

高等学校试用教材

# 热 工 学

同济大学 蒋汉文 主编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是根据1981年在广州召开的热工教材编审委员会上原则通过的四年制非动力类《热工学教学大纲(参考性草案)》(60学时)编写的。

全书依据传统的体系,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、工业企业蒸汽动力装置、内燃机、压气机及致制冷装置。此外本书对能源问题也作了简要的介绍。书中各章均有例题,复习思考题和习题,书末附有热工学常用图表,外加索引。本书全部采用国际单位制,但在附录中列有工程单位与国际单位的换算表。

此书经热工教材编审委员会审查同意为非动力类专业热工学试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

热 工 学

同济大学 蒋汉文 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 13 插页 3 字数 310,000

1984年4月第1版 1984年10月第1次印刷

印数 00,001—7,350

书号 15010·0583 定价 2.45 元

## 前 言

本书是依据 1981 年高等学校工科热工教材编审委员会原则通过的四年制工科非动力类专业试用的《热工学教学大纲（参考性草案）》(60 学时)，并参照教育部 1980 年以来颁发的有关理工科基础课和技术基础课教材编写工作的精神进行编写的。在编写中，还参考了同济大学热工教研室编《热工学》(1960 年 10 月，人民教育出版社出版)。

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。我国目前单位能源消耗所能创造的国民收入比较少，远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，能耗偏高。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题目，也是一个世界性的学术问题。

热工学是研究热能利用的一门技术科学，把热能合理而有效地加以利用是这门科学的主要课题。在生产领域和人类日常生活中，随时随地，不论直接或间接都会遇到热能利用的问题。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，就应该学些热工学的基本知识和基本理论。

本课程的任务是使学生通过本课程的学习，能够具备：有关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；有关热工设备的一般工作原理、构造特征和性能指标；有关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，适用的专业门类可以较多，这是本书特点之一。本书在内容方面，例如热工设备中的锅炉设备，考虑到联系国内工程实际，只介绍我国生产的工业锅炉，电厂锅炉设备就不

作介绍；又如内燃机、压气机和致冷装置，亦以中、小型的为主，大功率内燃机和大型压气机设备均不介绍，以避免内容偏多偏深。从逐步提高当前教学质量的实际出发，篇幅也不宜过大，但又不能将内容浓缩。因此，凡是大纲中未列的内容，尽量少写，以免加重学生负担，这是本书特点之二。为了反映现代热工学领域内的部分新成就，书中也适当介绍一些在过去教学大纲中没有的内容，如焓的概念、热管简介、沸腾炉、太阳能利用、企业能量平衡、企业热电联产和余能利用等，以加强节能技术方面的基本知识和开扩学生在学习热工学过程中的视野，这是本书特点之三。此外，在本书的附录里，纳入了国内自己测定的少数热物性数据，供学生和工程设计人员参考，这是一个初步尝试。

全书共分七章，由同济大学热工教研室教师承担编写任务，并由蒋汉文负责主编。书中第一二两章热工理论基础由陈黉编写；绪论和第三章锅炉设备由吴味隆编写；第五章内燃机、第六章压气机和致冷装置由岳孝芳编写；第四章工业企业蒸汽动力装置和第七章能源由蔡长顺编写。邱信立在校阅各章内容的基础上，编写了全书的基本符号和索引。全书各章初稿写成后，由主编人修改和统稿，企图使全书基本上有个统一的风格。全书采用国际单位制。但部分符号考虑到目前国内工程实际情况，例如有关热工设备方面的符号角标，仍采用国标或部标中规定的符号角标。

书末附有简要的水和水蒸气表及其焓焓图。图表数据都是从庞麓鸣、陈军健编的《水和水蒸气热力性质图和简表》(人民教育出版社, 1982年版)一书中摘录下来的。

本书承热工教材编审委员会委托江苏工学院王同章同志担任主审，委托热工教材编审委员周坤永和吕灿仁两同志担任复审，并经1983年11月热工教材编委会全体会议审查同意作为非动力类各专业《热工学》试用教材。参加本书审稿诸同志，对本书稿都

提出了很多宝贵意见，编者在此谨向他们表示衷心的感谢。本书内容丰富，而篇幅有限，所以在取材上较费周章。加以近年来教学计划中设置热工学课程的专业还不多，因此总结这方面教学实践经验的机会也较少，再加编者教学水平有限，书中错误和缺点，在所难免，我们热忱欢迎读者批评指正。

编 者

1984年2月

# 目 录

前言	1
基本符号	4
绪论	1

## 第一篇 热工理论基础

<b>第一章 工程热力学</b>	9
第一节 基本概念及定义	9
第二节 热力学第一定律	33
第三节 气体热力过程	44
第四节 热力学第二定律	55
第五节 水蒸气	66
第六节 气体和蒸汽的流动	79
第七节 混合气体及湿空气	87
复习思考题	101
习题	104
<b>第二章 传热学</b>	110
第一节 概述	110
第二节 导热	117
第三节 对流换热	129
第四节 热辐射和辐射换热	150
第五节 传热及换热器	166
复习思考题	178
习题	180

## 第二篇 热工设备

<b>第三章 锅炉设备</b>	185
-----------------	-----

第一节	锅炉设备基本知识	185
第二节	锅炉的燃料及燃烧	192
第三节	燃烧设备——炉子	201
第四节	汽锅型式及辅助受热面	211
第五节	锅炉运行的经济性	232
第六节	锅炉给水、通风及消烟除尘	239
第七节	锅炉设备的安全运行和维护	241
	复习思考题	243
	习题	244
<b>第四章</b>	<b>工业企业蒸汽动力装置</b>	246
第一节	蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	246
第二节	回热循环	252
第三节	热电循环	255
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	270
	习题	270
<b>第五章</b>	<b>内燃机</b>	272
第一节	内燃机的燃料	273
第二节	四冲程内燃机的工作原理	274
第三节	二冲程内燃机的工作原理	282
第四节	内燃机的主要性能指标和负荷特性	283
第五节	内燃机的热平衡	288
第六节	内燃机的污染和噪声	289
第七节	内燃机的基本构造	291
	复习思考题	305
	习题	305
<b>第六章</b>	<b>压气机及致冷装置</b>	306
第一节	压气机的应用和分类	306
第二节	压气机的基本工作原理和构造	307
第三节	单级活塞式压气机的工作过程	312

第四节	活塞式压气机的功率和效率	315
第五节	多级压缩及中间冷却	317
第六节	活塞式压气机的调节和维护保养	321
第七节	致冷装置的应用和分类	324
第八节	蒸气压缩式致冷循环	325
第九节	蒸气压缩式致冷循环的热力计算	330
第十节	吸收式致冷	334
第十一节	蒸汽喷射式致冷	339
第十二节	热泵装置	341
	复习思考题	343
	习题	343
<b>第七章</b>	<b>能源</b>	<b>345</b>
第一节	能源概述	345
第二节	新能源的开发利用	349
第三节	能源的节约	359
	复习思考题	368
	习题	369
<b>主要参考文献</b>		<b>370</b>
<b>索引</b>		<b>371</b>
<b>附录</b>		<b>378</b>
表 1	国际单位制与工程单位制的单位换算表	378
表 2	气体的平均定压质量比热和容积比热表	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)	383
表 5	饱和水与饱和水蒸气表(按压力排列)	386
表 6	未饱和水与过热蒸汽表	389
表 7	干空气的热物理性质(1.013bar)	395
表 8	气体的热物理性质(1.013bar)	396
表 9	干饱和水蒸气的热物理性质	397
表 10	未饱和水(1.013bar)与饱和水的热物理性质	398
表 11	饱和液体的热物理性质	400



表 12	固体材料的热物理性质 .....	401
表 13	物体表面热辐射的法向黑度 .....	403
表 14	换热设备中 $\alpha$ 及 $k$ 的概值范围 .....	404
<b>附图 1</b>	<b>水蒸气焓熵图</b>	
<b>附图 2</b>	<b>湿空气焓湿图 (760mmHg)</b>	
<b>附图 3</b>	<b>氨 <math>\lg p-h</math> 图</b>	
<b>附图 4</b>	<b>氟利昂 12 <math>\lg p-h</math> 图</b>	

## 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。热能的利用不外乎两种方式:一种是直接利用,把热能用于直接加热物料;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。

根据我国能源资源,就已探明的煤炭及石油储量而言,虽然比较丰富,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数,而且热能利用率较低,今后随着工农业的向前发展和人民生活水平的不断提高,能源的供需关系将长期处于紧张状态。这就要求我们必须一面抓开发,一面抓节约,而在近期要把节能放在优先地位。节约能源的重点问题也就是如何合理并有效地利用热能。要解决这个问题,势必各行各业的科技人员对热工学都要具备一定的基本知识,以利于在本单位内开展节能工作。当然,加强热能管理工作,对于改进热能的利用,也会发挥一定的节能效果。

热工学可认为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,它是一门技术科学,它的建立和发展又与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,正由于热能的利用,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”<sup>①</sup>，这是人类利用热能的开始。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。

直到十八世纪中叶，热能的利用还仅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，大大地推进社会生产力的发展，导致第一次“工业革命”<sup>②</sup>的到来，同时也推动了能量转换等热工理论的研究。

由于蒸汽机的广泛使用和热工理论研究的结果，同时也是生产的飞速发展和世界贸易、各地往来日益增多的需要，对原动机又提出了高速、轻便等新的要求。十九世纪的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作功的新型热机，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

---

① 恩格斯：《反杜林论》1974年人民出版社第112页。

② 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。到了十九世纪七十年代，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”。

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涡轮机(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三分之二以上,单机功率已达百万千瓦级的水平。

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。

我们祖先在早期探索热能利用方面,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。北宋时代制造的“走马灯”是世界上最早利用热气流产生机械旋转运动的装置,其基本原理与现代燃气轮机相同,这比欧美同类记载至少要早400多年。但是近一二百年间,国外热工技术飞速发展,而我国因封建君主制度的统治和外来帝国主义的侵略,使热工技术和生产力的发展受到严重束缚,以致旧中国的工农业生产水平极为落后,人民生活长期处于水深火热的灾难境地。

新中国成立后,在党的领导下,我国热工技术得到了很快的发展。现在我国不但已能生产三十万千瓦的蒸汽动力装置的全套设备,且能自己设计和制造上万匹马力的船用柴油机、数千千瓦的机车内燃机。用多级火箭发动机发射了人造卫星和洲际导弹,并能按计划回收太空飞行器。此外,核电站也正在积极建设之中。所有这一切,都有力地说明我国的热工技术已逐步走上了现代化的轨道。

## 0-2 热工学研究的对象及主要内容

众所周知,在现代技术领域里,热能的应用甚为普遍和重要,是当前耗用能源的主要形式。人们不仅直接把热能用作加热的能源,其量更大的还是通过热机把它转换为另一种能量形式——机械能或电能。例如锅炉生产的高温高压蒸汽所携带的热能,通过汽轮机转换为机械能,而后带动发电机,输出电能。但是在实现能量转换的过程中,总有很大份额的热能损失。因此,为了合理而有效地实现热能与其他能量形式的转换,就必须对能量转换规律,对空气、水蒸气、燃气和湿空气等热力性质加以研究,对不同的热力过程和热力循环进行分析、计算,探讨提高转换效率的有利途径。这正是本课程中工程热力学所要论述的主要内容。

无论在热能的直接利用和间接利用中,都存在着热量的传递。这就促使我们去研究热量的传递规律,以改善传热过程和合理利用热能。事实上,凡存在温度差的地方,就有热量自发地从高温物体向低温物体的传递过程。例如生产蒸汽的锅炉、蒸汽动力装置中的冷凝器等都存在着热量从一种流体传递给另一种流体的传热过程。又如换热量大、体积小、材料省的换热器,一直是人们所关心的传热问题。此外,如何减少热管道的热损和冷管道的冷耗问题,如何处理建筑物的保温隔热,以节约能源。凡此种都需要引用传热学的知识,也正是本课程中传热学所要论述的主要内容。传热学是本课程的理论基础的一部分,它与工程热力学组成热工理论基础。

前已提及的锅炉设备、蒸汽动力装置、内燃机均属热工设备,它们承担着热能利用的具体任务,它们的工作原理、构造特征以及性能指标等,都要受热工理论基础的指导。另外,在现代工业的许

多部门里,还需要应用压气机、致冷装置和热泵,这些设备都是以消耗机械能等为代价分别用它们来产生压缩气体、降低或提高物体的温度。它们是属于另一类热工设备,尽管它们的工作过程与热机相反,却同样存在着能量的转换,也要以热工理论基础作指导。在热工设备各章中,主要是阐明这些设备的工作原理及性能指标,以了解它们的用能水平,这是热工设备部分的主要内容。

目前能源的利用,主要在于如何充分用好常规能源?从开发新能源出发,如何利用太阳能、地热能以及原子核能?从节能出发,如何从企业能量平衡和企业热电联产实现节能?这些问题也就是在能源这一章所要阐明的主要内容。

综上所述,以工程热力学和传热学为理论基础,以锅炉设备、工业企业蒸汽动力装置、内燃机、压气机和致冷装置等为主要热工设备的基本知识,构成了本课程——热工学的主要内容。此外,结合我国目前的能源形势,把节约能源的思路和措施贯穿在热力学的有关章节,是十分必要的。

### 0-3 国际单位制简介

在热工学中涉及的物理量比较多,以往采用工程单位制。近几年来,随着科学技术的发展,国际间的交往日益频繁,为便于单位制不同而引起混乱和繁琐的换算,世界各国决定逐步采用国际单位制(SI)<sup>①</sup>。我国国务院于1984年2月27日发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,决定在采用先进的国际单位制的基础上,进一步统一我国的计量单位。“命令”要求在1990年前完成向国家法定计量单位的过渡。因此,本书中所涉及的物理

---

<sup>①</sup> 国际单位制(Le Système International d'Unités)的国际简称为SI,详见中华人民共和国标准《国际单位制及其应用》(GB3100-82)。

量均采用国际单位制。考虑到在过渡期间国内的工程实际情况，也适当介绍工程单位制，并在附录中列出了各种单位制的换算表。

国际单位制共给出了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度七个基本单位，这些量的名称、单位及符号如表 0-1 所列。

表 0-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

[ ] 内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字；( ) 内的字为前者的同义语。

国际单位制中的导出单位，是根据物理量的定义由基本单位通过代数式来表示的。例如，力的单位是一个导出单位，按照牛顿第二运动定律：

$$\begin{aligned} \text{质量} \times \text{加速度} &= \text{力} \\ 1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2 &= 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

于是得到力的单位为  $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。国际计量大会把它定名为牛顿，简称牛，单位符号为 N。1N 就是质量为 1kg 的物体授以  $1\text{m/s}^2$  加速度所需的力。

必须指出，用重力加速度  $g$  来计算的力，在国际单位制里称为重力。质量为 1kg 的物体在标准重力场中所受到的重力与工程单位制中的 1 公斤力(kgf)等量，即

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.80665\text{m/s}^2 = 9.80665\text{N}$$

压力的单位也是一个导出单位,按压力的定义

$$\frac{\text{力}}{\text{面积}} = \text{压力}$$

$$\frac{1\text{N}}{1\text{m}^2} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

可见压力的单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ , 定名为帕斯卡, 简称帕, 单位符号为 Pa。

再如, 功的单位  $\text{N}\cdot\text{m}$  也是导出单位, 称为焦耳, 简称焦, 单位符号为 J。在国际单位制中, 能量、功、与热量的单位相同, 均为 J。在工程计算中还可使用瓦秒 ( $\text{W}\cdot\text{s}$ ) 为单位, 这是焦的另一种表达形式, 即

$$1\text{J} = 1\text{W}\cdot\text{s}$$

功率的单位用瓦

$$1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$$

如用千瓦 ( $\text{kW}$ ) 表示功率则

$$1\text{kW} = 1\text{kJ}/\text{s}$$

工程中惯用的功的单位千瓦时 ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ) 用国际单位制表示则为

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 3600\text{kJ}$$

在传热计算中, 常用的导热系数、对流换热系数和热流密度 (或称热流密度) 等单位也都是导出单位, 其单位名称分别为瓦特每米开尔文、瓦特每平方米开尔文和瓦特每平方米, 其相应的符号分别是  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  和  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

热工学中所用的导出单位较多, 现将常用的列于表 0-2。

最后还需指出, 国际单位制所用的温度单位为开[尔文](K), 在工程技术上也可用摄氏温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 而每 1K 和  $1^{\circ}\text{C}$  的大小是相等的。



表 0-2 国际单位制中具有专门名称的导出单位示例

量的名称	SI 导出单位		
	单位名称	基本符号	其它表示式例
力,重力	牛[顿]	N	$m \cdot kg/s^2$
压力,压强	帕[斯卡]	Pa	$N/m^2$
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率,辐射通量	瓦[特]	W	J/s
[动力]粘度	帕[斯卡]秒	$Pa \cdot s$	$N \cdot s/m^2$
热流通量(热流密度)	瓦[特]每平方米	$W/m^2$	$kg/s^3$
比热,比焓	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$	$m^2/(s^2 \cdot K)$
热容,焓	焦[耳]每开[尔文]	J/K	$m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot K)$
比内能,比焓	焦[耳]每千克	J/kg	$m^2/s^2$
导热系数	瓦[特]每米开[尔文]	$W/(m \cdot K)$	$m \cdot kg/(s^3 \cdot K)$
对流换热系数,传热系数	瓦[特]每平方米开[尔文]	$W/(m^2 \cdot K)$	$kg/(s^3 \cdot K)$

关于压力、能量、热量和功的国际单位制的单位与其他各种单位制的单位之间的换算常数,可查阅本书附录表 1。