

767024

585
4424

内燃机理论



中国人民解放军运输技术学校

绪 论

将燃料燃烧所产生的热能转变为机械能的动力装置称为热机，其中以燃气作为工质的，称为内燃机。而一般所说内燃机通常都是指燃料在气缸内燃烧的往复式内燃机。目前汽车上采用的内燃机主要是以汽油或柴油为燃料的往复式内燃机。

“内燃机理论”课程是以内燃机工作过程和使用性能指标为主要研究对象，把合理组织工作过程、提高整机性能作为中心内容，分析影响性能指标的各种因素，研究提高内燃机性能的途径和改善的方向。自70年代以来，由于对内燃机工作过程作了进一步的研究，使整机性能比过去又有了很大的提高，同时在组织内燃机工作过程的观点上也发生了明显的变化。过去主要考虑提高内燃机的机力性和经济性，而70年代以来在考虑动力性的同时突出了对提高经济性和减少排气污染的研究，此外内燃机的强化程度和冷起动等问题也受到了重视。

性能指标是衡量一台内燃机的质量的基本问题，而内燃机质量还需要从可靠性、耐久性结构工艺、操纵维修、成本核算等多方面进行全面的、综合的评定。因此，衡量内燃机质量的指标也是全面的，而其中许多指标又是互相制约的。一台内燃机的质量是否先进，应该全面论证这些指标的综合效果。不同使用条件的内燃机对各种指标的要求应有所侧重，只能满足它的主要要求，而尽量照顾其它方面的要求。

根据军用汽车的使用条件，对军用汽车内燃机的主要要求是：

1. 足够的动力性

军用汽车为适应现代化战争的特点，保证有较高的行驶速度和良好的机动性能，要求内燃机具有足够的动力性能。

2. 运转安全可靠，起动性好

军用汽车在战斗条件下使用，要求内燃机运转安全可靠，使用寿命长，同时起机性好，特别是在低温条件下的起动，一般要求在 -40°C 时能够顺利起动。

3. 工作适应性强

军用汽车内燃机的工作不仅要求能适应寒区、热区和高原地区的需要，而且还要求能适应野战的特殊条件。如军用牵引汽车越野行驶走走停停，要求内燃机能适应经常卸载，又经常在低速大负荷条件下工作；军用汽车在倾斜状态下行驶，要求内燃机能正常工作；为适应军用汽车涉水行驶，内燃机的进气管口和排气管口位置应较高，各部位密封防水性能良好。此外，多种燃料内燃机对军用汽车战时的使用也具有较好的适应性。

4. 操作、维修简便易行

军用汽车为适应在战斗条件下使用，要求内燃机的操作和维修均简便易行。

5. 燃油消耗率低

军用汽车燃油消耗率低，不仅具有经济上的价值，而且还有军事上的作用。燃油消耗率低，携带同样数量的燃油，汽车的行驶里程可增大，这在战时更有着特殊的意义。

根据对内燃机各项指标的全而衡量，几十年来往复式汽油机和柴油机一直占比较有利的地位，无论在民用汽车或军用汽车上都得到了广泛的应用。

本教材主要介绍工程热力学基础，燃料燃烧基本理论，内燃机实际循环和性能指标，内燃机的换气过程、混合气形成和燃烧，内燃机特性，以及内燃机的增压等内容。

本教材是根据我校汽车运用工程专业教学大纲编写的，除作为该专业的教材以外，还可供部队车辆技术人员参考。

本教材由肖伯英同志担任主编，第一章由王志友同志和王永德同志编写，第五章中化油器特性部分由周振铨同志编写，其余各章均由肖伯英同志编写，最后由内燃机教研室张兴良、汤子兴同志审定。

由于编者水平所限，书中缺点一定不少，欢迎读者批评指正。

目 录

绪论

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	(11)
第三节 气体热力过程	(18)
第四节 热力学第二定律	(27)
第五节 内燃机理想循环	(33)
第六节 气体流动过程	(44)
第二章 内燃机实际循环和性能指标	(60)
第一节 内燃机的实际循环	(60)
第二节 内燃机的指示指标	(67)
第三节 机械损失和机械效率	(70)
第四节 内燃机的有效指标	(75)
第五节 内燃机的热平衡	(79)
第三章 内燃机的换气过程	(85)
第一节 换气过程及其损失	(85)
第二节 换气过程的参数	(90)
第三节 影响充量系数的因素	(94)
第四节 进气马赫数	(99)
第四章 燃料燃烧	(101)
第一节 燃烧的化学反应历程	(101)
第二节 燃烧热化学	(107)
第三节 内燃机工作循环的计算	(113)
第五章 汽油机混合气的形成和燃烧	(122)
第一节 汽油机的燃烧过程	(122)
第二节 不正常燃烧	(126)
第三节 汽油机混合气的形成	(129)
第四节 影响燃烧过程的因素	(150)
第六章 柴油机混合气的形成和燃烧	(161)
第一节 柴油机的燃烧过程	(161)
第二节 柴油机混合气的形成	(167)
第三节 柴油的喷射	(181)

第四节	影响燃烧过程的因素	(186)
第七章	内燃机特性	(192)
第一节	内燃机负荷特性	(194)
第二节	内燃机速度特性	(200)
第三节	柴油机调速特性	(209)
第四节	内燃机万有特性	(219)
第五节	内燃机的功率标定及其修正	(221)
第六节	内燃机排气污染和净化	(225)
第八章	内燃机的增压	(237)
第一节	增压系统的分类	(238)
第二节	废气涡轮增压器	(239)
第三节	内燃机与增压器的匹配	(248)
第四节	增压柴油机性能的改善	(252)
第五节	汽油机的增压	(256)
附录一	本教材所用的主要符号	(261)
附录二	常用单位的换算	(264)
附录三	各种因素对汽油机工作过程、性能和磨损的影响	
附录四	各种因素对柴油机混合气形成、燃烧过程和性能的影响	

第一章 工程热力学基础

工程热力学是研究热能和机械能相互转换规律的科学。本章在物理课程的基础上, 对学习内燃机理论所必须的热力学知识作一扼要的叙述, 内容包括: 气体的热力性质; 热能和机械能相互转换的规律即热力学一定律和热力学第二定律; 气体的热力过程; 内燃机的理论循环和气体流动等。

第一节 气体的热力性质

一、气体的热力状态

往复活塞式内燃机是由气缸、活塞和曲柄连杆等机构组成如图 1—1 所示。它工作时, 进入气缸的燃料燃烧形成高温高压燃气, 燃气膨胀时推动活塞移动, 通过曲柄机构向外输出机械功, 将热能转换成机械能。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。气体的流动性和膨胀性最好, 它的热力性质也最简单, 因而热机均用气体作为工质。所以下面首先研究作为热机工质的气体的热力性质。

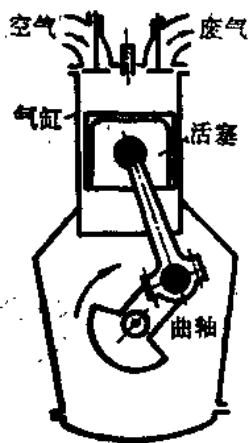


图 1—1 活塞式内燃机简图

较深入地研究内燃机工作时可以看出, 在完成热功转换的过程中, 气缸内的气体总是连续不断地经历着压缩、吸热、膨胀和放热等过程, 气体的热运动情况在不断变化, 称为热力状态的变化。描述气体热力状态的物理量称为状态参数。一个状态参数从某一方面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、比容、温度、内能、焓和熵。其中压力、比容和温度可以直接测量且应用最多, 称为基本状态参数。

(一) 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, 以 P 表示。根据气体分子运动论可知: 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 (帕斯卡), 符号为 Pa , $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, 因为这一单位太小, 在工程运算中常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 来代替。

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

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

气体压力用压力计或真空计测量，如图 1-2 所示。因压力计或真空计本身都处在大气压力的作用之下，所以它们的读数都是被测气体的压力与外界大气压力的差值，称为表压力和真空度。若用 $P_{\text{表}}$ 和 $P_{\text{真}}$ 表示表压力和真空度， $P_{\text{绝}}$ 表示绝对压力， P_0 为大气压力则：

$$P_{\text{绝}} = P_0 + P_{\text{表}}$$

$$P_{\text{绝}} = P_0 - P_{\text{真}}$$

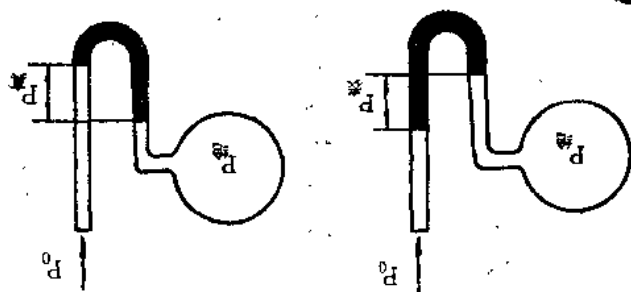


图 1-2 表压力和真空度

由此可见表压力和真空度是相对压力，它随大气压力 P_0 变化而变化。气体的状态参数则是指绝对压力。

(二) 比容

气体的比容是指质量为 1 千克的气体所占的容积，以 v 表示，单位是 m^3/kg 。设 m 千克气体所占的容积为 V ，则：

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

与此相反，单位容积气体所具有的质量称为密度，以 ρ 表示，单位是 kg/m^3 。

显然 $\rho = \frac{1}{v}$ ， $\rho \cdot v = 1$ 。比容与密度互为倒数。

(三) 温度

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动能成正比。热力学温标用 T 表示，单位是开（开尔文），符号为 K 。1 K 定义为水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

热力学温标与常用摄氏温标的关系是：

$$T = t + 273.15 \quad (\text{K})$$

$T_0 = 273.15\text{K}$ 为水的冰点的热力学温度。水的三相点的热力学温度比冰点高 0.01K 。必须指出只有热力学温度 (K) 才是状态参数。

其他状态参数在后面节次内介绍。

二、热力系统和热力过程

(一) 气体的平衡状态

当气体各部分的温度、压力处处相同且不随时间而变化时，称为气体处于平衡状态。在没有外界作用的情况下它可以长期保持。这时气体各部分状态均匀一致，每一状态参数只有一个数值。气体的一个平衡状态对应应有一组唯一的

状态参数（如 P 、 v 、 T 等），只要状态参数发生了变化，说明气体的状态就发生了变化。只研究气体的纯物理变化时，知道了两个独立的状态参数（如压力 P 和温度 T ）就可以确定气体的状态，其余状态参数均可由此两独立的状态参数计算确定。今后所述状态都是指平衡状态。

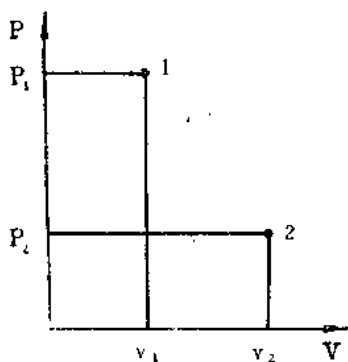


图 1—3 $P-v$ 座标图

的座标图（ $P-v$ 图）上 1（ P_1 、 v_1 ）、2（ P_2 、 v_2 ）表示两个平衡状态。

（二）热力系统

在热力学中常把研究热工转换的主要对象——工质称为热力系统，简称热力系；而把包围工质的物体（如气缸等）称为外界。它们之间有“分界面”（当然“分界面”可以是实在的也可以是假想的）隔开。根据在分界面上质量和能量的交换情况，热力系统分为：

闭口系统——和外界无质量交换的系统；

开口系统——和外界有质量交换的系统；

绝热系统——和外界无热量交换的系统；

孤立系统——和外界既无质量交换又无能量交换的系统。

（三）热力过程

热力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的总和称为热力过程。热力系统若从一个平衡状态连续经过无数个中间的平衡状态过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为准静态过程，它可以在 $P-v$ 图上用一条连续的曲线表示，如图 1—4 上的曲线 1—2 所示。在准静态过程中，不仅热力系内部时时处于平衡状态，而且和外界随时保持着热和力的平衡。当然它仅是实际过程的一种近似的描写，因为只有当传热是在无温差的条件下进行而且外力的改变十分微小的无限缓慢的过程才是准静态过程，所以说准静态过程是实际过程的理想化，是实际过程进行得非常缓慢的一个极限。当然，实际过程都不是绝对的准静态过程，但在适当条件下可以近似地当作准静态过程研究。如在往复活塞式内燃机中，活

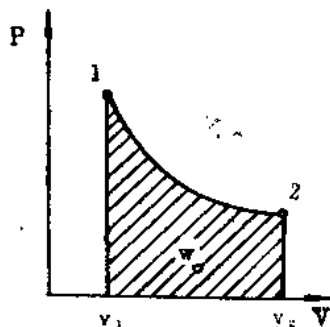


图 1—4 准静态过程

塞运动速度通常为每秒十米左右，而气缸中气体压力传播的速度可达每秒几百米以上，气体分子热运动的平均速度也达每秒几百米，故当内燃机工作时，气缸中的气体能够建立起一系列的平衡和温度平衡，使气体的变化过程接近于准静态过程。

另外，内部无摩擦的准静态过程称为可逆过程，它可以沿原变化过程使热力系统和外界都回复到原来状态。今后我们主要讨论可逆过程。

三、理想气体状态方程

所谓理想气体就是假设气体分子本身不占有体积，分子间又没有引力的气体。在热力计算和分析中，参与内燃机工作的空气、燃气和烟气等气体可近似看作理想气体。因为气体分子之间的平均距离比较大，气体分子本身所占体积比气体的容积小得多，气体分子之间的相互吸引力也很小，所以常把某些实际气体近似地看作理想气体。

理想气体的三个基本状态参数 P 、 v 、 T 之间有内在联系： $f(P, v, T) = 0$ 。通过实验可得到 P 、 v 、 T 之间的关系式：

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

R ——气体常数

上式称为理想气体状态方程式，又称克拉贝隆方程式。因 $v = \frac{V}{m}$ ，将其代入 1-1 式，变换后得到另一形式

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

理想气体状态方程式给出了某一状态下理想气体的三个基本状态参数 P 、 v 、 T 之间的关系。只要知道其中的两个就可以通过该方程式求得第三个。

气体常数 R 的单位可由式 1-1 导出为 $J/kg \cdot K$ ，数值大小与气体的种类有关，见表 1-1，也可以通过阿伏加得罗定律求得。阿伏加得罗定律指出：“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”。也就是说“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”。并已测得在标准状态下，即 $P_0 = 101325 Pa$ ， $T_0 = 273.15 K$ 各种气体的千摩尔容积均为 $V_{m0} = 22.414 m^3/kmol$ 。将 1-2 化成一千摩尔质量的状态方程形式有：

$$PV_m = MRT \quad (1-3)$$

V_m 为一千摩尔容积

M 为分子量

在标准状态下：

$$P_0 V_{m0} = M R T_0$$

所以：

$$\begin{aligned} MR &= \frac{P_0 V_{m0}}{T_0} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15} \\ &= 8314.3 \quad \left(\frac{N \cdot m}{kmol \cdot K} \right) \end{aligned} \quad (1-4)$$

MR 称为通用气体常数，则有：

表 1-1 部分理想气体在 0℃ 时的质量比热、摩尔比热、摩尔质量和气体常数

气体种类	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	36.4164	78.0961	94.49613	0.1289	1.106

$$R = \frac{8314.3}{M} \quad (\text{J/kgK}) \quad (1-5)$$

由此可见，将通用气体常数除以气体分子量，即得出该气体的气体常数 R 。

四、工质的比热

比热是物质的一个重要的热力学性质。在工程中，热量的计算是通过比热来进行的。所谓工质的比热就是在一定条件下单位物量的物质作单位温度变化时所吸收或放出的热量。即：

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

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 所吸收或放出的热量。

比热随工质种类、物量单位、加热过程的性质和加热时的状态而异。

(一) 比热与物量单位的关系

工质的计量单位可用千克 (kg)、千摩尔 (kmol) 和米³ (m^3)，因而工质的比热相对应的有：

质量比热 —— c	单位： $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
摩尔比热 —— C	单位： $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
容积比热 —— C'	单位： $\text{kJ}/(\text{标m}^3 \cdot \text{K})$

因一定量气体在不同状态下体积不同，在用容积比热进行热量计算时均用标准状态下的容积比热。又因为 1 kmol 工质的质量是 $M \text{ kg}$ ，其对应的标准容积是 22.4 m^3 ，故上述三种比热之间有以下关系：

$$C = M \cdot c = 22.4 C' \quad (1-6)$$

(二) 比热与热力过程性质的关系

工质的比热与工质经历的热力过程的性质有关，不同的加热或放热过程有不同的比热值。工程热力学计算中最常用的有：

定压比热 —— 工质在压力不变的条件下加热；

定容比热 —— 工质在容积不变的条件下加热。

因而相应有：

定压质量比热 —— c_p	定容质量比热 —— c_v
定压摩尔比热 —— C_p	定容摩尔比热 —— C_v
定压容积比热 —— C'_p	定容容积比热 —— C'_v

(三) 比热与加热时工质状态的关系 —— 真实比热与平均比热

实验表明，工质的比热并不是一个不变的常量，而是一个变量。它随压力的变化关系不大，但随着温度的增高而加大。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。理想气体的比热与温度的关系可用下式表示：

$$c = a + bt + dt^2 \quad (1-7)$$

式中 a 、 b 、 d 为常数，它们的数值与气体种类和加热过程有关。

若以 c 为纵坐标, t 为横坐标, 则 $c = f(t)$ 的关系曲线如图 1—5 所示。由图可见不同的温度对应着不同的比热, 称工质在每一温度下所对应的比热为工质的真实比热。

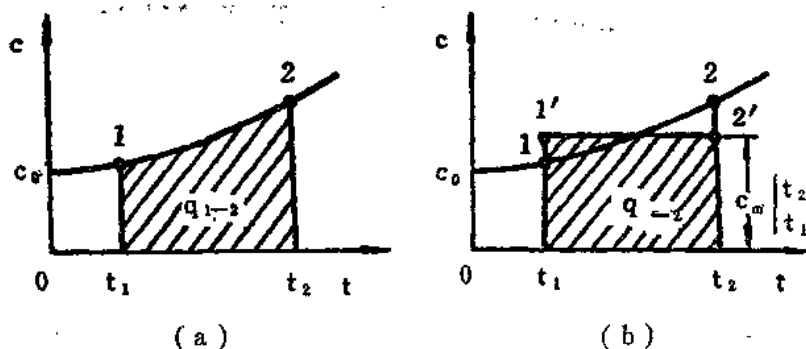


图 1—5 真实比热与平均比热

要求出工质从 t_1 到 t_2 温差范围内的热量就必须进行积分运算。即:

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

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

为简化运算, 在求热量时经常采用“平均比热”—— c_m 的概念: 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差的比值 (见图 1—5 b)。即:

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

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

故
$$q_{1-2} = c_m \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_m \Big|_0^{t_1} \cdot t_1 \quad (1-8)$$

这样, 只要有了从 $0 - t$ °C 的各种理想气体的平均比热表 (表 1—2) 就可以通过上式计算出热量 q_{1-2} 来。

(四) 定值比热

在实际应用中, 当温度变化不大或者在并不要求很精确的热量计算时, 常常忽略温度对比热的影响, 把理想气体的比热近似地看作常量来处理, 只按理想气体的原子数确定比热, 称为定值比热。见表 1—3。

表1-2 0 到 t℃ 之间理想气体平均定压摩尔比热表

t °C	$C_{pm} \left \begin{smallmatrix} t \\ 0 \end{smallmatrix} \right. \text{ kJ/(kmol} \cdot \text{K)}$										
	H ₂	N ₂	O ₂	OH	CO	NO	H ₂ O	CO ₂	N ₂ O	SO ₂	空 气
0	28.6202	29.0899	29.2642	30.0107	29.1063	29.9325	33.4708	35.9176	37.4132	38.9081	29.0825
100	28.9427	29.1151	29.5266	29.8031	29.1595	29.8648	33.7121	38.1699	39.6653	40.7119	29.1547
200	29.0717	29.1992	29.9232	29.6908	29.2882	29.9665	34.0831	40.1275	41.5569	42.4325	29.3033
300	29.1362	29.3504	30.3871	29.6260	29.4982	30.1984	34.5388	41.8299	43.1977	43.9931	29.5207
400	29.1886	29.5632	30.8669	29.6034	29.7697	30.5059	35.0485	43.3299	44.6457	45.3491	29.7914
500	29.2470	29.8209	31.3244	29.6240	30.0805	30.8462	35.5888	44.6584	45.9327	46.5260	30.0927
600	29.3176	30.1066	31.7499	29.6852	30.4080	31.1928	36.1544	45.8462	47.0813	47.5494	30.4065
700	29.4083	30.4006	32.1401	29.7818	30.7356	31.5308	36.7415	46.9063	48.1099	48.4321	30.7203
800	29.5174	30.6947	32.4920	29.9074	31.0519	31.8524	37.3413	47.8609	49.0342	49.1997	31.0265
900	29.6461	30.9804	32.8151	30.0557	31.3571	32.1543	37.9482	48.7231	49.8678	49.8777	31.3205
1000	29.7892	31.2548	33.1094	30.2209	31.6454	32.4354	38.5570	49.5017	50.6224	50.4725	31.5999
1100	29.9485	31.5181	33.3781	30.3981	31.9198	32.6962	39.1621	50.2055	51.3080	51.0098	31.8638
1200	30.1158	31.7673	33.6245	30.5831	32.1717	32.9377	39.7583	50.8522	51.9333	51.4895	32.1123
1300	30.2891	31.9998	33.8548	30.7726	32.4097	33.1612	40.3418	51.4373	52.5058	51.9181	32.3458
1400	30.4705	32.2182	34.0723	30.9640	32.6308	33.3683	40.9127	51.9783	53.0317	52.3146	32.5651
1500	30.6540	32.4255	34.2771	31.1553	32.8380	33.5605	41.4675	52.4710	53.5167	52.6728	32.7713
1600	30.8394	32.6187	34.4690	31.3448	33.0312	33.7391	42.0042	52.9285	53.9655	52.9990	32.9653
1700	31.0248	32.7979	34.6513	31.5316	33.2103	33.9054	42.5229	53.3508	54.3823	53.3060	33.1482
1800	31.2103	32.9688	34.8305	31.7148	33.3811	34.0607	43.0254	53.7423	54.7706	53.5875	33.3209
1900	31.3937	33.1284	35.0000	31.8939	33.5379	34.2060	43.5081	54.1030	55.1336	53.8497	33.4843
2000	31.5751	33.2797	35.1664	32.0684	33.6890	34.3421	43.9745	54.4418	55.4740	54.0928	33.6392

续表
0 到 t℃ 之间理想气体平均定压摩尔比热表

t °C	$C_{p,0}^t$ kJ/(kmol·K)										
	H ₂	N ₂	O ₂	OH	CO	NO	H ₂ O	CO ₂	N ₂ O	SO ₂	空气
2100	31.7545	33.4225	35.3263	32.2383	33.8290	34.4701	44.4248	54.7629	55.7941	54.3230	33.7863
2200	31.9299	33.5541	35.4831	32.4034	33.9606	34.5905	44.8571	55.0576	56.0960	54.5405	33.9262
2300	32.1024	33.6801	35.6366	32.5638	34.0838	34.7042	45.2749	55.3392	56.3816	54.7452	34.0595
2400	32.2705	33.8006	35.7838	32.7196	34.2013	34.8117	45.6783	55.6031	56.6524	54.9435	34.1867
2500	32.4358	33.9126	35.9309	32.8709	34.3133	34.9135	46.0656	55.8494	56.9099	55.1290	34.3081
2600	32.5991	34.0190	36.0717	33.0177	34.4197	35.0101	46.4402	56.0870	57.1552	55.3081	34.4243
2700	32.7583	34.1226	36.2124	33.1603	34.5205	35.1019	46.8022	56.3069	57.3896	55.4744	34.5356
2800	32.9135	34.2179	36.3500	33.2988	34.6157	35.1895	47.1516	56.5181	57.6139	55.6407	
2900	33.0667	34.3103	36.4844	33.4334	34.7080	35.2730	47.4902	56.7204	57.8290	55.7942	
3000	33.2158	34.3971	36.6155	33.5642	34.7948	35.3528	47.8162	56.9140	58.0358	55.9477	
3100	33.3625	34.4807	36.7451	33.6914	34.8780	35.4293	48.1295	57.0964	58.2350	56.0940	
3200	33.5064	34.5605	36.8723	33.8150	34.9576	35.5026	48.4367	57.2707	58.4271	56.2358	
3300	33.6476	34.6367	36.9972	33.9353	35.0338	35.5730	48.7347	57.4374	58.6128	56.3735	
M (kg/kmol)	2.015650	28.006148	31.989830	17.002740	27.994915	29.997989	18.010565	43.98983	44.001063	63.962185	28.95

表 1—3

定 值 比 热 表

	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

内燃机工质是由几种气体组成的混合气体。当各组成气体在混合时不发生化学变化时, 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。例如

$$P \cdot v = R_{mix} T$$

$$R_{mix} = \frac{8314.3}{M_{mix}}$$

式中

R_{mix} ——混合气体的气体常数

M_{mix} ——混合气体的平均千摩尔质量

由此可见, 只要求得 M_{mix} 即可求得 R_{mix} , 即把混合气体看成具有气体常数 R_{mix} 的单一气体处理。下面是求 M_{mix} 的公式。

$$M_{mix} = \frac{m_{mix}}{n_{mix}} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n_1 + n_2 + \dots + n_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (1-9)$$

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质量成分为 $g_1, g_2, \dots, g_n$, 则 1 千克理想混合气体的温度从 t_1 升高到 t_2 , 也就是使各组成种气体温度都从 t_1 升高到 t_2 , 因此所需要的热量为:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= g_1 C_{1m} \bigg|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) + g_2 C_{2m} \bigg|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) + \dots + g_i C_{im} \bigg|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \\ &\quad + \dots + g_n C_{nm} \bigg|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \\ &= \left(\sum_{i=1}^n g_i C_{im} \bigg|_{t_1}^{t_2} \right) (t_2 - t_1) \end{aligned}$$

则理想混合气体的平均质量比热为:

$$c_{mix} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right. = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1} = \sum_{i=1}^n g_i c_{i,m} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right. \quad (1-10)$$

当 t_2 无限趋近于 t_1 时, 可得到理想混合气体的真实质量比热为:

$$c_{mix} = \frac{dq}{dt} = \sum_{i=1}^n g_i C_i \quad (1-11)$$

理想混合气体的摩尔比热和容积比热, 可以用同样的方法求得:

$$C_{mix} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right. = \sum_{i=1}^n r_i \cdot C_{i,m} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right.$$

$$C_{mix} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot C_i \quad (1-12)$$

$$C'_{mix} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right. = \sum_{i=1}^n r_i C'_{i,m} \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right.$$

$$C'_{mix} = \sum_{i=1}^n r_i C'_i \quad (1-13)$$

式中 r_i ——第 i 种组成气体的相对摩尔数或相对容积。

由于在同温同压 (指理想混合气体的总压力) 下, 任何理想气体的摩尔容积均相等即 $(Mv)_i = (Mv)_{mix}$, 则:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{mix}} = \frac{n_i (Mv)_i}{n_{mix} (Mv)_{mix}} = \frac{n_i}{n_{mix}}$$

总之, 理想混合气体的比热等于各组成气体的比热与相对成分乘积的总和。

第二节 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒和转换定律在热力学上的应用, 它阐明了机械能和热能在转换过程中的守恒关系。热力学第一定律可以表达为: “热能可以转变为机械功, 机械功也可以转变为热能。一定量的热能可以转化为数量相同的机械功, 一定量的机械功也可以转化为数量相同的热能”。用 W 表示机械功, Q 表示热量, 则有:

$$Q = W \quad (J)$$

热力学第一定律应用于不同的热力系统的能量转换过程, 可以得到不同的能量平衡方程式。为便于推导, 把热力学第一定律写成下列形式:

输入热力系统的能量 = 热力系统贮存能量的变化 + 热力系统输出的能量

一、闭口系统能量平衡方程

在研究闭口系统能量平衡方程之前, 先引入几个基本概念。

(一) 内能

内能就是工质内部分子运动的动能和由于分子间相互吸引所形成的位能的总和。1 千克

工质具有的内能用 u 表示, 单位为 J/kg 。 m 千克工质的内能用 U 表示, 单位为 J 。则:

$$U = mu$$

根据气体分子运动论, 分子热运动动能是温度 T 的函数, 分子间的位能是比容 v 的函数。因温度 T 、比容 v 都是工质的状态参数, 由它们决定的内能也是状态参数, 它的数值只与状态有关。因此工质在初态 (P_1, v_1, T_1) 具有内能 u_1 , 变化到终态 (P_2, v_2, T_2) 具有内能 u_2 , 则从初态到终态内能变化为 $\Delta u = u_2 - u_1$, 它只与初终状态有关, 而与状态变化过程的性质无关。

对于理想气体来说, 分子间没有引力, 分子间的位能为零, 内能 u 仅是温度的单值函数即 $u = f(T)$ 。因而只要初终态温度 T_1, T_2 确定时, 不管过程性质如何, 理想气体内能的变化都相等:

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

(二) 气体的膨胀功

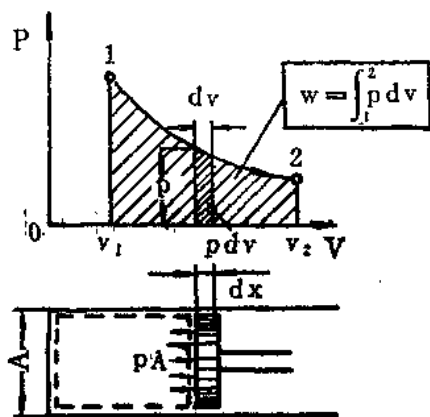


图 1-6 可逆过程的膨胀功

功和热量是热力系统在状态变化过程中能量转移的两种形式, 它与过程性质有关, 须通过系统状态变化过程来确定, 如热量计算是通过比热来进行的, 而比热与过程有关。下面讨论在热工计算中常用的膨胀功的计算。

图 1-6 为一气缸, 气体由活塞封闭在气缸内, 设活塞面积为 A (m^2), 当活塞在某一位置时, 工质的压力为 P (Pa), 它作用在活塞顶面上的力为 PA (N), 活塞移动 dx 距离时, 1 千克工质对活塞所做的微元功 dw 为:

$$dw = PA dx$$

式中 $A dx$ 即为这一千克工质所占容积的增量 $A dx = dv$ 。因此:

$$dw = P dv$$

对于可逆过程 1-2, 工质所做的膨胀功为:

$$w = \int_{v_1}^{v_2} P dv \quad (1-14)$$

如果已知工质的初终态, 以及过程 1-2 P 与 v 的函数关系为 $P = f(v)$ 即可求出工质的膨胀功 w 。其数值为 $P-v$ 图上过程线 1-2 下面所包围的面积 1-2- v_2 - v_1 -1。由此可见, 膨胀功不仅与初终状态而且与状态变化所经历的过程性质有关。

当然气缸内工质为 m 千克, 其总容积为 $V = mv$, 则膨胀功为:

$$W = m w = m \int_{v_1}^{v_2} P dv = \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad (\text{J}) \quad (1-15)$$

在膨胀过程中, $dv > 0$ 则 $w > 0$, 气体膨胀对外界作膨胀功; 而在压缩过程中 $dv < 0$ 则 $w < 0$, 外界压缩气体对气体作压缩功。