

工 程 热 力 学

西安交通大学

刘桂玉 刘咸定 钱立伦 马 元 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书根据国家教委 1986 年审定的《高等工业学校工程热力学课程教学基本要求》编写,内容翔实且比较深化。它的突出特点是:全书贯穿了能量不仅有量多少而且有品质高低的观点;阐明了有序能、无序能,有效能、无效能,有用功、无用功等基本概念,并运用它们分析能量间的相互转换;熵的导出不采用传统方法,而是根据能量贬值原理直接得到,使熵有了明确易懂的物理意义,还从无序度简明地阐述了熵与热力学第二定律的微观含义。与同类教材相比,本书内容有较强的变革,颇有新意。

本书可作为能源工程、动力机械、低温工程和化学工程等多类专业的工程热力学教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书由工程热物理课程指导委员会主任委员、天津大学吕灿仁教授审稿。

工程热力学

西安交通大学

刘桂玉 刘咸定 钱立伦 马元 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 22 插页 1 字数 530 000

1989 年 11 月第 1 版 1989 年 11 月第 1 次印刷

印数 0001—2 955

ISBN 7-04-001995-7/TH·45

定价 6.05 元

序

本书以国家教委 1986 年审定的《高等工业学校热工课程教学基本要求》为基础，考虑到能源工程、动力机械和低温工程等多类专业的需要，内容较基本要求有所拓宽和深化，并且是在经过多次教学实践后编写而成的。

工程热力学研究热能与机械能之间的转换规律，从本质上讲乃是研究无序能与有序能之间的转换规律。为使工程热力学的理论能较好地指导能源合理和有效的利用，本书在教学体系和方法上对基本定律的阐述有较大的改革，突出了“三有、三无”（有序能、无序能，有效能、无效能，有用功、无用功）的观点，并提出了非作功能的概念，从而可根据热力学第二定律直接导得熵参数，使熵参数具有明确而易于接受的物理意义——系统熵变化是非作功能变化的量度。这不仅使熵参数抽象难懂的程度有所改善，有利于读者掌握节约能源的实质在于尽量减少有效能向非作功能的退化——能量贬值，而且还简明地从量子能级角度阐述了熵与热力学第二定律的微观含义，揭示了有序能、无序能的实质，从而有助于读者深入理解热力学第二定律。上述能量转换观点贯穿全书，在过程与循环中分别以熵分析法和焓分析法论述了不可逆引起的有效能损失（焓损失）并引入了有效能效率（焓效率）。

本书除论述理想气体与水蒸气的热物性质外，还介绍了其他实际气体性质，不同专业可按需要有所侧重。在研究工质热物性的基本理论、方法和技能方面，内容有所扩展。随着计算机的普及以及某些专业的需要，还简单介绍了应用热力学微分方程进行热

力性质数值计算的原理和基本方法。

在化学热力学基础一章中提出了反应物、生成物的总化学势概念,并应用于实例,从而详细论述了化学平衡,并由化学势导得了化学平衡常数。还特别注意培养学生运用物性和热化学数据进行计算的能力。

为适应多类专业的需要,本书对正、反循环都作了较深入的阐述,对循环参数的选择与优化给予了足够的注意。

为加强理论联系实际,培养学生灵活运用热力学原理解决工程实际问题的能力,本书主要内容都有例题,而且注意配套,前后呼应,循序渐进,逐步深化,同时,还进行了简短讨论,以启发学生的思维、培养其解题的基本技能和加深对课程内容的掌握。

本书采用我国法定计量单位。

本书由西安交通大学刘桂玉(第三、四、七、十二、十三章)、刘咸定(绪论、第一、二、五、六章)钱立伦(第十一、十四、十五、十六章)和马元(第八、九、十章)编写,由刘桂玉任主编。本书聘请工程热物理课程指导委员会主任委员、天津大学教授吕灿仁担任审稿,同时,许多同行还对本书提出了不少宝贵意见和建议,在此,谨致深切感谢。

由于编者水平有限,加之有些内容和阐述方法属初次提出,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1987年6月于西安交通大学

刘咸定先生看来有较之的哲学倾向

主要符号表

拉丁字母

A	面积
A_n, a_n	无效能, 比无效能
A_u, a_u	无用功能, 比无用功能
A_w, a_w	非作功能, 比非作功能
a	加速度; 声速
C	摩尔热容
C'	容积热容
c	质量比热容(比热容); 流速
D, d	蒸汽量, 耗汽量
E, e	储存能, 比储存能
Ex, ex	有效能(炯), 比有效能(比炯)
Ex_1, ex_1	热量有效能, 比热量有效能
Ex_u, ex_u	内能有效能, 比内能有效能
Ex_h, ex_h	焓有效能, 比焓有效能
F, f	自由能, 比自由能
G	自由焓
g	比自由焓; 重力加速度
ΔG_f°	标准生成自由焓
H	焓
h	比焓; 普朗克常数
ΔH°	标准燃烧焓
ΔH_f°	标准生成焓
I, i	有效能损失(能量损耗), 比有效能损失(比能量损耗)
j	转动量子数
KE	宏观动能
K_c, K_p	化学平衡常数
k	比热容比; 绝热指数; 振动量子数
k_B	玻尔兹曼常数
L	长度

M	摩尔质量; 马赫数
M_{eq}	平均摩尔质量(折合摩尔质量)
$m, \dot{m}$	质量, 质量流量
N	功率; 粒子数
N_A	阿伏伽德罗常数
n	摩尔数; 多变指数; 平移量子数
PE	宏观位能
p	绝对压力
p_0, p_b	大气环境压力
p_g	表压力
p_i	分压力
p_v	真空度、湿空气的水蒸气分压力
p_s	饱和压力
Q, q	热量, 比热量
Q_v	定容热效应
Q_p	定压热效应
R, R_m	气体常数, 通用气体常数
R_{eq}	平均气体常数(折合气体常数)
r	潜热
S, s	熵, 比熵
S_m^0	标准摩尔绝对熵
T	开尔文温度
t	摄氏温度
T_s, t_s	沸点温度(饱和温度)
U, u	内能, 比内能
V, v	容积, 比容
W	膨胀功; 微态数
w	比膨胀功
W_l, w_l	耗散功, 比耗散功
W_{net}, w_{net}	净功, 比净功
W_t, w_t	技术功, 比技术功
W_{sh}, w_{sh}	轴功, 比轴功

$W_f (= \Delta p V)$	流动功
$w_f (= \Delta p v)$	比流动功
W_u, w_u	有用功; 比有用功
x	干度
x_i	质量成分
y_i	摩尔成分
z_i	容积成分
z	压缩因子; 高度

希腊字母

α	抽汽量; 离解度
α_p	热膨胀系数
γ	重度
ε	制冷系数; 压缩比; 化学反应度; 粒子能量
ε'	供热系数
η_O	卡诺循环热效率
$\eta_{C, s}$	压气机绝热效率
η_{ex}	有效能(烟)效率
η_N	喷管效率
η_T	蒸汽轮机和燃气轮机相对内效率
η_i	循环热效率
η_R	回热器效率或回热度
κ_s	定熵压缩系数
κ_T	定温压缩系数
λ	升压比
μ	化学势
μ_J	绝热节流系数
ξ	能量利用系数; 热量利用系数
π	压力比或增压比
ν	波动频率; 化学计量系数
ν_{cr}	临界压力比
ρ	密度; 膨胀比
σ	表面张力

τ	时间
φ	相对湿度
ω	比湿度(含湿量)
$p_{m,A}$	平均有效压力

下角标符号

a	湿空气中干空气的参数
c	临界点参数
cr	临界流动状况的参数
CV	控制容积
f	液体的参数
g	气体的参数
i	序号
in	进口参数
iso	孤立系统
ad	绝热系
j	序号
m	平均值; 每摩尔物质的物理量
0	环境的参数; 滞止参数
out	出口参数
p	定压过程物理量
r	对比参数
s	定熵过程物理量; 饱和状态参数
T	定温过程物理量; 汽轮机; 燃气轮机
u	有用的功量; 环境的参数(用于第十二章)
v	定容过程物理量; 湿空气中蒸汽的物理量
w	水的参数
B	锅炉
C	压缩机
con	冷凝器
G	发电机
P	管道

753057

目 录

主要符号表	1
绪论	1
§ 0-1 热能的利用和热力学发展简史	1
§ 0-2 热能转换装置简介	4
§ 0-3 工程热力学的研究对象	8
§ 0-4 热力学的研究方法	10
第一章 基本概念	13
§ 1-1 热力系和工质	13
§ 1-2 平衡态、状态参数	15
§ 1-3 压力、比容和密度	19
§ 1-4 温度	26
§ 1-5 状态公理、状态方程式	31
§ 1-6 能量、功和热量	32
§ 1-7 准静态过程和可逆过程	36
§ 1-8 循环	42
习题	43
第二章 热力学第一定律	47
§ 2-1 热力学第一定律的实质	47
§ 2-2 贮存能——内能和总能量	48
§ 2-3 迁移能——功和热量	49
§ 2-4 热力学第一定律及其表达式	55
§ 2-5 闭口系的能量分析	56
§ 2-6 稳定流动系的能量分析	58
§ 2-7 稳定流动能量方程的应用	66
* § 2-8 一般开口系的能量分析	72
习题	80
第三章 理想气体及其混合物的热力性质	85
§ 3-1 理想气体的概念和理想气体状态方程式	85

① 带 * 号部分属拓宽、深化的内容。跳过这些部分并不影响后续内容的学习。

§ 3-2 理想气体的比热容	91
----------------	----

§ 3-3 理想气体的内能、焓和熵	99
-------------------	----

§ 3-4 理想气体混合物	108
---------------	-----

习题	116
----	-----

第四章 理想气体的热力过程.....120

§ 4-1 研究理想气体热力过程的任务与方法	120
------------------------	-----

§ 4-2 基本过程	123
------------	-----

§ 4-3 多变过程	142
------------	-----

习题	153
----	-----

第五章 熵和热力学第二定律.....156

§ 5-1 过程的方向性和热力学第二定律	156
----------------------	-----

§ 5-2 自发过程的方向性与不可逆性	159
---------------------	-----

§ 5-3 卡诺定理	162
------------	-----

§ 5-4 能量贬值原理	169
--------------	-----

§ 5-5 熵和熵增原理	176
--------------	-----

§ 5-6 熵的意义和应用	180
---------------	-----

* § 5-7 热力学第二定律的微观解释	192
----------------------	-----

§ 5-8 稳定流动系的热力学第二定律分析	204
-----------------------	-----

* § 5-9 一般开口系的热力学第二定律分析	212
-------------------------	-----

§ 5-10 热力学温标	214
--------------	-----

习题	220
----	-----

第六章 有效能.....224

§ 6-1 有序能的有效能	225
---------------	-----

§ 6-2 热量的有效能	226
--------------	-----

§ 6-3 闭口系的有效能	231
---------------	-----

§ 6-4 稳定流动系的有效能	236
-----------------	-----

* § 6-5 一般开口系的有效能	243
-------------------	-----

§ 6-6 有效能效率	247
-------------	-----

习题	252
----	-----

第七章 化学热力学基础.....255

§ 7-1 基本概念	255
------------	-----

§ 7-2	热力学第一定律在化学过程的应用	260
§ 7-3	盖斯定律	268
§ 7-4	基尔霍夫定律——热效应与温度的关系	272
§ 7-5	理论燃烧温度	274
§ 7-6	化学反应的方向与化学平衡, 化学势	279
§ 7-7	化学平衡常数与平衡转移原理	291
* § 7-8	燃料的化学焓与燃烧焓损	302
§ 7-9	热力学第三定律和绝对熵	309
	习题	313

第八章 热力学一般关系式.....315

§ 8-1	偏导数基础	316
§ 8-2	麦克斯韦方程	319
§ 8-3	熵方程	321
§ 8-4	内能方程和焓方程	323
§ 8-5	比热容方程	329
§ 8-6	焦耳-汤姆逊系数	336
	习题	339

第九章 实际气体.....341

§ 9-1	相变和热力学面	341
§ 9-2	克劳修斯-克拉贝隆方程	349
§ 9-3	实际气体状态方程	352
§ 9-4	对比态原理和通用压缩因子	361
* § 9-5	实际气体焓、熵的计算	372
* § 9-6	用马丁-侯方程计算实际气体的比容	379
* § 9-7	用马丁-侯方程计算实际气体的焓和熵	386
	习题	389

第十章 蒸气的热力性质.....392

• § 10-1	蒸气的定压发生过程	392
§ 10-2	水和水蒸气的状态参数	395
§ 10-3	纯物质热力性质表	401
§ 10-4	不可压缩物质参数关系式	409

§ 10-5	蒸气热力性质图	412
§ 10-6	蒸气热力过程	417
	习题	424
第十一章	气体和蒸气混合物	428
§ 11-1	概说	428
§ 11-2	湿空气的状态参数	429
* § 11-3	绝热饱和器和绝热饱和温度	436
§ 11-4	湿度计与湿球温度	439
§ 11-5	湿空气的湿度($\omega-t$)图	441
§ 11-6	湿空气过程及其应用	443
	习题	448
第十二章	气体与蒸气的流动	451
§ 12-1	声速与马赫数	451
§ 12-2	一元稳定流动的基本方程	453
§ 12-3	定熵流动	455
§ 12-4	喷管的计算	461
§ 12-5	有摩擦的绝热流动	477
* § 12-6	喷管在非设计工况下的工作情况	480
§ 12-7	绝热节流	483
§ 12-8	合流	490
	习题	493
第十三章	气体和蒸气的压缩	496
§ 13-1	活塞式压气机	496
§ 13-2	余隙容积对压气机工作的影响	503
§ 13-3	叶轮式压气机	507
* § 13-4	引射式压缩机	512
* § 13-5	热化学压缩简述	514
	习题	516
第十四章	气体动力循环	518
§ 14-1	空气标准奥托循环	519
§ 14-2	空气标准狄塞尔循环	523
§ 14-3	空气标准混合加热循环	528

§ 14-4	各种空气标准循环的比较	533
§ 14-5	空气标准布雷顿循环	535
§ 14-6	简单燃气轮机的回热循环	548
§ 14-7	多级压缩中间冷却与多级膨胀中间再热和回热的理想燃气轮机循环	552
* § 14-8	燃气轮喷气发动机循环	555
习题		557

第十五章 蒸气动力循环 559

§ 15-1	朗肯循环	560
§ 15-2	蒸汽参数——压力和温度对朗肯循环的影响	564
§ 15-3	再热循环	568
§ 15-4	回热循环	573
§ 15-5	热电联产循环	581
§ 15-6	燃气-蒸汽联合循环	583
* § 15-7	有能量损失的实际循环	585
习题		592

第十六章 制冷循环 594

§ 16-1	任意工质卡诺制冷机循环	594
§ 16-2	空气标准压缩式制冷机循环	595
§ 16-3	蒸气压缩式制冷机循环	603
* § 16-4	有能量损失的蒸气压缩式制冷机循环	606
* § 16-5	蒸汽喷射式制冷机循环	608
* § 16-6	吸收式制冷机循环	610
* § 16-7	热泵循环	615
习题		616

附录 619

附表 1	各种单位制常用单位换算表	620
附表 2	常用物理常数	621
附表 3	一些气体的摩尔质量、气体常数和低压下的比热容	621
附表 4	气体的真实定压摩尔热容 C_p	622
附表 5	气体的平均定压摩尔热容 C_{pm}	623

附表 6	气体的平均定容摩尔热容 C_{vm}	624
附表 7	气体的平均定压比热容 C_{pm}	625
附表 8	气体的平均定容比热容 C_{vm}	626
附表 9	气体的平均定压容积热容 C'_{pm}	627
附表 10	气体的平均定容容积热容 C'_{vm}	628
附表 11	理想气体摩尔热容公式	629
附表 12	自 $0^{\circ}\text{C} \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 气体的平均比热容与平均容积热容 (直线关系式)	630
附表 13	理想气体的热力性质(内能、焓和绝对熵)	631
附表 14	理想气体空气的性质	635
附表 15	饱和水与饱和蒸汽热力性质表(按温度排列)	636
附表 16	饱和水与饱和蒸汽热力性质表(按压力排列)	639
附表 17	未饱和水与过热蒸汽热力性质表	641
附表 18	氨(NH_3)饱和液与饱和蒸气表(按温度排列)	648
附表 19	氟里昂 12(CCl_2F_2)饱和液与饱和蒸气热力性质表 (按温度排列)	650
附表 20	氟里昂 12(CCl_2F_2)饱和液和饱和蒸气热力性质表 (按压力排列)	653
附表 21	氟里昂 12(CCl_2F_2)过热蒸气热力性质表	654
附表 22	制冷工质的饱和蒸气压	660
附表 23	1 atm、 25°C 时的燃烧焓 ΔH_b^0 和汽化焓 H_{fg}	660
附表 24	1 atm、 25°C 时的生成焓、生成自由焓和绝对熵	661
附表 25	一些反应的定压热效应 Q_p	662
附表 26	一些反应的平衡常数 K_p	664
附表 27	一些碳氢燃料 C_aH_b 的化学焓 $E_{x,p}$	666
附表 28	饱和水和饱和蒸汽性质表	667
参考文献		668
索引		670
习题答案		678
附图 1	氨(NH_3)的压-焓($\lg p-h$)图	
附图 2	氟里昂 12(CCl_2F_2)的压-焓($\lg p-h$)图	
附图 3	湿空气的湿度图	

绪 论

§ 0-1 热能的利用和热力学发展简史

翻开人类的文明史，不难发现人类对能源的需求是随着社会生产力和科学技术的发展而增长的。远古时代，人类几乎不依赖任何自然界的能源，随着生产的发展，人类对能源的需求也在逐步增长。近代，能源的开发和利用已经成为衡量社会物质文明的重要标志。

迄今为止，人类不同程度地开发和利用了自然界的风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。其中风能和水能是自然界以机械能形式提供的能量，其它能源则主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。因此，能源的利用在很大程度上是热能的利用。

热能的利用有两种基本方式：一种是热利用，即把热能用来加热物体，诸如烘干、采暖、冶炼、合成或分解等，以满足生产和生活的需要。这种方式的利用可以追溯到人类开始熟食的几千年以前。另一种是动力利用，指的是把热能转换成机械能或电能，为机械制造、矿山冶金、石油化工、交通运输以及日常生活提供动力。自从18世纪中叶英国人瓦特发明蒸汽机以来，至今只有200多年的历史。然而从此开创了热能动力利用的新纪元，使社会生产力和科学技术突飞猛进地发展。由此可见热能动力利用的重要。

当前，利用得最多的能源是燃料的化学能。通过燃烧，使化学能以热能的形式释放，再将热能转换为机械能，或者再转变为电能

供人们使用。其次,是原子核内部蕴藏的巨大能量,通过裂变或聚变反应产生大量的热,再转变为电能而被利用。目前,原子能电站在许多国家已付诸实用,我国也即将有自己的核电站。地球上核燃料所储存的能量很丰富,因此利用原子能产生动力有着非常广阔的前景。太阳能、地热能直接利用有悠久的历史,但是把它们转换成动力还是不久以前的事。虽然它们的能量取之不尽、用之不竭,但大规模地开发,目前还有不少困难。

热能通过热机转换为机械能的效率较低,早期蒸汽机的热效率只有1~2%,近代大型蒸汽动力发电装置的热效率也只有35~40%。因此人们寻求不通过热机,使热能或燃料的化学能直接转换为电能的方法。前者有磁流体发电、热离子发电和太阳能电池等,后者有燃料电池等。但是,这些方法目前尚处于试验研究阶段,一般只在特殊场合应用。

热现象是人类最早、最广泛接触到的自然现象之一。古代,社会生产力很低,人类几乎只限于直接利用热能。18世纪以前,人们对于热只有一些粗略的观念,不可能建立正确的、科学的理论。自从1714年法伦海脱建立华氏温标以后,热学才走上实验科学的道路。随着实验的进展,一种可以解释简单实验结果的热质说产生了。热质说认为:热是一种无重量的流体,称为热质,可以进入一切物体中,不生不灭;物体的热和冷决定于物体所含热质的多或少。热质说是一种错误的学说,不能解释大家熟知的摩擦生热现象,终于被科学界所抛弃。

与热质说相对立的运动说认为:热是运动的一种表现。最初用实验事实驳斥热质说的是伦福德,他在1798年的一篇论文中指出:制造枪炮所切下的铁屑温度很高,而且不断工作,高温铁屑不断产生,既然热可以不断产生,就非是一种运动不可。之后,戴维在1799年用两块冰互相摩擦使之融化来支持热的运动说。当时,他

们的工作并未引起物理界的重视,原因在于还没有找到热、功转换的数量关系。

1824年,德国医生迈耶提出能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能互相转换,并从空气的定压比热容和定容比热容之差算出了热的功当量。在此前后,用电的热效应和用各种不同的机械生热法测出的热功当量,有一致的结果。这就说明热是一种能量,可以和机械能、电能互相转换,从而用实验证明了能量守恒定律。至此,热质说被最后否定,能量守恒定律成为科学界公认的自然规律。

热力学第一定律(实质就是能量守恒定律)的建立,给制造不消耗能量而可源源不断产生功的第一类永动机的企图以粉碎性打击。但是当时普遍应用的蒸汽机热效率很低,提高热效率的要求十分迫切。在热力学第一定律确立以前,法国工程师卡诺曾发表了关于热机效率的定理。他的定理本身虽然正确,但错误地应用热质说来证明。1848年,开尔文根据卡诺定理制订了热力学绝对温标。随后,克劳修斯和开尔文又对卡诺定理进行分析,指出:要论证卡诺定理必须根据一个新的原理——热力学第二定律。按照克劳修斯说法,热力学第二定律表述为:热量不能自动地从低温物体传到高温物体。这样,热力学第一、二定律奠定了热力学的理论基础。之后,热力学被广泛地应用在化学中,1906年奈斯特根据低温下化学反应的许多实验事实,归纳出热力学第三定律,这一定律确认绝对零度不能达到。热力学第三定律的建立使热力学理论更臻完善。

1942年美国凯南在热力学的基础上提出能量的有效能概念。此后,许多学者提出了闭口系、稳定流动系以及一般开口系的有效能,以及扩散有效能和化学有效能等概念和定义式。目前有效能分析方法已在工程技术科学中得到广泛应用。