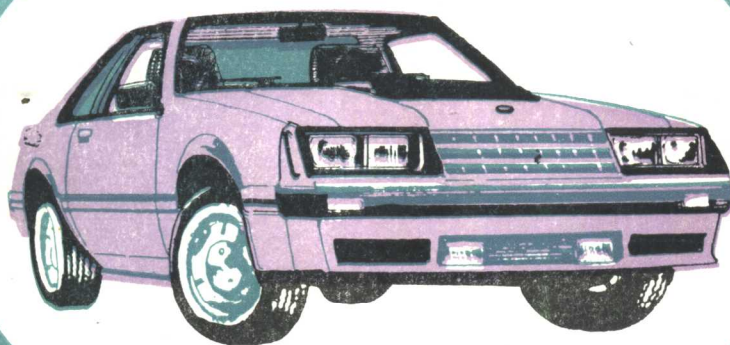


交通系统中等专业学校试用教材

发动机与汽车理论

(汽车运用与修理专业用)

杨玉如 编



人民交通出版社

U464
23

交通系统中等专业学校试用教材

Fadongji Yü Qiche Lilun

发 动 机 与 汽 车 理 论

(汽车运用与修理专业用)

杨 玉 如 编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书讲述汽车发动机工作过程的基本理论、汽车动力学和汽车的主要性能。全书共两篇十六章。第一篇为发动机理论,主要讲述工程热力学基础、发动机循环、发动机的性能指标、发动机的换气过程、混合气形成和燃烧过程、发动机特性、发动机试验等。第二篇为汽车理论,主要讲述汽车的动力性、制动性、燃料经济性、操纵稳定性、行驶平顺性、通过性等。

本书作为交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业的试用教材,亦可供从事汽车管理、使用、维修的技术人员参考。

交通系统中等专业学校试用教材

发动机与汽车理论

(汽车运用与修理专业用)

杨玉如 编

责任校对:梁秀清

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 17.75 字数: 440千

1988年6月 第1版

1988年6月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—40,010册 定价: 2.60元

前 言

本书是由交通部教育局组织编写的，并经交通系统中等专业学校机械类教材编委会审定作为“汽车运用与修理”专业的试用教材。本书是根据1983年北京会议制定的交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业（三年制）教学大纲编写的，又根据1986年济南会议制定的交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业（四年制）教学大纲进行了适当修改。

本书主要包括：工程热力学基础、发动机理论、汽车理论三个部分。

本书在编写过程中，注意了发动机理论与汽车理论的特点，又注意了它作为交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业的专业理论课教材的特点，加强了它的实践性。在教材内容中适当引入了实用性较强的国内外汽车技术发展新成果。本书的文字叙述力求简明易懂。

交通部济南交通学校汤朝模同志担任了本书的主审和责任编委。在本书编写过程中，还得到不少同志的热情帮助，在此一并表示衷心地谢意！

由于编者水平有限，经验不足，书中缺点和错误在所难免，欢迎使用本书的师生和其他方面的读者批评指正。

目 录

第一篇 发动机理论

第一章 工程热力学基础	1
第一节 气体的热力性质.....	1
第二节 热力学第一定律.....	8
第三节 基本热力过程.....	11
第四节 热力学第二定律.....	18
第二章 发动机循环	21
第一节 发动机的理想循环.....	21
第二节 发动机的实际循环.....	24
第三章 发动机性能指标	31
第一节 指示性能指标.....	31
第二节 有效性能指标.....	33
第三节 机械损失.....	35
第四节 发动机的热平衡.....	39
第四章 发动机的换气过程	41
第一节 四冲程发动机的换气过程.....	41
第二节 四冲程发动机的充气系数.....	43
第三节 影响充气系数的主要因素.....	46
第四节 提高充气系数的措施.....	48
第五节 单位时间充气量.....	51
第六节 多缸发动机新鲜充量的分配.....	51
第五章 燃料与燃烧	53
第一节 发动机燃料的一般知识.....	53
第二节 汽油的使用性能.....	55
第三节 柴油的使用性能.....	59
第四节 燃烧化学.....	61
第六章 汽油机的燃烧过程	68
第一节 概述.....	68
第二节 汽油机的正常燃烧过程.....	69
第三节 汽油机的不正常燃烧.....	72
第四节 影响燃烧过程的主要因素.....	75
第七章 柴油机的混合气形成与燃烧过程	85
第一节 柴油机的混合气形成.....	85

第二节	柴油机的燃烧过程	87
第三节	影响燃烧过程的主要因素	90
第四节	柴油机的燃烧室	93
第五节	发动机的排放污染	98
第八章	发动机特性	104
第一节	概述	104
第二节	汽油机特性	104
第三节	柴油机特性	110
第四节	发动机的万有特性	117
第五节	发动机的调整特性	118
第六节	发动机的功率标定及进气校正	122
第九章	发动机试验	127
第一节	发动机试验的种类与方法	127
第二节	发动机试验中的测量与设备	132
第三节	温度、压力、流量的测量	133
第四节	功率和转速的测量	139

第二篇 汽车理论

第十章	作用于汽车的各种外力	144
第一节	汽车的驱动力	144
第二节	汽车的行驶阻力	148
第三节	汽车的驱动力平衡方程	159
第四节	汽车行驶的驱动与附着条件	160
第十一章	汽车的动力性	167
第一节	汽车的动力性指标	167
第二节	汽车的驱动力—行驶阻力平衡图	167
第三节	汽车的动力特性	173
第四节	汽车的功率平衡	176
第五节	影响汽车动力性的主要因素	180
第六节	汽车动力性试验	189
第十二章	汽车的制动性	194
第一节	制动性的评价指标	194
第二节	汽车制动时车轮受力分析	194
第三节	制动效能及其恒定性	199
第四节	制动时汽车的方向稳定性	206
第五节	理想的前、后轮制动器制动力分配	210
第六节	具有固定比值的前、后轮制动器制动力及同步附着系数	214
第七节	影响汽车制动性的主要因素	216
第八节	汽车制动性试验	220

第十三章	汽车的燃料经济性	224
第一节	汽车燃料经济性的评价指标.....	224
第二节	汽车的燃料经济特性.....	226
第三节	影响汽车燃料经济性的主要因素.....	228
第四节	汽车的燃料经济性试验.....	232
第十四章	汽车的操纵稳定性	236
第一节	汽车的纵向和横向稳定性.....	236
第二节	汽车的转向特性.....	240
第三节	汽车转向轮的振动.....	248
第四节	前轮定位与转向轮的稳定效应.....	251
第五节	汽车操纵稳定性的道路试验.....	253
第十五章	汽车的行驶平顺性	258
第一节	汽车行驶平顺性的评价指标.....	258
第二节	汽车的振动.....	260
第三节	影响汽车行驶平顺性的主要因素.....	262
第四节	汽车行驶平顺性试验.....	264
第十六章	汽车的通过性	267
第一节	汽车通过性的几何参数.....	267
第二节	汽车通过性的支承与牵引参数.....	269
第三节	影响汽车通过性的主要因素.....	271
第四节	汽车通过性试验.....	273
参考文献		276

第一篇 发动机理论

发动机理论主要研究汽车发动机（内燃机）的工作过程，以性能指标为主线，分析影响各个工作过程的因素，从而找出提高发动机性能的一般规律和具体措施。

为了讲述发动机理论的需要，本篇首先介绍工程热力学基础知识，也介绍有关燃料与燃烧的一般知识，供选用。

第一章 工程热力学基础

本章扼要介绍学习发动机理论所必需的工程热力学基础知识，主要内容有：

- （1）研究常用工质（如空气、可燃混合气、燃烧产物等）的热力性质；
- （2）研究热力学基本定律：热力学第一定律、热力学第二定律；
- （3）研究基本热力过程，即工质在热力过程中的状态参量变化及能量交换关系。

工程热力学是热机的理论基础，是热力学的一个分支。它所讨论的中心是和热力工程有关的热能和机械能的相互转换，并侧重于热能转换为机械能的规律。它阐明并应用热力学两条基本定律，分析热力工程中有关的各种热力过程和热力循环，从理论上探讨提高热功转换的有效程度的途径。研究工质的热力性质也是它的重要内容之一。工程热力学采用宏观的研究方法。必要时，适当引用分子运动的微观理论说明热力现象的物理实质。

第一节 气体的热力性质

为便于讨论问题，在研究热功转换的基本规律之前，要建立一些必要的基本概念。本节从气体的状态出发，讨论气体的状态参数、气体状态方程式、理想混合气体及气体比热等内容。

一、基本概念

1. 工质

在发动机中，气体吸收燃料燃烧产生的热量，在膨胀过程中将部分热量转换为机械功。在工程热力学中，把实现热能与机械能相互转换的工作物质称为“工质”。通常热机中采用的工质几乎都是气体。这是因为气体具有良好的流动性和膨胀性，能够有效地作功，同时其热力性质也最简单。

2. 热力系统

在研究热功转换过程时，总是把某一宏观尺寸范围内的工质作为主要研究对象，称为热力系统，如气缸内的气体；而将热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体统称为“外界”，如气缸。对于外界一般只笼统地考察它们和热力系统间传递的热量和机械功。热力系统和外界之间的分界面称为“边界”。不仅实际的器壁可作为边界，也可根据需要在连续的

工质内部假设一个分界面作为边界。

3. 热力状态

在热机依靠工质将热能转换为机械能的过程中，工质本身也在不断地变化。在宏观上表现为气体的物理特性，如压力、温度等在不断变化。热力学中把工质所处的某种宏观状况称为工质的“热力状态”，简称“状态”。工质的状态常用一些物理量来描述。用于描述工质状态的物理量称为“状态参数”。例如比容、压力和温度三个可测的状态参数，称为基本状态参数。每一个状态参数都从某一方面描述气体的状态。

4. 平衡状态

许多物理现象表明，处在没有外界影响条件下的热力系统，经过一定时间后，将达到一个确定的状态，而不再有任何宏观变化。这种在不受外界影响的条件下，宏观性质不随时间变化的状态叫做平衡状态。这里所说没有外界影响，是指外界对系统既不作功也不传热。处于平衡状态的气体各部分均匀一致，每一个状态参数只有一个数值。气体的一个平衡状态对应有唯一的一组状态参数（如比容、压力和温度）。只要有一个状态参数发生了变化，就足以说明气体的状态发生了变化。今后我们所讲的状态都是指的平衡状态。

实际上完全不受外界影响、宏观性质绝对保持不变的系统是不存在的，平衡状态只是一个理想的概念。在许多实际问题中，可以把实际状态近似地当作平衡状态来处理。

5. 热力过程

当热力系统的状态随时间而变化时，我们就说系统经历了一个热力过程。热力学所研究的主要是准静态过程，在这种过程进行中的每一时刻，系统都处于平衡状态，即工质变化经过的所有状态都是平衡状态。准静态过程是一种无限缓慢进行的理想过程，在过程中系统和外界的温度与压力总保持着无限接近并且无摩擦阻力的影响。如图1-1，设有一个带活塞的气缸，里面贮有气体，活塞与气缸壁间无摩擦，控制外界压强，使它在每一时刻都比气体压强大一微小量，如此，气体就被缓慢地压缩。如果每压缩一步（气体体积减少一个微小量 ΔV ）所经过的时间都较长，足以使气体各部分的压强达到均匀一致，也就是在压缩过程中系统几乎随时接近平衡状态。这一压缩过程就是准静态过程。这种情形实际上不能完全实现，但可以使实际过程无限趋近。因为只有在平衡状态时，工质的状态才能用状态参数来描述，所以热力学主要研究准静态过程。通常都把实际过程当作准静态过程来处理，要求精度较高时，再对所得结果作一修正，以消除误差的影响。

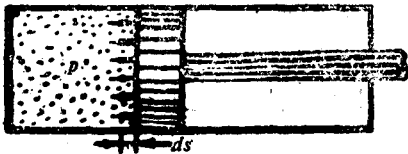


图1-1 气体的热力过程

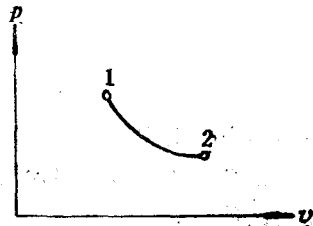


图1-2 $p-v$ 图

可逆过程：如果进行一个热力过程后，有可能沿原来过程逆向进行，使系统和外界都返回原状态而不留下任何变化，则这样的热力过程就称为可逆过程。可逆过程就是无摩擦的准静态过程。可逆过程只是实际过程的理想极限。

6. 压容图 ($p-v$ 图)

为研究热力过程的方便, 通常应用两个独立状态参数组成坐标图, 如图 1-2 所示为压力—比容坐标图, 简称压容图或 $p-v$ 图。理论证明只要有二个独立的状态参数就能确定气体的一个状态, 所以 $p-v$ 图上任意一点 1 (p_1, v_1) 即代表一个平衡状态, 任意一条曲线 1—2 就代表一个准静态过程。

二、基本状态参数

如前所述, 系统处于平衡状态时, 可以选用几个物理量来描述工质的状态, 称这些物理量为工质的状态参数。比容、压力和温度可以直接测得, 称为基本状态参数。下面对它们逐个进行介绍。

(一) 比容

单位质量的工质所占有的容积称为比容, 用符号 v 表示, 单位为 m^3/kg 。按定义有公式

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

式中: V ——工质的容积, m^3 ;

m ——工质的质量, kg 。

反之, 单位容积物质的质量称为密度, 用符号 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。按定义可得

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-2)$$

即密度的数值就是比容数值的倒数。

显然, 物质的比容 v 与密度 ρ 互为倒数。

(二) 压力 (压强)

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。气体的压力就是气体在单位面积容器壁上的垂直作用力。按气体分子运动学说, 气体压力的实质是大量分子对容器内壁碰撞的平均结果。因为分子热运动是无规则的, 所以当容器内气体没有宏观运动时, 气体本身的重量又可略去不计, 则在容器内任何位置任何方向上气体的压力都相同。压力的符号用 p 表示, 压力的单位是帕斯卡, 中文符号为帕, 国际符号为 Pa (N/m^2)。因为帕的单位很小, 所以工程中常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 作单位。

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

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

气体的压力也称为气体的绝对压力。如图 1-3 所示, 测量压力的仪表并不是直接测得气体的绝对压力, 而是测得气体的绝对压力和当时的大气压力 p_0 的差值。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, 则

$$p = p_0 + p_g$$

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, 它是绝对压力低于大气压力的数值, 用 p_v 表示, 则

$$p = p_0 - p_v$$

绝对压力与表压力和真空度的关系如图 1-4 所示。

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, 表压力和真空度也要发生变化。要注意, 只有绝对压力才能作为工质的状态参数, 它表示工质的真

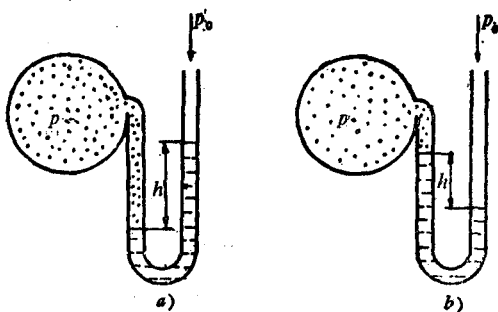


图1-3 液柱压力表和真空度

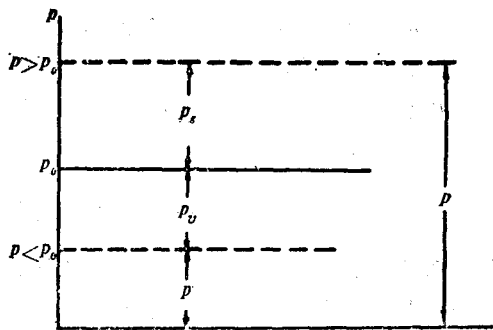


图1-4 绝对压力、表压力及真空度的相互关系

实状态。

(三)温度

在生活中，通常用温度表示物体的冷热程度。热的物体温度高，冷的物体温度低。冷热程度不同的两物体互相接触后，甲物体由热变冷，而乙物体由冷变热，这说明甲物体原来的温度较高，而乙物体原来的温度较低。经过一段时间后，两物体的状态都不再发生变化，这就表明两物体具有相同的温度。此种状态就叫做热平衡。对于两系统也是一样。因为处于热平衡的系统都具有相同的温度，所以温度是决定一系统与其他系统是否处于热平衡的宏观性质。

按分子运动学说，温度反映了组成系统的大量分子的无规则运动的剧烈程度，是分子运动能量的代表。气体分子运动的速度高，动能大，气体的温度就高。

为了表示温度的数值，需要有量度温度的标尺即温标。热力学温标，也叫开尔文温标，是国际单位制（SI）的基本单位。由热力学温标所确定的温度称为热力学温度，用符号 T 表示，单位为开尔文，简称开，国际符号为 K 。国际单位制规定，采用水的三相点温度，即水的固相（冰）、液相（水）和气相（水蒸汽）三相平衡共存的温度，作为定义热力学温标的单一固定点。并严格规定水的三相点温度为 $273.16K$ ，而热力学温度单位“ K ”为三相点温度的 $1/273.16$ 。

摄氏温标，由热力学温标导出。摄氏温标所确定的温度用 t 表示，摄氏温度与热力学温度的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (1-3)$$

这就是说，规定热力学温度 $273.15K$ 为摄氏温标的零点（ $t=0$ ）。摄氏温度的单位为摄氏度，写成 $^{\circ}C$ ；用摄氏度表示的温差也可以用开（ K ）表示。值得注意的是，摄氏温标的零点与冰点并不严格相等。即 $273.16K$ 相当于 $0.01^{\circ}C$ ， $0K$ 相当于 $-273.15^{\circ}C$ 。

在工程上为了简化计算，常把式(1-3)近似写为

$$t = T - 273 \quad (1-4)$$

要注意，只有热力学温度才是状态参数。

三、理想气体状态方程

(一)理想气体

在热力学计算中，通常把实际气体近似看做理想气体，其结果极其相似。所谓理想气

体，就是分子本身不占有体积，分子间又没有吸引力的气体。理想气体仅是一种理想的模型。但实验证明，当压力较低或温度较高时，一般气体的比容较大，分子间的距离比分子的直径大得多，因此，其分子间吸引力和分子本身的体积就可忽略不计，它的性质就比较接近理想气体。在发动机热力分析中，常把空气、燃气等都近似地看作理想气体。气体压力越低，越接近于理想气体。

(二)理想气体状态方程

在平衡状态下，理想气体的压力、温度和比容三者之间的关系式称为理想气体状态方程式。它是在实验的基础上，根据分子运动学说导出的。

对于1kg 理想气体，状态方程式为

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

对于 mkg 理想气体则为

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

式中：V = mv——mkg 气体的总容积。

R 为气体常数，它的数值决定于气体的性质，单位为 kJ/(kg·K)。各种气体的气体常数数值可在表(1-1)或有关手册中查得。

理想气体状态方程式给出了在某一状态下三个基本状态参数的关系，如果任意两个状态参数的数值一定，则第三个参数亦一定，即气体的状态可以确定。

常用气体的热力性质

表1-1

气 体	摩尔质量 M kg/kmol	气体常数 R kJ/(kg·K)	密 度 ρ_0 kg/m ³ (0°C 101325Pa)	定压比热 c_p kJ/(kg·K)	定容比热 c_v kJ/(kg·K)	比 热 比 k_0
He	4.003	2.077	0.179	5.234	3.153	1.667
Ar	39.94	0.2081	1.784	0.524	0.316	1.667
H ₂	2.016	4.1244	0.090	14.36	10.22	1.404
O ₂	32.000	0.2598	1.429	0.917	0.657	1.395
N ₂	28.016	0.2968	1.250	1.038	0.741	1.400
空气	28.97	0.2871	1.203	1.004	0.716	1.400
CO	28.011	0.2968	1.25	1.042	0.745	1.399
CO ₂	44.010	0.1889	1.977	0.850	0.661	1.285
H ₂ O	18.016	0.4615	0.804	1.863	1.402	1.329
CH ₄	16.04	0.5183	0.717	2.227	1.687	1.32
C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.260	1.721	1.427	1.208

(三)摩尔、通用气体常数、摩尔气体状态方程

1. 摩尔、摩尔质量

在热力学计算中，常用摩尔作单位计量气体的量。它是国际单位制的物质质量的单位，国际符号为 mol。按规定，如果气体中所包含的分子数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等时，该气体的量称为 1mol。在工程热力学中常采用千摩尔 (kmol) 为单位。1kmol 气体的质量称为千摩质量，其符号为 M，单位为 kg/kmol。按定义可知千摩质量的数值即等于分子量。例如氧气的分子量为 28，则其千摩质量 M = 28kg/kmol。

1kmol 气体所具有的容积称为千摩容积，用 V_m 表示。它的数值等于千摩质量乘以比容。根据阿佛加德罗定律：同温同压下，相同容积的任何气体都有相同数目的分子。因此，在同温同压下任何气体的千摩容积都相等。在物理标准状况，即 p₀ = 101.325kPa、t₀ = 0°C

的条件下, 各种气体的千摩容积均为

$$V_m = 22.4 \text{ 标准 m}^3/\text{kmol}$$

2. 通用气体常数、摩尔气体状态方程

试看引入千摩尔的概念以后, 状态方程式的变化。按式(1-5)可得出 1kmol 理想气体的状态方程式为

$$pMv = MRT$$

即

$$pV_m = R_m T \quad (1-7)$$

由上式可得 $R_m = MR = \frac{pV_m}{T}$

因为在相同的压力和温度下, 任何理想气体的 V_m 数值都相同, 故对于任何理想气体, R_m 的数值都相同, 并称为通用气体常数。 R_m 的数值, 可利用物理标准状况时的数值, 即 $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ 、 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 、 $V_m = 22.4 \text{ m}^3$, 代入上式求得,

$$R_m = 8.314, \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \quad (1-8)$$

显然, 某种气体的气体常数 R 可按式求得:

$$R = \frac{8.314}{M}, \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-9)$$

按照公式(1-7)可以得到 1kmol 理想气体的状态方程式

$$pV_m = 8.314T \quad (1-10)$$

及 $n \text{ kmol}$ 理想气体的状态方程式

$$pV = 8.314nT \quad (1-11)$$

由于以上两式中不包含任何与气体性质有关的量, 因而可用于各种理想气体的计算及分析。

理想气体状态方程式反映出了气体各状态参数之间的基本关系。在温度不太低, 压力不太高时, 按它计算得到的结果, 误差不大。加之公式简单, 便于计算, 所以它经常用于气体工质各状态参数的计算。

四、理想混合气体状态方程

发动机的工质通常都是由各种气体组成的混合气体。由各种理想气体组成的混合气体仍然是理想气体。在理想混合气体中, 各种组成气体互不影响地充满在整个容积中, 如同它们各自单独存在时一样。因而理想混合气体的性质实际上就是各组成气体性质的总和。有关理想气体的公式和定律对理想混合气体也都适用。在平衡状态下, 理想混合气体的状态方程式有如下的形式:

对于 $n \text{ kmol}$ 理想混合气体 $pV = nR_m T \quad (1-12)$

对于 1 kg 混合气体 $pv = R_{m,x} T \quad (1-13)$

式中: $R_{m,x}$ ——理想混合气体的气体常数。

为了正确进行理想混合气体的热力计算, 必须弄清混合气体与组成气体参数的关系, 并建立必要的概念。

1. 混合气体的千摩数值为各组成气体的千摩数值的总和, 即

$$n_{m,x} = n_1 + n_2 + \dots + n_n \quad (1-14)$$

2. 理想混合气体的压力等于各组成气体分压力的总和, 即

$$p_{mix} = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (1-15)$$

分压力 p_i 就是在混合气体中任意取第 i 种组成气体, 如果令它具有混合气体的温度与容积时所具有的压力。也可利用分压力写出任一种组成气体的状态方程

$$p_i V = n_i R_m T \quad (1-16)$$

要注意式(1-13)与(1-16)中压力 p 与 p_i 的区别。

3. 理想混合气体的容积等于各组成气体分容积之和, 即

$$V_{mix} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1-17)$$

分容积 V_i 就是在混合气体中任意取第 i 种气体, 如果令它具有混合气体的温度和压力时, 它所占有的容积。也可按分容积列出组成气体的状态方程式。

$$p V_i = n_i R_m T \quad (1-18)$$

4. 理想混合气体的折合分子量可用下式计算

$$M_{mix} = \frac{m_{mix}}{n_{mix}} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n_1 + n_2 + \dots + n_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (1-19)$$

式中: m_i ——组成气体的质量。

5. 理想混合气体的折合气体常数可由下式计算

$$R_{mix} = \frac{R_m}{M_{mix}} = \frac{8.314}{M_{mix}} \quad (1-20)$$

6. 理想混合气体的成分: 是指组成气体的质量 m_i 与混合气体总量 m 之比的百分数。

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

五、工质的比热

在热力工程中, 热量的计算常利用比热。工质的比热就是单位量的物质温度升高(或降低) 1K 时所吸收(或放出)的热量。用符号 c 表示。按定义

$$c = \frac{dq}{dT}$$

式中: dq ——单位量工质在准静态过程中温度变化 dT 时所吸收(或放出)的热量。

比热是物质的一个重要的热力学性质。气体比热的数值与气体的性质、热力过程的性质和加热时的状态等有关。

(一) 比热与物量单位的关系

因为工质的计量单位可用 kg、kmol、m³, 工质的比热有如下三种:

质量比热 c	kJ/(kg·K)
摩尔比热 C	kJ/(kmol·K)
容积比热 C'	kJ/(标 m ³ ·K)

(二) 比热与热力过程性质的关系

不同的加热和放热过程有不同的比热, 工程热力学中最常见的有两种:

定压比热 c_p ——工质在压力不变的条件下加热或放热时的比热;

定容比热 c_v ——工质在容积不变的条件下加热或放热时的比热。

同样由于工质计量单位的不同,又可分为定压质量比热 c_p [kJ/(kg·K)], 定压摩尔比热 C_p [kJ/(kmol·K)], 定压容积比热 C_p [kJ/(标 m³·K)], 以及定容质量比热 c_v [kJ/(kg·K)], 定容摩尔比热 C_v [kJ/(kmol·K)], 定容容积比热 C_v [kJ/(标 m³·K)]。

(三) 比热与加热时工质状态的关系

热力学中, 比热的数值是通过实验确定的。它是一个变化的物理量, 通常随温度的升高而增大。 $c = f(t)$ 曲线如图1-5所示。在不同的温度, 其比热的数值也不同。

真实比热是工质在每一温度下所对应的比热。气体在某一温度下的真实比热为:

$$c = \frac{dq}{dt}$$

式中: dq ——某温度下给1kg 气体所加入的微小热量;
 dt ——气体温度增量。

如果气体的温度从 t_1 上升到 t_2 , 则加给气体的热量为:

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$

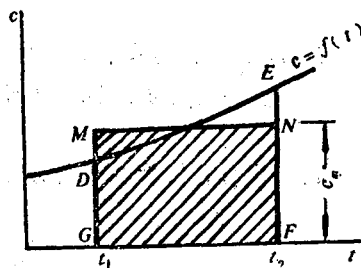


图1-5 真实比热与平均比热

在工程上为了简化计算常采用平均比热。它是指在一定温度范围内单位量工质所吸收或放出的热量与温度差的比值。以 $c_m|_{t_1}^{t_2}$ 为符号, 即

$$c_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}$$

由图1-5可知,

$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$ 相当于面积 $GDEFG$ = 面积 $GMNFG$ 的值, 矩形的高 GM 就是 $c_m|_{t_1}^{t_2}$ 。

则

$$q_{1-2} = c_m|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$$

需要指出的是, 工质的计量单位不同, 仅影响比热的表现形式, 真正影响比热大小的还是气体的种类、加热过程的条件和加热时的温度。

第二节 热力学第一定律

本节首先介绍热力系统和外界相互作用的两种方式: 做功和传递热量, 然后介绍热力学第一定律, 即能量转换与守恒定律应用于热现象的具体规律。根据它建立的能量方程是热力学分析和热工计算的基础。

一、功、热量、内能

(一) 功

观察图 1-6 所示气缸中气体组成的热力系统, 当气体膨胀推动活塞右移时, 则气体对外做功, 反之, 当活塞左移, 压缩气体时, 则外界对气体做功, 或称气体接受了外界的功。可见功是系统与外界间传递的能量, 它的全部效果表现为使物体改变宏观运动的状态。

在无摩擦的准静态过程中, 功的大小可用工质状态参数的函数表示。如图1-6所示系统, 设活塞面积为 A (m²), 缸内为1kg 气体, 受热膨胀过程中压力变化如过程曲线1—2, 活塞在

某一位置时气体的压力为 p ，则气体对活塞所作的功，可根据情况分别用下列公式计算。

设活塞移动微小距离 ds ，则 1kg 气体所作的微元功：

$$\begin{aligned} dw &= pAds & \text{因 } Ads = dv \text{ 则} \\ dw &= p dv \end{aligned} \quad (1-21)$$

在过程1—2中， 1kg 气体所作的功：

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-22)$$

$m\text{kg}$ 气体的总容积 $V = mv$ 时，它所作的功为：

$$W = mw = \int_{v_1}^{v_2} pm dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-23)$$

功的单位为焦耳，以 J 为符号， $1J = 1N \cdot m$ ，也常用 kJ 为单位。 1kg 工质作的功，其单位为 kJ/kg 。

根据积分原理可知，曲线下面所包围的面积，就代表 $\int_{v_1}^{v_2} p dV$ 这一积分的数值。因此，气体在这一过程中所作的功也能用曲线下面的面积来表示。

从功的计算可以看出，功不仅和初、终状态有关，而且和在初、终状态之间气体所经历的过程性质有关，所以功不是状态参数。而且也不能说系统在某一状态有多少功，只能说系统在某一过程对外作了多少功，或从外界得到了多少功。

热力学中规定：当 $dv > 0$ 时，工质对外界作的功，即膨胀功为正；当 $dv < 0$ 时气体对外界作的功为负，实质是外界对气体作了压缩功。

(二) 热量

实践中经常要应用热量的概念。当温度不同的两个物体接触时，热的物体要变冷，冷的物体要变热，最后达到热平衡，具有相同的温度 T 。对于这种现象，引入热量的概念就可以说：在这种过程中，有热量从高温物体传递给低温物体。

气体温度的高低代表了分子运动能量的大小，温度不同的两种气体接触时，它们的分子便在紊乱运动中互相碰撞，于是具有较大动能的分子便将能量传递给动能较小的分子。在固态物体间分子动能的传递也与此类似。所以热量是仅仅由于温度不同，在两物体间通过微观分子运动作用而传递的能量。

由于在热力学中热量是指传递的能量，所以无论对于系统或外界都不能说它们含有多少热量。热量和功一样是过程的函数。它们的区别在于前者是通过微观分子运动作用而传递的能量，后者则是通过宏观运动作用而传递的能量。

热力过程中的热量计算可以采用不同的方法，下面仅列出利用比热计算的方法。

1kg 气体的微元热量，当温度变化 dt 时

$$dq = c dt = f(t) dt \quad (1-24)$$

$t_1 \sim t_2$ 温差范围内的热量

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= \int_{t_1}^{t_2} dq = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \\ q_{1-2} &= \int_0^{t_2} f(t) dt - \int_0^{t_1} f(t) dt \end{aligned} \quad (1-25)$$

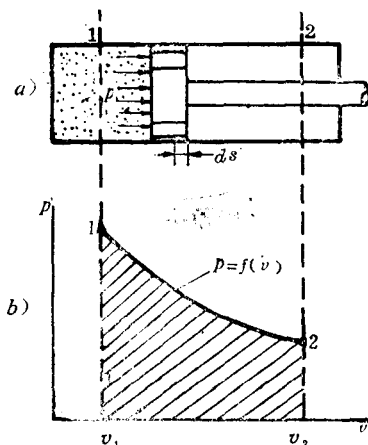


图1-6 气体在气缸中所作的功

$$q_{1-2} = c_m \Big|_0^{t_2} t_2 - c_m \Big|_0^{t_1} t_1 \quad (1-26)$$

式中的比热可根据不同的条件, 利用不同的比热。

在热力学中规定: 工质接收热量为正, 工质放出热量为负。在国际单位制中, 热量的单位为J, 也常用kJ。

(三) 内能

内能就是工质内部气体分子和原子运动的动能和分子间的位能的总和。气体内部动能包括分子移动动能、转动动能和原子的振动动能。它仅和气体的温度有关。温度升高时, 内部动能增大。分子间位能是由于气体分子间相互吸引而形成。它和气体的比容或压力有关。当气体的温度和比容一定时, 气体的内能便有确定的数值。所以内能也是气体的状态参数。

1kg 工质的内能用符号 u 表示, 单位用 kJ/kg。工质的质量增加时, 工质的内能也增加。 m kg 工质的总内能为

$$U = mu, \quad \text{kJ} \quad (1-27)$$

对于理想气体, 由于假设其分子间没有吸引力, 所以理想气体的内能仅指气体内部动能, 它是温度的单值函数。只要工质初终状态的温度 T_1 、 T_2 确定, 不论其间经过什么过程, 其内能的变化 Δu 都相等。

$$\Delta u = u_2 - u_1 = f(T_2) - f(T_1) \quad (1-28)$$

通常只需计算内能的变化值, 可以人为规定某状态的内能为零, 从而给出各种状态下内能的数值。常将其值列于气体热力性质表内, 供计算时查阅。

二、热力学第一定律

(一) 热力学第一定律的表述

人们通过长期的生产实践, 总结出了能量转换与守恒定律, 它指出各种能量可以相互转换, 但它们的总量不变。

热力学第一定律就是能量转换与守恒定律在热力学上的应用。在工程热力学中, 热力学第一定律可以表述为: 热和功可以相互转换, 转换前、后的能量保持不变。

假定 Q 表示转变为功的热量, W 表示转换过来的功, 热量和功的单位都用 kJ, 则热力学第一定律的数学表达式为

$$Q = W$$

热力学第一定律应用于任何热力系统, 其能量转换过程都必须遵循的公式: 输入系统的能量 = 系统贮存能量的变化 + 系统输出的能量

热力学第一定律的意义在于它告诉人们, 不消耗能量而可产生机械功的第一类永动机是不能制成的。

(二) 能量平衡方程式

在热力过程中, 能量平衡关系由能量平衡方程表示。

假设封闭在气缸中的工质为 1kg, 工质从状态 1 (p_1, v_1, T_1, u_1), 经历某一过程到达状态 2 (p_2, v_2, T_2, u_2), 过程中工质从外界吸收热量 q , 并对外做功 w 。此时工质与外界仅有能量交换, 没有物质交换, 系统内没有整体运动。根据能量转换与守恒定律, 系统内能、热量和功三者的转换必然遵守下列方程:

对 1kg 工质的微元过程