



教育部高职高专规划教材

# 工程热力学

● 徐建良 编



化学工业出版社  
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

# 工程热力学

徐建良 编

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

工程热力学 / 徐建良编. — 北京: 化学工业出版社,  
2002.1  
教育部高职高专规划教材  
ISBN 7-5025-3452-0

I. 工… II. 徐… III. 工程热力学-高等学校:  
技术学校-教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 079281 号

---

教育部高职高专规划教材  
**工程热力学**

徐建良 编

责任编辑: 高 钰

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

北京市燕山印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11 1/4 插页 1 字数 274 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3452-0/G·923

定 价: 19.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 前 言

为适应高职院校及中等职业学校制冷与空调专业学生的要求,本书在内容和体系上较传统的工程热力学教材作了较大的改动和调整,将一些理论性较强、计算繁琐的内容作了适当的删减。全书共分十章。第一章基本概念,重点介绍工质、热力系、平衡、状态参数、实际过程、准静态过程、可逆过程、热量、功、循环等基本概念。第二章为气体的  $p$ 、 $V$ 、 $T$  性质,重点介绍理想气体及其混合物的性质,对实际气体仅作了简要介绍。第三章为能量与热力学第一定律,重点介绍了稳流体系的热力学第一定律的表达式及其特殊情况下的应用形式,介绍了轴功、技术功的概念,并较为详细地讲解了利用摩尔定压热容计算气体显热的各种方法。第四章为气体的主要热力过程与气体的压缩,重点介绍了理想气体定容过程、定压过程、定温过程、可逆绝热过程这四种典型热力过程以及多变过程的概念、 $p$ - $v$  图及过程中轴功、技术功、热效应、内能、焓变等计算。重点讲解了理想气体可逆定温压缩过程、可逆绝热压缩过程、可逆多变压缩过程中压缩功的计算,可逆多级多变、可逆多级绝热过程压缩功和最小压缩功的计算及在  $p$ - $v$  图上的表示,讲述了实际生产中压缩机功率和原动机功率的估算。第三、四章是全书的重点,是全书热力过程分析及计算的理论基础。第五章为能质与热力学第二定律,阐述了热力学第二定律原理,结合实例,定性地分析了能的不等价性,能质的蜕变与过程进行的方向,并利用蒸汽动力循环、卡诺循环引出了熵的概念,讲解了熵变的计算及熵增原理。第六章为水蒸气,介绍了水蒸气的性质,水蒸气表及水的  $T$ - $s$ 、 $h$ - $s$  图的构成及使用。第七章为气体与蒸汽的流动,利用前面章节的热力学原理,以定性为重点,讲解了喷管、扩压管的概念及其外形的选择,叙述了有摩擦阻力的绝热流动以及绝热节流的概念及其工程应用。第八章为动力循环,重点介绍了蒸汽动力循环中朗肯循环的基本组成、在  $T$ - $s$  图上的表示以及如何利用水蒸气图表进行热力计算的方法,详细讲解了提高朗肯循环热效率的各种措施,并简要介绍了气体动力循环的基本构成及原理。对于制冷专业的学生,本章可作为扩展内容。第九章制冷,介绍了有关制冷的概念、方法分类及其应用,以单级蒸汽压缩制冷为重点,讲解了其装置的构成、制冷原理以及如何利用制冷剂的  $T$ - $s$  图进行有关制冷的热力计算,简要讲述了对制冷剂的要求以及多级压缩制冷、复叠式制冷的构成及原理。简要介绍了蒸气吸收制冷和热泵的基本构成及工作原理。第十章湿空气,讲述了湿空气的概念,重点讲解了描述湿空气的几个重要参数,如绝对湿

度、相对湿度、比湿度、干球温度、湿球温度、露点温度以及焓的概念及其处理，简要讲述了湿空气焓湿图的构成及其应用，讲解了有关湿空气应用的几个典型实例。

本书一律采用法定单位制，但考虑到目前实际生产、生活中使用的仪器、仪表及参考书、手册等，仍有使用其他单位制，因此，在本书附录中列出了各种单位制的换算表以及采用了两张非法定单位制的热力学性质图。书中带\*号部分为选学内容。

本书由南京化工职业技术学院（原南京化工学校）徐建良主编，丁华玲参编。其中，绪论、第一章、第三章、第五章、第七章、第八章、第九章由徐建良编写；第二章、第四章、第六章、第十章由丁华玲编写。

本书由贺召平主审。参加审稿的还有康西鹏、彭德厚、徐红及孙德松等，在此一并致谢。

限于编者学术水平及教学经验，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2001年8月

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 绪 论                   | 1  |
| 第一章 基本概念              | 5  |
| 第一节 工质、热力系            | 5  |
| 第二节 工质的热力状态和基本状态参数    | 6  |
| 第三节 状态方程与状态参数坐标图      | 8  |
| 第四节 热力过程及其描述          | 9  |
| 第五节 热力系的状态能           | 11 |
| 第六节 热力系的传递能——功与热      | 13 |
| 第七节 热力循环              | 17 |
| 复习思考题                 | 18 |
| 习题                    | 18 |
| 第二章 气体的 $pVT$ 性质      | 20 |
| 第一节 理想气体状态方程及微观模型     | 20 |
| 第二节 理想气体混合物           | 22 |
| 第三节 理想气体混合物的成分表示方法与换算 | 25 |
| 第四节 实际气体的微观模型与状态方程    | 28 |
| 复习思考题                 | 30 |
| 习题                    | 30 |
| 第三章 能量与热力学第一定律        | 32 |
| 第一节 热力学第一定律的实质        | 32 |
| 第二节 稳流热力系的轴功与技术功      | 35 |
| 第三节 理想气体的显热计算         | 37 |
| 第四节 热力学第一定律在稳流热力系中的应用 | 43 |
| 复习思考题                 | 47 |
| 习题                    | 47 |
| 第四章 气体的主要热力过程与气体的压缩   | 50 |
| 第一节 概述                | 50 |
| 第二节 四种典型的热力过程分析       | 50 |
| 第三节 多变过程              | 55 |
| 第四节 压缩机的用途、分类及原理      | 58 |
| 第五节 单级活塞式压缩机的理论功耗     | 60 |
| 第六节 多级压缩和级间冷却         | 62 |
| *第七节 实际压缩机功率与原动机功率的估算 | 66 |
| 复习思考题                 | 67 |
| 习题                    | 68 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第五章 能质与热力学第二定律 .....     | 70  |
| 第一节 能质与能质蜕变 .....        | 70  |
| 第二节 热力学第二定律的实质及表述 .....  | 72  |
| 第三节 卡诺循环与卡诺定理 .....      | 73  |
| 第四节 熵与熵变的计算 .....        | 76  |
| 第五节 熵增原理及其应用 .....       | 82  |
| *第六节 理想功、损耗功和热力学效率 ..... | 86  |
| 复习思考题 .....              | 92  |
| 习题 .....                 | 92  |
| 第六章 水蒸气 .....            | 94  |
| 第一节 基本概念 .....           | 94  |
| 第二节 水蒸气表及其应用 .....       | 95  |
| 第三节 水蒸气图及其应用 .....       | 96  |
| 复习思考题 .....              | 99  |
| 习题 .....                 | 100 |
| 第七章 气体与蒸汽的流动 .....       | 101 |
| 第一节 稳定流动的基本方程 .....      | 101 |
| 第二节 喷管与扩压管 .....         | 102 |
| 第三节 有摩阻的绝热流动 .....       | 106 |
| 第四节 绝热节流 .....           | 108 |
| 复习思考题 .....              | 109 |
| 习题 .....                 | 110 |
| *第八章 动力循环 .....          | 111 |
| 第一节 蒸汽动力基本循环—朗肯循环 .....  | 111 |
| 第二节 提高朗肯循环热效率的措施 .....   | 116 |
| 第三节 燃气动力循环 .....         | 123 |
| 复习思考题 .....              | 125 |
| 习题 .....                 | 125 |
| 第九章 制冷 .....             | 127 |
| 第一节 概述 .....             | 127 |
| 第二节 蒸气压缩制冷循环 .....       | 129 |
| 第三节 蒸气吸收制冷循环 .....       | 138 |
| 第四节 热泵 .....             | 140 |
| 复习思考题 .....              | 142 |
| 习题 .....                 | 142 |
| 第十章 湿空气 .....            | 144 |
| 第一节 基本概念 .....           | 144 |
| 第二节 描述湿空气的有关参数 .....     | 144 |
| 第三节 湿空气的焓 .....          | 147 |
| 第四节 湿空气的焓-湿图 .....       | 148 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第五节 湿空气的应用实例..... | 151 |
| 复习思考题.....        | 155 |
| 习题.....           | 156 |
| 附录一 常用数据表.....    | 157 |
| 附录二 常用热力学图（见插页）   |     |

## 绪 论

### 一、热力学发展简述

热现象是人类最早接触到的自然现象之一。古代燧人氏的钻木取火，就是最简单的由机械能转为热能的例子。中国在南宋时代（公元 1150 年左右）就有用火焰的热力来产生机械旋转运动的走马灯，以及使用火药燃烧后产生的喷气加速火箭的飞行的记载。但是，人类对热的认识逐步形成一门科学却是近 300 年来的事。从观察和实验总结出来的热现象的规律，构成热现象的宏观理论，从而诞生了热力学。然而在其发展过程中又早已超越了热的范围，最通常的是把热力学定义为一门研究能量、物质和它们之间相互作用规律的科学。

然而，要单一且比较详尽地确定任何一门具体学科的范围并且把它从相近学科中严格地划分出来是很困难的，这一点热力学也不例外。从历史上看，热力学是在研究如何提高热机的效率，制造性能更好的热机的基础上发展起来的。

在 18 世纪以前，曾出现过一种“热质学说”。这种学说认为热是一种能流动的没有质量的物质，名为热质，它可以透入一切物质中，不生不灭。一个物体热还是冷，就看它所含的热质是多还是少。这个学说的最明显的缺陷是不能解释摩擦生热的现象，最终为科学界所抛弃。

与热质说相对立，培根（Bacon）认为热是一种运动。罗蒙诺索夫（Lomonosov）在 1744 年发表的论文“论热与冷的原因”中断言，热是物质分子运动的表现，但是他没有给出热是能量形式的明确结论。

1824 年法国军事工程师卡诺（Carnot）发表了一篇著名的论文“论火的动力及能够发展这种动力的机器”，该论文可以认为是热力学这门新兴科学的基础。在该论文中，卡诺第一个以普遍的形式阐述了热转化为功的问题。作为理论分析的辅助方法，他引入了“理想机器”和“可逆循环过程”的概念，他从一定的机器结构和具体工质中抽象出来的结论，为热力学第二定律的发现创造了条件。同时在卡诺的札记中，已有了热功相互转化时所循的热功当量原理的最初说法，只不过这是在他不幸早逝后过了 40 年才被公布的。

1842 年，德国人迈尔（Mayer）阐述了热功当量原理，指出了热是能量的一种形式，它可以和机械能互相转化，他从理论上算出了热功当量，只是当初和迈尔同时代的人并不承认它的正确性。

1843 年至 1848 年期间，焦耳（Joule）在与迈尔的理论研究毫无联系的情况下，通过大量的实验测定了热功当量值，这项结果使科学界公认能量守恒为自然界的普遍规律。能量守恒定律在热能利用中的具体形式就是热力学第一定律，后人公认迈尔和焦耳同为热力学第一定律的创立者。热力学第一定律的建立为热力学这门科学奠定了基础。

1850 年，克劳修斯（Clausius）在卡诺、迈尔和焦耳的思想基础上，确切地阐述了热力学两个基本定律，第一个给出了热力学第一定律的数量公式，建立了热量、功与内能之间相互联系的方程式。在阐述热力学第二定律时，他引入了一个新的参量——熵。克劳修斯引入的熵概念，在热力学中占有重要地位。热力学第二定律关于一切自然过程方向性的论述意义透彻地表现在熵增原理之中。

汤姆逊（Thomson、后名开尔芬 Kelvin），在与克劳修斯没有联系的情况下，几乎同时

(1851 年) 给出了热力学第二定律的另一种表述, 同时建立了十分著名的能量散逸或贬值原理。早在 1848 年, 根据卡诺的理论, 汤姆逊制定了绝对温标, 为了纪念他, 这种温标称为开尔芬温标。

由于克劳修斯和汤姆逊卓越的研究工作, 到 19 世纪末, 热力学在其发展进程中达到了相当完善的程度。在这个过程中, 理论与实际的紧密结合起了重要作用, 在与克劳修斯和汤姆逊的同时代人中, 朗肯 (Rankine) 对热力学的发展也作出了重要的贡献, 他研究了热力学的基本原理, 并发明了“朗肯循环”。

热力学的建立与理论上所取得的成就大大促进了热力原动机的发展与性能的改善, 到 19 世纪后半期, 蒸汽机已不能满足工业生产发展的需要。19 世纪末, 人们发明了汽轮机和内燃机, 汽轮机成为现今火力发电厂的主要动力设备。汽轮机的出现促进了对蒸汽性质、蒸汽与气体的流动以及蒸汽动力循环的研究。内燃机则逐步成为汽车、飞机、船舶和机车等交通工具的主要原动机, 并促进了对内燃热力过程和热力循环的研究工作, 进入 20 世纪以后, 人们又发明了燃气轮机、喷气发动机。20 世纪 50 年代原子能动力装置的建成, 为人类开辟了能源利用的新纪元。在热力原动机和热力工程的发展过程中, 也使热力学逐步发展成一门成熟的具有广泛应用的基础学科。

热力学具有广阔的研究范围, 可以说凡是涉及热现象的任何能量转换过程都是热力学的研究对象。运用热力学的基本理论研究某种领域或范围的能量转换热现象就构成了不同方向的热力学。如研究大气流热现象的气象热力学, 研究生物体内热现象的生物热力学, 研究流体热力学性质的流体热力学, 研究化学工艺过程中热现象的化工热力学, 研究热机循环的发动机热力学等等。工程热力学也是其中之一。

## 二、工程热力学的研究对象和基本任务

工程热力学是热力学的一个分支, 但由于其系统的完整性和应用的广泛性, 已使之成为一门独立的学科。

工程热力学是研究工程中热能与其他形式能量的转换规律以及影响转换的各种因素的技术科学, 其中对热能与机械能的转换规律的研究, 一直作为工程热力学的研究重点。

凡是涉及热现象的过程、装置以及系统都是工程热力学的研究对象, 而热机中进行的过程和循环则是工程热力学的传统研究对象。

众所周知, 任何工程特别是现代化工程, 在其建设和使用过程中, 总是与能量的利用紧密联系着的。更值得注意的是工业生产能耗在国家的总能耗中占有很大的比例 (中国工业生产能耗约占总能耗的 65%)。如何合理地有效地利用能量, 使之在工业生产中尽可能降低能耗, 具有重要的经济意义。

工程热力学的基本任务就是通过对各种用能设备及系统中的能量转换过程及影响因素的研究, 探求有效用能的技术途径和基本方法。

为了衡量能量是否获得了有效利用以及有效利用的程度, 工程热力学建立了相应的评价方法。

以能量平衡理论, 即以热力学第一定律为依据的传统用能理论作为能量有效利用的评价指标, 该指标称热力学第一定律效率, 表示为被系统有效利用的能量数占系统所耗总能量数的百分率, 即

$$\eta_1 = \frac{\text{有效利用的能量的数量}}{\text{耗费能量的总数量}} \times 100\%$$

热力学第二定律从能的质量——能质的观点揭示了能量在传递和转化过程中能质变化的规律，而且可以用熵和焓（有效能）这两个状态参数的变化来定量地描述过程中能质的变化。因而能量的有效利用，除了要考察具体数量的有效利用外，还应考察其能质的有效利用程度。热力学第二定律的效率表示为：被系统有效利用的能质占系统所耗费能质的百分率，即

$$\eta_{II} = \frac{\text{有效利用的能质}}{\text{耗费的能质}} \times 100\%$$

按照现代用能理论，一个合理的用能系统，应使其热力学第一、二定律效率达到或接近最佳值。因此，同步提高用能设备或系统的两个效率，使能的数量与能质都获得有效利用已成为工程热力学研究能量利用的重要目标。

### 三、工程热力学的主要内容

根据工程热力学的研究对象、任务及学科的性质，其所研究的主要内容包括以下几个方面。

① 研究热力学的基本定律——热力学第一、二定律。这是工程热力学的理论基础。其中，热力学第一定律给出了热能与机械能相互转换时的数量关系；热力学第二定律指出了能量转换的方向性，并由此说明热能与机械能之间存在着质的差别，应用这两个定律可以从量和质两个方面综合地研究热力设备中的能量转换。

② 研究工质的热物理性质。热力设备中的能量转换是借助于工质来完成的，故研究热力设备中的能量转换必须掌握工质的基本热力性质。

③ 研究各种热力设备中的能量转换过程。即应用热力学基本定律，分析计算工质在热力设备中所经历的状态变化过程和循环过程，并在此基础上进一步分析影响能量转换效率的因素，探讨提高转换效率的途径。

④ 研究与热力设备的工作过程直接有关的一些化学和物理化学问题。目前，热动力装置中热能的主要来源是依靠燃料的燃烧，而燃烧是剧烈的化学反应。因此，为了更全面更深入地研究热力设备中的能量转换，必须掌握有关化学热力学的基础知识。

尽管传统上工程热力学是动力专业的一门主要技术基础课，但由于热现象广泛地存在于各种工程问题之中，因此，工程热力学的应用范围已扩展到许多工程技术领域中，如制冷、热泵、空气分离、空气调节、海水淡化、化学精炼、生物工程等，都需要应用工程热力学的基本理论和基本知识。因此，工程热力学已成为制冷与空调及许多相关专业所必修的一门技术基础课。

### 四、工程热力学的研究方法

热力学有两种不同的研究方法：一种是采用宏观研究方法的热力学——宏观热力学；一种是采用微观研究方法的热力学——统计热力学。

宏观的研究方法不研究物质内部微观粒子的运动，而是通过对大量宏观热现象的直接观察和实验，总结出有关热现象的基本规律，即热力学的基本定律。再以热力学基本定律为依据，进行严密的逻辑推理，导出描述物质性质的宏观物理量之间的普遍关系及其他一些重要的推论。由于热力学基本定律是无数经验的总结，因而具有高度的可靠性和普遍性。宏观研究方法简单、可靠，只需要少数几个宏观物理量就可以对热状态进行描述，要求的数学知识也比较简单。但是宏观研究方法有其局限性，由于它没有涉及到物质的内部结构，因此该方法无法解释热现象的本质，也不能预示新物质的各种热力学性质，也不能用于描述物质个别

分子的行为。微观研究方法及其研究成果正好弥补了这个不足。

统计热力学是从物质内部的微观结构出发,应用力学定律说明分子的运动,并用统计方法研究大量分子杂乱运动的统计平均性质,故能从物质内部分子运动的微观机理来更深刻地解释所观测到的宏观热现象的物理实质。但是,微观方法也有它的局限性。因为微观分析方法所得结果的正确性取决于人们对物质微观结构的认识。人们对物质的认识还在不断深入,现有的物质微观结构的模型还存在一定的近似性。因此由统计热力学导出的某些结果与实验不能完全吻合。此外,微观研究方法计算复杂,也给统计热力学的应用带来了一定的困难。

工程热力学主要采用宏观方法来分析热能与机械能的互相转换,并辅以微观统计方法,分析和解释某些热现象及能量转换规律。

### 五、工程热力学的学习方法

① 明确本课程的研究对象和任务。这是全书的纲,必须牢固掌握,这样才能在学习时明确每章的目的、作用,才能将课程前后各部分连成一个有机的整体,达到纲举目张、融会贯通的目的。

② 掌握本课程的基本理论,掌握分析问题解决问题的科学方法。在学习每章时,除了明确其目的外,必须注意对复杂事物进行抽象、概括、理想化和简化,以及所应用的一些基本定律和公式等一系列具体的研究方法。

③ 重视平时的解题训练。因本课程有些概念较为抽象,解答思考题与相关习题不仅有助于深入理解基本理论和基本知识,而且还可以培养分析问题能力和工程计算能力,是学习过程中的重要环节,应予以重视。

# 第一章 基本概念

在工程热力学的研究内容中,使用了许多术语,如工质、热力系、平衡态、准静态、可逆过程、功和热等。因此,要学好工程热力学,首先必须正确理解、掌握这些基本术语。

## 第一节 工质、热力系

### 一、工质

能量是物质运动的量度,能量与物质是不可分割的。在工业生产和现实生活中,常需要将热能转换成机械能,而要完成热能与机械能之间的相互转换必须借助于某种工作物质或工作介质——工质来实现。工质有时并不直接参与能量的转换,只是在能量转换中起媒介的作用,如图 1-1 所示的蒸汽动力循环,其工质为水,通过水的状态的不断变化而将锅炉中燃料的化学能经汽轮机转换为机械能。在热机循环中,为获得较高的热功转换效率,常选用可压缩、易膨胀的气体,如水蒸气、空气或燃气等作为工质。在制冷循环和热泵循环中,为提高从低温热源吸热、向高温热源放热的工作效率,常选用被称为冷媒或制冷剂的物质,如氨、氟里昂等作为工质。

工质的性质以及工质在能量转换中的变化特性是工程热力学的主要研究内容之一。

### 二、热力系、边界与外界

实际系统,大多较复杂。为了便于分析研究,按照热力学的方法,可以根据不同的研究目的来确定研究对象及范围,从而使一个较复杂的系统得以分解或简化。以图 1-1 为例,如要研究整个热机的热力特性及经济性,相应地取整套热机为研究对象;如要分别研究压缩、加热、做功等过程,则可分别取泵、锅炉、汽轮机为研究对象。这种被人为地划分出来作为热力学研究的对象就称之为热力系。热力系可以是一种真实的物质,如泵中被压缩的水;也可以是一个真实的设备,如锅炉;还可以是一种抽象出来的或一种假想的热力学模型,如图 1-2 所示的卡诺热机,就是一种假想的热力学模型。

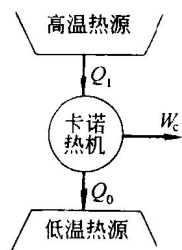


图 1-2 卡诺热机模型

由热力系所确定的研究范围,可以看做是一个由边界包围起来的空間。界面以外为外界。外界可以是自然环境,也可以是另一个热力系或两者兼而有之。界面可固定不变,也可运动可变;可以是实有的,也可以是假想的。如图 1-3 所示的活塞式压缩机的气缸活塞系统,当取气缸中的工质为热力系时,则界面的一部分——活塞顶就是运动的,而另外的部分——接触工质的气缸壁面,则是周期性变化的,而这些界面同时又是实际存在的。若以图 1-1 所示的整个蒸汽动力循环为热力系,则其界面就是假想的,但却可以想象成是固定不变的。

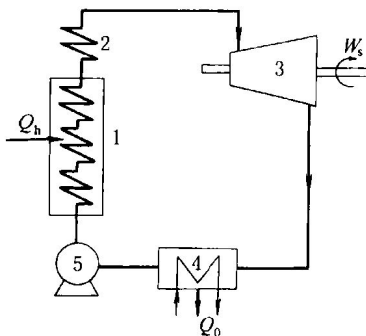


图 1-1 蒸汽动力循环  
1—锅炉; 2—过热器; 3—透平;  
4—冷凝器; 5—水泵

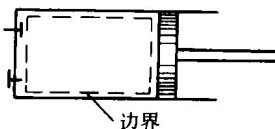


图 1-3 活塞式压缩机的气缸活塞系统

### 三、热力系的分类

在一般情况下,热力系与外界处于相互的作用之中,它们可以通过边界互相交换能量和物质。按照热力系与外界相互作用的不同,热力系通常可以分为以下几种。

#### (一) 封闭热力系 (简称闭系)

热力系若与外界仅有热和功的传递,即通过边界只有能量交换而无物质交换,则该热力系称为封闭热力系,其质量是恒定不变的,如图 1-3 所示,若其进、出口阀门都处在关闭状态,则此时以工质——气体的热力系为封闭热力系,这时的气体只能通过气缸壁和活塞杆与外界发生热、功的交换。

#### (二) 敞开热力系 (简称开系)

热力系通过边界与外界既有能量交换又有物质交换,则该热力系称为敞开热力系,以图 1-3 所示为例,若其进、出口阀门中有一是处在打开状态,则此时以气缸中气体的热力系即为敞开热力系。

#### (三) 孤立热力系 (简称孤立系, 又称隔离热力系)

热力系通过边界与外界既无能量交换又无物质交换,则该热力系称为孤立热力系。由于一切热力现象所涉及到的空间范围总是有限的,若将研究对象连同与之相关的外界用一个新的边界包围起来,则这个新的、扩大了边界就是孤立热力系的边界,此时原热力系及与之相互作用的外界都可以看成是孤立热力系的一部分。由此可见,一切热力系连同与之相互作用的外界都可抽象为孤立热力系。

热力系的划分除了上述三种外,还有一些其他的特殊热力系,如绝热热力系、稳流热力系等。

## 第二节 工质的热力状态和基本状态参数

### 一、热力状态

热力系中的工质在某一瞬间所具有的全部宏观物理状况称为工质的热力状态,简称状态。从原则上讲,这些宏观物理状况是完全能够被确定的。在图 1-1 所示的蒸汽动力循环体系中,其所以能与外界发生功、热交换,就是因为其工质——水的状态可以不断变化的缘故。

### 二、平衡状态

平衡状态是指热力系在无外界影响下,其宏观物理状况不随时间而变化的状态。例如,只要将一物体置于环境中足够长的时间,则其温度最终必与环境温度相同,即其最终必与环境达平衡状态,只要环境温度不变,则其温度也必不变。

一个热力系,当其内部无不平衡力,且作用在边界上的力和外力达平衡,则该热力系处于力平衡状态;当热力系内各点温度均匀一致且等于外界温度时,则该热力系处于热平衡状态。热力系要达到平衡状态,至少必须满足力平衡和热平衡这两个基本条件。

工程热力学一般只对平衡状态进行分析研究,因为这样可用共同的宏观特性来简单描述热力系所处的状态而不必涉及时间因素。

### 三、基本状态参数

#### (一) 状态参数

状态参数是指用来描述处于平衡态的热力系的宏观物理量。知道了一个热力系足够多的状态参数,就可以确定该热力系的宏观状态;反之,对于一个给定状态的热力系,通过一些

相应的手段，就可确定其一切状态参数。

状态参数是状态的函数，对应一定的状态，无论采用何种方法进行测定，其某一状态参数都只有惟一确定的数值，工质的状态发生变化时，状态参数的变化值仅与初、终态有关，而与状态变化的途径无关。这一点就像《物理学》中两地之间的位移，不论你采用何种方法，通过何种途径往返于两地之间，其两地间位移只有惟一确定的数值。

状态参数的数学特征为点函数，它可以表示为

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 = \Delta x$$

循环积分

$$\oint dx = 0$$

式中  $x$ ——工质的某一状态参数。

热力学中常见的状态参数有温度、压力、比容、密度、内能、焓、熵等。其中温度、压力、比容或密度可以直接或间接地用仪表测量出来，称为基本状态参数。而其余的一些状态参数都不能直接测量，必须由基本状态参数导出，它们称之为导出状态参数。

热力学状态参数按其热力系质量的关系，有强度量和广延量之分。凡与质量无关的称为强度量，如压力、温度等，强度量不具有加和性；凡与质量成比例的量称之为广延量，如容积、内能、焓、熵等，广延量是可加量，热力系的总广延量是热力系各部分广延量之和。但广延量除以质量就可转化为强度量，具有强度量的特性。

## (二) 温度

众所周知，两个冷热状况不同的物体相互作用，冷的物体要变热，热的物体要变冷。经过相当长时间，在没有其他外来因素影响的情况下，两物体将达到相同冷热状况，即所谓热平衡状态。实践证明，如两物体分别和第三个物体处于热平衡，则它们彼此之间也必处于热平衡，这一规律称为热力学第零定律。从这一定律可以推论，相互处于热平衡的热力系，必然具有一个数值上相等的热力学参数来描述这一热平衡特性，这个参数就是温度。由此可知，温度是描述平衡热力系冷热状况的物理量。

从微观上看，温度是物质内部大量分子热运动的强弱程度的标志，两个物体接触时，通过接触面上分子的碰撞，进行动能交换，这种微观的动能交换就是宏观的热量交换。

温度的数值标尺简称温标。任何温标都要规定基本状态点和每一度的数值。国际单位制 (SI 制) 规定，采用热力学温度，符号用  $T$ ，单位名称为开 (K) (Kelvin)。热力学温标规定纯水的三相点温度 (即水的汽、液、固三相平衡共存时的温度) 为基本定值，并指定为 273.16K，每 1K 为水三相点温度的 1/273.16。热力学温标所表达的温度也称为绝对温度。

除绝对温度外，在日常生活中，常用摄氏 (Celsius) 温度，符号用  $t$ ，单位为摄氏度，符号为  $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度是以标准压力下水的冰点为零点，沸点为  $100^{\circ}\text{C}$ ，将水银柱的高度划分为 100 个等分而得出的。

摄氏温标与热力学温标的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

式中 273.15 的值由国际计量会议规定。可见，摄氏温度与热力学温度差值为 273.15，当  $t = 0^{\circ}\text{C}$  时， $T = 273.15\text{K}$ 。摄氏温标的每  $1^{\circ}\text{C}$  与热力学温标的每 1K 相同。

## (三) 压力

单位面积上所受的垂直力称之为压力，以符号  $p$  表示。根据分子运动理论，气体的压

力是大量分子向容器壁撞击的平均结果。

工程上工质的压力由压力表和真空表来测定,如图 1-4 (a)、(b) 所示。

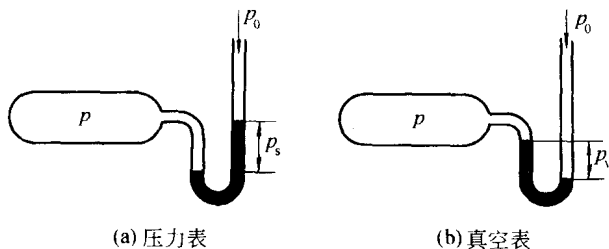


图 1-4 测压原理

当绝对压力大于大气压力 ( $p_0$ ) 时,压力表上的读数  $p_s$  称为表压力。此时有

$$p = p_s + p_0 \quad (1-2)$$

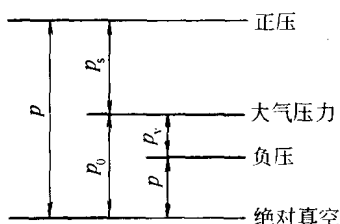


图 1-5 绝压与表压、真空度之间关系

式中  $p$  ——绝对压力;  
 $p_s$  ——表压力;  
 $p_0$  ——大气压力。

当绝对压力低于大气压力时,表示容器内工质具有真空度 ( $p_v$ ), 此时有

$$p = p_0 - p_v \quad (1-3)$$

绝对压力与表压力、真空度的关系如图 1-5 所示。

压力的计量单位,法定单位制采用 Pa ( $\text{N/m}^2$ ) 表示,称为帕斯卡。工程上因 Pa 单位太小,读数不方便,常用 MPa (兆帕)、kPa (千帕) 和 bar (巴) 来表示。

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

$$1\text{kPa} = 1 \times 10^3 \text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 1 \times 10^5 \text{Pa}$$

在工程上还有一些其他单位,如  $\text{mmH}_2\text{O}$ 、 $\text{mmHg}$ 、 $\text{kgf/cm}^2$  等。有关压力单位之间的换算可参阅附表 1-1。

#### (四) 比体积和密度

工质所占有的空间为工质的容积,单位质量工质占有的容积称之为工质的比体积。如工质的容积为  $V$ , 质量为  $m$ , 那么比体积则为

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

单位容积的工质所具有的质量,称为工质的密度。即

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

显然,工质的比体积与密度互为倒数,即

$$\rho v = 1$$

从上式可知,比体积与密度不是两个独立的状态参数,如二者知其一,则可确定另一个。

### 第三节 状态方程与状态参数坐标图

描述热力系特性的参数有许多,如上所述,热力系的状态是用状态参数来描述的。各个状态参数分别从不同的角度来描述状态的某种特性。当热力系与外界有能量交换时,将导致

状态参数的改变。如对气缸中的气体进行压缩, 不仅工质的容积要缩小, 工质的温度、压力也随之改变。可见, 各个状态参数是以一定的函数形式互相制约的。这种表示状态参数之间函数关系的数学表达式称为状态方程式。

实际物质构成的热力系的状态方程是相当复杂的。本书只讨论简单热力系的状态方程。

当组成热力系的是一种均匀的, 化学成分恒定的纯物质时, 该热力系就称为简单热力系。若这种简单热力系仅与外界进行热能与机械能交换, 经验证明, 这种物系最大只有 2 个自由度, 即该热力系独立的状态参数只有两个。换言之, 对某个状态来说,  $p$ 、 $v$ 、 $T$  三个基本状态参数中, 其中任意一个状态参数均可表示为另外两个参数的函数, 即可以表示为

$$p = f(v, T)$$

或

$$T = f(p, v) \quad v = f(p, T)$$

上列各式都是以显函数形式表示的状态方程。若以隐函数形式表示, 则为

$$f(p, v, T) = 0$$

上列各式都称之为纯物质的状态方程, 通常由实验确定, 也可由理论推导求得。如理想气体, 其状态方程  $p v_m = RT$  就是其中一个特例。

既然简单热力系的平衡状态可由任意两个参数确定, 因此, 可采用两个参数在平面坐标系中来描述其状态和分析其状态变化的过程。这种用状态参数描述热力系平衡状态的状态参数之间关系的图形称状态参数坐标图。在热力学中, 经常采用的状态参数坐标图有压容图 ( $p-v$  图)、温熵图 ( $T-s$  图) 和焓熵图 ( $h-s$  图) 等。如图 1-6 所示为  $p-v$  图, 对应于某个热力状态, 在坐标图上相应地为一点, 如点 1 ( $p_1, v_1$ )、点 2 ( $p_2, v_2$ ), 这恰好显示了点函数的性质。反之, 图上一点, 即代表了一个平衡状态。

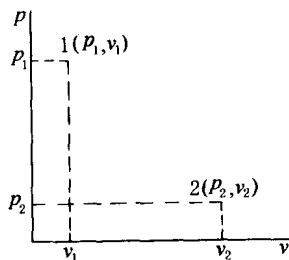


图 1-6 状态参数坐标图

图示法与状态方程法相比, 具有简明、直观、便于分析等优点。缺点是不能给出过程中各参数之间精确的数量关系。严格地说, 只有平衡状态才能表示在状态参数坐标图上, 有时热力系各点的状态虽有差异但并不悬殊, 或允许以状态参数的平均值来表示状态时, 也可以采用坐标图。

## 第四节 热力过程及其描述

### 一、热力过程

一个处于平衡态的热力系, 如果无外界影响, 必将永远保持其平衡状态, 这时热力系具有确定的状态参数。若热力系与外界发生了能量传递, 就会使热力系偏离平衡状态而发生变化, 直至达到新的平衡状态。这种由于热力系与外界相互作用而引起的热力系由一个平衡状态经过连续的中间状态变化到一个新的平衡状态的全过程, 称为热力过程, 简称过程, 它实质上是一系列状态点组成的轨迹。

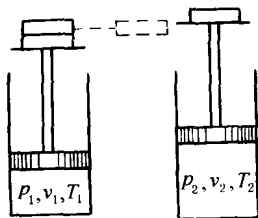


图 1-7 气体不平衡膨胀

### 二、实际热力过程——非平衡过程

在通常情况下, 对热力系的加热是在温差下进行的, 作机械功是在压差下进行的。显然, 一切实际热力过程都是热力系与外界之间的不平衡势差 (如温差、压差等) 作用的结果。

如图 1-7 所示是气体在活塞气缸装置中的变化过程示意图。在初态下, 活塞上有两块质量相等的重物, 此时气体的压力  $p$  与外界