

高等学校教材

工程热力学

严家骝 编

人民教育出版社

高等学校教材

工程热力学

严家驛 编

人民教育出版社

内 容 简 介

本书是根据一九八〇年五月高等学校工科热工教材编审委员会扩大会议审订的四年制非动力类专业四十学时《工程热力学教学大纲》(草案)编写的。本书在编写过程中也参考了哈尔滨工业大学热工教研室编《热工理论基础》“工程热力学”部分。

该书主要讲述热力学基本概念、基本定律以及气体和蒸汽的性质、过程和循环。书中附有例题、思考题和习题以及必要的热工图表。全书采用SI单位,对工程制单位也作了适当介绍。

本书由热工教材编审委员会委托上海机械学院蔡祖恢同志审阅,并经热工教材编审委员会复审通过。

该书可作为非动力类专业教材,亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

工 程 热 力 学

严家驛 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 8 插页 2 字数 200,000

1981年12月第1版 1982年4月第1次印刷

印数 00,001—10,500

书号 15012·0380 定价 1.10 元

前 言

本书是根据一九八〇年五月高等学校工科热工教材编审委员会扩大会议审订的四年制非动力类专业四十学时《工程热力学教学大纲》(草案)编写的。

书中主要讲述热力学的基本概念、基本定律以及气体和蒸汽的性质、过程和循环,并有计算例题穿插配合。每章末还附有适量的思考题和习题。

本书在编写过程中参考了哈尔滨工业大学热工教研室编《热工理论基础》“工程热力学”部分。本书前半部分,即基本理论部分,编者结合教学实践中的经验,在体系上作了新的安排,在内容上也有补充,力图使学生能较好地掌握热力学基本概念和基本定律的实质,并灵活运用它们来分析计算各种热力过程,以便在能源科学方面打下一定的基础。本书后半部分,主要分析了各种循环,包括热机和致冷机的循环。它既是前面基本理论的具体应用,又是进一步联系工程实际的桥梁。这将有利于培养学生解决实际问题的能力。

全书采用国际单位制。对工程单位制也作了适当介绍。

本书由热工教材编审委员会委托上海机械学院蔡祖恢同志主审,天津大学吕灿仁同志也参加了审稿工作,并经一九八一年六月召开的热工教材编委会复审通过。

编者感谢主审人和参加审稿的全体同志对本书的仔细审阅和提出的宝贵意见,并希望能得到读者的批评和指正。

对哈尔滨工业大学热工教研室同志们给予编写工作的支持，
在此一并表示感谢。

编 者
一九八一年十一月

符号说明

拉丁字母

| | |
|------|-----------------|
| A | 面积; 功的热当量 |
| a | 音速 |
| B | 大气压力 |
| C | 千摩尔热容; 常数 |
| c | 比热; 流速 |
| D | 过热度 |
| DA | 干空气 |
| d | 含湿量 |
| E | 总能量 |
| e | 比总能量 |
| F | 力 |
| g | 质量成分; 重力加速度 |
| H | 焓 |
| h | 比焓 |
| k | 玻耳兹曼常数; 定熵指数 |
| L | 不可逆损失 |
| M | 分子量; 千摩尔质量; 马赫数 |
| m | 质量; (压气机)级数 |
| N | 分子数 |
| n | 分子浓度; 多变指数 |
| P | 功率 |
| p | 压力 |
| Q | 热量 |

| | |
|-------|--------------------|
| q | 每公斤物质的热量 |
| R | 气体常数 |
| r | 容积成分; 摩尔成分; 汽化潜热 |
| S | 熵 |
| s | 比熵 |
| std | 标准(状况) |
| T | 绝对温度 |
| t | 摄氏温度 |
| U | 内能 |
| u | 比内能 |
| V | 容积 |
| v | 比容 |
| W | 功; 膨胀功 |
| w | 每公斤物质的功; 每公斤物质的膨胀功 |
| X | 千摩尔数 |
| x | 干度 |
| y | 湿度 |
| z | 高度 |

希腊字母

| | |
|------------|-----------|
| α | 抽气率 |
| β | 膨胀压力比 |
| Δ | 增量 |
| δ | 微小量 |
| ϵ | 压缩比; 致冷系数 |
| ζ | 供热系数 |

| | |
|------------|--------------------------------|
| η | 效率 |
| κ | 比热比 |
| λ | 压升比 |
| ξ | 热利用系数 |
| π | 增压比 |
| ρ | 密度; 预胀比 |
| τ | 时间; 升温比 |
| φ | 相对湿度 |
| 顶标 | |
| \cdot | 单位时间的 |
| $-$ | 平均 |
| 上角标 | |
| $*$ | 滞止 |
| $'$ | 饱和液体 |
| $''$ | 饱和蒸汽 |
| 下角标 | |
| A | 三相点 |
| C | 卡诺循环; 逆向卡诺循环; 压气机; 临界(物质的临界状态) |
| c | 临界(流动的临界状态) |
| d | 露点 |
| f | 摩擦; (熵)流 |
| g | 表(压); (热、熵)产; 干空气 |
| H | 供热 |
| i | 第 i 个; 内部 |
| j | 第 j 个 |

| | |
|------------|-----------------------|
| K | 动能 |
| l | (功)损 |
| M | 每千摩尔的 |
| m | 平均 |
| max | 最大 |
| min | 最小 |
| mix | 混合气体 |
| n | 多变过程 |
| \bigcirc | 循环的(功、热量) |
| opt | 最佳 |
| P | 位能; 泵 |
| p | 定压 |
| R | 冷库 |
| r | 相对; 回热 |
| s | 定熵; 饱和 |
| sh | 轴(功) |
| std | 标准状况 |
| T | 定温; 透平(燃气轮机、蒸汽轮机、膨胀机) |
| t | 热(效率); 技术(功) |
| th | 喉部 |
| v | 真空(度); 定容; 水蒸汽 |
| w | 水; 湿球(温度) |
| x | 湿蒸汽 |
| 0 | 理想气体状态 |
| 1 | 初态; 进口 |
| 2 | 终态; 出口 |

目 录

| | |
|---------------------------|-----------|
| 前言 | I |
| 符号说明 | III |
| 绪论 | 1 |
| 1. 热能的利用 | 1 |
| 2. 工程热力学的研究对象和研究方法 | 1 |
| 3. 工程热力学所用单位制 | 3 |
| 第一章 基本概念 | 6 |
| 1-1 热力系 | 6 |
| 1-2 状态和状态参数 | 7 |
| 1-3 平衡状态 | 15 |
| 1-4 状态方程和状态参数坐标图 | 17 |
| 1-5 过程和循环 | 18 |
| 1-6 功和热量 | 20 |
| 思考题 | 20 |
| 习题 | 20 |
| 第二章 热力学第一定律 | 22 |
| 2-1 热力学第一定律的实质及表达式 | 22 |
| 2-2 功和热量的计算及其在压容图和温熵图中的表示 | 28 |
| 思考题 | 35 |
| 习题 | 35 |
| 第三章 气体的热力性质和热力过程 | 37 |
| 3-1 实际气体和理想气体 | 37 |
| 3-2 理想气体状态方程和通用气体常数 | 38 |
| 3-3 理想混合气体 | 40 |
| 3-4 气体的热力性质 | 44 |
| 3-5 定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程 | 51 |
| 3-6 多变过程 | 62 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 3-7 不作功过程和绝热过程 | 67 |
| 思考题 | 75 |
| 习题 | 76 |
| 第四章 热力学第二定律 | 79 |
| 4-1 热力学第二定律的任务 | 79 |
| 4-2 可逆过程和不可逆过程 | 81 |
| 4-3 状态参数熵 | 83 |
| 4-4 热力学第二定律的表达式——熵方程 | 86 |
| 4-5 热力学第二定律各种表述的等效性 | 91 |
| 4-6 卡诺定理和卡诺循环 | 93 |
| 4-7 克劳修斯积分式 | 97 |
| 4-8 可用能及其不可逆损失 | 99 |
| 4-9 热力学第二定律对工程实践的指导意义 | 104 |
| 思考题 | 108 |
| 习题 | 108 |
| 第五章 气体的流动和压缩 | 111 |
| 5-1 一元稳定流动的基本方程 | 111 |
| 5-2 喷管中气流参数变化和喷管截面变化的关系 | 115 |
| 5-3 气体流经喷管的流速和流量 | 118 |
| 5-4 绝热节流 | 127 |
| 5-5 压气机的压气过程 | 129 |
| 思考题 | 139 |
| 习题 | 140 |
| 第六章 气体动力循环 | 142 |
| 6-1 概说 | 142 |
| 6-2 活塞式内燃机的混合加热循环 | 143 |
| 6-3 活塞式内燃机的定容加热循环和定压加热循环 | 148 |
| 6-4 活塞式内燃机各种循环的比较 | 150 |
| 6-5 燃气轮机装置的循环 | 152 |
| 思考题 | 161 |
| 习题 | 162 |

| | |
|---|-----|
| 第七章 水蒸汽性质和蒸汽动力循环 | 163 |
| 7-1 水蒸汽的饱和状态 | 163 |
| 7-2 水蒸汽的产生过程 | 165 |
| 7-3 水蒸汽图表 | 171 |
| 7-4 水蒸汽的热力过程 | 174 |
| 7-5 基本的蒸汽动力循环——朗肯循环 | 177 |
| 7-6 蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响 | 179 |
| 7-7 提高蒸汽动力循环热效率的其它途径 | 180 |
| 思考题 | 186 |
| 习题 | 186 |
| 第八章 致冷循环 | 189 |
| 8-1 逆向卡诺循环 | 189 |
| 8-2 空气压缩致冷循环 | 190 |
| 8-3 蒸汽压缩致冷循环 | 197 |
| 8-4 致冷剂的热力性质 | 200 |
| 8-5 蒸汽喷射致冷循环和吸收式致冷循环 | 202 |
| 思考题 | 206 |
| 习题 | 207 |
| 第九章 湿空气 | 208 |
| 9-1 湿空气和饱和空气 | 208 |
| 9-2 绝对湿度和相对湿度 | 209 |
| 9-3 露点温度和湿球温度 | 210 |
| 9-4 含湿量、焓和焓湿图 | 215 |
| 9-5 湿空气过程——焓湿图的应用 | 218 |
| 思考题 | 223 |
| 习题 | 223 |
| 附录 | 224 |
| 附表 1 常用气体的某些基本热力性质 | 224 |
| 附表 2 某些常用气体在理想气体状态下的定压比热与温度的 关系式 | 224 |
| 附表 3 某些常用气体在理想气体状态下的平均定压比热 | 225 |

| | | |
|--------|------------------------|-----|
| 附表 4 | 某些常用气体在理想气体状态下的平均定容比热 | 226 |
| 附表 5 | 空气在理想气体状态下的热力性质表 | 227 |
| 附表 6 | 饱和水与饱和水蒸汽的热力性质表(按温度排列) | 231 |
| 附表 7 | 饱和水与饱和水蒸汽的热力性质表(按压力排列) | 234 |
| 附表 8 | 未饱和水与过热水蒸汽的热力性质表 | 236 |
| 附表 9 | 各种压力单位的换算关系 | 243 |
| 附表 10 | 各种能量(功、热量、能量)单位的换算关系 | 244 |
| 附表 11 | 各种功率单位的换算关系 | 245 |
| 附录图 I | 氨的压焓图 | |
| 附录图 II | 水蒸汽的焓熵图 | |

绪 论

1. 热能的利用

现代化的工农业生产，要求充足而经济的动力供应。自然界中可大量产生动力的主要能源有：风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。目前利用得最多的仍然是燃料（石油、煤、天然气等）的化学能。但是，日益减少的地下燃料资源势必不能满足飞速发展的生产力对动力的需求。因此，目前世界各国对原子能、太阳能、地热能，乃至海洋能、生物能等各种新能源正大力开展多方面的研究工作，以期找到新的能源出路。

在上述各种能源中，除风能（空气的动能）和水能（水的位能）向人们直接提供机械能以外，其它各种能源往往直接或间接地（通过燃烧、核反应）提供热能。人们可以直接利用热能为生产和生活服务，例如用于冶炼、分馏、加热、蒸煮、烘干、采暖等方面。但更大的还是通过热机（如蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）使这些热能部分地（只能是部分地）转变为机械能，或进一步转变为电能，以供生产和生活中的大量需要。因此，对热能性质及其转换规律的研究，显然有着十分重要的意义。

2. 工程热力学的研究对象和研究方法

热力学是研究能量（特别是热能）性质及其转换规律的科学。

热力学是在研究热机效率的基础上于十九世纪中叶由于建立了热力学第一定律和第二定律而形成的。在初期，它所涉及的主要是热能和机械能的转换。以后，由于热力学在化工、冶金、致冷、空调以及近年来在低温、超导、反应堆以至气象、生物等各个方面获得了越来越广泛的应用，因而它的研究范围扩大到了化学、物理

化学、电、磁、辐射等现象。

工程热力学着重研究热能和机械能的转换规律。从理论上阐明提高热机效率(使热能以更大的百分率转变为机械能)的途径仍然是工程热力学的一项主要任务。

热能转变为机械能必须借助一套设备和借以传递能量的某种载能物质。这设备就是通常所说的热机,而这里的载能物质便是工质。热机对外做功时,要求工质有良好的膨胀性,这样才能方便地做功;而要热机不断地做功,则必须不断地将新鲜工质引入气缸,并将工作完了的工质排出,这就要求工质有良好的流动性。同时具备良好的膨胀性和流动性的,不是固体,也不是液体,而是气体(如空气、水蒸汽等)。因此,热机中的工质一般都是气态物质。但在应用蒸汽时也会涉及到液体。对常用工质的热力性质进行必要的研究也是工程热力学的任务之一。

因此,工程热力学的主要内容包括下列三部分:

(1) 介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。

(2) 介绍常用工质的热力性质。

(3) 根据热力学基本定律,结合工质热力性质,分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环,指出提高转换效率的正确途径。

工程热力学的研究方法也就是热力学的宏观研究方法。这种宏观研究方法的特点是:根据热力学的两个基本定律,运用严密的逻辑推理,对物体的宏观现象进行分析研究,而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。所以,热力学是热学的宏观理论。与此对照,热学的微观理论是统计物理学。统计物理学从物质的微观结构出发,依据每个微观粒子的力学规律,应用概率理论和统计平均的方法,研究大量微观粒子(它们构成宏观物体)的运动表现

出来的宏观性质。

热力学和统计物理学在对热现象的研究上相辅相成。热力学经常利用微观理论得到的知识（例如对工质热物理性质的研究成果以及对一些热现象和经验定律的微观实质的解释）。由于热力学研究方法所依据的两个基本定律不需要任何假设，因而能给出普遍而可靠的结果，可以用来检验微观理论的正确性。但是由于热力学不涉及物质的微观结构，因而，用热力学方法无法获得有关物质的具体性质。统计物理学则由于深入了热现象的本质，可以使热力学理论获得微观机理上的说明，并可揭示宏观性质的微观决定因素，从而在理论上起到指导作用，并可用来求得物质的性质。但统计物理学也有它的不足之处，主要是推导比较复杂，不象热力学那样简单、直观，而且由于在推导过程中不可避免地要对物质结构模型作一些简化或假设，因此所得结果和实际情况往往有差异。

象其它学科一样，在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。这种略去细节、抽出共性、抓主要矛盾的处理问题的方法，在进行理论分析时特别有用。这种科学的抽象，不但不脱离实际，而且总是更深刻地反映了客观事物的本质。

3. 工程热力学所用单位制

在工程热力学中涉及到比较多的物理量，这就有一个对这些物理量采用什么计量单位的问题。解放后我国出版的工程热力学书籍一般都采用工程单位制。近年来世界各国决定逐步采用统一的国际单位制（简称SI），以避免由于单位制不同而引起的混乱现象和繁琐的换算。我国也准备逐步采用国际单位制。因此，本教材采用国际单位制。考虑到目前实际情况，对工程单位制也作适当的介绍。

国际单位制中给出了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物

质的量和光强度共七个基本单位。工程热力学中各常用物理量牵涉到的基本单位有五个，即长度、质量、时间、热力学温度和物质的量。

国际单位制比较科学，各导出单位和基本单位的关系式中的系数都等于1，因此换算简单。表1和表2分别给出了工程热力学中常用的国际单位制的基本单位和导出单位。

表1 国际单位制基本单位(部分)

| 量 | 单位名称 | 单位符号 |
|-------|---------|------|
| 长度 | 米 | m |
| 质量 | 千克(公斤)* | kg |
| 时间 | 秒 | s |
| 热力学温度 | 开[尔文]** | K |
| 物质的量 | 摩[尔] | mol |

* 圆括号中的名称与它前面的名称是同义词。

** 去掉方括号时为单位名称的全称，去掉方括号中的字时即成为单位名称的简称，下同。

表2 国际单位制导出单位(部分)

| 量 | 单位名称 | 单位符号 | 用其它SI单位表示的表示式 |
|---------|--------------|------|------------------|
| 力 | 牛[顿] | N | |
| 功、热量、能量 | 焦[耳] | J | N·m |
| 压力 | 帕[斯卡] | Pa | N/m ² |
| 功率 | 瓦[特] | W | J/s |
| 比内能、比焓 | 焦[耳]每千克 | | J/kg |
| 比热、比熵 | 焦[耳]每千克开[尔文] | | J/(kg·K) |

在工程单位制的基本单位中，长度用米(m)；时间用秒或小时

(s 或 h); 力用公斤力 (kgf)。质量则是导出单位。根据牛顿第二定律 ($m = \frac{F}{a}$), 质量单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$ 。

工程单位制中的公斤力 (kgf) 和国际单位制中的牛顿 (N) 之间的关系如下 ($F = ma$):

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

9.80665 m/s^2 是标准重力加速度。所以, 在标准重力场中, 重量为 1 kgf 的物质, 其质量正好是 1 kg。

关于压力、能量和功率的各种单位之间的换算关系可查阅本书附表 9、附表 10 和附表 11。

第一章 基本概念

1-1 热力系

作任何分析研究，首先必须明确研究对象。**热力系就是具体指定的热力学研究对象。**与热力系有关的周围物体统称为**外界**。为了不至于把热力系和外界混淆起来，设想有**界面**将它们分开。这界面可以是真实的(如图 1-1 和图 1-2 中取气体工质为热力系时，气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面)，也可以是假想的(如图 1-2 中进口截面和出口截面便是假想的界面)；可以是固定的，也可以是变动的(如图 1-1 中当活塞移动时界面发生变化)。

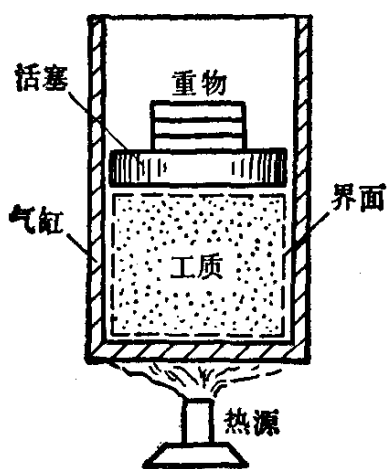


图 1-1

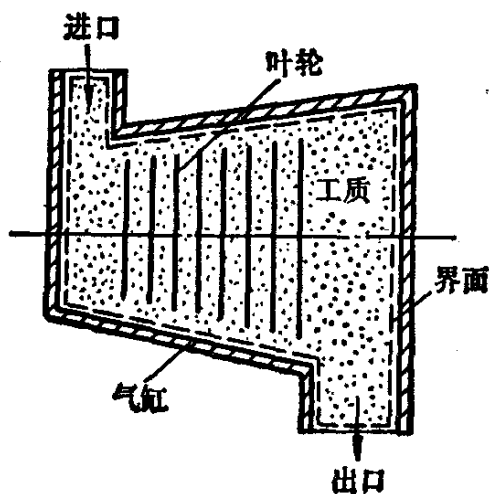


图 1-2

热力系的选取，决定于所提出的研究任务。它可以是一群物体、一个物体或物体的某一部分。它可以很大，也可以很小，但是不能小到只包含少量的分子，以至不能遵守统计平均规律(热力学理论的正确性有赖于分子运动的统计平均规律，而这一规律只存