

高等学校试用教材

工程热力学

曾丹苓 敖 越 朱克雄 李清荣 合编

人民教育出版社

高等学校试用教材

工程热力学

曾丹苓 教 越
朱克雄 李清荣 合编

人民教育出版社

内 容 提 要

本书是根据 1977 年 12 月教育部委托召开的高等学校工 科 技术基础课机械原理、机械零件、工程热力学、传热学教材会议讨论的“工程热力学”(蒸气动力类)编写大纲编写的。

本书与我国现行的同类型教材相比较,体系变动较大。全书共分四部分:一、热力学的基本概念及基本定律;二、物质的热力性质;三、热力过程及热力循环;四、化学热力学基础。本书力图加强基础理论,同时对如何运用热力学理论解决实际问题的方法也给予了较多的注意。各章均附有例题、思考题及习题。全书基本上采用国际单位制。

本书经教育部委托召开的工程热力学审稿会审定,推荐作为热能动力设备、锅炉、汽轮机等有关蒸气动力类专业的试用教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

工 程 热 力 学

曾丹苓 敖 越 合编
朱克雄 李清荣

*

人民教育出版社出版

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 17.5 插页 1 字数 423,000

1980 年 7 月第 1 版 1980 年 12 月第 1 次印刷

印数 00,001—8,000

书号 15012·0261 定价 2.10 元

符 号

拉丁字母

A	面积; 功热当量
a	加速度; 声速
C	摩尔比热
C'	容积比热
c	质量比热; 流速
E	总储存能量
e	比储存能量
F	自由能(赫姆霍茨函数)
f	比自由能
G	自由焓(吉布斯函数)
g	比自由焓; 重力加速度
ΔG_f°	标准生成吉布斯函数
H	焓
h	比焓
ΔH_b°	标准燃烧焓
ΔH_f°	标准生成焓
K_e	化学平衡常数
K_p	化学平衡常数
L	长度
M	分子量; 千摩质量; 马赫数
m	质量
$\dot{m}$	质量流率
N	功率
n	摩尔数; 多变指数
p	绝对压力
p_b	大气压力
p_t	表压力

p_v	真空度
p_s	饱和压力
Q	总热量
$\dot{Q}$	热流率
q	比热量
R	气体常数
R_M	通用气体常数
r	潜热
S	熵
S_M^0	绝对熵
s	比熵
T	开尔文温度
t	摄氏温度
T_s, t_s	沸点温度(饱和温度)
U	内能
u	比内能
V	容积
V_M	千摩尔容积
v	比容
W	膨胀功; 循环净功
w	比膨胀功; 比循环净功
W_i	耗散功
w_i	比耗散功
W_{net}	净功
w_{net}	比净功
W_t	技术功
w_t	比技术功
x	干度
x_i	混合物的质量成分
y_i	混合物的摩尔成分
Z	压缩性系数
z	高度

希腊字母

α_p	热膨胀系数
β_s	绝热压缩系数
β_T	定温压缩系数
ϵ	制冷系数; 气体循环压缩比; 热湿比
η	效率
η_c	卡诺循环热效率
$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率
η_N	喷管效率
η_{ri}	汽轮机和燃气轮机相对内效率
η_i	循环热效率
η_φ	炯效率
λ	气体循环定容增压比
μ	化学势
μ_J	绝热节流系数
ξ	热量利用系数
π	压气机增压比
ρ	密度; 内燃机预胀比
σ	表面张力
Φ	炯
φ	比炯; 相对湿度; 喷管速度系数
ω	含湿量

角注符号

a	湿空气中干空气的参数
c	临界点参数
cr	临界流动状况下的参数
c, v	控制容积(开口系)
f	液体的参数
g	气体的参数
i	序号
in	进口参数

i, s	孤立系统
j	序号
M	每千摩尔物质的物理量
0	周围环境的参数; 滞止参数
out	出口参数
p	定压过程的物理量
r	对比参数
s	定熵过程的物理量; 固体的参数; 饱和状态的参数
T	定温过程的物理量
v	定容过程的物理量; 湿空气中蒸汽的参数
w	水的参数
B	锅炉
C	压缩机
con	冷凝器
G	发电机
P	管道
T	汽轮机; 燃气轮机

序

本书是高等学校工科热能动力设备、锅炉、汽轮机等有关蒸汽动力类专业的工程热力学教材，它是根据 1977 年 12 月教育部委托召开的高等学校工科学技术基础课机械原理、机械零件、工程热力学、传热学教材会议讨论的“工程热力学”（蒸汽动力类）编写大纲编写的。

本书与我国现行的同类型教材相比较，体系变动较大。全书共分四个部分：第一部分着重阐明热力学的基本概念和基本定律，这是分析一切实际工程问题的理论依据；第二部分集中探讨物质的热力性质，其中除对理想气体及水蒸汽的热力性质进行具体介绍外，并论述了热力学理论在物质热力性质研究中的指导作用；第三部分联系实际分析了工程上常见的一些热力过程及热力循环；第四部分简单介绍了热力学基本定律在化学反应系统中的应用。

本书在编写中力图注意加强理论基础，同时对如何运用热力学理论解决实际问题的方法也给予了较多的注意，并力图使学生能在牢固掌握热力学基本理论和基本方法的基础上，联系实际，灵活地应用理论来解决实际工程问题。

为了适应不同专业教学的需要，使教与学能有所取舍，除基本教学内容外，书中还编入了一些在教学上供选择讲授的部分，这些内容用小号字排印。

为帮助同学复习，本书在各章配有一定数量的例题、思考题及习题，这是本书的一个重要组成部分。

全书基本上采用国际单位制，并附有各种单位的换算公式。

本书经 1979 年 6 月召开的审稿会审定，由华中工学院罗干辉同志担任主审，黄文迪同志也做了不少审稿工作。参加审稿会议单

位还有：清华大学、西安交通大学、上海交通大学、南京工学院、天津大学、华南工学院、同济大学、上海化工学院、浙江大学、哈尔滨工业大学、吉林工业大学、山东工学院、海军工程学院等廿六个院校。与会同志提出不少宝贵意见，谨在此向他们致以谢意。

参加本书编写工作的有曾丹苓、敖越、朱克雄、李清荣同志，由曾丹苓担任主编。由于编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1980年1月

目 录

符号	i
序	1
绪论	1
0-1 热能及其利用	1
0-2 能量转换装置的工作过程	3
0-3 工程热力学研究的对象及主要内容	8
0-4 国际单位制(SI)简介	9
思考题	13

第一部分 热力学基本定律

第一章 基本概念及定义	14
1-1 热力学	14
1-2 热力系	18
1-3 热力系的描述	19
1-4 基本状态参数	22
1-5 状态方程式, 状态参数坐标图	32
1-6 热力过程及热力循环	35
思考题	41
习题	41
第二章 能量与热力学第一定律	45
2-1 热力学第一定律的实质	45
2-2 通过热力系边界的能量交换之一——功	46
2-3 通过热力系边界的能量交换之二——热	53
2-4 循环过程热力学第一定律的表达式	54
2-5 热力学第一定律的推论, 状态参数内能	55
2-6 热力系与外界的物质交换	59
2-7 热力学第一定律的表达式	63
2-8 能量方程式的应用	70

思考题	76
习题	77
第三章 熵与热力学第二定律	80
3-1 概述	80
3-2 热过程的不可逆性	81
3-3 可逆过程	83
3-4 热力学第二定律的几种表述	85
3-5 卡诺定理	88
3-6 热力学第二定律推论 I, 热力学温度标尺	90
3-7 卡诺循环	98
3-8 热力学第二定律推论 II, 克劳修斯不等式	101
3-9 热力学第二定律推论 III, 状态参数熵	104
3-10 热力学第二定律推论 IV, 熵增原理	106
3-11 热力学第二定律的表达式, 熵方程	113
3-12 热力系的作功能力	117
3-13 热力学第二定律的统计解释	122
3-14 热力学第二定律的局限性, “热寂说”批判	124
思考题	125
习题	126

第二部分 物质的热力性质

第四章 一般热力学关系	130
4-1 主要数学关系	131
4-2 基本热力学关系式	133
4-3 热系数	136
4-4 定容比热和定压比热	137
4-5 熵、内能和焓的一般关系式	143
4-6 绝热节流及绝热节流系数	148
思考题	155
习题	156
第五章 气体的热力性质	158

5-1 理想气体及其状态方程	158
5-2 理想气体的比热、内能和焓	160
5-3 理想气体的熵	167
5-4 物质的集态变化	168
5-5 实际气体状态方程	173
5-6 根据实验数据组成状态方程式的方法	177
5-7 热力学相似和对比态方程式	179
5-8 实际气体的 Δu 、 Δh 及 Δs 计算方法举例	183
思考题	185
习题	186
第六章 单元系复相平衡	189
6-1 平衡判据	189
6-2 单元复相系平衡条件	192
6-3 平衡的稳定性	196
6-4 克劳修斯-克拉贝龙方程式	198
6-5 有曲界面时的汽-液平衡	202
思考题	209
习题	210
第七章 水蒸汽	212
7-1 概述	212
7-2 定压下水蒸汽的发生过程	213
7-3 水蒸汽的状态方程式及比热	217
7-4 水和水蒸汽的热力性质表	219
7-5 水蒸汽的焓-熵图	223
7-6 水蒸汽图表的应用	225
思考题	231
习题	231
第八章 理想气体混合物及湿空气	233
8-1 混合物的成分	233
8-2 道尔顿分压定律	236
8-3 分容积定律	238

8-4 理想气体混合物内能、焓、比热和熵的计算	239
8-5 湿空气及其状态参数	244
8-6 绝热饱和器及干-湿球温度计	248
8-7 湿度图	252
8-8 湿空气过程	254
思考题	263
习题	263

第三部分 热力过程及热力循环

第九章 气体的热力过程	266
9-1 概述	266
9-2 四种典型热力过程的分析	268
9-3 多变过程	282
9-4 热力过程焓分析举例	291
思考题	294
习题	294
第十章 气体与蒸汽的流动	297
10-1 概述	297
10-2 稳定流动的基本方程	297
10-3 定熵流动的基本特性, 声速与马赫数	300
10-4 气体在喷管和扩压管中的定熵流动	306
10-5 喷管中气体的流速和流量	310
10-6 理想气体定熵流动表解法	319
10-7 水蒸汽的定熵流动	323
10-8 工作条件变化时喷管内流动过程的分析	325
10-9 有摩擦的绝热流动	328
10-10 流动的一般规律	329
思考题	335
习题	336
第十一章 气体的压缩	337
11-1 压气机工作原理	337

11-2 压缩过程的热力学分析	340
11-3 活塞式压气机余隙容积的影响	344
11-4 多级压缩及中间冷却	346
11-5 引射器	351
思考题	352
习题	352
第十二章 分析动力循环的一般方法	354
12-1 分析循环的目的与一般方法	354
12-2 比较可逆循环工作效果的方法	355
12-3 分析实际动力装置不可逆循环的方法	357
12-4 几种方法的比较	362
思考题	365
第十三章 蒸汽动力循环	366
13-1 概述	366
13-2 蒸汽卡诺循环	367
13-3 朗肯循环	368
13-4 考虑不可逆损失时对朗肯循环的分析	371
13-5 蒸汽参数对循环热效率的影响	381
13-6 蒸汽再热循环	385
13-7 回热循环	387
13-8 热电循环	398
13-9 工质性质对循环热效率的影响	400
思考题	403
习题	404
第十四章 气体动力循环	406
14-1 燃气轮机装置定压加热理想循环	406
14-2 考虑不可逆损失时燃气轮机装置定压加热循环的分析	411
14-3 具有回热的燃气轮机装置循环	416
14-4 活塞式热气发动机理想循环	419
14-5 往复活塞式内燃机理想循环	422
14-6 喷气式发动机简介	430
思考题	431

习题	432
第十五章 能量直接转换及其它动力循环	434
15-1 概述	434
15-2 热电转换器	436
15-3 热离子能量转换装置	437
15-4 磁流体发电装置	439
15-5 太阳能电池	444
15-6 燃料电池	445
15-7 蒸汽-燃气联合循环	447
15-8 核动力装置循环	448
第十六章 制冷循环	450
16-1 逆卡诺循环	451
16-2 空气制冷循环	452
16-3 蒸汽压缩制冷循环	457
16-4 蒸汽喷射制冷循环	464
16-5 吸收式制冷循环	465
16-6 热泵供热循环	467
思考题	469
习题	469

第四部分 化学热力学基础

第十七章 化学热力学基础	471
17-1 概述	471
17-2 热力学第一定律在化学反应中的应用	472
17-3 化学反应的功和热	474
17-4 盖斯定律	476
17-5 反应的热效应与温度的关系——基尔霍夫定律	481
17-6 理论燃烧温度	485
17-7 热力学第二定律在化学反应中的应用	486
17-8 化学反应方向的判据	486
17-9 反应的最大功	487

17-10 化学平衡.....	491
17-11 热力学第三定律.....	503
思考题.....	509
习题.....	509
附录.....	511
附录表 I 一些物质的临界参数	511
附录表 II 一些气体的千摩尔质量、气体常数和低压下比热	511
附录表 III 理想气体摩尔比热公式	512
附录表 IV 气体的平均比热	513
附录表 V 饱和水与饱和蒸汽表	519
附录表 VI 未饱和水与过热蒸汽表	524
附录表 VII 饱和氨(NH ₃)蒸汽性质表	536
附录表 VIII 饱和氟里昂-12(CCl ₂ F ₂)蒸汽性质表.....	537
附录表 IX 气体动力函数表	538
附录表 X 物质在 1 atm、25°C 下的燃烧焓 ΔH_f^0	539
附录表 XI 物质在 1 atm、25°C 下的生成焓 ΔH_f^0 , 生成吉布斯 函数 ΔG_f^0 及绝对熵 S_M^0	539
主要参考文献.....	540

绪 论

0-1 热能及其利用

自然能源的开发和利用是人类走向繁荣的起点，能源开发和利用的程度又是生产发展的一个重要标志。因地制宜地充分利用我国的能量资源，是实现我国四个现代化的一个重要条件。所谓能源，是指为人类生产与日常生活提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止，已为人们所发现的自然界中可被利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中，除风能和水能是以机械能的形式（指空气的动能和水的位能）提供给人们以外，其余各种能源，都往往直接以热能的形式，或通过最为简便的能量转换，将它们转换为热能的形式提供给人们。太阳以热辐射的方式向地球传送大量的热能；地热可使水加热成为热水或蒸汽以传送热能；煤、石油和天然气等的化学能，往往通过燃烧，转换为热能；核能则无论通过裂变反应或聚变反应释放出来的能量，都是高温热能的形式。以上事实说明，人们从自然能源中获得的能量的主要形式是热能。因此，热能的研究和利用，对于整个人类的生产与生活有着巨大的意义。

热能的利用，有以下两种基本方式：

一种是直接利用，将热能直接用来加热物体，如烘干、蒸煮、采暖、熔化……等；另一种是间接利用，通常是指将热能转变为其它形式的能量如机械能或者电能而加以利用，热力发电、车辆、船舶、飞机的动力装置等皆属此类。

直接使用热能加热物体，为生活或生产工艺服务固然重要，然