

热  
工  
学



## 内 容 提 要

本书是在第一版的基础上，通过广泛征求意见，并总结近十年的教学经验修订而成。

全书共四篇（二十一章）：工程热力学；传热学；工业锅炉；热力发动机、压气机与制冷装置。与第一版相比，除保持本书原有特色（简练、通俗、重点突出、易于自学）外，侧重加强了基础理论部分，增加了一些加深加宽的内容，以适应不同层次学生的需要，还增设了思考题和习题，同时结合本学科的最新成果，对教材内容进行了更新；且全书采用我国法定计量单位。

本书编写时除照顾到森工企业热能利用的特点外，也考虑到了其它工科类相近专业的需要，因此本书也适于化工、轻工、食品、纺织、热工计量、农机、采矿、建筑等相近专业作为教材或参考书，亦可供有关工程技术人员参考。



## 第二版 前 言

本书是参照1980年12月制定的高等林业院校木材机械加工专业《热工学》教学大纲，并根据1984年制定的《热工学》编写大纲（修订稿），在1980年第一版本的基础上修订而成。

全书共分四篇，第一篇工程热力学；第二篇传热学；第三篇工业锅炉；第四篇热力发动机、压气机与制冷装置。与第一版相比，第二版作了如下几方面的修订：

1. 加强了热工基础理论部分，这是根据第一版试用后读者的反映，和当前教改的要求而对基础理论部分作了适当的补充。这部分内容比第一版增加了近30%，为缩小篇幅，一些加深加宽的内容采取了排小字的办法。

2. 热工设备部分去掉了一些较陈旧的内容（如旧的锅炉和内燃机型号），又补充了一些较新的内容（如制冷与热泵装置），这部分的总篇幅略有增加，但变化不大。

3. 增加了例题以便于学生自学，例题比第一版增加了一倍。

4. 第一版书中没有附思考题和习题，第二版于每章后附有思考题和习题。全书思考题和习题共计500余题，其中约有近一半的习题附有答案，以便于学生自学。

5. 第二版全书采用我国法定计量单位，但考虑到目前我国尚处于单位制过渡时期，因此书中附有各种单位的换算表，并有少量单位换算的例题和习题。

全书除考虑具有一定的专业特色外，也考虑到要适当扩大本书的适用范围。如热工设备部分，考虑到专业的需要，重点在工业锅炉，其篇幅和内容比一般非动力类专业几乎多一倍。而有些内容，如第四篇（热力发动机、压气机与制冷装置），从专业的角度看不要求讲授，但从扩大教材的使用范围和拓宽学生知识面的角度，我们以加注※号的方式，将这部分内容附于本书的最后。

本书由北京林业大学张璧光、乔启宇主编。编写分工如下：第一至九章，第十一、十二、十六、十七章及第十八章第二、三节由张璧光编写；绪论、第十、十三、十四、十五及二十章由乔启宇编写；第十八章第一节，第十九章及二十一章由连仁悌（厦门工人业余大学）编写。张璧光同志负责全书修订的统稿工作。

本书承杨昌俊（中国计量学院）、解鲁生（青岛建筑工程学院）及徐永铭（东北林业大学）三位同志担任主审。其中杨昌俊负责审阅绪论及第一、二两篇；解鲁生负责审阅第三篇；徐永铭负责审阅第四篇，在此谨向他们表示诚挚的谢意。

本书承蒙中国科学院学部委员、国家教委热工课程教学指导委员会主任委员王补宣教授撰写了序言，在本书修订过程中还得到清华大学陈宏芳及蔡启林同志的指导和帮助，在此一并致谢。

由于我们水平有限，书中难免还会有错误或不妥之处，希读者给予帮助和指正。

编者

1988年5月

# 绪 论

热工学是研究热能在工程上有效利用的一门综合性技术科学，它的发展已有一百多年历史，在当代新兴的能源科学中热工学占有相当重要的地位。

## 一、能源与国民经济

能源是各种能量来源的总称，机器的运转离不开动力，人们在生活中需要用热用电，因此能源是现代化生产和文明生活的重要物质基础。一些工业化国家的统计资料表明，国民生产总值的增长指数大体与能源消费增长指数成正比，所以随着经济的发展，对能源的需求必然相应增长，能源的开发和利用已成为当今世界急需解决的一个重大问题，因此党和国家已经确定将能源问题列为四化建设的战略重点之一。

## 二、热能在能源中的地位

能量的形式多种多样，如热能、机械能、电磁能、化学能、原子能等等。热能广泛地存在于自然界，太阳的辐射能被物体吸收后就转化为热能；地壳表层蕴藏着丰富的地热能；海洋表层的水温显著高于深部，这就使表层海水热能的利用成为可能；各种燃料的化学能通过燃烧反应变成热能；原子核的裂变和聚变反应使原子能变成大量的热能；许多工业生产过程中的废汽、废气、废液、废渣和成品半成品都带有很多余热可供利用。各种形式的能量在一定条件下可以互相转换，而人类在利用能量过程中所接触到的能量形式以热能为最多，约占85%以上，因此热能是目前最主要的一种能量形式。

## 三、热工学与热能利用

热能的利用有直接与间接两种方式，在直接利用热能进行加热的过程中并不改变热能的形式，只是将热能在它的载体之间或载体内部进行传递，起决定作用的是热量转移的规律；热能的间接利用是将它转变成机械能、电能等其它形式的能量以后再加以利用，起支配作用的是能量转换的规律。作为一门热能利用的综合性技术科学的热工学，是由热工理论基础和热工设备两部分组成的，热工理论基础包括工程热力学和传热学，分别研究热能与机械能相互转换和热量传递的规律；热工设备包括各种热力发动机（简称热机，如蒸汽机、内燃机、汽轮机、燃气轮机和喷气发动机等）、压气机、制冷装置和锅炉设备等等，这些设备是按照热工理论所研究的规律进行工作的。因此，本课程将在学习热工基本理论的基础上，研究各种热工设备的工作原理、构造特征、运行条件和适用场合等具体问题。

人类很早就在与自然界的斗争中学会了取火和用火，但在18世纪70年代以前，对热能的利用还局限于直接用来加热的简单方式，而生产所必须的动力主要来源于人力、畜力、风力和水力。17世纪末，由于采矿业的发展，出现了用于矿井排水的原始蒸汽机，经过不断的改进，到18世纪80年代，出现了相当完善的蒸汽机，从此创造了另一种利用热能的形式——把



热能转变为机械能再加以利用。蒸汽机出现以后，迅速在纺织、锯木等行业中广泛使用，促进了生产的发展，在欧洲引起了产业革命，推动了资本主义的发展。

19世纪中叶，由于对蒸汽机的研究和改进，逐渐弄清了热机工作的基本原理，从而建立了工程热力学的理论体系。到19世纪后半叶，由于交通运输业的发展，要求有结构轻巧和高效率的热机，当时机械制造水平的提高，以及电机电器制造的发展，也为其它类型热机的出现准备了条件。更重要的是已经建立起来的热工基本理论，指导了其它类型热机的研究，于是在19世纪的最后20年内，相继出现了煤气机、汽油机、重油机和柴油机等多种型式的往复式内燃机和蒸汽轮机。进入20世纪以后，工业的发展对电力的需求迅速增加，用于火力发电厂的蒸汽轮机和配套的锅炉工作参数，也迅速向高温高压和大容量方向发展，20世纪50年代以来，由于高速飞行、宇宙航行和火箭导弹等科学技术的飞跃发展，又为新型发动机在设计理论、燃料、结构材料和制造工艺各方面创造了条件，因此出现了燃气轮机和喷气发动机。同时往复式内燃机在性能和结构上有了很大改进，相对于往复式内燃机具有一定优点的旋转活塞式内燃机也有了发展。

世界上各类热机的拥有量不断增加，所耗用的燃料也随之增长，同时，化学工业的发展使煤、天然气和石油等有机矿物燃料成为塑料、合成纤维和合成食品等化工新产品的重要原料，因此，进一步加剧了燃料短缺的矛盾。此外，发动机排出的大量废气也造成了严重的环境污染。以人工控制的原子核裂变所放出的原子能，作为热机的新热源虽然已经实现，但随之而来的放射性环境污染问题并未彻底解决。因此，正致力于探索和开发廉价和“清洁”的新能源，如太阳能、地热、海水热等自然界中取之不尽的能源。在高效率发电装置方面，磁流体发电和燃料电池的研究也取得了显著成就，关于这些新能源利用和新型动力装置的理论已成为工程热力学的新的内容。

热量传导的基本规律发现于19世纪后半叶，随着热机功率的大量提高，传热过程所起的作用越来越显著，同时，在建筑、冶金、化工、机器制造和电工等其它技术领域内也对传热过程进行了大量的研究。20世纪以来，物理学上的成就，尤其是关于流体“层流”和“紊流”理论，以及流体流动边界层理论的形成和发展，更深刻地揭示出换热过程的物理本质，逐渐形成了传热学的理论体系。随着传热理论的发展，热机的工作得到了很大改善，许多大容量、高效能的换热设备在工程上得到广泛应用，还解决了高速飞行和宇宙航行中一系列复杂的换热问题。

制冷装置最早出现于19世纪80年代，当时是氨压缩制冷系统，经过近一百年的发展，出现了各种制冷循环和制冷剂，目前由于化工、医疗卫生、空调、冷藏和科学研究等方面的需要，制冷装置向大制冷量和深度制冷方向发展。

上述历史发展表明，热工理论是在热力工程实践的基础上建立和发展起来的，而热工理论的发展又反过来指导和促进了热工技术的进步和提高。

#### 四、我国的能源工业和技术水平

在热能利用方面，我国劳动人民有许多杰出的发明和创造，火药、火箭、用于金属冶铸鼓风的压气设备，以及作为现代燃气轮机雏形的走马灯等，据记载，远较世界各国为早，但在近200年内，由于封建制度对生产力的束缚以及帝国主义的侵略，在科学技术上与先进国家相比出现了显著的差距。建国近40年来，我国能源工业的产量大幅度增长，1980年的

与1949年相比,煤增加了18倍,石油增加了880多倍,天然气增加了1200多倍,发电量增加约70倍,1985年煤产量跃居世界第一位,其它能源的产量也已列入世界先进行列。近40年来,动力机械和设备制造工业得到了稳步发展,许多技术水平较高的产品,如各种航空发动机、大功率机车柴油机、万吨级船舶用柴油机以及大型火力和水力发电成套设备等,都能自行设计和制造,我国有了自己的远程导弹和卫星运载火箭,并且掌握了卫星回收的复杂技术,这一切标志着我国的热工技术正在跨入世界先进水平。但是也应当看到,我国能源生产的绝对数量虽然不少,由于人口众多,平均每人所占有的能源数量只及世界平均水平的四分之一,能源短缺的矛盾比较突出。另一方面我国单位产值所消耗的能源又显著高于先进国家,以木材加工行业为例,我国生产每立方米人造板所消耗的能源大约是先进国家的1.5~3倍,这说明我国能源利用效率低,能源浪费严重。究其原因,主要是用能设备和人员的技术比较落后,能源管理水平较低。这些都说明我国在能源生产和利用上还存在着落后的一面,因此,从事热工技术的研究和开发应用,仍然是有关科技人员的一项迫切任务。

### 五、热工学的单位制

我国的工程计量单位长期使用工程单位制,1984年国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。要求在1990年以前完成向国家法定计量单位的过渡。新的法定计量单位系统是以国际上通用的国际单位制为基础的,它采用了国际单位制中的基本单位、辅助单位和导出单位,适当规定了少数允许与国际单位制并用的常用单位。本书所涉及的物理量均采用国家法定计量单位,但考虑到过渡阶段的实际情况,也适当介绍一些工程单位制,并在附表1中列出热工学中常用物理量的不同单位制单位之间的换算关系。

表 1 国际单位制的基本单位

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

( )内的字是在不致混淆的情况下可以省略的字; ( )内的词是前者的同义词。

各种单位制都由基本单位和导出单位组成,基本量的单位叫做基本单位,国际单位制的基本量和基本单位如表1所示。导出量是由基本量按照定义或一定的物理关系组成的复合量,导出量的单位叫做导出单位,它实际上是由基本单位按一定的物理关系所组成的复合单位。例如在国际单位制中,导出量力与基本量质量和加速度的关系由牛顿第二定律决定:

$$力 = 质量 \times 加速度$$

因此力的单位

$$1 \text{ 牛顿} = 1 \text{ 千克} \cdot \text{米} / \text{秒}^2$$

在工程单位制中力是基本量,单位是公斤力,容易与国际单位制中质量的单位千克(公斤)混淆。1公斤力是质量为1千克的物体在标准重力场中所受到的重力,它与牛顿的关系是

$$1 \text{ 公斤力} = 1 \text{ 千克} \times 9.8065 \text{ 米} / \text{秒}^2 = 9.8065 \text{ 牛顿}$$

导出量压力的定义式为

$$压力 = 力 \div 面积$$



因此压力的国际单位制单位  $1 \text{帕斯卡} = 1 \text{牛顿/米}^2$

导出量功的定义式为  $\text{功} = \text{力} \times \text{距离}$

因此功的单位  $1 \text{焦耳} = 1 \text{牛顿} \cdot \text{米}$

在国际单位制中功、热量、能量的单位统一，都是焦耳。导出量比内能的定义是单位质量物质所具有的能量，所以比内能的单位是焦耳/千克。

表2列出了国际单位制中一部分具有专门名称的导出量和导出单位的名称、符号和其它表示方法，这些都是热工学中常见的物理量。

表 2 国际单位制中部分具有专门名称的导出单位

导出量名称	导出单位名称	单位符号	其它表示
力,重力	牛(顿)	N	$\text{m} \cdot \text{kg}/\text{s}^2$
压力,压强	帕(斯卡)	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$
能(量),功,热量	焦(耳)	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率	瓦(特)	W	$\text{J}/\text{s}$
热流通量(热流密度)	瓦(特)每平方米	$\text{W}/\text{m}^2$	$\text{kg}/\text{s}^3$
内能,焓	焦(耳)	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
比内能,比焓	焦(耳)每千克	$\text{J}/\text{kg}$	$\text{m}^2/\text{s}^2$
熵,热容	焦(耳)每开(尔文)	$\text{J}/\text{K}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
比热,比熵	焦(耳)每千克开(尔文)	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{m}^2/\text{s}^2$
热导率(导热系数)	瓦(特)每米开尔文	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$
对流换热系数,传热系数	瓦(特)每平方米开(尔文)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$

# 目 录

序

第二版 前言

绪论..... 1

## 第一篇 工程热力学

第一章 基本概念..... 1

第一节 工程热力学的研究对象与研究方法..... 1

第二节 工质与热力系统..... 2

第三节 工质的热力状态及基本状态参数..... 3

第四节 准平衡过程与热力循环..... 7

第五节 可逆过程与不可逆过程..... 9

思考题..... 11

习题..... 11

第二章 气体的热力性质..... 13

第一节 理想气体的状态方程式..... 13

第二节 气体的比热..... 14

第三节 理想混合气体..... 17

思考题..... 21

习题..... 22

第三章 热力学第一定律及热力过程..... 24

第一节 热力学第一定律及其解析式..... 24

第二节 稳定流动能量方程式及轴功和技术功..... 29

第三节 焓与理想气体的比热..... 32

第四节 稳定流动能量方程式的应用..... 34

第五节 理想气体的基本热力过程与多变过程..... 35

思考题..... 44

习题..... 45

第四章 热力学第二定律..... 48

第一节 正循环和逆循环..... 48

第二节 热力学第二定律..... 50

第三节 卡诺循环与卡诺定理..... 51

第四节 熵与克劳修斯积分式..... 56

第五节 热力学第二定律的表达式——熵增原理..... 58

※第六节 可用能与烟..... 61

思考题..... 64



习题 .....	65
<b>第五章 水蒸气</b> .....	<b>68</b>
第一节 概述 .....	68
第二节 基本概念 .....	69
第三节 定压下水蒸气的产生过程 .....	70
第四节 水蒸气表及水蒸气状态的确定 .....	73
第五节 水蒸气的焓熵图 .....	75
第六节 水蒸气的基本热力过程 .....	76
思考题 .....	78
习题 .....	79
<b>第六章 气体和蒸汽的流动</b> .....	<b>82</b>
第一节 气体和蒸汽在喷管中的流动 .....	82
第二节 喷管的计算 .....	85
第三节 气体和蒸汽的绝热节流 .....	89
※第四节 有摩擦的绝热流动与合流 .....	90
思考题 .....	92
习题 .....	92
<b>第七章 湿空气</b> .....	<b>94</b>
第一节 湿空气的性质 .....	94
第二节 相对湿度的测定 .....	96
第三节 湿空气的焓-湿 ( $H-d$ ) 图 .....	98
第四节 湿空气焓-湿 ( $H-d$ ) 图的应用 .....	101
思考题 .....	105
习题 .....	106

## 第二篇 传 热 学

概述 .....	108
<b>第八章 稳定导热</b> .....	<b>111</b>
第一节 导热的基本定律 .....	111
第二节 导热系数 .....	112
第三节 通过平壁的稳定导热 .....	113
第四节 通过圆筒壁的稳定导热 .....	117
※第五节 二维稳定导热的近似解 .....	121
思考题 .....	121
习题 .....	122
<b>第九章 不稳定导热</b> .....	<b>125</b>
第一节 概述 .....	125
第二节 导热微分方程 .....	127
第三节 无限大平壁的加热或冷却 .....	129
※第四节 集总参数法 .....	135
思考题 .....	137
习题 .....	137

<b>第十章 对流换热</b> .....	139
第一节 牛顿公式和放热系数.....	139
第二节 影响放热过程的因素.....	140
第三节 边界层的基本概念.....	141
第四节 对流换热的相似准则和准则函数.....	143
第五节 大空间自由运动放热.....	148
第六节 管内受迫运动放热.....	150
第七节 外掠圆管和管束放热.....	153
第八节 集态改变时的放热.....	156
思考题.....	161
习题.....	161
<b>第十一章 热辐射</b> .....	163
第一节 热辐射的基本概念.....	163
第二节 热辐射的基本定律.....	165
第三节 物体之间的辐射换热.....	170
第四节 气体辐射与太阳辐射.....	176
思考题.....	178
习题.....	179
<b>第十二章 传热与换热器</b> .....	181
第一节 复合换热.....	181
第二节 通过间壁的传热.....	183
第三节 换热器及其热计算原理.....	187
第四节 传热单元数法与换热器效能.....	193
第五节 传热的增强与削弱.....	195
※第六节 热管简介.....	199
思考题.....	200
习题.....	200

### 第三篇 工业锅炉

<b>第十三章 工业锅炉概述</b> .....	204
第一节 锅炉设备组成.....	204
第二节 锅炉工作原理.....	205
第三节 锅炉设备基本特性.....	207
思考题.....	210
<b>第十四章 锅炉燃料和燃烧计算</b> .....	211
第一节 锅炉燃料的成分和燃料分类.....	211
第二节 煤的燃烧特性和煤的分类.....	214
第三节 燃料燃烧所需要的空气量.....	218
第四节 燃料燃烧所生成的烟气量.....	220
第五节 锅炉运行中烟气的成分和过剩空气系数的确定.....	223
思考题.....	224
习题.....	224



第十五章 锅炉热平衡	226
第一节 锅炉热平衡方程和锅炉热效率	226
第二节 机械不完全燃烧损失与化学不完全燃烧损失	228
第三节 排烟热损失	230
第四节 散热损失和灰渣物理热损失	231
思考题	232
习题	233
第十六章 燃烧设备——炉子	234
第一节 炉子的分类及炉内燃烧过程	234
第二节 手烧炉	235
第三节 机械化篦炉	237
第四节 抛煤机炉及沸腾炉	241
第五节 悬燃炉	243
第六节 炉子热强度及燃烧情况的判断	245
思考题	248
习题	248
第十七章 汽锅及辅助受热面	249
第一节 锅炉型式的发展概况及基本类型	249
第二节 几种典型锅炉的介绍	250
第三节 锅炉的辅助受热面	258
第四节 锅炉的传热过程及水循环	261
思考题	264
第十八章 锅炉的辅助设备与锅炉的选择	265
第一节 锅炉的水处理	265
第二节 锅炉的通风、除尘设备	271
第三节 锅炉的选择	275
思考题	277
习题	278

### ※第四篇 热力发动机、压气机与制冷装置

第十九章 蒸汽动力装置	279
第一节 蒸汽动力循环	279
第二节 热力发电厂及热电联合循环	286
第三节 汽轮机的工作原理	290
第四节 汽轮机的结构	295
思考题	298
习题	298
第二十章 内燃机	299
第一节 内燃机的燃料和着火方式	299
第二节 四冲程点燃式内燃机的工作原理	301
第三节 四冲程压燃式内燃机的工作原理	304
第四节 二冲程内燃机的工作原理	306

第五节 内燃机的性能指标和负荷特性 .....	308
第六节 内燃机的曲柄连杆机构和配气机构 .....	311
第七节 汽油机的燃料供给系和点火系 .....	316
第八节 柴油机的燃油供给系和燃烧室 .....	318
第九节 内燃机的润滑与冷却 .....	321
第十节 燃气轮机装置的工作原理 .....	323
思考题 .....	324
习题 .....	325
<b>第二十一章 压气机与制冷装置 .....</b>	<b>326</b>
第一节 压气机的用途及分类 .....	326
第二节 往复式压气机工作循环 .....	329
第三节 往复式压气机的功率和效率 .....	335
第四节 离心式压气机的工作原理及选择 .....	337
第五节 制冷装置的应用与分类 .....	340
第六节 蒸汽压缩式制冷循环 .....	341
第七节 吸收式及蒸汽喷射式制冷原理 .....	345
第八节 太阳能制冷装置 .....	346
第九节 热泵 .....	347
思考题 .....	349
习题 .....	349
<b>附录 .....</b>	<b>351</b>
表 1 单位换算表 .....	351
表 2 某些常用气体在理想气体状态下的平均定压比热 .....	352
表 3 某些常用气体在理想气体状态下的平均定容比热 .....	352
表 4 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列) .....	353
表 5 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列) .....	354
表 6 未饱和水与过热蒸汽表 .....	356
表 7 干空气的物理参数 .....	362
表 8 在大气压力下烟气的热物理性质 .....	362
表 9 未饱和水和饱和水的物理参数 .....	363
表 10 饱和水蒸汽的物理参数 .....	363
表 11 各种材料的黑度 $e$ .....	364
附图 1 氨 (R71'7) 的 $\lg p-h$ 图 .....	367
附图 2 氟里昂-12 (R12) 的 $\lg p-h$ 图 .....	368
附图 3 水蒸气的焓-熵图 .....	369
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>368</b>



# 第一篇 工程热力学

化学、物理、传热学

## 第一章 基本概念

### 第一节 工程热力学的研究对象与研究方法

热力学是研究伴有热效应的能量转换规律及物质热力学性质的科学。它是在19世纪以后人们研究利用热能的动力装置——热机效率的基础上发展起来的一门学科，因此在最初阶段，它主要研究热能和机械能（功量）之间的转换规律。以后随着科学技术的发展，热力学已远远超出原来的范围，逐渐深入到化工、冶金、制冷、空调、气象与生物等各个领域而形成许多分支。例如：物理热力学主要研究各种物理过程中的能量转换规律；化学热力学研究各种化学反应过程中的能量转换规律；工程热力学则主要研究热能与机械能之间的转换规律。近年来由于新能源的开发，各种新的能量转换方式的出现，已使工程热力学的应用范围扩大，而不只限于热、功转换。例如应用于宇宙航行、热核反应堆、太阳能、地热与生物能的利用、海水淡化、空气分离与低温技术。就目前的情况来看，工程热力学仍以研究热、功转换为研究对象。

工程热力学的研究内容：

(1) 研究能量转换的客观规律，即热力学的基本定律。热力学第一与第二定律是工程热力学的理论基础。热力学第一定律指出：热能与其它形式的能量相互转换时，必须遵守能量守恒原理。热力学第二定律则规定了热能和其它形式能量转换时的方向、条件和限度。

(2) 研究能量转换的媒介物——工质的热力学性质。

(3) 研究各种热、功转换的过程，对实现热、功转换的不同热力过程和热力循环进行分析计算，指出影响能量转换效果的因素及提高转换效率的途径。

热力学的研究方法有宏观和微观两种。宏观的方法即经典热力学（简称热力学）的研究方法，它并不深入地研究物质分子的热运动，而是从能量转换的观点出发，直接观察用宏观物理量（如温度、压力）所描写的宏观现象，并从中总结出一些带有普遍性的基本定律，如热力学第一与第二定律、卡诺定理等。这些基本定律是人类长期实践经验的总结，它在人们所能观察到的范围内，具有高度的可靠性。但宏观的研究方法也有一定的局限性，因为它没有涉及物质的微观结构，所以不能解释宏观现象中物质多种变化的物理本质。

从分子、原子的微观角度来阐述热力学的理论称为统计热力学。它是用分子运动的力学定律和统计的方法来研究大量分子紊乱运动的统计平均性质，故能用物质内部分子运动的微观机理来阐明宏观现象中物质变化的物理本质。但微观研究方法的缺点是必须对物质结构采取一些简化和假设，因而所得的结果与实际情况往往有差异，其次，这种方法的推导比较复杂，不象宏观方法那样简单、直观。

总的说来,宏观与微观的方法是相辅相成互为补充的。就目前而言,宏观的方法仍为主要的研究方法,但在某些领域里,微观方法已起主导作用,例如在设计热核反应堆时,就必须用统计热力学的方法来研究中子的运动规律。

工程热力学的研究方法与热力学一样,主要采用宏观的方法,有时为了便于理解宏观现象的热运动本质,也适当地从分子运动论的观点作一些微观的解释。

此外,工程热力学象力学及其它学科一样,为简化研究过程,抓住影响事物本质的主要因素,抽出同类现象的共性,而忽略一些枝节问题,即采取抽象、概括、理想化和简化的方法。例如把内燃机气缸中的实际气体(燃油燃烧后的混合气)当作理想气体;把燃油燃烧时气缸内混合气的升温过程,抽象为某一个外热源<sup>①</sup>对混合气的加热过程。但必须注意的是,这些抽象和简化必须合理、接近实际。

## 第二节 工质与热力系统

### 一、工 质

能量的传递和转换需要媒介物质,这种媒介物质称为工质。实现能量传递和转换的设备,则分别称为热力设备和热机。以图1-1所示的蒸汽动力装置为例,首先是水在锅炉中吸收高温烟气的热能而变为蒸汽,蒸汽进入汽轮机推动叶轮旋转,将热能转变为机械能,再带动发电机发出电能。做完功的废汽排入冷凝器被冷却水冷凝成水,再经给水泵重新送到锅炉中去,这就完成了一个蒸汽动力循环。在这个蒸汽动力装置中,汽轮机中的工质是蒸汽;而在锅炉中,受热面外的工质是烟气,受热面内的工质是水和蒸汽。这里的汽轮机是热机,而锅炉及冷凝器为换热设备。

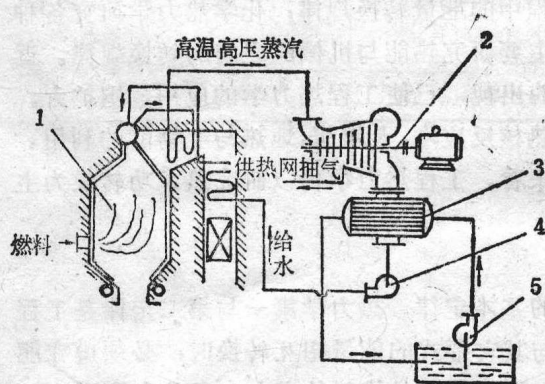


图 1-1 蒸汽动力装置示意图

1. 锅炉 2. 汽轮发电机组 3. 冷凝器  
4. 给水泵 5. 冷却水泵

所有的热机无论何种类型,都是使工质先在一定的条件下受热,以提高温度、压力,然后膨胀作功,这说明工质的热力性质与作功能力的大小及传热能力等有密切关系,因此在工程热力学中还必须研究工质的热力性质。由于气(或汽)态物质有良好的膨胀性和流动性,最适于作热机和热力设备的工质,故本书中讨论的工质一般都是指气(或汽)态物质。

### 二、热力系统

无论哪门学科,在确定研究对象时都要划分出一定的范围。热力学和其它学科类似,常把分析对象从若干物体中分割出来,并把它称为“热力系统”,或简称“系统”。系统以外的物质称为“外界”或“环境”,系统与外界的分界面称为“边界”(通常用虚线表示)。边界可以是实际的[图1-2(a)]或假想的[图1-2(b)],固定的(如图1-1中汽轮机的进、出口截面)或移

<sup>①</sup> 热源是指具有很大容热能力的物体,当热量传入或传出热源时,它的温度保持不变。



动的(如图1-2(a)中活塞由I移至II的情形)。

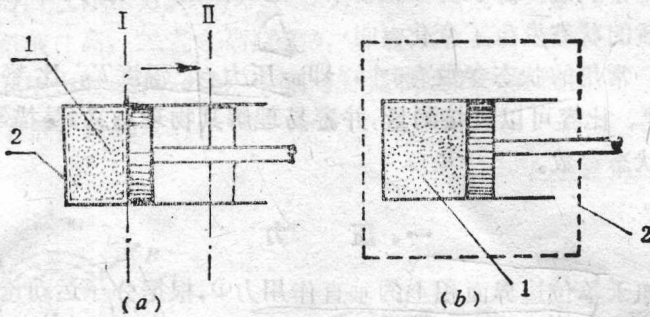


图 1-2 系统边界示意图

(a) 实际边界 (b) 假想边界  
1. 工质 2. 边界

系统范围的大小视具体要求而定。例如图1-1所示的蒸汽动力装置, 当需要计算整个蒸汽动力厂的经济性时, 可把整个蒸汽动力装置划作一个热力系统; 如果只研究蒸汽在汽轮机中作的功, 就可把汽轮机进口与出口截面间的蒸汽划作一个热力系统, 计算在一定的时间内, 从进口处输入的蒸汽所带进的能量; 从出口处排出的蒸汽所带走的能量; 以及蒸汽对叶轮所做的功等。

系统与外界的相互作用可以有多种形式, 常见的有: 系统和外界的物质交换; 系统和外界之间的热量和功量交换。根据系统与外界相互作用的不同, 可将热力系统分为以下几类:

- 闭口系: 系统和外界无物质交换, 如图1-2(a)中工质封闭于活塞气缸中的情况。
- 开口系: 系统和外界有物质交换, 如取图1-1中汽轮机内的蒸汽作热力系统, 则蒸汽不断地流过汽轮机进、出口截面的情况, 即属于开口系。
- 绝热系: 系统和外界无热量交换。
- 孤立系: 系统和外界无关, 既无能量交换也无物质交换。

必须指出, 自然界并不存在真正的绝热系和孤立系, 因为自然界不存在绝对的隔热材料, 也不存在绝对孤立的物体。不过今后我们将会发现, 工程热力学所研究的许多热力系统, 可以近似地看作是绝热系或孤立系。也就是说, 这两个概念是从实际中抽象出来, 经过简化、理想化的概念, 有很大的现实意义。

此外, 根据热力系内部状况的不同, 还可分为: 单元系——具有单一化学成分的物系; 多元系——具有多种化学成分的物质; 单相系——如同为液相或气相的物系; 多相系——如汽、液两相共存、或汽、液、固三相共存的物系。

### 第三节 工质的热力状态及基本状态参数

工质的热力状态(简称状态), 是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。工质在工作过程中, 温度、压力等物理量都在不断地变化, 例如在锅炉中, 低温的水变成高温的蒸汽; 又如在汽轮机中, 温度、压力都较高的蒸汽, 经膨胀作功后变为温度、压力都较低的废气。上述现象称为工质热力状态的变化, 用来表征工质热力状态的各种宏观物理量, 称为状

态参数。

对应于工质的每一个状态，各状态参数都有一定的数值，只要其中一个状态参数的值有了变化，就意味着工质的状态发生了变化。

在工程热力学中，常用的状态参数有6个，即：压力 $p$ 、温度 $T$ 、比容 $v$ 、内能 $u$ 、焓 $h$ 及熵 $s$ 。其中压力、温度、比容可以直接测量，并容易理解其物理意义，是描写工质状态最常用的物理量，称为基本状态参数。

## 一、压 力

压力是指工质施加于单位边界面积上的垂直作用力①，根据分子运动论的观点，气体的压力是气体大量分子在紊乱运动中对容壁撞击的总结果。因此，气体作用在器壁上的压力，与单位容积内的分子数和分子的平均移动动能成正比。

若用 $p$ 表示工质的压力， $A$ 表示受力面积， $F$ 表示垂直作用于该面积上的力，则：

$$p = \frac{F}{A}$$

**压力单位** 随力和面积所选用单位的不同而不同。在我国法定计量单位②中，压力的单位为帕斯卡，简称帕，用符号Pa表示。1Pa相当于1米<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>) 面积上，作用1牛顿力 (N) 时的压力。即：

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

工程上往往嫌Pa的单位太小而用兆帕作压力单位，符号为MPa。

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

此外，还有一些本应废除，但习惯上仍在使用的一些压力单位，如：  
工程上曾用巴 (bar) 作压力单位。

在工程单位制中，用工程气压 (at) 作压力单位。

$$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 10^4\text{kgf}/\text{m}^2 \approx 0.98 \times 10^5\text{Pa} = 10\text{mHg}$$

在一些压力不大的场合，也曾用毫米汞柱 (mmHg) 和毫米水柱 (mmH<sub>2</sub>O) 作为压力单位③。

在物理学中，把纬度45°海平面上的常年平均大气压力称为标准大气压，用符号atm表示。

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1.0133 \times 10^5\text{Pa}$$

以上几种压力单位与法定计量单位的换算关系见附录表1。

各种压力单位的换算关系详见附录表1。

**工质压力的测量**，常用弹簧管式压力计及U形管压力计。弹簧管式压力计的原理如图1-3所示，它有一根截面为扁圆形的弹性金属管，此管在工质压力 ( $p$ ) 和大气压力 ( $B$ ) 之差的作用下，产生变形，从而拨动指针转动，指示出被测工质的压力与大气压力之差值。

① 在物理学中称为压强。

② 我国法定计量单位中，包括国际单位 (SI) 制的基本单位、辅助单位和导出单位，也包括国家选定的其它单位，详见国家计量局的规定。

③ 工质压力的大小之所以可用液柱的高度 $h$ 来表示，是由于液柱的重量在它的底面产生一定的压力，因此若已知液柱的重量为 $\gamma$ ，则： $p = \gamma h$ 。



U形管压力计原理如图1-4所示，U形管内装有水银或水，其一端与大气相通，另一端与容器相通，当容器内气体压力 $p$ 高于大气压力 $B$ 时[图1-4(a)]，与容器相通的一侧液柱低，而与大气相通的一侧液柱高，二者之高度差 $h$ ，即表示容器内气体压力高于大气压力之差值。当气体压力低于大气压力时[图1-4(b)]，则与容器相通的一侧液柱高，与大气相通的一侧液柱低，也会出现一个液柱差 $h$ 。

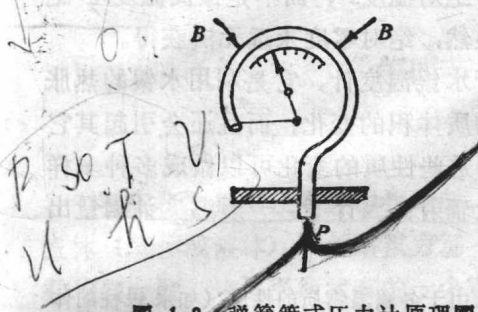


图 1-3 弹簧管式压力计原理图

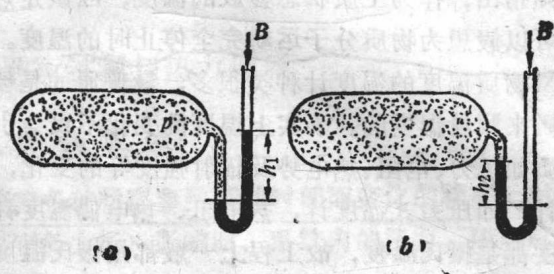


图 1-4 U形管压力计原理图  
(a) 高于大气压 (b) 低于大气压

由上述压力计的原理可以看出，压力计本身处于大气压力 $B$ 的作用下，故由压力计测得的压力是工质的实际压力与当时当地大气压力之差值，是一个相对压力，称为表压力用 $p_g$ 表示。气体的实际压力称为绝对压力，用 $p$ 表示。于是当气体压力高于大气压力时，其表压力为：

$$p_g = p - B \tag{1-1}$$

当气体压力低于大气压力时，其表压力称为真空度，用 $p_v$ 表示。则：

$$p_v = B - p \tag{1-2}$$

对工质作状态分析及热力计算时，作为状态参数的压力应是气体的真实压力，即绝对压力。因为大气压力 $B$ 随时随地都可能变化，即使气体的绝对压力不变，表压力或真空度仍可能变化。绝对压力的数值一般不能直接测量出来，但由于表压力和大气压力都是可以测定的，故绝对压力可以由式(1-1)或(1-2)求得。

大气压力 $B$ 可用专门的气压计测定。就一个地方而言，大气压力的变化不大，在工程计算中，当 $p_g$ 值较大时，大气压力可视为常数。

## 二、温 度

温度是表示物质冷、热程度的一个宏观物理量，更严格地说，温度是衡量系统内部或系统之间是否处于热平衡的特性参数。从微观角度看，它反映了物质内部分子、原子(或离子)热运动的强弱程度。根据分子运动论，气体的温度与其大量分子热运动的平均移动动能成正比，气体的温度高就表明气体分子热运动的动能大。

衡量温度高低的尺度称为温标。在法定的计量单位中，采用热力学温标称绝对温标，用符号 $T$ 表示，以“开尔文”作温度单位，以 $K$ 表示。热力学温标取水的三相点作为基准点，并定义其温度为 $273.16K$ 。1 $K$ 等于水的三相点热力学温度的 $273.16$ 分之一。

与热力学温标并用的还有摄氏温标，单位为 $^{\circ}C$ 。摄氏温度与热力学温度

0.0133  
1.7105 Pa