

■ 高等学校教材

工程 热力学

■ 蔡祖恢



高等教育出版社

高等学校教材

工程热力学

蔡祖恢



高等教育出版社

(京) 112号

高等学校教材
工程热力学
蔡祖恢

高等教育出版社 出版

新华书店总店科技发行所发行

通县觅子店印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张 20.5 插页 2 字数 530 000

1994年11月第1版 1995年2月第1次印刷

印数 0 001—2 845

ISBN 7-04-004646-6/TH·355

定价 11.70 元

序

热力学是国内外高等学校设置的一门基础课。热力学的基本定律是高度归纳客观现实的总结，具有普遍的真实性。热力学的分析方法是依据这些最基本的宏观概括，从各种复杂的具体情况下透过现象看本质地演绎出有用的论断，以指导改造自然的工程实践，并从中经受了长期的考验，学科的内涵和外延也都继续得到了深化、充实和扩展。这种逻辑严密的辩证思维方法，正是工科学生为适应当代科学技术迅猛发展所必需的基本训练的一个重要方面。

经典热力学是宏观的，基本概念、基本定律和分析方法都不涉及物质的具体结构构造，而把物质的性质作为基本数据接纳下来，因此容易被接受，但又往往不易被深入领悟。

本书不同于国内的一些基本教科书，而是作为蔡祖恢教授积三十多年的教学心得，以有限的篇幅和严谨的笔触，旁征博引地诱导读者深入浅出地理解热力学的重要概念、基本定律和分析方法，不拘一格地列举工程上一些常见的物质运动形态和变化过程的热力学分析的实际应用示例。这不只对初学者有启迪之效，对已学者也会起画龙点睛之益。

在本书成稿并经校审，行将付印之际，我有幸得以先睹为快，深感全书别具特色，故愿附书数语，算是举荐之言，自然，书总要为读者服务，为正确传播科学知识负责，应从各方面广征意见和建议，精益求精地改进和充实内容，以便在不断修订提高中发挥更大效用。

王补宣

1993年3月于清华大学

前 言

工程热力学是高等工业学校许多专业设置的一门重要的技术基础课。本书是根据国家教委批准的《高等工业学校工程热力学课程教学基本要求(55~70学时)》的精神,按热工类及机械类动力机械等专业的教材要求编写的,也可作为其他有关专业的学生、教师和热工技术人员的参考书。

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的基础理论。工程热力学则是在阐述热力学普遍原理的基础上,研究这些原理在技术上的各种具体应用,它属于技术基础理论的范畴。所以,本书的编写宗旨首先是在不失基础理论严密性和逻辑性的前提下,力求以工程观点和便于应用的形式来阐述热力学的基本概念、原理及其各种工程应用。此外,在体系结构、内容取舍和侧重点上,本书也作了一些变革,主要在下列几个方面。

工程热力学着重研究的是热能与其他形式能量(主要是机械能)之间的转换。这种热相互作用和力相互作用互相耦合的现象不同于单纯的热现象、力学现象和电、磁现象。工程热力学的特殊性和复杂性就在这里,而学生对这种热-力耦合现象并不熟悉。为了使学生便于领会,本书根据由简单到复杂、循序渐进的原则,将热力学概念和原理的阐述,放在学生熟悉的前期课知识的基础上展开。例如,对能量守恒原理,首先从最简单的单纯热现象和单纯力学现象着手,论述热力非耦合系统的热力学第一定律的特殊表现形式,然后,将它扩展到一般的热-力耦合系统的复杂情况。对过程的方向性,同样从最简单的热力非耦合系统着手,论述力学中保守过程和耗散过程的特性,然后在此基础上,将这两类过程相应地扩展为可逆过程和不可逆过程。

热力机械的发明和应用，推动了热力学的发展。由于这种历史上的原因，多数工程热力学教材中，其工程应用部分的内容，基本上局限于各种典型循环的热力分析，而对过程，相对说来，则重视不够。然而，在能源合理利用日趋重要的今天，热力学在工程中的应用已不限于循环，何况即使对循环而言，新型循环的研究也必须建筑在过程分析的基础上。有鉴于此，本书在应用部分的内容安排上，加强了过程分析。在全书十章的篇幅中，过程和过程分析的内容占两章。其中第三章论述热力学第一定律在过程分析中的应用，包括根据系统与外界的相互作用条件建立过程方程式以及对各种热力过程，按控制质量和控制容积进行能量分析的方法。在这一章中，结合较多的例题详尽地讨论了各种形式的功，并通过具体实例分析了有限温差换热对有用功的影响，为第四章热力学第二定律作一伏笔。第八章则是在第三章的基础上，进一步应用热力学第二定律(熵产法)，对工程中常见的典型过程和稳流设备进行全面的热力分析。第九章各种典型循环(动力和制冷循环)的热力分析是在第八章稳流设备分析的基础上进行的，并加强了合理组织过程，主要是结合热源，合理组织换热过程的讨论。

本书对热力学方法的培养给予较大的重视。在第一章就着重阐述了热力学方法的细节，随后，结合实例强调其重要性，并通过各章的例题，详细说明求解方法，启发学生思索怎样根据具体问题的特点，选取系统，作出合理简化，建立模型，以加强学生应用热力学原理解决实际问题的能力。每章都附有较多结合实际的习题，供学生巩固所学之用，其中无“*”号的习题是基本要求题。多做各类习题是掌握热力学方法，学好本课程的必不可少的环节。

全书采用我国法定计量单位。内容分为十章，其中有“*”的，属于扩大、加深的內容，在教学中，可按实际情况进行取舍，也可不讲授这部分內容。

本书由东南大学陈景尧教授主审，并经高等工业学校热工课程教学指导委员会召开的审稿会审查通过。陈教授和审稿会同志

提出了不少宝贵的修改意见，对此谨致衷心的感谢。这里特别要感谢王补宣教授的鼓励和支持；他在本书定稿后，于百忙之中俯允对书稿中变动较大的第三、四、五、八、九等五章作仔细审阅，提出了宝贵意见，并为本书写了序言。我的同事李美玲教授提供了热力性质计算的素材和电算示例的程序；余敏同志为全书描绘了插图，并和李科群同志一起作了习题解答；对同事们的帮助，在此一并致谢。最后，还要感谢我的妻子，没有她的支持，全书是难以如期完成的。

本书部分内容虽已在我校有关专业讲授过两遍，但由于在体系和内容取舍上的一些变革尚属初次提出，加之本人水平有限，不妥或错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正，以便在今后不断完善、改进。

蔡祖恢

1993.6 于上海机械学院

主要符号

拉丁字母

A	面积	p	压力
a	音速	Q	热量
C	热容量;浓度	Q	热流率
c	比热容;速度	q	比热量
C_M	摩尔热容	Q_p	等压热效应
C	容积热容	Q_v	等容热效应
E	系统总能量	R	气体常数
e	比能量	R_M	通用气体常数
E_s	稳定流的焓	S	熵
e_s	比焓	S_s	熵产
F	自由能;力	s	比熵
f	比自由能	s_r	比熵产
G	自由焓(吉布斯函数)	T	绝对温度
g	比自由焓;重力加速度	t	摄氏温度
H	焓	U	内能
h	比焓	u	比内能
ΔH_0°	标准燃烧焓	V	容积
Δh_0°	标准生成焓	v	比容
K_p, K_c	化学平衡常数	W	功
k	弹簧常数	w	比功
M	相对分子质量;摩尔质量	W_L	有用功损失·可用能损失
M_s	马赫数	W_t	技术功
m	质量	w_t	比技术功
\dot{m}	质量流率	W'_{net}	净功
n	物质的量;多变指数	w'_{net}	比净功
		X	广义力

x	广义坐标;干度
x_i	质量成分
y_i	摩尔成分
Z	压缩因子
希腊字母	
α_p	等压膨胀系数
β	压力温度系数
ϵ	制冷系数;压缩比
ϵ'	供热系数
η	热效率
η_N	喷管效率
$\eta_{i,T}$	涡轮机等熵效率
$\eta_{i,CO}$	压缩机等熵效率
$\eta_{T,CO}$	压缩机等温效率
η_V	容积效率
θ	经验温标
κ	比热比(绝热指数)
κ_T	等温压缩系数
λ	内燃机等容升压比
μ	化学势
μ_1	焦-汤系数(绝热节流系数)
π	压气机增压比
ρ	密度;内燃机等压预胀比
σ	表面张力
τ	时间
ψ_{ci}	临界压力比
φ	相对湿度;喷管速度系数
ω	含湿量

角标符号

A	可用的能量
atm	环境
ad	绝热
C	纯粹保守系统单元
CM	控制质量
CV	控制容积
cr	临界流动状况下的参数
D	纯粹耗散系统单元
f	液体;流体
g	气体
H	高温热源
I	不可逆
in	流入
is	孤立
L	低温热源
l	液态
O,0	理想气体状态;滞止态;环境状态
out	流出
P	生成物
p	等压;
R,r	可逆;反应物
S	等熵
s	固态;饱和状态
sou	热源
T	等温
T	纯粹热系统单元
TP	三相点状态
V,v	等容
v	湿空气中蒸汽的参数

目 录

主要符号	1
绪论	1
0-1 能量和社会发展	1
0-2 热力学的研究对象和研究方法	5
0-3 热力学发展简史	7
第一章 基本概念、定义和分析方法	11
1-1 系统、状态和状态参数	11
1-1-1 系统	11
1-1-2 状态和状态参数	13
1-2 系统与外界的相互作用和热动平衡态	15
1-2-1 系统与外界的相互作用	15
1-2-2 热动平衡态	18
1-3 过程和循环	21
1-3-1 准静态过程和可逆过程	21
1-3-2 正循环和逆循环	24
1-4 量纲与单位	25
1-5 基本状态参数	27
1-5-1 系统的容积 V 、比容 v 和密度 ρ	28
1-5-2 压力	28
1-5-3 温度	32
1-6 平衡态的描述和状态方程	35
1-7 工程热力学的主要内容和分析方法	39
习题	41
第二章 热力学第一定律	46
2-1 应用于闭口系统的热力学第一定律	46
2-2 系统在过程中的功	54
2-2-1 保守力学系统的机械功	55

2-2-2 可压缩系统容积变化时所做的功(容积功).....	57
2-2-3 表面张力功和电、磁功.....	60
2-3 系统在过程中的热量、热容量和比热容.....	65
2-3-1 热容量和比热容.....	65
2-3-2 理想气体的定容比热容和定压比热容.....	70
*2-4 耦合系统和非耦合系统的热力特性.....	80
2-5 控制容积的能量分析.....	97
2-5-1 控制容积的质量守恒方程.....	99
2-5-2 控制容积的能量方程.....	100
2-6 稳定流动能量方程.....	107
习题.....	112
第三章 热力学第一定律在能量分析上的应用.....	119
3-1 气体的热力过程.....	120
3-2 闭口系统的能量分析.....	128
3-2-1 终态的确定.....	128
3-2-2 过程期间内能的变化量.....	129
3-2-3 过程的容积功.....	129
3-2-4 过程的技术功.....	131
3-2-5 非静态过程的能量分析.....	134
3-3 开口系统的能量分析——稳定流动.....	139
3-3-1 作净功的机器.....	141
3-3-2 喷管和扩压管.....	145
3-3-3 节流元件.....	146
3-3-4 换热设备.....	148
3-4 开口系统的能量分析——不稳定流动.....	153
3-4-1 稳定气源向容器的充气.....	154
*3-4-2 放气问题.....	159
3-5 系统的有用功.....	168
3-5-1 闭口系统所能作出的有用功.....	171
*3-5-2 过程不可逆性对有用功的影响.....	173
习题.....	180
第四章 热力学第二定律.....	188
4-1 稳定平衡态和热力学第二定律.....	191

4-2	可逆过程和不可逆过程	199
4-3	理想气体的卡诺循环和逆卡诺循环	208
4-4	与两个热源发生热相互作用的任意系统、卡诺定理和热力学 绝对温标	212
4-4-1	卡诺定理	215
4-4-2	热力学绝对温标	217
4-5	与任意多个热源发生热相互作用的任意系统	222
4-6	状态参数——熵	227
4-7	熵变化的计算	237
4-8	热力学第二定律应用于开口系的表达式	246
4-9	熵函数的性质及其应用	250
4-9-1	用以判别过程的可行性和方向性	250
4-9-2	用以确定系统达到平衡的条件	252
4-9-3	闭口热力系统的作功能力	254
4-9-4	热源提供热量中的可用能	259
4-9-5	稳定物质流的作功能力	261
4-9-6	熵产与可用能的损失	263
	习题	265

第五章 纯物质的热力性质及其一般关系式

5-1	热力学面	272
5-2	纯物质的汽-液两相转变	276
5-3	纯物质的相平衡条件和克劳修斯-克拉贝龙方程	281
5-3-1	平衡判据	282
5-3-2	平衡条件	284
*5-3-3	克劳修斯-克拉贝龙方程	286
5-4	亚稳平衡态——过热液体和过冷蒸汽	291
5-4-1	范德瓦尔方程的等温线	292
*5-4-2	汽-液分界面为曲面时的平衡条件	295
5-5	纯物质热力性质之间的一般关系式	302
5-5-1	偏导数基础	302
*5-5-2	特性函数	304
5-5-3	麦克斯韦关系	306
5-5-4	热力学一般关系式	307

5-6	纯物质的热力性质图表	314
5-6-1	热力性质表	314
5-6-2	热力性质图	323
5-6-3	热力性质图表的应用	325
5-7	纯物质热力性质的计算	331
5-7-1	理想气体	332
5-7-2	不可压缩流体	333
5-7-3	气态纯物质	334
5-8	纯物质的状态方程	339
5-9	对应态原理	344
*5-10	电算实例简介	352
5-10-1	电算实例	353
5-10-2	算例源程序	358
	习题	371
第六章	理想气体混合物及湿空气	375
6-1	混合气体的成分表示方法及其气体常数	376
6-2	道尔顿分压定律与阿美格分容积定律	378
6-2-1	道尔顿分压定律	378
6-2-2	阿美格分容积定律	379
6-3	理想混合气体热力性质的计算	381
6-4	空气和水蒸气的混合物——湿空气	385
6-4-1	绝对湿度和相对湿度	387
6-4-2	含湿量 ω	388
6-4-3	干湿球温度	389
6-4-4	湿空气的焓	390
6-4-5	湿空气的熵	391
6-5	湿度图	392
6-6	湿空气过程	396
6-6-1	加热或冷却	396
6-6-2	冷却去湿	398
6-6-3	绝热加湿	400
6-6-4	冷却塔	403
	习题	405
第七章	气体在管道中的稳定流动	408

7-1 基本方程组	409
7-1-1 连续性方程	409
7-1-2 稳流能量方程	409
7-1-3 焓方程	410
7-1-4 状态方程	410
7-2 等熵流动的特性	411
7-3 喷管的热力计算	416
7-3-1 等熵滞止状态	416
7-3-2 流速的计算	418
7-3-3 临界压力比	419
7-3-4 流量的计算	421
7-4 蒸汽的等熵流动	427
7-5 有摩阻的绝热流动	431
*7-6 工况变动时喷管内的流动情况	433
7-7 绝热节流、焦汤效应	435
习题	442
第八章 典型设备和过程的热力分析	445
8-1 充气过程	446
8-1-1 向刚性容器绝热充气	446
8-1-2 等压绝热充气过程	448
*8-2 放气过程	450
*8-2-1 刚性容器绝热放气	450
*8-2-2 等压绝热放气	451
8-3 不作功的换热过程、换热设备	455
*8-4 节流元件——毛细管	461
*8-4-1 毛细管的流动特性——音速压力	461
**8-4-2 毛细管的尺寸计算	469
8-5 作净功的机器——涡轮机、泵和压缩机	475
8-5-1 涡轮机、泵和叶轮式压缩机	475
8-5-2 活塞式压缩机	479
8-5-3 多级压缩和中间冷却	486
习题	489

第九章 热力装置及其循环	497
9-1 蒸汽动力装置	499
9-1-1 朗肯循环	503
9-1-2 朗肯循环热效率的分析	505
9-1-3 实际朗肯循环的热力分析	512
9-2 朗肯循环的改进	523
9-2-1 再热循环	523
9-2-2 回热循环	529
9-2-3 热电循环	536
9-3 燃气轮机装置	538
9-3-1 燃气轮机装置等压加热循环	539
9-3-2 燃气轮机等压加热循环的改进	551
9-4 内燃机	555
9-4-1 内燃机的工作原理	555
9-4-2 内燃机的理想循环模型	559
9-4-3 理想循环的比较	564
9-5 供热和制冷装置	565
9-5-1 空气压缩制冷循环	567
9-5-2 循环的改进——回热式空气制冷循环	572
9-5-3 蒸汽压缩制冷循环	575
9-5-4 吸收式制冷装置	578
习题	579
第十章 热力学定律在化学反应上的应用	585
10-1 热力学第一定律在化学反应上的应用.....	586
10-2 盖斯定律和基尔霍夫定律.....	588
10-2-1 盖斯定律.....	588
10-2-2 热效应与温度的关系——基尔霍夫定律.....	591
10-2-3 绝热理论燃烧温度.....	593
10-3 热力学第二定律在化学反应上的应用.....	595
10-3-1 化学平衡条件.....	596
10-3-2 化学反应的亲合势和平衡常数.....	598
10-3-3 化学平衡与温度、压力的关系	602
*10-3-4 绝对熵和热力学第三定律.....	604

习题	606
附录	608
附表 1 各种单位制常用单位换算表	608
附表 2 低压时一些气体的热力性质	610
附表 3 气体定压摩尔热容公式	611
附表 4-1 气体平均定压摩尔热容	612
附表 4-2 气体平均定压比热容	613
附表 5-1 饱和水和饱和蒸汽表(按温度排列)	614
附表 5-2 饱和水与饱和蒸汽表(按压力排列)	616
附表 6 未饱和水与过热蒸汽表	618
附表 7 R-22(CHF_2Cl) 饱和状态下的热力性质	624
附表 8 R-134a($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_6$) 饱和状态下的热力性质	626
附表 9 物质在 25°C 、 101325Pa 下的燃烧焓 ΔH_c°	628
附表 10 物质在 25°C 、 101325Pa 下的生成焓和绝对熵	628
附表 11 平衡常数 K_p 的对数值	629
附图 1 低压范围的通用压缩因子图	636
附图 2 湿空气的 $\omega-t$ 图	637
附图 3 R-22 $p-h$ 图	638
附图 4 R-134a $p-h$ 图	639
参考文献	630
索引	631

绪 论

0-1 能量和社会发展

工程热力学是一门研究能量和能量转换的应用科学。人类要生存,就必须生产,就需要能量;要不断提高人民的生活水平,就要持续发展生产,不断提高国民生产总值,就需要不断增加可供利用的能量。据目前的估测,就全世界范围来说,人类对能量的平均需要量大概不到50年就要翻一番。对发展中国家,由于要力求尽快发展生产,改善生活,对能量需要的增长率更要高于平均值。由此可见,开发有使用价值的新能源,提高能量利用的技术水平,减少能量使用中的浪费,对人类社会发展、生活水平的提高是十分迫切和至关重要的。

人类为日常生活和进行生产而必需的能量形式基本上有两类:一类是用于加热物体,如蒸煮食品、生活采暖、烘干物料、熔化冶炼等等的热能;另一类是为人类提供作功动力的机械能(或电能)。在自然界,已知的可供利用的能源中,只有风能、水能和潮汐能是直接以机械能的形式提供给人们的,其它的主要能源如地热能、太阳能、燃料的化学能、核能等,或直接提供给人们热能,或通过燃烧反应、裂变反应或聚变反应等先使其能量转换成热能,用以加热物体,或再通过能量转换,变成机械能(或电能)为人类提供动力。有关的统计资料表明,在当今世界使用的能量总额中,经过热能形式而被利用的能量超过85%,甚至有时在90%以上。这一比例在相当长时期内将不会有显著变化。因此,对热能的特性、合理利用及其转换,尤其是对热能和机械能(或电能)之间的转换规律进行研究是十分必要的。