

汽车拖拉机内燃机原理

武汉工学院、河北工学院 编



中国农业机械出版社

高等院校试用教材

汽车拖拉机内燃机原理

武汉工学院
河北工学院 编

中国农业机械出版社

本书包括热工基础，内燃机基本工作过程、特性与调节，内燃机增压及内燃机试验等内容。

本书除作为汽车、拖拉机两专业的教材外，也可以作为工程机械、矿山机械、起重机械等专业相应课程的教学参考书，还可以供从事内燃机方面实际工作的科技人员、技术工人参考。

汽车拖拉机内燃机原理

武汉工学院 编
河北工学院

*

中国农业机械出版社出版
地质印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
新华书店经售

*

787×1092 16开 14印张 340千字

1981年3月北京第一版·1981年3月北京第一次印刷

印数：00,001—13,000 定价 1.50元

统一书号：15216·043

前 言

本书是根据 1978 年一机部在天津召开的高等院校对口专业教材会议拟订的出版计划和镇江会议、南宁会议制定的《汽车拖拉机内燃机原理》教学大纲编写的。在编写过程中，我们力图加强基础，革新教材内容，并注意精简，以适应专业教学的需要。主要包括：热工基础，内燃机基本工作过程、特性与调节，内燃机增压及内燃机试验等方面。书中采用国际单位制。为了方便读者，在附录（二）内列出各种单位制的换算。本书按授课 60 学时编写，但根据专业的具体要求在内容上可以有所取舍。

本书除作为汽车、拖拉机两专业的教材之外，还可以作为工程机械、矿山机械、起重机械等专业相应课程的教学参考书，也可供从事内燃机方面实际工作的科技人员、技术工人参考。

参加编写的有：武汉工学院赵亦斌同志编写第一章，王右君同志编写第二章，董敬同志编写第三、五、七章，庄志同志编写第八章，河北工学院朱世钰同志编写第四、六章及附录。主编是朱世钰同志和董敬同志。主审是华北农业机械化学院高阜同志和清华大学朱倩同志。

清华大学程宏教授对全书进行了审阅并提出许多修改意见，还有许多同志对本书的编写给予了很多帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，经验不足，书中缺点错误在所难免，欢迎广大读者给予批评指正。

常用符号表

A ——面积 cm^2 或 m^2	p_c ——压缩终点压力 kPa
功的热当量 $\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{m})$	p_e ——平均有效压力 kPa
a ——音速 m/s	p_f ——循环最高压力 kPa
c ——比热, 质量比热 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	p_i ——平均指示压力 kPa
c_m ——活塞平均速度 m/s	p_k ——扫气压力, 增压压力 kPa
c_p ——定压比热 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$	p_t ——升功率 kW/l
c_v ——定容比热 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	p_m ——平均机械损失压力 kPa
D ——汽缸直径 cm	p_r ——排气终了压力 kPa
E ——分子反应活化能 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{mol})$	p_w ——饱和蒸气压力 kPa
e ——自然对数的底	Q ——热量 J
f ——频率 $1/\text{s}$	Q_{mix} ——混合气热值 kJ/mol 或 kJ/kg
G_s ——比重量 kg/kW	q ——单位质量热量 J/kg
G_T ——每小时耗油量 kg/h	R ——气体常数 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
g_s ——有效燃料消耗率 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	S ——熵 J/K
g_t ——指示燃料消耗率 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	活塞行程 cm
H ——焓 J	s ——单位质量的熵 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
h ——单位质量的焓 J/kg	T ——绝对温度 K
h_n ——燃料低热值 kJ/kg	T_0 ——大气温度 K
i ——汽缸数	T_a ——进气终点温度 K
K ——适应性系数	T_b ——膨胀终点温度 K
k ——绝热指数	T_c ——压缩终点温度 K
L_0 ——理论空气量 kg/kg 或 mol/kg , m^3/kg	T_f ——循环最高温度 K
M_e ——有效扭矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	T_r ——排气终点温度 K
m ——质量 kg	U ——内能 J
m_T ——燃料分子量	u ——单位质量的内能 J/kg
n ——多变指数	V ——容积 m^3
发动机转速 rpm	V_h ——汽缸工作容积 m^3 或 l
n_1 ——压缩多变指数	V_c ——压缩容积 cm^3
n_2 ——膨胀多变指数	V_h ——燃烧室容积 cm^3
P_i ——指示功率 kW	v ——比容 m^3/kg
P_k ——压缩机功率 W	流速 m/s
P_m ——机械损失功率 kW	W ——功 J
P_s ——有效功率 kW	W_i ——指示功 J
P_T ——涡轮机功率 W	w ——单位质量的功 J/kg
p_0 ——大气压力 kPa	Z ——马赫数
p_a ——进气终点压力 kPa	α ——过量空气系数
p_b ——膨胀终点压力 kPa	δ ——后期膨胀比

ε ——压缩比	λ ——压力升高比
η_{ad-k} ——压缩机绝热压缩效率	τ ——行程数
η_e ——有效热效率	τ_i ——着火延迟期 ms
η_i ——指示热效率	ψ ——冲程损失百分比
η_m ——机械效率	φ ——曲柄转角 deg
η_s ——扫气效率	φ_0 ——过量扫气系数
η_T ——涡轮机效率	μ ——扭矩储备系数, 分子量
η_t ——热效率	μ_0 ——分子变更系数
η_v ——充气系数	ρ ——密度 kg/m ³
θ ——点火提前角, 喷油提前角 deg	ρ ——预胀比

目 录

第一章 工程热力学基础	1	§ 5-3 混合气形成及燃烧室	111
§ 1-1 气体的热力性质	1	§ 5-4 运转因素对燃烧过程的影响	125
§ 1-2 热力学第一定律	11	第六章 汽油机的燃烧过程	129
§ 1-3 气体热力过程	20	§ 6-1 燃烧过程的进行	129
§ 1-4 热力学第二定律	29	§ 6-2 影响燃烧过程的因素	132
§ 1-5 内燃机理想循环	34	§ 6-3 内燃机排气污染与防止措施	140
第二章 内燃机性能指标	40	第七章 内燃机的特性	148
§ 2-1 四行程内燃机实际循环	40	§ 7-1 内燃机的工况	148
§ 2-2 指示指标	45	§ 7-2 内燃机负荷特性	149
§ 2-3 有效指标	47	§ 7-3 内燃机的速度特性	152
§ 2-4 机械损失	50	§ 7-4 调速特性	159
§ 2-5 内燃机热平衡	55	§ 7-5 万有特性	165
第三章 内燃机换气过程	57	§ 7-6 内燃机的功率标定及大气修正	168
§ 3-1 四行程内燃机的换气过程	57	第八章 车用柴油机的废气涡轮增压	171
§ 3-2 四行程内燃机的充气系数	60	§ 8-1 概述	171
§ 3-3 减小进气系统的阻力	65	§ 8-2 废气涡轮增压器的工作原理	173
§ 3-4 合理选择配气定时	66	§ 8-3 废气能量的利用	181
§ 3-5 进、排气管的动态效应	68	§ 8-4 增压内燃机的特点	184
§ 3-6 单位时间充气量	71	§ 8-5 废气涡轮增压器与车用柴油机联 合工作	187
§ 3-7 多缸内燃机新鲜充量的分配	72	附录一 内燃机试验及试验设备	195
§ 3-8 二行程内燃机的换气	74	§ 附 1-1 内燃机试验及试验台	195
第四章 燃料及燃烧	79	§ 附 1-2 温度的测量	197
§ 4-1 石油液体燃料	79	§ 附 1-3 压力的测量	201
§ 4-2 汽油的使用性能	81	§ 附 1-4 流体流量的测量	203
§ 4-3 柴油的使用性能	84	§ 附 1-5 功率的测量	207
§ 4-4 燃烧热化学	86	§ 附 1-6 转速的测量	215
§ 4-5 燃烧理论概述	90	附录二 国际单位制与各种单位的换 算	217
第五章 柴油机混合气形成和燃烧	96		
§ 5-1 柴油机的燃烧过程	96		
§ 5-2 燃油喷射与雾化	102		

第一章 工程热力学基础

本章就学习内燃机基本理论所必需的热力学知识做一扼要的叙述,其主要内容是:

1. 研究常用工质(主要是空气、可燃气体和燃烧产物等气体)的热力性质;
2. 研究热能和机械能之间相互转换的规律,热力学第一定律、第二定律;
3. 研究工质的热力状态变化过程、基本热力参数之间的关系和变化;
4. 研究内燃机理想循环,从而探讨提高内燃机性能指标、提高热效率的方法和途径,为学习内燃机原理提供必要的理论基础和计算方法。

§ 1-1 气体的热力性质

一、气体的热力状态及其基本状态参数

在内燃机中,热能向机械能的转换是通过气体状态的变化来实现的。在气缸内,气体不断经历着压缩、吸热、膨胀、放热等热力过程,气体热运动情况在不断变化,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。即气体的热力状态在不断变化。我们把描述气体热力状态的物理量称为状态参数,每一个状态参数都是从某一方面来描写气体所处的状态。在工程热力学中,常用的状态参数有六个,即;

压力 p ; 比容 v ; 温度 T ; 内能 u ; 焓 h ; 熵 s ;

在这六个状态参数中, T 、 p 、 v 可以直接测量,应用最多,称为基本状态参数。

(一) 温度 T

温度表示气体的冷热程度,也是气体分子热运动的强弱程度。温度与大量分子平均移动能的大小成正比。

热力学温度单位——开尔文是国际单位制(SI)的基本单位。其定义是:热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$,同时也规定了用单位开尔文及其代号 K 表示温度间隔或温差。

除以开尔文表示热力学温度(以字母 T 表示)外,也使用由式:

$$t = T - T_0$$

即

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

所定义的摄氏温度(以字母 t 表示)。

式中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$, 即水的冰点的热力学温度。水的三相点的热力学温度比其冰点高 0.01 K 。

摄氏温度用“摄氏度”代号 $^{\circ}\text{C}$ 表示,“摄氏度”这一单位与“开尔文”相等,而且摄氏温度间隔或温差可用摄氏度表示,也可以用开尔文表示。只是摄氏温度的零点,比热力学温度开尔文的零点高 273.15 K 。

在这里要特别指出,只有热力学温度开尔文(也称绝对温度)才是状态参数。

(二) 压力 p

气体对单位面积容器壁面的垂直作用力称为压力。以字母 p 表示。一定容积内气体压力

的实质是气体大量分子在紊乱的热运动中对容器壁面频繁撞击的平均效果。压力的单位是帕斯卡[代号 Pa(N/m²)]。因为这一单位太小,一般用千帕(代号 kPa)或兆帕(代号 MPa)。

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

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

在工程实际中,暂时允许使用的其他压力单位还有标准大气压(代号 atm)和巴(代号 bar)。

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

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

压力的其他各种单位及其换算关系见附录二。

气体的压力通常是使用压力计或真空计来测量的。如图 1-1 所示。因为压力计本身都处在大气压力的作用之下,所以压力计的读数都是被测气体的压力与外界大气压力的差值,称表压力,用字母 $p_{\text{表}}$ 表示。如果气体的绝对压力以 $p_{\text{绝}}$ 表示,大气压力以字母 p_0 表示,则有:

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_0$$

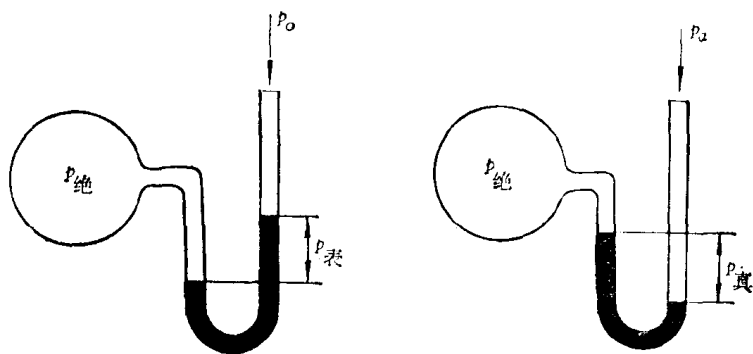


图 1-1 表压力和真空度

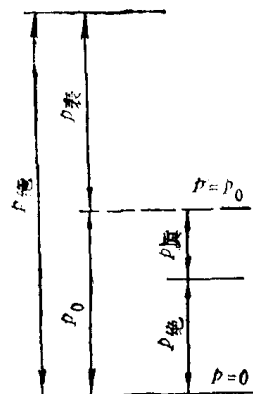


图 1-2 绝对压力与相对压力的关系

如果气体的绝对压力低于外界大气压时,其表压力是真空度,以字母 $p_{\text{真}}$ 表示。则:

$$p_{\text{真}} = p_0 - p_{\text{绝}}$$

即

$$p_{\text{绝}} = p_0 - p_{\text{真}}$$

表压力、真空度称为相对压力。而通常所说气体状态参数的压力是指其绝对压力。它们之间的关系如图 1-2 所示。

(三) 比容 v

气体的比容是 1 千克气体所占有的容积,以字母 v 表示,其单位是 m³/kg。

$$v = \frac{V}{m} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

式中 V ——mkg 气体总容积 [m³];

m ——气体质量 [kg]。

反之,单位容积气体的质量称为密度,以字母 ρ 表示,其单位是 kg/m³。

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [\text{kg/m}^3]$$

显然, 气体的比容 v 与密度 ρ 互为倒数。

二、工质及其平衡态、热力系、热力过程

(一) 工质及其平衡态

1. 工质

在内燃机中, 燃料在燃烧中产生的热能, 在膨胀过程中转换为机械能。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”。内燃机的工质是空气和燃气。通常一切热机中采用的工质都是气体。这是因为气体具有最好的流动性和膨胀性, 便于迅速引进热机, 作功以后又能迅速排出热机, 在相同的压差或温差下, 其膨胀比最大, 因而能够更有效地做功。同时气体的热力性质最简单, 可以简化为理想气体。

2. 气体的平衡状态

平衡状态包括热平衡和力平衡两个方面。即气体的各部分的温度和压力处处相等不随时间而变化, 它是气体在没有外界作用的情况下可以长久保持的状态。这时气体各部分的状态均匀一致, 每一状态参数只有一个数值。气体的一个平衡状态对应有一组唯一的的状态参数(如 p 、 v 、 T 等)。只要知道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。同时, 只要知道了两个独立的状态参数(如压力 p 和温度 T)就足以确定工质所处的状态, 这时其余所有的状态参数都可以通过这两个已知的独立的状态参数计算确定。今后我们所讲的状态都是指的平衡状态。

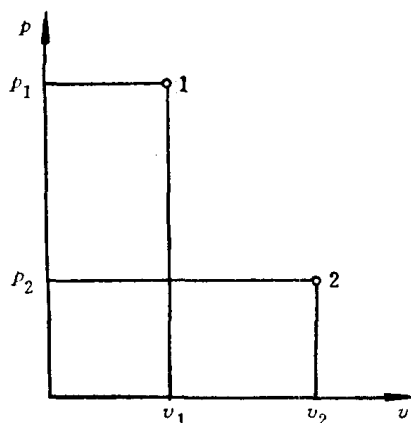


图 1-3 平衡状态

气体的平衡状态既然可以由两个独立的状态参数来确定, 那么由任意两个独立的状态参数所组成的平面直角坐标系上的任意一点都相应于气体的某一平衡状态。如压力 p 与比容 v 组成的坐标图——简称压容图, 见图 1-3。其中 1 点、2 点分别代表 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态。

(二) 热力系统

在内燃机中, 能量的转换是通过工质在气缸内的状态变化来实现的。在热力学中规定把某一宏观尺寸范围内的工质定作研究的对象——“热力系统”, 简称热力系。而把包围工质的物体(如气缸)称为“外界”。

它们之间有“分界面”, 根据分界面上质量和能量交换的情况, 热力系统主要分为:

1. 开口系统: 和外界有质量交换的系统;
2. 闭口系统: 和外界无质量交换的系统。

和外界既无质量交换又无能量交换的系统被称为孤立系统, 它是闭口系统的特例。凡和外界无热量交换的系统又统称为绝热系统。

(三) 热力过程

热力过程是指系统在外界条件作用下从某一状态变化到另一状态所经历的全部状态的总和。热力过程种类很多, 这里先介绍平衡过程和可逆过程。

平衡过程即系统从一个平衡状态连续经过无数个平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态

的热力过程。平衡过程在压容图上可用一条连续的曲线来表示，如图 1-4 中的曲线 1-2。在平衡过程中系统随时与外界保持热平衡，即热量的传递是在没有温差的条件下进行的，它是实际过程的近似描写。

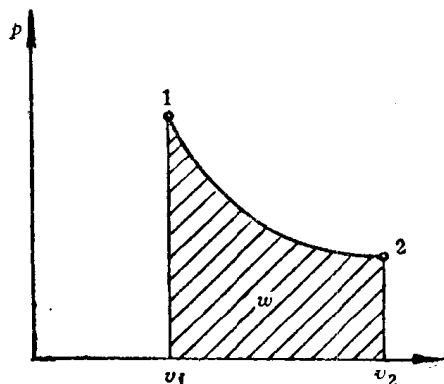


图 1-4 可逆过程

可逆过程：假设系统经历平衡过程 1-2 由状态 1 变化到状态 2，并对外作膨胀功 w ，见图 1-4。如果外界给以同样大小的压缩功 w 使系统从状态 2 反向循着原来的过程曲线经历完全相同的中间状态回复到原来的状态 1，外界也回复到原来的状态，既没有得到功，也没有消耗功，这样的平衡过程称为可逆过程。

只有无摩擦、无温差的平衡过程才有可逆性，即可逆过程就是无摩擦、无温差的平衡过程。

可逆过程是没有任何损失的理想过程，实际的热力过程既不可能是绝对的平衡过程，又不可避免地会有摩擦。因此，可逆过程是实际过程的理想极限。今后我们所讨论的主要是可逆过程。

三、理想气体状态方程

所谓理想气体就是假设在气体内部其分子不占有体积，分子间又没有吸引力，这样的气体称为理想气体。在热力计算和分析中，常常把空气、燃气、烟气等气体都近似地看作理想气体。因气体分子之间的平均距离通常要比液体和固体的大得多，所以，气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多；气体分子之间的相互吸引力也很小。通常把实际气体近似地看作理想气体来进行各种热力计算，其结果极其相似。所以对理想气体性质的研究在理论上和实际上都是很重要的。

理想气体的三个基本状态参数 p 、 v 、 T 之间有内在的联系。通过分子运动论，对于 1 千克理想气体可以导出如下关系：

$$\frac{pv}{T} = R$$

或

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

即理想气体每一状态下的绝对压力和比容的乘积除以绝对温度其商是一个常数，称为该理想气体的“气体常数”，以字母 R 表示。式 1-1 称为理想气体状态方程式，又称为克拉贝隆方程式。

对 m 千克理想气体则有：

$$p(mv) = mRT$$

即

$$pV = mRT \quad (1-2)$$

式中 $V = mv$ —— m 千克气体的总容积 [m^3]。

理想气体状态方程式的重要意义在于，它指出了在某一状态下，理想气体的三个基本状态参数 p 、 v 、 T 不是互不相关，而是有内在联系的，只要知道其中的两个就可以通过该方程式求得第三个。它证明了前面提到的这一事实：即只要知道气体的两个独立的状态参数就足以确定工质的一个状态。

气体常数 R 的单位可由式 1-1 导出：

$$R = \frac{[p][v]}{[T]} = \frac{[N/m^2] \cdot [m^3/kg]}{[K]} = \left[\frac{N \cdot m}{kg \cdot K} \right] = [J/(kg \cdot K)]$$

不同的气体有其固有的气体常数 R 值，它只与气体的种类有关。见表 1-1。

表 1-1 部分理想气体在 0 °C 时的比热和摩尔比热、摩尔质量和气体常数

	c_p [kJ/(kg·K)]	c_v [kJ/(kg·K)]	C_p [kJ/(kmol·K)]	C_v [kJ/(kmol·K)]	摩尔质量 M [kg/kmol]	气体常数 R [kJ/(kg·K)]	绝热指数 $k = c_p/c_v$
He	5.2377	3.1605	20.9644	12.6501	4.0026	2.0772	1.66
Ar	0.5203	0.3122	20.7858	12.4715	39.948	0.2081	1.66
H ₂	14.2003	10.0754	28.6228	20.3085	2.01565	4.1249	1.409
N ₂	1.0389	0.7421	29.0967	20.7824	28.006148	0.2969	1.400
O ₂	0.9150	0.6551	29.2722	20.9579	31.98983	0.2598	1.397
空气	1.0043	0.7171	29.0743	20.7600	28.95	0.2872	1.400
CO	1.0403	0.7433	29.1242	20.8099	27.994915	0.2970	1.400
NO	0.9983	0.7211	29.9464	21.6321	29.997989	0.2772	1.384
HCl	0.7997	0.5717	29.1601	20.8458	36.464825	0.2280	1.40
CO ₂	0.8169	0.6279	35.3336	27.6193	48.98983	0.1890	1.301
N ₂ O	0.8507	0.6618	37.4326	29.1183	44.001063	0.1890	1.285
SO ₂	0.6092	0.4792	38.9666	30.6523	63.962185	0.1300	1.271
NH ₃	2.0557	1.5674	35.0018	26.6875	17.026549	0.4883	1.312
C ₂ H ₂	1.5127	1.1931	39.3536	31.0393	26.01565	0.3196	1.268
CH ₄	2.1562	1.6376	34.5667	26.2524	16.0313	0.5187	1.317
CH ₃ Cl	0.7369	0.5722	37.1979	28.8836	50.480475	0.1647	1.288
C ₂ H ₄	1.6119	1.3153	45.1842	36.8699	28.0313	0.2966	1.225
C ₂ H ₆	1.7291	1.4524	51.9556	43.6413	30.04695	0.2765	1.20
C ₂ H ₅ Cl	1.3398	1.2109	86.4104	78.0961	64.49613	0.1289	1.106

四、摩尔、通用气体常数、摩尔气体状态方程

(一) 摩尔、摩尔质量

国际单位制规定，物质的量的单位是摩尔（代号 mol）。它的定义是：摩尔是一物系的物质的量，该物系中所包含的结构粒子数与 0.012 千克（公斤）碳 12 的原子数目相等。

显然，一摩尔某物质，即通常我们所说的 0.001 M kg 某物质。其中 M 为该物质的分子量。

千摩尔（代号 kmol）某物质的量 M [kg]——“摩尔质量” M (kg/kmol)， M 又称公斤分子量。

$$1 \text{ kmol} = 10^3 \text{ mol} = M \text{ kg}$$

m 千克气体的千摩尔数 n 为：

$$n = \frac{m}{M}$$

式中 M ——气体的“摩尔质量”[kg/kmol]。

(二) 通用气体常数

根据阿伏加德罗定律，即“在同温同压下，相同容积的各种理想气体具有相同的分子数”。由此可以推论：“在同温同压下，分子数相同的各种气体，它们的容积应该相等”。

根据摩尔的定义，则可知 1 摩尔任何气体，其所包含的分子数都是相等的。取 M 千克

气体, 即 1 千摩尔气体 作为计量单位, 其对应的气体容积为 Mv ——“摩尔容积”。显然, 在同温同压下任何气体的摩尔容积相等。若取标准状态 即 压力 $p_0=101325 \text{ Pa}$, 温度 $T_0=273.15 \text{ K}$, 则标准状态下各种气体的摩尔容积均为 $Mv_0=22.414[\text{标准 m}^3/\text{kmol}]$ 。

设有两种气体, 它们的分子量分别为 M_1 和 M_2 , 气体常数分别为 R_1 和 R_2 , 在相同的压力 p 和温度 T 下, 它们的比容分别为 v_1 和 v_2 。取 M_1 千克第一种气体和 M_2 千克第二种气体分别写出其状态方程:

$$pM_1v_1=M_1R_1T$$

$$pM_2v_2=M_2R_2T$$

因为

$$M_1v_1=M_2v_2$$

所以

$$M_1R_1=M_2R_2$$

上式说明, 各种气体其 MR 值是相等的, 它和气体种类无关。同时 M 和 R 本身都与气体的状态无关。因此 MR 既与气体种类无关, 又与气体的状态无关。 MR 称为“通用气体常数”或“摩尔气体常数”。其数值可以由任一气体的标准状态来确定:

$$MR=\frac{p_0Mv_0}{T_0}=\frac{101325 \times 22.414}{273.15}=8314.3\left[\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}\right]$$

显然

$$R=\frac{8314.3}{M}\quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

(三) 摩尔气体状态方程

一千摩尔气体的状态方程为:

$$pMv=MR T=8314 T \quad (1-3)$$

n 千摩尔气体的状态方程为:

$$pV=nMR T=8314 nT \quad (1-4)$$

式 1-3、式 1-4 称为摩尔气体状态方程。

五、工质的比热

在工程中, 热量的计算常常利用比热。所谓工质的比热就是单位量的物质作单位温度变化时所吸收或放出的热量。根据比热的定义有:

$$c=\frac{dq}{dT} \quad (1-5)$$

式中 c ——某工质在某一状态下的比热;

dq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 时所吸收或放出的热量。单位是千焦耳(kJ)或(J)。

比热是一个物性参数。它不是工质的状态参数。比热的数值因工质种类不同而异, 见表 1-1。对于同一种工质, 其比热还和物量的单位, 加热过程的性质及加热时的状态等有关。

(一) 质量比热、摩尔比热、容积比热——比热与物量单位的关系

工质计量单位可用千克、摩尔、米³。因而工质的比热相对应地有:

质量比热 c [kJ/(kg·K)]

摩尔比热 C [kJ/(kmol·K)]

容积比热 C [kJ/标 m³·K]

因为 1[kmol]工质的质量是 $M[\text{kg}]$, 其对应的标准容积是 $22.4[\text{m}^3]$, 则这三种比热有

表 1-2 0到 $t^{\circ}\text{C}$ 之间理想气体平均定压摩尔比热 C_{pm}^0

$t^{\circ}\text{C}$	$C_{pm}^0 [\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$					
	H_2	N_2	O_2	OH	CO	NO
0	28.6202	29.0899	29.2642	30.0107	29.1063	29.9325
100	28.9427	29.1151	29.5266	29.8031	29.1595	29.8648
200	29.0717	29.1992	29.9232	29.6908	29.2882	29.9665
300	29.1362	29.3504	30.3871	29.6260	29.4982	30.1984
400	29.1886	29.5632	30.8669	29.6034	29.7697	30.5059
500	29.2470	29.8209	31.3244	29.6240	30.0805	30.8462
600	29.3176	30.1066	31.7499	29.6852	30.4080	31.1928
700	29.4083	30.4006	32.1401	29.7818	30.7356	31.5308
800	29.5174	30.6947	32.4920	29.9074	31.0519	31.8524
900	29.6461	30.9804	32.8151	30.0557	31.3571	32.1543
1000	29.7892	31.2548	33.1094	30.2209	31.6454	32.4354
1100	29.9485	31.5181	33.3781	30.3981	31.9198	32.6962
1200	30.1158	31.7673	33.6245	30.5831	32.1717	32.9377
1300	30.2891	31.9998	33.8548	30.7726	32.4097	33.1612
1400	30.4705	32.2182	34.0723	30.9640	32.6308	33.3683
1500	30.6540	32.4255	34.2771	31.1553	32.8380	33.5605
1600	30.8394	32.6187	34.4690	31.3448	33.0312	33.7391
1700	31.0248	32.7979	34.6513	31.5316	33.2103	33.9054
1800	31.2103	32.9688	34.8305	31.7148	33.3811	34.0607
1900	31.3937	33.1284	35.0000	31.8939	33.5379	34.2060
2000	31.5751	33.2797	35.1664	32.0684	33.6890	34.3421
2100	31.7545	33.4225	35.3263	32.2383	33.8290	34.4701
2200	31.9299	33.5541	35.4831	32.4034	33.9606	34.5905
2300	*32.1024	33.6801	35.6366	32.5638	34.0838	34.7042
2400	32.2705	33.8006	35.7838	32.7196	34.2013	34.8117
2500	32.4358	33.9126	35.9309	32.8709	34.3133	34.9135
2600	32.5991	34.0190	36.0717	33.0177	34.4197	35.0101
2700	32.7583	34.1226	36.2124	33.1603	34.5205	35.1019
2800	32.9135	34.2179	36.3500	33.2988	34.6157	35.1895
2900	33.0667	34.3103	36.4844	33.4334	34.7080	35.2730
3000	33.2158	34.3971	36.6155	33.5642	34.7948	35.3528
3100	33.3625	34.4807	36.7451	33.6914	34.8780	35.4293
3200	33.5064	34.5605	36.8723	33.8150	34.9576	35.5026
3300	33.6476	34.6367	36.9972	33.9353	35.0338	35.5730
$M_{\text{kg/kmol}}$	2.015650	28.006148	31.989830	17.002740	27.994915	29.997989

注：表内数字减8.3143即为 C_{vm}^0 ——平均定容摩尔比热；表内数字除以最后一行摩尔质量 M 即为 C_{pm}^0 ——平均定压质量比热。

* 原书误为31.1024——编者注。

续表

t	$^{\circ}\text{C}$	$C_{pm}^{\text{H}} [\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$				
		H_2O	CO_2	N_2O	SO_2	空 气
0		33.4708	35.9176	37.4132	38.9081	29.0825
100		33.7121	38.1699	39.6653	40.7119	29.1547
200		34.0831	40.1275	41.5569	42.4325	29.3033
300		34.5388	41.8299	43.1977	43.9931	29.5207
400		35.0485	43.3299	44.6457	45.3491	29.7914
500		35.5888	44.6584	45.9327	46.5260	30.0927
600		36.1544	45.8462	47.0813	47.5494	30.4065
700		36.7415	46.9063	48.1099	48.4321	30.7203
800		37.3413	47.8609	49.0342	49.1997	31.0265
900		37.9482	48.7231	49.8678	49.8777	31.3205
1000		38.5570	49.5017	50.6224	50.4725	31.5999
1100		39.1621	50.2955	51.3080	51.0098	31.8638
1200		39.7583	50.8522	51.9333	51.4895	32.1123
1300		40.3418	51.4373	52.5058	51.9181	32.3458
1400		40.9127	51.9783	53.0317	52.3146	32.5651
1500		41.4675	52.4710	53.5167	52.6728	32.7713
1600		42.0042	52.9285	53.9655	52.9990	32.9653
1700		42.5229	53.3598	54.3823	53.3060	33.1482
1800		43.0254	53.7423	54.7706	53.5875	33.3209
1900		43.5081	54.1030	55.1336	53.8497	33.4843
2000		43.9745	54.4418	55.4740	54.0928	33.6392
2100		44.4248	54.7629	55.7941	54.3230	33.7863
2200		44.8571	55.0576	56.0960	54.5405	33.9262
2300		45.2749	55.3392	56.3816	54.7452	34.0595
2400		45.6783	55.6031	56.6524	54.9435	34.1867
2500		46.0656	55.8494	56.9099	55.1290	34.3081
2600		46.4402	56.0870	57.1552	55.3081	34.4243
2700		46.8022	56.3069	57.3896	55.4744	34.5356
2800		47.1516	56.5181	57.6139	55.6407	
2900		47.4902	56.7204	57.8290	55.7942	
3000		47.8162	56.9140	58.0358	55.9477	
3100		48.1295	57.0964	58.2350	56.0940	
3200		48.4367	57.2707	58.4271	56.2358	
3300		48.7347	57.4374	58.6128	56.3735	
$M/\text{kg}/\text{kmol}$		18.010565	43.98983	44.001063	63.962185	28.95

注：表 1-1、表 1-2 引自西德 E. Schmidt 著“Technische Thermodynamik”一书 Band 1 Einstoffsysteme 1975 Springer-Verlag 出版社。

如下关系:

$$C = M \times c = 22 \cdot 4 C \quad (1-6)$$

(二) 定压比热和定容比热——比热与热力过程性质的关系

工质的比热与工质从某一状态变到另一状态所经历的热力过程有关, 不同的加热或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;

定容比热 c_v ——工质在容积不变的条件下加热。

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) 真实比热与平均比热——比热与加热时工质的状态的关系

工质的比热并不是一个不变的常量, 它是一个变化的物理量。工质比热的变化与压力的关系不大, 它是随着温度的升高而增大的。例如使空气从 0°C 升高到 1°C 与使空气从 100°C 升高到 101°C 所需要的热量是不同的。一般说来, 理想气体的比热与温度的关系是:

$$c = a + bt + et^2$$

式中 a 、 b 、 e 是常数, 它们的数值随气体的种类及加热的过程不同而异。

如果以比热 c 为纵坐标, 温度 t 为横坐标, 则 $c-t$ 的关系曲线如图 1-5 a) 所示。可见不同的温度对应着不同的比热。工质在每一温度下所对应的比热称为工质的真实比热。如果 $c=f(t)$ 的函数关系已知, 则工质从 t_1 到 t_2 温差范围内的热量 q_{1-2} 就必须积分。

$$dq = c dt = f(t) dt$$

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \text{面积 } 12t_2t_1$$

为了简化计算, 在求热量时经常采用“平均比热”—— $c_m|_{t_1}^{t_2}$, 平均比热就是在一定温差范围内单位量物质所吸收或放出的热量和温度差的比值[见图 1-5 b)]。

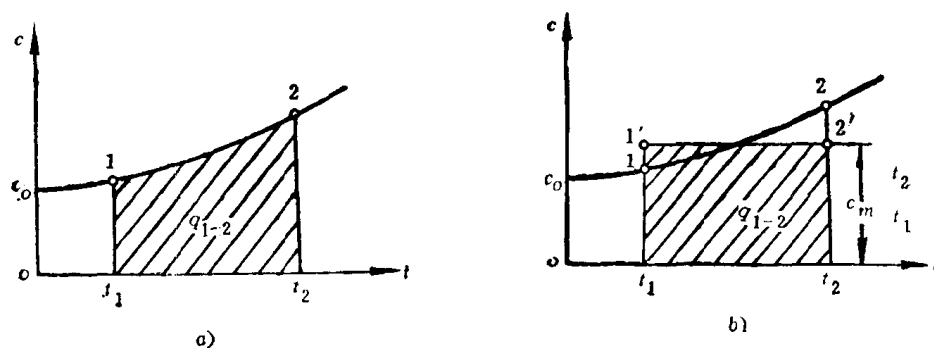


图 1-5 真实比热与平均比热

a) $c-t$ 图 b) 平均比热

即

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

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \int_0^{t_2} f(t) dt - \int_0^{t_1} f(t) dt$$

故

$$q_{1-2} = c_m|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_m|_0^{t_1} \cdot t_1 \quad (1-7)$$

所以,只要有了从 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 的各种理想气体的平均比热表 (见表 1-2 各种气体的 C_{pm} 平均定压摩尔比热表), 则可以通过式 (1-7) 很方便地计算热量 q_{1-2} 。

(四) 定比热

在实际应用中,当温度变化不太大,或者在并不要求很精确的热量计算中,则常常把理想气体的比热近似地看作常量来处理。这时忽略了温度对比热的影响,而只按理想气体的原子数确定比热,称为“定比热”。见表 1-3。

表 1-3

	定 容 摩 尔 比 热 C_v kJ/(kmol·K)	定 压 摩 尔 比 热 C_p kJ/(kmol·K)
单原子气体	3×4.1868	5×4.1868
双原子气体	5×4.1868	7×4.1868
多原子气体	7×4.1868	9×4.1868

(五) 理想混合气体及其比热

内燃机的工质通常都是由各种气体组成的混合气体。由于各组成气体在混合的时候不发生化学变化,因此由各理想气体组成的混合气体仍然是理想气体,有关理想气体的公式和定律对理想混合气体也都适用。如:

$$pv = R_{\text{mix}} T$$

$$M_{\text{mix}} R_{\text{mix}} = 8314$$

式中 R_{mix} ——理想混合气体的气体常数;

M_{mix} ——理想混合气体的平均摩尔质量。

显然,只要已知 M_{mix} ,便可求得 R_{mix} 。因此,研究理想混合气体的性质,只要确定 M_{mix} 就行了。

$$M_{\text{mix}} = \frac{m_{\text{mix}}}{n_{\text{mix}}} = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_n}{n_1 + n_2 + \cdots + n_n}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

式中 m_i ——组成气体的质量;

n_i ——组成气体的千摩尔数。

理想混合气体的比热。

理想混合气体的比热取决于各组成气体的比热和其相对成分。

假定已知理想混合气体的相对重量成分为 $g_1, g_2, \cdots, g_n$ 。如果取 1 千克混合气体,那么其中第一种气体有 g_1 千克、……等,第 n 种气体有 g_n 千克。使 1 千克理想混合气体的温度从 t_1 升高到 t_2 ,也就是要使 g_1 千克第一种气体…… g_n 千克第 n 种气体的温度都从 t_1 升高到 t_2 ,因此,所需要的热量为: