

高等学校教材

热 工 基 础

(1981 年修订第四版)

王 补 宣 主 编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校教材

热 工 基 础

(1981 年修订第四版)

王补宣 主编

人 民 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书是在王补宣主编的《热工学》(1964年修订第三版)的基础上,根据1980年修订的40学时“工程热力学”及30学时“传热学”教学大纲(草案)修订的。书中加强了理论基础部分的叙述,适当联系常见热工设备的工作原理和构造要点,删掉了原书中热工设备部分。书中主要采用国际单位制(SI)。全书分为工程热力学和传热学两部分,共十一章,并附有习题、附录和索引。

本书由中国科学技术大学葛新石同志审阅,并经教育部热工教材编审委员会1981年青岛会议通过。

本书可作为非动力类专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

热 工 基 础

(1981年修订第四版)

王补宣 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 插页 2 字数 228,000

1960年5月第1版 1981年11月第4版 1982年4月第1次印刷

印数 94,001—110,000

书号 15012·0361 定价 1.20 元

前 言

本书是在原“热工学”(1964年修订第三版)基础上,参考1980年6月教育部热工教材编审委员会苏州会议审订的高等学校工科四年制非动力类40学时“工程热力学”和30学时“传热学”的教学大纲(草案),并按照热工教材编审委员会历次工作会议的精神改编而成的。

热工学或热能工程学所研究的,是热能的有效开发和合理利用。热工设备到处可见,又五花八门。我国能源供应紧张,缺电少煤的现象严重存在,明显地束缚了我国国民经济发展和人民生活水平提高的速度,影响了四化建设的进程。我国已经确定了“实行开发和节约并重,近期要把节能放在优先地位”的解决能源问题的总方针。作为工程技术人员,即使不属于动力类专业,也必须具备点热工基础知识,以便面对现实,不断采取技术上可行、经济上合算的有效节能措施,深入持久地开展技术革新和技术改造的增产节约运动。因此,对高等学校培养非动力类工程技术人员来说,需要让学生学点热工基础理论,从原理上了解点热工设备的知识,但又不完全从属于热工设备的要求,有关热过程,尤其是传热的基本概念和分析也将同样有助于对新技术应用和发展的理解。正是本着这个意图,本书注重以小骨架的方式,分篇对工程热力学和传热学作系统的阐述,适当联系常见热工设备的工作原理和构造要点,所以把本书取名“热工基础”,而不是“热工理论基础”。书名没有采用“热工原理”,而用“热工基础”,主要考虑与部分专业教学计划中的课程名称相一致。

本书保留了原“热工学”(1964年修订第三版)强调基本概念和基本方法、注意原理与应用、文字讲解与公式图表和例题相结合、前后呼应和互相补充的特色,进一步明确了取材要从热能有效利用的工程观点出发,要能体现出技术基础课为非动力类专业服务、理论和实际结合、当前和长远兼顾、善于启发而不生搬硬套的基本原则。全书共两篇、十一章、42节,收编例题35个,增加了习题(总计121题)。修订了附录,所用符号尽力做到全书统一。主要由于把原“热工学”(1964年修订第三版)的第四篇(蒸汽动力装置)和第五篇(内燃动力装置)合并压缩为本书第五章,精简了设备具体构造的细节,使全书更加紧凑,总篇幅减少了30%。与此同时,却大大充实了传热学篇,还增添了可用能和烟(§2-5)、换热器的有效度和传热单元数(§11-3)两节,在新技术方面仍适当介绍了核电站、燃气轮机、喷气推进机、复合装置、新能源和工业余能开发利用的最基本知识。所有这些,凡超出教学大纲(草案)所规定的引伸性内容已一律用小号字排印,供不同读者参考。这些在编排上的预留余地,使全书能有较大的适应性,可以满足非动力类40—60学时“热工基础”或“工程热力学和传热学”课程教学的需要。如果辅之以锅炉设备和热机构造与运行调节的补充讲义或挂图等实用教具,也可暂作非动力类50—60学时“热工学”课程的教材。

陈宏芳同志编写了本书第五章和第六章,校订了工程热力学部分的例题和单位制。由于汇集了清华大学热工学教研组教学改革的经验,也汲取了兄弟院校在审订教学大纲时的意见,定稿前又承中国科技大学葛新石同志详予审校,使本书质量得到了基本保证。编者愿在此向所有给予支持和协助的同志表示诚挚的谢意。编写这种篇幅小、内容广泛,又要求适应性大的教科书,而且时间短促,限于编者水平,谬误疏漏之处在所难免。恳切地希望使用本书的同志对所发现的尚存缺陷不吝指正,让本书在不断

提高中发挥作用。

王朴宣

1981年11月于清华大学

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 工程热力学

概说	7
----	---

第一章 气体性质	12
----------	----

§ 1-1 工质的热力状态及其基本参数	12
---------------------	----

§ 1-2 气体状态方程式	20
---------------	----

§ 1-3 气体的比热	25
-------------	----

第二章 热力学基本定律	30
-------------	----

§ 2-1 热力学第一定律及其解析式	30
--------------------	----

§ 2-2 稳定流动能量方程式·焓	37
-------------------	----

§ 2-3 热力学第二定律	45
---------------	----

§ 2-4 熵和温熵图	52
-------------	----

* § 2-5 可用能和㶲	57
---------------	----

第三章 气体的热力过程	63
-------------	----

§ 3-1 气体的基本热力过程	63
-----------------	----

§ 3-2 气体的多变过程	68
---------------	----

§ 3-3 气体的压缩	71
-------------	----

§ 3-4 气体在喷管中的流动	83
-----------------	----

§ 3-5 气体的节流	88
-------------	----

第四章 蒸汽	90
--------	----

§ 4-1 蒸气简释	90
------------	----

§ 4-2 蒸汽的形成	91
-------------	----

§ 4-3 蒸汽状态的确定	94
---------------	----

§ 4-4 蒸汽焓熵图及其应用	97
-----------------	----

第五章 动力装置循环	103
------------	-----

§ 5-1 蒸汽动力装置循环	103
----------------	-----

§ 5-2	内燃机循环	115
§ 5-3	燃气轮机装置循环	131
第六章	致冷装置循环	141
§ 6-1	压缩致冷装置循环	141
* § 6-2	其他致冷装置的工作原理	147
* § 6-3	热泵的基本知识	151
第七章	气体混合物和湿空气	154
§ 7-1	气体混合物	154
§ 7-2	湿空气性质	159
* § 7-3	湿空气的焓-湿量图及其应用	163

第二篇 传热学

概说	167
第八章 导热	174
§ 8-1 导热的基本定律	174
§ 8-2 平壁的稳定导热	178
§ 8-3 圆筒壁的稳定导热	182
§ 8-4 关于复杂情况的稳定导热	186
§ 8-5 不稳定导热的概念	193
第九章 对流换热	201
§ 9-1 放热过程	201
§ 9-2 相似理论的基本概念	206
§ 9-3 流体自由运动和受迫运动时的放热	213
* § 9-4 流体集态改变时的放热	223
第十章 辐射换热	228
§ 10-1 辐射换热过程	228
§ 10-2 组成封闭空间的两物体之间的辐射换热	231
§ 10-3 任意位置的两物体之间的辐射换热	235
第十一章 换热器	239
§ 11-1 换热器的基本概念	239
§ 11-2 换热器的热计算原理	242

* § 11-3	换热器的有效度和传热单元数	246
* § 11-4	换热器的技术经济指标	251
习题		253
附录		270
表 1	SI 和工程单位制的单位换算	270
表 2	气体的平均定压质量比热表	271
表 3	气体的热力学性质	272
表 4	饱和蒸汽表(按温度编排)	273
表 5	水与过热蒸汽表	275
表 6	氨(NH ₃)的饱和蒸气表	280
表 7	氟利昂-12(CF ₂ Cl ₂)的饱和蒸气表	281
表 8	1 atm 下干空气的热物理性质	282
表 9	1 atm 下气体的热物理性质	283
表 10	饱和水的热物理性质	286
表 11	饱和线上蒸汽的热物理性质	287
表 12	液体的热物理性质	288
表 13	固体材料的热物理性质	290
表 14	物体表面热辐射的黑度	292
表 15	不同材料表面对太阳辐射能和对一般热辐射的吸收率的概值	293
表 16	北纬 40° 处晴天太阳照射力 E_s [瓦/米 ²]	293
索引		294
附图 1	水蒸气 $h-s$ 图(SI)	

绪 论

热工学是研究热能在工程上有效利用的一门综合性的技术科学。利用热能,原则上无非有两种考虑:一种是把热能直接当作加热的能量来源;另一种是把热能转变为其他形式的能而加以利用,例如让热能转变为机械能或电能,也就是把热能当作取得动力的能量来源。这两种利用方式都必须在有控制的热工设备里进行,都要讲究利用效果和如何改进的问题。因此,将不难看到:研究热能与机械能及其他形式的能相互之间转换的工程热力学,和研究热量传递的传热学一起,组成为热工理论基础。

自然界蕴藏有无穷无尽的不同形式的能,有的尚未被人们所认识,或者迄今为止还难以开发利用。燃料化学能、水能、风能、原子能、太阳能和地热能等都是可被利用的能源,其中,燃料通过燃烧所发出的热能是目前用得十分广泛的一种能源。燃料,无论石油和天然气,或者煤炭,又是发展塑料、合成纤维、人造食品等现代化学工业的重要原料。这些矿藏资源终究是会枯竭的,因此,特别在1973年,由于中东战争所产生的“石油危机”,触发了世界性的能源危机感。原子核发生裂变时,将同燃料燃烧一样对外释放大量的热能,所以常形象地把裂变物质叫作“核燃料”,并且称原子核反应堆为“原子炉”。1千克(即1公斤,记作1 kg)铀235完全核分裂时,可以释放出相当于大约3000吨(吨记作t, $1t=1000\text{ kg}$)标准煤或2000吨油的燃烧发热量。正在研究中的可控核聚变是比核裂变时对外释放热能数量大得多的高能反应。太阳就是连续的由氢原子核聚变为氦原子核的天然反应堆,核心温度维持上亿度,表面温度约6000K。太阳辐射能被地面物体吸收后,也照例会产生热效应,包括

在自然界形成风和水的流动，或者经过生物的储存和千万年的长期埋藏，自然演变为有机矿物燃料的化学能。辽阔的海洋，是太阳能的天然集热器，表面温度高于深层，蕴藏着海水热能。随着科学技术的发展，自然能源也常被转换成特定条件下更便于使用的形式，例如发电提供电力，或者将原煤焦化或冶金用焦或煤气化。把石油精炼成汽油、柴油等，以及人工生产沼气、制造酒精和氢一类洁净燃料，这些经过转换后的能源统称为“二次能源”。由于制造现代大型动力锅炉和蒸汽轮机发电机组以及远距离输电的成功，又在发电的基础上进一步扩大了热能利用在国民经济中所占的地位，可以在邻近燃料资源处建立宏伟的热力发电站（或称“火力发电站”），包括使用“核燃料”的核电站，集中生产成本较低的电力，并将有利于控制人口密集的工业城市的大气污染问题。此外，许多工业生产过程常伴随有大量的余热资源，成为可供开发利用的“工业二次能源”。

人类很早就在争取自己生存条件的自然斗争中学会了取火和用火。这是原始人所取得的一个巨大成就，是人类启蒙性发掘利用热能的第一步，所以恩格斯曾对此给予了高度的评价^①。人类也是在制服洪水的搏斗中逐步认识了水的一些性质，懂得可以应用最简单的水轮机，让它受水冲动来代替人力工作，并且逐渐发现水被烧“开”后具有新的可观的膨胀力，开始形成“热的力量”的感觉。直到十八世纪中叶，对热能的利用还局限于直接用作加热的能量来源，至于从事生产所必需的动力仍来源于人力、畜力、风力和水力。特别是水力的应用曾经在历史上长期占据过统治地位，那时的大小工场和作坊都沿河建立。随着生产力的发展，对创造不受地区和时间限制的发动机的要求促成了提供动力用的蒸汽机的出

① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社，1959年版，第83页。

现。这是一种最初的热力发动机(简称“热机”),然而,蒸汽机的使用却最先在欧洲引起了产业革命,推动了资本主义世界的发展^①,使小生产转向大生产。一切现代化的技术生产总离不开机器,都需要足够的动力供应,电力拖动或者机械拖动。没有现代工业,就不可能大规模开发自然资源,包括建设大型水电站。目前全世界的总发电量中,利用另一种热机——蒸汽轮机带动发电机的热力发电占三分之二强。没有现代工业,就不可能进一步装备农业技术以实现农业生产现代化,也难于提供精准复杂的科学观测仪器以促进科学技术的发展。而工农业生产的大发展,还必须有强大的交通运输网的支持,以调运原料和产品。农用拖拉机、建筑机械以及陆海空交通所需的动力,几乎全部要用内燃机等以至燃气轮机和喷气推进机这些热机来供给。与此同时,现代工业部门的生产工艺过程也要直接利用热能取得加热、烘干、蒸煮、精馏、供暖等效果,其中带有普遍性的设备是各种各样的换热器。制备蒸汽的锅炉本身就是一个复杂的换热器,使炉膛里燃料燃烧所发出的热量传给汽锅里的水,让它汽化。

尽管热能在今天得到了广泛应用,并且成为取得动力的重要来源,而热机的出现却还只有二百年的历史。蒸汽机使用范围的扩大,特别是当蒸汽机用在航海业上以后,由于船上储煤空间的宝贵,促使人们对如何提高蒸汽机的工作效率、节约用煤问题进行了系统的研究,并在十九世纪中叶开始形成“工程热力学”这门学科,逐步弄清了热机工作的基本道理,在随后的热机实践中起了一定的指导作用,使内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机和喷气推进机等相继

^①、俄国工程师波尔宗诺夫(И. И. Ползунов, 1729—1819)与英国瓦特(J. Watt, 1736—1819)先后于1766年和1784年分别制成了各自的蒸汽机。但由于当时社会制度的不同,波尔宗诺夫的蒸汽机在仍处于农奴社会的俄国没有得到发展而被埋没了;瓦特的蒸汽机,经过他本人的不断改进,在已经处于资本主义初期的英国得到了实际的应用,推动了生产力的发展,引起了产业革命。

地得到发展。也只是当人们运用工程热力学的知识,找出了蒸汽动力装置最理想的工作情况以后,发现实际的蒸汽机虽然经过长期的改进,但其经济性和同条件下最理想情况仍差得很远时,才引起人们进一步去研究运行中的实际蒸汽机里的各种损失,包括最主要的一项热损失,即汽缸内部由传热问题所引起的损失。联系到各种技术领域里的很多方面也都广泛存在有传热问题,自然促使人们去努力研究热量传递的规律。正是在这种形势下,自本世纪开始,“传热学”开始形成为一门独立的科学,至今还在不断地丰富和发展。如果说,热机、锅炉和换热器等热工设备与热工技术的发展是受生产发展的推动的,而热工设备与技术的改进和发展又反过来推动人类社会生产力的发展,那末,归根到底,热工理论的发展也同样是受生产发展的推动的。同其它技术科学一样,正确的热工理论总要以生产实践中产生,而又为解决生产实践中的热工问题服务,并接受实践的进一步检验。

在现代热工领域中,也包括工作过程正好与热机相反的技术措施,像食品冷藏和医药卫生事业所常用的致冷装置,以及某些生产过程或劳动保护所必需的冷气调节装置,就是要消耗机械功作为代价,人为地获致低温。这些装置通常包含有气体压缩机,简称“压气机”。由于压缩空气可以充当人为的风力能源,用来起动大型内燃机和驱动许多风动工具,用来输送煤粉和排除煤灰,所以压气机本身使用得很普遍,是一种易见的通用机械。压气机也是燃气轮机工作必不可少的配套装备,而且只是在本世纪三十年代有了大容量、高效率压气机之后和冶金工业能够提供耐高温的合金材料时,才使现代燃气轮机和更新颖的燃气轮喷气推进机首先在高速飞行方面得到实际的应用和飞速的进展。所以,压气机也常被列入热工设备。

1949年全国解放时,从旧中国接收到的,包括水力发电在内

的全部发电设备的总容量只有 185 万千瓦，年发电量为 43 亿度（1 度 = 1 千瓦·时，记作 1 kW·h），生产力异常落后，沉重的手工劳动压倒了一切，根本谈不上什么机械化和电气化。但这决不是我们民族的先天落后。根据考证^①，不仅风力和水力的利用在我国有着悠久的历史，我们的祖先在早期探索热能利用方面也有很多光荣的记载，例如，还在南宋时代（公元 1150 年左右）以前就有了走马灯，这正是现代燃气轮机的雏型，比欧洲同类记载至少早 400 年；大约 1250 年前后就发明了火药火箭，以后经阿拉伯传到了欧洲；十四世纪时发明了简单的飞弹，并且作过初级喷射飞行器的尝试，十七世纪时更创造了原始的两级火箭。我国也是最早懂得使用煤的国家，已经出土的文物证明，我国商、周就有精巧的冶铸技术，因此供鼓风用的压气设备的发明至少已有三千年的历史。只是在国外热工事业取得突飞猛进的近二百年间，我们却长期受到封建社会制度的桎梏和帝国主义的外来欺凌，生产方式停滞不前，以致落后的差距日益显著，才使我国人民在解放时不得不处于“一穷二白”的境地。

新中国建立以来，一直重视发展燃料动力。我国现已探明的矿物燃料资源，以煤的蕴藏相对最丰富，居世界第三位，而且摘掉了“无油国”和“贫油国”的帽子。但按人口平均，我国的燃料资源还算不上富裕。1979 年，我国原煤和原油的年产量已分别跃居世界第三位和第九位，电力的年发电量也进入世界第七位。与 1949 年相比，原煤年产量增长 19.6 倍，年发电量增长 65.6 倍，我国的能源工业在三十年中取得了全球公认的进步^②。然而，由于人口多，而

① 可参看刘仙洲：“中国在原动力方面的贡献”，中国机械工程学报，1953 年，第 1 卷第 1 期，第 22—32 页；或刘仙洲：《中国机械工程发明史》第一编，科学出版社，1962 年版。

② 《关于建国以来党的若干历史问题的决议》（1981 年 6 月 27 日）中指出：1980 年同完成经济恢复的 1952 年相比，原煤年产量增长 8.4 倍，达到六亿二千万吨；年发电量增长 40 倍，达到三千多亿度；原油产量达到一亿零五百多万吨。

且增长快,要求工农业尽快发展,我国能源开发的速度仍跟不上经济发展的需要,束缚了我国国民经济发展的速度。要解决我国能源的供需平衡问题,以适应在我国实现农业、工业、科学技术和国防现代化,建设十亿以上人口的社会主义强国的实际要求,就必须注意开源节流和包括水能、风能、太阳能、地热能等丰富的自然再生能源和原子能在内的多样化开发利用。能源开发,需要资金和较长的建设周期,因此,我国已确定了“实行开发和节约并重,近期要把节能放在优先地位”的总方针。

能源问题是一个重大的战略问题。1979年,我国能源消费构成中,煤炭占 71.3%,石油占 21.8%,天然气占 3.3%,水力发电占 3.6%;全年能源消费总量折合 5.86 亿吨标准煤,占世界第三位。可是,如按十亿人口平均,每人全年消费量与工业发达国家相比仍很落后,我国全年国民经济生产总值也远非名列世界前茅。而在我国现有能源消费结构中,10 亿人民的生活用能只占大约 10%,这表明我国的生产企业部门的能耗普遍偏大,有着很大的节能潜力。作为工程技术人员,即使不属于动力类专业,也应该对热能的有效利用具备必要的基本知识,才能面对本企业、本部门的现实,不断挖潜,采取技术上可行、经济上合算的有效节能措施,深入持久地开展技术革新和技术改造的增产节约运动。热工设备到处可见,又五花八门。因此,对高等学校非动力类专业的学生来说,从原理上学习点热工基础理论,即有关工程热力学和传热学的基本知识,显然是非常必需的。

不但在热能利用方面,就是在土建、电机、化工冶炼、机械制造、通讯和电子仪器设备、环境保护等各个方面,也很容易列举出许多有关加热、发热、冷却或隔热等需要很好解决的热物理现象的技术问题。由此可见,今后的技术干部需要了解热物理现象的一些基本规律,学点工程热力学和传热学的基本知识同样是非常必需的。

第一篇 工程热力学

概 说

工程热力学是热力学最早发展起来的一个分支，它主要研究的对象是工程技术上有关热能和机械能相互转换的规律。显然，这正是研究热机工作情况和工作条件所必需的理论基础。

人们对于“热”和“冷”的现象本质的追究，引起了物理学中热学的发展。直到十七世纪末，最原始的蒸汽排水装置^①出现时，人们还根本不知道蒸汽是什么东西。当时的一些学者认为蒸汽就是水中含有的空气，还说什么 1 份水里可以含有 14000 倍容积的空气，水一受热，空气就被驱逐出来，成为蒸汽。那时候，甚至连“温度”和“热量”这两个描写热现象的最基本概念也还分不清楚。在错误的“热质说”（或叫“热素说”）的统治下，把热看作是一种特殊的没有重量的流质，能从温度较高处流向温度较低处，正好像水由高位处流向低位处一样，认为物体的温度高是由于储存的“热质”多。只是在 1714 年华氏^②和 1742 年摄氏^③各自选定了温标以后，

① 英国人塞维利(T. Savery, 约 1650—1715)于 1698 年制成了蒸汽排水装置。大约在同一个时期，法国人巴本(D. Papin, 1647—1712)也制造出同样的器械。后来，英国工匠瓦特正是在手工操作这种蒸汽排水装置的劳动实践中，发明了能够自动开关汽阀的机构，并把活塞的往复运动转变为轴的回转运动，在 1784 年制成了可以连续运行、带动其他机器工作的蒸汽机。

② 华氏(D. Fahrenheit, 1686—1736)温标最初以氯化铵与冰混合物的温度为 0° ，以人的体温为 100° ，以后改为以水的冰点为 32°F ，以水的沸点为 212°F 。

③ 摄氏(A. Celsius, 1701—1744)温标以水的冰点为 0°C ，以水的沸点为 100°C 。

温度的测量才有了公认的标准，并发展了量热的技术。利用初期所仅有的混合法，热量是根据水的温度改变测定的，热量的单位“卡”(记作 cal)，其实就是“热质”音译“卡路里”(caloric)的简写。测温 and 量热，使热学走上了近代实验科学的道路。大量实验事实的积累^①，终于使科学界在 19 世纪上半叶彻底抛弃了“热质说”，确认热是运动的一种形态。热力学的开始形成也是在 19 世纪上半叶，这与当时生产实践迫切要求改进已被广为利用的蒸汽机、制造合理的热机有着密切联系。

现代热力学已扩大到研究各种“能”之间相互转换的关系，把广阔的物理现象和化学现象都变成了被研究的对象，在工程热力学之外，又发展成物理热力学和化学热力学两个分支。工程热力学侧重热力学在热工中的应用，因此，它所涉及的主要是热物理现象。但近年来的发展趋势，工程热力学的研究范围正在逐步伸展到把诸如燃烧和溶解等一些热化学现象也包括进去。

热力学是热学的宏观理论。热力学的研究方法是宏观的方法，是以归纳无数事实所得到的热力学第一定律和热力学第二定律这两个基本规律作为分析和推理的基础，通过物体或某部分物质的诸如压力、温度、体积或容积等的外在表现和受热、冷却、膨胀或收缩等的整体行为，从能量收支平衡着眼，来进行物体宏观现象和宏观过程的研究。这种方法，只承认热是一种“能”，不追问热到底是一种什么样的运动表现，不深入到物体内部去考察分子、原子的微观行为，不需要对物质的微观结构进行任何臆测，因此，分析推理的结果具有高度的可靠性，而且关系明确，条理清楚，这是它的独

① 伦福德(Count Rumford, 即 B. Thompson, 1753—1814)于 1798 年和戴维(H. Davy, 1778—1829)于 1799 年最先用直接实验结果驳斥了“热质说”，特别是戴维用两块冰相互摩擦而使它们完全融化掉，这个实验谁都可以实践，显然无法用“热质说”得到解释。