



高等学校教材

基础课程系列

# 热力学与 气体动力学基础

王新月 杨清真 编

*Fundamental  
Courses*

西北工业大学出版社



高等学校教材

# 热力学与气体动力学基础

王新月 杨清真 编

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书包括热力学基础与气体动力学基础两部分内容。热力学部分主要介绍热力学的基本概念,气体的热力学性质,热力过程分析及热力循环,并讨论热力学第一定律、第二定律、燃气涡轮喷气发动机和内燃机的理想循环。

气体动力学基础首先介绍了气体动力学的基本概念,一维定常流动的基本方程;其次讨论了超声速流动中的激波,膨胀波理论,可压缩一维定常管内流动,并简单地介绍一维非定常管内流动;最后讨论了粘性流体的基本概念和附面层知识,并简单地介绍流体基本参数的测量方法。

本书可作为高等院校少学时(50~60)的工程热力学与气体动力学基础课程的教材。适合于航空控制工程、工程热物理、民航工程、机电一体化等各专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热力学与气体动力学基础/王新月,杨清真编. —西安:西北工业大学出版社,2004.8  
ISBN 7-5612-1760-9

I. 热… II. ①王… ②杨… III. 热力学-高等学校-教材②气体动力学-高等学校-教材  
IV. O414.1②O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 020959 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西丰源印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.875

字 数:409 千字

版 次:2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

定 价:22.00 元

# 前 言

---

本教材重点放在热力学和气体动力学的基本概念、基本原理和基本方法上,主要阐述气体热力学的基本定律、热力过程及热力循环,重点讨论高速流动中的激波、膨胀波理论与可压缩流体一维定常管内流动,同时对粘性流体的流动基础做了简单介绍。考虑到拓宽专业、加强实验的特点,最后介绍了一维非定常流动基础和流体参数的测量原理。

为了便于学生自学,教材中配有较多的例题,每章都配有小结、思考与练习。

本书紧紧围绕学生学习航空发动机原理所必须的基础知识,取材尽可能做到少而精。

对于先修过流体力学的学生,可以略去第四、五、十章的内容。而增加第九、十一章的内容,对于没有预先修过流体力学的学生,可以略去第九、十一章的内容。

本书所用的专业术语尽量与国家标准 GB3101—93 的规定相一致,如比容改用比体积。对于有量纲的量称为系数,无量纲的量称为因数,如速度系数、流量系数分别改用速度因数、流量因数。

本书第九章由杨清真编写,其余各章由王新月编写,全书由王新月统稿。西北工业大学严家祥教授担任本书的主审,并提出了许多宝贵意见,在此,编者对严家祥教授表示衷心的感谢。对于书中存在的缺点和不妥之处,欢迎读者批评指正。

王新月

2004 年 2 月于西北工业大学

# 目 录

---

## 第一篇 热力学基础

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 气体的热力学性质及基本概念       | 1  |
| § 1.1 热力学系统及热力学状态       | 1  |
| § 1.2 状态参数及基本状态参数       | 3  |
| § 1.3 完全气体的状态方程及状态参数坐标图 | 5  |
| § 1.4 热力过程              | 7  |
| § 1.5 气体的比热容与热量         | 8  |
| 小结                      | 11 |
| 思考与练习                   | 11 |
| 第二章 热力学第一定律及热力过程        | 13 |
| § 2.1 功                 | 13 |
| § 2.2 热力学第一定律的基本表达式     | 14 |
| § 2.3 熵                 | 18 |
| § 2.4 热力过程分析            | 20 |
| § 2.5 热量与功的计算           | 24 |
| § 2.6 $p-v$ 图与 $T-s$ 图  | 27 |
| 小结                      | 28 |
| 思考与练习                   | 29 |
| 第三章 热力学第二定律及其动力循环       | 30 |
| § 3.1 热力循环和制冷循环         | 30 |
| § 3.2 热力学第二定律           | 32 |
| § 3.3 熵方程及孤立系统的熵增原理     | 33 |
| § 3.4 卡诺循环与卡诺定理         | 34 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| § 3.5 活塞式内燃机的理想循环.....    | 37 |
| § 3.6 空气涡轮喷气发动机的理想循环..... | 41 |
| 小结 .....                  | 43 |
| 思考与练习 .....               | 43 |

## 第二篇 气体动力学基础

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第四章 流体静力学基础与基本概念 ..... | 45 |
|------------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| § 4.1 基本概念.....           | 45 |
| § 4.2 作用在流体上的力.....       | 50 |
| § 4.3 流体静力学微分方程及其应用.....  | 52 |
| § 4.4 流体的相对平衡.....        | 57 |
| § 4.5 静止流体对平面和曲面的作用力..... | 60 |
| § 4.6 描述流体运动的方法及基本概念..... | 64 |
| 小结 .....                  | 69 |
| 思考与练习 .....               | 70 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第五章 一维定常流动的基本方程 ..... | 72 |
|-----------------------|----|

|                      |    |
|----------------------|----|
| § 5.1 连续性方程.....     | 72 |
| § 5.2 动量方程.....      | 75 |
| § 5.3 微分形式的动量方程..... | 79 |
| § 5.4 能量方程.....      | 80 |
| § 5.5 柏努利方程.....     | 83 |
| 小结 .....             | 87 |
| 思考与练习 .....          | 87 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第六章 滞止参数与气动函数 ..... | 90 |
|---------------------|----|

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| § 6.1 微扰动的传播及马赫数.....     | 90  |
| § 6.2 气流的滞止参数.....        | 93  |
| § 6.3 极限速度、临界参数和速度因数..... | 100 |
| § 6.4 气体动力学函数及其应用 .....   | 104 |
| 小结.....                   | 112 |
| 思考与练习.....                | 113 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第七章 膨胀波与激波..... | 115 |
|-----------------|-----|

|                        |     |
|------------------------|-----|
| § 7.1 微扰动在气流中的传播 ..... | 115 |
|------------------------|-----|

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| § 7.2 普朗特-迈耶流动 .....            | 117        |
| § 7.3 波的相互作用 .....              | 121        |
| § 7.4 激波的形成及其特点 .....           | 124        |
| § 7.5 激波的基本方程及计算公式 .....        | 128        |
| § 7.6 平面斜激波相交与反射 .....          | 138        |
| § 7.7 锥面激波 .....                | 142        |
| § 7.8 激波和膨胀波的组合及其应用 .....       | 144        |
| 小结 .....                        | 147        |
| 思考与练习 .....                     | 148        |
| <b>第八章 一维定常可压缩管内流动</b> .....    | <b>150</b> |
| § 8.1 理想气体在变截面管道中的流动 .....      | 150        |
| § 8.2 收缩喷管 .....                | 154        |
| § 8.3 拉伐尔喷管 .....               | 159        |
| § 8.4 其他变截面管流 .....             | 168        |
| § 8.5 等截面摩擦管流 .....             | 170        |
| § 8.6 气体在有热交换的管道中的流动 .....      | 176        |
| 小结 .....                        | 183        |
| 思考与练习 .....                     | 184        |
| <b>第九章 气体一维非定常流动基础</b> .....    | <b>186</b> |
| § 9.1 控制方程 .....                | 186        |
| § 9.2 一维非定常均熵流动 .....           | 191        |
| § 9.3 有间断面的流动 .....             | 195        |
| 小结 .....                        | 199        |
| 思考与练习 .....                     | 200        |
| <b>第十章 粘性流体基本概念及附面层知识</b> ..... | <b>202</b> |
| § 10.1 管道中的实际粘性流动 .....         | 202        |
| § 10.2 圆管内定常不可压层流流动 .....       | 204        |
| § 10.3 湍流流动的时均化 .....           | 206        |
| § 10.4 附面层基本知识 .....            | 207        |
| § 10.5 高温附面层概念 .....            | 209        |
| 小结 .....                        | 212        |
| 思考与练习 .....                     | 212        |
| <b>第十一章 气体基本参数的测量原理</b> .....   | <b>213</b> |
| § 11.1 流体温度及压强的测量 .....         | 213        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| § 11.2 气流速度与马赫数的测量 ..... | 217 |
| § 11.3 流量的测量 .....       | 219 |

## 附录 数据表

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 附表 1 气体的平均比定压热容表 .....         | 223 |
| 附表 2 国际标准大气表 .....             | 224 |
| 附表 3 一维等熵流气动函数表 .....          | 225 |
| 附表 4 普朗特-迈耶函数表 .....           | 232 |
| 附表 5 正激波表 .....                | 234 |
| 附表 6 斜激波前后气流参数表 .....          | 240 |
| 附表 7 有摩擦的直等截面管道中绝热流动的数值表 ..... | 259 |
| 参考文献 .....                     | 262 |

# 第一篇 热力学基础

热力学是研究能量的性质及其转换规律的一门科学,尤其是研究热能和机械能相互转换规律的科学。目前,热力学已涉及工程的各个领域。研究高速气体流动问题以及在发动机内的流动规律及其能量转换关系时都要用到它。

热能转变为机械能必须借助某种设备和某种载能物质,这种设备就是所谓的热机,而载能物质就是工质。

热力学的基本理论仍然是热力学的两条基本定律:热力学第一定律和热力学第二定律。

本篇在阐明气体的热力学性质和热力学两条基本定律的基础上,主要应用这两个基本定律来分析热力过程和热力循环,研究如何提高热能和机械能转换的有效性和方向性,以便分析各种热力发动机的热力循环和能量之间的转换规律。

热力学采用宏观的研究方法,把物质看成连续介质,用宏观的物理量来研究物质所处的状态。它不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动。

## 第一章 气体的热力学性质及基本概念

### § 1.1 热力学系统及热力学状态

#### 一、热力学系统

在分析热力学问题时,为了便于研究,总是按任务的具体要求,选取某些确定的物质或某个确定空间中的物质作为研究对象,并称它为热力学系统,简称系统。与热力学系统有关的周围物体称为外界。系统通过真实的或假想的分界面(称其为系统的边界)与外界分开。边界可以是固定的,也可以是运动的;可以是真实的,也可以是假想的。通常选择边界时要使系统具有明确的含义。图 1-1 表示封闭在汽缸中的气体作为研究对象时,汽缸与活塞的内壁面就是真实的分界面,而活塞顶部是可以运动的。图 1-2 表示气体不断地从进口流进,在受到叶轮

的作用下,压强升高并不断地从出口流出,则应选取进出口截面之间的气体作为研究对象,那么,进出口截面是假想的、固定的分界面,侧面的内壁是真实的、固定的分界面。系统和外界的作用总是通过分界面进行的,系统与外界之间,可以有功和能量的交换,也可以有物质的交换。

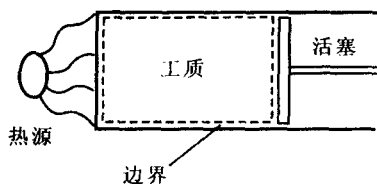


图 1-1 封闭系统

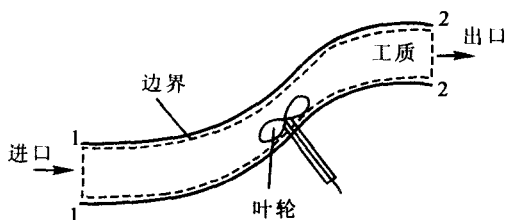


图 1-2 开口系统

根据热力学系统和外界相互作用的不同情况及特点,热力系可分为:

### 1. 闭口系统

热力学系统与外界可以有功和热的交换,但无物质的传递。如图 1-1 所示的热力学系统即为封闭系统。工质在汽缸内受热膨胀而推动活塞做功。若取工质为热力学系统,则系统的边界随同活塞一起移动,通过系统的边界没有任何物质的交换,这时活塞、热源均为外界。这种与外界不发生物质交换的热力学系统称为闭口系统。

### 2. 开口系统(控制体)

热力系和外界之间不仅可以有功和热的交换,而且还可以有物质的交换。如图 1-2 所示,物质不断从进口流入,气体膨胀并推动叶轮旋转对外界做功,然后从出口流出。若取虚线所示的空间及其中的物质为一个热力学系统,由于通过 1—1,2—2 的假想边界有物质交换,即热力学系统与外界间有物质交换,则称这种系统为开口系统或控制体,其界面为控制面。

### 3. 绝热系统

若系统与外界之间没有热量交换,则称为绝热系统。

### 4. 孤立系统

若热力系与外界无任何相互作用,则称之为孤立系统。例如把进行能量交换的一切有关物质如工质、低温热源、高温热源、耗功设备等一起取做一个热力系,则由于该系统和外界不发生任何能量和物质的交换,这样的系统就是一个孤立系统。

### 5. 简单热力系

若热力系与外界只交换热量和一种形式的功,就称其为简单热力系。

### 6. 简单可压缩热力系

由可压缩流体(气体或蒸气)组成的简单热力系称为简单可压缩热力系。这种热力系与外界只有热量和容积功的交换。本书主要研究简单可压缩系并且限于单相系统。

构成简单可压缩系的物质称之为工质,它是热机实现热功转换的一种必要介质。

应当指出:自然界中的事物都是普遍联系、相互制约的,所以绝对的封闭系统、绝热系统和孤立系统实际上是不存在的。当系统和外界的作用在某一方面或某些方面无限减弱,或其作用的影响小到可以略去不计时,那么就可以把它看做某一特定的系统,从而将复杂的问题进行了简化。

## 二、热力学状态

在某一指定的瞬间,热力学系统所处的状态,称之为热力学状态,简称状态,它是系统所具有的物理特性的总的表现。

## 三、平衡状态

平衡状态是指在一段时间内,热力系与外界不发生相互作用,且热力系的宏观性质不随时间变化的状态。否则称其为非平衡状态。平衡状态时分子运动的统计平均值不随时间变化,即为动态平衡。换句话讲,系统内部各点介质温度与压强分别和外界的温度和压强相等,系统内部各处介质的成分也相同。如果系统内部各处的介质成分不同,或外界的温度或压强改变成另一个数值,则界面两侧将有温差或压差,平衡状态就变成非平衡状态。若外界温度或压强不再变化,则经过一定时间后,系统内部各处的温度或压强又均匀一致且与外界温度或压强相等,此时系统又重新达到了新的平衡状态。在外界条件发生变化的情况下,由于系统内气体分子运动得很快,系统会自动地由不平衡状态很快地过渡到平衡状态。因此所遇到的系统往往都是非常接近于平衡状态。对于非平衡的热力系,可以将其分成许多单元,而将每个单元作为平衡热力系来研究。气体热力学只研究平衡状态以及系统由一个平衡状态向另一个平衡状态的转化,即研究平衡状态时气体参数的变化关系以及状态转化过程中能量的转化关系。

实现平衡状态的条件是:热力系内部以及热力系与外界之间应满足力平衡(无压力差)、热平衡(无温度差)、物质平衡(无化学势差)。

## § 1.2 状态参数及基本状态参数

描述热力系平衡状态的物理量称为状态参数。常用的状态参数有压强、比体积、温度、内能、焓和熵等。

状态参数中压强、比体积、温度的物理概念比较明确,而且可以直接测量,称为基本状态参数。

### 一、比体积 $v$ 和密度 $\rho$

比体积是描述热力学系统内部物质分布的状态参数。单位质量的物质所占有的体积称之为比体积  $v$ ,  $v = V/m$ , 单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$  (立方米每千克)。比体积的倒数称为密度  $\rho$ ,  $\rho = m/V$ , 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$  (千克每立方米)。

### 二、压强 $p$

压强是描述热力学内部力学状况的状态参数,是单位面积上所承受的垂直作用力,以符号  $p$  表示。它是气体分子作无规则运动时频繁地撞击容器内壁的平均结果。压强与其作用面积的乘积称为作用在该面积上的压力。压力也称为绝对压力。

压强的单位是帕(Pa),  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$ 。工程中也常用兆帕(MPa)作为压强的单位,  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。此外,目前能见到的非国家标准规定的压强单位还有巴(bar),标准大气压(atm),毫米汞柱(mmHg),毫米水柱(mmH<sub>2</sub>O)等。

压强可以用不同的方法来测量。通常的测量仪表(如弹簧管式压强表和液柱式压强计)只能测量出流体的真实压强与当地环境压强( $p_a$ )的差值。该差值即为相对于当地环境压强为基准的计示压强(又称相对压强)。而流体的真实压强称为绝对压强,以符号  $p_{abs}$  表示。绝对压强总是正值,而计示压强可正可负。通常当流体的绝对压强大于环境压强时,所测量的压强称为表压强,记为  $p_e$ ,所用的测量仪表称为压强表。而当流体的绝对压强小于环境压强时,所用的测量仪表称为真空表。流体的绝对压强低于环境压强差值称为真空度,以符号  $p_v$  表示。这样就有

$$p_e = p_{abs} - p_a \quad (1-1)$$

$$p_v = p_a - p_{abs} \quad (1-2)$$

表压强、真空度和绝对压强间的上述关系如图 1-3 所示。图 1-3(a) 表示的是表压强,  $p_e = \gamma h$ , 而图 1-3(b) 表示的是真空度,  $p_v = \gamma h'$ 。根据上述关系,即使流体的绝对压强不变,由于环境压强的变化,表压强和真空度也会发生变化。因此只有流体的绝对压强(真实压强)才能作为描述流体状态的状态参数。

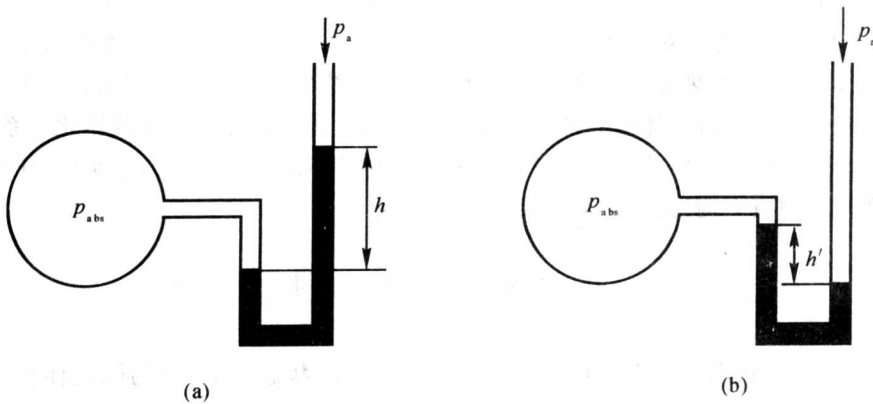


图 1-3 绝对压强和真空度

**【例 1-1】** 如图 1-4 所示, A 与 B 为由刚性壁所隔成的两个空间。压强表 1 与压强表 2 的读数分别为  $p_1 = 1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $p_2 = 1.9 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 环境压强  $p_a = 0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 问 A 与 B 两个空间内的压强分别是多少? 仪表 3 是压强表还是真空表? 仪表 3 的读数是多少?

**解** 由  $p_1 = p_A - p_a = 1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  得

$$p_A = p_1 + p_a = (1.25 + 0.98) \times 10^5 = 2.23 \times 10^5 \text{ Pa}$$

又由  $p_2 = p_A - p_B$  得

$$p_B = p_A - p_2 = (2.23 - 1.9) \times 10^5 = 0.33 \times 10^5 \text{ Pa}$$

因为  $p_B < p_a$ , 故仪表 3 为真空表。

$$p_3 = p_a - p_B = (0.98 - 0.33) \times 10^5 = 0.65 \times 10^5 \text{ Pa}$$

大气压强在实验室中可以用水银气压计测量, 水银气压计是一个倒插在水银槽内顶端封住的垂直玻璃管, 如图 1-5 所示, 由于大气压强的作用, 水银在玻璃管内上升至一定高度  $h$ , 而

水银柱顶部玻璃管内的水银蒸气压强很小,可以忽略,于是测量出高度  $h$ ,可近似得到大气压强  $p_a = \gamma h$ 。

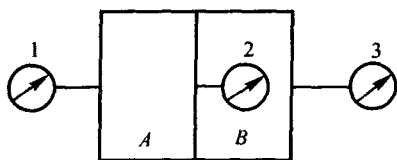


图 1-4 例 1-1 的示意图

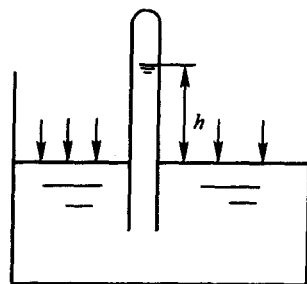


图 1-5 大气压强测量原理

### 三、温度

温度表示物体的冷热程度,气体的热力学温度是气体分子无规则平均移动动能的量度。国际单位制中采用热力学温标,用开(K)表示。热力学温度  $T$  与摄氏温度  $t$  的关系为

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-3)$$

热力学温度  $T$  总大于零。

## § 1.3 完全气体的状态方程及状态参数坐标图

### 一、完全气体的概念及气体状态方程式

一切物质都是由大量的分子所组成,而每个分子具有一定的质量和体积,所有的分子又都在不停地作无规则的热运动,分子之间存在有空隙,彼此间有相互的作用力(吸引或排斥力)。与液体和固体相比,气体分子运动得最快,分子间隙最大,分子间的作用力最小。由于上述特点,气体具有显著的膨胀性和流动性,所以气体是热力发动机的最理想的工质。

理论上研究气体的性质,如要考虑气体分子本身的体积及气体分子的作用力是非常复杂的。为了研究方便,在热力学中提出了完全气体的概念。由于气体分子本身的体积与分子间的空隙比较起来是微不足道的,因此可以把气体的分子看做是一个没有体积的质点在作无规则的热运动,此外,因为气体分子间的平均距离较大,故相互之间的作用力小到可以忽略不计。我们把这种假想的气体,即只有质量而没有体积,分子间完全失去作用力的气体,叫做完全气体。在工程上,当气体远离液态时,即在压强较低和温度较高时,气体分子本身所具有的体积和分子间的相互作用力,都小到可以忽略不计,可以作为完全气体来处理。航空发动机所用的工质(空气和燃气)就可作为完全气体。

凡不可以略去气体分子本身所具有的体积和分子间相互作用力的气体,称为实际气体。例如,在蒸汽机中所用的工质——水蒸气,距离液态较近,就不能当做完全气体,而必须当做实际气体来处理。大部分气体在一般温度和压强下,都近似是完全气体。

气体的状态,由它的各个状态参数( $p, v, T$ )决定。根据实验结果,在一定的气体中,如果没

有相态(固态、液态和气态)的转变,则上述三个状态参数中,只要决定了任意两个,那么,第三个参数也就相应的确定了。气体状态的三个基本状态参数  $p, v, T$  之间存在着一定的关系,即

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-4)$$

这样的关系式叫做气体状态方程式。

## 二、完全气体的状态方程式

1 mol(摩尔)物质的量称为摩尔质量,记为  $M, M = m/n$ , 式中  $m$  是物质的质量,  $n$  是该物质的量。摩尔质量的单位是  $\text{kg/mol}$ , 空气的摩尔质量为  $M = 28.96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 。对于完全气体,状态方程式可以从气体分子运动论的基本方程导出或直接从实验得到。完全气体的状态方程可以表示为以下几种形式。

$$pV = nR_M T \quad (1-5)$$

式中,  $R_M = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ , 称为通用气体常数,  $R_M$  与气体种类和状态无关。对于 1 kg 的完全气体,气体的状态方程还可以写为

$$pv = RT \quad (1-6a)$$

或

$$p = \rho RT \quad (1-6b)$$

式(1-6)就是完全气体状态方程式,它是对 1 kg 的质量气体而言的。根据状态方程式,可以由任意状态的两个已知参数去计算第三个参数。对  $m(\text{kg})$  质量的气体可有

$$pV = mRT \quad (1-7)$$

式中,  $R = R_M/M$ ,  $R$  的数值与气体种类有关,  $R$  的单位为  $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ , 几种常见的气体常数如表 1-1 所示。

表 1-1 常见气体的气体常数

| 气体   | 相对分子质量 | 气体常数 $R(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$ |
|------|--------|----------------------------------------------------------|
| 氧气   | 32.00  | 260                                                      |
| 氮气   | 28.01  | 297                                                      |
| 氢气   | 2.018  | 4 120                                                    |
| 一氧化碳 | 28.01  | 297                                                      |
| 二氧化碳 | 44.01  | 187                                                      |
| 空气   | 28.97  | 287.06                                                   |
| 燃气   |        | 287.4                                                    |

## 三、状态参数坐标图

简单热力系的平衡状态可以由两个相互独立的状态参数确定。从状态方程式(1-6)可以看出,气体在任一状态下,只要知道了三个状态参数中的任意两个,就可求出第三个。也就是说,只要用三个参数中的任意两个就可以描述气体的状态。根据这个原理,就可以把气体的热

力学状态形象地用平面坐标图上的点来表示。例如  $p-v$  图,  $T-s$  图(见图 1-6\*) 等。

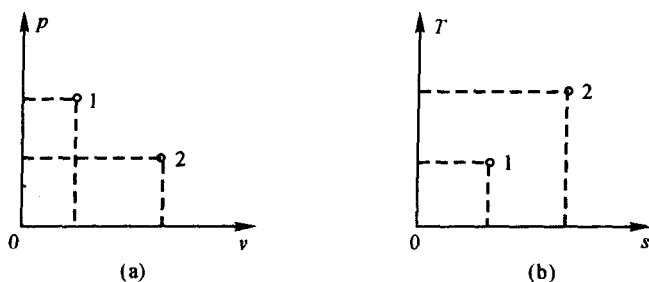


图 1-6

(a) 状态在  $p-v$  图上的表示; (b) 状态在  $T-s$  图上的表示

## § 1.4 热力过程

### 一、热力过程

处于平衡状态的系统,在受到外界作用时,系统的状态就会发生变化。热力过程是指热力系从一个状态出发,经过一系列中间状态而变化到另一个状态所经历的全部状态的总和,而封闭的热力过程称为热力循环。

### 二、准静态过程

由于外界条件的变化,在外界和系统间形成热不平衡或力不平衡时,系统的平衡状态遭到破坏引起系统状态发生变化,也就是说,热力过程中系统所经历的过程是一系列不平衡状态的总和。而由一系列不平衡状态所组成的热力过程是难以分析的,因为只有平衡状态才有确定的状态参数,从而才可用状态方程和  $p-v$  图来描述。这样就需要引进一种理想化的热力过程即准静态过程的概念。

所谓准静态过程是热力学引入的一种理想的热力过程,该过程中热力系所经历的是一系列平衡状态,并在每次状态变化时仅无限小地偏离平衡状态。如果过程进行得相当缓慢,则热力系内部就能很快地恢复到平衡状态,这样的过程可以看做是准静态过程。大部分实际过程都可以近似地当做准静态过程。因为气体分子的热运动非常快,在气体的平衡状态被破坏后,热力系内部能够及时恢复到平衡状态。即使在气流速度较高,状态变化较快的燃气轮机中,气流中气体状态的变化仍可近似地按准静态过程进行分析。由于准静态过程中系统所经历的是平衡状态,故可以利用状态参数来描述,因而可以在  $p-v$  图上表示出来。热力学中主要研究准静态过程。

### 三、可逆过程与不可逆过程

1824 年,法国工程师卡诺提出了可逆过程的概念,即如果进行一个热力过程后,有可能沿

\* 由于排版软件字母的局限,在本书图中用  $v$  表示  $v$ 。

原来过程逆向进行,使系统和有关的外界都返回原状态而不发生任何变化,这样的热力过程就称为可逆过程。如果在热力过程中存在着不可逆因素,则该过程就称为不可逆过程。按照这个定义,过程的可逆性不仅与系统是否回到原来状态有关,更重要的是,在过程的进行中,系统和外界(包含参与过程的正向和逆向变化的一切其他有关系统)都不应发生任何变化。这就要求在正向和逆向过程中,没有任何的做功能力的损失、摩擦的影响以及其他耗散(摩擦、电阻等都属于耗散)的作用。需要说明的是,可逆过程的定义是要求热力系与外界都能恢复到原来状态。热力系总是可以恢复到原来状态的,而外界却未必能同时恢复到原来状态。

对于简单可压缩系,造成过程不可逆性的因素有功的耗散和有限温差产生的导热。耗散的存在必然导致过程的不可逆性。例如摩擦就是一种耗散。其他如电阻等也是一种耗散,对于简单热力系,最典型的耗散是内摩擦。有摩擦的过程必然是不可逆过程。

不等温传热(有限温差导热)也是造成热力过程不可逆的一种因素。热量总是由高温物体传向低温物体,于是当热力系经过吸热和放热的循环后恢复到原来状态时,外界并不能恢复到原来状态,而是有一部分热量从高温物体传向了低温物体。

由以上分析可知,要使过程可逆,必须满足压力平衡、温度平衡、物质平衡和没有耗散作用,即无耗散的准静态过程是可逆过程,同时外界的温度必须无限接近气体的温度。一切实际过程都不可能满足以上这些条件。因此,可逆过程在自然界中是不可能实现的。尽管如此,可逆过程的研究仍然是热力学分析中的一种重要方法。很多情况下的实际过程与可逆过程的偏差很小,为了便于理论研究和分析计算,可以忽略这种偏差。如果实际计算与实验偏差较大,则可根据实验结果利用修正系数或效率,对可逆过程的结果进行修正。这样就大大简化了实际过程的分析 and 计算。

## § 1.5 气体的比热容与热量

当我们把热量加入一个热力系时,这个热力系的温度一般总是提高的,加入不同的热量,热力系的温度变化也不相同。如果其他条件不变而热力系质量较大,则单位质量气体吸收的热量就较少,温升自然也将较小。在热力计算中,常采用比热容来计算气体在某一过程中吸收或放出的热量。比热容是描述气体性质的重要参数之一。

### 一、比热容

在无耗散的准静态过程中,单位质量的气体,温度升高(或降低) $1^{\circ}\text{C}$  所需加入(或放出)的热量称为气体的比热容,用符号  $c$  表示。比热容的单位是  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 计算式为

$$c = \left( \frac{\partial q}{\partial T} \right) \quad (1-8a)$$

式中,符号  $\partial$  表示在微元过程中传递的微小量,以便与状态量的微小增量  $d$ (全微分符号)区分开。

对气体加热,可以在各种不同条件下进行,例如可以在容积不变或在压强不变的条件下加热,也可以在同时改变容积、压强和温度的条件下加热。同一种气体,加热时的条件不同,比热容的数值也不同。相应于定容过程的比热容称为比定容热容,用  $c_v$  表示,则有

$$c_v = \left( \frac{\partial q}{\partial T} \right)_v \quad (1-8b)$$

比定容热容的另一种定义是:1 kg 气体的内能在保持比体积不变的条件下,随温度的变化,即对温度的偏微分称为比定容热容  $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ ,对于完全气体,气体的内能仅是温度的函数,因此有  $c_v = \frac{du}{dT}$ 。

相应于无耗散准静态过程中的定压过程的比热容称为比定压热容,用  $c_p$  表示,则有

$$c_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_p \quad (1-8c)$$

比定压热容的另一种定义为气体的比焓(单位质量气体的焓)在保持压强不变的条件下随温度的变化,即对温度的偏微分称为比定压热容,即  $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$ ,对完全气体,气体的比焓仅是温度的函数,则有  $c_p = \frac{dh}{dT}$ 。关于内能和焓的概念,第二章将详细讨论。

需要说明的是,上述关于比热容的定义及表达式只适合于不存在功耗散的准静态过程,以避免由于摩擦等功耗散现象引起附加的温度变化。

比较定容加热和定压加热的情况可以看出:定容条件下加入的热量,全部用来提高气体的温度;而定压条件下加入的热量,除了用来提高气体的温度外,还要推动活塞做功。可见要使 1 kg 气体的温度同样升高 1℃,采用定压加热的方法比采用定容加热的方法所需要加入的热量多一些。即比定压热容  $c_p$  比比定容热容  $c_v$  的数值要大。对于完全气体,可以证明

$$c_p - c_v = R \quad \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (1-9)$$

比定压热容与比定容热容的比值称为比热比或称气体的绝热指数,用符号  $k$  表示,即

$$k = c_p / c_v \quad (1-10)$$

$k$  值取决于组成气体分子的原子数及气体的温度。常温空气的  $k = 1.4$ ,  $c_v = 717.7 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $c_p = 1004.7 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。空气的比热比随温度的变化关系见表 1-2。

表 1-2 空气的比热比随温度的变化

| T/K | 200     | 300     | 400     | 500     | 600     | 700     | 800     |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $k$ | 1.401 3 | 1.399 9 | 1.395 2 | 1.386 7 | 1.375 7 | 1.364 4 | 1.353 7 |
| T/K | 900     | 1 000   | 1 100   | 1 200   | 1 300   | 1 400   | 1 500   |
| $k$ | 1.344 2 | 1.336 1 | 1.329 3 | 1.323 4 | 1.318 5 | 1.314 2 | 1.310 6 |

由式(1-9),式(1-10)可以推出

$$c_p = \frac{kR}{k-1} \quad (1-11)$$

$$c_v = \frac{R}{k-1} \quad (1-12)$$

实验表明:气体在定容和定压条件下,温度每增加 1℃ 时,所需要加入的热量并不相同。也就是说,如果我们根据气体增加 1℃ 对所得的热量来计算,我们只能得到在这 1℃ 里面的平均比热,而在这 1℃ 内,前半度和后半度所需要的热量是不同的。即气体比热的数值是随温度的变化而变化的,对完全气体的比热容随温度的变化是当温度升高时,气体的比热容变大,如图 1-7 所示。所以要精确地计算比热容,则必须考虑比热容随温度的变化关系。