p ——气体对容器壁的压力；

n ——分子浓度(单位容积中所含的分子数)；

m ——每个分子的质量；

$\sqrt{\bar{c}^2}$ ——分子平移运动的均方根速度。

将式(1-3)代入上式，得：

$$p = \frac{2}{3} n \cdot B T$$

两边乘以比容 v ，得：

$$p v = \frac{2}{3} n \cdot v B T$$

因 $n \cdot v$ 是 1 kg 气体的分子数，用 n 表示，则上式变为：

$$p v = \frac{2}{3} n B T$$

对于同一种气体来说， n 是个常数， B 也是个常数，故 $\frac{2}{3} n B$ 也是个常数，令 $R = \frac{2}{3} n B$ 代入上式，得：

$$p v = R T \quad (1-8)$$

式(1-8)称为理想气体状态方程式 (State equation of ideal gas)，也叫理想气体特性方程式 (Characteristic equation of ideal gas)，有时被叫做克拉贝隆方程式 (Clapeyron equation) 由该式可以看出，三个基本参数中只要确定任意两个，第三个就确定了。

在上述方程式中，比容 v 表示 1 kg 气体的容积，如果气体质量是 m kg，其容积相应为 $m v = V$ m³。此时状态方程应为

$$p V = m R T \quad (1-9)$$

在国际单位制中规定采用 mol (摩尔) 作为物质的量的基本单位，状态方程也应作相应的变更。如果气体质量的 kg 数，恰好等于它的分子量 M 的话，就称这气体为 1 kg mol 气体，1 kg mol 气体所占的容积叫摩尔容积 (Molar volume)。显然，1 kg mol = M kg，摩尔容积 $V_{kgmol} = m v$ m³/kg mol (米³/摩尔)。1 kg mol 气体的状态方程应为：

$$p V_{kgmol} = M R T$$

因 M 与 R 都是常数，它们的积也是常数，令 $R_{mol} = M R$ ，则：

$$p V_{kgmol} = R_{mol} T \quad (1-10)$$

式中 R_{mol} 叫做通用气体常数 (Universal gas constant)，单位为 J/(kg mol·K) (焦耳/摩尔·开)。

三、通用气体常数 R_{mol} 和气体常数 R

应用理想气体状态方程式时，需要知道常数 R 和 R_{mol} 的值，它们可根据阿佛加德罗定律 (Avogadro's law) 求出。

阿佛加德罗定律指出：各种理想气体在同温同压下相同容积内的分子数相等。由于分子量是分子相对质量的标志，据该定律可推知，在上述条件下，各种理想气体分子量 M 的比等于它们的密度 (Density) ρ 的比，即：

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-11)$$

因为 $\rho = \frac{1}{v}$ ，代入上式得：

$$M_1 v_1 = M_2 v_2$$

$$\text{或：} \quad v_{kgmol1} = v_{kgmol2} \quad \text{m}^3/\text{kg mol} \quad (1-12)$$

式(1-12)表明同温同压下 1 kg mol 的各种理想气体的摩尔容积 v_{kgmol} 数都相等。据实验测