



高等院校网络教育精品教材  
机械类

# 热工基础

REGONG JICHU

秦 萍 毕海权 / 主编



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等院校网络教育精品教材——机械类

# 热 工 基 础

秦 萍 毕海权 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 提 要

热工基础理论是现代工程技术人员必备的技术基础知识,是 21 世纪工科类专业人才工程素质的重要组成部分。本书是热工技术理论基础教材,分为工程热力学和传热学两部分。工程热力学部分共 8 章,包括基本概念和定义、热力学第一、第二定律,理想气体的热力性质及过程,水蒸气、湿空气的热力性质及过程,气体与蒸汽的流动,常见热工设备和装置的热力过程和热力循环分析等。传热学部分共 4 章,包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程和换热器的基本概念、基本定律及基本计算方法等。

本书为非能源动力类专业网络教育系列教材,非能源动力类专业大专生可以使用,也可作为有关工程技术人员的参考用书。书后附有必要的附表和附图及习题参考答案。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

热工基础 / 秦萍, 毕海权主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2011.1  
高等院校网络教育精品教材. 机械类  
ISBN 978-7-5643-1044-8

I. 热… II. ①秦… ②毕… III. 热工学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 009572 号

---

高等院校网络教育精品教材——机械类

### 热 工 基 础

秦 萍 毕海权 主编

\*

责任编辑 王 旻

特邀编辑 王玉珂

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 18.25 插页: 1

字数: 451 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1044-8

定价: 32.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

“热工基础”的主要研究内容是如何有效地利用热能，最大限度地提高热能利用率。由于工业领域的各行各业及人们日常生活中，都离不开能源消费。能源的开发和利用在很大程度上是热能的开发和利用，在能源危机日趋严重的今天，作为一名工程技术人员或现代管理人员，更应具备一定的热工基础知识，以便在实际工作中面对与能源和热能有关的问题时，能正确决策并能采取技术上先进、经济上合理的有效措施，节能减排，提高劳动生产率，这也是历史赋予每个科学技术工作者和管理者的责任和使命。

本书分为工程热力学和传热学两部分。工程热力学是研究热现象中，物质系统在平衡时的性质和建立能量的平衡关系，以及状态发生变化时，系统与外界的相互作用。它主要研究热能与机械能之间相互转换的规律及其有效应用，是机械工程的重要基础学科之一。

传热是生产生活中非常普遍的现象。传热学是研究热量传递过程及其规律的一门科学，应用传热理论和实验成果指导强化传热或削弱传热，可以达到节能的目的。

书中不仅注重热工基础理论的叙述，而且注重理论联系实际，对常见热工设备的工作原理、构造特点，以及提高能量利用率的措施等都进行了分析和讲述。对一些典型例题采用不同方法求解，并进行讨论，帮助学生理解复杂概念。同时注意选编了一些密切联系工程实际的例题、思考题和习题，以培养学生的工程意识和素养，提高学生分析解决实际工程问题的能力。

学习本课程的目的：使学生着重从工程的角度，掌握热力学和传热学的基本规律，并能正确运用这些规律，理论联系实际地对热工设备进行热力过程、热力循环分析和计算；同时培养学生正确的逻辑思维能力，为学习后续有关专业课程提供必要的工程热力学和传热学的基础理论知识和热力计算的基本方法；为学生毕业后从事工程设计、管理和科学研究提供必要的热力学理论基础和良好的工程素质。

针对网络教育的特点，本书在编写时力求做到深入浅出，便于学生自学。每章之前都给出了明确的学习指导，包括学习目标、学习时间和学习方法建议、本章重难点等；每章之后有本章小结，包括重点再现、典型例题分析等，帮助学生掌握重点，突破难点。另外有思考题及解答，对易于混淆的概念或定义，都作了详细说明。最后还有一定量的习题，可通过适当的作业和练习巩固所学知识。

本书第一篇工程热力学部分由秦萍编写，第二篇传热学部分由毕海权编写，全书由秦萍教授统稿。在编写过程中得到张继苍、刘应清等许多老师的帮助，在此深表谢意。由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者不吝赐教。

编 者

2010年7月于西南交通大学

## 目 录

绪 论	1
-----	---

## 第一篇 工程热力学

第一章 基本概念和定义	4
第一节 热力系统	5
第二节 工质的热力状态及其基本状态参数	6
第三节 平衡状态、状态公理及状态方程	8
第四节 准平衡过程和可逆过程	10
本章小结	13
思考题	14
习 题	15
第二章 热力学第一定律	17
第一节 热力学第一定律的实质	18
第二节 系统的储存能	18
第三节 功量与热量	20
第四节 热力学第一定律及其解析式	23
第五节 稳流能量方程式应用举例	29
本章小结	30
思考题	34
习 题	35
第三章 理想气体的热力性质及过程	37
第一节 理想气体及其状态方程式	38
第二节 理想气体的比热容	40
第三节 理想气体的热力学能、焓和熵	44
第四节 理想气体混合物	48
第五节 理想气体的热力过程	53
本章小结	61
思考题	69
习 题	70

第四章 热力学第二定律 .....	72
第一节 热力学第二定律的表述与实质 .....	73
第二节 卡诺循环与卡诺定理 .....	75
第三节 熵方程与孤立系统熵增原理 .....	80
本章小结 .....	89
思考题 .....	93
习题 .....	93
第五章 水蒸气 .....	95
第一节 水蒸气的定压发生过程 .....	96
第二节 水蒸气的热力性质图表 .....	100
第三节 水蒸气的热力过程 .....	102
本章小结 .....	103
思考题 .....	105
习题 .....	106
第六章 湿空气 .....	108
第一节 湿空气概述 .....	109
第二节 湿空气的状态参数 .....	110
第三节 湿空气的湿度图 ( $\omega$ - $t$ 图) .....	115
第四节 湿空气的热力过程实例分析 .....	117
本章小结 .....	120
思考题 .....	120
习题 .....	121
第七章 气体与蒸气的流动 .....	123
第一节 一维稳定流动基本方程 .....	124
第二节 气体流速与管道截面面积的关系 .....	126
第三节 气体喷管的计算 .....	128
第四节 喷管的设计计算和校核计算 .....	132
第五节 绝热节流 .....	134
本章小结 .....	134
思考题 .....	138
习题 .....	138
第八章 热力循环 .....	140
第一节 压气机循环 .....	141
第二节 活塞式内燃机循环 .....	146
第三节 蒸气压缩制冷循环 .....	152
本章小结 .....	158
思考题 .....	159
习题 .....	160

## 第二篇 (工程) 传热学

第九章 导 热	164
第一节 导热的基本概念和定律	165
第二节 导热微分方程和定解条件	167
第三节 一维稳态导热	171
第四节 非稳态导热	179
本章小结	184
思考题	187
习 题	188
第十章 对流换热	189
第一节 对流换热的基本概念	190
第二节 边界层对流换热微分方程组	195
第三节 相似理论基础	199
第四节 单相流体强迫对流换热的准则方程	205
第五节 自然对流换热的准则方程	214
本章小结	215
思考题	220
习 题	221
第十一章 辐射换热	223
第一节 热辐射的基本概念	224
第二节 热辐射的基本定律	226
第三节 角系数	229
第四节 黑体和灰体间的辐射换热	234
第五节 遮热板	237
本章小结	238
思考题	242
习 题	243
第十二章 传热过程和换热器计算基础	245
第一节 传热过程	246
第二节 传热的增强和削弱	248
第三节 换热器简介	250
第四节 换热器的平均温差	251
第五节 平均温差法的换热器热计算	255
本章小结	256
思考题	259
习 题	260
附 录	261
习题参考答案	279
参考文献	283

# 绪 论

## 一、概 述

能源是指可以提供各种能量和动力的物质资源。自然界提供的能源有：太阳能、风能、水力能、地热能、燃料的化学能、潮汐能，以及原子核能等。在上述能源中，风能、水力能、潮汐能属机械能，其余大多数都是直接或间接地以热能的形式提供能量。人类社会发展的历史与能源开发利用的历史是密不可分的，从钻木取火到现代文明，能源的开发利用水平代表了社会生产力和社会物质文明的发展水平。迄今为止，在我们的能源消费结构中，以热能形式提供的能量消费仍占据了相当大的比例，因此研究热能的有效利用是非常重要的。

热能的利用可分为直接利用和间接利用。直接利用是把热量直接作为加热的能量来源，热能的形式不变，如蒸煮、供暖、物料烘干、精馏、冶炼、化学分解与化合等。而间接利用则是把热能转变为其他形式的能量加以利用，例如，把热能转变为机械能或电能，即把热能作为获取动力的能量来源。直到 18 世纪中叶发明蒸汽机之前，人类对热能的利用仍局限于直接利用。蒸汽机的使用，最先在欧洲引发了第一次工业大革命，推动了资本主义生产力的发展，使作坊式的小规模生产转向大规模工业生产，开创了热能间接利用的新纪元。随着蒸汽机使用范围的扩大，特别是当蒸汽机用于航海业之后，由于船上储煤空间的宝贵，促使人们对提高蒸汽机工作效率和节煤问题进行了系统研究，并在 19 世纪中叶开始形成了“工程热力学”这门学科。通过对热的本质、热能和机械能之间相互转换的规律以及各种工质的热力学性质进行研究，使得人们对热机的工作原理有了更深刻的理解。这些理论在随后的热机实践中起到了一定的指导作用，使内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机和喷气推进器等相继问世，进一步促进了各行各业的现代化发展。19 世纪中叶，世界上第一台与热机工作过程正好相反的机械——制冷装置问世。制冷技术的应用和发展，不但可以实现微环境的空气调节和食品冷藏保鲜，提高人们的生活质量，而且在精密仪器、半导体、合成纤维、航空、航天、超导、医学、精细化工等高、精、尖工业领域开辟了一片新天地。

在人类开发利用能源的过程中，特别是在蒸汽机出现以后，人们始终不懈地探求有效利用热能的手段，以追求最大的能量转换效率。当人们运用工程热力学知识，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了改进和完善，但其经济性和同条件下的理想情况仍相差很远，于是人们才开始进一步关注实际蒸汽机的各种损失，发现气缸内部由传热引起的热损失是最主要的。联系到许多工程技术领域普遍都存在的传热问题，从而促使人们开始研究热量传递的规律，正是在这种情形下，自 20 世纪初开始，“传热学”应运而生为一门独立的学科。

无论是热能的直接利用还是间接利用，都必须在可控制的热工设备中进行，而且人们都



会自然而然地追求最佳经济性。因此，研究热能与机械能相互转换规律的工程热力学和研究热量传递规律的传热学共同组成为热工基础理论。该学科是研究热能在工程上有效利用的一门综合性技术科学，是工程科学最重要的领域之一。

随着全球能源危机和环境保护问题的日渐凸显，如何开发利用新能源和可再生能源，进一步提高能源利用率，节能减排，保护环境，是摆在我们面前的重要任务。为了开发新能源，如太阳能、地热能、风能、水力能、潮汐能、煤的气化、氢能源、作为生物质能源的速生植物的栽培以及核聚变等，需要完成一大批激动人心的新工程。对于所有这些工作，热工理论都将在工程分析和工作方案拟订中起到非常重要的作用。只有具备坚实的热工基础知识，并能在工程分析中正确运用这些知识，才能在这些重要的技术开发工作中有所作为。由于热工理论在传统工业、现代科技及日常生活各个领域中的应用越来越广泛，因此，从事能源、交通运输、航空、航天、化工、冶炼、机械制造、制冷空调、电子、地质、气象、超导传递、高能激光、消防、环境保护等专业的工程技术人员、现代管理人员，以及有关的领导干部，都应掌握或了解有关热能有效利用的必要的知识，才能针对目前我国生产企业部门普遍存在的能耗高、污染重的现状，不断挖潜，节能减排，为我国的能源和环境事业作出贡献。

一个优秀工程师的重要特质就在于他能够正确、系统地分析问题，能从错综复杂的影响因素中找出主要和次要影响因素，并对实际问题进行适当的理想化假定，建立合理可行的研究模型，然后准确地、有条不紊地从事工作。如果缺乏这样一种系统的研究方法，常常会使容易的问题变得困难，或者把大量时间浪费于追求错误的答案上。本课程的主要目标是使学生通过对热工基础基本概念和原理的学习，了解热力学研究的简化手段和分析方法，培养学生科学的逻辑思维方法和工程意识，提高科学素养，以及在工程实际中灵活运用理论知识解决实际问题的能力。

## 二、热工基础的研究对象、内容和研究方法

如前所述，热工基础包括工程热力学和传热学两部分。工程热力学是热力学最早发展起来的一个分支，主要研究对象是在热能间接利用中热能与机械能相互转换的规律，这是研究热机工作情况和工作条件所必需的理论基础；传热学相对较年轻，作为一门比较系统的科学，只有 100 年历史。传热学的主要研究对象是在热能直接利用中热量传递的规律，目的是进行热力过程的分析计算，提高热能利用的经济性。实际上，在热能与机械能相互转换的过程中离不开传热过程。所以，工程热力学和传热学一起，为分析各种热物理现象、研究热工设备的工作情况、分析计算各种热力过程，以及提高能量转换效率等方面提供了必需的理论基础。

工程热力学的主要研究内容包括：基本概念和定义、热力学第一定律和第二定律、工质的热力性质、热力过程和热力循环。其目的是通过对常用热工设备热力过程和热力循环的分析计算，提出能够提高能量利用经济性的措施。

传热学的主要研究内容包括：导热、对流换热、辐射换热和传热过程。虽然热量传递的三种基本方式为热传导、热对流和热辐射，但在很多实际情况下是三种基本传热方式在具体场合的不同组合。如“热对流”是指流体各部分发生相对位移或混合而引起的热量传递，该现象只在流体中出现。而“对流换热”则是特指流体与固体壁面之间的换热，其换热机理是“热传导”和“热对流”的综合作用，是工程上一种非常重要的换热形式；“传热过程”是指

冷、热两种流体通过固体壁面的传热，包含“对流换热”和“热传导”两种传热方式。所以传热学主要研究的是工程换热现象，其目的是通过对传热规律的研究，找到提高热能利用率应采取的增强或削弱传热的途径。

在研究方法上，工程热力学主要采用经典热力学的研究方法。这种方法是从宏观现象出发，以归纳无数事实所得到的热力学第一定律和第二定律作为分析和推理的基础，只把热看做是一种“能”，不深入到物质内部去考察分子、原子的微观行为，不需要对物质的微观结构进行任何臆测，而只是从能量收支平衡的角度，进行物体宏观现象和宏观过程的研究。因此，分析推理的结果具有高度的普遍性和可靠性，而且关系明确，条理清楚，在数学上也比较简单，这是它的独特优点。但在另一方面，经典热力学无法推测与物质内部结构有关的具体性质，也不能解释与分子和原子行为有关的现象的机理和实质。而从微观研究方法出发的统计热力学能从物质内部分子运动的微观机理，更深刻地解释宏观热现象的物理实质。但统计热力学需对物质的微观结构采取简化模型，会涉及很多数学问题，而且所得到的结果往往在数量上还不完全符合实际情况，仍需得到宏观研究方法的检验。所以，工程热力学主要采用宏观方法，必要时引用气体分子运动论和统计热力学的观点、方法和理论，对一些物理现象和物质的性质进行说明和解释。

传热学的研究方法与工程热力学一样，也主要采用宏观方法，它的基础也是归纳无数实验事实所得到的热导热、热对流和热辐射的基本定律。对实际过程都是以三种基本传热方式的具体组合来处理。具体研究方法有解析法、相似理论指导下的实验法，以及数值解法。这几种方法针对各自研究的问题相互独立，但又相辅相成，互为补充。如解析法是对实际传热现象进行简化后建立数学物理模型，用数学分析方法求解，但简化之后的分析解必须通过实验验证或修正。此外，分析求解还受非线性偏微分方程组求解困难的局限。数值解在较大程度上弥补了解析法的缺陷，扩大了求解范围，但对复杂课题仍需用实验核定其中的某些点，并不断修改模型或模型中的某些系数。由于计算机的广泛应用，已经有可能利用微分方程数值解解决一些传热问题。

由于热能的间接利用或直接利用都离不开热工设备，因此本课程将以适当的篇幅对部分常用热工设备的工作原理、基本结构和性能及其热力过程的分析 and 计算进行介绍。

### 三、课程特点

热工基础课包含工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学内容的特点是概念多、公式多、内容抽象、逻辑严密，各部分内容相互渗透交叉。热力学第一定律、热力学第二定律、工质热力性质和热力过程是贯穿整个内容的主线。传热学部分的特点是实践性强，能量守恒定律（热平衡方法）是贯穿此部分内容的主线，建立物理模型并正确给出数学描述是求解工程实际问题的前提。

课程实际上是一种载体，通过课程知识的学习，我们应学习课程中的逻辑思维方式 and 解决问题的巧妙迂回手段，举一反三，学会将工程实际问题简化抽象为物理模型的一般原则和方法，培养自己科学缜密的逻辑思维习惯，提高分析和解决实际问题的能力。

# 第一篇

## 工程热力学

### 第一章 基本概念和定义

#### 【学习指导】

##### 1. 学习目标

了解工程热力学的基本术语和概念，正确理解状态参数的性质，准静态过程和可逆过程的定义、实现的条件及两者之间的关系，并能灵活应用这些性质和关系，掌握不同过程在  $p$ - $v$  图和  $T$ - $s$  图上的表示，为工程热力学的深入学习奠定基础。

##### 2. 学习建议

(1) 学习时间：3~4 学时。

(2) 学习方法。

A. 认真阅读教材第一章的内容，注重工程热力学中一些基本术语和概念的理解，如：热力系统、平衡状态、状态公理、状态参数及其性质、准平衡过程和可逆过程的定义、实现的条件及两者之间的关系。

B. 点播学习网络课程第一章的内容。

C. 完成习题。

##### 3. 学习重难点

A. 热力系统的概念，状态参数及其性质，平衡状态、状态公理及状态方程。

B. 准平衡过程和可逆过程的定义、实现的条件及两者之间的关系。

## 第一节 热力系统

研究任何问题均需选择一定的对象，如力学中研究物体运动时取“分离体”为研究对象。同样，在热力学中也需要将所研究的物质或空间划出一个有限范围，在这个范围内的研究对象称为热力系统，简称热力系或系统。即：系统是被人为分离出来，作为研究对象的物体的总称。系统以外的其他物质称为外界，系统与外界的分界面称为边界。图 1.1 给出了 3 个不同的系统示意图。图 (a) 取气缸内的气体为系统，气缸壁固定不动，但活塞作往复运动；图 (b) 取一段管道内的物质为系统，管壁为真实边界，但 I、II 两边界面为虚拟边界；图 (c) 取流动介质中的一个流体质团为系统，全部边界均为虚拟边界，而系统为运动的系统。因此可以看出，系统可以是固定的，也可以是运动的。边界可以是真实的，也可以是虚拟的；可以是固定的，也可以是运动的。

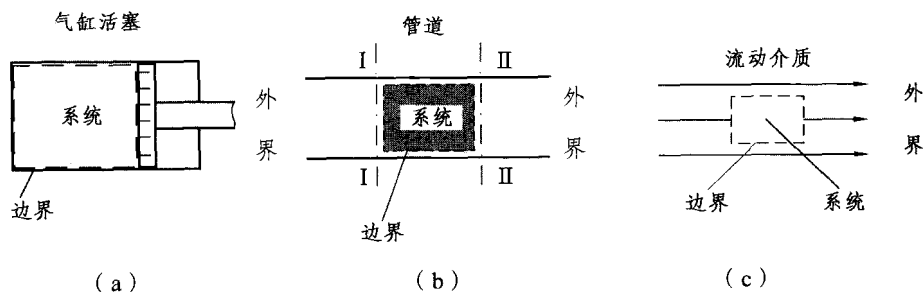


图 1.1 3 个不同的系统示意图

按系统与外界相互作用的不同情况，本课程研究的系统主要有：闭口系、开口系、绝热系和孤立系等。

**闭口系：**边界是封闭的，系统与外界无物质交换，系统内包含的物质质量保持不变，故又称控制质量系统。但该系统与外界可以有功量、热量的交换。如图 1.1 (a) 和 (c) 所示的系统均为闭口系。

**开口系：**边界有开口，系统与外界有物质交换，系统内物质的质量可以是变化的，通常将研究对象限制在一定的容积内，故又称控制容积系统。同样，系统与外界可以有功量、热量的交换。如图 1.1 (b) 所示的系统，如果在边界面 I 有物质流进、在边界面 II 有物质流出，那么该系统即为开口系。开口系可以有一个进口、一个出口；也可以有多个进口、多个出口；还可以是只有进口、没有出口；或者只有出口、没有进口。总之，只要与外界有物质交换的系统就是开口系。

**绝热系：**绝热边界，系统与外界无热量交换。但与外界可以有功量和物质的交换。

**孤立系：**与外界无功量、热量和物质交换的系统。即与外界不发生任何相互作用。通常将系统与相关联的有限外界放在一起构成近似的孤立系。

闭口系与开口系是对立的，如果一个系统为闭口系，那么该系统绝不可能是开口系，反之亦然。但是闭口系和开口系都有可能是绝热系，即闭口绝热系和开口绝热系。如果闭口系

与外界同时又没有功量、热量的交换，那么该系统即为孤立系。

另外，也可按系统内部状况的不同，将系统分为均匀系（系统内各部分化学成分和物理性质均匀一致）与非均匀系；单相系（单一的气、液、固物相）与复相系；单元系（由一种均匀的、化学物质稳定的纯物质组成，空气可看做纯物质）与多元系等。

工程热力学中所研究的系统大多为简单可压缩系。简单可压缩系是指由可压缩流体构成且与外界交换的功只有容积变化功的系统，不涉及化学反应，没有电、磁和表面张力等外力场作用。

系统选择不是唯一的，应根据实际情况，以解决问题方便为原则。系统选取方法对研究问题的结果没有影响，仅与解决问题的繁复程度有关，因此，合理选择系统是进行正确的热力学分析的前提。

## 第二节 工质的热力状态及其基本状态参数

### 一、工质的热力状态、状态参数的性质

工质是实现热、功转换的工作物质，简称工质。热能与机械功的相互转换是通过工质一系列的状态变化来实现的。工程热力学中所研究的系统大多为简单可压缩系，与外界交换功的模式只有容积变化功，由于气态物质具有良好的流动性和膨胀性，体积最容易发生变化，因此，热力学中的工质基本是气体以及有相变的液体。如空气、燃气、水蒸气、水、制冷剂等。

系统中的工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力状态。可定量描述工质状态特性的物理量称为状态参数。状态参数是状态的单值函数，一种状态必定对应一组确定的状态参数，即状态与状态参数一一对应。初、终状态参数的变化值，只取决于工质的初、终状态，而与状态变化的过程无关。这是状态参数的重要性质。

状态参数的数学特征为点函数，设  $x$  为任意状态参数，则

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1.1a)$$

$$\oint dx = 0 \quad (1.1b)$$

若  $x = f(y, z)$ ，其微量是全微分，则

$$dx = \frac{\partial x}{\partial y} dy + \frac{\partial x}{\partial z} dz \quad (1.2)$$

### 二、状态参数

热力学中常用的状态参数有 6 个，它们是：压力  $p$ 、温度  $T$ 、比容（比体积） $v$ 、热力学能  $U$ 、焓  $H$  和熵  $S$ 。其中  $p$  和  $T$  为强度性参数， $V$ 、 $U$ 、 $H$  和  $S$  为广延性参数。强度性参数与系统内工质的数量多少无关，没有可加性，系统内各单元体的参数值与整个系统的参数值相

同。当强度性参数不相等时，便会发生能量传递，如在压差作用下有功的传递，在温差作用下有热量的传递。因此，强度性参数在热力过程中起着推动力的作用，称为广义力或势。而广延性参数则与系统内工质的数量多少有关，各部分广延参数具有可加性，系统内各单元体的参数值之和等于整个系统的参数值。在热力过程中，广延性参数类似于力学中位移的作用，称为广义位移。如系统与外界交换容积功时，必然引起系统容积的变化；而系统与外界交换热量时，必然引起系统熵的变化。

单位质量的广延性参数称为比参数。热力学中，规定所有的比参数均用相应的小写字母表示。如比容  $v$ 、比热力学能  $u$ 、比焓  $h$  和比熵  $s$  等。习惯上除比容外，常将“比”字省略，简称为热力学能、焓、熵等。比参数具有强度参数的性质，例如，相同温度下，比容  $v$  不同，则表示单位质量的工质所占有的容积不同，那么它们的压力也一定不同，所以比容间接地反映了压力；同样，在相同压力下，比容可间接地反映温度。因此比参数可以看做强度性参数。

### 三、基本状态参数 ( $p$ 、 $v$ 、 $T$ )

状态参数又可分为基本状态参数和导出状态参数。可通过仪表直接或间接测量得到的状态参数称为基本状态参数，利用基本状态参数计算得到的状态参数称为导出状态参数。 $p$ 、 $v$ 、 $T$  为基本状态参数，其余 3 个则为导出状态参数。在此，先介绍工质的基本状态参数，导出状态参数的定义、物理意义以及计算方法等将在后续章节中陆续引入。

#### 1. 压力

压力可用绝对压力、表压力或真空度三种形式表示。

##### (1) 绝对压力 $p$ 。

按分子运动论的观点，气体的压力是大量的分子与容器壁碰撞而在单位面积容器壁面上所产生的平均垂直作用力，该压力以绝对真空为基准点，为气体的绝对压力。对于理想气体，宏观上即为单位面积上承受的垂直作用力，即物理学中的压强，其数学定义式为

$$p = \frac{F}{A} \quad [\text{N/m}^2 (\text{Pa})] \quad (1.3)$$

工程上有时还采用其他压力单位，如巴 (bar)、标准大气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米水柱 (mmH<sub>2</sub>O) 和毫米汞柱 (mmHg) 等 (注：标准大气压、工程大气压、毫米水柱、毫米汞柱为非法定计量单位)。各种压力单位的换算关系见附表 1。

##### (2) 表压力 $p_g$ 。

工程上测压仪表的结构原理都是力的平衡原理，其测量背压为当时当地大气压力  $p_b$ ，因此绝对压力高出大气压的数值称为表压力。其数学表达式为

$$p_g = p - p_b \quad \text{或} \quad p = p_g + p_b \quad (1.4)$$

##### (3) 真空度 $p_v$ 。

绝对压力低于当地大气压的数值称为真空度，由真空表测量。 $p_v$  习惯以正值表示，其数学表达式为

$$p_v = p_b - p \quad \text{或} \quad p = p_b - p_v \quad (1.5)$$

上述表压力和真空度都是以大气压力为背压的相对压力。由于大气压力随地理位置和气候条件等因素而变化,所以  $p_0$  的值不恒定。绝对压力相同的工质,在不同的大气压力下,其表压力或真空度的值并不相同。因此,只有绝对压力才是工质的真实压力,因而才能作为工质的状态参数。热力学中如不特别说明是表压力和真空度,所说的压力均指“绝对压力”。

如果测压计所处环境不是大气环境,而是另外一个环境空间,测压计读数则是以测压计所处环境的空间压力为背压的相对压力。

## 2. 温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。相互接触的物体,当处于热平衡时,则它们的温度相同。温度的数值标尺称为温标。常用的温标有:摄氏温标  $t$ 、热力学温标  $T$  和华氏温标  $t_F$ 。

摄氏温标以标准大气压下纯水的冰点标作  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,以标准大气压下纯水的沸点标作  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ,其间的温差等间隔分度。工程热力学中采用热力学温标表示的温度(又称热力学温度或绝对温度)作为状态参数。按国际计量会议规定,绝对温度以纯水的三相点温度,即水的气、液、固三相平衡共存时的温度( $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ )为基准点,并规定此点的绝对温度为  $273.16\text{ K}$ 。热力学温标与摄氏温标的温差间隔相等,绝对温度  $0\text{ K}$  为  $-273.15\text{ }^\circ\text{C}$ 。两种温标的换算关系式为

$$T = t + 273.15 \approx t + 273 \quad (\text{K}) \quad (1.6)$$

英美等国常采用华氏温标,华氏温度  $32\text{ }^\circ\text{F}$  为  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,华氏温度  $212\text{ }^\circ\text{F}$  为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。华氏温标与摄氏温标的换算关系为

$$t = \frac{5}{9}(t_F - 32) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.7)$$

## 3. 比容和密度

工质所占有的空间称为工质的容积,单位质量工质所占有的容积称为工质的比容(比体积),即

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1.8)$$

单位容积的工质所具有的质量称为工质的密度。密度与比容互为倒数,因此有

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1.9)$$

# 第三节 平衡状态、状态公理及状态方程

## 一、平衡状态

如果一个系统内部的压力和温度处处相同、且不随时间发生变化,我们就称它处于热力学平衡状态,简称平衡状态。此时系统中所有的状态参数具有确定的数值。这是平衡状态的特点。也就是说,只有平衡状态才能由一组具有确定数值的状态参数定量描述系统的状态。因此,热力学研究的都是平衡状态。

显然，保持平衡状态不变的充要条件是：系统内部以及系统与外界之间不存在任何不平衡势差。如果内部不平衡，系统内部的压力和温度不可能处处相同；如果外部不平衡，系统内的压力和温度将会随时间发生变化，进而导致系统内部的不平衡。

应当指出，平衡和均匀是两个不同的概念。对于单相系统（特别是气体组成的单相系统），如果忽略重力场对压力分布的影响，则可以认为平衡状态下单相系统内部各种参数不仅均匀一致，而且不随时间变化，平衡和均匀是统一的。但对于多相系统，如处于平衡状态的水和水蒸气，虽然气液两相的温度和压力分别相等，且不随时间变化，但比容相差很大，所以不能称为均匀系。在此，平衡是相对于时间而言的，而均匀是相对于空间而言的。因此，平衡不一定均匀。

另外，平衡和稳定也是两个不同的概念。例如一铁棒，一端浸入冰水混合物中，另一端浸入沸水中，经过足够长时间后，铁棒各点温度保持恒定，即温度分布不随时间发生变化，但铁棒各点处的温度是不同的。这时只能说铁棒温度分布是稳定的，但铁棒并非处于平衡状态。在此，平衡是相对于空间而言的，而稳定是相对于时间而言的。铁棒两端的势差维持了温度分布稳定，但铁棒系统内部的温度不同。因此，平衡一定稳定，但稳定不一定平衡。

平衡状态只是一个理想的概念，对于偏离平衡状态不远的实际状态在工程上都可按平衡状态处理，这样将使分析计算大为简化。

## 二、状态公理

对于组成一定的物质系统，若系统与外界有  $n$  种功量的传递形式，那么确定该系统平衡状态的独立状态参数有  $n+1$  个。加 1 是考虑了系统与外界的热交换。因此也可以说，系统所需的独立状态参数等于系统与外界交换能量的各种方式的总和。

对于简单可压缩系统，没有电功、磁功、化学功等其他形式的功量，系统与外界只有一种功的传递形式，即容积功，所以只有两个独立的状态参数。如基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$ ，只要知道其中的任意两个，其余状态参数就被唯一地确定。故可由任意两个独立的状态参数构成平面坐标图，称为状态参数坐标图，图上任一点表示工质的一个平衡状态。但由于不平衡状态没有确定的状态参数，所以无法在状态参数坐标图上表示。

常用的状态参数坐标图有压容图（ $p$ - $v$  图）和温熵图（ $T$ - $s$  图）等。利用坐标图进行热力分析，既直观清晰，又简单明了，因此在热力学中应用非常广泛。

## 三、状态方程

状态公理提供了确定热力系统平衡状态所需的独立状态参数数目的经验规则，习惯上以反映基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  之间关系的公式称为状态方程式。简单可压缩系的气体状态方程式可以表示为

$$p = p(v, T) \quad v = v(p, T) \quad T = T(p, v) \quad (1.10a)$$

$$\text{或} \quad f(p, v, T) = 0 \quad (1.10b)$$

状态方程式的具体形式取决于工质的性质。常用的气态工质基本上可分为两类：理想气



体和蒸气(实际气体)。理想气体是指远离液态点,不易液化的气体;而蒸气则是指由液体汽化后、离液态点较近,比较容易液化的气体。理想气体和蒸气之间没有绝对的界限,而且两者可以相互转化。如蒸气在高过热状态时离液态点较远,因此可看做理想气体;而常温常压下通常可看做理想气体的氢气、氧气、氮气、一氧化碳、二氧化碳及惰性气体等,在低温和高压状态时离液态点较近,继续作为理想气体进行分析计算,将会有较大的误差,此时就应将它们看做蒸气。当然不同的气体具有不同的液态点。

理想气体的状态方程式比较简单,将在第三章第一节详细介绍。而蒸气 $p$ 、 $v$ 、 $T$ 之间的关系则比较复杂,人们通过理论分析和实验求出了多种形式的实际气体状态方程式,其中最具有代表性的是范德瓦尔方程式。工程上为了方便计算,常将实际气体的状态参数列成表或绘成图。本书在第五章中将以水蒸气为例,介绍其热力计算方法,其他蒸气的分析计算方法与水蒸气相同。另外,利用以范德瓦尔方程为基础得到的通用压缩因子图也可以近似确定许多工程常用实际气体的 $p$ 、 $v$ 、 $T$ 。有兴趣的读者可参阅其他热力学教科书和专著。

## 第四节 准平衡过程和可逆过程

我们知道,热力学中的热功转换必须依赖工质的状态变化,那么工质从一个状态变化到另一个状态时所经历的全部状态的总和就是一个过程。实际的热力过程非常复杂,给热工分析计算带来很大困难。如前所述,系统只有处于平衡状态时,才能用确定的状态参数描述该状态,那么如果要描述一个过程,就要求过程中间经历的状态是连续的平衡状态。为了简化计算,在平衡概念的基础上,将满足一定条件的热力过程理想化为准平衡(又称准静态)过程和可逆过程,这便是经典热力学可以描述的两种过程。

### 一、准平衡过程

按照平衡状态的定义,“平衡”意味着宏观静止,而如果要发生一个“过程”,则意味着必须打破原来的平衡状态。“平衡”与“过程”便形成了一对矛盾。“准平衡过程”概念的引入使得这一对矛盾在一定条件下得到了统一。

对处于平衡状态的系统,若要进行一个过程,首先要破坏系统与外界之间的热力平衡,进而也就破坏了系统内部的热力平衡。如果破坏平衡的温差、压差无限小,而且过程进行得足够缓慢,使得系统内部恢复平衡的速度大于破坏平衡的速度。这样每一瞬间的状态只是无限小地偏离平衡状态,并能及时恢复不断被破坏的平衡,建立新平衡。这样的过程就是准平衡过程或准静态过程。所以,准平衡过程是由一系列连续的准平衡状态(无限接近平衡状态)所组成的过程。

实现准平衡过程的条件可归纳如下:

- (1) 破坏平衡状态存在的力差、温差无穷小,系统内外始终近似处于力的平衡和热的平衡(无势差损失)。
- (2) 系统恢复平衡的速度大于外界条件变化的速度(弛豫时间短)。