

高等学校试用教材

内燃机及其热工基础

大连理工大学 王俊金
太原重型机械学院 马元绍 主编
同济大学 高永源

机械工业出版社

31012003

TK4
15

高等学校试用教材

内燃机及其热工基础

大连理工大学 王俊金

太原重型机械学院 马元绍 主编

同济大学 高永源

UK11107



C0072901

机械工业出版社

51.5120

114
15

前 言

本书是根据高等工业学校“起重运输与工程机械专业教学指导委员会”提出的要求编写的。其要求是：让本专业的学生掌握内燃机及其热工基础的必要知识，应单独设课，并按50学时编写教材。

因此，本书将内燃机及其热工基础合编为一册。编写中，考虑了热工基础的系统性与易读性，并使它与内燃机紧密结合；注意了革新和精选内容，并使读者容易理解和掌握，为节省篇幅和学时，删去了热工基础中与内燃机关系不密切的水蒸气及其动力设备等内容。

书中量的符号、单位均采用国家标准。

本书除作为机械系统起重运输、工程机械等专业教材外，还可作为土建、港口、矿山及林业等专业相应课程的教材，同时，亦可供从事汽车、拖拉机或内燃机的工程技术人员及技术工人参阅。

本书由大连理工大学王俊金担任主编，太原重型机械学院马元绍、同济大学高永源担任副主编，吉林工业大学刘巽俊教授担任主审。大连理工大学 王 俊 金 编写绪论、2、3、5章，孙文策编写1、4章，太原重型机械学院马元绍编写6章，同济大学高永源编写7、8章。

大连理工大学于洪志教授、张久成和张志寿副教授等审阅过本书部分章节，特此致谢。因编者水平有限，书中不当之处，请大家批评指正。

编 者

1990年2月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一篇 热 工 基 础

第一章 理想气体的性质	3
§1-1 工质的热力状态及其基本状态参数	3
§1-2 理想气体的状态方程	6
§1-3 理想气体的比热容	7
§1-4 理想混合气体	9
思考题和习题	13
第二章 热力学基本定律	14
§2-1 闭口系统能量方程	14
§2-2 开口系统稳定流动能量方程	18
§2-3 热力学第二定律	23
思考题和习题	33
第三章 气体的热力过程	35
§3-1 气体的基本热力过程	35
§3-2 气体在喷管中的绝热流动	43
§3-3 气体的压缩过程	49
§3-4 气体的绝热节流	55
思考题和习题	56
第四章 传热学基本知识	58
§4-1 导热	58
§4-2 对流传热	62
§4-3 辐射传热	69
§4-4 传热过程与换热器	73
思考题和习题	79

第二篇 内 燃 机

第五章 内燃机的工作原理	84
§5-1 内燃机的实际循环	84
§5-2 内燃机的理想循环	89
§5-3 内燃机的性能指标	95
§5-4 内燃机的换气过程	100
§5-5 内燃机的混合气形成与燃烧过程	105
思考题与习题	126

第六章 内燃机构造	128
§6-1 曲柄连杆机构与机体组件	128
§6-2 配气机构	144
§6-3 柴油机的供给系	149
§6-4 汽油机的供给系	165
§6-5 汽油机的点火系	172
§6-6 内燃机的润滑系	177
§6-7 内燃机的冷却系	183
§6-8 内燃机的起动装置	188
思考题	194

第七章 内燃机特性、试验和选用	195
§7-1 内燃机的工况与特性	195
§7-2 内燃机的负荷特性	196
§7-3 内燃机的速度特性	198
§7-4 柴油机的调速特性	202
§7-5 内燃机的万有特性	204
§7-6 内燃机试验与测量	206
§7-7 内燃机的选用	209
思考题	213

第八章 柴油机废气涡轮增压	215
§8-1 概述	215
§8-2 涡轮增压器	216
§8-3 废气涡轮增压系统的选择	223
§8-4 增压柴油机的性能与结构变动	225
§8-5 涡轮增压器与柴油机的匹配	227
思考题	234

附录	235
附表一 常用气体的基本热力性质表	235
附表二 气体的平均定压比热容	235
附表三 空气的焓和内能	236
附表四 几种材料的密度、热导率和比热容	236
附表五 饱和水的物性参数	237
附表六 干空气的热物理性质 (101.3kPa)	238
附表七 油类的物性参数	239
附表八 常用材料的表面黑度	239
参考文献	240

绪 论

《内燃机及其热工基础》是论述内燃机及其理论基础的一本教材。内燃机广泛用于国民经济各部门，它是推动生产发展的动力。在能源短缺的今天，一切从事这方面工作的人员，都应了解和掌握内燃机及其能量利用知识，以便合理使用，正确管理和节约能源。

随着科学技术的发展，热机、制冷机和压气机获得了广泛的应用，是国民经济各部门不可缺少的设备。

热机是将燃料燃烧所放出的热能转变为机械能的动力机械。动力是国民经济发展的主要支柱。没有动力，就不能进行任何生产。热机的发明和发展是社会生产力发展的结果。而热机的发展又推动生产力的前进。1763年瓦特制成实用的蒸汽机而促成产业革命，推动资本主义生产大发展。1889年汽轮机的问世，奠定了电力工业发展的基础。

历来的发明都是劳动创造的结果。内燃机的创立也是人们劳动智慧和长期实践的产物。奥托于1877年制出实用的按等容燃烧的四冲程煤气机，因为笨重和煤气来源不易而无法推广。1885年德国人戴姆勒造出第一台汽油机，并于1886年用于汽车上，推动了运输业的发展。为研制使用廉价燃料的内燃机，1897年德国工程师狄塞尔研制出第一台柴油机。运输业发展要求大功率的内燃机，1905年瑞士制成了第一台船用二冲程柴油机。1925年瑞士工程师艾尔弗雷德·比希研制成废气涡轮增压器，1930年便广泛用于四冲程柴油机，1940年后在低速二冲程柴油机上普及，1960年后，由于增压技术的进步，出现许多中小型高速柴油机的系列产品。目前四、二冲程增压柴油机的功率可提高50%~200%和35%~150%。由于科技和生产的进一步发展，又出现了燃气轮机、喷气式发动机、火箭及核电站等。

热机中实现热能转变为机械能的物质称为工质。根据工质准备和燃料燃烧地点的不同，热机分为外燃机和内燃机两大类。内燃机以水蒸气为工质，如汽轮机，其燃料燃烧及工质准备是在机外的锅炉中进行，再将工质引入汽轮机中作功。汽轮机是回转式热机，是目前电厂的主要动力。内燃机的工质是空气或燃气，工质准备和燃料燃烧在机内气缸中完成，靠燃气膨胀而推动活塞往复运动而作功，如汽油机、柴油机等。因内燃机具有质量轻、体积小、热效率高（35%~50%）、功率范围广（0.6kW~3.5万kW）、起动迅速和操作简便等优点，故广泛地应用于国民经济和军事装备的各个领域。

柴油机具有工作可靠、经济性好、功率使用范围广等优点，因而广泛用作起重运输和工程机械的动力。由于应用增压技术，可大幅度提高柴油机功率，其经济性和排气污染也可得到明显的改善。因此，工程机械越来越多地采用增压柴油机作为动力。故本书只讨论动力机械中的内燃机，尤其是柴油机，并单列一章讨论柴油机的废气涡轮增压技术。

制冷机是实现热能从低温转移到高温的设备。它用于冷藏工业、空调技术、生产过程和劳动保护，有的工程机械和工程车辆也装有空调机，以改善其工作条件。因此，这部分内容

放在热工基础中作简要的讲述。

压气机是获得高压气体的设备。不仅在工业生产、施工工地、空调技术中广泛使用，而且在柴油机的增压和起动、内燃机的冷却和车辆制动系统中也是不可缺少的设备。故本书也把压气机放在热工基础中讨论。

热工设备包括热机、制冷机、压气机等等，其理论基础是工程热力学和传热学。工程热力学主要是研究热能与机械能相互转换的学科，传热学则是讨论热量传递的科学。因能量转换与传递并存于热工设备中，为了便于理解热工设备的工作原理，应先掌握工程热力学与传热学。故本书把工程热力学和传热学作为热工基础而列入第一篇，内燃机则归入第二篇。

第一篇 热 工 基 础

热工基础包括工程热力学和传热学。工程热力学是研究热能与机械能及其他形式的能量之间相互转变的规律的科学。内燃机是把热能转变成机械能的装置，因此工程热力学是内燃机的理论基础之一。传热学是研究热量传递的规律的科学。内燃机在工作中也存在大量的热量传递的问题。本篇第一至三章论述工程热力学的基本原理。第四章介绍传热学的基本概念和基本计算公式。

第一章 理想气体的性质

§1-1 工质的热力状态及其基本状态参数

一、热力系统、状态与过程

在热力学中，为了分析问题的方便，常把分析的对象从周围物体中分割出来，这种被人为分割出来的一定范围的研究对象在热力学中称为热力系统，简称系统，与系统有关的周围物体称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界，如图1-1的虚线所示。边界可以是实际存在的，也可以是假设的；可以是固定的，也可以是变动的。如图1-1a

所示，当取内燃机气缸中的燃气作为热力系统时，燃气和气缸壁之间的边界是固定不动的，而燃气和活塞之间的边界是随着活塞的运动而变动的。又如图1-1b所示，当取涡轮机中的气体作为热力系统时，气体和气缸之间的边界是实际的，而在进出口，系统的边界是假想的。

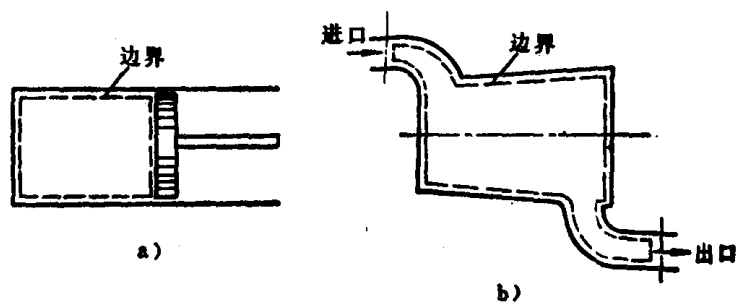


图1-1 热力系统

a) 闭口系统 b) 开口系统

按热力系统与外界进行质量和能量的交换情况，热力系统可分为

闭口系统：系统与外界无质量交换，系统里质量保持不变，如图1-1a所示。

开口系统：系统与外界有质量交换，系统内的质量可能发生变化，如图1-1b所示。

绝热系统：系统与外界无热量交换。

孤立系统：系统与外界既无质量交换又无能量交换。

绝对的绝热系统和孤立系统是不存在的。但根据系统的特点有时可以近似看成是绝热系统或孤立系统，这种简化常给分析研究带来很大方便。

在热机中，热能转变为机械能必须借助某种媒界物质，依靠它进行压缩、膨胀、吸热、

放热等过程来实现上述转变。这种实现热能转变为机械能的媒介物质称为工质。例如内燃机和燃气轮机中的燃气，汽轮机中的水蒸气都是工质。热机中的工质在实现热能与机械能的转变过程时，其宏观物理状况，随时在起变化。工质在某一瞬时所呈现的宏观物理状况称为工质的热力状态，简称状态。用来描述工质所处状态宏观物理量称为状态参数，如压力、比容、温度等。

一个热力系统在不外界影响的条件下，经过一定时间之后，其状态参数达到均匀一致的状态称为热力平衡状态，简称平衡状态。处于平衡状态的系统有一组唯一的参数。

系统在外界作用下，从某一状态变化到另一状态所经历的全部状态称为热力过程，简称过程。一切过程都是平衡被破坏的结果，实际过程都是不平衡的。不平衡过程是很难描述的，因此引入准平衡过程概念。如果一个过程，系统的状态在每一瞬时偏离平衡状态为无穷小，且能很快恢复平衡，则该系统所经历的过程是由一系列平衡状态所组成的，这样的过程称为准平衡过程，又称准静态过程。显然准平衡过程是进行得无限缓慢的过程，是一种理想化的过程。但是，在热机中工质进行的实际过程一般都可以近似地看成是准平衡过程。因为气体分子热运动的平均速度可达每秒百米以上，气体压力传播速度也达每秒数百米，因而气体的平衡被破坏后恢复平衡所需的时间非常短，而与工质接触的机器零件运动速度则慢得多，如高速内燃机的活塞的运动速度仅为每秒十余米，因此机器工作时工质的变化过程很接近准平衡过程。

工质通过其状态变化完成能量传递和转换，其规律可通过状态参数坐标图来研究，图1-2是以压力 p 和比容 v 为纵横坐标构成的 $p-v$ 坐标图。其它坐标图在后面陆续介绍。

准平衡过程可以在状态参数坐标图上用一条曲线来表示。如图1-2中曲线1-2表示一准平衡过程，如果系统由状态1'到2'的变化经历的的不是准平衡过程，则整个过程经历的状态无法确切地表示出来，习惯上用虚线示意地表示。

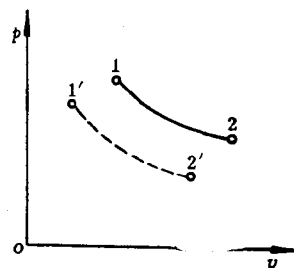


图1-2 热力过程

如果一个系统完成一个热力过程之后，能够使系统沿相同路线逆行回复到原态，并且使参与过程变化的外界也回复到原态，而不留下任何痕迹，这样的过程称为可逆过程。可逆过程和准平衡过程的区别在于：可逆过程不仅系统内部是平衡的，而且系统与外界的相互作用也是可逆的，也就是可逆过程必须要保持内、外力平衡与热平衡，是运动无摩擦、传热无温差的准平衡过程。可逆过程是实际过程的理想极限。下面我们讨论的主要是可逆过程。

二、工质的基本状态参数

在工程热力学中，常用的状态参数有：压力 p 、比容 v 、温度 T 、比内能 u 、比焓 h 、比熵 s 。其中压力、比容、温度可以直接测量，应用最多，称为基本状态参数。

(一) 压力

工质对容器壁单位面积作用的垂直力称为压力。按分子热运动学说，气体的压力是气体分子向容器壁面碰撞的平均结果。

在工程中，工质压力是用压力表（计）测量的，其测量值均指工质绝对压力 p 和环境大气压力 p_0 的差值，如图1-3所示。U型管压力计（图1-3a），两端液柱高度差表示工质和环境大气的压差。当绝对压力 p 高于环境大气压力值时，两者的差值称为表压力 p_r ，此时，绝对

压力按下式计算：

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

当环境大气压力高于绝对压力时，两者的差值称为真空度 p_v ，此时，绝对压力按下式计算：

$$p = p_0 - p_v \quad (1-2)$$

弹簧管式压力表（图1-3b）利用弹簧管在内外压差作用下产生的变形，从而拨动指针来指示工质与环境大气的压差。只有绝对压力才是气体的真实压力，才是气体的状态参数。本书中的压力未特别注明，均指绝对压力。各种压力的相对关系如图1-3c所示。

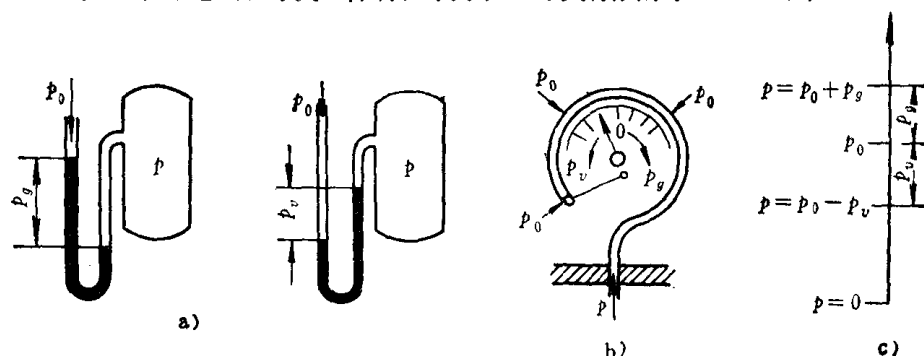


图1-3 压力的测量及表示

a) U型管压力计 b) 弹簧管压力表 c) 各种压力的相对关系

我国采用国际单位制，规定 p 的单位为Pa， $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$ 。此外，实践中广泛应用的压力单位还有毫米汞柱（ 0°C 时， $1\text{ mmHg} = 1.3332 \times 10^2\text{ Pa}$ ）以及毫米水柱（ 4°C 时， $1\text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{ Pa}$ ）。

(二) 比容

单位质量的工质所占有的体积称为比容，以符号 v 表示， v 的单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-3)$$

式中 m ——工质的质量， m 的单位为kg；

V ——工质的体积， V 的单位为 m^3 ；

单位体积工质的质量称为密度，以符号 ρ 表示， ρ 的单位为 kg/m^3 。密度和比容互为倒数，即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-4)$$

从微观意义上讲，密度和比容均为描述分子密集程度的物理量，取其一（常为 v ）作为状态参数。

(三) 温度

温度是物体冷热程度的标志。按分子运动学说，气体温度是气体分子平均移动动能的度量。衡量温度的标尺称为温标。在国际单位制中，温度测量采用热力学温标，其基本量是热力学温度，以 T 来表示， T 的单位为K。规定采用水的三相点温度为基本定点，并规定该点的热力学温度为 273.16 K 。热力学温度单位每1K为水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

与热力学温度并用的还有摄氏温度，以 t 来表示， t 的单位为 $^\circ\text{C}$ 。因规定摄氏零度等于 273.15 K ，故热力学温度与摄氏温度之间的关系为

$$t = T - 273.15\text{K}$$

一般工程计算可近似取

$$t = T - 273\text{K}$$

例1-1 某换热设备内压力低于大气压力。用U形管压力计测量,若用水银作测压液体,测得水银柱高为720.6mmHg。若当时当地大气压力 $p_0=750\text{mmHg}$,求该换热设备内的绝对压力为多少Pa?

解 根据式(1-2)

$$\begin{aligned} p &= p_0 - p_v = (750 - 720.6)\text{mmHg} = 29.4\text{mmHg} \\ &= 29.4 \times 133.32\text{Pa} = 3919.6\text{Pa} = 3.92\text{kPa} \end{aligned}$$

§1-2 理想气体的状态方程

假设组成气体的分子不占有体积,分子间又没有吸引力,这样的气体称为理想气体。理想气体实际上并不存在,但工程中的许多常用气体如 O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 CO 等及其混合物(例如空气、燃气等)在通常使用的温度、压力下都可以看成是理想气体。根据物理学中的分子运动论,1kg理想气体的压力、比容、温度之间有简单的关系,即

$$pv = RT \quad (1-5)$$

对于mkg理想气体,因为 $mv = V$,故

$$pV = mRT \quad (1-6)$$

上两式均为理想气体状态方程式。式中 R 称为气体常数,它仅与气体的种类有关,而与气体的状态无关, R 的单位为 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

由式(1-5)可知,对于一定量的气体,工质的状态只需由两个独立的状态参数所确定。

工程中还常常用千摩尔(kmol)为物质的单位。设某种物质的相对分子质量为 M_r ,则1kmol的这种物质,其质量为 M_r , M_r 的单位为 kg/kmol 。1kmol气体的体积称为千摩尔体积,用 V_m 表示,可知 $V_m = M_r v$ 。根据阿伏加德罗定律,在同温同压下,任何气体的千摩尔体积都相等,经测定在标准状态(0.101325MPa , 0°C)条件下,任何气体的千摩尔体积为

$$V_m = 22.4135\text{m}^3(\text{标准})/\text{kmol} \approx 22.4\text{m}^3(\text{标准})^\ominus/\text{kmol}$$

由于1kmol气体具有质量为 M_r ,根据式(1-6),则1kmol理想气体的状态方程式为

$$pM_r v = M_r RT$$

或

$$pV_m = M_r RT \quad (1-7)$$

由式(1-7)可得

$$M_r R = \frac{pV_m}{T}$$

根据阿伏加德罗定律,由上式可知,在同温同压下任何气体的 $M_r R$ 都相等,即与气体种类无关。又因为 M_r 和 R 都是与气体状态无关的量,所以 $M_r R$ 也与气体的状态无关。因此 $M_r R$ 是一个与气体的种类和状态无关的常数,称为通用气体常数 R_u , R_u 的单位为 $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。 R_u 的值可以由任选一种气体在任意状态下,将其 $p \cdot T \cdot V_m$ 代入上式求得。例如,以标准状态下

[⊖] 标准状态下的体积称为标准立方米,用 $\text{m}^3(\text{标准})$ 表示。

的各参数代入上式, 可得

$$R_u = M \cdot R = \frac{0.101325 \times 10^6 \times 22.4135}{273.15} \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)} = 8314.3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$$

由此, 各种理想气体的气体常数可由下式计算

$$R = \frac{R_u}{M_r} \quad (1-8)$$

常用气体的气体常数见附表一。

例1-2 压缩空气贮气罐的容积为 0.3m^3 , 罐内空气的压力 p_1 为 1MPa 。用去一部分压缩空气后, 罐内空气的压力 p_2 为 0.9MPa 。设室温为 20°C , 求罐内原有空气的质量 m_1 及用后剩下空气的质量 m_2 。

解 设空气是理想气体, 故可用理想气体状态方程计算。

(1) 由附表一查得空气的气体常数 $R = 287.1 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 又由题意 $T = (273 + 20)\text{K} = 293\text{K}$, $p_1 = 1\text{MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa}$, 则由式(1-6)贮气罐内原有空气的质量

$$m_1 = \frac{p_1 V}{RT} = \frac{1 \times 10^6 \times 0.3}{287.1 \times 293} \text{ kg} = 3.56 \text{ kg}$$

(2) 由式(1-6), 根据用气前后的状态可列出

$$p_1 V = m_1 RT; \quad p_2 V = m_2 RT$$

于是可得

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2}$$

故用气后罐内剩下的空气质量为

$$m_2 = m_1 \frac{p_2}{p_1} = 3.56 \times \frac{0.9 \times 10^6}{1 \times 10^6} \text{ kg} = 3.20 \text{ kg}$$

§1-3 理想气体的比热容

在热工计算中, 常常要确定系统和外界交换的热量, 而计算热量常常要用到热容或比热容。

一、比热容及其分类

根据物量单位的不同, 工质可以分为: 质量比热容 c (简称比热容)和摩尔热容 C_m (又称摩尔比热容)。

单位量的物质作单位温度变化时所吸收或放出的热量称为比热容。

比热容 c 的单位为 $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$; 摩尔热容 C_m 的单位为 $\text{J/(kmol} \cdot \text{K)}$ 。

显然, 两者之间有如下关系:

$$C_m = M \cdot c \quad (1-9)$$

热量是与过程有关的量, 即使过程的初、终态相同, 如果经历的路径不同, 工质吸收或放出的热量也不相同, 因此比热容也是与过程有关的量。工程中工质的吸热与放热常常在容积不变或压力不变的条件下进行, 故相应地有定容比热容和定压比热容。

对应前述两种比热容, 又有定压比热容 c_p , 定压摩尔热容 $C_{p,m}$; 定容比热容 c_v , 定容摩尔热容 $C_{v,m}$ 。

理想气体的定压比热容和定容比热容有如下重要关系:

$$c_p - c_v = R \quad (1-10)$$

上式称为迈耶公式 (详见 § 3-1, 二)。

二、比热容与温度的关系及热量的计算

气体的比热容还与状态有关。实验证明, 理想气体的比热容只是温度的函数。即

$$c = f(T) \quad (1-11)$$

一般理想气体的比热容随着温度的升高而增加, 如图1-4所示。根据比热容的定义, 气体在某个温度下的真实比热容可表示为

$$c = \frac{dQ'}{dT}$$

式中 dQ' 是在某一温度下, 1kg工质的温度增加一微小增量 dT 而吸收的微小热量。对应每一温度值都有一真实比热容。因摄氏与热力学两温标刻度相等, 即温度增温相等, 故上式也可表示为 $c = dQ'/dt$, 这说明在相同的温度增量下, 以热力学温标表示的比热容 (单位为 $J/(kg \cdot K)$) 和以摄氏温标表示的比热容 (单位为 $J/(kg \cdot ^\circ C)$) 是相等的 (参见附表二), 习惯上两者可以相通。

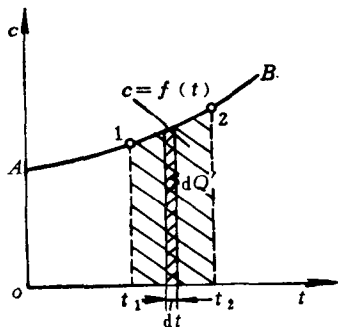


图1-4 比热容与温度的关系

应用比热容计算热量时, 可以通过对式 (1-11) 积分来计算1kg工质由 t_1 升至 t_2 所需要的热量

$$Q' = \int_1^2 c dt = \int_1^2 f(t) dt = \text{面积} 12t_2t_1$$

式中 Q' 的单位为 J/kg 。当已知式 (1-11) 的具体函数关系时, 可以由上式积分计算。比热容的具体函数关系式是由实验数据确定的经验公式, 例如 $c = a + bt + et^2$, 式中 a 、 b 、 e 为经验常数。

为了避免繁琐的积分运算, 可用平均比热容来计算热量。由图1-4可以看出, 1kg工质由 $t_1(^{\circ}C)$ 加热到 $t_2(^{\circ}C)$ 所需的热量 Q' 为

$$Q' = \text{面积} A2t_20A - \text{面积} A1t_10A = c_m \Big|_0^{t_2} t_2 - c_m \Big|_0^{t_1} t_1 \quad (1-12)$$

式中 $c_m \Big|_0^{t_2}$ 是从 $0(^{\circ}C)$ 到 $t_2(^{\circ}C)$ 的平均比热容, $c_m \Big|_0^{t_1}$ 是从 $0(^{\circ}C)$ 到 $t_1(^{\circ}C)$ 的平均比热容。工程中已将各种理想气体从 $0(^{\circ}C)$ 到各温度 $t(^{\circ}C)$ 的平均比热容制成表。常用气体的平均定压比热容 $c_{p,m} \Big|_0^t$ 见附表二。

当缺乏合适的比热容图表和公式, 而且计算不要求很精确, 温度变化又不太大时, 可以不考虑比热容随温度的变化, 即把比热容看成是一个常数。根据分子运动论, 理想气体的摩尔热容是一个仅与气体的原子个数有关, 而与气体的种类和温度无关的定值, 称为定值摩尔热容。理想气体定值摩尔热容见表1-1。

例1-3 空气以流量为 $400 m^3(\text{标准})/h$ 流过加热器, 在其中进行定压加热, 设进口温度为 $27^{\circ}C$, 出口温度为 $327^{\circ}C$, 求加热器对空气提供的热量。(1) 按定值比热容计算; (2) 按平均比热容表计算。

解 查附表一, 1kmol空气的质量为 $28.96 kg$, 体积为 $22.4 m^3(\text{标准})$ 。所以根据题意空气

的质量流量为

$$q_m = \frac{28.96 \times 400}{22.4} \text{ kg/h} = 517.14 \text{ kg/h}$$

表1-1 理想气体定值摩尔热容

项 目	单 原 子	双 原 子	多 原 子
$C_{p,m}/(\text{J} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1})$	5×4186.8	7×4186.8	9×4186.8
$C_{v,m}/(\text{J} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1})$	3×4186.8	5×4186.8	7×4186.8
$\kappa = C_{p,m}/C_{v,m}$	1.67	1.4	1.29

(1) 按定值比热容计算

空气可看成是双原子气体,由表1-1查得 $c_{p,m} = 7 \times 4186.8 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 根据式(1-9)求出空气的定压比热容为:

$$\begin{aligned} c_p &= \frac{C_{p,m}}{M} = \frac{7 \times 4186.8}{28.96} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ &= 1012 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 1.012 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{于是 } Q' &= c_p(t_2 - t_1) = 1.012 \times (327 - 27) \text{ kJ/kg} \\ &= 303.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

所以加热器对空气提供的热量

$$Q = q_m Q' = 517.14 \times 303.6 \text{ kJ/h} = 1.57 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

(2) 按平均比热容表计算

由附表二查得,空气在27℃及327℃时的平均定压比热容分别为: $c_{p,m} \Big|_0^{27} = 1.004 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 及 $c_{p,m} \Big|_0^{327} = 1.021 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。于是按式(1-11)

$$\begin{aligned} Q' &= c_{p,m} \Big|_0^{327} \times 327 - c_{p,m} \Big|_0^{27} \times 27 \\ &= (1.021 \times 327 - 1.004 \times 27) \text{ kJ/kg} = 306.76 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\text{所以 } Q = q_m Q' = 517.14 \times 306.76 \text{ kJ/h} = 1.586 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

这两种方法当然是查平均比热容表更为准确,因它考虑了比热随温度的变化关系,但本题在较低温度内变化,所以两种方法所得计算结果很接近。因此,气体一般在较低温度范围内用定值比热容计算也是比较准确的,在较高温度范围内用定值比热容则误差较大。此外,附表一还列出了在低压下各种气体的定值比热容,它们与表1-1很接近,亦可供查用。

§1-4 理想混合气体

理想气体组成的混合气体称为理想混合气体。工程中常用的气体工质多是混合气体。例如,空气、燃气都是由 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 等以及少量其他气体组成的混合气体。 N_2 、 O_2 、 CO_2 等在一般情况下都可看成是理想气体。水蒸气在密度很低或温度较高条件下也可以作为理想气体处理,因此空气、燃气都可作为理想混合气体处理。理想混合气体也具有理想气体的性质并服从理想气体的定律。此外,混合气体的性质还取决于组成气体的性质和成分。以下参数带下标*i*者是属于某组成气体,不带者是属混合气体。

一、分压力和分体积

(一) 分压力

若混合气体的某种组成气体单独占有混合气体整个体积 V ，并处于混合气体的温度 T ，这时它的压力 p_i 称为该种组成气体的分压力。由理想气体状态方程可以证明：理想混合气体的压力等于各组成气体分压力之和，即

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-13)$$

这称为道尔顿定律。

(二) 分体积

若混合气体的某种组成气体具有混合气体的压力 p 和温度 T 而单独存在，这时它的体积 V_i 称为该种组成气体的分体积。利用理想气体状态方程可以证明：理想混合气体的体积 V 等于各组成气体的分体积 V_i 之和，即

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-14)$$

这称为亚美格定律

二、混合气体的成分及其表示法

组成气体的含量与混合气体的总量的比值称为混合气体的成分。对于单一气体，只要知道两个独立的状态参数，它的状态就可确定。但对于混合气体，除了要知道两个独立状态参数外，还必须知道其成分才能确定它的状态。由于物量可以用质量、体积和千摩尔数（混合气体及其组成气体分别为 m, m_i, V, V_i, n, n_i ）表示，混合气体成分可以表示为质量分数 w_i 、体积分数 φ_i 和摩尔分数 x_i ，即

$$w_i = \frac{m_i}{m}$$

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V}$$

$$x_i = \frac{n_i}{n}$$

显然有

$$w_1 + w_2 + \cdots + w_n = \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$$

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_n = \sum_{i=1}^n x_i = 1$$

理想混合气体成分的各种表示法之间存在着一定的换算关系。由

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{m_i R_i T / p}{m R T / p} = \frac{m_i R_i}{m R} = \frac{n_i M_{e,i} R_i}{n M_{e,R} R} = \frac{n_i}{n}$$

得

$$\varphi_i = x_i \quad (1-15)$$

即各组成气体的体积分数和摩尔分数相等。另外质量分数和体积分数（或摩尔分数）之间也

存在关系, 由

$$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{n_i M_{r,i}}{n M_r}$$

得

$$w_i = x_i \frac{M_{r,i}}{M_r} = \varphi_i \frac{M_{r,i}}{M_r} \quad (1-16)$$

又

$$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{V_i \rho_i}{V \rho}$$

得

$$w_i = \varphi_i \frac{\rho_i}{\rho} = x_i \frac{\rho_i}{\rho} \quad (1-17)$$

式中 ρ_i 、 ρ 分别为某组成气体的密度和混合气体的密度。

三、理想混合气体参数的计算

(一) 理想混合气体的平均相对分子质量和气体常数

混合气体不能用一个化学分子式来表示, 因而没有真正的相对分子质量和气体常数。为了计算方便, 可以把混合气体假想成单一成分的气体, 计算出这种假想的单一气体的相对分子质量和气体常数, 就作为混合气体的平均相对分子质量和气体常数。

第 i 种气体的摩尔数为 $n_i = \frac{m_i}{M_{r,i}}$

于是混合气体总摩尔数 $n = \sum_{i=1}^n n_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_{r,i}}$

则混合气体的平均相对分子质量为

$$M_r = \frac{m}{n} = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_{r,i}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{M_{r,i}}} \quad (1-18)$$

这是已知混合气体质量分数计算平均分子量的公式。

又因 $m = n M_r = \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n n_i M_{r,i}$

得

$$M_r = \sum_{i=1}^n \varphi_i M_{r,i} \quad (1-19)$$

这是已知体积分数计算平均相对分子质量的公式。

理想混合气体的气体常数可以根据式 (1-8) 计算, 即

$$R = \frac{R_u}{M_r} = \frac{R_u}{\sum_{i=1}^n \varphi_i M_{r,i}} \quad (1-20)$$

或

$$R = \frac{R_u}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{M_{r,i}}} = M_{r,i} R_i \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{M_{r,i}} = \sum_{i=1}^n w_i R_i \quad (1-21)$$

可见, 混合气体的平均气体常数等于各组成气体的气体常数与相应质量分数之积的和。

(二) 混合气体的比热容

设混合气体及其组成气体的比热容为 c 和 $c_1, c_2, \dots, c_n$, 根据能量守恒定律, 混合气体温度升高 1K 所需要的热量等于各组成气体温度升高 1K 所需要的热量之和, 即

$$mc = m_1c_1 + m_2c_2 + \dots + m_nc_n = \sum_{i=1}^n m_i c_i$$

则

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} c_i = \sum_{i=1}^n w_i c_i \quad (1-22)$$

同理可得混合气体摩尔热容 C_m 及其组成气体摩尔热容 $C_{m1}, C_{m2}, \dots, C_{mn}$ 之间有:

$$C_m = \sum_{i=1}^n x_i C_{mi} = \sum_{i=1}^n \varphi_i C_{mi} \quad (1-23)$$

例1-4 设干空气中氧和氮的质量成分分别为: $w_{O_2}=23.29\%$, $w_{N_2}=76.71\%$ 。求: (1) 空气的平均相对分子质量和气体常数; (2) 空气的体积成分; (3) 各组成气体的分压力; (4) 空气的定压比热容。已知空气的压力为 100kPa , O_2 和 N_2 的相对分子质量分别为 32 和 28 。

解 (1) 空气的平均相对分子质量和气体常数

根据式 (1-18) 和式 (1-20) 可得:

$$M_r = \frac{1}{\frac{w_{N_2}}{M_{r,N_2}} + \frac{w_{O_2}}{M_{r,O_2}}} = \frac{1}{\frac{0.7671}{28} + \frac{0.2329}{32}} = 28.84$$

$$R = \frac{8314.3}{28.84} \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} = 288.3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

(2) 空气的体积成分

根据式 (1-16) 可得

$$\varphi_{O_2} = \frac{w_{O_2} M_r}{M_{r,O_2}} = \frac{0.2329 \times 28.84}{32} = 21\%$$

$$\varphi_{N_2} = \frac{w_{N_2} M_r}{M_{r,N_2}} = \frac{0.7671 \times 28.84}{28} = 79\%$$

(3) 各组成气体的分压力

根据混合气体压力和某组成气体分压力的定义可分别写出它们的理想气体状态方程式:

$$p_i V = m_i R_i T \quad \text{和} \quad pV = mRT$$

于是

$$\frac{p_i}{p} = \frac{m_i R_i}{mR} = \frac{n_i M_{r,i} R_i}{n M_r R} = \varphi_i$$

得

$$p_{O_2} = p\varphi_{O_2} = 100 \times 0.21 \text{ kPa} = 21 \text{ kPa}$$

$$p_{N_2} = p\varphi_{N_2} = 100 \times 0.79 \text{ kPa} = 79 \text{ kPa}$$

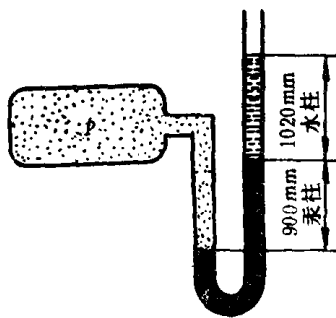
(4) 空气的比热容

根据式 (1-22) 和式 (1-9) 并利用表 1-1 可得

$$\begin{aligned}
 c_p &= w_{O_2} c_{pO_2} + w_{N_2} c_{pN_2} \\
 &= \left(0.2329 \frac{7 \times 4186.8}{32} + 0.7671 \frac{7 \times 4186.8}{28} \right) \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\
 &= 1016 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})
 \end{aligned}$$

思考题和习题

- 1-1 何谓平衡状态?
- 1-2 何谓准平衡过程?
- 1-3 何谓理想气体? 有何实际意义?
- 1-4 气体常数和通用气体常数有何联系和区别?
- 1-5 理想气体的比热容和一般物质的比热容有什么不同?
- 1-6 何谓理想混合气体的平均相对分子质量?
- 1-7 用U形管测量容器中气体的压力(见图1-7), 由于水银蒸气对人体有害, 故在水银液面上常注有一层水, 以防水银蒸气产生。测得水银柱高900mmHg(120kPa), 水柱高1020mm H_2O (10kPa), 当时大气压力为750mmHg(0.1MPa), 求容器中的气体压力。
- 1-8 已知 CO_2 的相对分子质量 $M_r = 44$, 求 (1) CO_2 的气体常数 R ; (2)标准状态下 CO_2 的比容和密度; (3)在 $p = 0.1 \text{MPa}$, $t = 500^\circ\text{C}$ 时 CO_2 的比容 v ; (4)上述状态下的千摩尔容积 V_m 。
- 1-9 室内一氧气瓶容积为25L, 压力表指出瓶内氧气的表压力为500kPa, 如果室温为 20°C , 大气压力为100kPa, 试求瓶内贮存的氧气质量。
- 1-10 用压缩空气开动内燃机时, 贮气罐内空气的压力从6MPa减至4MPa, 试确定开动内燃机所消耗的空气量。设贮气罐的容积为 0.07m^3 , 空气的温度为 27°C 。
- 1-11 以空气为工质的压气机每分钟从大气中($t = 17^\circ\text{C}$, $p = 100 \text{kPa}$)吸取 0.2m^3 的空气, 充入容积为 $V = 1 \text{m}^3$ 的贮气罐中。气罐中原有空气的温度为 $t_1 = 17^\circ\text{C}$, 表压力为50kPa, 问经过多少分钟才能使贮气罐中气体状态变为 $p_2 = 700 \text{kPa}$, $t_2 = 50^\circ\text{C}$?
- 1-12 氧气在容积为 0.5m^3 的容器中, 从 27°C 被加热到 327°C , 设加热前氧气压力为 0.6MPa , 求加热量; (1)按定值比热容计算; (2)按平均比热容表计算。
- 1-13 当空气在管道中流动时, 温度由 100°C 降低到 50°C , 忽略管道阻力, 试求每千克空气传给管壁的热量; (1)按定值比热容计算; (2)按平均比热容表计算。
- 1-14 某燃烧气体的质量成分为 $w_{O_2} = 0.12$, $w_{H_2O} = 0.03$, $w_{CO_2} = 0.07$, $w_{N_2} = 0.78$, 设比热容为定值, 求燃气的定值质量比热容。
- 1-15 收集到某内燃机的烟气 0.2kg , 经分析知其中含 $m_{CO_2} = 0.0316 \text{kg}$, $m_{O_2} = 0.0115 \text{kg}$, $m_{H_2O} = 0.0124 \text{kg}$ 其余为 m_{N_2} 。烟气中的水蒸气可以作为理想气体计算。求烟气的质量成分、容积成分、气体常数、平均相对分子质量以及在 $p = 100 \text{kPa}$, $t = 200^\circ\text{C}$ 时的容积。
- 1-16 已知天然气的容积成分 CH_4 (甲烷)=97% C_2H_6 (乙烷)=0.6% C_3H_8 (丙烷)=0.18% C_4H_{10} (丁烷)=0.19% $CO_2 = 0.2\%$ $N_2 = 1.83\%$, 求: (1)天然气在标准状态下的密度; (2)各组成气体在标准状态下的分压力。



题1-7 图