

# 飞机动力装置

第一部分：热工气动基础知识

《飞机动力装置》编写组编

## 前 言

飞机动力装置是飞机的核心部分，它的主要部件工作在高温、高压、高转速的特殊条件下，其工作正常与否，直接影响到飞机的正常飞行，涉及到航空公司的经济利益和人民群众的生命财产安全，因此，飞机动力装置是飞机机电专业学生的一门必修课。

根据高等职业教育的特点，我们对原有的飞机动力装置的有关课程：《热工气动》、《发动机原理》、《发动机构造》和《发动机控制系统》进行了改革，在满足维护飞机发动机的理论需要为前提，加强维护飞机发动机的实践能力为目的，构建了新的飞机动力装置课程体系。新的课程体系分为四部分，即：《热工气动基础知识》、《活塞式发动机》、《燃气涡轮发动机》和《发动机燃油和控制系统》。

在使用该套教材教学时，要根据高等职业教育的特点，加强理论与实践相结合。在理论教学的同时，进行实践教学。即：理论教学与实习同步进行，并利用录象和多媒体等现代教学手段进行教学。这样，可以使学生更好地理解发动机工作原理，了解发动机的构造。

本书是由《飞机动力装置》系列课程的第一部分，由陈忠军重新编写。全书分为七章，内容包括气体的基本属性、热力学第一定律、热力过程、热力学第二定律、发动机的理想循环和气体的管内流动等。通过本书的学习，应掌握理解发动机工作原理必备的热工气动基础知识，为学习飞机动力装置地其它内容打好基础。

本书作为广州民航职业技术学院航空机电专业高职班的教材；也可作为民用航空器维修基础执照班的辅助教材；也可作为民航机务维修人员的参考资料。

由于编者水平有限，书中错漏与不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2000. 6

FU3P / 20

## 目录

|          |                      |    |
|----------|----------------------|----|
| 第一章      | 气体的基本属性.....         | 1  |
| §1-1     | 气体的特性.....           | 1  |
| §1-2     | 热力学系统、状态和状态参量.....   | 3  |
| §1-3     | 平衡状态、状态方程、参数坐标图..... | 8  |
| §1-4     | 气体的比热.....           | 11 |
| 习 题..... |                      | 12 |
| 第二章      | 热力学第一定律.....         | 13 |
| §2-1     | 热力学第一定律的实质.....      | 13 |
| §2-2     | 功和热.....             | 13 |
| §2-3     | 热力学第一定律解析式.....      | 15 |
| 习 题..... |                      | 16 |
| 第三章      | 热力过程.....            | 17 |
| §3-1     | 可逆过程与不可逆过程.....      | 17 |
| §3-2     | 定容过程.....            | 19 |
| §3-3     | 等压过程.....            | 20 |
| §3-4     | 等温过程.....            | 22 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| §3-5 绝热过程.....            | 23 |
| §3-6 多变过程.....            | 27 |
| § 3-7 可逆过程中理想气体的熵.....    | 30 |
| 习 题.....                  | 32 |
| 第四章 热力学第二定律和发动机的理想循环..... | 33 |
| § 4-1 热力学第二定律的阐述.....     | 33 |
| § 4-2 热力循环.....           | 35 |
| § 4-3 卡诺循环.....           | 36 |
| § 4-4 发动机的理想循环.....       | 37 |
| 习 题.....                  | 41 |
| 第五章 稳定流动的气体动力学基本方程.....   | 42 |
| § 5-1 连续方程.....           | 42 |
| § 5-2 能量方程.....           | 43 |
| § 5-3 伯努利方程.....          | 46 |
| § 5-4 音速与马赫数.....         | 48 |
| § 5-5 气流的滞止参数.....        | 49 |
| 习 题.....                  | 51 |
| 第六章 气体在管内的流动.....         | 52 |
| § 6-1 气流速度与管道横截面积的关系..... | 52 |

---

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| § 6-2 亚音速气流在收敛形管内的流动.....   | 53 |
| § 6-3 气体的粘性对管道内气体流动的影响..... | 58 |
| § 6-4 气体在斜切口管内的流动.....      | 59 |
| 习 题.....                    | 61 |
| 第七章 扰动与波.....               | 62 |
| § 7-1 弱扰动在气流中的传播.....       | 62 |
| § 7-2 膨胀波.....              | 64 |
| § 7-3 激波.....               | 65 |
| 习 题.....                    | 69 |

## 第一章 气体的基本属性

燃气涡轮发动机作为一种热力发动机,它是在气体的高速流动过程中完成热能与机械能的相互转换的,活塞式发动机亦为热力发动机,但是,它是利用燃气在变化的封闭空间中完成热能与机械能的相互转换的。这两种航空发动机都是利用气体作为媒介,来完成热能与机械之间的相互转换,这种媒介物质称为工作介质,或简称工质。要了解发动机的工作原理,必须首先对气体的基本属性有所了解。

### §1-1 气体的特性

#### 一. 气体的特点

物质都是由分子组成的,分子时刻都在作无规则的热运动;分子之间存在着空隙;分子之间有相互作用力,相互之间经常碰撞,交换着动能和热能。但是,与液体或固体比较起来,气体的分子运动得最快;分子间空隙最大;分子间的作用力最小。所以,若把气体充入容器内,其分子很快便能均匀地充满在容器中,使容器具有膨胀的趋势,此时如果容器的体积能够变大,气体便能够膨胀而对外作功。因此,人们便利用气体的这些特点,把它作为热力发动机的工质,以完成热能和机械能的互相转换。

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,分子间作用力也很微弱。所以,在研究实际问题时,可以把分子的体积及分子间的作用力忽略不计,这会使研究的问题大为简化,而得出来的结论又与实际情况非常接近。因此,在热力学中,设想出一种气体,它的分子只有质量而没有体积。分子之间完全没有作用力,这种气体称为理想气体。相对于理想气体而言,实际气体的分子则有体积,分子间有相互作用力。一切实际存在的气体都是实际气体。当实际气体的压力与大气压力相比不太大,以及实际气体的温度与室温相比不太低时,便与理想气体非常接近。而气体的压力很大、温度很低时,则非常接近于液体。此时,就不能不考虑分子的体积和分子间的作用力了。

#### 二. 气体的连续介质假设

航空发动机都是在较稠密的气体中工作,气体分子的平均自由程与物体的尺寸相比都是微乎其微的,即:在微小的体积中,有非常多的分子,以海平面的大气而言,每立方厘米的空间内有空气分子  $2.7 \times 10^{19}$  个,因此,当我们研究气体的流动时,不考虑气体分子间的间隙及其相互作用,而是认为气体的质点是稠密的,并且连续地充满它所占据的空间。当气体作为热动力设备的工质而稳定流动时,既不会中断,也不会堆积。

实践证明,流动气体的连续性,可以反映气体运动的真实过程。只有在研究极高空的飞行问题时,由于这时空气很稀薄分子间的距离很大,如果还采用连续性,将会导致很大的误差,甚至得到错误的结论。

#### 三. 气体的压缩性

气体因压力和温度的变化而改变其密度的性质,称为气体的压缩性。气体的压缩性

### 三. 气体的压缩性

气体因压力和温度的变化而改变其密度的性质, 称为气体的压缩性。气体的压缩性对其流动性是有影响的, 这时, 气体的流动规律会发生变化。但是压缩性对气体流动规律的影响有多大, 则要看气体密度的相对变化量, 即气体密度的变化量 $\Delta\rho$ 与气体原来的密度 $\rho$ 的比值 $\Delta\rho/\rho$ 的大小而定。如果 $\Delta\rho/\rho \ll 1$ , 即气体因压力和温度的变化导致其密度的改变极微小, 因而可近似地当作不可压缩处理。但当这个比值不是很小时, 压缩性的影响便不能忽略, 否则必然带来较大的误差。

当气体的速度改变时, 会引起其压力和密度的变化。但若气体以低速流动, 则其速度改变所引起的气体密度的相对变化量甚小, 这时对压缩性的影响很小; 只有当气体速度较大时, 因这时所引起的气体密度的相对变化量较大, 故才要考虑对气体压缩性的影响。

### 四. 气体的粘性

相邻的两层气体作相对运动时, 在这两层气体之间就会出现阻力以阻止它们的相对运动。气体的这种特性叫做粘性。这种现象叫做气体的摩擦, 这种阻力叫做粘性力或摩擦力。

气体的粘性, 在气体流过物体表面时会明显地表现出来。参看图 1-1, 气体以速度 $C_0$ 平直地流过平板, 当沿着平板的法线方向测量表面附近各层气体的流速时发现, 紧贴平板的那层气体的流速为零; 沿法线 $ON$ 方向向外, 气流速度逐渐增大, 直至离开平板一定距离的地方, 流速才接近于 $C_0$ 。

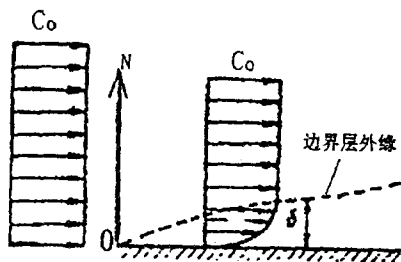


图 1-1 气体流过平板时粘性的影响

平板附近气流速度出现上述分布, 正是由于气体粘性作用的结果。紧贴板面的一层气体, 受到板面的阻滞、完全贴在板面上, 与板面没有相对运动, 流速为零。稍外的一层气体, 由于紧贴板面的那层气体有了相对运动, 受到摩擦力的阻碍作用, 其流速也就大为减小。稍外层气体的流速减小后, 又与再外层的气体有了相对运动, 又要阻碍再外层气体的运动, 使其流速减小。这样一层层地影响下去, 就有相当多层的气体, 在粘性的作用下受到牵制而减小了流速。从而出现了平直气流流过平板时如图 1-1 所示的速度分布现象。

从紧贴平板流速为零到沿平板法线方向流速恢复原来流速这一气层, 其总厚度 $\delta$ 不过从几毫米到几厘米, 习惯上称为附面层。

从气体分子运动的观点来看, 粘性实质是分子热运动的结果。气体流动时, 每个气体分子除了具有随气流前进的过程中, 由于无规则的运动。当分子在气流前进的过程中, 由于无规则的热运动而进入相邻层中时, 就会改变相邻层中气体的流速。流速较小的这层气体以阻力, 使之减速; 而流速较大的气体层中的分子进入流速较小的气体层中时, 则要给流速较小的这层中的分子以推进力, 使之加速。这就是气体层有相对运动时, 表现出粘性的原因。这相邻气体层之间的一对力就是摩擦力。

大量实践表明, 相邻气体层之间的单位面积摩擦力, 与气流速度沿法线方向的变化率

$$\tau = \mu \frac{dC}{dn} \quad (1-1)$$

式中:  $\tau$  相邻气体层之间的单位面积摩擦力, 单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ ;

$dc/dn$  相邻气体层之间的速度梯度, 单位为  $\text{米}/\text{秒} \cdot \text{米} (\text{m}/\text{s} \cdot \text{m})$ ;

$\mu$  比例常数, 单位为  $\text{牛顿} \cdot \text{秒}/\text{米}^2 (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ ;

比例常数  $\mu$  称为动力粘性系数或简称粘性系数, 它与流体的性质及温度有关。不同性质的流体, 其粘性系数相差很大。温度对粘性系数的影响很密切, 例如液体的粘性系数随温度的升高而急剧降低; 而气体的粘性系数则随温度的升高而增大。

除了动力粘性系数外, 有时还使用运动粘性系数, 它等于动力粘性系数与密度之比值, 其单位为  $\text{米}^2/\text{秒} (\text{m}^2/\text{sec})$ 。

## §1-2 热力学系统、状态和状态参量

### 一、热力学系统

#### 1. 热力学系统的概念

在研究和分析任何一个问题时, 首先要确定研究的对象。在热力学中把所要研究的对象叫做热力系统, 简称为系统或热力系。与热力系统有关的周围物体称为外界或环境。将热力系统与外界分隔开的空间界限。称为边界或界面。边界可以是真实的, 也可以是假想的; 可以是固定的, 也可以是变动的。

热力系统的变化总是存在热现象, 往往伴随着热能和机械能之间的转换。热现象是一种复杂的物质运动形式, 是物质中大量分子热运动的宏观表现。

#### 2. 热力系统的分类

在进行热力学分析时, 既要考虑热力系统内部的变化, 也要考虑热力系统通过边界和外界发生的能量交换和物质交换, 但对外界的变化不必追究。

热力系统的选取, 取决于所要研究的任务, 它可以是一群物体, 一个物体或物体的某一部分。

若热力系统与外界只发生能量交换, 而无物质交换, 则称该热力系统为闭口系统, 图 1-2 所示。热力系统与外界不仅发生能量交换, 而且有质量交换, 即有物质流入表明出系统, 则称该热力系统为开口系统, 所示。

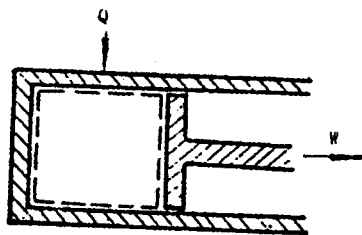


图 1-2 闭口系统

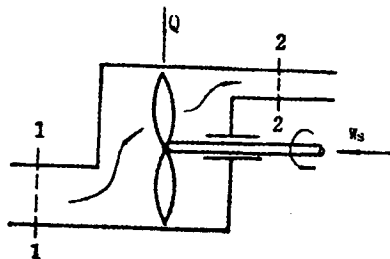


图 1-3 开口系统

热力系统与外界不发生热交换, 则称该热力系统为绝热系统。

热力系统与外界既无能量交换, 也无物质交换, 即与外界无任何联系, 则称该热力系统为孤立系统。



实际上, 与外界绝对不发生任何联系的系统是不存在的。当实际存在的系统与外界的能量交换和物质交换少到可忽略的程度时, 就可近似地当作孤立系统来处理, 因此, 孤立系统只是一种假设的极限情况。

## 二、状态和状态参数

热力设备中, 依靠工质从热原吸热及对外膨胀做功而实现热功转换, 这时工质本身也在不断发生变化。为了说明热力设备中的热功转换过程, 必须研究这个过程中工质所发生的变化, 因而就需要说明在这个过程中工质所组成的热力系统发生变化时所经历的每一种宏观状况。热力学中把工质所处于的某处宏观状况称为工质的热力状态或简称状态。

工质的状态常用一些物理量来描述, 这种描述工质状态的物理量称为状态参数。状态参数的数值仅决定于工质的状态, 而与达到这个状态所经历的变化过程无关。故对应于所给定的状态, 所有的状态参数都各自有确定的数值。当有一个状态参数的数值发生变化时, 工质的状态也就发生变化, 常用的状态参数有六个, 这六个状态参数是比容、压力、温度、内能、焓和熵。

这六个状态参数中, 比容、压力、温度是基本状态参数, 它们可以直接测量, 比较直观, 其它状态参数可以根据基本状态参数进行计算间接得到。

### 1. 比容 $v$

单位质量的气体所占据的容积  $V$  称为比容, 用符号  $v$  表示, 即,

$$v = V/m \quad (1-2)$$

式中:  $V$  \_\_\_\_ 气体的容积, 单位为米<sup>3</sup> (m<sup>3</sup>)

$m$  \_\_\_\_ 气体的质量, 单位为公斤 (kg);

所以, 比容  $v$  的单位为米<sup>3</sup>/公斤 (m<sup>3</sup>/kg);

单位容积气体的质量称密度, 用符号  $\rho$  表示, 即:

$$\rho = m/V = 1/v \quad (1-3)$$

所以, 密度  $\rho$  的单位为公斤/米<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>), 其数值与比容互为倒数。

### 2. 压力 $p$

气体的压力就是气体垂直作用在单位面积上的力。它是由于气体分子运动撞击表面, 而在单位面积上所呈现的平均作用力。当容器内气体没有宏观运动时, 若气体本身重量影响可忽略不计, 则在容器内任何位置的任何方向上气体的压力都相同。

压力的符号用  $p$  表示, 按定义可得:

$$p = F/A \quad (1-4)$$

式中:  $F$  \_\_\_\_ 垂直作用于容器面积上的力, 单位为牛顿 (N);

$A$  \_\_\_\_ 力的作用面积, 单位为米<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>)

所以, 压力的单位为牛顿/米<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>), 称为帕斯卡, 简称为帕, 国际代号 Pa。工程上常用兆帕 (MPa), 作压力单位,

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

由于历史上的原因, 目前尚有一些其他压力单位, 见之于各种文献、书报及计量仪器, 它们的名称、代号及与国际单位制压力单位的换算于表 1-1。

气体的压力也称为绝对压力。测量压力的仪器并不是直接测得气体的绝对压力，而是测得绝对压力和当时大气压力差值。当气体的绝对压力高于大气压力时，压力表指示的数值称为表压力，用  $p_g$  表示，即：

$$P = p_a + p_g \quad (1-5)$$

式中： $p_a$  为大气压力。

表 1-1 压力单位换算表

| 压力单位                       | 帕<br>Pa                  | 巴<br>bar                | 工程大气压<br>at             | 物理大气压<br>atm            | 毫米汞<br>柱<br>mmHg | 毫米水柱<br>mmH <sub>2</sub> O | 磅力/时 <sup>2</sup><br>PSI |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1Pa = 1 N/m <sup>2</sup>   | 1                        | 10 <sup>-5</sup>        | 1.02 × 10 <sup>-5</sup> | 0.99 × 10 <sup>-5</sup> | 0.0075           | 0.102                      |                          |
| 1bar                       | 10 <sup>5</sup>          | 1                       | 1.02                    | 0.9869                  | 750.1            | 10197                      | 14.5                     |
| 1at = 1 kg/cm <sup>2</sup> | 9.8067 × 10 <sup>4</sup> | 0.981                   | 1                       | 0.9678                  | 735.6            | 10000                      | 14.22                    |
| 1atm                       | 1.013 × 10 <sup>5</sup>  | 1.013                   | 1.033                   | 1                       | 760              | 10332                      | 14.7                     |
| 1mmHg                      | 133.32                   |                         | 136 × 10 <sup>-3</sup>  |                         | 1                |                            | 1934 × 10 <sup>-2</sup>  |
| 1mmH <sub>2</sub> O        | 9.807                    |                         | 1 × 10 <sup>-4</sup>    |                         |                  | 1                          |                          |
| 1PSI                       | 6894.8                   | 6.89 × 10 <sup>-2</sup> | 7.03 × 10 <sup>-2</sup> | 6.8 × 10 <sup>-2</sup>  | 57.71            | 703.1                      | 1                        |

表压力  $p_g$  也可用 U 形管两边直管中液柱高度差  $h$  计算（图 1-4 (a)），此时：

$$p_g = \rho gh \quad (1-6)$$

式中： $\rho$  为管内液体的密度， $g$  为重力加速度。

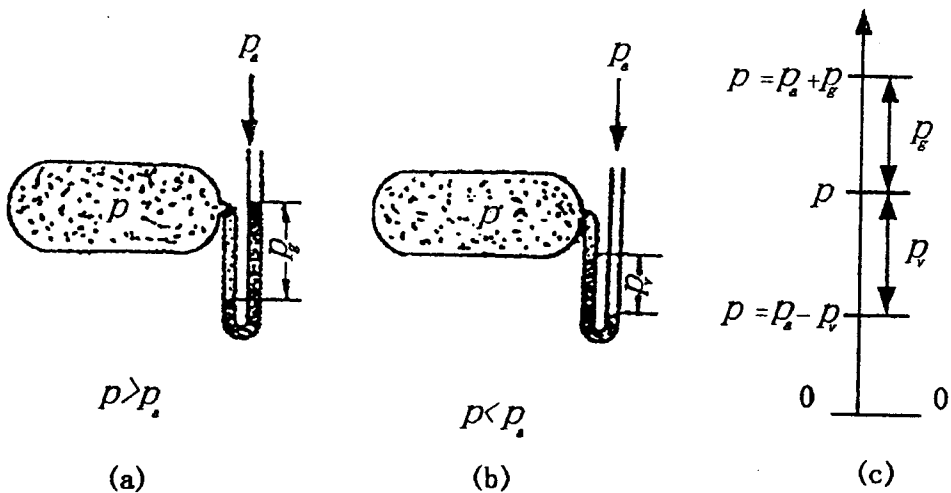


图 1-4 压力的测量

当气体的压力低于大气压力时,用真空表测得的数值,称为真空度,用  $p_v$  表示(图 1-4(b)),即:

$$p = p_a + p_v \quad (1-7)$$

显然,大气压力是经常变化的。所以即使绝对压力不变时,随着大气压力的变化,表压力或真空度也要发生变化,因此作为气体状态参数的压力,只能是气体的绝对压力。

### 3. 温度

温度表示物体的冷热程度。当一个物体处于较热状态时,称为温度较高;处于较冷状态时,称为温度较低。温度的高低在日常生活中是经常能感受到的。但是,仅以感觉是难以做出准确判断的。比如说,长时间置于同一房间里的金属和棉花,其温度应是相同的。此时与它们接触却感到两者凉暖有别,若因此而判定两者的温度不同,则是错误的。

物体的温度或冷热程度可以通过一些物理量的温度效应来说明。例如,大部分物体较热时,其体积较大;较冷时,其体积较小。又如许多物体较热时电阻较大,较冷时电阻较小。因而可以按这些物理量的数值来说明物体温度的高低。

两个不同性质的物体,其冷热程度可以通过互相接触进行比较。若两个物体接触后,甲物体由热变冷,而乙物体由冷变热,则说明甲物体原来的温度较高,而乙物体原来的温度较低,若两物体相互接触时,它们的冷热程度都不发生变化,就表明这两个物体具有相同的温度。

按分子运动学说,气体的温度是气体分子平均移动动能的量度。温度高即气体分子平均移动动能大,温度低即气体分子平均移动动能小。当两种气体的分子平均移动动能相同时,它们的温度便相同。

为了表示温度的数值,需要有作为量度温度的标尺即温标,热力学温标是基本的温标,它所定义的温度称为热力学温度,其符号为  $T$ ,单位为开尔文,国际代号为  $K$ ,规定采用水的三相点温度,即水的固相、液相和气相三相平衡状态的温度,作为定义热力学温标的单一固定点,并规定水的三相点温度为  $273.16^\circ K$ ,而热力学温度单位开尔文为三相点温度的  $1/273.16$ ,与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标。摄氏温标将基准点(即水的三相点)的温度规定为  $0.01^\circ C$ ,并选用纯水在 1 个标准大气压下的冰点( $0^\circ C$ )和沸点( $100^\circ C$ )之间划分 100 等份,每等份即  $1^\circ C$ 。如此确定的温度称为摄氏温度,用符号  $t$  表示,单位为摄氏度 $^\circ C$ 。它与热力学温标之间具有如下的换算关系:

$$t(^{\circ}C) = T(K) - 273.15 \quad (1-8)$$

即摄氏温度 $0^\circ C$ 相当于开尔文温度 $273.15 K$ ,而  $0 K$ 相当于 $-273.15^\circ C$ 。同时也规定了两种温度的单位( $^\circ C$ )和( $K$ )所代表的温度间隔相等,因此两种温度只是起点不同,用 $K$ 表示的温度差也可以用 $^\circ C$ 表示。

少数欧美国家仍习惯使用华氏温标,它的单位为华氏度,代号为 $^\circ F$ 。华氏度 $^\circ F$ 与摄氏度 $^\circ C$ 的关系为:

$$F(^{\circ}F) = 9/5t(^{\circ}C) + 32 \quad (1-9)$$

或

$$t(^{\circ}C) = 9/5(F(^{\circ}F) - 32) \quad (1-10)$$

### 4. 内能

根据气体分子理论, 气体分子在运动中具有移动动能, 转动动能和原子的振动动能。这三种动能的总和叫做气体的内动。实际气体由于分子间存在着作用力, 所以具有位能, 叫做气体的内位能。气体内动能与内位能之和叫做气体的内能。用符号  $U$  表示。单位质量物质所具有的内部叫比内部, 简称为焓, 符号  $u$  表示。

气体内动能的大小, 取决于气体温度的高低, 温度升高, 内动能增大。气体内能的大小, 则取决于气体分子间距离的远近, 即气体比容的大小。比容增大, 表示气体分子间的距离加大, 由于分子间存在着吸引力, 要使分子间的距离增大, 必须克服吸引力的作用, 对分子作功, 因而气体的内位能也就增大。

由此可知, 气体内能的大小, 只取决于气体的温度和比容两个状态参数的数值。由于温度和比容是状态参数, 所以内能也是状态参数。可表示为:

$$u=f(T, v) \quad (1-11)$$

$$U=mu \quad (1-12)$$

式中:  $u$  表示单位质量的物质所具有的内能, 单位: J/kg。

$U$  表示  $m$  kg 物质具有的内能, 单位: J。

理想气体因分子间没有作用力, 分子内位能等于零, 其内能的大小只取决于气体的温度。所以理想气体在状态发生变化时, 内能的变化量只取决于气体起始状态的温度和终了状态的温度。

## 5. 焓

是一个组合的状态参数, 用符号  $H$  表示, 单位质量物质所具有的焓叫比焓, 简称为焓, 用符号  $h$  表示。

焓的定义为:

$$H = U + pV \quad (1-13)$$

$$h=H/m=u+pv \quad (1-14)$$

式中  $H$ : 焓, 单位: 焦耳 J;

$h$ : 比焓, 单位: 焦耳/公斤 J/kg;

$U$ : 总内能, 单位: 焦耳、J;

$u$ : 内能, 单位: 焦耳/公斤 J/kg;

$p$ : 压力, 单位: 帕、Pa。

$m$ : 物质的质量, 单位: 公斤 kg;

$V$ : 容积, 单位:  $m^3$

对于理想气体因为分子内能只取决于气体的温度,  $pv=RT$ , 所以, 理想气体焓的大小亦只取决于气体的温度。所以理想气体在状态发生变化时, 焓的变化量只取决于气体起始状态的温度和终了状态的温度。

## 6. 熵

熵是一个导出的状态参数, 用符号  $S$  表示, 单位质量物质所具有的熵叫比熵, 用符号  $s$  表示。

熵的定义式为:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-15)$$

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (1-16)$$

$$S = ms \quad (1-17)$$

式中  $S$  : 熵, 单位: J/ K;

$s$ : 比熵, 单位: J/kg·K;

$q$ : 热量, 工质获得(或放出)的热量, 单位: J/ kg;

$T$ : 工质获得(或放出)的热量时的热力学温度, 单位: K。

$S$ 表示 $m$  kg物质所具有的熵,  $s$  则表示单位质量的物质具有的熵, 称为比熵, 简称为熵。

### §1-3 平衡状态、状态方程、参数坐标图

#### 一. 平衡状态

描述热力系统的状态时, 如果整个系统的状态参数为一致, 在系统内到处相同的温度和压力, 那么系统的每一个状态参数可各用一个确定的数值表示。此时, 若外界条件不变, 则系统的状态不变。系统的这种状态称为热力平衡状态, 简称平衡状态。

当系统处于平衡状态时, 其介质所有的状态参数都有确定的数值。

平衡状态的特点: 平衡不会自动被破坏。一个平衡的热力系统, 只要不受外界的影响, 它的状态就不会随时间而变化, 将一直保持原有的平衡状态。如果这个热力系统原来处于非平衡状态(如内部存在温差, 压差等), 只要不受外界的影响, 那么它的内部必然会自发地进行一个变化过程, 经过一段时间, 当不平衡逐渐消失而内部不再发生变化时, 热力系也就达到了平衡状态。如果没有外界的作用, 它也一直保持这种平衡状态。

下面是两个从非平衡状态达到平衡状态的例子:

例 1-1, A、B 两个温度不同的物体, 设  $T_A > T_B$ , 相互接触后,  $T_A$  下降, 而  $T_B$  上升, 最终  $T_A = T_B$ , 达到平衡状态。

例 1-2, 一封闭容器, 隔成 A、B 两部分, 设  $p_A > p_B$ , 隔板抽去, A 部分的气体向 B 部分运动, 最终  $p_A = p_B$  达到平衡状态。

#### 二. 状态方程

处于平衡状态的系统其各个状态参数是均匀的, 都有确定的值。但是, 如果要确定系统所处的状态, 不必给出全部状态参数的值。事实上, 对于一个处于平衡状态的系统, 且工质是气体, 要确定它的状态, 只需给出两个相互独立的状态参数值就够了。所谓两个相互独立的状态参数, 指的是其中一个状态参数不能只是另一个状态参数的函数。或者说, 一个状态参数不能只由另一个状态参数所决定。例如, 比容和密度就不是两个相互独立的参数, 给出比容也就给出了密度, 因为比容与密度互为倒数。也就是说, 只由比容就能决定密度或只由密度也能决定比容。既然对一个处于平衡状态的热力系只要给出两个相互独立的状态参数就可确定它的状态, 其含义就是其它的状态参数可以从这两个已知的状态参数出发, 按某些函数关系计算出来, 这样, 其它的状态参数也就有了确定的数值。例如, 已知系统的压力和比容这两个独立的状态参数的值, 那么系统的温度、内能、焓、熵的值

就可以通过一定的函数关系计算出来, 即

$$T=f_1(p, v)$$

$$u=f_2(p, v)$$

$$h=f_3(p, v)$$

$$s=f_4(p, v)$$

其中  $T=f_1(p, v)$  表示了三个基本参数  $T, p, v$  之间的关系, 这样的关系称为状态方程, 状态方程也可以写成如下隐函数的形式

$$F(p, v, T)=0 \quad (1-18)$$

式中:  $p, v, T$  分别为气体的压力、比容和温度。

在实践的基础上获得的理想气体的状态方程即克拉贝龙方程, 表明气体的压力与其绝对温度成正比, 与比容成反比。对 1 公斤气体, 状态方程为:

$$pv=RT \quad (1-19)$$

对于  $m$  公斤气体, 状态方程为:

$$pv=mRT \quad (1-20)$$

式中  $R$  称为气体常数, 它的数值取决于气体的性质, 它的单位为焦耳/公斤·度 ( $J/Kg \cdot K$ )。

例 (1-3) 氧气瓶中氧气 5Kg, 瓶的容积为  $0.05m^3$ , 求在室温  $27^\circ C$  时, 瓶内氧气的压力。已知氧气的  $R=259.8$ 。

解: 把氧气当作理想气体, 所以按式 (1-20) 得瓶内氧气的压力为:

$$p = 5 \times 259.8 \times (273 + 27) / 0.05 = 7.5 MPa$$

### 三. 参数坐标图

从状态方程可以看出, 气体在任一状态下, 只要知道三个参数中的任意两个, 就可以求出第三个。因此, 三个参数中只有两个是独立的参数。常用压力和比容作为独立参数, 将气体的状态在压容图上表示出来, 如图 1-5 所示。图上横座标表示比容  $v$ , 纵座标表示压力  $p$ , 平面坐标上的任意一点就对应于热力系的某一平衡状态, 如点 1 表示气体压力为  $p_1$ 、比容为  $v_1$  的状态。对于热力系的不平衡状态, 是无法在这样的坐标系中表示的, 因为热力系内各部分状态参数不一致。

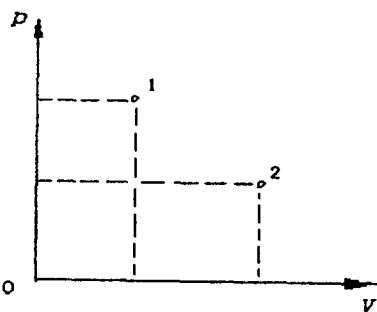


图 1-5 参数  $p-v$  坐标图

状态一经确定, 状态参数就具有确定的值, 在状态参数坐标图上也有一个确定的点与之对应。反之, 状态参数坐标图上一个确定的点表示状态参数已给出, 则系统的状态也就随之确定了。即, 状态参数、状态参数坐标图上的点与热力系统的状态是一一对应的。因此, 状态参数是热力系统状态的单值函数。状态参数只取决于状态, 而与达到这一状态的途径无关。状态参数的这一特性在数学上表现为: 它的微分是全微分, 而全微分沿闭合曲线的积分等于零。

例(1-4) 压缩空气瓶容积  $0.3\text{m}^3$ ，瓶内空气压力  $1\text{MPa}$ ，室温  $20^\circ\text{C}$ ，已知空气  $R=287.1\text{J/Kg}\cdot\text{K}$ ，求剩下的空气质量。若用去一部分空气后，瓶内气压降压  $0.9\text{MPa}$ ，求剩下的空气质量。

解：以  $p_1=1\text{MPa}=1\times 10^6\text{Pa}$ ， $T=273+20=293\text{K}$ ， $V=0.3\text{m}^3$  及  $R=287.1\text{J/Kg}\cdot\text{K}$  代入理想气体状态方程，得原有空气质量  $m_1$ ：

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT} = \frac{10^6 \times 0.3}{287 \times 293} = 3.56\text{kg}$$

当瓶内气体降至  $p_2=0.9\text{MPa}$  时，瓶内空气的质量  $m_2$ ：

$$m_2 = \frac{p_2 V}{RT} = \frac{0.9 \times 10^6 \times 0.3}{287 \times 293} = 3.2\text{kg}$$

#### 四. 过程和循环

热力系统在受到外界作用时，其状态在不断地变化。系统从某一状态变化到另一状态的过程，叫做气体的热力过程。若系统从某一状态开始，经过一系列中间状态后，又回到原来状态的封闭过程，则该封闭过程称为热力循环。热动力装置中热能和机械能的相互转换是通过工质的一系列变化过程或热力循环实现的。

热力系统从一平衡状态经过无数个中间的平衡状态连续地变化到另一平衡状态的过程，称为平衡过程。平衡过程在状态参数图上可以用一条连续的曲线来表示，如图(1-6)。

若热力系统从一平衡状态变化到另一平衡状态的过程，经过中间状态不全是平衡状态，则称为不平衡过程。

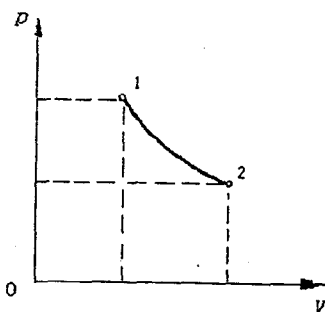


图1-6 平衡过程

#### 五. 强度量和外延量

按状态参数是否与系统的工质质量有关，可分为两类：强度量、外延量（广度量）。

与工质质量无关的参数称为强度量，如压力 $p$ 、温度 $T$ 、比容 $v$ 。这类参数不具有可加性，例如 $1\text{kg}$ 工质的压力为 $1\text{MPa}$ ，而 $2\text{kg}$ 状态相同，种类相同的工质的压力并不等于 $2\text{MPa}$ 。只有在平衡状态下，系统的强度参数才有确定的值。对于不平衡状态，系统内各处的强度量数值一般不相同，所以对于整个系统，强度量没有确定的数值。

与工质质量有关的参数称为外延量，如容积 $V$ 、总内能 $U$ 、总焓 $H$ 、总熵 $S$ 等。这类参数具有可加性，在系统中它的总量等于它在系统各部分中的分量之和。对于任意给定的平衡或不平衡热力系统，外延量都具有确定的数值。单位质量的外延量，具有强度量的性质，如果系统内工质的状态参数均匀一致，则系统的外延量除以系统的质量，即可得到系统的强度量。

## §1-4 气体的比热

## 一. 比热的定义

单位份量的气体, 在加热放或放热过程中, 温度升高或降低 1 度所需加入或放出热量称为气体的比热。

按照量度份量所采用的单位不同, 可以把比热分为质量比热、容积比热和摩尔比热。

质量比热 质量为 1 公斤的气体, 温度升高或降低 1 度所需加入或放出的热量称为气体的质量比热, 用符号  $C$  表示, 如果物质量的单位采用  $\text{kg}$ , 比热的符号用  $c$  表示, 则比热的定义式表示为:

$$C = \frac{dq}{dT} \quad (1-21)$$

比热  $C$  单位取决于热量的单位和物质量的单位。在 SI 单位制个, 热量的单位为焦耳 ( $\text{J}$ )。如果物质量的单位用千克 ( $\text{kg}$ ), 则相应的比热称为质量比热, 单位为  $\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 如果物质量的单位采用千摩尔 ( $\text{kmol}$ ), 单位取为  $\text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。对于气体, 有时物质量的单位采用标准立方米 ( $\text{Nm}^3$ ), 即以标准状态 ( $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $273.15 \text{ K}$ ) 下, 容积为  $1 \text{ m}^3$  的气体作为物质量的单位, 则相应的比热称为容积比热, 记为  $c'$ , 单位为  $\text{J} / \text{Nm}^3$ 。

## 二. 定容比热和定压比热

定容比热 1 公斤质量的气体, 在保持容积不变的条件下, 温度升高  $1^\circ\text{C}$  所需加入的热量称气体的定容比热, 用符号  $C_v$  表示, 单位为焦耳/公斤 $\cdot$ 度  $\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$ 。

定压比热 1 公斤质量的气体, 在保持压力不变的条件下, 温度升高 1 度所需加入的热量称气体的定压比热, 用符号单位与  $C_p$  相同。单位与  $C_v$  相同。

试比较等容加热和等加热的情况可知, 等容时所加的热量全部用来提高气体的温度; 而等压时所加的热量除了用来提高气体的温度处, 气体还要膨胀对外做功。可见若要使 1 公斤气体的温度同样升高  $1^\circ\text{C}$ , 则等压加热时所需加入的热量要比等容加热时多些。因而定压比热的数值要比定容比热大。

## 三. 影响比热的因素

对单原子气体来说, 要使其温度升高  $1^\circ\text{C}$ , 加入的热量, 只需用来增大分子的移动动能。对双原子气体, 要使其温度升高  $1^\circ\text{C}$ , 除不要加入与上述单原子气体所需的相同热量, 以增大分子和移动动能之外, 还要多加一部分热量以增大分子的转动动能。对于三原子以上的多原子气体, 要使其温度升高  $1^\circ\text{C}$ , 则需要加入更多的热量, 以增大分子的转动动能和原子的振动动能。由此可见, 双原子气体的比热大于单原子气体的比热, 三原子气体的比热大于双原子气体的比热。

此外还应指出, 即使原子数目相同, 但由于各种气体的分子量不同, 它们的质量比热是不同的。分子量小的气体, 质量比热大; 分子量大的气体, 质量比热小。

最后理想气体的比热还与温度有关; 温度升高时, 气体的比热变大。但对一般热工计算, 仅取平均值, 并可在有关手册中查取。

## 四. 比热比 (绝热指数)



气体的定压比热与定容比热的比值,叫做气体的绝热指数,用符号  $k$  表示,即:

$$k = C_p / C_v \quad (1-22)$$

在热力学和气体动力学计算中,绝热指数  $K$  是个重要的数值。绝热指数的数值取决于气体分子中所含的原子数和气体的温度。

气体分子中所含的原子数越多,绝热指数越小,在  $0^\circ\text{C}$  时单原子、双原子和三原子气体的绝热指数分别为:

单原子气体  $k=1.67$

双原子气体  $k=1.4$

三原子气体  $k=1.29$

空气是双原子气体,其绝热指数  $k=1.4$ ,燃气是双原子气体与三原子气体的混合物,其绝热指数  $k=1.33$ 。

绝热指数是随温度升高而减小,但减小的程度不大。可以认为,当温度变化不大时,绝热指数是个常数。

## 习 题

- 1-1 理想气体有些什么特征?
- 1-2 试述气体的连续性的概念。
- 1-3 什么叫做气体的压缩性?
- 1-4 什么叫做气体的粘性?
- 1-5 什么叫做工质的热力状态和状态参数?工质的基本状态参数有哪些?
- 1-6 什么叫做压力?什么叫做真空度?绝对压力和大气压力及表压三者的关系怎样?
- 1-7 什么是理想气体的状态方程?怎样用公式表示?
- 1-8 什么叫做气体的比热?试述定容比热和定压比热的定义。
- 1-9. 气象报告中说:某高压中心气压是1025百帕,它当于多少毫米汞柱?它比标准大气压力高多少百帕?
- 1-10 若压力计测得某容器内的气体压力为  $0.27\text{MPa}$ ,而此时气压计的读数为  $755\text{mm}\cdot\text{Hg}$ ,求绝对压力。又若气体的压力不变,而大气压力降至  $740\text{ mm}\cdot\text{Hg}$ ,向压力计上的读数变成多少?
- 1-11 用U型管压差计测量冷凝器内气体的压力,管内水银液面高度为  $720.6\text{mm}$ ,若当时当地的气压计读数为  $750\text{ mm}\cdot\text{Hg}$ ,求冷凝器内气体的绝对压力。
- 1-12 有一容积为  $0.5\text{ m}^3$  的气罐,内装氮气,压力表的指示为  $2.5\text{MPa}$ ,温度为  $25^\circ\text{C}$ ,今走了一些气体后,压力表指示为  $1.2\text{MPa}$ ,温度为  $10^\circ\text{C}$ 。设大气压力为  $0.1\text{MPa}$ ,问放走了多少氮气? ( $R=296.8\text{J/Kg}\cdot\text{K}$ )。