

高等学校教材

热工学

(第三版)

陈 黥 吴味隆 等编著



高等教育出版社

高等学校教材

热 工 学

(第三版)

陈 黥 吴味隆 等编著



高等教育出版社

内容提要

本书是参照教育部制定的高等学校少学时工程热力学和传热学课程教学基本要求,在第一、二版的基础上修订而成的。

全书共七章,分热工理论基础和热工设备两大部分。热工理论基础包括工程热力学和传热学;热工设备部分包括锅炉设备、蒸汽动力装置、内燃机及燃气轮机装置、压气机及制冷装置,有关热力循环结合热工设备进行分析讲解。此外,专列一章“能源及其合理利用”,以拓宽能源科学知识和扩大视野。书中每章选编有例题、复习思考题和习题,书末附有参考答案和索引、附录。

本书可作为非能源动力类专业以及其他相关相近专业的热工学课程教材,适用教学学时数大致在 50~60 学时,也可供能源管理等方面管理干部和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工学/陈黥,吴味隆等编著. —3 版. —北京:高等教育出版社,2004.11(2005 重印)

ISBN 7-04-014513-8

I. 热... II. ①陈... ②吴... III. 热工学-高等学校-教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 107373 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 胡 纯 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 王效珍 责任印制 孔 源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京东光印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 26.75
字 数 500 000
插 页 2

版 次 2004 年 7 月第 1 版
2004 年 11 月第 3 版
印 次 2005 年 11 月第 2 次印刷
定 价 33.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 14513-00

第二版前言

本书参照国家教育委员会颁布的高等工业学校少学时工程热力学和传热学课程教学基本要求，在 1984 年第一版的基础上修订而成，适用于教学时间大致为 50~60 学时的非热工类及机械类非动力机械专业的热工学课程。

根据我国国情确定的能源方针是，开发和节能并重，近期把节能放在优先地位。我国目前单位能耗创造的国民收入远低于工业发达国家。这说明，我国能源没有得到充分而有效的利用，产值能耗较高。如何降低产值能耗，不仅是我国科学技术界的一个重要研究课题，也是一个世界性的学术问题。

热工学是研究能量转换规律、热能利用和热能传递的一门技术学科，能量转换和热能合理而有效的利用是这门学科的主要课题。在生产领域和人类日常生活中，随时随地、直接或间接地都会遇到热能利用和传热问题。因此，各行各业的工程技术人员，要把热能按质按量利用得好，就应该掌握热工学的基本知识、基本理论和热工主要设备的工作原理。

本课程的任务是使学生通过本课程的学习，具备：能量转换和热量传递的基本知识、基本理论和相应的热工分析计算能力；热工主要设备的一般工作原理、构造特征和性能指标；合理而有效地利用热能和节能技术的知识。

本书是一本通用教材，适用的专业门类较广，这是本书特点之一。本书体系分热工理论基础和热工设备两大部分，有关热力循环则结合热工设备进行分析讨论；采用小骨架编写原则，以避免篇幅过大。一些学校使用本书第一版的经验认为，这种体系和骨架的教学效果较好，应在第二版保留下来，这是本书特点之二。在内容方面，例如热工设备部分的锅炉设备，考虑到联系国内工程实际，主要介绍我国生产的工业锅炉，电厂锅炉设备不作介绍，而对汽车、拖拉机和农机专业，工业锅炉的内容可灵活处理，予以免学；又如，内燃机、压气机和制冷装置以中小型为主，大功率内燃机及大型压气设备均不介绍，避免内容偏多偏深，这是本书特点之三。为了反映我国在热工事业方面的新成就，“在新能源的开发利用”一节也注意到介绍核能、太阳能和地热的利用，以扩大学生的视野，这是本书特点之四。本书附录纳入了同济大学在材料热物性研究方面的一些成果，供学生和国内工程技术人员参考或采用，这是本书特点之五。此外，本书采用的量和单位凡国标 GB 3102—86 有规定的，一律按规定的采用，这些量和单位是与国际单位制单位完全一致的。另外，对于水蒸气的物性参数，率先采用了我国学者严家騄等根据国际上 1985 年水蒸气骨架数据编

制的水蒸气物性数据，这是本书特点之六。

全书共分七章，由同济大学热工教研室教师承担编写任务，并由蒋汉文教授负责主编。书中前言和绪论由蒋汉文编写；第一、二章由陈黥编写；第三章由吴味隆编写，第五、六章由岳孝芳编写；第四、七章由蔡长顺编写。蒋汉文在校阅各章内容的基础上，编写了全书的基本符号和索引。岳孝芳还担任各编者之间联络事宜。此次各章改写后，由主编人修改和统稿，希望使全书基本上有个统一的风格。全书采用我国法定计量单位。部分符号考虑到目前国内工程实际情况，仍采用习惯上使用的符号。

书末附有简要的水和水蒸气表及其焓熵图，图表数据采用严家驷等著《水和水蒸气热力性质图表》(高等教育出版社1994年出版)一书中的有关内容。

书中正文凡是有*号的内容，可根据教学时数的多少由任课教师决定取舍。另外，有些内容如水蒸气图表的应用和锅炉设备等章节如采用音像教学方法进行教学^①，可获得较好的教学效果。

本书承热工课程教学指导委员会委托上海交通大学杨强生教授主审。他提供了许多来自教学实践的经验和意见，十分细致和可贵，对提高教材质量起着一定的作用，编者深表谢意。嗣于1992年10月又经热工课程教学指导委员会工程热力学课程教学指导小组全体会议评审通过，可作为高等工业学校热工学课程的教材。编者对审稿会与会同志和采用过第一版《热工学》的教师提出的宝贵意见表示衷心感谢。由于我们教学水平有限，书中错误和缺点在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

蒋汉文

1993年3月

^① 锅炉设备及汽轮机录像带可分别向西安交通大学和浙江大学电化教学部门洽购。

第三版前言

本书是参照教育部制定的高等学校少学时工程热力学和传热学课程教学基本要求，结合征集到的、使用过本书第一、二版的师生和其他读者的意见和建议，在1984年第一版和1994年第二版的基础上修订而成的。它是一本通用教材，适用专业门类较广，主要可作为非能源动力类专业的热工学课程的教材，适用的教学时数大致在50~60学时。

能源利用，绝大部分是通过热能或由热能转换为其他形式的能量加以利用的，即便是那部分未被充分利用的余能，大多也是以热能形式存在，要回收和有效利用它们也离不开热能的转换和传递。热工学就是研究能量转换规律、热量传递和热能有效利用的一门技术学科。学生通过本课程的学习，可以掌握能量转换和热量传递的基本知识、基本理论及相应的热工分析计算能力，热工主要设备的一般工作原理、构造特征和性能指标，合理而有效地利用热能和节能技术的知识，从而具备一定的研究分析和解决生产、生活中热能利用问题的能力，为今后在实际工作中更好地储能、用能和节能打下坚实的基础。

本书保持原有的特色和框架体系，注重理论与实践相结合，力图使所叙述的内容寓理深刻而讲解通俗、透彻。修订时，只更新内容，不增篇幅，及时反映该学科国内外的新进展、新成果，更好地适应教学改革及教学的实际需要。

本书共七章，仍分为热工理论基础和热工设备两大部分。热工理论基础部分注意理论的准确性、完整性和系统性，通过提炼力图使学生能较好地掌握热工基础理论和基本定律的实质。热工设备部分加强了设备与基础理论的联系，将热力循环的内容结合各热工设备予以分析讨论，通过基本热力过程和循环的分析计算，帮助学生掌握热工基础理论知识和提高分析及解决工程实际问题的能力。

由于我国经济保持快速增长，能源需求量将持续上升，环境压力也日益严重。因此，保障能源的合理利用，并与经济发展、环境保护相协调已成为我国可持续发展战略的重要一环。第七章能源及其合理利用简要介绍了我国能源资源及能源发展战略、提高能源利用率的方法和途径以及新能源的开发与利用，以拓展学生对有关能源科学知识的认识，扩大视野。

本书正文中凡有*号的内容，可根据不同专业及教学时数的多少，由任课教师决定取舍。有些内容如水蒸气图表应用和锅炉设备等章节，如有条件采用音像教学方法进行教学，将可获得更好的教学效果。

为了便于学生复习和掌握所学的基础知识，本书每章末选编有复习思考题和习题，并在书末附有参考答案。此外，书末还附有索引、附录，包括简要的水和水蒸气表及焓熵图，采用的是我国学者严家骅教授等编制的《水和水蒸气热力性质图表》。

本版修订工作由同济大学陈黥教授和吴味隆教授完成，原热工课程教学指导委员会委员梅飞鸣教授审阅了本书稿，提出了许多建设性的建议和宝贵意见。

对已故的本书主编、原热工课程教学指导委员会委员蒋汉文教授和同事蔡长顺教授表示深切怀念。对梅飞鸣教授结合自己长期积累的教学经验，对本书修订提供了许多建设性建议和宝贵意见，深表感谢。对采用过本书第一、二版并提出诸多宝贵意见和建议的师生，对本书所引用的参考文献作者以及所有关心、帮助过本书编写和修订的同志，在此一并致以最诚挚的谢意。

本书涉及面较广，囿于编著者水平，疏漏和谬误之处，敬请读者批评指正。

编著者

于同济大学

2004.08.08

基本符号

英文字母

A	表面积；截面积；传热面积
a	声速；导温系数
c	比热容；临界点；速度；绝对速度；余隙比
c_m	摩尔热容
c'	体积热容
c_b	黑体辐射系数
d	直径；含湿量
E	辐射力；系统总能量
E_λ	单色辐射力
E_x	焓
e	单位质量总能量
e_x	单位质量焓(比焓)
F	作用力；浮升力
G	投入辐射；循环水量；内燃机燃料耗量
Gr	格拉晓夫数
g	重力加速度；油耗率
H	焓；高度
h	比焓；对流换热表面传热系数
I	太阳辐射总辐射强度；电流
J	有效辐射
K	热能利用系数
k	总传热系数
L	长度
M	摩尔质量
Ma	马赫数
M_r	相对分子质量
m	质量；级数
Nu	努塞尔数
n	多变指数；物质的量；旋转速度

P	功率
Pr	普朗特数
p	压力
p_b	大气压力
p_v	真空度
Q	热量; 燃料发热量; 制冷量; 辐射热能
q	单位面积传热量; 热流密度; 单位质量传热量
q_m	质量流量
q_v	体积流量
R	摩尔气体常数; 热阻; 电阻
R_g	气体常数
Re	雷诺数
r	半径; 汽化潜热
S	熵
s	比熵; 行程(冲程)
T	热力学温度
t	摄氏温度
U	总热力学能; 周边长度; 电位差
u	质量热力学能(比热力学能); 汽煤比; 圆周速度; 速度
V	体积; 电位(电势)
v	比体积; 速度
W	总功
w	单位质量传递功; 速度
w_B	物质 B 的质量分数
w_{net}	循环净功
$X_{1,2}$	角系数
x_B	物质 B 的摩尔分数
Z	高度; 级数; 气缸数

希腊字母

α	吸收比; 喷管出口角; 回热抽气量
α_v	体膨胀系数
β	肋化系统; 动叶片进出口角; 压力比
δ	厚度
ε	黑度(发射率); 压缩比; 制冷系数

ε'	供热系数
ζ	热系数
η	热效率；肋片效率；集热器效率；动力粘度
η_c	循环热效率
η_v	容积效率
κ	绝热指数
λ	导热系数；波长；定容增压比；单色辐射
ν	运动粘度
ν_{cr}	临界压力比
ρ	密度；绝对湿度；定压预胀比；反击度；反射比
σ_b	黑体辐射常数
τ	时间；粘性力；内燃机冲程数；透射比
Φ	热流量
φ	相对湿度；速度系数
φ_B	物质 B 的体积分数

英文和其他角标

a	干的
b	黑体
c	临界；卡诺循环；冷凝
cond	导热
conv	对流
cr	临界的
d	传动；露点
e	有效；蒸发；表压的
f	流体
i	指示的
i	泛指任一组成气体
in	流进；内部
l	液体；损失
m	机械；平均；摩尔
max	最大
min	最小
n	多变指数
0	标准状态；理论；循环

out	流出；外部
p	定压的
q	热量的
R_c	过冷
rad	辐射
r	相对的
re	可逆的
s	饱和；轴；吸收
T	定温
t	技术的
v	定容
v	蒸汽的
w	壁面的；湿的
wat	水
1	初态；进口
2	终态；出口
'	饱和液体；进口
"	饱和蒸汽；出口

锅炉设备角标

ad	燃料的空气干燥基
ar	燃料的收到基
d	燃料的干燥基
daf	燃料的干燥无灰基
gg	供给
gl	锅炉
gr	高位
gs	给水
k	空气
net	低位
ps	排污水
py	排烟
q	蒸汽
ss	损失
yx	有效

目 录

基本符号	1
绪论	1

第一篇 热工理论基础

第一章 工程热力学	11
第一节 基本概念及定义	11
第二节 热力学第一定律	25
第三节 气体的热力性质和热力过程	34
第四节 热力学第二定律	57
第五节 水蒸气	71
第六节 气体和蒸汽的流动	83
第七节 混合气体及湿空气	90
复习思考题	101
习题	105
第二章 传热学	113
第一节 概述	113
第二节 导热	118
第三节 对流换热	133
第四节 热辐射和辐射换热	156
第五节 传热及换热器	171
复习思考题	181
习题	184

第二篇 热工设备

第三章 锅炉设备	193
第一节 锅炉设备基本知识	193
第二节 锅炉燃料及燃烧	198
第三节 燃烧设备——炉子	207

第四节	汽锅型式及辅助受热面	220
第五节	锅炉运行的经济性	234
第六节	锅炉通风、烟气净化及给水处理	240
* 第七节	锅炉设备的安全运行和维护	243
	复习思考题	244
	习题	246
第四章	蒸汽动力装置	249
第一节	朗肯循环	249
第二节	回热循环	254
第三节	热电联供循环	256
第四节	工业企业蒸汽动力装置	258
第五节	汽轮机	260
	复习思考题	269
	习题	269
第五章	内燃机及燃气轮机装置	271
第一节	概述	271
第二节	内燃机的分类与型号	272
第三节	内燃机的基本构造	274
第四节	四冲程内燃机的工作原理	286
第五节	二冲程内燃机的工作原理	292
第六节	内燃机的性能指标和负荷特性	294
第七节	内燃机的热平衡	298
第八节	内燃机的污染和噪声	299
* 第九节	燃气轮机装置	300
	复习思考题	303
	习题	304
第六章	压气机及制冷装置	305
第一节	压气机的应用和分类	305
第二节	压气机的基本工作原理和构造	306
第三节	单级活塞式压气机的工作过程	310
第四节	活塞式压气机的功率和效率	313
第五节	多级压缩及中间冷却	314
第六节	制冷装置的应用和分类	318
第七节	蒸气压缩式制冷循环	319
第八节	蒸气压缩式理论制冷循环的热力计算	323

* 第九节 吸收式制冷	327
* 第十节 蒸汽喷射式制冷	331
第十一节 热泵装置	332
复习思考题	333
习题	334
* 第七章 能源及其合理利用	335
第一节 能源的分类	335
第二节 我国的能源	337
第三节 节能原理与节能	342
第四节 新能源的开发利用	350
复习思考题	363
习题	363
习题答案	365
索引	371
主要参考文献	378
附录	379
表 1 国际单位制与工程单位制的单位换算表	379
表 2 气体的平均比定压热容和容积热容表	380
表 3 常用气体的某些基本热力性质	382
表 4 饱和水与饱和水蒸气表(按温度排列)	382
表 5 饱和水与饱和水蒸气表(按压力排列)	384
表 6 未饱和水与过热蒸汽表	387
表 7 干空气的热物理性质(0.101 3 MPa)	394
表 8 气体的热物理性质(0.101 3 MPa)	395
表 9 干饱和水蒸气的热物理性质	396
表 10 饱和水的热物理性质	397
表 11 饱和液体的热物理性质	398
表 12 固体材料的热物理性质	399
表 13 物体表面热辐射的法向发射率	400
表 14 换热设备中 h 及 k 的概值范围	401
表 15 国家标准 GB 3102—93 中常用热工量的名称和单位	402
表 16 双曲线函数值	404
表 17 氟利昂 134a(R134a)的饱和性质(温度基准)	405
表 18 氟利昂 134a(R134a)的饱和性质(压力基准)	406
表 19 氟利昂 134a(R134a)过热蒸汽的热力性质	407

湿空气焓湿图

氨 (R717) $\lg p - h$ 图

绪 论

在人类利用能源的长期历史进程中，直到目前为止，利用最多的仍是热能。燃料燃烧把化学能转变为热能，广泛应用于生产和生活。热能的利用主要有两种方式：一种是直接利用，把热能用于直接加热物料或用以制冷；另一种是间接利用，把热能转换成为机械能，或再转换成为电能。热能利用的实质是能量的转换和热量的传递，其中就包含着热能利用的上述两种方式。

我国的能源资源，就其蕴藏量而言，是世界上能源最丰富的国家之一：煤炭储量仅次于俄罗斯和美国，位居世界第三；水力资源的储量为世界之首；石油和天然气资源也显示有良好的前景。但以人口平均数来看并不富足，每人能源占有量远远低于世界平均水平。而单位国民生产总值(GDP)的能耗却高出世界平均水平，是世界平均值的4.7倍，能源利用率只有33%，低于世界先进水平约10个百分点，能源安全形势十分严峻。能源问题已成为我国经济发展的长期制约因素。因此，在社会经济发展和人民物质生活提高所需能源进一步增长的同时，必须加大能源开发力度，贯彻“开发与节约并举，把节约放在首位”的方针，以缓解我国能源供应和环境保护产生的巨大压力。节约使用各种能源，建立节能型工业、节能型社会，是增强经济发展后续保障能力的重要途径。节约能源的重点问题是如何合理并有效地利用热能。要解决这个问题，各行各业的科技人员对热工学势必都应具备一定的基本知识，以利于开展节能工作。当然，推行先进节能技术，加强热能管理工作，都将有效提高热能利用水平，也会发挥一定的节能效果。

热工学是热能工程学的简称。它所研究的是工程技术中如何合理而有效地利用热能，它是一门技术学科，它的建立和发展与热工理论和热工技术的发展紧密相关。

0-1 热能利用与生产力的发展

人类在长期的生产实践中逐步认识和掌握了热能利用的规律，使之有效地为自己服务。同时，热能的利用对人类文明和社会生产力的发展也起了非常重大的推动作用。

“摩擦生火第一次使人支配了一种自然力”^①，这是人类利用热能的开始。

^① 恩格斯：《反杜林论》，人民出版社，1974年，第112页。

从此，人类可以利用火来煮熟食物、取暖和照明；可以用火来冶炼矿石，获得金属用以制造劳动工具，使农业生产得到迅速发展。但是，当时人类只能把草木燃料中的化学能转变成为热能，却不会把火所产生的能量转换成为动力以替代或减轻人们的体力劳动。

直到18世纪中叶，热能的利用仍局限于作为加热的能源。随着生产的发展，动力的需求量日益增长，风能和水能等自然动力的缺点逐渐暴露，这就迫使人们寻找一种新的不受气象、地理等自然条件限制和影响的动力来源，促成了蒸汽机的出现。1784年，英国詹姆斯·瓦特(James Watt)在前人研制的基础上制成了性能较为良好的热机——蒸汽机。

蒸汽机的广泛使用是热能利用技术的一个飞跃。摩擦生火完成了从机械能到热能的转换，而蒸汽机则成功地使热能转换成机械能。从此，提供热能的燃料也能提供动力，大大地推进了社会生产力的发展，导致第一次“工业革命”^①的到来，同时也推动了能量转换等热工理论的研究。

蒸汽机的广泛使用和热工理论研究的结果，促使生产飞速发展和世界贸易、各地往来日益增多，从而对原动机又提出了高速、轻便等新的要求。19世纪下半叶出现了内燃机。这是一种把燃料直接放置在气缸中燃烧做功的新型热机，不再需要笨重的锅炉，而且比蒸汽机效率高，使用方便，因此很快得到推广和应用。就是现在，在交通运输和需要移动的中、小型动力机械中，所使用的原动机绝大部分仍是内燃机。

在内燃机出现的前后，蒸汽动力得到了重大改进。1894年制成了一种全新的蒸汽轮机(或称汽轮机)，它利用蒸汽膨胀产生动能，直接推动涡轮，使之高速旋转，且结构简单、效率较高。目前汽轮机大都用来拖动发电机发电，其发电量占世界总发电量的 $\frac{2}{3}$ 以上，单机功率在世界上已达1300 MW级水平。

随着科学技术的进步和社会生产力的发展，人类利用的能源不断更替和扩大。原子核能的利用，又开创了热能利用的新阶段。原子核能的利用是使原子核发生裂变而产生大量热能，并把它用于发展社会经济。核电站就是核能利用的范例。

在早期探索热能利用方面，我们祖先曾有过极其辉煌的功绩。早在商朝，已经会利用热能创造出水平很高的冶炼和铸造技术。隋朝民间娱乐盛行的流星焰火，宋朝发明的火箭、火枪，这些都可作为现代火箭和枪炮的始祖。北宋时

^① 蒸汽机在英国广泛使用后，促使工业生产一日千里地向前发展，在历史上称为“产业革命”。但近年来也有把这一次产业革命称为第一次“工业革命”，这是以蒸汽机的出现为标志的。到了19世纪70年代，在德国广泛使用电力，又一次迅猛地提高了劳动生产率，使工业生产进一步向前大发展，人们称之为第二次“工业革命”。