

号 A 策半登祿(黑)

热 工 原 理

赵玉珍 编

哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第 4 号

内 容 简 介

本书主要讲述热力学和传热学的基本概念、基本定律, 气体和蒸汽的性质、过程、循环, 传热的基本方式和换热器的计算、节能设备及一些科研成果等。书中附有例题和习题以及必要的热工图表。

本书可作为高等工科院校非动力类有关专业的教材, 也可供有关工程技术人员参考。

热 工 原 理

赵玉珍 编

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

黑龙江省绥化印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张15.5 插页 1 字数348 000

1990年12月第 1 版 1993年 3 月第 2 次印刷

印数5 001—10 000

ISBN 7-5603-0480-X/TK·22 定价7.50元

目 录

绪 论	(1)
-----------	-------

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念

1-1 工程热力学的研究对象和研究方法	(4)
1-2 热力系统和平衡状态	(6)
1-3 工质的状态参数、过程和循环	(10)
1-4 可逆过程和不可逆过程	(20)

第二章 热力学第一定律

2-1 热力学第一定律的实质	(25)
2-2 热量	(26)
2-3 功	(27)
2-4 热力学第一定律解析式	(30)
2-5 稳定流动能量方程式	(32)
2-6 稳定流动能量方程式的应用	(39)

第三章 理想气体的性质

3-1 理想气体	(47)
3-2 理想气体状态方程式和通用气体常数	(48)
3-3 理想混合气体	(51)
3-4 气体的热力性质	(56)

第四章 理想气体的热力过程

4-1 研究热力过程的目的及一般方法	(71)
4-2 定容过程	(73)

4-3	定压过程.....	(75)
4-4	定温过程.....	(77)
4-5	绝热过程.....	(80)
4-6	多变过程.....	(85)

第五章 热力学第二定律

5-1	热力学第二定律的任务.....	(102)
5-2	热力学第二定律的两种说法.....	(105)
5-3	热力学第二定律两种表述的等效性.....	(106)
5-4	循环和热效率.....	(107)
5-5	卡诺循环及其效率.....	(111)
5-6	卡诺定理.....	(113)
5-7	状态参数熵.....	(116)
5-8	熵增原理.....	(120)
5-9	孤立系统的熵增与作功能力损失.....	(129)
5-10	热力学第二定律对工程实践的指导意义.....	(133)

第六章 水蒸气

6-1	概说.....	(145)
6-2	基本概念.....	(147)
6-3	水蒸气的产生过程.....	(149)
6-4	水蒸气图表.....	(155)
6-5	水蒸气的热力过程.....	(159)

第七章 气体与蒸汽的流动

7-1	概述.....	(165)
7-2	稳定流动的基本方程.....	(165)
7-3	喷管截面变化规律.....	(169)
7-4	气体流经喷管的流速和流量.....	(174)
7-5	绝热节流.....	(186)

第八章 动力循环

- 8-1 概说.....(190)
- 8-2 活塞式内燃机的混合加热循环.....(191)
- 8-3 活塞式内燃机的定容加热循环和定压加热
循环.....(197)
- 8-4 活塞式内燃机各种循环的比较.....(200)
- 8-5 燃气轮机装置的循环.....(202)
- 8-6 基本的蒸汽动力循环——朗肯循环.....(210)
- 8-7 蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响.....(213)

第九章 气体压缩过程和制冷原理

- 9-1 压气机的压气过程.....(219)
- 9-2 制冷循环.....(230)

第十章 湿空气

- 10-1 概述.....(252)
- 10-2 绝对湿度和相对湿度.....(254)
- 10-3 露点温度和湿球温度.....(255)
- 10-4 含湿量、焓和焓湿图.....(258)
- 10-5 湿空气过程——焓湿图的应用.....(262)

第二篇 传热学

第十一章 基本概念

- 11-1 传热学研究的对象及其在工程上的应用.....(271)
- 11-2 热传递的基本方式.....(272)
- 11-3 传热过程.....(276)
- 11-4 温度场和温度梯度.....(277)

第十二章 导热

- 12-1 导热的基本定律——傅里叶定律.....(281)

12-2	导热微分方程式.....	(283)
12-3	通过平壁的稳态导热.....	(287)
12-4	通过圆筒壁的稳态导热.....	(293)
12-5	通过肋片的导热.....	(299)
12-6	二维稳态导热的数值解法.....	(312)

第十三章 对流换热

13-1	对流换热过程.....	(327)
13-2	对流换热微分方程式组.....	(336)
13-3	对流换热的准则方程式.....	(341)
13-4	实验方案的确定和数据的整理.....	(349)
13-5	流体在管(槽)内受迫对流换热.....	(350)
13-6	流体横向外掠圆管时的对流换热.....	(354)
13-7	流体自然对流时的换热.....	(360)
13-8	沸腾和凝结时的对流换热.....	(364)
13-9	热管与热水器的工作原理.....	(369)

第十四章 辐射换热

14-1	热辐射的基本概念.....	(374)
14-2	热辐射的基本定律.....	(377)
14-3	任意放置的两黑体表面间的辐射换热.....	(383)
14-4	平均角系数.....	(386)
14-5	计算辐射换热的网络法.....	(389)
14-6	特殊排列的两灰体表面间的辐射换热.....	(393)
14-7	气体辐射和吸收的特点.....	(398)

第十五章 传热和换热器

15-1	复合换热.....	(402)
15-2	传热过程.....	(409)
15-3	增强传热.....	(413)

15-4	换热器的种类和计算的一般说明.....	(416)
15-5	对数平均温差.....	(419)
15-6	换热器的有效度和传热单元数法.....	(425)
第十六章 非稳态导热		
16-1	非稳态导热过程的特点.....	(434)
16-2	无限大平板的加热 (或冷却)	(435)
16-3	集总参数法.....	(445)
16-4	有限大物体的非稳态导热计算.....	(448)
附表		
附表1	常用气体的某些基本热力性质.....	(454)
附表2	某些常用气体在理想气体状态下的平均定 压比热.....	(455)
附表3	某些常用气体在理想气体状态下的平均 定容比热.....	(456)
附表4	空气在理想气体状态下的热力性质.....	(457)
附表5	饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按温 度排列)	(461)
附表6	饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按压 力排列)	(464)
附表7	未饱和水与过热水蒸气的热力性质.....	(466)
附表8	各种压力单位的换算关系.....	(473)
附表9	各种能量 (功、热量、能量) 单位的换 算关系.....	(474)
附表10	各种功率单位的换热关系.....	(475)
附表11	金属材料的密度、比热容和导热系数.....	(476)
附表12	保温、耐火材料的导热系数与温度的关 系.....	(478)

附表13	各种材料的辐射黑度 ε	(479)
附表14	干空气的热物理性质.....	(480)
附表15	饱和水的热物理性质.....	(481)
附表16	干饱和水蒸气的热物理性质.....	(482)
附表17	在大气压力下烟气的热物理性质.....	(484)
附表18	双曲线函数值.....	(485)
附表19	污垢热阻的参考值.....	(486)
附表20	传热系数 k 的大致范围.....	(486)
参考文献		(487)
附录图 I	氨的压焓图	
附录图 II	焓湿图	

绪 论

热能的利用无非两种方式：一种是把热能直接用于加热物体；另一种是把热能转换成机械能或其它形式的能量。所以，热能利用过程与能量传递和转换过程是紧密相关的。可以说研究热能与机械能及其它形式的能量相互转换规律的工程热力学与研究热量传递规律的传热学构成了热工原理的理论基础。

我国的能源储量（就已探明的）累计8000多亿吨，居世界第三位，其中，以煤为最丰富，可称为能源大国。但人口平均占有能量远低于世界平均数，而且热能的利用率很低。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，在今后相当长的时期内，能源供需关系将处于紧张状态，由于我国工矿企业的能耗普遍过大，在近期要把节能放在优先地位。应当指出节约能源的一大重点是怎样有效合理地利用热能，作为一个工程技术人员，应该具备必要的热工知识，以利于在本企业开展节能工作。然而要学好热工课，还有必要了解热工学的发展过程。

人类在争取自身生存的斗争过程中很早就学会了钻木取火。从此，人类可以利用火烤煮食物、取暖、冶炼金属和制造工具等，推动了生产的发展。这是人类发掘利用热能的开始。

到18世纪初，欧洲出现了专供矿井排水用的原始蒸汽机——纽可门机。由于航海和贸易事业的发展，迫切需要一种可应用于交通运输、纺织、煤炭和钢铁等工业部门的不受风

力、水力等气候地理条件限制的通用发动机，英国瓦特在1763~1784年对原始蒸汽机作了全面改进，制成了工业普遍应用的蒸汽机，推动了产业革命。

1824年法国工程师卡诺发现蒸汽机工作必须在两个热源之间，并提出卡诺热机的效率最高。1849年焦耳宣布了他多年的实验结果，为能量守恒定律奠定了坚实的基础。到1850年能量守恒定律已经建立起来。接着德国物理学家克劳修斯于1850年、英国工程师开尔文于1851年先后提出了热力学第二定律，从而使热力学从物理学中独立出来。

工程中常有传热问题出现，有的要求加强传热，有的则要求防止传热，这便促使人们努力研究传热规律。由于导热、对流、辐射等定律的出现，传热学逐渐成为一门独立的学科。工程热力学和传热学共同作为热工原理的理论基础，对热机的研制和改进起着极为重要的指导作用。

在19世纪末，随着生产的发展，特别是汽轮机和发电机的研制成功，使得大工业生产获得强大的电力供应。目前，世界上仍有2/3以上的发电厂为火力发电厂。

在交通运输上，需要体积小、重量轻、起动快、燃料省的热机。1876年德国工程师奥托研制成功活塞式煤气机，由于煤气机需要带一台体积大的煤气发生炉，所以成为交通运输的一个包袱。随着石油工业的发展，用石油取代煤气已是必然趋势。1892年德国工程师狄塞尔发明了柴油机（称为狄塞尔内燃机）。随后柴油机广泛地用于载重汽车、拖拉机、船舶及机车上。在第二次世界大战中燃气轮机作为航空动力迅速得到发展。

我们的祖先在热能利用方面曾有过辉煌成就，从出土文物可知，在公元前2000年左右已经会利用热能冶铸精美的青

铜器物。我国是最早利用煤的国家。火药火箭在南宋时代已经发明。北宋时代制造的走马灯和现代燃气轮机的原理相同，这比欧美同类记载至少早 400 多年。但是，在近一二百年来，由于受到封建制度的束缚和帝国主义的侵略，生产力不但没有发展，而且遭到破坏，使旧中国的工农业生产非常落后。

新中国建立以来，党和政府一直非常重视能源和动力的发展，十一届三中全会以来更把能源、交通等放在优先地位，能源发展很快，在热能动力机械制造方面发展也很迅速。现在，我国不但能够制造万吨级船舶用的柴油机，数千千瓦内燃机机车用的柴油机，而且能够制造 30 万千瓦的全套火力发电设备。我国自行研制的“长征二号”、“长征三号”火箭多次成功发射卫星，并且按计划返回地面。从 1985 年 9 月正式宣布承揽国内外用户发射卫星业务。我国自行设计的核电站正在筹建中。所有这一切都说明我国的热工技术在逐步走向现代化。

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念

1-1 工程热力学的研究对象和研究方法

一、工程热力学的研究对象

热力学是由物理学中的热学发展而形成的学科。它是研究热能和其它形式能量，如机械能、化学能、电能等相互转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个分支，它所研究的主要对象是热能与机械能相互转换的规律。早期工程热力学只是作为制造热机的理论基础，是为研究如何提高热机的热效率而形成的一门科学。随着科学技术的发展，工程热力学不仅研究各种热能动力装置和各种制冷装置的能量转换规律，而且进一步研究诸如磁流体发电、半导体发电、热泵、化学精炼、高能激光、生物工程、太阳能利用、节能技术等许多方面的热力学理论。因而使它的研究范围扩大到了化学、物理化学、电、磁、辐射等领域。

二、工程热力学的研究方法

工程热力学所研究的是人们能直接观察的宏观现象，它的研究方法是从能量的观点出发，依据热力学第一和第二定律，运用严密的逻辑推理，得出一系列有关热功转换的计算公式，但不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。因此，热力学是热学的宏观理论。热学的微观理论是统计物理

学。统计物理学是从物质的微观结构出发，依据每个微观粒子的力学规律，应用概率理论和统计平均的方法，研究大量微观粒子（它们构成宏观物体）的运动表现出来的宏观性质。

热力学和统计物理学在对热现象的研究上是相辅相成的。热力学经常利用微观理论得到的知识，例如对工质热物理性质的研究成果以及对一些热现象和经验定律的微观实质的解释等。由于热力学研究方法所依据的两个基本定律不需要任何假设，因而能给出普遍而可靠的结果，可以用来检验微观理论的正确性。但是由于热力学不涉及物质的微观结构，因而用热力学方法无法获得有关物质的具体性质。统计物理学则由于深入到热现象的本质，可以使热力学理论获得微观机理上的说明，并可揭示宏观现象的微观本质，从而在理论上起到指导作用。但统计物理学也有它不足之处，主要是推导比较复杂。同时，由于在推导过程中不可避免地要对物质结构模型作一些简化或假设，因此所得结果和实际情况往往有差异。

与其它学科一样，在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。

三、工程热力学的主要内容

热能转变为机械能必须借助一套设备和借以传递能量的某种载能物质。这套设备就是通常所说的热机，而这里的载能物质便是工质。热机对外作功时，要求工质有良好的膨胀性，这样才能方便地作功。而要热机不断地作功，则必须不断地将新鲜工质引入气缸，并将工作完了的工质排除，这就要求工质有良好的流动性和膨胀性。同时兼备良好的膨胀性和流动性的不是固体，也不是液体，而是气体（如空气、水

蒸气、燃气等)。因此,工程热力学的主要内容包括下列几部分:

1. 构成工程热力学理论基础的基本概念和两个基本定律——热力学第一和第二定律。

2. 因为热能转换成为机械能通常是经过工质在热动力设备中的吸热、膨胀、作功等状态变化过程,以及由这些过程所组成的循环而实现的。对这些过程和循环的研究、计算以及对提高热能转换为机械能效率的正确途径的分析、讨论,都是工程热力学的主要内容。

3. 介绍常用工质的热力性质。

四、工程热力学所用单位制

近年来世界各国决定逐步采用统一的国际单位制(简称SI)。本教材亦采用国际单位制。考虑到目前我国有些地方仍用工程单位,书中附有两者的对照表。

1-2 热力系统和平衡状态

一、热力系统

在研究和分析任何一个问题时,首先要确定研究的对象。在热力学中把所要研究的对象叫做热力系统,简称系统或热力系。与热力系有关的周围物体统称为外界。为了不把热力系统和外界混淆起来,设想有界面将它们分开。这界面可以是真实的(如图1-1和图1-2中取气体工质为热力系统时,气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面),也可以是假想的(如图1-2进口截面和出口截面便是假想的界面),可以是固定的,也可以是变动的(如图1-1中当活塞移动时界面发生变化)。

热力系统的选取，取决于所要研究的任务。它可以是许多物体，一个物体或物体的某一部分。

在作热力学分析时，既要考虑热力系内部的变化，也要考虑热力系通过界面和外界发生的能量交换和物质交换，但对外界的变化则不必研究。

根据热力系内部情况的不同，热力系可以分为：

单元系统——由单一的化学成分组成；

多元系统——由多种化学成分组成；

单相系统——由单一的相（如气相或液相等）组成；

复相系统——由多种相（如气-液两相或气-液-固三相等）组成；

均匀系统——各部分性质均匀一致；

非均匀系统——各部分性质不均。

根据热力系统与外界发生质量和能量转换关系的特征，可把热力系统分为：

闭口系统——系统与外界只发生能量交换，而无物质交换。如图 1-1 所示，封闭在气缸活塞内的一定质量的气体从外界热源吸热，同时膨胀推动活塞向上移动对外界作功。

开口系统——系统与外界不仅有能量交换，而且有质量交换，即有物质流入和流出，如图 1-2 所示。

绝热系统——系统与外界不发生热量交换。

孤立系统——系统与外界既无能量交换，又无物质交换，即和外界无任何联系。实际上与外界绝对不发生任何联系的系统是不存在的。当实际存在的系统与外界的能量交换和物质变换减弱到可忽略不计时，可近似地当作孤立系统，所以孤立系统只是一种假想的极限情况。

例如图 1-1 中取气体工质为氧气时的热力系统，它是单

元、单相、均匀的闭口系统。如取图 1-2 中的气体为热力系统，并忽略和外界交换的热量，那么它是单元、单相、绝热的开口系统。

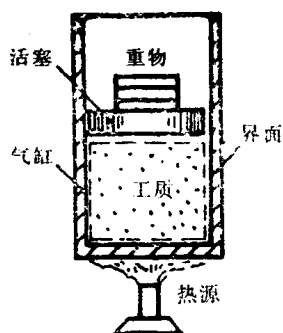


图 1-1

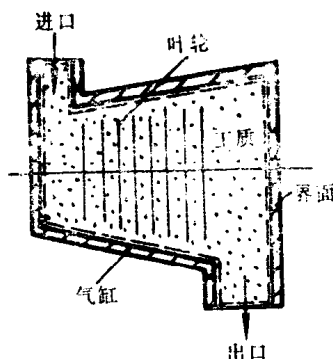


图 1-2

二、平衡状态

在热力学中把工质所处的某种宏观状况称为工质的热力状态，简称状态。在热力学中常常用到平衡状态的概念，所谓平衡状态系指在没有外界作用的情况下可以长久保持的状态。气体在平衡状态下，各部分的性质都均匀一致，每个状态参数只有一个值。一个系统，例如气缸中的气体，如果它的压力到处相同，我们就称它处于压力平衡或机械平衡，如果它的温度到处相同，则称它处于温度平衡。如果一系统同时处于压力平衡和温度平衡，该系统就处于热力平衡状态，简称平衡状态。一个平衡的热力系统，只要不受到外界的影响，它的状态就不会随时间而改变，平衡就不会自动地破坏，这是平衡状态的特点。如果受到外界作用，引起系统内压力不均匀及温度不均匀，破坏了系统的平衡状态。则当外界作用停止后，系统内压力不同及温度不同的各部分物质之

间，将自发地产生机械作用和热作用。压力较大的部分将自发地膨胀压缩压力较低的部分；温度较高的部分将把热量传给温度较低的部分。例如有一封闭容器，有隔板将它分成 A 、 B 两部分， A 部分装有气体，并处于平衡状态， B 部分抽成真空（图1-3a）。当把隔板抽开以后，由于 A 、 B 两部分压力不平衡， A 部分的气体就会向 B 部分运动。在这个过程中，气体的状态是随时间变化的。过了一段时间以后，当容器中气体的压力和温度趋于一致时，容器中气体的状态不再发生变化。如果没有外界的作用，气体将一直保持这种状态（图1-3b），这就是平衡状态。

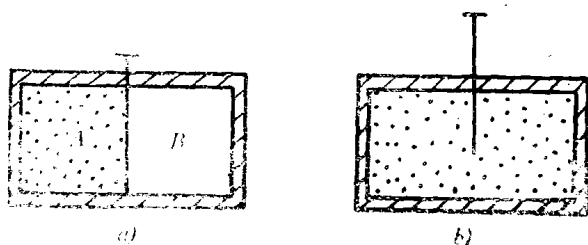


图 1-3

对于处于热力平衡状态的单相流体（气体或液体），如果忽略重力的影响，那末流体内部各处的性质是均匀一致的。各处的温度、压力、密度等状态参数都应相同。如果考虑到重力的影响，那末流体中的压力和密度将沿高度而有所差别，但如果上下高度相差不大，则这种差别通常可以忽略不计。

对于气液两相并存的热力平衡系统，气相的密度和液相的密度不同，所以整个系统内就不是均匀的。

在未加特别注明，本书一律把平衡状态下单相系统当作是均匀的，即系统中各处的状态参数相同。